

**令和4年度開始廃炉・汚染水・処理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・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発))**

2022年度最終報告

2023年6月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

目次

1. 研究の背景・目的
 2. 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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析
 - 6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討
 - 6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価
 - 6.4 保管様式の検討
 7. 全体まとめ
- 参考資料

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。

燃料デブリの取り出し・回収には複数の方法が検討されており、それに伴って取り出される燃料デブリの性状や一緒に回収される燃料デブリ以外の随伴物の物性も異なってくる。特に取り出し時の燃料デブリの切削加工時に発生する粉体状の燃料デブリの一部は冷却水循環系で回収されるため、スラリー・スラッジ化することが予想される。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

本補助事業では、粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ(以下「粉状燃料デブリ」という。)を安全・確実に収納・移送・保管するための技術課題の解決のための検討を実施する。それに基づいて粉状燃料デブリを安全、確実かつ合理的に収納・移送・保管できるシステムの開発に向けて、水素ガス対策、粉状燃料デブリ及び随伴物の挙動の解明、保管様式の検討を行う。

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、取り扱い時の注意点、安全確保のための考え方等の情報を収集する。調査結果に基づき、粉状燃料デブリの安定保管に向けた課題を抽出する。
- ・粉状燃料デブリからの水素ガス発生特性および放出特性を検討する。
- ・収納缶内の粉状燃料デブリの挙動の評価を行う。
- ・粉状燃料デブリの収納方法の概念を提案する。

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

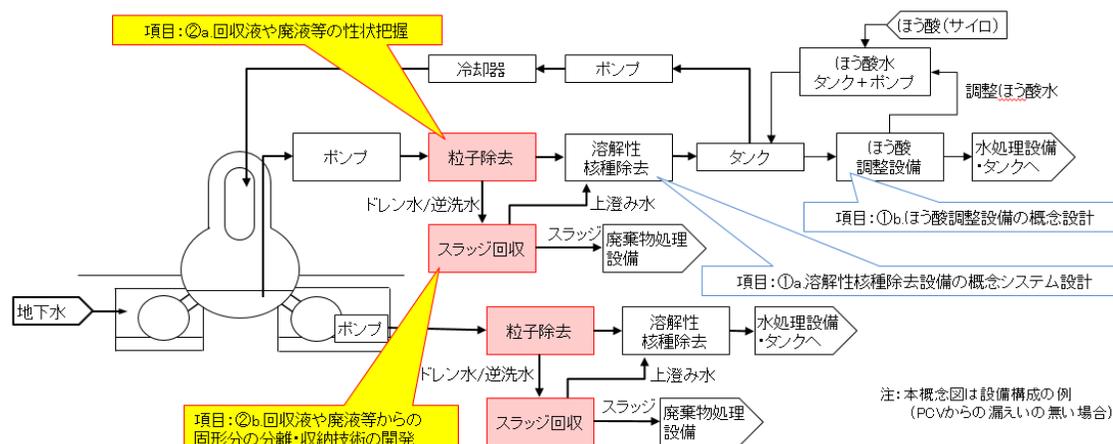


図. 燃料デブリ取り出し時の液体システム(概念図)と要素試験の実施対象

2. 目標

2022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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析</p> <ul style="list-style-type: none"> 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） 燃料デブリを塊状、粒状の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>2. 水素ガス発生特性、放出特性の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> 粉状燃料デブリの水素ガス発生挙動に影響する因子を特定し、その影響度合いについて分析と評価を行い、粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法を提案していること。（終了時目標TRL:レベル3） 蓄積された状態の粉状燃料デブリからの水素ガス放出について調査や検討を行い、その放出特性や粒状、塊状燃料デブリとの相違を明らかにし、水素ガス放出に影響する因子の特定およびその影響について分析・評価していること。（終了時目標TRL:レベル3） |
| <p>3. 粉状燃料デブリの挙動の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> 舞い上がり等の挙動が大きいと推定される収納缶での乾燥処理時を対象とした粉状燃料デブリの挙動を、文献などによる類似事例調査やCFD等を用いた流動解析により推定し、粉状燃料デブリの安定保管までの取り扱い時や、保管時に維持すべき安全機能への影響を評価していること。（終了時目標TRL:レベル3） |
| <p>4. 保管様式の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> 粉状燃料デブリ性状、安全要求事項等の条件、及び、回収経路を考慮した上で、粉状燃料デブリを安定保管状態に持ち込むための収納方法の概念を複数提案し、安全機能要求への適合性、スループットへの影響等、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、それらの指標に対する評価を行い、絞り込みを行っていること。（終了時目標TRL:レベル3） |

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、福島第一原子力発電所燃料デブリの移送・保管のエンジニアリングに向けて、以下の技術開発課題に取り組む計画である。

(1) 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

燃料デブリの取り出しにおいては、燃料デブリの切削装置に設置される予定の局所集塵装置、冷却水循環系設備やガス処理系設備で燃料デブリを含む粉体状及びスラリー・スラッジ状の物質を回収する検討が進められている。粉状燃料デブリを安全かつ確実に保管状態に持ち込むためには、塊状、粒状の燃料デブリとは異なる取り扱いが必要になる部分があると想定されることから、それに適した収納・移送・保管システムを検討していく必要がある。そのために必要となる粉状、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、知見及び情報を収集、分析しておくことは有用と判断される。そこで具体的には以下の事例の調査を行う。

仏ラ・アーク再処理工場等を対象として欧米での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う。また、国内についても同様に、類似の施設を調査対象とする。これらの調査より、粉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、知見及び情報の分析、整理を行う。その結果を踏まえ、国内外の事例の比較検討からそれらの設計の考え方の相違、福島第一原子力発電所の廃止措置に有用な情報や良好事例の抽出等を行う。その際には、不具合や事故の事例、その解決策も対象とする。

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.1 実施項目

(2) 水素ガス発生特性、放出特性の検討

2020年度までの検討の成果である粒状、塊状燃料デブリからの水素ガス発生特性に影響する因子の分析結果とそれを踏まえた発生予測法(「燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発」(2019・2020年度)事業)を基に粉状燃料デブリの水素ガス発生挙動に影響する因子を特定(例えばアルファ、ベータ、ガンマ線共存体系の影響、エネルギー吸収率の設定方法等)し、その影響度合いについて分析と評価を行う。さらに影響因子とその影響度合いについて粒状及び塊状の燃料デブリの場合との比較・分析(粒径分布の影響、試験結果のばらつきや計算結果との乖離の推定要因等)を行い、粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法の提案を行う。さらにその検証に向けて解決すべき技術課題の整理を行い、課題解決のために必要な検討項目を明らかにする。

粒状、塊状燃料デブリの水分の大部分は燃料デブリの内部(多孔質の場合)とそれらの表面に存在するもの(燃料デブリが濡れた状態)と判断される。一方、粉状燃料デブリでは粒径が非常に小さいため、燃料デブリ粒子間の大部分に水分が存在すると想定される。このため、発生した水素ガスの放出特性は、粒状、塊状の燃料デブリとは表面張力の影響や、燃料デブリの体積に対する表面積が相対的に大きいこと等の影響によって異なってくることが想定される。蓄積された状態の粉状燃料デブリからの水素ガス放出(発生した水素ガスが粒子間に蓄積され、突発的に放出されること)について調査や検討を行い、その放出特性や粒状、塊状燃料デブリとの相違を明らかにする。さらに、水素ガス放出に影響する因子の特定およびその影響(例えば間欠的な放出となって一時的に収納容器内の水素濃度が高くなる等)について分析と評価を行う。

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.1 実施項目

(3) 粉状燃料デブリの挙動の評価

冷却水循環系では、燃料デブリの加工時の飛散抑制材、臨界防止のため水ガラス中性子吸収材、固形分を回収するための吸着材や凝集剤が、粉状燃料デブリと共に回収される。これら随伴物は粉状燃料デブリに比べて比重や粒径等の性状に差があると考えられるため、乾燥処理後における収納容器の取り扱い時や保管状態において、収納容器内でのふるまいが大きく異なると想定される。収納容器内で発生する水素ガスや崩壊熱による流動や、収納容器の保管までの取り扱いによる衝撃や運動等によって、粉状燃料デブリや随伴物は収納缶内で舞い上がり等の挙動を呈すると考えられる。特に、舞い上がり等の挙動が大きいと推定される収納缶での乾燥処理時を対象とした粉状燃料デブリの挙動を、文献などによる類似事例調査やCFD (Computational Fluid Dynamics; 流体解析) 等を用いた流動解析により推定する。その結果より、粉状燃料デブリの安定保管までの取り扱い時や保管時に維持すべき安全機能への影響(例えば、収納容器のフィルタの閉塞等)を評価する。

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.1 実施項目

(4) 保管様式の検討

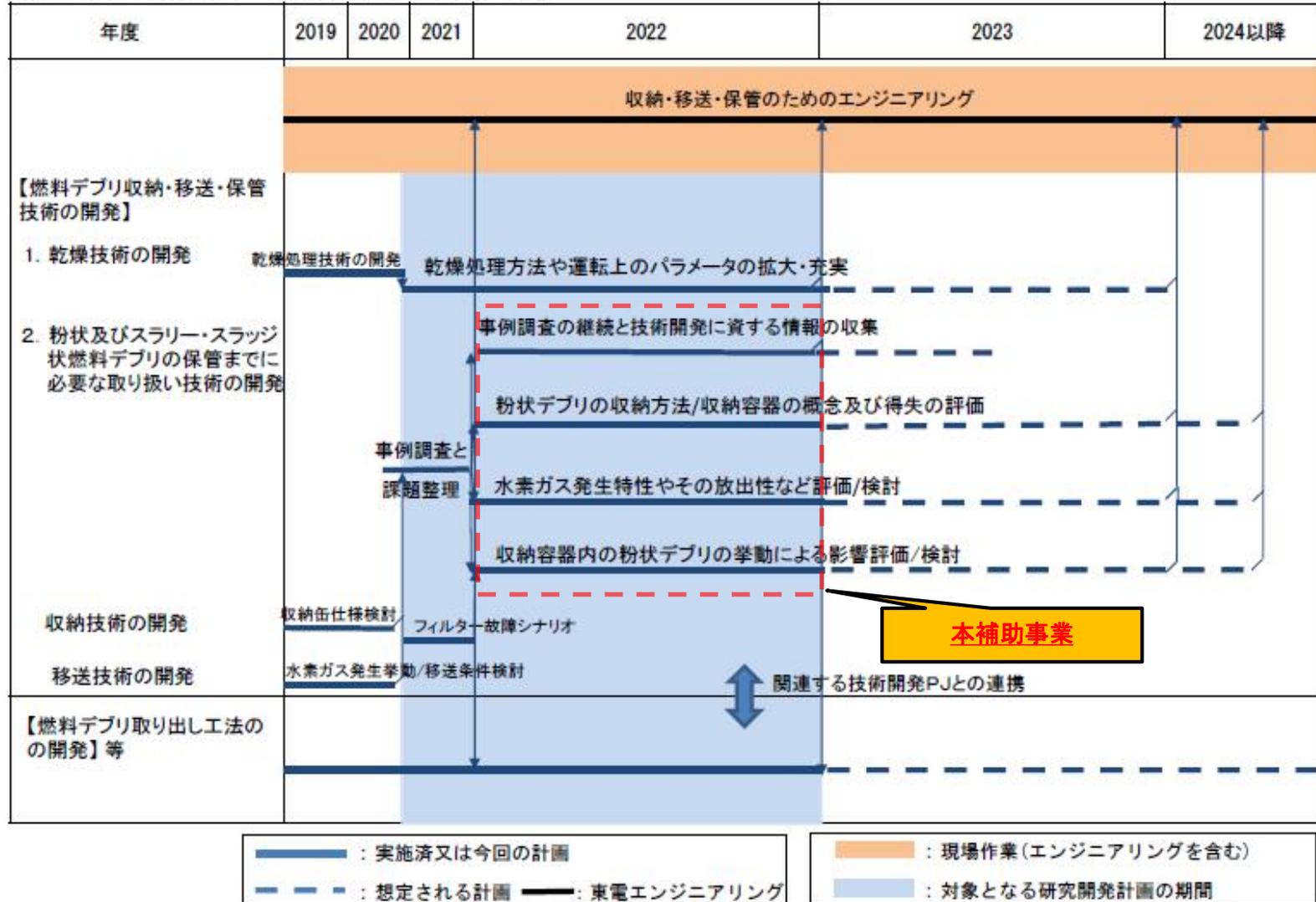
関連する研究開発において粉状燃料デブリの粒径分布等の性状や、取り扱い時における安全要求事項等の条件、粉状燃料デブリの回収方法等に関する検討が継続されている。これらの関連する研究開発における検討状況を踏まえて、粉状燃料デブリ性状、安全要求事項等の条件、及び、回収経路を考慮した上で、粉状燃料デブリを安定保管状態に持ち込むための収納方法(ユニット缶(Unit Can、以下「UC」と併記や略称することもある。))のような内容器を使用して収納缶に収納する、収納缶に直接収納する等)の概念を複数提案する。

提案された概念に対して、安全機能要求への適合性、スルーputへの影響等、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、それらの指標に対する評価を行い、絞り込みを行う。

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

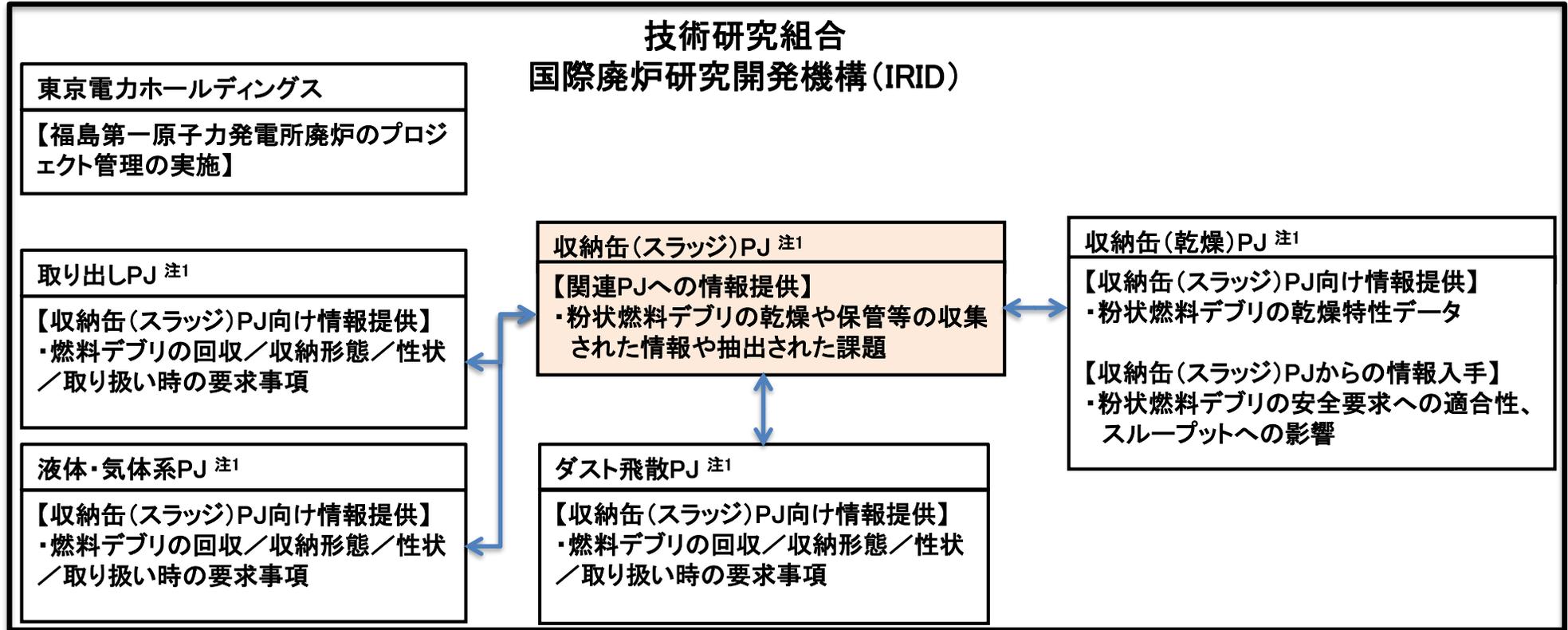
(目標工程)B3④: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議(第98回)資料「2022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PJ : 燃料デブリの取り出し工法の開発(燃料デブリ飛散抑制技術の開発)

液体・気体系PJ : 安全システムの開発(液体系・気体系システム、臨界管理技術)

ダスト飛散PJ : 安全システムの開発(ダスト飛散率データ取得)

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)

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・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)

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。

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.3 他研究との関連性(インプット・アウトプット情報)

【関連するPJから本PJへのインプット】

| ID | 実施項目と具体的内容 (情報の用途) | 必要情報 | 入手先 ^{注1} |
|----|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 課題抽出のための検討条件 | 燃料デブリの回収／収納形態／ 性状／取り扱い時の要求事項 | 取り出しPJ、 液体・気体系PJ、 ダスト飛散PJ |
| 2 | 課題抽出のための検討条件 | 粉状燃料デブリの乾燥特性データ | 収納缶(乾燥)PJ |

【本PJから関連するPJへのアウトプット】

| ID | 実施項目とアウトプットする内容 | アウトプット先での用途 | 提出先 ^{注1} |
|----|-------------------------|-------------|-------------------|
| 1 | 安全要求への適合性、スループットへの影響の検討 | 乾燥装置概念の検討 | 収納缶(乾燥)PJ |

注1:

取り出しPJ: 燃料デブリの取り出し工法の開発(燃料デブリ飛散抑制技術の開発)

液体・気体系PJ: 安全システムの開発(液体系・気体系システム、臨界管理技術)

ダスト飛散PJ: 安全システムの開発(ダスト飛散率データ取得)

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)

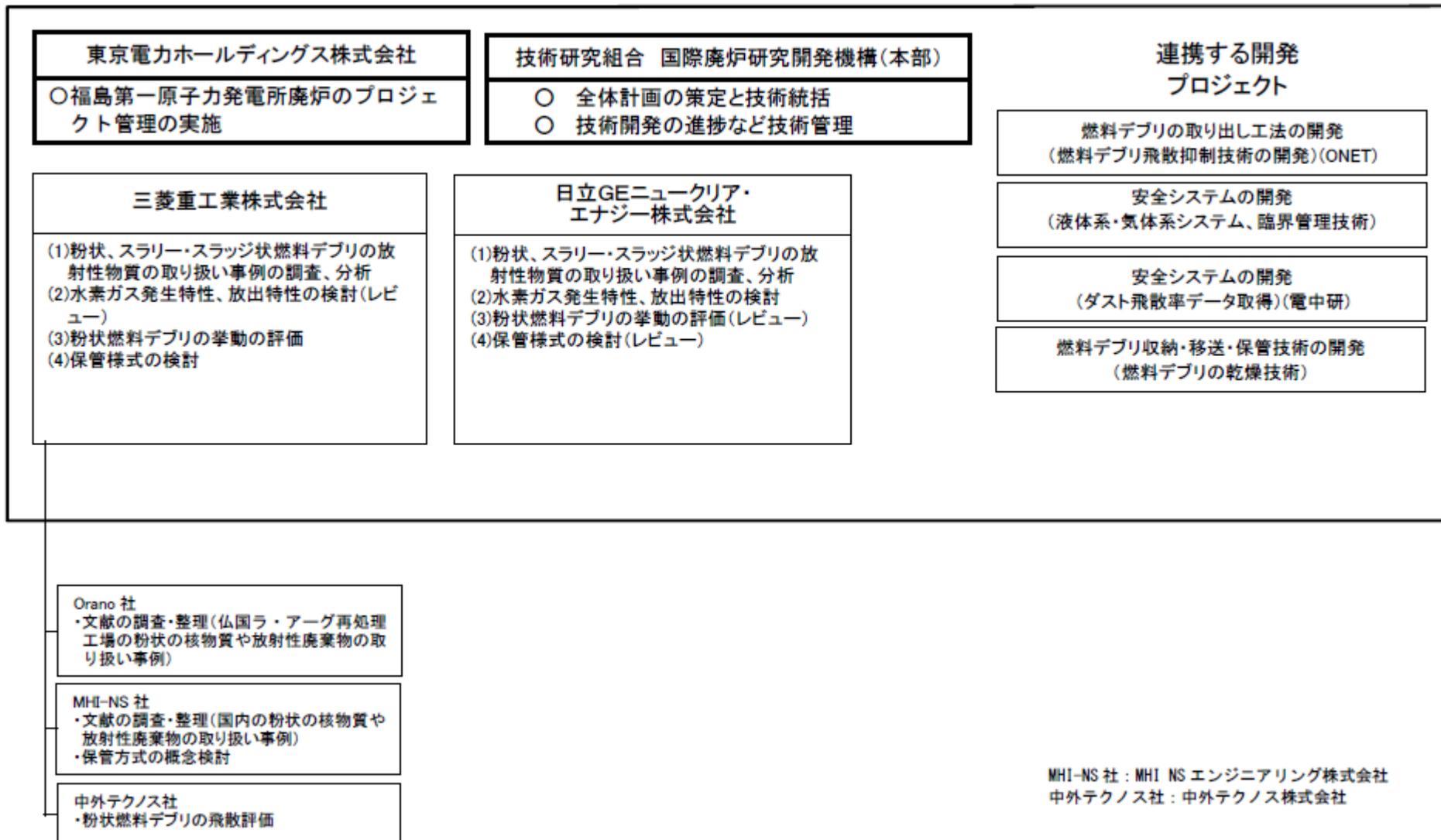
4. 実施スケジュール

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 (粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)

| | 2022年度 | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|---|----|----|--|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | | | |
| 1.粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ①事例調査 | 計画 | | | | | | | | | 実績 | | | | | |
| ②分析／課題の抽出 | | | | | | | | | | 計画 | | | 実績 | | |
| 2.水素ガス発生特性、放出特性の検討 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ①水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討 | 計画 | | | | | 実績 | | | | | | | | | |
| ②粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法の提案 | | | | 計画 | | | | | | | | | 実績 | | |
| ③粉状燃料デブリの水素ガス放出特性 | | | | 計画 | | | | | | | | | 実績 | | |
| 3.粉状燃料デブリの挙動の評価 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ①文献調査 | 計画 | | 実績 | | | | | | | | | | | | |
| ②粉体の挙動評価方法の検討 | | | | 計画 | | | | | | | | | 実績 | | |
| ③安全機能への影響評価 | | | | | | | | | | | 計画 | | | 実績 | |
| 4.保管様式の検討 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ①検討条件の整理 | 計画 | | | 実績 | | | | | | | | | | | |
| ②粉状燃料デブリの収納方法の概念検討 ^{注1} | | | | 計画 | | | | | | | | | 実績 | | |
| ③収納方法の絞り込み ^{注1} | | | | | | | | | | | 計画 | | | 実績 | |
| 5.進捗報告等 | | | | | | | | ▼ | ▼ | | | | | | |

注1:1～3項の検討結果を考慮して、収納方法の概念検討および収納方法の絞り込みを実施

5. 実施体制図 (2023年3月末時点)



- 6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析
- 6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討
- 6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価
- 6.4 保管様式の検討

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

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、分析しておくことが有用である。

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(1/16)

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、下記の調査項目について調査先に関する情報収集を実施した。

<調査先>

仏国

ラ・アーク再処理工場(La Hague)の粉状の核物質や放射性廃棄物の取り扱い事例

国内

日本原子力研究開発機構(JAEA) 廃液処理から排出される放射性物質の事例

<調査項目>

安全な移送や保管に必要となる調査項目

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に関する調査項目

収納容器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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(2/16)

仏国ラ・アーク再処理工場に対して、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経験、知見および情報の入手のため Oranoと協議し、以下の対象施設及び対象プロセスについて事例調査を実施した。

<事例調査の対象施設>

| 検討対象施設 | 施設の概要 | 主要なプロセス |
|-------------------------|---|--------------------|
| UP2-400 [ラ・アーク再処理工場] | 照射済燃料(UNGG燃料 ^{注1} 、軽水炉燃料)の再処理施設であり、現在廃止措置を実施中。燃料処理量は400トン/年。 | 前処理、燃料せん断、溶解、貯蔵 |
| UP2-800 [ラ・アーク再処理工場] | 照射済燃料(金属ウラン燃料、軽水炉燃料、MOX燃料)の再処理施設であり、稼働中。燃料処理量は800トン/年。 | 前処理、燃料せん断、溶解、濃縮、貯蔵 |
| UP3 [ラ・アーク再処理工場] | 照射済燃料(金属ウラン燃料、軽水炉燃料、MOX燃料)の再処理施設であり、稼働中。燃料処理量は800トン/年。 | 同上 |

注1: 黒鉛減速・炭酸ガス冷却天然ウラン金属燃料発電炉 (仏語のUranium Naturel(天然ウラン)・Graphite(黒鉛)・Gaz(ガス)の頭文字)

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

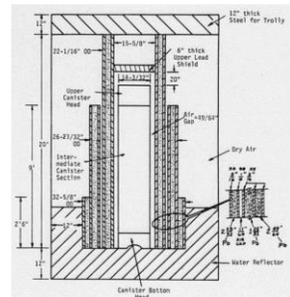
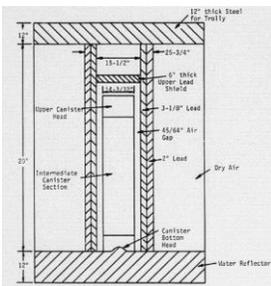
a.事例調査(3/16)

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注1を以下に示す。

注1:a.項では、先行補助事業「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応)」での調査結果に本補助事業での調査結果を緑字で追加した。

表1 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(1/13)

| 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。 |
| | <u>La Hague</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・<u>貯槽及び容器内のスラッジは、サンプリング分析による濃度管理、質量管理を行うことで未臨界を担保。</u> ・<u>CBF-C2容器(廃棄フィルタを収納したキャニスタ2基をコンクリ固化)の貯蔵時は、最大Pu密度を考慮し、容器間の間隔をあけた貯蔵により未臨界を担保。</u> |



注2: TMI-2 Transfer System Criticality Technical Report, Doc.No. 77-1155739-02



注3: Orano Report 2022, NT 102413 00 0001

図1 移送キャスクに収納されたキャニスタ(収納容器)の評価モデルの例(TMI-2)注2

図2 CBF-C2容器保管時の配置注3 ioning

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(4/16)

表1 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(2/13)

| 調査項目 | 調査先 | 調査結果 |
|------|-----------------|--|
| 遮蔽 | 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。 |
| | <u>La Hague</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・<u>La Hagueでは、セルの壁や容器によって遮蔽を施している。</u> ・<u>ここで、廃棄物から放出されるγ線、中性子線を基に、通常時2.5μSv/h、不定期作業時25μSv/hを満足することを確認している。</u> |

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(5/16)

表1 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(3/13)

| 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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(6/16)

表1 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(4/13)

| 調査項目 | 調査先 | 調査結果 |
|------|----------|---|
| 除熱 | La Hague | <ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料を溶解した硝酸ウラニル溶液に残った溶解残渣は、ガラス固化してCSD-V容器1体あたり2kW以下になるまで収納され、セルのコンクリートが90°C、CSD-V容器中心が510°Cを超えないように管理している。 ・CSD-V容器はR7施設の貯蔵ピット内に段積みで保管され、換気停止時においても自然冷却により冷却が可能であることを計算コードFLUENTで評価している。 |

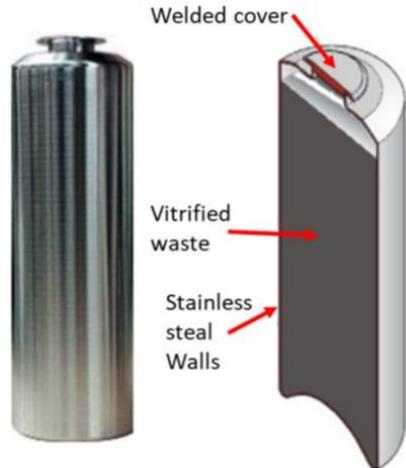


図1 CSD-V容器^{注1}

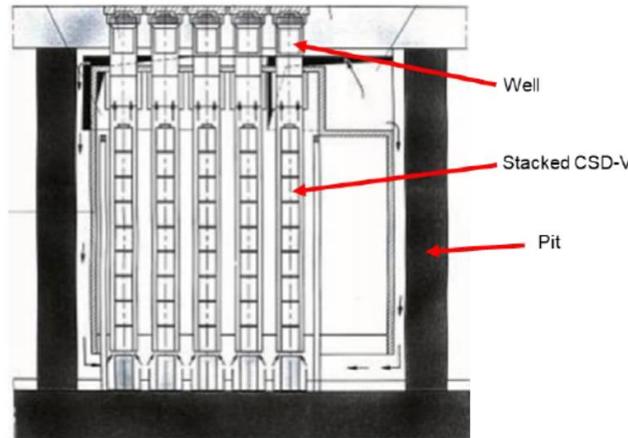


図2 CSD-V容器を貯蔵するR7施設の貯蔵ピット^{注1}

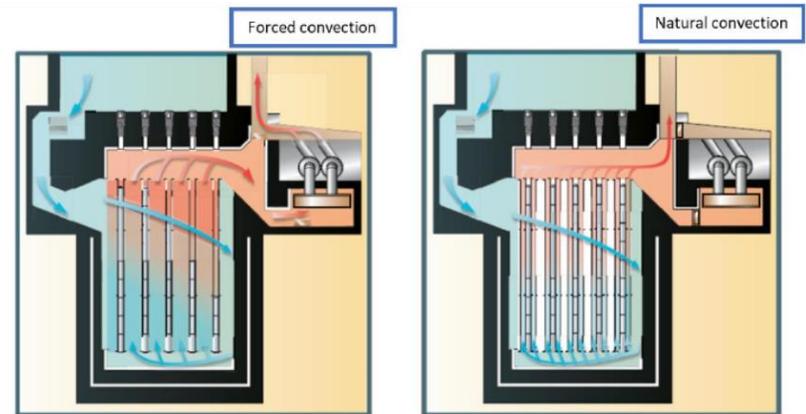


図3 R7施設での冷却システム^{注1}

注1: Orano Report 2022, NT 102413 00 0001

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(7/16)

表1 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(5/13)

| 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。 |

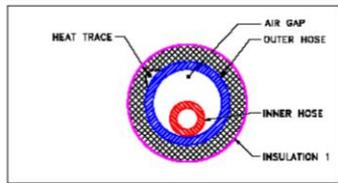


図1 スラッジ輸送に使用された Hose-in-Hose^{注1}

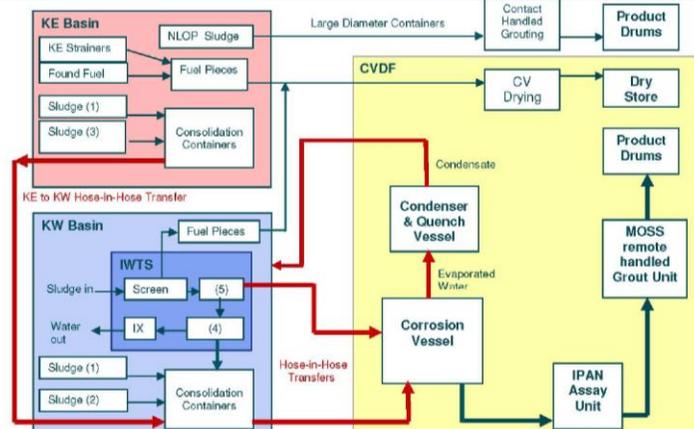


図2 K-West-Basinに設置されたスラッジ処理、固化システムの概要^{注1}

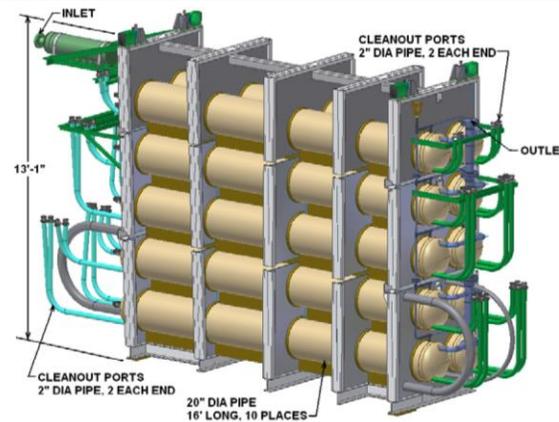


図3 Settle Tanks^{注2}

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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(8/16)

表1 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(6/13)

| 調査項目 | 調査先 | 調査結果 |
|------|----------|---|
| 構造 | La Hague | ・HAOサイロで貯蔵されている放射性スラッジは、CFR容器(水素はPorous pelletから放出)に入れてセメント固化(移送中などの取り扱い時における粉状の放射性物質の飛散防止の観点から固化を実施)される。CFR容器は、遮蔽および換気機能を持つ移送容器Hermès/Mercureに入れて、移送車両NICOLASで中間貯蔵施設DE/EDSへ移送され、最終処分場の作業が開始されるまで中間貯蔵される。 |

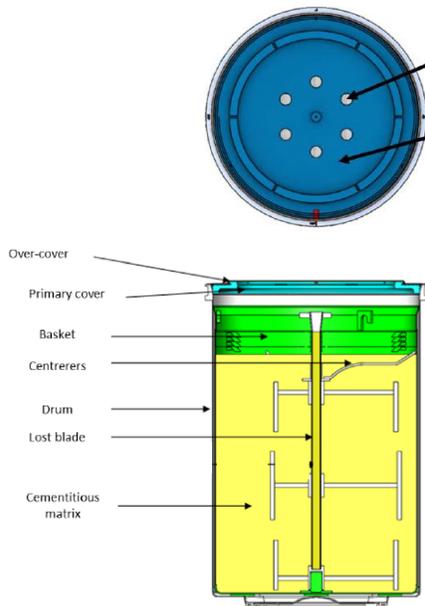


図1 CFR容器^{注1}

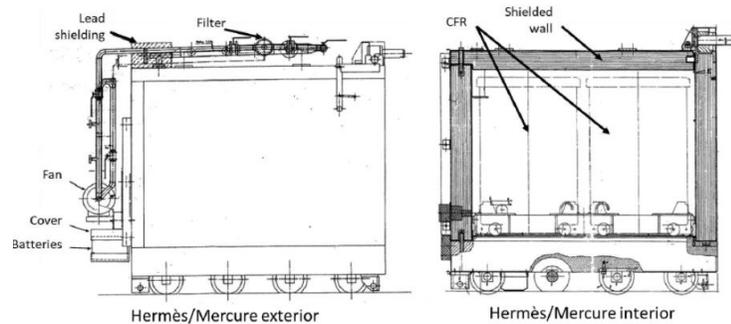


図2 中間貯蔵施設DE/EDSに移送するためのCFR容器的移送容器Hermès/Mercure^{注1}



図3 移送容器Hermès/Mercureを中間貯蔵施設DE/EDSに移送する車両NICOLAS^{注1}

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(9/16)

表1 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(7/13)

| 調査項目 | 調査先 | 調査結果 |
|------|----------------------|--|
| 構造 | JAEA | <ul style="list-style-type: none"> ・東海再処理施設では、濃縮ウラン溶解槽に蓄積するスラッジを除去するため、バキュームクリーナーの吸引力を利用したスラッジ回収装置を開発した。 ・スラッジ回収装置により回収されたスラッジは一部金属光沢を有するものであり、そのほとんどが砂状であった、3基の濃縮ウラン溶解槽の溶解部(バレル)および貯液部(スラブ)から約30L程度のスラッジが回収された。 |

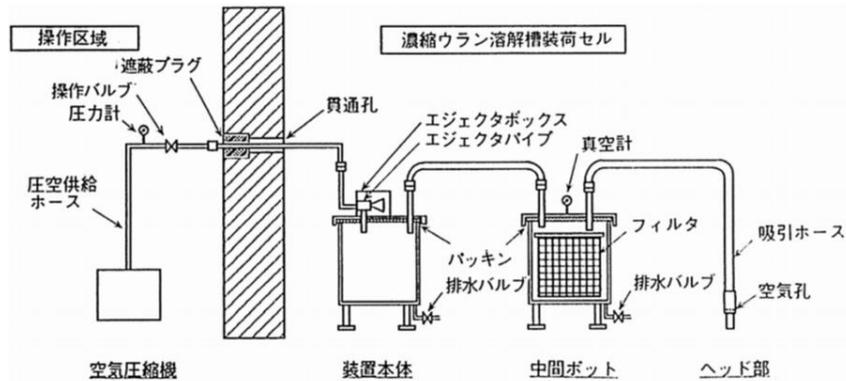


図1 バキュームクリーナーの吸引力
を利用したスラッジ回収装置^{注1}

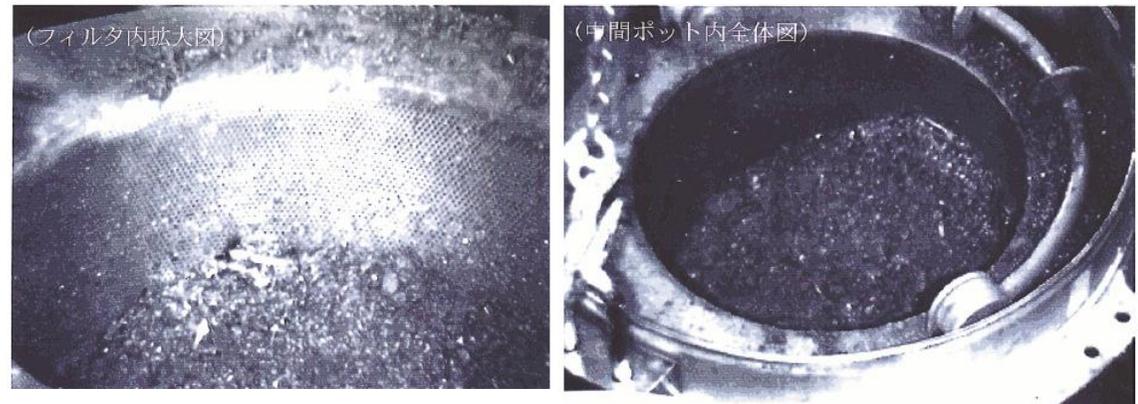


図2 スラッジ回収装置によるスラッジ回収結果^{注1}

注1: Nagasato, Y., Abiko, S., Tamura, U., Hikita, K., Kogawa, T. (2000) “濃縮ウラン溶解槽からのスラッジ回収装置の開発”, サイクル機構技報, No.9, p.49.

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(10/16)

表1 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(8/13)

| 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。 |

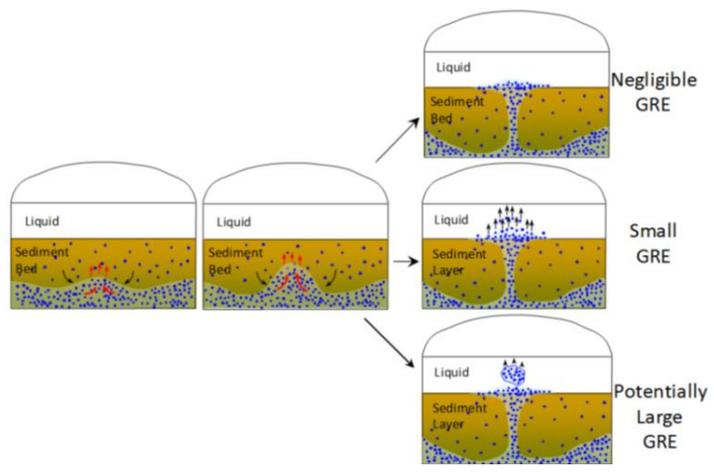


図1 Hanford Siteのタンク内における水素放出事象 (GRE: Gas Release Event) 注1

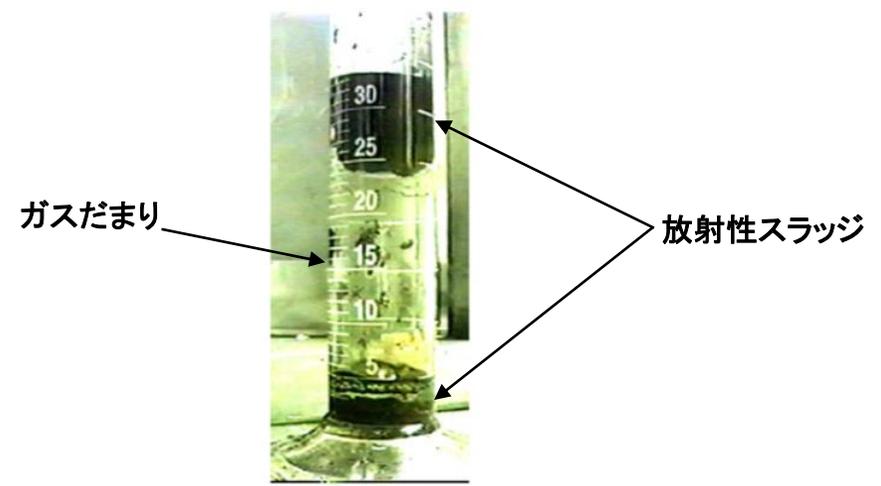


図2 放射性スラッジにより形成されたスラッジ層内のガスだまり注2

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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(11/16)

表1 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(9/13)

| 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。 |

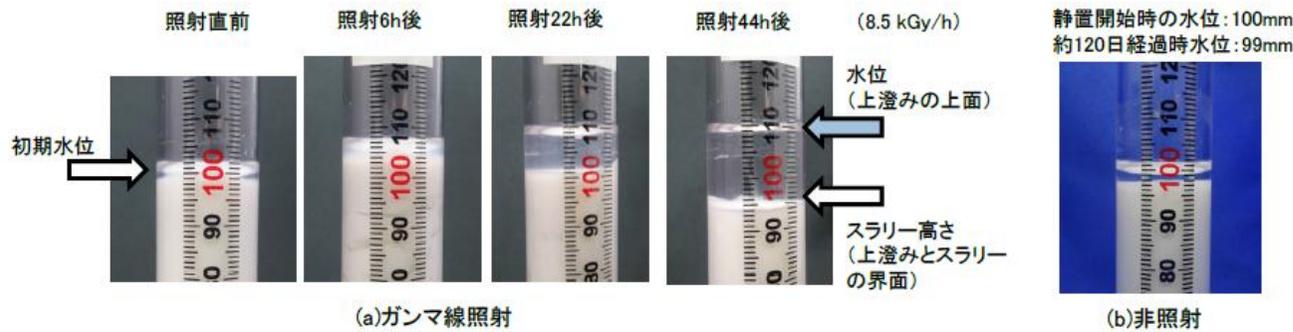


図1 HIC模擬炭酸塩スラリーへのガンマ線照射による水位上昇、たまり水増加^{注1}

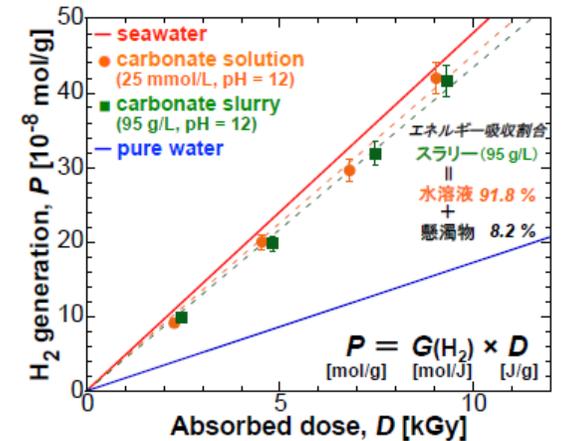


図2 HIC模擬炭酸塩スラリーへのガンマ線照射による水素発生量と吸収線量の関係^{注2}

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

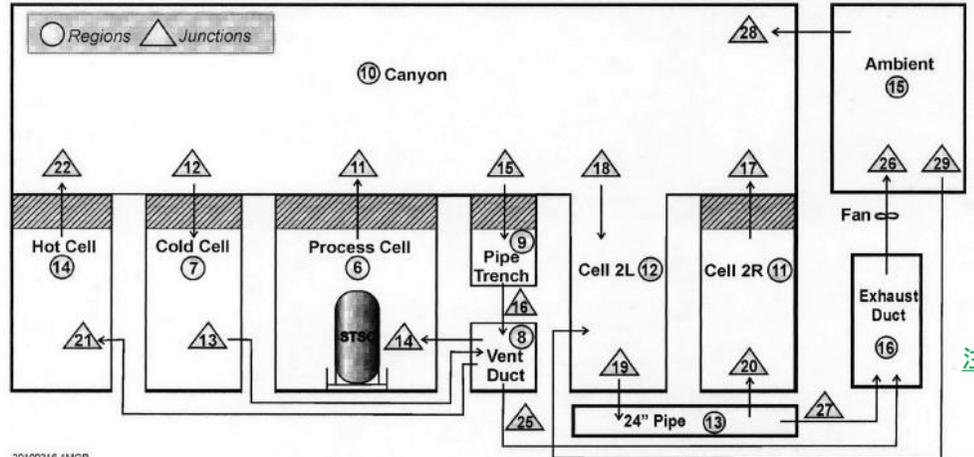
6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(12/16)

表1 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(10/13)

| 調査項目 | 調査先 | 調査結果 |
|------|--------------------------|---|
| 水素 | <u>Hanford (K-Basin)</u> | ・K-Basinにて回収されたスラッジをT-Plantで貯蔵できることを確認するために、計算コードFATEを用いて温度および水素濃度を評価し、換気がない場合でも最高温度72°C、水素濃度3.3vol%であり、熱的に安定であることや水素濃度が爆発下限濃度4vol%を超えないことを確認した。 |
| | <u>La Hague</u> | ・HAOサイロで貯蔵されている放射性スラッジを、CFR容器に入れて中間貯蔵施設DE/EDSに移送する際の水素発生速度が算出された。算出された水素発生速度はCFR容器1体あたり0.07L/hであり、移送容器Hermes/Mercureの換気能力20m ³ /hに対して十分小さいことを確認した。 |



注1: Crowe, R.D., Apthorpe, R, Lee, S.J, Plys, M.G., (2010), "Thermal and Gas Analyses for Sludge Transport and Storage Container (STSC) Storage at T Plant", PRC-STP-00241 Revision 0

図1 T-PlantのFATE評価に設定された評価ノード注1

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(13/16)

表1 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(11/13)

| 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天然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。 |

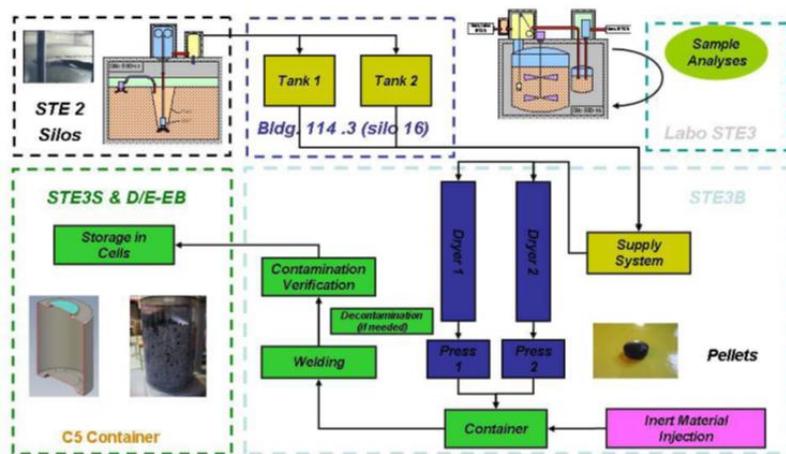


図1 Drying/Compressプロセス^{注1}



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、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(14/16)

表1 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(12/13)

| 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。 |
| | <u>La Hague</u> | <p><u>・La Hagueでは、安全原則に従い、二段階で放射性物質を閉じ込めている。</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <u>- 第一段階: 機器、配管、容器により放射性物質を閉じ込める。</u> <u>- 第二段階: (万一漏洩した場合に)セル及び建屋、又は、輸送容器によって閉じ込める。(環境への放射性物質の放出を防止)</u> |

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(15/16)

表1 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(13/13)

| 調査項目 | 調査先 | 調査結果 |
|-------|-------------------|--|
| 長期健全性 | Hanford (K-Basin) | <ul style="list-style-type: none"> ・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°C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。 |
| | <u>La Hague</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・<u>La Hagueで容器に収納された廃棄物は、最終処分施設(Cigeo)の運転開始まで中間貯蔵される。中間貯蔵時には、水素ガス発生、腐食等を確認し、容器(廃棄物)の状態を監視している。</u> ・<u>スラッジがHAOサイロ(核燃料のせん断と核分裂性物質の溶解を行う施設の貯蔵エリア)の組成と同等であれば、スラッジを収納する容器は、SUS316Lを使用することで60°Cに到達しても高い耐食性を示すことを試験により確認している。</u> |
| 乾燥 | Hanford (K-Basin) | <ul style="list-style-type: none"> ・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°C、乾燥時間:50時間)を実施。 |
| | <u>La Hague</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・<u>La Hagueでは、一般的に湿式プロセスを使用しているため、乾燥処理を行わない。</u> ・<u>一方で、R1施設(使用済み燃料のせん断/溶解施設)で発生したスラッジをガラス固化前にか焼する。</u> ・<u>ここで、か焼は、化学的安定性、粒子形状、反応性を均一化させ、ガラス固化処理の連続性や生産効率を向上させる目的で行われる。(水素発生防止が目的ではない)</u> |

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

a.事例調査(16/16)

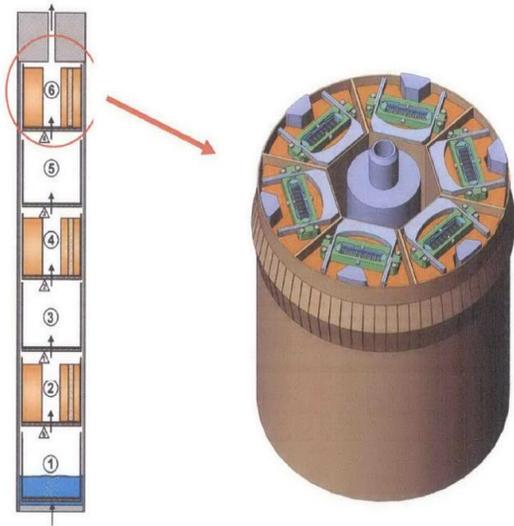


図1 HanfordのMCO(Multi Canister Overpack)とMCOに収納するスクラップバスケット^{注1}

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.

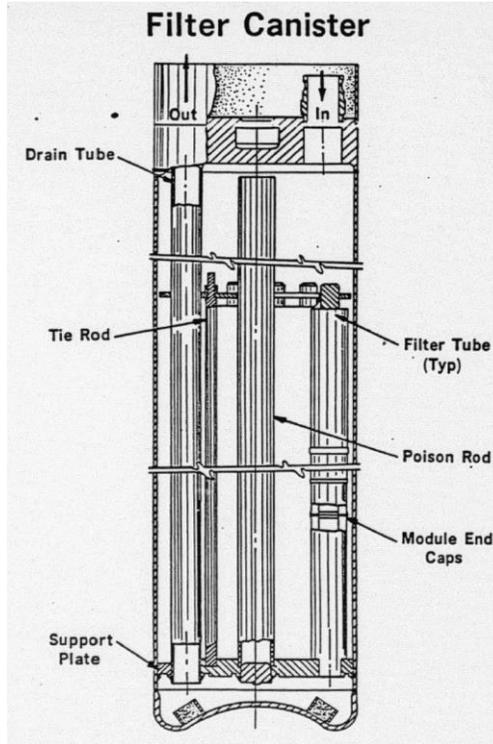


図2 TMI-2 フィルタ収納缶 (収納粒径: 0.5~800 μ m)^{注2}

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

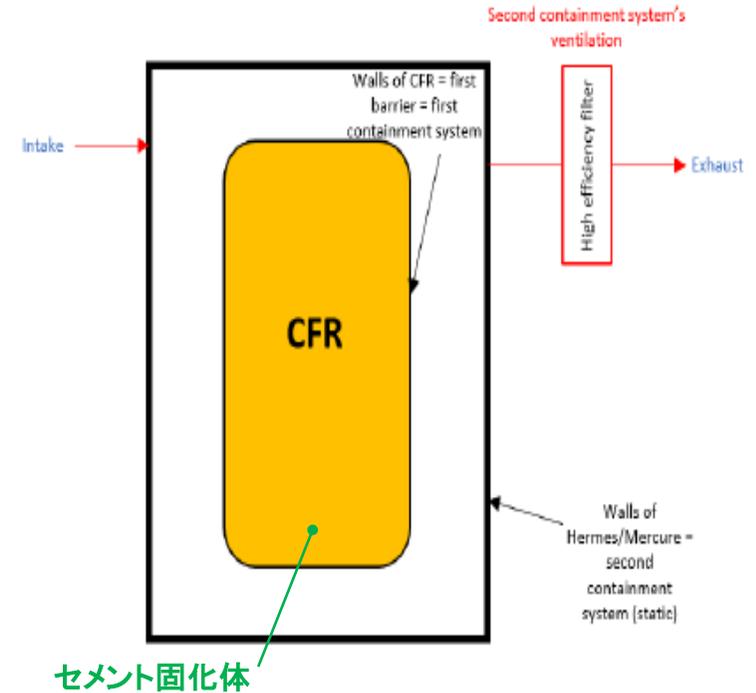


図3 Hermes/Mercure(輸送時梱包)による閉じ込め^{注3}

注3: Orano Report 2022, NT 102413 00 0001

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

b.分析／課題の抽出(1/5)

事例調査により得られた情報に基づき、粉状燃料デブリを塊状、粒状の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た。

＜課題抽出フォーマットに基づく課題抽出の一例＞

| No | ステップ | 場所 | 実施内容 | 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 | 収納缶 | その他機器 (UCや収納缶以外の取り扱い設備) | | | | | | |
| 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、移送管 器、保管容器、セルのいづれかで担保する。 | UC | ②⑤の基本 要求が維持 可能な構造とするが、収納 缶内UCを収納した場合 は収納缶で維持する。 | UC | ・積層の二重化等により、取 り取り時に短絡や落下などの 想定事象が生じないものと 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。 | UC | ・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。 | 収納缶 | - | - | - | | | | |
| | | | ②除熱 | ・環境熱により燃料デブリが溶融しないこと。 ①、②～⑦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内の前 面から十分な換気能力を有 する。 | UC | ・発熱量は小さく換気により 除熱できる十分な換気能力を有する。 | UC | ・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。 | UC | ・燃料デブリの発熱量は小 さくと考えられ、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。 | UC | ・燃料デブリの発熱量は小 さくと考えられ、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。 | 収納缶 | - | - | ＜課題(UC)＞ 建屋熱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。 (発熱量が小さい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) | ・放射性物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 | ・UCは、閉じ込め性能は担保しない。 | UC | ・UCは、閉じ込め性能は担保しない。 | UC | ・UCは、閉じ込め性能は担保しない。 | UC | ・閉じ込め性能は担保しないので課題なし。 | 収納缶 | - | - | - | ＜課題(ホットセル)＞ UC外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り扱いには他PUにて検討されており、課題としない(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。 | ・燃料デブリから発する放射線による放射線被ばく防止は、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、収納缶の板厚は構造等の観点から必要となる厚さとする。 | UC | ・セルのバンダリで担保するので特に担保しない。 | UC | ・セルのバンダリで担保するので特に担保しない。 | UC | ・セルのバンダリで担保するので特に担保しない。 | UC | ・セルのバンダリで担保するので特に担保しない。 | 収納缶 | - | - | - | ＜課題(ホットセル)＞ セルのバンダリで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り扱いには他PUにて検討されており、課題としない(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。 ①、②～⑦の基本 要求が維持できることを前提にする。 | ・UCの幾何学的形状で未臨界を維持する。 ①、②～⑦の基本 要求が維持できることを前提にする。 | UC | ・UCの幾何学的形状で未臨界を維持する。 | UC | ・UCの幾何学的形状で未臨界を維持する。 | UC | ・UCの幾何学的形状で未臨界を維持する。 | UC | ・UCの幾何学的形状で未臨界を維持する。 | UC | - | - | - | ・UC取り扱いに、設備側で乾留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を爆発下限界である4vol%未満を維持する。 UCに蓄積する場合、ユ ニット内内に発生する水素 が適切に放出されることを水素拡散評価等で確認する。 | UC | ・UCに蓄積しない場合、水素を原子炉内に即時放出するため、原子炉内を換気することで、水素濃度を爆発下限界である4vol%未満を維持する。 UCに蓄積する場合、原子炉内内に発生する水素が適切に放出されることを水素拡散評価等で確認する。 | UC | ・UCに蓄積しない場合、原子炉内を換気することで水素濃度を維持する。 UCに蓄積する場合、原子炉内内に発生する水素が適切に放出されることを水素拡散評価等で確認する。 | UC | ・UCに蓄積しない場合、原子炉内を換気することで水素濃度を維持する。 UCに蓄積する場合、原子炉内内に発生する水素が適切に放出されることを水素拡散評価等で確認する。 | UC | ・燃料デブリの微細化により、水素の放射線分解への影響が大きいα線の発生率が高まり、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。 ・現状のUC構造案は蓋なし(上部が開放状態)であるため問題は少ないが、蓋あり(密閉状態)に変更した場合は、UC内の水素濃度4vol%未満維持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内の気相の水素濃度が一気に上昇する可能性がある。 | UC | - | - | - | ＜課題(UC)＞ 燃料デブリの取り扱いのプロセス毎(原子炉内から燃料取り出しから長期保管までに想定される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で表示 | |
| | | | 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。 | UC | ・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 | ・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。 | UC | ・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。 | UC | ・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。 | UC | - | - | - | - | |
| | | | 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の取り扱い時には計量管理(収納缶への装着後から計量管理を実施) | UC | ・燃料デブリを回収したUCの取り扱い時には計量管理(収納缶への装着後から計量管理を実施) | UC | ・燃料デブリを回収したUCの取り扱い時には計量管理(収納缶への装着後から計量管理を実施) | UC | ・燃料デブリを回収したUCの取り扱い時には計量管理(収納缶への装着後から計量管理を実施) | UC | ・燃料デブリを回収したUCの取り扱い時には計量管理(収納缶への装着後から計量管理を実施) | UC | ・燃料デブリを回収したUCの取り扱い時には計量管理(収納缶への装着後から計量管理を実施) | 収納缶 | - | - | ＜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PUにて検討されており、課題としない(可能性あり) |
| | | | 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。 | ・取り扱い時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。 | UC | ・取り扱い時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。 | UC | ・取り扱い時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。 | UC | ・取り扱い時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。 | UC | ・取り扱い時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。 | UC | ・取り扱い時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。 | UC | - | - | ＜課題(ホットセル)及び防護措置の課題＞ 取り扱い時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り扱いには他PUにて検討されており、課題としない(可能性あり) |
| | | | ⑩取り扱い操作上の必要事項 | ・燃料デブリ取り出し、収納をする上で必要な機能を備えていること。 | - | UC | - | UC | - | UC | - | UC | - | UC | - | UC | - | - | - |

対象機器(ユニット缶(UC)、収納缶、取り扱い設備)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(原子炉内から燃料取り出しから長期保管までに想定される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で表示

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

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

b.分析／課題の抽出(2/5)

＜抽出した粉状、スラリー・スラッジ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(Unit Can、略称UC)】

| 項目 | 選定された課題 | 対策案 | 技術課題 ^{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・スラッジ状の燃料デブリ(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)および本補助事業(保管様式の検討)で検討済* |
| | ・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、スラリー・スラッジ状の燃料デブリの排出を検討している補助事業でも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 |
| | ・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。 | ・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)で検討済 |
| 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。 | ・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 ⇒本補助事業(水素ガス発生特性、放出特性の検討)で検討済 |
| | ・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。 | ・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濃度測定方法の検討 ⇒今後検討要 |
| | ・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)および本補助事業(保管様式の検討)で検討済 |

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)
・本補助事業 : 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)

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

b.分析／課題の抽出(3/5)

＜抽出した粉状、スラリー・スラッジ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 ^{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 ⇒今後検討要 |
| 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 ⇒本補助事業(粉状燃料デブリの挙動の評価)で検討済 |
| | | ・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)および本補助事業(保管様式の検討)で検討済 ・粉状燃料デブリの取り扱い方法(収納方法)の検討 ⇒本補助事業(保管様式の検討)で検討済 |
| 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.33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.33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)
・本補助事業 : 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)

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

b.分析／課題の抽出(4/5)

＜抽出した粉状、スラリー・スラッジ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 |
|-------|---|---|---|
| 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 ⇒今後検討要 |
| | | ・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 ⇒今後検討要 |
| 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 ⇒今後検討要 |
| 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及び環境を考慮し、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及び腐食対策の検討 ⇒今後検討要 |
| | | ・スラッジの長期保管では容器劣化により漏洩する可能性が想定される。このため、容器の長期健全性を評価するとともに、固体状態による安定保管に向けた対策を検討する。 | ・粉状燃料デブリの安定保管方法の検討 ⇒今後検討要 |

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

③実施事項、成果

b.分析／課題の抽出(5/5)

<抽出した粉状、スラリー・スラッジ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 ^{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)で一部検討済 ⇒システム全体構成は今後検討要 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 ⇒本補助事業(粉状燃料デブリの挙動の評価)で検討済 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 ⇒今後検討要 |
| | <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 ⇒今後検討要 |
| 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及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 ⇒今後検討要 |
| 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.33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.33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)
 ・本補助事業 : 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)

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

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、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。

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、所期計画通り目標を達成できたと判断する。

- ・ 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評価対象外)
- ・ 燃料デブリを塊状、粒状の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。(TRLレベル:1)

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

⑦まとめ

- ・仏ラ・アーグ再処理工場および国内類似施設における粉状、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、知見及び情報を得るため、調査対象とする施設及び対象プロセスに関する情報収集を実施し、整理及び分析を行った。
- ・整理及び分析を行った情報に基づき、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の整理、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。

6. 実施内容

6.1 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

⑧今後の課題

燃料デブリを塊状、粒状の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、国内外の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.33～36参照)

下記の技術課題の解決に向けた検討が必要である。

【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 【⇒関連補助事業(乾燥PJ)、本補助事業で検討】
- ✓ 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 【⇒本補助事業で検討】
- ✓ 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 【⇒本補助事業で検討】
- ✓ 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 【⇒本補助事業で検討】
- ✓ 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及び腐食対策、安定保管方法の検討
- ✓ 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 水素ガス発生特性、放出特性の検討

①目的、目標

粒状、塊状燃料デブリと粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリ(以下、「粉状燃料デブリ」という。)の違いにより、水素ガス発生特性に影響する因子を文献調査等により特定し、各因子の水素発生速度への影響度合いを検討する。水素発生速度に影響する各因子を考慮し、粒状、塊状燃料デブリの水素発生速度予測法の見直しを行い、課題解決のために必要な検討項目を明らかにする。

また、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い時に確認された水素ガスだまりが突発的に放出される事象について、粉状燃料デブリの保管への影響を、海外文献等で提案されている評価式、福島第一原子力発電所で回収が想定される粉状燃料デブリの性状を仮定して評価する。

②既存技術との対比

2020年度までの燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJでは、粒状、塊状燃料デブリに適用が可能な水素発生速度予測法の提案を行った。

一方、燃料デブリの取り出し時には、粉状燃料デブリの回収も見込まれることから、粉状燃料デブリに適用する水素発生速度予測法を検討し、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 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(1/13)

(i) 粒状、塊状燃料デブリの水素発生速度予測法(リニアモデル)

粒状、塊状燃料デブリの水素発生予測法は、使用済燃料を用いた水素発生試験の結果をもとに、燃料デブリの粒径を含む性状が不確定な状況下での評価手法として、保守的に最大値となる微粒子の水素発生速度($R_{H_2(PHITS)powder}$)で評価することを提案した。

将来的には、燃料デブリの性状を把握した状態での評価手法として、燃料デブリのサンプリングや取り出し時の測定等によって燃料デブリの粒径を含む性状を明らかにする、もしくは、ユニット缶構造の具体化により収納される燃料デブリの粒径を制限して、微粒子よりも大きな粒径を含めた粒径依存性まで考慮する水素発生速度($R_{H_2(PHITS)d}$)で評価することを提案した。

<燃料デブリの性状が不確定な状況下での評価手法>

$$R_{H_2(PHITS)powder} = R_{H_2(PHITS)powder(\alpha)} + R_{H_2(PHITS)powder(\beta)} + R_{H_2(PHITS)powder(\gamma)}$$

$$R_{H_2(PHITS)powder(i)} = E_{(i)} \times P_{(i)} \times M \times C \times F_{(PHITS)powder(i)} \times G_{(i)}$$

$R_{H_2(PHITS)powder}$: 水素発生速度、 $R_{H_2(PHITS)powder(i)}$: 線種ごとの水素発生速度、 $E_{(i)}$: 線種ごとの崩壊熱、 $P_{(i)}$: 線種ごとのピーキングファクタ、
 M : 燃料デブリ重量、 C : 燃料含有割合、 $F_{(PHITS)powder(i)}$: 微粒子の線種ごとのエネルギー吸収率、 $G_{(i)}$: 線種ごとの水素発生のG値、 $i = \alpha$ 線、 β 線、 γ 線

<燃料デブリ性状把握下での評価手法>

$$R_{H_2(PHITS)d} = R_{H_2(PHITS)d(\alpha)} + R_{H_2(PHITS)d(\beta)} + R_{H_2(PHITS)d(\gamma)}$$

$$R_{H_2(PHITS)d(i)} = E_{(i)} \times P_{(i)} \times M \times C \times \left(F_{(PHITS)powder(i)} \times \frac{a}{100} + F_{(PHITS)d(i)} \times \frac{b}{100} \right) \times G_{(i)}$$

$R_{H_2(PHITS)d}$: 水素発生速度、 $R_{H_2(PHITS)d(i)}$: 線種ごとの水素発生速度、
 $F_{(PHITS)d(i)}$: 粒径dの線種ごとのエネルギー吸収率、
 a : 粒径 微粒子の割合、 b : 粒径d mmの割合

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(2/13)

(ii)粒状、塊状燃料デブリの水素発生速度予測法の入力値

粒状、塊状燃料デブリにおける水素発生速度の評価に用いた入力値とその根拠を以下に示す。なお、エネルギー吸収率は粒状、塊状燃料デブリにおいて使用した入力値のうち、最も保守的な入力値である、含水率50vol%(水切り相当)かつ粒径が微粒子相当(0.0001mm)の条件における入力値のみを記載する。

表1 粒状、塊状燃料デブリの水素発生速度予測法に使用した入力値

| 入力値 | 記号 | 値 | 単位 | 根拠 |
|-----------|----|----------------------------------|-----------------------|--|
| 崩壊熱 | E | α線:0.133 β線:0.383 γ線:0.221 | J/s/kgUO ₂ | JAEAにより公開されている福島第一原子力発電所の燃料組成評価 ^{注1} より、単位重量当たりの発熱量と放射能が最も高い、1号機の短期発熱量と光子放出率を使用して崩壊熱とした。 |
| ピーキングファクタ | P | α線:2.35 β線:1.56 γ線:1.56 | — | ピーキングファクタは崩壊熱を保守的に算出するための値であり、TMI-2と同様、JAEAにより公開されている福島第一原子力発電所の燃料組成評価 ^{注1} より、最大燃焼度を平均燃焼度で除することで算出した。 |
| 燃料含有割合 | C | 1(100%) | — | 燃料デブリは構造物やコンクリート等の混合物であるが、水素発生速度を保守的に評価するために100%とし、全てUO ₂ とした。 |
| 燃料デブリ重量 | M | 72.9 | kgUO ₂ | 燃料デブリをユニット缶内にTMI-2における実績値(20~30%)から仮定した、目標値30vol%を収納した際の重量を使用。 |
| エネルギー吸収率 | F | α線:0.250 β線:0.160 γ線:0.158 | — | 以下の条件で、粒子輸送計算PHITSを用いたモンテカルロ計算を実施。 ・水分量:2019年度に実施した、模擬燃料デブリを使用した水切り試験により得られた、水分量50vol%(水:粒子=1:1) ・粒径:PHITSの計算結果が最大値となる0.0001mm |
| 水素発生のG値 | G | α線:1.3 β線:0.45 γ線:0.45 | molecules/100eV | 保守的な評価となる、純水のプライマリーG値を文献から引用して使用。 |

注1:西原健司、岩元大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、表2、表43 日本原子力研究開発機構、2012年9月より、1F-1の線種ごとに主要核種の発熱量を抽出し、足し合わせた値とした。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(3/13)

(iii) 影響因子の検討(1/8)

リニアモデルにおける入力値のうち、粒状、塊状燃料デブリと粉状燃料デブリの違いで挙げられる影響因子の抽出結果を以下に示す。

表1 影響因子の抽出結果

| 入力値 | 記号 | 影響有無 | 根拠 |
|-----------|----|------|--|
| 崩壊熱 | E | 無 | 評価対象の燃料デブリが粒状、塊状燃料デブリと同様であるため差異要因としない。 |
| ピーキングファクタ | P | 無 | 評価対象の燃料デブリが粒状、塊状燃料デブリと同様であるため差異要因としない。 |
| 燃料含有割合 | C | 有 | 燃料デブリには燃料成分(UO ₂)以外にも構造物(金属)およびコンクリートも含まれるため、燃料成分(UO ₂)100%の条件と、燃料成分(UO ₂)・構造物(金属)・コンクリートが混合した条件の2ケースで評価を実施する。 |
| 燃料デブリ重量 | M | 有 | 燃料デブリ重量は含水率と燃料含有割合の影響を受けることから、UC内の水充填率と燃料デブリ充填率の関係と燃料含有割合をパラメータとした評価を実施する。 |
| エネルギー吸収率 | F | 有 | 粉状燃料デブリは粒状、塊状燃料デブリと比較して含水率が高いため、含水率が多くなると水のエネルギー吸収率が上昇することを考慮し評価を実施する。 |
| 水素発生のG値 | G | 有 | 燃料デブリが微細化して単位質量あたりの表面積が増加するため、水素発生のG値が見かけ上大きくなる可能性を考慮した評価を実施する。 |

燃料含有割合、燃料デブリ重量、エネルギー吸収率、水素発生のG値について、評価条件の詳細を以降のページに示す。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(4/13)

(iii) 影響因子の検討(2/8)

イ.燃料含有割合

粒状、塊状燃料デブリにおける評価では、保守的な評価をするために燃料成分(UO₂)が100%で評価を実施していたが、燃料デブリには、燃料成分(UO₂)に加えて構造物(金属)とコンクリートが含まれることから、本補助事業では燃料成分(UO₂)100%の条件と、燃料成分(UO₂)・構造物(金属)・コンクリートが混合した条件の2ケースを実施し、燃料含有割合の変化にともなう影響評価を実施する。ただし、燃料成分(UO₂)以外を考慮した場合、水素発生速度は燃料成分(UO₂)100%の条件よりも小さくなることから、燃料成分(UO₂)・構造物(金属)・コンクリートの割合をパラメータとした評価は実施せず、発熱量と放射能が最も高い1号機(崩壊熱の出典と同じ号機)におけるペDESTAL内部の成分内訳を代表で評価する。

表1 ペDESTAL内外に生成されたMCCI生成物の成分内訳(想定)

| 号機 | 部位 | 燃料成分(UO ₂) | 構造物(金属) | コンクリート |
|-----|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1号機 | ペDESTAL内部 | 9.3vol%(4.80m ³) | 12.0vol%(6.15m ³) | 78.7vol%(40.4m ³) |
| | ペDESTAL外部 | 7.9vol%(2.91m ³) | 18.1vol%(6.63m ³) | 74.0vol%(27.2m ³) |
| 2号機 | ペDESTAL内部 | 10.9vol%(5.24m ³) | 20.6vol%(9.86m ³) | 68.5vol%(32.8m ³) |
| | ペDESTAL外部 | 6.7vol%(2.55m ³) | 12.5vol%(4.75m ³) | 80.8vol%(30.8m ³) |
| 3号機 | ペDESTAL内部 | 11.2vol%(5.40m ³) | 20.9vol%(10.1m ³) | 67.9vol%(32.8m ³) |
| | ペDESTAL外部 | 6.9vol%(2.64m ³) | 13.0vol%(5.00m ³) | 80.1vol%(30.8m ³) |

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(5/13)

(iii) 影響因子の検討(3/8)

ロ. 燃料デブリ重量

燃料デブリ重量は燃料デブリの体積と燃料含有割合から算出する。燃料デブリの体積は以下に示す条件から、ユニット缶(UC)内の燃料デブリ充填率をパラメータとする。UC内の水充填率と燃料デブリ充填率の関係を下図に示す。燃料含有割合は前述の UO_2 が100%の条件と1号機のペDESTAL内部の成分内訳を条件とする。

- ・UCは収納缶内に2段積みとし、UCの内径は198mm、内部高さは360mmと仮定
- ・密度は燃料成分(UO_2)を $10.96g/cm^3$ 、構造物(金属)を $8g/cm^3$ 、コンクリートを $2.5g/cm^3$
- ・UC内に収納される粉状燃料デブリの最大充填率は、粒状、塊状燃料デブリと同様の30vol%と仮定
(水処理PJが想定する粉状燃料デブリの含水率は90~95vol%であり、燃料デブリ充填率30vol%は保守的な値)
- ・水充填率が0vol%の状態は、UC内容積に対して粉状燃料デブリのみが30vol%収納された状態
- ・水充填率が0~70vol%までは、粉状燃料デブリ充填率30vol%は一定
- ・水充填率が70~100vol%の間は、粉状燃料デブリが水に置き換わり燃料デブリ充填率が30~0vol%に減少

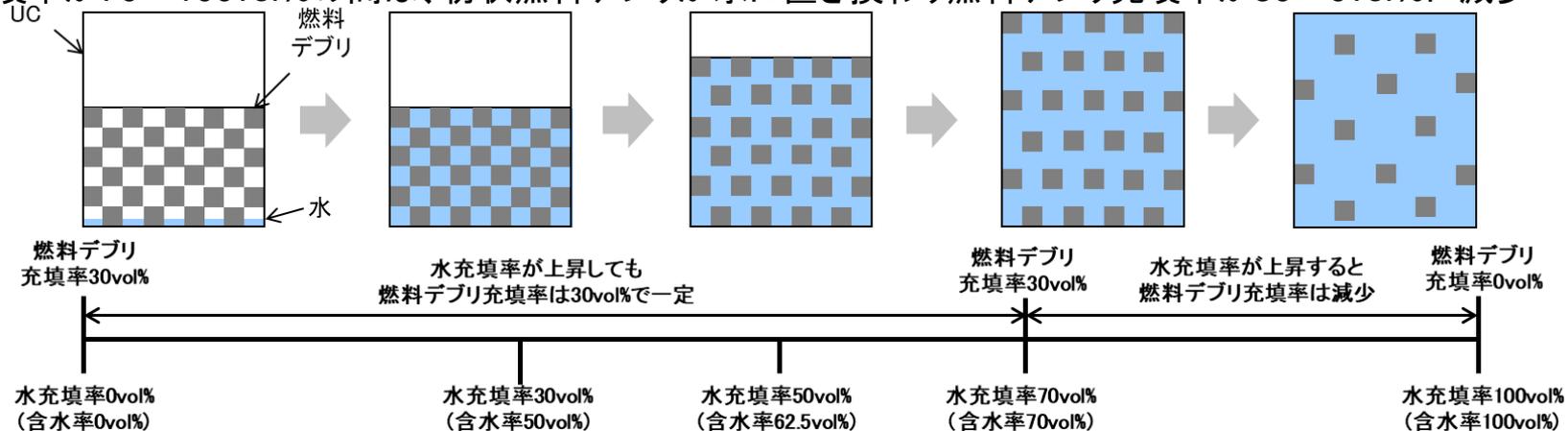


図1 UC内の水充填率と燃料デブリ充填率の関係

<補足>

水充填率: UCの内容積に対しての水の割合(水の体積/UCの内容積)

燃料デブリ充填率: UCの内容積に対しての燃料デブリの割合(燃料デブリの体積/UCの内容積)

含水率(vol%): 燃料デブリの体積あたりの水の割合(水の体積/水と燃料デブリの合計体積)

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(6/13)

(iii) 影響因子の検討(4/8)

ハ. エネルギー吸収率(1/2)

エネルギー吸収率が最大となる微粒子サイズ(0.0001mm)のPHITSを用いた評価は、これまで、下表に示す3ケースのみ実施している。本補助事業では含水率の違いによるエネルギー吸収率の影響評価を実施するために、含水率0~100%におけるエネルギー吸収率を評価する。ただし、PHITSを用いて含水率0~100%をパラメータとしたエネルギー吸収率をすべて評価することは工程上困難であることから、本補助事業では各物質の阻止能と含有割合を用いた手計算でエネルギー吸収率を評価する。なお、実際の水素発生速度評価では手計算ではなく、PHITSを用いて評価したエネルギー吸収率を用いるものとし、手計算は今回の影響評価のみに使用する。

表1 粒状、塊状燃料デブリの水のエネルギー吸収率の計算結果

| 粒径 | 条件 | 粒子と水の体積比 (粒子:水) | 含水率 | α線 | β線 | γ線 |
|----------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|
| 0.0001mm | 試験条件 ^{注1} | 1:33 | 97vol% (75wt% ^{注3}) | 0.914 | 0.859 | 0.833 |
| | 水切り時 ^{注2} | 1:1 | 50vol% (8.4wt% ^{注3}) | 0.250 | 0.160 | 0.158 |
| | 乾燥時 ^{注2} | 91:1 | 1.1vol% (0.1wt% ^{注3}) | 0.004 | 0.002 | 0.002 |

注1: 燃料条件は水素発生試験で使用した高燃焼度8×8燃料(比出力26.2MW/MTU、燃焼度51.5GWd/tおよび52.6GWd/t)を使用した。

注2: 燃料条件は西原健司、岩元大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より1F-1の条件を使用した。

注3: 含水率(wt%)は、燃料デブリの質量あたりの水の割合(水の体積×密度/(水の体積×密度+粒子(UO₂)の体積×密度))を指す。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(7/13)

(iii) 影響因子の検討(5/8)

ハ. エネルギー吸収率(2/2)

PHITSによるエネルギー吸収率と手計算で評価したエネルギー吸収率を以下に示す。
 手計算で評価したエネルギー吸収率は、PHITSの評価結果と近い結果(最大5%程度の差異)が得られたことから、粉状燃料デブリの評価では手計算により含水率(水充填率)を考慮したエネルギー吸収率を使用して水素発生速度への影響評価を実施する。なお、下表におけるエネルギー吸収率の算出には水と燃料成分(UO₂)のみを考慮し、構造物(金属)とコンクリートの影響は考慮していない。

表1 PHITSと手計算で評価した水のエネルギー吸収率の比較結果

| 粒径 | 条件 | 粒子と水の体積比 (粒子:水) | 含水率 | 計算方法 | α線 | β線 | γ線 |
|----------|------|--------------------|------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| 0.0001mm | 試験条件 | 1:33 | 97vol% (75wt% ^{注3}) | PHITS | 0.914 | 0.859 | 0.833 |
| | | | | 手計算 ^{注1注2} | 0.912 | 0.853 | 0.861 |
| | 水切り時 | 1:1 | 50vol% (8.4wt% ^{注3}) | PHITS | 0.250 | 0.160 | 0.158 |
| | | | | 手計算 ^{注1} | 0.243 | 0.152 | 0.161 |
| | 乾燥時 | 91:1 | 1.1vol% (0.1wt% ^{注3}) | PHITS | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| | | | | 手計算 ^{注1} | 0.004 | 0.002 | 0.002 |

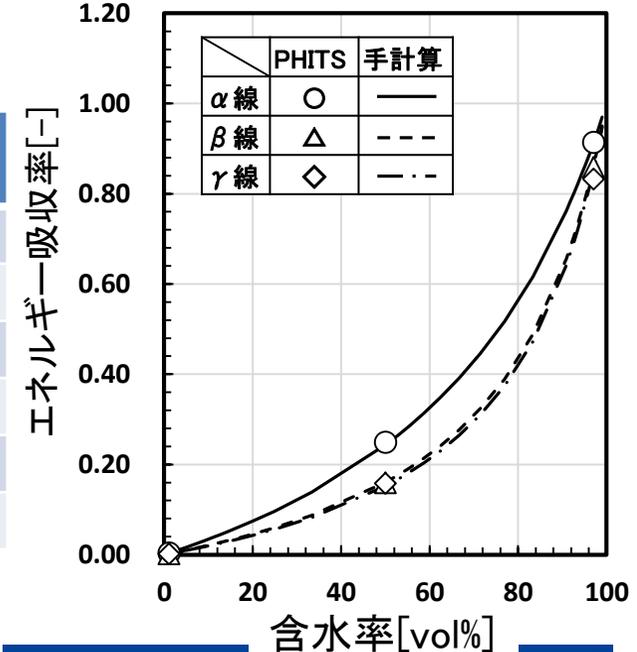


図1 含水率とエネルギー吸収率の関係

注1: 燃料条件は西原健司、岩元大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より1F-1の条件を使用した。
 注2: 試験で使用した使用済燃料ペレット片は1F-1に近い燃焼度であったことから、試験条件におけるエネルギー吸収率は水切り時と乾燥時に合わせて1F-1の燃料条件を使用した。
 注3: 含水率(wt%)は、燃料デブリの質量あたりの水の割合(水の体積×密度/(水の体積×密度+粒子(UO₂)の体積×密度))を指す。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(8/13)

(iii) 影響因子の検討(6/8)

ニ. 水素発生のG値(1/2)

粒状、塊状燃料デブリの水素発生予測法の評価式では、水素発生のG値に純水のプライマリーG値を使用している。水素発生のG値は、水が吸収したエネルギーに対して放射線分解で生じる水素の発生量を示す値である。水素発生のG値に寄与する要因として、線源から生じた放射線エネルギーの水中通過による放射線分解と、線源表面に付着する水に線源から直接移動したエネルギー(電荷)による放射線分解が挙げられる。直接移動したエネルギー(電荷)による放射線分解は線源の表面のみで生じるが、水素発生のG値への寄与が大きいため、粉状燃料デブリのように粒径が小さく、燃料デブリの単位質量あたりの表面積が大きくなる場合、水素発生のG値が見かけ上大くなる可能性がある。含水率と線源粒径の水素発生のG値への影響のイメージを以下に示す。

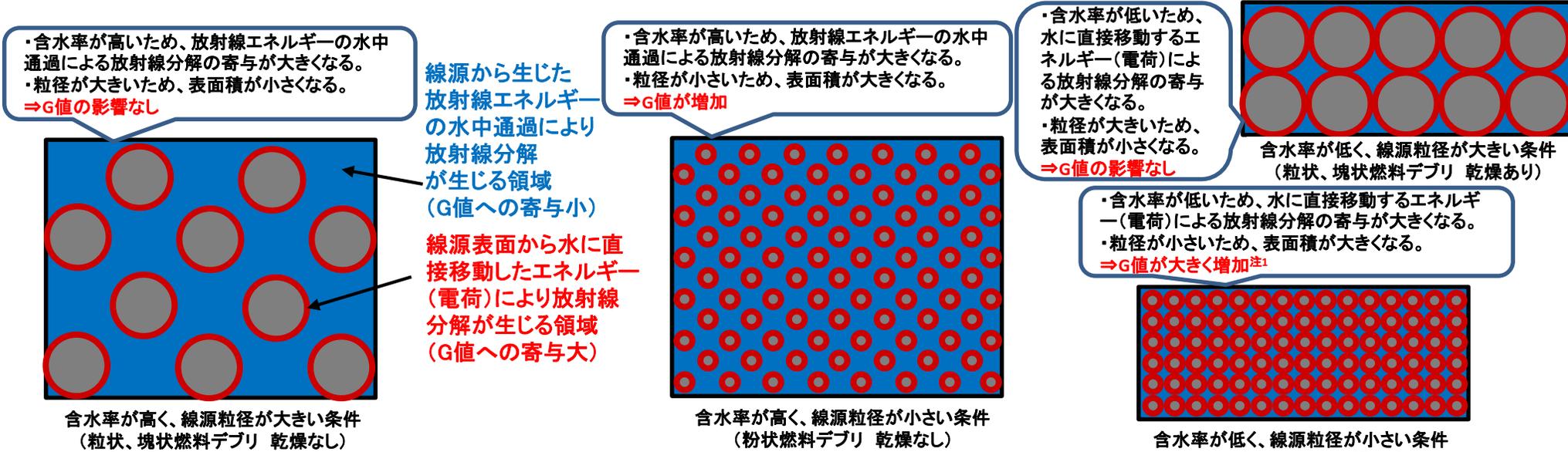


図1 含水率と線源粒径の水素発生のG値への影響のイメージ図

注1: 粒径が小さく、含水率が低い場合、γ線が粒子に衝突する確率が大きくなり、励起により発生するエネルギーの総量が大きくなることも水素発生のG値が大きくなる要因の一つとして考えられる。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(9/13)

(iii) 影響因子の検討(7/8)

ニ. 水素発生 of G 値(2/2)

水を吸着させた微粒子に γ 線を照射し、水素発生 of G 値を測定した試験結果^{注1}に基づき、表面積を考慮した水素発生 of G 値を評価した。以下に示す評価結果より、 α 線の G 値は一定の水充填率を超えると純水のプライマリー G 値(1.3[molecules/100eV])以下の値となるため、保守的に水素発生速度が大きくなるように、純水のプライマリー G 値を下限として評価する。本補助事業では、表面積を考慮した水素発生 of G 値と純水のプライマリー G 値の2ケースを実施し、水素発生 of G 値の見かけ上の変化にともなう影響評価を実施する。

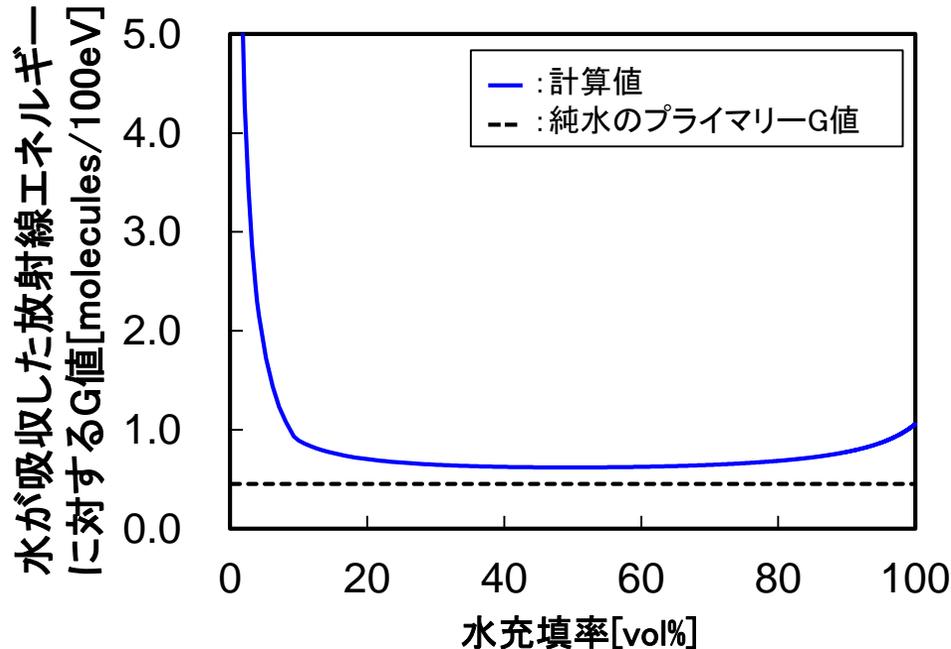


図1 β 線および γ 線における水素発生 of G 値

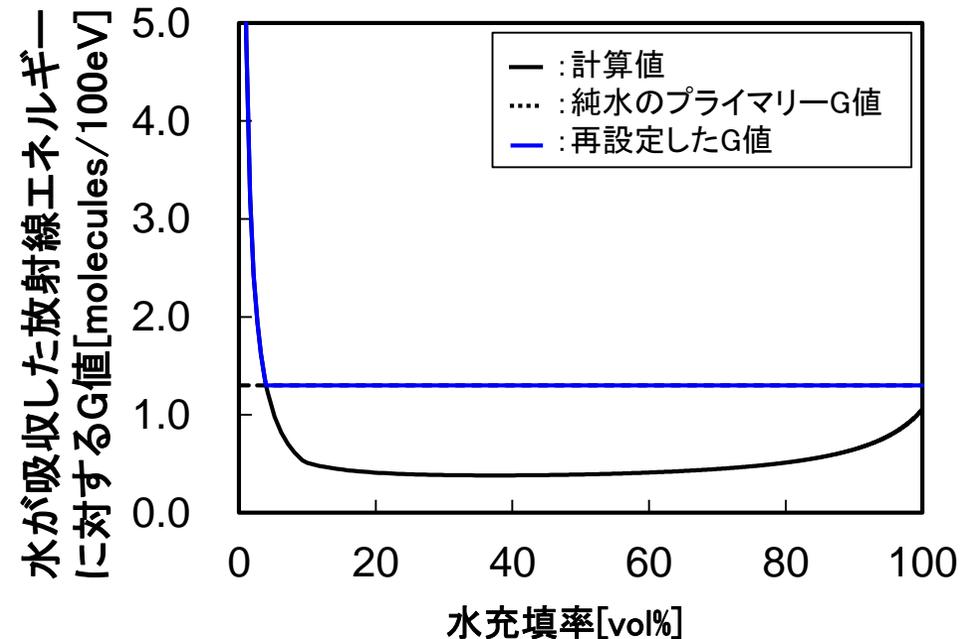


図2 α 線における水素発生 of G 値

注1: LaVerne, J.A., and Tandon, L., "H2 Production in the Radiolysis of Water on UO2 and Other Oxides", J. Phys. Chem. B 2003, 107, 13623-13628. より。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(10/13)

(iii) 影響因子の検討(8/8)

ホ. 評価条件のまとめ

水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討における評価条件を以下に示す。

表1 評価条件のまとめ

| 入力値 | 記号 | 評価条件A | 評価条件B | 評価条件C | 単位 |
|---------------|----|--|---|---|-----------------------|
| 崩壊熱 | E | α 線:0.133、 β 線:0.383、 γ 線:0.221 | | | J/s/kgUO ₂ |
| ピーキング ファクタ | P | α 線:2.35、 β 線:1.56、 γ 線:1.56 | | | — |
| 燃料含有 割合 | C | 燃料成分(UO ₂):1(100vol%) | 燃料成分(UO ₂):0.093(9.3vol%) 構造物(金属):0.12(12.0vol%) コンクリート:0.787(78.7vol%) | 燃料成分(UO ₂):1(100vol%) | — |
| 燃料デブリ 重量 | M | 燃料含有割合およびUC内の水充填率と燃料デブリ充填率の関係を考慮して算出 0~72.9 | | | kgUO ₂ |
| エネルギー 吸収率 | F | 燃料含有割合およびUC内の水充填率と燃料デブリ充填率の 関係を考慮して手計算で算出(PHITSは使用しない) α 線:0~0.997、 β 線:0~0.994、 γ 線:0~0.995 | | | — |
| 水素発生の G値 | G | <純水のプライマリーG値> α 線:1.3、 β 線:0.45、 γ 線:0.45 | | <表面積を考慮した 水素発生のG値> α 線:1.3~16.0 β 線:0.61~28.4 γ 線:0.61~28.4 | molecules/ 100eV |

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(11/13)

(iv) 差異要因を考慮した水素発生速度(1/3)

イ. 評価結果(1/2)

各影響因子を考慮した水素発生速度の評価結果を以下に示す。どの条件においても、水素発生速度は水充填率0～70vol%の間で上昇し、70～100vol%の間で低下した。

評価条件Aにおける水素発生速度の最大値は0.200L/h、評価条件Bの最大値は0.024L/hで評価条件Aの約12%の水素発生速度となった。

評価条件Cの最大値は0.237L/hで評価条件Aの約118%の水素発生速度となった。

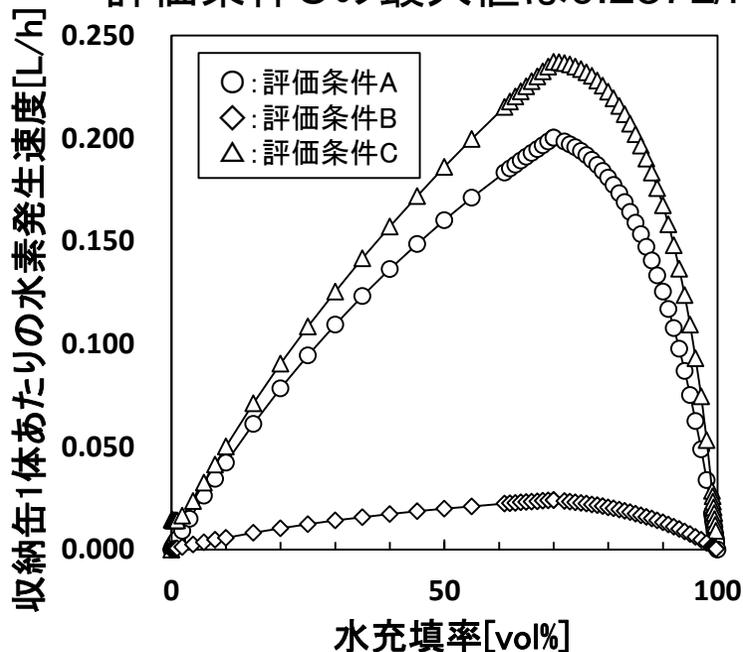


表1 影響因子の比較結果

| 評価条件 | 記号 | 最大水素発生速度 | 評価条件の概要 | 評価条件Aとの比較 |
|------|----|----------|---|-----------|
| A | ○ | 0.200L/h | 燃料成分(UO ₂)100% 純水のプライマリーG値 | — |
| B | ◇ | 0.024L/h | 燃料成分(UO ₂)以外考慮 純水のプライマリーG値 | 12% |
| C | △ | 0.237L/h | 燃料成分(UO ₂):100% 表面積を考慮したG値 | 118% |

図1 影響因子を考慮した水素発生速度

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(12/13)

(iv) 差異要因を考慮した水素発生速度(2/3)

イ. 評価結果(2/2)

水処理設備の沈降分離槽からの排出が想定される粉状燃料デブリ(以下、「水処理粉状燃料デブリ」という。)を乾燥した場合の評価結果を以下に示す。水処理粉状燃料デブリの含水率は90~95vol%であるため、水充填率は水素発生速度が大きくなる90vol%(燃料デブリ充填率10vol%)で評価した。評価結果より、評価条件Aは0.125L/hから0L/hまで低下し、評価条件Cは0.167L/hから0.005L/hまで低下した。

評価条件Cの評価結果より、表面積を考慮したG値を考慮する場合、水充填率1vol%までは水素発生速度が低減するが、水充填率1vol%以下では単位質量あたりの表面積の増加に伴い、水充填率が低下しても水素発生速度が減少しないことが分かった。

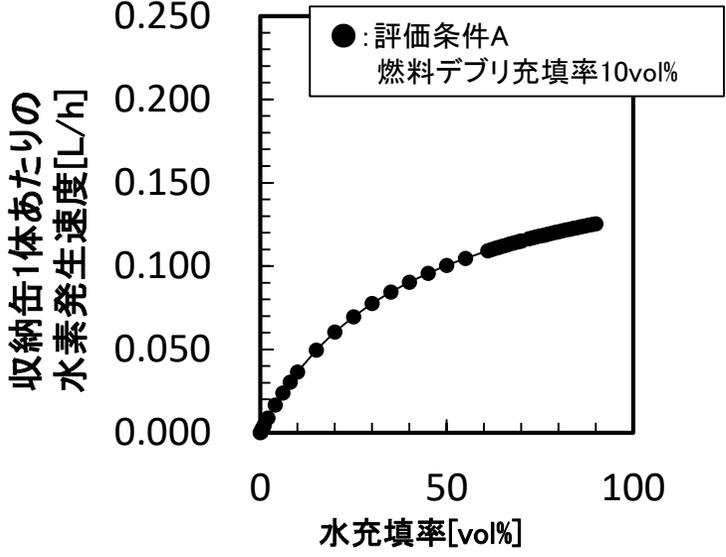


図1 水処理設備より排出される粉状燃料デブリの水素発生速度(評価条件A)

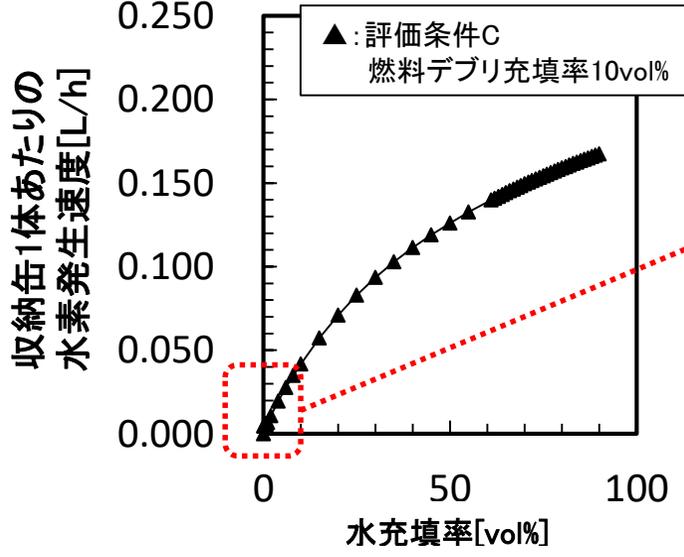
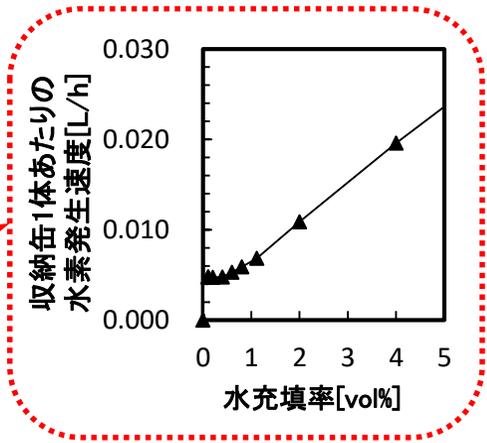


図2 水処理設備より排出される粉状燃料デブリの水素発生速度(評価条件C)



6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

a.水素発生に及ぼす影響因子とその影響度合いの検討(13/13)

(iv) 差異要因を考慮した水素発生速度(3/3)

ロ. 評価結果の考察

各因子ごとの水素発生速度の影響度合いを評価した。評価の結果、粉状燃料デブリの重量、エネルギー吸収率、燃料含有割合および水素発生G値が水素発生速度に大きく影響することが分かった。

<燃料デブリ重量およびエネルギー吸収率の影響>

- 含水率の上昇に伴い、エネルギー吸収率が上昇し、水素発生速度が大きくなることが分かった。ただしUC内の水充填率が70vol%を超え、燃料デブリ重量が減少する場合は水素発生速度が小さくなることを確認した。そのため、水充填率の上昇に伴い、エネルギー吸収率は大きくなるが、燃料デブリ重量が減少に転じた時点で、水素発生速度は小さくなることが分かった。

<燃料含有割合の影響>

- 燃料成分(UO₂)以外を考慮する場合、水素発生速度が大きく低減することが分かった。したがって、粉状燃料デブリの水素発生速度評価では燃料成分(UO₂)以外を考慮することとするが、粉状燃料デブリの燃料含有割合は燃料デブリの取り出し箇所によって増減することから、粉状燃料デブリの性状が不明な場合においては水素発生速度が最も大きくなる条件である燃料成分(UO₂)100%で評価せざるを得ないと考える。

<水素発生G値の影響>

- 粉状燃料デブリのように粒径が微細な条件では、単位質量あたりの表面積の増加により水素発生G値が見かけ上大きくなり、水素発生速度が大きくなることが分かった。特に、単位質量あたりの表面積が大きくなる水充填率の低い領域(1vol%未満)では影響が顕著に見られた。
- 乾燥による水素発生速度低減効果は水充填率1vol%まで得ることができるが、水素発生G値の影響より、水充填率が1vol%より小さくなると水素発生速度低減効果が得られないことが分かった。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

b.粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法の提案

(i)粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法

a.項で確認した影響因子を考慮し、粉状燃料デブリにおける水素発生予測式を検討した。水素発生予測式を以下に示す。崩壊熱(E)およびピーキングファクタ(P)は粒状、塊状燃料デブリの水素発生速度の入力値と同様、1F-1の発熱量から求めた値を用いる。燃料デブリ重量(M)および燃料含有割合(C)は、燃料デブリに含まれる燃料成分(UO₂)・構造物(金属)・コンクリートの比率を考慮して算出する。エネルギー吸収率(F)はPHITSを用いて求め、各物質に吸収されるエネルギー吸収量から算出したエネルギー吸収率を使用する。水素発生G値(G)は文献調査により得られた、粉状燃料デブリの表面積を考慮した水素発生G値を用いる。

<粉状燃料デブリの水素発生速度評価式>

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

$$R_{H2(i)} = E(i) \times P(i) \times M \times C \times F_{(PHITS)(x_w^{vol\%})(i)} \times G_w(i)$$

<燃料デブリ重量>

$$M = (\rho_{UO2}V_{UO2} + \rho_{Fe}V_{Fe} + \rho_{cement}V_{cement})/1000$$

<燃料含有割合>

$$C = \frac{\rho_{UO2}V_{UO2}}{\rho_{UO2}V_{UO2} + \rho_{Fe}V_{Fe} + \rho_{cement}V_{cement}}$$

<表面積を考慮した水素発生G値>

$$G_w(i) = \frac{G_t}{F_{(PHITS)(x_w^{vol\%})(i)}}$$

・含水率が0.925wt%未満の場合

$$G_t = 0.017$$

・含水率が0.925wt%以上の場合

$$G_t = 0.007 + 0.0105 x_w^{wt\%}$$

R_{H2}: 水素発生速度[L/h]、R_{H2(i)}: 線種ごとの水素発生速度[L/h]、M: 燃料デブリ重量[kg]、
E_(i): 線種ごとの崩壊熱[J/s/kgUO₂]、C: 燃料含有割合[kgUO₂/kg]、i: α線、β線、γ線、
P_(i): 線種ごとのピーキングファクタ[-]、ρ_m: 物質mの密度[g/cm³]
F_{(PHITS)(x_w^{vol%})_(i)}: 含水率x_w^{vol%}の時の線種ごとのエネルギー吸収率[-]、
G_{w(i)}: 表面積を考慮した線種ごとの水素発生G値[molecules/100eV]、
G_t: 水及びUO₂が吸収した放射線エネルギーに対する水素発生G値 [molecules/100eV]、
x_w^{vol%}: 水の体積含有率[vol%]、x_w^{wt%}: 水の質量含有率[wt%]、V_m: 物質mの体積[cm³]

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(1/20)

(i)実施内容(1/2)

2021年度に実施した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により確認された、水素のガスだまりがスラリー・スラッジ層に生じ、突発的に水素が放出される事象について、水素のガスだまりが影響する因子とその影響度合いを分析する。さらに、福島第一原子力発電所で回収が想定される粉状燃料デブリの性状を仮定して粉状燃料デブリにおける水素のガスだまりの影響を検討する。

・【米国】Hanford(K-Basin)の事例

放射性スラッジにより生成された水素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し、突発的にガスが放出される事象(以下、「GRE(Gas Release Event)」という。)が確認された。また、サンプリングした放射性スラッジを用いた試験では放射性スラッジ内で生成された水素ガスだまりにより、スラッジが分断され、押し上げられる事象(以下、「VSB(Vessel-Spanning Bubble)」という。)が観測された。

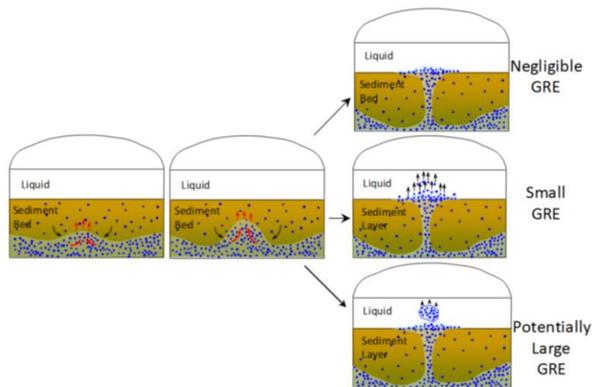


図1 Hanford Siteのタンク内における水素放出事象^{注1}

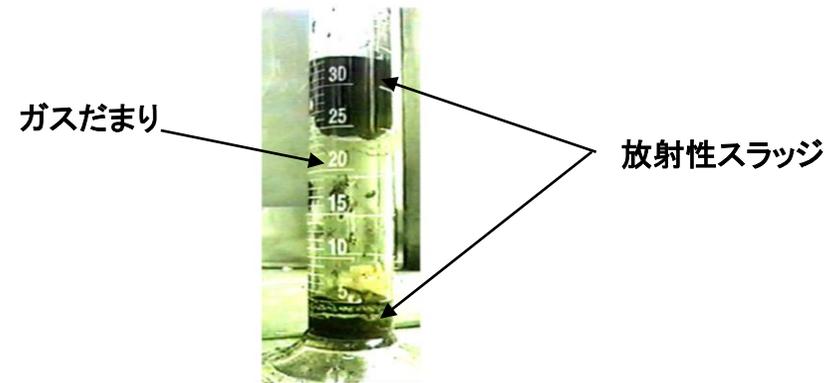


図2 放射性スラッジにより確認されたVSB^{注2}

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

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(2/20)

(i)実施内容(2/2)

粉状燃料デブリの水素ガス放出特性の検討については、以下の手順で検討を実施する。

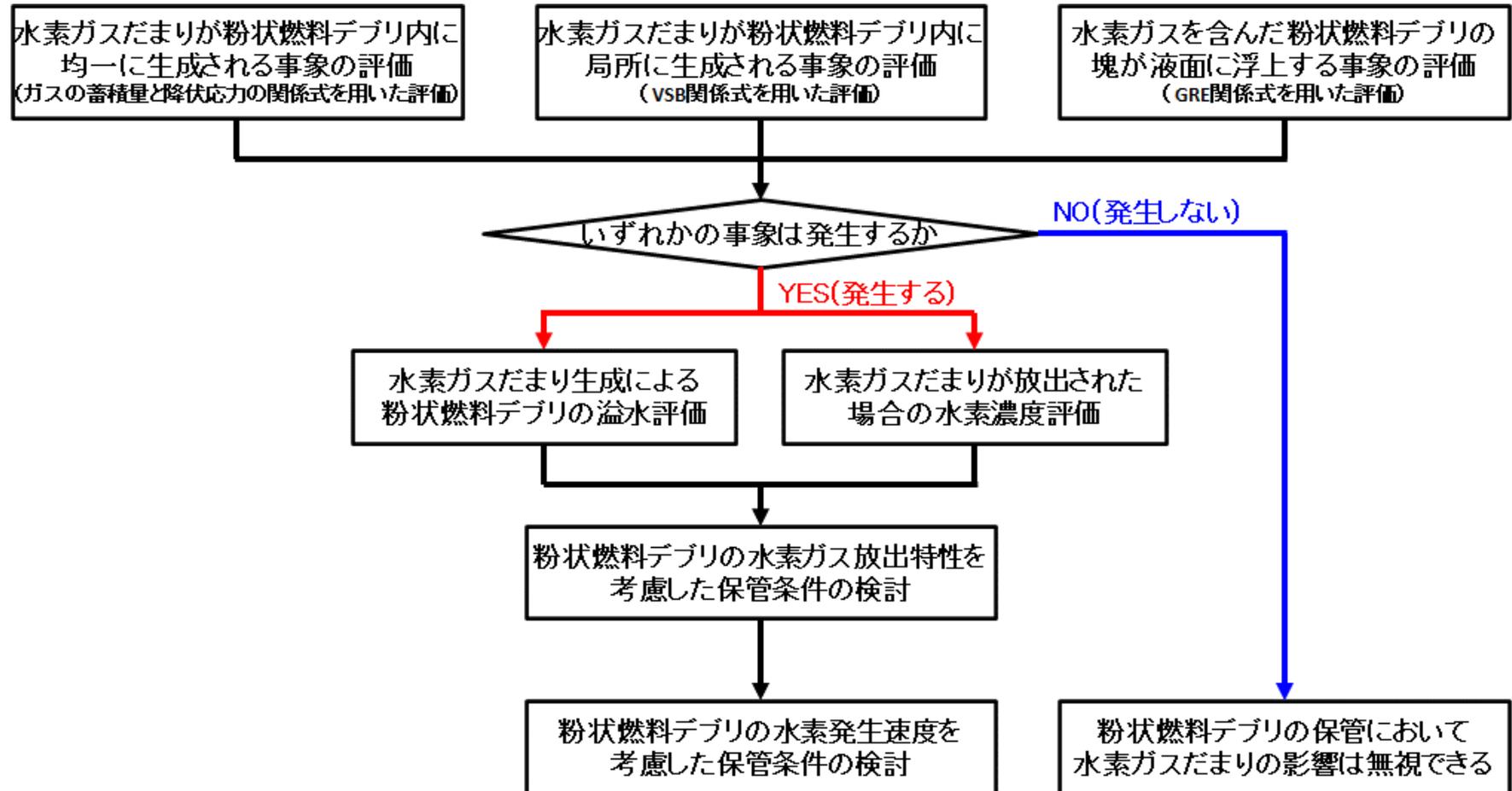


図1 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性評価フロー

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(3/20)

(ii)水素ガスだまりが均一に生成される事象の評価(1/4)

イ.スラッジ内に保持されるガスの蓄積量と降伏応力の関係

Hanford高レベル廃液貯蔵タンクで生じたスラッジ内のガス蓄積挙動について、模擬物質としてカオリンを用いた試験^{注1}により、スラッジ内のガス蓄積量が検討された。試験により、スラッジ層内のガス蓄積量(最大ガス分率)はスラッジの降伏応力(Yield Stress)およびスラッジの粒径に依存することが報告されているため、スラッジの降伏応力を評価する必要がある。

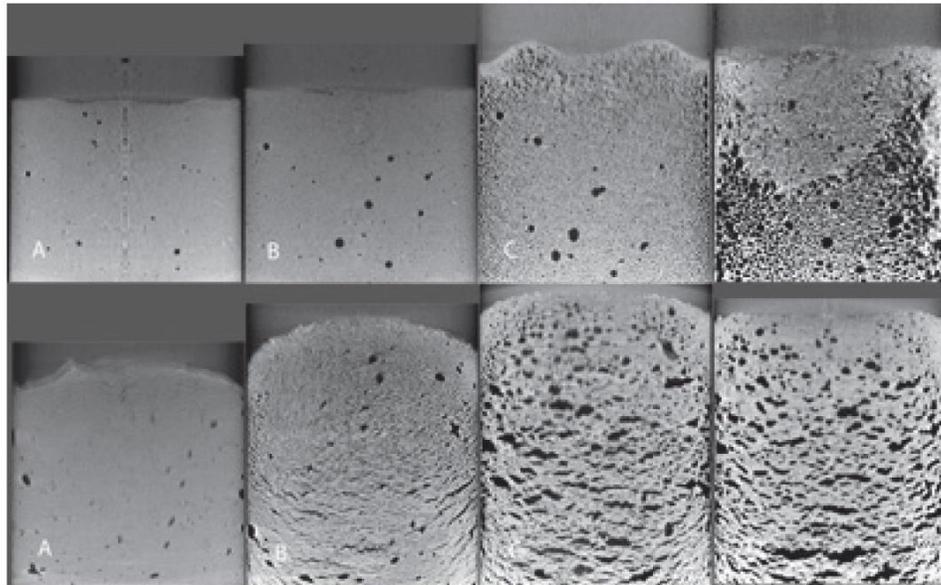


図1 カオリンを模擬物質とした、ガス蓄積挙動の経時変化^{注1}

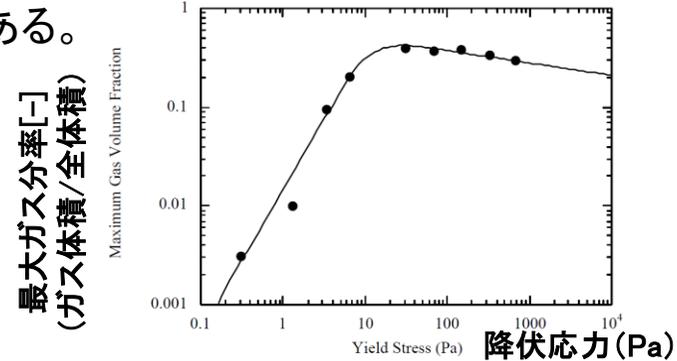


図2 スラッジ層内の最大ガス分率とスラッジ降伏応力との関係^{注1}

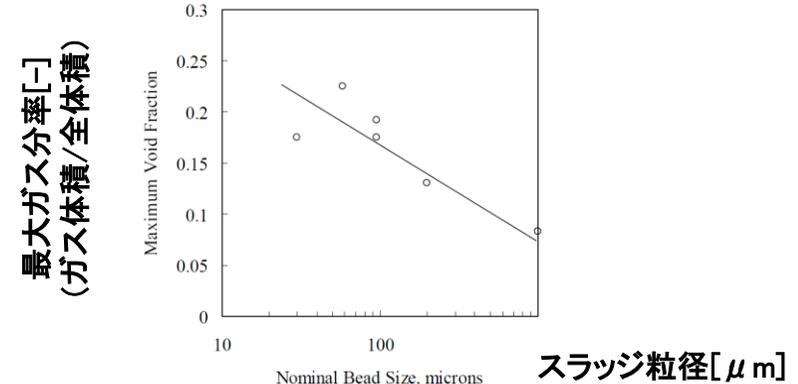


図3 スラッジ層内の最大ガス分率とスラッジ粒径の関係^{注1}

注1: PA, Gauglitz et al. PNNL-21167 Strong-Sludge Gas Retention and Release Mechanisms in Clay Simulants. 2012. より

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(4/20)

(ii)水素ガスだまりが均一に生成される事象の評価(2/4)

ロ.粉状燃料デブリに生じる降伏応力の推定式(1/2)

スラッジにおける固体の体積率(水分+固体における固体の割合)(ϕ)、再充填した際の空間率(ε)、粒径(d)および相対粘度(μ_r)の関係式^{注1}(以下、「Matsuo式」という。)を以下に示す。Matsuo式では、粒径ごとのスラッジの相対粘度を求めることができる。

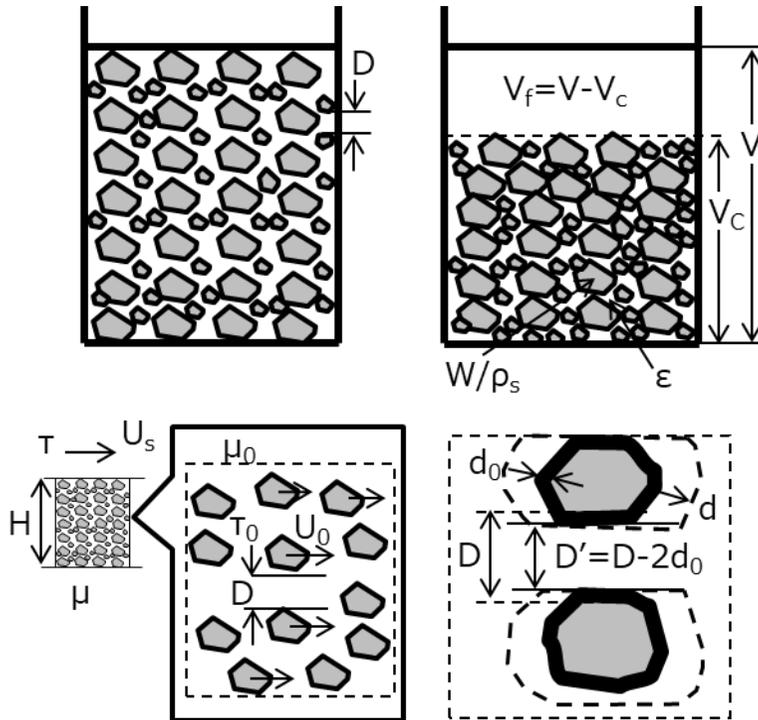


図1 Matsuo式における評価モデル

<Matsuo式>

$$\mu_r = K \frac{\rho_s S}{\frac{1}{\phi_s} - \frac{1}{1-\varepsilon} - d_0 \rho_s S}$$

$$S = \frac{6}{d \rho_s} \quad \mu_r = K \frac{\frac{6}{d}}{\frac{1}{\phi_s} - \frac{1}{1-\varepsilon} - d_0 \frac{6}{d}}$$

μ_r : 相対粘度 (μ/μ_0 , μ_0 : 水の粘度)

ϕ_s : 固体の体積率 (水分と固体の合計体積に対する固体の体積割合)

ε : 固体を充填した際の空間率

d_0 : 粒子周りの束縛された水膜厚さ

S : 固体の比表面積

ρ_s : 固体の密度

d : 固体の粒径

K : スラッジに依存した定数

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(5/20)

(ii)水素ガスだまりが均一に生成される事象の評価(3/4)

ロ.粉状燃料デブリに生じる降伏応力の推定式(2/2)

降伏応力(τ_0)は、Matsuo式で求められる相対粘度(μ_r)にせん断速度と水の粘度(μ_0)を掛けることで求めることができる。降伏応力の推定式(以下、「降伏応力の推定式」という。)を以下に示す。せん断速度は0.1/sと仮定^{注1}した。降伏応力の推定式の入力値のうち、スラッジに依存した定数(K)および固体を再充填した際の空間率(ε)は評価対象のスラッジの物性により変わることから、試験^{注3}により求められたUO₂スラッジの降伏応力とのフィッティングにより求めた。

<降伏応力の推定式>

$$\tau_0 = 0.1\mu_0 K \frac{\frac{6}{d}}{\frac{1}{\phi_s} - \frac{1}{1-\varepsilon} - d_0 \frac{6}{d}}$$

- τ_0 : 降伏応力
 μ_0 : 水の粘度
 ϕ_s : 固体の体積率(水分と固体の合計体積に対する固体の体積割合)
 ε : 固体を充填したときの空間率(=0.6)
 d_0 : 粒子周りの束縛された水膜厚さ
 (水膜厚さはMatsuo氏が提案された文献^{注2}と同様の0.02 μm と仮定した。)
 d : 粒径
 K : スラッジに依存した定数(=1.0 $\times 10^5$)

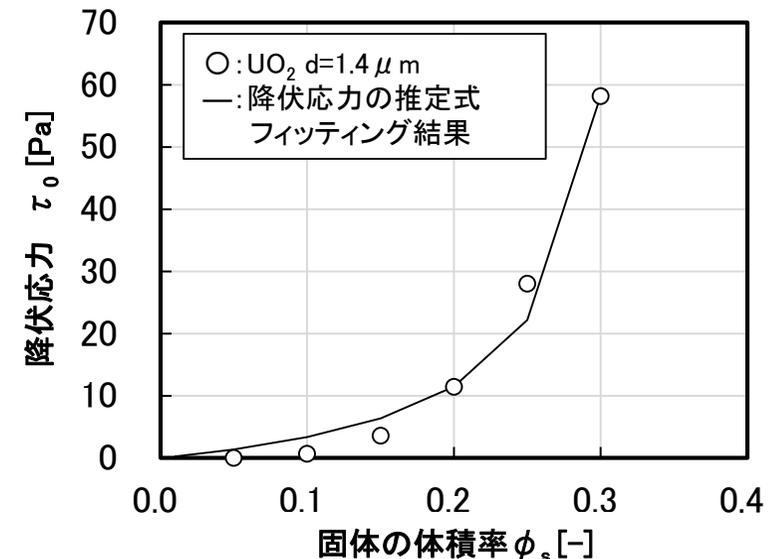


図1 実験値と推定式のフィッティング結果

注1: せん断速度は「Usui, H. 単分散シリカ微粒子の凝集性スラリーに対するレオロジーモデル, 化学工学論文集, 25, p459, 1999.」より得られたせん断速度0.1/sにおける粘度とせん断速度を0.1/sと仮定した場合の降伏応力の推定式における応力が近い値であることから、せん断速度を0.1/sとして評価することは妥当であると判断した。

注2: Matsuo, S. 高濃度石炭-水スラリーの粒度分布に基づく粘度モデルの提案, 化学工学論文集, 29, p.562, 2002 より。

注3: J.A.Lane, H.G.MacPherson and E.Maslan, Fluid Fuel Reactors Addison-Wesley Publishing Company Inc. (USA), 1958. より

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(6/20)

(ii)水素ガスだまりが均一に生成される事象の評価(4/4)

ハ.粉状燃料デブリの均一なガスだまり生成の評価結果

降伏応力の推定式を用いて評価した、粒径(d)ごとの降伏応力(τ_0)と固体の体積率(ϕ_s)の関係を図1に示す。図1より、スラッジの粒径縮小に伴い、降伏応力が増加することが分かった。

また、スラッジの粒径ごとのスラッジ層内の最大ガス分率と固体の体積率の関係を図2に示す。

粉状燃料デブリは0.1mm(100 μ m)以下の粒径かつ、燃料デブリ充填率が最大で30vol%であることから、図2より最大ガス分率は1%程度であり、粉状燃料デブリは均一な水素ガスだまりを生成する可能性が高いことが分かった。

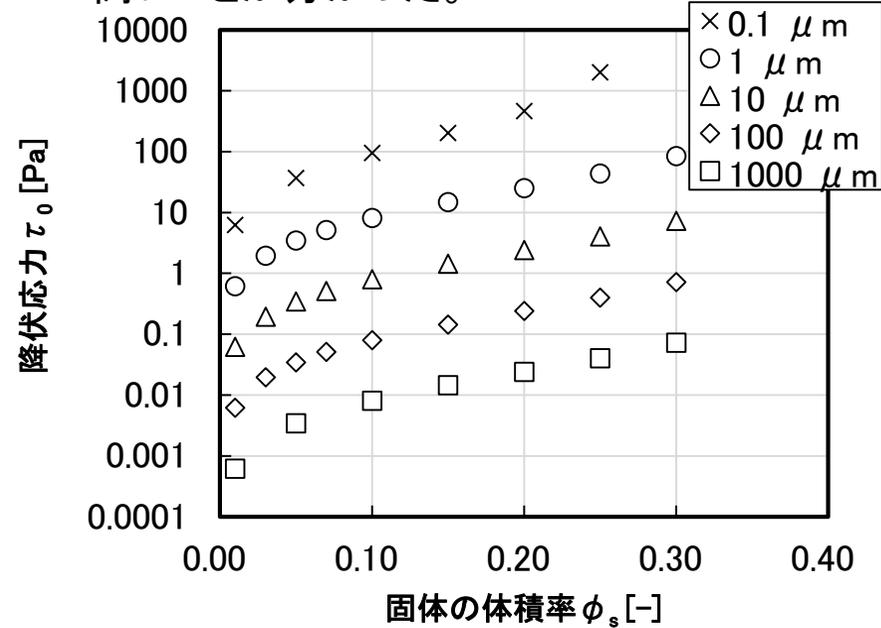


図1 粒径ごとの降伏応力と固体の体積率の関係

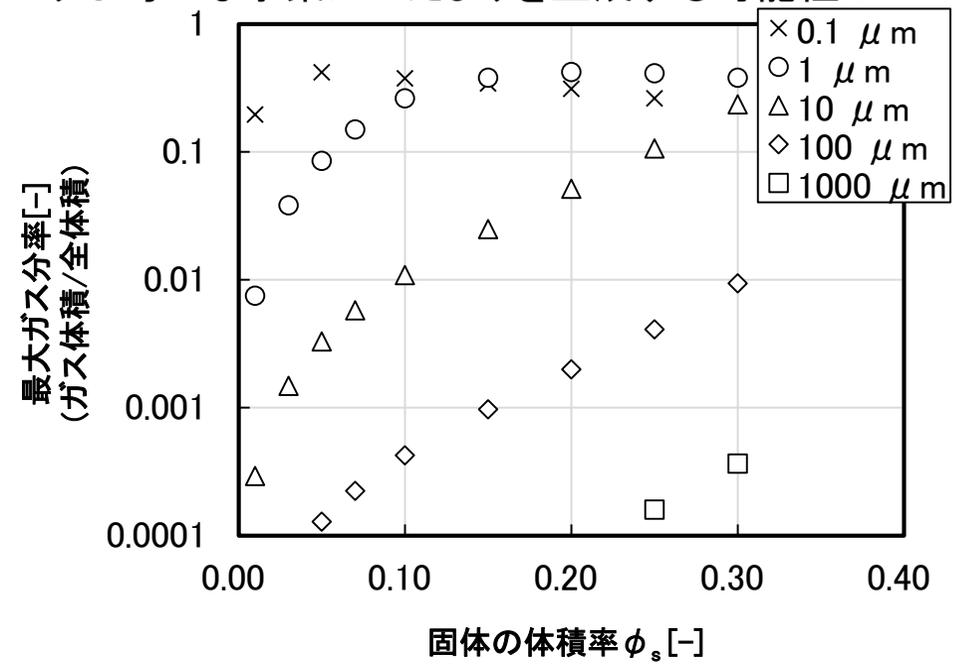


図2 粒径ごとのスラッジ層内の最大のガス分率と固体の体積率の関係

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(7/20)

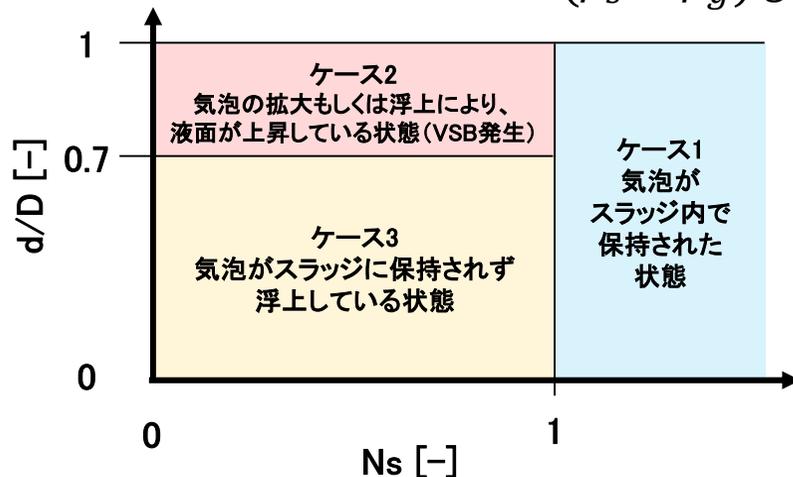
(iii)水素ガスだまりが局所に生成される事象の評価(1/2)

イ.粉状燃料デブリの局所的な水素だまり生成(VSB)の評価式

K-Basinで採取されたスラッジを使った試験で見られたVSBについて、PNNLにより評価式が提案された。評価モデルはガスだまりを1つの気泡と仮定し、気泡径(d)と容器の内径(D)の比が0.7を超えており、生成したガスの浮力が降伏応力による抗力を超えた場合にVSBが発生すると評価した。VSBの評価式で求められる N_s は、浮力に対する抗力の比であり、 $N_s > 1$ の場合は抗力によって気泡の上昇が抑制されている状態、 $N_s \leq 1$ の場合は抗力よりも浮力が大きくなり、気泡が浮上する状態を示す。

<VSBの評価式>

$$N_s = \frac{\text{(抗力)}}{\text{(浮力)}} = \frac{\tau_0}{k(\rho_s - \rho_g)gd}$$



N_s : 浮力に対する抗力の比(1未満になると浮力により気泡が上昇する。)

ρ_s : 沈殿物の密度[kg/m³]

ρ_g : ガスの密度[kg/m³]

g : 重力加速度[m/s²]

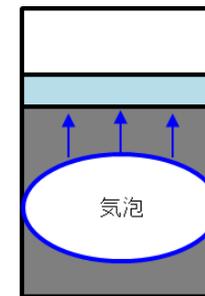
d : 気泡径[m]

D : 容器の内径[m]

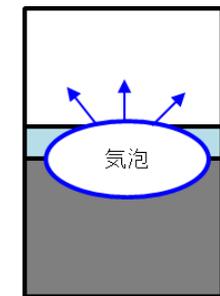
k : 無次元の応力係数(dimensionless yield constant, 試験より求められる値で $k = 0.04 \sim 0.6$ の値を持つ、K-Basinのスラッジでは0.061と評価されていることから本評価でも同様の値と仮定して評価する。)



(a)ケース1
気泡がスラリー内で保持された状態 ($N_s > 1$)



(b)ケース2
気泡の拡大もしくは浮上により、液面が上昇している状態 (VSB発生) ($N_s \leq 1, d/D \geq 0.7$)



(b)ケース3
気泡がスラリーに保持されず浮上している状態 ($N_s \leq 1, d/D < 0.7$)

図2 VSB発生の評価結果のモデル

図1 d/D と N_s の関係

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(8/20)

(iii)水素ガスだまりが局所に生成される事象の評価(2/2)

ロ.粉状燃料デブリの局所的な水素だまり生成(VSB)の評価結果

沈殿物の密度(ρ_s)を UO_2 の密度(10960kg/m^3)とした場合に、降伏応力(τ_0)あたりの気泡が上昇し始める($Ns=1$)気泡径(d)を求めた。図1に示す評価結果より、粉状燃料デブリの降伏応力が908 Pa以上の条件で d/D 比は0.7(気泡径138.6mm)を超え、VSBが発生することが分かった。粉状燃料デブリの粒径ごとの降伏応力と固体の体積率の関係と照らし合わせると、粉状燃料デブリの粒径が $0.1\mu\text{m}$ かつ固体の体積率が0.2を超える場合、VSBが発生する可能性があり、それ以外の条件では d/D 比が0.7未満となるため、VSBは生じず、粉状燃料デブリの降伏応力に応じた大きさの気泡が放出される可能性があることが分かった。

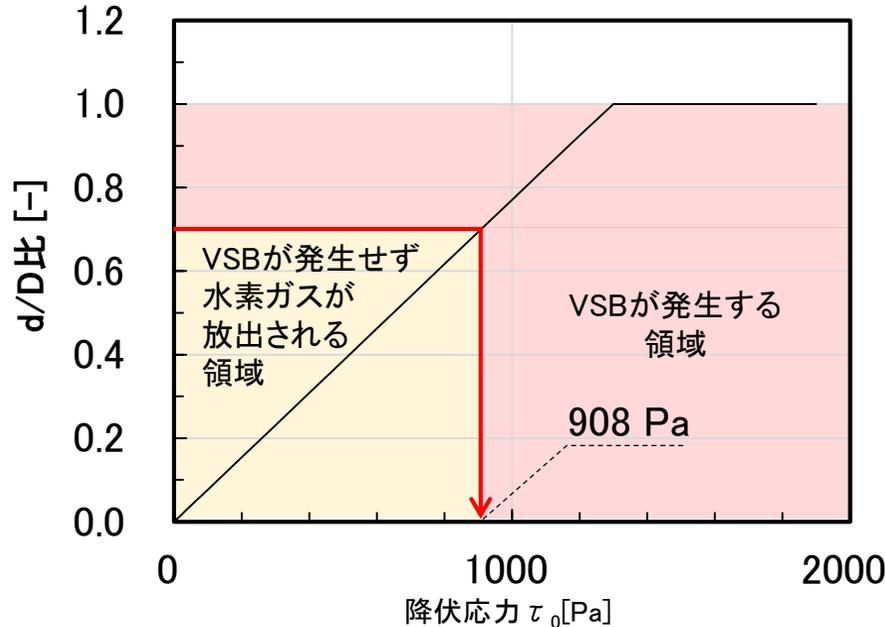


図1 $Ns=1$ のときの d/D 比と降伏応力の関係($D=198\text{mm}$)

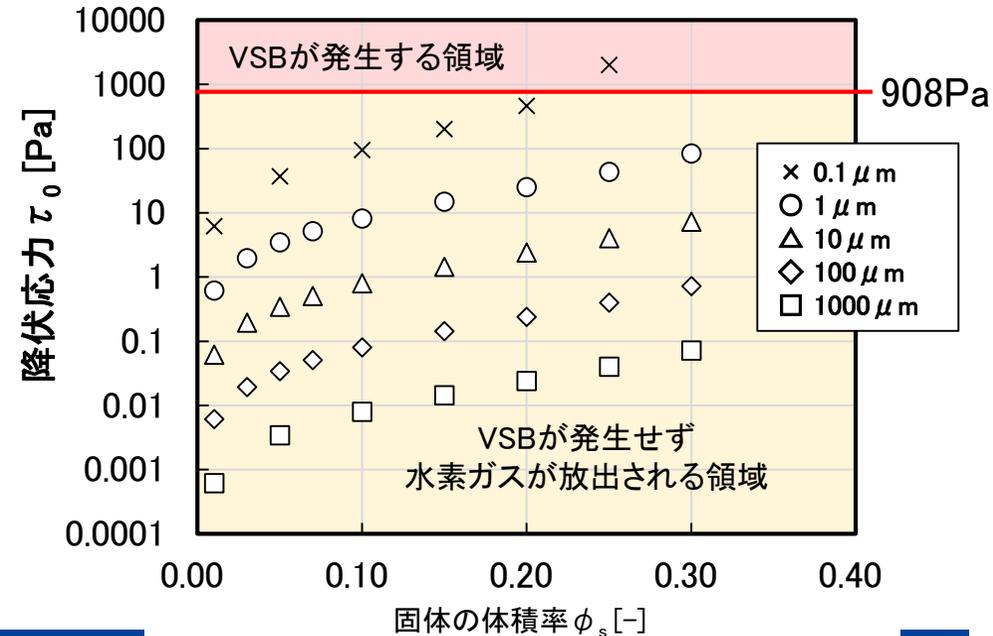


図2 粒径ごとの降伏応力と固体の体積率の関係

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(9/20)

(iv)水素ガスを含んだ粉状燃料デブリの塊が液面に浮上する事象の評価(1/4)

イ.水素ガスを含んだ粉状燃料デブリ塊の液面浮上(GRE)の評価式(1/2)

Hanford高レベル廃液貯蔵タンクではスラッジ内で発生したガスによるGREにより、タンク上部空洞の水素濃度が一時的に爆発下限界(4vol%(40,000ppm))を超える事象が確認され、GREの評価式が検討されている。

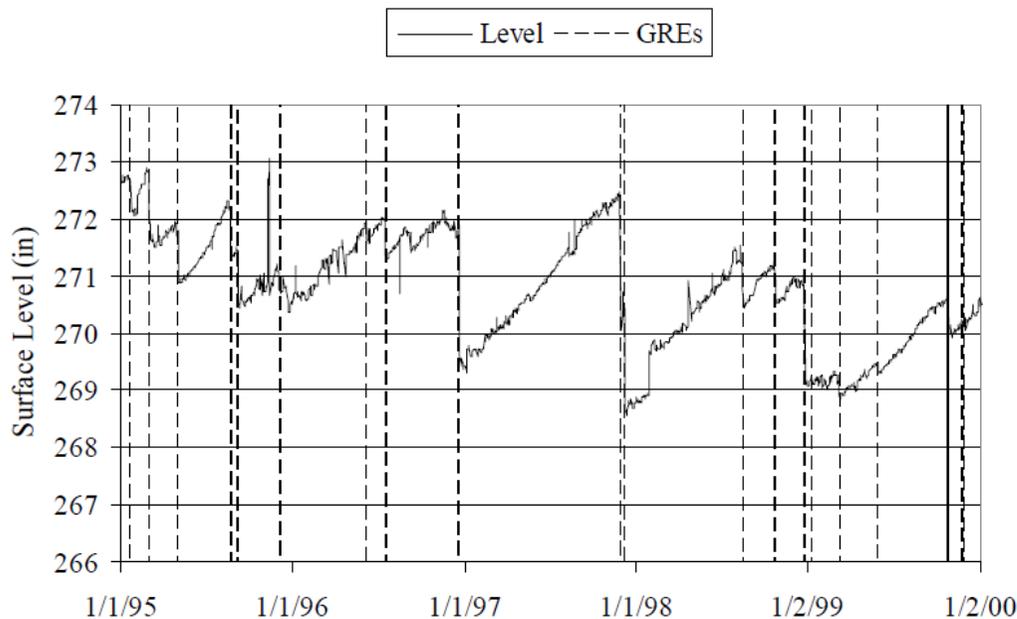


図1 Hanford siteにおいて確認されたGRE時刻歴^{注1}

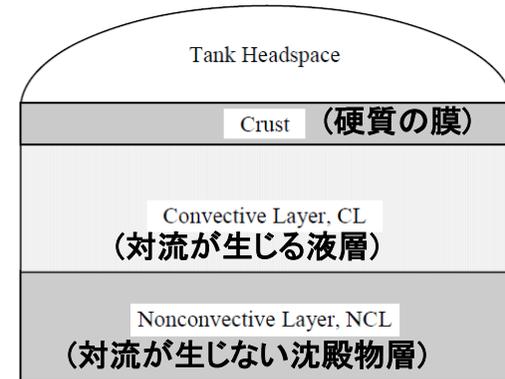


図2 Hanford高レベル廃液タンクのスラッジ溶液のモデル^{注1}

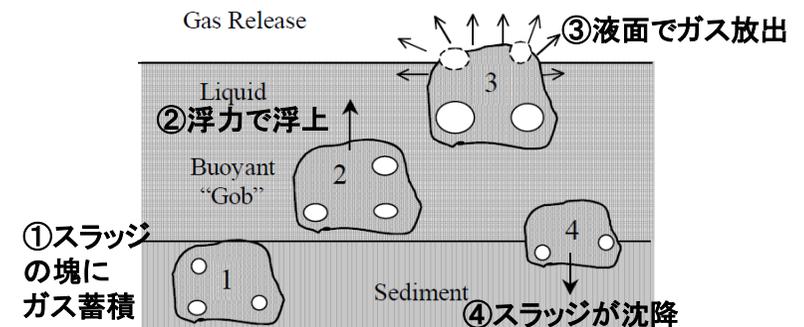


図3 GREのプロセスモデル^{注1}

注1: CW. Stewart et al., PNNL-15238 Predicting Peak Hydrogen Concentrations from Spontaneous Gas Releases in Hanford Waste Tanks, 2005, より

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(10/20)

(iv)水素ガスを含んだ粉状燃料デブリの塊が液面に浮上する事象の評価(2/4)

イ.水素ガスを含んだ粉状燃料デブリ塊の液面浮上(GRE)の評価式(2/2)

Hanford siteにおけるGREの評価モデルは、タンク底部に蓄積したスラッジ内で生成した水素等のガスが蓄積し、浮力によりスラッジの塊が液面に浮上してタンク上部空洞に放出されるという事象を想定し評価式^{注1}を構築している。GREの評価式におけるBRは浮力比であり、BRが1を超えると浮力によりスラッジが浮上する。

<GREの評価式^{注1}>

$$BR = \frac{C}{\rho_s - \rho_L} \left(\frac{G T_s}{p_{gas}} \right)^{1/3} H_s^2$$

$$p_{gas} = P_A + \rho_L g \left(H_L + \frac{H_s}{2} \right)$$

$$C = \frac{3 N^{2/3} R^{1/3} m_\tau}{16 S K g}$$

$$S = \frac{2}{9} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{2/3}$$

BR: 浮力比(1を超えると浮力によりスラッジが浮上する。

Hanford高レベル廃液タンクでのGREの有無を基に設定)、

ρ_s : 沈殿物の密度[kg/m³]、 ρ_L : 液の密度[kg/m³]、

G: ガス生成速度[mols/m³/day]、 T_s : 沈殿の平均温度[K]、

p_{gas} : 沈殿内の平均のガス圧力、 H_s : 沈殿層高さ[m]、

P_A : 大気圧[Pa]、g: 重力加速度[m/s²]、 H_L : 沈殿層上の液層の高さ[m]、

N: 単位体積当たりの気泡数、R: 気体定数[8.314 J/mol K]、K: 定数、

S: ストークス流の定数、 m_τ : 沈殿槽の降伏応力の勾配[Pa/m]、

C: 定数(Hanford高レベル廃液タンクでのGREより

1018 [(kg/m⁴)(day-Pa/mol-K)^{1/3}]を導出)

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(11/20)

(iv)水素ガスを含んだ粉状燃料デブリの塊が液面に浮上する事象の評価(3/4)

ロ.水素ガスを含んだ粉状燃料デブリ塊の液面浮上(GRE)の評価条件

イ項で示したGREの評価式を用いて、UCに粉状燃料デブリを収納した場合のGREの発生の有無を評価する。評価条件および評価モデルのイメージを以下に示す。

- ・UCの内径198mm、内部高さ360mmと仮定した場合と、内部高さを720mmと仮定して場合の2ケースを評価
- ・燃料デブリ充填率を30vol%と10vol%と仮定した場合の2ケースを評価
- ・燃料デブリかさ密度を50%と100%の場合の2ケースを評価
- ・定数CはHanford siteにおける評価と同じ値(C=1018)を使用
- ・水素発生速度はNo.51における評価条件Cの水素発生速度の最大値を使用

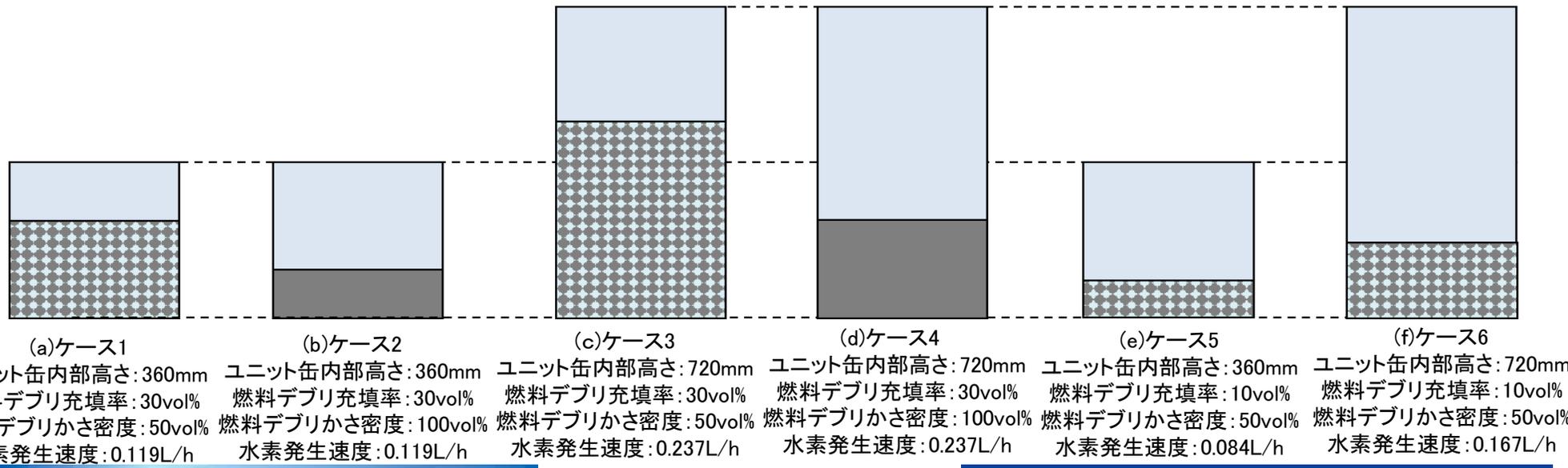


図1 GREの評価モデル

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(12/20)

(iv)水素ガスを含んだ粉状燃料デブリの塊が液面に浮上する事象の評価(4/4)

ハ.水素ガスを含んだ粉状燃料デブリ塊の液面浮上(GRE)の評価結果

UCに粉状燃料デブリを収納した場合におけるGREの評価結果より、粉状燃料デブリを収納したユニット缶でのBRは全てのケースで1よりも十分小さく、水素ガスを含んだ粉状燃料デブリの塊が液面に浮上する事象(GRE)が発生する確率は低いことが分かった。BRが低くなった原因は、固相密度が大きいこと、固相高さおよび液相高さが低いことが考えられる。

表1 粉状燃料デブリをユニット缶に収納した場合のGRE評価結果^{注1}

| 項目 | 固相密度 | 液相密度 | ガス(H ₂ +O ₂)生成速度 | 水素発生速度 | 水素発生速度 | 温度 | 固相高さ | 固相上液相高 | BR |
|-------------------------|----------------------|----------------------|---|--------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| | ρ_s | ρ_L | G | - | H | T _s | H _s | H _L | |
| | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [mols/m ³ /day] | [L/h] | [mols/m ³ /day] | [K] | [m] | [m] | |
| Hanfordの例 ^{注1} | 1600 | 1400 | 0.017 | - | 0.011 | 323 | 4 | 3 | 2.6 |
| ケース1 | 5980 ^{注2} | 1000 | 52.5 ^{注3} | 0.119 | 35.0 ^{注4} | 298 | 0.216 | 0.144 | 0.0051 |
| ケース2 | 10960 ^{注2} | 1000 | 52.5 ^{注3} | 0.119 | 35.0 ^{注4} | 298 | 0.108 | 0.252 | 0.0006 |
| ケース3 | 5980 ^{注2} | 1000 | 52.5 ^{注3} | 0.237 | 35.0 ^{注4} | 298 | 0.432 | 0.288 | 0.0201 |
| ケース4 | 10960 ^{注2} | 1000 | 52.5 ^{注3} | 0.237 | 35.0 ^{注4} | 298 | 0.216 | 0.504 | 0.0025 |
| ケース5 | 5980 ^{注2} | 1000 | 110.9 ^{注3} | 0.084 | 73.9 ^{注4} | 298 | 0.072 | 0.288 | 0.0007 |
| ケース6 | 5980 ^{注2} | 1000 | 110.9 ^{注3} | 0.167 | 73.9 ^{注4} | 298 | 0.144 | 0.576 | 0.0029 |

注1: CW. Stewart et al., PNNL-15238 Predicting Peak Hydrogen Concentrations from Spontaneous Gas Releases in Hanford Waste Tanks, 2005, より
 注2: 燃料デブリは燃料成分(UO₂)100%と仮定、固相密度はUO₂の密度10.96g/cm³と水の密度1g/cm³とかさ密度を考慮した固相の密度を算出している。
 注3: 放射線分解により生成されるガス(2H₂O→2H₂+O₂)発生速度。水素発生速度を1.5倍することで算出。
 注4: 水素発生速度/粉状燃料デブリの体積/24.5(298Kにおけるガス体積)×24

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

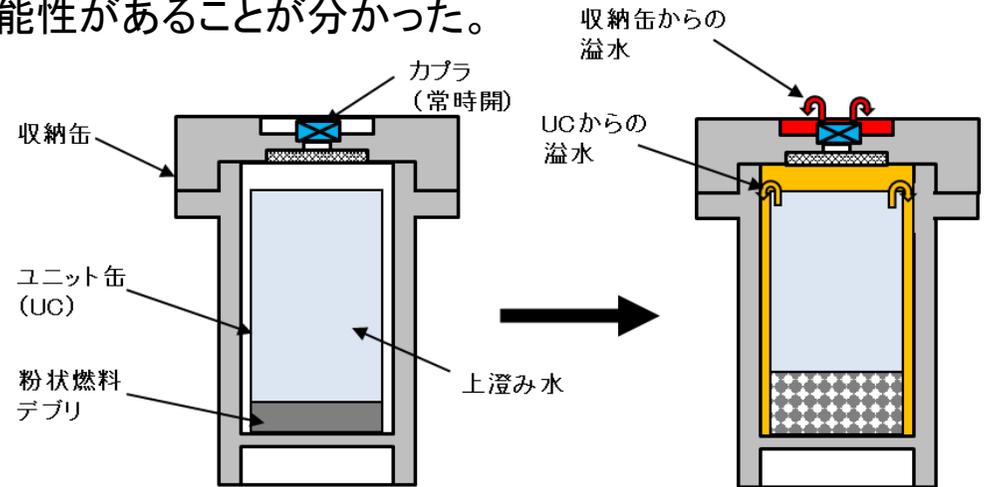
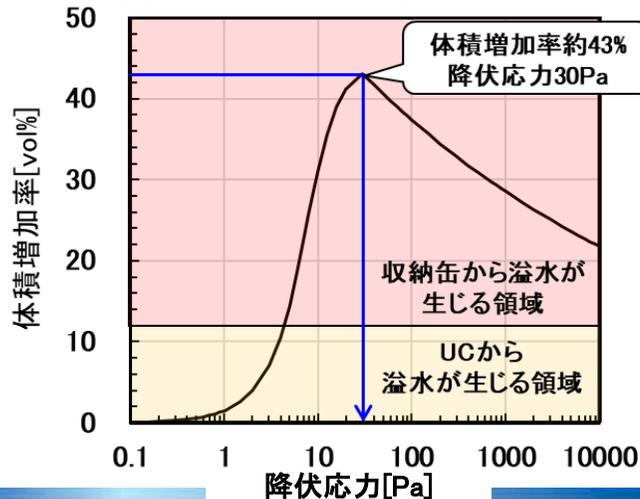
③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(13/20)

(v) 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(1/8)

イ.水素ガスだまり生成による粉状燃料デブリの溢水評価(1/2)

これまでの評価結果より、粉状燃料デブリ内には水素ガスだまりが生成されることが分かった。水素ガスだまりが生成される場合、UC内の粉状燃料デブリの見かけの体積が大きくなることから、粉状燃料デブリの液面高さが上昇し、UCから溢水する可能性があるため、粉状燃料デブリの溢水が生じないように、UCへの収納量の制限が必要であると考えます。粉状燃料デブリをUCに収納した場合、粉状燃料デブリに生成される水素ガスだまりの体積を算出し、粉状燃料デブリの見かけの体積を評価した。評価結果より、粉状燃料デブリの体積は降伏応力が30Paの時に最大約43%体積が大きくなることが分かった。収納缶は内径220mm、内部高さ840mmであることから、粉状燃料デブリの体積増加率が12%を超えると、収納缶から溢水する可能性があるため、降伏応力が4Paを超える条件の粉状燃料デブリは収納缶からも溢水する可能性があることが分かった。



(a) 粉状燃料デブリの保管開始時

(b) 水素ガスだまりの生成により、溢水が発生

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(14/20)

(v) 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(2/8)

イ.水素ガスだまり生成による粉状燃料デブリの溢水評価(2/2)

UCへの粉状燃料デブリ全体(水と粉状燃料デブリの全て)の初期充填率を減らした場合、降伏応力が30Paの条件で初期充填率を78%にすると収納缶からの溢水が生じなくなり、69%にするとUCからの溢水が生じなくなることが分かった。よって、粉状燃料デブリはガスだまりの影響による溢水を防止するために、粉状燃料デブリの体積膨張を考慮した初期充填率とする必要があることが分かった。

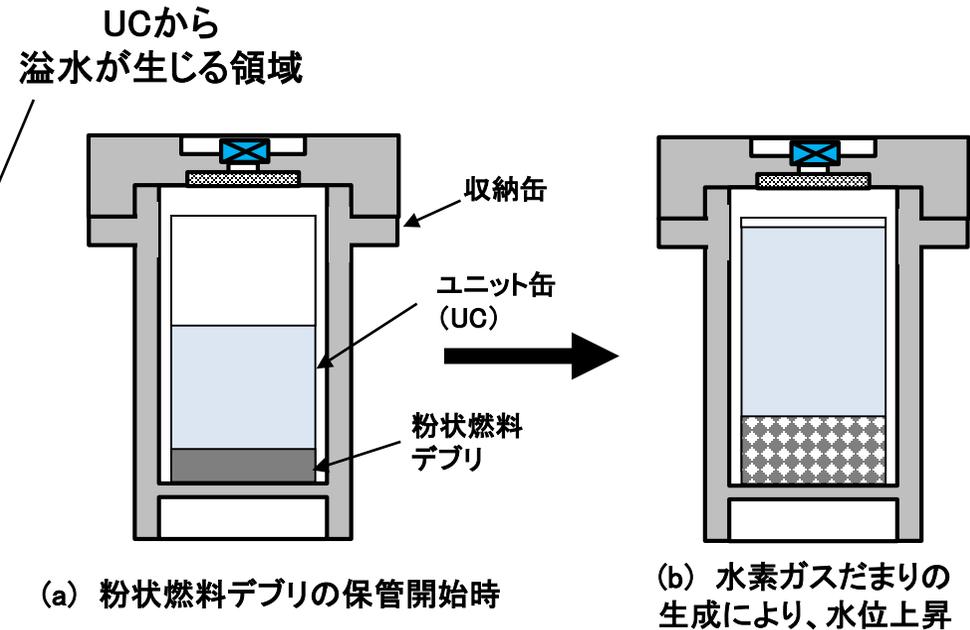
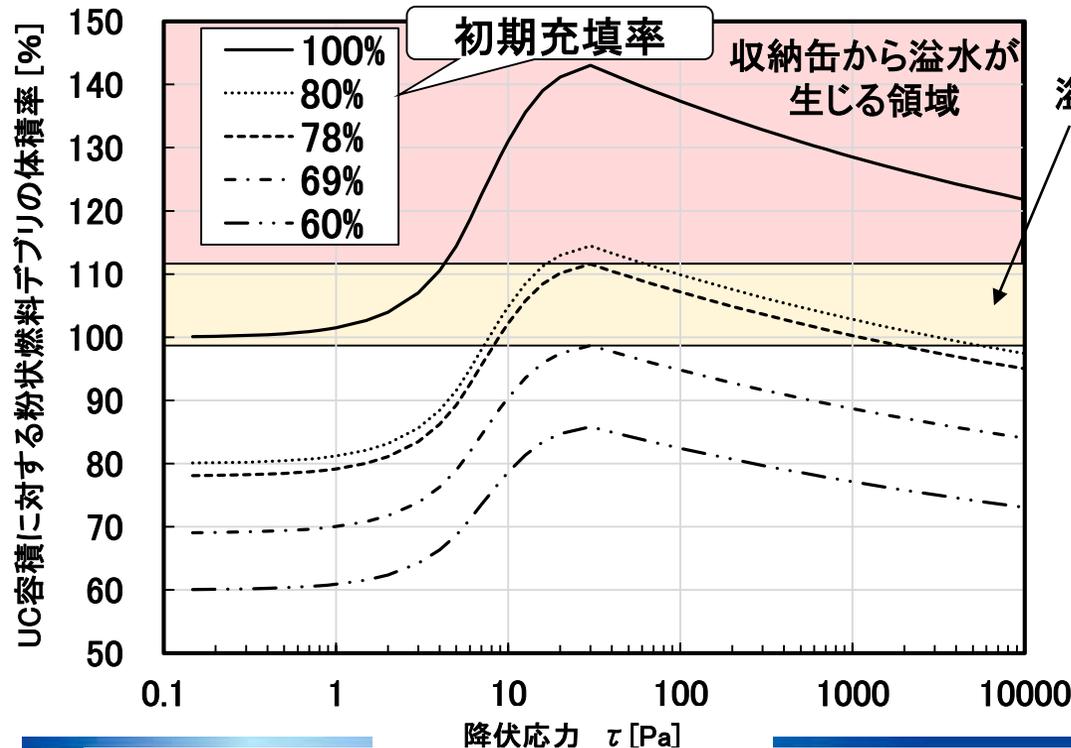


図2 粉状燃料デブリ充填量低減による溢水の抑制

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(15/20)

(v) 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(3/8)

ロ.水素ガスだまりが放出された場合の水素濃度評価(1/2)

粉状燃料デブリを収納缶で収納・移送・保管する場合、収納缶内気相部の水素濃度を爆発下限界(4vol%)未満に保つ必要がある。水素ガスだまりが粉状燃料デブリ内に局所に生成されると仮定した場合、水素ガスだまりの最大気泡径は粉状燃料デブリの降伏応力によって求められる。粉状燃料デブリ内の水素ガスだまりが一瞬で収納缶内気相部に均一に放出された場合に、水素濃度を爆発下限界(4vol%)以上に上昇させる水素だまりの気泡径は体積比から約68mm以上であり、その気泡径は粉状燃料デブリの降伏応力が約450Pa以上で生じる。そのため、粉状燃料デブリの粒径が $0.1\mu\text{m}$ かつ、固体の体積率が20%を超える場合に、水素濃度が爆発下限界(4vol%)以上になることが分かった。

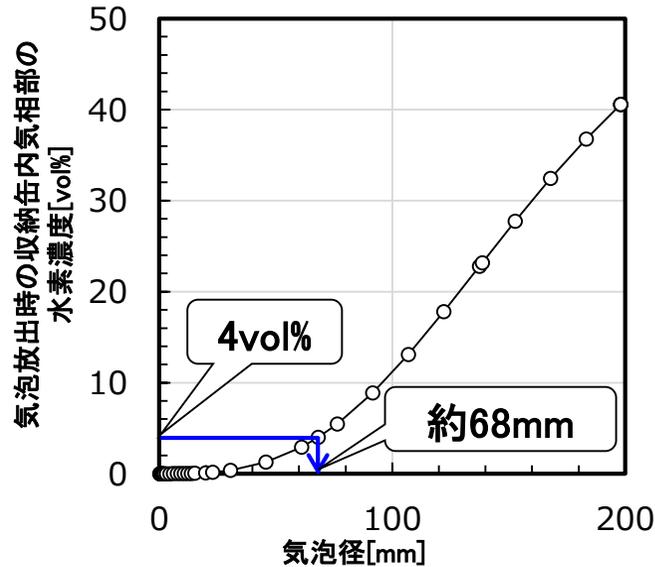


図1 水素ガスだまりの気泡径と気泡放出時の収納缶内の水素濃度の関係

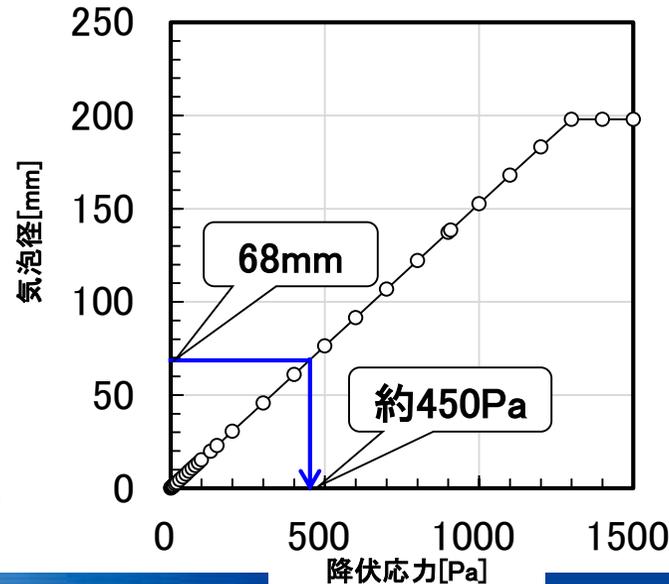


図2 降伏応力と最大気泡径の関係

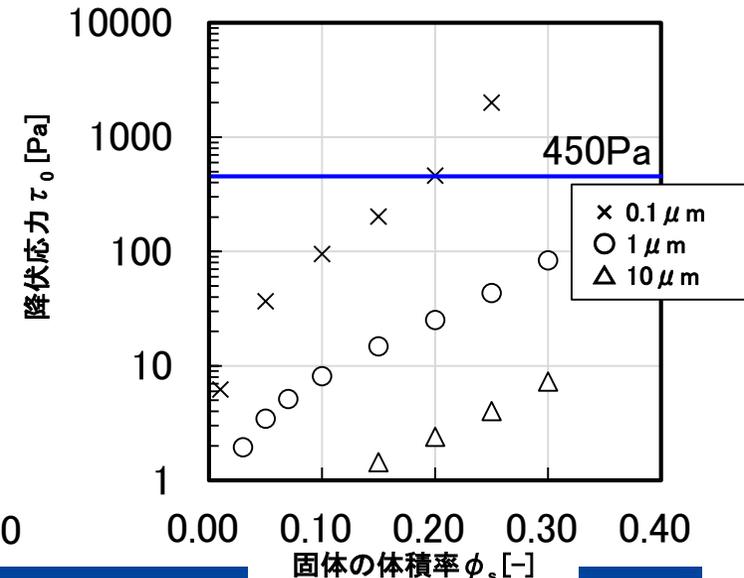


図3 粒径ごとの降伏応力と固体の体積率の関係

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(16/20)

(v)粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(4/8)

ロ.水素ガスだまりが放出された場合の水素濃度評価(2/2)

水処理粉状燃料デブリは粒径が $0.1\mu\text{m}$ で含水率が90~95vol%と想定されていることから、粒径ごとの降伏応力と固体の体積率の関係より、降伏応力は約95Paとなることが想定される。95Paの粉状燃料デブリが生成可能な気泡径は約15mmであり、水素ガスだまりが一瞬で放出された場合でも収納缶内気相部の水素濃度は約0.04%であり、水処理粉状燃料デブリであれば水素ガスだまりが放出された場合でも水素濃度は爆発下限界(4vol%)未満になることが分かった。

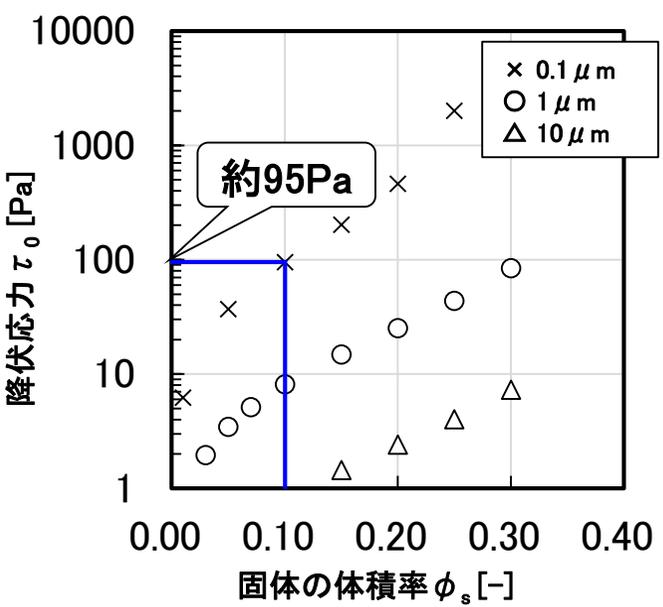


図1 粒径ごとの降伏応力と固体の体積率の関係

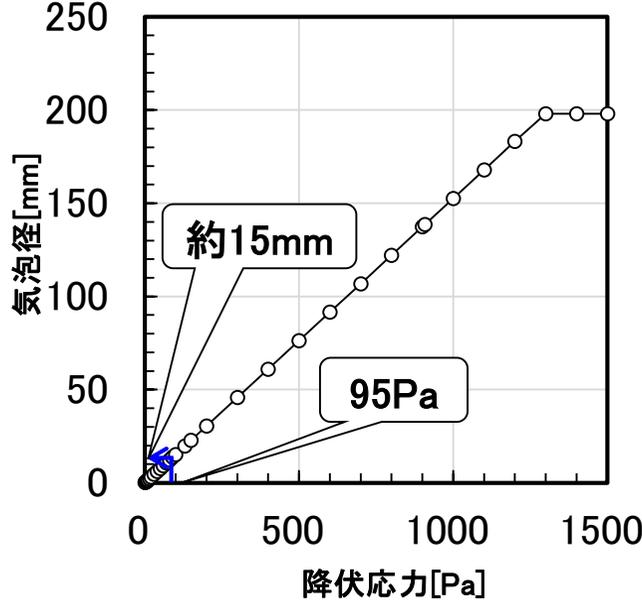


図2 降伏応力と最大気泡径の関係

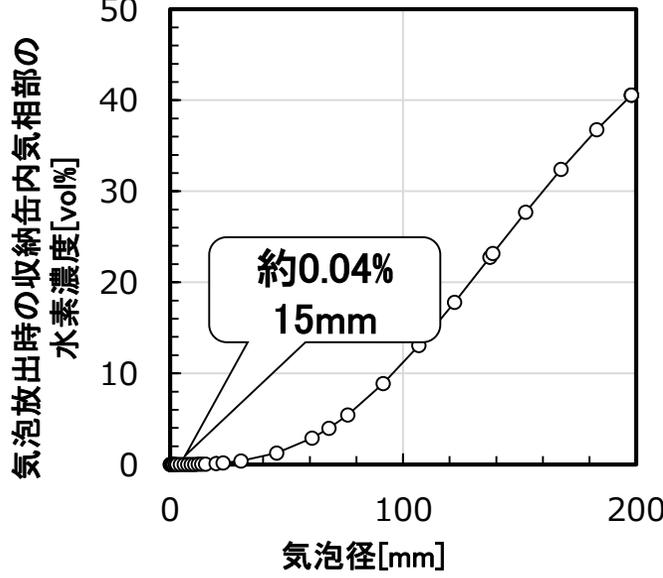


図3 水素ガスだまりの気泡径と気泡放出時の収納缶内の水素濃度の関係

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c. 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(17/20)

(v) 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(5/8)

ハ. 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(1/2)

粉状燃料デブリを乾燥せずに長期保管する場合、粉状燃料デブリの溢水および収納缶内気相部の水素濃度を爆発下限界(4vol%)以上に上昇させる水素ガスだまりの放出が生じない条件であっても、蒸発等で含水率が徐々に低下していくことが想定される。含水率が低下すると、降伏応力が上昇し、粉状燃料デブリ内に生成される水素ガスだまりの気泡径が大きくなる。その場合、収納缶内の水素濃度を爆発下限界(4vol%)以上に上昇させる水素ガスだまりが生成される可能性があるため、粉状燃料デブリを乾燥せずに長期保管することは避けるべきと考える。

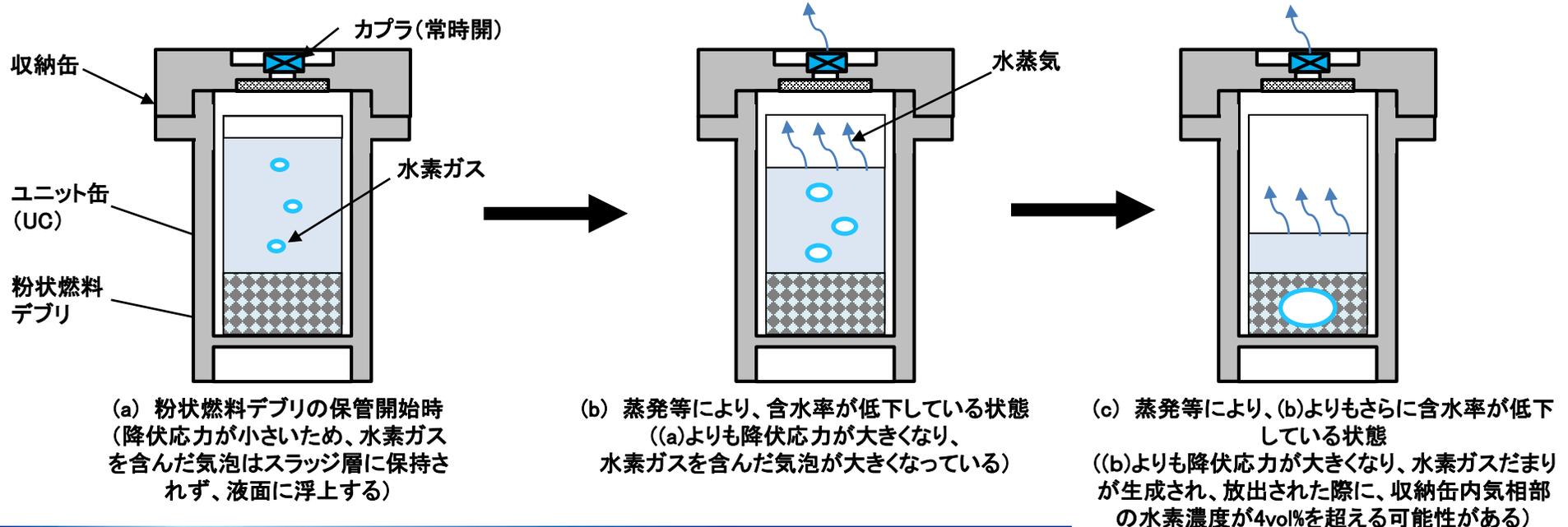


図1 粉状燃料デブリを乾燥せずに長期保管した場合のイメージ

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

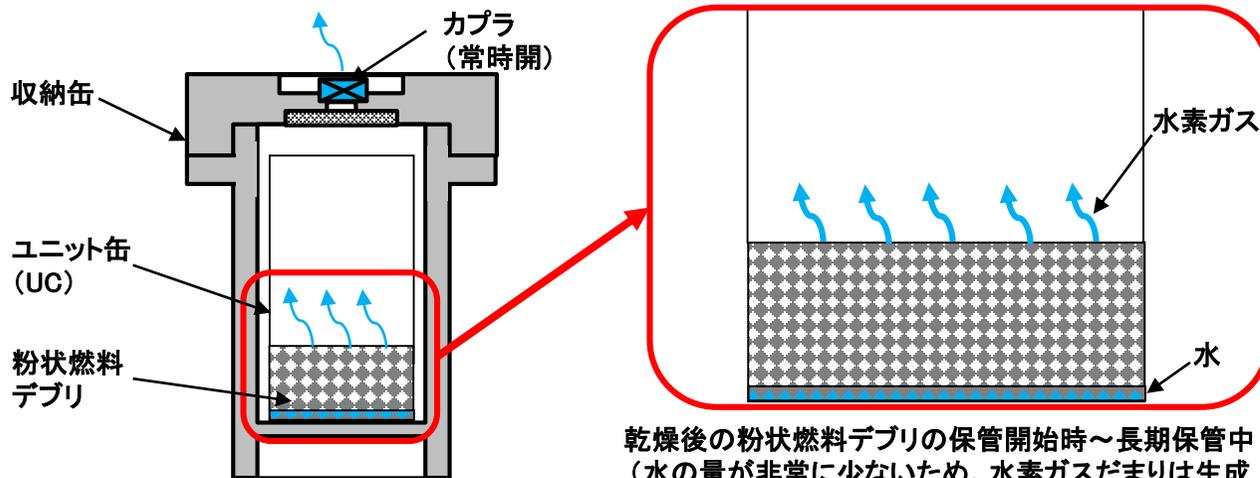
③実施事項、成果

c. 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(18/20)

(v) 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(6/8)

ハ. 粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(2/2)

粉状燃料デブリを乾燥し、乾燥目標である0.1wt%まで乾燥した場合、粉状燃料デブリ72.9kgに付着する水は72.9gであり、72.9gの水を内径198mmのUCに入れても2mm程度の高さにしかならないため(実際は粉状燃料デブリにほぼ均一に付着するため、水たまりは生じないと想定される)、水素ガスだまりが生成される可能性は低いと考える。よって、乾燥目標である0.1wt%まで乾燥すれば、粉状燃料デブリを収納缶状態で保管することが可能であると考えられる。



乾燥後の粉状燃料デブリの保管開始時～長期保管中
(水の量が非常に少ないため、水素ガスだまりは生成されず、水素が放出されている状態)

図1 粉状燃料デブリを乾燥して長期保管した際のイメージ図

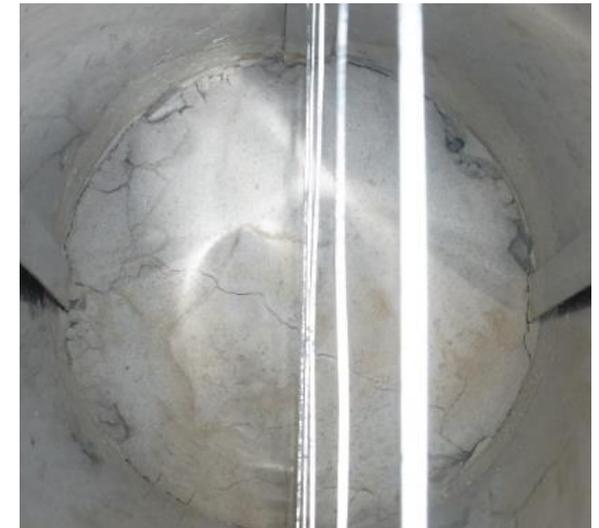


図2 【参考】収納缶(乾燥)PJ
実規模スケールのスラリー・スラッジ試験
珪砂スラリー・スラッジ乾燥後
(平衡含水率0.02wt%未満)注1

注1: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、令和3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(粉状燃料デブリの乾燥技術))」2022年度中間報告、2022、より。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(19/20)

(v)粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(7/8)

ニ.粉状燃料デブリの水素発生速度を考慮した保管条件の検討

粉状燃料デブリを粒状、塊状燃料デブリ用の収納缶^{注1}のベントカバーを開放した状態で保管した場合の平衡状態における収納缶内気相部の水素濃度を評価^{注1}した。水素濃度はフィックの法則に基づき保守的に気体の拡散のみを考慮して評価^{注2}した。評価結果より、粉状燃料デブリを乾燥せずに保管することは困難であるが、乾燥処理を施せば収納缶状態での保管が成立することが分かった。なお、乾燥せずに収納缶状態で保管する場合は、収納缶の構造変更(ベントカバー径の拡大など)が対策案として考えられるが、蒸発等による含水率の低下に伴ってガスだまりが生成される懸念があるため、粉状燃料デブリを乾燥せずに収納缶状態で保管することは避けるべきと考える。

表1 粉状燃料デブリを粒状・塊状燃料デブリ用収納缶で保管した場合の水素濃度

| 燃料デブリの種類 | 乾燥有無 | 燃料デブリ充填率 | 水充填率(含水率) | 純水のプライマリーG値条件の結果 | | 表面積を考慮したG値条件の結果 | |
|------------|------|----------|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
| | | | | 水素発生速度 | 水素濃度 | 水素発生速度 | 水素濃度 |
| 粉状燃料デブリ | 無 | 30vol% | 70vol% (17.6wt%) ^{注3} | 0.200 L/h | 10.5 vol% | 0.237 L/h | 12.1 vol% |
| | 有 | 30vol% | 0.333vol% (0.1wt%) ^{注3} | 0.002 L/h | 0.09 vol% | 0.014 L/h | 0.88 vol% |
| 水処理粉状燃料デブリ | 無 | 10vol% | 90vol% (45.1wt%) ^{注3} | 0.125 L/h | 7.01 vol% | 0.167 L/h | 9.03 vol% |
| | 有 | 10vol% | 0.111vol% (0.1wt%) ^{注3} | 0.001 L/h | 0.03 vol% | 0.005 L/h | 0.30 vol% |

注1:技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告、2021、より。

実機大収納缶(内径220mm、ボルト構造、送気機構なし)を参照。

注2:収納缶内の水素濃度評価は、実機大収納缶内のユニット缶より上の範囲についての構造を考慮して実施。

注3:含水率(wt%)は、燃料デブリの質量あたりの水の割合(水の体積×密度/(水の体積×密度+粒子(UO₂)の体積×密度))を指す。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

③実施事項、成果

c.粉状燃料デブリの水素ガス放出特性(20/20)

(v)粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を考慮した保管条件の検討(8/8)

ホ.評価結果の考察

粉状燃料デブリの水素ガス放出特性の検討として、収納缶状態において粉状燃料デブリ内に生成される水素ガスだまりの放出特性を検討した。評価結果の考察を以下に示す。

- 粉状燃料デブリを収納缶状態で保管する場合、粉状燃料デブリの溢水が発生する可能性があることが分かった。
- 粉状燃料デブリを収納缶状態で保管する場合、水素ガスだまりが放出された場合に、収納缶内気相部の水素濃度が爆発下限界(4vol%)を超える可能性があることが分かった。
- 粉状燃料デブリを乾燥しない場合、保管開始時には粉状燃料デブリの溢水および収納缶内気相部の水素濃度を爆発下限界(4vol%)以上に上昇させる水素ガスだまりの放出が生じない条件であっても、保管中に蒸発等で徐々に含水率が低下することで、収納缶内気相部の水素濃度を爆発下限界(4vol%)以上に上昇させる水素ガスだまりが生成される可能性があることが分かった。

以上の考察より、粉状燃料デブリを乾燥せずに収納缶状態で保管することは避けるべきと考える。また、収納缶を密封移送する場合、保管時と同様に水素ガスだまりが放出された場合に、収納缶内気相部の水素濃度が爆発下限界(4vol%)を超える可能性があることから、保管前ではなく、移送前に乾燥することが望ましいと考える。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

④成果の反映先への寄与

粉状燃料デブリの水素発生予測法の提案および水素だまりの影響評価結果をもとに、粉状燃料デブリの取り扱い方法(保管方式、保管施設等)および粉状燃料デブリ用収納容器の設計の検討に寄与できるものと考える。

⑤現場への適用性の観点における分析

現場への適用においては、提案した水素ガス発生予測法の確からしさを試験等による検証もしくは、サンプリングされた燃料デブリの水素ガス発生特性との比較評価等の検討が必要と考える。

⑥目標に照らした達成度

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

- 粉状燃料デブリの水素ガス発生挙動に影響する因子を特定し、その影響度合いについて分析と評価を行い、粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法を提案していること。(TRLレベル:3)
- 蓄積された状態の粉状燃料デブリからの水素ガス放出について調査や検討を行い、その放出特性や粒状、塊状燃料デブリとの相違を明らかにし、水素ガス放出に影響する因子の特定およびその影響について分析・評価していること。(TRLレベル:3)

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

⑦まとめ

- 2020年度に実施した補助事業「燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発」で提案した粒状、塊状の燃料デブリの水素発生予測法を、粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリに適用した場合の水素ガス発生挙動に影響する因子を特定し、その影響度合いを明らかにしたうえで、粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリの水素発生予測法を提案し、実機適用に向けた課題とその対応策を検討した。
- 2021年度の補助事業「燃料デブリの収納・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）」の事例調査で得られた、粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ内に蓄えられた水素ガスが突発的に放出される事象について、調査や検討を行い、その放出特性や粒状、塊状の燃料デブリとの相違を明らかにした。
さらに、粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリを収納缶で保管する場合の条件を検討し、実機適用に向けた課題とその対応策を検討した。

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

⑧今後の課題(1/2)

粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法の実機適用に向けた課題を以下に示す。

表1 粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法の実機適用に向けた技術課題と解決時期

| 項目 | 技術課題 | 技術課題の解決策 | 解決時期 |
|---|--|---|--|
| 崩壊熱 ピーキングファクタ 燃料含有割合 燃料デブリ重量 エネルギー吸収率 | 燃料デブリの性状が不明確であり、実燃料デブリの崩壊熱や燃料含有割合等を考慮した現実的な評価ができないため、保守的な条件で水素発生速度を評価せざるを得ない。 | 実燃料デブリの性状把握のためのサンプリング等を実施し、その結果を考慮した崩壊熱や燃料含有割合等の条件で水素発生速度を評価する。 | 燃料デブリ性状把握のための燃料デブリサンプリング ⇒今後検討要 |
| 水素発生G値 | 含水率が低い領域での水素発生G値の増加や、混在する物質による水素発生G値の増加等により、乾燥処理等によって含水率を低下させても水素発生速度が十分に低減しない懸念がある。 | 粉状燃料デブリを模擬した照射試験を実施して、含水率や混在する物質による水素発生G値を確認し、水素発生速度への影響を評価する。 | 粉状燃料デブリを模擬した照射試験による水素発生G値の検討 ⇒今後検討要 |

6. 実施内容

6.2 水素ガス発生特性、放出特性の検討

⑧今後の課題(2/2)

粉状燃料デブリの水素ガス放出特性を踏まえ、粉状燃料デブリを収納缶で保管する際に想定される技術課題、その解決策および解決時期を整理した。

表1 粉状燃料デブリの保管に向けた課題

| 課題内容 | 収納缶での保管における技術課題の有無と解決策 | | 解決時期 |
|--------------------------------------|---|--|---|
| | 乾燥無 | 乾燥有 | |
| (1) 水素ガスだまりの生成により、粉状燃料デブリ溢水の発生 | 技術課題あり: 溢水が発生する。 ⇒解決策(1): UCへの初期充填率を減らすことで溢水を防止する。ただし、現場での初期充填率の管理方法も検討が必要。 | 技術課題なし: 溢水は発生しない。 | 解決策(1): UCへの粉状燃料デブリ充填方法及び初期充填率の検討 ⇒今後検討要 |
| (2) 収納缶状態での長期保管 | 技術課題あり: 保管中に蒸発等で燃料デブリの含水率が徐々に低下することで、生成される水素ガスだまりの気泡径が大きくなり、収納缶内気相部の水素濃度を爆発下限界(4vol%)以上に上昇させる水素ガスだまりが生成される可能性がある。 ⇒解決策(2)-1: 収納缶以外の保管方式を検討する。代替案としては、タンク保管で水を継ぎ足し含水率の低下を抑制しながら保管することで、水素だまりの生成を防止する。 | 技術課題あり: 粉状燃料デブリは乾燥目標である含水率0.1wt%まで乾燥すると水素だまりが生成されない。ただし、乾燥後の粉状燃料デブリの体積が小さいため、収納効率が悪い。 ⇒解決策(2)-2: 収納効率の向上が必要な場合は、乾燥後の粉状燃料デブリを集積してから収納缶に収納するなどの対策が必要。 | 解決策(2)-1: 収納缶以外の保管方式の検討 ⇒本補助事業(保管様式の検討)にて検討済 解決策(2)-2: 収納効率の向上対策の検討 ⇒今後検討要 |
| (3) 水素ガスだまり放出時および定常状態における収納缶内の水素濃度 | 技術課題あり: 収納缶内気相部の水素濃度が爆発下限界(4vol%)以上になる。 ⇒解決策(3)-1: 収納缶の構造変更(ベントカプラ径の拡大など)により水素放出特性を向上させる。 ⇒解決策(3)-2: 収納缶以外の保管方式を検討する。代替案としては、収納缶以外の保管容器(タンク等)を用いて、常時換気状態で保管することで、水素濃度の上昇を防止する。 | 技術課題なし: 収納缶内気相部の水素濃度が爆発下限界(4vol%)未満になる。 | 解決策(3)-1: 収納缶の構造変更による水素放出特性の向上 ⇒今後検討要 解決策(3)-2: 収納缶以外の保管方式の検討 ⇒本補助事業(保管様式の検討)にて検討済 |
| (4) 収納缶状態で長期保管し、保管期間終了後の粉状燃料デブリの取り扱い | 技術課題あり: 保管中の蒸発等により、粉状燃料デブリの含水率が低下している可能性が高いため、保管期間終了後の収納缶開放時に粉状燃料デブリが飛散する恐れがある。 ⇒解決策(4)-1: 収納缶以外の保管方式を検討する。代替案としては、タンク保管で水を継ぎ足し含水率の低下を抑制しながら保管することで、粉状燃料デブリの飛散を防止する。 | 技術課題あり: 保管期間終了後の収納缶開放時に粉状燃料デブリが飛散する恐れがある。 ⇒解決策(4)-2: 収納缶以外の保管方式を検討する。代替案としては、タンク保管で水を継ぎ足し含水率の低下を抑制しながら保管することで、粉状燃料デブリの飛散を防止する。 | 解決策(4)-1および(4)-2: 収納缶以外の保管方式の検討 ⇒本補助事業(保管様式の検討)にて検討済 |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

①目的、目標

冷却水循環系では、燃料デブリの加工時の飛散抑制材、臨界防止のための水ガラス中性子吸収材、固形分を回収するための吸着材や凝集剤が、粉状燃料デブリと共に回収される。これら随伴物は、粉状燃料デブリに比べて比重や粒径等の性状に差があると考えられるため、乾燥処理後における収納容器の取り扱い時や保管状態において、収納容器内でのふるまいが大きく異なると想定される。収納容器内で発生する水素ガスや崩壊熱による流動や、収納容器の保管までの取り扱いによる衝撃や運動等によって、粉状燃料デブリや随伴物は収納缶内で舞い上がり等の挙動を呈すると考えられる。特に、舞い上がり等の挙動が大きいと推定される収納缶での乾燥処理時を対象とした粉状燃料デブリの挙動を、文献などによる類似事例調査やCFD等を用いた流動解析により推定する。その結果より、粉状燃料デブリの安定保管までの取り扱い時や、保管時に維持すべき安全機能への影響（例えば、収納容器のフィルタの閉塞等）を評価する。

②既存技術との対比

粉体の飛散挙動に関する研究はあり、文献調査等により既存技術を確認しながら、本検討に反映する。

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

【2022年度粉状燃料デブリの挙動の評価フロー】

③実施事項、成果

【補足】基本方針(1/5)

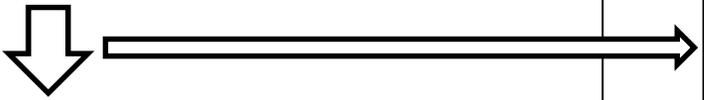
収納缶(乾燥)PJ【燃料デブリの乾燥技術】2021～2022年実機規模収納缶スラッジ乾燥試験^{注1}

- (1)スラッジ乾燥処理の適用範囲を明確化
 - ・処理対象物の具体化

- (2)スラッジ処理形態の合理化
 - ・実機規模収納缶、内容器方式による実規模試験
 - ・含水率、温度特性の把握

2022年度粉状燃料デブリの挙動の評価

- (1) スラッジ乾燥処理時、飛散評価適用範囲明確化
 - ・スラッジ飛散評価対象物の具体化



- (2)粉状燃料デブリ挙動評価手法構築
 - ・実機規模収納缶、スラッジ乾燥試験時、乾燥特性と粉状燃料デブリの飛散速度を把握(代表スラッジ、最大スラッジ高さ条件)

- ・基本現象の深掘り(ビーカースケール試験)
 - ・微細粉体の飛散特性

- ・実機条件変更時影響(解析による評価)
 - ・スラッジ種類、スラッジ高さ、含水率
 - ・温風、ヒータ加熱

- (3) 乾燥処理中のフィルタへのスラッジ到達量、粒径評価

- (4) 安全機能への影響評価
 - ・フィルタ閉塞、フィルタ集塵効率/フィルタ下流線量

- (5) 今後の課題
 - 実機収納缶におけるフィルタデータ取得、フィルタ設計、安全機能評価

注1:本6.3項にて“スラッジ”と記載しているのは、飛散評価対象物(後述の珪砂、凝集剤など)を示す。

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【補足】 基本方針(2/5)

○**収納缶(乾燥)PJ【燃料デブリの乾燥技術】**実機規模収納缶スラッジ乾燥試験
(試験目的)

難乾燥物や水和物を含有する種類に対する乾燥処理の適用性を確認

(効果)

①乾燥可能な処理対象物の種類具体化

②代替水素対策案

(試験内容) 内容器(ふた無し)構造における24h後の含水率評価



本PJ【粉状燃料デブリ挙動評価方針】

①実機規模収納缶スラッジ乾燥試験において、粉状燃料デブリの飛散特性を把握

②粉状燃料デブリ飛散の観点で、処理対象物を選定

③飛散速度に着目した実機規模模擬収納缶スラッジ乾燥試験を実施

④粉状燃料デブリ高さ、温風条件等の変更影響は流動解析で実施

【収納缶(乾燥)PJと本PJの実施内容】

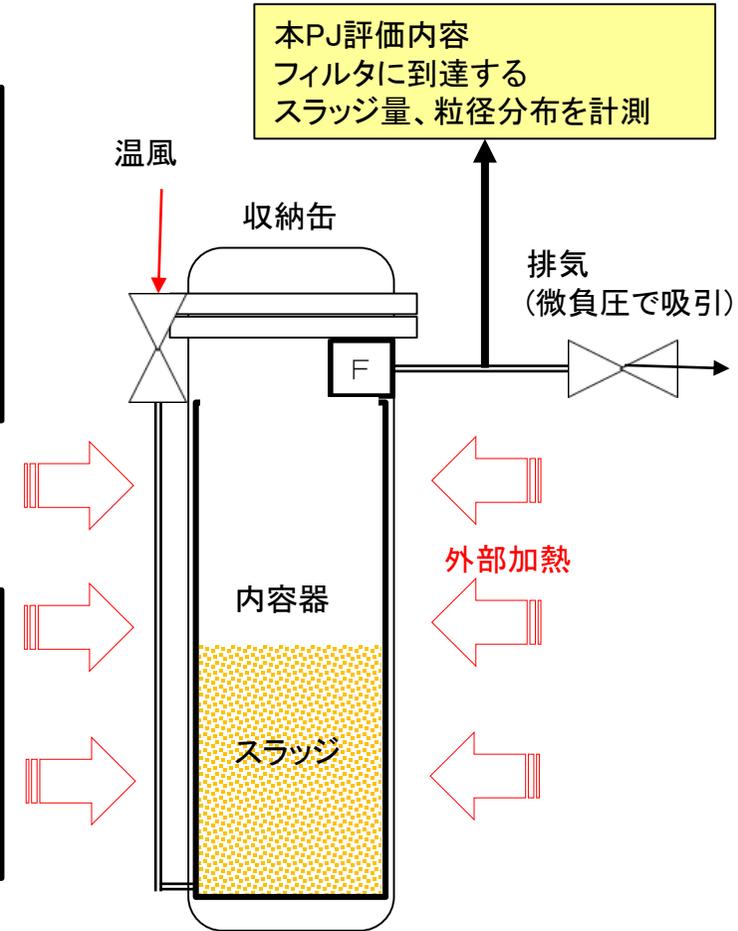


図1 現状の処理概念
(2019~2020年度検討結果、収納缶の場合)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

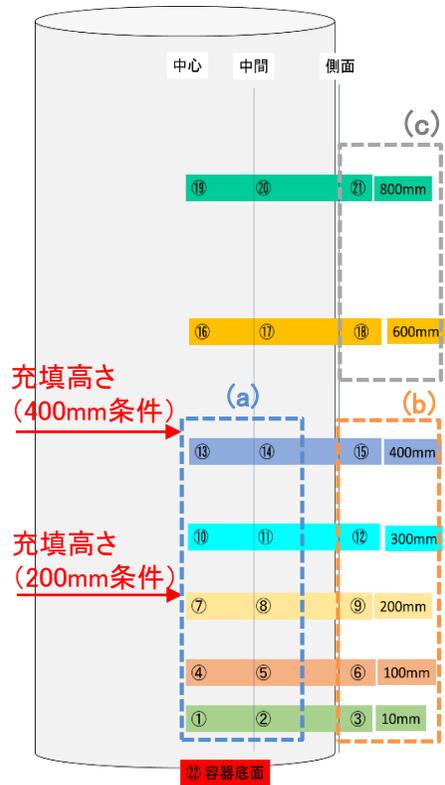
③実施事項、成果

【補足】 基本方針(3/5)

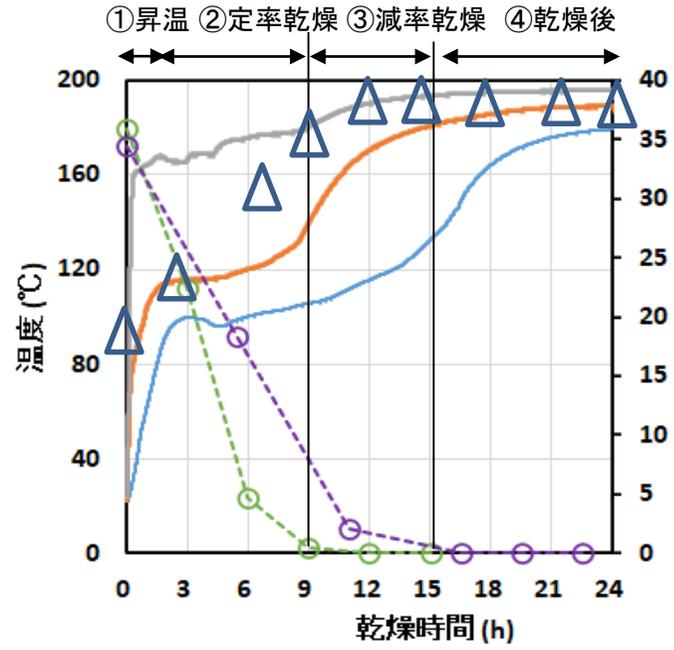
①昇温、②定率乾燥、③減率乾燥、④乾燥後と言った乾燥過程で、スラッジ層の温度、含水率(水蒸気発生量)は異なる。スラッジの飛散は、スラッジ層の温度、含水率、ガス流れの影響を受けることから、乾燥過程ごとに、スラッジ飛散の特性(飛散量、粒径)を評価する。

安全影響評価内容を鑑み、時間積算した(1バッチ当たり)当たりの粉状燃料デブリ量を評価する。

【実機規模収納缶スラッジ乾燥試験結果分析】



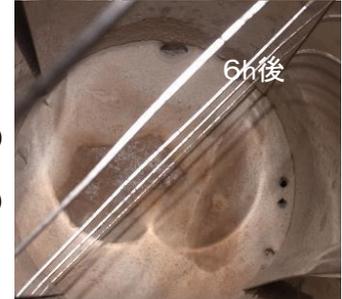
(1)内容器・スラッジ温度計測点



(2)乾燥試験結果
 (収納缶側面ヒータ加熱200°C+温風加熱200°C時の
 充填高さ400mm条件における温度履歴と含水率)

本PJ評価内容
 フィルタに到達する
 スラッジ量、粒径分布を計測

- △ 内容器からのスラッジ流出量(イメージ)
 - (a) — スラッジ平均温度(青破線四角の平均温度)
 - (b) — 内容器平均温度(スラッジ範囲)(橙破線四角の平均温度)
 - (c) — 内容器平均温度(スラッジ上方)(灰色破線四角の平均温度)
 - 含水率(200mm)
 - 含水率(400mm)
- (a)~(c)はグラフ左図の破線四角で示す計測点温度の平均値を示す。
 含水率は充填高さ200mm条件の結果も併記する。



(3)スラッジ状況(スラッジ初期高さ200mm)

図1 収納缶(乾燥)PJで実施された実機規模収納缶スラッジ乾燥試験結果

6. 実施内容

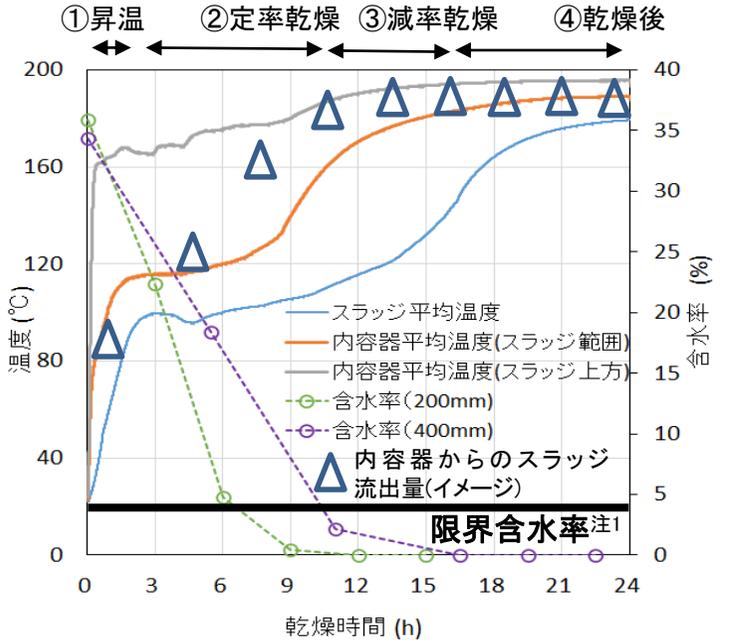
6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【補足】 基本方針(4/5)

スラッジ乾燥過程は、スラッジ層の温度、含水率に着目すると、①容器、スラッジ昇温過程、②定率乾燥過程、③減率乾燥過程、④乾燥後の4つの過程で特徴付けられる。そのため、各過程でのスラッジ飛散有無、飛散量を、別途試験で確認する。スラッジ飛散が確認された過程において、内容器温度、スラッジ温度、水蒸気発生速度、スラッジ飛散速度をCFDの境界条件として設定する。そして、スラッジの挙動をCFDで定常計算する。これら4つの過程における境界条件を、手計算モデルで算出する。

【評価全体方針】



各表示温度の説明はNo.82に示す。
含水率は充填高さ200mm条件の結果も併記する。

(乾燥試験結果(充填高さ400mm条件における温度履歴と含水率))

注1: 定率乾燥速度から減率乾燥速度に変わる含水率

| 過程 | 容器、スラッジ昇温 (100℃まで) | 定率乾燥 (減率移行限界含水率以上) | 減率乾燥 (減率移行限界含水率以下) | 乾燥後(含水率0) |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 内容器温度 | 20~100℃ | 140~160℃ | 160~180℃ | ~200℃ |
| スラッジ温度 | 20~100℃ | 100℃ | 100~160 | ~200℃ |
| 水蒸気 | 未発生 | 発生 | 発生 | 未発生 |

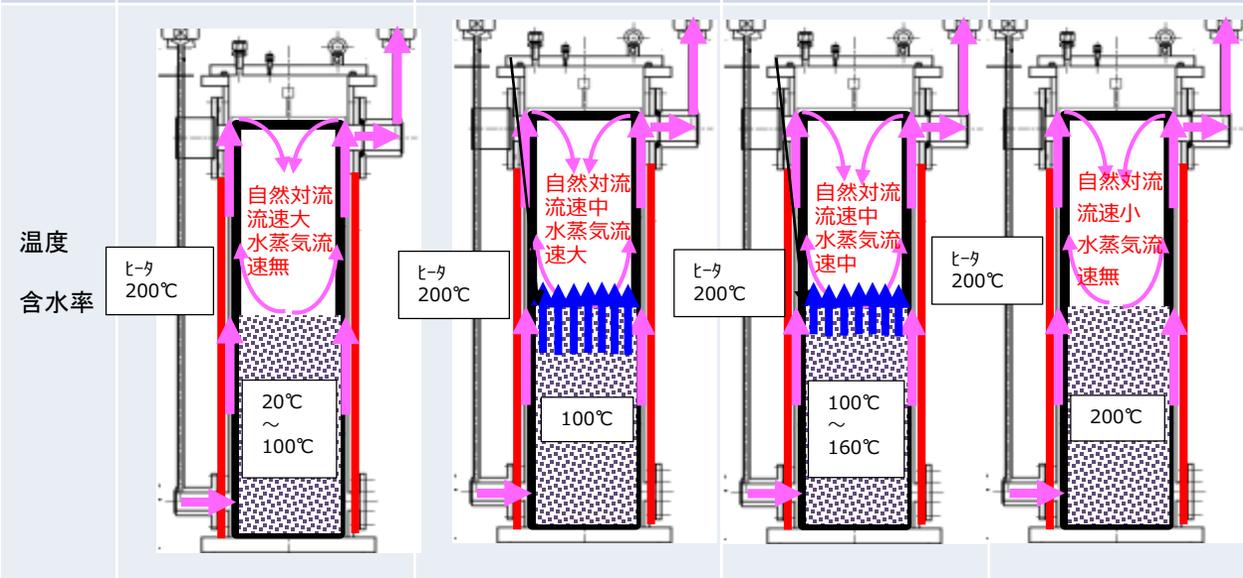


図1 スラッジ温度、含水率評価の概要

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

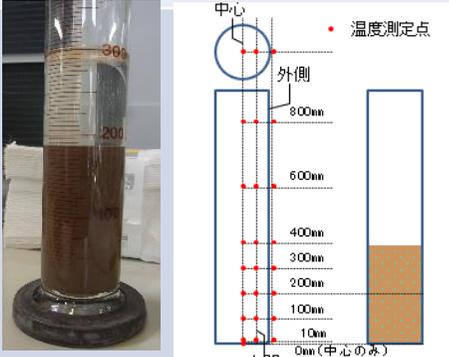
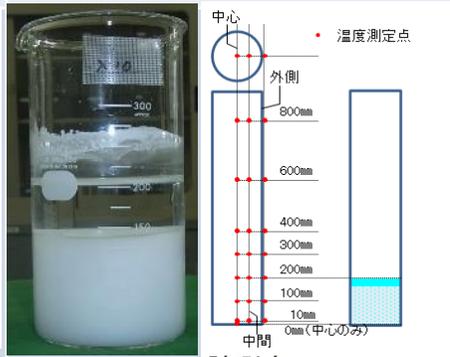
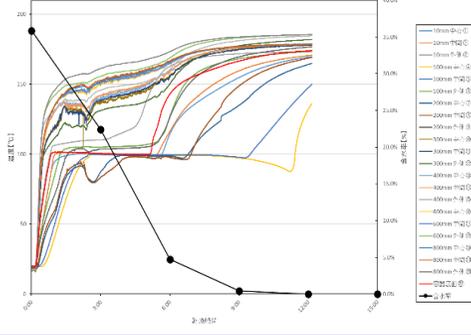
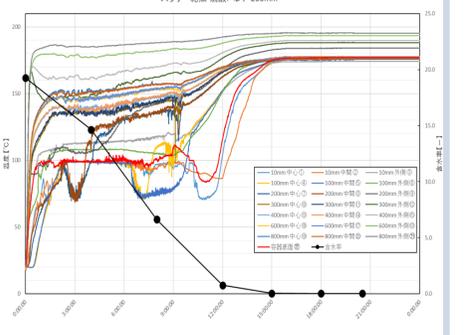
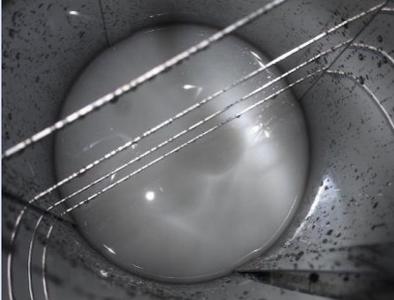
③実施事項、成果

【評価対象とする粉状燃料デブリ】

【補足】 基本方針(5/5)

実機規模収納缶スラッジ乾燥試験結果の分析

- ①珪砂を用いた試験では、スラッジ高さがパラメータで200、400mmである。この条件では、乾燥試験後、珪砂が内容器内に残る。温風出口配管に到達したスラッジは確認できなかった。
 - ②凝集剤を用いた試験では、スラッジ高さが200、800mmである。乾燥試験後、凝集剤が飴状に凝固したものが内容器内に残る。内容器上方内面に、液体が突沸し、壁面で凝固したものがあつた。
- この結果より、粉状物質でスラッジ高さが400mm以上と凝集剤の飛散挙動を評価する。

| | 標準粉体 | 凝集剤 | | |
|------|---|--|--|--|
| 材質 | 珪砂7、8号 | 凝集剤 $Al_2(SO_4)_3$ | | |
| 平均直径 | 53、106 μm | 液状 | | |
| 写真 |  <p>計測点</p> |  <p>計測点</p> | | |
| |  <p>各点の温度と含水率の履歴</p> |  <p>各点の温度と含水率の履歴</p> | | |
| |  <p>乾燥前</p> |  <p>乾燥後</p> |  <p>乾燥前</p> |  <p>乾燥後</p> |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【粒子飛散事象の文献調査;事例の調査】

a.文献調査 (粉状燃料デブリの挙動) (1/7)

(i) 粉状燃料デブリ飛散速度 (1/3)

- ①珪砂に代表される粉状物質の飛散挙動については、スラッジ表面に対して、平行にガスが流れ、粉状物質を巻き上げる飛砂事象と水分が乾燥して、スラッジ表面を水蒸気が上昇し、粉状物質がスラッジ表面から飛び出す事象を対象とする。
- ②凝集剤の飛散挙動については、凝集剤が沸騰する際に、凝集剤表面で突沸が起こった際、微細粒子がガス相に飛び出す、飛沫同伴を対象とする。

| | 粉状物質 | 凝集剤(液状物質) | |
|------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 事象 | ガス横流れによる飛砂 | 水蒸気上昇流による粒子飛び出し | プール沸騰、突沸時飛沫同伴 |
| 類似事例 | 放射性エアロゾル粒子の土壌からの飛散 風による微粒子飛散 | 流動床 | 再処理工場苛酷事故反応槽残留物蒸発乾 固乾燥装置、蒸気発生器 |
| 説明図 | | | |
| | | | |

ガス横流れによる飛砂メカニズムと限界摩擦速度 (上図注1、下図注2)

水蒸気による飛び出しメカニズムと流量 (上図注3、下図注4)

第1図 飛沫液滴の粒大分布
突沸時飛沫同伴メカニズムと液滴径分布 (上図注5、下図注6)

注1: 鮑本一裕、粒子状放射性物質の再浮遊と移流による2次汚染、Jpn.J.Heath Phys.,49(1),17-28(2014)
 注3: 谷本他、気固系流動層表面からの粒子の放出機構、化学工学論文集、第9巻、第5号(1983)
 注5: 三石他、飛沫同伴に関する研究、化学工学 第22巻 第11号、680-686(1958)

注2: 土屋他、飛砂における砂粒の運動機構(1)、京大防災研究所年報第13号B(昭和45.3)
 注4: 加藤 邦夫、粉粒流動層における微粒子の挙動、粉体工学誌、Vol.36、No.8(1988)
 注6: 藤江他、沸騰水型原子炉における飛沫除去、p792,Vol.3,No.10(1961)、日本原子力学会論文誌

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【粒子飛散事象の文献調査; 飛散速度評価方法】

a. 文献調査 (粉状燃料デブリの挙動) (2/7)

(i) 粉状燃料デブリ飛散速度 (2/3)

放射性物質飛散、飛砂(土木)、クリーンルーム、蒸発器等の飛散速度を参照した。

| | ガス横流れ(飛砂) | 上昇流粒子飛び出し(固気二相流) | 突沸・上昇流飛沫同伴(気液二相流) |
|-----------|--|--|---|
| イメージ図 | | | |
| 代表図 | | | |
| (評価) 飛散速度 | <p>粒子飛散量qは、粒子がガス横流れによってガス相に飛散開始する速度、掃流限界速度u_*1とガス壁面上流速u_*との差のn乗に比例する注2。</p> $q = c \cdot (u_* - u_{*1})^n \quad (u_* \geq u_{*1})$ | <p>粒子終端速度utよりもガス上昇流ufが大きい場合、流速差の2乗に比例して粒子がガス相に飛び出す。</p> <p>表3-5 飛び出し速度定数 K^* [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] の推算式</p> <p>Yagi-Aochi^{97,98)} $K^* g d_{p0}^2 / \mu (u_0 - u_1)^2 = 0.0015 Re_0^{0.6} + 0.01 Re_0^{1.2}$ $Re_0 = u_0 \rho_0 d_{p0} / \mu$ (Leva-Wen⁹⁹⁾ により数式化</p> <p>Zenz-Weil¹⁰⁰⁾ $\frac{K^*}{\rho_g u_0} = [(u_0 / \sqrt{g d_{p0}}) (81.4 / \rho_p)]^3 \quad (\rho_p: \text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ <small>(平間ら¹⁰¹⁾ により数式化)</small></p> | <p>水蒸気上昇流速j_sに対して、同伴する飛沫の質量流量比ARRを求める。</p> $ARR(t) \cong \frac{\rho_{fc}}{\rho_f} E_{fg}$ $E_{fg} = K \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_g \rho_g)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{g \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{6}} j_g$ |

注1: 興嶺他、風による土壌の飛散に関する研究、日環セ所報 No.11,1984
 注3: 日本粉体工業技術協会編、流動層ハンドブック、培風館、P.78、1999年

注2: 藤江他、沸騰水型原子炉における飛沫除去、p792,Vol.3,No.10(1961)、日本原子力学会論文誌
 注4: 吉田他、再処理施設の蒸発乾固事故での放射性物質の移動挙動解析、p213,Vol.14,No.4(2015)、日本原子力学会論文誌

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

a.文献調査 (粉状燃料デブリの挙動) (3/7)

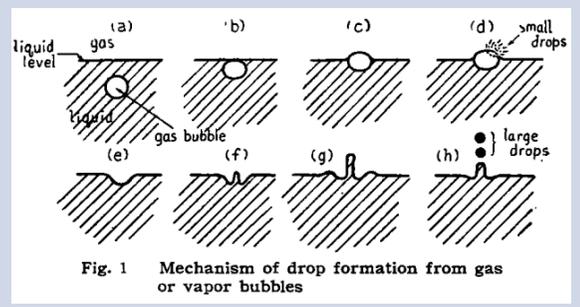
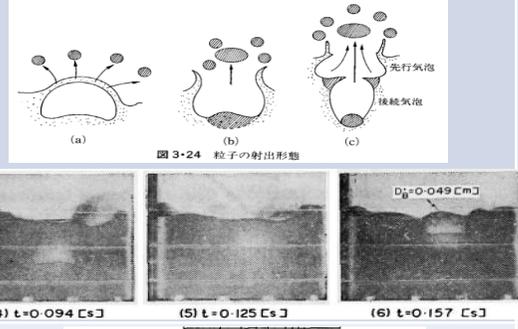
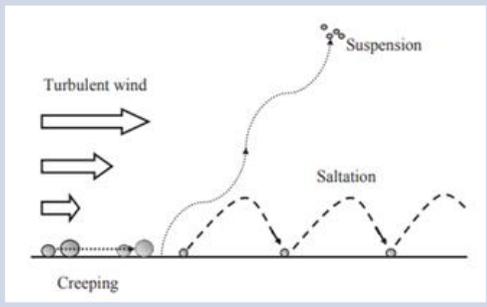
(i) 粉状燃料デブリ飛散速度(3/3)

【粒子飛散事象の文献調査; 飛散速度評価例】

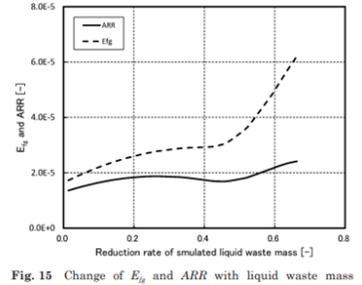
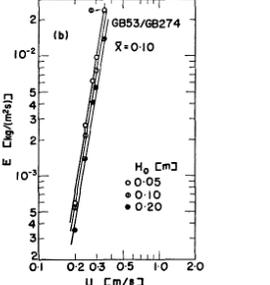
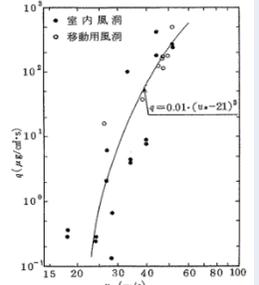
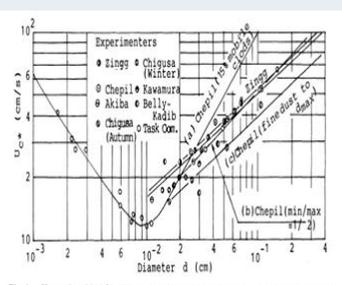
代表ガス横流れ、水蒸気上昇流速下のスラッジ飛散速度は、横流れ飛砂、飛沫同伴、上昇流粒子飛び出しの大小関係を有する。

| ガス横流れ(飛砂) | 上昇流粒子飛び出し(固気二相流) | 突沸・上昇流飛沫同伴(気液二相流) |
|-----------|------------------|-------------------|
|-----------|------------------|-------------------|

イメージ



代表図

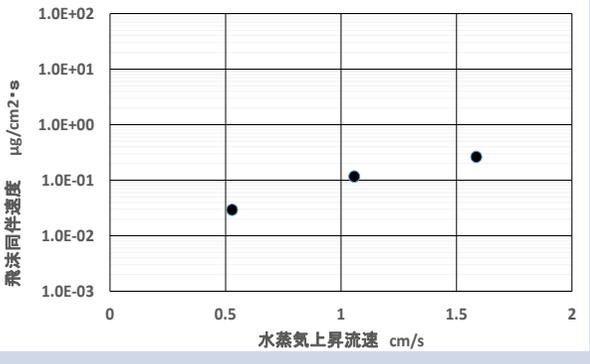
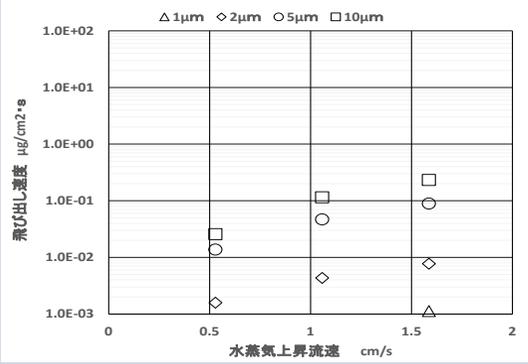
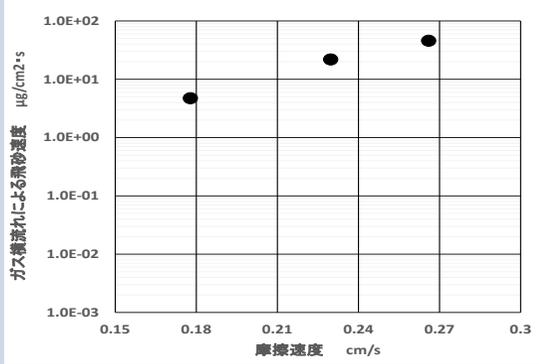


限界摩擦速度と飛散量

上昇流速と飛散量

飛沫同伴率、移行率

飛散速度評価



6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

a.文献調査（粉状燃料デブリの挙動）（4/7）

(ii) 粉状燃料デブリ壁面拡散沈着

後述のマスバランスモデルでは、スラッジ層表面から飛散するスラッジ飛散速度に対して、壁面に拡散沈着するスラッジ質量流量を評価する。そのため、粒子の壁面拡散沈着速度を調査した。

【壁面拡散沈着事象の文献調査】

表1 拡散沈着速度評価式(一例)

| | 評価式例 |
|----|--|
| 層流 | $v_{dx} = 0.34 \left(\frac{D}{x} \right) \left(\frac{u_0 x}{\nu} \right)^{1/2} Sc^{1/3}$ |

| 乱流 | $\frac{v_d}{u_*} = \frac{1}{3.2} Sc^{-2/3} \left(\frac{k u_*}{\nu} \right)^{-1/4} \quad (24)$ <p>ここで u_* ($= \sqrt{\tau_w / \rho_f}$, τ_w は壁面でのせん断応力, ρ_f は空気の密度) は摩擦速度; 粗さの高さ k</p> <p>【変数の説明】 V_{dx} は前縁から距離 x における局所的な沈着速度 V_d は拡散沈着速度、D は粒子拡散係数、x は代表長、 S_c はシュミット数、u_0 はガス流速、ν はガス粘性係数、 u_* は摩擦速度である。</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>θ (rad)</th> <th>Curve</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>$\pi/2$</td> <td>- - -</td> </tr> <tr> <td>π</td> <td>· · ·</td> </tr> </tbody> </table> <p>粒子径と壁面拡散沈着速度の関係^{注1,2}</p> | θ (rad) | Curve | 0 | — | $\pi/2$ | - - - | π | · · · |
|----------------|---|---|----------------|-------|---|---|---------|-------|-------|-------|
| θ (rad) | Curve | | | | | | | | | |
| 0 | — | | | | | | | | | |
| $\pi/2$ | - - - | | | | | | | | | |
| π | · · · | | | | | | | | | |

注1: 島田他、エアロゾル粒子の物体表面への沈着現象、エアロゾル研究、Vol.3、No.4(1988)
 注2: 石神他、放射性物質以降挙動解析コードARTを用いたNSPPエアロゾル実験の解析、日本原子力学会誌、Vol.31、No.9(1989)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

a.文献調査（粉状燃料デブリの挙動）(5/7)

【重力沈降事象の文献調査】

(iii) 粉状燃料デブリ 重力沈降

スラッジ表面層では、蒸発による水蒸気上昇流がスラッジ終端速度よりも大きい場合、スラッジはガス相に飛び出す。また、内容器上方空間では、ガス上昇流が、スラッジ終端速度よりも小さい場合、スラッジは重力沈降して、フィルタに到達しない。（図1、図3参照）

重力沈降は、粒子の粒径に応じて挙動のメカニズムが異なるため、粒子 Reynolds数(Re)を用いた場合分けを行う。（図2参照）

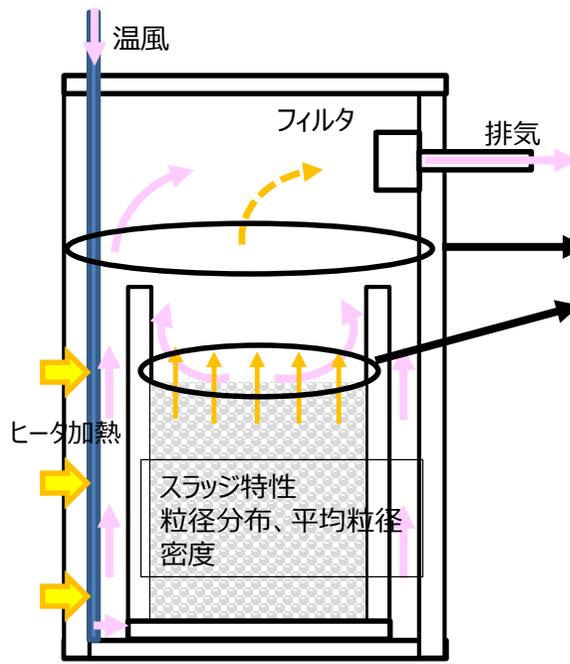


図1 ダスト重力沈降評価面

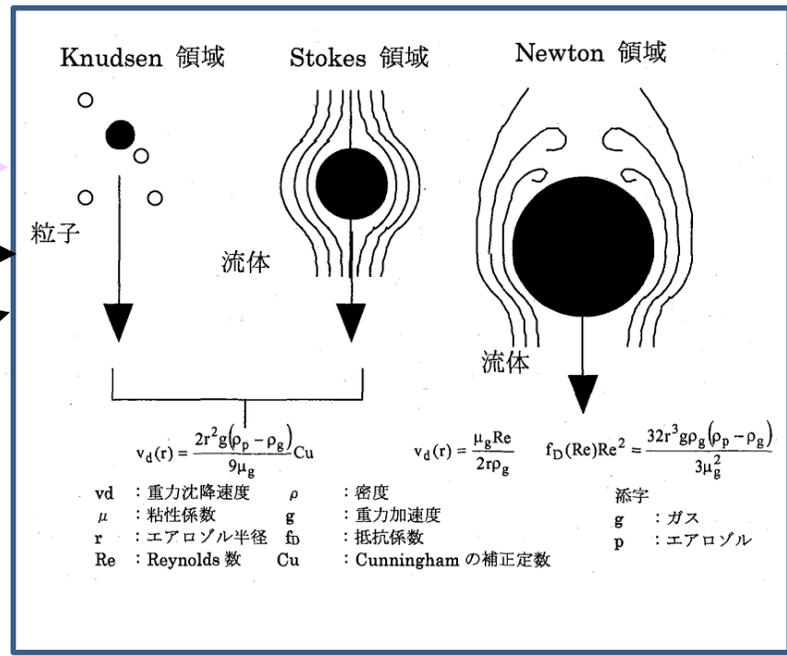


図2 ダスト重力沈降評価式^{注1}

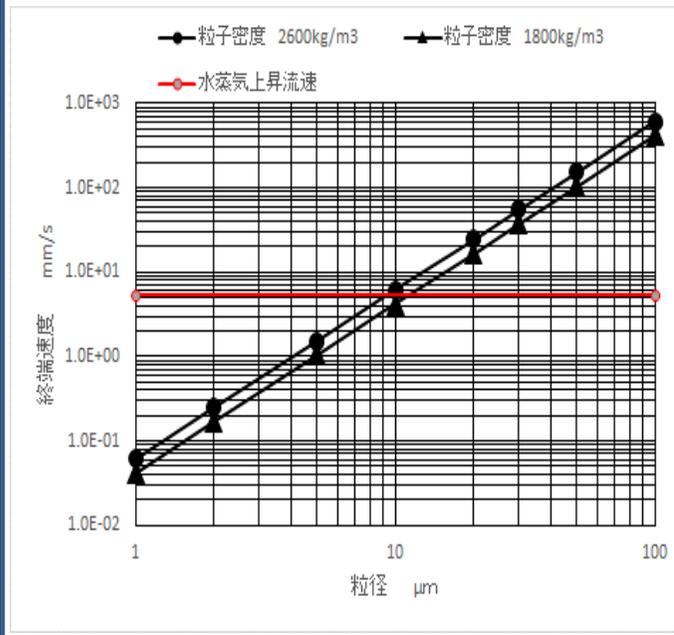


図3 ダスト重力沈降評価例

注1: 石川他、THALES-2コードによるBWR Mark-IIを対象としたレベル3PSAのための体系的なソースターム解析、JAERI-Research 2005-021

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

a.文献調査（粉状燃料デブリの挙動）（6/7）

【粒子飛散と湿分の関係に関する文献調査】

(iv) 粉状燃料デブリの飛散速度と湿分

湿分が粒子飛散速度に与える影響を調査した。スラッジ表面ガス横流れによるスラッジ飛砂事象については、湿分が大きいと、掃流限界流速が大きくなり、浮遊量を低減する。これらについては、スラッジ飛散量の不確かさとして、考慮する。（図1参照）

湿分が粒子の凝集に与える文献調査結果を図2に示す。水蒸気上昇流によって、粒子がホールドアップされるとともに、微粒子が粗大粒子に凝集することが示されている。これは、飛散量を低下する効果なので、不確かさとして考慮する。

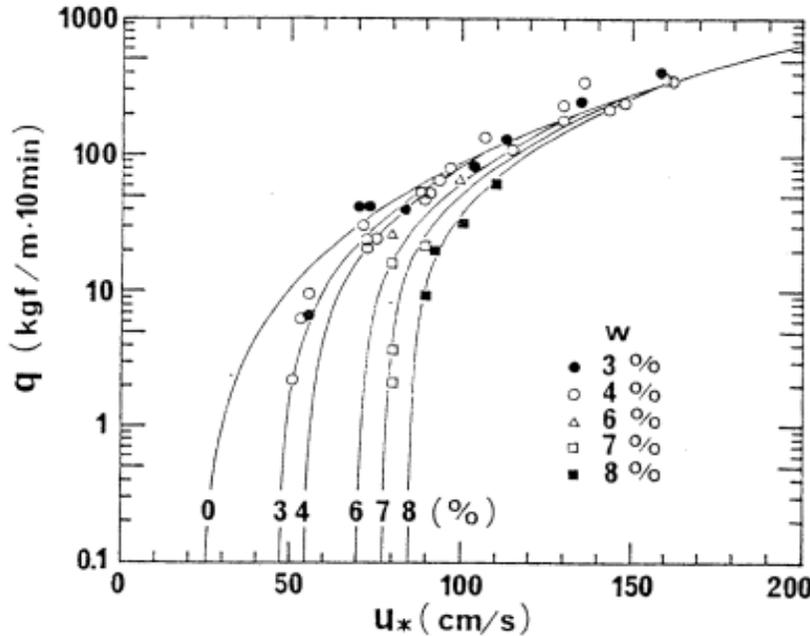


図1 横流れ飛砂速度と湿分の関係^{注1}

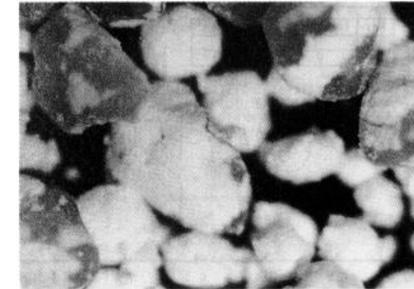


Fig. 9 Adhesion of fine particles to coarse particles

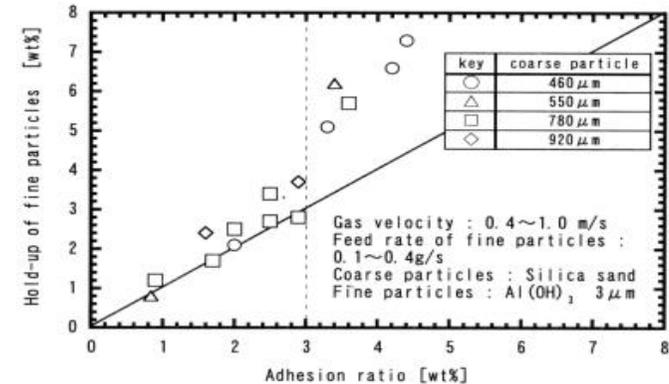


図2 ガス上昇流による粒子飛び出しと湿分との関係^{注2}

注1: 堀川他、湿砂面上における飛砂についての研究、第31回海岸工学後援会論文集(1984)

注2: 種田他、粉粒流動層の微粒子ホールドアップと凝集に関する研究、化学工学論文集、第24巻、第1号(1998)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

a.文献調査（粉状燃料デブリの挙動）(7/7)

(v) 粉状燃料デブリと凝集

ガス中において、粒子同士が衝突し、粗大化する凝集事象については、ブラウン運動に基づく拡散凝集が一般的である。凝集事象と凝集速度定数の評価式の例を図1に、凝集定数を算出した例を表1に示す。凝集による粒子数濃度の変化は、粒子rの凝集定数をkとすると、次式で計算される。

$$dn/dt = -K \cdot n^2$$

10 μmの代表数密度条件の概算例を図2に示す。粒子数が10%低下するまでに、数十秒以上の時間を有する。これは、粒子の収納缶内の滞在時間よりも非常に長いので、凝集効果は無視できると判断される。

【粒状燃料デブリと凝集に関する文献調査】

表1 凝集速度定数例

2粒子間の凝集定数
 $K(r_1, r_2) \times 10^{10} [\text{cm}^3/\text{s}]$

| r_1 [μm] | r_2 [μm] | | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|-----------|-----|-----|
| | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} | 1 | 10 |
| 10^{-3} | 4.5 | | | | |
| 10^{-2} | 440 | 12 | | | |
| 10^{-1} | 1.2×10^3 | 180 | 5 | | |
| 1 | 1.6×10^5 | 1.7×10^3 | 32 | 3.2 | |
| 10 | 1.6×10^6 | 1.8×10^4 | 280 | 17 | 3.0 |

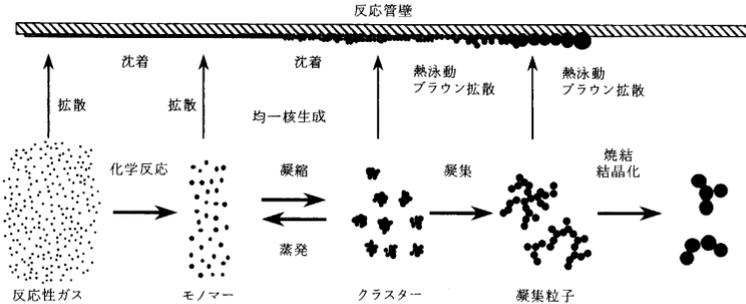


図1 エアロゾルプロセスでの微粒子の生成過程

表1 遷移領域における2つの非球形粒子(i, j)の凝集速度関数β

$$\beta = 2\pi (d_{ci} + d_{cj}) (D_i + D_j) \left[\frac{1 + Kn_D}{1 + 2Kn_D(1 + Kn_D)} \right]$$

d_c : 粒子の衝突直径; $d_{ci} \approx d_{mi}$, d_m : 電気移動度径
 D : 拡散係数; $D_i = \frac{\kappa T C_c}{3\pi\eta d_{mi}}$, C_{ci} : カニンガムの補正係数; $C_{ci} = C_c(Kn_i)$
 κ : ボルツマン定数, T : 温度
 Kn : クヌーセン数; $Kn_i = \frac{2\lambda}{d_{mi}}$, λ : 媒体分子の平均自由行程
 Kn_D : 粒子の拡散クヌーセン数; $Kn_D = \frac{2\lambda_{ij}}{d_{ci} + d_{cj}}$
 λ_{ij} : 粒子の拡散平均自由行程; $\lambda_{ij} = \frac{(D_i + D_j)}{\sqrt{12\kappa T (d_{ci}^{-3} + d_{cj}^{-3}) / (\pi^2 \rho_p)}}$
 d_v : 粒子の体積相当径, ρ_p : 粒子物質のバルク密度

図1 凝集事象と凝集速度定数の評価式の例^{注1}

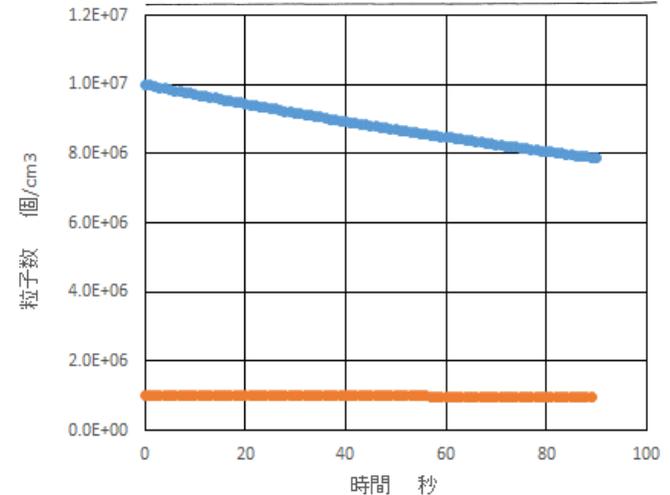


図2 凝集事象による粒子数時間変化

注1: 中曾他、凝集粒子の生成・成長過程のシミュレーション、エアロゾル研究 15 (3)、226~233 (2000)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b.粉体の挙動評価方法の検討(1/33)

(i) 評価フロー

フィルタへの粉体到達量の評価フローを以下に示す。

- ①乾燥条件決定
- ②粉状燃料デブリ温度、含水率分時間変化(手計算)
- ③ガス流れ流動解析

粉状燃料デブリ、内容器・収納缶・スラッジ層表面温度、水蒸気発生速度、温風境界条件をインプットとして、定常解析を実施し、ガス流れ、温度、水蒸気濃度分布を計算する。

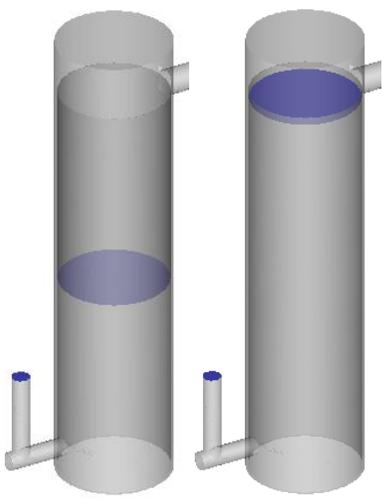
④粉状燃料デブリ飛散速度

粉状燃料デブリ層表面ガス流速より、ガス横流れ飛砂による飛散速度を求める。

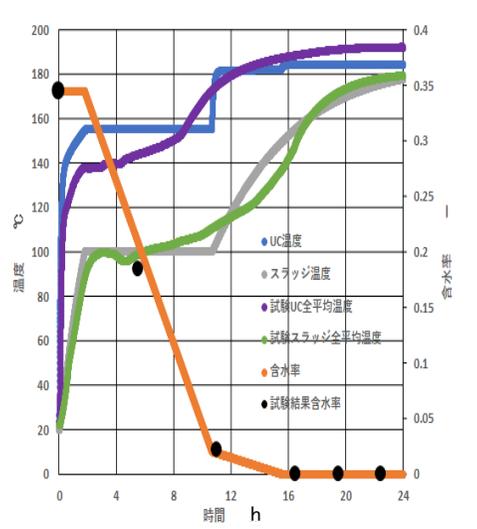
②の手計算で求めた水蒸気発生速度より、水蒸気上昇流による粒子飛び出し速度を求める。

⑤粉状燃料デブリ濃度分布、フィルタ部粉状燃料デブリ到達質量流量(g/h)を求める。

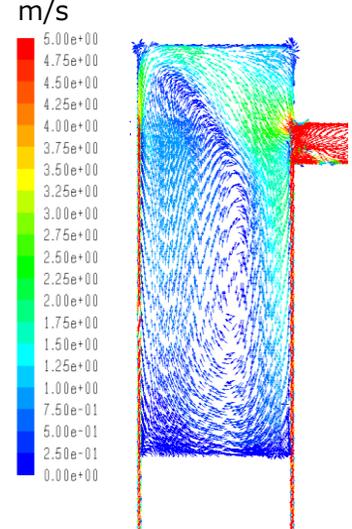
④で設定した粉状燃料デブリ飛散速度、直径、密度をインプットして、粉状燃料デブリの定常濃度分布を計算する。



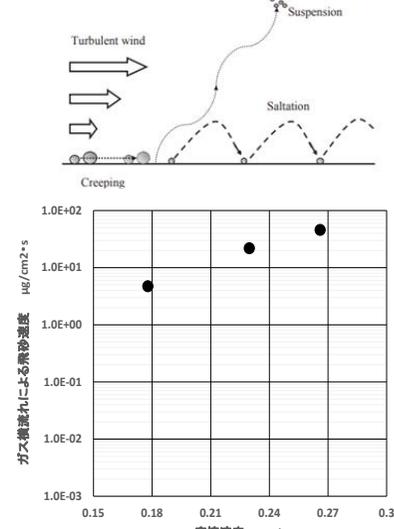
①乾燥条件



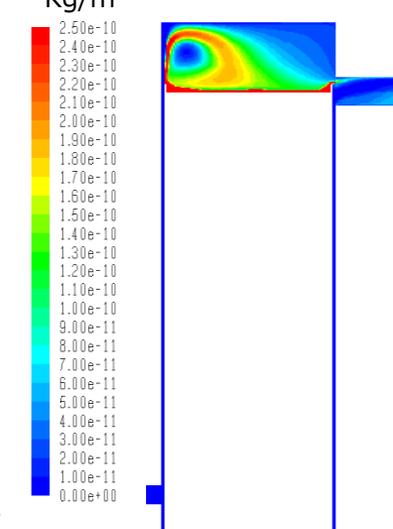
②粉状燃料デブリ温度・含水率時間変化



③ガス流れ熱流動解析



④飛散速度



⑤粉状燃料デブリ解析

図1 粉状燃料デブリの挙動の評価フロー

【フィルタへの粉体到達量の評価フロー】

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b.粉体の挙動評価方法の検討(2/33)

(ii) スラッジのマスバランスの評価

収納缶内ガス相に飛散したスラッジのマスバランスに着目する。
 ガス相に飛散するスラッジ飛散速度を $M_{in}(g/s)$ とすると
 このスラッジは収納缶内のガス流れに乗って、一様になると考える。
 ガス相におけるスラッジ濃度は、スラッジを舞い上げるガス流量に
 依存する。

壁面への拡散沈着速度(g/s)は、内容器断面積(m^2)、スラッジ濃度
 (kg/m^3)、拡散沈着速度の関数である。

スラッジを舞い上げるガス流量は温風流量に比例倍するとして、拡散
 沈着量を計算した。感度解析の位置づけで、スラッジ飛散速度は $1g/s$
 とした。拡散沈着量は、飛散速度と比較して、非常に小さいので、
 飛散したスラッジ粒子のマスバランス評価上、無視することができる。

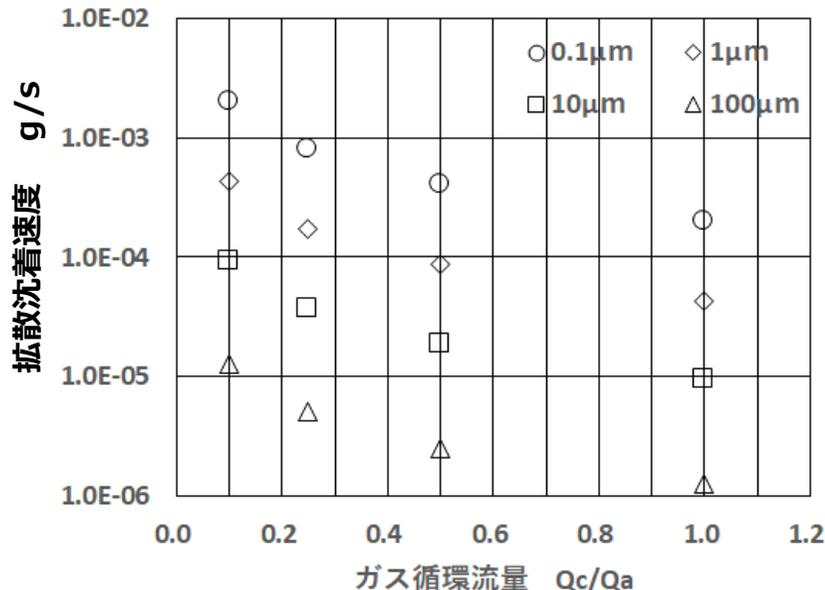


図1 飛散スラッジのマスバランス

【スラッジのマスバランス評価方法】 No.93

マスバランスモデル: フィルタ部へのスラッジ到達質量流量

$$Q \times C_m = M_{in} - A_w \times V_d \times C_m - A_t \times V_t \times C_m$$

フィルタ部スラッジ到達質量流量 (kg/s) : $Q \times C_m$

C_m : スラッジ平均濃度 (kg/m^3)

Q : 排気風量 (m^3/s)

M_{in} : スラッジ飛散速度 (kg/s)

A_w : 内容器側面面積 (m^2)

V_d : 拡散沈着速度 (m/s)

A_t : 内容器スラッジ上方内面積 (m^2)

V_t : 終端速度 (m/s)

スラッジ平均濃度: $C_m = M_d / V_0$

V_0 : 内容器スラッジ上部体積 (m^3)

M_d : ガス中スラッジ粉質量 (kg)

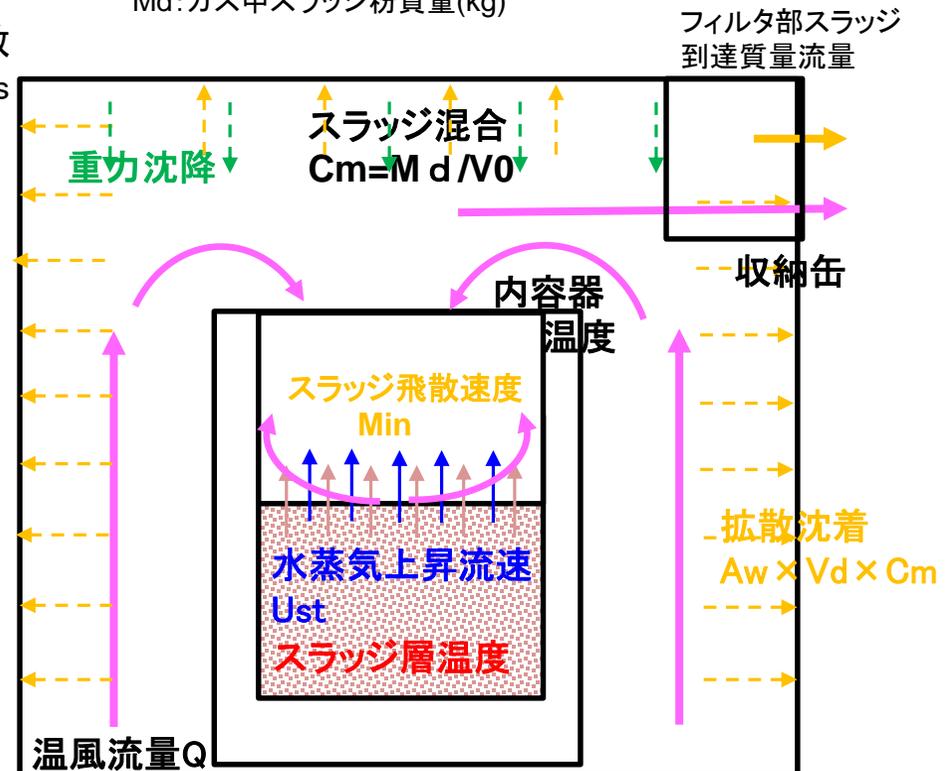


図2 手計算モデル

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b.粉体の挙動評価方法の検討(3/33)

(iii) 内容器、スラッジ温度、含水率時間変化(1/2)

| | 内容器熱収支 | スラッジ熱収支・含水率 |
|--|---|---|
| [1]共通条件 | ヒータ加熱、収納缶側面温度 T_h 200°C、温風ガス流入温度 T_g 200°C、流量一定 | |
| [2]昇温過程 スラッジ温度 100°C以下 | (1)内容器熱収支(温度 T_1) ①収納缶側面から内容器へのふく射伝熱 ②温風による対流熱伝達 ③内容器からスラッジへの対流熱伝達 ④内容器スラッジ上方面からスラッジ層表面へのふく射伝熱 | (1)スラッジ熱収支(温度 T_s) ③内容器からスラッジへの対流熱伝達 ④内容器からスラッジへのふく射伝熱 ⑤スラッジ層表面での対流熱伝達 (2)スラッジ含水率 スラッジ温度100°Cまでは内容器からの受熱量に応じて昇温 |
| [3]定率乾燥 ・スラッジ温度 100°C以上 ・含水率 10%以上 ^{注1} | (1)内容器熱収支 同上、ただし、③内容器からスラッジへの対流熱を変更 | (1)スラッジ熱収支 スラッジ温度100°C固定 (2)スラッジ含水率 ⑥内容器からスラッジへの伝熱量に応じて水蒸気発生、含水率減少 |
| [4]減率乾燥 ・含水率 10%以下 ^{注1} | (1)内容器熱収支 同上、ただし、③内容器からスラッジ乾燥層への対流熱を変更 スラッジ乾燥層から含水層への対流熱を設定 | (1)スラッジ熱収支 内容器からスラッジ乾燥層への対流熱を変更 伝熱量に応じて、スラッジ昇温 (2)スラッジ含水率 内容器からスラッジ含水層への伝熱量に応じて水蒸気発生、含水率減少 |
| [5]乾燥後 ・含水率 0% | (1)内容器熱収支 上記③内容器からスラッジ乾燥層への対流熱を維持 スラッジ乾燥層から含水層への対流熱はゼロ | (1)スラッジ熱収支 内容器からスラッジ乾燥層へ伝熱量に応じて、スラッジ層昇温 (2)スラッジ含水率 内容器からスラッジ含水層への伝熱量はゼロ、含水率ゼロ |



図1 熱収支モデル

Ta:外気、Th:収納缶側面温度、T1:内容器温度、Ts:スラッジ温度、Tg:温風入口温度

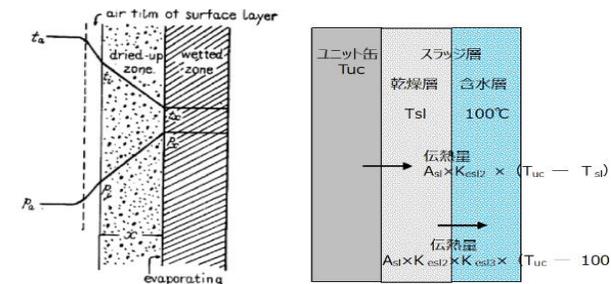


Fig. 8 Schematic model of evaporating surface of bed in the second falling rate period

図4 減率乾燥過程におけるユニット缶からスラッジへの熱移動

図2 含水層熱通過モデル^{注2}

注1: 試験結果より判断

注2: 桐栄他、粒体及び粉体材料層の減率乾燥速度解析、化学工学、第29巻、第10号(1965)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【温度、水蒸気上昇流速、含水率の評価結果】

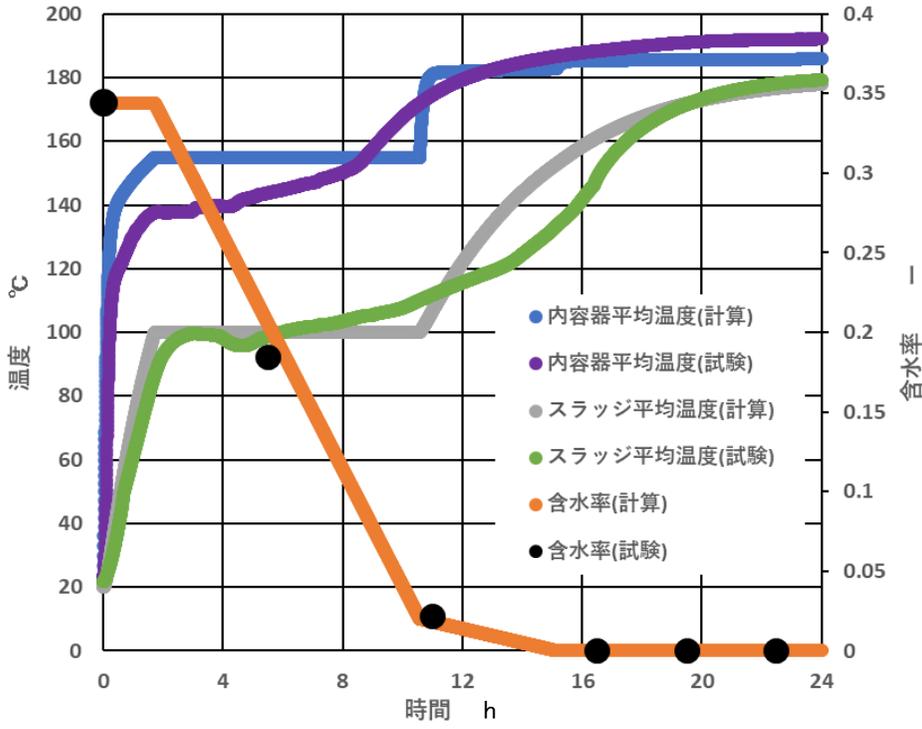
b.粉体の挙動評価方法の検討(4/33)

(iii) 内容器、スラッジ温度、含水率時間変化(2/2)

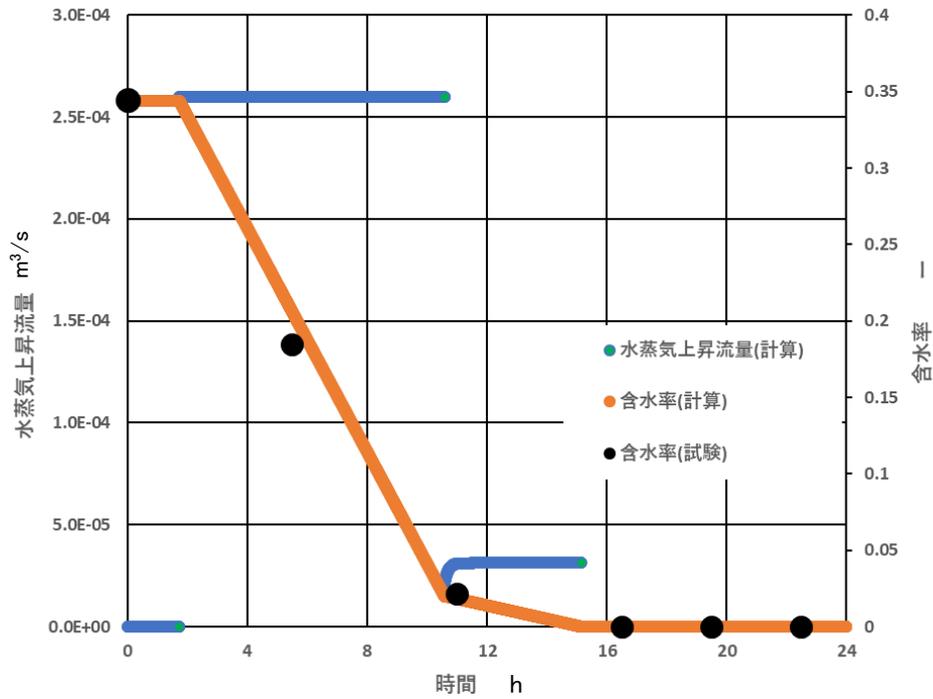
調整因子である内容器とスラッジ層間の等価熱通過率は、昇温時 $120\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、定率乾燥時 $120\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、減率乾燥時 $4\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ で、一般的な乾燥特性と同様の値であった。

今後、実規模収納缶を用いた検証試験を対象に、マスバランスモデルの不確かさを確認する。

実機評価では、スラリー種類、高さ、含水率を変えたケーススタディを実施する。



(1) スラッジ層、内容器温度と含水率の時間変化



(2) 含水率と水蒸気上昇流速の時間変化

図1 収納缶(乾燥)PJ 実規模乾燥試験(スラッジ高さ400mm)内容器・スラリー温度、含水率手計算結果

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【粉状燃料デブリ挙動解析条件】

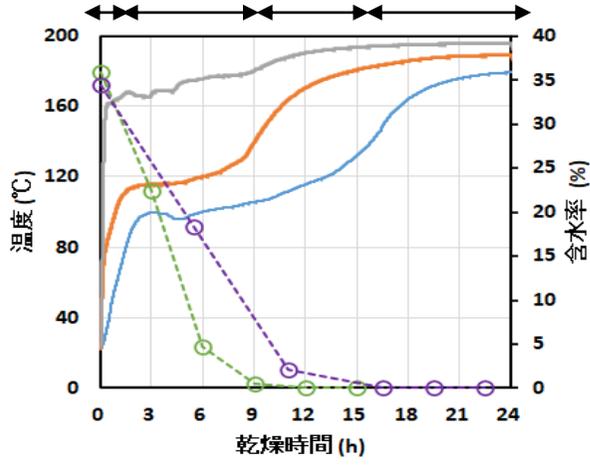
b. 粉体の挙動評価方法の検討(5/33)

(iv) 流動解析(1/5) 先行している収納缶(乾燥)PJでは、実規模収納缶を用いて、スラリー・スラッジ(珪砂)の乾燥試験を実施しており、このケースを代表条件として、ガス熱流動、スラッジ飛散有無並びにフィルタ部スラッジ到達有無を事前確認する。試験はスラッジ高さ400mmであるが、高さ影響を把握するため、785mmの仮想ケースの評価も実施した。

表1 解析条件^{注1}

| 乾燥過程 | スラッジ高さ785mm | | | スラッジ高さ400mm | | |
|-------------------|-------------|--------|-----|-------------|--------|-----|
| | 定率乾燥 | 減率乾燥 | 乾燥後 | 定率乾燥 | 減率乾燥 | 乾燥後 |
| スラッジ高さmm | 785 | | | 400 | | |
| 内容器/スラッジ高さ温度 °C | 120 | 180 | 180 | 120 | 180 | 180 |
| 内容器/上部温度 °C | 170 | 190 | 190 | 170 | 190 | 190 |
| スラッジ表面温度 °C | 100 | 130 | 130 | 100 | 130 | 130 |
| 水蒸気流入温度 °C | | | | | | |
| 収納缶内面温度 °C | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| スラッジ表面水蒸気上昇流速 m/s | 0.0101 | 0.0012 | 0 | 0.0084 | 0.0012 | 0 |

①昇温 ②定率乾燥 ③減率乾燥 ④乾燥後



注1:スラッジ高さ400mmの各数値は、試験結果(左記グラフ)から設定。
スラッジ高さ785mmの各温度は、400mmの数値を参照。スラッジ表面水蒸気上昇流速は、200mmと400mmの含水率から外挿評価。

— スラッジ平均温度
— 内容器平均温度(スラッジ範囲)
— 内容器平均温度(スラッジ上方)
-○- 含水率(200mm)
-○- 含水率(400mm)
各表示温度の説明はNo.82に示す。
含水率は充填高さ200mm条件の結果も併記する。

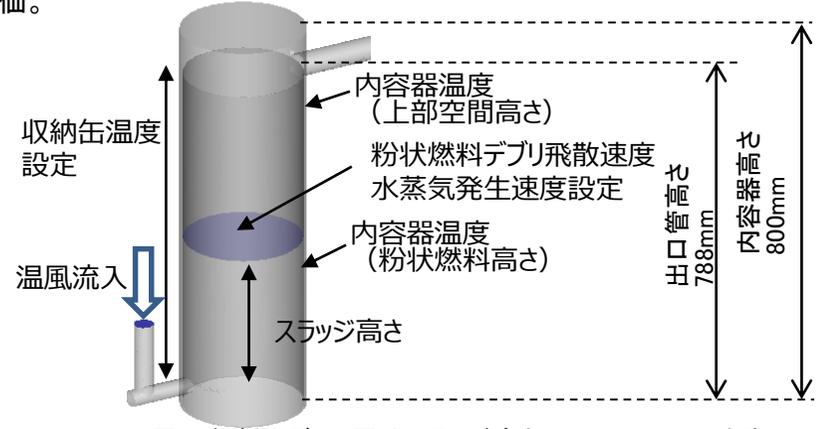
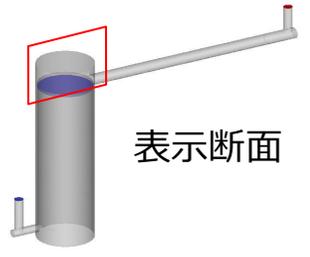


図2 解析モデル(図はスラッジ高さ400mmのケースを表示)

図1 乾燥試験結果(充填高さ400mm条件における温度履歴と含水率)

【流動解析結果：スラッジ高さ785mm】



6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討 (6/33)

(iv) 流動解析 (2/5)

- ◆ スラッジ層上部空間では、出口配管に向かうガス流れと循環流が形成されている。乾燥中は、スラッジ表面から上昇する水蒸気により、循環流は遅い。
- ◆ 乾燥中は循環流が遅いことからスラッジ層上部空間の温度分布が成層化し、低温ガスがスラッジ表面に滞留する。

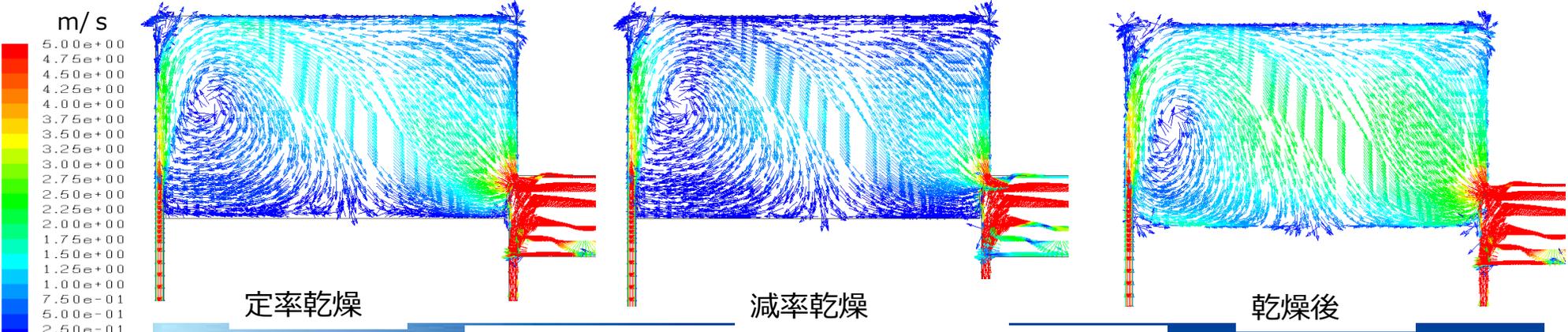
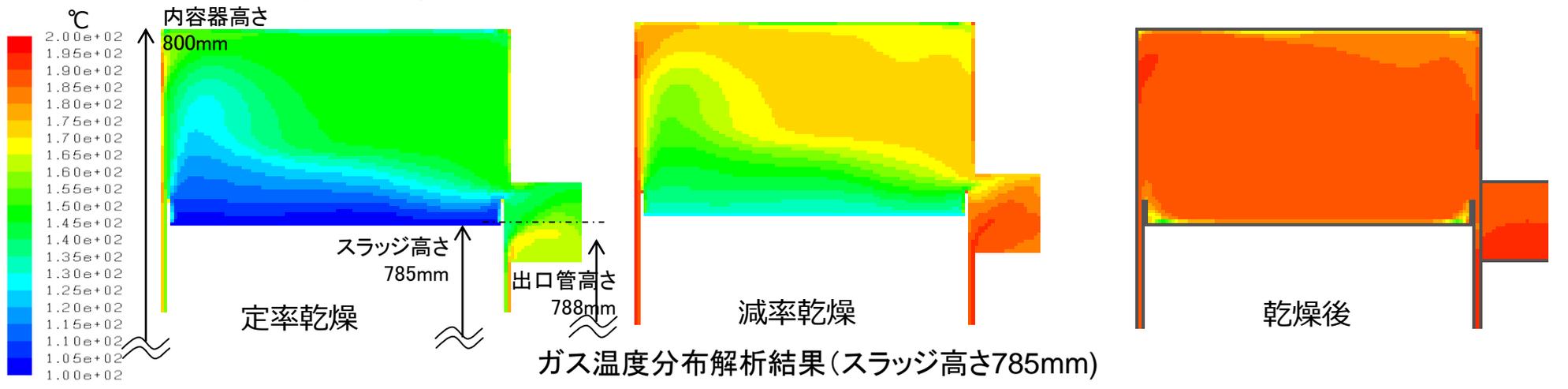


図1 ガス流速分布解析結果 (スラッジ高さ785mm)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(7/33)

(iv) 流動解析(3/5)

スラッジ高さ785mmと400mmを比較すると、785mmの方がスラッジ上方空間における循環流が強く、スラッジ表面での平均流速は0.28m/s程度であり、掃流限界流速より速い。

【粉状燃料デブリ挙動解析結果】

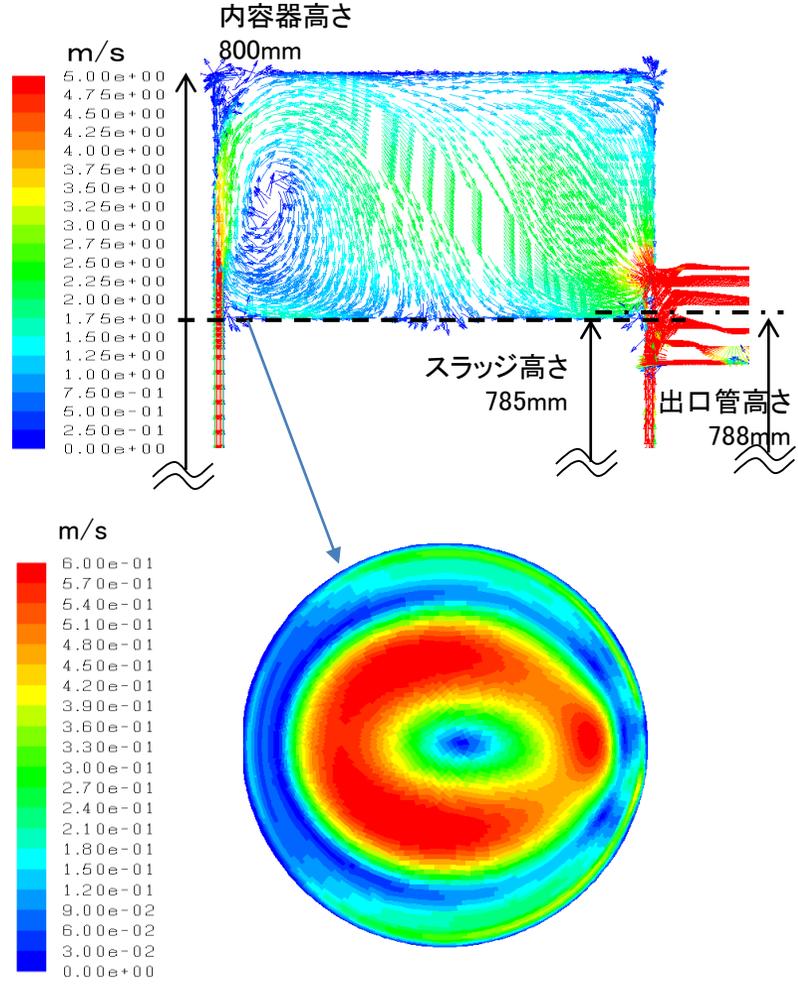


図1 流速分布;乾燥後 スラッジ高さ785mm

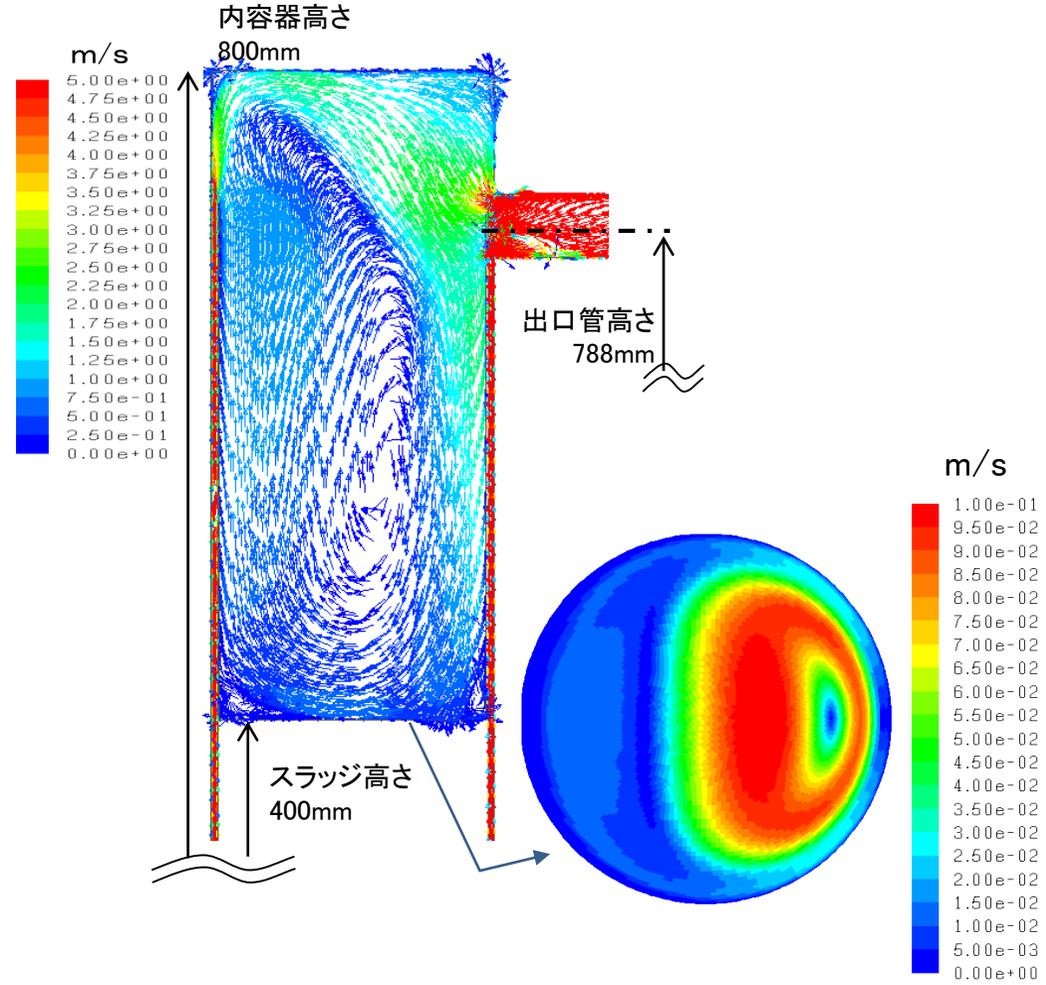


図2 流速分布;乾燥後 スラッジ高さ400mm

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(8/33)

(iv) 流動解析(4/5)

【粉状燃料デブリ挙動解析結果】

表1 粉状燃料デブリ飛散速度

| | スラッジ高さ785mm | | | スラッジ高さ400mm | | |
|--|--|---|-------------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| | 定率乾燥 | 減率乾燥 | 乾燥後 | 定率乾燥 | 減率乾燥 | 乾燥後 |
| スラッジ表層平均流速m/s、(摩擦速度m/s) | 0.024 | 0.023 | 0.28 (0.175) | 0.01 | 0.003 | 0.1 (0.06) |
| 水蒸気上昇流m/s | 0.0101 | 0.0012 | — | 0.0084 | 0.0012 | — |
| 横流れ飛散速度 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$ 粒径100 μm 、密度2.6 g/cm^3 粒径10 μm 、密度2.6 g/cm^3 粒径1 μm 、密度2.6 g/cm^3 | スラッジ表面からの水蒸気上昇流があるケースでは表面に摩擦速度が生じないため、横流れによる粒子飛散は計算上発生しない。 | | | スラッジ表面からの水蒸気上昇流があるケースでは表面に摩擦速度が生じないため、横流れによる粒子飛散は計算上発生しない。 | | |
| 飛び出し飛散速度 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$ 粒径100 μm 、密度2.6 g/cm^3 粒径10 μm 、密度2.6 g/cm^3 粒径1 μm 、密度2.6 g/cm^3 | 飛散しない 3.69×10^{-1} 1.10×10^{-2} | 飛散しない 飛散しない 3.38×10^{-4} | スラッジ表面からの水蒸気発生がないため、表面からの粒子飛び出しはなし。 | 飛散しない 1.38×10^{-1} 7.87×10^{-3} | 飛散しない 飛散しない 3.36×10^{-4} | スラッジ表面からの水蒸気発生がないため、表面からの粒子飛び出しはなし。 |

「飛び出し飛散速度」については、10 μm 以上では飛ばないケースもあることから、1 μm を代表粒子径とする。

ここで、減率乾燥ケースはスラッジ飛散量が少ないので、定率乾燥785mm(ケース1)、400mm(ケース2)を対象とする。

「横流れ飛散速度」については、スラッジ高さ400mmではいずれの粒子径も飛散しない。スラッジ高さ785mmでは、乾燥後の条件で掃流限界流速の小さい100 μm のみ飛散することから、スラッジ高さ785mm、100 μm ・減率乾燥を対象とする。(ケース3)

飛散する100 μm 粒子の粒径分布に1 μm も含まれるとして、保守的に1 μm も100 μm と同じ掃流限界速度だと考え、ケース3に対して粒子径を1 μm としたケースを実施する。(ケース4)

スラッジ飛散評価予備解析ケース

ケース1; 定率乾燥785mm、粒子径1 μm 、飛散量 $1.10 \times 10^{-2} [\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$

ケース2; 定率乾燥400mm、粒子径1 μm 、飛散量 $7.87 \times 10^{-3} [\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$

ケース3; 乾燥後785mm、粒子径100 μm 、飛散量 $4.22 [\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$

ケース4; 乾燥後785mm、粒子径1 μm 、飛散量 $4.22 [\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b.粉体の挙動評価方法の検討(9/33)

(iv) 流動解析(5/5)

【粉状燃料デブリ挙動解析結果】

- ①定率乾燥時、スラッジ層表面は、温度成層で、ガス流速が遅いが、スラッジ高さが785mmと高い場合、
1 μmの比較的小さい粒子はフィルタ部に到達する。
- ②定率乾燥時、スラッジ高さが400mmと低い場合、フィルタ部に到達する粒子量は非常に少ない。
- ③乾燥後、スラッジ高さが高い場合(785mm)、100 μmの比較的大きい粒子がフィルタ部に到達する。

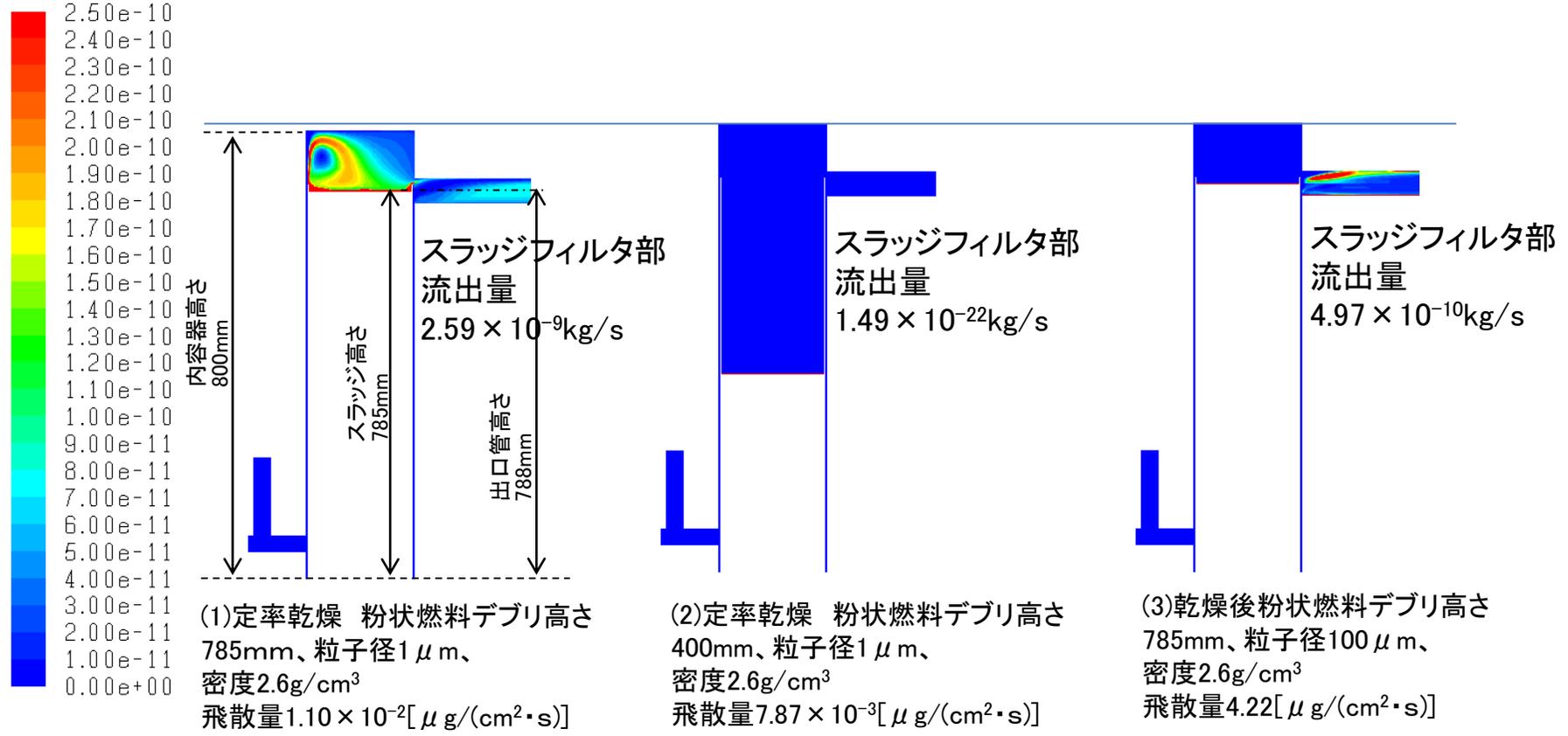


図1 粉状燃料デブリ濃度分布(kg/m³)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(10/33)

(v) 要素試験(1/14) イ.基本計画(1/7)

【評価対象燃料デブリ】

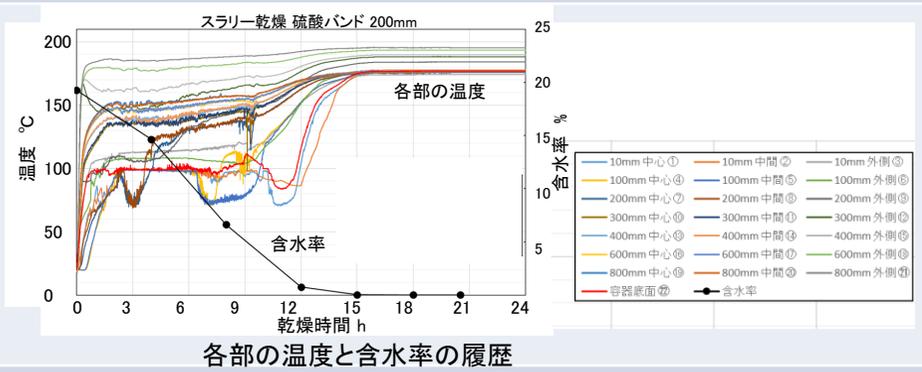
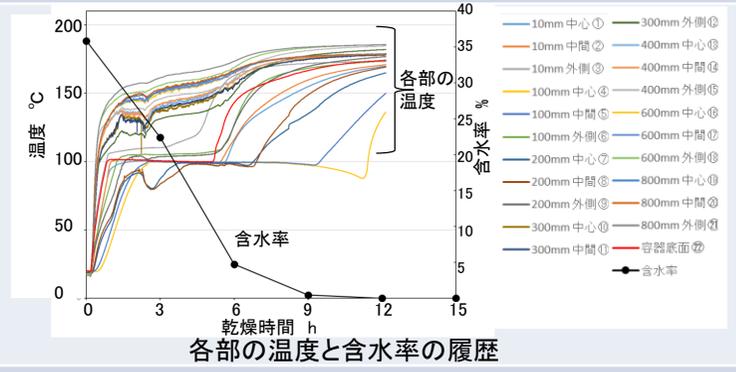
粉状燃料デブリ及び随伴物の挙動の解明が目的であるため、実機規模収納缶乾燥試験で、飛散挙動が予想される、または、飛散挙動が確認された、粒子状燃料デブリ(珪砂)と粉状燃料デブリ(凝集剤)を対象とする。

| 粒子状燃料デブリ(珪砂) | | 備考 | |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--|
| 珪砂 7号 | z=200mm 4740g + 400g | 7号・8号を50%ずつ混合 上澄みが多かったため | |
| 珪砂 8号 | 4740g + 400g | 各400g追加 合計10280g | |
| 水 | 3380g | 先入れ | |
| 充填量 Total (計算) | 13660g | | |
| 初期含水率 | 33% | | |

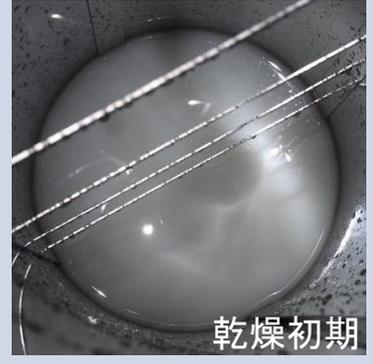
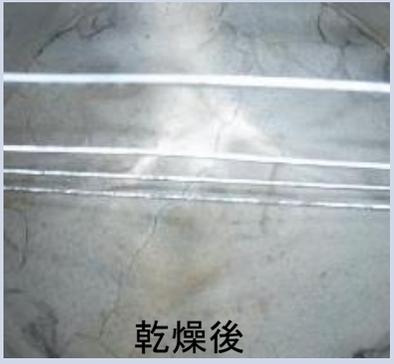
| 粉状燃料デブリ(凝集剤) | |
|--------------------|---------|
| 初期条件 | |
| スラリー重量 | 7422g |
| 絶乾重量 ^{注1} | 367.9g |
| 含水量 | 7054.1g |
| 含水率 (含水/絶乾) | 1917% |
| 含水率 (含水/総重量) | 95% |

注1: 水酸化アルミニウム換算での絶乾重量

乾燥特性



結果



6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【要素試験基本計画】

b. 粉体の挙動評価方法の検討(11/33)

(v) 要素試験(2/14) イ.基本計画(2/7)

粉状燃料デブリ及び随伴物の挙動の解明が目的であるので、実機規模収納缶乾燥試験で、飛散挙動が予想される、または、飛散挙動が確認された、粒子状燃料デブリ(珪砂)と粉状燃料デブリ(凝集剤)を対象とする。

実機条件における飛散速度の取得を目的に、実機規模収納缶を用いて粒状燃料デブリ飛散試験を実施する。飛散速度に着目し、スラッジ最高高さ800mm相当での試験を中心に実施し、他の条件は、解析で評価する。

微小重粒子の飛散特性データは、ビーカースケール試験で取得する。

表1 要素試験基本計画

| 乾燥対象 | 既存概念 | 試験形態 | 項目 | 目的／概要 | 取得データ |
|-----------|------|----------|------------------|---|---------------------|
| スラリー・スラッジ | | 実規模試験 | 温度の乾燥特性 | 現状想定されるスラリーを用いて、 <u>最大スラッジ高さ条件を主体に、乾燥特性データ並びにスラッジ飛散量、粒径分布データ</u> を取得する。 | 温度vs含水率 |
| | | | スラッジ飛散特性 | | 温度vs含水率vs粉状粒子飛散量・粒径 |
| | | 実規模解析 | 設計条件変更時、スラッジ飛散特性 | 乾燥物種類、スラッジ高さによるスラッジ到達量を確認 | スラッジ高さvs粉状粒子到達量 |
| | | ビーカースケール | スラッジ飛散特性 | 小さい、重い粒子の飛散特性 | 温度vs含水率vs粉状粒子飛散量・粒径 |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

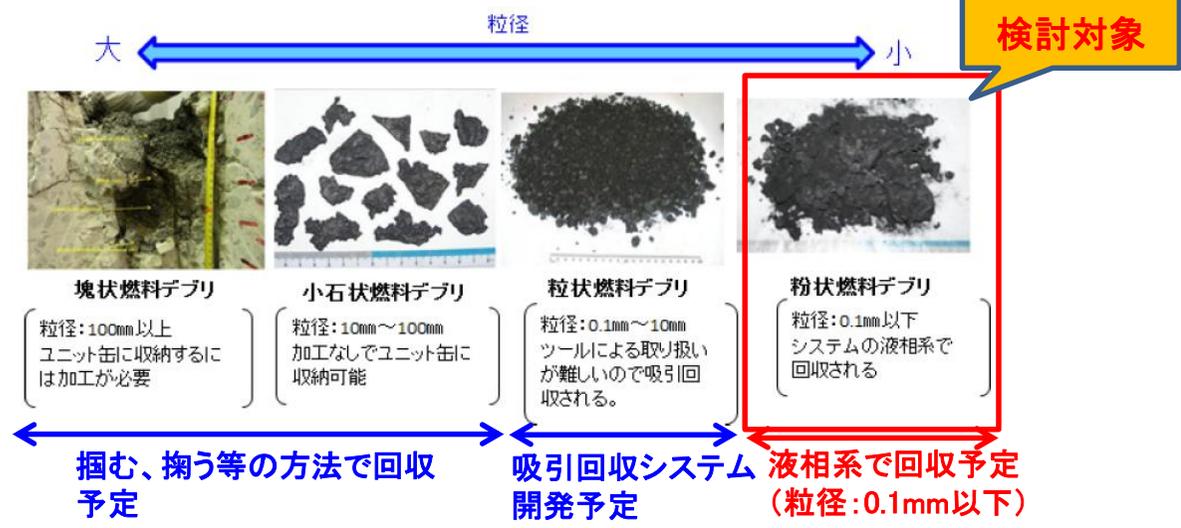
b. 粉体の挙動評価方法の検討(12/33)

(v) 要素試験(3/14) イ.基本計画(3/7)

【乾燥対象物】

【乾燥対象物】(1/3)

- ・収納缶(乾燥)PJでの実機規模収納缶スラリー・スラッジ試験にて、抽出された乾燥対象物を選定する。
- ・乾燥時のスラリー・スラッジ層表面のガス流れを踏まえ、飛散速度が大きいと考えられるものを対象物として、選定する。



| | a.凝集沈殿物(粒子・粉状) | b.凝集剤沈殿物(液状主体) | c.その他粒子 |
|------|--|--|---|
| 種類 | 粉状粒子に着目 0.1 μm ~ 100 μm 密度 1g/cm ³ | 凝集剤(液状)突沸に着目 | 中性子吸収材、粉状MCC生成物破片材、燃料デブリ切りくず 0.1 μm ~ 100 μm 密度 2.1 ~ 7.95g/cc |
| 形態 | 収納缶 + 内容器 + 温風・ヒータ加熱 | | |
| サンプル |  サンプル;凝集沈殿物(粒子・粉状) |  サンプル;凝集剤沈殿物(液状主体) |  サンプル;その他粒子 |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【乾燥対象物】

b.粉体の挙動評価方法の検討(13/33)

(v) 要素試験(4/14) イ.基本計画(4/7)

粉状燃料デブリは、文献調査より、横流れでは、乾燥後に100μmの粒子が飛散しやすい。
 粒子飛び出しでは、定率乾燥時、10μm以下の粒子が飛散しやすい。
 飛散量(絶対量)は、乾燥後、横流れによる飛砂100μmの条件が大きい。
 また、定率乾燥時、燃料デブリは湿っているので、水蒸気上昇流による粒子飛び出しは抑制されると考えられる。
 従って、平均粒径100μmの珪砂を対象に飛散評価を行い、この結果をもとに、乾燥対象物を検討する。

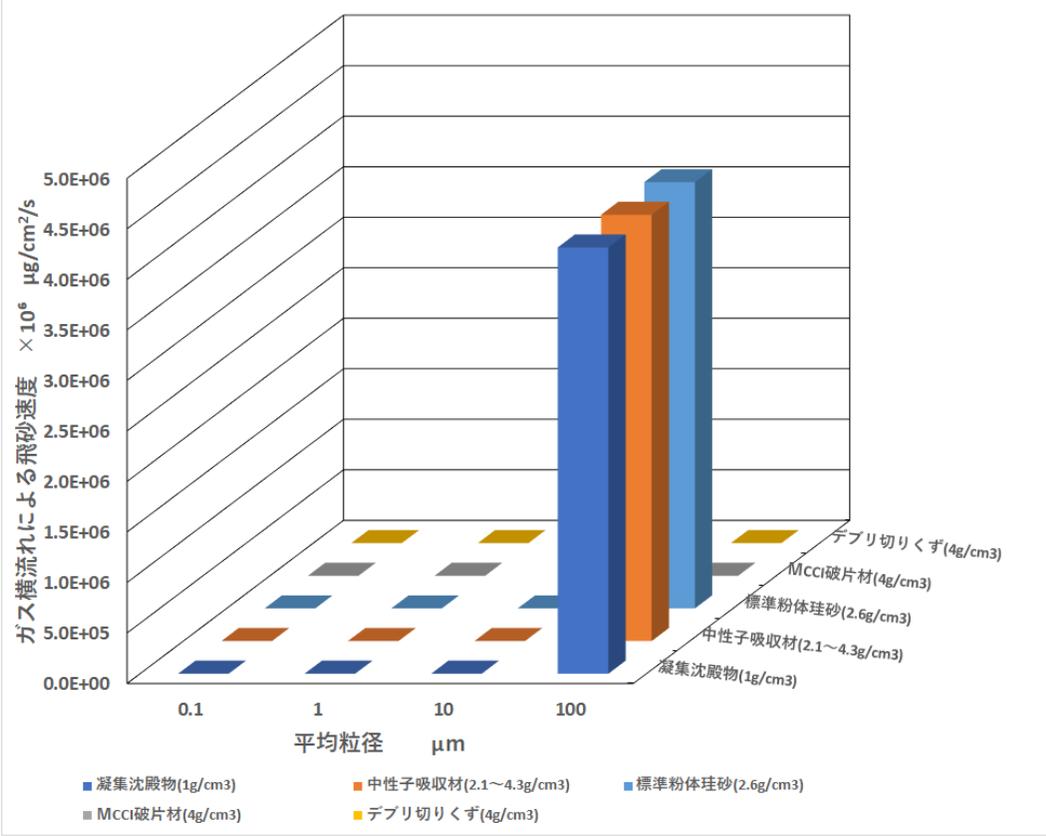
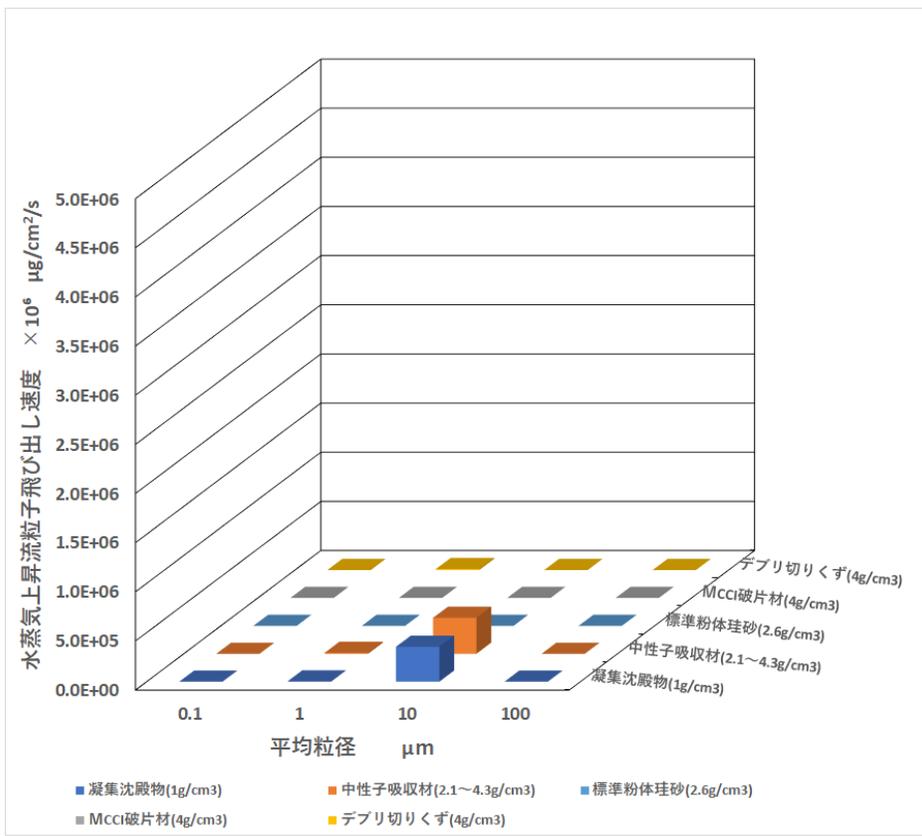


図1 粉状燃料デブリ飛散特性(水蒸気上昇流速、横流れガス流速)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【乾燥対象物】

b.粉体の挙動評価方法の検討(14/33)

(v) 要素試験(5/14) イ.基本計画(5/7)

○実機規模収納缶乾燥試験で使用する標準粉体

粉状燃料デブリとして、抽出された燃料デブリの特性を下表に示す。ガス相への飛散しやすさの評価の観点で、試験粉体を以下選定した。

第1優先:平均粒径100 μm珪砂(粒子、粉状燃料デブリで一番飛散しやすいと予想)、実機規模試験実施

第2優先:凝集剤(収納缶(乾燥)PJのスラッジ乾燥試験で、飛散を確認)、実機規模試験実施

第3優先:10 μm以下の微細粒子で重い粒子は、飛散しにくいと考えている。ビーカースケール試験で定性的な傾向を確認

注記:第1優先の平均粒径100 μm珪砂が飛散しない場合は平均粒径が10 μm以下の珪砂で実機規模試験実施

ゼオライトは珪砂と密度が近いこと、飛散は粒子間抗力とガス流れの大小関係が影響するが、気孔は飛散に影響しないので対象としない。

表1 試験実施ケース選定案

| 対象スラッジ(No. 注1) | 粒子直径(μm) | 密度(g/cm ³) | 本PJ試験条件(粒子設定)の考え方 |
|---------------------|--------------------|------------------------|--|
| 1 粗取りフィルタ廃液凝集沈殿物 | 数十から100 | 1 | ①収納缶(乾燥)PJにて、使用している珪砂で代表する。 サイズは、飛散速度が大きいと予想される下記条件を選定する。 密度 2.3 g/cm ³ 、平均粒径100 μm |
| 2 フィルタ廃液の凝集沈殿物 | 0.1から数十 | | |
| 3 RO濃縮水凝集沈殿物 | 数 μm | | |
| 5 中性子吸収材 | ~500 ~1 ~100 | 4.3 4.29 2.1 | 重い粒子は飛散しにくいので、①の試験で代表する |
| 6 中性子吸収材 | ~10 | 2.1 | 小さい粒子は飛散しにくいので、①の試験で代表する。 |
| 7 粉状MCCI生成物破片材 | ~0.1 | 3.96から4.05 | 小さい、重い粒子は飛散しにくいので、①の試験で代表する ただし、①の試験で粒子飛散が確認できない場合は、調達できる小さい粒子で試験を行う。 |
| 10 燃料デブリ切りくず | 1 μm以下 1 μm以下 | 3.95 7.93 | ①の試験で、粒子飛散が確認できた場合、 小さい粒子は飛散しにくいことを要素試験(ビーカースケール試験)で確認する。 |



6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【乾燥対象物】(補足)

b. 粉体の挙動評価方法の検討(15/33)

(v) 要素試験(6/14) イ. 基本計画(6/7)

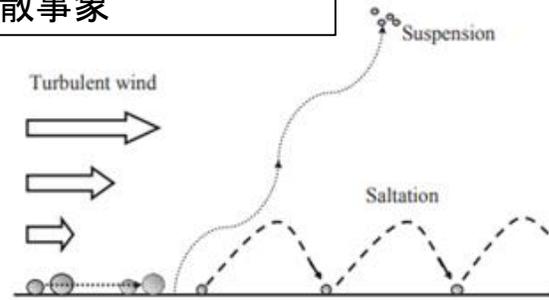
- ・乾燥後、ガス横流れによる粉状燃料デブリ飛砂事象は、100 μmの粒子が飛散しやすい。(掃流限界速度が小さい)
掃流限界速度、飛散速度の試験データは粒子密度1~2.6 g/cm³、粒径10~1000 μmをカバー
粒径が100 μm以下、密度が大きいと飛散しにくい。
- ・乾燥中、水蒸気上昇流による粒子飛び出しでは、10 μm以下が飛散しやすい。
- ・飛散速度絶対値は乾燥後ガス横流れによる飛砂事象が大きい。乾燥中は温度成層でガス流れが遅いので、乾燥後、ガス横流れによる平均粒径100 μm珪砂を代表ケースとする。

横流れによる飛散事象

掃流限界速度 u_{c*} (壁面上で定義)

$$u_{c*} = A_0 \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}$$

A_0 : 定数、 σ : 粒子密度、 ρ : 流体密度、
 d : 粒子直径、 g : 重力加速度



乾燥時、水蒸気上昇流による粒子飛び出し

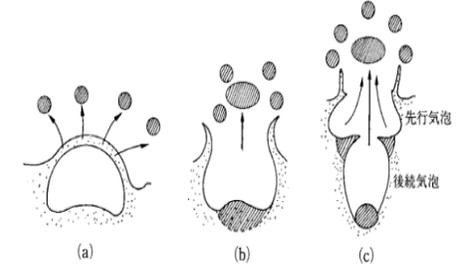


図3-24 粒子の射出形態
△1μm ◇2μm ○5μm □10μm

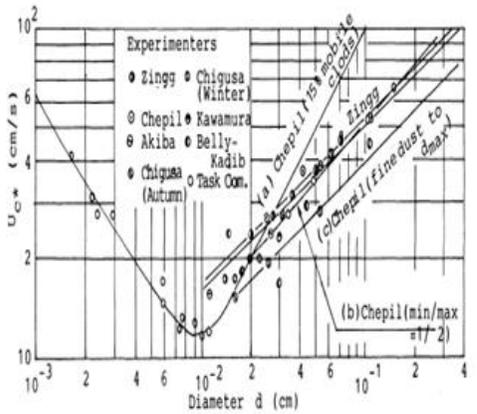


Fig. 1. Change in critical friction velocity of movement as a function of particle diameter.¹⁰⁾

図1 掃流限界速度

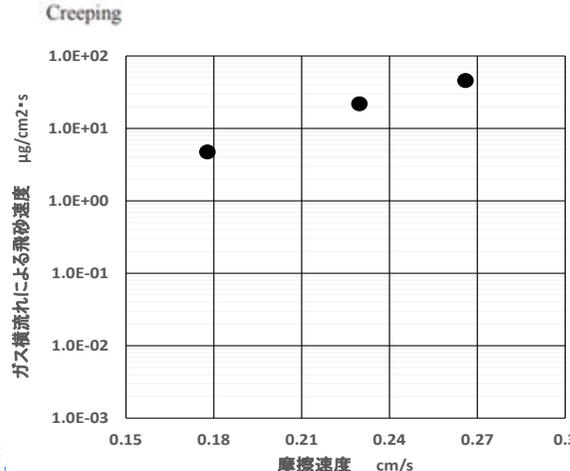


図2 飛砂による飛散速度

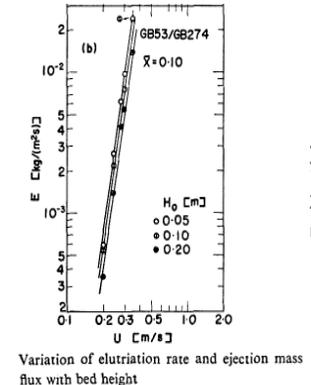


図3 粒子飛び出し飛散速度

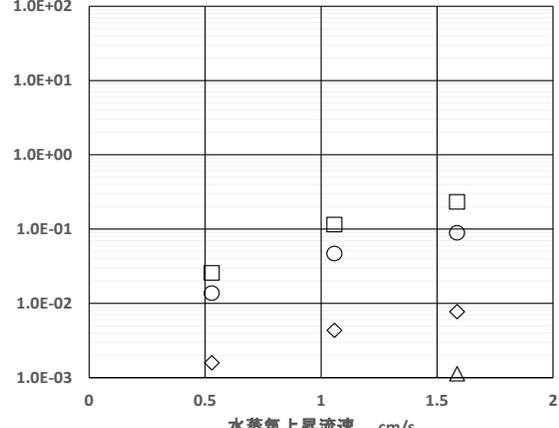


図4 粒子飛び出し飛散速度(乾燥条件)

【試験装置サイズ】

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(16/33)

(v) 要素試験(7/14) イ. 基本計画(7/7)

スラッジ飛散速度は、乾燥過程におけるスラッジ含水率、乾燥層進行、水蒸気上昇流、ガス相横流れ流速の影響を受ける。そのため、試験では、乾燥プロセス、ガス流れを実機模擬する必要があると考える。

試験装置仕様と重要事象の検討結果を下表にまとめる。

収納缶(乾燥)PJで使用している実機規模収納缶を用いて、スラッジ飛散特性を把握し、スラッジ飛散に関わる定性的な傾向を把握するために、小型の要素試験装置を使用する。

表1 スラッジ飛散事象と重要事象

| | 実機規模収納缶乾燥試験 | 要素試験(装置改造)(スラッジ直径が一致) | 要素試験(収納缶(乾燥)PJの現状装置) |
|--------------------|---|--|--|
| 説明図 | | | |
| 仕様 | D220mm, H _{sa} 800mm, H _s ~ 800mm, 水量14kg | D220mm, H _{sa} 200mm, H _s 200mm, 水量3.5kg ヒータ加熱面200℃固定、温風200℃、3m/s | D60mm, H _{sa} 100, H _s 100mm, 水量0.25kg |
| 実機模擬 ^{注1} | ○乾燥層進展 ○横流れ ○水蒸気吹上げ | ○乾燥層進展 △横流れ(パラメータ) ○水蒸気吹上げ(一部模擬) | ×乾燥層進展 △横流れ(パラメータ) ×水蒸気吹上げ |
| 評価 | 実機スラッジ飛散挙動(飛散有無、飛散量)再現可能 本装置を用いて、スラッジ飛散特性データを取得 | スラッジ高さ200mmまで、実機スラッジ飛散挙動を把握可能。200mm以上の試験はできない。 | 実機スラッジ飛散挙動を再現できない スラッジ飛散に関わる定性的な形状を把握 |

注1: ○: 実機再現性良好、△: 実機再現性一部良好、×: 実機再現性無

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【燃料デブリ挙動試験 試験条件】

b. 粉体の挙動評価方法の検討(17/33)

(v) 要素試験(8/14) □.試験条件(1/2)

○試験目的

- ・実規模収納缶方式による乾燥処理過程において、フィルタ部にスラッジが到達する条件を把握する。
例:乾燥終了後にスラッジが飛散する等。
- ・スラッジ含水率、スラッジ温度とスラッジ飛散特性データ(到達量、粒径)を取得する。
- ・ガス相におけるスラッジ移行挙動は解析で評価するとして、スラッジ層からガス相へ飛散するスラッジ量のデータ取得を優先する。

○試験条件

- ・表1に試験条件案を示す。
No.1試験では、平均粒径 $100\mu\text{m}$ の模擬粒子で粉状燃料デブリの飛散量を把握する。スラッジ高さは最大高さ785mmである。この試験で、飛散が確認できた場合、No.2試験では、同じ模擬粒子で、スラッジ高さを400mmに低下して、粉状燃料デブリ飛散が低下することを確認する。
- ・No.2試験で粉状燃料デブリ飛散が確認できなかった場合、平均粒径 $10\mu\text{m}$ 以下、スラッジ高さが785mmの試験を実施する場がある。
- ・先行乾燥試験で、飛散が確認された凝集剤で、飛散量を把握する。スラッジ高さは785mmとする。

表1 試験条件案

| No. | 乾燥物 | スラッジ高さ | 初期含水率 | 代替試験 |
|-----|--|----------------|-------|--|
| 1 | 珪砂7、8号 (密度 $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ 、 平均粒径 $100\mu\text{m}$) | 785mm | 38% | No.1、No.2試験のいずれかで、粉状燃料デブリ飛散が確認できない場合、No.3は、平均粒径 $10\mu\text{m}$ 以下、スラッジ高さ785mm条件での試験を実施する場がある。 |
| 2 | | 400mm | | |
| 3 | | No.1、No.2試験後決定 | | |
| 4 | 凝集剤 (硫酸アルミニウム) | 785mm | 90% | — |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【燃料デブリ挙動試験 試験条件】

b. 粉体の挙動評価方法の検討(18/33)

(v) 要素試験(9/14) □. 試験条件(2/2)

- ①乾燥後、ガス横流れ飛散によって飛散量の多い、平均粒径 $100\mu\text{m}$ の標準粉体(珪砂)で試験を行う。
- ②多くの飛散が確認された凝集剤での試験を行う。
- ③①で飛散が確認できない場合、乾燥時に飛散量が多いと考えられる、平均粒径が $10\mu\text{m}$ の標準粉体(珪砂)で試験を行う。
(No.115参照)

表1 模擬スラッジの選定

| | 標準粉体 | 標準粉体 | 凝集剤 |
|------------------------------|--------|---------|--|
| 材質 | 珪砂7、8号 | 珪砂3種 | 硫酸アルミニウム($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) |
| 平均直径 μm | 53、106 | 6.6~8.6 | |
| 密度(g/cm^3) | 2.6 | 2.6~2.7 | 1.3 |

写真



サンプル(標準粉体 珪砂7、8号)



サンプル(標準粉体 珪砂3種)



サンプル(凝集剤)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(19/33)

(v) 要素試験(10/14) ハ. 試験方法(1/5)

実機規模模擬収納缶を用いてスラッジ乾燥試験を行う。
温風出口配管で、フィルタ付近にて、粒子到達量と粒径分布を計測する。

【実規模試験】

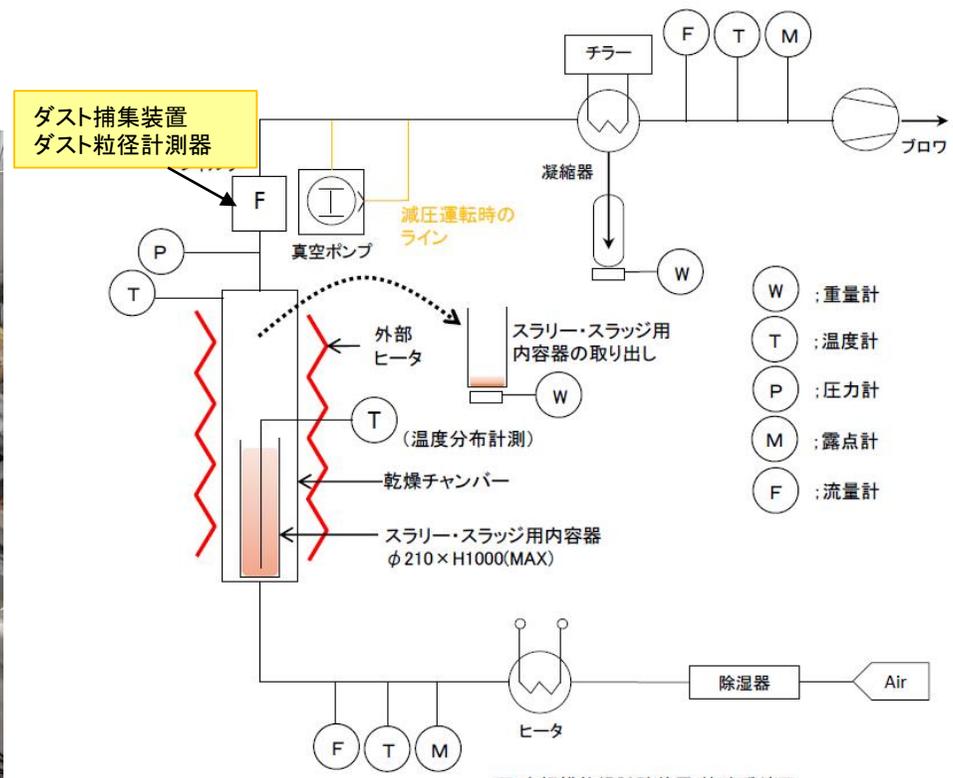


図 実規模乾燥試験装置 簡略系統図

- (試験条件・体系)
- ・温風乾燥
 - ・内容器にスラリーを充填して、収納缶内で乾燥
 - ・乾燥対象:珪砂
凝集沈殿スラリー
 - ・スラリー内部温度/含水率計測
 - ・出口配管でのスラッジ量・直径計測
- (試験パラメータ)
- ・乾燥対象
 - ・スラリー高さ(785mm、最大高さ)



実規模乾燥試験装置 外観

図1 スラッジ飛散量評価試験

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【実規模試験】

b. 粉体の挙動評価方法の検討(20/33)

(v) 要素試験(11/14) ハ. 試験方法(2/5)

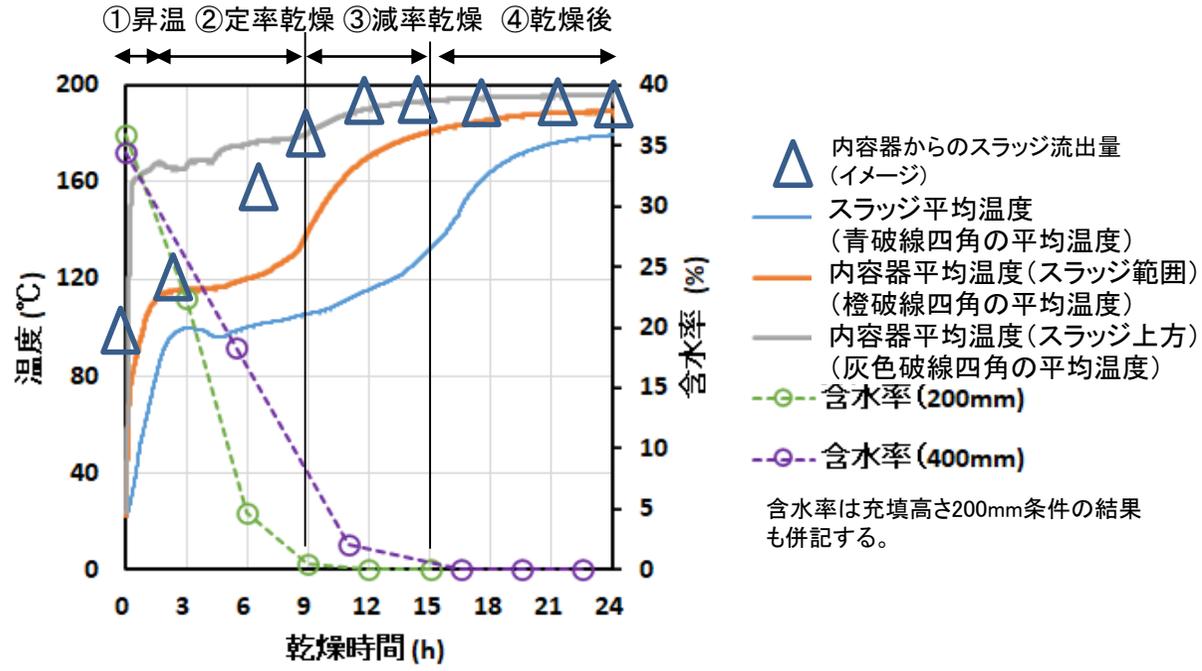
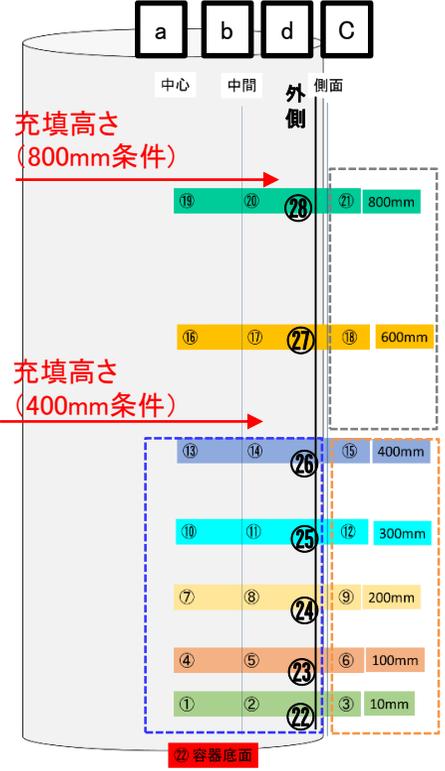
実機規模模擬収納缶を用いてスラッジ乾燥試験を行う。

先行して実施した乾燥試験と比較して、スラッジ内外側温度を追加計測する。

温度時間変化を見て、昇温、定率乾燥、減率乾燥、乾燥後過程において、時間積分した飛散スラッジ量と直径を計測する。

温度計測点の説明

aはスラッジ中心、bは中間、dはスラッジ外側
cは内容器外面を意味する。



乾燥試験結果(充填高さ400mm条件における温度履歴と含水率)

図1 スラッジ飛散量評価内容

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(21/33)

(v) 要素試験(12/14) ハ. 試験方法(3/5)

【実規模試験】

フィルタ部に到達する粒子質量は時間積算したものを計測する。
 電子天秤の計測精度、サンプリング流量比より、評価できる粒子量の分解能は1mgで、フィルタ閉塞、被ばく評価上、十分な精度を有する。

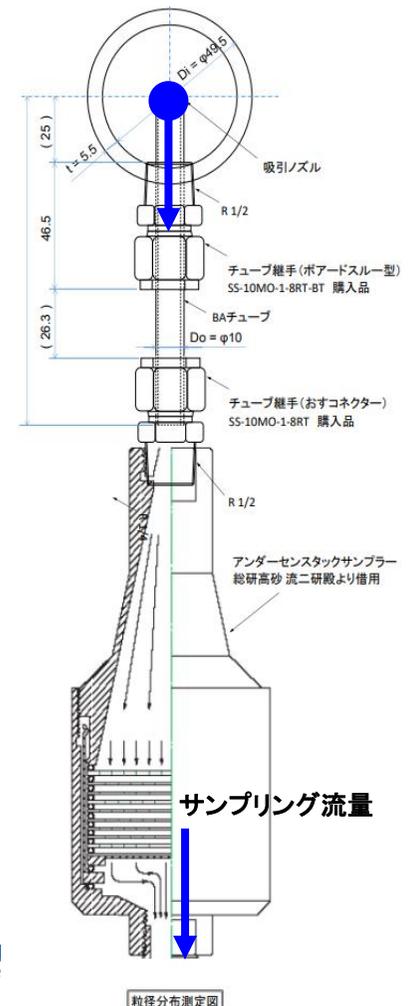
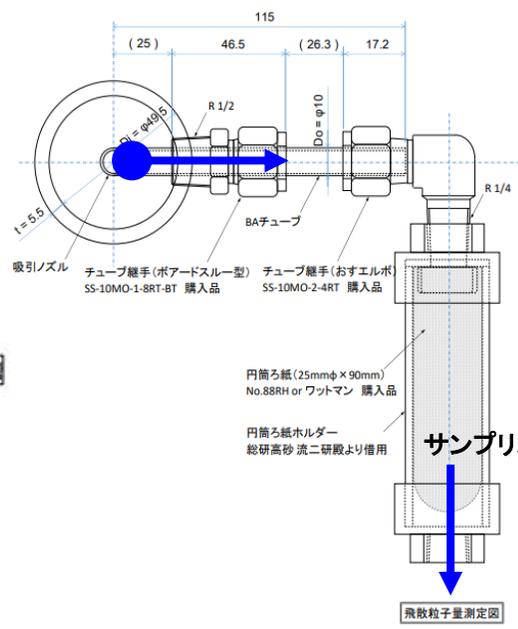
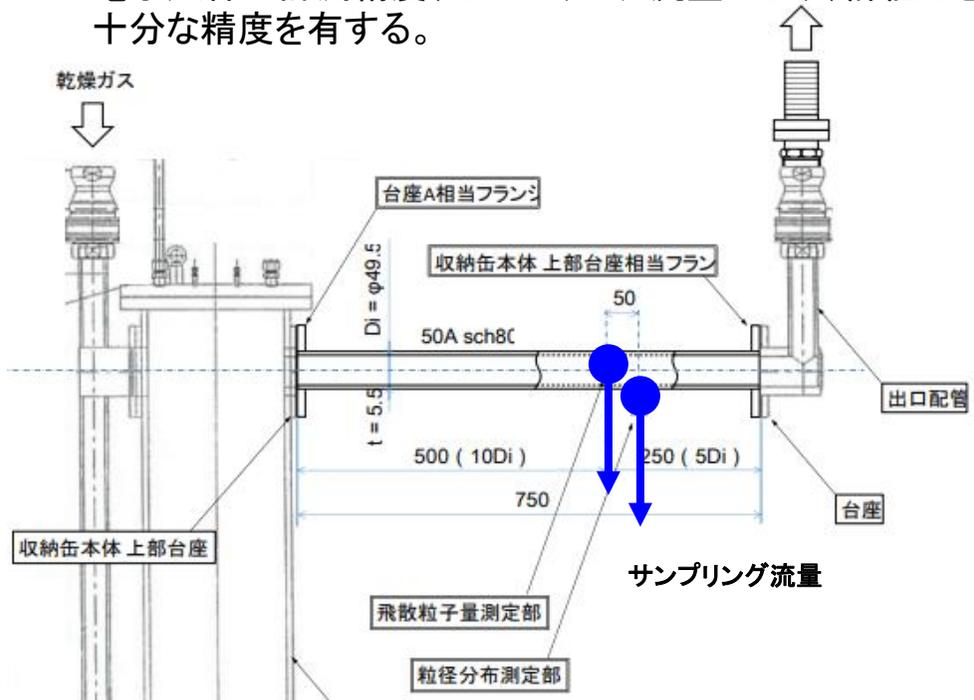


表1 計測精度

| | サンプリング流量 | 粒子回収 | 粒子質量計測 |
|-----------|----------------------------------|---------|----------------|
| 計測内容 | 配管流量の1/10 | ろ紙フォルダー | 電子天秤 |
| 粒子到達量計測精度 | サンプリング流量補正 0.1mg × 10 =1mg | 同右 | 最小分解能 0.1mg |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【実規模試験】

b. 粉体の挙動評価方法の検討 (22/33)

(v) 要素試験 (13/14) ハ. 試験方法 (4/5)

排ガス中のばいじん濃度の測定は、JIS Z 8808「排ガス中のダスト濃度の測定方法」に基づいて行う。
JIS 法は手分析であるため、濃度の瞬間的な変化や時間的な変動を計測するのではなく、時間積算した、ダスト濃度を計測する。

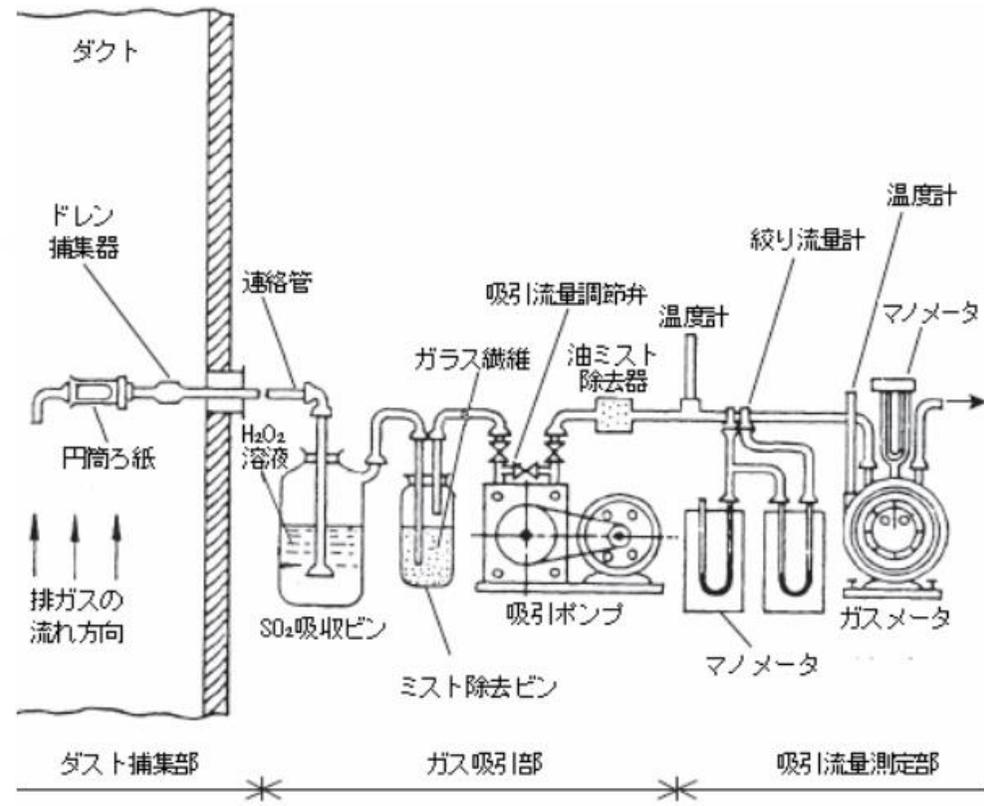
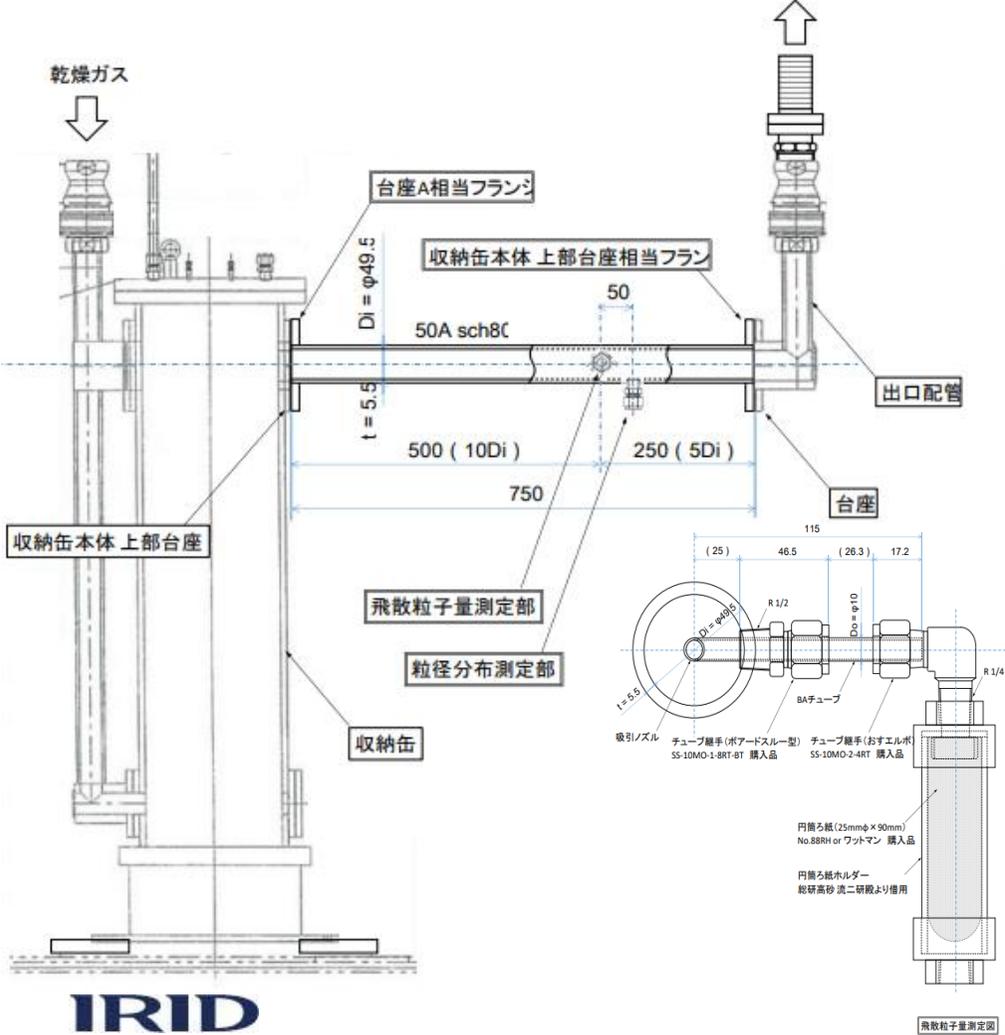


図1 ダスト試料採取装置の構成例 注1

注1: 5-1-6 粒子状物質計測器、JEMIMA 一般社団法人 日本電気計測器工業会

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

【実規模試験】

b. 粉体の挙動評価方法の検討(24/33)

(vi) 成果 要素試験結果(1/6)

出口配管に到達するスラッジ量は、スラッジサイズが大きく(珪砂100 μ m)、スラッジ高さが高い(785mm)条件で多い。

表1 試験条件と結果概要

| 試験No. | スラッジ種類 | 初期高さ mm | スラッジ g | 水 g | 内容器 g | 試験結果 |
|--------------|---------------|------------|-----------|--------|----------|--|
| T1-1(温度計測) | 珪砂100 μ m | 785 | 36680 | 11833 | 9301 | スラッジサイズが大きく、スラッジ高さが高い。出口配管に到達するスラッジ量が多い。 |
| T1-2(含水率計測) | 珪砂100 μ m | 785 | 36680 | 11543 | 6278 | スラッジが噴きこぼれ、非常に多くのスラッジが出口配管に到達した。 |
| T2-1(温度計測) | 珪砂100 μ m | 400 | 20560 | 7061 | 9292 | スラッジサイズが大きく、スラッジ高さが低いと出口配管に到達するスラッジ量が低下する。 |
| T2-2(含水率計測) | 珪砂100 μ m | 400 | 20560 | 6936 | 6277 | |
| T3-1(温度計測) | 珪砂7.6 μ m | 785 | 39201 | 11375 | 9294 | スラッジサイズが小さく、スラッジ高さが高いが、出口配管に到達するスラッジ量が低下する。 |
| T3-2(含水率計測) | 珪砂7.6 μ m | 785 | 39202 | 11429 | 6281 | スラッジ表面層下方にガス空間があるので、スラッジ割合を多くした試験を実施した。(T3-1”、T3-2”) |
| T3-1“(温度計測) | 珪砂7.6 μ m | 785 | 45700 | 8756 | 9304 | スラッジサイズが小さく、スラッジ高さが高く、スラッジ充填率が高いが、出口配管に到達するスラッジ量が低下する。 |
| T3-2“(含水率計測) | 珪砂7.6 μ m | 785 | 45702 | 8622 | 6281 | |
| T4-1(温度計測) | 凝集剤 | 740 | 1307.6 | 24620 | 9305 | 凝集剤が噴きこぼれないように、液面変動高さ分、スラッジ高さを少し低く740mmにした。 |
| T4-2(含水率計測) | 凝集剤 | 740 | 1307.6 | 24633 | 6288 | 出口配管に到達するスラッジ量は少ない。 |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(25/33)

(vi) 成果 要素試験結果(2/6)

- ・珪砂100 μm 、高さ785mmは、スラッジが噴きこぼれた。噴きこぼれていない条件でもスラッジ到達量が多い。
- ・珪砂100 μm 、高さ400mmのスラッジ到達量は785mmよりも低下する。
- ・珪砂7.6 μm 、高さ785mmのスラッジ到達量は100 μm よりも低下する。
- ・凝集剤、高さ740mmのスラッジ到達量は珪砂100 μm 、高さ785mmよりも低下する。
- ・スラッジの飛散は、定率乾燥時が多く、それ以降は低下する。

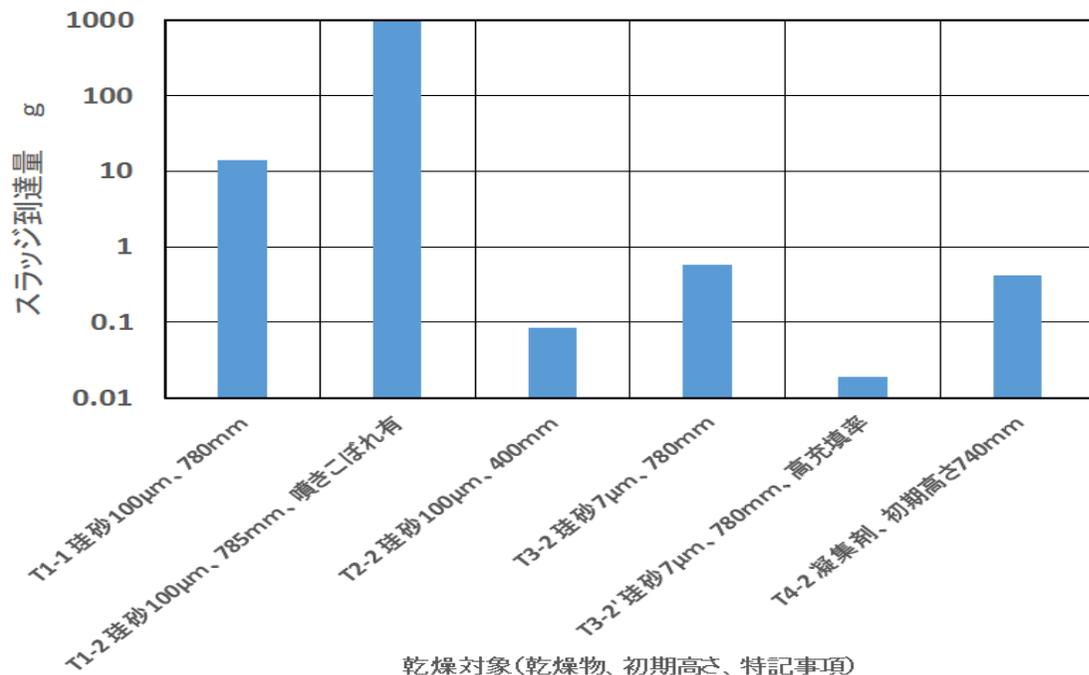


図1 スラッジフィルタ到達量

【実規模試験】

No.116

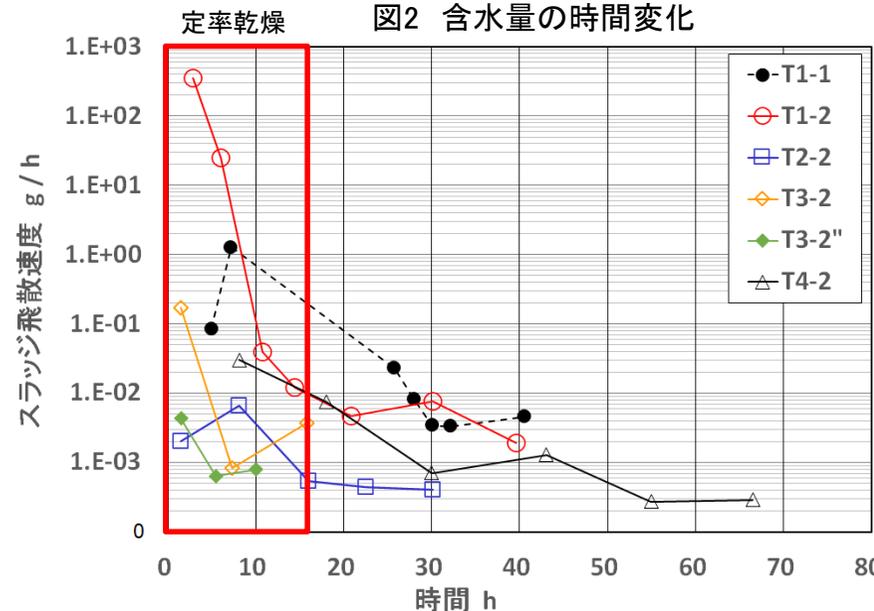
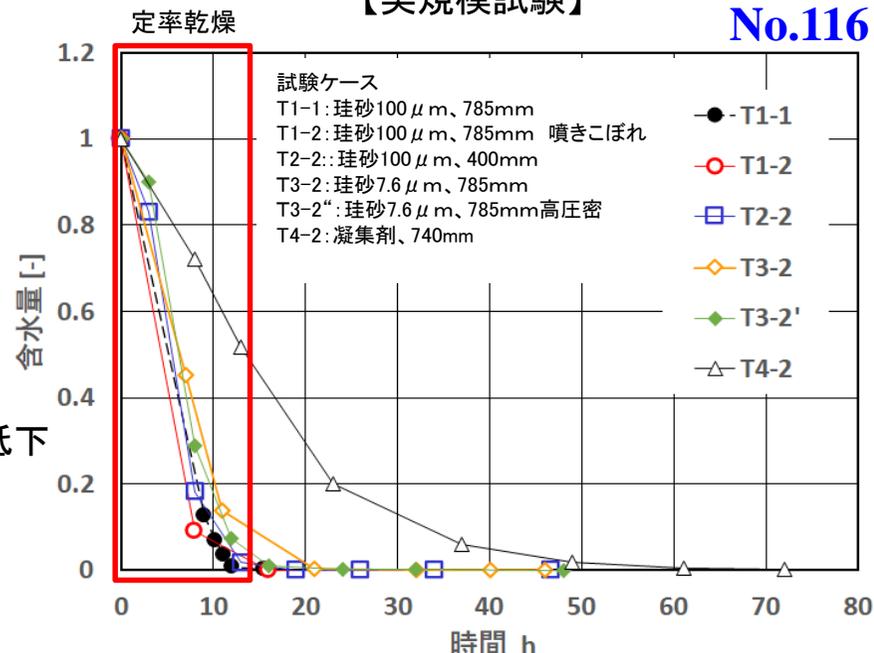


図3 スラッジ飛散速度の時間変化

6. 実施内容

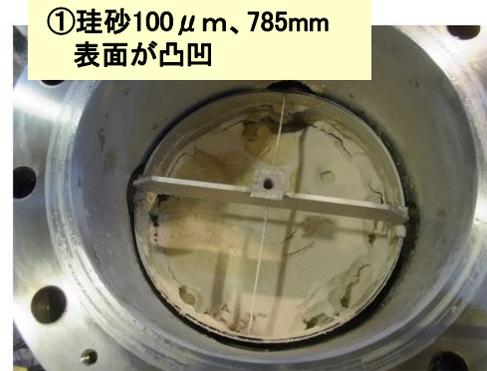
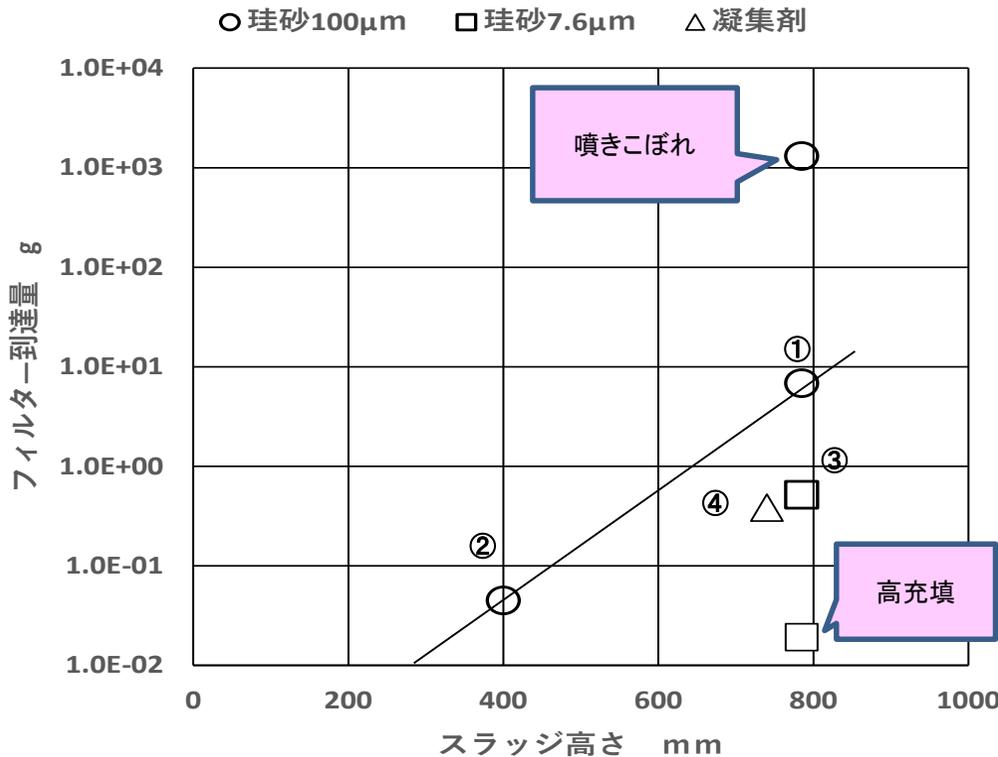
6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討 (26/33)

(vi) 成果 要素試験結果 (3/6)

- ・珪砂100 μ m、高さ785mmは、スラッジが噴きこぼれた。噴きこぼれていない条件でもスラッジ到達量が多い。表面に凹凸が有り、水蒸気の吹上げが激しい。
- ・珪砂100 μ m、高さ400mmのスラッジ到達量は785mmよりも低下する。スラッジ表面が滑らかで、水蒸気の吹上げが弱い。
- ・珪砂7.6 μ m、高さ785mmのスラッジ到達量は100 μ mよりも低下する。スラッジ表面が滑らかで、水蒸気の吹上げが弱い。
- ・凝集剤、高さ740mmのスラッジ到達量は珪砂100 μ m、高さ785mmよりも低下する。表面が低下、内容器に凝集剤が付着。



2022年10月20日 8h後取り出し



2022年10月27日 8h後取り出し



2022年12月13日 8h後取り出し



2022年11月15日 13h後取り出し

図1 スラッジフィルタ達量とスラッジ層表面状況

6. 実施内容

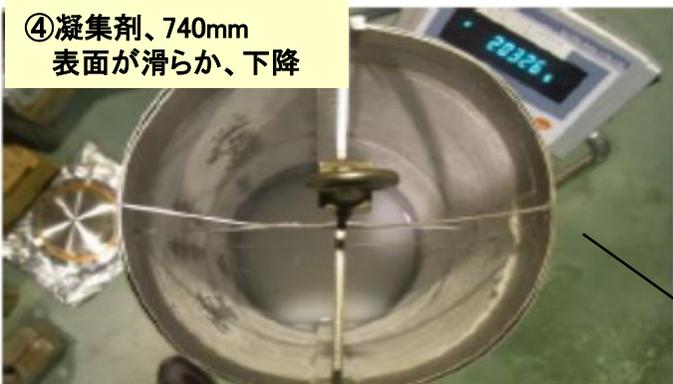
6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

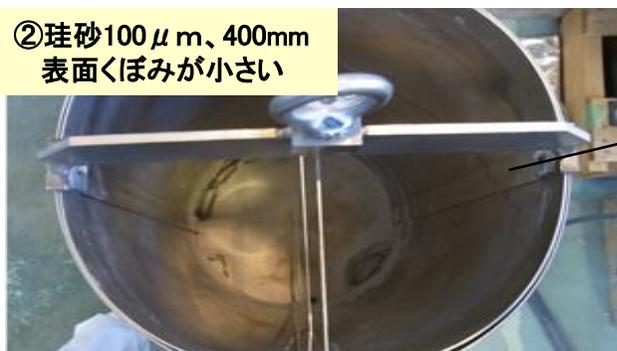
b. 粉体の挙動評価方法の検討(27/33)

(vi) 成果 要素試験結果(4/6)

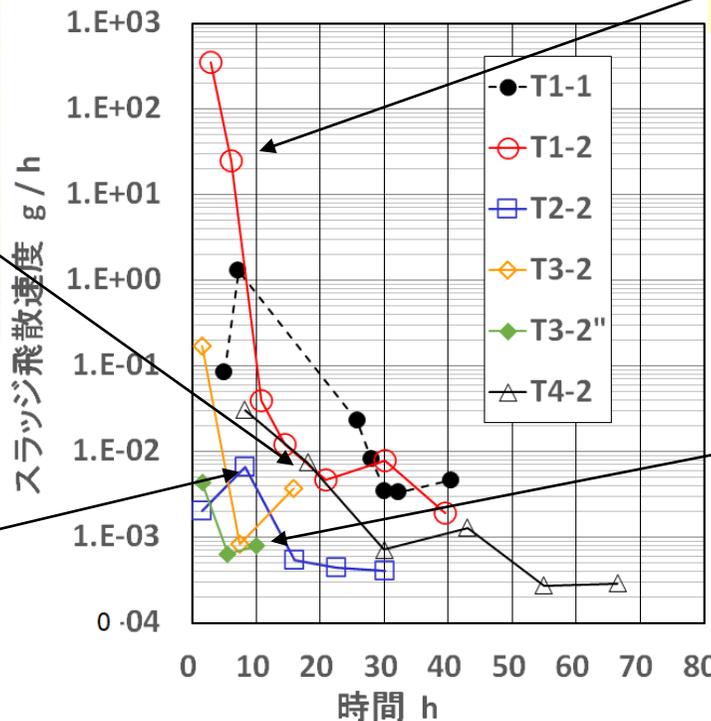
- ・珪砂100 μ m、高さ785mmは、スラッジが噴きこぼれた。噴きこぼれていない条件でもスラッジ到達量が多い。表面に凹凸が有り、水蒸気の吹上げが激しい。
- ・珪砂100 μ m、高さ400mmのスラッジ到達量は785mmよりも低下する。スラッジ表面が滑らかで、水蒸気の吹上げが弱い。
- ・珪砂7.6 μ m、高さ785mmのスラッジ到達量は100 μ mよりも低下する。スラッジ表面が滑らかで、水蒸気の吹上げが弱い。
- ・凝集剤、高さ740mmのスラッジ到達量は珪砂100 μ m、高さ785mmよりも低下する。表面が低下、内容器に凝集剤が付着する。



2022年11月15日 13h後取り出し



2022年10月27日 8h後取り出し



2022年10月20日 8h後取り出し



2022年12月13日 8h後取り出し

図1 スラッジフィルタ到達量とスラッジ層表面状況

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討(28/33)

(vi) 成果 要素試験結果(5/6)

- ・スラッジの飛散は、定率乾燥時が多く、それ以降は低下する。
 - ・スラッジの平均直径は $10\mu\text{m}$ 以下である。
- 定率乾燥で平均直径は大きいですが、その後、低下する。

試験ケース

- T1-1 : 珪砂 $100\mu\text{m}$ 、785mm
- T1-2 : 珪砂 $100\mu\text{m}$ 、785mm 噴きこぼれ
- T2-2 : 珪砂 $100\mu\text{m}$ 、400mm
- T3-2 : 珪砂 $7.6\mu\text{m}$ 、785mm
- T3-2' : 珪砂 $7.6\mu\text{m}$ 、785mm 高圧密
- T4-2 : 凝集剤、740mm

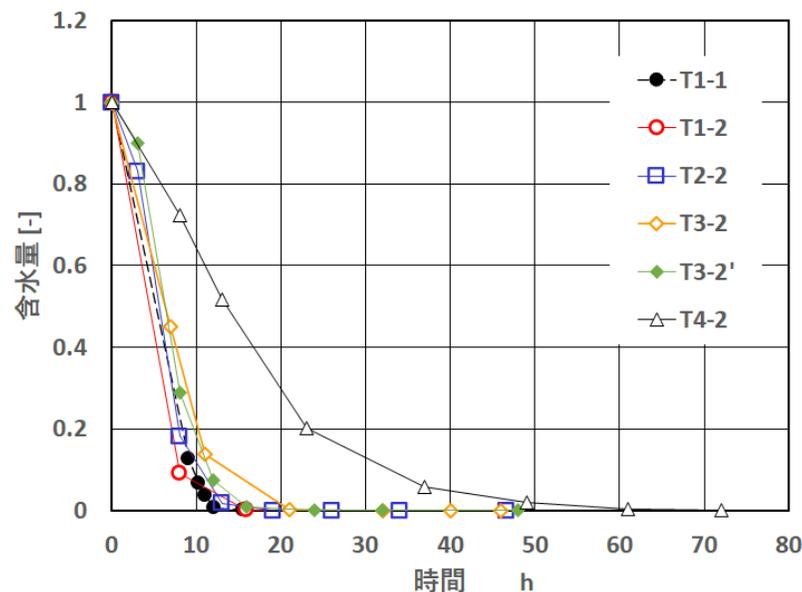


図1 含水量の時間変化

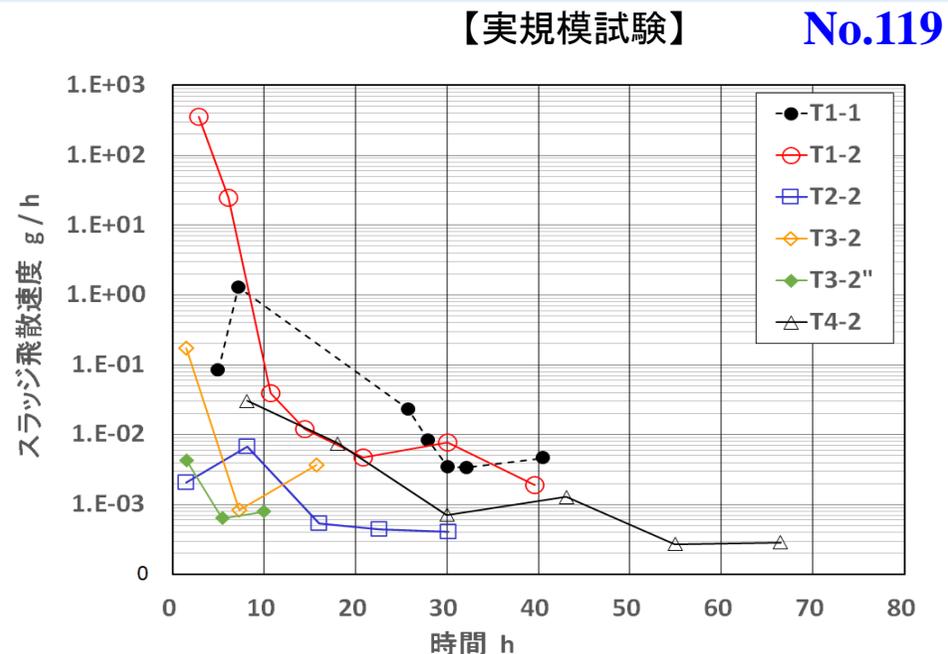


図2 スラッジ飛散速度の時間変化

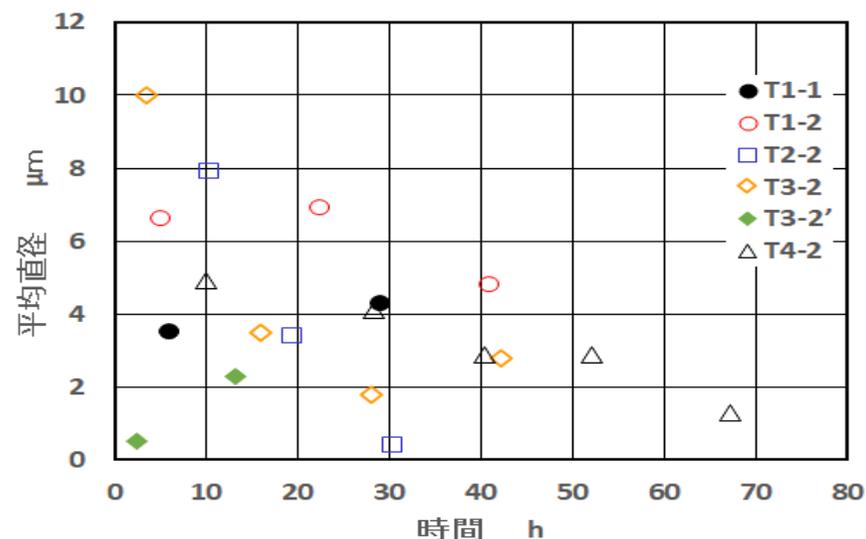


図3 スラッジ平均直径の時間変化

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

【実規模試験】

No.120

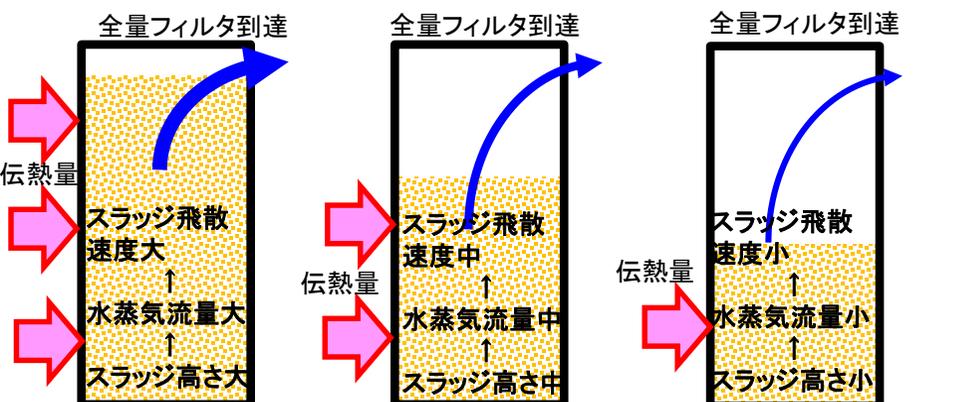
③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討 (29/33)

(vi) 成果 要素試験結果 (6/6)

スラッジは定率乾燥時、飛散量が多い。(水蒸気上昇流に伴って飛散)
減率乾燥、乾燥後は、スラッジ層表面の粒子流動性が悪く、飛散量が少ない。
スラッジ飛散速度に影響を与えるのは、スラッジ高さ、スラッジサイズ(直径)である。

スラッジ初期高さ



スラッジサイズ

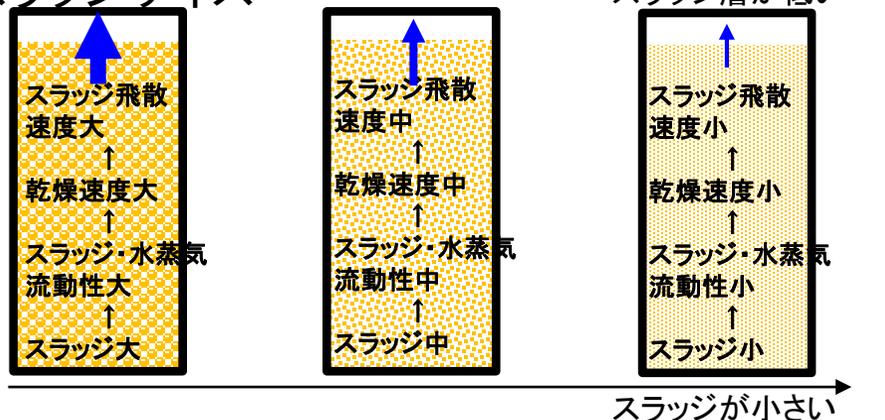


図1 スラッジ層の初期高さ及びスラッジサイズが飛散に与える影響

スラッジ初期高さの影響

- ・スラッジが低いと水蒸気流量が少ない
- ・スラッジ飛散速度が小さい、フィルタ到達量少ない

珪砂100 μ m、高さ785mm



珪砂100 μ m、高さ400mm



スラッジサイズの影響

- ・スラッジが小さいと粒子流動性が悪い、スラッジ内水蒸気流動性が悪い
- ・スラッジ層が乾燥すると固まる(チョーク状状態)

珪砂100 μ m、高さ785mm



珪砂7.6 μ m、高さ785mm



図2 スラッジ層表面状況

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

b. 粉体の挙動評価方法の検討 (30/33)

(vii) 成果 流動解析結果 (1/4)

実機規模模擬収納缶によるスラッジ乾燥試験の検証解析を実施した。

- 入口から200℃の温風が流入(流量は試験実績値を設定)
- 試験の温度履歴をもとに、スラッジ表面温度、内容器温度(各部)を試験の温度履歴を設定。含水率の変化から、スラッジ表面の水蒸気発生速度を設定。図1に、T1-1(珪砂平均粒径100 μ m、スラッジ高さ、785mm)における温度履歴と含水率の例を示す。
- 先ず、粒子を与えない気相のみの解析を実施し、その後スラッジ表面に飛散速度を設定して気相への移行率を評価した。飛散速度は水蒸気発生による飛散と、気相解析で得られた表面ガス流れによる飛散をそれぞれ文献式で評価した。

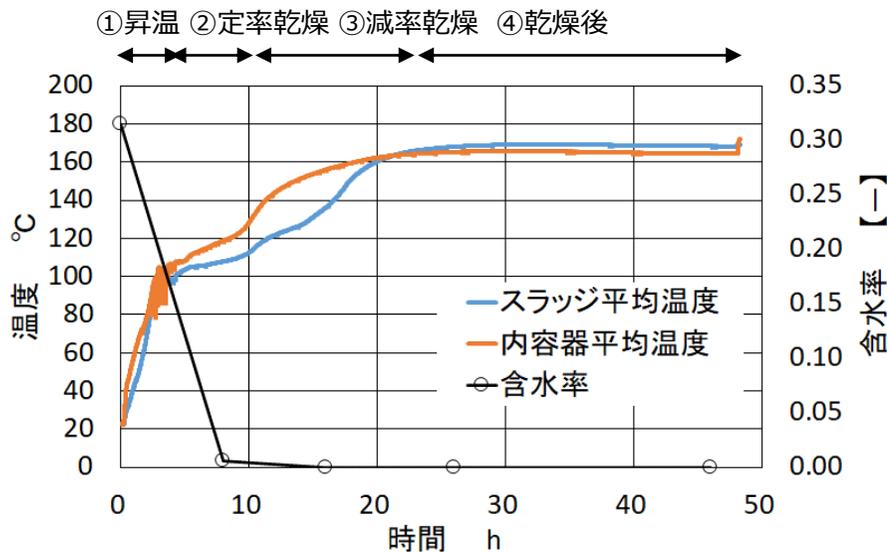


図1 T1-1(珪砂平均粒径100 μ m、スラッジ高さ、785mm)における温度履歴と含水率

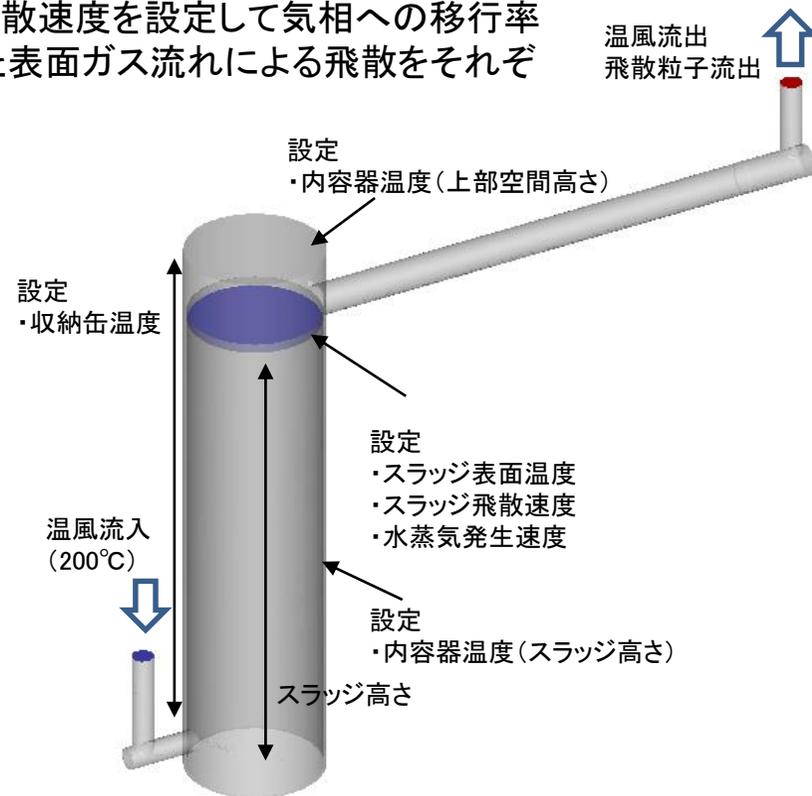


図2 T1-1(珪砂平均粒径100 μ m、スラッジ高さ、785mm)解析モデル

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

【流動解析】

No.122

③実施事項、成果

b.粉体の挙動評価方法の検討(31/33)

(vii) 成果 流動解析結果(2/4)

表1 定率乾燥条件

| | T1-1 | T1-2 | T2-2 | T3-2 | T3-2'' | T4-2 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| スラッジ高さ [mm] | 785 | 785 | 400 | 785 | 785 | 740 |
| スラッジ種類、粒径 | 珪砂 100 μ m | 珪砂 100 μ m | 珪砂 100 μ m | 珪砂 7.6 μ m | 珪砂(圧密大) 7.6 μ m | 凝集剤 |
| スラッジ初期質量[g] | 36680 | 36680 | 20560 | 39202 | 45702 | 1307.6 |
| 初期含水量[g] | 11833 | 11543 | 6936 | 11429 | 8622 | 24620 |
| スラッジ表面横流れ[cm/s] | 0.163 | 1.87 | 0.088 | 0.148 | 0.131 | 0.120 |
| スラッジ表面横流れによる 飛散速度 [μ g/cm ² s] ^{注1} | 飛散しない | 飛散しない | 飛散しない | 飛散しない | 飛散しない | 飛散しない |
| 水蒸気上昇流速 [cm/s] ^{注2} | 1.57 | 1.88 | 0.989 | 1.32 | 0.987 | 1.26 |
| 水蒸気上昇流による スラッジ飛散速度 [μ g/cm ² ・s] ^{注3} | | | | | | |
| 粒径5 μ m | 5.58×10^{-1} | 7.42×10^{-1} | 2.85×10^{-1} | 3.96×10^{-1} | 2.46×10^{-1} | 3.84×10^{-1} |
| 粒径2.5 μ m | 1.37×10^{-1} | — | 7.60×10^{-2} | — | 6.51×10^{-2} | 9.81×10^{-2} |

注1: 藤江他、沸騰水型原子炉における飛沫除去、p792, Vol.3, No.10(1961)、日本原子力学会論文誌

注2: スラッジ乾燥過程における重量変化の計測値より算出

注3: 石倉, 水津, 田中, 篠原、固-気系小型噴流層からの小粒子の飛び出し、第5巻 第2号(1979)、化学工学論文集

ケース名

T1-1: 珪砂100 μ m、785mm、T1-2: 珪砂100 μ m、785mm 噴きこぼれ

T2-2: 珪砂100 μ m、400mm、T3-2: 珪砂7.6 μ m、785mm、T3-2'': 珪砂7.6 μ m、785mm 高压密

T4-2: 凝集剤、740mm

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

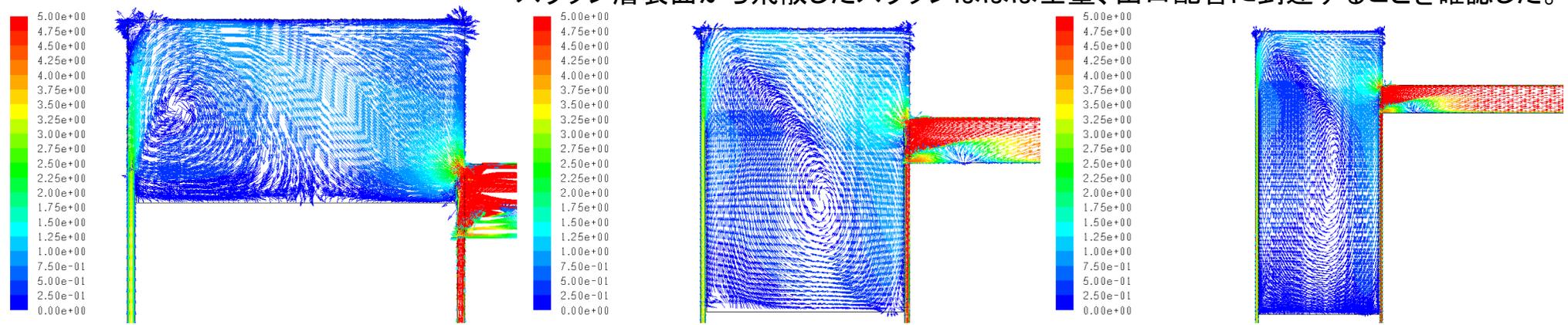
b.粉体の挙動評価方法の検討(32/33)

(vii) 成果 流動解析結果(3/4)

CFDによるスラッジガス相移行率評価

スラッジ高さ785、600、400mmで、ガス流速、スラッジ濃度分布を解析した。

スラッジ層表面から飛散したスラッジはほぼ全量、出口配管に到達することを確認した。

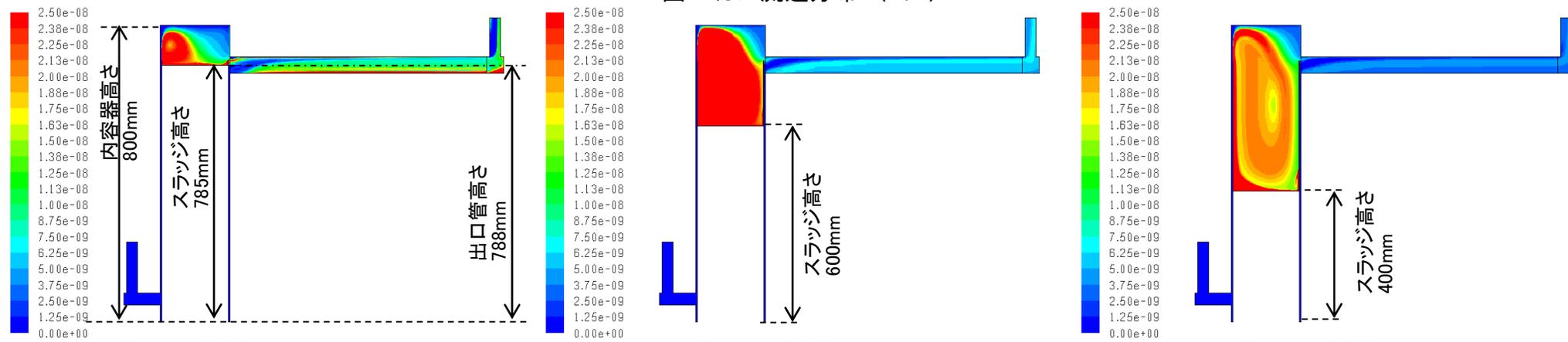


①スラッジ高さ785mm

②スラッジ高さ600mm

③スラッジ高さ400mm

図1 ガス流速分布 (m/s)



①スラッジ高さ785mm

②スラッジ高さ600mm

③スラッジ高さ400mm

図2 スラッジ濃度分布 (-)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

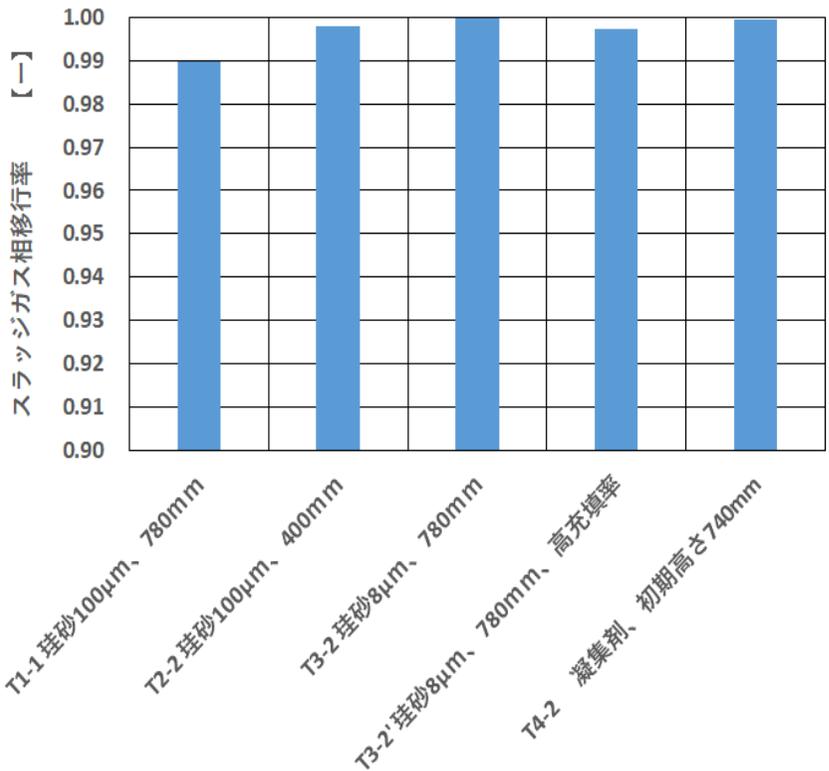
b. 粉体の挙動評価方法の検討 (33/33)

(vii) 成果 流動解析結果 (4/4)

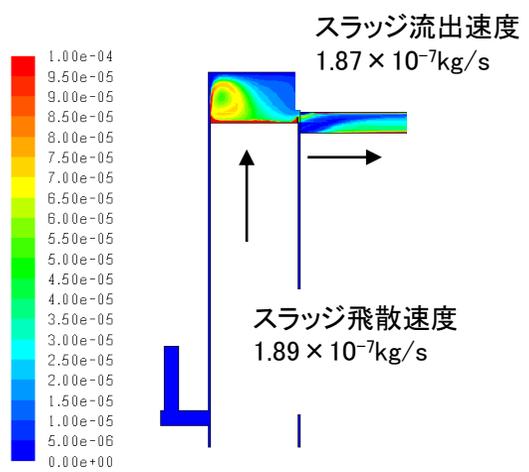
CFDによるスラッジガス相移行率評価

スラッジ高さ785、600、400mmで、ガス流速、スラッジ濃度分布を解析した。

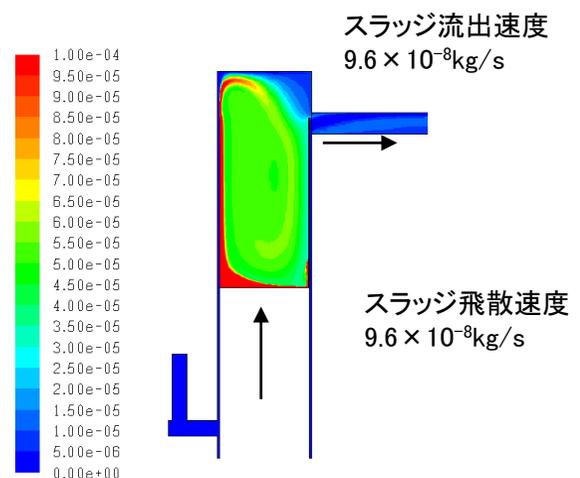
スラッジ層表面から飛散したスラッジはほぼ全量、出口配管に到達することを確認した。



乾燥対象 (乾燥物、初期高さ、特記事項)



スラッジ濃度分布(kg/m³)
(1)珪砂5 μ m、780mm



スラッジ濃度分布(kg/m³)
(2)珪砂5 μ m、400mm

スラッジガス相移行率 = スラッジ流出速度 / スラッジ飛散速度

図1 CFDによるスラッジガス相移行率評価

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(1/8)

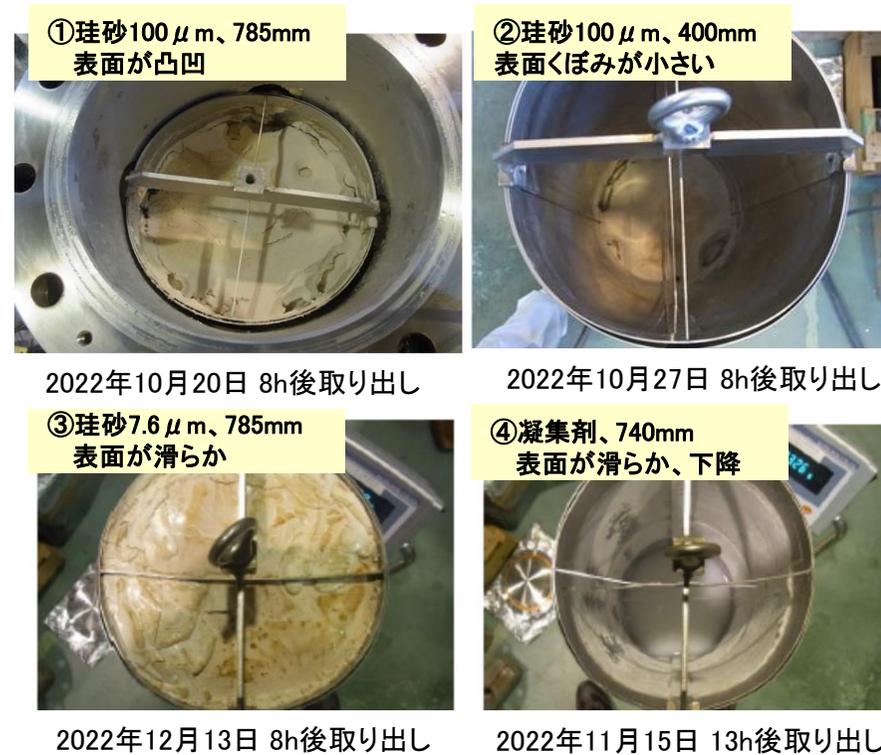
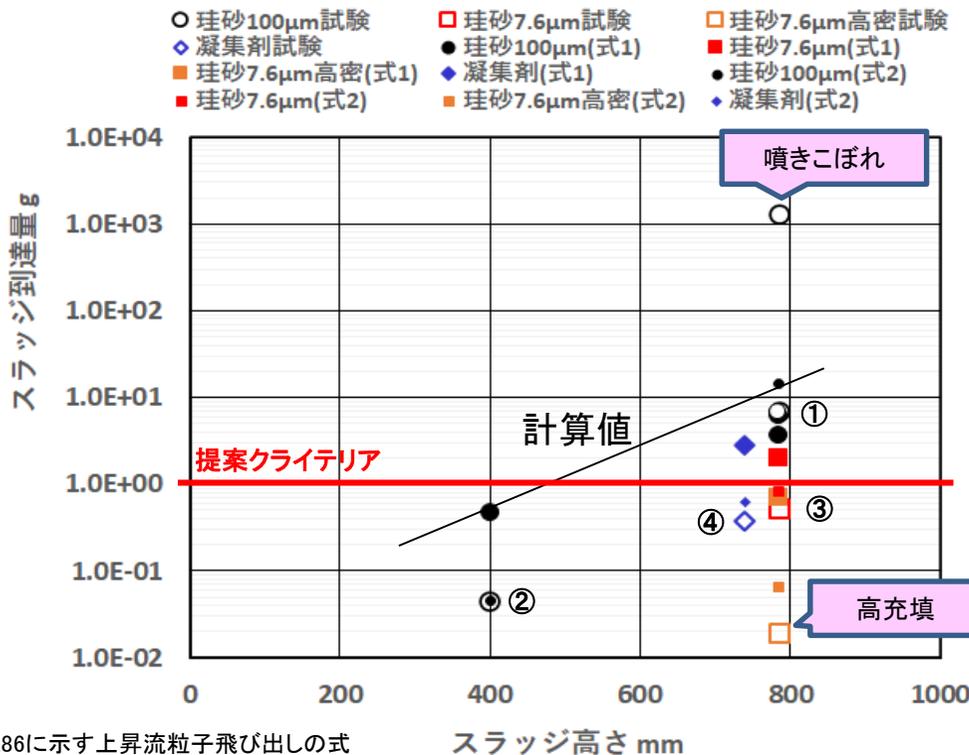
(i) 成果 フィルタ到達量(1/3)

スラッジが高く、大きいとフィルタ到達量は多い。各条件を比較すると、珪砂100 μ m、スラッジ高さ785mmが到達量が最大であった。小さいスラッジ、高充填のスラッジはフィルタ到達量が少ない。

計算上、水蒸気上昇流速が小さくなると、スラッジ飛散速度が少なくなり、到達量も少なくなる。

試験結果○◇□□は計算値●◆■■よりもさらに一桁程度小さく、粒子流動性が悪くなる、スプラッシュした粒子が壁面に付着することが要因と考えられる。

フィルタ設計上は、計算値で設計することが保守的であると判断される。フィルタのスラッジ到達クライテリア(保持容量)は1g程度にすることを提案し【参考資料(参考1)を参照】、乾燥条件、乾燥プロセスを検討することを推奨する。



(式1): No.86に示す上昇流粒子飛び出しの式
(式2): (式1)を試験結果を再現するように調整した式

図1 スラッジフィルタ到達量とスラッジ層表面状況

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

【実規模試験】

No.126

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(2/8)

(i)成果 フィルタ到達量(2/3)

表1 パラメータに対する飛散速度評価方法

| パラメータ | 試験計画・結果 | スラッジ評価手法(設計)への反映 |
|----------|---|---|
| 乾燥過程 | 定率乾燥初期飛散速度大 定率乾燥時スラッジ表面粒子流動性が悪く、飛散速度小 | 定率乾燥時を対象とした評価 減率乾燥以降の飛散量は軽微 |
| 初期スラッジ高さ | 800mmに近いと飛散速度大 400mmでは飛散速度小 乾燥速度(水蒸気上昇流速)が遅いからと考えられる | スラッジ高さが変わると、被乾燥物の熱容量が変わる。熱容量に応じた乾燥時間を計算し、乾燥速度=含水量/乾燥時間を求め、スラッジ飛散速度を求める。 |
| スラッジサイズ | 100 μ mは飛散速度大、 10 μ mは飛散速度小 飛散粒子は1~10 μ m | 飛散する粒子の平均直径は5 μ mとして、飛散速度、フィルタ圧損を評価する。 |
| スラッジ密度 | 1~2.4g/ccで飛散特性を把握 | 密度が重くなると、飛散速度低下 密度の影響は掃流限界速度、終端速度に基づいて飛散速度を補正 |
| 初期水量 | 検証データ未取得、一般知見活用 | 内容器な熱容量から乾燥速度、スラッジ飛散速度を評価 |
| スラッジ充填率 | 小さい粒子で充填率が高い、粒子・水蒸気流動性が悪くなり、飛散速度が低下 | 珪砂100 μ mの一般的な充填率で評価が可能であると判断される。 |

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(3/8)

(i)成果 フィルタ到達量(3/3)

フィルタ到達量 = スラッジ飛散速度 × 定率乾燥時間
とする。

スラッジ飛散速度はフィルタ到達量と同様の傾向を示す。
乾燥時間は、内容器顕熱、スラッジ顕熱、含水量顕熱、潜熱による熱容量がわかれば、定率乾燥時間は予想できる。
試験結果○◇□□は計算値●◆■■よりもさらに一桁程度小さく、粒子流動性が悪くなる、スプラッシュした粒子が壁面に付着することが要因で、スラッジ飛散速度が小さいかと考えられる。フィルタ設計上は、計算値で設計することが保守的であると判断される。

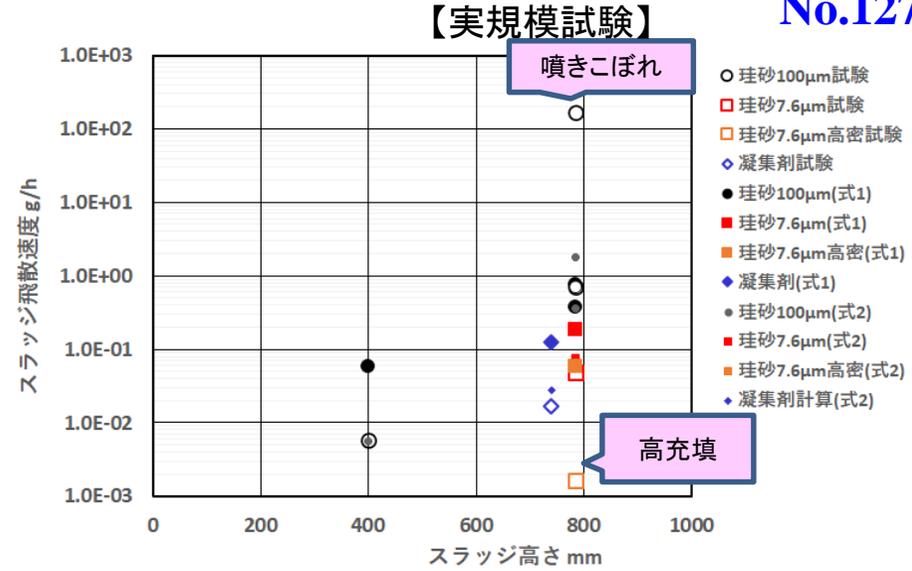


図2 スラッジ飛散速度の時間変化

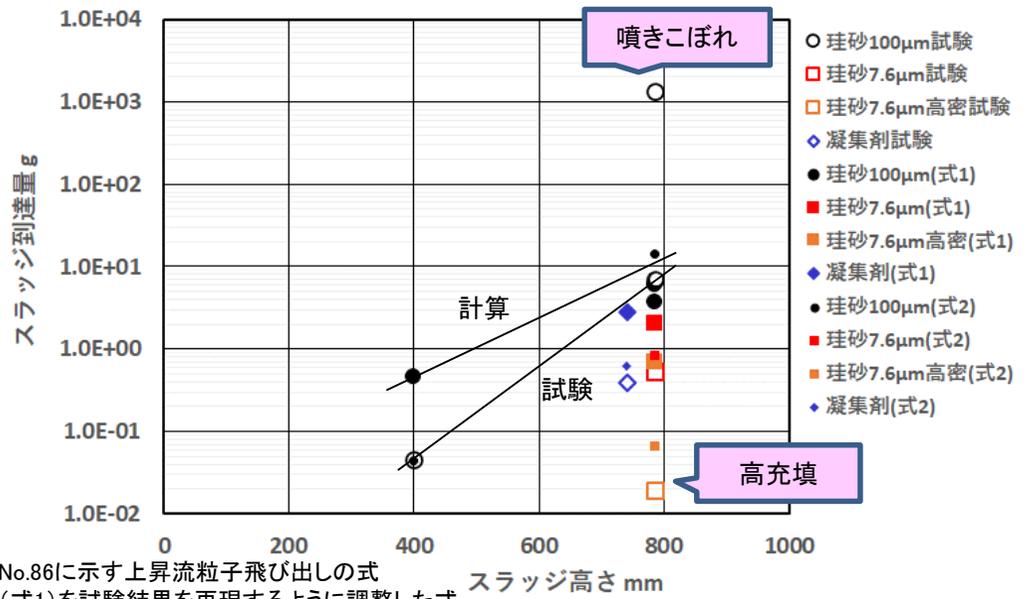


図1 スラッジフィルタ到達量

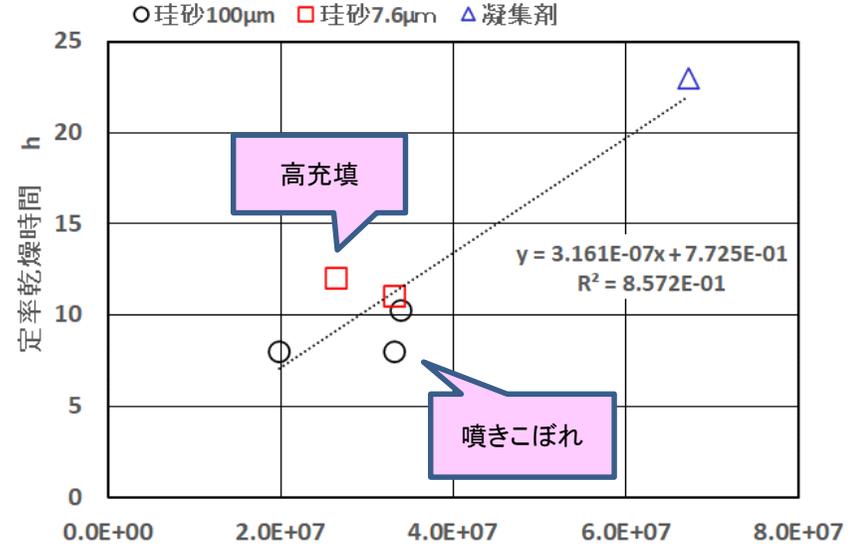


図3 定率乾燥時間

(式1): No.86に示す上昇流粒子飛び出しの式
(式2): (式1)を試験結果を再現するように調整した式

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(4/8)

(ii) 成果 フィルタ到達スラッジサイズ(1/2)

定率乾燥時がスラッジ飛散量の大多数を占める
乾燥時間10時間までに着目すると、スラッジ平均は
2~10 μmである。

飛散速度が0.01g/h以下は対象から除く。

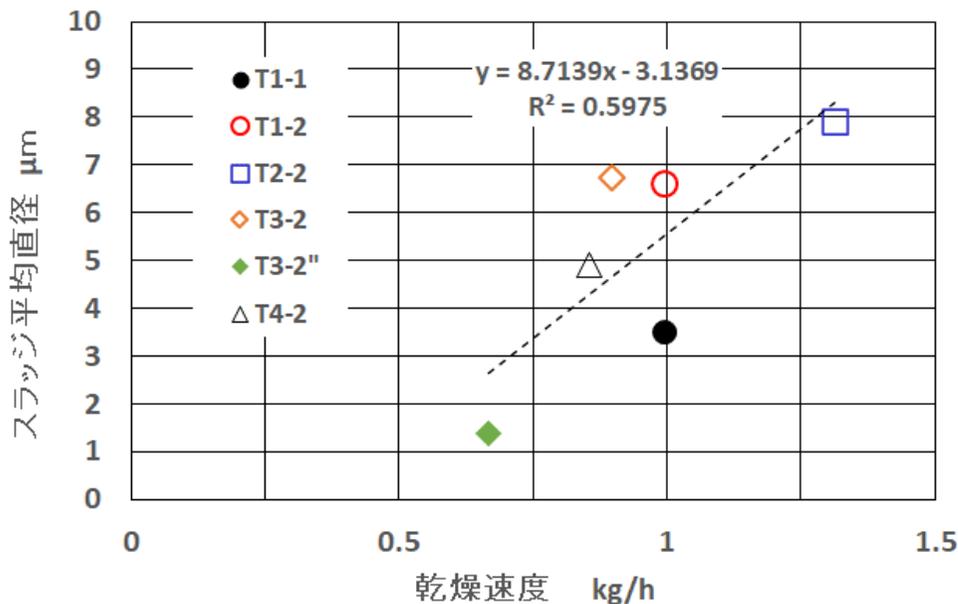


図1 乾燥速度とスラッジ粒径

【実規模試験】

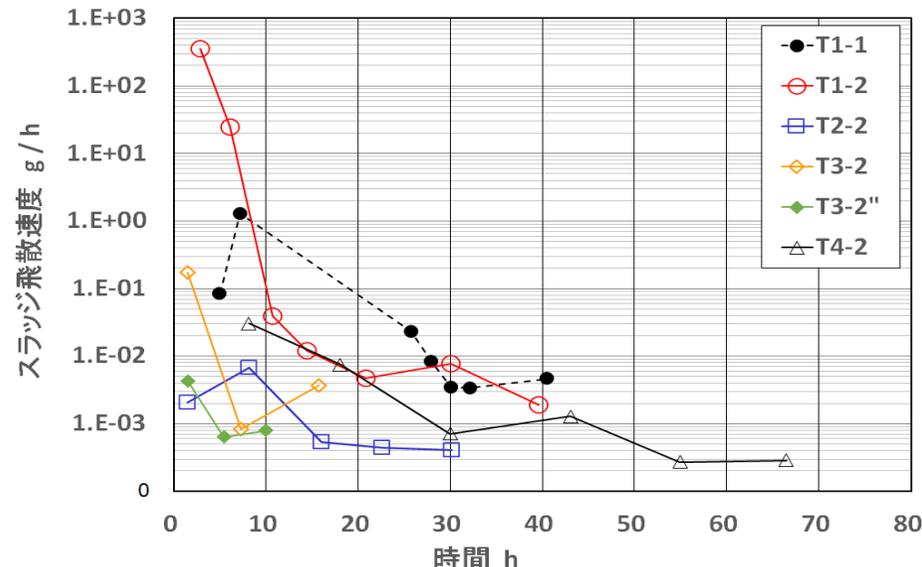


図2 乾燥時間とスラッジ飛散速度

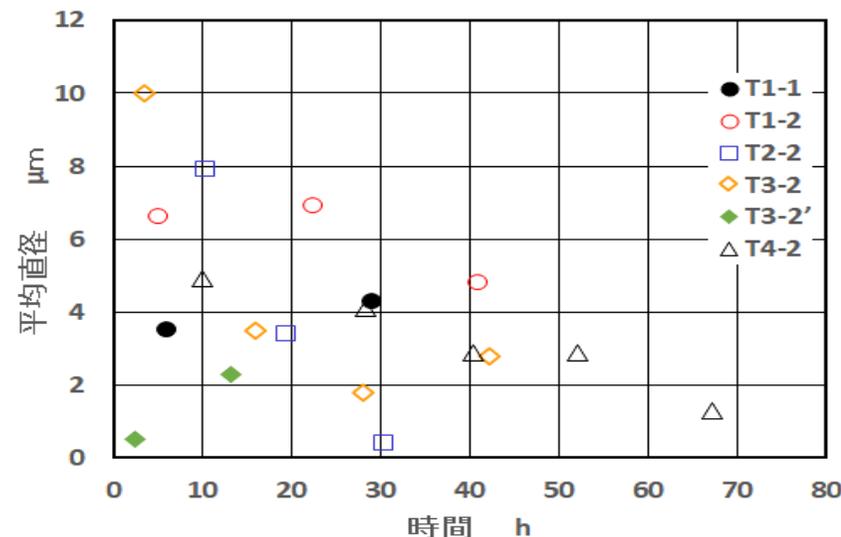


図3 乾燥時間とスラッジ粒径分布

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(5/8)

(ii) 成果 フィルタ到達スラッジサイズ(2/2)

定率乾燥時、水蒸気上昇流速は1~2cm/sである。
 珪砂の場合、上昇流速と終端速度が一致するサイズは、10 μ m相当である。
 これ以上の粒子は飛散しない。
 試験結果によれば、スラッジ平均粒径は5 μ m前後になる。
 これは、計測結果と同程度であるので、水蒸気上昇流速が大きく変わらなければ、飛散粒子サイズ5 μ mを設定する。

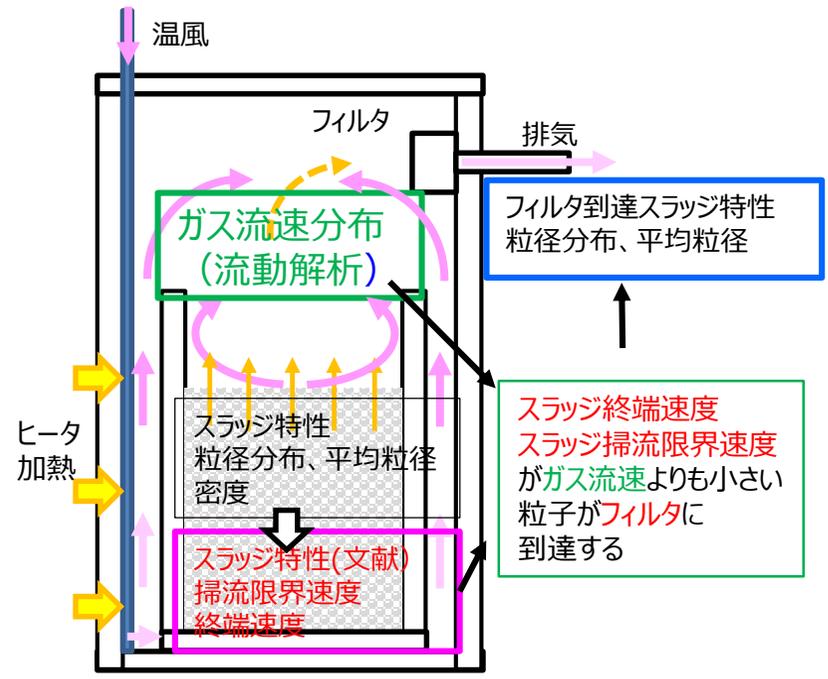


図1 安全機能と評価ツールのアウトプット

【実規模試験】 No.129

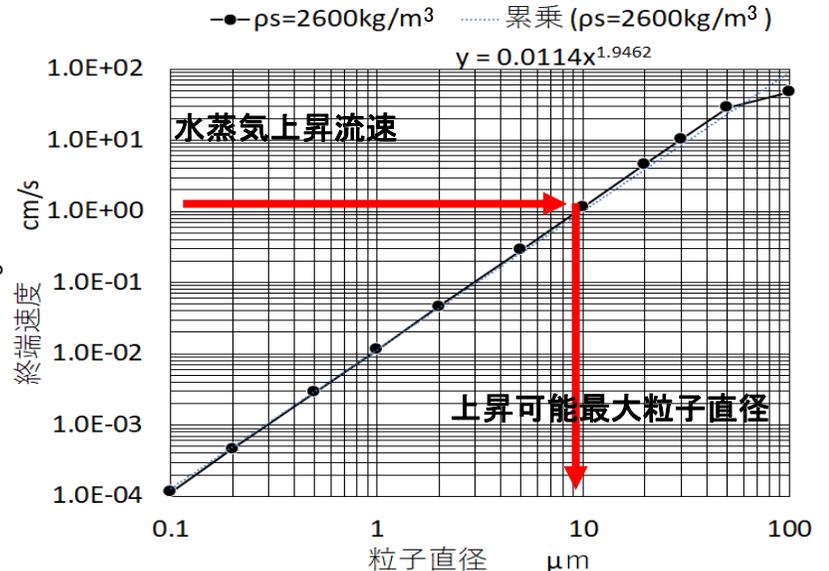


図2 スラッジ終端速度(密度2600kg/m³)

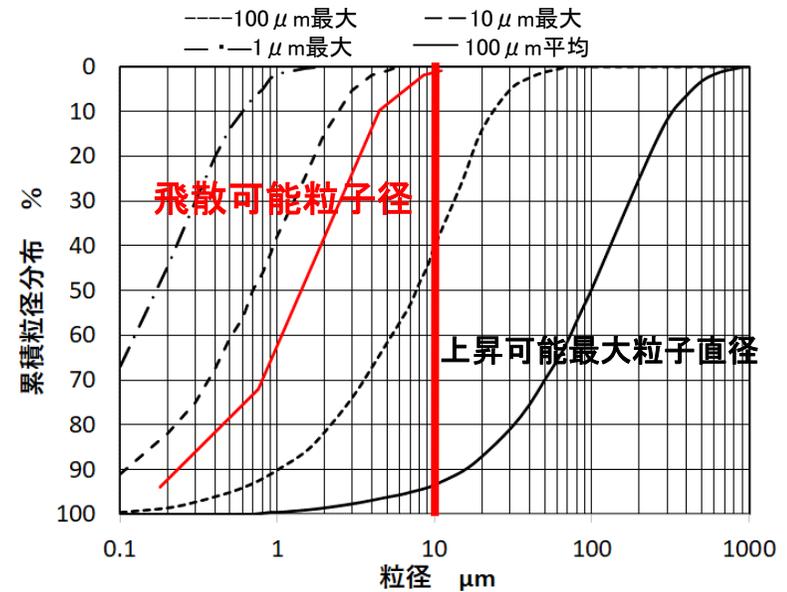


図3 スラッジ粒径分布

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

【振動時フィルタ閉塞】

No.130

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(6/8)

(iii) 成果 収納容器の衝撃・振動時フィルタ到達量(1/3)

運搬時の振動や地震動などにより粉状燃料デブリが舞い、フィルターが閉塞する事象に着目する。初速を有した粒子軌跡に基づき、フィルタへの粒子到達量を評価する。フィルタ閉塞性、フィルタ下流部流出性はフィルタ試験等で別途確認する。

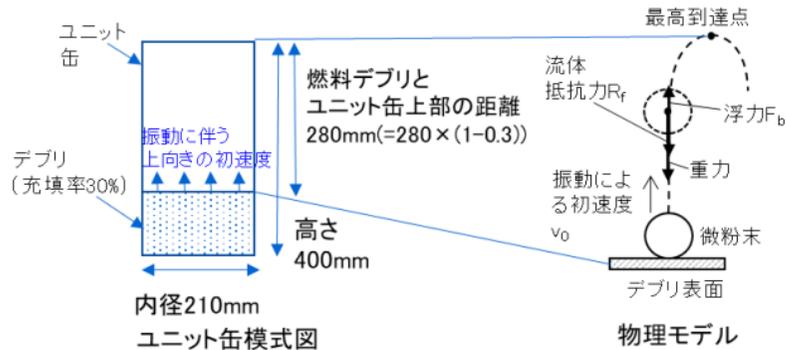


図 4.3.2(2)(viii)-1 ユニット缶の模式図と振動による発塵の物理モデル

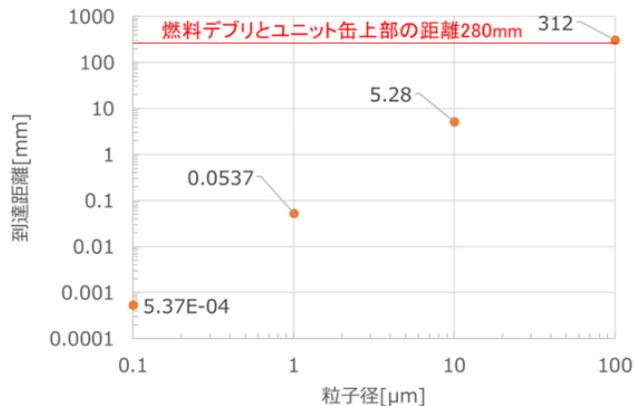


図 4.3.2(2)(viii)-3 振動による微粒子の最大到達高さの計算結果

図1 2021年度補助事業実施内容注1

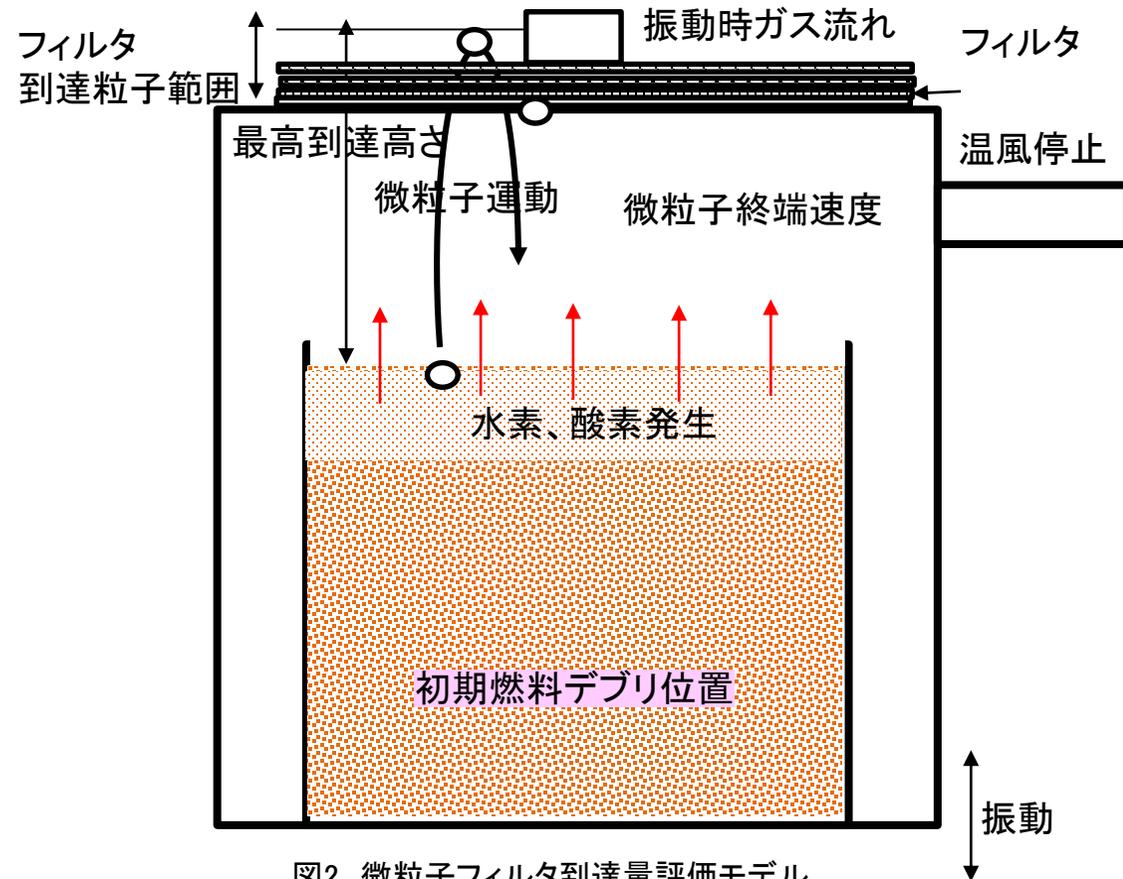


図2 微粒子フィルタ到達量評価モデル

注1: IRID HP 2021年度研究開発「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)」成果を引用

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(7/8)

(iii) 成果 収納容器の衝撃・振動時フィルタ到達量(2/3)

○評価方法

フィルタスラッジ到達量 M_s は次式で求める。

$$M_s = \rho_s \times (Z - 312\text{mm}) \times \alpha \times \beta \times \gamma$$

ここで、 ρ_s は単位長さあたりのスラッジ質量、

Z はスラッジ表面からフィルタまでの距離、

312mmは100 μm スラッジの最大到達高さ、

α は触媒ケース開口率、 β は触媒開口率、

γ は多孔板開口率である。(図1、表1参照)

単位長さあたりのスラッジ質量は、実機規模収納缶

乾燥試験のサンプル(珪砂7、8号、平均粒径100 μm)を

参照し、スラッジ高さ785mmで36680gとする。

○評価結果

評価結果を図2に示す。

一般的なHEPAフィルタのダスト保持量を1gとすると、

スラッジ到達量は多い。【参考資料(参考1)を参照】

表1 フィルタ前障害物

| 構成要素 | 開口率 |
|----------------|-------|
| 触媒ケース α | 0.402 |
| 触媒 β | 0.25 |
| 多孔板 γ | 0.629 |

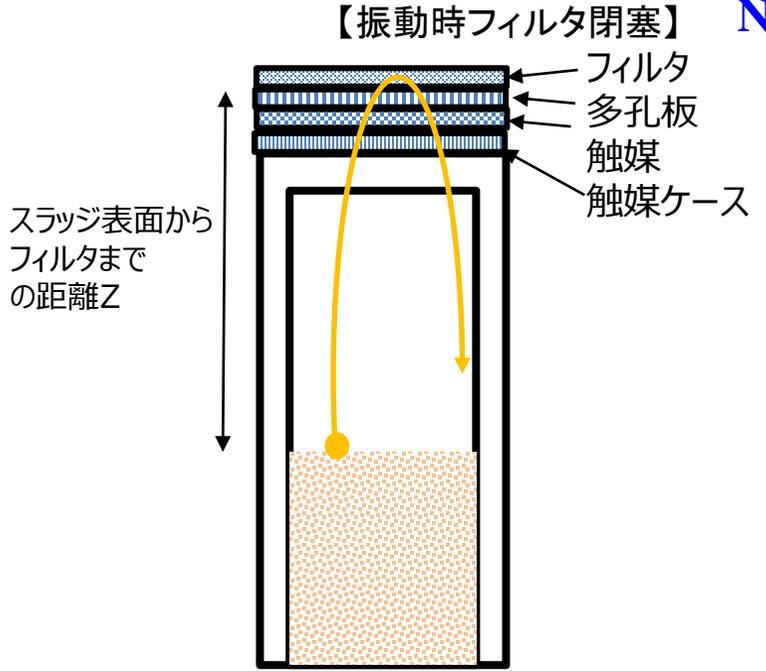


図1 評価モデル

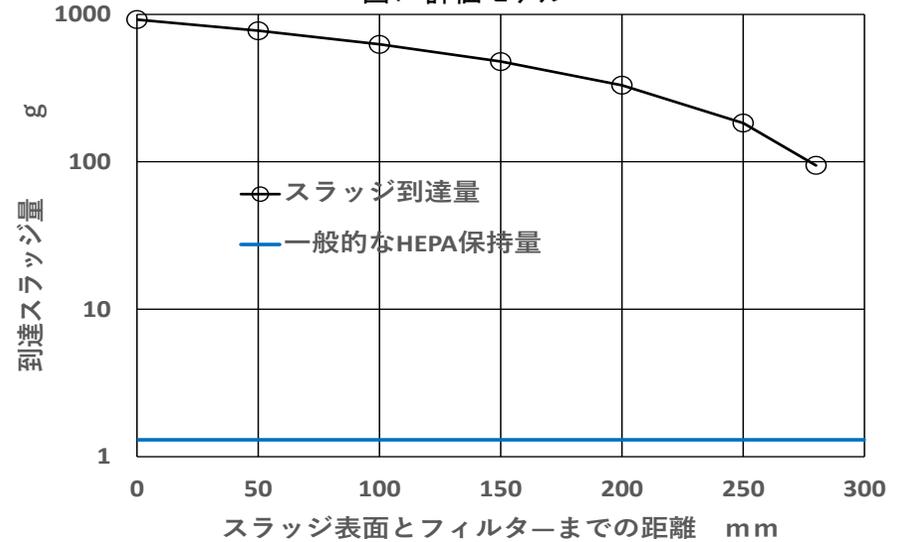


図2 フィルタスラッジ到達量

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

③実施事項、成果

c.安全機能への影響評価(8/8)

(iii) 成果 収納容器の衝撃・振動時フィルタ到達量(3/3)

○評価

スラッジ状態で、 $100\mu\text{m}$ 程度の粒子が振動時に舞い上がることができる場合、フィルタに到達するスラッジ量は、一般的なHEPAフィルタの閉塞性クライテリア(保持量)と比較して有意な量になる。

○対策案

スラッジ乾燥後、スラッジ間の固着力が大きいので、個別に粒子が飛散することは考えにくい。そのため、乾燥後のスラッジに振動を与えて、浮き上がり有無、フィルタへの侵入性を試験で確認する。(図1)

フィルタ上流に、邪魔板を設置する。(図2)

【振動時フィルタ閉塞】

No.132



図1 珪砂 $100\mu\text{m}$ 、高さ785mm乾燥後

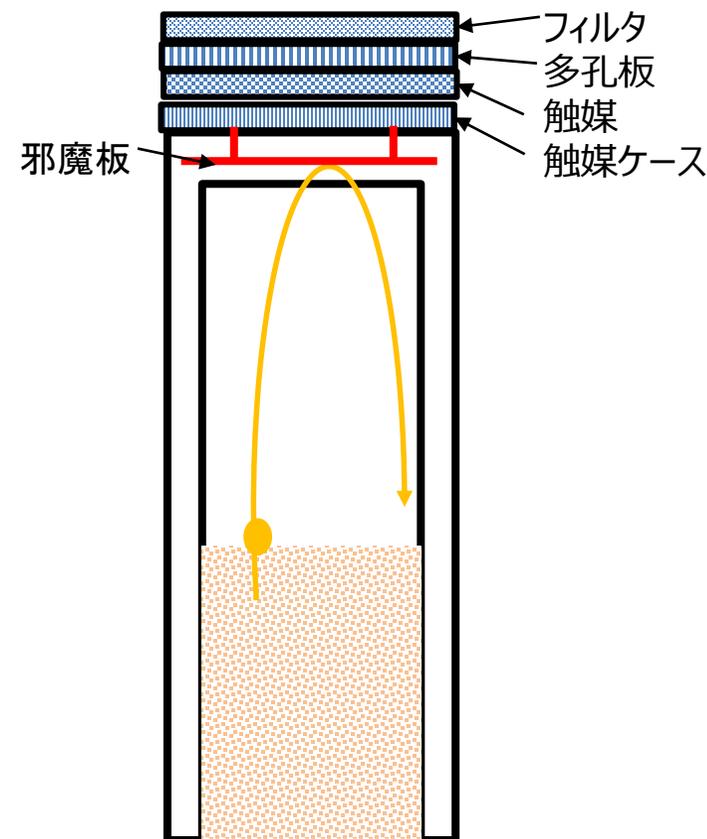


図2 粒子侵入防止

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

④成果の反映先への寄与

粉状燃料デブリの挙動評価を実施し、粉状燃料デブリ扱い時の収納方法の概念の絞り込みの検討に寄与できるものとする。

⑤現場への適用性の観点における分析

燃料デブリの挙動評価は、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乾燥処理および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、所期計画通り目標を達成できたと判断する。

- 舞い上がり等の挙動が大きいと推定される収納缶での乾燥処理時を対象とした粉状燃料デブリの挙動を、文献などによる類似事例調査やCFD等を用いた流動解析により推定し、粉状燃料デブリの安定保管までの取り扱い時や、保管時に維持すべき安全機能への影響を評価していること。
(TRLレベル:3)

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

⑦まとめ

- ・粉状燃料デブリの挙動を評価するため、スラッジ飛散挙動、拡散沈着、重力沈降、凝縮等に関する文献調査を行い、収納缶内のスラッジマスバランスを検討する手計算モデルおよび粉体の挙動評価に関する流動解析の解析条件を検討した。また、流動解析に必要なとなる粉体の飛散データを取得するための試験を計画し、実施して飛散データ(飛散量、粒径)を取得した。
- ・上記の検討で設定した解析条件に基づき、収納缶内の乾燥処理時における粉状燃料デブリの挙動評価(収納缶内のガス流速、スラッジ濃度分布、収納缶のフィルタへの粉状燃料デブリの到達量等)を実施した。
- ・上記で検討した収納缶内の粉状燃料デブリの挙動評価の結果を踏まえ、粉状燃料デブリの保管までの取り扱い時、保管時に維持すべき安全機能として、水素対策に影響する収納缶のフィルタ閉塞の有無への影響を評価した。

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

⑧今後の課題(1/2)

- ・文献調査および試験による飛散データの取得、得られた試験データ等に基づく流動解析、収納缶内の乾燥処理時における粉状燃料デブリの挙動評価を実施し、粉状燃料デブリの保管までの取り扱い時、保管時に維持すべき安全機能として、水素対策に影響する収納缶のフィルタ閉塞の有無への影響を評価した。

粉状燃料デブリの挙動の評価結果から、実機適用に向けて想定される下記の技術課題の解決に向けた検討が必要である。

✓ 粒径サイズが大きく異なる燃料デブリの混在時の飛散挙動の把握

粉状燃料デブリの乾燥時、スラッジ層内の粒子ならびに水蒸気の流動性が良好な方がスラッジ飛散量が多くなる。そのため、100 μ m以上の粒状、塊状燃料デブリと粉状燃料デブリが混在するような体系でのスラッジ飛散が厳しいと予想されることから、試験等により飛散挙動を把握が必要。

✓ 乾燥後の粉状燃料デブリの取り扱い時の飛散挙動の確認

粉状燃料デブリの乾燥後、スラッジの流動性が悪いことから、移送時や振動時のスラッジ飛散量は少ないと考えられる。粉状燃料デブリの一連の取り扱いを考慮して想定される振動や落下等により、スラッジ飛散の問題が生じないことを試験等により確認することが必要。

✓ フィルタ設計に必要なデータの取得

粉状燃料デブリの乾燥時、スラッジ到達量に対するフィルタの閉塞性、圧力損失の時間変化を試験等により把握することが必要。

6. 実施内容

6.3 粉状燃料デブリの挙動の評価

⑧今後の課題(2/2)

- ・文献調査および試験による飛散データの取得、得られた試験データ等に基づく流動解析、収納缶内の乾燥処理時における粉状燃料デブリの挙動評価を実施し、粉状燃料デブリの保管までの取り扱い時、保管時に維持すべき安全機能として、水素対策に影響する収納缶のフィルタ閉塞の有無への影響を評価した。
粉状燃料デブリの挙動の評価結果から、実機適用に向けて想定される下記の技術課題の解決に向けた検討が必要である。

✓粉状燃料デブリの挙動評価の再現性

乾燥時飛散速度の再現性については、誤差も含めてデータの信頼性についても評価する必要がある。また、飛散速度に大きな影響を与える噴きこぼれが起こる条件、起きない条件等の試験条件の整理が必要である。

✓粉状燃料デブリの挙動評価の最適化

スラッジ高さに対する収納効率と乾燥時間には相反するところもあり、トータルとして最適な収納条件を整理する必要がある。

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

①目的、目標

粉状燃料デブリ性状、安全要求事項等の条件および回収経路を考慮した上で、粉状燃料デブリを安定保管状態に持ち込むための収納方法の概念を複数提案し、安全機能要求への適合性、スループットへの影響等、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、それらの指標に対する評価を行い、絞り込みを行う。

②既存技術との対比

燃料デブリの取り出し時には、粉状燃料デブリの回収が見込まれることから、粉状燃料デブリを安定保管状態に持ち込むための収納方法を検討する必要がある。

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

a. 検討条件の整理(2/2)

先行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)にて整理した粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリについて、保管様式の検討で想定する燃料デブリの状態に分類した。

<評価対象とする粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの条件>

| 種類 | 含有物 | 粒径 [μm] | 密度 [g/cm ³] | 発生場所 | 安全要求事項 | 燃料デブリの状態 |
|---------------|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 凝集沈殿物 | 燃料デブリ(熔融燃料、炉心構造物)、コンクリート、硫酸AL | 数～100 | 1 | 増設建屋内の沈降分離槽(フィルタ等で除去した沈殿物) | ・形状管理による臨界管理 ・ベント等による水素爆発下限界の維持 | スラリー・スラッジ状、又は、粉状 ^{注2} |
| 中性子吸収材 | Gd ₂ O ₃ 、水ガラス等 | 数～500 | 2.1～4.3 | RPV内、PCV内の燃料デブリ加工部分 | 特になし(吸収材の安全性は他PJにて確認済み) | 粉状 |
| 粉状MCCI生成物、破砕片 | MCCI生成物(燃料デブリ、コンクリート) | ～100 | 3.96～4.05 | RPV内、PCV内の燃料デブリ加工部分 | ・形状管理による臨界管理 ・ベント等による水素爆発下限界の維持 | 粉状 |
| 燃料デブリ加工の切りくず | アルミナ、ステンレス | ～1 | 3.95～7.93 | RPV内、PCV内の燃料デブリ加工部分 | 特になし | 粉状 |
| 液相系フィルタ | 燃料デブリ、MCCI生成物 | — ^{注1} | — ^{注1} | 増設建屋設置の液相系フィルタ | ・形状管理による臨界管理 ・ベント等による水素爆発下限界の維持 | 粉状(フィルタを含む) |
| 気相系フィルタ | 燃料デブリ、MCCI生成物 | — ^{注1} | — ^{注1} | RPV内、PCV内の空調系統フィルタ、局所回収用フィルタ | ・形状管理による臨界管理 ・ベント等による水素爆発下限界の維持 | 粉状(フィルタを含む) |

注1: フィルタの濾過性能(メッシュ寸法)による。

注2: スラリー・スラッジ状の凝集沈殿物を乾燥させたものを想定する。

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

b.粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(1/10)

6.1項から6.3項で得られた成果を考慮して、粉状燃料デブリの安全な取り扱い及び保管状態に持ち込むための収納方法の概念を複数検討する。

収納方法の概念検討する上での検討方針を以下に示す。

<収納方法の概念検討時の検討方針>

- ・粉状燃料デブリの移送及び保管などの取り扱いを実施する際、2020年度までに検討^{注1}された粒状、塊状の燃料デブリを回収対象とした収納缶の取り扱い方法や取り扱い設備と同じにすることにより、取り扱い設備を共用することが可能となり、合理的と考えられる。そのため、粉状燃料デブリの収納方法の概念検討では、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の形状をベースとする。
- ・粉状燃料デブリの一時保管を目的とした専用容器として、収納缶と比較して大容量の収納が可能な容器の概念案も検討する。
- ・収納対象とする粉状燃料デブリは、発生場所にて収納容器(以降のページで検討)に直接収納(回収)する、もしくは取り扱いエリアの寸法制限等により発生場所での直接収納が困難なため収納容器への収納が可能な別の場所まで内容器(収納容器より一回り小さく、収納容器に収納できる容器)にて取り扱われることを想定する。また、粒状、塊状燃料デブリと同程度の性状^{注1}を想定し、臨界管理が必要なものとする。(放射性廃棄物ではない)

注1:平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告書(公開版)で報告されている収納缶の構造、及び想定されている燃料デブリの性状

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

b.粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(2/10)

前頁の検討方針に基づき、粉状燃料デブリの収納方法として以下の8ケースの概念案を検討した。

＜収納方法の概念案＞

- (a) 回収された粉状燃料デブリの状態のまま収納缶^{注1}に直接収納する。
(以下、「収納缶へ直接収納(内容器無)」と略す)
- (b) 回収された粉状燃料デブリの状態のまま水切り用のメッシュ構造のない内容器に入れ、内容器を収納缶^{注1}に収納する。(以下、「収納缶へ直接収納(内容器有)」と略す)
- (c) 回収された粉状燃料デブリを収納缶に直接入れ、収納缶^{注1}で乾燥処理を行う。
(以下、「収納缶内へ収納後に乾燥(内容器無)」と略す)
- (d) 回収された粉状燃料デブリを水切り用のメッシュ構造のない内容器に入れ、収納缶に収納した上で乾燥処理を行う。(以下、「収納缶内へ収納後に乾燥(内容器有)」と略す)
- (e) 回収された粉状燃料デブリを収納缶に直接入れ、収納缶^{注1}で固化処理を行う。
(以下、「収納缶内へ収納後に固化(内容器無)」と略す)
- (f) 回収された粉状燃料デブリを水切り用のメッシュ構造のない内容器に入れ、収納缶^{注1}に収納した上で固化処理を行う。(以下、「収納缶内へ収納後に固化(内容器有)」と略す)
- (g) 回収された粉状燃料デブリを収納缶^{注1}に直接入れ、同時に集塵を行う。
(以下、「収納缶内へ収納時に集塵(内容器無)」と略す)
- (h) 回収された粉状燃料デブリをタンクに直接入れ、一時保管する。
(以下、「タンクへ一時保管」と略す)

注1:形状管理による臨界管理が必要な場合は、内径220mmの粒状、塊状燃料デブリ用の収納缶とし、
臨界管理の緩和が可能な場合は、内径220mmより大きい収納缶とする。

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

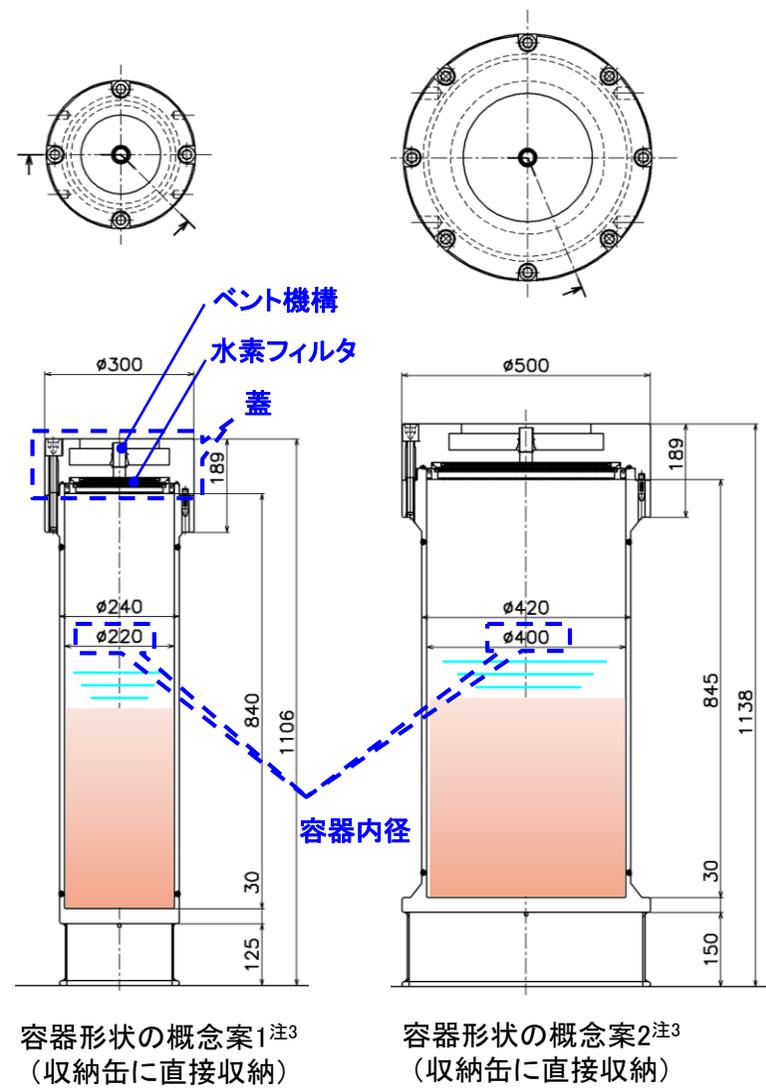
b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(3/10)

< 収納方法の概念案(1/8) >

(a) 収納缶へ直接収納(内容器無)の場合の容器概念案
回収された燃料デブリを**直接収納**して、取り扱うための
容器概念案を以下に示す。

| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|--------------------|---|--|
| (a) 収納缶へ直接収納(内容器無) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを容器に直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。 ⇒蓋付き構造 ・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、容器内の放射性物質を閉じ込めつつ、水素放出が可能な構造。 ⇒水素フィルタ^{注1}付きベント機構 ・収納缶の内径寸法により未臨界を担保。 ⇒容器内径220mm。 臨界管理の緩和が可能な収納物の場合、容器内径を拡大(400mm程度)。(粒状、塊状燃料デブリ用収納缶^{注2}と同じ) | <p>【概念案1】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構なし)と同じ構造 (内径φ220mm、材質SUS316L) |
| | | <p>【概念案2】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・形状による臨界管理を必要としないため、【概念案1】の収納缶に対して、収納容積を拡大 (内径φ400mm、材質SUS316L) |

注1: 放射性物質(フィルタのメッシュ径より大きい粒子)は捕獲し、水素爆発に影響する水素や酸素を含む気体は通過させる機能を有したフィルタを想定。次葉以降同義
 注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」で収納量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法



注3: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告(公開版)に対して、一部情報を追加

6. 実施内容

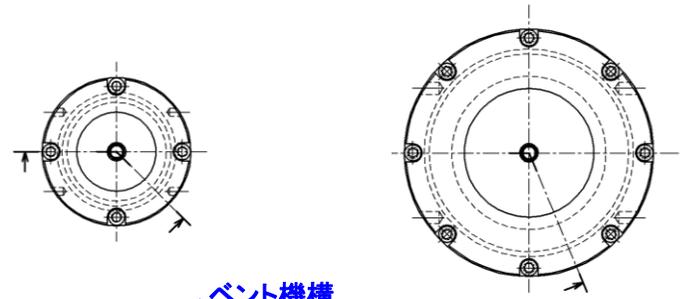
6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

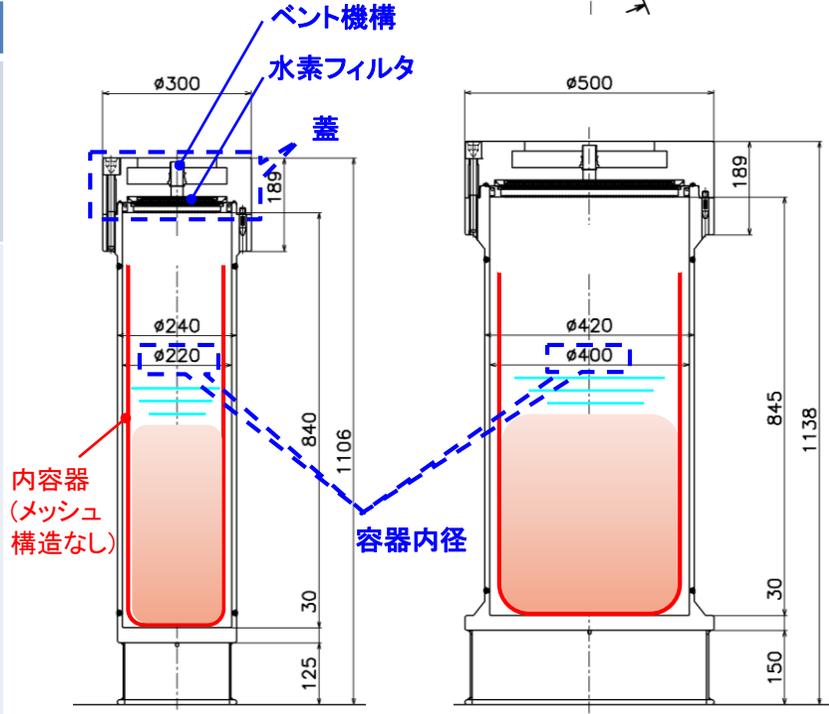
b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(4/10)

< 収納方法の概念案(2/8) >

(b) 収納缶へ直接収納(内容器有)の場合の容器概念案
 回収された燃料デブリを水切り用のメッシュ構造のない**内容器**
 に収納して、取り扱うための容器概念案を以下に示す。



| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|--------------------|--|--|
| (b) 収納缶へ直接収納(内容器有) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納缶までの移送手段がない、または、取り扱いエリアの寸法制限等により、粉状燃料デブリを収納缶に直接収納が困難な場合の対応。 | <p>【概念案3】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構なし)に内容器を追加した構造(内径φ220mm、材質SUS316L) |
| | | <p>【概念案4】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・形状による臨界管理を必要としないため、【概念案3】の収納缶に対して、収納容積を拡大(内径φ400mm、材質SUS316L) |



容器形状の概念案3^{注2}
 (収納缶の内容器に直接収納)

容器形状の概念案4^{注2}
 (収納缶の内容器に直接収納)

注1: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」で収容量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法

注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告(公開版)に対して、一部情報を追加

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

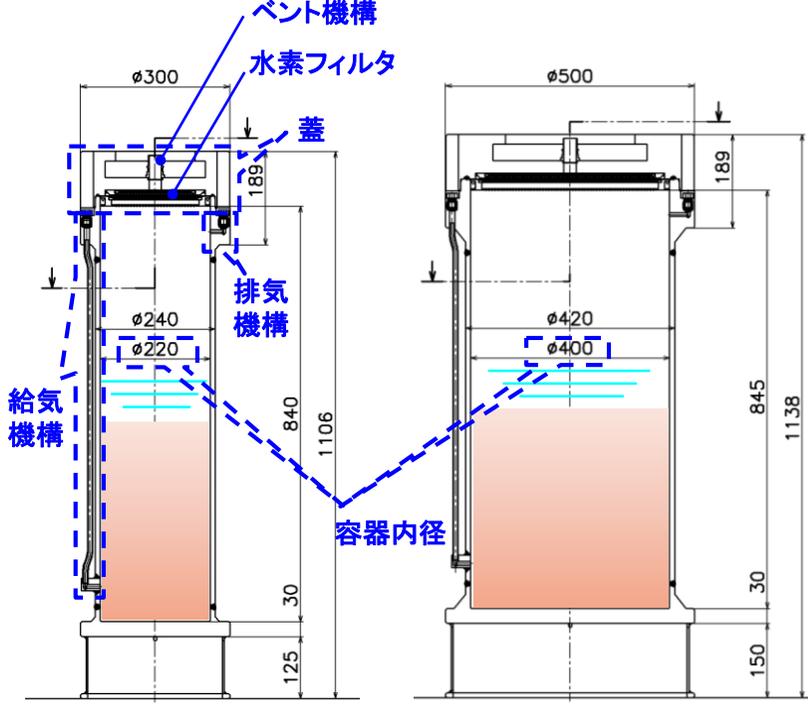
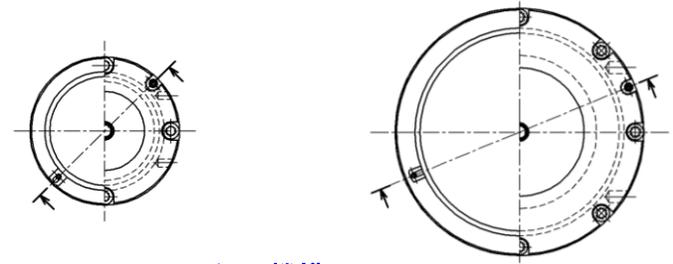
③実施事項、成果

b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討 (5/10)

< 収納方法の概念案 (3/8) >

(c) 収納缶内へ収納後に乾燥(内容器無)の場合の容器概念案
回収された燃料デブリを**直接収納し乾燥処理**を行い、
取り扱うための容器概念案を以下に示す。

| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|-------------------------------|--|---|
| (c) 収納缶内へ 収納後に乾燥 (内容器無) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを容器に直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。 ⇒ 蓋付き構造 ・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、容器内の放射性物質を閉じ込めつつ、水素放出が可能な構造。 ⇒ 水素フィルタ付きベント機構 ・容器での乾燥処理に対応した構造。 ⇒ 温風乾燥^{注1}が可能な給気/排気構造。 ・収納缶の内径寸法により未臨界を担保。 ⇒ 容器内径220mm。 臨界管理の緩和が可能な収納物の場合、容器内径を拡大(400mm程度)。(粒状、塊状燃料デブリ用収納缶^{注2}と同じ) | <p>【概念案5】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構あり)と同じ構造 (内径φ220mm、材質SUS316L) <p>【概念案6】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・形状による臨界管理を必要としないため、【概念案5】の収納缶に対して、収納容積を拡大 (内径φ400mm、材質SUS316L) |



容器形状の概念案5^{注3}
(収納缶に直接収納し、乾燥処理)

容器形状の概念案6^{注3}
(収納缶の直接収納し、乾燥処理)

注1: 令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業補助金(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))」にて検討している粉状燃料デブリの乾燥方式
 注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」で収納量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法

注3: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告(公開版)に対して、一部情報を追加

6. 実施内容

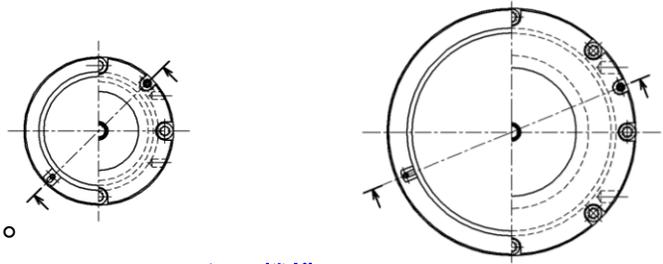
6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

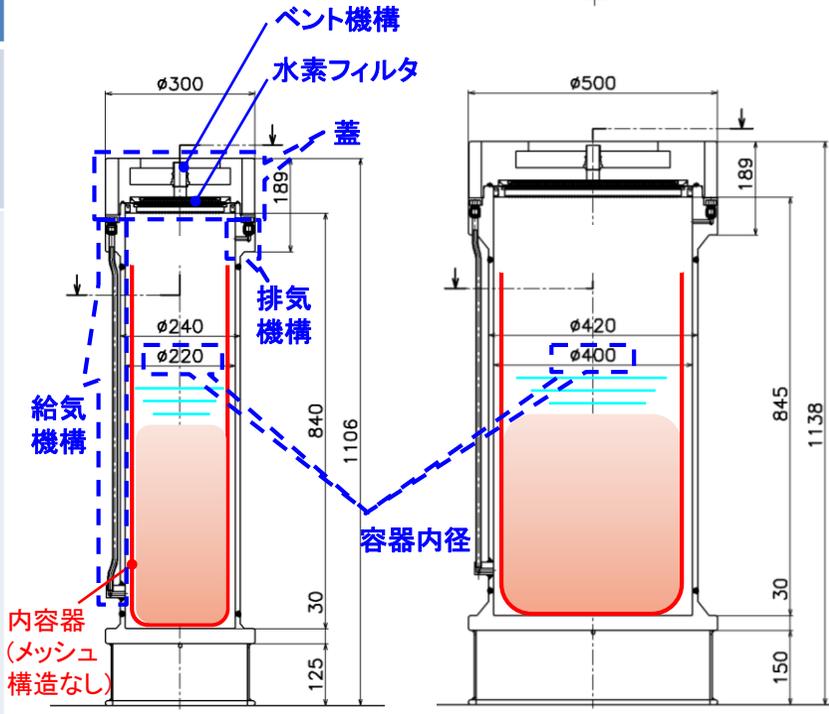
b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(6/10)

< 収納方法の概念案(4/8) >

(d) 収納缶内へ収納後に乾燥(内容器有)の場合の容器概念案
回収された燃料デブリを水切り用のメッシュ構造のない内容器に
収納し乾燥処理を行い、取り扱うための容器概念案を以下に示す。



| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|-------------------------------|--|---|
| (d) 収納缶内へ 収納後に乾燥 (内容器有) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納缶までの移送手段がない、または、取り扱いエリアの寸法制限等により、粉状燃料デブリを収納缶に直接収納が困難な場合の対応。 ⇒内容器の追加 ・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを入れた内容器を直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。 ⇒蓋付き構造 ・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、容器内の放射性物質を閉じ込めつつ、水素放出が可能な構造。 ⇒水素フィルタ付きベント機構 ・容器での乾燥処理に対応した構造。 ⇒温風乾燥^{注1}が可能な給気/排気構造。 ・収納缶の内径寸法により未臨界を担保。 ⇒容器内径220mm。 臨界管理の緩和が可能な収納物の場合、容器内径を拡大(400mm程度)。(粒状、塊状燃料デブリ用収納缶^{注2}と同じ) | <p>【概念案7】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構あり)に内容器を追加した構造(内径φ220mm、材質SUS316L) <p>【概念案8】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・形状による臨界管理を必要としないため、【概念案7】の収納缶に対して、収納容積を拡大(内径φ400mm、材質SUS316L) |



容器形状の概念案7^{注3}
(収納缶の内容器に
収納し、乾燥処理)

容器形状の概念案8^{注3}
(専用内容器の内容器に
収納し、乾燥処理)

注1: 令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業補助金(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))」にて検討している粉状燃料デブリの乾燥方式

注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」で収分量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法

注3: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告(公開版)に対して、一部情報を追加

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

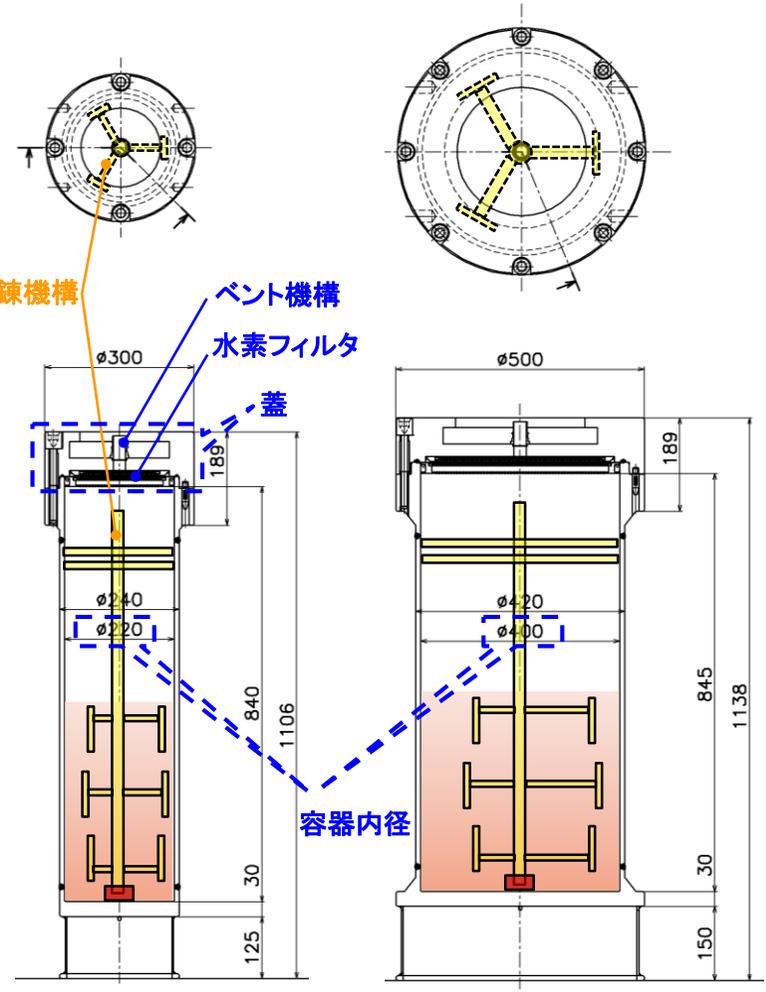
③実施事項、成果

b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(7/10)

< 収納方法の概念案(5/8) >

(e) 収納缶内へ収納後に固化(内容器無)の場合の容器概念案
回収された燃料デブリを**直接収納し固化処理**を行い、
取り扱うための容器概念案を以下に示す。

| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|-------------------------------|---|---|
| (e) 収納缶内へ 収納後に固化 (内容器無) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを容器に直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。 | <p>【概念案9】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構なし)に固化処理用の混錬構造を追加した構造 (内径φ220mm、材質SUS316L) <p>【概念案10】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・形状による臨界管理を必要としないため、【概念案9】の収納缶に対して、収納容積を拡大 (内径φ400mm、材質SUS316L) |
| 【6.1項の事例調査で確認された概念】 | <p>⇒蓋付き構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、容器内の放射性物質を閉じ込めつつ、水素放出が可能な構造。 <p>⇒水素フィルタ付きベント機構</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粉状燃料デブリ収納後の収納缶取り扱い時における容器内外での飛散を防止するため容器内での固化処理が可能な構造。 <p>⇒容器内の混錬機構</p> <ul style="list-style-type: none"> ・収納缶の内径寸法により未臨界を担保。 <p>⇒容器内径220mm。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・臨界管理の緩和が可能な収納物の場合、容器内径を拡大(400mm程度)。 (粒状、塊状燃料デブリ用収納缶^{注1}と同じ) | |



容器形状の概念案9^{注2}
(収納缶に直接収納し、
固化処理)

容器形状の概念案10^{注2}
(収納缶に直接収納し、
固化処理)

注1: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
で収納量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法

注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
2020年度最終報告(公開版)に対して、一部情報を追加

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(8/10)

< 収納方法の概念案(6/8) >

(f) 収納缶内へ収納後に固化(内容器有)の場合の容器概念案
回収された燃料デブリを水切り用のメッシュ構造のない内容器に
収納し固化処理を行い、取り扱うための容器概念案を以下に示す。

| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|-------------------------------|--|---|
| (f) 収納缶内へ 収納後に固化 (内容器有) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納缶までの移送手段がない、または、取り扱いエリアの寸法制限等により、粉状燃料デブリを収納缶に直接収納が困難な場合の対応。 | <p>【概念案11】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構なし)に内容器及び固化処理用の混錬構造を追加した構造と同じ構造 (内径φ220mm、材質SUS316L) |
| | | <p>【概念案12】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・形状による臨界管理を必要としないため、【概念案11】の収納缶に対して、収納容積を拡大 (内径φ400mm、材質SUS316L) |

⇒内容器の追加

・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを入れた内容器を直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。

⇒蓋付き構造

・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、容器内の水素放出が可能な構造。

⇒ベント機構付き構造

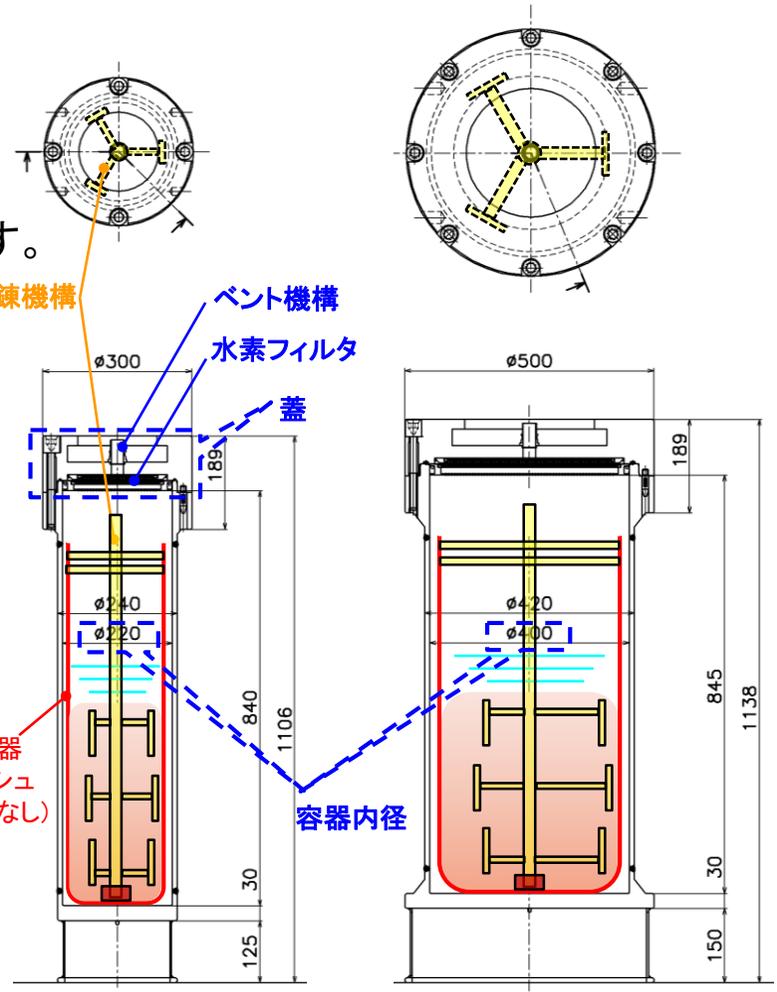
・粉状燃料デブリ収納後の収納缶取り扱い時における容器内外での飛散を防止するため容器内での固化処理が可能な構造。

⇒容器内の混錬機構

・収納缶の内径寸法により未臨界を担保。

⇒容器内径220mm。

臨界管理の緩和が可能な収納物の場合、容器内径を拡大(400mm程度)。(粒状、塊状燃料デブリ用収納缶^{注1}と同じ)



容器形状の概念案11^{注2}
(収納缶の内容器に
収納し、固化処理)

容器形状の概念案12^{注2}
(収納缶の内容器に
収納し、固化処理)

注1: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」 注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
で収納量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法 2020年度最終報告(公開版)に対して、一部情報を追加

6. 実施内容

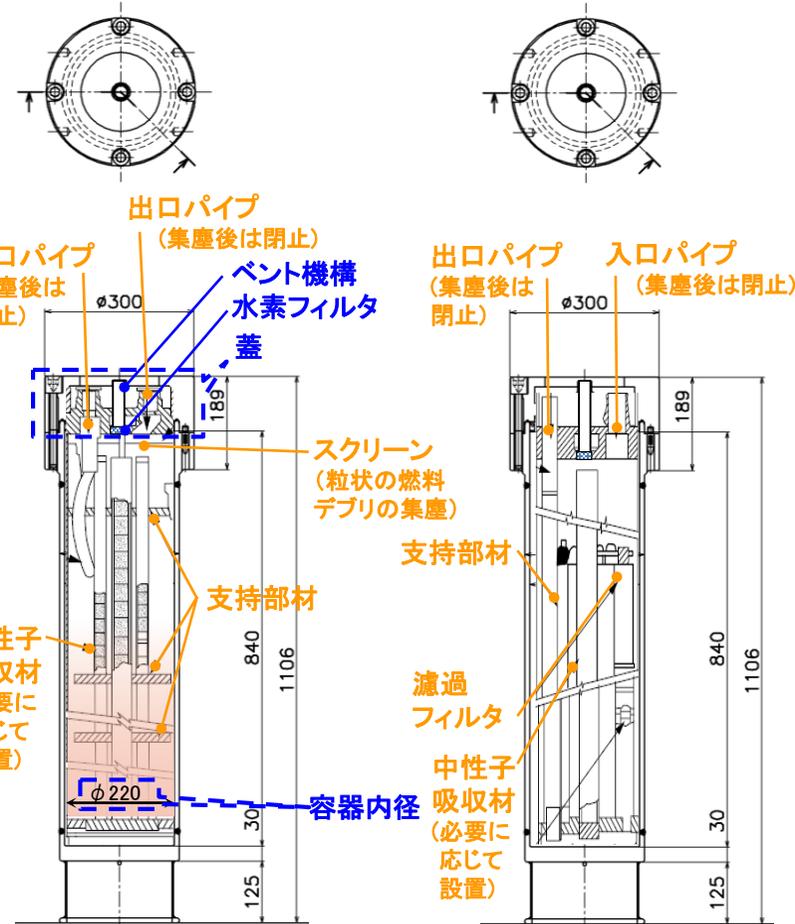
6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討 (9/10)

< 収納方法の概念案 (7/8) >

(g) 収納缶内へ収納時に集塵(内容器無)の場合の容器概念案
 回収された燃料デブリを**直接収納しながら、容器内で集塵し、**
 取り扱うための容器概念案を以下に示す。



容器形状の概念案13^{注2}
 (収納缶に直接収納し、同時に集塵)

容器形状の概念案14^{注2}
 (収納缶に直接収納し、同時に集塵)

| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|-------------------------------|---|---|
| (g) 収納缶内へ 収納時に集塵 (内容器無) | <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の取り扱い設備により取り扱い可能であることが合理的であるため、外形形状は、粒状、塊状燃料デブリ用収納缶をベースにする。 ・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを容器に直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。 | <p>【概念案13】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構なし)に集塵構造(比較的粒径の大きい場合)を追加した構造(内径φ220mm、材質SUS316L) |
| 【6.1項の事例調査で確認された概念】 | <p>⇒蓋付き構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、容器内の水素放出が可能な構造。 <p>⇒ベント機構付き構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粉状燃料デブリ(一部、粒状燃料デブリを含む)を収納缶に収納しながら、同時に容器内で集塵及び水の除去が可能な構造。 <p>⇒集塵構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・収納缶の内径寸法により未臨界を担保。 <p>⇒容器内径220mm。</p> <p>臨界管理の緩和が可能な収納物の場合、容器内径を拡大(400mm程度)。(粒状、塊状燃料デブリ用収納缶^{注1}と同じ)</p> | <p>【概念案14】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒状、塊状燃料デブリ用収納缶(送気機構なし)に集塵構造(粒径の小さい場合)を追加した構造(内径φ220mm、材質SUS316L) |

注1: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」で収納量増加の観点から検討した粒状、塊状燃料デブリ用収納缶の内径寸法

注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告(公開版)に対して、TMI-2での燃料デブリ回収に使用されたノックアウトキャニスタ及びフィルタキャニスタの構造(“TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis”、DOE/SNF/REP-084より)他の情報を追加

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

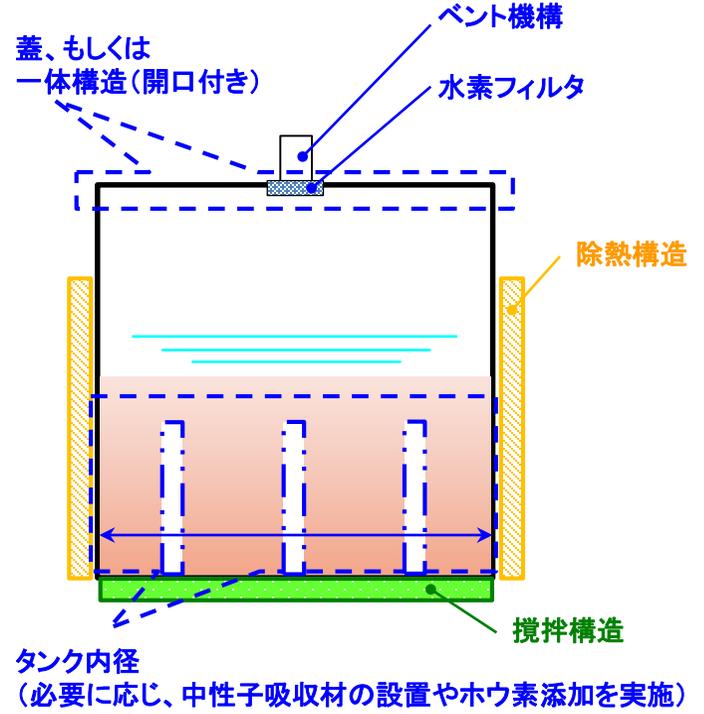
b. 粉状燃料デブリの収納方法の概念検討(10/10)

< 収納方法の概念案(8/8) >

(h) タンクへ一時保管の場合の容器概念案

回収された燃料デブリをタンクに直接収納し、一時保管する容器概念案を以下に示す。

| 収納方法の概念 | 容器の思想 | 容器概念案 |
|--------------|--|--|
| (h) タンクへ一時保管 | <ul style="list-style-type: none"> ・粉状燃料デブリの一時保管を目的とした専用容器として、(a)~(h)の収納缶と比較して大容量の収納が可能なタンクとする。(タンクまでの移送については、別の容器等により実施する必要がある。) ・収納対象とする様々な形状の燃料デブリを容器に直接収納可、かつ、収納後に放射性物質の閉じ込めが可能な構造。 ⇒ <u>蓋付き構造、もしくは、一体構造(開口付き)</u> ・燃料デブリから発生する水素の爆発防止の観点から、タンク内の水素放出が可能な構造。 ⇒ <u>ベント機構付き構造</u> ・大量の粉状燃料デブリの収納を想定し、一時保管中の除熱が可能な構造。 ⇒ <u>除熱構造(冷却水、エアジャケット等)</u> ・タンクからの再取り出し時、タンク内底部に堆積した粉状燃料デブリの取り出しが可能な構造。 ⇒ <u>攪拌構造(エアリフト、攪拌装置等)</u> ・タンクの内径寸法及び必要に応じて中性子吸収材等に未臨界を担保。 ⇒ <u>臨界管理の観点から、粉状燃料デブリの収納量に対応した、タンク内径を設定。必要に応じて、中性子吸収材の設置やホウ素添加等を実施</u> | <p>【概念案15】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タンク形状にベント機構及び冷却機能、攪拌機能を追加した構造 (材質SUS316L) |



容器形状の概念案15
(タンクへの一時保管)

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

c. 収納方法の絞り込み(1/3)

6.4③b項で検討した粉状燃料デブリの収納方法の概念案に対して、安全機能要求(遮蔽、未臨界、水素対策など)への適合性、スループットへの影響など、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標(遮蔽、未臨界維持、水素対策、スループットなど)を設定し、粉状燃料デブリの収納方法に対する評価に基づき、絞り込みを実施した。

【比較評価の方針・前提条件】

- 本評価においては、液体を多量に含んだ状態のスラリー・スラッジ状の燃料デブリ、および液体をほとんど含まない状態(乾燥した粉を含む)の粉体状の燃料デブリの2種類に分類して、収納缶、又は、タンクへ収納された状態以降について相対比較する。
- 収納された粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリは、一時保管後に再度取り出す可能性があるものとする。
- 収納缶及びタンクにはベントラインを設け、燃料デブリから発生する水素を掃気可能な構造を想定する。
- 移送時においては、輸送容器を7日間密封搬送することを前提とする。
即ち、移送時には、移送容器が密封されるため、その間に火災・爆発防止への考慮が必要となる。

【評価指標】

- ・放射性物質を取り扱う上での安全要求(遮蔽、未臨界維持、閉じ込め、水素対策、除熱、長期健全性)
- ・スループット(収納/取り扱いの容易さ)
- ・収納効率(容器あたりの収納量)

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

c. 収納方法の絞り込み(2/3)

粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリに対し、b項で検討した収納方法の概念案に対する適応性を相対比較した。

表1 スラリー・スラッジ状の燃料デブリに対する収納方法比較

 : 解決が困難な項目
 : 今後の検討により解決できる可能性がある項目
← : 相対比較で差異がある (例: 右側の方が有利)

| 比較項目 | 収納方法の概念案 | | | | | | | | |
|----------------------|---|---|---|------------------------|---|-------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|
| | (a) 収納缶へ直接収納 (内容器無) | (b) 収納缶へ直接収納 (内容器有) | (c) 収納缶内へ収納後に乾燥 (内容器無) | (d) 収納缶内へ収納後に乾燥 (内容器有) | (e) 収納缶内へ収納後に固化 (内容器無) | (f) 収納缶内へ収納後に固化 (内容器有) | (g) 収納缶内へ収納時に集塵 (内容器無) | (h) タンクへ一時保管 | |
| 被ばく防止 (遮蔽) | 問題なし (収納缶をセル内及び取り扱い設備(移送容器など)で取り扱うことで、セル/建屋/取り扱い設備で遮蔽) | | | | | | | | |
| 未臨界維持 | 問題なし (収納缶の内径寸法により未臨界を担保) | | | | | | | 内径寸法の管理。必要に応じて、中性子吸収材等を設置 | |
| 放射性物質の閉じ込め | 問題あり (ベントラインより放射性物質が容器から漏洩する可能性有り、移送や保管は困難) | 問題なし (乾燥後の粉体状の燃料デブリは、フィルタにより放射性物質の放出を抑制) | | | 問題なし (粉体状の燃料デブリは少ない。粉体状の燃料デブリはフィルタにより放射性物質の放出を抑制) | | 問題なし (フィルタにより放射性物質の放出を抑制) | | |
| 火災・爆発防止 (水素対策) | 問題あり (水素発生速度によっては、移送時に水素濃度が爆発下限界に達する可能性有。また、保管時に含水率の変化により水素ガスだまりが生成し、爆発下限界に達する可能性有) | 問題なし (乾燥処理により水素発生量は少ないと共に、水素が発生してもベントラインから掃気可能。また、乾燥後は燃料デブリ間の固着力が大きく、飛散し難く、フィルタの閉塞リスクは低い) | | | 問題なし (固化形態によっては水素が発生するもののベントラインから掃気可能) | | 問題なし (水素が発生しても、ベントラインから掃気可能) | | |
| 異常な過熱の防止(除熱) | 問題なし(自然対流冷却可能) | | 問題なし(乾燥時:異常発熱時は加熱を停止、保管時:自然対流冷却可能) | | 問題なし(自然対流冷却可能) | | 問題なし(自然対流冷却可能) | | |
| 長期健全性 | 一般的に、スラリー・スラッジ状(液体状)の物質を取り扱うため、固体状と比較し腐食し易い | | スラリー・スラッジ状の物質を処理(乾燥、固化)することにより、液体状で存在しないため、スラリー・スラッジ状と比較して腐食のリスクは低い | | | | | | (a)、(b)と同等 |
| スループット (収納/取り扱いの容易さ) | 収納/取り扱いが比較的容易 | | 乾燥処理を行うため、(a)、(b)よりもスループットへ影響あり | | 固化処理を行うため、(a)~(d)よりもスループットへ影響あり | | 集塵処理を行うため(a)、(b)よりもスループットへ影響あり | | 移送が困難 (別の移送手段が必要) |
| 収納効率 (容器あたりの収納量) | (b)と比較し収納量多((c)と同等と想定) | (a)と比較し収納量少((d)と同等と想定) | (d)と比較し収納量多((a)と同等と想定) | (c)と比較し収納量少((b)と同等と想定) | (f)と比較し収納量多(固化可能な量は検討要) | (e)と比較し収納量少(固化可能な量は検討要) | 濾過するため、(a)~(f)と比較し収納効率が高い | | 除熱及び未臨界維持の観点から大型化できない可能性あり(収納効率が低くなる) |
| 上記以外の重大な課題点 | ・スラリー・スラッジは液体を含むため、腐食のリスクがあり、長期健全性の確認が必要 ・水素発生速度の把握が必要 | | 乾燥ガス掃気が不可(乾燥が不成立) | | 特になし | | ・固化方法の検討が必要(固化可能な重量及び条件の検討を含む) ・(e)は再取り出し困難 | | ・容器の構造が複雑 常時電源を確保する必要がある |
| 適応性比較 | ×:安全要求を満足しない | | ×:乾燥困難のため、成立しない | | ○ | | ×:再取り出しが困難 △:(d)と比較し、課題点あり | | ○~△:収納効率は高いが容器構造が複雑 △~×:課題点が多い |

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

③実施事項、成果

c. 収納方法の絞り込み (3/3)

: 解決が困難な項目
 : 今後の検討により解決できる可能性がある項目
← : 相対比較で差異がある (例: 右側の方が有利)

表1 粉体状の燃料デブリ(粉体状の燃料デブリが付着したフィルタを含む)に対する収納方法比較

| 比較項目 | 収納方法の概念案 | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|---------------------|--|------------------------|---|------------------------|---|---------------------------|--|----------------|-------------------------|------------|----|--|
| | (a) 収納缶へ直接収納 (内容器無) | (b) 収納缶へ直接収納 (内容器有) | (c) 収納缶内へ収納後に乾燥 (内容器無) | (d) 収納缶内へ収納後に乾燥 (内容器有) | (e) 収納缶内へ収納後に固化 (内容器無) | (f) 収納缶内へ収納後に固化 (内容器有) | (g) 収納缶内へ収納時に集塵 (内容器無) | (h) タンクへ一時保管 | | | | | | |
| 被ばく防止 (遮蔽) | 問題なし (収納缶をセル内及び取り扱い設備(移送容器など)で取り扱うことで、セル/建屋/取り扱い設備で遮蔽) | | | | | | 粉体状の燃料デブリ (液体をほとんど含まない)では使用しない | (a)~(f)と同等 | | | | | | |
| 未臨界維持 | 問題なし(収納缶の内径寸法により未臨界を担保) | | | | | | 同上 | 内径寸法の管理。必要に応じて、中性子吸収材等を設置 | | | | | | |
| 放射性物質の閉じ込め | 問題なし(ベントラインのフィルタにより放射性物質の放出を抑制) | | 問題なし(乾燥後の粉体状の燃料デブリは、ベントラインのフィルタにより放射性物質の放出を抑制) | | 問題なし(粉体状の燃料デブリは少ない。粉体状の燃料デブリはベントラインのフィルタにより放射性物質の放出を抑制) | | 同上 | (a)、(b)と同等 | | | | | | |
| 火災・爆発防止 (水素対策) | 問題あり(水素が発生してもベントラインより掃気。ただし、取り扱い中の振動等による粉体状の燃料デブリの浮き上がりによりフィルタ閉塞の可能性有) | | 問題あり(乾燥処理により水素発生量は少ないと共に、水素が発生してもベントラインより掃気。ただし、粉体状の燃料デブリの乾燥時や移送時の浮き上がりによりフィルタ閉塞の可能性有) | | 問題なし(固化形態によっては水素が発生するものの、ベントラインから掃気) | | 同上 | (a)、(b)と同等 | | | | | | |
| 異常な過熱の防止(除熱) | 問題なし(自然対流冷却可能) | | 問題なし(乾燥時:異常発熱時は加熱を停止、保管時:自然対流冷却可能) | | 問題なし(自然対流冷却可能) | | 同上 | 冷却水で冷却 (電源確保が必要) | | | | | | |
| 長期健全性 | 一般的に、液体状の物質を取り扱わないため、腐食のリスクは低い | | | | | | 同上 | (a)~(f)と同等 | | | | | | |
| スループット (収納/取り扱いの容易さ) | 収納/取り扱いが比較的容易 | | 乾燥処理を行うため、(a)、(b)よりもスループットへ影響あり | | 乾燥処理を行うため、(a)~(d)よりもスループットへ影響あり | | 同上 | 移送が困難 (別の移送手段が必要) | | | | | | |
| 収納効率 (容器あたりの収納量) | (b)と比較し収納量多((c)と同等と想定) | | (a)と比較し収納量少((d)と同等と想定) | | (d)と比較し収納量多((a)と同等と想定) | | (c)と比較し収納量少((a)と同等と想定) | | (f)と比較し収納量多(固化可能な量は検討要) | | (e)と比較し収納量少(固化可能な量は検討要) | | 同上 | 除熱及び未臨界維持の観点から大型化できない可能性あり (収納効率が低くなる) |
| 上記以外の重大な課題点 | 1)粉状燃料デブリの成分把握 2)粉状燃料デブリの取り扱い方法 3)粉体状の燃料デブリの飛散し、フィルタが閉塞する可能性あり | | 1) (a)、(b)の1~3) 2)流路の確保が困難であり乾燥困難 | | ・(a)、(b)の1~3) | | ・(a)、(b)の1~2) ・固化方法の検討が必要 (固化可能な重量及び条件の検討を含む) ・(e)は再取り出しが困難 | | 同上 | 常時電源を確保する必要がある | | | | |
| 適応性比較 | △:フィルタが閉塞する場合は、火災・爆発の可能性あり | | ×:乾燥困難のため成立しない | | △:フィルタが閉塞する場合は、火災・爆発の可能性あり | | ×:再取り出しが困難 | | ○~△:他より課題点が少ない。(内容器で固化した後専用容器へ収納することも可能) | | —:(使用しない) | △~×:課題点が多い | | |

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

④成果の反映先への寄与

粉状燃料デブリの収納方法の概念を検討および絞り込みを行うことは、粉状燃料デブリの取り扱い方法および粉状燃料デブリ用収納容器の設計の検討に寄与できるものと考ええる。

⑤現場への適用性の観点における分析

保管様式の検討は、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、所期計画通り目標を達成できたと判断する。

- 粉状燃料デブリ性状、安全要求事項等の条件、及び、回収経路を考慮した上で、粉状燃料デブリを安定保管状態に持ち込むための収納方法の概念を複数提案し、安全機能要求への適合性、スループットへの影響等、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、それらの指標に対する評価を行い、絞り込みを行っていること。(TRLレベル:3)

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

⑦まとめ

- ・関連する研究開発より提示された粉状燃料デブリの性状および安全要求事項等を踏まえて評価対象とする粉状燃料デブリの条件を整理し、放射性物質の取り扱い事例調査結果を考慮した粉状燃料デブリの収納方法の容器概念案を複数検討した。
- ・検討した収納方法の概念に対して、安全機能要求への適合性、スループットへの影響等、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、本補助事業で実施した他実施項目（粉状燃料デブリの水素ガス発生特性／放出特性、挙動の評価）での検討成果を考慮して、指標に対する評価を行い、絞り込みを行った。

6. 実施内容

6.4 保管様式の検討

⑧今後の課題

- ・粉状燃料デブリの性状および安全要求事項等を踏まえて、粉状燃料デブリの収納方法の容器概念案を複数検討し、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、本補助事業で実施した他実施項目での検討成果を考慮して、指標に対する評価を行い、絞り込みを行った。

保管様式の検討結果から、実機適用に向けて想定される下記の技術課題の解決に向けた検討が必要である。

✓ 粉状燃料デブリの固化方法の検討

粉状燃料デブリの収納方法の概念案の一つである容器内で粉状燃料デブリを固化する収納缶を実現するためには、固化方法(成分調整、混錬方法、必要に応じて可逆性を持たせることなど)に具体化に向けて、粉状燃料デブリの固化方法について検討が必要。

✓ 粉状燃料デブリの長期保管時に想定される環境及び腐食対策、安定保管方法の検討

粉状燃料デブリを容器に収納後に長期保管する場合、長期保管時に想定される保管方法および環境を考慮した収納缶の腐食発生有無の評価、ならびに腐食管理等の対策の検討が必要。

7. 全体まとめ(1/3)

実施内容に対し、開発目標(No.4)に対する達成状況をまとめる。

| 1. 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析 | |
|--|---|
| 目標達成判断指標(TRL) | 達成状況 |
| <ul style="list-style-type: none">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、安全確保の考え方が整理されていること。(TRL評価の対象外)燃料デブリを塊状、粒状の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) | <ul style="list-style-type: none">仏ラ・アーク再処理工場および国内類似施設における粉状、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調査を行い、注意点、安全確保の考え方を整理した。事例調査結果に基づき、粉状燃料デブリを安全、確実に合理的な保管状態に持ち込むための技術課題の抽出およびその解決フェーズ、解決時期を明確化した。 |
| 2. 水素ガス発生特性、放出特性の検討 | |
| 目標達成判断指標(TRL) | 達成状況 |
| <ul style="list-style-type: none">粉状燃料デブリの水素ガス発生挙動に影響する因子を特定し、その影響度合いについて分析と評価を行い、粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法を提案していること。(終了時目標TRL:レベル3)蓄積された状態の粉状燃料デブリからの水素ガス放出について調査や検討を行い、その放出特性や粒状、塊状燃料デブリとの相違を明らかにし、水素ガス放出に影響する因子の特定およびその影響について分析・評価していること。(終了時目標TRL:レベル3) | <ul style="list-style-type: none">粉状燃料デブリの水素ガス発生挙動に影響する因子を特定し、各因子の影響度合いが考慮できる粉状燃料デブリの水素発生速度予測法を提案した。粉状燃料デブリ内で生成される水素ガスだまりの放出特性の検討および水素ガス放出に影響する因子を特定し、粉状燃料デブリを収納缶で保管する場合の条件を検討した。 |
| 3. 粉状燃料デブリの挙動の評価 | |
| 目標達成判断指標(TRL) | 達成状況 |
| <ul style="list-style-type: none">舞い上がり等の挙動が大きいと推定される収納缶での乾燥処理時を対象とした粉状燃料デブリの挙動を、文献などによる類似事例調査やCFD等を用いた流動解析により推定し、粉状燃料デブリの安定保管までの取り扱い時や、保管時に維持すべき安全機能への影響を評価していること。(終了時目標TRL:レベル3) | <ul style="list-style-type: none">粉状燃料デブリの挙動を評価するため、文献調査および粉体の飛散データ取得、流動解析を実施し、収納缶内の乾燥処理時の粉状燃料デブリの挙動評価を行った。挙動評価に基づく、収納缶のフィルタへの粉状燃料デブリ到達量等の評価を行い、粉状燃料デブリ取り扱い時の安全機能への影響を評価した。 |
| 4. 保管様式の検討 | |
| 目標達成判断指標(TRL) | 達成状況 |
| <ul style="list-style-type: none">粉状燃料デブリ性状、安全要求事項等の条件、及び、回収経路を考慮した上で、粉状燃料デブリを安定保管状態に持ち込むための収納方法の概念を複数提案し、安全機能要求への適合性、スループットへの影響等、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、それらの指標に対する評価を行い、絞り込みを行っていること。(終了時目標TRL:レベル3) | <ul style="list-style-type: none">評価対象とする粉状燃料デブリの条件を整理し、放射性物質の取り扱い事例調査結果等を考慮した粉状燃料デブリの収納方法の容器概念案を複数検討した。検討した収納方法の概念案に対し、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、指標に対する評価を行い、絞り込みを行った。 |

7. 全体まとめ(2/3)

- 仏ラ・アーク再処理工場などの粉状、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を実施。入手した情報を分析し、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の整理、技術課題の抽出、ならびに解決フェーズ、解決時期を明確化した。
- 粉状燃料デブリの水素ガス発生特性への影響が大きい因子が、燃料デブリの性状(重量、燃料含有割合)、含水率に対応した水のエネルギー吸収率および水素発生のG値であることを特定し、各因子の影響度合いが考慮できる粉状燃料デブリの水素発生速度予測法を提案した。また、粉状燃料デブリ内で生成される水素ガスだまりの放出特性を検討し、粉状燃料デブリを収納缶で保管する場合の条件を検討し、実機適用に向けた技術課題と解決策を整理した。
- 粉状燃料デブリの挙動を評価するため、文献調査及び粉体の飛散データ取得試験、流動解析を実施し、収納缶内の乾燥処理時における粉状燃料デブリの挙動評価を行った。挙動評価に基づく、収納缶のフィルタへの粉状燃料デブリ到達量等の評価を実施し、粉状燃料デブリ取り扱い時の安全機能への影響を評価した。
- 評価対象とする粉状燃料デブリの条件を整理し、放射性物質の取り扱い事例調査結果を考慮した粉状燃料デブリの収納方法の容器概念案を複数検討した。検討した収納方法の概念案に対して、粉状燃料デブリの安定保管のために必要な評価指標を設定し、指標に対する評価を行い、絞り込みを行った。

粉状燃料デブリの収納・移送・保管技術の実機適用に向けた課題

| No. | 選定された課題 | 対策案 |
|-----|--|---|
| 1 | ・水素ガス発生予測法の精緻化および検証 | <ul style="list-style-type: none"> ・実燃料デブリの性状把握のためのサンプリング結果に基づく、崩壊熱や燃料含有割合等の条件による水素発生速度評価 ・粉状燃料デブリを模擬した照射試験を実施して、含水率や混在する物質による水素発生G値の確認 |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・粉状燃料デブリの長期保管に向けた安定保管方法の検討 <ul style="list-style-type: none"> ①水素だまり対策 (水素濃度上昇、粉状燃料デブリの溢水の防止) ②腐食対策 | <ul style="list-style-type: none"> ①収納缶の構造変更による水素放出特性の向上およびUC(内容器)への初期充填率の検討 ②サンプリング分析等により粉状燃料デブリ性状を把握し、燃料デブリ性状を踏まえた要素試験等による腐食発生の有無確認 |
| 3 | ・粉状燃料デブリの飛散挙動(粒径サイズの混在状態／振動・落下時)の確認(再現性、最適化を含む) | ・模擬粉体を用いた要素試験等(実規模収納缶を用いた乾燥試験、実規模収納缶と乾燥物を用いた振動、落下試験等)による飛散挙動データ取得 |
| 4 | ・フィルタ設計に必要なデータ取得 | ・模擬粉体を用いた要素試験等によるフィルタ閉塞性および圧力損失の時間変化等のデータ取得 |
| 5 | ・粉状燃料デブリの固化方法の検討 ^{注1} | ・要素試験等による固化方法(成分調整、混錬方法、必要に応じて可逆性を持たせることなど)の具体化 |

注1: 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例調査で確認された実績およびフィルタ閉塞リスクを防ぐ観点から、収納方法の概念案の一つの候補としている。なお、収納対象とする粉状燃料デブリの性状や発生量、最終処分方法などの条件により、固化以外の収納方法を選択する方が良いことも考えられることから、粉状燃料デブリの収納方法の選定に際しては、上記の検討条件を明確にした上での検討が必要である。

参考資料

原研の文献^{注1}では、HEPA保持量は折込型で60g/m²相当である。

| 仕様 | - | 31m ³ /min用 | 56m ³ /min用 | 備考 |
|------|------------------|------------------------|------------------------|--------|
| 断面形状 | mm | 610×610 | 610×610 | ① |
| ろ過面積 | m ² | 20 | 40 | ② |
| 保持量 | g | 1350 | 2400 | ③(平均値) |
| 保持容量 | g/m ² | 67.5 | 60 | ③÷② |

3.4 ダスト負荷加速試験

HEPAフィルタが目詰まりした場合の圧力損失の上昇の程度についてISE型と従来型の比較を行なった。図9はJIS15種ダストを100mg/m³の濃度にて負荷した場合の1段目HEPAフィルタのダスト付着による圧損上昇を示している。図に示されるように、31m³/minのフィルタの圧損はダスト保持量1300～1400gにて最終圧損が50mmAqまで上昇した。また56m³/minのフィルタの圧損はダスト保持量2300～2500gにて最終圧損50mmAqまで上昇した。両者のフィルタのダスト保持容量は、表1に示されるろ過面積にほぼ比例している。図において、ISE型と従来型の曲線が平行に若干ずれているがこれは本試験の再現性(試験時の湿度の違い、ダスト組成の不均一さ)とフィルタ自体の圧損のばらつきによるものであり、フィルタ装置の形状の違いに起因するものではない。

表1 試験に用いた3種類のHEPAフィルタの仕様比較

| 仕様 | 31m ³ /min用 (セパレータタイプ)*① | 50m ³ /min用 (セパレータタイプ)*① | 56m ³ /min用 (セパレータレスタイプ)*② | |
|----------------------------|--|--|--|---------|
| 外形寸法 H×W×D(mm) | ① 610×610×292 | 610×610×290 | ① 610×610×292 | |
| 定格風量 (m ³ /min) | 31 | 50 | 56 | |
| 初期圧損 (mmAq) | 25 | 25 | 25 | |
| 最終圧損 (mmAq) | 50 | 50 | 50 | |
| 捕集効率 φ 0.3μm③ | 99.97 | 99.97 | 99.97 | |
| 構成材料 | 外枠 | 合板 | 合板 | 合板 |
| | 戸材 | ガラスベーパー | ガラスベーパー | ガラスベーパー |
| | セパレータ | アルミ箔 | アルミ箔 | なし |
| | 密封材 | ウレタン樹脂 | ウレタン樹脂 | ウレタン樹脂 |
| | ガスケット | クロプロレン | クロプロレン | クロプロレン |
| ろ過面積 (m ²) | ② 20 | 27 | ② 40 | |
| 重量 (Kg) | 13 | 15 | 25 | |

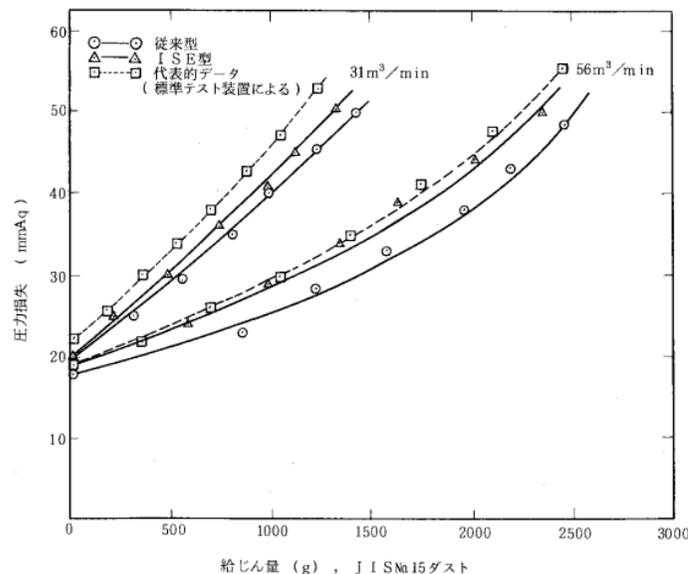
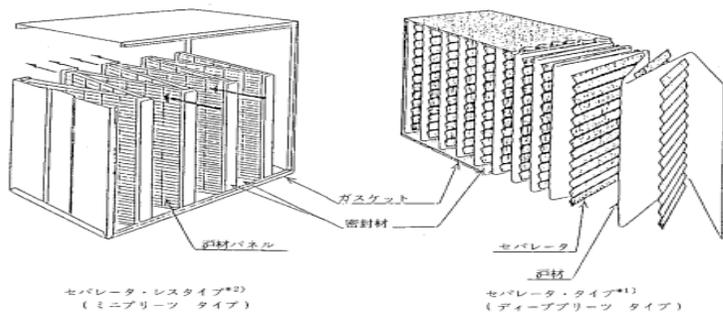


図9 ダスト負荷による1段目HEPAフィルタの圧力損失の上昇

注1: 伊勢著、高性能排気フィルタ装置の性能試験結果報告書(原研フィルタユニットISE型と従来型装置の比較)、JAERI-M 88-118

一般的なフィルタの許容スラッジ量

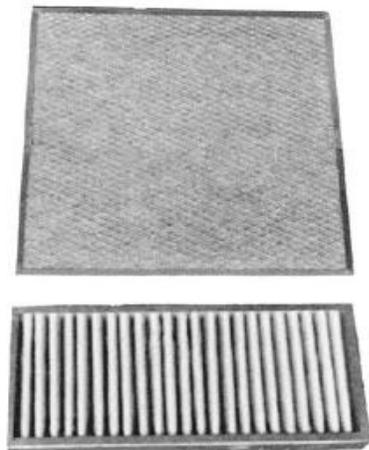


図2 パネル形エアフィルタ 注1



図3 自動巻取形エアフィルタの一例 注1

表1 エアフィルタの性能別分類表 注1

| 性能別分類 | 形 式 | 用 途 | 対 象 粒 子 径 | 対 象 粉 塵 濃 度 | 捕 集 効 率 | | 粉 塵 保 持 容 量 | 圧 力 損 失 |
|-----------------|-----------------------|-----------------|---------------|----------------|---------------------|---------|---|--------------------|
| | | | | | 重量法 | 比色法 計数法 | | |
| 粗 塵 用 エアフィルタ | 濾材交換形(パネル形) エアフィルタ | 外気処理用 | 5 μm以上 | 中～大 | ～ 85% | | 500～ 2000 g/m ² | 3～20 mmHzO |
| | 自動巻取形 ロール・フィルタ | 循環空気の プレフィルタ | | | ～ 85% | | | 12～20 mmHzO |
| | 自動濾材再生形 エアフィルタ | | | | ～ 80% | | | |
| 中・高性能 エアフィルタ | 濾材折込形 エアフィルタ | 中間フィルタ | 中性能 1 μm以上 | 小～中 | 60～95% | | 中性能 300～ 800 g/m ² 高性能 70～ 250 g/m ² | 3～40 mmHzO |
| | 吹流し形(袋形) エアフィルタ | | 高性能 1 μm以下 | | 30～95% | | | 9～25 mmHzO |
| | 静電式空気清浄装置 | | | | 85～90% | | | 8～15 mmHzO |
| 超 高 性 能 フィルタ | 濾材折込形 | 最終フィルタ | 1 μm以下 | 小 | 0.3 μm 95%以上 | | 10～25 mmHzO | 10～25 mmHzO |
| | HEPAフィルタ | | | | 0.3 μm 99.97%以上 | | | 25.4～50.8 mmHzO |
| | ULPAフィルタ | | | | 0.1 μm 99.999%以上 | | | 25.4～50.8 mmHzO |

参考1(1/3)フィルタ許容スラッジ量に示す原研の文献のHEPA保持容量は折込型で60g/m²相当である。

左記高性能HEPAの粉塵保持容量は70から250g/m²である。

小さい側の数値に着目すると、原研の文献のHEPA保持容量と同等であり、60g/m²は概ね妥当な数値と判断される。

フィルタ許容スラッジ量

原研論文のダスト保持容量60g/m²から、温風用フィルタのスラッジ保持量はΦ35mm折込型ならば約4g、平板ならば、0.06gになる。上部設置フィルタは1.3gになる。

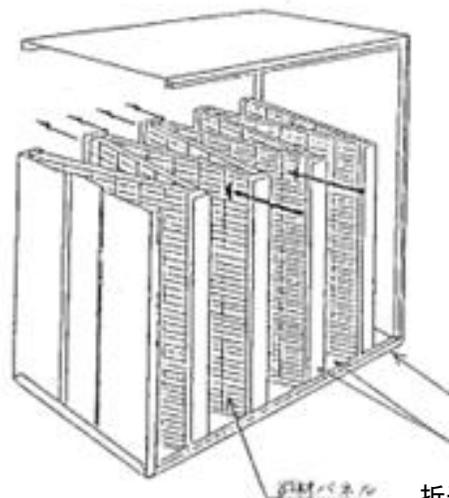
原研論文

| 仕様 | - | 31m ³ /min用 | 56m ³ /min用 |
|------|------------------|------------------------|------------------------|
| 断面形状 | mm | 610×610 | 610×610 |
| ろ過面積 | m ² | 20 | 40 |
| 保持量 | g | 1350 | 2400 |
| 保持容量 | g/m ² | 67.5 | 60 |

| 直径 | mm | 35 | 50 |
|------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| ろ過面積 | m ² | 9.62×10^{-4} | 1.96×10^{-3} |
| 保持量 | g | 0.06 | 0.12 |

| 直径 | mm | 35 | 50 |
|------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| ろ過面積 | m ² | 6.58×10^{-2} | 2.69×10^{-1} |
| 保持量 | g | 3.95 | 16.12 |

| 直径 | mm | 169 | 169 |
|------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| ろ過面積 | m ² | 2.24×10^{-2} | 2.24×10^{-2} |
| 保持量 | g | 1.35 | 1.35 |



折込型

図1 フィルタの構造案^{注1}

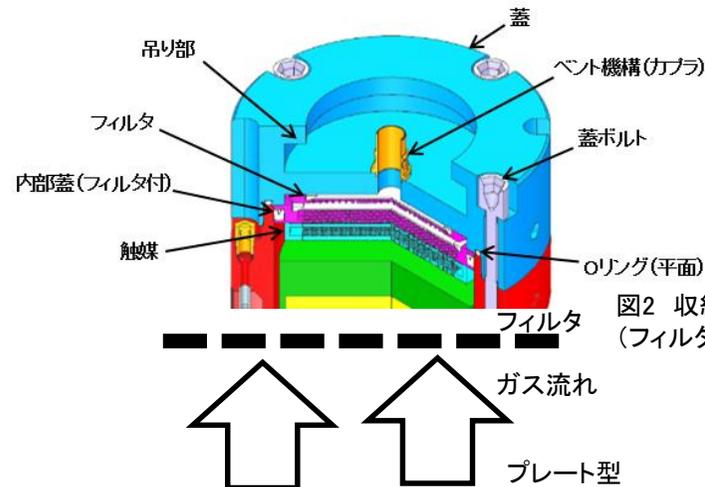
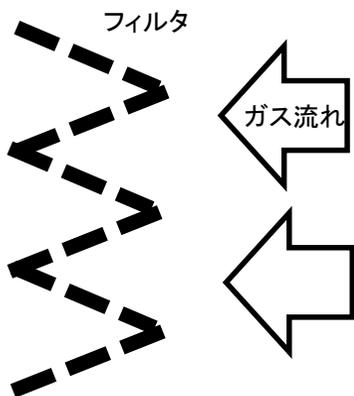


図2 収納缶の上部構造^{注2}
(フィルタ近傍)

注1: 伊勢・松本、高性能排気フィルター装置の性能試験結果報告書(原研フィルタユニットISE型と従来型装置の比較)、JAERI-M 88-118

注2: 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2020年度最終報告(公開版)