

**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
（燃料デブリの乾燥技術））**

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 乾燥対象の種類, 乾燥形態等の乾燥処理方法及び
 運転上のパラメータの拡充
 - 6.2 乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充
 7. 全体まとめ
- 参考資料

・背景

乾燥対象である燃料デブリの種類やサイズに対して、燃料デブリの性状(溶融物, MCCI, 金属及び切り株燃料等), 気孔率, 揮発性FP放出率, 主要元素組成等が乾燥処理に影響する可能性がある。また, 乾燥形態および乾燥方法によって影響を受けることが想定される。

2019～2020年度に行った補助事業ではTMI-2の実績を踏まえて多孔質体の燃料デブリを想定し, ゼオライトを供試体とした検討を行った。また, 乾燥装置としては, 乾燥促進のための攪拌等の操作が有効ではあるものの排気ガスに同伴する微粒子燃料デブリのオフガス処理等の観点からメッシュ構造のユニット缶(Unit Can, 略称UC)に収納したままの状態乾燥チャンバーに収納して乾燥させることを志向し, 温風や減圧乾燥を検討した。これらの検討を踏まえて本事業でも汚染範囲を抑制する観点からできるだけ乾燥対象物を静置した条件で乾燥させることを前提として, 要素試験にて乾燥対象物のデータ拡充を行い, 実規模試験にて収納缶形態での適用性を検討する。

・目的

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

1. 研究の背景・目的(2021年度廃炉研究開発計画)

- 取り出された燃料デブリは安全・確実に合理的に収納・移送・保管する必要がある。
- 燃料デブリは水分を含んだ状態で、放射線分解により水素ガスの発生要因になる。
- 移送・保管時の閉じ込め性の確保と水素爆発防止対策としてのベントは、トレードオフの関係にあるが、このようなリスクを低減する手段として水分を除去する**乾燥処理**が期待されている。
- 乾燥処理も収納缶形態で直接実施する方が積み替え回数の面等では合理的であり、本事業では、収納缶形態での乾燥を実現するため、データの拡充や最適な運転条件の検討等を実施する。

(目標工程)B3④:燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



1. 研究の背景・目的

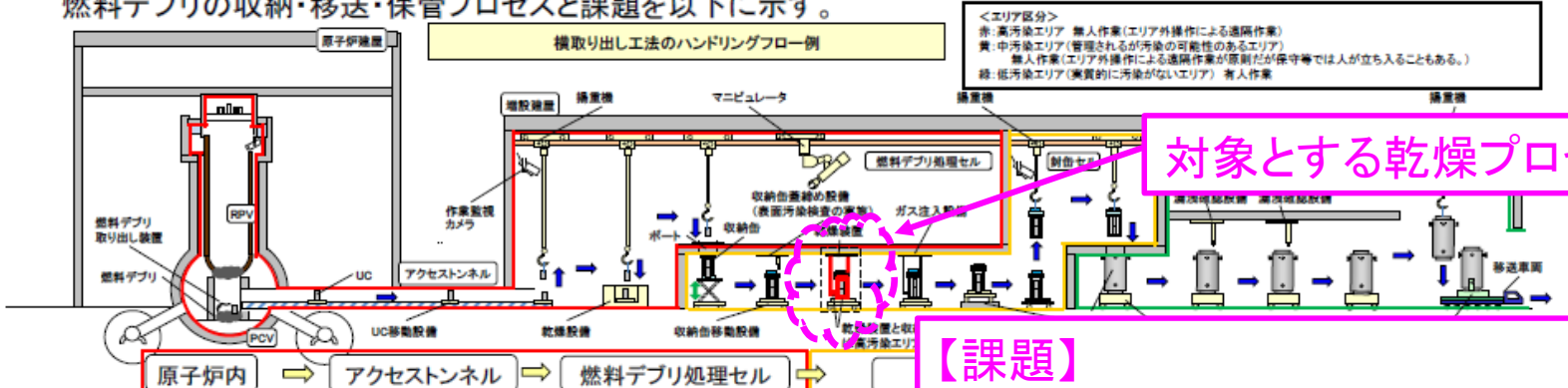
燃料デブリの収納・移送・保管プロセスを以下に示す。

平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金
(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
2020年度最終報告(2021年6月)より抜粋

1. 研究の背景・目的

1.3 これまでの検討と残された課題(1/4)

燃料デブリの収納・移送・保管プロセスと課題を以下に示す。



対象とする乾燥プロセス

【課題】

- ◆ 密封移送時を可能とする水素対策
→ 乾燥処理による含水率低減
- ◆ 最大7日間の密封が可能な乾燥レベルの達成

黒字: 従来実績等から技術開発不要としたもの
 青字: 検討が終了したもの(実工事へ引き継いだもの)
 茶字: 本補助事業で検討を終了するもの(実工事に引き継ぐもの)
 赤字: 継続検討が必要なものの(後続の補助事業で検討又は候補となるもの)
 (括弧)内の数字は検討している章を示す
 注記: “原子炉内～燃料デブリ処理セル”での安全設計及び取り扱い性は取り出し規模の更なる拡大PJで検討
 注記: RPV(原子炉圧力容器の略)
 PCV(原子炉一次格納容器の略)
 UC(ユニット缶の略)

安全設計	エア		封缶セル	
	収納缶			
未臨界			収納缶の幾何形状で未臨界維持できる	
除熱			通常のセル内換気で収納缶を自然冷却できる	
閉じ込め			収納缶のシール材(6.2)/フィルタの検討(6.2)/封缶セルで閉じ込める(ガスは管理放出)	検討(6.2)/仕立てセルで閉じ込める(ガスは管理放出)
遮蔽			封缶セルでの遮蔽	仕立てセルでの遮蔽
構造			最大9mの落下/移送容器内での収納缶落下による損傷に対して安全機能を維持するための検討(6.2)	移送中の事故に対応できる(落下に包絡できるよう設計)
材料			経年劣化に対して安全機能が維持できる(金属材料を事前に腐食を検討。中性子束密度は小さく照射は影響しない)	
水素			<ul style="list-style-type: none"> ・収納缶のフィルタ付ベント孔からセルへ放出するためのベント口径の検討(6.2)/セルは換気により水素濃度を爆発下限以下に抑制できる ・密封移送時の水素対策のために燃料デブリの早期乾燥による燃料デブリの含水率の低減検討(燃料デブリ処理セルでの乾燥タイミングが第一優先順位)(6.3) ・移送時水素濃度4vol.%以下担保のための移送容器内水素濃度測定検討(6.4) 	<ul style="list-style-type: none"> ・最大7日間の収納缶または移送容器の密封のための乾燥(6.3) ・移送時の水素発生予測法の検討(評価式による)(6.3) ・再結合触媒の検討(6.3)
火災防止			封缶セル/仕立てセル/移送容器内を不活性雰囲気中で維持できる	
取り扱い性			遠隔搬送・蓋閉めができる	遠隔搬送ができる
収納作業性の向上			収納缶内径を拡大し収納作業効率化する	なし

塊状、粒状燃料デブリの取り扱いプロセス

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。

No.	開発目標の判断指標
1	難乾燥物のスラリー・スラッジやコンクリートの乾燥データが整備されていること (終了時目標TRL:レベル4)
2	収納缶形態での乾燥に対してチャンバー方式との得失が整理されていること (終了時目標TRL:レベル4)
3	多孔質体に対して収納缶状態での効果的な運転方法が提案されていること (終了時目標TRL:レベル4)
4	乾燥処理面で収納缶への要求(要望)事項が整理されていること (終了時目標TRL:レベル4)

3.実施項目とその関連, 他研究との関連

3.1乾燥対象の種類, 乾燥形態等の乾燥処理方法及び運転上のパラメータの拡充

[公募記載内容]

乾燥対象である燃料デブリの種類やサイズに対して, 適用可能な乾燥形態及び乾燥方法の選定を解析的な評価や確認/検証のための試験を通じて行います。そのうえで, 運転上のパラメータの拡充も同様に解析的な評価や確認/検証のための試験を通じて行います。

なお^{注1}, 収納形態については, ユニット缶, 収納缶それぞれを単独で乾燥させるだけではなく, 設備規模やスループット確保に有用と考えられる複数同時に乾燥する場合も検討対象とします。さらに, 乾燥処理を行うために必要となるユニット缶, 収納缶の現時点での仕様, 構造への変更/改良要求などを, 選定する乾燥技術に対し必要に応じてまとめます。

実施内容

注1: “なお”書き以降に関しては, 3.2項で検討(No.9参照)

①乾燥対象物の種類・データ拡充

燃料デブリやその加工物が多種多様(性状・サイズ)であることを踏まえ, スラリー・スラッジ等の難乾燥物を含めた乾燥対象物を想定する。さらに, 要素試験又は解析評価により, 各種乾燥対象物に対する乾燥特性を把握し, 乾燥レベルや乾燥時間等の運転上のパラメータに関するデータを拡充する。

【成果】

(1)スラリー・スラッジの乾燥特性データ(要素試験)

(2)コンクリートの乾燥特性データ(要素試験)

3.実施項目とその関連, 他研究との関連

3.1乾燥対象の種類, 乾燥形態等の乾燥処理方法及び運転上のパラメータの拡充

[公募記載内容]

乾燥対象である燃料デブリの種類やサイズに対して, **適用可能な乾燥形態及び乾燥方法の選定**を解析的な評価や確認/検証のための試験を通じて行います。そのうえで, 運転上のパラメータの拡充も同様に解析的な評価や確認/検証のための試験を通じて行います。

なお^{注1}, 収納形態については, ユニット缶, 収納缶それぞれを単独で乾燥させるだけでなく, 設備規模やスループット確保に有用と考えられる複数同時に乾燥する場合も検討対象とします。さらに, 乾燥処理を行うために必要となるユニット缶, 収納缶の現時点での仕様, 構造への変更/改良要求などを, 選定する乾燥技術に対し必要に応じてまとめます。

注1: “なお”書き以降に関しては, 3.2項で検討(No.9参照)

実施内容

②乾燥方式の適用性検討

拡充した試験データに基づき, これまでの補助事業で考案した乾燥処理方法の**適用性を評価**する。また, 適用が難しい乾燥対象物については, **代替候補**と考えられる処理方法・手段を提案する。

【成果】

- (1)本事業で考案した乾燥概念の適用範囲(乾燥対象物)
- (2)適用が難しい乾燥対象物の代替処理方法・手段

3.実施項目とその関連, 他研究との関連

3.2 乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充

【公募記載内容】

これまで補助事業で考案された乾燥装置/設備/システムの概念検討結果の具体化や運転条件の設定に必要な各種データの拡充を行います。燃料デブリの性状(熔融デブリ, MCCI デブリ, 金属デブリ及び切り株燃料等), 気孔率, 揮発性 FP放出率の違いに適応できる乾燥装置/設備/システムの概念について検討を行い, その具体化を行います。また, ユニット缶及び収納缶単体またはそれぞれを複数で乾燥処理するための装置/設備/システムの概念検討も実施します。さらに, 検討された乾燥処理のための装置/設備/システムの概念に対して, 安全要求への適合性等の観点から最適な運転条件(範囲)を検討して提案します。それらの結果に基づき, 安全要求への適合性, 要求されるスループットへの適合性, 必要敷地面積, 建設工期, オペレーション(点検/検査/メンテナンスの頻度と期間, 除染の必要性和範囲, 部品類の交換頻度等)等の観点からの得失の定性的な評価を行います。

実施内容

①収納缶形態でのデータ拡充

汚染範囲の拡大抑制として有効な収納缶形態での乾燥試験計画^{注1}を立案し, 実規模大の収納缶にて乾燥処理を実施する。また, 乾燥レベル, 乾燥時間等を確認し, 収納缶による乾燥の適用性を評価する。

【成果】

(1)収納缶形態での試験検証結果

注1: 先行の補助事業(2019~2020年度)で製作した実規模試験装置の改造を含む

3.実施項目とその関連, 他研究との関連

3.2 乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充

[公募記載内容]^{注1}

これまで補助事業で考案された乾燥装置/設備/システムの概念検討結果の具体化や運転条件の設定に必要な各種データの拡充を行います。燃料デブリの性状(溶融デブリ, MCCI デブリ, 金属デブリ及び切り株燃料等), 気孔率, 揮発性 FP放出率の違いに適応できる**乾燥装置/設備/システム**の概念について検討を行い, その具体化を行います。また, ユニット缶及び収納缶単体またはそれぞれを**複数で乾燥処理**するための装置/設備/システム**の概念**検討も実施します。さらに, 検討された乾燥処理のための装置/設備/システム**の概念**に対して, 安全要求への適合性等の観点から**最適な運転条件(範囲)**を検討して提案します。それらの結果に基づき, 安全要求への適合性, 要求されるスループットへの適合性, 必要敷地面積, 建設工期, オペレーション(点検/検査/メンテナンスの頻度と期間, 除染の必要性と範囲, 部品類の交換頻度等)等の観点からの**得失の定性的な評価**を行います。

実施内容

注1: 3.1項(No.6,7参照)に記載した公募記載内容の“なお”書き以降に関しては, 本項で検討実施。

②乾燥装置概念の具体化

収納缶形態での乾燥装置概念を検討し, **最適な運転条件を具体化**すると共に, 収納缶を用いた場合について, 3.2①項の試験結果を踏まえ, チャンバーを用いた場合と比較し, 乾燥時間や安全要求他の観点からの**得失の評価**を行う。また, 基本的には複数同時乾燥は実工事段階で系列数を増やすことで対応可能であるが, 本検討では適用に当たっての**検討課題**について整理する。さらに, 乾燥処理の観点から収納缶仕様への**要求事項(要望)**^{注2}をまとめる。

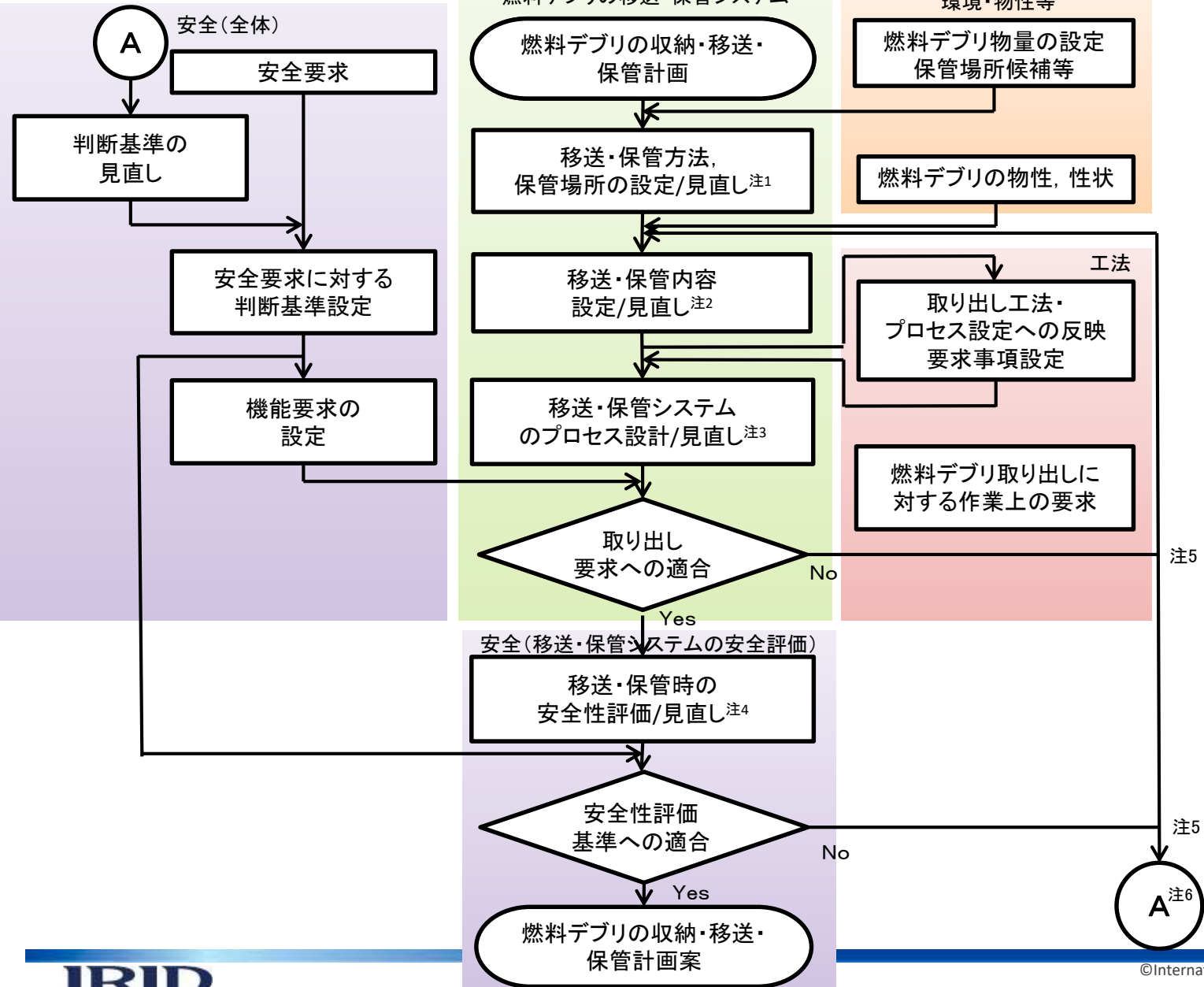
【成果】

- (1)収納缶形態での乾燥装置概念
- (2)収納缶形態での最適な運転条件
- (3)チャンバー方式と比較した得失評価結果
- (4)複数同時処理時の検討課題
- (5)収納缶設計への要求事項(要望)

注2: マーカ部は, 公募記載内容3.1項からの要求

3. 実施項目とその関連, 他研究との関連

3.3 実施項目間の関連



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

3. 実施項目とその関連, 他研究との関連

3.3 実施項目間の関連

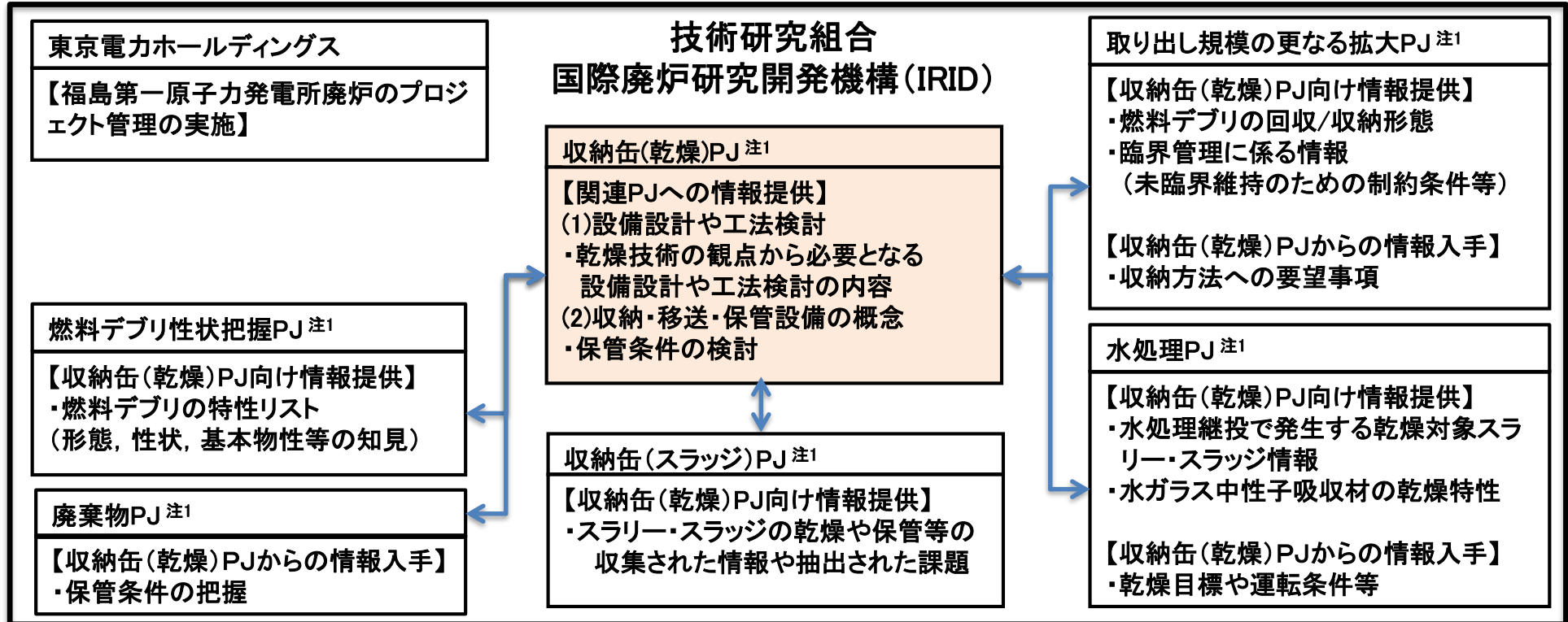
(目標工程)B3④: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



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

3. 実施項目とその関連, 他研究との関連

3.3 実施項目間の関連



注1: 以降のスライドでも本略称を使用する。

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

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

廃棄物PJ : 「固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発」PJ

水処理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)」PJ

収納缶(スラッジ)PJ : 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状, スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応)」PJ

収納缶(乾燥)PJ : 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)」PJ

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

3.4 他研究との関連性(インプット・アウトプット情報)

注1:

取り出しPJ: 燃料デブリの取り出し工法の開発

性状PJ: 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

収納缶(スラッジ)PJ: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

(粉状, スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応)

水処理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)

廃棄物PJ: 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発

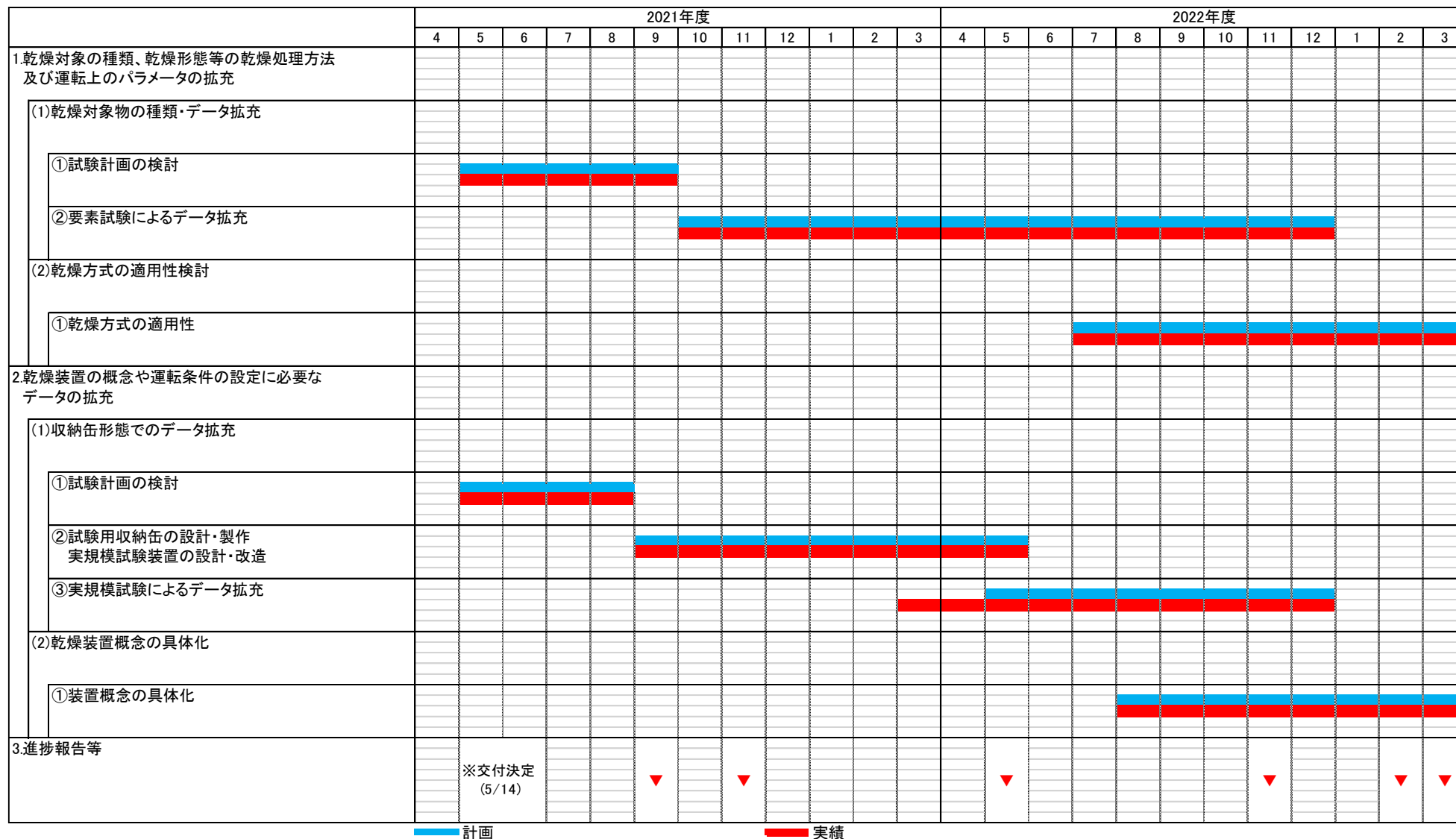
【関連するPJから本PJへのインプット】

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	燃料デブリの特性リスト	性状PJ
2	課題抽出のための検討条件	燃料デブリの回収/収納形態	取り出しPJ
3	検討における参考情報	スラリー・スラッジの乾燥や保管等の収集された情報や抽出された課題	収納缶(スラッジ)PJ
4	課題抽出のための検討条件	水処理システムで発生する乾燥対象スラリー・スラッジ情報	水処理PJ

【本PJから関連するPJへのアウトプット】

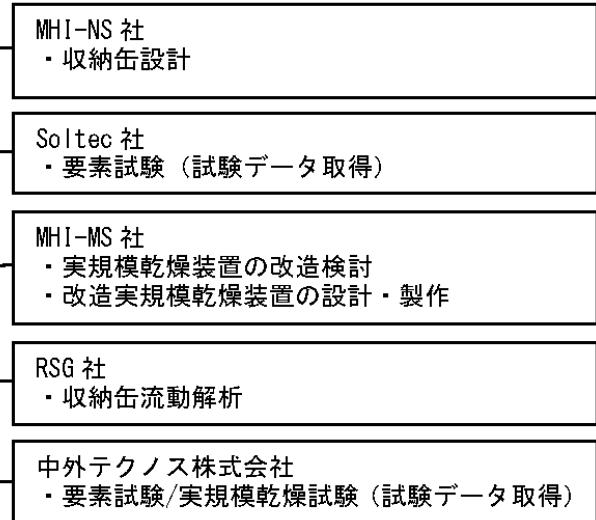
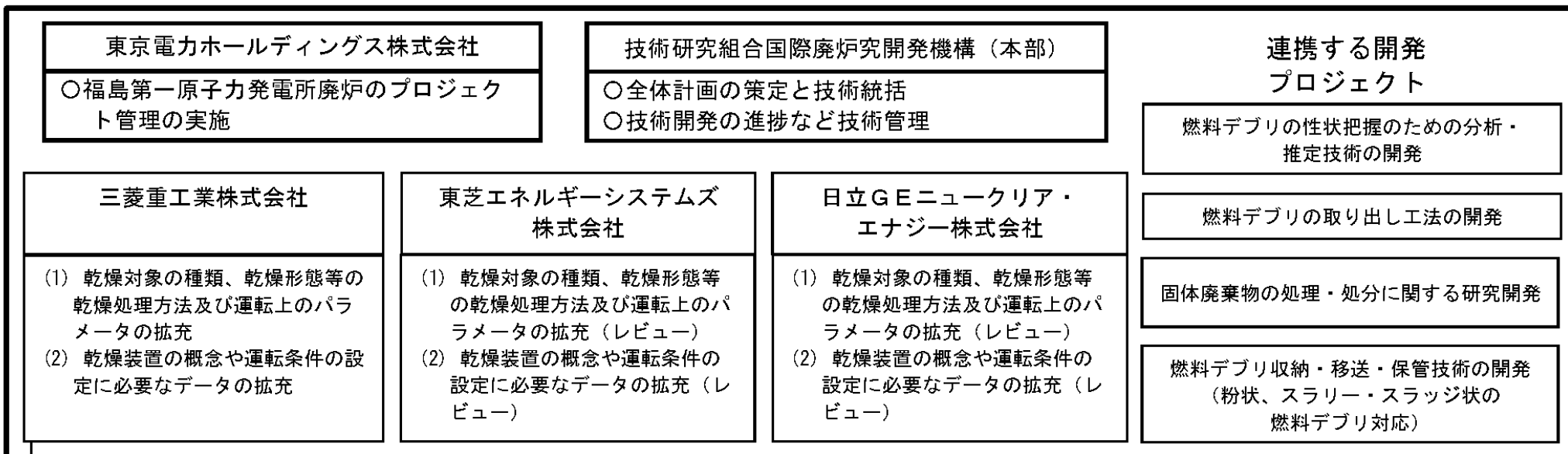
ID	実施項目と アウトプットする内容	アウトプット先での 用途	提供先 ^{注1}
1	設備設計や工法検討	収納方法への要望事項	取り出しPJ
2	収納・移送・保管設備の概念	保管条件の把握	廃棄物PJ

4. 実施スケジュール



5. 実施体制図

(2023年3月末時点)



注記)

MHI-NS : MHI NS エンジニアリング株式会社

Soltec : MHI ソリューションテクノロジーズ株式会社

MHI-MS : 三菱重工機械システム株式会社

RSG : 株式会社菱友システム技術

6.1 乾燥対象の種類，乾燥形態等の乾燥処理方法及び運転上のパラメータの拡充

- (1) 乾燥対象物の種類・データ拡充
- (2) 乾燥方式の適用性検討

6.2 乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充

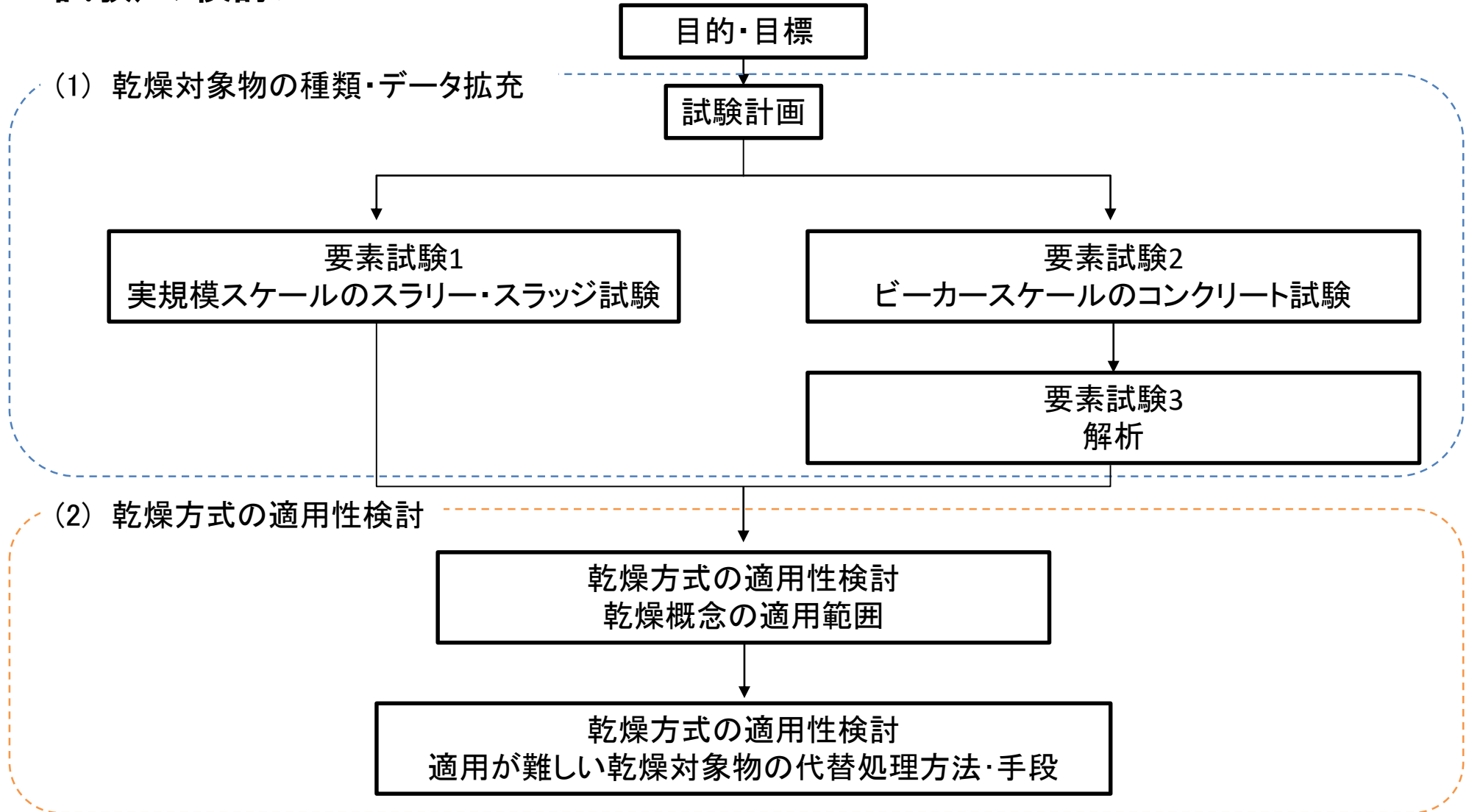
- (1) 収納缶形態でのデータ拡充
- (2) 乾燥装置概念の具体化

なお，本資料では，実施内容のうち「乾燥対象の種類，乾燥形態等の乾燥処理方法及び運転上のパラメータの拡充」を「要素試験^{注1}」と称して結果を整理する。

また，本資料では，実施内容のうち「乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充」を「実規模試験」と称して結果を整理する。

注1: No.17以降，“実規模スケールのスラリー・スラッジ試験，ビーカースケールのコンクリート試験，解析評価”を総じて「要素試験」と呼称する。

6.1 乾燥対象の種類, 乾燥形態等の乾燥処理方法及び運転上のパラメータの拡充(要素試験)の検討フロー



6.実施内容

6.1要素試験

①目的, 目標

2019・2020年度 要素試験(ビーカースケール試験^{注1})を実施

多孔質体(ゼオライト)・SUSビーズ・珪砂
・ ZrO₂スラリーの乾燥特性データを取得

ZrO₂スラリーは24hで3.3wt%^{注2}まで乾燥
(乾燥には長い時間が必要)

狙い: 乾燥処理の適用範囲を明確化

他種類への展開

スラリー・スラッジ

コンクリート^{注5}

要素試験^{注3}

解析による
影響評価

(試験目的) 難乾燥物^{注4}や水和物を含む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

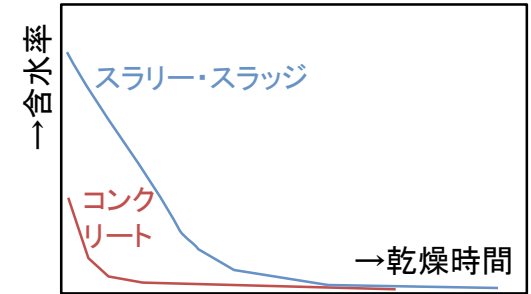


図 取得データイメージ① 含水率経時変化

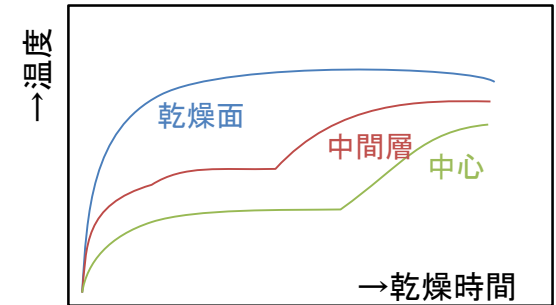


図 取得データイメージ② 内部温度分布

注1: φ45mm × 100mmHスケール

注2: 燃料デブリ換算では3.7wt%, 目標は0.1wt%(No.107,113参照)

注3: スラリー・スラッジは実規模スケールで実施(理由は後掲)

注4: 2019~2020年度の検討成果である乾燥概念での乾燥では長時間を要する, 乾燥途中での含水率低下が促進されない等の適用が難しいと想定されるものを難乾燥物とする。

注5: 汚染されたものや燃料デブリが付着したものを想定

6.実施内容

6.1要素試験

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、粒状の燃料デブリを収納缶を用いて安全に取り扱い、収納・移送・保管をするための技術開発を行っており、難乾燥物としてゼオライトを対象として、乾燥方法およびユニット缶を対象とした乾燥装置の概念検討を行った。

一方、燃料デブリの取り出し時には、粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリおよびコンクリートの回収も見込まれることから、塊状、粒状の燃料デブリと同様に乾燥することが可能であるか検討するため、乾燥データを取得する必要がある。

6.実施内容

6.1要素試験



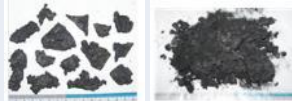


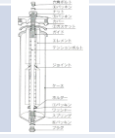

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(1/35)

(i)試験計画の検討: 乾燥対象物(1/2)

注1: 2020年度までに1条件取得済, 2021~2022年度で水処理PJからのインプット(No.114に基づいてデータ拡充)
 注2: 燃料デブリの粒径に応じて, 塊状燃料デブリ(粒径10mm以上), 粒状燃料デブリ(0.1mm~10mm), 粉状燃料デブリ(粒径0.1mm以下)に分類する。また, 粉状燃料デブリのうち, 水分を多量に含んだ状態のものをスラリー・スラッジ状燃料デブリに分類する。

表 各乾燥対象物に対するデータ取得状況 □ ...2021~2022年度データ拡充範囲

分類 ^{注2}	発生源	概要	イメージ	データ取得状況(~2020年度)			
				Zeol.	SUS	スラリー	Conc.
切株燃料デブリ	取り出し プロセス	燃料集合体の一部が溶融せずに残留したもの		○	—	—	—
塊状燃料デブリ, MCCI		ゆっくりと冷却されて塊状となったもの		○	—	—	未
小石状燃料デブリ		溶融した炉心材料が急冷され, 小片化したもの		○	○	—	—
燃料デブリの付着した構造物		溶融せず残存した構造物に燃料デブリが付着したもの		○	○	—	—
スラリー・スラッジ	水処理 系統	粉状, 細かい粒子状燃料デブリ		—	—	1条件 (ZrO ₂) ^{注1}	未
水処理フィルタ		粉状, 細かい粒子状燃料デブリが付着したフィルタ		—	—	未	未
ガス処理フィルタ	ガス処理 系統	乾燥燃料デブリ粉が付着したフィルタ		—	—	未	—

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(2/35)

(i)試験計画の検討:乾燥対象物(2/2)

データ未取得の乾燥対象物の想定乾燥処理状態を検討

① 乾燥特性データが未取得の対象物

a. 処理回収された燃料デブリとコンクリート粉や炉心構造材切粉が混在するスラリー・スラッジ

→水処理PJでの検討を反映し、凝集剤を添加した凝集沈殿スラリー・スラッジ

b. コンクリート片が混入した燃料デブリ, コンクリート片に付着した燃料デブリ

c. 燃料デブリの微粉末が付着した水処理フィルタ, ガス処理フィルタ

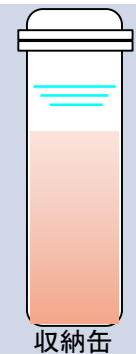
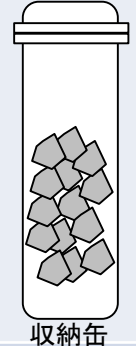
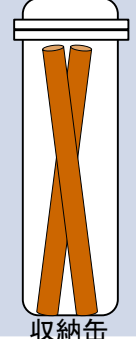
② 想定される乾燥処理前の状態

a. デカンター, サイクロン等で固形分をある程度分離した後, 収納缶へ収納

b. コンクリート片(ガラ状)を収納缶へ収納

c. 焼結金属フィルタやHEPAフィルタの濾材を収納缶へ収納

表 乾燥処理前の想定状態(例)

種類	形態	概念図
a.スラリー・スラッジ	収納缶	 収納缶
b.コンクリート片	収納缶	 収納缶
c.フィルタ濾材	収納缶	 収納缶

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(3/35)

(ii)試験計画の検討: 試験方針

(試験目的) 難乾燥物や水和物を含む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



【試験方針】

- i. 難乾燥物に対する現状の処理概念の適用範囲を確認(24h(目安)の含水率)
- ii. 取得データの傾向から代替水素対策手段の要否やその方法を提案

注1:「UC」とは、ユニット缶のこと。

注2: チャンバーでの乾燥の場合は収納缶を乾燥チャンバーに置き換える。

注3: 200℃以上でFP放出の懸念があるため、乾燥温度は最大200℃とする。

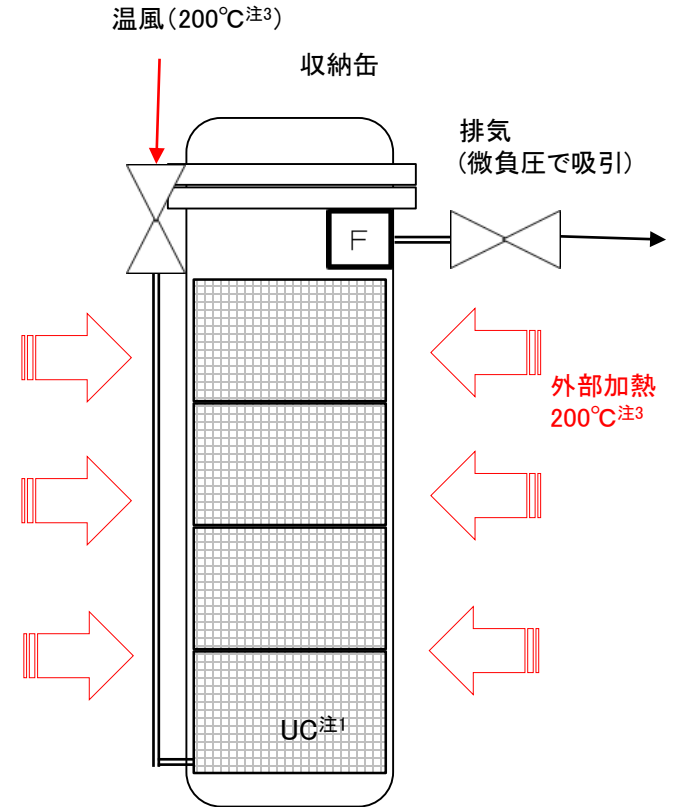


図 現状の処理概念
(2019～2020年度検討結果
収納缶での乾燥^{注2}の場合)

6.実施内容

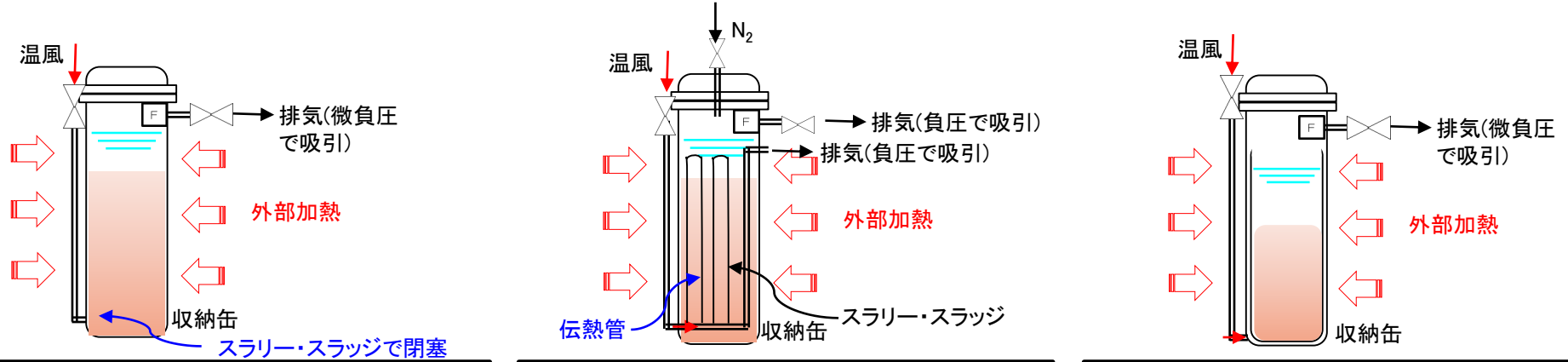
6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(4/35)

(iii)試験計画の検討: 試験項目と目的(1/3)

- 想定する乾燥状態を現状の処理概念に適用し, 試験を計画する。
- スラリー・スラッジを充填した収納缶での乾燥処理方法は「案③内容器スラリー・スラッジ充填」方式とする。



【案① 直接充填】

- 給排気口を使用した現状の収納缶仕様を前提。ただし, 汚染拡大防止のため, 内部にフィルタを追加
- 給気口はスラリー・スラッジにより閉塞し, 通気処理できない可能性が高い

⇒ × (適用不可)

【案② 伝熱管追加】

- 伝熱管およびノズルを追加
- 乾燥は可能であるが, 収納缶が非常に高価となり非現実的

⇒ × (適用不可)

【案③ 内容器スラリー・スラッジ充填】

- 容器本体を二重化し, 内容器にスラリー・スラッジ充填
- 配管閉塞リスクは大幅低減

⇒ ○ (適用可)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(5/35)

(iii)試験計画の検討: 試験項目と目的(2/3)

内容器スラリー・スラッジ充填方式での要素試験の課題

- 2019～2020年度のビーカースケール試験は、伝熱と水分移動の方向が一致することを前提とした装置である。
- 一方、内容器スラリー・スラッジ充填方式は、伝熱は側面から・水分は3次元的に移動して開放上部からの蒸発である。

<伝熱・水分移動方向の違いによる問題>

- ✓ 伝熱・水分移動の方向が一致しない。そのため、2019～2020年度のビーカースケール乾燥試験装置を使用できない。
- ✓ 3次元的な乾燥挙動では、縮尺試験データ取得後の実機スケールアップ評価が難しい。
- ✓ 入熱量(外表面積)と熱容量(体積)の関係において、縮尺モデルでは相対的に後者が小さくなり、同じ加熱条件では試験体の温度レベル、ひいては乾燥速度レベルが実機より高くなる。

以上の観点から、スラリー・スラッジ試験は内容器スラリー・スラッジ充填での実規模スケール試験とすると必要があると考えられる。

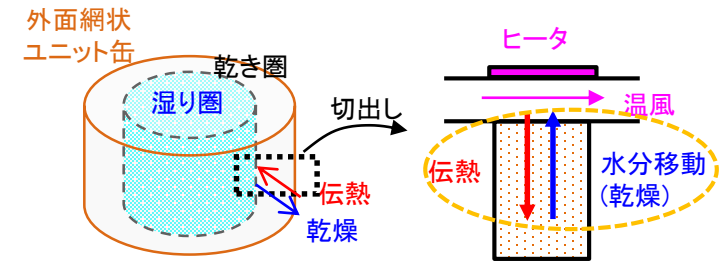


図 ビーカースケール試験モデル

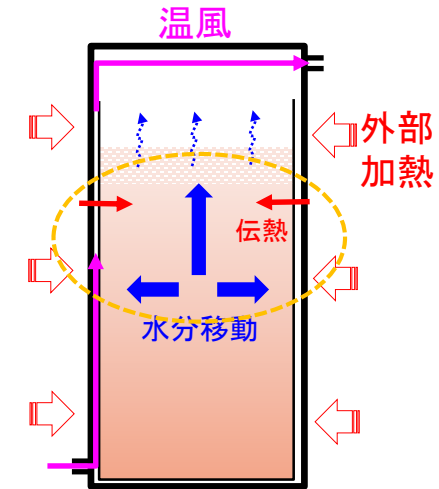


図 スラリー・スラッジ乾燥モデル

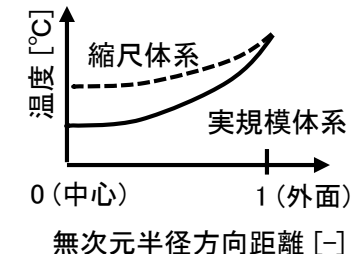


図 縮尺・実規模体系の温度分布模式図

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(6/35)

(iii)試験計画の検討: 試験項目と目的(3/3)

既存概念の適用範囲を明確化するため, 以下のとおりデータ取得する。

表 各乾燥対象物の試験概要

注1: No.22図参照。
 注2: ヒータON・通気開始からの時間
 注3: 水分/乾燥重量。目標: 燃料デブリ比重換算で0.1wt%(No.107,111,113参照)
 注4: 実機大サイズ(容器)での試験

乾燥対象	処理概念 ^{注1} の適用想定	試験形態	項目	目的/概要	取得データ
スラリー・スラッジ		実規模スケール ^{注4}	温度の乾燥特性	現状想定されるスラリー・スラッジを用いて, 温度と充填量をパラメータに乾燥特性データを取得し, 既存の処理概念が適用可能な範囲を確認	内部温度・時間 ^{注2} vs含水率 ^{注3}
		実規模スケール ^{注4}	充填量の乾燥特性		充填量・時間 ^{注2} vs含水率 ^{注3}
コンクリート		ビーカースケール	コンクリートの乾燥特性	コンクリートの水和物の影響を評価するため, 含水率の経時変化を把握し, 外部浸透水の乾燥時間を確認	時間 ^{注2} vs含水率 ^{注3}
フィルタ濾材	収納缶に直接収納	解析	乾燥物種類の範囲	スラリー・スラッジ等の試験データよりフィルタ濾材の乾燥可否, 乾燥可能な種類を確認	解析結果

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(7/35)

(iv)要素試験によるデータ拡充1(実規模スケールのスラリー・スラッジ試験:試験計画(1/2))

○試験目的

- ・実規模試験装置を用いて, 沈降分離設備から排出されるスラリー・スラッジに対して, 乾燥目標含水率の達成可否(達成可能な処理時間)を確認する。
- ・達成不可の場合や乾燥時間の低減案として, 乾燥温度(ヒータ面温度)や充填高さ影響を確認する。

○評価方法

- ・試料内の温度分布, 試料の質量, 排ガス露点の経時変化を測定し, 到達含水率や乾燥速度(水分減少速度)を評価する。
- ・排ガス中の粒子は回収する。(代表1条件:RUN1)

表 試験条件

R U N	スラリー・スラッジ 材料	粒子 粒径 [μm]	充填 高さ [mmH]	ヒータ表面・ 温風温度 [°C]	温風流速 ^{注3} [m/s] (流量[Nm ³ /h])	試験 項目	
1	珪砂	10~100	200	200	3(37)	内部温度 含水率変化	
2	Al ₂ (SO ₄) ₃	—	200				
3	珪砂	10~100	400				
4	Al ₂ (SO ₄) ₃	—	400				
5	Al ₂ (SO ₄) ₃	—	800			内部温度 含水率変化	
6	珪砂+Al ₂ (SO ₄) ₃ 2層化	10~100 /—	200+				
7	Al ₂ (SO ₄) ₃	—	200				内部温度
8	水	—	200				

○スラリー・スラッジ条件

- ・スラリー・スラッジ:珪砂^{注1, 注2}(1条件)
- ・凝集剤:硫酸アルミニウム^{注1}(1条件)
- ・スラリー・スラッジ粒子粒径:10~100μm^{注1}

○処理条件

- ・乾燥方式:側面ヒータ+温風加熱
- ・ヒータ^{注4}表面/温風温度:200°C or 300°C
- ・充填高さ:200~800mm

注1:水処理PJの粗取り系統からの排出物のみ対象とし, スラリー・スラッジや凝集剤は代表1条件を選定(No.114参照)

注2:水処理PJ要素試験での模擬スラリー・スラッジ成分(炭化タングステン, SUS316L, 珪砂)から, 最も含水率が大きくなり

乾燥しにくいと考えられる珪砂を選定

注3:チャンバー内アニュラス部での流速

注4:ヒータ出力は最大10kW(チャンバー壁温度代表1点でのPID制御)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(8/35)

(iv)要素試験によるデータ拡充1(実規模スケールのスラリー・スラッジ試験:試験計画(2/2))

- 内容器充填スラリー・スラッジの乾燥特性データを取得する。

<試験条件・体系>

- 温風乾燥
- 内容器にスラリー・スラッジを充填して乾燥チャンバーで乾燥
- 乾燥対象:凝集沈殿スラリー・スラッジ(水処理PJ検討)
- スラリー・スラッジ内部温度計測/取り出し重量計測(乾燥特性データ取得)

<試験パラメータ>

- 試料材料, 温度, スラリー・スラッジ充填高さ

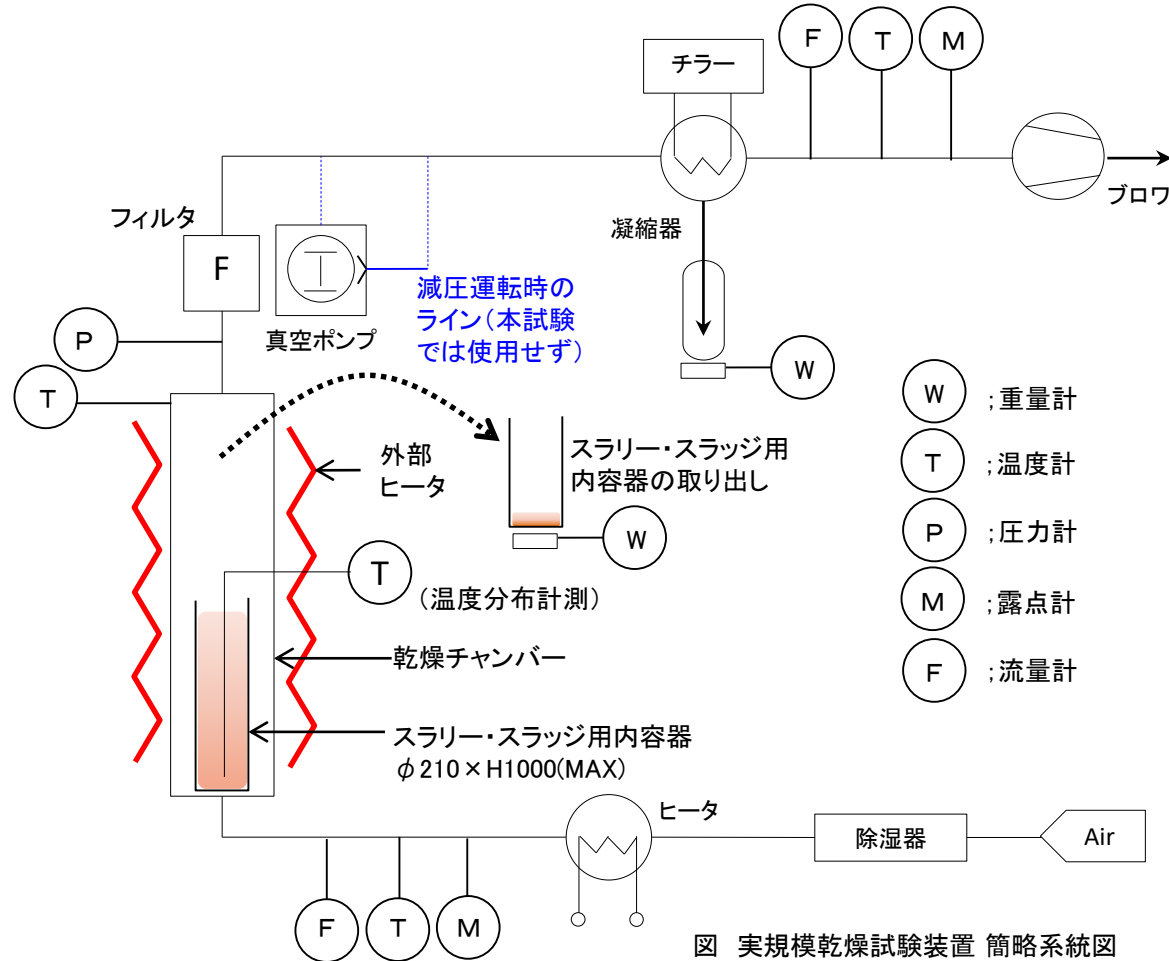


図 実規模乾燥試験装置 簡略系統図

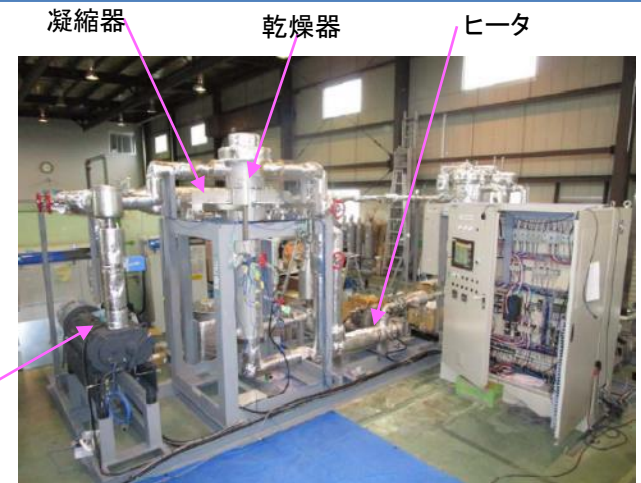


図 実規模乾燥試験装置 外観

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(9/35)

(iv)要素試験によるデータ拡充1(実規模スケールのスラリー・スラッジ試験:結果(1/3)-珪砂)

注1: 含水率=含水量/絶乾重量。目標は0.2wt%。絶乾重量は300°Cで5時間以上加熱した時の重量(実測値) (No.107,111~113参照) No.28
 注2: 取り出し計測での含水量変化が重量計誤差以下の変動となった最初の時点を終点とし、終点達成時の含水率・乾燥時間をそれぞれ平衡含水率と乾燥所要時間とする。最小含水量は重量計誤差とする。

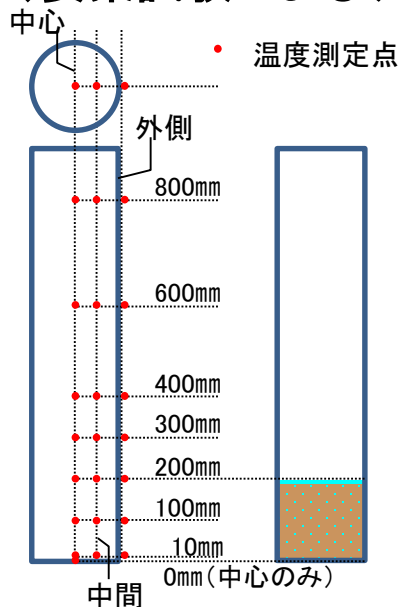


図 温度測定点(充填高さ200mm)



図(参考)ビーカースケール作成時試料外観

表 試験結果

充填高さ	初期含水量/含水率注1	平衡含水率注2	乾燥所要時間注2	平均乾燥速度
200mm	3687g/35.9wt%	<0.02 wt%	12h	307g/h
400mm	7074g/34.4wt%	<0.01 wt%	16.5h	429 g/h

目標含水率0.2wt%を達成見込み

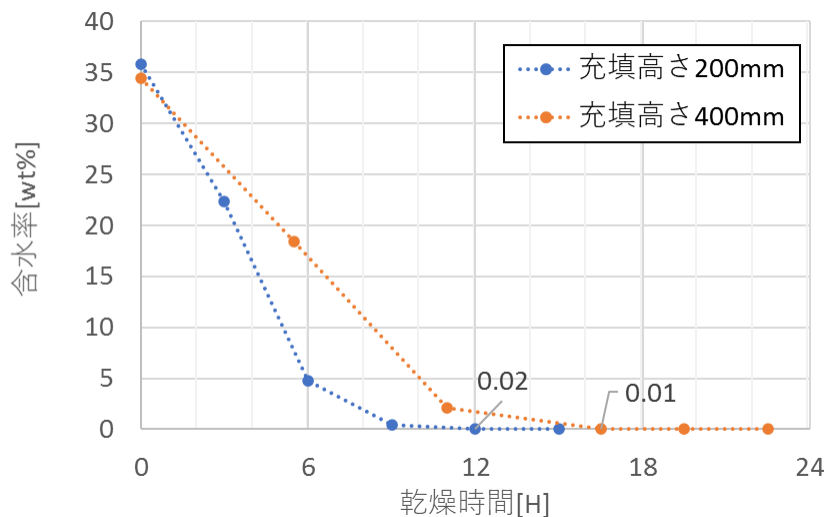


図 取得データ(含水率)



図 珪砂スラリー・スラッジ乾燥後(充填高さ200mm, 乾燥時間15h)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(10/35)

(iv)要素試験によるデータ拡充1(実規模スケールのスラリー・スラッジ試験:結果(2/3)-凝集剤フロック)

注1:含水率=含水量/絶乾重量。目標は0.2wt%。絶乾重量は200℃加熱時に生成する物質の質量を投入試薬量から計算した理論値(No.107,111~113参照)

注2:取り出し計測での含水量変化が重量計誤差以下の変動となった最初の時点,あるいはすべての計測点での温度上昇が観測されなくなった時を終点とし,終点達成時の含水率・乾燥時間をそれぞれ平衡含水率と乾燥所要時間とする。最小含水量は重量計誤差とする。

表 試験結果

充填高さ	初期含水量/含水率注1	平衡含水率注2	乾燥所要時間注2	平均乾燥速度
200mm (200℃乾燥)	6995g/1927wt%	1.9±0.6 wt%	18 h	388g/h
400mm	13795g/1880wt%	1.5±0.3 wt%	>34.5h	400g/h
800mm	27667g/ 1892wt%	1.3±0.1wt%	(参考:<72h)	-(含水率変化未測定のため計算不可)
200mm (300℃乾燥)	6876g/1875wt%	0~ 7.5±0.5wt%	(参考:<22.5h)	

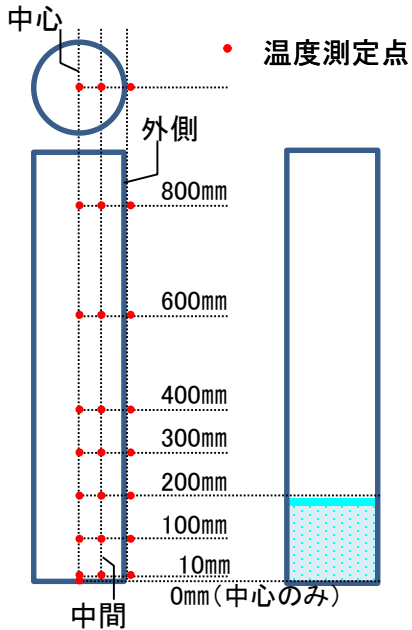


図 温度測定点(充填高さ200mm)



図 (参考)ビーカースケール作成時試料外観

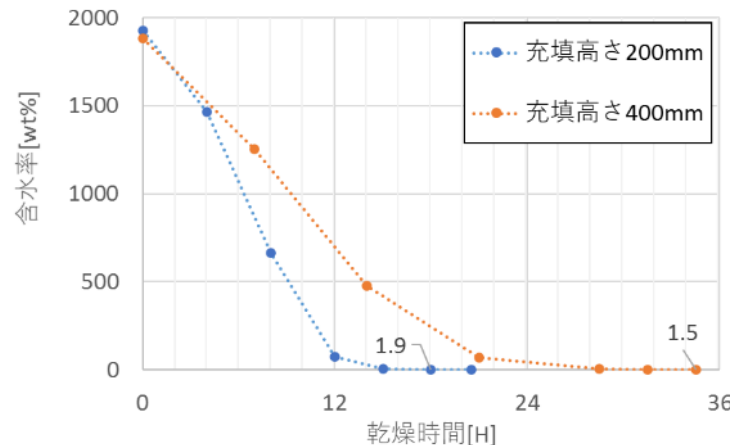


図 取得データ(含水率)



図 凝集剤フロックスラリー・スラッジ乾燥後(充填高さ200mm, 乾燥時間20.5h)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(11/35)

(iv)要素試験によるデータ拡充1(実規模スケールのスラリー・スラッジ試験:結果(3/3)-珪砂+凝集剤)

注1: 含水率=含水量/絶乾重量。目標は0.2wt%。絶乾重量は300℃で5時間以上加熱した時の重量(珪砂)と200℃加熱時に生成する物質の質量を投入試薬量から計算した理論値(凝集剤)の和(No.107,111~113参照)

注2: 取り出し計測での含水量変化が重量計誤差以下の変動となった最初の時点を終点とし、終点達成時の含水率・乾燥時間をそれぞれ平衡含水率と乾燥所要時間とする。最小含水量は重量計誤差とする。

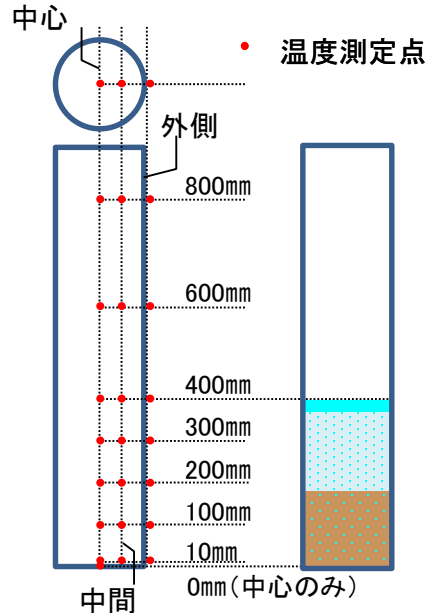


図 温度測定点(充填高さ400mm)



図(参考)ビーカースケール作成時試料外観

表 試験結果

充填高さ	初期含水量/含水率注1	平衡含水率注2	乾燥所要時間注2	平均乾燥速度
200+200mm	10482g/98.4wt%	<0.02 wt%	22.5h	466g/h

目標含水率0.2wt%を達成見込み

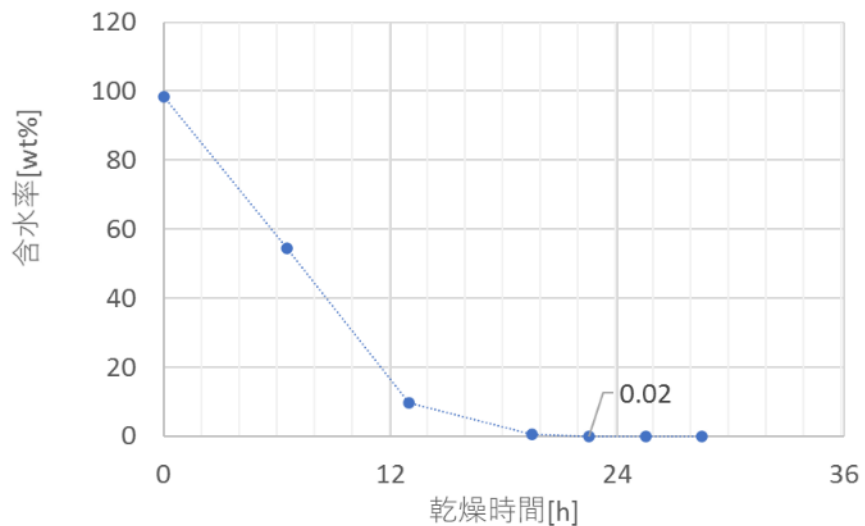


図 取得データ(含水率)



図 珪砂+凝集剤フロックスラリー・スラッジ乾燥後(充填高さ200+200mm, 乾燥時間28.5h)

6.1 要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(12/35)

(iv)要素試験によるデータ拡充1(実規模スケールのスラリー・スラッジ試験:まとめ)

- 実規模スケールでの乾燥試験を行い, 珪砂及び珪砂+凝集剤スラリー・スラッジで目標含水率を達成する見込みを得た。なお, 凝集剤フロックスラリー・スラッジは単体では目標含水率を達成しないものの, 実機で想定される珪砂との混合条件で達成した。
- 乾燥速度はどの試料でも300~450g/h程度。収納缶の有効充填量は約25L(φ210mm×800mmH内容器想定)であり, 全量に水充填の場合で乾燥所要時間は60~80時間程度と乾燥処理の長時間化が想定される。
- 乾燥処理の適用可否はスラリー・スラッジの持込量・持込頻度, 目標処理時間による。

⇒スラリー・スラッジ^{注1}の乾燥処理に対し, 目標含水率に対しては2019~2020年度検討の処理概念の適用見込み有。ただし, 所要時間は長時間化するため, 目標処理時間の達成度はNo.60~62にて適用性を検討する。

6. 実施内容

6. 1 要素試験

③ 実施事項, 成果

(1) 乾燥対象物の種類・データ拡充 (13/35)

(v) 要素試験によるデータ拡充2 (ビーカースケールのコンクリート試験: 全体計画)

- 乾燥特性に対するコンクリート中の水和物等の影響を把握するため, ビーカースケール乾燥試験を実施する。
- コンクリート中には, セメント成分(カルシウム等)や骨材(シリカ等), 添加剤(界面活性剤)が含まれている。
- そこで, コンクリート組成の乾燥挙動への影響範囲を確認するため, コンクリート組成をパラメータとして試験を行う。
- また, 実機装置設計および処理条件に反映するために, コンクリート片粒径や処理条件(ガス温度・ガス流速)の影響を確認する。

○ コンクリート条件

- セメント: 普通ポルトランドセメント
(JIS R 5210)
- 細骨材: 砂(粗粒率: 2.5~2.9)
- 粗骨材: 砂利(粗粒率: 6.2~6.6)
- 化学混和剤: 減水剤等
(JIS A 6204に準拠し選定)

$$\text{粗粒率} = \frac{X_{40} + X_{20} + X_{10} + X_5 + X_{2.5} + X_{1.2} + X_{0.6} + X_{0.3} + X_{0.15}}{100}$$

Xi: immのふるいに留まった骨材の質量分率 [%]

○ 試験パラメータ:

- コンクリート成分^{注1}
 - 水/セメント重量比
 - 骨材/セメント重量比
 - 細骨材/粗骨材重量比
- コンクリート片粒径
- ガス温度
- ガス流速

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(14/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:物性測定試験計画)

○コンクリート材物性測定

注1:熱重量/示差熱・ガス質量分析 同時測定
 注2: Air Entraining Agent (空気連行剤)
 注3: Run 2の配合時にまとまりが悪く水を追加したため, Run 2に対して水/セメント比が少し低い条件となっている。

- コンクリート材の乾燥挙動評価に向けて, 乾燥挙動に寄与する物性測定を実施する。
- 測定項目は以下の通り。各物性測定条件は下表を参照。
 - ✓ 熱物性(熱伝導率・比熱) :コンクリート組成との相関, 乾燥挙動への影響を評価する。
 - ✓ TG/DTA-MS^{注1} :乾燥処理時の熱分解挙動を確認する。
 - ✓ 細孔径分布 :水分吸着特性をゼオライトと比較する。

表 物性測定条件一覧

Run	水 /セメント比	骨材 /セメント比	細骨材 /総骨材比	AE剤 ^{注2} /セメント比	配合パラメータ 評価項目	熱伝導率	比熱	TG/DTA -MS	細孔径分布
	[wt%]	[-]	[wt%]	[wt%]					
1	55	5.4	44	0.03	基本条件	○	○	○	○
2	45	〃	〃	〃	①水 /セメント重量比	○	○	○	○
3	70	〃	〃	〃		○	○	○	○
4	55	3.0	〃	〃	②セメント /総骨材重量比	○	○	—	—
5	〃	6.0	〃	〃		○	○	—	—
6	〃	5.4	60	〃	③細骨材 /総骨材重量比	○	○	—	—
7	〃	〃	30	〃		○	○	—	—
A	55	0	—	—	Run 1の骨材有無	○	○	○	○
B	40	0	—	—	Run 2の骨材有無 ^{注3}	○	○	○	○
C	70	0	—	—	Run 3の骨材有無	○	○	○	○

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(15/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2 (ビーカースケールのコンクリート試験: 物性測定試験結果(1/3))

○熱物性(熱伝導率・比熱)測定結果

- 熱伝導率, 比熱共に, 骨材/セメント比(骨材有無)の影響が大きく, その他の組成は比較的影響が小さい結果となった。
- 骨材/セメント比が高い程, 全体のセメント比が低下するため, セメント部に存在する微細な空隙等の比率が低くなるため, 熱伝導率が高い傾向を示したと考えられる。
- 比熱においては, 骨材の比熱がセメントと比較して半分以下のため, 骨材有無で大きな差が生じたと考えられる。

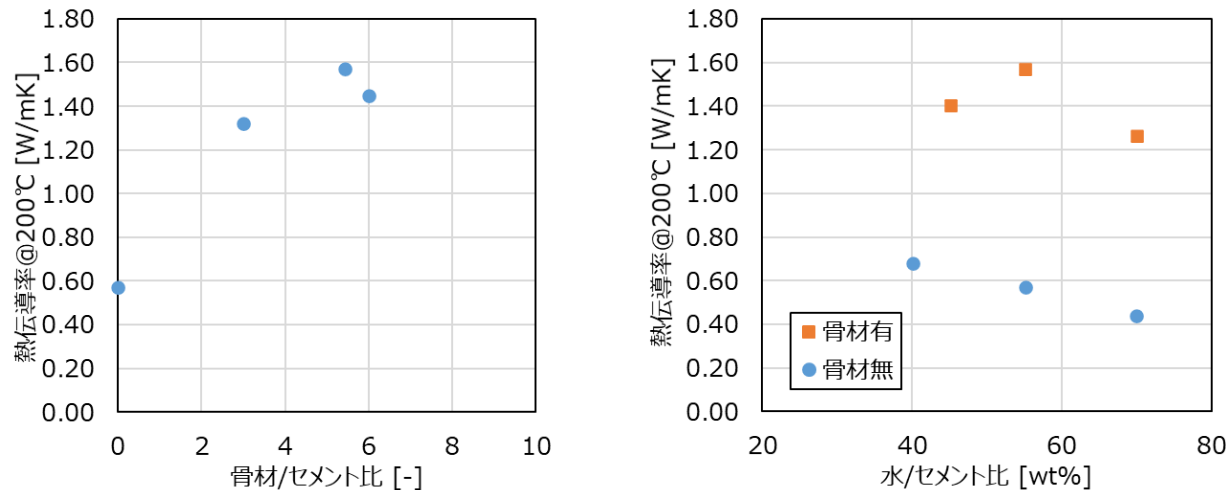


図 熱伝導率測定結果

表 比熱測定結果

Run	比熱 [J/K·g]/測定温度 [°C]	
	207	297
1	1.4	1.3
2	1.4	1.3
3	1.4	1.4
4	1.4	1.3
5	1.3	1.2
6	1.4	1.3
7	1.4	1.3
A	2.8	2.2
B	2.7	2.2
C	2.9	2.3
細骨材	1.1	1.2
粗骨材	1.2	1.2

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(16/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2 (ビーカースケールのコンクリート試験: 物性測定試験結果(2/3))

○TG/DTA-MS測定結果

- 骨材無の試料はセメント部が多いことから、吸湿しやすいため、初期含水率が高い傾向を示した。
- 200°C昇温時には顕著な吸熱や重量減少が確認されたが、200°C保持中にはほとんど確認されなかった。
- 従って、昇温に伴う水分の脱着や熱分解等の可能性はあるものの、200°Cにおける乾燥処理中にはほとんど影響が無いと考えられる。

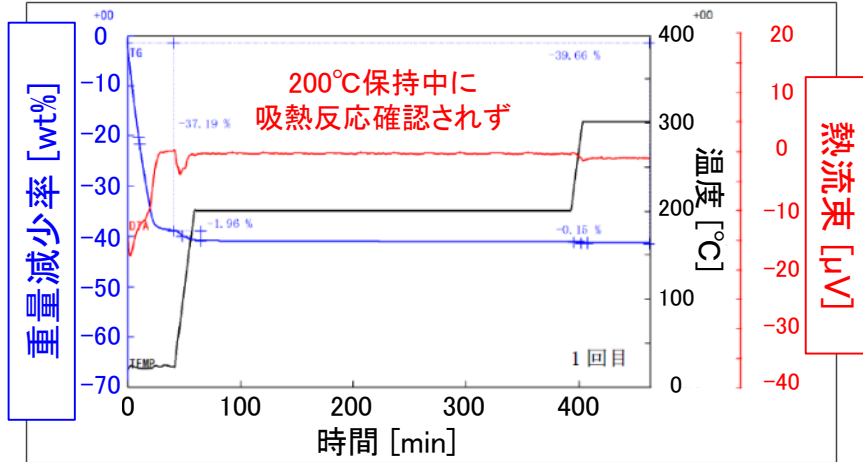


図 TG/DTA測定結果

表 含水率^{注1}評価結果

Run	初期含水率 [wt%]	到達含水率 [wt%]
1 ^{注2}	4.2	0.3
2 ^{注2}	6.8	0.3
3 ^{注2}	3.3	0.3
A	16.8	1.3
B	17.8	1.2
C	18.3	1.2

注1: 含水率 = 水分量 / 絶乾重量 × 100
 昇温開始時を初期値, 200°C 5.5h保持後を乾燥終点,
 300°C 1h保持後を絶乾重量基準として算出 (No.111~113参照)
 注2: Run 1~3は測定回数 of 平均値

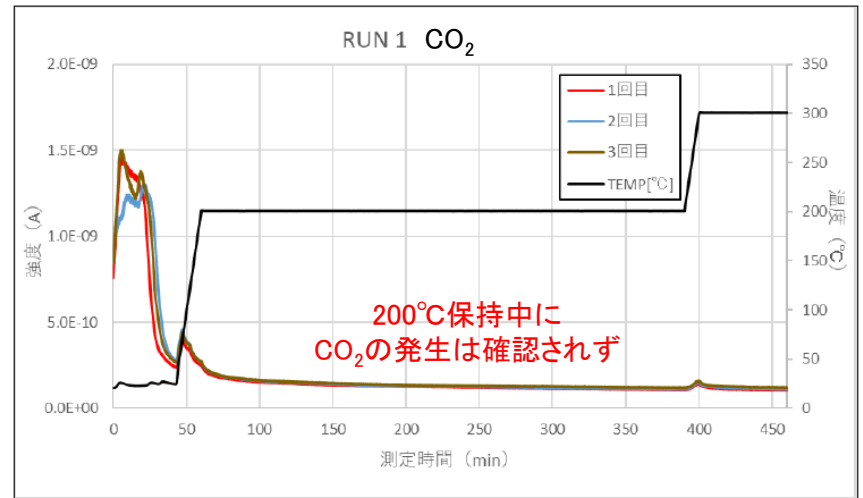


図 発生ガスのMS測定結果

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(17/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2 (ビーカースケールのコンクリート試験: 物性測定試験結果(3/3))

○細孔径分布測定結果

- 水/セメント比や骨材有無に関わらず, 平均細孔径は同程度であることを確認した。
- 骨材無試料は細孔容積や比表面積が大きい傾向が確認された。
- ゼオライトと比較すると, コンクリート試料の0~4nm範囲(図赤枠部)の平均細孔径はいずれも2倍弱大きく, 細孔容積も1桁以上小さいことが確認された。
- 従って, コンクリート材はゼオライトよりも水分吸着による乾燥への影響度は小さいと考えられる。

表 細孔径・細孔容積測定結果

Run	測定範囲				比表面積
	0~4 nm		1~200 nm		
	平均細孔径	細孔容積	平均細孔径	細孔容積	[m ² /g]
	[nm]	[cm ³ /g]	[nm]	[cm ³ /g]	
1	1.66	0.006	11.00	0.031	10.99
2	1.70	0.014	6.60	0.041	23.58
3	1.69	0.022	7.18	0.074	38.00
A	1.72	0.039	7.77	0.140	66.23
B	1.72	0.029	7.61	0.101	49.59
C	1.73	0.038	10.43	0.190	65.39
ゼオライト	0.95	0.135	9.57	0.141	341.24

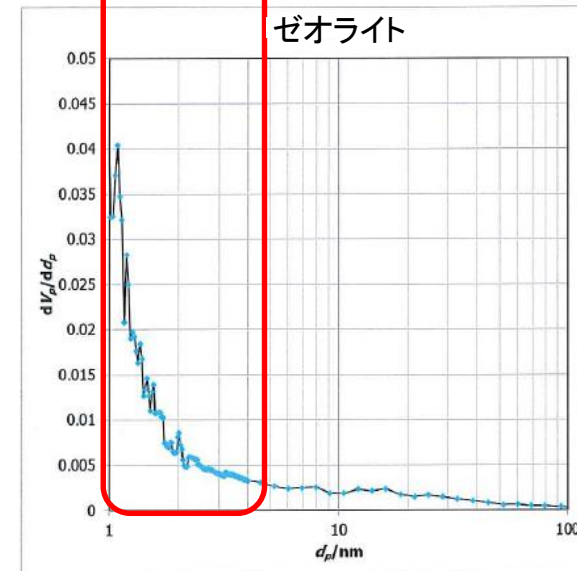
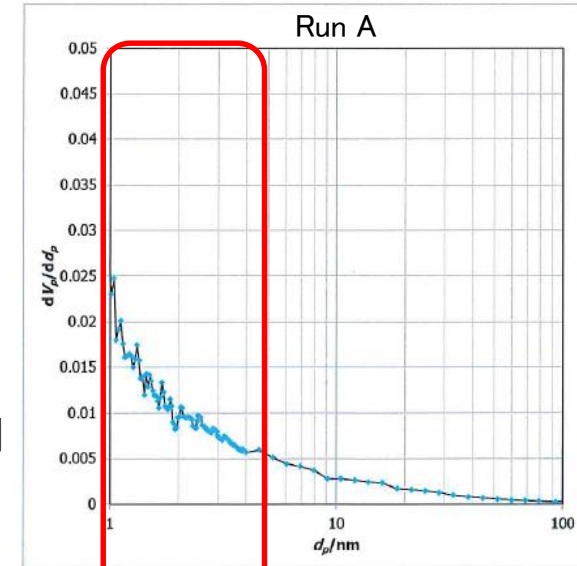


図 細孔径分布測定結果

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(18/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:乾燥試験計画(1/2))

- 2020年度に製作したビーカースケール試験装置を用いて, コンクリート片を対象とした乾燥試験を行い, コンクリート組成と乾燥特性の相関性を把握する。

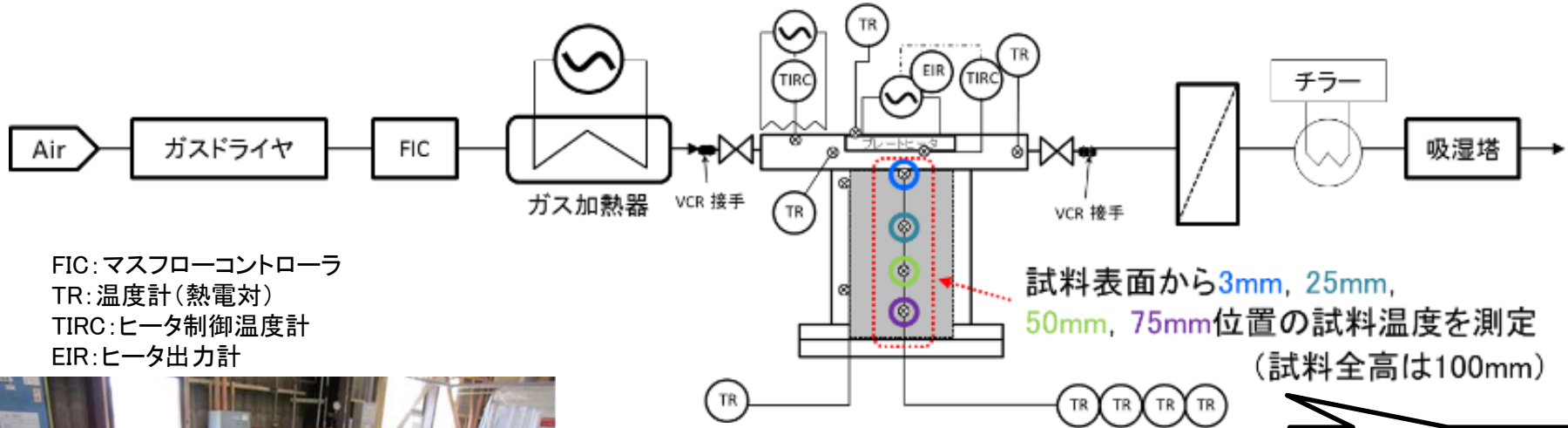


図 温風乾燥要素試験装置 簡略系統図



図 温風乾燥要素試験装置 外観

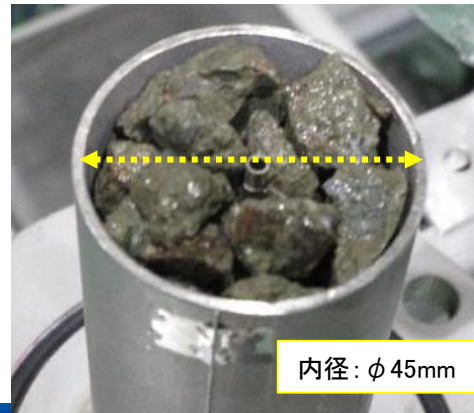
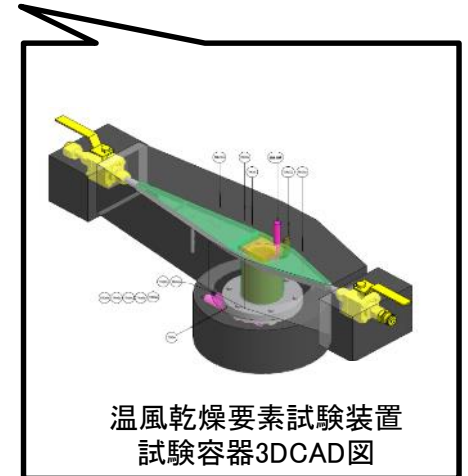


図 含水試料充填時の容器外観



6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(19/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:乾燥試験計画(2/2))

注1:コンクリート成分条件は, 福島第一原子力発電所工事報告書^{注2}および熱物性等を参考に設定し, 必要に応じて追加・変更する。
 注2:野村他, “福島原子力発電所第3号機工事報告”, コンクリートジャーナル, vol.12, No.6, 1974
 注3:使用するビーカーサイズ(No.37)に対し, 一定以上の数の粒を充填できるような粒径を考慮して選定。

○試験目的

- コンクリート片を対象とした場合の乾燥処理条件を策定するため, 乾燥特性に関するデータを取得する。
- 得られた試験データに基づき, 2020年度のゼオライトや金属球との違いを定量的に評価し, 各被乾燥物対象に対して対応可能な乾燥処理条件を見出す。
- 乾燥が困難な場合や乾燥時間の低減案として, 乾燥温度の影響を確認する。

○評価方法

- 試料内の温度分布, 試料の質量の経時変化を測定し, 到達含水率や乾燥速度(水分減少速度)を評価する。

表 試験条件一覧

Run	水/セメント ^{注1} [-]	骨材/セメント ^{注1} [-]	粗骨材/細骨材 ^{注1} [-]	コンクリート 片粒径 ^{注3} [mm]	充填率 [vol%]	ガス温度 [°C]	ガス流速 [m/s]
1	55	6	1.3	10	成行き	200	1
2	〃	〃	〃	5	〃	〃	〃
3	〃	〃	〃	20	〃	〃	〃
4	〃	0	—	10	〃	〃	〃
5	〃	6	1.3	〃	〃	〃	3
6	〃	〃	〃	〃	〃	〃	0.1
7	〃	〃	〃	〃	〃	300	1

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(20/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:乾燥試験結果(1/4))

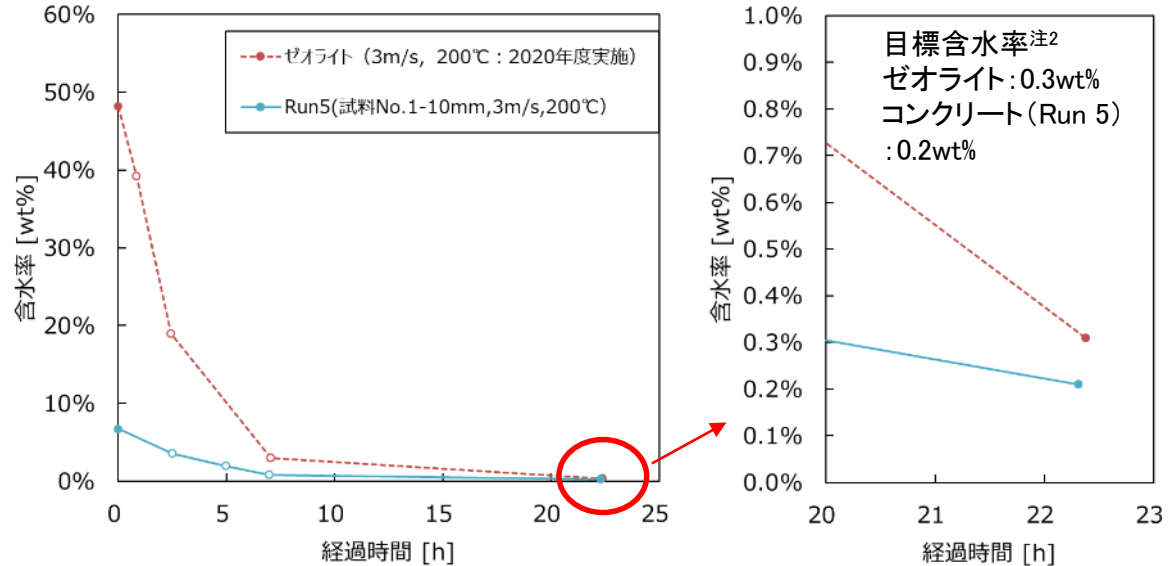
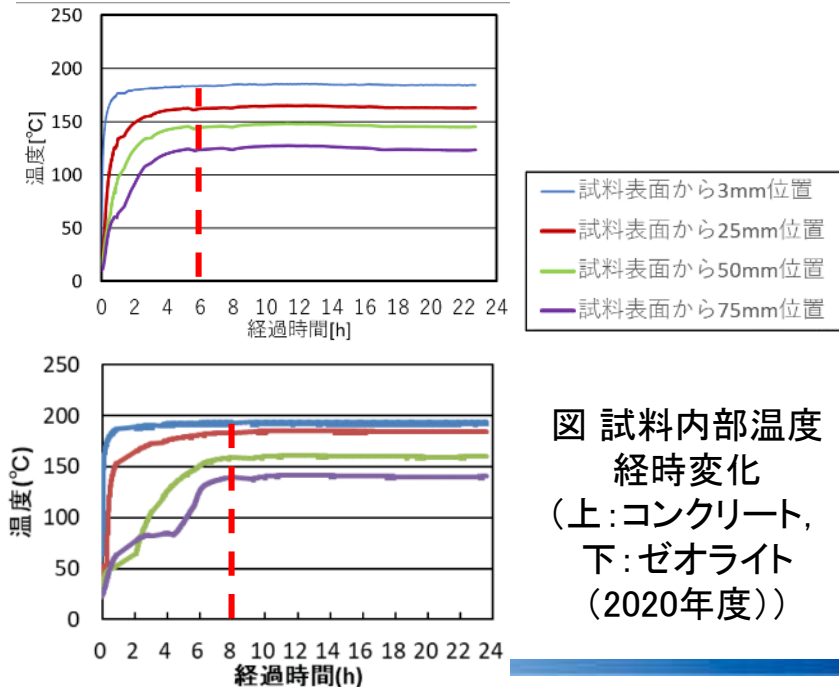
○ゼオライト試料との比較評価

- コンクリート試料に対して, 2020年度のゼオライトと同様の試験条件にて乾燥試験を実施した。
- ゼオライトと比較すると, コンクリート試験体の方が, 試料内部温度が一定(定率乾燥完了)になるまでに要する時間が短い傾向が確認された。
- これは, ゼオライトと比較して, コンクリート試料では, 粒径が大きく, 水分吸湿性が低いため, 付着水等が少ないことから, 初期含水率^{注1}が小さいためと考えられる。
- 乾燥終点については, 乾燥処理時間が10~20h時点での質量計測を行い評価する。(No.42)

注1: 含水率=水分量/絶乾重量×100 (300℃で5時間以上保持した時の重量を絶乾重量とする)
(No.111~113参照)

注2: 移送期間中の水素発生量を踏まえて被乾燥物密度を考慮した目標含水率(No.107,113参照)

注3: 図中の○は乾燥中の試験容器ごと質量測定して算出した含水率のため参考値とする
(●は被乾燥物の質量を直接測定し算出した含水率)



注1:ビーカースケール試験では、試験中の質量経時変化が電子天秤の直線性の仕様範囲(±0.2g)以内となった場合、乾燥終点に到達したと判断。

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(21/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:乾燥試験結果(2/4))

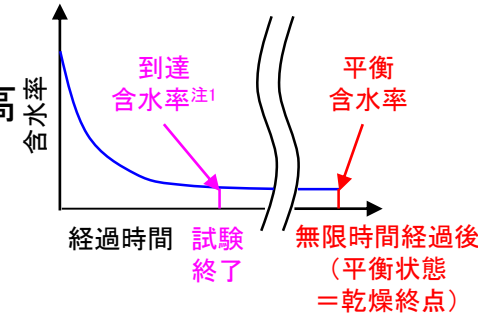


図 到達含水率と平衡含水率のイメージ(詳細はNo.112)

○ガス流速に対する影響評価

- 1m/s, 3m/sでは、有意な差は確認されなかった。
- 0.1m/sでは、乾燥初期(予熱)及び乾燥後期(減率乾燥)の乾燥速度が低く、到達含水率も高い結果となった。
⇒乾燥速度が低く、22時間程度では乾燥終点に到達していないためと考えられる。

○ガス温度に対する影響評価

- ガス温度が高い程、到達含水率が低く、300℃では目標含水率0.2wt%以下となった。
⇒十分に乾燥が完了した後の到達含水率は、温度及び圧力によって決まる平衡含水率となるため、試料温度が高い程、低下する。

試験終了時拡大

試験終了時拡大

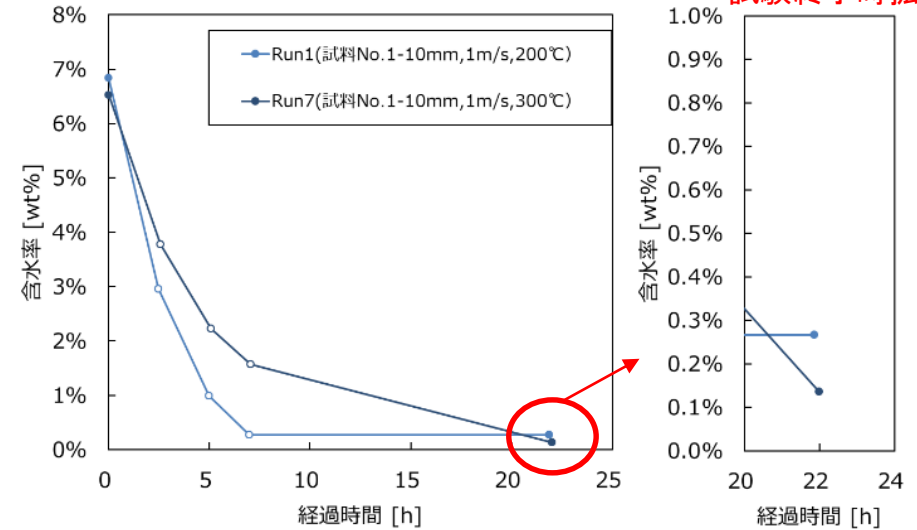
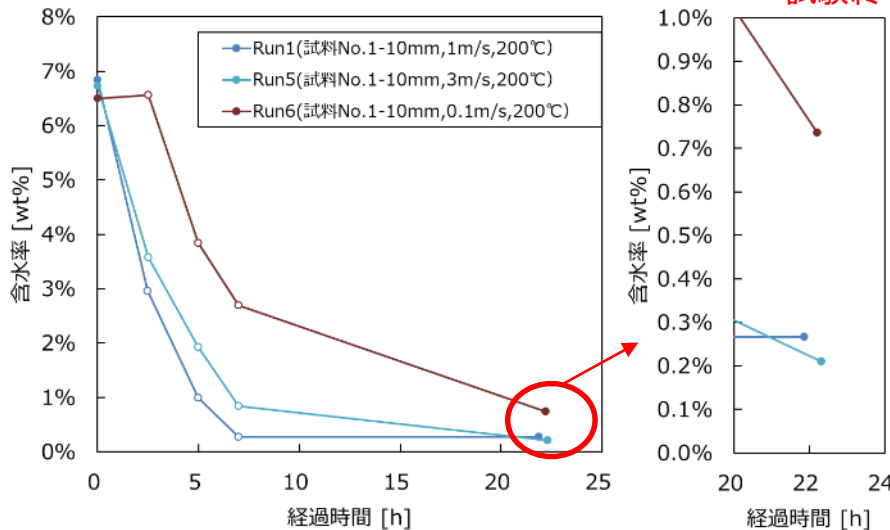


図 ガス流速に対する含水率経時変化の影響評価

図 ガス温度に対する含水率経時変化の影響評価

(Run1:1m/s, Run5:3m/s, Run6:0.1m/s)

(Run1:200℃, Run7:300℃)

注1:各条件の充填率は以下の通り。
粒径5mm:45vol%
粒径10mm:44vol%
粒径20mm:41vol%

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(22/35)

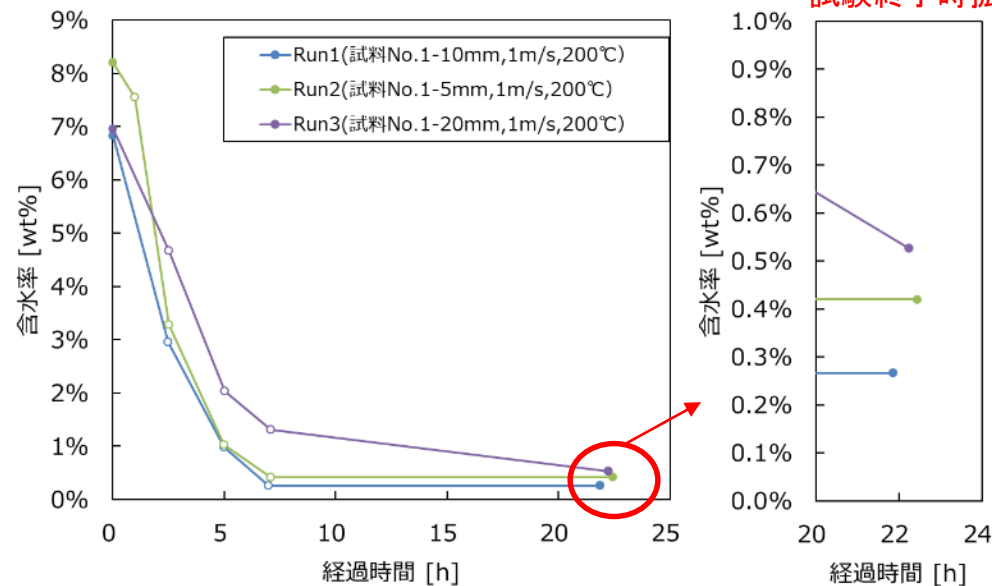
(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:乾燥試験結果(3/4))

○コンクリート片粒径注1に対する影響評価

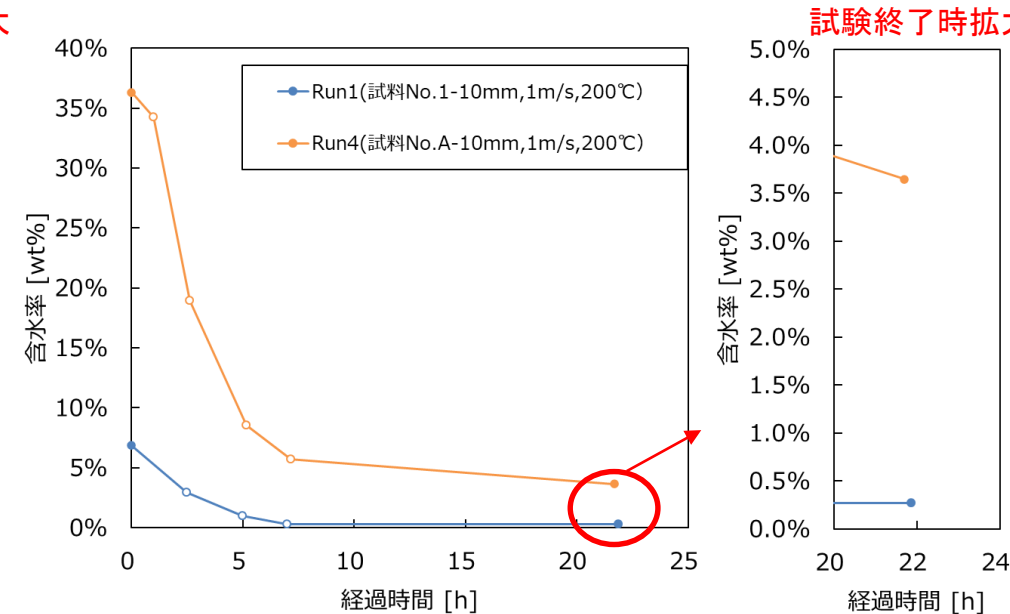
- 5mm試料は10mm, 20mm試料と比較し, 初期含水率が高い傾向を示した。
⇒比表面積が大きいいため, 表面付着水の影響が大きいためと考えられる。
- 20mm試料は5mm, 10mm試料と比較し, 乾燥終点への到達に時間を要する傾向を示した。
⇒粒径が大きい程, 試料内部の細孔長さが大きく, 水蒸気の拡散に時間を要するためと考えられる。

○骨材有無に対する影響評価

- 骨材無し試料では, 初期含水率が著しく高く, 到達含水率も高い結果となった。
⇒TG-MSの結果と同様の傾向となった。



■ 図 コンクリート片粒径に対する含水率経時変化の影響評価 (Run1: 10mm, Run2: 5mm, Run3: 20mm)



■ 図 骨材有無に対する含水率経時変化の影響評価 (Run1: 骨材有, Run4: 骨材無)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(23/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:乾燥試験結果(4/4))

○乾燥終点(平衡到達)時間の確認

- 10mm粒径コンクリート試料はガス温度200℃, ガス流速1m/sにて, 10~13時間程度で乾燥終点に到達していることを確認した。
- 10mm粒径硬化セメント試料(骨材無)はガス温度200℃, ガス流速1m/sにて, 20時間程度で乾燥終点に到達していることを確認した。

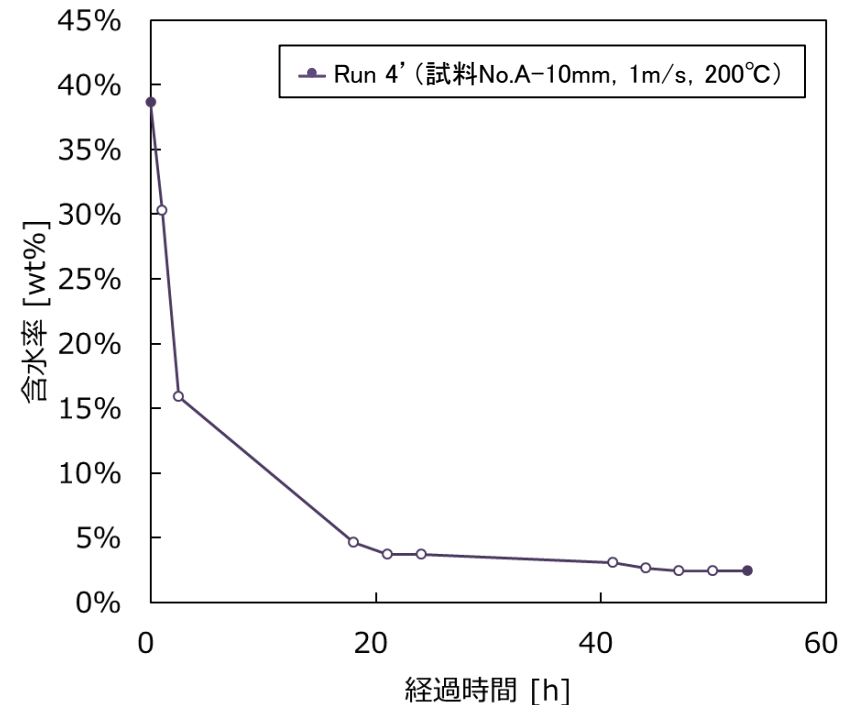
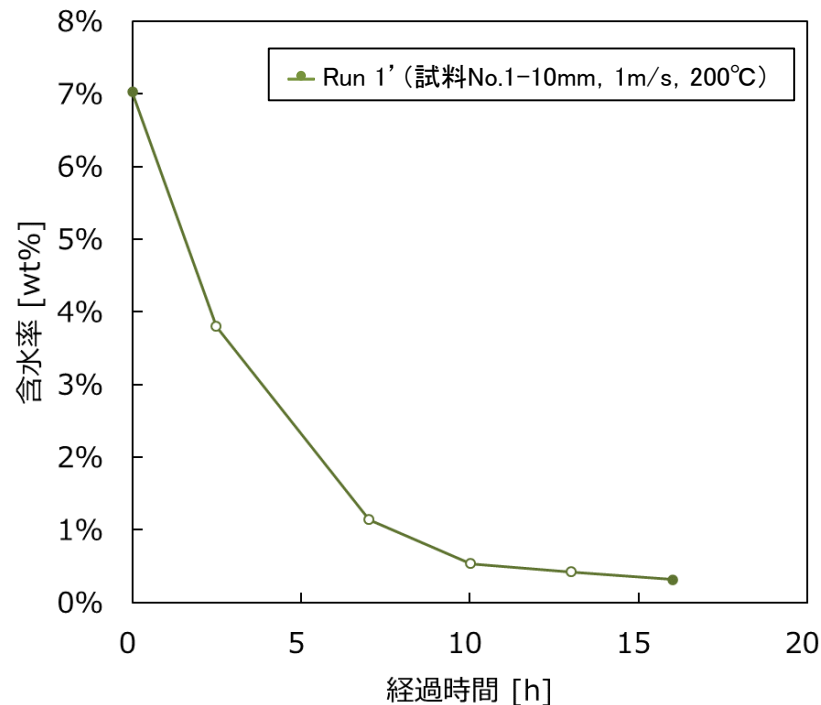


図 乾燥終点の確認(ガス温度:200℃, ガス流速:1m/s)
(左:コンクリート試料, 右:硬化セメント試料(骨材無))

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(24/35)

(v)要素試験によるデータ拡充2(ビーカースケールのコンクリート試験:まとめ)

- コンクリート試料の物性測定を行い, 組成と熱物性(比熱・熱伝導率)や熱分解挙動, 細孔径分布等の相関性や基礎データを確認した。
- 物性測定の結果, 水/セメント比や骨材比の変動よりも骨材有無の影響が最も大きい傾向を確認した。
- 福島第一原子力発電所の工事記録を参考に同様の組成のコンクリート試料に対して, ガス温度やガス流速, 粒径等の乾燥条件に対する乾燥挙動への影響を確認した。
- 10mm粒径のコンクリート試料に対して, ガス温度:200°C, ガス流速:1m/sで乾燥処理を行うことで, 10~13時間程度で乾燥終点(平衡状態)に到達する目途を得た。
- ガス温度:300°C, ガス流速:1m/sで乾燥処理することで目標含水率以下となる目途を得た。

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(25/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析内容)

ビーカースケールのゼオライトやコンクリート乾燥試験結果を踏まえて, 乾燥挙動評価モデルを構築し, 以下の内容について実規模体系での乾燥における乾燥挙動を評価する。

- ビーカースケールのコンクリート乾燥試験に基づくコンクリート乾燥評価, 実規模ユニット缶体系への展開
- フィルタ濾材の乾燥時間評価

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(26/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析モデル(1/5))

- 伝熱・乾燥における熱・水蒸気移動は厚み方向が支配的と考え、一次元モデルを考える。
- 乾き圏と湿り圏を考え、乾燥によってその境界面(乾燥面と呼ぶ)が内部に移動する。(減率乾燥モデルの考え方の1つ)

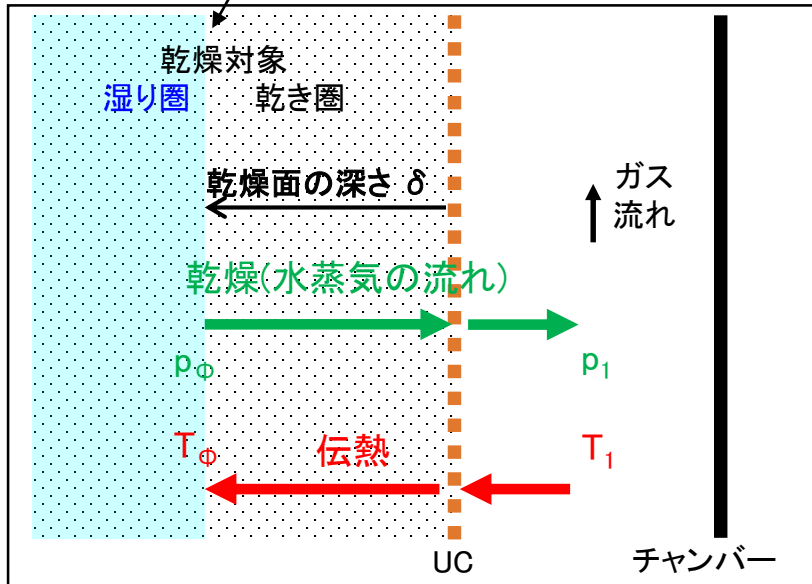
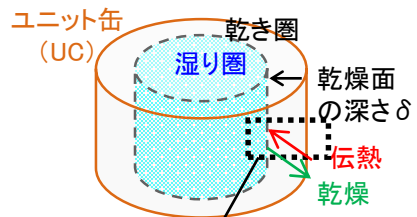


図 乾燥と伝熱の模式図(縦断面)

乾燥・伝熱の速度は、雰囲気と乾燥面との間の抵抗と駆動力(乾燥速度は蒸気圧差, 伝熱速度は温度差)により計算する。

乾燥速度

$$W = \frac{A}{\frac{1}{h_D} + \frac{\delta}{\epsilon_d D}} \left(\frac{p_\phi}{R_w T_\phi} - \frac{p_1}{R_w T_1} \right)$$

- A: 面積 [m²]
- D: 水蒸気の拡散係数 [m²/s]
- h: 被乾燥物外表面の熱伝達率 (輻射も別途考慮) [W/(m²-K)]
- h_D: 被乾燥物外表面の物質移動係数 [m/s]
- h_{fg}: 潜熱 [J/kg]
- p₁: 雰囲気の水蒸気分圧 [Pa]
- p_φ: 乾燥面の水蒸気分圧 [Pa] (=T_φにおける飽和蒸気圧)
- Q: 伝熱量 [W]
- R_w: 水蒸気の気体定数 [J/(kg-K)]
- T₁: 雰囲気温度 [K]
- T_φ: 乾燥面の温度 [K]
- W: 乾燥速度 [kg/s]
- ε_d, ε_λ: 空隙率等を考慮した補正係数[-]
- δ: 乾燥面の深さ [m]
- λ: 被乾燥物の熱伝導率 [W/(m-K)]

伝熱速度

$$Q = \frac{A}{\frac{1}{h} + \frac{\delta}{\epsilon_\lambda \lambda}} (T_1 - T_\phi)$$

次式の乾燥速度と伝熱速度の関係からT_φを求める。

$W = Q/h_{fg}$ 乾燥速度Wから、時間(乾燥の進行)とともに乾燥面の深さδが大きくなる。
Wの積算により、平均含水率の減少が得られる。

乾燥試験の計測データから、雰囲気・乾燥面の水蒸気分圧および温度, 乾燥面の深さδを推定する。また, 試料の熱伝導率を別途取得する。これらのデータと試験の含水率の時間変化からε_d, ε_λを調整する。
被乾燥物の種類の違いをλ, 形状の違いをA, δに反映し, 評価を行う。

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(27/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析モデル(2/5))

【乾燥モデル(充填層内の有効拡散係数)】

$$D_e = \phi_v \beta D$$

D_e : 充填層内の有効拡散係数 [m²/s]

D : 一般的な気中での拡散係数 [m²/s]

ϕ_v : 空隙率 [-] (<1)

β : 拡散経路の屈曲を考慮した補正係数 [-] (<1)

・ ϕ_v について

伝熱モデルで使用する伝熱面積は、乾燥物(粒) + 空隙の総面積で定義されるのに対し、拡散の流路面積は空隙部分である。両者の面積を伝熱モデル側に合わせるため、拡散係数に空隙率を乗じ、見かけ上、拡散係数を小さくする。

・ β について

右図に示すように、充填層内部では拡散経路が屈曲しており、乾燥物の厚みよりも実際の拡散経路は長くなる。その効果を考慮するため、見かけ上、拡散係数を小さくする。

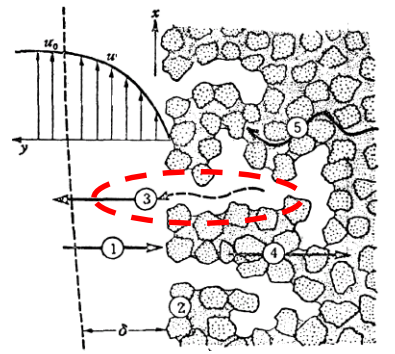


図 粒子層における熱と物質の移動^{注1}
注1: 大谷 茂盛, “粒子層の乾燥機構”, 化学工学, 第36巻2号, 1972

適用範囲が広い「Marshall」の式を参照する。

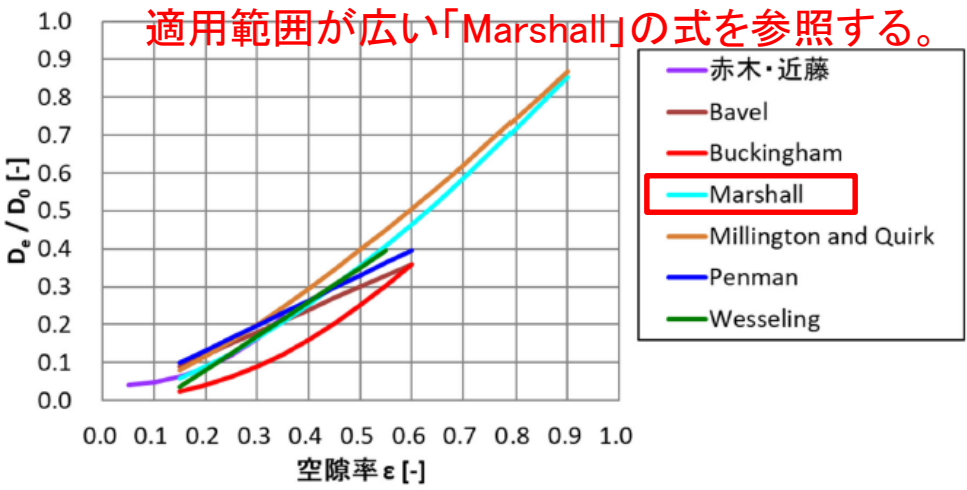


図 空隙率と有効拡散係数比の関係

表 土壌中の気体の拡散に関する研究事例 有効拡散係数の評価式

出典	有効拡散係数の評価式
赤木・近藤, 2009	$D_e/D_0 = 2.5\epsilon^{2.5} + 0.04$
Bavel, 1952	$D_e/D_0 = 0.6\epsilon$
Buckingham, 1904	$D_e/D_0 = \epsilon^2$
Marshall, 1959	$D_e/D_0 = \epsilon^{3/2}$
Millington and Quirk, 1960	$D_e/D_0 = \epsilon^{4/3}$
Penman, 1940	$D_e/D_0 = 0.66\epsilon$
Wesseling, 1962	$D_e/D_0 = 0.9\epsilon - 0.1$

D_e : 充填層内の有効拡散係数 [m²/s]
 D_0 : 気中の拡散係数 [m²/s]
 ϵ : 空隙率 [-]

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(28/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析モデル(3/5))

充填層の有効熱伝導率

Kunii-Smithモデル^{注1}

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \varepsilon \left(1 + \frac{h_{rv} d_p}{\lambda_f} \right) + \frac{1 - \varepsilon}{\frac{1}{\xi} + \frac{2\lambda_f}{3\lambda_p}}$$

$$\xi = \frac{1}{\phi} + \frac{h_{rp} d_p}{\lambda_f}$$

$$h_{rp} = 0.227 \frac{\varepsilon_p}{2 - \varepsilon_p} \left(\frac{T}{100} \right)^3$$

$$h_{rv} = \left[0.227 / \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{2(1 - \varepsilon)} \frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right\} \right] \left(\frac{T}{100} \right)^3$$

ϕ は ε の関数で, 次式から求める。

$$\phi = \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2) \frac{\varepsilon - 0.260}{0.216} \quad (0.260 \leq \varepsilon \leq 0.476)$$

$$\phi = \phi_1 \quad (\varepsilon \geq 0.476)$$

$$\phi = \phi_2 \quad (\varepsilon \leq 0.260)$$

ϕ_1, ϕ_2 の値は右図参照

- d_p : 粒子径 [m]
- h_{rp}, h_{rv} : 放射熱伝達率 [W/(m²-K)]
- T : 温度 [K]
- λ_e : 充填層の有効熱伝導率 [W/(m-K)]
- λ_f : 乾燥物隙間の流体の熱伝導率 [W/(m-K)]
- λ_p : 乾燥物(固体部分)の熱伝導率 [W/(m-K)]
- ε : 空隙率 [-]
- ε_p : 粒子の放射率 [-]

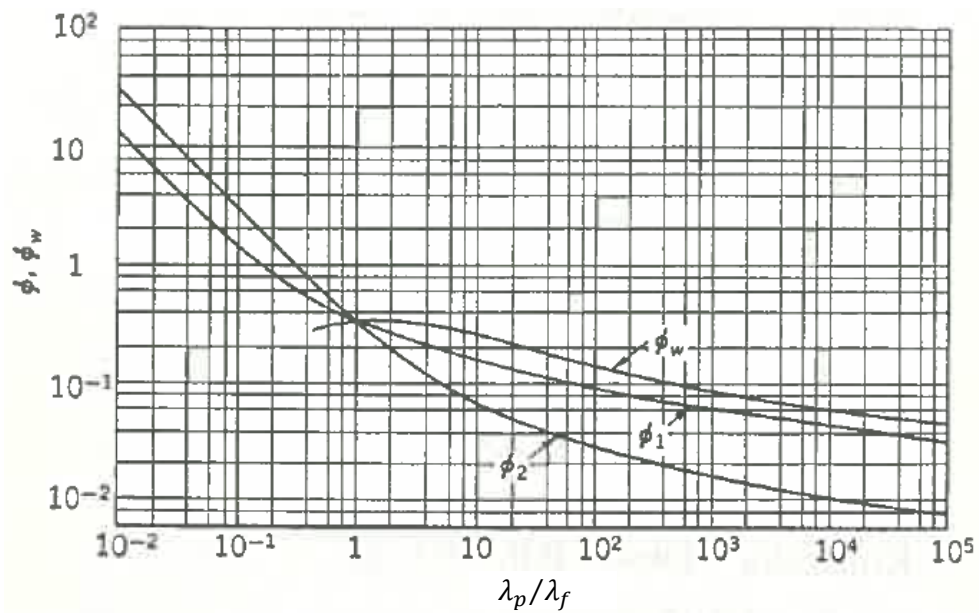


図 ϕ_1, ϕ_2 の値^{注1}

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

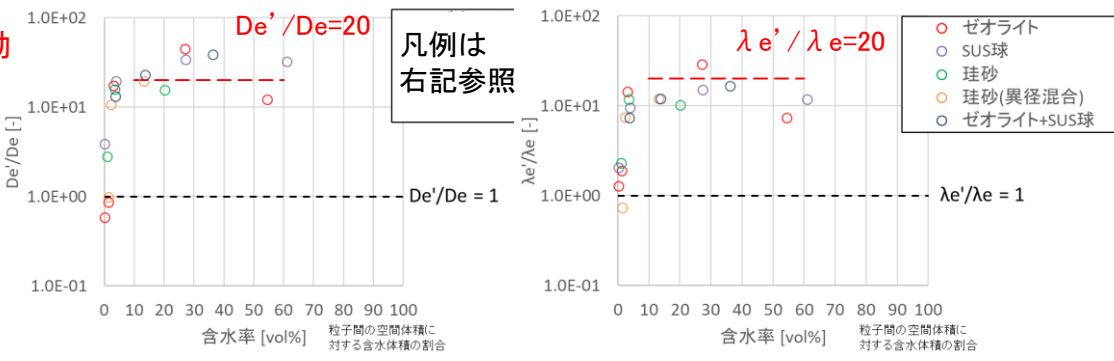
(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(29/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析モデル(4/5))

○ビーカースケール試験に基づく有効拡散係数, 有効熱伝導率

試験データに基づく逆解析から有効拡散係数 De' , 有効熱伝導率 $\lambda e'$ を求め, 文献に基づく値 De , λe と比較した(図)。ゼオライトの乾燥前期では文献値に対して10~30倍大きく, 定率乾燥で見られる液状水移動の影響と考えられる。一方, コンクリートではその影響は数倍程度と小さく, ゼオライトに比べて含水率が小さいためと考えられる。解析では上記効果を拡散係数, 熱伝導率の補正係数として取り入れることとする(De' , $\lambda e'$)。

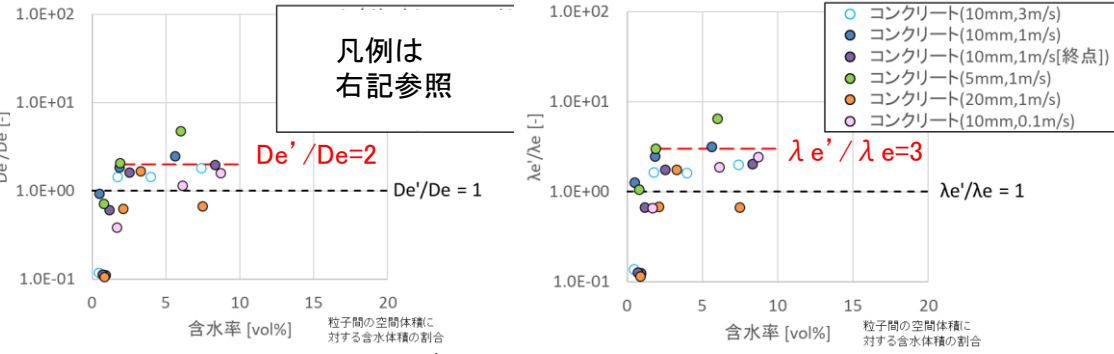
液状水移動の影響
↑
充填層の水蒸気拡散
↓
細孔の影響



(ゼオライト, 他)

表 ビーカースケール試験条件

試験条件		絶対乾試料 g	初期含水 g	空隙率 -
Run1	ゼオライト	102	50	0.46
Run8	SUS球	776	58	0.39
Run9	珪砂	193	34	0.55
Run11	珪砂(異径混合)	211	27	0.51
Run12	ゼオライト+SUS球	417	52	0.43
コンクリRun5	コンクリート(10mm,3m/s)	176	12	0.53
コンクリRun1	コンクリート(10mm,1m/s)	167	11	0.55
コンクリRun1-2	コンクリート(10mm,1m/s[終点])	181	13	0.51
コンクリRun2	コンクリート(5mm,1m/s)	164	13	0.56
コンクリRun3	コンクリート(20mm,1m/s)	152	11	0.59
コンクリRun6	コンクリート(10mm,0.1m/s)	184	12	0.50



(コンクリート)

表 De , λe の補正

パラメータ	単位	ゼオライト	コンクリート
ϵ	-	0.46	0.53
D_0	m^2/s	4.5×10^{-5}	4.5×10^{-5}
De	m^2/s	1.4×10^{-5}	1.8×10^{-5}
De'	m^2/s	$De' = De \times 20$	$De' = De \times 2$
λe	$W/(m \cdot K)$	0.09	0.2
$\lambda e'$	$W/(m \cdot K)$	$\lambda e' = \lambda e \times 20$	$\lambda e' = \lambda e \times 3$

図 含水率と有効拡散係数比, 有効熱伝導率比の関係

- ϵ : 空隙率
- D_0 : 気中での水蒸気拡散係数
- De : 充填層内の有効拡散係数
- De' : ビーカースケール試験に基づく有効拡散係数
- λe : 充填層の有効熱伝導率
- $\lambda e'$: ビーカースケール試験に基づく有効熱伝導率

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(30/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析モデル(5/5))

○細孔の影響

自由水と細孔内水の2つのモデルに分け, 細孔内水については, 前述の拡散の式に細孔内の蒸気圧 p_v , クヌッセン拡散を考慮した拡散係数 D_e' を計算上の試料温度に応じて設定する。

- p_v : 細孔内の蒸気圧 [Pa]
- p_s : 温度Tの飽和蒸気圧 [Pa]
- p_c : 毛管吸引力 [Pa]
- M_L : 水の分子量 [kg/mol]
- ρ_L : 液体の密度 [kg/m³]
- R: 気体定数 [J/(mol·K)]
- T: 温度 [K]
- σ : 表面張力 [N/m]
- θ : 接触角度 [deg]
- r: 細孔半径 [m]

- D_e' : クヌッセン拡散を考慮した有効拡散係数 [m²/s]
- D_e : 多孔質体の有効拡散係数 [m²/s]
- D_{KA} : クヌッセン拡散係数 [m²/s]
- D_0 : 気中での水蒸気拡散係数 [m²/s]
- ε : 細孔の空隙率 [-]
- β : 屈曲を考慮した補正係数 [-]
(= 1/6~1/3)

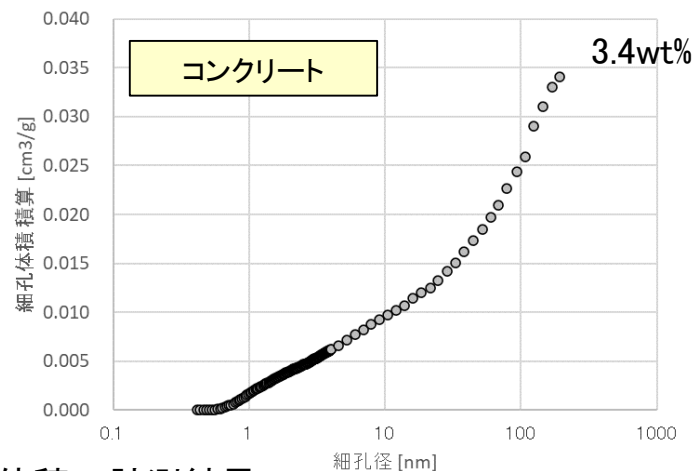
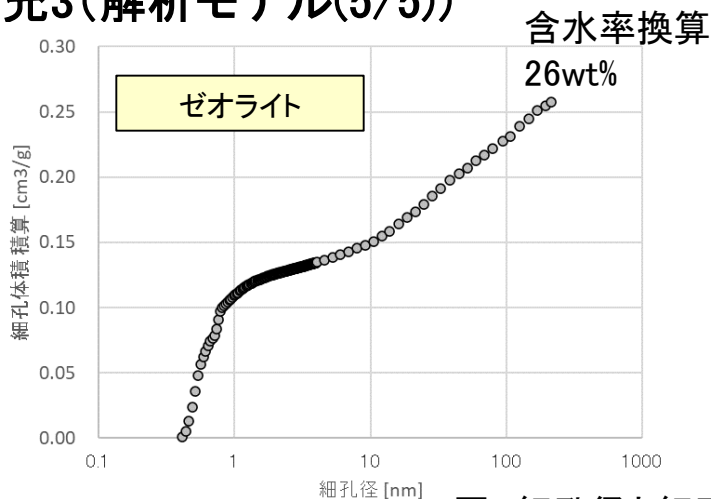


図 細孔径と細孔体積の計測結果

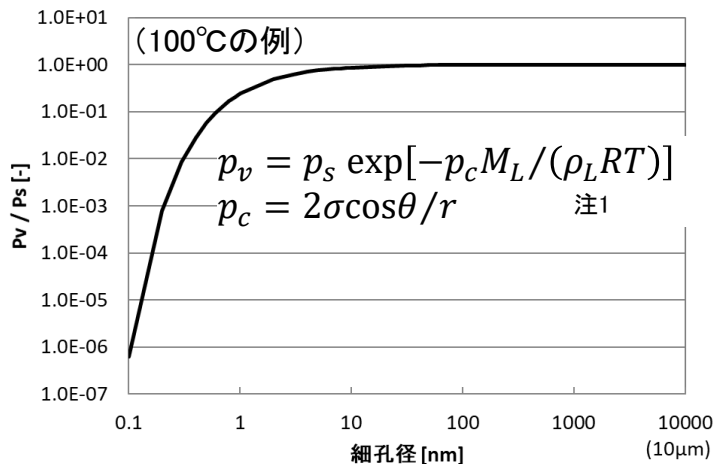


図 細孔径と蒸気圧比の関係

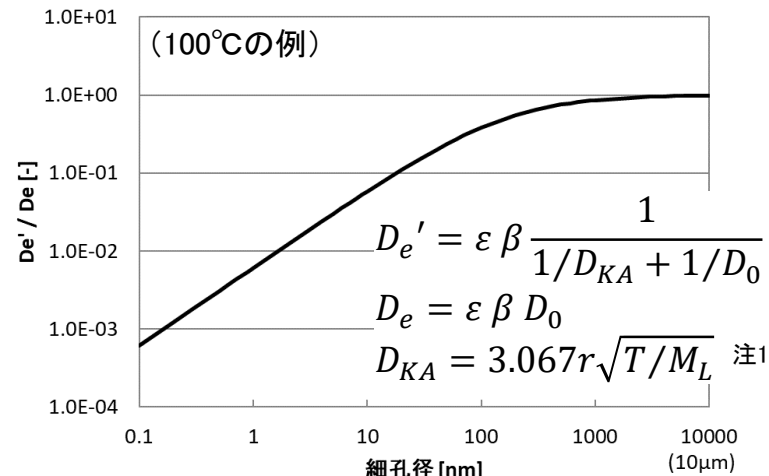


図 細孔径と拡散係数比の関係(クヌッセン拡散)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(31/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析結果(1/5))

○ビーカースケール試験 再現解析

自由水と細孔内水の2つのモデルとすることで, 含水率の減少勾配の前期, 後期に違いが表れる。後期では細孔径の影響により含水率の減少勾配が緩やかとなる。

温風乾燥, 200°C, 3m/s条件

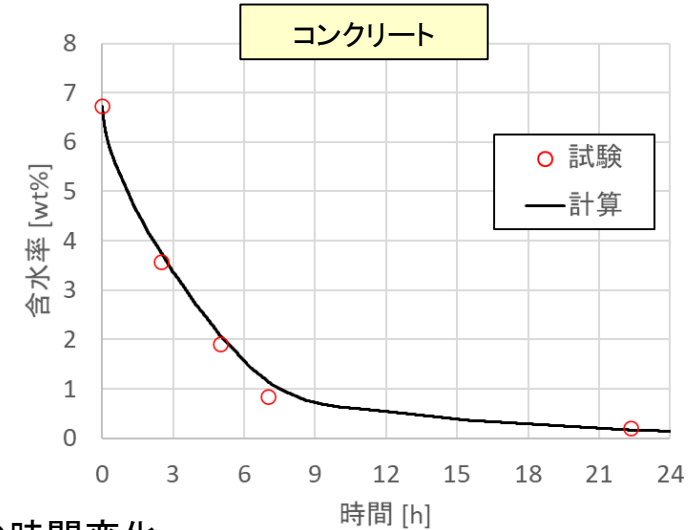
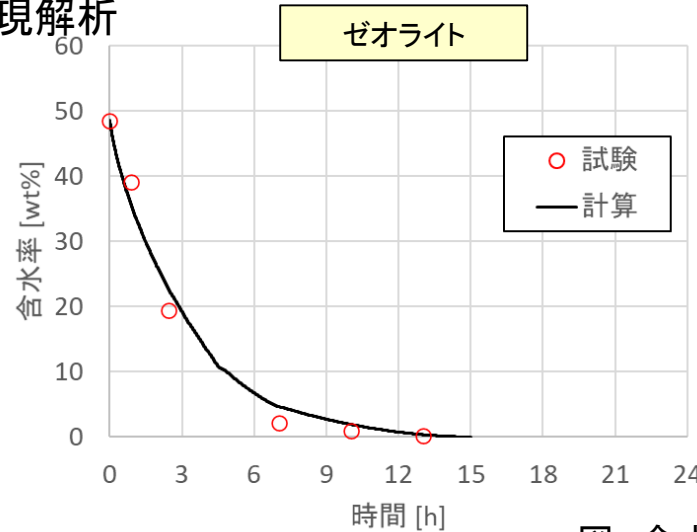


図 含水率の時間変化

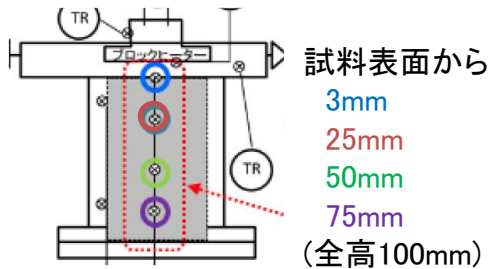


図 温度計測点

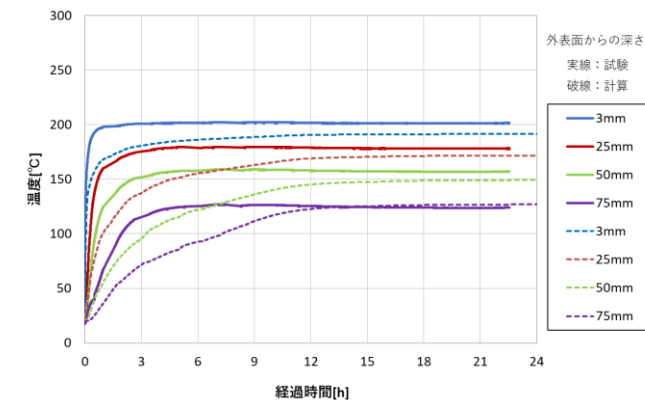
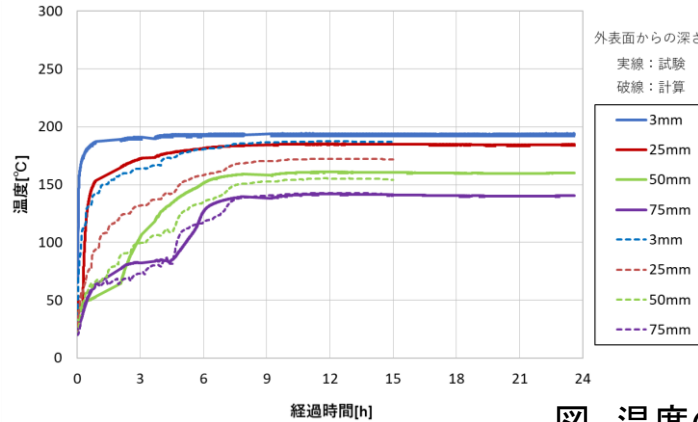


図 温度の時間変化

6.実施内容

6.1要素試験

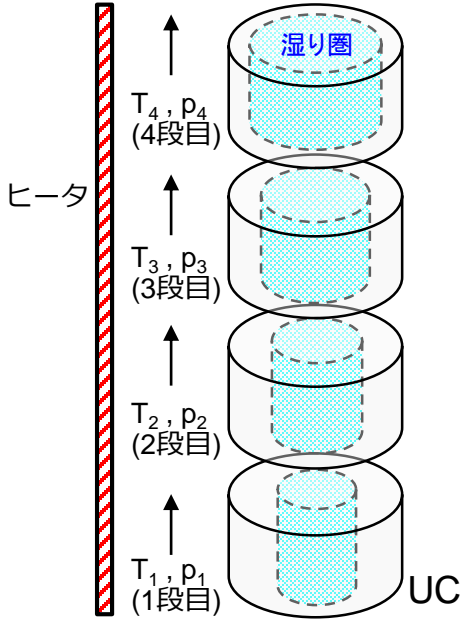
③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(32/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析結果(2/5))

○実規模体系への展開

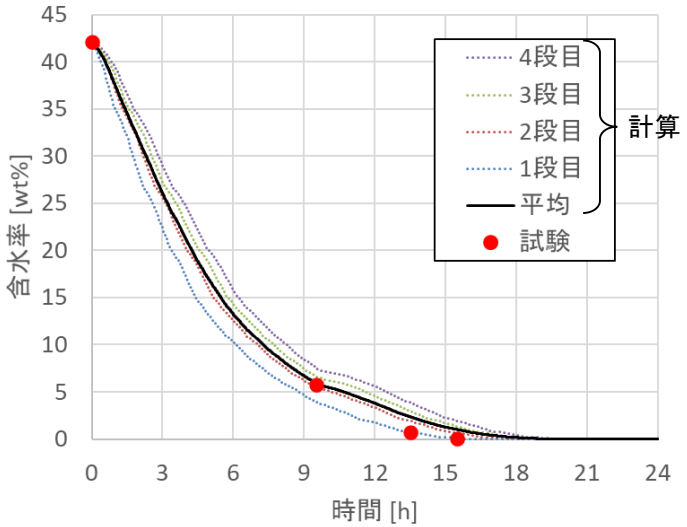
ユニット缶の半径方向一次元モデルとし, 各段のアニュラス部のガス温度, 水蒸気分圧の変化を考慮して含水率の時間変化を評価した。ゼオライトでは, 実規模試験の乾燥終了約15時間に対して計算(平均)が約18時間, コンクリートでは計算(平均)が約13時間となった。



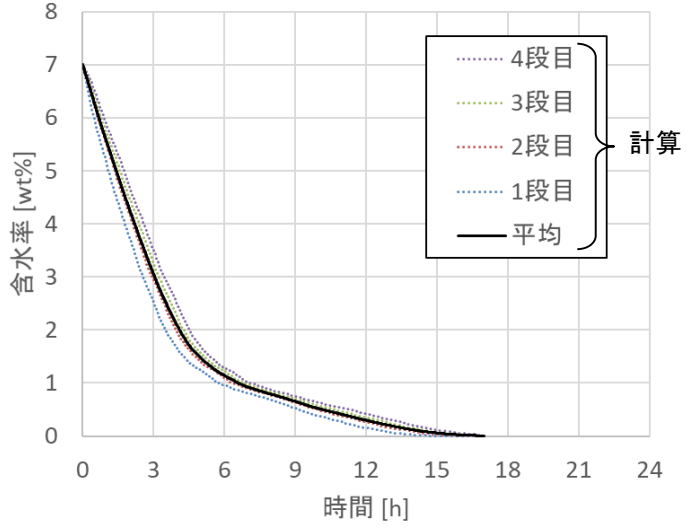
T : ガス温度
p : 水蒸気分圧

図 評価モデル

温風乾燥, 200°C, 3m/s条件



(ゼオライト: 実規模試験と計算の比較)



(コンクリート: 計算)

図 含水率の時間変化

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

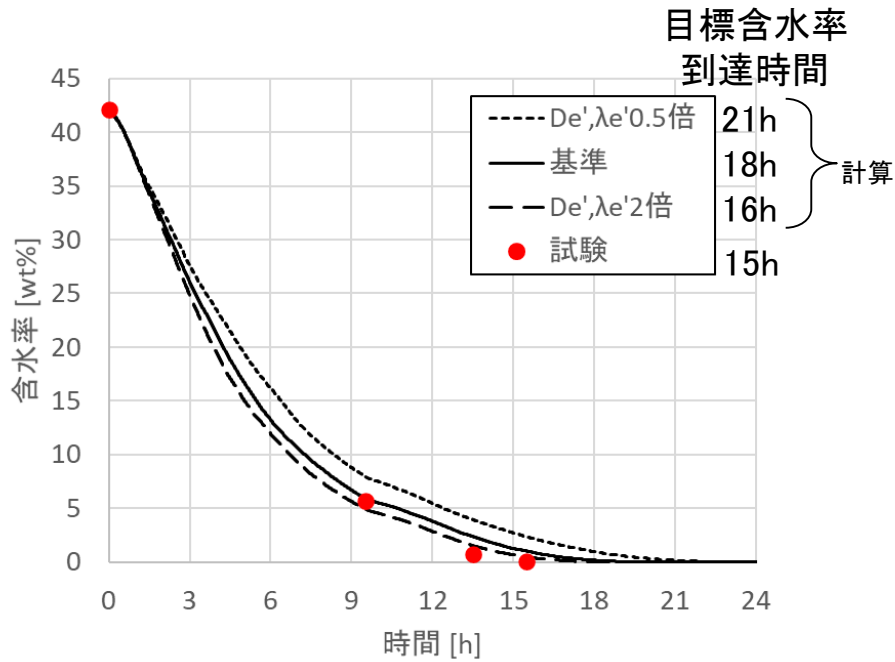
(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(33/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析結果(3/5))

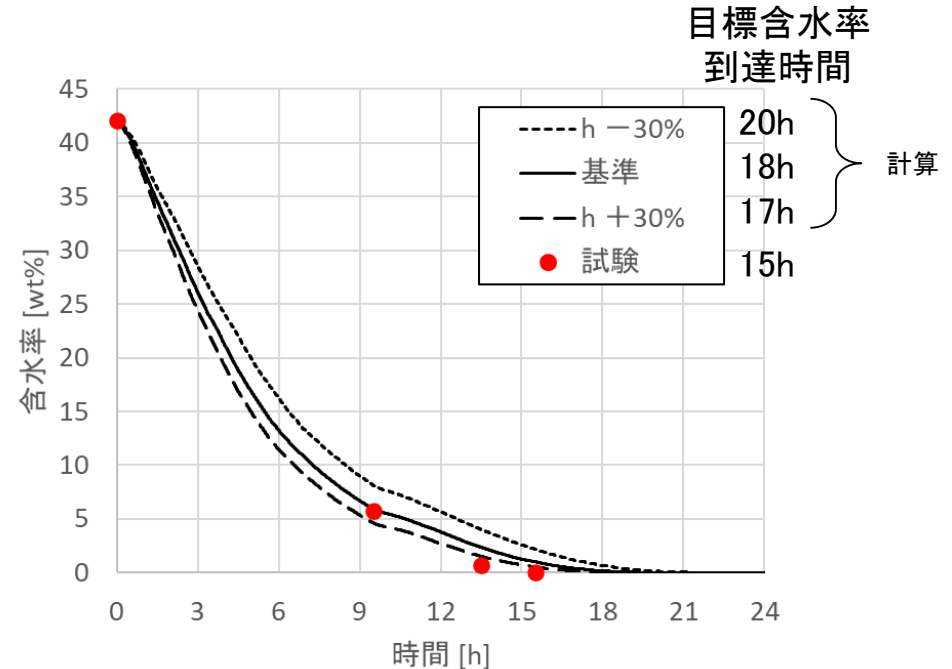
○不確かさの評価

No.48の De' , $\lambda e'$ のばらつき, 熱伝達率の一般的な誤差($\pm 30\%$)を考慮した実規模体系の解析を実施し, 基準の乾燥時間に対して, それぞれ ± 3 時間程度の結果となった。

(備考)
グラフ中の「基準」は, No.51のゼオライトの4段平均の値



有効拡散係数 De' , 有効熱伝導率 $\lambda e'$ の感度



熱伝達率 h の感度

図 含水率の時間変化 (温風乾燥, 200°C, 3m/s条件, ゼオライト)

6.実施内容

注1:設計風量(アニュラス幅5mmにおいて3m/s相当)に対し, 収納缶内径φ220mmの断面平均流速を設定する。
ストレーナ内外の通風を考える。

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(34/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析結果(4/5))

○フィルタ濾材の乾燥時間評価(1/2)

・評価モデル・条件

粗取りシステムのフィルタを対象とし, 温風乾燥による評価を実施した。

表 フィルタ仕様(水処理PJより入手)

系統	粗取り
粒子捕集機器	オートストレーナ
材質	SUS316L
スクリーン開孔率 (=スリット幅/(ワイヤー幅(1mm)+スリット幅))	4.8% (=スリット幅50μm)
ろ過性能 (補足可能な粒子径)	>50μm
線径	ワイヤー幅:1.0mm
外形寸法	φ200mm×H300mm

- ・堆積物 粒子はゼオライト仮定
- ・空隙率 26%仮定(最密充填)
- ・含水率 56wt%仮定(粒子間・細孔内満水)

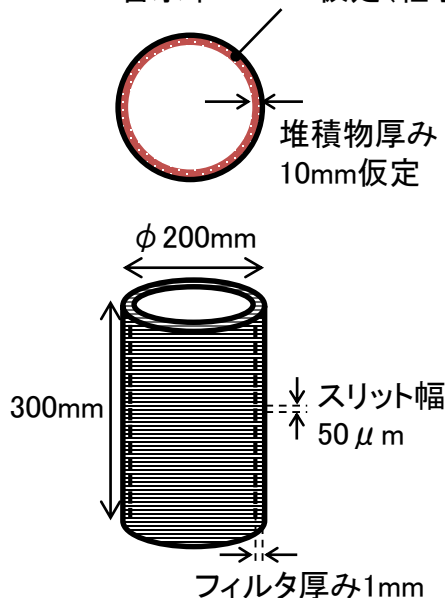


図 ストレーナと堆積物の設定

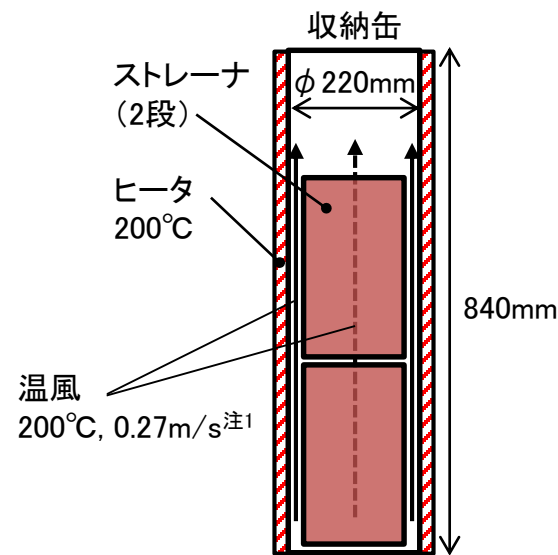


図 乾燥形態

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(1)乾燥対象物の種類・データ拡充(35/35)

(vi)要素試験によるデータ拡充3(解析結果(5/5))

○フィルタ濾材の乾燥時間評価(2/2)

・評価結果

粗取り系統フィルタの温風乾燥による乾燥時間は約9時間となった。

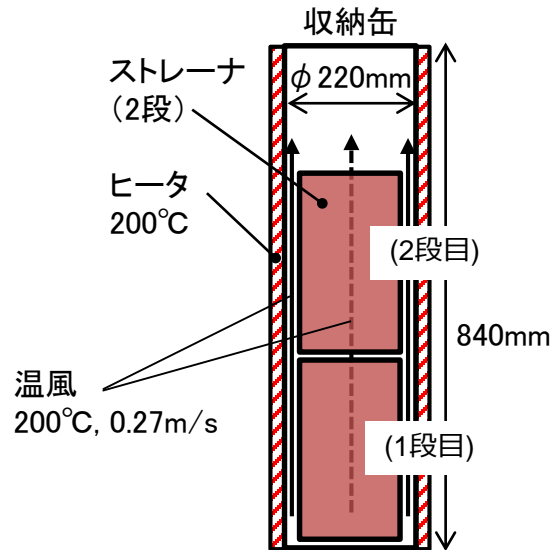


図 段数の定義

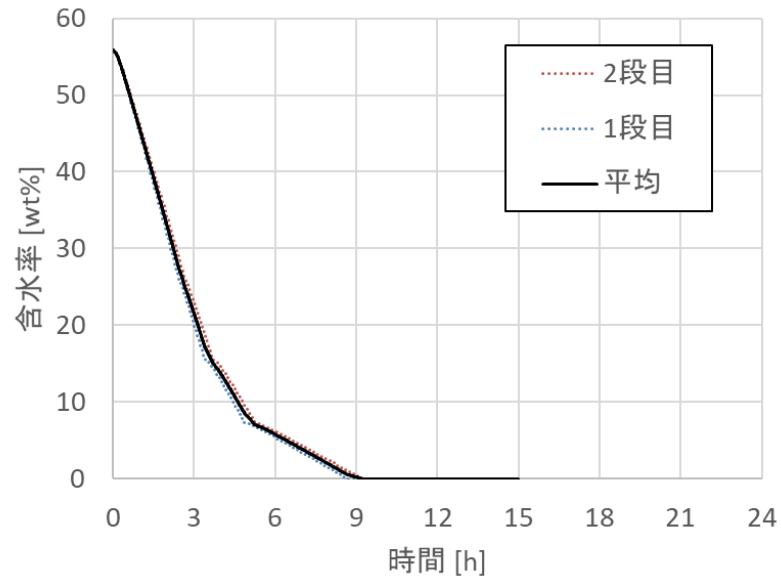


図 含水率の時間変化

6.実施内容

注1:ゼオライト解析では実規模試験結果に対して解析結果は約1.2倍

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥方式の適用性検討(1/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(試験・解析結果)

各試料の乾燥概念の適用性を評価。

表 乾燥対象物の種類・データ拡充/適用性検討結果

□ ……2021~2022データ拡充範囲

試験模擬材料	適用性検討状況(上段:試験・解析結果/下段:検討内容)		備考
	乾燥チャンバー	収納缶	
粒状 ゼオライト	<ul style="list-style-type: none"> 目標含水率達成 乾燥時間14~16h 	<ul style="list-style-type: none"> 6.2項にて検討 	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速:3m/s
	<ul style="list-style-type: none"> 適用性あり 	<ul style="list-style-type: none"> 6.2項にて検討 	
SUSビーズ	<ul style="list-style-type: none"> 2019~2020年度の要素試験(ビーカースケール):7hで全水分乾燥 適用性あり(同体系のゼオライト要素試験との比較による) 		<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速:3m/s
	<ul style="list-style-type: none"> 2021~2022年度の要素試験(ビーカースケール):10~13hで目標含水率と同オーダーの乾燥レベルを達成 解析結果より,実規模スケールにて約13h(UC4段平均)で目標含水率を達成^{注1} No.56~59にて検討 		
コンクリート片	<ul style="list-style-type: none"> 2021~2022年度の要素試験(ビーカースケール):10~13hで目標含水率と同オーダーの乾燥レベルを達成 解析結果より,実規模スケールにて約13h(UC4段平均)で目標含水率を達成^{注1} No.56~59にて検討 		<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速1m/s 粒径10mm 骨材なしだと20h程度
スラリー・スラッジ (珪砂,凝集剤)	<ul style="list-style-type: none"> 目標含水率達成 乾燥時間25.5h 	—	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速:3m/s 試料2層化 合計で40vol%(400mmH)充填
	<ul style="list-style-type: none"> No.60~62にて検討 		
液体フィルタ (SUSオートストレーナ)	<ul style="list-style-type: none"> 解析結果より,実規模スケールにて約9hで目標含水率を達成 		<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速0.27m/s 粗取り廃液処理設備由来のスラリー・スラッジ捕捉のストレーナ
	<ul style="list-style-type: none"> 適用性あり(解析結果による) 		

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥方式の適用性検討(2/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(コンクリート(1/4))

【要素試験・解析結果】

- TG/DTA-MSの結果(No.35)より, 処理対象の大半と想定される骨材ありのコンクリートは目標含水率を達成できる見込み。
- 解析での実規模体系での乾燥時間の計算結果より, UCに充填した塊状, 粒状コンクリート(ϕ 10mm)はゼオライトよりも短時間~同等の時間で乾燥することから, 乾燥処理適用性あり。
- 一方, 骨材なしのコンクリートは, 粉状となってスラリー・スラッジ固形分として混入が想定されるが, TG/DTA-MSの結果(No.35)でも乾燥程度は目標未達。
- 高温(300°C)での乾燥の場合は平衡含水率が下がるため, より高度な乾燥(低含水率)まで乾燥可能。

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

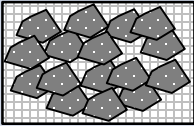
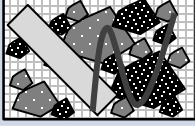
(2)乾燥方式の適用性検討(3/9)

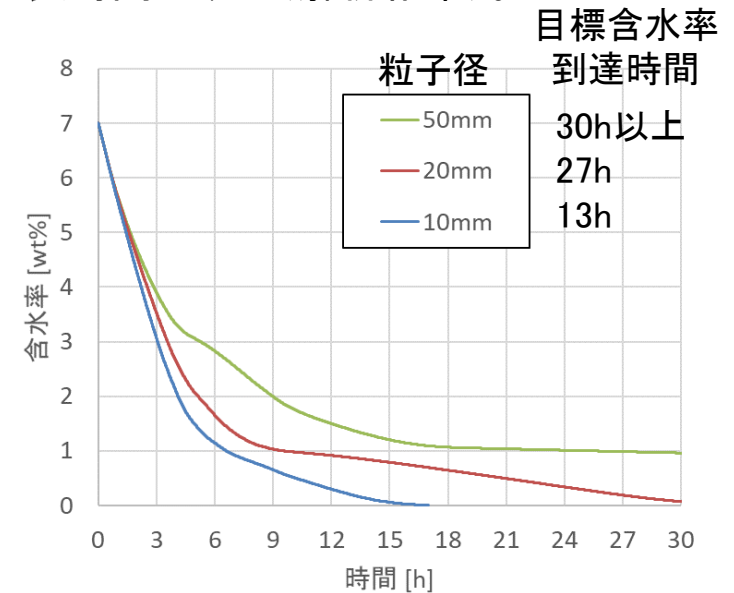
(i)乾燥概念の適用範囲(コンクリート(2/4))

【実機適用性検討結果1(1/2)】

- 実機想定では大小の粒の混合となるため、試験・解析条件よりも密に充填され、伝熱性能向上が期待できる。
- 一方で、大きな粒の内部まで水が浸透している場合は乾燥時間が長時間化する(解析結果)。

表 標準乾燥条件(温風乾燥・200℃)での解析・実機想定と比較

	解析モデル(No.51)	実機想定
乾燥対象イメージ	 コンクリート φ10mm ×4段	 被乾燥物混合 Φ大小混合 ×4段
充填率	44vol%	成り行き (試験・解析よりも密に充填)
初期含水率	6.7wt%	付着水量や空隙への浸透度 による
乾燥程度	0.2wt%達成	骨材混入程度による
乾燥時間	UC平均13h	粒子径, 充填率, 初期含水率 による



粒子径パラスタ解析(UC4段平均含水率)

⇒コンクリートを含む被乾燥物は乾燥目標を達成するレベルまで乾燥できる見込みであるが、実規模スケールでの粒径やその粒への水の浸透具合によって乾燥時間の幅が広がる(目標時間内での乾燥が困難となる可能性あり)。今後の課題として、実際の処理対象物のデータを拡充していく必要がある。

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

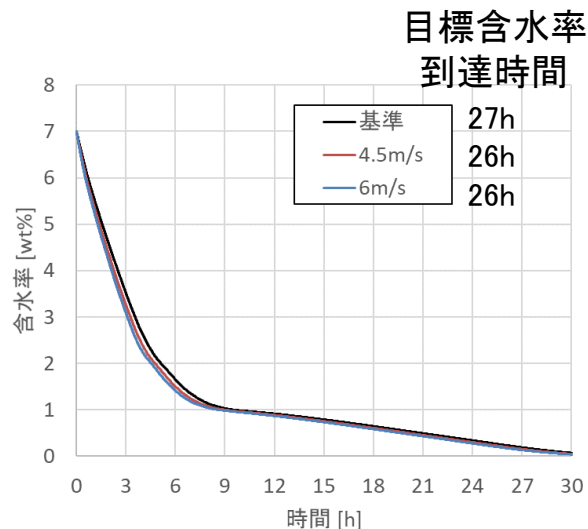
(2)乾燥方式の適用性検討(4/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(コンクリート(3/4))

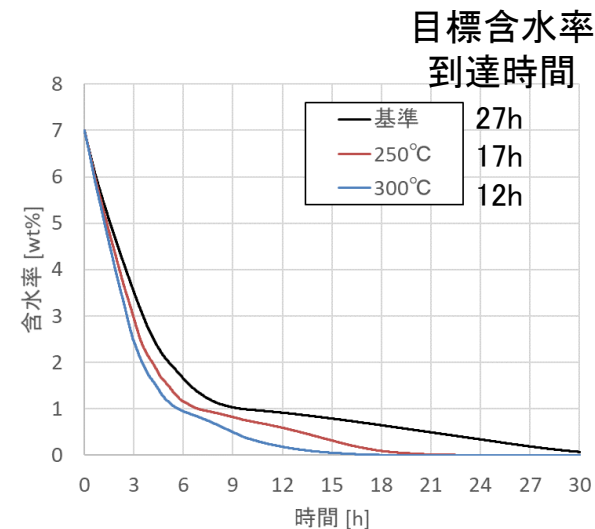
【実機適用性検討結果1 (2/2)】

粒子径20mmに対し, 温風流速, 加熱温度の感度を解析により確認した結果, 流速の感度は小さく, 加熱温度の感度が大きい。細孔内水の乾燥では, 被乾燥物の温度を上げることが重要であると考えられる。

(備考)
グラフ中の「基準」は, No.57の
コンクリート, 粒子径20mmの値
(温風3m/s, 200°C条件)



温風流速の感度



加熱温度(温風, ヒータ)の感度

図 含水率の時間変化(解析)

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

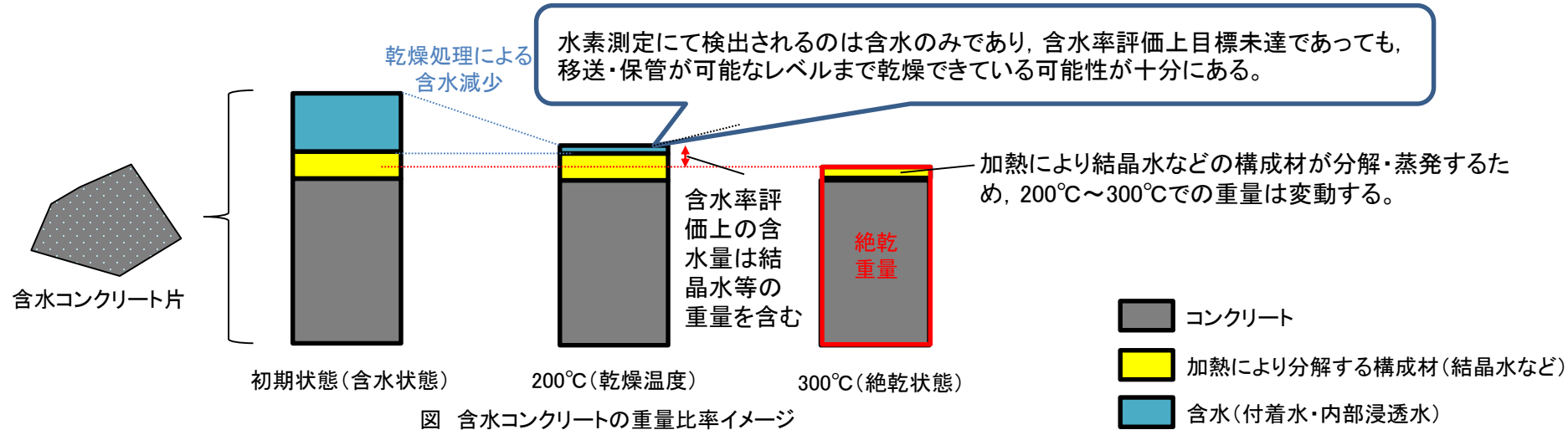
(2)乾燥方式の適用性検討(5/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(コンクリート(4/4))

【実機適用性検討結果2】

- 骨材なしのコンクリートの場合, 含水率を目標レベルまで十分に下げることが難しい。
- 高温(300℃)で乾燥し, 平衡含水率を下げることで目標レベルの含水率に近づけることは可能。
- 一方, コンクリートは加熱温度が高くなるほど構成材料の分解が起こりやすくなる^{注1}ため, 含水率評価上の含水が実態よりも大きくなる傾向がある。
- コンクリートの結晶水(結合水・水和水)は放射線による分解は起こらずに残留する^{注2}。

注1: 吉田 他, “火災による熱を受けたコンクリートの化学的変化に関する検討”, GBRC(日本建築総合試験所機関紙), Vol.44, No.1, 2019
 注2: 平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」(2015-2016(H27-28)年度実施分)報告



⇒コンクリートは評価上の含水率以上に乾燥が進行している可能性が高いため, 水素濃度(発生速度)での管理によって水素爆発防止とする。

注1:水処理PJでの検討結果(2022年度)の聴取結果より、スラリー・スラッジ発生量0.02m³/dayに対し、収納缶有効体積25Lと仮定した値

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥方式の適用性検討(6/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(スラリー・スラッジ(1/3))

【実規模試験結果】

- 粗取り廃液処理由来のスラリー・スラッジについては、珪砂・凝集剤を代表とした試験での目標含水率を達成。
- 乾燥速度は平均で300~450g/h。

【適用性検討結果】

- 粗取り廃液処理由来のスラリー・スラッジの乾燥処理への持込頻度は収納缶0.8缶/日^{注1}相当であり、乾燥装置4系列を占有すれば処理可能。ただし、スラリー・スラッジ処理時間中は燃料デブリの乾燥処理が不可となる。

⇒1バッチあたりの乾燥時間を短くする・乾燥処理への持込頻度を低減するなどの対策が望ましい。

表 粗取り廃液処理由来のスラリー・スラッジ
乾燥条件(収納缶1缶充填想定)

持込頻度	1回/1.25日(4回/5日)
含水率	900wt%
初期含水量	24kg
乾燥時間	2.2~3.3日

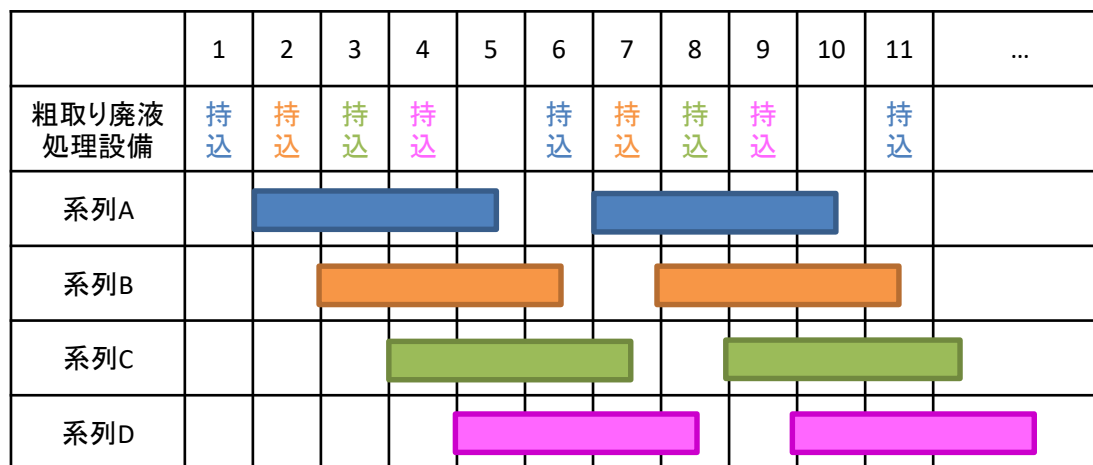


図 粗取り廃液処理由来のスラリー・スラッジの持込頻度と乾燥処理時間

6.実施内容

注1:T:実測(計測位置3点)がほぼ一定になったときの平均値, T_{in} :実測値またはTと同様と仮定

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥方式の適用性検討(7/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(スラリー・スラッジ(2/3))

(対策1) 充填量(高さ)低減または高温乾燥(300°C)による1バッチの乾燥時間短縮

- 実規模スラリー試験結果より充填量(高さ)を低減すれば乾燥時間が短くなることを確認した。しかし, 収納缶本数が増えるため, 乾燥装置系列の占有への対策とはならない。
- 200°C/300°Cでの試料への入熱効率を比較すると, 1/1.7倍程度の乾燥時間短縮が見込めることから, 系列数は3まで削減可能。

表 珪砂条件での乾燥温度による入熱効率

充填高さh	200°C	300°C
200mm	213W	361W
400mm	340W	600W

表 粗取り廃液処理由来のスラリー・スラッジ
300°C乾燥条件(収納缶1缶充填想定)

持込頻度	1回/1.25日(4回/5日)
含水率	900wt%
初期含水量	24kg
乾燥時間	1.3~2.0日

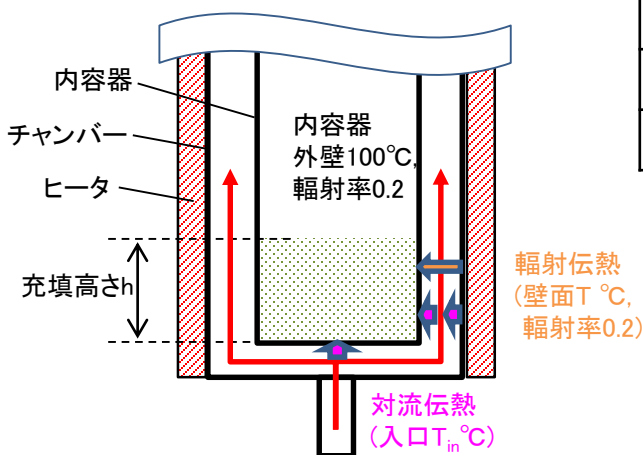


図 スラリー・スラッジ試験 入熱計算体系^{注1}

約1.7倍 乾燥時間短縮



図 粗取り廃液処理由来のスラリー・スラッジの持込頻度と乾燥処理時間(300°C乾燥)

6.実施内容

注1:2022年度実施内容の聴取結果。含水/全重量の場合は50~80wt%

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥方式の適用性検討(8/9)

(i)乾燥概念の適用範囲(スラリー・スラッジ(3/3))

(対策2)脱水前処理による初期含水低減

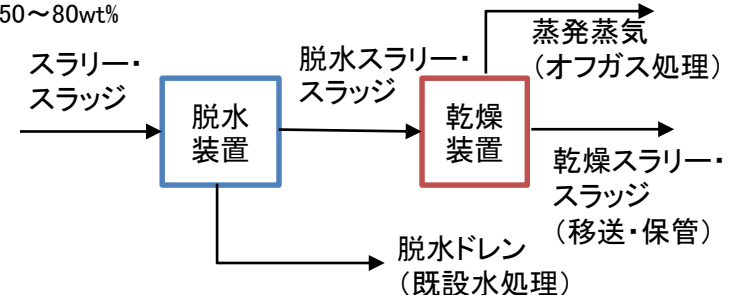


図 脱水前処理イメージ

- 水処理PJでのカートリッジフィルタろ過によるRO濃縮水脱水試験の実績・・・脱水スラリー・スラッジの含水率が100~400wt%^{注1}
- 同等レベルの脱水が可能であれば, 占有系列数を1~2まで削減可能
- 脱水により初期含水量が減り, 1缶当たりに収納される乾燥後のスラリー・スラッジ体積が増加するため, 収納缶本数も削減可能

表 粗取り廃液処理由来の脱水スラリー・スラッジ 乾燥条件1(収納缶1缶充填想定)

持込頻度	1回/2.5日(2回/5日)
含水率	400wt%
初期含水量	23kg
乾燥時間	2.1~3.2日

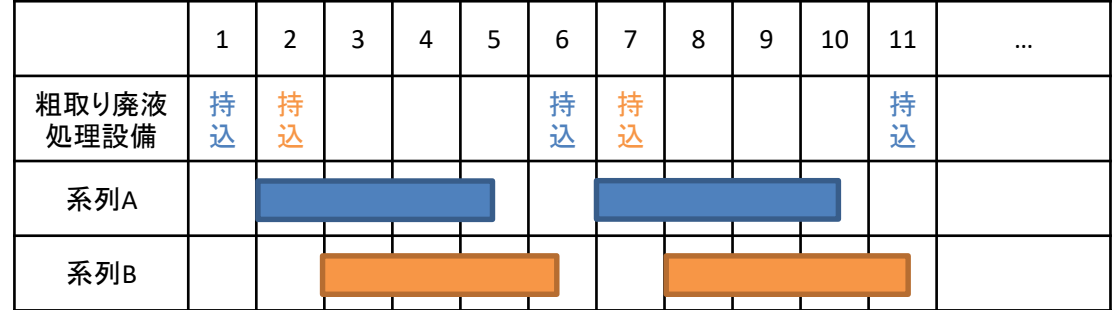


図 粗取り廃液処理由来の脱水スラリー・スラッジの持込頻度と乾燥処理時間1

表 粗取り廃液処理由来の脱水スラリー・スラッジ 乾燥条件2(収納缶1缶充填想定)

持込頻度	1回/6.25日(4回/25日)
含水率	100wt%
初期含水量	13kg
乾燥時間	1.2~1.8日

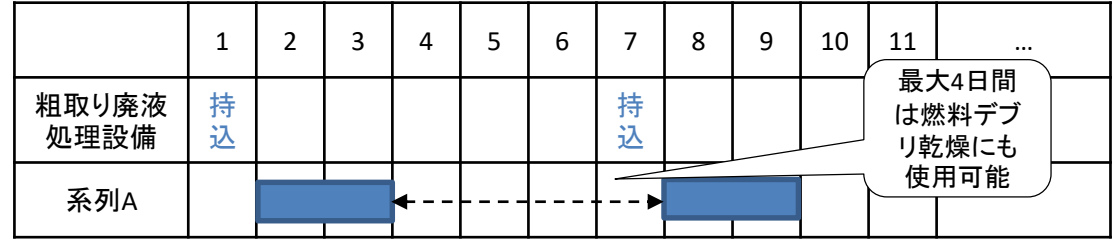


図 粗取り廃液処理由来の脱水スラリー・スラッジの持込頻度と乾燥処理時間2

⇒今後の課題として, 乾燥対象スラリー・スラッジ性状の明確化と, 保管形態に適した乾燥処理設備(前処理も含む)設計が必要。

6.実施内容

6.1要素試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥方式の適用性検討(9/9)

(ii)適用が難しい乾燥対象物の代替処理方法・手段

No.56～62の検討の結果から、乾燥処理の適用が難しい場合の代替処理方法・水素爆発対策の手段をまとめる

- 含水率が十分に低下しないコンクリートについては、乾燥処理後に水素濃度(発生速度)で管理することで、水素爆発対策とする。(他の乾燥対象物も同様)
- 上記以外は乾燥処理の適用性あり。ただし、想定以上の乾燥時間を要する場合は、高温乾燥、脱水前処理などの代替手法(運転条件の変更)にて対応する。

6.実施内容

6.1要素試験

④成果の反映先への寄与

- 各対象物の乾燥方式への適用性検討結果(No.55)や適用が難しい乾燥対象物の代替処理手法(運転条件の変更)の提案(No.63)をもとに、実機での乾燥運転条件の決定に寄与できるデータを取得できたものとする。

⑤現場への適用性の観点における分析

- 各対象物について、ユニット缶や内容器(スラリー・スラッジ用)、あるいは収納缶単位での取り扱いを考慮したうえでの乾燥方法について検討(No.21)し、その適用性を評価(No.55)したことから、現場への適用性を考慮した検討を行った。今後の課題は⑧のとおり。

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(No.5)が満足できていることから、目標を達成できたと判断する。
 - ✓ 難乾燥物のスラリー・スラッジやコンクリートの乾燥データが整備されていること

6.1要素試験

⑦まとめ

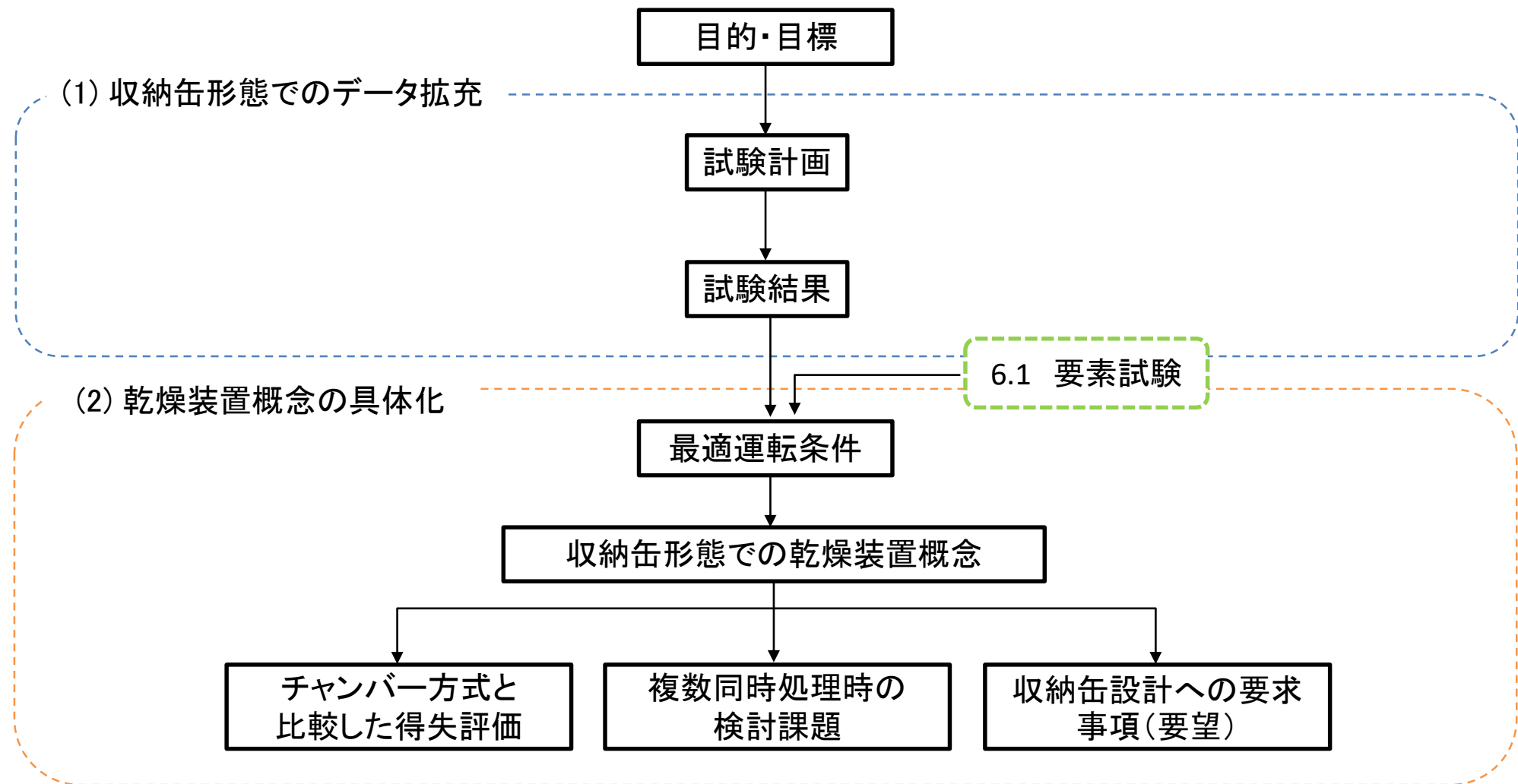
<成果>

- スラリー・スラッジ, コンクリート等, データ未取得の乾燥対象物およびその保管形態を整理した。(No.18~21)
- データ未取得の乾燥対象物について2019・2020年度に立案した乾燥概念の適用方法を検討し, それぞれの保管形態に応じた要素試験計画を立案した。(No.22~25)
- スラリー・スラッジおよびコンクリートの乾燥特性を確認する要素試験を実施した。(No.26~43)
 - ✓ 実規模スラリー・スラッジ乾燥試験を行い, 目標含水率達成見込みを得た。
 - ✓ ビーカースケールコンクリート試験(物性測定)を行い, 熱物性や細孔径分布の取得やTG/DTA-MS^{注1}による乾燥傾向の確認を行った。
 - ✓ ビーカースケールコンクリート試験(乾燥試験)を行い, ガス流速・温度, コンクリート片粒径, 及び骨材有無の乾燥条件の影響を確認した。
- 解析による要素試験に基づくコンクリート乾燥評価, 実規模体系への展開やフィルタ濾材等, 被乾燥物の種類による乾燥時間の影響評価を計画し, 解析した。(No.44~54)
- 各試料について, 乾燥方式の適用性を評価し, 適用が難しい場合の代替処理方法・水素爆発対策の手段をまとめた。(No.55~63)

⑧今後の課題

- 実際の処理対象物性のデータ拡充(No.57)
- 乾燥対象スラリー・スラッジ性状の明確化と保管形態に適した乾燥処理設備設計(No.62)

6.2乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充(実規模試験)の検討フロー



6.実施内容

6.2実規模試験

①目的, 目標

2019~2020年度
 実規模乾燥チャンバー試験を実施

多孔質体を16hで
 含水率0.3wt%^{注1}まで乾燥

狙い: 処理形態の合理化

収納缶方式

実規模試験

(試験目的) 収納缶方式による乾燥処理の実現性を検証

(効果)

- ①乾燥処理に伴う汚染拡大の防止
- ②処理手順の簡素化(UC出し入れ手順の削減)

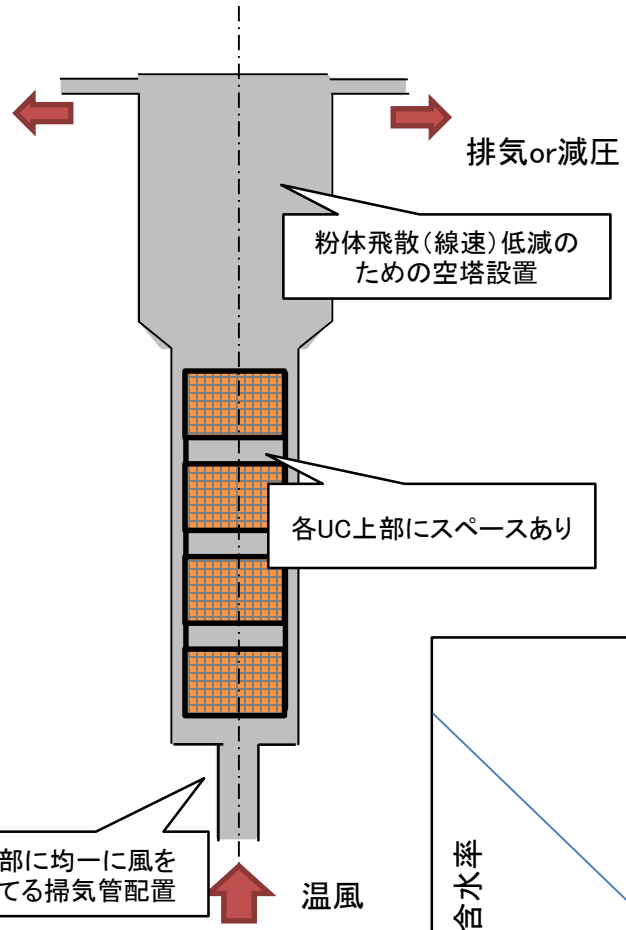


図 チャンバー方式での乾燥概念

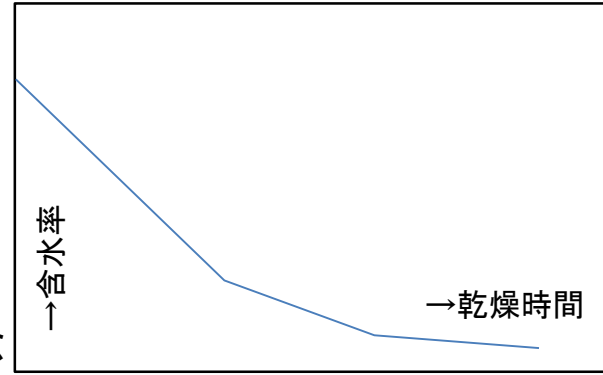


図 取得データイメージ 乾燥時間と含水率

6.実施内容

6.2実規模試験

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、粒状の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ており、難乾燥物としてゼオライトを対象として、乾燥方法およびユニット缶を対象とした乾燥装置の概念検討を行うとともに、ユニット缶の段積み影響等を考慮した実規模スケールのチャンバーでの乾燥試験を実施した。

一方、2020年度検討したチャンバー形態での乾燥方式に比較し、汚染範囲の拡大抑制として有効と考えられる収納缶形態での乾燥方式の適用性については確認できていないことから、収納缶形態での乾燥データを取得してチャンバー試験結果との得失を整理したり、スラリー・スラッジ状の燃料デブリや燃料デブリが付着したコンクリート片ならびにフィルタ濾材等の乾燥処理の観点から現行の収納缶構造案への要求事項を整理する必要がある。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(1/10)

(i)試験計画の検討: 試験目的

○試験目的

- ・ 実規模収納缶方式による乾燥処理の実現性を検証するため, 乾燥目標含水率(燃料デブリ換算0.1wt%)の達成可否(達成可能な処理時間)を確認する。
- ・ 達成不可の場合や乾燥時間の低減案として, 乾燥の観点からの現行の収納缶構造案への要望を整理する。

○評価方法

- ・ ノズルや流量条件を変えて, 乾燥時間と含水率のデータを取得する。

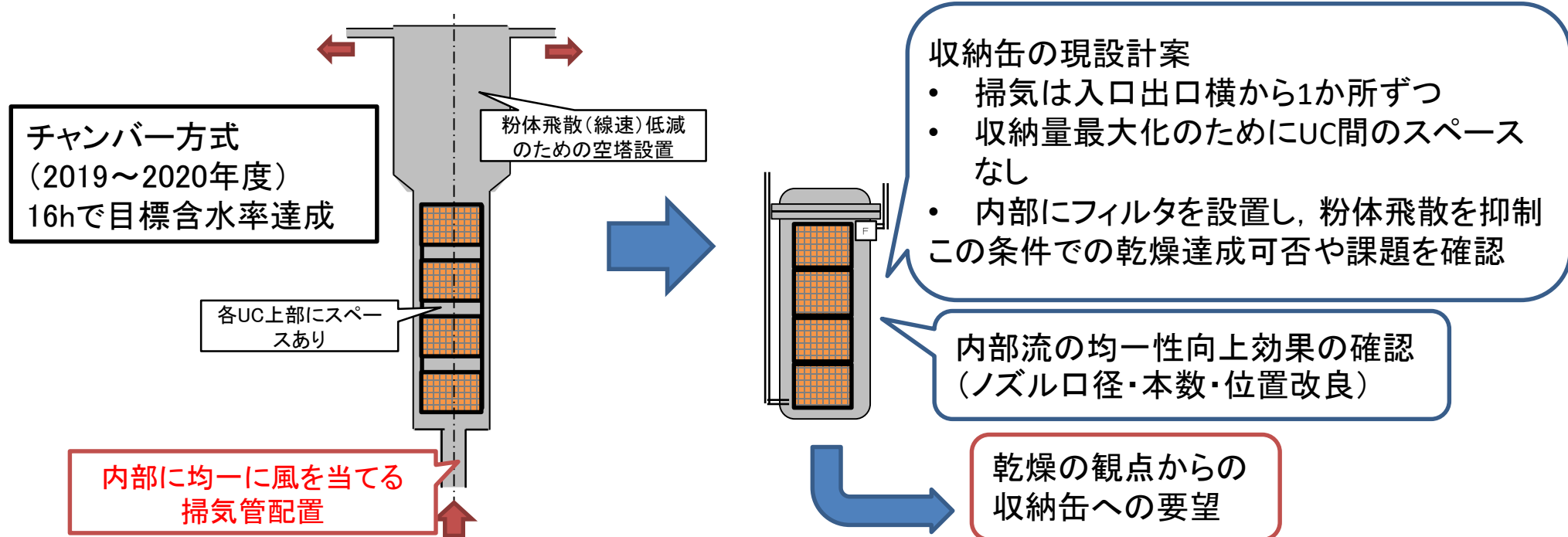


図 チャンバー方式から収納缶方式に変更した時の想定課題

注1: 試験では収納缶にバンド式ヒータを装着

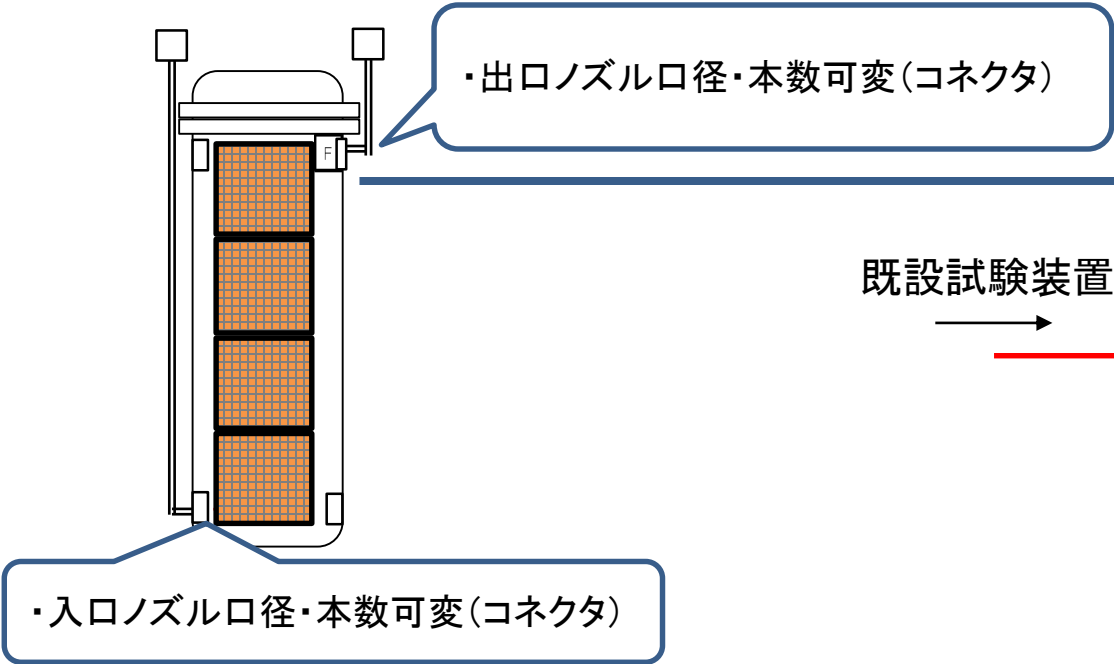
6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(3/10)

(ii)試験計画の検討: 試験装置(2/2)



乾燥対象:ゼオライト
 ・充填高さ100vol%
 ・初期含水率約40~45wt%
 (2019~2020年度チャンバー試験と同等)



図 乾燥試験対象(UC充填ゼオライト)

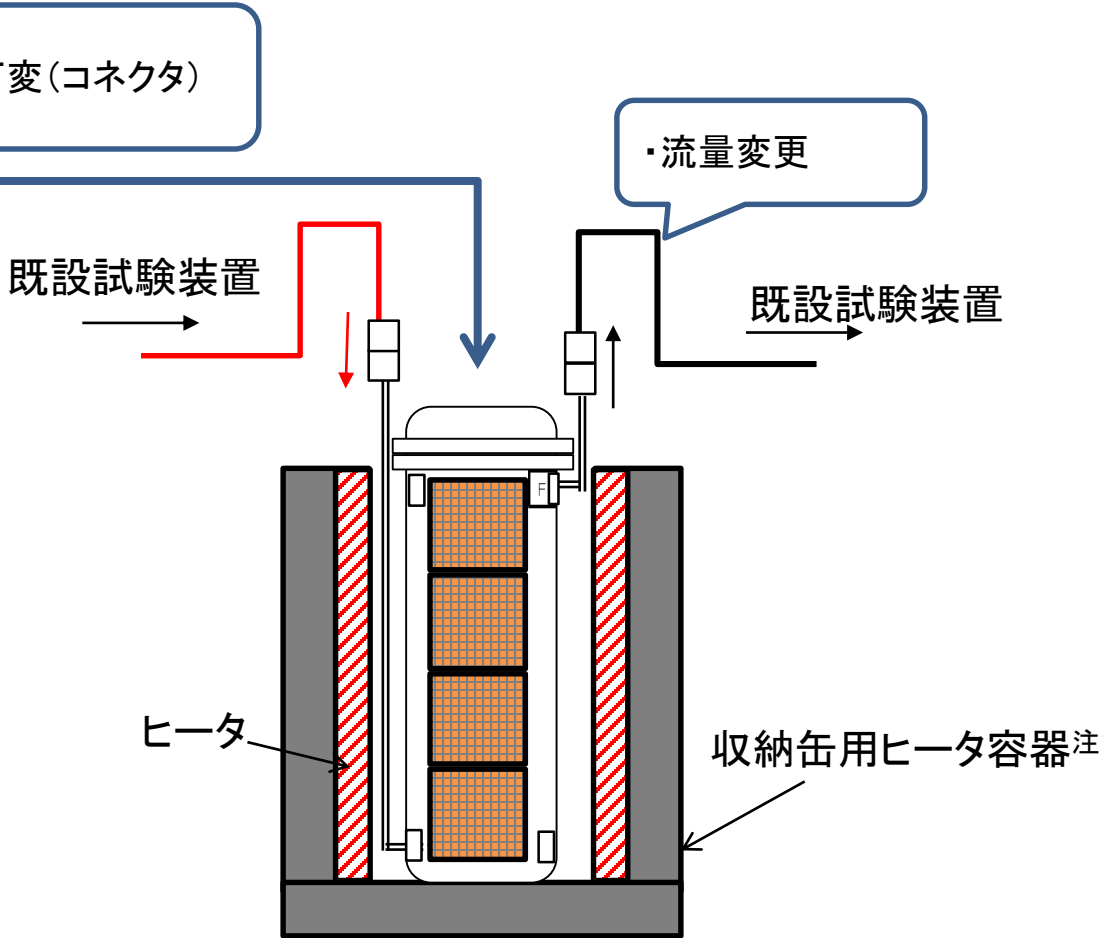


図 収納缶での乾燥イメージ

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(4/10)

(iii)試験計画の検討:改造課題と試験内容

現計画の収納缶形状に基づく課題

- 既設の実規模試験装置のチャンバーと比較し, 収納缶配管口径が小さく, 本数が減るため圧損が過大となる。
- 燃料デブリ乾燥装置は負圧管理を想定しているため, 実現可能な圧力体系に制限がある。
- 試験装置の機器・計器の使用圧力範囲外となるため凝縮器や露点計の機能・計測が不可。

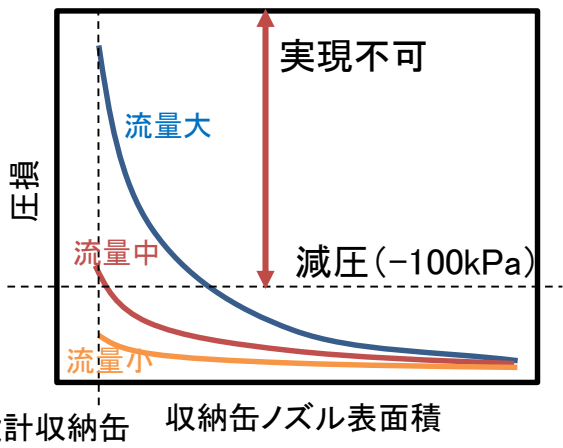
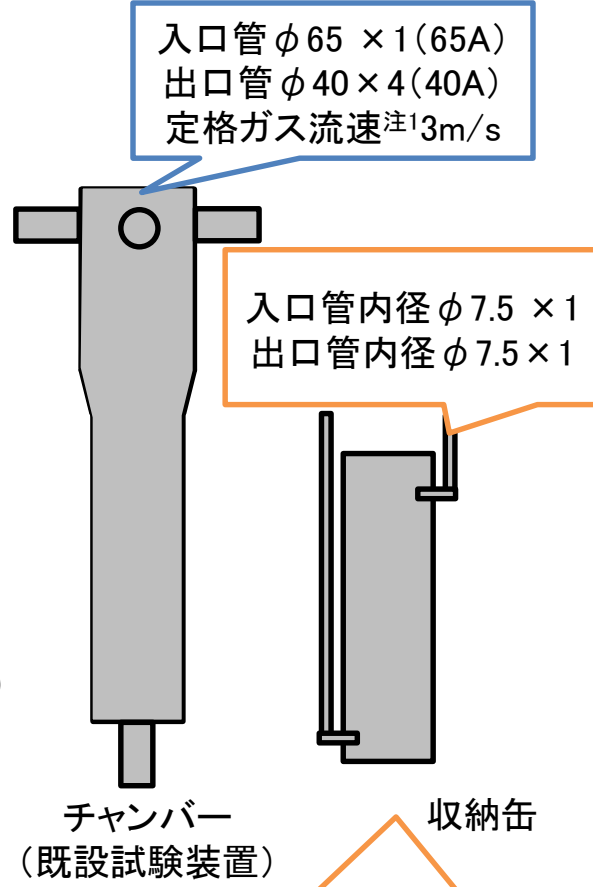


図 収納缶ノズル表面積一圧損(イメージ)



最大ガス流速
 0.1m/s(凝縮器・露点計使用時)
 1m/s(凝縮器・露点計不使用時)

図 チャンバー/収納缶のノズル寸法

【試験内容】
 試験目的に応じて計測項目を変えた2つの試験とする。
 ✓ 収納缶乾燥可否試験
 凝縮器や露点計は使用せず, 現設計収納缶での乾燥時間をチャンバー方式データと比較する。
 ✓ 収納缶設計条件をパラメータとした乾燥時間データ取得
 収納缶ノズル設計や流量を変化させたときの乾燥トレンド(凝縮水量, 露点温度)を計測し, 収納缶設計データとする。

注1:ヒータON・通気開始からの時間

注2:水分/乾燥重量。目標:0.3wt%(No.107,111~113参照)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(5/10)

(iv)試験計画の検討:試験内容と目的

表 収納缶乾燥試験概要

区分	項目	概要	取得データ
I 収納缶乾燥可否確認	RUN①チャンバー方式比較	RUN①の比較用データ取り(収納缶入口での流量・ガス温度を同等とする)	乾燥時間 ^{注1} vs含水率 ^{注2}
	RUN①現設計収納缶乾燥	現計画の収納缶で乾燥運転を行い, 乾燥可否を確認する。	
II 乾燥の時間変化のデータ取得	RUN②ノズル口径大	ノズル口径を大きいものに変更し, 2020年度のチャンバー乾燥と同流量・温度での乾燥を実施。ノズル口径大とし, 通気断面積を増やしてチャンバーと同流量の温風を流せるときの乾燥性能や効果を確認する。	乾燥時間 ^{注1} vs含水率 ^{注2} 乾燥時間 ^{注1} vs凝縮量/露点
	RUN③ノズル本数増	ノズル本数を増やし, 2020年度のチャンバー乾燥と同流量・温度での乾燥を実施。ノズル本数を増やして通気断面積を大きくし, チャンバーと同流量の温風を流し, さらに風の当たり方を均一に近づけた状態での乾燥性能や効果を確認する。	
	RUN④周期運転	温風・減圧乾燥の周期運転での効果を確認する。	乾燥時間 ^{注1} vs含水率 ^{注2}

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(6/10)

(v)試験計画の検討:試験ケース

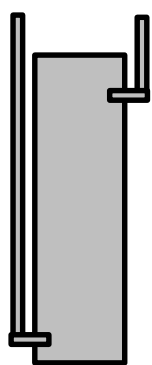
注1: I…収納缶乾燥可否確認 II…乾燥の時間変化のデータ取得

注2: 収納缶-UCアニュラス部の流速

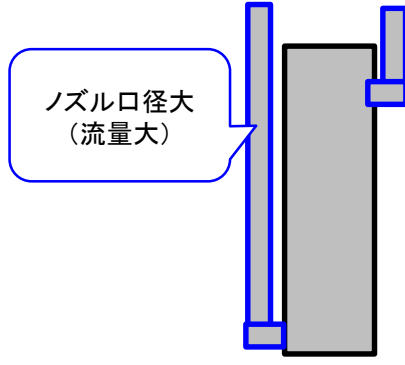
注3: チャンバーヒータ表面温度や収納缶入口ガス温度に応じて自動出力調整

表 収納缶乾燥試験条件

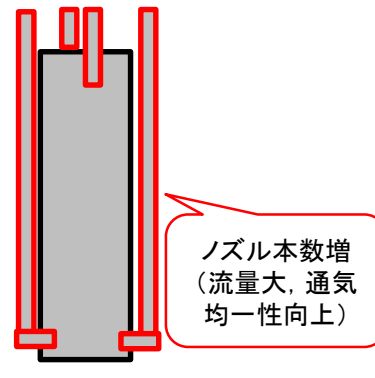
区分 ^{注1}	RUN	収納缶構造	運転モード	入口・出口管			ヒータ表面・温風温度(°C)	チャンバー/収納缶ヒータ出力(kW)	流速 ^{注2} (m/s) (流量(Nm ³ /h))
				内径(mm)	各本数(本)	断面積(mm ²)			
I	①	チャンバー	温風	—	—	—	200	~10 ^{注3}	1(12)
	②	現構造案	温風	7.5	1	44.2	200	~10 ^{注3}	1(12)
II	③	改造1(ノズル口径大)	温風	35	1	962.1	200	~10 ^{注3}	3(37)
	④	改造2(ノズル本数増)	温風	25	2	981.7	200	~10 ^{注3}	3(37)
	⑤	現構造案	周期	7.5	1	44.2	200	~10 ^{注3}	1(12)



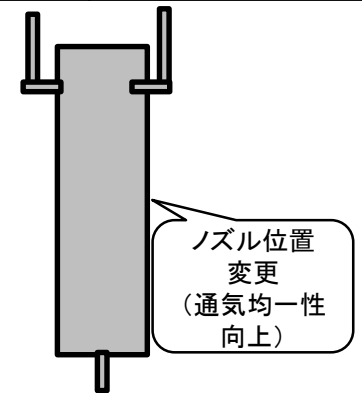
現構造案



改造1



改造2



対象外

(同等通気均一条件での乾燥可否・性能は2019~2020年度チャンバーで取得済み)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(7/10)

(vi)試験用収納缶の設計・製作 実規模試験装置の設計・製作・改造

- ・収納缶形態での乾燥の課題を整理(No.69)し, 2019-2020年度のチャンバー方式と比べて内部の風の当たり方が変わることや, 圧損が大きくなることで温風流量に制限があることを確認した。これらの課題解決のため, 現設計の収納缶を大幅に変えることなく対処可能な改造案を検討し, 掃気管(吸気管, 排気管)の内径や本数を変更した改良収納缶を検討し, 製作した。
- ・試験装置本体の改造はNo.70~71の計画の通り。

表 乾燥試験用収納缶比較

	現設計収納缶	改良収納缶1	改良収納缶2
掃気管内径	φ7.5mm	φ35mm	φ25mm
掃気管数	1本	1本	2本
改良点	—	掃気管内径を大きくし, 大きな流量で流せるように改良。	掃気管内径を大きくし, さらに本数を増やすことで, 流量を大きくし, 流れの偏向も改良。

(備考)

収納缶の蓋には, 水素ベント用の穴およびフィルタが設置されているが, 乾燥時には, 水素ベント用の穴を塞ぐため, 乾燥試験用収納缶では, 蓋の水素ベント用の穴およびフィルタは模擬しない。

掃気管をアタッチメント化し,
アタッチメント取り替えにて
各条件での試験を実施



注1: 燃料デブリ取り出しのスループットに応じた受入から払出しの目標時間が24h(No.107)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(8/10)

(vii) 実規模試験によるデータ拡充: 試験結果(1/3)

I 収納缶乾燥可否確認試験

- ✓ 現設計収納缶vsチャンバー
- ✓ 流速1m/s(収納缶最大)

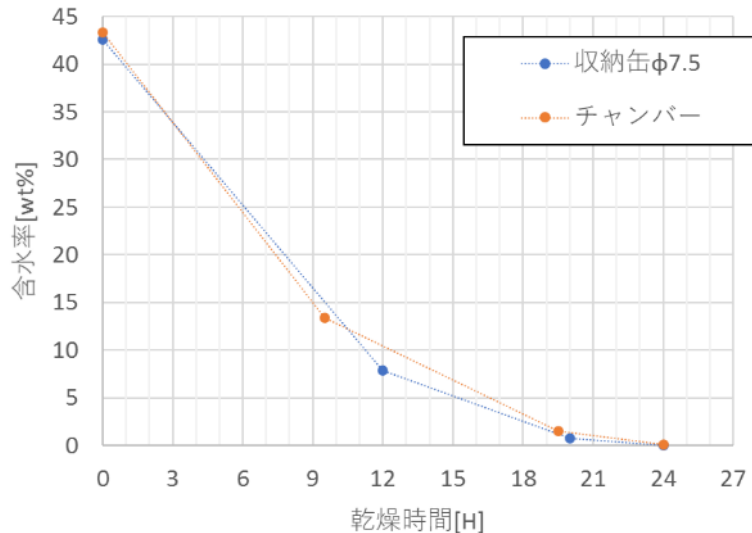


図 含水率変化(現設計収納缶・チャンバー)

- 目標含水率まで20h超→乾燥スループットの達成は困難と考えられる^{注1}。
- チャンバー/収納缶の形状差による乾燥性能の差は小さい。

II 乾燥の時間変化のデータ取得

- ✓ 改良収納缶vsチャンバー
- ✓ 流速3m/s(チャンバー定格)での比較

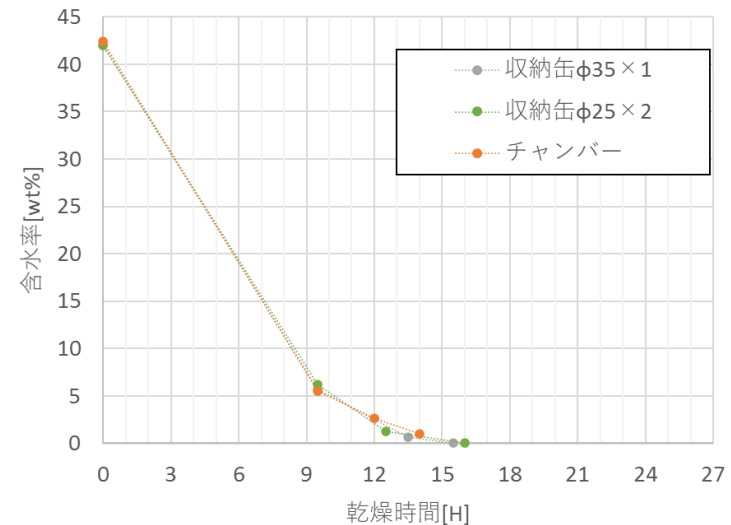


図 含水率変化(改良収納缶・チャンバー)

- 目標含水率まで14~16h程度→乾燥スループット達成可能見込みあり^{注1}。
- チャンバー/収納缶2種の形状差による乾燥性能の差は小さい。

改良収納缶で高流速を可能とすることで, 処理目標を達成できる見込みが得られた。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(9/10)

(vii)実規模試験によるデータ拡充:試験結果(2/3)

II 乾燥の時間変化のデータ取得

- ✓ 現設計収納缶での温風乾燥vs周期乾燥
- ✓ 温風乾燥流速1m/s(収納缶最大)
- ✓ 減圧乾燥圧力1kPa
- ✓ 基本サイクル:温風1時間⇔減圧30分^{注1}

表 目標含水率達成時間

乾燥体系	温風	周期	周期(改良運転)
チャンバー	14~16h	14~16h※	※から1.5h程度短縮見込み
収納缶(右図)	20~24h	—	20h超

注1:取り出し重量計測前後は温風乾燥。温度・圧カトレンドを観察し,変動が小さくなるなどのタイミングによって運転サイクルを適宜見直しながら乾燥

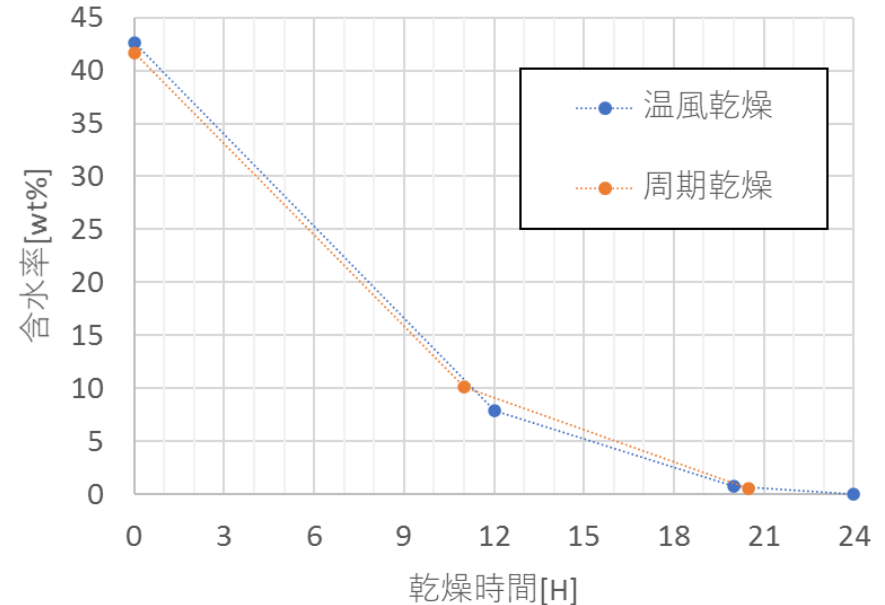


図 含水率変化(現設計収納缶での温風・周期)

- No.80~82で見られるような周期乾燥での時間短縮効果は確認されず, 温風乾燥のみの条件とほぼ同等の乾燥時間となった。
- 周期乾燥は, 温風・ヒータ加熱中に含水に熱を蓄え, 急減圧によってそれらを一挙に蒸発熱に変換し, 乾燥速度を一時的に増大させる効果を狙ったものであるが, 収納缶乾燥の場合, 温風流速(流量)を十分に上げることができないため入熱量が小さくなり, 急減圧の時間短縮効果を相殺したと考える。
- 改良収納缶においては, 温風乾燥の結果がチャンバーと改良収納缶で大差なかったことから, 周期運転でもチャンバーでの周期運転と同様に乾燥進行すると考える。

注1: 結露すると測定不可となるため、乾燥初期は凝縮器入口側の測定は不可。⇒途中で測定位置を切替

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(1)収納缶形態でのデータ拡充(10/10)

(vii)実規模試験によるデータ拡充: 試験結果(3/3)

乾燥終了判断方法の検討

- 入口・出口露点(湿度)データ
- ✓ 乾燥進行で露点(湿度)が下がる傾向は確認できるが、入口露点に一致するまでは低下しない。
- ✓ 露点計での乾燥終了判断は困難。
- 出口付近ガス温度データ
- ✓ スラリー・スラッジ試験で取得した内部温度データより、チャンバー空頭や容器高さ800mm位置(試料充填外の空頭位置)温度も乾燥進行に応じた変化あり。
 - 変動大/温度上昇・・・乾燥初期, 試料含水率が高く、ガス中に水蒸気が多い状態。
 - ほぼ一定・・・乾燥後期, 試料含水率が低く、ガス中の水蒸気が少ない。
- ✓ 収納缶出口やチャンバー空頭のガス温度を測定することで、露点計同様に乾燥進行の推測が可能な見込みあり。

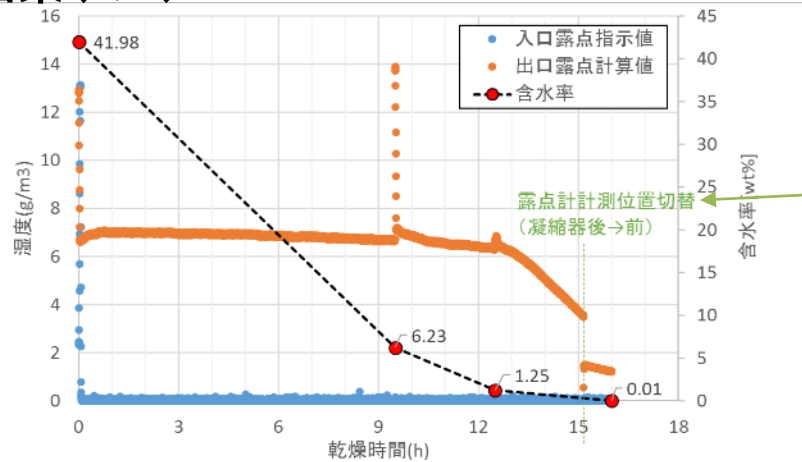


図 入口・出口湿度変化と含水率 (収納缶φ25×2, 温風3m/s)

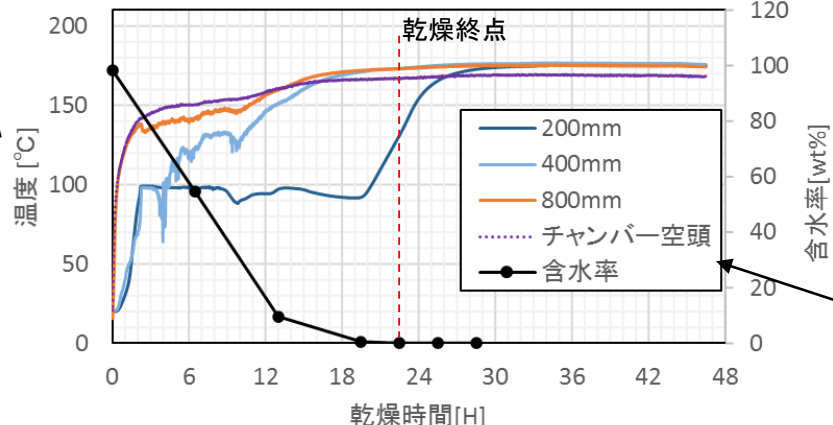
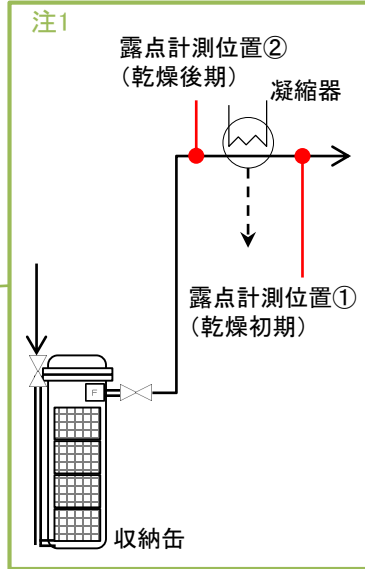
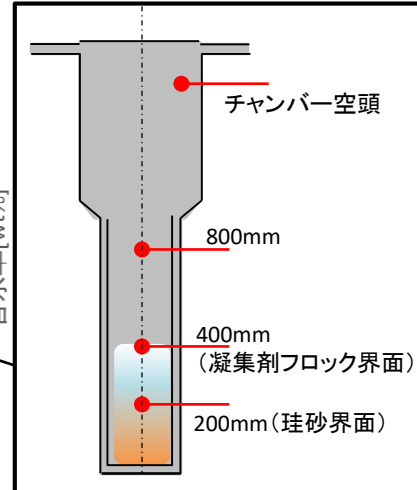


図 スラリー・スラッジ試験(珪砂+凝集剤フロック)内部温度取得データ(No.30)



6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(1/22)

(i)収納缶形態での最適な運転条件(1/4)

要素試験/実規模試験の結果から, 収納缶形態での最適運転条件を以下の通りとし, 本条件を基本条件として乾燥装置概念を具体化する。

- **運転温度: 200°C**
※温度条件達成のためには高温・高放射線環境下で健全性を保持できるシール構造が必要。
- **ガス流速(流量): 缶内アニュラス部3m/s(37Nm³/h)以上^{注1}**
※流速条件達成のためには通気管径を大きくした改良収納缶での処理が必要。
- **乾燥モード(温風/周期(減圧)): 温風**

一方, 難乾燥物対策の代替手法(運転条件の変更)を踏まえ, 以下を装置のオプションとして導入する。

- ✓ 難乾燥が予想される場合(骨材なしのコンクリートの多量な混入など)や水素計測結果に基づく再乾燥に備えて, 運転温度300°Cも選択可能とする。
※300°Cで乾燥する場合は, FPガス放出の懸念があるためオフガス処理が必要。
- ✓ 水素計測結果に基づく再乾燥など, 必要に応じて減圧モード(周期運転)も選択可能とする。
(1系列のみ採用: No.83参照)
- ✓ 時間短縮を要する場合は周期乾燥も選択可能とする。(No.80~82にて検証)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(2/22)

(i)収納缶形態での最適な運転条件(2/4)

解析モデルにより以下の検討を行う。

- 周期乾燥での温風・減圧周期による乾燥時間の感度評価, 最適化検討
(チャンバ体系での解析, 試験ではあるが, No.77の通り改良収納缶に関しては同様の傾向と考えられる。)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(3/22)

(i)収納缶形態での最適な運転条件(3/4)

- 周期乾燥方式は、温風・ヒータ加熱中に含水に熱を蓄え、急減圧によってそれらを一挙に蒸発熱に変換し、乾燥速度を一時的に増大させる効果を狙ったものである。
- 2020年度試験ではユニット缶(UC)中心温度が30℃程度までしか昇温できておらず、乾燥速度増大の効果が十分には得られていないと考え、温風時間の延長の検討を行った。

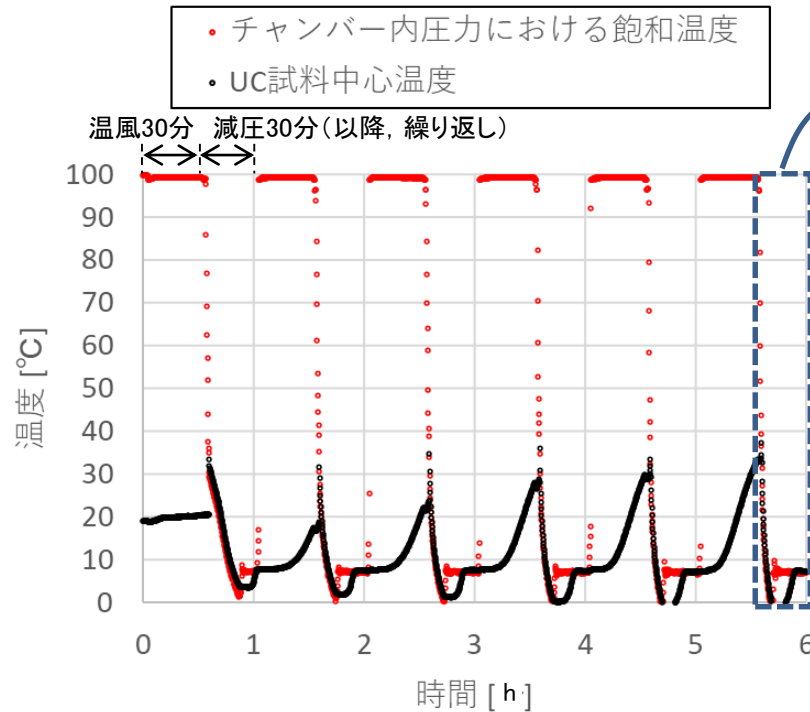


図 2020年度 周期乾燥試験
 チャンバー内圧力における飽和温度とUC温度の時間変化
 (乾燥前期の時間スケール拡大)

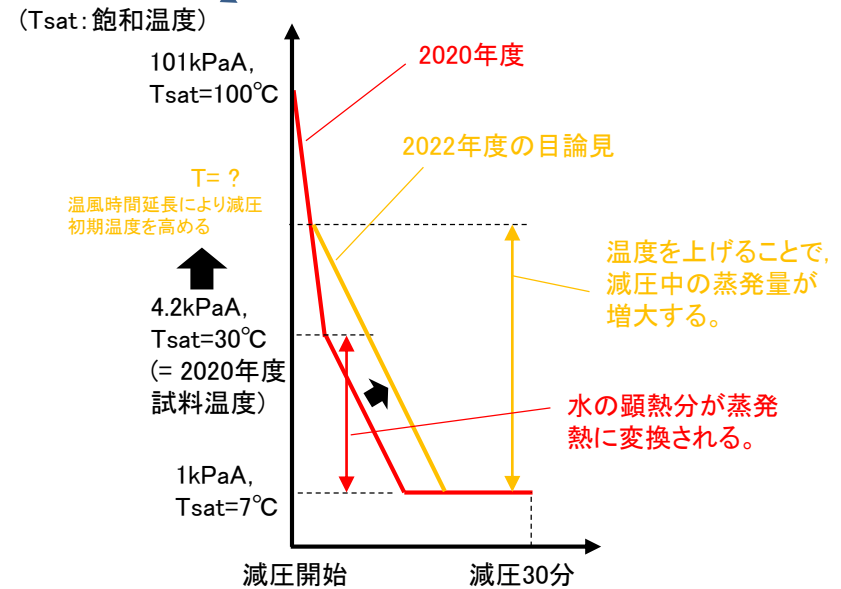


図 圧力・温度変化と蒸発の関係の模式図

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(4/22)

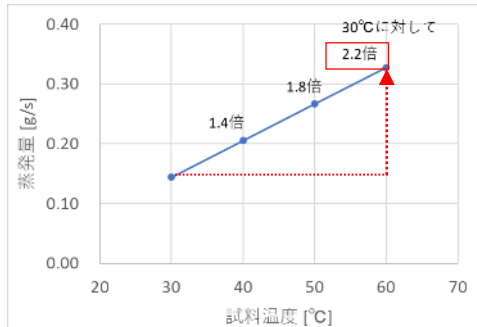
(i)収納缶形態での最適な運転条件(4/4)

- 試料温度の上昇による減圧中の乾燥速度増大を狙うが、一方で試料の予熱に長時間を要する場合には、乾燥工程全体の時間短縮には繋がらないことになる。
- 試料温度を60°Cまで上げる場合、蒸発量では2倍の効果が得られる一方、昇温には2倍の時間が必要となる。このとき、昇温0.5h+減圧0.5h = 1h/1set ⇒ 昇温1h+減圧0.5h = 1.5h/1setとなる。両者を合わせて考えると、蒸発量2倍/1セット時間1.5倍 = 1.3倍の乾燥速度増大の効果が見込まれる。(なお、予熱中は水沸点の上限があるため、昇温効果には限界があると考えられる)
- ゼオライトの細孔の影響が顕著になると考えられる乾燥後期では上記効果が小さいと考えられ、乾燥前期と仮定する~9.5hまでのデータに上記効果を適用すると、9.5-9.5/1.3=2hの時間短縮が見込まれる。これに対し、0.3wt%達成時刻で判定すると1.5h程度短縮する結果が得られた。

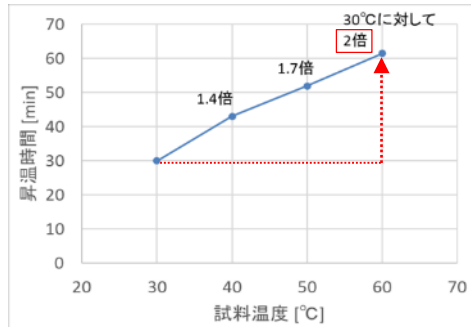
注1: 減圧・降温過程の水エンタルピー減少速度 Δh による蒸発量 W の検討

$$W[\text{kg/s}] = \Delta h[\text{J/kg/s}] \times \text{含水量}[\text{kg}] / \text{潜熱}[\text{J/kg}]$$

注2: ユニット缶の半径方向一次元・非定常熱伝導計算による検討



周期乾燥・減圧期間における試料温度と蒸発量の関係^{注1}



周期乾燥・加熱期間における試料温度と昇温時間^{注2}

図 2020年度試験に基づく推算結果

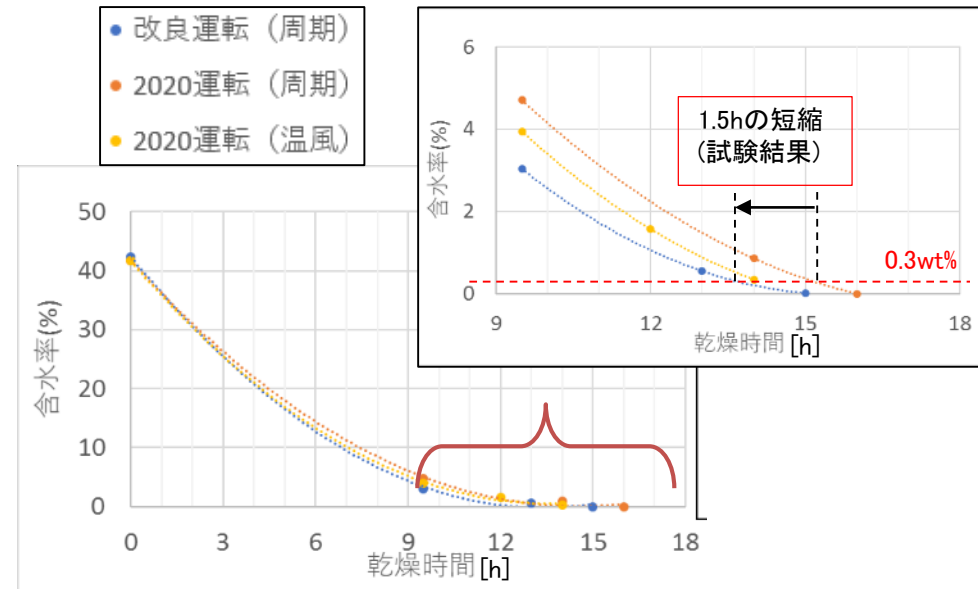


図 2022年度 周期乾燥試験 含水率の時間変化 2020年度試験との比較

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(5/22)

(ii) 収納缶形態での乾燥装置概念(1/2)

注1: 本図は、概念を示すものであり、主要な機器, 弁, 計器のみを記す。

注2: 収納缶のフィルタは、その性能と安全評価の結果によっては、別途、排ガス処理系統にフィルタの設置が必要となる可能性有

最適運転条件(No.79)より、系統概念を検討した。

- (1) 乾燥システムは、所定の処理能力(300kg/日)を満足させるため、収納缶を複数同時乾燥可能な様に、乾燥装置を複数系列設け、湿式スクラバーより下流工程は1系列に統合する。
- (2) 乾燥システムでは、全系列で**温風乾燥運転**が、1系列で**周期(減圧)乾燥運転**(No.99参照)が可能な構成とする。
- (3) 各乾燥装置への窒素ガスの供給は、入口ガス供給・乾燥系統で行い、各乾燥装置(収納缶)上流の流量計により流量調整弁を自動調整し、目標風量に制御する。
- (4) 乾燥装置下流へは粉体が飛散しない見込みであるが、仮に飛散した場合、収納缶に設置したフィルタで放射性物質の大部分を除去することで系統内の汚染を最小限にする。
(フィルタが目詰まりした場合、収納缶毎交換)
- (5) **減圧乾燥時**において、減圧乾燥装置で系統内へ放出した水蒸気は、コールドトラップで回収し、定期的に払い出す。また、**温風加熱乾燥時**においては、水蒸気を湿式スクラバー及び凝縮器で回収する。
- (6) 排風機上流には、排ガスフィルタを設置し、系統内の放射性物質を除去した上で建屋排気系へ排気する。
- (7) 系統内は、真空ポンプ、又は、排風機により負圧に維持し、系統内圧力を計測の上、圧力調整弁でコントロールする。

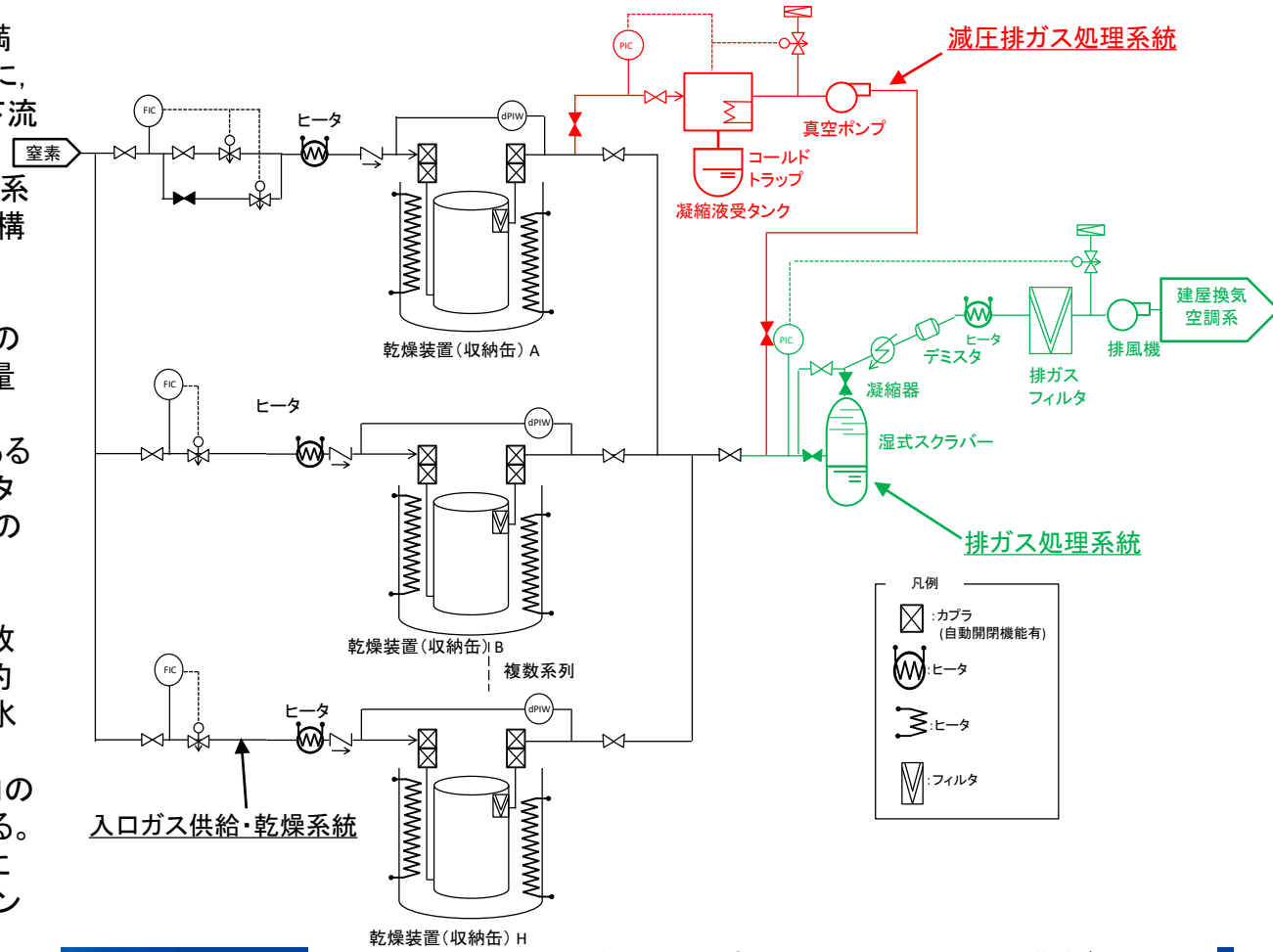


図 複数乾燥の検討課題を考慮した乾燥システムの構成注1, 2

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(6/22)

(ii) 収納缶形態での乾燥装置概念(2/2)

収納缶乾燥装置の操作フローと概算所要時間を検討した。

(検討条件)

- 収納缶などの移動速度はPM^{注1} 走行速度とする。
 - ボルト締めなどのMSM^{注2}の作業時間は, 人手での想定時間の1.5倍とする。
- ⇒水素計測(目安4時間)を含めても24時間以内での処理が可能な見込み。具体化は今後の課題として検討が必要

注1:PM:パワーマンピュレータ。走行速度は2019-2020年度の検討で使用したPM走行台車の値を使用
 注2:MSM:メインセカンダリマンピュレータ

処理工程	作業時間	タイムチャート				
(UC移動設備)	—					
UC取り出し・移動・収納缶への装荷・蓋閉め	—					
収納缶移動・接続	1h					
1) 吊具を収納缶用に交換						
2) 収納缶の移動・ヒータ内設置・ベント閉						
3) フレキホースを収納缶上に配置, 収納缶カプラ接続						
乾燥	16h					
冷却	2h					
一時保管	—					
水素計測	—					
再乾燥	—					
収納缶移送	0.5h					
1) カプラ取り外し・フレキホース位置を元に戻す・ベント開						
2) 収納缶の移動						
(収納缶仮置き場(移送側への払出))	—					

合計19.5h
(水素計測除く)

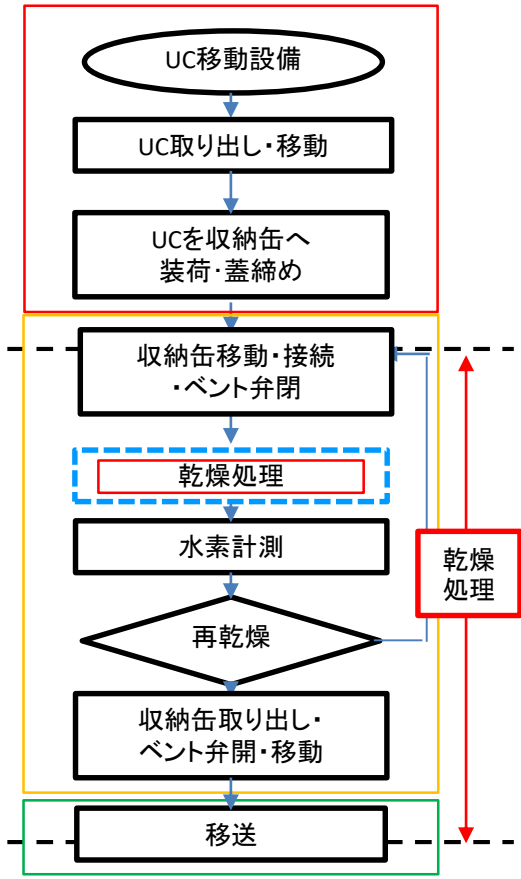


図 収納缶乾燥フロー(移送を目的とした場合の例)(No.88)

図 収納缶乾燥処理時間の検討例

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(7/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(観点))

収納缶乾燥の適応性として, 下記の2項目の観点でチャンバー方式と比較した。

- ・ 乾燥特性
- ・ 乾燥装置, 乾燥系統(収納缶の検討項目を含む)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(8/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥特性の比較))

表 乾燥対象物の種類・データ拡充/適用性検討状況(No.55に追記)

 ...2021~2022データ
拡充範囲

試験模擬材料	適用性検討結果(上段:試験・解析結果/下段:検討内容)		備考
	乾燥チャンバー	収納缶	
粒状 ゼオライト	<ul style="list-style-type: none"> 目標含水率達成 乾燥時間14~16h 	<ul style="list-style-type: none"> 目標含水率達成 乾燥時間20h超(現設計収納缶)/ 14~16h(改良収納缶) 	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速:3m/s
SUSビーズ	<ul style="list-style-type: none"> 適用性あり 	<ul style="list-style-type: none"> 改良収納缶での流速(流量)向上条件で適用性あり 	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速:3m/s
コンクリート片	<ul style="list-style-type: none"> 2019~2020年度の要素試験(ビーカースケール):7hで全水分乾燥 適用性あり(同体系のゼオライト要素試験との比較による) 	<ul style="list-style-type: none"> 2021~2022年度の要素試験(ビーカースケール):10~13hで目標含水率と同オーダの乾燥レベルを達成 解析結果より, 実規模スケールにて約13h(UC4段平均)で目標含水率を達成^{注1} 適用可能だが, 粒径大・中心部まで含水状態の場合は長時間化 	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速1m/s 粒径10mm 骨材なしだと20h程度
スラリー・スラッジ (珪砂, 凝集剤)	<ul style="list-style-type: none"> 目標含水率達成 乾燥時間25.5h 	—	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速3m/s 試料2層化 合計で40vol%(400mmH)充填
液体フィルタ (SUSオートストレーナ)	<ul style="list-style-type: none"> 適用性あり 	<ul style="list-style-type: none"> 解析結果より, 実規模スケールにて約9hで目標含水率を達成 	<ul style="list-style-type: none"> アニュラス部流速0.27m/s 粗取り廃液処理設備由来のスラリー・スラッジ捕捉用ストレーナ

⇒乾燥特性は両方式で同等と判断。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(9/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(1/9)))

収納缶方式とチャンバー方式の比較をするにあたり, 前提条件として下記を想定する。

【比較の前提条件】

① 乾燥の目的

- a. 移送を目的とし, 7日間密封しても水素発生量が爆発限界以下になるように乾燥する。
- b. 参考として, 保管を目的とした乾燥^{注1}についても, 適合性を概略検討する。ここで, 保管を目的とした乾燥は, 一定期間密封保管しても水素発生量が爆発限界以下となることを前提とする。

注1: 保管を目的とした乾燥では, 移送を目的とした乾燥と比較し, 乾燥の要求が高く, 乾燥に必要な時間は長くなる。

② 燃料デブリの収納缶での保管形態

- a. 移送を目的とした乾燥では, 乾燥後の燃料デブリから発生する水素をベントしながら保管する。
- b. 保管を目的とした乾燥では, 水素ベントせず, 密封状態での保管を想定する。

③ 収納缶

収納缶の上蓋にはベントラインがあり, 乾燥運転を行う収納缶には下記の機能を持たせることとする。

- ・ ベントラインには, 弁が設置されており, 乾燥運転中に閉止可能な構造とする。
- ・ 乾燥性能を担保するために, 改良収納缶の使用を想定する。

(その他, 検討を進めるにあたって抽出した収納缶への要求事項は別途整理)

④ 水素計測

- a. 移送を目的とした乾燥では, 一定時間密封した容器内の水素濃度を測定し, 許容値以下であることを確認する。
- b. 保管を目的とした乾燥では, 一定期間密封保管した際においても, 水素濃度が爆発限界以下である必要があることから, aと比較し, 水素発生速度が低い必要がある。

ここでは, 水素発生速度を考慮し, 必要期間保管した後に水素計測を行い, 水素濃度が許容値以下であることを確認する。
なお, スループットへの影響を小さくするため, 乾燥装置内ではなく, UCを収納缶へ格納後に水素濃度を計測する。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

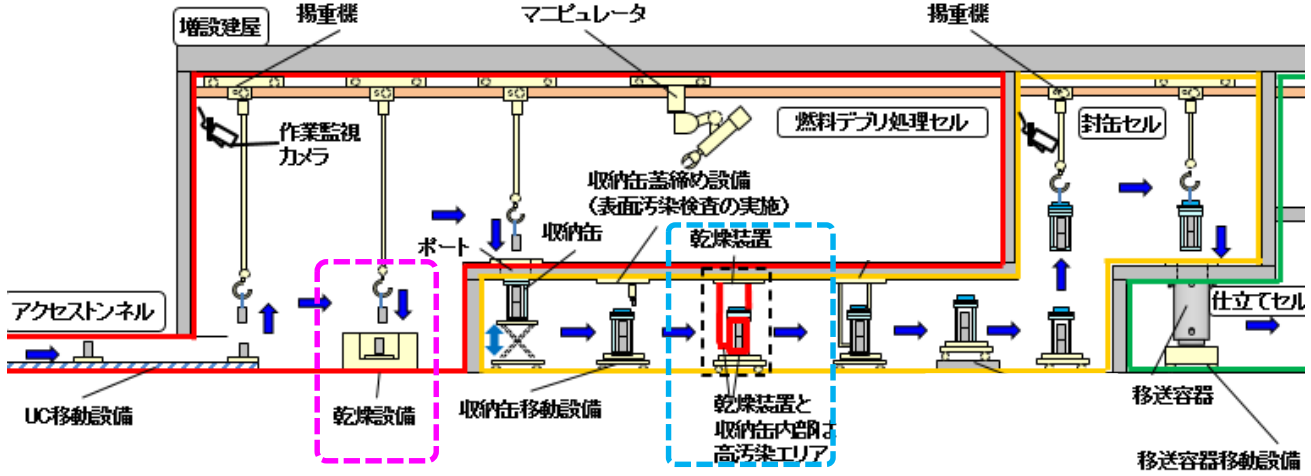
(2)乾燥装置概念の具体化(10/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(2/9)))

移送を目的とした乾燥について、収納缶方式とチャンバー方式の乾燥装置周りの比較を実施するにあたり、前提となるプロセスフローは下記及び右図を想定。

横アクセス工法のハンドリングフロー例

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



チャンバー方式の乾燥設備 (収納缶方式では不要)

収納缶方式の乾燥設備 (チャンバー方式では不要)

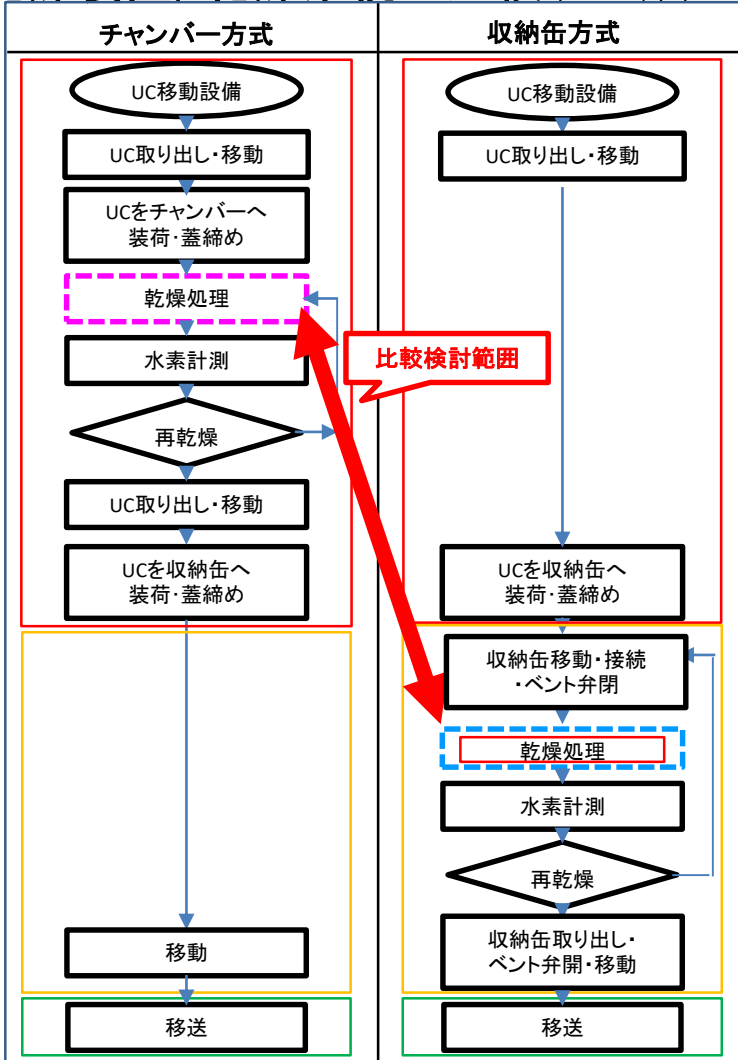
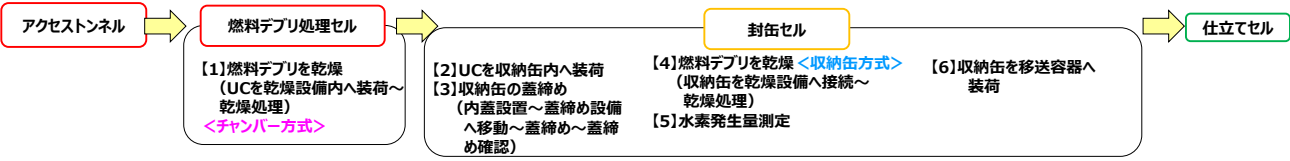


図 塊状, 粒状燃料デブリの一連の取り扱いプロセス(No.4抜粋)

図 プロセスフローの比較【移送を目的とした乾燥のケース】

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(11/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥システムの比較(3/9)))

安全要求への適合性, スループットへの影響, 装置/設備規模, メンテナンス性について, 収納缶乾燥(以下, 「収納缶方式」)の適応性をチャンバー方式と比較した。前提となる乾燥システムは下記のとおり想定する。

- 注1:本図は概念系統図であり, 主要な機器, 弁, 計器のみ記載。複数系列存在する機器等も単系列として記す。なお, 本図では, 温風乾燥を採用した場合を示す。
- 注2:収納缶方式において, 収納缶のフィルタは, その性能と安全評価の結果によっては, 別途, 排ガス処理系統にフィルタの設置が必要となる可能性有。
- 注3:収納缶方式において, 収納缶への要求事項については, 本図には未反映である。

チャンバー方式と収納缶方式のシステム構成の違い
(破線部以外の緑色の系統は同等の構成)

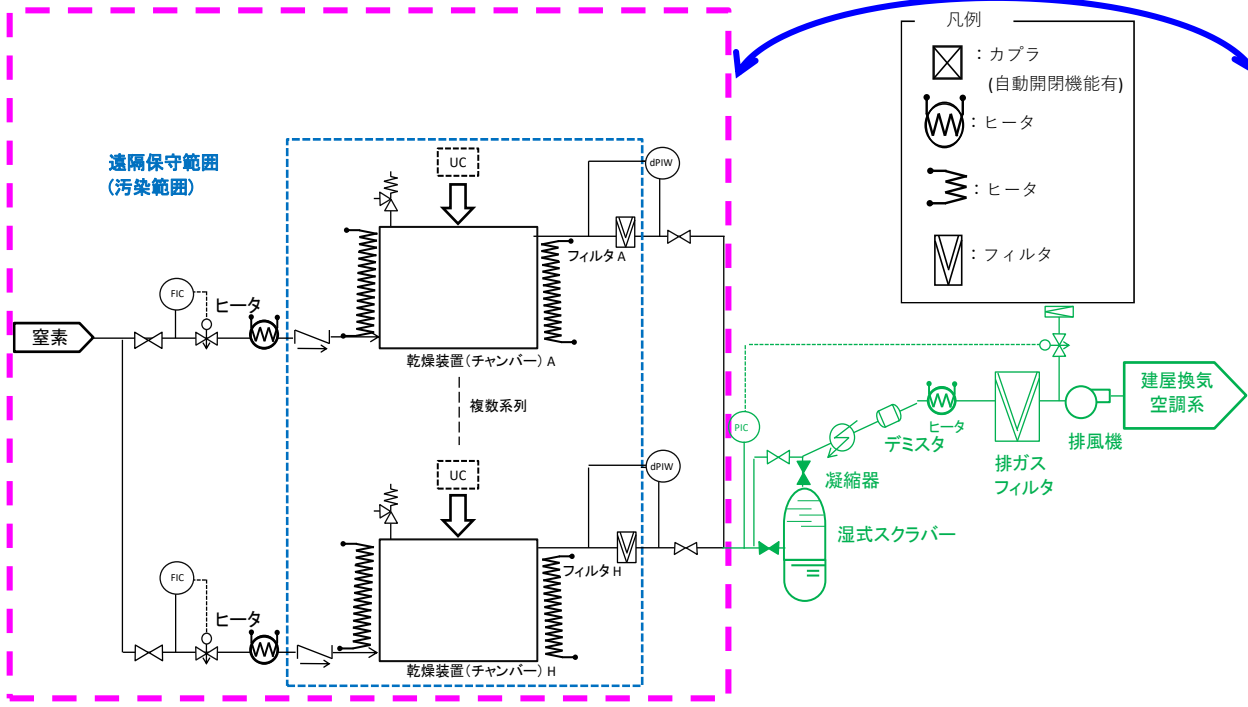


図 チャンバー方式の乾燥システム注1

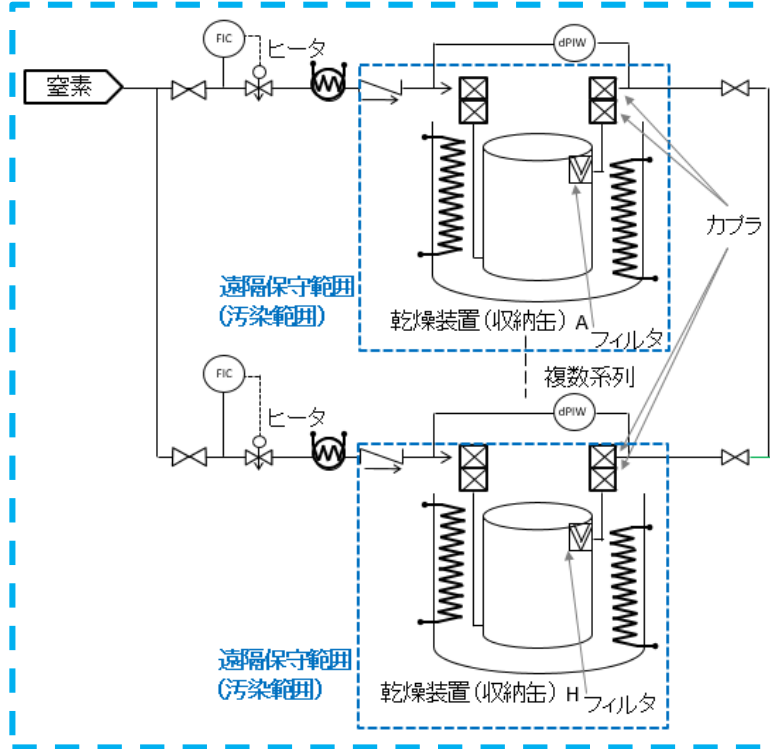


図 収納缶方式の乾燥システム(乾燥装置周りのみ)注1, 2, 3

注1: 収納缶内での火災・爆発を防ぐため、収納缶への空気流入を防止することを目的に封缶セルを不活性ガス雰囲気とする。
 注2: 収納缶のフィルタは、その性能と安全評価の結果によっては、別途、排ガス処理系統にフィルタの設置が必要となる可能性有。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(12/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(4/9)))

表 チャンバー方式と収納缶方式の乾燥装置, 乾燥系統に係る適応性の比較【移送を目的とした乾燥】(1/4)

比較項目	a. チャンバー方式	b. 収納缶方式	基本方針(2020年度に設定した方針)
バウンダリによる放射性物質の漏洩防止	基本方針で対応【a/bで差異なし】	基本方針で対応【a/bで差異なし】	① 系統は溶接構造が基本。メンテナンスが必要な部分はフランジ等を使用。 ② 系統内を負圧に維持し放射性物質の漏洩を防止。 ③ 廃液が漏洩した場合は、ドリフトレイで回収。
炉内から取り出された放射性物質の閉じ込め	【bと比較し、閉じ込め性低】 乾燥を行う燃料デブリ処理セルでは、UCの装荷時等に、UCからセル内へ燃料デブリが落下する可能性があり、②、③のみでの対応。 チャンバー方式では、UCの取り扱い操作が多く、又、乾燥後のUCを取り扱うため、セル内への放射性物質の飛散が多い。	【aと比較し閉じ込め性高】 乾燥を行う封缶セルは基本方針で対応。 燃料デブリ処理セルでは、UCからセル内へ燃料デブリが落下する可能性があり、②、③のみでの対応。 ただし、チャンバー方式と比較し、UCの取り扱い操作が少なく且つ乾燥後のUCを取り扱わないためセル内への放射性物質の飛散は少ない。	① 放射性物質は系統内に閉じ込め、セル内への放出を抑制。 ② ①で放射性物資が放出された場合、セル内を負圧に維持することでセル内に閉じ込める。 ③ ②が失敗した場合においても、負圧に維持した建屋内に放射性物質を閉じ込める。
火災・爆発防止 (水素/粉塵爆発防止)	基本方針で対応【a/bで差異なし】 (燃料デブリ処理セル, 封缶セル ^{注1} , 及び乾燥システムを不活性ガス雰囲気とする)	基本方針で対応【a/bで差異なし】 (燃料デブリ処理セル, 封缶セル ^{注1} , 及び乾燥システムを不活性ガス雰囲気とする)	① 水素掃気すると共に、不活性ガス雰囲気とすることで火災・爆発を防止。
追加核分裂反応の防止	基本方針で対応【a/bで差異なし】	基本方針で対応【a/bで差異なし】	① UCおよび乾燥装置を形状管理することで、未臨界を維持。 ② 複数系列を取り扱う際には、形状管理と距離の確保、又は、中性子の遮蔽体を設置することで相互影響を無くし、未臨界を維持。
異常な加熱の防止	基本方針で対応【a/bで差異なし】	基本方針で対応【a/bで差異なし】	① 異常加熱の際はヒータ電源をOFFとし、窒素を連続供給することで除熱。
乾燥による異常な放射性物質の拡散防止 (系統外への汚染防止)	基本方針で対応【a/bで差異なし】 (系統側のフィルタで抑制)	基本方針で対応【a/bで差異なし】 (収納缶側のフィルタで抑制 ^{注2})	① ガス系に同伴する放射性物質をフィルタで抑制。
公衆への被ばく防止	基本方針で対応【a/bで差異なし】	基本方針で対応【a/bで差異なし】	① 放射性物質をセル内で取り扱うことで、セル/建屋で遮蔽。
作業員の被ばく防止	基本方針で対応【a/bで差異なし】	基本方針で対応【a/bで差異なし】	① 遠隔保守、又は、放射性物質を除去した上で直接保守で対応し、作業員の被ばくを低減。

安全要求への適合性

注1: 収納缶のフィルタは、その性能と安全評価の結果によっては、別途、排ガス処理系統にフィルタの設置が必要となる可能性有。

6.実施内容

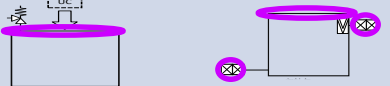
6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(13/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(5/9)))

表 チャンバー方式と収納缶方式の乾燥装置, 乾燥系統に係る適応性の比較【移送を目的とした乾燥】(2/4)

比較項目		a. チャンバー方式	b. 収納缶方式	備考
ス ル ー プ ッ ト へ の 影 響	乾燥性能	チャンバー方式と収納缶方式で乾燥性能に有意な差はない。【a/bで差異なし】	チャンバー方式と収納缶方式で乾燥性能に有意な差はない。【a/bで差異なし】	No.86を参照。
	乾燥準備の容易さ	チャンバー方式では、UCのチャンバーへの装荷・蓋締め／取り出し操作を行う。ボルト締めが必要であり、収納缶方式と比較してスループットへ影響する作業量が多い。【bと比較し、スループットへの影響大】	収納缶方式では、収納缶の乾燥システムへの接続／取り外しをカブラにより行うことから、作業性が高く、スループットへ影響する作業が少ない。【aと比較し、スループットへの影響小】	—
	非定常な(不具合時の)リスク	遠隔操作での操作があるものの、スループットへの影響は比較的小さい。 ①: シール材を遠隔操作で交換 ②: 全系列の乾燥運転を中断し、フィルタを遠隔操作で交換 (系統側のフィルタ閉塞時は、予備のフィルタへ切替えたものの、予備のフィルタも閉塞したことを前提とする)【bと比較し、スループットへの影響大】	乾燥装置周りでの作業は比較的に容易であり、スループットへの影響は小さい。(乾燥運転を全系列停止する必要もない) ①: ・収納缶のシール(カブラを含む)の不具合時は、収納缶をUCの装荷エリアへ移動し、UCが収納済みの健全な収納缶と交換。 ・系統側のシールの不具合時は、遠隔操作でシール(カブラ)を交換。 ②: 収納缶のフィルタ閉塞時は、収納缶をUCの装荷エリアへ移し、UCが収納済みの健全な収納缶と交換。 (フィルタは繰り返し使用しないため、閉塞は考え難い)【aと比較し、スループットへの影響小】	 <p>チャンバー方式のシール部 収納缶方式のシール部</p> <p>収納缶方式では、不具合発生時にスループットへ影響のない状態で、UCの詰替え、又は、収納缶のメンテナンスを実施。</p>
	【想定項目】 ①シール部の漏洩 ②フィルタの閉塞			
再乾燥の容易さ	乾燥・水素計測・再乾燥を同一の乾燥装置内で実施するため容易。【a/bで差異なし】	乾燥・水素計測・再乾燥を同一の乾燥装置内で実施するため容易。【a/bで差異なし】	—	
装 置 ／ 設 備 規 模	排ガス処理系統の規模	収納缶方式と比較し、排ガス処理系統に排ガスフィルタが必要となり、収納缶方式より設備規模がやや大。【bと比較し、設備規模大】	収納缶にフィルタが設置されていることから、排ガス処理系統に排ガスフィルタが不要と想定 ^{注1} した場合、設備規模がチャンバー方式より小さい。【aと比較し、設備規模小】	—
	乾燥装置の規模	チャンバー方式, 収納缶方式共に同規模。【a/bで差異なし】	チャンバー方式, 収納缶方式共に同規模。【a/bで差異なし】	—
	乾燥装置周りの操作想定【参考】	<ul style="list-style-type: none"> ・チャンバーの蓋開閉 : PMで対応 ・チャンバーのシール交換 : MSMで対応 	<ul style="list-style-type: none"> ・収納缶のシール交換: MSMで対応, 又は、蓋ごと交換 ・収納缶の系統への接続: MSMで対応 <p>⇒ 封缶セル内のUC装荷エリアに収納缶のメンテナンスが可能なスペースやマテハン機器が必要</p>	乾燥装置周りで、乾燥準備に影響する操作のみ記載。 PM : パワーマニピュレータ MSM: メインセカンダリマニピュレータ

6.実施内容

6.2実規模試験


③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(14/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(6/9)))

注1: 収納缶のフィルタは, その性能と安全評価の結果によっては, 別途, 排ガス処理系統にフィルタの設置が必要となる可能性有。

表 チャンバー方式と収納缶方式の乾燥装置, 乾燥系統に係る適応性の比較【移送を目的とした乾燥】(3/4)

比較項目	a. チャンバー方式	b. 収納缶方式	備考
乾燥装置本体	チャンバー内外の汚染レベルが高く, メンテナンスは遠隔操作を想定。除染後の直接保守も容易でないと想定され, メンテナンス性は中程度。 【bと比較し, メンテナンス性低】	乾燥装置内外の汚染レベルは低いと考えられ, メンテナンスは直接保守(必要に応じて除染), 又は, 遠隔保守を想定。直接保守が比較的容易なため, メンテナンス性は高い。 【aと比較し, メンテナンス性高】	—
乾燥装置周りのシール部	シール部のメンテナンスは, チャンバー周りで対応。チャンバー上(蓋)部のシールについては, 線量が高く, 遠隔操作が必要であり, メンテナンス性は中程度。 (スループットへの影響があるため, 早急にメンテナンスする必要があり, 許容時間は限定される) 【a/bで差異なし】	基本的に遠隔保守で対応。メンテナンス性は中程度。 ・ 収納缶側のシール部(上部, 水素ベント, カプラ)は, 収納缶をUC装荷エリアに移動後に遠隔操作で交換, 又は, 収納缶毎交換。 (UC装荷エリアでメンテナンスを実施するため, メンテナンス時間に余裕有) ⇒封缶セル内のUC装荷エリアに収納缶のメンテナンスが可能なスペースやマテハン機器が必要。 ・ 系統側のカプラは遠隔保守。 【a/bで差異なし】	収納缶方式のシール部として, 下記のメンテナンスを想定。 ・ 収納缶上(蓋)部 ・ 収納缶の水素ベント部 ・ カプラ部(収納缶側, 系統側)  収納缶方式のシール部
メンテナンス性			
フィルタ	下記想定より, メンテナンス性は中程度。 ・ 排ガス処理系統のフィルタは遠隔操作で交換。 ・ 閉塞時には, 予備機に切り替える。フィルタ交換は排ガス処理系統の運転が停止中に実施。【a/bで差異なし】	下記想定より, メンテナンス性は中程度。 ・ フィルタは収納缶に設置されており, 繰り返し使用することがないため, 通常運転中において, フィルタ交換は想定しない。 【a/bで差異なし】	—
排ガス処理系統	【bと比較し, メンテナンス性低】 フィルタ設置部まで系統内が汚染しており, 遠隔保守が必要なため, メンテナンス性は中程度。	【aと比較し, メンテナンス性高】 放射性物質は, 基本的に収納缶内に閉じ込められ, 系統内の汚染が抑制されるため, 直接保守 ^{注1} (必要に応じて除染), 又は, 遠隔保守が想定され, メンテナンス性が高い。	—
除染の必要性と範囲	【bと比較し, メンテナンス性低】 チャンバー内に放射性物質が飛散しており, チャンバー内の除染が必要。また, 乾燥装置の系統内もフィルタ設置部まで汚染しており, 除染が必要。 乾燥装置の直接保守が必要な場合は, セル内除染が必要。	【aと比較し, メンテナンス性高】 放射性物質を収納缶内に閉じ込めるため, 乾燥系統内の除染は基本的に不要 ^{注1} 。 乾燥装置の直接保守が必要な場合においても, セル内の除染が不要の可能性有。	—

注1:平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」より引用。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(15/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(7/9)))

表 チャンバー方式と収納缶方式の乾燥装置, 乾燥系統に係る適応性の比較【移送を目的とした乾燥】(4/4)

比較項目		a. チャンバー方式	b. 収納缶方式	
収納缶の検討項目	安全性	閉じ込め性能(落下時の健全性)	健全性を確認済み(2020年度の収納缶PJで検討した収納缶と同等)	
		火災・爆発防止(水素爆発対策)	水素は滞留し難くリスクは低い	
	構造	耐熱性の要否	不要(乾燥処理が不要なため)	必要(乾燥処理が必要なため)
		構造の複雑さ	比較的シンプル(2020年度の収納缶PJで検討した収納缶と同等)	気送管, フィルタが必要なため, aと比較し やや複雑
	運用性	キャスクへの収納効率	比較的高い(2020年度の収納缶PJで検討した収納缶と同等)	外周が大きくなるため, aと同等かやや劣る ⇒ 構造検討が必要
		UCの収納性	比較的容易(2020年度の収納缶PJで検討した収納缶と同等)	比較的容易 ⇒ 排気フィルタが干渉しない工夫が必要
適応性の比較(総合評価)		<ul style="list-style-type: none"> 全体を通して, 収納缶方式の方が, 適応性の高い項目が多い結果となった。 一方で, 収納缶方式で使用を想定する収納缶は, 安全性(閉じ込め性能(落下時の健全性))を含め今後の課題として検討が必要な項目がある。 <p style="text-align: center;">⇩</p> <p>収納缶の検討項目が評価・確認されるまで, 両方式の優劣はつけ難い(今後の課題)。</p>		

- i: 風量確保のため, 改良収納缶(ノズル口径を拡大, 又は, ノズル本数を増加)を使用する。
- ii: ベントラインを乾燥時に閉止するため, 隔離弁を設ける。
- iii: 排気ラインのフィルタは, 閉塞時の交換が容易なような構造(ノズル全体を交換など)に変更とする。

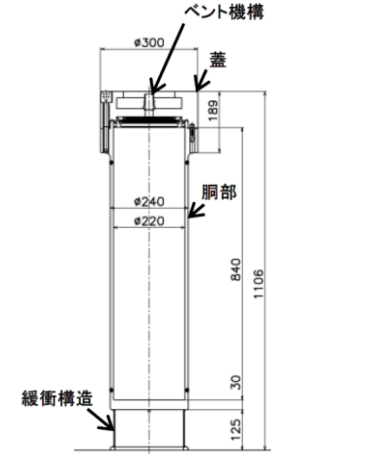


図 チャンバー方式で使用する収納缶(送気機構無)の構造注1

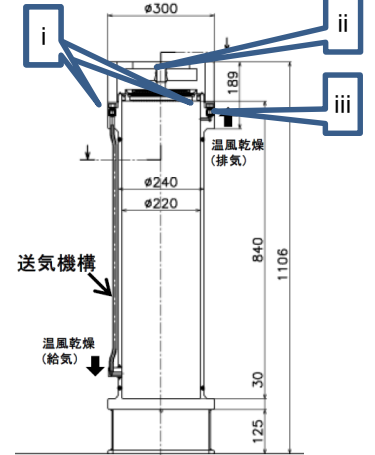


図 収納缶方式で使用する収納缶(送気機構有)の構造注1

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(16/22)

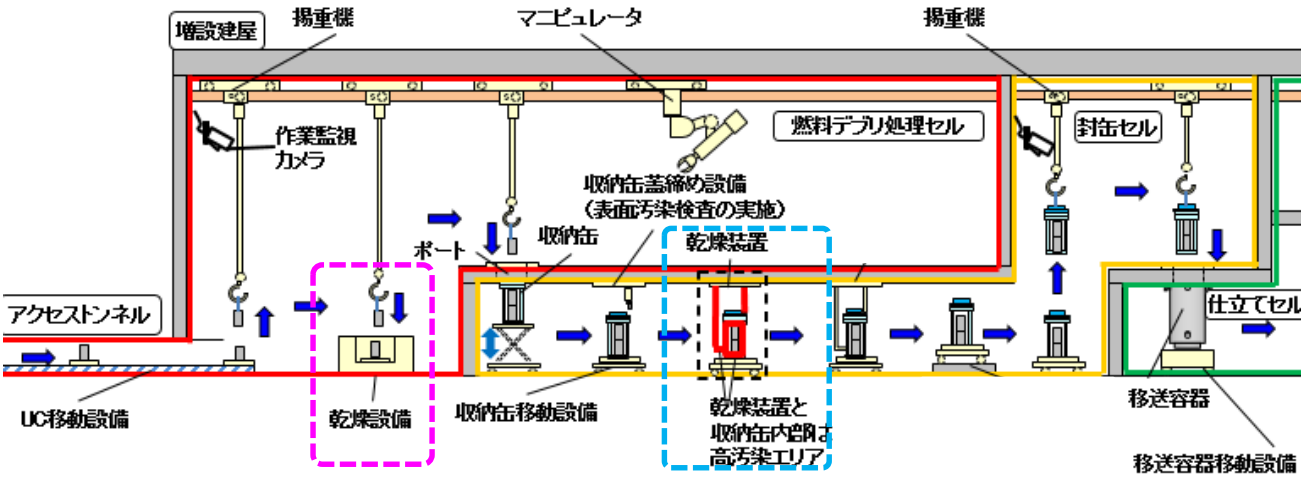
(iii)チャンバー方式と比較した得失評(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(8/9)))

参考として, 保管を目的とした乾燥についても収納缶方式とチャンバー方式の乾燥装置周りの比較を実施。前提となるフローは下記及び右図を想定。

注1: 保管を目的とした乾燥では, 移送を目的とした乾燥と比較して, 水素計測までに必要な期間が長いため, 乾燥後の燃料デブリを封缶セル内で一定期間密封保管した後に, 水素計測する。ここでは, 乾燥後の入れ替え作業を少なくすることを考慮したフローを示す。

横アクセス工法のハンドリングフロー例

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



チャンバー方式の乾燥設備 (収納缶方式では不要)

収納缶方式の乾燥設備 (チャンバー方式では不要)

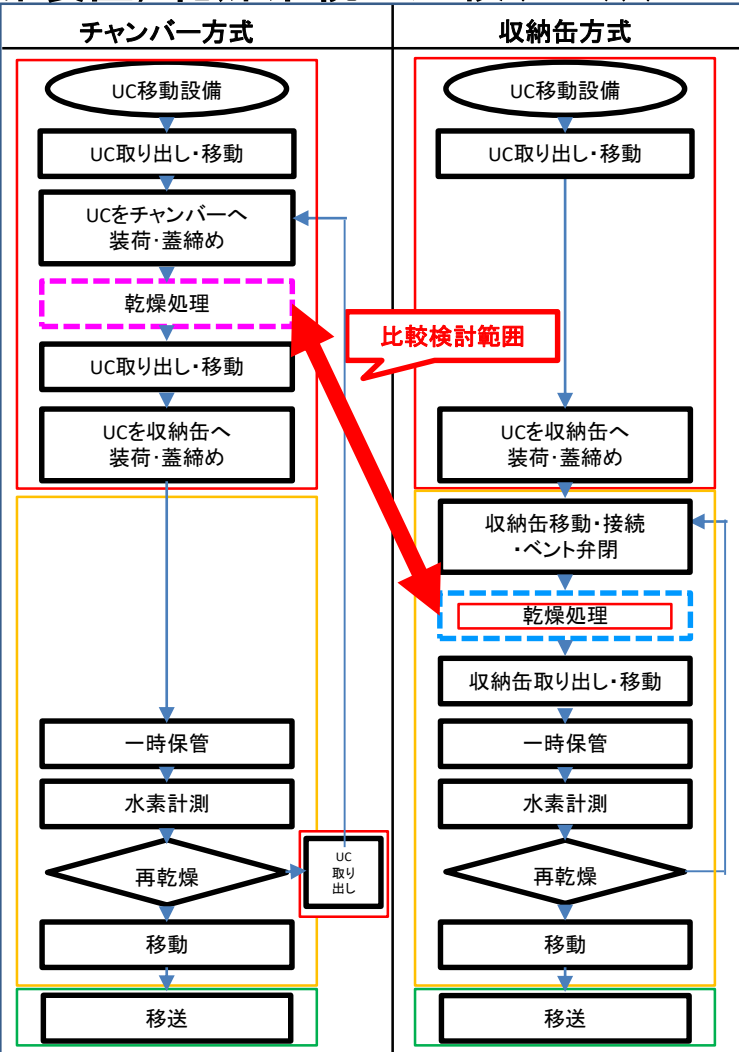
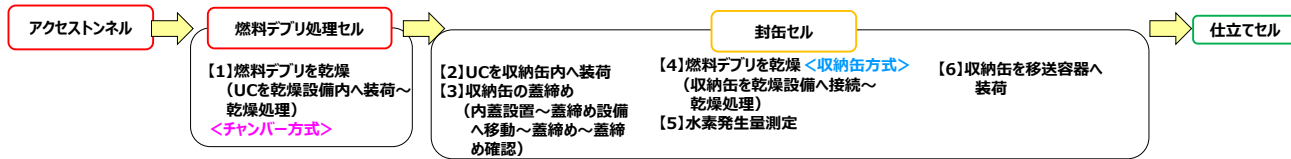


図 塊状, 粒状燃料デブリの一連の取り扱いプロセス(No.4抜粋)

図 プロセスフローの比較注1【参考: 保管を目的とした乾燥のケース】

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(17/22)

(iii)チャンバー方式と比較した得失評価(収納缶乾燥の適応性(乾燥装置, 乾燥系統の比較(9/9)))

注1: 収納缶内での火災・爆発を防ぐため、収納缶への空気流入を防止する必要がある。

保管を目的とした乾燥では、燃料デブリの乾燥後に、収納缶を密封状態で保管し、ベントラインを解放しないことから、封缶セル内の雰囲気気は収納缶内へ流入することはない。そのため、封缶セル内を不活性ガス雰囲気にする必要はない。

表《参考》チャンバー方式と収納缶方式の乾燥装置, 乾燥系統に係る適応性の比較【保管を目的とした乾燥】
(「移送を目的とした乾燥」との差異のみ記載)

比較項目	a. チャンバー方式	b. 収納缶方式	備考
安全要求への適合性 火災・爆発防止 (水素/粉塵爆発防止)	基本方針で対応【a/bで差異なし】 (燃料デブリ処理セル ^{注1} , 及び乾燥システムを不活性ガス雰囲気とする)	基本方針で対応【a/bで差異なし】 (燃料デブリ処理セル ^{注1} , 及び乾燥システムを不活性ガス雰囲気とする)	—
スループットへの影響 再乾燥の容易さ	【bと比較し, スループットへの影響大】 再乾燥の際は, UCを収納缶から取り出し, 燃料デブリセルへ移送した後に乾燥するため, 再乾燥は容易でない。	【aと比較し, スループットへの影響小】 再乾燥の際は, UCを収納缶から取り出す必要がなく, 封缶セル内で再乾燥が可能であり, 比較的に対応可能。	—
適応性の比較	収納缶の検討項目が評価・確認されるまで, 両方式の優劣はつけ難い。 (一方で, 「移送を目的とした乾燥」と比較しても収納缶方式の方が有利な点が多く, 収納缶の検討項目について評価・確認されれば, 収納缶方式の適応性が高いと評価されると思慮する)		—

注1:各運転操作の所要時間は暫定的に記載したもの。

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(18/22)

(iv)複数同時処理時の検討課題(1/4)

複数乾燥運転としては、①同時運転、②連続運転の二種類がある。ここでは、運転状態が重なる割合が低く、段階的に乾燥運転が可能な②について検討課題を整理する。

ここでは、温風乾燥方式と周期乾燥方式では乾燥性能に大きな差がないため、設備規模が小さい温風乾燥方式を代表として比較する。

(周期乾燥方式特有の課題点は、参考として別途整理する(No.99))

単独乾燥運転に対する複数乾燥運転の課題点については、下記の観点で整理した。

- 運転性
- 安全性
- 装置・設備規模
- スループットへの影響
- メンテナンス

乾燥は全系列を同時運転
乾燥は全系列の3/4を運転

凡例：
解放・払出 / 受入・装荷
温風乾燥
水素濃度 測定・確認

表 ①同時運転の運転状態^{注1}(温風乾燥のケース, 系列数は暫定な値)

項目	乾燥装置の時間毎の捜査状態																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
B	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
C	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
D	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
E	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
F	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
G	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
H	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放

表 ②連続運転の運転状態^{注1}(温風乾燥のケース, 系列数は暫定な値)

項目	乾燥装置の時間毎の捜査状態																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
B	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
C	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
D	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
E	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
F	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
G	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放
H	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放	解放

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(19/22)

(iv)複数同時処理時の検討課題(2/4)

表 単体乾燥運転に対する複数乾燥運転の比較と課題点の整理【温風乾燥方式】(1/2)

項目	a. 単独乾燥運転	b. 複数乾燥運転	複数運転の課題点	
			変動要因	課題点
入口ガス供給・乾燥系統	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥運転を実施する度に窒素供給を発停。 窒素の供給は、流量調整弁で目標値に調整。 	<ul style="list-style-type: none"> 常時複数系統で乾燥運転を実施していることから、常時窒素を供給。 乾燥運転していない系列は弁で隔離。 窒素供給は、流量調整弁で各系列の流量が目標値になる様に調整。 	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥運転中にフィルタの閉塞具合が変化。 窒素供給する系列数が変化。 <p>⇒ 一 系列毎に流調弁の開度を自動調整し、目標風量に制御する。</p> <p>一 フィルタ圧損が設定値を超えた場合、風量調整が困難となる。その際は、差圧高注意報が発報し、フィルタが閉塞した収納缶を遠隔操作で交換する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 特になし
排ガス処理系統	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥運転を実施する度に排ガス処理系統を起動/停止。 	<ul style="list-style-type: none"> 常時複数系統で乾燥運転を実施していることから、常時系統を運転。 乾燥運転していない系列は弁で隔離。 	<ul style="list-style-type: none"> 排気運転する系列数が変動し、排風機の運転風量が変化するため、負圧が変動する。 <p>⇒ 一 系統内圧を計測し、吸気ラインの弁開度調整により、吸気ラインからの吸気風量、並びに、排風機の運転風量を調整することで、負圧を一定に制御する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 特になし
乾燥装置	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥運転をする度に乾燥装置を発停。 	同左	<ul style="list-style-type: none"> 特になし 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし

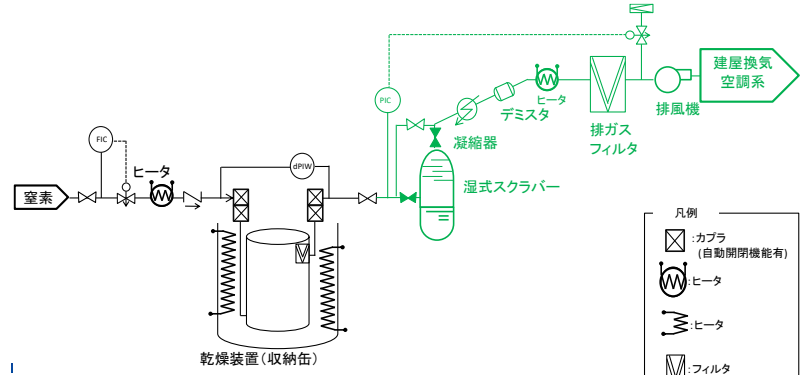
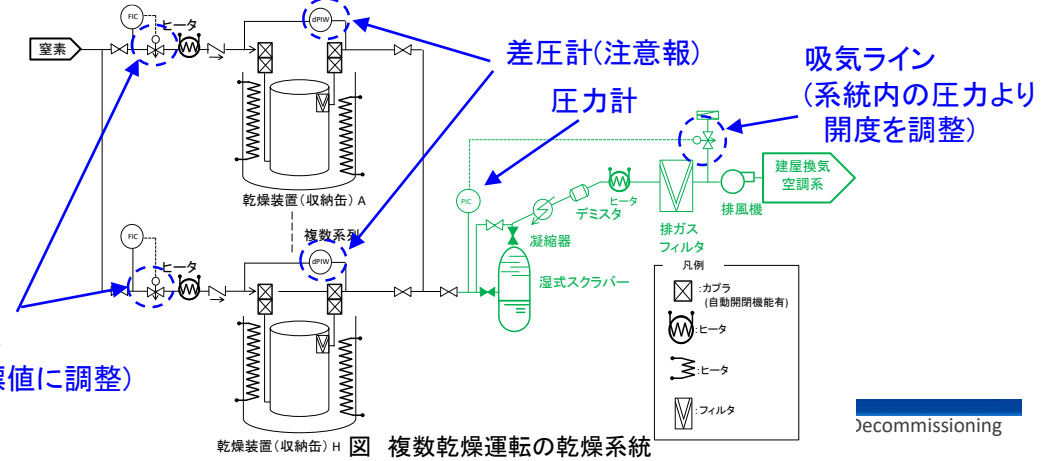


図 単独乾燥運転の乾燥系統



流量調整弁
(風量を目標値に調整)

差圧計(注意報)

圧力計

吸気ライン
(系統内の圧力より開度を調整)

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(20/22)

(iv)複数同時処理時の検討課題(3/4)

表 単体乾燥運転に対する複数乾燥運転の比較と課題点の整理【温風乾燥方式】(2/2)

項目	a. 単独乾燥運転	b. 複数乾燥運転	複数運転の課題点	
			変動要因	課題点
安全性	・安全要求に基づいて対応。	・同左	・特になし	・特になし。
装置・設備規模	・単系列のため, 300kg/dの処理能力を持たせるためには, 同様の装置・設備が複数系統必要。	・非共用機器: 複数系列必要 ・共用機器: 1系列必要(予備機は別途有)	・非共用機器: 特になし ・共用機器: 単独乾燥運転の機器と比較し, 機器容量は大きいものの, 系列数が少ない。	・特になし。
スループットへの影響	・同様の系統が複数存在するが, 不具合時には, 不具合が発生した系統のみ停止。	・非共用機器の不具合時は, 当該系列を隔離・停止し, 残りの系列のみで運転。 ・共用機器の不具合時は, 全系列の運転を停止。	・非共用機器: 特になし ・共用機器: 全系列運転を停止するため, スループットへの影響有。 ⇒ 全系列の停止を低減するため, 共用機器を複数系列化する必要有。	・特になし (今後の設計で, 共用機器の系列数について検討が必要)
メンテナンス	・単系列のため, 不具合等によるメンテナンスは1系列ずつ独立して対応可能。	・非共用機器の不具合時は, 当該系列を隔離・停止。メンテナンスは, 定検時などに全系列を停止して実施。 ・共用機器の不具合時は, 全系列の運転を停止し, メンテナンスを実施。	・非共用機器: 特になし ・共用機器: メンテナンスには全系列の停止が必要。 ⇒ メンテナンスを定検時に行うため, 共用機器を複数系列化する必要有。	・特になし (今後の設計で, 共用機器の系列数について検討が必要)
総合評価			複数運転に大きな課題点はないと考えられる。	

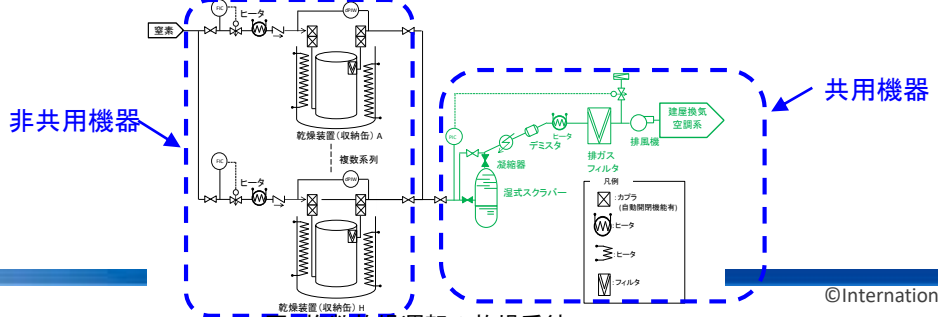


図 複数乾燥運転の乾燥系統

6.実施内容

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(21/22)

(iv)複数同時処理時の検討課題(4/4)

表 単体乾燥運転に対する複数乾燥運転の比較と課題点の整理【周期乾燥方式特有の課題点】

項目	a. 単体乾燥運転	b. 複数乾燥運転	複数運転の課題点	
			変動要因	課題点
運転性	減圧排ガス処理系統 ・減圧乾燥運転を実施する度に排ガス処理系統を起動/停止。	・常時複数系列で減圧乾燥運転を実施することから、常時系統を運転。 ・減圧乾燥運転していない系列は弁で隔離。	・温風乾燥運転から減圧乾燥運転への切り替え時に、既に減圧乾燥していた収納缶の圧が上昇し、乾燥した燃料デブリへ水蒸気が移行する可能性がある。 (図の圧が高い収納缶Bから圧の低い部分に窒素及び水蒸気が流れ込む際に、収納缶Aにも水蒸気が流れ込む)	温風乾燥運転から減圧乾燥運転への切り替え時に、水蒸気の逆流を防ぐ対策が必要。 ⇒対策としては、下記の何れかが考えられる。 ① 収納缶へ窒素及び水蒸気の流れ込みを防止するため、運転の切り替え前に、圧の低い系列の収納缶を隔離する。 (図の収納缶Aの出口側の弁を閉止する) ② 減圧乾燥運転は、複数系列同時に行わず、1系列のみにする。

周期乾燥方式では、運転切り替え時の水蒸気逆流防止対策が必要となる。

⇒上記を考慮の上、本補助事業では、下記より周期乾燥運転可能な系列は1系列のみとした。

- ・温風乾燥と周期乾燥では乾燥性能に大きな差がなく、通常は温風乾燥で対応可能。(周期乾燥は、乾燥が困難場合にのみ使用)。
- ・運転切り替え時の水蒸気逆流防止を根本的に解決可能。
- ・周期乾燥運転可能な系列数を限定することで、設備規模も小さくなる。

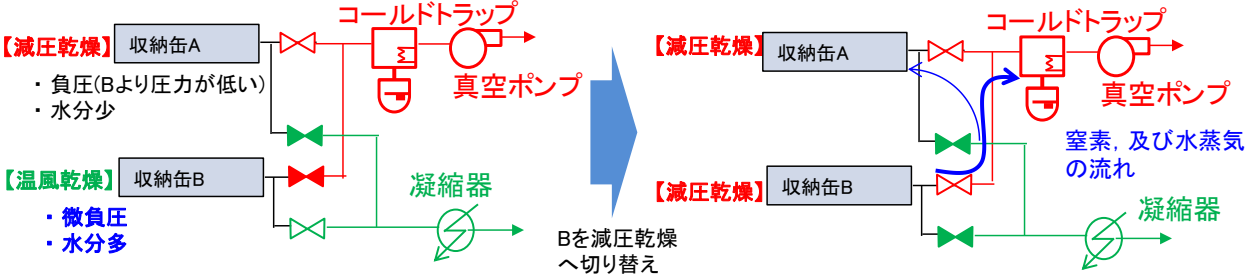


図 温風乾燥運転から減圧乾燥運転への切り替え時における窒素及び水蒸気の流れ(イメージ)

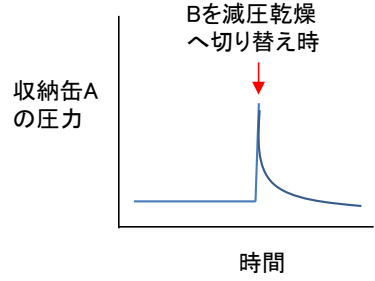


図 温風乾燥運転から減圧乾燥運転への切り替え時の圧力変動(イメージ)

6.実施内容

注1:平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」より引用。

6.2実規模試験

③実施事項, 成果

(2)乾燥装置概念の具体化(22/22)

(v)収納缶設計への要求事項(要望)

乾燥の観点から, 収納缶設計への要求事項(要望)を整理した。

表 収納缶設計への要求事項(要望)

No	目的	要求事項(要望)	例
i	乾燥性能確保 (最適運転)	風量確保のため, ノズル口径を拡大, 又は, ノズル本数を増加する。	風量はアニュラス部 3m/s(37Nm ³ /h)
ii	乾燥性能確保 (オプション)	耐放射線性と300°Cでの乾燥を考慮したシール構造とする。	金属ガスケットの採用
iii	処理フロー成立	ベントラインを乾燥時に閉止する。	隔離弁を設置
iv		排気ラインのフィルタは, 閉塞時の交換が容易なような構造に変更とする。	ノズル全体を交換

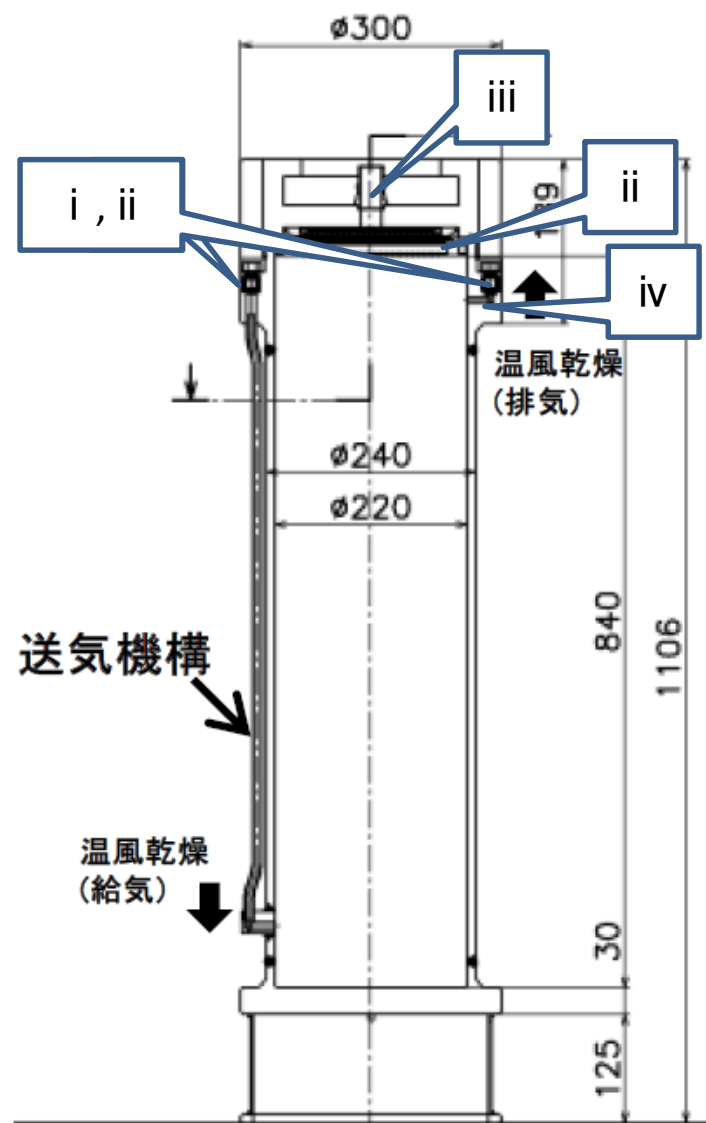


図 収納缶設計への要求箇所注1

6.実施内容

6.2実規模試験

④成果の反映先への寄与

- 実規模試験結果をもとに、収納缶乾燥装置概念や運用条件を具体化し、さらに乾燥の観点での収納缶への要求・要望事項をまとめた(No.79～100)ことで、実機乾燥装置や収納缶の設計・製作・運用方法の決定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

- 収納缶乾燥装置の最適運転条件や操作フロー・所要時間の検討を実施し、チャンバー/収納缶の得失評価の中では、安全要求への適合性、スループットへの影響やメンテナンス性などの観点でも評価を行った上で、収納缶乾燥装置概念や収納缶への要求・要望を提案(No.79～100)しており、現場への適用性を考慮した検討を行った。今後の課題はNo.105のとおり。

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(No.5)が満足できていることから、目標を達成できたと判断する。
 - ✓ 収納缶形態での乾燥に対してチャンバー方式との得失が整理されていること
 - ✓ 多孔質体に対して収納缶状態での効果的な運転方法が提案されていること
 - ✓ 乾燥処理面で収納缶への要求(要望)事項が整理されていること

6.実施内容

6.2実規模試験

⑦まとめ

<成果>

- 収納缶での乾燥概念や実規模試験装置での試験内容と必要な改造範囲，試験用収納缶条件を検討し，収納缶乾燥試験を立案した。(No.69～74)
- 収納缶乾燥試験計画に沿って，試験用収納缶と実規模試験装置を設計・製作し，収納缶での乾燥試験を実施した。(No. 75～78)
 - ✓ 現設計収納缶での乾燥時間は20h超となり，スループットの達成は困難と考えられる。
 - ✓ 改良収納缶にて流速(流量)向上することで乾燥時間を短縮し，スループットの達成見込みを得た。
 - ✓ 現設計収納缶での周期乾燥での乾燥時間は温風乾燥と同等であった。
 - ✓ 露点や温度観察により乾燥終了判断方法を検討した。
- 要素試験・実規模試験の結果から，収納缶乾燥装置の最適運転条件を検討した。さらに2019～2020年度の周期乾燥運転の改良運転案を解析検討し，その検証運転試験を実施し，1.5時間程度の処理時間の短縮が図れる見込みを得た。(No.79～82)
- 最適運転条件に基づき収納缶乾燥装置概念を検討し，その処理フローと概算所要時間を検討した。(No.83～84)
- 収納缶乾燥装置について，安全要求への適合性，スループットへの影響，装置／設備規模，メンテナンス性等について，チャンバー方式と比較した。
(No85～95)
- 収納缶乾燥装置について，複数同時処理時の課題を検討した。(No.96～99)
- 試験や乾燥装置の具体化検討を踏まえ，乾燥の観点での収納缶への要求・要望をまとめた。(No.100)

⑧今後の課題

- 出口ガス温度やチャンバー空頭での乾燥終了判断の検証(No.78)
- 高温，高放射線環境下におけるシール部の健全性(No.79)
- 遠隔操作設備の具体化と検証(No.84)

実施内容に対し、開発目標(No.5)に対する達成状況をまとめる。

No.	開発目標の判断指標	達成状況
1	難乾燥物のスラリー・スラッジやコンクリートの乾燥データが整備されていること (終了時目標TRL:レベル4)	要素試験を計画・実施し、スラリー・スラッジは実規模スケールでの試料温度分布や含水率変化を取得し、目標含水率は達成見込みとされるが、処理時間が長くなることを確認した。コンクリートは物性特性とビーカースケールでの試料温度分布や含水率変化のデータを取得、解析評価に展開し、実規模スケール解析で乾燥時間13h程度・含水率0.2wt%以下を確認した。これらの結果から、これまでの乾燥概念が難乾燥物に対しても適用できることを確認した。
2	収納缶形態での乾燥に対してチャンバー方式との得失が整理されていること (終了時目標TRL:レベル4)	安全要求への適合性、スループットへの影響、装置/設備規模、メンテナンス性について収納缶乾燥方式とチャンバー乾燥方式での得失を評価をした。
3	多孔質体に対して収納缶状態での効果的な運転方法が提案されていること (終了時目標TRL:レベル4)	要素試験や実規模収納缶試験結果を踏まえ、多孔質体に対して収納缶形態での効果的な運転方法を検討し、基本条件としては「温風乾燥/温度200°C/流速3m/s(流量37Nm ³ /h)」を、オプションとして高温や周期乾燥の付加を提案した。さらに周期乾燥のサイクルを見直した解析評価と検証試験を実施し、2020年度の運転からの改良を確認した。
4	乾燥処理面で収納缶への要求(要望)事項が整理されていること (終了時目標TRL:レベル4)	実規模試験を計画し、実規模収納缶の製作及び試験装置の改造を行い、試験を実施して収納缶形態での含水率変化や乾燥時間のデータを取得した。これらのデータおよび開発目標No.2,3の検討内容も踏まえ、通気流速3m/s程度の確保や使用温度300°Cでのシール仕様等収納缶への要求(要望)事項を整理した。

7. 全体まとめ(成果概要)

注1: ○印付きのものは平衡含水率(終点確認)の値, 無印は到達含水率

本事業で取得した主要な成果(乾燥性能データ)を下表にまとめる。詳細な条件や下表外の結果については各試験・解析の報告頁を参照すること。

表 主要成果(乾燥性能データ)

試験模擬材料	条件			成果			
	体系・モード・試料等		流速(流量)	温度	含水率注1	乾燥時間	
粒状ゼオライト	・ 実規模スケール(現設計収納缶)		・ 温風	1m/s(12Nm ³ /h)	200℃	0.01wt%	24h
	・ 実規模スケール(改良収納缶)		・ 温風	3m/s(37Nm ³ /h)	200℃	0.01wt%	16h
	・ 実規模スケール(現設計収納缶)		・ 周期	1m/s(12Nm ³ /h)	200℃	0.56wt%	20.5h
スラリー・スラッジ	・ 実規模スケール(乾燥チャンバー)		・ 珪砂400mm	3m/s(37Nm ³ /h)	200℃	0.01wt%○	16.5h
	・ 実規模スケール(乾燥チャンバー)		・ 凝集剤フロック400mm	3m/s(37Nm ³ /h)	200℃	1.5wt%	34.5h
	・ 実規模スケール(乾燥チャンバー)		・ 珪砂200mm+凝集剤フロック200mm	3m/s(37Nm ³ /h)	200℃	0.02wt%○	22.5h
コンクリート片	・ ビーカスケール	・ Φ10mm	・ 骨材/セメント=6wt%	1m/s(12Nm ³ /h)	200℃	0.3wt%○	10~13h
	・ ビーカスケール	・ Φ10mm	・ 骨材/セメント=0wt%	1m/s(12Nm ³ /h)	200℃	3.6wt%○	20h
	・ ビーカスケール	・ Φ10mm	・ 骨材/セメント=6wt%	1m/s(12Nm ³ /h)	300℃	0.1wt%	22h
	・ 実規模スケール(解析)	・ Φ10mm	・ 骨材/セメント=6wt%	3m/s(37Nm ³ /h)	200℃	0.2wt%	13h
液体フィルタ(SUSオートストレーナ)	・ 実規模スケール(解析)		・ 補足粒子:ゼオライト	0.27m/s(37Nm ³ /h)	200℃	0.3wt%	9h

表 実機適用に向けた課題

No.	実機適用に向けた課題	対策案	解決フェーズ
1	燃料デブリ性状の把握と許認可及び 乾燥特性データの取得	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプリング分析により、燃料デブリ性状を把握 ・多種多様な被乾燥物に対する乾燥データ(温度分布等を含む)の拡充 ・実機乾燥装置による乾燥特性データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリサンプリングが可能となった時期 ・発生する燃料デブリ対象物が具体化された時期 ・実機運転開始後
2	乾燥処理を考慮した改良収納缶の概念構築, 試作検証	<ul style="list-style-type: none"> ・シール部の高温対策検討(材質選定等) ・改良収納缶の安全・構造設計 ・ユニット缶や収納缶寸法などの構造(仕様)が確定した段階での乾燥解析とチャンバー方式との得失評価 ・温度計測点を含めた乾燥終了判断の検証試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・ユニット缶や収納缶寸法が確定したエンジニアリング段階
3	遠隔操作設備の具体化と検証	<ul style="list-style-type: none"> ・配管接続方法の設計と検証 ・ガスサンプリング方法の具体化 ・遠隔操作による測定精度検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・エンジニアリング段階(汚染区分等の施設安全設計等)
4	乾燥対象スラリー・スラッジ性状の明確化と 保管形態に適した乾燥処理設備設計	<ul style="list-style-type: none"> ・スラリー・スラッジ処理プロセスの設計と保管形態の設定 ・模擬液によるスラリー・スラッジ性状の分析 ・乾燥処理設備の具体化設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・エンジニアリング段階
5	収納缶ベントや安全裕度を考慮した 乾燥目標の再設定	<ul style="list-style-type: none"> ・収納缶ベントの流体計算 ・安全裕度を考慮した水素濃度制限値の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・エンジニアリング段階

参考資料

6. 実施内容

6.4 乾燥技術／システムの開発

(1) 乾燥装置の基本仕様の検討

③ 実施事項、成果(予実)

a. 基本条件の検討(1/2)

イ. 性能要求の整理

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

(目標時間) 受入れ～払出し24hr

(目標含水率) 0.1wt%^{注1}

表 性能要求に対する評価

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

注1: 燃料デブリの密度を前提にした含水率。
試験はゼオライトで行うため、ゼオライトの供試体密度で見直す

2022.11.22追記

要素試験は乾燥対象の密度換算で目標含水率を決める。(No.113参照)

2023.3.8追記

保管を対象とした乾燥の場合はこの限りではなく、さらに低い含水率目標や別方法(ベントや吸着)での水素爆発防止策が必要

参考資料(目標含水率について)
平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金
(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
2020年度最終報告(2021年6月)より抜粋

参考資料(2019~20年度の実施内容:要素試験)
 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金
 (燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
 2020年度最終報告(2021年6月)より抜粋

6. 実施内容

6.4 乾燥技術/システムの開発

(1)乾燥装置の基本仕様の検討

③実施事項、成果(予実) b.乾燥挙動データの採取(2/6)

イ. 要素試験 【試験結果】・温風及び減圧乾燥時の運転パラメータ感度を把握 → 温度、圧力、ガス流速の影響大

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

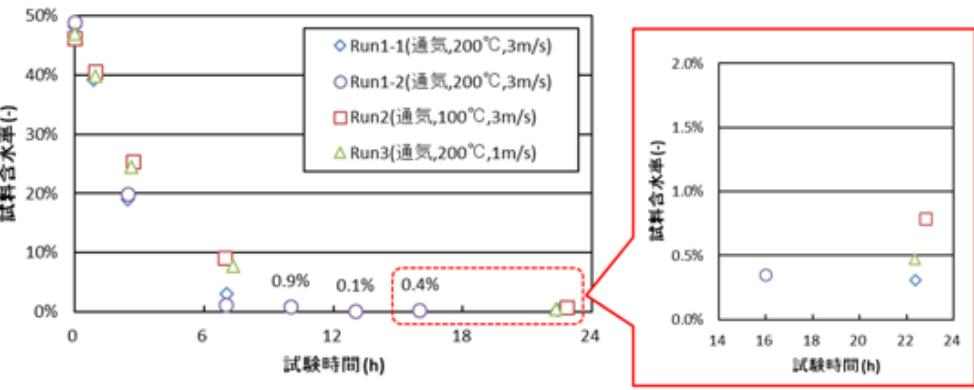


図 温風乾燥要素試験 含水率経時変化

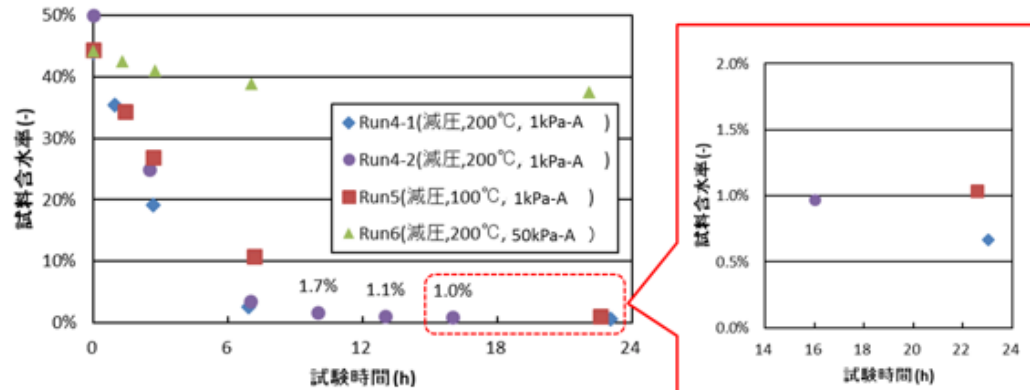


図 減圧乾燥要素試験 含水率経時変化

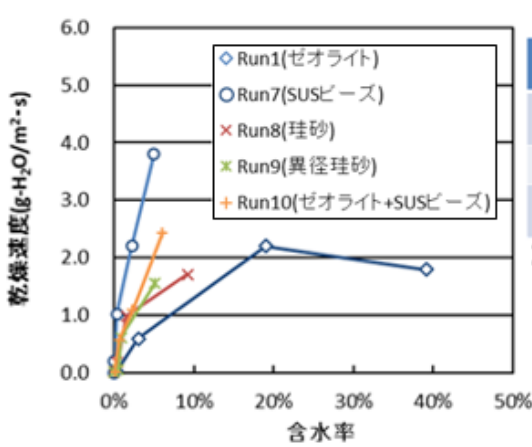


図 被乾燥物の影響評価 乾燥特性曲線

表 被乾燥物物性

被乾燥物	密度 [g/cm ³]	熱伝導率 [W/m·K]	充填率 [%]
ゼオライト ^{*1} (気孔率38%)	1.17	0.09	55
SUSビーズ ^{*2}	7.93	16	62
珪砂	2.7 ^{*3}	1.0 ^{*4}	47(同一粒径) 52(異径混合)

*1: 実測値。*2: 日本ステンレス協会HP参照(<http://www.jssa.gr.jp/contents/>)
 *3: JS Z 8901。*4: 改訂5版 化学便覧(丸善)のノダガラスの値を参照

- 【試験結果】
- ・乾燥挙動には熱伝導率や細孔有無の影響大
 - ・燃料デブリ性状の把握;熱伝導率、細孔径、粒子径など

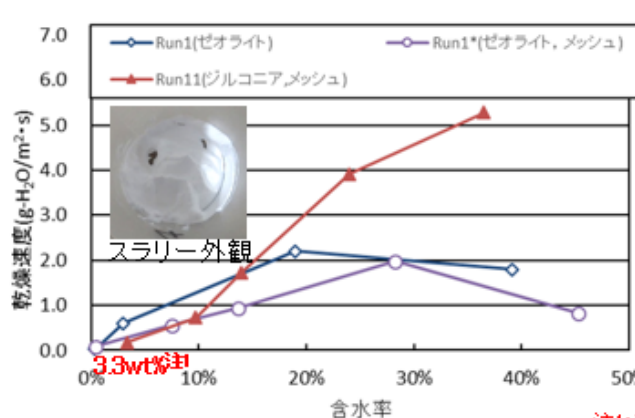


図 スラリー温風乾燥試験 乾燥特性曲線

表 スラリー(ジルコニア)物性

項目	値
材質	ZrO ₂
粒径	0.04 μm
密度	6.0 g/cm ³ ^{*1}
熱伝導率	3 W/m·K ^{*1}
比表面積	14±3m ² /g
SS濃度	70wt%
充填率	27%

注1: 試験時間24H経過時点でのジルコニアメッシュの含水率

【試験結果】低充填率スラリーは乾燥後に粒子間に空気層生成 → 供試体乾燥面の熱伝導性が低下し、乾燥速度が低下

6. 実施内容

6.4 乾燥技術/システムの開発

(1) 乾燥装置の基本仕様の検討

③ 実施事項、成果(予実) b. 乾燥挙動データの採取(3/6)

イ. 要素試験

【評価方法】

- ① 乾燥評価モデルで試験データから有効拡散係数を逆算(De')
- ② 充填層内における水蒸気拡散係数の理論値(De)と比較

○ 評価結果(1/2)

(1) 乾燥期間の前半; $De'/De > 1$

- ・水蒸気拡散よりも速い乾燥速度
- ・液状水の表面側への移動により乾燥促進と推察(モデル上、拡散係数が大きく算定)

(2) 乾燥期間の後半; $De'/De < 1$

- ・細孔部の乾燥速度が遅いためと推察(細孔のないSUSビーズではその傾向なし)
- ・減圧乾燥で顕著

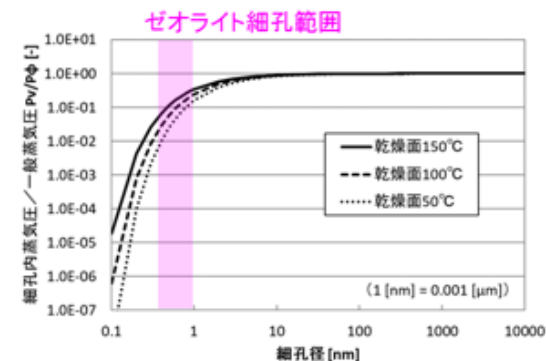


図 細孔径と蒸気圧の関係

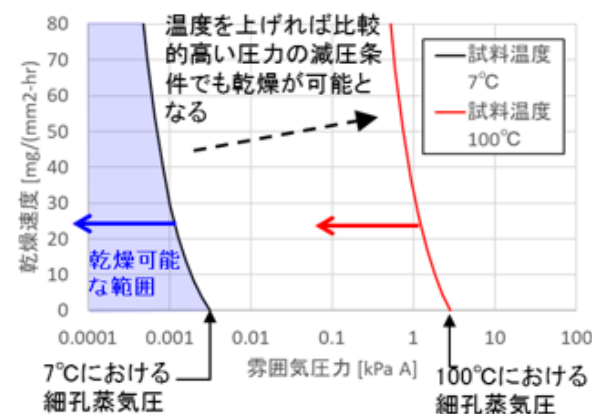
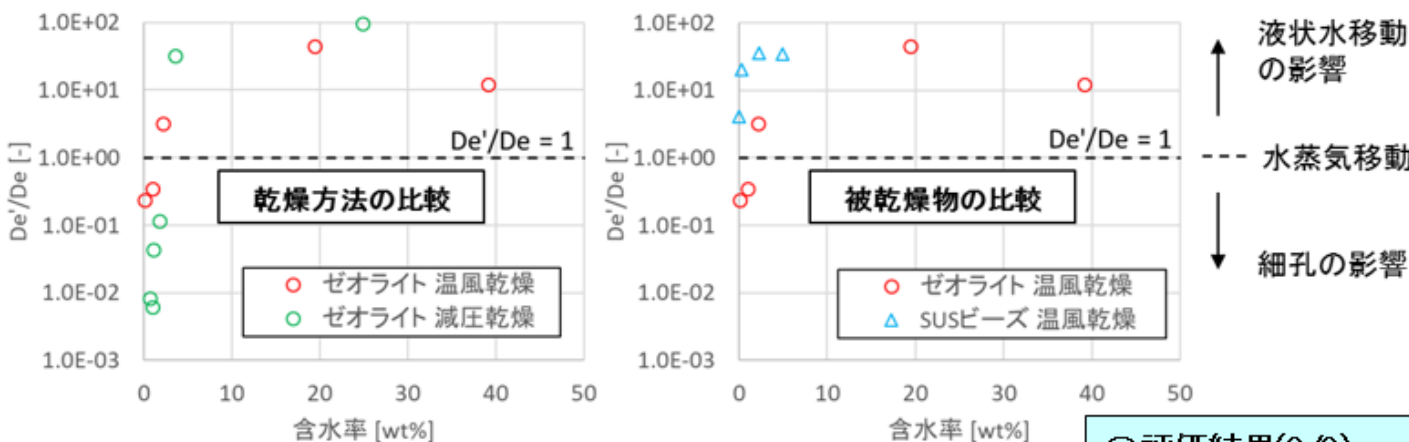


図 減圧乾燥における
雰囲気圧力と乾燥速度の関係

○ 評価結果(2/2)

- ・細孔径0.4~1nmのでは、蒸気圧が1/100~1/10程度
- ・低温の1kPaA(乾燥面7°C程度)では細孔内の乾燥不可
- ・試料温度を十分高くとした上で減圧する処理方法が効率的

図 要素試験の有効拡散係数の算定結果



6. 実施内容

6.4 乾燥技術／システムの開発

(1) 乾燥装置の基本仕様の検討

③ 実施事項、成果(予実)

b. 乾燥挙動データの採取(6/6)

ハ. 取扱い性/乾燥挙動データの採取

参考資料(2019~20年度の実施内容:実規模試験)
平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金
(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」
2020年度最終報告(2021年6月)より抜粋

表 実規模試験結果

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

注1:含水率=含水量(g)/絶乾重量(g)

試験での絶乾重量は約16kg(UC4缶の合計、充填率100%の場合)

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

注2:充填高さ85%で乾燥時間も約85%となっている。

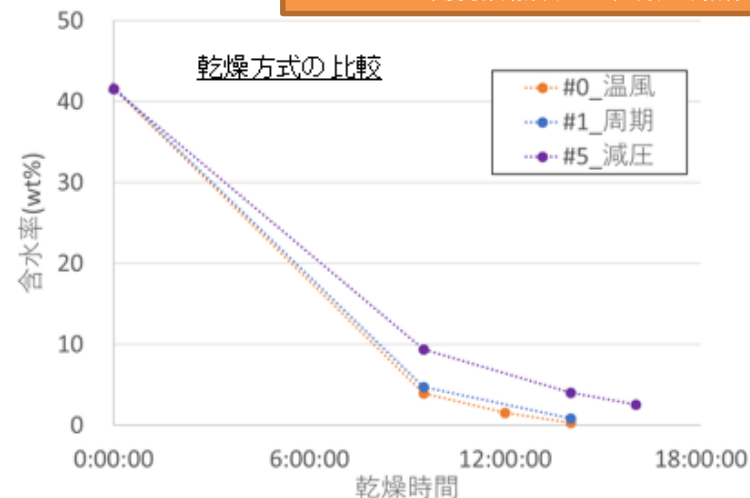


図 乾燥方式による含水率経時変化の比較

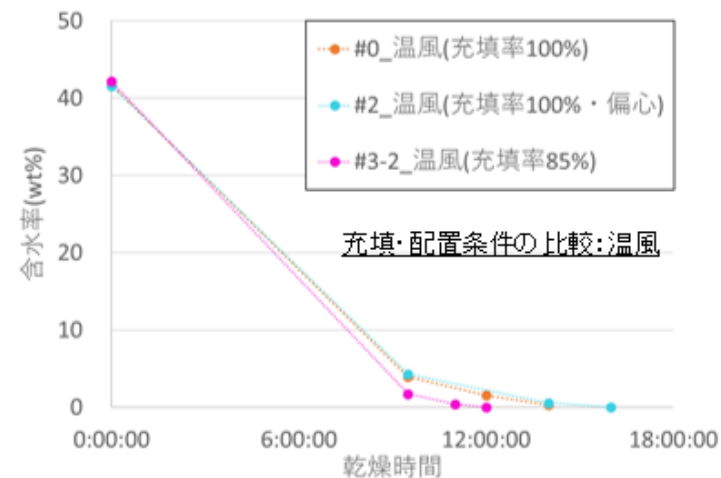


図 温風乾燥における
充填・配置条件による含水率経時変化の比較

試料	本プロジェクトでの 絶乾重量の定義	絶乾測定方法
ゼオライト	300°C加熱で所定時間 ^{注1} 以上保持した時の重量	試験で使用する試料を300°Cで所定時間 ^{注1} 以上加熱し、簡易隔離冷却 ^{注2} 後に重量測定
スラリー・スラッジ (珪砂)		
コンクリート		
スラリー・スラッジ (凝集剤)	試験条件温度での生成物理論値	試験でを使用した試薬量から生成物の理論値を算出 (200°C: $\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{Na}_2(\text{SO}_4)$, 300°C: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2(\text{SO}_4)$)

注1: ビーカースケールでの要素試験, 実規模試験では5時間。物性測定のうちTG/DTA-MSでは1時間。

注2: 簡易隔離冷却: 通気口にシリカゲル等の乾燥剤を設置した隔離容器内での冷却

- 到達含水率
ある時点まで乾燥した時に測定した含水率。
乾燥運転時間を決めてその時間でデータ取得を切り上げた場合や、目標含水率以下であることを確認してデータ取得を切り上げた場合は到達含水率が取得データとなる。
- 乾燥終点(平衡状態)
これ以上乾燥処理を続けても含水率が下がらない状態。
- 平衡含水率
乾燥終点(平衡状態)での含水率。
終点達成を確認してデータ取得を切り上げた場合は平衡含水率が取得データとなる。
- 含水率
含水重量と絶乾重量(No.111)の比
含水率[wt%] = 含水重量[kg] / 絶乾重量[kg] × 100

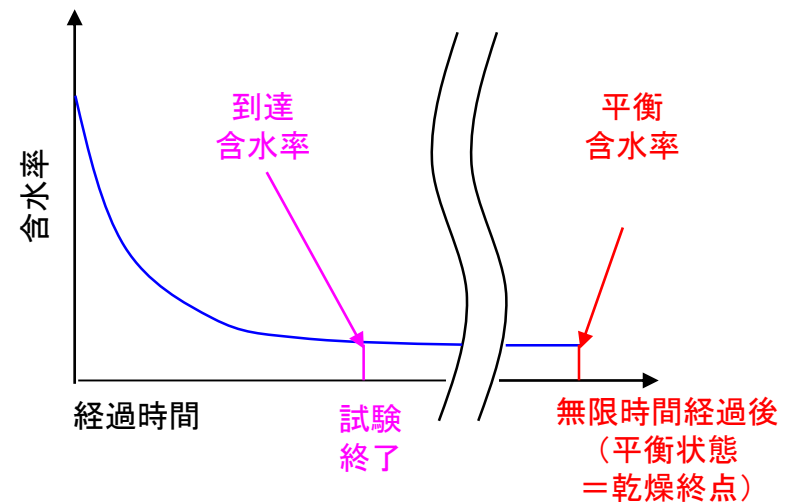


図 到達含水率と平衡含水率のイメージ(No.40再掲)

• 目標含水率

移送期間7日間で収納缶内の水素濃度が爆発下限(4vol%)となる含水率(1.5wt%)に対して余裕を見込み、設定された含水率。燃料デブリ比重で0.1wt%であり、本事業では対象物の比重で換算(小数点以下2桁で四捨五入^{注1)}し、試料毎に設定する。

試料Aの目標含水率[wt%] = 燃料デブリ目標含水率(0.1wt%) × 燃料デブリ比重(5.32) / 試料Aの比重

表 各試料の目標含水率

試料	目標含水率	比重	備考
ゼオライト	0.3wt%	1.88	<ul style="list-style-type: none"> 2019～2020年度に実測した真比重
珪砂	0.2wt%	2.66	<ul style="list-style-type: none"> 石英(SiO₂)真比重を代表とする 伝熱工学資料改訂第5版, p287
凝集剤生成物 (Al(OH) ₃ , Na ₂ (SO ₄))	0.2wt%	2.62	<ul style="list-style-type: none"> Al(OH)₃真比重: 2.42 Na₂(SO₄)真比重: 2.68 Al(OH)₃:Na₂(SO₄)=21:79(理論上の生成重量比) 一般的な試薬のSDS(富士フイルム和光純薬(株)公開データで代表)記載の真比重
コンクリート	0.2wt%	2.23	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所工事報告書の組成で作製した試験体の実測値(嵩比重^{注2)})
硬化セメント	0.3wt%	1.73	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所工事報告書の組成に対して骨材無条件で作製した試験体の実測値(嵩比重^{注2)})
フィルタ	0.3wt%	1.88	<ul style="list-style-type: none"> 堆積物としてゼオライトを仮定
燃料デブリ	0.1wt%	5.32	<ul style="list-style-type: none"> 平成28年度収納缶PJ報告書より1～3号機の平均真比重

注1: 燃料デブリの目標含水率は必要条件の1/10以下となる十分な余裕を見込んで設定していることから、四捨五入で丸める。

注2: 実測値である嵩比重を代表とする。真比重で換算した場合でも、燃料デブリ目標含水率の余裕代に含まれる。

水処理PJからのインプット情報より、試験対象のスラリー・スラッジを選定。
 なお、中間・最終処理廃液由来のスラリー・スラッジについての考察をNo.120にて実施した。

廃炉・汚染水対策事業費補助金「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）」
 2021年度実施分成果
 (2022年8月)公開資料より抜粋

スラッジ回収システム系統構成

非溶解性核種除去設備およびRO膜設備より発生する廃液から固形成分を回収する

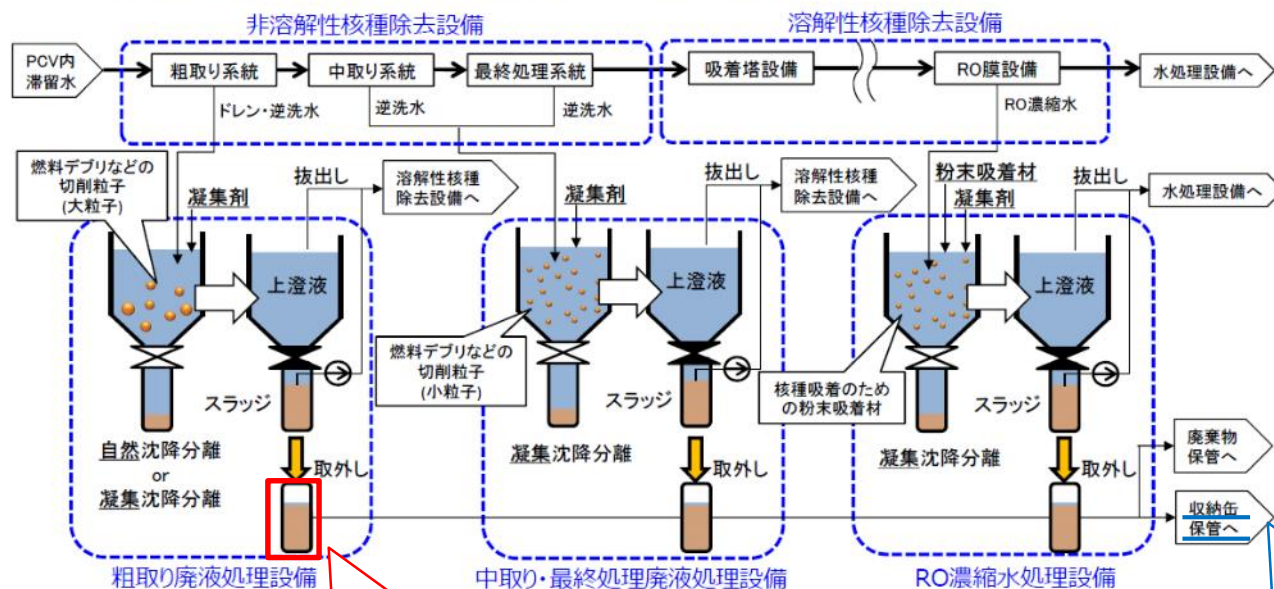


図 スラッジ回収システムの系統構成概念

燃料デブリの大粒子が含まれる粗取り廃液処理設備由来のスラリー・スラッジを代表として選定。

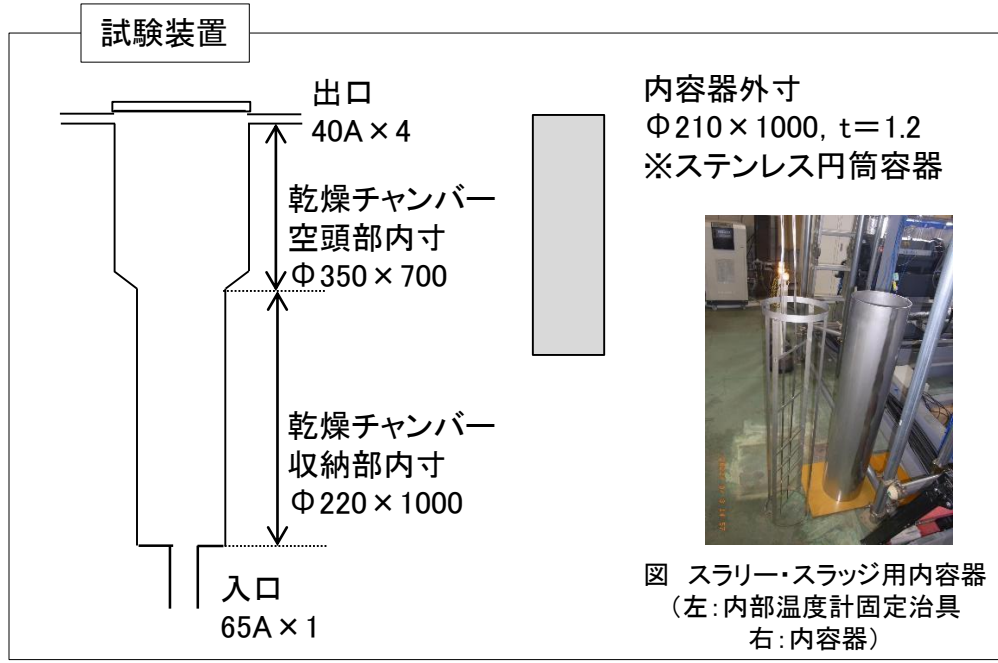
スラリー・スラッジは容器に入った状態で収納缶保管されることを想定。

表 粗取り廃液処理設備におけるシステム要件 (2022年検討にて一部見直しあり)

No.	項目	粗取り廃液処理設備
1	処理対象水	粗取り機器より発生するドレン水・逆洗水
2	含有粒子成分 (凝集沈降対象)	熔融燃料、炉心構造物、コンクリート成分、その他固形分 (粒径100~数十μm)
3	粒子濃度	数千~10000 ppm フィルタ要素試験結果より
4	処理流量	間欠ドレン: 100 m ³ /year 常時ドレン: 1300 m ³ /year フィルタ要素試験結果より
5	処理流量要求	間欠ドレン: 1.0 m ³ /day以上 常時ドレン: 8.2 m ³ /day以上 設備稼働率80%で処理可能とするための流量

乾燥チャンバー

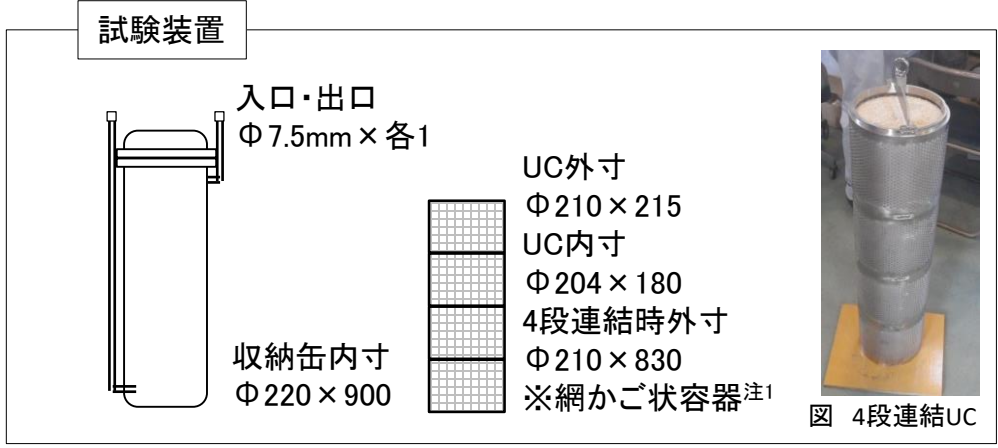
- 6.1 要素試験（スラリー・スラッジ乾燥試験）
- 6.2 実規模試験（一部のデータ（収納缶との比較用データ））



収納缶

注1：目開き約0.1mmの180mesh平織金網（開口率40.8%）と補強用パンチングメタル（開口率50.1%）の組み合わせ

- 6.2 実規模試験



試料

注2：30分以上で規定。試験では半日以上浸水

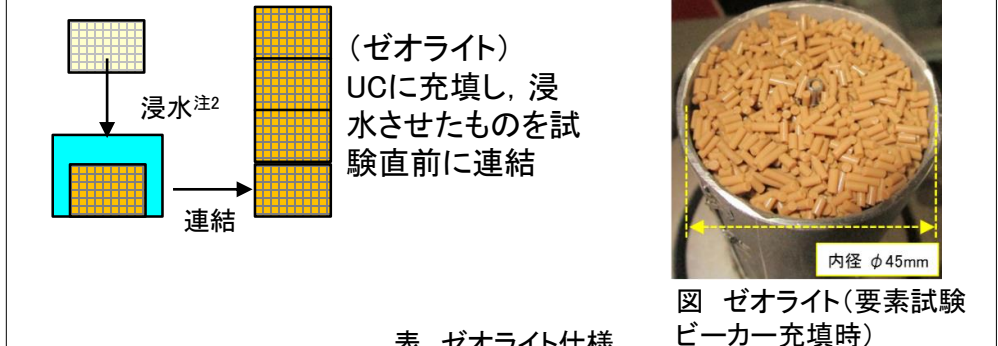
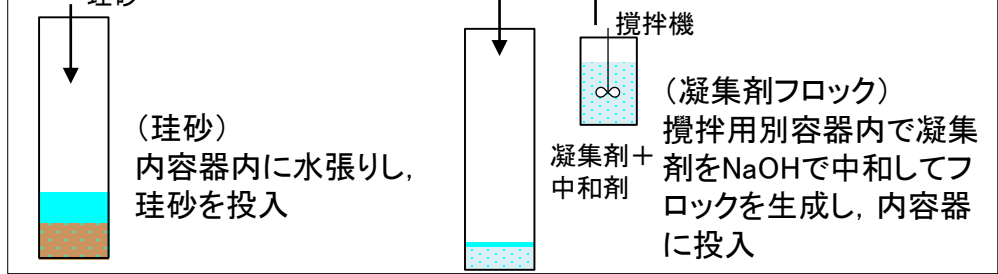


表 ゼオライト仕様

要目・物性		備考
特徴	ハイシリカゼオライト	
寸法・形状	1.6mm × 2～5mm柱状ペレット	
真密度	1.88 g/cm ³	2019～2020補助事業での物性測定値
気孔率	38%	

試料（充填方法）

※2層化試験は珪砂充填後に凝集剤フロックを注ぎ込む



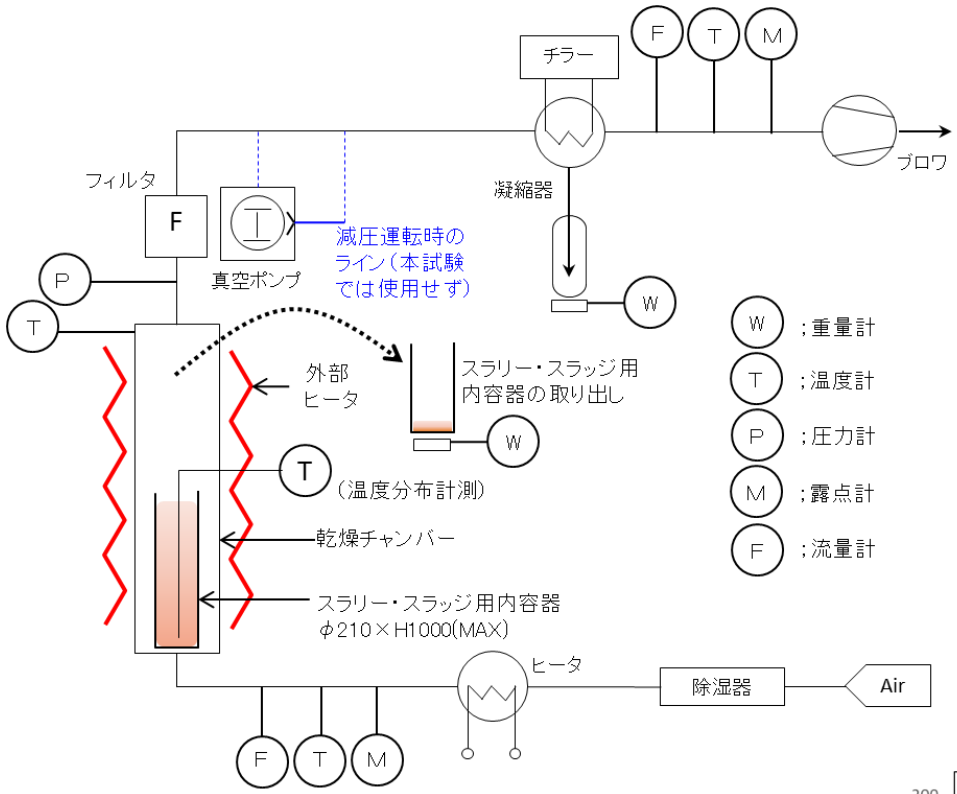


図 実規模乾燥試験装置 簡易系統図 (No.27)

乾燥試験手順(温度計測)

- ① 乾燥チャンバーに容器を設置する。
- ② ヒータ制御値(200℃/300℃)を設定し、チャンバーヒータ・エアヒータを起動する(乾燥開始)。
- ③ すべての温度計測点が一固定になったら乾燥チャンバーから容器を取り出して重量を測定する。運転時間が長時間化する場合は、すべての温度計測点が100℃を超えていれば試験完了とする。

乾燥試験手順(重量計測)

- ① 温度計測試験結果から、各計測点での100℃超となる時間や温度一定となる時間を確認し、重量計測時間を決定する。
 - ② 温度計測試験①②と同様に乾燥を開始する。
 - ③ ①で決めた時間になったらヒータ・温風供給を停止し、チャンバーから容器を取り出して重量を計測する。
 - ④ 容器をチャンバーに戻し、再度ヒータを起動・温風供給を再開して乾燥再開する。
 - ⑤ ①で決めた重量計測がすべて完了したら試験終了とする。
- ※ガス流量・温度・露点、凝縮器ドレン回収量などは常時計測

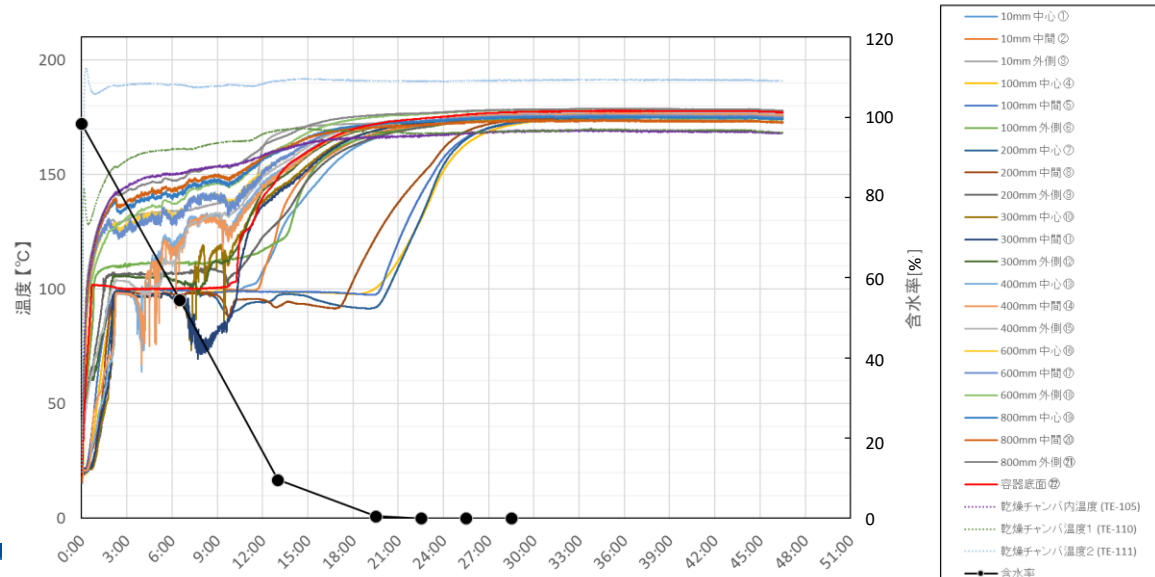


図 スラリー・スラッジ取得データ例(珪砂+凝集剤)

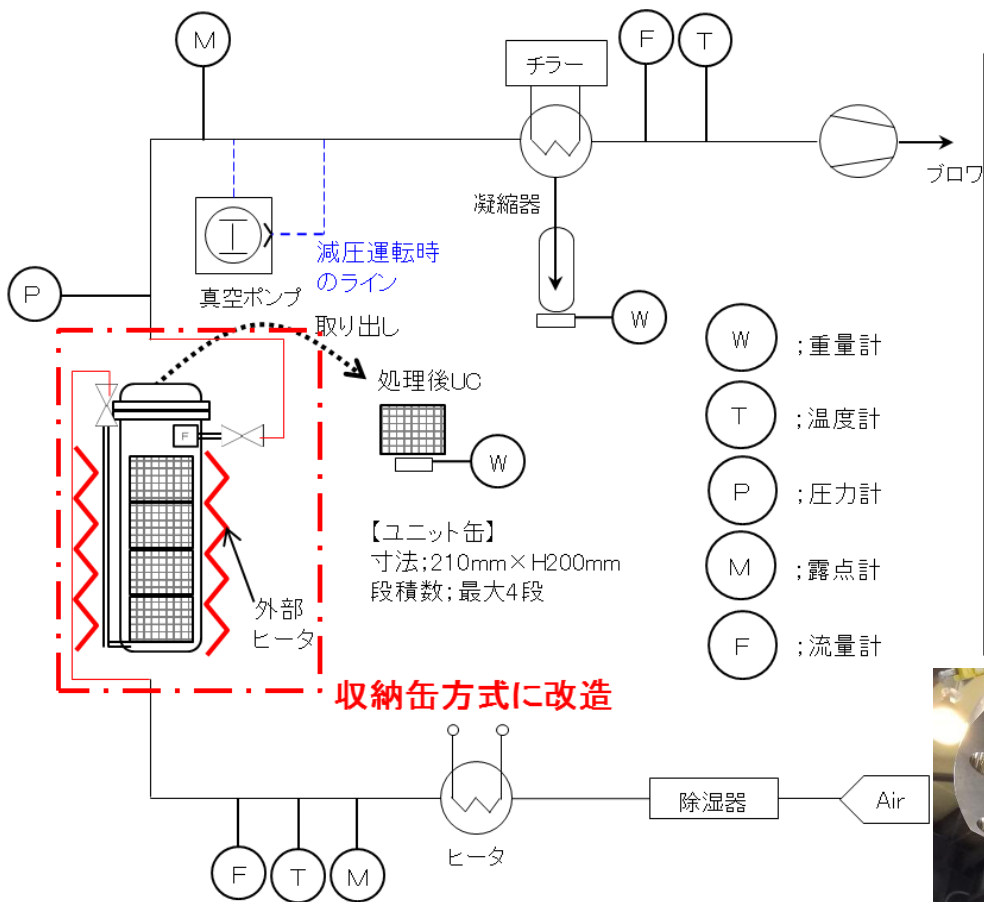


図 実規模乾燥試験装置 簡易系統図 (No.70)

- 乾燥試験手順** 注1:ゼオライト内部温度トレンドや2019~2020年度データ等から決定
- ① 収納缶蓋にゼオライト内部温度参考測定用の熱電対を取り付ける。
 - ② 収納缶にUCを設置する。
 - ③ ヒータ制御値(200°C/300°C)を設定し、収納缶ヒータ・エアヒータを起動する(乾燥開始)。
 - ④ 所定時間^{注1}になったらヒータ・温風供給を停止し、収納缶からUCを取り出して重量を計測する。
 - ⑤ UCを収納缶に戻し、再度ヒータを起動・温風供給を再開して乾燥再開する。
 - ⑥ 周期運転(減圧乾燥に切替)の場合は、温風供給を停止・真空ポンプを起動する。温風乾燥に再切替するときは、真空ポンプを停止・エアヒータ起動・温風供給再開とする。なお真空ポンプは圧力制御(1kPa)である。
 - ⑦ 含水率0.3wt%以下となる、あるいは予定した計測がすべて完了したら試験終了とする。
- ※ガス流量・温度・露点、凝縮器ドレン回収量などは常時計測



図 収納缶蓋・熱電対

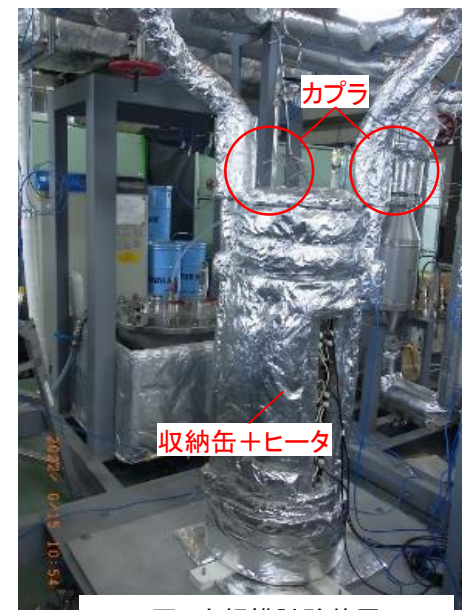


図 実規模試験装置 (収納缶周辺)

参考：要素試験要領(コンクリート)

◇コンクリート原料(No.32)

- ・セメント: 普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)
- ・細骨材: 砂(粗粒率: 2.5~2.9)
- ・粗骨材: 砂利(粗粒率: 6.2~6.6)
- ・化学混和剤: 減水剤, AE剤等
(JIS A 6204に準拠し選定)

表 コンクリート 調製条件(No.33)

Run	水 /セメント比	骨材 /セメント比	細骨材 /総骨材比	AE剤 /セメント比
	[wt%]	[-]	[wt%]	[wt%]
1	55	5.4	44	0.03
2	45	〃	〃	〃
3	70	〃	〃	〃
4	55	3.0	〃	〃
5	〃	6.0	〃	〃
6	〃	5.4	60	〃
7	〃	〃	30	〃
A	55	0	—	—
B	40	0	—	—
C	70	0	—	—

○コンクリート試料作製

- 1) 単位セメント量330kg/m³を基準に、各原料を右下表に示す条件にて秤量する。
- 2) 混練機に材料を投入し、低速(約130rpm)で60秒練り混ぜる。
- 3) 30秒間休止し、休止中にさじで練鉢及びパドルに付着した混練物を掻き落とす。
- 4) 高速(約200rpm)で90秒練り混ぜる。
- 5) 練鉢を外してモールドに混練物を充填する。
- 6) 混練物充填時は突き棒で突きながら、モールドに振動を与え、空気の混入を防ぐ。
- 7) 上端よりはみ出した混練物を取り除き、表面をならす。
- 8) ラップで開放部を覆い、ビニールテープで止める。
- 9) 大気雰囲気中で28日間放置する。
- 10) 開缶後、破碎機により破碎し、所定の粒径に分級する。



混練時



モールド充填



養生後



開缶時



破碎機



分級後

○乾燥試験手順

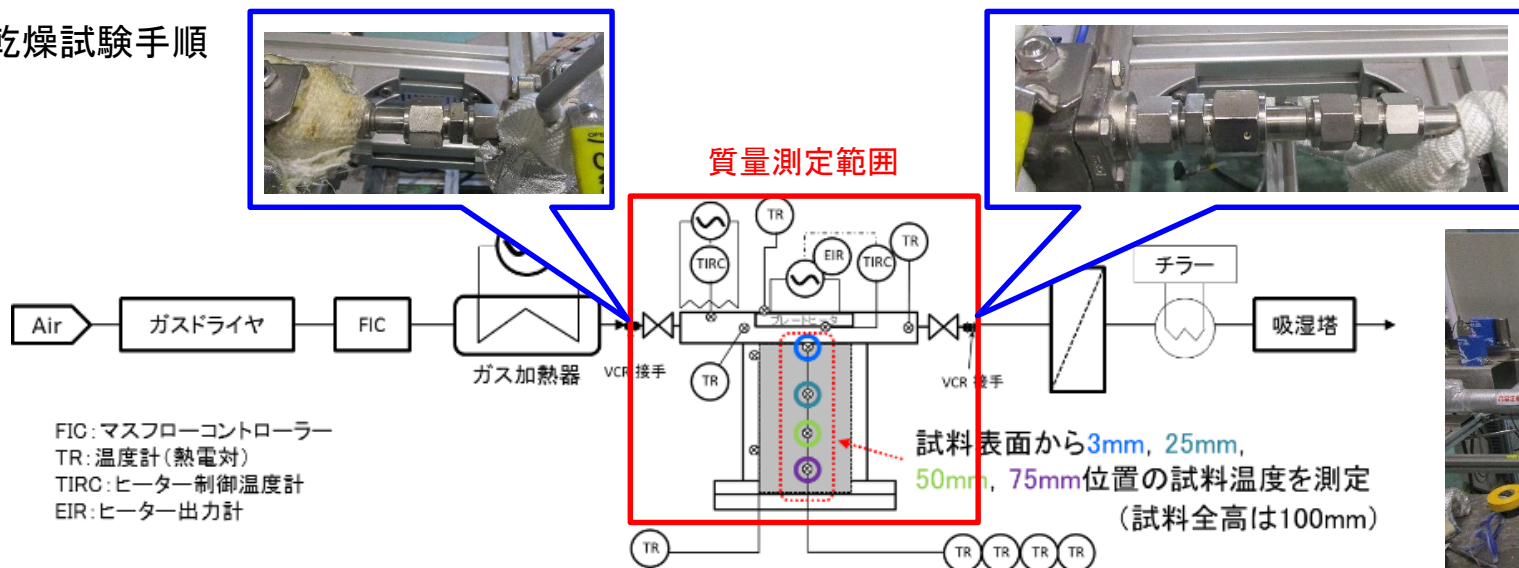


図 温風乾燥要素試験装置 簡略系統図 (No.37)



図 試験装置外観

- 1) 乾燥容器内筒に吸湿させたコンクリートを充填する。
- 2) 内筒と外筒を組立て、内外筒の質量を測定する。
- 3) 乾燥容器をVCR継手(上図青枠)にて系統に接続する。
- 4) 温度センサ及び圧力計のコードを接続する。
- 5) 所定時間経過後、温度センサのコネクタを取り外し、VCR継手にて乾燥容器を取り外す。
- 6) 乾燥容器の質量を測定する。
- 7) 再度、乾燥容器をVCR継手にて系統に接続し、温度センサのコネクタを接続する。
- 8) 試験終了まで、5)~7)を繰り返す。

○絶乾質量測定手順

- 1) 秤量瓶の質量を測定する。
- 2) 試料を秤量瓶に入れて秤量する。
- 3) 秤量瓶の蓋を外して、300°C・乾燥空気雰囲気にて、5h以上乾燥する。
- 4) 乾燥後の試料に対して、蓋を外した状態でデシケーター内にて放冷する。
- 5) 放冷後、蓋をして質量を測定する。

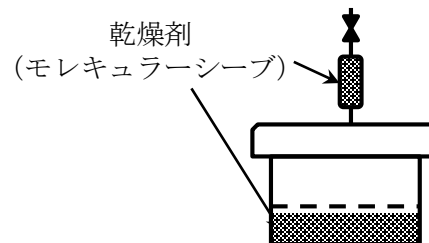


図 デシケータイメージ図

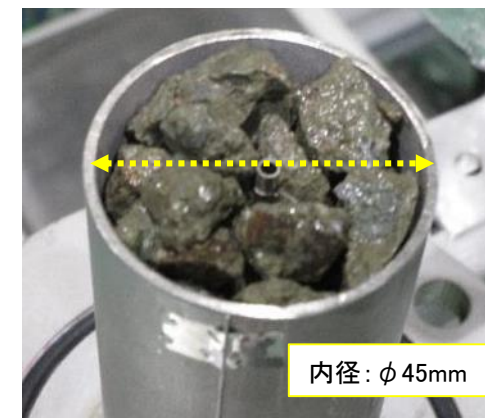
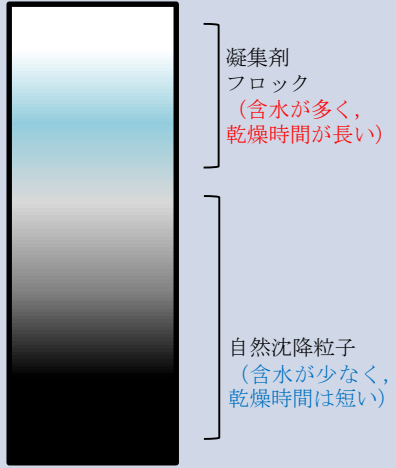
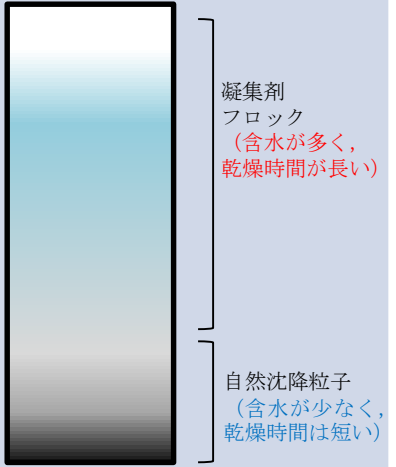


図 含水試料充填時の容器外観 (No.37)

参考: さらに小粒径のスラリー・スラッジ(中取り・最終処理廃液由来)の考察

表 粗取り, 中取り・最終処理廃液由来のスラリー・スラッジの特徴比較

項目	粗取り廃液	中取り・最終廃液
充填状態イメージ図	 <p>凝集剤フロック (含水が多く, 乾燥時間が長い)</p> <p>自然沈降粒子 (含水が少なく, 乾燥時間は短い)</p>	 <p>凝集剤フロック (含水が多く, 乾燥時間が長い)</p> <p>自然沈降粒子 (含水が少なく, 乾燥時間は短い)</p>
粒子成分	燃料デブリ, 炉心構造材, コンクリート, 凝集沈殿材等	
粒子径	50~100 μ m	0.1~50 μ m
粒子濃度	約10wt%(粒子重量/全重量) ただし燃料デブリなどの比重の大きな粒子比率にもよる	
想定充填状態	<ul style="list-style-type: none"> 上層: 凝集剤フロック 下層: 自然沈降による粒径や比重の大きな粒子 自然沈降粒子が比較的多い 	<ul style="list-style-type: none"> 上層: 凝集剤フロック 下層: 自然沈降による粒径や比重の大きな粒子 凝集剤フロックが比較的多い

- さらに小粒径のスラリー・スラッジの場合, 自然沈降粒子が減り, 凝集剤フロック成分が増える。
- 試験では, 同じ充填高さの場合, 珪砂単体<2層化<凝集剤フロックの順に乾燥時間が長くなることから, 小粒径のスラリー・スラッジの乾燥時間は試験で確認した乾燥時間以上となる可能性が高い。(初期含水が増えることで乾燥時間が長くなる)
- 粒子層で考えると, 小粒径の方が密に充填されることで, 蒸気パスが形成されにくくなり, 蒸発抵抗となることから, さらに乾燥時間が長くなる可能性もある。