

**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）」**

2021年度中間報告

2022年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

目次

1. 研究の背景・目的
 2. 目標
 3. 実施項目とその関連、他研究との関連
 4. 実施スケジュール
 5. 実施体制図
 6. 実施内容
 - 6.1 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補助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法が合理的であり、本補助事業では、これを実現するため、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。

横取り出し工法のハンドリングフロー例

原子炉内 → アクセストンネル → 燃料デブリ処理セル

No.4

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(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	収納缶	エア	封缶セル	検討(6.2)/仕立てセルで閉じ込める(ガスは管理放出)	検討(6.2)/移送容器で閉じ込める(ガスは管理放出)
	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)			
遮蔽		封缶セルでの遮蔽	仕立てセルでの遮蔽	移送容器での遮蔽	
構造		最大9mの落下/移送容器内での収納缶落下による損傷に対して安全機能を維持するための検討(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	移送容器に収納できる	
収納作業性の向上		収納缶内径を拡大し収納作業効率化する	なし		

粒状、塊状燃料デブリの取り扱いプロセス

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、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。

実施内容

※ “なお“書き以降に関しては、3.2項で検討

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、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。

実施内容

※ “なお“書き以降に関しては、3.2項で検討

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)補助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(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

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: 補助事業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】

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

②乾燥装置概念の具体化

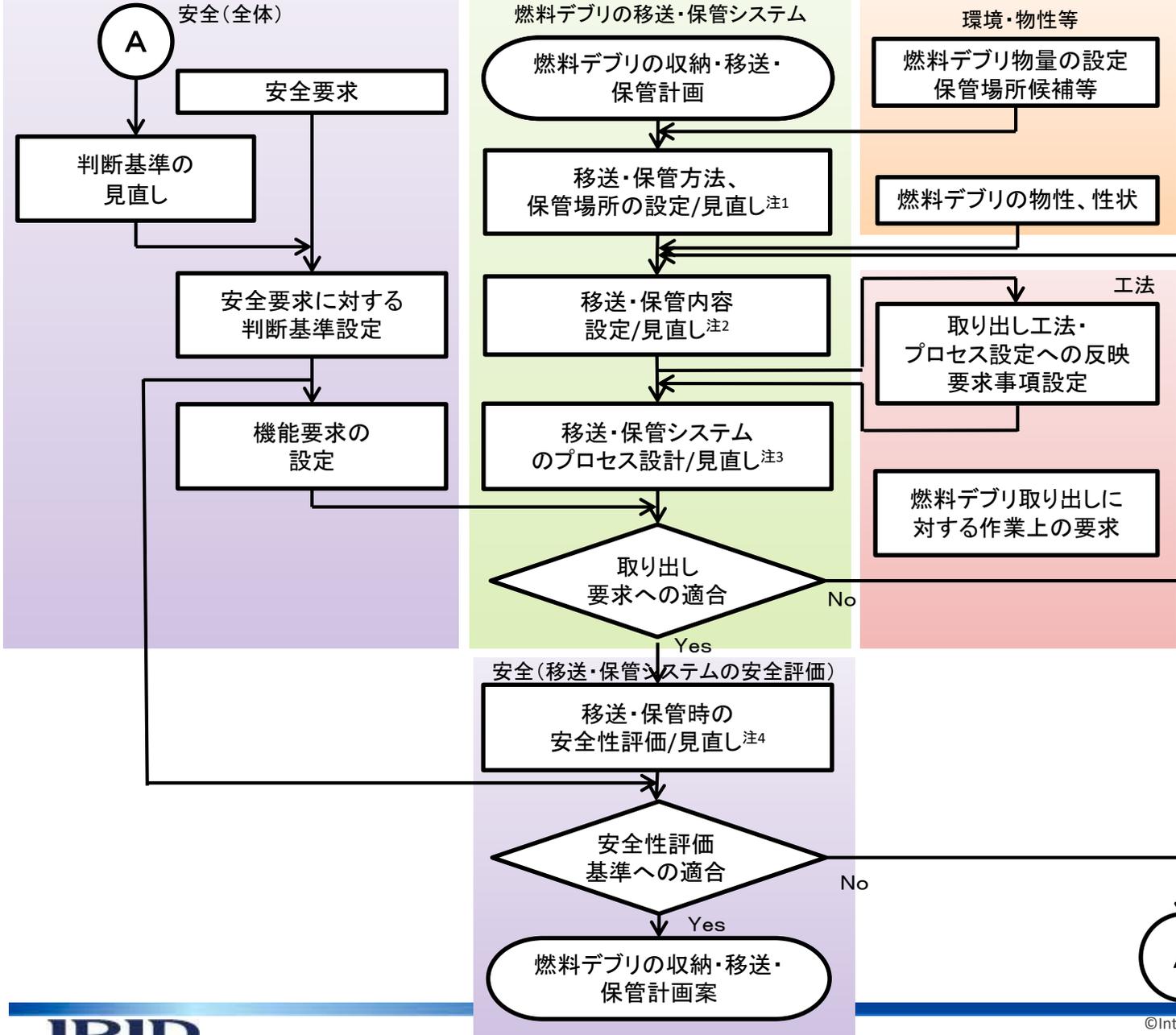
収納缶形態での乾燥装置概念を検討し、最適な運転条件を具体化すると共に、収納缶を用いた場合について、3.2①項の試験結果を踏まえ、チャンバーを用いた場合と比較し、乾燥時間や安全要求他の観点からの得失の評価を行う。また、基本的には複数同時乾燥は実工事段階で系列数を増やすことで対応可能であるが、本検討では適用に当たっての検討課題について整理する。さらに、乾燥処理の観点から収納缶仕様への要求事項(要望)^{注1}をまとめる。

【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1: 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



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

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.3 実施項目間の関連

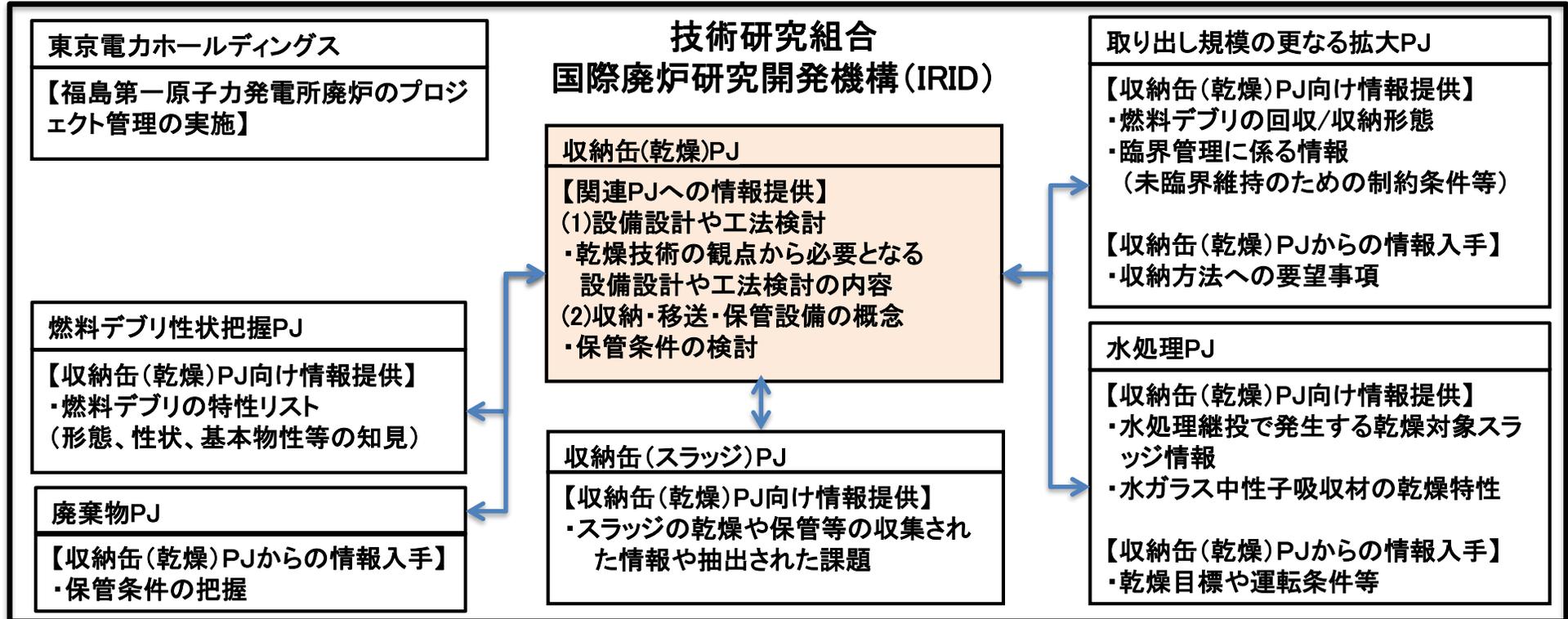
(目標工程)B3④:燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



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



注記) 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

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

4. 実施スケジュール

	2021年度												2022年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	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																								
(1)乾燥対象物の種類・データ拡充																								
①試験計画の検討																								
②要素試験によるデータ拡充																								
(2)乾燥方式の適用性検討																								
①乾燥方式の適用性																								
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																								
①試験計画の検討																								
②試験用収納缶の設計・製作 実規模試験装置の設計・改造																								
③実規模試験によるデータ拡充																								
(2)乾燥装置概念の具体化																								
①装置概念の具体化																								
3.進捗報告等																								

■ 計画

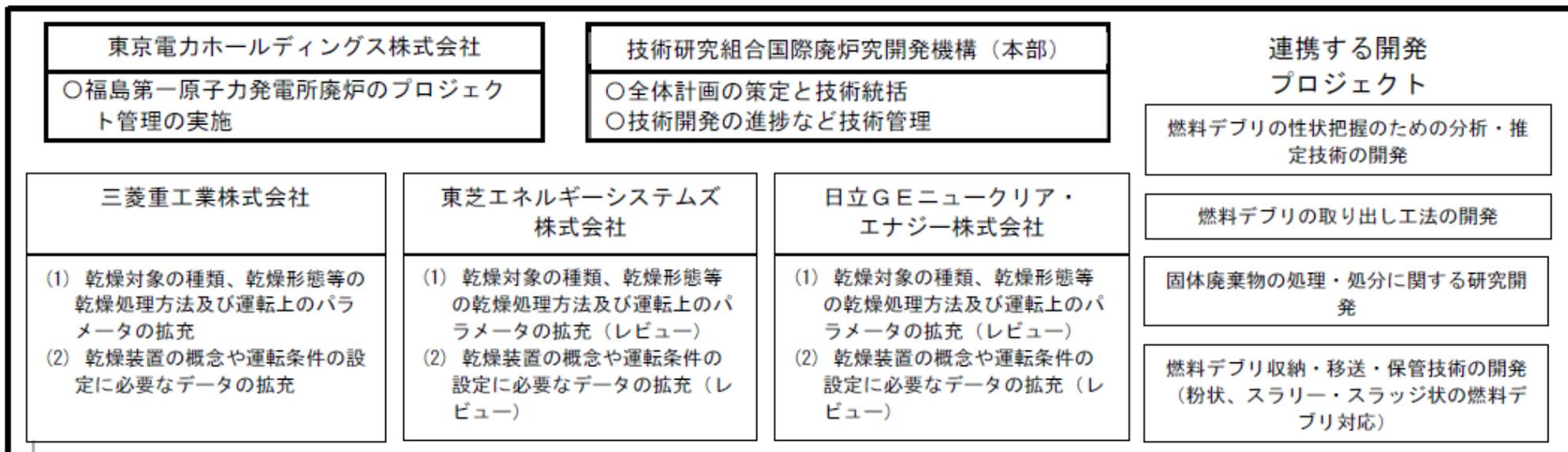
■ 実績

※交付決定
(5/14)



5. 実施体制図

(2022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

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

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」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実規模乾燥試験」を「実規模試験」と称して結果を整理する。

6.1 要素試験

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%
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)

① 目的、目標

2019・20年度 要素試験(ビーカスケール試験^{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24hrで**3.3wt%**^{注2}まで乾燥
(乾燥には長い時間が必要)

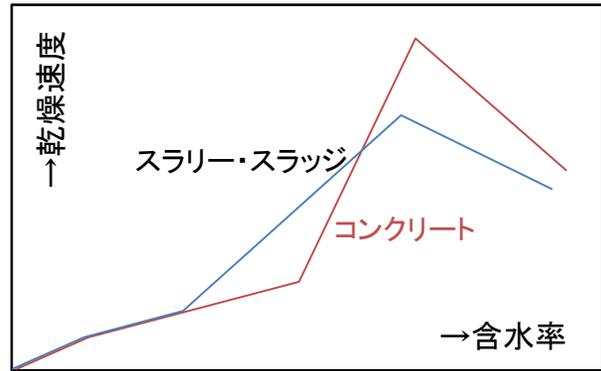
狙い: 乾燥処理の適用範囲を明確化



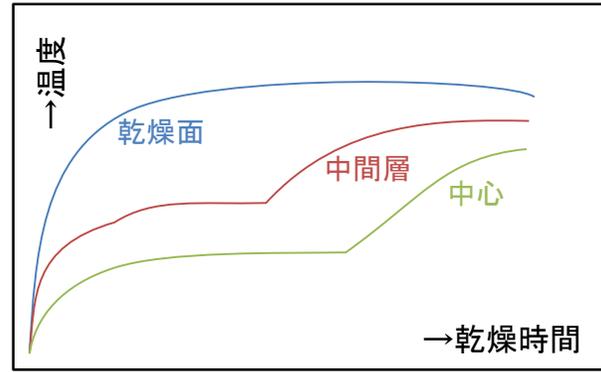
(試験目的) 難乾燥物や水和物を含む種類に対する乾燥処理の適用性を確認

(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



取得データイメージ① 乾燥特性曲線



取得データイメージ② 内部温度分布

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。

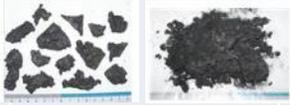
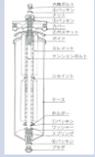
注1: 2020年度までに1条件取得済、2021~2022年度で水処理PJからのインプットに基づいてデータ拡充予定

6.1要素試験

③実施事項、成果

(1)試験計画の検討:乾燥対象物(1/2)

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	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材		溶融せず残存した構造物に燃料デブリが付着したもの		○	○	—	—
スラリー・スラッジ	水処理システム	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	ガス処理システム	乾燥燃料デブリ粉が付着したフィルタ		—	—	未	—

6.1 要素試験

③ 実施事項、成果

(1) 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

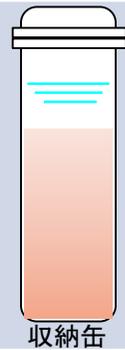
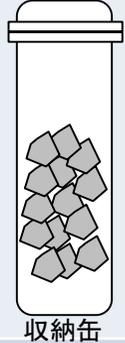
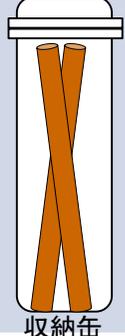
② 想定される乾燥処理前の状態

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

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

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(2)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有する種類に対する乾燥処理の適用性を確認

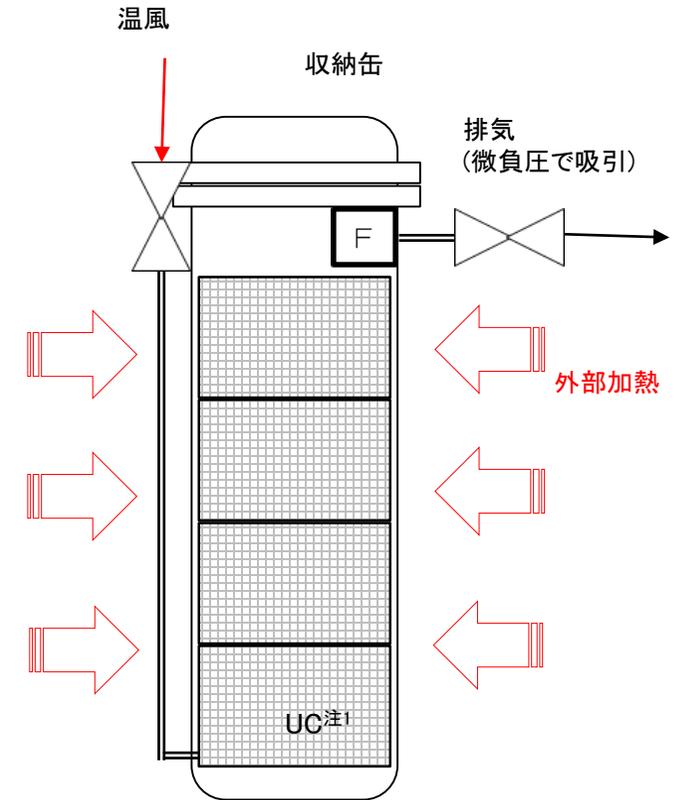
(効果)

- ① 乾燥可能な処理対象物の種類具体化
- ② 代替水素対策案



【試験方針】

- i. 難乾燥物に対する現状の処理概念の適用範囲を確認(24hr(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



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)

注1: 「UC」とは、ユニット缶のこと。

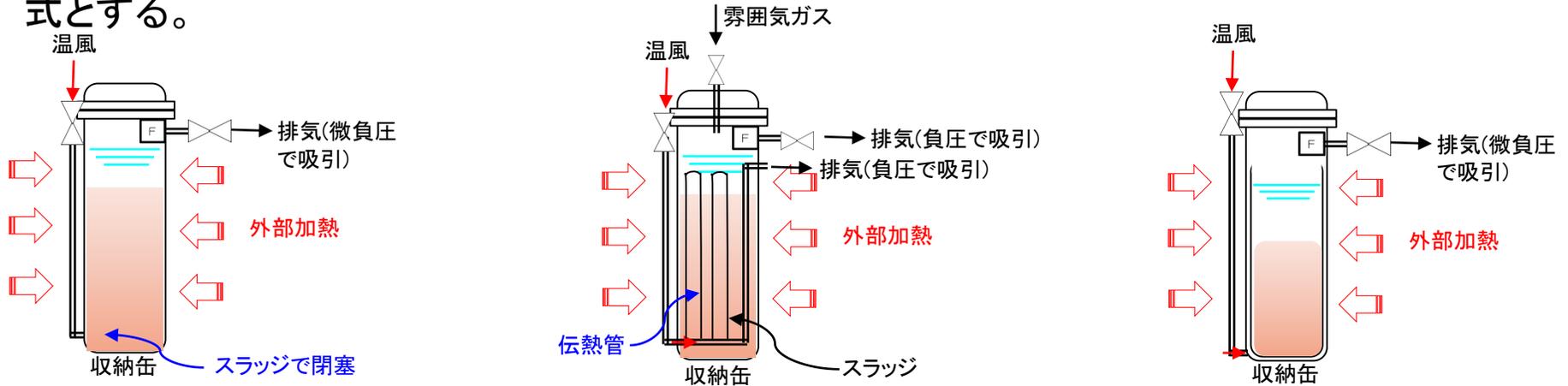
注2: 乾燥チャンバーでの乾燥の場合は収納缶を乾燥チャンバーに置き換える。

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(3)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】

1. 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
2. 給気口はスラッジにより閉塞し、通気処理出来ない可能性が高い

⇒ × (適用不可)

【案② 伝熱管追加】

1. 伝熱管およびノズルを追加
2. 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】

1. 容器本体を二重化し、内容器にスラッジ充填
2. 配管閉塞リスクは大幅低減

⇒ ○ (適用可)

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(3)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。(図1)
- 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。(図2)

<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。(図3)

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。

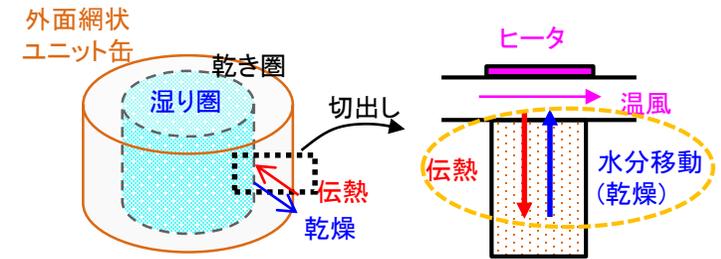


図1 ビーカスケール試験

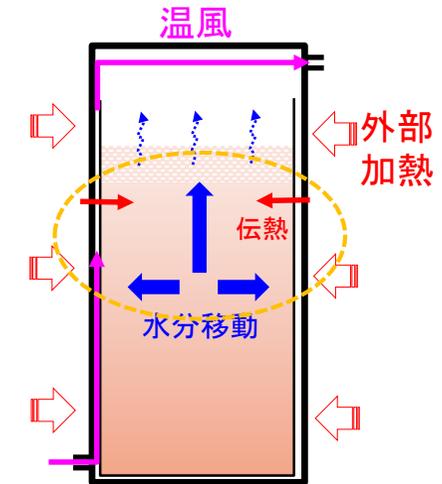


図2 スラリー・スラッジ乾燥

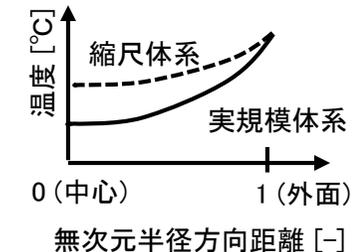


図3 縮尺・実規模体系の温度分布模式図

6.1 要素試験

③実施事項、成果

注1: No.20図参照。

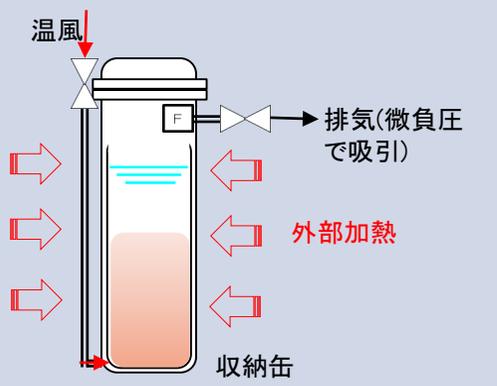
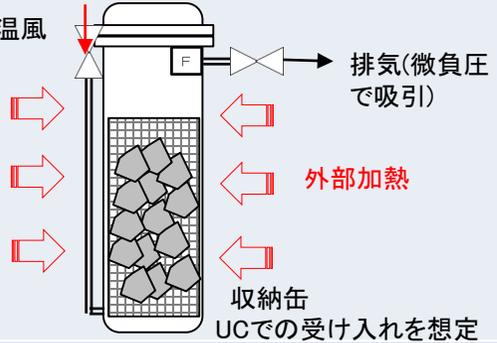
No.23

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: 燃料デブリ換算で0.1wt%

(3)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。

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	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	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}
フィルター材	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ー材の乾燥可否、乾燥可能な種類を確認	解析結果

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(4) 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(ヒーター表面温度)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。

○処理条件

- ・ 乾燥方式: 側面ヒーター+温風加熱
- ・ ヒーター表面/温風温度: 200°C、300°C
- ・ 充填高さ: 200mm以上(飛散状況を見て高さ影響確認試験条件は調整)

○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: 10~100 μ m

表 試験条件案

スラリー・スラッジ材料	粒子粒径 [μ m]	充填高さ [mmH]	ヒーター表面/ 温風温度[°C]	ヒータ出力 [kW]	流速 ^{注4} [m/s] (流量[Nm ³ /h])
珪砂	10~100	200/400	200	~10	3(37)
Al ₂ (SO ₄) ₃	—	200/400	200	~10	3(37)
珪砂+Al ₂ (SO ₄) ₃	—	400	200	~10	3(37)
代表1条件 ^{注3}	—	200	300	~10	3(37)

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

注2: 水処理PJ要素試験での模擬スラリー・スラッジ成分(炭化タンゲステン、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: 他の試験結果を踏まえて決定 注4: チャンバー内アニュラス部

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(4)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

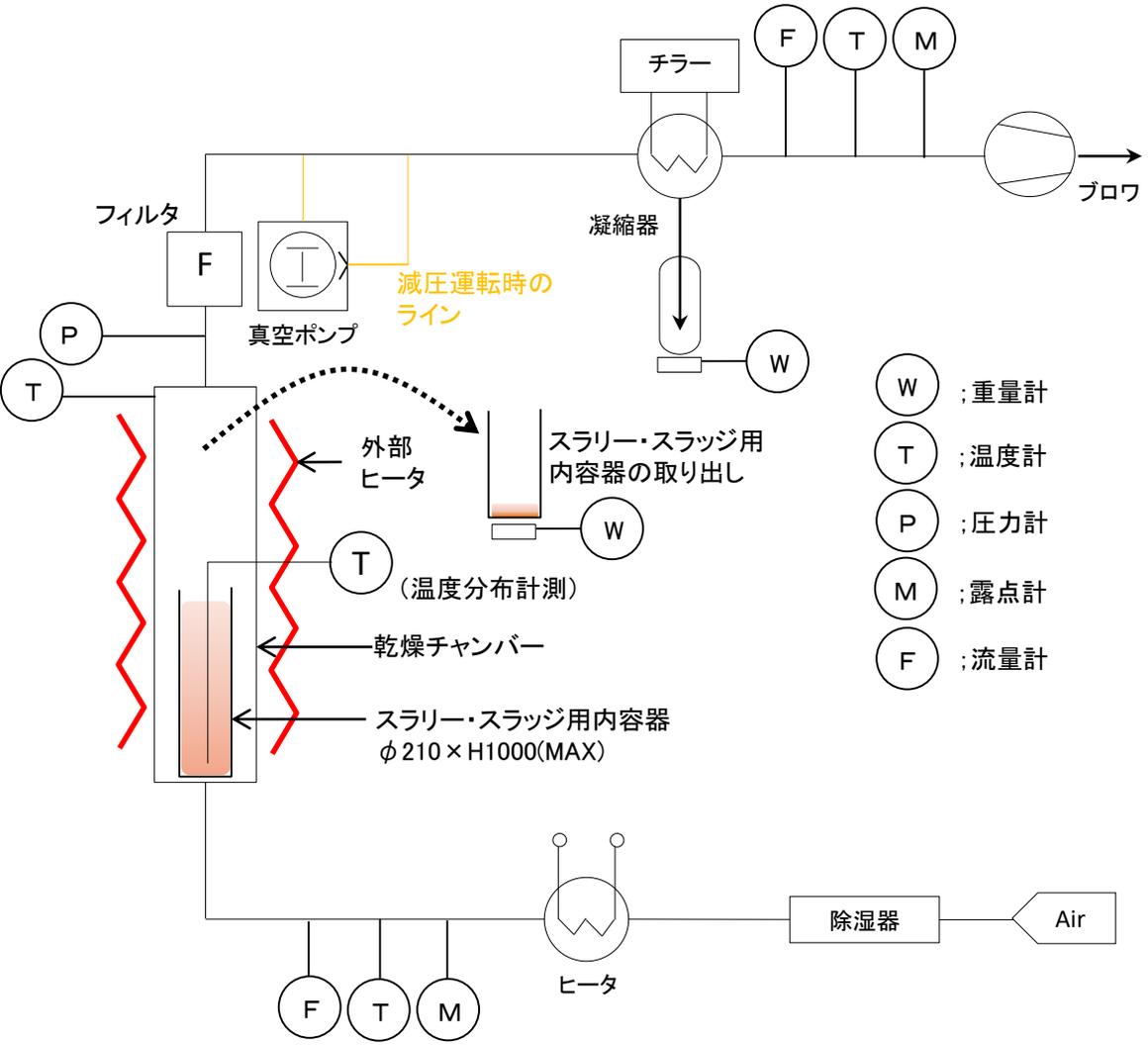


図 実規模乾燥試験装置 簡略系統図



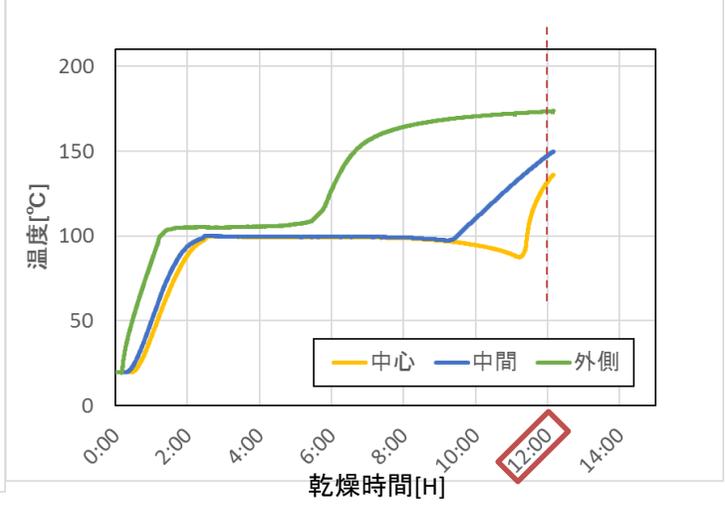
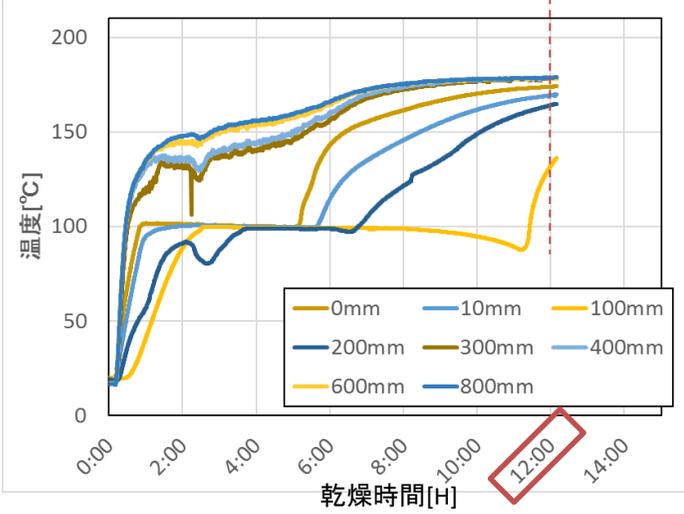
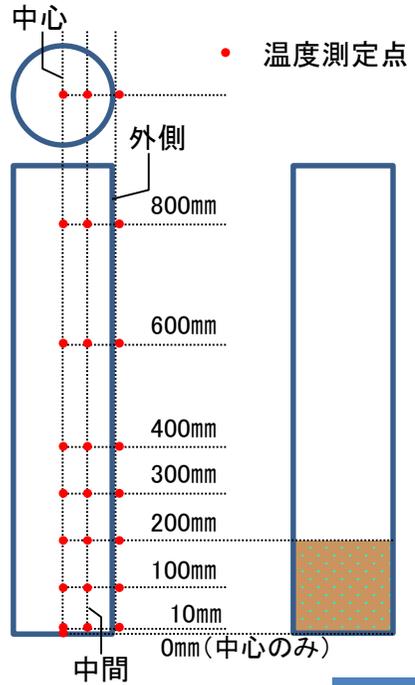
実規模乾燥試験装置 外観

6.1 要素試験

③ 実施事項、成果

(4) 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 (1/2))

…珪砂200mm (20%高さ)

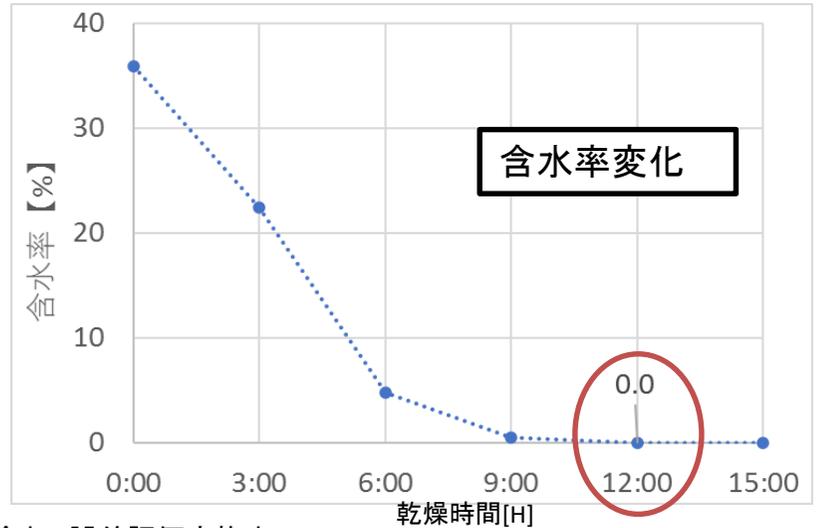


200mm (充填高さ20%) での温度変化 左: 中心 (0~800mm) / 右: 径方向 (100mm)



ビーカスケール作成時の様子 (ただし上澄みは除いてから乾燥)

重量測定結果	
絶乾重量 ^{注1}	10280g
初期含水率 ^{注2}	36%
12時間後残水量	≒0 ^{注3}
12時間後含水率 ^{注2}	≒0 ^{注3}



注1: 300°Cで5時間加熱した時の重量

注3: 測定誤差を含む。誤差評価実施中

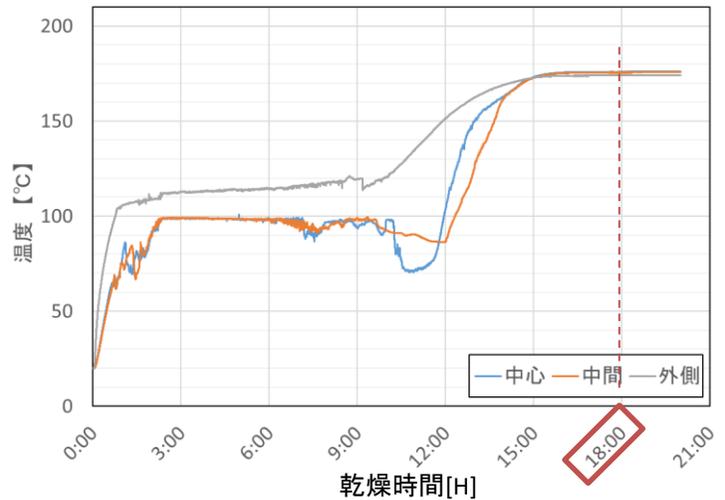
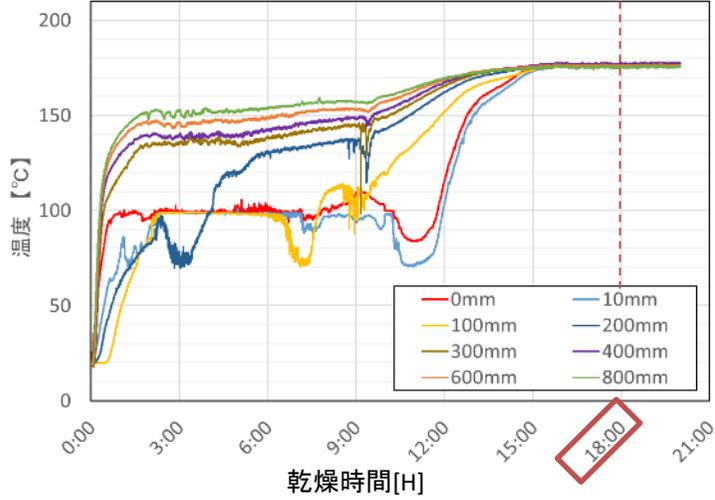
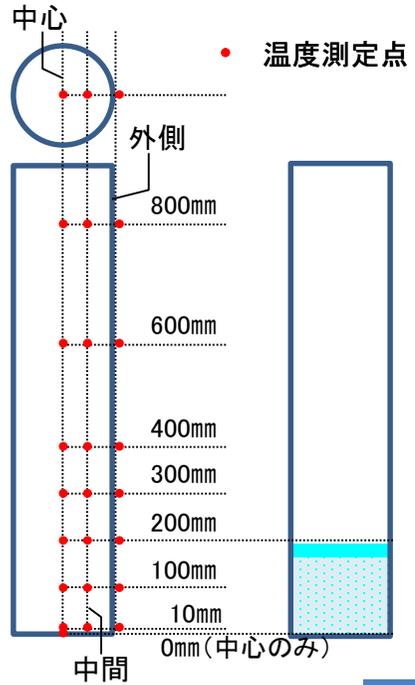
注2: 含水量/絶乾重量 (300°Cで5時間以上保持後の重量)。乾燥目標は0.2wt% (燃料デブリ換算での目標含水率)

6.1要素試験

③実施事項、成果

(4)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(2/2))

・・・凝集剤フロック200mm(20%高さ)

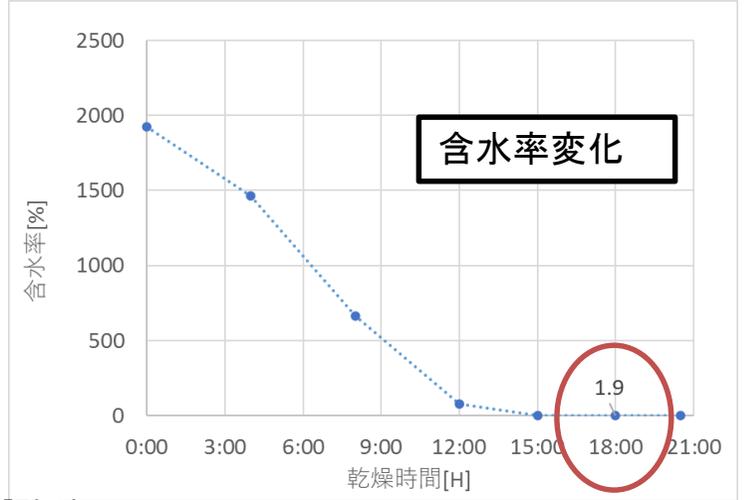


200mm(充填高さ20%)での温度変化 左:中心(0~800mm)/右:径方向(10mm)



ビーカースケール作成時の様子

重量測定結果	
絶乾重量 ^{注1}	363g
初期含水率 ^{注2}	1927%
18時間後残水量	7g
18時間後含水率 ^{注2}	1.9% ^{注2}



注1: 200°C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
 注2: 含水量/絶乾重量。目標は0.2wt%(燃料デブリ換算での目標含水率)ただし、絶乾重量は評価中

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(4)要素試験によるデータ拡充2(コンクリートビーカースケール試験: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)

○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

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

X_i : immのふるいに留まった骨材の質量分率 [%]

注1:ビーカースケール試験とは別に熱物性取得も予定

6.1 要素試験

③実施事項、成果

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

○コンクリート材物性測定

- 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。
 - ✓ 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。
- 各物性測定条件を下表に示す。

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	○	○	○	○

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。

6.1要素試験

③実施事項、成果

(4)要素試験によるデータ拡充2 (コンクリートビーカースケール試験: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。

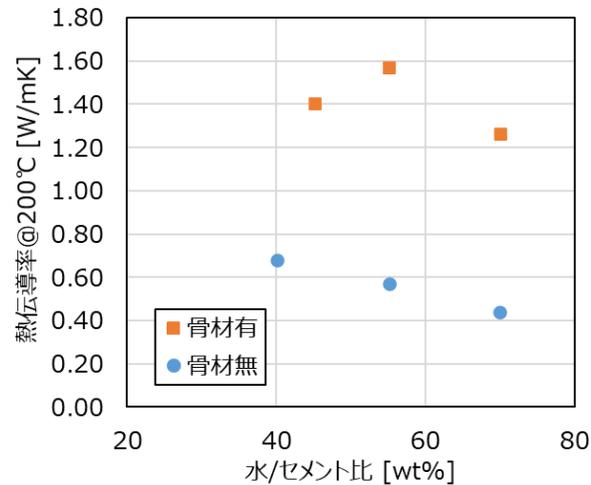
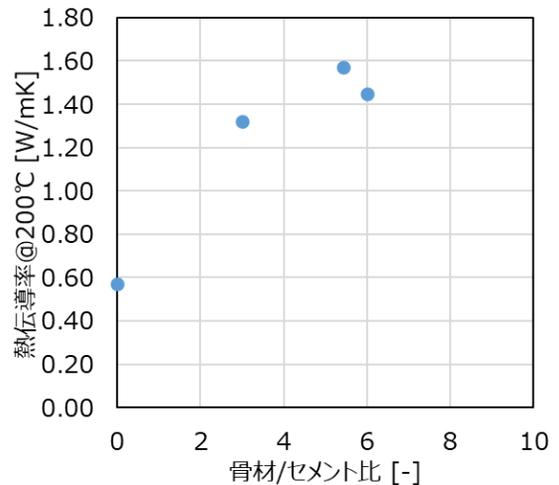


図 熱伝導率測定結果

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

6.1要素試験

③実施事項、成果

(4)要素試験によるデータ拡充2 (コンクリートビーカースケール試験: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。

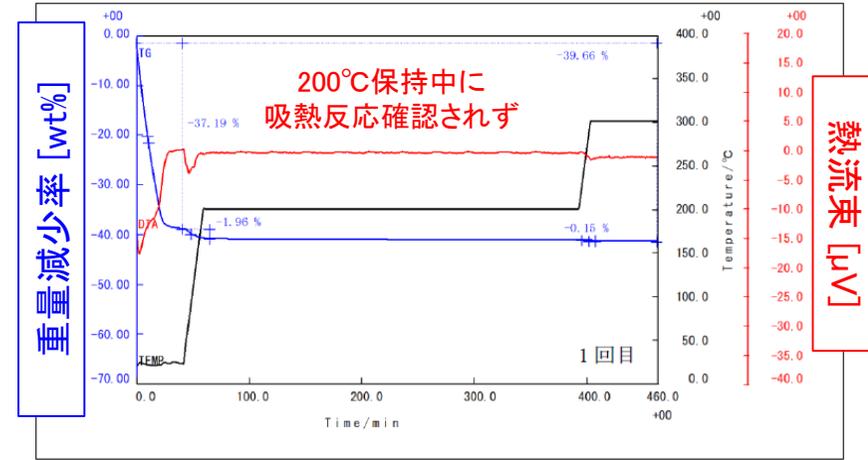


図 TG/DTA測定結果

表 含水率評価結果

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

※Run 1～3はN数3の平均値

※含水率 = 水分量 / 絶乾重量 × 100

昇温開始時を初期値、200°C 5.5時間保持後を乾燥終点、300°C 1h保持後を絶乾重量基準として算出

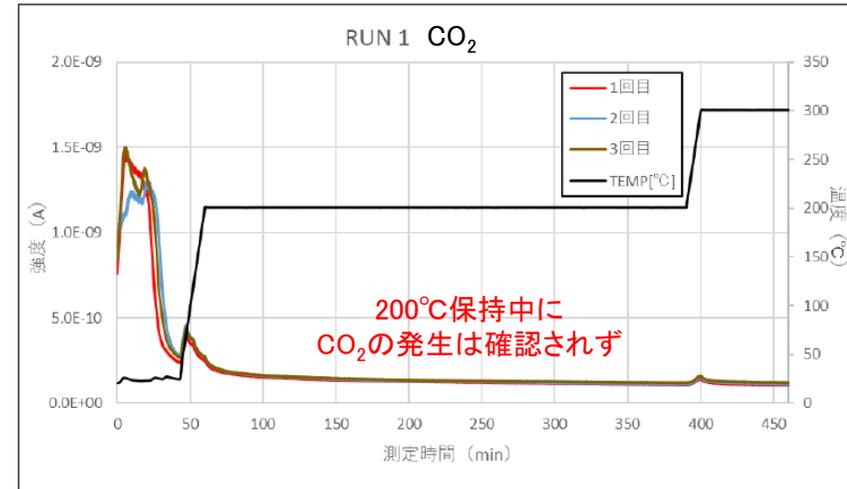


図 発生ガスのMS測定結果

6.1要素試験

③実施事項、成果

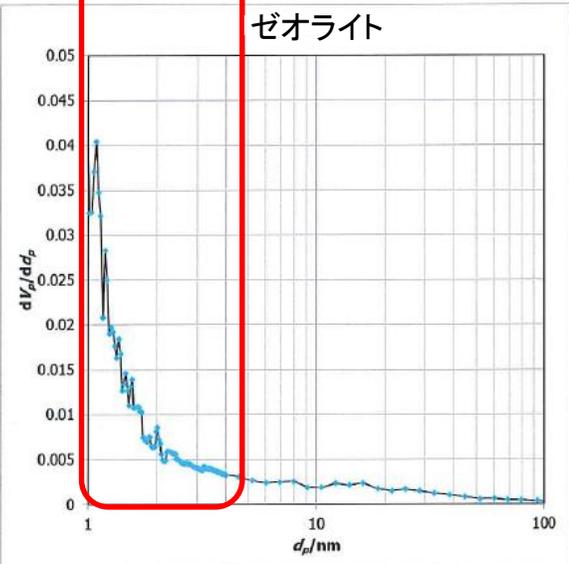
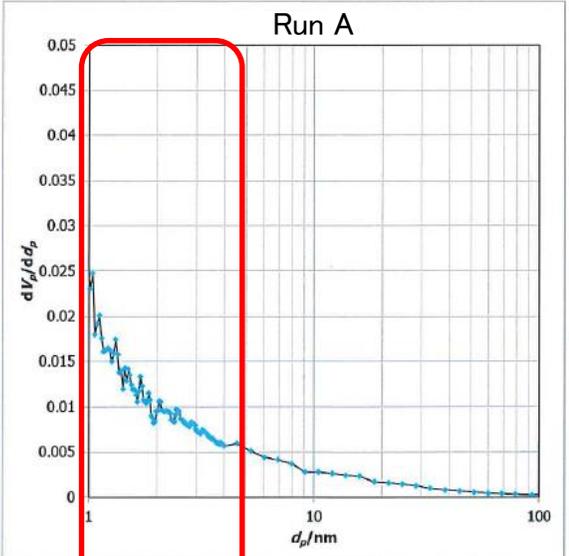
(4)要素試験によるデータ拡充2 (コンクリートビーカースケール試験:物性測定試験結果(3/3))

○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



6.1 要素試験

③実施事項、成果

(4)要素試験によるデータ拡充2(コンクリートビーカースケール結果: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。

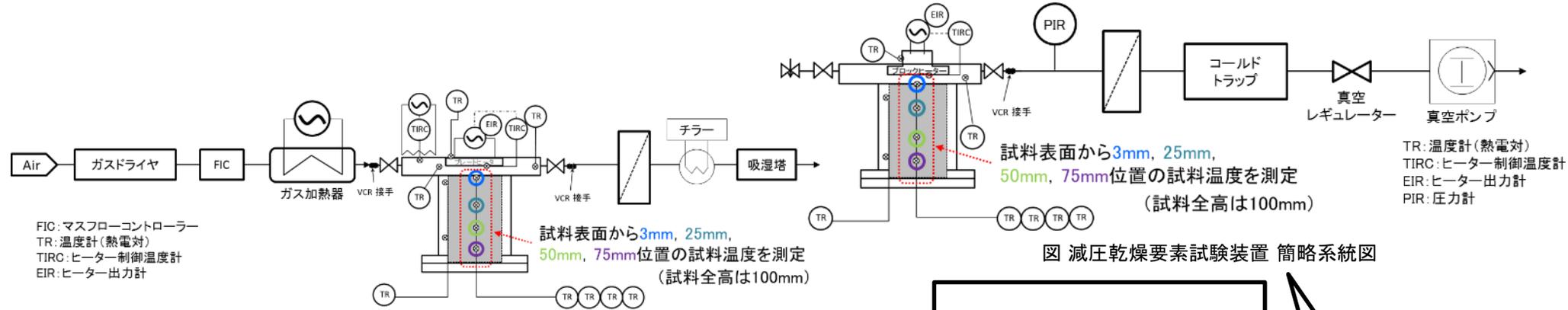


図 温風乾燥要素試験装置 簡略系統図

図 減圧乾燥要素試験装置 簡略系統図

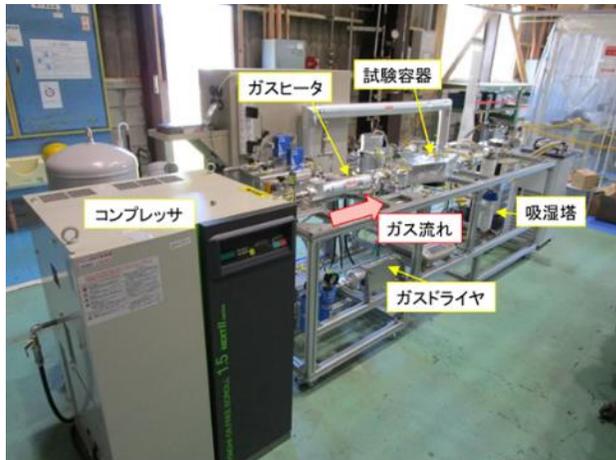
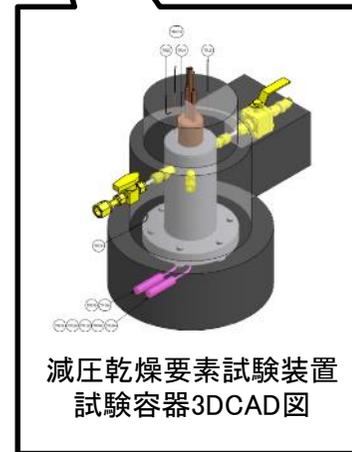
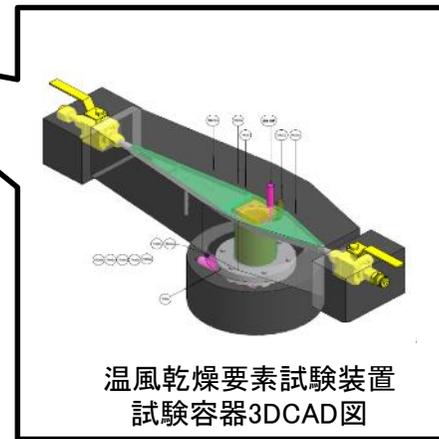


図 温風乾燥要素試験装置 外観



図 含水試料充填時の容器外観



6.1 要素試験

③実施事項、成果

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

○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。

○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 [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	//	//	200	3
6	//	//	//	//	//	//	0.1
7	//	//	//	//	//	300	1

注1:コンクリート成分条件は、1F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

6.1 要素試験

③ 実施事項、成果

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

○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、今後、乾燥処理時間が10~20h時点での質量計測を行い評価する予定。

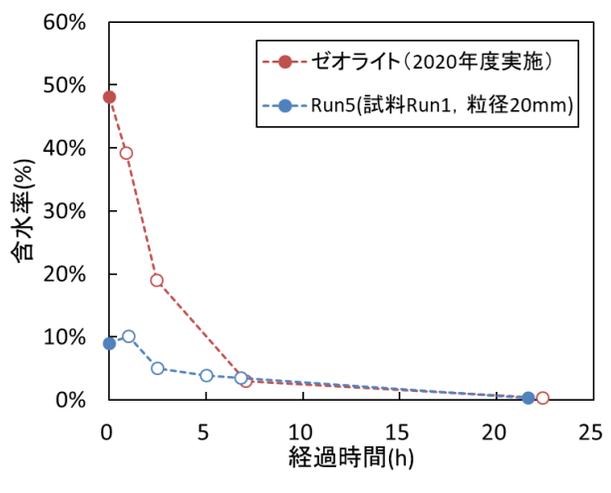
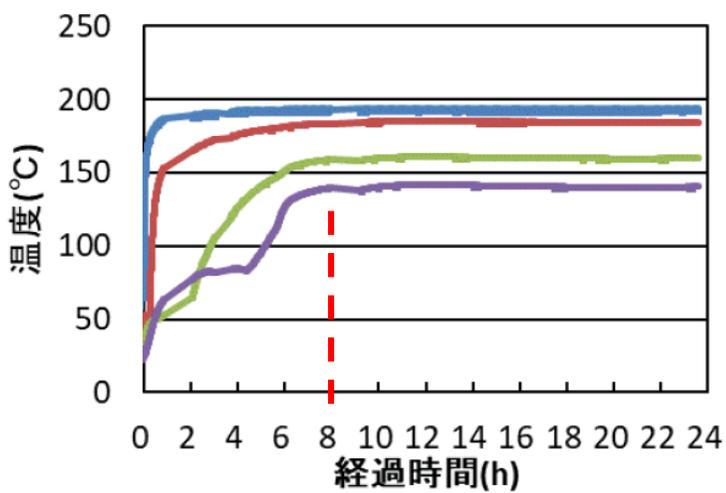
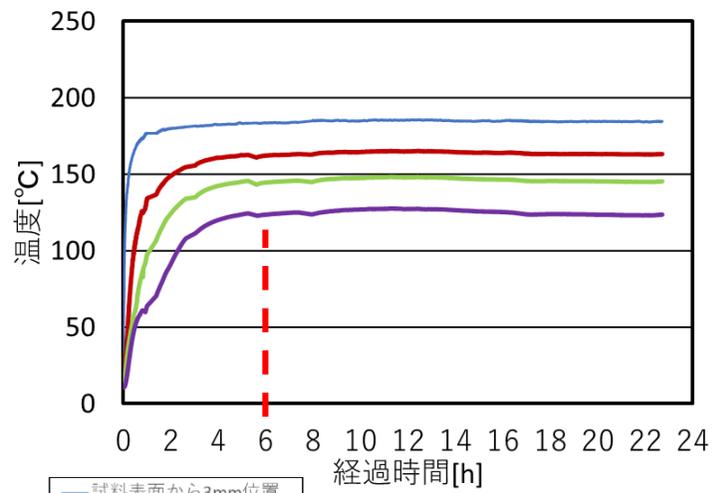


図 試料内部温度経時変化
(左:コンクリート、右:ゼオライト(2020年度))

図 含水率経時変化

— 試料表面から3mm位置
— 試料表面から25mm位置
— 試料表面から50mm位置
— 試料表面から75mm位置

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

③実施事項、成果

(5) 解析内容

解析モデルにより以下の検討を行う。

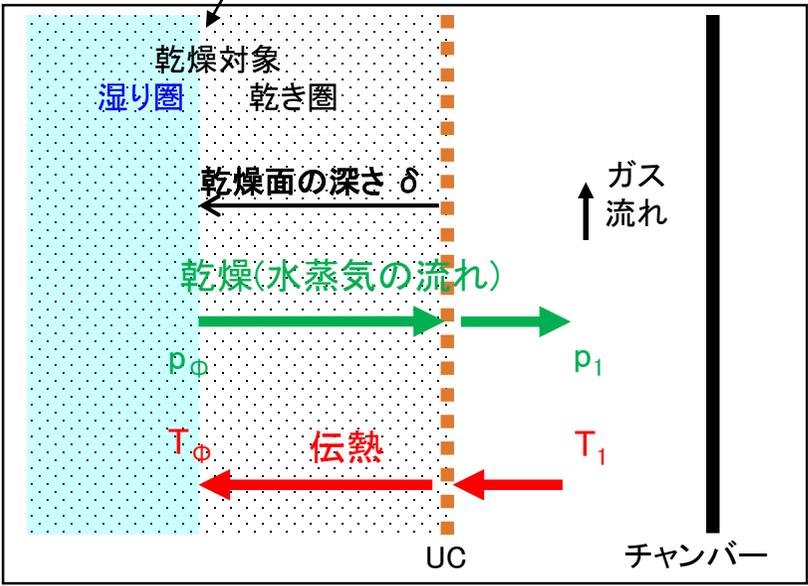
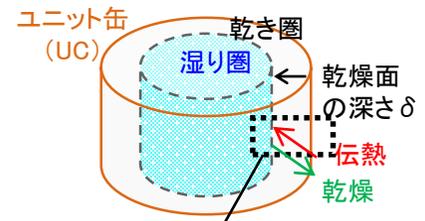
- 要素試験に基づくコンクリート乾燥評価、実規模体系への展開
- フィルタ濾材等、被乾燥物の種類による乾燥時間の感度評価

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(6) 解析モデル

- 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)



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、温度が得られ、乾燥面の深さδは計測温度から推定する。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。

6.1 要素試験

③実施事項、成果

(7)まとめ

- 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.18～19)
- 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.20～23)
- 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中で、現状は以下のとおりである。(No.24～35)
 - ① スラリー・スラッジ模擬物の珪砂・凝集剤(充填高さ200mmH)は12～18時間で乾燥完了
 - ② TG/DTA-MS(熱重量/示差熱・ガス質量分析同時測定)結果より、コンクリートについて昇温に伴う水分の脱着や結晶水の熱分解等の可能性はあるが、200℃における乾燥処理中はほとんど影響無し
 - ③ コンクリートの細孔は2020年度に試験したゼオライトに対し、細孔容積は1桁以上小さく、水分吸着による乾燥への影響度は小さい。
- 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感度評価を計画中。(No.36～37)

④成果の反映先への寄与

- ・ 今後、被乾燥物対象の拡充データをまとめ、移送中における水素対策の検討に寄与する。

⑤現場への適用性の観点における分析

- ・ 最適運転条件の提示等、現場オペレーションの観点から設備仕様を検討予定。

⑥課題

- ・ 現計画の遂行上、課題はなし。

⑦目標に照らした達成度

- ・ 試験を実施中であり、計画に従って所定の成果が見られる見込みである。

⑧今後の予定

- ・ 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継続。
- ・ 2022年度は、要素試験の継続と解析による乾燥時間の感度評価を実施し、各乾燥対象物に対する乾燥概念の適用性評価を実施予定。

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16hrで
 含水率0.3wt%^{注1}まで乾燥

注1: 燃料デブリ換算では0.1wt% (燃料デブリ換算での0.1wt%が目標含水率)

狙い: 処理形態の合理化

収納缶方式

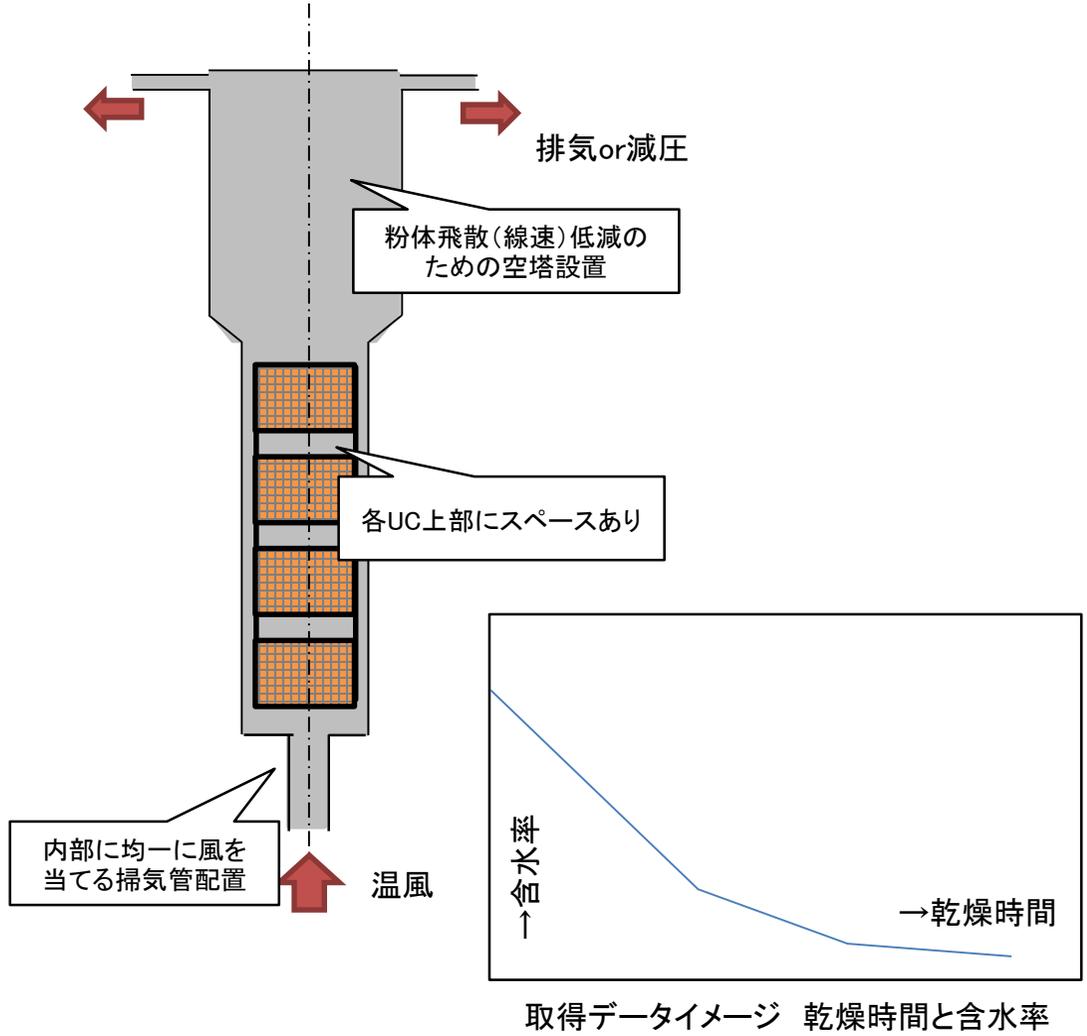
↓ 実規模試験

(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)

2019～2020年度検討結果(チャンバー方式)



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。

6.2実規模試験

③実施事項、成果

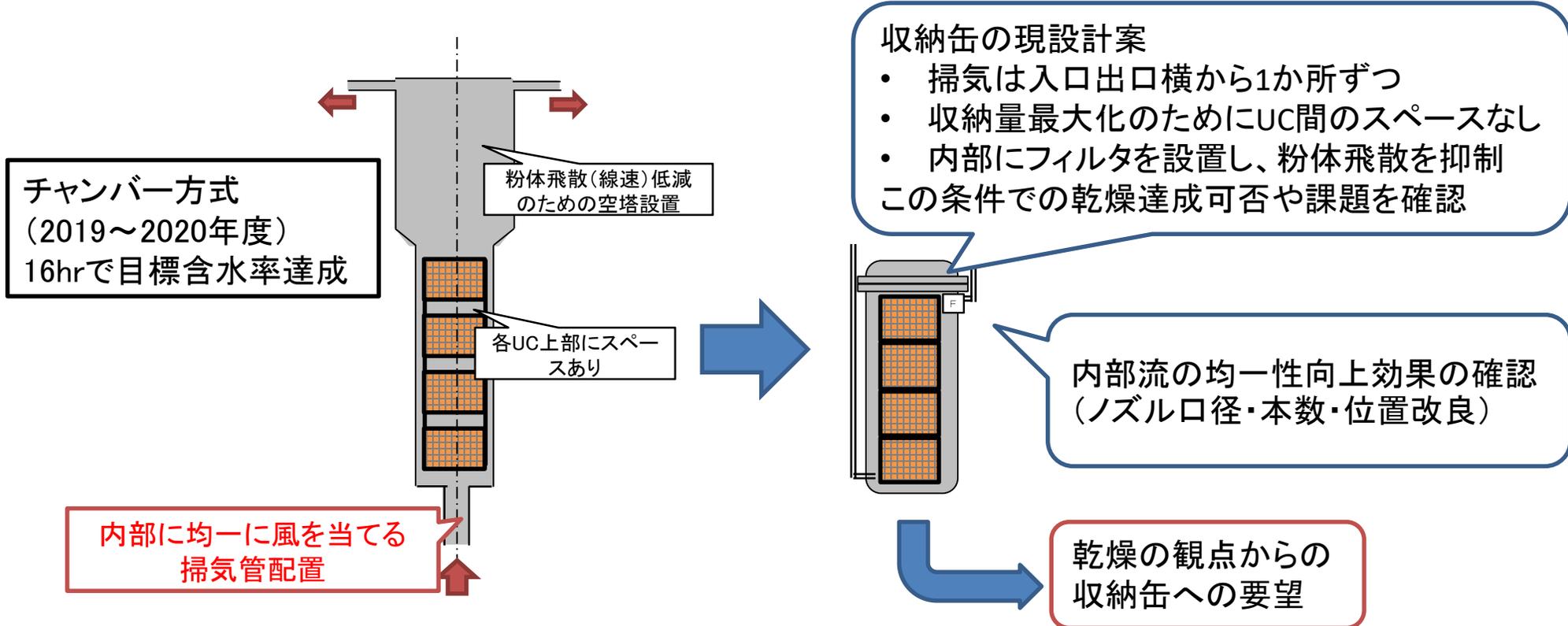
(1)試験計画の検討:試験目的

○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。



6. 2実規模試験

③実施事項、成果

(2)試験計画の検討：試験装置(1/2)

チャンバー方式実規模試験装置(2019~2020年度)→収納缶方式に改造

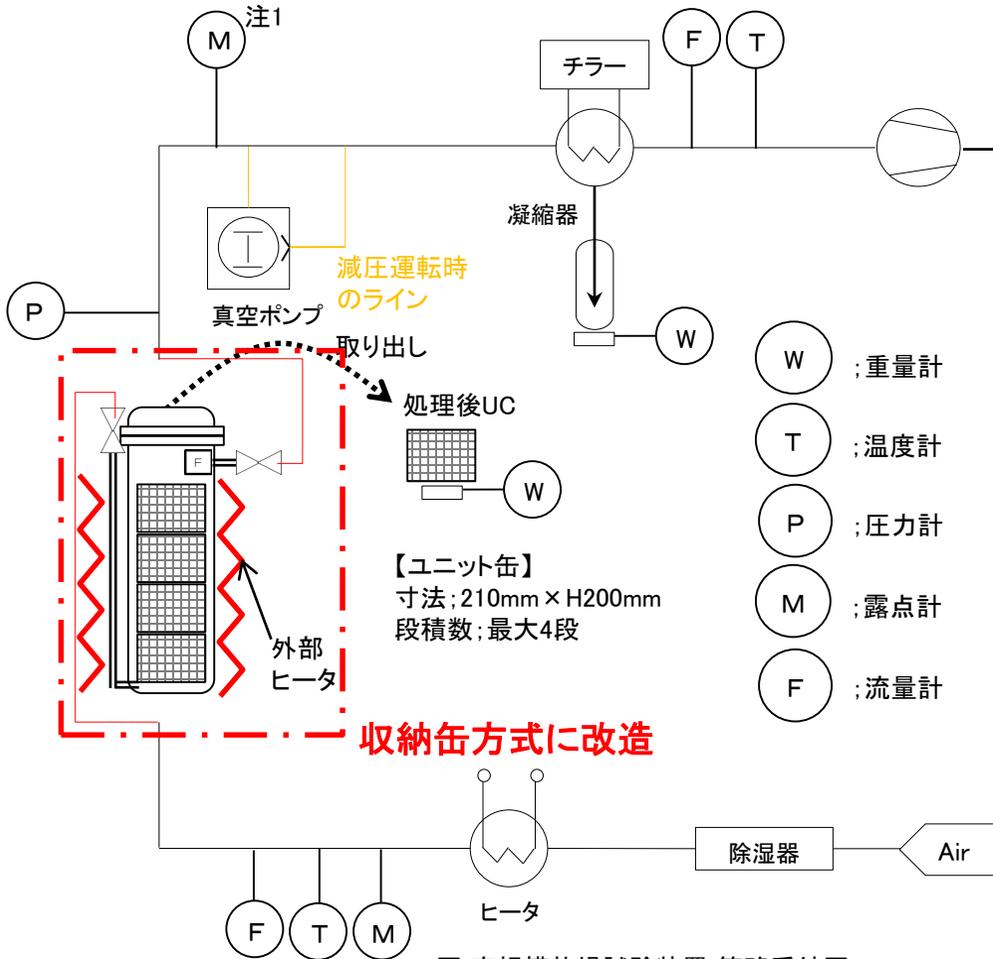


図 実規模乾燥試験装置 簡略系統図

(試験条件・体系)

- 温風/周期乾燥
- 収納缶ノズルに試験装置システムを接続
- 収納缶内にユニット缶(UC)最大4段
- 乾燥対象:ゼオライト
- 乾燥後重量測定、凝縮量や露点、ガス流量・温度等の経時変化データを取得注1

(試験パラメータ)

- 収納缶ノズル寸法/本数/温風流量

注1: 2019~2020年度装置から露点計設置位置を変更し、乾燥終了判定方法の改良についても確認予定

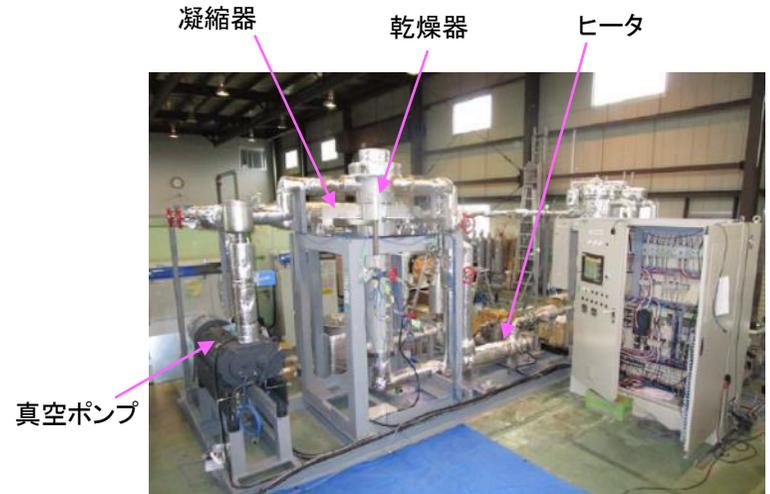


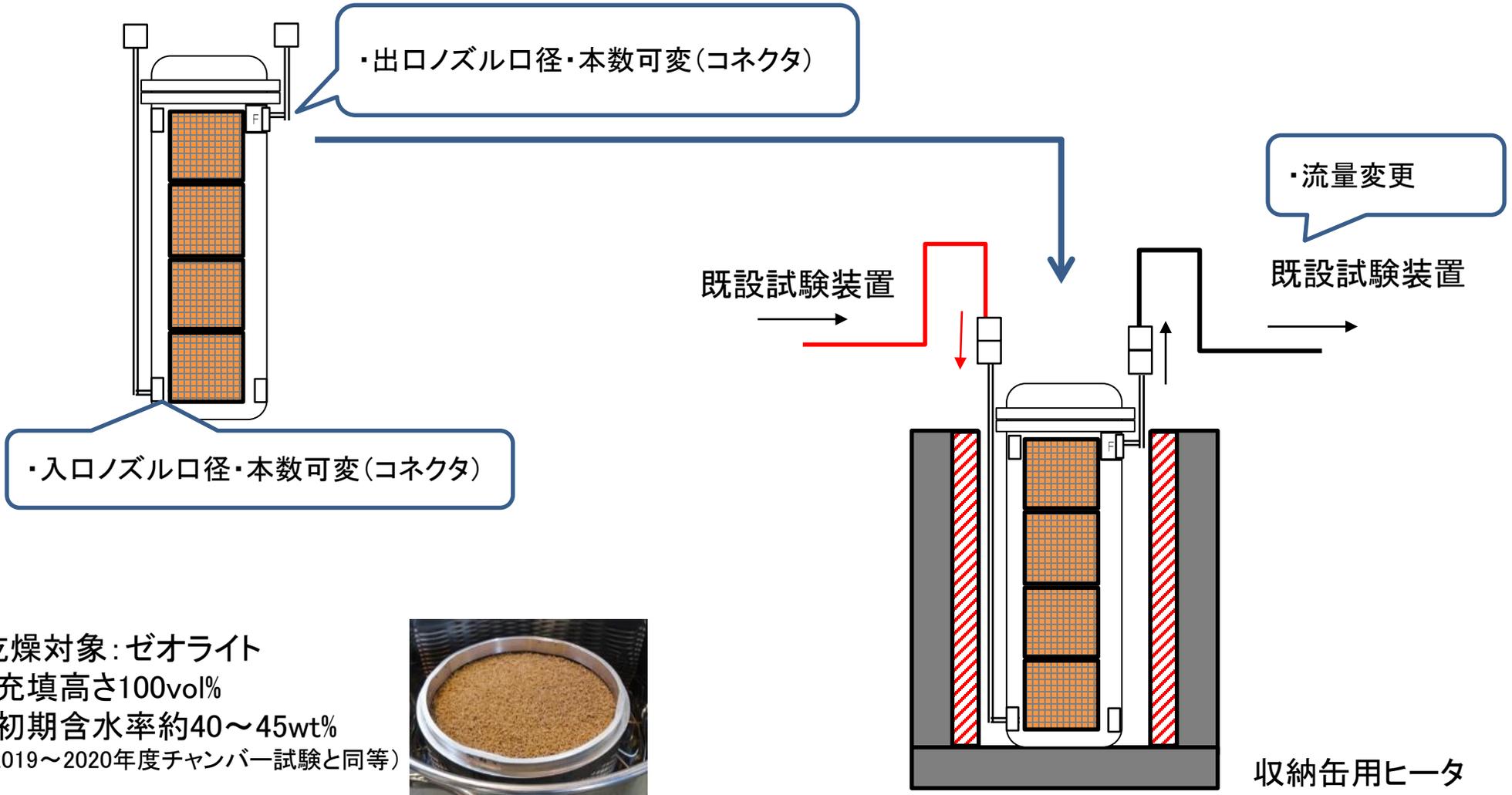
図 実規模乾燥試験装置 外観

6.2実規模試験

③実施事項、成果

(2)試験計画の検討:試験装置(2/2)

収納缶での乾燥イメージ



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)



6.2実規模試験

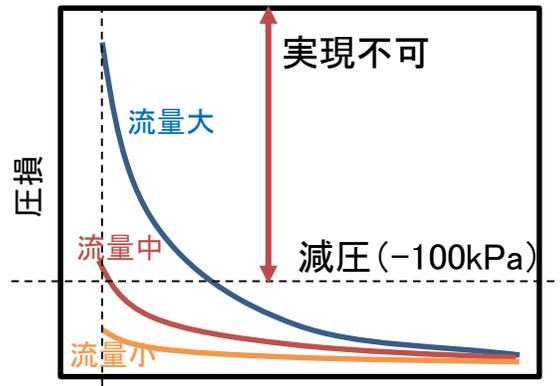
③実施事項、成果

(3) 試験計画の検討：改造課題と試験内容

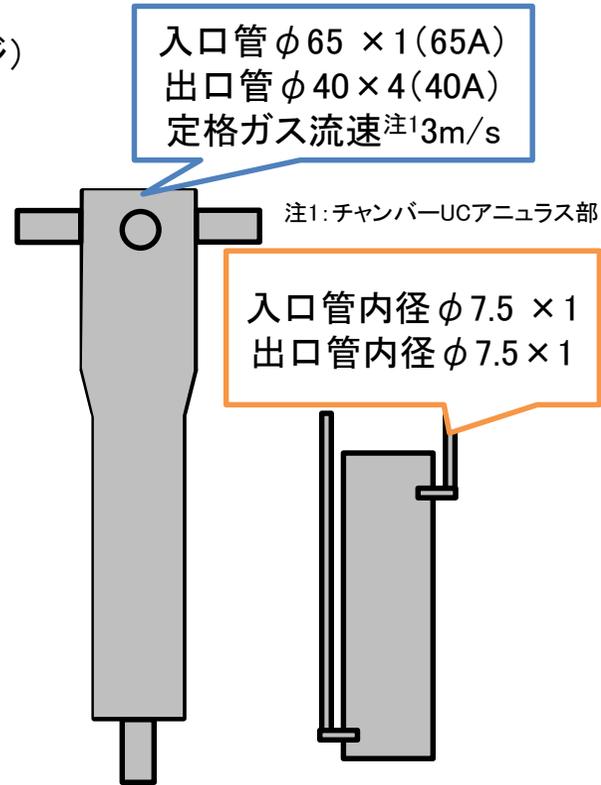
現計画の収納缶形状に基づく課題

- 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。

収納缶ノズル表面積一圧損(イメージ)



現設計収納缶 収納缶ノズル表面積



チャンバー (既設試験装置) 収納缶

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)

【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。

6. 2実規模試験

③実施事項、成果

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:燃料デブリ換算で0.1wt%

(4)試験計画の検討:試験内容と目的

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}

なお、装置設計データとして、ガス流量やヒータ電流値も取得予定

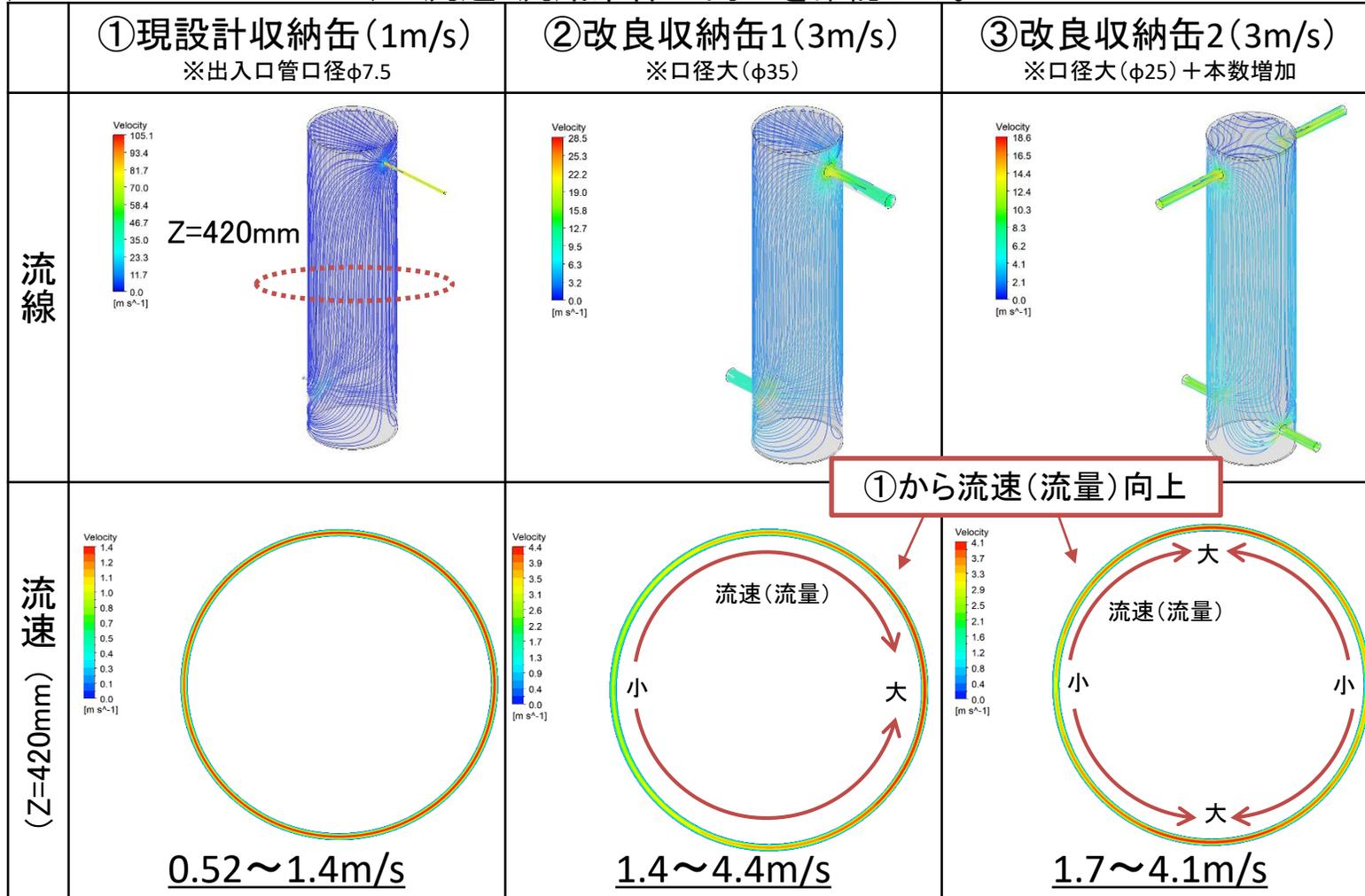
6. 2実規模試験

③実施事項、成果

(5)試験計画の検討: 試験ケース(1/2)

2019～2020年度要素試験結果より、乾燥性能に対し流速が影響する。

収納缶改良案は流速をチャンバ一定格同等まで可能とするもの、流路均一性を向上できるものを検討し、CFD解析(ANSYS FLUENT v17.2)で流速・流路条件の向上を確認した。



①から流速(流量)向上

- ①の現設計収納缶条件の中間部(収納缶高さ420mm断面)の流速に比べ、②の改良収納缶1および③の改良収納缶2の流速は全範囲で速くなっており、乾燥性能向上が見込まれる。
- ②と③を比較すると、③の方が最低流速が速く、定性的に均一性も向上し、より乾燥しやすくなると見込まれる。

CFD解析結果

6. 2実規模試験

③実施事項、成果

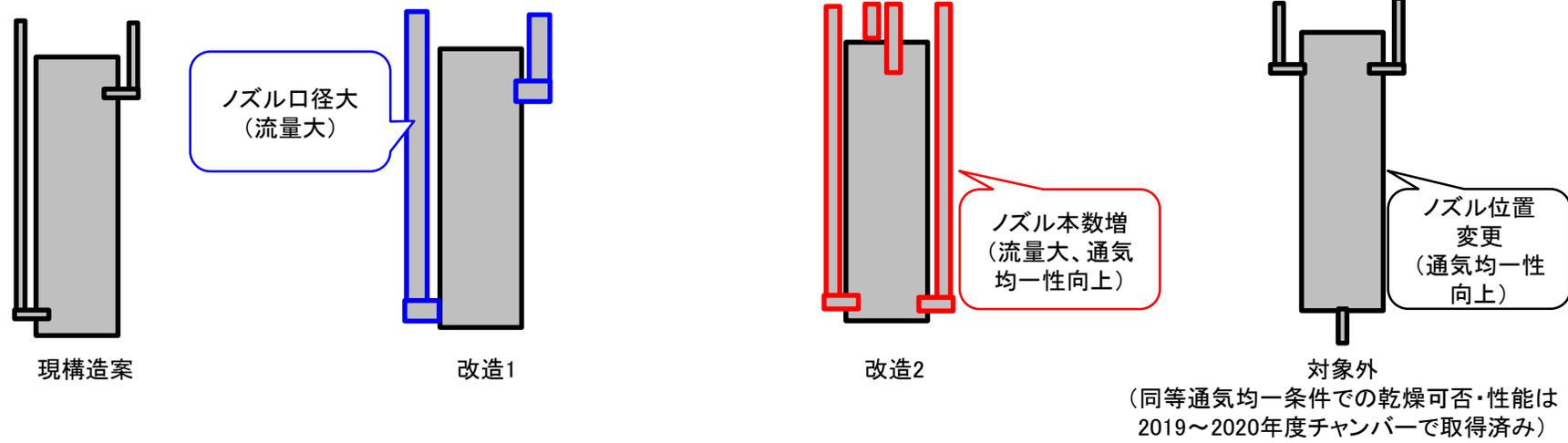
(5)試験計画の検討: 試験ケース(2/2)

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)

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

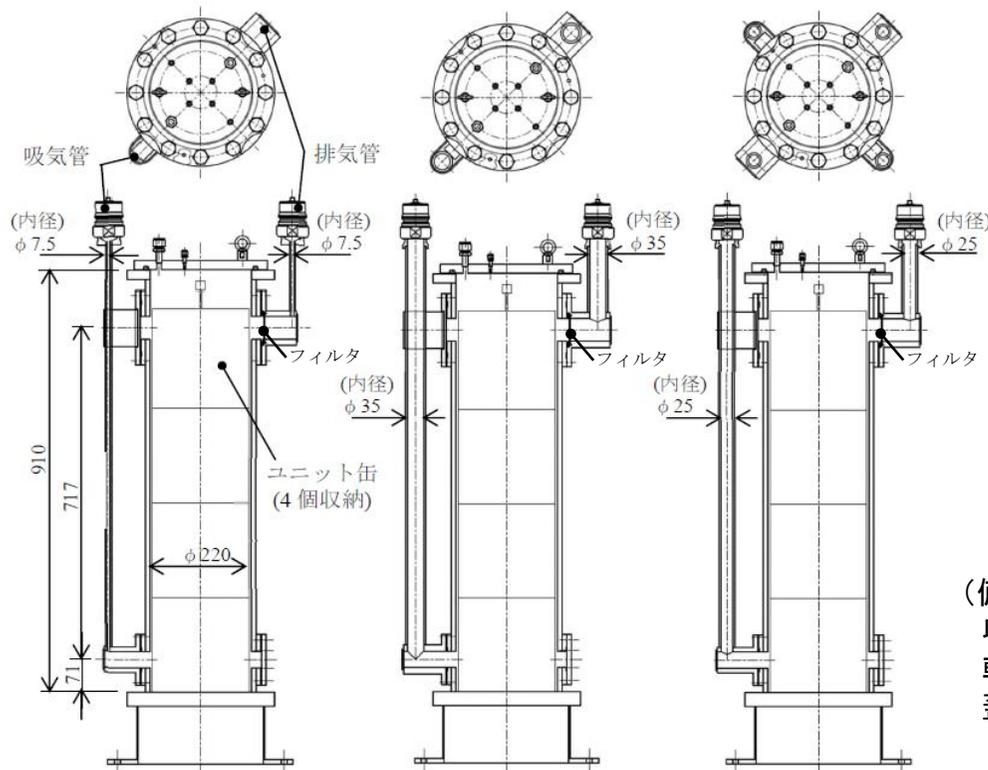
注3: チャンバーヒーター表面温度や収納缶入口ガス温度に応じて自動出力調整



③実施事項、成果

(6) 試験装置設計・製作・改造^{注1}

- ・収納缶形態での乾燥の課題を整理(No.45)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に偏りが生じることや、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(下図)、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た。実規模試験に向けて、改良収納缶を製作中。
- ・試験装置本体はNo.43~44の計画の通り改造中。



	現設計収納缶	改良収納缶1	改良収納缶2
掃気管内径	φ 7.5mm	φ 35mm	φ 25mm
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。

図 乾燥試験用収納缶の形状図

③実施事項、成果

(6) 解析内容(1/3)

解析モデルにより以下の検討を行う。

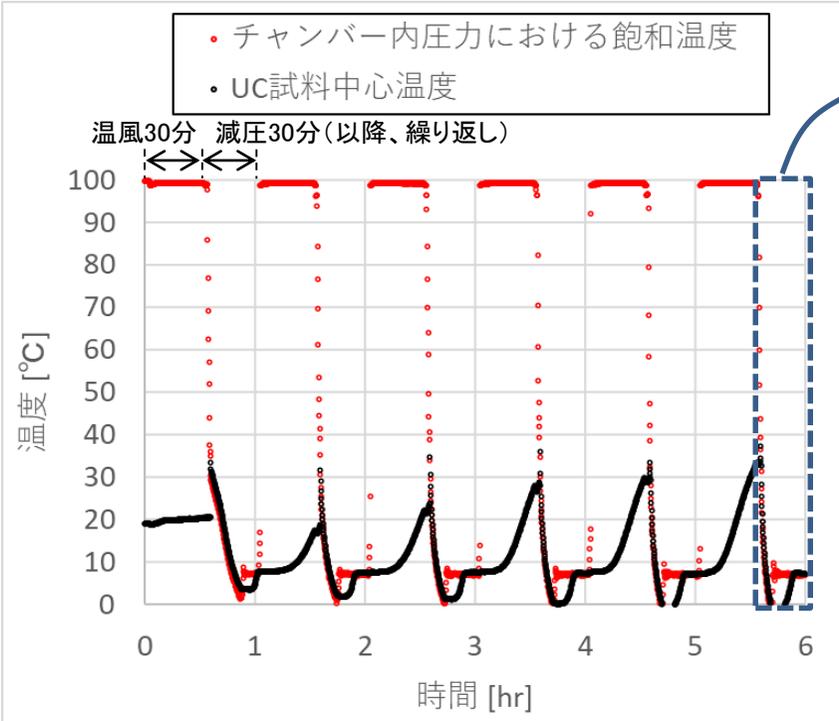
- 周期乾燥での温風・減圧周期による乾燥時間の感度評価、最適化検討

6. 2実規模試験

③実施事項、成果

(6) 解析内容(2/3)

- 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°C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。



2020年度 周期乾燥試験
 図1 チャンパ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)

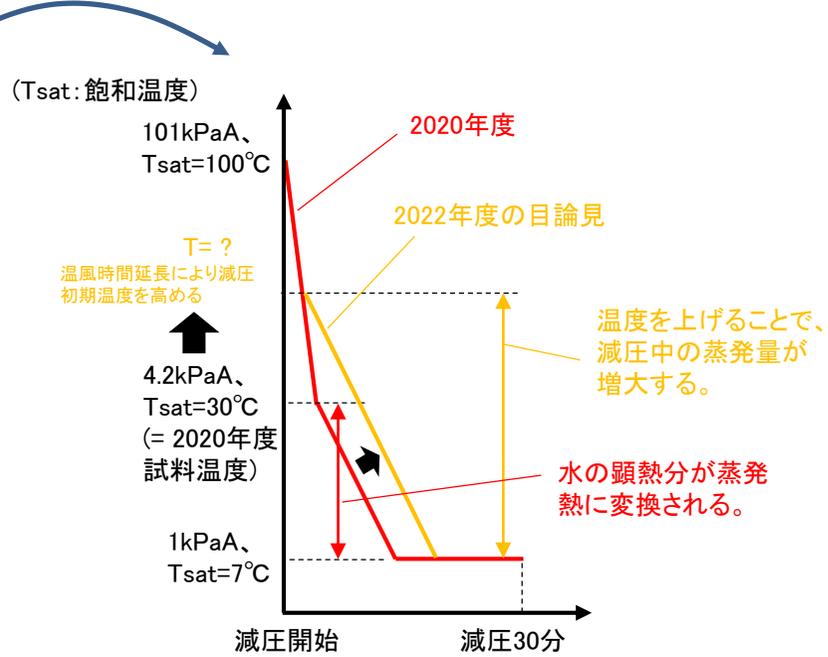


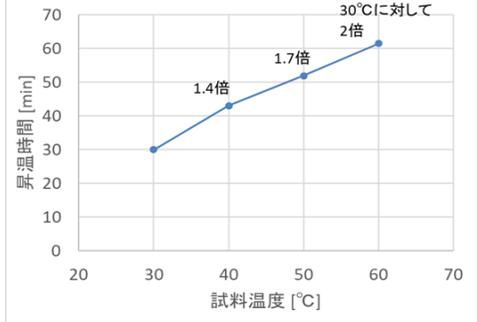
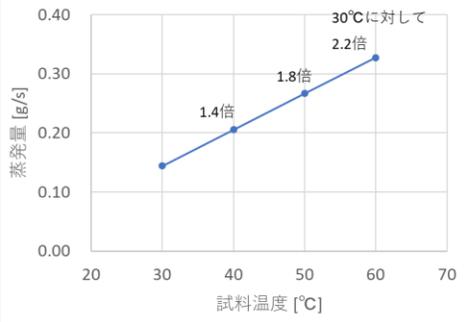
図2 圧力・温度変化と蒸発の関係の模式図

6. 2実規模試験

③実施事項、成果

(6) 解析内容(3/3)

- 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(図1)。このとき、昇温0.5hr+減圧0.5hr = 1hr/1set ⇒ 昇温1hr+減圧0.5hr = 1.5hr/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~9.5hrまでのデータに上記効果を適用すると、9.5-9.5/1.3=2hrの時間短縮が見込まれる。これに対し、試験の乾燥終了時刻で判定すると1.5hr程度短縮する結果が得られた(図2)。



周期乾燥・減圧期間における試料温度と蒸発量の関係

周期乾燥・加熱期間における試料温度と昇温時間

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

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

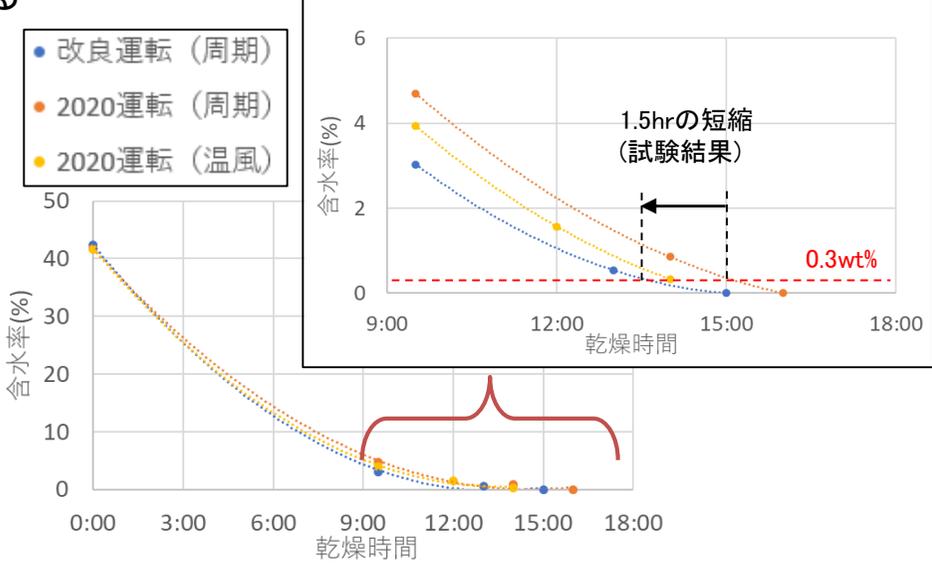


図2 2022年度 周期乾燥試験 含水率の時間変化 2020年度試験との比較

図1 2020年度試験に基づく推算結果

6. 2実規模試験

③実施事項、成果

(7) まとめ

- 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.40～48)
 - ⇒ 現状の収納缶構造では圧力損失が大きく、十分な通気流量を確保できない。
 - ⇒ 今後、乾燥処理のため、要望する収納缶構造としてまとめる方針。
- 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・製作中。(No.49)
- 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た。(No.50～52)
 - ⇒ 1.5時間程度の処理時間の短縮が図れる見込み。

④成果の反映先への寄与

- ・ 今後、収納缶仕様に対する要求事項をまとめ、移送中における水素対策検討に寄与する。

⑤現場への適用性の観点における分析

- ・ 最適運転条件の提示等、現場オペレーションの観点から設備仕様を検討予定。

⑥課題

- ・ 現計画の遂行上、課題はなし。

⑦目標に照らした達成度

- ・ 具体的な試験計画を立案・装置や試験用収納缶の準備中であり、計画に従って所定の成果が見られる見込みである。

⑧今後の予定

- ・ 2022年度は、実規模試験装置の改造工事、実規模試験によるデータ拡充、解析による乾燥時間の感度評価、および試験や解析結果を踏まえた乾燥概念の具体化検討を実施予定。
- ・ 取得したデータを参考に、収納缶乾燥装置概念、収納缶での最適運転条件、チャンバー方式との得失評価、複数処理時の課題等を検討する。

- 要素試験での成果案(スラリー・スラッジ、コンクリートの乾燥特性データ)に対し、試験を計画・実施中。スラリー・スラッジは実規模乾燥での試料温度分布や含水率変化を、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・考察継続中。
- 要素試験での成果案(乾燥概念の適用範囲(乾燥対象物)や適用が困難な乾燥対象物の代替方法・手段)は、上記の試験結果を踏まえて2022年度に検討し、成果を得る予定。
- 実規模試験での成果案(収納缶形態での試験検証結果)に対し、試験装置改造の課題を抽出し、改造試験装置や試験用収納缶および試験条件を検討した。その結果、圧損を考慮した上での試験条件を決定し、収納缶製作と試験装置改造対応中。2022年度に試験を実施し、これらの成果を得る予定。
- 実規模試験での成果案(収納缶乾燥装置概念、収納缶での最適運転条件、チャンバー方式との得失評価、複数処理時の課題、収納缶設計への要求)については、最適運転条件の検討として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。残りは上記の試験結果を踏まえて2022年度に検討し、成果を得る予定。

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。スラリーについては、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。

2021.11.11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。

・スラリー・スラッジ(珪砂): 2.6g/cm³

→換算値0.2wt%

・コンクリート: 2.3g/cm³ →換算値

0.2wt%

(使用する試料により見直しの可能性あり)

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

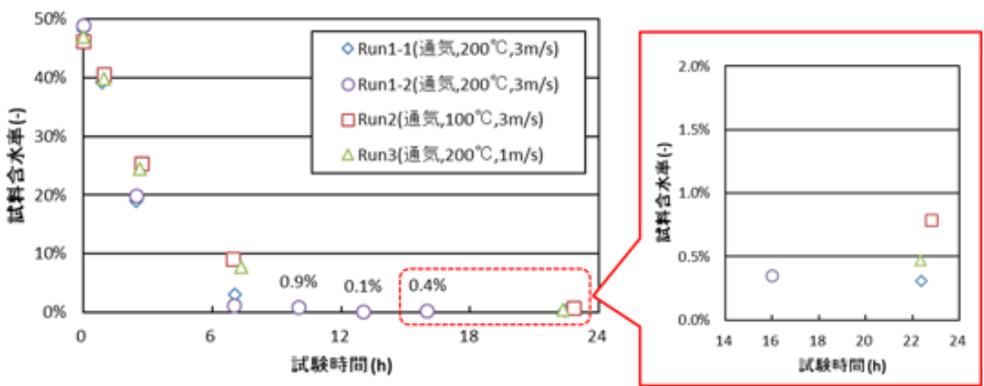


図 温風乾燥要素試験 含水率経時変化

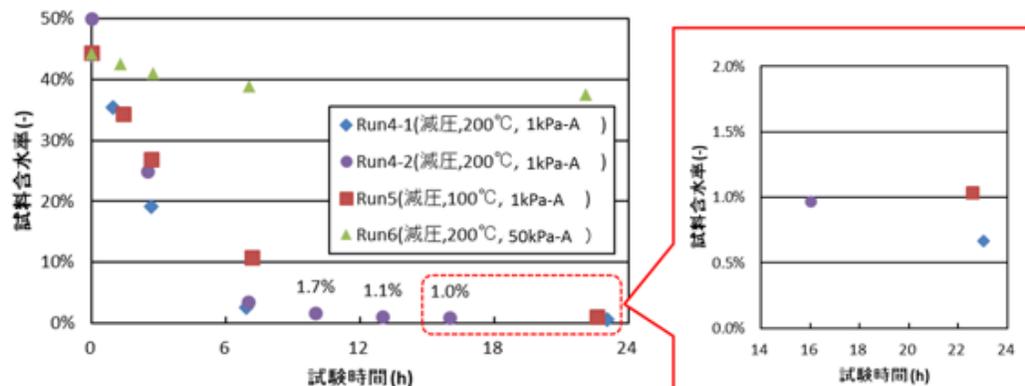


図 減圧乾燥要素試験 含水率経時変化

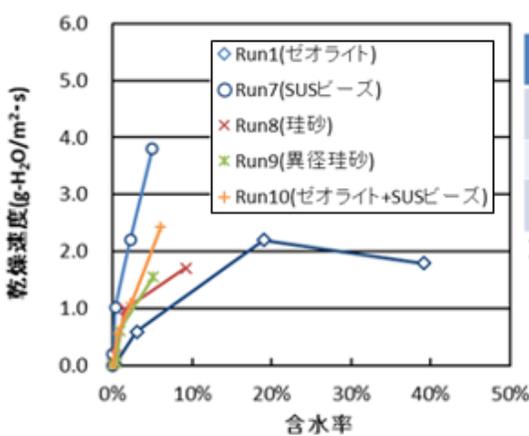


図 被乾燥物の影響評価 乾燥特性曲線

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: JIS Z 8901, *4: 改訂15版 化学便覧(丸善)のノンダカラスの値を参照

【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

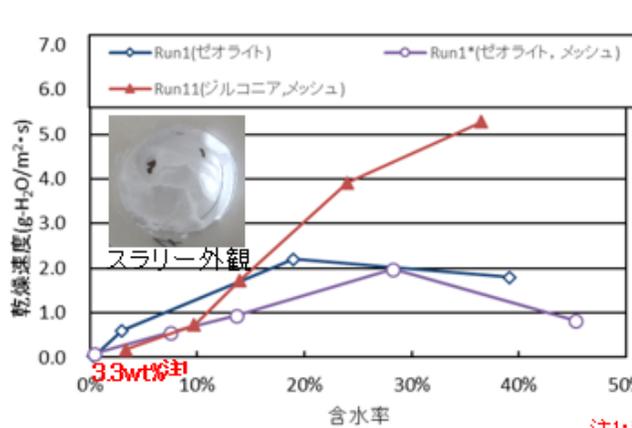


図 スラリー温風乾燥試験 乾燥特性曲線

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±3 m 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

参考資料(2019~20年度の実施内容:解析評価)
 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(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

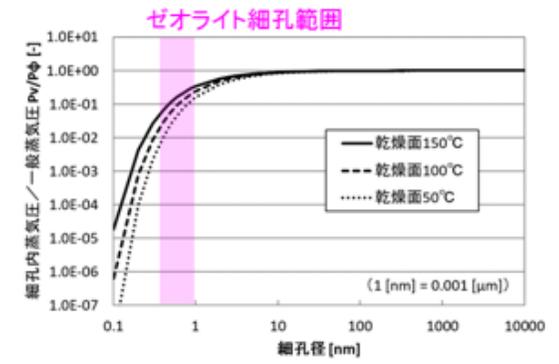


図 細孔径と蒸気圧の関係

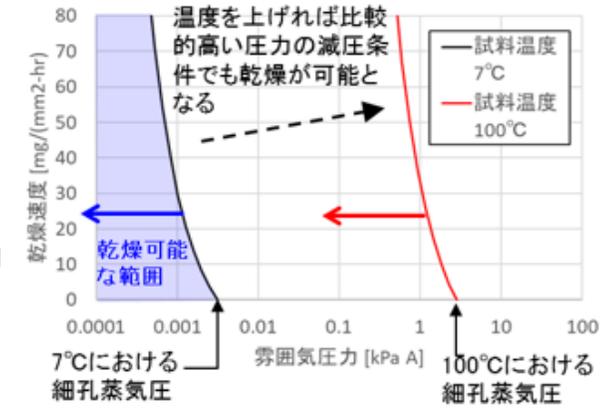


図 減圧乾燥における 雰囲気気圧力と乾燥速度の関係

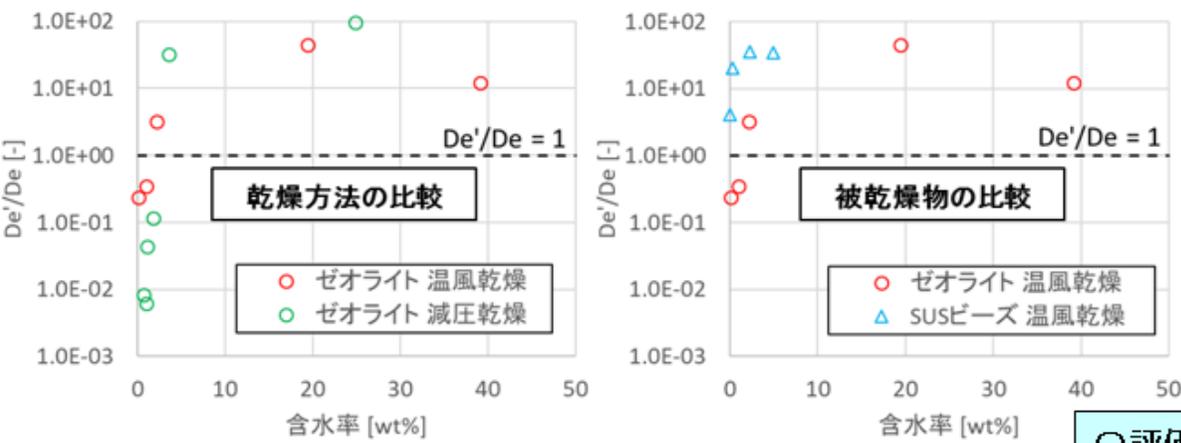


図 要素試験の有効拡散係数の算定結果

○ 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
- ・試料温度を十分高とした上で減圧する処理方法が効率的

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

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

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。

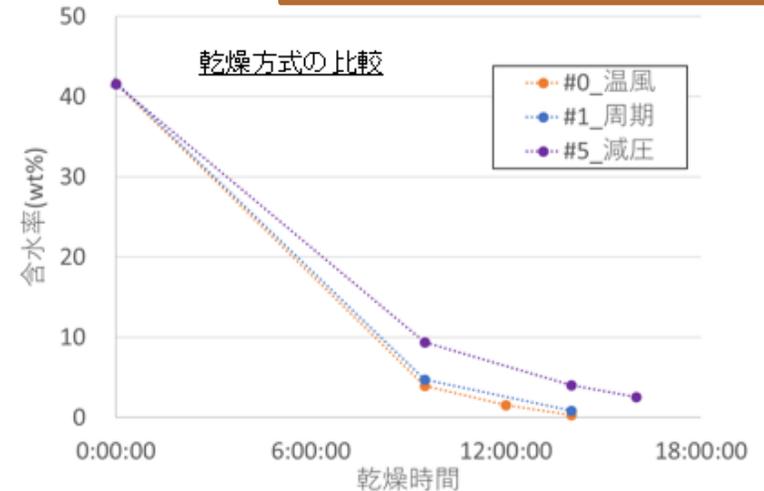


図 乾燥方式による含水率経時変化の比較

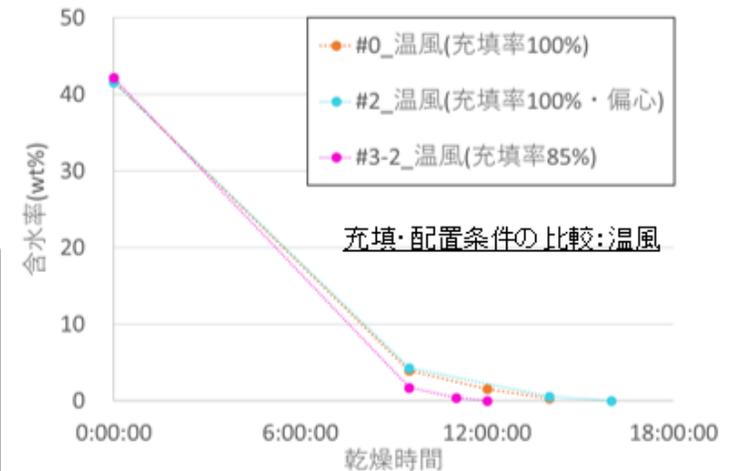


図 温風乾燥における
 充填・配置条件による含水率経時変化の比較

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 スラリー・スラッジ (珪砂) コンクリート	300°C加熱で5時間以上保持 した時の重量	試験で使用する試料を300°Cで5時間 以上加熱し、簡易隔離冷却 ^{注1} 後に 重量測定
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: 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