

【成果公開資料】

令和5年度開始 廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金

**燃料デブリ取り出し工法の開発
(気中上取り出し工法における充填安定化技術,
加工時落下対策技術の開発)**

2024年度 最終報告

Decom.Tech

2025年10月

東双みらいテクノロジー株式会社

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

1.はじめに

- 本資料は経済産業省／令和5年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における充填安定化技術，加工時落下対策技術の開発））」における最終報告資料としてまとめたものである。
- 具体的な報告内容は以降に記載する。

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
 - 2.1 充填安定化技術の開発
 - 2.2 加工時落下対策技術の開発
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
- 3. 事業目的**
 - 3.1 補助事業の名称**
 - 3.2 事業目的**
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

3.事業目的

◆ 3.1 補助事業の名称

燃料デブリ取り出し工法の開発

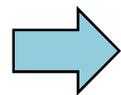
(気中上取り出し工法における充填安定化技術, 加工時落下対策技術の開発)

◆ 3.2 事業目的

- 先行実施されている「燃料デブリ取り出し工法の開発」(2021・2022年度) 事業および「燃料デブリの取り出し工法の開発 (大型構造物取り出し及び搬送時における汚染拡大防止隔離技術の開発)」(2021・2022年度) 事業の2022年度事業成果を踏まえ, 以下を実施することで, 福島第一原子力発電所(1F)の廃炉対策を円滑に進めるとともに, 我が国の科学技術水準の向上に資することを目的とする。

● 実施項目①：充填安定化技術の開発

- ✓ 気中取り出し工法を構築する上で重要な技術要素である「解体・加工時安全対策技術」の一つである「充填安定化技術」について, これまでに得られた研究開発成果に基づき, 必要となる要素技術開発および試験を行う。



充填固化により**不安定な炉内構造物の転倒・落下防止を図るとともに**充填固化で安定化させたことによる**解体作業の安全性, 効率を向上**することを目的としている。

● 実施項目②：加工時落下対策技術の開発

- ✓ 気中取り出し工法を構築する上で重要な技術要素である「解体・加工時安全対策技術」の一つである「加工時落下対策技術」について, 落下による再臨界防止およびダスト飛散抑制, 機器損傷等の防止のため, 落下対策の概念検討を実施し, 要素試験により成立性の検証と現場適用性を評価する。
- 本技術開発は, 東京電力HDのニーズを踏まえ, 関係機関(経済産業省殿, 東京電力HD殿, 廃炉・汚染水・処理水対策事業事務局殿)との協議を行い実施する。

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
- 4. 目標達成を判断する指標**
 - 4.1 目標達成を判断する指標**
 - 4.2 本事業のゴールイメージ**
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

4. 目標達成を判断する指標

◆ 4.1 目標達成を判断する指標

【実施項目①：充填安定化技術の開発】

●テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証

- 実機を考慮した充填手順，装置構成が具体化されていること。
- 部分模擬要素試験により，成立性・現場適用性が評価されていること。

【終了時目標TRL：レベル3の範囲に到達】

●テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証

- 設定した要求性能を満たす充填材の固化試験・性能評価試験を実施し，汎用性^{*1}の高い充填安定化材を評価・選定されていること。
- 充填固化体の搬出後の処理方法等に関する現場実用性のある分離・分別手法が検討されていること。

【終了時目標TRL：レベル3の範囲に到達】

*1：ここでいう「汎用性」とは，RPVおよびRPV以外へ適用可能性を指し，各適用先について必要とされる安定化や補修等を実現するために相応の充填材や充填工法を選定することで施工可能とする検討を実施する。

【実施項目②：加工時落下対策技術の開発】

- PCV内環境条件およびペDESTAL内の燃料デブリ・構造物の前提条件の設定から，落下物の想定（重量，形状，材質）が具体化されていること。
- 落下により発生する，再臨界・ダスト飛散・ペDESTAL内構造物の損傷等の想定事象が整理され，各影響度評価が明確にされていること。
- 上記で想定した落下事象の対策要求を満足する各種候補を選定されていること。
- アクセSRUートの構築を含めた遠隔ハンドリング方法が具体化されていること。

【終了時目標TRL：レベル3の範囲に到達】

4. 目標達成を判断する指標

◆ 4.2 本事業のゴールイメージ（充填安定化技術の開発）

実施項目① 充填安定化技術の開発

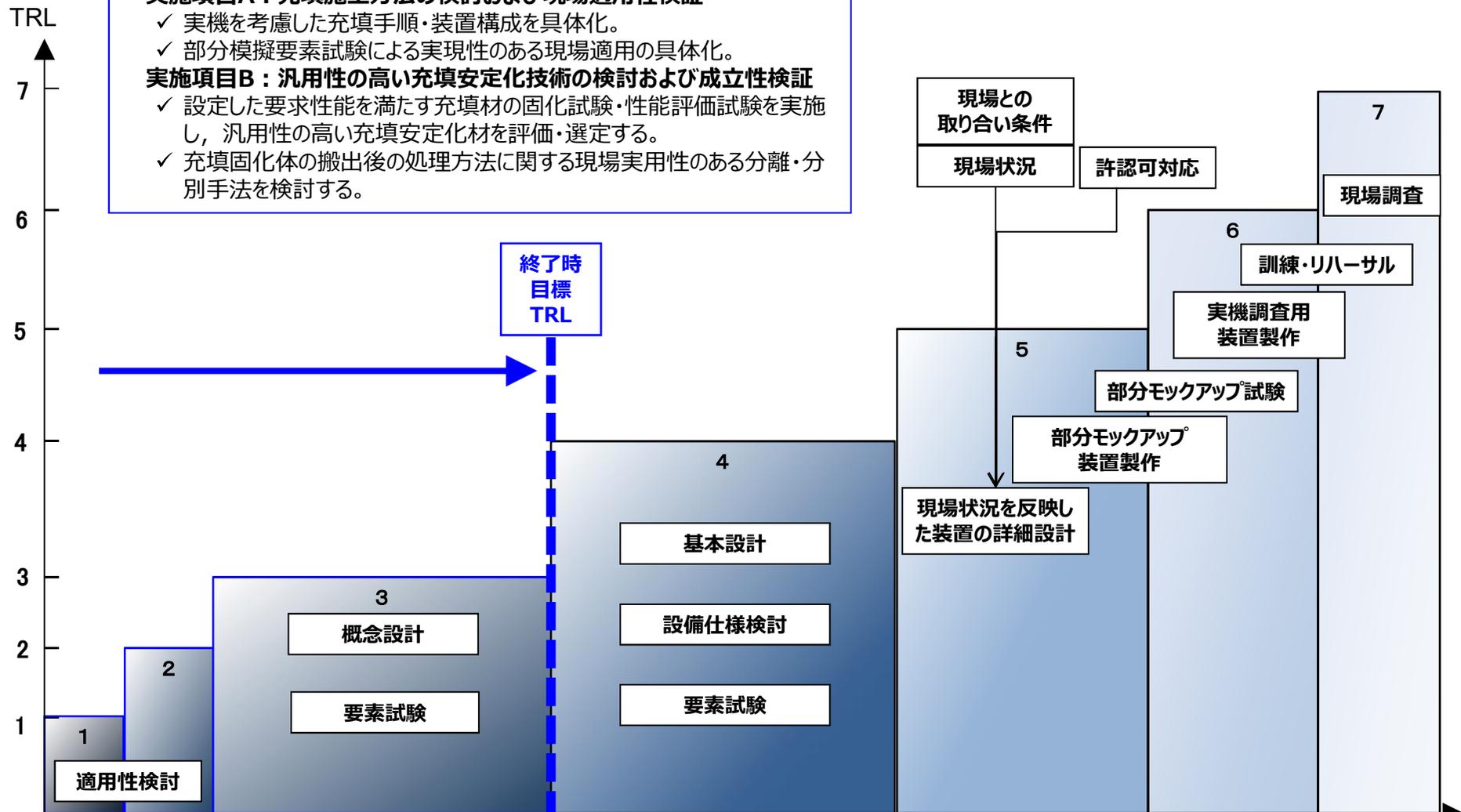
充填安定化方法の具体化について、以下を目標とする。

実施項目A：充填施工方法の検討および現場適用性検証

- ✓ 実機を考慮した充填手順・装置構成を具体化。
- ✓ 部分模擬要素試験による実現性のある現場適用の具体化。

実施項目B：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証

- ✓ 設定した要求性能を満たす充填材の固化試験・性能評価試験を実施し、汎用性の高い充填安定化材を評価・選定する。
- ✓ 充填固化体の搬出後の処理方法に関する現場実用性のある分離・分別手法を検討する。



4. 目標達成を判断する指標

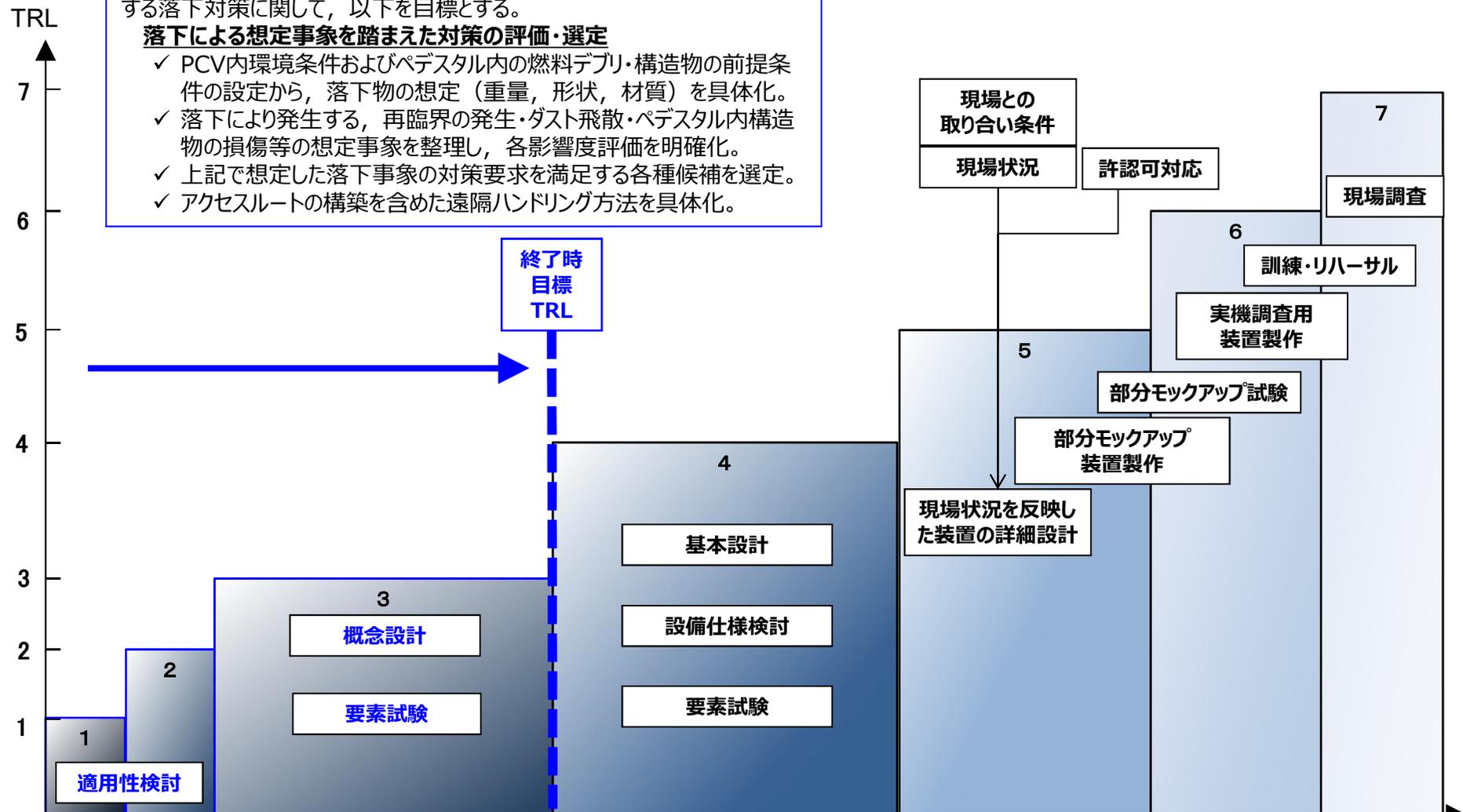
◆ 4.2 本事業のゴールイメージ（加工時落下対策技術の開発）

実施項目② 加工時落下対策技術の開発

燃料デブリ加工時におけるCRDハウジング等のペDESTAL内への落下事象に伴う、再臨界、ダスト飛散、機器損傷等の抑制・防止のために実施する落下対策に関して、以下を目標とする。

落下による想定事象を踏まえた対策の評価・選定

- ✓ PCV内環境条件およびペDESTAL内の燃料デブリ・構造物の前提条件の設定から、落下物の想定（重量、形状、材質）を具体化。
- ✓ 落下により発生する、再臨界の発生・ダスト飛散・ペDESTAL内構造物の損傷等の想定事象を整理し、各影響度評価を明確化。
- ✓ 上記で想定した落下事象の対策要求を満足する各種候補を選定。
- ✓ アクセスルート of 構築を含めた遠隔ハンドリング方法を具体化。



目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
 - 5.1 共通する前提条件の設定
 - 5.2 PCV・RPV内環境条件の整理および前提条件設定
 - 5.3 RPV内部（炉心部・炉底部）損傷状態の整理および前提条件設定
 - 5.4 ペDESTAL内損傷状態の整理および前提条件設定（一部想定を含む）
 - 5.5 前提条件の設定に関する参考資料一覧
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）

◆ 5.1 共通する前提条件の設定

- 充填安定化技術・加工時落下対策技術に共通する前提条件として、以下の3項目について、1-3号機までの内容を整理した。なお、各設定の詳細は次頁以降を参照とする。

【検討の共通条件として設定した炉内状況】

✓ PCV・RPV内環境条件の整理および前提条件設定

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（以下、IRIDという）・東京電力HDの「1-3号機PCV内部調査報告書」および先行実施されている「燃料デブリ取り出し工法の開発（2022年度）」の結果等から「温度」「湿度」「PCV水位」「圧力」「炉内注水量」「PCV内放射線量率」の環境条件を整理した。

✓ RPV内部（炉心部・炉底部）損傷状態の整理および前提条件設定

IRID・東京電力HDの「1-3号機PCV内部調査報告書」および先行実施されている「燃料デブリ取り出し工法の開発（2022年度）」の結果等から炉内構造物の状態および損傷により生じたRPV下鏡開口部の推定状況を整理した。

✓ ペDESTAL内損傷状態の整理および前提条件設定（一部想定を含む）

IRID・東京電力HDの「1-3号機PCV内部調査報告書」等から、1-3号機におけるペDESTAL内の燃料デブリおよび構造物の状態（一部想定を含む）を整理した。

5.前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）

◆ 5.2 PCV・RPV内環境条件の整理および前提条件設定

- IRID・東京電力HDの「1-3号機PCV内部調査報告書」および先行実施されている「燃料デブリ取り出し工法の開発（2022年度）」の結果等から、1-3号機におけるPCV・RPV内の環境条件を整理し、前提条件として設定した。

前提条件（PCV・RPV内の環境条件）

項目	設定した条件	理由
温度	R/B 内：-8~40 °C PCV 内：10~40 °C	R/B内温度は、外気温と同等と想定し設定する。PCV内温度は、東電HD「2号機原子炉注水停止試験結果」（2020年10月29日）を参考に余裕を含め設定する。
	RPV 内：10~55 °C	東京電力HD公開情報「プラント関連パラメータ」より設定する。
湿度	1-3号機共通： 100 %（ノークontrol）	屋外環境と同様と想定し設定する。
	RPV内：100 %	湿度は未測定のため、注水による蒸気を考慮して仮定する。
PCV 水位	降水環境ではあるが、燃料デブリ堆積面は水没していない状況とする。	燃料デブリ堆積面の上で落下対策を実施することから、燃料デブリ堆積面より下方位置に水位を設定する。
圧力	1-3号機共通： 約-400 Pa程度 （気相部：窒素パージ）	放射性物質の漏えいを防ぐため負圧管理を実施する可能性を想定。 負圧管理は、将来的な大規模取り出しの時期を想定し、令和2年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」「燃料デブリ・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（燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発）」での設定値を参考にセル内圧力-400 Paを設定する。
炉内 注水量	1-3号機共通： 作業に応じて一定期間注水停止*1する。	作業に応じて注水停止を許容できる前提とする。
PCV内 放射 線量率	1-3号機共通： ペDESTAL内外（気中、水中） 10 Sv/h	1-3号機PCV内部調査実施結果（*2のデータは除く）からPCV内放射線量率を設定する。また、設定する線量率は保守的とし、ペDESTAL内外の放射線量率の差異が少ないことから数値を同一とした。 ・1号機 ペDESTAL外：約9.4 Sv/h ペDESTAL内：公開情報なし ・2号機 ペDESTAL外：約70~80 Gy/h *2 ペDESTAL内：約7.6 Gy/h ・3号機 ペDESTAL外：約1 Sv/h ペDESTAL内：公開情報なし
	RPV内：90 Sv/h	補助事業「燃料デブリ取り出し工法の開発」2022年度最終成果報告添付資料より想定。

*1：通常は91 m³/日(1号), 36 m³/日(2号), 96 m³/日(3号)で注水している。*2：局所的な放射線量率のため、本検討においてはこのデータは除外する。

5.前提条件の設定 (充填安定化技術・加工時落下対策技術共通)

Decom.Tech

◆ 5.3 RPV内部 (炉心部・炉底部) 損傷状態の整理および前提条件設定

- IRID・東京電力HDの「1-3号機PCV内部調査報告書」および先行実施されている「燃料デブリ取り出し工法の開発 (2022年度)」の結果等から、1-3号機における炉内構造物の状態および損傷により生じたRPV下鏡開口部の推定状況を整理し、不確かさはあるが、これを前提条件として設定した。
- 損傷状況推定図は、これまでの損傷状況の情報から本事業で新たに作成したものである。なお、本損傷状況の推定根拠 (資料) は、5.5前提条件の設定に関する参考資料一覧を参照。

前提条件 (1-3号機 炉心部・炉底部の損傷状況)

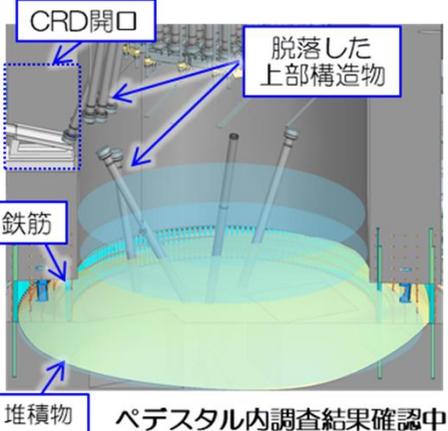
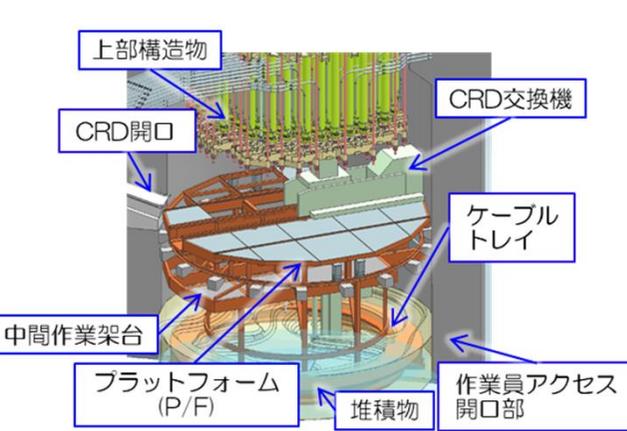
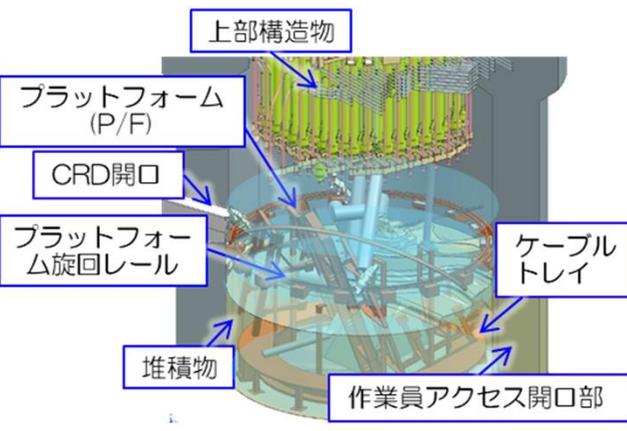
	1号機	2号機	3号機
損傷状況推定図			
損傷状況の概要	<ul style="list-style-type: none"> • 炉心部に構造物はほぼ残存しておらず、切り株燃料や燃料デブリは残存していない (資料1) • 炉底部に少量の燃料デブリが堆積 (資料5) • 炉底部中央部に開口が存在 (3号機と同程度) (資料2) • 炉底部にCRガイドチューブが倒壊 (資料1) 	<ul style="list-style-type: none"> • 炉心部に残存する構造物が少ない (資料3) • 炉心部 (外周部の一部) に切り株燃料や燃料デブリが残存 (3号機より多い) (資料4) • 炉底部に燃料デブリが堆積 (資料5) • 炉底部に上部タイプレートが落下する大きさの開口が存在 (資料4) (側面部に□20 cm程度の開口が存在と仮定) • 不安定なCRガイドチューブが多数存在 (資料5) 	<ul style="list-style-type: none"> • 炉心部に残存する構造物が少ない (資料5) • 炉心部 (外周部の一部) に切り株燃料や燃料デブリが残存 (資料3) • 炉底部に燃料デブリが残存 (資料5) • 炉底部にCRガイドチューブが落下する大きさの開口が存在 (資料5) (中央部に70×100 cmの開口が存在すると仮定) • 上記開口の上部にCRガイドチューブが倒壊 (資料5)

5.前提条件の設定 (充填安定化技術・加工時落下対策技術共通)

◆ 5.4 ペDESTAL内損傷状態の整理および前提条件設定 (一部想定を含む)

- IRID・東京電力HDの「1-3号機PCV内部調査報告書」等から、1-3号機におけるペDESTAL内の燃料デブリおよび構造物の状態 (一部想定を含む) を整理し、前提条件として設定した。
- 本損傷状況の推定根拠 (資料) は、5.5前提条件の設定に関する参考資料一覧を参照。

前提条件 (1-3号機 ペDESTAL内の損傷状況)

	1号機	2号機	3号機
損傷状況推定図	 <p>CRD開口</p> <p>脱落した上部構造物</p> <p>鉄筋</p> <p>堆積物</p> <p>ペDESTAL内調査結果確認中</p>	 <p>上部構造物</p> <p>CRD開口</p> <p>CRD交換機</p> <p>ケーブルトレイ</p> <p>中間作業架台</p> <p>プラットフォーム (P/F)</p> <p>堆積物</p> <p>作業員アクセス開口部</p>	 <p>上部構造物</p> <p>プラットフォーム (P/F)</p> <p>CRD開口</p> <p>プラットフォーム回転レール</p> <p>ケーブルトレイ</p> <p>堆積物</p> <p>作業員アクセス開口部</p>
燃料デブリ堆積高さ	約0.6~1 m堆積 (資料6)	約0.4~0.7m堆積 (資料7)	約2~3 m堆積 (資料8)

5.前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）

◆ 5.5 前提条件の設定に関する参考資料一覧

前提条件の設定に関する参考資料一覧

No.	資料名称
1	技術研究組合国際廃炉研究開発機構，一般財団法人エネルギー総合工学研究所 「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」平成29年度成果報告（平成30年6月）
2	技術研究組合国際廃炉研究開発機構，東京電力ホールディングス株式会社 「1号機PCV内部調査(後半)について」（2023年4月27日）
3	技術研究組合国際廃炉研究開発機構 平成27年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「総合的な炉内状況把握の高度化」研究報告書（平成30年3月）
4	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構，廃炉環境国際共同研究センター 令和4年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 「原子炉圧力容器の損傷状況等の推定のための技術開発」2022年度最終報告書（2023年9月）
5	東京電力ホールディングス株式会社 「福島第一原子力発電所事故発生後の原子炉圧力容器内・格納容器内の状態推定について」（2021年7月19日）
6	「令和2年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリ・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(燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発)」2021年度最終成果報告」
7	「PCV内部調査に関する公開図書で報告されているベDESTAL内落下物，炉底部の損傷情報（写真）」、「平成28年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化 平成年度最終報告」
8	「令和3年度開始 廃炉・汚染水対策事業費補助金に係る補助事業（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 -2022年度最終報告-）」
参考	平成29年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 原子炉圧力容器内部調査技術の開発 研究報告書（中間報告）平成31年3月
参考	平成27年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ臨界管理技術の開発 研究報告書（平成30年3月）
参考	IRID、東京電力HD「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第39回）資料1 1号機原子炉格納容器内部調査の状況について」（2023年9月12日）
参考	IRID、東京電力HD「1号機PCV内部調査（後半）について」（2023年4月27日）
参考	IRID、東京電力HD「福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査結果について」（2018年4月26日）
参考	東京電力HD「福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査実施結果」（2019年2月28日）
参考	東京電力HD「福島第一原子力発電所3号機原子炉格納容器調査映像からの3次元復元結果」（2018年4月26日）
参考	IRID、東京電力HD「3号機原子炉格納容器内部調査について」（2017年11月30日）
参考	東京電力HD「福島第一原子力発電所事故発生後の原子炉圧力容器内・格納容器内の状態推定について」（2021年7月19日）

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
- 6. 充填安定化技術の開発**
 - 6.0 事業背景**
 - 6.0.1 テーマA: 充填施工方法の検討および現場適用性検証**
 - 6.0.2 テーマB: 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証**
 - 6.0.3 各テーマの違い**
 - 6.1 充填施工方法の検討および現場適用性検証（テーマA）
 - 6.2 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証（テーマB）
 - 6.3 現場適用性に向けた課題抽出および評価
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

6. 充填安定化技術の開発

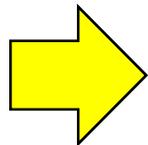
◆ 6.0 事業背景

● 6.0.1 テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証

- これまで気中上取り出し工法は、炉心部や炉底部の解体加工時の安全性・効率を向上するために、充填固化材で安定化させた上で切断・撤去する方法の検討として、基礎試験による充填材の特性把握や施工方法による概念検討等を行ってきた。
- また、予め不安定な炉内構造物を充填固化することにより、炉内作業での機器接触などによる炉内構造物の転倒・落下のリスクを低減する可能性が考えられる。
- 本事業では、充填安定化技術の現場適用に向けて炉内の損傷状況・炉底部開口等の条件を設定し、有効な充填安定化方法、装置構成、充填手順などについて現場適用性を検討する。

● 6.0.2 テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証

- 充填安定化技術の様々な用途への活用を目的とし、汎用性の高い充填材の抽出・評価を行う。
- ここでいう汎用性とは、RPVおよびRPV以外への適用可能性を指し、各適用先について必要とされる安定化や補修等を実現するために相応の充填材や充填工法を選定することで施工可能とする検討を実施する。
- 本評価にあたっては、充填材の固化試験・性能評価試験を行うと共に、充填固化体の処理・処分への影響、および発熱体（燃料デブリ）を固化した際の影響も考慮した検討・評価を行う。



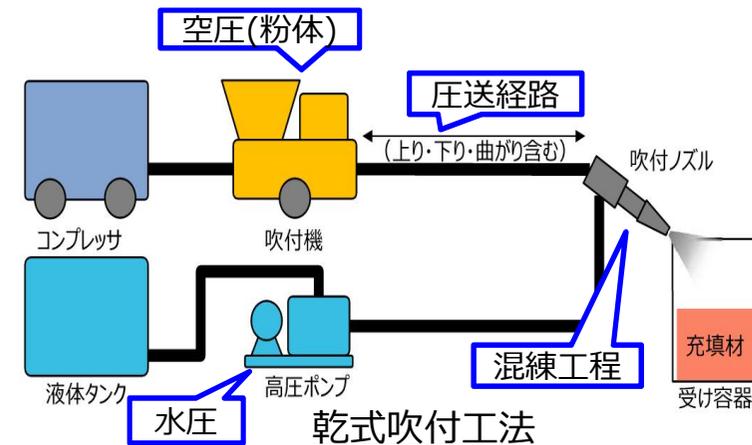
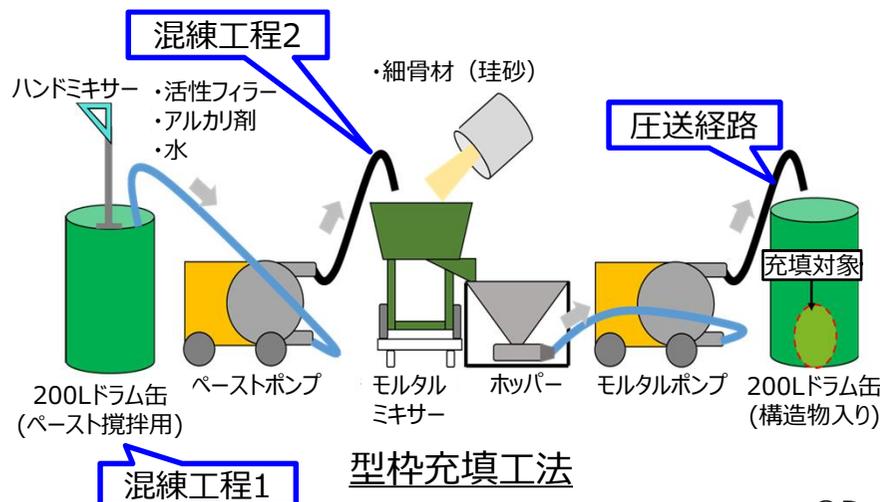
上記2テーマの要素試験の位置付けとしては、**充填材を現場側の固定対象までに圧送ができた**と仮定した上で**末端側の固化成立を確認**することで充填工法の成立性を判断する。

6. 充填安定化技術の開発

● 6.0.3 各テーマの違い

➤ 充填安定化技術の開発における検討テーマA，テーマBに関する背景を下表にまとめる。

充填安定化技術の開発	テーマ A 充填施工方法の検討および現場適用性検証	テーマ B 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証
経緯	継続テーマ (現場適用に向けた更なる検討)	2023年度新規開始テーマ (汎用性のある充填補修技術の適用をベースに開発)
開発目標	RPVの炉心部・炉底部への充填補修の適用を考慮した工法の確立	RPVに限らない充填補修の適用を考慮した汎用性の高い工法の確立
充填材	ジオポリマー(配合可変)	ジオポリマー・セメント他(配合可変)
充填程度	部分充填(全充填も視野)	部分充填(補修向き)
適用工法	上アクセス工法	上アクセス工法, 横アクセス工法, その他補修
充填工法	型枠充填工法 (混練した材料を圧送し流し込む)	乾式吹付工法 (材料[水・粉体等]を個別に圧送した後, ホース先端のノズル部で混練し吹き付ける)



目次

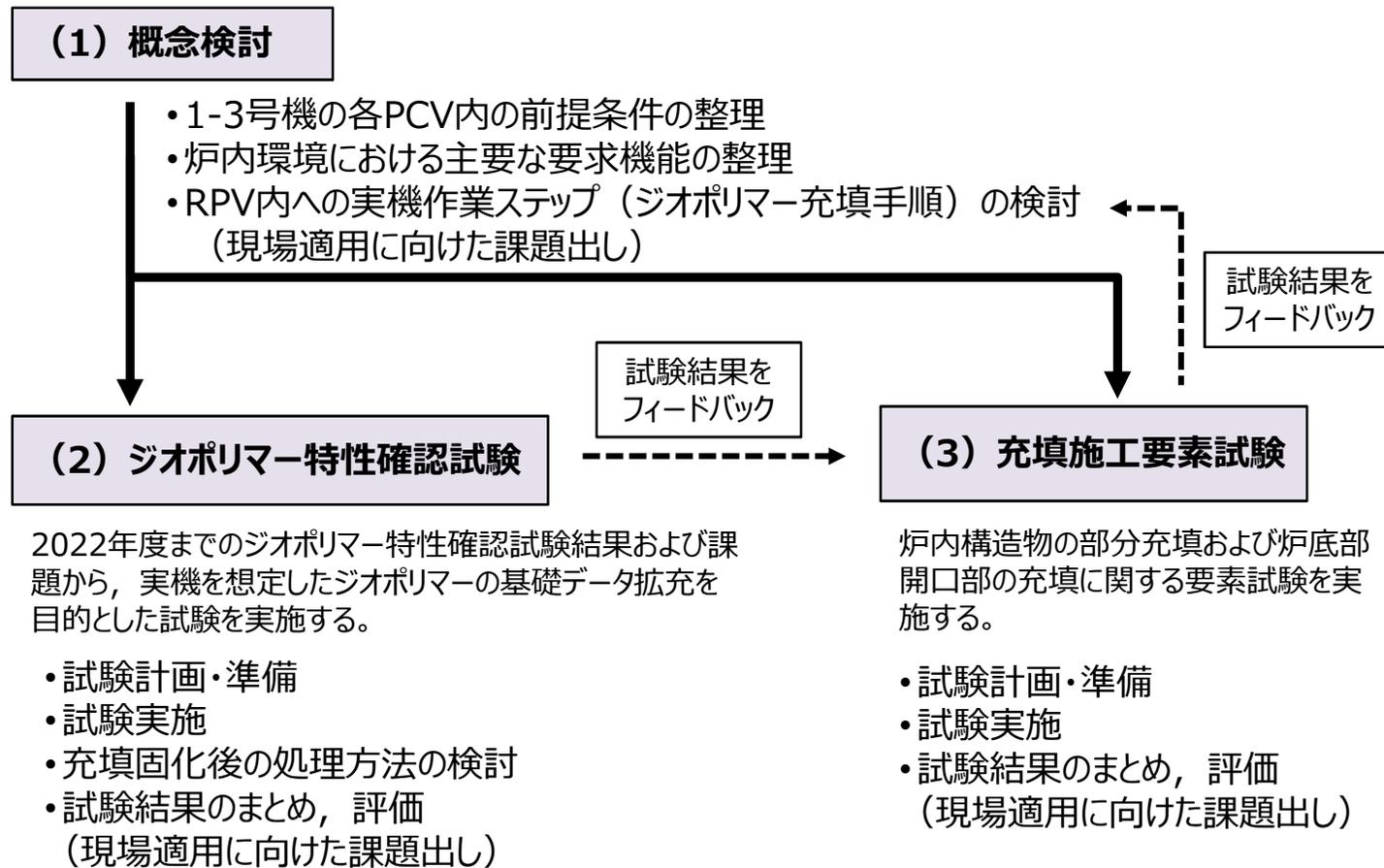
1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
- 6. 充填安定化技術の開発**
 - 6.0 事業背景
 - 6.1 充填施工方法の検討および現場適用性検証（テーマA）**
 - 6.1.1 開発フロー
 - 6.1.2 概念検討
 - 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験
 - 6.1.4 充填施工要素試験
 - 6.2 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証（テーマB）
 - 6.3 現場適用性に向けた課題抽出および評価
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

◆ 6.1 充填施工方法の検討および現場適用性検証 (テーマA)

● 6.1.1 開発フロー (テーマA)

- 「テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証」に関する開発フローを以下に示す。



開発フロー (テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証)

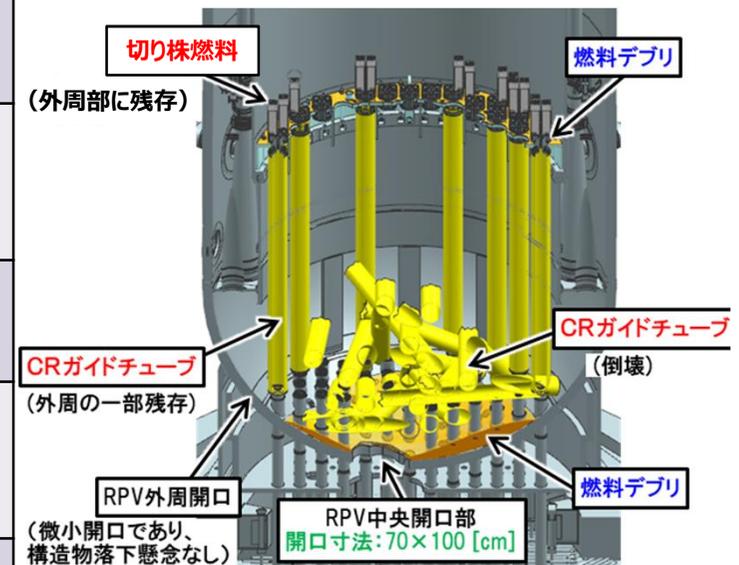
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (要求機能の整理)

- 5章：前提条件の設定の結果を踏まえ、1-3号機の炉内状況を以下に整理した。
- 炉内状況の整理結果より抽出した主要な対策（要求機能）を以下に示す。

炉内状況と対策

号機	対象	炉内状況	対策 (要求機能)
1	炉心部	(※ ミュオン測定により燃料棒が残存していないと想定)	—
	炉底部	① 燃料デブリが堆積(少量)し, 不安定なCRガイドチューブ等が残存 ② 中央に開口(3号機と同程度)が存在	① 脱落防止 (燃料デブリ, CRガイドチューブ等) ② 開口閉止
2	炉心部	① 残存した切り株燃料や燃料デブリが残存	① 脱落防止 (切り株燃料, 燃料デブリ等)
	炉底部	① 燃料デブリの堆積(3号機より多い) ② 側面に開口(□20cm)が存在	① 脱落防止 (燃料デブリ, CRガイドチューブ等) ② 開口閉止
3	炉心部	① 残存した切り株燃料や燃料デブリが残存	① 脱落防止 (切り株燃料, 燃料デブリ等)
	炉底部	① 燃料デブリの堆積 ② 中央に開口(70×100cm)が存在	① 脱落防止 (燃料デブリ, CRガイドチューブ等) ② 開口閉止



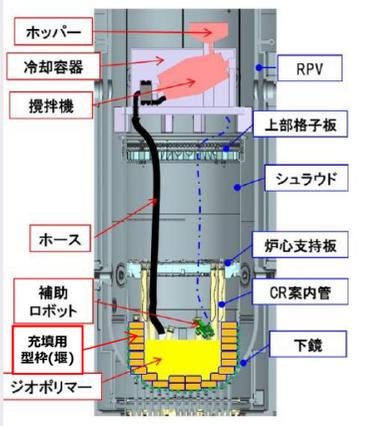
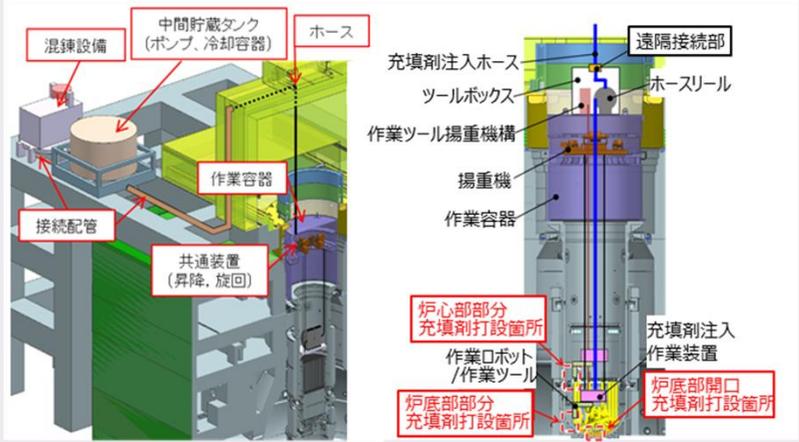
損傷状況推定図 (3号機の例)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.2 概念検討 (移送方式)

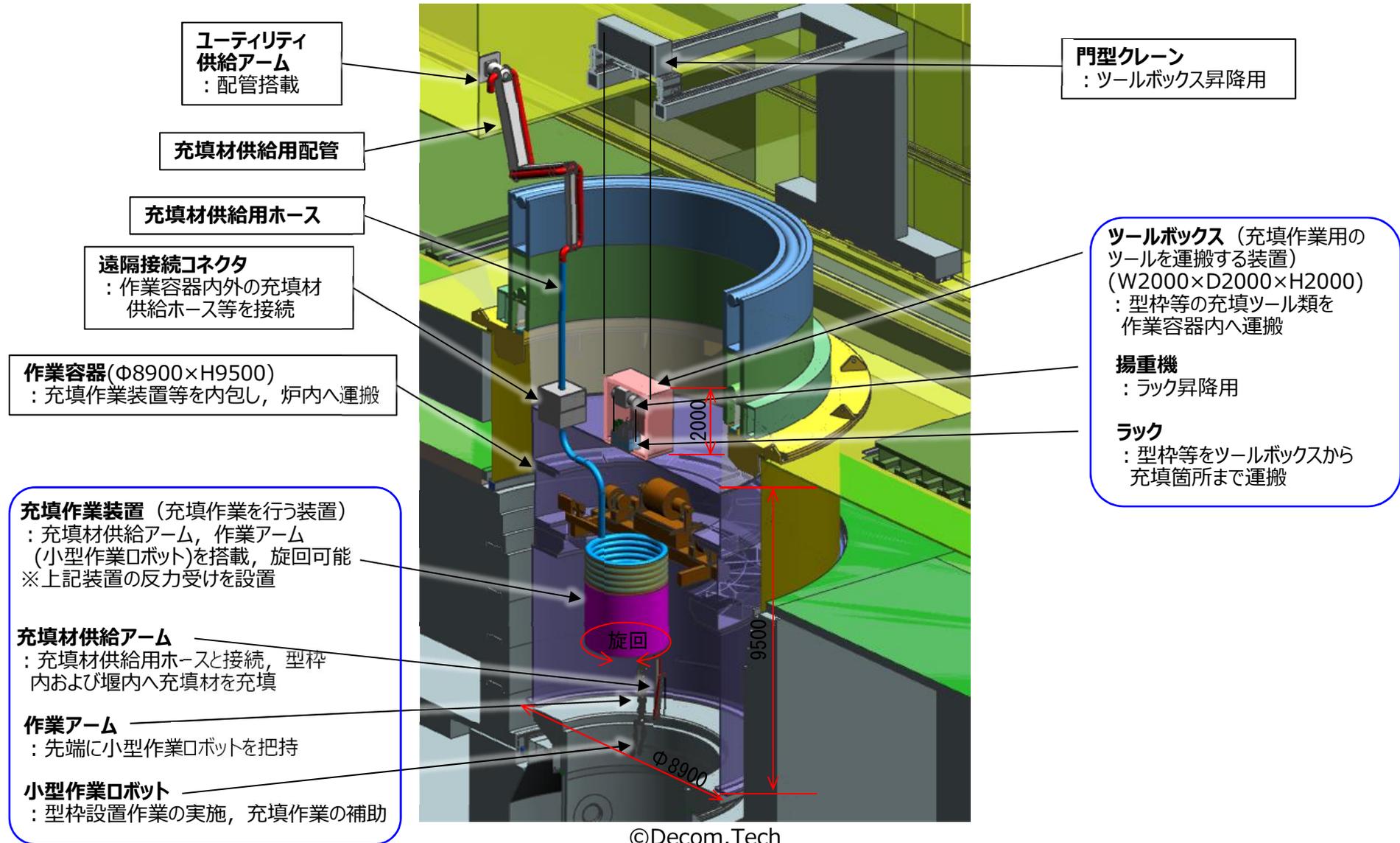
- RPV内への充填材を投入するにあたり、炉内への充填方法 (方式) を検討した。
- 検討の結果、「バッチ処理方式」および「連続投入方式」の2種類の方式を抽出した。以下に各方式に関する説明およびイメージ図を示し、現場に適するかの比較評価を以下に示す。
- 比較評価の結果より本事業での充填方法 (方式) は「連続投入方式」を採用とした。

バッチ処理方式および連続投入方式の比較表

	バッチ処理方式	連続投入方式
コンセプト	炉内で材料を混練し、充填施工箇所までの距離を短くすることで、流動性を維持しながら施工する。	構台上や地上で材料を混練し、炉内へホースで圧送することで、連続して施工する。
イメージ図		
評価	<p>△</p> <ul style="list-style-type: none"> ・移送距離が連続投入方式と比較して短いため、ホース内の詰まりリスクが低減される。 ・攪拌機等の混練設備を炉内に設置する必要があり、炉内装置との共存は寸法制約上の難易度が高い。 ・完全遠隔で混練作業等を実施する必要がある。 	<p>○</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ジオポリマー製造作業 (混練等) に関する設備を人がアクセス可能な場所に設置できるため、トラブル等の対応が容易。 ・大量のジオポリマーを供給可能。 ・移送距離がバッチ方式に比べ長くなるため、ホース内の詰まりリスクが上がる。

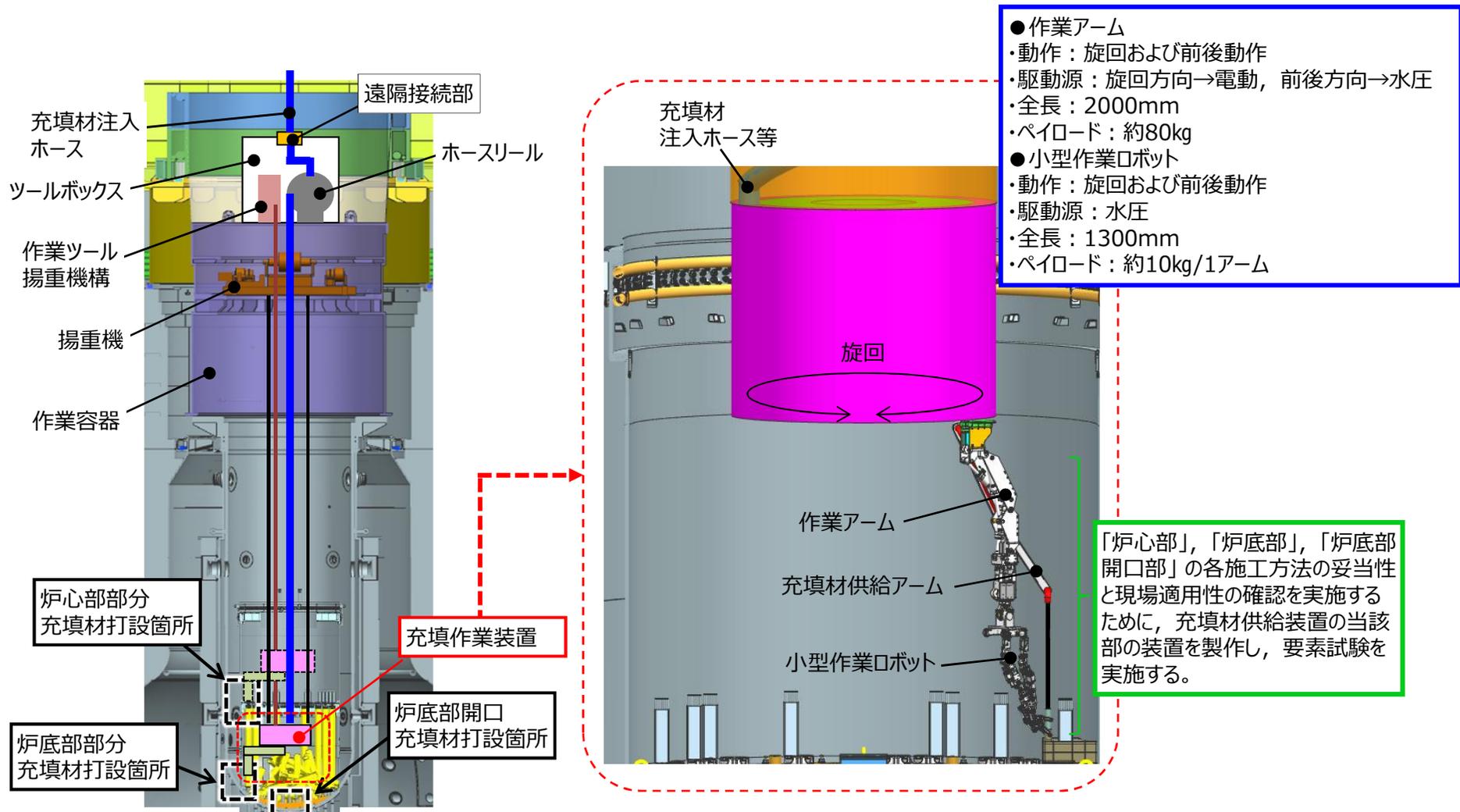
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (充填作業装置の全体概要) (1/2)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (充填作業装置の全体概要) (2/2)



充填作業装置の概要

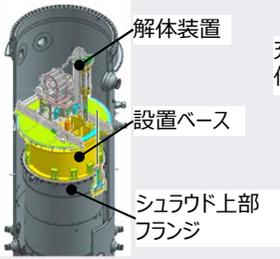
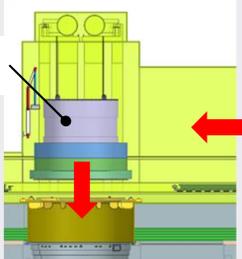
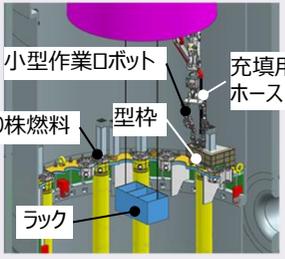
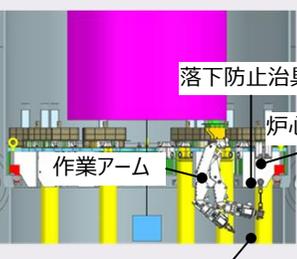
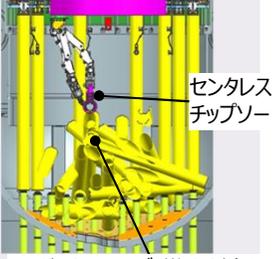
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (実機作業フロー) (1/2)

- 実機におけるジオポリマー充填作業フローを以下に示す。なお、前提となる工法としては大型一体搬出工法*1を基礎とする。
- 実機の作業フローとして、上部格子板を撤去した後に炉心部、炉底部、炉底開口部の手順で充填固化および干渉物撤去をする方針とした。

*1：IRID「令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリの取り出し工法の開発 2022年度最終報告」(2023年6月)

実機を想定したジオポリマー充填施工の作業フロー (1/2)

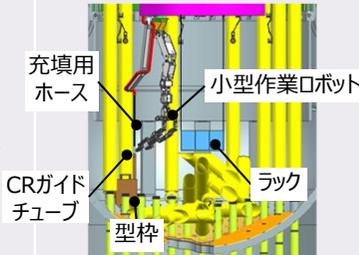
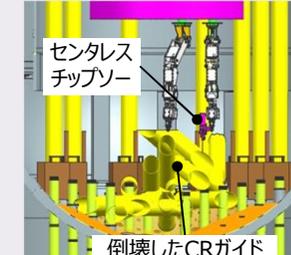
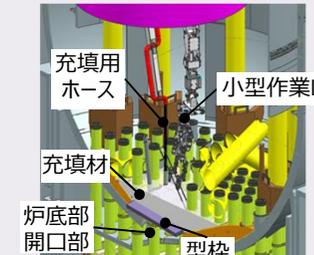
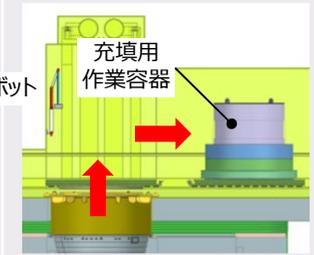
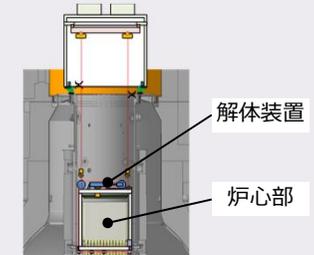
ステップ	0. 上部格子板搬出	1. 炉心部充填		2. 炉底部充填	
内容	上部格子板搬出	充填用作業容器搬入	炉心部充填	落下防止治具設置	倒壊CRガイドチューブ 頂部撤去①
作業イメージ					
遠隔/有人	遠隔				
作業内容詳細	<ul style="list-style-type: none"> 設置ベースをシュラウド上部フランジ上に設置後、その上に解体装置を設定。 解体装置から切断ツールを吊り降ろし、シュラウド中間フランジ下を切断。 シュラウド上部とともに上部格子板を作業容器内に収納し、搬出。(2022年度補助事業にて検討) 	<ul style="list-style-type: none"> 充填用作業容器を搬入し、原子炉開口部に設置。 	<ul style="list-style-type: none"> 小型作業ロボットにて、ラックから炉心部充填用型枠等を取り出し、充填位置に設置。 型枠と充填用ホースを接続し、型枠内を充填。 型枠と充填用ホースの接続を解除し、充填用ホースを堰内に移動させて堰内を充填。切り株燃料等を固化。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業容器を構造物解体用と入れ替え。 残存しているCRガイドチューブと炉心支持板に穴加工ツールで落下防止治具取り付け用の穴を加工。 加工した穴に落下防止治具を設置し、不安定なCRガイドチューブを固定。 	<ul style="list-style-type: none"> センタレスチップソーで倒壊したCRガイドチューブの頂部を撤去し、炉底部へのアクセスルートを構築。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

Decom.Tech

● 6.1.2 概念検討 (実機作業フロー) (2/2)

実機を想定したジオポリマー充填施工の作業フロー (2/2)

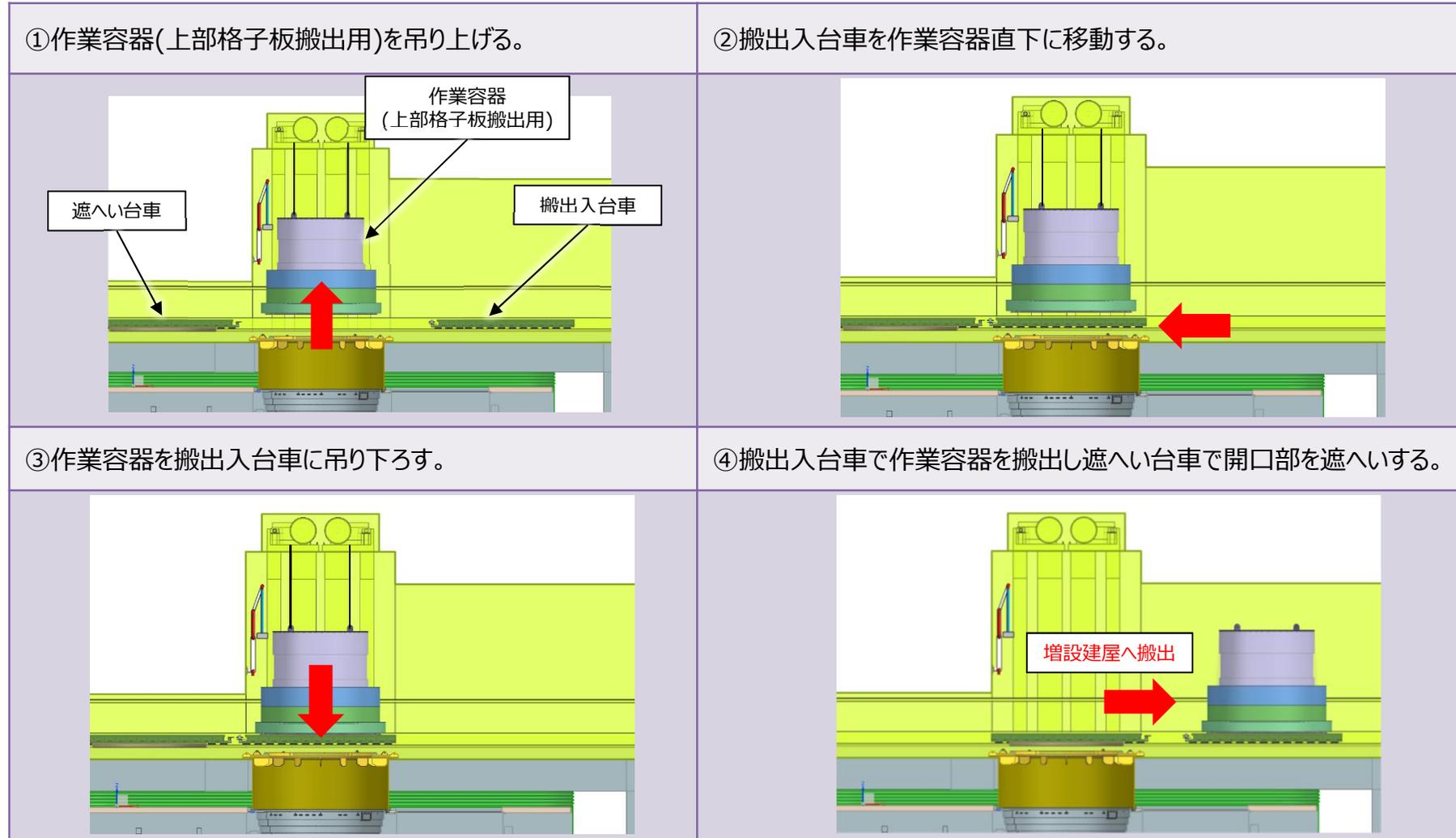
ステップ	2. 炉底部充填		3. 炉底部開口部充填		4. 炉心部搬出		
内容	炉底部充填		倒壊CRガイドチューブ 頂部撤去②	炉底部開口部充填	充填用作業容器搬出	炉心部切断・搬出	
作業 イメージ							
遠隔/有人			遠隔				
作業内容 詳細	<ul style="list-style-type: none"> 作業容器を充填用と入れ替え。 小型作業ロボットにて、ラックから炉底部充填用型枠等を取り出し、充填位置に設置。 型枠と充填用ホースを接続し、型枠内を充填。 型枠と充填用ホースの接続を解除し、充填用ホースを堰内に移動させて堰内を充填。CRガイドチューブ等を固化。 		<ul style="list-style-type: none"> 作業容器を構造物解体用と入れ替え。 センタレスチップソーで倒壊したCRガイドチューブを撤去し、炉底部開口部へのアクセスルートを構築。 		<ul style="list-style-type: none"> 作業容器を充填用と入れ替え。 小型作業ロボットにて炉底部開口部充填用型枠を把持した状態で、開口部付近まで下降し、開口部に型枠を設置。 型枠と充填用ホースを接続し、型枠内を充填。 型枠と充填用ホースの接続を解除し、充填用ホースを型枠上に移動させて型枠上(炉底部)を充填。 	<ul style="list-style-type: none"> 充填用作業容器を搬出。 	<ul style="list-style-type: none"> 解体装置を吊り降ろし、シュラウドサポート上に設定後、先端の切断ツールを用いて、シュラウド下部フランジ下側を切断する。 解体装置(切断ツール)を入れ替えた後、炉心部(充填状態)を切断する。シュラウド・炉心部切断後、シュラウドとともに炉心部を作業容器に収納・搬出。(2022年度補助事業にて検討)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

- 前頁で示した実機作業フローの内ステップ1～3に対して具体的な実機作業ステップ案を以下に示す。

(1) 炉心部充填 (充填用作業容器搬入) (1/4)

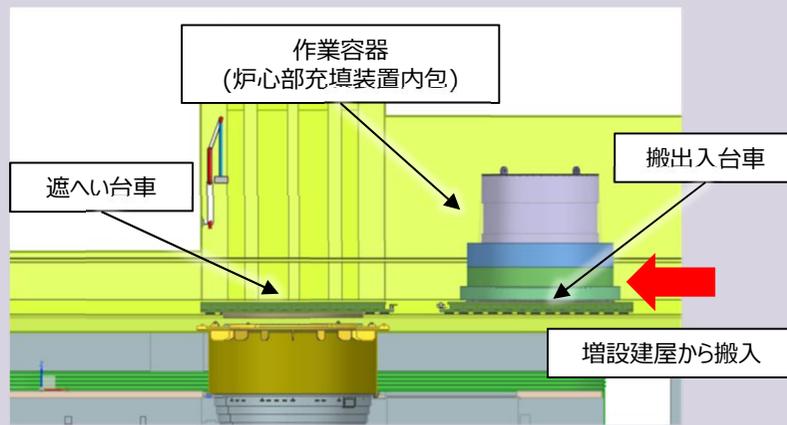


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

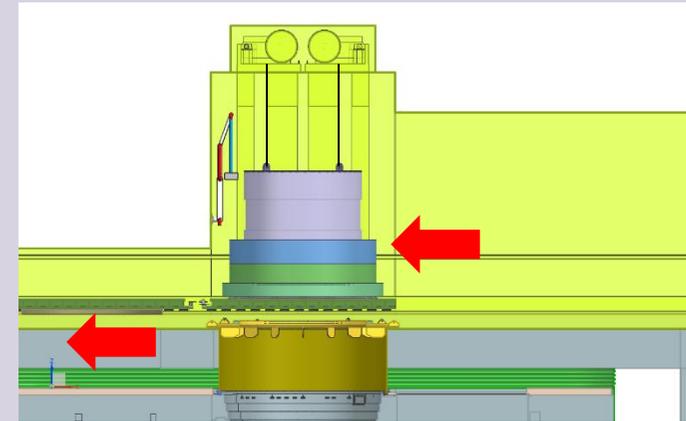
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(1) 炉心部充填 (充填用作業容器搬入) (2/4)

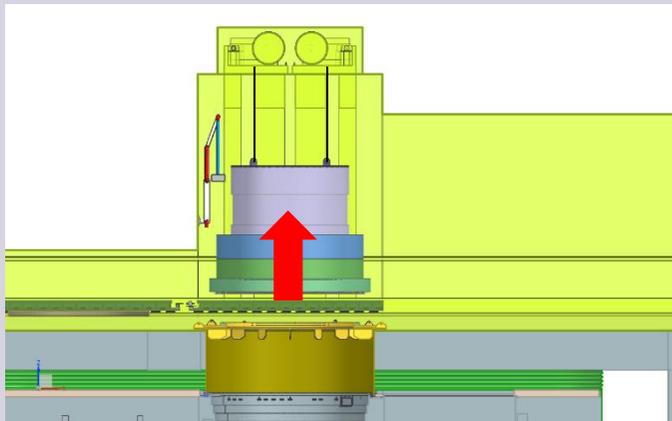
⑤ 搬出上台車に作業容器(炉心部充填装置内包)を積載し搬入する。



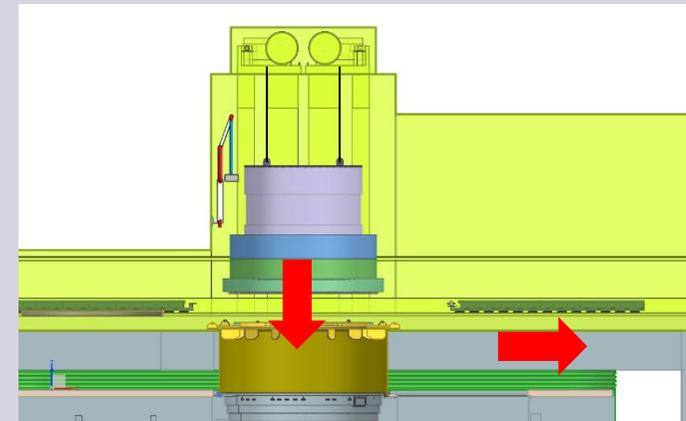
⑥ 搬出上台車を作業容器の吊り上げ位置に移動し吊りワイヤを設置する。(遮へい台車を待機位置に移動する)



⑦ 作業容器を吊り上げる。



⑧ 搬出上台車を移動し作業容器を吊り下ろす。

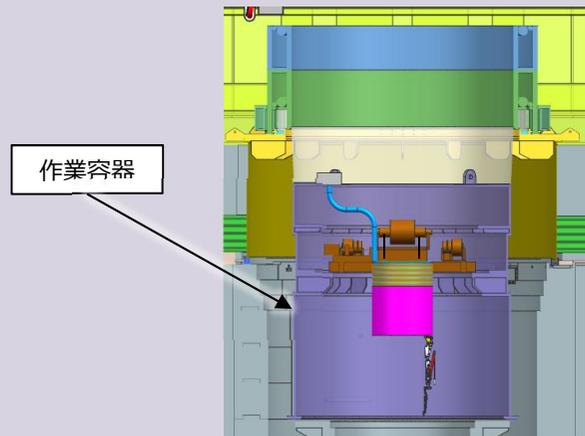


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

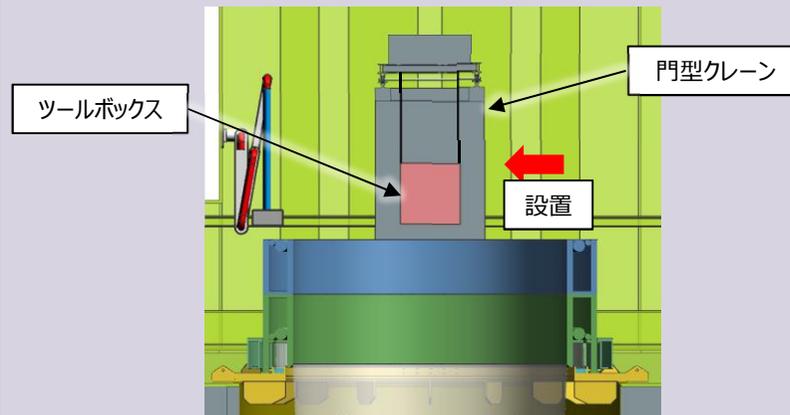
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(1) 炉心部充填 (充填用作業容器搬入) (3/4)

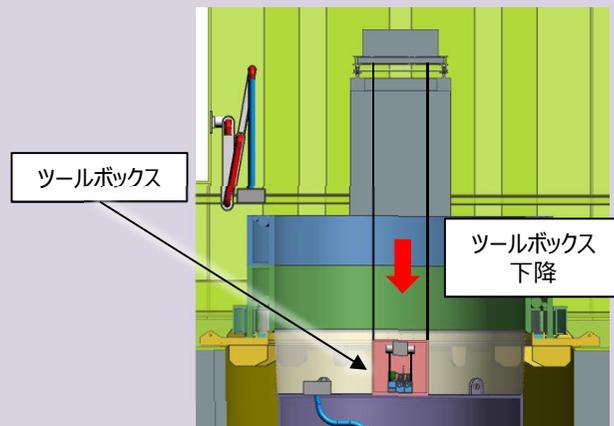
⑨ 作業容器を設置する。



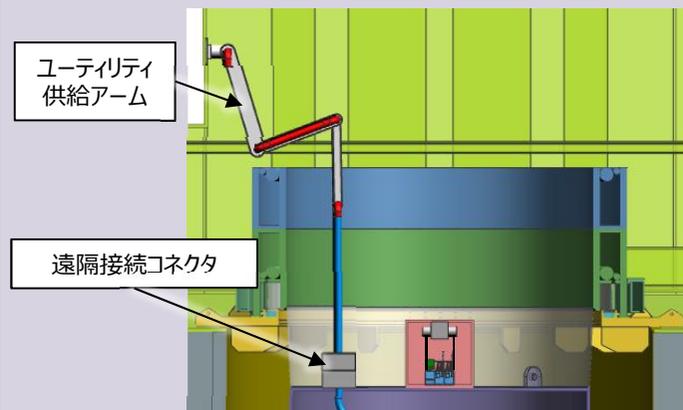
⑩ ツールボックスを門型クレーンで吊上げ作業容器上に搬入する。



⑪ ツールボックスを作業容器上面に設置する。



⑫ ユーティリティ供給アームを展開し遠隔接続コネクタに接続する。

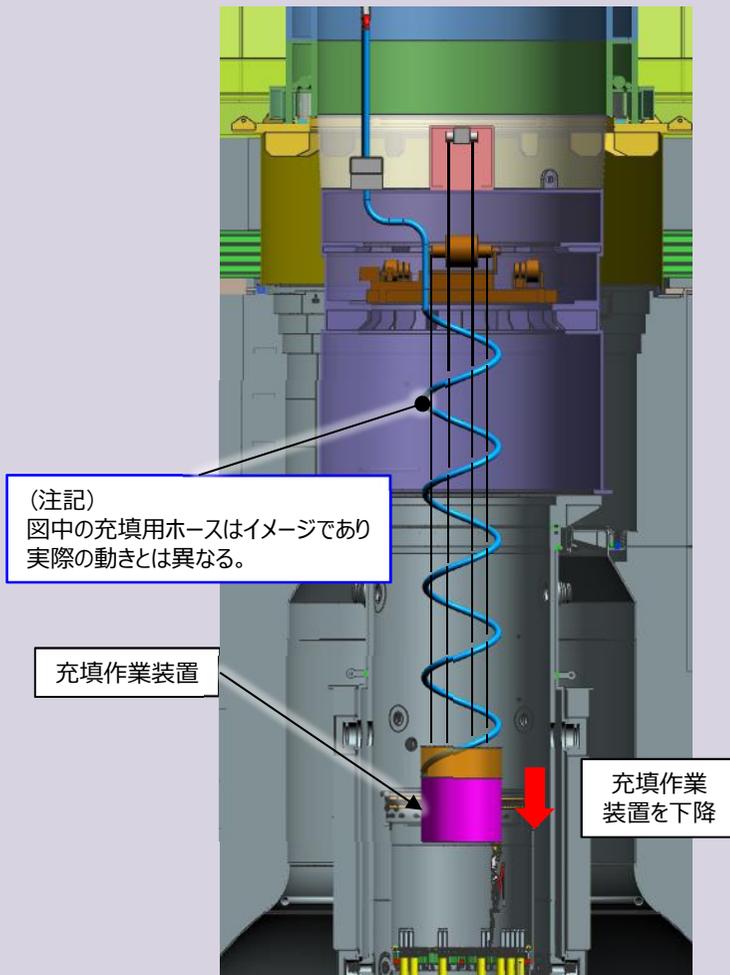


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

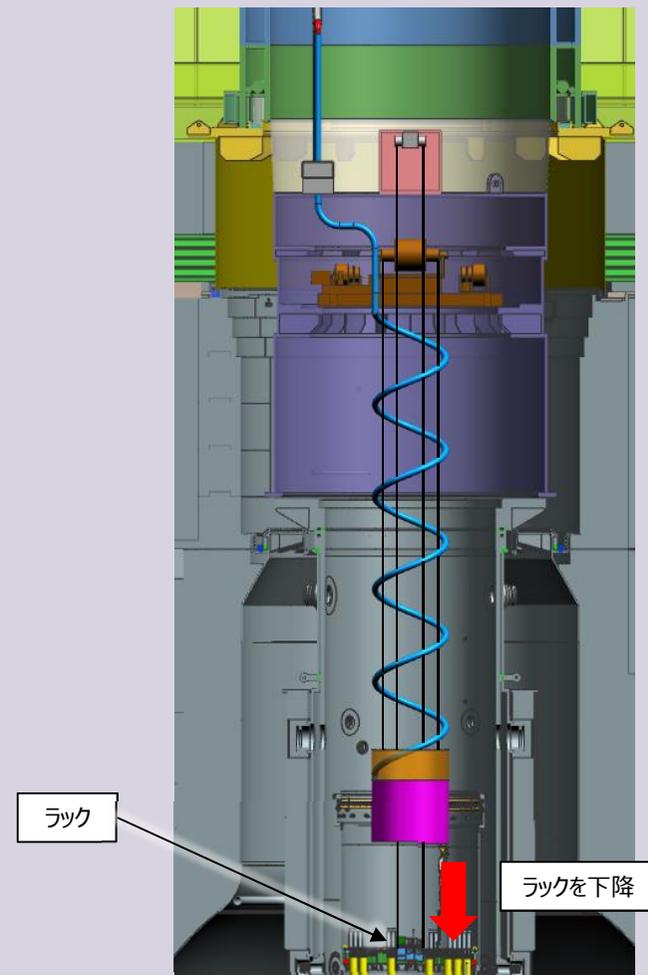
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(1) 炉心部充填 (充填用作業容器搬入) (4/4)

⑬ 充填作業装置を下降させる。



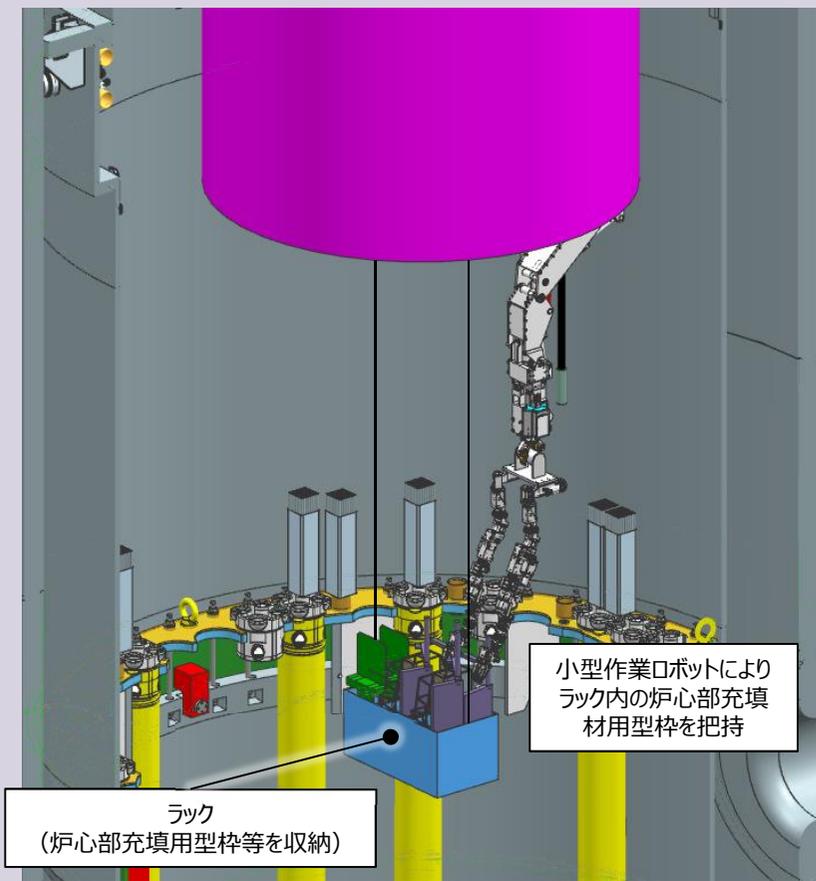
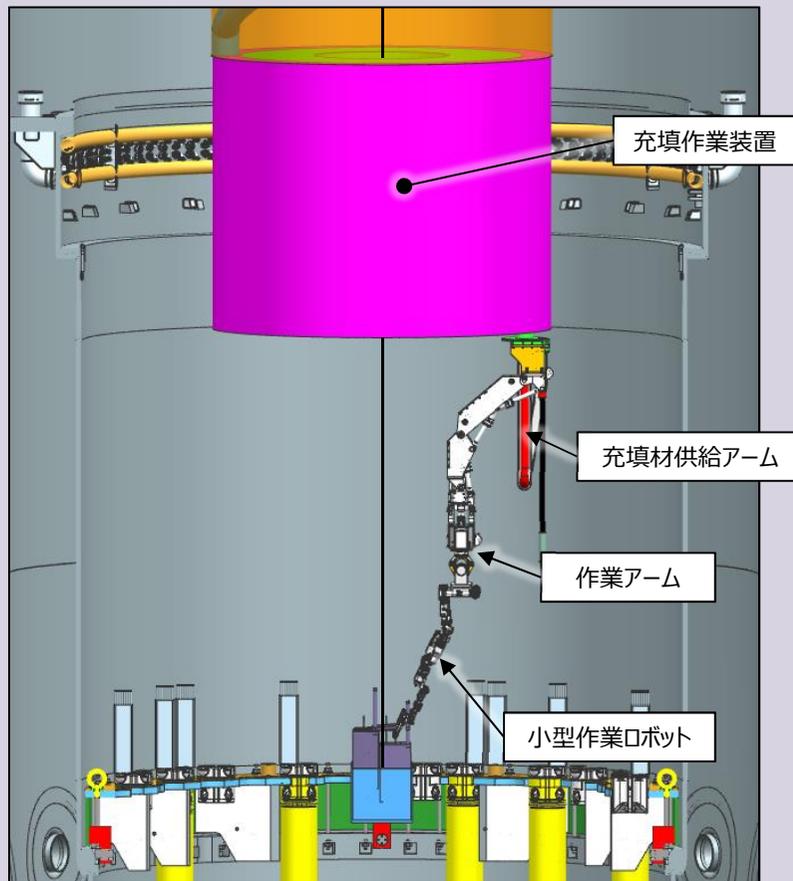
⑭ ラックを下降させる。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

- 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)
 - (1) 炉心部充填 (炉心部充填) (1/3)

① 小型作業ロボットでラック内の炉心部充填用型枠を把持する

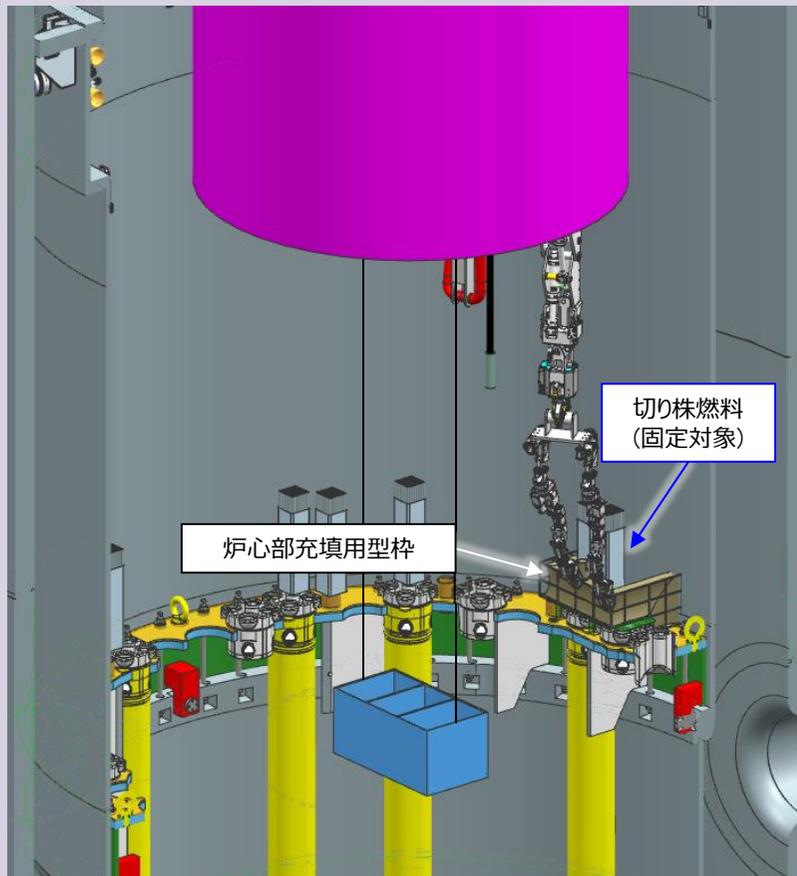


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

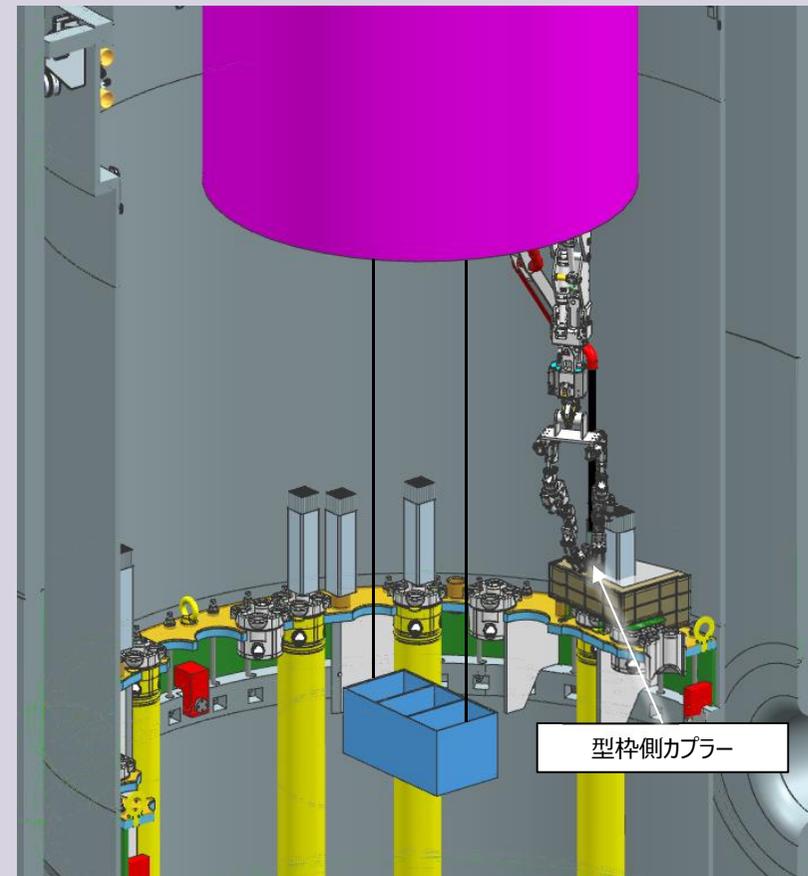
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(1) 炉心部充填 (炉心部充填) (2/3)

② 炉心部充填用型枠等を設置する。



③ 型枠側のカプラーに充填材供給アームのホースを接続して型枠内部に充填することで堰を形成し、その後堰内を充填する。

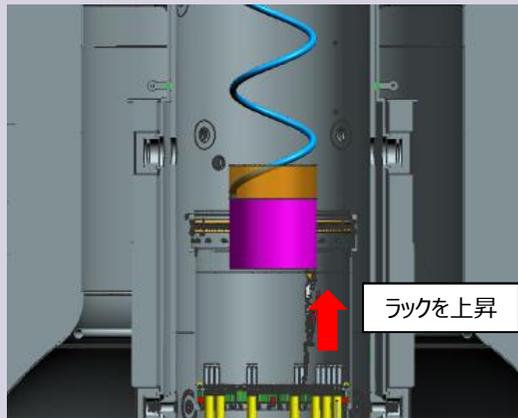


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

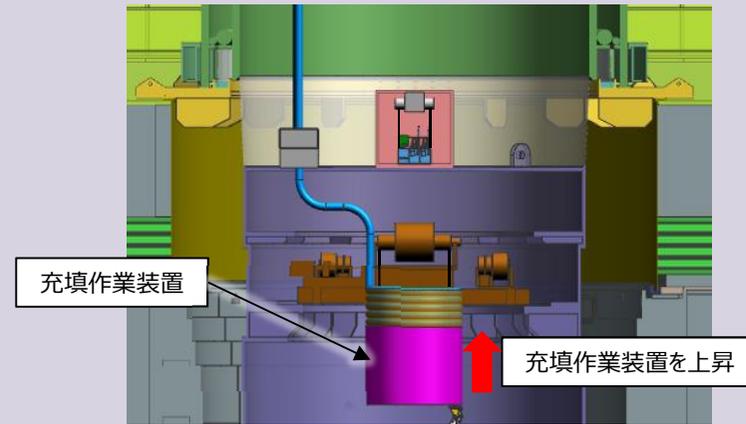
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(1) 炉心部充填 (炉心部充填) (3/3)

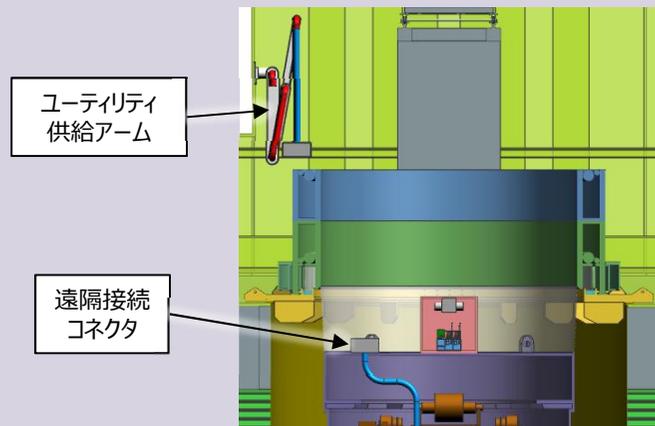
④ラックを上昇させ、ツールボックス内に格納する。



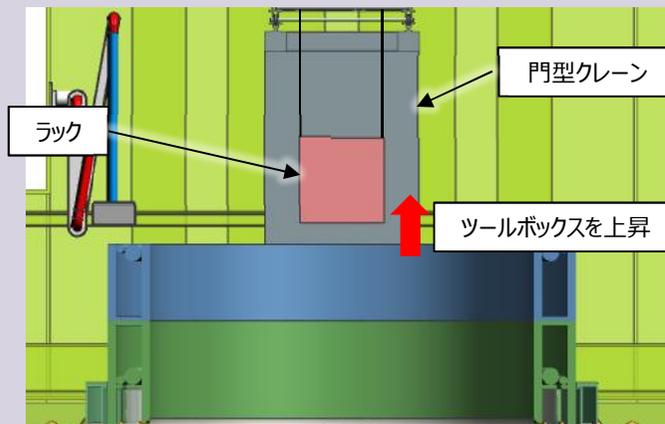
⑤充填作業装置を上昇させる



⑥遠隔接続コネクタの接続を解除しユーティリティ供給アームを格納する。



⑦ツールボックスを門型クレーンで吊上げ回収する。

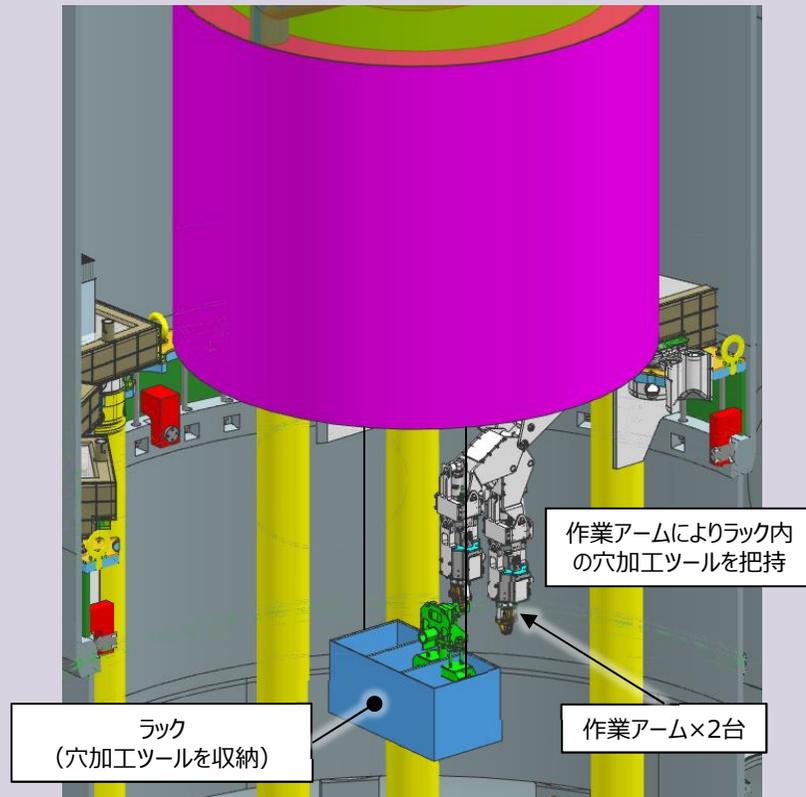


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

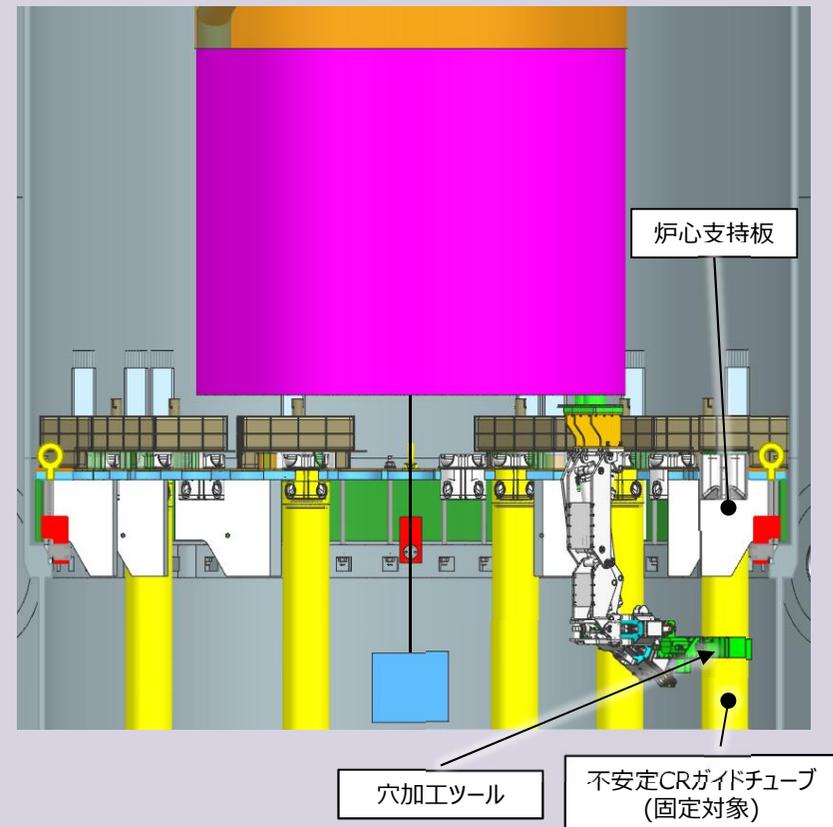
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(2) 炉底部充填 (落下防止治具設置) (1/2)

①作業アームでラック内の穴加工ツールを把持する。



②残存しているCRガイドチューブ, および炉心支持板に穴加工ツールで落下防止治具取付用の穴を開ける。

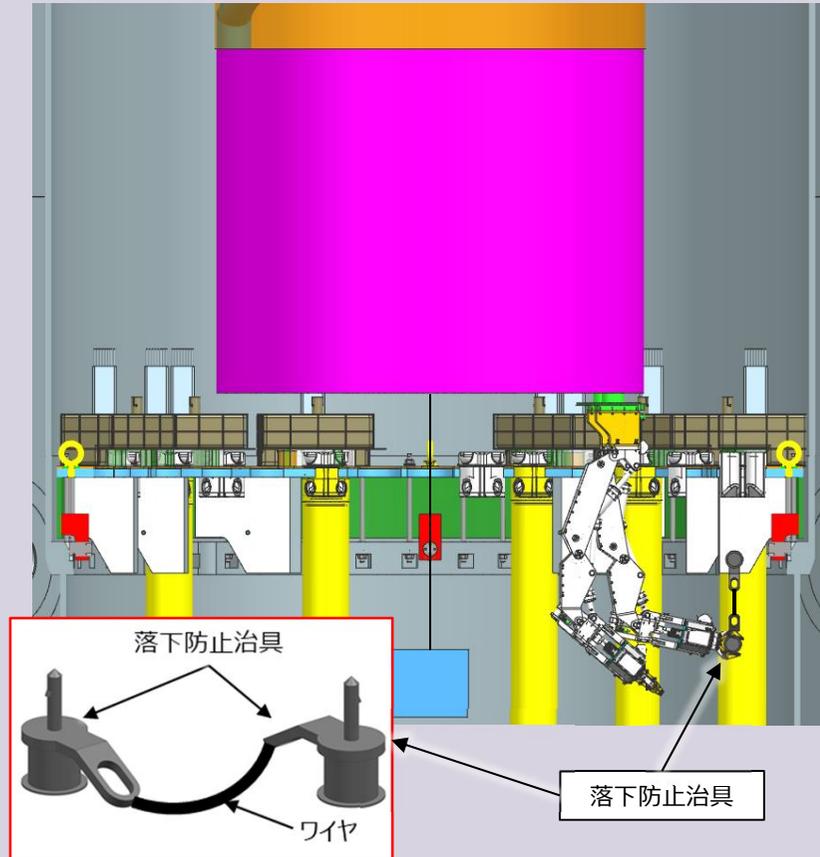


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

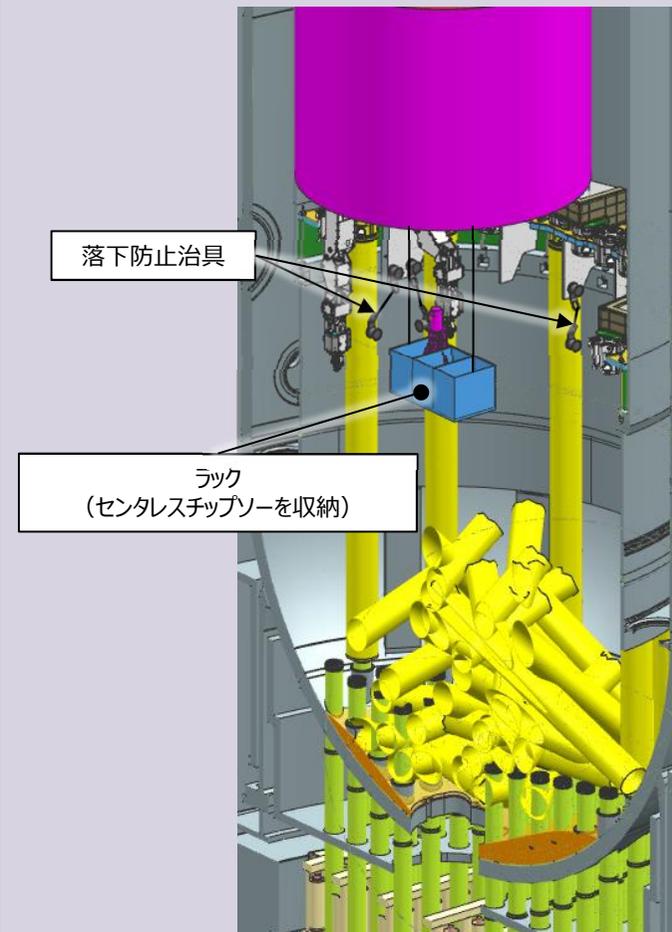
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(2) 炉底部充填 (落下防止治具設置) (2/2)

③ 穴加工ツールで開けた穴に落下防止治具を設置する。



④ 作業アームでラック内のセンタレスチップソーを把持する。

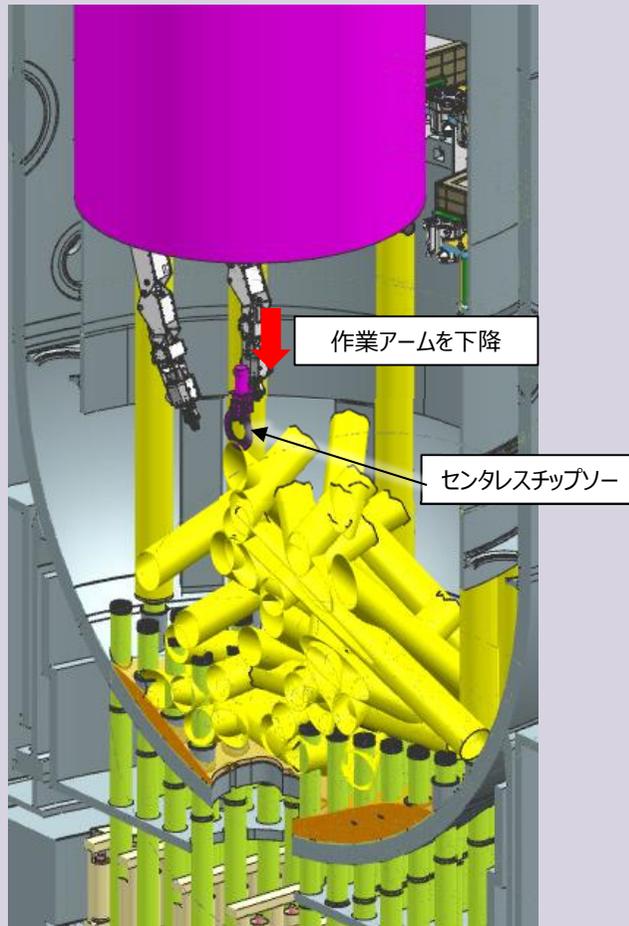


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

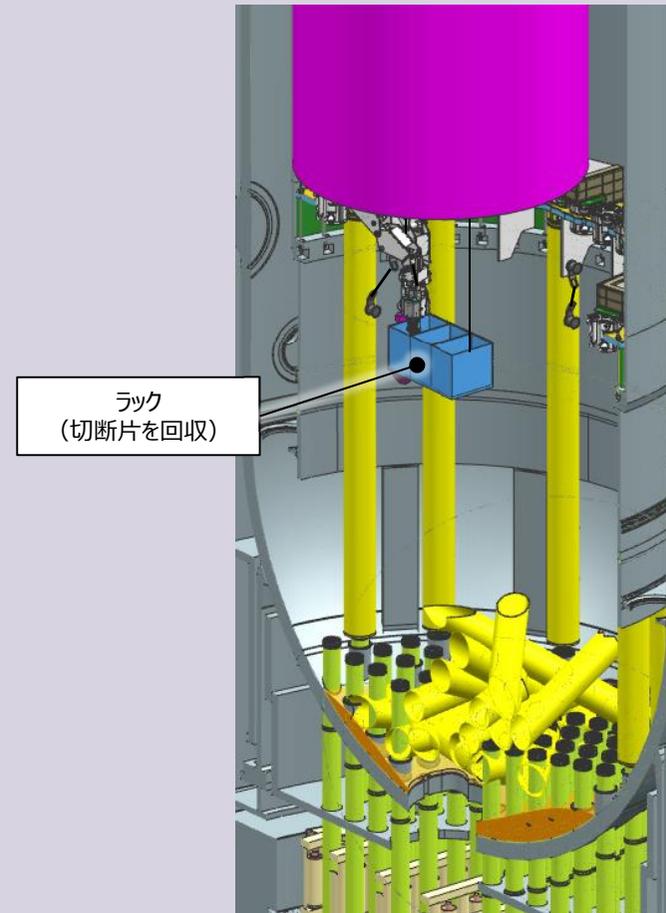
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(2) 炉底部充填 (倒壊CRガイドチューブ頂部撤去①) (1/1)

① センタレスチップソーで倒壊したCRガイドチューブの頂部を撤去する。



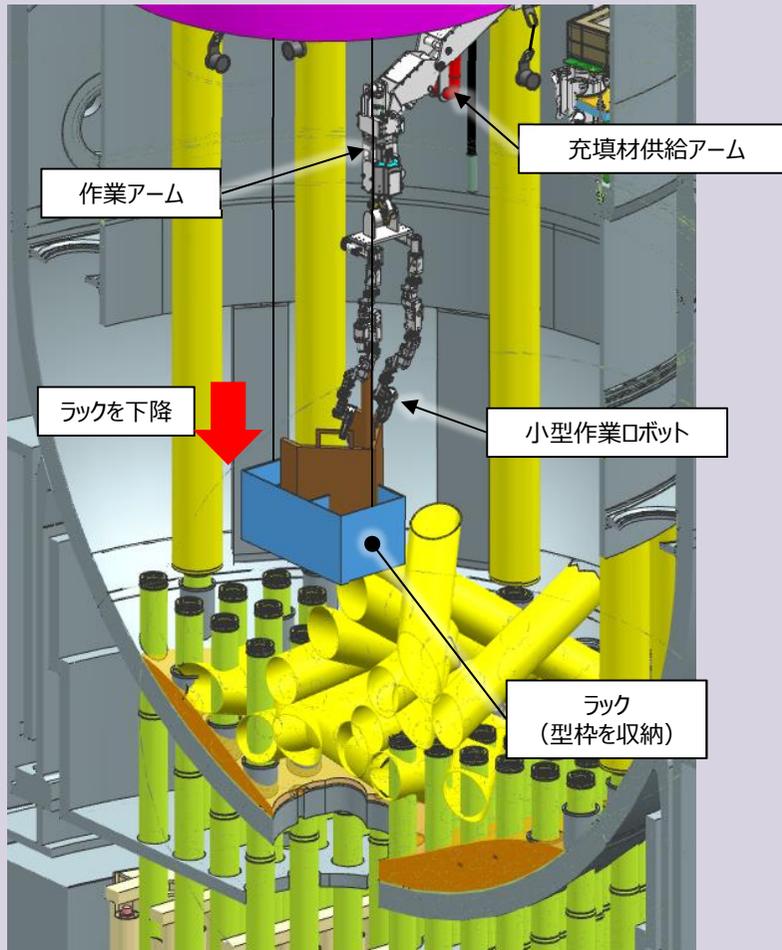
② 作業アームで切断片をラックに回収する。



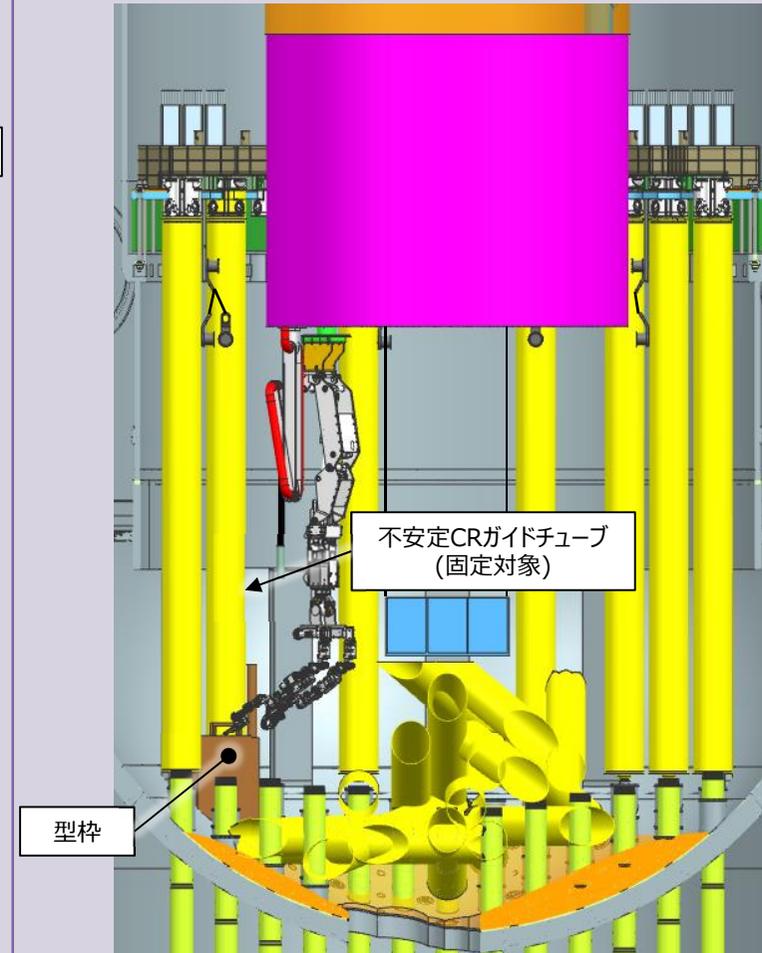
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

- 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)
 - (2) 炉底部充填 (炉底部充填) (1/2)

① 小型作業ロボットでラック内の型枠を把持する。



② 型枠を外周の不安定CRガイドチューブを囲うように設置する。

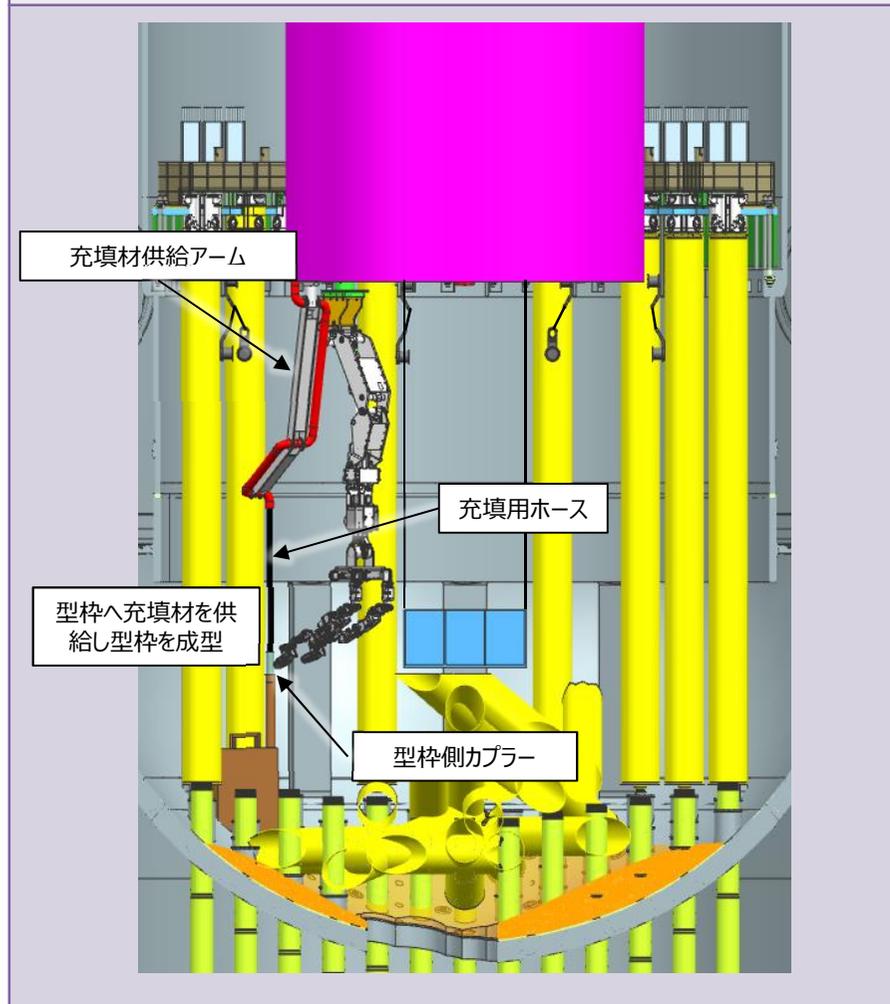


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(2) 炉底部充填 (炉底部充填) (2/2)

③型枠側のカプラーに充填材供給アームのホースを接続して型枠内を充填し、その後堰内を充填する。

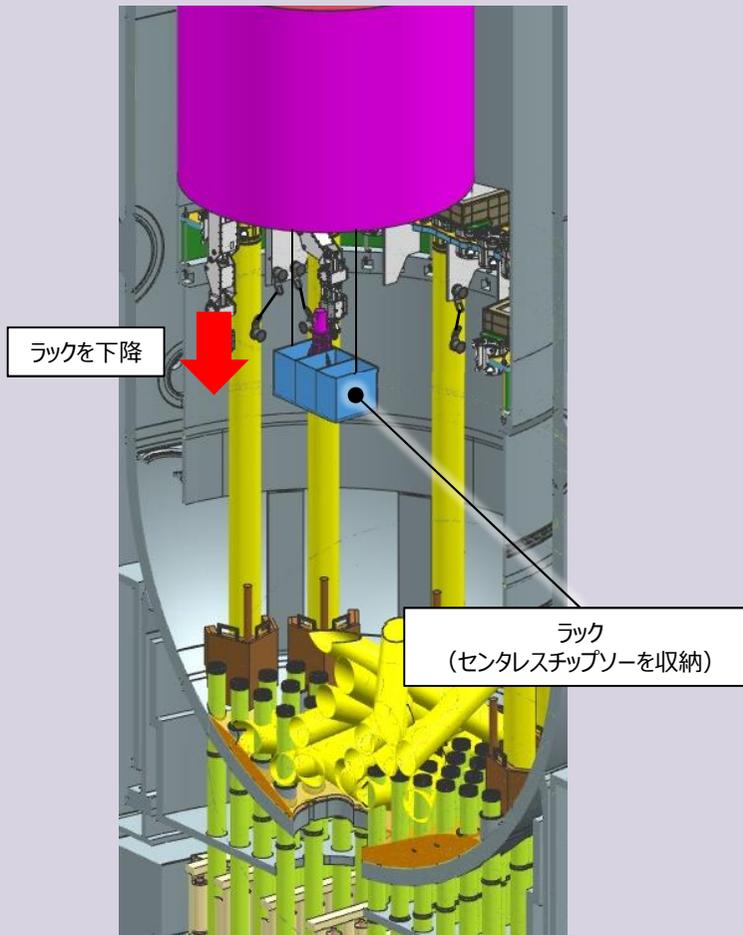


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

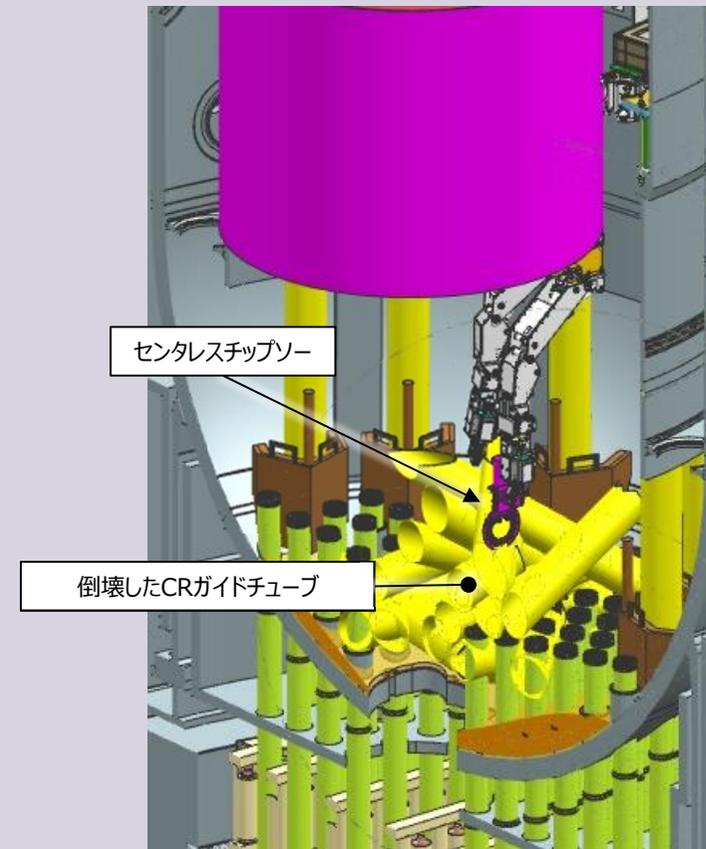
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(3) 炉底部開口部充填 (倒壊CRガイドチューブ頂部撤去②) (1/2)

①作業アームでラック内のセンタレスチップソーを把持する。



②センタレスチップソーで開口周囲の倒壊したCRガイドチューブを撤去する。

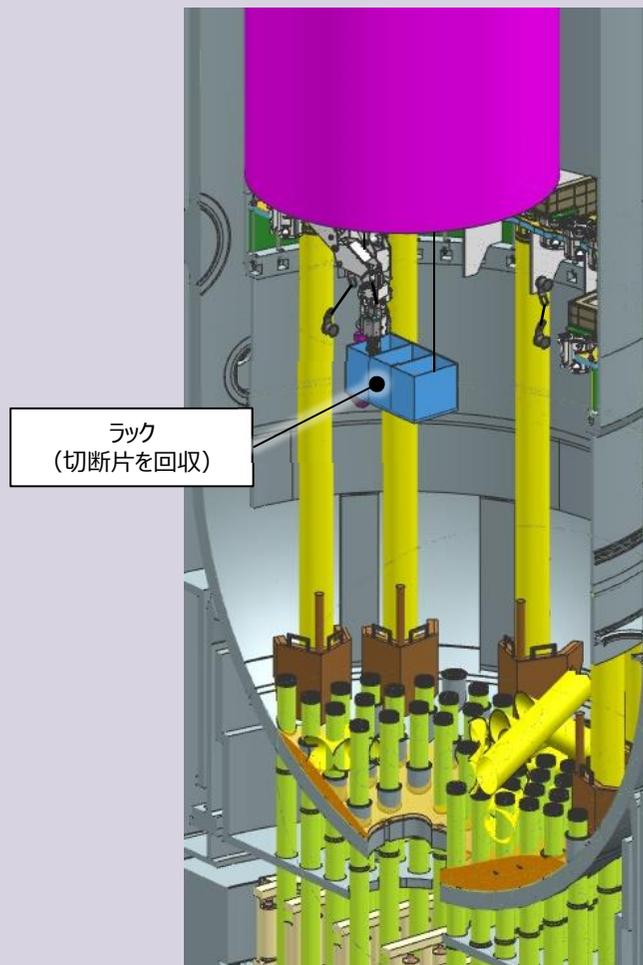


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(3) 炉底部開口部充填 (倒壊CRガイドチューブ頂部撤去②) (2/2)

③作業アームで切断片をラックに回収する。

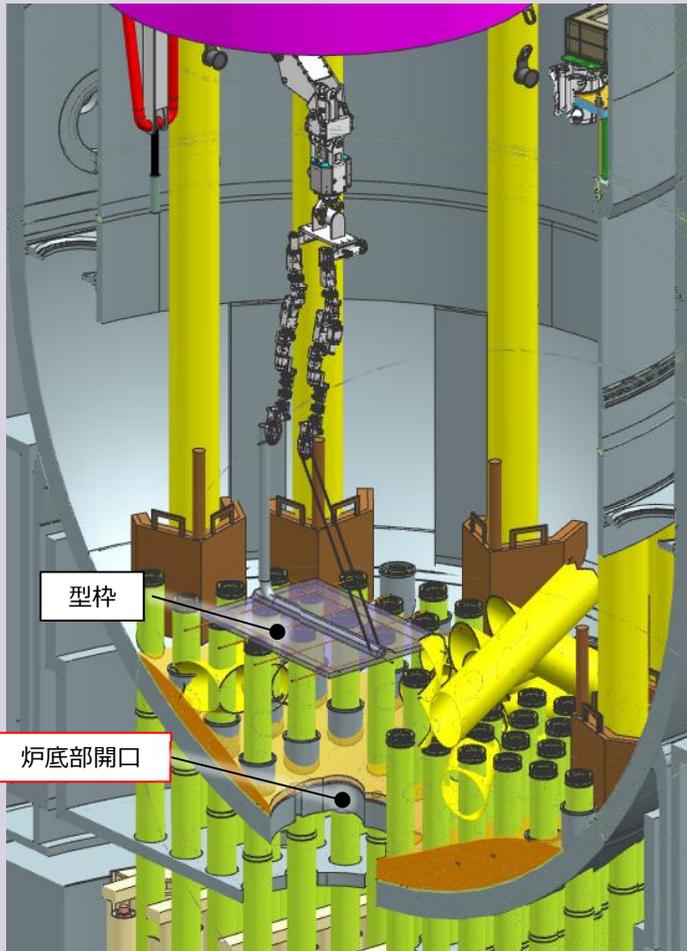


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

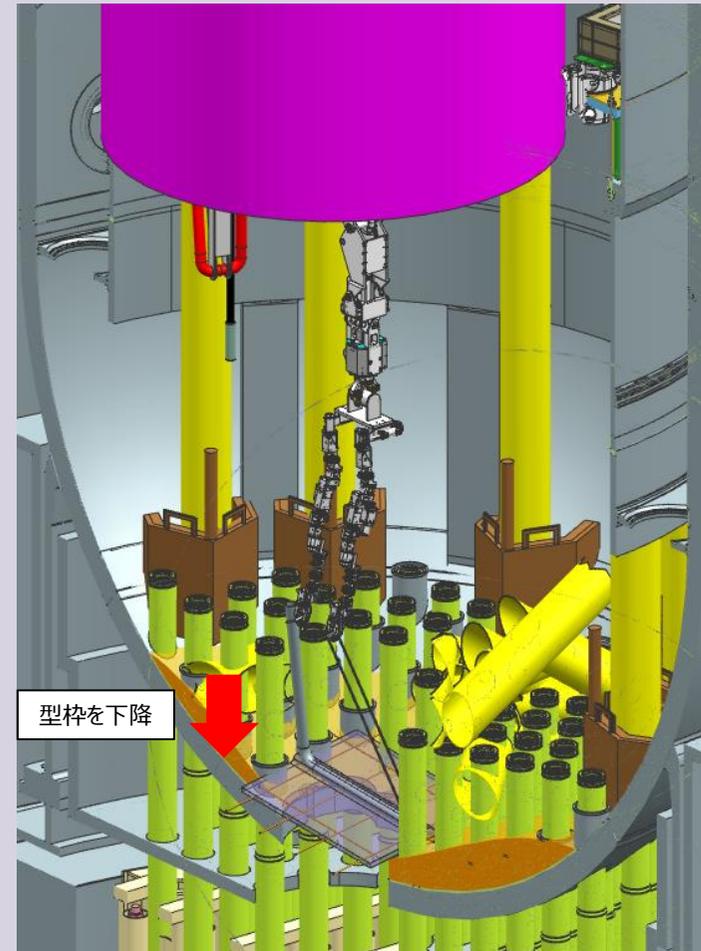
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(3) 炉底部開口部充填 (炉底部開口部充填) (1/2)

① 小型作業ロボットで型枠を把持した状態で、開口付近まで下降する。



② 型枠を炉底部の開口に合わせて設置する。

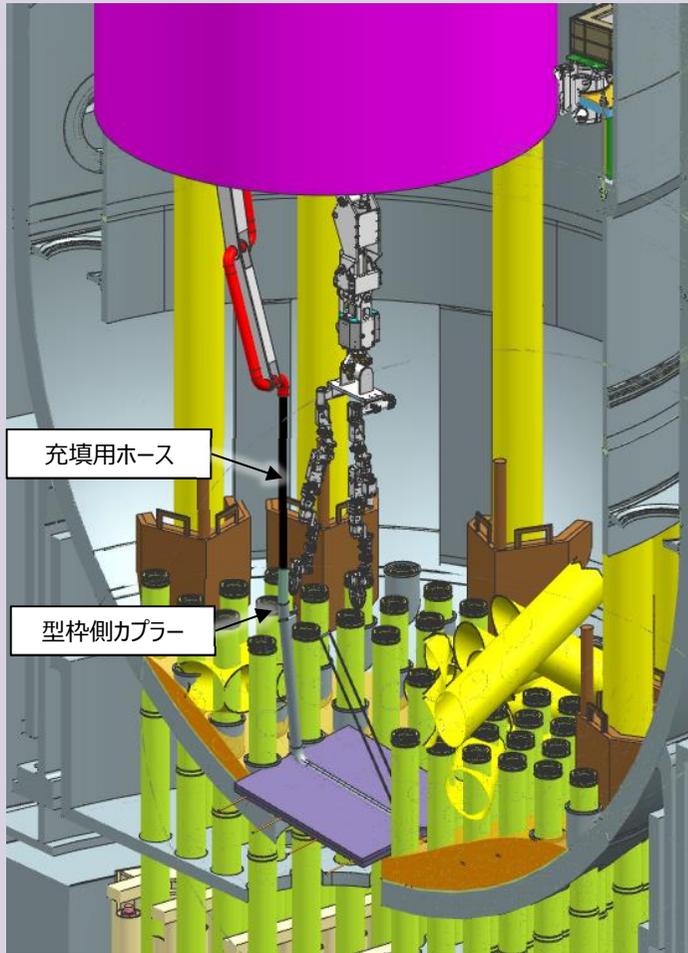


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

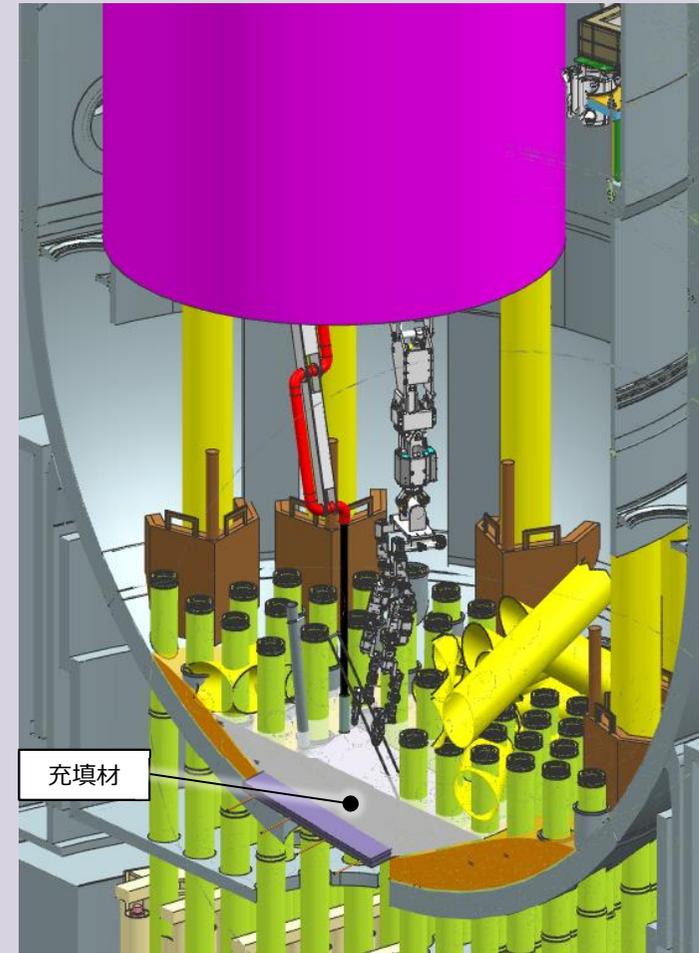
● 6.1.2 概念検討 (実機作業ステップ)

(3) 炉底部開口部充填 (炉底部開口部充填) (2/2)

③型枠側のカプラーに充填材供給アームのホースを接続し、型枠内を充填する。



④充填した型枠の上から炉底部に充填材を充填する。



(3) 炉底部開口部充填 (充填用作業容器搬出)

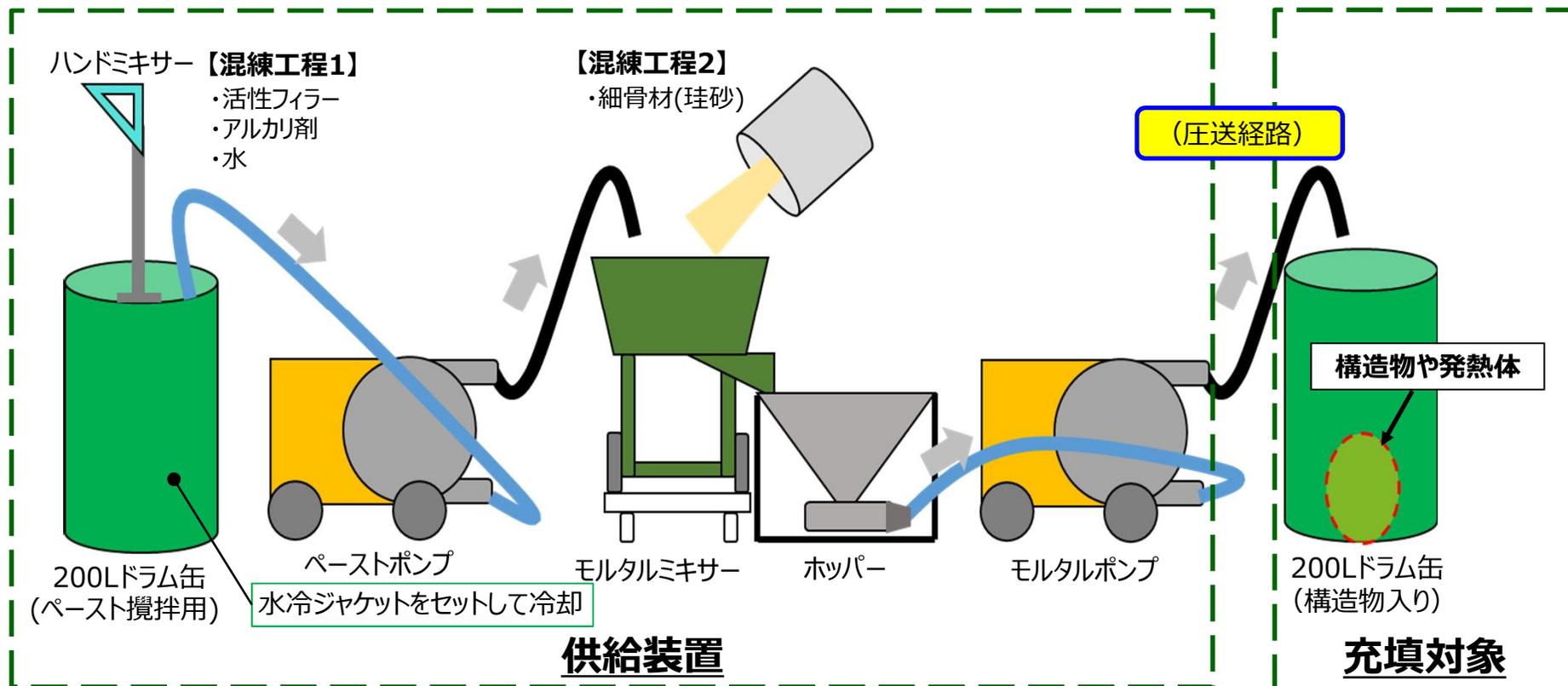
※充填用作業容器の搬出は (1) 炉心部充填 (充填用作業容器搬入) の逆手順のため記載を省略する。

©Decom.Tech

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験

- ジオポリマーの基本特性を確認することを目的に、打ち継ぎ試験、構造物内包時のジオポリマー充填試験、発熱体内包時のジオポリマー充填試験の3つの試験を実施する。各種試験計画は次頁以降に示す。
- 当該試験（以降の充填施工要素試験も同様）の試験システム・装置構成（概略）を以下に示す。なお、本事業における施工装置は一般産業向けに実績のある装置を使用しており、充填材の特性を確認することを目的とし、得られたデータを基に現場適用に最適な形態を考察するものとする。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

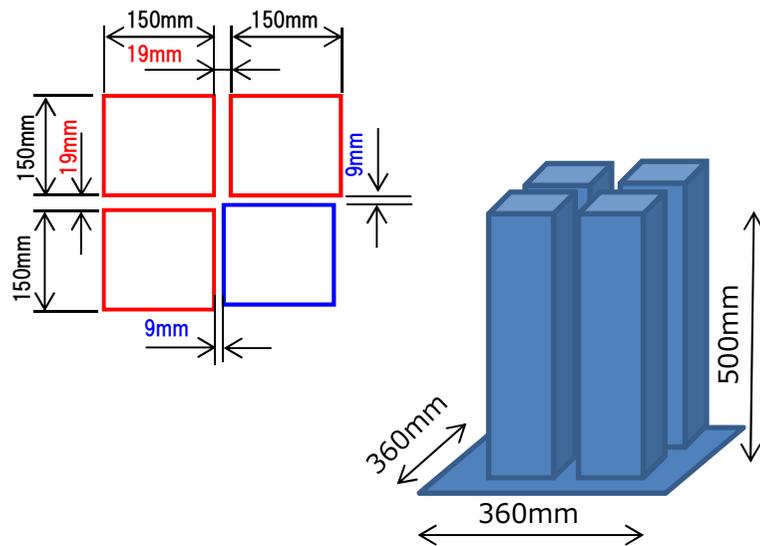
Decom.Tech

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 試験計画 (構造物内包時のジオポリマー充填試験)

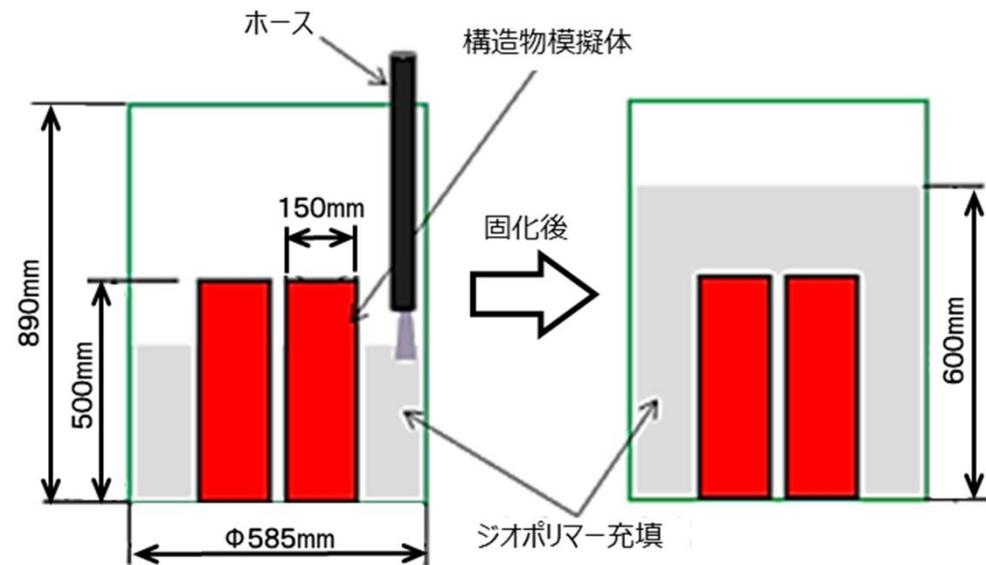
No.	試験項目	試験条件	試験パラメータ
2	構造物内包時のジオポリマー充填試験	・ドラム缶内に燃料集合体を模擬した構造物を内包した状態で充填固化を行い, 固化後に断面観察を実施する。	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体の模擬構造物*1 (直方体形状) : 計1体 【確認項目1: 断面観察】狭隘部の充填性の確認 構造物との狭隘部*2に充填可能であること。 (隙間にジオポリマーが流動せずに生じた空隙がないこと) 【確認項目2: 断面観察】クラック有無の確認 (クラック発生した場合においても, その後の充填により構造物が固定できる場合は問題ないとする)

*1: □150mm, 高さ500mmの角パイプ4本を19mm(および9mm)の隙間をあけ, 底板(□360mm)に並べ角パイプと底板を溶接固定する。

*2: 燃料集合体の隙間19mmを想定し, 極端な例として隙間9mmの充填材の浸透についても評価する。



構造物模擬体イメージ



充填イメージ

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

Decom.Tech

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 試験計画 (発熱体内包時のジオポリマー充填試験)

No.	試験項目	試験条件	試験パラメータ
3	発熱体内包時のジオポリマー充填試験	・ドラム缶内に発熱体 (Φ100mmの鉄球) を内包した状態で充填固化を行い, 発熱体周囲のクラック発生状況, 温度変化等を確認する。	・発熱量*1 : 50W, 100W, 450W 【確認項目1 : 断面観察】発熱体周囲の色およびクラック有無の確認 【確認項目2 : 発熱体周辺温度】各温度によるジオポリマー性状を確認

*1: 発熱体の温度条件は燃料デブリ発熱量 1.1kW/m^2 (仮定値)から, 安全側にみて 1.5kW/m^2 と設定し, 発熱体の鉄球表面積 0.032m^2 より発熱量50Wを基準とした。100Wは基準の2倍として設定。450Wは極端な例として安全に試験可能な最大値として設定。

*2: 燃料集合体の隙間19mmを想定し, 極端な例として隙間9mmの充填材の浸透についても評価する。

〈試験条件〉

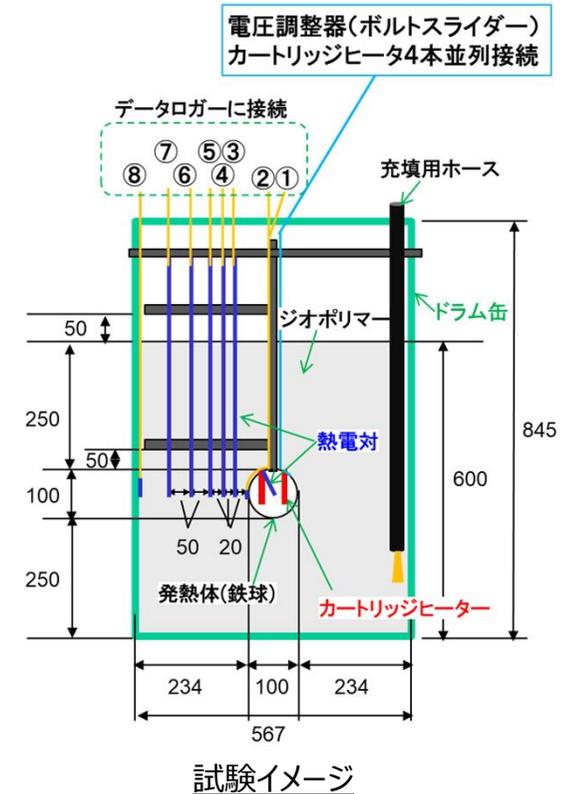
・熱電対は右図に示す間隔で設置する。

- ① : 鉄球中心 (シース型)
- ② : 鉄球表面 (フィルム型)
- ③-⑦ : GP内部 (シース型)
- ⑧ : ドラム缶側面 (フィルム型)

・電圧調整器 (ボルトスライダ)により, 電圧を一定にすることで発熱量を調整する。

〈試験手順〉

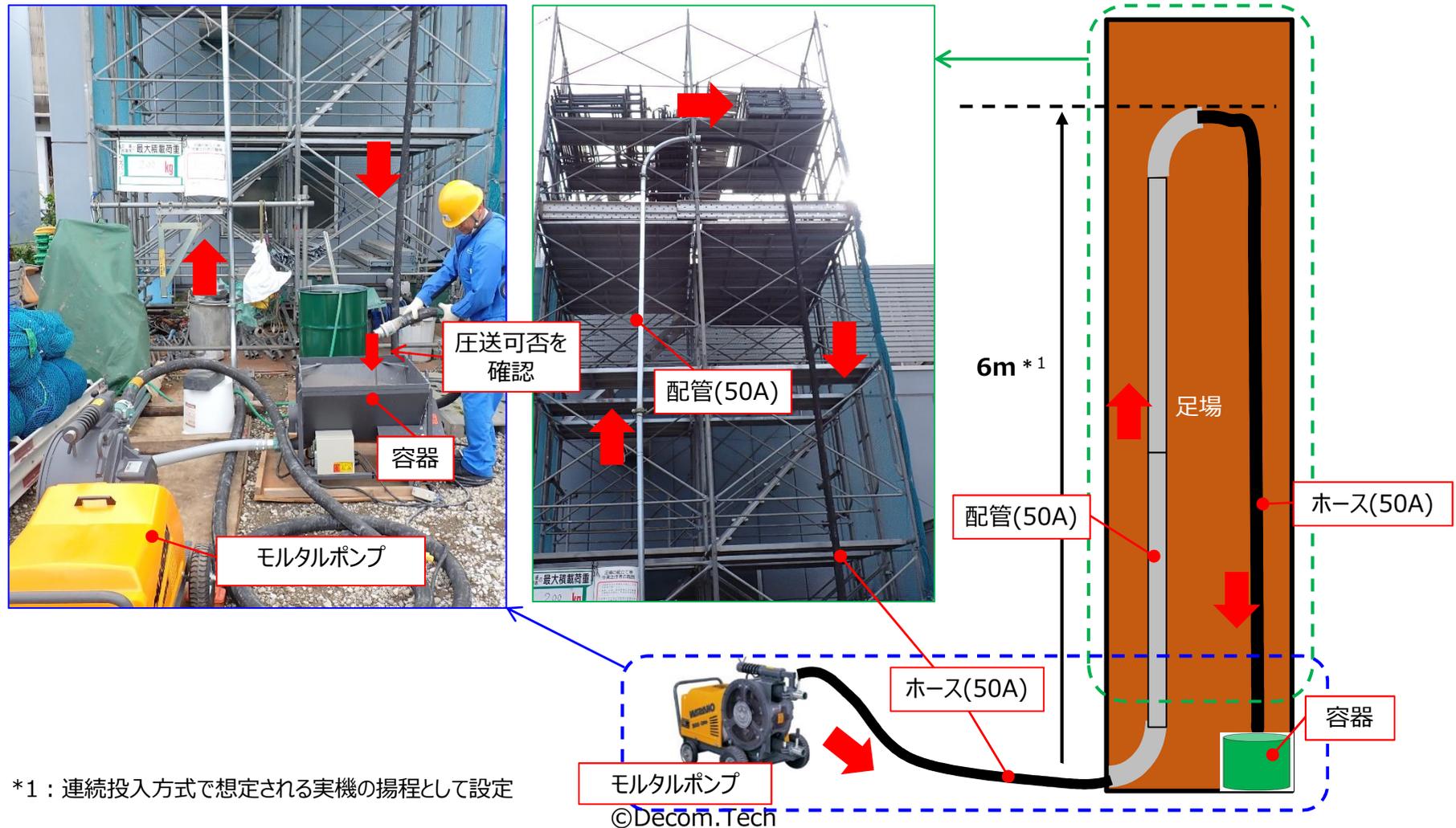
- ・ジオポリマーを注入した容器の中心にある鉄球を加熱開始する。
- ・周囲に設置した熱電対にて温度計測。
- ・5日間加熱状態にて放置後, 切断して断面観察。
- ・試験設備は「構造物内包時のジオポリマー充填試験」と共通。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (1/7)

- 試験装置の事前確認として、混練したジオポリマーをモルタルポンプで圧送し容器まで供給が可能であるかを確認するために以下の圧送試験を実施した。

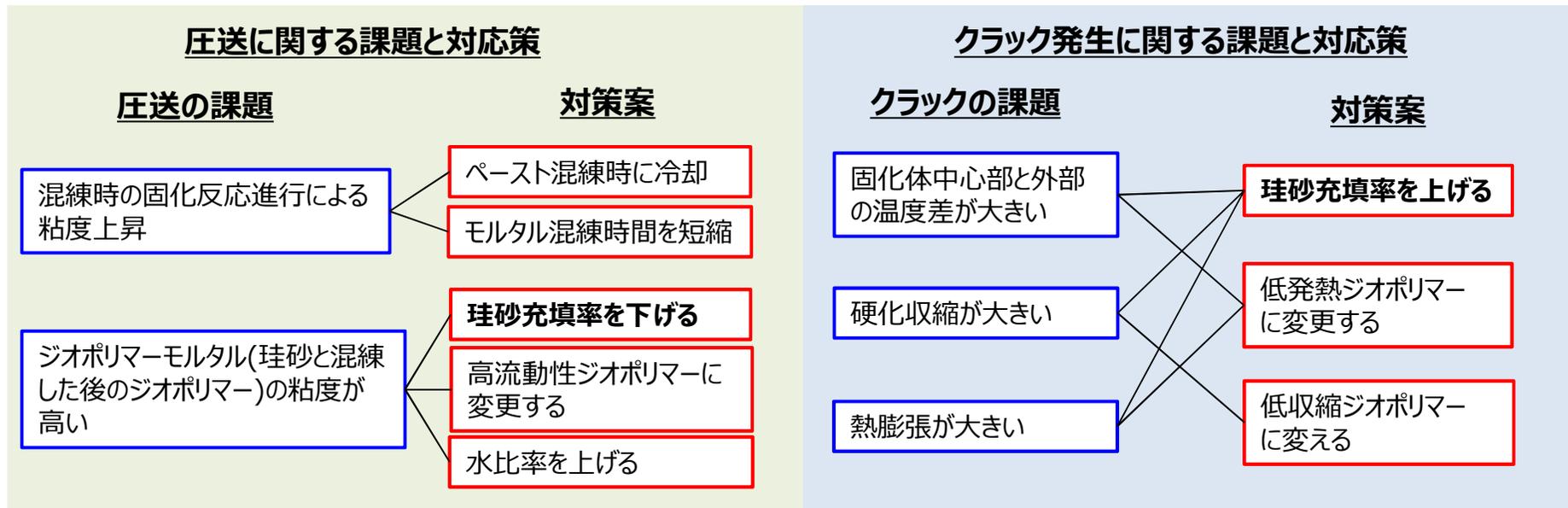


*1: 連続投入方式で想定される実機の揚程として設定

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (2/7)

- 予備試験の結果, 配管内でジオポリマーが固化する等により圧損が大きく生じたため当該経路において, ジオポリマーが圧送できないことが判明した。
- 本事象の原因は混練スケールが大規模化したことにより, 固化時の反応熱 (発熱) の増大の影響で固化反応が加速され, 結果として粘度が上昇したと考えられる。
- 本予備試験の結果より圧送に関する課題と対策案を以下にまとめた。また, 関連して2022年度までの事業成果であるクラック発生に関する課題と対応策を以下にまとめた。



- 各対応案から読み取れるように, 圧送の対策としては**珪砂充填率を下げる**の方が良いが, 一方でクラックの対策としては**珪砂充填率を上げる**の方が良いため相反していることが分かる。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (3/7)

- 前頁の考察結果より圧送とクラック対策を両立するために以下の対応策を抽出した。
 - A. ジオポリマー : 低収縮, 高流動性を実現できるジオポリマーの開発
 - B. 珪砂充填率・粒径 : 最適化 (ジオポリマー組成ごとの最適化)
 - C. システム : ペースト混練時の冷却 (可使時間の管理), 珪砂との混練時間を最小化
- 抽出したA~Cの対応策に対して, 以降に示す見直しおよび確認試験を実施した。

【ジオポリマー配合, 細骨材 (珪砂) の見直し】

- ジオポリマー (SIAL[®]配合) および珪砂充填率・粒径に対して下表に示す見直しを実施した。
- 見直した配合に対する確認として①可使時間の確認試験 (粘度測定, フロー試験), ②外観確認および③圧縮試験を実施した。

ジオポリマー (SIAL[®]配合), 珪砂充填率, 珪砂粒径の見直し結果

No.	項目	2022年度実績	見直し結果
1	SIAL [®] 配合	水はほとんど存在しないが湿度100%に近い環境を想定した配合	低収縮, 高流動性を実現できる配合
2	珪砂充填率	50wt%	30wt%, 40wt%, 50wt% (事前確認試験にて選定)
3	珪砂粒径	4号 : 8号 = 4 : 1	珪砂8号のみ

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

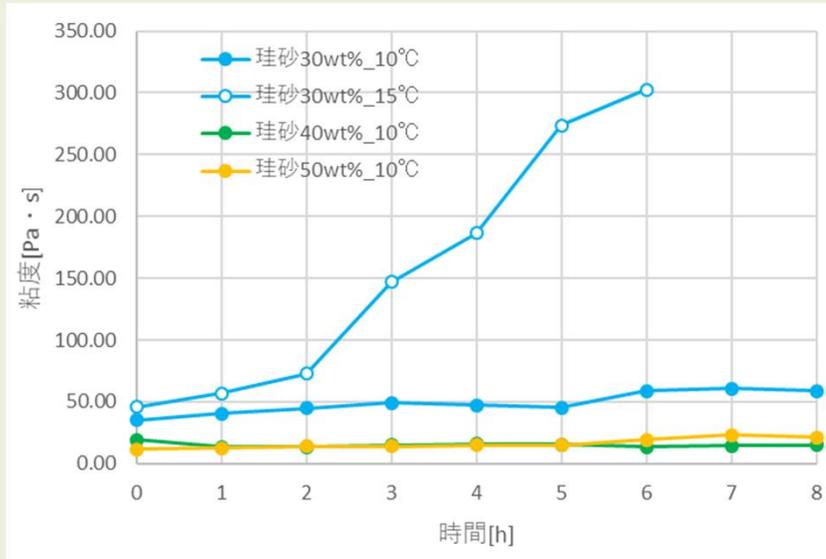
● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (4/7)

【確認試験および評価：① 可使時間の確認(粘度測定, フロー試験)】

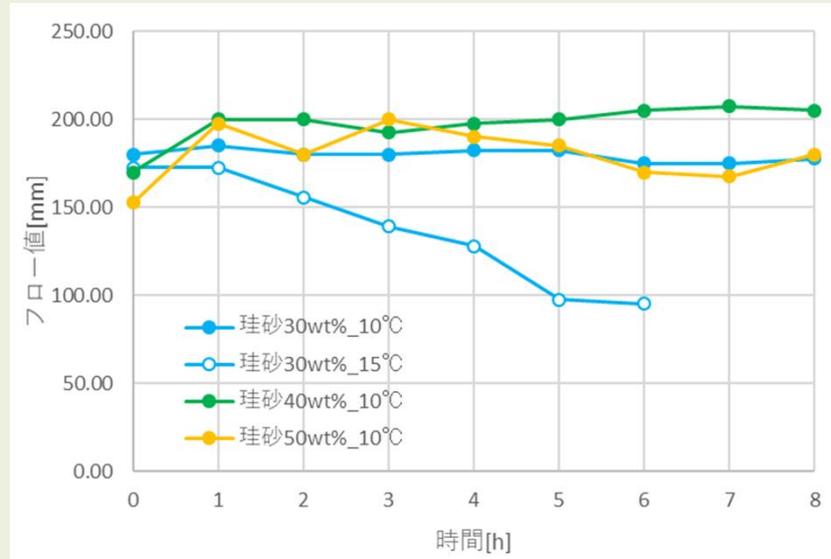
➤ 可使時間の確認として実施した, 粘度測定およびフロー試験の結果を以下に示す。

【試験条件】

- ・試験材料：珪砂8号, 充填率：30wt%, 40wt%, 50wt%の3種類
- ・冷却温度：10, 15℃, 測定時間：0～8時間 (目標6時間以上)



粘度測定の結果



フロー試験の結果

- 粘度測定の結果より冷却温度15℃で実施した場合, 冷却温度10℃と比較して可使時間は2～3時間と短くなり, 目標の6時間以上を満たさなかった。
- フロー試験の結果より冷却温度10℃以下で粘度上昇を抑制できることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

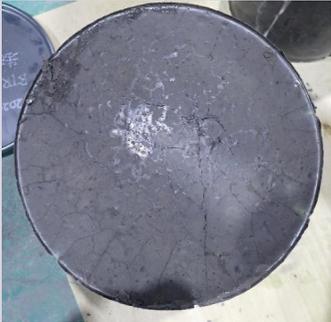
● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (5/7)

【確認試験および評価：②外観確認】

- ジオポリマーの固化状況の確認として20Lペール缶規模で固化したジオポリマーの外観確認結果を以下に示す。

【試験条件】

- ・試験材料：珪砂8号，充填率：30wt%，40wt%，50wt%の3種類
- ・養生期間：20日，外観確認（評価）：固化体の表層と側面の観測

	30wt%	40wt%	50wt%
表層			
側面			表面がゲル状になっていたため、側面観察せず候補から除外

- 充填率50wt%では表面がゲル状になることが確認されたため，50wt%を条件から外した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

Decom.Tech

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (6/7)

【確認試験および評価：③圧縮試験】

➤ 養生期間28日後の圧縮試験の結果を以下に示す。

【試験条件】

- ・試験材料：珪砂8号，充填率：30wt%，40wt%，50wt%（参考比較用）の3種類
- ・養生期間：28日，冷却温度：10℃，25℃*1

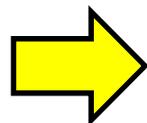
*1:25℃は比較参考用として計測するが，P53のフロー試験の結果より冷却温度は10℃を前提とする。

No.	細骨材 充填率	冷却温度/時間	養生 温度	材齢	圧縮強度【MPa】			
					①	②	③	平均値
1	30wt%	10℃/6h	10℃	28日	72.3	48.4	75.3	65.3±7.0
2		10℃/6h	25℃		72.0	86.9	73.9	77.6±3.8
3		25℃/6h	25℃		80.1	76.9	81.5	79.5±1.1
4	40wt%	10℃/6h	25℃		48.8	20.1	37.0	35.3±6.8
5		25℃/6h	25℃		37.4	43.9	48.6	43.3±2.7
6	50wt%	25℃/6h	25℃		16.8	15.9	14.0	15.6±0.7



圧縮試験後の様子

- 充填率30wt%にて，冷却温度10℃の圧縮強度が2022年度までのジオポリマーと同程度(圧縮強度：80MPa程度)であることを確認した。
- なお，充填率が高いほど圧縮強度が低下しているが，これは充填率が高いジオポリマーは流動性が低下するため，水比率を上げている(ジオポリマー成分が相対的に少ない)ためである。

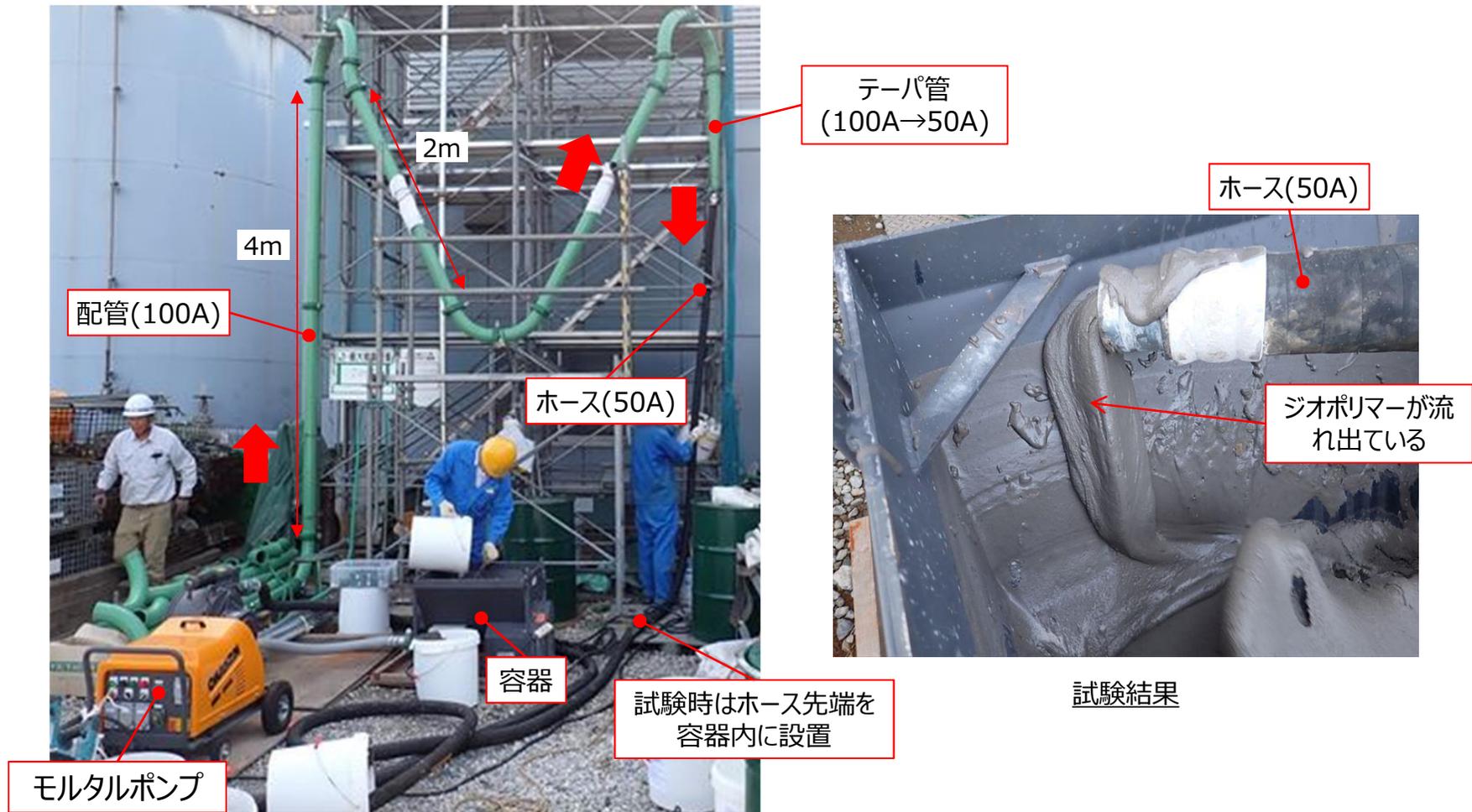


①可使時間確認，②外観確認，③圧縮試験の結果より可使時間が長く，圧縮強度も2022年度と同程度である**細骨材充填率30wt%・冷却温度10℃**を選定した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 予備試験結果・考察 (圧送試験) (7/7)

- 見直したジオポリマー配合 (細骨材充填率30wt%・冷却温度10℃) にて, 当初条件の圧送試験を実施した結果, 圧送が可能であることを確認した。また, 下図のような類似経路の圧送についても事前確認を実施し, 圧送が可能であることを確認した。



試験準備状況 (写真は類似経路)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 (考察・結果まとめ) (1/2)

➤ ジオポリマー特性確認試験の試験概要ならびに試験結果を下表に示す。

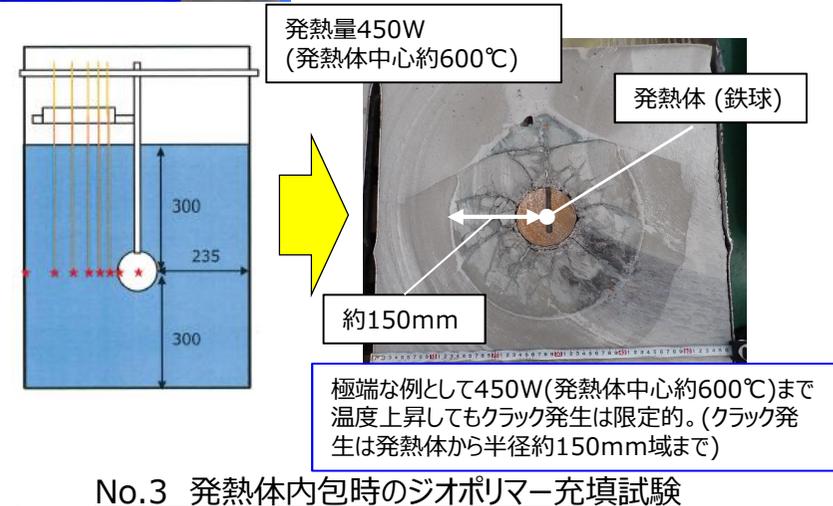
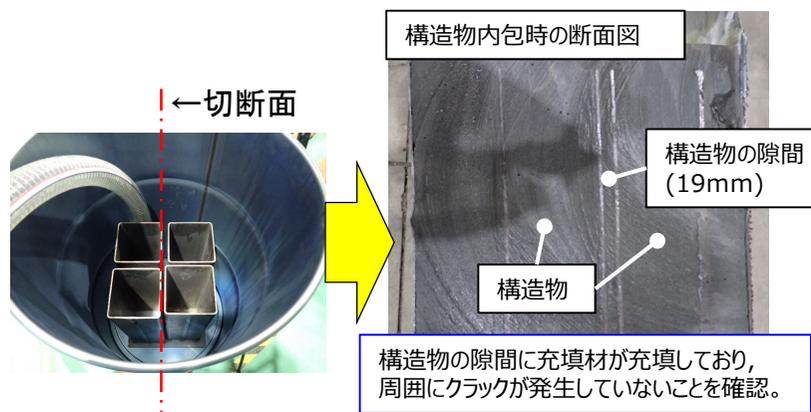
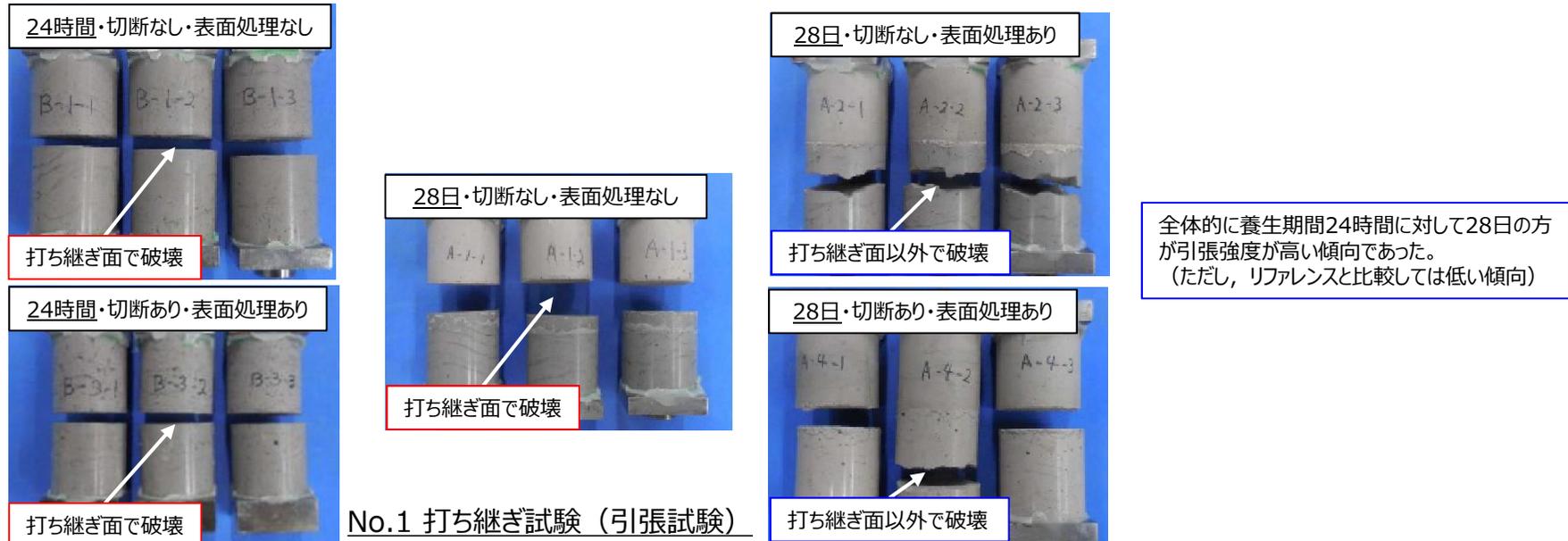
ジオポリマー特性確認試験 結果統括表

No.	試験項目	試験概要	試験結果	
0	圧送試験 (予備試験)	充填材配合と試験設備の確認のために圧送性を確認する予備試験を実施した。 ・圧送経路：長さ25m (揚程6m)	不可 ↓ 可	当初の配合では充填規模が拡大したことにより、反応熱で固化反応が加速し、GPの粘度が上昇したため圧送不可となった。 GPの配合および細骨材 (珪砂) 充填率などの見直しを行い、珪砂充填率30wt%・冷却温度10℃で圧送が可能であることを確認した。
1	打ち継ぎ試験	現場適用を想定した場合における、打ち継ぎ間隔2時間以上での強度や内部の観察データを取得する。	可	表面処理に関して、固化体表面にはつりをした際、表面以外が崩れ落ちたため試験体の製作が不可となった。またブラストとワイヤブラシを比較した際に1分間当たりの表面粗さが大きいブラスト処理を採用とした。 【強度試験】 はつり以外の引張・圧縮強度を測定した。比較評価の結果、打ち継ぎ・切断・表面処理の条件の有無による圧縮強度に有意な差が見られなかった。一方、引張試験では打ち継ぎ間隔24時間および28日共にリファレンスより低い結果となったが、打ち継ぎ間隔28日の方が平均的に24時間よりも強度が高い結果となった。 【断面観察】 引張試験の結果、基本的に打ち継ぎの境界面での破壊が確認されが、打ち継ぎ間隔28日・表面処理ありの場合において、1回目の充填固化体の中心位置付近で破壊されているものが確認した。本結果よりブラストによる表面処理が効果的であることを確認した。
2	構造物内包時のジオポリマー充填試験	充填対象物を模擬した構造物への充填可否の判断として、隙間への充填性やクラック発生の有無等を確認する。 ・隙間：9mm,19mm	可	【隙間への浸透性】 9mm,19mmともに隙間にジオポリマーが充填し固化したことを確認した。 【断面観察】 9mm,19mmともに有害なクラックが発生していないことを確認した。
3	発熱体内包時のジオポリマー充填試験	発熱体内包時の充填可否の判断として、クラック発生の有無や温度データを確認する。 ・発熱量：50W,100W,450W	可	【クラック発生の有無】 発熱量50Wおよび100Wでは発熱体周囲においても有害なクラックが発生していないことを確認した。 発熱量450Wでは熱影響によるクラックが発生したが、クラックは発熱体中心位置から半径約150mmの範囲に限定されることを確認した。 【温度データ】 50W：100℃以下、100W：100℃程度、450W：600℃程度

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 (考察・結果まとめ) (2/2)

➤ ジオポリマー特性確認試験の試験結果 (写真など) を以下に示す。

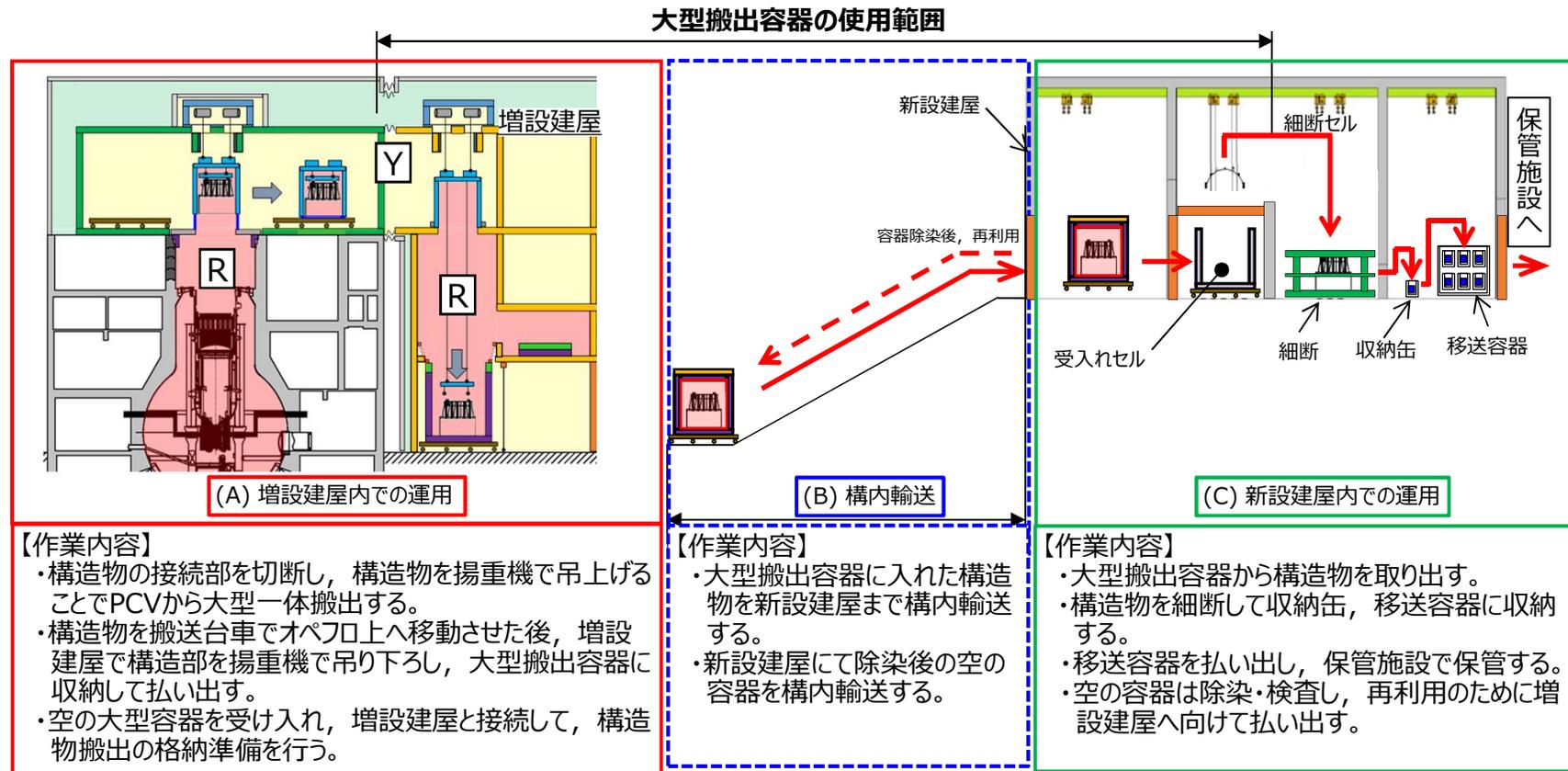


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 (充填固化後の処理方法の検討) (1/2)

- これまでの補助事業*¹で検討した、構造物搬出の概略ステップを以下に示す。
- 本ステップで充填固化後の構造物は大型搬出容器に収納し、新設建屋に輸送後に細断して収納缶で保管する計画である。
- この細断までの収納期間に対してジオポリマー特性確認試験の結果に基づき評価を実施した。

*1：令和3年度開始廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリの取り出し工法の開発」最終報告(2023年6月)



構造物搬出の概略作業ステップ

©Decom.Tech

汚染エリア区分等は検討中のため今後変更する可能性がある

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.3 ジオポリマー特性確認試験 (充填固化後の処理方法の検討) (2/2)

【ジオポリマー特性確認試験からの評価】

- 発熱量450W(約600℃)もの高温の物質を内包した場合においても、熱影響範囲（クラック発生範囲）は発熱体中心から半径150mm厚までに抑えられる見込みである。（発熱体はΦ100mmの鉄球）
- 本結果よりジオポリマーを構造物周囲に厚さ100mm以上*1で充填することにより、細断までの一定期間保管や大型搬出容器に入れたまま長期保管が可能であると考えられる。
- ただし、実際の燃料デブリの発熱量が不明であるため、ジオポリマーで固化した際にどの程度まで中心温度が上昇するのかを正確に評価する必要がある。

*1:構造物（発熱体）の半径50mmを差し引く。

【主要な課題（今後の開発要素）】

- ジオポリマー特性確認試験の結果をもとに長期保管に関する主要な課題および対応策を下表に示す。

長期保管に関する主要な課題と対応策

No	主要な課題	対応策
1	ジオポリマー内部の水が乾燥したことが原因と推定されるクラックが発生した。	クラック抑制のため、ジオポリマー内部の水分が無くなるまでの養生期間を設定する。
2	内部温度が約150℃以上でクラック発生する可能性がある。	熱影響範囲は限定的であるため、発熱体周囲にジオポリマーを厚さ100mm以上充填することで熱影響を低減する見込みがある。
3	構造物間の隙間が本事業の試験模擬体よりも狭く、長い場合のジオポリマーの充填を確認する必要がある。	より極端な例での侵入経路を設定しジオポリマーの充填を確認する。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験方針) (1/3)

- 充填の想定適用先3件に関して、型枠仕様と遠隔設置性を確認するための充填施工要素試験を本項に示す。
- 各要素試験は実規模を前提としており、主要な確認項目を下表に示す。

各充填施工要素試験における主要確認項目

No.	試験名称	主要な確認項目		
		必要資材の設置性	充填用ホース等のアクセス性	充填施工性
A	炉心部の充填施工要素試験	✓ 充填の際に使用する型枠が設置可能であること	✓ 充填に必要な充填用ホースが充填箇所にアクセスが可能であること	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 型枠を用いた充填により堰が形成できること ✓ 形成した堰に充填材を注入し、模擬した切り株燃料が固定できること
B	炉底部の充填施工要素試験	✓ 充填の際に使用する型枠が設置可能であること	✓ 充填に必要な充填用ホースが充填箇所にアクセス可能であること	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 型枠を用いた充填により堰が形成できること ✓ 形成した堰に充填材を注入し、模擬したCRガイドチューブ等が固定できること
C	炉底部開口部の充填施工要素試験	✓ 開口部の充填で使用する型枠の敷設が可能であること	—	✓ 敷設した型枠に充填材を注入し、開口部が閉止できること

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験方針) (2/3)

➤ 本試験における各種資機材の仕様ならびに実機との相違点を以下に示す。

試験資機材の仕様と実機との装置点

No.	品名	充填施工要素試験仕様	実機との相違点	相違理由
1	充填材 (ジオポリマー)	<ul style="list-style-type: none"> ・SIAL[®] (低収縮、高流動性を実現できる配合) ・珪砂:8号 ・珪砂充填率:30wt%または40wt% (特性確認試験にて決定) 	<ul style="list-style-type: none"> ・実機は珪砂の代わりに以下も混合。但し主成分は同仕様を想定。 ・中性子吸収材 ・Pd粉末等 	要素試験では珪砂で代替可能であるため、珪砂のみを混合する。(実機では未臨界維持および水素発生抑制が必要なため、添加剤を追加する。)
2	充填材供給設備	<ul style="list-style-type: none"> ・吐出量:3.8~45L/min ・吐出圧力:最大3.5MPa ・ポンプ~充填材供給アームまでのホース長:約3m、ホース径:50A 	<ul style="list-style-type: none"> ・供給量および圧送長さ(ポンプ吐出圧力、配管・ホース長など) 	<ul style="list-style-type: none"> ・要素試験では充填施工性の確認が目的であるため、必要量のみを供給する。(充填材の長距離圧送は対象外)
			<ul style="list-style-type: none"> ・充填材供給アームへの供給方向(実機:下向き、要素試験:上向き) 	<ul style="list-style-type: none"> ・要素試験場所のスペース制約により、要素試験では充填材供給アームへ上向きで充填材を圧送する。
3	充填作業装置	<ul style="list-style-type: none"> ・昇降架台で昇降動作を模擬 	<ul style="list-style-type: none"> ・装置の揺れ止め、旋回動作は模擬しない 	要素試験に必要な昇降動作のみを昇降架台で模擬し、実機設計に反映する。
4	昇降架台	<ul style="list-style-type: none"> ・高さ:約7000mm ・昇降ストローク:2400mm 	<ul style="list-style-type: none"> ・充填作業装置における昇降動作のみを模擬 	
5	充填材供給アーム	<ul style="list-style-type: none"> ・高さ:約4100mm ・配管長:約10m ・配管径:100A 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業アーム(小型作業ロボット)との位置関係(実機:並列方向、要素試験:前後方向) 	<ul style="list-style-type: none"> ・代表的な供給機構を模擬し、実機構造の課題抽出を行う。
			<ul style="list-style-type: none"> ・配管径(実機は50A) 	<ul style="list-style-type: none"> ・50Aのスイベルが長納期品であり、要素試験に間に合わないため、100Aで代用。 ・代表的な供給機構模擬による実機構造の課題抽出が目的であるため、配管径の相違は問題ないと判断した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験方針) (3/3)

試験資機材の仕様と実機との装置点

No.	品名	充填施工要素試験仕様	実機との相違点	相違理由
6	作業アーム	<ul style="list-style-type: none"> ・型式:単腕アーム ・動作:旋回および前後 ・駆動源:旋回方向は電動、前後方向は水圧 ・全長:2000mm ・可搬質量:約80kg 	実機では既存のアームから見直す可能性有	過去の補助事業で準備したアームを利用
7	小型作業ロボット	<ul style="list-style-type: none"> ・型式:双腕アーム ・動作:旋回および前後 ・駆動源:水圧 ・全長:1300mm ・可搬質量:約10kg/1アーム 	実機では既存のアームから見直す可能性有	過去の補助事業で準備した装置のアーム部分を利用
8	充填用型枠	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心部:コの字形状 (約490×640×H430mm) ・炉底部外周部:Uの字形状 (約550×560×H560mm) ・炉底部開口部:平板形状 (約1000×1300×H100mm) 	実機想定 (要素試験結果を踏まえ見直す可能性有)	—(相違なし)
9	試験体 (模擬体)	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心部:約1900×1500×H1800mm ・炉底部外周部:約1500×1300×H2400mm ・炉底部開口部:約1900×1500×H1750mm ・材質:炭素鋼 	形状、 材質(実機は主にSUS)	・実機損傷形状は不明のため、建設時形状を参考に模擬。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験計画) (1/6)

- A. 炉心部の充填施工要素試験の目的と概要および試験設備イメージを以下に示す。

要素試験の目的と概要および試験イメージ (A. 炉心部の充填施工要素試験)

No.	試験項目	要素試験の目的と概要	試験イメージ
A-1	必要資材の設置性確認	<p>【目的】 充填の際に必要な布製型枠等が充填対象箇所に設置できることを確認する。</p> <p>【概要】 炉心部模擬体に設置した小型作業ロボットにて、布製型枠を把持し、模擬切り株燃料周囲に設置する。主要な確認事項は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 小型作業ロボットでの把持、設置方法 ✓ カメラ、照明配置等 	
A-2	充填用ホース等のアクセス性確認	<p>【目的】 充填に必要な充填用ホースが充填箇所にアクセスできることを確認する。</p> <p>【概要】 充填材供給アームにて充填用ホースを充填対象付近に移動し、小型作業ロボットにて充填用ホースの位置合わせを行い、充填可能状態にする。主要な確認事項は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 充填用ホースの移動 ✓ 小型作業ロボットでの把持方法 ✓ 対象への充填用ホース設置方法等 	
A-3	充填施工性確認	<p>【目的】 以下を実施し、充填施工性を確認する。</p> <p>【概要】 布製型枠内の充填材堰形成および構築した堰内に充填材を注入し、模擬切り株燃料を固定する。主要な確認事項は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 充填材の漏えい状況 ✓ 固化時間 ✓ クラック発生状況 ✓ 固定対象の固定状況 ✓ カメラ、照明配置等 	

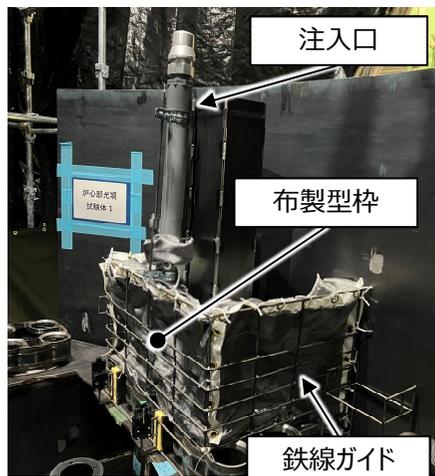
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.4 充填施工要素試験 (試験計画) (2/6)

➤ 炉心部の充填試験手順・試験イメージを以下に示す。

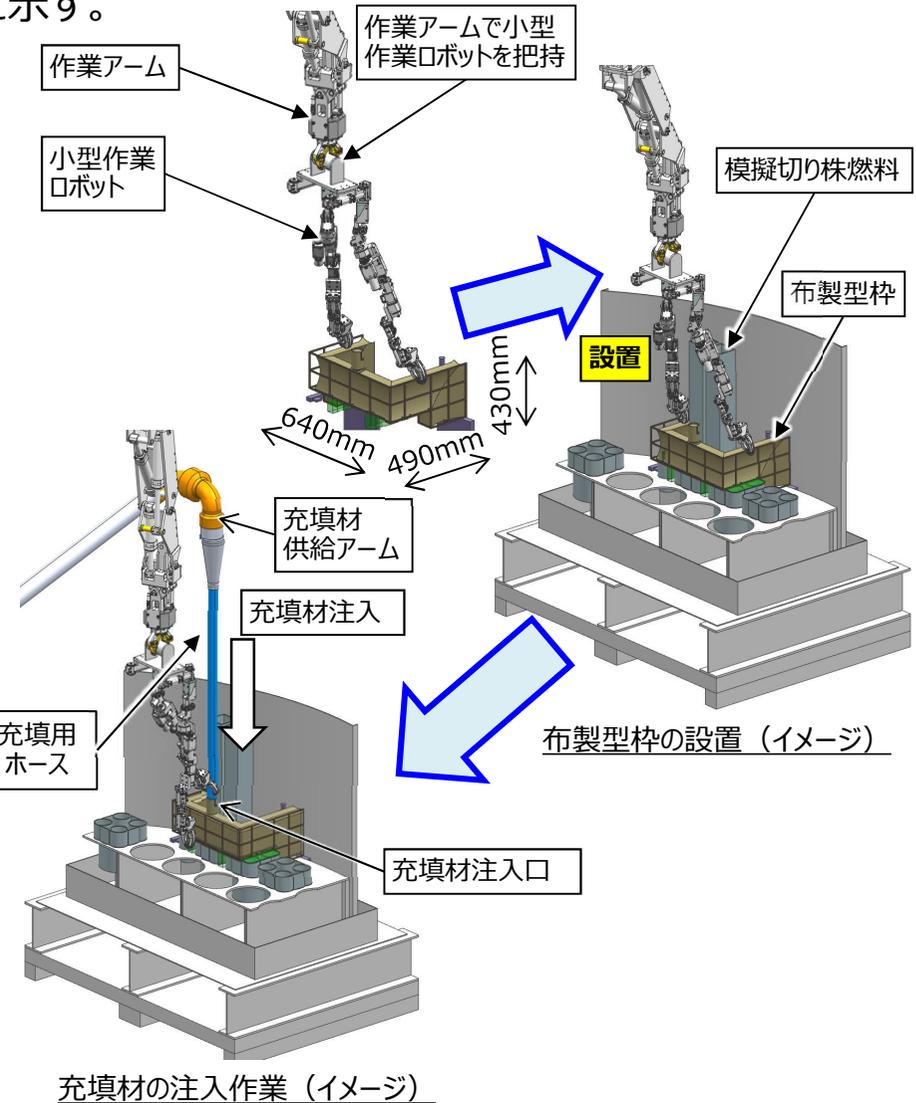
炉心部充填の試験手順

1. 作業アームで把持した小型作業ロボットにて、布製型枠等を模擬切り株燃料周囲に設置する。
2. 充填材供給アームにて充填用ホースを充填対象部付近へ移動し、作業アームで把持した小型作業ロボットにてホースを把持し、布製型枠へアクセスする。
3. 布製型枠内に充填材を注入し、堰を構築する。
4. 堰の形成状況を確認する。
5. 形成した堰に充填材を注入し、模擬切り株燃料を固化する。



布製型枠

- ・充填材を注入する際に充填材が溢れないよう堰の役割として使用する。
- ・鋼線ガイドより垂れ下げられた袋状の布製型枠に充填材を注入することで型枠が展張・形成される。



充填材の注入作業 (イメージ)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験計画) (3/6)

要素試験の目的と概要および試験イメージ (b. 炉底部の充填施工要素試験)

No.	試験項目	要素試験の目的と概要	試験イメージ
b-1	必要資材の設置性確認	<p>【目的】 充填の際に必要な布製型枠等が充填対象箇所に設置できることを確認する。</p> <p>【概要】 小型作業ロボットを吊下ろし、炉底部模擬体に設置し、布製型枠を保持し模擬CRガイドチューブ周囲に設置する。 ✓ 小型作業ロボットでの把持, 設置方法 ✓ カメラ, 照明配置等</p>	
b-2	充填用ホースのアクセス性確認	<p>【目的】 充填に必要な充填用ホースが充填箇所にアクセスできることを確認する。</p> <p>【概要】 充填材供給アームにて充填用ホースを充填対象付近に移動し、小型作業ロボットにて充填用ホースの位置合わせを行い、充填可能状態にする。 ✓ 充填用ホースの移動 ✓ 小型作業ロボットでの把持方法 ✓ 対象への充填用ホース設置方法等</p>	
b-3	充填施工性確認	<p>【目的】 以下を実施し、充填施工性を確認する。</p> <p>【概要】 布製型枠内の充填材堰形成および小築した堰内に充填材を注入し、模擬CRガイドチューブを固化する。 ✓ 充填材の漏えい状況 ✓ 固化時間 ✓ クラック発生状況 ✓ 固定対象の固定状況 ✓ カメラ, 照明配置等</p>	

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.4 充填施工要素試験 (試験計画) (4/6)

➤ 炉底部の充填試験手順・試験イメージを以下に示す。

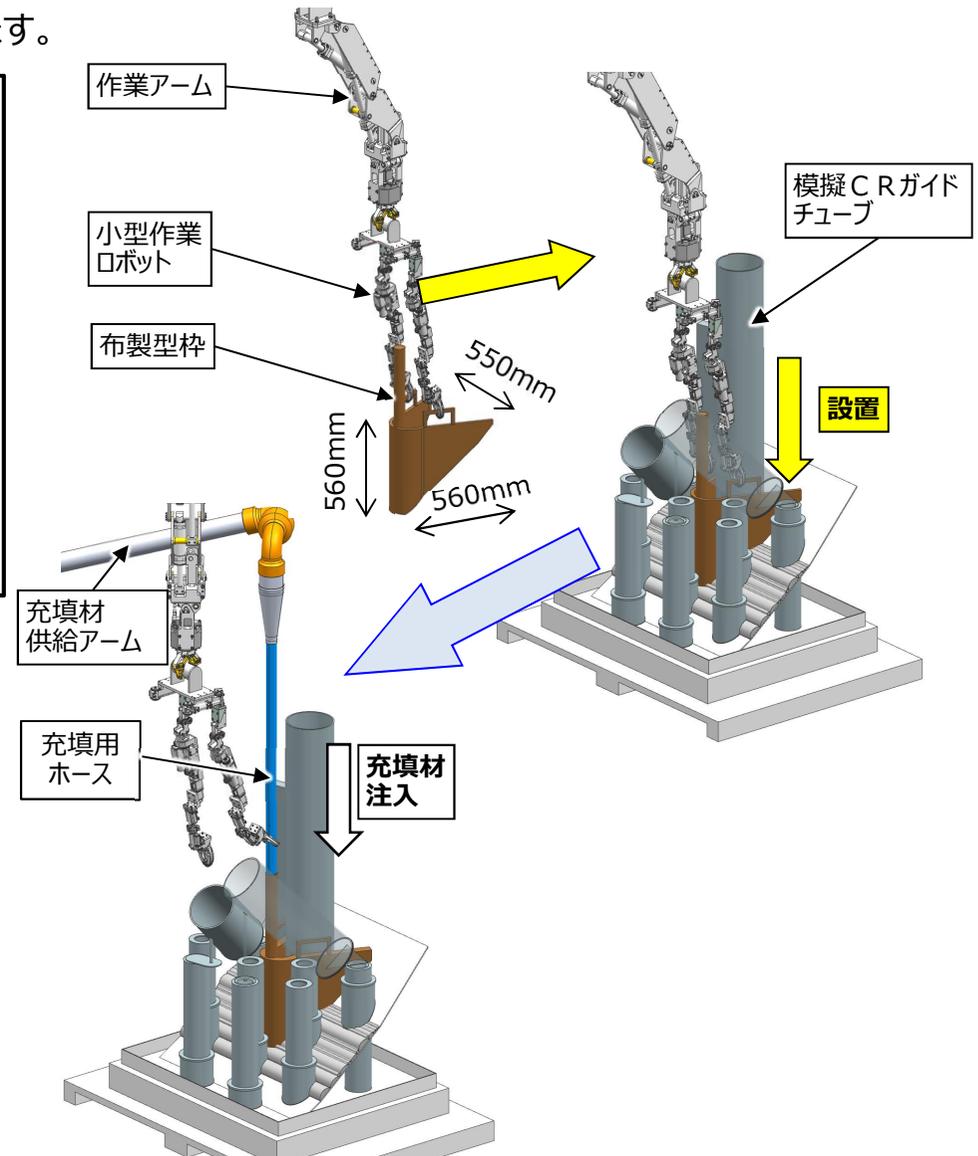
炉底部充填の試験手順

1. 作業アームで把持した小型作業ロボットにて、布製型枠を模擬CRガイドチューブ周囲に設置する。
2. 充填材供給アームにて充填用ホースを充填対象部付近へ移動し、作業アームで把持した小型作業ロボットにてホースを把持し、布製型枠へアクセスする。
3. 布製型枠内に充填材を注入し、堰を構築する。
4. 堰の形成状況を確認する。
5. 形成した堰に充填材を注入し、模擬CRガイドチューブを固化する。



布製型枠

- ・充填材を注入する際に充填材が溢れないよう堰の役割として使用する。
- ・鋼線ガイドより垂れ下げられた袋状の布製型枠に充填材を注入することで型枠が展張・形成される。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験計画) (5/6)

要素試験の目的と概要および試験イメージ (c. 炉底部開口部の充填施工要素試験)

No.	試験項目	要素試験の目的と概要 (案)	試験イメージ
c-1	必要資材の設置性確認	<p>【目的】 充填の際に必要な布製型枠が充填箇所を設置できることを確認する。</p> <p>【概要】 小型作業ロボットにて布製型枠を把持し、模擬開口部に設置する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 小型作業ロボットでの布製型枠把持方法 ✓ 布製型枠の開口部付近への設置方法等 	
c-2	充填用ホースのアクセス性確認	<p>【目的】 充填に必要な充填用ホースが充填箇所へアクセスできることを確認する。</p> <p>【概要】 充填材供給アームにて充填用ホースを充填対象付近に移動し、小型作業ロボットにて充填用ホースの位置合わせを行い、充填可能状態にする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 充填用ホースの移動 ✓ 小型作業ロボットでの把持方法 ✓ 対象への充填用ホース設置方法等 	
c-3	充填施工性確認	<p>【目的】 以下を実施し、充填施工性を確認する。</p> <p>【概要】 開口部に充填材を注入し、開口部を固化する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 充填材の漏えい状況(開口部への充填状況) ✓ 固化時間 ✓ クラック発生状況 ✓ カメラ、照明配置 	

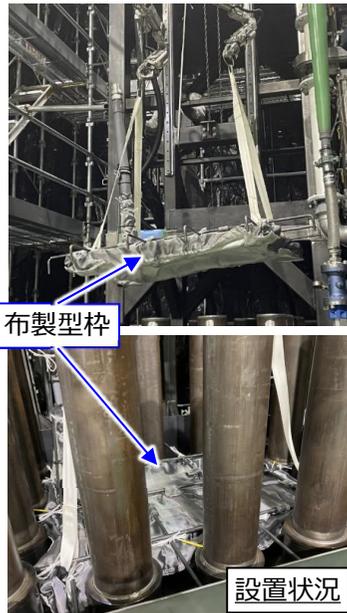
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.4 充填施工要素試験 (試験計画) (6/6)

➤ 炉底部開口部の充填試験手順・試験イメージを以下に示す。

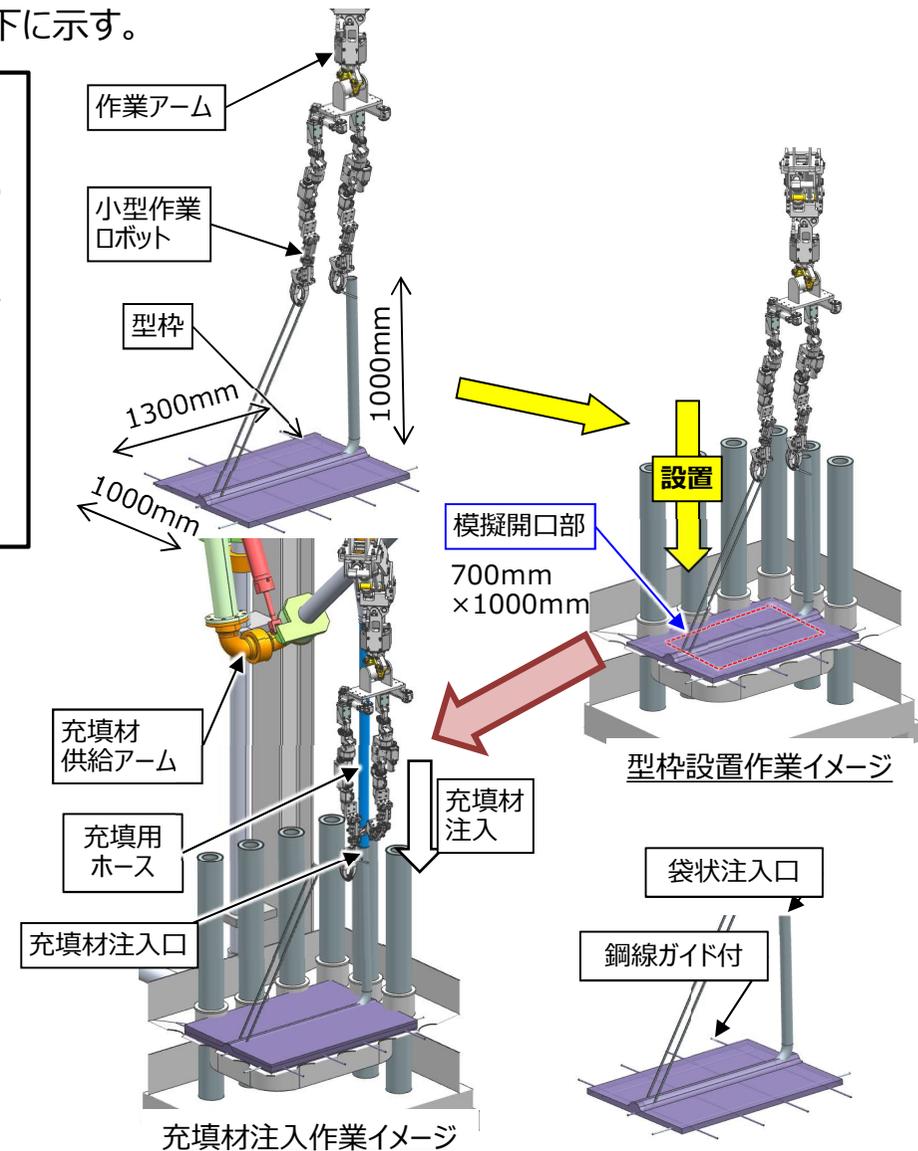
炉底部開口部充填の試験手順

1. 作業アームで把持した小型作業ロボットにて、布製型枠を模擬開口部に設置する。
2. 充填材供給アームにて充填用ホースを充填対象部付近へ移動し、作業アームで把持した小型作業ロボットにて、ホースを把持し、炉底部開口部へアクセスする。
3. 模擬開口部に設置した布製型枠内および布製型枠上を含む開口部周辺に充填材を注入し、開口部を固化する。



布製型枠

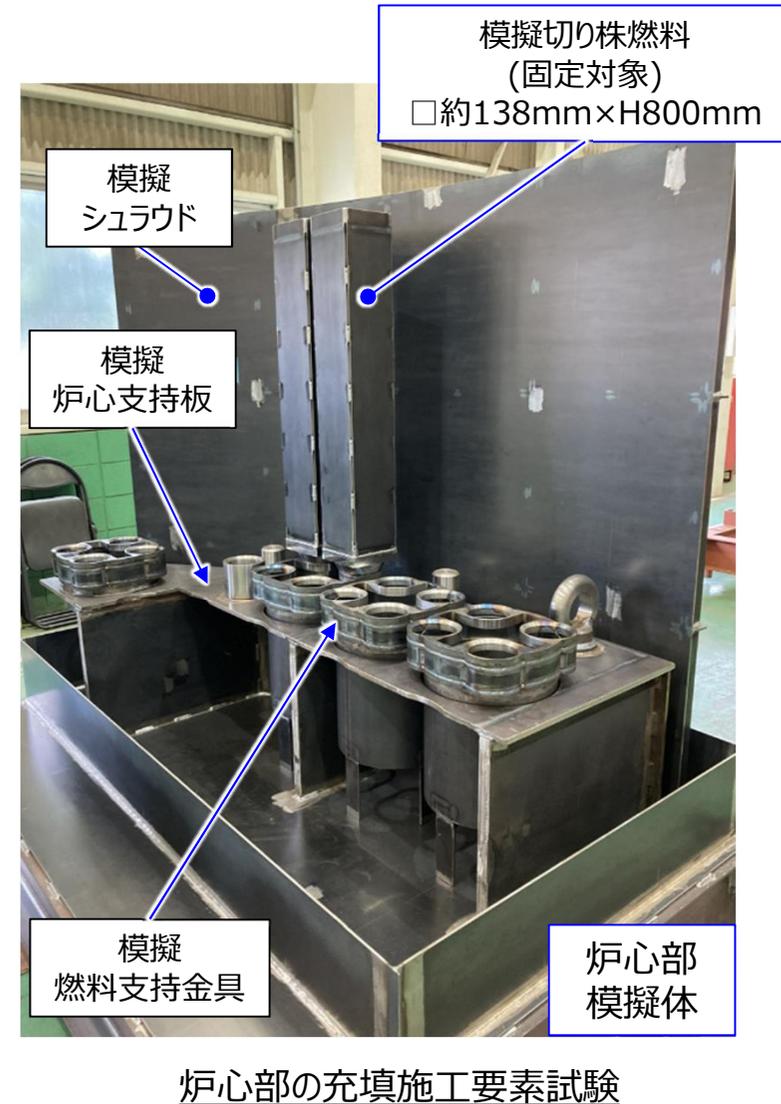
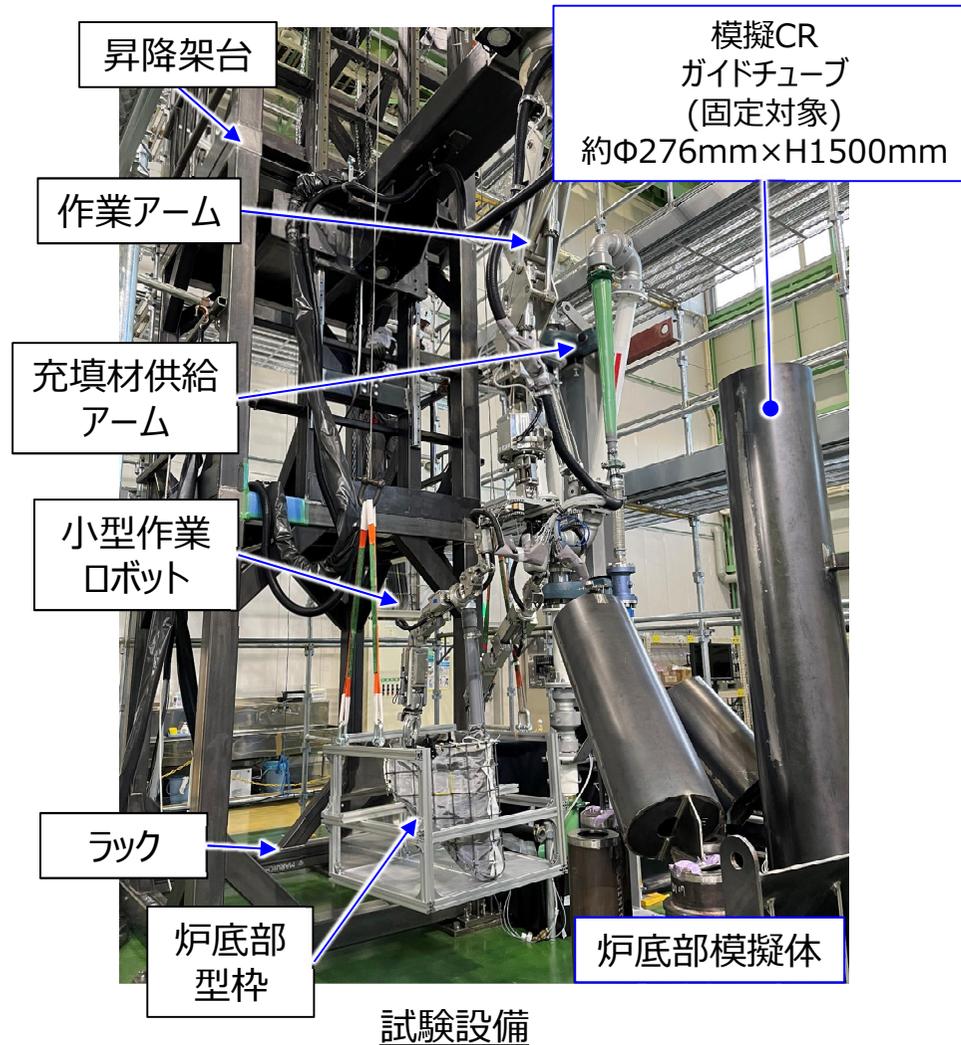
- ・充填材を注入する際に充填材が溢れないよう堰の役割として使用する。
- ・鋼線ガイドより垂れ下げられた袋状の布製型枠に充填材を注入することで型枠が展張・形成される。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験装置等) (1/4)

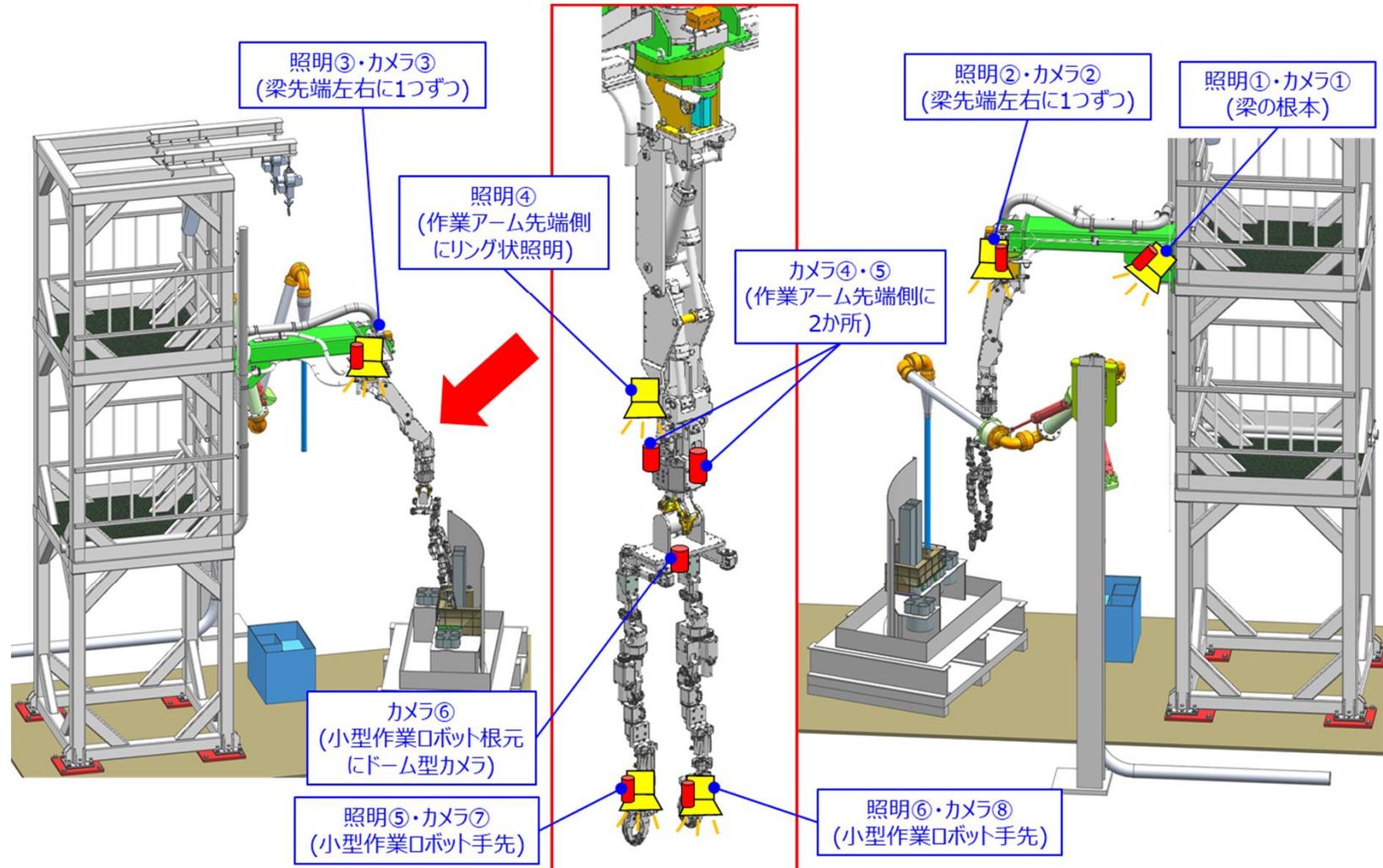
➤ 試験装置および模擬体を以下に示す。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験装置等) (2/4)

- 試験装置に付帯するカメラおよび照明の設置に関して以下に示す。

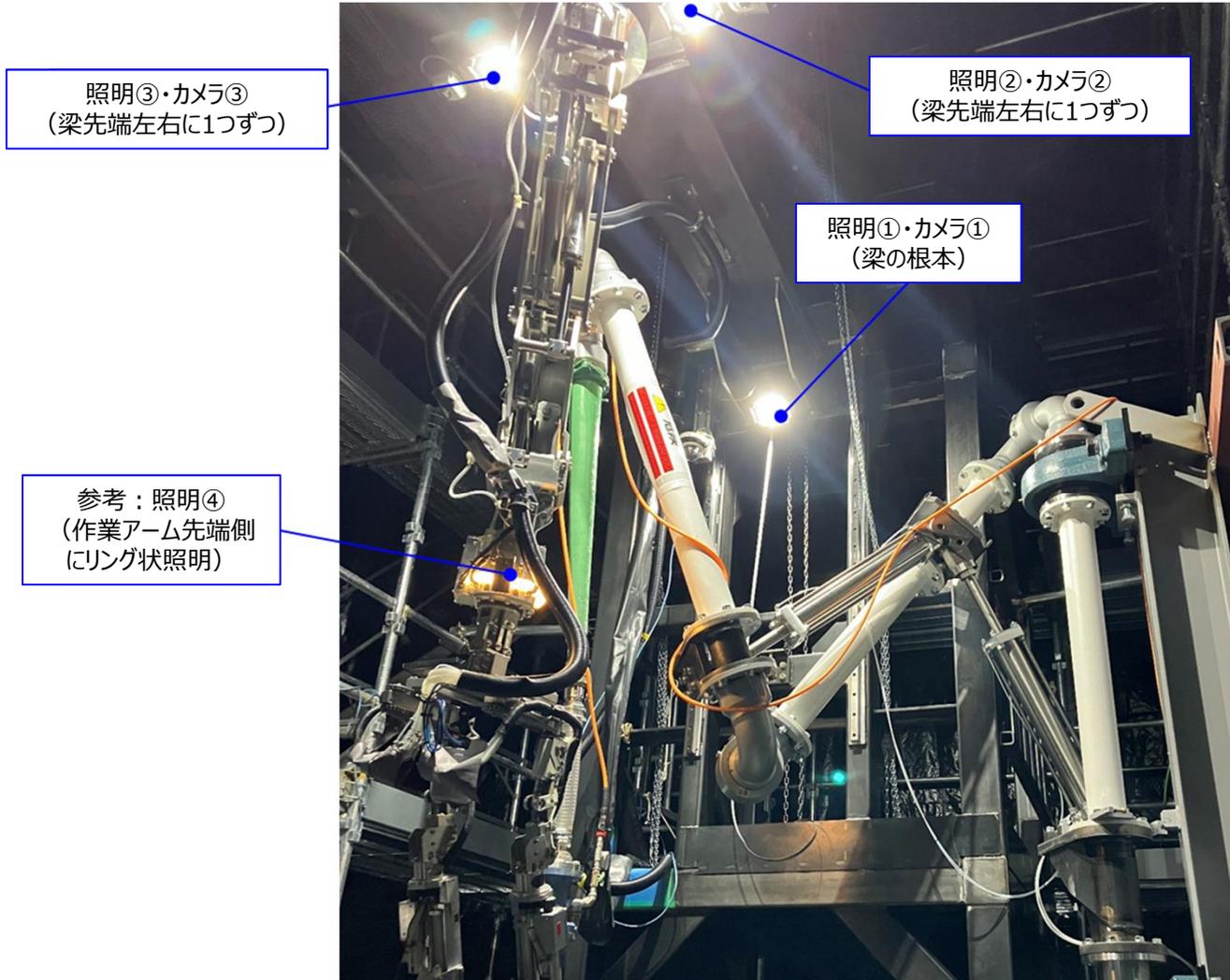


試験設備 (照明・カメラの設置)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験装置等) (3/4)

- カメラおよび照明の設置イメージを以下に示す。

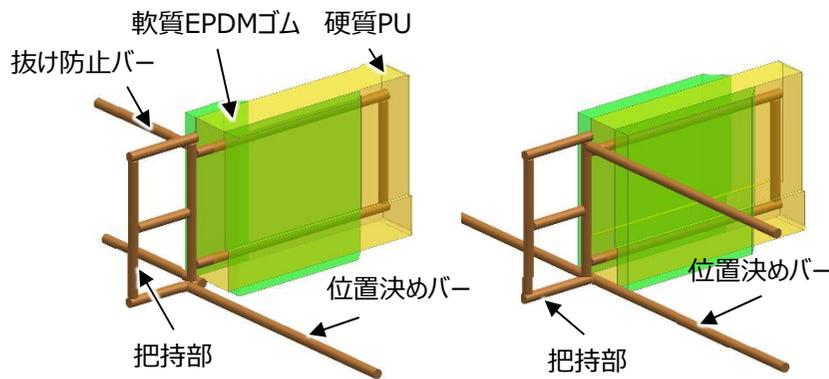
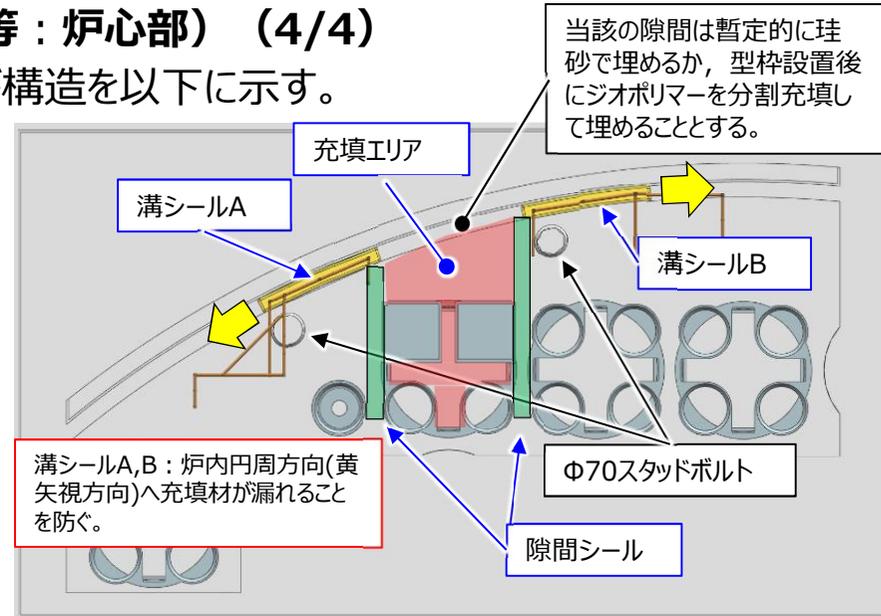
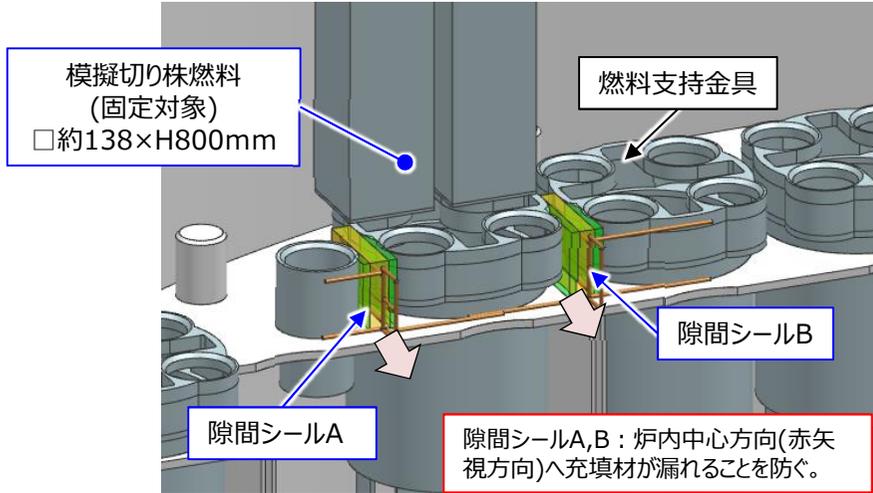


試験設備イメージ (照明・カメラの設置)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.4 充填施工要素試験 (試験装置等：炉心部) (4/4)

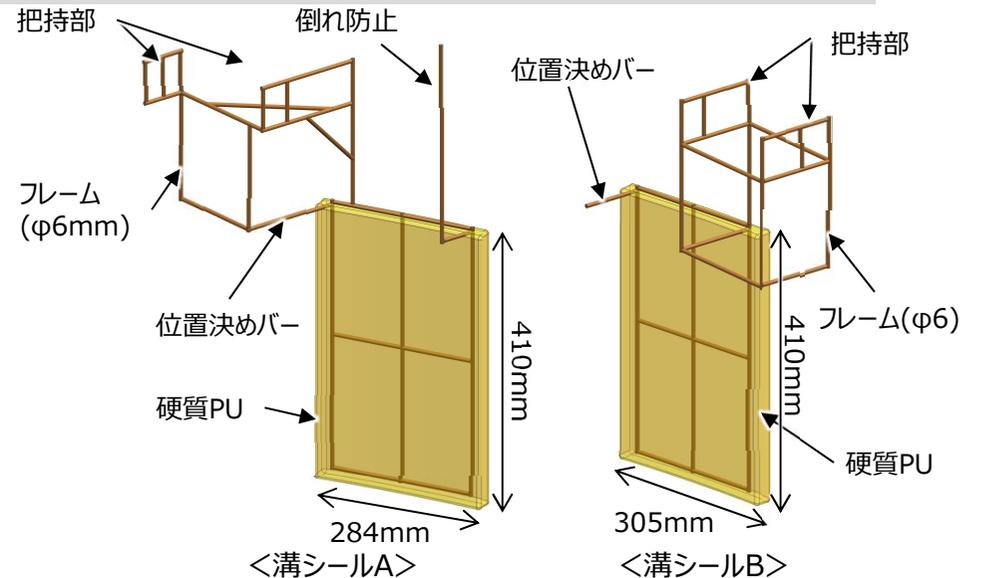
➤ 隙間シール, 溝シールの設置イメージおよび構造を以下に示す。



<隙間シールA>

<隙間シールB>

隙間シールの概要



<溝シールA>

<溝シールB>

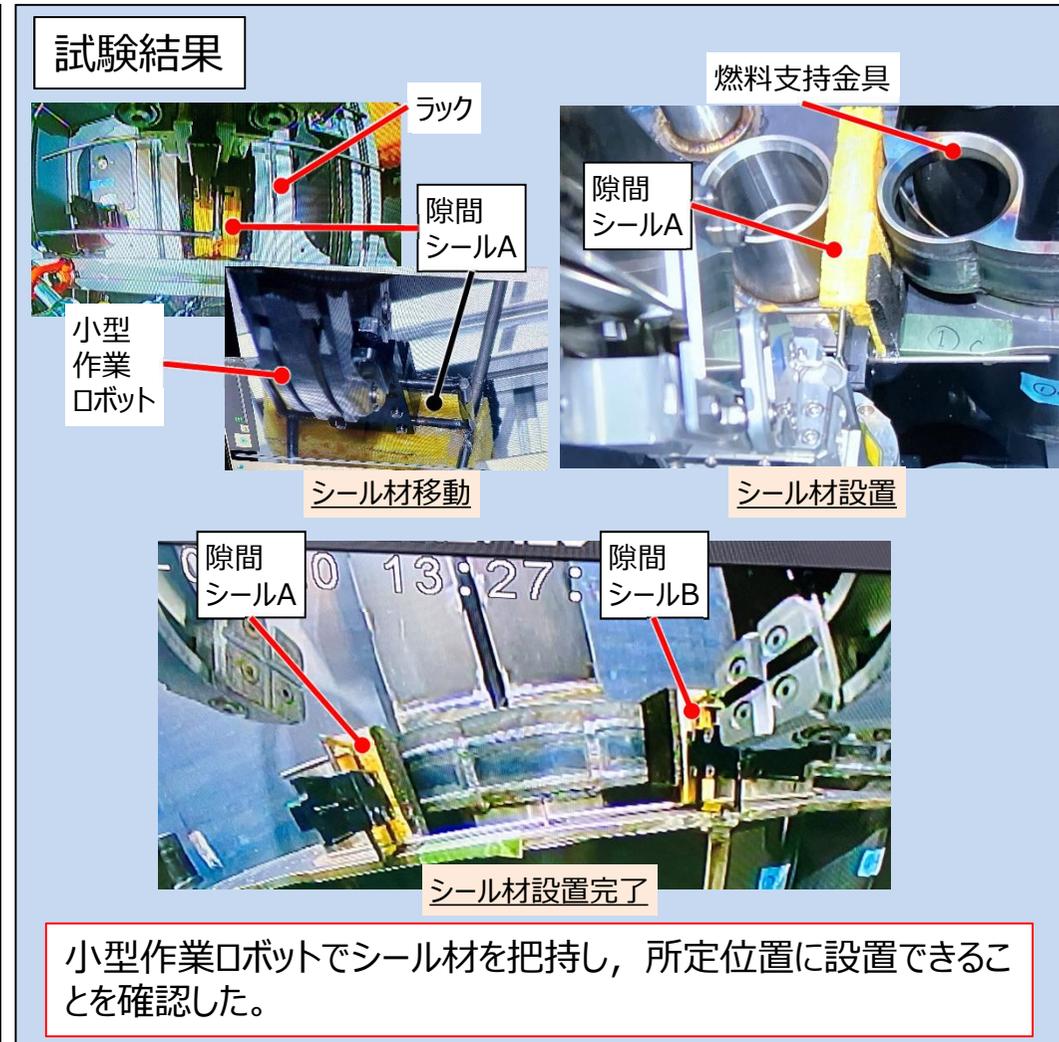
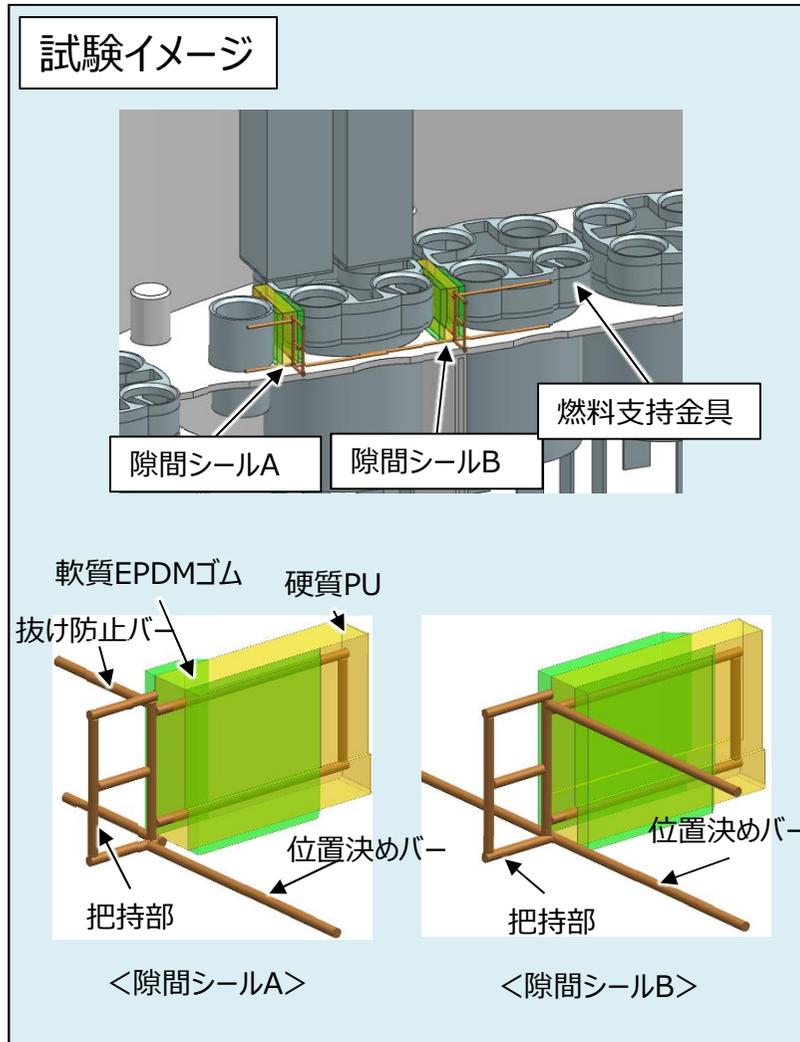
溝シールの概要

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (1/22)

➤ 各充填施工要素試験の試験状況を以降に示す。

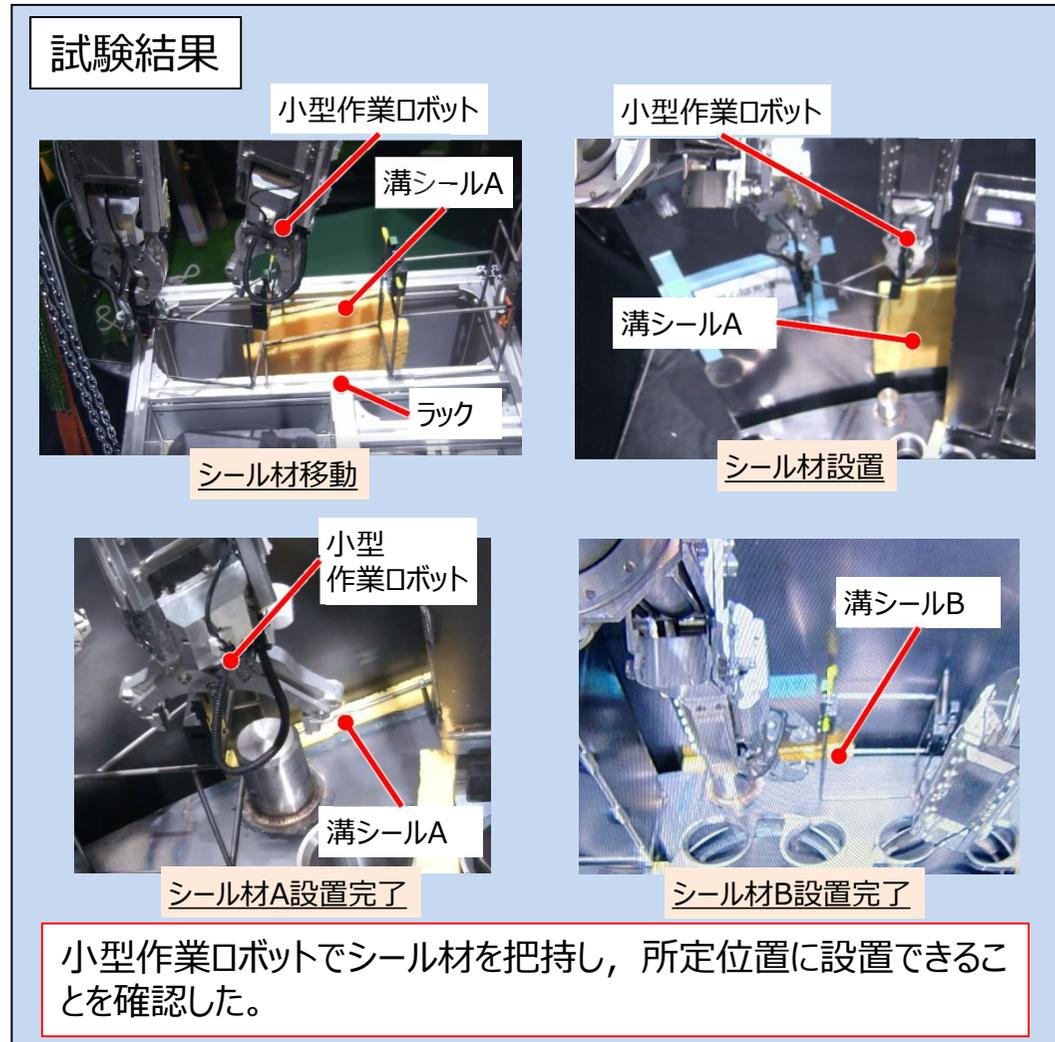
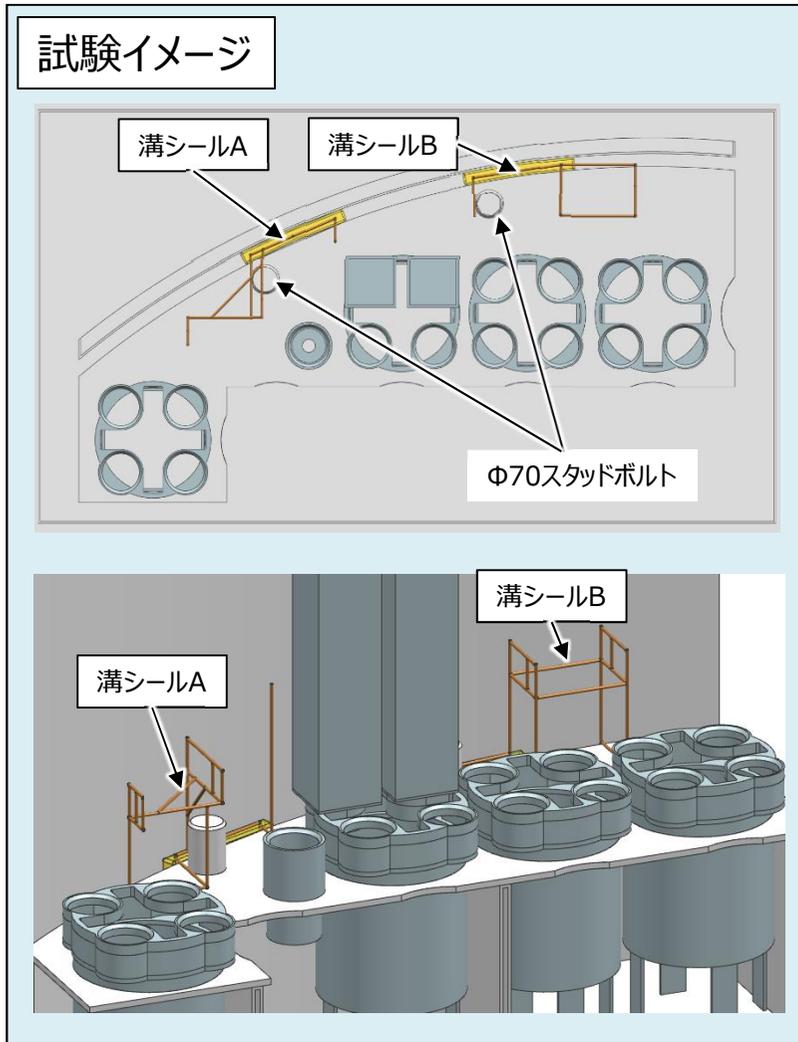
① 初回試験 (必要資材の設置性確認)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (2/22)

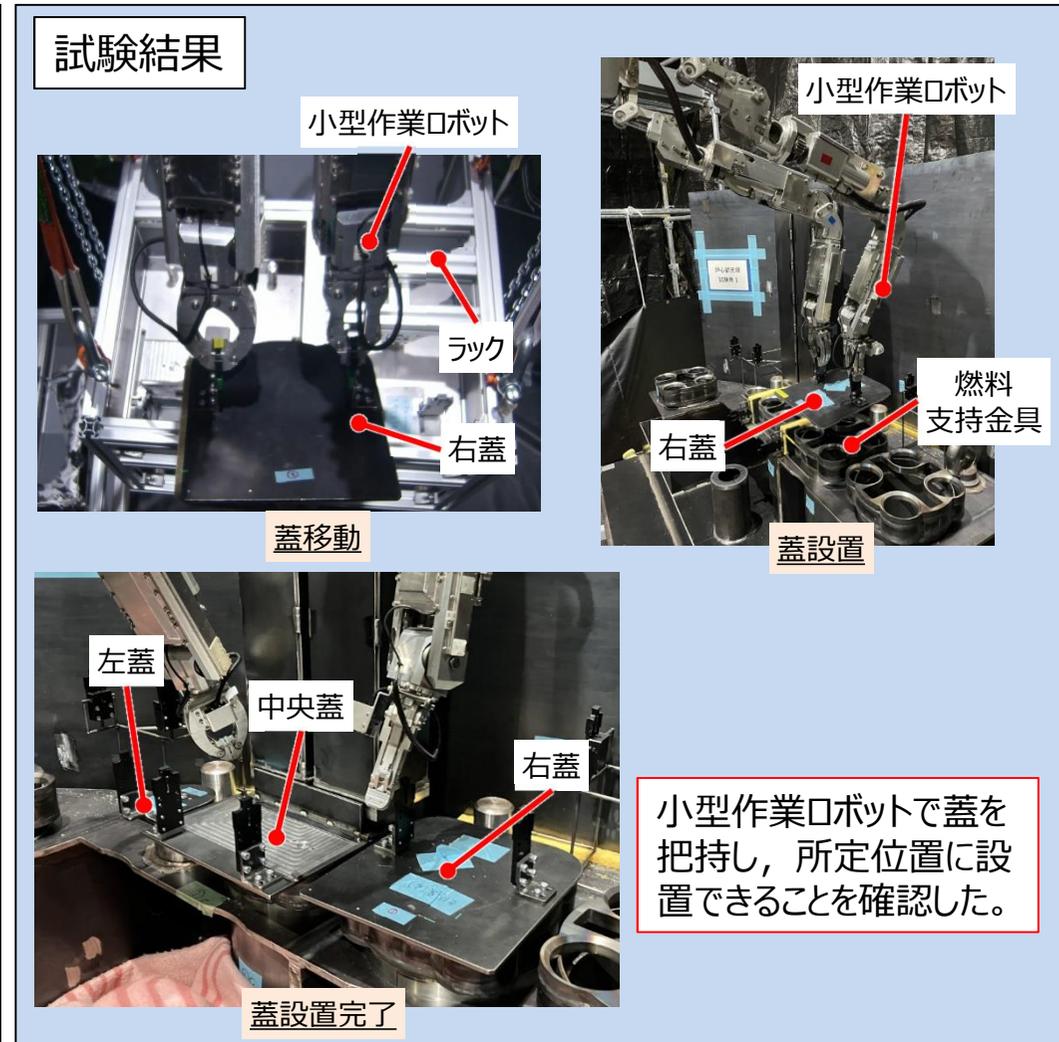
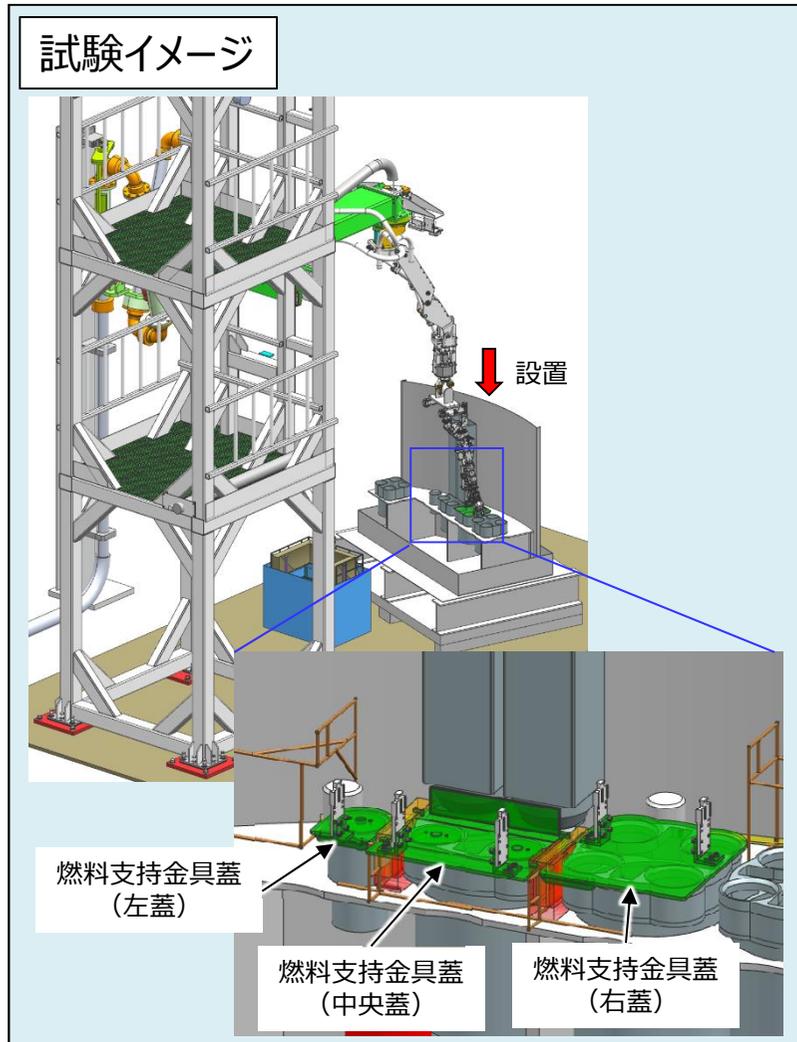
① 初回試験 (必要資材の設置性確認)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (3/22)

① 初回試験 (必要資材の設置性確認)

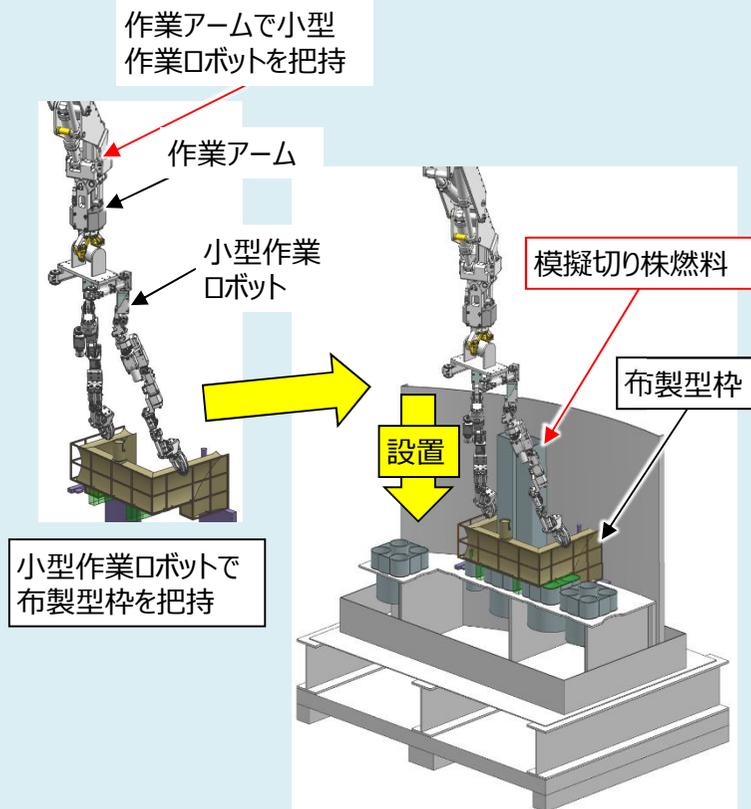


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

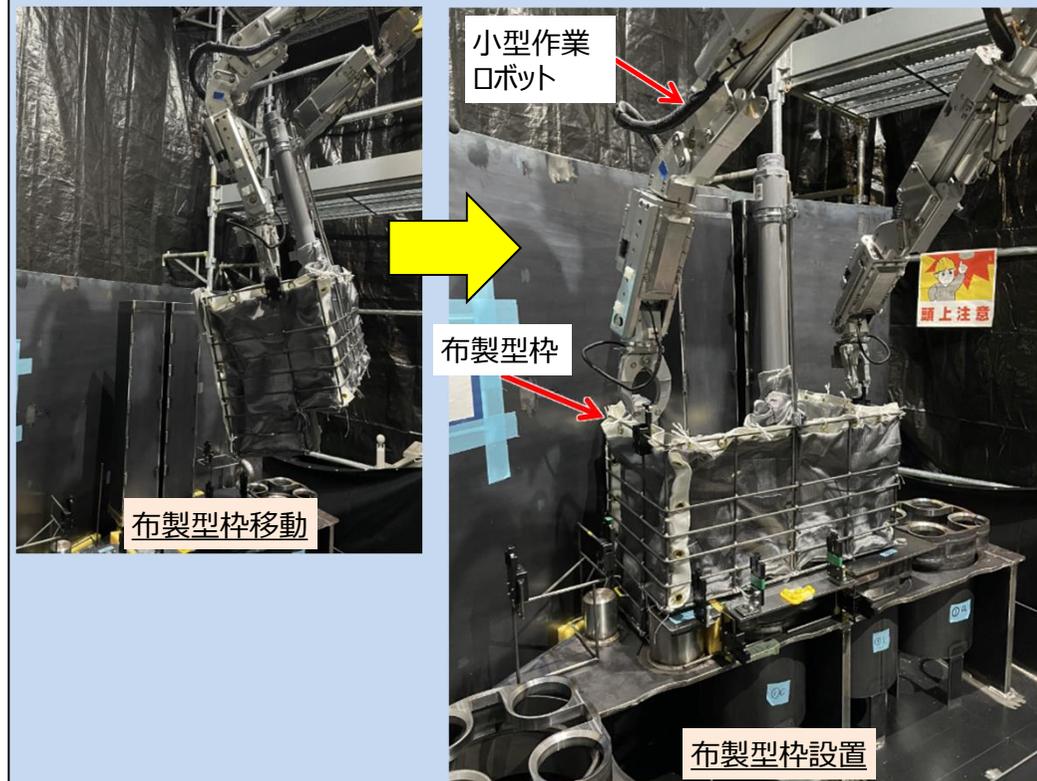
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (4/22)

① 初回試験 (必要資材の設置性確認)

試験イメージ



試験結果



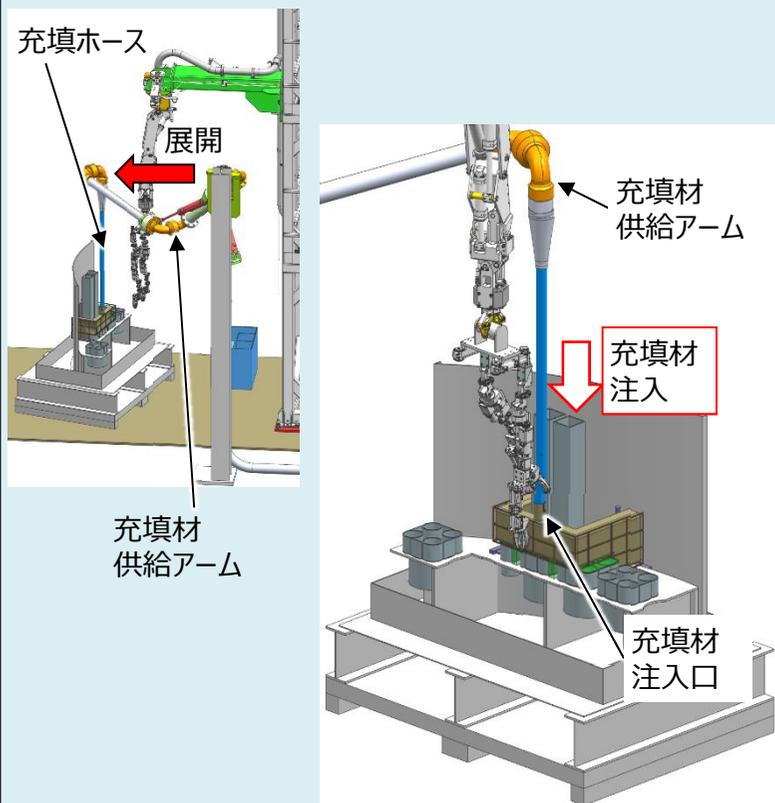
小型作業ロボットで型枠等を把持し、堰設置位置に設置できることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

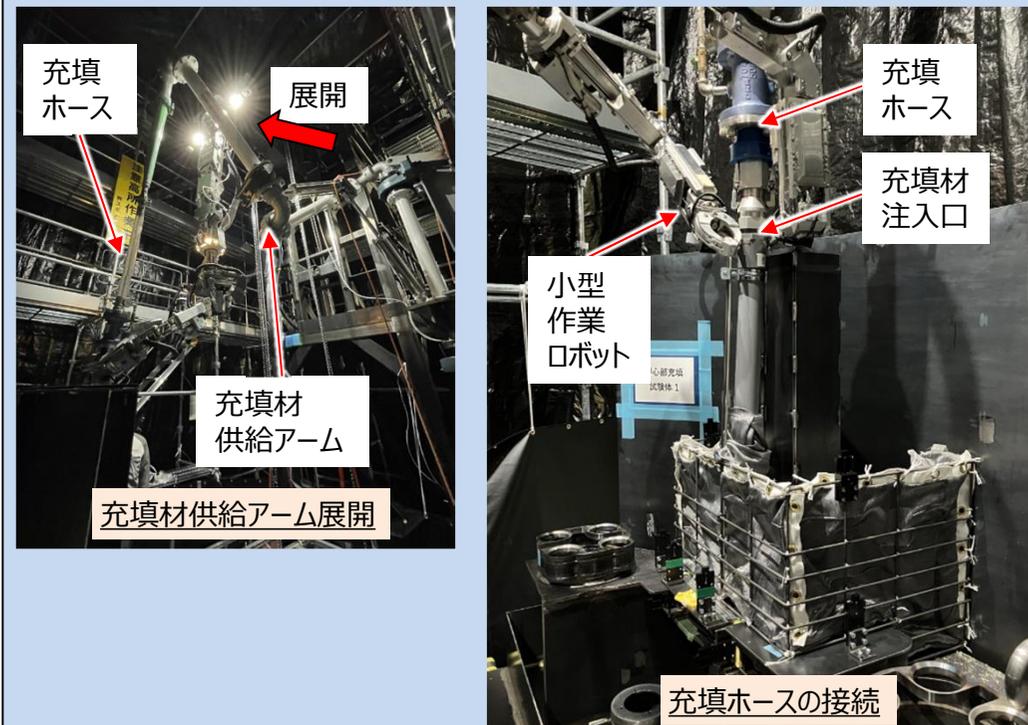
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (5/22)

① 初回試験 (充填ホースのアクセス性確認)

試験イメージ



試験結果

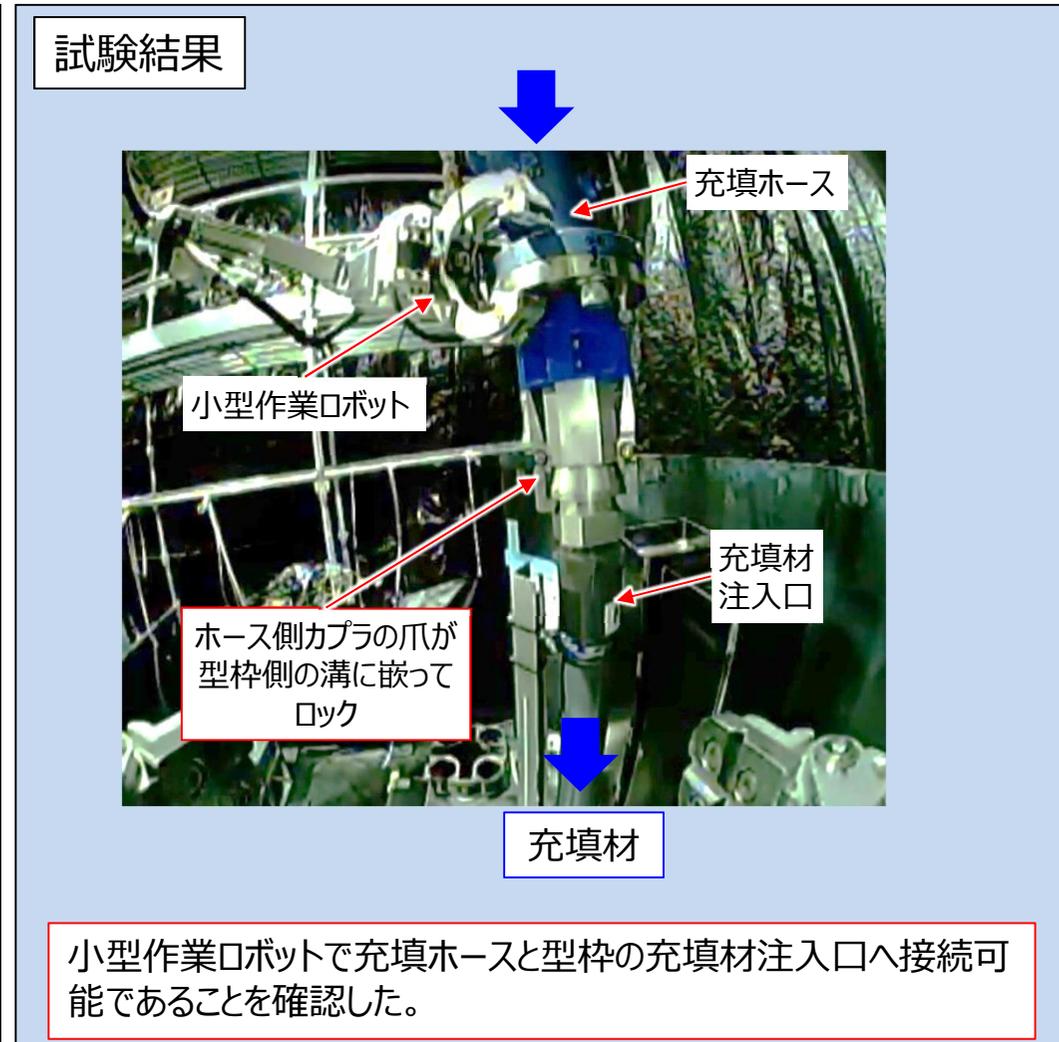
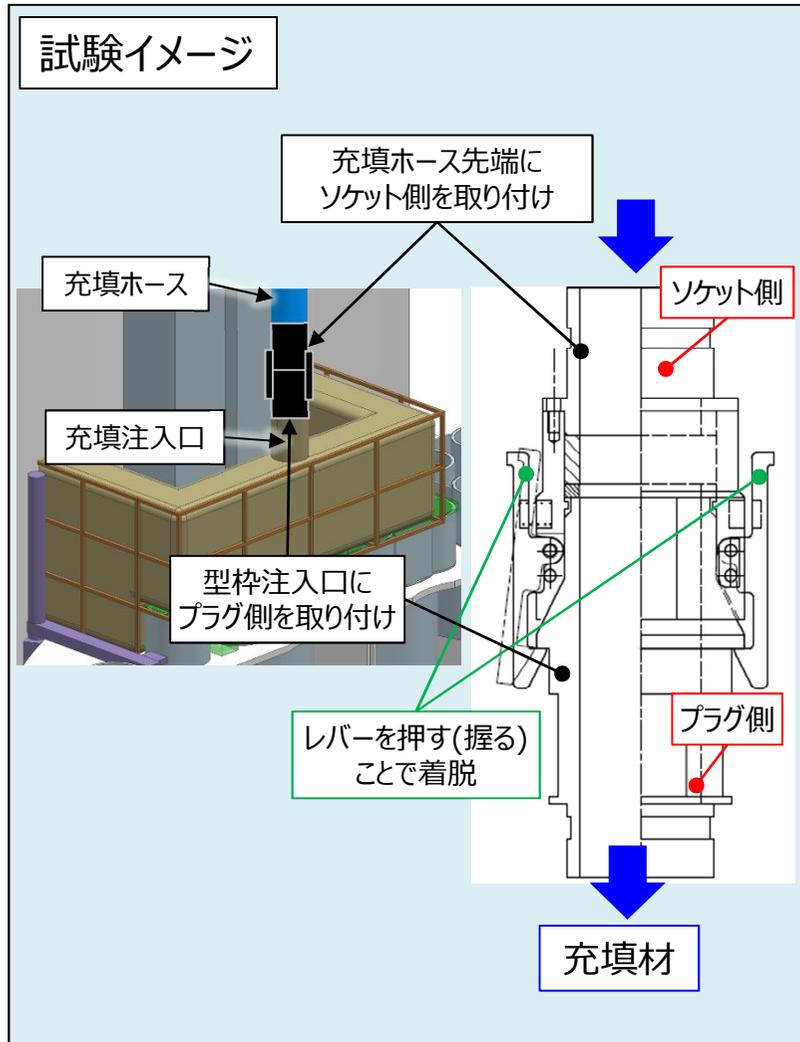


充填材供給アームにて、充填料用ホースを対象付近へ移動できることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (6/22)

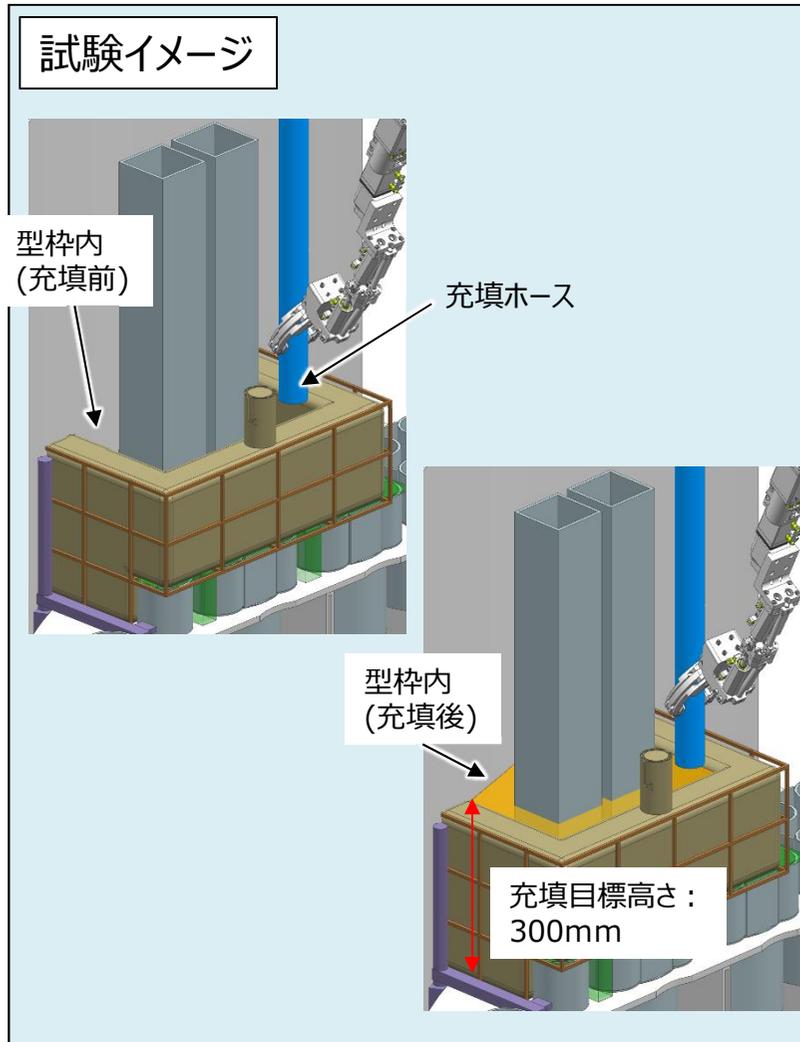
① 初回試験 (充填ホースのアクセス性確認)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

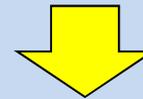
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (7/22)

① 初回試験 (充填施工性確認)



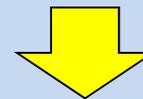
試験結果

1回目充填：堰内から充填材が漏れ出し、目標高さ(300mm)までの充填不可。



堰内から充填材が全て流出後に珪砂2号を堰内の溝部と床面に人手で投入。

2回目充填：堰内から充填材が漏れ出し、目標高さ(300mm)までの充填不可。



堰内充填高さ230mmの位置で漏れいが止まったため、3回目の充填を行うこととした。

3回目充填：目標高さ(300mm)まで充填できることを確認した。

最終的には充填可能であったものの、漏れい量が多く方法改善が必要。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

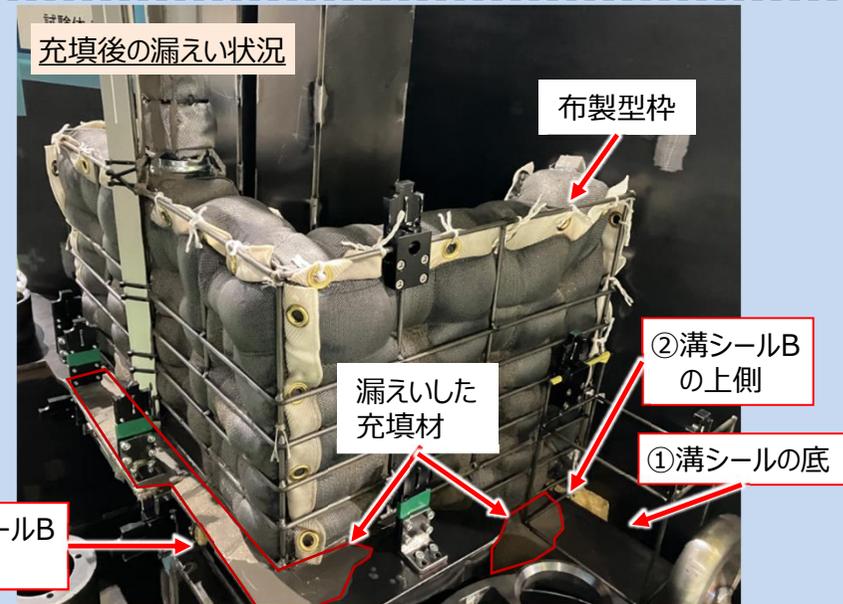
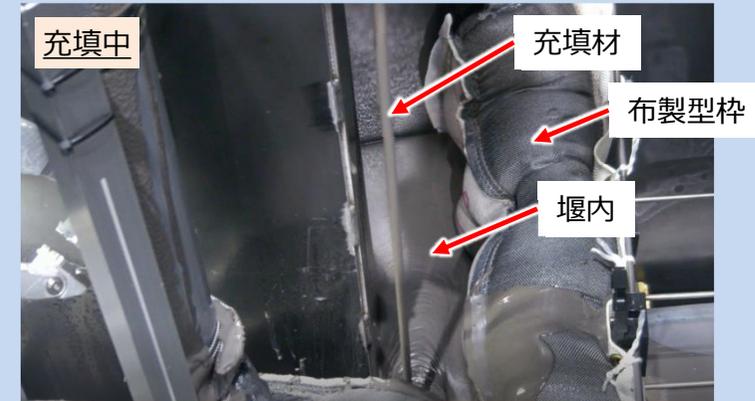
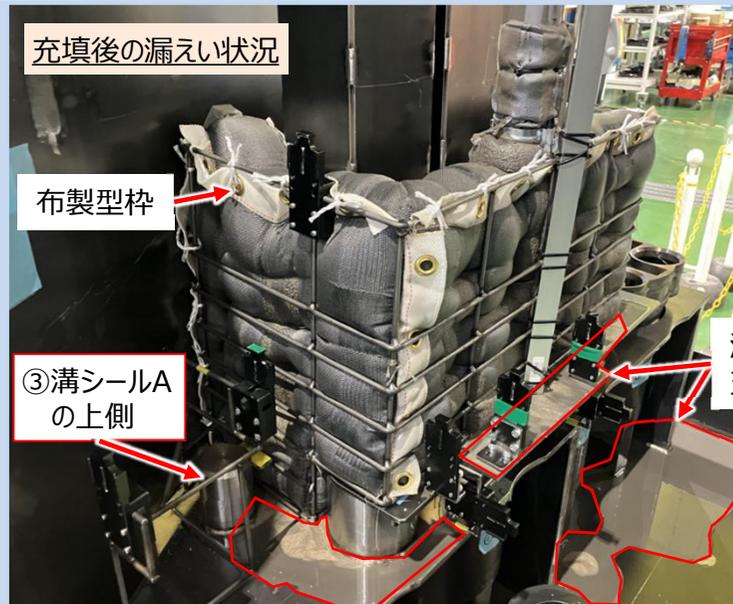
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (8/22)

① 初回試験 (充填施工性確認)

試験結果【1回目充填】

漏えい箇所(下図参照)

- ① 溝シールの底
- ② 溝シールBの上側
- ③ 溝シールAの上側
- ④ 隙間シールBの右側



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

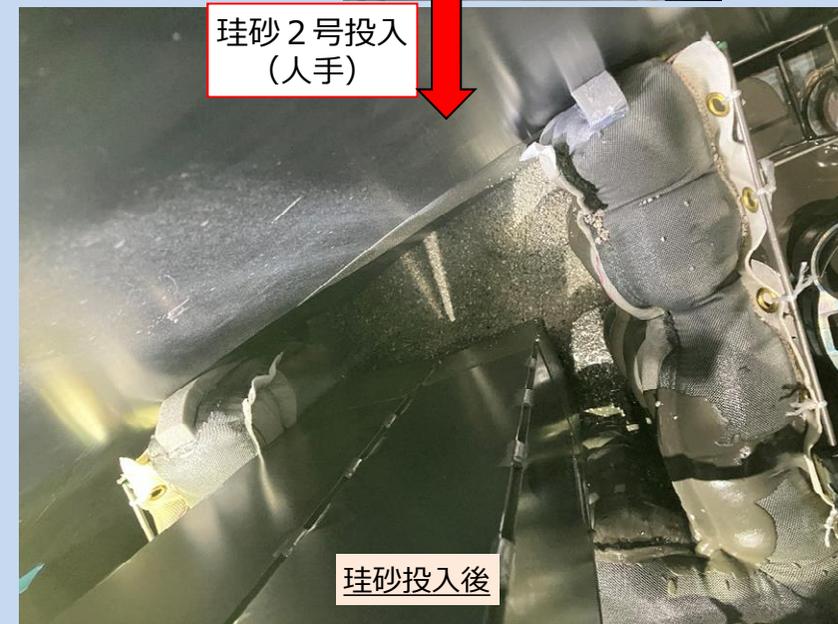
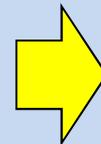
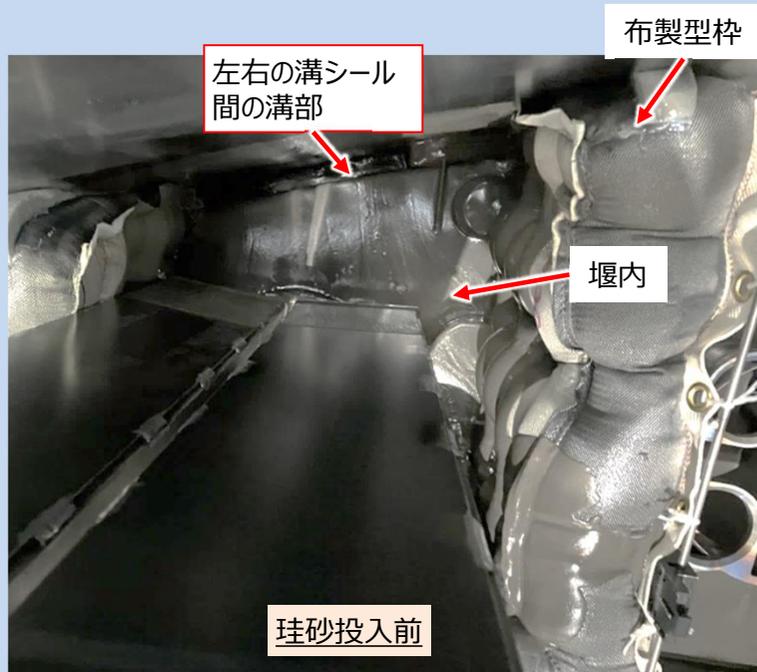
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (9/22)

① 初回試験 (充填施工性確認)

1回目充填後の対応

- ① 充填材が堰内から漏れしきるまで待機。
- ② 砂利(珪砂 2号)を左右の溝シール間の溝部および型枠設置の床面を少し越えるくらいまで撒く。

珪砂 2号
(粒径約3mm)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

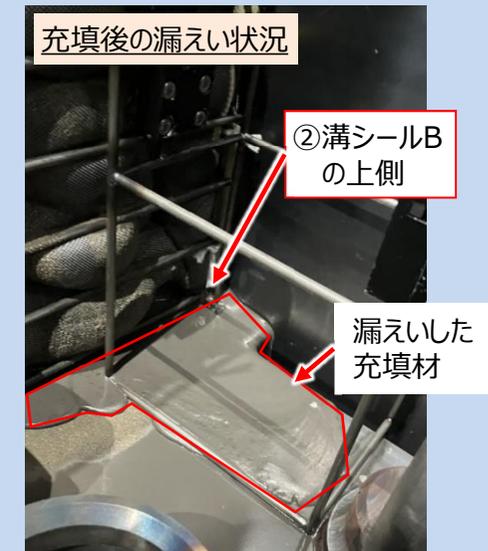
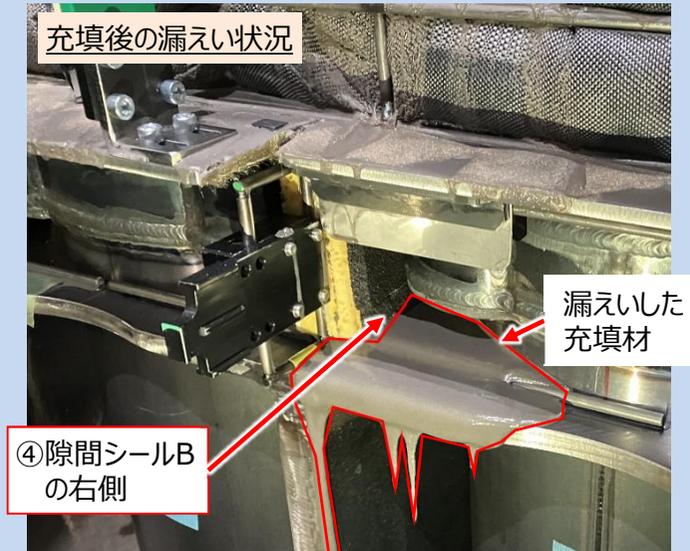
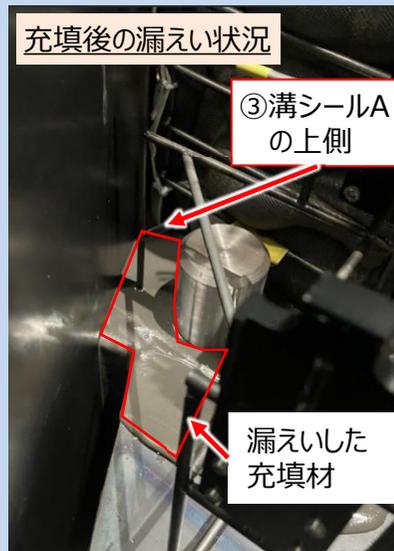
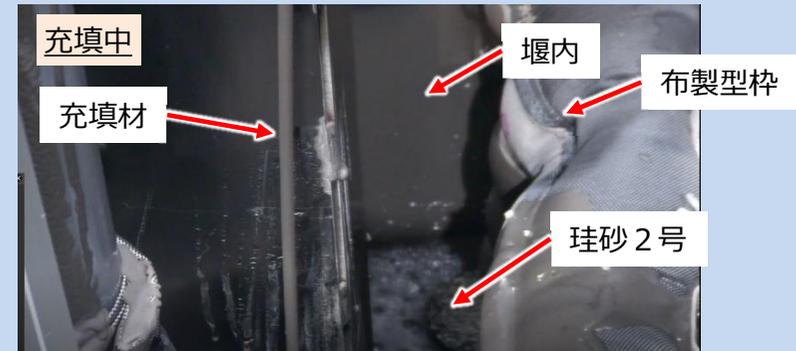
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (10/22)

① 初回試験 (充填施工性確認)

試験結果【2回目充填】

漏えい箇所(下図参照)

- ① 溝シールの底→2回目充填時は漏えい確認されなかった
- ② 溝シールBの上側→充填直後は漏えい止まらず
- ③ 溝シールAの上側→充填直後は漏えい止まらず
- ④ 隙間シールBの右側→充填直後は漏えい止まらず



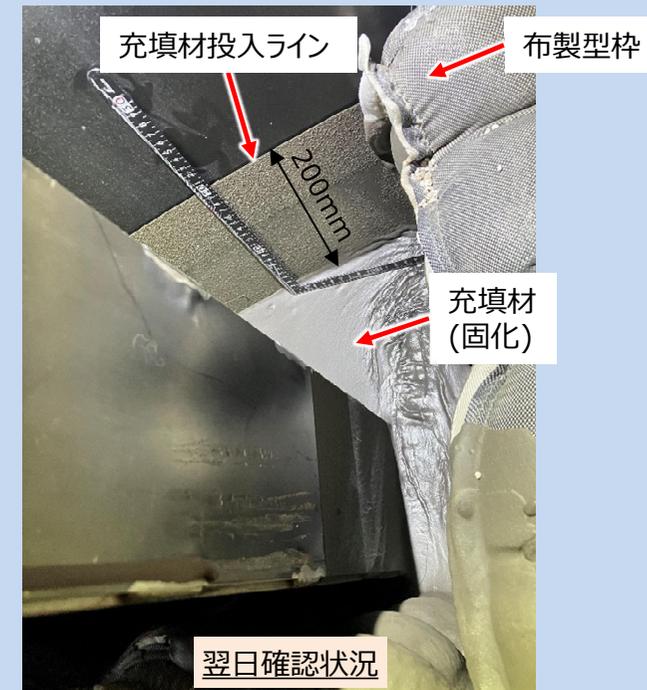
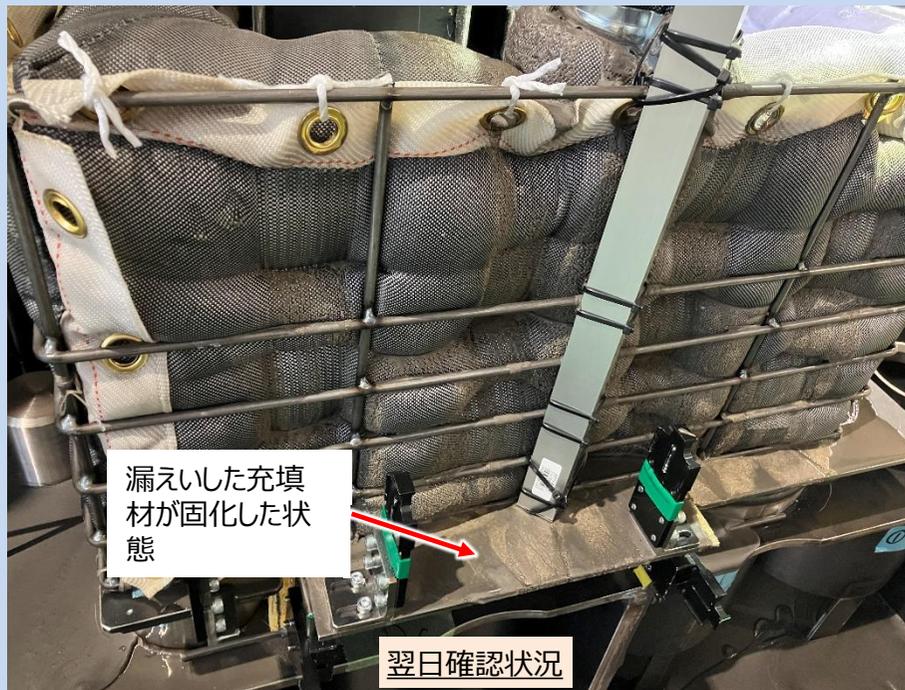
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (11/22)

① 初回試験 (充填施工性確認)

2回目充填後の対応

- ① 充填材が堰内から漏れいている状態で夜間放置。
- ② 翌日、堰内充填高さ230mmの位置で漏えいが止まったことを確認。

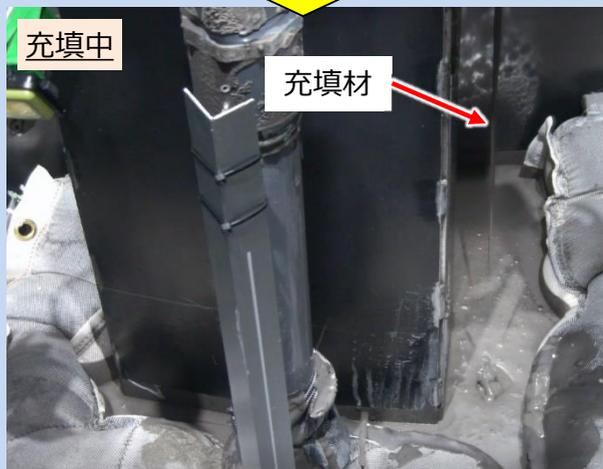


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

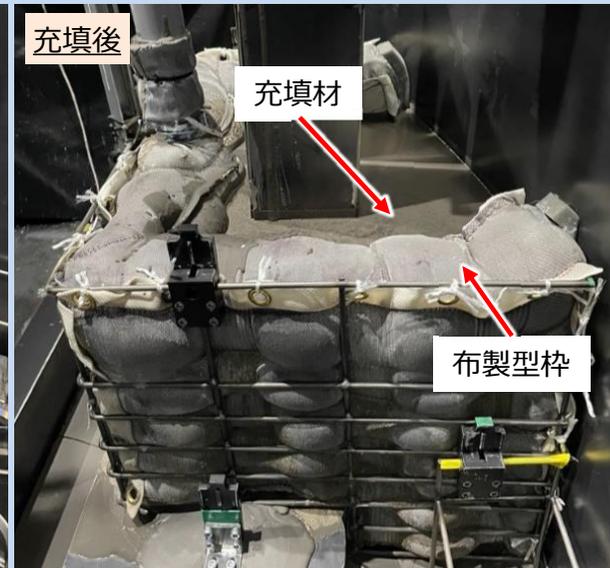
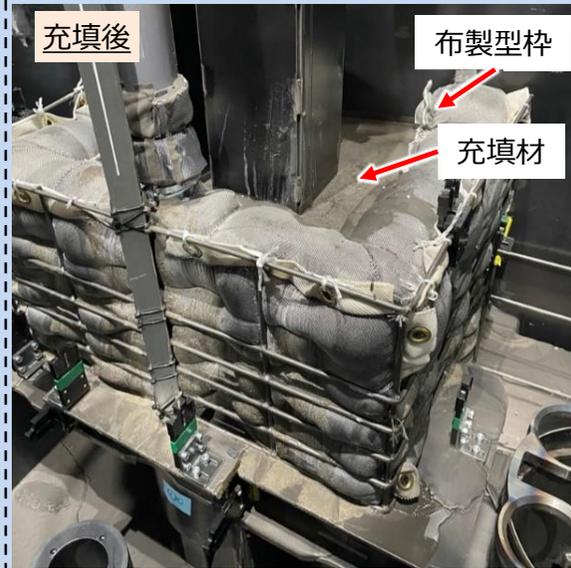
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (12/22)

① 初回試験 (充填施工性確認)

試験結果【3回目充填】



漏えい確認



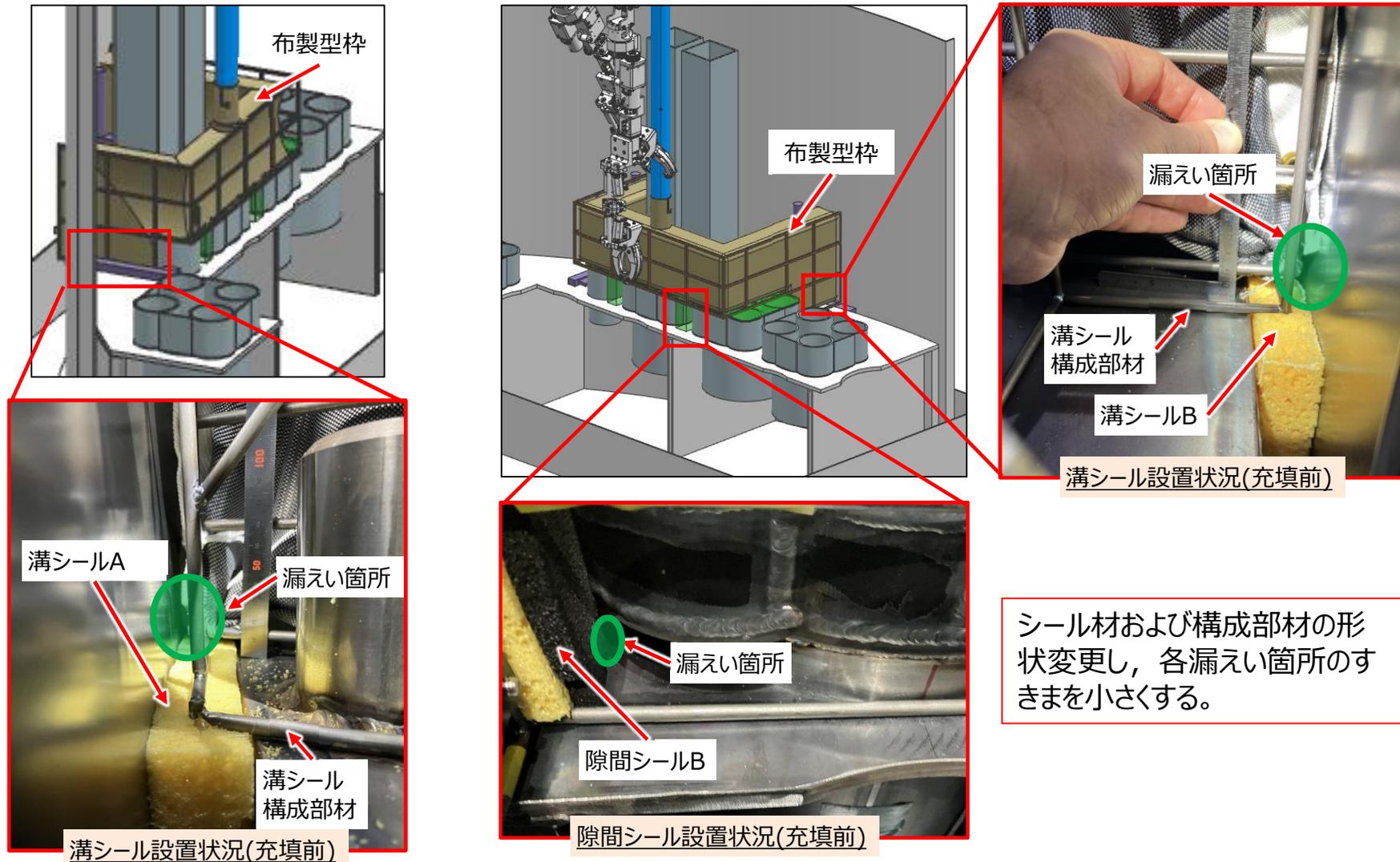
新たな漏えい無しで目標高さ (300mm) まで充填可能であった。

再試験へ向けた改善内容は次頁以降に示す。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (13/22)

②再試験へ向けた改善内容 (漏えい箇所のすきま縮小)



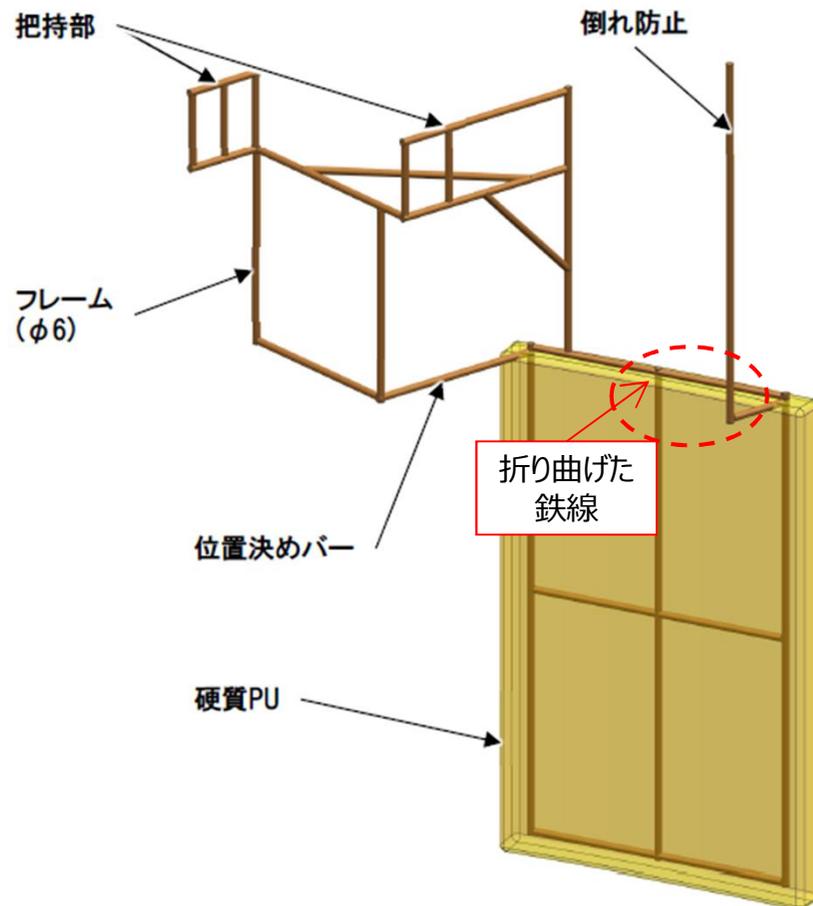
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (14/22)

②再試験へ向けた改善内容 (漏えい箇所のすきま縮小)

【溝シール改良：溝シールA】

・溝シールAの鉄線に型枠の鉄線が乗り上げ隙間が生じたため、溝シールAの鉄線を約40mm折り曲げ、型枠の鉄線と干渉しないように加工。



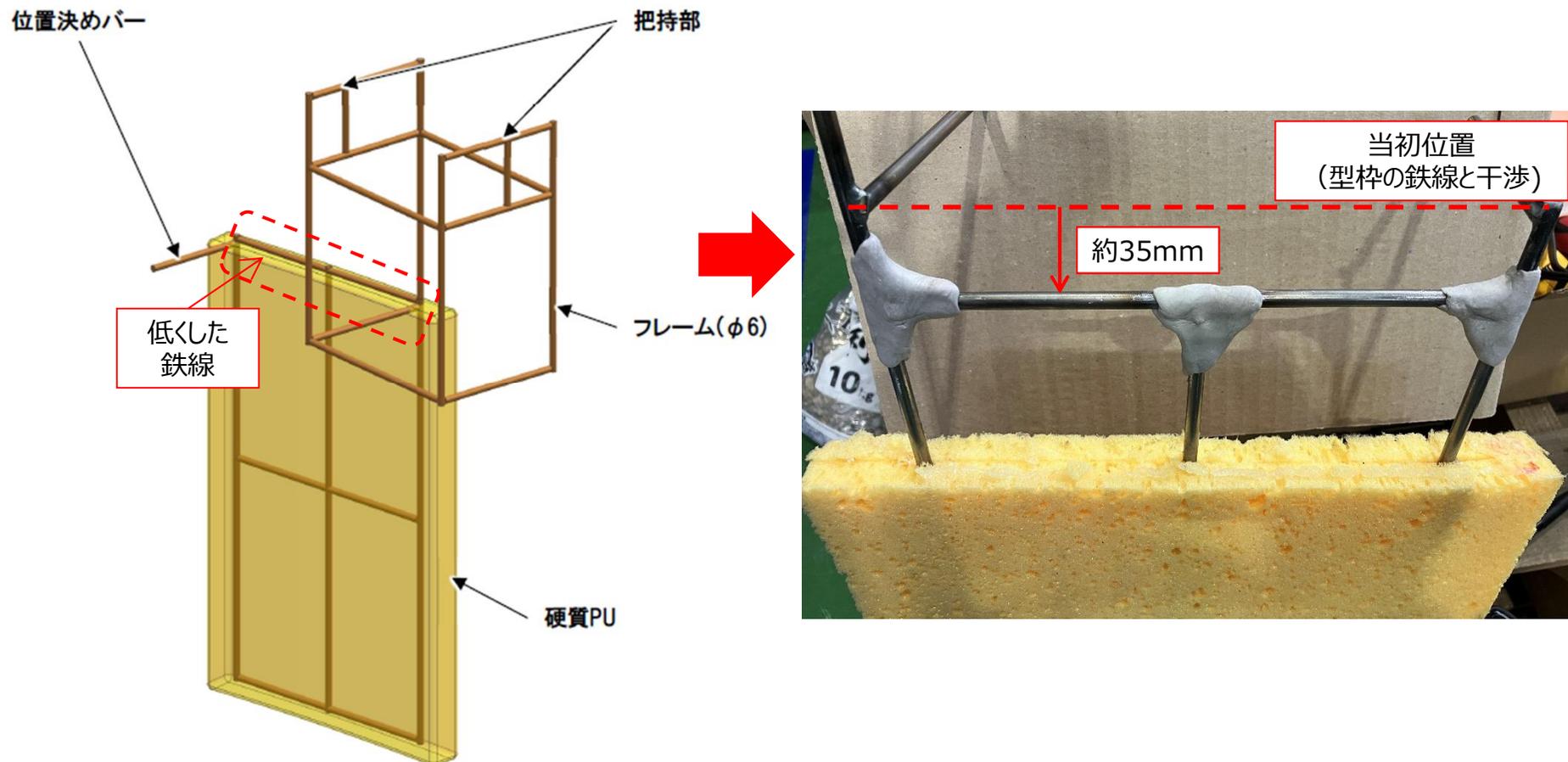
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (15/22)

②再試験へ向けた改善内容 (漏えい箇所のすきま縮小)

【溝シール改良：溝シールB】

・溝シールBの鉄線に型枠の鉄線が乗り上げ隙間が生じたため、溝シール側の鉄線を約35mm低くし、型枠の鉄線と干渉しないように加工。



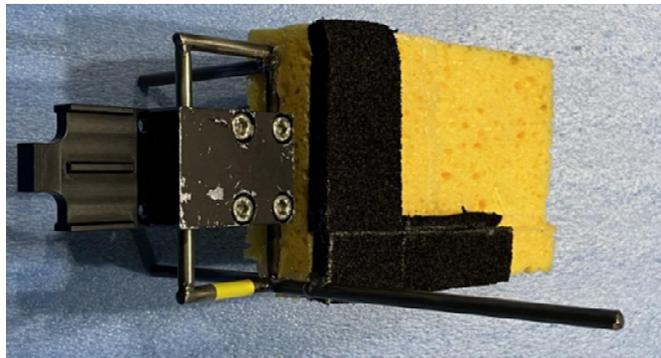
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (16/22)

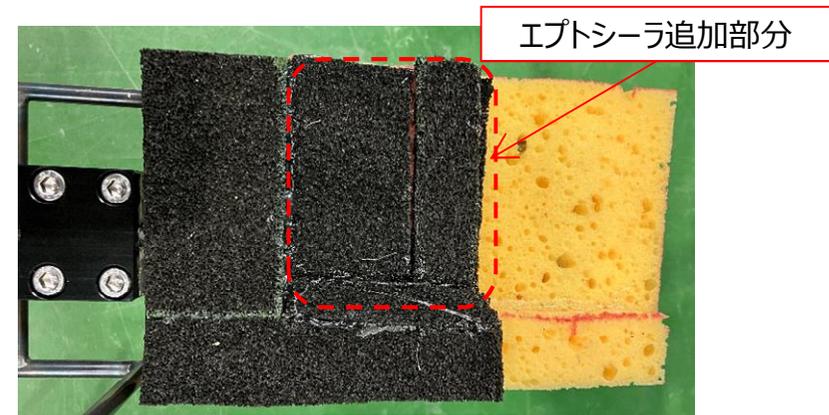
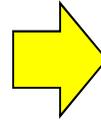
②再試験へ向けた改善内容 (漏えい箇所のすきま縮小)

【隙間シール改良：隙間シールA・B】

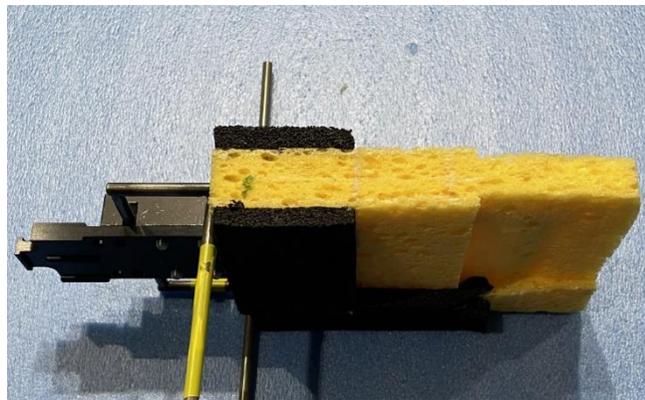
・1回目試験では隙間シールBから漏えいが生じたため、隙間シールA・B共にエプトシーラを追加した。



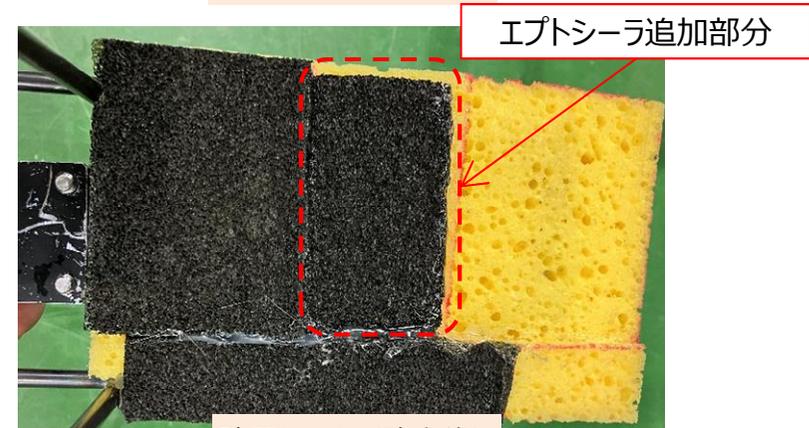
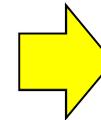
隙間シールA(改良前)



隙間シールA(改良後)



隙間シールB(改良前)

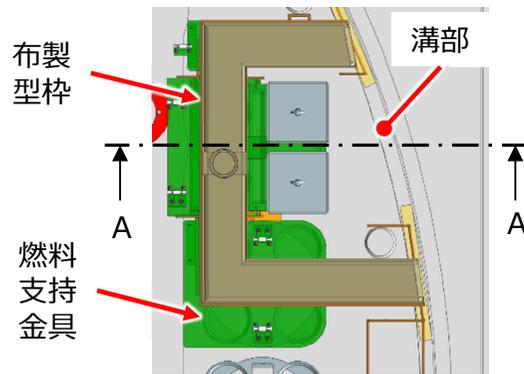


隙間シールB(改良後)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (17/22)

②再試験へ向けた改善内容 (充填材にかかる圧力の低減)



分割充填手順

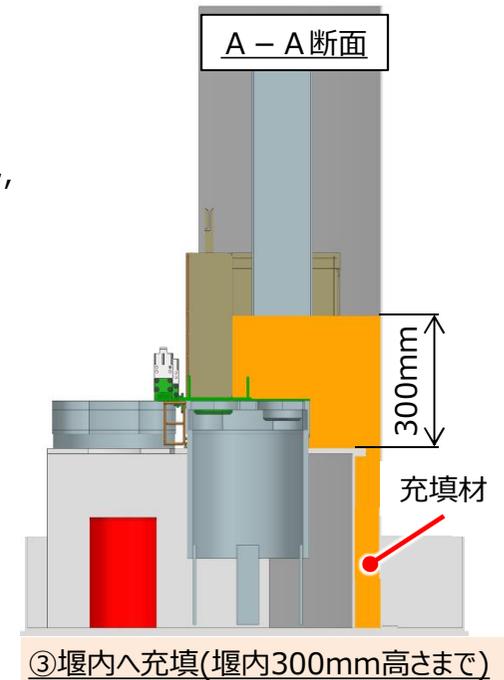
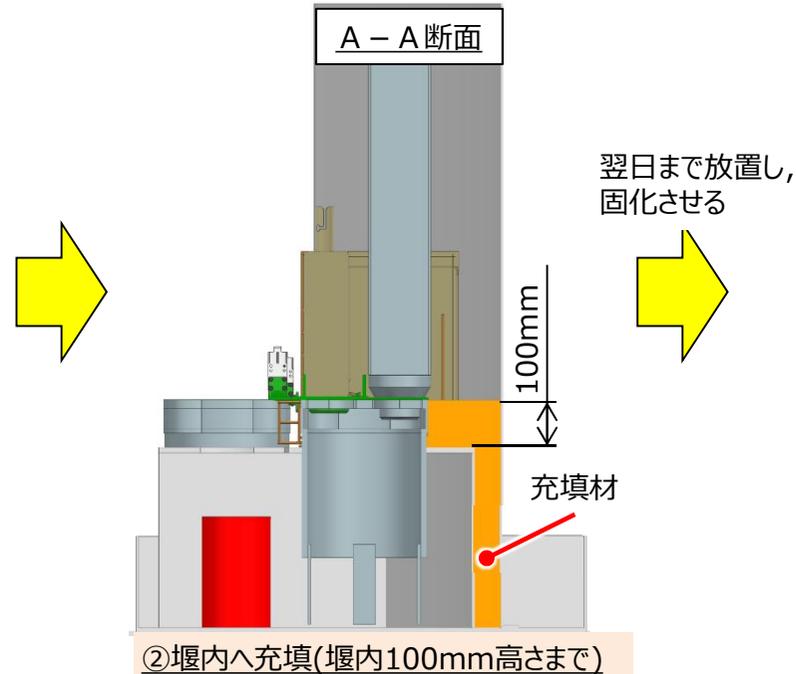
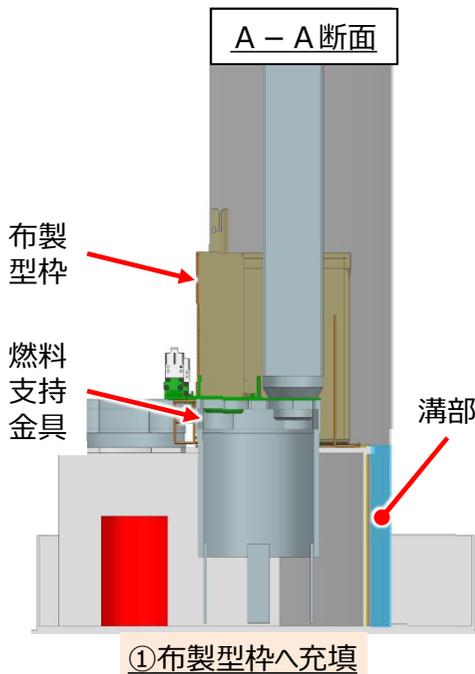
①布製型枠内へ充填する。

②堰内へ充填する(堰内100mm高さまで)

↓ ~翌日まで放置し, 固化させる~

③堰内へ充填する(堰内300mm高さまで)

充填材を分割して充填し, 充填材にかかる堰内から堰外への圧力を低減する。

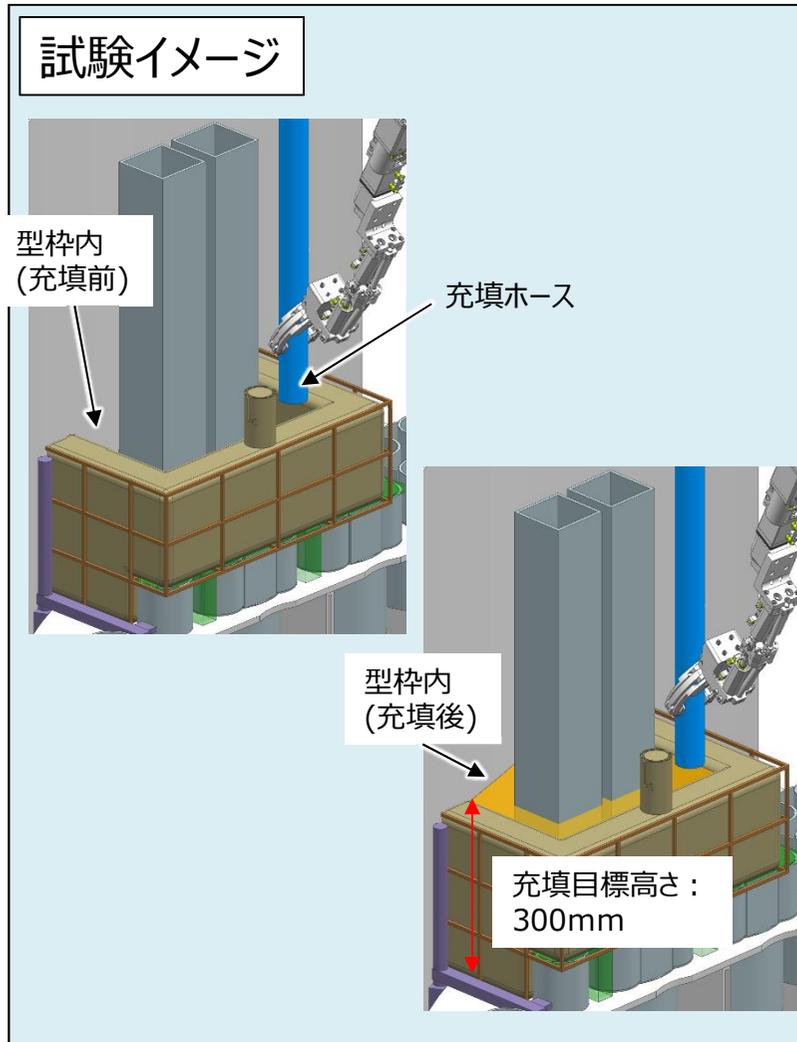


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (18/22)

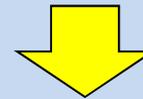
③再試験 (充填施工性確認)

※必要資材の設置性確認, 充填用ホースの
アクセス性確認は初回試験同様に作業可能であった。



試験結果

1回目充填：堰内100mm高さまで充填したが、充填材が徐々に漏れ出し、水位が低下した。



堰内充填高さ約30mm位置で漏れいが止まったため、予定通り、2回目の充填を行うこととした。

2回目充填：堰内から充填材が漏れ出したものの、充填材が徐々に固化し、最終的に堰内280mm高さまで充填材が残存した。
(目標高さ300mm付近まで充填できたため、再充填は行わないこととした)

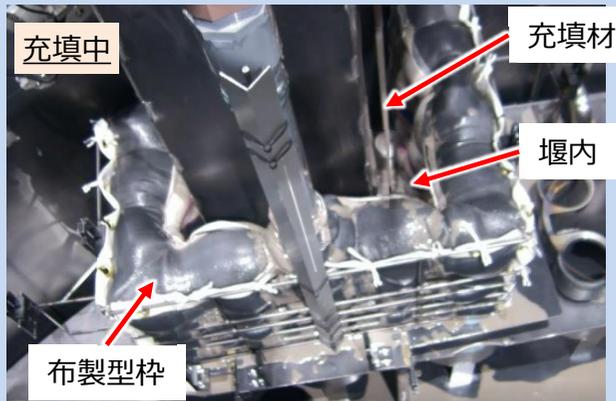
初回試験後の対策を行い、目標高さ付近まで充填可能であることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (19/22)

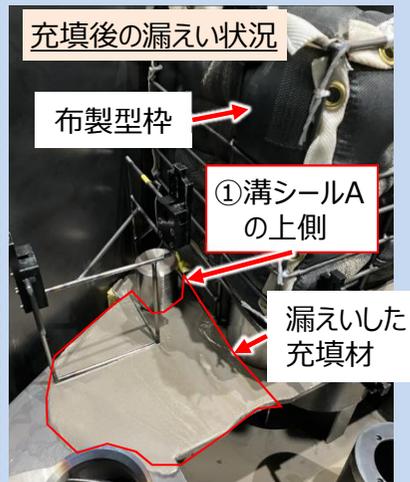
③再試験 (充填施工性確認)

試験結果【1回目充填】

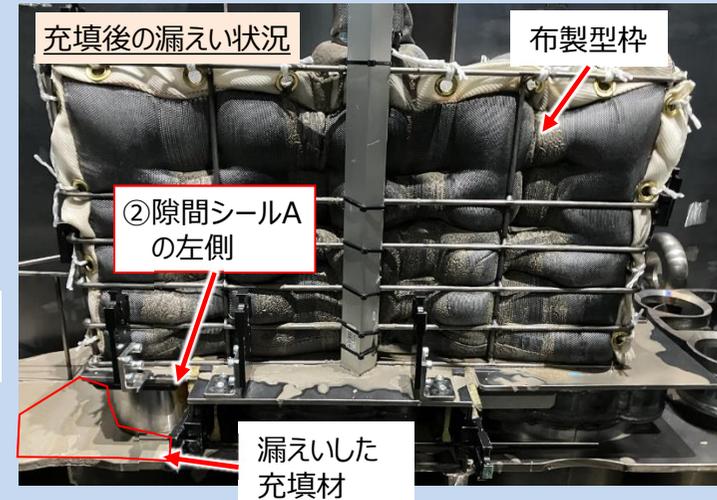


漏えい箇所(下図参照)

- ①溝シールAの上側
- ②隙間シールAの左側



初回試験時に充填材が漏えいした箇所は対策後、漏えいが低減されたと考える。



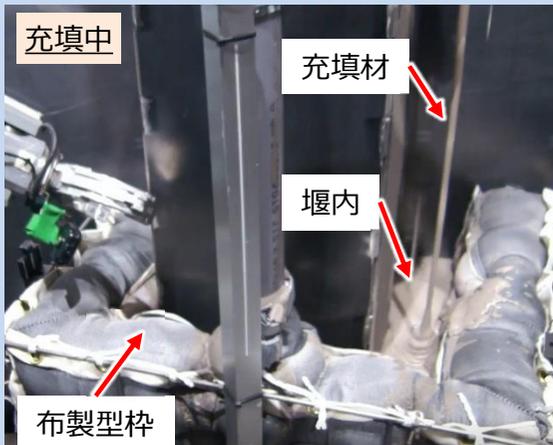
堰内充填高さ約30mm位置で漏えいが止まったため、予定通り2回目の充填を行うこととした。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (20/22)

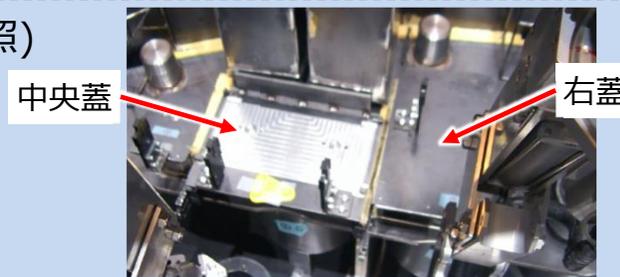
③再試験 (充填施工性確認)

試験結果【2回目充填】



漏えい箇所(下図参照)

- ①中央蓋裏面
- ②右蓋裏面



堰内から充填材が漏えいしたものの、充填材が徐々に固化し最終的に堰内280mm高さまで充填材が残存した。
(目標高さ300mm付近まで充填できたため、再充填は行わないこととした)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (21/22)

④ 試験結果 (充填施工性確認)

- 充填材の固化時間を下表に示す。
- なお、試験スケジュールの都合により充填後に固化状態を確認するタイミングが充填作業を実施した翌朝であったため、固化時間としては全て19時間以内の結果となっている。(実際には19時間よりも早く固化している可能性が高い)

充填対象	初回試験		再試験	
	充填回数	固化時間	充填回数	固化時間
布製型枠	1回	19時間以内	1回	19時間以内
堰内	1回目	— (ほとんどの充填材が 漏えいしたため)	1回目	19時間以内 (堰内充填高さは 約30mm)
	2回目	19時間以内 (堰内充填高さは 230mm)	2回目	19時間以内 (堰内充填高さは 280mm)
	3回目	19時間以内 (堰内充填高さは 300mm)	—	—

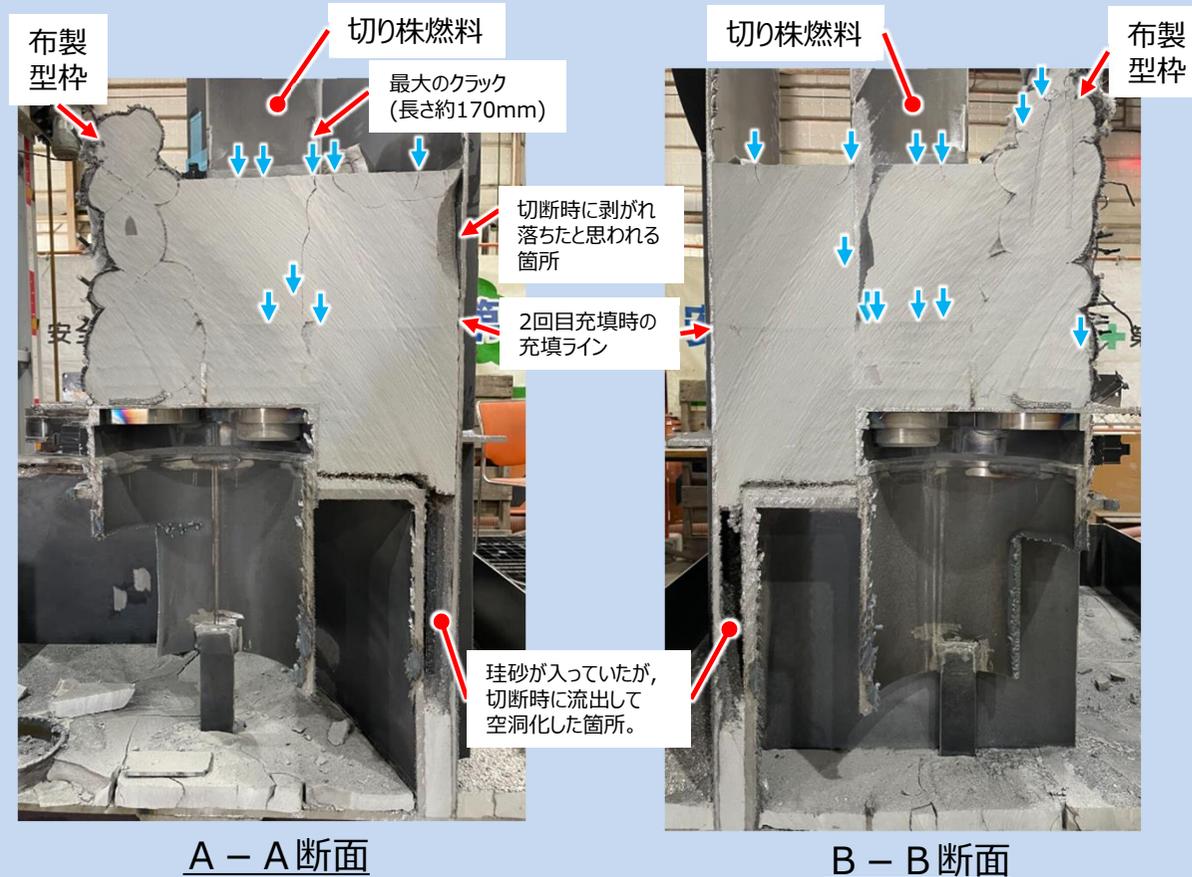
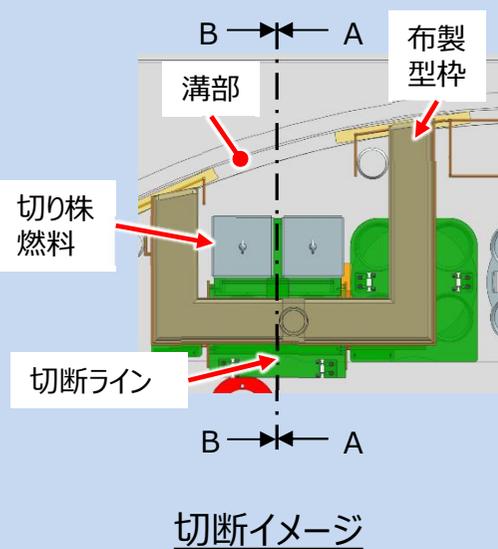
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉心部) (22/22)

④ 試験結果 (充填施工性確認)

[凡例] ・クラック端：↓

断面観察結果

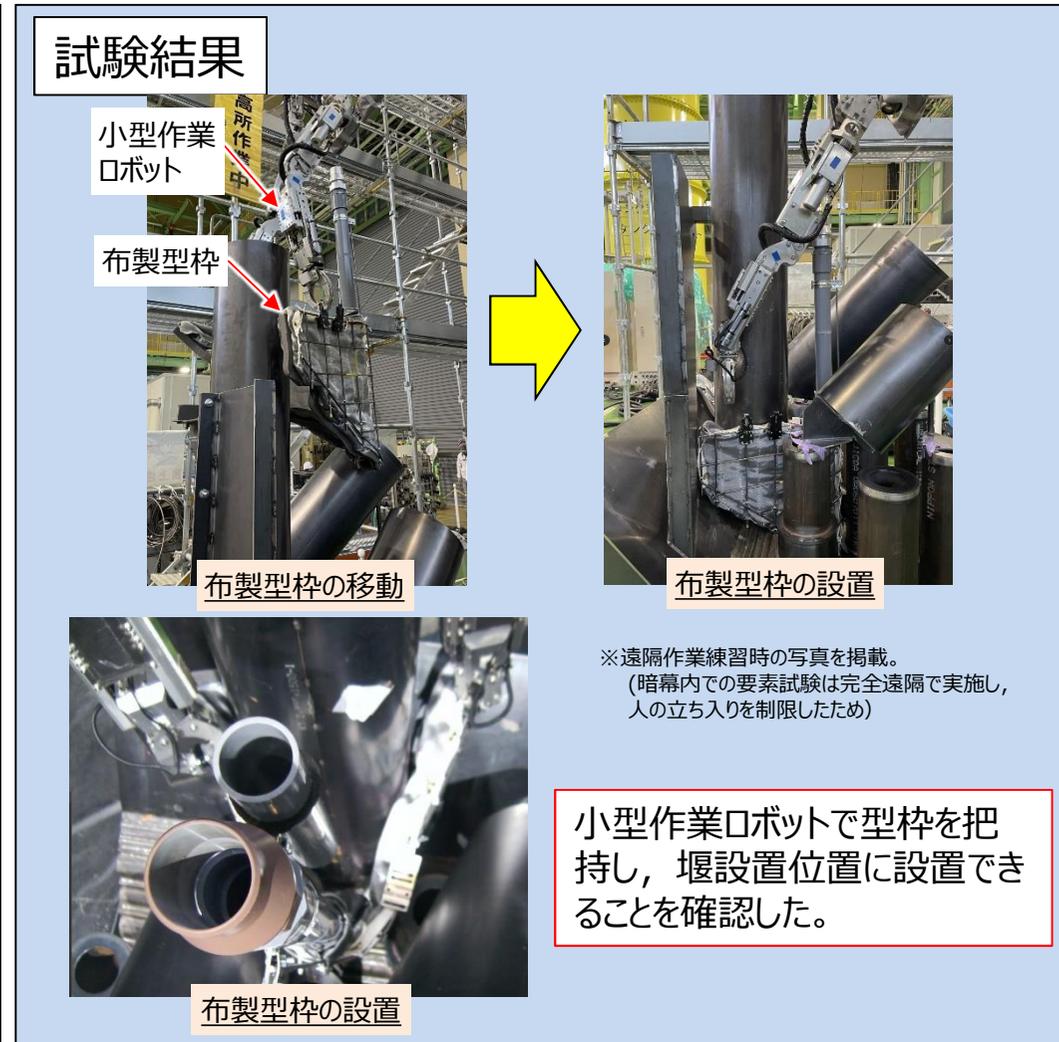
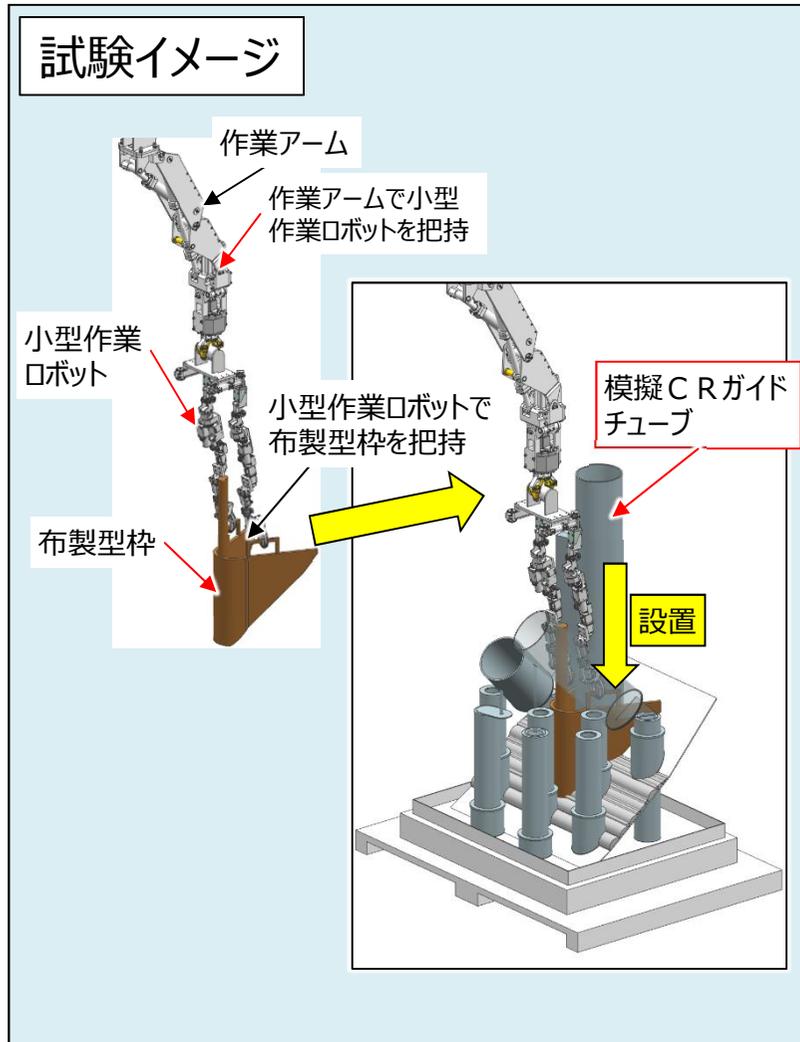


- ・充填材が全体に行き渡っており、空隙なく充填できていることを確認した。
- ・表層に多数のクラック発生を確認したが、切り株燃料の固定に支障がないものと判断した。
- ・クラックについては、特にA-A断面の切り株燃料付近から大きいクラックが発生しており、構造物間隔が近いことで、硬化収縮の影響を受けやすいことが原因と推定する。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (1/9)

① 初回試験 (必要資材の設置性確認)

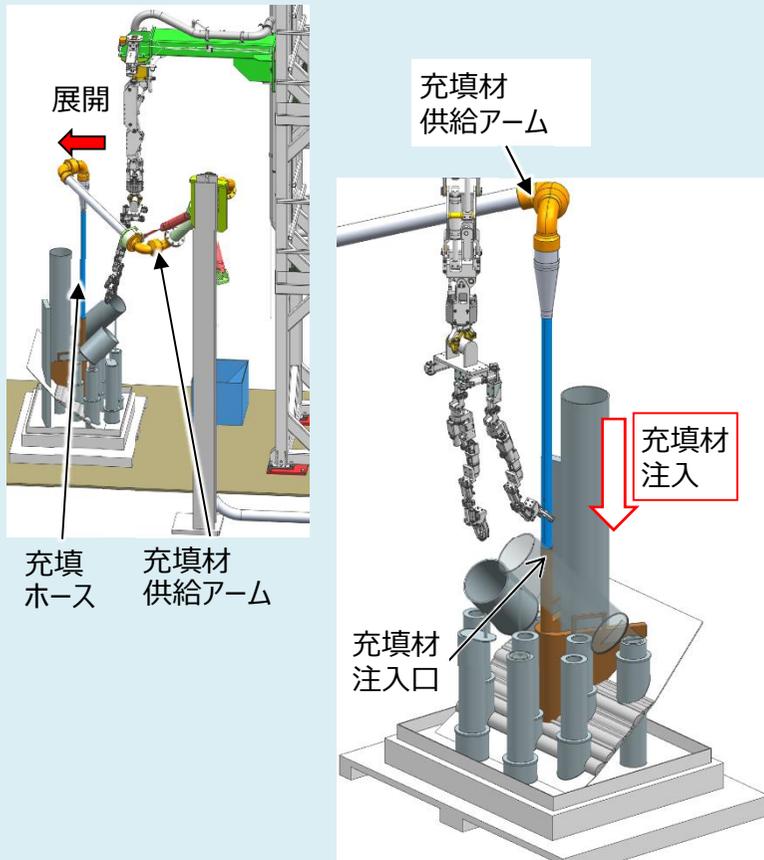


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

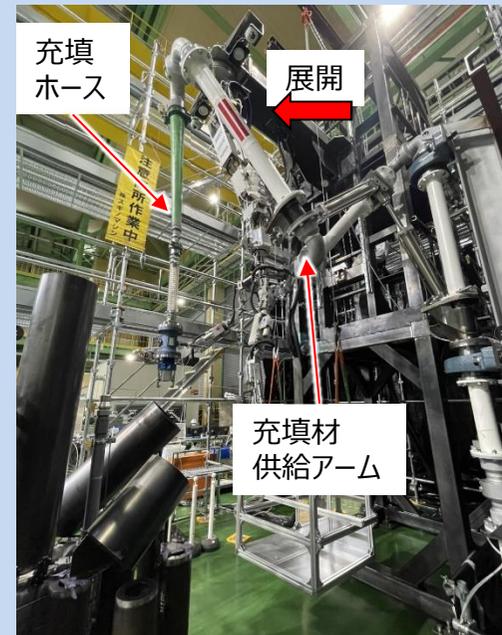
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (2/9)

① 初回試験 (充填用ホースのアクセス性確認)

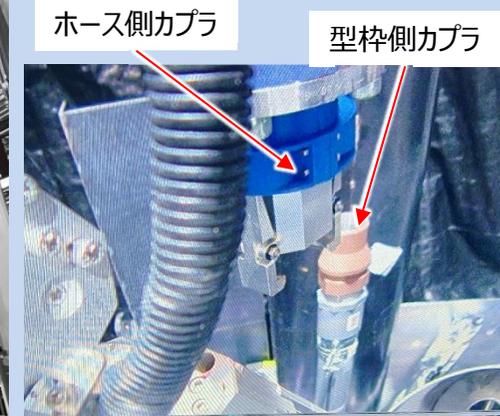
試験イメージ



試験結果



充填材供給アーム展開*



ホース側カプラを型枠側カプラへ接近

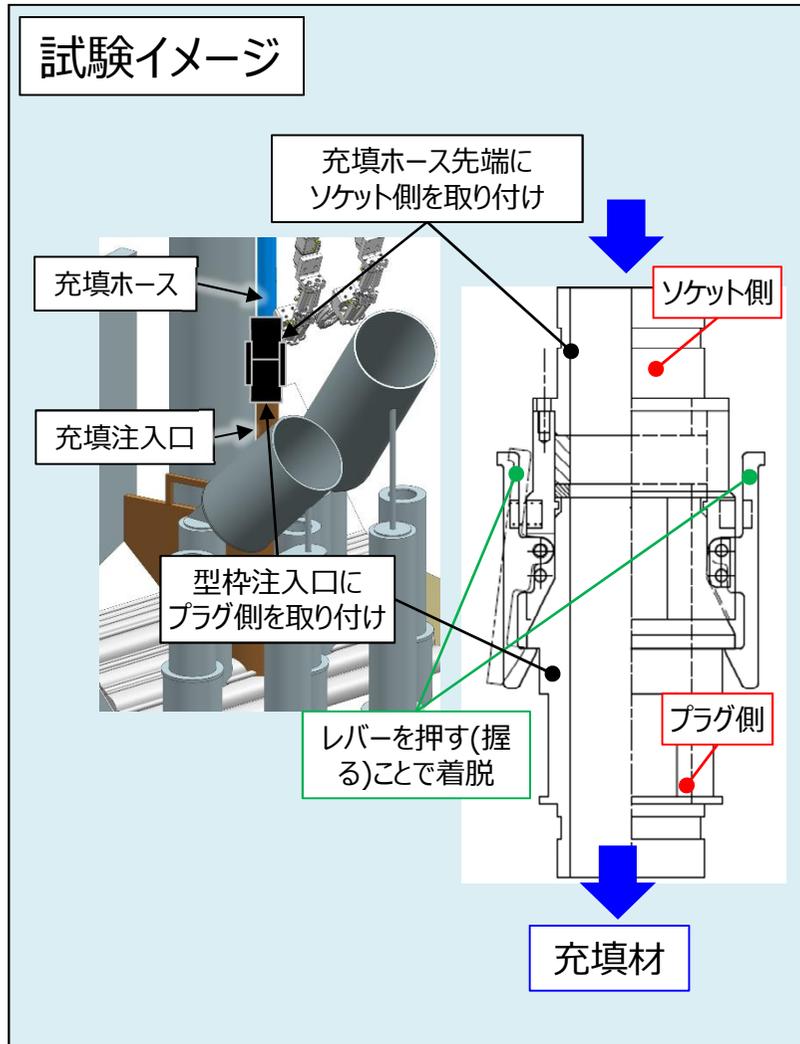
*：遠隔作業練習時の写真を掲載。
(暗幕内での要素試験は完全遠隔で実施し、
人の立ち入りを制限したため)

充填材供給アームにて、充填用ホースを対象付近へ移動できることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (3/9)

① 初回試験 (充填用ホースのアクセス性確認)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (4/9)

① 初回試験 (充填施工性確認)

試験イメージ

型枠内(充填前)

充填ホース

型枠内(充填後)

試験結果

壺内

充填中

充填材

布製型枠

目標高さまで充填可能であった。ただし、充填完了の判断が難しく、壺を乗り越えて漏えいが発生した。

再試験へ向けた改善内容は、次ページに示す。

漏えい確認

充填後

レグ

布製型枠

充填材

レグ裏から漏えい
(壺を乗り越えて溢れた)

充填後

レグ

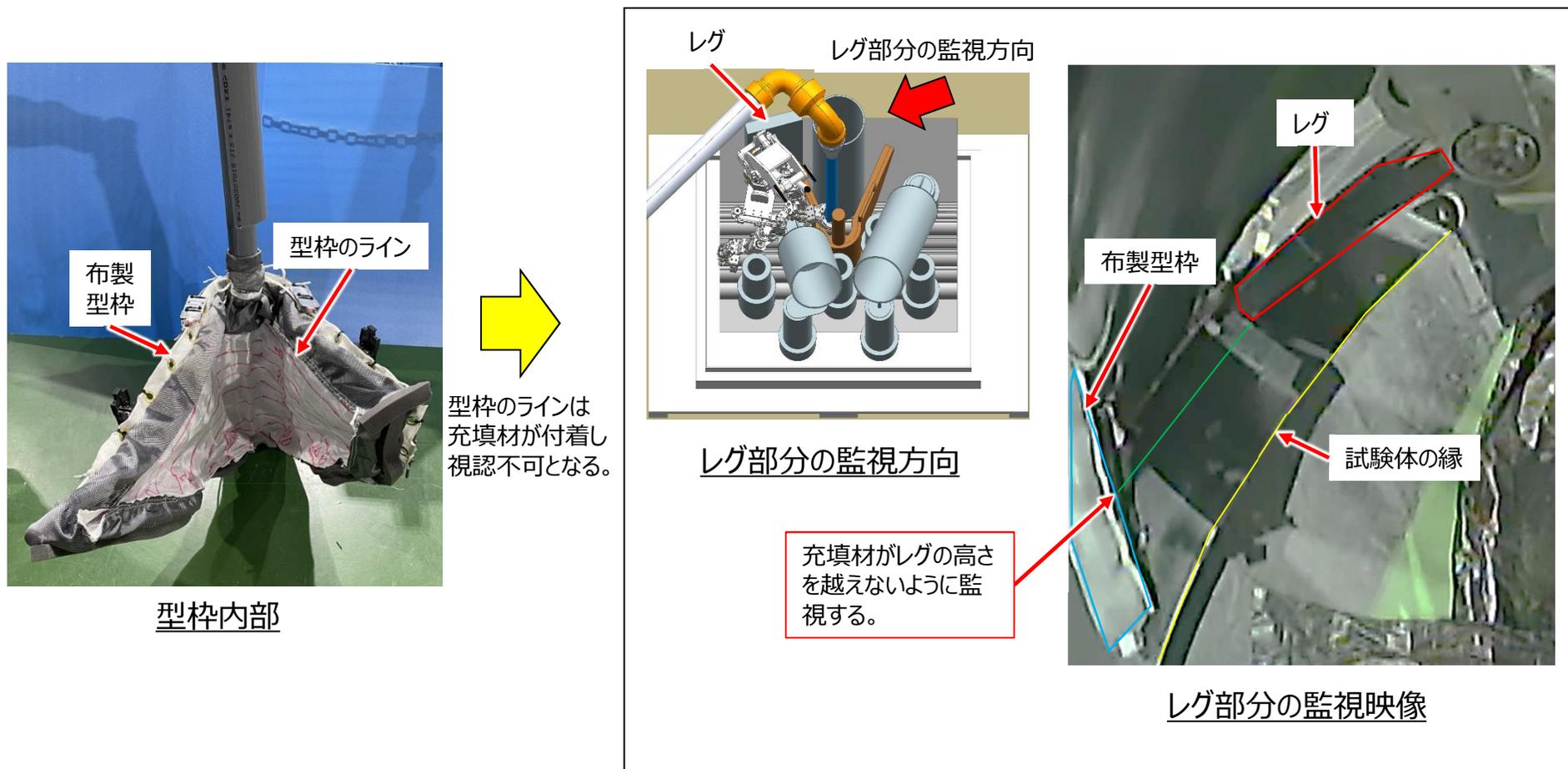
漏えいした
充填材

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (5/9)

②再試験に向けた改善内容 (充填完了判断の見直し)

- 充填完了の基準としていた型枠のラインは充填時に充填材が付着し視認不可となったため、充填完了判断が困難であった。そのため、レグ部分を監視しレグ裏側から充填材が溢れることを防止する。

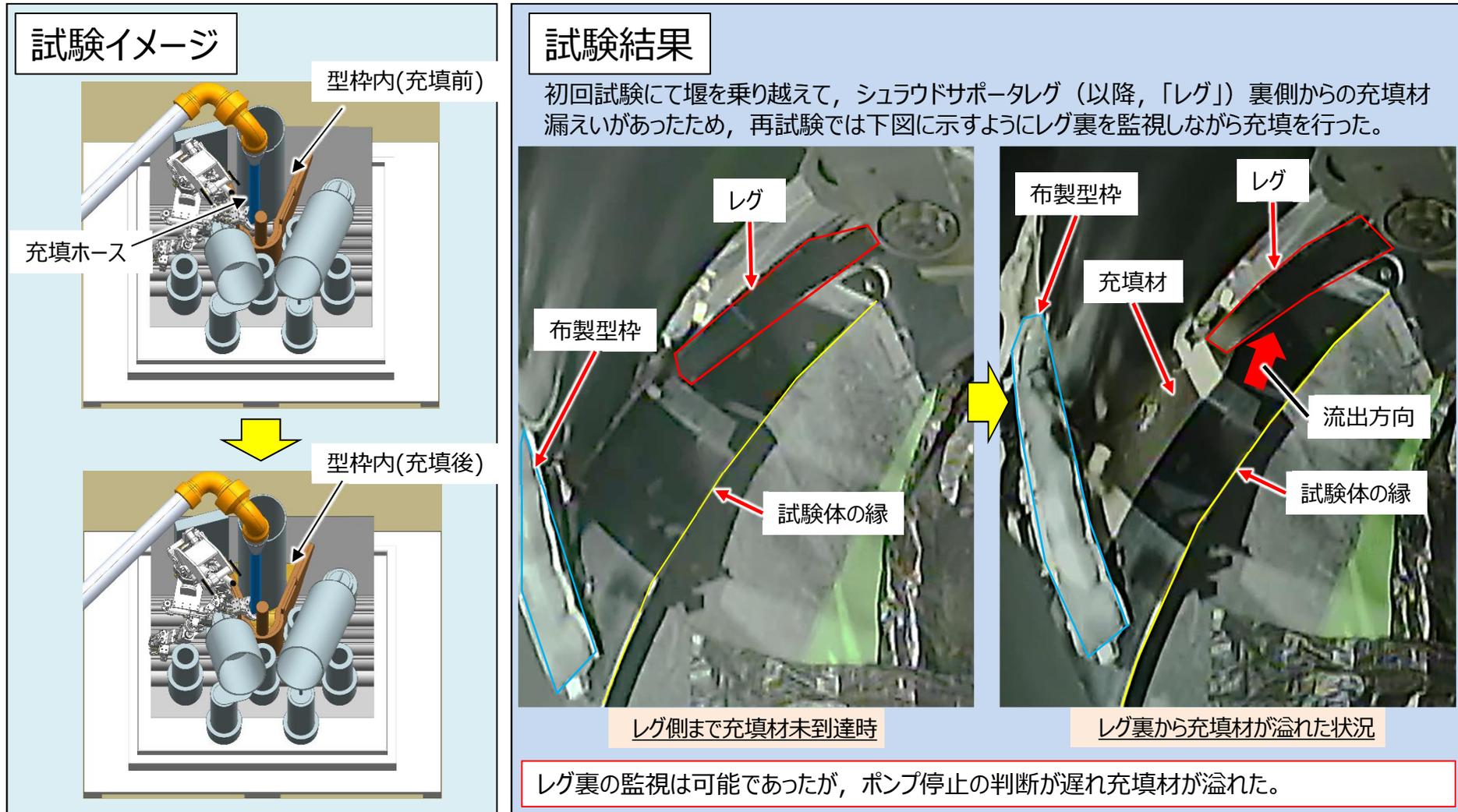


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (6/9)

③再試験 (充填施工性確認)

※必要資材の設置性確認, 充填料ホースの
アクセス性確認は初回試験同様に作業可能であった。

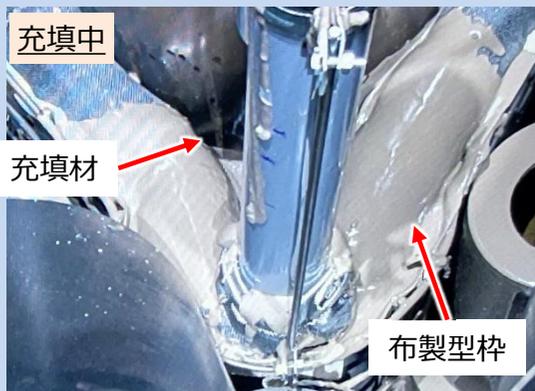


6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (7/9)

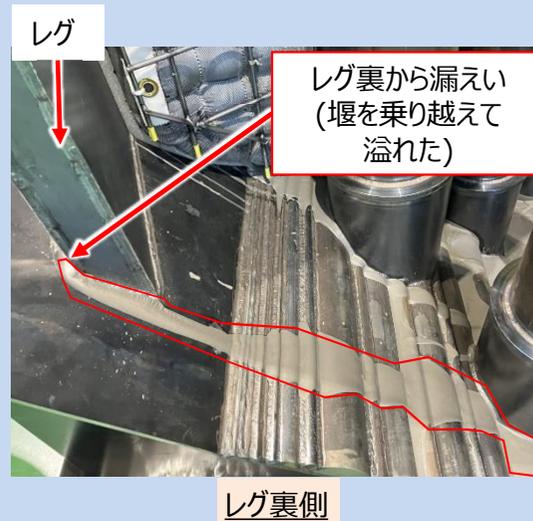
③再試験 (充填施工性確認)

試験結果



漏えい箇所(下図参照)

- ①レグ裏側
- ②型枠左側



堰からの充填材漏えいはあったものの、目標高さまで充填可能であった。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (8/9)

④ 試験結果 (充填施工性確認)

- 充填材の固化時間を下表に示す。
- なお、試験スケジュールの都合により充填後に固化状態を確認するタイミングが充填作業を実施した翌朝であったため、固化時間としては全て19時間以内の結果となっている。(実際には19時間よりも早く固化している可能性が高い)

充填対象	初回試験		再試験	
	充填回数	固化時間	充填回数	固化時間
布製型枠	1回	19時間以内	1回	19時間以内
堰内	1回	19時間以内 (堰内高さ500mm まで充填)	1回	19時間以内 (堰内高さ500mm まで充填)

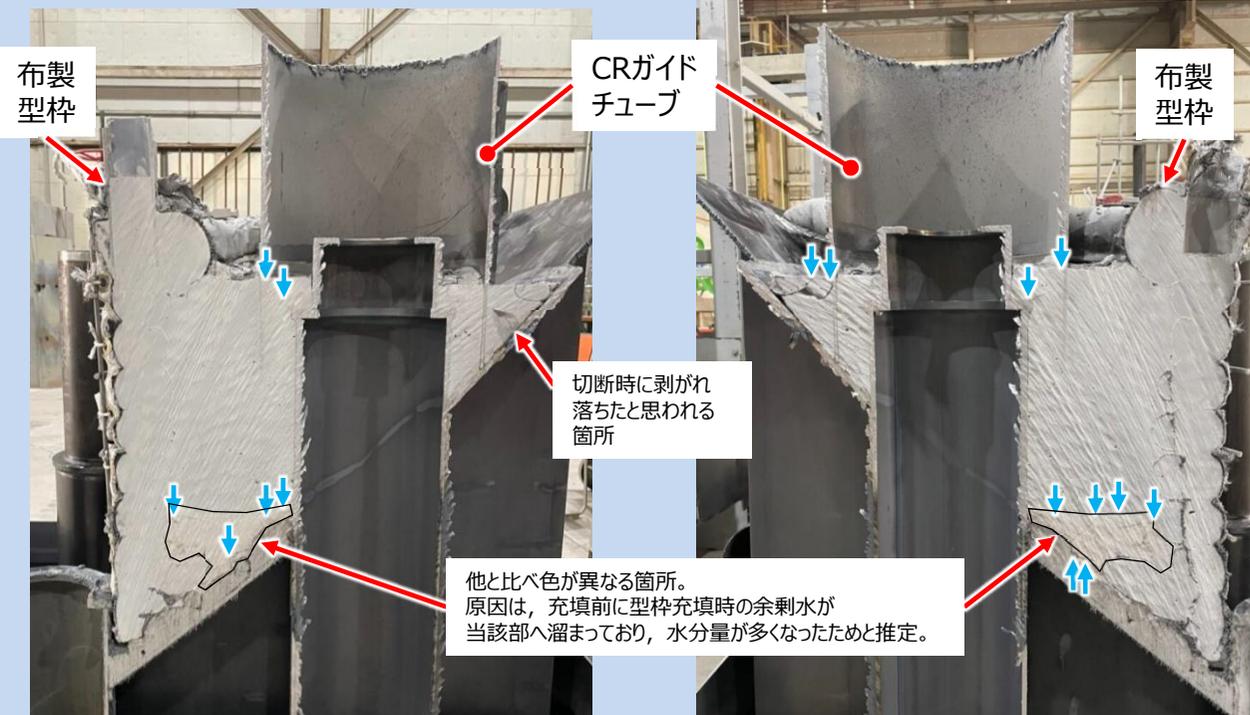
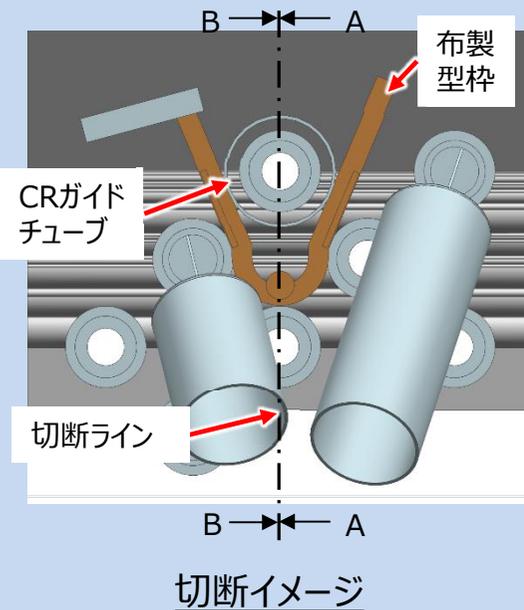
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部) (9/9)

④ 試験結果 (充填施工性確認)

[凡例] ・クラック端 : ↓

断面観察結果



A - A 断面

B - B 断面

- ・充填材が全体に行き渡っており、空隙なく充填できていることを確認した。
- ・表層に多数のクラック発生を確認したが、CRガイドチューブの固定に支障がないものと判断した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部開口部) (1/6)

① 初回試験 (必要資材の設置性確認)

試験イメージ

作業アームで小型作業ロボットを把持

作業アーム

小型作業ロボット

布製型枠

小型作業ロボットで型枠を把持

設置

模擬開口部

試験結果

小型作業ロボット

布製型枠

設置

型枠の移動

型枠の設置

布製型枠

型枠の設置

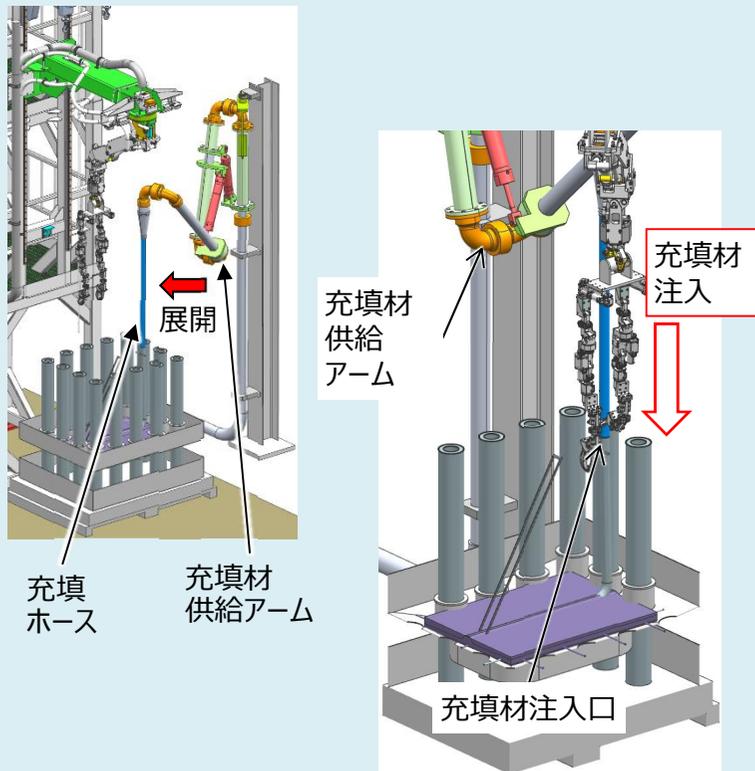
小型作業ロボットで型枠を把持し、開口部付近に設置できることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

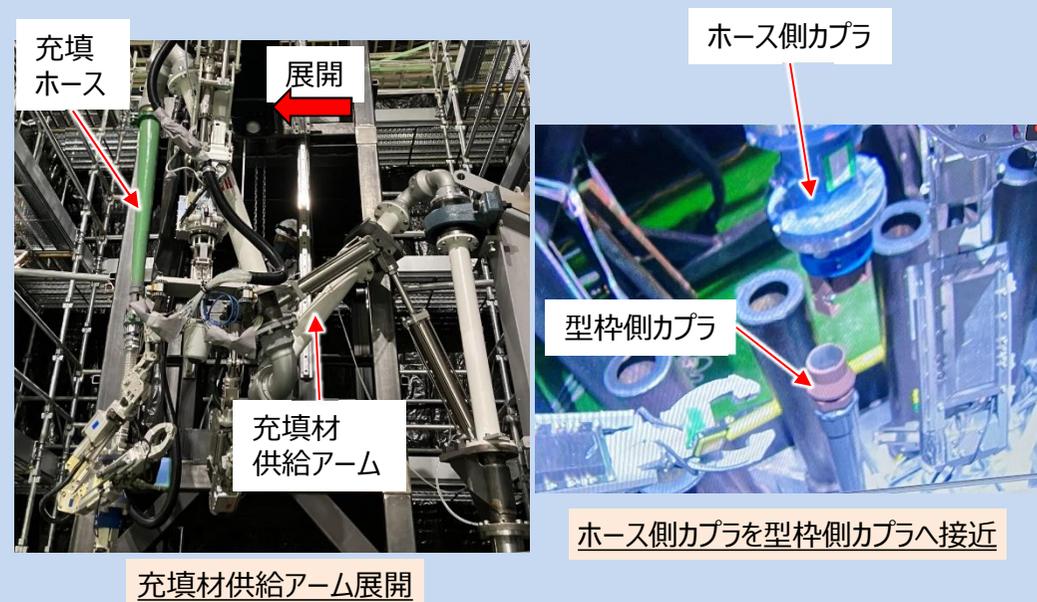
● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部開口部) (2/6)

① 初回試験 (充填用ホースのアクセス性確認)

試験イメージ



試験結果

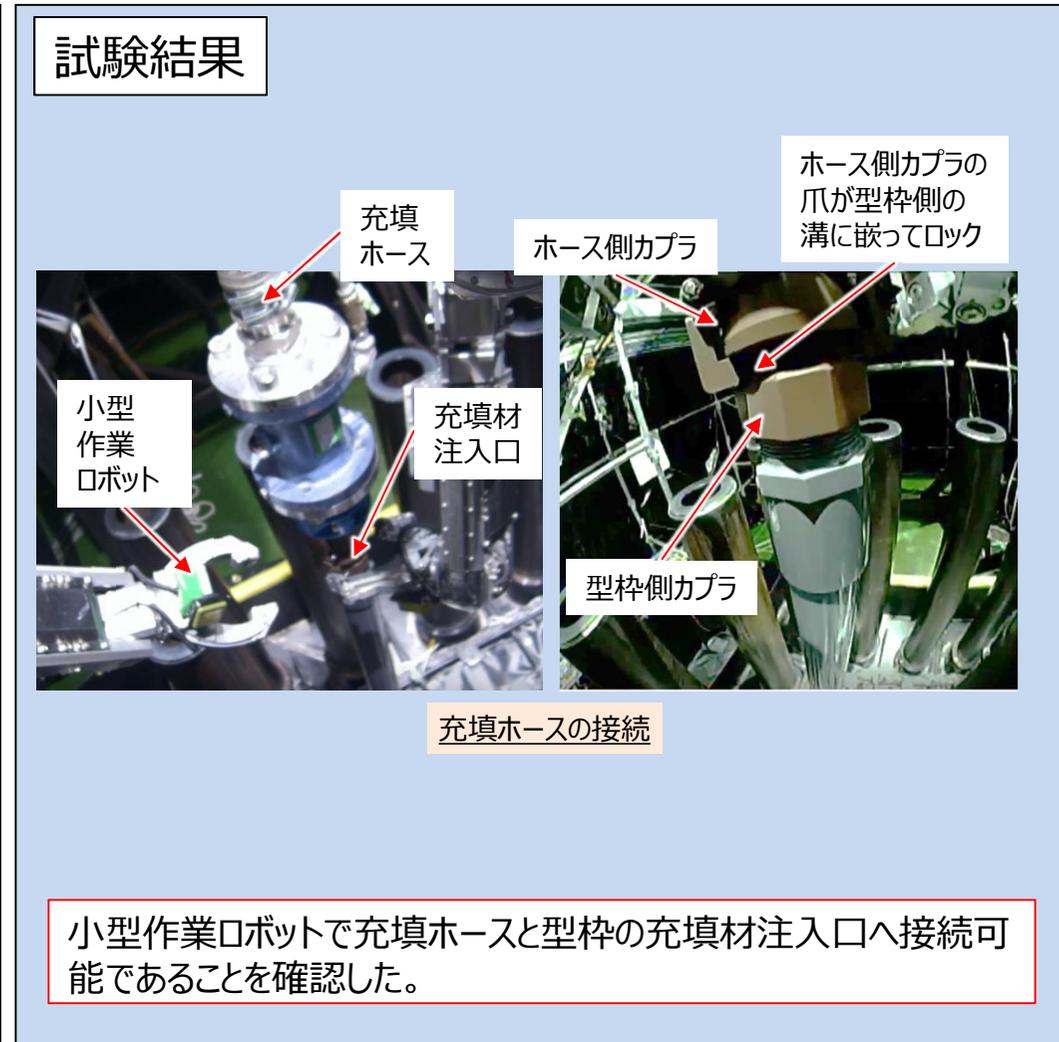
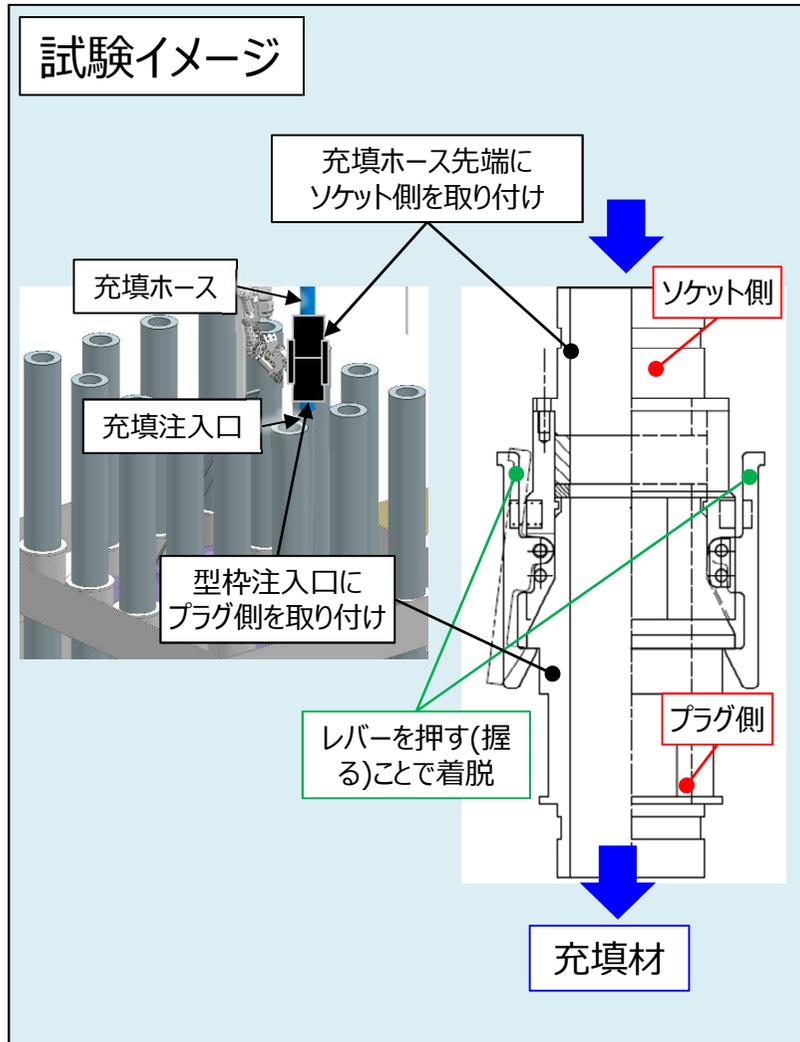


充填材供給アームにて、充填用ホースを対象付近へ移動できることを確認した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部開口部) (3/6)

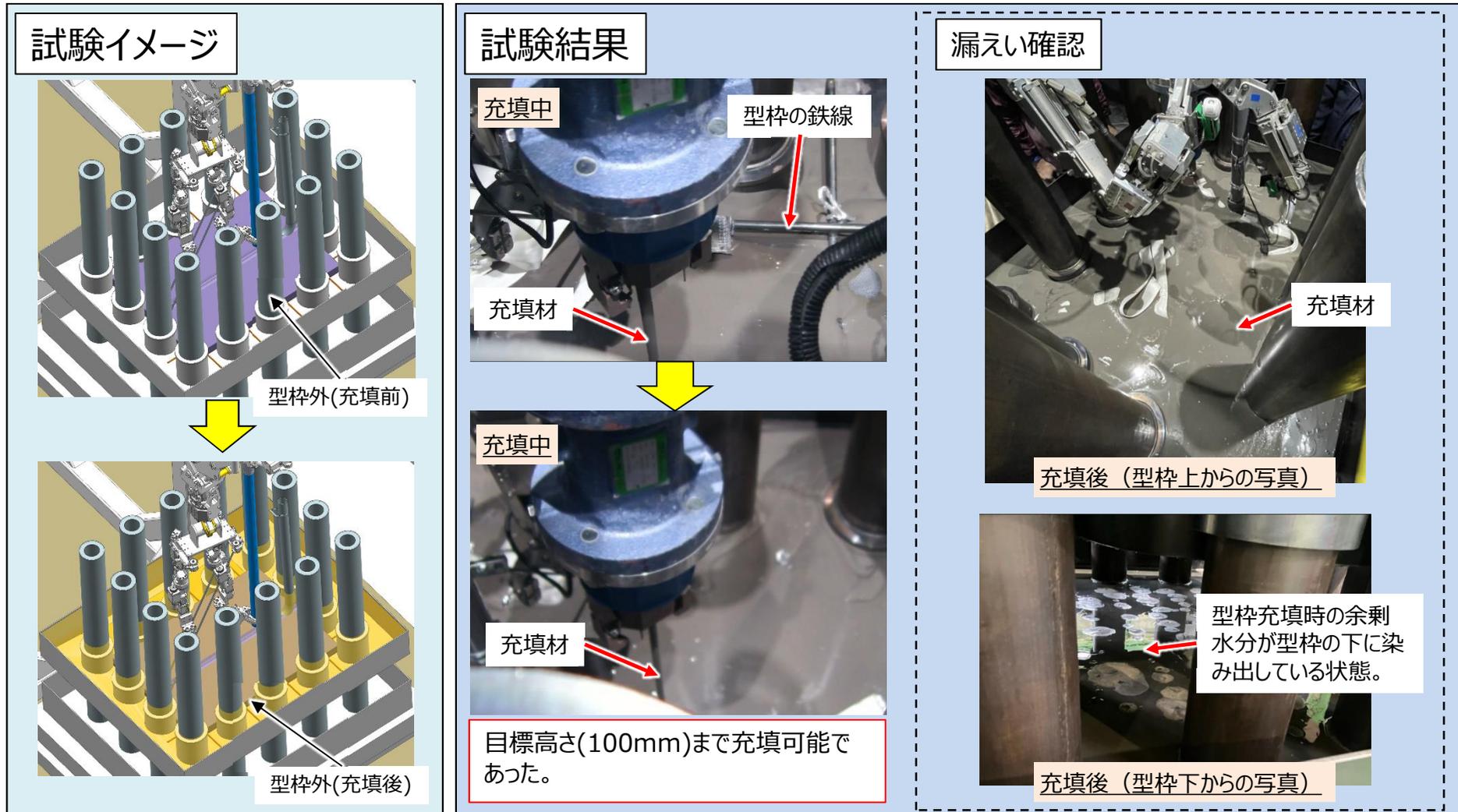
① 初回試験 (充填用ホースのアクセス性確認)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部開口部) (4/6)

① 初回試験 (充填施工性確認)



6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部開口部) (5/6)

② 試験結果 (充填施工性の確認)

- 充填材の固化時間を下表に示す。
- なお、試験スケジュールの都合により充填後に固化状態を確認するタイミングが充填作業を実施した翌朝であったため、固化時間としては全て19時間以内の結果となっている。(実際には19時間よりも早く固化している可能性が高い)

充填対象	初回試験		再試験	
	充填回数	固化時間	充填回数	固化時間
布製型枠	1回	19時間以内	— (初回試験で施工性確認できたため再試験は実施せず)	
型枠外	1回	19時間以内 (型枠上部に高さ 100mmまで充填)		

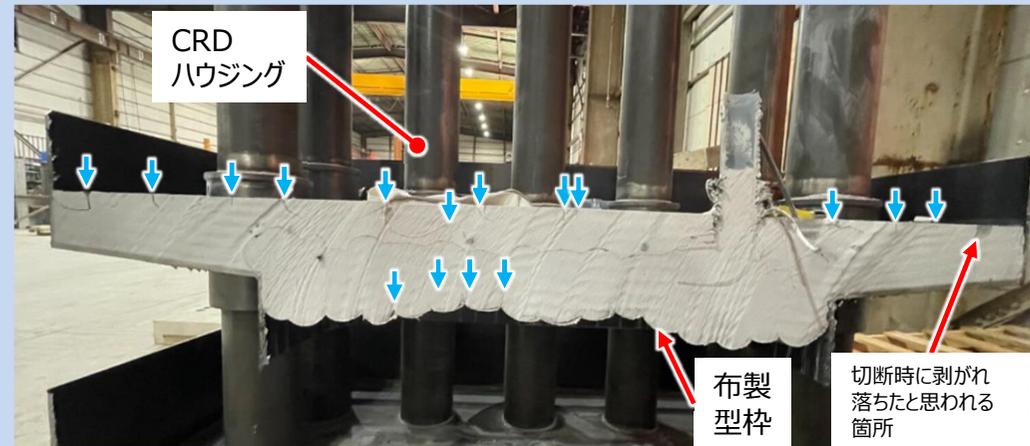
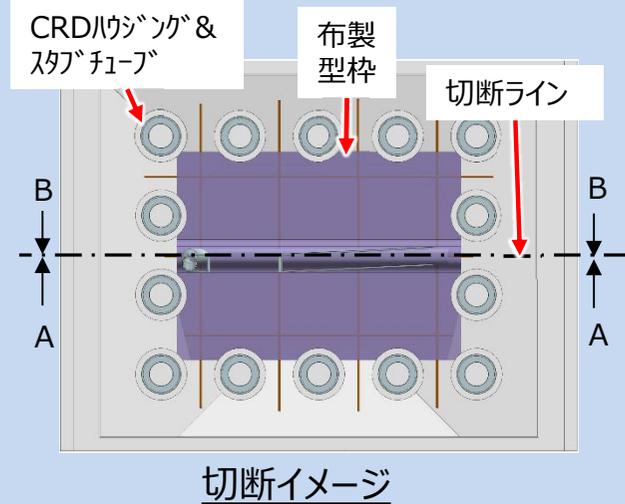
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (試験状況：炉底部開口部) (6/6)

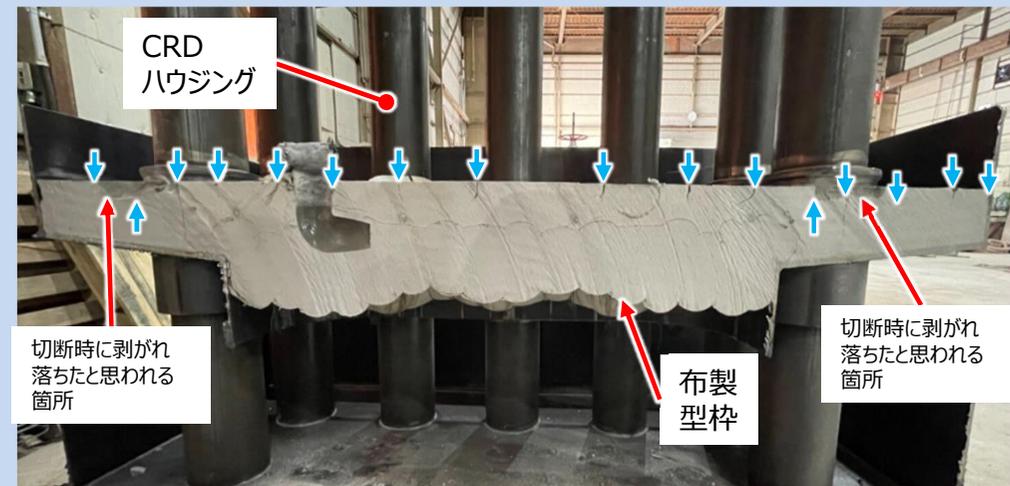
② 試験結果 (充填施工性の確認)

[凡例] ・クラック端：↓

断面観察結果



A - A 断面



B - B 断面

- ・充填材が全体に行き渡っており、空隙なく充填できていることを確認した。
- ・表層に多数のクラック発生を確認したが、開口部の閉じ込めに支障がないものと判断した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.1.4 充填施工要素試験 (結果まとめ) (1/2)

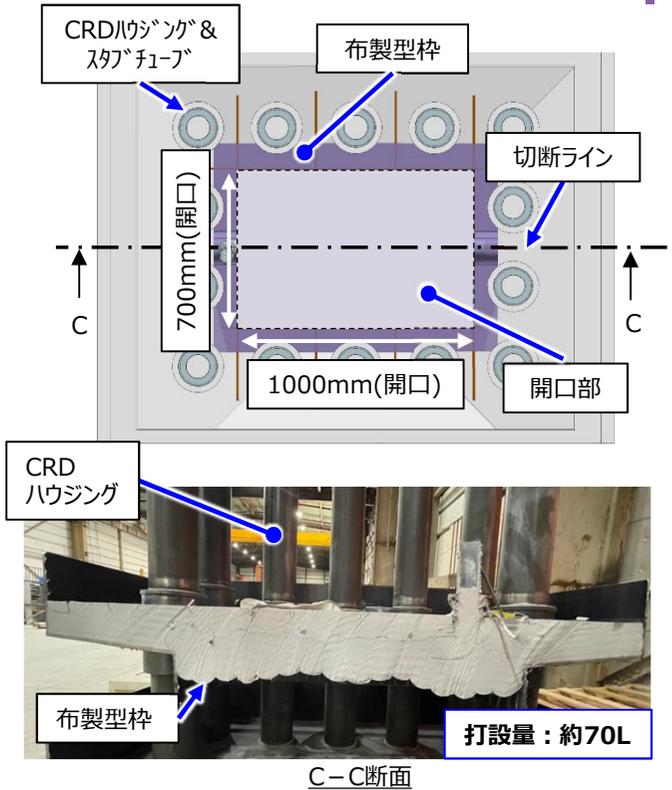
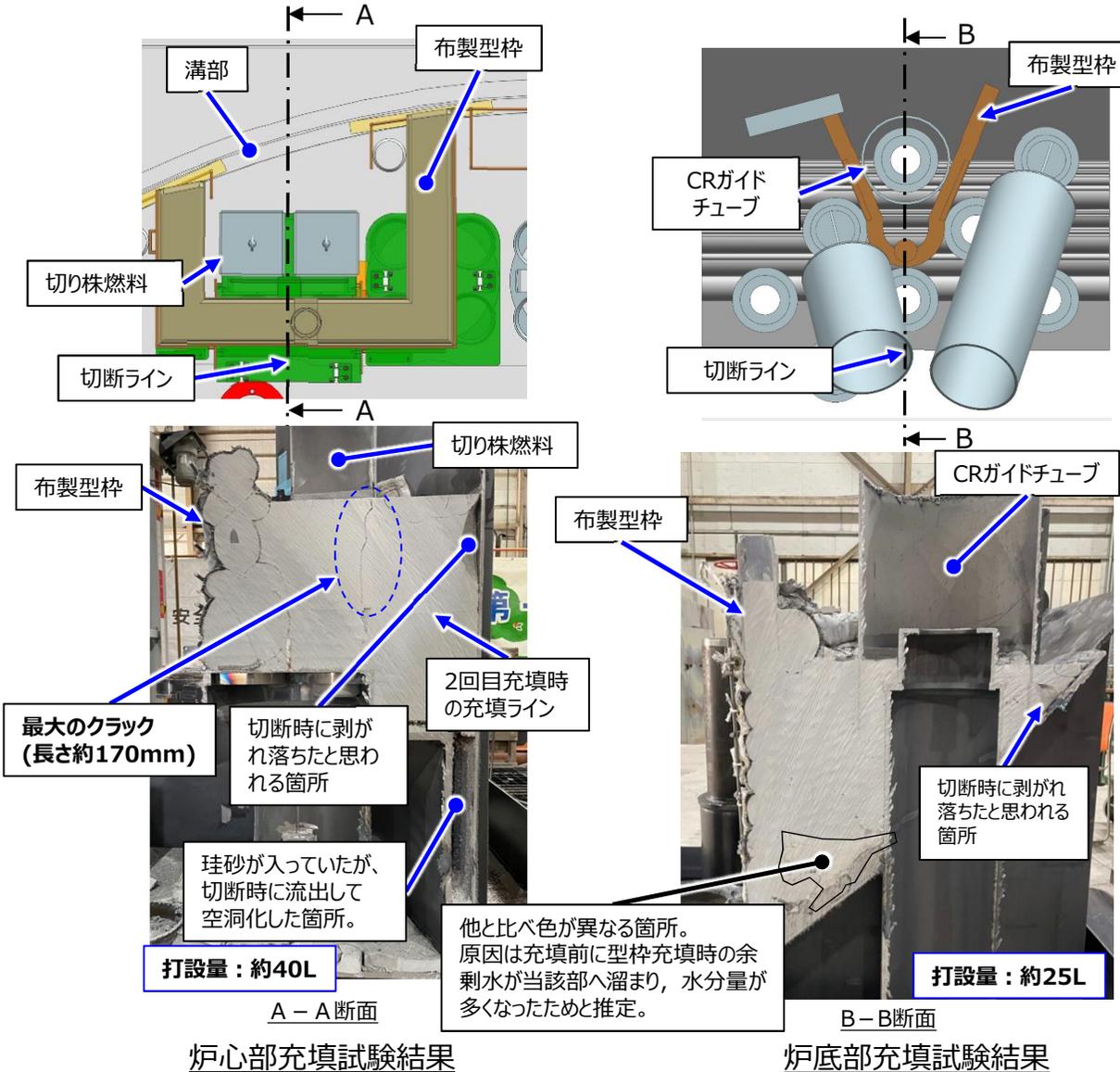
➤ 充填施工要素試験の試験結果を下表に示す。

各充填施工要素試験 結果統括表

No	試験対象	試験項目	結果	
A	炉心部	必要資材の設置性の確認	可	小型作業ロボットで型枠等を把持し、堰設置位置に設置できることを確認した。
		充填用ホース等のアクセス性の確認	可	充填用ホースを型枠の充填材注入口へ接続可能であることを確認した。
		充填施工性の評価	可 (課題あり)	・遠隔にて布製型枠および補助シール材を設置することが可能であることを確認した。 ・布製型枠および補助シール材を使用することにより対象の充填固化が可能であることを確認した。ただし、充填材の漏えいに関する問題や遠隔操作性(動作)および遠隔監視(視認)が困難な状況が確認されたため、当該事象の改善の余地がある。
B	炉底部	必要資材の設置性の確認	可	小型作業ロボットで型枠等を把持し、堰設置位置に設置できることを確認した。
		充填用ホース等のアクセス性の確認	可	充填用ホースを型枠の充填材注入口へ接続可能であることを確認した。
		充填施工性の評価	可	・遠隔にて布製型枠を設置することが可能であることを確認した。 ・布製型枠を使用することにより対象の充填固化が可能であることを確認した。ただし、充填完了の判断(視認)が難しく、堰を乗り越えて充填材が漏えいたため、遠隔監視に関する改善の余地がある。
C	炉底部 開口部	必要資材の設置性の確認	可	小型作業ロボットで型枠を把持し、開口部付近に設置できることを確認した。
		充填用ホース等のアクセス性の確認	可	充填用ホースを型枠の充填材注入口へ接続可能であることを確認した。
		充填施工性の評価	可	目標高さ(100mm)まで充填可能であった。
D	その他 確認	長距離圧送性の課題	可	充填材圧送前後によるフロー値の減少はなく、圧送後最大で10℃程度の温度上昇が見られたが圧送不可となる事象は見られなかった。
		充填時のホース挙動	可	ジオポリマー充填中においてホースが暴れるなどの目立った挙動が無いことを確認した。
		ホースの洗浄方法	可 (課題あり)	スポンジボールを用いたホース内の洗浄試験を行い、繰り返し試験を行うことで洗浄効果があったことを確認した。また、試験後の各ホースの曲げ半径は公称値以下であることから本試験ではホースの再利用に問題ないと判断した。ただし、今後の実機構成での洗浄方法・効果には装置設計や試験によるさらなる検討が必要である。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

6.1.4 充填施工要素試験 (結果まとめ) (2/2)



炉底部開口部充填試験結果

- ・試験全体を通じて充填材が全体に行き渡っており、空隙なく充填できていることを確認した。
- ・試験全体を通じて表層に多数のクラック発生を確認したが、固化対象物の安定化が確認できたため固定に支障がないものと判断した。(特にA-A断面の切り株燃料付近から大きいクラックが発生しており、構造物間隔が近いことで硬化収縮の影響を受けやすいことが原因と推定する。)

目次

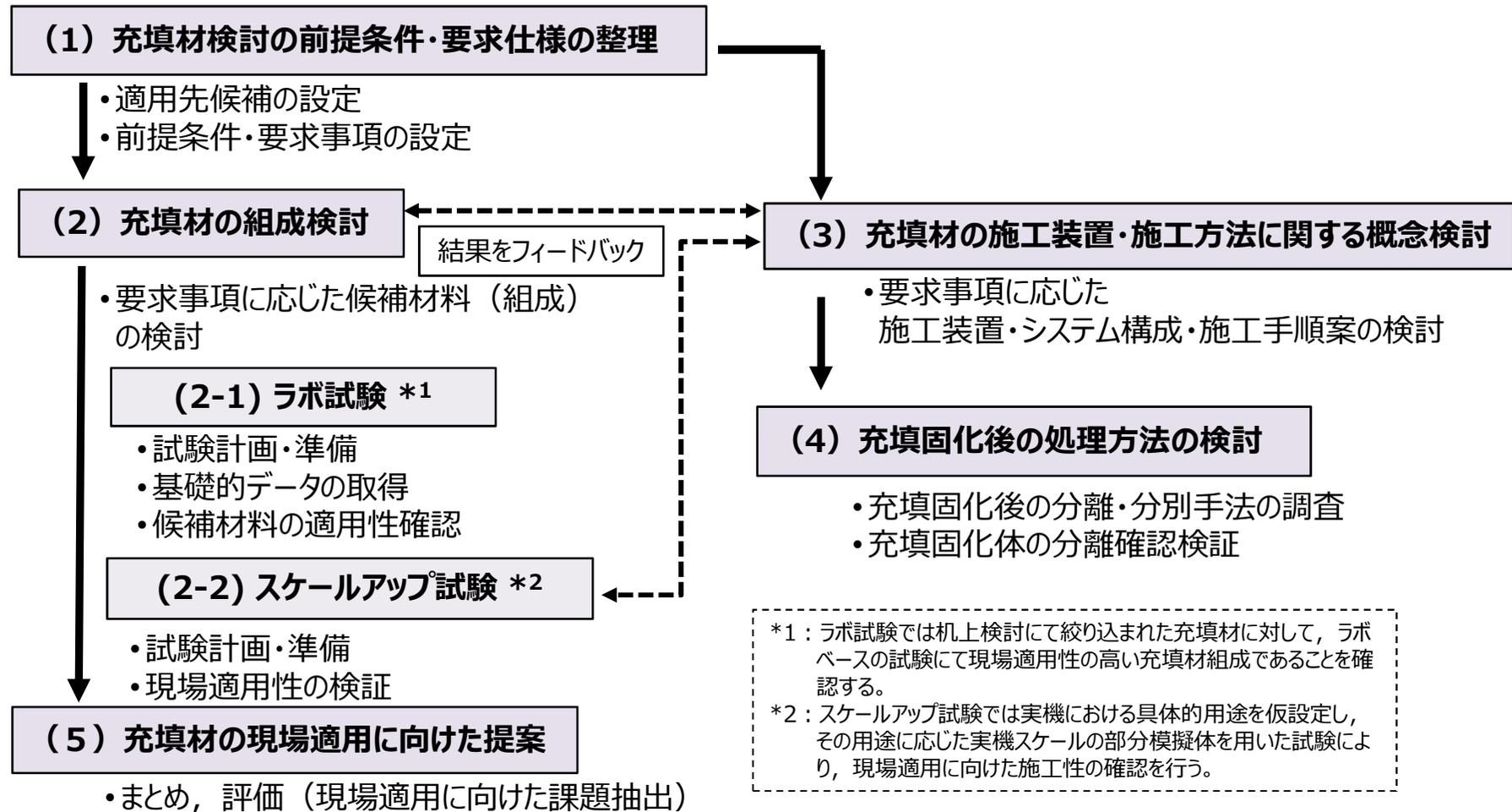
1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
- 6. 充填安定化技術の開発**
 - 6.0 事業背景
 - 6.1 充填施工方法の検討および現場適用性検証（テーマA）
 - 6.2 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証（テーマB）**
 - 6.2.1 開発フロー
 - 6.2.2 概念検討
 - 6.2.3 ラボ試験
 - 6.2.4 スケールアップ試験
 - 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討
 - 6.3 現場適用性に向けた課題抽出および評価
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

◆ 6.2 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証 (テーマB)

● 6.2.1 開発フロー (テーマB)

- 「テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証」に関する開発フローを以下に示す。



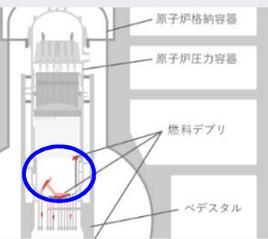
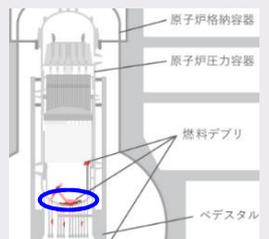
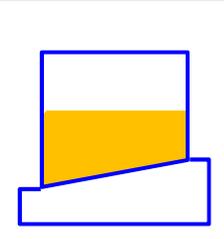
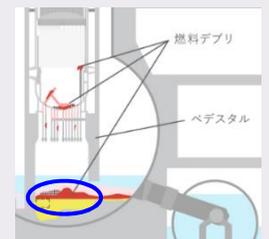
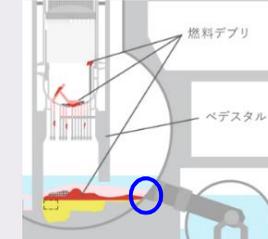
開発フロー (テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (適用対象) (1/3)

- 充填安定化技術の他用途への活用を目的に以下に示す適用先を候補として挙げた。
- 選定した各適用先候補の充填目的および主要な前提条件を以下に示す。

各適用先候補の主要な前提条件

	用途				
	1. 脱落防止	2. 開口部補修	3. 廃棄物安定化	4. 鉄筋剥き出し部補修	5. 燃料デブリ流出防止
適用先 (候補)	炉内構造物	開口部	Rw/B, FSTR (増設廃棄物地下貯蔵設備)	ペDESTAL	開口部 (水あり)
想定 適用先の イメージ					
目的	炉内の不安定な構造物や燃料デブリを固定安定化させ、取り出し装置の衝突・作業時の振動等による転倒・落下の防止を図る。	炉内の開口部を充填材の吹付 (積層) により閉止させ、開口部からの燃料デブリ等の拡散の防止を図る。	廃樹脂を内包したタンク内に充填材原料を投入、固化し、タンク撤去時に廃棄物のタンクからの漏えいを防ぐ。	鉄筋むき出し部等を充填材の吹付により被覆し、剥き出しとなっている鉄筋のさらなる損傷・劣化の進展を防ぐ。	吹付けにより堰を形成し止水することで小片化した燃料デブリ等の拡散を防ぐ。
アクセス 方向	上アクセス	上アクセス	建屋1Fから地下タンク室に穴をあけアクセス	横アクセス	横アクセス
移送距離	100m程度	100m程度	100m程度	100m程度	100m程度
施工対象	不安定な構造物	開口部	廃樹脂	鉄筋	水のある開口部等
温度/湿度	10~55℃, 100%RH	10~55℃, 100%RH	10~55℃, 100%RH	10~55℃, 100%RH	10~55℃, 100%RH
水分環境	湿潤	湿潤	水中	湿潤	水位300mm程度 流れなし

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (適用対象) (2/3)

- 前頁で示した各適用先における充填材の要求仕様として、「a. 施工性」「b. 基本特性」「c. 解体・加工性」「d. 処分適合性（分離性）」の4項目を設定した。
- 充填材の適用先および各適用先に対する要求仕様の詳細（特性）を以下表にまとめる。
- なお、施工方法は充填材料を空圧で圧送し、先端のノズル位置で水と混合し吹付ける工法である乾式吹付工法を前提とする。

各適用先における充填材の要求仕様 (1/2)

要求仕様			目的 (用途)				
大項目	小項目	詳細	1. 脱落防止	2. 開口部補修	3. 廃棄物安定化	4. 鉄筋剥き出し部補修	5. 燃料デブリ流出防止
a. 施工性	長距離移送性 (圧送性)	現場まで充填材材料を移送できること	●	●	●	●	●
	吹付施工性	部分的な施工ができること	●	●	—	●	●
	充填性	対象に隙間なく充填されること	—	—	●	—	—
	付着性	対象に付着し垂れずに留まること	●	●	—	●	●
	積層性	積層が可能であること	●	●	—	●	●
	閉止施工性	対象開口部を閉止できること	—	●	—	—	—
	堰形成性	必要な高さの堰を形成できること	—	—	—	—	●
	止水性	水の流出を抑制できること	—	—	—	—	●
	廃棄物安定化	対象廃棄物を含有し安定化できること	—	—	●	—	—
	大容量施工性	大容量の施工ができること	—	—	●	—	—
	加熱処理の有無	施工前後に加熱処理等を不要とすること	●	●	●	●	●

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (適用対象) (3/3)

各適用先における充填材の要求仕様 (2/2)

要求仕様			目的 (用途)				
大項目	小項目	詳細	1. 脱落防止	2. 開口部補修	3. 廃棄物安定化	4. 鉄筋剥き出し部補修	5. 燃料デブリ流出防止
b. 基本特性	硬化性	湿潤環境 (100 %Rh) 下で適切な時間で硬化すること	●	●	●	●	●
		水中環境下で適切な時間で硬化すること	—	—	●	—	●
		高温環境 (55 °C) で適切な時間で硬化すること	●	●	—	●	●
		低温環境 (10 °C) で適切な時間で硬化すること	●	●	●	●	●
	物理的強度	硬化後に必要な強度を有すること	●	●	●	●	●
		硬化後に必要な付着強度を有すること	●	●	—	●	●
	耐熱性	燃料デブリの崩壊熱に耐えること	●	●	—	—	—
	材料特性	放射線による劣化, 有害ガスの発生がない, もしくは少ない材料であること (無機物質材料が望ましい)	●	●	●	●	●
c. 解体・加工性	加工性	取り出し時・取り出し後の加工が可能なこと	●	●	●	●	●
	物理的強度	取り出し時・取り出し後の把持ができる程度の強度があること	●	●	—	●	●
d. 処分適合性 (分離性)	対象物分離性	取り出し後に燃料デブリ等と分離できること	●	●	—	●	●

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (工法選定) (1/2)

- 一般に普及しているセメントを用いた施工方法として、左官工法、充填工法、湿式吹付工法、乾式吹付工法の4工法が確立している。
- 下記に建設業界で実用化されているコンクリート構造物の補修・補強工法の例をまとめ、充填の工法の特徴を抽出した。

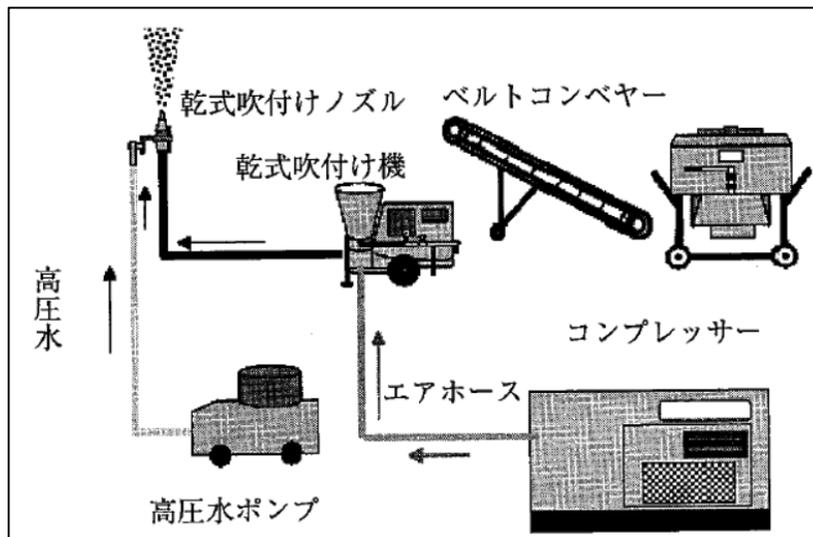
補修・補強工法のまとめ

工法	特長
①左官工法	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>従来から最も一般的に使われてきた工法。</u> ➤ 断面修復箇所が小規模や点在している場合に、主に経済的理由で適用される。 ➤ 施工方向は、下向き、横向き、上向きのすべてにおいてバランスよく適用が可能。
②充填工法 (型枠あり)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>型枠を設置し、流動性の高いモルタルやコンクリートを型枠の中に流し込む工法。</u> ➤ 断面修復箇所が中～大規模の補修に適す。 ➤ 断面厚さが10cm以上の場合は、コンクリート打継ぎ工法、プレバック工法、5cm程度の場合はモルタル充填工法が用いられる。
③-1 湿式吹付工法	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>セメント、水、砂、添加剤を、ミキサーで練り混ぜ、モルタルポンプにて圧送し、先端ノズル位置で空気の圧力により吹付ける工法。</u> ➤ 断面修復箇所が中～大規模の補修に適す。 ➤ 施工規模に応じ、設備をコンパクトにできる。 ➤ 吹付け時の粉塵発生量が少ない等。
③-2 乾式吹付工法	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>セメント、砂、補強材等をミキサーで練り混ぜ、空気圧力で圧送し、先端ノズル位置で水と混練し、吹付ける工法。</u> ➤ 断面修復箇所が中～大規模の補修に適す。 ➤ 施工能力が高く、1回の吹付けで10cm以上の厚さも吹付け可能。鉄筋裏への充填も比較的容易など。 ➤ <u>湿式吹付工法に比べ、圧送距離、吹付け能力に優れる。</u>

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (工法選定) (2/2)

- 前頁の内, 充填工法は「テーマA: 充填施工方法の検討および現場適用性検証」での施工方法であり, 型枠等を使用し充填材を固化安定化する方法である。
- 他の左官工法, 湿式吹付工法, 乾式吹付工法は型枠等を使用しない施工であり, その内, **乾式吹付工法**は吹付ノズル部にて材料と水を混合する構成で施工直前まで硬化反応が進まないことから, 他工法と比べ材料の長距離移送 (圧送) が優れる。
- また, 適用対象として挙げた各適用先候補においても汎用的に使用できることが見込めるため, **乾式吹付工法**を採用した。



乾式吹付けシステムの例



吹付ノズル

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (材料選定) (1/4)

➤ 机上検討にて幅広く抽出した充填材の候補となる材料を以下の表に示す。

充填材の候補材料

No.	充填材の候補材料	
1	ジオポリマー	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 常温から数十℃という低温域で硬化する固化材料であり、セメント固化体と同程度の強度である ✓ 高い耐熱性、耐薬品性を有する
2	セメント	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 低レベル廃棄物の処分時の固化材として適用例あり ✓ 土木建設分野で施工ノウハウが豊富、局所的な施工への適用性ある
3	アスファルト	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 低レベル廃棄物の処分時の固化材として適用例あり ✓ 可燃性有機物であり潜在的な危険性がある (火災爆発事例あり)
4	プラスチック	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 低レベル廃棄物の処分時に固化材として適用例あり (セメント固化に比べ減容化できる) ✓ 可燃性有機物であり火災の危険性がある
5	グラウト	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 地盤の補強改良材、止水材として、また建築物のひび割れ補修材として活用される ✓ 亀裂・割れ目に浸透し急結硬化することで地盤を強化・止水する
6	ゴム系止水材	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 豪州企業により開発されたラテックス (ゴム) 系ポリマーを含有するグラウト材の1種 ✓ 固化後はゴム状となり亀裂を閉止する
7	ゲル状充填材	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 粘土鉱物や樹脂を含有するゲル状の物質 ✓ 硬化しないため、固化による対象物の安定化は不可
8	超重泥水	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 放射性廃棄物の遮水材・飛散防止材、炉内作業での建屋汚染水漏えい防止・止水材として活用される ✓ 硬化しないため、固化による対象物の安定化は不可
9	キャストブル (不定形耐火物)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 製鉄の高炉、プロセス機器、化学工業炉など耐熱物で不定形な施工用として実績が多数ある ✓ セメントと同様、局所的な施工への適用性がある

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (材料選定) (2/4)

- 抽出した充填材候補に対して絞り込みを行うべく、「使用想定環境」と「アクセス性」の観点より以下の評価基準を設けた。

充填材候補の絞り込みにおける評価基準

No.	評価基準	各評価基準の説明
A	材料特性	✓ 基本特性として放射線環境下への施工となることから、放射線による劣化、有害ガスの発生がない、もしくは少ない材料であること（無機物質材料が望ましい）
B	物理的強度	✓ 解体・燃料デブリ取り出し作業に適用するため、施工後（固化後）に必要な強度を有すること
C	長距離移送（圧送性）	✓ 現場へのアクセス経路が制限されることから、長距離移送（圧送）が可能であること
D	施工時の加熱処理等の有無	✓ 作業環境を考慮した場合、施工前後に加熱処理を要さない材料であることが望ましい
E	水中施工性および止水性	✓ 作業環境・目的を考慮した場合、水中環境での施工が可能であり、止水性を有すること
F	充填性および付着性	✓ 様々な形態、場所に存在する充填対象物への局所的な施工が可能となる材料であること

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (材料選定) (3/4)

- 前頁の評価基準を基に絞り込みを実施した。

6つの評価指標それぞれに対し、下記の通り評価した。
 ○ (良好)
 △ (一部課題あり)
 × (劣る)

充填材候補比較評価表

No.	充填材	A. 材料特性	B. 物理的強度	C. 長距離移送 (圧送性)	D. 施工時の加熱 処理等の有無	E. 水中施工性 および止水性	F. 充填性 および付着性
1	ジオポリマー	○	○	○	○	△	○
2	セメント	○	○	○	○	△	○
3	アスファルト	× 可燃性有機物であり、他より劣る	△	× 高粘性により長距離移送が困難	× 施工時に加熱が必要	× 固化対象が乾燥していることが前提	× 主に容器内への充填が前提となる
4	プラスチック	× 可燃性有機物であり、他より劣る	△	× 高粘性により長距離移送が困難	× 施工時に加熱が必要	× 固化対象が乾燥していることが前提	× 容器内への充填を前提とする
5	グラウト	△	○	△ 移送時の凝集固化対策が必要	○	△	× 主に亀裂や割れ目が前提となる
6	ゴム系止水材	× ラテックスポリマーを含有する	× 亀裂等の隙間に浸潤しない	△ 移送時の凝集固化対策が必要	○	△	× 主に亀裂や割れ目が前提となる
7	ゲル状充填材	○	× 固化しない材料	△	○	△	× 流体のため局所施工が困難である
8	超重泥水	○	× 固化しない材料	△	○	△	× 流体のため局所施工が困難である
9	キャストブル (不定形耐火物)	○	○	○	△	△	○

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (材料選定) (4/4)

- 下表に各適用先 (P115) の1～5における充填材候補の比較評価結果を示す。

充填材候補比較評価表 (点数表)

前頁の6つの評価指標それぞれに対し、下記の通り配点しポイントを積算
 ○ (良好) : 2ポイント
 △ (一部課題あり) : 1ポイント
 × (劣る) : 0ポイント

適用先「1,2,4」に関する結果

候補材料	ポイント
ジオポリマー	10
セメント	10
キャストブル	9
超重泥水	5
ゲル状充填材	5
グラウト	6
ゴム系充填材	3
アスファルト	1
プラスチック	1

適用先「3」に関する結果

候補材料	ポイント
ジオポリマー	8
セメント	8
キャストブル	7
超重泥水	5
ゲル状充填材	5
グラウト	6
ゴム系充填材	3
アスファルト	1
プラスチック	1

適用先「5」に関する結果

候補材料	ポイント
ジオポリマー	11
セメント	11
キャストブル	10
超重泥水	6
ゲル状充填材	6
グラウト	7
ゴム系充填材	4
アスファルト	1
プラスチック	1

- 各適用先に対し、いずれに対してもポイントが高かった**ジオポリマー**、**セメント**の2つを充填安定化材料の検討対象として選定する。
- なお、キャストブルは適用先3を想定した固化試験で固化しなかったことおよび固化後の目安として設定した強度 (12N/mm²) に未達であったことから除外とした。

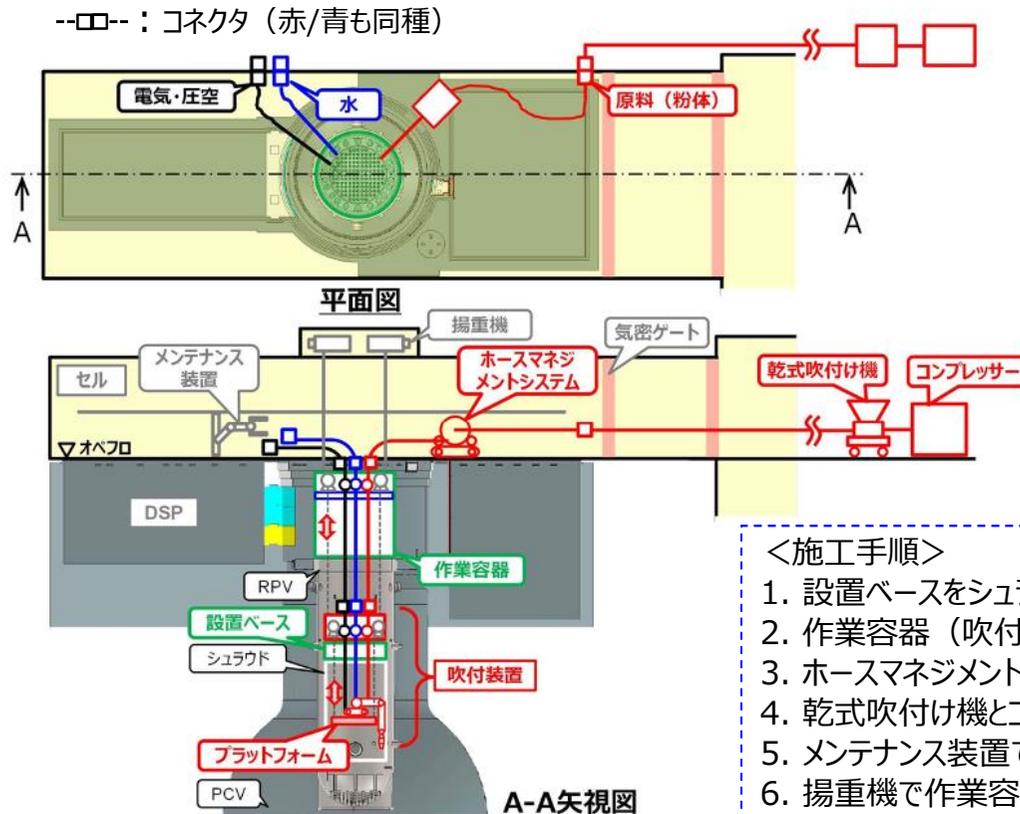
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (施工装置・施工方法案) (1/3)

RPV内部 (炉心部・炉底部) への充填の場合

- 前提となる工法としては、大型一体搬出工法*1を基礎とし、施工箇所へのアクセスが可能となっているものとして検討した。(テーマAと共通前提)
- 上アクセス工法 (RPV内) による充填施工手順 (想定概略) を以下に示す。

*1: IRID「令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリの取り出し工法の開発 2022年度最終報告」(2023年6月)



<施工の想定時期>

- ・炉底部
炉底部への落下対策施工が完了し、炉心部上部の大型構造物 (ヘッド、ドライヤ、セパレータなど) の撤去終了後、取り出し規模拡大前に実施
- ・炉心部
炉心部の撤去作業および炉心部の充填施工炉底部終了後、取り出し規模拡大前に実施

<施工手順>

1. 設置ベースをシュラウド上面に設置
2. 作業容器 (吹付装置を内蔵) をオペフロ上に仮置き
3. ホースマネジメントシステムをオペフロ上に設置
4. 乾式吹付け機とコンプレッサーをセル外に設置
5. メンテナンス装置で、電気・水・圧空および粉体システムを作業容器にコネクタ接続
6. 揚重機で作業容器をRPVフランジ面に設置
7. 吹付装置を設置ベース上に設置
8. 吹付装置のプラットフォームを目標高さまで吊り下し、吹付施工を行う

©Decom.Tech

上アクセス工法による充填施工手順

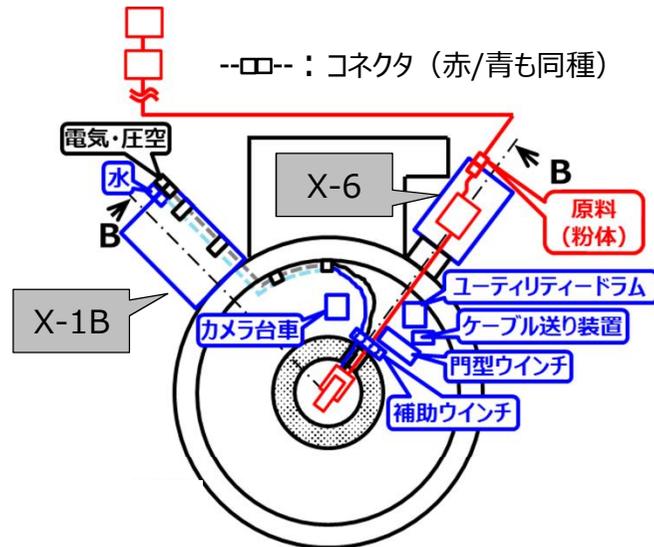
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (施工装置・施工方法案) (2/3)

RPV以外 (ペDESTAL内) への充填の場合

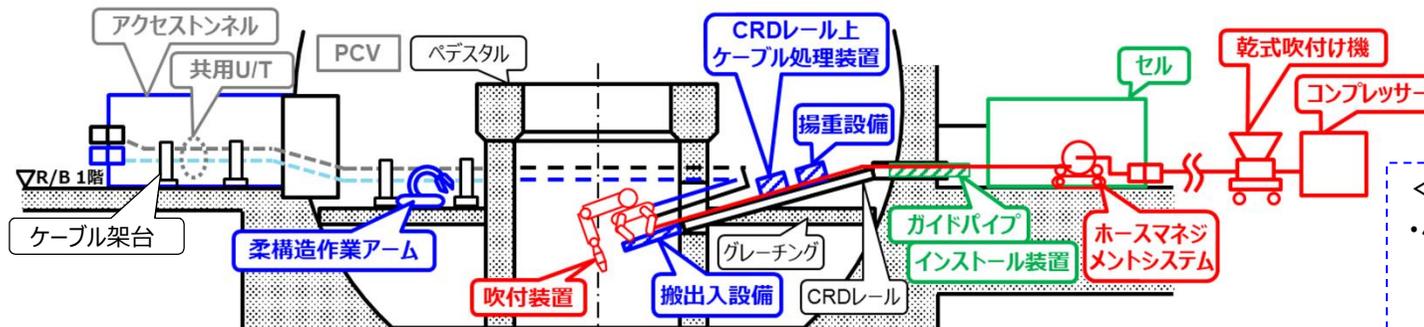
- 前提となる工法としては、CRD交換機の解体*1の工法を参考とし、施工箇所へのアクセスが可能となっているものとして検討した。
- 横アクセス工法 (ペDESTAL内) による充填施工手順 (想定概略) を以下に示す。

*1: IRID「令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリの取り出し工法の開発 2022年度最終報告」(2023年6月)



<施工手順>

1. X-6ペネにセルを設置
2. X-6ペネにガイドパイプを設置
3. セル内にホースマネジメントシステムを設置
4. セル内にインストール装置を設置し、ホース先端と接続
5. R/B建屋外に乾式吹付け機とコンプレッサーを設置
6. CRDレール上に、揚重設備・搬出入設備などを設置
7. X-1Bペネから投入した吹付装置を門型ウインチにてCRDレール上に設置
8. 柔構造作業アームを使用して、吹付装置に電気・水・圧空および原料(粉体)系統のコネクタ接続
9. 揚重設備で支えながら吹付装置をペDESTAL内に投入し、吹付施工を行う



<施工の想定時期>

- ・ペDESTAL内
- D/W地下階の水域制御や落下対策などの施工完了後、取り出し規模拡大前に実施

横アクセス工法による充填施工手順 (ペDESTAL内)

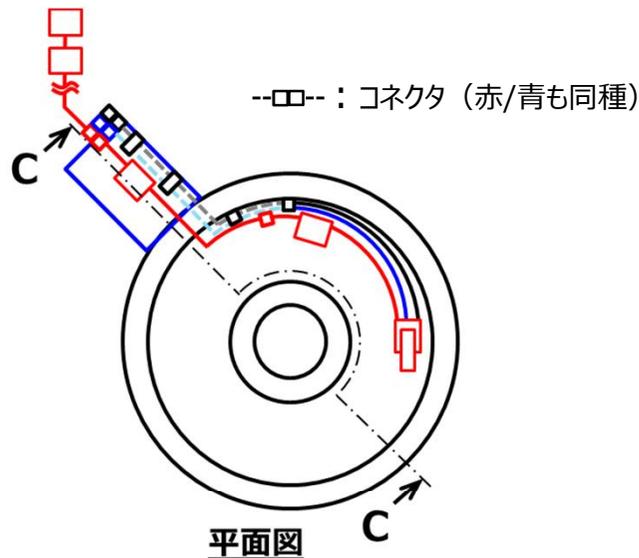
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (施工装置・施工方法案) (3/3)

RPV以外 (ペDESTAL外) への充填の場合

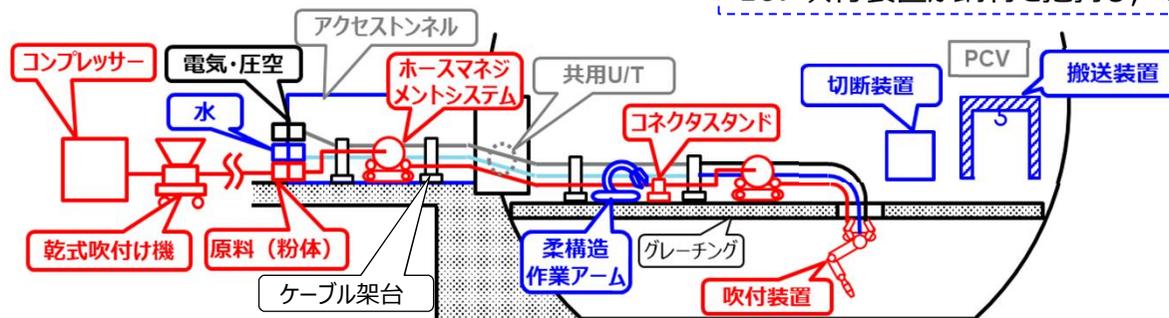
- 前提となる工法としては、横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法*1の工法を参考とし、施工箇所へのアクセスが可能となっているものとして検討した。
- 横アクセス工法 (ペDESTAL外) による充填施工手順 (想定概略) を以下に示す。

*1: IRID「令和2年度開始「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 2020年度実施分最終報告」(2021年8月)



<施工手順>

1. 切断装置で対象位置近傍のグレーチングを切断
2. 原料 (粉体) ホース用のコネクタスタンドを設置
3. ホースマネジメントシステムを設置
4. 柔構造作業アームで原料 (粉体) ホースとコネクタスタンドを接続
5. R/B建屋外に乾式吹付け機とコンプレッサーを設置
6. 搬送装置を開口付近に設置
7. 吹付装置を開口付近に仮置き
8. 柔構造作業アームを使用して、吹付装置に電気・水・圧空および原料 (粉体) システムのコネクタ接続
9. 搬送装置で吹付装置を開口から吊り下ろす
10. 吹付装置が鋼材を把持し、ぶら下がった状態で吹付施工を行う



C-C矢視図 横アクセス工法による充填施工手順 (ペDESTAL外)

©Decom.Tech

<施工の想定時期>

- ・ペDESTAL外
- D/W地下階の水域制御や落下対策などの施工完了後、取り出し規模拡大前に実施

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.2 概念検討 (まとめ)

- テーマBにおける概念検討の成果を下表に示す。

概念検討結果統括表

No.	概念検討	適用先候補の選定
1	適用対象	充填安定化技術の工法適用先として①炉内構造物, ②開口部, ③Rw/B・FSTR ^{*1} , ④ペDESTAL内, ⑤PCV底部 (水中環境) の5点を選定した。 *1 : FSTR=増設廃棄物地下貯蔵設備
2	工法選定	適用先への施工方法として4種類の施工方法から長距離移送 (圧送) に優れる乾式吹付工法を採用した。
3	材料選定	No.1項へ適用する充填材の要求仕様として「使用想定環境」や「アクセス性」の観点からの評価基準を設け, 9種類の充填材候補から机上検討にて評価ポイントが高かったジオポリマーおよびセメントを検討対象として選定した。
4	作業ステップ	乾式吹付工法を用いた作業ステップとして以下 3 箇所への作業ステップを検討した。 上アクセス工法 : RPV内部 ^{*2} (No1①②), 横アクセス : ペDESTAL内 ^{*3} (No.1④), 横アクセス : ペDESTAL外 ^{*4} (No.1⑤) 注記 : 乾式吹付工法を適用する前提として以下の工法を基礎とし作業ステップを検討した。 *2 : IRID「令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリの取り出し工法の開発 2022年度最終報告」(2023年6月)のうち, 大型一体搬出工法 *3 : 同上記報告の内, CRD交換機の解体 *4 : IRID「令和2年度開始「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 2020年度実施分最終報告」(2021年8月)のうち, 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (結果概要)

- 充填材の基本特性を確認するため、選定された充填材のジオポリマーおよびセメントを用いたラボ試験を実施した。結果概要を下表に示す。試験詳細については次頁以降に記載する。

ラボ試験 結果統括表

No	試験項目	試験目的	結果*1
1	移送試験	安定した長距離移送の可否を確認する。	可
2	吹付試験	吹付け後の充填材の付着状況から吹付施工性の成立可否を確認する。	可
3	充填試験 (タンク内)	タンク中の廃樹脂の固化を想定し、樹脂と充填材原料を混合した充填材の固化状況を確認する。	可
4	付着強度試験	充填材の施工対象への付着性を比較評価する。	可
5	堰形成試験	充填材の吹付施工による積層および堰の形成可否を確認する。	否 → 可
6	開口閉止試験	充填材の吹付施工による開口部の閉止可否を確認する。	可
7	堰き止め試験	充填材で形成した堰の止水性可否を確認する。	可
8	固化試験	想定される環境条件による充填固化体の硬化性や強度等への影響を評価する。	可
9	強度試験	一般的な指標で各試験体の強度を評価する。	可
10	耐熱試験	燃料デブリの崩壊熱により充填材が高温状態に晒された場合の影響を評価する。	可
11	加工試験	充填材が一般的な加工方法で切断可能であることを確認する。	可
—	分離試験*2	燃料デブリを含んだ固化体に対する、燃料デブリと充填材の分離の基礎試験を実施し、分離の見通しを確認する。	

*1：ジオポリマー、セメントの両方またはいずれか一方が必要な特性を満たした場合または安定化に必要な強度特性が取得された場合に「可」と記した。

*2：当該試験は「6.2.5 充填固化後の処理方法の検討」にて実施する。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (移送試験)

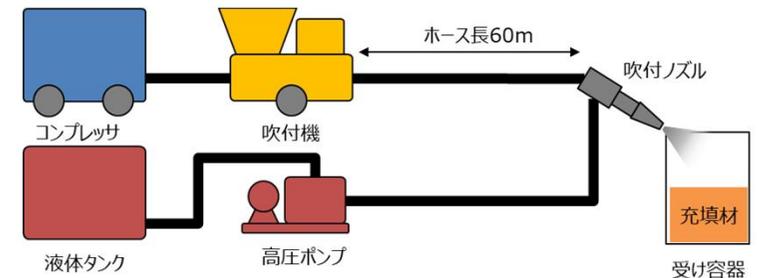
No.	試験項目	目的	概要	結果	
1	移送試験	安定した長距離移送の可否を確認する。	長さ60m*1の充填材圧送用ホースを用い、充填材の吹付け状況を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

充填材圧送用ホースを60mとして、充填材を受け容器に吹き付けて単位時間あたりの吐出量を計測*2する。3回繰り返し吐出量に大きな変動がないことを確認する。

【評価項目】

充填材の単位時間あたり吐出量 (安定性の目安 : ±5%)



吐出量単位 : m³/h

充填材	吐出量 (1回目)	吐出量 (2回目)	吐出量 (3回目)	平均吐出量	変動係数	評価
ジオポリマー	0.32	0.33	0.32	0.32	0.5%	○
セメント	0.37	0.39	0.37	0.38	2.7%	○

【結果】

➤ 全長60mの材料移送にて充填材の吹付施工を行った場合、吐出量の変動係数はジオポリマー・セメントでいずれも±5%未満となった。

【考察】

➤ 本事業では長距離移送の可否を確認するため、短時間にて吐出量の安定性を評価した。今後、長時間吹付けを行いホースやノズルの耐久性・閉塞性を評価する。

*1 : 本試験では、標準的な吹付施工装置のホース長である60 mを設定した。

*2 : 具体的には、充填材を30秒間受け容器に吹付け、容器の重量増加分から吐出量を算出した。また、環境温度は外気温度 (NC) であった。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

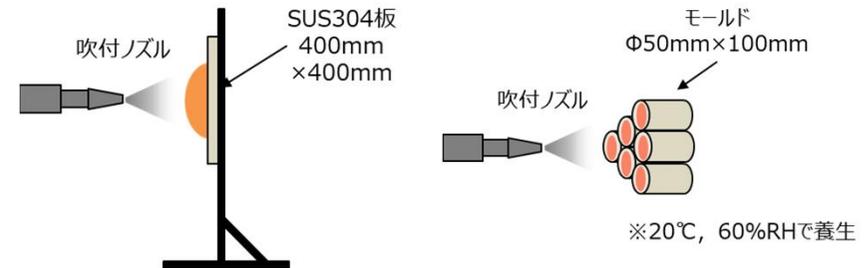
● 6.2.3 ラボ試験 (吹付試験-1)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
2	吹付試験	吹付け後の充填材の付着状況から吹付施工性の成立可否を確認する。	移送試験で使用した装置の条件にて、対象物へ吹付けを行い、吹付施工性の成立可否を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】(通常吹付)

移送試験の吹付条件にて、模擬体 (□400mmのSUS304板) に対して吹付け、厚さ90mm以上の施工ができることを確認する。

また、Φ50mm×100mmの円筒型枠のモールドに吹付けて試験体を作製し、温度20℃、湿度60%RHで養生した後、材齢7日と28日で圧縮強度 (JIS A 1108準拠) と引張強度 (JIS A 1113準拠) を取得する。(n=3)



【評価項目】

施工厚さ (90mm以上*1)

【結果】

- ジオポリマー、セメントともに1回の連続した吹付で、施工厚さ90mm以上の吹付施工ができた。
- 垂直面であっても対象に付着して垂れずに留まる特性を確認できた。
- 吹付けた材料の上に連続して施工しても、飛散せずに積みあがり、厚付けできることを確認した。

	試験前	ジオポリマー	セメント
外観	 施工厚さ目安 長さ90mmの棒		
評価	—	○	○

*1：一般的なセメント系の乾式吹付施工の施工厚さは20mm～100mm程度とされている。

本試験では暫定的な目標値として90mmを設定した。確認方法として、平板中央部に目安となる90mmの棒を立てた。

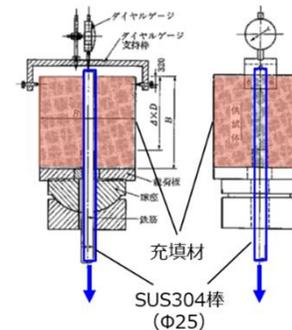
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (吹付試験-2)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
2	吹付試験	吹付け後の充填材の付着状況から吹付施工性の成立可否を確認する。	移送試験で使用した装置の条件にて、対象物へ吹付けを行い、吹付施工性の成立可否を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】(脱落防止)

土木学会基準JSCE-G503に準拠し、引き抜き試験による充填材とSUS304棒の付着強度(せん断方向)を確認する。Φ25のSUS304の棒が一辺150mmの立方体の中心を貫通するように吹付施工により試験体を作製する。材齢28日にて、SUS304棒を引き抜く方向に載荷して引張試験を行い、SUS304棒と充填材との付着強度(せん断方向)を確認する。(n=3)



試験体

【評価項目】

付着強度(せん断方向) (評価データの取得)

【結果】

- 強度評価が可能な付着強度のデータ取得ができた。
- 付着強度を比較すると、セメントに比べてジオポリマーの方が低い値となった。
- 変位量と付着応力に関するグラフにおいて、ジオポリマーはセメントに比べてグラフの初期勾配が小さい。

【考察】

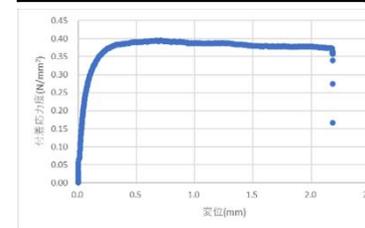
- 本結果は試験No.9の圧縮強度の差に関係していると考えられる(後述)。
- なお、試験体を切断し、切断面(SUS棒との付着面)を観察してみたところ、ジオポリマーもセメントも平滑で充填が不足している箇所は観察されなかった。

*1: SUS304棒が0.002D (=0.05mm) 変位したときの応力。

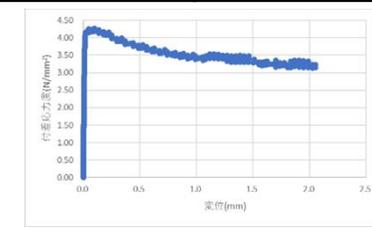
*2: 表記載値は材齢28日でのn=3の平均値。

単位: N/mm²

平均付着強度	ジオポリマー	セメント
0.002D付着強度*1*2	0.02	4.26
最大付着強度*2	0.36	4.31



ジオポリマー



セメント

変位量と付着応力の関係

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (吹付試験-3)

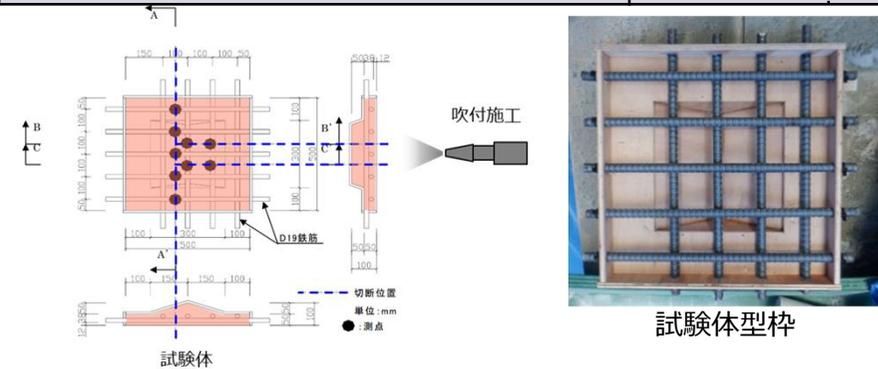
No.	試験項目	目的	概要	結果	
2	吹付試験	吹付け後の充填材の付着状況から吹付施工性の成立可否を確認する。	移送試験で使用した装置の条件にて、対象物へ吹付けを行い、吹付施工性の成立可否を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】(鉄筋剥き出し部補修)

NEXCO試験法432に準拠し、鉄筋が組まれた所定の試験体(右図参照)に、吹付施工を行う。試験体を20℃の恒温室で保管し、材齢7日を目的に試験体を切断し、鉄筋まわりが被覆できているか(有害な空隙がないか)を確認する。

【評価項目】

切断面の目視観察(有害な空隙がないこと)



【結果】

➤ ジオポリマー・セメントともに有意な差はなく、鉄筋の表面周囲や型枠角部に十分に充填材が回り込むことで、隙間なく充填された。
(セメント側の試験体に隙間がみられるのは、型枠の変形によるものと推察)

	ジオポリマー	セメント
外観		
評価	○	○

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (充填試験 [タンク内])

No.	試験項目	目的	概要	結果	
3	充填試験 (タンク内)	タンク中の廃樹脂の固化を想定し、樹脂と充填材原料を混合し、充填材の固化状況を確認する。	樹脂と水が入った容器 (容量18L相当*1) に充填材原料 (粉体) を投入し、固化可否や圧縮強度を確認する。	ジオポリマー	可 (充填率55vol%以下)
				セメント	可

【試験内容】

樹脂*2と水が入った容器 (18Lパール缶) に充填材原料 (粉体) を投入し、固化可否および樹脂の充填率を変化させた場合 (45, 55, 65vol%) の影響を確認する。また、材齢7日でΦ50mm×100mmのコア試験体を上部・下部からそれぞれ採取し、材齢7日及び28日*3の圧縮強度を確認する。(n=3)

【評価項目】

- 固化可否
- 圧縮強度 (評価データの取得, 比較参考値: 材齢28日で1.47N/mm²以上)

【結果】

- 強度評価が可能な圧縮強度のデータ取得ができた。
- 材齢7日では固化が不十分であり、コア抜きが不可であった。
- 材齢28日では固化が十分であり、コア抜きが可能であった。
- ジオポリマーは充填率55vol%以下の条件で圧縮強度の判定値を満足した。
- セメントでは全ての条件で圧縮強度の判定値を満足した。

【考察】

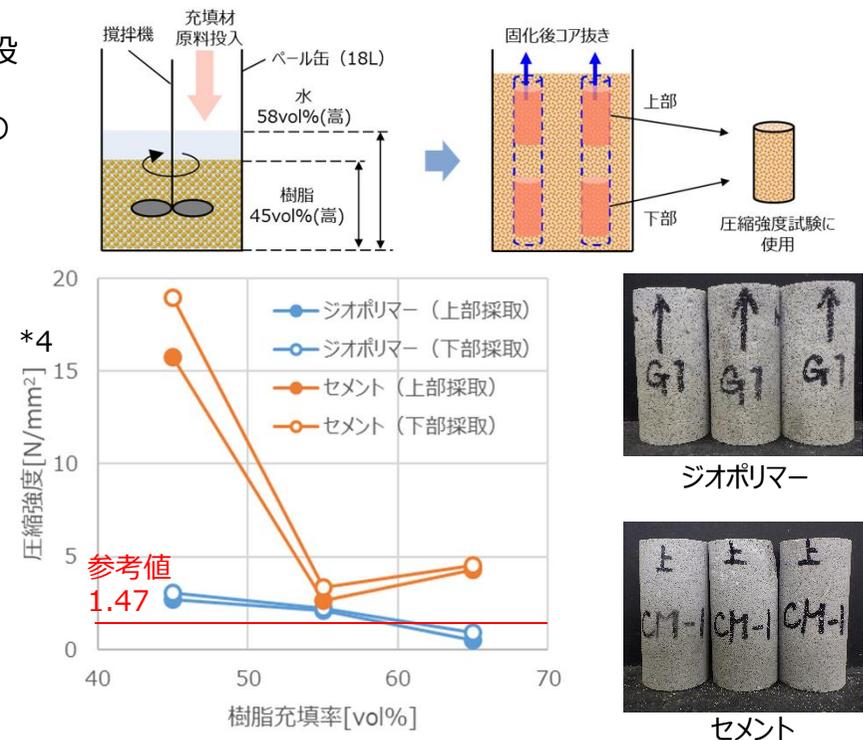
- セメントに比べてジオポリマーの方が低い値となったのは、後述する圧縮強度の差に起因していると考えられる。

*1: 容器のサイズは攪拌機による混練ができ、かつ強度試験体 (Φ50 mm×100 mm) の取り出しが容易な大きさである18Lパール缶とした。

*2: 樹脂は、未使用の陽イオン交換樹脂と陰イオン交換樹脂を同量混合したものをを使用した。

*3: 養生条件は10℃封かん養生。温度は、保守的評価となる低温条件の10℃とした。

*4: 圧縮強度は材齢28日でのn=3の平均値。ただし一部試験体が崩れ、評価上除外したものもあり。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (付着強度試験)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
4	付着強度試験	充填材の施工対象への付着性を比較評価する。	“充填材とSUS304*1”および“充填材同士”に対して各充填材の付着強度を評価する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

土木学会基準JSCE-K561およびJSCE-E545に準拠し、①充填材とSUS304板との付着強度と②充填材同士の付着強度を材齢7日と28日で評価する。(n=3)

施工面に□40mmの鋼製治具をエポキシ樹脂等で接着する。コンクリートカッターなどで鋼製治具の周囲に沿って切り込みを入れた後、鋼製治具を引く方向に載荷し、付着強度を評価する。

【評価項目】

- ①充填材とSUS304の付着強度 (評価データの取得)
- ②充填材同士の付着強度 (評価データの取得, 比較参考値: 材齢28日で1.5N/mm²以上)

【結果】

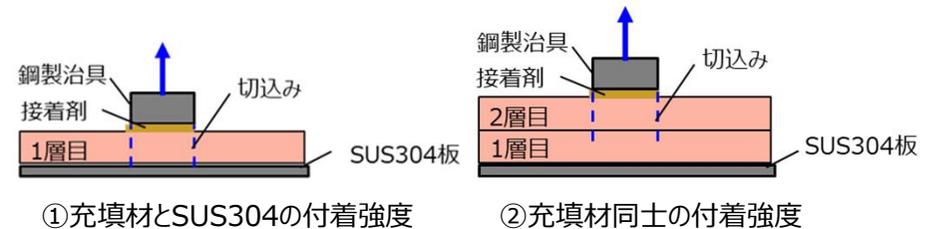
- ①充填材とSUS304の付着強度:
 - ・強度評価が可能な付着強度のデータ取得ができた。
 - ・比較的ジオポリマーの方がセメントより高かった。
- ②充填材と充填材の付着強度:
 - ・強度評価が可能な付着強度のデータ取得ができた。
 - ・セメントは材齢28日の結果で参考値1.5N/mm²を上回ったが、ジオポリマーでは未達となった。
 - ・セメント材は破壊する面がばらつく傾向が見られたが、充填材同士の付着力はジオポリマーよりセメントが高かった。

【考察】

- 圧縮強度の差に起因していると考えられる。

*1: 炉内構造物への施工を想定し、炉内構造物と同等の材質との付着性を模擬するため、材質はSUS304とした。

*2: 付着強度は材齢28日でのn=3の平均値。



① 充填材とSUS304の付着強度

② 充填材同士の付着強度



治具接着後



載荷時



載荷後

単位: N/mm²

付着対象	ジオポリマー	セメント
① 充填材とSUS304の付着強度*2	0.43	0.07
② 充填材と充填材の付着強度*2	1.28	1.78

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (堰形成試験-1)

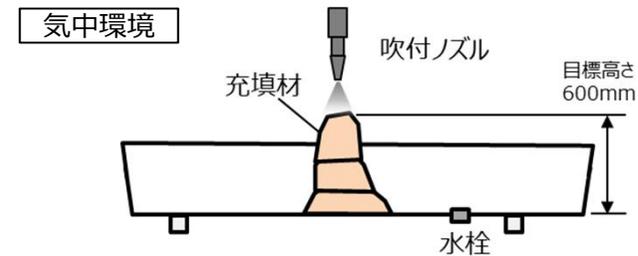
No.	試験項目	目的	概要	結果	
5	堰形成試験	充填材の吹付施工による積層および堰の形成可否を確認する。	気中環境および水中環境に対して吹付施工による積層ができ、その積層が堰として形成可能であるかを確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】(気中環境)

気中環境、型枠なしの状態、充填材を水平面（下向き）に施工し、形状維持・積層ができ、堰形成が可能かを確認する。

【評価項目】

- 積層・堰形成可否
- 積層高さ
気中:目標600mm



【結果】(気中環境)

- ジオポリマー、セメントともに600mm以上の高さまで積層ができた。

	試験前	ジオポリマー	セメント
模擬体外観	目標積層高さ 600mm		
評価	—	○	○

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (堰形成試験-2)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
5	堰形成試験	充填材の吹付施工による積層および堰の形成可否を確認する。	気中環境および水中環境に対して吹付施工による積層ができ、その積層が堰として形成可能であるかを確認する。	ジオポリマー	否
				セメント	否

【試験内容】(水中環境)

水中への施工を模擬し、水位300mmとした水槽内へ充填材を水平面(下向き)に施工し、形状維持・積層ができ、堰形成が可能であることを確認する。

【評価項目】

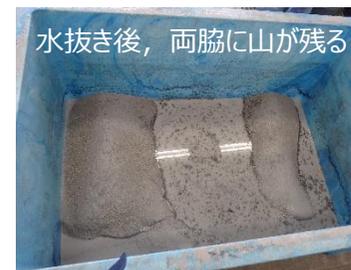
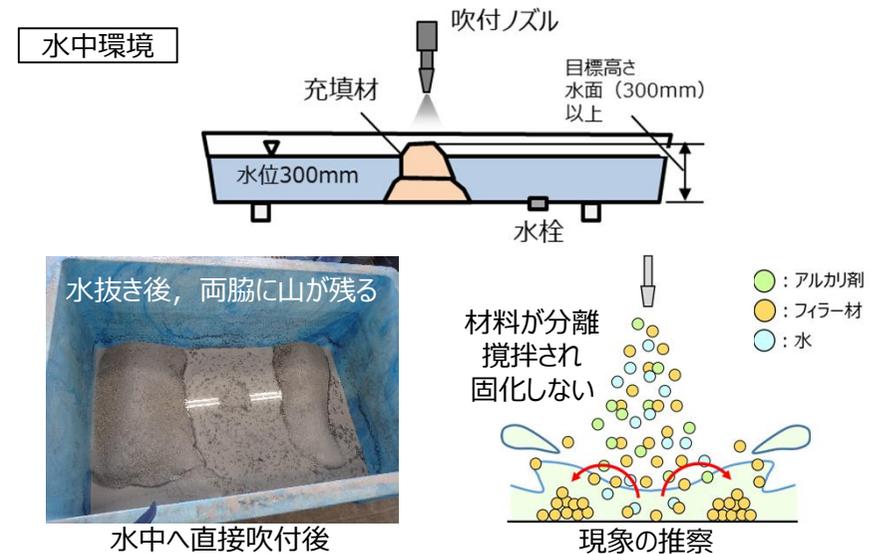
- 積層・堰形成可否
- 積層高さ
水中:水面 (300mm) 以上

【結果】(水中環境・予備試験)

- 予備試験として水中に直接吹付けを行ったところ、水が懸濁し、砂の山が両側に残る状態となり、堰形成ができなかった。

【考察】

- 原因として、充填材が高速で水面に衝突することで材料が分離し、さらに圧縮空気による攪拌で固化が妨げられたものと推察される。
- そこで、以下機能を有する方向変換治具を用いることで、水中への充填材の積層が可能となる見通しを得た。
 - ① 圧縮空気を水中へ向けず、空中へ逃がす。
 - ② 高速で噴出される吹付材を穏やかに水中に投下・積層する。
- 方向変換治具を用いて試験した結果を次ページに示す。



水中へ直接吹付後



方向変換治具



方向変換治具を用いた吹付後

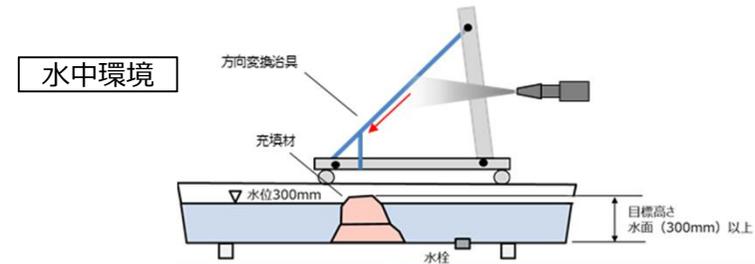
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (堰形成試験-3)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
5	堰形成試験	充填材の吹付施工による積層および堰の形成可否を確認する。	気中環境および水中環境に対して吹付施工による積層ができ、その積層が堰として形成可能であるかを確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】(水中環境)

水中への施工を模擬し、水位300mmとした水槽内へ充填材を水平面(下向き)に施工し、形状維持・積層ができ、堰形成が可能であることを確認する。



【評価項目】

- 積層・堰形成可否
- 積層高さ
水中:水面 (300mm) 以上

【結果】(水中環境・方向変換治具使用)

- ジオポリマー、セメントともに水面(水位300mm)以上の積層ができた。
- ジオポリマーとセメントの堰形状(プロファイル)を比較
ジオポリマー: 堰が鋭角に突き出している形状だった。
セメント: ジオポリマーに比べ堰の両側(すそ野部分)の堆積量が多かった。

※: 水中に施工された際にセメントの粘性が低くなり、堰を形成しながらも左右に拡散していったことを示しており、容器の壁があったことで積層できた可能性がある。

	ジオポリマー	セメント
積層状態		
積層高さ	<p>鋭角に突き出した形状</p>	<p>堰の両側の堆積量が多い</p>
評価	○	○※

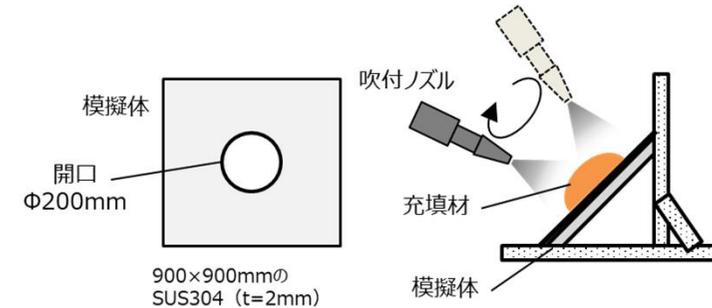
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (開口閉止試験)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
6	開口閉止試験	充填材の吹付施工による開口部の閉止可否を確認する。	SUS304の模擬体に開口 (Φ200mm等*1) を設け, 開口部周りに円周状に吹付け積層を行い開口部の閉止可否を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

開口のある構造物を模擬し, 充填材により開口部の閉止可否を確認する。模擬体は900mm×900mm, t=5mmのSUS304板にΦ200mmの開口*1を設け, 木枠で支えたものとする。開口部を閉止するように開口部周りから円周状に吹付け積層し, 物が落下するような隙間がないことを確認する。



【評価項目】

外観観察 (物が落下するような隙間がないこと)

【結果】

- ジオポリマー：3回の吹付 (3層) で開口を閉止することができた。
- セメント：吹付物を乾燥, 硬化させながら少量ずつ重ねていきジオポリマー施工時と比較して積層数, 施工時間は増えたが最終的には閉止できた。
- 結果として, 開口閉止にはジオポリマーが適していると考えられる。

	試験前	ジオポリマー	セメント
模擬体外観			
評価	—	○	○

※：3号機炉底部の開口径は70×100 cmとして前提条件を設定したが, 本事業では閉止可能な開口サイズの確認を段階的に進めることを考えているため, 初期設定として開口径Φ200 mmとした。なお, 開口の形状や開口径の大きさは本試験結果を参考に今後検討予定である。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (堰き止め試験)

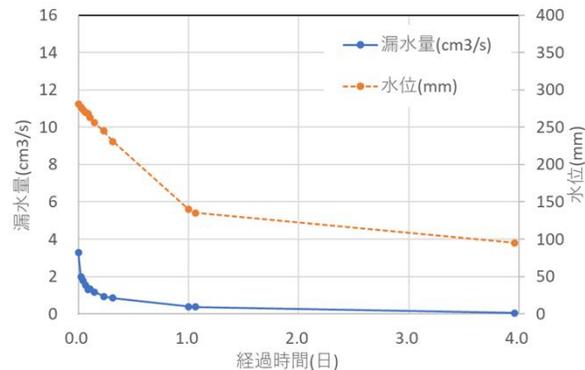
No.	試験項目	目的	概要	結果	
7	堰き止め試験	充填材で形成した堰の止水性可否を確認する。	No.5の水中環境で形成した堰の水栓を外し, 反対側からの水の漏れ状況を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

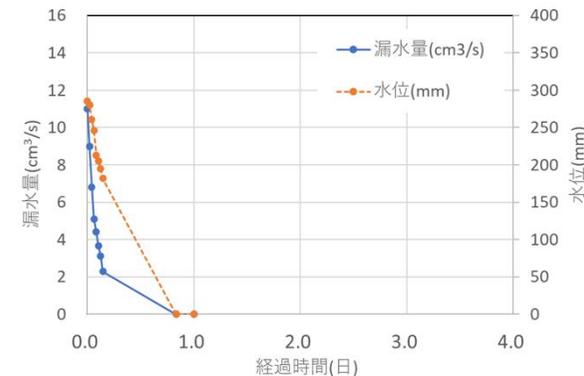
積層・堰形成試験の水中環境で堰形成したものの片方の水を抜き, 反対側からの水の流出の有無を確認する。漏れがある場合には, 水栓からの単位時間あたりの流出量を確認する。また, 24時間後の状況の変化を確認する。

【評価項目】

止水可否 (漏れがある場合は単位あたりの漏えい量を確認)



ジオポリマー



セメント

【結果】

- ジオポリマー, セメントともに漏えいが観察された。単位時間あたりの漏えい量は, セメントの方が大きかった。
- いずれも吹付物と容器との境界部から少量ずつ漏えいしていることが観察された。充填材の収縮率の違いや容器との付着強度の違いなどによって, セメントの漏えい量が大きくなったと考えられる。
- 収縮によって発生した隙間に追加施工することによって, 対策できる見込みと考えられる。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (固化試験)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
8	固化試験	想定される環境条件による充填固化体の硬化性や強度等への影響を評価する。	適用先環境を模擬した状態(低温10℃/常温20℃/高温55℃：高湿度95%RH)* ¹ で充填材を固化した場合の影響を評価する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

Φ150mm×150mmの容器に吹き付けて以下の条件で養生し、硬化していることの確認として、24時間後にプロクター貫入抵抗を取得する。(JIS A 1147準拠)

Φ50mm×100mmの円筒型枠のモールドに吹き付けて試験体を作製する。以下の条件で養生した後、材齢7日と28日で圧縮強度 (JIS A 1108準拠) と引張強度 (JIS A 1113準拠) を取得する。(n=3)

【パラメータ】

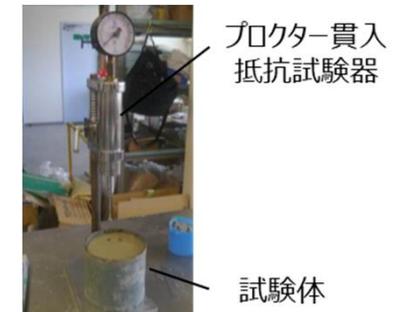
- ①低温環境 (温度10℃, 湿度95%RH)
- ②常温環境 (温度20℃, 湿度95%RH)
- ③高温環境 (温度55℃, 湿度95%RH)

【評価項目】

- プロクター貫入抵抗 (28N/mm²以上)
- 圧縮強度 (参考値：材齢28日で18N/mm²以上)
- 引張強度 (参考データ取得)

【結果】

- プロクター貫入抵抗は、全数28N/mm²以上となった。
(ジオポリマーの10℃養生の試験体のみ56N/mm², それ以外の試験体はジオポリマー、セメントともに80N/mm²超え)



充填材	養生温度	貫入抵抗 [N/mm ²]	評価
ジオポリマー	10℃	56	○
	20℃	> 80.0	○
	55℃	> 80.0	○
セメント	10℃	> 80.0	○
	20℃	> 80.0	○
	55℃	> 80.0	○

※：高温・低温条件および湿度は炉内の環境条件を設定する。また比較用としてコンクリートの養生条件として一般的に用いられている常温環境 (20℃) も試験条件として設定する。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (強度試験)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
9	強度試験	一般的な指標で各充填材の強度を評価する。	各種条件で作製した試験体について、JIS規格に準拠した圧縮強度および引張強度が得られることを確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

各種条件で作製した試験体 (Φ50mm×100mm) について、圧縮強度 (JIS A 1108準拠)、引張強度 (JIS A 1113準拠) を評価する。(n=3)

【評価項目】

- ・圧縮強度 (評価データの取得, 比較参考値: 材齢28日で18N/mm²以上)
- ・引張強度 (評価データの取得)

単位: N/mm²

試験項目	養生条件	ジオポリマー		セメント	
		圧縮強度*1	引張強度*1	圧縮強度*1	引張強度*1
吹付試験	20℃ 60%RH	19.1	1.79	22.3	3.47
固化試験	10℃ 95%RH	17.3	1.66	30.6	3.40
	20℃ 95%RH	21.7	1.88	20.3	3.20
	55℃ 95%RH	12.6	4.08	25.8	3.28



強度試験用試験体
Φ50mm×100mm

試験装置 (例)

*1: 圧縮強度・引張強度は材齢28日でのn=3の平均値。
(青字: 参考値を上回った結果)

【結果】

- 安定化を評価するための強度データの取得ができた。
- 20℃60%RHでは、ジオポリマー、セメントとも材齢28日の圧縮強度で目安の18N/mm²を上回った。10℃と55℃の条件で、ジオポリマーは参考値を下回った。

【考察】

- ジオポリマーの圧縮強度の方がセメントよりも低い傾向にあった原因として、吹付施工による混練反応が十分ではなかったことが考えられる。
- なお、本試験と同様の配合の充填材をミキサー混練した場合 (基礎試験で実施)、より高い圧縮強度 (ジオポリマー50N/mm²程度、セメント70N/mm²程度) が得られていることから、吹付設備等の改良で圧縮強度が向上する可能性がある。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

6.2.3 ラボ試験 (耐熱試験)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
10	耐熱試験	燃料デブリの崩壊熱により充填材が高温状態に晒された場合の影響を評価する。	No.8で作製した試験体を用い、試験体を電気炉内にて7日間で300℃*1まで昇温し、7日間*2保持した後、7日間で室温まで降温した状態における影響度評価を実施する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

固化試験で作製した試験体を、恒温恒湿槽から材齢7日で試験体を取り出し、電気炉内にて7日間で300℃まで昇温、7日間保持した後、7日間で室温まで降温し、外観観察を行う。材齢28日で圧縮強度を確認する。(n=3)

【評価項目】

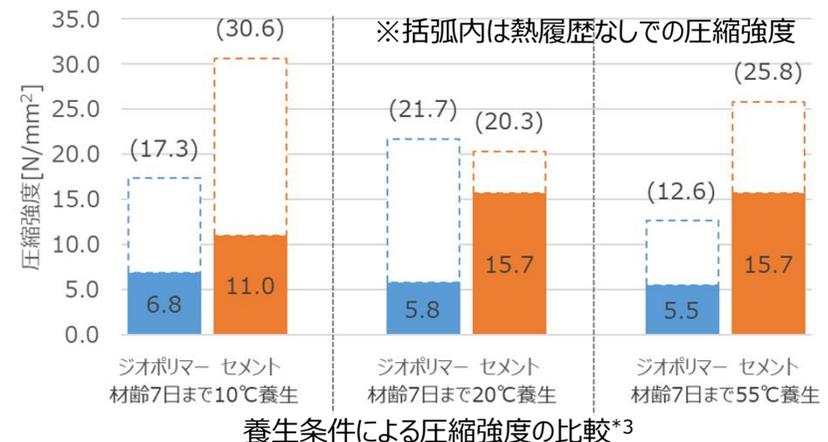
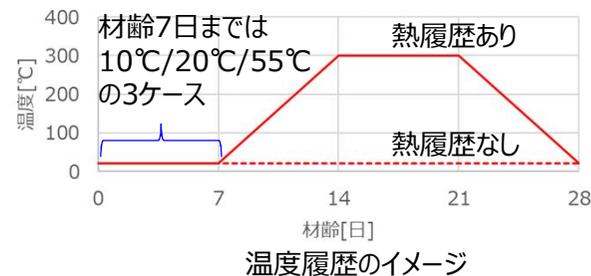
- ・外観観察 (有害なひび割れがないこと)
- ・圧縮強度 (参考データ取得)

【結果】

- 外観確認の結果、セメントは表面が欠けている状態となったが、一定の強度が確認されたことから、適用先によっては有害とならないと判断した。
- 熱履歴を経た後の圧縮強度はジオポリマーの方が低い傾向であり、熱履歴による強度低下は、ジオポリマーの方が大きい傾向であった。

【考察】

- 本試験では材齢7日後(養生期間が短いケース)で熱履歴を与えているため、一般的に耐熱性があるされるジオポリマーの十分な強度が得られなかったことが考えられる。



*1：温度は燃料デブリの想定温度である300℃を設定した。出典：技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) (2023) 令和3年度開始 廃炉・汚染水対策 事業費補助金 燃料デブリの取り出し工法の開発 2022 年度 最終報告

*2：昇温期間・保持期間・降温時間は燃料デブリの崩壊熱による充填材の昇温速度は想定が困難であることから、7日を仮設定とした。

*3：グラフ中の圧縮強度は材齢28日でのn=3の平均値。グラフ中の括弧書きは、熱履歴なしの場合の材齢28日での圧縮強度。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (加工試験)

No.	試験項目	目的	概要	結果	
11	加工試験	充填材が一般的な加工方法で切断可能であることを確認する。	コアボーリングやコンクリートカッターで試験体の加工可否を確認する。	ジオポリマー	可
				セメント	可

【試験内容】

コアボーリングやコンクリートカッター等で加工が可能であることを確認する。
(各種試験で実施するコア試験体の作製や、試験体のカットにより加工可否を確認する)

【評価項目】

切断が可能なこと (試験体の著しい崩れなどがみられないこと)

【結果】

➤ 一般的な加工ツール (コアボーリングやコンクリートカッター等) での加工が問題なく実施可能であることを確認した。

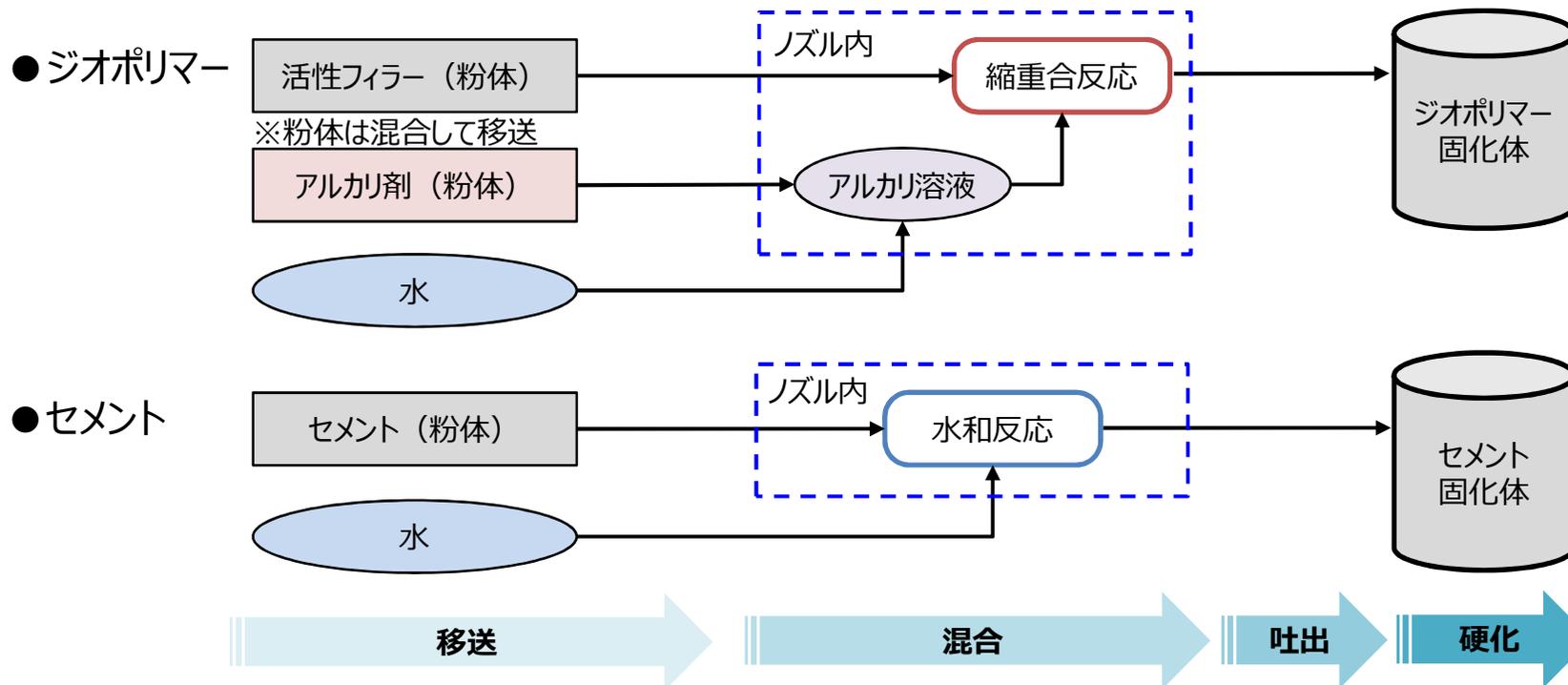


一般的な加工ツールによる加工状況

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.3 ラボ試験 (考察)

- 本試験で、セメントに比べてジオポリマーの圧縮強度や付着強度の方が低い傾向にあった点について、ジオポリマーとセメントとの硬化メカニズムの違いが影響している可能性がある。
- 乾式吹付工法では、粉体と水をそれぞれ別で移送し、吹付ノズル内で混合し対象に吹付けられる方式であるが、材料がノズル内を通過する短時間の間に粉体と水を十分混合し、以下の反応を進行させる必要がある。



- 2023年度に実施した基礎試験において、ミキサーにて混練したジオポリマーでは高い圧縮強度が発現していることから、ノズルでの混合性の改善や材料の前処理による反応性の改善などによって、乾式吹付施工においても圧縮強度の向上が見込まれる。また、ノズル内混合の均一性を向上することで、安定した品質の維持が見込まれる。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.4 スケールアップ試験 (開発優先度の検討と試験方針)

- 本充填工法（乾式吹付施工）は，新規開発テーマであることから開発段階に応じた課題解決が必要である。本事業では，現場適用成否において最も重要である固化成立性の課題について優先的に取り組むこととした。下表に現時点で想定される各課題とそれらに対する取り組みの優先性を示す。

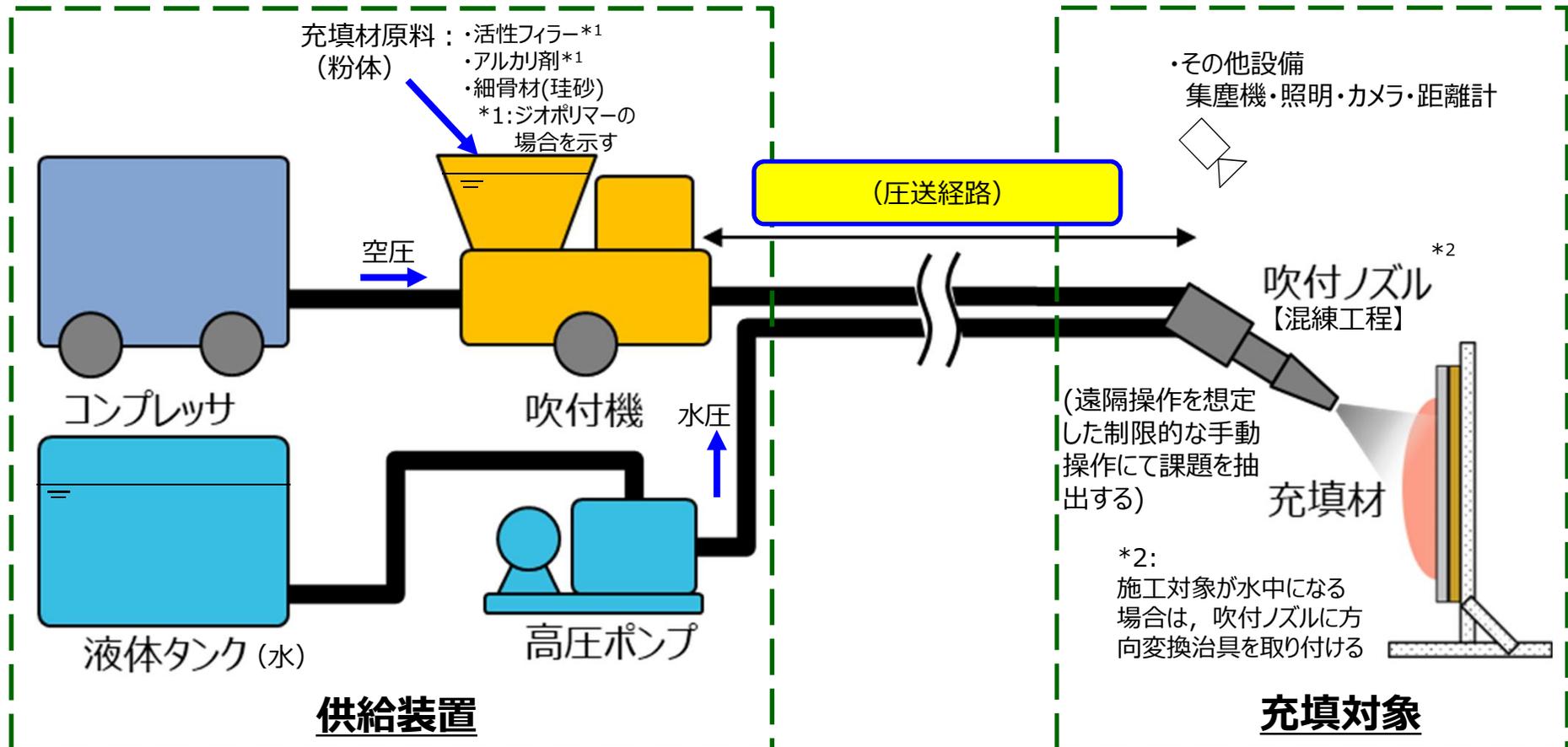
施工段階	課題	本事業で優先的に取り組み	将来的に取組み
機器配置/ライン敷設	機器配置検討，吹付ノズル・ホース等の小型・軽量化	(基礎データ取得)	○
施工箇所エントリー	アクセスルート設定，ライン遠隔接続，視認性確保，バウンダリ設定		○
吹付施工	・充填材の吹付施工性（付着性・積層性）	○	見直し
	・施工箇所までの長距離圧送性	○	見直し
	・ノズルと対象の距離設定，ノズル速度の設定 ノズル遠隔操作，施工の完了判定	(基礎データ取得)	○
	・負圧管理システムへの影響評価		○
一時的回収/完全撤去	ノズル/ホース清掃，保守/メンテナンス，機器の撤去方法，除染方法		○

- 充填材の基礎的な性能である脱落防止に係る付着性，開口閉止性，堰の形成性（水中環境）および長距離移送性に係る試験を優先的に実施することとし，試験は手動で実施する。
- また，今後の遠隔施工検討に資するデータも併せて取得する（ノズルと対象の距離測定・影響確認，ノズルの移動速度の影響確認，遠隔を見据えたノズル動作の遠隔模擬など）。
- 次頁に本試験（スケールアップ試験）の計画検討の結果を示す。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

6.2.4 スケールアップ試験 (試験装置・系統)

- 乾式吹付工法の試験装置および構成図の概略を以下に示す。
- 本試験の施工装置は主に一般産業向けに実績のある気中吹付け装置を使用し、吹付施工に関する基本特性を確認する方針とする。



6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

6.2.4 スケールアップ試験 (試験概要) (1/2)

- 抽出された課題に対して、実機および工法適用に配慮して優先的に対象物固化の成立性の開発を優先とした以下試験を実施する。

No.	試験項目	試験目的および概要	試験イメージ図
1	気中吹付 施工試験	<p>【目的】 実機の固定対象物を想定して、脱落防止の模擬体をスケールアップした際の固定可否を評価するとともに、どの程度の荷重まで耐えられるか評価する。充填材の施工対象への付着性を比較評価する。</p> <p>【概要】 炉内構造物等を想定した模擬体を、吹付施工にて固定する。材齢28日にて、模擬体を押しめくように載荷試験を行い、模擬体の脱落に要する荷重を確認する。</p>	<p>施工能力の確認としてCRガイドチューブ模擬の丸パイプおよび燃料集合体のチャンネルボックス模擬の角パイプを設定。</p>
2	気中吹付・ 積層施工試験	<p>【目的】 開口閉止の対象をスケールアップさせ、どの程度の大きさの開口が閉止可能かを評価する。また、開口閉止における施工性の課題を抽出する。</p> <p>【概要】 模擬体としてSUS304板に□400mm, □600mmの開口を設け、開口部まわりを囲むように吹付け、複数回の積層を行い、物が落下するような隙間がなく施工可能かを確認する。施工時は遠隔施工となることを考慮し、ノズル操作は人手での調整を制限する治具を使用する方針とする。</p>	<p>施工能力の確認として開口設定はラボ試験のΦ200より拡大して難易度の高い□400と□600かつ垂直面を設定した。</p>

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.4 スケールアップ試験 (試験概要) (2/2)

No.	試験項目	試験目的および概要	試験イメージ図
3	水中積層施工試験	<p>【目的】 水中環境に対する吹付・積層施工（堰形成）によって、開口閉止が可能かを確認する。</p> <p>【概要】 一辺600mmの立方体で側面が開口しているものを模擬体とする。水位300mm（D/W水位を想定）とした□3m程度の水槽内に模擬体を設置し、水中での積層施工によって開口閉止が可能か確認する。施工にあたっては、ラボ試験での結果を踏まえ、ノズルに取り付ける方向変換治具を使用するものとする。</p>	<p>施工能力の確認として水位の300mmはD/W地下階水位を参考に設定、開口の□600×板厚30mmはジェットデフレクターを参考に設定した。</p>
4	長距離移送試験	<p>【目的】 安定した長距離移送の可否を確認する。</p> <p>【概要】 ホース長を100mとして、充填材を容器に受けて単位時間あたりの吐出量を計測する。3回繰り返し吐出量に大きな変動がないことを確認する。そのときの搬送空気圧力、ポンプ圧力・流量を確認する。</p>	<p>施工能力の確認として想定圧送距離より100mを設定する。</p>

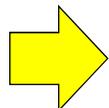
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.4 スケールアップ試験 (結果まとめ)

➤ スケールアップ試験の試験結果を下表に示す。

スケールアップ試験 結果統括表

No	試験項目	充填材	結果概要	結果
1	気中吹付 施工試験	ジオポリ マー	炉内の不安定な構造物として想定されるCRガイドチューブや燃 料集合体を安定化 (固定) できる見通しを得られた。	可
		セメント	模擬体の固定が困難であったことから、炉内の不安定な構造物 として想定されるCRガイドチューブや燃料集合体を安定化 (固 定) には不向きであることを確認した。	不可
2	気中吹付・ 積層施工 試験	ジオポリ マー	遠隔施工を考慮した (吹付けノズル操作を制限) 施工方法に より開口閉止試験を実施し、垂直開口部 (□400, □600) の閉止が可能であることを確認した。	可
		セメント	ラボ試験結果より、Φ200以上での開口閉止が非効率的かつ 困難であると判断し、試験への適用を除外した。	—
3	水中積層 施工試験	ジオポリ マー	方向変換治具を用いることで堰形成が可能であり、漏水を抑 制できることを確認した。ただし、型枠を用いないため充填量が 過大になる傾向である。	可
		セメント	方向変換治具を用いても堰形成が困難であることを確認した。 水中で充填材原料が拡散しやすく、止水は現実的でないとい 判断する。	不可
4	長距離 移送試験	ジオポリ マー	ホース内の詰まりや大きな脈動等なく安定した移送が可能である ことを確認した。	可
		セメント	ホース内の詰まりや大きな脈動等なく安定した移送が可能である ことを確認した。	可



スケールアップ試験の試験結果より、充填材はセメントより
ジオポリマーの方が現場適用性が高いと判断する。

©Decom.Tech



No.1 気中吹付施工試験 (試験体)



No.1 気中吹付施工試験 (載荷)



No.2 気中吹付・積層施工試験



No.3 水中積層施工試験

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (試験方針)

【分離の位置付けと分離試験の目的】

- 充填固化では、ジオポリマーやセメントなどの水処理二次廃棄物の安定化にも適用が検討されている充填材を用いているため、将来検討される燃料デブリの処理・処分方針によっては、固化された燃料デブリをそのまま処分できる可能性があり、必ずしも処分のための完全分離が必要とは考えられない。
- 一方、分離試験では将来検討される処理・処分方針に対して、より柔軟に対応できる技術オプションの一つとしての分離の見通しを評価するため、固化後の充填材が燃料デブリと分離できること（可逆性があること）を評価・確認することを目的とする。

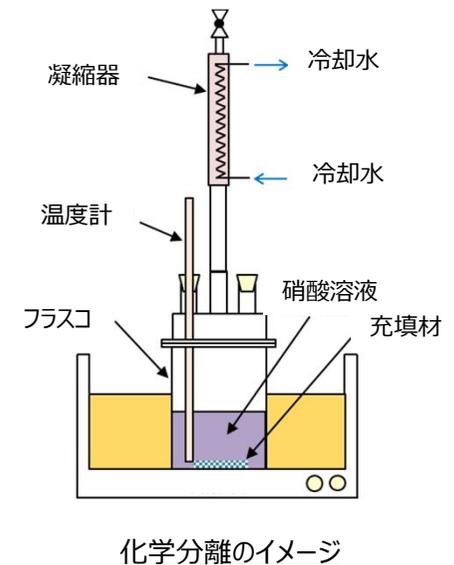
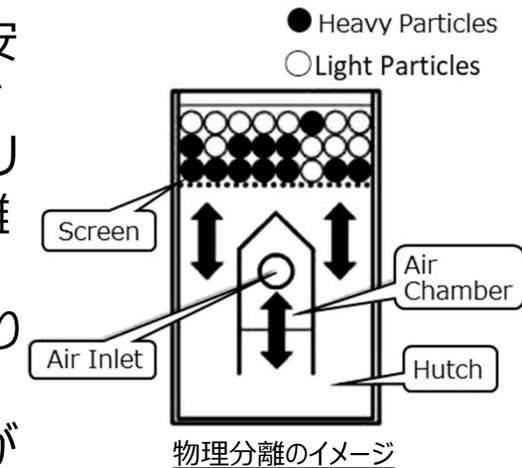
【分離試験の方針】

- 分離手法は複雑な処理を実施するほど二次廃棄物を発生させることに繋がるため、使用済燃料の再処理や一般産業で実績のある分離方法より適用するものとし、物理分離（破碎mmオーダー程度・ふるい分けによる比重分離）および化学分離（硝酸溶解による分離）の区分で分離試験を実施する。

充填固化後の処理検討の検討区分

検討区分	手法	評価
物理分離	破碎・ふるい分けによる比重分離	分離の成立性 (可否・分離効率)
化学分離	硝酸溶解による分離	

©Decom.Tech



6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (試験概要) (1/2)

- 充填材と燃料デブリにより形成される固化体について、廃棄物処理・処分への影響と発熱体（燃料デブリ）についての影響を検討するためのラボ試験を実施する。
- 処分適合性（分離性）について評価するための、物理分離および化学分離の影響確認試験イメージを下表に示す。

分離試験の目的と概要

No.	試験項目	試験目的	試験イメージ図
1	物理分離試験	<p>【目的】 充填材（ジオポリマー）とその他の燃料デブリ等とに分離する手法として、物理的な分離が適用可能か見通しを得ることを目的とする。</p> <p>【概要】 燃料デブリの模擬体を充填材で固化した試験体を準備し、試験体を破碎、一定粒度でふるい分け、それぞれについて比重分離を施し、比重や成分等を計測することで、充填材と模擬体の分離効率を評価する。</p>	
2	化学分離試験	<p>【目的】 充填材（ジオポリマー）とその他の燃料デブリ等とに分離する手法として、化学的な分離が適用可能か見通しを得ることを目的とする。</p> <p>【概要】 充填材のみを硝酸に浸漬させた試験を実施し、充填材の主な元素であるSi, Al, Naの硝酸への溶解率を、同じ硝酸濃度および温度での燃料デブリ (UO₂) の溶解率 (文献値) と比較する。</p>	

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (試験概要) (2/2)

➤ 発熱体を固化した際の影響確認試験を下表に示す。

発熱体影響評価試験の目的と概要

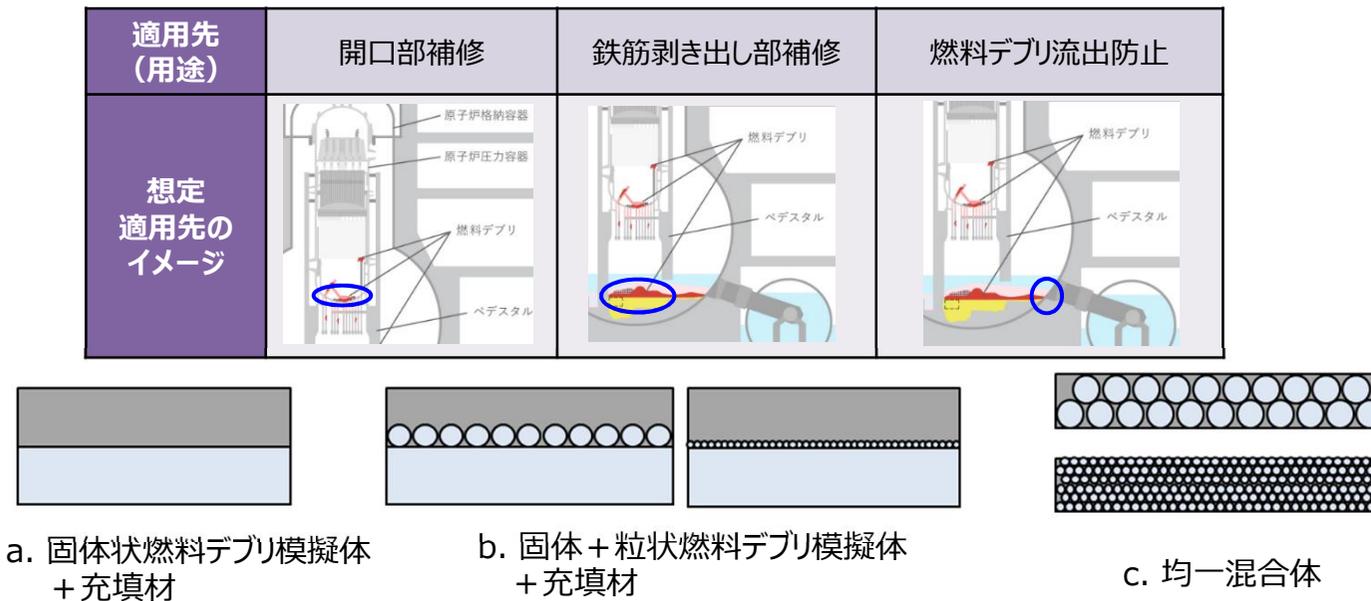
No.	試験項目	試験目的	試験イメージ図
3	発熱体影響評価試験	<p>【目的】 充填材にて燃料デブリを固化した場合を想定し、充填材への燃料デブリの発熱の影響を確認する。</p> <p>【概要】 150mm×150mm程度のSUS304板に同形の型枠を用いて充填材を吹付ける。吹付物をSUS板とともにプレート型ヒータ上に設置し加熱する。加熱処理した試験体と、常温ままの試験体を用意、外観、断面観察、XRDなどにより、加熱された試験体と常温養生された試験体で、発熱による影響を確認する。</p>	

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (1/10)

【試験体】

- 本試験における試験体は充填安定化の目的 (用途) を考慮し以下3種類とする。
 - ◇ 充填安定化の目的 (用途) である「開口部補修」, 「鉄筋剥き出し部補修」, 「燃料デブリ流出防止」を想定した場合の試験体として, 「a. 固体状燃料デブリ模擬体 + 充填材」, 「b. 固体 + 粒状燃料デブリ模擬体 + 充填材」を選定
 - ◇ 施工方法にかかわらず, 充填材と燃料デブリ模擬体が混在した状態として「c. 均一混合体」を選定



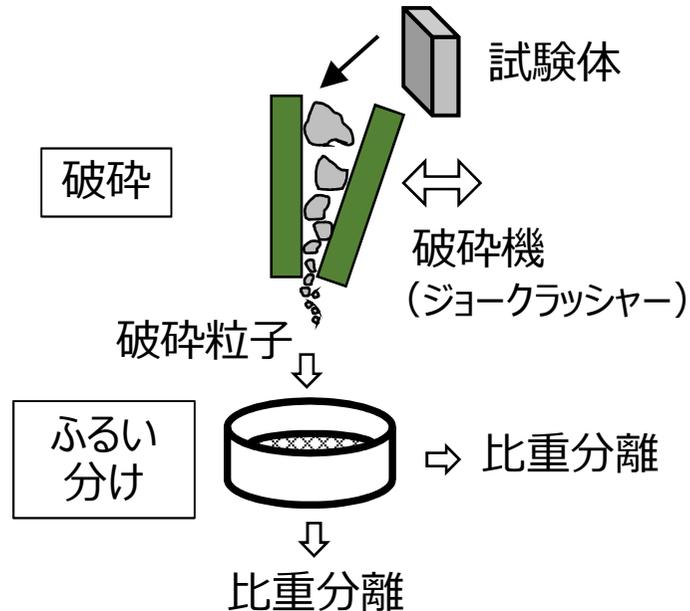
- 燃料デブリの模擬体は, 破碎性 (硬度) , 比重分離性 (密度) を模擬するため ZrO_2 とする。
- 燃料デブリ模擬体は, 固体, 粒径10mm, 粒径1mmとする。試験体の種類は5種類とする。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

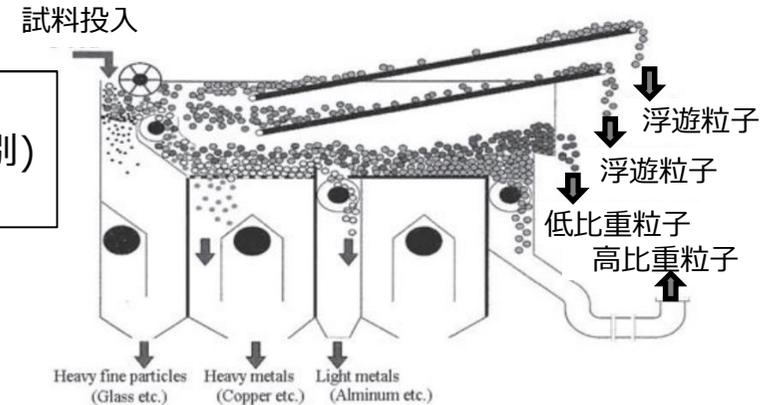
● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (2/10)

【実施方法】

- 破碎, ふるい分け, 比重分離



比重分離
(湿式：ジグ選別)
次頁参照



原理：湿式（水）環境下で、振動等を与え分離対象物の比重差を利用して分離

特徴：工業的に確立された手法。連続処理可能。水は循環させ繰り返し使用。粒子同士の摩擦影響が大きくなるため、微細粒は分離困難

【パラメータ】

- 試験体の種類：5種類
- 破碎条件：2条件（常温・加熱処理）

【評価方法】

- 分離後の粒子について、抜取りによる密度計測にて概算構成比率を求め、全体重量から、分離効率を評価する
- 抜取った粒子について電子顕微鏡による外観観察および成分分析を行い、破碎後の粒子状態を評価する（90%分離を目安とする）

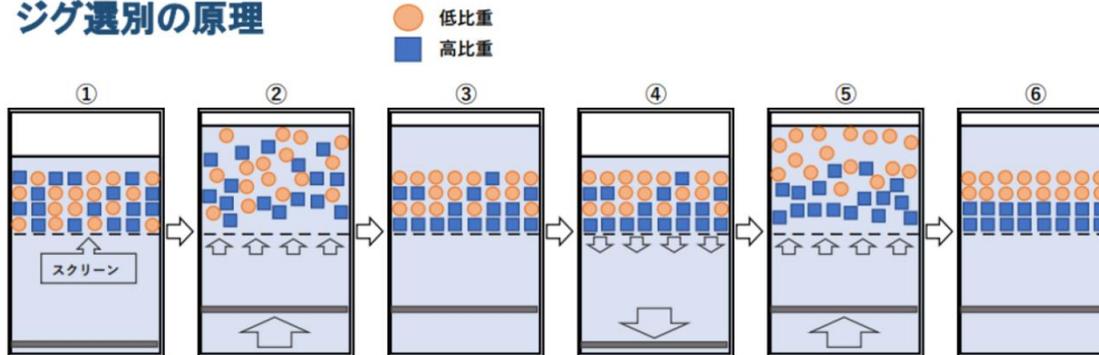
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (3/10)

【比重分離の原理】

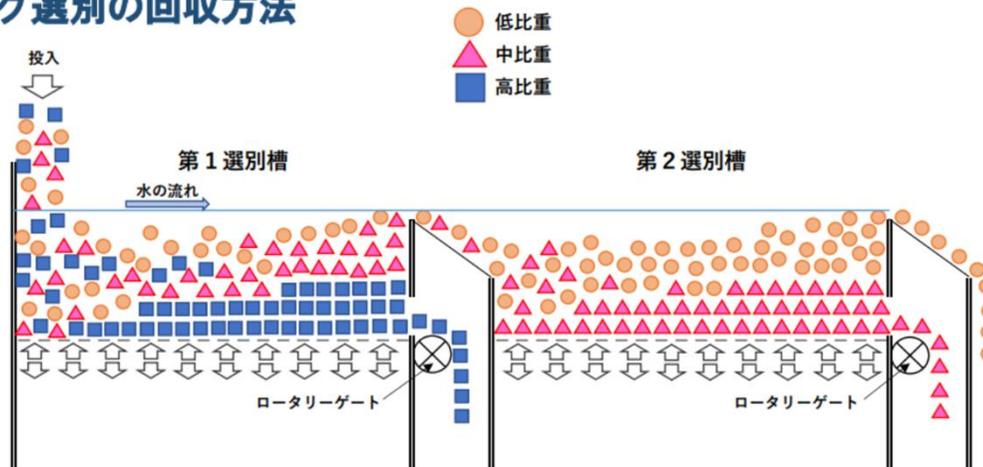
- 資源リサイクル分野で実績のある湿式の比重分離 (ジグ選別) の原理を示す。
(出典：日本資源技術株式会社HPを元に作成)

ジグ選別の原理



- ①スクリーンを有する水槽に、水と選別対象粒子 (比重差がある) を入れる
- ②スクリーンの下から水を押し上げると粒子も押し上げられる
- ③放置すると粒子の比重差により落下速度に差が生じる
- ④⑤工程を繰り返す
- ⑥最終的に下部に高比重の対象物
上部に低比重の対象物が成層される

ジグ選別の回収方法



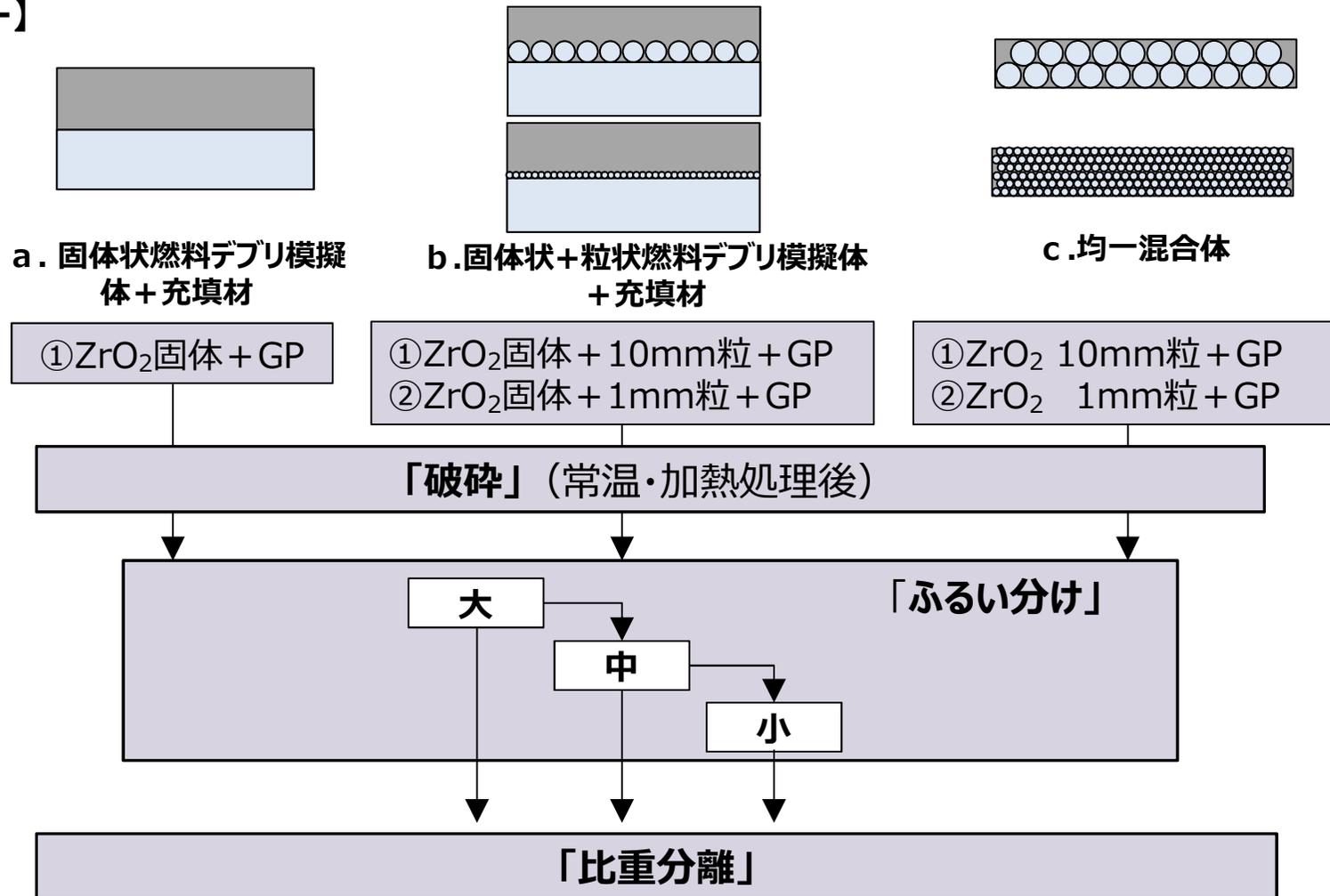
対象物が比重ごとに成層された後、第1段階で成層された高比重の対象物をロータリーゲートで回収。中比重と低比重はオーバーフローさせる。

第2段階で成層された中比重の対象物をロータリーゲートで回収。低比重はオーバーフロー、回収。
※各成層の厚さは調整され目的以外の粒子が混合することを防ぐ。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (4/10)

【実施フロー】



・破碎後にふるい分け、比重分離を行い粒径ごとの燃料デブリ模擬体の分離効率を算出する。

試験体の違い、破碎程度の違いによる分離の程度を評価する。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (5/10)

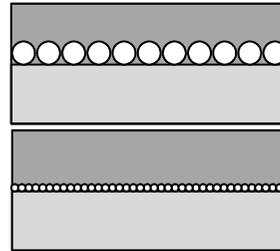
【試験体製作】



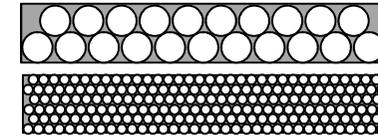
a. ZrO_2 ブロック+ジオポリマー



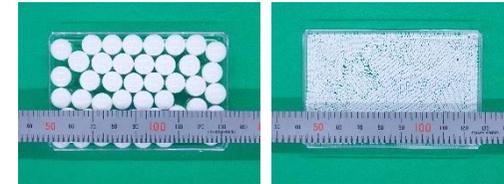
ZrO_2 ブロック



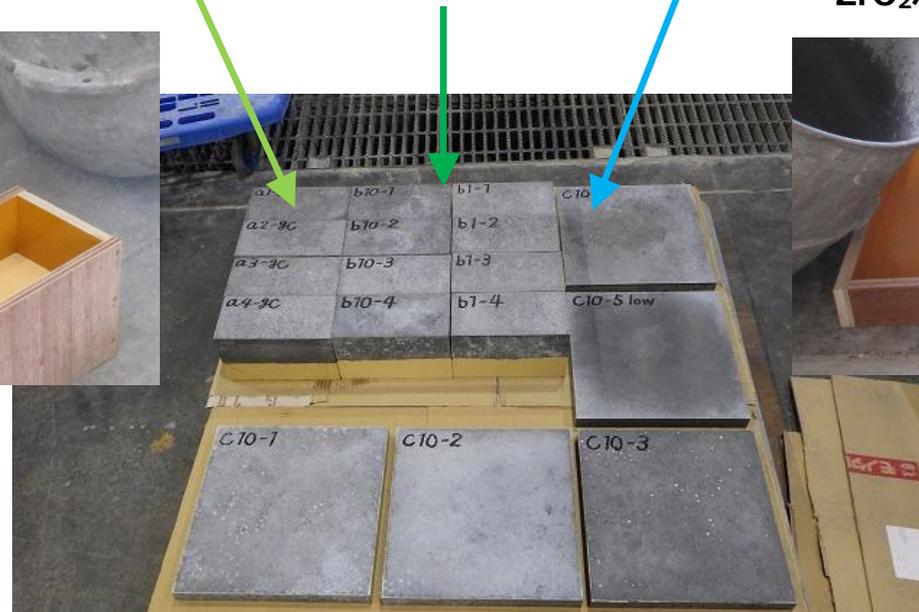
b. ZrO_2 ブロック+ボール
+ジオポリマー



c. ZrO_2 ボール+ジオポリマー
均一混合体



ZrO_2 ボール (Φ10mm, Φ1mm)



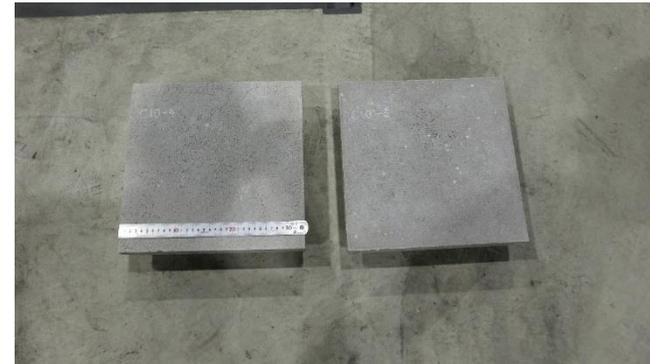
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (6/10)

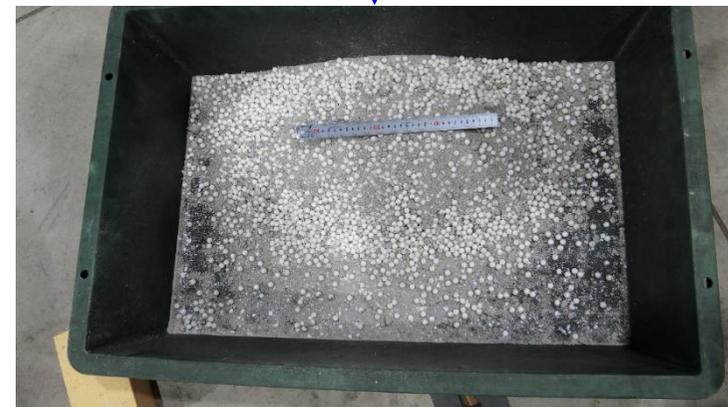
- 粒子サイズが不均一であると分離能が低下するため、破碎した粒子はふるい分けによりサイズを整える。ふるいの目開きは、JIS Z8801「試験用ふるい」に準拠し、22.4mm, 9.5mm, 0.71mmとした。破碎後、ふるい分けした粒子を比重分離する。



片刃が回転運動し
破碎する



破碎機 (ジョークラッシャ)

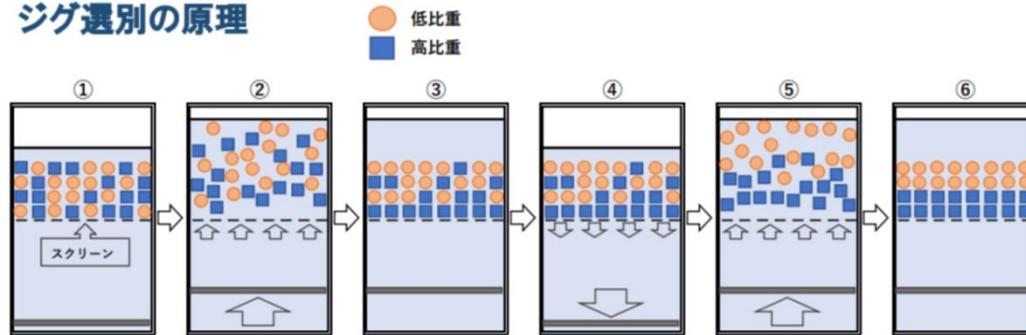


破碎後、ふるい分けした粒子を
比重分離へ。

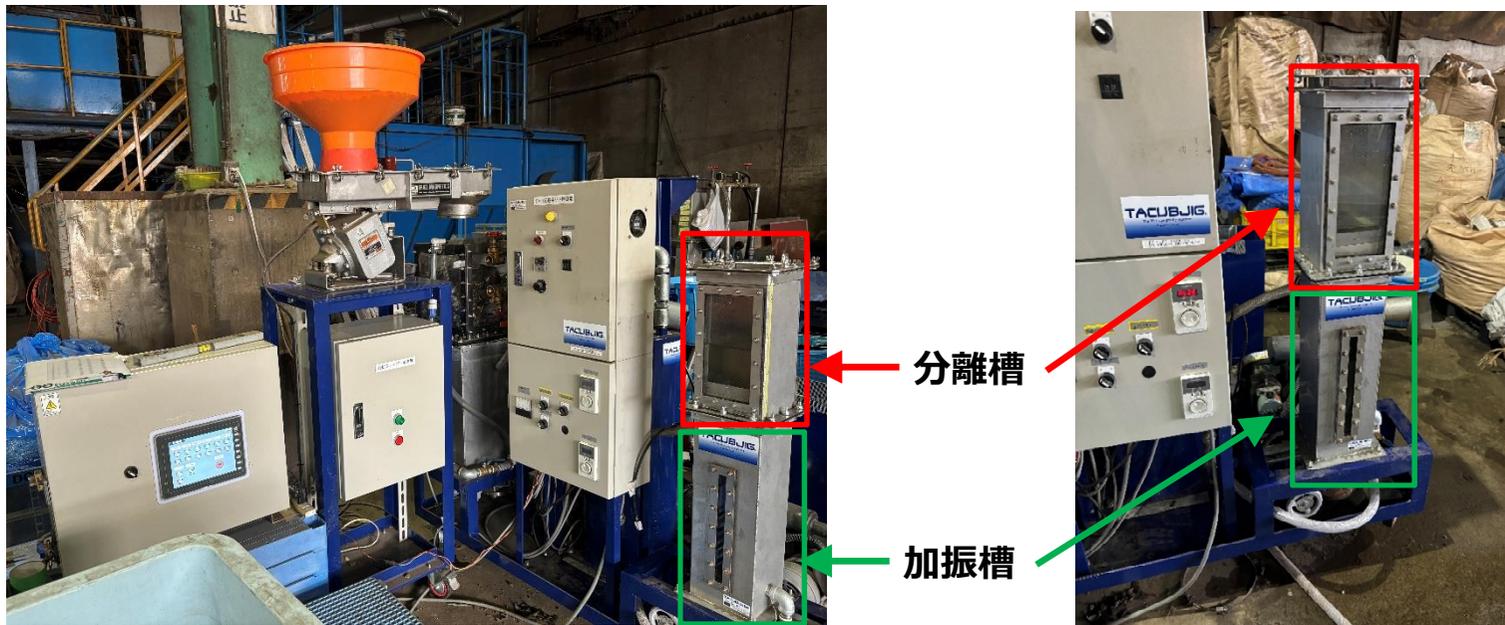
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (7/10)

ジグ選別の原理



- ①スクリーンを有する水槽に、水と選別対象粒子（比重差がある）を入れる
- ②スクリーンの下から水を押し上げると粒子も押し上げられる
- ③放置すると粒子の比重差により落下速度に差が生じる
- ④⑤工程を繰り返す
- ⑥最終的に下部に高比重の対象物上部に低比重の対象物が成層される



湿式比重分離試験装置

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (8/10)

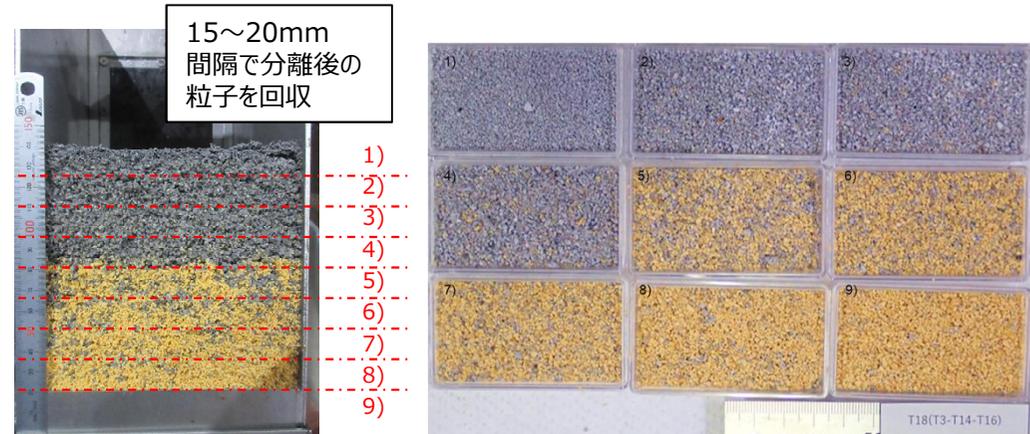
【破碎後の結果】

	300℃ 過熱	最細*1 重量 (kg)	破碎 重量 (kg)	比率
固化体模擬体+充填材	なし	4.6	23.0	20%
	あり	6.5	22.3	29%
固体状+粒状模擬体 (Φ1mm)+充填材	なし	5.1	22.6	23%
	あり	6.0	22.4	27%
固体状+粒状模擬体 (Φ10mm)+充填材	なし	5.2	24.1	22%
	あり	5.3	23.4	23%
粒状模擬体(Φ1mm)+ 充填材(1:1配合)	なし	1.7	25.1	7%
	あり	1.9	24.5	8%
粒状模擬体 (Φ10mm)+充填材 (1:1配合)	なし	1.1	24.9	4%
	あり	1.5	24.3	6%

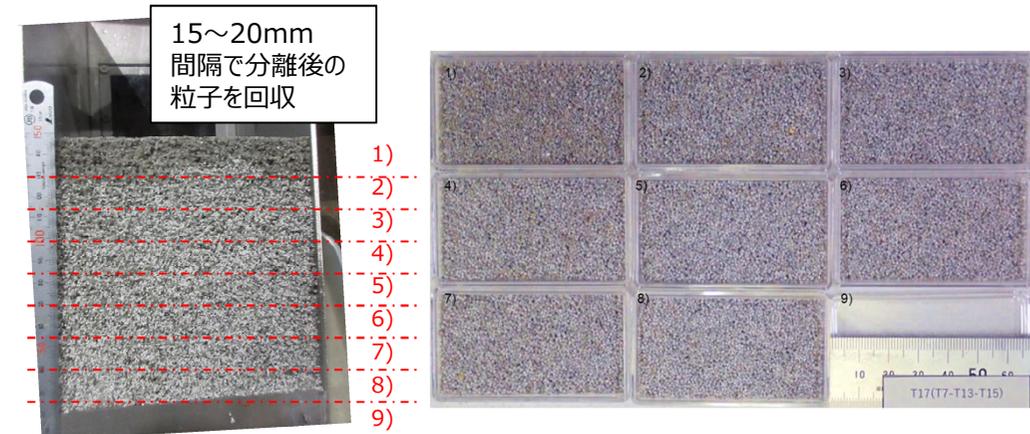
*1: 最細重量とはふるいの一番細かい目(0.71mm)を通過した粒子の重量を示す

- 破碎前に模擬体を加熱(300℃)することでより細かく破碎される傾向であることを確認した。

【分離試験結果】



試験体bの分離試験後の例
(ジオポリマー+ZrO₂ブロック+ZrO₂Φ1mmボール)
(9.5~22.4mm)



試験体cの分離試験後の例
(ジオポリマー+ZrO₂Φ1mmボール)
(9.5~22.4mm)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (9/10)

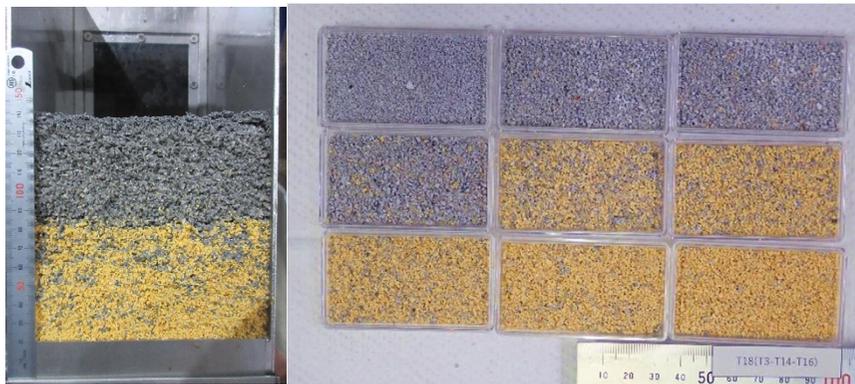
【その他の試験体の分離試験結果 (例)】



ZrO₂ブロック + ジオポリマー



ZrO₂ボール + ジオポリマー



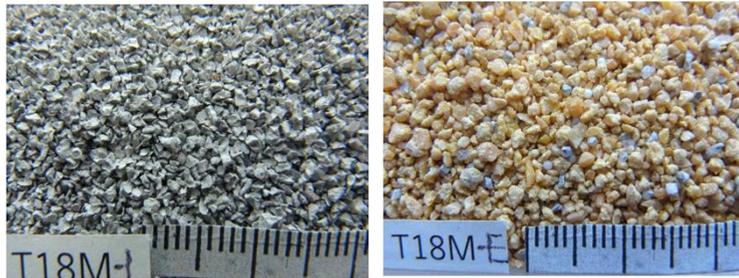
ZrO₂ブロック + ジオポリマー



ZrO₂ブロック + ZrO₂ボール
+ ジオポリマー

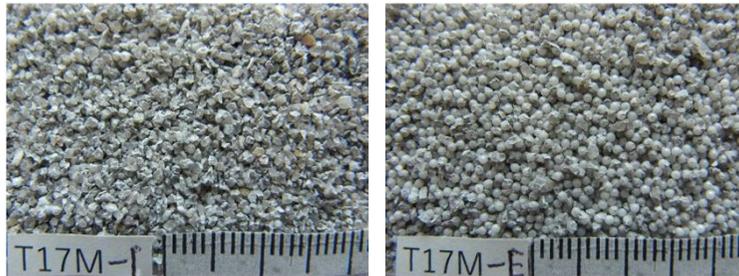
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (物理分離試験) (10/10)



試験体b 最上層

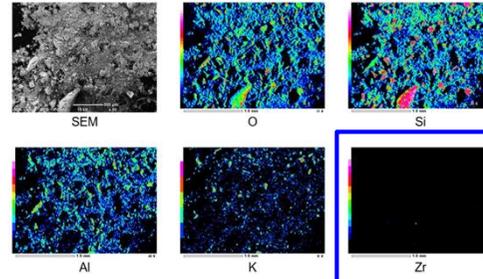
試験体b 最下層



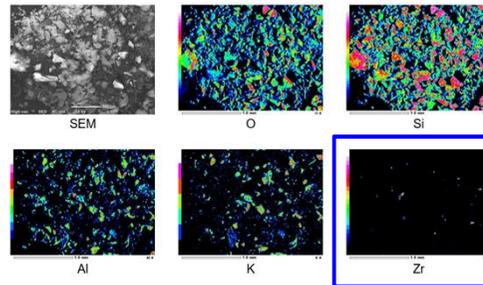
試験体c 最上層

試験体c 最下層

試験体b 最上層粒子のSEM-EDS像

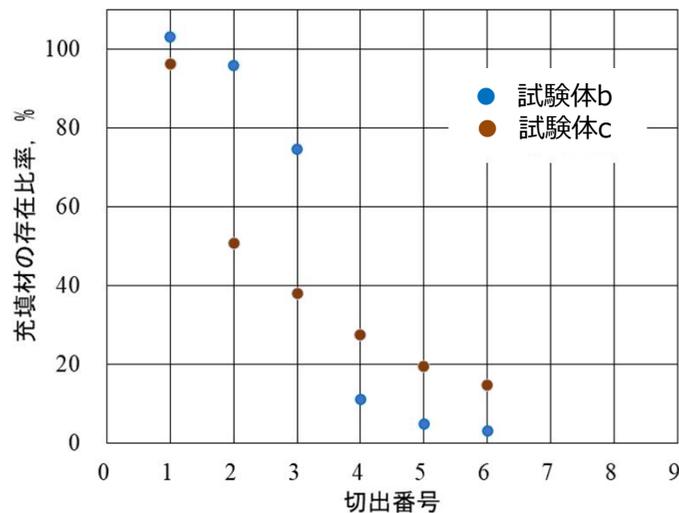


試験体c 最上層粒子のSEM-EDS像



(wt%)

	b 最上層	b 最下層	c 最上層	c 最下層
Na	11.4	0.7	4.0	2.9
Al	14.7	0.8	7.8	3.2
Si	68.1	5.4	81.2	5.8
K	5.4	0.0	5.0	0.3
Ca	0.4	3.5	0.4	0.2
Zr	0.0	89.5	1.5	87.6



- ✓ 分離試験後、最上層などではほぼZrが含まれず、最下層では90%程度含まれる結果となった。本結果より分離試験によって充填固化後の充填材と模擬物を精度良く分離できる見通しが得られた。
- ✓ 破碎後のZrO₂ブロックやZrO₂ボールには、充填材の付着が認められたことから、燃料デブリとの分離を行う場合には、少量ではあるが、燃料デブリと充填材の同伴の可能性は残る。
- ✓ 比重分離方式としては、連続的に処理可能な装置や、乾式での処理装置も存在することから、要求仕様によって、より望ましい分離装置を選定することが可能であると考えられる。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (1/7)

【試験計画 基本方針】

- 充填安定化を選択した際に「可逆性」があることを示すことが求められるのは、燃料デブリとの分離であり、模擬体はSUS等の炉内構造物は対象としない。
- 使用する充填材はジオポリマーとし、セメントモルタルは試験の対象外とする。化学分離では、充填材成分が溶解せずに、燃料模擬成分のみ溶解するかの見込みを確認する。
- この際、工学的に実現性があるものを選定するため、再処理等で実績のある硝酸溶解による分離を採用し、溶解条件等も材料腐食などを考慮し、再処理機器等で実績ある範囲とする。
- 分離試験では、 UO_2 等の燃料成分を用いることができないため、 CeO_2 、 Nd_2O_3 等の模擬物質を用いた試験が考えられる。しかし、これら模擬物質は硝酸溶液中での存在状態(価数)を模擬し、溶媒抽出などの試験に用いられることは多いが、硝酸への溶解速度という観点では、模擬性が不明である。
- そこで、本試験では、充填材粉体を硝酸へ浸漬し、充填材成分の溶解率を確認する。
- そのうえで、既往の文献の UO_2 の硝酸濃度および温度に対する溶解速度から、充填材の浸漬条件における UO_2 溶解率を求めることで、分離の可能性を評価するものとする。

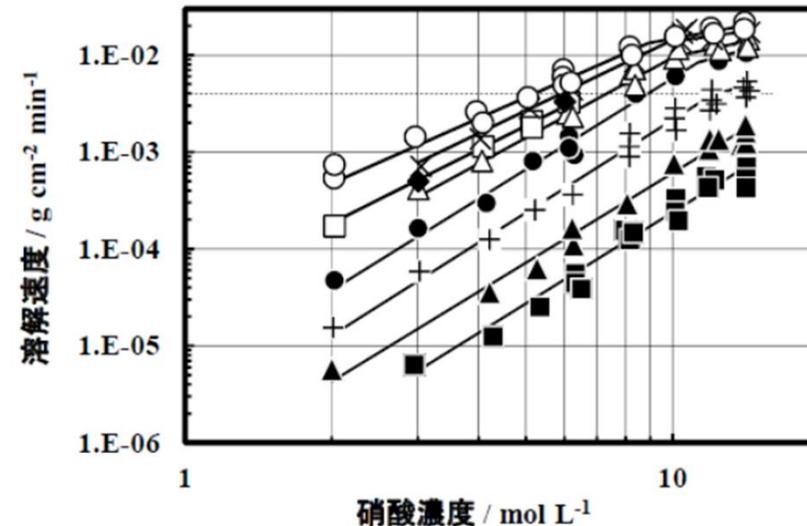


図1 未照射 UO_2 ペレットの溶解速度¹⁾ (Taylor, R. F., et al., J. Appl. Chem., 13, 1963, UO_2 ペレット (未照射), 硝酸: 6~14 mol L⁻¹, ペレット密度 10.4 g cm⁻³, 温度 ■: 20 °C, ▲: 35 °C, +: 50 °C, ●: 65 °C, △: 75 °C, □: 80 °C, ×: 85 °C, ○: 95 °C, ◆: 沸点)

UO_2 溶解速度 (再処理プロセス・化学ハンドブック 第3版 JAEA, 2015)

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (2/7)

【評価のやり方】

- 充填材粉体を硝酸へ浸漬し、充填材成分の溶解率を求め、 UO_2 の溶解率と比較・評価する。
 - (1) 粉砕した充填材の比表面積を測定する。
 - (2) 任意条件における浸漬試験を行い、充填材成分の硝酸に対する溶解率を求める。
 - (3) UO_2 の溶解率を既往の文献の UO_2 の硝酸濃度および温度に対する溶解速度の関係から算出する。
 UO_2 溶解率は以下の式で算出する。
溶解率 (= 1g当たり溶解量) = 溶解速度 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{t}$) \times 比表面積 (cm^2/g) \times 試験時間 (t)
ここで、比表面積は(1)の測定結果、試験時間は(2)の実績を用いる。
 - (4) 充填材成分と UO_2 との硝酸への溶解率を比較し、化学分離の適用可能性を評価する。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (3/7)

【溶解条件】

- 酸の種類：硝酸
- 酸濃度：3条件 (3, 6, 8mol/L)
- 溶液温度：3条件 (35℃, 65℃, 95℃)
- 浸漬期間：8h

【試験装置】

- 加温および温度制御はオイルバスにて実施
- フラスコ内で発生する蒸気は、凝縮器で凝縮させフラスコ内へ戻す

【分析】

- 充填材の比表面積を測定する。
- 浸漬試験後の硝酸溶液ろ液のSi, Al, Na濃度を計測する。

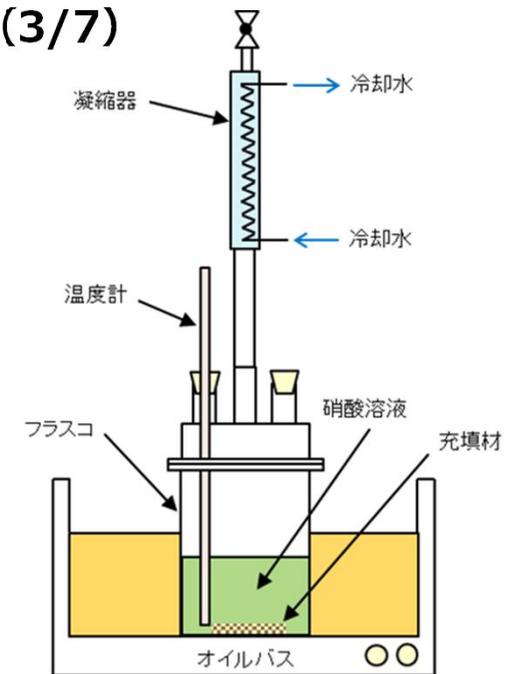
【評価方法】

- Si, Al, Naの溶解率を算出し、UO₂の溶解率に対する相対評価により判定する。

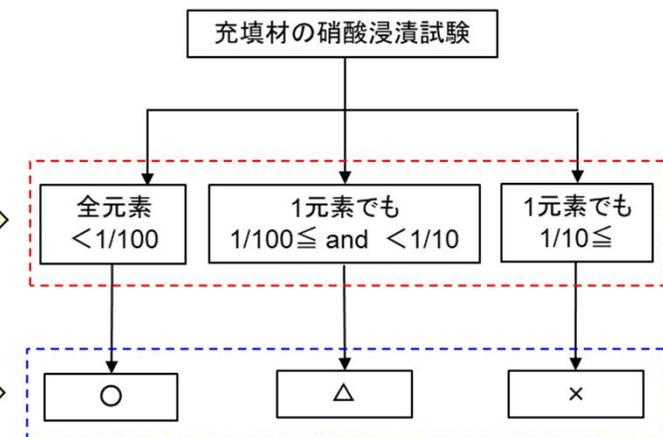
Si, Al, Naの溶解率が1/100, 1/10を目安に充填固化体の化学分離の適用可能性への見通しを評価する。

UO₂の溶解率に対する
Si, Al, Naの溶解率

適用可能性



試験装置概要



化学分離適用可能性の評価フロー

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (4/7)

【試験条件の設定根拠】

(1) 酸濃度

- 既往の文献から、 UO_2 ペレットの場合において、硝酸濃度 5mol/L 、溶液温度 95°C 、溶解時間 6.5h 以上で UO_2 の溶解率が1となることが分かっている。(右上図)
- また、硝酸濃度と溶解速度の関係が求められており、ここに硝酸濃度 5mol/L 、溶液温度 95°C の条件を当てはめると(右下図) 青いポイント (●) となる。ここから硝酸濃度の高い領域 (黄色のエリア) は、溶解率が1となると考えられる。
- 図の黄色エリアの硝酸濃度条件 (5mol/L 以上) から、浸漬試験の硝酸濃度を設定する。六ヶ所再処理工場の使用済み燃料の回分式溶解槽の溶解前硝酸濃度が $6\sim 8\text{mol/L}$ であることから、パラメータとして酸濃度 $3, 6, 8\text{mol/L}$ と設定する。

(2) 溶液温度

- 図の黄色エリアの温度条件から浸漬試験の溶液温度を設定する。エリア内にある 95°C に加え、パラメータとして 65°C 、 35°C と設定する。

(3) 浸漬時間

- 右上図より、溶解率1となる試験時間は 6.5h 以上であることから、これより長い 8h に設定する。

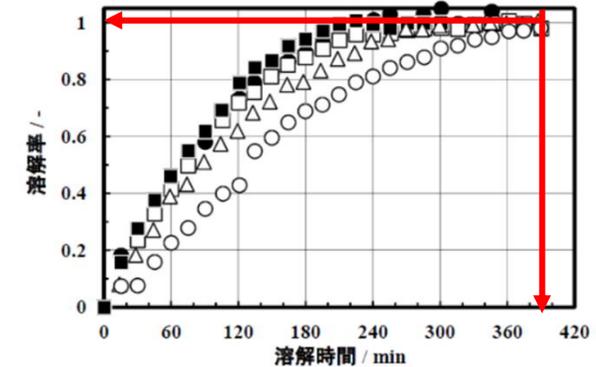


図2 硝酸ウラン濃度が未照射 UO_2 ペレットの溶解挙動へ与える影響⁹⁾ (Honma, S., et al., J. Nucl. Sci. Technol., 30, 1993, UO_2 ペレット (未照射), 硝酸: 5mol/L , 温度: 95°C , 溶解前 U 濃度 ○: $0.0\text{gUO}_2/\text{L}$, △: $50.1\text{gUO}_2/\text{L}$, □: $94.5\text{gUO}_2/\text{L}$, ●: $131.2\text{gUO}_2/\text{L}$, ■: $164.3\text{gUO}_2/\text{L}$)

UO_2 溶解率
(再処理プロセス・化学ハンドブック 第3版 JAEA, 2015)

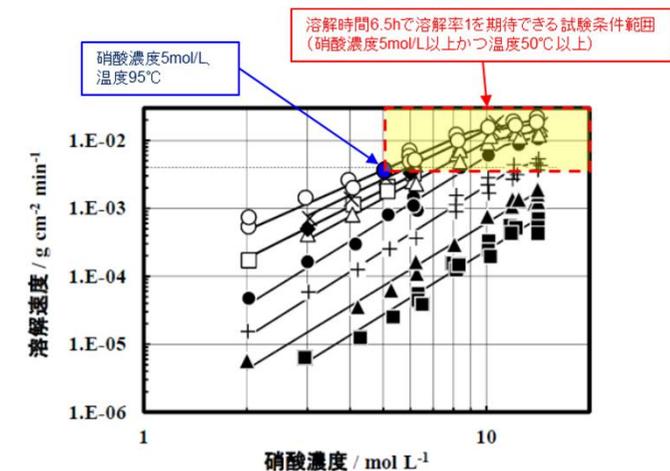


図3 未照射 UO_2 ペレットの溶解速度¹¹⁾ (Taylor, R. F., et al., J. Appl. Chem., 13, 1963, UO_2 ペレット (未照射), 硝酸: $6\sim 14\text{mol/L}$, ペレット密度 10.4g/cm^3 , 温度 ■: 20°C , ▲: 35°C , +: 50°C , ●: 65°C , △: 75°C , □: 80°C , ×: 85°C , ○: 95°C , ◆: 沸点)

溶解時間 6.5h で溶解率1を期待できる試験条件範囲

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (5/7)

【試験状況および試料外観】

(1) 浸漬試験状況

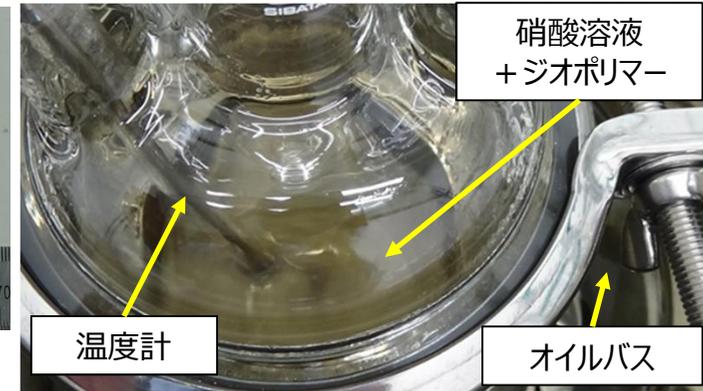
- 充填材 (ジオポリマー) は、粒径0.1mm以下に粉碎調整したものをを用い、フラスコにて硝酸溶液に浸漬して加熱保持した。

(2) 溶液試料外観

- 試験後の溶液試料 (ろ過前およびろ過後) 外観を以下に示す。



ジオポリマー
(粉碎処理)



試験時のフラスコ内の様子

試験後溶液試料外観 (ろ過前)

温度 (°C)	硝酸濃度 (mol/L)		
	3	6	8
35			
65			
95			

ろ過

試験後溶液試料外観 (ろ過後)

温度 (°C)	硝酸濃度 (mol/L)		
	3	6	8
35			
65			
95			

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (6/7)

【試験結果】

(3) 充填材成分 (Na, Al, Si) の溶解率

- 各浸漬条件における UO_2 溶解率と充填材成分 (Na, Al, Si) の溶解率を以下に示す。

○Na

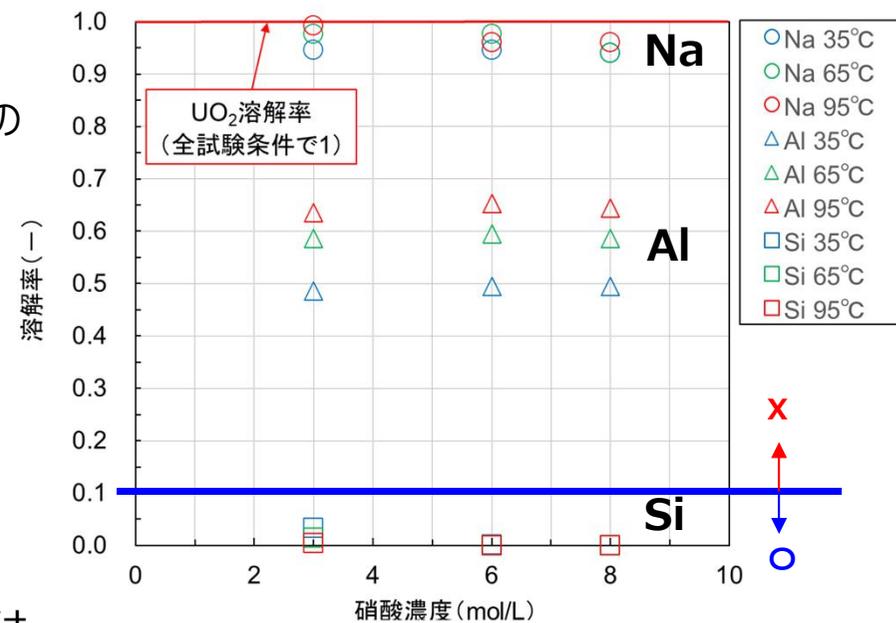
- 溶解率は全ての浸漬条件で0.94以上
- 硝酸濃度による溶解率の差異は認められなかった。
- 温度による溶解率の差異は若干認められ、35℃での溶解率は65℃、95℃に比べて若干低かった。

○Al

- 溶解率はNaよりも低く、おおよそ0.50~0.65
- 硝酸濃度による溶解率の差異は認められなかった。
- 温度による溶解率の差異はNaより顕著であり、温度が高いほど溶解率も上昇する傾向が認められた。

○Si

- 溶解率はNa、Alに比べて非常に低く、硝酸溶液には容易に溶解されないことが示された。



充填材成分 (Na, Al, Si) の溶解率

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (化学分離試験) (7/7)

【化学分離の適用可能性評価】

- UO_2 溶解率に対するNa, Al, Si溶解率の比は, NaおよびAlにおいて, 全ての浸漬条件で0.1 (=1/10) を超える (下表) ため, 充填固化体を硝酸浸漬した場合, UO_2 と充填材中のNa, Alが共に溶解してしまうことが予想される。
- したがって、ジオポリマー充填固化体の分離に硝酸を用いた化学分離を適用することは困難であると判断した。

化学分離の適用可能性評価

試験 No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
硝酸濃度 (mol/L)		6	8	8	8	6	6	3	3	3
温度 (°C)		95	95	65	35	65	35	95	65	35
UO_2	溶解率 (-)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
溶解率	Na (-)	0.961	0.961	0.940	0.940	0.977	0.945	0.992	0.977	0.945
	Al (-)	0.653	0.644	0.586	0.495	0.595	0.495	0.636	0.586	0.486
	Si (-)	0.0004	0.0002	0.0002	0.0003	0.0004	0.002	0.004	0.014	0.033
溶解率比	Na/ UO_2	0.96	0.96	0.94	0.94	0.98	0.95	0.99	0.98	0.95
	Al/ UO_2	0.65	0.64	0.59	0.49	0.59	0.49	0.64	0.59	0.49
	Si/ UO_2	0.0004	0.0002	0.0002	0.0003	0.0004	0.0017	0.0044	0.0142	0.0326
適用可能性		×	×	×	×	×	×	×	×	×

溶解率比
0.1を超える

全ての条件で
×評価

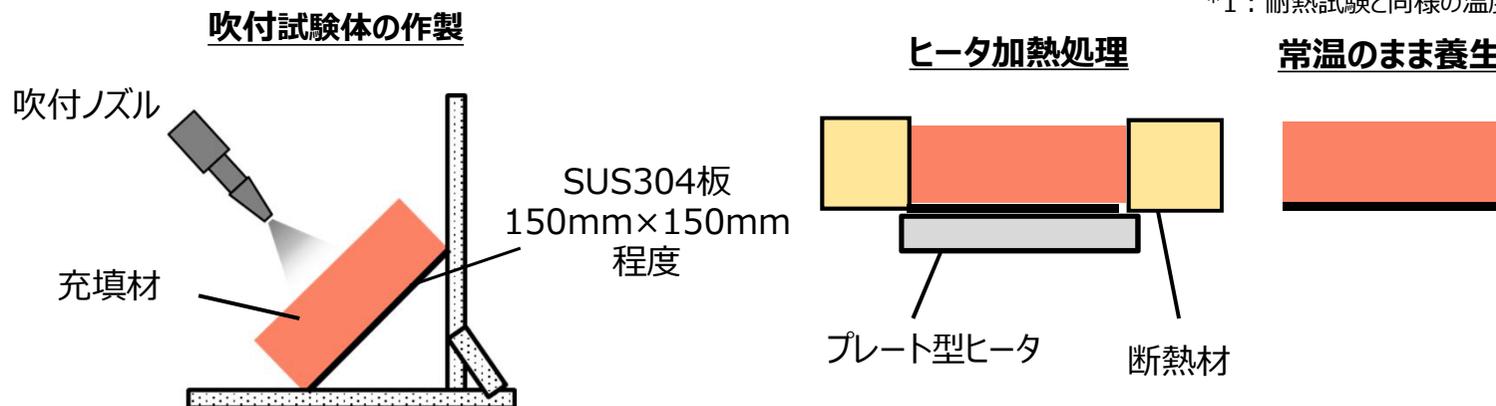
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (発熱体影響評価試験) (1/4)

【試験概要】

試験項目	発熱体内包試験
目的	充填材にて発熱体 (燃料デブリ) を固化した際の影響を確認する。
試験概要	面状ヒータを150mm×150mm程度のSUS304板に取り付け、吹付厚90mm程度の厚さで吹き付ける。吹付施工完了後、ヒータによる加熱を開始し、7日間で300℃*1まで昇温させ、7日間で室温まで降温し、外観および断面の観察を行う。 また、試料をXRDにて分析し、常温で養生した試料と比べて結晶構造の違い等を確認する。
パラメータ	—
評価項目	<ul style="list-style-type: none"> ・外観観察 (有害なひび割れの有無) ・切断面観察 (有害なひび割れの有無) ・XRD分析 (結晶構造の変化の有無)

*1：耐熱試験と同様の温度条件とする



6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (発熱体影響評価試験) (2/4)

【試験体の準備】

試験体作製：

SUS板の上に断熱材を配置して150×150×90mmの空隙を作り、そこに充填材を吹き付け施工し、硬化させた。周囲には100mmの断熱材を設置した。

試験方法：

ホットプレートの上に試験体を載せ、加熱試験を実施。

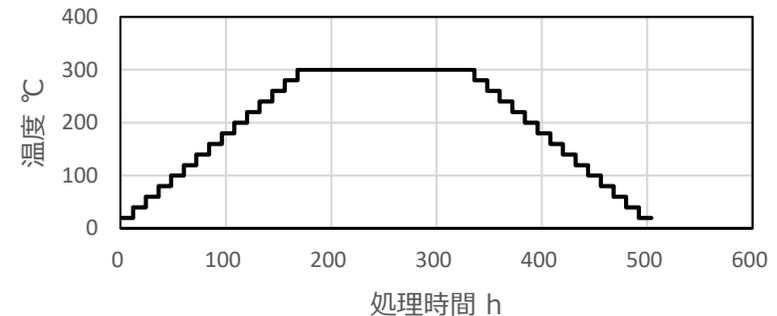
温度パターン：12時間ごとに20℃昇温→300℃にて168時間保持→12時間ごとに20℃降温



吹付施工前の様子



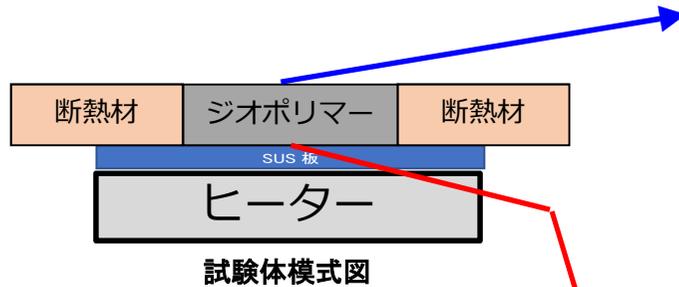
ホットプレートに設置した
試験体外観



6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (発熱体影響評価試験) (3/4)

【加熱後の外観の比較】



反対側の面については差が見られなかった。



加熱した試験体



常温養生試験体

加熱試験体のヒーター加熱面は常温養生した試験体と比べて若干の色の違いを確認した。
(淡いピンク色に変色)

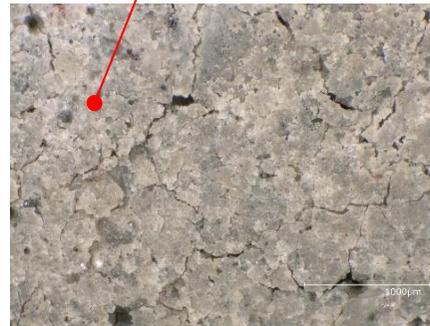
6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (発熱体影響評価試験) (4/4)

拡大観察結果



ヒーター加熱面 20倍

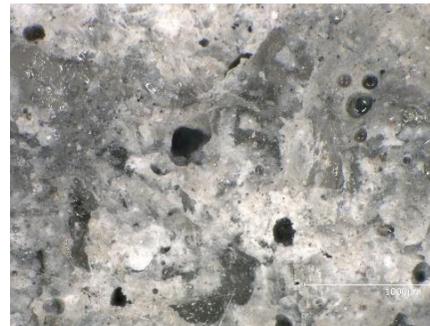


ヒーター加熱面 100倍

淡いピンク色に変色
細かいひびが確認

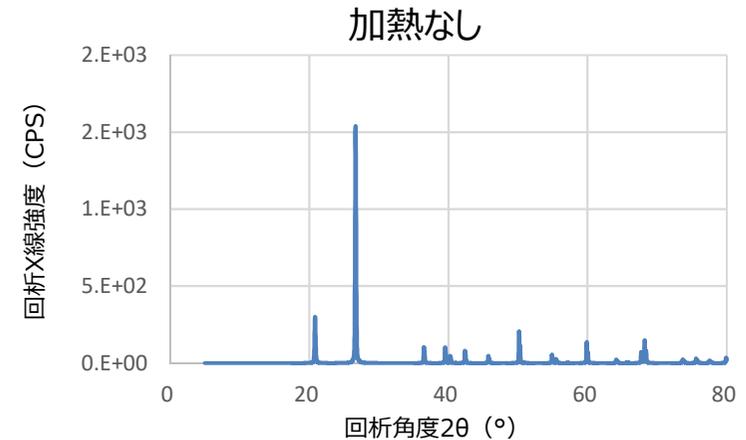
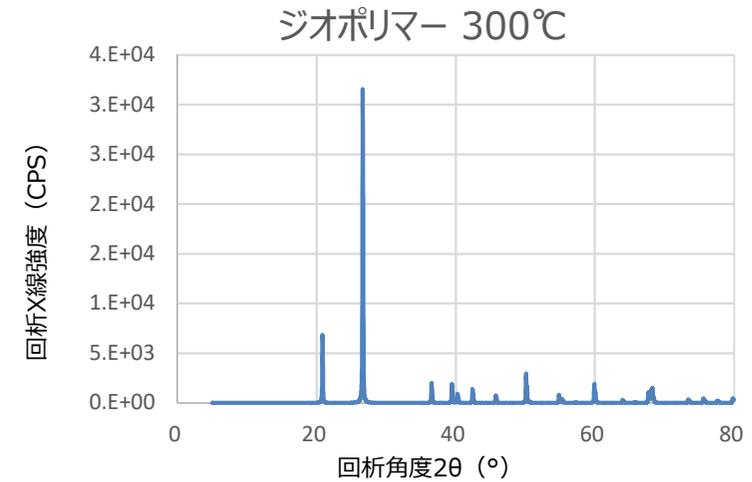


常温養生 20倍



常温養生 100倍

XRD分析結果



- ✓ 加熱した試験体には、変色やひび割れはみられたものの形状が維持できなくなるようなことはなかった。またXRDによる分析結果からも構造の変質等は確認されなかった。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (結果まとめ) (1/2)

➤ 分離試験および影響評価試験の試験概要および試験結果を下表に示す。

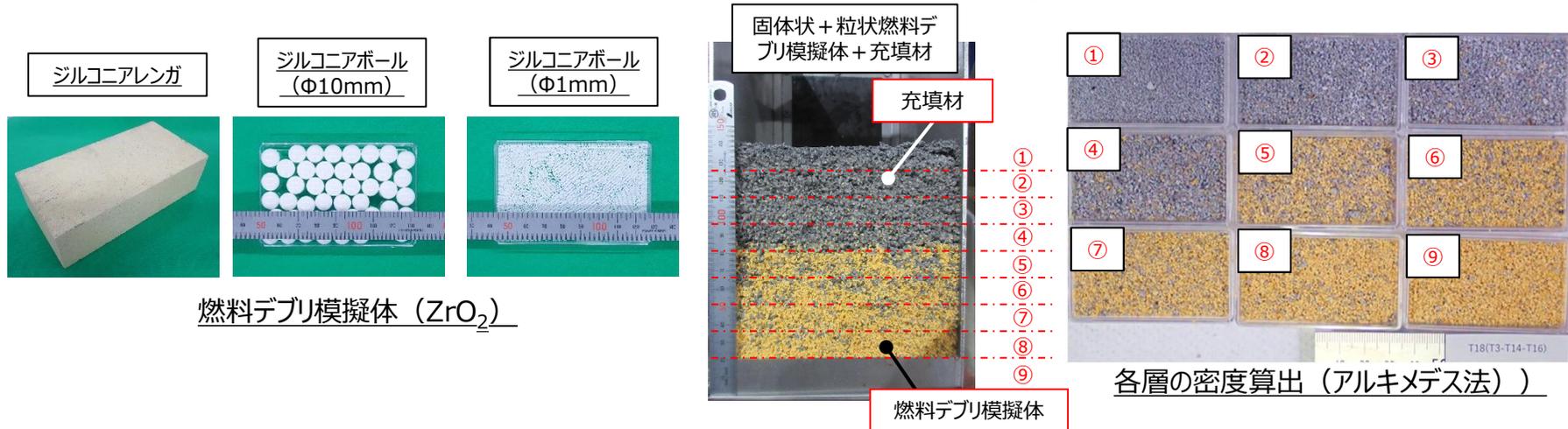
分離試験・影響評価試験 結果統括表

No	試験項目	試験概要	結果
1	物理分離試験	燃料デブリ模擬体 (ZrO ₂) と充填材 (ジオポリマー) の混合物 (1:1,1:9) を粉碎の後、ふるい分けし比重分離により模擬体の分離効率を確認・評価する。 試験体の主な組合せを以下に示す。 ・固体状燃料デブリ模擬体 + 充填材 ・粒状燃料デブリ模擬体(Φ10mm) + 充填材 ・粒状燃料デブリ模擬体(Φ1mm) + 充填材 【判定基準】 (目安として設定) ・燃料デブリ模擬体 : 90%分離	可 ・より細かく破碎することで分離効率が上がることを確認した。また、破碎前に模擬体を加熱(300℃)することでより細かく破碎される傾向であることを確認した。 ・固体状燃料デブリ模擬体を含む試験体では充填材を90%以上で分離ができる見通しを得た。 ・粒状燃料デブリ模擬体を含む試験体では模擬体サイズよりも大きい破碎粒子の場合には、模擬体と充填材が一部混在 (付着) していたことから分離効率の低減が確認された。
2	化学分離試験	充填材を硝酸に浸漬させた後、UO ₂ の溶解率1 (100%) に対するSi,Al,Na (充填材に含まれる主な元素) の溶解率を比較評価する。 (Si,Al,Naが溶け出さないことが望ましい。) 試験パラメータ*1を以下に示す。 ・試験体数 : 9体 ・硝酸濃度 (mol/L) : 3,6,8 ・溶液温度 (℃) : 35,65,95 【判定基準】 (目安として設定) UO ₂ の溶解率1に対するSi,Al,Naの溶解率が以下 ・1/100未満 : 良 ・1/100以上1/10未満 : 可 ・1/10以上 : 不可	不可 ・Si,Al,Naの溶解率はSi : 0.04以下,Al : 約0.50~0.65,Na : 0.94以上であった。 ・Al,Naの溶解率が適用の目安とした0.1を大きく超えているため、硝酸を用いた化学分離の現場適用は困難であると判断した。
3	影響度評価試験	燃料デブリ (発熱体) を固化した際の影響評価として、300℃まで加熱養生した固化体と常温養生した固化体にて比較・評価する。	可 ・加熱した固化体は変色や細かいひび割れが確認されたものの、形状が維持できなくなるような変形はなかった。

*1 : UO₂ペレットが全溶解する条件は溶解時間6.5h, 硝酸濃度5mol/L, 溶液温度95℃以上である (「再処理プロセス・化学ハンドブック第3版」(JAEA,2015) 参照)。本事業の試験では溶解時間8.0hで固定し、硝酸濃度を3種類、溶液温度を3種類で設定した。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

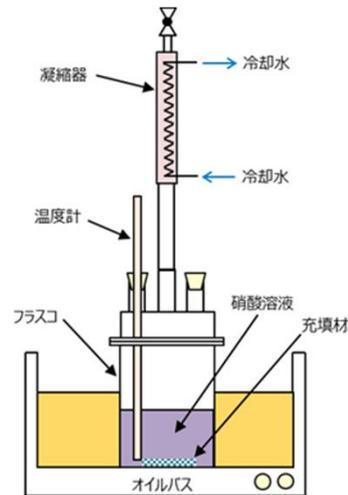
● 6.2.5 充填固化後の処理方法の検討 (結果まとめ) (2/2)



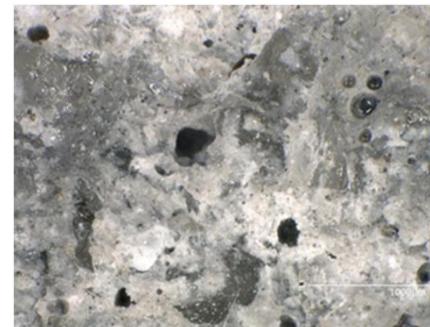
湿式比重分離試験



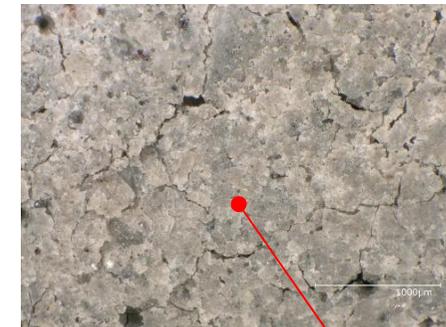
化学分離試験状況



常温養生試験体(100倍)



ヒータ加熱面(100倍)



淡いピンク色に変色
細かいひびびが確認

影響度評価試験

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
- 6. 充填安定化技術の開発**
 - 6.0 事業背景
 - 6.1 充填施工方法の検討および現場適用性検証（テーマA）
 - 6.2 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証（テーマB）
 - 6.3 現場適用性に向けた課題抽出および評価**
 - 6.3.1 現場適用性に向けた評価**
 - 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し**
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

◆ 6.3 現場適用性に向けた課題抽出および評価

● 6.3.1 現場適用性に向けた評価 (1/2)

- 前頁までに示した両検討テーマに対して、本事業の成果として各テーマの現場適用性を以下に評価する。

● テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証

- 実機を考慮した充填手順および装置構成の検討を行い、装置仕様の具体化を図った。
- また、炉心部・炉底部・炉底部開口部の部分模擬体を用いた遠隔施工要素試験を実施し、充填固化の成立を確認した。これらの成果より本事業にて概念設計が完了する見通しを得ることができた。今後、本成果を受けて下表に示すような現場適用に向けた課題を解決する必要がある。

機器等	No.	現場適用に向けた課題
充填材	1	充填材の配合 今後想定する圧送距離などが変わった場合には、充填材配合や装置構成に関する再検討が必要
装置	2	充填材の温度管理 充填材の長距離圧送時におけるホース内の固化・つまりを防止するために温度管理の検討が必要
	3	実機装置構成での成立性 本要素試験では作業アーム部以下のみの構成を模擬し試験を行ったため、今後実規模構成での成立性の確認が必要
	4	構成部品の耐放射線性 実機での具体的な作業時間の設定やその際の想定線量から構成部品の耐放射線性の検討が必要
リスク対応	5	炉内構造物の損傷状態 具体的な炉内構造物の損傷状態については現状不明な点が多いことから本工法適用前に内部調査を行い、炉内状況の把握が必要
	6	非常時回収 現場適用にあたってより具体的な非常時のパターンを検討し、対策の検討が必要

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.3.1 現場適用性に向けた評価 (2/2)

● テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証

- 設定した要求性能を満たす充填材の固化試験・性能評価試験（ラボ試験およびスケールアップ試験）を実施し RPV内の構造物や炉底開口部，ペDESTAL内，PCV底部（水中環境）等への適用の可能性が高い充填材を評価・選定した。
- 充填固化体の搬出後の処理方法等に関して物理分離試験および化学分離試験を実施し，現場適用性のある分離・分別手法の効果について評価した。
- これらの成果より本事業にて概念設計が完了する見通しを得ることができた。
- 今後，本成果を受けて下表に示すような現場適用に向けた課題を解決する必要がある。

機器等	No.	現場適用に向けた課題
充填材	1	充填材の配合 今後想定する炉内状況など変わった場合には，充填材配合や装置構成に関する再検討が必要
装置	2	充填材の品質管理 乾式吹付工法の特徴として末端側での充填材の品質を保つための必要なデータの取得が必要
	3	実機装置構成での成立性 スケールアップ試験では充填対象における固化状況の把握を主に行ったため，遠隔操作による充填安定化の成立および実規模構成での成立を確認が必要
	4	構成部品の耐放射線性 実機での具体的な作業時間の設定やその際の想定線量から構成部品の耐放射線性の検討が必要
リスク対応	5	炉内構造物の損傷状態 具体的な炉内構造物の損傷状態については現状不明な点が多いことから本工法適用前に内部調査を行い，炉内状況の把握が必要
	6	非常時回収 現場適用にあたってより具体的な非常時のパターンを検討し，必要な対策の検討が必要

6. 充填安定化技術の開発

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し（技術課題の区分）

- ここまで充填安定化技術の開発として2つの検討テーマの成果を報告した。各検討テーマの各種要素試験結果を踏まえ、以降に現場適用に向けた課題ならびに留意点を示す。
- 各検討テーマの主たる課題について、以下の通り **充填材料・配合**、**充填装置**、**遠隔装置**の3つの大区分と工程ステップによる4つの中区分で整理・抽出し次頁の技術課題一覧表を作成した。
- 重要度の高い項目については技術課題ピックアップとして抜粋し、現場適用に向けた留意点の詳細説明を追加した。

技術課題の区分表

大区分（装置）	中区分（工程）
1. 充填材料・配合*1 ➤ 充填材の選定・配合およびアレンジによる変更	1. 現場確認 ➤ 対象・周囲の情報取得，調査
2. 充填装置 ➤ 圧縮機・ホース・ノズルなどの充填材の供給装置から現場施工までの装置・系統	2. 設備の設置・搬出入（含む撤去） ➤ 機器類，ホース系統などの設置／撤去
3. 遠隔装置 ➤ 作業アーム・ロボットなどの操作系統に関する装置 ➤ カメラ・照明・センサなど検出系統に関する装置・系統	3. 施工（含む前後確認） ➤ 現場充填，型枠設置，施工および前後確認など
	4. その他（保守・救援等） ➤ 保守，修理，救援などのトラブル対応時

*1:大区分「1.充填材料・配合」については、中区分（工程）を対象外とする。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

Decom.Tech

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマA) (1/4)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策 段階
A1. 充填 材料・配合	—	A1-1-1	圧送性・クラック発生抑制の両立	本事業で長距離圧送には粘性の低い充填材の基本配合が必要なことが試験で判明した。一方で型枠充填の固化にはクラックの発生の低減および固化性の観点から粘性の高い充填材の基本配合が必要となることが評価されたことから、適用対象の条件・特性に合わせて粘性・クラック発生抑制を考慮した充填材料(細骨材・珪砂)の配合調整が必要。 → 施工対象・施工規模の決定後(耐荷重も考慮)に配合変更の詳細検討を実施。	TRL4
		A1-1-2	構造体内包時の固化および発熱体内包時における固化の成立	本事業で得られた高温条件とクラック発生領域の評価から施工条件へのフィードバック(熱影響部を包含する充填量とするなど)が必要。 → 本事業の成果を受けて、水中・水冷条件下の充填可能性の拡大や温度条件による充填箇所の限定化などを検討。	TRL4,5
		A1-1-3	可使用時間6時間での固化成立	大規模充填を考慮した可使用時間6時間での固化成立に関する充填材料の配合開発が必要。 → 大規模充填の条件ごとの固化特性を検討し、適用箇所の拡大を図る。	TRL4
A2. 充填 装置	1. 現場確認	A2-1-1	充填の準備に必要な炉内情報の確認	施工・設置のための情報取得が必要。 → 取り出し工法および内部調査などの進捗により判明した情報を受けて、具体的対策の検討を実施。	TRL5
	2. 設備の設置・搬出入 (含む撤去)	A2-2-1	充填用ホース・ケーブルマネジメントおよび接続	ホース曲げ・巻取箇所などを考慮したアクセスルートの構築および接続が必要。 → 充填装置の仕様の詳細化によるホース仕様や可動部仕様を受けて装置の具体化を検討。	TRL4,5
		A2-2-2	ケーブルマネジメントを含んだ遠隔施工方法の検討	充填用作業容器の下降・上昇に同期した各種接続ライン送り出し・巻き取り方法の確立が必要。 → 充填装置の仕様決定によるホース系統や可動部追従仕様の詳細化を受けて装置の具体化を検討。	TRL4,5

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

Decom.Tech

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマA) (2/4)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点/対策方針	対策 段階
A2. 充填 装置	3. 施工 (含む前後 確認)	A2-3-1	圧送性・クラック発生 抑制の両立	圧送性の考慮 (= 粘性を下げる) およびクラック発生の抑制を両立するための充填材料 (細骨材・珪砂) の配合の確立が必要。 → 配合変更による対応(1-1-1)を主とするが、圧送仕様(圧力・口径)などの変更による対策も検討。	TRL4
		A2-3-2	充填装置の仕様決 定	充填材料供給装置の検討および配置設定などの開発・検討が必要。 → 充填材仕様や型枠設置などの条件詳細化に合わせた圧送装置・システム・ノズル・継ぎ手などの装置仕様を検討。	TRL4
		A2-3-3	打ち継ぎ間隔24Hr 以上での固化成立	充填材料の発熱および外部環境の影響などを考慮した供給装置の選定および改良に関するさらなる検討が必要。 → 一体搬出工法の仕様要求や炉内環境などにより、打ち継ぎ一体固化への要求を達成する方法を検討。	TRL4
		A2-3-4	型枠 (堰) の仕様 決定	本事業の試験結果より布製型枠ならび補助シール(溝・隙間)の改善が必要 → 充填対象と炉側との隙間等の取り合い形状・固化特性の評価結果から、裕度・設置の精度等の要求を満足する型枠仕様の詳細検討を実施。	TRL4
		A2-3-5	開口部への充填施 工方法	本事業の試験結果としては施工および充填閉止が可能であることを確認した。 → 現場適用に向けて対象に合わせた施工方法および型枠仕様の検討が必要。具体的には開口閉止に要求される目的や程度 (圧力や荷重) によって施工方法や型枠仕様へ反映することが必要。	TRL4
		A2-3-6	長距離圧送性の成 立	本事業により長距離圧送には粘性の低い充填材の基本配合が必要であることが判明した。一方で型枠充填の固化にはクラックの発生の低減および固化性の観点から粘性の高い充填材の基本配合が必要となることが評価されたことから、実規模想定における長距離圧送に関する検討・開発が必要。 → ポンプ圧力・ホース系などの装置仕様による適正化の検討およびバッチ方式またはバケット方式 (容器搬入) など圧送方式の変更などを検討。	TRL4

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表: テーマA) (3/4)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点/対策方針	対策 段階
A2. 充填 装置	4. その他 (保守・ 救援等)	A2-4-1	PCV内圧上昇	緊急停止が機能可能となるよう、システムとしての機器構成・機器配置・人員配置などの検討と開発が必要。 →内圧上昇を緩和するための装置の小型化・施工時間の管理などの工法の検討および異常検出により装置を停止させるシステムを検討。	TRL4,5
		A2-4-2	充填用ホース継手の外れ, ホースの破損	当該事象の特定方法や継手部の回収・再接続方法に関する装置構成など検討が必要。 →異常発生時の挙動や検出方法を検討し、装置を停止させる運用を検討。機器仕様および接手の再接続性について検討。	TRL4,5
		A2-4-3	ホース・ノズル内の詰まり	充填施工後の具体的なホース・ノズルの清掃方法の確立およびホース・ノズルの交換に関する検討が必要。 →異常発生時の挙動や検出方法の条件により、装置を停止させる運用を検討。ホースの仕様および回収性について検討。	TRL4,5
		A2-4-4	ホースマネジメントシステムの故障	ホース・ケーブルなどの可動部・追従部トラブル発生時における検討が必要。 →揚重機または遠隔ロボットなどによる当該機器の回収・補修に関して検討。	TRL4,5
A3. 遠隔 装置	1. 現場確認	A3-1-1	遠隔操作の準備に必要な炉内情報の確認	施工・設置のための情報取得が必要。 →取り出し工法および内部調査などの進捗により判明した情報を受けて、具体的対策を検討。	TRL5
	2. 設備の設置・搬出入 (含む 撤去)	A3-2-1	充填用ホース・ケーブルマネジメントおよび接続	ホース曲げや巻き取り箇所などを考慮したアクセスルートの構築および接続が必要。 →充填装置の仕様の詳細化によるホース仕様や可動部仕様を受けて装置の具体化を検討。	TRL4,5
		A3-2-2	作業アーム・カメラ・照明等のコネクタ接続	機材の炉内持込後の系統接続の成立性検討が必要。 →機器仕様の詳細化および遠隔動作による各種ラインのコネクタ接続・取り外し方法の確立を検討。	TRL4
		A3-2-3	ケーブルマネジメントを含んだ遠隔施工方法の検討	充填用作業容器の下降・上昇に同期した各種接続ライン送り出し・巻き取り方法の確立が必要。 →充填装置の仕様決定によるホース系統や可動部追従仕様の詳細化を受けて装置の具体化を検討。	TRL4,5

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

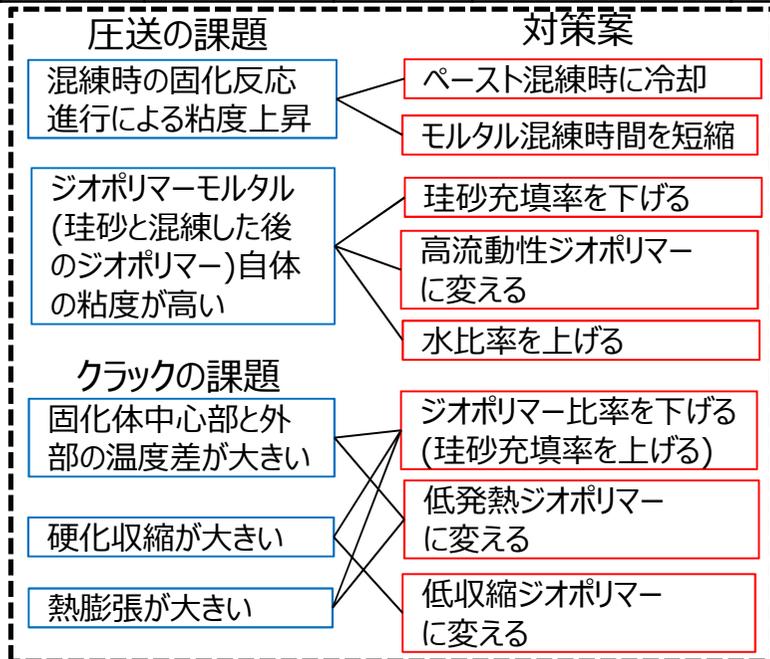
● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマA) (4/4)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策 段階
A3.遠隔 装置	2.設備の設 置・搬出入 (含む撤 去)	A3-2-4	各種作業装置 (プラットフォーム等) の搬出入	充填用作業容器・ツールボックス・ラック・落下防止治具等の搬出入および回収に関する検討が必要。 →各種装置の仕様の選定時に、搬入出の条件を加味した機能・外形等の仕様を検討。	TRL4
	3.施工 (含む前後 確認)	A3-3-1	型枠の設置	遠隔による型枠の設置および設置状況の視認に関する検討が必要。 →本事業の試験結果による設置性と作業監視の見通しに基づき、遠隔による型枠設置の実現の具体化を検討。	TRL4
		A3-3-2	充填用ホースの操作・誘導	本事業による遠隔施工性の操作精度などの評価を受けて、作業アームおよびロボットによる充填施工方法の確立が必要。 →本事業の試験結果より、装置仕様の見直しや施工の速度・可動域などを検討。	TRL4
		A3-3-3	施工完了状態の判断	遠隔操作における、画像確認などによる状態監視が必要。 →カメラなどによる施工完了状態の識別を検討。	TRL4
		A3-3-4	現場の視認性・照度・計測の 成立性	各種検出システムの選定・配置・固定方法に関する検討が必要。 →炉内環境に対応した施工確認の成立を検討。	TRL4
		A3-4-1	充填材供給アームおよび充填 用ホースの洗浄方法・再利用 性の確認	遠隔による装置の再利用および回収・交換に関する開発が必要。 →施工による充填材付着や装置劣化に対し運用・洗浄・交換などによる作業の継続可能な時間等を検討。	TRL4
	4.その他 (保守・ 救援等)	A3-4-2	ホースマネジメントシステムの故 障	揚重機または遠隔ロボットなどによる当該機器の回収・補修に関する 検討が必要。 →揚重機または遠隔ロボットなどによる当該機器の回収・補修につ いて検討。	TRL4,5
		A3-4-3	ロボットアーム故障時のライン撤 去	故障ロボットの回収および追加ロボットアームの設置・配置などの検討 が必要。 →本事業における知見を活かして異常時の対応・装置仕様の見直 しを検討。	TRL4,5

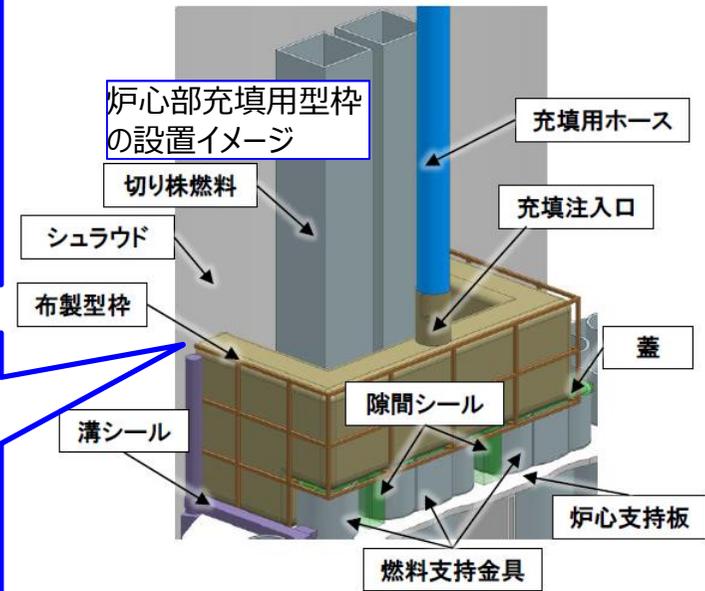
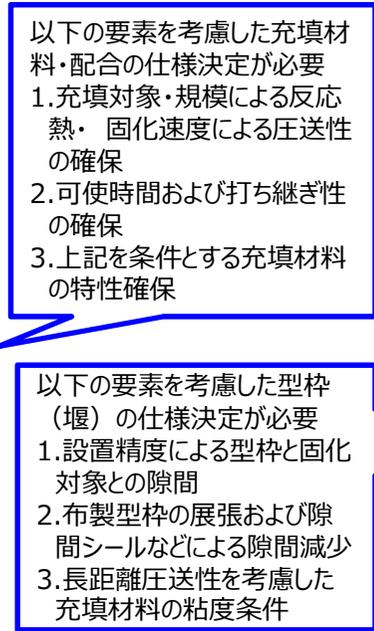
6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題ピックアップ: テーマA) (1/2)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	現場適用に向けた留意点/対策方針	対策 段階
A1. 充填 材料・配合	—	A1-1-1	圧送性・クラック発生抑制の両立	本事業で長距離圧送には粘性の低い充填材の基本配合が必要ことが試験で判明した。一方で型枠充填の固化にはクラックの発生の低減および固化性の観点から粘性の高い充填材の基本配合が必要となることが評価されたことから、適用対象の条件・特性に合わせて粘性・クラック発生抑制を考慮した充填材料(細骨材・珪砂)の配合調整が必要。 → 施工対象・施工規模の決定後(耐荷重も考慮)に配合変更の詳細検討を実施。	TRL4
A2. 充填 装置	3. 施工(含む 前後確認)	A2-3-4	型枠(堰)の仕様 決定	本事業の試験結果より布製型枠ならび補助シール(溝・隙間)の改善が必要 → 充填対象と炉側との隙間等の取り合い形状・固化特性の評価結果から、裕度・設置の精度等の要求を満足する型枠仕様の詳細検討を実施。	TRL4



A1-1-1 圧送性・クラック発生抑制の両立



A2-3-4 型枠(堰)の仕様決定

6. 充填安定化技術の開発 (テーマA)

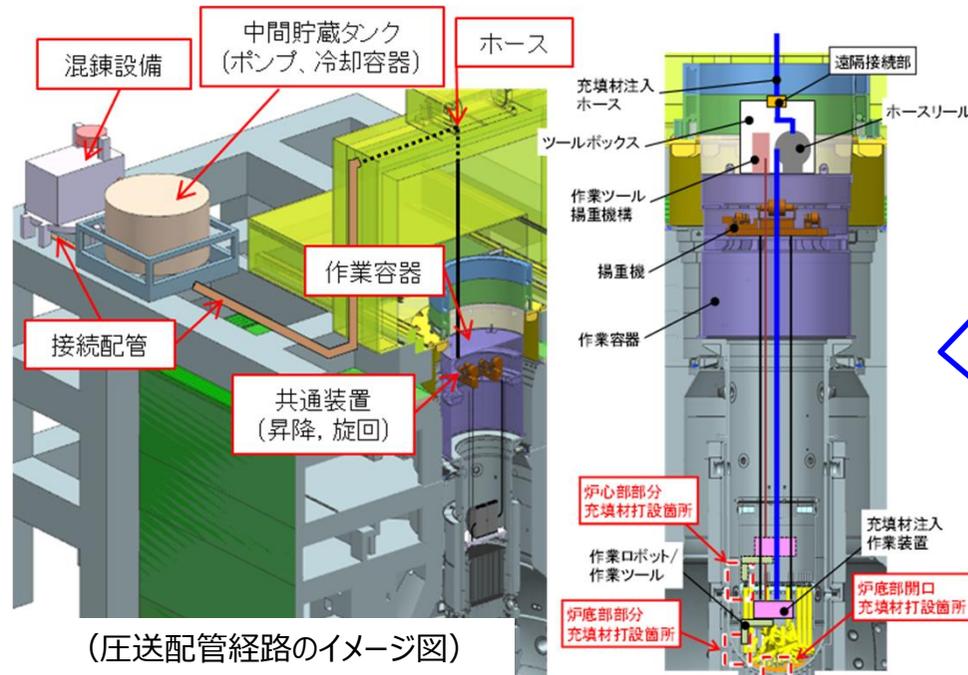
● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題ピックアップ: テーマA) (2/2)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	現場適用に向けた留意点/対策方針	対策 段階
A2. 充填 装置	3. 施工 (含む 前後確認)	A2-3-6	長距離圧送性の成 立	本事業により長距離圧送には粘性の低い充填材の基本配合が必要である。一方で型枠充填の固化にはクラックの発生の低減および固化性の観点から粘性の高い充填材の基本配合が必要となることが評価されたことから、実規模想定における長距離圧送に関する検討・開発が必要。 →ポンプ圧力・ホース系などの装置仕様による適正化の検討およびバッチ方式またはバケット方式 (容器搬入) など圧送方式の変更などを検討。	TRL4
A3. 遠隔 装置	3. 施工 (含む 前後確認)	A3-3-2	充填用ホースの操 作・誘導	本事業による遠隔施工性の操作精度などの評価を受けて、作業アームおよびロボットによる充填施工方法の確立が必要。 →本事業の試験結果より、装置仕様の見直しや施工の速度・可動域などを検討。	TRL4

前提となる大型一体搬出工法やユーティリティおよび炉内環境の前提に基づき、左イメージ図より以下の要素の検討が必要。

1. 配置, 系統の前提の検討
 2. 揚程・配管抵抗などの圧損に対応したポンプ元圧・吐出速度の検討
 3. 配管長, 配管径の仕様検討
- 注記: 長距離圧送性が成立しない場合の他方式適用の検討(バッチ方式, バケット方式など)

A2-3-6 長距離圧送性の成立



(圧送配管経路のイメージ図)

©Decom.Tech

前提となる大型一体搬出工法やユーティリティおよび炉内環境の前提に基づき、左イメージ図の圧送配管の系統についての経路決定および敷設方法の検討が必要

A3-3-2 充填用ホース の操作・誘導

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマB) (1/5)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策 段階
B1. 充填 材料・配合	—	B1-1-1	充填材料の更なる組成開発 ・性能向上	施工要求の変更などに対応した流動性、付着性および強度の向上を目的とした開発が必要。 →本事業の成果を受け、充填材の用途に適した基本配合のアレンジを検討。	TRL4
		B1-1-2	使用目的・要求機能に応じた 組成開発	再臨界リスク低減や遮へい効果の向上などの要求機能の追加を目的とした組成開発が必要。(ホウ素、ガドリニウム、鉄粉の添加など) →本事業の成果を受け、充填材の用途に適した配合調整を検討。	TRL4
		B1-1-3	ダスト飛散の抑制	本事業による吹付時のダスト飛散状況およびの視認性の施工性評価を受けて、ダスト飛散の抑制および吹付時の視認性向上を目的に充填材の配合や原材料の前処理による改善などが必要。 →施工装置や施工方法によるダスト抑制対策の他に、必要に応じて充填材料の配合調整・改善による対策を検討。	TRL4
		B1-1-4	連続運転時のノズル閉塞リス ク対策	連続運転時の吹付挙動の確認、ノズル洗浄運転方法の検討、ノズル内面の材質変更・コーティングなどの開発・検討が必要。 →施工方法の高度化の過程で、ノズル等の劣化寿命の延長、装置改善および洗浄対策などを検討。	TRL4
		B1-1-5	ノズルの小型化・軽量化に適 した組成・配合の再設定	ノズルの小型・軽量化に適合した充填材料の更なる検討が必要。 →炉内への適用性を向上させるため、充填材料の配合調整を検討。	TRL4
B2. 充填 装置	1. 現場確認	B2-1-1	アクセスルートの設定	ホース曲げや巻き取り箇所などを考慮したアクセスルートの構築が必要 →充填の準備に必要な炉内情報などにより、系統敷設ルートおよび敷設・設置の方法を検討。	TRL4,5
		B2-1-2	ホースマネジメントシステムの 構築	地這いホースの整線などの遠隔によるホースマネジメントシステムの構築が必要。 →系統敷設の仕様に合わせて、可動部への追従性を考慮したホースマネジメントシステムの開発を検討。	TRL4,5

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマB) (2/5)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策 段階
B2. 充填 装置	1. 現場確認	B2-1-3	ケーブルマネジメントを含んだ遠隔施工方法の検討	プラットフォームの下降・上昇に同期した各種接続ライン送り出し・巻き取り方法の確立が必要。 →装置仕様に適合した設置・撤去の成立性や対応装置の仕様を検討。	TRL4,5
	2. 設備の設置・搬出入 (含む撤去)	B2-2-1	バウンダリ内で遠隔での機器の固定, 設置箇所の健全性	作業アームやロボットなどの設置および固定方法の検討が必要。 →充填の準備に必要な炉内情報や装置仕様の決定に際して遠隔設置性を検討。	TRL4,5
		B2-2-2	各種ラインのコネクタ接続・取り外し	遠隔動作による各種ラインのコネクタ接続・取り外し方法の確立が必要 →装置・システムの仕様の決定に際して, 遠隔による接続・取り外し, 再接続などの施工性を検討。	TRL4,5
	3. 施工 (含む 前後確認)	B2-3-1	ダスト飛散の抑制	ダスト飛散の抑制および吹付時の視認性向上を目的に充填材の混合性向上に向けたノズルの改善などが必要。 →施工装置や施工方法によるダスト抑制対策を検討。	TRL4
		B2-3-2	連続運転時のノズル閉塞リスク対策	連続運転時の吹付挙動の確認, ノズル洗浄運転方法の検討, ノズル内面の材質変更・コーティングなどの開発・検討が必要。 →ノズルの長寿命化のための装置開発を実施する外, 交換時の遠隔操作性や回収方法を検討。	TRL4
		B2-3-3	吹付ノズル・ホース等の小型・軽量化	本事業の既存の市販機器を用いた施工試験を受けて, 遠隔施工性の向上を目的に吹付ノズルやホース等の小型化および軽量化の開発・検討が必要。 →炉内の設置性・施工性を向上させるために装置の小型化・軽量化を検討。	TRL4
	B2-3-4	コンプレッサ類の原料供給装置の選定・配置や供給方法の確立	外部環境の影響などを考慮した, 供給装置の選定および配置に関するさらなる検討が必要。 →施工前提の炉内外の環境およびバウンダリ条件に基づく設置位置の検討と操作性や異常時の緊急停止などの運用・制御を考慮した仕様を検討。	TRL4	

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマB) (3/5)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策 段階
B2. 充填 装置	3. 施工 (含む 前後確認)	B2-3-5	人手作業に関する機能分担の 詳細化	手動作業・現場盤作業・中央制御盤作業の機能分担の詳細化による供給方法の確立が必要。 →充填施工の発停・操作などの判断などに必要な外部情報との連絡や自動停止の必要性について検討。	TRL5
	4. その他 (保 守・救援等)	B2-4-1	ホースおよびノズルの清掃方法の 検討	吹付施工後の具体的なホースおよびノズルの清掃方法の確立が必要。 →充填材の付着や摩耗などによるノズル寿命を評価し、清掃などの延命対策について検討。	TRL4
		B2-4-2	PCV内圧上昇	緊急停止が機能可能となるよう、システムとしての機器構成・機器配置・人員配置などの検討と開発が必要。 →内圧上昇を緩和するための装置の小型化・施工時間の管理などの工法の検討および異常検出により装置を停止させるシステムを検討。	TRL4,5
		B2-4-3	充填用ホース継手の外れ、ホースの 破損	当該事象部の特定方法や継手部の回収・再接続方法に関する装置構成など検討が必要。 →異常発生時の挙動や検出方法から装置を停止させる方法を検討。継手の再接続性について機器仕様と遠隔性を検討。	TRL4,5
		B2-4-4	ホース・ノズル内の詰まり	吹付施工後の具体的なホースおよびノズルの清掃方法の確立またはホース・ノズルの交換に関する検討が必要。 →異常発生時の挙動や検出方法を検討し、装置を停止させる方法を検討。ホースの回収性について検討。	TRL4,5
		B2-4-5	ホースマネジメントシステムの故障	ホース・ケーブルなどの可動部・追従部トラブル発生時における検討が必要。 →揚重機または遠隔ロボットなどによる当該機器の回収・補修に関して検討。	TRL4,5

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマB) (4/5)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策段階
B3.遠隔装置	1.現場確認	B3-1-1	アクセスルートの設定	ホース曲げや巻き取り箇所などを考慮したアクセスルートの構築が必要。 →充填の準備に必要な炉内情報などにより、系統敷設ルートおよび敷設・設置の方法を検討。	TRL4,5
		B3-1-2	ホースマネジメントシステムの構築	地這いホースの整線などの遠隔によるホースマネジメントシステムの構築が必要。 →系統敷設の仕様に合わせて、可動部への追従性を考慮したホースマネジメントシステムの開発を検討。	TRL4,5
		B3-1-3	ケーブルマネジメントを含んだ遠隔施工方法の検討	プラットフォームの下降・上昇に同期した各種接続ライン送り出し・巻き取り方法の確立が必要。 →装置仕様に適合した設置・撤去の成立性や対応装置の仕様を検討。	TRL4,5
	2.設備の設置・搬出入 (含む撤去)	B3-2-1	バウンダリ内で遠隔での機器の固定、設置箇所の健全性	作業アームやロボットなどの設置および固定方法の検討が必要。 →充填の準備に必要な炉内情報や装置仕様の決定に際して遠隔設置性を検討。	TRL4,5
		B3-2-2	各種ラインのコネクタ接続・取り外し	遠隔動作による各種ラインのコネクタ接続・取り外し方法の確立が必要。 →装置・系統の仕様の決定に際して、遠隔による接続・取り外し、再接続などの施工性を検討。	TRL4,5
	3.施工(含む前後確認)	B3-3-1	照明・カメラによる視認性確保	照明・カメラの配置に関わる検討が必要。 →施工前・中・後の状態確認のため、視認性の確保または代替手段を検討。	TRL4
		B3-3-2	対象との距離の確認方法の確立	施工前に対象との距離の確認が必要 →対象との距離を検知可能な視界の確保・センサ情報などによる情報取得について検討。(対象との距離の確認、機器の衝突防止)	TRL4

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

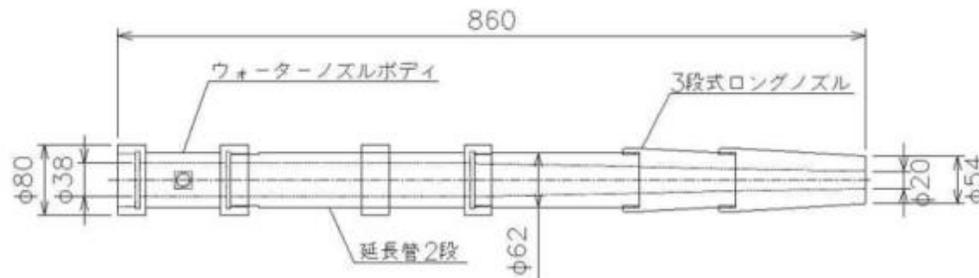
● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題一覧表：テーマB) (5/5)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点／対策方針	対策 段階
B3.遠 隔装置	3.施工 (含む前 後確認)	B3-3-3	遠隔での適切な吹付方向・距離・速度等の設定	作業アームおよびロボットによる充填施工方法の確立が必要。作業アームおよびロボットによる充填施工方法の確立が必要。 →本事業の成果を受けて、遠隔による施工方法の開発を検討。	TRL4
		B3-3-4	ノズルの遠隔操作/追従	本事業で得られたノズルの振り幅または速度などの条件より、遠隔機器(ロボット等)を用いた現場施工性の検証試験が必要。 →視界悪化などの前提も考慮した遠隔に必要な操作について検討。	TRL4
		B3-3-5	施工完了の判定方法	本事業の吹付施工後の付着状況などの評価を受けて、遠隔操作に適用性のある充填状態の判別方法の開発が必要。 →本事業の成果を受け、施工完了の判断基準や検知可能な視界の確保・センサ情報などによる情報取得について検討。 (施工箇所の確認, 機器の衝突防止)	TRL4
	4.その他(保 守・救援等)	B3-4-1	保守メンテナンス方法の確立	各種アタッチメント(ノズル, カメラ, 照明)などの交換や回収に関する検討が必要。 →長期消耗が見込まれる装置類について、寿命・劣化の評価と交換・回収方法および機器仕様への反映を検討。	TRL4,5
		B3-4-2	ホースマネジメントシステムの故障	可動部・追従部のトラブル時の対応の検討が必要。 →揚重機または遠隔ロボットなどによる当該機器の回収・補修について検討。	TRL4,5
		B3-4-3	ロボットアーム故障時のライン撤去	故障ロボットの回収および追加ロボットアームの設置・配置などの検討が必要。 →本事業における知見を活かして異常時の対応・装置仕様の見直しについての検討。	TRL4,5

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題ピックアップ: テーマB) (1/2)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	現場適用に向けた留意点/対策方針	対策 段階
B1. 充填 材料・配合	—	B1-1-3	ダスト飛散の抑制	本事業による吹付時のダスト飛散状況およびの視認性の施工性評価を受けて、ダスト飛散の抑制および吹付時の視認性向上を目的に充填材の配合や原材料の前処理による改善などが必要。 → 施工装置や施工方法によるダスト抑制対策の他に、必要に応じて充填材料の配合調整・改善による対策を検討。	TRL4
B2. 充填 装置	3. 施工 (含む 前後確認)	B2-3-3	吹付ノズル・ホース等の小型・軽量化	本事業の既存の市販機器を用いた施工試験を受けて、遠隔施工性の向上を目的に吹付ノズルやホース等の小型化および軽量化の開発・検討が必要。 → 炉内の設置性・施工性を向上させるために装置の小型化・軽量化を検討。	TRL4



B2-3-3 吹付ノズル・ホース等の小型・軽量化

©Decom.Tech

既存の市販機器を用いた施工から、炉内施工に最適化された専用装置の開発を検討し、施工性の向上を進める。

6. 充填安定化技術の開発 (テーマB)

Decom.Tech

● 6.3.2 現場適用性に向けた課題出し (技術課題ピックアップ: テーマB) (2/2)

大区分 (装置)	中区分 (工程)	小区分 (課題)	主たる技術課題	現場適用に向けた留意点/対策方針	対策 段階
B3.遠隔 装置	3.施工 (含む 前後確認)	B3-3-4	ノズルの遠隔操作/追従	本事業で得られたノズルの振り幅または速度などの条件より, 遠隔機器 (ロボット等) を用いた現場施工性の検証試験が必要。 →視界悪化などの前提も考慮した遠隔に必要な操作について検討。	TRL4
		B3-3-5	施工完了の判定方法	本事業の吹付施工後の付着状況などの評価を受けて, 遠隔操作に適用性のある充填状態の判別方法の開発が必要。 →本事業の成果を受け, 施工完了の判断基準や検知可能な視界の確保・センサ情報などによる情報取得について検討。(施工箇所の確認, 機器の衝突防止)	TRL4

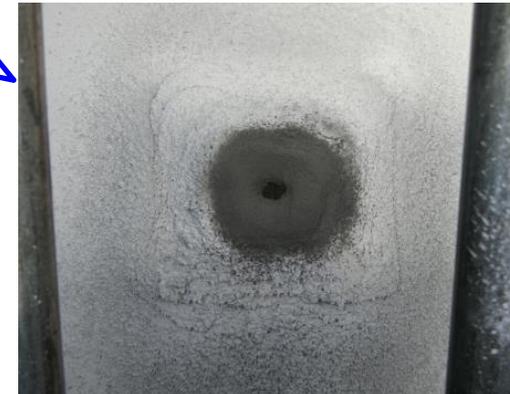
上写真: 開口閉止の施工途中状態。
下写真: 開口閉止の施工完了状態。
遠隔施工による視認やセンサによる充填
状態の判定方法を検討する。



B3-3-4 ノズルの遠隔操作/追従

現状人手による現場施工
のため, 遠隔操作による吹
付施工の成立性を検討。

©Decom.Tech



B3-3-5 施工完了の判定方法

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
- 7. 加工時落下対策技術の開発**
 - 7.1 事業背景**
 - 7.2 実施概要**
 - 7.3 成果報告
 - 7.4 まとめ
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

7. 加工時落下対策技術の開発

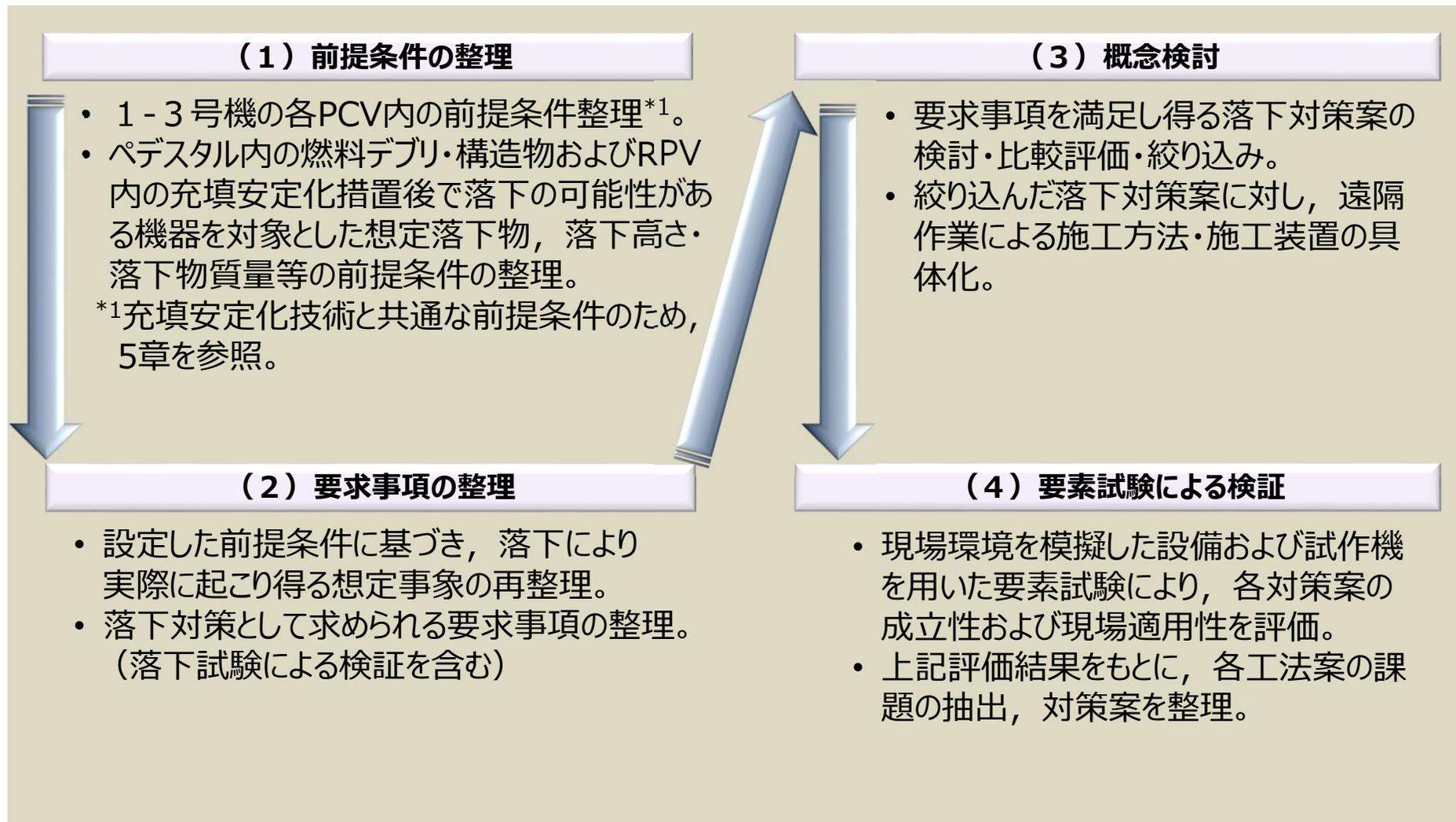
◆ 7.1. 事業背景

- 気中取り出し工法について、燃料デブリ加工時の破片や振動等によりCRDハウジング等の重量物がペDESTAL底部へ落下する可能性がある。このため、落下による再臨界防止およびダスト飛散抑制、機器損傷等防止の観点から落下対策を実施する。
- 本事業では、加工時落下対策の実機適用に向けて、1 - 3号機に応じた想定落下物の条件を設定した上で、再臨界防止およびダスト飛散抑制、機器損傷等防止を目的に、対応可能な落下対策案を検討する。また、安全性、遠隔作業の確実性・容易性・保守性、頑強性、効果（性能）等の観点から対策案を評価・選定し、選定した対策案について、模擬試験体を用いた要素試験を実施し、成立性の検証と現場適用性を評価する。

7. 加工時落下対策技術の開発

◆ 7.2. 実施概要

➤ 「実施項目②：加工時落下対策技術の開発」の開発フローを以下に示す。詳細は次頁以降に示す。



開発フロー（実施項目②：加工時落下対策技術の開発）

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
- 7. 加工時落下対策技術の開発**
 - 7.1 事業背景
 - 7.2 実施概要
 - 7.3 成果内容**
 - 7.3.1 前提条件の整理**
 - 7.3.2 要求事項の整理**
 - 7.3.3 概念検討**
 - 7.3.4 要素試験による検証**
 - 7.3.5 試験結果からの課題整理**
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

7. 加工時落下対策技術の開発

◆ 7.3 成果内容

● 7.3.1 前提条件の整理 (1/2)

本項では、加工時落下対策技術の前提条件を設定した。

- 1-3号機におけるPCV・RPV内の環境条件，ペDESTAL内の燃料デブリ，構造物の状態を整理し，前提条件として設定した。（共通の前提条件の詳細は5章を参照）
- RPV内部調査結果よりペDESTAL内への落下が想定される主な構造物を選定し，「寸法」「重量」「材質」「落下高さ」のデータから，燃料デブリに対する影響を「落下エネルギー」の観点で整理した。整理結果を下表に示す。

各想定落下物の落下エネルギーの一覧(主な落下物)*1

ID.	対象号機	想定落下物				落下高さ*2 h [m]	落下エネルギー (m_1+m_2)gh [J]
		品目	員数	重量 m_1 [kg]	想定落下物に付帯する燃料デブリ量 m_2 [kg]		
1	1号機	CRDハウジング	1	510	185	5.0	3.41 E+04
2		ICMハウジング	1	70	—	5.0	3.43 E+03
3		CRDハウジング支持金具ブロック	1	20	—	5.0	9.80 E+02
4	2号機	上部タイプレート	1	2	—	19.0	3.72 E+02
5		スプリング状落下物	1	0.05	—	19.0	9.31 E+00
6	3号機	CRガイドチューブ (インデックスチューブ含む)	1	160	—	10.0	1.57 E+04
7		制御棒相当 (落下防止リミッタ)	1	100	—	14.0	1.37 E+04
8		上部タイプレート	1	2	—	19.0	3.72 E+02
9		円筒状構造物 (CRガイドチューブ)	1	130	—	10.0	1.27 E+04
10		CRDハウジング	1	510	165	5.0	3.31 E+04
11		CRDハウジング支持金具ブロック	1	20	—	5.0	9.80 E+02

*1：各号機における，落下エネルギーが最大となる機器を黄色にてハイライトした。

*2：本検討では，ペDESTAL底部堆積物表面までの距離ではなく，ペDESTAL底部までの距離を落下高さとした。

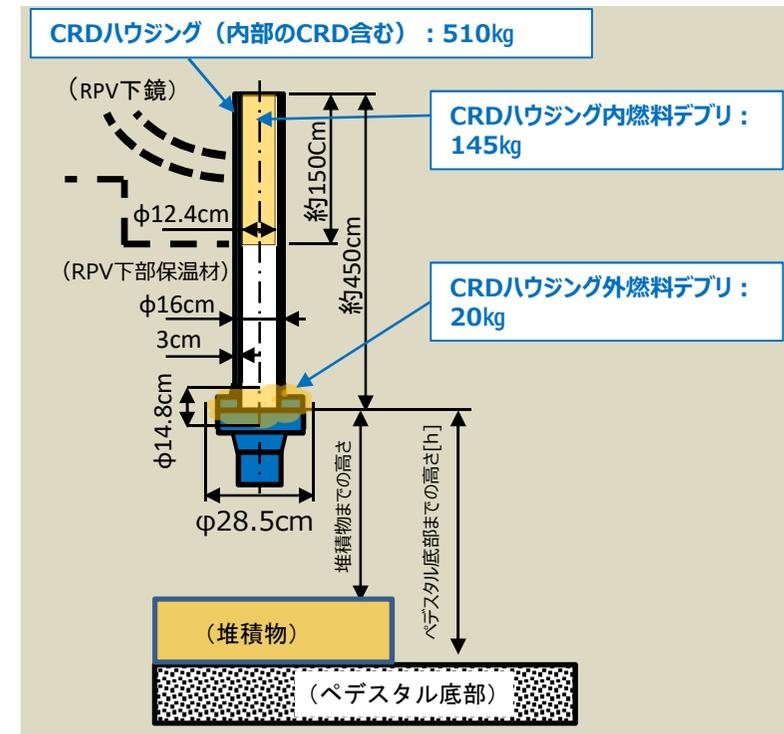
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.1 前提条件の整理 (2/2)

- 前頁に示した落下エネルギーの整理結果を踏まえ、本事業では、落下エネルギーが最も大きく、落下時に生じる事象への影響が大きいと想定される「1号機のCRDハウジングのペDESTAL底部への落下」*1を代表事象として選定（保守的な条件設定）し、以降の検討および要素試験を進めた。
- CRDハウジングの主要情報と、推定図を以下に示す。
- 要素試験で模擬する落下物の形状は、各要素試験の目的に応じ設定した。

CRDハウジング (CRD含む) 主要情報

項目	主要情報
概略寸法*2	外径約φ16 cm (フランジ約φ25 cm) , 長さ約450 cm, 肉厚約3 cm
概略重量*2	約510 kg (CRDハウジング : 300 kg, CRD : 210 kg)
付着している燃料デブリ量	<ul style="list-style-type: none"> ・付着している燃料デブリ密度 : 8 g/cm³ *3 ・ハウジング内燃料デブリ : 約145 kg (保温層範囲に燃料デブリが侵入と仮定) ・CRDハウジング外燃料デブリ : 約20 kg (画像イメージから燃料デブリ容積を推定) 計165 kg→切り上げで200 kgと仮定
合計重量	710 kg (CRDハウジング (CRD含む)) 概略重量 : 約510 kg+燃料デブリ約200 kg)
重心位置	CRDの重心位置については、CRDハウジングの重心位置と同じと仮定
材質	ステンレス鋼
落下高さ*2	約5 m
落下エネルギー	3.48 E+04 J



CRDハウジング (CRD含む) 推定図

*1 : 各号機のうち、最も落下エネルギーの想定値が大きい1号機の値（燃料デブリの付着も加味）を採用する。

*2 : 概略寸法、重量は、健全時の数値。落下高さは健全時のCRDハウジング下端位置からペDESTAL底部床面までの距離を示す。

*3 : 燃料デブリの組成モル比を $UO_2:ZrO_2=1:1$ と想定し $7.99g/cm^3 \approx 8g/cm^3$ とした。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（1/8）

落下対策として求められる要求事項について，想定落下物の落下により起こり得る事象の「再臨界」，「ダスト飛散」，「ペDESTAL内機器・構造部の損傷」の観点で検討，整理した。

再臨界：再臨界の発生につながり得る事象の分類・規模の検討

- 再臨界は，落下時の衝撃により燃料デブリが変形して細粒化した場合，燃料デブリの組成・性状，粒径，および水位が適切な組み合わせ条件となったときに発生する可能性がある。
- 落下物による再臨界について，過去の補助事業で検討が進められており，その代表的検討例を以下に示す。
- 現状の情報では，燃料デブリ組成・性状等不明であり，実機において再臨界が生じるか否かを判断することは困難である。そのため，保守的に落下物を想定し検討を進めるとともに，落下物の衝撃による燃料デブリの変化を把握し，再臨界発生の可能性を検証するため，落下衝撃影響確認試験を実施した。(P208～212参照)

再臨界の発生事象分類と再臨界事象の規模の検討

		加工片落下時の臨界管理	燃料デブリ1回取り出し時の反応度
仮定条件	燃料デブリ組成	知的財産保護のため非公開	UO ₂ + SUS20 %混在
	燃料デブリ破碎条件		立方体に破碎
	水位		水有り
検討結果			取り出し領域の幅190 cm，高さ110 cm立方体（体積3.97E+06 cm ³ ）までは未臨界となる。
出典			平成27年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ臨界管理技術の開発 研究報告書（平成30年3月）
CRDハウジング 1本落下における推定			CRDハウジング1本落下時の破碎体積を仮定した場合，1.16E+05 cm ³ となり，取り出し領域の幅190 cm，高さ110 cm立方体（体積3.97E+06 cm ³ ）より小さいことから再臨界の可能性は小さい。

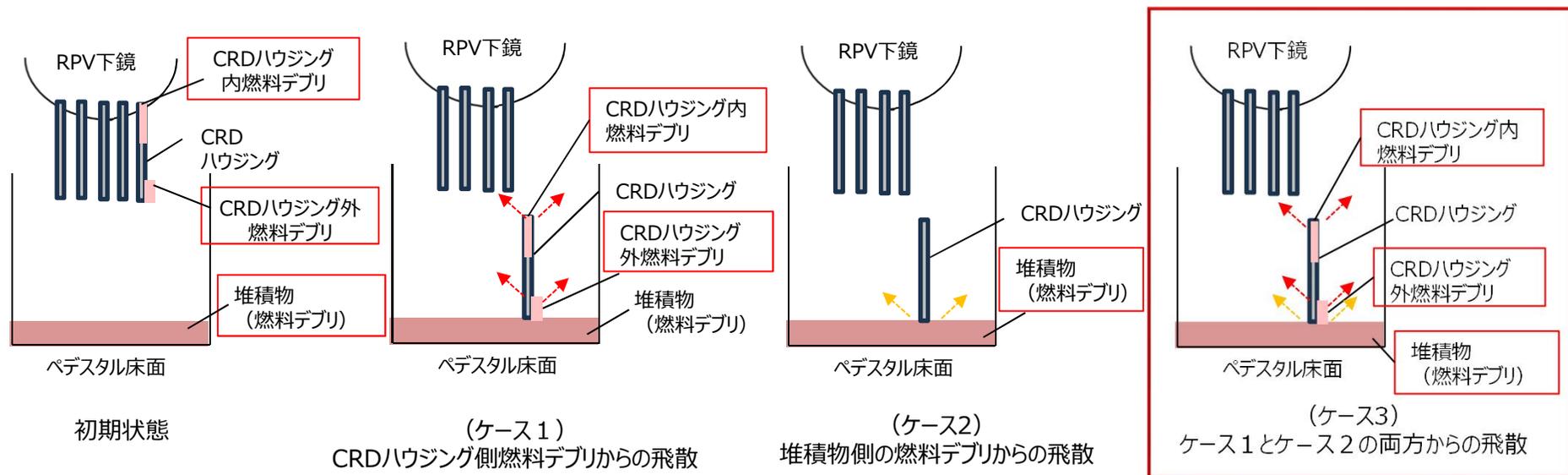
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（2/8）

ダスト飛散：落下物によるダスト飛散の影響検討（1/3）

- 想定落下物がペDESTAL下部に落下した場合，下図に示すように，燃料デブリから生じるダスト（放射性物質）の飛散が予想される。
- 本事業では，CRDハウジング側燃料デブリと堆積物側燃料デブリの両方からダスト（放射性物質）が生じるケース3（最も厳しいケース）の条件で，公衆被ばく評価を行った。
- 評価結果を次頁以降に示す。



公衆被ばく評価を実施するケースの考え方

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（3/8）

ダスト飛散：落下物によるダスト飛散の影響検討（2/3）

- 事故時の被ばく評価は、建屋から放出された放射性物質が、以下の経路を経て一般公衆へ拡散・被ばくすると考える。各被ばく経路での被ばく線量を算出し、各被ばく経路の合計（以下の①＋②＋③＋④）値として、事故時の公衆被ばく線量を算出した。

- ① 放射性雲からのガンマ線による外部被ばく *1
- ② 地表沈着物からのガンマ線による外部被ばく *2
- ③ 呼吸摂取による内部被ばく *1
- ④ 地表沈着核種の再浮遊による呼吸摂取による内部被ばく *2

*1：文献「廃止措置工事環境影響評価ハンドブック（第3次版）(7)」による

*2：文献「（東電・実施計画書）1号機原子炉格納容器内部詳細調査 原子炉格納容器バウンダリ施工箇所開放時の影響評価に関する説明資料」による

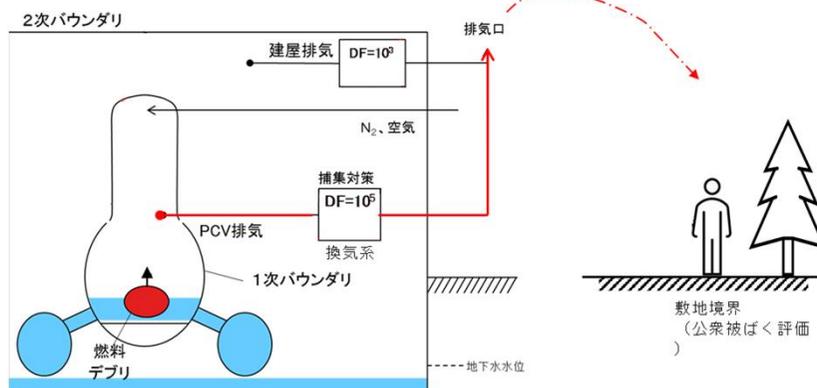
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（4/8）

ダスト飛散：落下物によるダスト飛散の影響検討（3/3）

- CRDハウジング（1本）の落下を想定した場合の被ばく影響と想定事象の検討結果を示す。
- 公衆被ばく量の試算結果は $2.8\mu\text{Sv}/\text{事象}$ であり、事故時の基準 $5\text{mSv}/\text{事象}$ に対して十分小さく、PCVでの閉じ込めが維持できれば問題ないと考える。
- ただし、より高い精度の公衆被ばく量評価に資するべく、現実的なダスト飛散状況を確認することを目的とし、ダスト飛散確認試験を実施した。(P213～218参照)
- 上記の通り、公衆被ばくという観点では評価上問題ないが、実際のプラント運営を考慮した場合には、CRDハウジングの落下事象発生時には以下の影響が挙げられる。前述の影響回避のために落下物を想定した対策の検討を行った。
 - ① PCV内が負圧維持されているため、発生したダスト（放射性物質）が換気系を介してガス管理システムに影響（ LCO^* 逸脱）を与える可能性がある。
 - ② 規制庁への報告や、周辺作業の停止に至る可能性がある。



公衆被ばく評価のイメージ

公衆被ばく評価の条件および評価結果

項目		CRDハウジング1本落下
ダスト飛散条件		ケース3
構造物+燃料デブリ重量合計重量(kg)		710kg (CRD含む)
落下高さ(m)		5m
落下エネルギー (J)		$3.48\text{E}+04$ (J)
飛散率 (-)	CRDハウジング側 燃料デブリ	$2\text{E}-03$
	堆積物 (燃料デブリ)	$5.88\text{E}-05$
換気系DF(-)		$1.00\text{E}+05$
公衆被ばく評価		$2.8\mu\text{Sv}/\text{事象}$
事故時の基準		$5\text{mSv}/\text{事象}$

*1：（LCO：Limiting Conditions for Operation）保安規定における
運転上の制限

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（5/8）

ペDESTAL内機器・構造物の損傷：発生事象の可能性と影響の検討(1/2)

- 落下物により生じ得る、ペDESTAL内機器・構造物の損傷および想定影響について検討した。検討結果を下表に示す。また、次頁に各号機のペDESTAL内状況想定図を示す。

落下物により生じ得るペDESTAL内機器・構造物の損傷および想定影響

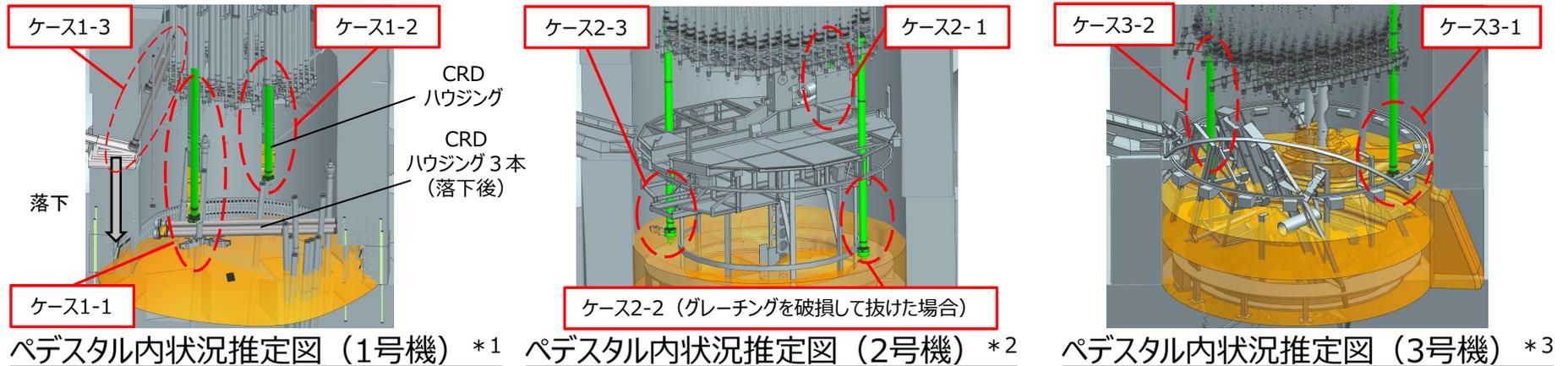
ID.	対象号機	想定ケース	ペDESTAL内機器・構造物の損傷および想定影響
1-1	1号機	堆積物（燃料デブリ）への落下	他機器に直接落下しないため影響小。棚状堆積物の場合、CRDハウジング落下により破損の可能性有。
1-2		CRDハウジング（落下物）への落下	CRDハウジング（落下物）の損傷拡大はあり得る。ただし、今後使用しないため影響は低い。
1-3		CRDハウジング3本落下	他機器に直接落下しないため影響小。棚状堆積物の場合、CRDハウジング落下により破損の可能性有。
2-1	2号機	CRD交換機への落下	CRD交換機の損傷拡大はあり得る。ただし、CRD交換機は今後使用しないため影響は低い。
2-2		CRDプラットホームグレーチングへの落下	グレーチングが破損した場合、破損したグレーチングは下方（堆積物）に落下する。
2-3		CRDプラットホームグレーチング開口への落下	他機器に直接落下しないため影響小。
3-1	3号機	堆積物（燃料デブリ）への落下	他機器に直接落下しないため影響小。
3-2		CRDプラットホーム（落下物）への落下	CRDプラットホームの損傷拡大はあり得る。ただし、CRDプラットホームは今後使用しないため影響小。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（6/8）

ペDESTAL内機器・構造物の損傷：発生事象の可能性と影響の検討(2/2)



*1：状況推定の参考資料

- ・IRID、東京電力HD「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第39回）資料1 1号機原子炉格納容器内部調査の状況について」（2023年9月12日）
- ・IRID、東京電力HD「1号機PCV内部調査（後半）について」（2023年4月27日）

*2：状況推定の参考資料

- ・IRID、東京電力HD「福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査結果について」（2018年4月26日）
- ・東京電力HD「福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査実施結果」（2019年2月28日）

*3：状況推定の参考資料

- ・東京電力HD「福島第一原子力発電所3号機原子炉格納容器調査映像からの3次元復元結果」2018年4月26日
- ・IRID、東京電力HD「3号機原子炉格納容器内部調査について」（2017年11月30日）
- ・東京電力HD「福島第一原子力発電所事故発生後の原子炉压力容器内・格納容器内の状態推定について」（2021年7月19日）

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（7/8）

まとめ（1/2）

- 落下対策を検討するにあたり、「再臨界」、「ダスト飛散」および「ペDESTAL内機器・構造物の損傷」に対する「考慮すべき影響因子」を整理した。
- また、上記の影響因子を踏まえ、影響因子ごとの落下対策の方針と期待される効果を整理した。

各想定事象の影響因子の検討結果

ID.	想定事象	影響因子の検討結果
1	再臨界	影響因子は燃料デブリ組成・性状，粒径，破砕体積，および水位などの要件が関連する。 ただし，燃料デブリ組成・性状，粒径の条件は現時点では不明の為，破砕体積の元となる「落下エネルギー（衝撃力）」と「水位」を検討対象の影響因子とする。
2	ダスト飛散	影響因子は落下物重量と落下高さである。 ただし，落下物と想定したCRDハウジング重量は変化しない為，「落下高さ」を検討対象の影響因子とする。
3	ペDESTAL内機器・構造物の損傷	影響因子は，ダスト飛散量と同様に落下物重量と落下高さである。 ただし，落下物と想定したCRDハウジング重量は変化しない為，「落下高さ」を検討対象の影響因子とする。

各影響因子に対する落下対策の方針と期待される効果

影響因子	落下対策の方針	落下対策に期待される効果
落下エネルギー（衝撃力）	落下エネルギー（衝撃力）削減	想定落下物が堆積物（燃料デブリ）に直接落下することを防止し，その衝撃力を緩和することにより，堆積物（燃料デブリ）の破砕体積の低減が図れるため，再臨界リスクの低減と，破砕量を少なくすることでダストの飛散量の低減が期待できる。
水位	水位の低減	堆積物（燃料デブリ）の下方（破砕半径の範囲）に水位を下げることで，再臨界リスクの低減が期待できる。
落下高さ	落下高さの低減	想定落下物を堆積物（燃料デブリ）に落下する前に途中で捕捉することにより堆積物（燃料デブリ）の破砕を防止でき，再臨界リスクの低減とダスト飛散量の低減が期待できる。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

落下対策として求められる要求事項（8/8）

まとめ（2/2）

- 前頁に示した要求事項を整理したものを下表に示す。なお、更なる寄与が期待できる因子を「追加因子」として追加した。

落下対策に求められる要求事項と期待される効果

ID.	項目	因子分類	影響因子	要求事項	期待される効果
1-1	想定落下物による再臨界防止	影響する因子	落下エネルギー（衝撃力）	想定落下物を落下途中で捕捉及び緩和	想定落下物の落下時の衝撃力を緩和して、燃料デブリの破砕範囲（大きさ）を低減する。
1-2			水位	水位の低下	堆積物（燃料デブリ）の下方（破砕領域の範囲）に水位を下げることでリスクを低減。
1-3		追加因子	—	中性子の吸収	中性子の吸収による再臨界を防止。
2-1	想定落下物によるダスト飛散抑制	影響する因子	落下エネルギー（衝撃力）	想定落下物の落下時の衝撃力の緩和	衝撃力の緩和により、飛散量を低減する。
2-2			落下高さ	想定落下物を落下途中で捕捉	堆積物との衝突を防止し、飛散量を低減。
2-3		追加因子	—	ダスト飛散対策	燃料デブリ（堆積物含む）の表面にカバー、被膜等を設けることで、ダストの飛散を抑制する。 ダスト粒子を飛びにくくする（粒子同士を結合し粒径を大きくする等）。
3-1	ペDESTAL内機器・構造物の損傷防止	影響する因子	落下高さ	想定落下物の落下時の衝撃力発生防止及び緩和	衝撃力の発生防止及び緩和することで、機器・構造物の損傷拡大を防止する。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

試験により確認する想定事象

机上検討にて求められる要求事項を整理した結果，再臨界に関しては，燃料デブリの組成・性状などが不明であり，実機において再臨界が生じるか否かを机上検討のみで判断することは困難である。そこで，落下物の衝撃による燃料デブリの変化を把握することを目的に，落下試験を実施した。

また，ダスト飛散に関して，PCVの閉じ込めが維持できれば問題ないと考えられるが，より精度の高い公衆被ばく量の評価に資するため落下試験を実施した。

以下に実施する2試験の概要を示す。

① 落下衝撃影響確認試験

模擬燃料デブリベッドに対する影響評価を目的に，環境状態(乾燥・湿潤)を設定し，想定落下物であるCRDハウジングを模擬した試験体(落下物模擬体)をペDESTAL底部を模擬した模擬燃料デブリベッドに落下させ，各種データを取得した。

② ダスト飛散確認試験

落下衝撃影響試験と同様の落下装置を用い，より精度の高い公衆被ばく量の評価に資する各種データを取得した。なお，本試験では，燃料デブリベッド上に粉体を模擬するため，アルミナ粉体を模擬燃料デブリベッド上に散布し，落下によるダスト飛散の各種データを取得する試験を実施した。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

① 落下衝撃影響確認試験 (1/5)

➤ 目的

本事業における落下衝撃影響確認試験は、落下衝撃による燃料デブリ損傷の状態を確認することと共に緩衝体選定のための基礎データの取得を目的とする。

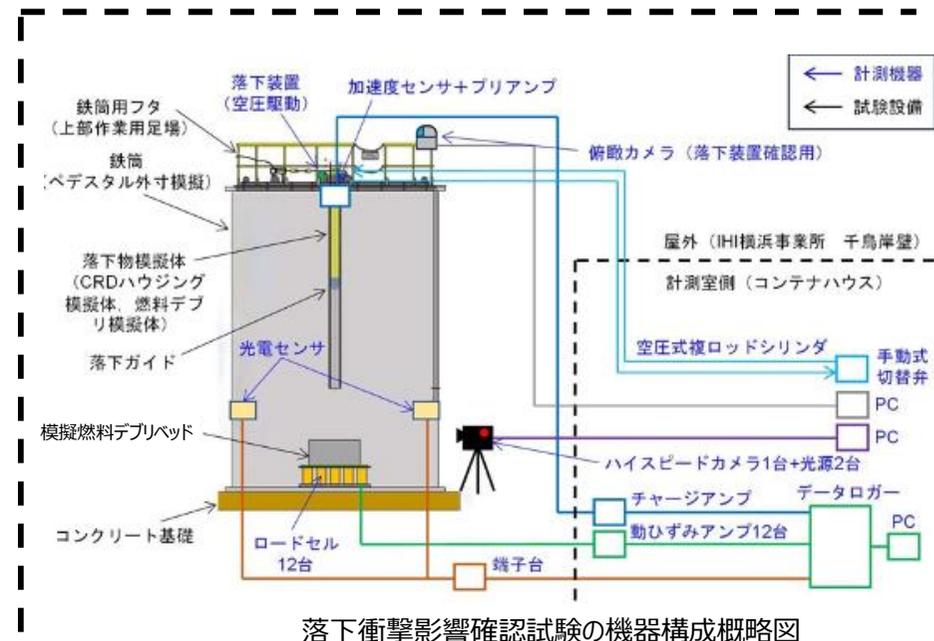
確認試験は、想定落下物であるCRDハウジングを模擬した試験体(落下物模擬体)をペDESTAL底部を模擬した模擬燃料デブリベッドに落下させることで各種データを取得する。また、模擬燃料デブリの損傷状態より、再臨界の可能性についても検討する。

➤ 試験条件，機器構成

試験条件および回数を下表に示す。また、右図に機器構成を示す。次頁に試験設備写真を示す。

衝撃試験の試験条件

環境	落下物模擬体	落下高さ [m]	試験回数
乾燥環境	CRDハウジング模擬体 (710(kg))	1	1
		3	1
		5	1
湿潤環境 (表面の凹凸が浸る程度に水を張った状態)	CRDハウジング模擬体 (710(kg))	1	1
		3	1
		5	1



落下衝撃影響確認試験の機器構成概略図

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

①落下衝撃影響確認試験 (2/5)

試験設備の写真を示す。



試験設備全景



落下物模擬体(CRDハウジング模擬体)



ハイスピードカメラ



模擬燃料デブリベッド

主要試験装置写真

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

①落下衝撃影響確認試験 (3/5)

➤ 計測項目及び方法

ハイスピードカメラ，加速度計及びロードセルを用い，計測を実施した。計測データについては，模擬燃料デブリベッドの損傷状態である「燃料デブリ損傷状態データ」として以下①，②のデータを取得し。また，「緩衝体選定のための基礎データ」として③，④のデータを取得した。（⑤，⑥のデータについて参考用とする。）

①貫入深さ，②亀裂範囲，③衝撃荷重，④衝撃加速度，⑤落下速度，⑥加速度

➤ 計測結果考察および，活用方法

計測結果を以下に示す。また試験写真を次頁に示す。

(1) ①貫入深さ，②亀裂範囲データ

燃料デブリの損傷状態により再臨界の条件を満たす可能性を評価するため，データを取得した。計測結果概要を下表に示す。本試験結果と「衝撃吸収性確認試験」との模擬燃料デブリベッドの貫入深さ，亀裂範囲を比較し緩衝体の効果を確認する。また本結果をもとに再臨界の可能性も評価した。

(2) ③衝撃荷重(衝撃力(荷重))，④衝撃加速度*¹(衝撃力(加速度))

要素試験(衝撃吸収性確認試験)との比較データとして，ロードセルで計測した荷重からの衝撃力とハイスピードカメラで計測した加速度からの衝撃力を取得した。計測結果概要を下表に示す。本試験結果と「衝撃吸収性確認試験」との衝撃荷重および，加速度を比較し緩衝体の効果を確認する。

(3) ⑤落下速度，⑥加速度

参考データの位置付けであり，計測機器が正常であったことを確認した。

* 1 : 衝撃加速度とは，ハイスピードカメラ映像で計測した落下物模擬体が模擬燃料デブリベッドに衝突した時の最大減速度を示す。

計測結果概要

	貫入深さ (mm)	亀裂範囲 (mm ²)	衝撃力 (荷重)(kN)	衝撃力 (加速度)(kN)
乾燥状態	18~55	10738~ 45560	529~1066	454~781
湿潤状態	37.5~86.5	40279~ 97460	365~663	286~541

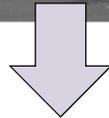
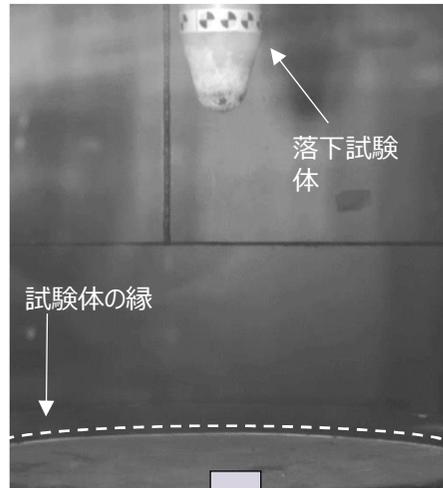
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

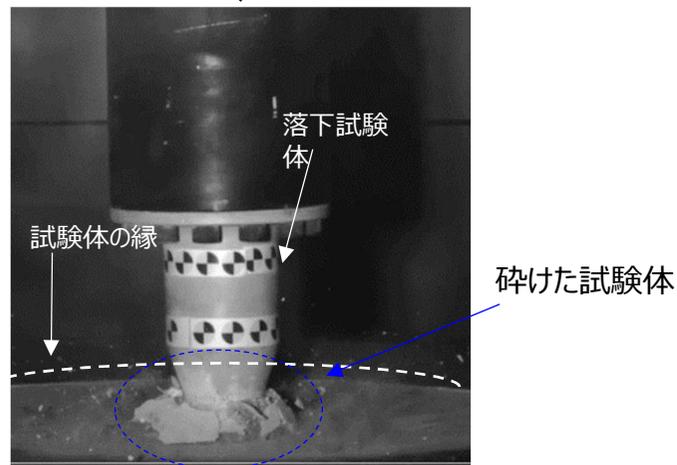
①落下衝撃影響確認試験 (4/5)

試験写真を示す。

落下時



衝突時



試験時写真



試験体(損傷前)写真



緩衝体無し:貫入深さ86.5mm
試験体(損傷後)写真(一例を示す)

試験体の損傷前後写真

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

①落下衝撃影響確認試験 (5/5)

模擬燃料デブリベッドへの落下試験の結果より、想定落下物の落下による再臨界の可能性を考察した。以下に考察結果を示す。

➤ 再臨界の可能性の評価に資する情報

- ・今回の想定落下物での模擬燃料デブリへの貫入深さは、86.5mmと浅く、また、CRDハウジングは先端形状が細いため、模擬燃料デブリベッドの破損は小さかった。
- ・落下物模擬体の落下による影響(貫入深さや亀裂範囲)は、一定の規模に収まっている(限定的)ことを確認した。
- ・加工時落下対策として求められる影響緩和に資する情報として、衝撃による影響程度は、非常にわずかであり、落下による直接的な再臨界の可能性は低いと考えられる。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

②ダスト飛散確認試験 (1/6)

➤目的

本事業におけるダスト飛散確認試験の目的は、想定落下物(CRDハウジング)が落下した際の落下衝撃によるダストの飛散状況を試験により検証することである。本試験では、想定落下物(CRDハウジング)を模擬した試験体を実機の設置位置から炉底部までの距離(高さ)を模擬し、落下させた際のダスト挙動データを取得する。

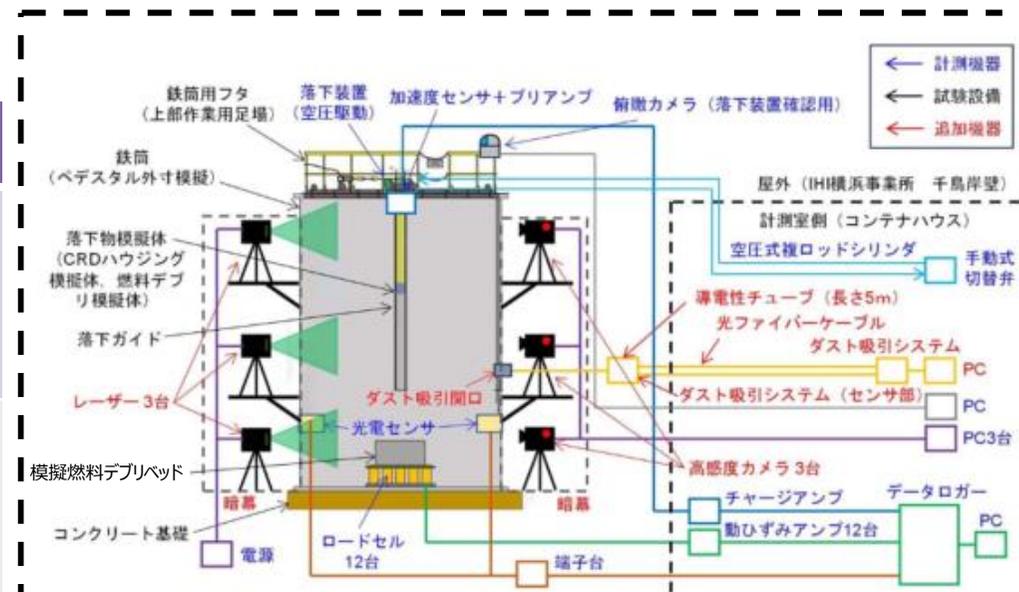
また、ダストの飛散状態より、ダスト飛散の影響(公衆被ばくの可能性)についての評価も行うものとする。

➤試験条件，機器構成

試験条件および回数を下表に示す。また、右図に機器構成を示す。次頁に試験設備写真を示す。

衝撃試験の試験条件

環境	落下物模擬体	落下高さ [m]	試験回数
乾燥環境 (模擬燃料デブリ粉末を設置)	CRDハウジング 模擬体 (710(kg))	5	2
湿潤環境 (表面の凹凸及び模擬燃料デブリ粉末が浸る程度に水を張った状態)	CRDハウジング 模擬体 (710(kg))		2



ダスト飛散状況を確認するための装置構成概略図

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

②ダスト飛散確認試験 (2/6)

試験設備の写真を示す。



試験設備全景

- ・落下用模擬体及び模擬燃料デブリベッドは落下衝撃影響確認試験で使用したのと同じものを使用。

落下前



- ・模擬燃料デブリベッドに模擬粉体(アルミナ粉体)を散布した状態写真

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

②ダスト飛散確認試験 (3/6)

➤ 計測項目及び方法

微粒子可視化システムおよび、想定落下物落下時から15分間のダスト吸引装置による計測を行い、以下の項目を確認する。

- (1)発生し得るダストの飛散範囲と飛散高さ、気中での滞留時間
- (2)落下により模擬燃料デブリベッドから生じ得るダスト量
- (3)乾燥・湿潤状態など環境条件の違いによるダストの舞い上がり状況

➤ 計測条件

- (1)明るさ：実規模試験設備の隙間を埋めて暗室状態
- (2)環境状態：乾燥状態、湿潤状態
- (3)模擬燃料デブリの表面状態：模擬燃料デブリ粉体としてアルミナ粉体を模擬燃料デブリベッド表面を覆う程度に敷設(約300g)

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

②ダスト飛散確認試験 (4/6)

➤ 計測結果

計測結果内容を以下に示す。また試験写真を次頁に示す。

(1)発生し得るダストの飛散範囲と飛散高さ、気中での滞留状況

- ・飛散範囲については、乾燥状態、湿潤状態とも想定落下物が落下した直上に舞い上がり、横への広がりは少ない状況であった。
- ・飛散高さについては、最大でペDESTALCRDレール開口(高さ3m)まで舞い上がることを確認した。
- ・気中での滞留状況については、微粒子可視化システムの画像より粒子数を計測した結果、最大の粒子数を観測した条件は湿潤状態であり、その値は、想定落下物が落下した約5分後で、粒子数は16532個*¹、15分後には4351個*¹であり、20分経過後にはほとんど計測されなかった。

*1 落下時の飛散量が多かった高さ3m位置での測定値

(2)落下により燃料デブリベッドから生じ得るダスト量 (ペDESTAL外に浮遊するダスト量)

PCV内の流路、流速を想定し、試験装置(円筒部：ペDESTALに相当する試験装置)の側面に設けた吸引装置でダストを吸引*²したところ、乾燥状態：7E-06g～1E-05g、湿潤状態：9E-06gであった。

*2 ダスト吸引は、CRD交換用レール開口の位置高さ(底部より3m)を模擬した吸引口から、実機流量を模擬した5L/minで吸引した際の粒子量である。

(3)乾燥・湿潤状態など環境条件の違いによるダストの舞い上がり状況

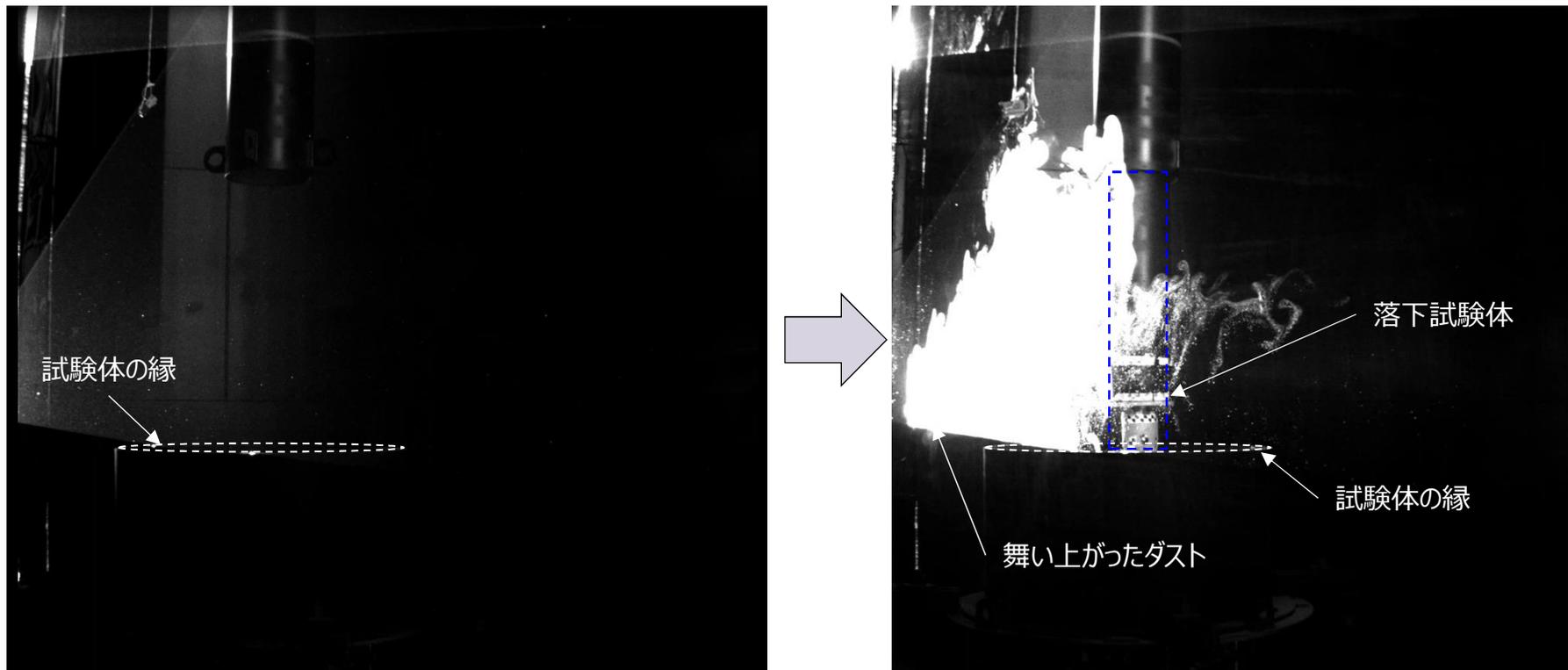
乾燥状態と湿潤状態で大きな差異は確認されなかった。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

②ダスト飛散確認試験 (5/6)

試験写真を示す。



試験時画像

©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理

②ダスト飛散確認試験 (6/6)

模擬燃料デブリベッドへの落下試験の結果より、想定落下物の落下によるダスト飛散の影響を考察した。以下に考察結果を示す。

➤ダスト飛散の影響評価

・微粒子可視化システムの計測にて以下が確認された。

① 模擬燃料デブリベッド(高さ1m)から最大2.5m(炉底部から3.5m)ダストが飛散した。

② アルミナ粉体の滞留量計測の結果、最大2億個(重量換算：1.12g)があり、これに基づく放射性物質の実効線量は0.004mSv/事象*1と計算された。

*1：実効線量は、東京電力殿の資料より、ダスト11.2gに対して0.04[mSv/事象]と算出されており、今回の滞留量1.12gが汚染核種と想定し、比によって算出した。

・ダスト吸引システムの計測にて以下が確認された。

① 捕集した粒子体積は乾燥状態と湿潤状態で以下値となり、大きな差異は確認されなかった。

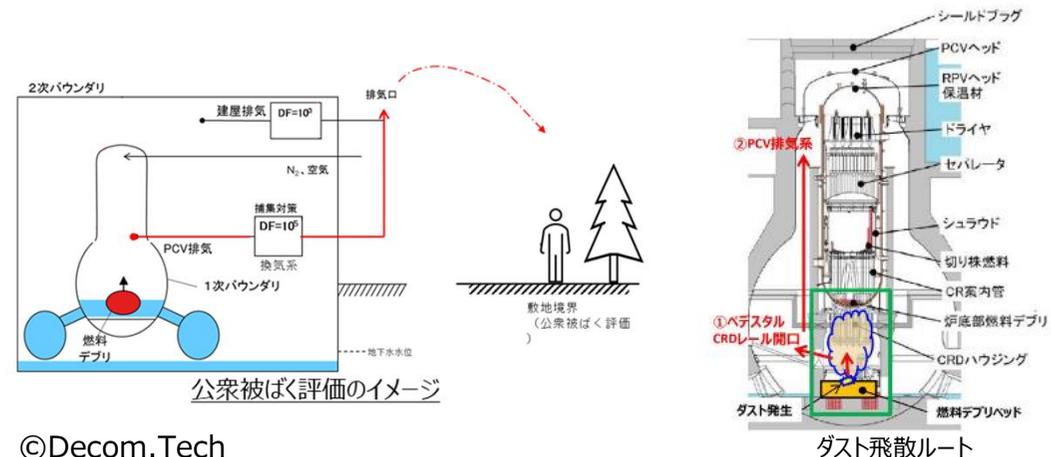
乾燥状態：最大23040 μm^3 、重量は1E-05g

湿潤状態：最大17320 μm^3 、重量は9E-06g

上記の結果より、保守的に設定した本試験条件では炉底部から3m位置にあるペDESTALCRDレール開口までダストが到達する可能性が確認されたが、本試験条件においても滞留した粒子量による実効線量が事故時の基準線量に比べ低く、またダスト吸引システムにて捕集したダスト量が微量(7E-06g~1E-05g)であるため、バウンダリ外への放出が生じたとしても敷地境界での事故時の被ばく基準(5mSv/事象)に対し公衆被ばくの影響は非常に低いものと想定する。

公衆被ばく評価の条件および評価結果

項目	CRDハウジング1本落下	
ダスト飛散条件	ケース3	
構造物+燃料デブリ重量合計重量(kg)	710kg (CRD含む)	
落下高さ(m)	5m	
落下エネルギー (J)	3.48E+04 (J)	
飛散率 (-)	CRDハウジング側燃料デブリ	2E-03
	堆積物(燃料デブリ)	5.88E-05
換気系DF(-)	1.00E+05	
公衆被ばく評価	2.8 μSv /事象	
事故時の基準	5mSv/事象	



7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.2 要求事項の整理 今後の方針

➤ 評価結果と開発の継続に関して

「落下衝撃影響試験」/「ダスト飛散確認試験」結果の評価にて、再臨界の可能性および、敷地境界での事故時基準値を上回る可能性は低く、想定落下物の落下事象に対する落下対策の施工の必要性は低い結果となった。

ただし、将来的に炉内の燃料デブリ取り出し方法が変更になる可能性および、想定落下物と異なる落下物の存在が確認された場合などに備える観点より、落下対策技術に係る技術を蓄積することが望ましいと考える。

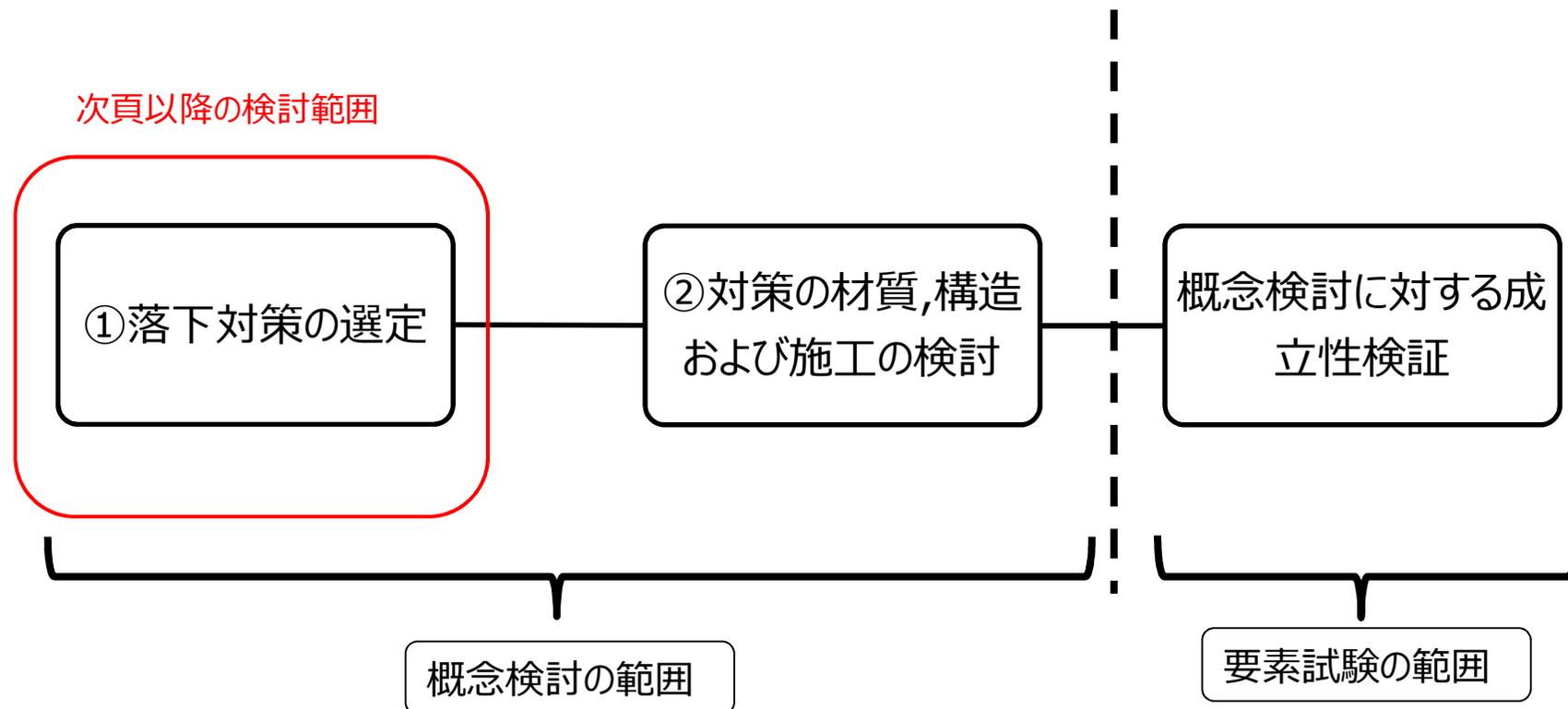
そのため、他の検討および作業中の取り出し装置の損傷防止に活用することを目的に、当初計画通りに加工時落下対策の開発を継続するものとした。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

要求事故の整理結果を踏まえ、落下対策検討の概念検討を実施した。検討区分については、「①落下対策の選定」、「②対策の材質、構造および施工の検討^{*1}」の区分に従い検討を進めた。

^{*1}検討した落下対策に対する遠隔ハンドリング方法の検討も含む。



7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

①落下対策の選定 (1/6)

- 要求事項を満足する落下対策の候補案を複数検討し，下表に整理した。
- 各落下対策の候補案を精査した結果を次頁以降に示す。

要求事項をする落下対策案

イメージ図	候補案1：緩衝体		候補案2： 落下防止シート	候補案3： 不溶性中性子吸収材 散布	候補案4： ダスト飛散防止材
	候補案1-1： ペDESTAL下部衝撃吸収体	候補案1-2： CRDハウジング吹付緩衝体			

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

①落下対策の選定 (2/6)

- 7.3.2 要求事項の整理の「落下対策として求められる要求事象」で検討した「想定落下物による再臨界防止(ID. 1-1～1-3)」における影響因子，追加因子に基づき対策候補案を精査した。

①想定落下物による再臨界防止				
		堆積物（燃料デブリ）への衝撃力の緩和	堆積物（燃料デブリ）への衝撃力の排除	堆積物（燃料デブリ）破砕時の再臨界防止
	候補案1-1： ペDESTAL下部衝撃吸収体	候補案1-2： CRDハウジング吹付緩衝体	候補案2： 落下防止シート	候補案3： 不溶性中性子吸収材
防止方法	ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）への衝撃（落下エネルギー）を緩和することで破砕範囲を低減。	落下物に存在する燃料デブリへの衝撃（落下エネルギー）を緩和することで破砕範囲を低減	落下する機器をその近傍で捕捉し、ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）への落下を防ぎ、破砕を防止	ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）が破砕した時に混合することで再臨界を防止
適用材料	<ul style="list-style-type: none"> モルタル，ポリウレタン等の液体緩衝材 ゴム，エアバッグ等の固体緩衝材 	<ul style="list-style-type: none"> モルタル，ポリウレタン等液体緩衝材 	<ul style="list-style-type: none"> 高強度繊維シート 	<ul style="list-style-type: none"> Gd₂O₃中性子吸収材 B・Gd入ガラス材 (別途補助事業で開発が進められているもの)
イメージ図				

対策候補案の精査 (1/3)

©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

①落下対策の選定 (3/6)

➤ 7.3.2 要求事項の整理の「落下対策として求められる要求事象」で検討した「想定落下物によるダスト飛散抑制(ID. 2-1 ~ 2-3)」における影響因子，追加因子に基づき対策候補案を精査した。

②想定落下物によるダスト飛散抑制				
堆積物（燃料デブリ）からの飛散		CRDハウジング側燃料デブリからの飛散		
落下時の衝撃力の緩和		落下時のダスト舞い上がりの抑制	落下物の落下高さの低減	落下時の衝撃力の緩和
	候補案1-1： ペDESTAL下部衝撃吸収体	候補案4： ダスト飛散防止材	候補案2： 落下防止シート	候補案1-2： CRDハウジング吹付緩衝体
防止方法	ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）への衝撃（落下エネルギー）を緩和することでダスト飛散量を低減。	ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）から飛散したダストをPCV内に拡散することを防止。	落下する機器をその近傍で捕捉し、ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）への落下によるダスト飛散を防止。	落下物に存在する燃料デブリへの衝撃（落下エネルギー）を緩和することでダスト飛散量を低減
適用材料	<ul style="list-style-type: none"> モルタル，ポリウレタン等の液体緩衝材 ゴム，エアバッグ等の固体緩衝材 	<ul style="list-style-type: none"> ライニング樹脂等による表面塗膜 微粒子間の固着による粒子結合 	<ul style="list-style-type: none"> 高強度繊維シート 	<ul style="list-style-type: none"> モルタル，ポリウレタン等の液体緩衝材
イメージ図				

対策候補案の精査 (2/3)

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

①落下対策の選定 (4/6)

- 7.3.2 要求事項の整理の「落下対策として求められる要求事象」で検討した「2-3 ペDESTAL内機器・構造物の損傷防止(ID. 3-1)」における影響因子に基づき対策候補案を精査した。

③ペDESTAL内機器・構造物の損傷防止			
構造物・機器への衝撃力の緩和		構造物・機器への衝撃力の排除	
	候補案1-1： ペDESTAL下部衝撃吸収体	候補案1-2： CRDハウジング吹付緩衝体	候補案2： 落下防止シート
防止方法	ペDESTAL内構造物・機器への衝撃（落下エネルギー）を緩和することで損傷拡大を低減	落下物に構造物・機器への衝撃（落下エネルギー）を緩和することで損傷拡大を低減	落下する機器をその近傍で捕捉し、ペDESTAL内構造物・機器への落下を防ぎ、損傷拡大を防止
適用材料	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタル, ポリウレタン等の液体緩衝材 ・ゴム, エアバッグ等の固体緩衝材 	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタル, ポリウレタン等液体緩衝材 	<ul style="list-style-type: none"> ・高強度繊維シート
イメージ図			

対策候補案の精査 (3/3)

©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

①落下対策の選定 (5/6)

- 前頁で示した各対策候補案について、想定事象に対する効果を整理した。

各対策候補案の想定事象に対する効果*1

	候補案1：緩衝体		候補案2： 落下防止シート	候補案3： 不溶性中性子吸収材	候補案4： ダスト飛散防止材
	候補案1-1： ペDESTAL下部衝撃吸収体	候補案1-2： CRDハウジング吹付緩衝体			
①想定落下物 による再臨界防 止	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）の破碎範囲（大きさ）を低減することで、再臨界リスク低減への寄与が期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 本候補案は、全ての想定事象に効果が期待できるが以下の理由により開発優先度が低いと判断する。 a)全ての想定落下物に対し安定した干渉体の厚みの施工が難しいと共に、厚みを計測する手法の開発が必要。 b)落下姿勢により、緩衝体の施工の無い部分が、ペDESTAL底部または内部構造物に落下衝突する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）に落下する前に捕捉することで、堆積物（燃料デブリ）の破碎を防止し再臨界リスクを低減。 	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）を破碎した範囲に不溶性中性子吸収材と混合することで再臨界リスクの低減が期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 再臨界防止の寄与無し。
②想定落下物 によるダスト飛 散抑制	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）の破碎範囲（大きさ）を低減することで、ペDESTAL側からのダスト飛散防止の効果が期待できる。 CRDハウジング側に存在する燃料デブリからのダスト飛散防止の効果も期待できる。 		<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）に落下する前に捕捉することで、堆積物（燃料デブリ）からのダスト飛散を防止。 CRDハウジング側に存在する燃料デブリには、落下高さを低減することにより、飛散量の低減が期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ダスト飛散防止の寄与無し。 	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL下部の堆積物（燃料デブリ）の表面を塗膜付繊維シートで覆うことで、その下部からのダスト飛散の防止が期待できる。 但し、CRDハウジング側に存在する燃料デブリからのダスト飛散防止には効果が無い。
③ペDESTAL内 機器・構造物の 損傷防止	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL内構造物・機器への衝撃を低減することで、損傷拡大の低減が期待できる。 		<ul style="list-style-type: none"> ペDESTAL内構造物・機器に落下する前に捕捉することで、機器の損傷拡大を防止。 	<ul style="list-style-type: none"> 機器の損傷拡大防止の寄与無し。 	<ul style="list-style-type: none"> 機器の損傷拡大防止の寄与無し。
結果	再臨界リスクの低減およびダスト飛散低減の効果が期待できる。	候補案1-1と同様の効果は期待できるが、上記の理由により開発優先度は他の候補案に対し低い。	再臨界リスクの低減およびダスト飛散低減の効果が期待できる。	単独では再臨界リスク低減が期待できる。 (なお、候補案1-1(緩衝体),4(ダスト飛散防止材)と組み合わせることで再臨界リスクの低減およびダスト飛散低減の効果が見込める)	単独ではダスト飛散低減が期待できる。 (なお、候補案1-1(緩衝体)と組み合わせることで再臨界リスクの低減およびダスト飛散低減の効果が見込める)

*1：効果が期待できる部分を黄色ハイライトにて示す。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

①落下対策の選定（6/6）

比較の結果

- 前頁までの比較検討結果より、「候補案1-1:ペDESTAL下部衝撃吸収体」、「候補案2:落下防止シート」は、全ての想定事象に対し効果が期待できる。
- 「候補案3:不溶性中性子吸収材」および、「候補案4:ダスト飛散防止材」は、一部の想定事象に対しのみ効果が有るものの、他の候補案と組み合わせることで幅広く効果が期待できる。
- 「候補案1-2:CRDハウジング吹付緩衝体」は、他の候補案と比較して開発優先度が低い。

以降の検討方針

以下に示す通り、「候補案1:緩衝体」、「候補案2:落下防止シート」および、「候補案4:ダスト飛散防止材」を落下対策の候補案とし、詳細検討を実施する。

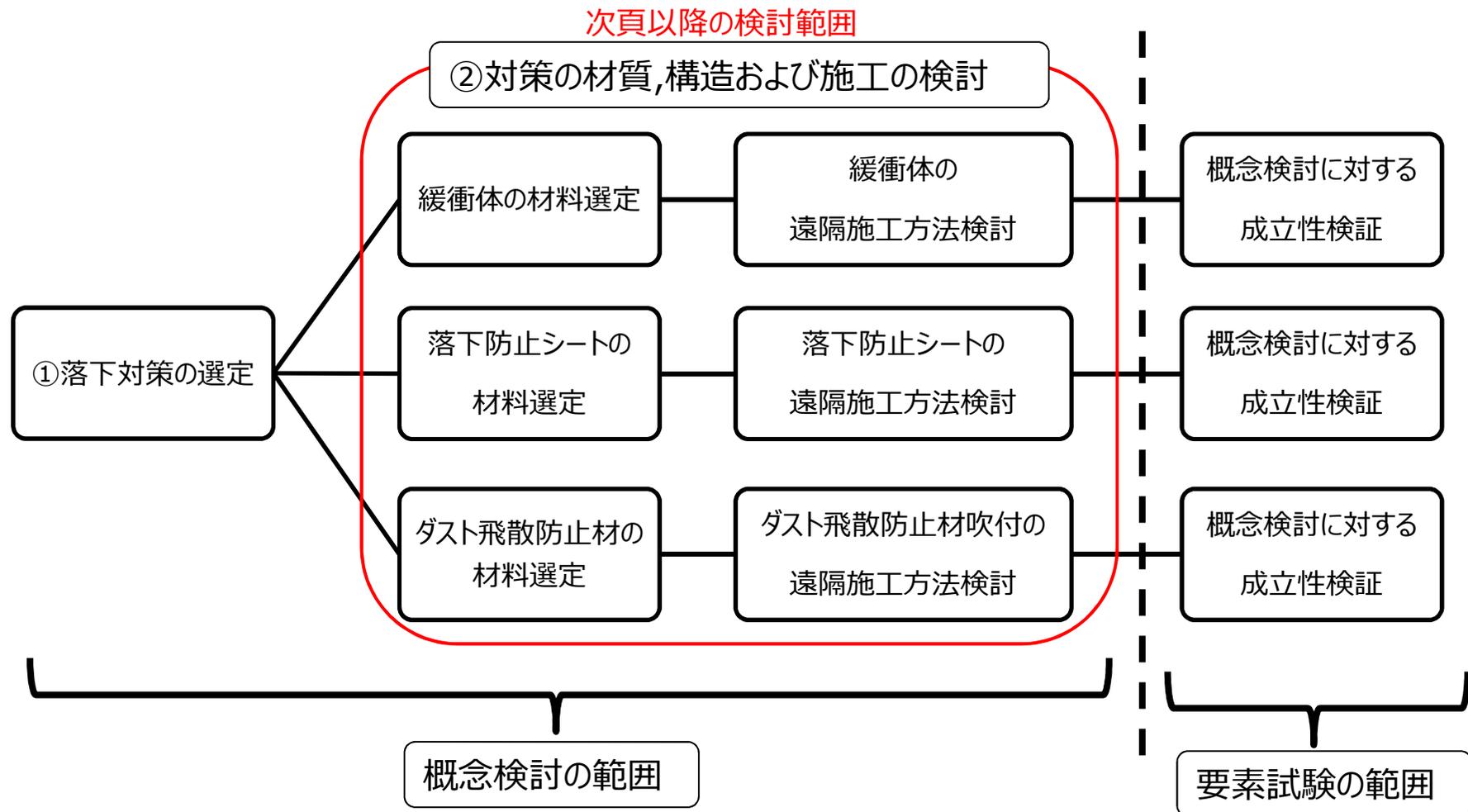
- 「候補案1:緩衝体」は、「候補案1-2:CRDハウジング吹付緩衝体」の開発優先度が低いことから、「候補案1-1:ペDESTAL下部衝撃吸収体」のみを検討する。
- 「候補案3:不溶性中性子吸収材」は、別の補助事業（臨界管理）*1にて研究が行われているため、本事業での開発から除外する。
- 「候補案4:ダスト飛散防止材」は、想定事象への効果が限定的だが、以下の理由にて開発を継続する。
 - ・単独ではダスト飛散の効果のみで落下対策としての効果は低いですが、緩衝体と組み合わせることで再臨界リスクの低減およびダスト飛散防止にも効果が見込める。
 - ・ペDESTAL内堆積物（燃料デブリ）上で作業ロボットによる施工作业時のダスト飛散防止や緩衝体の補強にも効果があり、用途も広く開発のメリットが高い。

*1：令和3年度開始廃炉・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））

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

次頁以降では、「①落下対策の選定」で選定した「候補案1:緩衝体」、「候補案2:落下防止シート」および「候補案4:ダスト飛散防止材」について、「②対策の材質, 構造および施工の検討」を検討した。以降に検討フローを示す。



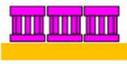
7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(緩衝体の材質および構造)(1/1)

概念検討の「①落下対策材の選定」にて選出された「候補案1:緩衝体」の緩衝体候補を下表に選出し、比較評価を行った。その結果、土のう(内部が脆性素材)が、安全性/頑強性/効果/回収性に優れていること、比較項目にて不適格な評価が無いこと、総合評価にて最も得点が高いことより、緩衝体の第一候補として今後検討を継続することとした。

緩衝体候補の比較表

落下衝撃の緩和方法	破壊エネルギー方式	応力分散方式	複合型 (破壊エネルギー方式+応力分散方式)	複合型 (変形エネルギー方式+応力分散方式)	複合型 (変形エネルギー方式+破壊エネルギー方式)	複合型 (変形エネルギー方式+破壊エネルギー方式+応力分散方式)
緩衝体候補	クラッシュブルダンパー設置案	ビーズ投入案	固化材施工案	マット設置案	土のう設置案 (袋が破壊し中身を放出する)	土のう設置案 (内部が脆性素材)
イメージ図						
安全性	○	○	×	△	△	○
遠隔作業の 確実性・容 易性・保守 性	×	○	○	△	△	△
頑強性	○	○	○	○	○	○
効果 (性能)	×	○	○	△	○	○
実現性	○	△	×	△	△	△
回収性	×	×	×	○	○	○
総合評価*1	×	×	×	8	9	10

* 1 総合評価の点数は、以下に基づき点数付けし、総和した点数である。

凡例:○:緩衝体として適する(2点)/△:緩衝体として欠点があり(1点)/×:緩衝体候補から除外する。

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(緩衝体の遠隔施工方法)(1/4)

➤ 緩衝体(土のう(内部が脆性素材))の遠隔設置

- ✓ 緩衝体(土のう(内部が脆性素材))を遠隔ハンドリングするため, 緩衝体の状態, 緩衝体の搬入に使用するペネ, 緩衝体の搬入方法, 補助装置の要否, 組み合わせる補助装置, 作業量を加味し, 以下に示すハンドリング方法案を立案した。
- ✓ 立案した遠隔施工方法案に対して「安全性」「遠隔作業の確実性, 容易性, 保守性」「頑強性」「性能」「実現性」の観点で1次スクリーニングを行い, 案1.1および案1.3に絞り込んだ。

(立案した遠隔施工方法案)

案1群: X-6 ペネのみを使用する案	
案1.1	伸縮アームとエンドエフェクタで搬送する方法
案1.2	コンベアにより搬送を補助する方法
案1.3	土のうをペDESTAL内部で作成する方法

案2群: X-6 ペネとその他ペネを使用する案	
案2.1	X-2 または, X-1Bから配置したコンベアで搬送を補助する方法
案2.2	ROVにより土のうの搬送を補助する方法
案2.3*1	追加の伸縮アームで土のうの搬送を補助する方法

1次スクリーニング結果

1次スクリーニング	評価項目					合計
	安全性	遠隔作業の確実性 ・容易性・保守性	頑強性	効果 (性能)	実現性	
案1.1	◎	○	○	◎	○	12
案1.2	○	△	△	○	×	—
案1.3	◎	△	○	○	△	9
案2.1	△	△	△	○	×	—
案2.2	△	×	△	○	×	—
案2.3	△	○	△	○	△	7

◎: 優 (3点) / ○: 良 (2点) / △: 可 (1点) / ×: 合計点数に依らず検討から除外する

*1: 案2.3に関しては, 2つのペネを使用すること, 構成装置が複雑であること, 開発コストがかかることで評価として劣るため, 2次スクリーニングの対象から除外する。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(緩衝体の遠隔施工方法)(2/4)

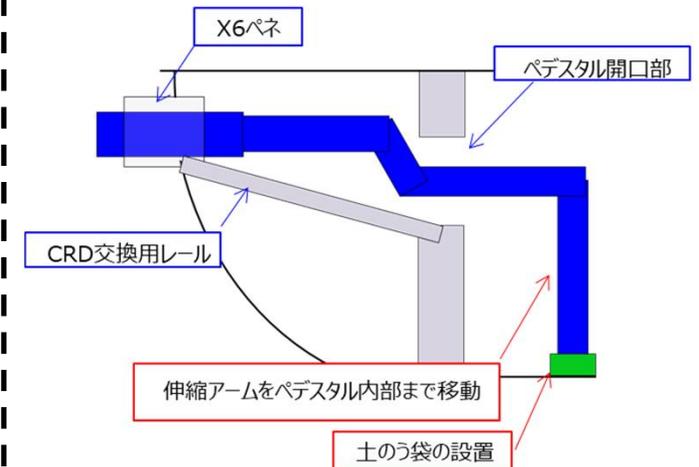
- 緩衝体(土のう(内部が脆性素材))の遠隔設置
 2次スクリーニングとして, 1次スクリーニングで絞り込んだ2つの案(案1.1および案1.3)に対して, 1次スクリーニングの項目を細分化しスループット等の現場適用性観点を踏まえ評価することで成立性を検討した。
 2次スクリーニングの結果, 案1.1(伸縮アームとエンドエフェクタで搬送する方法)を検討工法とすることとした。

2次スクリーニング結果

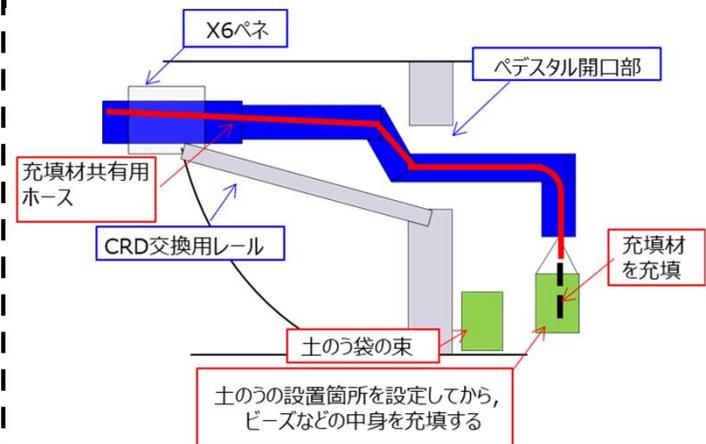
評価項目	小項目	案1.1	案1.3
安全性	a.原子力安全(作業員安全)	○	○
	b.原子力安全(汚染の拡大防止)	○	○
遠隔作業の 確実性・容易性・保守性	a.ペダスタル内の全域に緩衝体を設置できること	○	○
	b.効率(作業が少ないこと)	○	△
	c.緩衝体の管理や保守・交換が容易なこと	○	○
頑強性	a.装置のメンテナンス頻度	○	△
	b.環境変化に対して安定して動作すること	○	△
	c.機械的外乱に対しても正常に動作すること	○	△
	d.復旧・救援	◎	○
効果(性能)	a.汎用性・運用性(他の工法への適用可否)	◎	△
	b.汎用性・運用性(運用のしやすさ)	○	△
	c.汎用性・運用性(運用準備)	◎	○
実現性	a.技術的難易度	◎	△
	b.合理性	○	△
	c.原状復帰の可否	○	△
評価結果(点数)		採用(34)	不採用(21)

◎:優(3点)/○:良(2点)/△:可(1点)/×:合計点数に依らず検討から除外する

©Decom.Tech



案1.1のイメージ図



案1.3のイメージ図

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質、構造および施工の検討(緩衝体の遠隔施工方法)(3/4)

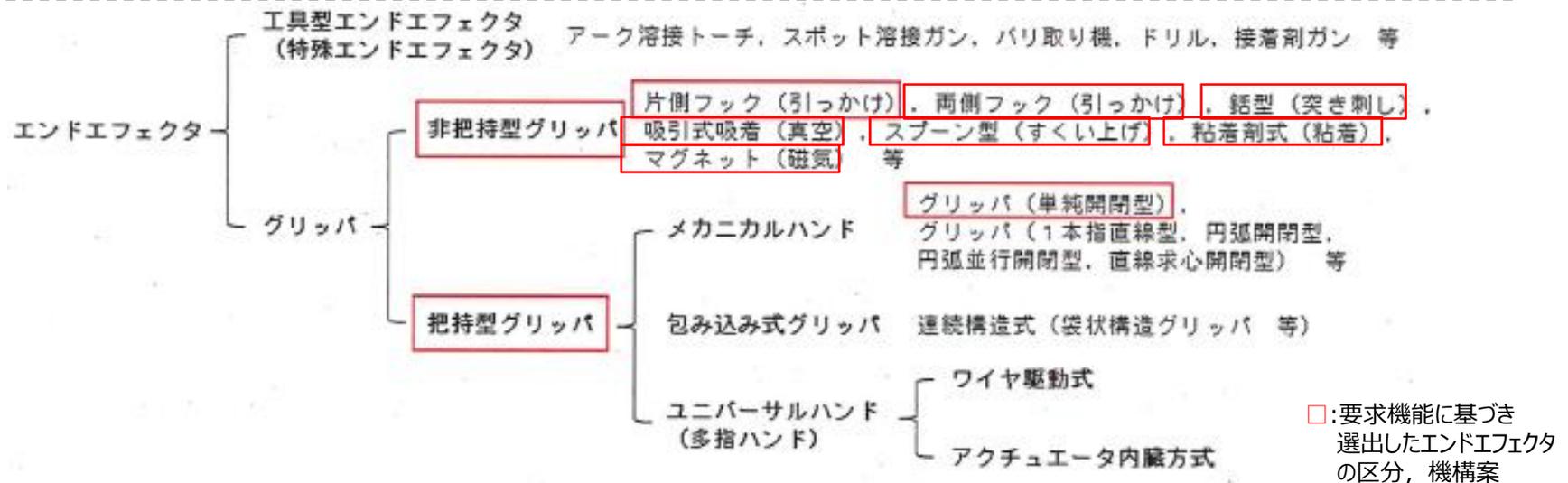
- 緩衝体(土のう(内部が脆性素材))の遠隔設置

選択した案1.1(伸縮アームとエンドエフェクタで搬送する方法)に必要なエンドエフェクタについて検討した。

エンドエフェクタの要求機能を「装着が容易で、緩衝体の設置・回収作業が実現できる汎用性を有すること」と設定した。本要求機能に基づき、緩衝体の遠隔設置に適するエンドエフェクタを下図に示すエンドエフェクタの区分図に基づきエンドエフェクタを選出し比較評価した。

上記結果に基づき、エンドエフェクタの詳細評価を実施した結果、グリッパ(単純開閉型)と片側フック(引っ掛け)の2つを候補とし、要素試験で実機適用性の確認をすることとした。

(評価結果の詳細は次頁に示す。)



エンドエフェクタの区分図

(出典: 日本ロボット学会 (2023): “ロボット工学ハンドブック 第3版”, コロナ社, p.260)

©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(緩衝体の遠隔施工方法)(4/4)

エンドエフェクタのスクリーニング結果表

分類	把持型グリップ	非把持型グリップ						
機構案	グリップ機構 (単純開閉型)	片側フック機構 (引っ掛け)	両側フック機構 (引っ掛け)	鉗型機構 (突き刺し)	吸引式吸着機構 (真空)	スプーン型機構 (すくい上げ)	粘着剤式機構 (粘着)	マグネット (磁気)
イメージ								
把持性能	○ 安定的に把持可能	△ ベイル等必要だが把持可能	△ ベイル等必要だが把持可能	○ しっかり刺されれば把持可能	○ 強い吸着力ならば安定把持可能	× 把持ではなくすくい上げ	× 粘着なので把持力が弱い	△ 磁気で把持可能だが、対象の磁性にもよる
設置性能	○ 目標位置に設置して開放可能	○ 目標位置に設置して開放可能	○ 目標位置に設置して開放可能	△ 設置は可能だが目標位置に合わせる事が困難	○ 目標位置に設置して開放可能	△ 設置は可能だが目標位置に合わせる事が困難	× 位置合わせが困難かつ設置後ずれる可能性あり	△ 設置可能だが位置合わせが緩衝体以外の磁性の影響を受ける
移動性能	○ 機構が小さく移動させやすい	○ 機構が小さく移動させやすい	○ 機構が小さく移動させやすい	○ 機構が小さく移動させやすい	△ 移動には装置の制約(ホース等)も加わる	△ 機構自体が大きいく移動に不向き	△ 機構が小さく移動させやすいが落下の可能性あり	× 機構の大きさ、装置の制約、落下の可能性などの要素がある
回収性能 (緩衝体は未使用品)	○ 安定的に把持して回収可能	○ ベイル等があれば回収可能	△ 緩衝体姿勢によって両フックの引っ掛けが難しくなる	○ しっかり刺されれば回収可能	○ 強い吸引力ならば回収可能	△ スペースがあれば、すくい上げで回収可能	△ 粘着させることができれば回収可能	× 緩衝体以外のものを吸着してしまう可能性大
回収性能 (緩衝体は破損済み)	△ 緩衝体の破損程度によるが、把持回収可能	○ ベイル等があれば回収可能	△ 緩衝体の破損状態によって両フックの引っ掛けが難しい	× 破損している緩衝体にしっかり刺すことは困難	× 破損した緩衝体は安定した吸着が困難	△ スペースがあれば、すくい上げで回収可能	△ 粘着させることができれば回収可能	× 上記に加え、破損した緩衝体は安定した吸着が困難
装置構成	○ 電動グリップで簡単	○ 電動フックで簡単	○ 電動フックで簡単	△ 刺す機構が必要だが比較的簡単	× 吸引システムが複雑	○ 電動バケットで簡単	△ 粘着させる機構が必要だが比較的複雑	△ 吸引式と比較すると比較的簡単
汎用性	○ 別のハンドリング用途等へ適用可能	△ 別のハンドリング用途へ適用可能だが、片フックなので限定的	○ 別のハンドリング用途等へ適用可能	× 本用途限定	× 本用途以外は装置のシステム変更が必要	△ すくい上げが必要な用途へは適用可能	△ 粘着するだけの用途へは適用可能	△ 磁性体のハンドリング用途へは適用可能
想定される課題	● グリップの開閉角度によっては破損した緩衝体の把持が困難となる事が想定される。	● 姿勢によっては緩衝体のバンドルがフックから外れるため、エンドエフェクタの姿勢が制限される。	● ある程度緩衝体のバンドルが正常である必要がある。 ● 回収時のエンドエフェクタの姿勢が制限される可能性がある。	● 緩衝体に突き刺さったまま抜けなくなる。 ● 破損した緩衝体の回収性が低いことが想定される。	● 緩衝体以外のダストやスラッジなど汚染物質の吸引が想定される。 ● 装置構成の複雑化が想定される。	● 把持時、緩衝体を保持することができないため、落下の可能性が想定される。	● 緩衝体表面の堆積物によっては粘着が機能しないことが想定される。	● 緩衝体以外の磁性体(構造物等)が吸着する可能性がある。 ● 緩衝体に磁性体を使用する必要がある。(対象の制約)
総合評価	13	12	11	8	7	7	5	4

(赤枠：要素試験で確認するエンドエフェクタ)

凡例 (○:2点, △:1点, ×:0点)

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質、構造および施工の検討(緩衝体検討のまとめ)(1/1)

➤ 緩衝体

- ・落下衝撃の緩和方法として6つの方法を候補として挙げ、安全性/頑強性/効果/回収性に優れていること、比較項目にて不適格な評価が無いこと、総合評価にて最も得点が高いことから、土のう(内部が脆性素材)を緩衝体の候補と選定した。
- ・緩衝体の候補とした「土のう(内部が脆性素材)」について、落下衝撃を緩和し、ダスト飛散防止に効果が高い内部充填材料を選定するために、落下影響確認試験(衝撃吸収性確認試験, ダスト飛散確認試験)を実施した。

➤ 遠隔施工方法

- ・遠隔施工法として、「X-6 ペネのみを使用する案」と「X-6 ペネとその他ペネを使用する案」で合計6つの案を立案し、各案について「安全性」「遠隔作業の確実性、容易性、保守性」「頑強性」「性能」「実現性」の観点でスクリーニングで絞り込みを行い、案1.1「伸縮アームとエンドエフェクタで搬送する方法」を検討工法として選定した。
- ・選択した案1.1「伸縮アームとエンドエフェクタで搬送する方法」で必要となるエンドエフェクタの要求機能を設定し、当該要求機能を満足するエンドエフェクタを比較評価した結果、グリッパ(単純開閉型)と片側フック(引っかけ)の2つを候補として選定した。
- ・上記の結果を受けて、遠隔ハンドリングツールによる遠隔での設置性、移動性、回収性を確認するため、実機のペDESTAL底部を想定した凹凸面、暗所とした試験エリアにおいて、遠隔ハンドリングツールの施工性を確認する要素試験を実施した。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(落下防止シートの材質および構造)(1/3)

➤ 落下防止シート材質の一次スクリーニング

概念検討の「①落下対策の選定」にて選出された「候補案2:落下防止シート」に対し、要求仕様を満足するシート材料としてアラミド繊維、超高分子量ポリエチレン繊維（高性能PE繊維）、高強カポリアラレート繊維、PBO繊維、PAN系炭酸繊維を選出し、「機能」、「使用環境」の順に適合性を評価して絞り込みを行った。絞り込みの結果、「アラミド繊維」、「高強度ポリアラレート繊維」が高い評価であった。

➤ 落下防止シート材質の選定

落下防止シートとして最も適したシートを選定のため、上記にて選定したシートのさらなる比較評価を実施した。

2種類の材質とも保守性と入手性以外は落下防止シートとして良好との評価であり、保守性についても適用可能との評価となった。結果、「アラミド繊維」と「高強度ポリアラレート繊維」の差異は入手性のみであり、本試験では入手性の良い「アラミド繊維」を採用した。

➤ 落下防止シート構成検討

落下防止シートの機能として、「シートの吊り上げ」、「落下物捕捉」、「シートたわみの抑制」、「落下物の衝撃荷重分散」、「落下エネルギー吸収」等が必要となり、各機能を有した素材の積層構造を採用することとした。

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(落下防止シートの材質および構造)(2/3)

➤ 落下防止シート材質の選定結果

落下防止シート材質の評価結果詳細(2次スクリーニング結果)を下表に示す。

落下防止シート材料選定の表 (赤枠：選定した材料)

項目		落下防止シート	
		アラミド繊維	高強度ポリアラレート繊維
1. 安全性	①ダスト飛散	○ ・落下防止シートの施工作業上、ベデスタル内作業空間の確保のため、堆積物（燃料デブリ）から突き出した落下物の一部除去を要するが、堆積物（燃料デブリ）の端に相当する作業は無し。	○ ・同左
	②再臨界	○ ・落下防止シートはベデスタル内での組立作業上、水の使用は不要。 ・堆積物（燃料デブリ）の破碎に相当する作業無し。	○ ・同左
	③火災誘発	○ ・使用材料は難燃性	○ ・同左
2. 遠隔作業の 確実性、容易性、 保守性	④確実性	○ ・落下防止シートは、織物構造となる補強繊維を使用し、開口部は折り畳み搬入し、ベデスタル内では展開（広げる）若しくは組立にて対応可。	○ ・同左
	⑤容易性	○ ・落下防止シートは織物構造となる補強繊維を使用し、開口部は折り畳み搬入し、ベデスタル内では展開（広げる）若しくは組立にて対応可。	○ ・同左
	⑥保守性	△ ・局所的な損傷に対して部分的な交換は不可。シート全体の交換を要する。	△・同左
3. 頑強性	○ ・PCV内環境（温度、湿度、水位、圧力、放射線量率）に適用可。	○ ・同左	
4. 効果（性能）	○ ・ダスト飛散、再臨界、ベデスタル内機器の損傷の複数リスクへの効果あり。	○ ・同左	
5. 後工程への影響	○ ・落下防止シートは下鏡側に設置し、そのまま下鏡を一体で搬出するため、ベデスタル床側での作業は、一体搬出後となる。その場合は、CRDハウジングは下鏡と一体で搬出される落下のリスクは無くなる。	○ ・同左	
6. 入手性	○ ・入手が容易	× ・入手ルートが少ない	
評価	○	△	

アラミド繊維、高強度ポリアラレート繊維ともに有意差はなかったが、入手しやすさを考慮してアラミド繊維で検討する。

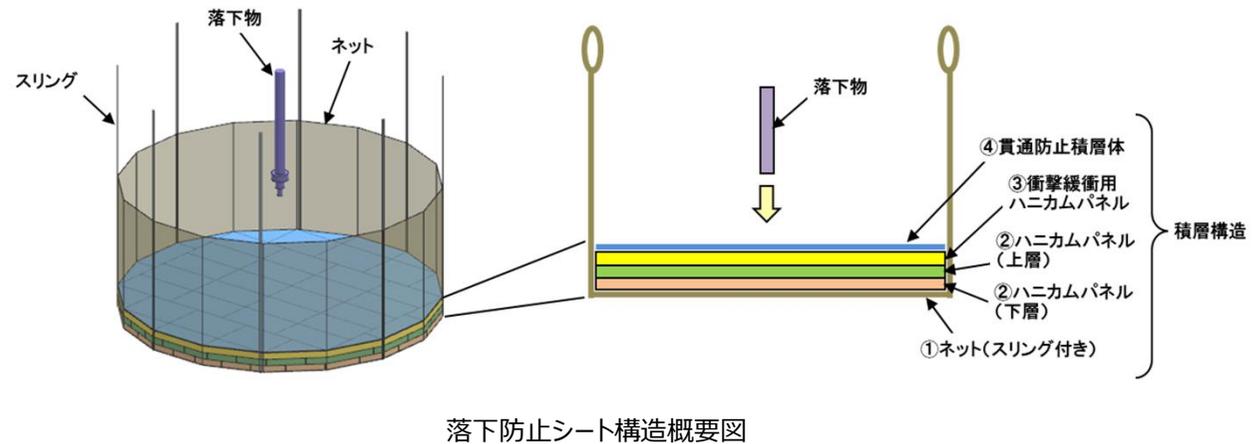
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(落下防止シートの材質および構造)(3/3)

▶落下防止シート構成の検討結果

落下防止シートの要求機能
(落下物捕獲, 落下エネルギー吸収等)を満足する構成案の検討結果を右図に示す。
また, 下表に示す機能部材を積層しシートを構成するものとした。
本構成の効果については, 模擬落下体による落下試験により検証を行う。



落下防止シートの積層各部の材質及び機能

No	構成品	素材	機能
1	ネット(スリング付き)	・アラミド繊維 (ネット、スリング)	・底面、側壁を有する16角形筒状のネット ・落下防止シートから落下物が外に落ちないように捕捉 ・スリングは落下防止シートの吊り上げに使用 ・衝撃力に耐える強度を選定
2	ハニカムパネル	・アラミド繊維で補強したFRP(繊維強化プラスチック) ・アルミハニカムコア(2層構造)	・落下物が中央に落ちたときに生じるたわみを抑制 ・軽量で高い曲げ剛性が得られるハニカム構造 ・衝撃緩衝
3	衝撃緩衝用ハニカムパネル	・アルミハニカムコア(1層構造) ・発泡ウレタン充填 ・ポリウレタ吹付	・衝撃緩衝 ・落下物による局所的な衝撃荷重を分散
4	貫通防止積層体	・アラミド繊維	・貫通防止 ・落下物による局所的な衝撃荷重を分散

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

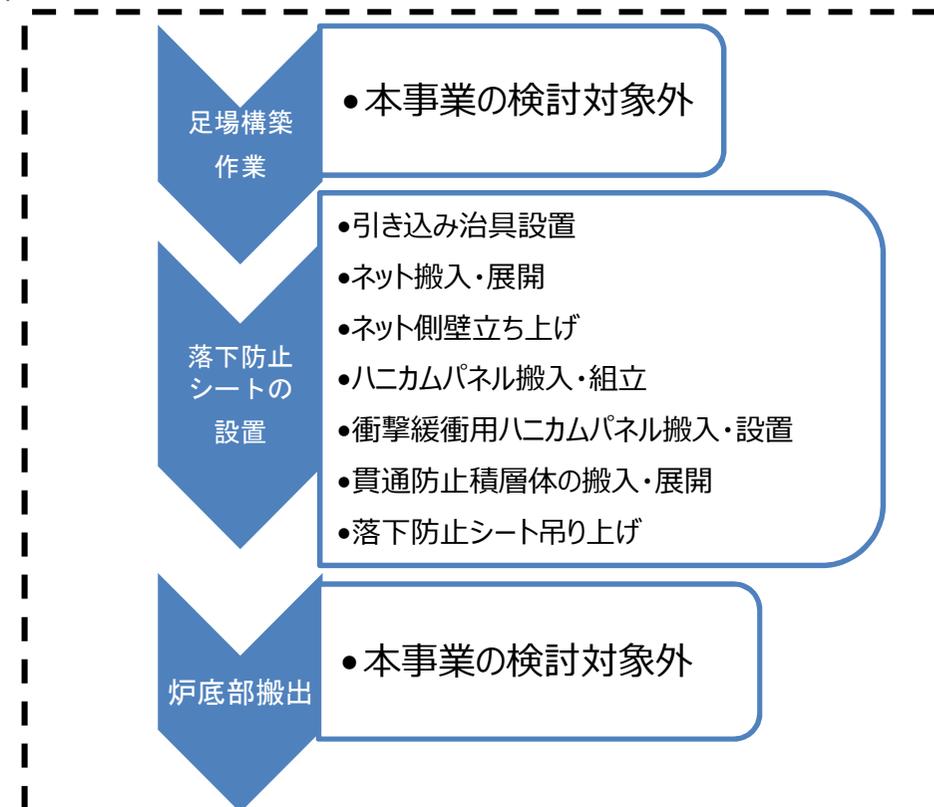
②対策の材質,構造および施工の検討(落下防止シートの遠隔施工方法)(1/5)

➤ 落下防止シートの遠隔施工作业ステップ

落下防止シートを遠隔ロボットで施工するため、工法全体(一例：大型一体搬送工法)における加工時落下対策施工タイミングから、落下防止シート施工タイミング(炉底部解体前)での想定作業を検討した。

上記検討結果より、本事業で検討する想定作業は「足場構築作業」「落下防止シートの設置」「炉底部搬出」に区分され、更に詳細項目に落とし込み、作業内容を検討した。下図に作業ステップのフロー図を示す。詳細は、次頁以降に示す。

検討した作業ステップの「足場構築作業」は別研究での解体装置や揚重機を使用することで実現の見通しがあるため、検討から除外し落下防止シート設置の作業ステップを要素試験で確認することとした。



落下防止シート設置の作業ステップ図

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質, 構造および施工の検討(落下防止シートの遠隔施工方法)(2/5)

落下防止シートの設置作業ステップを以降に示す。

■：落下防止シートの遠隔取付施工性確認試験対象

ステップ	2. 落下防止シート設置	2. 落下防止シート設置
内容	2-1. 引き込み治具の取付	2-2. ネット搬入・展開
作業イメージ		
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> 引き込み治具を作業ロボットで取り付ける。(ポリウレア吹付による取付を想定) 引き込み治具の取付け位置は、原子炉圧力容器内（以降「RPV内」）の炉底部取り出し用の大型一体取り出しフレームから吊り下げる落下防止シートの吊りフック位置を目安とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ネットを進入台車でベDESTAL内へ搬入し、進入台車から作業足場へ降ろす。 ネットに作業用ワイヤを接続し、引き込み治具を介して大型一体取り出しフレームから下げた落下防止シートの吊りフックと接続する。 吊りフックを引き上げながら、ネットを作業足場上に広げる（展開）。 作業用ワイヤは、進入台車でベDESTAL外へ搬出する。
主な装置	<ul style="list-style-type: none"> 作業ロボット（ベDESTAL内） 大型一体取り出しフレーム（RPV内） 	<ul style="list-style-type: none"> 作業ロボット（ベDESTAL内） 進入台車（ベDESTAL内） 大型一体取り出しフレーム（RPV内）

・本事業での大型一体取り出しフレームの検討は、落下防止シートと取合う吊りフックまでとする。

落下防止シートの設置作業ステップ図(1/4)

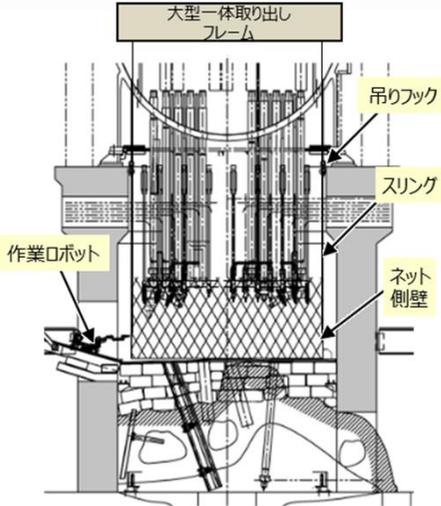
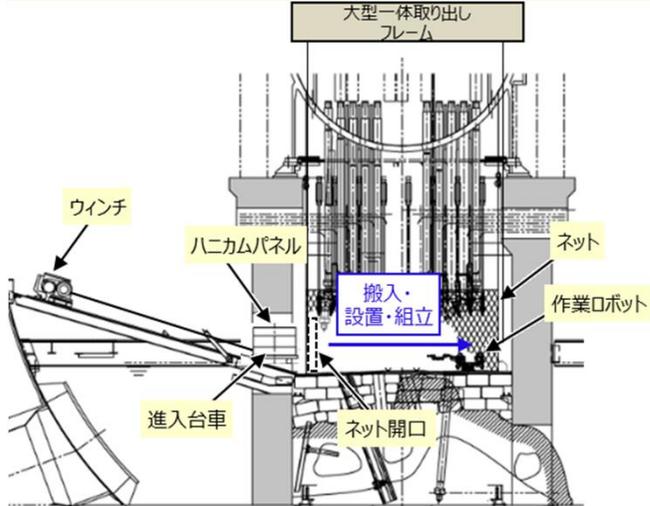
©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(落下防止シートの遠隔施工方法)(3/5)

: 落下防止シートの遠隔取付施工性確認試験対象

ステップ	2. 落下防止シート設置	2. 落下防止シート設置
内容	2-3. ネット側壁立ち上げ	2-4. ハニカムパネル搬入・組立
作業イメージ		
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> 落下防止シートの吊りフックとスリングを玉掛けする。 吊りフックを引き上げて、ネット側壁を立ち上げる。 	<ul style="list-style-type: none"> 進入台車でハニカムパネルをベDESTAL内手前まで搬入する。 ネット開口部から作業ロボットでハニカムパネルを進入台車から取り出す。 取り出したハニカムパネルを、作業ロボットで所定位置まで移動し、設置、組立てる。 分割で搬入したハニカムパネルを接合して一体化する。 <p>【接合候補】</p> <ol style="list-style-type: none"> 遠隔接着その1 (2液混合注入ノズル塗布方式 + ボルト接合による接着面圧縮) 遠隔接着その2 (シート状遠隔接着装置方式 + ボルト接合による接着面圧縮) パネル面への事前接着シート方式 (ボルト接合による接着面圧縮) ボルト接合方式
主な装置	<ul style="list-style-type: none"> 作業ロボット (ベDESTAL内) 進入台車 (ベDESTAL内) 大型一体取り出しフレーム (RPV内) 	<ul style="list-style-type: none"> 作業ロボット (ベDESTAL内) 進入台車 (ベDESTAL内) 大型一体取り出しフレーム (RPV内)

・本事業での大型一体取り出しフレームの検討は、落下防止シートと取合う吊りフックまでとする。

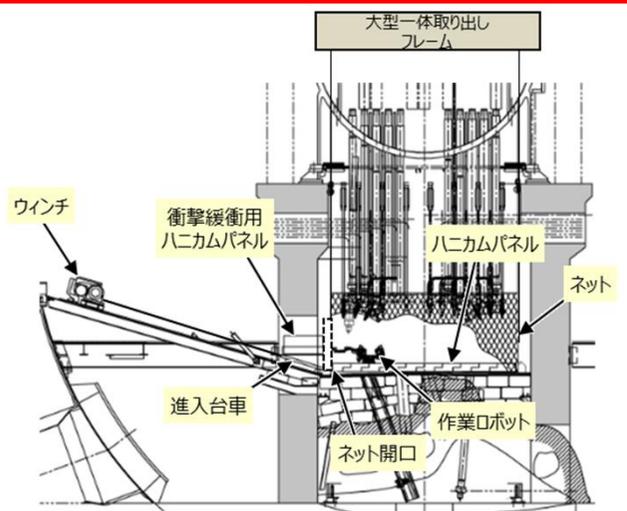
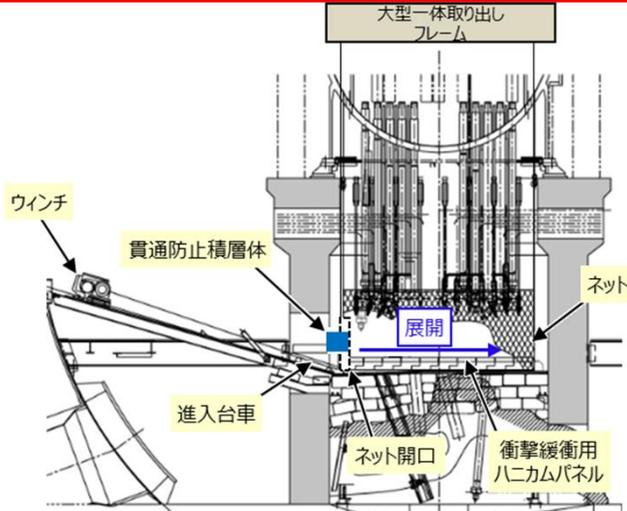
落下防止シートの設置作業ステップ図(2/4)

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(落下防止シートの遠隔施工方法)(4/5)

■ : 落下防止シートの遠隔取付施工性確認試験対象

ステップ	5. 落下防止シート設置	5. 落下防止シート設置
内容	2-5. 衝撃緩衝用ハニカムパネル搬入・設置	2-6. 貫通防止積層体の搬入・展開
作業イメージ		
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> ・進入台車で衝撃吸収用ハニカムパネルをペDESTAL内手前まで搬入する。 ・ネット開口部から作業ロボットで衝撃緩衝用ハニカムパネルを進入台車から取り出す。 ・取り出した衝撃緩衝用ハニカムパネルを所定位置まで移動し、ハニカムパネルの上に設置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・進入台車で貫通防止積層体をペDESTAL内の手前まで搬入する。 ・貫通防止積層体をネット開口部より衝撃緩衝用ハニカムパネルの上に展開する。
主な装置	<ul style="list-style-type: none"> ・作業ロボット (ペDESTAL内) ・進入台車 (ペDESTAL内) ・大型一体取り出しフレーム (RPV内) 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業ロボット (ペDESTAL内) ・進入台車 (ペDESTAL内) ・大型一体取り出しフレーム (RPV内)

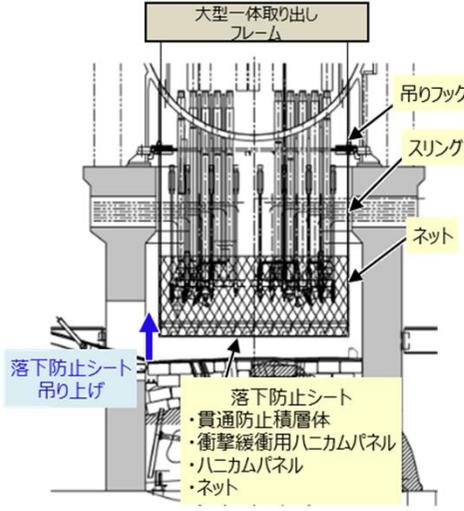
・本事業での大型一体取り出しフレームの検討は、落下防止シートと取合う吊りフックまでとする。

落下防止シートの設置作業ステップ図(3/4)

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(落下防止シートの遠隔施工方法)(5/5)

ステップ	2. 落下防止シート設置
内容	2-7. 落下防止シート吊り上げ
作業イメージ	
作業内容	・吊りフックで落下防止シートを吊り上げる。
主な装置	・大型一体取り出しフレーム (RPV内)

: 落下防止シートの遠隔取付施工性確認試験対象

・本事業での大型一体取り出しフレームの検討は、落下防止シートと取合う吊りフックまでとする。

落下防止シートの設置作業ステップ(4/4)

©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(落下防止シート検討のまとめ)(1/1)

▶ 落下防止シート

- ・落下防止シートの材料として5種類を検討し, 「機能」, 「使用環境」の順に適合性の評価を行い, 保守性や入手性から「アラミド繊維」を落下防止シートの材料として選定した。
- ・構造として「シートの吊り上げ」「落下物捕捉」「シートたわみの抑制」「落下物の衝撃荷重分散」「落下エネルギー吸収」等の機能を有するよう積層構造を検討した。
検討した落下防止シートが上記機能を有していることを確認するため, 要素試験を実施した。

▶ 遠隔施工方法

- ・落下防止シートを遠隔ロボットで施工するため, 工法全体(一例: 大型一体搬送工法)における加工時落下対策施工タイミングから, 落下防止シート施工タイミング(炉底部解体前)での想定作業を検討した。
検討した作業ステップにて落下防止シートの組み立てが可能かを確認するため, ペDESTAL内を模擬した試験設備にて遠隔施工性を確認する要素試験を実施した。

7. 加工時落下対策技術の開発

7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(ダスト飛散防止材の材質および構造)(1/3)

概念検討の「①落下対策材の選定」にて選出された「候補案4:ダスト飛散防止材」に対し5種類の材料を選定し、比較評価を行った。

- これらは、堆積物（燃料デブリ）の表面に塗膜を形成（コーティング）してダスト飛散を防止する方法である。
- 比較評価は、一般的なライニング材（ポリウレタン樹脂、エポキシ樹脂、アクリル樹脂）に対して、本工法の適用性に関わる主要項目を比較した。評価結果を下表に示す。
- 評価結果について、ポリウレアは短時間で硬化することから施工時の待ち時間が短いため、施工効率の観点で優れている。また、伸び率が高いことから耐衝撃性も期待できるため、本開発で採用することとした。

ダスト飛散防止材選定の表（赤枠：選定した材料）

		ポリウレア樹脂	スプレタン	ポリウレタン樹脂	エポキシ樹脂	アクリル樹脂
原料	原材料	ポリイソシアネート、ポリアミン	ポリイソシアネート、ポリアミン、ポリオール、添加剤	ポリイソシアネート、ポリオール、ジアミン	ビスフェノールA、エピクロルヒドリン	アクリル酸エステル 又は、メタクリル酸エステル
	溶剤要否	不要	不要	不要	不要	必要
性能	引張強度	20MPa	20MPa	15MPa	70MPa	30MPa
	伸び率	400%	60%	50%	3%	5%
	難燃性	難燃性	難燃性	難燃性グレード有り	難燃性グレード有り	可燃性
施工	施工方法	吹付け施工	吹付け施工	吹付け施工	ローラー塗り施工	吹付け施工
	硬化時間	約10秒(指触可)	約1分(可使用時間)	数時間	数時間	数時間
結論		○:採用 ・硬化時間が短い ・伸び率が大きく、衝撃にも破れにくい	○:次点 ・硬化時間が短い ・ポリウレアに対して伸び率が小さい ・輸入品((株)KEMICA Coatings社)	× ・硬化時間が長い ・ポリウレアに対して伸び率が小さい	× ・硬化時間が長い ・ポリウレアに対して強度は高いが、伸び率が小さい	× ・可燃性 ・硬化時間が長い ・ポリウレアに対して強度は高いが、伸び率が小さい。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(ダスト飛散防止材の材質および構造)(2/3)

選定したダスト飛散防止材と類似研究にて開発された材料との比較結果を以下に示す。

- 前頁にて選定した「ポリウレア樹脂」と類似研究* 1にて開発された「RTVFA878樹脂」について、機能比較を行った結果、「飛散防止」、「搬入性」、「施工性」の項目については、同程度の機能性であることを確認した。一方で、「難燃性」、「水素発生有無」の項目については、ポリウレアが本工法の適用性の観点で適していることを確認した。
- 上記評価結果より、本事業のダスト飛散防止材として「ポリウレア樹脂」を採用する。

* 1類似研究（事業者:Onet Technologies):令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業」に関する補助事業（第二次公募、燃料デブリの取り出し工法の開発
燃料デブリ飛散抑制技術の開発）

7. 加工時落下対策技術の開発

7.3.3 概念検討

② 対策の材質, 構造および施工の検討(ダスト飛散防止材の材質および構造)(3/3)

➤ ダスト飛散防止材吹付の施工

ダスト飛散防止材として選定したポリウレアは, PCV内での施工を想定しているため, ロボットでの施工が必要である。

一般的なポロウレアの施工は, 右図のような市販機器を用い, 人手にて塗料を塗り重ねて行う。

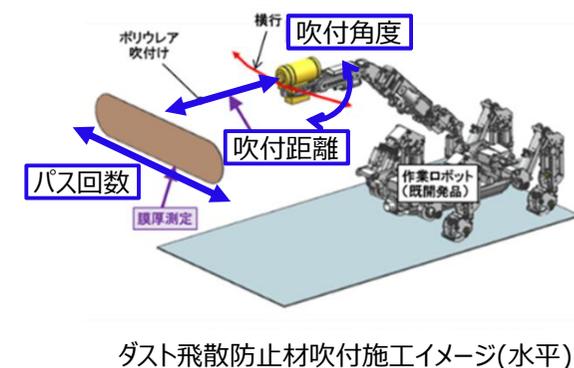
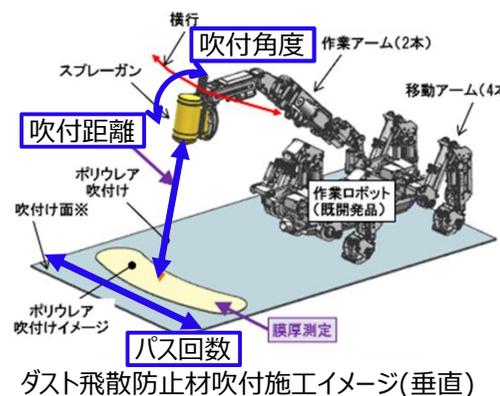
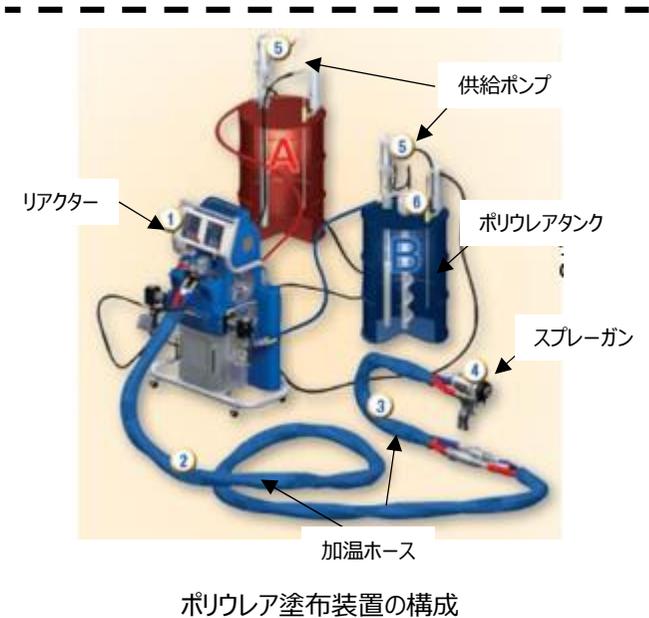
本事業では, ダスト飛散防止のため膜厚を2mm以上*1と設定し, ロボットによる施工を検討した際, 先端部のスプレーノズルの持ち手を人手からロボットのアームに置き換え, 塗料を塗りかねる施工を検討した。

ロボットによる施工の実現性確認を目的としていたため, メーカー保有の遠隔ロボットのアーム部分にスプレーノズルを取り付け, 垂直, 水平面に対する吹付施工の実施を検討した。本施工性確認について, 要素試験にて確認する。

*1膜厚設定根拠として, 下記文献より, ポリウレアの保水性(水を通さない)の膜厚が示されており, 保水が可能であれば, ダスト等の微粒子の通過防止も可能との考えより適用している。

(参照文献)

アーバンインフラ・テクノロジー推進会議 第32回技術研究発表会「ポリウレア樹脂を用いたコンクリート構造物の機能保持・向上(清水建設, 日本工営, 三井化学産資)(2020年11月20日)より引用



7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

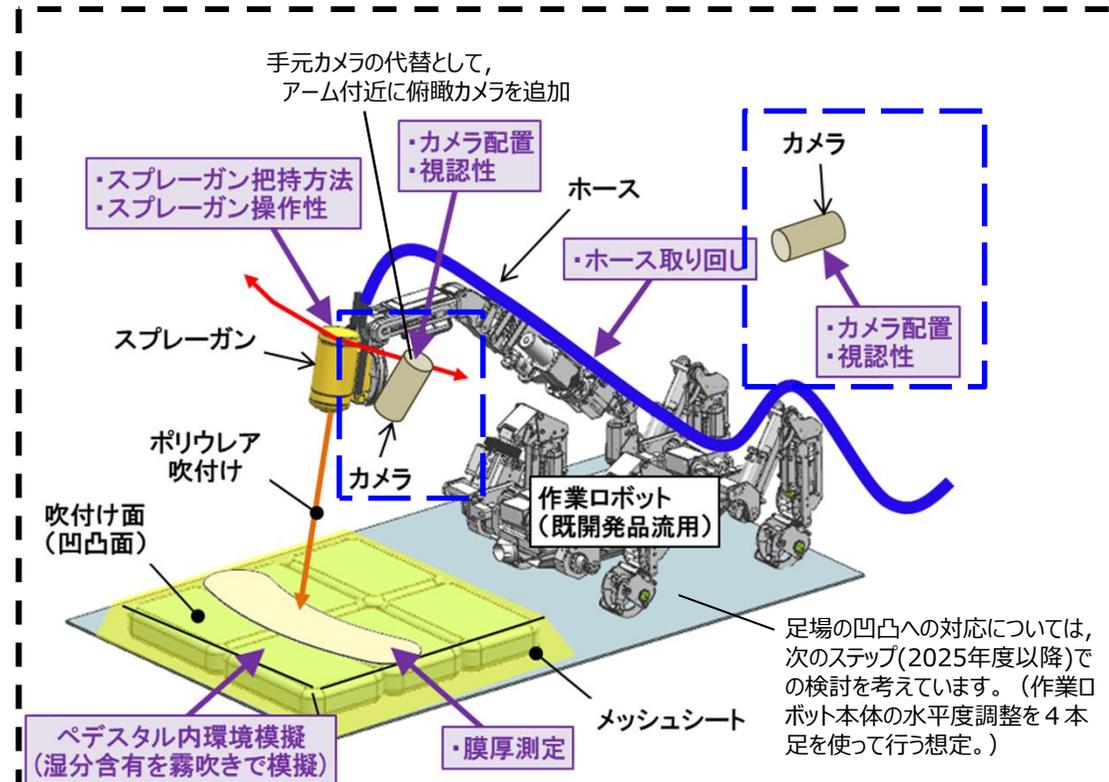
②対策の材質,構造および施工の検討(ダスト飛散防止材吹付の遠隔施工方法)(1/1)

➤ダスト飛散防止材吹付の遠隔施工

吹付施工は、試験装置(遠隔ロボット)によって施工されるため、吹付工法の作業ステップと同様である。遠隔施工については、俯瞰カメラ1台、手元カメラ1台のカメラ視野によって吹付作業を遂行することを検討した。

遠隔施工確認試験では、ダスト飛散防止材の仕上がり具合の判定基準を吹付試験と同じ、厚み2mm以上とした。

また、遠隔施工時は、実機を想定した吹付面とするため、凹凸がある吹付面で施工することを検討した。



ダスト飛散防止材吹付施工試験イメージ (遠隔施工)

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.3 概念検討

②対策の材質,構造および施工の検討(ダスト飛散防止材検討のまとめ)(1/1)

➤ ダスト飛散防止材吹付

ダスト飛散防止材として5種類の材料を検討し、「材質」、「性能」、「施工性」を比較した結果、吹付工法に適した材料として、「ポリウレア樹脂」を選定した。

また、吹付工法の検討としてRPV内での作業を想定し、ロボットによる施工を検討した。当該ロボットによる吹付施工の条件設定を確認するため、要素試験を実施した。

➤ 遠隔施工方法

ダスト飛散防止材の施工は、ロボットによる施工を想定しているため、遠隔施工の検討として俯瞰カメラ1台および手元カメラ1台の視野による施工を検討した。

当該カメラ視野にてダスト飛散防止材の吹付施工が可能かを確認するため、要素試験を実施した。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

① 緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（1/8）

a. 緩衝体の衝撃吸収性確認試験（1/4）

➤ 目的

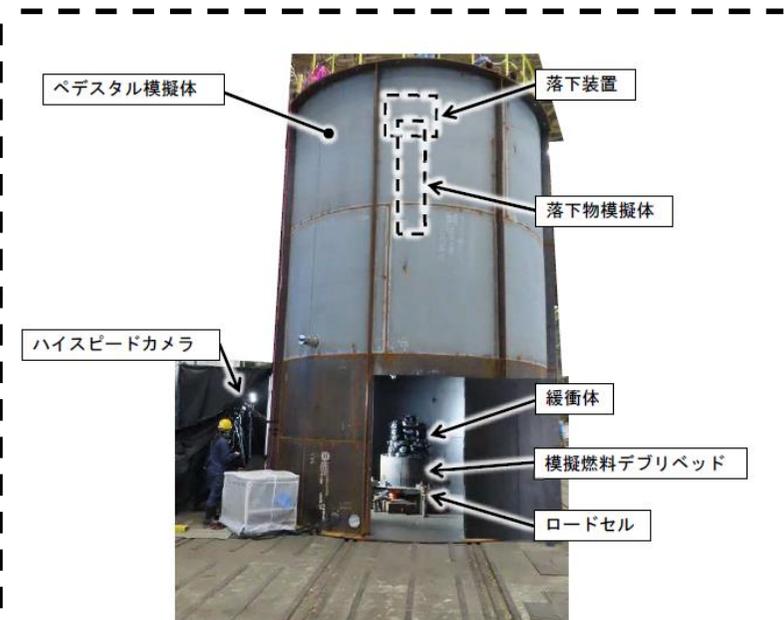
脆性素材のサイズ，形状および充填率等の緩衝体仕様を設定するため，計画した縮小試験（1/5スケール試験）と実規模試験を行い，緩衝体の性能確認を行うことを目的とする。

➤ 試験概要

- ✓ 縮小試験で，緩衝体の寸法および中に充填する脆性素材(ビーズ，砂，碎石)の粒径，落下距離(実際の1/5サイズの1m)，落下物サイズを1/5サイズ(寸法は1/5，重量は1/125)として落下試験を実施し，緩衝体の仕様検討を行った。縮小試験で効果が見込まれる緩衝体内に入れる充填材について，効果を確認するため実規模サイズでの落下試験にて効果を確認した。落下高さは，実機寸法と同様5mとした。
- ✓ 実機適用を考慮した緩衝体を設置した場合における模擬燃料デブリベッドの損傷低減およびダスト飛散低減効果を確認した。ダスト飛散確認試験は，想定事象の検証試験と同条件(模擬燃料デブリベッドへ粉体を散布)にて実施した。

➤ 試験結果

- ✓ 緩衝体(脆性素材充填)で検討している脆性素材について比較評価した結果，ビーズ形状では，落下模擬体の落下エネルギーを吸収することが出来ず，落下模擬体が積層している緩衝体を貫通し，模擬燃料デブリベッドに損傷を与えた。
- ✓ ビーズの代替として選定した碎石は，落下物模擬体の貫通を防止し，模擬燃料デブリベッドの損傷を防止する効果を確認できた。
- ✓ なお，緩衝効果を得るには，積層高さを1m程度にする必要があった。
- ✓ 上記試験結果を踏まえ，実機適用に向けて積層高さを低減できる見込みのある構造への見直しを行うこととした。



実規模試験の試験装置

7. 加工時落下対策技術の開発

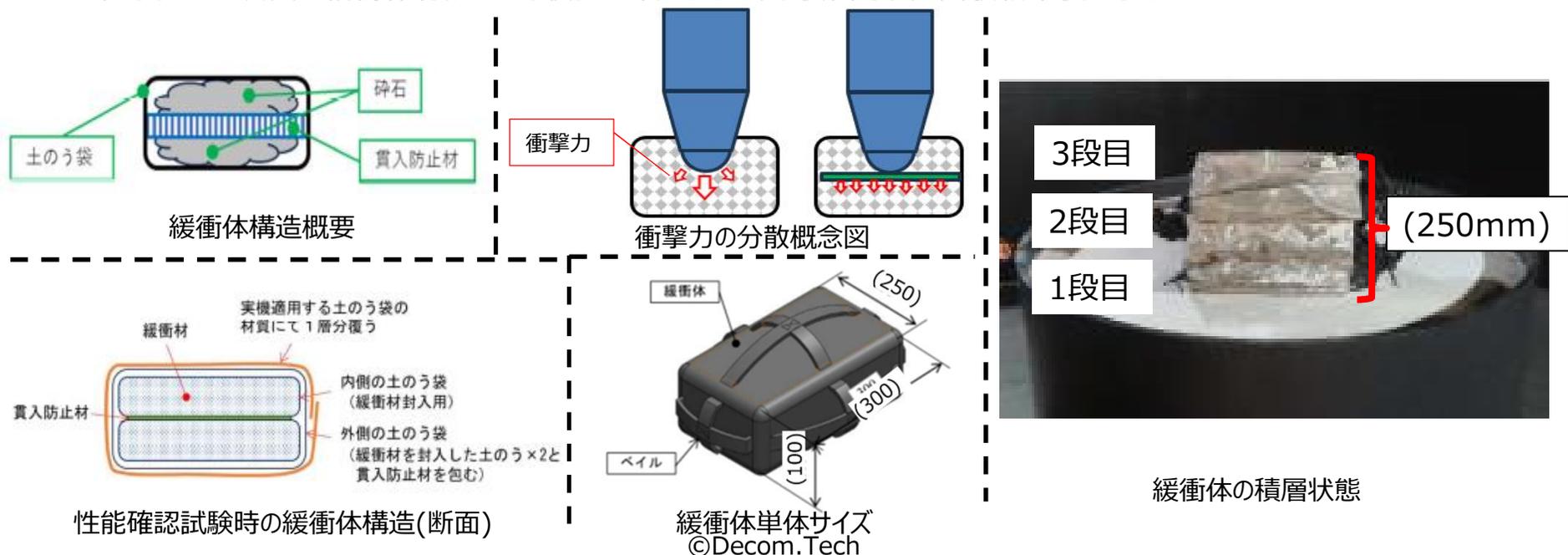
●7.3.4 要素試験による検証

① 緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（2/8）

a. 緩衝体の衝撃吸収性確認試験(2/4)

➤ 検討および試験結果

- ✓前項の試験の結果を踏まえ実機適用を考慮した積層高さ低減案を検討し，緩衝体(脆性素材充填)として検討した土のう(碎石を充填した構造)に貫入防止材を入れた下図の構造を立案した。検討の経緯を以下に示す。
 - ・碎石の充填率を検討するための実規模試験で，落下物模擬体が緩衝体に鋭く刺さったことから，落下物模擬体の先端部面積が小さく，土のう内の碎石が落下物模擬体によりかき分けられ，計画した緩衝効果が得られないと推測する。
 - ・そこで貫入防止材(鉄板)を内部に入れ，落下物模擬体による碎石のかき分けを防止し，碎石が受ける衝撃力の面積を広げ，計画した緩衝効果を得るようにした。
- ✓貫入防止材の厚み選定として2mm，4mm，6mm，8mmで積層厚さを2段，3段と変化させた落下試験を実施し，効果を確認した。試験結果より，8mmの貫入防止材を入れた緩衝体を3段積層することで，十分効果が得られることを確認した。次頁に緩衝体有無による模擬燃料デブリベッド表面写真と試験結果表を示す。



7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

① 緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（3/8）

a. 緩衝体の衝撃吸収性確認試験（3/4）

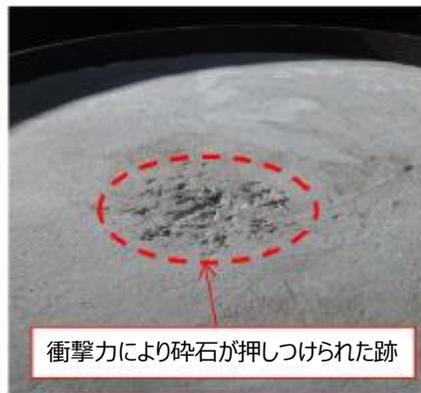
➤ 検討および試験結果（続き）

- ✓ 下の写真に示すように構造を改良した緩衝体では，緩衝体無しの場合に比べ模擬燃料デブリベッドへの貫入深さが抑えられることを確認した。なお，最大衝撃力については，貫入防止材を入れたことによる低減はなかった。次頁に考察を示す。



落下物模擬体の先端部が衝突した痕跡

緩衝体無し：貫入深さ86.5mm



衝撃力により碎石が押しつけられた跡

緩衝体有り：貫入深さ4.5mm（試験No.4）

模擬燃料デブリベッドの緩衝体有無の痕跡

緩衝体の衝撃吸収確認試験結果

No.	貫入防止材		試験回数	緩衝体積層厚さ（実測値）	緩衝体への最大貫入深さ [mm]	模擬燃料デブリベッドの損傷		模擬燃料デブリベッドが受ける最大衝撃力 [kN]
	総板厚 [mm]	1段あたりの板厚 [mm]				陥没深さ [mm]	陥没面積 [mm ²]	
落下衝撃影響確認試験（5[m]落下／乾燥）				緩衝体無し	—	45*1	24,416*1	1066
落下衝撃影響確認試験（5[m]落下／湿潤）				緩衝体無し	—	86.5*1	97,460*1	638
1	12	6	1	2段(177[mm])	176	15.5	15,607	1375
2	8	4	1	2段(152[mm])	154	14.5	11,828	1645
3	4	2	1	2段(155[mm])	179（貫通）	27	10,425	1180
4	24	8	1	3段(241[mm])	202	5.5	3,536	1384
			2	3段(236[mm])	184	4.5	4,895	1187
5	18	6	1	3段(243[mm])	216	7	11,082	1027
			2	3段(257[mm])	215	7.5	9,896	961
			3	3段(235[mm])	208	10.5	4,235	931
6	12	4	1	3段(237[mm])	219	7	6,467	1197
			2	3段(236[mm])	211	17	18,176	1143
			3	3段(235[mm])	207	11	9,896	1235

*1 想定事象の試験検証での陥没深さおよび陥没面積の値を示す。

□：落下衝撃確認試験時の最大貫入深さと緩衝体有りでの最小貫入深さ箇所を示す。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

①緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（4/8）

a.緩衝体の衝撃吸収性確認試験(4/4)

➤ 検討および試験結果(続き)

✓最大衝撃力について

最大衝撃力は，緩衝体無しに比べ緩衝体2段積みの状態が大きく，3段積みでは同程度となった。(右図参照)

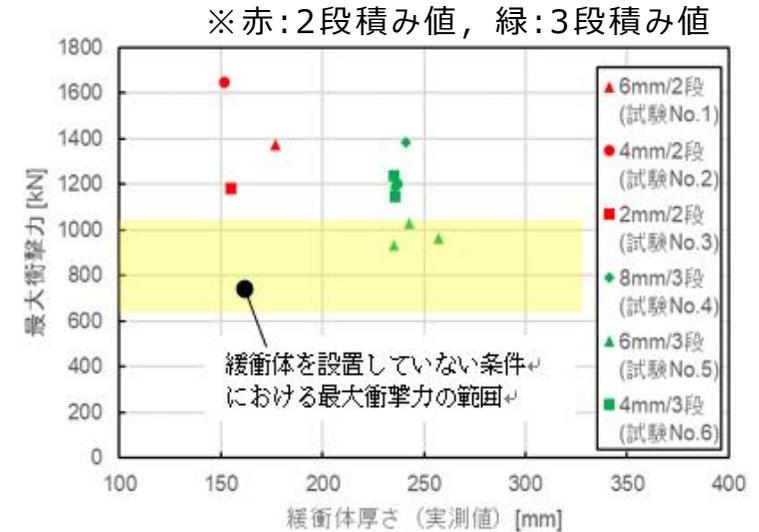
試験結果から緩衝体が無い状態では，模擬燃料デブリベッドが損傷することで衝撃力を吸収し，緩衝体（3段積み）が有る状態では，模擬燃料デブリベッドの損傷を低減できたことから，落下物模擬体の衝撃力を緩衝体が吸収したと考えられる。

また，3段積みでも積層厚さは250mm程度と薄いため，衝撃力が同程度となったと考えられる。

そこで，緩衝体を受ける衝撃力を計算により算出して比較し，考察の妥当性を検証することとした。

落下物模擬体が緩衝体により減速される最大加速度を机上計算にて算出し，落下物模擬体の質量(710 [kg])を掛け算出した結果，緩衝体3段積み時の衝撃荷重と同等の荷重となり，上記の考察が妥当であることを確認した。

以上より，緩衝体3段（250mm層）の模擬燃料デブリベッドに与える荷重は，緩衝体が無い場合と同等であるが，燃料デブリの破損状況（陥没深さや陥没面積）の低減結果から，燃料デブリベッドの損傷防止機能は有していることを確認した。



最大衝撃力と緩衝体厚さ(積層)の散布図

ロードセルによる衝撃力範囲と計算による衝撃力範囲

計測箇所(緩衝体無し)	最大衝撃力 [kN]
ロードセルの値	638～1066
計測箇所(緩衝体有り，3段積み)	最大衝撃力 [kN]
ロードセルの値	931～1384
計算条件	最大衝撃力 [kN]
・緩衝体(3段積層)の貫入深さ h : 219～184 [mm]	705～841

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

① 緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（5/8）

b.ダスト飛散確認試験(1/2)

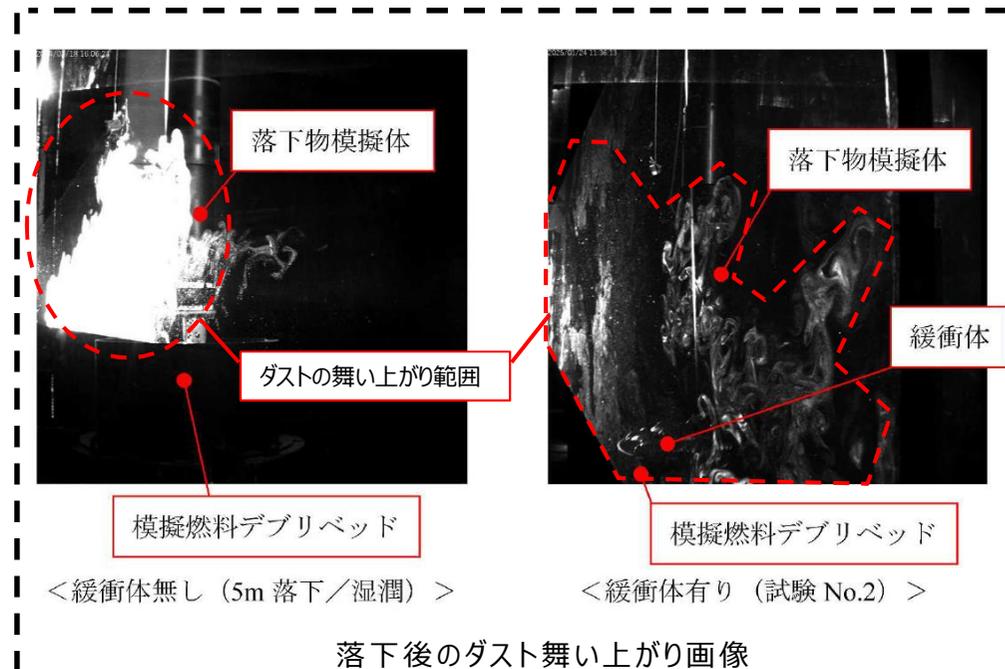
➤ 検討および試験結果

✓ 緩衝体の設置によるダスト飛散低減効果を確認する目的で実施したダスト飛散確認試験の結果を以下に示す。
 なお，その評価は緩衝体を設置していない条件と緩衝体を設置した条件の推定飛散個数の比較により評価した。
 次頁に計測結果の表を示す。

・湿潤条件において，緩衝体を設置することで，3割程度に推定飛散量が減少した。(次頁表の赤枠箇所比較)

・乾燥条件において，緩衝体を設置することで，7割程度に推定飛散量が減少した。(次頁表の青枠箇所比較)

✓ また，緩衝体みの飛散量(試験No.1)と緩衝体，燃料デブリ粉体，模擬燃料デブリベッドの飛散量(試験No.2)の差は 0.02×10^8 [個/s](次頁表の緑枠箇所)であり，粒子の大半は緩衝体から発生したもので，模擬燃料デブリ粉末や模擬燃料デブリベッドからのダスト飛散を防止しており，飛散防止機能を有していることを確認した。



落下後のダスト舞い上がり画像
 (微粒子可視化システムの撮影画像(下段カメラ))

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

① 緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（6/8）

b. ダスト飛散確認試験（2/2）

ダスト飛散確認試験（緩衝体有り/無し）結果

試験No. (又は名称)	乾燥 / 湿潤	燃料デブリ ベッド 保護板 *1 有無	試験 回数	緩衝体 積層厚さ (実測値) [mm]	最大飛散 高さ [mm]	落下後20分間 における平均推 定 飛散個数 [個/s]
ダスト飛散 確認試験 5m落下/乾燥	乾燥	無	1	緩衝体 無し	1500	0.8×10^8
			2	緩衝体 無し	2500	1.0×10^8
			平均	—	—	0.9×10^8
ダスト飛散 確認試験 5m落下/湿潤	湿潤	無	1	緩衝体 無し	2125	1.7×10^8
			2	緩衝体 無し	1625	1.2×10^8
			平均	—	—	1.45×10^8
試験No.1 (緩衝体のみ)	湿潤	有	1	3段 226(mm)	4200	0.38×10^8
			2	3段 209(mm)	4450	0.23×10^8
			平均	—	—	0.30×10^8
試験No.2	湿潤	無	1	3段 235(mm)	4575 (画角 上限)	0.53×10^8
			2	3段 239(mm)	3575	0.10×10^8
			平均	—	—	0.31×10^8
試験No.2平均 — 試験No.1平均 (緩衝体分除外)	—	—	—	—	—	0.02×10^8

・粒子数量は，微粒子可視化システムにて算出された値である。

*1 燃料デブリベッド保護板：
緩衝体だけの飛散量を確認するため模擬燃料デブリベッドを覆った板

 ：湿潤条件において，緩衝体を設置することで，3割程度に推定飛散量が減少したことを示す

 ：乾燥条件において，緩衝体を設置することで，7割程度に推定飛散量が減少したことを示す

 ：緩衝体だけの飛散量(試験No.1)と緩衝体，燃料デブリ粉体，模擬燃料デブリベッドの飛散量(試験No.2)の差を示す

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

① 緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（7/8）

c. 緩衝体の遠隔施工確認試験(1/2)

➤ 目的

1-1 緩衝体の衝撃吸収性確認試験の結果で選定した緩衝体に対する設置性，移動性，回収性の確認を実機のペDESTAL底部を想定した凹凸面，暗所とした試験エリアにて実施し，遠隔施工性の確認を目的とした。

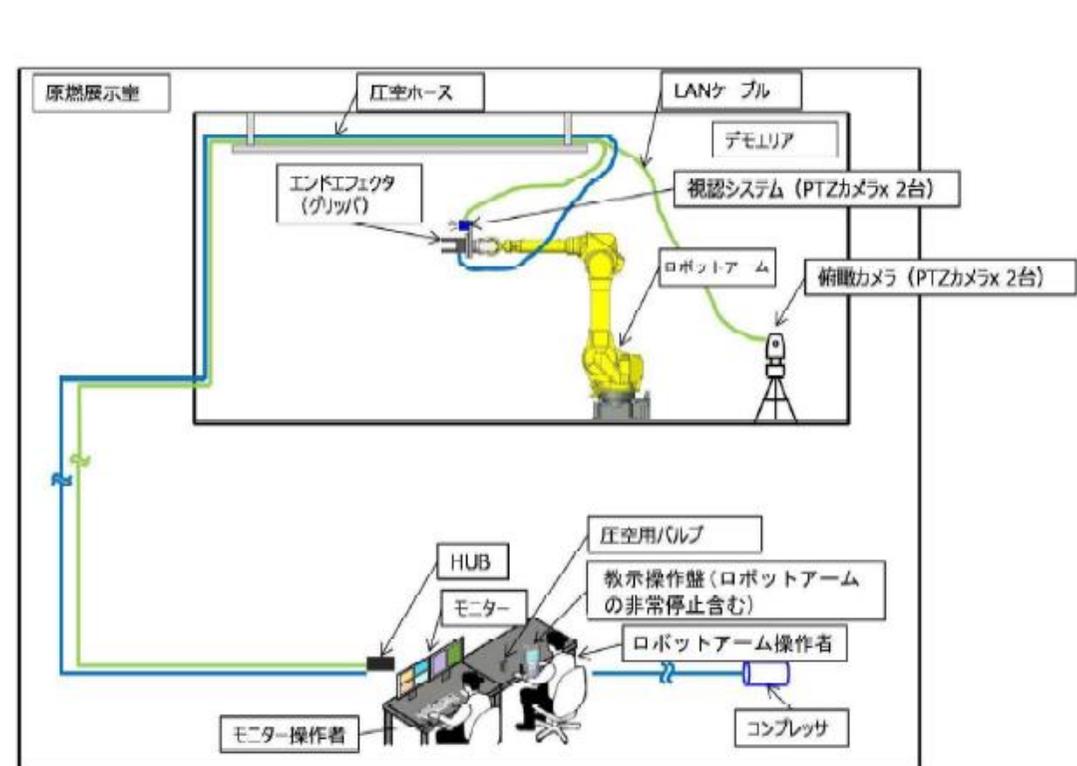
➤ 試験概要

✓ペDESTAL底部を想定した凹凸面，暗所とした試験エリアで，緩衝体の搬入・設置・内部での移動・回収が行えるかをロボットアーム(伸縮アーム先端部，エンドエフェクタを模擬)とカメラ(手元カメラ，俯瞰カメラ)による視野で施工が可能かを確認した。

また，X-6ペネを模擬した円筒内を並行移動可能かを確認した。

✓緩衝体にベイル*1を設け，ベイル長さの違いによる遠隔施工性への影響を確認した。

*1エンドエフェクタ(フック機構)による緩衝体操作を容易にするため，緩衝体に付けた帯状のもの



試験装置構成の概略図

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

①緩衝体の落下影響確認試験，遠隔施工性確認試験（8/8）

c.緩衝体の遠隔施工確認試験(2/2)

➤試験結果

- ✓実機で使用する伸縮アームを模擬した汎用性ロボットアームにて，選定したエンドエフェクタ(グリップ型，フック型)を用い緩衝体の設置性，移動性，回収性の確認するハンドリング試験を行った結果，フック型による施工の方が成立性が高いことを確認した。
- ✓遠隔ハンドリングに適する緩衝体のバイルを以下の通り選定した。
 - ・複数材料のバイルから，柔軟性，形状保持の観点から，繊維と細いワイヤを組み合わせた形状が有効であると評価した。
 - ・バイル長さについては，ハンドリング性の観点から長さ200mmのものが適していると評価した。
- ✓今後モックアップにて抽出した課題・対策案の検証を行う。課題と対策案を7.3.5に記載する。

バイル材質の選定結果(*1)

No.	材質	選定結果	課題
1	繊維製ベルト+細いワイヤ	採用	・バイルを引き出す必要がある。
2	金属バンド	不採用	・バイルの形状保持力が高く，緩衝体の設置が困難
3	ワイヤ	不採用	・金属バンドと同様，バイルの形状保持力が高く，緩衝体の設置が困難
4	ゴムベルト	不採用	・表面の摩擦が緩衝体の設置性を低下する
5	金属チェーン	不採用	・フックに掛けることが困難

*1グリップ機構は，緩衝体本体を把持するため，バイルはフック機構を用いた場合を想定して評価した。

遠隔施工性確認試験結果

計測項目	フック機構	グリップ機構
緩衝体の把持	達成	達成
緩衝体の搬入	達成	達成
緩衝体の設置	達成	未達成
緩衝体の移動	達成	未達成
緩衝体の回収 (破損無し)	達成	未達成
緩衝体の回収 (破損有り)	達成	未達成
総評	○ 実機にも適用できる見通し	× 実機適用は困難な見通し

・遠隔施工性確認試験として，フック機構，グリップ機構で2回づつ試験を実施しており，2回とも成功した計測項目を成功，1回でもできなかった項目を未達成と表記した。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

② 落下防止シートの性能確認試験，遠隔施工性確認試験（1/7）

a. 落下防止シートの性能確認試験（1/3）

➤ 目的

計画した積層構造を採用した落下防止シートの衝撃吸収性（落下物の貫入防止）およびシートのたわみ抑制（想定落下物をシートが受け止めた際に下方の堆積物へ接触することを防止する）効果が，計画した数値以内であることを確認することを目的とした。

➤ 試験概要

CRDハウジングを模擬した落下用模擬体をクレーンで吊り上げ，落下防止シート1.5m上から落下させ，落下防止シートの損傷状況，たわみ量を計測する試験を実施した。

・たわみ計画値：1m以内

➤ 試験結果

✓予備試験^{*1}で積層構造の接続部が損傷し，試験計画した状態への修復が困難な状態となったため，試験計画（落下実施箇所）の修正を行い試験を行った。

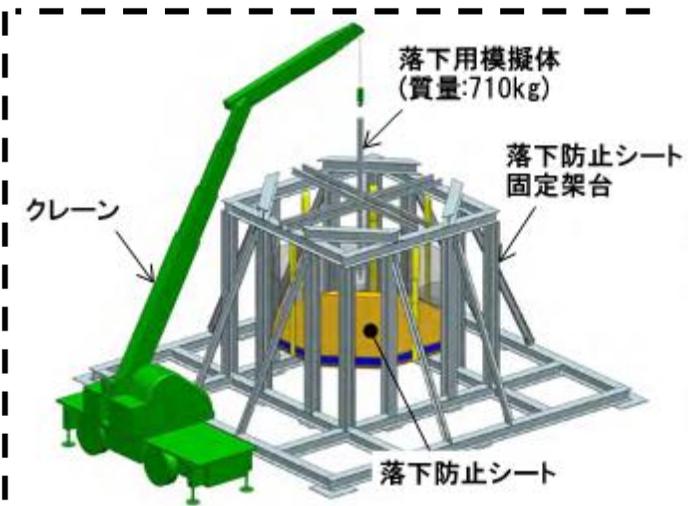
上記状況でも半分以上の積層構造部は形状を維持し，オリジナル状態に近い箇所を使用し，①外周部の0°位置での落下試験を継続した。

*1予備試験：約100°位置で落下模擬体を0.5mの高さから落下させた試験。

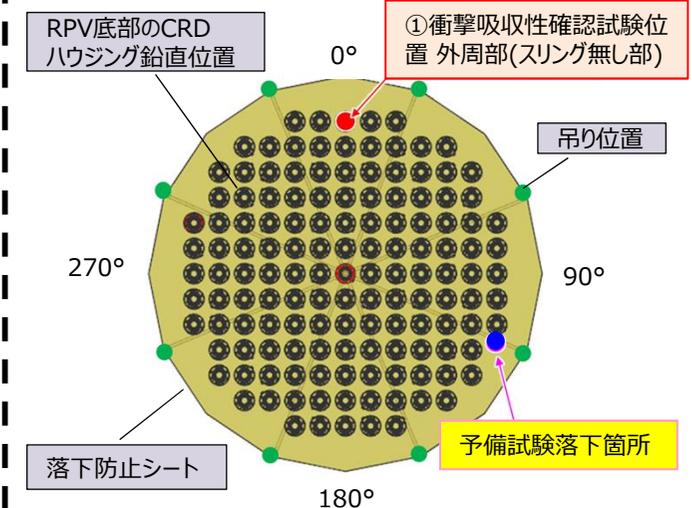
✓①の位置に落下用模擬体を落下させると落下防止シートがたわみ，床面まで到達し，許容たわみ1mを超過する状態となった。

また，落下用模擬体が緩衝体とともに床面に到達したため，貫通有無は確認できなかった。シートはハニカム連結が崩れた状態で，落下防止シートの損傷は更に拡大した。

落下後の落下防止シートの状況および考察を次頁に示す。



要素試験装置図 鳥観図



落下用模擬体の落下位置

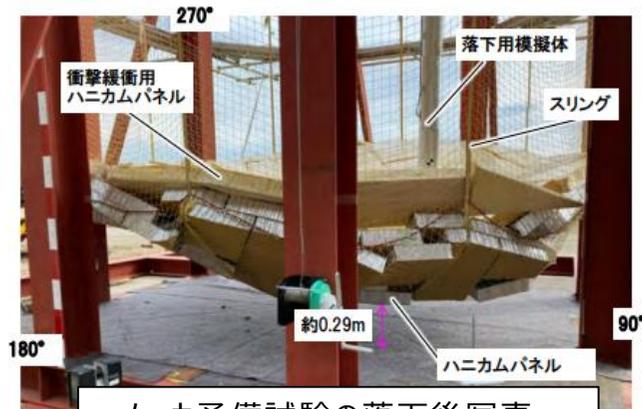
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

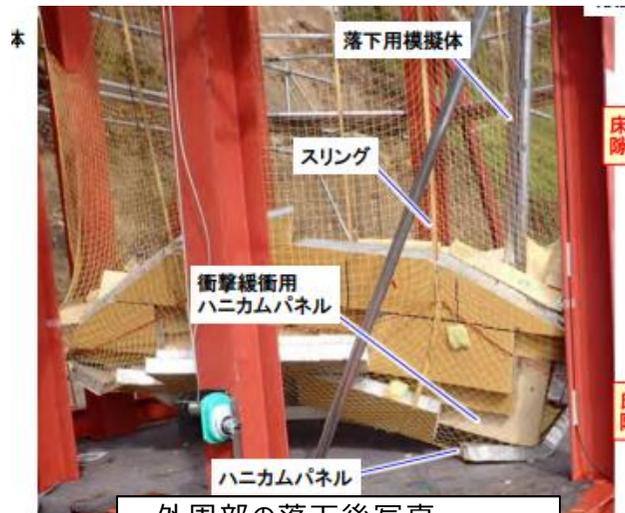
② 落下防止シートの性能確認試験，遠隔施工性確認試験（2/7）

a. 落下防止シートの性能確認試験（2/3）

落下試験状況写真を以下に示す。



メーカー予備試験の落下後写真
(1/3程度が損壊)



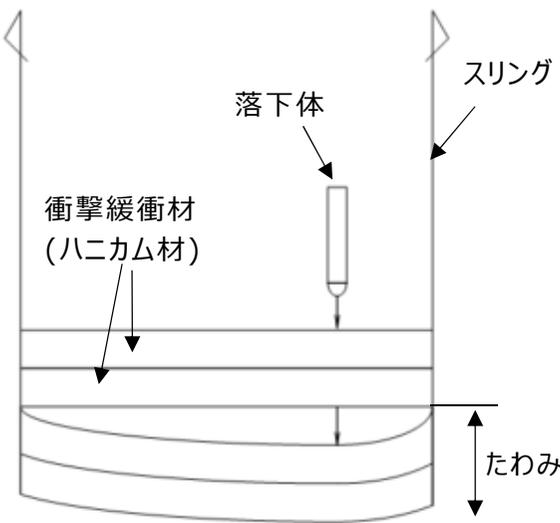
外周部の落下後写真
(ほぼ全てが損壊)

(考察)

以下に落下防止シートの想定挙動と実際の挙動の図を示す。

予備試験で積層構造の落下防止シートが破損した要因としては、 $\Phi 4.7\text{m}$ の落下防止シートを形成する緩衝体ハニカムのブロックを接続する接着剤が落下衝撃に耐えられず剥離し、ブロック同士の整列が崩れてしまったことにより、想定したネットのたわみを超えることとなったと推定。たわみ軽減の対策検討の結果、次頁に示す対策案を立案した。

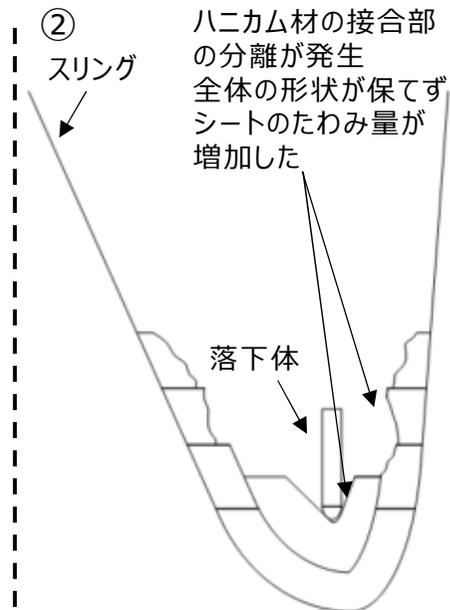
①



想定時の落下挙動

©Decom.Tech

②



実際の落下挙動

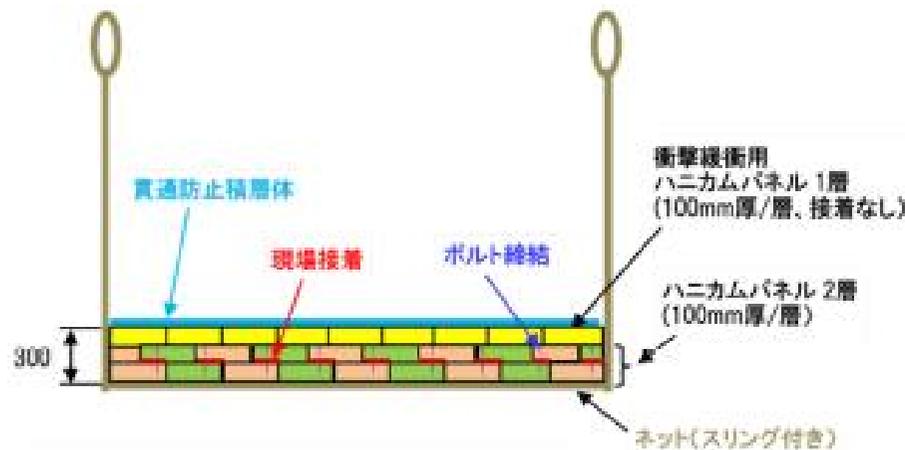
7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

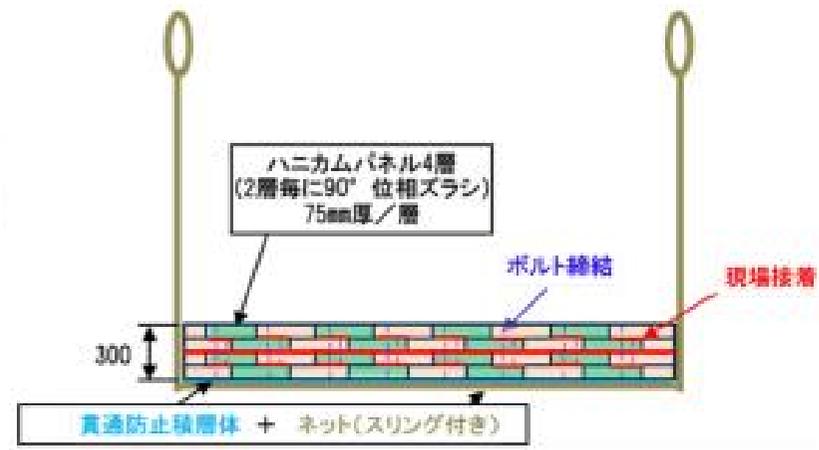
②落下防止シートの衝撃吸収性確認試験，遠隔施工性確認試験（3/7）

a.落下防止シートの性能確認試験(3/3)

落下防止シートの破損事象が確認され，その原因をハニカムパネルの接合力不足と考えた。そのため，接着面の強度確保および許容引張荷重の向上によりパネル間の接合力を向上させ，落下防止シートの形状維持を目的とした改良案を検討した。落下防止シートの当初シートと改良計画を下図に示す。



落下防止シートの構造(当初シート)



落下防止シートの構造(改良計画)

➤(変更計画の内容)

- ✓ 接着面の強度確保のため，面積を増加（接着層を1層から3層にし，接着面積を3倍にした）させ，パネル4層構造とする。
- ✓ 許容荷重向上のため，ボルトの本数とサイズを変更（パネル重ね1式につき，M10 ボルト数本からM20 ボルト8本に変更）しパネル間を接合する。

7. 加工時落下対策技術の開発

7.3.4 要素試験による検証

② 落下防止シートの衝撃吸収性確認試験，遠隔施工性確認試験（4/7）

b. 落下防止シートの遠隔施工性確認試験（1/4）

➤ 目的

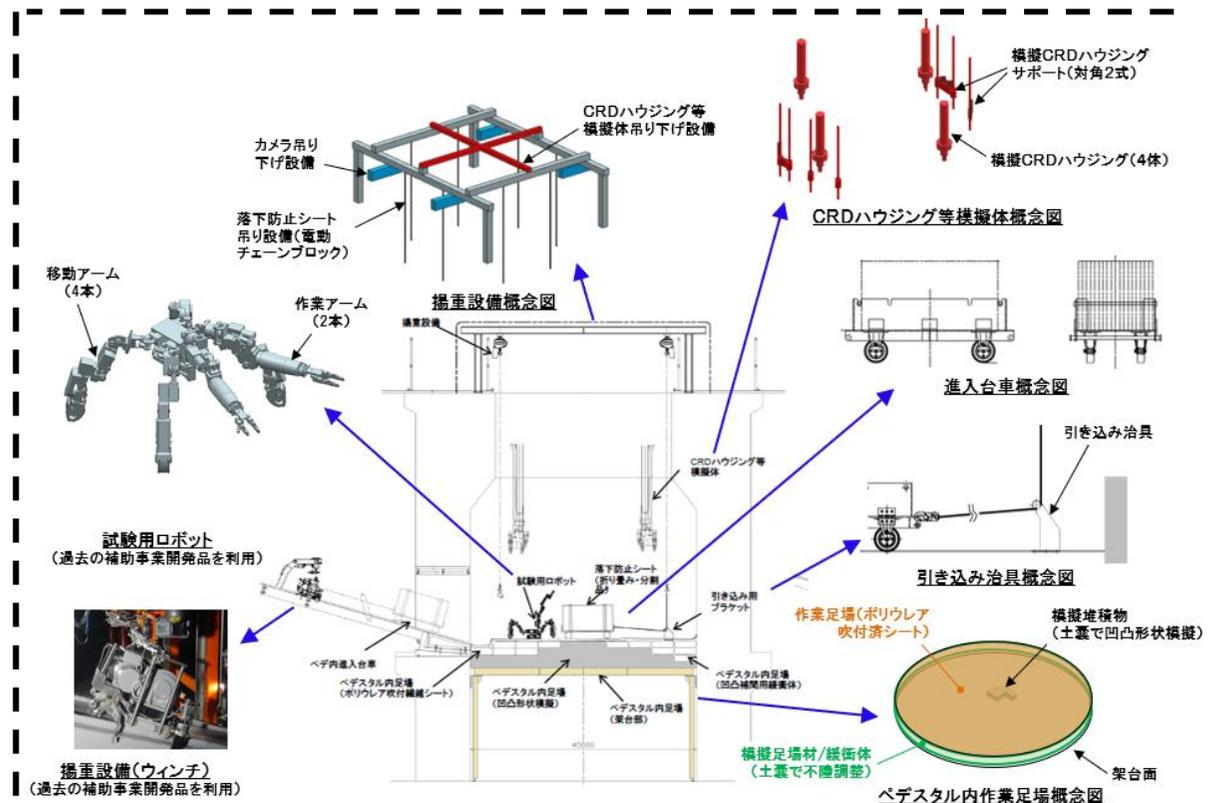
ペDESTAL内部を一部模擬した試験設備において，落下防止シート（※）の遠隔組み立て施工性の確認を目的とした。

（※）落下防止シートの性能確認試験にて使用したものと同一構造

➤ 試験概要

大型一体搬出工法の落下防止シート施工タイミングにおけるペDESTAL内部を一部模擬した試験設備を用い，遠隔施工試験を実施した。

試験は，自立移動型小型ロボットを用い，カメラによる視認にて落下防止シートの組み立て可否を確認した。右図に，設備概要を示す。



7. 加工時落下対策技術の開発

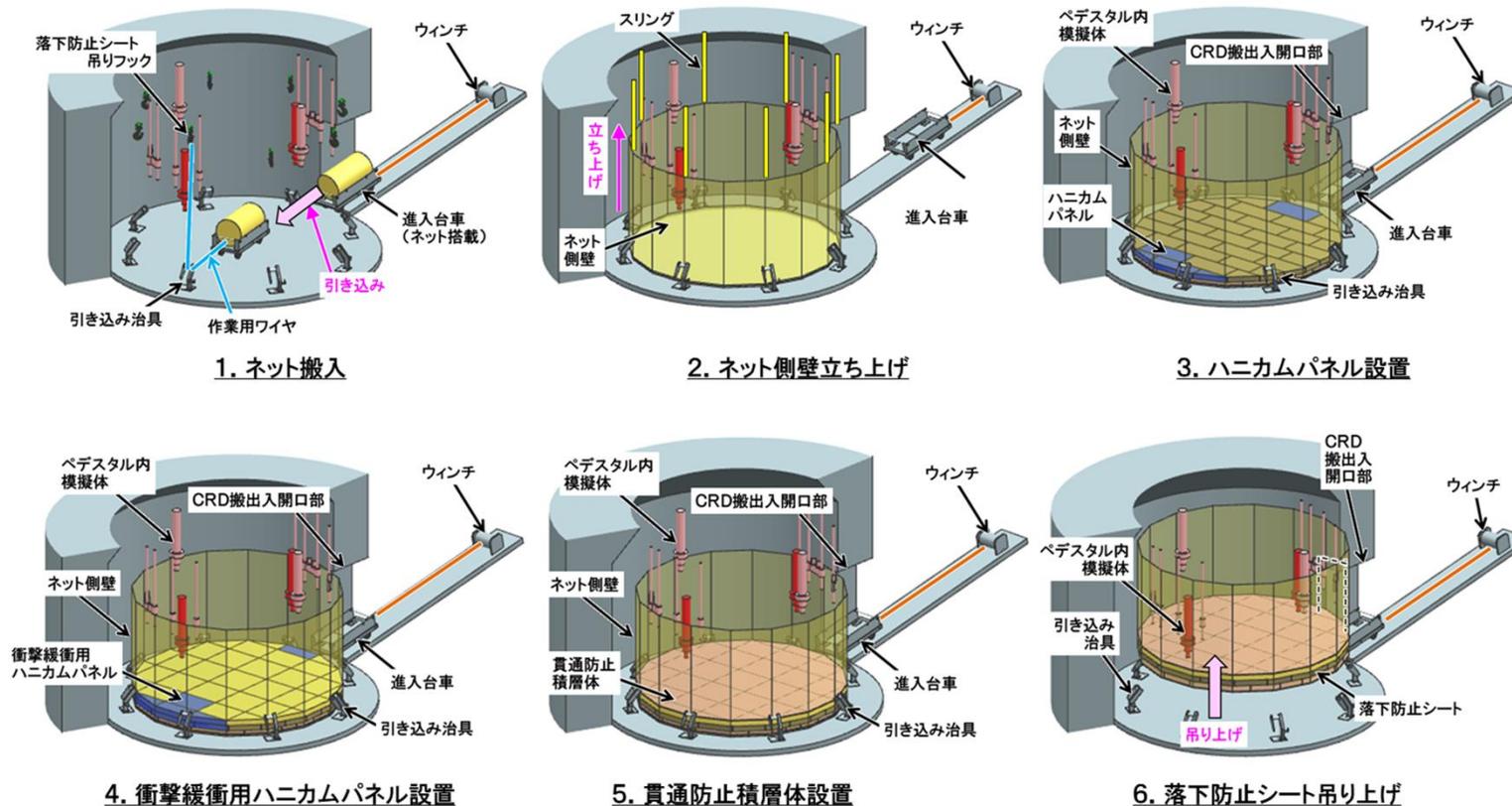
● 7.3.4 要素試験による検証

② 落下防止シートの衝撃吸収性確認試験，遠隔施工性確認試験（5/7）

b. 落下防止シートの遠隔施工性確認試験(2/4)

➤ 試験結果

ペDESTAL内部を模擬した試験設備内で，下図に示す遠隔施工手順概要のステップに従い，遠隔作業による落下防止シートの施工が可能であることを確認した。各ステップでの結果内容を次頁に示す。



落下防止シートの遠隔施工手順概要
©Decom.Tech

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

②落下防止シートの衝撃吸収性確認試験，遠隔施工性確認試験（6/7）

b.落下防止シートの遠隔施工性確認試験(3/4)

各作業ステップにおける試験結果まとめ（1/2）

No.	作業ステップ	結果内容
1	ネット搬入	<ul style="list-style-type: none"> 折り畳んだ状態のネットを積載した台車をペDESTAL内へ引き込み治具を用い引き込み，ワイヤーの付け替えを実施して台車から荷下ろしを行い，吊りワイヤーによるネットの展開が可能なことを確認した。なお，引き込み治具は，試験時はボルトで固定しており，実機適用時はポリウレタによる接着固定を想定していた。引き込み治具の固定方法の確立が課題である。
2	ネット側壁立ち上げ	<ul style="list-style-type: none"> 作業用ロボットにて玉掛けを行ったネットを吊り上げ，ネット側壁の立ち上げが可能なことを確認した。ネットを引き上げ時，たわんだネットがCRDハウジングサポート模擬体と干渉するため，ネット側壁部にエアチューブ(上・中段)を設け，展開してからネットを引き上げることでCRDハウジングサポート模擬体との干渉を防止する対策を実施した。
3	ハニカムパネル設置	<ul style="list-style-type: none"> 実機ではハニカムパネル間を接着剤及びボルトで固定するが，試験時は接着剤の代替として粘着テープを施工(人手で実施)し，ボルト(ガイドピン)固定も最初の数か所を作業用ロボットで施工(残りの反復部は人手にて実施)を行い，ハニカムパネルの施工が可能なことを確認した。 なお，施工時の照明として，CRD搬出入開口付近に1台設けて作業を実施したが，ハニカムパネル同士を固定するボルト(ガイドピン)挿入作業の照度が不十分であること，また試験時に使用した俯瞰カメラ，ロボット搭載カメラではスペックや台数の改善が課題がある。
4	衝撃緩衝用ハニカムパネル設置	<ul style="list-style-type: none"> ハニカムパネル上で衝撃緩衝用ハニカムパネルを作業用ロボットにて運搬し，マーキングを利用して所定の位置へ施工が可能なことを確認した。なお，パネルの施工は最初の数か所を作業用ロボットにて施工し，反復する部分は人手にて配置を実施した。 施工時の照度やカメラのスペック，台数の改善は，ハニカムパネル設置と同様の課題である。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.4 要素試験による検証

②落下防止シートの衝撃吸収性確認試験，遠隔施工性確認試験（7/7）

b.落下防止シートの遠隔施工性確認試験（4/4）

各作業ステップにおける試験結果まとめ（2/2）

No.	作業ステップ	結果内容
5	貫通防止積層体設	<ul style="list-style-type: none"> ネット入口まで移送した台車から，作業用ロボットにて折り畳まれた貫入防止積層体(以後シートと示す)を降ろし，所定の位置に展開が可能なことを確認した。 当該シートは，施工性向上のため，縦展開用と左右展開用に枝状にエアチューブをシートに縫い付けており，エアを供給し一気にネット内に展開する改善を行い作業効率の向上させた。
6	落下防止シート吊り上げ	<ul style="list-style-type: none"> 本確認試験では，ハニカムパネル同士を接続しておらず、シートの吊り上げ時にハニカムパネルが崩壊する可能性があったため，衝撃緩衝用ハニカムパネルを設置せず，落下防止シートを落下模擬CRDハウジング下端まで吊り上げ，形状が維持され，吊り上げが可能なことを確認した。なお，衝撃緩衝用ハニカムパネルを含めた落下防止シートの吊り上げは、強度確認の要素試験で吊り上げできることを確認しており、本遠隔取付施工性確認における模擬体との干渉や吊り上げ高さに関する確認への影響はないと考える。

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（1/12）

a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（1/8）

➤ 目的

飛散防止材として選定したポリウレアは，PCV内での施工を想定しているため，ロボットを用いた遠隔施工が必要である。そこで，本事業では，ダスト飛散防止材に対する吹付施工条件の確立を目的とし，ダスト飛散防止材吹付試験を実施した。なお，吹付施工条件の確認方法については，ポリウレアの厚みとし，判定基準以上の厚みの施工可否を確認する。

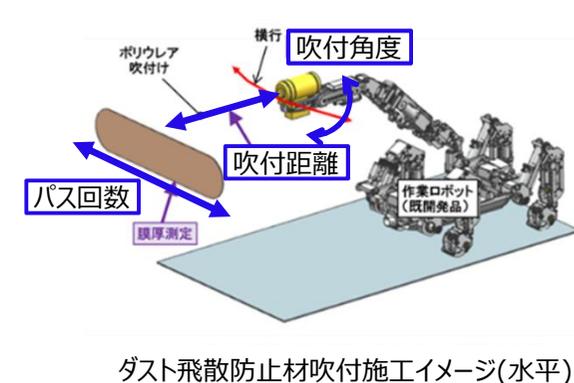
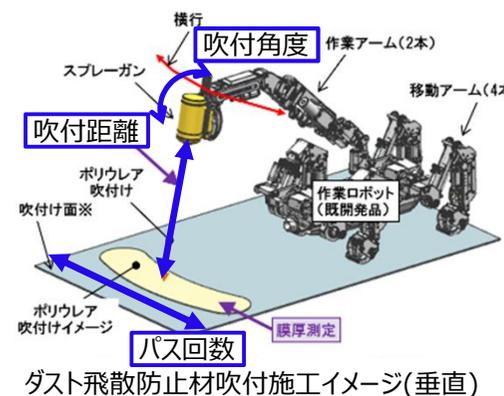
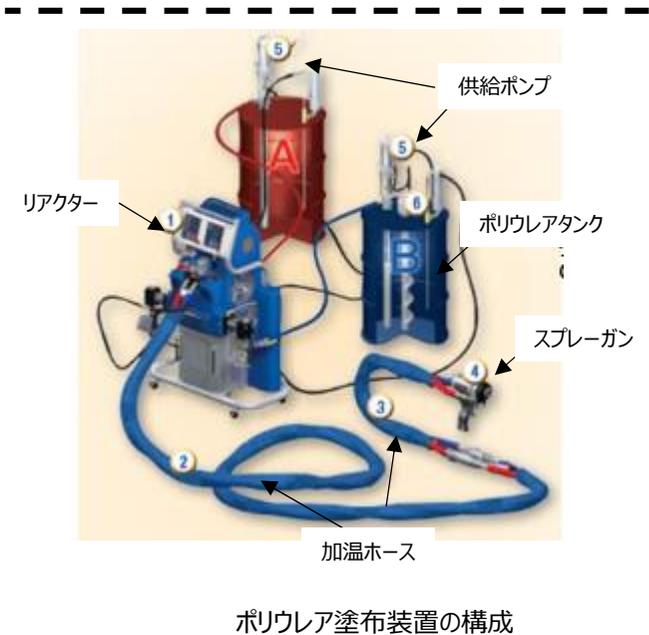
➤ 吹付試験の装置および条件

- 試験用吹付装置は，多数の施工実績がある市販の機器により構成する。（右図，供給装置部の構成を参照。また，試験時の動作名称を示す。）
- 使用するロボットは，IRIDからの借用ロボット(過去IRID研究)を適用。

- 試験は，PCV内での作業を想定し垂直下向きと水平の2種類の試験を行う。

（右図，ダスト飛散防止吹付施工イメージを参照）

- 各機器の詳細および試験条件等を次頁以降に示す。



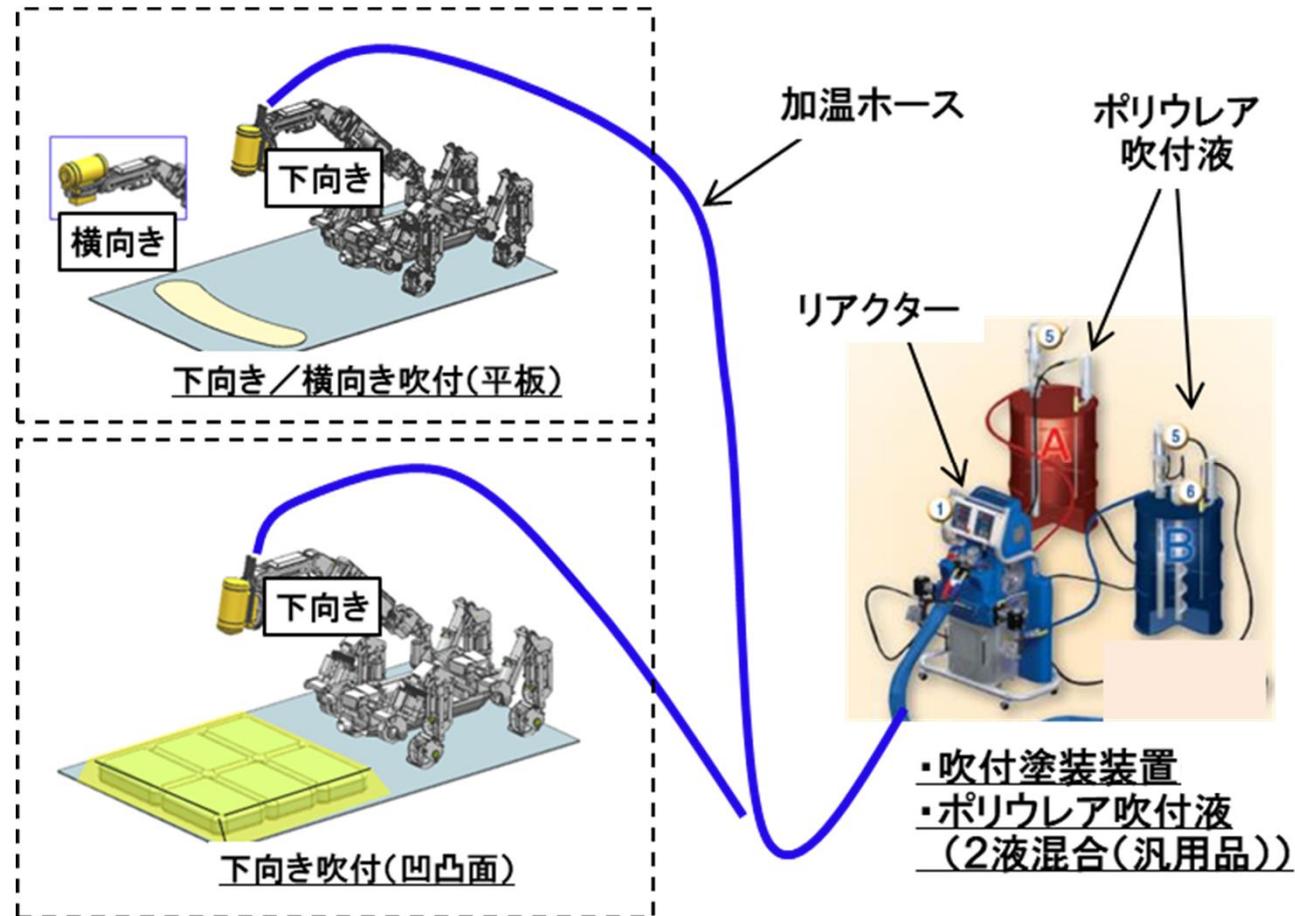
7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験, 遠隔施工性確認試験 (2/12)

a. ダスト飛散防止材の施工確認試験 (2/8)

下図に試験装置構成を示す。



ダスト飛散防止材の吹付施工試験全体図

7. 加工時落下対策技術の開発

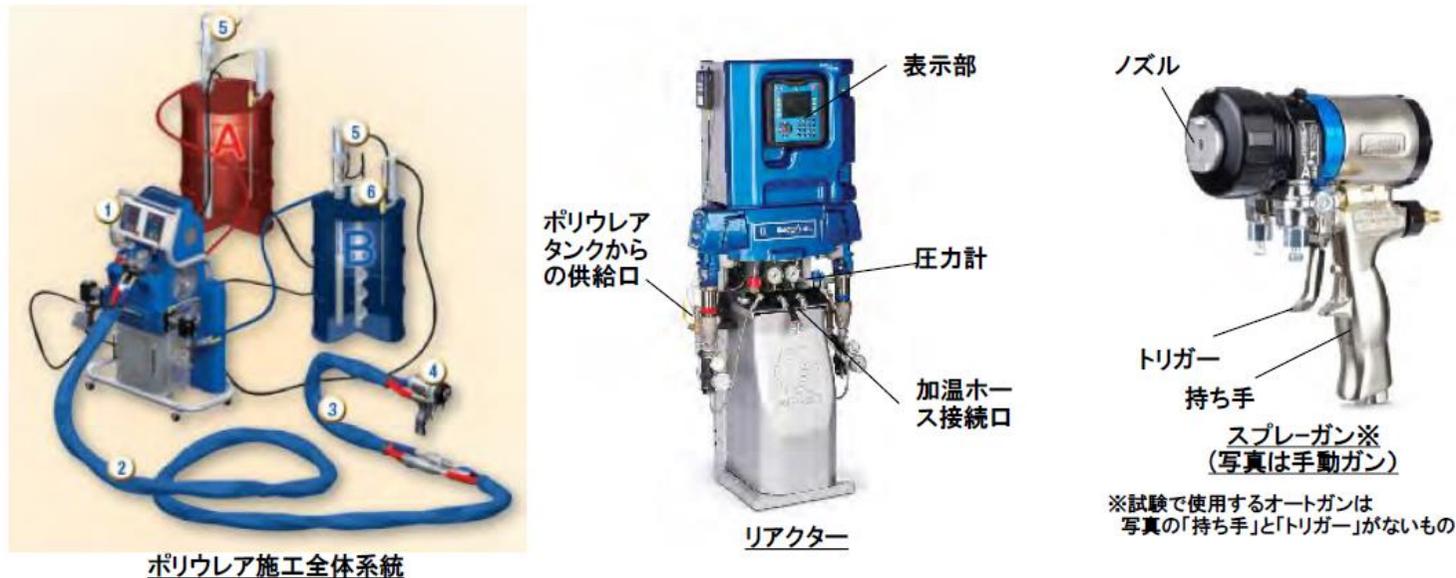
● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（3/12）

a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（3/8）

下図に試験装置詳細を以下に示す。

(ポリウレア吹付装置)



番号	品名	機能
①	リアクター	<ul style="list-style-type: none"> ●スプレーガンに2液(ポリイソシアネート、ポリアミン)を送給するもの。 圧力、流量をコントロール(最大24.1MPa、最大7.6L/分) ●電動式(最大ホース長90m)、油圧式(広範囲連続吹付可能、最大ホース長120m)があり、要素試験は電動式使用 ●スプレー塗布を維持するため塗料温度を維持(推奨約60℃)
②③	加温ホース	<ul style="list-style-type: none"> ●リアクターからスプレーガンまで2液を送給するホース(最長120m) ●リアクターからスプレーガンまでの送給における塗料温度の低下を防止するため加温
④	スプレーガン	●エア駆動操作で、2液を混合しノズルから吹付するオートガン
⑤	供給ポンプ	●ポリイソシアネート、ポリアミン各々の液をタンクから混合装置に供給するポンプ
⑥	ポリウレアタンク	●2液(ポリイソシアネート、ポリアミン)を各々貯蔵 :200L/液

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（4/12）

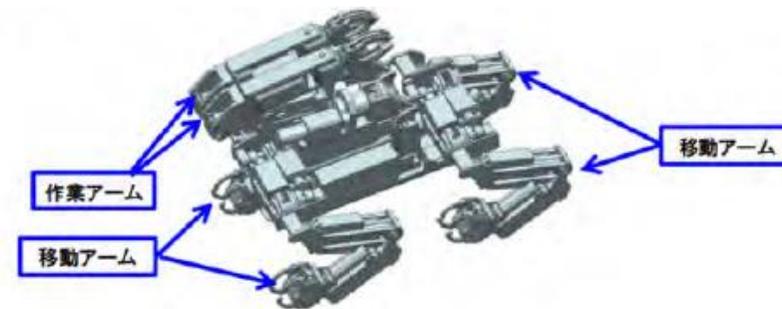
a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（4/8）

下図に試験装置詳細を以下に示す。

(ロボット仕様)



干渉物撤去装置



干渉物撤去装置モデル

項目	仕様	要求事項・備考	
装置寸法[mm]	L約1503×W約463×H約575	CRD開口(W762×H1118)、P/F開口①(L1000×W600)を通過可能	
構成	作業アーム×2本	1本のアームで作業を行い、もう1本のアームで作業補助(切断対象物の固定など)が可能	
	移動アーム×4本	ベデスタル内・底部の歩行移動、プラットフォーム(P/F)を把持しての移動、昇降が可能 ※現状、移動アームにて把持する箇所があれば移動可能	
用途	ベデスタル内の干渉物撤去 および燃料デブリ回収	加工ツール・カメラ等の移動・設置、ケーブル・ホース処理など	
作業アーム可搬重量[kg]	約10/アーム1本	切断ツール等比較的軽量の物品の把持・移動が可能	
装置重量[kg]	約80	必要な機能を搭載し、可能な限り軽量化 ※損傷を受けたプラットフォーム(P/F)の耐荷重が不明のため	
駆動源	水圧	電気部品を使用していないため、感電のリスクがない	
ケーブル	長さ[m]	約100	ベデスタル内・底部全域を移動可能な長さを検討中 ケーブル長による装置動作の影響を見るために、長く設定(ベデスタル底部全域を移動可能な長さは約20m)
	径[mm]	約φ60	

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（5/12）

a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（5/8）

以下に試験内容，試験条件を示す。

ダスト飛散防止材吹付試験 試験条件表

No	試験条件			条件設定理由	
	項目	下向き吹付	横向き吹付		
1	吹付条件	①吹付圧力	・約16MPa（吹付樹脂量：約75g/s（実測値））	・同左	実機仕様 注記*1)の出典の標準条件(保水性目安厚さ2mm) に対して吹付の厚みむらを考慮して1mm余裕を考慮して目標値を設定(保水可能厚さであればダスト飛散防止も可能)
		②膜厚（判定基準/目標）	・2mm以上（目標：3mm以上） （吹付軌跡の回数で厚みを設定）	・同左	
2	吹付作業	①吹付姿勢	・スプレーガン斜め下方 （角度は試験ロボットとの位置関係で設定）	・スプレーガン横向き	実機で想定する代表的な吹付姿勢での基礎確認 メーカ標準条件（左記試験条件内容）にて設定
		②吹付距離	・約700mmから1000mmの範囲で設定	・同左	
3	吹付方法	①吹付方法	・連続吹付	・同左	メーカ標準条件（左記試験条件内容）にて設定 ロボット操作を考慮し、左右双方向のみに簡素化 試験に供するロボットの対応可能速度で設定(アーム姿勢毎の速度)
		②吹付軌跡	・左右繰り返し（左右双方向）（円弧状）	・同左（直線状）	
		③吹付速度(平均)	・約0.3から1.1m/s	・同左	
4	試験体	・平板（横置き）	・平板（縦置き）		基礎データ取得のため、ポリプロピレン(PP)の平板を使用 吹付範囲：約□0.9m（ロボットアームの旋回長さを考慮）

注記：*1) アーバンインフラ・テクノロジー推進会議 第32 回技術研究発表会「ポリウレア樹脂を用いたコンクリート構造物の機能保持・向上」(清水建設、日本工営、三井化学産資)(2020年11月20日)

ダスト飛散防止材吹付試験 計測項目及び判定基準

No	測定項目			判定基準
	項目	下向き吹付	横向き吹付	
1	吹付回数/吹付幅 （左右横行1ライン）	・吹付軌跡（左右横行）の回数測定 ・上記回数における吹付膜厚、吹付幅測定	・同左	判定基準：膜厚2mm以上 （目標膜厚3mm以上）
2	吹付軌跡と吹付間隔 の組合せ（左右横行 複数ライン）	・吹付間隔との組合せによる吹付膜厚測定	・同左	判定基準：膜厚2mm以上 （目標膜厚3mm以上）

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（6/12）

a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（6/8）

➤ 試験設備

試験設備の写真を次々頁に示す。

➤ 試験概要

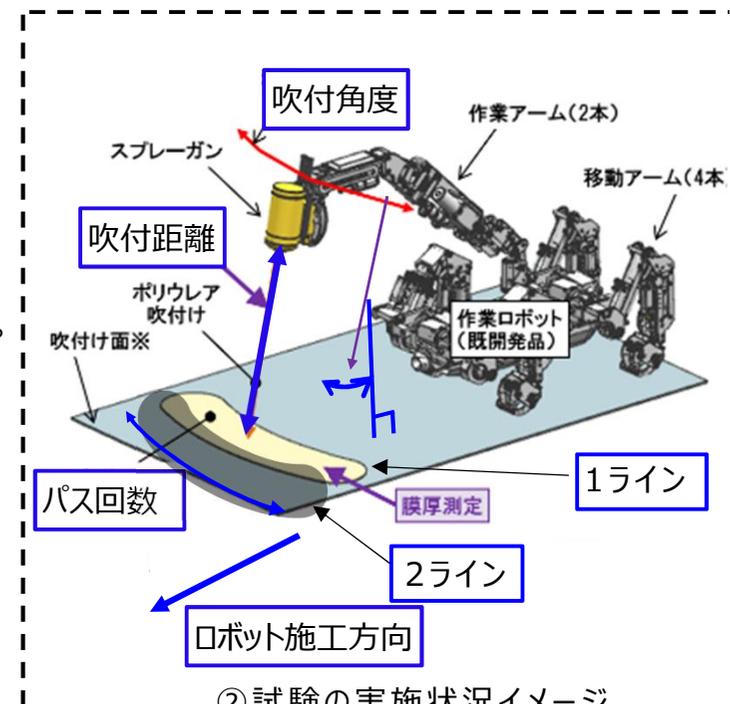
- 保有ロボットを用い，施工実績の多い市販機器で構成した塗布装置にて，飛散防止材を水平方向，垂直方向に以下内容で実施した。

① 吹付回数/吹付幅の関係を確認する試験（下向き状態，横向き状態）

初期状態の吹付角度0度，基準吹付距離800mm（角度により吹付距離は700～1000mmに変化）から，吹付角度を0°，9°，18°と変更し，1ラインが「判定基準：膜厚2mm以上」となるパス回数を確認した。

② 吹付間隔の組み合わせを確認する試験（下向き状態）

初期状態の吹付角度0度，基準吹付距離800mm（吹付距離は700～1000mmに変化）から，吹付角を変化させ，3ラインが重なるよう施工を行った。パス数を①の結果より設定した6回，10回，12回とし，3ラインが「判定基準：膜厚2mm以上」となることを確認した。



7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（7/12）

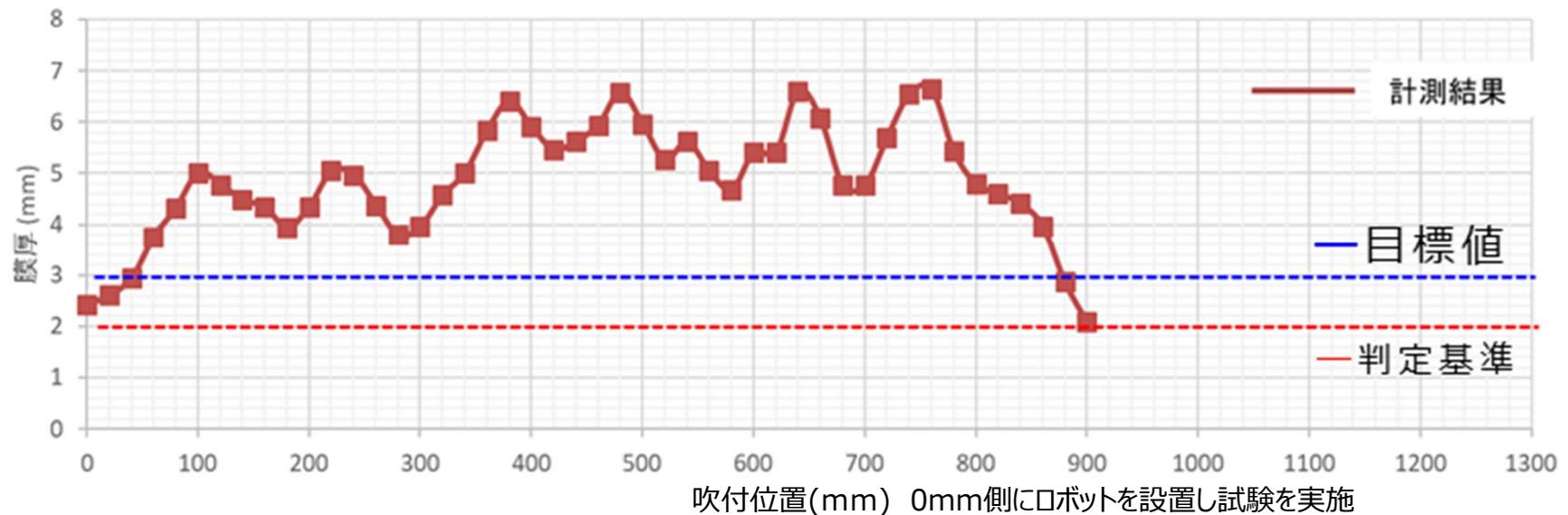
a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（7/8）

➤ 試験結果

吹付間隔の組み合わせ確認試験結果を下図に示す。下図の横軸0mm～900mmは，ロボットが施工した距離である。

また，本試験にて確認したことを以下に示す。

- ・施工後の膜厚について，測定を行い垂直，水平のどちらとも判定基準の2mm以上の膜厚で施工できていることを確認した。
- ・また，吹付狙い位置の確認にレーザポインタを使用することで吹付間隔を安定させ，膜厚のばらつきを抑えた施工が可能であることを確認した。



吹付位置の組み合わせ確認試験結果

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（8/12）

a. ダスト飛散防止材の施工確認試験（8/8）

試験設備を示す。



吹付ブース



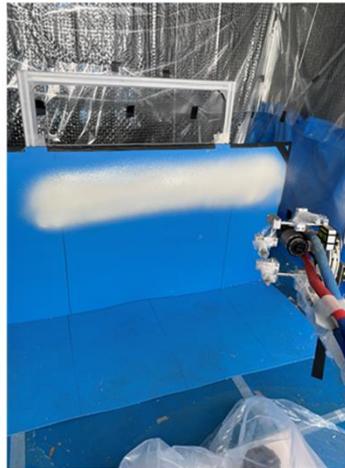
ポリウレア供給装置



監視モニター



吹付ブース 内部配置



吹付施工後（1ライン横向き）



ロボット全体

7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（9/12）

b. ダスト飛散防止材遠隔施工試験および結果（1/4）

➤ 目的

飛散防止材として選定したポリウレアは，PCV内での施工を想定しているため，ロボットでの遠隔施工が必要である。ダスト飛散防止材吹付施工の遠隔施工試験として，カメラ視野による施工性の実現可否を確認することを目的とした。

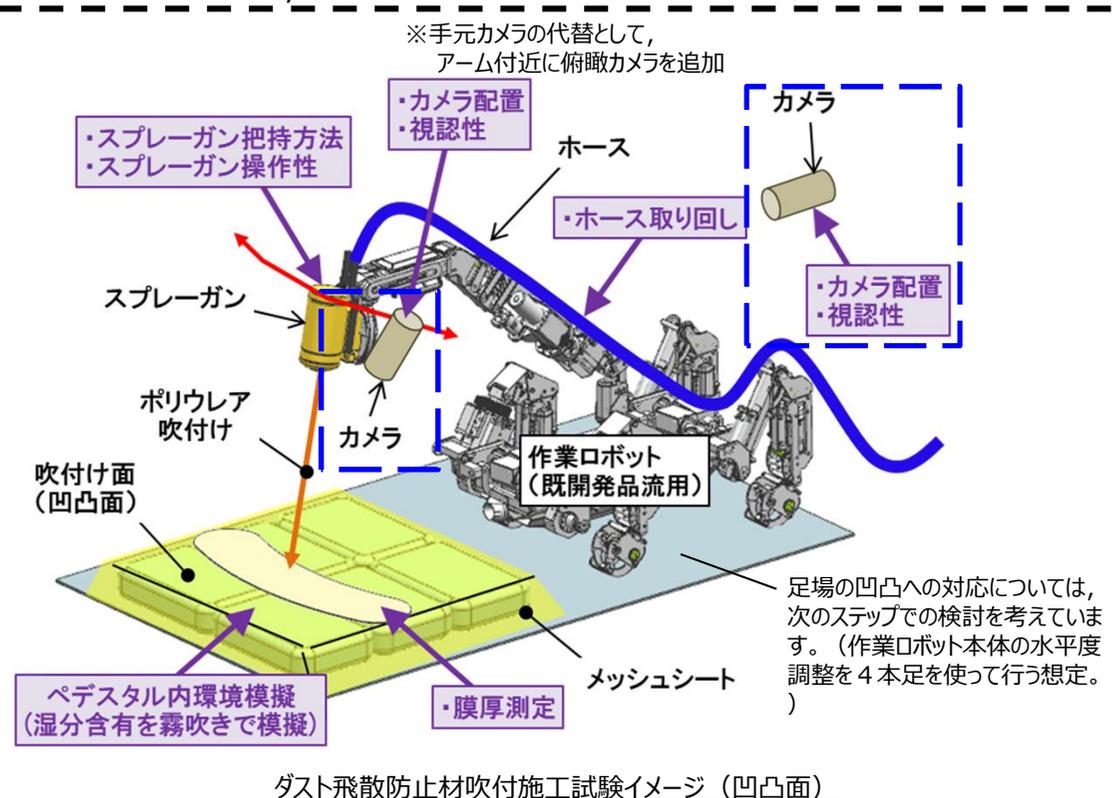
➤ 遠隔施工試験装置および条件

・試験装置，試験設備構成は，右図のように俯瞰カメラ1台，手元カメラ1台のカメラを設置して行う。

・施工したダスト飛散防止材の仕上がり具合の判定基準については，ダスト飛散防止材吹付と同様とし，厚み2mm以上とした。

・試験は，PCV内での作業を想定し凹凸のある面への垂直下向きの試験を実施した。
(右図に垂直下向きのダスト飛散防止吹付施工イメージを示す。)

・吹付施工条件は，吹付施工確認試験と同様である。



7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（10/12）

b. ダスト飛散防止材遠隔施工試験および結果（2/4）

➤ 試験概要

俯瞰カメラ1台，手元カメラ1台のカメラ視野にて要素試験で設定した施工条件が実現可能か確認した。

なお，凹凸面の吹付は，1層，2層に分けて実施する。1層目は土のうの上にメッシュシート(□ 1 m)を敷き，土のうとメッシュシートを固定するためにポリウレアを吹き付ける。2層目はダスト飛散防止を目的とし，メッシュシートを敷いた後，膜厚2mm以上とするポリウレアの吹き付けを実施した。

➤ 試験結果

・凹凸面(乾燥状態)と凹凸面(湿潤状態)の環境において，下表に示す要素試験で設定した施工条件を俯瞰カメラおよび手元カメラの視野で施工した結果を以下に示す。

- ① 吹付作業中でスプレーガン操作(把持含む)に支障が無いこと。
- ② 凹凸のある施工面であっても判定基準の膜厚2mm以上(目標値3mm以上)の塗布が可能であること。

・作業ロボットに取り付けたホースガイドにより，ホースのたるみや引っ張りの影響を緩和し，吹付動作に影響が無いことを確認した。

・作業ロボットの自走については未確認であり，俯瞰カメラの配置についても実機適用性の評価ができていない。そこで，今後の課題として，現場適用に向けたロボットの詳細仕様の検討やカメラ配置の詳細を検討の上，その検証が必要である。

要素試験で設定した施工条件

項目	内容
姿勢	下向き
吹付角度及びパス数	初期：吹付角度0度 吹付角0°：6パス 吹付角9°：10パス 吹付角18°：12パス
吹付距離	基準吹付距離800mm (※吹付距離は700～1000mmで変化)

7. 加工時落下対策技術の開発

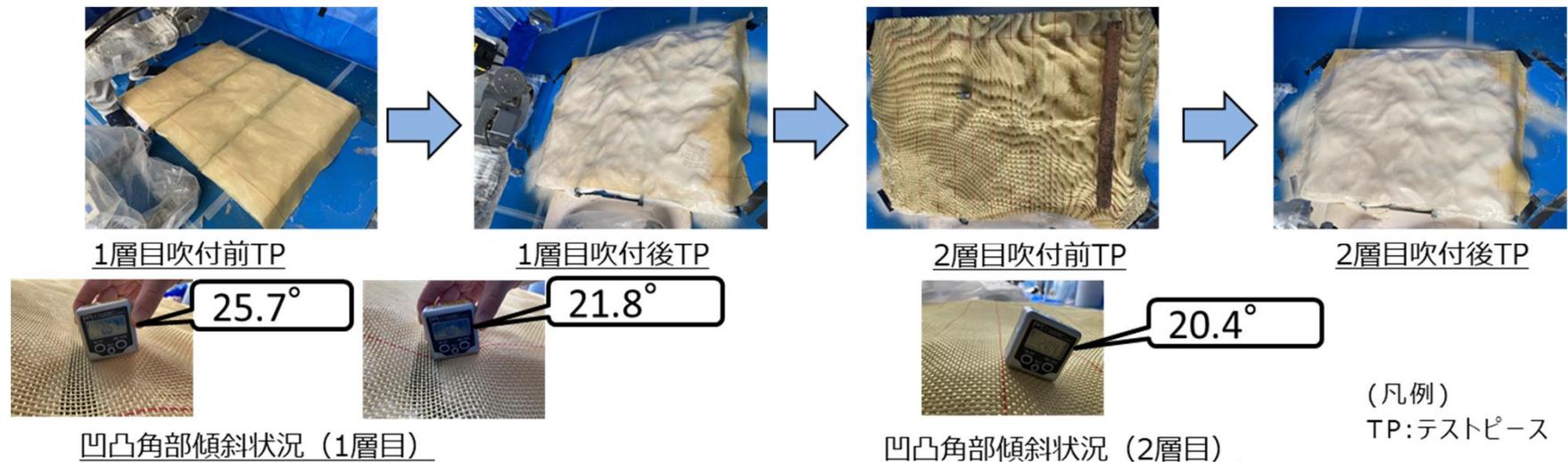
● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験, 遠隔施工性確認試験 (11/12)

b. ダスト飛散防止材遠隔施工試験および結果 (3/4)

➤ 試験結果(続き)

- 凹凸面(乾燥状態)の施工結果写真を以下に示す。



7. 加工時落下対策技術の開発

● 7.3.4 要素試験による検証

③ ダスト飛散防止材吹付施工確認試験，遠隔施工性確認試験（12/12）

b. ダスト飛散防止材遠隔施工試験および結果（4/4）

➤ 試験結果（続き）

- 凹凸面（湿潤状態）の施工結果写真を以下に示す。

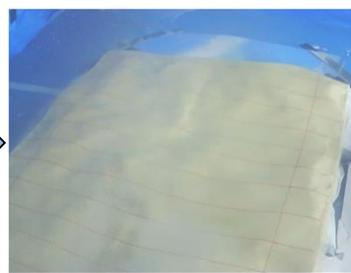
湿潤状態は，施工時の模擬として，メッシュシート1層目を霧吹きで湿らせ，メッシュシート2層目は湿らさず施工を行っており，1層目施工時に水分の蒸発吹き出しによる穴が見られたが，2層目施工後の外面では穴は封じ込められていた。



①1層目吹付前TP



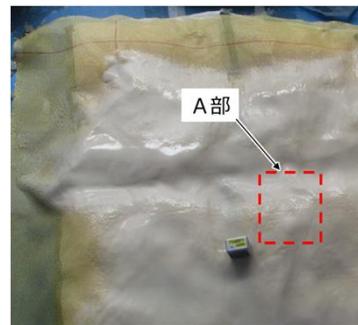
②1層目吹付後TP



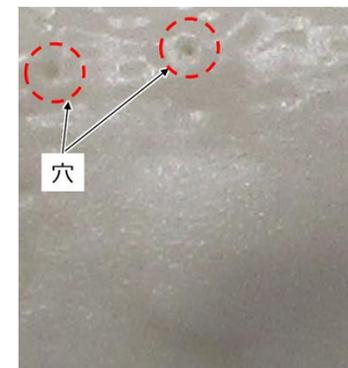
③2層目吹付前TP



④2層目吹付後TP



①1層目吹付後表面



②表面に生じた穴（A部拡大）

1層目吹付後TPの拡大写真

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

➤ 緩衝体の試験結果から得られた現場適用性に対する課題および対策案を下表に示す。

緩衝体の性能および緩衝体遠隔施工性に関する課題・対策(1/6)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
1	緩衝体	落下物候補の見直し	本事業では、現在までの調査状況や設計データに基づいて、落下物模擬体としてCRDハウジングを選定していたが、今後の炉内調査の進展や取り出し工法の変更などによって、落下物として他の構造物が候補に挙がってくる可能性もある。	高	今後の炉内調査の状況や燃料デブリ取り出しの状況を随時確認し、想定落下物の見直しが発生した際に、緩衝体の仕様見直しを行う。	基本設計～モックアップ試験
2	緩衝体	ホウ酸水の散水への対応尾	最終的な再臨界防止としてホウ酸水を散水する場合、緩衝体を設置することで浸透する速度が遅くなり、応答性が悪くなる可能性がある。	低	緩衝体の配置方法や必要に応じて緩衝体の各要素（緩衝材、貫入防止材、土のう袋）の再検討を行う。	基本設計～モックアップ試験
3	緩衝体	緩衝体の製作について	本事業で選定した緩衝体は、概念検討、要素試験を通じ性能、入手性、コストについて評価されたものであるが、大量に製作することについては、未だ検討の余地があると考えられる。	中	今後の基本設計以降において、製作性も十分考慮に入れながら検討、設計を実施していく。	基本設計～詳細設計
4	緩衝体	緩衝体の破損状況	本事業では、緩衝体は落下してくるCRDハウジングによって上面から破損することで検討をしていたが、落下物の状況によっては、それ以外の箇所から破損することが考えられ、その対応が必要になる可能性がある。	低	今後の基本設計以降において、破損についても考慮に入れながら検討、設計を実施していく。	基本設計～詳細設計
5	緩衝体／遠隔施工	緩衝体の回収	緩衝体をベDESTAL内部に設置後、土のうが何らかの外力により移動して、ベイルが何か干渉物や構造物に引っ掛かる・絡まるなどした場合、回収のための治具や装置が必要となる。	低	対応に必要な装置の開発を行う。または、ベイルを含めた緩衝体自体の外形形状の見直しを行い、留意点の事象を考慮し検討する。必要ならば要素試験を実施する。	基本設計～詳細設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

緩衝体の性能および緩衝体の遠隔施工性に関する課題・対策(2/6)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
6	緩衝体 ／遠隔 施工	緩衝体の設置方法	緩衝体を実環境で設置する場合、緩衝体の性能を十分に引き出す設置方法（複数の緩衝体をどの範囲にどのように積み上げるのか等）を、燃料デブリベッドの凹凸などに合わせて、検討する必要がある。	中	今後の炉内調査の状況などを随時確認し、燃料デブリベッドに対して適切となる緩衝体の設置方法を検討する。必要ならば要素試験を実施する。	基本設計～ モックアップ試験
7	遠隔施工	緩衝体敷設状況が変わった場合の対応	現状では緩衝体は部分敷設を想定しているが、今後の工法変更などによって落下事象が変化し、広範囲への敷設が必要となった場合には、一部敷設作業の自動化など敷設時間の短縮方法を検討する必要がある。	中	今後の炉内調査の状況や燃料デブリ取り出しの状況を随時確認し、敷設範囲の見直しが発生した際に、広範囲への敷設方法の検討を行う。	基本設計～ モックアップ試験
8	遠隔施工	緩衝体中身の回収	落下物の落下等により土のう袋が破損し破け、中身の緩衝材が土のう袋からペDESTAL内部等にこぼれ落ちた場合、回収のために、回収装置または回収方法の検討が必要となる。（例えば吸引回収装置など）	中	緩衝体中身を想定した回収方法および装置開発を実施していく。必要ならば要素試験を実施する。	基本設計～ 詳細設計
9	遠隔施工	他の作業装置との作業の干渉	検討の結果、緩衝体の搬入／搬出は X-6 ペネを使用しているが、今後の取り出し工法の変更などによっては、他の作業で X-6 ペネの使用頻度が高まることも想定される。その場合は、更なる作業の短縮が必要になる可能性がある。	中	他の作業への影響低減のため、X-6 ペネの使用時間制約等が発生した場合に備え、作業時間の短縮、別ペネからの搬入／搬出方法の検討を行う。	基本設計～ 詳細設計
10	遠隔施工	緩衝体設置のための遠隔機器の共有化	緩衝体の搬入/設置の確認には、カメラ、照明、センサなどを使用するが、これらの機器は別の作業で使用するものと兼用になることが考えられる。そのため、他の作業にはオーバースペックであっても緩衝体の施工に耐えられる仕様のものを準備する必要がある	低	燃料デブリ取り出し等、各作業で使用する遠隔機器の仕様を整理し、共有化を合理的な範囲で進める。	基本設計～ 詳細設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

緩衝体の性能および緩衝体の遠隔施工性に関する課題・対策(3/6)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
11	遠隔施工	施工完了の確認方法	緩衝体の設置成功、回収成功の確実な確認方法の確立が必要である。	高	今後の基本設計以降の検討において、実機における緩衝体の設置方法、確認事項を確立する。対応案としては、搭載されているカメラで複数視点から緩衝体の状況を確認する。また、緩衝体の向きを視認できるように、各面にマーキングを施すなどが考えられる。	基本設計～モックアップ試験
12	遠隔施工	装置の動作制限が発生した場合の対処	遠隔施工装置のうち、環境要因などにより装置の一部に動作制限が生じた場合の対処や施工方法の検討が必要である。（回収においては、緩衝体の状態も要因の一つとなる可能性がある。）	中	アームのアクセスルートに制限がある状態を想定し、アクセスルートのシミュレーションで確認する。	基本設計～モックアップ試験
13	遠隔施工	ベイルの固着	経年劣化により、ベイルが緩衝体表面に固着した場合、フックが引っ掛けられず回収できない可能性がある。	低	フックによる回収ができない場合に備え、グリッパ（本要素試験にて使用したものと異なる形状）等の異なるエンドエフェクタによる回収方法を検討する。	基本設計～詳細設計
14	遠隔施工	フック機構の操作性	遠隔施工装置の先端部の軸数（ピッチ軸、ロール軸が各1軸）では、フック機構の先端部の高さを変えずに、回転させてベイルに引っ掛ける動作ができないため、操作難易度が高い。	低	フック機構の先端部のみを回転させられるような構造に見直す。（リンク機構等を用いて、エンドエフェクタ内で先端部を回転させる）必要に応じて要素試験を行う。	基本設計～詳細設計
15	遠隔施工	グリッパ機構の操作性	グリッパの把持部分は、幅方向と長手方向で適した形状があり、それにより作業性も変わってくる可能性がある。なお、本要素試験のグリッパは緩衝体に合わせた形状とした。	低	グリッパ機構を採用する場合、各方向（幅方向、長手方向）に適した把持部の形状に見直す。	基本設計～詳細設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

緩衝体の性能および緩衝体の遠隔施工性に関する課題・対策(4/6)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
16	遠隔施工	カメラ視野	緩衝体把持後のカメラ視野について、緩衝体の把持位置とカメラ設置位置が近いと、緩衝体により視野が制限され、遠隔操作の難易度が高くなる。	中	耐放射線性を考慮し可能な範囲で、画角が広いカメラを使用する。また、エンドエフェクタから離れた位置にカメラを追加し、複数のカメラにより適宜切り替えて操作する。	基本設計～詳細設計
17	遠隔施工	暗所でのカメラによる視認①	暗所でベイルの位置を視認しづらい。	低	ベイルを暗所でも視認しやすい色（黄色など）で着色する。	基本設計～詳細設計
18	遠隔施工	暗所でのカメラによる視認②	暗所において、破損した緩衝体は境界部が視認しづらく、グリッパ機構の正確な位置決めができず把持できない。	低	緩衝体の各面にマーキングなどを施し、暗所や破損によっても緩衝体を認識できるようにする。	基本設計～詳細設計
19	遠隔施工	ハレーション	水が滞留している箇所に照明が当たると、反射光によりハレーションが起こり、カメラでの視認が困難となり遠隔操作の難易度が高くなる。	低	作業内容を検討し、ハレーションしづらい位置に照明を配置する。また、ハレーションにくいような照明仕様（照度や拡散範囲）を検討する。	基本設計～詳細設計
20	遠隔施工	フック機構での把持操作ミスによる装置の破損	緩衝体との距離を把握するため、フック先端部を緩衝体に接触させる必要があり、操作ミスによりエンドエフェクタや伸縮アームを損傷する可能性がある。	低	エンドエフェクタや伸縮アームの関節部の電流値を監視し、損傷前にインターロックをかける制御を追加する。	基本設計～詳細設計
21	遠隔施工	フック機構での把持操作時間短縮	ベイルに引っ掛ける際、一度ベイルの形状をフック先端部で把持できる形状に整える必要があるため時間を要する。	低	ベイルのみを引っ張り上げるような仕組み（ベイルを磁性材に変更しマグネットツールで引っ張り上げるなど）を追加する。	基本設計～詳細設計
22	遠隔施工	フック機構での搬入時の設備への接触	X-6 ペネ内部で接触すると落下する可能性がある。また、ベイルが長い場合、X-6 ペネとのクリアランスが小さくなり接触する可能性が上がる。	低	緩衝体が落下しないようにロック機構を有するフックに見直す。また、緩衝体に設置するベイルは把持する際に影響がない範囲で短くする。	基本設計～詳細設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

緩衝体の性能および緩衝体の遠隔施工性に関する課題・対策(5/6)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
23	遠隔施工	フック機構での設置操作時間短縮①	ベイルが短いため、遠隔操作にてフックに引っ掛ける動作の難易度が高く、緩衝体を把持するまでに時間を要する。	低	ベイルのみを引っ張り上げるような仕組み（ベイルを磁性材に変更しマグネットツールで引っ張り上げるなど）を追加する。	基本設計～詳細設計
24	遠隔施工	フック機構での設置操作時間短縮②	ベイルが長いため、移動開始時や方向転換時に緩衝体が大きく揺れるため、脱落する可能性がある。	低	緩衝体に設置するベイルは把持する際に影響がない範囲で短くする。	基本設計～詳細設計
25	遠隔施工	ベイルの変形	下段にある緩衝体を回収する際、上段に設置していた緩衝体の自重によりベイルが変形するため、フック先端部でベイル形状を調整する必要があり時間を要する。	低	ベイルのみを引っ張り上げるような仕組み（ベイルを磁性材に変更しマグネットツールで引っ張り上げるなど）を追加する。	基本設計～詳細設計
26	遠隔施工	フック機構での破損緩衝体の回収	破損した緩衝体の移動時に、破損部から内容物が流出する可能性がある。	低	フックにて持ち上げた後、回収容器に移して内容物が流出しない構造に見直す。また、流出した内容物を回収する方法を検討する。（ホースによる吸引等）	基本設計～詳細設計
27	遠隔施工	グリッパ機構での操作ミスによる装置の破損	グリッパ機構にて把持するには、刃先を緩衝体の下に潜り込ませる必要があるが、先端部のカメラのみでは距離を把握することができず、ベDESTAL底部等と接触しエンドエフェクタや伸縮アームを損傷する可能性がある。	低	エンドエフェクタや伸縮アームの関節部の電流値を監視し、損傷前にインターロックをかける制御を追加する。	基本設計～詳細設計
28	遠隔施工	グリッパ機構での安定把持のための時間短縮	グリッパ機構から緩衝体が落下しない条件として、緩衝体の重心をグリッパ機構の刃幅内に収める必要があり、位置調整に時間を要する。	低	グリッパの把持部について、緩衝体をすくい上げる形状ではなく、挟み込んで把持するなどの形状に見直す。	基本設計～詳細設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

緩衝体の性能および緩衝体の遠隔施工性に関する課題・対策(6/6)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
29	遠隔施工	グリップ機構での安定把持①	グリップ機構の可動域が狭く、把持できる面積が小さいため、安定的に把持できる範囲が狭い。	低	外形がX-6ペネを通過可能な範囲で、グリップ機構の可動域を広げて、把持できる面積を増加させる。	基本設計～詳細設計
30	遠隔施工	グリップ機構での安定把持②	緩衝体が「くの字」に変形するため安定的に把持できない。	低	把持時に緩衝体に変形しないように、貫入防止材の大きさや形状を性能に影響ない範囲で見直す。	基本設計～詳細設計
31	遠隔施工	グリップ機構での搬入時の緩衝体落下	緩衝体がグリップ機構の片側に載る形となり、伸縮アーム操作時の振動により、グリップ機構から緩衝体が脱落する可能性がある。	低	グリップの把持部について、緩衝体をすくい上げる形状ではなく、挟み込んで把持するなどの形状に見直す。	基本設計～詳細設計
32	遠隔施工	グリップ機構での設置操作時間短縮①	グリップ機構の開動作に伴い把持している緩衝体もずれるため、所定の位置への設置難易度が高く、時間を要する。	低	グリップの把持部について、緩衝体をすくい上げる形状ではなく、挟み込んで把持するなどの形状に見直す。	基本設計～詳細設計
33	遠隔施工	グリップ機構での設置操作時間短縮②	設置済みの緩衝体の隣に設置する際、グリップ機構の開動作により設置済みの緩衝体が動くため、離れた位置に緩衝体を設置した後、緩衝体を押しこむ必要があり時間を要する。	低	設置済みの緩衝体と接触している把持部を動かさずに把持を解除できるように、グリップの片側のみを開閉動作できる構造に変更する。	基本設計～詳細設計
34	遠隔施工	グリップ機構での設置緩衝体の再把持	凹凸部に設置した緩衝体の再把持において、緩衝体が傾いて設置されているため、グリップ機構を緩衝体の設置向きや角度に合わせる操作の難易度が高い。	低	緩衝体の設置向きや角度を把握できる箇所にカメラを追加する。あるいは、複数視点から見て把握するようなオペレーションにする。	基本設計～詳細設計
35	遠隔施工	片側フック機構の取り外し不良	フック機構の緩衝体からの取り外し時に、当該治具が外れず、緩衝体が設置できなくなる可能性が考えられる。	低	<ul style="list-style-type: none"> ・フック部の滑りを良くするようコーティングを施し、取り外しが容易になるようにする。 ・エンドエフェクタのフック部のみ駆動する機能を活用し、取り外し動作を遂行する。 	基本設計～詳細設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

➤ 落下防止シートの試験結果から得られた現場適用性に対する課題および対策を下表および図に示す。

落下防止シート性能確認試験に関する課題

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
1	落下防止シート	許容引張荷重の強化	落下模擬体720kg の0.5~1.5m落下時に落下防止シートの構成部品であるハニカムパネル接着部が剥離し、判定基準1.0mを超えるシートのたわみが確認された。	高	落下防止シートの構成見直し以下の対策を行い、ハニカムパネル接着部の強度向上を図る。 (以降頁に示す「落下防止シートの構成見直し案」参照) ・パネル4層構造として接着面積を増やす。 ・上記に加えて、ボルト締結でパネル間を接合する。(パネル重ね1式につき、M20 ボルト8本) *1	概念検討
	落下防止シート	衝撃力(落下高さ)低減		高	想定落下物の落下高さの低減以下の対策を行い、想定落下物の落下高さを低くし、落下防止シートに衝撃荷重が掛からないようにする。 (以降頁に示す「想定落下物の高さ低減案」参照) ・落下防止シート内に発泡ウレタン等を注入し、想定落下物(CRDハウジング等)を固定する。	概念検討

注記

*1：対策前のハニカムパネル接着部は以下の通り。

① パネル2層構造：接着面は1面

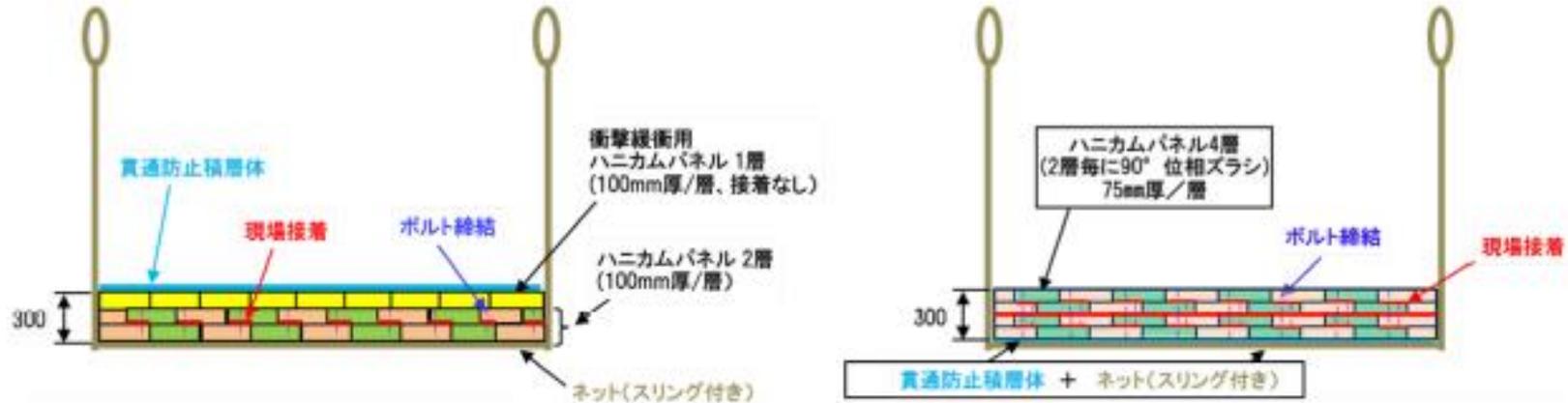
② パネル間のボルト締結：強度部材としてのボルト締結は無し。※

※接着力確保に向けた面間加圧のためのボルト結合を実施予定。ガイドピン先端のねじ加工(M10)等を想定し、パネル重ね1式につき、数本を想定。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

落下防止シートの構造見直し対策を下図に示す。



試験計画時の落下防止シート構成

強度試験結果による見直し後の落下防止シート構成

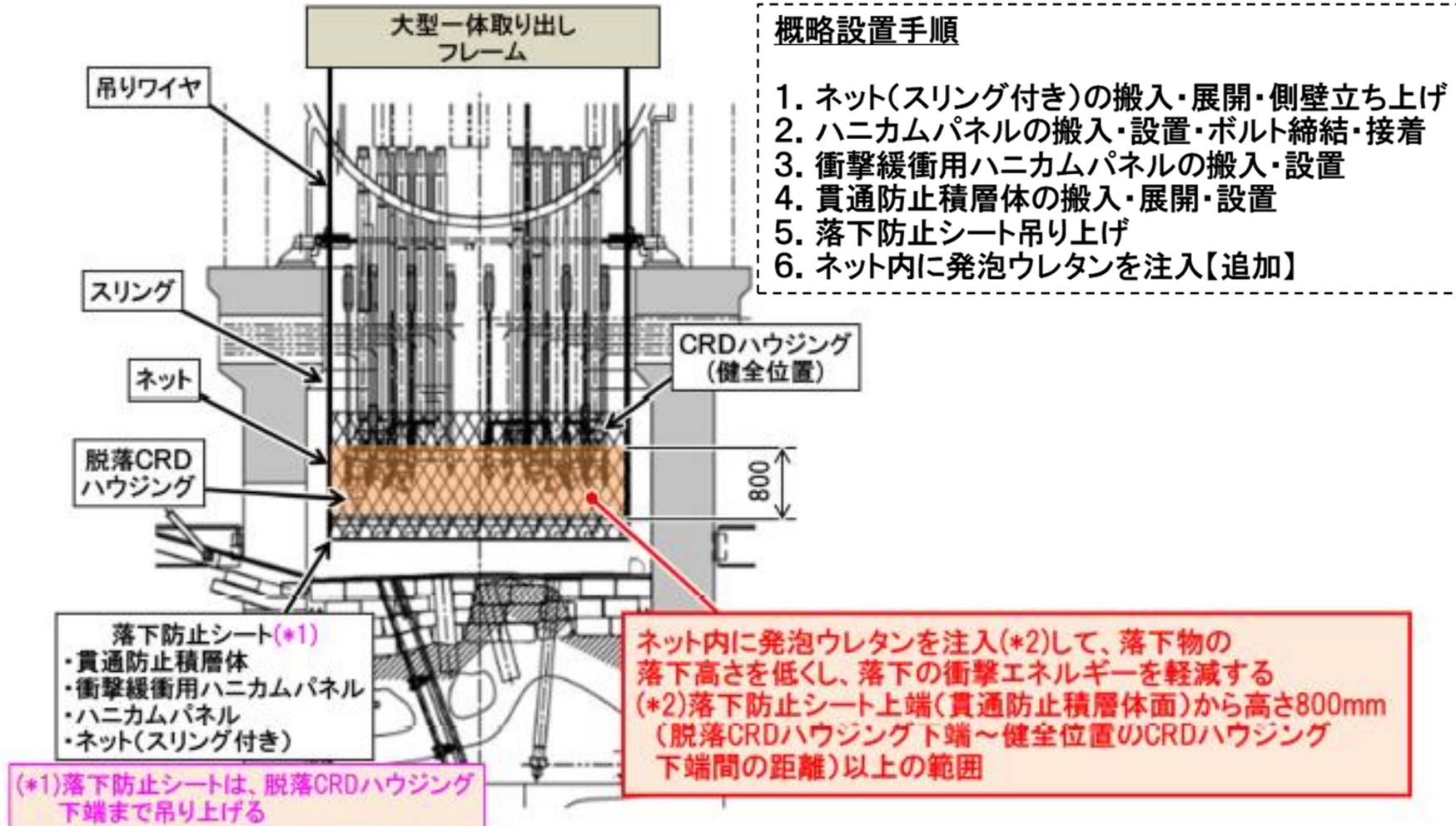
構成品	搬入・設置手順 (代表箇所での遠隔取付施工性確認済み)	結果活用	構成品	見直しシート構成の設置適用可否
ネット (スリング付き)	<ul style="list-style-type: none"> 台車へ折り畳んで搭載し、ベデスタル内へ搬送 台車から荷降ろしてベデスタル内へ展開 ネット側壁立ち上げ 	→	ネット(スリ ング、貫通防 止積層体付き)	<ul style="list-style-type: none"> 試験計画からネット形状・寸法は同じで、貫通防止積層体が追加となるが、ワイヤによる荷降し、展開のため、要素試験で確認した手順で設置可と考える。 進入台車への搭載、折畳み方法は検証が必要。
ハニカム パネル(2層)	<ul style="list-style-type: none"> 進入台車に搭載し、ベデスタル内へ搬送 台車から取り出し、所定位置へ設置 ボルト締結で組立 パネル2層間を現場接着(要素試験は対象外。未実施) 	→	ハニカム パネル(4層)	<ul style="list-style-type: none"> ハニカムパネルを進入台車に搭載可能な分割構造にすることで、要素試験で確認した手順で設置可と考える。 ただし、ボルトサイズアップによる締結の検証が必要。(M10→M20見込み) 接着は要素試験未実施のため検証が必要。
衝撃緩衝用 ハニカムパネル	<ul style="list-style-type: none"> 進入台車に搭載し、ベデスタル内へ搬送 台車から取り出し、所定位置へ設置 	→		
貫通防止 積層体	<ul style="list-style-type: none"> 台車へ折り畳んで搭載し、ベデスタル内へ搬送 台車から取り出して、パネル上へ展開(縦1回・横2回) 	→	吊り上げ	<ul style="list-style-type: none"> スリング位置やパネル全体厚み300mmに変更はなく、衝撃緩衝用パネルを無くすことで、シート全体の質量は軽減されるため、要素試験で確認した手順で吊り上げ可と考える。
吊り上げ	<ul style="list-style-type: none"> 大型一体取り出しフレームで吊り上げ 	→		

落下防止シート構成見直し後も、今回実施した遠隔取付施工性確認試験の手法を有効活用できる。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

落下防止シートの高さ低減対策を下図に示す。



◆想定落下物の落下高さを低くすれば、現状の落下防止シート構成を変更せず使用できる。

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

落下防止シート遠隔施工性に関する課題・対策(1/2)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
1	カメラ	カメラ視野不足	ハニカムパネル，衝撃緩和用ハニカムパネルの設置時の位置合わせが現状の試験用ロボットに搭載（手先・胴体）したカメラでは不十分。	高	カメラの追加搭載（カメラ専用アーム）を行う，または作業補助用の小型ロボットを投入。	基本設計
	カメラ	カメラ台数不足	試験用ロボット姿勢は，現状のカメラ配置でも作業できたが，ロボット姿勢やハニカムパネル設置確認の作業効率を考えると，カメラの追加が必要。	高	作業監視用小型ロボットの投入。または，進入台車などにカメラを搭載し，ネット外側からの監視を行う。	基本設計
	カメラ	カメラサイズ	RPV内からの吊り降ろしペDESTAL外周部に配置したカメラは，パン・チルト・ズーム機能を有し，実機適用時も同仕様で，狭隘部を通過可能な小型化が必要。	高	高線量条件に適用したパン・チルト・ズーム仕様の小型化カメラの検討を行う。	基本設計
2	引き込み治具	治具の固定手法	引き込み治具の固定は，落下防止シート設置作業において重要であり，固定方法の確立が必要。	高	引き込み治具の固定方法やポリウレアを吹付けない作業足場以外の固定位置（例えば，ペDESTAL内壁への固定）の検討を行う。	基本設計
	引き込み治具	治具固定の保守	ポリウレア吹付けによる固定が剥がれた場合，作業構成をポリウレア吹付けに入れ替えを必要とするため，取付け直しが困難。	高	ポリウレア吹付け作業足場以外の固定位置（例えば，ペDESTAL内壁への固定）の検討を行う。	基本設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

落下防止シート遠隔施工性に関する課題・対策(2/2)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
3	照明	作業時の明るさ不足	CRD搬出入開口付近に照明を1箇所配置したが、ハニカムパネル設置のガイドピン挿入作業時に明るさが不十分であった。	中	複数箇所からの照明吊り降ろし（カメラ一体型含む）ハニカムパネル設置近傍への携帯型照明の設置の検討を行う。	基本設計
4	ロボット	ロボットの回収性	ロボットのトラブル時の回収・修理の対策が必要。	中	トラブル対策の検討を行う。	基本設計
	ロボット	ロボット作業の効率化	ネット外側に位置する進入台車からのハニカムパネル材（ハニカムパネル、衝撃緩衝用ハニカムパネル）取り出し作業は、取り出し把持用吸盤を取り付けて工夫したが、ロボット姿勢が厳しかった。	高	進入台車にスライド機構を設けて、ハニカムパネル材をネット内側に送り出す方法の検討を行う。	基本設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

➤ ダスト飛散防止材吹付の試験結果から得られた現場適用性に対する課題および対策を下表および図に示す。

ダスト飛散防止材施工性に関する課題・対策(1/3)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
1	施工性	施工精度向上①	スプレーノズルが取りついたアームを左右に動作させた際の反力により、ポリウレタ塗布時のアーム往復運動反転位置にずれが生じ、塗布の端部に塗膜のむらが発生した。	高	今回適用した水圧駆動式ロボットを使用する場合の対策を下記に示す。 ①アーム回転軸の水圧チューブの径を小さくし、回転速度を下げ、反力低減および動作速度調整を図る。(試験時：チューブ内径 3.21mm (速度 0.6~1.1m/s), 改善案：チューブ内径 2.42mm (速度 0.4~0.6m/s (予想値))) ②アーム左右回転時にロボ本体の姿勢が安定するよう、左右の荷重を受けられるように脚の最適な軸攻勢を検討する。 (a) 脚の接地面にすべり止めを取り付け、ずれを防止する。 (b) 接地面積を増やすために、胴が接地できるようにする。 (以降頁に示す「水圧駆動ロボット図」参照)	基本設計
2	施工性	施工精度向上②	スプレーガン重心とロボット手元軸重心がオフセットした影響で、横行吹付時の吹付ラインにうねりが生じた。	高	今回適用した水圧駆動式ロボットを使用する場合の対策を下記に示す。 ①捻り軸でガタが生じやすいため、捻り軸を最小限とした軸構成とする。 ②スプレーガンとロボット手元は一体化する。 (以降頁に示す「水圧駆動ロボット図」参照)	基本設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

ダスト飛散防止材施工性に関する課題・対策(2/3)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
3	施工性	施工作业とアームの干渉	吹付作業はロボットの脚がポリウレアに張り付かないように、アーム軸を伸ばして行うが、可動部にポリウレアが付着しアーム動作に支障が生じる。	中	今回適用した水圧駆動式ロボットを使用する場合の対策を下記に示す。 ・ロボットの可動部にアームカバーを取り付け、ポリウレア付着防止を図る。	基本設計
4	施工性	施工時の俯瞰カメラ配置	ペDESTAL内3台の俯瞰カメラをロボットの廻りに近接配置することは難しい。	高	今回適用した水圧駆動式ロボットを使用する場合の対策を下記に示す。 ・俯瞰カメラ3台のうち、以下の機能(2台分)をロボットの手元カメラに追加する。 ①吹付面確認用：吹付ガンと同じ手元にカメラ設置 ②ガン角度確認&膜厚判定用：吹付ガンと反対側のアーム手元にカメラを設定	基本設計
5	施工性	舞い上がりダストの対策	施工により、周辺のダストが舞い上がる可能性がある。	中	施工条件を見直し、ダストが舞い上がらず、規定膜厚を確保できる施工法を要素試験にて確認する。 または、施工面の前処理(例：湿潤状態とする)を行い、ダストの舞い上がりを低減した状態での施工法を検討する。	基本設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

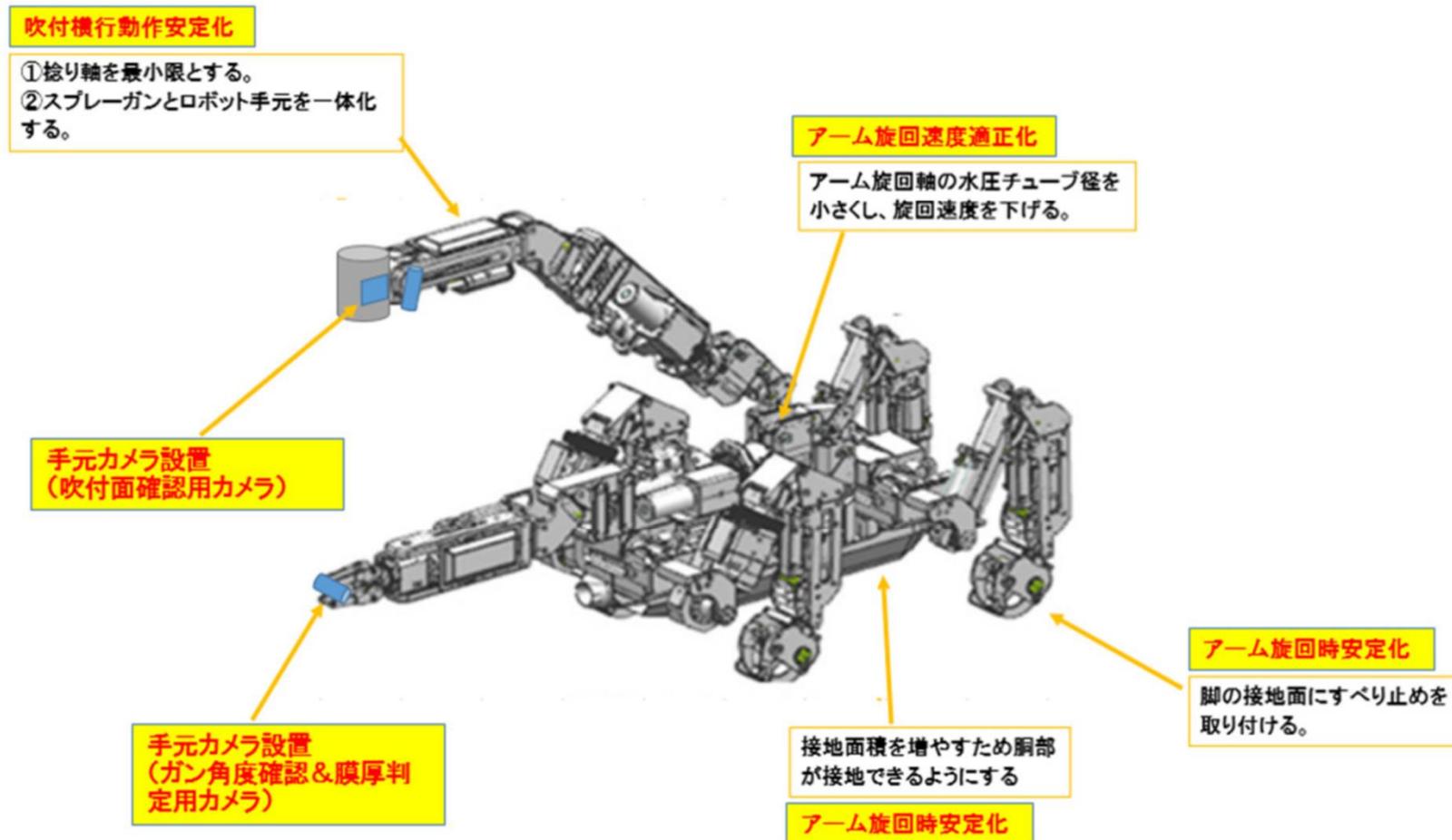
ダスト飛散防止材施工性に関する課題・対策(3/3)

No.	区分	主たる技術課題	実機適用に向けた留意点	重要度	今後の方針または対策案	対策が必要な時期
6	施工性	施工法の見直し	PCV内調査等でダストの性状に関する新たな情報が得られ、想定と異なった性状だった場合、工法の妥当性評価に影響が生じる可能性がある。	中	ダスト性状に関する新たな情報が得られた段階で、本事業の再評価、必要に応じ新たな防止策の検討を実施する。	基本設計
7	保守・メンテナンス	スプレーノズルの保守	ポリウレアの安定吹付においては以下の作業の遠隔化の検討が必要となる。 ①吹付開始時の試し吹き ②スプレーガンの定期的な清掃	中	①試し吹きについては、ペDESTAL内周辺（ペDESTAL内壁）に吹付を行うか、廃棄用タンク内に吹付けるかのどちらかとなる。廃棄用タンク内に試し吹きする場合は、作業ロボットの周りにタンクを配置する必要がある。 ②スプレーガン清掃装置を作業ロボット周りに配備する。 (以降頁に示す「ペDESTAL内の配置イメージ」参照)	基本設計
8	保守・メンテナンス	ロボットの保守・回収	ロボットのトラブル時の回収・修理の対策が必要。	中	トラブル対策の検討を行う。	基本設計

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

ダスト飛散防止材の水圧駆動式ロボットでの吹付施工時の対策を下図に示す。

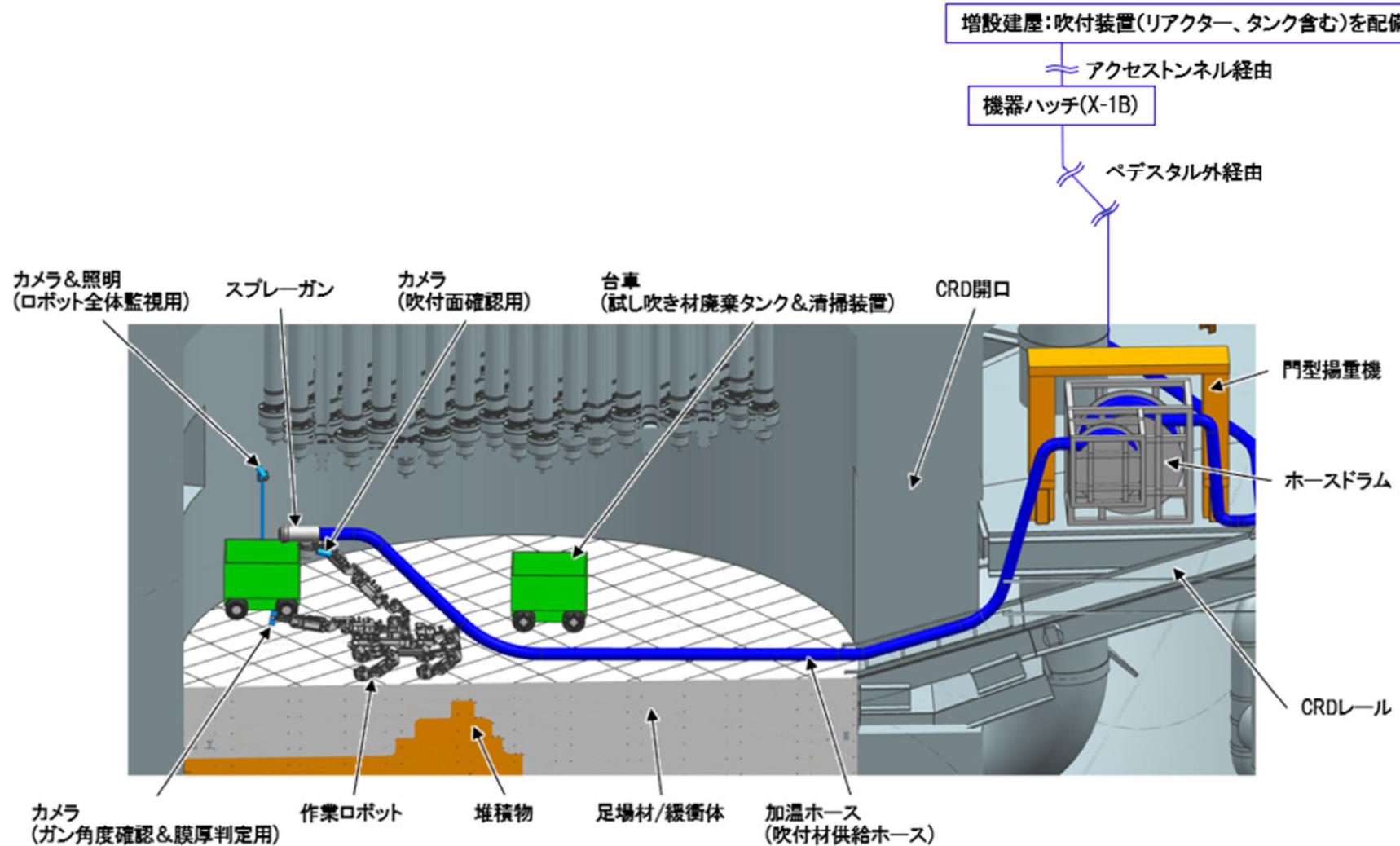


水圧駆動ロボット図

7. 加工時落下対策技術の開発

●7.3.5 試験結果からの課題整理

水圧駆動式ロボットでのペDESTAL内の吹付施工に関する配置対策を下図に示す。



ペDESTAL内の配置イメージ
©Decom.Tech

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. **本事業の成果・まとめ**
 - 8.1 **充填安定化技術の開発成果**
 - 8.2 加工時落下対策の開発成果
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.1 充填安定化技術の開発成果（1/4）

- 充填安定化技術の開発として、予め不安定な炉内構造物を充填安定化することで解体加工時の安全性・効率を向上させることや炉内作業時の機器接触などによる炉内構造物の転倒・落下のリスクを低減させることを目的に検討を実施した。
- また、検討テーマBは新規開発テーマであり、炉内のみならずペDESTAL内やPCV底部などへの適用の可能性を考え、同様に検討を実施した。
- 本事業の検討テーマAおよび検討テーマBの開発成果を以下にまとめる。

● テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証

- 実機を考慮した充填手順および装置構成の検討を行い、装置仕様の具体化を図った。
- 炉心部・炉底部・炉底部開口部の部分模擬体を用いた遠隔施工要素試験を実施し、炉内構造物の充填安定化を確認した。その結果より現場適用に向けた課題を抽出・評価した。
【TRL：レベル3の範囲に到達】

● テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証

- 設定した要求性能を満たす充填材の固化試験・性能評価試験（ラボ試験およびスケールアップ試験）を実施し、RPV内の構造物や炉底開口部、ペDESTAL内、PCV底部（水中環境）等に適用の可能性が高い充填材を評価・選定した。
- 充填固化体の搬出後の処理方法等に関して物理分離試験および化学分離試験を実施し、現場適用性のある分離・分別手法の効果について評価した。
【TRL：レベル3の範囲に到達】

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.1 充填安定化技術の開発成果（2/4）

➤ 充填施工方法の検討および現場適用性検証（テーマA）の開発成果を以下にまとめる。

充填施工方法の検討および現場適用性検証（テーマA）の開発成果・まとめ表

No.	開発フロー	開発成果・まとめ						
1	概念検討	<ul style="list-style-type: none"> 1～3号機の各PCV内の前提条件および炉内環境における主要な要求機能（アクション項目）を整理した。上記、前提条件・要求機能からRPV内への充填作業ステップへ落とし込み、充填作業装置（充填材供給アーム、作業アームなど）の装置仕様の具体化を図った。 上記の検討結果はジオポリマー特性確認試験および充填施工要素試験の試験条件へ反映し、各試験結果より現場適用に向けた課題を抽出し今後の開発方針をまとめた。 試験結果より装置の全体フローの見直しはなかったが、炉心部への充填手順に関して1回ではなく2回に分けて充填する方針に変更した。また、装置の課題として実機装置構成での成立性を挙げており、特に供給アームへ接続される充填ホースはスパイラル形状を想定しているため、充填材の圧送や冷却に関する懸念がある。 						
2	ジオポリマー特性確認試験	<ul style="list-style-type: none"> 2022年度までのジオポリマー特性確認試験の結果・課題を受けて、本事業では打ち継ぎ間隔2時間以上での打ち継ぎ試験、構造物・発熱体内包時の充填試験ならびに予備試験として圧送試験を実施した。各試験の成果を以下に示す。 						
		<table border="1"> <tr> <td>打ち継ぎ試験</td> <td>打ち継ぎによる圧縮強度の有意な差が無いことを確認した。一方で引張試験では打ち継ぎ時間24時間に比べ28日の方が強度が高いことが分かった。また、プラストによる表面処理の効果（打ち継ぎ面ではない部分での破壊）を確認した。</td> </tr> <tr> <td>構造物・発熱体内包時の充填試験</td> <td>構造物の隙間充填に関しては問題なく充填することを確認した。発熱体の発熱量50W,100W（温度100℃以下,100℃程度）では、クラックの発生はなく充填材が安定して固化することを確認した。ただし、極端な例として450W（温度600℃程度）の条件では発熱体中心から半径150mmの範囲までのクラックを発生を確認した。当該結果より熱影響範囲は限定的であるため、発熱体周囲にジオポリマーを厚さ100mm以上充填することで熱影響を低減する一体固化の見込みがあることを確認した。</td> </tr> <tr> <td>圧送試験</td> <td>当初の配合では充填規模が拡大したことにより、反応熱で固化反応が加速し、GPの粘度が上昇したため圧送不可となった。当該結果よりGPの配合および細骨材（珪砂）充填率などの見直しを行い、珪砂充填率30wt%・冷却温度10℃で圧送が可能であることを確認した。</td> </tr> </table>	打ち継ぎ試験	打ち継ぎによる圧縮強度の有意な差が無いことを確認した。一方で引張試験では打ち継ぎ時間24時間に比べ28日の方が強度が高いことが分かった。また、プラストによる表面処理の効果（打ち継ぎ面ではない部分での破壊）を確認した。	構造物・発熱体内包時の充填試験	構造物の隙間充填に関しては問題なく充填することを確認した。発熱体の発熱量50W,100W（温度100℃以下,100℃程度）では、クラックの発生はなく充填材が安定して固化することを確認した。ただし、極端な例として450W（温度600℃程度）の条件では発熱体中心から半径150mmの範囲までのクラックを発生を確認した。当該結果より熱影響範囲は限定的であるため、発熱体周囲にジオポリマーを厚さ100mm以上充填することで熱影響を低減する一体固化の見込みがあることを確認した。	圧送試験	当初の配合では充填規模が拡大したことにより、反応熱で固化反応が加速し、GPの粘度が上昇したため圧送不可となった。当該結果よりGPの配合および細骨材（珪砂）充填率などの見直しを行い、珪砂充填率30wt%・冷却温度10℃で圧送が可能であることを確認した。
		打ち継ぎ試験	打ち継ぎによる圧縮強度の有意な差が無いことを確認した。一方で引張試験では打ち継ぎ時間24時間に比べ28日の方が強度が高いことが分かった。また、プラストによる表面処理の効果（打ち継ぎ面ではない部分での破壊）を確認した。					
構造物・発熱体内包時の充填試験	構造物の隙間充填に関しては問題なく充填することを確認した。発熱体の発熱量50W,100W（温度100℃以下,100℃程度）では、クラックの発生はなく充填材が安定して固化することを確認した。ただし、極端な例として450W（温度600℃程度）の条件では発熱体中心から半径150mmの範囲までのクラックを発生を確認した。当該結果より熱影響範囲は限定的であるため、発熱体周囲にジオポリマーを厚さ100mm以上充填することで熱影響を低減する一体固化の見込みがあることを確認した。							
圧送試験	当初の配合では充填規模が拡大したことにより、反応熱で固化反応が加速し、GPの粘度が上昇したため圧送不可となった。当該結果よりGPの配合および細骨材（珪砂）充填率などの見直しを行い、珪砂充填率30wt%・冷却温度10℃で圧送が可能であることを確認した。							
3	充填施工要素試験	<ul style="list-style-type: none"> 炉内構造物（切り株燃料・CRガイドチューブ）の部分充填および炉底部開口部に対して遠隔施工による充填要素試験実施した。 試験結果としては遠隔による型枠の設置および目標高さまで充填安定化が可能であった。ただし隙間からの充填材の漏えいやカメラによる施工完了の把握などの課題が挙げられた。 本要素試験の模擬は作業アーム部以下のみの構成であったため、今後は実規模構成での成立性の確認が課題となる。 						

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.1 充填安定化技術の開発成果（3/4）

- 汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証（テーマB）の開発成果を以下にまとめる。

汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証（テーマB）の開発成果・まとめ表

No.	開発フロー	開発成果・まとめ		
1	充填材検討の前提条件・要求仕様の整理	<ul style="list-style-type: none"> 1～3号機の各PCV内の前提条件および炉内環境における主要な要求機能（アクション項目）を整理した。 上記、前提条件・要求機能から充填材の適用先候補として、「脱落防止(RPV内)」、「開口部の補修(RPV内)」、「廃棄物安定化」、「鉄筋剥き出し部補修」、「燃料デブリ流出防止」を設定した。 		
2	充填材の組成検討	<ul style="list-style-type: none"> 充填材の候補として9種類を抽出し、適用先の要求機能に基づき絞り込みを実施した結果、ジオポリマーとセメントを試験対象に設定した。 以降に実施した、ラボ試験、スケールアップ試験の結果より、本工法に適した開発優先度の高い充填材はジオポリマーであると評価した。 		
		<table border="1"> <tr> <td>ラボ試験</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 充填材の付着性や堰形成などの12項目の基本特性を試験で確認した。 ジオポリマーは全体的に成立性が見通しを得たが、セメントに比べて圧縮強度などが低い傾向が見られた。また、単純な圧縮強度で良好な結果が得られたセメントは開口部補修や水中施工では効率的な施工が困難であることが分かった。 </td> </tr> <tr> <td>スケールアップ試験</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 工事の重要性や技術開発の難易度などの優先度から「脱落防止」、「開口部補修」、「水中吹付」、「長距離圧送性」に関する実規模試験を実施した。 ジオポリマーは全体的に成立性が見通しを得たが、ラボ試験と同様にセメントに比べて圧縮強度などが低い傾向が見られた。また単純な圧縮強度で良好な結果が得られたセメントは水中分散により固化が困難であることが分かった。 </td> </tr> </table>	ラボ試験	<ul style="list-style-type: none"> 充填材の付着性や堰形成などの12項目の基本特性を試験で確認した。 ジオポリマーは全体的に成立性が見通しを得たが、セメントに比べて圧縮強度などが低い傾向が見られた。また、単純な圧縮強度で良好な結果が得られたセメントは開口部補修や水中施工では効率的な施工が困難であることが分かった。
ラボ試験	<ul style="list-style-type: none"> 充填材の付着性や堰形成などの12項目の基本特性を試験で確認した。 ジオポリマーは全体的に成立性が見通しを得たが、セメントに比べて圧縮強度などが低い傾向が見られた。また、単純な圧縮強度で良好な結果が得られたセメントは開口部補修や水中施工では効率的な施工が困難であることが分かった。 			
スケールアップ試験	<ul style="list-style-type: none"> 工事の重要性や技術開発の難易度などの優先度から「脱落防止」、「開口部補修」、「水中吹付」、「長距離圧送性」に関する実規模試験を実施した。 ジオポリマーは全体的に成立性が見通しを得たが、ラボ試験と同様にセメントに比べて圧縮強度などが低い傾向が見られた。また単純な圧縮強度で良好な結果が得られたセメントは水中分散により固化が困難であることが分かった。 			
3	充填材の施工装置・施工方法に関する概念検討	<ul style="list-style-type: none"> No.1で設定した前提条件に基づき、「脱落防止（RPV内）」、「開口部の補修（RPV内）」、「鉄筋剥き出し部補修」、「燃料デブリ流出防止」の各用途に適した装置・機器類を検討した。 また、材料の長距離圧送性に優れる乾式吹付工法を採用し、現場での装置構成や施工手順を検討した。 		
4	充填固化後の処理方法の検討	<ul style="list-style-type: none"> 将来検討される処理・処分方針に対して、より柔軟に対応できる技術オプションの一つとしての分離（可逆性があること）の見通しを評価するため、分離試験を実施した。 既存の技術を用いた物理分離試験では90%程度の分離が可能である見通しを得た。化学分離試験では充填材成分も一部溶解してしまうことから適用不可と評価した。 		
5	充填材の現場適用に向けた提案	<ul style="list-style-type: none"> 現場適用に向けた主要な課題として開発優先度を評価し、遠隔施工性の向上を目的とした吹付ノズル・ホースの小型化／軽量化の検討やロボット等を用いた遠隔施工性検証などを抽出し、今後の開発の見通しを得た。 		

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.1 充填安定化技術の開発成果（4/4）

- 検討テーマAおよびテーマBの開発成果を踏まえ、今後の開発方針案を以下に示す。

【今後の開発方針案】

● テーマA：充填施工方法の検討および現場適用性検証

- 本事業でジオポリマー特性確認試験および充填施工要素試験を実施し、想定する現場環境下におけるジオポリマーの特性把握や模擬した炉内構造物への充填安定化状況ならびに部分模擬による遠隔施工性などの評価・課題を得ることができた。
- 充填安定化の適用先として、炉心部切り株燃料や炉底部CRガイドチューブの固定安定化、炉底部開口部の閉止に対する現場適用性が高いと評価した。
- 今後、現場適用を成立させるためにはより具体的な炉内状況を把握するとともに、実機環境を模擬したモックアップ試験の成立や詳細な装置開発、現場適用時のリスク対応・検討などの開発が必要になる。

● テーマB：汎用性の高い充填安定化技術の検討および成立性検証

- 本事業より新規開発テーマとして実施し、充填安定化の適用箇所の設定から充填材の調査、充填材の基礎性能確認（ラボ試験）、充填工法への適用確認（スケールアップ試験）を行い、ジオポリマーを用いた乾式吹付工法の現場適用が高い見通しを得ることができた。
- 充填安定化の適用先として、炉内構造物の固定安定化ならびに補修、型枠を必要としない開口部（炉底部開口部やジェットデフレクター）の閉止および炉内およびペDESTAL内側のコンクリート消失部補修に対する現場適用性が高いと評価した。
- 今後、現場適用を成立させるためにはより具体的な炉内状況を把握するとともに、装置開発（遠隔装置・充填ノズルの改造など）や遠隔施工性を評価する試験実施、リスク対応等の開発が必要になる。

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
- 8. 本事業の成果・まとめ**
 - 8.1 充填安定化技術の開発成果
 - 8.2 加工時落下対策の開発成果**
9. 実施体制
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.2 加工時落下対策技術の成果

● 落下影響評価のまとめ

▶燃料デブリヘッドの損傷による再臨界の可能性およびダスト飛散による公衆被ばくの可能性を評価するため、「落下衝撃影響試験」「ダスト飛散確認試験」を実施し、落下影響の検討を実施した。各試験から得られた知見を以下に示す。

✓「落下衝撃影響試験」

落下物模擬体の落下による影響(貫入深さや亀裂範囲)は、一定の規模に収まっている(限定的)ことを確認した。

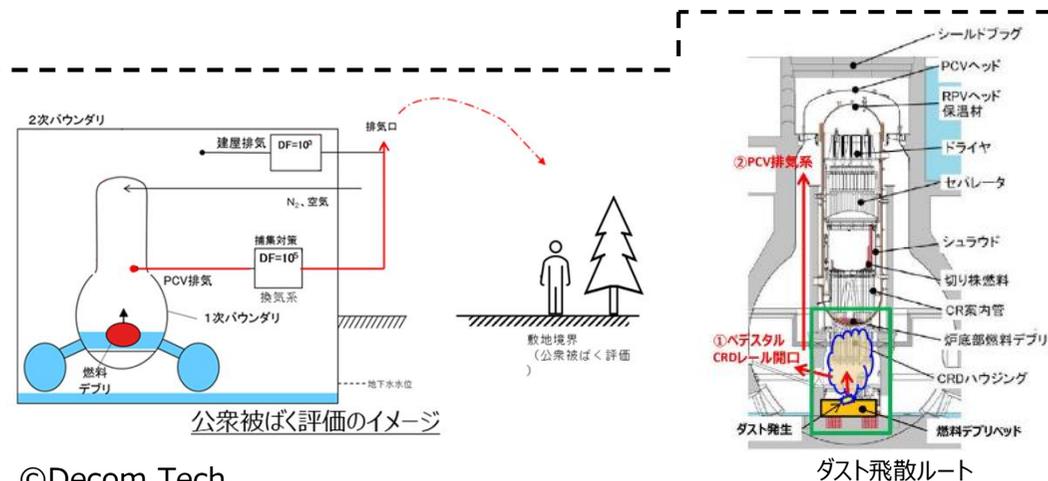
加工時落下対策として求められる影響緩和に資する情報として、衝撃による影響の程度は、ごくわずかであり、落下による直接的な再臨界の可能性は低いと考えられた。

✓「ダスト飛散確認試験」

保守的に設定した試験条件でもダストの舞い上がりは微量で、想定した敷地境界外への流出ルートから放出があったとしても、事故時の被ばく基準(5mSv/事象)に対し非常に低いことが想定がされた。

公衆被ばく評価の条件および評価結果

項目		CRDハウジング1本落下
ダスト飛散条件		ケース3
構造物+燃料デブリ重量合計重量(kg)		710kg (CRD含む)
落下高さ(m)		5m
落下エネルギー (J)		3.48E+04 (J)
飛散率 (-)	CRDハウジング側 燃料デブリ	2E-03
	堆積物 (燃料デブリ)	5.88E-05
換気系DF(-)		1.00E+05
公衆被ばく評価		2.8μSv/事象
事故時の基準		5mSv/事象



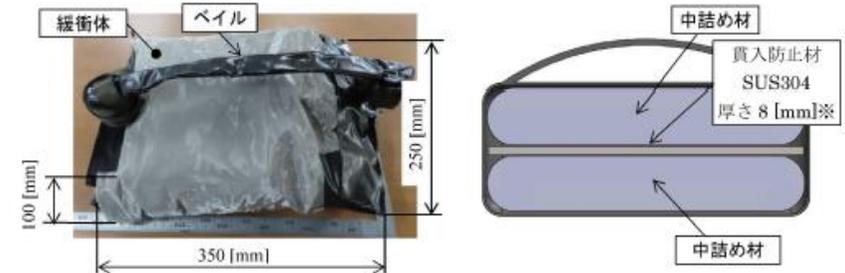
8.本事業の成果・まとめ

◆8.2 加工時落下対策技術の成果

●各対策の開発成果まとめ

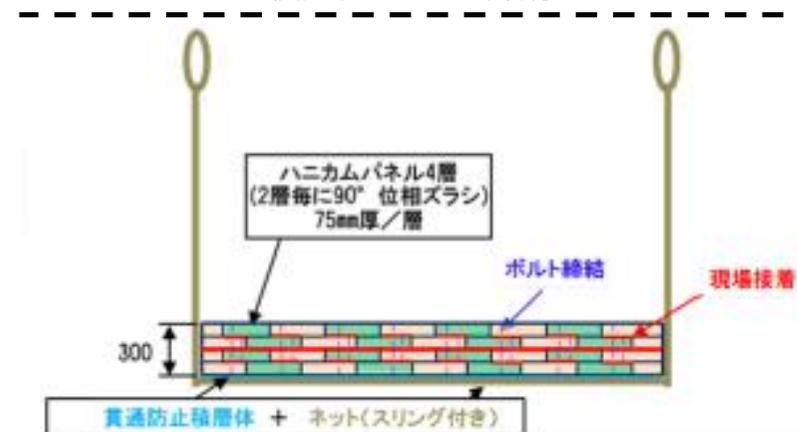
想定落下物に対する緩衝対策，落下防止対策，落下時のダスト飛散防止対策として，「緩衝体」「落下防止シート」，「ダスト飛散防止材」を設定した。各対策の開発成果を以下に示す。

- **想定落下物に対する緩衝対策の開発成果**
 - ✓要素試験にて緩衝体(土のう(内部が脆性素材))の脆性素材(碎石)を選定した。
 - ✓実機適用を考慮した構造(右図)を検討し，要素試験により緩衝効果を確認した。
- **想定落下物に対する落下防止対策の開発成果**
 - ✓機能，使用環境おける適合性，入手性を考慮し，落下防止シートの適用材料(アラミド繊維)を選定した。
 - ✓要素試験にてたわみ量が基準値以上となり，構造仕様(接着範囲，構成パーツの連結手法)に課題が確認された。
 - ✓構造仕様の見直し(右図)検討，評価により落下防止の達成見通しを得た。
- **落下時のダスト飛散防止対策の開発成果**
 - ✓ダストの舞い上げ抑制効果の期待できる材料(ポリウレア)を選定した。
 - ✓当該材料のダスト舞い上がり抑制効果の得られる膜厚の施工方法の検証および遠隔施工による工法の成立見通しを得た。

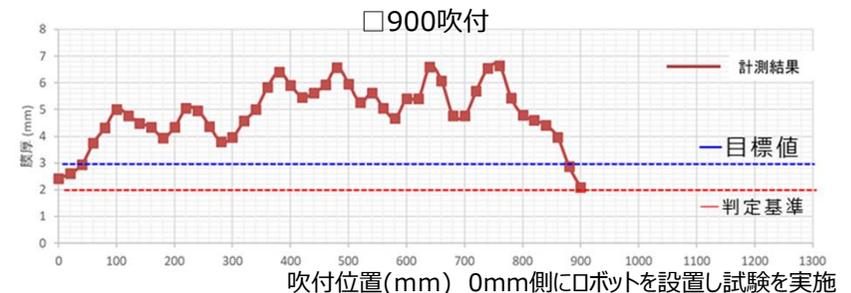


※8 [mm]は性能確認試験により決定。

検討した土のうの外観



検討した落下防止シート構造(概略)



吹付位置の組み合わせ確認試験を実施

吹付位置の組み合わせ確認試験結果

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.2 加工時落下対策技術の成果

● 課題及び対策のまとめ

➤ 試験結果から抽出された現場適用性に対する課題および対策のまとめを以下に示す。

課題と対策

項目No.	課題	概要	対策	
本事業検討から得られた課題	—	1 再臨界の可能性リスク	緩衝体設置有無の落下試験結果から、開発した緩衝体は、衝撃荷重低減性能から再臨界リスクの低減に有効であることが確認できたが、設置した場合の再臨界リスクがどれほどかは評価できない状況であり、実機適用にあたっての緩衝体の必要物量の算定ができない。	合理的な実機対策の実現に向けて、落下事象による再臨界リスクの評価を目標にした研究開発の立ち上げが望まれる。また、対策の検討も同時に行うことが望ましい。(例：緩衝体の充填材に中性子吸収材を混合する)
	落下防止シート	2 見直し構造による落下防止性能の確認（シート損傷対策）	落下防止シートは、想定落下物に対する落下防止の性能が十分でなかったため、改善案の立案とシート構成の検討を計画し計画の性能を有していることを机上にて確認した。ただし、試験による検証は未実施であり実機適用に向け実証試験は必須となる。	実機適用に向け実証検証は必須であり、本事業の継続もしくは検証のための事業を開始することが望ましい。
	ダスト飛散防止材	3 吹付施工専用のロボット開発	本事業においては、ロボットによる遠隔吹付施工の可否を目的に既存ロボットを流用し試験を実施した。本ロボットは、汎用性が高いものの、吹付作業に適していない動作もあり、アームの反転時等に慣性力によるロボットの位置ずれなどにより、吹付ラインのうねり事象が発生し作業性の低下が見られ対策が必要と考えられる。	作業性の向上を目的とした、既設ロボットの駆動系の制御、構成の改良もしくは、専用ロボットの研究開発。
	遠隔性	4 炉内への施工用カメラ配置可否	遠隔作業に必要な俯瞰カメラ等の配置について、炉内状況を考慮した配置、設置可能台数の検討が必要。	炉内調査結果による炉内状況を考慮し、各落下対策に必要な俯瞰カメラの配置および台数を検討し、検証試験にて成立性を確認する。

8. 本事業の成果・まとめ

◆ 8.2 加工時落下対策技術の成果

● 課題及び対策のまとめ

➤ 今後の課題および対策について下表に示す。

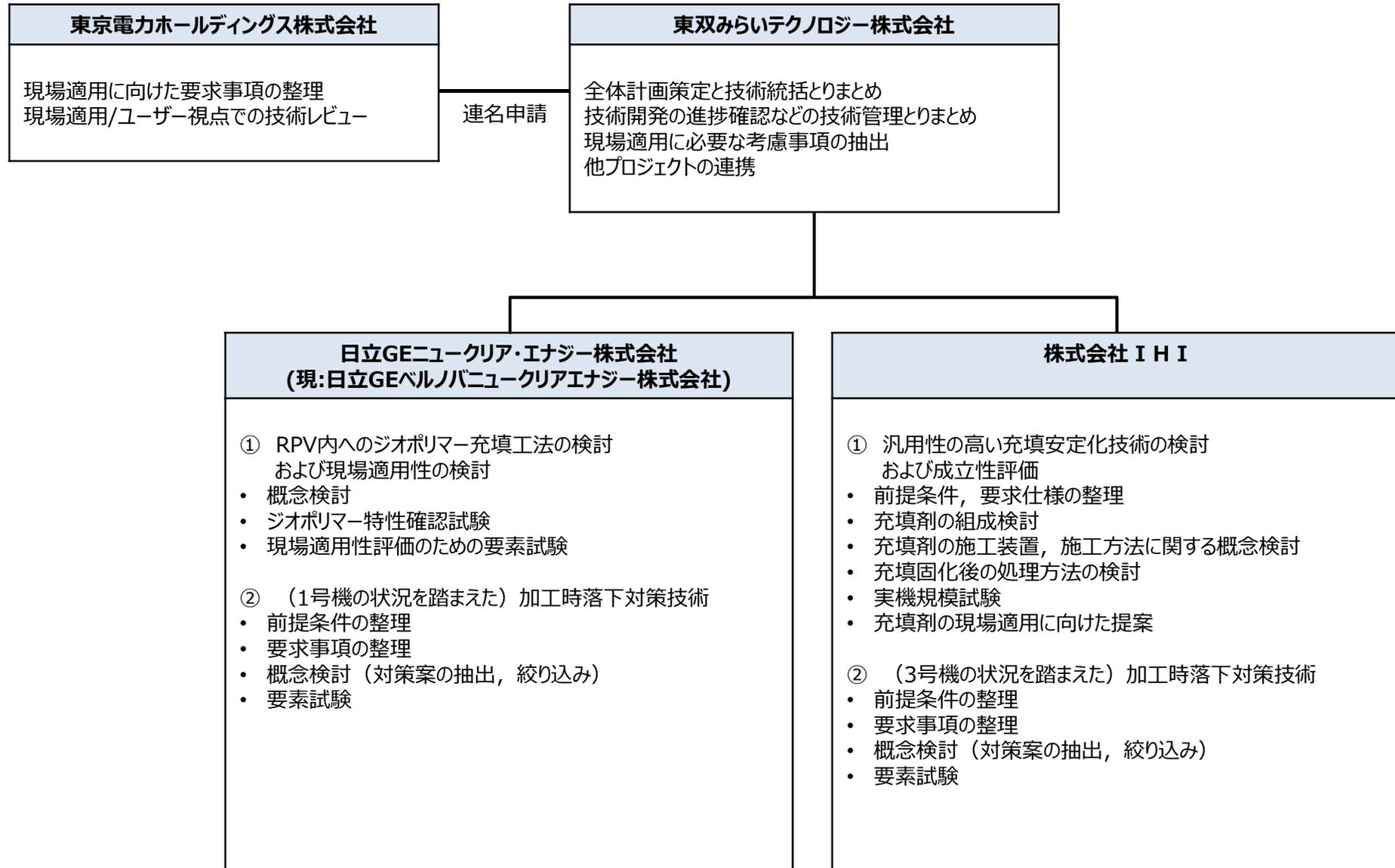
課題と対策

項目, No.	課題	概要	対策	
今後の課題	1	適用限界	緩衝体を実機で設置する場合には、設置期間中の劣化等による取り換えを不要とすべきである。この検証は、本事業のスコープ外である。	・実用的な設置想定期間を定めて、放射線環境下での腐食、複数回落下等による劣化程度、設置周辺部への影響を検証する試験の実施が必要。結果に応じて緩衝体構造、材料の見直し改良を実施。
	2	適用限界	本事業では、落下物衝撃を受けた燃料デブリベッドの損傷を対象としており、落下物として燃料デブリを想定した場合の落下物側の損傷検討は行っていない。	・燃料デブリが落下した場合に、本事業で開発した緩衝体上に落下した燃料デブリへの衝撃荷重低減効果を試験で確認することにより、緩衝体の適用可能範囲を拡げる。
	3	処分・廃棄方法	廃炉事業としての落下対策の開発においては、使用資材の廃棄プロセスまでの検討は必須であり、当該プロセスの検討が本事業のスコープ外であった。	処分・廃棄プロセスの検討を進めるとともに、廃棄物量低減のため、構成材料の見直しを行い物量の低減を図ると共に、処分が容易な材料を採用し、同程度の性能を得られる改良を実施。
	4	ケーブル・ホースマネジメント	遠隔ロボットによる施工では、自身のケーブル、ホースが動線に干渉し作業の妨げとなることが考えられる。本事業では、落下防止対策や吹付施工の成立性を主目的としたため、遠隔施工に伴うケーブル・ホースマネジメントは本事業のスコープ外であった。	他の補助事業で、ペDESTAL周辺へのユーティリティ設備設置が検討がされており、当該設備との取り合いを検討し、実機適用に向けた操作性を検証するため、本事業の継続もしくは検討事業を開始することが望ましい。
	5	衝撃力の評価	落下物の重心位置を中央と想定し検討を実施したが、重心位置が中央からずれていた場合の影響の評価が出来ていない。	落下物の重心位置が中央からずれていた場合を想定し、斜め落下時の落下距離等を変化させた、複数パターンにおける影響の評価検討。

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
- 9. 実施体制**
10. 実施項目とその関連，他研究との関係

9.実施体制



目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 事業目的
4. 目標達成を判断する指標
5. 前提条件の設定（充填安定化技術・加工時落下対策技術共通）
6. 充填安定化技術の開発
7. 加工時落下対策技術の開発
8. 本事業の成果・まとめ
9. 実施体制
- 10. 実施項目とその関連，他研究との関係**

10. 実施項目とその関連，他研究との関係

Decom.Tech

燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における大型搬送装置等のオペフロ上部設備の開発）

- ✓ 大型搬送装置等のオペフロ上部設備の設計・検討情報

原子炉圧力容器内部調査技術の開発（上部アクセス調査工法における加工技術の高度化，下部アクセス調査工法の開発）

- ✓ 上部アクセス調査方法・調査装置の概念検討情報

検討状況の共有



本事業

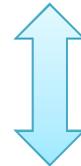
検討状況の共有



燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における充填安定化技術，加工時落下対策技術の開発）

- ✓ オペフロ上部に設置する充填設備等の概念検討情報

検討状況の共有



- ・ 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（粉状およびスラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱い技術の開発）
- ・ 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）
- ・ 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

- ✓ 充填材の組成検討結果の情報

人を大切にし、新しい技術を創造し、地域と共に成長する

Decom.Tech