

【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

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)

Decom.Tech

2024年9月

東双みらいテクノロジー株式会社

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

1. はじめに

- 本資料は、「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）」における成果公開資料である。

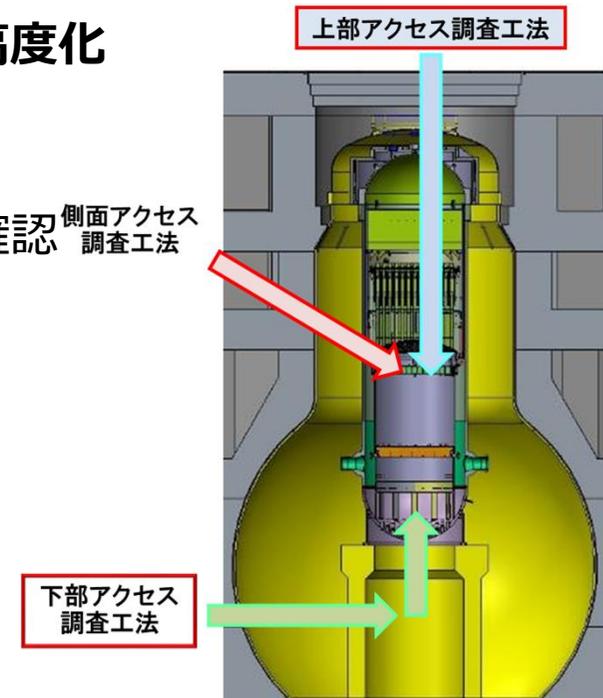
【実施項目】

◆ 実施項目① 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

- A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認
- B) AWJ※切断技術に係わる部分要素試作機の切断性能確認 側面アクセス調査工法
- C) 耐放射線性確認試験

◆ 実施項目② 下部アクセス調査工法の開発

- A) ドローンを用いた調査工法開発
- B) テレスコパイプを用いた調査工法開発
- C) 代替工法の検討



※：アブレイシブウォータージェット（AWJ）

2. 研究の目的および背景

◆ 研究の目的

- 先行実施されている「原子炉圧力容器内部調査技術の開発」(2020・2021年度)事業の2021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を図ることを目的とする。

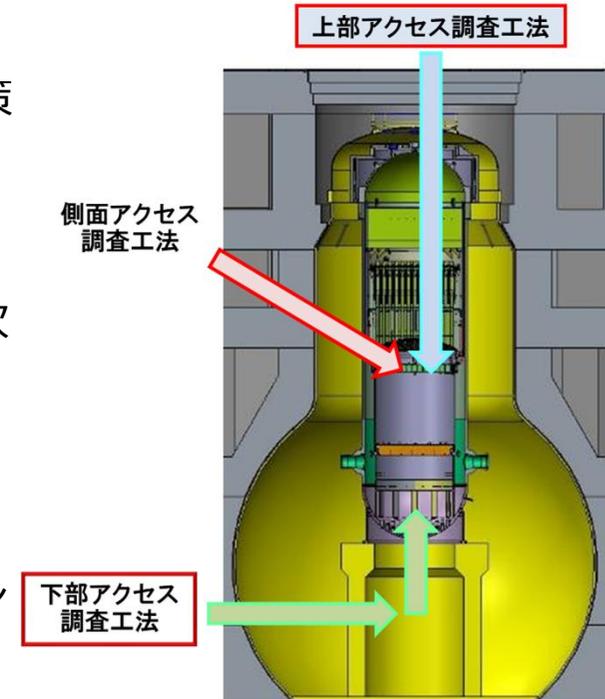
実施項目① 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

- ✓ 現場状況を模擬した試験にて、レーザー切断工法及び二次廃棄物(アブレイシブ)の少ないアブレイシブウォータージェット(AWJ)工法の現場適用性を確認する。

実施項目② 下部アクセス調査工法の開発

- ✓ 現場状況を模擬した試験にて、原子炉圧力容器(RPV)内部を下部からアクセス・調査するための調査装置(ドローンやテレスコパイプ等を用いたもの)の現場適用性を確認する。

- 本技術開発は、東京電力HDのニーズを踏まえ、関係者(経済産業省、東京電力HD、事務局)との協議を行い、進めるものとする。



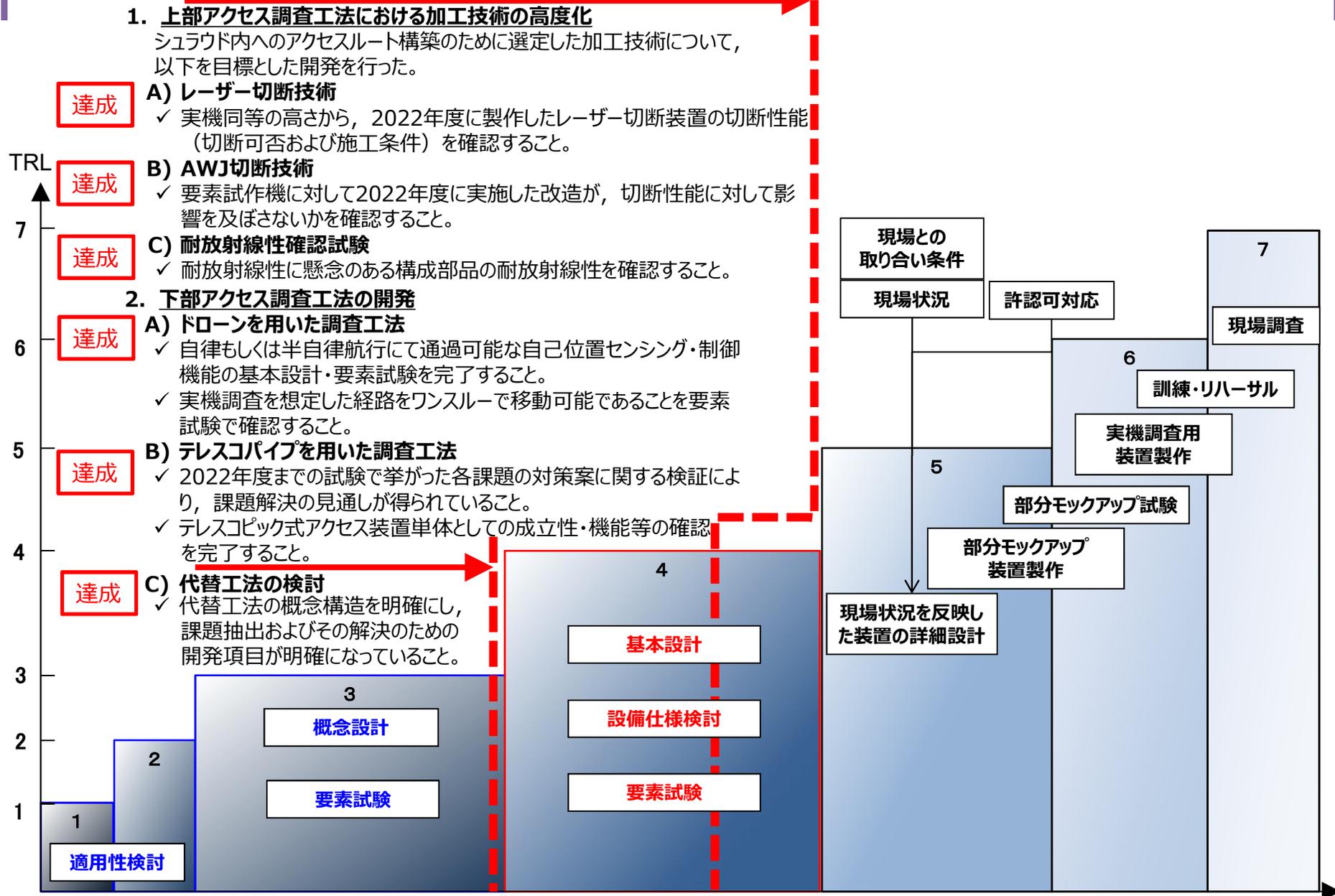
2. 研究の目的及び背景

◆ 背景

- 原子炉圧力容器（RPV）内部調査において、上部アクセス調査工法実機適用のため、炉内構造物にアクセスルートを設定する加工方法として、2021年度までに従来のアブレイシブウォータージェット（AWJ）切断よりも二次廃棄物（アブレイシブ等）を少なくする工法として、**改良型のAWJ切断およびレーザー切断に絞り込みを実施し、絞り込んだ工法について更なる高度化**を図った。
- また、より早期にRPV内部調査を実施できる可能性のある下部アクセス工法について、**ドローンやテレスコピック式の調査装置の概念検討**を実施してきた。

2019年度まで	2020~2022年度	2023年度提案
<p>【課題①】</p> <p>➤ シュラウド内へのアクセスルート構築のための炉内構造物に対する開口加工方法について、従来のAWJを用いた場合は二次廃棄物（アブレイシブ）発生量が多いことが課題。</p>	<p>【課題①対策】</p> <p>➤ RPV内での切断等により発生する二次廃棄物（アブレイシブ）のより少ない加工技術の開発を実施。</p>	<p>【課題①対策】（継続）</p> <p>➤ 現場状況を模擬した試験にて、レーザー切断工法及び二次廃棄物（アブレイシブ）の少ないAWJ工法の現場適用性の確認が必要である。</p> <p>⇒実施項目① 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化</p>
<p>【課題②】</p> <p>➤ 上部／側面アクセス調査工法は、現場適用までに一定の時間がかかると想定され、より早期にRPV内部調査を実施できる可能性のある工法の開発を進めることが重要。</p>	<p>【課題②対策】</p> <p>➤ PCV内部へ調査装置を投入し、RPV底部に存在すると想定される開口部から調査装置をRPV内に挿入し、RPV内部を調査する工法（下部アクセス調査工法）の調査計画の策定、および下部アクセス・調査装置の概念検討を実施。</p>	<p>【課題②対策】（継続）</p> <p>➤ 現場状況を模擬した試験にて、RPV内部を下部からアクセス・調査するための調査装置（ドローンやテレスコパイプ等を用いたもの）の現場適用性の確認が必要である。</p> <p>⇒実施項目② 下部アクセス調査工法の開発</p>

3. 研究の目標



目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.1 2022年度までの成果

(1) 適用可能な加工技術の抽出

- AWJ切断でアブレイシブ使用量が最も多い気水分離器の切断に重点をおき、適用可能な加工技術の調査・評価を行い、アブレイシブを少なくする加工技術としてホールソー、ディスクソー切断、レーザー切断、WJ切断をAWJ切断に加え適用技術の候補として抽出。
- 簡易試験の結果、レーザー切断、AWJ切断(改良型)に絞り込んだ。

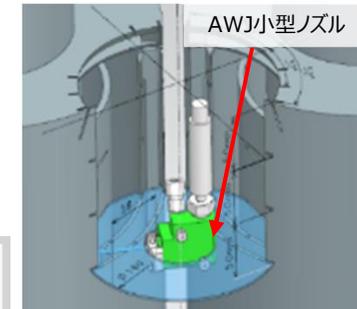
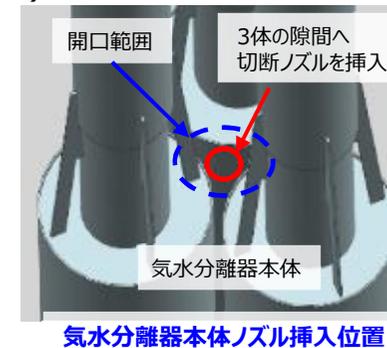
(2) 絞り込んだ加工技術により要素試験実施

A) レーザー切断

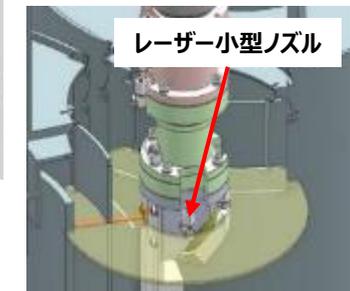
- 全ての加工対象に施工可能な条件を確認済み。
(気水分離器 3 体の隙間へ挿入可能なレーザー小型ノズルを設計)

B) AWJ切断 (改良型)

- アブレイシブ使用量目標の500kg以下を達成可能な見通しを得た。
- 全ての加工対象に施工可能な条件を確認済み。



小型ノズルによる気水分離器切断



気水分離器本体部の切断イメージ
(レーザー切断)

(3) 他システムへの影響確認 (ダスト粒径分布測定)

- AWJ及びレーザー切断により発生するダストの粒径分布を測定した結果、両技術共に0.3 μ m以下の粒径が支配的であった。気相系システム的设计に適宜反映していく必要がある。

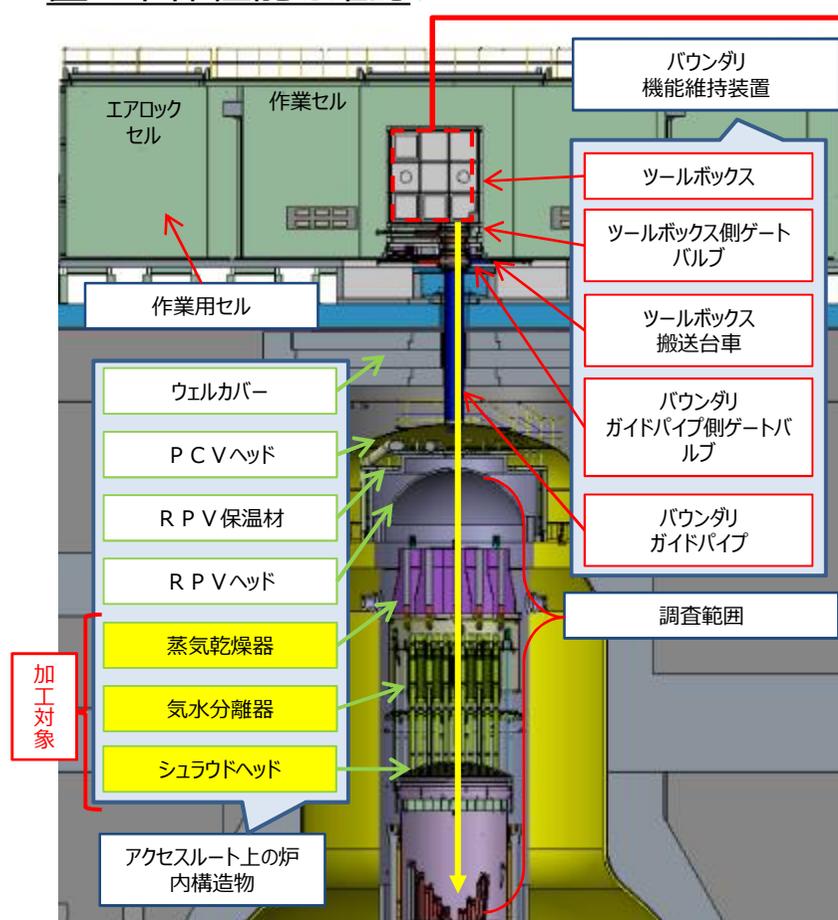
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.1 2022年度までの成果

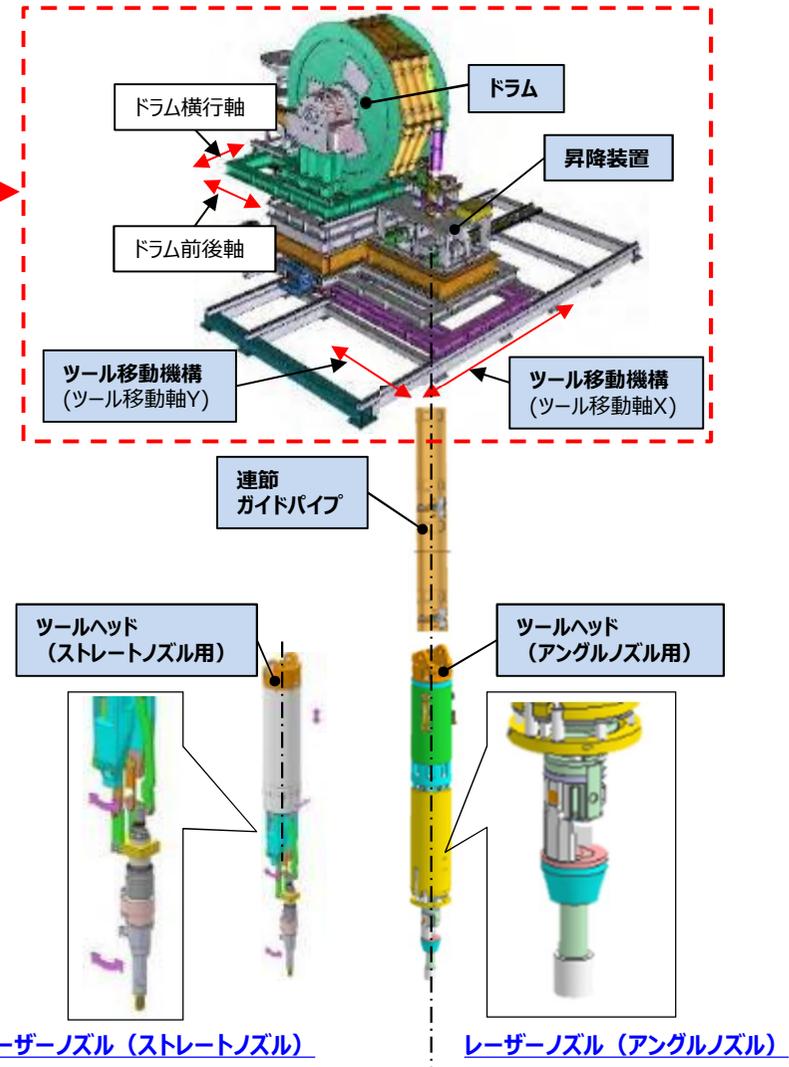
【参考： A) レーザー切断技術の概要】

- 実機適用を考慮した遠隔装置の設計。
- 遠隔装置成立性を確認するため試作を行い、装置の単体性能を確認。



RPV内部調査の概要図

<2022年度試作装置概要>



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

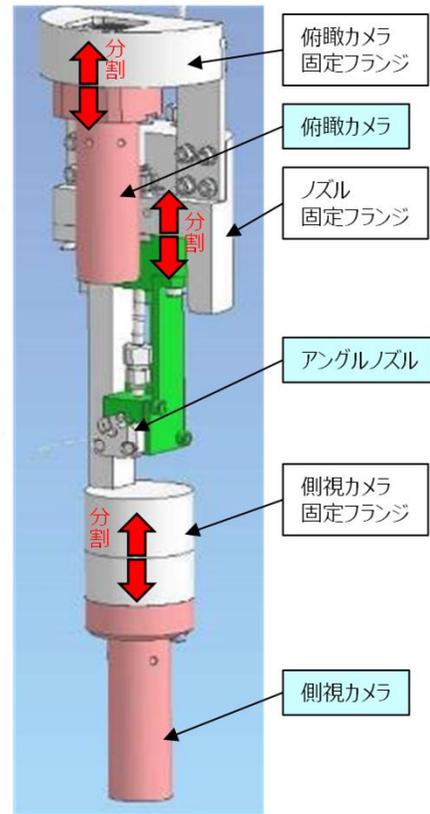
◆ 4.1 2022年度までの成果

【参考： B) AWJ切断技術の概要】

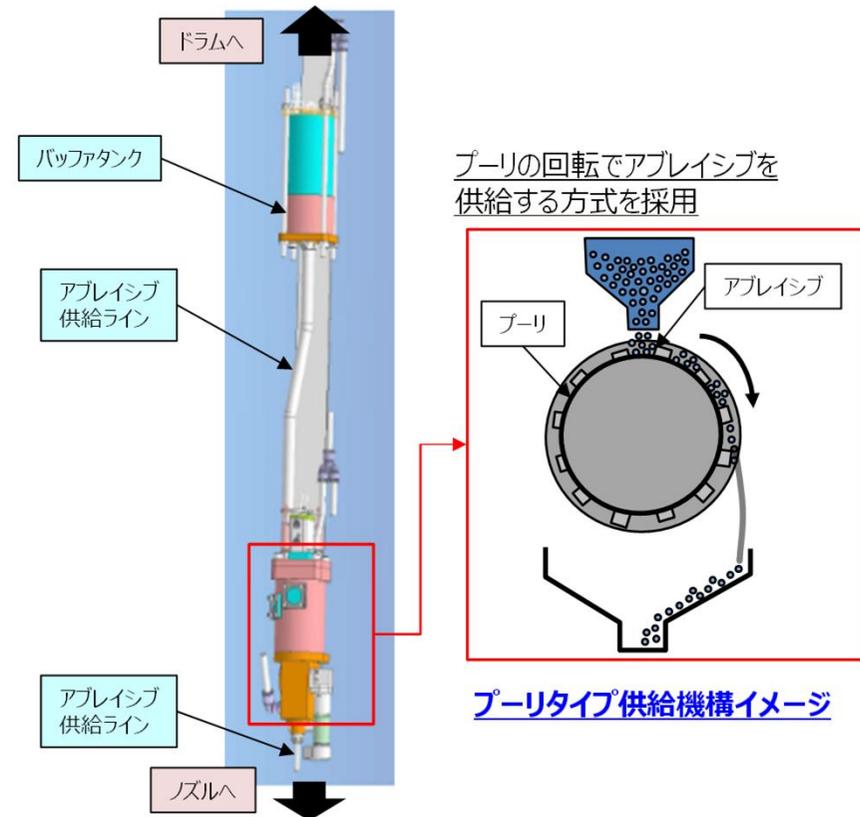
- AWJ切断は2019年度までに前頁のレーザー切断に示すような遠隔装置の試作は実施済。
- 2022年度は2021年度までの課題として挙げられているヘッドのメンテナンス方法（ノズル、カメラの遠隔交換）とアブレシブ供給量の安定化の検討を実施。

⇒所定の機能を満足している見通しは得られたが、切断性能の評価は簡易的な評価のため、詳細な切断性能の評価は必要

メンテナンス方法検討
 ・カメラおよびノズルの遠隔交換構造を検討
 ・遠隔交換構造を部分的に試作し、交換可否を確認



AWJヘッド部概要図



プーリタイプ供給機構イメージ

アブレシブ供給機構

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.2 2023年度の実施概要

- 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化では、2022年度までに実施された開発成果を踏まえ、以下の項目を実施した。

A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認

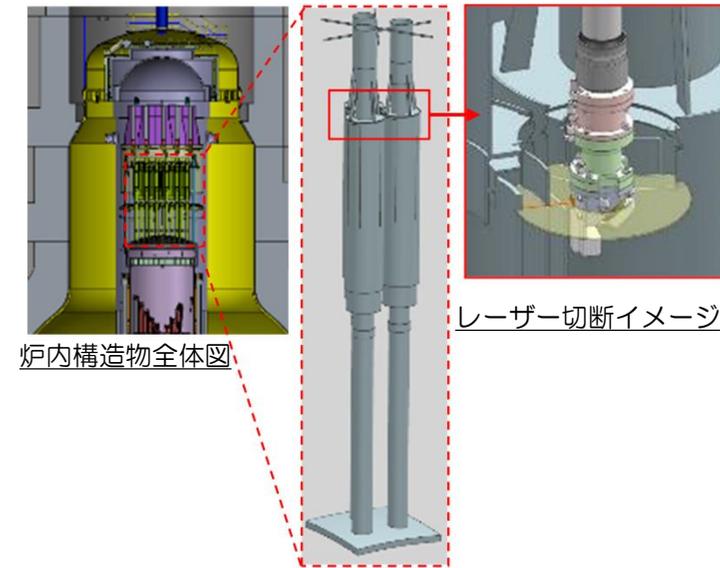
- 2022年度に製作したレーザー加工装置（試作機）を用いて、切断対象の炉内構造物の主に切断部位を模擬した試験体を実機の高さと同等に配置し試験体を切断することで、加工装置の切断性能を確認

B) AWJ切断技術に係わる部分要素試作機の切断性能確認

- 2022年度に製作したアブレイシブ供給機構の要素試作品を用いて、切断対象の炉内構造物のうち代表的な炉内構造物の一部を模擬した試験体を切断し、アブレイシブ供給機構改良後の切断性能を確認

C) 耐放射線性確認試験

- 耐放射線性に懸念のある構成部品（レーザー用ファイバー・ミラー・保護ガラス等）に対し照射試験を行い、耐放射線性を確認



レーザー切断イメージ(気水分離器の例)



AWJ切断イメージ(気水分離器の例)
(写真は2021年度の試験状況)

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認：背景

【2021年度 試験実施内容】

- レーザー加工装置のうち、ツールヘッドの部分要素試作機を製作し、平板切断試験および部分模擬体切断試験を実施し切断条件の確認を行った。

【2022年度 試験実施内容】

- レーザー加工装置（試作機）を一式製作。確認を実施。
- ※ 上記レーザー加工装置の試作機を用いた実機配置を想定した遠隔操作による切断性能の確認等は未実施であった。



【2023年度実施内容】

- 2022年度に製作したレーザー加工装置を用いて、加工装置と切断対象の高さ関係を実機模擬した設備にて遠隔操作による切断性能およびツールヘッドのアクセス性等の確認を行うこととした。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認：概要

2022年度に製作したレーザー加工装置を用いて、遠隔操作による切断性能（切断対象が切断可能であること、その際の施工条件(※)、アクセス性）を確認する。

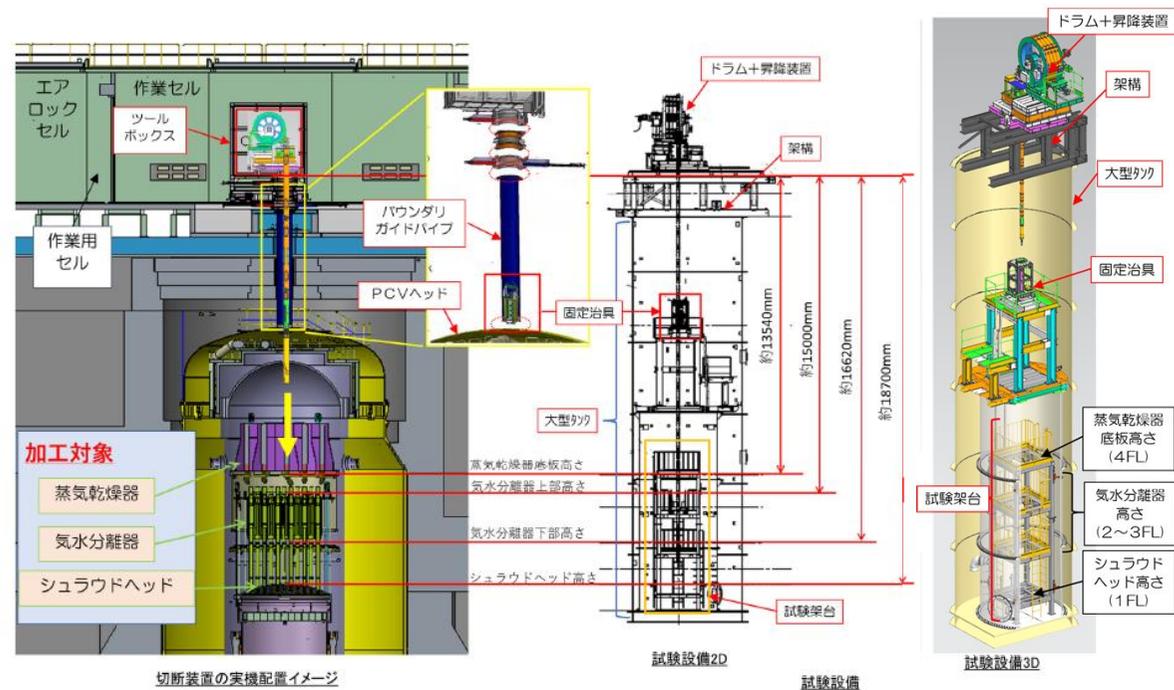
- ▶ 切断対象の炉内構造物を部分的に模擬した試験体を実機同様に配置(詳細は次ページ参照)。
⇒ 加工装置本体(ドラム+昇降装置)～レーザー加工ヘッド間距離：鉛直方向最大約18mを模擬(オペフロ上構台～シュラウドヘッド間距離を想定)
- ▶ 試験対象は切断対象の炉内構造物である蒸気乾燥器，気水分離器，シュラウドヘッド。

※ 切断性能として、下表の開口要求値を満たす施工条件(ノズルの駆動速度/駆動範囲/スタンドオフ等)を確認する。

加工対象	開口要求値(*1)	開口計画値(*2)
蒸気乾燥器 (底板) (SUS304, 板厚12mm)	Φ140mm 以上	Φ200mm
気水分離器 (SUS304, 板厚3mm)	Φ140mm 以上	Φ160mm
シュラウドヘッド (SUS304, 板厚51mm)	Φ100mm 以上	Φ120mm

(*1)：開口要求値は公算要領に開口径の目安として記載されている値

(*2)：開口要求値に対して、開口計画値はΦ20～60mm程度裕度を設けて設定



レーザー切断試験体系図（2023年度試験設備計画図）

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

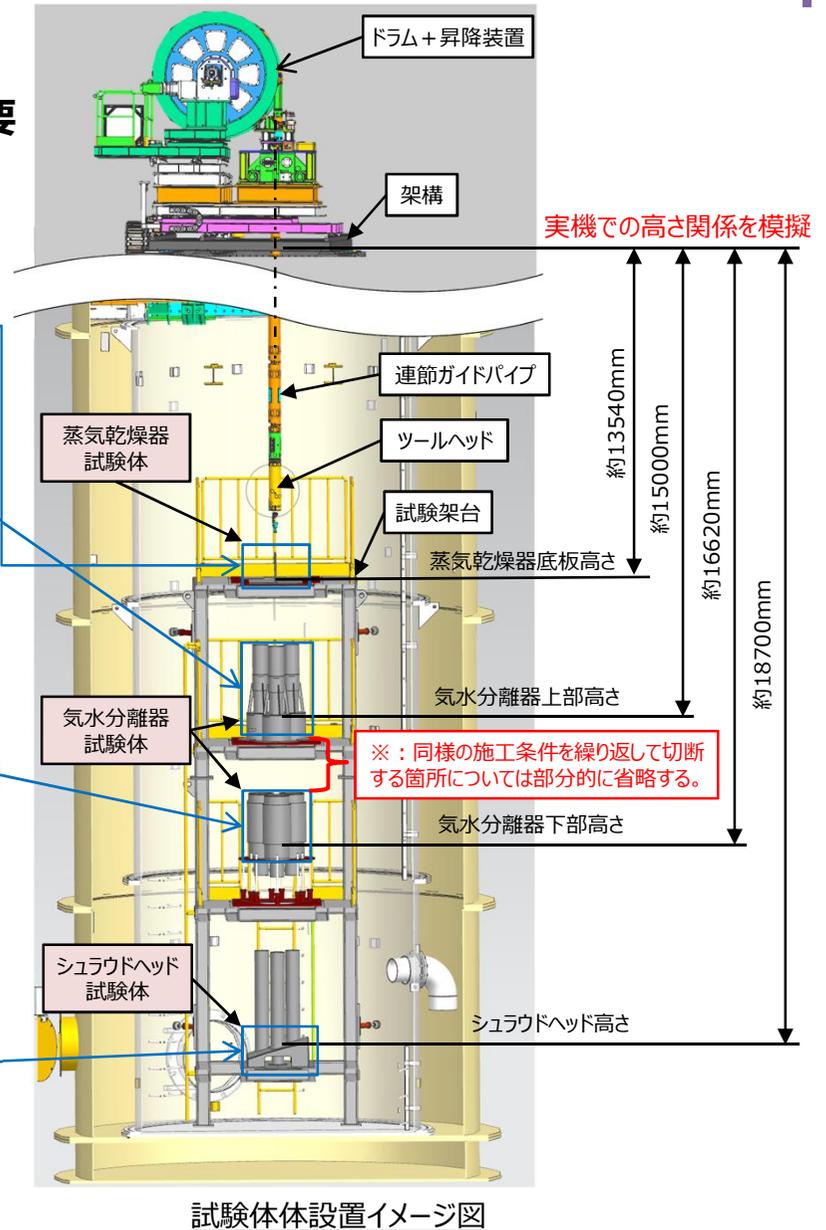
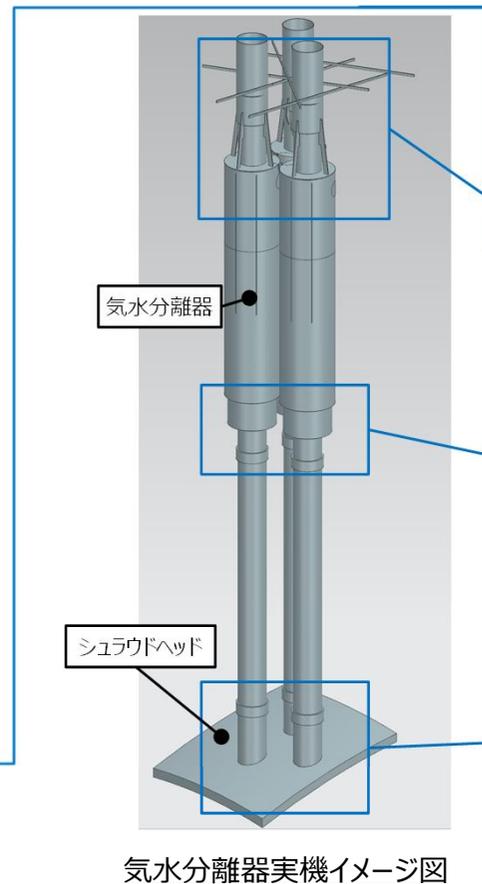
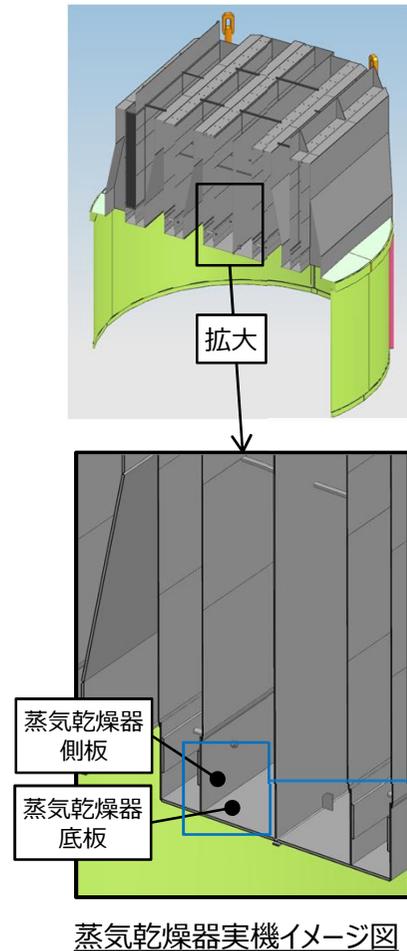
◆ 4.3 試験計画

A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認：概要

- ・試験体の模擬範囲イメージおよび試験体設置イメージ

試験体は、切断に影響する部分を模擬する。

(切断線についてはすべての切断線から代表切断線を抽出する。)



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

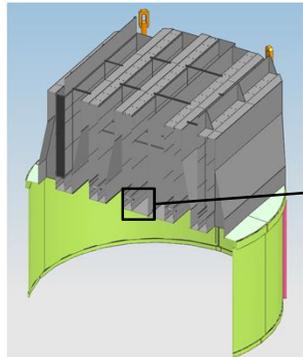
Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

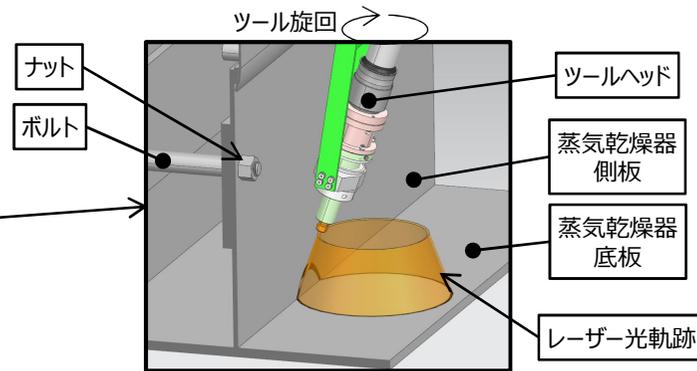
A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認：概要

・試験体の実機模擬イメージ

一例として、蒸気乾燥器底板部および気水分離器上部の模擬イメージを示す。

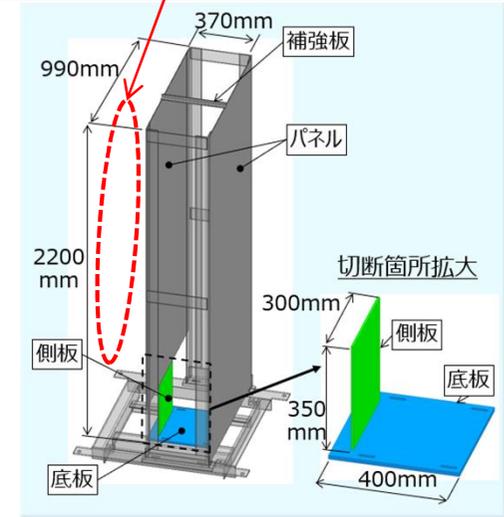


蒸気乾燥器実機イメージ図



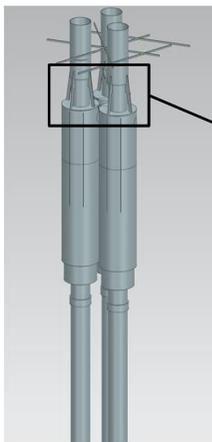
蒸気乾燥器切断イメージ図

パネル背面など、切断やアクセス性に影響しない範囲は簡略化する。

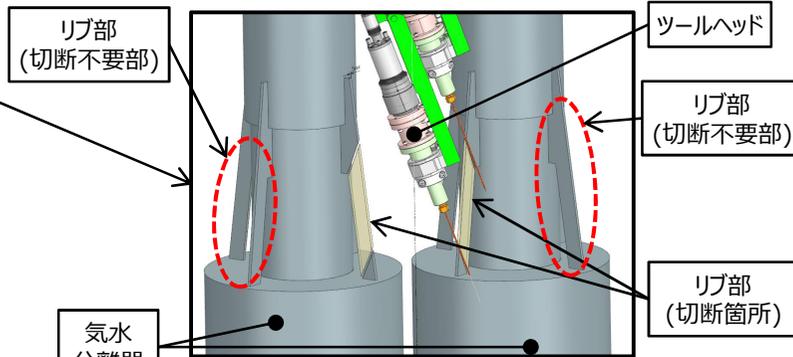


蒸気乾燥器模擬イメージ

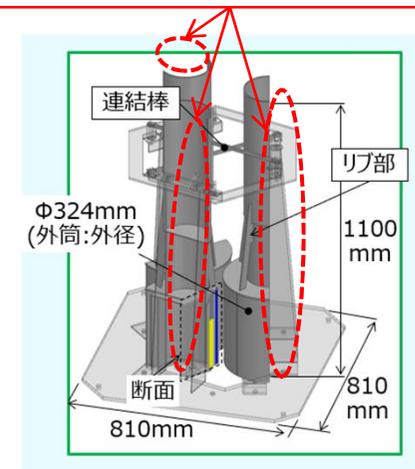
切断やアクセス性に影響しない範囲は簡略化する。



気水分離器実機イメージ図



気水分離器リブ部の切断イメージ図
(图中手前の気水分離器は非表示)



気水分離器上部模擬イメージ

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

A) レーザー加工装置（試作機）の切断性能確認：詳細計画

<試験項目>

- 本試験では、「遠隔施工性確認試験」と事前確認としての「平板切断試験」「部分模擬体切断試験」を実施することとした。試験フローを以下に示す。

【事前確認】

1. 平板切断試験

目的

2021年度の施工条件を採用するにあたり、同等の切断性能が得られることの見通しを立てるため、事前に2021年度の施工条件と同様の平板切断試験を実施し切断状態を確認する。

試験項目

- ①切断深さ（切断深さ確認試験）
- ②平板を切断(貫通)可能な切断速度（切断速度確認試験）

2. 部分模擬体切断試験

目的

実機を模擬したレーザー加工装置での「遠隔施工性確認試験」に先立ち、切断施工性を見通しを得るため、2021年度の施工条件に合わせ部分模擬体の切断試験を行う。2021年度切断試験の切断状態と差異がないことおよび施工条件の確認を行う。

試験項目

- ①固定治具の要否（固定治具なしの場合でも同等の施工が可能か評価）
- ②当該部の所定開口径(Φ140)での切断可否
- ③ドロスの状態/再溶着の懸念の有無

3. 遠隔施工性確認試験

目的

事前確認にて確認された施工条件、パラメータ等をベースとし形状および高さ方向の配置を模擬した試験体を用い、遠隔での施工性（位置決め/アクセス性と切断可否）を確認。また、施工中に想定される事象への対応についても、併せて確認する。

試験項目

- ①装置のアクセス性の確認※1
- ②試験体の切断可否および施工条件の確認※2
- ※1 施工位置への高さ方向/水平方向の位置合わせ可否（周辺構造物への接触有無の確認含む）
- ※2 開口要求値（Φ140）以上の切断可否および施工条件

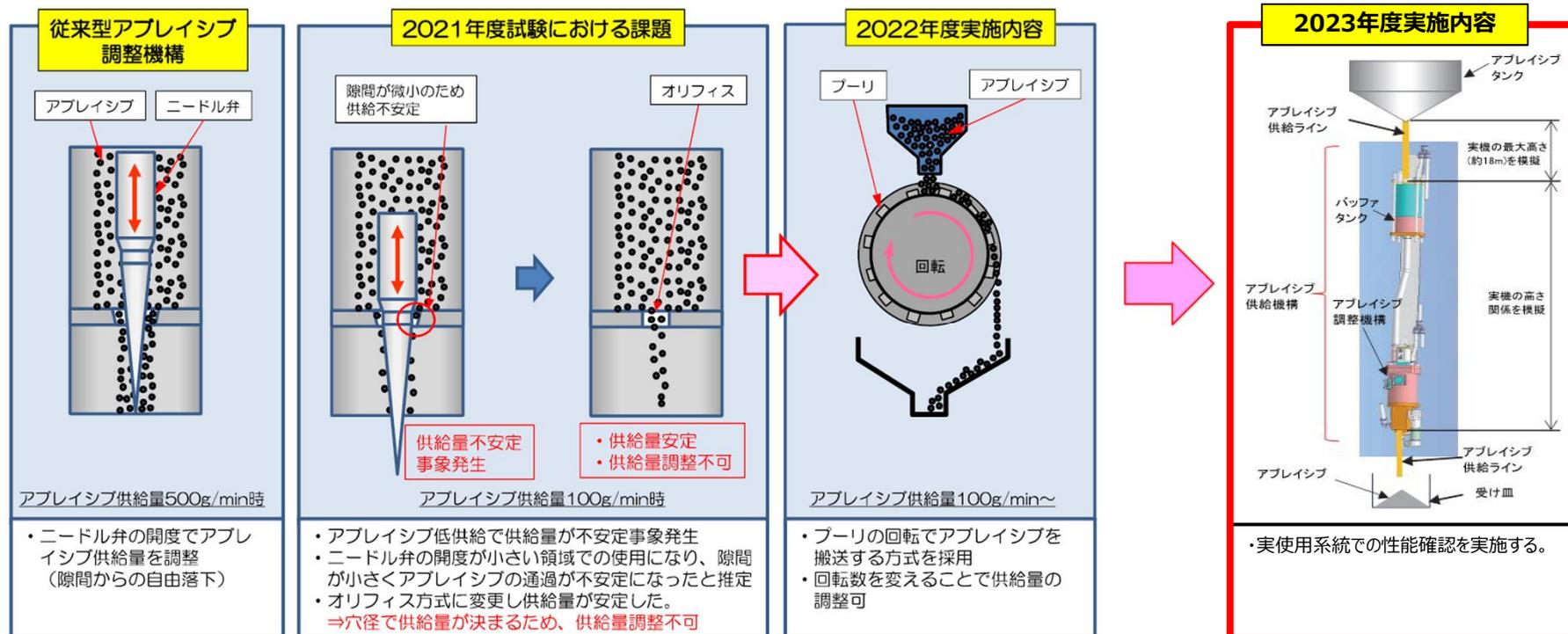
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

◆ 4.3 試験計画

B) AWJ切断技術に係わる部分要素試作機の切断性能確認：背景

従来、アブレイシブ供給機構は、下図のようにニードル弁により供給量を調整する機構であった。2021年度に供給量低減を目標にオリフスタイプへの改良を行い、供給量の安定と要求切断性能の確認が得られた。しかし、当該機構では供給量の調整が十分でなく、更なる安定切断のため、供給量が調整可能な機構開発を2022年度で実施し、供給量が調整可能となった。

2022年度は上記機構開発のみであり、実使用系統での確認試験を実施していないため、本事業（2023年度）にて確認試験を実施することとした。



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

B) AWJ切断技術に係わる部分要素試作機の切断性能確認 : 概要

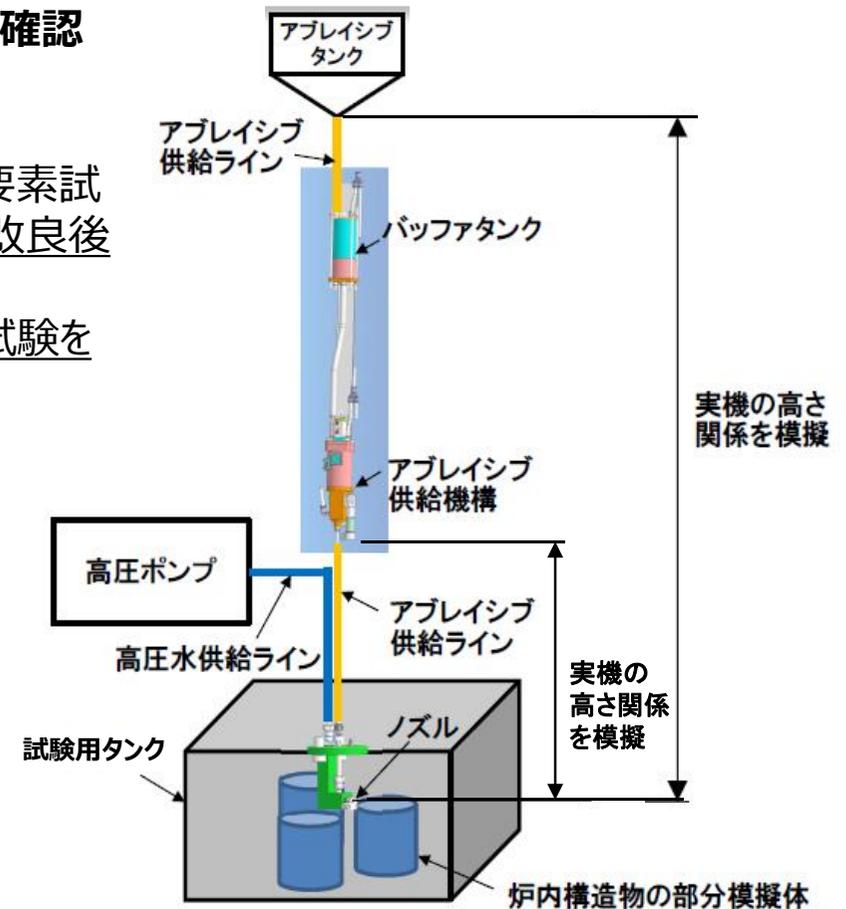
- 2022年度に製作したアブレシブ供給機構の部分要素試作を用いて試験体を切断し、アブレシブ供給機構改良後の切断ヘッドの切断性能（※）を確認する。
- 試験は、切断ヘッドのみ設置し、試験用水槽内で試験を実施。

※ 切断性能として、加工対象の中で最も切断形状が複雑な「気水分離器」の部分模擬体に対して代表的な切断手順を実施し、所定の切断深さ、切断範囲となることを確認する。
気水分離器の開口要求値は下表参照。

加工対象	開口要求値(*1)	開口計画値(*2)
気水分離器 (SUS304, 板厚3mm)	Φ140mm以上	Φ160mm

(*1) : 開口要求値は公募要領に開口径の目安として記載されている値

(*2) : Φ140mm以上の穴を施工するため、開口要求値に対してΦ20mmの裕度を設け開口計画値としてΦ160mm設定した。



AWJ切断試験体系図 (試験設備計画図)

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

B) AWJ切断技術に係わる部分要素試作機の切断性能確認：詳細計画

<試験項目>

【事前確認】

1. アブレイシブ供給量確認

目的

2022年度に要素試験用に試作されたアブレイシブ供給機構が、実機を模擬した「模擬体切断試験」にてアブレイシブを安定的に定量供給することを事前確認するため、アブレイシブタンク～バッファタンク、バッファタンク～アブレイシブ供給機構までの実機高さ関係を模擬した配置構成で「模擬体切断試験」での計画供給量が得られることを確認する。（2022年度にも同様の確認を実施済みであるが2023年度の試験を開始するにあたり再度確認する。）

試験項目

アブレイシブ設定供給量
(設定値：100g/min)

2. 平板切断試験

目的

「模擬体切断試験」での切断施工性を見通しを得るため、アブレイシブ供給機構を変更したAWJにおいて2021年度と同様な切断性能が得られることを、事前に平板切断試験にて確認をする。

試験項目

- ①切断深さ（切断深さ確認試験）
- ②平板を切断(貫通)可能な切断速度（切断速度確認試験）



3. 模擬体切断試験

目的

切断施工性を見通しを得るため施工対象中、切断断面の形状が複雑な部位（切断中に照射角、スタンドオフ等の変化が想定される部位）の切断試験を行い、施工条件、パラメータの適正を確認する。

試験項目

- ①気水分離器本体部の切断可否、及び施工条件の確認

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

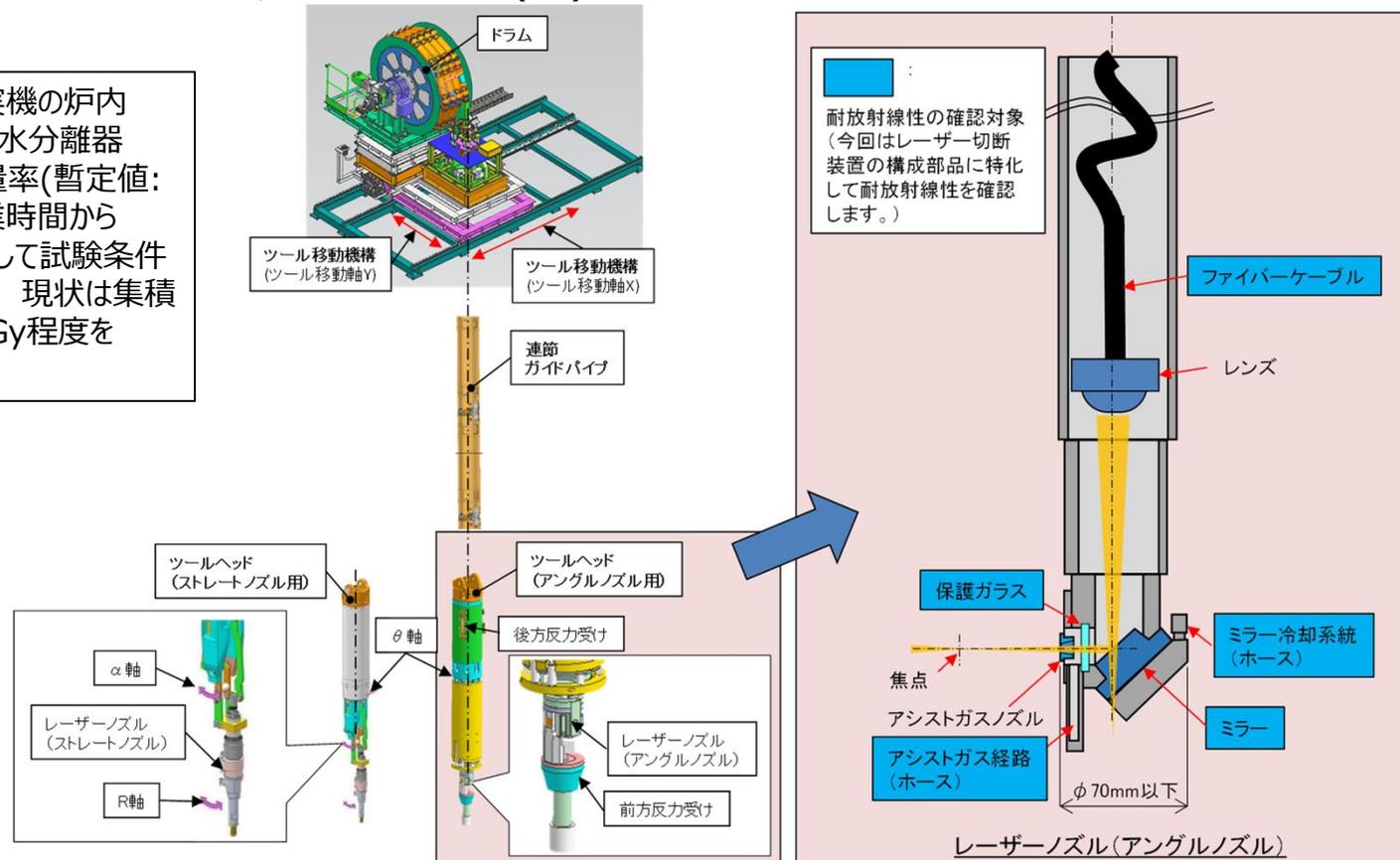
Decom.Tech

◆ 4.3 試験計画

C) 耐放射線性確認試験：概要

- レーザー加工装置を構成する部品のうち、光学系部品（レーザー用ファイバー・ミラー・保護ガラス等）については耐放射線性に関する情報が得られていないことから、放射線影響による課題を早期に抽出する目的で、本照射試験(※)を実施した。

※ 照射試験は、実機の炉内（蒸気乾燥器/気水分離器近傍）の想定線量率（暫定値：800Sv/h）と作業時間から集積線量を算出して試験条件を設定する。なお、現状は集積線量として150kGy程度を想定している。



耐放射線性試験範囲（試験設備計画図）

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. **上部アクセス調査工法における加工技術の高度化**
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 **試験結果**
 - 4.4.1 **試験結果(レーザー切断試験)**
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.4 試験結果

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(1) 試験結果概要 A-1.平板切断試験

- 2021年度の施工条件を採用するにあたり、同等の切断性能が得られることの見通しを立てるため、2021年度の施工条件で平板切断試験を行い、同程度の切断性能を得られることを確認する試験を実施した。
 - 切断深さ(切断深さ確認試験)
 - 平板を切断(貫通)可能な切断速度(切断速度確認試験)
- 試験結果：2021年度と2023年度との試験結果は、同様の性能を示した。このことから模擬体切断試験へ移行が可能と判断した。以下に平板試験結果の概要を示す。試験結果の詳細は、本章の4.4.1 (2)試験結果詳細 A-1.平板切断試験を参照のこと。

①切断深さ確認試験	深さmm (アシスト：エア)		確認結果
	2023年度結果(平均)	2021年度結果	
ストレートノズル	31	31	2021年度と2023年度試験では同等の施工深さであった。
アングルノズル	30	24	2021年度試験結果より施工深さが深く性能は満足すると判断した。

②切断速度確認試験	貫通可能速度mm/s (アシスト：エア)		確認結果
	2023年度結果	2021年度結果	
ストレートノズル	20	20	平板を貫通するためのノズル速度は同一であった。
アングルノズル	20	20	平板を貫通するためのノズル速度は同一であった。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(1) 試験結果概要 A-2.部分模擬体切断試験

・次項の「遠隔施工性確認試験」による切断施工が可能であるとの見通しを得るため、部分模擬体を使用した試験にて以下の項目を確認する試験を実施した。

- ① 固定治具の要否（固定治具なしの場合でも同等の施工が可能か評価）
- ② 当該部の所定開口径(Φ140mm)での切断可否
- ③ ドロスの状態/再溶着の懸念有無

・試験結果

以下に部分模擬体切断試験結果の概要を示す。また下表に示す通り本試験での確認項目は設定した目標を達成したことにより「遠隔施工性確認試験」の切断施工が可能であるとの見通し得ることが出来た。なお、試験結果の詳細は、本章の4.4.1 (2)試験結果詳細 A-2.部分模擬体切断試験を参照のこと。

試験での確認項目	確認内容&確認結果	確認結果
①固定治具の要否	<ul style="list-style-type: none"> ・固定治具を無くすことによる、施工中のノズルの振れ。 ⇒ノズルの振れなどが発生することは無かった。 ・固定治具を無くすことにより、アシストガスの反力の影響確認。 ⇒切断位置が約3mmズレが発生したが、補正により計画通り開口の施工が可能であった。 	<p>施工上の問題無く計画の開口を得ることが出来た。 よって、固定治具は不要と判断した。</p>
② 当該部の所定開口径(Φ140mm)での切断可否	<ul style="list-style-type: none"> ・ストレートノズルとアングルノズルの施工による開口サイズ。 ⇒施工開口は、目標のΦ140mm以上を達成。 	<p>所定開口切断を達成した。</p>
③ ドロスの状態/再溶着の懸念有無	<ul style="list-style-type: none"> ・施工中の有害なドロスの発生 ⇒切断に影響するドロスの発生は無かった。 	<p>切断に影響するドロスの発生は無く計画した施工条件は、適正であったと判断した。</p>
④ 施工の改善（追加項目）	<ul style="list-style-type: none"> 残留切断片への対策 ・切断片のサイズ縮小（切断箇所の追加） ⇒残留物が削減され、排除性も向上した。 ・アシストガス量の増加（残留片の排除能力向上） ⇒残留片の排除能力の向上を確認した。 	<p>残留切断片の再切断などの追加施工の必要性もなくなり有効な対策と判断した。 遠隔施工性確認試験に本施工方法を適用する。</p>

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(1) 試験結果概要 A-3.遠隔施工性確認試験

・装置が下部まで進行可能であることを確認するための判定基準を設け、遠隔施工で実機を切断する最適な施工条件を把握する確認試験を実施した。

なお、切断対象の炉内構造物の模擬体とレーザー切断装置を実機と同等の高さに配置し、以下項目を確認した。

①装置のアクセス性の確認※1

②実機模擬体の切断可否および施工条件（(2)試験結果詳細に示す条件を参照）の確認※2

※1 施工位置への高さ方向/水平方向の位置合わせ可否
(周辺構造物への接触有無の確認含む)

※2 開口要求値(Φ140mm)以上の切断可否および施工条件

また、本試験は、アクセスルート確保のために切断が必要となる炉内構造物である、「蒸気乾燥器」「気水分離器」「シュラウドヘッド」のうち、それぞれの代表箇所を加工対象とした。

・試験結果

以下に遠隔施工性確認試験結果の概要を示す。下表に示す通りアクセス性、実機模擬体の切断は設定した目標を達成した。また、計画した施工条件は、一部施工の改善(切断片の細断化等)を除き計画した施工条件にて各部の加工を完了した。前述にて示した通り、本項にて確認すべき項目は全て満足する結果であった。

なお、試験結果の詳細は、本章の4.4.1 (2)試験結果詳細 A-3.遠隔施工性確認断試験を参照のこと。

試験での確認項目	確認内容 & 確認結果	確認結果
①装置のアクセス性の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・下降位置および、水平方向の位置合わせの可否を確認。 ⇒水平方向の位置合わせにて許容値を超える事象が発生したが位置合わせのターゲットを見直し許容内に収めることが出来た。 	下降位置、水平方向もアクセスの位置精度を確保できたため、遠隔でのアクセス性は確保できたと判断した。
②実機模擬体の切断可否および施工条件の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・実機模擬体の切断確認。 ⇒目標開口径の施工を行うことが出来た。 ・施工条件の確認。 ⇒残留切断片の排除のための対策などで、一部施工を変更したが、基本工程の施工条件を変更することなく試験を完了した。 	実機模擬での開口要求値(Φ140mm以上)の施工および計画した施工条件での施工の確認を完了した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-1. 平板切断試験(①切断深さ評価)

【試験目的】

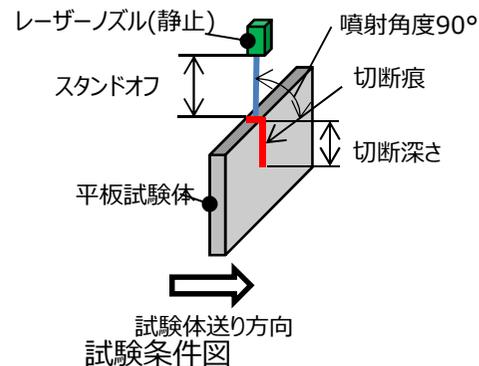
- ・2022年度製作した試作機の切断性と2021年度要素試験の結果の比較・評価
- ・アシストガスに窒素を使用した場合の影響評価

【試験概要】

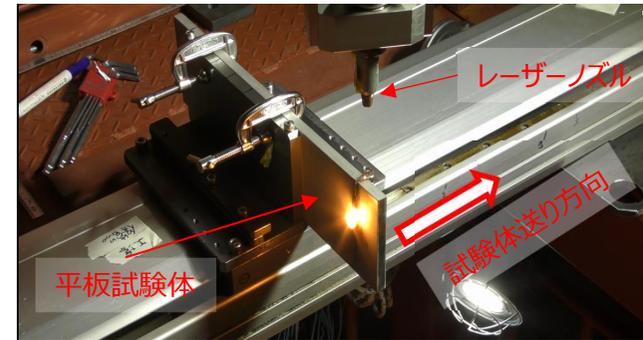
- ・平板を長手方向に切断し、2021年度試験(要素試験)と試作機の切断性能を切断深さで比較・評価した。
- ・アシストガスに窒素を使用し同様の試験を行い、アシストガスに窒素を使用した場合の影響を評価した。

【試験条件】

- ①ノズル：ストレートノズル
- ②レーザー出力：8kW
- ③アシストガス：エア・窒素
- ④アシストガス流量：750 l/min
- ⑤スタンドオフ：50mm
- ⑥切断速度：2, 3, 5mm/s
- ⑦試験回数：3回



【試験結果】



切断状況写真

切断深さ測定結果

No.	スタンドオフ (mm)	切断速度 (mm/s)	切断深さ(mm)				2021年度 切断深さ(mm)
			エア		窒素		
1	50	2	35	平均 36	35	平均 34	38.5
2			35		35		
3			38		33		
4		3	29	平均 33	32	平均 31	
5			32		30		
6			37		30		
7		5	23	平均 23	24	平均 24	
8			23		24		
9			23		24		

切断深さは2021年度と同等の結果であり、試作機が2021年度試験機と同等の切断性能を有しているものと判断。

また、アシストガスに窒素を使用した場合でも、切断性能に顕著な差はみられなかったため、以降の試験はエアにて実施することとした。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-1. 平板切断試験(①切断深さ評価)

【試験目的】

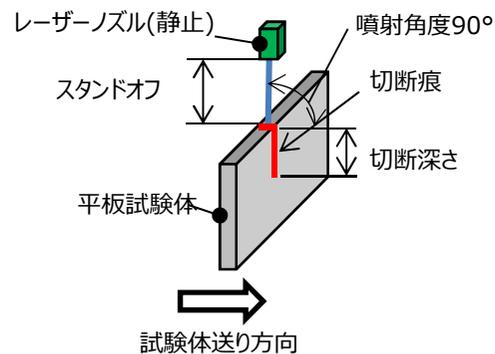
- ・2022年度製作した試作機の切断性と2021年度要素試験の結果の比較・評価

【試験概要】

- ・平板を長手方向に切断し、2021年度試験(要素試験)と試作機の切断性能を切断深さで比較・評価した。

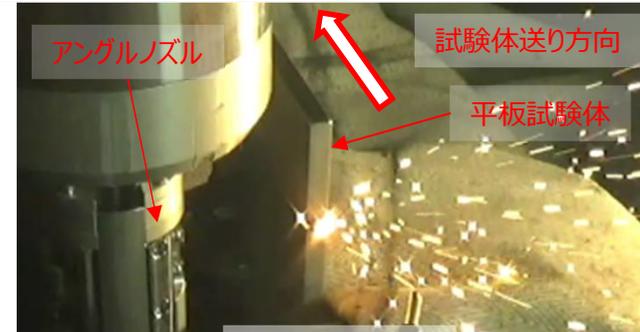
【試験条件】

- ①ノズル：アングルノズル
- ②レーザー出力：8 kW
- ③アシストガス：エア
- ④アシストガス流量：680 l/min
- ⑤スタンドオフ：55mm
- ⑥切断速度：2, 3, 5mm/s
- ⑦試験回数：3回



試験条件図

【試験結果】



切断状況写真

切断深さ測定結果

No.	スタンドオフ (mm)	切断速度 (mm/s)	切断深さ(mm)		2021年度切断深さ(mm)
			エア	平均	
1	55	2	35.5	平均 37	28
2			37.5		
3			38		
4		3	29.5	平均 30	24
5			31		
6			29.5		
7		5	22	平均 22	20
8			22.5		
9			21		

切断深さは2021年度と同等の結果であり、試作機が2021年度試験機と同等の切断性能を有しているものと判断。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-1. 平板切断試験(①切断深さ評価)

【試験結果】(続き) 【切断深さ試験】

【切断深さ試験】(ストレートノズル)

アシストガス：エア

前面

切断速度
(mm/s)

5 3 2 5 3 2

裏面

切断速度
(mm/s)

2 3 5 2 3 5

アシストガス：窒素

前面

5 3 2 5 3 2

裏面

2 3 5 2 3 5
SN21-50 SN22-50 SN23-50 SN24-50 SN25-50 SN26-50

【切断深さ試験】(アングルノズル)

前面

5 3 2 5 3 2

裏面

2 3 5 2 3 5

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-1. 平板切断試験(②切断速度評価)

【試験目的】

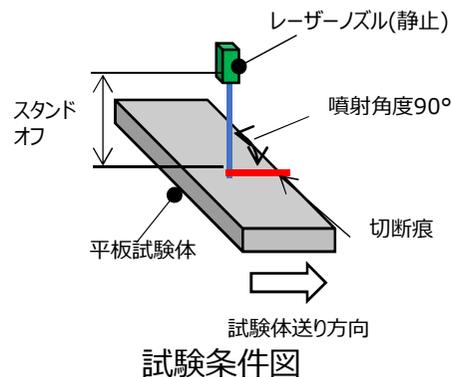
- ・2022年度製作した試作機の切断性と2021年度要素試験の結果の比較・評価
- ・アシストガスに窒素を使用した場合の影響評価

【試験概要】

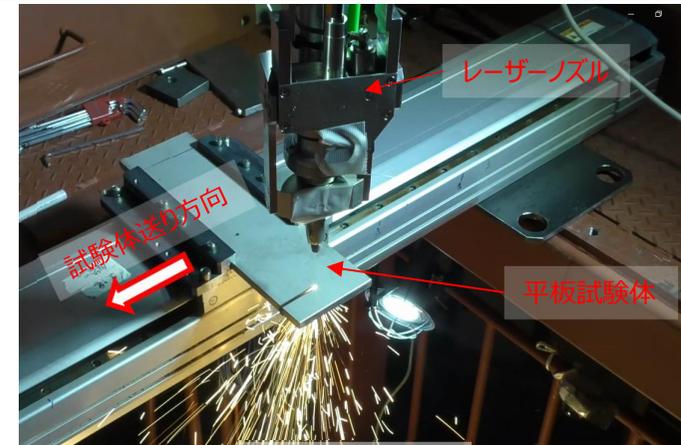
- ・平板を板厚方向に切断し、2021年度試験（要素試験）と試作機の切断性能を切断可能（貫通可能）な切断速度で比較・評価した。
- ・アシストガスに窒素を使用し同様の試験を行い、アシストガスに窒素を使用した場合の影響を評価した。

【試験条件】

- ①ノズル：ストレートノズル
- ②レーザー出力：8 kW
- ③アシストガス：エア・窒素
- ④アシストガス流量：750 ℓ /min
- ⑤スタンドオフ：50mm
- ⑥切断速度：5,10,20,40,mm/s
- ⑦試験回数：3回



【試験結果】



試験状況写真

切断速度評価結果

No.	スタンドオフ (mm)	切断速度 (mm/s)	切断可否 (可：○/否：×)		2021年度切断可否
			エア	窒素	
1	50	5	○	○	○
2		10	○	○	○
3		20	○	○	○
4		40	×	×	×

切断可能な切断速度は20mm/minで2021年度と同じ結果であり、試作機が2021年度試験機と同等の切断性能を有しているものと判断。また、①切断深さ評価と同様、アシストガスに窒素を使用した場合でも、切断性能に顕著な差はみられなかったため、以降の試験はエアにて実施することとした。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A- 1. 平板切断試験(②切断速度評価)

【試験目的】

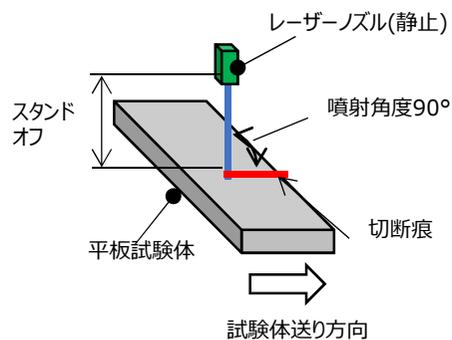
- ・2022年度製作した試作機の切断性と2021年度要素試験の結果の比較・評価

【試験概要】

- ・平板を板厚方向に切断し、2021年度試験（要素試験）と試作機の切断性能を切断可能（貫通可能）な切断速度で比較・評価した。

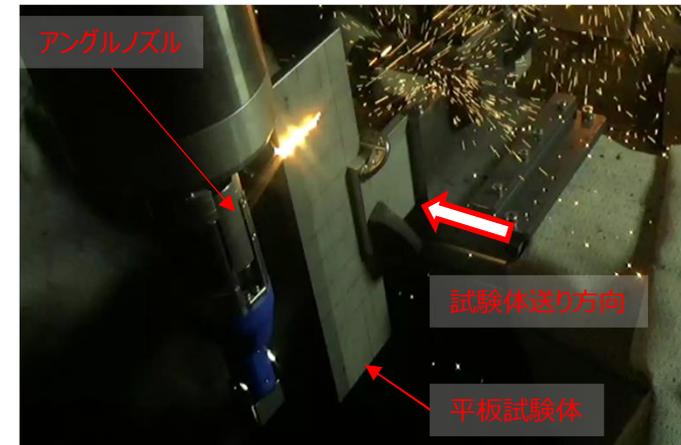
【試験条件】

- ①ノズル：アングルノズル
- ②レーザー出力：8 kW
- ③アシストガス：エア
- ④アシストガス流量：680 l/min
- ⑤スタンドオフ：55mm
- ⑥切断速度：5,10,20,40,mm/s
- ⑦試験回数：3回



試験条件図

【試験結果】



試験状況写真

切断速度評価結果

No.	スタンドオフ (mm)	切断速度 (mm/s)	切断可否 (可：○/ 否：×)	2021年度 切断可否
			エア	
1	55	5	○	○
2		10	○	○
3		20	○	○
4		40	×	×

切断可能な切断速度は20mm/minで2021年度と同じ結果であり、試作機が2021年度試験機と同等の切断性能を有しているものと判断。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

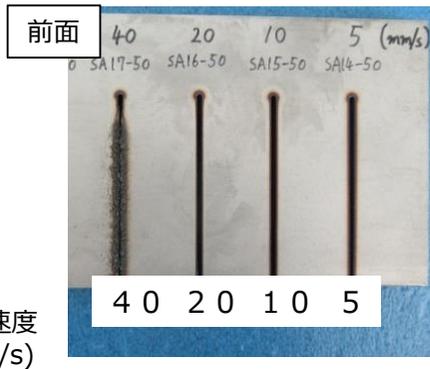
4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-1. 平板切断試験(②切断速度評価)

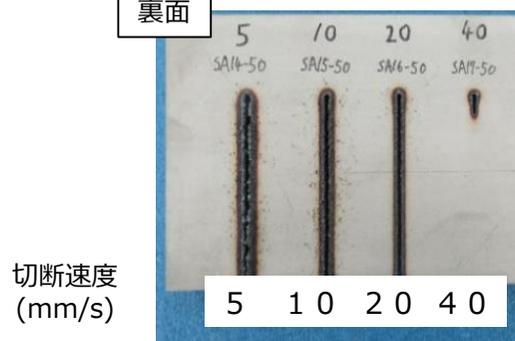
【試験結果】(続き) 【切断速度試験】

【切断速度試験】(ストレートノズル)

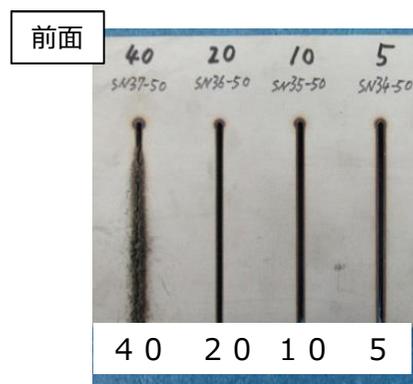
アシストガス：エア



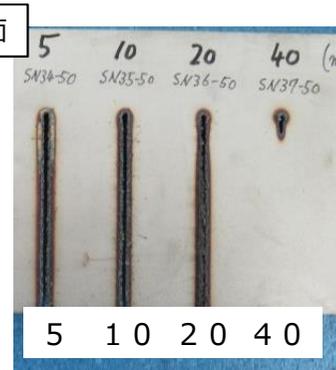
裏面



アシストガス：窒素

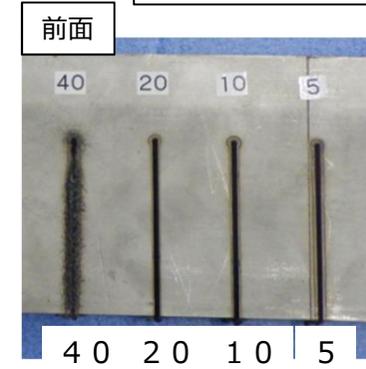


裏面

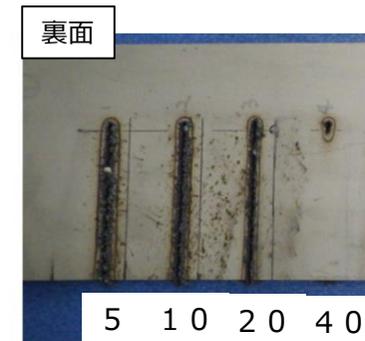


【切断速度試験】(アングルノズル)

アシストガス：エア



裏面



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

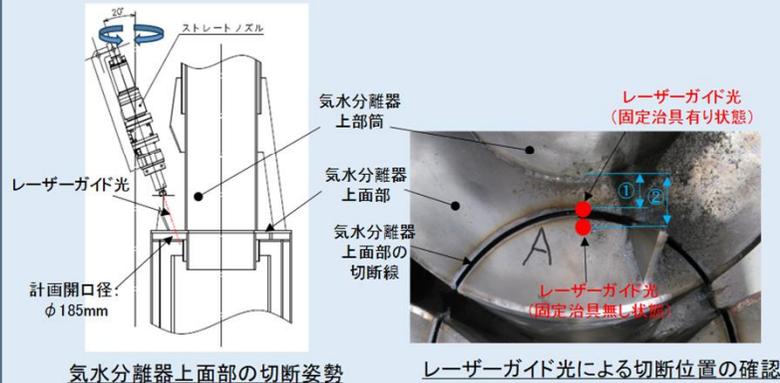
4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-2.部分模擬体切断試験(①固定治具の要否)

1. 固定治具無し状態での切断への影響確認

①切断への影響確認方法

- ・気水分離器上面部の切断姿勢をつくり、レーザーガイド光を出す。
- ・固定治具有り状態で、レーザーガイド光から気水分離器上部筒までの距離①を測定する。
- ・固定治具無し状態で、レーザーガイド光から気水分離器上部筒までの距離②を測定する。
- ・また切断時の反力の影響を合わせて確認するため、アシストガスの噴射有り/無しの条件で上記の距離①、②を測定する。



②切断への影響確認結果

- ・下表の結果より、固定治具有りと無しを比較すると、固定治具無し状態の方が、位置ずれが大きくなるが、補正して対応できる範囲と考える。

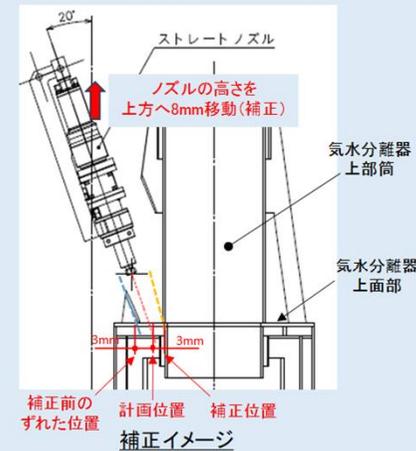
レーザーガイド光による切断位置

	固定治具有り	固定治具無し
	①レーザーガイド光から気水分離器上部筒までの距離(mm)	②レーザーガイド光から気水分離器上部筒までの距離(mm)
アシストガス噴射無し	20mm	20mm
アシストガス噴射有り	20.5mm (上記より+0.5mm)	23mm (上記より+3mm)

2. 固定治具無し状態での切断試験

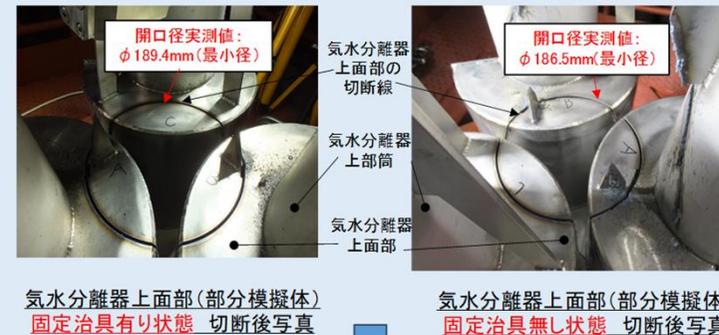
①補正量算出と補正方法

- ・左記の結果から補正量を算出し、下図の通り補正する。



②固定治具有り状態と無し状態の切断結果比較

- ・固定治具無し状態で切断を実施し、下記のことから問題なく切断することができた。
- ・固定治具有り状態と比較し、固定治具無し状態でも、ふら付き無く、切断可能であった(下図参照)。
- ・固定治具無し状態でも補正を行うことで、計画開口径(φ185mm)を満足する開口を開けることができた。



固定治具無し状態で問題なく切断が可能であったため、「遠隔施工性確認試験」へ適用するものとした。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2)試験結果詳細 A-2.部分模擬体切断試験(②当該部の所定開口径での切断可否・③ドロスの状態/再溶着の懸念有無)

【対象箇所写真】

気水分離器模擬体の上面部



気水分離器模擬体(プレート部)



気水分離器模擬体(リング部)



【計測値】

気水分離器模擬体の上面部

模擬体	切断高さ	開口径(※)
	(計画30mm)	判定基準： Φ140mm以上
A	30	Φ165mm
B	31	
C	30	

気水分離器模擬体(プレート部)

模擬体	切断高さ	開口径(※)
	(計画200mm)	判定基準： Φ140mm以上 (計画Φ160mm)
A	200	Φ145mm
B	201	
C	201	

気水分離器模擬体(リング部)

模擬体	切断高さ	開口径(※)
	(計画150mm)	判定基準： Φ140mm以上 (計画Φ160mm)
A	148	Φ160mm
B	150	
C	149	

本試験では、ドロスの発生などによる加工不具合は発生せず、試験で設定した施工条件により、当該部に所定開口径(Φ140mm以上)の施工が可能であること、および切断高さも計画値と同等であることが確認できたため、遠隔施工性確認試験への移行見通しを得た。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-3. 遠隔施工性確認試験(①装置のアクセス性の確認・ ②実機模擬体の切断可否および施工条件の確認)

遠隔施工性確認試験の主な試験条件を以下の表に示す。

試験条件		
項目	条件	設定理由
レーザーノズルの種類	ストレートノズル, アングルノズル	施工に必要なノズル全種類にて試験を実施
アシストガスの種類	エア	※ 1
アシストガス流量	750 ℓ /min (ストレートノズル) 900 ℓ /min (アングルノズル) ※2	2021年度の補助事業の切断試験にて確認した条件
アシストガス圧力(参考値)	0.68MPa	2021年度の補助事業の切断試験にて確認した条件
試験(試行)回数	2回 + 予備試験1回	※ 3

- ※ 1 : 実機切断時には、窒素ガスを予定しているが「事前確認試験」にてエアと窒素ガスにて切断性に差異の無いことを確認しアシストガスをエアとし試験を行った。
- ※ 2 : 2021年度の補助事業の切断試験で確認した条件 (680 ℓ /min) から、切断片除去向上のため、試験条件を変更した。
- ※ 3 : 本試験は、「事前確認試験」での施工条件とパラメータを基に「遠隔施工性確認試験」の初回の試験を実施し再現性確認のため 2 回目の試験を実施した。また、初回の試験にて切断不可(再溶着含む)の事象が発生した場合は対応を検討し、再加工や施工条件見直しを実施した。その後、模擬体を交換し、見直し後の施工条件で 2 回目の試験を実施し予備試験にて再現性の確認を行った。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2)試験結果詳細 A-3.遠隔施工性確認試験(①装置のアクセス性の確認・
②実機模擬体の切断可否および施工条件の確認)

・【施工中に想定される事象への対応】の試験条件を以下に示す。

【施工中に想定される事象】

- ① ドロスの再溶着などによる切断不可事象
- ② 落下した切断片による切断不可事象

【施工中想定事象への対応確認】

- 上記2事象に対し、遠隔施工性確認試験を通じて施工中想定事象対応における課題抽出および対策案の検討を実施。
- 本試験中に上記2事象が確認された場合には、当該事象の原因究明および事象発生の低減策の検討を行い、必要に応じ切断方法や切断パラメータ等への反映を実施。
- また、施工中想定事象対応として切断継続が可能な対応策を確認する。必要に応じ実作業によりその効果を検証。

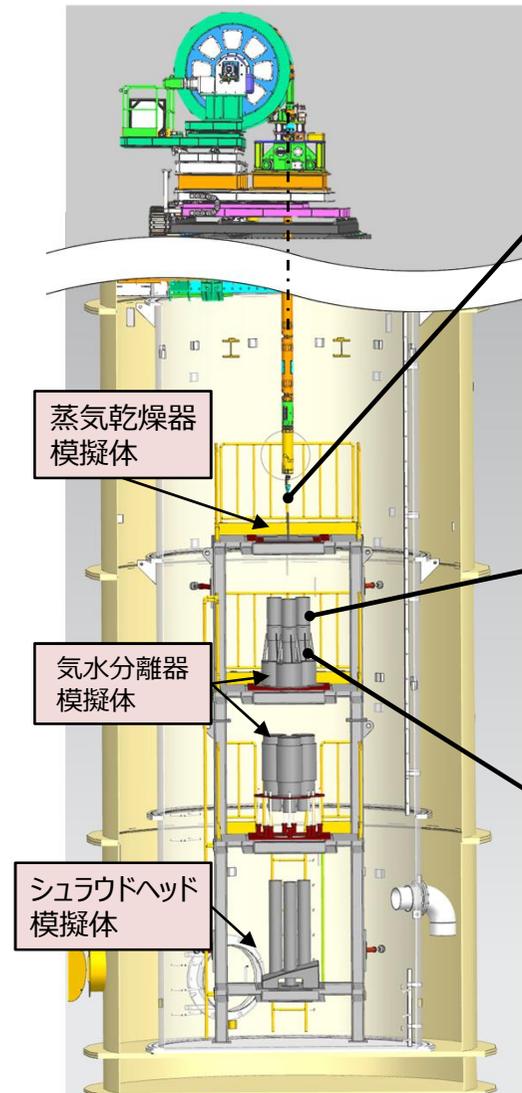
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-3. 遠隔施工性確認試験(①装置のアクセス性の確認・

②実機模擬体の切断可否および施工条件の確認)



蒸気乾燥器

中心位置ズレ		ノズル高さ	小径開口		大径開口	
(判定基準値: 20mm以内)		判定基準: ±10mm (計画40mm)	判定基準: Φ35以上 (計画Φ40mm)		判定基準: Φ140以上 (計画Φ200mm)	
XY			XY方向の寸法を計測		XY方向の寸法を計測	
X	Y		X方向	Y方向	X方向	Y方向
-0.5 ~ -4mm	-31※1 ~ +2mm	40 ~ 42mm	40~ 42mm	41.5~ 42mm	196~ 215mm	207~ 216mm

気水分離器(連結棒)

ノズル中心位置ズレ	ノズル高さ	開口径(※)
(実測値から算出) (mm) (判定基準: 48mm以内)	判定基準: ±10mm (計画95.6mm)	判定基準: Φ140mm以上
2.3mm	94.5mm	Φ165mm

※: 開口径は挿入可能であった測定治具の径を記載。

気水分離器(リブ部)

	ノズル中心位置ズレ	ノズル高さ	開口径(※)
	(実測値からずれ量を評価) (mm) (判定基準: 19mm以内)	判定基準±10mm (計画値(上部): 479mm) (計画値(下部): 623mm)	判定基準: Φ140mm以上
リブ上部	1.5mm	476mm	Φ165mm
リブ下部	2.0mm	620mm	

※: 開口径は挿入可能であった測定治具の径を記載。

※1: 蒸気乾燥器の中心位置ズレについては、施工法の改善で中心位置ズレがY方向ズレ量:-31→-1~+2に改善され基準値以内となることを確認した。

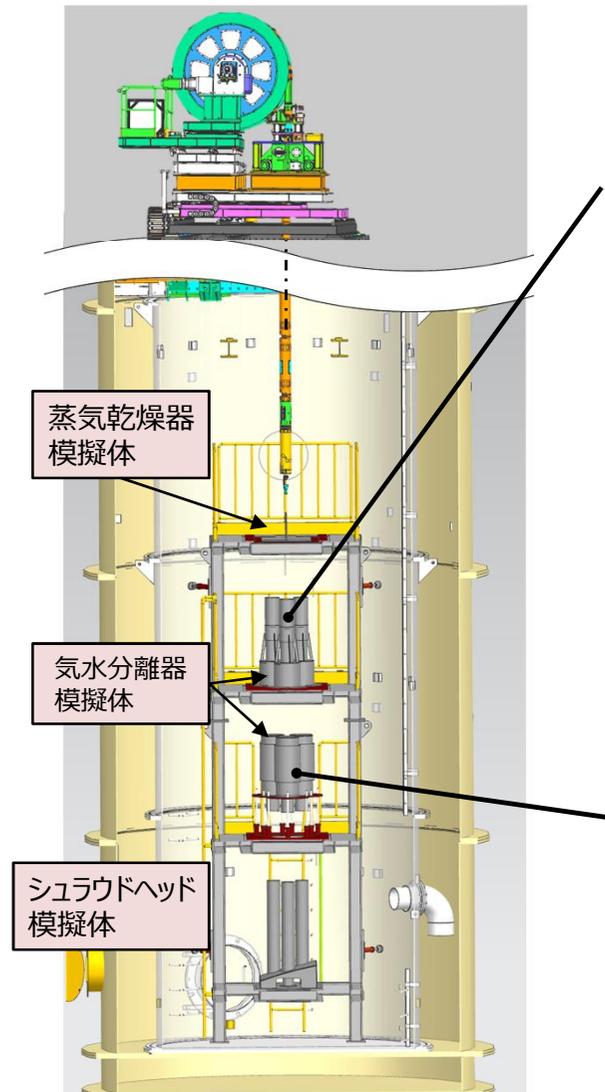
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-3. 遠隔施工性確認試験(①装置のアクセス性の確認・

②実機模擬体の切断可否および施工条件の確認)



気水分離器(上面部)

- ・上面部(表面部)(ストレートノズル施工分)

中心位置ズレ	ノズル高さ※	上面部開口
(判定基準値： 10mm以内)	判定基準±10mm (計画73mm)	判定基準：Φ140mm以上 (計画Φ185mm)
0.7mm	73mm	Φ192mm以上※

※：上部から降下し、上面部までの高さ

※：本値は上面部を細断した際の最大円の値である。

- ・上面部(切断加工後)(アングルノズル施工分)

ノズル高さ※	上面部開口(※)
判定基準：±10mm (計画10mm)	判定基準：Φ140mm以上 (計画Φ160mm)
12mm	Φ165mm以上

※：切断後の降下高さ

※：開口径は挿入可能であった測定治具の径を記載。

気水分離器(本体部)

本体部開口(※)
判定基準：Φ140mm以上 (計画Φ160mm)
Φ155mm以上

※：開口径は挿入可能であった測定治具の径を記載。

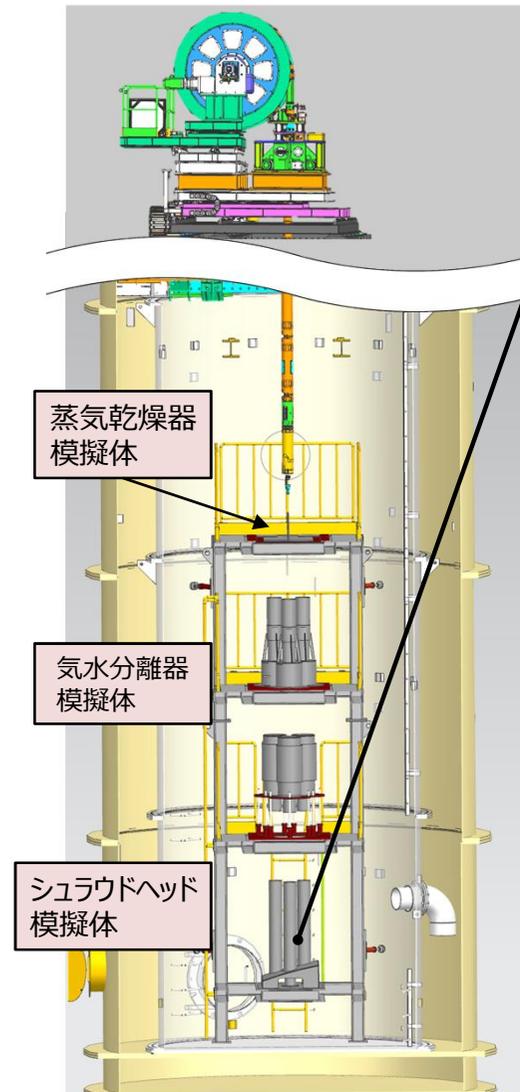
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2)試験結果詳細 A-3.遠隔施工性確認試験(①装置のアクセス性の確認・

②実機模擬体の切断可否および施工条件の確認)



シュラウドヘッド

・シュラウドヘッド上面までの高さ

中心位置ズレ		ノズル高さ
(判定基準値： 20mm以内)		判定基準： ±10mm (計画52mm)
X	Y	
5~6.5mm	12~13mm	56~57mm

・施工用小口径穴の穴中心

中心穴開口	
判定基準：Φ12mm以上(計画Φ18mm)	
XY方向の寸法を計測	
X方向	Y方向
17~21mm	17~21.5mm

・施工後の穴開口径

シュラウドヘッド大開口	
判定基準：Φ100mm以上	
XY方向の寸法を計測	
X方向	Y方向
118~124mm	123~127mm

実規模擬体における装置のアクセス性を確認し、中心位置のズレ等、基準値以内であることを確認した。また、設定した切断施工条件での切断が可能であることを確認した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)

(2) 試験結果詳細 A-4. 切断試験結果まとめ

(1) 平板切断試験

- ▶ 平板切断試験について、2021年度のツールヘッドのみの試作機と比較し、ストレートノズル、アングルノズル共に切断性能に著しい変化は確認されなかった。
- ▶ アシストガスをエアから窒素に変更した際も、切断性能に変化は見られず、またドロスの状況についても著しい変化は確認されなかった。したがって、実機切断時にはアシストガスを窒素とする計画ではあるが、試験はエアで実施することで問題ないと判断した。

(2) 部分模擬体切断試験

- ▶ 部分模擬体切断試験について、気水分離器上面部模擬体を用いて固定治具の要否を確認したところ、固定治具無しの状態であっても、ノズルの高さ位置を補正することで計画している開口径を満足することが可能であった。また、遠隔施工性確認試験を固定治具無しの状態で実施し、施工が可能であったことからレーザー加工装置においては固定治具は不要と考えられる。
- ▶ 気水分離器上面部分模擬体および本体部部分模擬体について、当初計画通りに施工を実施したところ、要求される開口径（Φ140mm以上）での切断は可能であったものの、上面部ではアシストガスで除去困難な切断片が残るなど改善が必要であった。そこで、切断片を落下・除去しやすくなるよう、切断片を細かく細断する手順を追加する等、切断条件を見直す事で、遠隔施工性確認試験へ移行が可能と判断した。

(3) 遠隔施工性確認試験

- ▶ 遠隔施工性確認試験について、蒸気乾燥器、気水分離器、シュラウドヘッドの模擬体を切断し、いずれの模擬体に対しても要求される開口径（蒸気乾燥器と気水分離器はΦ140mm以上、シュラウドヘッドはΦ100mm以上）での切断が可能であることを確認した。
- ▶ 切断前の高さ方向/水平方向の位置合わせについても、装置カメラ映像を確認しながらの遠隔操作にて判定基準を満たす位置合わせが可能であり、また、ツールヘッドを施工位置まで降下させた際も、開口部に干渉して降下不能となる事象は確認されなかった。
- ▶ 遠隔施工性確認試験における蒸気乾燥器の切断中に、レーザー照射不可事象が確認され、原因調査の結果、回転体（ドラム）にレーザーを伝送するための回転カプラが損傷していることが分かった。

⇒以上の結果から、2022年度試作したレーザー加工装置にて施工対象である炉内構造物に対し、位置合わせを行い切断すること、所定の開口を設けることが可能であることを確認した。
また本試験で抽出された施工中想定事象への対応に関する課題や対策案は、次フェーズ以降の詳細検討に活用する。

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. **上部アクセス調査工法における加工技術の高度化**
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 **試験結果**
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 **試験結果(AWJ切断試験)**
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(1) 試験結果概要 B-1.アブレイシブ供給量確認

- ・2022年度に製作したアブレイシブ供給機構の部分要素試作品のアブレイシブ供給量安定化の再確認のため、2022年度と同様の方法で「アブレイシブ供給量」を確認し、**2022年度試験時と同程度の供給能力があることを確認した。**

(2022年度の判定基準：設定した供給量±10%以内を目安とする)。

・試験結果

以下にアブレイシブ供給量確認結果の概要を示す。**設定した目安内の供給量であると共に、2022年度試験供給量(98g/min)と同等であることが確認できたため、供給性能を満足すると判断した。**

なお、試験結果の詳細は、本章の4.4.2(2)試験結果詳細 B-1アブレイシブ供給量確認を参照のこと。

試験での確認項目	アブレイシブ供給量平均(100g/min)	確認結果
アブレイシブ供給量確認	98.6	設定した目安内の供給量であることを確認した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(1) 試験結果概要 B-2.平板切断試験

・次項の「模擬体切断試験」での切断施工性の見通しを得るため、2021年度の平板切断試験と同様の試験を行い2021年度試験の切断性能と同程度の結果が得られることを確認した。

- ①切断深さ
- ②平板を切断（貫通）可能な切断速度

・試験結果

以下に部分模擬体切断試験結果の概要を示す。また下表の判定に示す通り2021年度と2023年度の結果は、同様であるため「模擬体切断試験」の切断施工が可能であるとの見通し得ることが出来た。

なお、試験結果の詳細は、本章の4.4.2(2)試験結果詳細 B-2.平板切断試験を参照のこと。

①切断深さ確認試験 スタンドオフ(mm)（ノズル先端 ～切削物までの距離）	深さmm		確認結果
	2023年度結果	2021年度結果	
20	6.6	7	2021年度と2023年度試験では同等の施工深さであった。
50	4.9	4	2021年度と2023年度試験では同等の施工深さであった。

②切断速度確認試験 切断速度(mm/min)	切断可否（可○/否×）		確認結果
	2023年度結果	2021年度結果	
80	○	○	2021年度の結果と2023年度の結果、同一となった。
90	×	×	

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(1) 試験結果概要 B-3. 模擬体切断試験

- ・試験対象の気水分離器の模擬体を切断し、アブレイシブ供給機構変更による切断への影響、切断可否および、施工条件を確認した。また、切断後の開口径が所定の寸法（Φ140mm以上）を満足することを確認した。
- ・模擬体は、以下の2通りの模擬体を使用した。

① プレート部模擬体：

気水分離器本体部の「“スペーサ”を有する部位」, 「“プレート”を有する部位」を有する模擬体

② リング部模擬体：

気水分離器本体部の「“スペーサ”を有する部位」, 「“リング”を有する部位」, 「“外筒, 中間筒”のみ切断とする部位」を有する模擬体

・試験結果

以下に模擬体切断試験結果の概要を示す。下表の確認結果に示す通り、目標(判定基準)を達成しており、施工した施工条件の妥当性を得ることが出来た。なお、試験結果の詳細は、本章の4.4.2(2)試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験を参照のこと。

試験での確認項目	確認内容 & 確認結果	確認結果
① 気水分離器, プレート部模擬体の切断	・AWJ施工による開口サイズ。 ⇒施工開口は、目標のΦ140mm以上を達成。	施工上の問題無く計画の開口を得ることが可能であったことから、本試験での施工条件は妥当と判断した。
② 気水分離器, リング部模擬体の切断	・AWJ施工による開口サイズ。 ⇒施工開口は、目標のΦ140mm以上を達成。	一部切断に不具合が発生したが、施工条件を見直した事で、計画の開口を得ることが可能となった。見直した施工条件を採用することで、本試験での施工条件は妥当と判断した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

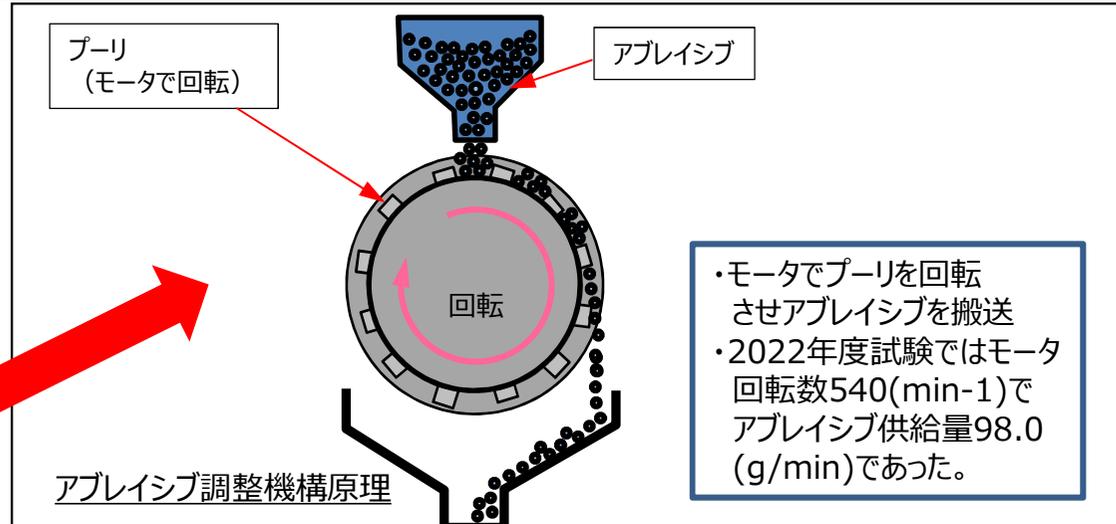
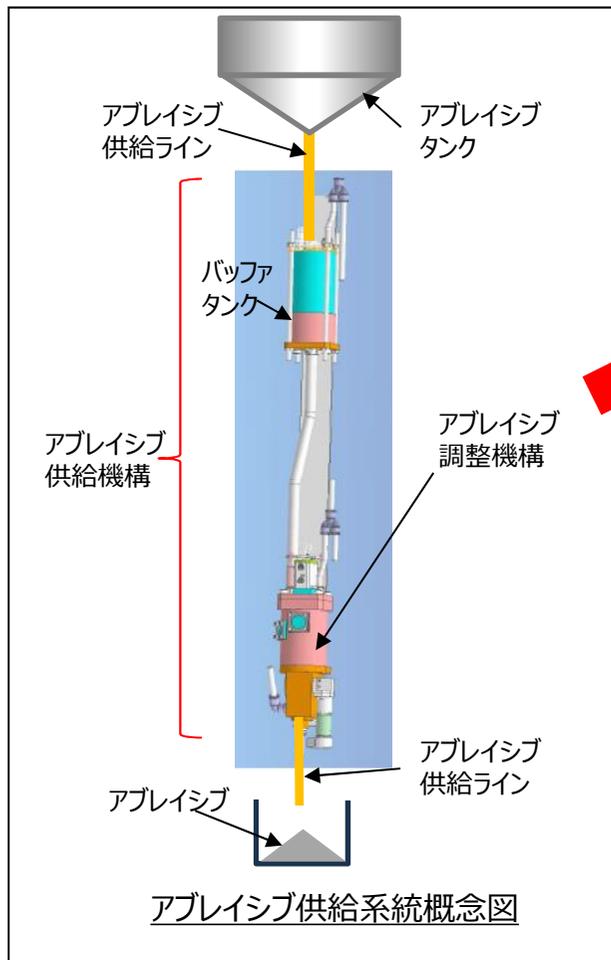
4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-1.アブレイシブ供給量確認

【試験目的】 ・アブレイシブ供給量安定化の再確認 (2022年度も実施しており再確認)

【試験概要】 ・WJを噴射せず、アブレイシブ供給量のみ測定し、設定値通りの供給が可能であることを確認

【試験条件】 ①アブレイシブ供給量：100g/min (設定値) ②測定時間：3 min ③回数：3回



【試験結果】

アブレイシブ供給量測定結果

No.	モータ回転数	実測値 (g)	計算値 (g/min)	平均値 (g/min)
1	540 (min ⁻¹)	291	97.0	98.6
2		297	99.0	
3		299	99.7	

設定に対し2%程度の誤差で供給出来ており、2022年度の結果とも同等であり問題なし

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果 (AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-2. 平板切断試験 (①切断深さ評価)

【試験目的】

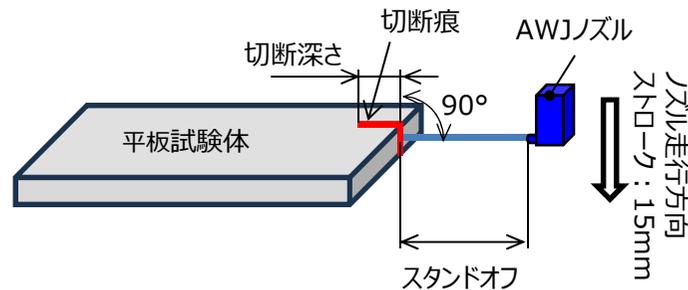
- ・アブレイシブ供給機構変更による切断能力への影響確認

【試験概要】

- ・平板を長手方向に切断し、2021年度試験（供給機構変更前）と同等の切断性能があることを切断深さで評価

【試験条件】

- ①アブレイシブ供給量：100g/min
- ②WJ圧力：343MPa
- ③スタンドオフ：20/50mm
- ④切断速度：60mm/min
- ⑤試験体：SUS304/10t
- ⑥試験回数：3回



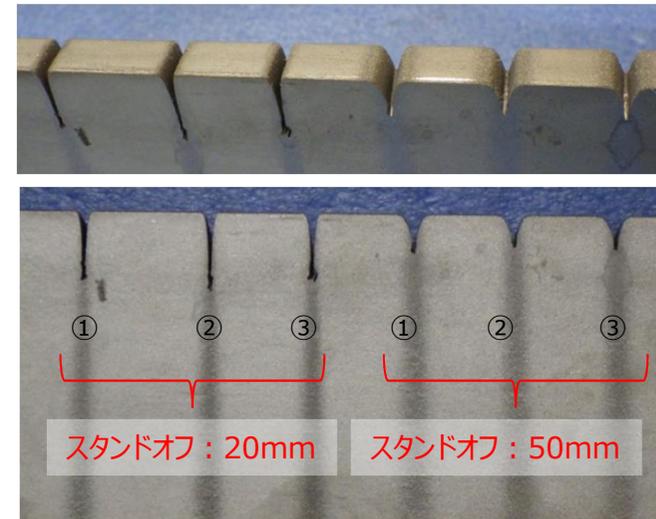
試験条件図

【試験結果】

切断試験体写真を以下に示す。また、次頁に切断深さ測定結果の表を示す。

本試験の結果として、以下を確認した。

切断深さは2021年度と同等の結果であり、アブレイシブ供給機構変更前後で切断能力に差はなくアブレイシブ供給機構変更の影響はないと判断。



切断試験体写真

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-2.平板切断試験 (①切断深さ評価)

【試験結果】

切断深さ測定結果

No.	アブレイシブ 供給量 (g/min)	WJ圧力 (MPa)	切断速度 (mm/min)	スラット幅 (mm)	切断深さ (mm)		2021年度 切断深さ(mm)	
1	100	343	60	20	6.6	平均 6.6	7	
2					6.7			
3					6.4			
1				50	5.0	平均 4.9		4
2					4.7			
3					4.9			

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果 (AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-2. 平板切断試験 (②切断速度評価)

【試験目的】

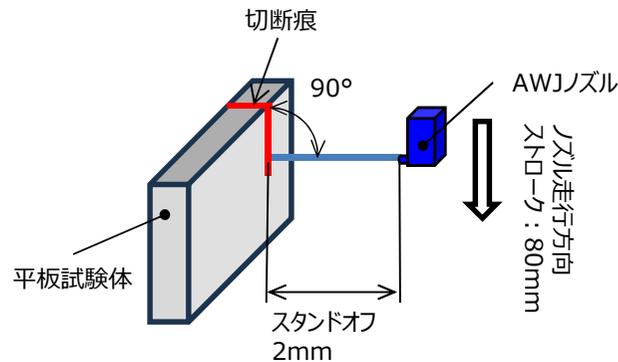
アブレイシブ供給機構変更による切断能力への影響確認

【試験概要】

平板を板厚方向に切断し、2021年度試験（供給機構変更前）と同等の切断性能があることを切断可能（貫通可能）な切断速度で評価

【試験条件】

- ①アブレイシブ供給量：100g/min
- ②WJ圧力：343MPa
- ③スタンドオフ：2mm
- ④切断速度：60, 70, 80, 90, 100, 110mm/min
- ⑤試験体：SUS304/10t
- ⑥試験回数：3回



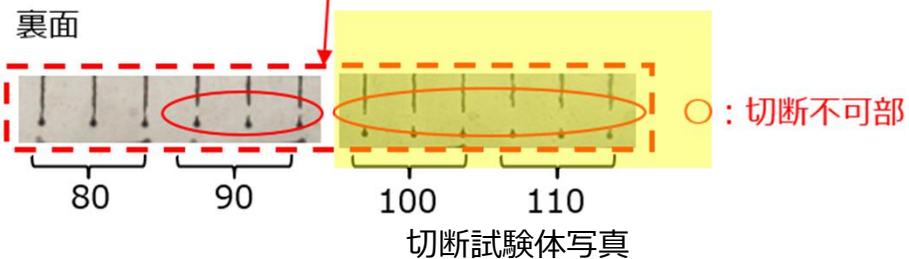
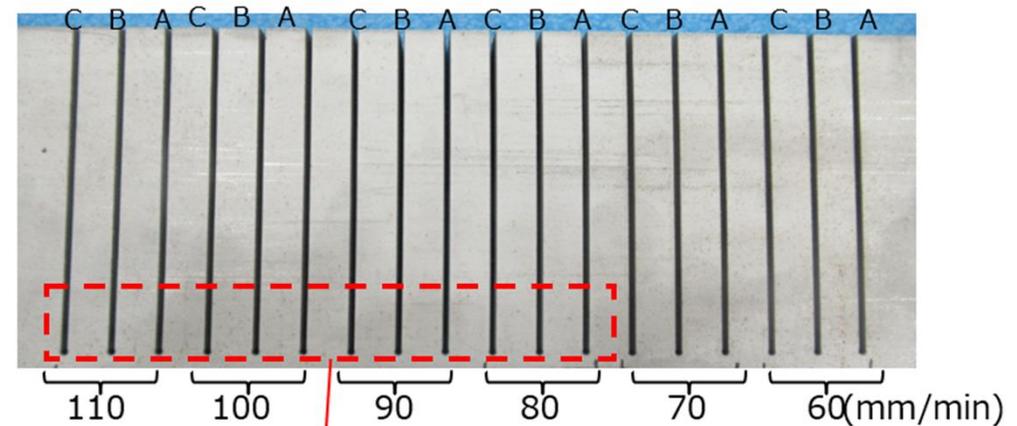
試験条件図

【試験結果】

切断試験体写真を以下に示す。また、次頁に切断深さ測定結果の表を示す。本試験の結果として、以下を確認した。



切断可能な切断速度は80mm/minで2021年度と同じ結果であり、アブレイシブ供給機構変更の影響はないと判断。



切断試験体写真

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果 (AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-2. 平板切断試験 (②切断速度評価)

【試験結果】

切断速度測定結果

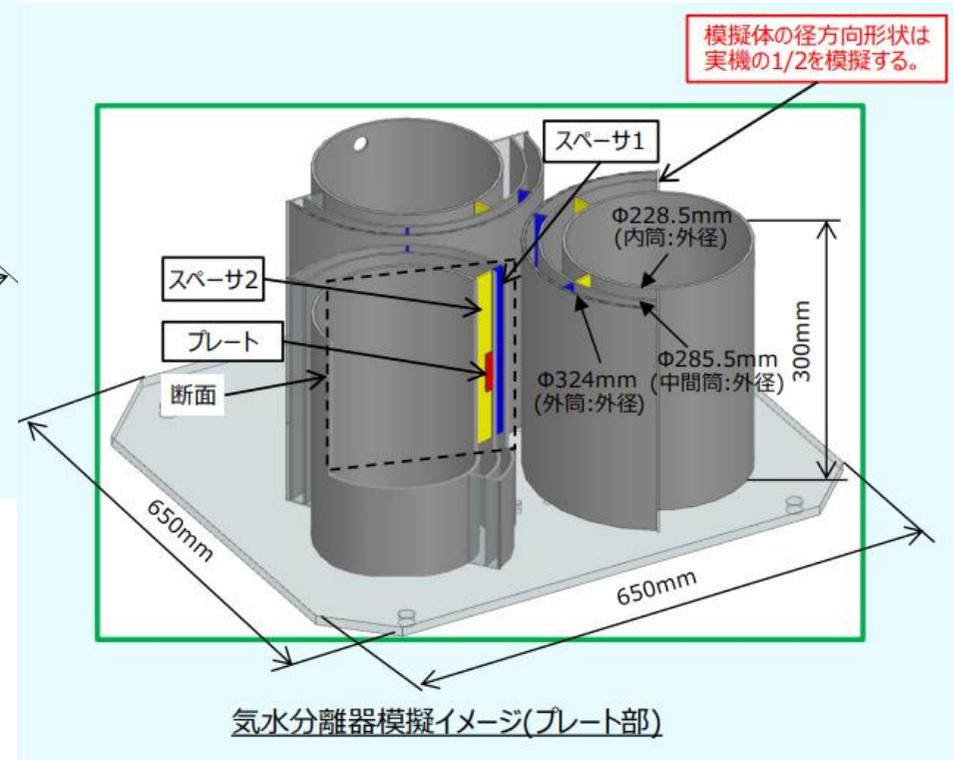
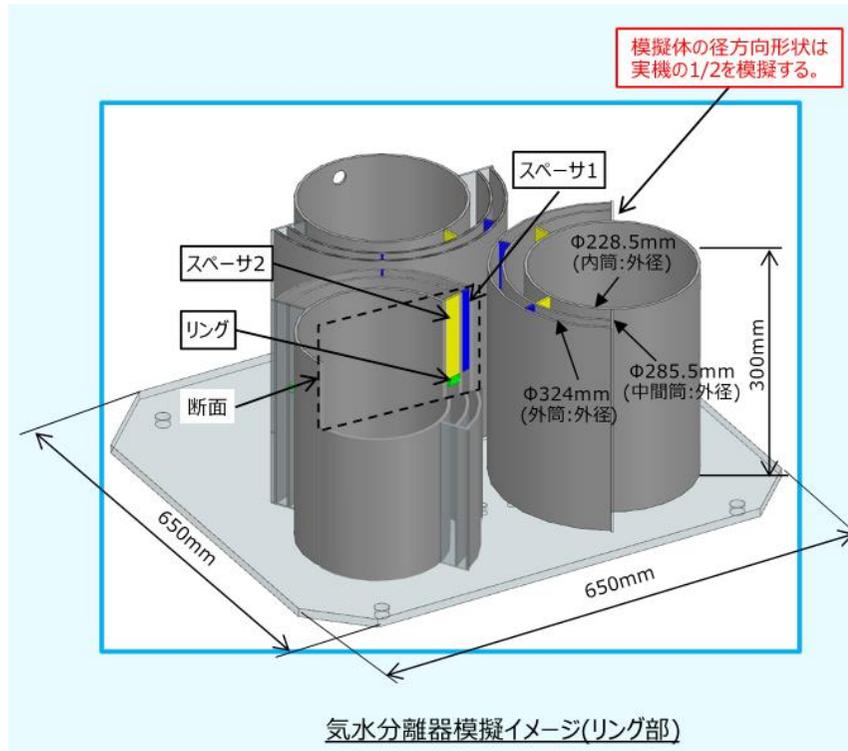
No.	アブレイシブ 供給量 (g/min)	WJ圧力 (MPa)	スタンドオフ (mm)	切断速度 (mm/min)	切断可否 (可○/不可×)			2021年度 切断可否 (可○/不可 ×)
					A	B	C	
1	100	343	2	60	○	○	○	—
2				70	○	○	○	○
3				80	○	○	○	○
4				90	×	×	×	×
5				100	×	×	×	×
6				110	×	×	×	×

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験

切断試験用模擬体 (気水分離器鳥瞰図)



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験

試験条件

- ① 模擬対象箇所 : 気水分離器の構造で複雑な箇所を模擬する。以下に模擬箇所を示す。
- a) 本体部(スペーサを有する部分), b) 本体部(プレートを有する部分)
 c) 本体部(比較的厚板のリングを有する部分), d) 本体部(外筒, 中間筒のみの部分)

- ② 試験回数 : 2回 + 予備試験 1回※

※本試験は、「事前確認試験」での施工条件とパラメータを基に「模擬体切断試験」の初回の試験を実施し再現性確認のため2回目の試験を実施する。また、初回の試験にて切断不可の事象が発生した場合は対応を検討し、再加工や施工条件見直しを実施する。その後、模擬体を交換し、見直し後の施工条件で2回目の試験を実施し予備試験にて再現性の確認を行う。

- ③ 試験条件 : 1) 各切断対象に共通の試験条件

使用ノズル : アングルノズル※1
 アブレイシブ供給量 : 100g/min※2
 WJ圧力 : 343MPa(ポンプ圧力)※2
 WJ流量 : 3.3 ℓ /min※2

※1 : ストレートとアングルノズルの仕様が同じだが、アングルノズルの方が、切断する際に使用頻度が高く、形状が複雑な箇所を切断するため、試験対象として選定した。

※2 : 施工条件のうち、切断方向および切断速度は下表の条件で実施する計画とした。

- 2) 模擬対象箇所ごとに変更する試験条件。例を以下に示す。

本体部(スペーサを有する部分)の施工条件表 (一例を示す)

模擬対象箇所(切断箇所)	施工条件	
	切断方向	切断速度
中間筒	鉛直方向(鉛直切断)	20mm/min
外筒		10mm/min
スペーサ1, 2		20~30mm/min
中間筒, 外筒, スペーサ1, 2	水平方向(水平切断)	12°/min

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験

施工中に想定される事象への対応

【施工中に想定される事象】

施工中に発生することが想定される事象を以下に示す。

- ・落下破片による切断不可事象

【施工中想定事象への対応確認試験】

- 上記事象に対し、模擬体切断試験を通じて施工中想定事象対応における課題抽出および対策案の検討を行った。
- 本試験中に上記事象が確認された場合には、当該事象の原因究明および事象発生の低減策の検討を行い、必要に応じ切断方法や切断パラメータ等への反映を行った。
- また、施工中想定事象対応として切断継続が可能な対応策を確認した。必要に応じ実作業によりその効果を検証した。

【今後の対応】

- 本試験で抽出された施工中に想定される事象への対応に関する課題や対策案を、次フェーズ以降の詳細検討に活用する。

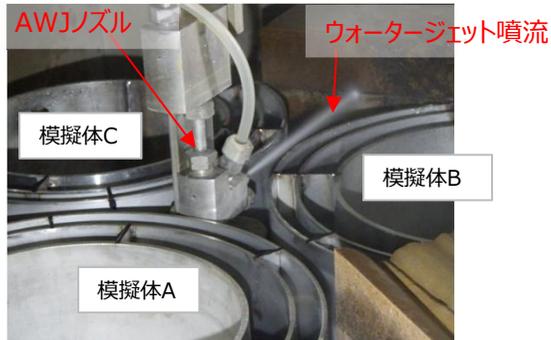
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果 (AWJ切断試験)

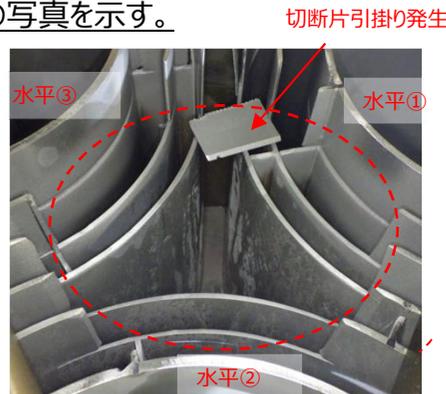
(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験 (①プレート部模擬体)

【試験目的】 アブレイシブ供給機構変更による気水分離器切断への影響確認
 【試験概要】 気水分離器プレート部模擬体を切断し、切断可否及びその施工条件を確認した
 【試験条件】 ①アブレイシブ供給量：100g/min ②WJ圧力：343MPa

【試験結果】※下図は模擬体1体目切断時の写真を示す。



低圧試噴射



1 段目切断完了



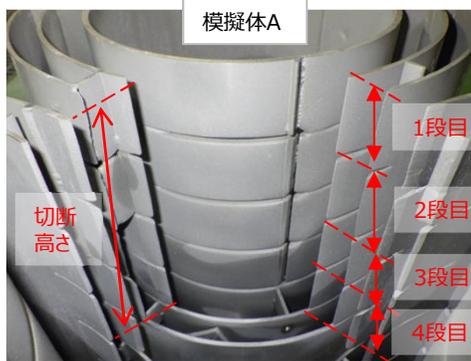
ウォータージェット噴流による切断片吹き飛ばし



開口寸法測定結果

模擬体		切断高さ (mm)	切断所要時間	開口径(※) (mm)
		(計画：200)	-	判定基準 Φ140以上 (計画Φ160)
1 体目	A	201	5時間31分0秒	Φ165
	B	202		
	C	202		
2 体目	A	200	5時間31分1秒	Φ160
	B	202		
	C	202		

※：開口径は挿入可能であった測定治具の径を記載。



4 段目切断完了



開口径確認

計画通りの施工条件で切断可。また、切断高さは計画値と同等であり、開口径も判定基準以上であることを確認した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験 (②リング部模擬体)

【試験目的】 アブレイシブ供給機構変更による気水分離器切断への影響確認
 【試験概要】 気水分離器リング部模擬体を切断し、切断可否及びその施工条件を確認した
 【試験条件】 ①アブレイシブ供給量：100g/min ②WJ圧力：343MPa

【試験結果】 ※下図は模擬体1体目切断時の写真を示す。



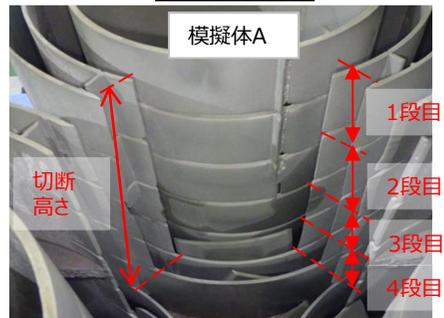
低圧試噴射

1段目切断完了

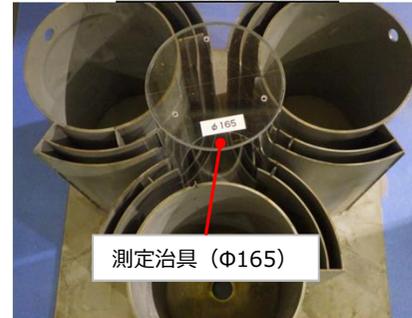


次ステップ切断による切断片の移動

開口寸法測定結果



4段目切断完了



開口径確認

模擬体	切断高さ (mm)	切断所要 時間	開口径(※) (mm)
			判定基準 Φ140以上 (計画Φ160)
1 体 目	A	201	Φ165
	B	202	
	C	201	
2 体 目	A	201	Φ165
	B	203	
	C	203	

※：開口径は挿入可能であった測定治具の径を記載。

鉛直切断（リング）の一部で切断不可箇所があったが、施工条件を見直すことで切断可能であった（リング部切断の変更した施工条件は54ページ参照）。
 また、再現性確認のため、変更後成功条件にて切断を行い、良好な切断結果を得ることができ、施工条件の成立性を確認した。
 鉛直切断（リング）以外の箇所は計画通りの施工条件で切断可。また、切断高さは計画値と同等であり、開口径も判定基準以上であることを確認した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験

・切断片残存時の対策について

切断片残存時の対策について、プレート部模擬体およびリング部模擬体切断試験で、一部施工条件の変更はあったが、**全て切断が可能であることを確認した。**

一方、試験中に切断片が落下せず次工程の切断部近傍に残存するケースが数回発生している。それらの**残存切断片の対応**について、以下に述べる。

高圧水を噴射し除去する方法や、切断片が残存したまま（外筒と中間筒の間にあり吹き飛ばせないもの等）次工程の切断を実施し除去する方法を実施した。

試験中8か所で切断片が残存する事象が発生したがいずれも**高圧水噴射や次工程の切断で除去可能**であった。

したがって、切断片残存には、高圧水噴射やそのまま次工程の切断をすることで除去可能と言えるが、実機工事では今回の試験で発生していないような残存事象が発生するリスクがあり、それに備え、残存切断片撤去の方法や撤去のための装置等の検討が必要と考える。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

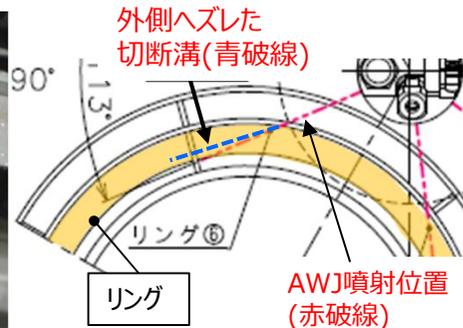
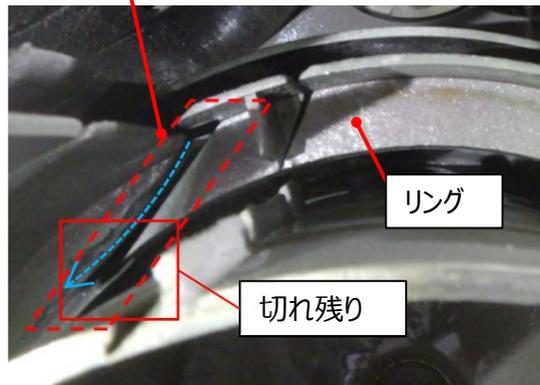
4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験 (②リング部模擬体) (切断条件変更について)

【切断条件変更について】

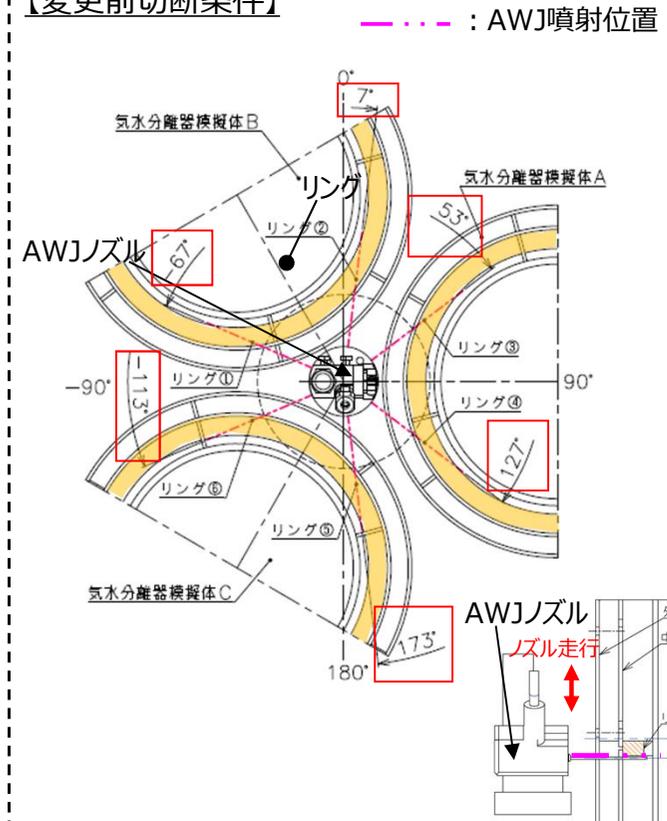
- ・模擬体1体目の鉛直切断(リング)の1回目の切断位置であるリング⑥(下図)で切断不可があった。
- ・切断不可の原因は、リング部に対し、AWJ噴射角度が浅いため(接線方向)、AWJ噴射の微小のズレで外側に切断溝が出来き、施工を繰り返しても外側にズレた切断溝方向に倣って噴流が進み、切断しきれなくなったものと推定する(下図参照)。
- ・対策として、AWJ噴流が多少ズレても切断可能なノズル角度へ変更した。
- ・リング⑥について、変更後の切断条件で切断可能であることを確認し、以降のリング①～⑤および、模擬体2体目の鉛直切断(リング)は、変更後の切断条件で、切断可を確認した。

外側へズレた切断溝
(溝に沿って高圧水が流れる。)



鉛直切断(リング)の切断不可箇所

【変更前切断条件】



切断速度 : 30mm/min
切断回数 : 9往復

鉛直切断(リング)6か所

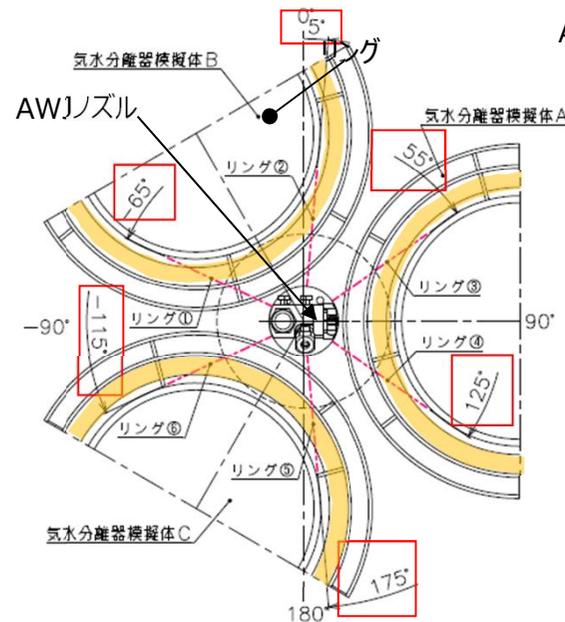
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-3. 模擬体切断試験 (②リング部模擬体) (切断条件変更について)

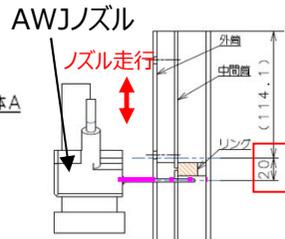
【変更後切断条件】



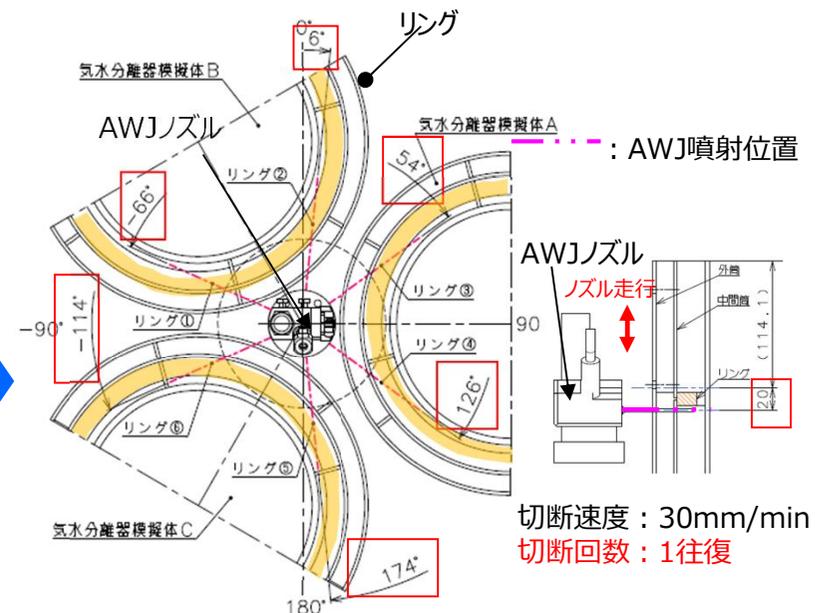
鉛直切断（リング）6か所

（ノズル角度を計画から2°内側へ変更後、5往復切断）

--- : AWJ噴射位置



切断速度：30mm/min
切断回数：5往復



鉛直切断（リング）6か所

（ノズル角度を2°から1°へ変更後、1往復切断）

【変更後切断条件での切断結果】

- ・変更後の切断条件で切断可
 - ・開口径も計画値以上で問題なし
 - ・切断回数は変更前と比べると少ない回数で切断可9往復→6往復)
- 上記の結果から、変更後の切断条件は、切断に有効な条件であることを確認した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)

(2) 試験結果詳細 B-4.切断試験結果まとめ

(1) アブレイシブ供給量確認

- 100g/minの設定に対し2%程度の誤差で供給出来た。また、2022年度のアブレイシブ供給装置単体試験と本事業にて実施した実機を高さ模擬したアブレイシブ供給試験と同等の供給量であり問題ないと判断した。

(2) 平板切断試験

- 切断深さ評価、切断速度評価ともに2021年度と同等または、それ以上であった。アブレイシブ供給機構変更後も予定した切断能力を有していると判断した。

(3) 模擬体切断試験

- アブレイシブ供給機構および、供給量を変更し模擬体切断試験を実施した。試験の結果、計画通りの切断性能を示すことが出来た。模擬体各部の切断試験の状況を以下に示す。

① プレート部模擬体

- 計画通りの施工条件で切断可。また、切断高さ、開口径も計画値以上であった。

② リング部模擬体

- 鉛直切断（リング）の一部で切断不可箇所があったが、施工条件を見直すことで切断可能であった。
- 鉛直切断（リング）以外の箇所は計画通りの施工条件で切断可。また、開口高さ、開口径も計画値以上であった。
- 一部の鉛直切断（リング）で切断不可となった原因は、計画の切断条件がAWJ噴射位置の多少の誤差を許容しない条件となっていたことが原因と推定する。

③ 共通（プレート部模擬体、リング部模擬体）

- 切断後の次ステップの切断部に残存した切断片については、ウォータジェット噴流で吹き飛ばし可能であった。また、ウォータジェット噴流で吹き飛ばせなかったものでも、次ステップの切断を実施し、切断中のAWJ噴流により切断片は移動し、当該箇所は問題無く切断可能であった。

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. **上部アクセス調査工法における加工技術の高度化**
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 **試験結果**
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 **試験結果(耐放射線性確認試験)**
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(1) 試験結果概要 C-1.耐放射線性確認試験

・試験結果

以下に模擬体切断試験結果の概要を示す。また下表の判定に示す通り、150kGyの照射において健全性が担保できなかった部品は対策が必要と判断した。なお、試験結果の詳細と健全性が担保出来なかった部品の対策案については、本章の4.4.3(2)試験結果詳細 C-2.1回目照射後 健全性確認結果および、C-3.2回目照射後 健全性確認結果を参照のこと。

試験での確認項目	健全性確認結果	今後の対応
①150kGy照射試験	ファイバーケーブル、ミラーホルダーおよびアシストガス系統に健全性確認にて不適合事象があった。	2024年度以降の課題とすると共に各部品に対し対策案をまとめる。
②400kGy照射試験	上記に加え、エア機器駆動系統、冷却水系統および、N ₂ パージ系統に健全性確認にて不適合事象あった。但し、耐圧漏洩試験にて流体の漏れが認められなかったことから、機能は満足しているものと判断した。	健全性確認結果より、本部品については対応の必要が無いと判断する。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-1.耐放射線性確認試験

1) 試験目的

上部アクセス調査工法におけるアクセスルート構築の際、レーザー切断装置の一部は高線量環境である炉内へ投入する必要がある。そこで本試験では、耐放射線性に懸念がある構成部品について耐放射線性を有することを確認する。

2) 試験条件

- ① 線源 : ^{60}Co
- ② 照射線量率 : 約800 Gy/h (RPV 内部調査 (上部アクセス調査工法) の前提条件の内、炉内 (蒸気乾燥器 / 気水分離器近傍) の想定空間線量率(最大)から設定)
- ③ 集積線量 : 150 kGy (※1) , 400 kGy (※2)

※1 レーザー切断による開口作業の実機想定作業時間と、炉内の想定空間線量率 (最大) から試算した値。以下、「基準集積線量」(次頁参照) という。

※2 実機切断作業での計画作業時間の超過や不具合、将来計画の拡張を想定し、基準集積線量を約2.5 倍した値 (150kGyの2.5倍は375kGyであるが、本資料中では約2.5倍 (400kGy) と呼ぶ。)

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-1.耐放射線性確認試験

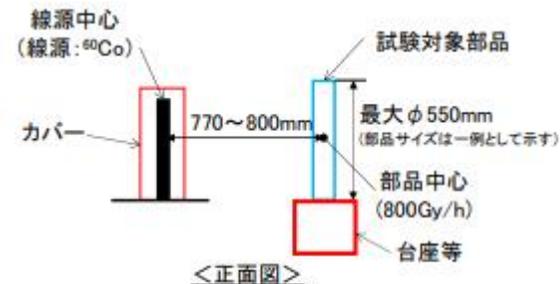
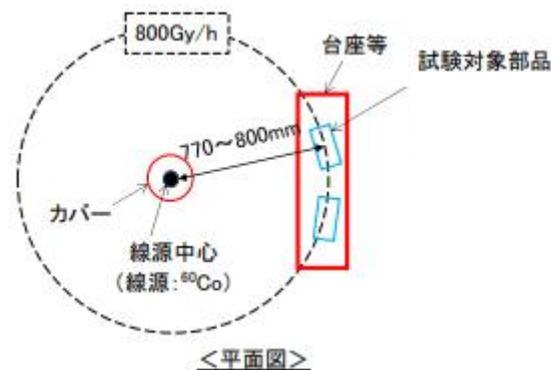
下表に示す基準集積線量試算結果をもとに、150kGyを設定した。

【レーザー切断】

No.	作業内容	作業場所	作業回数(回)	作業時間(h/回)	作業時間計(h)	線量率(Sv/h)	集積線量(Gy)	備考
1	加工装置インストール (作業セルへのインストール)	オベフロ(作業エリア)	-	N/A	N/A	0.001	N/A	低線量のため考慮せず
2	加工装置降下	炉内 (蒸気乾燥器/気水分離器近傍)	31	0.5	15.5	800	12400	-
3	加工装置位置調整	炉内 (蒸気乾燥器/気水分離器近傍)	151	1	151	800	120800	-
4	加工作業	炉内 (蒸気乾燥器/気水分離器近傍)	-	-	4	800	3200	-
5	加工装置上昇	炉内 (蒸気乾燥器/気水分離器近傍)	31	0.5	15.5	800	12400	-
-	合計		-	-	186	-	148800	-

作業回数、作業時間は、2019年度の切断試験結果、2021年度の要素試験結果、及び切断手順を参考に、想定作業回数から設定した。
各作業場所の線量率は、RPV内部調査技術の開発における前提条件に沿って設定した。

照射試験配置を下図に示す。



※: 800Gy/hとなるポイントを事前測定し、そのポイントが部品中心となる位置に部品を設置する。また、集積線量は照射時間で管理する。

照射試験配置図

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

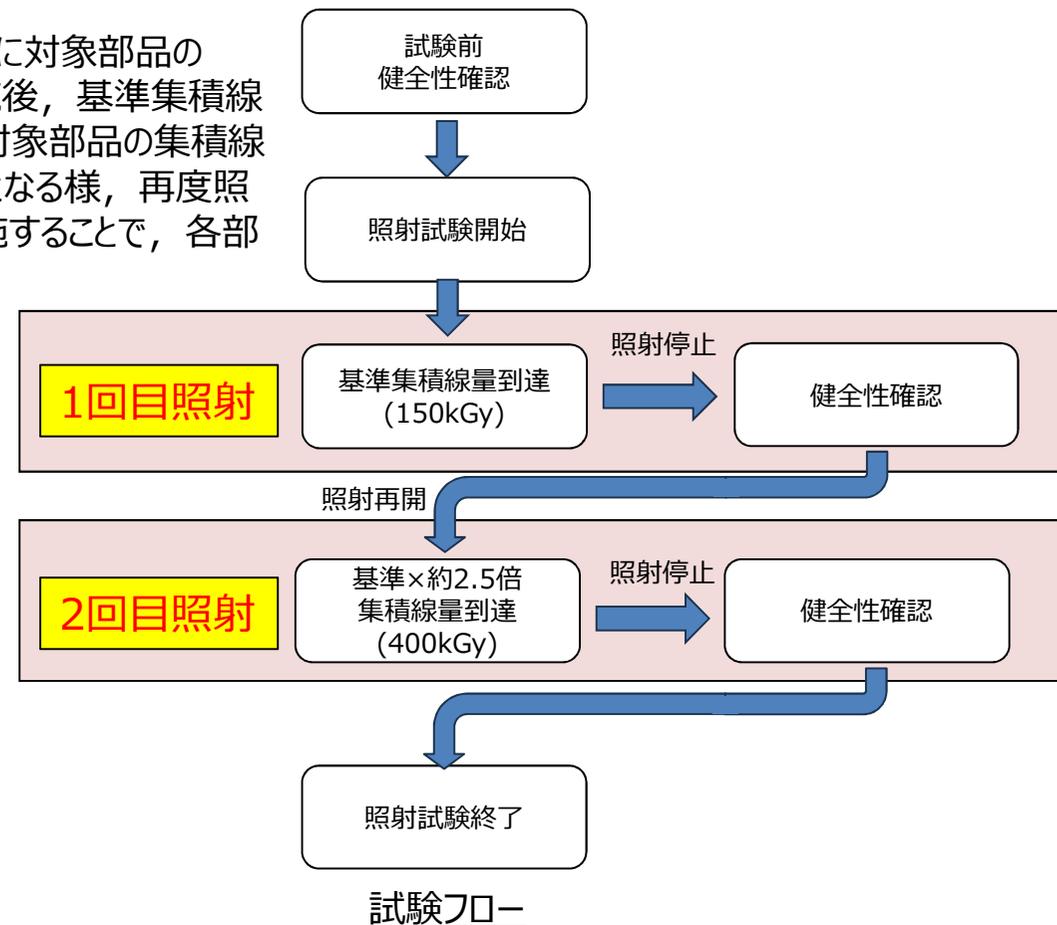
4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-1.耐放射線性確認試験

3) 実施内容

試験フロー

試験フローは下図に示す通り、照射試験前に対象部品の健全性確認（曲げなどの機械的性能）を実施後、基準集積線量まで照射し、照射後の健全性を確認する。対象部品の集積線量が基準集積線量の約2.5倍（400kGy）となる様、再度照射試験を実施し、照射後の健全性確認を実施することで、各部品の耐放射線性を確認する。



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-1.耐放射線性確認試験

3) 実施内容

・判定基準

健全性確認項目および判定基準

N O.	健全性 確認項目	主な 対象部品	確認方法	判定基準	備考
1	外観	部品全般	変形, 割れ, 傷, 変色がないことを目視で確認する。	著しく変形, 割れ, 傷, 変色がないこと。	照射前後の写真を撮影する。
2	パワー 測定	光学部品 全般	光学部品を組上げた状態で, 低出力から徐々にパワーを上げていき, 設定値とパワーメータ測定値を確認する。(8kWファイバーレーザーを使用)	照射試験前の健全性確認で測定した出力の90%以上であること。	—
3	耐圧漏洩	ホース, 継手, シール	耐圧用の治具に試験対象部品を接続した状態で, 最高使用圧力で加圧, 30分間保持したのち, 圧力を確認する。	圧力低下しないこと。	圧力低下が確認された場合は, リーク液(作動流体が気体の場合)や目視(作動流体が液体の場合)で漏洩箇所を確認。
4	曲げ試験	ケーブル, ファイバー ケーブル, ホース	最小曲げRまで曲げ, 元に戻す動作を10回繰り返す。	著しく変形, 割れがないこと。	—

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-2.1回目照射後 健全性確認結果(1/5)

【凡例】○：合格 ×：不合格 —：試験対象外

分類	部品	構成部品	健全性確認結果			
			外観	パワー測定	耐圧漏洩	曲げ試験
光学部品	ファイバーケーブル	ファイバーケーブル, ファイバーケーブル用 保護キャップ	○	× (※2)	—	× (※3) (ケーブルのみ)
		ファイバーケーブル レシーバー	× (※1)		—	—
	ミラー ホルダ	保護ウィンドウ, ミラー, リング	×	○	—	—

(※1)外観写真は、C-2.1回目照射試験後 健全性確認結果(3/5)参照。

(※2)ファイバーケーブルのパワー測定の結果詳細は、C-2.1回目照射後 健全性確認結果(4/5)参照。

(※3)ファイバーケーブルの被覆材は問題なかったが、分解調査の結果、光ファイバーは曲げ試験結果：不合格と判定した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-2.1回目照射後 健全性確認結果(2/5)

【凡例】○：合格 ×：不合格 -：試験対象外

分類	部品	構成部品	健全性確認結果			
			外観	パワー測定	耐圧漏洩	曲げ試験
流体系統	アシストガス系統	ホース, 継手, シール	○ (※1,※2)	—	× (※3)	○ (ホースのみ)
	エア機器駆動系統	ホース, 継手, シール	○ (※1,※2)	—	○	○ (ホースのみ)
	冷却水系統	ホース, 継手, シール	○ (※2)	—	○	○ (ホースのみ)
	N2パージ系統	ホース, 継手, シール	○ (※2)	—	○	○ (ホースのみ)

(※1)外観写真は, C-2.1回目照射試験後 健全性確認結果(3/5)参照。

(※2)流体系統のシール材については, 耐圧漏洩確認の対象であり, 外観確認のために分解を行うことで傷をつけ, 耐圧性能を保てなくなる恐れがあったため, 2回目照射後の耐圧漏洩確認後に外観確認を行う。

(※3)アシストガス系統の耐圧漏洩確認結果の詳細は, C-2.1回目照射後 健全性確認結果(5/5)参照。

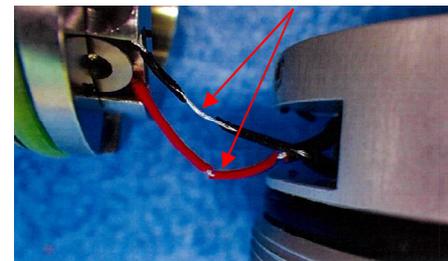
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-2.1回目照射後 健全性確認結果 (3/5)

外観写真 (1回目照射後) (光学系部品)

ファイバーケーブル



サーマルスイッチ
電線被覆劣化

コネクタ内部の電線確認

ファイバーケーブルレシーバー

外観写真 (1回目照射後) (流体系部品)

アシストガス系統



ホース・継手 (シール内包)

工ア機器駆動系統



ホース・継手 (シール内包)



切断片回収治具用シリンダ
(樹脂部品内包)

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-2.1回目照射後 健全性確認結果 (4/5)

【ファイバーケーブル構成部品のパワー測定結果詳細】

- ファイバーケーブルの曲げ試験を実施し、外観で割れ等が無いことを確認。
- 曲げ試験後、ファイバーケーブルのパワー測定を実施中、発振器出力を低出力の20Wからレーザー照射実施し、50Wまで上昇させた時点で「Fiber interlock (※)」のアラームが発生し、非常停止した。そのため、ファイバーケーブル内に内包された銅線（インターロックワイヤ）が断線しているものと判断。なお、20Wレーザー照射時点ではアラーム発生しなかったため、ファイバーケーブルとファイバーケーブルレシーバの接続不良ではないと考えた。
- インターロックワイヤが断線した原因は、放射線照射の影響で劣化した光ファイバーへレーザー光を通したことで、光ファイバーが発熱し、インターロックワイヤが溶融したためと考える。
- 上記の確認後、ファイバーケーブル製作メーカーにて分解調査を行い、光ファイバーをわずかに曲げるだけで破損する状況であることがわかった。なお、曲げ試験を行った箇所状況は不明であるが、光ファイバーの劣化状況から当該箇所も破損しているものと推定する。
- 以上のことから、本ファイバーケーブルの耐放射線性は、150kGy未満であると考える。

(※) : Fiber interlockのアラームは以下を検知した際に発報する。

- ファイバーケーブル内に光ファイバーと共に内包された銅線（インターロックワイヤ）の断線
- ファイバーケーブルとファイバーケーブルレシーバの接続不良

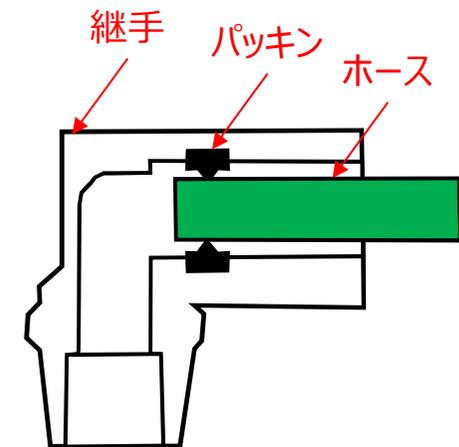
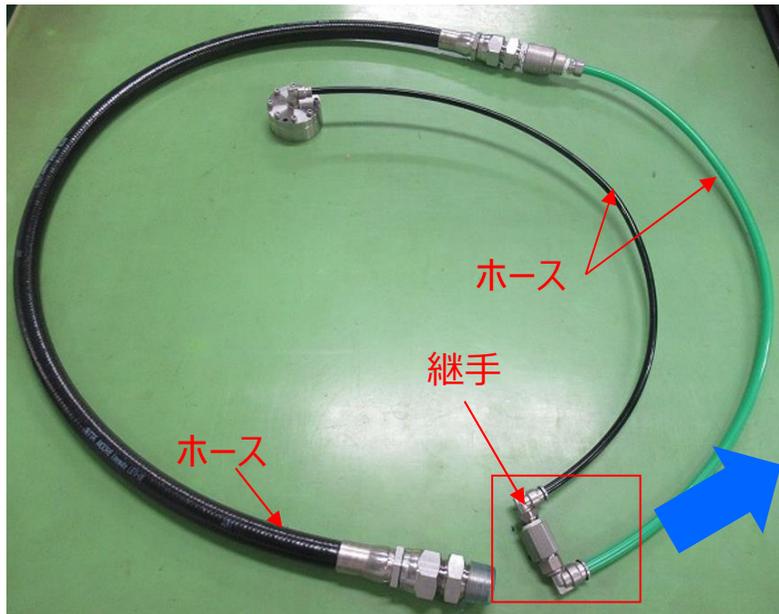
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-2.1回目照射後 健全性確認結果 (5/5)

【アシストガスシステムの継手部品の結果詳細】

- 耐圧漏洩確認の際、継手へ接続されたホースを軽く動かすと漏洩が発生。
- 当該部の継手を新品(未照射部品)へ変えた状態では漏洩しないことを確認。
- したがって、継手部からの漏洩と判断した。なお、継手内にパッキン(材質：フッ素ゴム(特殊FKM))が使用されており、その部材の劣化が漏洩に影響しているものとする。



継手イメージ

アシストガスシステム

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-3.2回目照射後 健全性確認結果 (1/3)

【凡例】○：合格 ×：不合格 -：試験対象外

分類	部品	構成部品	健全性確認結果			
			外観 (※1)	パワー 測定	耐圧 漏洩	曲げ 試験
光学 部品	ファイバー ケーブル	ファイバーケーブル, ファイバーケーブル用 保護キャップ	— 2回目照射未実施のため試験対象外 (1回目照射後の健全性確認結果より耐放射線性は 150kGy未満と評価)			
		ファイバーケーブル レシーバー	× (※1)	— (※2)	—	—
	ミラー ホルダ	保護ウィンドウ, ミラー, リング	×	× (※3)	—	—

(※1)外観写真は、C-3.2回目照射試験後 健全性確認結果(3/3)参照。

(※2)ファイバーケーブルレシーバーは、ファイバーケーブルとセットでパワー測定を行うため、ファイバーケーブルの2回目照射未実施につき、ファイバーケーブルレシーバーのパワー測定は試験対象外とした。

(※3)ミラーがパワー測定不可であったため、不合格とした（保護ウィンドウは合格であった）。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-3.2回目照射後 健全性確認結果 (2/3)

【凡例】○：合格 ×：不合格 -：試験対象外

分類	部品	構成部品	健全性確認結果			
			外観	パワー測定	耐圧漏洩	曲げ試験
流体系統	アシストガス系統	ホース, 継手, シール (※2)	× (※3)	—	× (※4)	○ (ホースのみ)
	エア機器駆動系統	ホース, 継手, シール	× (※1, ※3)	—	○	○ (ホースのみ)
	冷却水系統	ホース, 継手, シール	× (※3)	—	○	○ (ホースのみ)
	N2パージ系統	ホース, 継手, シール	× (※3)	—	○	○ (ホースのみ)

(※1)外観写真はC-3.2回目照射試験後 健全性確認結果(3/3)参照。

(※2)アシストガス系統は1回目照射後の健全性確認結果より, 耐圧漏洩で継手からの漏洩があり, 不合格であったが, 他部品(ホース, シール)の耐放射線性を確認するため, 継続して2回目の照射を実施した。

(※3)シール材であるOリングに変形があったため, 外観は不合格と判定した。

(※4)アシストガス系統の耐圧漏洩確認結果は, 1回目照射後の健全性確認結果と同様に継手から漏洩したため不合格とした。

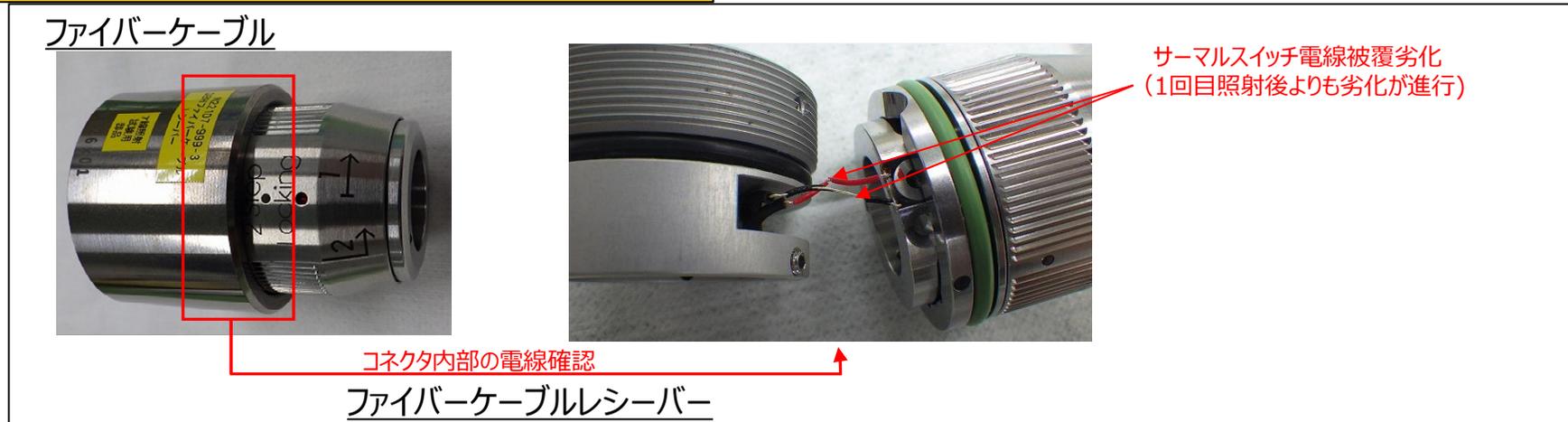
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-3.2回目照射後 健全性確認結果 (3/3)

外観写真 (2回目照射後) (光学系部品)



外観写真 (2回目照射後) (流体系部品)



4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-4.耐放射線性試験結果まとめ(1/2)

以下に、耐放射線性試験（照射量 150kGyおよび、400kGy）の結果をまとめる。また、目標の照射線量（400kGy）を満足しない部品については、本章の「試験結果から得られた課題と対策案」にて現状考えられる対策案を示す。

①光学部品

- ・ファイバーケーブル構成部品は、150kGyの照射時点で以下の状態であったため、ファイバーケーブルの耐放射線性は150kGy未満と評価した。
 - ・光ファイバーケーブル : 光ファイバーが劣化し、レーザー伝送不可（パワー測定不可）
 - ・ファイバーケーブルレシーバー : サーマルスイッチ電線被覆劣化
- ・ミラーホルダ構成部品は、各部品について以下のように評価した。
 - ・保護ウィンドウ : 400kGy照射後、外観上濃いくもりが発生していたが、パワー測定の結果は問題なかったため、耐放射線性は400kGy以上と評価した。
 - ・ミラー : 150kGy照射時点で、外観上薄いくもりが発生していたが、パワー測定で問題なく所定のレーザー出力が得られていることを確認した。
400kGy以上照射後、外観上濃いくもりが発生しており、パワー測定不可（※）であったため、耐放射線性は150kGy以上400kGy未満と評価した。
※：発振器出力8kWでのパワー測定中、ミラー近傍で著しい温度上昇があり、パワー測定を中断した。
 - ・Oリング : 400kGy照射後、外観上は不合格であるが、性能としての評価は、同材を用いた流体システムのOリングの結果を参照することとした。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-4.耐放射線性試験結果まとめ(2/2)

②流体系統

- ・アシストガス系統構成部品は、150kGyの照射時点で継手からの漏洩があったため、継手は150kGy未満であると評価した。
ホースは400kGyの照射後も健全であったため、耐放射線性は400kGy以上であると評価した。
また、シールは、400kGyの照射後の外観確認でOリングに変形があったものの耐圧漏洩確認の結果は問題なかったため、性能は問題無いと判断し、耐放射線性は400kGy以上であると評価した。
- ・エア機器駆動系統を構成する部品(ホース, 継手, シール) は、400kGyの照射後の外観確認でOリングに変形があったものの耐圧漏洩確認の結果は問題なかったため、性能は問題無いと判断し、エア機器駆動系統の耐放射線性は400kGy以上であると評価した。
また、切断片回収治具用のシリンダは、400kGyの照射後も健全であったため、耐放射線性は400 k Gy以上であると評価した。
- ・冷却水系統を構成する部品は、400kGyの照射後の外観確認でOリングに変形があったものの耐圧漏洩確認の結果は問題なかったため、性能は問題無いと判断し、冷却水系統の耐放射線性は400kGy以上であると評価した。
- ・N2ページ系統を構成する部品は、400kGyの照射後の外観確認でOリングに変形があったものの耐圧漏洩確認の結果は問題なかったため、性能は問題無いと判断し、N2ページ系統の耐放射線性は400kGy以上であると評価した。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)

(2) 試験結果詳細 C-5. 試験結果から得られた課題と対策案

課題：現状の試作機を構成している部品に、耐放射線性が400kGy未満の部品がある。

対策：耐放射線性が400kGy未満の部品については、今後の対応のために、以下に示す対策案を整理した。

耐放射線性：400kGy未満の部品			対策案
分類	部品	構成部品	
光学部品	ファイバーケーブル	ファイバーケーブル, ファイバーケーブル用 保護キャップ	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 耐放射線性ファイバーケーブルの適用 ・市場調査（国内メーカーで候補となるファイバーケーブル有） ・候補ファイバーケーブルの耐放射線性試験の実施
		ファイバーケーブル レシーバー	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 電線被覆の材質変更（内部配線の更新） ➢ 耐放射線性を考慮したファイバーケーブルレシーバーの再選定
	ミラーホルダー	ミラー	<ul style="list-style-type: none"> ➢ ミラーホルダーのメンテナンス方法の検討（ミラーホルダーの交換方法や、くもりのふき取り等） ➢ ミラーホルダーの交換サイクルの検討
流体系統	アシストガス系統	継手 (ホース, シールは耐放射線性 400kGy以上)	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 継手の再選定 ・劣化部品を使用していない部品の選定 ➢ 該当継ぎ手を使用しない構造への見直し（ねじ込み継ぎ手の採用など）

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. **上部アクセス調査工法における加工技術の高度化**
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 **開発の課題**
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. **下部アクセス調査工法の開発**
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.5開発の課題

➤ 2023年度の事業にて確認を実施した課題事項(1/2)

N o.	大項目	中項目	開発課題	2023年度実施内容	2023年度実施結果	備考
1	レーザー切断	加工装置	<p><u>実機を考慮した遠隔装置の成立性</u> 以下項目について成立性の確認が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> 切断ノズルの狭隘部への遠隔挿入 切断前後の加工対象物の状況確認方法 実機長さのファイバー伝送(レーザー出力減衰による切断性能低下を懸念) ファイバーのドラムへの組み込み(ファイバーの曲げ耐性を懸念) 高出力レーザー(8kW)へのスリップリング(回転カブラ)の適用 	<ul style="list-style-type: none"> 左記課題への対策を反映して2022年度に設計/試作した遠隔装置を用い、炉内構造物模擬体を切断する試験を実施。 試験では炉内構造物の実機想定高さ(最大18m)を模擬し、遠隔装置としての成立性を確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 施工対象である炉内構造物に対し、所定の開口径以上の施工が可能であったことから、遠隔装置としての成立性があることを確認。 試験にて新たに確認された課題については「2024年度以降、確認および、検討が必要な課題事項」No.5,6,7,17に追加(※1) 	<p>(※1) :</p> <ul style="list-style-type: none"> No.5は切断試験中に発生したレーザーを伝送する回転カブラの損傷事象を受けて追加。 No.6は2023年度切断試験にて、切断条件を一部見直したことにより後方反力受けの設計見直しが必要となったことを受けて追加。 No.7は切断試験中に発生した装置カメラのカバー動作不具合事象を受けて追加。 No.17は装置を操作する上で装置を俯瞰するカメラが必要と考えられたため追加。
2		他システムへの影響確認	<p><u>アシストガス制約</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 2021年度に実施した要素試験にてアシストガスはエアを使用していたが実機施工時にエアの種類や流量について制約がある可能性がある。 制約に合うアシストガス条件にて炉内構造物切断が可能か確認が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 2022年度机上検討にて、現状RPV内へ封入されている「窒素」をアシストガスとして選定したことを受け、窒素を用いた場合の切断性能の変化を平板切断試験にて確認。 	<ul style="list-style-type: none"> アシストガスが窒素の場合も、エアの場合と同等の切断性能が得られることが確認され、炉内構造物切断に適用可能な見込みが得られた。 	<p>2022年度の机上検討にて、流量については、現行のRPV内窒素封入流量より多くなる見込みだが、断続的に切断を行う等、運用面で対策可能と考えられる。</p> <p>運用面での対策は、実機情報がインプットされるTRL 5のフェーズで具体的に検討することを想定。</p>

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.5開発の課題

➤ 2023年度の事業にて確認を実施した課題事項(2/2)

No.	大項目	中項目	開発課題	2023年度実施内容	2023年度実施結果	備考
3	AWJ切断	加工装置	<u>アブレイシブ供給量安定化</u> ・2021年度にアブレイシブ供給量を100g/minとしたが、実機を考慮した遠隔装置で安定供給可能であるか確認が必要。 ・なお、2022年度にプーリタイプの供給機構を検討し、要素試作にてアブレイシブ低供給量条件であっても安定供給可能であることを確認しているが、切断性能（炉内構造物に対し所定の開口が可能か）については未確認。	2022年度に変更した供給機構を用いて気水分離器模擬体を切断する試験を実施。	<ul style="list-style-type: none"> 2022年度に変更した供給機構を用いた場合でも所定の開口径での切断が可能であり、変更前と同等の切断性能が得られていることを確認。 試験にて新たに確認された課題については「2024年度以降、確認および検討が必要な課題事項」No.14に追加(※2) 	(※2) : No.14はAWJ噴射位置のズレにより対象物切断不可の事象を受けて追加。
4	レーザー切断	加工装置	<u>構成部品の耐放射線性</u>	レーザー切断関連の一部部品について耐放射線性試験を実施。	<ul style="list-style-type: none"> 光学部品、アシストガスシステムの部品の一部に耐放射線性が不十分な部品があることが確認。 上記の結果から「2024年度以降、確認および検討が必要な課題事項」No.8を追加 	—

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.5開発の課題

➤ 2024年度以降（※1），確認および検討が必要な課題事項(1/4)

赤字：2023年度試験結果を受け追記した箇所

No. (※2)	大項目	中項目	開発課題	対応方針	実施フェーズ	備考
5	レーザー切断	加工装置	<u>回転機構におけるレーザー伝送方法の検討</u> (2023年度切断試験中に発生したレーザーを伝送する回転カブラの損傷事象を受け、回転機構を有する装置のレーザー伝送方法について改良・見直しが必要)	以下について検討を行う。 ・回転カブラ改良 ・回転カブラの損傷予兆の検知方法 ・回転カブラ以外の伝送方法の調査・適用性検討	TRL 4	2024年度以降に机上検討・要素試作による適用性評価を行い、実機向け加工装置の設計・製作に反映する。
6			<u>後方反力受けの見直し</u> (後方反力受けは気水分離器の内筒で反力を受ける設計としていたが、2023年度切断試験にて、一部の内筒を切断・除去する必要が生じたため、設計の見直しが必要。)	一部の内筒が切断・除去された場合でも反力を受けられる構造・配置に見直す。	TRL 5~7	2024年度以降に机上検討を行い、実機工事前のモックアップ・トレーニングで検証する。
7			<u>カメラカバーの見直し</u> (レーザー切断中にヒュームやドロス等からカメラを保護するためのカメラカバーが、2023年度切断試験中に動作不良となる事象を受け、カメラのカバーについて見直しが必要)	カメラカバーの摺動部にヒュームが付着したためと考えられ、カメラカバー摺動部保護方法やカメラカバー駆動方法を見直す。	TRL 5~7	2024年度以降に机上検討を行い、実機工事前のモックアップ・トレーニングで検証する。
8			<u>構成部品の耐放射線性</u> (2023年度試験にて、光学部品、アシストガスシステムの部品の一部に耐放射線性が不十分な部品があることが確認されたことを受け、対策が必要)	耐放射線性の不十分であった部品については、再選定や交換・メンテナンス方法を検討する。 上記検討結果により、メンテナンスを実施する場合は、メンテナンス装置もしくは治具を設計・製作する。	TRL 4 TRL 5~7	2024年度以降に部品の再選定・耐放射線性試験による適用性評価を行い、実機向け加工装置の設計・製作に反映する。

(※1)2024年度以降の計画は、事業実施者の案として記載するもので決定事項ではありません。

(※2) 2023年度の事業にて確認を実施した課題事項からの追番号で付番

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.5開発の課題

- 2024年度以降（※），確認および検討が必要な課題事項(2/4)

赤字：2023年度試験結果を受け追記した箇所

No.	大項目	中項目	開発課題	対応方針	実施フェーズ	備考
9	レーザー切断	加工装置	<u>ノズルのメンテナンス</u> (ノズル耐久性は問題ないことを2021年度に確認済みであるが、ノズルに不具合発生した場合の対応として検討が必要)	ノズルメンテナンス方法を検討する。	T R L 4	AWJ切断のノズルメンテナンス方法を2022年度に検討しており、レーザー切断はその結果を受けて、2024年度以降に実施
				メンテナンスするための装置もしくは治具を設計・製作する。	T R L 5~7	
10	レーザー切断	加工技術	<u>切断時のドロスの影響</u> (再溶着なく施工可能な条件は、2021年度の試験で確認済みであるが、必要に応じてドロスを飛ばしやすい切断パラメータを模索し、再溶着リスクを低減)	アシストガス流量、方向とレーザー出力やノズル速度などのパラメータを最適化し、ドロスを飛ばしやすい条件を確認する。	T R L 5~7	再溶着なく施工可能な条件は、2021年度の試験で確認済みのため、遠隔装置の成立性を確認した後、2024年度以降に更なるリスク低減を要否含めて検討。
11		環境模擬	<u>実機環境の影響</u> (温度・湿度・雰囲気などの環境条件が試験と実機で異なり、切断性能・遠隔操作性・部品の耐久性などが変わる可能性があり、事前に影響の確認が必要)	実機環境の影響を検討し、必要に応じて試験で影響を確認する。	T R L 4	遠隔装置の成立性を確認した後での確認とし、2024年度以降に実施

(※)2024年度以降の計画は、事業実施者の案として記載するもので決定事項ではありません。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.5開発の課題

➤ 2024年度以降（※），確認および検討が必要な課題事項(3/4)

赤字：2023年度試験結果を受け追記した箇所

No.	大項目	中項目	開発課題	対応方針	実施フェーズ	備考
12	AWJ切断	加工装置	実機を考慮した遠隔装置の成立性 (実機を考慮した遠隔装置の成立性は2019年度までに確認済みであるが2019年度からの変更点の影響の確認が必要)	2019年度からの変更点の影響を確認する。	TRL5 ~7	2019年度からの主な変更点はノズル形状であり、軽微な変更のため、必要に応じてレーザー切断用試作機の試験結果を2024年度以降にAWJ切断へ展開
13			ノズルのメンテナンス (2021年度試験結果より、ノズル寿命が約8時間に対し、想定される実機施工時間は約42時間(アングルノズルの場合)のため、メンテナンスが必要)	ノズルメンテナンス方法を検討する。 (損傷の大きかったミキサー部分の材質変更(SUS630→超硬)も考えられるが、実機施工時間には到達不可と推定するため)	TRL4	2022年度に以下を実施。 ・ノズルメンテナンス方法の検討 ・部分要素試作機の設計/試作 ・部分要素試作機の単体機能試験
				メンテナンスするための装置もしくは治具を設計・製作する。	TRL5 ~7	2024年度以降メンテナンス装置の設計を行い、実機工事前のモックアップ・トレーニングで検証する。
14		AWJ噴射位置の確認・調整方法の検討 (AWJ噴射位置のズレや切断対象構造物の図面との相違に対応が必要)	位置ズレの有無の確認可能な方法やズレが発生している場合の調整方法(カメラによる監視方法等)について検討する。	TRL5 ~7	・2024年度以降机上検討を行い、実機工事前のモックアップ・トレーニングで検証する。	
15	アブレイシブ低減	更なるアブレイシブ使用量低減 (2021年度の開発で目標のアブレイシブ使用量：500kg以下は達成しているが、今後必要に応じて検討)	目標のアブレイシブ使用量：500kg以下は達成しているため、対応はHOLDとし、他課題の対応結果を受け、再度対応要否を確認する。なお、検討項目の例は以下。 ・アブレイシブ供給量適正值の更なる深堀り ・最適ノズルの形状選定 ・切断回数の多い箇所の回数低減等	- (HOLD)	-	

(※)2024年度以降の計画は、事業実施者の案として記載するもので決定事項ではありません。

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.5開発の課題

➤ 2024年度以降（※），確認および検討が必要な課題事項(4/4)

赤字：2023年度試験結果を受け追記した箇所

No.	大項目	中項目	開発課題	対応方針	実施フェーズ	備考
16	共通	加工装置	切断片の処理（移動） （2023年度試験では気水分離器切断片が落下せず、気水分離器切断面に残置され別箇所の切断の障害物となるケースがあったが、それらは全て除去可能であった。但し、実機では除去できないケースが発生する可能性あり。また、シールドヘッド上に溜まった切断片の除去も必要。）	切断片の移動方法を検討する。	T R L 5～7	装置本体の開発課題を優先し、付帯装置の対策は、2024年度以降に実施。
17			装置監視方法の検討 （2023年度レーザー切断では、装置ヘッドのカメラのみで試験が可能であったが、装置を操作する上で装置を俯瞰するカメラが必要。但し、現状ではカメラ追加スペースがない。）	装置自体を俯瞰するカメラの追設及びそのためのスペース拡大を検討する。	T R L 5～7	2024年度以降机上検討を行い、実機工事前のモックアップ・トレーニングで検証する。
18			構成部品の耐放射線性	破損リスクのある構成部品に照射試験を行い、適切な部品を選定する。	T R L 6～7	遠隔装置の装置構成を決定した後での確認が合理的と判断し、2024年度以降に実施。
19			構成部品の耐久性	ホースおよびその他の構成部品について劣化リスクのあるものを抽出し、耐久性を確認する。 （各ノズルの耐久性は2021年度確認済み）	T R L 6～7	劣化リスクの高いノズルについては、2021年度に確認済み。その他構成部品については、実機相当品での確認が合理的と判断し、2024年度以降に実施
20		リスク対応	炉内構造物が損傷して変形していた場合のインストール方法	変形によるインストール不可リスクが高いのは、気水分離器の3筒間ヘノズルを挿入する工程と考えるため、3筒間の開口を拡大する方法や、変形にも対応可能な、前方反力受けの構造を検討する。	T R L 5～7	現場状況を反映した装置の詳細設計は次フェーズでの実施内容とし、2024年度以降に実施
21		連節ガイドパイプ回収不能時の対応	回収不能となるパターンを検討し、必要に応じて対応策を検討する。	T R L 5～7	回収不能パターンの検討し、必要に応じて2024年度以降に対応策を検討し設計へ反映	

（※）2024年度以降の計画は、事業実施者の案として記載するもので決定事項ではありません。

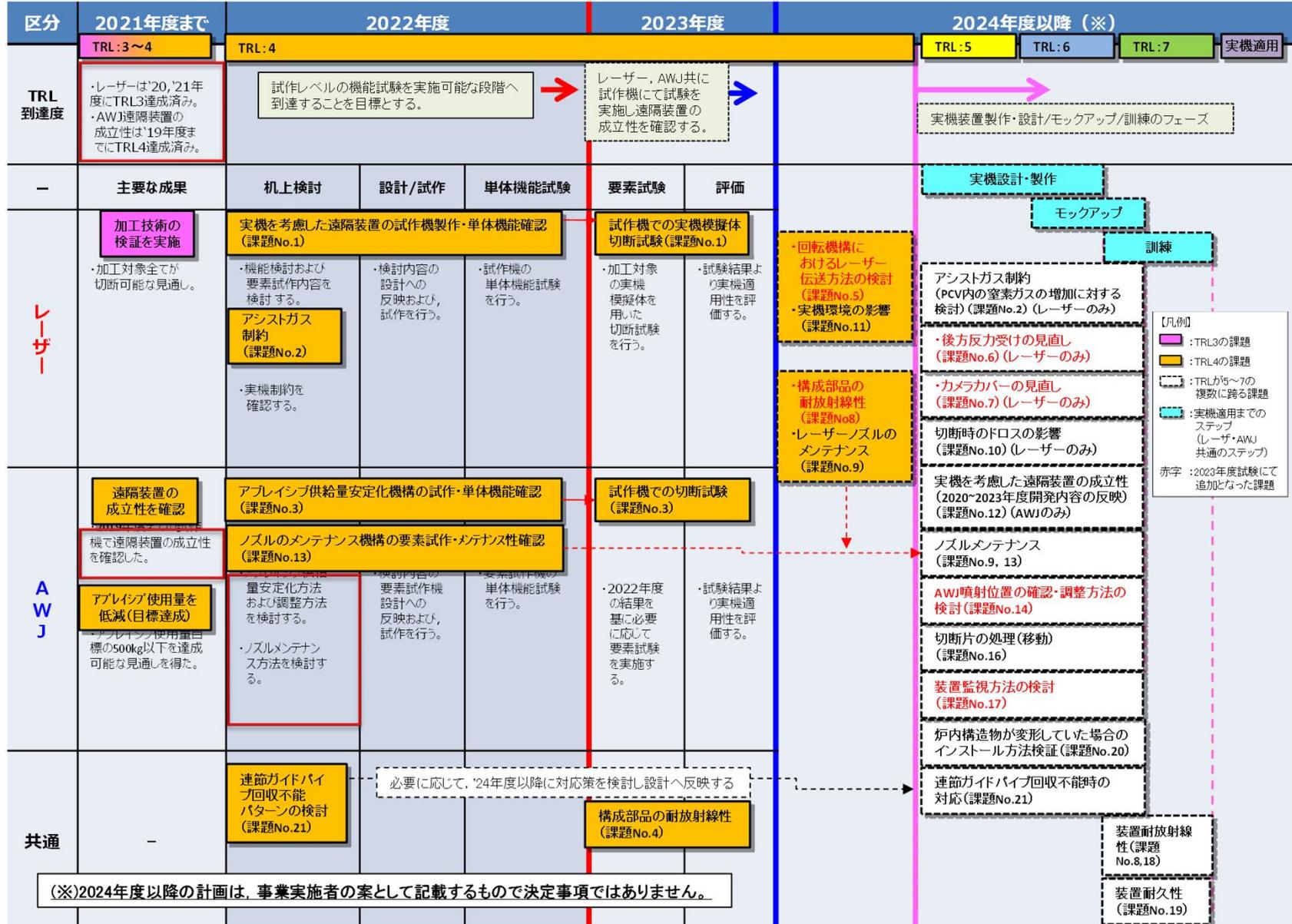
目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. **上部アクセス調査工法における加工技術の高度化**
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 **開発計画**
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.6 開発計画



目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. **上部アクセス調査工法における加工技術の高度化**
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 **実施スケジュール**
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化

Decom.Tech

◆ 4.7 実施スケジュール

実施項目	2023年度											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
主要なマイルストーン									▼中間報告			最終報告▼
A) レーザー加工装置 (試作機)の切断性能 試験			試験計画	試験体(模擬体)設計	試験体(模擬体)製作				切断試験		切断性能確認・評価▼	試験結果まとめ・評価
B) AWJ切断試験に係わる 部分要素試作機の切断 性能			試験計画	試験体(模擬体)設計	試験体(模擬体)製作			切断試験		切断性能確認・評価▼	試験結果まとめ・評価	
C) 耐放射線性確認			試験計画	部品調達					耐放射線性確認試験			結果まとめ

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.1 2023年度の実施概要

- 下部アクセス調査工法の開発では、2022年度までに実施された開発成果を踏まえ、**ドローン/テレスコパイプを用いた調査工法について、実機適用条件（※）を模擬した試験を実施し、現場適用性を評価した。**加えて、上記2工法に加えた**代替工法の概念検討**を行った。

※ 実機適用条件

- 調査装置のペDESTAL内までのアクセス
- ペDESTAL内の経路のゆがみ、ギャップ、障害物など調査時の稼働範囲の制約等

A) ドローンを用いた調査工法

- ✓ 「センシング技術・飛行制御技術の検討」、「調査計画・開発計画の更新および装置改良」、「実規模大の組合せ試験」を実施した。

B) テレスコパイプを用いた調査工法

- ✓ 「非常時収縮の対策」、「姿勢制御機構」、「傾き検知方法の適用検討」、「調査装置（カメラ）の試作・試験」、「調査装置（カメラ）の取得映像処理方法の検討」を実施した。

C) 代替工法の検討

- ✓ 上記に示した開発中の2工法に加え、さらなる代替工法として考えられる案を抽出し、当該工法に関する概念検討を実施した。
- アクセスルートや環境条件等の制約条件を精査した上で要求仕様を設定し、その要求仕様を満足する装置（仕様）により現場適用性を評価した。
- 本工法の開発では、調査装置のアクセス手段として想定されるアクセス装置も対象として含める。

目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (1) 2022年度までの成果 (1/2)

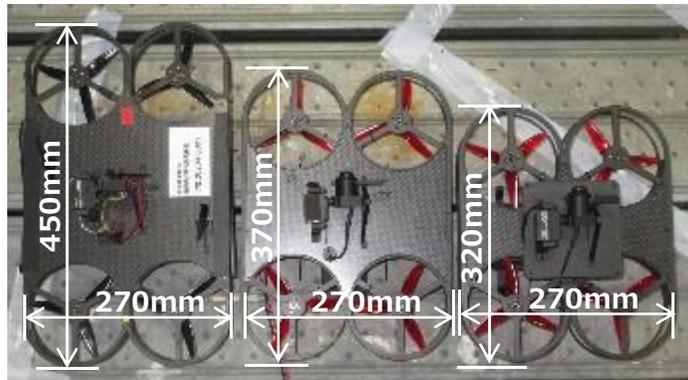
- 2021年度までは、アクセスルート上のCRD開口部からRPV内底部までを模擬した要素試験により、ドローンによる調査の成立性を確認し、開発課題を抽出した。
- 2022年度は、2021年度までに抽出した開発課題を踏まえたドローンの改良設計・製作に加え、PCV内へのアクセス等を補助するためのアクセス装置として、本調査工法への適用を計画している他補助事業開発装置とドローンとの取り合い・仕様を検討し、下部アクセス調査工法向けに改良した設計・製作を実施。そのうえで、これら試作機を用いた単体機能確認試験を実施。



有線ドローン



無線ドローン



(参考) 2021年度無線 2022年度有線 2022年度無線
(有線も同様形状)



有線用伸縮ロッド走行台車
(無線用は先端に送受信機を搭載)



ケーブルドラム走行台車



ケーブル介助装置



350A用インストール装置要素試作

2022年度試作機概要

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (1) 2022年度までの成果 (2/2)

➤ 以下に、各装置の概要及び、2022年度に設計・製作した試作機を示す。

調査システム構成装置概要

区分		装置概要	2022年度試作有無
有線	有線ドローン	<ul style="list-style-type: none"> X-2ペネの350A開口部から進入し、ペDESTAL外プラットホームを飛行、CRD開口部からペDESTAL内に進入、RPV底部の想定開口部よりRPV内部にアクセスする。 伸縮ロッド先端から送り出されている複合ケーブル(以下：ケーブル)を牽引しながら、RPV内底部(CRD交換用プラットホームより約7m)を調査(映像取得/線量率測定)する。 	2021年度試作機を改良
	有線用伸縮ロッド走行台車	<ul style="list-style-type: none"> 伸縮ロッド先端に有線ドローンのケーブルの送り出し/巻き戻し可能な機構を有する。 伸縮ロッドはCRD開口部からペDESTAL内部のRPV底部の想定開口部下部付近まで伸長する。 	他事業開発装置を一部改良
	ケーブルドラム走行台車	<ul style="list-style-type: none"> ケーブルドラムは有線ドローンのケーブルをドラムに巻き付け、ケーブルの送り出し/巻き戻し可能な機構を有する。 ドローン用のケーブルは伸縮ロッド走行台車の伸縮ロッドに沿わせ、有線ドローンへ接続する。 	<ul style="list-style-type: none"> ケーブルドラムは2021年度試作機を改良 走行機能は他事業開発装置を一部改良
無線	無線ドローン	<ul style="list-style-type: none"> X-2ペネの350A開口部から進入し、RPV内部に有線ドローンと同様の軌跡でアクセスする。 伸縮ロッド先端の無線機と無線通信しながら、炉心支持板上面(CRD交換用プラットホームより約11m)を調査(映像取得/線量率測定)する。 	2021年度試作機を改良
	無線用伸縮ロッド走行台車	<ul style="list-style-type: none"> 伸縮ロッド先端に無線通信の送受信機を有し、無線ドローンと無線通信する。 伸縮ロッドはCRD開口部からペDESTAL内部のRPV底部の想定開口部下部付近まで伸長する。 	他事業開発装置を一部改良
有線 / 無線 共通	ケーブル介助装置	<ul style="list-style-type: none"> X-2ペネの250A開口部より進入し、伸縮ロッド又はケーブルドラム走行台車のペDESTAL外プラットホーム上のケーブルに不具合が生じないように介助・移動する。 	他事業開発装置を一部改良
	インストール装置	<ul style="list-style-type: none"> X-2ペネの350A/250A開口部よりPCV内部に各装置を進入させる装置。 	他事業開発装置を一部改良し、350A用のみ要素試作
その他補機		<ul style="list-style-type: none"> X-2ペネの開口部に設置し、装置の進入/回収時の補助装置として試験・検討結果により、適宜検討する(例：進入/回収時の監視カメラ、緊急時の複合ケーブルの切断装置など)。 	試作無し

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容 (1/4)

① センシング技術・飛行制御技術の検討・評価

- ドローンに搭載可能な形状計測装置 (3D-LiDAR) を用いて、RPV内へのアクセスルート、RPV底部の開口状況を含むRPV内外の構造物形状情報を取得する技術を検討。また、ドローンの自己位置情報を更新する技術、制御技術についても、合わせて基本設計し要素試験により性能を評価。

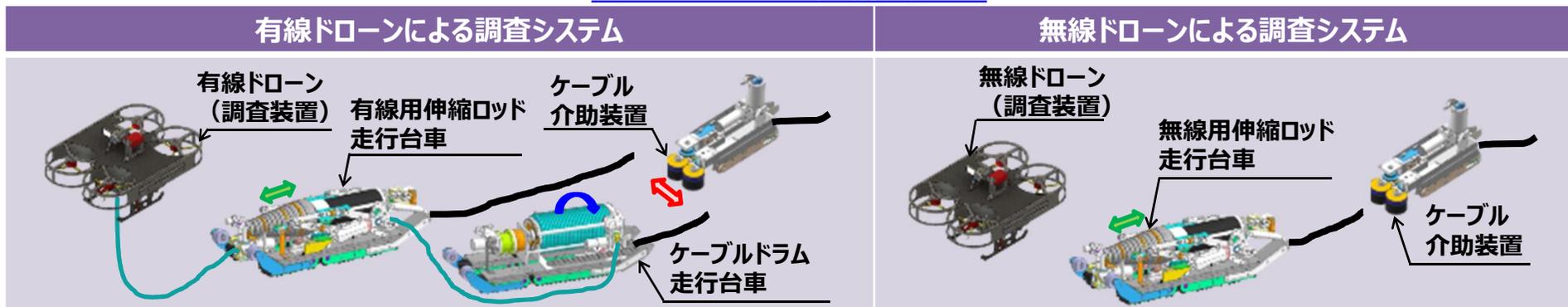
② 調査計画・開発計画の更新および装置改良

- 2022年度までの成果を踏まえ、調査計画・開発計画を更新。また、2022年度に試作した調査装置(有線/無線ドローン)とアクセス装置(有線/無線用伸縮ロッド走行台車、ケーブル介助装置、ケーブルドラム走行台車(有線専用))を改良。

③ 実規模大の組合せ試験

- X-2ペネトレーションからRPV底部開口までを模擬した実規模大の試験設備にて、改良した調査装置とアクセス装置の試作機を組合せた試験を実施し、調査工法の成立性を確認。また組合せ試験結果より現場適用性を評価し、実機装置設計へのインプットを整理。

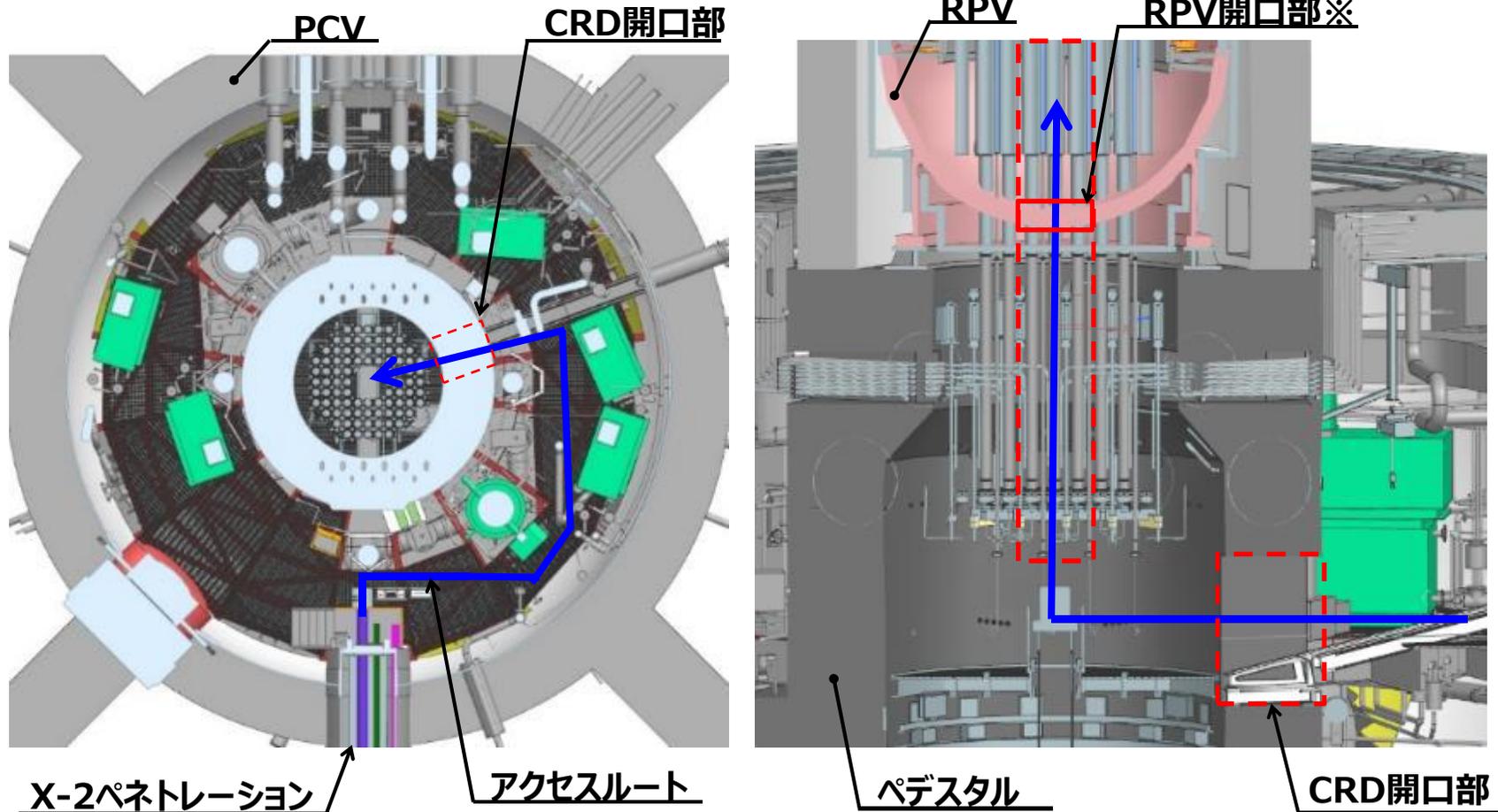
調査システム全体構成概要



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容 (2/4)



※内部調査では確認されていないが、燃料の大部分がペDESTAL底部に落下していると評価されているため、RPV下鏡中央部に直径1 m程度の開口部があると想定。ただし、先行する調査結果を踏まえ開口部のインプットは適宜更新。

[アクセスルート概要](#)

5. 下部アクセス調査工法の開発

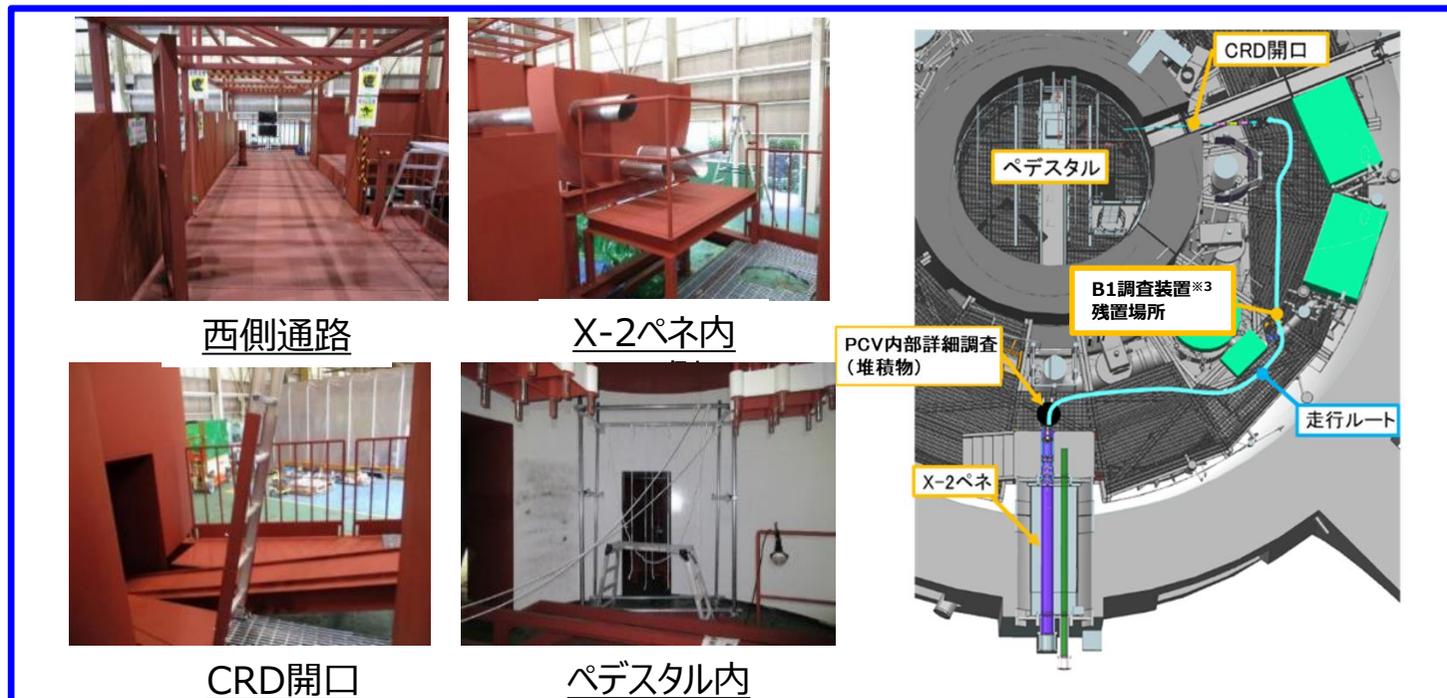
5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容 (3/4)

- 2022年度に実施した単体試験で抽出した課題や、B3調査（※1）の調査結果を踏まえ各装置を改良。例えば、有線ドローンの飛行性能を確保するため、ケーブルの送り出し、巻き取りに際し、ケーブル抵抗を低減するための走行台車に設置しているケーブルガイドの設置位置やコーティング等の見直し等を実施。

※1：2023年3月28～29日に実施された調査装置ROV-A2によるペDESTAL地下階へのアクセス及び調査

- 実規模大の組合せ試験では、他の補助事業（※2）で製作した設備を、B3調査結果を踏まえ改造することで実機環境（暗闇、水滴滴下かつ水蒸気環境下等を含む）を極力模擬し、本事業で活用。



他の補助事業で製作した試験設備概要

※2：廃炉・汚染水対策事業費補助金（原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発）

※3：2015年4月に実施されたB1調査に用いた装置

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容 (4/4)

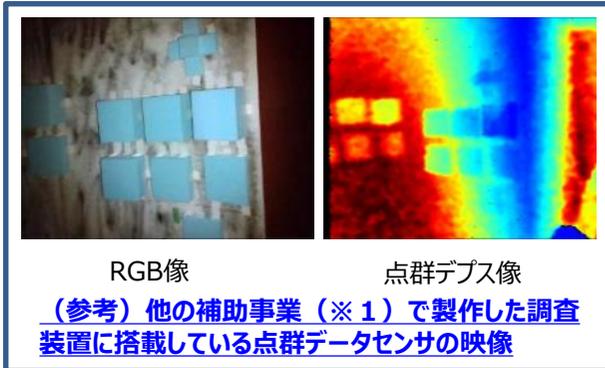
- 2022年度までに、ドローン小型化による狭隘部の通過性能向上や、モーションキャプチャにより飛行時の揺らぎ量を測定し飛行性能を定量的に評価した。
- 2023年度は、これまでに抽出した飛行時のリスク（下表参照）を低減するために既存技術(点群データセンサ等)をベースに、センシング・飛行制御技術を基本設計。また、要素試験を実施し本事業のドローンへの適用性を評価。

ドローンの飛行に関するリスク

考えられるリスク	リスクによる影響
飛行中のドローン姿勢が不安定	① 障害物との衝突・墜落 ② 狭隘部の飛行が不可 ③ 調査映像がブレる
既存のカメラのみでは、障害物の確認が難しい場合あり	① 障害物との衝突・墜落
操作者の負担が常に大きく、飛行中は休憩できない	④ 操作ミスが生じる可能性
高度な技術を持つ熟練者しか操縦できない	⑤ 現地調査時の人材確保が困難
ドローンの自己位置・姿勢の把握ができない	⑥ 調査対象位置の特定不可

リスク解消のための開発項目(案)

開発項目	目標成果	活用方法(案)
ドローンセンシング技術の開発	自己位置・姿勢の推定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 飛行制御へのインプット ・ 調査対象位置の特定 (⑥)
	周囲の障害物状況の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝突・墜落回避 (①)
ドローン飛行制御技術の開発	飛行時の安定性向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝突・墜落回避 (①) ・ 狭隘部の調査 (②) ・ 調査映像のブレ低減 (③) ・ 操作者の負担軽減 (④) ・ 非熟練者の操作性向上 (⑤)



(①～⑥はリスク表の番号に対応)

※1：廃炉・汚染水対策事業費補助金（原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発）

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (1/18)

2023年度組合せ試験について、以下の考えに基づき実施する。

1. 2022年度までの成果をベースにした試験

- 2022年度までに、無線・有線ドローンの装置単体試験を実施し、基本的な機能を満足していることを確認した。同時に、各装置の課題(機体の転倒防止対策、有線ケーブルのマネジメント等)を抽出した。
 - 2023年度組合せ試験では、2022年度に実施した単体試験結果で抽出された課題を基に装置改良を行う。
 - ⇒ ①/②：改良後無線/有線ドローンを用いた実機適用性評価試験

2. B3調査結果を起因とした試験

- 2023年3月に実施されたROVによるB3調査結果より、ペDESTAL内へのアクセスルートである、CRD開口部にCRDハウジング等の干渉物が存在することが確認された(図1参照)。
- 2022年度の試作機は寸法上、CRD開口部を通過可能な見通し(図2, 3参照)だが、調査の成立性をより高めるため、通過性の向上を検討する余地があると考え。
 - 2022年度までに有線・無線ドローンについて、狭隘部通過性能の確認・向上のため、モーションキャプチャによる飛行精度評価や小型化に取り組んできた。
 - B3調査結果を踏まえ、さらに狭隘空間の通過性を高めるために機動性の高い無線ドローンをベースに、飛行制御・センシングの高度化及び更なる小型化を検討し、適用性を検証した。
 - ⇒③無線ドローン(センシング, 飛行制御搭載)を用いた実機適用性評価試験
 - ⇒④無線ドローン(小型)を用いた実機適用性評価試験

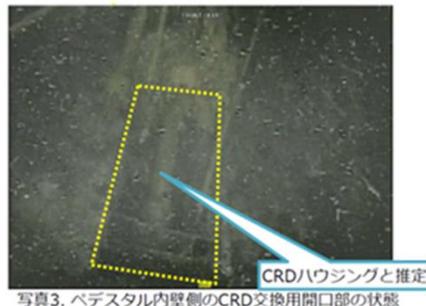
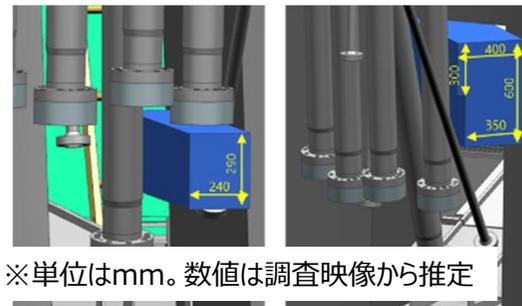


図1. CRD開口付近のB3調査映像

(出典：1号機 原子炉格納容器内部調査の状況について
(<https://www.nra.go.jp/data/000426855.pdf>))



※単位はmm。数値は調査映像から推定

図2. 想定アクセスルートの空間寸法
(CRD開口部)

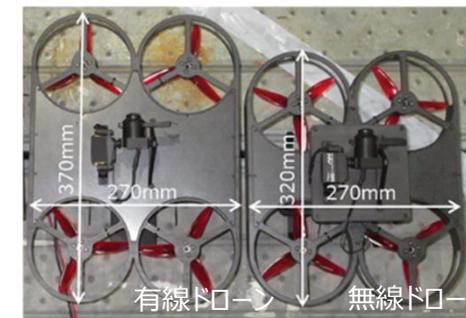


図3. 有線・無線ドローン外観 (2022年度試作機)

5. 下部アクセス調査工法の開発

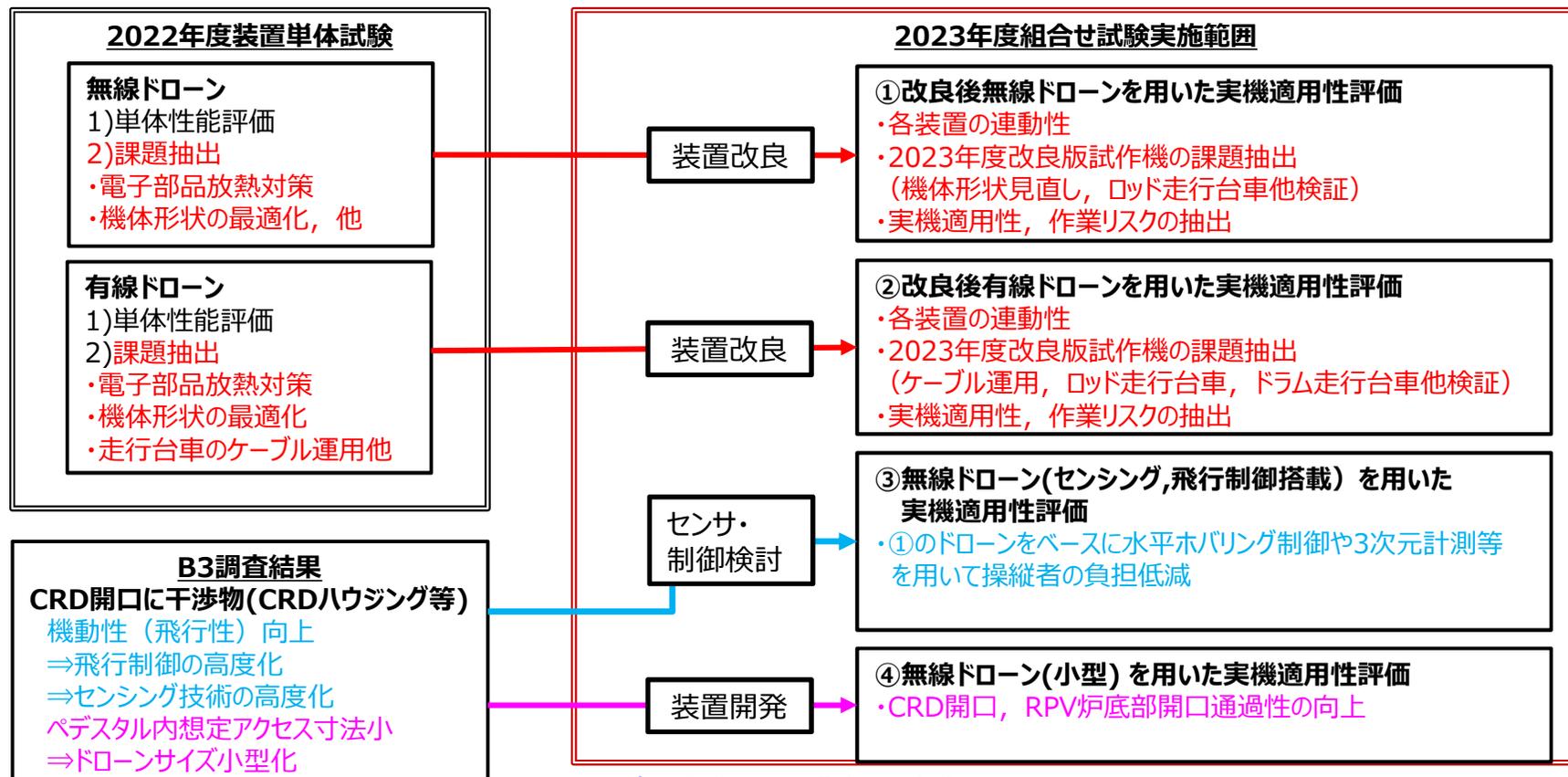
5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (2/18)

➤ 試験概要

2023年度実規模大組合せ試験の概要を以下に示す。

実規模大組合せ試験は2022年度の単体試験結果を基に、装置改良状況の検証、B3調査結果で判明した状況（CRD開口に干渉物（CRDハウジング））を基にした飛行制御・センサ、装置開発結果の検証を実施した。



2023年度組合せ試験イメージ図

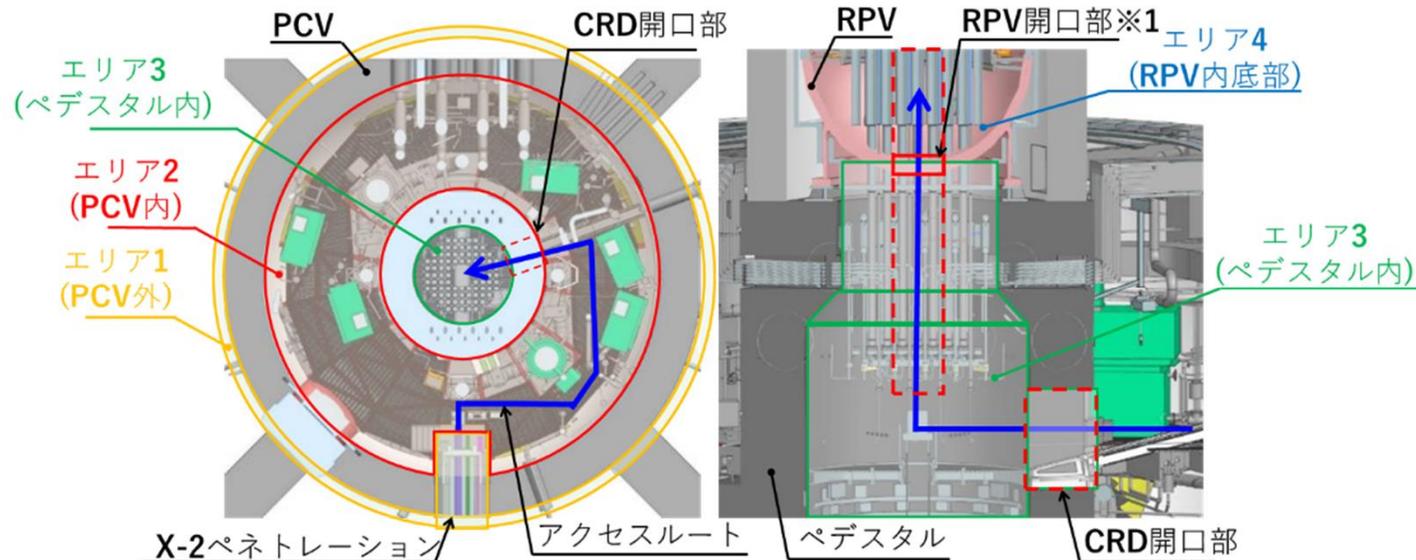
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (3/18)

➤ 試験設備

- 試験は調査装置とアクセス装置の試作機を組み合わせた試験により、調査工法の成立性を確認するため、実規模大の模擬体にて実施した。
- 試験範囲は、PCV内のX-2ペネトレーション箇所からRPV内底部(エリア2～4)について実規模大で模擬し、試験を実施する(エリア1はPCV外のため模擬対象外)。
- RPV開口部(下図※1)は 2022年度までの検討では、当該箇所が未確認であったため仮定条件(RPV下鏡中央部に直径1 m程度の開口部)を置き検討していた。
- 2023年3月に実施されたB3調査結果を踏まえた想定条件(本項3/6～6/6)で開発した。



アクセスルート概要図

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (4/18)

➤ 試験設備

- 実機条件と試験条件の環境条件の比較表を下表に示す。
- 環境条件は水蒸気の雰囲気をできる限り再現する。
- 実機設備と試験設備の対比を次項以降に示す。

試験条件の実機等価性の評価の凡例；
 ◎：等価性あり，○：凡そ等価性あり
 △：一部等価性あり，×：等価性なし

実機条件と試験条件の比較(環境条件)

項目	実機条件			2023年度試験条件			試験条件の実機等価性評価 (エリア2, 3, 4の等価性を評価)
	エリア2 PCV内	エリア3 ベデスタル内	エリア4 RPV内底部	エリア2 PCV内	エリア3 ベデスタル内	エリア4 RPV内底部	
温度	10~40℃			室温(季節により変動)			◎ 等価性あり(実機温度範囲内)
照明	照明なし(暗闇)			照明あり。ただし暗幕を設置しており、 照明を消すことで暗闇条件も可			◎ 等価性あり
湿度	100%RH(想定)			水蒸気発生装置により水蒸気を充満させるため、 高湿度(100%RHよりも低い)			△ 湿度影響は低いと想定
水蒸気	水蒸気あり (映像あり)		水蒸気あり (想定)	水蒸気発生装置により水蒸気を充満			○ 調査映像より水蒸気量を検討
落水	水滴滴下 (映像あり)		水滴滴下 (想定)	霧吹きでグレーチング上の濡れ状態を 模擬	水滴滴下装置により、水滴滴下		○ 調査映像より水滴滴下量を検討
雰囲気 線量率	10Sv/h (実測値)	100Sv/h (想定)	1,000Sv/h (想定)	0Sv/h			× 別途照射試験により放射線影響を確認
雰囲気	窒素			空気			◎ (比重) 窒素の比重は0.967(大気圧の場合)のため同等
圧力	微正圧(0.45kPa g)			大気圧			× 一般的な気体密度は圧力に比例する。試験条件は実機条件と比較しプロペラ推力は小さくなる(プロペラ推力は気体密度に比例するため)が、微小な違いのため影響はほぼ無いと考えられるため対策は不要
風速	窒素封入による風ありだが微風(想定)			沈静			△ 机上検討で風速0.02m/s程度と試算しており、微風であるため風の影響は小さいと考えられる。
ダスト	ダストは存在するが 注水によって湿潤状態(想定)			ダストは少量存在する			○ 実機ではダストは湿潤状態で、舞い上がりにくいと想定

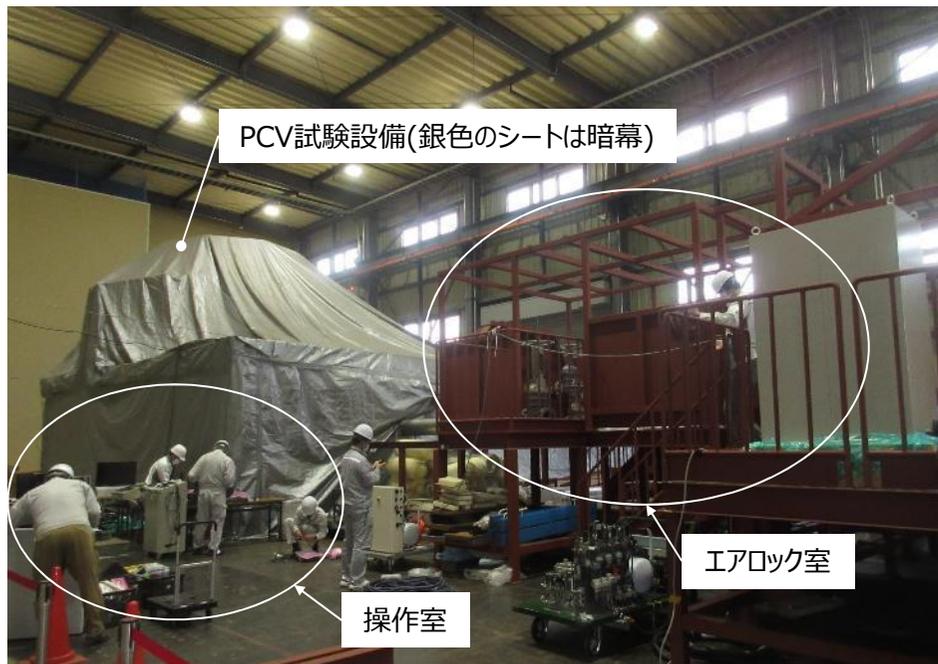
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (5/18)

➤ 試験設備

- 構造物の模擬体はB3調査結果により、損傷や変形が見られた個所の模擬を行う。
- ただし、損傷の詳細な寸法は不明のため映像等から判断した概略寸法による模擬程度とする。
- 試験設備を示す（他の補助事業（※）で製作した試験設備に模擬体を追加した）



試験設備外観

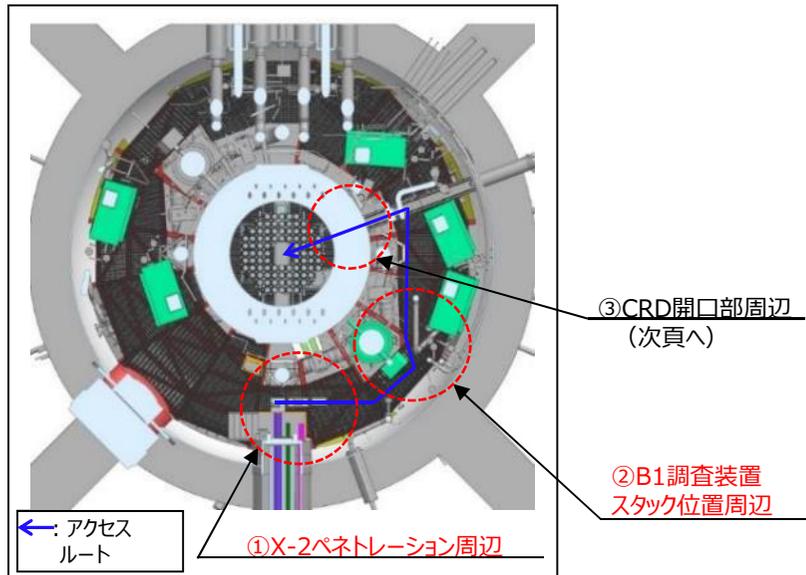
※：廃炉・汚染水対策事業費補助金（原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発）

5. 下部アクセス調査工法の開発

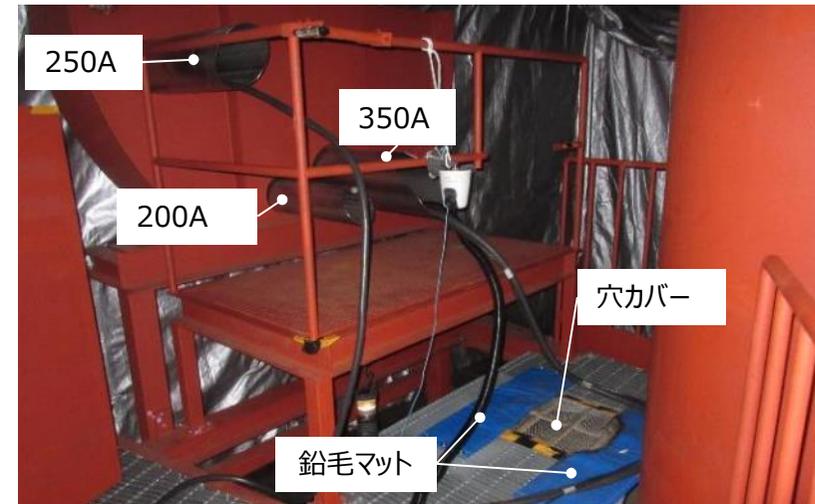
5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (6/18)

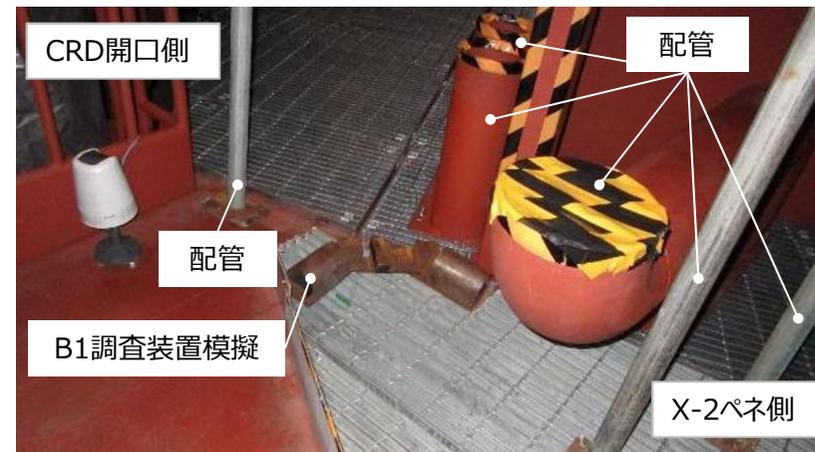
➤ 試験設備



模擬範囲箇所イメージ



①X-2ペネトレーション周辺



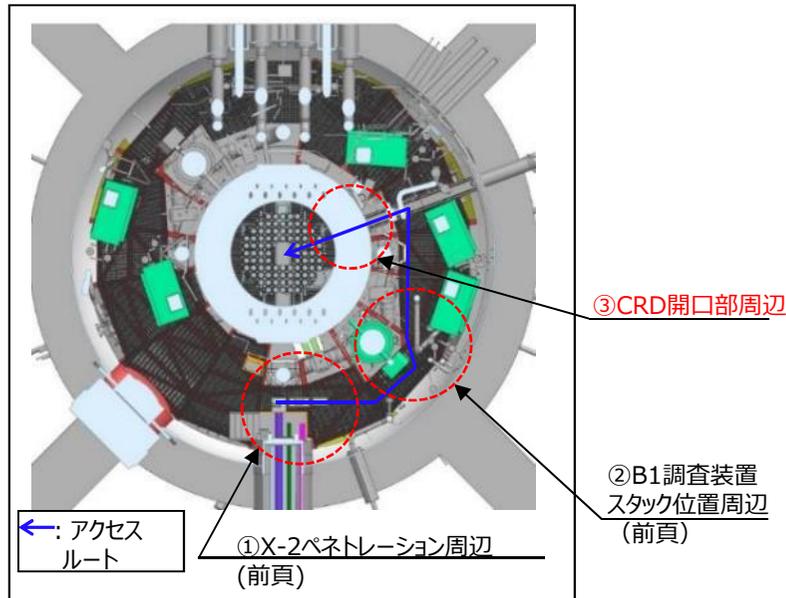
②B1調査装置スタック位置周辺

5. 下部アクセス調査工法の開発

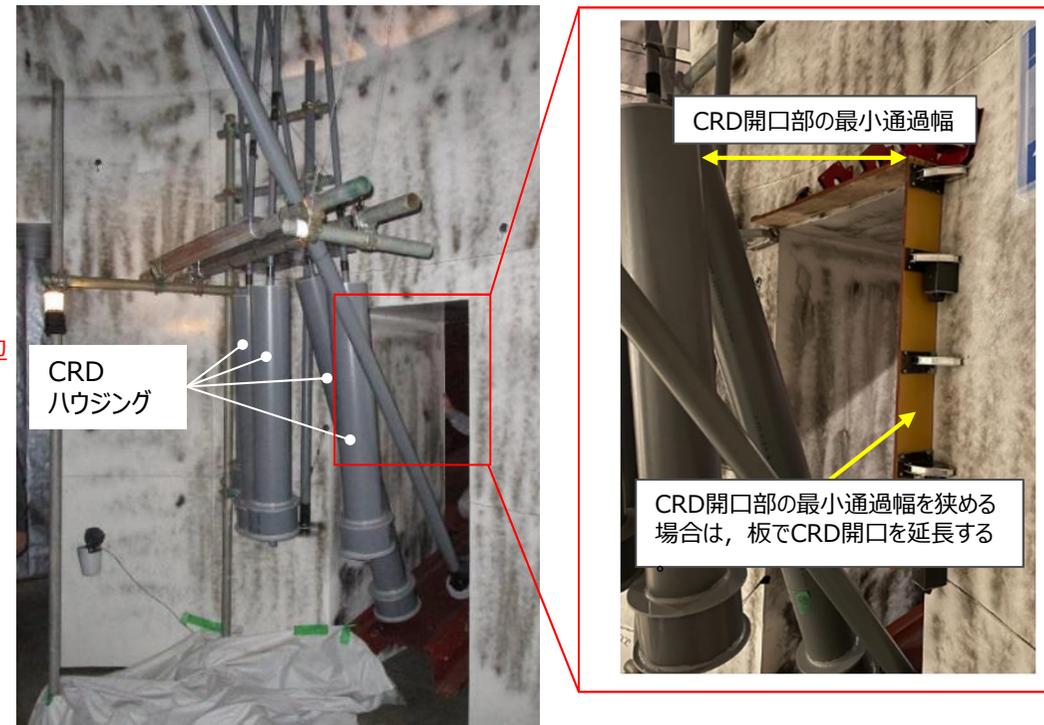
5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (7/18)

➤ 試験設備



模擬範囲箇所イメージ



③ CRD開口部周辺

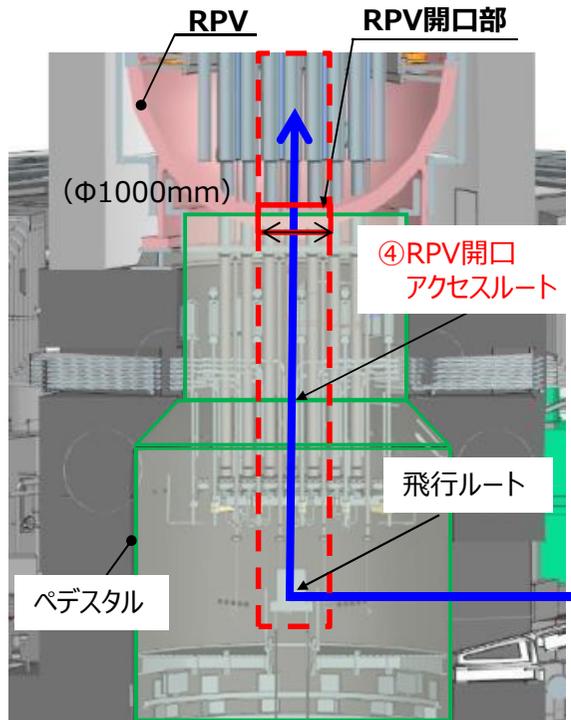
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (8/18)

➤ 試験設備

- RPV開口アクセスルートはCRDハウジングの倒れ等が想定されRPV開口(推定 Φ 1m)より狭隘な可能性がある。
- 下図の赤破線アクセスルート上に飛行の障害となる干渉物を想定した模擬体を配置する。
- RPV開口部から複数の干渉物を斜めに張ったりと、障害となるよう配置する。



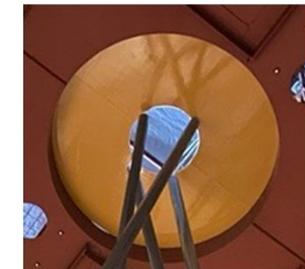
ペDESTAL周辺概要図



④RPV開口アクセスルート
(干渉物配置の一例)

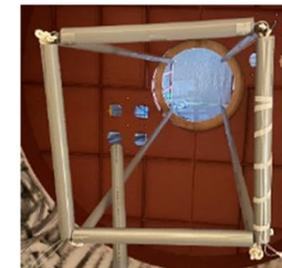


Φ 0.8mの場合

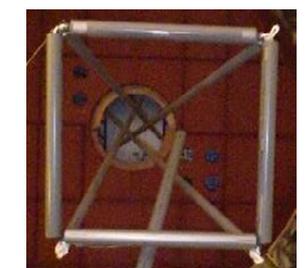


Φ 0.3mの場合

RPV炉底部開口の直径



振じりなしの場合



振じりありの場合

干渉物の設定（真下から撮影）

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (9/18)

➤ 試験装置：組合せ試験時の装置構成

- 本組合せ試験に使用する装置の構成を下図に示す。次頁以降に各装置についての詳細を述べる。

組合せ試験時の装置構成

区分	装置構成	区分	装置構成
組合せ試験①	<p>無線ドローン (2022年度 試作機改良型)</p> <p>無線用伸縮ロッド 走行台車</p> <p>ケーブル 介助装置</p>	組合せ試験③	<p>無線ドローン (センシング・飛行制御)</p> <p>無線用伸縮ロッド 走行台車</p> <p>ケーブル 介助装置</p>
組合せ試験②	<p>有線ドローン (2022年度 試作機改良型)</p> <p>有線用伸縮ロッド 走行台車</p> <p>ケーブル 介助装置</p> <p>ケーブルドラム 走行台車</p>	組合せ試験④	<p>無線ドローン(小型)</p> <p>無線用伸縮ロッド 走行台車</p> <p>ケーブル 介助装置</p>

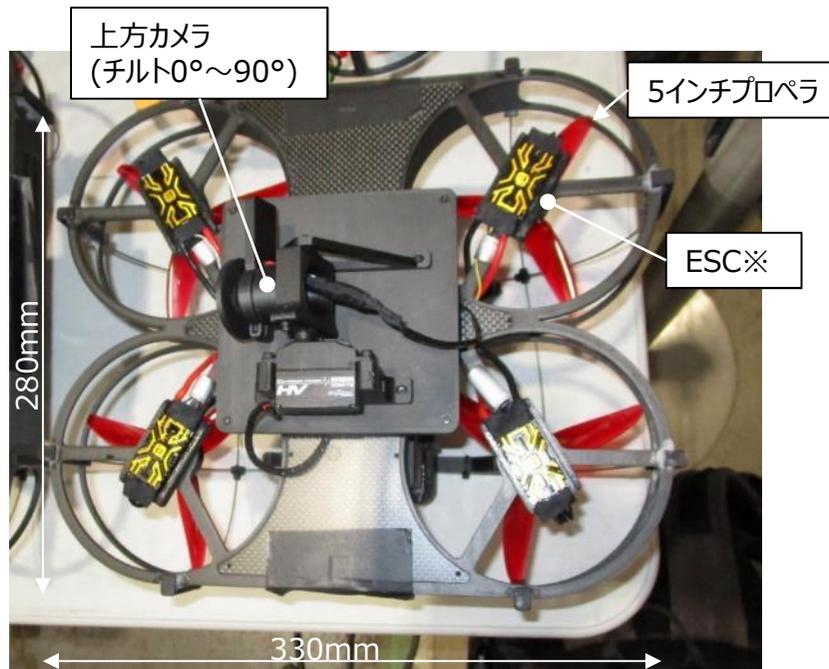
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (10/18)

➤ 試験装置：無線ドローン (2022年度試作機改良型)

- 2022年度までにドローン転倒時にドローンが復帰不可となる事象が見られたため、2022年度の試作機の形状を前提とした改良を検討し、機体下部に半球状にワイヤーフレームを搭載しドローン離着陸時に転倒しづらい形状へと改良
- ドローン機体の外部にESCを設置することで機体内部に熱がこもることを防ぎ、ドローン自身のプロペラの風により空冷できるよう改良



※ESC : Electric Speed Controller



無線ドローン (2022年度試作機改良型) 外観

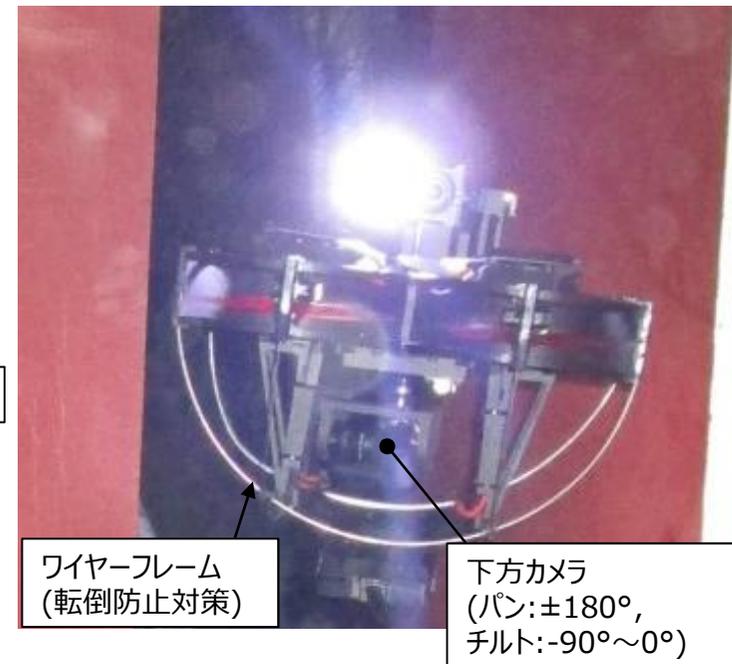
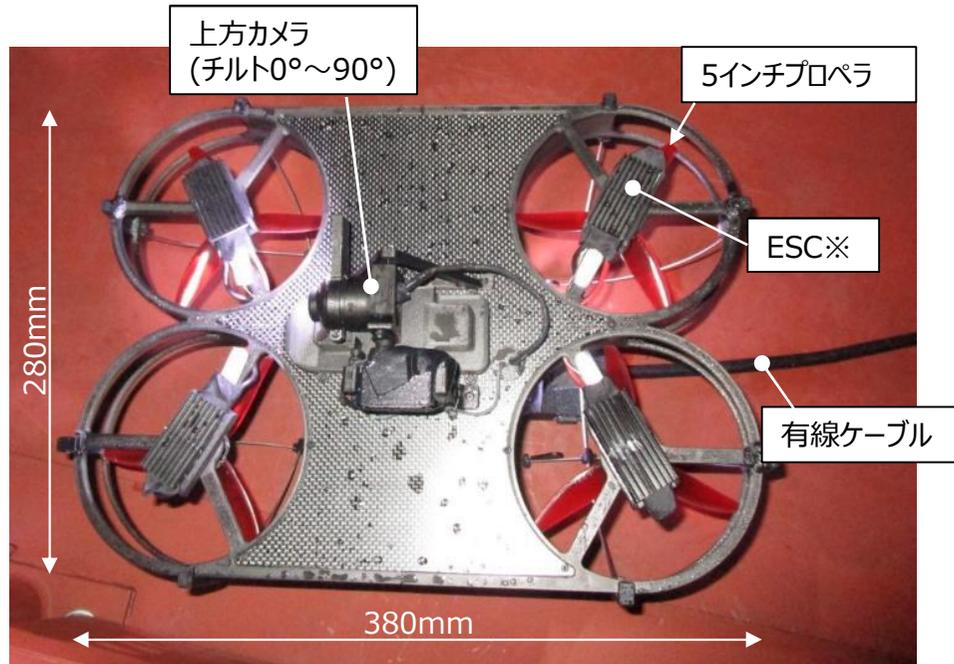
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (11/18)

➤ 試験装置：有線ドローン (2022年度試作機改良型)

- 2022年度までにドローン転倒時にドローンが復帰不可となる事象が見られたため、2022年度の試作機の形状を前提とした改良を検討し、機体下部に半球状にワイヤーフレームを搭載しドローン離着陸時に転倒しづらい形状へと改良
- ドローン機体の外部にESCを設置することで機体内部に熱がこもることを防ぎ、ドローン自身のプロペラの風により空冷できるよう改良



※ESC : Electric Speed Controller

有線ドローン (2022年度試作機改良型) 外観

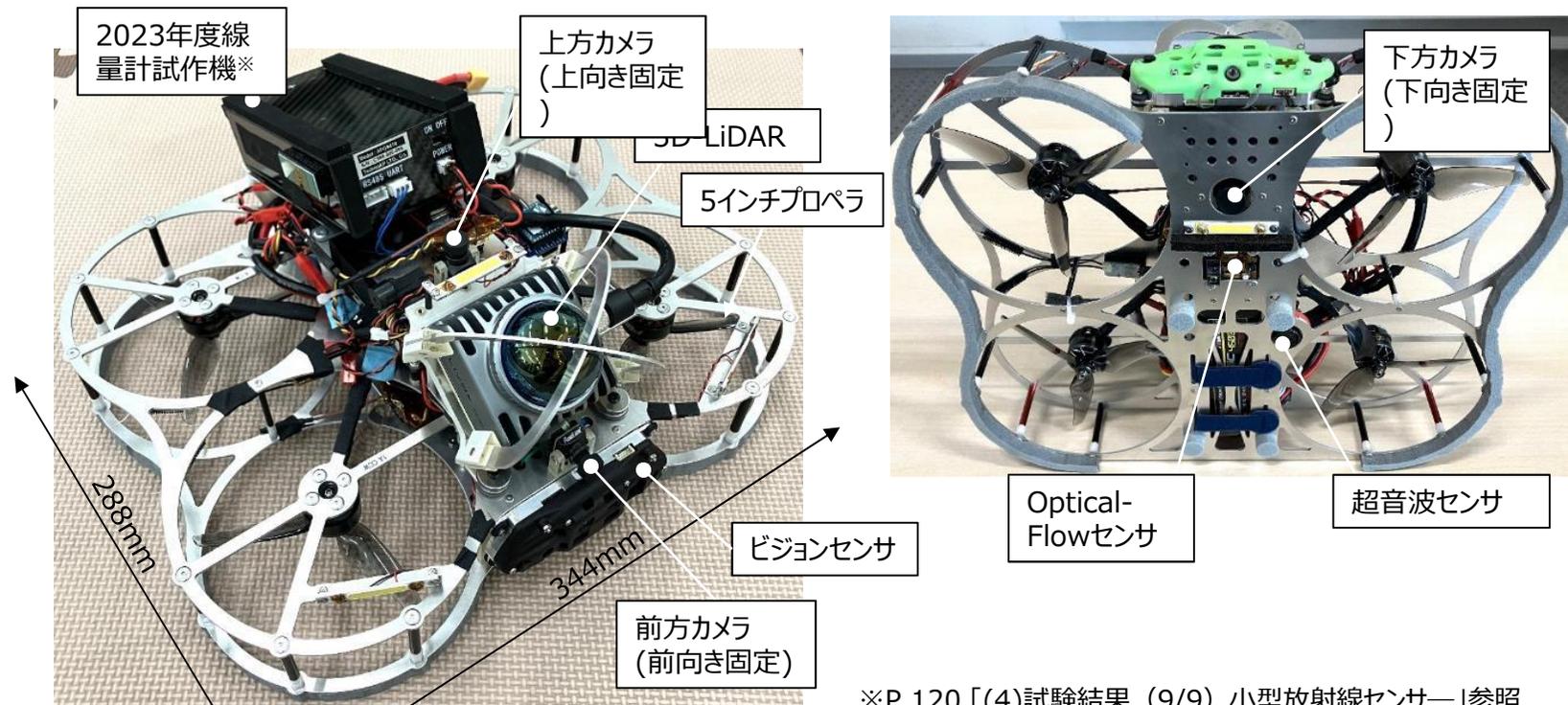
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (12/18)

➤ 試験装置：無線ドローン（センシング，飛行制御搭載）

- 3D-LiDARにより構造物の3次元形状計測を可能とした。各種センサによりホバリング制御の安定性を向上(適用場面によるが、パイロットの操縦無しでその場での自動ホバリングが可能)
- 2023年度新規製作であり，構成部品の配置を再検討のうえ機体下部を極力平面形状とすることで転倒しづらい機体形状とし設計へ反映



※P.120「(4)試験結果 (9/9) 小型放射線センサー」参照

無線ドローン（センシング・飛行制御搭載）外観

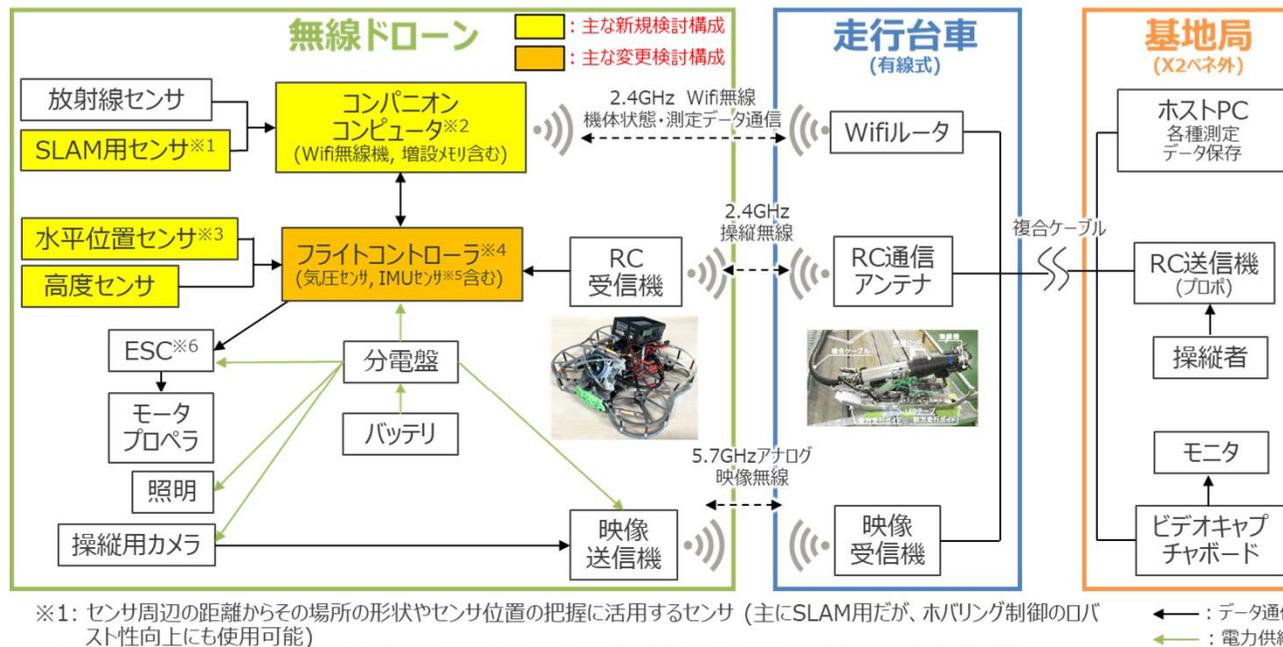
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (13/18)

➤ 試験装置：ドローンのセンシング、飛行制御について

- 過去の補助事業成果を元に、2023年度は調査技術としてSLAM (Simultaneous Localization And Mapping, 自己位置の推定と環境地図 (本開発では3次元の地図) の作成を同時に行う技術)、飛行制御技術として自動ホバリング制御の開発を行いドローンに搭載した。
- 2022年度の無線ドローンをベースに改良した調査システム構成を下図に示す。



調査システム構成

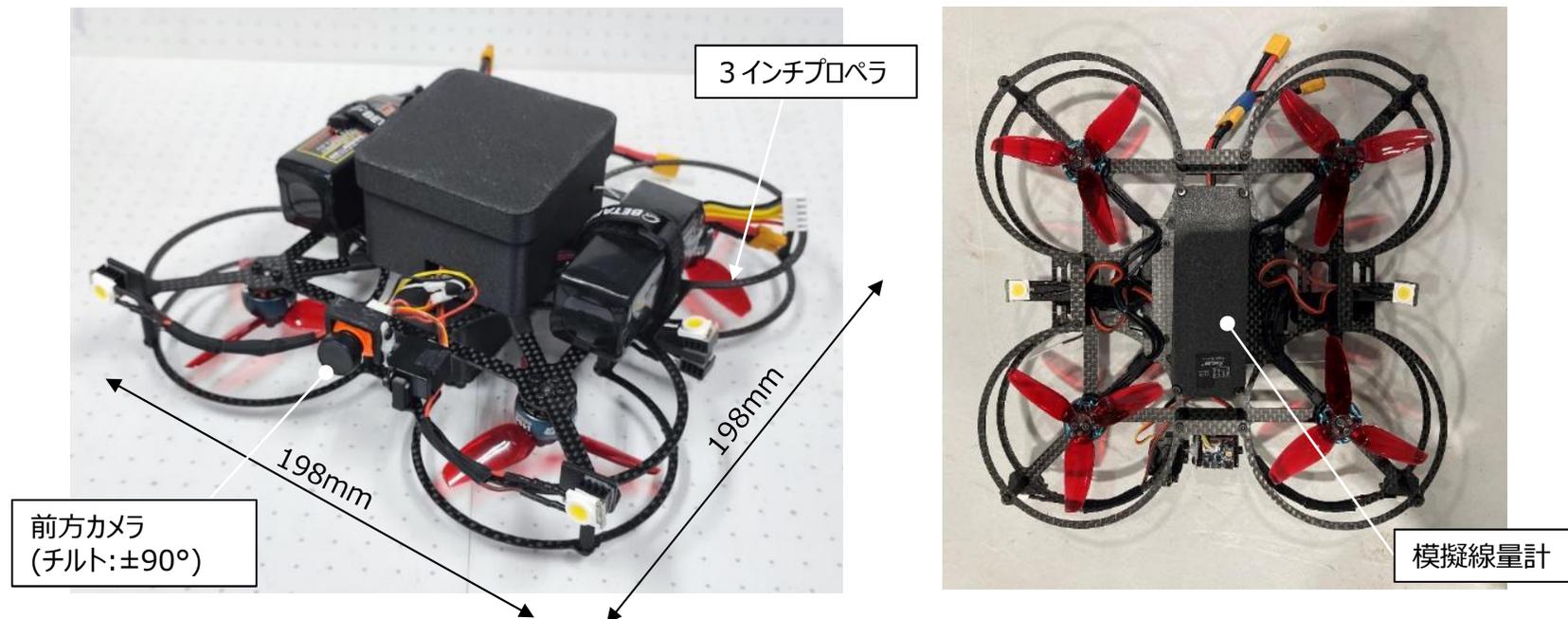
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (14/18)

➤ 試験装置：無線ドローン (小型)

- 2022年度までのドローン試作機のプロペラサイズ5インチから3インチへと見直すことで機体の平面寸法を198mm×198mmへと小型化 (ドローンの推力はプロペラ径の3乗に比例するためプロペラ径を小さくすると推力は落ちる。そのため機体前方にチルト機能を備えたカメラを1台とすることで質量を抑えた)
- 2023年度新規製作であり、構成部品の配置を再検討のうえ機体下部を極力平面形状とすることで転倒しづらい機体形状とし設計へ反映



無線ドローン (小型) 外観

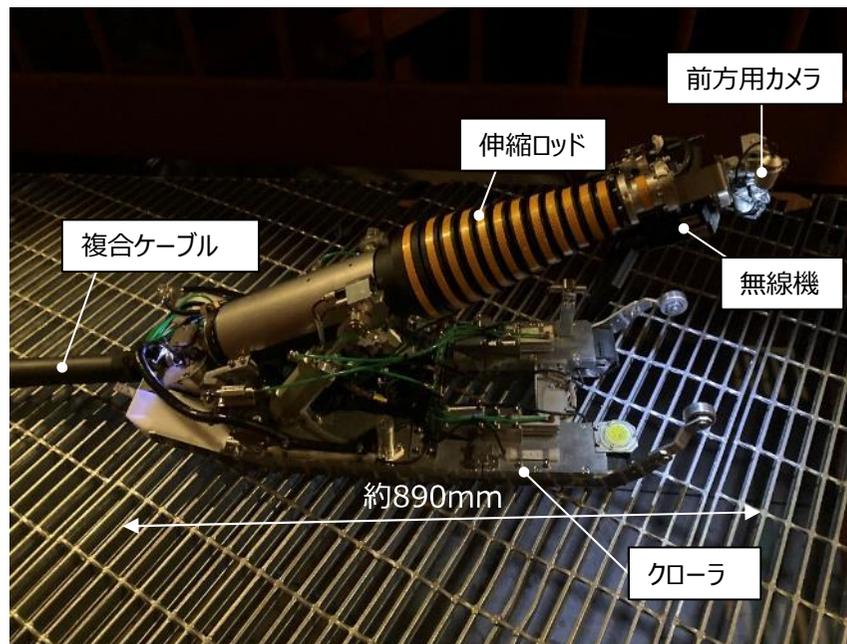
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

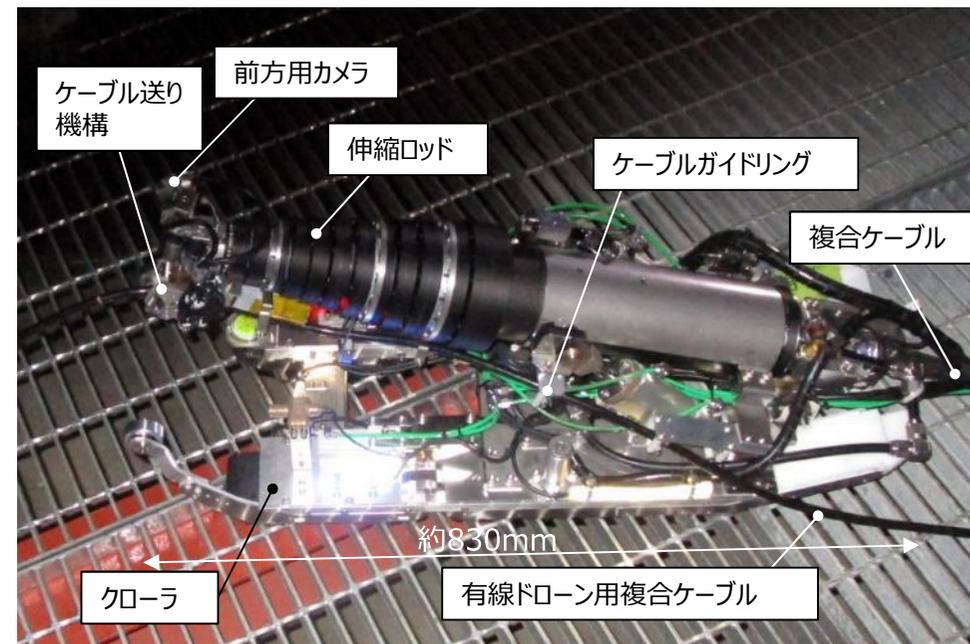
◆ (3) 試験計画 (15/18)

➤ 試験装置：無線/有線用伸縮ロッド走行台車

- 有線用伸縮ロッド走行台車について、有線ドローン用の複合ケーブルガイドリングに複合ケーブルの摺動抵抗を低減するためのローラを設置することで複合ケーブルの引っ掛かりを低減する改良を実施
- 無線用伸縮ロッド走行台車に関しては、ロッド先端のカメラの配置を見直し視認範囲を向上



無線用伸縮ロッド走行台車外観



有線用伸縮ロッド走行台車外観

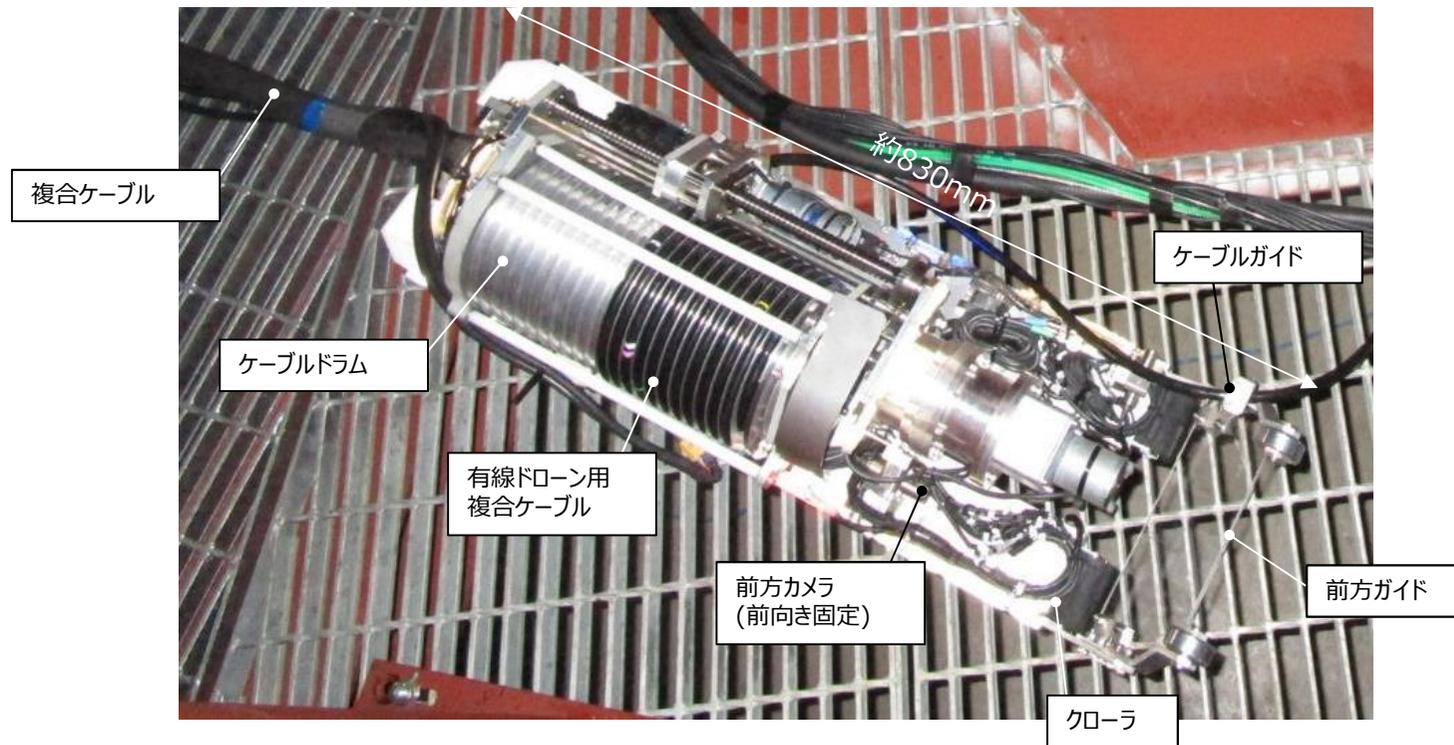
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (16/18)

➤ 試験装置：ケーブルドラム走行台車（有線ドローン用）

- 前方ガイドの形状および材質を透明な材質に見直し視認性を向上
- 有線ドローン用の複合ケーブルガイドリングに複合ケーブルの摺動抵抗を低減するためのローラを設置することで、複合ケーブルの引っ掛かりを低減する改良を実施



ケーブルドラム走行台車外観

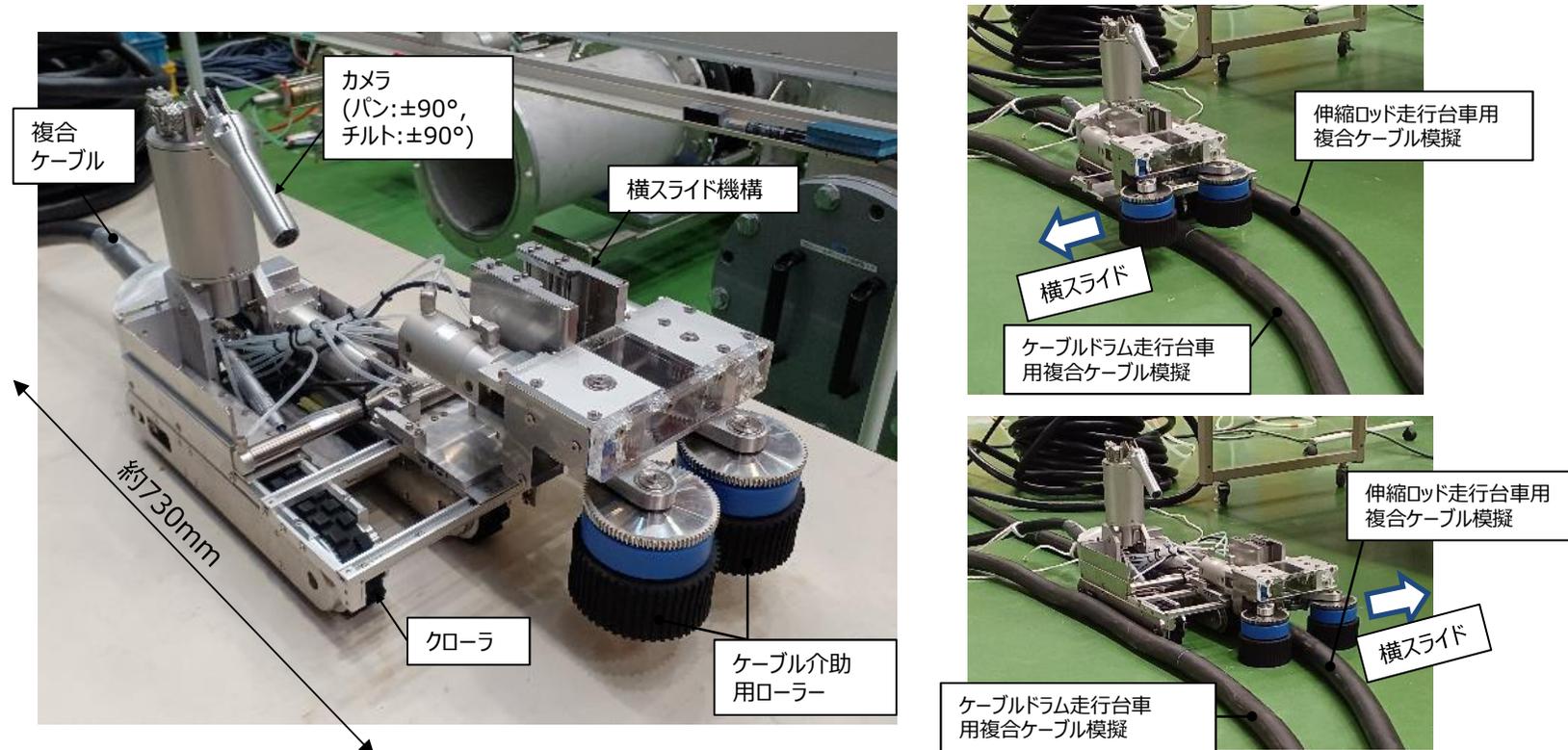
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (17/18)

➤ 試験装置：ケーブル介助装置（有線/無線ドローン兼用）

- 有線ドローンでの調査の場合，伸縮ロッド走行台車とケーブルドラム走行台車の2本の複合ケーブルを介助する必要があるため介助機構については左右にスライド可能な仕様としている。



ケーブル介助装置外観

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (3) 試験計画 (18/18)

➤ 試験項目/確認事項

- 組合せ試験での試験項目と、それに対応する確認項目とアウトプット/判定基準を下表に示す。
- 現地調査作業におけるリスクの抽出(机上)と対策の検証も本試験内で併せて実施した。

組合せ試験での試験項目

区分	試験項目	確認項目	アウトプット/判定基準
①改良後無線ドローンを用いた実機適用性評価	①-1.ドローン飛行・走行台車移動(X-2ペネ～CRD開口部)	<ul style="list-style-type: none"> • 各装置の運動性 • 干渉物(B1調査装置等)乗越え可否 	<ul style="list-style-type: none"> • 課題抽出(機体形状見直し, ロッド走行台車他検証) • 干渉物(B1調査装置等)を乗り越えることができること
	①-2.ロッド伸縮・ドローン調査(CRD開口部～RPV内部)	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部の通過性 • RPV炉底部開口の通過性 	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部をロッド・ドローンが通過できること • RPV炉底部開口をドローンが通過できること
②改良後有線ドローンを用いた実機適用性評価	②-1.ドローン飛行・走行台車移動(X-2ペネ～CRD開口部)	<ul style="list-style-type: none"> • 各装置の運動性 • 干渉物(B1調査装置等)乗越え可否 • 有線ケーブル有での運用手順 	<ul style="list-style-type: none"> • 課題抽出(ケーブル運用, ロッド走行台車, ドラム走行台車他検証) • 干渉物(B1調査装置等)を乗り越えることができること • 運用手順に問題無いこと
	②-2.ロッド伸縮・ドローン調査(CRD開口部～RPV内部)	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部の通過性 • RPV炉底部の通過性 • 有線ケーブル有での運用手順 	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部をロッド・ドローンが通過できること • RPV炉底部開口をドローンが通過できること • 有線ケーブル有りでもドローンがRPV炉底部開口を通過できること
③無線ドローン(センシング, 飛行制御搭載)を用いた実機適用性評価	③-1.ドローン飛行全般	<ul style="list-style-type: none"> • ドローン運用手順 	<ul style="list-style-type: none"> • 運用手順に問題が無いこと
	③-2.ドローン飛行(X-2ペネ～CRD開口)	<ul style="list-style-type: none"> • 飛行制御(水平ホバリング制御)による操縦者の負担低減 	<ul style="list-style-type: none"> • 飛行制御による操縦者の負担低減が有効であること
	③-3.ドローン飛行(CRD開口部～RPV内部)	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部の通過性 • RPV炉底部開口の通過性 • 飛行制御(水平ホバリング制御)による操縦者の負担低減 	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部をドローンが通過できること • RPV炉底部開口をドローンが通過できること • 飛行制御による操縦者の負担低減が有効であること
④無線ドローン(小型)を用いた実機適用性評価	④-1.ドローン飛行全般	<ul style="list-style-type: none"> • ドローン運用手順 	<ul style="list-style-type: none"> • 運用手順に問題が無いこと
	④-2.ドローン飛行(CRD開口部～RPV内部)	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部の通過性 • RPV炉底部開口の通過性 	<ul style="list-style-type: none"> • CRD開口部をドローンが通過できること • RPV炉底部開口をドローンが通過できること

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (1/9)

➤ 組合せ試験① (改良後無線ドローンを用いた実機適用性評価)

区分	試験項目	確認項目	アウトプット/判定基準	主な試験結果
①改良後無線ドローンを用いた実機適用性評価	①-1.ドローン飛行・走行台車移動 (X-2ベネ～CRD開口部)	・各装置の連動性	・課題抽出(機体形状見直し, ロッド走行台車他検証)	・一連の手順をワンスルーで実施して課題を抽出 ・離着陸時に無線ドローンが転倒するケースあり※ ・視認性確認用チャートの視認性が不十分なケースあり※
		・干渉物(B1調査装置等)乗り越え可否	・干渉物(B1調査装置等)を乗り越えることができること	・干渉物(B1調査装置等)を乗り越え可能
	①-2.ロッド伸縮・ドローン調査(CRD開口部～RPV内部)	・CRD開口部の通過性	・CRD開口部をロッド・ドローンが通過できること	・ロッドは干渉物の手前まで伸長可能 ・無線ドローンはCRD開口部を通過可能
		・RPV炉底部開口の通過性	・RPV炉底部開口をドローンが通過できること	・無線ドローンはRPV炉底部開口を通過可能

※：組合せ試験③④までに対策を講じ、対策の有効性を確認した



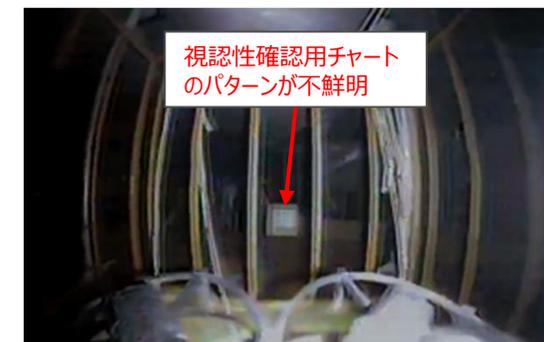
干渉物を乗り越える伸縮ロッド走行台車
(ケーブル介助装置のカメラ映像)



転倒した無線ドローン



CRD開口部を通過する無線ドローン



RPV内の視認性確認用チャートを撮影した無線ドローンのカメラ映像

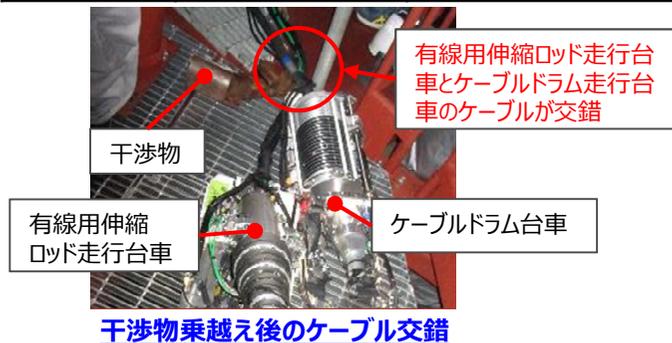
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (2/9)

➤ 組合せ試験② (改良後有線ドローンを用いた実機適用性評価)

区分	試験項目	確認項目	アウトプット/判定基準	主な試験結果
②改良後 有線ドローン を用いた 実機適用 性評価	②-1.ドローン飛行・走行台車移動(X-2ペネ～CRD開口部)	・各装置の運動性	・課題抽出(ケーブル運用, ロッド走行台車, ドラム走行台車他検証)	・一連の手順をワンスルーで実施して課題を抽出し, 対策案を立案。次フェーズの開発のインプットとする計画 ・B1調査装置の乗越え後にケーブルが交錯するリスクが大きい
		・干渉物(B1調査装置等)乗越え可否	・干渉物(仮置き中の既投入調査装置等)を乗り越えることができること	・干渉物の乗越えが可能
		・有線ケーブル有での運用手順	・運用手順に問題無いこと	・具体的なリスクを抽出し, それらに対する装置改善・運用見直し等の対策案。次フェーズの開発のインプットとする計画
	②-2.ロッド伸縮・ドローン調査(CRD開口部～RPV内部)	・CRD開口部の通過性	・CRD開口部をロッド・ドローンが通過できること	・干渉物の手前までロッド伸長が可能 ・有線ドローンはCRD開口部を通過可能
		・RPV炉底部の通過性	・RPV炉底部開口をドローンが通過できること	・干渉物の影響により, 有線ドローン用ケーブル長が不足し, ドローンがRPV炉底部開口を通過することが不可
		・有線ケーブル有での運用手順	・有線ケーブル有りでもドローンがRPV炉底部開口を通過できること	



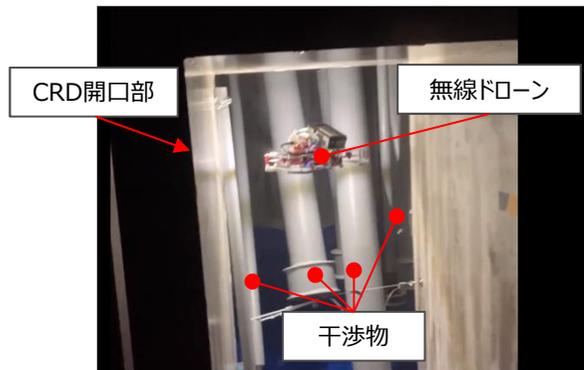
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

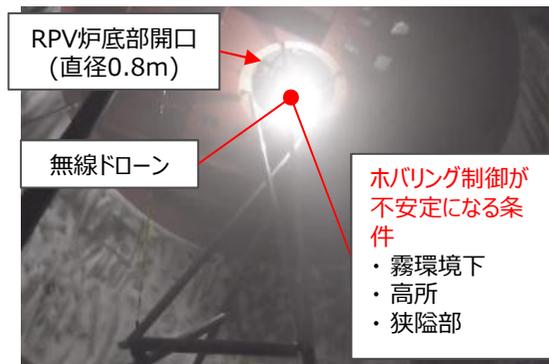
◆ (4) 試験結果 (3/9)

➤ 組合せ試験③ (無線ドローン(センシング, 飛行制御搭載)を用いた実機適用性評価)

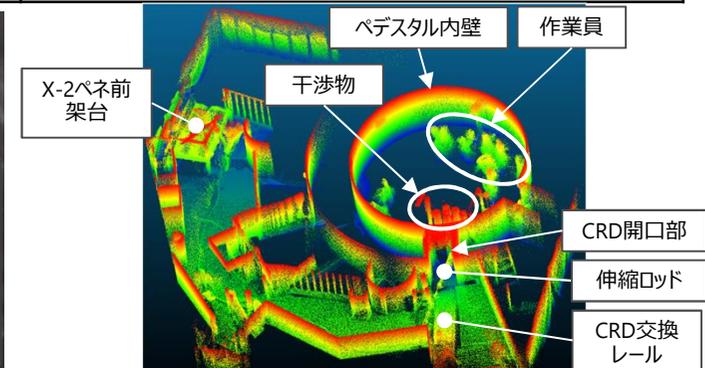
区分	試験項目	確認項目	アウトプット/判定基準	主な試験結果
③無線ドローン(センシング, 飛行制御搭載)を用いた実機適用性評価	③-1.ドローン飛行全般	・ドローン運用手順	・運用手順に問題が無いこと	・一連の手順をワンスルーで実施して運用手順に問題なし
	③-2.ドローン飛行(X-2ペネ～CRD開口)	・飛行制御(水平ホバリング制御)による操縦者の負担低減	・飛行制御による操縦者の負担低減が有効であること	・ホバリング制御を有効化することで, 操縦者の負担が軽減
	③-3.ドローン飛行(CRD開口部～RPV内部)	・CRD開口部の通過性	・CRD開口部をドローンが通過できること	・ドローンはCRD開口部を通過可能
		・RPV炉底部開口の通過性	・RPV炉底部開口をドローンが通過できること	・ドローンはRPV炉底部開口を通過可能
		・飛行制御(水平ホバリング制御)による操縦者の負担低減	・飛行制御による操縦者の負担低減が有効であること	・ホバリング制御を有効化することで, 操縦者の負担が軽減 ・狭隘部および霧有りで機体の高度が4m以上の場合にホバリング制御が不安定になった



狭隘部でホバリング制御を有効にして飛行する無線ドローン(センシング・飛行制御搭載)



ホバリング制御が不安定になる状況の例



飛行中にリアルタイムで生成した試験設備の点群データ※

※飛行時間は約2分。天井の暗幕が映るため、高さ方向の表示範囲を制限

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (4/9)

➤ 組合せ試験④ (無線ドローン(小型)を用いた実機適用性評価)

区分	試験項目	確認項目	アウトプット/判定基準	主な試験結果
④無線ドローン(小型)を用いた実機適用性評価	④-1.ドローン飛行全般	・ドローン運用手順	・運用手順に問題が無いこと	・一連の手順をワンスルーで実施可能
	④-2.ドローン飛行(CRD開口部～RPV内部)	・CRD開口部の通過性	・CRD開口部をドローンが通過できること	・ドローンはCRD開口部(最小幅0.25m※)を通過可能
		・RPV炉底部開口の通過性	・RPV炉底部開口をドローンが通過できること	・ドローンはRPV炉底部開口(直径0.5m)を通過可能

※繰り返し試験の中で確認したドローンの最小通過可能な開口幅として設定した。



CRD開口部を通過する無線ドローン(小型)



RPV炉底部開口を通過する無線ドローン(小型)



RPV内部の無線ドローン(小型)の映像

<課題> 試験外のデモ飛行中に、繰り返し試験を実施していたことにより不具合が生じた。次フェーズ以降でドローンの耐久性の確認が必要。

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (5/9)

➤ 組合せ試験結果を踏まえた実機適用性評価(無線ドローンによる調査工法)

以下に、組合せ試験結果を踏まえた無線ドローンによる調査工法の実機適用性評価結果を示す。運用面では想定通りに機能することを確認した。また、センシング・飛行制御の有効性を確認したほか、小型機についてはその機動性・通過性の実効性を確認した。

実機適用性評価(無線ドローンによる調査工法)

区分	実機適用性評価
組合せ試験①(改良後無線ドローンを用いた実機適用性評価)	主としてPCV内を試験対象とし、無線ドローンの運用面について確認した。一部抽出課題はあったものの、各装置の連動性や運用については想定通りに機能していることを確認した。前述した抽出課題については、組合せ試験③④までに対策を講じ有効に機能することを確認した。
組合せ試験③(無線ドローン(センシング, 飛行制御搭載)を用いた実機適用性評価)	主として無線ドローン向けのセンシング(3次元形状計測機能)と飛行制御(ホバリング制御機能)向上について確認した。飛行制御はホバリング制御を向上したことで、操縦者の負担軽減が可能な見通しを得ることができた。一方で、霧環境下かつ高所の狭隘空間ではホバリング制御に影響が出る場合があることを確認したため、操作時には制御のON・OFFの切り替えを適切に行う運用とすることで対応可能な見通しを得た。またセンシングについては構造物の3次元形状計測が目標の精度内(目標値:誤差±10cmに対して試験での最大誤差:6cm(絶対値))でリアルタイムの計測が可能であった。
組合せ試験④(無線ドローン(小型)を用いた実機適用性評価)	主として無線ドローンの小型化による通過性の向上可否を確認した。ドローンの大幅な小型化(プロペラサイズを5インチから3インチ)をしたことで、狭隘部の通過性が向上できたことを試験で確認した。ただし、小型化に伴い搭載可能な機器質量に制限があるため、実機環境の状況を踏まえて小型無線ドローンの適用可否を検討していく必要がある。

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (6/9)

➤ 組合せ試験結果を踏まえた実機適用性評価(有線ドローンによる調査工法)

以下に、組合せ試験結果を踏まえた有線ドローンによる調査工法の実機適用性評価結果を示す。実機での想定手順を追いながら具体的な課題を抽出することができ、調査を成立させるための装置改善や運用の見直し等による対策案を立案した。検討した対策案は次フェーズ以降に運用や装置詳細設計へ反映する計画である。

実機適用性評価(有線ドローンによる調査工法)

区分	実機適用性評価
組合せ試験②(改良後有線ドローンを用いた実機適用性評価)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 主としてPCV内を試験対象とし有線ドローンの運用面について確認した。実機での想定手順を追いながらケーブル干渉等が生じる可能性がある箇所や、有線ドローン・付帯設備における装置仕様について具体的に課題やリスクを抽出した。 ➤ 抽出課題・リスクの中で、運用や調査工法へのインパクトがあったものについては大きく2点あり、1点目はB1調査装置の乗り越え後の伸縮ロッド走行台車とケーブルドラム走行台車の複合ケーブルが交錯することである。 <ul style="list-style-type: none"> → B1調査装置の手前でケーブルドラム走行台車が停止し、乗り越えない運用へと見直すことでケーブル交錯のリスクを低減可能であると考えられる。 ➤ 2点目は、2022年度のB3調査で明らかとなったCRD開口部の干渉物の影響により有線ドローンがRPV内部まで到達できないことである。有線ドローンについてはCRD開口部の干渉物により有線ドローン用のケーブルを補助しているロッド先端をペDESTAL内へ伸長不可のため、現状の装置仕様ではRPV炉底部の想定開口部までは到達困難であることが明らかとなった。 <ul style="list-style-type: none"> → 本年度までの基本的な装置仕様を次フェーズ以降も踏襲する場合、有線ドローンはペDESTAL内までを調査する調査工法とする必要がある。

5. 下部アクセス調査工法の開発

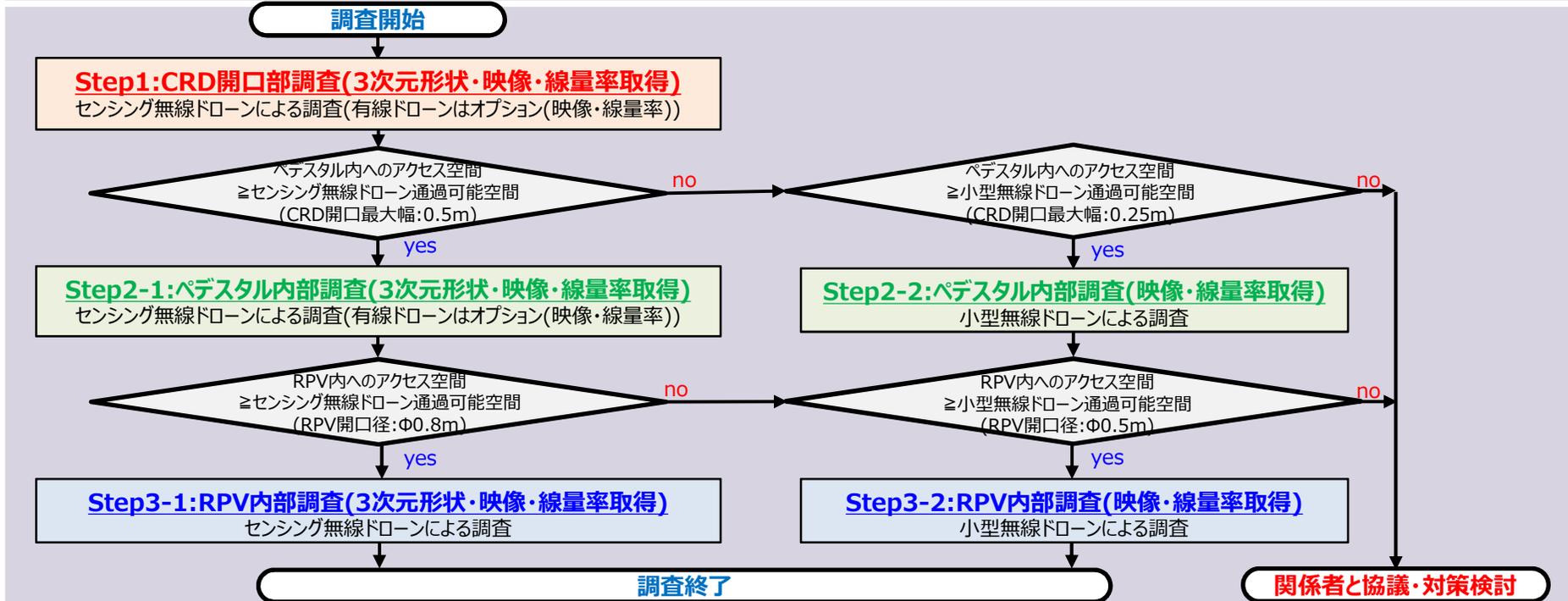
5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (7/9)

➤ 実機での調査シナリオについて

- 早期のRPV内調査の実施を前提とした場合、**現時点で相対的に開発課題の少ない無線ドローンを主案**とする（有線ドローンについては、飛行時間が長いメリットを活かし映像情報を十分に取得する必要がある場合のオプションとして用いる）。
- **各調査ステップ間は別日**とすることや、**各調査ステップでは複数機体を用意し調査**することも検討する。
- 本調査シナリオは次フェーズ以降の開発状況や他先行調査結果を踏まえ適宜更新・具体化していく。

2023年度までの成果を踏まえたRPV内部調査シナリオ案



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (8/9)

➤ 耐放射線性について

- 2023年度新規検討した搭載機器の耐放射線性を確認するため、通電状態で放射線照射試験を行い、センサは計測結果に異常が生じた時点で故障と判断して計測を終了した。全ての機器で要求仕様を満たす結果となった。
- バッテリー※1の耐放射線性については、先行研究※2において169Sv程度までの耐放射線性を有する可能性があることが示唆されている。次フェーズ以降も、継続して検討していく必要がある。

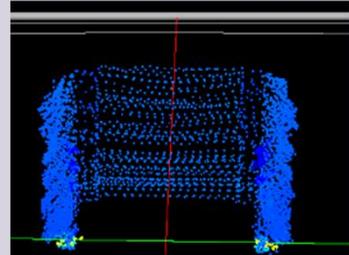
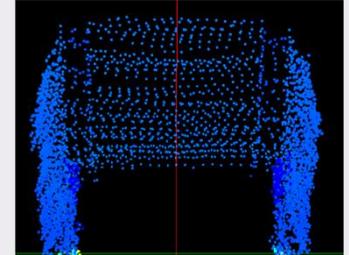
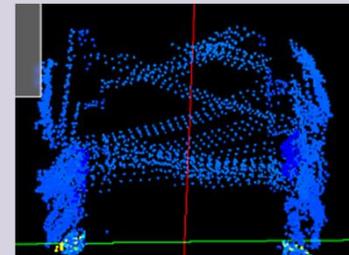
2023年度新規検討センサの耐放射線性

No.	品名	要求仕様	動作不良発生時の集積線量	判定
1	超音波センサ	90Gy (想定飛行時間, 想定線量率, 安全率の積より算出)	198Gy	○
2	3D-LiDAR		341Gy	○
3	ビジョンセンサ		150Gy以上	○
4	オプティカルフローセンサ		110Gy	○
5	フライトコントローラ/ コンパニオンコンピュータ		150Gy	○

※1 2022年度にエネルギー密度の高いバッテリーを要素試作したが、放電性が安定しなかったため2023年度は従来のバッテリーを使用することとした。

※2 小柳栄次 (2016) : “災害対応ロボット-福島第一原子力発電所建屋内探査ロボット-”, 日本ロボット学会誌, vol.31, No.10, pp.671-675.

照射前後の計測結果の変化 (3D-LiDARの例)

区分	計測結果(点群)
照射前	 <p>集積線量0Gy</p>
照射中	 <p>集積線量333Gy</p>
動作不良発生時	 <p>集積線量341Gy</p>

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (4) 試験結果 (9/9)

➤ 小型放射線センサについて

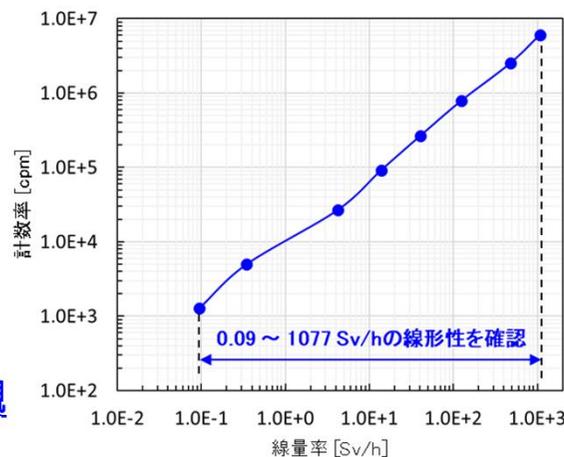
- 2022年度より開発に着手していた小型放射線センサ(パルス計測型)について、回路集積による基板の極小化及び筐体の小型化等を実施し、176gまで軽量化(2022年度実績：376g)
- 性能確認のため要素試験を実施し、全ての項目で要求仕様を満たす結果であった。

小型放射線センサ要素試験結果

No.	要素試験項目	要求仕様	試験結果	判定
1	線量率測定性	線量率測定範囲：1 ~ 1000Sv/h	0.09 ~ 1077Sv/hにおいて線量率線形性有り	○
2	ドローンノイズ影響確認	ドローン結合時のノイズレベルが、線量率測定時の閾値(100チャンネル)以下	ノイズレベルの最大値は20チャンネル	○
3	耐放射線性	90Gy	452Gy	○



小型放射線センサ
(パルス計測型)試作機外観



線量率測定性評価結果



試験時のドローン出力は75% (運用時の想定最大出力)で飛行(ホバリング)させ、ノイズの影響確認試験を実施

ドローンノイズ影響確認試験概要

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (5) 実機適用時のプラントへの影響リスク対策案

以下に、実機適用時に想定されるプラントへの影響想定リスク及び対策案を示す。次フェーズ以降本項目については、より詳細に整理・評価し、リスク管理方法を具体化していく必要がある。また、先行調査におけるリスク管理の運用方法も適宜参照していく。

ドローンによる調査工法のプラントへの影響想定リスクと対策案

No.	プラントへの影響想定リスク	対策・対応(案)	
		リスク低減策	発生時対応
1	万一、墜落したドローンのバッテリーが滞留水と反応して水素が発生する (RPV内に窒素封入を実施しているため、影響は小さいと想定)	ドローンの飛行安定性を高めて、墜落のリスクを低減させる。	ドローンが墜落した場合は、PCV内の水素濃度値を注視する。
2	ドローン飛行時の風によりPCV内でダストが飛散する (PCV内は湿潤環境のため、影響は小さいと想定)	ダスト濃度上昇を早期で検出できるように、ガス管理設備にダストモニタを設置し、指示値を監視しながら飛行する。	・ダスト濃度が基準値を超過する可能性がある場合は、一時的にドローンの飛行を中断する。
3	ドローンが衝突することで、X-100B温度計/水位計の鋼管で保護されていない部分が破損する	<ul style="list-style-type: none"> ・ドローンにプロペラガードを搭載し、プロペラにより周囲の構造物を破損させない構造とする。 ・X-100B温度計/水位計と極端に近接しないルートで調査を実施する。 	X-100B温度計/水位計のうち、破損していない部分を使用してデータ計測を継続する。
4	ドローン飛行時の風により、PCV温度計の指示値が変動する	ドローンの飛行中は一時的に温度計の指示値が変化する可能性を関係各所にご理解を頂いたうえで、ドローンの飛行中は温度計の計測を控えるか、計測結果を参考値として扱うように調整する。	PCV内温度計を用いた計測が必要な場合は、距離を取るか着陸する。
5	ドローンの故障により、バッテリーが発火する	<ul style="list-style-type: none"> ・バッテリーが外力により破損しないように、機体内部に格納する構造とする。 ・耐久性に優れたバッテリーを選定し、厳しい条件においても発火しないことを確認する。 	他の装置で状況を監視する。

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (6) まとめ (1/3)

➤ 本年度の成果

- 過年度までに設計・製作した装置の改良型，本年度新規設計・製作した装置を用いた**実規模大の組合せ試験を実施し一定の実機適用性を満足していることを確認した。**
- 無線ドローンについては，**センシング・飛行制御の有効性を確認したほか，小型機についてはその機動性・通過性の有効性を確認した。**
- 有線ドローンについては，**ケーブルマネジメント等の具体的な課題を抽出することができ，装置改善や運用の見直し等による対策案を立案し，次フェーズ以降に運用や装置詳細設計へ反映する計画である。**
- 上記結果を踏まえ，**次フェーズに向けてより具体的な調査工法を立案した。**

2023年度ドローン試作機外観

区分	無線ドローン (2022年度試作機改良型)	有線ドローン (2022年度試作機改良型)	無線ドローン (センシング・飛行制御搭載) (2023年度新規試作)	無線ドローン (小型) (2023年度新規試作)
外観				

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (6) まとめ (2/3)

➤ これまでの開発変遷・今後の見通し

本年度までの成果を踏まえて、下表にこれまでの本事業の開発変遷および今後の見通しについてまとめる。

1号機向けドローンを用いた調査工法の開発変遷・今後の見通し

区分	2020年度～2021年度	2022年度～2023年度	2024年度以降（案）
開発フェーズ	TRL1～3 (適用性評価, 概念設計, 要素試験等)	TRL4 (基本設計, 設備仕様検討, 要素試験等)	TRL5～7 (詳細設計, モックアップ試験, 現場調査等)
開発内容	<ul style="list-style-type: none"> ✓ RPV内部調査における, 下部アクセスによる調査のニーズ確認, 他補助事業で開発済・開発中の既存技術を調査し, 各号機毎にアクセス技術の適用性評価を行い, 1号機向けにはドローン（無線/有線）へ絞り込み ✓ 絞り込んだ技術に関して, 実現性評価のための簡易試験および要素試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 装置仕様検討の上, 試作機を基本設計・製作し, 単体試験により装置の単体性能を評価 ✓ ドローン技術については, センシングや飛行制御を高度化。小型ドローンについても試作 ✓ 無線/有線ドローンともにPCV内における実規模大の組合せ試験により実機適用性を評価, 課題・リスクを抽出。一定の実機適用性があることを確認 	<p>本年度までの成果を踏まえ以下の実施項目に取り組む必要がある</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ PCV外における装置や補機を含む, 装置詳細設計・製作および性能確認 ✓ 実機適用時のリスク詳細評価（ダスト飛散, ドローン残置影響など）およびリスク管理方法の具体化 ✓ モックアップ試験, トレーニングなど

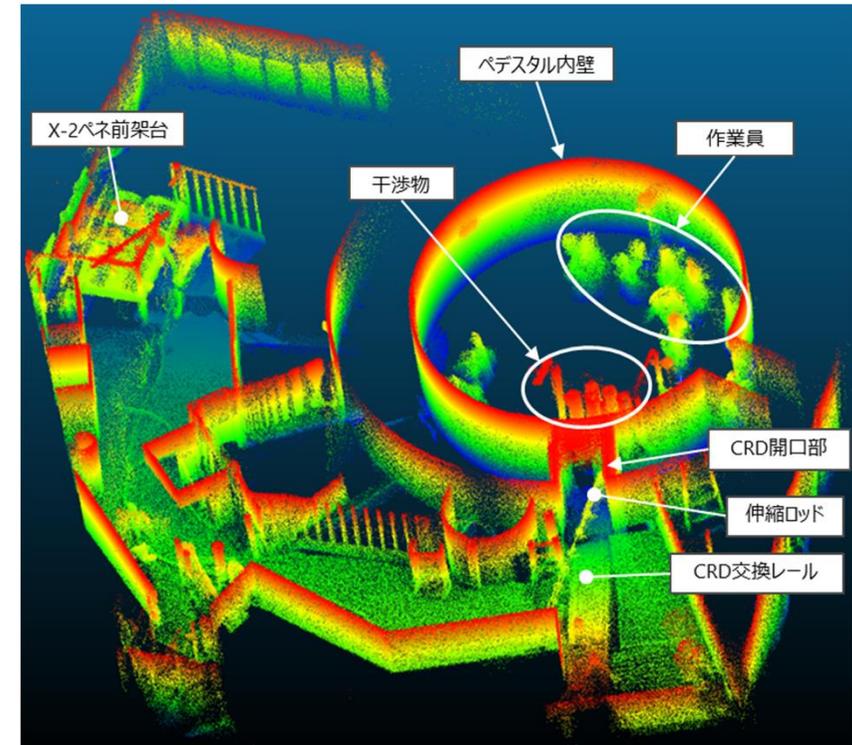
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (6) まとめ (3/3)

➤ RPV内部調査以外のドローン適用可能性

- 本年度までにRPV内部調査向けに無線ドローンと有線ドローンの開発を進め、ドローン調査技術の高度化や実機適用性を評価してきた。
- 一方で、RPV内部に限らず原子炉建屋内やPCV内においても、未だ作業員が近づくことが困難な高所や狭隘部が多く存在する。当該箇所における環境認識についても廃止措置を安全かつ効率的に実施するために重要である。
- 従って、今後そのような厳しい環境下へ本技術開発を水平展開し、ドローン技術を適用することも考えられる。



飛行時間約2分で生成した点群データ

**飛行中にリアルタイムで生成した
2023年度試験設備の点群データ**

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.2 A) ドローンを用いた調査工法

◆ (7) 実施スケジュール

実施項目	2023年度											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
主要なマイルストーン								▼中間報告				最終報告▼
A①センシング技術・飛行制御技術の検討			開発計画の策定			計測技術の検討			制御技術の検討			結果まとめ
A②調査計画・開発計画の更新および装置改良			開発計画の更新									結果まとめ
A③実規模大の組合せ試験			試験計画			設備準備			組合せ試験 ・無線ドローン ・有線ドローン		組合せ試験 ・無線ドローン (飛行制御・センシング / 小形化)	結果まとめ
								▼		▼		
								組合せ試験 (結果整理・改善点検討)				

目次

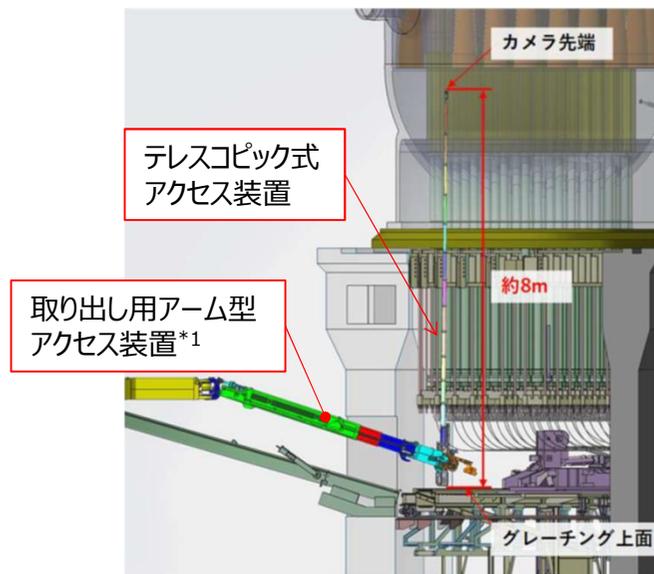
1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (1) 2022年度までの成果

- 取り出し用アーム型アクセス装置との取り合い等の開発課題に対して、これまで概念設計や要素試験を実施。
- 2020年度に実施した3段テレスコパイプによる簡易試験において、シール部のリークや摺動抵抗が高いという課題に対する対策案を検討。パイプの内面表面粗さの改善等、装置仕様へ反映した。3段テレスコパイプによる簡易試験を実施し、対策案の効果を確認。
- 全14段のアクセス装置の成立性を評価する要素試験を実施し、テレスコピック式アクセス装置単体の成立性があると評価。



テレスコパイプによるアクセスイメージ

*1: 「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発」で開発されているアーム



全伸縮状態

全伸展状態

3段テレスコパイプによる簡易試験

2022年度までの実施概要



14段テレスコパイプによる要素試験

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 背景

- 2022年度までの開発の成果として、テレスコパイプを用いた調査工法の課題を抽出した。
- これらの課題と2023年度に実施する課題への対応策を下表に示す（対応策の詳細は次頁以降参照）。

No.	2022年度までの検討項目	2022年度の検討結果概要	課題への対応策
1	<p>2022年度に以下の項目について検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ テレスコパイプ伸展時に回転防止レールの方向に傾斜する挙動の抑制 ➤ 各パイプの間隙によるガタ抑制、間隙による非常時収縮の傾斜防止 	<p>【検討内容】 テレスコパイプ伸展時の傾き抑制のため、パイプ摺動部の間隙の低減およびダストシールの変更（硬化）を行い、改善効果を確認するための試験を実施した。改善したもので試験を実施し、非常時収縮の可否を確認した。</p> <p>【検討結果】 テレスコパイプの伸縮動作に問題ないことを確認したが、傾きは2021年度より大きくなり、傾き改善の効果は得られなかった。 非常時収縮においては、テレスコパイプ内を減圧した際に傾斜して収縮できなくなる事象が2021年度と同様に発生した。</p> <p>【課題】 上記事象を考慮した非常時収縮の対策について継続検討が必要</p>	<p>非常時収縮時に傾斜して収縮できなくなる事象の解決のため、以下の対策検討を行い、試験にてその効果を確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ テレスコ先端部分のアルミ化 ➤ パイプ接合部の構造見直し <p>また、事象が解消しない場合に備え、以下の運用による非常時収縮の可否を試験にて確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 周辺構造物へもたれ掛かりながらの収縮可否 <p>⇒(2)実施内容 1) 非常時収縮の対策検討</p>
2	<p>2022年度に以下の項目について検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 姿勢制御機構の試作と評価 	<p>【検討内容】 姿勢制御機構の試作を行い、動作確認を実施した。</p> <p>【検討結果】 基本動作に問題ないことを確認した。一部動作範囲が設計値よりも狭い箇所があることを確認した。</p> <p>【課題】 動作範囲の修正が必要</p>	<p>動作範囲が狭い事象の解決のため、姿勢制御機構の一部設計見直し（改良）を行う。試験にてその効果を確認する。</p> <p>⇒(2)実施内容 2) 姿勢制御機構の改良</p>

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 背景 (続き)

No.	2022年度までの検討項目	2022年度の検討結果概要	課題への対応策
3	<p>2022年度に以下の項目について検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 調査装置 (カメラ) による開口の通過可否の判断やテレスコパイプ姿勢の補正方向の判断可否の評価 ➢ 取り出し用アーム型アクセス装置先端の定点カメラによるテレスコパイプの通過クリアランスや伸展量の認識可否の評価 	<p>【検討内容】 シミュレータを用いて、穴への位置合わせ時に、調査装置 (カメラ) /取り出し用アーム型アクセス装置先端の定点カメラで得られると想定される模擬映像画像を取得した。また、位置ずれがあった場合に得られる模擬映像画像を取得した。</p> <p>【検討結果】 開口中心位置に対する位置合わせは、カメラ映像を基に判断可能。一方で、映像のみでは開口部の通過可否の判断は困難であった。 テレスコパイプ姿勢は、大きく傾いている場合を除き、映像のみでの傾きの判断は困難であった。</p> <p>【課題】 開口部寸法を判断できる機能が必要 テレスコパイプ自身の傾きを判断できる機能が必要</p>	<p>開口部寸法を判断できる機能を追加するため、ソフトウェアの試作を行う。試験にてその機能を確認する。 ⇒(2)実施内容 5)調査装置 (カメラ) の取得映像処理方法の検討</p> <p>テレスコパイプ自身の傾き検知機能を追加するため、センサの搭載、代替案としてレーザーポインタを用いた検知方法を検討する。試験にてその効果を確認する。 ⇒(2)実施内容 3)傾き検知方法の検討</p>
4	<p>2021年度に以下の項目について検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 調査装置 (カメラ) 外形設計 	<p>【検討内容】 調査装置 (カメラ) はPCV内部調査用に開発したものを活用することとし、上向き運用する際の防水対策について検討した。</p> <p>【検討結果】 調査装置 (カメラ)) を上向きで運用する場合、炉内の冷却水が調査装置 (カメラ) に溜まる可能性があることから、ドレン用のスリット等を設けることとした。また、接合部等にはシール強化等の対策を図る方針とした。</p> <p>【課題】 設計のみのため、試作しての機能確認が必要</p>	<p>これまでの検討を踏まえ、調査装置 (カメラ) の詳細設計・試作・試験を行い、その機能・性能を確認・評価する。 試作範囲等は、機能確認が必要な項目を踏まえて決定する。 ⇒(2)実施内容 4)調査装置 (カメラ) の試作・試験</p>

5. 下部アクセス調査工法の開発

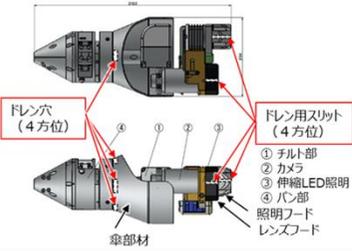
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 課題への対応方針

- 2023年度の実施項目（下表1）～5））は、それぞれ2022年度までに試作した14段テレスコパイプ（(1) 2022年度までの成果 参照）を用いた試験・単体要素試験・その他（シミュレーション）にて、検証を行う。

記号の凡例
○：対象，－：対象外

		試験種類		
		14段テレスコパイプを用いた試験	単体要素試験	その他
試験設備／装置イメージ		次頁参照		－
実施項目	1)非常時収縮の対策検討	○	－	－
	2)姿勢制御機構の改良	○	－	－
	3)傾き検知方法の検討	○	－	－
	4)調査装置の試作・試験	－	○ カメラの単体要素試験で対応予定	－
	5)調査装置カメラの取得映像処理方法の検討	○ 開口部の寸法測定機能の確認	－	○ 天球画像の作成は、試験に代わりシミュレーションで対応

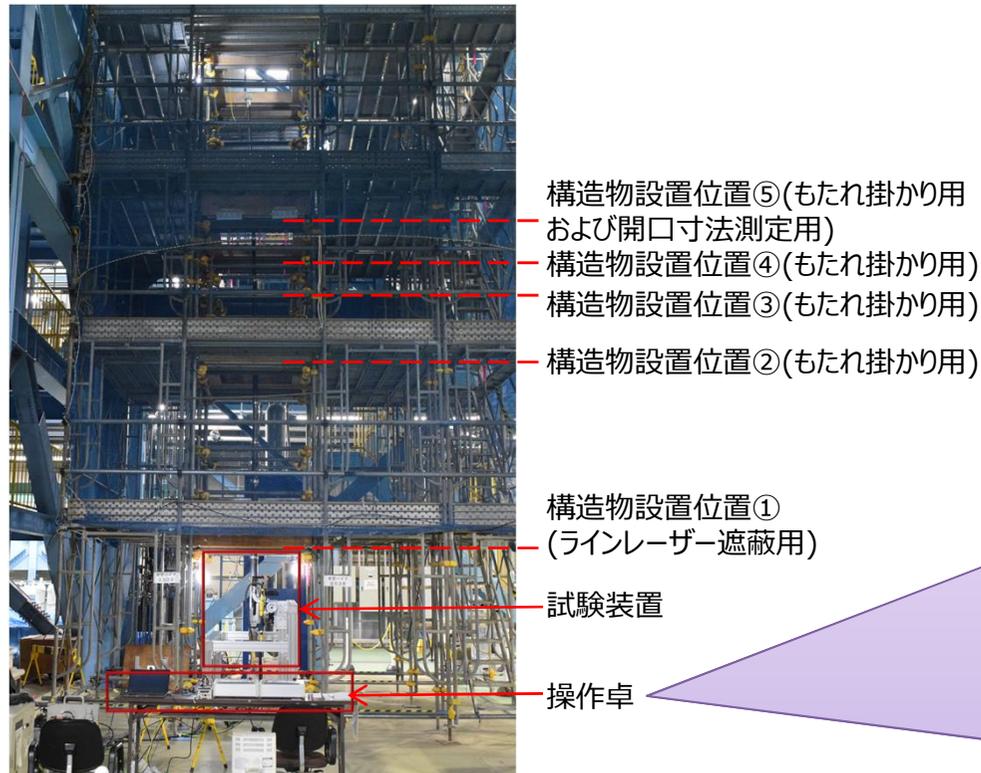
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

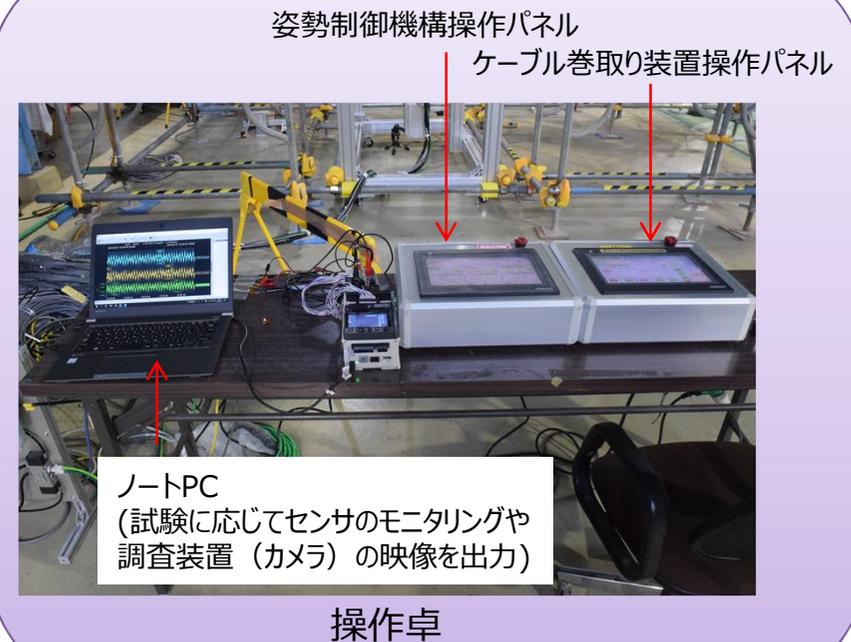
◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 課題への対応方針

- 14段テレスコパイプを用いた試験の試験設備・試験体系は下図の通り。



構造物設置位置①～⑤にそれぞれ対応する模擬開口の設置高さ
 ①グリッドプレート下面高さ、②CRD挿入引抜配管上側高さ
 ③インシュレーション下面高さ、④インシュレーション上面高さ、
 ⑤RPV底部開口高さ



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

■ 実施概要

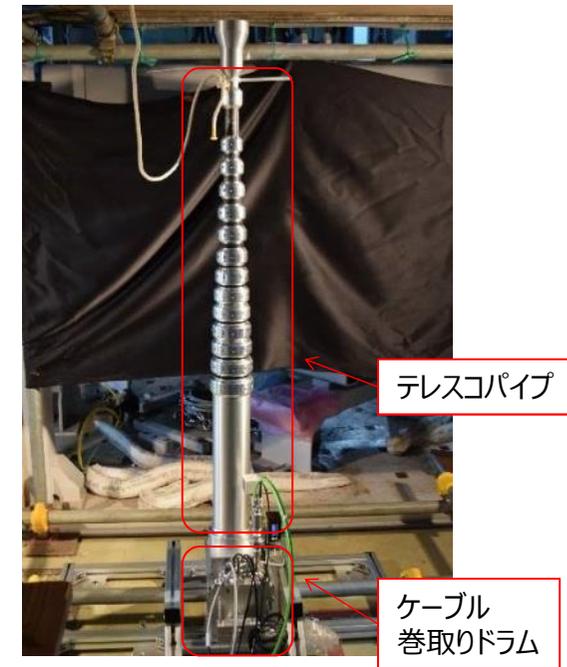
- テレスコピック式アクセス装置は、ケーブル巻取りドラム故障時には、パイプ内圧の減圧のみで収縮動作を行うが、これまでの試験結果で、テレスコ全伸展状態からパイプ内圧を減圧するとテレスコパイプが徐々に傾斜し、収縮できなくなること等の課題を確認。
- 2022年度までに、[非常時収縮の対策として傾斜挙動の抑制、間隙低減によるガタ抑制などを検討したが、これら対策の有効性は確認できていない](#)。2023年度は、2022年度に引き続きテレスコパイプの非常時収縮の対策検討として、以下の検討を行った。

① テレスコパイプの一部アルミ化

- ✓ テレスコパイプは製作性の観点等からCFRP※を使用している。
- ✓ 一方、2022年度の検討にてアルミ製パイプの製作性にも目途がついていることから、[テレスコパイプの一部（上部3段分）を摺動抵抗の少ないと考えられるアルミ製パイプ化およびパイプ接合部の構造見直し](#)を行い、非常時収縮が可能かを試験にて確認する。

② 非常時収縮の運用検討

- ✓ [パイプ内圧力を減圧した際に傾く挙動が解消できない場合、周辺の構造物にもたれ掛かりながら収縮することで傾きを抑制する等、運用面での対策を検討し、これらの動作が可能かを試験にて確認](#)する。



テレスコパイプとケーブル巻取りドラム

※CFRP：炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics）

5. 下部アクセス調査工法の開発

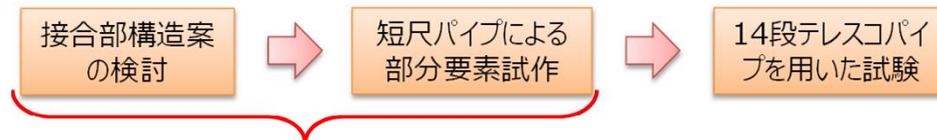
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

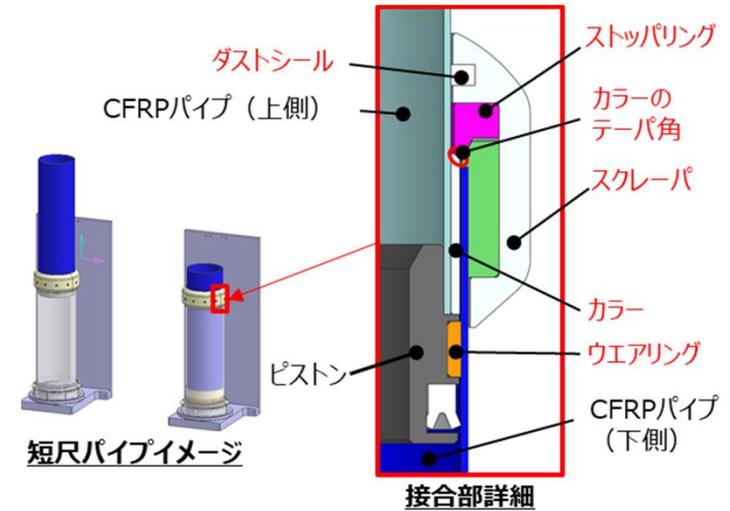
■ パイプ接合部の構造見直し

- ①テレスコパイプの一部アルミ化のうち、パイプ接合部の構造見直しについて以下フローの通り実施



本項目実施部分

- 以下の案1～3について、[短尺パイプ \(右図\)](#) で部分要素試作し、[要素評価を実施](#)。ガタの量、摺動抵抗の小ささ等から総合的に評価し、14段テレスコパイプの接合部に採用することとし、改造を行った。



	2022年接合部 テーパ角45°	案1 テーパ角90°	案2 ウエアリング追加	案3 摺動ストップリング
外観				
1. テーパ角	45°(15°,30°と比較し選定)	90°	45° or 90°	45° or 90°
2. スクレーパ	ウエアリング無し	ウエアリング無し	ウエアリング追加	ウエアリング無し
3. ストップリング	アルミ	アルミ	アルミ	樹脂 (超高分子量ポリエチレン)
4. ダストシール	フェルト材	フェルト材	フェルト材	フェルト材

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

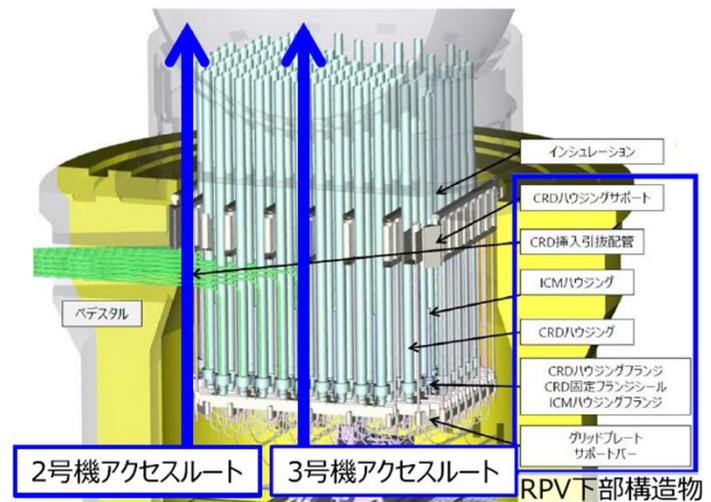
■ 非常時収縮の運用検討

- 14段テレスコパイプを用いた試験では、想定される実機の条件に近づけるため、RPV内部構造物の部分模擬体を用意した。
- RPV内部構造物の部分模擬体は、下表に示す2/3号機の主要な想定条件をもとに検討を行う。
- 以下の観点から、本事業ではRPV下部開口寸法の条件を除き、3号機の想定条件ベースで部分模擬を行うこととした。
 - ✓ アクセスルート周囲の構造物が多く、テレスコパイプの伸展時に引っかかるリスクが高いこと。
 - ✓ レーザーポインタの照射光路上に構造物が多く、光路に対する制約が厳しいこと。

2/3号機の主要な想定条件

#	項目	2号機	3号機
1	実機状態	ペDESTル上部構造物の一部脱落はあるが、大規模な損傷はない。	CRDはいくつか脱落している。
2	RPV下部開口部位置	CRDハウジング46-39近傍	CRDハウジング38-35の位置
3	RPV下部開口部の外径	187mm	284mm
4	RPV下部開口部から下の構造物の状態	RPV下部開口部から下にΦ187mmの円筒状の空間が存在	RPV下部開口部から下にΦ284mmの円筒状の空間が存在

備考：開口部の位置・外径については、P170参照



3号機のアクセスルートの方がRPV下部構造物内を通過するため、引っかかりのリスクが高く、レーザーポインタの照射光路付近に構造物が多く光路に対する制約が厳しい

5. 下部アクセス調査工法の開発

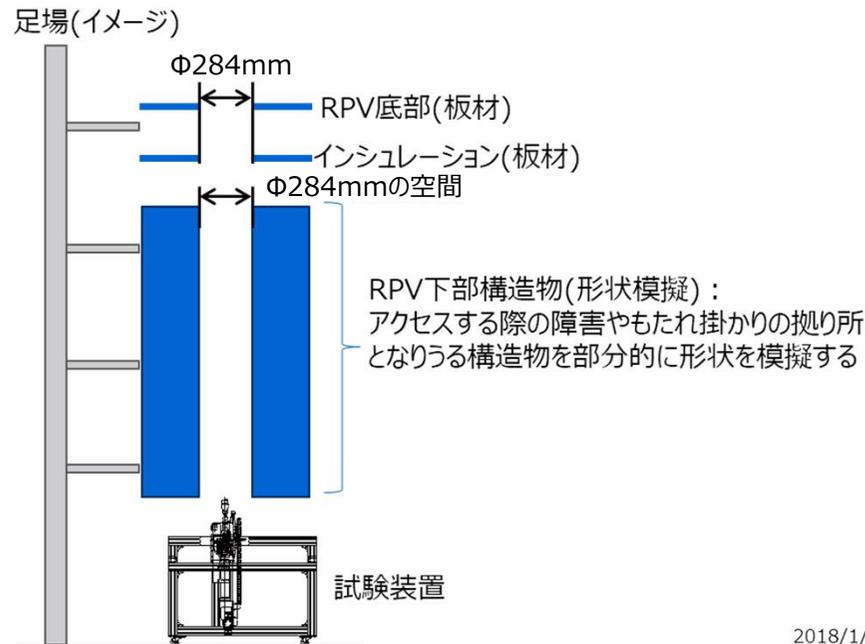
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

■ 非常時収縮の運用検討

- CRDハウジング等のRPV下部構造物の模擬体については、テレスコパイプがアクセスする際の障害となり得るもの、もたれ掛かりながら非常時収縮する際に拠り所となり得るものを部分的に模擬する。
- RPV底部やインシュレーションは板材に穴を開けたものを模擬体とする。
- 開口はもたれ掛かりながら非常時収縮する際に厳しい条件となる3号機の想定寸法とする。(伸展時の通過性評価としては想定開口が小さい2号機が厳しい条件となるが、先端位置ずれ量を下げ振りを用いて測定し、2号機の通過可否を評価するものとした。)



2号機のRPV下部構造物下端の様子

2018/1/19 東京電力HD(株)発行
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 (速報) より抜粋

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験計画）

➤ 非常時収縮の対策検討に関する14段テレスコパイプを用いた要素試験は、以下の1～4を対象に実施することとした。

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）
1	伸縮動作の確認	テレスコパイプの傾斜抑制対策として各パイプの接合部構造を改良したテレスコパイプを用い、これまでのテレスコパイプと同様に伸縮動作できることを確認する	供給圧力(0.1MPa)で伸展，ケーブル巻き取り装置で収縮できること
2	伸展時の鉛直度評価	各パイプの接合部構造の改良効果について，伸展動作時の傾き量を測定して2022年度に試作したテレスコパイプの試験結果と比較評価する	2号機 ^{※1} の想定開口を通過可能な先端位置ずれ量として，先端位置ずれ量が30mm以内 ^{※2} であること
3	ガタ評価	各パイプの接合部構造を改良したことによる，テレスコパイプ伸展時のガタ量の低減効果について，2021年度 ^{※3} に試作したテレスコパイプの試験結果と比較評価する	2021年度試作したテレスコパイプと比べガタ量が減少していることとし，ガタ量が片側144mm以内であること
4	非常時収縮の可否評価	①各パイプの接合部構造を改良したことによる全伸展時の鉛直度の改善，②先端3段はアルミ製パイプにしたことによる摺動抵抗の低減により，テレスコパイプ内を減圧した際にテレスコパイプが5.5deg以上（パイプ強度の設計上限）に傾斜しないで収縮できること，傾斜した場合も周囲の構造物にもたれ掛かりながら非常時収縮可能であるか確認する もたれ掛かり用構造物： ・RPV炉底部 ・インシュレーション ・CRDハウジングサポート ・CRD挿入引抜配管 それぞれ3号機 ^{※4} の想定開口径Φ284mmの開口を設けた平板を設置	減圧（最大-0.092MPa）で収縮できること ①もたれ掛かり用構造物なし ・先端傾斜角5.5deg以内（パイプ強度の設計上限） ②もたれ掛かり用構造物あり ・構造物に引っかからずに収縮

※1 3号機よりも想定開口径が小さいため，より厳しい条件

※2 2号機の想定開口Φ187mm，調査装置直径がΦ126mmであり，片側のクリアランスが約30mmとなることから条件として設定

※3 2022年度に試作した14段テレスコパイプよりガタが少ない2021年度のガタ量を条件として設定

※4 2号機よりも想定開口径が大きいため，より厳しい条件

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

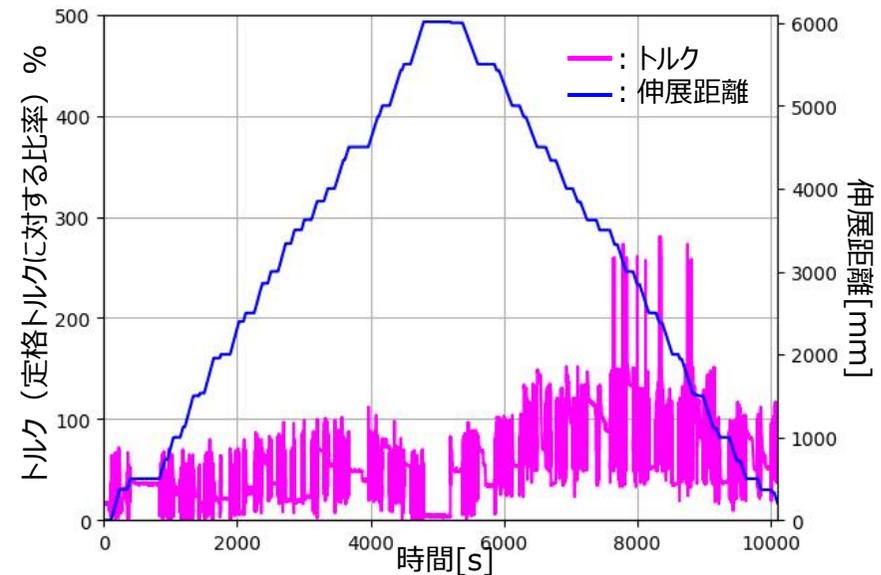
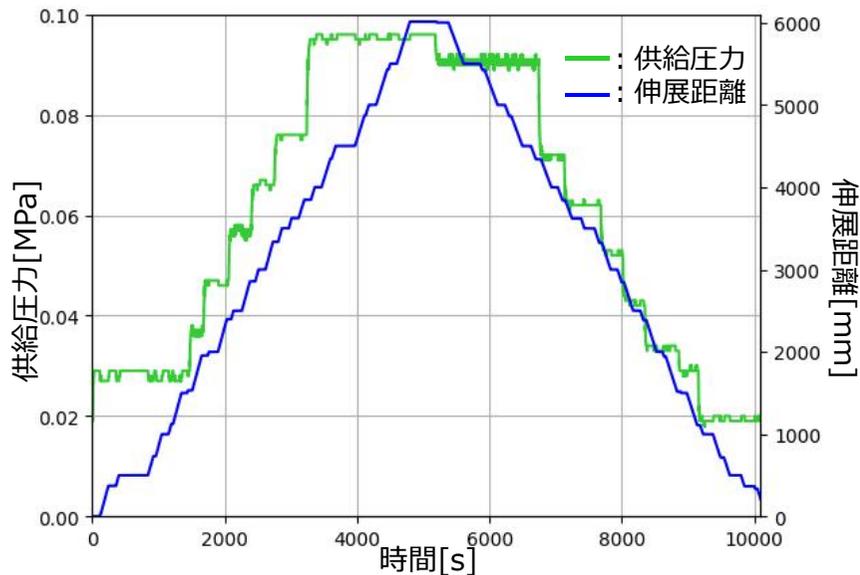
◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験結果）（1/4）

- ▶ 本年度改良したテレスコパイプにおいても問題なく伸縮動作ができることを確認した（詳細は以下参照）。
- ▶ モータトルクは過年度までと同様に定格トルクに対して100%を超えることがあるが、一時的であること、モータドライバの過負荷エラーも出なかったことから、伸縮動作には問題ないと評価した。

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）	試験結果
1	伸縮動作の確認	テレスコパイプの傾斜抑制対策として各パイプの接合部構造を改良したテレスコパイプを用い、これまでのテレスコパイプと同様に伸縮動作できることを確認する	供給圧力(0.1MPa)で伸展、ケーブル巻き取り装置で収縮できること	【達成】伸展・収縮ともに問題なく実施できることを確認した



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

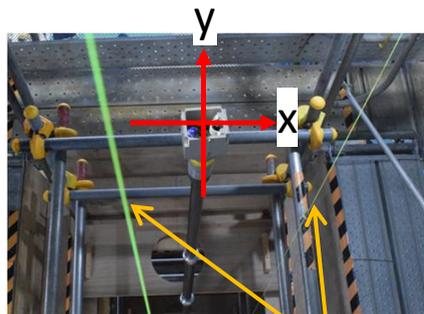
◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

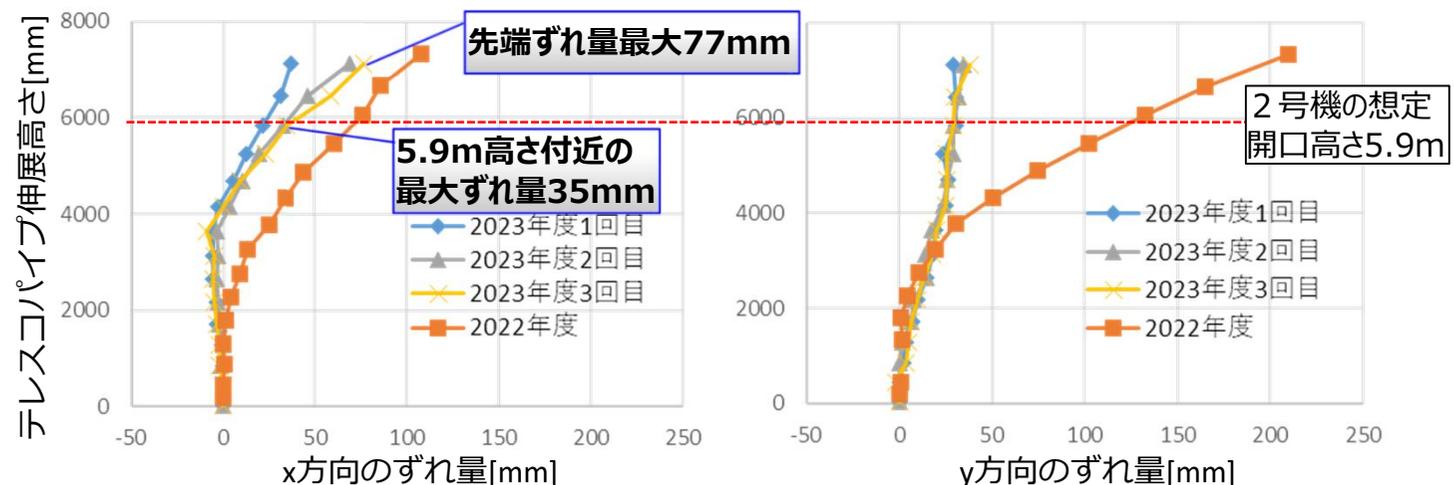
■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験結果）（2/4）

- 伸び切ったテレスコパイプについて、各パイプの先端から下げ振りまでの距離を測定し、水平XY方向のずれ量を測定した。2022年度のテレスコパイプのずれ量は最大約210mmであったが、本年度のテレスコパイプでは最大77mmと1/3程度に抑えることができた。
- 目標の先端ずれ量30mm以内は達成できなかったが、2号機の想定開口高さ5.9mに近い高さ(12段目先端高さ5.83m)の最大ずれ量は35mmであり、姿勢制御機構のα軸機構※を0.05°動かせば開口高さで水平に5mm動かすことが可能なため、[姿勢制御機構により調整を行うことで開口を通過できることを確認した](#)。

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）	試験結果
2	伸展時の鉛直度評価	各パイプの接合部構造の改良効果について、伸展動作時の傾き量を測定して2022年度に試作したテレスコパイプの試験結果と比較評価する	2号機の想定開口を通過可能な先端位置ずれ量として、先端位置ずれ量が30mm以内であること	【一部未達（有意な問題なし）】 ずれ量は最大77mmと目標より大きい結果であった。但し、姿勢制御機構の調整で対処可能であり、有意な問題はないことを確認した



鉛直度評価用下げ振り



※詳細は「2）姿勢制御機構の改良（P.141～144）」を参照

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験結果）（3/4）

- 伸び切ったテレスコパイプについて各パイプに曲げ方向の力をx方向と-x方向にかけ、鉛直度評価と同様にx方向についてのみ下げ振りまでの距離を測定した。
- 2021年度のテレスコパイプよりも1/2程度に抑えることができた。

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）	試験結果
3	ガタ評価	各パイプの接合部構造を改良したことによる、テレスコパイプ伸展時のガタ量の低減効果について、2021年度※に試作したテレスコパイプの試験結果と比較評価する	2021年度試作したテレスコパイプと比べガタ量が減少していることとし、【達成】ガタ量は片側107mm以内であること	【達成】ガタ量は片側107mm（最大）であり、目標を達成したこと



3段目パイプに曲げ方向の力をかけてガタを潰している様子

※ 2022年度に試作した14段テレスコパイプよりガタが少ない2021年度のガタ量を条件として設定

ガタ量の測定結果

		テレスコパイプ	
		2023年度	2021年度
ガタ量 [mm]	+x方向	107	218
	-x方向	-69	-144

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

1) 非常時収縮の対策検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験結果）（4/4）

- もたれ掛かり用構造物なし／ありの両条件ともに、計画目標を達成した。

【もたれ掛かり用構造物無し】

- ✓ テレスコパイプ内の減圧により徐々に傾いたが、テレスコパイプの傾斜角が約3.5deg程度まで傾くと傾斜挙動が止まり、その後α軸機構でテレスコパイプを鉛直姿勢に近付けることで非常時収縮できた。

【もたれ掛かり用構造物有り】

- ✓ テレスコパイプ内の減圧により徐々に傾いたが、構造物にもたれ掛かることで傾斜挙動が止まった(テレスコパイプの傾斜角1.5deg)。α軸機構で構造物への引っ掛かりが解消でき、非常時収縮できた。
- 収縮に伴いテレスコパイプ内のケーブルが根元側に詰まるため2022年度と同様に完全に収縮することはできず、最大180mm飛び出す結果であったが、非常時の救援・回収の一連の動作に影響はない（構造物等への干渉がない）ことをCADで確認済。
- 先端側3段が縮みにくい傾向は2022年度と変わらず、アルミ製にした効果は確認できなかった。



非常時収縮で縮んだ
テレスコパイプ

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）	試験結果
4	非常時収縮の可否評価	①各パイプの接合部構造を改良したことによる全伸展時の鉛直度の改善、②先端3段はアルミ製パイプにしたことによる摺動抵抗の低減により、テレスコパイプ内を減圧した際にテレスコパイプが5.5deg以上（パイプ強度の設計上限）に傾斜しないで収縮できること、傾斜した場合も周囲の構造物にもたれ掛かりながら非常時収縮可能であるか確認する	減圧（最大-0.092MPa）で収縮できること ①もたれ掛かり用構造物なし ・テレスコパイプの傾斜角5.5deg以内（テレスコパイプ強度の設計上限） ②もたれ掛かり用構造物あり ・構造物に引っかからずに収縮	【達成】 完全に収縮することはできず、最大180mm飛び出す結果であったが、非常時の救援・回収に影響ないことを確認した。 ①テレスコパイプの傾斜角が約3.5degであり、設計強度上問題ないことを確認 ②α軸機構で構造物への引っ掛かりが解消でき、非常時収縮できることを確認

5. 下部アクセス調査工法の開発

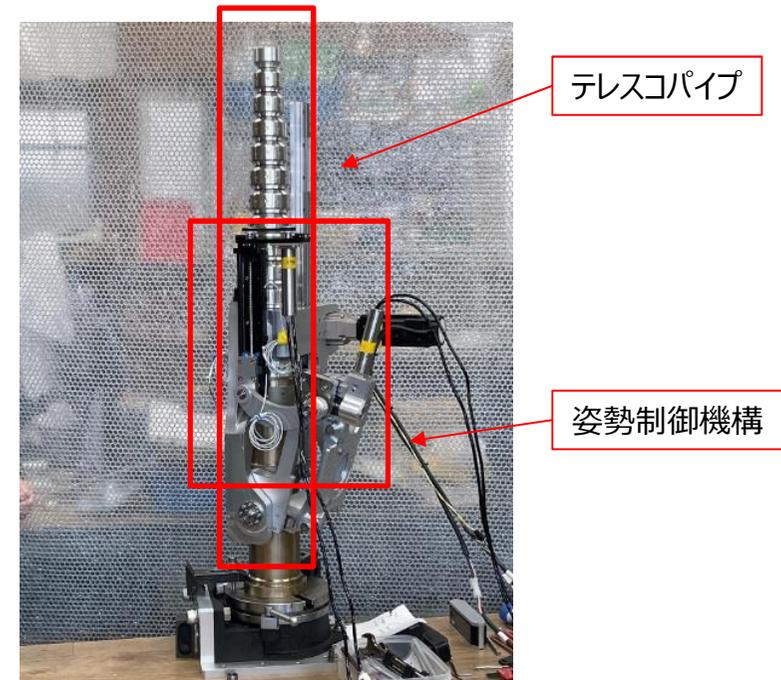
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

2) 姿勢制御機構の改良

■ 実施概要

- テレスコピック式アクセス装置はペDESTAL到達後、鉛直姿勢に姿勢を調整するが、取り合うアーム型アクセス装置のみではテレスコピック式アクセス装置を鉛直姿勢に出来ない。
- このため、2022年度の検討において、[テレスコピック式アクセス装置を鉛直姿勢にするために必要な姿勢制御機構](#)の詳細設計／製作／試験を実施。
- 2023年度は、2022年度に得られた結果を踏まえ、[姿勢制御機構の改良](#)を行った。



[テレスコパイプと姿勢制御機構](#)

5. 下部アクセス調査工法の開発

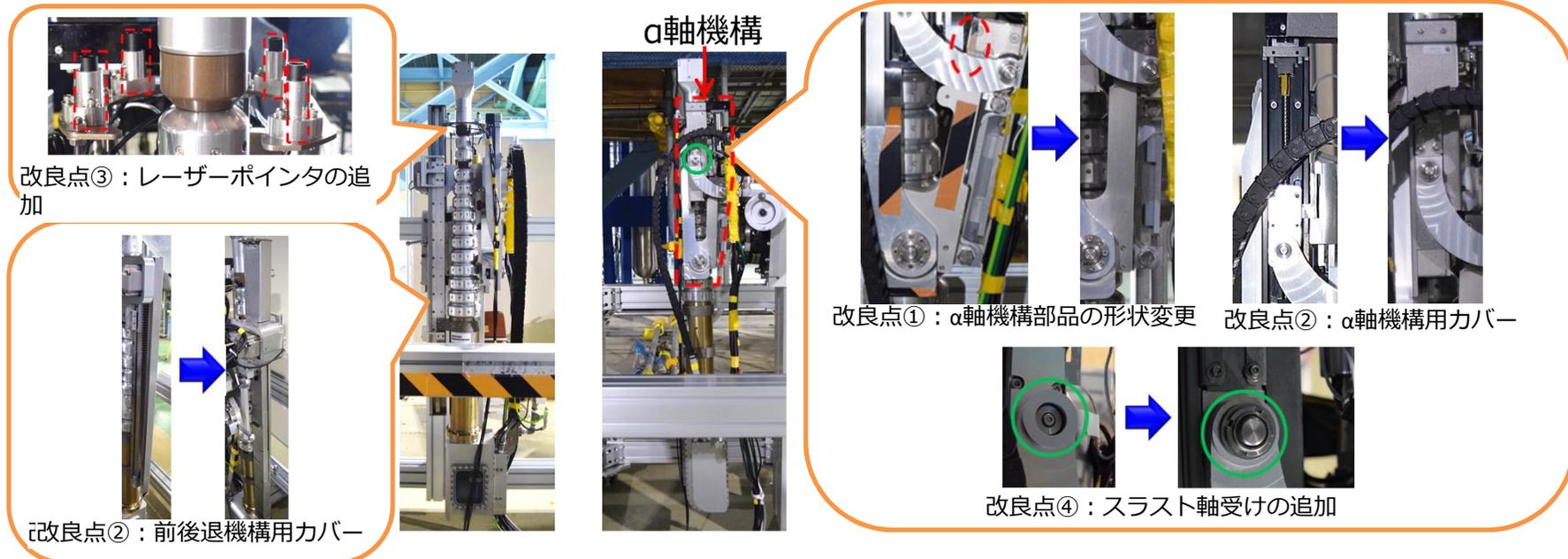
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

2) 姿勢制御機構の改良

■ 改良内容

- ▶ 姿勢制御機構の改良として、改良点を抽出。以下の改良点①～④について、改造を実施した。
- ✓ 改良点①：部品干渉によりテレスコパイプを鉛直に建て起こすための可動軸の一つ（ α 軸：下図参照）の可動範囲が不足しているため、部品形状を変更して可動範囲を拡大
 - ✓ 改良点②：実環境を想定して異物の噛み込みにより動作不良が懸念される箇所へカバーを追加
 - ✓ 改良点③：傾き検知用機器の取り付け
 - ✓ 改良点④： α 軸のガタつき抑制のためにスラスト軸受けを追加



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

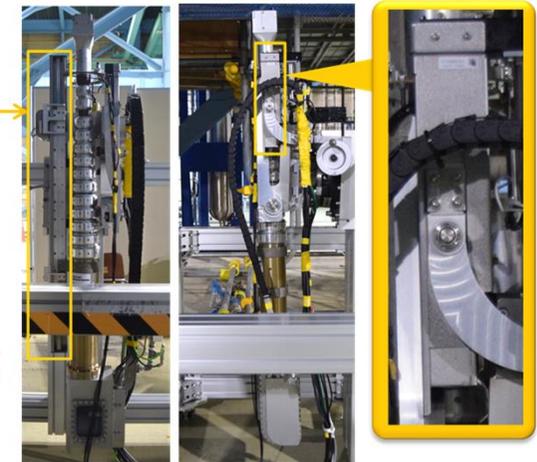
◆ (2) 2023年度 実施内容

2) 姿勢制御機構の改良

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験計画／試験結果）（1/2）

- 新たに異物付着防止カバーを追加した姿勢制御機構を動かし、各軸の可動範囲を評価した（各機構の動作は次頁参照）。
 - ✓ α軸機構：本年度、干渉部材の形状を見直したことにより、可動範囲の要求仕様を満たせることを確認
 - ✓ β軸機構：2022年度から改良等行っていないが可動範囲に変化が無いことを確認した。
 - ✓ 前後退機構：カバーを追加したことで可動範囲が狭まり要求仕様を満たせなかった。但し、可動範囲を制約しているカバーの切り欠き範囲を拡張する等の簡易的な改良で要求仕様を満たせる見込み。

前後退機構
用カバー



α軸機構用カバー

異物付着防止カバー取り付け後の
テレスコピック式アクセス装置

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）	試験結果
5	各軸の可動範囲評価	可動範囲の拡大改良と異物付着防止カバーを追加したα軸機構と、異物付着防止カバーを追加した前後退機構について、動作の仕様範囲を問題なく動かせることを確認する（β軸についても動作範囲に影響が無いことを併せて確認する）	α軸 : 0~13deg以上 β軸 : 20mm以上 前後退機構 : 499mm以上	【一部未達（有意な問題なし）】 α軸 : -0.4deg~+13.7deg β軸 : 22mm 前後退機構 : 494mm* *:簡易的な改良で要求仕様を満たせる見込み

5. 下部アクセス調査工法の開発

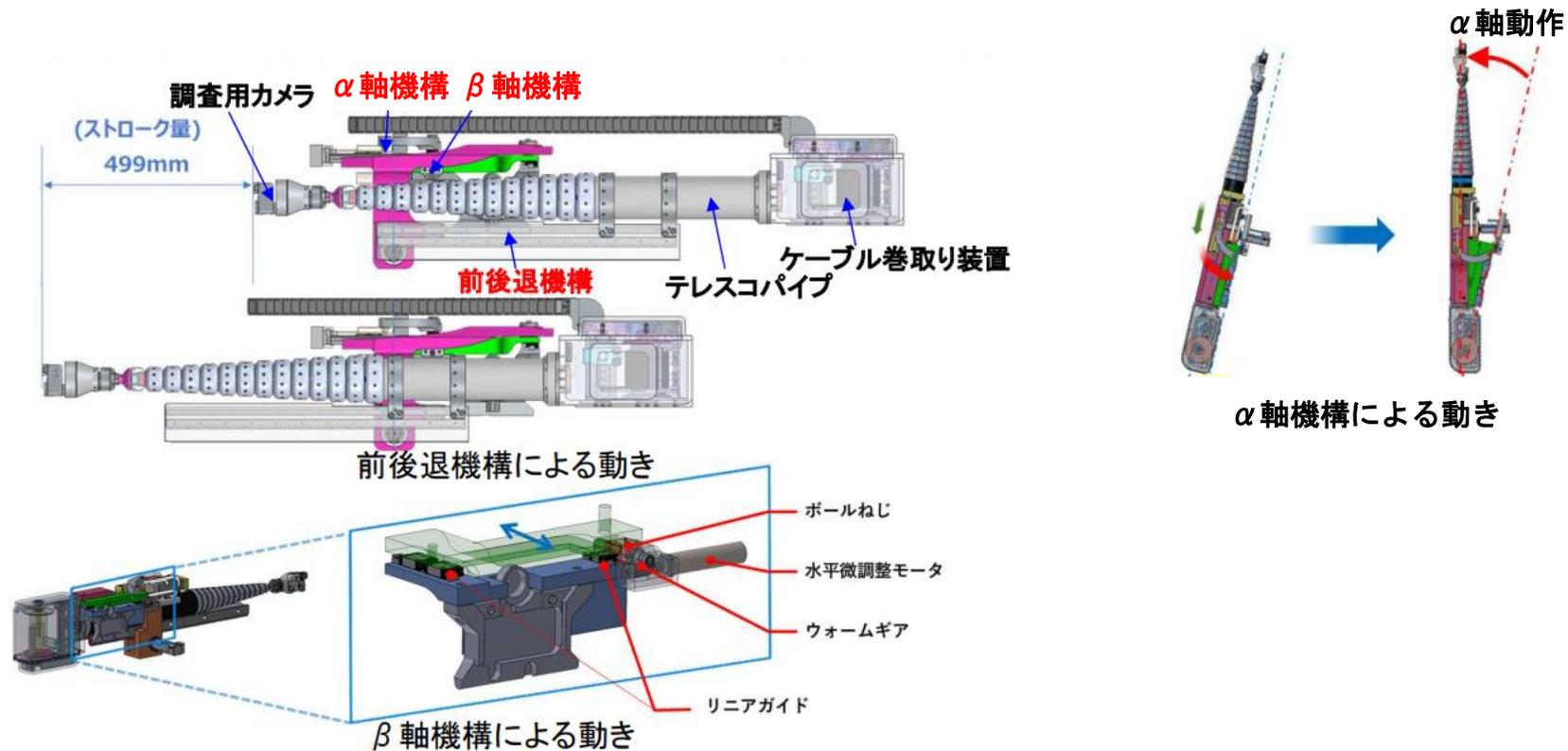
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

2) 姿勢制御機構の改良

■ 14段テレスコパイプを用いた試験 (試験計画/試験結果) (2/2)

➤ 各軸機構の動作説明図を下図に示す。



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

3) 傾き検知方法の検討

■ 実施概要

- テレスコピック式アクセス装置はペDESTAL到達後、鉛直姿勢に姿勢を調整するが、2022年度の検討ではカメラ映像のみで鉛直姿勢と判断することが困難であった。
- このため、2023年度では、傾きを判断するためのセンサ（加速度計等）の選定を行った。
- 選定したセンサをテレスコピック式アクセス装置に組込んだ状態で14段テレスコパイプを用いた試験を行い、適用性を確認した。
- なお、テレスコの伸展速度は約3mm/秒と低速であり、伸展中に揺れる恐れがないため、ジャイロセンサ等は不要であると評価
- また、傾き検知方法として、レーザーポインタを用いた検知方法も候補としており、センサの代替案として並行に検討した。
- 選定した傾き検知方法のうち、耐放射線性が不明なものについて、確認のために照射試験を行った。

テレスコパイプが鉛直の場合



テレスコパイプが3°傾いている場合



2022年度のシミュレーションによる検討

■仕様

- ・測定レンジ：2g, 8g ※ピンによる切り替え
- ・電源：2.25V~3.6V
- ・消費電流：150μA
- ・基板サイズ：約18x12.7mm
- ・重量：1g
- ・動作温度：-40~+125℃
- ・鉛フリー、RoHS対応、金フラッシュ、MADE IN JAPAN



適用するセンサ（加速度センサの一例）

⇒ 大きく傾いている場合を除き、映像のみでの傾きの判断は困難と評価

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

3) 傾き検知方法の検討

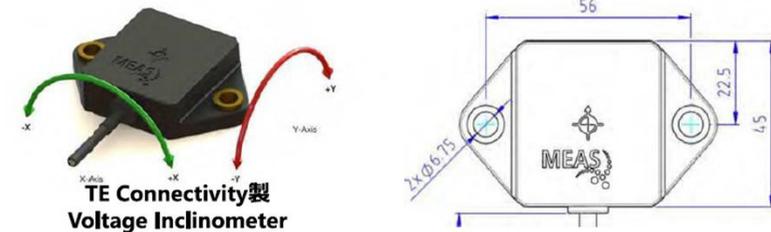
■ センサ等の選定 (1/3)

① ケーブル巻取り装置用傾斜センサ

- ケーブル巻取り装置に取り付け、装置の鉛直度を測定する。
- 「姿勢制御機構（α軸）の可動範囲を含む、鉛直方向に対するロール角とピッチ角の測定範囲が±14°以上である」、「想定しているケーブル長40m以上でも少ない回路構成で通信でき、放射線による破損リスクを抑えられる」、それぞれの観点からアナログ信号出力であることを条件に選定した。

② 調査用装置加速度センサ

- 調査装置に組み込めるサイズの小型傾斜センサが無いため、3軸加速度センサを用いて傾斜角を算出する。
- サイズを満足する候補は複数あるが、傾斜センサと同様の理由からアナログ信号出力のものを選定した。



ケーブル巻取り装置用傾斜センサ



サイズ：18×12.7mm

3軸加速度センサモジュール
アナログ信号出力可能



サイズ：24×24×13mm

M5Stack用6軸IMUユニット



サイズ：43×18mm

Arduino Nano 33 BLE

通信距離が10m程度のシリアル通信出力のため、長距離通信を可能とする変換回路が別途必要

調査装置用加速度センサ

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

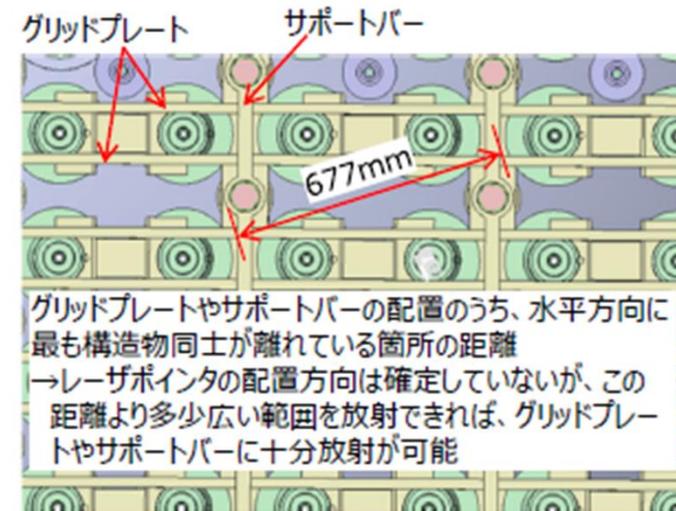
◆ (2) 2023年度 実施内容

3) 傾き検知方法の検討

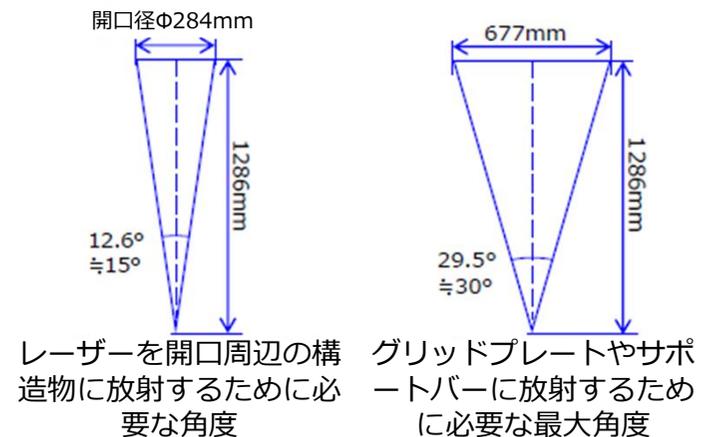
■ センサ等の選定 (2/3)

③レーザーポインタ

- レーザーポインタを用いた傾き検知の目的は、次の2点とし、レーザーポインタの選定を行うこととした。
 - A) RPV底部やインシュレーションの開口にテレスコパイプの位置・傾き調整するための目印を作る。
 - B) テレスコパイプの破損を防ぐために5度以上傾かないように調整する。
- 実機における炉底部の開口径は不明なため、裕度をもって対応できるよう、レーザー光の形状はライン型のものを検討する。
- レーザーポインタはRPV内部調査（上部アクセス）にて照射試験実績のあるQuarton社製のものから以下の方針に沿って選定した。
 - ✓ 調査装置用カメラの耐放射性試験の実績より、積算線量値が高くなると青色を認識しにくくなるため、レーザーの色は赤色を選定する。
 - ✓ レーザーを照射する構造物の一つである炉底部は約6m先にあるため、推奨照射距離は6mに近いものを選定する。
 - ✓ レーザーの放射角が大きいと減光して認識しづらくなるため、必要角度を満足する範囲で狭いものを選定する。レーザーポインタの設置高さとして想定開口径Φ284mm、またレーザーポインタからの距離が近い照射対象であるサポートバーやグリッドプレートの配置から検討し、最低15°必要で、30°あれば運用上十分なため、これらに近いものを選定する。



RPV下部構造物を下方から見上げた図



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

3) 傾き検知方法の検討

■ センサ等の選定 (3/3)

③レーザポインタ

➢ 前述の選定方針をもとに、Quatron社のラインレーザーのラインナップから下記2種類を選定した。

- ✓ VLM-635-55 LPO (クラス1レーザー, 光出力4~5mW, 放射角度60°)
- ✓ VLM-635-55 LPT (クラス1レーザー, 光出力9~10mW, 放射角度60°)

Model Number	VLM-635-27 series VLM-650-27 series	VLM-650-28 LPT	VLM-650-30 series	VLM-635-37 series VLM-650-37 series	VLM-650-41 series	VLM-635-55 series	VLM-635-56 series	VLM-635-57 series (TTL)	VLM-650-29 LPT	VLM-635-58 series	VLM-635-59 series (TTL)
Dimensions	Ø12.5 x 30 mm	Ø9 x 26 mm	Ø10 x 27.1 mm	(W)(H)14 x (L)26 mm	Ø10 x 26 mm	Ø10 x 38 mm	Ø10 x 40 / Ø10 x 45 mm	Ø10 x 40 / Ø10 x 45 mm	Ø9 x 26 mm	Ø10 x 40 / Ø10 x 45 mm	Ø10 x 40 / Ø10 x 45 mm
Operating voltage	2.6~6 VDC	2.6~6 VDC	3~6 VDC	2.6~6 VDC	3~6 VDC	3~6 VDC	3~6 VDC / 10~36V	3~6 VDC / 10~36V	2.6~6 VDC	3~6 VDC / 10~36V	3~6 VDC / 10~36V
Operating current	< 50mA / < 55mA < 35mA / < 100mA	< 35mA	< 40mA / < 60mA	< 50mA < 35mA / < 100mA		< 80mA / < 100mA	< 50mA / < 100mA 10mA / 15mA at 24V	< 50mA / < 100mA 10mA / 15mA at 24V	< 35mA	< 50mA / < 100mA 10mA / 15mA at 24V	< 50mA / < 100mA 10mA / 15mA at 24V
Optical power	< 2mW / 4~5mW < 2mW / 12~15mW	< 2mW	< 5mW / < 20mW	4~5mW / 12~15mW	< 2.5mW / < 20mW	4~5mW / 9~10mW	< 5mW / < 10mW	< 5mW / < 10mW	< 2mW	< 5mW / < 10mW	< 5mW / < 10mW
Laser power output	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW	< 0.39mW / < 1mW	< 0.39mW / < 1mW
Laser class	Class I / Class II	Class I	Class I / Class II	Class I / Class II	Class I / Class II	Class I / Class II	Class I / Class II	Class I / Class II	Class I	Class I / Class II	Class I / Class II
Wavelength	630~645nm / 645~665nm	645~665nm	645~665nm	630~645nm / 645~665nm	635~665nm	630~645nm	630~645nm	630~645nm	645~665nm	630~645nm	630~645nm
Collimating lens	Plastic lens	Plastic lens	Plastic lens	Glass lens	Plastic lens	Glass lens	Glass lens	Glass lens	Plastic lens	Glass lens	Glass lens
Line lens	Plastic lens	Plastic lens	Glass lens	Glass lens	Plastic lens	Glass lens	Glass lens	Glass lens	Plastic lens	Glass lens	Glass lens
Beam shape	Line	Line	Line	Line	Line	Line	Line	Line	Crosshairs	Crosshairs	Crosshairs
Laser Line width	3 ±0.5mm at 5M 6 ±0.5mm at 10M	1.2mm at 1M	< 1.2mm at 40CM	2±1mm at 5M 4±1mm at 10M	< 1.2mm at 40CM	3±0.5mm at 5M 6±0.5mm at 10M	Less than 1mm	Less than 1mm	1mm at 40cm	Less than 1mm	Less than 1mm
Laser line accuracy	40" (±1mm @5M)	1/100	4/1000 (<1.6mm @400mm)	20" (± 1mm @10m)	1/100	40" (±1mm@5M)	40" (±1mm@5M)	40" (±1mm@5M)	80" (+/- 2mm @5M)	40" (±1mm@5M)	40" (±1mm@5M)
Emitting angle	More than 90°	More than 60°	60° / 90°	More than 120°	60° / 90°	60°	5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 110°	5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 110°	More than 60°	10°, 15°, 20°, 30°, 60°, 110°	10°, 15°, 20°, 30°, 60°, 110°
Operating temp. range	+10°C ~+40°C	+15°C ~+30°C	+15°C ~+40°C	-20°C ~ +50°C	+15°C ~+40°C	-20°C ~+65°C	-20°C ~+60°C	-20°C ~+60°C	+15°C ~+30°C	-20°C ~+60°C	-20°C ~+60°C
Potential of housing	VDD(+)	VDD(+)	Insulated	Insulated	Insulated	Insulated	Insulated	Insulated	VDD(+)	Insulated	Insulated
Mean time to failure	10000hrs	10000hrs	10000hrs	10000hrs	5000hrs	10000hrs	10000hrs	10000hrs	5000hrs	10000hrs	10000hrs
Application	General industrial alignment	Economic 3D scanner	Precision 3D scanner	Precision industrial alignment	Precision 3D scanner	Precision industrial alignment	Precision fine line for all industries	Precision fine line for all industries with TTL function	Economic application	Precision fine crosshairs for all industries	Precision fine crosshairs for all industries with TTL function
Suggestion	Above 2 meters	0.3~1.8 meters / 1~6 feet	20~60 cm / 8"-24"	1~20 meters / 3~60 feet	20~60 cm / 8"-24"	1~20 meters / 3~60 feet	0~1.2 meters / 0~4 feet	0~1.2 meters / 0~4 feet	0~1 meter / 0~3 feet	0~1.2 meters / 0~4 feet	0~1.2 meters / 0~4 feet

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

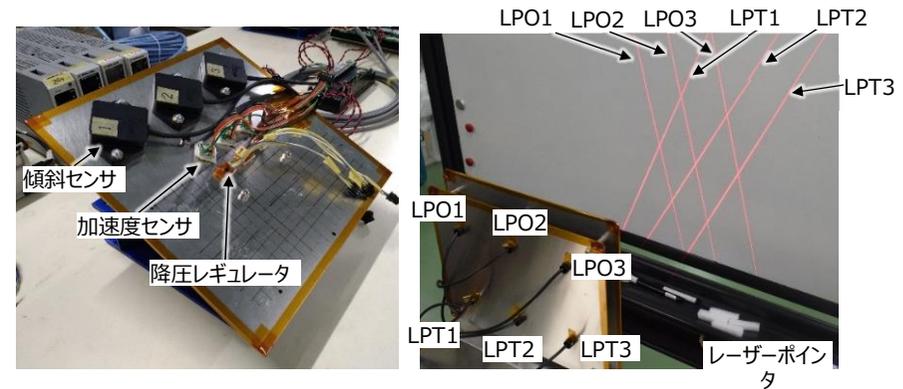
3) 傾き検知方法の検討

■ 耐放射線性試験

- 選定した加速度センサ・傾斜センサ・レーザーポインタに加えて、これまでに耐放射線性が確認できていなかった降圧レギュレータを対象に耐放射線性試験を実施した。
- 2022年度までに実施した調査装置（CMOSカメラ）の照射試験で1440[Gy]で色の異常が発生し、2060[Gy]で映像が途絶えたことから1440[Gy]が調査可能上限。本PJでは環境線量を100[Gy/h]と定義しており、右表の条件で出力信号電圧をモニタしながら照射を実施した。試験体は各3個を照射。

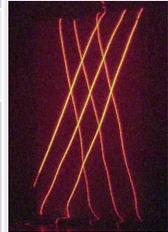
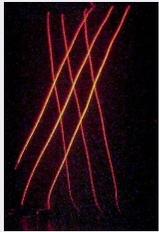
<試験結果>

- 加速度センサおよび降圧レギュレータは約270[Gy]までの耐放射線性であるため、100[Gy/h]の前提では調査装置への組み込みは困難と評価した。但し、270[Gy]までの耐放射線性はあるため、適用可能な環境は多くあり、今後の調査の進展により、適用の可能性も見込める。
- レーザーポインタは2種類ともに試験上限の2500[Gy]でも変化が無く、十分な耐放射線性があることを確認できたため、レーザーポインタを利用した傾き検知を採用する。
- ケーブル巻き取り装置に組み込み鉛直姿勢調整に利用する傾斜センサは低線量から信号がドリフトする結果となった。過去のPCV内部調査の結果から2号機ではケーブル巻き取り装置を利用するエリアの線量は約10[Gy/h]程度と小さいことや、装置筐体による遮蔽効果があるため、より低線量率での影響確認や今回約270[Gy]までの耐放射線性が確認された加速度センサを利用した構成の検討が必要。



	照射線量率（計画値）		照射時間
	加速度センサ 降圧レギュレータ※1 傾斜センサ	レーザーポインタ	
1日目	100[Gy/h]	200[Gy/h]	6[h]
2日目	250[Gy/h]	200[Gy/h]	6[h]
積算線量	2100[Gy]	2400[Gy]	合計12[h]

※1 加速度センサの電源3.3Vを供給するために調査装置電源の5Vから3.3Vに電圧変換する素子

	加速度センサ	降圧レギュレータ	傾斜センサ	レーザーポインタ	
①	270[Gy]から信号がドリフトして400[Gy]で出力停止	360[Gy]で出力不安定	125[Gy]からドリフト下降	0 [Gy]	2400 [Gy]
②	※2	350[Gy]で出力不安定	125[Gy]からドリフト下降		
③	出力変化が全く無く試験後に故障していることを確認。照射開始直後に故障した可能性あり。	270[Gy]で出力不安定	60[Gy]からドリフト下降		

※2 照射開始直前に故障したためデータなし

5. 下部アクセス調査工法の開発

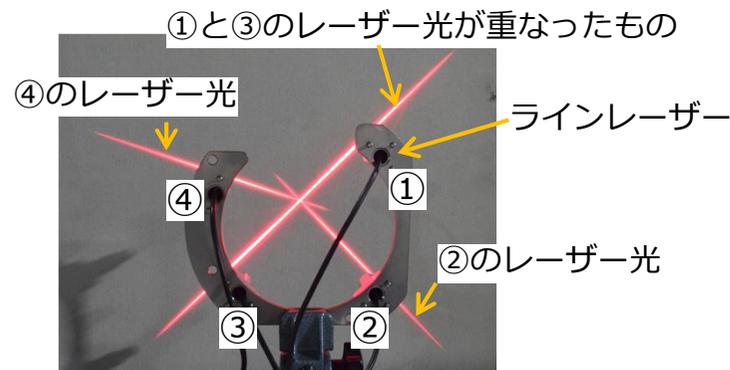
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

3) 傾き検知方法の検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験計画／試験結果）（1/2）

- ラインレーザーを用いたテレスコパイプの傾き修正手法の有効性を評価するため、テレスコパイプ先端にカメラを組み込み、ラインレーザーの見え方を基に姿勢制御機構により傾きを修正した。構造物はラインレーザー遮蔽用のものと開口寸法測定用のものを設置して評価した。
- 傾き修正のために実施した手順を以下に示す。
 - ① テレスコパイプ伸展前に、カメラ映像内におけるラインレーザーの交点を確認する（試験では映像をキャプチャしてラインレーザーの線を延長して確認した）
 - ② テレスコパイプを伸展させ、カメラの映像からラインレーザーの交点を確認できる範囲で可能な限り開口に近い高さで停止する
 - ③ ②で停止した位置で、再度カメラの映像内でラインレーザーの交点を確認する
 - ④ ①③で把握した交点位置の差から、傾き調整のための移動量を把握する
 - ⑤ 映像内で特徴点を見つけ、その特徴点が④で把握した分映像内で移動するよう姿勢制御機構およびアームチルト軸で傾き調整する



取り付け方位調整後のラインレーザー

※④は姿勢制御機構の他部品との干渉回避のため、②と位相が異なる

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

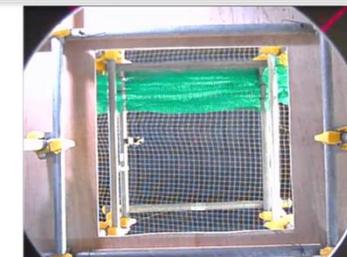
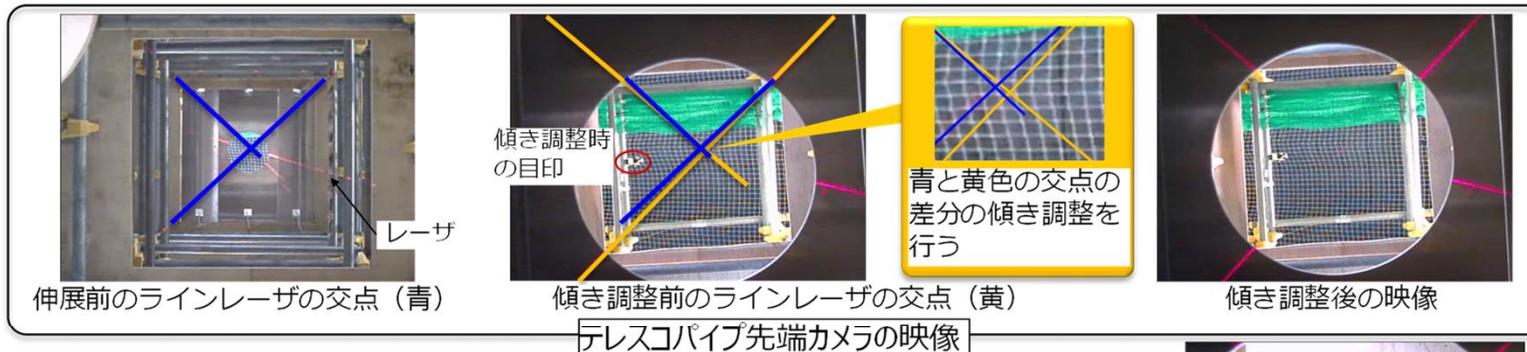
3) 傾き検知方法の検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験（試験計画／試験結果）（2/2）

- 検討した手順によりテレスコパイプ先端の傾きを鉛直方向に調整でき、[ラインレーザーを用いた傾き検知方法が有効であることを確認](#)した。
- [傾き調整後はテレスコパイプが開口に接することなく通過](#)できた。

No.	試験項目	概要	目標（判断基準）	試験結果
6	傾き検知方法の有効性評価	レーザーポインタを利用したテレスコパイプの傾き検知方法を用いて傾斜方向を判断し、姿勢制御機構で傾き調整することで開口を通過させることができることを確認する	3号機 ^{※1} の想定開口を通過できること	【達成】傾き検知方法が有効であることを確認。傾き調整後はテレスコパイプが開口に接することなく通過できた。

※1 2号機の想定開口位置はCRDの外側であるのに対し、3号機は全周囲にCRDがありレーザーを遮蔽する構造物が多い可能性があるため、3号機の方がより厳しい条件



カメラ映像で開口が見えなくなる直前の映像

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

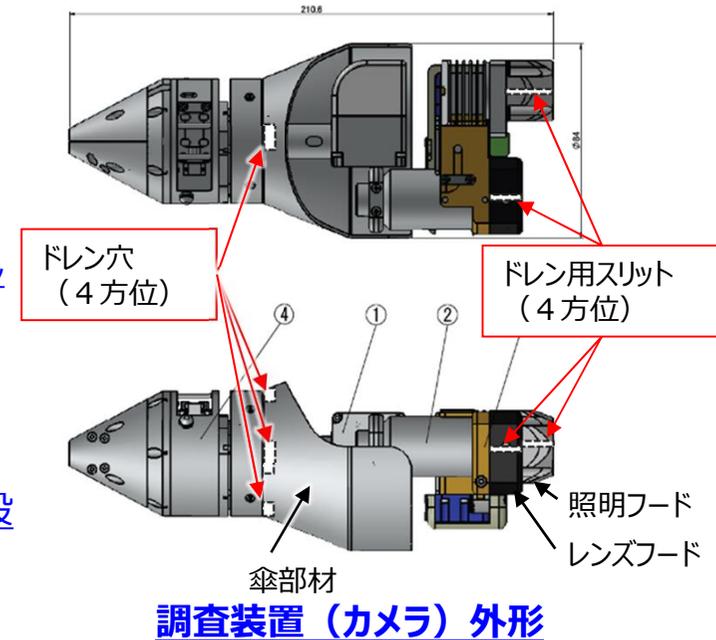
◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

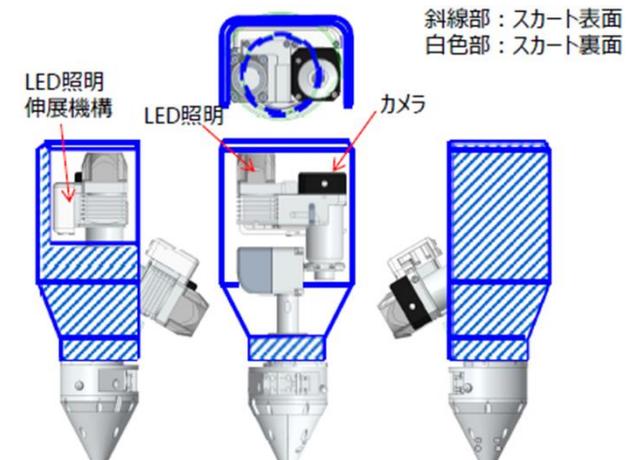
■ 実施概要

- 調査装置（カメラ）は、2021年度までに、[PCV内部調査用に開発したパン・チルト駆動軸付きのカメラを活用](#)する方針とし、向きの違い（PCV内部調査では調査装置用ケーブルにより吊り下ろして運用，本調査では上向きにして運用）より生じる課題として、[主に防水対策について検討](#)。
- 2023年度は、これまでの検討を踏まえ、[調査装置（カメラ）の詳細設計・試作・試験を行い、その性能を確認・評価](#)した。
- 調査装置（カメラ）のスカート部について以下の改良を実施した。
 - ✓ 構造物に囲まれた調査ルートを通過することを想定し、カメラやLED照明を保護するためにスカートの長さを延長
 - ✓ PCV内部調査では保護してなかったLED照明伸展機構も含めて保護すると従来の円柱型ではスカートが肥大化するため、カメラ側は直方体となるように形状を検討。照明伸展機構の動作方向にはスカートを設けない。

調査装置の仕様	
項目	仕様
外形	W83[mm]×H75[mm]×L210[mm]
質量	約0.7[kg]
搭載カメラ	カラー-CMOSカメラ
照明	LED照明（10[W]×1, カメラとの光軸間距離は可変で最大105[mm]）
視認範囲	287[°]（垂直面角27.0[°]+チルト130[°], パン±180[°]）
搭載センサ	線量計（1[Gy/h]～2000[Gy/h]測定可能）, 温度計（0～50[°C]、精度±0.5[°C]）, （参考情報として取得）
耐放射線性	1440[Gy]（CMOSカメラの耐放射線性より）



スカート改良方針



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 改良内容

➤ カメラ・照明フード内への水の溜まりや周囲環境の異物の排除のための改良を下記の通り実施した。

- ① 照明側のフードには、LED光が周囲の構造物に当たりカメラ映像の手前側が明るくなり過ぎないように、小さめの開口を設ける。
- ② 照明側／カメラ側のフードには、大きめの開口を設け、入り込んだ異物をチルト動作で流し落とせるようにする。
- ③ カメラ側のLED照明伸展機構に接する面は、異物が伸展機構側に流し落とされないよう埋める。



異物排除のためのカメラ・照明フードの改良内容

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 単体要素試験 (試験計画) (1/3)

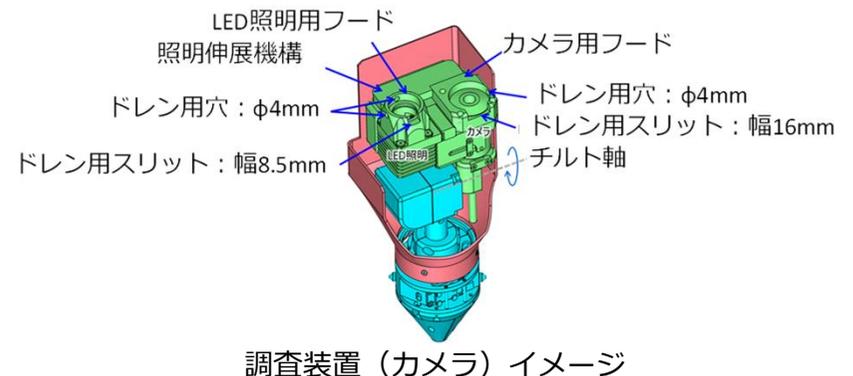
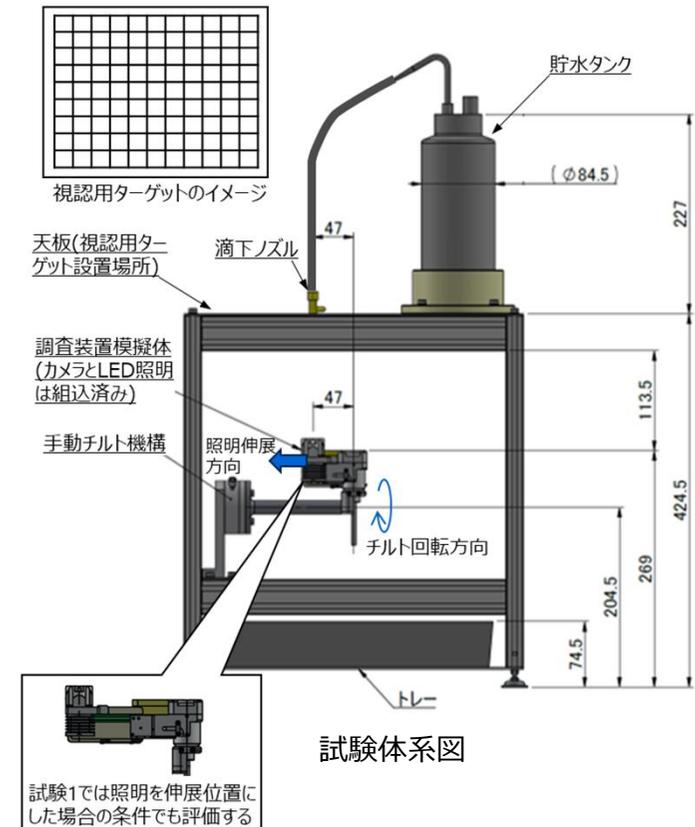
- 調査装置 (カメラ) に対して行う単体要素試験は、次の2項目について実施した。

<試験1> 改良フードの遮光効果確認

- ✓ 右の試験体系図の天板に視認用ターゲットを取り付けた状態で、LED照明の点灯前後の映像を比較し、カメラ映像にLED照明を点灯することによるハレーションや白飛びがないことを確認する (照明伸展あり/なしで評価)。

<試験2> ドレン用穴・スリットの効果評価

- ✓ 上向き状態でカメラレンズ面および照明レンズ面に水および模擬異物をレンズ面が覆われる程度付着させ、以下項目について評価する。
 - ① 水はドレン穴/スリットから排水できるか。
 - ② 模擬異物は滴下する水滴により流すことで除去できるか。
 - ③ 最大130°のチルト動作 (手動) により模擬異物を除去できるか。
- ✓ この時、水滴によるカメラ映像の歪み確認および除去できない場合の異物の影響確認を合わせて実施する。
- ✓ 模擬異物は、ドレン用穴のサイズ (φ4mm) を基準に、水の滴下のみで除去できる可能性があるφ4mm未満のサイズのもの2種類と、チルト動作すれば除去できる可能性があるφ4mmを超えるサイズのもの1種類用意して評価する。
- 評価対象箇所であるカメラおよびLED照明とそれらのフード (ドレン用穴・スリット付き) を含むチルト軸より先端側 (緑色部) を部分模擬して試験装置とする。なお、照明伸展機構の電動駆動機構は手動動作とする。



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

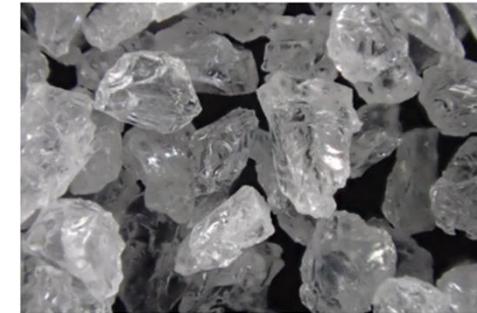
4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 単体要素試験 (試験計画) (2/3)

➤ 試験で使用する模擬異物

- ✓ 実調査では、調査装置が周囲の構造物に接した際に構造物表面を削り取り、カメラやLED照明のレンズ面に付着する可能性がある。過去のPCV内部調査（2号機）の結果から異物は固形物で、粉状や破片状と想定される。異物のサイズは想定が困難であるため、調査装置の異物除去性能を確認する観点から、ドレン用穴のサイズΦ4mmからの流出性や、チルト動作に対する異物の挙動確認を行うために、試験に用いる模擬異物は以下の3種類とした。

#	粒径	模擬異物	選定理由
1	<Φ4mm	アルミナ (Φ0.075mm ~Φ0.1mm)	Φ4mmよりも明らかに小さく水滴によりドレン用穴から流れ落ちると想定されるため
2	<Φ4mm	玉砂利 (Φ1mm~Φ3mm)	Φ4mmより小さいが水滴ではドレン用穴から流れ落ちにくいと想定されるため
3	>Φ4mm	玉砂利 (Φ3mm~Φ6mm)	Φ4mmより大きくチルト動作でしか除去できないと想定されるため



模擬異物のイメージ(アルミナ)



Φ1mm~Φ3mm Φ3mm~Φ6mm

模擬異物のイメージ(玉砂利)

5. 下部アクセス調査工法の開発

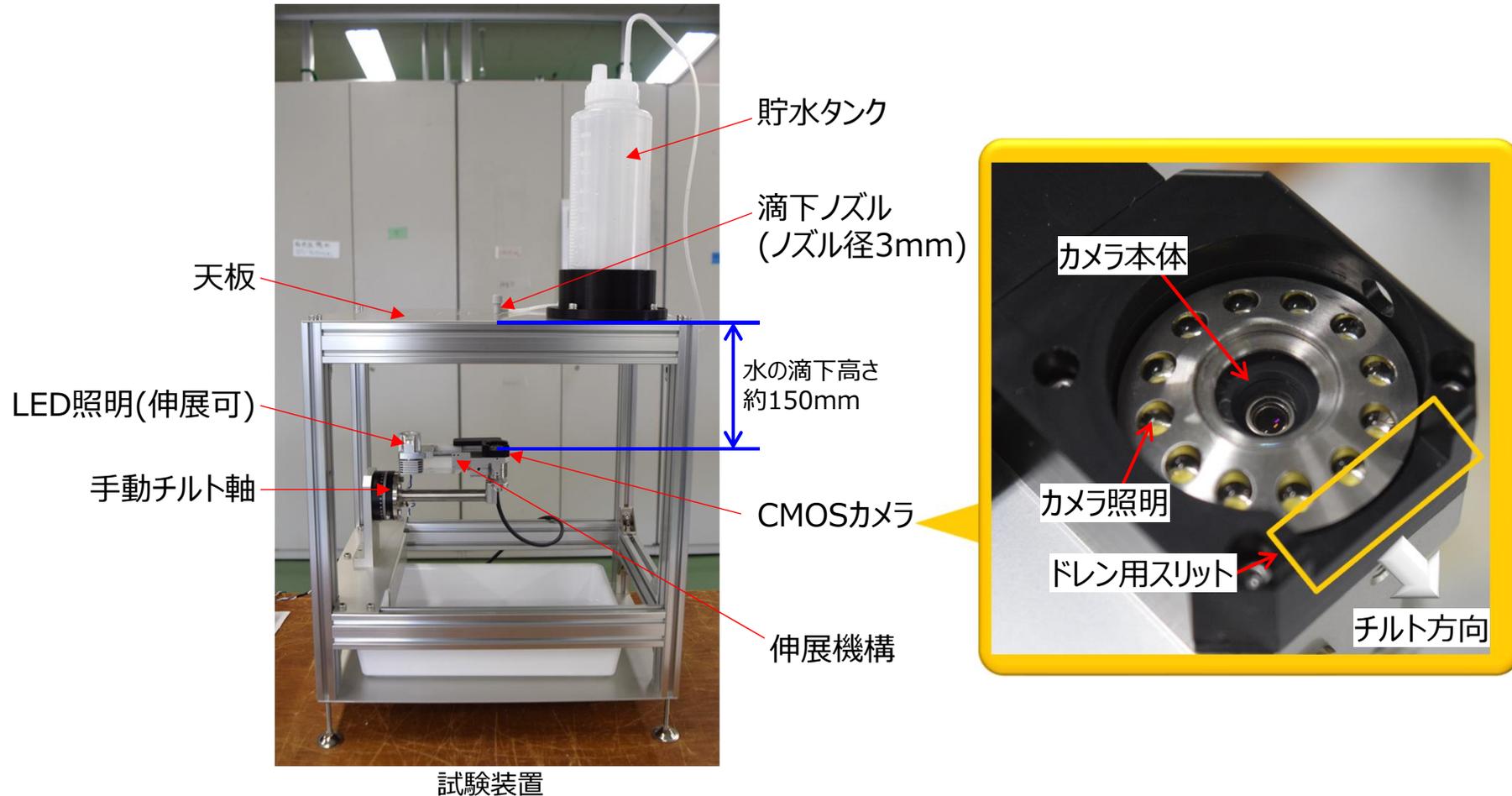
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 単体要素試験 (試験計画) (3/3)

➤ 試験設備イメージ



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

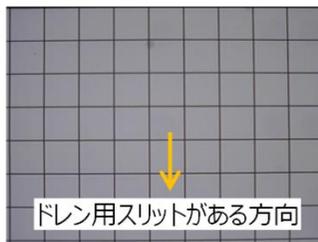
◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 単体要素試験 (結果) (1/3)

- カメラを広角にし、フードにスリットを追加するなど設計変更をしたが、[スリットを追加した方向にハレーション／白飛びが見られないことを確認した。](#)

No.	試験項目	概要	目標 (判断基準)	試験結果
1	改良フードの遮光効果確認	カメラを広角のものに変更したことに伴い、フードの設計を見直しているため、遮光効果を確認する。 また、カメラ・照明フードは、LED照明のカメラ映像への入り込みを防ぐ(遮光する)ために設けている。2023年度、ドレン用の穴、スリットを設ける改良を施したことで、遮光効果が損なわれていないことを確認する	カメラ映像内でLED照明の光によりハレーション／白飛びする部分がないこと	【達成】スリットを追加した方向にハレーション／白飛びが見られないことを確認した



LED照明, カメラ照明ともにOFFの映像

LED照明の 伸展	LED照明 : ON (明るさ弱)		LED照明 : ON (明るさ強)
	カメラ照明 : OFF	カメラ照明 : ON(明るさ最大)	
無			
有			

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 単体要素試験 (結果) (2/3)

- カメラ・LED照明ともに、水・模擬異物の除去が可能であることを確認した。

No.	試験項目	概要	目標 (判断基準)
2	ドレン用穴・スリットの評価	カメラ・LED照明に付着した水や異物は、下記の手順により取り除くことを検討している。試作したドレン用穴・スリットにより検討した手順で除去できることを確認する。異物の模擬には砂状のものを評価する ・ドレン用穴・スリットから滴下した水が流れ出ること、および滴下した水により模擬異物が流れ出ることを確認する ・上記の手法で除去できない場合は、チルト軸の動作により水・模擬異物を除去できるか確認する	<カメラ> 映像が歪むほどの水の付着を防げること、映像中央に付着した異物を除去できること <LED照明> カメラ映像による見え方に変化がないこと

#	模擬異物	結果	
		カメラ	LED照明
1	水	【達成】カメラと筐体の隙間から流れた(チルト動作不要)。中央付近のカメラレンズに付着した水はチルトして除去できた。	【達成】チルト動作で除去でき、見え方に変化もなかった。
2	アルミナ (Φ0.075mm～Φ0.1mm)	【達成】チルト動作のみでは除去できなかったが、60°チルトしてノズル位置を変えながら水を滴下して除去できた。	【達成】チルト動作のみでは除去できなかったが、60°チルトしてノズル位置を変えながら水を滴下して除去できた。
3	玉砂利 (Φ1mm～Φ3mm)		
4	玉砂利 (Φ3mm～Φ6mm)		

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

4) 調査装置(カメラ)の試作・試験

■ 単体要素試験 (結果) (3/3)

➤ 試験結果 (参考写真)

○カメラの結果

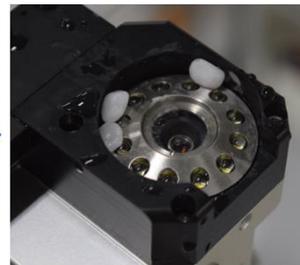
<砂利(Φ3mm-Φ6mm)>

>



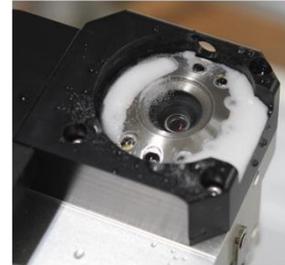
中央に水を滴下したため
砂利が端へ寄った

チルト前

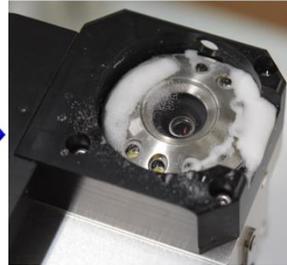


130°チルトした後

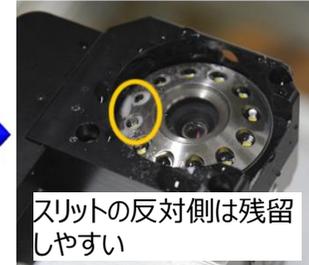
<アルミナ>



チルト前



130°チルトした後



スリットの反対側は残留
しやすい

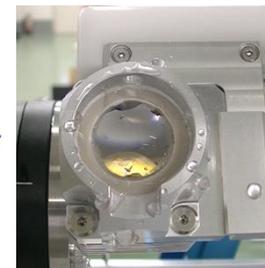
60°チルトしてノズル位置を
変えながら水を滴下した後

○LED照明の結果

<砂利(Φ3mm-Φ6mm)>

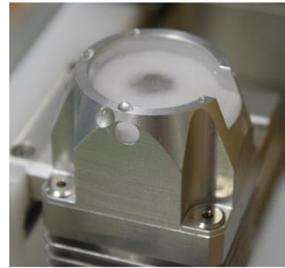


130°チルトした後



60°チルトしてノズル位置を
変えながら水を滴下した後

<アルミナ>



チルト前



130°チルトした後



スリットの反対側は
残留しやすい

60°チルトしてノズル位置を
変えながら水を滴下した後

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

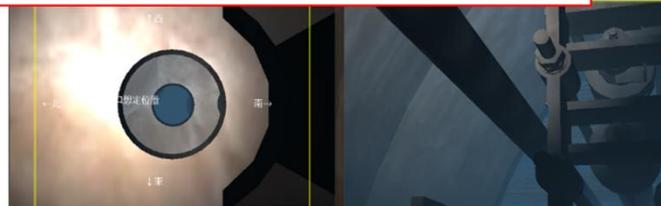
◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

■ 実施概要

- 2022年度の検討において、テレスコピック式調査装置がRPV下部の開口部を通過できるかの判断は映像のみでは難しいため、開口部の寸法が判断できる機能が必要との課題が発生。
- そこで、2023年度は、調査装置（カメラ）の映像から開口部の寸法測定をする機能を追加する検討を行う（ソフトウェアの試作を行い、14段テレスコパイプ試験に合わせ開口部の寸法測定が可能か確認）。
- カメラを上向き状態で運用する場合、2号機のPCV内部調査で得られたような天球画像の作成が可能かを検討する（作成の可否については、シミュレーションで確認）。

テレスコ縮状態から3000mm進展時のカメラ映像



テレスコ縮状態から3500mm進展時のカメラ映像



2022年度のシミュレーションによる検討



天球画像イメージ（2号機で得られたもの）



実機では開口部寸法は不明なため、その寸法が判断できる機能が必要

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

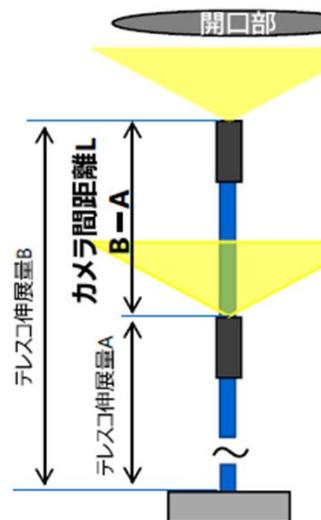
■ 開口部寸法測定の見直し

- 開口部の寸法計測に用いる三角測量の計算では以下の情報が必要である。
 - ①カメラ間距離： L （カメラ間の相対的な位置と姿勢）
 - ②各カメラ位置から計測点までの角度： α, β
- 上記情報は調査時に以下の方法で取得する計画とする。

①カメラ間距離： L (カメラ間の相対的な位置/姿勢)

- テレスコ伸展量は機械的に取得可能
2地点の伸展量の差からカメラ間距離
(位置)を取得する
- 姿勢については、傾きなしで伸展したとして
姿勢を取得する

※伸展量の誤差、テレスコの傾きが
寸法計測の誤差要因となる

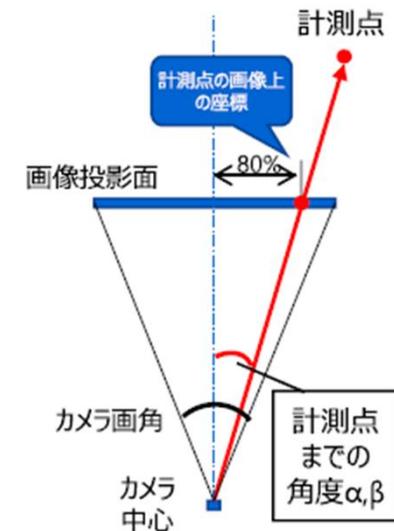
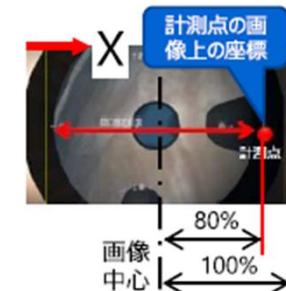


②各カメラ位置から計測点 までの角度： α, β

- カメラ画角を事前キャリブレーション
で取得する
- 計測点の画像上の座標が画像中
心から端部までの何%位置にある
か計算する
- このパーセンテージから計測点までの
角度を取得する

※計測点の座標選択誤差が
寸法計測の誤差要因となる

以下はX軸方向のみ図示しているがY軸も同じ



- 2023年度はこれらの誤差要因の実力値の把握と、本計測手法を試験で試適用し適用可否を検討する。

5. 下部アクセス調査工法の開発

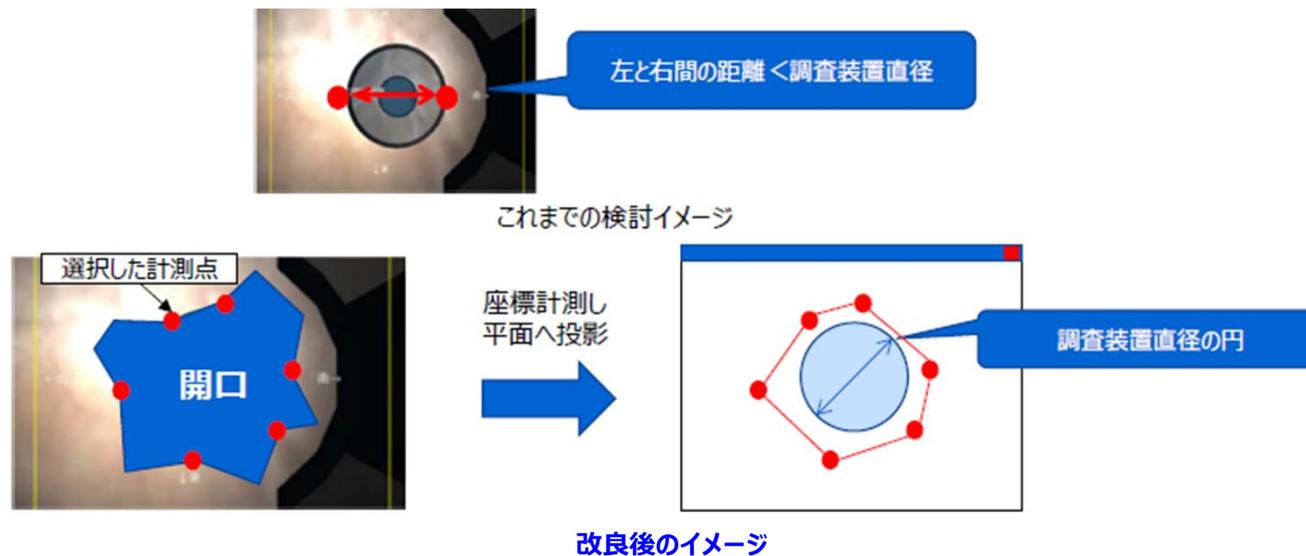
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

■ 開口通過可否確認方法

- テレスコの開口通過可否確認方法について、以下の通り検討した。
 - ✓ テレスコの開口通過可否を確認するには、開口の直径を求める必要がある。
 - ✓ 開口寸法計測には三角測量を用いる方針であり、三角測量では選択した点のカメラから見た三次元座標が得られる。
- これまで代表2点間距離を計測し、調査装置直径が収まるか判断する方法を検討していたが、実際の開口は複雑な形状をしている可能性が高いことから改良を検討した。
- 上記検討より、複数点の計測を行い、計測点と調査装置直径の円をソフト上で投影し、計測した開口領域内に装置直径が収まるか確認可能なシステムを作成する方針とした。



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

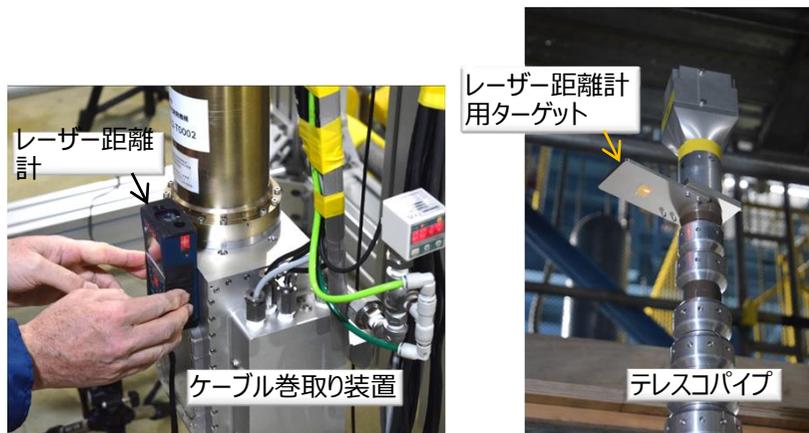
◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

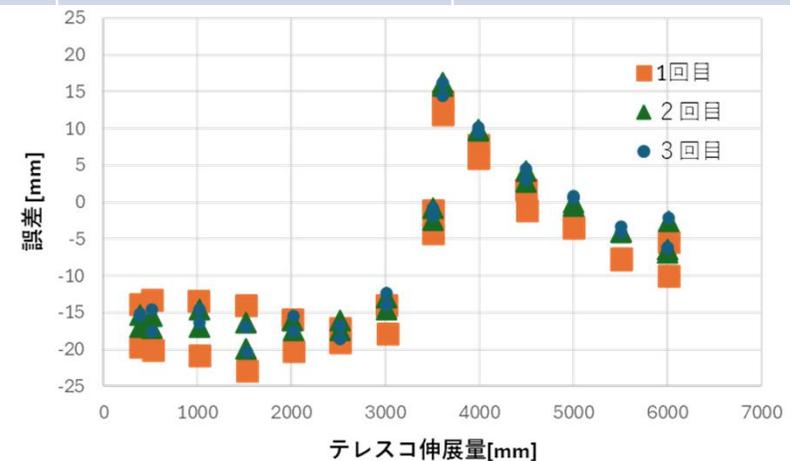
■ 14段テレスコパイプを用いた試験 (試験計画/試験結果) (1/3)

- ケーブル巻取り装置のドラム回転数から算出しているテレスコパイプの伸展量と、テレスコパイプ先端に取り付けたターゲットに向けてレーザー距離計を照射して測定した伸展量とを比較し、ドラム回転数から算出している伸展量の精度を評価した。
- ドラム回転数から測定した伸展量は誤差±25mm以内の精度で測定できることを確認した。本精度は次頁に示す開口寸法測定に影響するが、開口寸法測定の精度は十分な精度であったため、現場適用性はある(十分な精度)と評価した。

No.	試験項目	概要	目標 (判断基準)	試験結果
7	伸展量の精度評価	ケーブル巻取り装置によりドラムの回転数から測定・算出しているテレスコパイプ伸展量の精度を評価する (開口寸法測定の処理に伸展量を活用するためその精度が影響するため)	N/A (実力値を把握する。)	ドラム回転数から測定した伸展量は誤差±25mm以内の精度で測定できることを確認した。



テレスコパイプの伸展量を測定している様子



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

■ 14段テレスコパイプを用いた試験 (試験計画/試験結果) (2/3)

- 各撮影条件で開口形状3種類の代表寸法284mmを2か所 = 6か所を測定し、誤差を評価。今回実施した条件の範囲では**最大誤差12mm(寸法に対して4.2%)で測定可能なことを確認**した。想定開口径※¹とテレスコパイプの径※²から求められるクリアランス量 (片側約30mm) を考慮した際でも、精度としては十分で、現場適用性はあると評価した。
- 調査時の条件による誤差を加味し、通過可否を判断する方針

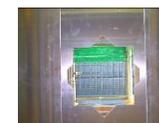
※1 : Φ187mm (2号機の場合)

※2 : Φ126mm

No.	試験項目	概要	目標 (判断基準)	試験結果
8	開口寸法測定機能の評価	検討した調査装置のカメラ映像から開口寸法を測定する手順により得られる寸法の精度を評価する 開口形状条件：①φ284mm, ②単純形状, ③複雑形状	実力値を把握する (判定基準なし)	開口形状3種類の代表寸法284mmを2か所 = 6か所を測定し、最大誤差12mm(寸法に対して4.2%)で測定可能なことを確認

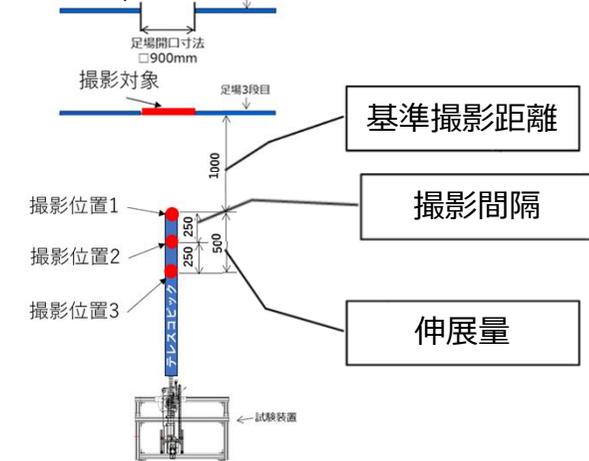
開口寸法測定結果

撮影条件		誤差 [mm]		
伸展量 [mm]	撮影間隔 [mm]	最大	平均	標準偏差
1750	250	7	4	4
1750	500	8	3	5
1750	1000	9	1	5
1500	250	6	3	4
1000	250	8	3	4
500	250	12	5	8



撮影例

撮影条件について
(伸展量500mm, 撮影間隔250mmのイメージ)



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

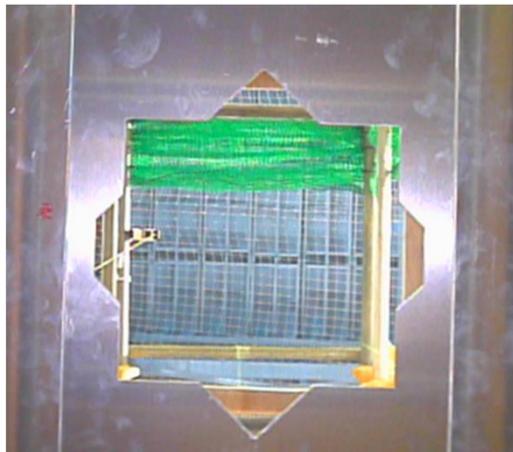
◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

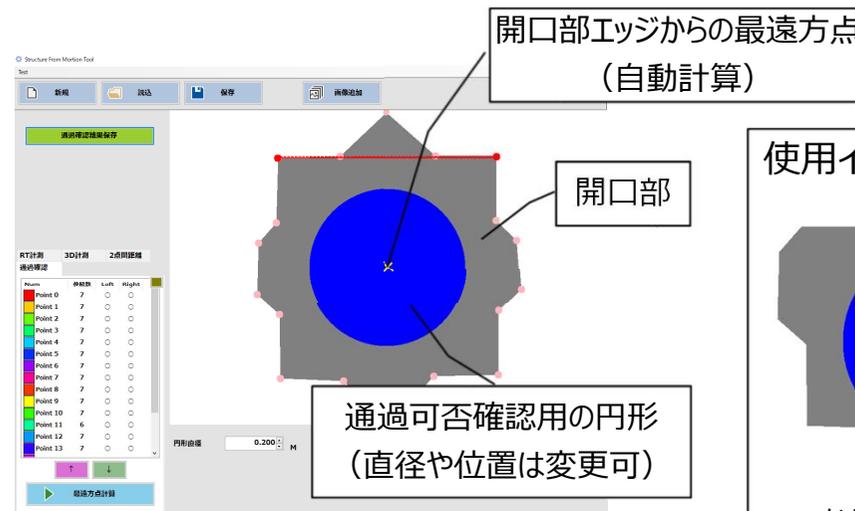
■ 14段テレスコパイプを用いた試験 (試験計画/試験結果) (3/3)

- CADのように測定した寸法に基づいて開口部を描画する機能を開発。
- 最遠方点 (中心), 通過に必要な調査装置直径を重ねて表示することを可能とし, 実機適用時は本機能により通過可否の確認を行う方針とした。

開口寸法測定結果の可視化機能

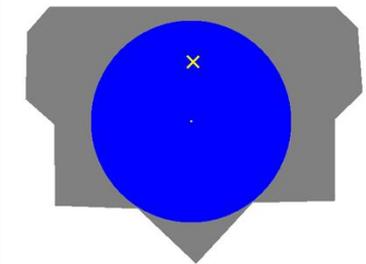


撮影映像



可視化

使用イメージ



寸法のみではわかりにくい
複雑形状に絡む通過確認時

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

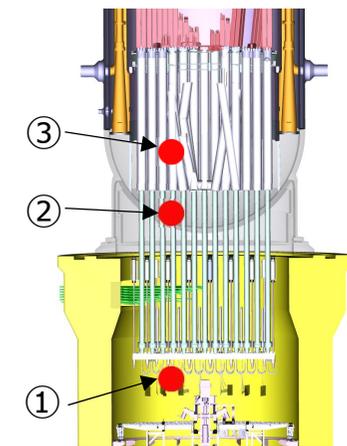
■ 天球画像生成の検討 (1/2)

- 撮影位置における調査可能範囲を検討するため、RPV内部の3Dモデルから天球画像を生成するシステムを作成した。



- 作成した天球画像生成システムを以下の条件で検証
- 撮影位置を①伸展前、②開口部通過直後、③全伸展時の3か所設定し、下記撮影条件で天球画像を生成した。

項目	設定値	備考
カメラ画角	水平35.5°, 垂直27.0°	装置仕様
パン範囲	-180° ~ 180°	装置仕様
パン間隔	24°	画角の1/3を重畳させる撮影を想定
チルト範囲	0° ~ 130°	装置仕様
チルト間隔	17°	画角の1/3を重畳させる撮影を想定
視認可能距離	4000mm	2021年度視認性確認試験より



使用した3Dモデル

※PCV/RPV内部の損傷を想定したモデル

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

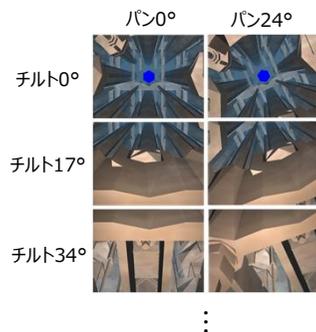
◆ (2) 2023年度 実施内容

5) 調査装置(カメラ)の取得映像処理方法の検討

■ 天球画像生成の検討 (2/2)

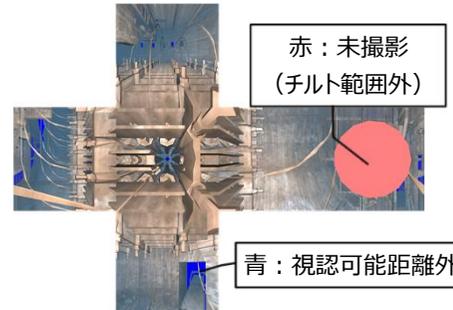
- 作成したシステムにより天球撮影の模擬、天球画像生成が可能であることを確認した。
- 未撮影や視認可能距離外の領域を判別可能なことを確認した。
- 本システムにより撮影範囲、撮影回数と調査時間を検討し、天球撮影位置の選定を行うことが可能となった。

シミュレーションによる天球撮影結果

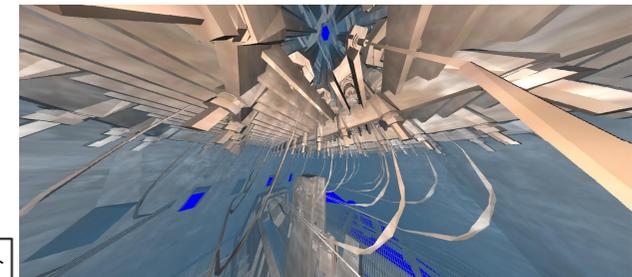


計135枚から
天球画像生成
を行う

① 伸展前位置の天球画像生成結果

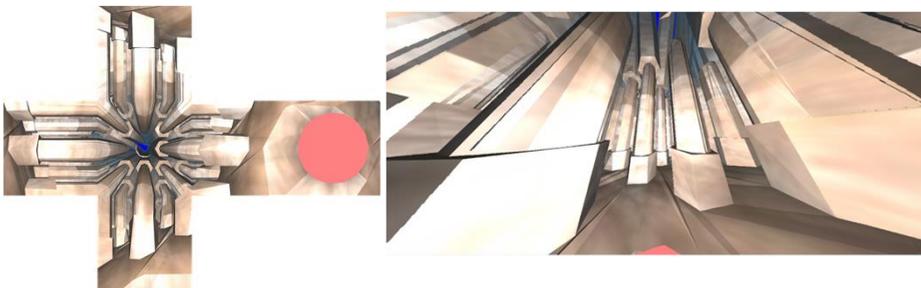


生成した天球画像
(キューブマップ形式)

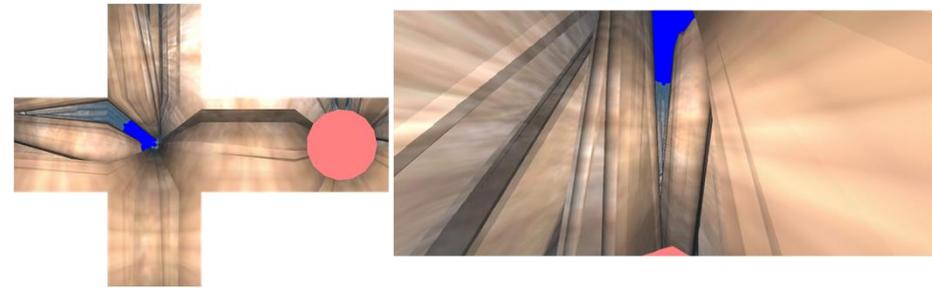


天球画像ビューアーによる広角の表示例
(画角は任意で変更可能)

② 開口部通過直後の天球画像生成結果



③ 全伸展位置の天球画像生成結果



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 要素試験結果を踏まえた実機適用性評価

- 以下に要素試験結果を踏まえた実機適用性評価結果を示す。一部、当初計画と異なる結果が確認されたが、運用面から得られた結果を再評価し、有意な問題がないことを確認した。

区分	実機適用性評価
1) 非常時収縮の対策検討	非常時として、ケーブル巻取り装置故障時を想定し、パイプ減圧による非常時収縮の可否を14段テレスコパイプを用いた試験で確認した。完全な収縮はできず、最大180mm飛び出す結果であったが、非常時の救援・回収の一連の動作に影響はない（構造物等への干渉がない）ことをCADで確認した。
2) 姿勢制御機構の改良	実機での使用環境を踏まえて、姿勢制御機構へ新たに異物付着防止カバーを追加した。カバー追加に伴い、姿勢制御機構各軸の動作について、仕様範囲を問題なく動くか14段テレスコパイプを用いた試験で確認した。前後退機構は、カバーを追加したことで可動範囲が狭まり要求仕様を満たせなかったが、簡易的な改造で改善可能な見通しを得た。
3) 傾き検知方法の検討	レーザーポインタを用いた傾き調整方法を検討。検討した方法にて位置調整、開口通過が可能な14段テレスコパイプを用いた試験にて確認し、いずれも可能なことを確認した。また、レーザーポインタの耐放射線性試験を行い、2400[Gy]まで問題なく使用可能なことを確認した。
4) 調査装置（カメラ）の試作・試験	PCV内部調査用に開発したパン・チルト駆動軸付きのカメラを活用する方針とし、向きの違い（PCV内部調査では調査装置用ケーブルにより吊り下ろして運用、本調査では上向きにして運用）より生じる課題として、主に防水・異物対策について検討。運用面の対策で異物の除去が可能な見通しを得た。
5) 調査装置（カメラ）の取得映像処理方法の検討	主にテレスコピック式調査装置に搭載されたカメラにより、テレスコパイプ自身の通過可否を判断する機能の追加を実施した。開口寸法に対して約4.2%程度の精度で測定可能なことを確認し、通過可否を判断するための材料を得ることができた。

5. 下部アクセス調査工法の開発

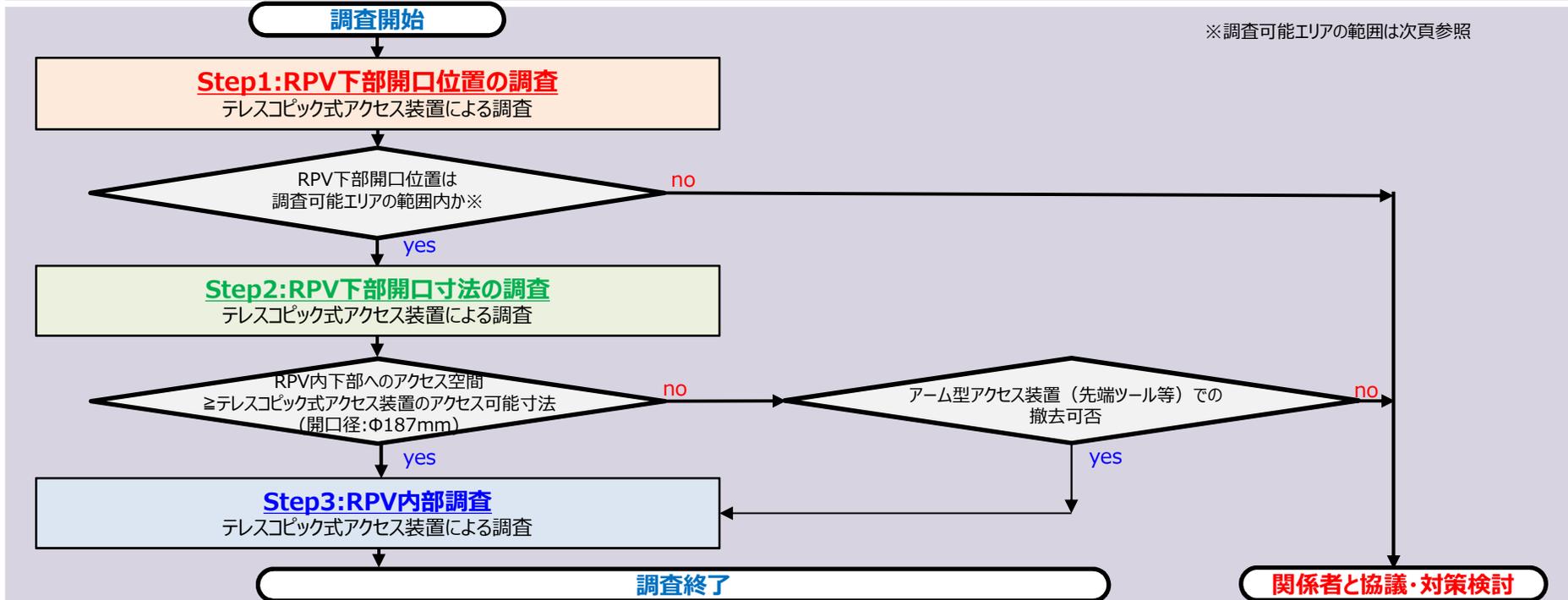
5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 実機での調査シナリオについて (2/3号機)

- 早期のRPV内調査の実施を前提とした場合のテレスコパイプを用いた調査工法の調査シナリオを以下に示す。
- 各調査ステップ間は別日とすることや、各調査ステップでは複数基を用意し調査することも検討する。
- 本調査シナリオは次フェーズ以降の開発状況や他先行調査結果を踏まえ適宜更新・具体化していく。

2023年度までの成果を踏まえたRPV内部調査シナリオ案



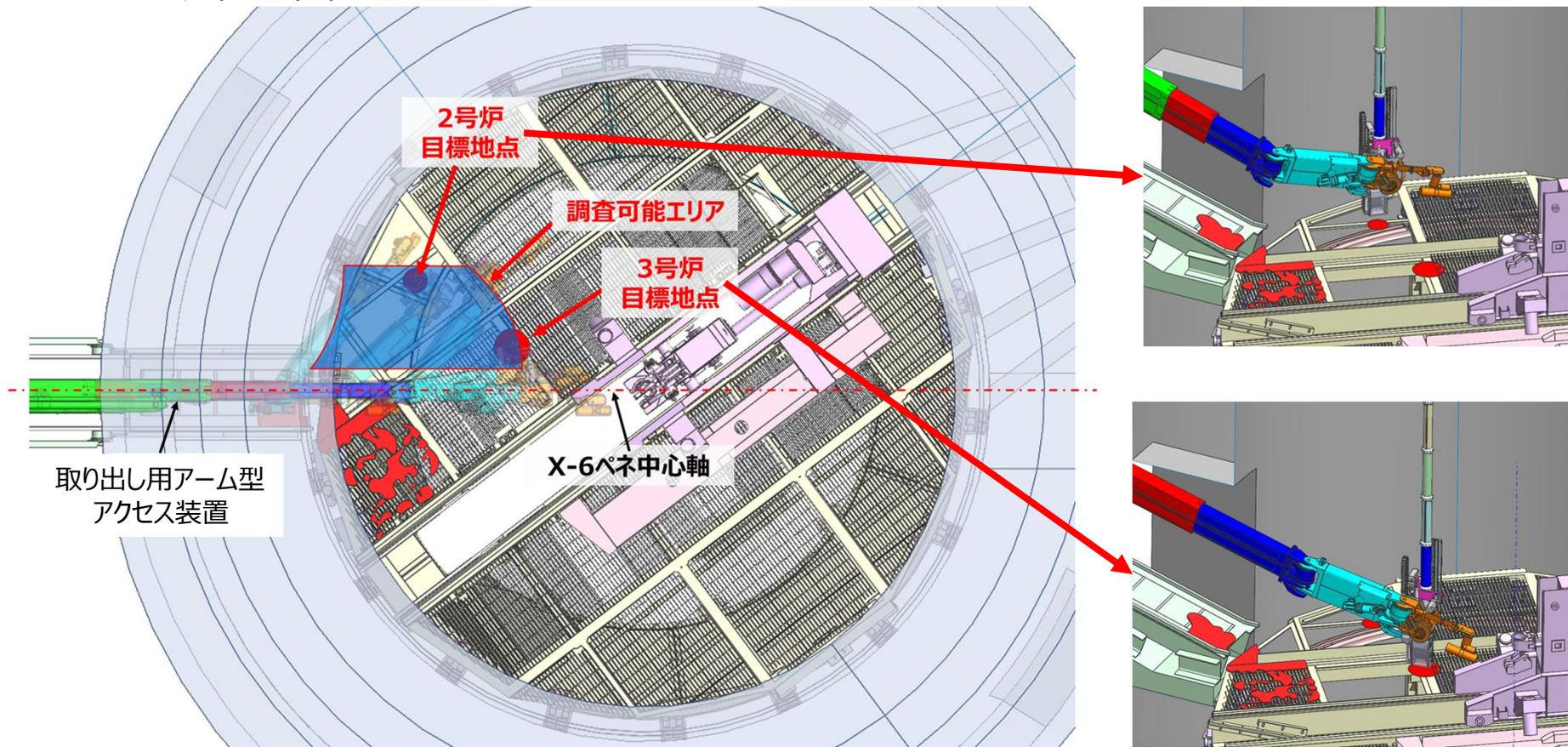
5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコピックを用いた調査工法

◆ (2) 2023年度 実施内容

■ 実機での調査シナリオについて (2/3号機) (調査可能エリアの範囲)

- 取り出し用アーム型アクセス装置へのテレスコピック式アクセス装置搭載時の調査可能範囲と、2/3号の想定調査位置を示す。



5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (3) まとめ

➤ 2023年度の試験結果（要旨）

1) 非常時収縮の対策検討

- ✓ [パイプ接合部の構造見直しを検討し、要素試験結果を基に構造を決定した。](#)
- ✓ [見直した構造にて14段テレスコパイプでの動作確認試験を実施し、伸縮動作が可能なこと、傾きやガタは2021年度に比べ改善していることを確認した。](#)
- ✓ [非常時収縮時はテレスコパイプの傾きが目標の5.5deg以内であり、姿勢制御機構による位置調整や、周辺構造物へもたれ掛かることで、非常時収縮が可能なことを確認した。](#)

2) 姿勢制御機構の改良

- ✓ [2023年度の結果を基に改良点を抽出し、改良を反映したもので動作確認を実施した。](#)
- ✓ [基本動作に問題がないこと、一部部品に干渉があったものの簡易的な改良で対策出来る見込みであることを確認した。](#)

3) 傾き検知機能の検討

- ✓ [レーザーポインタを用いた傾き調整方法を検討した。](#)
- ✓ [検討した方法にて位置調整、開口通過が可能なことを試験にて確認し、いずれも可能なことを確認した。](#)
- ✓ [また、レーザーポインタの照射試験を行い、2400\[Gy\]まで問題なく使用可能なことを確認した。](#)

4) 調査装置（カメラ）の試作・試験

- ✓ [調査装置（カメラ）を上向き運用する際の水・異物の対策として改良点を検討し、試験にて効果を確認した。](#)
- ✓ [水・異物はチルト動作および上方向から滴下する水を利用することで除去可能なことを確認した。](#)

5) 調査装置（カメラ）の取得映像処理方法の検討

- ✓ [カメラ映像から開口寸法を測定する手法を検討し、試験にて測定精度を確認した。](#)
- ✓ [結果、開口寸法に対して約4.2%程度で測定可能なことを確認し、現場適用性があると評価した。](#)

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (3) まとめ

➤ これまでの開発変遷・今後の見通し

- ✓ [テレスコピック式アクセス装置のこれまでの開発変遷・今後の見通しを以下に示す。](#)

区分	2020年度～2021年度	2022年度～2023年度	2024年度以降※ (案)
開発フェーズ	TRL1～3 (適用性評価, 概念設計, 要素試験等)	TRL4 (基本設計, 設備仕様検討, 要素試験等)	TRL5～7 (詳細設計, モックアップ試験, 現場調査等)
開発内容	<ul style="list-style-type: none"> ✓ RPV内部調査における, 下部アクセスによる調査のニーズ確認, 他補助事業で開発済・開発中の既存技術を調査し, 各号機毎にアクセス技術の適用性評価を行い, 2/3号機向けにはテレスコピック式アクセス装置へ絞り込み ✓ 絞り込んだ技術に関して, 実現性評価のための簡易試験および要素試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 取り出し用アーム型アクセス装置の開発仕様を基に, これと取り合うテレスコピック式アクセス装置の仕様を検討 ✓ 装置仕様検討の上, 試作機を基本設計・製作し, 要素試験等によりテレスコピック式アクセス装置の単体性能を評価 ✓ 要素試験・シミュレーション等を通じて実機適用性を評価, 課題を抽出。一定の実機適用性があることを確認 	<p>本年度までの成果を踏まえ以下の実施項目に取り組む必要がある</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 姿勢制御機構の改良 ✓ 装置運用手順の詳細検討 ✓ 開発中の取り出し用アーム型アクセス装置との取り合い調整, 組合せ試験の実施。但し, 必要に応じて, 別のアーム型アクセス装置との組合せも考慮する。 ✓ モックアップ試験, トレーニングなどを通じて, 課題の再抽出・潰しこみ

※：2024年度以降の計画は、事業実施者の案として記載するもので決定事項ではありません。

5. 下部アクセス調査工法の開発

5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法

◆ (3)まとめ

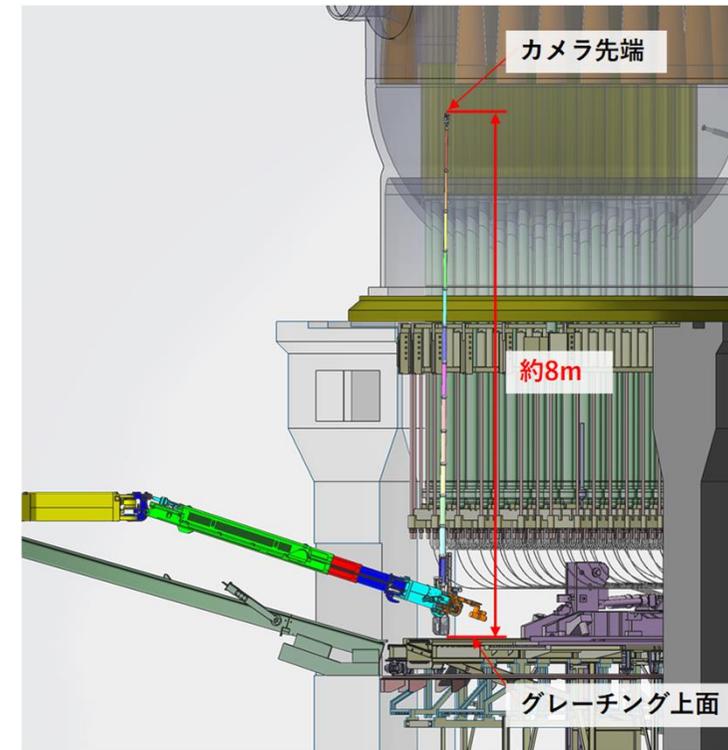
①2023年度に得られた成果

- 2022年度までの成果を基に、開発計画の見直し、課題抽出を行った。
- 抽出した課題に対する対策案とその効果を確認するための試験計画を立案した。
- 立案した試験計画に基づき、テレスコピック式アクセス装置の一部改良等を行い、試験を実施した。
- 試験の結果、テレスコピック式アクセス装置の基本動作が可能であり、装置としての成立性があることを確認した。

②今後の課題

2023年度の結果を踏まえ、想定される課題を以下に示す。

- 姿勢制御機構の改良が必要
- 装置運用手順（異常時対応含む）の詳細検討が必要
- 他事業にて開発中の取り出し用アーム型アクセス装置との取り合い調整、組合せ試験が必要（必要に応じて、別のアーム型アクセス装置との組合せ等も考慮）
- モックアップ試験、トレーニングなどを通じて、課題の再抽出・潰しこみが必要



テレスコパイプによるアクセスイメージ

目次

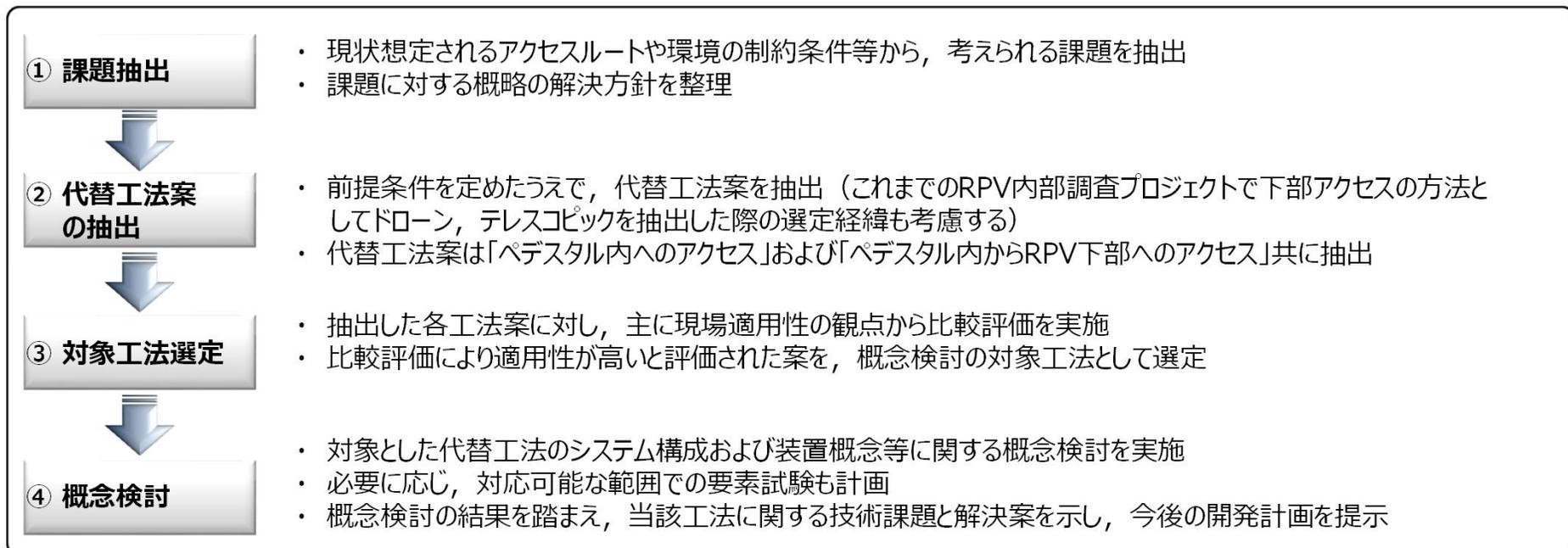
1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(1) 実施内容

- ▶ 下部アクセス調査は、制約条件が厳しく難易度が高いことから、上記に示した開発中の2工法に加え、さらなる代替工法として考えられる案を抽出し、当該工法に関する概念検討を実施した。
- ▶ 「ペDESTAL内へのアクセス」および「ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス」共に代替案の検討を行った。
- ▶ 最初に考えられる工法および装置案を抽出、それらを比較評価したうえで、より適用性が高いと考えられる案について概念検討を行い、対応可能な範囲での要素試験を実施した。
- ▶ 本検討のアウトプットとして、対象とした代替工法のシステム構成および装置概念、それらの技術課題および課題解決策と今後の開発計画を示した。
- ▶ 本検討の対応フローを以下に示す。



5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(2) 検討内容

① 現状案の主な課題

A) ドローンを用いた調査工法

【想定リスク, 課題】

- 1号PCV内部調査結果からも、ペDESTAL内は落下物を含む構造物が多く狭隘であり、ドローンがそれらに干渉せずにRPV下部へアクセスするのが困難な環境である可能性がある。
⇒ RPV下部中央Φ1mの開口条件は見直した上で、現場環境に即した運転条件とする必要あり

【開発継続の必要性】

- ドローンの飛行に適した環境であればアクセス性は良好であり、RPV下部のみならず様々な対象の調査への適用が期待できる。
- そのため、測位技術や形状計測技術等、ドローンを用いた調査を行う上で必要となる技術開発を継続する。

B) テレスコパイプを用いた調査工法

【想定リスク, 課題】

- 2号段階的取り出し用のアーム型アクセス装置の利用を前提としているが、ペDESTAL内アクセス範囲（可動域）の制限により調査可能範囲が限定的である。
⇒ 2号機以外への適用も考慮する場合、上記アクセス装置を前提としない検討も考慮が必要
- 本テレスコパイプは1自由度の鉛直方向の伸展のみを可能とする構造であるが、ペDESTAL内の構造物、落下物により鉛直上にアクセスできる環境でない可能性がある。

【開発継続の必要性】

- 代替工法との組合せ（代替工法への部分適用）も考えられることから、現状の課題解決に向けた開発は継続する。



1号PCV内部調査結果からもRPV下部調査の早期実現ニーズは高く、それに応えるために上記課題を踏まえた早期実現可能な代替工法の検討が必要

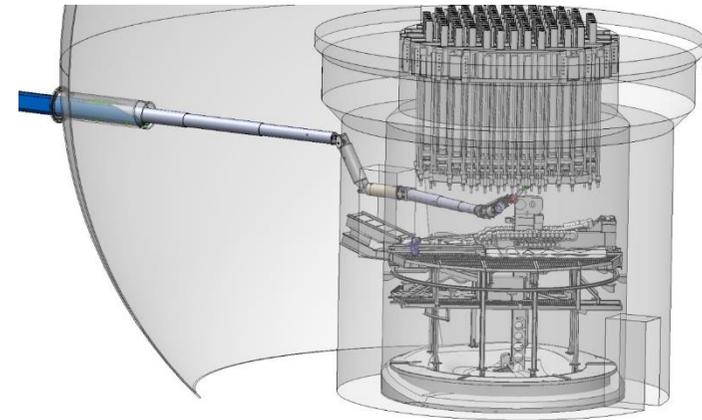
5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討 (2) 検討内容

②検討内容（アクセスルート）

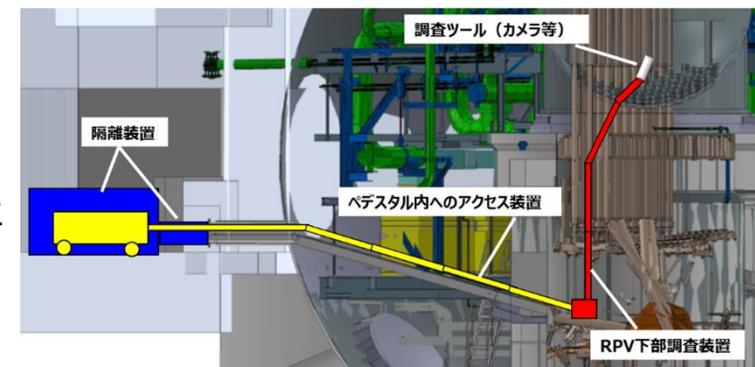
【A)ペDESTAL内へのアクセス】

- 主に2,3号機向けとして，X-6ペネからペDESTAL内へ直線的アクセスが可能なロングリーチアームの検討
- 主に以下を考慮した構造とする
 - ✓ ペDESTAL内へのアクセスに特化した極力簡易的な構造（極力可動部を減らし直線的な伸縮機構とする）
 - ✓ 保守性を考慮した構造（非常時回収の容易性，作業員による保守対象部位の汚染低減等）
 - ✓ RPV下部調査装置（外観調査用カメラ，線量計等）の搬送・設置において十分なアーム先端部のペイロード確保



【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】

- 不確定性の高い現場環境（RPV底部開口部位置・寸法・形状やペDESTAL内障害物等）への適合性を考慮した装置検討（以下例）
 - ・ 鉛直上以外へも伸展可能な長尺ロッド（複数関節の具備，傾斜させて伸展可能等）
 - ・ 先端部（調査ツール）の小型・軽量化



検討イメージ（参考）

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討 (2) 検討内容

③ 検討内容 (アクセス装置)

➤ ペDESTAL内へのアクセス装置

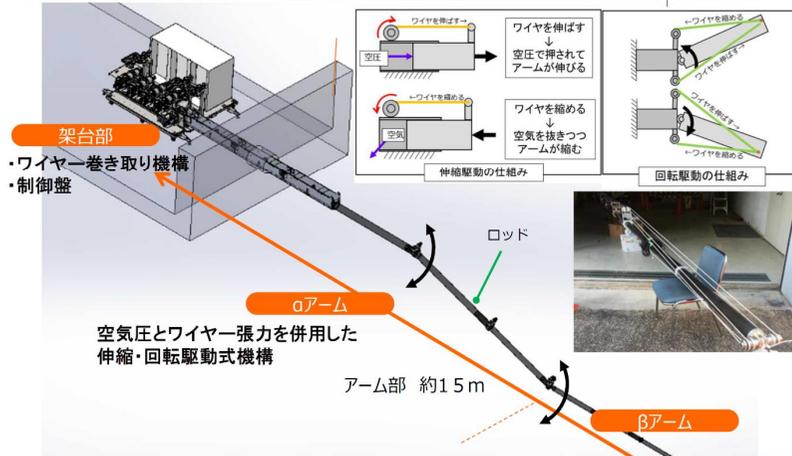
✓ ペDESTAL内へのアクセス装置に関しては、既存技術 (※) の応用を前提として検討することとした。

※ 東京電力HD自社開発による、X-6ペネからのアクセスによるPCV内作業用ロングリーチアーム
(以下参照)

原子炉格納容器内作業用アームの研究

概要: 遠隔作業用アームロボット

構成: 6本のロッドで構成された作業用アームを空気圧で進展し、16本のワイヤで制御する



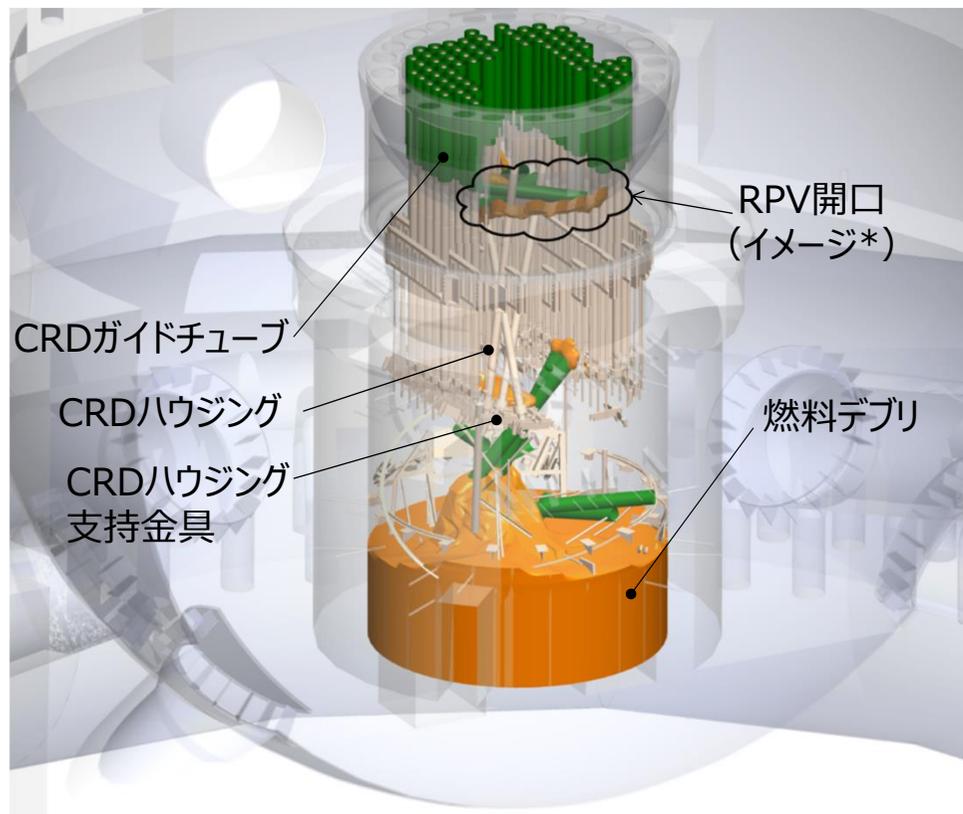
(東京電力HD自社研究開発: 「原子炉格納容器内作業用アーム」の資料より)

5. 下部アクセス調査工法の開発

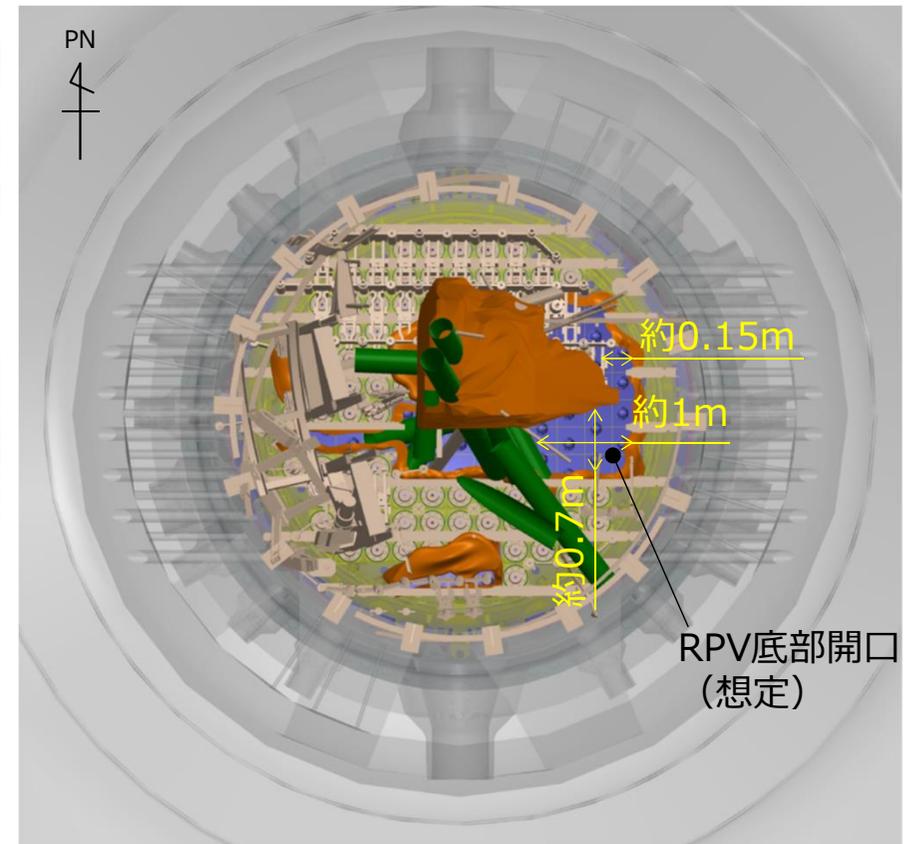
◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(参考) 3号機におけるペDESTAL内調査結果を基に想定されるRPV底部開口イメージ

※ 3号機のPCV内部調査結果（ペDESTAL内状況およびCRDハウジング支持金具の損傷状態等）を基にRPV底部開口イメージとして構築したものであり、実態を示しているものではない。



鳥瞰図



下面図

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(参考) 1号機PCV内部調査 (ROV-A2調査)

※ 1号機のペDESTAL内調査の結果に応じて、1号機向けの条件見直しや代替工法の検討も考慮する。



CRDハウジングサポートと思われる構造物

脱落しているCRD関連の構造物

※出典：東京電力ホールディングスホームページ (<https://photo.tepco.co.jp/date/2023/202303-j/230331-01j.html>)

5. 下部アクセス調査工法の開発

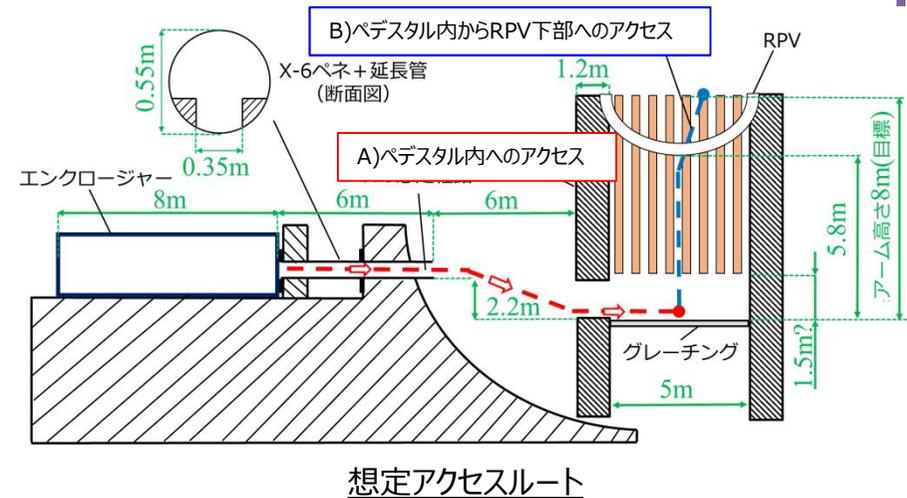
◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

① 課題抽出

a) 前提条件

- 代替工法の検討における前提条件を設定するに当たっては、アクセスルート、ペDESTAL内の状況、周辺の環境条件3つの観点（分類）から必要な前提を抽出・整理を行うこととした。
- これらの分類から、主要な前提条件を以下表に抽出・整理を行った。



前提条件（アクセスルート、ペDESTAL内の状況）

分類	前提条件		
アクセスルート	<ul style="list-style-type: none"> ✓ アクセスルートは上図のようにX6ベネからCRD開口を通り、ペDESTAL内部の想定開口直下までアクセスした後、ペDESTAL内底部（グレーチング部）からRPV下部へ鉛直上方向にアクセスする。 ※X6ベネからアクセスする場合、X6ベネ開放時にはエンクロージャ等によるバウンダリの構築が必要 ✓ 本事業では、アクセスルートを【A)ペDESTAL内へのアクセス】（上図赤破線部）と【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】（上図青破線部）の2つのルートに分けて検討し、最終的に装置を組み合わせ評価することとする。 ✓ アクセスルートにおける主要な寸法条件を以下に記載する。 		
	【A)ペDESTAL内へのアクセス】の距離	18m程度	2号機および3号機の想定開口位置直下までのアクセスを満足できる数値として算出
	【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】の距離	8m程度	調査対象位置をCRDハウジング上端面（グレーチング部から7.2mの高さ）程度として設定（先行調査工法（ドローン、テレスコパイプ）と同条件）
	X6ベネの内径	Φ547.6mm	X6の内部はCRDハウジング交換用レール等によりその開口サイズは幅350mm×高さ550mm程度になる。
	CRD開口	幅：760mm 高さ：1980mm程度	X6ベネから前方約6m、約2.2m下方の位置に存在
・RPV底部の開口部	1.0m×0.7m程度	PCV内部調査結果に基づく開口イメージ（P.180参照）	
ペDESTAL内の状況	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ペDESTAL底部に燃料デブリ等が堆積している。 ✓ CRガイドチューブが脱落している。 ✓ CRDハウジング等周辺にRPV開口がある。 		

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

① 課題抽出

a) 前提条件（続き）

前提条件（周辺環境状況）

分類	2号機	3号機
雰囲気線量	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内（南西～北西エリア）：5～10[mSv/h] ・PCV内（ペDESTAL外）：約1[Sv/h] ・PCV内（ペDESTAL内）：約10～80[Gy/h] 	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内（南西～北西エリア）：5～10[mSv/h] ・PCV内（ペDESTAL外）：約1[Sv/h] ・PCV内（ペDESTAL内）：約10～80[Gy/h]
温度	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内：-8～40[℃] ・PCV内：10～40[℃] ・PCV外：-8～40[℃] 	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内：-8～40[℃] ・PCV内：10～40[℃] ・PCV外：-8～40[℃]
湿度	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内：100%RH（40℃） ・PCV内：100%RH（40℃） ・PCV外：100%RH（40℃） 	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内：100%RH（40℃） ・PCV内：100%RH（40℃） ・PCV外：100%RH（40℃）
圧力	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内：大気圧 ・PCV内：-5.2～5.2[kPa] ・PCV外：-5.5～5.5[kPa] 	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内：大気圧 ・PCV内：-5.5～5.5[kPa] ・PCV外：-5.5～5.5[kPa]
その他	暗闇，降雨，霧環境	暗闇，降雨，霧環境

5. 下部アクセス調査工法の開発

Decom.Tech

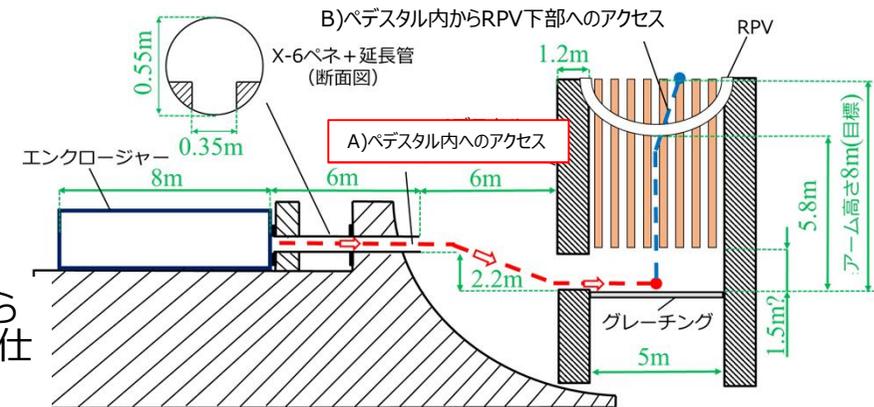
◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

① 課題抽出

b) 要求機能・課題の抽出・整理

- a) 前提条件で抽出・整理した結果を基に、代替工法で求められる要求機能（仕様）を抽出した。また、上記要求機能（仕様）に対する現状の課題を下表に整理した。
- 特に、A)ペDESTAL内へのアクセスにおいては、18m程度の長尺アームを片持ちで支持する状態になるため、強度・たわみ等の面で課題がある。



A)アクセス装置の想定経路

A)ペDESTAL内へのアクセスにおける要求機能（仕様）とその課題

		要求機能（仕様） A)ペDESTAL内へのアクセス		要求機能に対する課題
1	アクセスルート	A)1-1	アームの全長（上図赤破線部）が18m程度であること	18m程度の長尺アームを片持ちで支持する状態になるため、強度やたわみ等を考慮する必要がある
		A)1-2	アームの断面形状（X-6ベネ）が幅350mm以下×高さ550mm以下を満足すること	断面形状の小さいアームによって全長18mの強度を保つ必要がある
		A)1-3	X-6ベネからアクセスする場合、A)アームおよびB)アクセス装置を組合せた状態（総全長約26m）でエンクロージャ（全長8m）に格納できること	エンクロージャに格納できるようにA)アームおよびB)アクセス装置が伸縮可能な構造（折り畳み等含む）であること
		A)1-4	X-6ベネとのレベル差のあるCRD開口を通過するために必要な機構を有すること（例：屈曲関節を設ける場合は屈曲箇所が2箇所以上有する等）	屈曲箇所にモーメントが集中的にかかるため、これを考慮する必要がある
		A)1-5	アームがCRD開口（幅760mm×高さ1980mm程度）を通過すること	—
2	ペDESTAL内の状況	A)2-1	—	—
3	環境条件	A)3-1	高線量、高温環境下において、PCV内にアクセスする範囲は耐放射線性、ペDESTAL内にアクセスする範囲は耐水性を考慮すること	アクチュエータや電子機器等の耐放射線性、耐水性を考慮する必要があること
		A)3-2	非常時における装置の遠隔回収が可能であること	非常時における装置の救援回収が遠隔で実施できる構造・構成であること
		A)3-3	非常時における装置の保守（遠隔・人手）が可能であること	非常時における装置の保守（遠隔・人手）が可能であること

5. 下部アクセス調査工法の開発

Decom.Tech

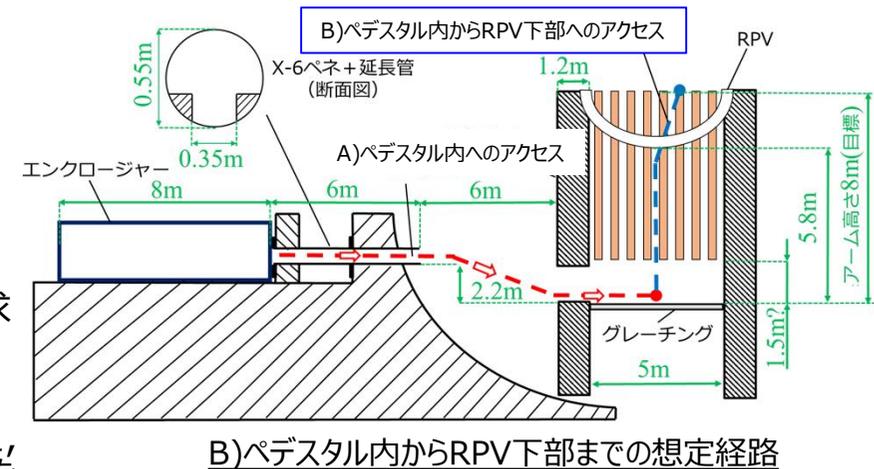
◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

① 課題抽出

b) 要求機能・課題の抽出・整理

- 【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】における主な要求機能（仕様）および要求機能に対する課題を下表に示す。
- 特に【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】においては、CRDハウジング等の干渉物の詳細状況が不明なことを踏まえ、様々な状況に対応可能な干渉回避機構（屈曲関節等）を設ける必要があることが課題である。



B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセスにおける要求機能（仕様）とその課題

		要求機能（仕様） B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス	要求機能に対する課題	
1	アクセスルート	B)1-1	アクセス装置はペDESTAL底部のグレーチングのレベルからRPV下部まで（8m程度）上方にアクセスできること 8m程度の長尺のアクセス装置を片持ちで支持する状態になるため、強度やたわみ等を考慮する必要がある	
		B)1-2	RPV下部の開口部に挿入される際のアクセス装置の断面形状は1.0m以下×0.7m以下であること	—
		B)1-3	エンクロージャに格納できるように伸縮可能な構造であること	エンクロージャに格納できるようにA)アームおよびB)アクセス装置が伸縮可能な構造であること
2	ペDESTAL内の状況	B)2-1	CRDハウジング等の干渉物の回避する機構（屈曲関節等）を有すること 屈曲箇所にもモーメントが集中的にかかるため、これを考慮する必要がある	
3	環境条件	B)3-1	高線量、高温環境下において、PCV内にアクセスする範囲は耐放射線性、ペDESTAL内にアクセスする範囲は耐水性を考慮すること アクチュエータや電子機器等の耐放射線性、耐水性を考慮する必要があること	
		B)3-2	アクセス装置先端に炉内調査に必要な調査カメラ、線量計、光源等が設置ができること アクセス装置の先端に設置する調査カメラ、線量計、光源等の配置方法や重量制限等の検討が必要	
		B)3-3	非常時における装置の遠隔回収が可能であること 非常時における装置の救援回収が遠隔で実施できる構造・構成であること	
		B)3-4	非常時における装置の保守（遠隔）が可能であること 非常時における装置の保守（遠隔）が可能であること	

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

②代替工法案の抽出

- 前頁で記載した【A)ペDESTAL内へのアクセス】および【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】における装置の要求機能およびそれらに対する課題，これまでの研究の比較評価も踏まえ，A)は，X6ペネを通過でき，上部アクセス装置を運搬できる構造，B)は，小型に格納でき，光学機器を搭載できるペイロードを有する構造が望ましいと考え絞り込みを行った。各装置構成を検討するにあたり主要な装置機能となる「A)伸縮方式」・「B)上方へアクセス可能な方法」にそれぞれ着目し，それら構造案を可能な限り網羅的に抽出した。結果を下表に示す。

No.	A)ペDESTAL内へのアクセスにおける伸縮方式	No.	B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセスにおける上方へのアクセス方法	No.	B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセスにおける上方へのアクセス方法
1	テレスコピック型 (電動型)	1	テレスコピック型 (電動型)	7	飛行船
2	テレスコピック型 (シリンダ駆動型)	2	テレスコピック型 (シリンダ駆動型)	8	風船上昇型
3	テレスコピック型 (ワイヤ駆動型)	3	テレスコピック型 (ワイヤ駆動型)	9	らせん導管式上昇型
4	折り畳み型	4	シザー型	10	折り畳み型
5	継ぎ足し型	5	ジップチェーン型	11	継ぎ足し型
6	—	6	飛行ドローン	12	吸着式上昇機

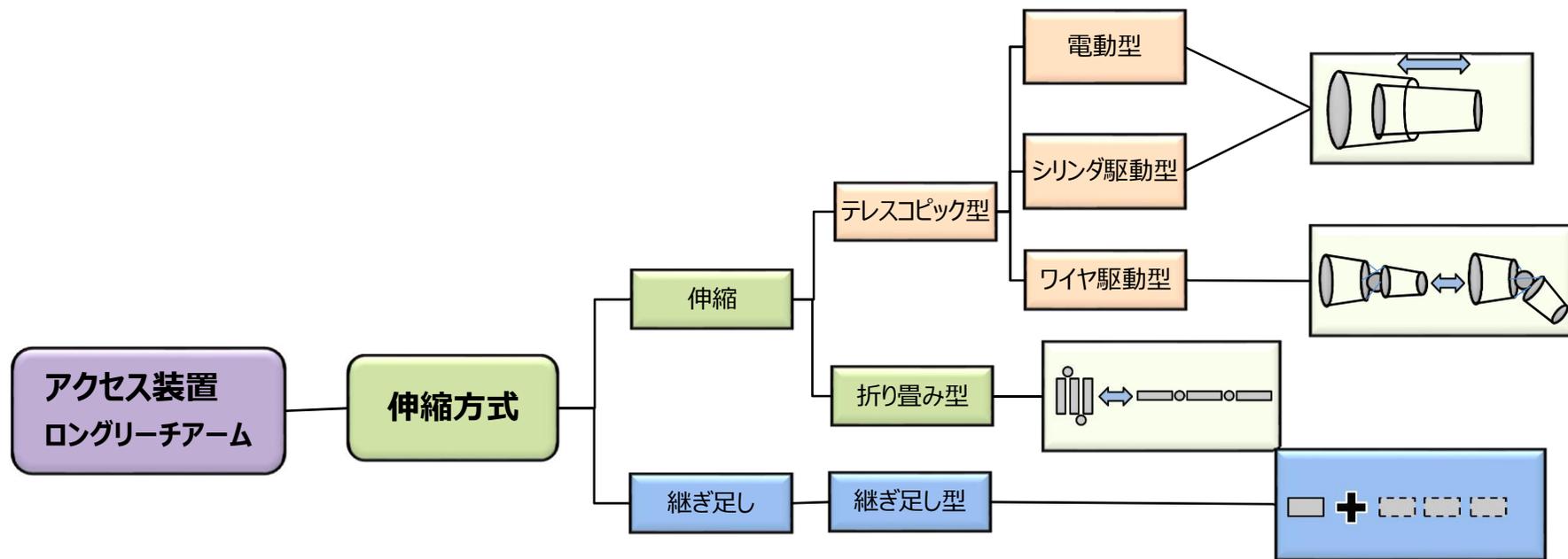
- 上記，【A)ペDESTAL内へのアクセス】における「伸縮方式」および【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】における「上方へのアクセス方法」に関する各案の抽出体系図を次頁に示す。

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討 (3) 代替工法案の対象

②代替工法案の抽出

【A)ペデスタル内へのアクセス】



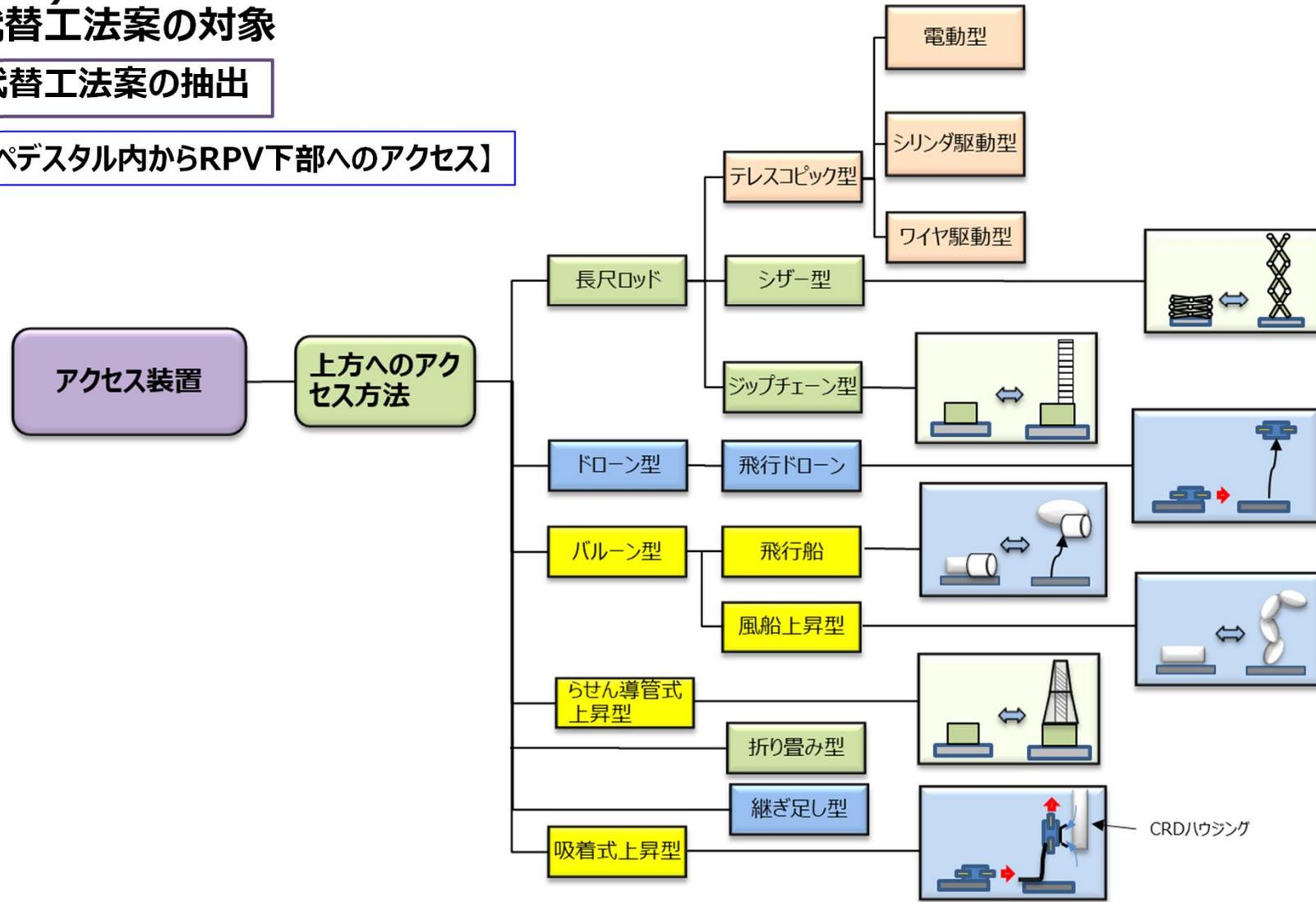
A)ペデスタル内へのアクセスのアクセス方式に関する各案の抽出体系図

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討 (3) 代替工法案の対象

②代替工法案の抽出

【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】



B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス方式に関する各案の抽出体系図

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

③対象工法選定

- ②代替工法の抽出にて示した【A)ペDESTAL内へのアクセス】および【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】の各アクセス装置の工法案について、以下の通り選定した。

【A)ペDESTAL内へのアクセス】

- ✓ **対象工法：テレスコピック型(ワイヤ駆動型)**
- ✓ 選定理由：他工法と比較評価の結果、アームの長尺化および格納性に優れており、屈曲関節を追加することができ屈曲動作の実現及び可動範囲の拡大が可能である。また、モータ等の駆動源をアーム本体でなくエンクロージャ側（PCV外）に設けられることから、アームの軽量化が可能となると共にモータ等の耐放射線性に優れ、保守性の観点からも利点がある。以上の理由等によりテレスコピック型（ワイヤ駆動型）アクセス装置を選定した。

【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス】

- ✓ **対象工法：テレスコピック型(ワイヤ駆動型)**
- ✓ 選定理由：A)の選定理由に加え、非常時において圧縮空気を外気に排出することで容易にテレスコを縮小することができ、上方へのアクセスにおける救援対応にも適している*。また、ワイヤ支持の場合は上記のとおり駆動源を先端部に設ける必要がないことから、アーム本体の先端部を軽量化できるとともに、屈曲関節部を追加できる点で、状況に不確かさのあるペDESTAL内の干渉物を回避できる可能性が他案と比較し高くなる。以上の理由等からテレスコピック型（ワイヤ駆動型）アクセス装置を選定した。

*：救援対応はテレスコ内の圧縮空気を外気排気することでテレスコを縮小し、アーム根本のリール機構のワイヤを巻き取ることでエンクロージャへ引き出し、回収することを想定している。

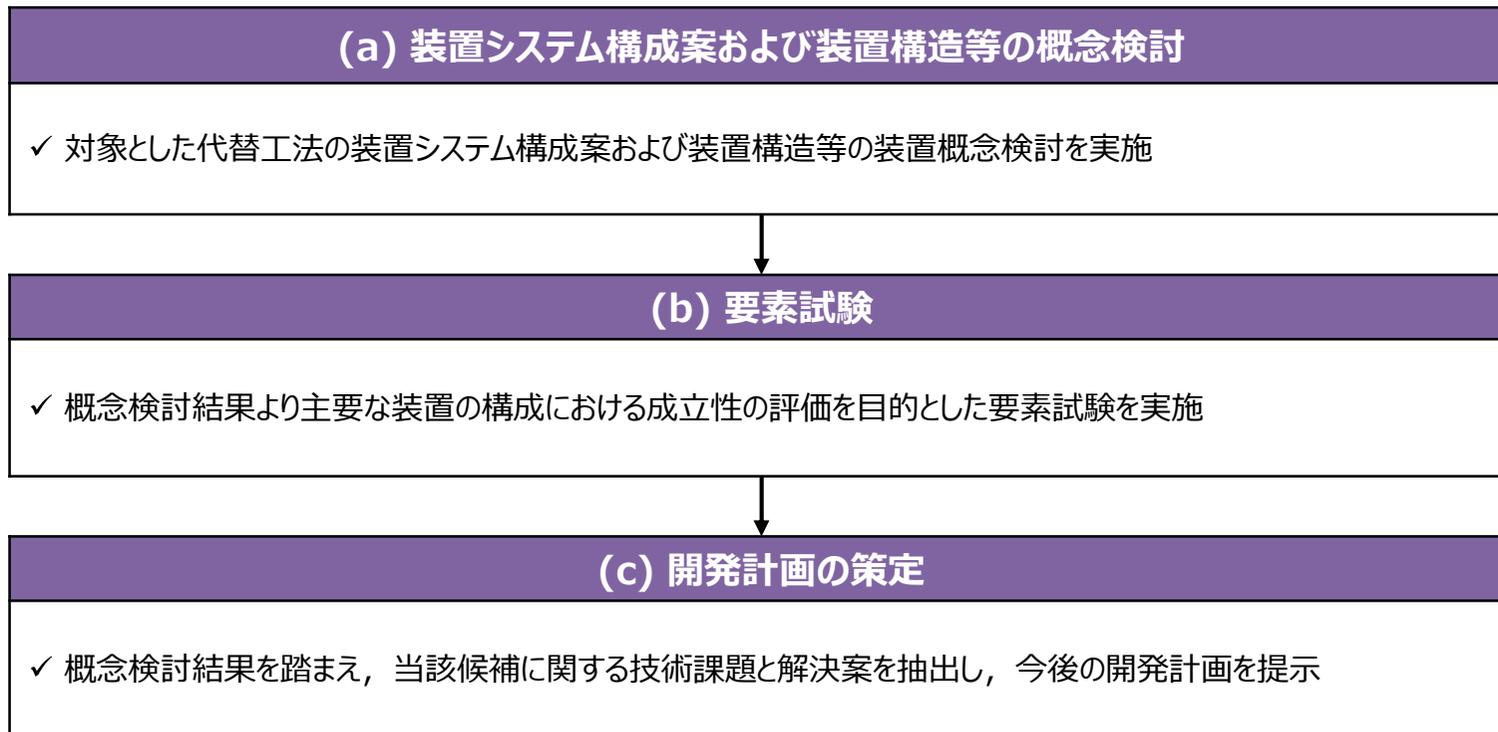
5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

- ③対象工法選定の結果より，【A）ペDESTAL内へのアクセス装置】および【B）ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】は，共に“テレスコピック型（ワイヤ駆動型）”として，装置構造およびシステム構成案等の概念検討を実施した。本概念検討の作業フローを以下に示す。



5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討 (1/11)

- ▶ 下部アクセス装置の概念検討を進めるにあたり、改めてRPV内部調査の目的およびアクセス装置の要求機能（仕様）を以下に示す。

<RPV内部調査(代替工法)の目的>

- ✓ 燃料デブリの取り出しに先立ち、燃料デブリの位置情報の把握、炉内構造物の損傷状況および線量等の把握を目的とする。また、代替工法は最新の調査結果等より不確定性の高い環境への適合性を考慮した検討により早期実現可能な工法を開発することを目的とする。

<アクセス装置の要求機能（仕様）>

- ✓ RPV内部調査の目的をもとに【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】および【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】の主な要求機能（仕様）を下表に示す。

		要求機能（仕様） A)ペDESTAL内へのアクセス		要求機能（仕様） B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス	
1	アクセスルート	A)1-1	アームの全長が18m程度であること	B)1-1	アクセス装置はペDESTAL底部のグレーチングのレベルからRPV下部まで（8m程度）上方にアクセスできること
		A)1-2	アームの断面形状（X-6ベネ）が幅350mm以下×高さ550mm以下を満足すること	B)1-2	RPV下部の開口部に挿入される際のアクセス装置の断面形状は1.0m以下×0.7m以下であること
		A)1-3	X-6ベネからアクセスする場合、A)アームおよびB)アクセス装置を組合せた状態（総全長約26m）でエンクロージャ（全長8m）に格納できること	B)1-3	エンクロージャに格納できるように伸縮可能な構造であること
		A)1-4	X-6ベネとのレベル差のあるCRD開口を通過するために必要な機構を有すること（例：屈曲関節を設ける場合は屈曲箇所が2箇所以上有する等）	—	—
		A)1-5	アームがCRD開口（幅760mm×高さ1980mm程度）を通過すること	—	—
2	ペDESTAL内の状況	A)2-1	—	B)2-1	CRDハウジング等の干渉物を回避する機構（屈曲関節等）を有すること
3	環境条件	A)3-1	高線量、高温環境下において、PCV内にアクセスする範囲は耐放射線性、ペDESTAL内にアクセスする範囲は耐水性を考慮すること	B)3-1	高線量、高温環境下において、PCV内にアクセスする範囲は耐放射線性、ペDESTAL内にアクセスする範囲は耐水性を考慮すること
		A)3-2	非常時における装置の遠隔回収が可能であること	B)3-2	アクセス装置先端に炉内調査に必要な調査カメラ、線量計、光源等が設置ができること
		A)3-3	非常時における装置の保守（遠隔・人手）が可能であること	B)3-3	非常時における装置の遠隔回収が可能であること
		—	—	B)3-4	非常時における装置の保守（遠隔）が可能であること

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

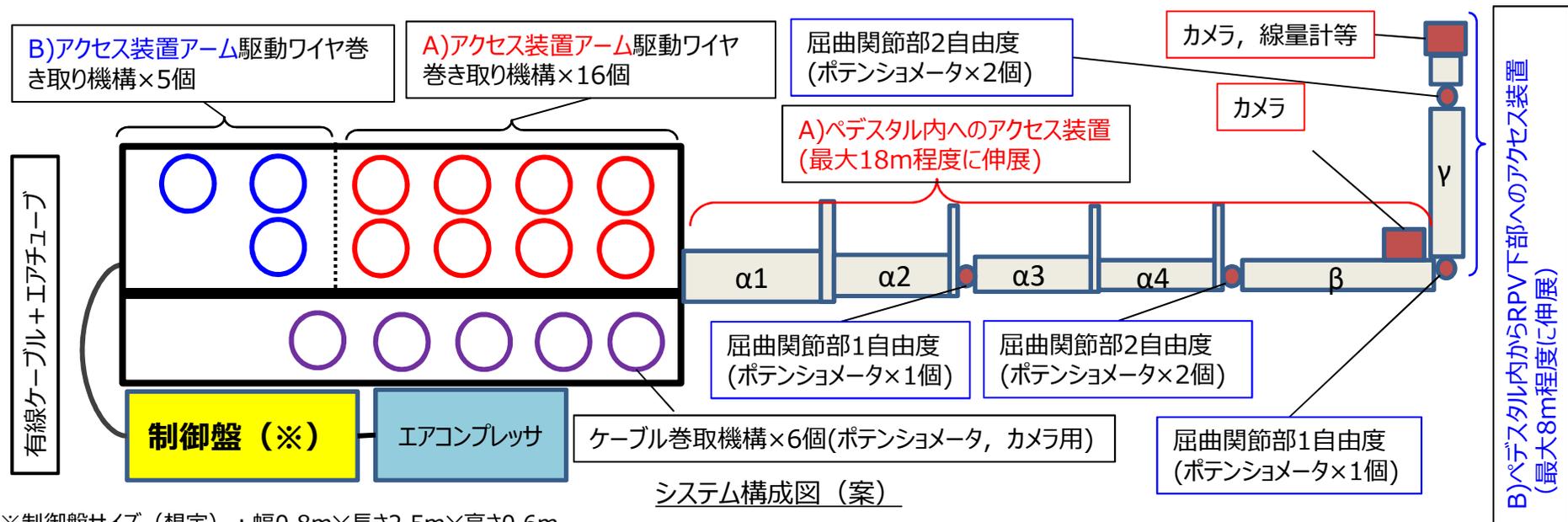
④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討 (2/11)

■ システム構成案

- 要求機能を基にテレスコピック型（ワイヤ駆動型）のアクセス装置に必要なシステム構成を検討した。
- 下図より，【A）ペDESTAL内へのアクセス装置】および【B）ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】のアーム先端部にはカメラおよび線量計等が取り付け機構を有しており，またアクセスルート条件を満たすために屈曲関節部を設ける。
- 各アームの伸展動作はテレスコ内部に流入した空気圧と複数のワイヤにより駆動される機構であり，ワイヤを巻き取るためのモータ等はアーム本体でなくエンクロージャ側に設けることによりアームの軽量化が可能となる。



※制御盤サイズ (想定) : 幅0.8m×長さ2.5m×高さ0.6m

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

要求機能（仕様）：A)1-1, B)1-1

(3) 代替工法案の対象

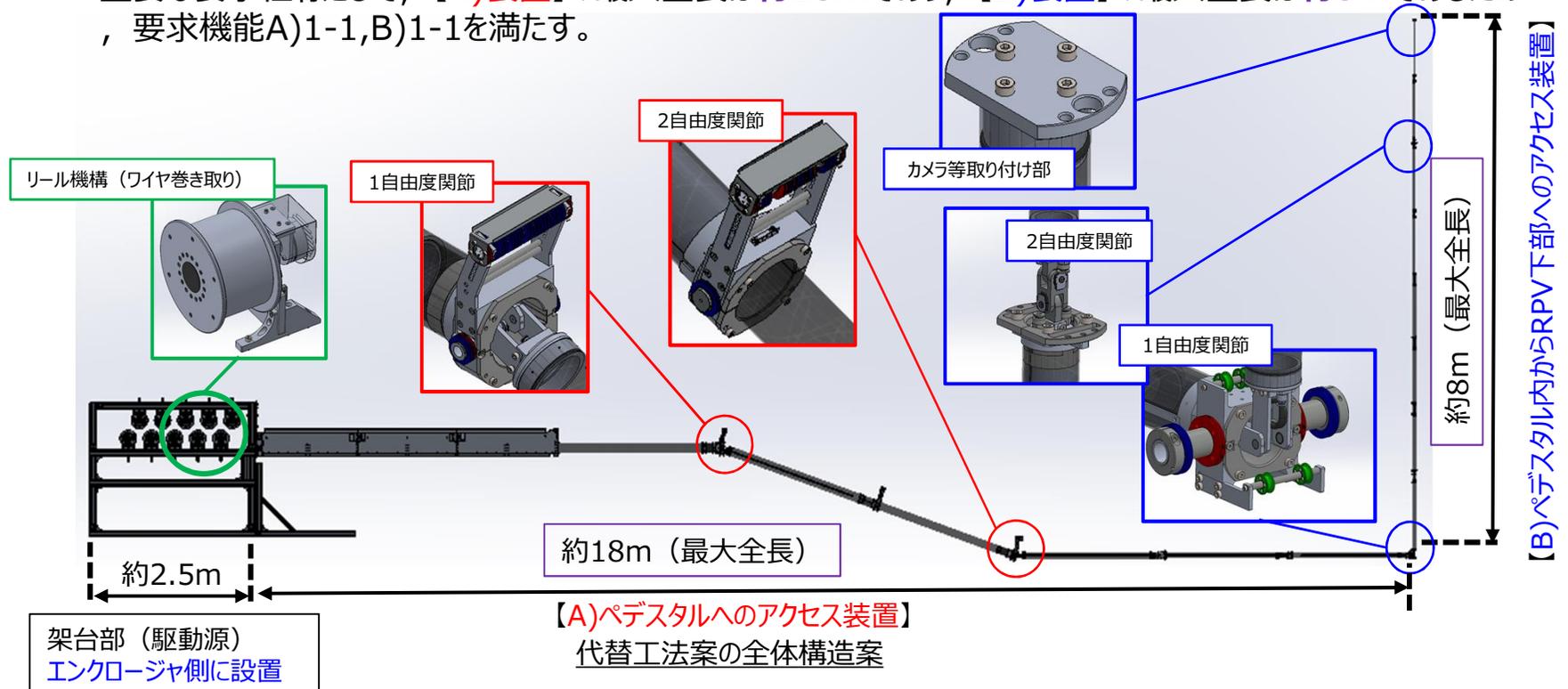
④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(a) システム構成案および装置構造の概念検討（3/11）

■ 装置全体構造（1/2）

- システム構成案をもとに【A)ペDESTALへのアクセス装置】および【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】の装置全体構造を以下に示す。
- 主要な要求仕様として、【A)装置】の最大全長は約18mであり、【B)装置】の最大全長は約8mであるため、要求機能A)1-1,B)1-1を満たす。



5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

要求機能（仕様）：A)1-2,A)1-3, A)1-5,B)1-3

(3) 代替工法案の対象

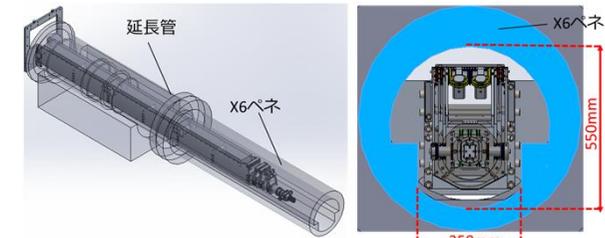
④ 概念検討

【アクセス装置共通】

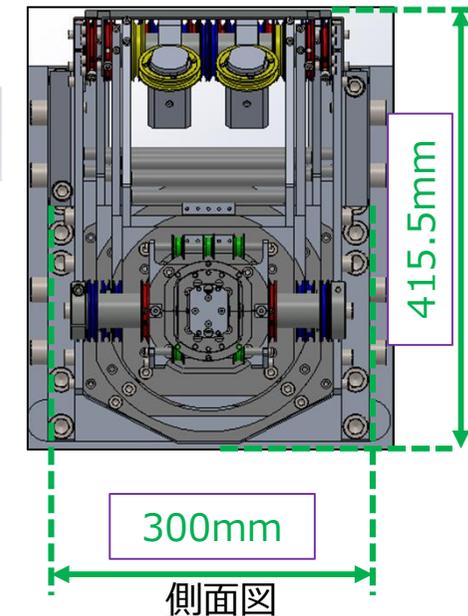
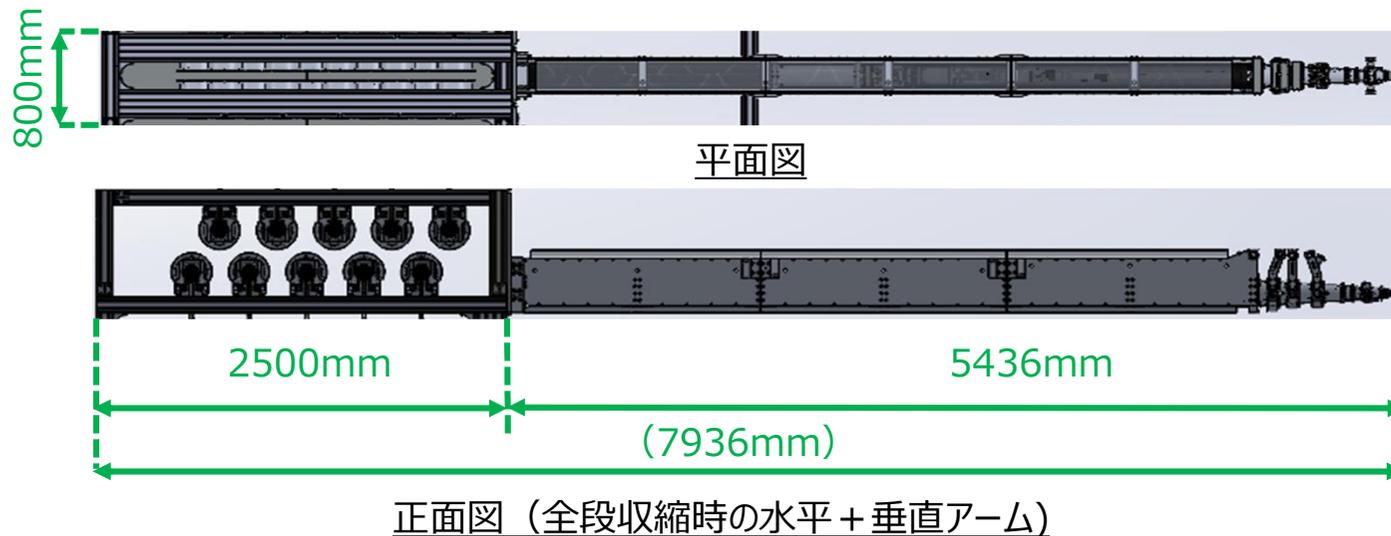
(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討（4/11）

■ 装置全体構造（2/2）

- アクセス装置全体の各アームが収縮した状態を以下に示す。
- 主要な要求仕様として、アームの断面形状は最大幅は**300mm**かつ最大高さは**415.5mm**であり、要求機能A)1-2である「X6ペネの開口サイズ（幅**350mm**×高さ**550mm**）」以下および要求機能A)1-5である「アームがCRD開口（幅760mm×高さ1980mm程度）を通過すること」を満足する。また、すべてのロッドが収縮した状態で全長は**約8m**であり、要求機能A)1-3,B)1-3のエンクロージャーへの格納条件を満たす。



アクセス装置挿入時の外観（X6ペネ）



5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

要求機能（仕様）：A)1-4

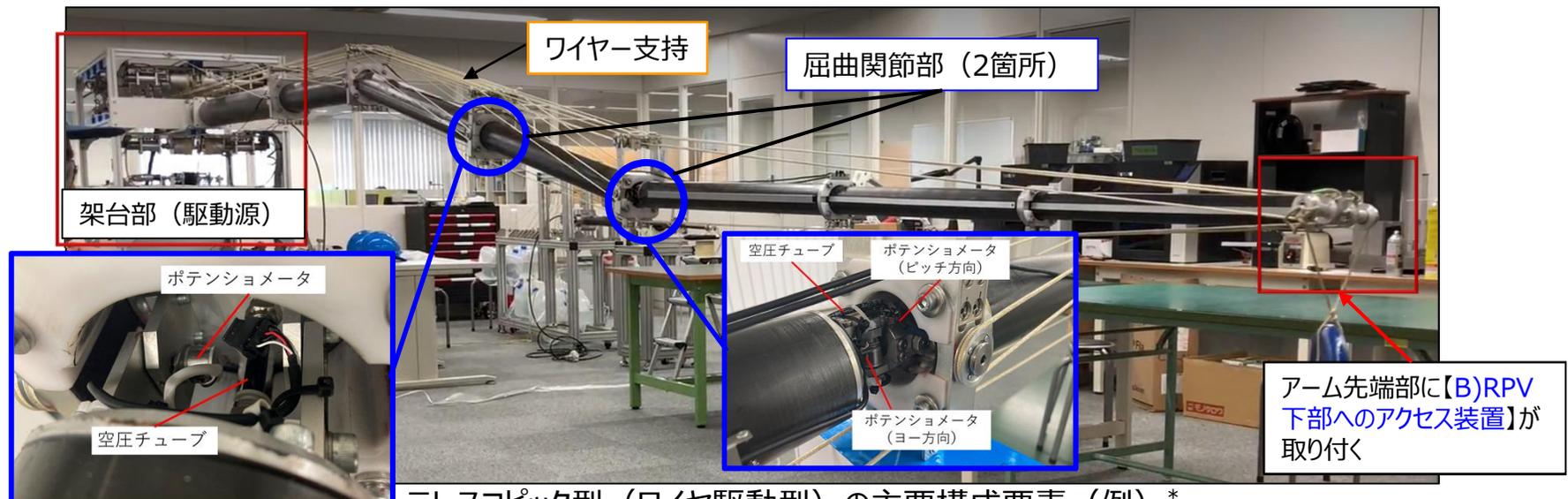
(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討 【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討（5/11）

■ 装置構造（1/6）

- 【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】の参考としてテレスコピック型(ワイヤ駆動型)のロングリーチアームの試作機を以下に示す。
- 主要な要求仕様として，【A)装置】は屈曲関節部が2箇所備わっており，駆動ワイヤの長さを調整することで伸縮だけでなく，屈曲も可能となるため，要求機能A)1-4である「X6ペネとのレベル差のあるCRD開口」を通過することが可能となる。また，テレスコ内部を印加する空気圧とテレスコを操作するワイヤの張力を適切に制御することで，テレスコ各段の自重による曲げの負荷を抑制することができる。



テレスコピック型（ワイヤ駆動型）の主要構成要素（例）*

* 出典：岡朋宏，木村直人，広瀬茂男，他，“屈曲関節を有するワイヤ干渉駆動型テレスコピック長尺アーム「Truss Arm」の伸縮制御”，第41回日本ロボット学会学術講演会予稿集2023

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

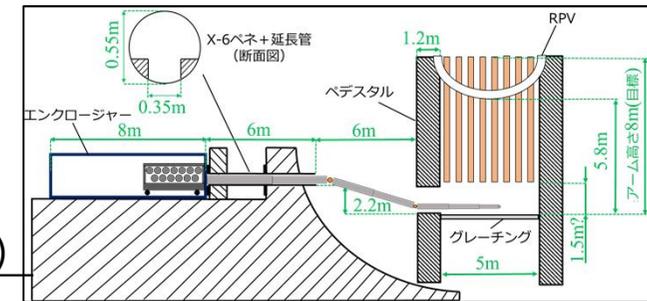
(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討 【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】

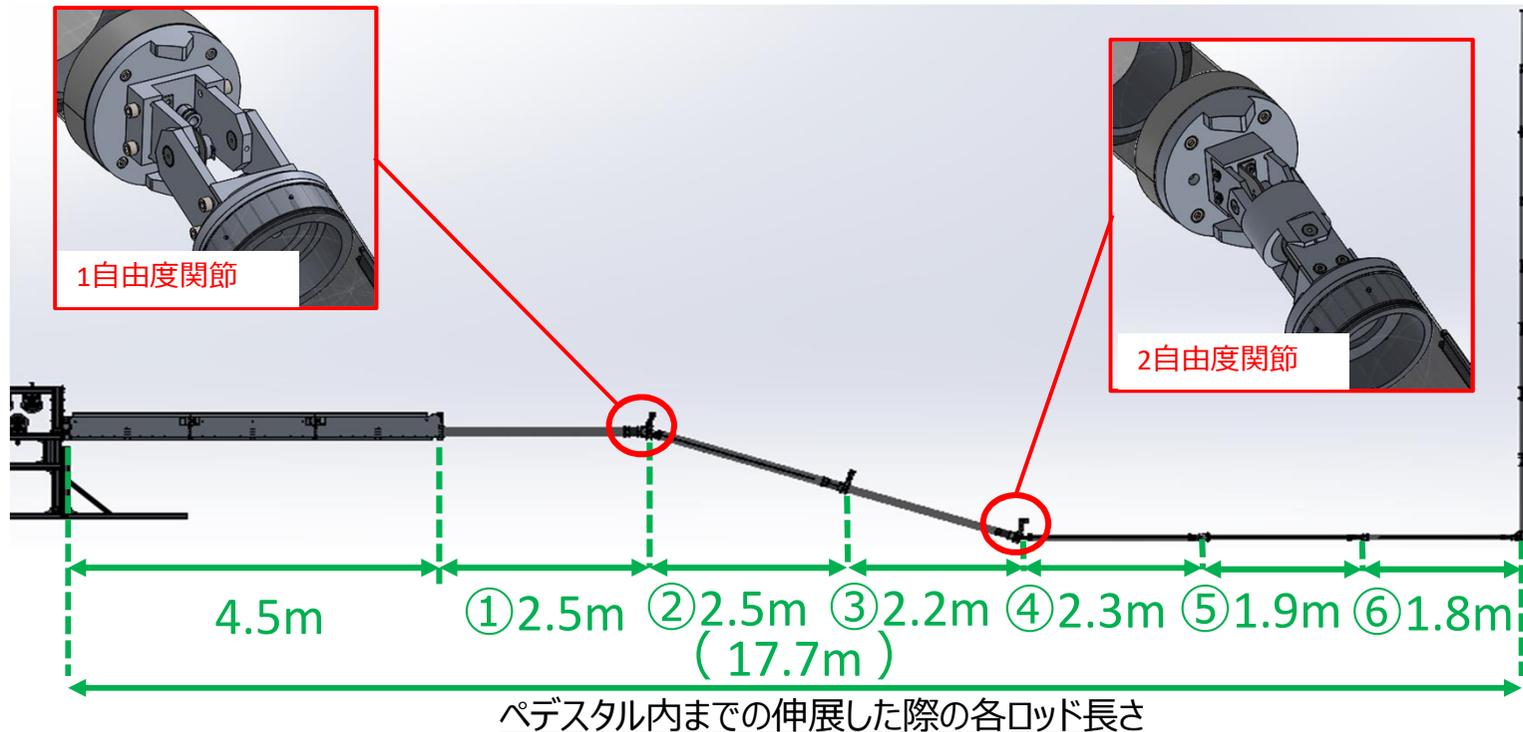
(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討 (6/11)

■ 装置構造 (2/6)

- 以下に【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】の各ロッド長さを示す。
- 【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】は全7段のロッドで構成され、ペDESTAL内へ挿入した状態の全長は**17.7m**であり、想定されるRPV下部の開口位置まで伸展させることが可能である。



【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】の伸展動作



5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

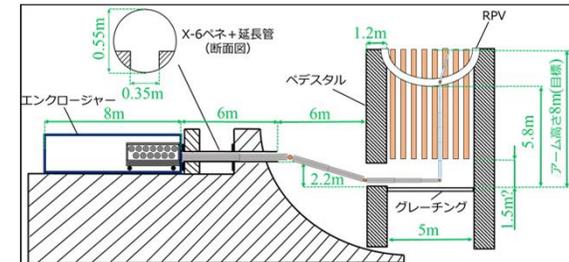
(3) 代替工法案の対象

要求機能（仕様）：B)1-2,B)2-1

④ 概念検討

【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討（7/11）



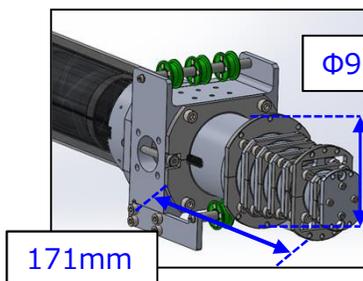
【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】の伸展動作

■ 装置構造（3/6）

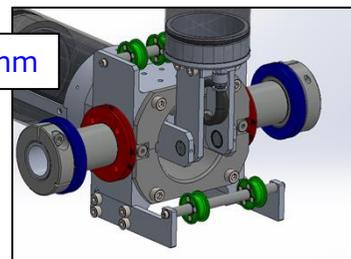
- 右図および下図に【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】であるテレスコピック型(ワイヤ駆動型)のアーム構造を示す。
- 【B)装置】は全8段のロッドから構成されており、駆動ワイヤは2自由度関節+ロッド伸縮で4本、垂直関節駆動ワイヤ1本の計5本でロッドの伸展量と姿勢を制御する。
- 主要な要求仕様として、RPV下部の開口部に挿入される部分の最大太さは **Φ96mm** であり、要求機能B)1-2の「RPV下部の想定開口サイズ（1.0m×0.7m）」以下を満足する。また、要求機能B)2-1 に関しては、③部に2自由度関節部を設けており、当該部の**屈曲動作により可能な範囲で干渉物の回避が可能**である。
- 主要な構成要素である②垂直関節部および③2自由度関節部の構造概要（ワイヤ駆動部を含む）を次頁以降に示す。



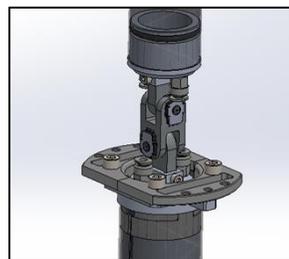
RPV下部へのアクセス装置全体図



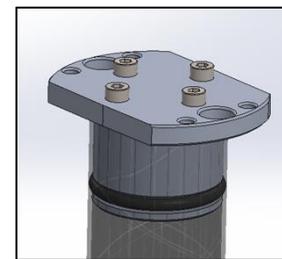
①収縮時状態



②垂直関節部



③2自由度関節部



④先端部

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

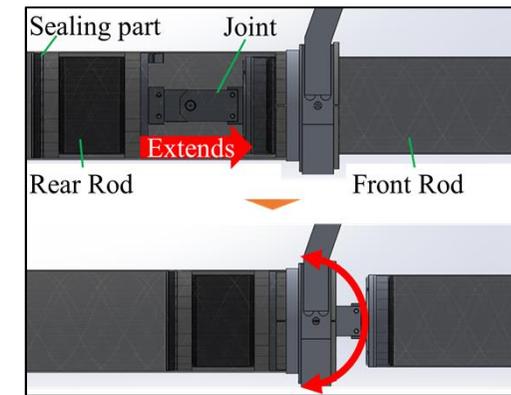
(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討 【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】

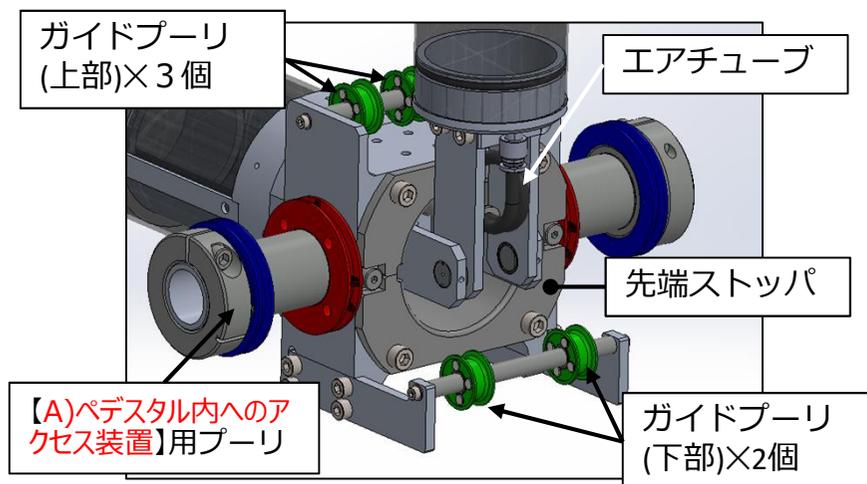
(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討 (8/11)

■ 装置構造 (4/6)

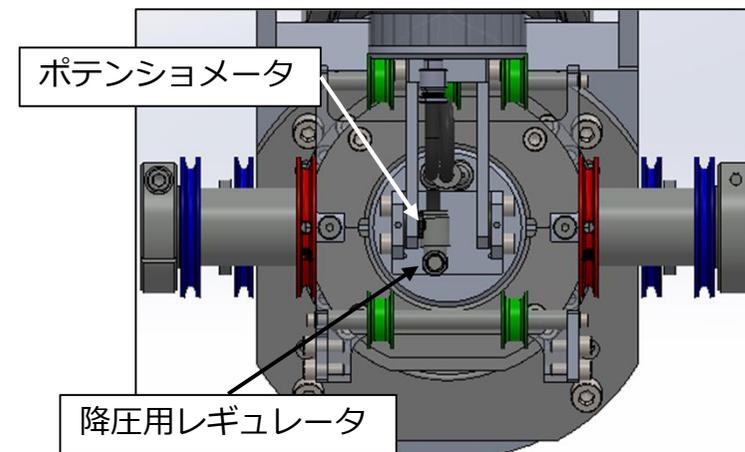
- 以下に②垂直関節部の構造概要を示す。
- 【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】も【A)ペDESTAL内へのアクセス装置】と同様にエアチューブを介し、先端側のロッドへ空気を伝達する。また、ワイヤにより伸展・収縮を制御する構造である。
- 【B装置】の①収納状態から根本側のロッドを伸展させ、関節部が露出した際（上図参照）に屈曲動作が可能となる。屈曲動作は垂直関節用のワイヤを用いて行い、垂直状態に姿勢を保つことができる。
- 上記の構造は装置の成立に重要な構造であり、今後も継続的な開発が必要となるが、まずは装置の成立性検証を目的として、エアによる伸展動作およびワイヤによる屈曲動作の成立性確認試験を実施した。



屈曲関節の可能状態



②垂直関節部 (鳥瞰図)



②垂直関節部 (側面)

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

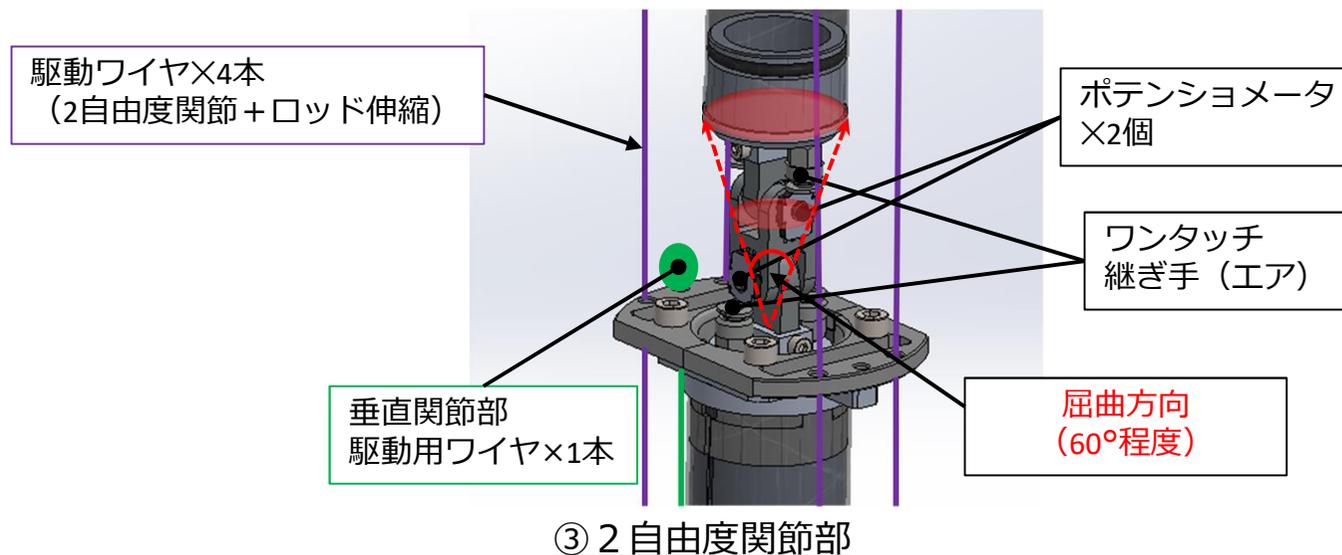
(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討 【(B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討 (9/11)

■ 装置構造 (5/6)

- 以下に③ 2自由度関節部の構造概要を示す。
- 【(B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】は垂直関節駆動用ワイヤにアクセス装置Aに対して垂直に屈曲され、駆動ワイヤ（計4本）により先端ロッド部の伸展量と姿勢を制御する。姿勢に関しては下図のように60°程度の範囲内で干渉物の回避が可能になる。
- 上記の構造は装置の成立に重要な構造であり、今後も継続的な開発が必要となるが、まずは装置の成立性検証を目的として、ワイヤによる屈曲動作の成立性確認試験を実施した。



5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

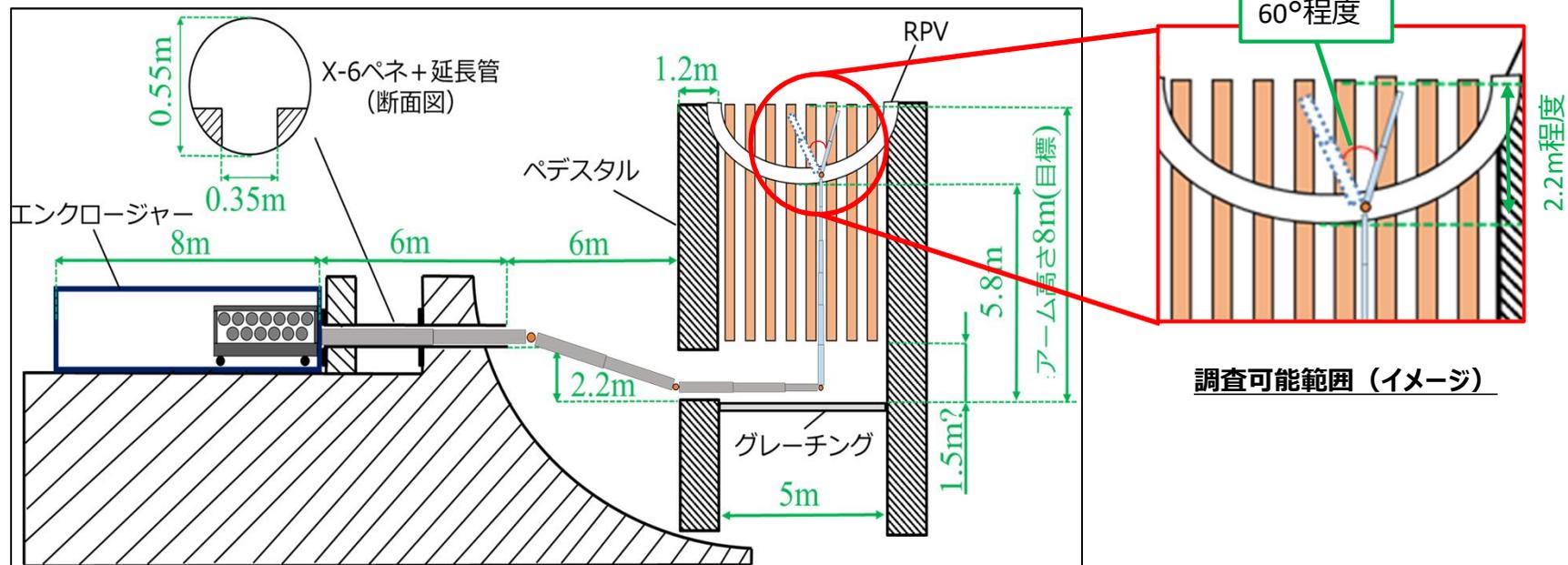
④ 概念検討

【(B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討 (10/11)

■ 装置構造 (6/6)

- 以下に本アクセス装置のアクセスイメージを示す。
- 本アクセス装置の調査可能範囲（アクセスできる範囲）はRPV下部の想定開口部からおよそ2.2m上部までの位置（およそCRDハウジング上端面）であり、先端ロッド部をRPV内部で屈曲させる場合は60°程度の範囲で周囲の調査が可能になる。



提案するアクセス装置によるアクセスイメージ

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

要求機能（仕様）：A)3-1, A)3-2, A)3-3,
B)3-1, B)3-2, B)3-3, B)3-4

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(a) 装置システム構成案および装置構造の概念検討（11/11）

■ 環境条件および非常時対応について

- 耐放射線性，耐高湿性，耐水性，保守性について
 - ✓ 駆動源・制御装置は全てアームの根本側に配置され，アーム本体は電子機器を含まず機械要素のみで構成されるので耐環境性に優れる。また，アーム・架台部・制御装置のそれぞれのユニットごとにメンテナンスが可能であるため保守性に優れる。
 - ✓ ただし，本事業ではそのユニットごとの具体的なメンテナンス方法（一例としてワイヤの張り替え方法等）に関する検討が進んでいないため，具体的なメンテナンス方法を今後検討する必要がある。
- アーム先端に調査装置（カメラ，線量計，など）の設置について
 - ✓ 概念検討の結果，手先ペイロードは最大6kg程度であり外径Φ100mm程度のサイズであれば各種調査装置の設置が可能である。なお，設置する各種機器および設置方法等については今後具体的に検討する必要がある。
- 非常時の遠隔回収について
 - ✓ 本アクセス装置は空気で伸展するテレスコをワイヤで牽引する機構であることおよびアーム駆動部の重量は約65kgと軽量であることから，テレスコ内部の空気を排気することで，ワイヤにより非常時回収（収縮）が可能である。また，駆動ワイヤは冗長な本数が張られ，回収方法が多重化されているシステムであり，非常時回収の確実性は高いと考える。
 - ✓ ただし，非常回収方法については机上検討における構造的な成立性を示しているため，その制御性には考慮が必要であり，実規模モックアップ等の実動作での確認が必要になる。

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

【アクセス装置共通】

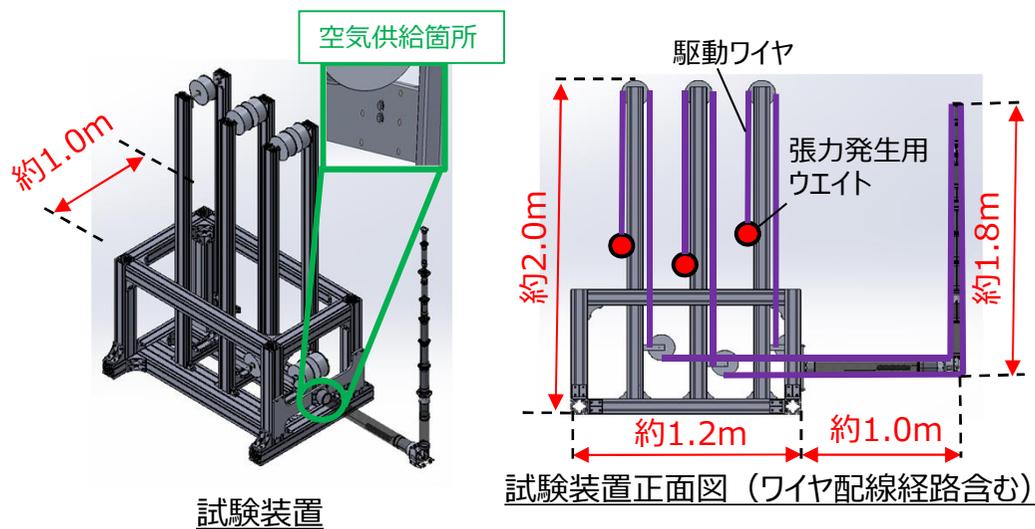
(b) 要素試験 (1/3)

■ 要素試験計画 (1/2)

- 本検討で新規検討した【B)ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置】に関して、重要な機構である**伸展動作**および**屈曲動作**の成立性検証を目的として以下の要素試験を計画した。

要素試験確認項目

#	試験項目	確認項目	判定基準
①	主要部の動作確認試験	✓ワイヤと空圧駆動による垂直伸展動作の確認 ✓屈曲動作の確認（垂直伸展した状態）	✓根本側のロッドから順にスムーズに伸展すること。 ✓関節部がスムーズに屈曲できること。



試験装置の外寸・重量 (主要箇所)

外寸	アーム部 : 最大幅96mm
	: 最大長さ約2.8m(アーム高さ1.8m)
	: 最小長さ約1.2m(全収縮時)
	: ロット数8本(8段)
架台部	: 幅1.0m x 長さ1.2m x 高さ2.0m
重量	アーム部 : 可動部約2.3kg
	: 全体約9.4kg
	架台部 : 約242kg
	総重量 : 約251kg

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

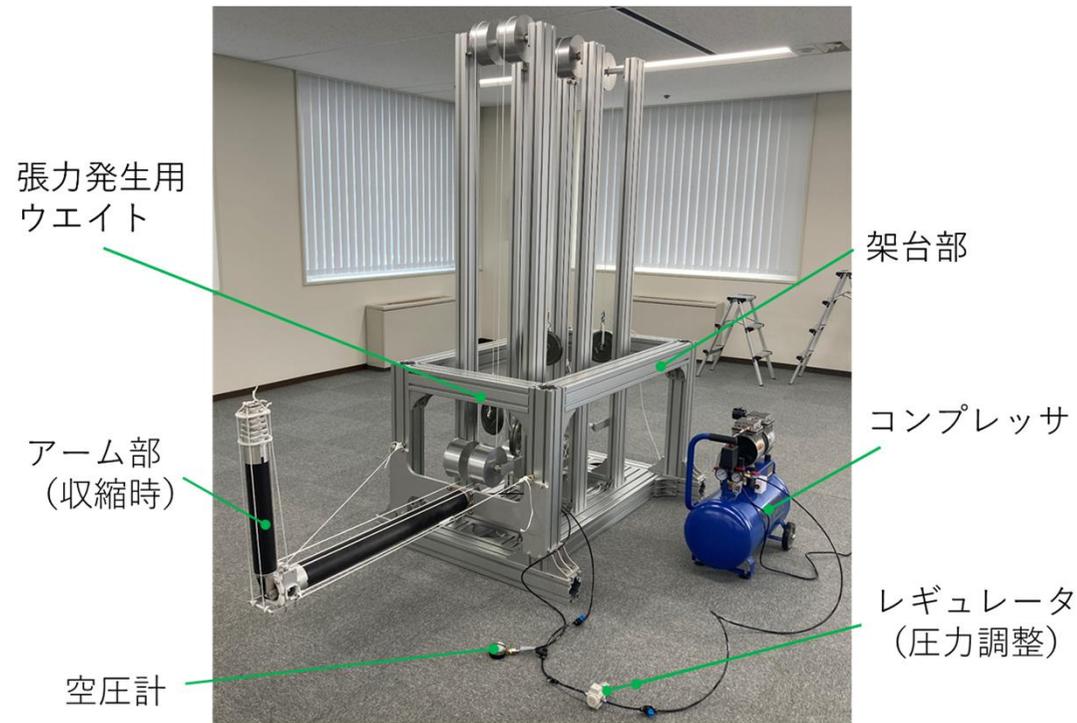
④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(b) 要素試験 (2/3)

■ 要素試験計画 (2/2)

➤ 試験設備および試験装置を以下に示す。



試験設備 (外観)

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(b) 要素試験 (3/3)

■ 試験結果

➤ 主要部の動作確認試験に関する試験結果を下表に示す。

#	試験項目	確認項目	アウトプット/判定基準	試験結果
①	主要部の動作確認試験	✓空気漏れの確認	✓根本側のロッドから順にスムーズに伸展すること。	✓空気漏れの影響が少なく、根本のロッドからスムーズに伸展することを確認した。
		✓空気圧によるテレスコップの伸展動作の確認	✓関節部がスムーズに屈曲できること。	✓ワイヤ駆動により1自由度関節部および2自由度関節部がスムーズに屈曲動作できることを確認した。



動作確認試験の様子（屈曲→伸展→屈曲）

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(c) 開発計画の策定 (1/2)

- ▶ 概念検討結果を踏まえ、代替工法に関する技術課題とその解決案を以下に示す。

代替工法に関する主な技術課題と課題解決案

#	アクセス装置	主な技術課題	課題解決案
1	共通	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 駆動ワイヤによる非常時回収方法の実現性検証 ✓ エンクロージャーの内部構造等に関する詳細検討 ✓ シール材, 接着部品の耐放射線性評価 ✓ アーム・架台部・制御装置に関する具体的なメンテナンス方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実スケール試作機および試験環境に合わせたモックアップ試験評価 ✓ エンクロージャー内におけるアームの高さ/方向性調整機能の追加および架台部とエンクロージャーの接続構造の検討 ✓ 放射試験後の各部材の機能の評価 ✓ ワイヤの張り替え等具体的なメンテナンス方法の検討およびその成立性の検証
2	ペダスタル内へのアクセス装置	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 周囲環境の影響による駆動ワイヤ等の損傷対策 ✓ 駆動ワイヤ損傷時の回収方法に関する検討 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 駆動ワイヤにカバーを被せ保護する方法等の損傷対策案の検討 ✓ エンクロージャー本体の移動によるアームの引き抜き方法や関節部を切断離す等の非常時対策案の検討
3	ペダスタル内からRPV下部へのアクセス装置	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 周囲環境の影響による駆動ワイヤ等の損傷対策 ✓ 屈曲関節部を増設するためにはワイヤの増設等が必要 ✓ リール機構による自動制御の実装 ✓ 新規機構の検討のため, 現場適用までに期間を要する 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 駆動ワイヤにカバーを被せ保護する方法等の損傷対策案の検討 ✓ ワイヤの配線やリール機構の小型化等によるエンクロージャー内への収納方法の検討 ✓ 逆運動学計算によるワイヤの繰り出し量の制御と計測角度による補正制御の実装 ✓ 早期の実スケール試作機の開発と実験的検証

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(3) 代替工法案の対象

④ 概念検討

【アクセス装置共通】

(c) 開発計画の策定 (2/2)

- 本装置の開発を継続する場合，以下のような開発計画が想定される。ただし，今回抽出した技術課題の解決が先決であり，その結果を踏まえて今後の工期短縮について検討する必要がある。

今後の開発計画案

#	2023年度	2024年度以降※
開発フェーズ	TRL1~3 (適正評価, 概念検討, 要素試験)	TRL4 (基本設計, 設備仕様検討, 要素試験, モックアップ等)
開発内容	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 現状想定されるアクセスルートや環境の制約条件等の前提条件から考えられる課題の抽出および課題に対する解決方針（要求事項）の整理し，最初に考えられる各工法および装置案を可能な限り抽出した。 ✓ 抽出した各案に対して主に現場適用性の観点から比較評価を実施し，対象工法を選定した。 ✓ 対象とした代替工法の装置に関するシステム構成等の概念検討を実施し，主要な機構の成立性検証として要素試験から成立性確認および技術課題を抽出した。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 2023年度に抽出した技術課題に関する解決 ✓ 電動リールの追加と自動制御機能（逆運動学計算，補正制御）の実装および評価 ✓ 各アクセス装置の実スケール試作機的设计・製作 ✓ 実スケール試験による各種動作評価および非常時の回収方法の検証 ✓ 各アクセス装置の組合せ試験による動作検証 ✓ 詳細設計へ向けた技術課題の抽出と改善案の検討

※：2024年度以降の計画は，事業実施者の案として記載するもので決定事項ではありません。

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

(4) まとめ

■ 本年度の成果

- 従来工法の課題（RPV下部の開口径やアーム型アクセス装置の制約等）や最新のPCV内部調査結果等より現状想定されるアクセスルートや環境の制約条件等の前提条件を再整理した。その後、考えられる課題の抽出および課題に対する解決方針（要求事項）の整理を実施した。
- 設定した前提条件（アクセスルート条件）より当該装置は「ペDESTAL内へのアクセス装置」, 「ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置」の各アクセス装置を組み合わせることを前提とし、最初に考えられる各工法および装置案を可能な限り抽出した。
- 抽出した各案に対して主に現場適用性の観点から比較評価を実施し、評価結果として「ペDESTAL内へのアクセス装置」および「ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置」共に“ワイヤ駆動型のテレスコピック”を当該工法として選定した。
- 対象とした代替工法の装置およびシステム構成等に関する概念検討を実施し、「ペDESTAL内からRPV下部へのアクセス装置」における主要な機構の成立性検証として要素試験を実施し、成立性の確認および技術課題の抽出を行った。
- 上記結果を踏まえ、課題解決策および今後の開発計画を示した。
- また、概念検討結果より、代替工法は従来工法の課題（RPV下部の開口径やアーム型アクセス装置の制約等）の解消が見込める工法であると評価した。

5. 下部アクセス調査工法の開発

◆ 5.4 C) 代替工法の検討

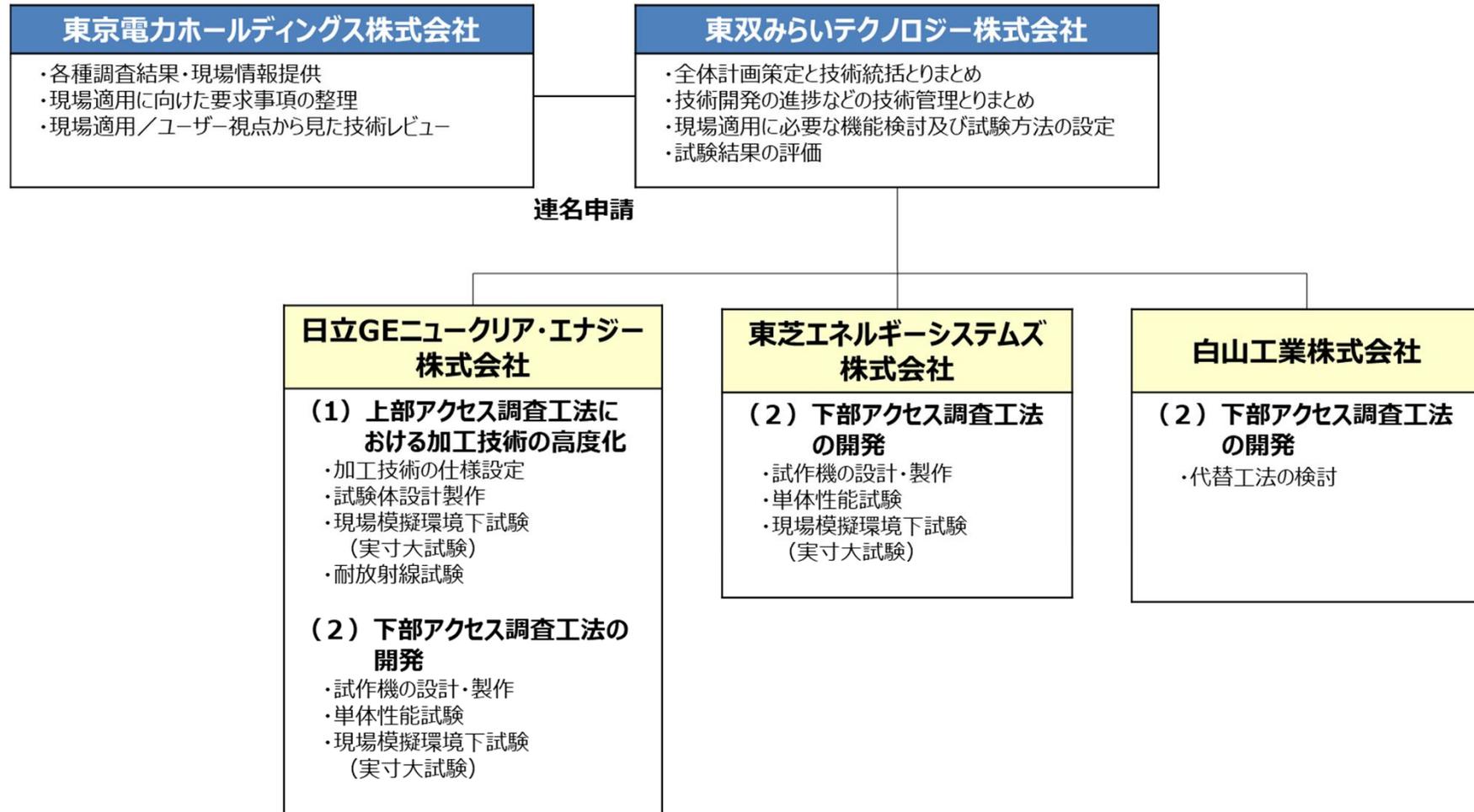
(5) 実施スケジュール

実施項目	2023年度											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
主要なマイルストーン								▼中間報告				最終報告▼
① 代替工法案の抽出 ・比較評価		代替工法案抽出・評価	▼代替工法案の対象決定									
② 代替工法案の概念検討					システム構成・装置構造 概念検討						▼システム構成図, 装置概念図等	
									技術課題抽出・開発計画策定			▼

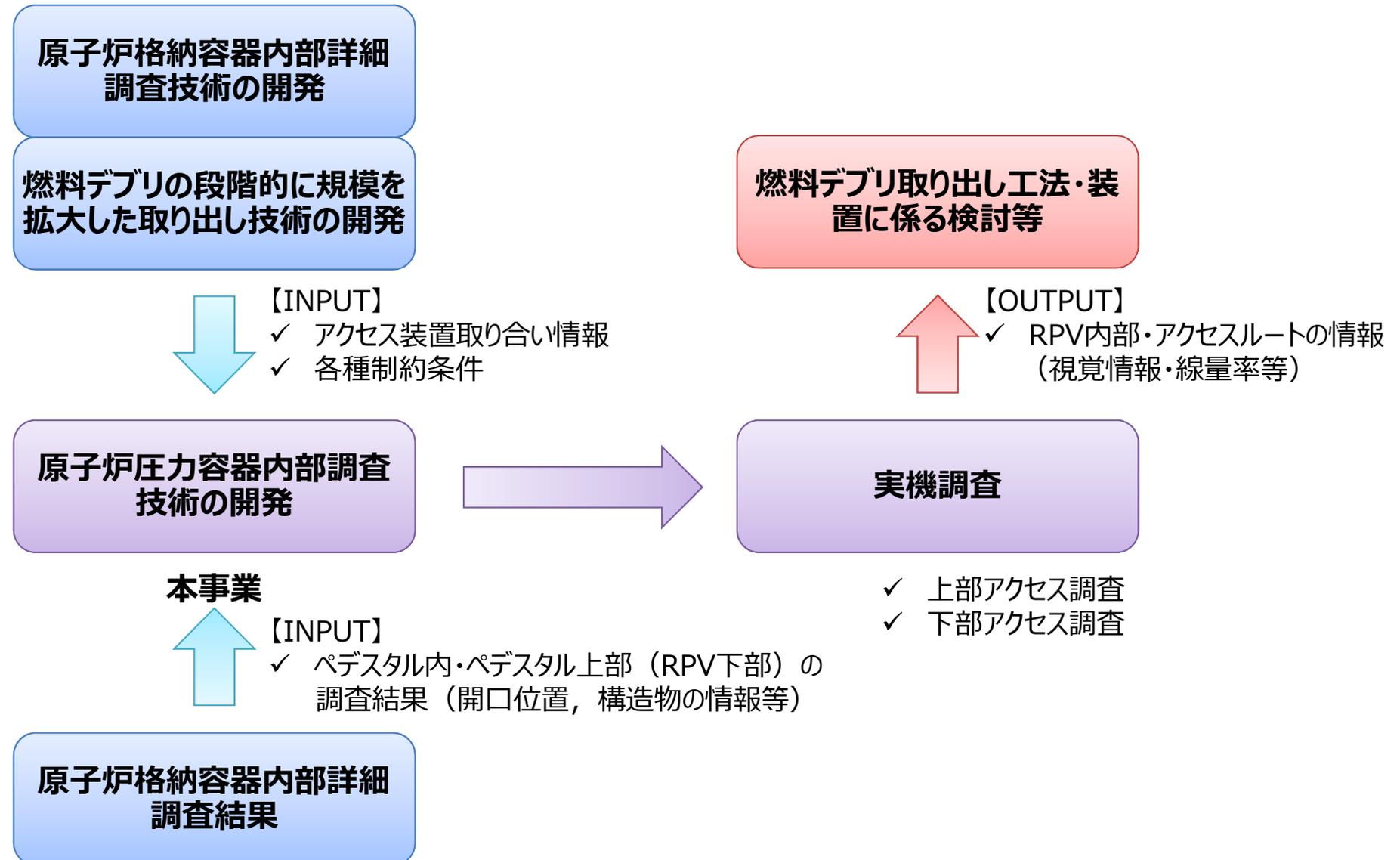
目次

1. はじめに
2. 研究の目的および背景
3. 研究の目標
4. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
 - 4.1 2022年度までの成果
 - 4.2 2023年度の実施概要
 - 4.3 試験計画
 - 4.4 試験結果
 - 4.4.1 試験結果(レーザー切断試験)
 - 4.4.2 試験結果(AWJ切断試験)
 - 4.4.3 試験結果(耐放射線性確認試験)
 - 4.5 開発の課題
 - 4.6 開発計画
 - 4.7 実施スケジュール
5. 下部アクセス調査工法の開発
 - 5.1 2023年度の実施概要
 - 5.2 A) ドローンを用いた調査工法
 - 5.3 B) テレスコパイプを用いた調査工法
 - 5.4 C) 代替工法の検討
6. 実施体制
7. 実施項目とその関連, 他研究との関連

6. 実施体制



7. 実施項目とその関連, 他研究との関係



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