

**TOSHIBA**

令和4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  
（既存配管を利用した原子炉圧力容器内部調査の技術開発））」

## 令和5年度最終報告

東芝エネルギーシステムズ株式会社  
2024年11月

# 目次

## 1. 補助事業の概要

- 1.1 研究の背景と目的
- 1.2 実施項目, TRLおよび他研究との関連
- 1.3 スケジュールと実施体制図
- 1.4 全体開発フロー

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

- 2.1 工場内試験の考え方（全配管共通）
- 2.2 ルート概要および主要機器
- 2.3 試験結果と将来開発課題
- 2.4 ここまでのまとめ

## 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

- 3.1 ルート概要および主要機器
- 3.2 試験結果と将来開発課題
- 3.3 ここまでのまとめ

## 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

- 4.1 ルート概要および主要機器
- 4.2 試験結果と将来開発課題
- 4.3 ここまでのまとめ

## 5. まとめ

# 1. 補助事業の概要

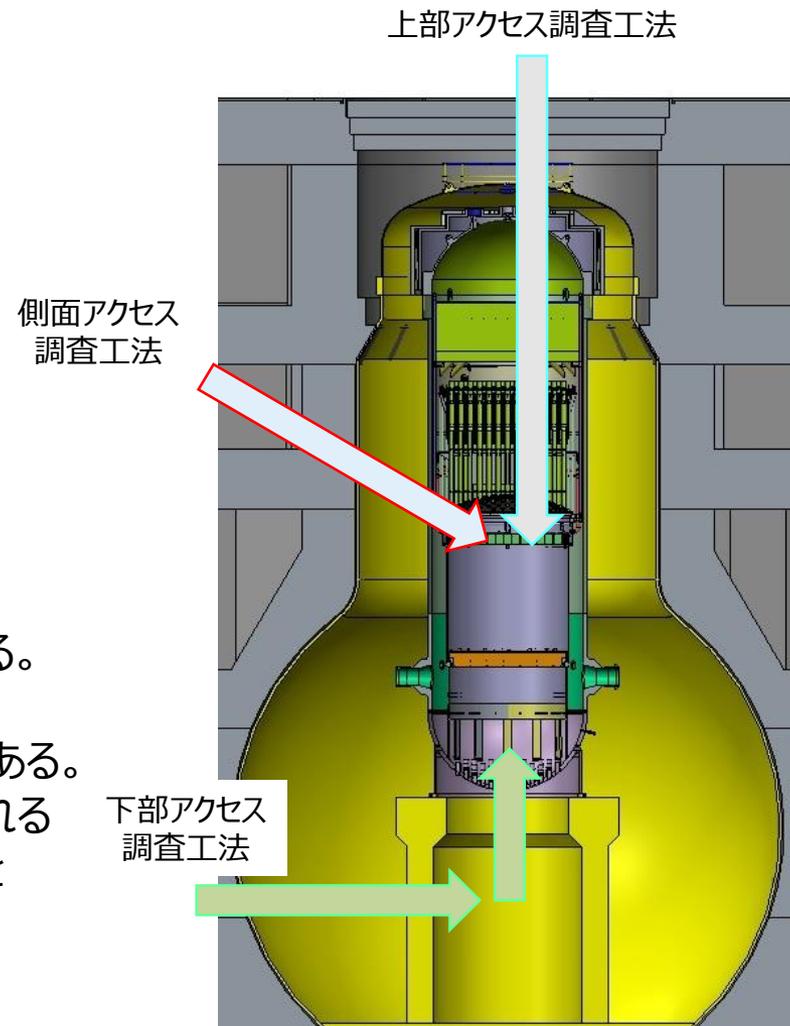
## 1.1 研究の背景と目的

【略語補足】

RPV：原子炉圧力容器

### ■ 背景（1/2）

- 燃料デブリ取り出し工法を検討する上で、**炉内の情報取得が必要とされている。**
- RPV内部調査工法として、これまでに
  - 上部から炉心にアクセスする工法（上部アクセス調査工法）
  - 側面から炉心にアクセスする工法（側面アクセス調査工法）の実機適用性が検討されてきた。
- 一方、上記の調査工法については、現場適用までに一定の時間がかかると想定される。
- よって、**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**を進めることも重要である。
- 2020年度からは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、内部を調査する下部アクセス調査工法の概念検討を進めている。



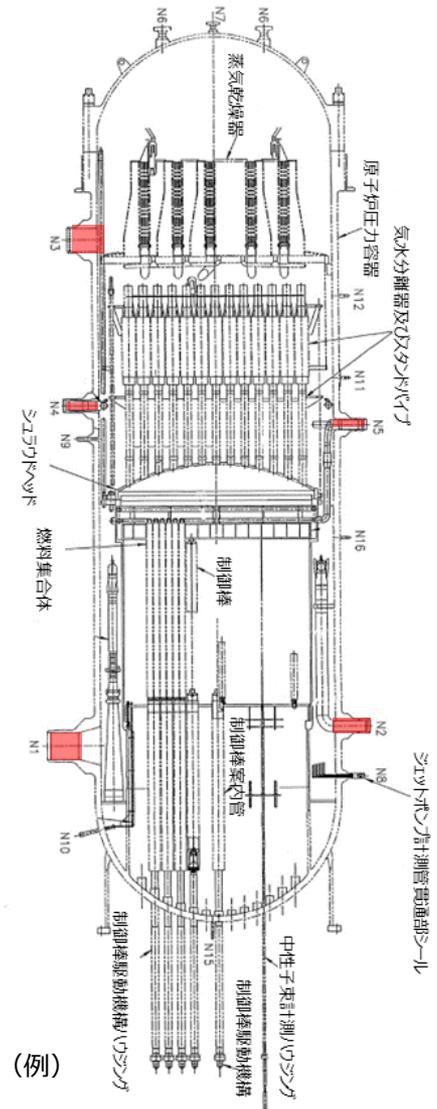
**背景①：現在研究する工法よりも早期にRPV内にアクセスするための研究も重要**

# 1. 補助事業の概要

## 1.1 研究の背景と目的

### ■ 背景 (2/2)

- 炉心部の上方から早期にRPV内部調査を実施できる可能性のある工法としては、既設配管を利用してRPV内にカメラを挿入して内部の調査を行うことが考えられ、東京電力HDでは小型の調査装置を用いた小口径配管（計装配管等）からの調査の検討を進めている。
- より大口径の配管へ適用するためには、
  - 配管の途中にある逆止弁やティ等の閉塞部を穿孔等して、調査装置を通過させる
  - 鉛直配管部の上方に調査装置を移動させるなどの課題が抽出されている。



背景②：大口径配管から調査する技術が求められているが、配管内移動に課題あり

# 1. 補助事業の概要

## 1.1 研究の背景と目的

### ■ 開発スコープとなる要素技術の特定

- 本事業は、作業員を含めた様々なヒト・モノの集合体である「RPV内部調査の全体システム」を完成させる過程となる。
- ゴール明確化のため、本事業の開発スコープの詳細を以下のように整理した。

#### 【公募要領が定義する開発キーワード】

“...本事業では、既存配管を利用したRPV内部調査技術の開発として、適用可能な既設配管ルートと**調査装置**（耐放射線性カメラ等）を検討した上で、既設配管内を通過・移動させてRPV内まで**調査装置を到達させるために必要となる装置類等の技術開発**を行い、工場内試験にて現場適用性の見通しを確認します。...”



開発キーワード：調査装置（+ 調査装置をRPV内に到達させる装置）



【本事業の開発スコープとなる要素技術】  
ルート構築技術・配管内移動技術・炉内状況確認技術

# 1. 補助事業の概要

## 1.2 実施項目, TRLおよび他研究との関連

### ■ 本事業の目的

【用語補足】

アニュラス：原子炉格納容器と原子炉建屋の間に設けられる気密性の高い円環状の空間

- **本事業では、既存配管を利用したRPV内部調査技術の開発として以下を目的とする。**
  - 適用可能な既設配管ルートと調査装置を検討する。
  - RPV内まで調査装置を到達させるために必要となる装置類等の技術開発を実施する。工場内試験にて現場適用性の見直しを確認する。

### ■ 本事業の目標

【調査の狙い】

- 既設配管ルートを利用する場合、到達できるのはアニュラス部等の炉心の外側であり、炉心へ到達するためにはRPV内到達後、シュラウド等の炉内構造物への穴あけが必要となる。
- 炉心へアクセスする工法は、上部アクセス調査工法、側面アクセス調査工法にて検討されている。
- **本事業では、RPV内部の状況が分かる映像を得ることで、炉内構造物の外観、据付状態を確認し、震災前の状況との差分を確認することを狙う。**

【目標】 ※TRLとしての目標は8頁参照

- **RPVノズル／配管穿孔部まで内視鏡を移送できる要素技術を開発する。**
- RPVノズル／配管穿孔部から内視鏡を吊り降すことができれば、より広範囲の映像取得が期待できる。各配管ルートごとの実現見込みや将来開発課題をまとめる。

# 1. 補助事業の概要

## 1.2 実施項目, TRLおよび他研究との関連

### 【関連資料】添付資料1

(\*1)参考：廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合，第116回事務局会議，公表資料より

(\*2)参考：IRID，原子力圧力容器内部調査技術の開発(2022年8月)，公開資料より

(\*3)高難度につき困難な場合はティAに切り替え

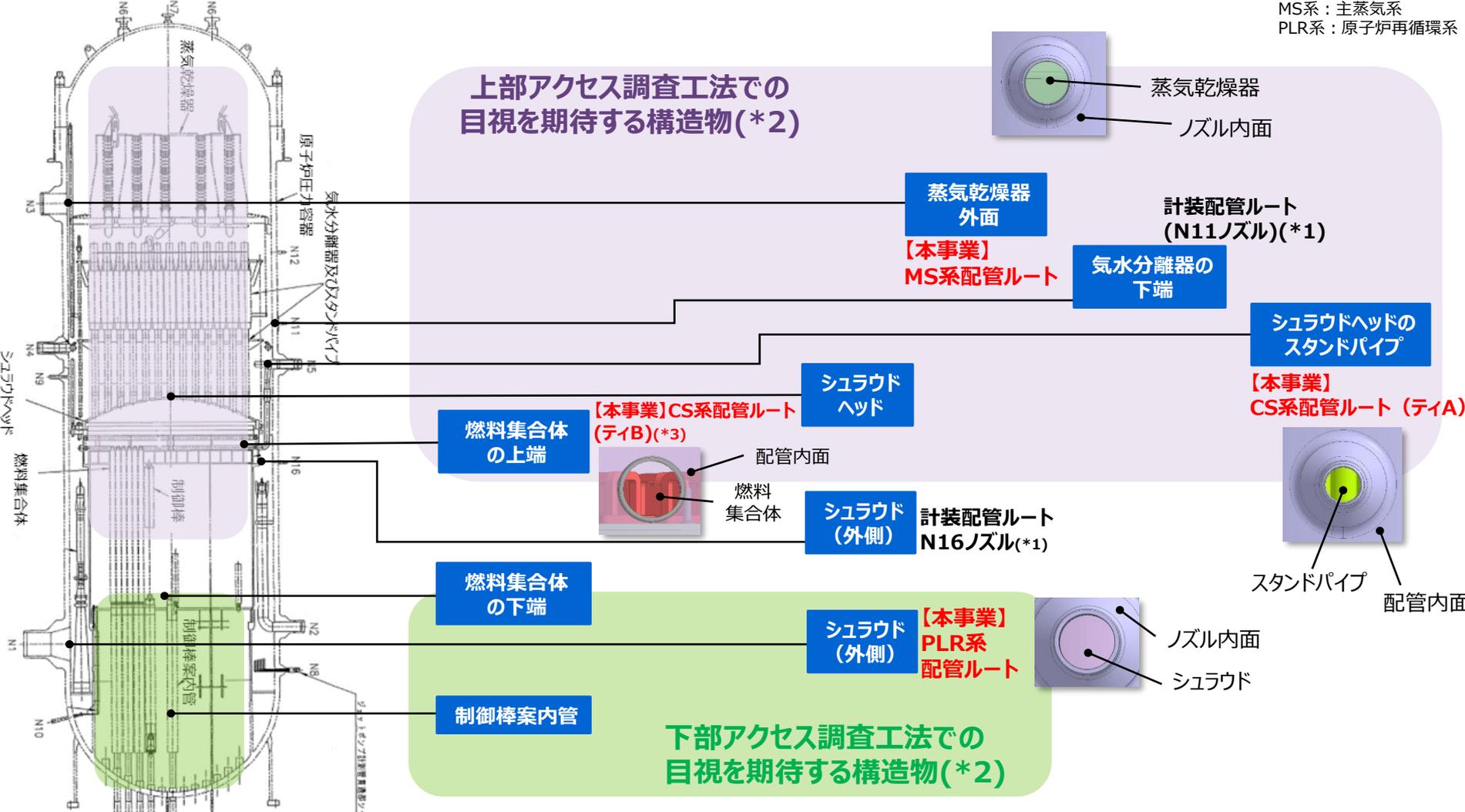
【略語補足】

CS系：炉心スプレイ系

MS系：主蒸気系

PLR系：原子炉再循環系

### ■ 期待する調査成果



・ 上部/下部アクセスシリーズは面的な調査、既存配管シリーズは点的な調査

・ 得られるデータ範囲は異なるが、上部・下部アクセス工法で期待するデータの一部をカバー可能

## 1.2 実施項目, TRLおよび他研究との関連

### ■ 実施項目

#### (1) 既設配管を利用したRPV内部調査計画と装置類の開発計画の策定

- 適用可能な**既設配管ルートを検討**し、作業の制約条件（線量, 作業環境, 干渉物の有無, 等）を考慮した上で、現場での既設配管へのアクセスおよび作業の実現可能性を検討する。
- 調査装置の機能要求・制約・RPV内部の調査可能な範囲等も確認した上で、**調査計画を策定**する。
- 調査に必要なとなる装置類の要求機能を検討し、それらの**開発計画を策定**する。

#### (2) 既存配管を利用したRPV内部調査技術に関する装置類の開発

- 上記（1）で策定した開発計画に基づき、**調査に適用性が高いと評価**された方法に必要なとなる装置類を試作する。
- 既設配管への調査装置を適用して調査する方法を模擬した**工場内試験**でその**現場適用性**を確認する。

(1) は調査で期待する成果を設定した上で、炉心スプレイ系配管, 主蒸気系配管, 原子炉再循環系配管の3ルートを選定  
(2) にて適用可能な装置類を開発

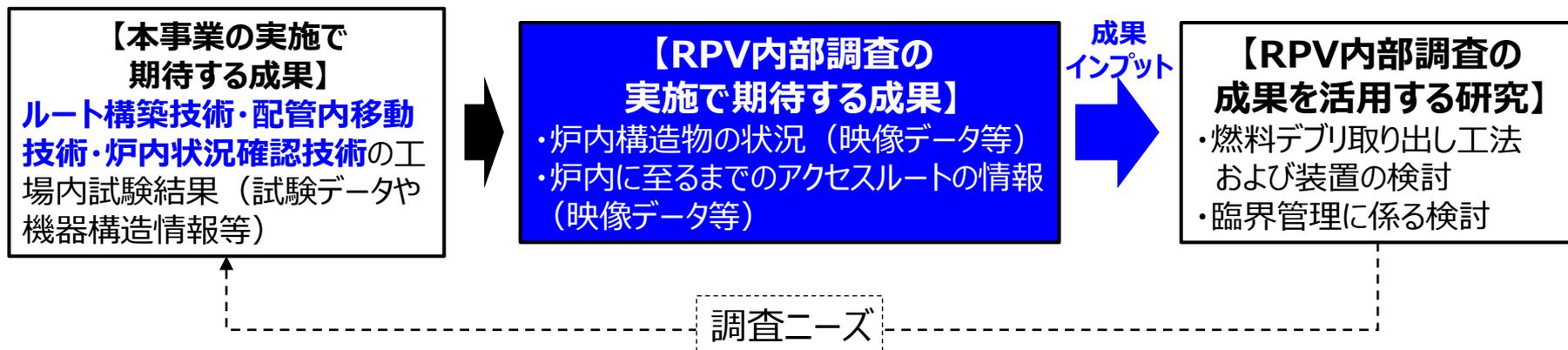
# 1. 補助事業の概要

## 1.2 実施項目, TRLおよび他研究との関連

### ■ TRL

実施項目	目指す効果	TRL定義
(1)既設配管を利用したRPV内部調査計画と装置類の開発計画の策定	(計画の策定は開発項目と異なるため、TRLは設定しない)	---
(2)既存配管を利用したRPV内部調査技術に関する装置類の開発	開発、エンジニアリングのプロセスとして、既存配管からのアクセス調査工法について、RPV内部へアクセスするための各種装置が、 <b>試作レベルの工場内試験を実施する段階</b> に到達していること (終了時目標TRL：レベル4)	開発、エンジニアリングのプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施する段階

### ■ 他研究との関連

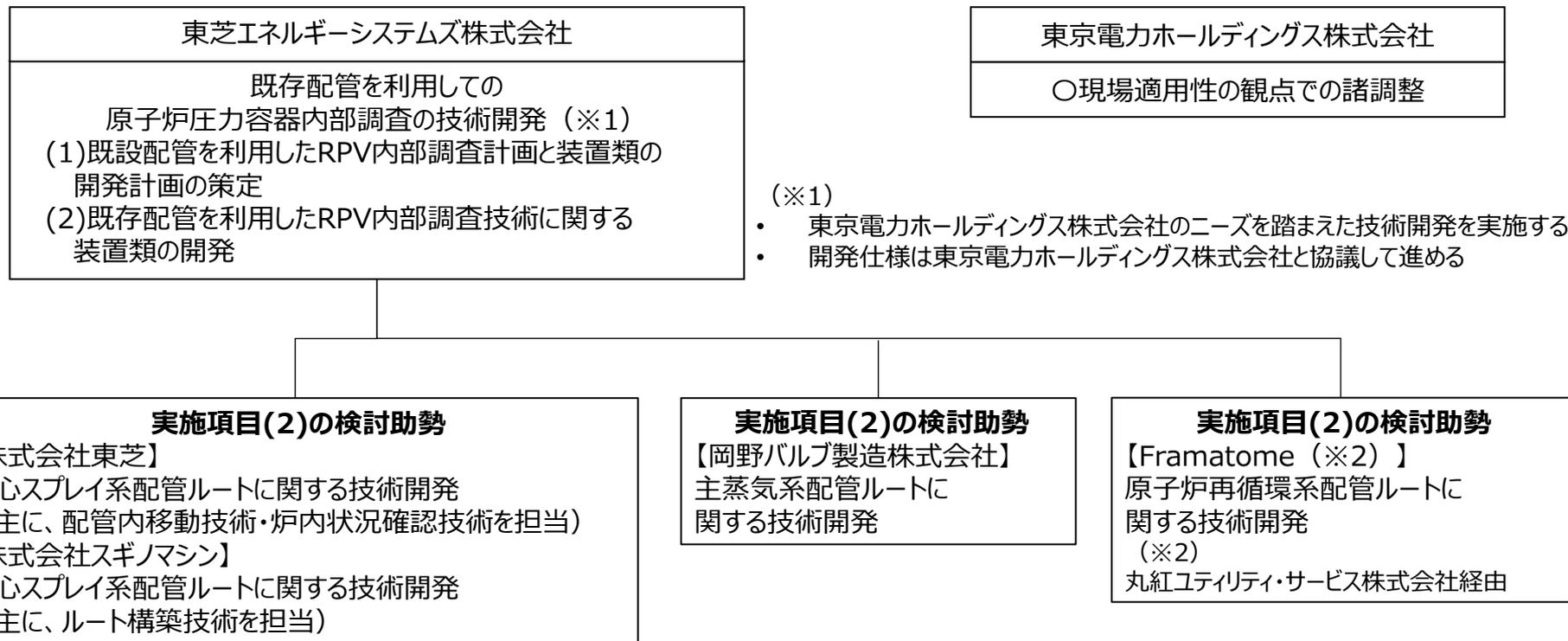




# 1. 補助事業の概要

## 1.3 スケジュールと実施体制図

### ■ 実施体制図



(\*)対策の検討後に現場適用性評価を再実施し、その評価結果によっては設計の再検討もしくは対象ルートへの適用不可と判断する場合もある。煩雑さ回避のため、上記においては本フロー図では表現していない。

# 1. 補助事業の概要

## 1.4 全体開発フロー

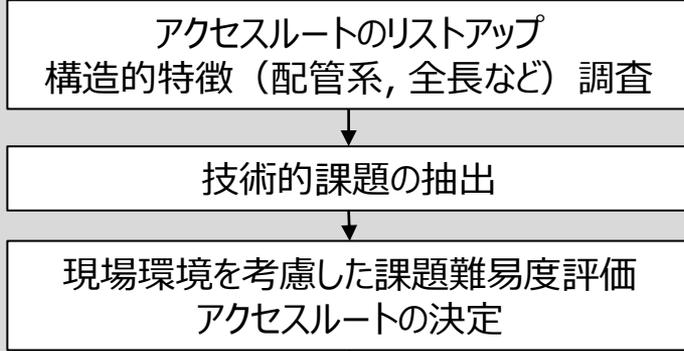
### ■ 福島第一原子力発電所（1F）現地適用に至るまでの全体開発フロー

- 本事業を起点とした、将来開発・現地適用までの繋がりを示す。

#### 実施項目(1)

##### (a) 既設配管ルートを選定

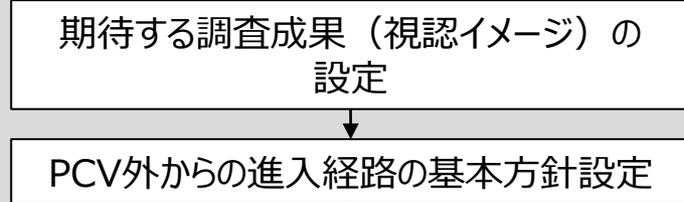
完了



【成果】添付資料2参照

##### (b) 調査計画の策定

完了



【成果】添付資料1参照

【略語補足】  
PCV：原子炉格納容器

##### (c) 装置類の開発計画と仕様策定(1/2)

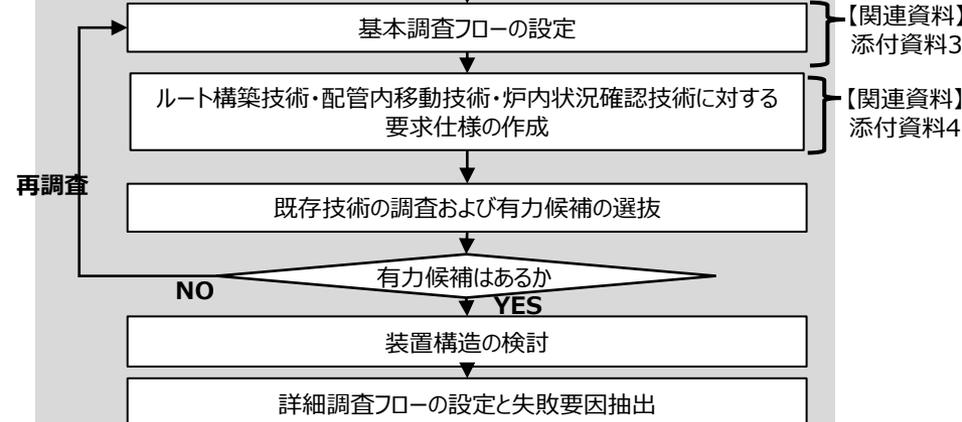
完了



#### 実施項目(2)

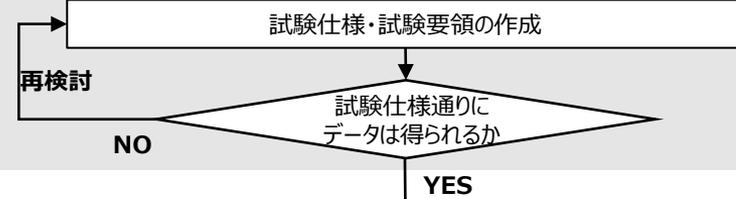
##### (a) 装置類の開発計画と仕様策定(2/2)

完了



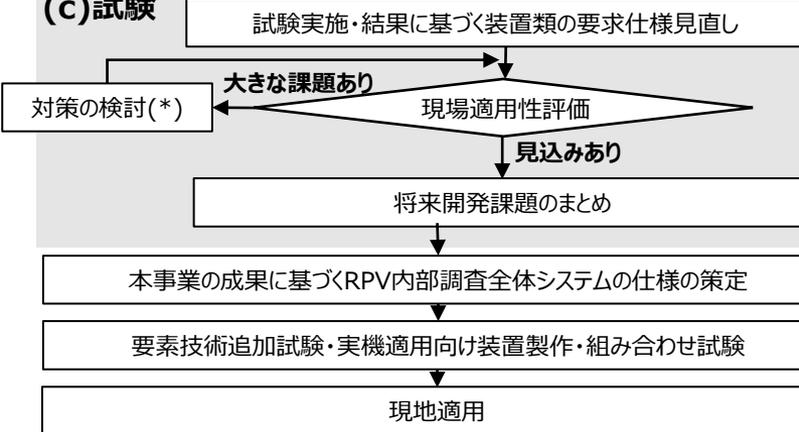
##### (b) 各種装置の設計・手配・製作

完了



##### (c) 試験

完了



## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.1 工場内試験の考え方（全配管共通）

#### ■ 工場内試験の方針

【略語補足】

1F：福島第一原子力発電所

AWJ：アブレシブウォータージェット

- 工場内試験は、将来の1F向け実機製作に向けた機能確認の位置付けとする。
- 1F現場の作業をWBS（Work Breakdown Structure）方式でブレイクダウンする。

【例】

WBS 1：逆止弁体切断

WBS 1-1 弁体加工ユニット配管内前進

WBS 1-2 AWJノズル位置決め

WBS 1-3 AWJ噴射・弁棒切断開始

WBS 1-4 弁棒切断完了・弁体が弁箱内に落下

WBS 1-5 AWJノズル移動・再位置決め・落下した弁体を追加切断（細断）

WBS 1-6 …



弁体加工ユニット



CS系の逆止弁

- WBSのタスク毎に作業失敗要因（定義：対策することで作業員の安全確保と、RPVへのアクセス行為の持続が期待できるもの）を抽出する。

【抽出方法】

- 各要求機能に対して「前進できない」、「位置決めできない」など、作業失敗のトップ事象を設定
- トップ事象を引き起こす要因（部品, 1F現場環境, 作業要領）を抽出
- 抽出にあたっては、PCV内部調査の経験・専門業者への聞き取り・要素試験で得た知見を活用
- モックアップ設備・試験機の試運転で得られた知見も取り込み

上記のWBS1-5のうち「落下した弁体を追加切断」を対象に  
抽出した作業失敗要因例を示す（次頁）

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.1 工場内試験の考え方（全配管共通）

#### ■ 工場内試験の方針

- WBSを頂点に機能面から1次～3次要因までブレイクダウンしたものを下表に示す。
- 各要因で工場内試験をしなければ対策の有効性を判断できないものは、能力試験・影響試験・取り扱い性試験の3種類の観点で整理し、試験要領を作成した。

前頁WBS 1-5のうち「落下した弁体を追加切断」に関する作業失敗要因と実施すべき試験の種類

作業内容	要素技術	目標	WBS 1に要求される機能	WBS 1-5で使用される機能	作業失敗のトップ事象	一次要因 (事象の具体化)	二次要因 (事象と部品or環境の紐づけ)	三次要因 (二次要因で不足する場合は掘り下げ)	実施した試験の種類
逆止弁を切断する	ルート構築技術+配管内移動技術	配管内を移動した後に、逆止弁の弁体を加工し、調査装置が通過できるようにする	弁体切断	使用	落下した弁体を追加切断できない	位置決め（ノズル-弁体角度およびスタンドオフ）が不適切	ジェットの反力で装置が後退する	反射水によるクローラの静止摩擦力低下	能力試験 取り扱い性試験
						弁体の切断軌道が不適切	落下した弁体が計画を越えた姿勢（角度）になる	使用済みアプレシブが弁体の落下軌道を変える	能力試験 取り扱い性試験
						弁体に到達するジェット供給量が不適切	ノズルからのジェットの勢いが計画を越えて衰退する	使用済みアプレシブによる障害	能力試験 取り扱い性試験
			弁体前まで移動	不使用		---			
			配管内環境による故障から防護	使用	故障して弁体を追加切断できない	位置決め（ノズル-弁体角度およびスタンドオフ）が不適切	クローラ駆動系が故障し、前進・後退ができない	部品隙間部へのアプレシブの詰まり	影響試験
						弁体の切断軌道が不適切	監視系が故障し、監視機能が喪失	カメラレンズがアプレシブで損傷	影響試験
						弁体に到達するジェット供給量が不適切	ノズル回転駆動系が故障し、ノズルが回転しない	部品隙間部へのアプレシブの詰まり	影響試験
						弁体に到達するジェット供給量が不適切	ノズルを含むジェット供給系が故障（漏れ）し、ジェット供給量が不足	放射線で加速度計が劣化	影響試験 (本事業では実施せず)
			各種作業の監視	使用	作業の監視ができず、追加切断できない	位置決め（ノズル-弁体角度およびスタンドオフ）が不適切	本体（クローラ部分）の姿勢が正しくないことを認識していない	---	能力試験 取り扱い性試験
						弁体の切断軌道が不適切	ノズル回転速度が速すぎて切り遅れが起きていることを認識していない	---	能力試験 取り扱い性試験
						弁体に到達するジェット供給量が不適切	ノズルからのジェット圧力・流量が正しくないことを認識していない	---	能力試験 取り扱い性試験

三種類の試験の具体的な目的を次頁に示す

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.1 工場内試験の考え方（全配管共通）

#### ■ 工場内試験の方針

- 工場内試験毎の目的は以下の三種類に振り分ける。特に能力試験については定量的目標を設定し、試験結果の判定基準とした。
- 上記判定基準を活用した詳細な試験結果の報告は添付資料6, 7, 8を参照のこと。

試験の種類	試験の目的	取得するデータ
能力試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機が想定した通りに働くか評価する               <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>【ロバスト性評価】</b> 1F現場の不確実性を見据えて、どのような環境条件であれば、装置はどの程度のパフォーマンスを発揮できるか評価する</li> <li>➤ <b>【安全対策評価】</b> 作業員安全を確保するために、バウンダリを含む装置あるいは現地作業要領に求める条件を取得する</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1F向け実機製作に役立つ記録を残すため、「成功／失敗」の二元論で終わらず、<b>成功あるいは失敗した場合の状況／条件が分かるデータ</b>を取得する</li> <li>特に、ロバスト性については機器の破損やスタックとのトレードオフが発生するため、<b>機器の性能限界も把握できるデータ</b>を取得する</li> </ul>
影響試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機の動作によって、試験機そのものあるいは作業環境がどのように変化するか評価する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機の振る舞いが、自機および配管や弁箱の損傷など<b>周囲環境に及ぼす物理的な影響</b>を評価できるデータを取得する</li> <li>基本的には、机上検討やシミュレーションで予測困難な事象に適用する</li> </ul>
取り扱い性試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>遠隔操作のし易さを確認する</li> <li>（補足）オペレータの負担になる要因は開発段階から取り除く必要があるため、能力試験と切り分けた。能力試験の結果と整合させつつ評価する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機の取り扱いを通じて<b>1F向実機に向けた構造や作業手順の改善</b>に役立つデータを取得する</li> <li>データ取得方法は、試験機を扱う作業員への聞き取り、設計者の日々の気づきを基本とする。1F現場作業経験者の知見も活用する</li> </ul>

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.1 工場内試験の考え方（全配管共通）

#### ■ 工場内試験の方針

【能力試験の目標と試験結果のまとめ】

- 能力試験は、1F現場で達成すべきものを試験目標として定量的に定める。
- 目標の達成度合いで、4段階の判定をおこなう（下図参照）。
- 「○, △, ×」は机上検討では発見できなかった新たな課題であり、将来開発課題とする。

水張りスプール通過試験（下図参照）

能力試験

（1F現場で達成すべき）  
定量的目標

（例）内径237mm、長さ約4400mm  
（配管中心軸距離）のスプールを通過する

影響試験

取り扱い性試験

#### 試験結果のまとめ方法

【結果：◎】

目標を達成。他の部品との取り合いなど、設計条件が変わらなければ、実機の構造設計に反映できる。

【結果：○】

目標を達成。ただし、机上検討で発見できなかった改善項目が残り、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが求められる。これらは将来開発課題となる。

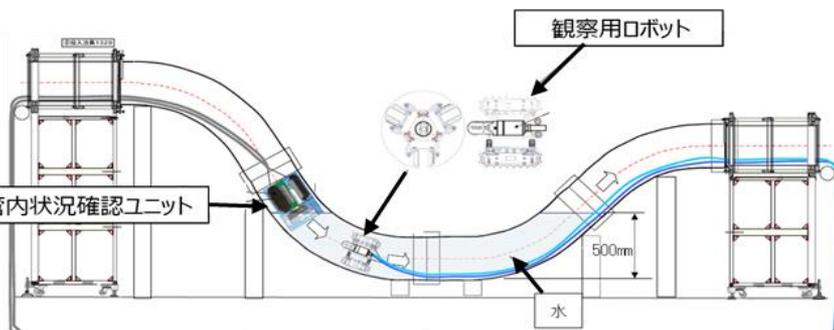
【結果：△】

目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい。目標を達成するには、コンセプトを維持しつつ調査手順や装置構造の見直しが求められる。これらは将来開発課題となる。

【結果：×】

目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性を見いだせず、抜本的に見直すことが求められる。これらは将来開発課題となる。

遠隔操作のし易さなど、オペレーションに関する将来開発課題は、「取り扱い性試験」の結果としてまとめる。



水封バウンダリ（U字型水張りスプール）通過試験の試験体系

(\*)水封バウンダリはCS系配管、MS系配管、PLR系配管全てに採用する計画。  
本図はCS系配管を代表例に示した。通過する装置の大きさや現地の設置制約で各系統配管ごとに微小に形状は変わるが、U字型スプールを使う点では共通

# 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

## 2.2 ルート概要および主要機器

【用語・略語解説】

ペネトレーション：原子炉格納容器の既設貫通孔

R/B：原子炉建屋

### ■ 配管ルートの概要

- 炉心スプレイ系の配管ルートの特徴を示す。ティAに至るまでの配管は250A、ティAより先の配管は内径φ約130mm（図3）。
- 逆止弁は「閉」状態（図1）。
- 仕切弁1と2は「閉」状態だが、R/B内（図4）。
- 仕切弁3は「開」状態。
- 調査装置の目標到達部となるティAとティBに既設開口は無い（図2, 3）。
- 調査装置は既設配管を切断し、閉じ込め空間を構築してから進入させる（図4）。
- ティBを穿孔できれば、炉心への唯一のアクセスルートになるが高難度。

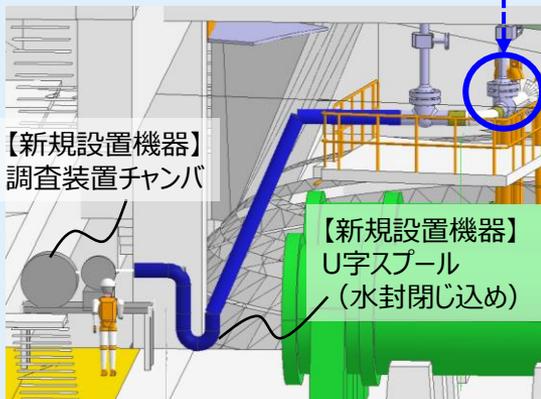
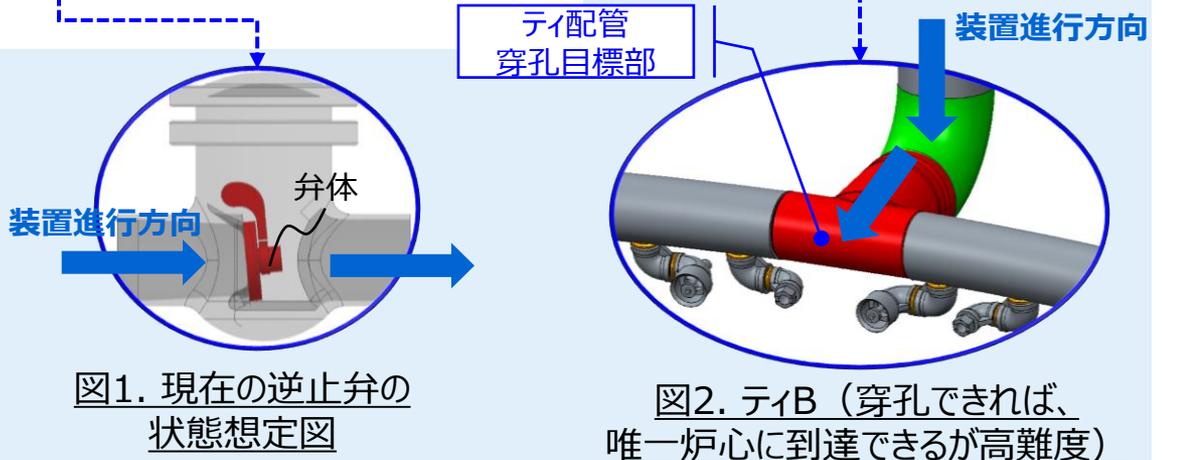
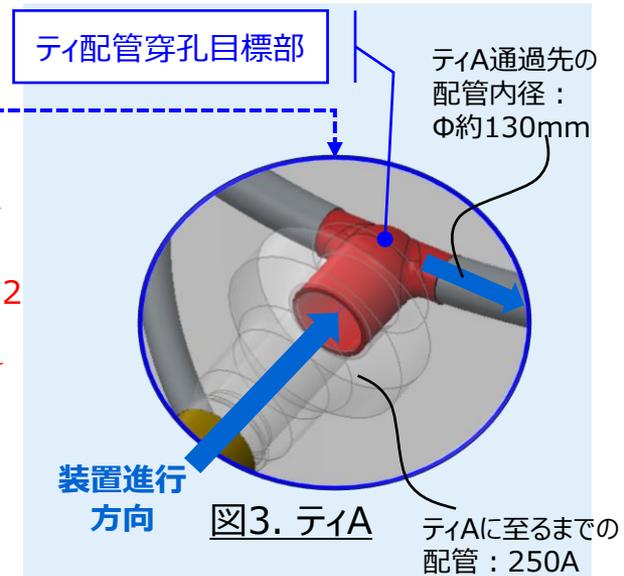
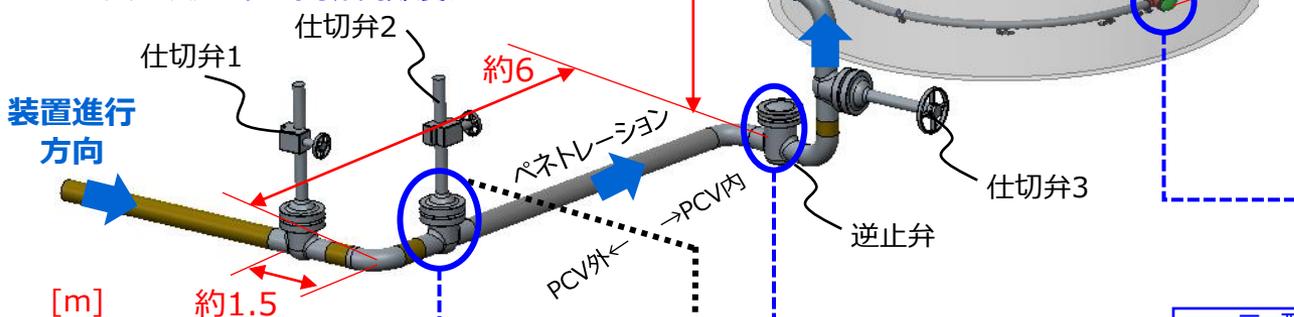


図4. R/B内機器設置イメージ

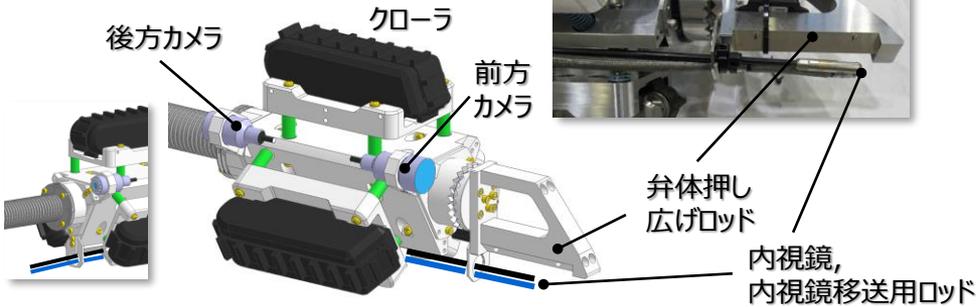
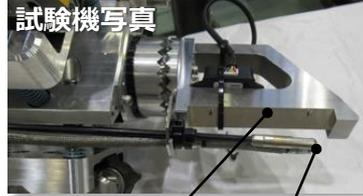
# 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

## 2.2 ルート概要および主要機器

### ■ 主要機器 (注記1)

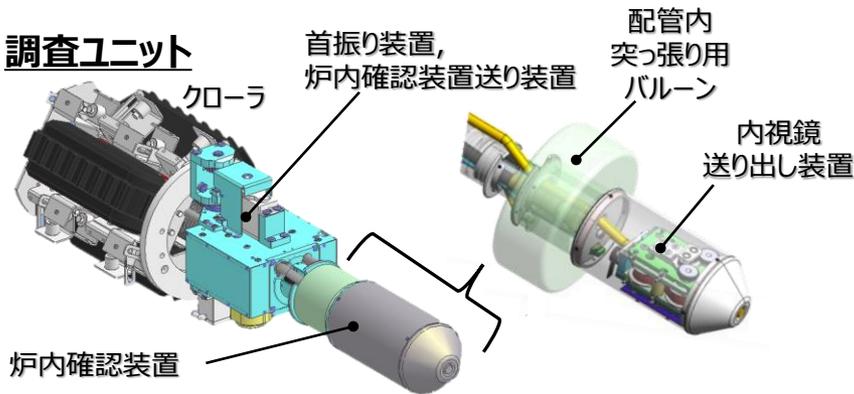
#### 配管内状況確認ユニット

写真補足：写真の内視鏡は市販品で模擬



全長	約440 mm (装置後端のケーブル部除く)
直径	約Φ216(*)~約Φ240mm(**) (*) 250A配管走行時, (**) バネ開放時最大値
重量	約11kg

#### 調査ユニット



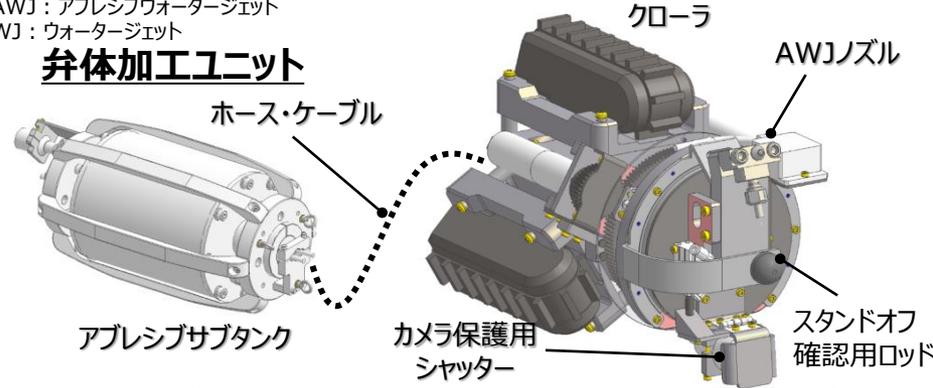
全長	約570 mm (装置後端のケーブル部除く)
直径	約Φ170(*)~約Φ240mm(**) (*) バネ最大収縮時, (**) バネ開放時最大値
重量	約11kg

【略語補足】

AWJ：アブレシブウォータージェット

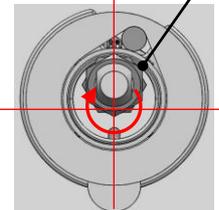
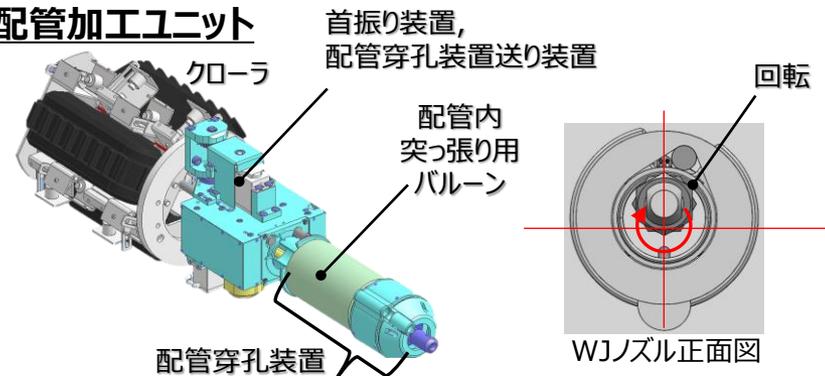
WJ：ウォータージェット

#### 弁体加工ユニット



全長	約310 mm (装置後端のケーブル部除く)
直径	約Φ200(*)~約Φ240mm(**) (*) 250A配管走行時, (**) バネ開放時最大値
重量	本体：約13kg, アブレシブサブタンク：約7kg
AWJ仕様	使用研磨剤：ガーネット 最高使用圧力約200MPa, ノズル偏心半径約87mm

#### 配管加工ユニット



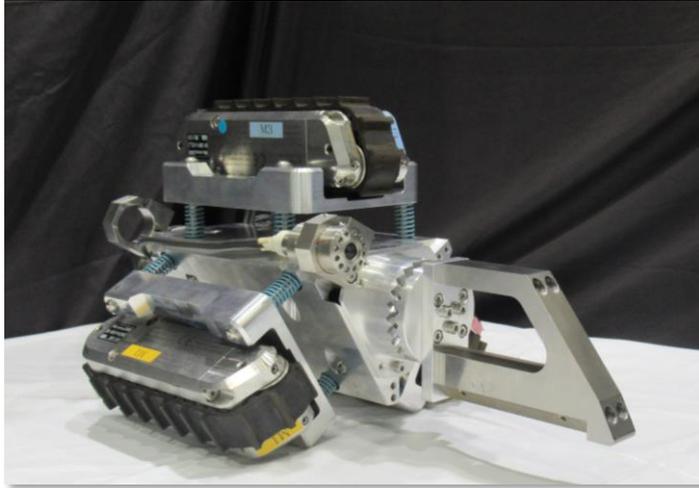
全長	約570 mm (装置後端のケーブル部除く)
直径	約Φ170(*)~約Φ240mm(**) (*) バネ最大収縮時, (**) バネ開放時最大値
重量	約11kg
WJ仕様	最高使用圧力約200MPa, ノズル偏心半径約5mm

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.2 ルート概要および主要機器

#### ■ 製作した試験機

##### 配管内状況確認ユニット



##### 弁体加工ユニット



##### 調査ユニット



##### 配管加工ユニット



## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.3 試験結果と将来開発課題

#### ■ 1F現場とモックアップ配管の差異

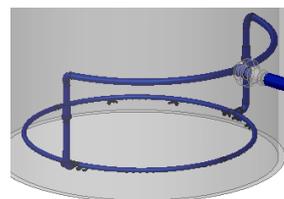
##### 【配管構造】

モックアップは、1F現場に新規設置する配管の向きが異なる。

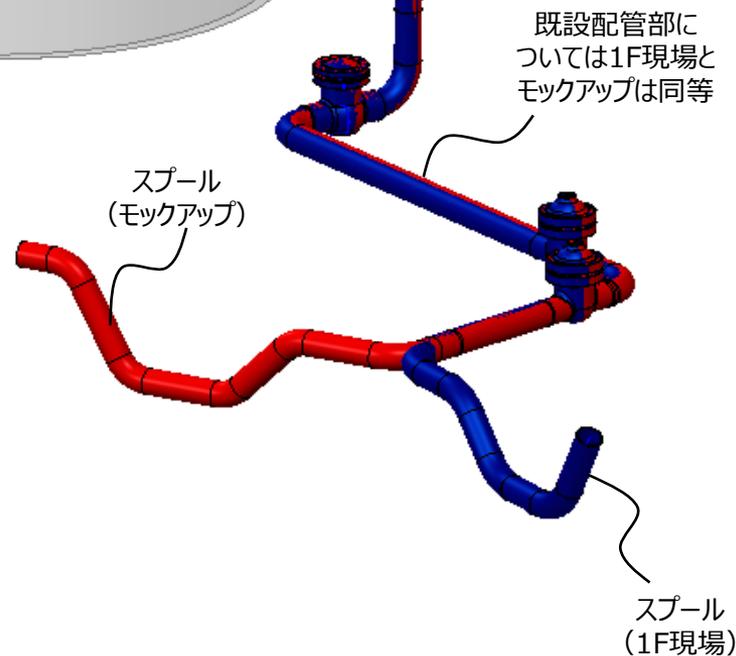
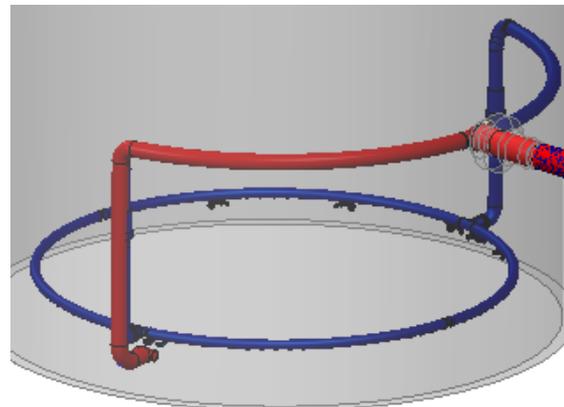
→配管のエルボ部角度は1F現場より狭く、クローラ構造制約の観点で保守的な条件

##### 【配管内環境】

- モックアップは暗闇状態を維持。  
→観察用小孔あり
- 配管内面は霧吹きによる水濡れ状態と非水濡れ（雰囲気成り行き）状態の2種類を再現。



1F現場



試験用のモックアップ

# 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

## 2.3 試験結果と将来開発課題

### ■ 走行セクションに応じた試験結果概要 (移動編)

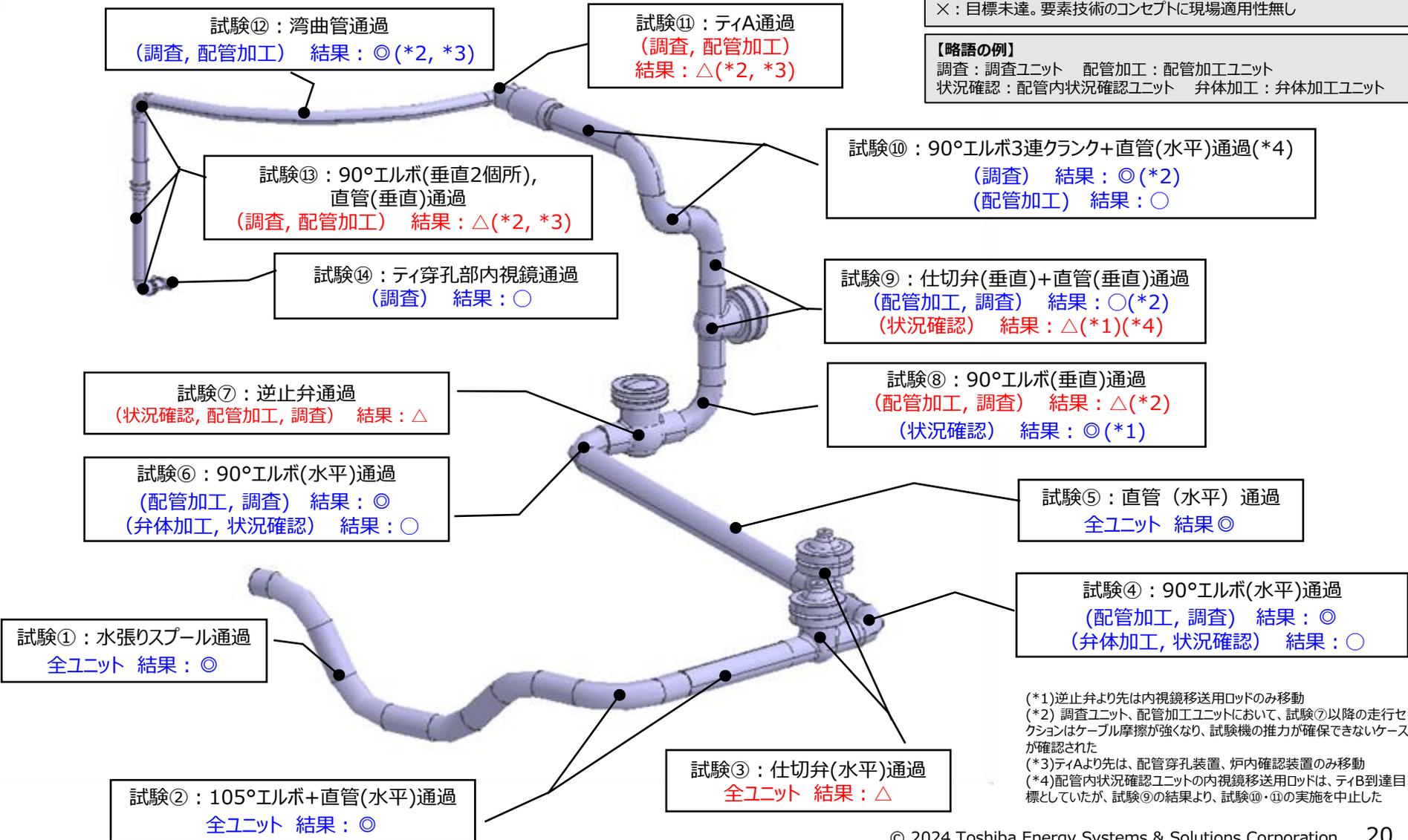
・試験目標・試験結果の詳細・試験機限界性能試験結果は添付資料6参照

【試験結果判定の定義 (詳細は15頁参照)】

- ◎: 目標達成
- : 目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △: 目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×: 目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し

【略語の例】

調査: 調査ユニット 配管加工: 配管加工ユニット  
状況確認: 配管内状況確認ユニット 弁体加工: 弁体加工ユニット



(\*1)逆止弁より先は内視鏡移送用ロッドのみ移動  
(\*2) 調査ユニット、配管加工ユニットにおいて、試験⑦以降の走行セクションはケーブル摩擦が強くなり、試験機の推力が確保できないケースが確認された  
(\*3) ティAより先は、配管穿孔装置、炉内確認装置のみ移動  
(\*4) 配管内状況確認ユニットの内視鏡移送用ロッドは、ティB到達目標としていたが、試験⑨の結果より、試験⑩・⑪の実施を中止した

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.3 試験結果と将来開発課題

#### ■ 走行セクションに応じた試験結果概要（ルート構築編）

- 試験目標および試験結果の詳細は添付資料6参照
- 使用水量／アブレシブ量／切削時間は添付資料6を参照

#### 【試験結果判定の定義（詳細は15頁参照）】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しいコンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し

試験⑰：ティA配管穿孔  
結果：○

試験⑱：ティB配管穿孔  
結果：○

試験⑮, ⑯：逆止弁体切断  
結果：○

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.3 試験結果と将来開発課題

#### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの		要求機能	試験結果（明らかにした課題を含む）	課題の対策
	作業STEP	要素技術と目標			
<b>(a)配管内状況確認ユニット</b>					
a1	逆止弁を押し広げてその先の配管内の状況を確認する	【要素技術】配管内移動技術 【目標】閉状態の逆止弁が押し開くかどうかを確認し、開いた逆止弁より先の配管内の状況を確認する	弁体を押し広げる機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>弁体为非固着であることを前提に、押し広げ可能</li> <li>エルボにて曲げの力が発生した内視鏡移送用ロッド（プッシングロッド）が配管内状況確認ユニットの姿勢を崩し、弁体を正しい姿勢で開けられなくなるケースを確認（開度が不十分になり、内視鏡が送り込めなくなる）</li> </ul>	<b>【装置構造の改善】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>内視鏡移送用ロッドの制御性を高める（ユニットの後方にロッド姿勢誘導ガイドを取り付け）</li> <li>別方法の模索（プッシングロッド方式ではない別手段（水噴射等）を導入）</li> </ul>
a2			弁体前まで移動する機能	<b>【ストレート】</b> 移動可能 <b>【エルボ】</b> 90°エルボに溶接痕のような段差がある場合、干渉して移動できなくなるケースを確認 <b>【仕切弁（水平）】</b> クローラは弁箱のスリット部に進入するとバネで押し広がる。同時に配管接面範囲が小さくなり、配管へ再進入するための推進力（即ち、バネを収縮させる力）が得られず、結果的に仕切弁を通過できなくなるケースを確認した	<b>【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】</b> アクティブサスペンション（開き勝手のバネの広がり二段階以上制御するストッパー、あるいは水圧バネ・空気バネなど金属コイル式ではない別手段）の導入
a3			逆止弁より先の配管内状況を確認する機能	逆止弁より先のエルボや仕切弁の段差で内視鏡移送用ロッドがスタックするケースがある。その場合、事前確認できる配管内状態は限定的となる	<b>【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】</b> ID a1の対策との兼ね合いになるが、状況確認範囲を拡張するには、プッシングロッド方式以外の別手段（水噴射等）の導入が必要
a4			配管内環境による故障から防護する機能	<b>【水濡れ】</b> 走行上の悪影響は確認されなかった <b>【段差（固着異物や溶接痕）】</b> 5mm以下は踏破可能であることを確認した（ID a2の「エルボ」のケースを除く）	---
a5			各種作業を監視する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>カメラ映像で状況判断しながら操作できることを確認した</li> <li>カメラ映像で弁体の押し広がり有無を把握できることを確認した</li> </ul>	---

配管内状況確認ユニットは「スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発」が今後必要

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.3 試験結果と将来開発課題

(\*1)★マークは、試験結果を受けて要求仕様を見直した箇所

#### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの		要求機能(*1)	試験結果 (明らかにした課題を含む)	課題の対策
	作業STEP	要素技術と目標			
<b>(b)弁体加工ユニット</b>					
b1	逆止弁の弁体切断する	【要素技術】 ルート構築技術	弁体を切断する機能	ID b3, b6に示す対策を行えば、弁体を目標通りに切断できることを確認	ID b3, 6参照
b2		+配管内移動技術	弁体前まで移動する機能	【ストレート】 引っ掛かりを起こさず走行可能 【エルボ】 ①牽引するアプレシブサブタンクが引っかかるケースを確認 【仕切弁】 ②ID a2 仕切弁 (水平) と同様	【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】 ① アプレシブサブタンクを小型化 ② ID a2と同様
b3		【目標】 配管内を移動した後に、逆止弁の弁体を加工し、調査ユニットが通過できるようにする	配管内環境による故障から防護する機能	【水濡れ】 走行上の悪影響は確認されなかった 【段差 (固着異物や溶接痕)】 5mm以下は踏破可能であることを確認 【アプレシブ】 ID b5参照	---
b4			各種作業を監視する機能	弁体加工中は水飛沫によって加工状況のタイムリーな把握が困難。特にジェットのワークの貫通 (切断のために最初に設ける小径の穿孔) や切り遅れ発生を目視して把握することが困難	【作業監視性の向上を考慮した、ルート構築技術の開発】 加工中の環境音の収集 (AWJはワークの貫通有無など、加工状態によって音が変わる仕組みを活用) など、弁体の切断深さを検知あるいは推定する方法を導入
b5			★アプレシブ付着による故障から防護する機能	飛散するアプレシブが装置摺動部の隙間へ侵入し、破損を引き起こす。試験で具体的な侵入経路を特定	【配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発】 ID b6の対策活用に加え、装置側もアプレシブ混入を防止する仕組みを導入
b6			★使用済アプレシブを撤去する機能	・弁箱内に堆積する使用済みアプレシブが弁体に干渉して位置や向きを変え、切断を困難にするケースを確認 ・追試により、水洗浄でアプレシブが除去できることを確認	【配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発】 有効性を確認した水噴射洗浄装置 (一般産業技術) を導入

弁体加工ユニットは、「スタック対策を考慮した配管内移動技術」、「作業監視性の向上および配管内環境変化への対応を考慮したルート構築技術の開発」が必要となる

# 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

## 2.3 試験結果と将来開発課題

### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの		要求機能	試験結果（明らかにした課題を含む）	課題の対策
	作業STEP	要素技術と目標			
<b>(c) 配管加工ユニット</b>					
c1	ティを穿孔する	【要素技術】 ルート構築技術 +配管内移動技術	ティA・Bを穿孔する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>飛散するWJの水が装置へ連続的に衝突し、ノズルの向きが変わることで切断軌跡が乱れて、計画する穿孔ができなくなるケースを確認</li> <li>飛散水用防護シールドを備えて追試を行い、目標穿孔径（10mm）の達成を確認</li> </ul>	【配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発】 追試で有効性を確認した飛散水防護シールドを導入
c2		【目標】 配管（ティA・B）を加工し、調査装置が通過できるようにする	ティAまで移動する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>【ストレート部】 引っ掛かりを起こさず走行可能</li> <li>【エルボ部】 ① 逆止弁より先の90°エルボ3連クランクにて、配管穿孔装置のノズルが配管壁面に押し付けられ、スタックするケースを確認（図1）</li> <li>【仕切弁（水平）・逆止弁】 ② 配管穿孔装置の先端部分が、弁箱のスリット部に進入してしまい、通過できなくなるケースを確認した。また、クローラ部の通過性についてもID a2と同様（クローラ部分の構造は配管内状況確認ユニットと同じであるため）</li> <li>【仕切弁（垂直）】 ③ 上記②と同様に、配管穿孔装置の先端部分が弁箱のスリット部に進入してしまうケースを確認。クローラ部の通過性についても同様</li> <li>【ケーブル牽引】 ④ クローラはエルボ通過時にローリングでケーブル同士が絡み合うケースがあり、ケーブル摩擦力が増大するケースを確認。さらに、通過済みエルボ部に接面するケーブル摩擦力によって、逆止弁より先側では牽引力が不足するケースを確認</li> </ul>	【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】 <ul style="list-style-type: none"> <li>・①②③ 仕切弁（水平+垂直）と逆止弁の双方を通過する本ユニットにおいては、ID a2の対策だけでは対応できない可能性がある。必要に応じて本事業で得た知見に基づく一般産業技術を再調査し、コンセプトの変更の見直しを行う</li> <li>・④ ケーブルに摩擦力低下や絡み合い防止用のガイドリングを付ける、もしくはケーブルサポート用ユニットを投入する</li> </ul>
c3			ティBまで移動する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>【湾曲部】 引っ掛かりを起こさず走行可能</li> <li>【エルボ】 ティB直前のエルボにて、配管穿孔装置が内壁と干渉し、スタックするケースを確認（図2）</li> <li>【ケーブル牽引】 ID c2と同様</li> </ul>	・ID c2と同様
c4			配管内環境による故障から防護する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>【水濡れ】 走行上の悪影響は確認されなかった</li> <li>【段差（固着異物や溶接痕）】 3mm以下は踏破可能であることを確認</li> </ul>	---
c5			各種作業を監視する機能	ティAの分岐点で進行方向を定めるための手段が必要になる。本試験では代替内視鏡（工業用ビデオスコープ）の重力センサで判別した	【装置構造の改善】 配管内環境と装置寸法制約を考慮した重力センサあるいは代替手段を導入（内視鏡もしくはユニット本体に搭載）

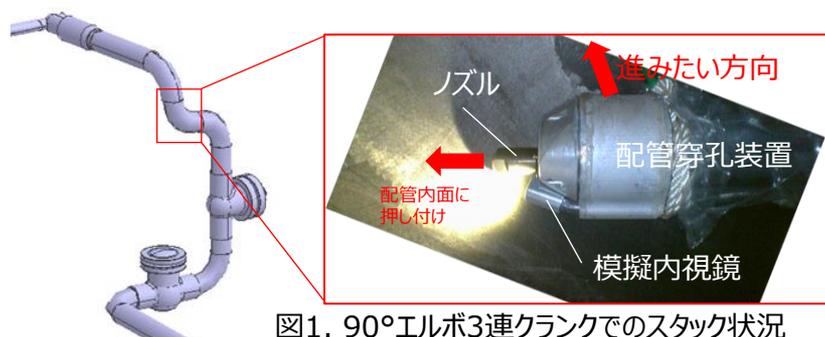


図1. 90°エルボ3連クランクでのスタック状況

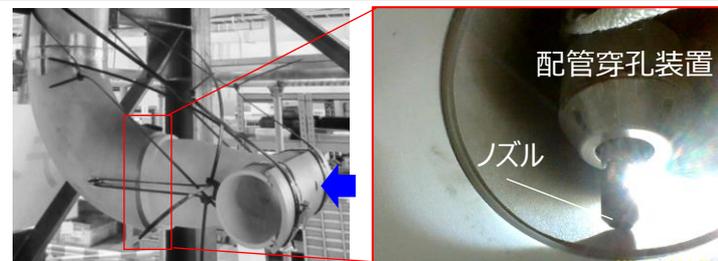


図2. ティB手前90°エルボでのスタック状況（右写真は←から撮影）

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.3 試験結果と将来開発課題

#### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの		要求機能	試験結果（明らかにした課題を含む）	課題の対策
	作業STEP	要素技術と目標			
<b>(d) 調査ユニット</b>					
d1	炉内状況を確認する	【要素技術】 炉内状況確認技術 +配管内移動技術	炉内目視機能（ティB）	・炉内確認装置のバルーン展開による位置決めと、内視鏡の先端屈曲を組み合わせて穿孔部を通過できることを確認（図1）。ただし、制御側の送り出し量指令値と、実際の送り出し量に乖離が発生。内視鏡は、ケーブル部分をタイミングベルトで挟んで押し出す方式としていたが、この挟み込みの力が不足して滑りが発生したことが原因 ・模擬内視鏡の重力方向検知機能は、炉内調査時の目標方向への先端屈曲操作のアシストに効果的であることを確認	【装置構造の改善】 内視鏡が破損しない程度にベルトの挟み込み力を高める方法を導入
d2	【目標】 ティA・Bの穿孔部から炉内状況を確認する		ティAまで移動する機能	【ストレート部・エルボ部】 引っ掛かりを起こさず走行可能 【仕切弁（水平）・逆止弁】 前頁ID c2と同じ。参考として、炉内確認装置の先端部分が、弁箱のスリット部に進入した状況を図2に示す 【仕切弁（垂直）】 前頁ID c2と同じ 【ケーブル牽引】 前頁ID c2と同じ	【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】 前頁 ID c2と同じ
d3			ティBまで移動する機能	【湾曲部】 引っ掛かりを起こさず走行可能 【エルボ】 湾曲管通過先の90°エルボにて、炉内確認装置の先端が配管壁面に押し付けられ、スタックするケースを確認 【ケーブル牽引】 前頁 ID c2と同じ	【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】 前頁 ID c2と同じ
d4			配管内環境による故障から防護する機能	【水濡れ】 走行上の悪影響は確認されなかった 【段差（固着異物や溶接痕）】 3mm以下は踏破可能であることを確認	---
d5			各種作業を監視する機能	前頁ID c5と同様	---
<b>(e) バウンダリ構築ユニット</b>					
e1	全ての作業を実行する間、PCV雰囲気閉じ込める	【要素技術】 バウンダリ構築技術 【目標】 作業員の過剰な内部・外部被ばくを防止する	バウンダリ機能 →拡張および調査後の復旧を含む →機器の設置と撤去は有人作業とする	水張りスプールを通過できることを確認	【PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発】 本事業で得た知見に基づき、作業装置側の要求を考慮した検討を開始
e2			緊急時バウンダリ復旧機能	---（本事業ではスコープ外）	調査ユニットを配管内に残置する場合、ケーブルを切断した上でバウンダリを元の状態に復旧する必要がある

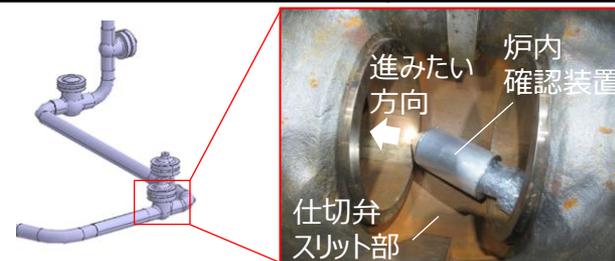
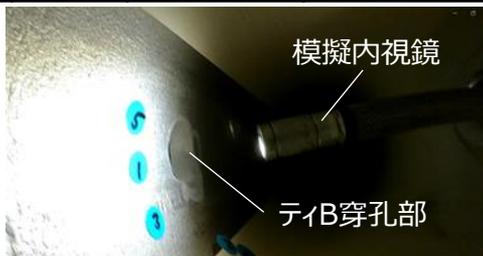


図1. 穿孔部通過試験の様子（左：俯瞰写真。右：模擬内視鏡映像）

図2. 仕切弁（水平）通過試験の様子

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.3 試験結果と将来開発課題

#### ■ 代表的な試験結果の解説（使用済みアブレシブを撤去する仕組みの必要性）

##### 【切断計画】

- 弁体の切断は図1の①と②の経路を切断することで、背面側の弁棒が切断され（図2、図4）、弁体が落下する。
- 落下後、図1の③と④の経路を追加切断することで、後続するクローラが通過可能なスペースが確保可能となる。（図3、図5）
- ③と④の切断時、POINT 6（もしくは8）からジェットを当てると、AWJの勢いで弁体が動いてスタンドオフが変わり、切断効率が落ちるため、POINT 7より切断を開始する。  
→切断中にアブレシブが弁箱内に溜まると、弁体の動きが抑制される。



図1.逆止弁の弁体の切断経路（①→②→③→④）

##### 【モックアップ外（理想的環境）での切断試験結果】

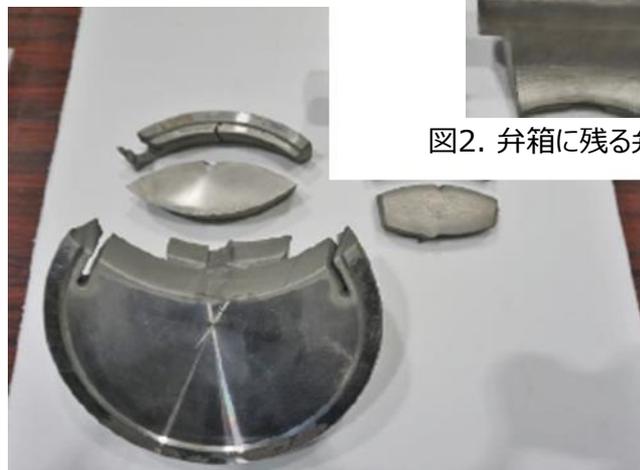


図3. 追加切断した弁体（正面）



図2. 弁箱に残る弁棒（正面）

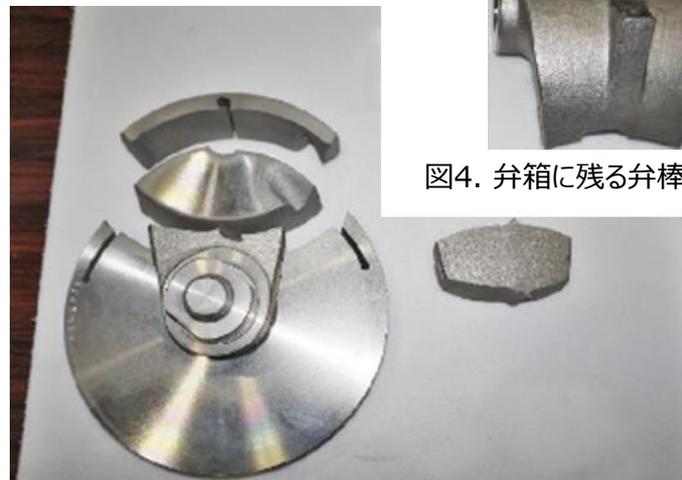


図5. 追加切断した弁体（背面）



図4. 弁箱に残る弁棒（背面）

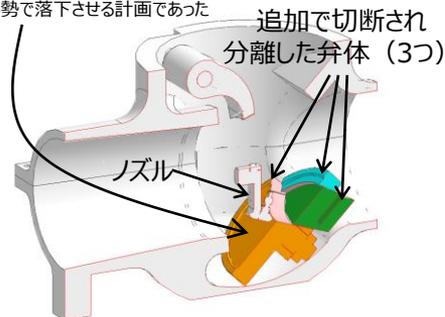
# 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

## 2.3 試験結果と将来開発課題

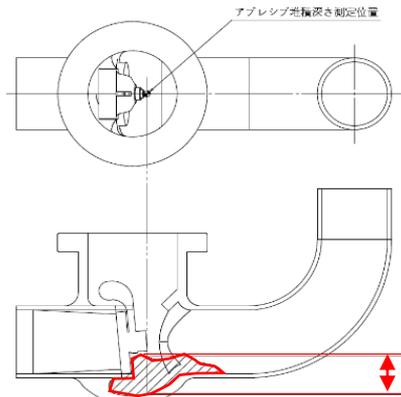
### ■ 代表的な試験結果の解説（使用済みアブレシブを撤去する仕組みの必要性）

- 弁体落下前の切断作業では、弁箱内に堆積したアブレシブによって、弁棒と切り離された弁体が計画通りの姿勢（図1）で落下しないことを確認した。（図1, 図2）
- そこで、一般産業で用いられている高圧水噴射式の配管洗浄ノズルを用いて、堆積したアブレシブを弁箱内から撤去する追試を実施した。
- 水流に乗ったアブレシブは、配管と弁体加工ユニットの合間を通過して弁箱内から排出され、追加切断に適した姿勢になることを確認した。（図3, 図4）

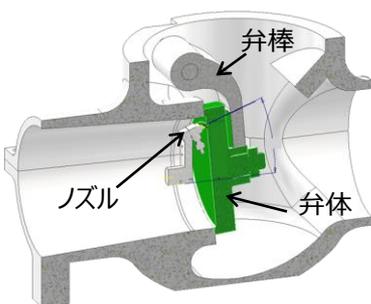
解説：本来はSTEP1で  
(b)の橙色の弁体のような  
姿勢で落下させる計画であった



(b)STEP2：落下弁体の切断



(b)堆積状況模式図



(a)STEP1：弁棒の切断

図1 切断計画



(a)堆積状況の再現

図2 アブレシブ堆積状況



図3. 配管洗浄ノズルによるアブレシブ撤去の様子



図4. 適切な姿勢になった弁体へ追加切断するための位置決めをする様子

## 2. 炉心スプレイ系配管ルートの開発成果

### 2.4 ここまでのまとめ

**炉心スプレイ系配管ルートに関する開発を行い、試験により以下の成果が得られた。**

- A) 実施項目(1)で策定した開発計画に基づき、調査に適用性が高いと評価した方法・装置を検討した。さらに、現場適用性を確認するための工場内試験に向けて、1F現場向けWBSを作成し、タスク毎の作業失敗要因を抽出した。これらは、「能力試験、影響試験、取り扱い性試験」の三種類で整理した。特に能力試験については、定量的目標を試験毎に個別に設定し、試験結果の判定基準とした。(2.1節, 添付資料6)
- B) 試験用のモックアップ設備は、1F現場との違いを評価し、開発上重要なものについては対策(暗闇状態, 配管内面のウェット状態, 保守的なエルボ角度, など)を施した。(19頁)
- C) 現場適用性を確認することを目的に、装置の試作および工場内試験を実施し、以下の観点で結果をまとめた。
  - A)に示す試験結果の判定基準を活用し、走行セクションに応じてまとめた。(20, 21頁)
  - 要求機能に応じて試験結果・課題・対策をまとめた。(22~25頁)
- D) 全てのユニット(バウンダリ構築ユニットは除く)は、仕切弁・逆止弁・ティA以降のエルボ部などを対象に「スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発」が今後求められることを確認した。(22~25頁)
- E) 配管内状況確認ユニットは、自重で閉まっている弁体を目的の角度まで押し広げるための推力を有していることを確認した。(22頁)
- F) 弁体加工ユニットは、アブレイブを水噴射で適切に撤去し、かつ加工状況を監視できれば、弁体を目的の大きさ・形状に加工できることを確認した。そこで、「作業監視性の向上を考慮した、ルート構築技術の開発」および「配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発」が今後求められることを確認した。(23, 27頁)
- G) 配管加工ユニットは、WJ使用時に飛散する水から防護できればティA・ティB共に目的の大きさ・形状に加工できることを確認した。そこで、「配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発」が今後求められることを確認した。(24頁)
- H) 調査ユニットは、D)に示す開発が今後求められることを確認した。(25頁)
- I) バウンダリ構築ユニットは、水張りスプールを各ユニットが通過できることを確認し、「PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発」の開始の必要性を確認した。(25頁)

**配管内の移動技術の開発及び弁体等の干渉物の加工技術の開発は、  
更なる開発課題が確認されたものの、現場への適用可能性も併せて確認した**

# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.1 ルート概要および主要機器

【略語補足】

MSIV：主蒸気隔離弁

R/B：原子炉建屋

T/B：タービン建屋

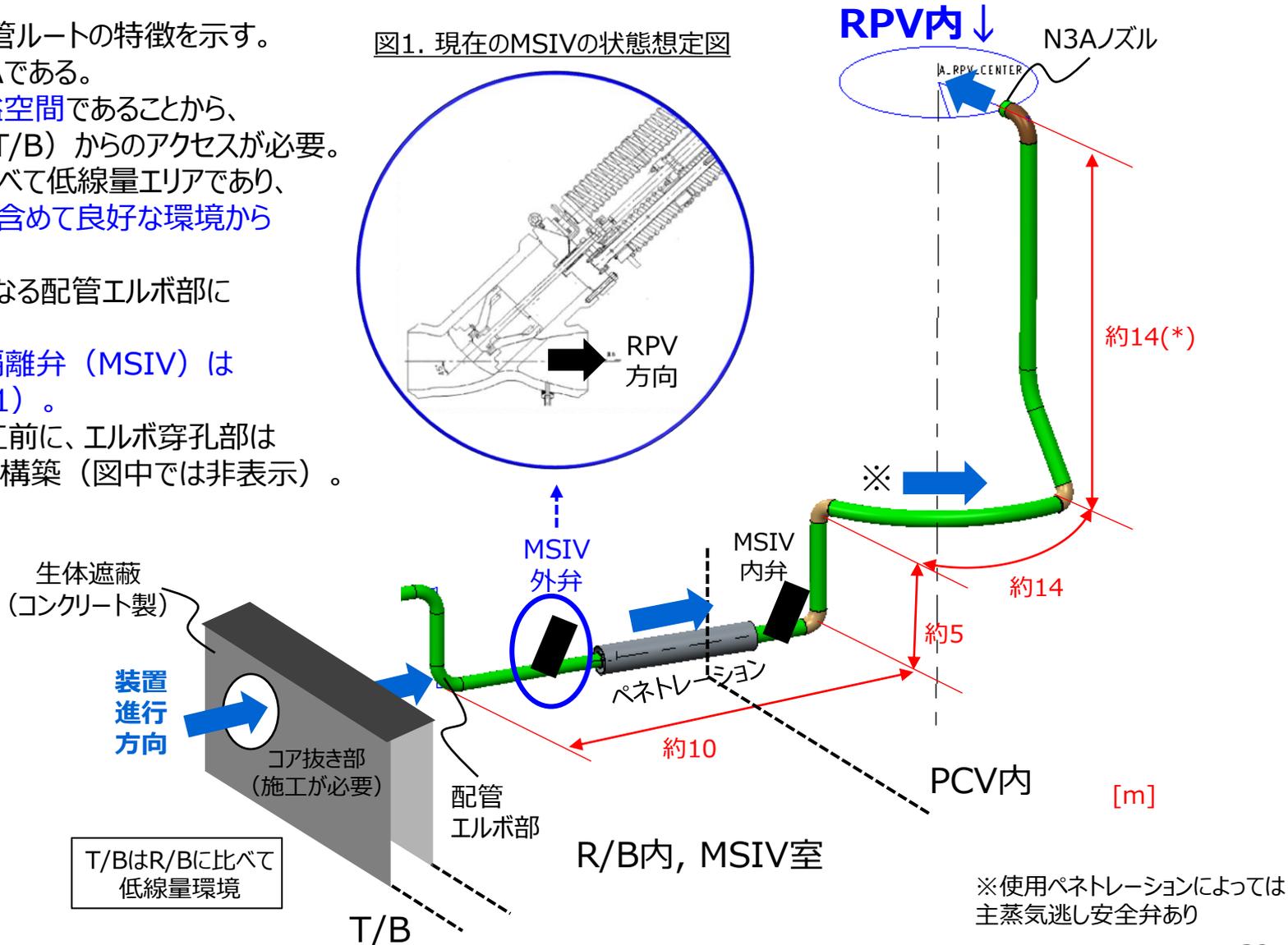
M3V-2024-000193, Rev.0

PSNN-2024-0540

### ■ 配管ルート概要

- 主蒸気系の配管ルートの特徴を示す。  
本配管は600Aである。
- MSIV室は狭隘空間であることから、タービン建屋 (T/B) からのアクセスが必要。
- T/BはR/Bに比べて低線量エリアであり、作業員被ばくも含めて良好な環境からアクセスが可能。
- アクセスルートとなる配管エルボ部に開口は無い。
- 2基の主蒸気隔離弁 (MSIV) は「閉」状態 (図1)。
- MSIV内弁加工前に、エルボ穿孔部は閉じ込め空間を構築 (図中では非表示)。

図1. 現在のMSIVの状態想定図



# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.1 ルート概要および主要機器

(注記1) 1F向け実機製作時には、主要機器にバウンダリ構築ユニットも含まれる。バウンダリ構築ユニットはバウンダリ内で作業する各ユニットによる配管内環境変化（アブレイシブ発生量など）の情報を集めた上で構造決定するため、本節から除外した。なお、炉心スプレイ系配管・主蒸気系配管・原子炉再循環系配管それぞれに用いる水封バウンダリの考え方は16頁の図4および添付資料6の試験①の図1を参照のこと。

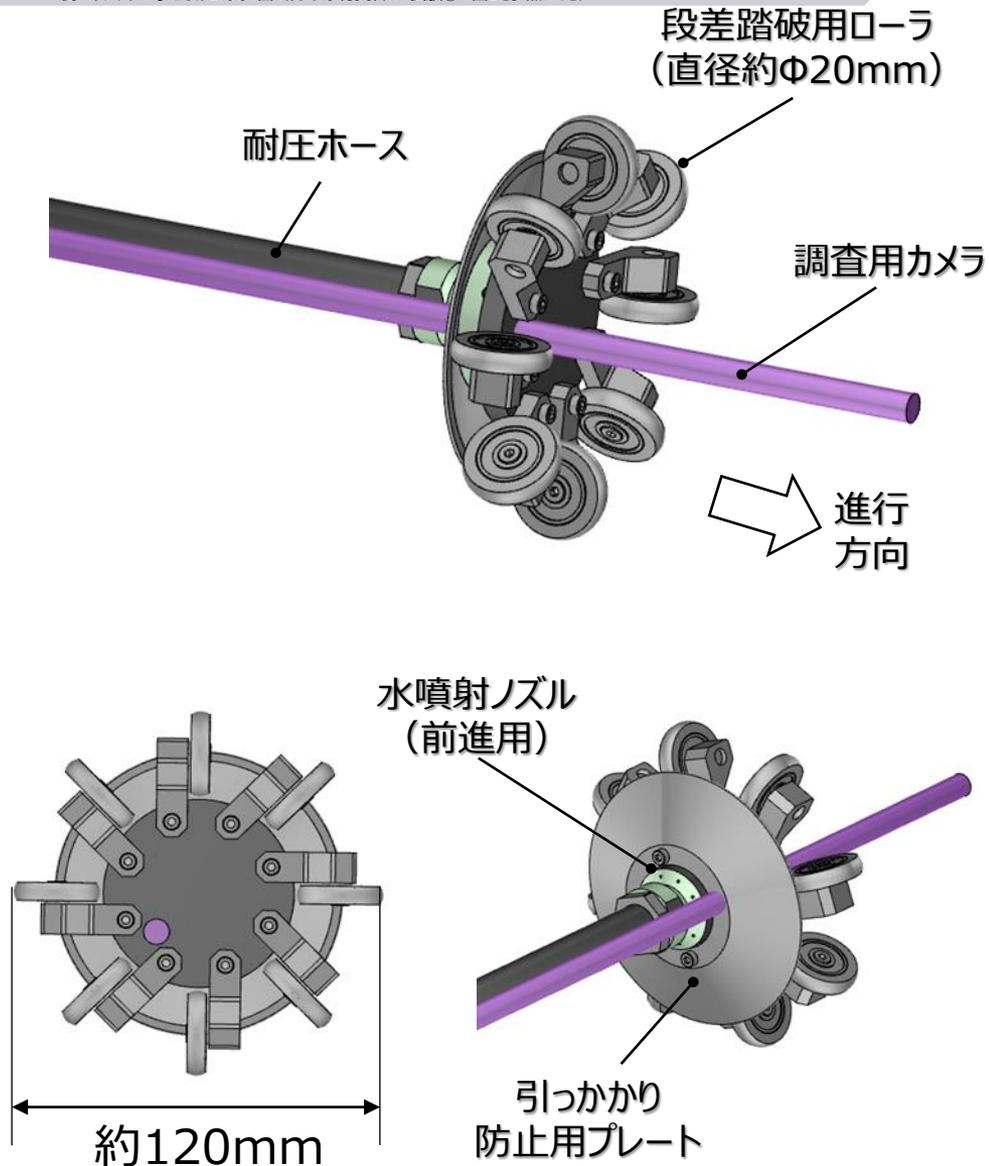
### ■ 主要機器 (注記1)

#### 調査ユニット



モックアップ用試験機諸元

重量	約600g (先端部のみ)
水噴射ノズル	前進用：穴径1.0mm, 穴数：8個 後退用：穴径1.6mm, 穴数：1個 最大流量：70L/min
ポンプ 根本圧力	最大40MPa
推力	約160N (理論値)

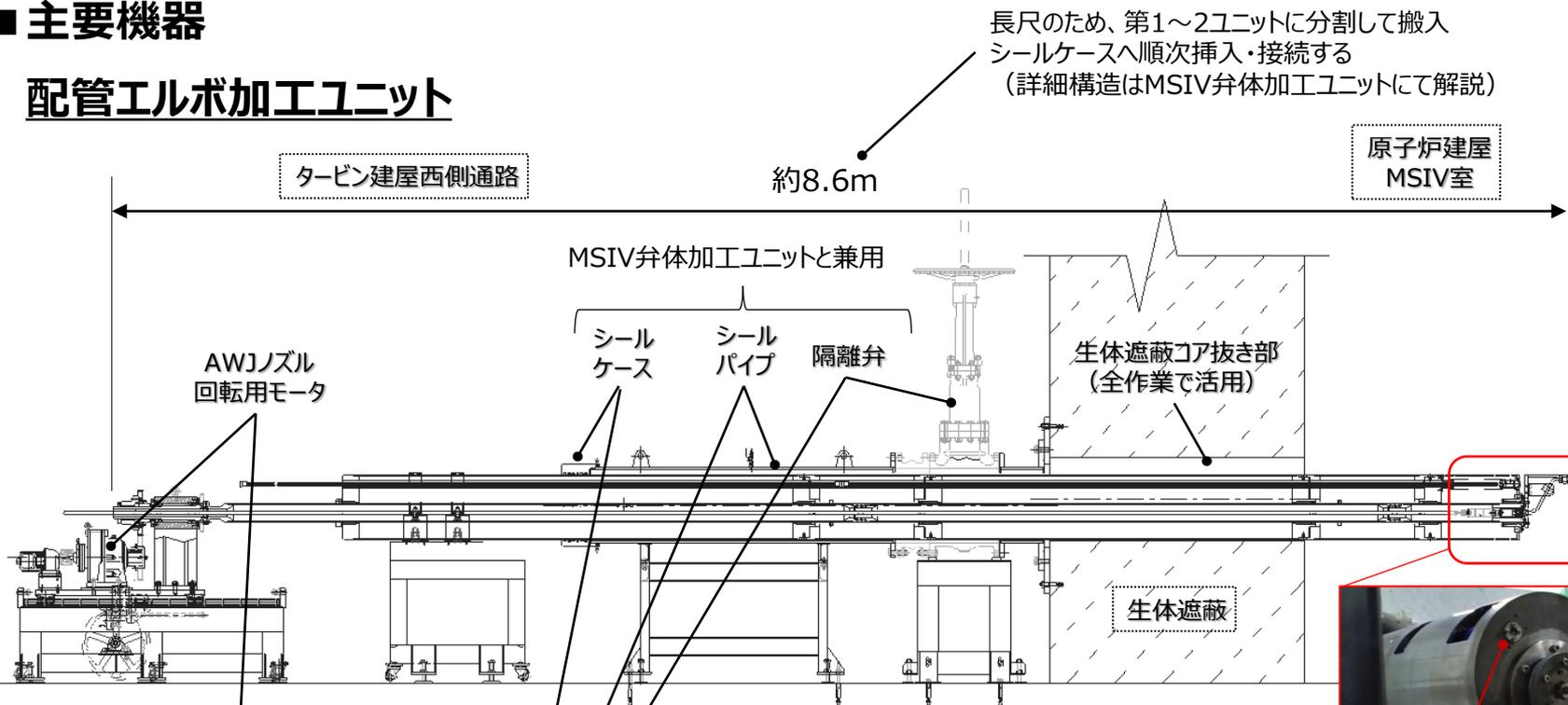


# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

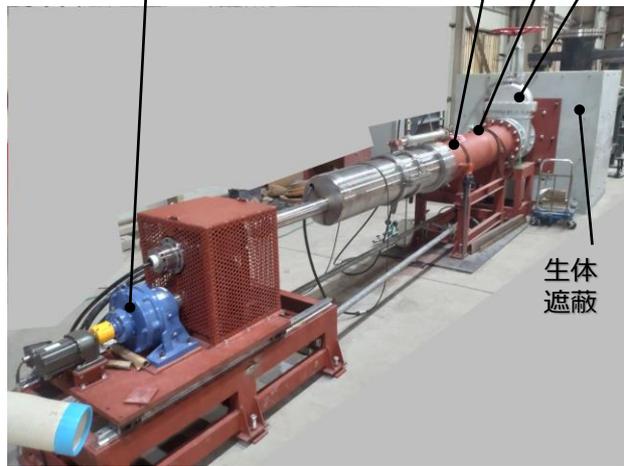
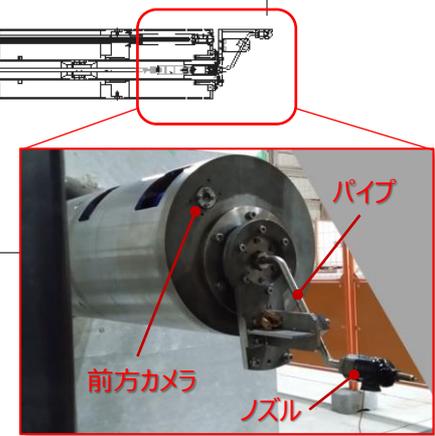
## 3.1 ルート概要および主要機器

### ■ 主要機器

#### 配管エルボ加工ユニット



長尺のため、第1～2ユニットに分割して搬入  
シールケースへ順次挿入・接続する  
(詳細構造はMSIV弁体加工ユニットにて解説)



役割	MSIV外弁体および内弁体の穿孔
全長	上記図面参照
直径	Φ350mm
駆動方式	有線ケーブルによる電気駆動
切断方式	アブレシブ・ウォーター・ジェット
主要付帯機器	前方カメラ (ユニット先端部に付属)
AWJノズル部仕様	切断直径 : Φ360mm ノズル周速 : 最大約32deg/min ノズル旋回角度 : 360deg

# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

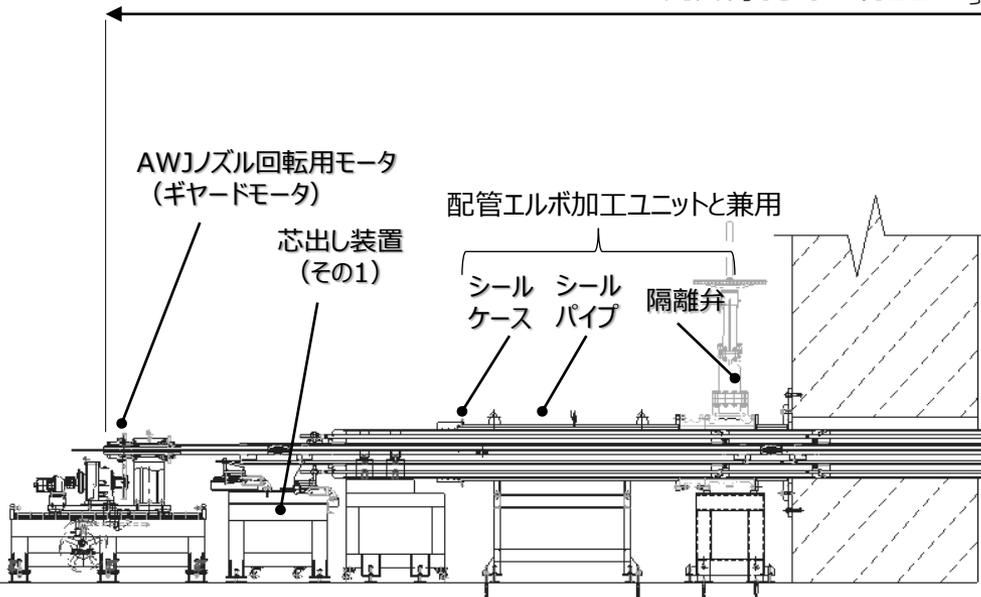
## 3.1 ルート概要および主要機器

### ■ 主要機器

#### MSIV弁体加工ユニット

外弁穿孔時：約14m  
内弁穿孔時：約21m

長尺のため、第1～3ユニットに分割して搬入  
シールケースへ順次挿入・接続する  
(接続方法・構造は配管エルボ加工ユニットも同様)



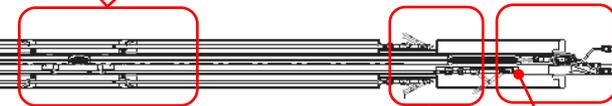
パイプ接続部 (メス)



パイプ接続部 (オス)



AWJノズルの前進はパイプのタービン建屋側での接続と挿入で実施。引き抜き時は逆手順。



芯出し装置 (その3)

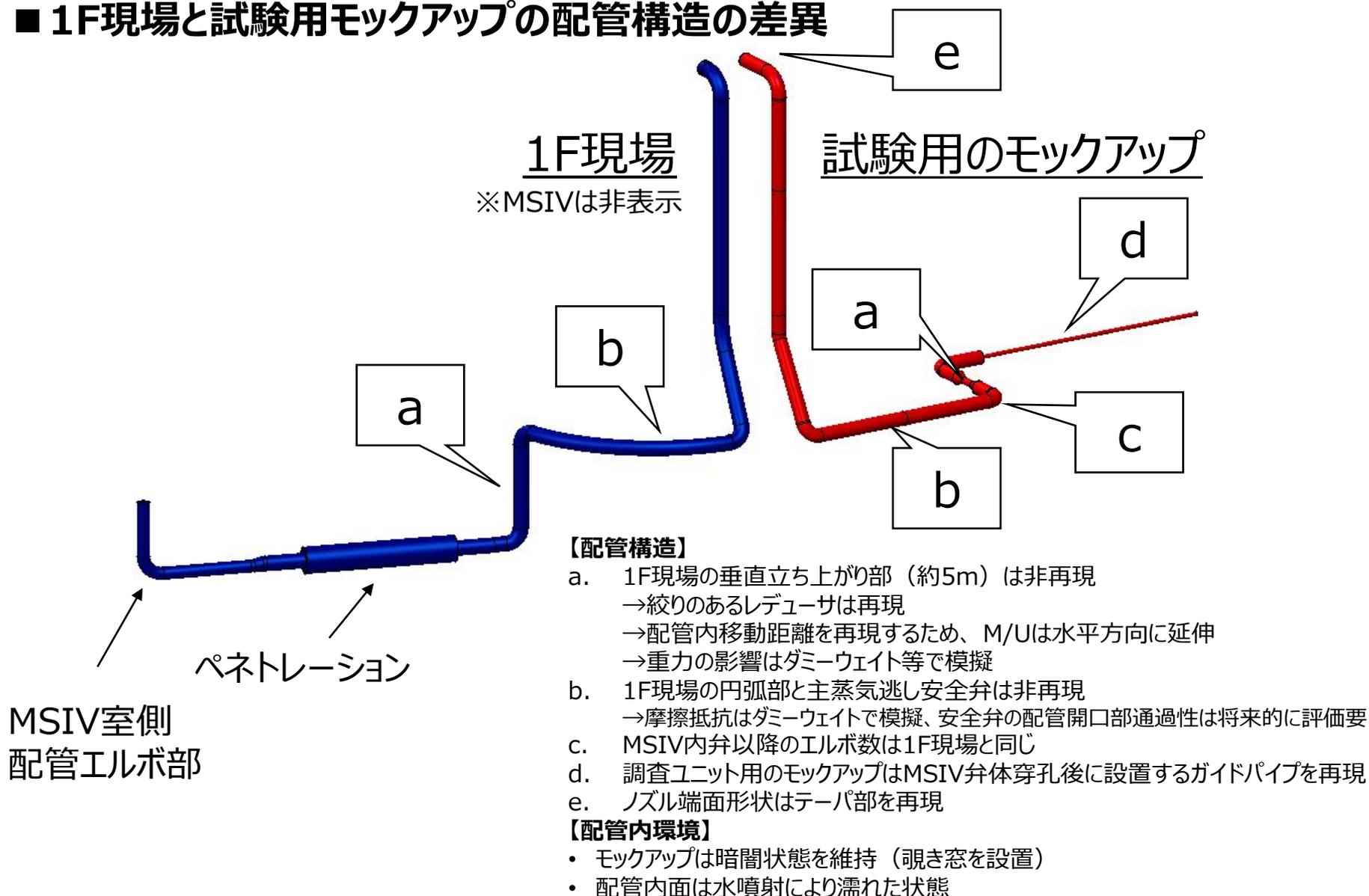


芯出し装置 (その2)  
方位90度毎に4箇所配置

役割	MSIV外弁体および内弁体の穿孔
全長	上記図面参照
直径	Φ350mm
駆動方式	有線ケーブルによる電気駆動
切断方式	アブレシブ・ウォーター・ジェット
主要な付帯機器	前方カメラ (ユニット本体付属), 芯出し装置 (3箇所)
AWJノズル部仕様	切断直径: Φ165mm, ノズル周速: 最大約32deg/min ノズル旋回角度: 360deg

## 3.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 1F現場と試験用モックアップの配管構造の差異



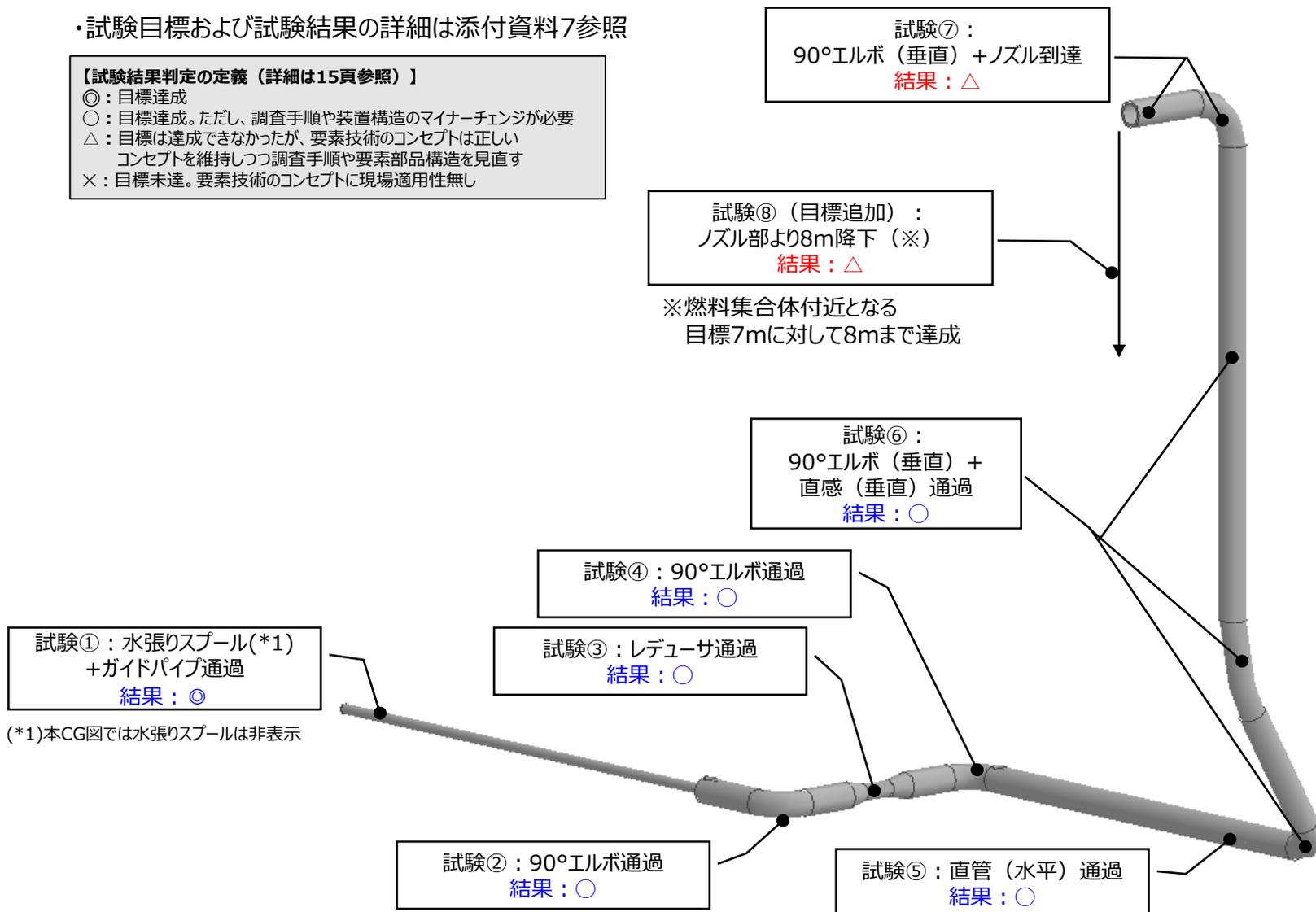
## 3.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 走行セクションに応じた試験結果概要（移動編）

・試験目標および試験結果の詳細は添付資料7参照

【試験結果判定の定義（詳細は15頁参照）】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し



# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 走行セクションに応じた試験結果概要（ルート構築編）

#### 【配管エルボ部および弁体穿孔結果】

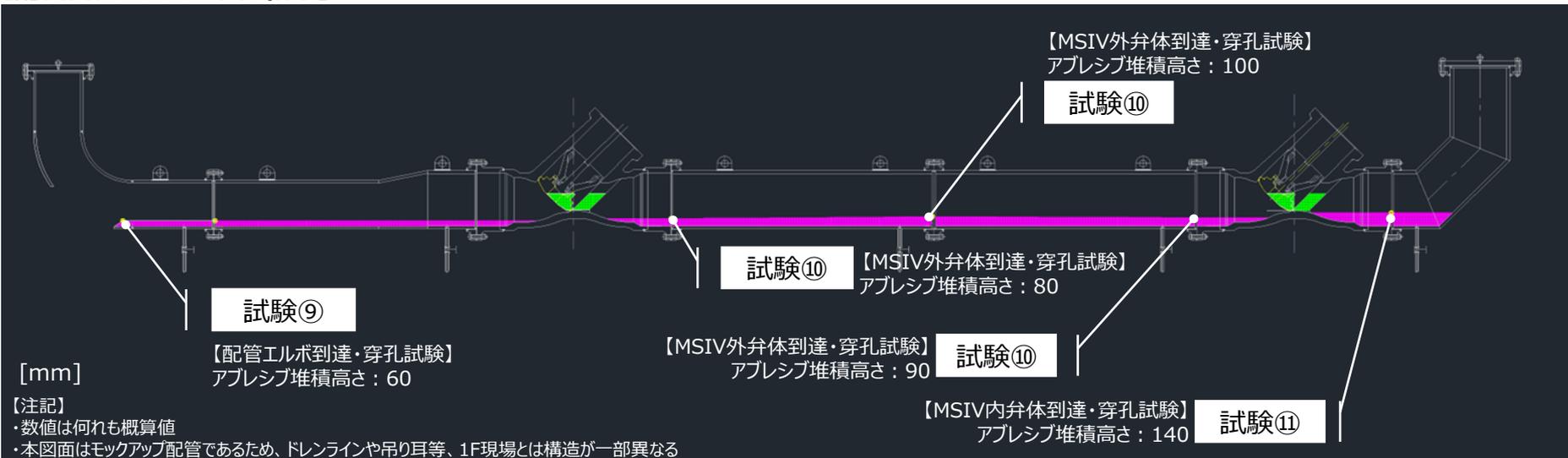
・使用水量／アブレシブ量／切削時間は添付資料7を参照

【試験結果判定の定義（詳細は15頁参照）】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し



#### 【配管内アブレシブ堆積結果】



# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.2 試験結果と将来開発課題

(\*1)★マークは、試験結果を受けて要求仕様を見直した箇所

### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの		要求機能 (*1)	試験結果 (明らかにした課題を含む)	課題の対策
	作業STEP	要素技術と目標			
<b>(a) 配管エルボ加工ユニット</b>					
a1	配管エルボ部を穿孔する	【要素技術】 ルート構築技術  【目標】 配管エルボ部を加工し、MSIV弁体加工ユニットが通過できるようにする	配管エルボを切断する機能	当初計画の切断軌道では、一部の配管にジェットが十分に当たらず切断できない箇所があることを確認。その後、切断軌道を見直した追試にて切断できることを確認	【作業効率向上を考慮した、ルート構築技術の開発】 見直した切断軌道を再現するためにAWJノズルのパイプ構造を見直し
a2			T/Bから配管エルボへ移動する機能	・引っ掛かりを起こさず到達可能 ・試験機の構造をそのまま実機として現地に持ち込む場合、タービン建屋の西側通路の幅に対して、寸法余裕が少なく、搬入や設置時に他設備と干渉する可能性が高い。また重量もあるため作業員による取り回し性が低い	【作業効率向上を考慮した、ルート構築技術の開発】 装置の小型化および軽量化を狙ってユニット全体の構造を見直し (主にパイプ部分)
a3			MSIV室環境による故障から防護する機能	【アプレシブ】ID a5, a6参照	ID a5, a6参照
a4			各種作業を監視する機能	配管エルボ加工ユニット本体に設置したカメラだけでは死角が発生し、切断状況を十分に把握できない	【作業監視性の向上を考慮した、ルート構築技術の開発】 MSIV室にカメラ付き遠隔ロボットを投入するなど、監視を支援する仕組みを導入
a5			★使用済アプレシブを撤去する機能	配管内に堆積する使用済みアプレシブが、次作業のMSIV弁体加工ユニットの動線に干渉する	【配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発】 一般産業で普及している配管水洗浄技術を導入し、アプレシブ撤去
a6			★アプレシブ付着による故障から防護する機能	ユニットに付着し、乾燥したアプレシブが機器の摺動部に引っかかり、破損するケースがあることを確認	【配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発】 付着したアプレシブが乾燥する前に水シャワーで除去する仕組みを導入
<b>(b) MSIV弁体加工ユニット</b>					
b1	MSIVの外弁と内弁を穿孔する	【要素技術】 ルート構築技術  【目標】 MSIVの外弁体と内弁体を加工し、調査ユニットが通過できるようにする	弁体を穿孔する機能 →穿孔コアの撤去を含む	ID b4, b5, b6参照	同左
b2			T/Bから弁体へ到達する機能	ID a2参照	同左
b3			配管内環境による故障から防護する機能	ID a5, a6参照	同左
b4			各種作業を監視する機能	試験機に備えたカメラ1台だけでは死角が発生し、弁体の穿孔状況を十分に把握できない	【作業監視性の向上を考慮した、ルート構築技術の開発】 カメラ増設等、作業状況を把握する仕組みを導入
b5			★使用済アプレシブを撤去する機能 →撤去、排出されたアプレシブの回収を含む	ID a5参照	【配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発】 一般産業で普及している配管水洗浄技術を導入
b6			★アプレシブ付着による故障から防護する機能	ID a6参照	同左

# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.2 試験結果と将来開発課題

(\*1)本調査ユニットは移動の制御性と視認性に課題が残るものの、各配管ルートの調査ユニットの中で比較的高い推進力を持つことから追加試験を実施した

### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの 作業STEP 要素技術と目標	要求機能	実機製作に向けた課題	課題の対策
<b>(c) 調査ユニット</b>				
c1	炉内状況を確認する 【要素技術】 配管内移動技術+ 炉内状況確認技術 【目標】 N3ノズルから炉内状況を確認する	T/BからN3ノズルへ移動する機能 (水噴射)	・調査ユニットは水噴射による前進と、ケーブル巻取りによる後退以外の動作モードが無いため、配管内でスタックした際の調査続行に向けた復旧手段が乏しい ・スタックが解消できた場合ノズルへ到達できることを確認	<b>【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】</b> 現在の動作モードの組合せで確度の高いスタック復旧方法を検討する。困難な場合、水噴射方向を変える等、新しい動作モードを導入
c2		弁体穿孔部を通過する機能 →ガイドパイプの設置を含む	・ガイドパイプを通じて引っ掛かりを起こさず通過可能 ・ガイドパイプの有効性は確認したが、挿入・調査・引き抜き時のバウンダリ構造との取り合い方法は未検討	<b>【PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発】</b> 本事業で得た知見に基づき、バウンダリ構造との取り合い方法を検討する
c3		配管内環境による故障から防護する機能	【水濡れ】 移動上の悪影響は確認されなかった 【スリット】 バウンダリ構築用仕切弁のスリット(幅63mm)を通過できることを確認 【段差(固着異物や溶接痕)】 20mm未満の段差は踏破できることを確認 【内視鏡保護】 内視鏡の先端屈曲部を露出したまま配管内を移動すると、内壁との衝突で損傷する可能性がある	<b>【装置構造の改善】</b> (内視鏡保護) 配管内移動中は内視鏡を格納するなどの保護する仕組みを導入する
c4		各種作業を監視する機能	・配管内移動時は、水噴射の飛沫やカメラレンズに付着した水滴により視認性が損なわれる ・特に、ID c1に関連し、スタック状態から調査続行のための復旧作業を行う際、カメラによる自機と周辺状況の認知性を高める必要がある	<b>【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】</b> 親水・撥水コーティングもしくはエアブローなど、水滴を積極的に除去する方法を導入。ただし、常時多量の水飛沫があるため、レンズ付着以外の視認影響も考慮する必要がある
c5		炉内目視機能 (ノズル部)	N3ノズルに一時停止中、水噴射の飛沫やカメラレンズに付着した水滴により視認性が損なわれるケースがあることを確認(事象としてはID c4と同じ)	ID c4と同様
c6		調査範囲拡張機能 (炉内降下)(*1)	ポンプをタービン建屋西側通路に設置することを前提にノズルから8mまで降下できることを確認。ただし、降下方向の制御は困難	ノズル部からの調査手法を成立させつつ、継続検討していく必要がある
<b>(d) バウンダリ構築ユニット</b>				
d1	全ての作業【構築技術】 を実行するバウンダリ構築技術 間、PCV雰囲気閉じ 込める【目標】 作業員の過剰な内部・外部被ばくを防止する	バウンダリ機能 →拡張および調査後の復旧を含む →機器の設置と撤去は有人作業とする	水張りスプールを通過できることを確認	<b>【PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発】</b> 本事業で得た知見に基づき、作業装置側の要求を考慮した検討を開始
d2		緊急時バウンダリ復旧機能	--- (本事業ではスコープ外)	調査ユニットを配管内に残置する場合、ケーブルを切断した上でバウンダリを元の状態に復旧する必要がある
d3		T/Bから配管エルボ穿孔部へ接続する機能	MSIV室で人手作業が困難な場合、T/B西側通路からバウンダリ構築用のパイプを配管エルボ穿孔部に接続する必要がある	ID d1と同様

# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 代表的な試験結果の解説（作業監視性の向上を考慮する必要性）

試験対象装置	MSIV弁体加工ユニット
対象となる1F現場作業	MSIV弁体加工ユニットを挿入, 内弁体まで到達
試験名	【大項目】MSIV外弁穿孔試験 【小項目】内弁体前到達試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 MSIV外弁体の穿孔部Φ170 mmを通過し、内弁体に対してノズルのスタンドオフを65～90 mm確保する 【環境試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	内弁体穿孔部分の通過時の隙間部寸法, MSIV弁体加工ユニットのたわみ量, ジェット噴射の初期位置（最初に小径の穿孔を設ける箇所）の位置決め精度（※位置決め精度には、弁体-ノズル間の距離（スタンドオフ）も含む）
試験作業の概要	生体遮蔽部からMSIV弁体加工ユニットを挿入し、外弁体穿孔部を通過させた後、カメラ・レーザーポインタ・スタンドオフ確保用治具（図1）を組み合わせて、ノズルのスタンドオフと方位を定める
試験結果	外弁体穿孔部を通過できることを確認した（図2, 図3）。スタンドオフ確保用治具を用いて、計画通りのスタンドオフを確保できることを確認した。弁体にレーザーポインタを照射（図4）し、カメラでノズル方位を確保できることを確認した
考察・将来開発課題	【能力試験】 検討する構造と仕組みで挿入性とノズル位置決めが可能であることを確認した 【環境試験】 試験機に著しい損耗や破損は確認されなかった 【取り扱い性試験】 機器を持ち込むT/B西側通路の幅に対して現在の装置は大きく、現場の他設備と干渉する可能性が高い。また、重量もあるため作業員による取り回し性が低い

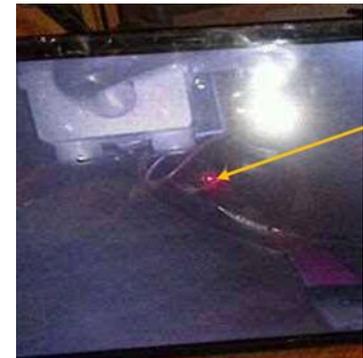
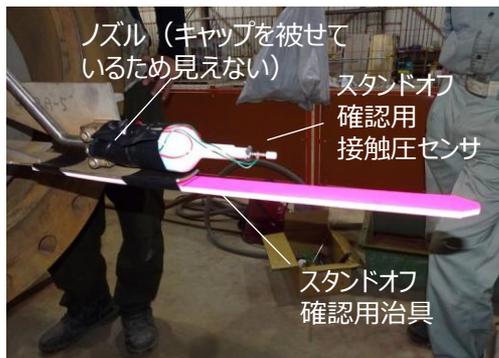


図1 スタンドオフの確保用治具

（解説：スタンドオフ確保用治具は弁体と接触するとなる（一定以上押し込むと自動的に外れる）。さらに挿入すると接触圧センサが弁体と接触し、ランプが点灯。何れも装置に備えたカメラで視認する）

図2 試験機の挿入状況（内弁体前）

（注記：本写真は装置の健全性確認のため配管を取り外している。実際の試験では配管は接続している）

図3 外弁穿孔部の通過状況

（解説：試験機は穿孔部と左右7mm程度の隙間を維持しながら挿入可能であることを確認。重量によるたわみの悪影響は確認されなかった）

図4 カメラによるレーザー視認状況

（解説：弁体からのレーザー反射光を活用し、ジェット噴射初期位置の調整ができることを確認した）

# 3. 主蒸気系配管ルートの開発成果

## 3.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 代表的な試験結果の解説（水噴射移動メカニズムを活用する場合に配慮すべき事項）

試験対象装置	調査ユニット
対象となる1F現場作業	ガイドパイプ通過後, 水噴射を継続しN3ノズル到達, RPV内部調査
試験名	ノズル到達試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】水平距離約24m・垂直距離約19mを移動し、ノズルへ到達、一時停止する 【影響試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	ポンプ根本圧力設定値, 使用水量, カメラ映像（模擬内視鏡）
試験作業の概要	ガイドパイプ入口部から水噴射を行い、N3ノズル部で一時停止して模擬内視鏡で映像を取得する
試験結果	【能力試験】移動途中の凹部でスタックはするが、スタックを解除すればN3ノズルまで到達し、根本側ケーブルの引張力をバランスさせ、一時停止できることを確認した（図1） 【影響試験】模擬内視鏡は水飛沫がレンズに付着し、視認性の確保が困難であった（図1）。模擬内視鏡は移動途中の配管と衝突し、折れ曲がってしまうことを確認した（図2） 【取り扱い性試験】配管内でスタックした際の調査続行に向けた復旧手段が乏しい
考察・将来開発課題	【能力試験】全ての試験中、配管内でホースの折れ曲がりによる墜落等は確認されなかった。水圧をかけた時のホース剛性が有効であったと考えられる。現場で使用するペネトレーションによっては、主蒸気逃し安全弁を通過する必要がある。配管接続孔を通過できるか今後確認が必要。なお、バウンダリ構築用仕切弁のスリット（幅63mm）を通過できることは確認した 【環境試験】内視鏡を保護する機構を設ける場合、可搬重量10kg以内（試験実測）で設計する必要がある 【取り扱い性確認試験】スタック対策については本事業で試みた車輪やテーパによるスタック防止対策には限界あり。より、対応力を高めるには前進・後退以外の移動モードが必要

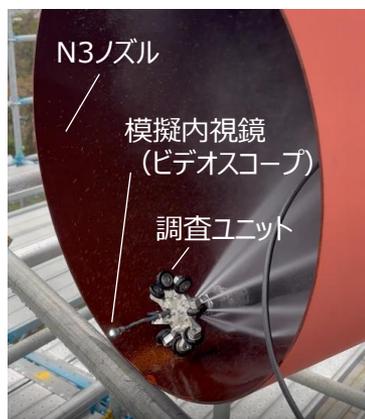


図1 N3ノズルに一時停止する調査ユニット



図2 内視鏡への負荷確認結果

## 3.3 ここまでのまとめ

※2.4節とほぼ同じ文意の箇所はグレーアウトしている

### 主蒸気系配管ルートに関する開発を行い、試験により以下の成果が得られた。

- A) 実施項目(1)で策定した開発計画に基づき、調査に適用性が高いと評価した方法・装置を検討した。さらに、現場適用性を確認するための工場内試験に向けて、1F現場向けWBSを作成し、タスク毎の作業失敗要因を抽出した。これらは、「能力試験、影響試験、取り扱い性試験」の三種類で整理した。特に能力試験については、定量的目標を試験毎に個別に設定し、試験結果の判定基準とした。(2.1節, 添付資料7)
- B) 試験用のモックアップ設備は、1F現場との違いを評価し、開発上重要なものについては対策（配管高さ不足を補うダミーウェイト、配管内面のウェット状態、など）を施した。(33頁)
- C) 現場適用性を確認することを目的に、装置の試作および工場内試験を実施し、以下の観点で結果をまとめた。
  - A)に示す試験結果の判定基準を活用し、走行セクションに応じてまとめた。(34～35頁)
  - 要求機能に応じて試験結果・課題・対策をまとめた。(36～37頁)
- D) 配管エルボ加工ユニットとMSIV弁体加工ユニットの共通事項として、試験機は重くかつ1ユニットあたりが長尺で、1F現場のタービン建屋での取り回しが悪い点を考慮し、軽量化・1ユニットあたりの長さの短尺化が必要と評価した。そこで、「作業効率向上を考慮した、ルート構築技術の開発」が今後求められることを確認した。(36頁)。
- E) D)に引き続き、水噴射によるアプレシブの撤去、自機に付着したアプレシブの水シャワー除去、かつ加工状況を監視できれば配管エルボとMSIV弁体はそれぞれ加工できることを確認した。なお、配管エルボ加工ユニット特有の課題としては、切断軌道の変更に伴うAWJノズルのパイプ構造の見直しも必要であることを確認した。そこで、「作業監視性の向上を考慮した、ルート構築技術の開発」と「配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発」が今後求められることを確認した。(36, 38頁)
- F) 調査ユニットは、配管内でスタックした際の調査続行に向けた復旧手段を獲得（動作モードの追加と、自機・周囲状況の認知性向上）すれば、ノズル部からの調査ができることを確認した。そこで、「スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発」が今後求められることを確認した。(37頁)
- G) 調査ユニットは、各配管ルートの調査ユニットの中で比較的高い推進力を持つことからノズルからの降下を行う追加試験を実施した。移動方向の制御性に課題があるものの、8mまで降下できることを確認し、継続検討の必要性を確認した。(37頁)
- H) バウンダリ構築ユニットは、水張りスプールを調査ユニットが通過できることを確認し、「PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発」の開始の必要性を確認した。(37頁)

**配管内の移動技術の開発及び弁体等の干渉物の加工技術の開発は、更なる開発課題を確認したが、現場への適用可能性も併せて確認した**

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.1 ルート概要および主要機器

### ■ 配管ルートの概要

- 原子炉再循環系の配管ルートの特徴を示す。
- 内径が異なる配管内を移動。(図1)
- 配管内の移動ルート上には仕切弁があり(図2では非表示)、凹凸部で引っかかりを起こさないようにする必要はあるが、「開」状態。
- 調査装置は既設配管を切断し、閉じ込め空間を構築してから進入。(図2では非表示)

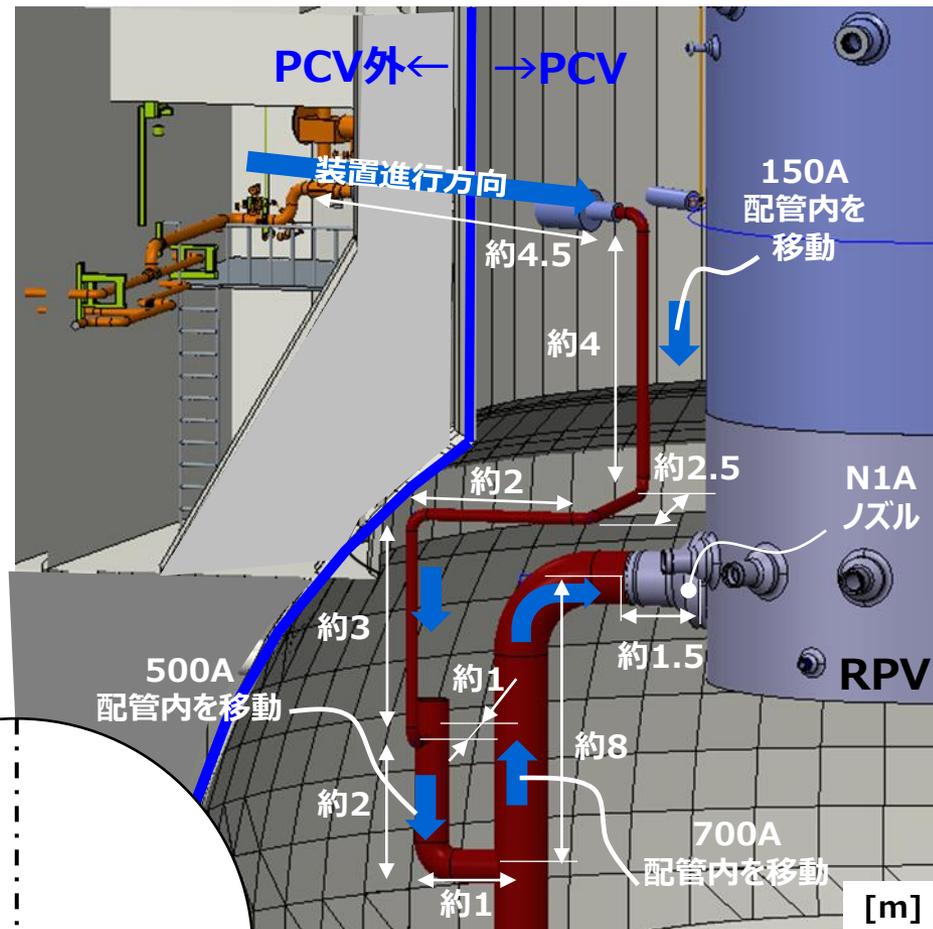


図2. PLR系配管ルート

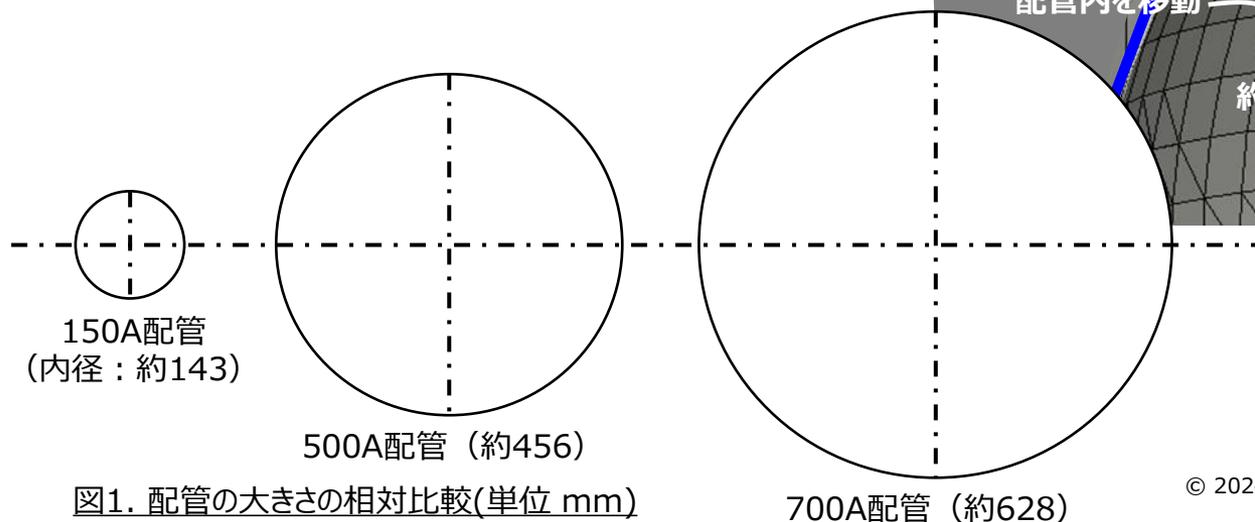


図1. 配管の大きさの相対比較(単位 mm)

700A配管 (約628)

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

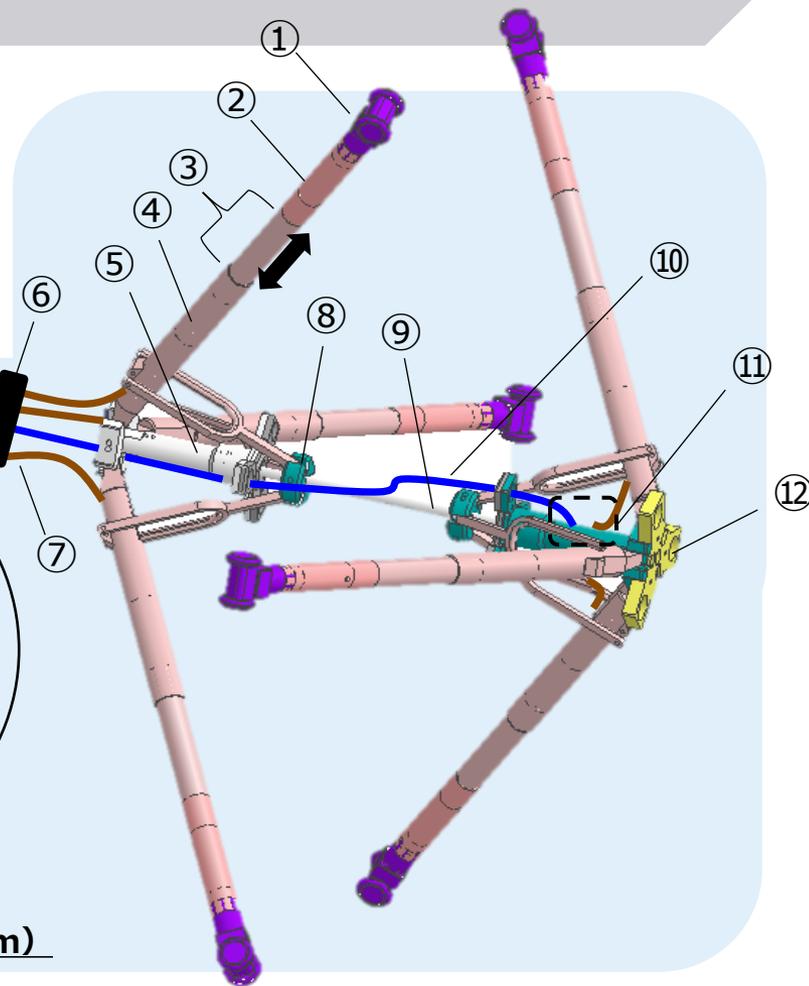
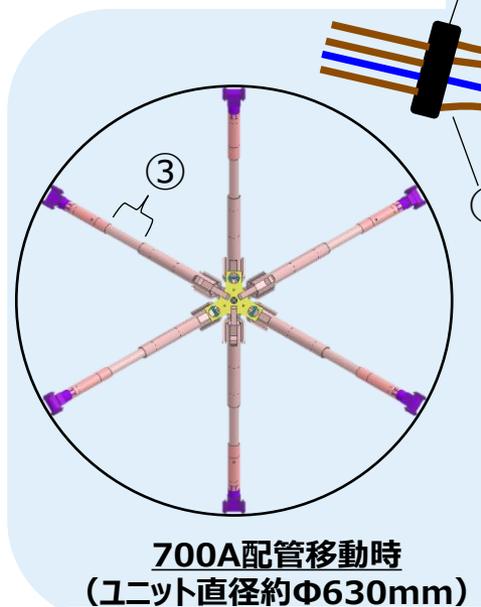
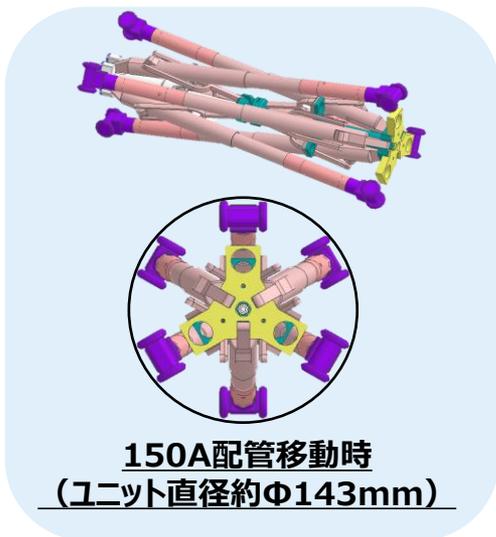
## 4.1 ルート概要および主要機器

### ■ 主要機器 (注記1)

#### 調査ユニット

##### 【構造コンセプト】

- 配管内径に合わせて車輪付きアームを展開  
→海外軽水炉の配管メンテナンス事業でも活用されている基礎技術



全長	約330mm
直径	約Φ143mm～約Φ630mm

- ①車輪
- ②車輪回転用モータ
- ③テレスコ式アーム伸縮部
- ④アーム伸縮用モータ
- ⑤アーム開閉用モータ
- ⑥ケーブルカップリング
- ⑦アーム内蔵モータ用電気ケーブル  
(各アーム毎に1本)

- ⑧台形ネジナット (アーム開閉用摺動部)
- ⑨台形ネジ (アーム開閉用)
- ⑩前方ケーブル群捕縛チューブ (前方側アームの電気ケーブル+耐放射線性内視鏡)
- ⑪前方ケーブル群捕縛点
- ⑫ボディフランジ (内視鏡等付帯機器 搭載位置)

(注記1) 1F向け実機製作時には、主要機器にバウンダリ構築ユニットも含まれる。バウンダリ構築ユニットはバウンダリ内で作業する各ユニットによる配管内環境変化 (アプレシブ発生量など) の情報を集めた上で構造決定する必要があるため、本節から除外した。なお、炉心スプレイ系配管・主蒸気系配管・原子炉再循環系配管それぞれに用いる水封バウンダリの考え方は16頁の図4および添付資料6の試験①の図1を参照のこと。

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.1 ルート概要および主要機器

### ■ 調査ユニットの概要

#### 【現地運用コンセプト（装置二台運用）】

調査ユニットは2体1組として運用。連結棒の両端部にはユニバーサルジョイント（図1）を備え、ユニット同士を支えつつエルボ部（図2）、仕切弁（図3）、ティ等のスタックが起きやすい箇所を安定的に通過する仕組みを備える。



試験機写真

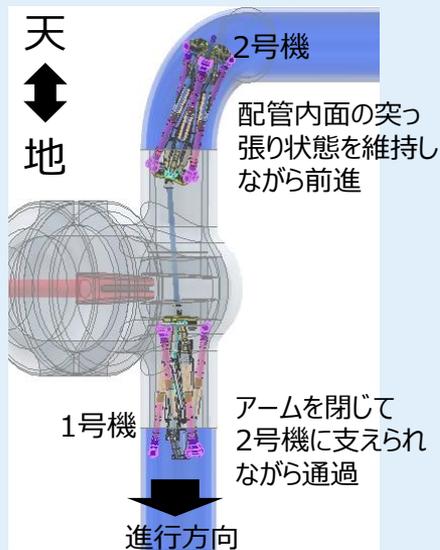
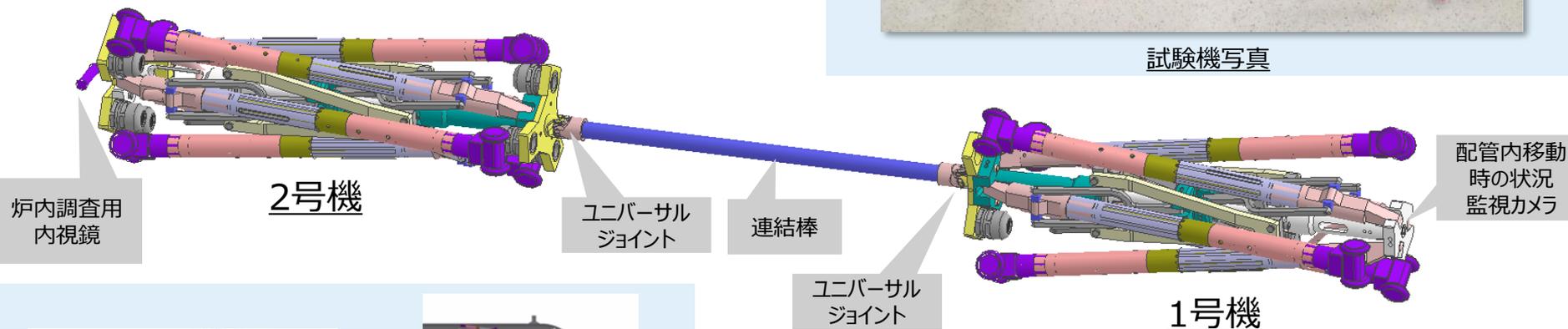


図3. 仕切弁（垂直部）走行イメージ

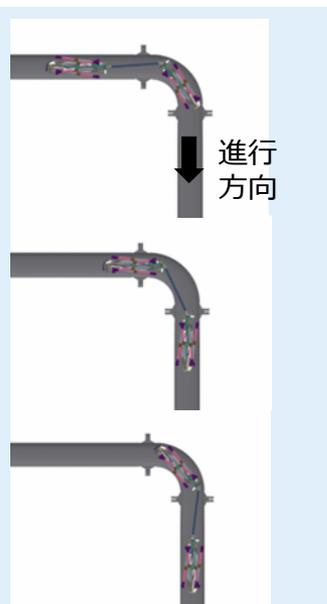


図2. エルボ部走行イメージ

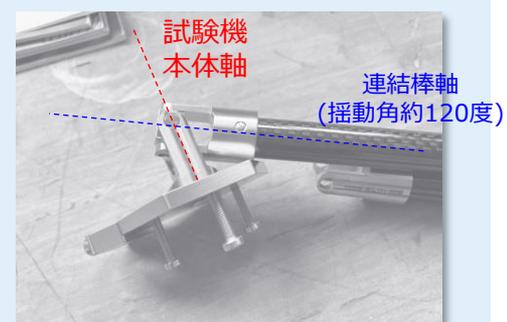
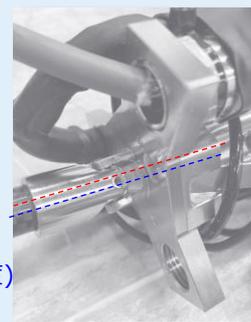


図1. ユニバーサルジョイントの詳細構造  
(揺動可動角：最大約120度)

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.1 ルート概要および主要機器

### ■ 調査ユニットの概要

(\*1)両者に顕著な差がある場合は1点を付与

(\*2)失敗要因分析結果に基づき、走行難易度が最も高いティ分岐(A7)と仕切弁(A8)は重み付けした。さらに、事業レビューで指摘された操作の難しさを考慮し、(C1)についても重み付けした

#### 【現地運用コンセプト（装置二台運用）】

二台運用は下表に示す机上比較とモックアップ配管を用いた試験で、その必要性を確認した。

カテゴリ	一台運用			二台運用			補足
	①基礎点 (*1)	②重み付け (*2)	得点 (①×②)	①基礎点 (*1)	②重み付け (*2)	得点 (①×②)	
<b>(A) 走行機能</b>							
(A1)ケーブル牽引力	---	---	---	---	---	---	両者に顕著な差無し
(A2)絡みつき等のケーブルハンドリング	1	1	1	0	1	0	二台運用の場合、後続の調査ユニットは前方ユニットのケーブルへの配慮が必要
(A3)垂直配管移動時の姿勢安定性（落下防止）	0	1	0	1	1	1	二台運用の場合、相互に補助（支え合う）ことが期待できる
(A4)配管内での姿勢制御等、動作モードの豊富さ	0	1	0	1	1	1	二台運用の場合、どちらかの調査ユニットで押し引きの動作モードを追加できる
(A5)配管ストレート部	---	---	---	---	---	---	両者に顕著な差は無い
(A6)配管エルボ部	0	1	0	1	1	1	エルボ・ティ分岐・仕切弁の通過時は6つの車輪の一部もしくは全部が空転状態になるため、別の調査ユニットによる補助が期待できる
(A7)配管ティ分岐部	0	2	0	1	2	2	
(A8)配管仕切弁部	0	2	0	1	2	2	
<b>(B) 装置の構造</b>							
(B1)部品構成・仕組みの複雑さ	1	1	1	0	1	0	
(B2)センサ類の搭載性	0	1	0	1	1	1	
<b>(C) 現場での作業要領</b>							
(C1)人間による操作性	1	2	2	0	2	0	調査ユニットは1台で13自由度を持ち、1台運用であっても操作は複雑になる
(C2)レスキュー（帰還能力・調査継続能力）	0	1	0	1	1	1	(A4)と同じ
得点合計	---	---	4	---	---	9	

机上検討で二台運用が必要と判断。モックアップ配管を用いた比較試験を実施（次頁）

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.1 ルート概要および主要機器

### ■ 調査ユニットの概要

#### 【現地運用コンセプト（装置二台運用）】

水平設置・垂直設置の仕切弁それぞれに対して、比較試験を実施した。

#### ～仕切弁（水平）～

- 調査ユニットはどちらの運用であっても弁体内スリット部に車輪は脱落するが、二台運用の場合は後続するユニットの推進力で、脱落車輪がスリットを乗り越えられることを確認した。（図1, 図2）
- 2台運用の場合、後続機も仕切弁通過時に脱輪するが、同様の理屈（先行機の推進力）で対処できることを確認した。

#### ～仕切弁（垂直）～

- 前側／後側のアーム開閉量は常に同じであることから、弁体スリット部を通過するためにアームを閉じると、後側アームの車輪は配管との接面が失われ、落下する。（図3）
- 2台運用の場合、後続機が先行機を支えることで先行機は安定的にスリット部を通過できることを確認した。

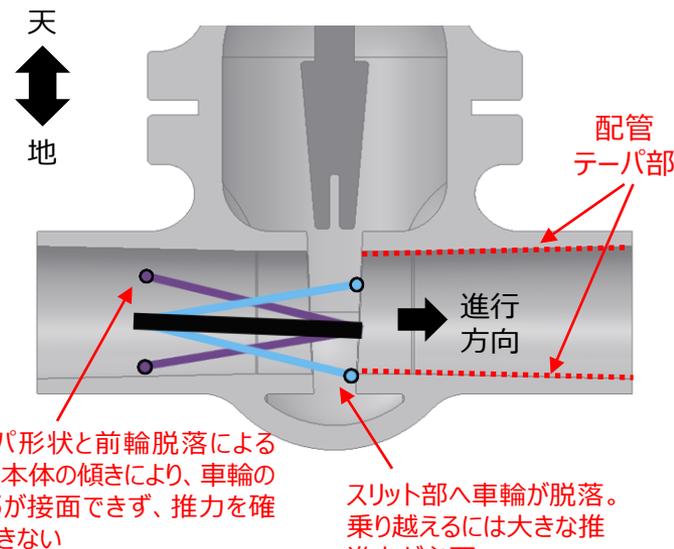


図1 調査ユニット一台運用時の状況  
(水平設置仕切弁の場合)

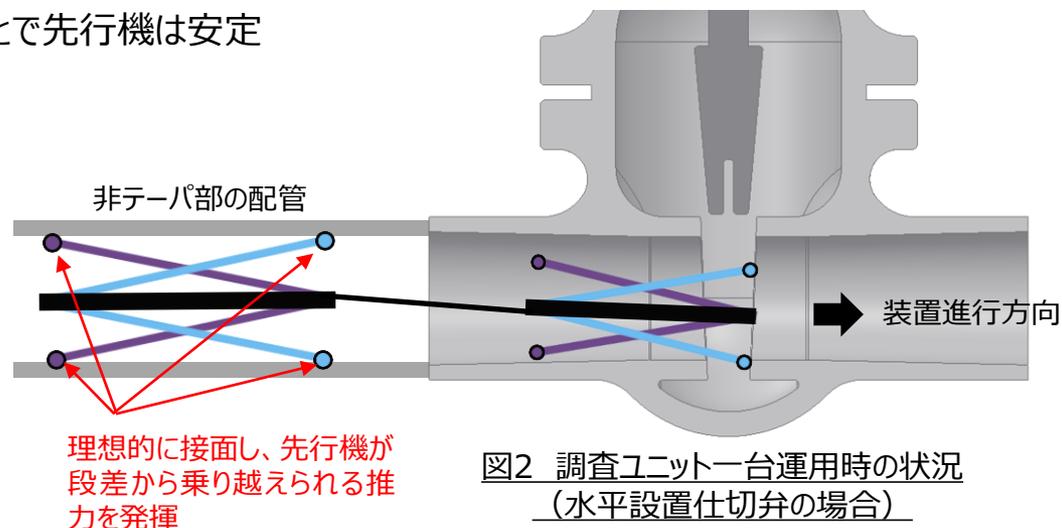


図2 調査ユニット一台運用時の状況  
(水平設置仕切弁の場合)

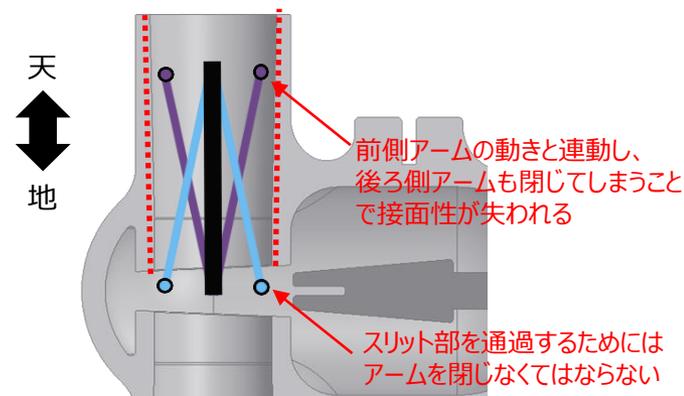


図3 調査ユニット一台運用時の状況  
(垂直設置仕切弁の場合)

## 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

### 4.2 試験結果と将来開発課題

#### ■ 1F現場とモックアップ配管の差異

##### 【配管構造】

- a. 仕切弁は弁箱のみ再現  
→弁体は走行に干渉しないため、非再現
- b. 配管ストレート部（ペネトレーション相当）は非再現  
→本ルートはエルボが多く、ケーブル摩擦力はエルボが支配的と判断

##### 【配管内環境】

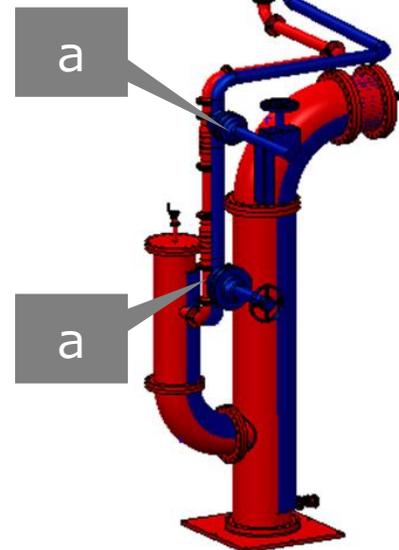
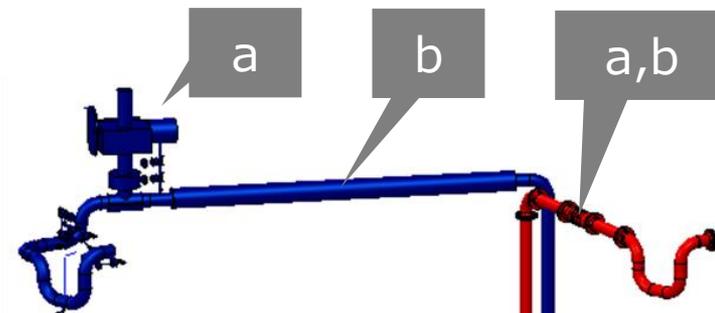
- モックアップは暗闇状態を維持  
→試験機の観察のため、エルボ部等に観察用小径穴を付設
- 配管内面は霧吹きによる水濡れ状態と非水濡れ（雰囲気成り行き）状態の2種類を再現



1F現場



モックアップ



机上検討で二台運用が必要と判断。モックアップ配管を用いた比較試験を実施（次頁）

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

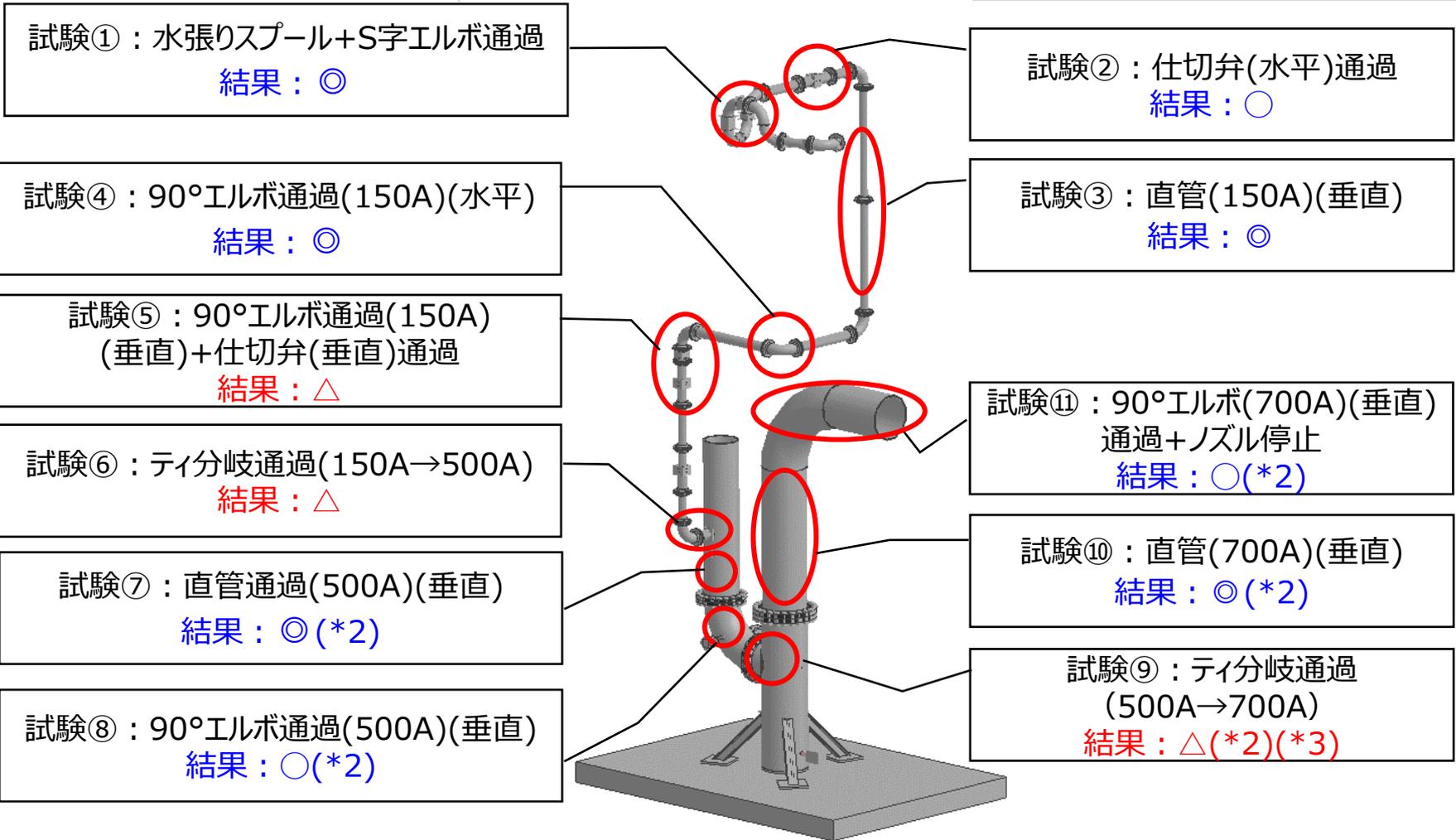
## 4.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 走行セクションに応じた試験結果概要(\*1)

- ・試験目標および試験結果の詳細は添付資料8参照
- ・段差踏破能力試験(試験⑫)およびレスキュー試験(試験⑬)は、添付資料8を参照

【試験結果判定の定義(詳細は15頁参照)】

- ◎: 目標達成
- : 目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △: 目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×: 目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し



(\*1)各試験の定量的目標は添付資料参照のこと

(\*2)試験⑥以降の走行セクションはケーブル摩擦が強くなり、試験機の推力が確保できないケースが確認された

(\*3)本試験では約320mmの連結棒を使用(他の試験で使用した約260mmの連結棒では短すぎて通過できなかったため)

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 装置機能に応じた試験結果概要、および将来開発課題の総括

ID	RPV内部調査で求められるもの		要求機能	試験結果（明らかにした課題を含む）	課題の対策
	作業STEP	要素技術と目標			
<b>(a) 調査ユニット</b>					
a1	炉内状況を確認する	【要素技術】 配管内移動技術＋炉内状況確認技術  【目標】 異径の配管間を移動し、N1ノズルから炉内状況を確認する	150A/500A/700Aの配管内を移動する機能	【ストレート部・エルボ部】 垂直・水平共に、引っ掛かりを起こさず移動可能【仕切弁】 ① 水平部の仕切弁は引っ掛かりを起こさず移動可能。垂直部の降下移動（行き）は可能。上昇移動（帰り）は仕切弁を通過する装置を支える装置が、エルボにいたるためタイヤが配管内面に十分に接触せず、推力を確保できないケースを確認 【ケーブル牽引】 ② エルボ部はストレート部よりケーブルの接触面が多く、摩擦力増大。特に、150A配管以降は牽引力が不足するケースを確認	【スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発】および【操作性向上に向けた配管内移動技術の開発】 ① 仕切弁とエルボが近接する箇所は、連結棒の長さを調節する仕組みを導入。仕切弁通過時は、装置2台がそれぞれ異なるアーム伸縮・開閉が必要となり、操作が複雑化する。半自動運転など、調査ユニットの操作を補助する仕組みが必要 【装置構造の改善】 ② 装置の寸法制約のため、車輪回転トルク向上のためのモータ大型化やギヤ比の強化は困難であるため、ケーブルに金属リング等を設けて、摩擦を低下させる仕組みが必要
a2			異径配管の接続部分（ティ部）を移動する機能	・500A→700Aティ部通過後、配管と試験機を中心軸がずれたまま移動することで車輪の接面性が損なわれ、移動できなくなるケースを確認 ・150A→500A、500A→700Aのティ部それぞれの必要連結棒長さは異なる（どちらかを最適化すると、もう一方が通過できなくなる）	ID a1の「仕切弁」と同様
a3			配管内環境による故障から防護する機能	【摩耗】 ① タイヤ（ゴム製）は配管内面への接触圧を高くすぎると、移動中に無視できなくなるほど摩耗するケースを確認（エルボ部の内輪・外輪差発生箇所での空転が原因） 【溶接痕等の段差】 ② アームの伸縮開閉を制御しないまま10mm以上の段差を踏破しようとすると、応力が装置の一部に集中、変形破損するケースを確認	【装置構造の改善】 ① 採用したタイヤは原子力産業で使用実績があり、水濡れ環境でも十分なグリップ力を持つため、タイヤの再選定以外の対策を優先して検討する。タイヤ接触圧を能動的に制御し、寿命を高める仕組みが必要 ② 装置の過負荷を直接的もしくは間接的に検知し、アームの伸縮開閉を制御する仕組みが必要
a4			各種作業を監視する機能	ID a1(仕切弁), a2, a5の試験において、試験機のカメラだけでは自機姿勢の把握が困難	ID a1の「仕切弁」と同様
a5			炉内目視機能	ノズル付近に正しく停止できることを確認	
<b>(b) バウンダリ構築ユニット</b>					
b1	全ての作業を実行する間、PCV雰囲気閉じ込める	【要素技術】 バウンダリ構築技術  【目標】 作業員の過剰な内部・外部被ばくを防止する	バウンダリ機能 →調査後の復旧を含む →機器の設置と撤去は有人作業とする	水張りスプールを通過できることを確認	【PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発】 本事業で得た知見に基づき、作業装置側の要求を考慮した検討が必要
b2			緊急時バウンダリ復旧機能	---（本事業ではスコープ外）	調査ユニットを配管内に残置する場合、ケーブルを切断した上でバウンダリの元の状態への復旧が必要

調査ユニットは他の配管ルートより複雑な操作が求められるため、対策が必要

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 代表的な試験結果の解説（操作性を向上させる技術の必要性）

#### 【試験】

ティ分岐通過試験（2箇所）

#### 【明らかにした課題】

連結棒は、水張りスプールから1つ目のティ分岐（150A→500A）通過までの経路で必要な長さ（約260 mm）と、それ以降の経路で必要な長さ（約320 mm）が異なることを明らかにした。（図1,図2参照）

#### 【対策】

連結棒にモータとスピンドルによる伸縮機構を設ける。（図3参照）

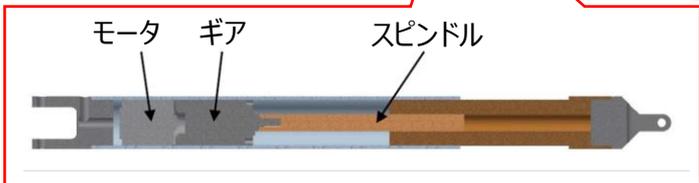
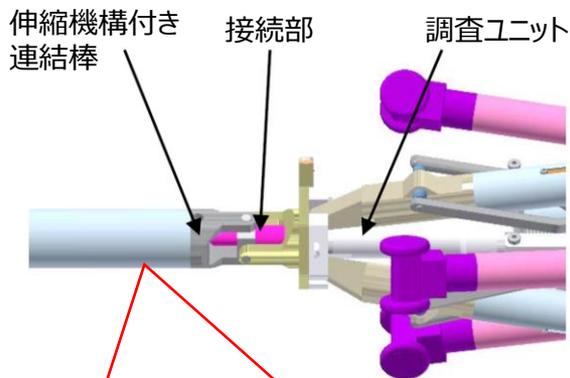


図3 伸縮機構付き連結棒の構造コンセプト

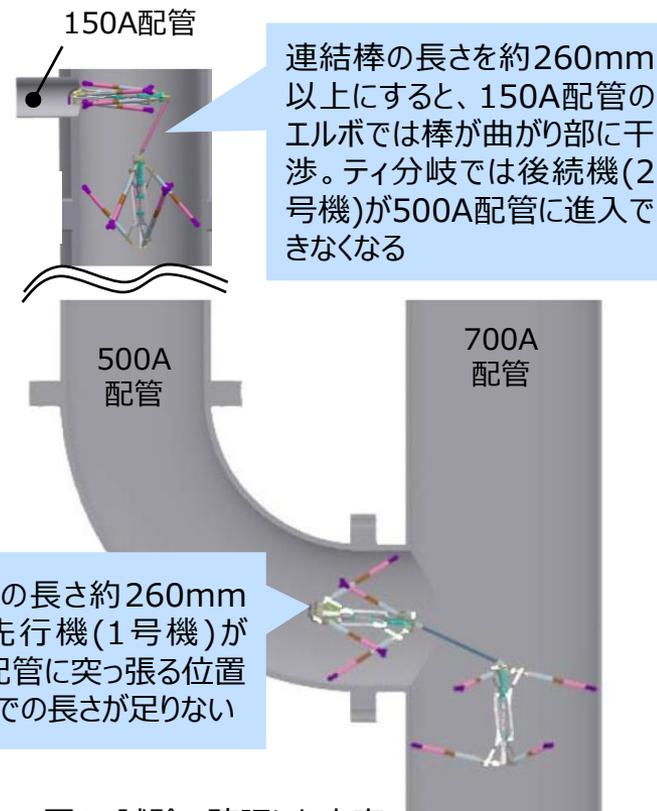


図1 試験で確認した内容

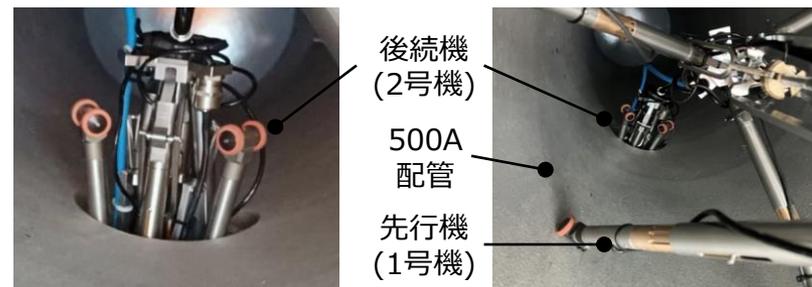


図2 150Aから500A配管へ進入する様子（配管の下から見上げた図）

# 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

## 4.2 試験結果と将来開発課題

### ■ 代表的な試験結果の解説（操作性を向上させる技術の必要性）

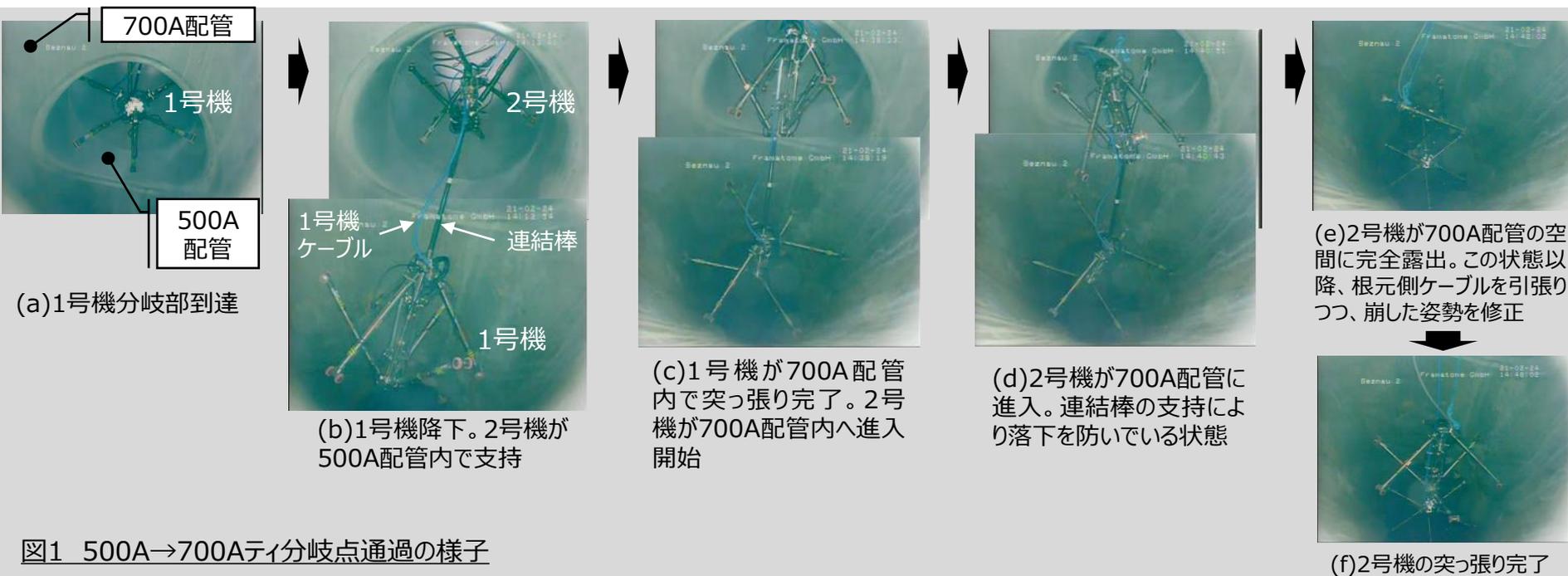


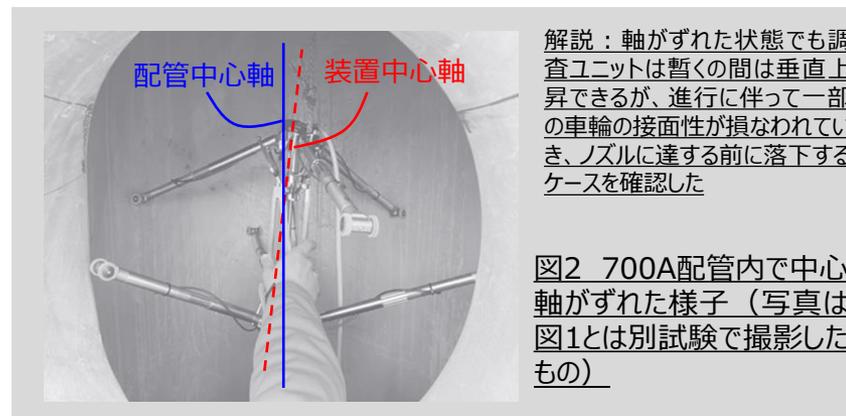
図1 500A→700Aティ分岐点通過の様子

### 【明らかにした課題】

- 500A→700Aティ部の通過後（図1）、配管と試験機を中心軸がずれたまま700A配管を垂直移動すると、車輪の接面性が損なわれ（図2）、落下するケースを確認。
- 軸ずれは、700A配管進入時（図1の(c),(f)）および、垂直上昇のための500A配管出口通過時（図2）の2箇所が発生。

### 【対策】

- 加速度計による傾き検知、あるいは車輪の空転発生やアームの押し付け負荷を検知する方法を導入。



## 4. 原子炉再循環系配管ルートの開発成果

### 4.3 ここまでのまとめ

※2.4節とほぼ同じ文意の箇所はグレーアウトしている

#### 原子炉再循環系配管ルートに関する開発を行い、試験により以下の成果が得られた。

- A) 実施項目(1)で策定した開発計画に基づき、調査に適用性が高いと評価した方法を実現する装置の検討した。さらに、現場適用性を確認するための工場内試験に向けて、1F現場向けWBSを作成し、タスク毎の作業失敗要因を抽出した。これらは、「能力試験、影響試験、取り扱い性試験」の三種類で整理した。特に能力試験については、定量的目標を試験毎に個別に設定し、試験結果の判定基準とした。  
(2.1節, 添付資料8)
- B) 試験用のモックアップ設備は、1F現場との違いを評価し、開発上重要なものについては対策（暗闇再現, 配管内面のウェット状態再現など）を施した。（46頁）
- C) 現場適用性を確認することを目的に、装置の試作および工場内試験を実施し、以下の観点で結果をまとめた。
  - A)に示す試験結果の判定基準を活用し、走行セクションに応じてまとめた。（47頁）
  - 要求機能に応じて試験結果・課題・対策をまとめた。（48頁）
- D) 調査ユニットは、机上評価と試験評価を行い、2台運用が必要であることを結論した。（44～45頁）
- E) 調査ユニットは、以下のF), G), H)の課題を解決すればノズル部から調査できることを確認した。
- F) 2つのティ分岐点を通る際、連結棒の必要長さがそれぞれ異なることを確認した。そこで、「スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発」が今後求められることを確認した。（48, 49頁）
- G) 仕切弁やティ分岐点を通る際、先行機・後続機それぞれのアームを個別に姿勢変更させる必要がある。この調整を全て人間系で実施することは困難であることを確認した。そこで、「操作性向上に向けた配管内移動技術の開発」が今後求められることを確認した。（48, 50頁）
- H) 崩した姿勢の立て直し、過剰な配管突っ張りによるタイヤの異常摩耗や装置破損を防止するために、モータ電流値の自動制御（過剰トルクの発生防止等）や装置姿勢を把握できるセンシングが必要であることを確認した。そこで、「装置構造の改善」が今後求められることを確認した。（48頁）
- I) バウンダリ構築ユニットは、水張りスプールを調査ユニットが通過できることを確認し、「PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発」の開始の必要性を確認した。（48頁）

配管内の移動技術の開発は、更なる開発課題が確認されたものの、  
現場への適用可能性も併せて確認した

# 5. まとめ

## 【調査計画・開発計画】

実施項目 (1) 「既設配管を利用したRPV内部調査計画と装置類の開発計画の策定」にて、適用可能な既設配管ルートとして「炉心スプレイ系, 主蒸気系, 原子炉再循環系」を選び、各ルート毎の調査計画と開発計画を策定した。

## 【TRL (工場内試験)】

実施項目 (2) 「既存配管を利用したRPV内部調査技術に関する装置類の開発」にて、現場適用性の見通しを立てるための工場内試験を実施した。

## 【現場適用性の確認結果】

- 配管内の移動技術の開発及び弁体等の干渉物の加工技術の開発は、更なる開発課題が確認されたものの、現場への適用可能性も併せて確認した。
- バウンダリ構築技術は、配管内を移動する装置が水封バウンダリ部を通過できることを確認し、今後、移動技術と加工技術を連携した開発を進めていく必要性を確認した。
- 上記各開発課題を整理 (下表参照) し、対策方針を示した。

要素技術	主要な将来開発課題	適用対象(*2)		
		CS系	MS系	PLR系
配管内移動技術(*1)	スタック対策を考慮した配管内移動技術の開発	○	○	○
	操作性向上に向けた配管内移動技術の開発	---	---	○
ルート構築技術	配管内環境変化への対応を考慮した、ルート構築技術の開発	○	○	加工作業 無し
	作業効率向上を考慮した、ルート構築技術の開発	---	○	加工作業 無し
	作業監視性の向上を考慮した、ルート構築技術の開発	○	○	加工作業 無し
バウンダリ構築技術	PCV内で稼働する装置と連携するバウンダリ構築技術の開発	○	○	○

(\*1) 炉内状況確認技術も含む。本技術は将来的に東京電力HDにて計画中の調査用カメラと整合させる必要がある

(\*2) ○ : 適用対象 --- : 現時点で見出さず

**TOSHIBA**

令和4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  
（既存配管を利用した原子炉圧力容器内部調査の技術開発））」

**令和5年度最終報告  
～添付資料集～**

東芝エネルギーシステムズ株式会社  
2024年11月

# 目次

添付資料1	各配管ルートに期待する調査成果	2
添付資料2	既設配管ルートの選定プロセスと結果	5
添付資料3	基本調査フロー	12
添付資料4	装置への要求仕様	15
添付資料5	モックアップ設備外観	18
添付資料6	炉心スプレイ系配管 工場内試験結果	22
添付資料7	主蒸気系配管 工場内試験結果	45
添付資料8	原子炉再循環系配管 工場内試験結果	57

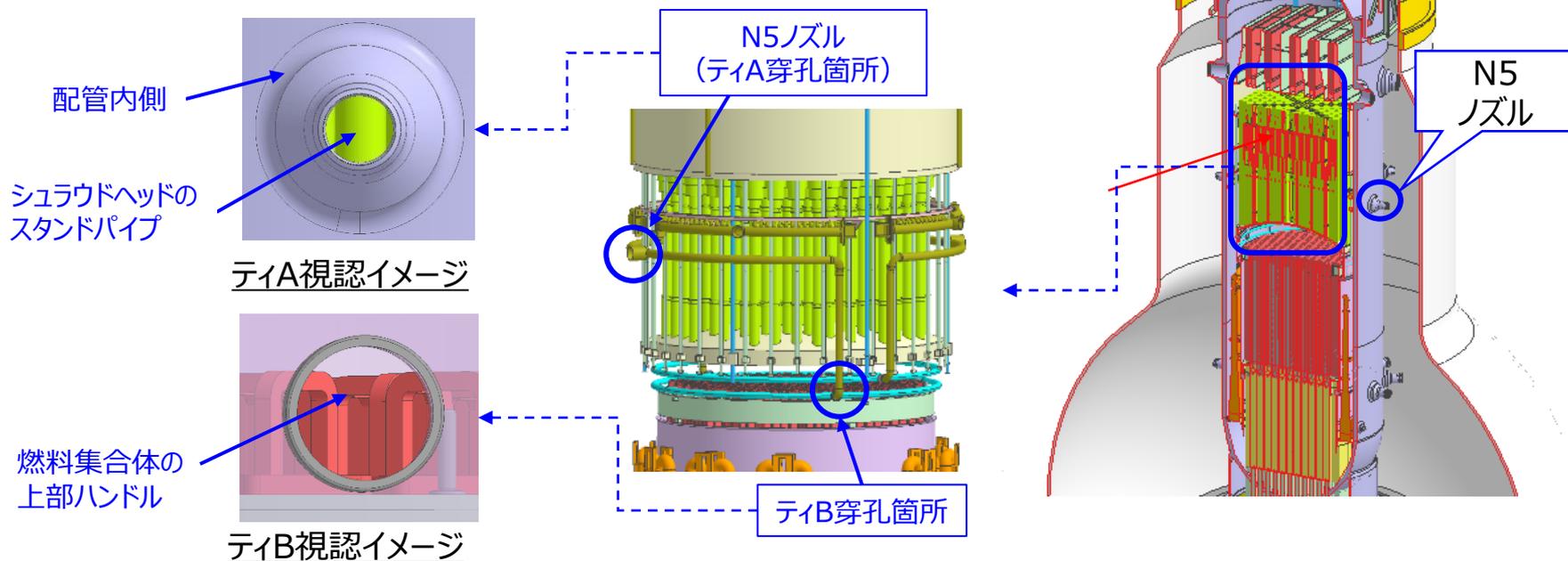
# 添付資料1 各配管ルートに期待する調査成果

## ■炉心スプレイ系配管

- 炉心スプレイ系の配管内からの視認イメージを以下に示す。
- ティA部からはシュラウドヘッドのスタンドパイプ周辺が確認可能。(※1, ※2)
- ティB部からは燃料集合体の上部ハンドル周辺が確認可能。(※1, ※2)

(※1) 炉内構造物が健全な状態の場合

(※2) ティ配管に開口は無いので、穿孔してアクセスルートを確認することが前提条件

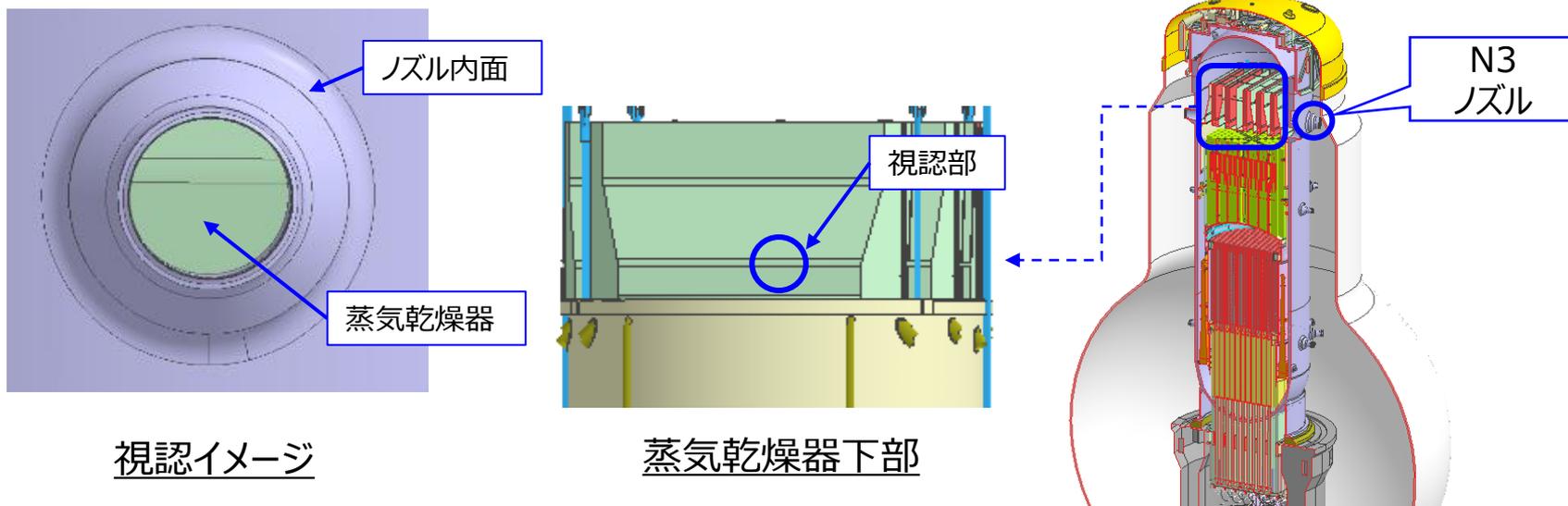


炉内構造物が健全であれば炉心スプレイ系配管からはシュラウドのスタンドパイプや燃料集合体の上部ハンドルを視認可能

# 添付資料1 各配管ルートに期待する調査成果

## ■主蒸気系配管

- 主蒸気系の配管内からの視認イメージを以下に示す。
- N3ノズルからは蒸気乾燥器の下部周辺が確認可能。(※1, ※2)  
(※1) 炉内構造物が健全な状態の場合  
(※2) ノズルから配管側へ異物混入(燃料デブリ等)の可能性あり



炉内構造物が健全であれば主蒸気系配管からは蒸気乾燥器の一部を視認可能

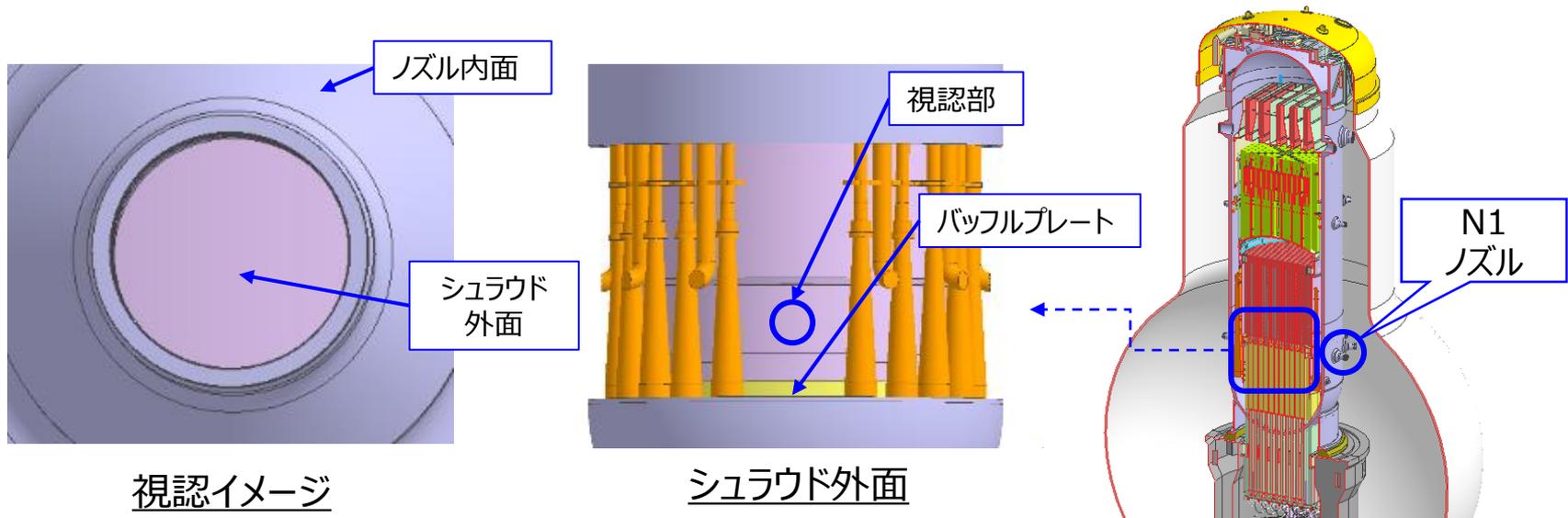
# 添付資料1 各配管ルートに期待する調査成果

## ■原子炉再循環系配管

- 原子炉再循環系の配管内からの視認イメージを以下に示す。
  - N1ノズルからはシュラウド外面が確認可能（※1, ※2）。
- なお、バッフルプレートがあるため炉底部へは移動不可。

（※1）炉内構造物が健全な状態の場合

（※2）ノズルから配管側へ異物混入（燃料デブリ等）の可能性あり



炉内構造物が健全であれば原子炉再循環系配管からはシュラウド外面を視認可能

# 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

## ■ 3つの配管ルートの特徴総括

- 各配管ルートの定量的な特徴をまとめたものを以下表に示す。
- 表中の**太字**は、「各系統独自の特徴」を整理する際に、特に注目すべきものである。

【注記】寸法は区間毎に端数処理しているため、他資料の配管距離の合計値と一致しない場合がある

系統	PCV ペネトレーション	RPV ノズル	配管内移動技術・炉内状況確認技術への要求					ルート構築技術への 要求（※）		各系統の 特徴
			配管径	移動距離 (水平)	移動距離 (垂直)	エルボ数	配管内の 分岐有無	配管内での 弁体加工要求	配管の 加工要求	
炉心 スプレイ系	X-16A	N5A	250A (ティA まで)	約13m	約7m	ティAまで： 6箇所 ティBまで： 8箇所	<b>有り</b>	<b>有り： 逆止弁、 1箇所</b>	<b>有り： ティ、 2箇所</b>	・配管内移動先での加工作業が求められる ・配管内に分岐点がある
主蒸気系	X-7A	N3A	600A	約24m	約19m	4箇所	<b>無し</b>	<b>有り： MSIV、 2箇所</b>	なし	・加工する弁体が最も大きい（ただし、有人作業エリアから近い） ・他ルートと異なり、配管内の分岐が無い
原子炉 再循環系	X-14	N1A	<b>150A 500A 700A</b>	約13m	約17m	9箇所	<b>有り</b>	なし	なし	・移動ルート上の配管径の変化が最も大きい ・配管内に分岐点がある



ルート構築技術・配管内移動技術・炉内状況確認技術は、  
これらの特徴を考慮した上で既存技術の調査・選抜を行う必要がある

※実機製作にあたっては、ルート構築要求の中に「PCV雰囲気閉じ込め」や「作業環境モニタリング」、「汚染装置閉じ込め」に代表される作業員被ばく等の安全対策も含まれる。

# 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

## ■ ルートをリストアップする条件の設定

既設配管ルートをリストアップするための条件を以下のように設定した。RPV内部調査の目的を詳細化した上で、条件を設定した。

### 【調査の目的・他のアクセス調査工法との棲み分け】

- 既設配管ルートを利用する場合、到達できるのはアニュラス部等の炉心の外側である。炉心への到達には、シュラウド等の炉内構造物の穴開けが必要となる。
- 炉心へアクセスする工法は、上部アクセス調査工法、側面アクセス調査工法にて検討されている。
- 本事業では、炉内構造物の外観、据付状態などに代表される震災前の状況との差分を確認できるような映像を得ることを目的とする。**

### 【リストアップ対象にする既設配管ルート】

- 配管内で調査装置（内視鏡等）を移動させる手段として、「調査装置を押し込む方式」、「クローラ等で搬送する自走式」に大別される。
- 本事業では、**自走式が適用可能な配管径を125A以上とし、大口径配管と呼ぶ**。それ以下の配管（100A以下）は小口径配管と呼ぶ。
- 小口径配管を利用するルートは、東京電力HDにて小型の調査装置（内視鏡）を押し込む方式での調査検討がされているため、本事業では、**125A以上の既存の大口径配管**を検討対象にする。
- なお、分岐等があるルートで100A以下の配管と125A以上の配管が混在する場合も、配管径は最低125A以上を検討対象とする。

**他のアクセス工法との棲み分け：炉心外側から震災前状況との差分を確認  
対象ルート：配管径125A以上**

## 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

### ■ ルートのリストアップ・技術的課題の抽出

#### 【リストアップ結果】

119ルートを一覧アップした。

#### 【技術的課題の抽出】

119ルートに対して、構造的な特徴を整理し、技術的課題を整理した。以下に主要な課題を示す。

#### 閉弁（MO弁、AO弁、MSIVなどの仕切弁、逆止弁）通過のための弁体加工が必要

- MO弁や仕切弁は「閉」状態のものもあり、調査装置を通過させるためには切断や穿孔等の加工作業が必要。あるいは押し広げてその状態を維持する方法が必要。
- 配管内での加工になるため、加工ツールの小型化が前提。

#### PCV外にて玉型弁等の撤去が必要

- 複雑形状の弁のため撤去が基本となる。有人作業の場合は環境改善や作業場所の確保が必要。

#### オリフィスを含む口径変化への対応が必要

- 配管口径は一律でないものも存在し、変化に追従しながら調査装置を移送する方法が必要。

#### ルート分岐への対応が必要

- ライザ管、ティ等の分岐や玉型弁がある場合、移動方向を選択できる方法が必要。円形配管の場合、装置の可動域が限定されるため、例えばクローラの場合は旋回などが困難な場合がある。

#### 装置が進入するための配管加工が必要

- ペネトレーションから進入できない場合、バウンダリを維持しつつ、調査装置が配管内に進入するための加工作業が必要。※ペネトレーション：PCV内に通じる既設貫通孔
- PCV外での作業が基本になるため、機器設置スペースや作業スペースの確保が必要。

【略語補足】

MO弁：電動駆動弁

AO弁：空気駆動弁

MSIV：主蒸気隔離弁

PCV：原子炉格納容器

## 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

### ■スクリーニングによるルート決定

- ルートの選定は二段階のスクリーニングで実施する。
- 評価方法を以下に示す。

#### 【1次スクリーニング】

RPV内部へのアクセス難易度の確認：

ルートのリストアップ時に抽出した技術課題を踏まえて、RPV内へのアクセス難易度を評価する。

※ 各ルート毎のRPV内部の調査可能範囲については、何れのルートも炉心外側であり、炉内構造物の据付状態を外観で確認できる点で、大きな相違はないため、評価対象外とした。

#### 【2次スクリーニング】

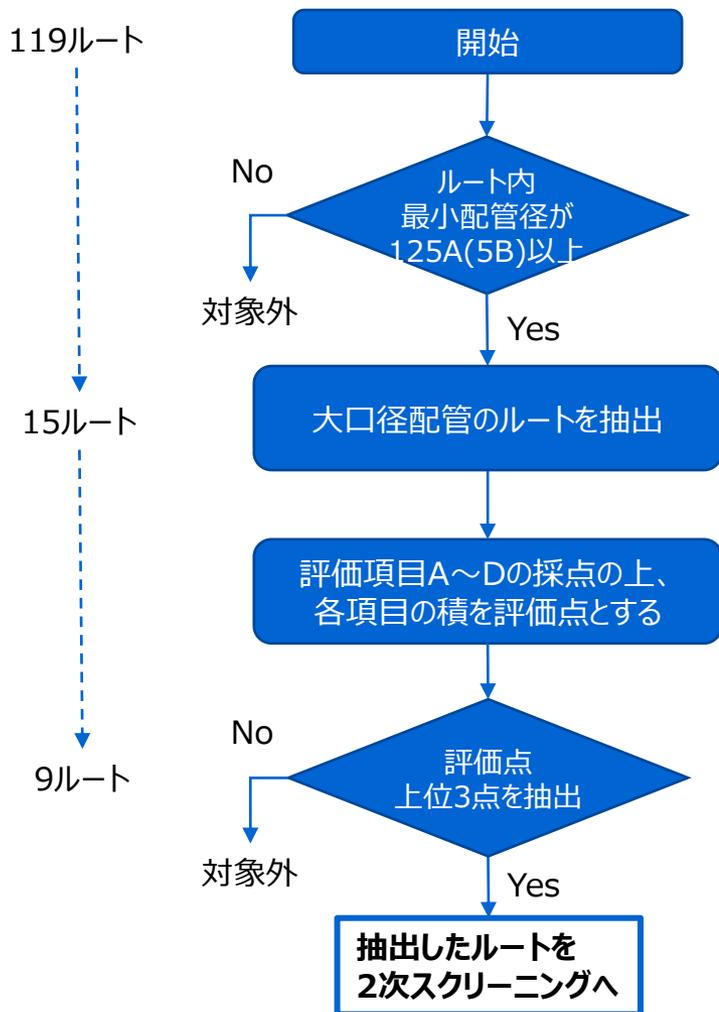
1次スクリーニングで選定したルートが、現場状況の観点で適用可能か評価する。

**1次スクリーニング：RPV内へのアクセス難易度で評価**  
**2次スクリーニング：現場適用性の観点で評価**

# 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

## ■スクリーニングによるルート決定

- 1次スクリーニングの評価手順を以下に示す。



### 【難易度評価点】

- 1点：現状の保有技術で対応可能
- 2点：1年間程度の期間での検討・開発で対応可能
- 3点：3～4年間程度の期間での検討・開発で対応可能
- 9点：技術的難易度が非常に高く、長期間の検討・開発が必要



評価内容ごとに  
点数を割り振り

#### 評価A：ルート上の障害物の有無

例：閉弁（MO弁、AO弁、MSIVなどの仕切弁、逆止弁）

- A-1：配管内に障害物がない（1点）
- A-2：配管内に障害物が1つある（2点）
- A-3：配管内に障害物が2つ以上ある（3点）

#### 評価B：ルート内の形状変化の有無

例：異径配管、レデューサ、オリフィス

- B-1：配管口径の変化がない（1点）
- B-2：配管口径の変化が1つある（2点）
- B-3：配管口径の変化が2つ以上ある（3点）
- B-4：ジェットポンプエルボのノズル部分がある（9点）

#### 評価C：ルート上の分岐の有無

- C-1：分岐がない（1点）
- C-2：分岐が1つある（2点）
- C-3：分岐が2つ以上ある（3点）

#### 評価D：炉内観察のための追加工の有無

例：給水スパーージャノズル、炉心スプレイスパーージャノズルの穿孔

- D-1：加工対象がない（1点）
- D-2：加工対象が1つある（2点）
- D-3：加工対象が2つ以上ある（3点）

## 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

### ■スクリーニングによるルート決定

- 2次スクリーニングの評価手順を以下に示す。

1次スクリーニングで抽出した3系統（炉心スプレイ系、主蒸気系、原子炉再循環系）について、作業場所となる各系統毎のペネトレーションの現場状況を踏まえて絞り込みを行う。

現場状況は主に以下の観点で踏まえて検討する。

- 線量
- 作業スペース
- 機器類の搬入経路
- 作業員のアクセス経路

なお、現場状況については環境改善等が進んでいる2号機を対象として検討し、その後他号機への適用を検討する方針で検討した。

3つの各系統（炉心スプレイ系、主蒸気系、原子炉再循環系）それぞれに、PCV外の線量・作業スペース・経路の観点で評価を行う

# 添付資料2 既設配管ルートを選定プロセスと結果

## ■スクリーニング結果のまとめ

- 2次スクリーニングを含めた最終結果を示す。

【略語補足】

R/B：原子炉建屋

T/B：タービン建屋

P/A：パーソナルエアロック

(\*1) 総合得点=評価A×評価B×評価C×評価D

(\*2) 2022年時点

系統	ノズル番号	可観察対象	PCVペネトレーション			配管径	1次スクリーニングの難易度評価点					2次スクリーニング			総合結果
			番号	接続系統	作業場所		難易度評価の総合得点(*1)	評価A	評価B	評価C	評価D	線量(*2)(mSv/h)	作業スペース	機器・作業員経路	
炉心スプレイ(CS)系	N5A	【ヘッドからアニュラスへ】 シュラウドヘッド CS配管	X-16A	炉心スプレイ(CS)系	R/B 2階北	250A	12	3	2	---	2	5~10	良好	大きな差異無し	第一候補
	N5B	【パージャからシュラウド内側へ】 上部格子板 シュラウド内側(炉心部)	X-16B		R/B 2階南		12	3	2	---	2				不明
主蒸気(MS)系	N3A	蒸気乾燥器	X-7A	主蒸気(MS)系	R/B1階東 または T/B 1階	600A	6	3	2	---	---	0.6 (T/B 1階)	大きな差異無し	大きな差異無し	第一候補 (MS系の代表例として検討)
	N3B		X-7B				12	3	2	2	---				---
	N3C		X-7C				12	3	2	2	---				---
	N3D		X-7D				6	3	2	---	---				---
	N3C		X-11				高圧注水(HPCI)系	R/B 1階西 P/A室	250A 600A	6	---				2
原子炉再循環(PLR)系	N1A	シュラウド、 ジェットポンプ	X-12	残留熱除去(RHR)系	R/B 1階西	500A 700A	12	2	2	3	---	2-7	大きな差異無し	大きな差異無し	---
			X-14	原子炉浄化系(CUW)	R/B 2階西	150A 500A 700A	9	---	3	3	---	不明			第一候補

・全119ルートから、CS系・MS系・PLR系でそれぞれ1つずつ候補を絞り込んだ  
・この3ルートを本事業の検討対象とする

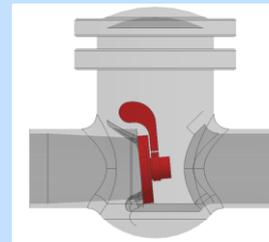
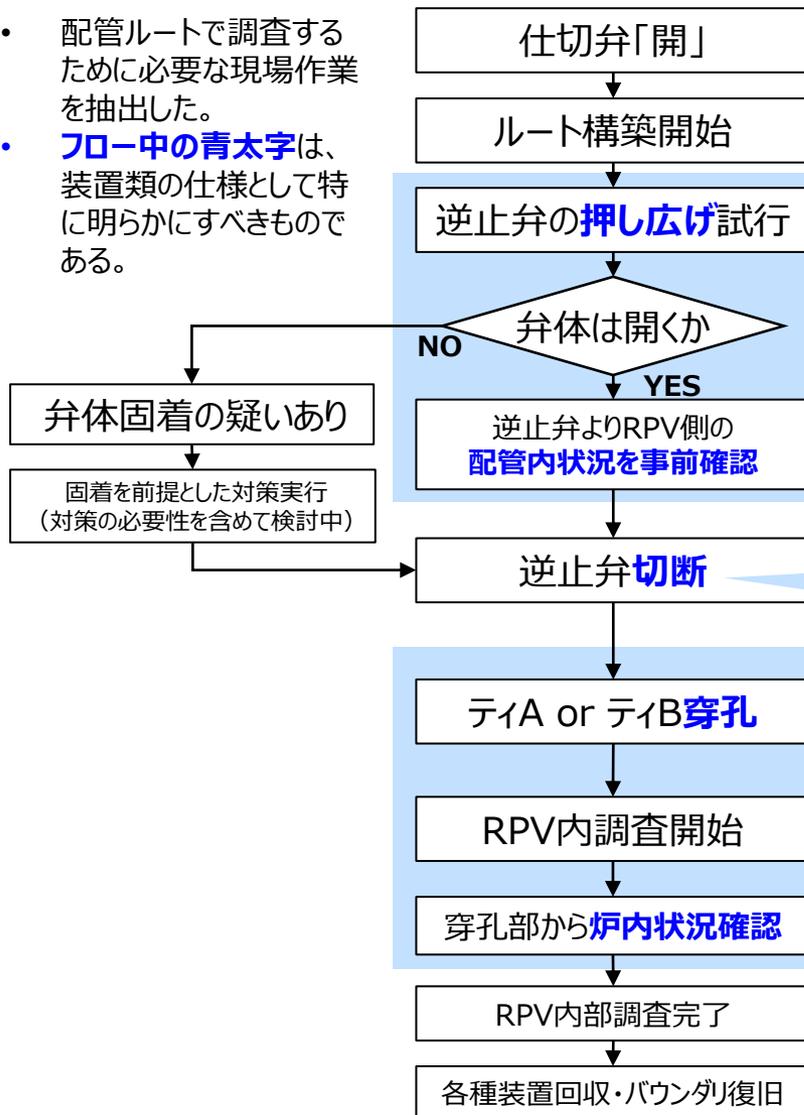
# 添付資料3 基本調査フロー

## 【注記】

- 本フロー図は装置仕様を策定することを目的としているため、成功パスのみを示している。
- 実際の調査手順では、各作業が失敗した場合のトラブルシューティングを設定する。

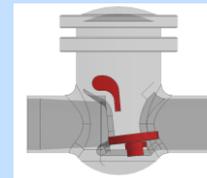
## ■ 炉心スプレイ系配管

- 配管ルートで調査するために必要な現場作業を抽出した。
- フロー中の青太字**は、装置類の仕様として特に明らかにすべきものである。

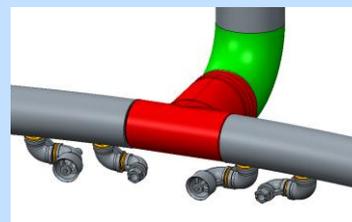


←赤色部が弁体(アーム含む)

- 弁体が小型。固着していなければ、**押し広げ**を期待できることから調査フローに組み込んだ。
- 切断前に可能な限り情報を収集**し、逆止弁切断失敗リスクおよびRPV内調査失敗リスクに備えることを目的とする。



- 弁体切断パターンの**候補が複数あり**。
- 本報告で絞り込み状況を示す。

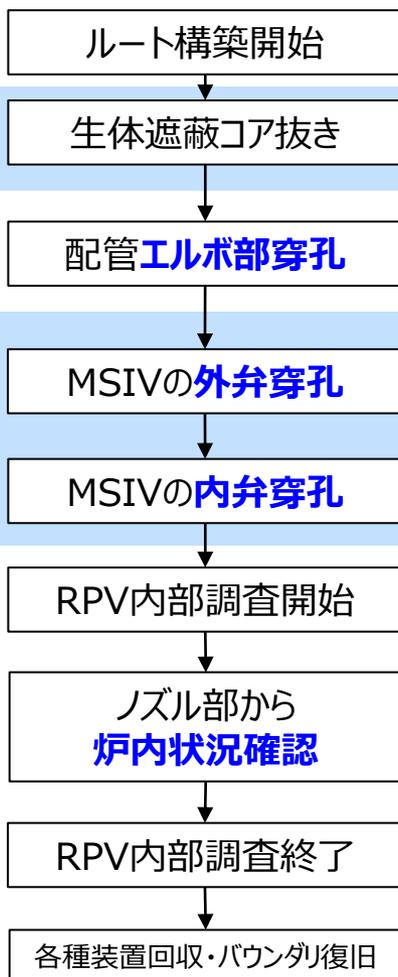


- 本事業では**ティAおよびBへの到達・穿孔**に必要な成立条件を模索する。
- 実際の現地調査時において、配管内状況からティBからの調査成功確度が高いと判断した場合は、ティBへの対応を優先する。

# 添付資料3 基本調査フロー

## ■ 主蒸気系配管

- 配管ルートで調査するために必要な現場作業を抽出した。
- フロー中の青太字**は、装置類の仕様として特に明らかにすべきものである。



コア抜き技術は1Fへの適用実績があり開発性は無いことからスコープ外とした。

- 弁体穿孔作業箇所からT/Bまでの距離は比較的短く、T/B側で荷重を支え、配管内を空中移動させるガイドパイプ方式が期待できる。
- よって、穿孔作業からは配管内移動技術の枠組みから外すこととした。

【注記】

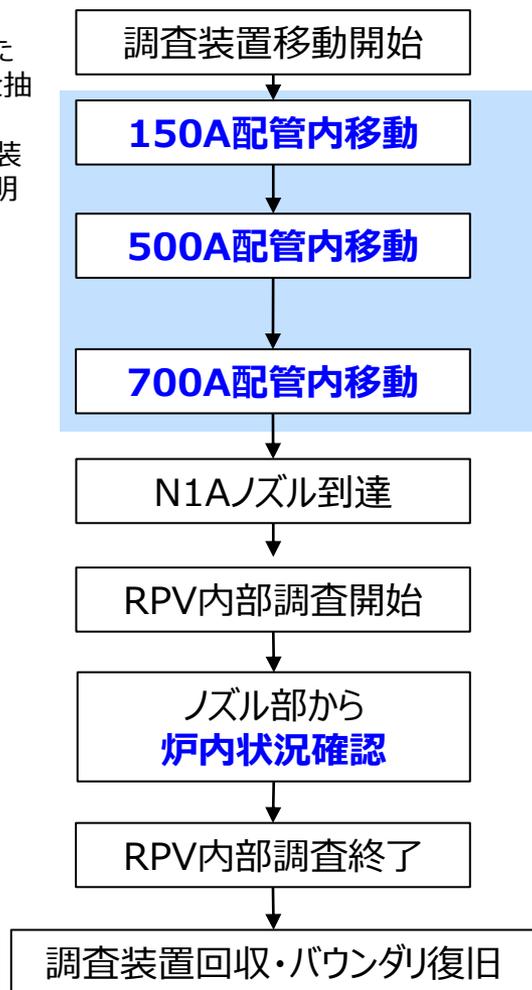
- 本フロー図は装置仕様を策定することを目的としているため、成功パスのみを示している。
- 実際の調査手順では、各作業が失敗した場合のトラブルシューティングを設定する。

**【装置仕様として特に明らかにすべき作業】**  
エルボ部穿孔, MSIV各種弁体穿孔, 炉内状況確認

# 添付資料3 基本調査フロー

## ■ 原子炉再循環系配管

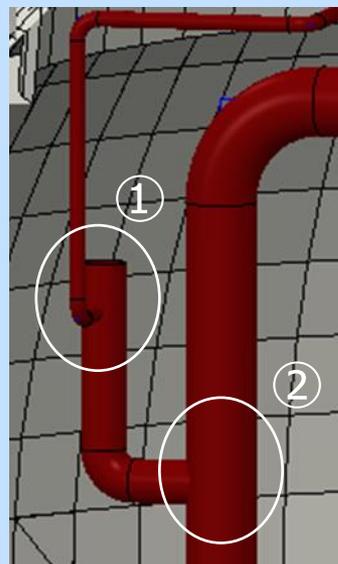
- 配管ルートで調査するために必要な現場作業を抽出した。
- フロー中の青太字は、装置類の仕様として特に明らかにすべきものである。



【注記】

- 本フロー図は装置仕様を策定することを目的としているため、成功パスのみを示している。
- 実際の調査手順では、各作業が失敗した場合のトラブルシューティングを設定する。

- 150A→500Aへの分岐は、垂直下方に移動しながら実施（下図①）
- 500A→600Aへの分岐は、落下しないよう対処しつつ、鉛直方向に移動する（下図②）



- 特に求める機能として、**異径配管間の移動機能**が挙げられる。

【装置仕様として特に明らかにすべき作業】  
異径配管間移動, 炉内状況確認

# 添付資料4 装置への要求仕様

## ■ 炉心スプレイ系配管

※開発進捗に伴い、装置名称を一部見直したものがあ

装置仕様として特に明らかにすべき作業			装置名称	要求される機能 (注記無き場合は遠隔操作を前提とする)	構造検討にあたって特に考慮すべき事項
作業内容	要素技術	目標			
逆止弁を押し広げる (+配管内状況を事前確認する)		閉状態の逆止弁が押して開くかどうかを確認し、開いた逆止弁の先の配管内の状況を確認する	配管内状況確認ユニット	弁体を押し広げる機能	・PCV内窒素加圧の影響あり、弁体固着の可能性あり
				弁体前まで移動する機能	【(※1)】
				逆止弁より先の配管内状況を確認する機能	・配管内面は、暗闇・汚れ・水濡れ・溜り水あり
				配管内環境による故障から防護する機能	・【(※2)】耐水性, 耐放射線性, 配管内付着物耐性 (異物噛み込み防止など)
逆止弁を切断する	ルート構築技術+配管内移動技術	配管内を移動した後に、逆止弁の弁体を加工し、調査装置が通過できるようにする	弁体加工ユニット	各種作業を監視する機能	・遠隔監視, 有線通信
				弁体を切断する機能	・加工時の力の程度によっては弁体が揺れ動く可能性がある ・配管内で作業するため、加工時の反力を考慮する必要がある
				弁体前まで移動する機能	・(※1)と同じ
ティを穿孔する		配管 (ティA・B) を加工し、調査装置が通過できるようにする	配管加工ユニット	配管内環境による故障から防護する機能	・加工点への位置決め機構を設ける ・加工時の反力に耐えられる設計とする
				各種作業を監視する機能	・遠隔監視・有線通信
				ティA・Bを穿孔する機能	・ティA・Bへ至る経路は、ティBの場合約20mと長距離である ・配管内で作業するため、加工時の反力を考慮する必要がある ・ティBへ至る経路は、配管250Aより狭く、寸法制約が大きい
				ティAまで移動する機能	・(※1)の事項に加え、RPV内相当の線量環境となる
				ティBまで移動する機能	【(※3)】 ・(※1)の事項に加え、RPV内相当の線量環境となる ・ティBへ至る経路は、配管250Aより狭く、寸法制約が大きい
炉内状況を 確認する	炉内状況確認技術+配管内移動技術	ティA・Bの穿孔部から炉内状況を確認する	調査ユニット	配管内環境による故障から防護する機能	・(※2)と同じ。ただし、ティ付近はRPV内相当の線量環境となる
				各種作業を監視する機能	・遠隔監視・有線通信
				ティAまで移動する機能	・(※1)の事項に加え、RPV内相当の線量環境となる
				ティBまで移動する機能	・(※3)と同じ
				炉内目視機能	・東京電力HDが開発計画中の耐放射線性内視鏡を採用する
配管内環境による故障から防護する機能	・(※2)と同じ。ただし、ティ付近はRPV内相当の線量環境となる				

# 添付資料4 装置への要求仕様

## ■ 主蒸気系配管

※開発進捗に伴い、装置名称を一部見直したものがあ

装置仕様として特に明らかにすべき作業			装置名称	要求される機能 (注記無き場合は遠隔操作を前提とする)	構造検討にあたって特に考慮すべき事項
作業内容	要素技術	目標			
配管エルボ部を穿孔する		配管エルボ部を加工し、MSIV穿孔装置が通過できるようにする	配管エルボ部加工ユニット	配管エルボ部を穿孔する機能	・配管周りに保温材／保護パネルあり
				T/Bから配管エルボ部へ移動する機能	【(※1)】 ・ガイドパイプ方式とするため、T/B側からの芯出し・押出位置調整を考慮 ・T/B側は作業員常時アクセス可能 ・MSIV室内は暗闇・雨漏り・汚染物質あり・高線量（未除染の場合、作業員は長時間立ち入りできないものとする）
				MSIV室環境による故障から防護する機能	・【(※2)】耐水性、耐放射線性
				各種作業を監視する機能	・遠隔監視、有線通信 ・T/B側設置機器は有人作業等の監視も可能だが、作業員の負荷を考慮し、遠隔監視を優先する
MSIVの外弁を穿孔する	ルート構築技術	MSIVの外弁を加工し、自身をMSIV内弁に到達できるようにする	MSIV弁体加工ユニット	外弁を穿孔する機能	・穿孔後のコアは重量があり、穿孔後のコア移動は困難
				T/Bから外弁へ到達する機能	【(※3)】 ・ガイドパイプ方式とするため、T/B側からの芯出しと押出位置調整を考慮する必要あり。加えて、距離があるため配管内でも芯出しの仕組みが必要 ・配管内面は、暗闇・汚れ・水濡れ・溜り水あり
				配管内環境による故障から防護する機能	・(※2)の事項に加えて、配管内付着物耐性（異物噛み込み防止など）を考慮
				各種作業を監視する機能	・遠隔監視、有線通信
MSIVの内弁を穿孔する		MSIVの内弁を加工し、調査装置が通過できるようにする	同上	～以下、内弁加工特有の機能のみ示す～	
				内弁を穿孔する機能	・穿孔後のコアは重量があり、穿孔後のコア移動は困難
				T/Bから内弁に到達する機能	・(※3)と同じ
				配管内環境による故障から防護する機能	・(※2)の事項に加え、PCV内相当の線量環境となる
炉内状況を確認する	炉内状況確認技術＋配管内移動技術	N3ノズルから炉内状況を確認する	調査ユニット	T/BからN3ノズルへ移動する機能	・配管が構造を保っている場合は移動経路の分岐無し
				炉内目視機能	・東京電力HDが開発計画中の耐放射線性内視鏡を採用する
				各種作業を監視する機能	・遠隔監視、有線通信
				配管内環境による故障から防護する機能	・(※2)の事項に加え、RPV内相当の線量環境となる

# 添付資料4 装置への要求仕様

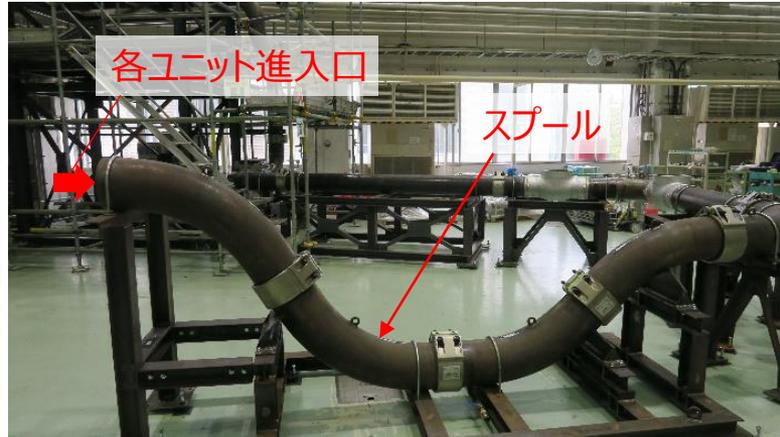
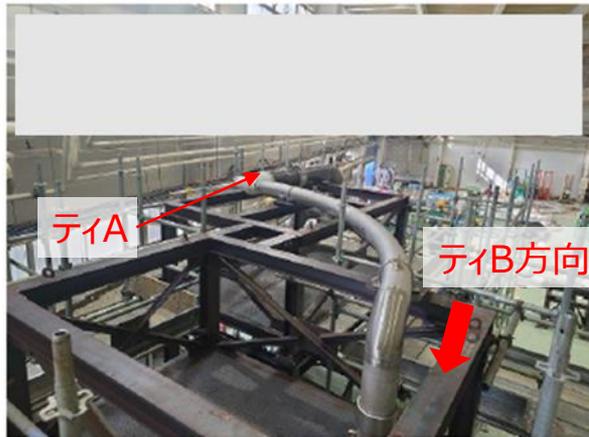
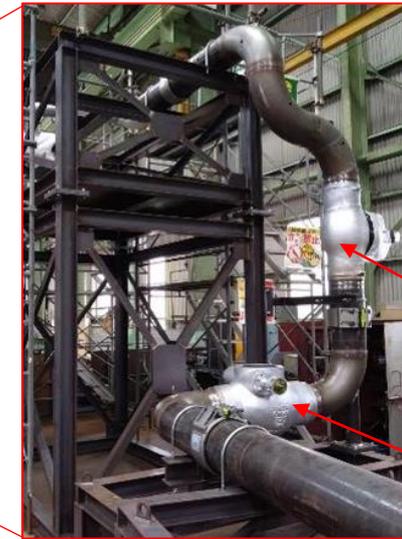
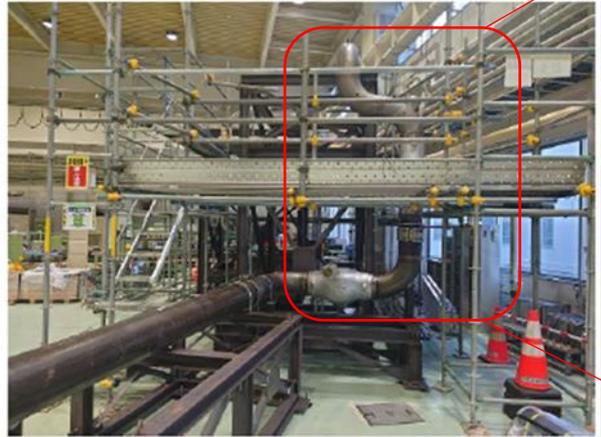
## ■ 原子炉再循環系配管

※開発進捗に伴い、装置名称を一部見直したものがあ

装置仕様として特に明らかにすべき作業			装置名称	要求される機能 (注記無き場合は 遠隔操作を前提とする)	構造検討にあたって特に考慮すべき事項
作業内容	要素技術	目標			
炉内状況を確認する	炉内状況確認技術+ 配管内移動技術	異径の配管間を移動し、 N1Aノズルから炉内状況を確認する	調査ユニット	150A配管内を移動する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>各配管間の内径に合わせるだけでなく、垂直移動も同時に実行できる構造にする必要がある</li> <li>配管内面は、暗闇・汚れ・水濡れ・溜り水あり</li> </ul>
				500A配管内を移動する機能	
				700A配管内を移動する機能	
				炉内目視機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>東京電力HDが開発計画中の耐放射線性内視鏡を採用する</li> </ul>
				配管内環境による故障から防護する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐水性, 耐放射線性, 配管内付着物耐性 (異物噛み込み防止など)</li> <li>600A配管のうち、ノズル付近はRPV内相当の線量環境となる</li> </ul>
				各種作業を監視する機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>遠隔監視・有線通信</li> </ul>

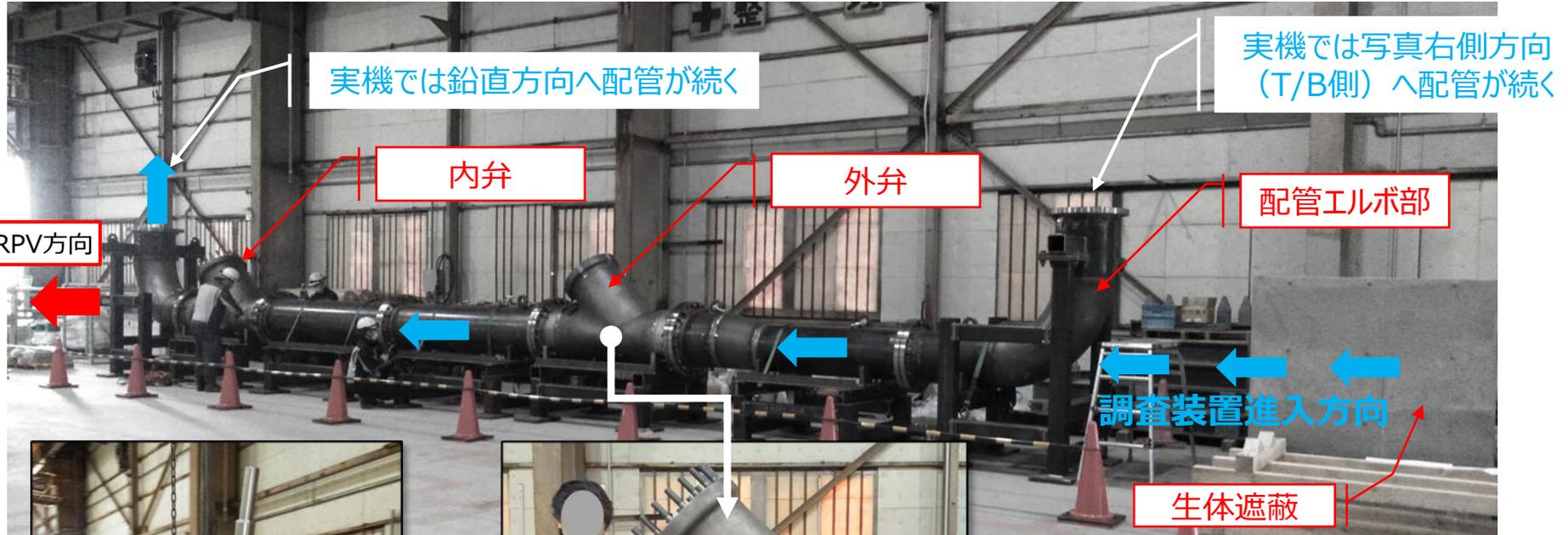
# 添付資料5 モックアップ設備外観

## ■ 炉心スプレイ系配管



# 添付資料5 モックアップ設備外観

## ■ 主蒸気系配管



MSIV弁体



MSIV弁箱

# 添付資料5 モックアップ設備外観

## ■ 主蒸気系配管



ノズル付近エルボ部



配管立ち上がり部



・工場制約により、MSIV内弁通過後の一部の垂直立ち上がり部は模擬不可。  
・調査ユニットに錘を付けて、垂れ下がるケーブル重量を模擬することで対処する。

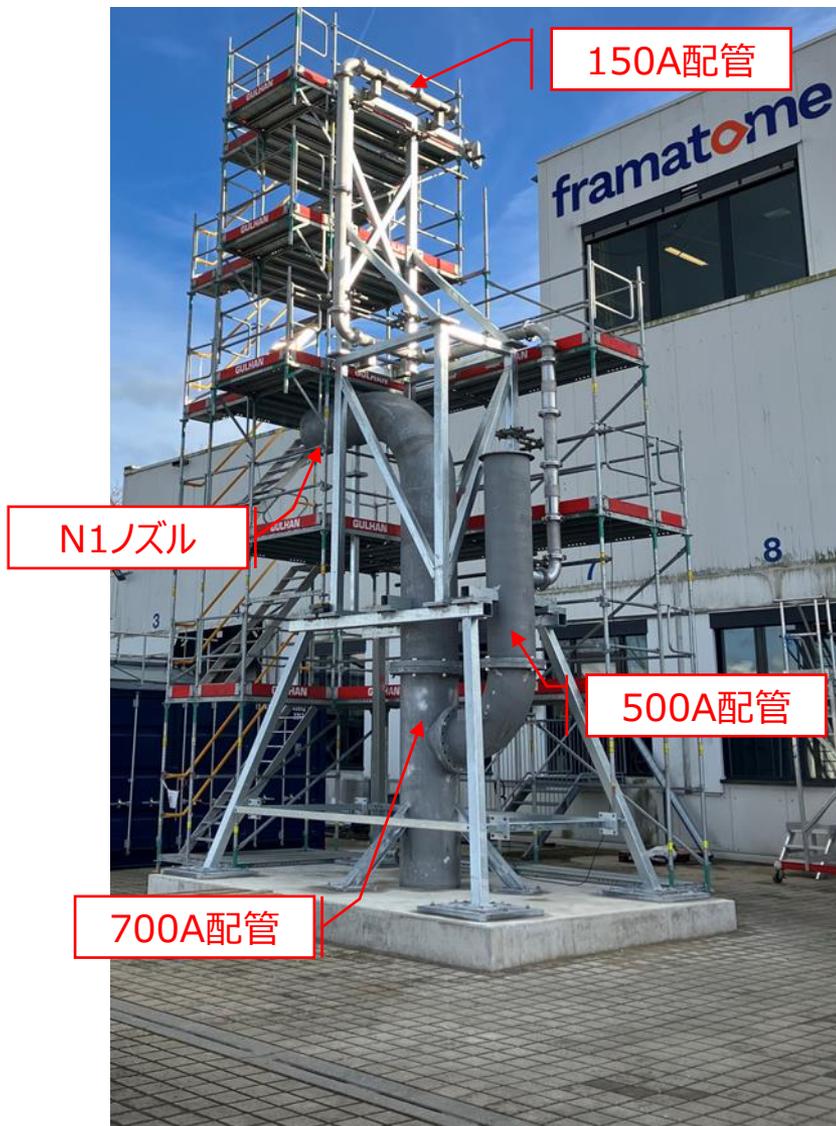
レデューサー

模擬ガイドパイプ

レデューサー

# 添付資料5 モックアップ設備外観

## ■ 原子炉再循環系配管



## 小目次① (配管内移動に関する試験)

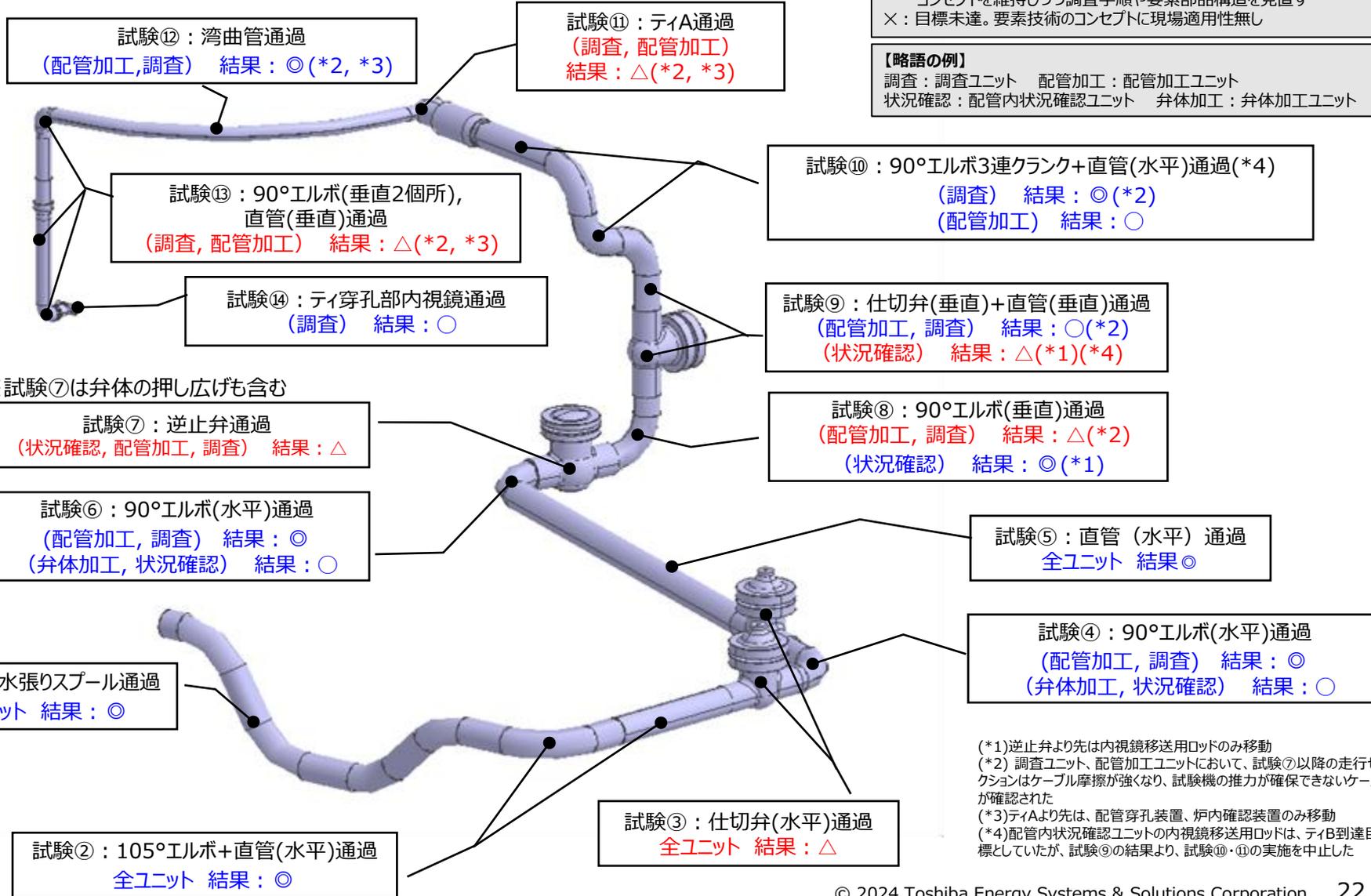
※試験機の限界性能等の確認は試験⑱, ⑳, ㉑参照

### 【試験結果判定の定義 (詳細は15頁参照)】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し

### 【略語の例】

調査：調査ユニット 配管加工：配管加工ユニット  
状況確認：配管内状況確認ユニット 弁体加工：弁体加工ユニット



※試験⑦は弁体の押し広げも含む

(\*1)逆止弁より先は内視鏡移送用ロッドのみ移動  
(\*2) 調査ユニット、配管加工ユニットにおいて、試験⑦以降の走行セクションはケーブル摩擦が強くなり、試験機の推力が確保できないケースが確認された  
(\*3)ティAより先は、配管穿孔装置、炉内確認装置のみ移動  
(\*4)配管内状況確認ユニットの内視鏡移送用ロッドは、ティB到達目標としていたが、試験⑨の結果より、試験⑩・⑪の実施を中止した

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果 小目次② (ルート構築に関する試験)

## 【試験結果判定の定義 (詳細は15頁参照)】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し

試験⑰：ティA配管穿孔  
結果：○

配管肉厚：6.0mm  
穿孔径：約Φ11mm  
試験総使用水量：1071L  
試験総時間：219min

配管肉厚：6.6mm  
穿孔径：約Φ13mm  
試験総使用水量：1622L  
試験総時間：331min

試験⑱：ティB配管穿孔  
結果：○

試験⑮：逆止弁体切断のうち、  
弁体切り落とし  
結果：○

※モックアップ外試験結果  
試験総使用水量：376L  
試験総使用アプレシブ量：88kg  
試験総時間：188min

試験⑯：逆止弁体切断のうち、  
弁体細分化  
結果：○

※モックアップ外試験結果  
試験総使用水量：414L  
試験総使用アプレシブ量：97kg  
試験総時間：207min

## 試験①：水張りスプール通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	配管内状況確認ユニット (◎), 弁体加工ユニット (◎), 配管加工ユニット (◎), 調査ユニット (◎)
1F現場作業	水張りスプールを通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】スプール通過試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 内径237mm, 長さ約4400mm (配管中心軸) のスプールを通過する 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機をスプールの入口から、スプール終端まで走行させる</li> <li>水張り環境は、代表例として配管内状況確認ユニットで走行させる (図1)</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>全てのユニットが定量的目標を達成した</li> <li>弁体加工ユニットは、配管降下点で一時的に干渉したが (図2)、ノズル回転動作で復旧した</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】 現時点で大きな課題はない</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	---



図2. 弁体加工ユニットのスタック状況

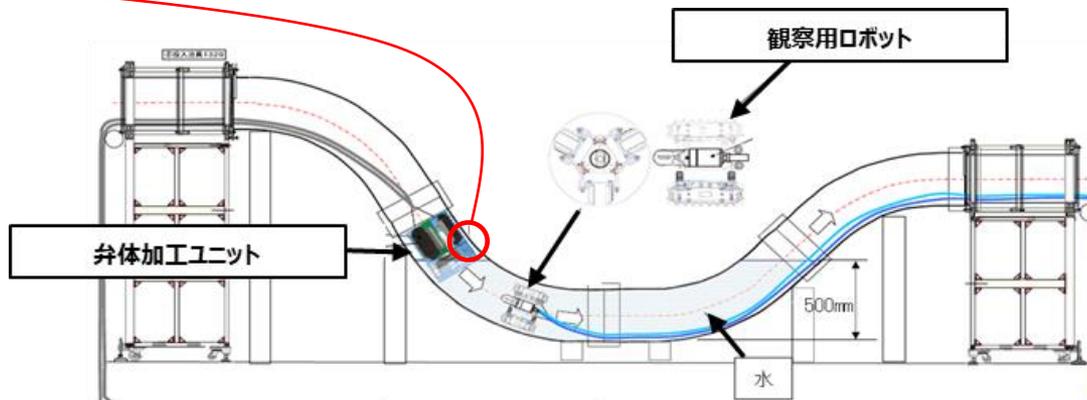


図1. 試験概要 (水張り時)

## 試験②：105°エルボ+直管（水平）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管内状況確認ユニット（◎），弁体加工ユニット（◎），配管加工ユニット（◎），調査ユニット（◎）
1F現場作業	105°エルボを通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】105°エルボ通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径237mmの105°エルボ, 内径248mm・長さ約1300mmの直管を通過する 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	試験機を105°エルボ入口から、直管終端まで走行させる
試験結果（◎）	全てのユニットが定量的目標を達成した
考察・将来開発課題	【能力試験】 現時点で大きな課題はない 【影響試験】 現時点で大きな課題はない 【取り扱い性試験】 現時点で大きな課題はない
課題の対策	---

## 試験③：仕切弁（水平）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	配管内状況確認ユニット (△), 弁体加工ユニット (△), 配管加工ユニット (△), 調査ユニット (△)
1F現場作業	仕切弁を通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】仕切弁通過試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 水平に設置された仕切弁 (スリット幅約16cm) を通過する 【影響試験】 試験前後での試験機への変化 (外観・動作) を確認 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	試験機を仕切弁の入口から、仕切弁終端まで走行させる。観察のため、弁体は取り外した状態で実施する
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>全てのユニットが、定量的目標を達成できなかった</li> <li>配管内状況確認ユニットと弁体加工ユニットは、スリットに進入したクローラによってスタックした</li> <li>配管加工ユニットと調査ユニットは、クローラ前部に備える装置 (配管穿孔装置もしくは炉内確認装置) がスリットに進入し、スタックした</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】</p> <p>～配管内状況確認ユニット, 弁体加工ユニット～ クローラは弁箱のスリット部に進入するとバネで押し広がる。同時に摩擦力を得るための配管接面範囲も少なくなり、配管へ再進入する (即ち、バネを収縮させる) ための力が得られず、結果的に仕切弁を通過できなくなるケースを確認した (図1)</p> <p>～配管加工ユニット, 調査ユニット～ 配管穿孔装置と炉内確認装置は先端部分にテーパが設けられているが、段差を乗り越えられる方向ベクトルを得られなかった (図2)</p> <p>【影響試験】現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	<p>～配管内状況確認ユニット, 弁体加工ユニット～ クローラ本体を長くすると、エルボ等の通過性が損なわれるため、バネ開度のセミアクティブ制御が必要となる。例えば、クローラと連結したシャフトとカムフォロアをユニットの前後に取り付け、スリット通過時に配管との接触範囲を増やし、バネの過剰な開きを防止する対策が挙げられる (図3)</p> <p>～配管加工ユニット, 調査ユニット～ 配管穿孔装置と炉内確認装置の姿勢を能動的に制御する仕組みが必要</p>

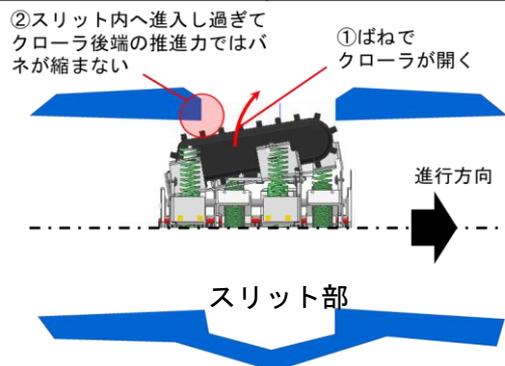


図1 仕切弁内でクローラがスタックするメカニズム



図2 炉内確認装置のスタック状況

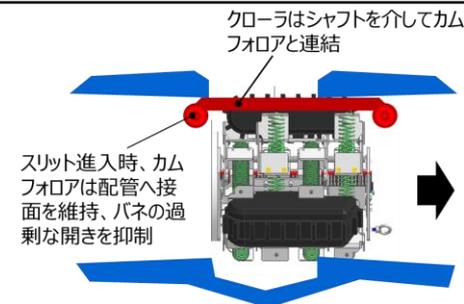


図3 カムフォロアを使用した仕切弁内通過構想

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験④⑥：90°エルボ（水平）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管内状況確認ユニット（○），弁体加工ユニット（○），配管加工ユニット（◎），調査ユニット（◎）
1F現場作業	90°エルボを通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】仕切弁通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径237mmの90°エルボを通過する 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像，走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	試験機を90°エルボ入口から、直管終端まで走行させる
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管加工ユニット・調査ユニット：定量的目標を達成できた</li> <li>配管内状況確認ユニット・弁体加工ユニット：溶接痕（代表値：約3mm）やエルボ壁面に引っ掛かり、スタックした</li> </ul>
考察・ 将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】 ～配管内状況確認ユニット～ 事前の試験で弁体は下側を押すことが効果的（必要推力が少ない）であるため、弁体押し広げロッドは下端に備えた。このロッド先端が溶接痕に引っかかった（図1）。また部品配置上、ユニットの外側に配置したカメラも溶接痕に引っかかった（図1）</p> <p>～弁体加工ユニット～ 配管内状況確認ユニットと同様に、ユニット外周部に配置した部品が溶接痕に引っかかった（図2）。また、弁体加工ユニットが牽引するアプレシブ供給用サブタンクがエルボに差し掛かった際、ヨー方向に傾いて引っかかった。このとき、クローラもエルボ内におり、配管への接面性十分ではないため、引っ掛かりを解除するだけの推進力が得られなかった（図3）</p> <p>【影響試験】現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	部品配置の見直し。また、弁体加工ユニットはサブタンクを小型化する

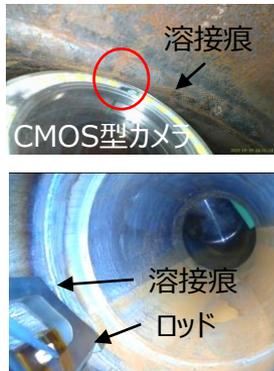


図1 配管内状況確認ユニットのスタック状況

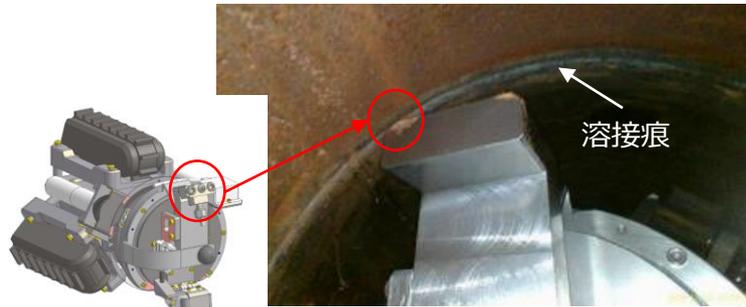


図2 弁体加工ユニットのスタック状況  
(写真はノズルの無いダミー部品で検証しているときのもの)

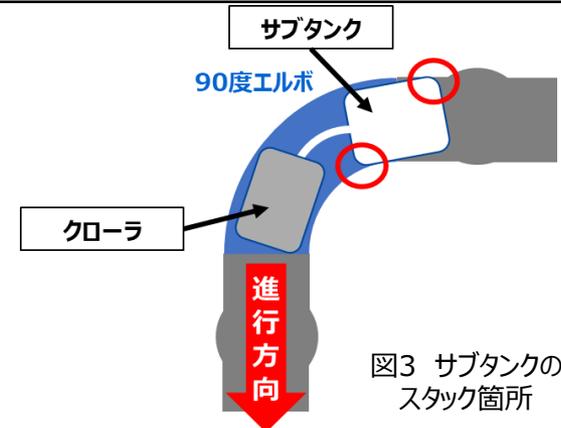


図3 サブタンクのスタック箇所

## 試験⑤：直管（水平）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管内状況確認ユニット（◎），弁体加工ユニット（◎），配管加工ユニット（◎），調査ユニット（◎）
1F現場作業	直管を通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】直管通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径237mm・長さ約4400mmの直管を通過する 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	直管入口から、終端まで走行させる
試験結果	全てのユニットが定量的目標を達成した
考察・ 将来開発課題	【能力試験】 現時点で大きな課題はない 【影響試験】 現時点で大きな課題はない 【取り扱い性試験】 現時点で大きな課題はない
課題の対策	---

## 試験⑦：逆止弁通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	配管内状況確認ユニットの内視鏡移送用ロッド (△), 配管加工ユニット (△), 調査ユニット (△)
1F現場作業	逆止弁を通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】逆止弁通過試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 逆止弁体 (弁箱内) の通過。配管内状況確認ユニットは弁体を最大40°まで押し広げ (必要推力約170N, PCV窒素加圧を考慮した理論値)、隙間より内視鏡移送用ロッドの通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	AWJで4個に細分化した弁体を逆止弁箱内に設置する (図1)。逆止弁手前の配管から逆止弁の入口に進出し、進行方向先の配管へ再進入させる。なお、配管内状況確認ユニットは、逆止弁手前でクローラは待機し、押し広げた弁体隙間から弁体押し広げロッド (プッシングロッド) を使って模擬内視鏡のみを通過させる
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管内状況確認ユニットは、弁体押し広げについては定量的目標を達成した</li> <li>弁体より先の通過については全てのユニットが、定量的目標を達成できなかった</li> <li>配管内状況確認ユニットは、クローラ後ろ側のプッシングロッドが曲がって押し出すことができなかった</li> <li>配管内状況確認ユニットと調査ユニットは、試験③と同様の事象により、配管穿孔装置と炉内確認装置が弁箱内でスタックした</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】</p> <p>配管内状況確認ユニット：プッシングロッドはエルボ通過時の折れ曲がり、方向ベクトルが変わる性質を持つ (図2)。特に、エルボ通過直後はロッド自体の剛性により進行方向の修正が効きづらい (図3)。配管内状況確認ユニットは、ガイドリングに進行方向を修正する仕組みであったが、装置根元側の押し込み力よりもプッシングロッドの剛性が勝り、逆止弁への進入ができなかった (図1)</p> <p>配管加工ユニット・調査ユニット：原因は試験③と同様 (配管穿孔装置と炉内確認装置が細断した弁体に引っ掛かり、クローラのバネ部広がりも重なって踏破する推進力を得られなかった)</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない (逆止弁体以降の通過試験でも、ケーブルを含む試験機の損傷は確認されなかった)</p>
課題の対策	<p>配管内状況確認ユニット：クローラ後方にメガホン状の治具を取り付けるなど、よりプッシングロッドの修正力を高める仕組みを導入する。もしくは、水噴射などロッド方式ではない別の推進手段を導入する</p> <p>配管加工ユニット・調査ユニット：試験③と同様の対策を基本とするが、逆止弁体内空間は仕切弁より大きいので、必要に応じて本事業で得た知見に基づく一般産業技術を再調査し、コンセプトの変更の見直しを行う</p>

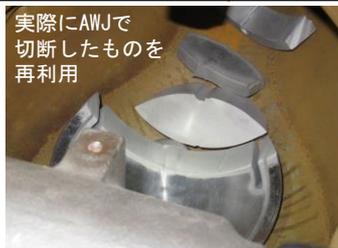


図1 弁体切断試験で切断したピースの落下状態を再現した様子

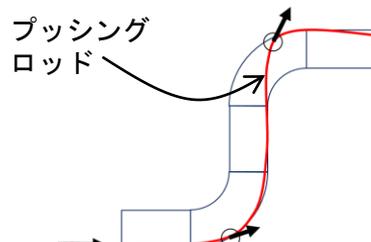


図2 エルボ通過で方向ベクトルが変わるメカニズム

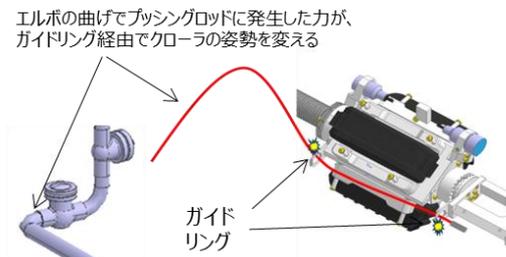


図3 プッシングロッドがクローラの姿勢を変えるメカニズム

## 試験⑧：90°エルボ（垂直）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管内状況確認ユニットの内視鏡移送用ロッド（◎），配管加工ユニット（△），調査ユニット（△）
1F現場作業	90°エルボを通過
試験分類	試験機搭載カメラ映像，走行中の試験機状況動画像
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径237mmの90°エルボの通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像，走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>90°エルボ入口から出口まで走行させる</li> <li>試験⑦以降の走行セクションは推進力不足のため、ケーブル送りをアシストした</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管内状況確認ユニットの模擬内視鏡：試験⑦で確認したスタックを解消したうえで定量的目標を達成した</li> <li>配管加工ユニット・調査ユニット：ケーブル牽引力の不足により前進できなかった。なお、エルボ部のケーブルにたるみを付けた場合は定量的目標を達成した</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】 配管加工ユニットと調査ユニットのケーブルは、配管との摩擦力を低くするためにコルゲイトチューブで一体化させている。ユニットが逆止弁を越えた時点で、道中のエルボを調査したところ、チューブは突っ張り状態になっていた（図1）</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>コルゲイトチューブを送るためのアシスト技術の導入</li> </ul>

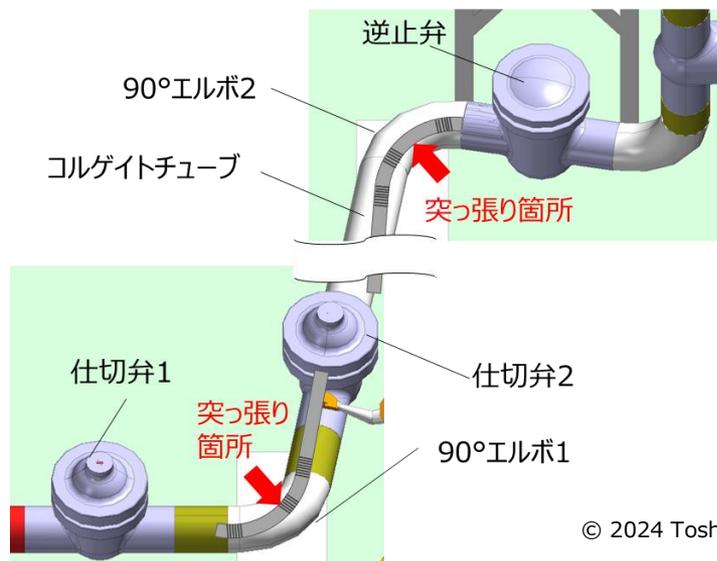


図1 コルゲイトチューブがエルボ部で突っ張っている箇所

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑨：仕切弁（垂直）＋直管（垂直）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管内状況確認ユニットの内視鏡移送用ロッド（△），配管加工ユニット（○），調査ユニット（○）
1F現場作業	仕切弁と直管を通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】仕切弁通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 垂直設置された仕切弁（スリット幅約16cm）および内径237mmの直管の通過 【影響試験】 試験前後での試験機への変化（外観・動作）を確認 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像，走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機を仕切弁入口から進入させ、スリットを通過させ、直管出口まで走行させる。観察のため、弁体は取り外した状態で実施する</li> <li>試験⑦以降の走行セクションは推進力不足のため、ケーブル送りをアシストした</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>全てのユニットが、定量的目標を達成できなかった（配管内状況確認ユニット：△，弁体加工ユニット・調査ユニット：○）</li> <li>配管内状況確認ユニットの模擬内視鏡・配管加工ユニットの配管加工装置・調査ユニットの模擬内視鏡がそれぞれ仕切弁のスリット部でスタックした（複数回押し引きしても改善されなかった）。なお、内視鏡移送用ロッドは剛性の異なる複数のプッシングロッドを入れ替えての追試と、先端構造を改良（図3）しての追試をそれぞれ実施し、一定の改善は得られたが抜本的解決に至らなかったため、仕切弁以降の配管セクションの試験は中止した</li> </ul>
考察・将来開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>【能力試験】 垂直方向に位置する仕切弁を通過できなかった原因は、炉内確認装置と配管穿孔装置それぞれの先端部が弁箱内の上側配管端に引っ掛かり、スタックしたためである（炉内確認装置の例：図1）。配管内状況確認ユニットは、プッシングロッドのみで試みたが先端の進行方向を制御できず、スリット部でスタックした（図2）。図3に示すように、先端を球状にした治具をロッドに備えて追試したが、改善されなかった</li> <li>【影響試験】 特になし</li> <li>【取り扱い性試験】 現在の炉内確認装置と配管穿孔装置の構造では仕切弁を通過できないため、対策が必要であることを確認した</li> </ul>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>内視鏡移送用ロッドは、試験⑦と同様</li> <li>配管加工ユニット・調査ユニットは、試験③と同様の対策を基本とするが、試験弁の方向が異なるため必要に応じて本事業で得た知見に基づく一般産業技術を再調査し、コンセプトの変更の見直しを行う</li> </ul>



図1 炉内確認装置が仕切弁内でスタックしている状態（配管穿孔装置も同様の状態となった）

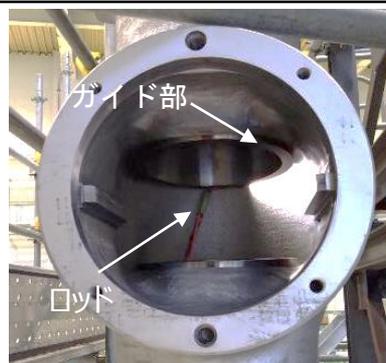


図2 内視鏡移送用ロッドが仕切弁内でスタックしている状態

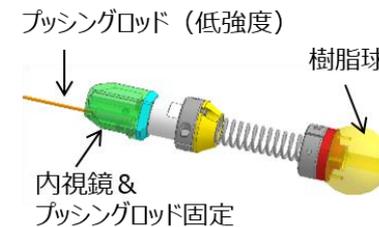


図3 追試で製作した内視鏡移送用ロッド

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑩：90°エルボ3連クランク+直管（水平）通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管加工ユニット（○），調査ユニット（◎）
1F現場作業	90°エルボ3連クランクを通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】90°エルボ3連クランク通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径237mmの90°エルボ3連クランクと内径237mm・長さ1915mmの直管の通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>90°エルボ3連クランクの入口から、直管終端部まで走行させる</li> <li>試験⑦以降の走行セクションは推進力不足のため、ケーブル送りをアシストした</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>調査ユニット：◎（定量的目標を達成した）</li> <li>配管加工ユニット：○（90°エルボにてスタックした）</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】 ～配管加工ユニット～ 90°エルボ3連クランクを通過できなかった原因は、クローラの前進によってWJノズルが配管壁面に押し付けられ、方向が変えられなくなり、スタックしたためである（図1）。ノズルを回転させて押し付け緩和を試みたが、方向を変えられる効果は得られなかったことを確認した</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験⑨と同様の対策を基本とする</li> </ul>

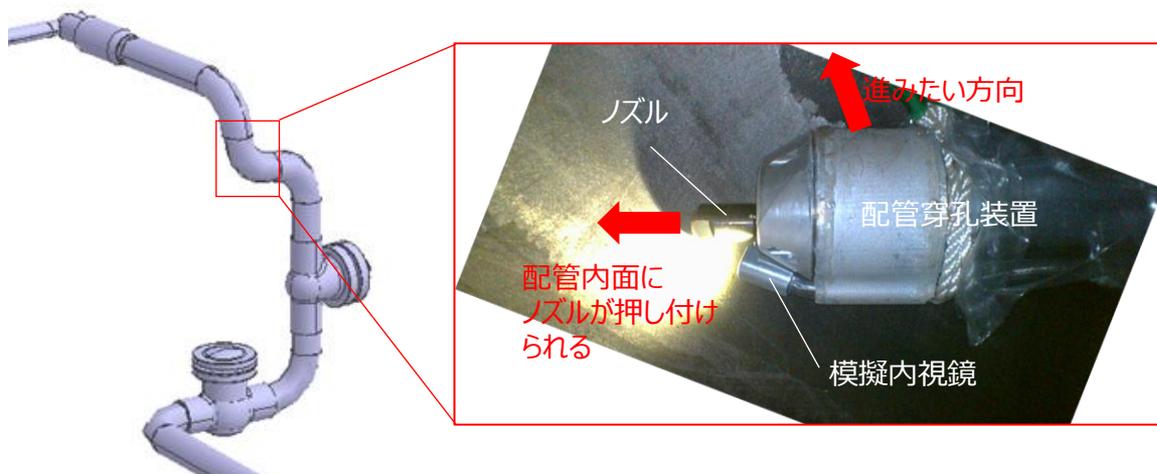


図1. 90°エルボ3連クランクでのスタック状況

## 試験⑪：ティA通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	配管加工ユニットの配管穿孔装置 (△), 調査ユニットの炉内確認装置 (△)
1F現場作業	ティAを通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】ティA通過試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 内径237mmから128mmへ変わるティAの通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像, ケーブル必要送り出し力
試験作業の概要	ティA手前の内径237mm配管にて、首振り装置と炉内確認装置送り装置で、炉内確認装置の向きを定めて内径128mm配管へ送り込む
試験結果 (△)	<ul style="list-style-type: none"> <li>首振り装置と炉内確認装置送り装置はケーブル摩擦力により、炉内確認装置を内径128 mm配管へ送り込むことができなかった</li> <li>エルボ付近のケーブルにたるみを作って追試を行ったが、改善されなかった。追加に必要な送り出し力は52Nであることを確認した</li> <li>模擬内視鏡の重力方向検知機能によって、ティB分岐方向を迷うことなく操作できた</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】 炉内確認装置送り装置は、ケーブルを束ねるコルゲイトチューブをタイミングベルトで挟み、プーリを回転させ摩擦力で送り出す方式である (図1(a))。コルゲイトチューブの挟みこむ力が不足していたことが原因と推定した</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】 市販品の模擬内視鏡は先端部に重力検知センサが付いていたため、ティB左右分岐方向の把握は容易であった。ティB配管内は左右分岐を識別するランドマークが無いいため、実機においてもこの機能の実装が望ましい</p>
課題の対策	挟み込みによる摩擦力向上のため、タイミングベルトの駆動プーリ間に設けた押しつけアイドラに押しつけ方向への調整幅を設け、左右それぞれコルゲイトチューブをS字状に挟み込み摩擦力を確保する (図1(b))

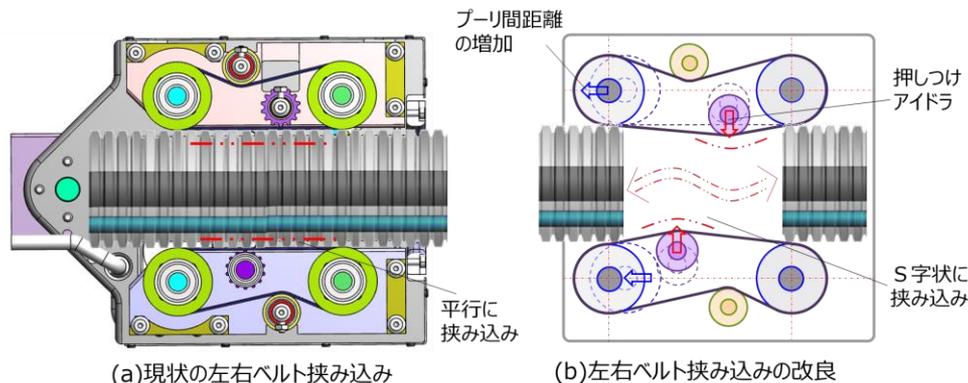


図1 摩擦力アップの対策例

## 試験⑫：湾曲管通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管加工ユニットの配管穿孔装置（◎），調査ユニットの炉内確認装置（◎）
1F現場作業	湾曲管を通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】湾曲管通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径128mm・長さ3759mmの湾曲管の通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>湾曲管の入口から出口まで、配管穿孔装置と炉内確認装置を通過させる</li> <li>ただし、試験⑪でケーブル（コルゲイトチューブ）の送り込み力が不足していることが判明したため、チューブの送り込みをアシストした</li> </ul>
試験結果	全てのユニットが定量的目標を達成した
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】 試験⑪で確認した課題を除き、現時点で大きな課題はない</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	---（試験⑪の課題の対策が必要）

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑬：90°エルボ（垂直2箇所）+直管（垂直）通過

M3V-2024-000193, Rev.0  
PSNN-2024-0540

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機（注記1）	配管加工ユニットの配管穿孔装置（△），調査ユニットの炉内確認装置（△）
1F現場作業	90°エルボを通過
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】90°エルボ通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 内径128mmの90°エルボ2箇所と、内径128mm・長さ1780mmの直管の通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像，走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験機を一つ目の90°エルボ入口から進入させ、直管を通じて2つ目の90°エルボ出口まで走行させる</li> <li>試験⑩以降のセクションではケーブル（コルゲイトチューブ）の送り込み力の不足をアシストした</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管加工ユニットは、2つ目の90°エルボ（ティB側）で配管穿孔装置がスタックした（図1）</li> <li>調査ユニットは、1つ目の90°エルボ（湾曲管側）で炉内確認装置がスタックした（図2）</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】 何れのユニットのスタック事象も、試験⑩と同様である。配管加工ユニットの配管穿孔装置はノズルの回転で方向ベクトルの修正を試みた が、模擬内視鏡が引っかかり、スタックが解消されなかった</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	試験⑨および試験⑩の対策が必要である

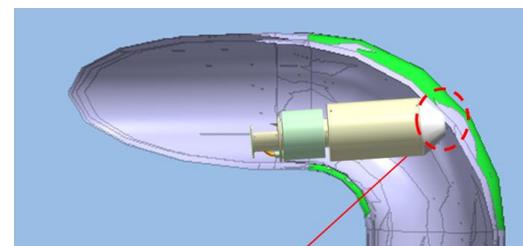
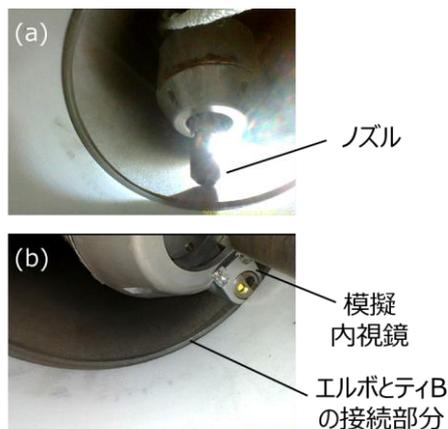
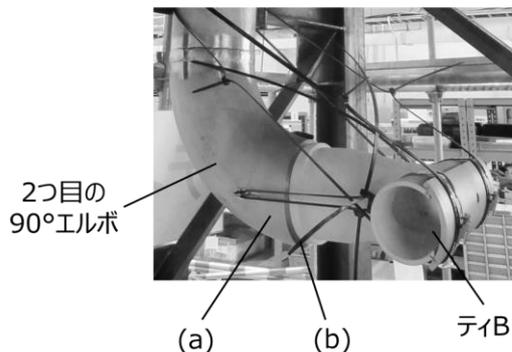


図2 炉内確認装置のスタックの様子

図1 配管穿孔装置のスタックの様子  
(右上：ノズルの干渉, 右下：内視鏡ホルダーの干渉)

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑭：ティ穿孔部内視鏡通過

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニットの炉内確認装置 (○)
1F現場作業	ティBまで到達、WJで穿孔した孔の中に内視鏡を挿入し、その先の状況を視認
試験分類	【大項目】ユニットの性能確認試験 【小項目】内視鏡挿入試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 ティB穿孔部 (直径約Φ10mm) に模擬内視鏡 (図1(a)) を先端屈曲可能な長さ (85mm以上) まで挿入 (通過する) し、ランドルト環を視認する 【影響試験】 試験前後での試験機への変化 (外観・動作) を確認 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像, 模擬内視鏡の送り出し量, ティ配管内の模擬内視鏡先端位置座標 (挿入して配管内壁に接触した箇所)
試験作業の概要	試験⑭で穿孔したテストピースを用いて、模擬内視鏡のカメラ映像のみを使って穿孔部を通過させる。この時、ティ配管内は暗闇環境を維持する。先端屈曲機能を使いながら位置決めし、ティ配管内面に先端が接触した場合は、その位置をマーキングする。先端部の通過後は、燃料方向 (ティB直下) に模擬内視鏡を向け、ランドルト環を視認する
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>定量的目標を達成した (図1(b))</li> <li>炉内確認装置のバルーン展開による位置決めだけでは、穿孔部は通過できず、穿孔屈曲機能による進行方向の修正が必要であることを確認した。送り出し途中でティB穿孔部と内視鏡ケーブルとで引っ掛かりが起きたが、先端屈曲機能で方向修正することで解消できた</li> <li>穿孔部通過後、模擬内視鏡の重力方向検知機能によって、操作を迷うことなく鉛直下方へ先端を向けることができた (図2)。先端を下方に向けてランドルト環を視認できた (図2)</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>模擬内視鏡の引っ掛かりは、ティB内で内視鏡ケーブルが湾曲し (図3)、穿孔部の縁とケーブルの摩擦が増加したことが原因である。引っ掛かりが起きると、ケーブル送り用のタイミングベルトは滑りを起こすので、制御側の送り出し量司令値と、実際の送り出し量に乖離が起きる。これは現場での取り扱い上の課題である</li> <li>市販品の模擬内視鏡は先端部に重力検知センサが付いていたため、視認方向の把握は有効であった。1F現場の炉内は冷却水による霧環境が想定され、ランドルト環による燃料方向の把握が困難になる可能性もあるため、実機においてもこの機能の実装が望ましい。</li> </ul> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>内視鏡送り出し機構のトルクアップと摩擦力アップ</li> <li>内視鏡ケーブルの抵抗を低減するための機構への改造</li> </ul>



(a) 模擬内視鏡外観 (先端屈曲させた様子) (b) ティBの外から撮影した図

図1 模擬内視鏡が孔を通過した様子

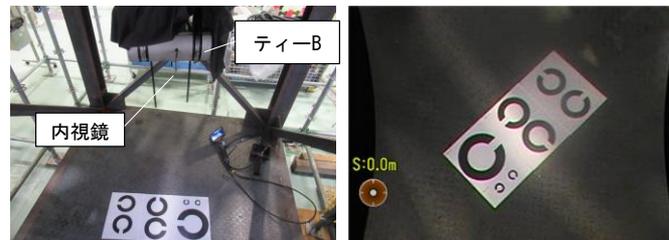


図2 模擬内視鏡でランドルト環を視認する様子 © 2024 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation 36  
(左図：試験風景, 右図：内視鏡の映像)



図3 ティB内の内視鏡ケーブルの様子

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

M3V-2024-000193, Rev.0

PSNN-2024-0540

## 試験⑮-1：逆止弁体切断のうち弁体切り落とし（予備試験：モックアップ外での弁体切り落とし）

（注記1）：記号の凡例は23頁参照

試験機（注記1）	弁体加工ユニット（○）
1F現場作業	逆止弁体手前まで到達，弁体切り落とし&細分化加工
試験分類	【大項目】逆止弁体加工試験 【小項目】逆止弁体切り落とし試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】逆止弁体（板厚約40mm）とスイングアーム（板厚約20mm）を同時切断する 【影響試験】弁体の落下状態制御，アブレシブと高圧水使用量確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	切断線形状，切り落とし時間，高圧水とアブレシブ使用量
試験作業の概要	スイングアーム付き逆止弁をモックアップ外にて同時切断（図1，2）
試験結果	定量的目標を達成した（図3，図4） 切断時間：188min，高圧水使用量：376L，アブレシブ使用量：88kg
考察・将来開発課題	【能力試験】AWJノズル回転半径と適正な回転速度設定によって、細分化可能な切断線で切り落としできる見込みを得た 【影響試験】アブレシブ使用量が多く、加工装置側に飛散するため、除去機能追加が必要 【取り扱い性試験】切断加工中に水とアブレシブが堆積するので、加工と堆積物除去のタイミングや運用方法が重要
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工状態を確認する仕組みが必要（反射音による判断等）</li> <li>加工装置の防塵防水対策。アブレシブ除去機能の追加（加工と除去をシーケンス的に行う）。</li> </ul>

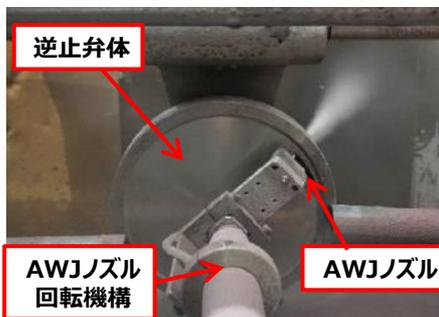


図1 逆止弁体切断状況  
（解説：次工程の細分化加工に適した切断ラインとするため、逆止弁シール面側からAWJを円弧上に回転させて切断）



図2 弁体&スイングアームの同時切断  
（解説：スイングアーム部は、AWJノズル回転速度を低下させ、弁体と同時に切断）



図3 切り落とした弁体（シール面）  
（解説：切断円弧角：145°を実現できており、細分化できる形状と判断）

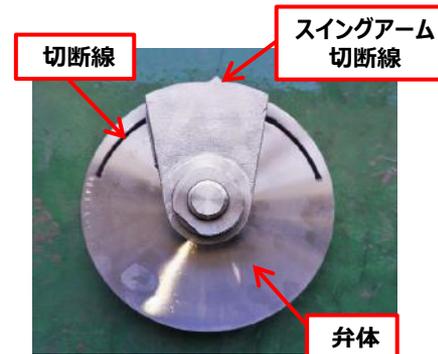


図4 切落した弁体&スイングアーム  
（解説：弁体とスイングアームの同時切断が可能であることを確認）

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑮-2：逆止弁体切断のうち弁体切り落とし（モックアップ配管内での弁体切り落とし）

(注記1)：記号の凡例は23頁参照

試験機（注記1）	弁体加工ユニット（○）
1F現場作業	逆止弁体手前まで到達，弁体切り落とし&細分化加工
試験分類	【大項目】逆止弁体加工試験 【小項目】逆止弁体切り落とし試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】逆止弁体（板厚約40mm）とスイングアーム（板厚約20mm）の同時切断、および次工程（細断）に適した姿勢で弁箱内へ落下させる 【影響試験】弁体の落下状態制御，アプレシブ堆積の影響，弁箱ダメージを確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	弁体とスイングアーム切り落とし状態，切り落とし時間，高圧水とアプレシブ使用量，アプレシブ堆積量，弁箱へのダメージ
試験作業の概要	逆止弁切断評価モックアップ（図1）、逆止弁加工ユニット（アプレシブサブタンク含む）を弁体手前まで遠隔操作で移動させ、AWJを弁体シール面から噴射して切断加工を実施（図2）。
試験結果	逆止弁体とスイングアームを約70%切断加工したところで（図3）、弁体加工ユニットのAWJノズル旋回機構に不具合発生し中断。弁体後方の配管内には、配管高さで約1/4までアプレシブが堆積した（図4）。弁箱を貫通するようなダメージは無かった。
考察・将来開発課題	【能力試験】弁体加工ユニットのAWJノズル旋回機構の信頼性を改善できれば、切り落としできる見込みが得られた。 【影響試験】ユニット自身へのアプレシブ混入防止対策が必要。また、アプレシブが逆止弁後方に多く堆積するため、除去機能追加が必要。弁箱貫通するようなダメージ無し。 【取り扱い性試験】切断加工中に水とアプレシブが堆積するので、加工と堆積物除去のタイミングや運用方法が重要。
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工装置の防塵防水対策。堆積物除去機能の追加（加工と除去をシーケンス的に行う）。</li> </ul>

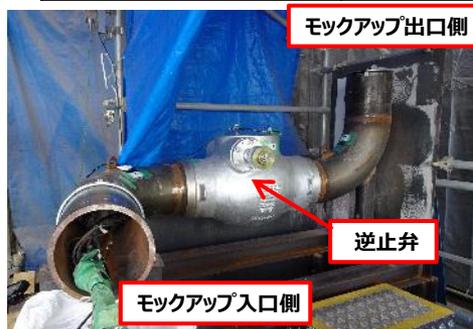


図1 モックアップ外観  
(解説：逆止弁上部機構は取り外して、内部状態を観察できるようにし、弁体手前に逆止弁加工装置を移動させて評価)



図2 弁体切り落とし試験状況  
(解説：逆止弁シール面側から、弁体とスイングアームを同時にAWJで切断加工。)



図3 逆止弁切り落とし評価結果  
(解説：約70%切断したところで弁体加工ユニットのAWJノズル旋回機構に不具合発生し中断)



図4 配管内に堆積したアプレシブ  
(弁体切り落とし約70%ではあるが、逆止弁体後方に、配管内高さ約1/4までアプレシブが堆積)

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

M3V-2024-000193, Rev.0

PSNN-2024-0540

## 試験⑬-1：逆止弁体切断のうち弁体細分化（予備試験：モックアップ外での弁体細分化）

（注記1）：記号の凡例は23頁参照

試験機（注記1）	弁体加工ユニット（○）
1F現場作業	逆止弁体手前まで到達，弁体切り落とし＆細分化加工
試験分類	【大項目】逆止弁体加工試験 【小項目】逆止弁体細分化試験
試験目標	【能力試験】落下した逆止弁体（板厚約40mm）とスイングアーム（板厚約20mm）の追加切断 【影響試験】細分化片の次工程アクセス装置への影響，アプレシブと高圧水使用量確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	弁体細分化可否，切断線形状，細分化時間，高圧水とアプレシブ使用量
試験作業の概要	モックアップ外で弁体切り落としを実施後、弁体の弁箱内落下状態を模擬して細分化切断評価を実施（図1）。弁体左右端から中央に向かって細分化評価を実施（図2）
試験結果	逆止弁体とスイングアームの同時細分化切断を確認（図3，図4） 切断時間：207min，高圧水使用量：414L，アプレシブ使用量：97kg
考察・将来開発課題	【能力試験】AWJノズル回転半径と適正な回転速度設定によって、細分化切断できる見込みを得た 【影響試験】アプレシブ使用量が多く、加工装置側に飛散するため、除去機能追加が必要 【取り扱い性試験】切断加工中に水とアプレシブが堆積するので、加工と堆積物除去のタイミングや運用方法が重要
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工状態を確認する仕組みが必要（反射音による判断等）</li> <li>装置の防塵防水対策。アプレシブ除去機能の追加（加工と除去をシーケンス的に行う）</li> </ul>



図1 弁体細分化切断前の状態  
（解説：モックアップ外で弁体切り落としを実施後、弁体の弁箱内落下状態を模擬して細分化切断評価を実施）



図2 弁体細分化切断状態  
（解説：弁体左右端から中央に向かって細分化評価を実施）



図3 細分化状態（弁体側）  
（解説：弁体を3分割、スイングアーム片の4つに分割可能）



図4 細分化状態（スイングアーム側）  
（弁体と裏面スイングアームが同時切断できており、次工程アクセス装置への影響は少ないと判断）

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑬-2：逆止弁体切断のうち弁体細分化（モックアップ配管内での弁体細分化）

(注記1)：記号の凡例は23頁参照

試験機（注記1）	弁体加工ユニット（○）
1F現場作業	逆止弁体手前まで到達，弁体切り落とし＆細分化加工
試験分類	【大項目】逆止弁体加工試験 【小項目】逆止弁体細分化試験
試験目標	【能力試験】次工程のティ配管加工や炉内調査作業のための通路を確保する（直径Φ 200mm以上の通路幅確保） 【影響試験】細分化片の次工程アクセス装置への影響，アプレシブ堆積の影響，弁箱ダメージを確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	通路拡大寸法，細分化時間，アプレシブ除去性能，高圧水とアプレシブ使用量，アプレシブ除去性能，弁箱へのダメージ
試験作業の概要	弁体切断後、弁体後方に堆積したアプレシブで弁体が落下しない状態（図1）から、加工装置AWJノズルと洗浄ノズルの併用でアプレシブを除去し、弁体を弁箱内に落下（図2）。その後、加工装置のAWJにて、細分化切断加工を実施（図3）
試験結果	細分化加工を45%実施して時点で、弁体加工ユニットのAWJノズル回転機構に不具合発生し中断。加工装置をモックアップ内から取り出してメンテ後、残りの細分化加工を実施したが、切断ラインにズレがあったため、完全切断できなかった（図4） * 加工装置をモックアップ内から取り出してメンテ後、再投入した際、加工装置の位置決め精度が不十分であった
考察・将来開発課題	【能力試験】弁体加工ユニットのAWJノズル回転機構の信頼性を改善できれば、細分化できる見込みが得られた 【影響試験】細分化加工中、アプレシブが多く堆積するため、アプレシブ除去機能が必要。弁体へのダメージ少ない 【取り扱い性試験】切断加工中に水とアプレシブが堆積するので、加工と堆積物除去のタイミングや運用方法が重要
課題の対策	加工装置の防塵防水対策。堆積物除去機能の追加（加工と除去をシーケンス的に行う）



図1 弁体切り落とし後の状態  
(解説：モックアップ外で弁体切り落としを実施後、モックアップ逆止弁体内に切断弁体と使用したアプレシブを戻して、弁体の弁箱内落下状態と洗浄ノズルによるアプレシブ除去性能を評価)



図2 弁体落下状態と洗浄ノズル  
(解説：弁体後方に堆積したアプレシブを洗浄ユニット（加工装置ノズルと洗浄ノズルを併用）で除去して弁体を弁箱内に落下させ、その後、洗浄ノズルにて弁箱内のアプレシブを除去。)



図3 弁体細分化加工状況  
(解説：弁箱内洗浄により、切り落とし弁体が細分化に適した姿勢となり、AWJで細分化加工実施)



図4 細分化加工後の弁体  
(細分化加工が45%程度進んだ時点で、弁体加工装置のAWJノズル回転不良。加工装置取り出しメンテ後、残りの切断加工したが、切断ラインにズレがあったため完全切断できなかった)

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験⑰, ⑱ : ティA, ティB配管穿孔

(注記1) : 記号の凡例は23頁参照

試験機 (注記1)	配管加工ユニット (○)
1F現場作業	ティ配管A,B手前まで到達, ティ配管側壁に耐放射線性内視鏡の通過用の穴を穿孔
試験分類	【大項目】ティ配管加工試験 【小項目】ティ配管A, ティ配管B側壁穿孔試験
試験目標	【能力試験】ティ配管側壁に耐放射線性内視鏡が通過可能な穴 (Φ10mm以上) を穿孔 【影響試験】RPV内部調査装置の耐放射線性内視鏡が通過できる穴であることを確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	ティA・ティB配管側壁への穿孔サイズ, 穿孔時間, 高圧水使用量
試験作業の概要	ティA・ティB配管 (図1) 内から200MPaの高圧水を噴射し、配管側壁を模擬したステンレス板への穿孔評価を行う (図2)
試験結果	事前評価から、高圧水噴射ノズルと穿孔部までの距離 (スタンドオフ) の目標値を10mmとし、穿孔を開始したが、高圧水を噴射すると5mm程度ノズルが後退するため、スタンドオフが変化する。更に、配管内では、高圧水の跳ね返りにより、ノズル回転負荷過多で回転不良となったが、柔軟性のある樹脂カバー追加とモータ電流アップで追試を行い改善を確認 (図3)。 ・ティA (SUS316L, 6.0mm) : 穿孔径: 約Φ11mm, 穿孔時間: 3時間39分, 高圧水量: 4.9L/min (1071L) ・ティB (SUS316L, 6.6mm) : 穿孔径: 約Φ13mm, 穿孔時間: 5時間31分, 高圧水量: 4.9L/min (1622L)
考察・将来開発課題	【能力試験】 ティA・ティB共にΦ10mm以上の穿孔可能 (図4) を確認したが、高圧水噴射ノズル旋回トルク向上が必要。ティBの穿孔時間が長い要因は、穿孔途中で配管突っ張り用のバルーンが後退し、スタンドオフが広がったためと判断 【影響試験】 今回使用したバルーンでは、高圧水加工点の保持力不足で要改善 【取り扱い性試験】 加工終了を判断できる仕組みが必要 ※バルーンの材料であるビニールの接着面が一部剥がれ、突っ張り力が落ちたことが原因
課題の対策	・ 高圧水跳ね返りカバーの適正化, 加工状態を反射音で判断できる検出方法の開発



ティB配管

図1 ティA,B穿孔モックアップ  
(解説: ティA・ティB配管内に配管加工ユニットを位置決めし、各配管内部から配管側壁にΦ10mm以上の穿孔を評価)



図2 ティA配管穿孔状態  
(解説: 200MPaの高圧水を配管内壁部に噴射して、Φ10mm以上の穿孔条件を評価)



図3 高圧水跳ね返り対策  
(解説: 配管内では高圧水の跳ね返りによって、ノズル回転不良となったが、柔軟性のある樹脂カバー追加とモータ電流アップで対策)

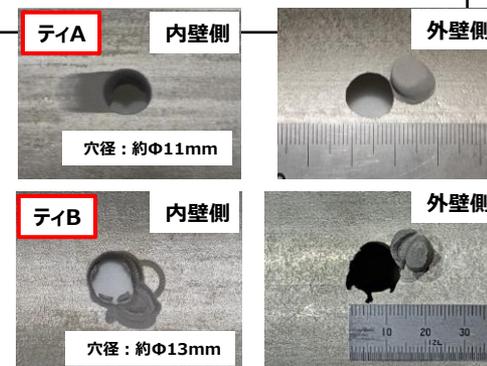


図4 ティ側壁への穿孔結果  
(解説: ティA約Φ11mm・ティB約Φ13mmの穿孔が可能。切断片は外壁側の飛び出した状態で壁面に残った)

## 試験⑱：段差踏破能力確認

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	配管内状況確認ユニット (◎), 弁体加工ユニット (◎), 配管加工ユニット (◎), 調査ユニット (◎)
1F現場作業	----
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】模擬段差踏破試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】内径237mmの配管移動中に於ける1, 3, 5mmの模擬段差を踏破する →設定根拠：モックアップ配管の溶接痕高さ (代表値3mm) を考慮し、三段階に設定 【影響試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	スプール配管入口から100mmの位置に、幅10mmのゴムシート (図1) を設置し、配管内に模擬段差を作る。高さの異なる模擬段差を各ユニットごとに通過し、踏破可否について確認する
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管内状況確認ユニットと弁体加工ユニットは全ての段差を踏破した</li> <li>配管加工ユニットと調査ユニットは3mmの段差まで踏破した (代表値を踏破したため、◎とする)</li> </ul>
考察・将来開発課題	【能力試験・取り扱い性試験】 配管加工ユニットはWJ噴射機構の内視鏡取り付け穴部分が、調査ユニットはクローラモジュールが5mmの段差に引っ掛かってスタックした (図2, 図3) 【影響試験】 現時点で大きな課題はない
課題の対策	---

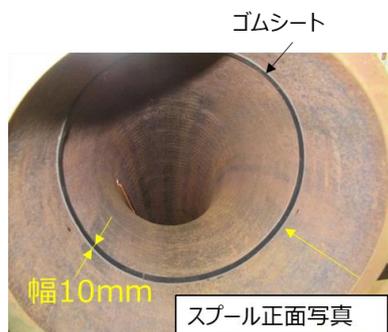


図1 ゴムシート設置の様子



図2 内視鏡取り付け穴部分のスタック直前の様子

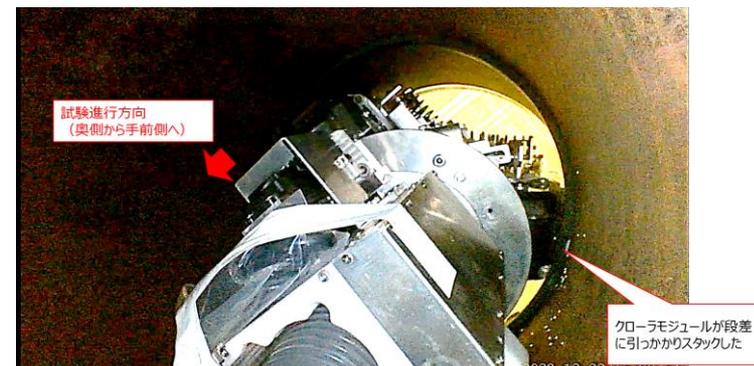


図3 クローラモジュールのスタックの様子

## 試験②⑩：必要ケーブル牽引力

(注記1)：装置仕様の定量化を目的とした試験のため、目標達成判定は無い

試験機	配管内状況確認ユニット（注記1），弁体加工ユニット（注記1），配管加工ユニット（注記1）
1F現場作業	各ユニットのクローラが目的地までケーブルを牽引しながら到達
試験分類	【大項目】ユニットの性能確認試験 【小項目】ケーブル牽引力の測定試験
試験目標	【能力試験】各ユニットのクローラが目的地まで到達するために必要なケーブルの牽引力を測定 【取り扱い性試験】試験を通じて、クローラの推進力がケーブルの牽引力を上回るかを確認し、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	クローラの推進力、ケーブルの牽引力、クローラ出力、配管内環境（ドライ/ウェット）
試験作業の概要	ケーブル牽引負荷が最も大きい箇所は、各ユニットのクローラの最終目的地である。そのため、配管内状況確認ユニットと弁体加工ユニットは逆止弁に、配管加工ユニットはティアAに到達したケーブル類をプッシュブルゲージで引っ張り、動き始めたときの値をケーブル牽引力の最大値とする。調査ユニットは、配管加工ユニットと同じケーブル構成であるため、割愛する。クローラの推進力は、装置投入口に於いて、クローラ後部をプッシュブルゲージで引っ張ることで測定する。クローラの推進力は、配管内環境（ドライ/ウェット）とクローラ出力（50%/75%/100%）次第で結果が変わるため、それぞれ実施する
試験結果	配管内状況確認ユニットは、今回実施した全ての条件（配管内環境とクローラ出力）下でクローラの推進力がケーブルの牽引力を上回った。弁体加工ユニットは、クローラ出力を75%以上にする事で、クローラの推進力の方が上回った。配管加工ユニットでは、配管内でのケーブルの突っ張り状況によって、クローラが前進できなくなる場合があった
考察・将来開発課題	【能力試験】 配管内状況確認ユニットと弁体加工ユニットに於ける最小のクローラ推進力は約100N（出力50%,ドライ）であった。配管内状況確認ユニットのケーブル牽引力は60.9Nであるため、今回実施した全ての条件下で問題ないことを確認した。弁体加工ユニットのケーブル牽引力は約190N（サブタンクを含む）であったため、最小のクローラ推進力よりも大きくなるが、出力を75%にすると214.4N（ウェット）以上の推進力が得られるため、問題ないことを確認した。配管加工ユニットに於ける最大のクローラ推進力が約280N（出力100%,ドライ）であるのに対し、ケーブル牽引力が57Nであるため、問題なかった。しかし、逆止弁前エルボに於いてコルゲイトチューブがエルボのコーナー内側へ引き寄せられ、突っ張る状態（図1）だと、牽引力が約400Nに増大するため、この状態だとクローラが前進できなくなることを確認した 【取り扱い性試験】配管加工ユニットで構造の見直しが必要であることを確認した
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属リングをケーブルに装着して摩擦を低減</li> <li>コルゲイトチューブを送るためのアシスト技術の導入</li> </ul>

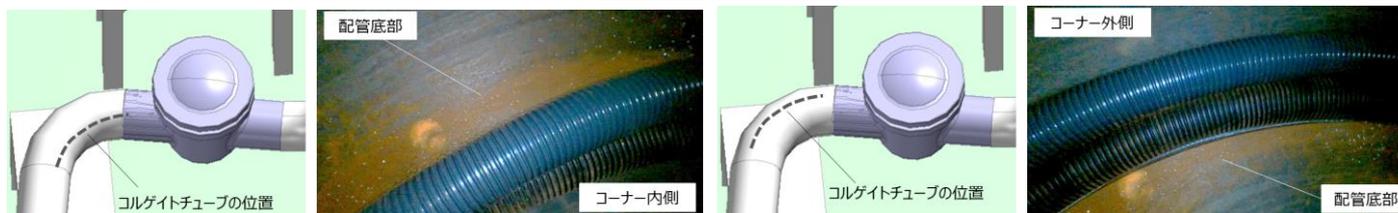


図1 コルゲイトチューブが引っ張られてエルボのコーナー内側へ寄せられ、突っ張る状態  
（左図：コーナー内側へ引き寄せられた突っ張り状態、右図：突っ張っていない状態）

# 添付資料6 炉心スプレイ系配管 工場内試験結果

## 試験②①：ケーブルハンドリング性

(注記1)：記号の凡例は22頁参照

試験機 (注記1)	配管内状況確認ユニット (△), 弁体加工ユニット (△), 配管加工ユニット (△), 調査ユニット (○)
1F現場作業	---
試験分類	【大項目】目的地までの到達性確認試験 【小項目】ユニット回収試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】装置投入口からティBまでの全長28m (逆止弁までだと17m) におけるユニットの回収可否 【影響試験】試験前後での試験機への変化 (外観・動作) を確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	配管内状況確認ユニットと弁体加工ユニットは逆止弁の手前から、配管加工ユニットと調査ユニットはティB手前から装置投入口まで回収できるか確認する
試験結果	調査ユニットは回収できたが、他のユニットはそれぞれ異なる箇所異なる要因で問題 (図1) が発生したため、自力回収ができなかった
考察・将来開発課題	【能力試験】ユニットの回収ができなかった理由は、ユニットと配管壁面との干渉によるスタックと、スパイラル状に滞留した内視鏡ケーブルやコルゲイトチューブ (図2) が妨げとなったためである 【影響試験】特になし 【取り扱い性試験】調査ユニット以外で構造の見直しが必要であることを確認した
課題の対策	---

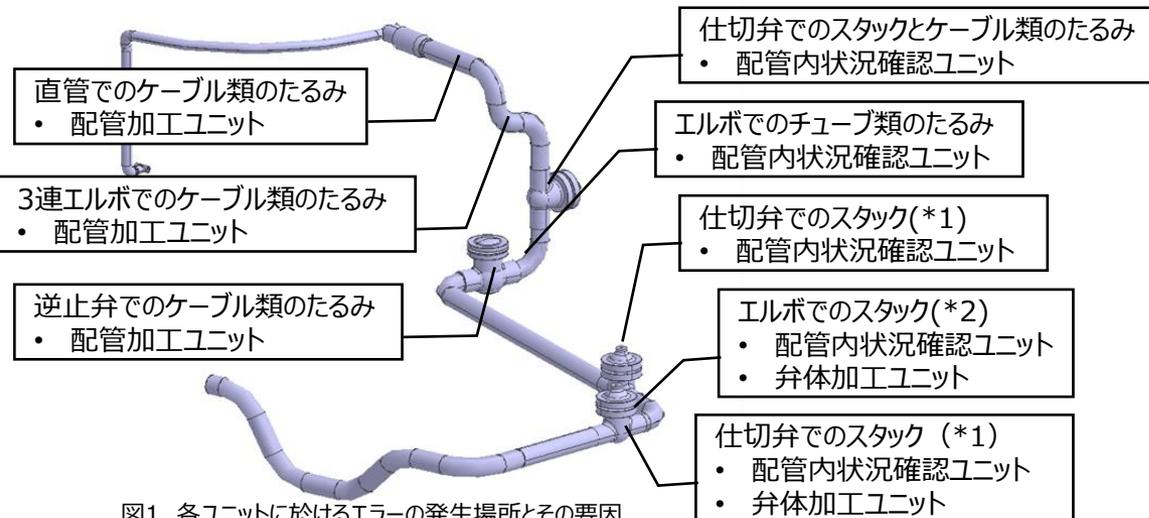


図1 各ユニットに於けるエラーの発生場所とその要因  
(\*1)後退時に、弁体スリットに落ちて引っ掛かり  
(\*2)後退時に、配管と接触干渉 (一部パーツの引っ掛かり)

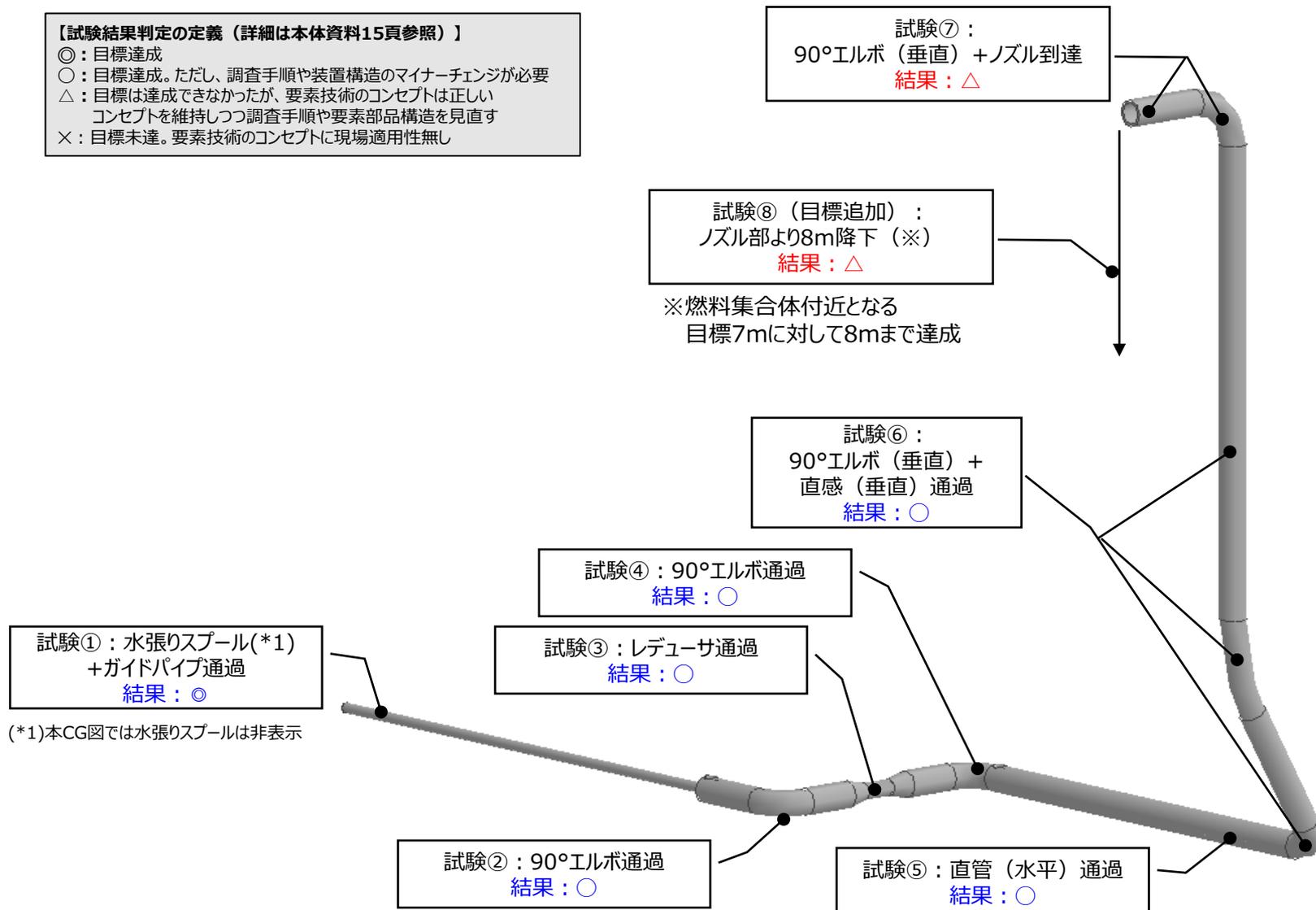


図2 スパイラル状に滞留したコルゲイトチューブの様子 (写真は配管加工ユニット)

## ■ 走行セクションに応じた試験結果概要（移動編）

### 【試験結果判定の定義（詳細は本体資料15頁参照）】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し



# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果 小目次

## ■ 走行セクションに応じた試験結果概要 (ルート構築編)

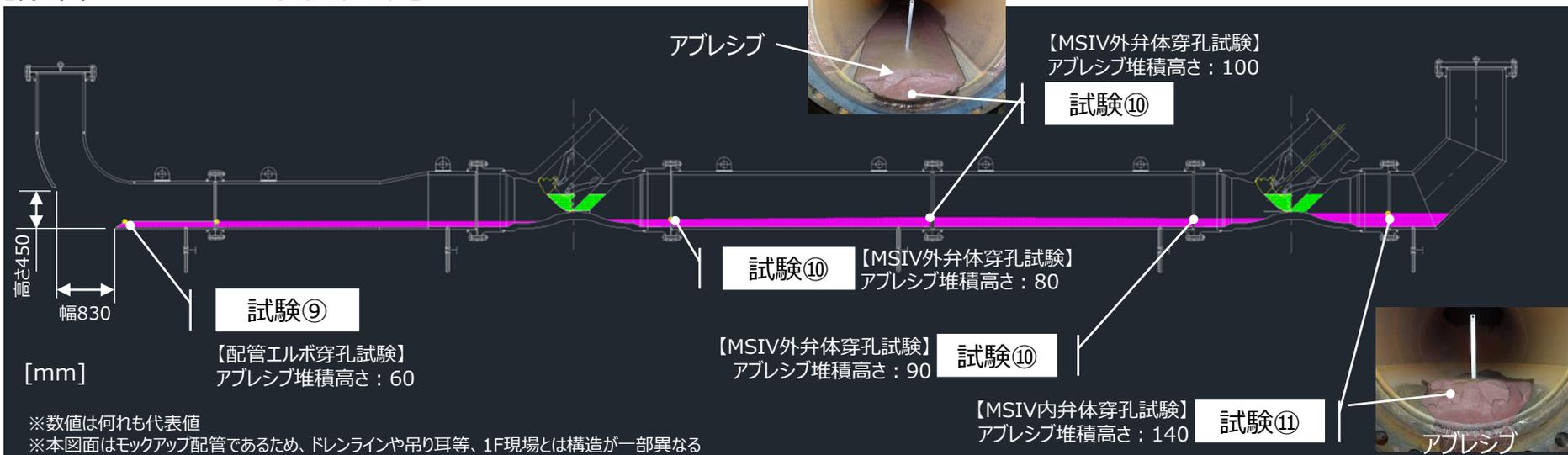
### 【配管エルボ部および弁体穿孔結果】

#### 【試験結果判定の定義 (詳細は本体資料15頁参照)】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し



### 【配管内アブレシブ堆積結果】



# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験①：水張りスプール+ガイドパイプ通過

M3V-2024-000193, Rev.0  
PSNN-2024-0540

(注記1)：記号の凡例は45頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (◎)
1F現場作業	調査ユニットを水張りスプール入口から進入した後、MSIV弁体開口部に挿入したガイドパイプを通過する
試験分類	ノズル仕様選定
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】内径約φ250mmの水張りスプールと、長さ約20mのガイドパイプを通過する 【影響試験】試験前後での試験機への変化 (外観・動作)、および水張りスプール内の水嵩を確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	水張りスプール水位変化量
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>水頭約500mmの水張りスプールの入口から、水噴射によって出口へ到達可能か確認する。試行回数は10回とし、その際の水嵩の増加量を測定する。比較のため、水噴射を使わず手押しで通過できるかどうかも確認する</li> <li>調査ユニット用ガイドパイプの入口から出口まで調査ユニットを通過させる (図1, 図2)</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>水張りスプール、ガイドパイプ共に定量的目標を達成した。なお、参考として手押しでの通過も試みたが水張りスプールのエルボ立ち上がり部でスタックした</li> <li>水張りスプールの水嵩は最大約10mmまで増加した (スプールから溢れ出る影響なし)</li> <li>ガイドパイプは10秒程度で通過。</li> </ul>
考察・将来開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガイドパイプ通過時は、水張りスプールに噴射水が流れ込むが、通過時間が短いことから水嵩への影響は低いと判断した。1F現場作業においても、通過時間の管理および、万一水嵩が基準より高くなった場合のドレン対策などが必要である</li> </ul>
課題の対策	---



図1 水張りスプール試験風景(\*)

(\*)本モックアップは配管内面寸法だけ模擬したもの。1F向け実機では、金属配管でスプールを製作する計画

(\*\*)本モックアップは配管内面寸法だけ模擬したもの。1F向け実機では、より軽量で簡素な構造にする計画



図2 MSIV弁体穿孔部挿入用の形状模擬ガイドパイプ(\*\*)

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験②～⑦（その1）：レデューサ・90°エルボ（4個所）・直管（水平・垂直）通過, ノズル到達

試験機（注記1）	調査ユニット（試験②～⑥：○，試験⑦：△）（注記1）：記号の凡例は45頁参照
1F現場作業	N3ノズル到達, RPV内部調査
試験分類	ノズル仕様選定
試験目標	【能力試験（定量的目標）】レデューサ（最狭部約270mm）を含む、内径最大約Φ550mmのMS系配管を通じて、RPVノズル部に到達するための最適な水噴射ノズル（図1）の仕様と、ホース限界長さを決定する 【影響試験】試験前後での試験機への変化（外観・動作）、および水張りスプール内水嵩を確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	下表参照
試験作業の概要	評価1：孔径/孔数/噴射角度をパラメータに6種類のノズルを準備し、推力をフォースゲージで測定。最も推力のあるノズルを選ぶ 評価2：評価1で選んだノズルを使い、RPVノズルに到達できるホースの限界長さを絞り込む（ホース内外径は統一） 評価3：評価1, 評価2を通じて調査ユニットのスタック有無を記録
試験結果	【能力試験】評価1・評価2：以下仕様のノズル・ホース長が最適と判断した →孔径：1mm, 孔数：8個, 噴射角度30°, ホース長70m（内径9.5mm, 外径15.6mm） →ポンプ出力水圧（根本圧力）：約40MPa, 吐出水量（最大）：約70L/min 【影響試験】現時点で大きな課題はない（ただし内視鏡は保護が必要。次頁参照） 【取り扱い性試験】評価3：段差に引っ掛かり、スタックするケースを確認（図2）
考察・将来開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホースは70m以上になるとノズルへ到達する推力が得られないため、1F現場ではタービン建屋西側通路にポンプを設置する必要がある</li> <li>調査ユニットは水噴射による前進とケーブル巻取りによる後退以外の動作モードが無い。この動作の組合せで配管内でスタックを解消できない場合、水噴射方向を変えるなど新たな動作モードの導入が必要である</li> </ul>
課題の対策	---

評価1. ノズル仕様に応じた直進時の推力

ノズル仕様		ポンプ根元圧力[MPa]			
ID	孔径[mm]/孔数/噴射角度[°]	25	30	35	40
1	0.8/10/30	93N	113N	130N	145N
2	1.2/10/30	103N	123N	144N	-
3	1.0/8/30	100N	123N	147N	166N
4	1.0/12/30	105N	128N	-	-
5	1.0/10/30	94N	118N	132N	143N
6	1.0/10/20	102N	128N	-	-

評価2. 評価1のID3のノズルを使ったホース限界長さ（ホースの内外径は統一）

ホース長さ [m]	ノズル到達可否	補足
50	到達可	
70	到達可	
100	到達不可	試験⑤の走行セクションの垂直配管立ち上がり部手前でスタック（図2）
150	到達不可	同上
200	到達不可	同上



図1 水噴射ノズル外観



図2 スタック箇所

注記：「-」表記部は、ポンプの吐出水量能力の不足により、目標出力水圧を出せなかったものを指す

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験②～⑦（その2）：配管移動中における模擬内視鏡の影響

(注記1)：記号の凡例は45頁参照

本体資料39頁と同じ内容

試験機（注記1）	調査ユニット（試験②～⑥：○，試験⑦：△）
対象となる1F現場作業	ガイドパイプ通過後，水噴射を継続しN3ノズル到達，RPV内部調査
試験名	ノズル到達試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】水平距離約24m・垂直距離約19mを移動し、ノズルへ到達、一時停止する 【影響試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	ポンプ根本圧力設定値，使用水量，カメラ映像（模擬内視鏡）
試験作業の概要	ガイドパイプ入口部から水噴射を行い、N3ノズル部で一時停止して模擬内視鏡で映像を取得する
試験結果	【能力試験】移動途中の凹部でスタックはするが、スタックを解除すればN3ノズルまで到達し、根本側ケーブルの引張力をバランスさせ、一時停止できることを確認した（図1） 【影響試験】模擬内視鏡は水飛沫がレンズに付着し、視認性の確保が困難であった（図1）。模擬内視鏡は移動途中の配管と衝突し、折れ曲がってしまうことを確認した（図2） 【取り扱い性試験】配管内でスタックした際の調査続行に向けた復旧手段が乏しい
考察・将来開発課題	【能力試験】全ての試験中、配管内でホースの折れ曲がりによる墜落等は確認されなかった。水圧をかけた時のホース剛性が有効であったと考えられる。現場で使用するペネトレーションによっては、主蒸気逃し安全弁を通過する必要がある。配管接続孔を通過できるか今後確認が必要。なお、バウンダリ構築用仕切弁のスリット（幅63mm）を通過できることは確認した 【環境試験】内視鏡を保護する機構を設ける場合、可搬重量10kg以内（試験実測）で設計する必要がある 【取り扱い性確認試験】スタック対策については本事業で試みた車輪やテーパーによるスタック防止対策には限界あり。より、対応力を高めるには前進・後退以外の移動モードが必要



図1 N3ノズルに一時停止する調査ユニット



図2 内視鏡への負荷確認結果

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験⑧：ノズル部より8m降下

(注記1)：記号の凡例は45頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (△)
1F現場作業	N3ノズル部よりRPV内へ降下 (帰還を含む)
試験分類	【大項目】移動試験 【小項目】調査範囲拡張試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】ホース長70mの制約の基でノズルから降下可能な距離を確認する。また、帰還のために必要な後退噴射ノズル仕様を決定する 【影響試験】試験前後での試験機への変化 (外観・動作)、および水張りスプール内水高を確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	下表参照
試験作業の概要	評価1：孔径/孔数/噴射角度をパラメータに6種類のノズルを準備し、理論上の最大降下距離 (8m程度) を達成するノズルを選ぶ 評価2：孔径をパラメータに3種類のノズルを準備し、RPV内に降下した調査ユニットをMS配管内に引き戻せるノズルを選ぶ 評価3：ノズル部より降下中の調査ユニットの挙動 (進む方向) を確認する
試験結果	【能力試験】 評価1：以下仕様のノズルが最適と判断した。なお、本ノズルは試験②～⑦ (その1) (48頁) で選定したノズルと同じである →孔径：1mm, 孔数：8個, 噴射角度：30° 評価2：以下仕様のノズルが最適と判断した。→孔径：1mm (ホースの内外径は前進用ノズルと同じ) 【影響試験】現時点で大きな課題はない 【取り扱い性試験】評価3：調査ユニットが鉛直下方に進まないケースを確認 (図1)
考察・将来開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>本試験で選出したノズルは、MS配管内の移動時に最適と判断したノズルと同じ仕様であり、親和性があることを確認した</li> <li>N3ノズル部からの降下中、ホースの癖などで調査ユニットは鉛直下方に進まないケースがある。1F向け実機においては進行方向をある程度能動的にしなければ、障害物の回避等が困難になる</li> </ul>
課題の対策	水噴射水噴射方向を変えるなど新たな動作モードの導入が必要である



(b)鉛直降下している様子



(a)鉛直降下しない様子

図1 調査ユニットがN3ノズル部から降下している様子

評価1 ノズル仕様毎のノズル降下最終到達地点

評価2 ノズルからの降下7m地点での後退噴射結果

ID	孔径[mm]/孔数/ 噴射角度[°]	最終到達地点	ポンプ吐出圧力 [MPa]	ポンプ吐出水量 [L/min]
1	0.8/10/30	降下約2m地点	40	63.1
2	1.2/10/30	降下約2m地点	35	74.5
3	1.0/8/30	降下約8m地点	40	67.4
4	1.0/12/30	配管出口の1m手前付近 (配管出口まで到達せず)	30	77.5
5	1.0/10/30	降下約2m地点	40	76.2
6	1.0/10/20	最終エルボを曲がり切れず (ノズルまで到達せず)	30	72.5

ID	孔径(*1) [mm]	後退可否	ポンプ吐出 圧力[MPa]	ポンプ 吐出水量 [L/min]
a	0.6	動かず (後退不可)	40	-
b	1.0	動かず (後退不可)	40	-
c	1.6	後退可能	32	21.7

(\*1)孔数は何れも1個、噴射角度は何れも0°

## 試験⑨：配管エルボ到達・穿孔

(注記1)：記号の凡例は46頁参照

～1/2～

試験機 (注記1)	配管エルボ加工ユニット (△)
1F現場作業	配管エルボ加工ユニットを挿入し、配管エルボへ到達、穿孔
試験分類	【大項目】配管エルボ穿孔試験 【小項目】配管エルボ前到達 【小項目】配管エルボ穿孔
試験目標	<p>【能力試験 (定量的目標)】</p> <p>目標1：配管エルボに対してノズルのスタンドオフを40～250mm確保する。</p> <p>目標2：配管エルボにΦ360mmの開口を設ける</p> <p>【環境試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する</p> <p>【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする</p>
主な取得データ	スタンドオフ, 移動中の試験機状況動画像, 開口部寸法, 使用水量, 使用アブレシブ量, 配管内アブレシブ堆積量
試験作業の概要	配管エルボ加工ユニットを模擬生体遮蔽の開口部へ進入させ、配管エルボと位置決めした後、穿孔する
試験結果	<p>【能力試験 (定量的目標)】</p> <p>目標1：定量的目標を達成した</p> <p>目標2：当初計画の切断軌道では、一部の配管面にジェット水が十分に当たらず切断できない箇所があることを確認 (図1, 図2)。その後、切断軌道を見直した(図3)追試にて切断できることを確認 (図4, 図5)</p> <p>→配管内アブレシブ堆積量と開口寸法は46頁参照</p> <p>【環境試験】</p> <p>試験機に付着して乾燥したアブレシブが機器の摺動部に引っかかり、破損するケースがあることを確認</p> <p>【取り扱い性試験】</p> <p>試験機の構造をそのまま実機として現地に持ち込む場合、タービン建屋の西側通路の幅に対して、寸法余裕が少なく、搬入や設置時に他設備と干渉する可能性が高い。また重量もあるため作業員による取り回し性が低い</p>
考察・将来開発課題	ジェット水が配管を貫通した後、アブレシブは配管内に蓄積するが、エルボ下面を切断することで配管外へ水と共に流出する。落下したエルボはほぼ真下に落下した見直した切断順序は有効であると考え
対策	<p>【能力試験関連】 見直した切断軌道を再現できるパイプ構造に見直し</p> <p>【関連試験関連】 付着したアブレシブが乾燥する前に水シャワーで除去する仕組みを導入</p> <p>【取り扱い性試験関連】 装置の小型化および軽量化を狙ってユニット全体の構造を見直し (主にパイプ部分)</p>

## 試験⑨：配管エルボ到達・穿孔

(注記1)：記号の凡例は46頁参照

～2/2～



図1 エルボのRでジェット水が逸れて切断できなかったケース (配管エルボを正面から見た図)



図2 エルボに対してジェット水が理想的に当たり、切断できているケース (配管エルボを横から見た図)

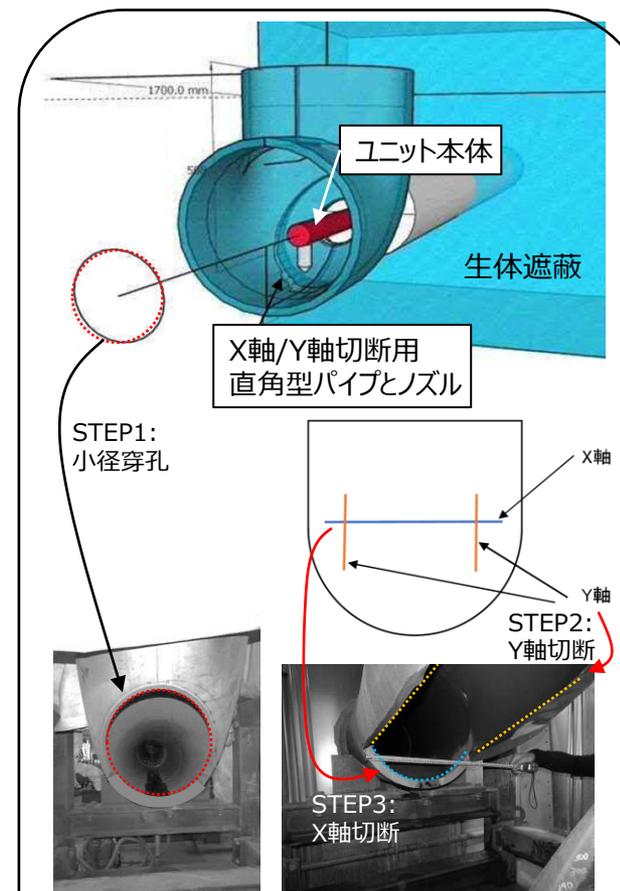


図3 見直した切断軌道の概念

【解説】

STEP 1：ノズルが配管へ進入できる大きさにエルボ部を穿孔

STEP 2：ノズルとパイプを、X軸/Y軸切断用に交換し、配管内部へ進入。ノズルをユニット本体の回転（パン）と前後移動を組み合わせさせてY軸2箇所を切断

STEP 3：ユニット本体の回転（パン）でX軸を切断

※切断ガラの落下タイミングの制御のため、各軸の切断順序は変わる可能性がある



図4 見直した切断軌道によるエルボ開口部外観



図5 切断ガラ

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験⑩, ⑪ : MSIV内弁体 (外弁体) 到達・穿孔

～1/3～

(注記1) : 記号の凡例は46頁参照

試験機 (注記1)	弁体加工ユニット (試験⑩ : ○, 試験⑪ : ○)
1F現場作業	弁体加工ユニットを挿入、内弁体 (外弁体) まで到達し、穿孔 (コアガラ撤去を含む)
試験分類	【大項目】MSIV外弁穿孔試験 【小項目】内弁体 (外弁体) 前到達試験 【小項目】内弁体 (外弁体) 穿孔
試験目標	<p>【能力試験 (定量的目標)】</p> <p>目標1 : 内弁体 (外弁体) に対してノズルのスタンドオフを65～90 mm確保する</p> <p>目標2 : 内弁体 (外弁体) をΦ170mm穿孔し、コアガラを抜き出し撤去する</p> <p>目標3 : 内弁体へのアクセス時、外弁体穿孔部 (Φ170mm) を通過する</p> <p>【環境試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する</p> <p>【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする</p>
主な取得データ	内弁体穿孔部分の通過時の隙間部寸法, MSIV弁体穿孔ユニットのたわみ量, ノズルの位置決め精度 (即ち、弁体-ノズル間の距離 (スタンドオフ) と配管に対するジェット水貫通目標位置)
試験作業の概要	生体遮蔽部からMSIV弁体穿孔ユニットを挿入し、外弁体穿孔部を通過させた後、カメラ・レーザーポインタ・スタンドオフ確保用治具 (図1) を組み合わせて、ノズルのスタンドオフと方位を定める
試験結果	<p>目標1 : 図1に示すスタンドオフ確保用治具を用いて定量的目標を達成した (図1, 図2)</p> <p>目標2 : 定量的目標を達成した (図3)。ただし、アプレシブの撤去が必要</p> <p>目標3 : 定量的目標を達成した (図4)</p>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】検討する構造と仕組みで挿入性とノズル位置決めが可能であることを確認した。</p> <p>ただし、カメラ死角により切断状況が一部把握できない</p> <p>【環境試験】試験機に付着・乾燥アプレシブが装置摺動部に引っ掛かり破損するケースを確認。</p> <p>また、堆積したアプレシブが次作業へ干渉する</p> <p>【取り扱い性試験】機器を持ち込むT/B西側通路の幅に対して現在の装置は大きく、現場の他設備と干渉する可能性が高い。</p> <p>また、重量もあるため作業員による取り回し性が低い</p>
課題の対策	<p>【能力試験】カメラ増設等、作業状況を把握する仕組みを導入</p> <p>【環境試験】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>一般産業で普及している配管水洗浄技術で堆積するアプレシブを撤去</li> <li>付着したアプレシブが乾燥する前に水シャワーで除去</li> </ul> <p>【取り扱い性】</p> <p>装置の小型化および軽量化を狙ってユニット全体の構造を見直し (主にパイプ部分)</p>

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験⑩, ⑪ : MSIV内弁体 (外弁体) 到達・穿孔

～2/3～

### ■ スタンドオフの確保



図1 スタンドオフの確保用治具  
(解説：スタンドオフ確認用治具は弁体と接触するとしなる（一定以上押し込むと自動的に外れる）、さらに挿入すると接触圧センサが弁体と接触し、ランプが点灯。何れも装置に備えたカメラで視認する)



図2 カメラによるレーザー視認状況  
(解説：弁体からのレーザー反射光を活用し、ジェット水貫通目標位置の調整ができることを確認した)



### ■ 外弁体穿孔



(a)穿孔途中  
(解説：弁体最上部は切断しない。)



(b)切断箇所へコアガラキャッチャーを差し込み。その後、残った部分を切断し、落下したコアガラを受け止める



(c)コアガラキャッチャー引き抜き、コアガラを弁体から撤去  
※撤去したコアガラは、次作業に干渉しない配管内箇所に残置



(d)穿孔完了

注記：この図は弁体をタービン建屋側から見たもの

### 図3 外弁体穿孔・コアガラ撤去プロセス

(解説：(b)と(c)の作業プロセスは内弁体の場合も同様)

※(a), (c), (d)は装置挿入方向側（タービン建屋側）側から撮影。(b)はRPV側から撮影

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果 試験⑩, ⑪ : MSIV内弁体 (外弁体) 到達・穿孔

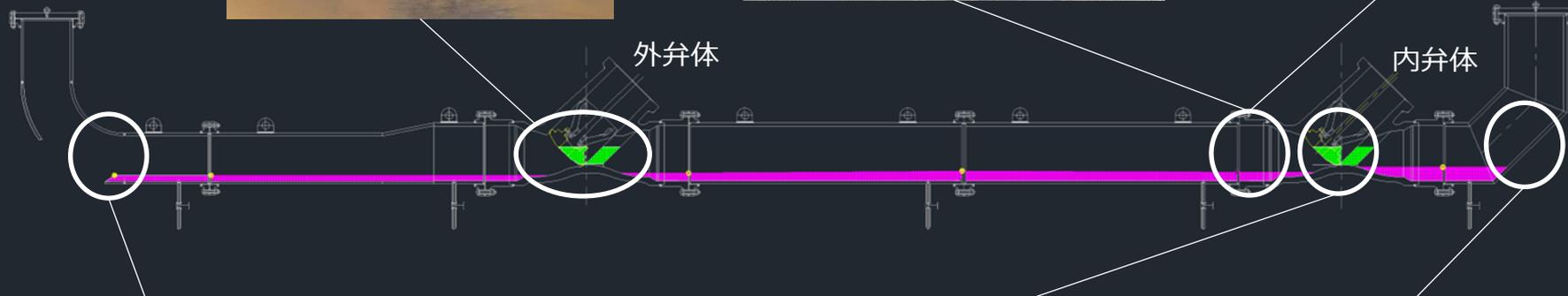
～3/3～

## ■ 内弁体穿孔

(b)内弁体穿孔部の通過  
(解説：穿孔部進入後、パイプは底面は弁体と擦る程度の接触をする  
が破損することなく通過できた)

(c)コアガラキャッチャで弁体手前側に  
移動・残置したコアガラ

(d)穿孔完了後の試験機  
(解説：点検のために配管を撤去した図。試験機に付着・堆積したアプレシブをそのままにすると、摺動部に噛み込んで破損するため、水洗浄による除去が必要)



(a)エルボ部への挿入状況  
(解説：1F現場では  
エルボ穿孔部にバウンダリを設ける)



(e)穿孔完了後の内弁体  
(PCV側から見た図)



(f)穿孔完了後のPCV側エルボ内面  
(解説：測定困難な目粗しを確認)

図4 外弁体穿孔・コアガラ撤去プロセス  
(解説：コアガラ撤去プロセスは外弁体と同様)

# 添付資料7 主蒸気系配管 工場内試験結果

## 試験⑫：調査ユニット用ガイドパイプ設計仕様抽出

- 調査ユニットが弁体穿孔部を容易に通過できるように、専用ガイドパイプを挿入する計画。  
本試験では、ガイドパイプへの構造要求を明らかにするため、塩ビパイプ（図1）を用いて単体試験を実施した。
- パイプ先端を斜めに切ってテーパを持たせ（図2）、弁体穿孔部に当てながら挿入根元側で人手作業で回転させると、目視に頼らず通過できることを確認した（図3）。
- 本ガイドパイプは軽量であることも重要であり、必ずしも金属で作成する必要はない。
- 将来課題としては、パイプ挿入・引き抜き中のバウンダリ維持方法の検討の他、パイプ挿入後の固定方法の検討が挙げられる。



図1 試験用資材外観（塩ビパイプ）



図2 先端形状



図3-2  
弁体穿孔部  
手前の状況

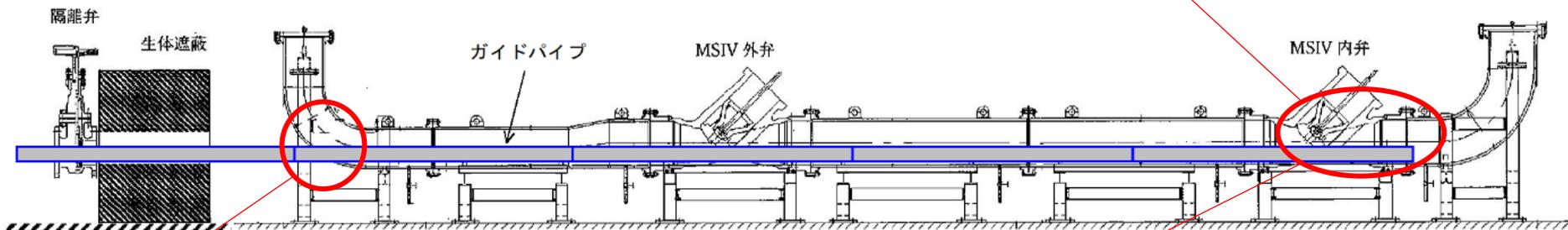


図3-1 配管エルボ穿孔部の通過  
（1F現場では事前のバウンダリ構築が必要）



図3-3 内弁穿孔部を  
通過した後の様子  
（※先端部は図2のような  
テーパ形状としているため  
本写真ではパイプが  
歪んで見えるが正常である）

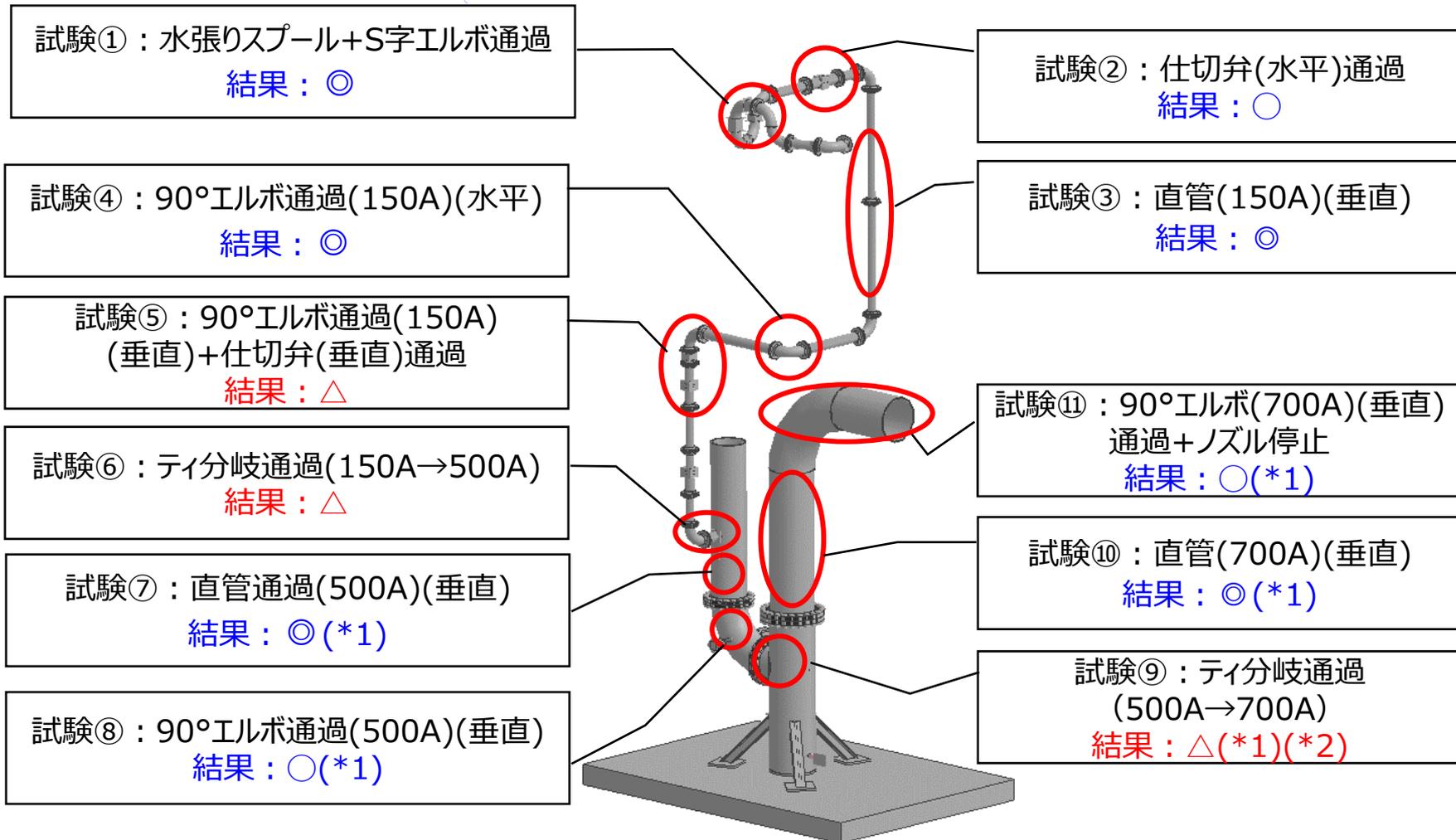
## 小目次

### ■ 走行セクションに応じた試験結果概要

- ・段差踏破能力試験は試験⑫参照
- ・レスキュー試験は試験⑬参照

【試験結果判定の定義（詳細は本体資料15頁参照）】

- ◎：目標達成
- ：目標達成。ただし、調査手順や装置構造のマイナーチェンジが必要
- △：目標は達成できなかったが、要素技術のコンセプトは正しい  
コンセプトを維持しつつ調査手順や要素部品構造を見直す
- ×：目標未達。要素技術のコンセプトに現場適用性無し



(\*1)試験⑥以降の走行セクションはケーブル摩擦が強くなり、試験機の推力が確保できないケースが確認された

(\*2)本試験では約320mmの連結棒を使用（他の試験で使用した約260mmの連結棒では短すぎて通過できなかったため）

## 試験①：水張りスプール+S字エルボ通過

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (◎)
1F現場作業	調査ユニットを挿入, S字エルボを通過
試験分類	水張りスプール+S字エルボ通過
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 内径143mmのエルボ2つで構成されるS字エルボの通過 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像, アームの開閉量/伸縮量 (電流・電圧値に基づく推定値)
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>S字エルボ前到達後、前方クローラと後方クローラのアーム開閉量は一定のまま、当該箇所を通過する。長さの異なる3種類の連結棒 (図1) を試して、通過可否を確認する</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像のみで操作した</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>定量的目標を達成した</li> <li>3種類の連結棒 (図1) とフレーム形状の改善 (図2, 図3) を組合せて、264mmの連結棒での通過を確認した</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】 S字エルボ通過時は、連結棒の長さは264mmが最適である</p> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	フレームの小型化 (図3)



図1 長さの異なる連結棒

(解説：319mmはティ分岐通過の観点で最適化した長さ。289mmは全ルート通過が可能と判断した長さ。264mmはS字エルボを余裕を持って通過が可能と判断した長さ)



図2 クローラが配管内壁と干渉する様子 (解説：264mmの連結棒を用いたとき、図3に示す改善前フレームでは、プレートが配管内壁と干渉した)

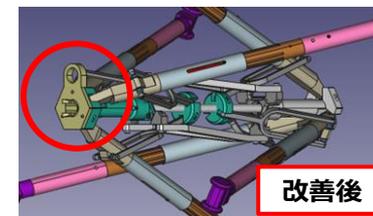
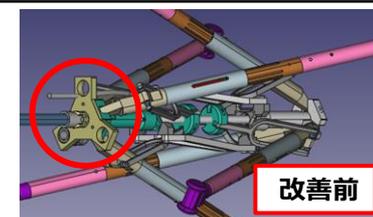


図3 フレームの小型化

## 試験②：仕切弁（水平）通過

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機（注記1）	調査ユニット（264 mm連結棒使用）（◎）
1F現場作業	調査ユニットを挿入, 仕切弁を通過
試験分類	【大項目】150A配管通過試験 【小項目】仕切弁通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】テーパ付き仕切弁（スリット幅 70mm）を通過する（図1） 【影響試験】試験前後での試験機への変化（外観・動作）を確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、2台クローラの運用手順に於ける改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	アームの開閉量/伸縮量, モーターの電流値/電圧値, 試験機の外観/動作変化の有無
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>後続する2号機がアームを閉じた状態で先行する1号機を押し込み、仕切弁を通過させる。通過後にアームを開いて、配管と車輪を接面させた1号機が、後続する2号機（アーム閉状態）を牽引し、2台の通過を完了させる（図2）</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像と配管観察用孔からのアシスト映像を併用して操作した</li> </ul>
試験結果	定量的目標を達成した
考察・将来開発課題	【能力試験】現時点で大きな課題はない 【影響試験】現時点で大きな課題はない 【取り扱い性試験】アシスト映像に頼らない自機状況の認知が必要
課題の対策	カメラ等スリット通過状況を把握する追加センシングの導入

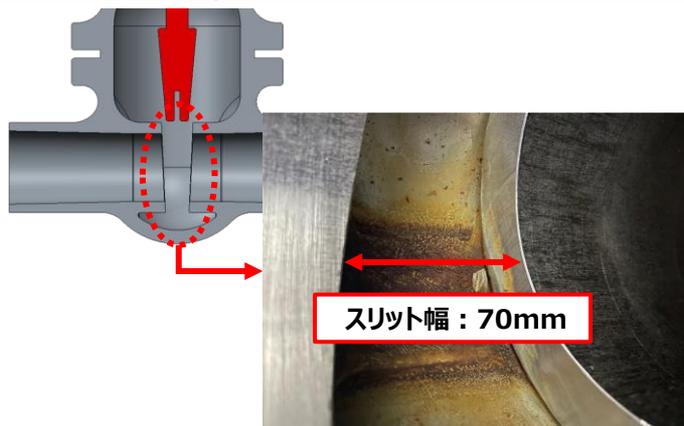
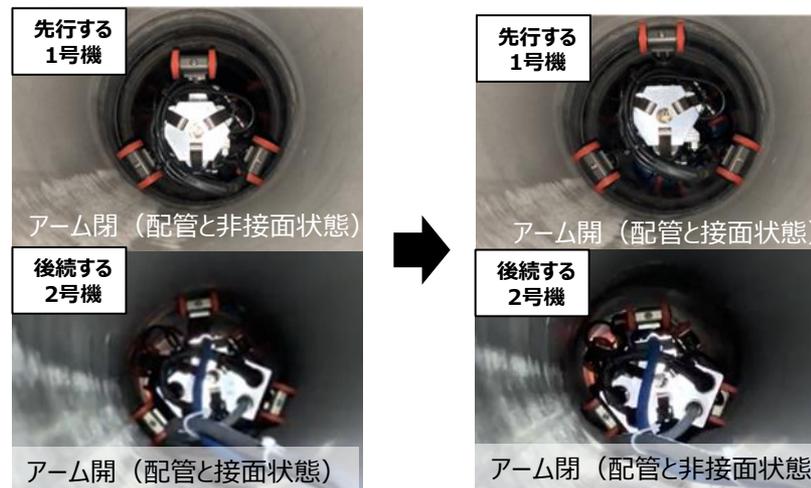


図1 弁箱内の隙間の状況  
 (解説：仕切弁を閉止する際に弁体が収まるための隙間である。PLR系はルート上に3箇所  
 の仕切弁が存在するが、水平方向のものが最も移動が困難であった。



(a)1号機が仕切弁を通過

(b)2号機が仕切弁を通過

図2 仕切弁通過時に於けるアーム開閉の様子

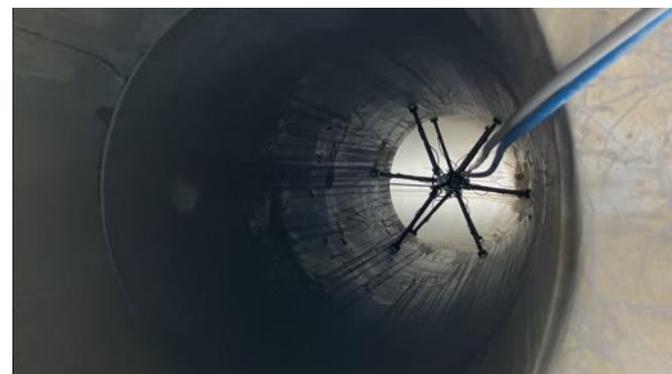
# 添付資料8 原子炉再循環系配管 工場内試験結果

## 試験③⑦⑩：直管（垂直）通過

M3V-2024-000193, Rev.0  
PSNN-2024-0540

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機（注記1）	調査ユニット（264 mm連結棒使用）（試験3：◎，試験7：◎，試験10：◎）
1F現場作業	調査ユニットを挿入，直管を通過
試験分類	【大項目】150A, 500A, 700A配管通過試験 【小項目】直管通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】内径143mm・445mm・627mm、総長さ26mの直管（垂直）の通過 【影響試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像、走行中の試験機状況動画像、アームの開閉量/伸縮量（電流・電圧値に基づく推定値）
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>1号機と2号機のアーム開閉・伸縮量を維持したまま、直管（垂直）を通過する（図1）</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像のみで操作した</li> <li>試験⑥以降の走行セクションは推進力不足のため、ケーブル送りをアシストした</li> </ul>
試験結果	全ての配管系に於いて定量的目標を達成した（アームの開閉・伸縮調整をしなくても通過できた）
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【影響試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	---



注記：ティ分岐（500A→700A）にて、1号機と2号機の先行する順番は入れ替わる為、700A配管上昇時は2号機が先行する

図1 クローラが700A配管の直管を登る様子（配管下側の覗き窓から見上げた図）

# 添付資料8 原子炉再循環系配管 工場内試験結果

## 試験④：90°エルボ通過（150A）（水平）

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機（注記1）	調査ユニット（264 mm連結棒使用）（◎）
1F現場作業	調査ユニットを挿入，エルボ（150A）を通過
試験分類	【大項目】150A配管通過試験 【小項目】エルボ通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】90°エルボ（内径143mm）の通過 【影響試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像，走行中の試験機状況動画，アームの開閉量/伸縮量（電流・電圧値に基づく推定値）
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>1号機と2号機のアーム開閉・伸縮量を維持したまま、直管（垂直）を通過する</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像のみで操作した</li> </ul>
試験結果	定量的目標を達成した（アームの開閉・伸縮調整をしなくても通過できた）（図1）
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【影響試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	---

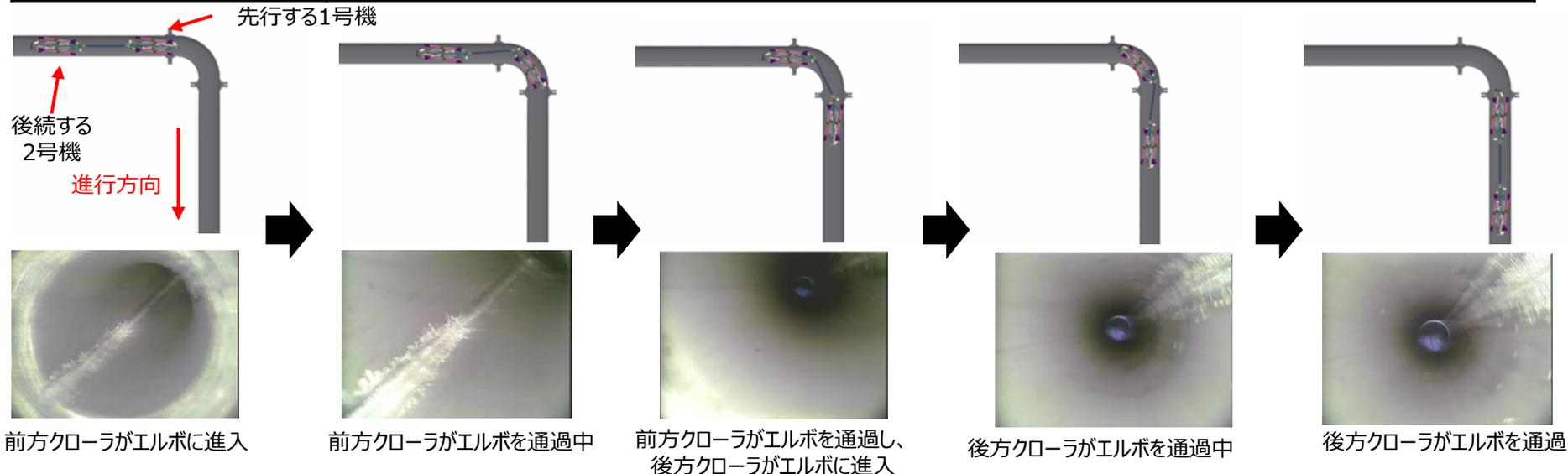


図1 エルボ通過の3Dシミュレーション（上図）と1号機に搭載したカメラ映像（下図）

## 試験⑤：90°エルボ通過（150A）（垂直）+仕切弁（垂直）通過

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機（注記1）	調査ユニット（264 mm連結棒使用）（△）
1F現場作業	調査ユニットを挿入, 仕切弁を通過
試験分類	【大項目】150A配管通過試験 【小項目】仕切弁通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】仕切弁（スリット幅70mm）および90°エルボ（内径143mm）の通過 【影響試験】一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像, アームの開閉量/伸縮量（電流・電圧値に基づく推定値）
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>後続する2号機が、アームを閉じた状態で先行する1号機（図1）を吊り下げながら移動し、仕切弁を通過させる。通過後にアームを開いて配管と車輪を接面させた1号機が、2号機（アーム閉状態）を支えながら移動し、2台の通過を完了させる</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像と配管観察用孔からのアシスト映像アシストを併用して操作した</li> </ul>
試験結果	定量的目標を達成した
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【影響試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】アシスト映像に頼らない自機状況の認知が必要</p>
課題の対策	試験②の対策と同様



図1 スリット部通過前に於ける試験機の動き  
（仕切弁の下側から見上げた図）

## 試験⑥：ティ分岐（150A→500A）通過

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (264 mm連結棒使用) (△)
1F現場作業	調査ユニットを挿入し、ティ分岐 (150A→500A) を通過
試験分類	【大項目】150A配管通過試験 【小項目】ティ分岐通過試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 内径が143mmから445mmに変化するティ分岐を通過する 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通して、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像, アームの開閉量/伸縮量 (電流・電圧値に基づく推定値)
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>先行する1号機が500A配管内に進入し、この間は後続する2号機が落下しないように支える。500A配管内で所定の位置についた1号機がアームを広げて配管へ接面する。その後、2号機も1号機に支えられながら500A配管内へ進入し、アームを開いて配管へ接面する (図1, 図2)</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像と配管観察用孔からのアシスト映像アシストを併用して操作した</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>ケーブル摩擦により定量的目標を達成できなかった。なお、ケーブルの送り込みをアシストすると定量的目標を達成できた (264 mm連結棒の場合)</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>別試験 (試験⑨ティ分岐 (500A→700A)) 連結棒264 mmでは長さが不足することを確認。連結棒の長さを変える仕組みが必要</li> <li>150A配管エルボ部に接面するケーブルの摩擦力が無視できず、推進力を失った。ケーブル摩擦力を低減する仕組みが必要</li> </ul> <p>【影響試験】 現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】 アシスト映像に頼らない自機状況の認知が必要</p>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>連結棒にモータ駆動 (スピンドル回転で伸縮) 式長さ調整機構を導入</li> <li>カメラ等スリット通過状況を把握する追加センシングの導入</li> <li>ケーブル摩擦力低減：金属リング等、ケーブル側での対処方法を導入する</li> </ul>



図1 後続する2号機が500A配管へ進入する様子 (配管の下から見上げた図)

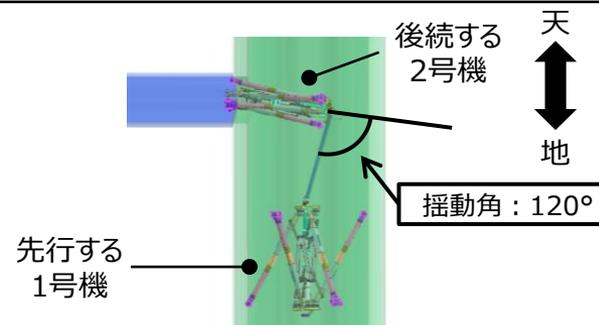


図2 ユニバーサルジョイントの必要揺動角 (注意：本図は厳密な角度を再現していない)

# 添付資料8 原子炉再循環系配管 工場内試験結果

M3V-2024-000193, Rev.0

PSNN-2024-0540

## 試験⑧,⑪ : 90°エルボ (500A, 700A) (垂直) 通過+ノズル停止

(注記1) : 記号の凡例は57頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (264 mm連結棒使用) (試験⑧ : ○, 試験⑪ : ○)
1F現場作業	調査ユニットを挿入し、エルボ (500Aおよび700A) を通過
試験分類	【大項目】500A配管通過試験 【小項目】エルボ通過試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 90°エルボ (内径445mm, 内径627mm) の通過、およびノズル部での停止 【影響試験】 試験前後での試験機への変化 (外観・動作) を確認 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、車輪の最適な材質を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画, アームの開閉量/伸縮量 (電流・電圧値に基づく推定値)
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>1号機と2号機のアーム開閉・伸縮量を維持したまま、エルボを通過する。700Aエルボではそのまま進み、ノズル部で停止する</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像のみで操作した</li> <li>試験⑥以降の走行セクションは推進力不足のため、ケーブル送りをアシストした</li> </ul>
試験結果	<p>定量的目標を達成できた。</p> <p>→エルボ部では、車輪 (ゴム製) の摩耗が大きく (図1, 図2)、極端に進行すると配管との接面が損なわれ、落下するケースがあることを確認した</p> <p>→エルボでは、内輪差・外輪差の発生に伴う滑りで落下することを防ぐため、他の走行セクションより配管への車輪の押し付けを強くすることを目的にアーム (テレスコ) を伸ばしたところ、フレームの一部が変形した</p>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験・取り扱い性試験】 アシスト映像に頼らない自機状況の認知が必要</p> <p>【影響試験】 車輪の摩耗は内輪差・外輪差発生による空転が主要因と考えられる (配管面の粗さなどの影響もある) 選定した車輪は、国外軽水炉の配管点検で使用実績があることから、材質の変更よりも車輪押し付け力を最適化する仕組みの検討が優先事項である。</p>
課題の対策	車輪摩耗防止 : 空転検知および車輪押し付け力を自動制御する仕組みを導入する



(a)ソフトタイヤ



(b)ハードタイヤ

図1 試験後の摩耗したタイヤ



(a)ソフトタイヤ



(b)ハードタイヤ

図2 試験前・試験後の比較

## 試験⑨：ティ分岐（500A→700A）通過

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機（注記1）	調査ユニット（319 mm連結棒使用）（△）
1F現場作業	調査ユニットを挿入し、ティ分岐（500A→700A）を通過
試験分類	【大項目】500A配管通過試験 【小項目】ティ分岐通過試験
試験目標	【能力試験（定量的目標）】 目標1：内径が445mmの配管から内径627mmの配管への進入 目標2：内径627mm配管から上昇、700A配管と500A配管の接続部（内径445mm配管出口部）の通過 【影響試験】試験前後での試験機への変化（外観・動作）を確認 【取り扱い性試験】試験機の取り扱いを通じて、車輪の最適な材質を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像、走行中の試験機状況動画像、アームの開閉量/伸縮量（電流・電圧値に基づく推定値）
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>先行する1号機が700A配管内に進入し、この間は後続する2号機が落下しないように支える。700A配管内で所定の位置についた1号機がアームを広げて配管へ接面する。その後、2号機も1号機に支えられながら700A配管内へ進入し、アームを開いて配管へ接面する。その後は、2号機が先行して配管を垂直移動し、700A配管と500A配管の接続部を通過する</li> <li>試験機は、試験機搭載カメラ映像と配管観察用孔からのアシスト映像アシストを併用して操作した</li> <li>試験⑥以降の走行セクションは推進力不足のため、ケーブル送りをアシストした</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>目標1を達成した（他の試験で使用した約260mmの連結棒では短すぎて通過できなかったため、319 mmで達成した）</li> <li>目標2は配管接続部の通過した後に、垂直配管を上昇し続けると落下するケースがあり、達成できなかった →落下は、試験機と配管の中心軸のずれが原因。軸ずれを起こしたまま垂直移動し続けると、ノズル到達前に車輪の接面が失われ、落下するケースがある。なお、映像アシストを使って軸ずれの修正はできることを確認した →軸ずれは、700A配管進入時および、垂直上昇のための500A配管出口通過時の2個所で発生する →クローラの姿勢に関係なく、ティ分岐通過時に車輪6個のうち、2個が壁面から離れることを確認した（図1）</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】試験結果の「→」参照。また、試験⑥の結果より、連結棒の長さを変える仕組みが必要</p> <p>【影響試験】現時点で大きな課題はない</p> <p>【取り扱い性試験】アシスト映像に頼らない自機状況の認知が必要</p>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>連結棒にモータ駆動（スピンドル回転で伸縮）式長さ調整機構を導入（試験⑥の対策と同じ）</li> <li>アームの開閉/伸縮動作を組合せた姿勢制御機能（自動修正が望ましい）の導入</li> </ul>

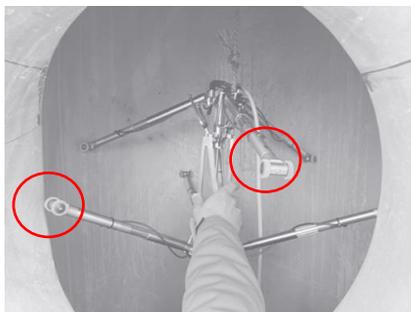


図1 500A配管出口通過時に配管内面から離れる車輪（500A配管から700A配管を見た図）

## 試験⑫：段差踏破能力確認

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (○) ※試験目標は達成したが、繰り返し試験で破損したため「○」とした。
1F現場作業	調査ユニットを挿入し、模擬段差を踏破
試験分類	【大項目】150A配管通過試験 【小項目】模擬段差踏破試験
試験目標	【能力試験 (定量的目標)】 内径143mmの配管移動中に於ける2, 5, 8mmの模擬段差の踏破可否を確認 →設定根拠：理論寸法上の限界値 (8 mm) を上限に三水準を設定 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	配管の接続部に3Dプリンターで製作したリング (図1, 図2) を設置し、模擬段差を作る。クローラのアーム開閉量は一定のまま、模擬段差を通過する
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>2mm, 5mm の段差はアーム開閉操作無しで通過した</li> <li>8mmの段差は、通過できなかった。なお、アームの開閉操作と後続する調査ユニットの押し込みアシストを用いた場合、通過した</li> <li>2mmと5mmの段差踏破試験を複数回行なった後、アーム開閉用のモータ軸が曲がった (図3)</li> </ul>
考察・将来開発課題	<p>【能力試験】 現時点で大きな課題はない</p> <p>【影響試験】 モータ軸はアーム開閉用の台形ねじに直結しているため、アームへモーメント負荷がモータ軸に加わって変形したと考えられる。1F現場作業においては、カメラ映像で段差を目視した場合は、その高さに関わらずアームを閉じて通行する運用が必要である。ただし、垂直配管移動時は落下の危険性も高まるため、この点にも考慮が必要である</p> <p>【取り扱い性試験】 現時点で大きな課題はない</p>
課題の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>モータ軸に負荷がかからない荷重伝達構造の導入</li> <li>アーム過負荷を検知する仕組みの導入。垂直配管移動時は、課題⑧⑩の対策の併用</li> </ul>

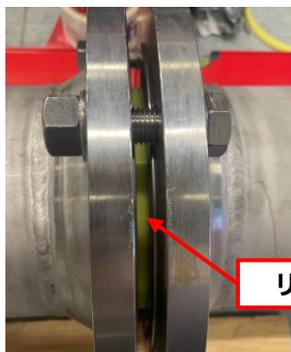


図1 模擬段差の外観 (配管の外から見た図)



図2 配管内から見た模擬段差 (写真は5mmの段差)



図3 モータ軸の変形の様子

## 試験⑬：レスキュー（調査継続能力）確認

(注記1)：記号の凡例は57頁参照

試験機 (注記1)	調査ユニット (◎)
1F現場作業	垂直配管移動時に、片方の調査ユニットが姿勢を崩して車輪が配管から離れてしまった場合
試験分類	【大項目】ユニットの性能確認試験 【小項目】調査継続能力の確認試験
試験目標	【能力試験】 垂直配管移動時に片方の試験機が壁面から外れても、落下せずそのまま垂直移動できることを確認 【影響試験】 一連の作業で装置に著しい損耗や破損の有無を確認する 【取り扱い性試験】 試験機の取り扱いを通じて、装置構造や運用手順の改善点の有無を明らかにする
主な取得データ	試験機搭載カメラ映像, 走行中の試験機状況動画像
試験作業の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>700A配管内を垂直移動時に、片方のクローラのアームを意図的に閉じて、全ての車輪が配管内面と接触しない状態を再現する。その状態で垂直移動を行なう。この試験は1号機・2号機それぞれ実施する</li> <li>配管内の状態をドライとウェットの2水準を用意してそれぞれ実施する</li> </ul>
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>1号機・2号機いずれであっても落下せず、そのまま垂直移動できることを確認（ドライ・ウェット双方）（図1, 図2）</li> </ul>
考察・将来開発課題	【能力試験・取り扱い性試験】 本能力は、試験⑨で示した試験機と配管の中心軸がずれていた場合の影響低減策の1つになり得る。本試験では脱輪後、そのまま垂直移動したが、1F現場においては姿勢を立て直してから移動を再開することとなる 【影響試験】 特になし
課題の対策	---

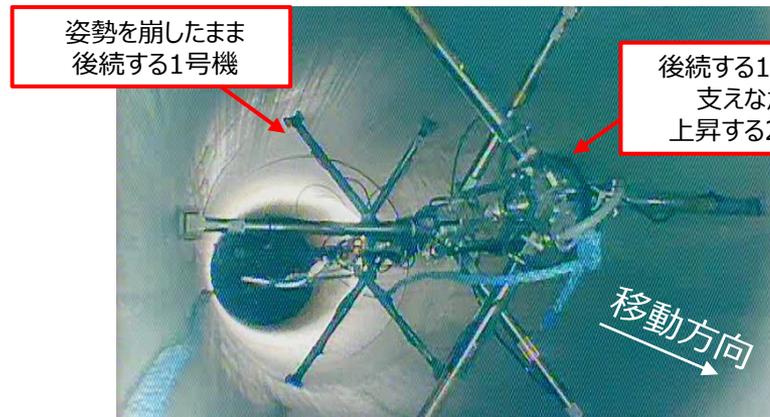


先行する2号機を支えながら上昇する1号機

移動方向

姿勢を崩したまま先行する2号機

図1 先行する2号機の手輪を壁面から外した試験  
(解説：2号機の手輪は壁面から外れているため、姿勢が不安定で推進力は無い。1号機が後ろから押し上げることで、垂直配管を移動している)



姿勢を崩したまま後続する1号機

後続する1号機を支えながら上昇する2号機

移動方向

図2 後続する1号機の手輪を壁面から外した試験  
(解説：1号機の手輪は壁面から完全に外れているため、姿勢が不安定で推進力は無い。2号機が引っ張り上げることで、垂直配管を移動している)

注記：ティ分岐 (500A→700A) にて、1号機と2号機の先行する順番が入れ替わる為、700A配管上昇時は2号機が先行する