

平成26年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金
燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業
平成28年度最終報告書

平成29年3月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

1. 本事業の実施内容

【目的】

中長期ロードマップでは平成33年頃に燃料デブリの取り出しが計画されており、具体的な開発を推進する必要がある。そのため、平成27～28年度は取り出し方針の決定に向けて、必要となる工法詳細ステップやシステム概要の実現性を検討し、開発計画の策定を行う。

なお、本国プロの開発項目は、平成26年度に実施した国プロの抽出した開発案件であるとともに、平成26年度の要素試験より得られた成果に基づき代表3工法(冠水-上アクセス工法、気中-上アクセス工法-気中-横アクセス工法)からの初号機の燃料デブリ取り出しに向けて、実機向け装置の開発に着手できるよう選定されたものである。

【平成28年度の主な実施内容】

①各要素試験の総合調整及び要素試験の結果分析

中長期ロードマップや戦略プラン、各号機の最新の状況や技術開発ニーズ、部分提案事業者による要素試験を含めた各要素試験の計画を整理した。

②工法実現性を見極めに必要な要素試験

燃料デブリ取り出し工法として、冠水-上アクセス工法、気中-上アクセス工法、気中-横アクセス工法の3工法を対象とし、工法の実現性を評価するために必要なデータ・情報を取得するため要素試験を実施した。

③研究開発の運営

廃炉作業や他の研究開発と連携しながら、研究開発を推進した。

2. 実施スケジュール・体制表

大分類	小分類	平成27年度												平成28年度												備考 (最新状況)
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月				
1. 各要素試験の総合調整及び要素試験の結果分析	a. 要素試験計画策定/成果の整理	要素試験計画案整理												中間成果の整理/要素試験計画案の整理												
	b. まとめ													まとめ												
2. 工法実現性の見極めに必要な要素試験 i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術 ① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験	a. 試験計画	試験計画												1/4モデル試作/試験装置試作												
	b. 1/4モデル試作/試験装置試作													要素試験												
	c. 要素試験													まとめ												
	d. まとめ																									
ii) RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術 ① 気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験	a. 試験計画	試験計画												試験装置試作												
	b. 試験装置試作													要素試験												
	c. 要素試験													まとめ												
	d. まとめ																									
iii) 燃料デブリへのアクセス技術 ① 液圧マニピュレータに関する試験 ② 冠水工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験 ③ 気中一横アクセス工法におけるベDESTAL内アクセス装置に関する試験	a. 試験計画	試験計画												試験装置試作												
	b. 試験装置試作													要素試験												
	c. 要素試験													まとめ												
	d. まとめ																									
	a. 試験計画	試験計画												試験装置試作												
	b. 試験装置試作													要素試験												
	c. 要素試験													まとめ												
	d. まとめ																									
	a. 試験計画	試験計画												試験装置試作												
	b. 試験装置試作													要素試験												
	c. 要素試験													まとめ												
	d. まとめ																									
iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術 ① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験	a. 試験計画	試験計画												試作/機器手配												
	b. 試作/機器手配													要素試験												
	c. 要素試験													まとめ												
	d. まとめ																									
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> 計画: 実績: </div>		主要なマイルストーン																								
		▲ 開発条件/開発目標の設定			▲ 要素試験計画案の総合調整 (関係機関による評価・確認)			▲ 年度報告			▲ 中間成果の整理 (関係機関による評価・確認)			▲ 工法ごとのとりまとめ含む全体成果の整理 (関係機関による評価・確認)			▲ 最終報告書提出									

2. 実施スケジュール・体制表

大分類	小分類	平成27年度									平成28年度									備考 (最新状況)				
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		1月	2月	3月	
iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術 ② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験	a. 試験計画				試験計画																			
	b. 試験装置試作									試験装置試作														
	c. 要素試験																							
	d. まとめ																							
v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術 ① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験 ② 気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験	a. 試験計画				試験計画																			
	b. 試験装置試作																							
	c. 要素試験																							
	d. まとめ																							
	a. 試験計画				試験計画																			
	b. 試験装置試作																							
	c. 要素試験																							
	d. まとめ																							
vi) 燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術 ① 上アクセス工法に適用する形状追従、軽量化遮へい体に関する試験	a. 試験計画				試験計画																			
	b. 軽量化遮へい体試作																							
	c. 要素試験																							
	d. まとめ																							
vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術 ① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験	a. 試験計画				試験計画																			
	b. 試験体試作																							
	c. 要素試験																							
	d. まとめ																							

計画:

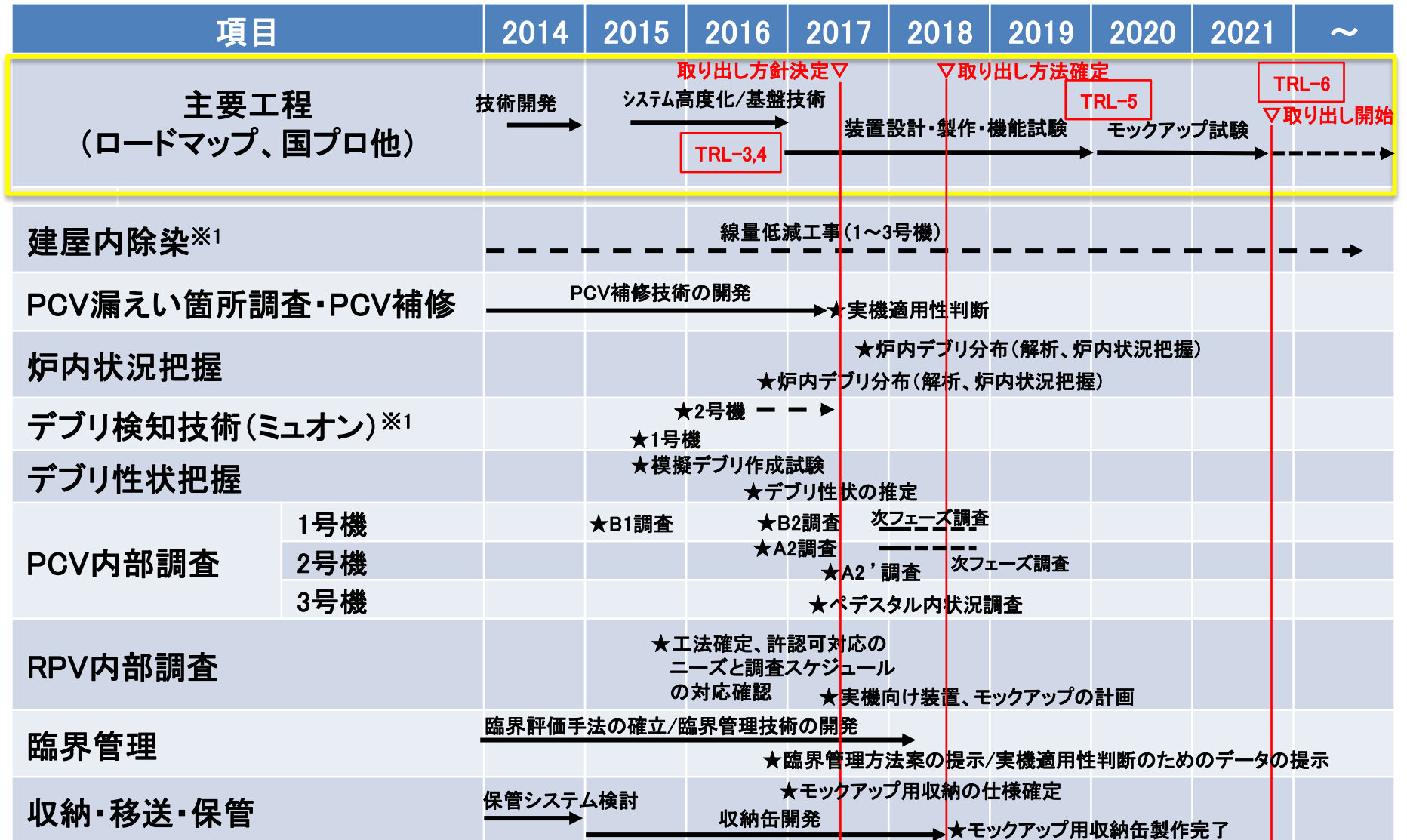
実績:

▲ 主要なマイルストーン

- ▲ 開発条件・開発目標の設定 (9/15)
- ▲ 要素試験計画案の総合調整 (関係機関による評価・確認)
- ▲ 年度報告
- ▲ 中間成果の整理 (関係機関による評価・確認)
- ▲ 工法ごとのとりまとめ含む全体成果の整理 (関係機関による評価・確認)
- ▲ 最終報告書提出

2. 実施スケジュール・体制表

＜他プロジェクトの情報＞ 各プロジェクト成果のアウトプット時期を整理した。



※1 補助金事業ではなく東京電力からの委託事業として実施

2. 実施スケジュール・体制表

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
<ul style="list-style-type: none"> ○ 全体計画の策定と技術統括のとりまとめ ○ 技術開発の進捗などの技術管理のとりまとめ

連携する開発プロジェクトチーム

日立GEニュークリア・エナジー株式会社	株式会社東芝	三菱重工業株式会社	燃料デブリ性状把握
<p>【要素試験・技術開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ①汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験 ②気中一上アクセス工法における RPV 内アクセス装置の RPV 内面シール及び装置下部シールに関する試験 ③遠隔作業用柔構造アームに関する試験 ④上アクセス工法に適用する形状追従、軽量遮へい体に関する試験 ⑤燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験 	<p>【要素試験・技術開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ①冠水一上アクセス工法における RPV 内アクセス装置に関する試験 ②燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験 ③冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験 ④燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験 	<p>【要素試験・技術開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ①液圧マニピュレータに関する試験 ②気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験 ③気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のための PCV 溶接装置に関する試験 	燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発
			燃料デブリ臨界管理技術の開発
			固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発
			格納容器内部調査技術の開発

3. 本事業の実施状況

3.1 各要素試験の総合調整及び要素試験の結果分析



- ①中長期ロードマップや戦略プラン、各号機の最新の状況や技術開発ニーズを整理した。
- ②以下に示す部分提案事業者(試験結果の開示があった場合)も含めて試験結果の整理を実施した。
- ③部分提案事業者においても、計画した要素試験を実施し、完了した。

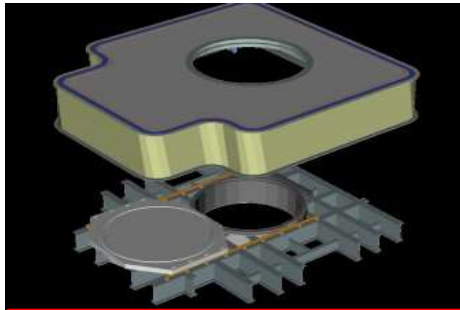
No.	部分提案事業者※	実施内容
1	大成建設(株)	燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験。
2	浜松ホトニクス(株)	視覚・計測技術の性能に関する試験。
3	COMEX NUCLEAIRE	燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験。

※補助事業の一部を実施する事業者。

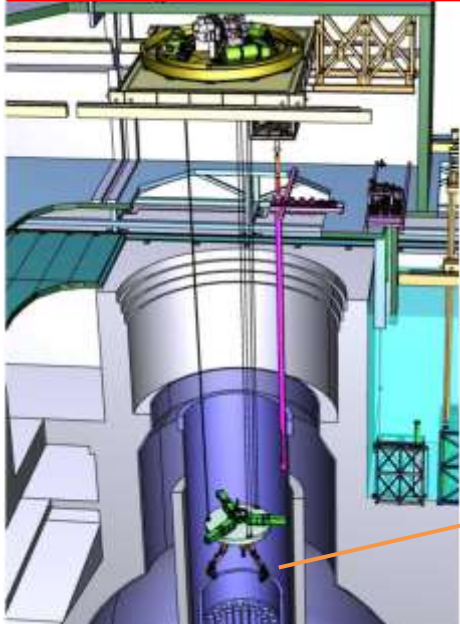
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験「冠水-上アクセス工法:要素技術の適用箇所(例)」

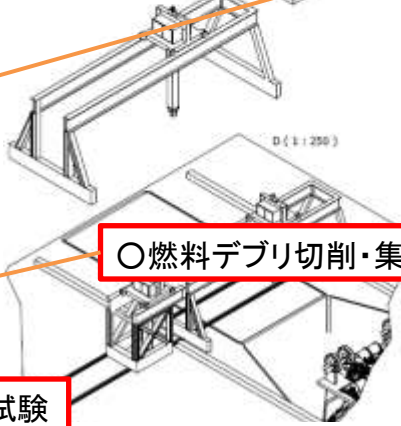
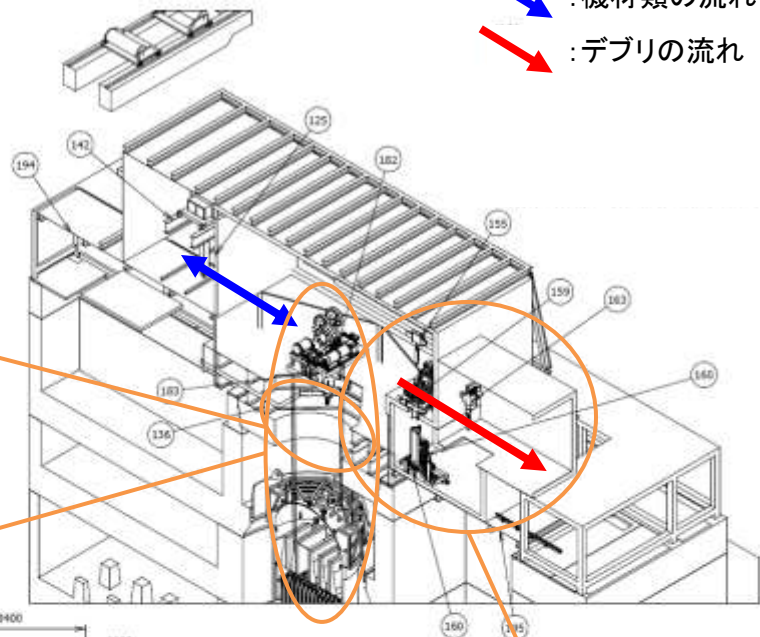
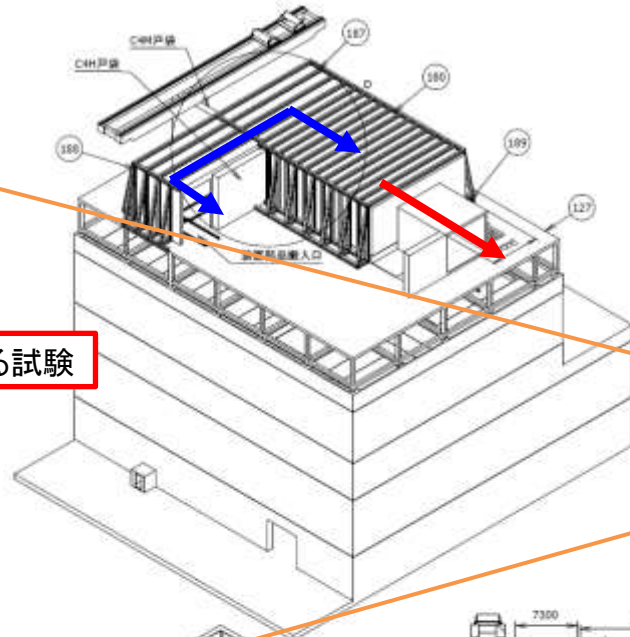
 : 機材類の流れ
 : デブリの流れ



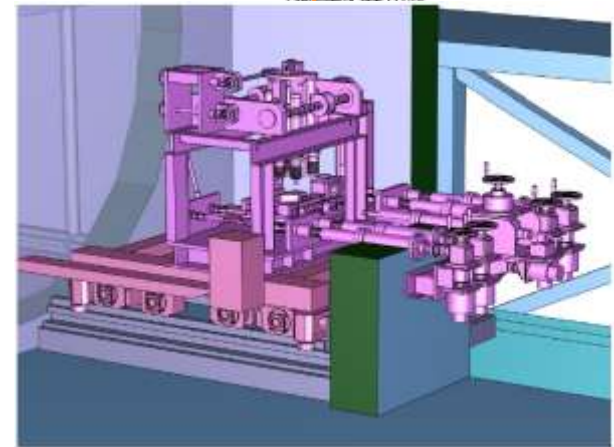
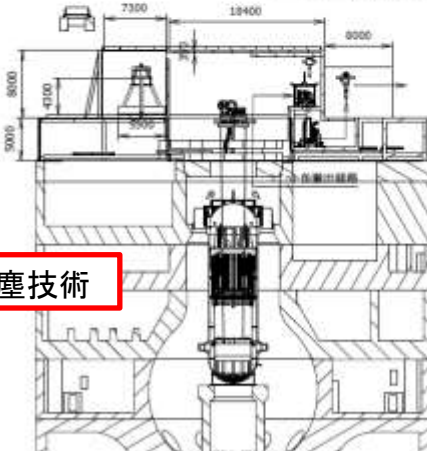
○プラットフォーム/セルに関する試験



○ORPV内アクセス装置に関する試験



○燃料デブリ切削・集塵技術

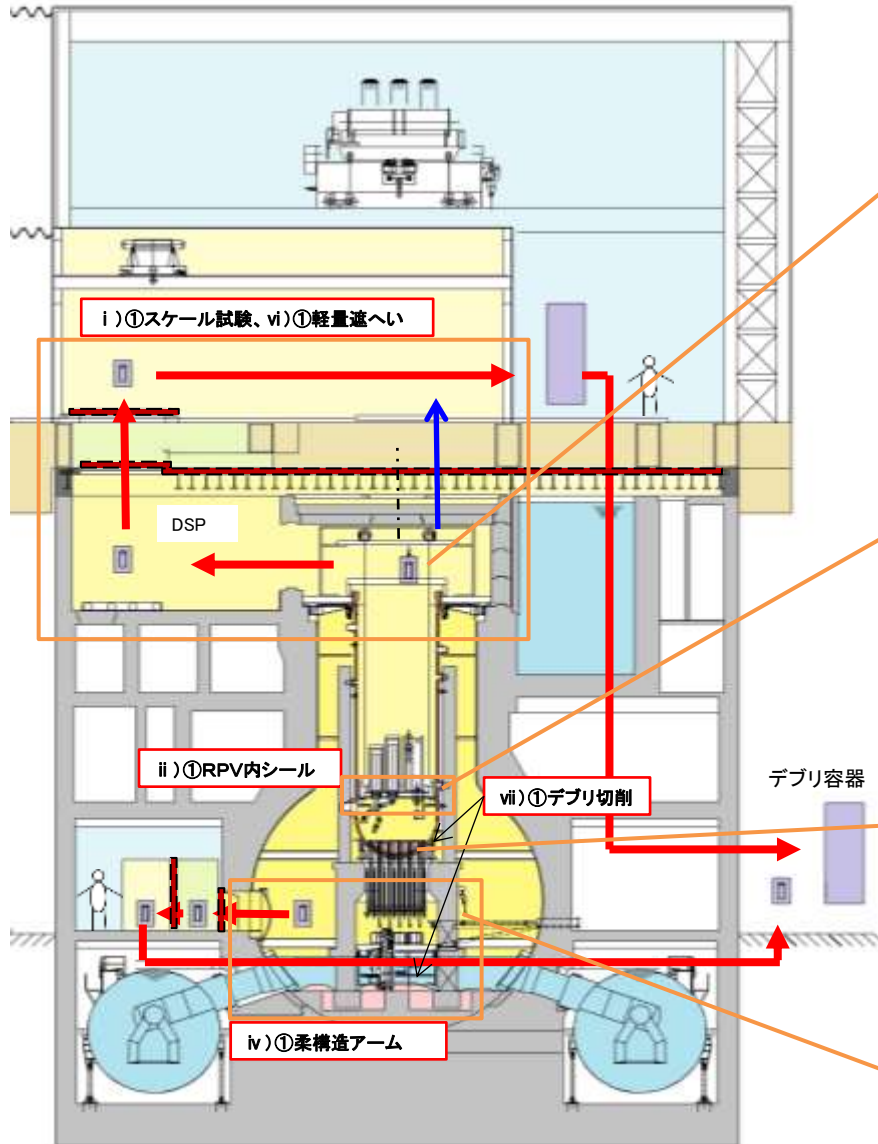


○収納缶取扱い装置に関する試験

これは一例であり、今後見直す可能性あり。工法を見直した場合でも適用可能なように、コンセプトレベルの技術課題に対して要素試験を計画。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験「気中-上アクセス工法(気中-横アクセス工法):要素技術の適用箇所(例)」



○スケール試験、軽量遮へいの開発

- ・開放作業を含む、取り出し作業中の遮へい／汚染拡大防止と重量物移動作業の最小化が重要。
- ・オペフロ上の機器や設備の軽量化は、建屋への負荷低減とともに、設備の合理化にも繋がる。
- ・上アクセス工法の場合デブリへのアクセスルートはDSP経由の有無により2ルートが考えられるが、建屋や機器の成立性を検討試験で確認する必要がある。

○RPV内シール技術の開発

- ・デブリ切削、回収作業時にデブリを現状位置から拡散させないことは、被ばく低減や汚染拡大防止の観点から重要。
- ・汚染拡大防止による装置類の汚染低減は、メンテナンス性の向上にも繋がる。

○デブリ切削技術の開発

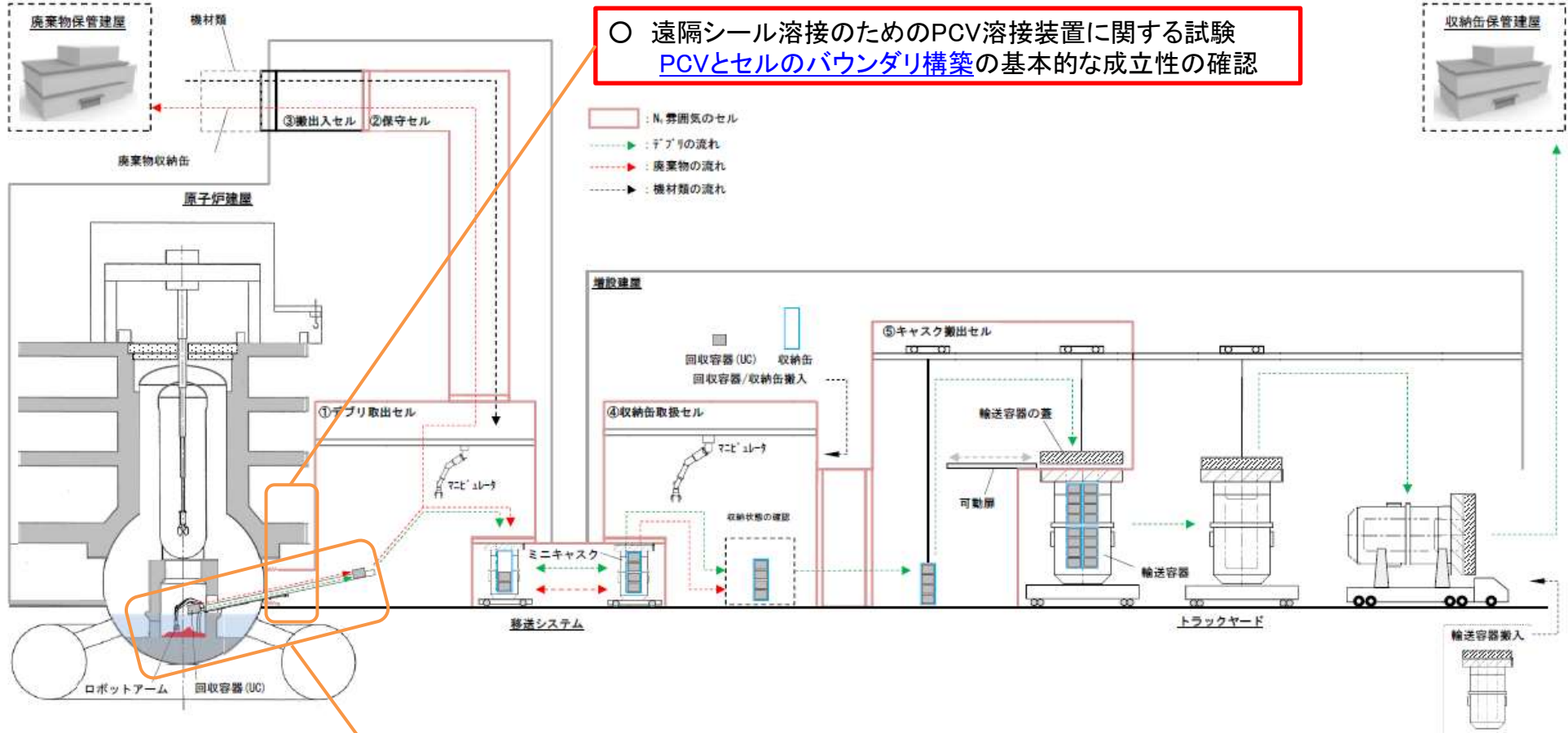
- ・デブリを取り出すためには、回収する収納缶に納まる大きさまで加工することが必要。
- ・デブリは燃料と金属、コンクリートなどが溶融・反応・凝固し、混在した物質で難削材であると想定され、切削する加工技術の開発が必要。

○柔構造アームの開発(気中-横アクセス工法)

- ・デブリ取り出しの為には、機器の撤去や設定、加工といった種々の作業を遠隔で行うことが必要。
- ・干渉物が多く、狭隘でもある場所での作業となるため、既存のロボットアームに加え、柔構造のアームも必要。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験「気中-横アクセス工法:要素技術の適用箇所(例)」



○ 遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験
PCVとセルのバウンダリ構築の基本的な成立性の確認

○ ペDESTAL内アクセス装置に関する試験
ロボットアームとアクセスレールの基本的な成立性の確認

○ 液圧マニピュレータに関する試験
制御ロジック構築のための基礎データを取得
 ロボットアーム開発のための基礎試験

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

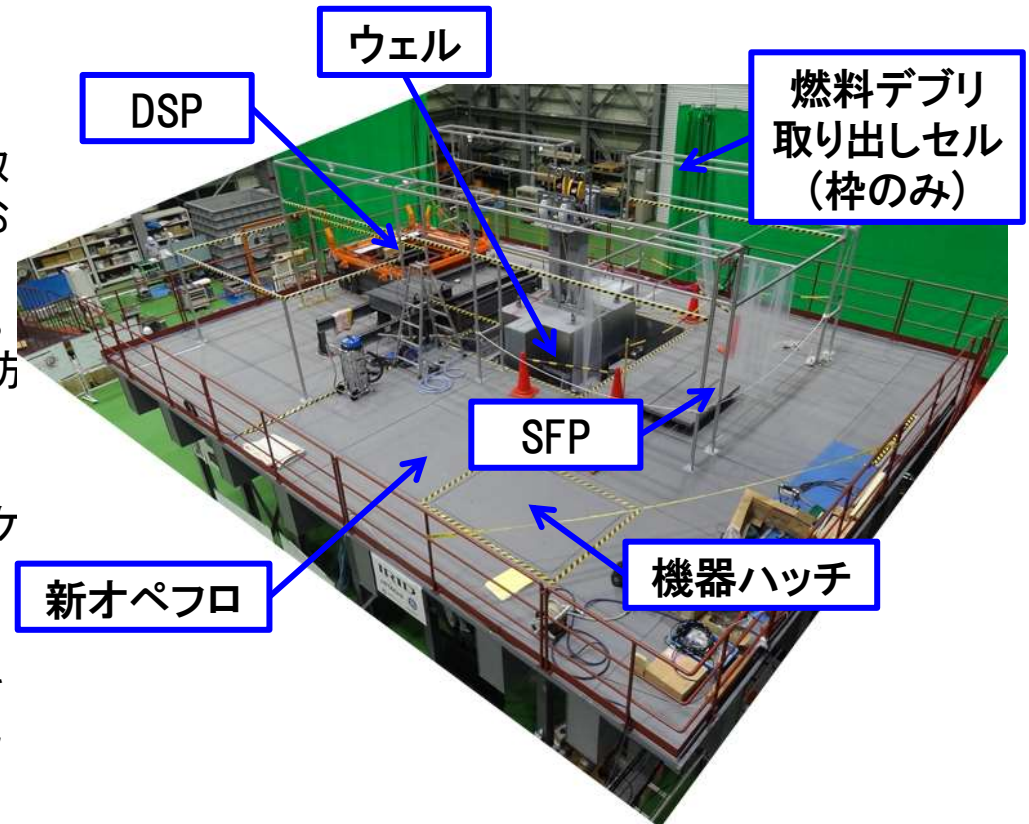
① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

【目的:開発目標】

1/4程度のスケールモデルを使用した要素試験において、課題の抽出・整理が実施され、対応方針が検討されていること。検討の中には、エリア区分・汚染拡大防止用シートに関する検討が含まれていること。(終了時目標TRL:レベル4)

【平成28年度検討内容】

- 平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業)」において検討した作業ステップを1/4スケールモデルを使用して妥当性の確認を行った。
- 詳細ステップの確認結果から、汚染拡大防止シートの適用性も含めて課題を抽出し、整理した。
- 水充填式遮へい体や、炉内装置の1/4スケールモデルと組み合わせて、作業実現性について確認した。
(水充填式遮へい体については、vi)燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術で報告する)



1/4スケールモデル試験設備

3. 本事業の実施状況

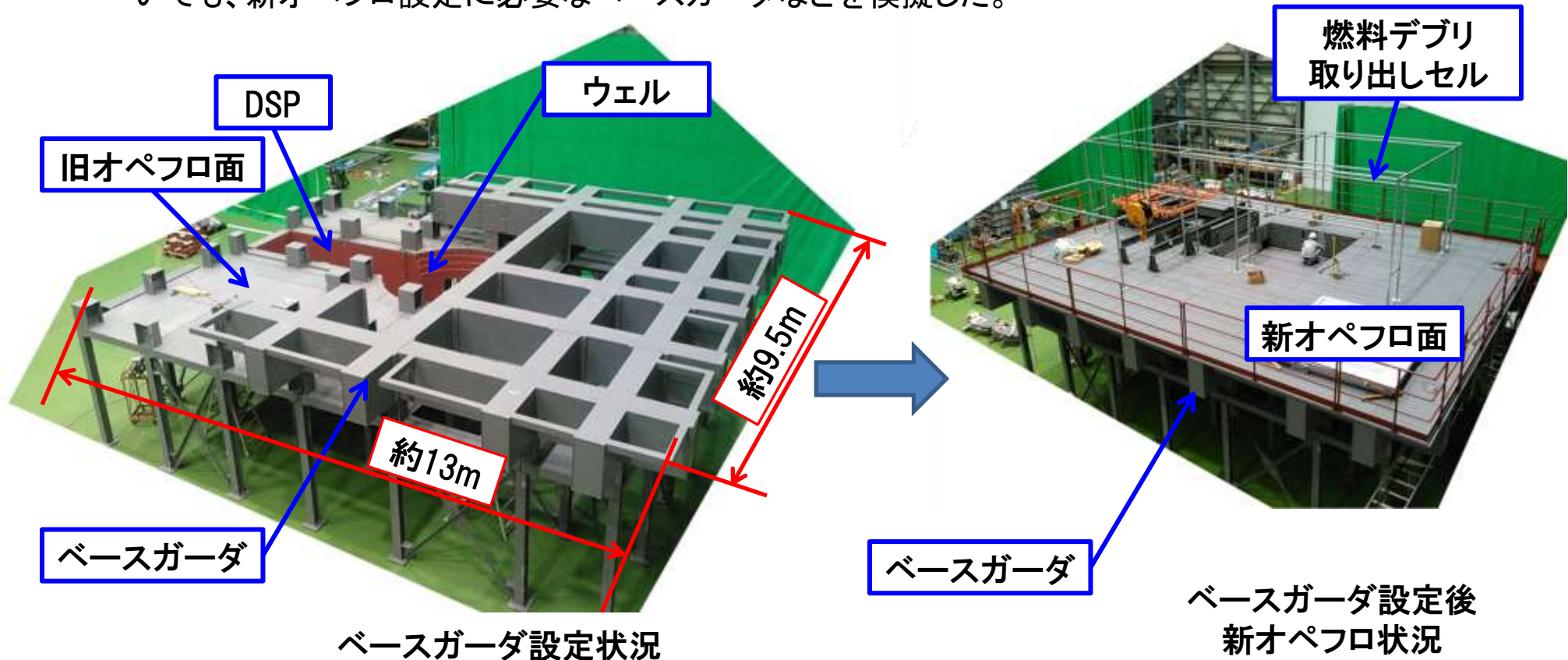
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

【1/4スケールモデル設備概要】(1/2)

燃料デブリ取り出し作業を実施するためには、汚染拡大を防止するため、オペフロに燃料デブリ取り出しセルなどを設置する必要がある。ただし、現状のオペフロは、高汚染・高線量であることがわかっており、オペフロでの人為作業を考慮した新オペフロの設置が必要となる。本1/4スケールモデルにおいても、新オペフロ設定に必要なベースガーダなどを模擬した。



3. 本事業の実施状況

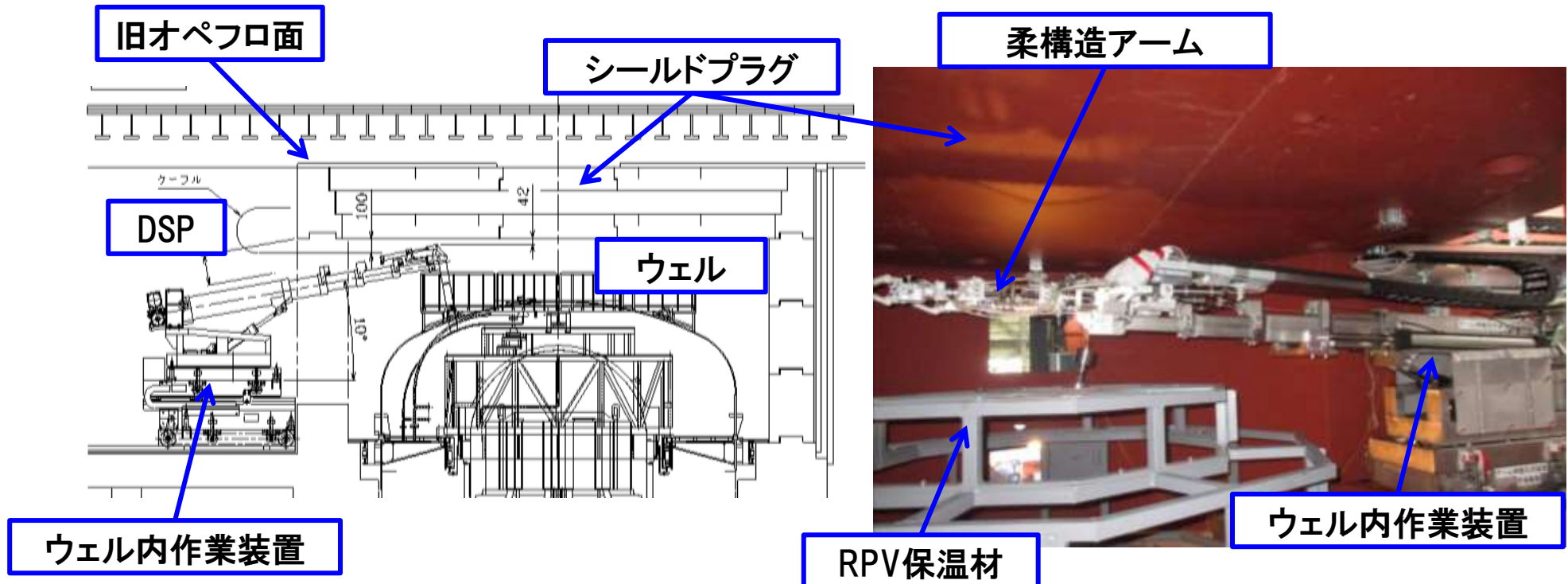
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

【1/4スケールモデル設備概要】(2/2)

DSP内に、柔構造アーム(筋肉ロボット)を備えたウェル内作業装置を設置した。ウェル内作業装置は、機器の撤去、水充填式遮へい体の設置など、多様な作業への適用を想定しており、要素試験でそれぞれの課題を抽出した。



PCVヘッド手摺撤去イメージ

RPV保温材撤去に関する
アクセス性確認状況

3. 本事業の実施状況

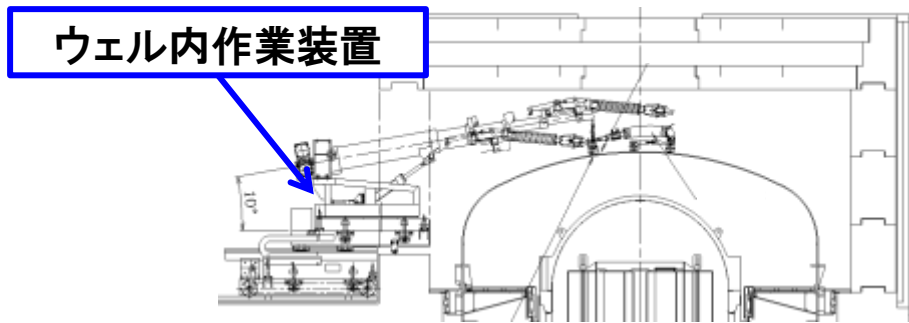
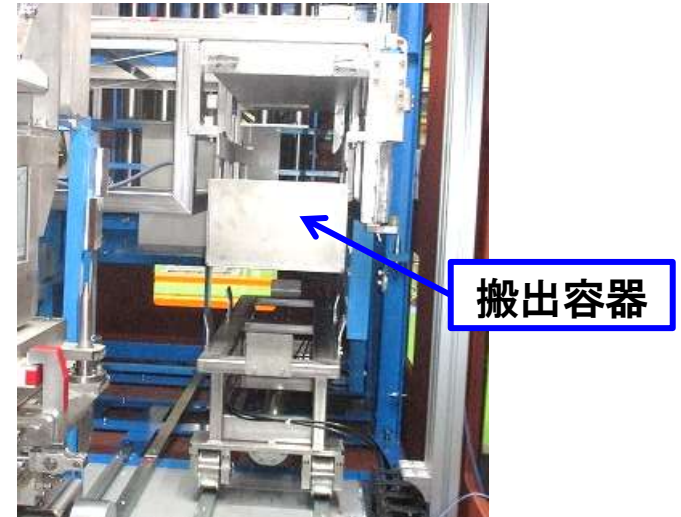
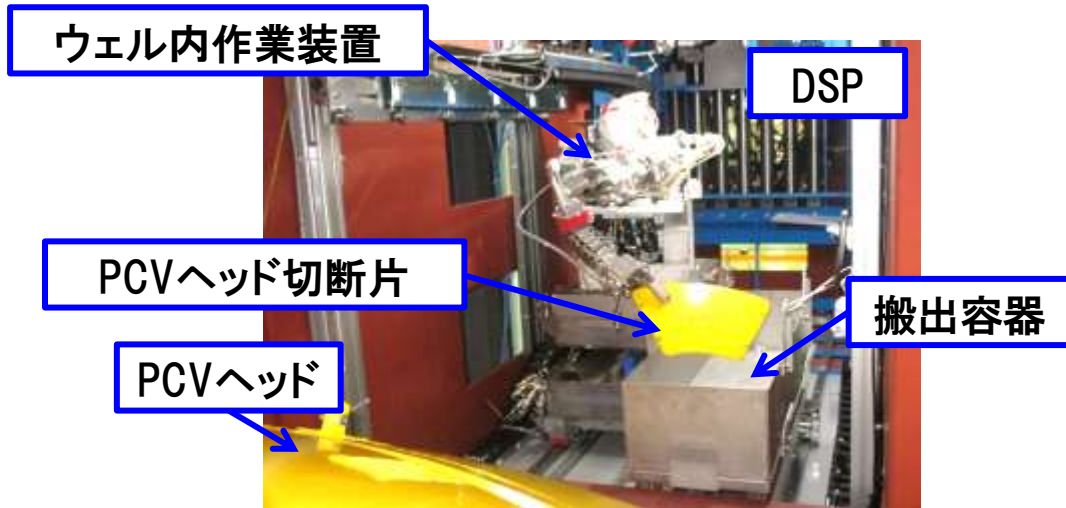
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

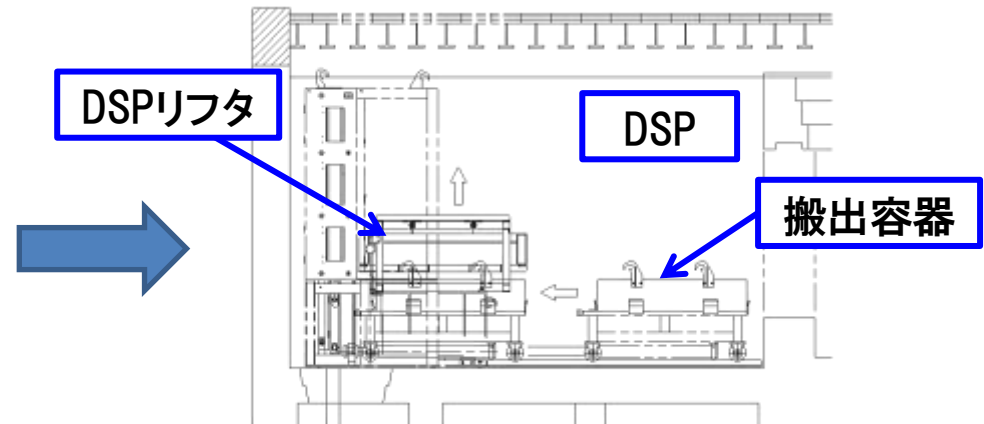
① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

【作業ステップの確認(PCVヘッド撤去の例)】

PCV撤去から、DSP搬出までのステップを確認した。基本的な遠隔作業性について適用可能な見通しを得た。



PCVヘッド撤去イメージ



DSPリフタによる搬出イメージ

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

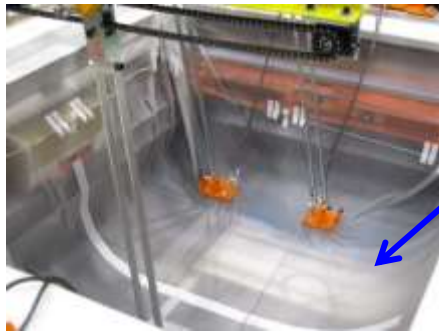
i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

【汚染拡大防止用シートの適用性確認】

DSPリフタから受け取った搬出容器を以下の手順において搬出する。

DSP内を-200Paで負圧管理し、遠隔操作において、廃棄物をシートごしに吊り上げ、ジッパーによりシートの開口を閉止し、搬出操作することが可能であった。



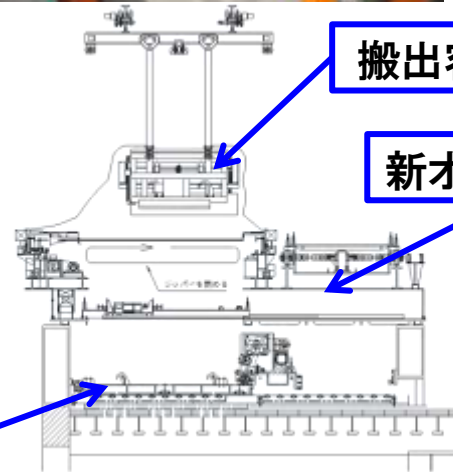
吊り上げ前状況



DSP(シート内)負圧管理 (-200Pa)



ジッパー閉止部

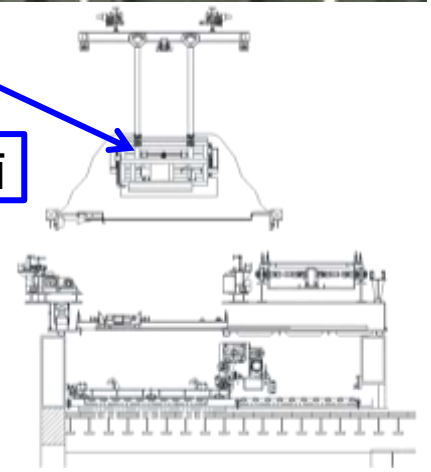


搬出容器

新オペフロ面

DSPリフタ

汚染拡大防止用シートによる搬出イメージ



ジッパー閉止切り離し状態イメージ

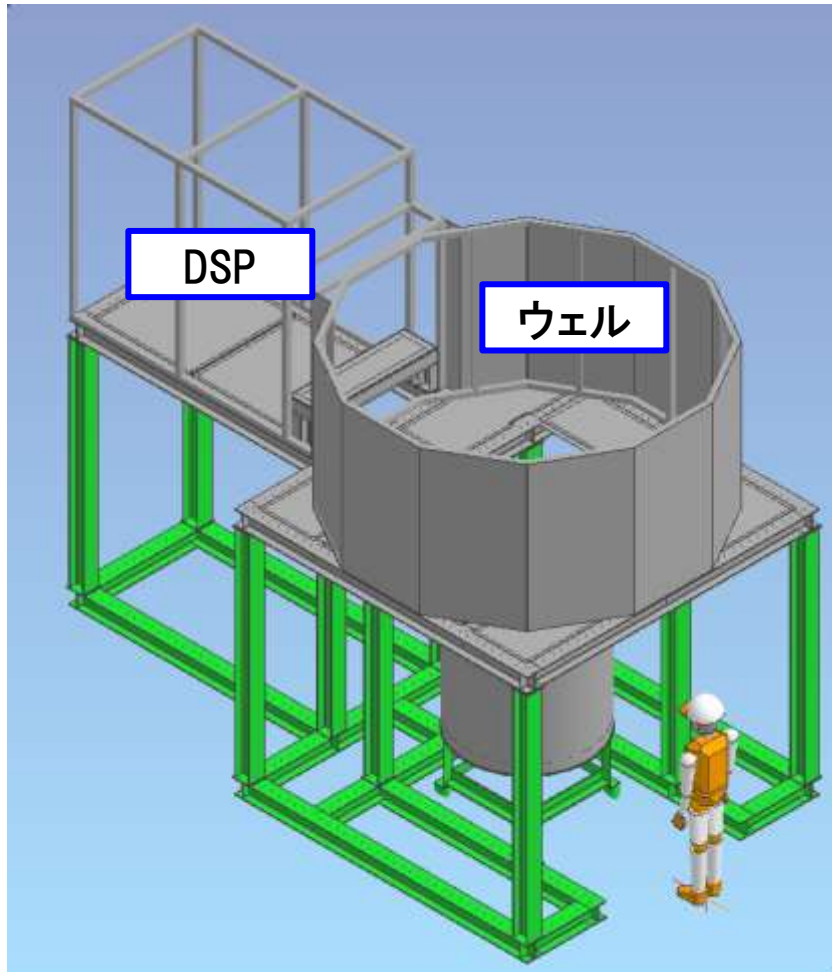
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

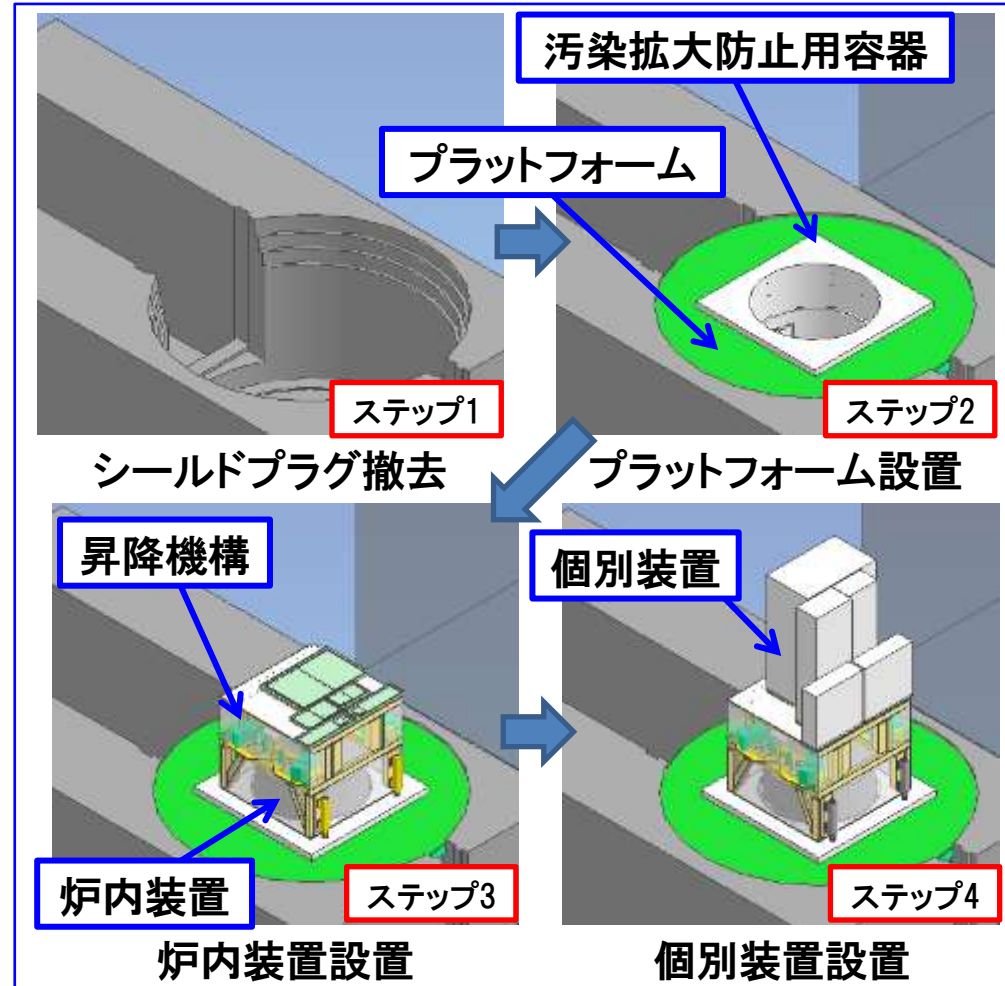
i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

炉内装置の設置実現性の確認として1/4スケールモデルによる工法ステップを確認した。



炉内装置設置確認用1/4スケールモデル全体イメージ



炉内装置設置ステップイメージ

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

ケーブル・ホース送り機構

個別装置搬送容器

汚染拡大防止容器

昇降機構

プラットフォーム

汚染拡大防止容器

炉内装置

写真の範囲

1/4スケールモデル構成

No.1

プラットフォーム

汚染拡大防止容器設置状況

No.2

昇降機構

炉内装置

汚染拡大防止容器

炉内装置設置状況

No.3

個別装置搬送容器

個別装置設置状況

ステップ1のシールドプラグ撤去は省略

ステップ2-3

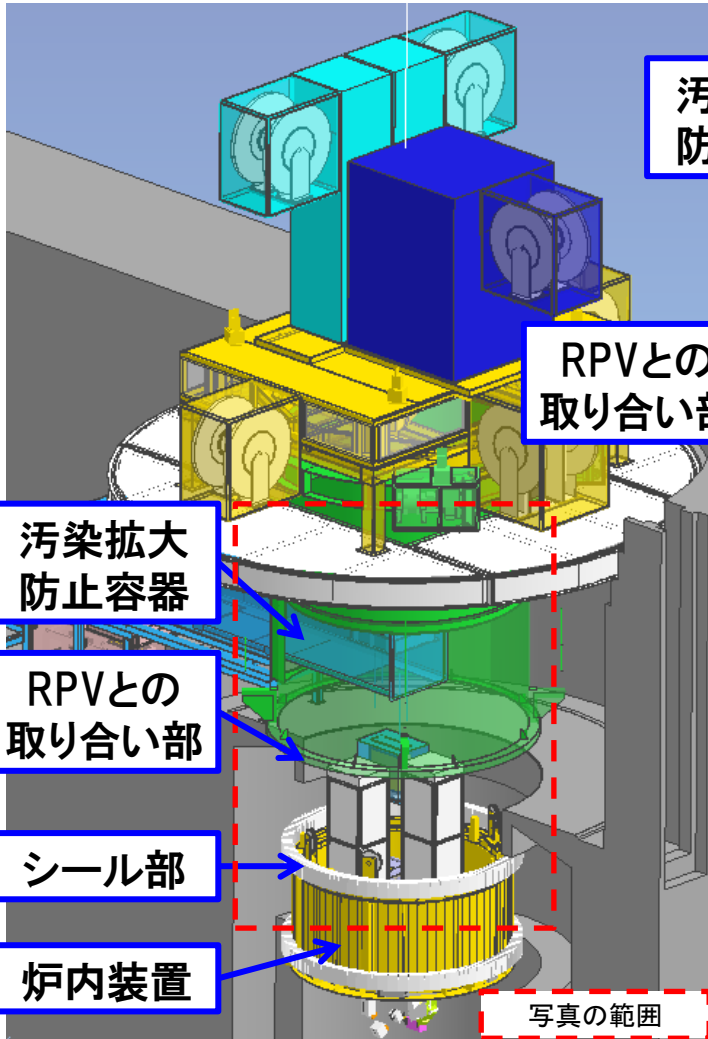
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

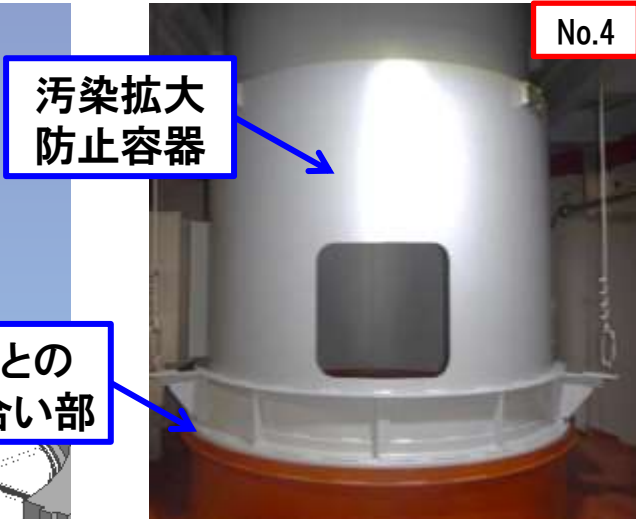
i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

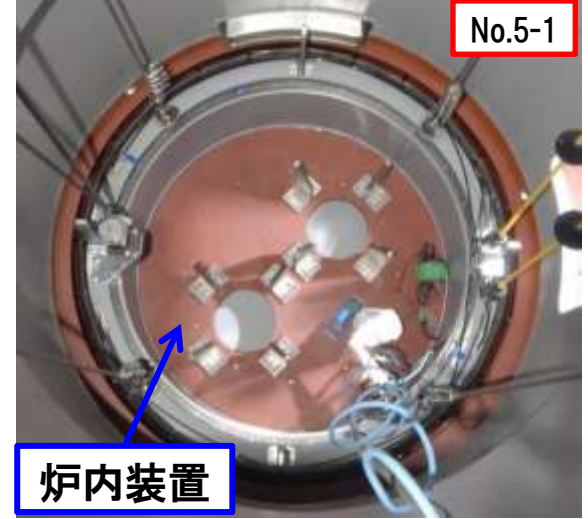
ステップ2-3



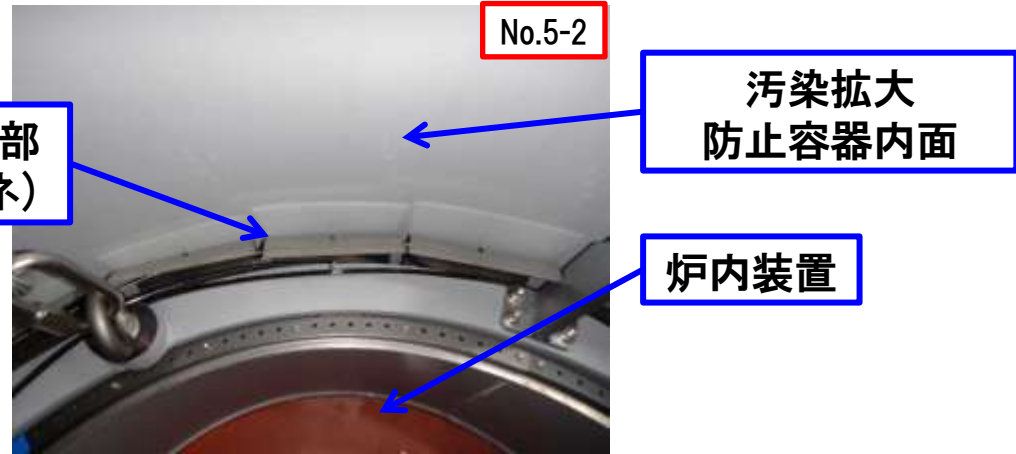
1/4スケールモデル構成



汚染拡大防止容器とRPVの取り合い



炉内装置RPV内設置状況



炉内装置下降状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

個別装置搬送容器

個別装置搬送容器

個別装置取り合い部

個別装置取り合い部

個別装置

炉内装置

写真の範囲

1/4スケールモデル構成

No.6-1

個別装置搬送容器

個別装置取り合い箇所

ステップ4

No.6-2

個別装置取り合い部(裏側)

個別装置

個別装置搬送容器より個別装置を下降

No.6-3

個別装置

個別装置下降時ケーブル状況

No.6-4

個別装置

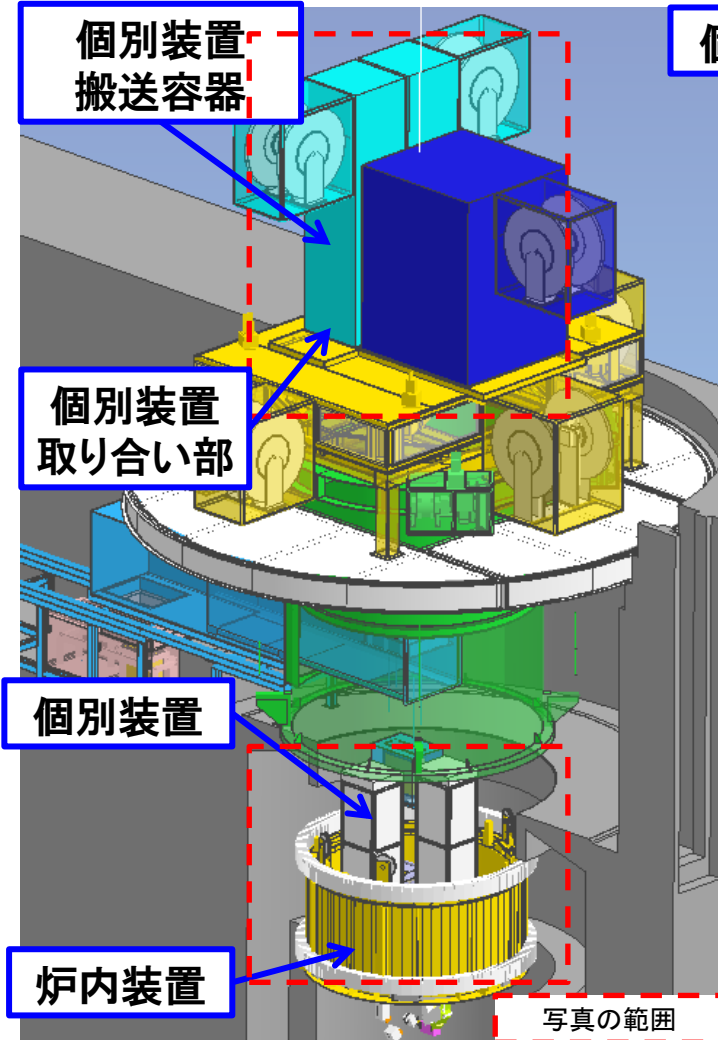
炉内装置への個別装置設置状況

3. 本事業の実施状況

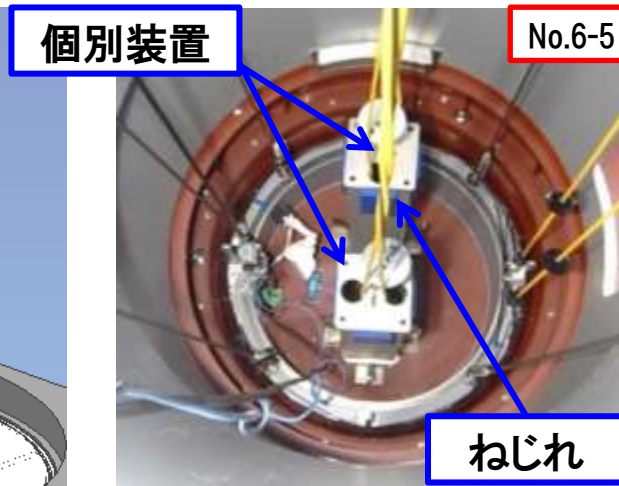
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験



1/4スケールモデル構成



炉内装置への個別装置設置状況



個別装置の吊り具切り離し状況

【要素試験結果と課題】

- カメラ画像による遠隔操作において炉内装置を設置可能な見通しを得た。
- 吊っている状態において、装置の水平度を保つこと、および装置の位置決め(特に角度決め)が困難であったため、設置に時間を要した。
- 個別装置設置時のケーブル、ホースのねじれが発生した。
- 炉内装置は、旋回可能な仕様であるが、旋回動作により個別装置の吊り具(吊りワイヤー)が張ってしまい動作に支障をきたす。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

i) 大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 汚染拡大防止技術を確認するための作業ステップ単位のスケールモデル試験

TRLレベル4に対し、机上検討した主な作業ステップについて、1/4スケールモデルを使用した要素試験により主要な課題が抽出できたことから達成度に問題ないと考える。以下に本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【要素試験結果】

- 検討した詳細ステップに基づき妥当性を確認した結果、遠隔作業(ケーブル処理や作業監視方法)における課題を抽出することができた。
- 汚染拡大防止用シートは、遠隔作業における適用の見通しを得た。
- 水充填式遮へい体や炉内装置との組み合わせにより実機適用に向けた課題を抽出することができた。

【主な課題】

- 作業確認方法。遠隔作業の死角がないような照明やカメラの配置とメンテナンス方法。
- 作業が確実に完了しているかどうか(次のステップに移ってよいか)の確認方法。
- ケーブルやホースの処理方法。
- 作業時間の長期化。

【対応方針】

- 最適な照明とカメラの配置方法の検討および移動可能なカメラなどの検討と要素試験の実施。
- 各ステップ完了を確認することが可能なセンサーや目印の活用による作業円滑化の検討および要素試験の実施。
- ケーブルやホースの取り回しや処理方法の検討と要素試験の実施。
- 設置機器の効率化および操作単純化などによる作業効率の向上。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii)RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

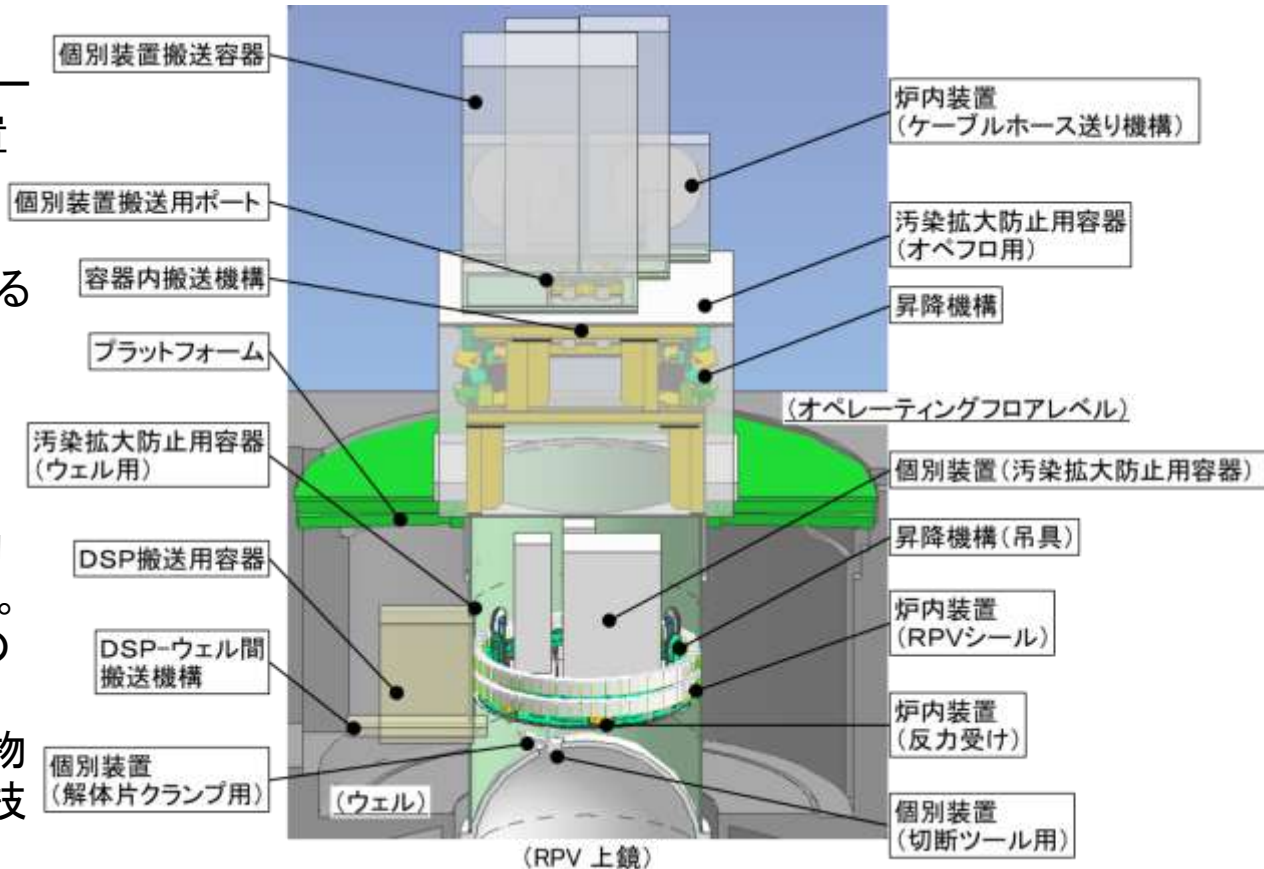
①気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験

【目的:開発目標】

RPV内面シール性能及び装置下部構造部のシール性能に関する、基本的な成立性及び検討課題が確認されていること。(終了時目標TRL:レベル4)

【平成28年度検討内容】

- 部分要素試験において確認したシール性能に基づいた実機大炉内装置の製作とシール試験用模擬RPVの製作。
- 炉内装置および模擬RPV内面による気密、シール試験の実施。
(システム側の機能要求である1次バウンダリ負圧-200Pa維持可能かの確認)
- 炉内装置に設置した加工機の振動がシール性能に与える影響を確認。
- 1/4スケールモデルによる設置性の確認。
(設置性については、i)大型構造物の取り出しにおける汚染拡大防止技術において合わせて報告する)



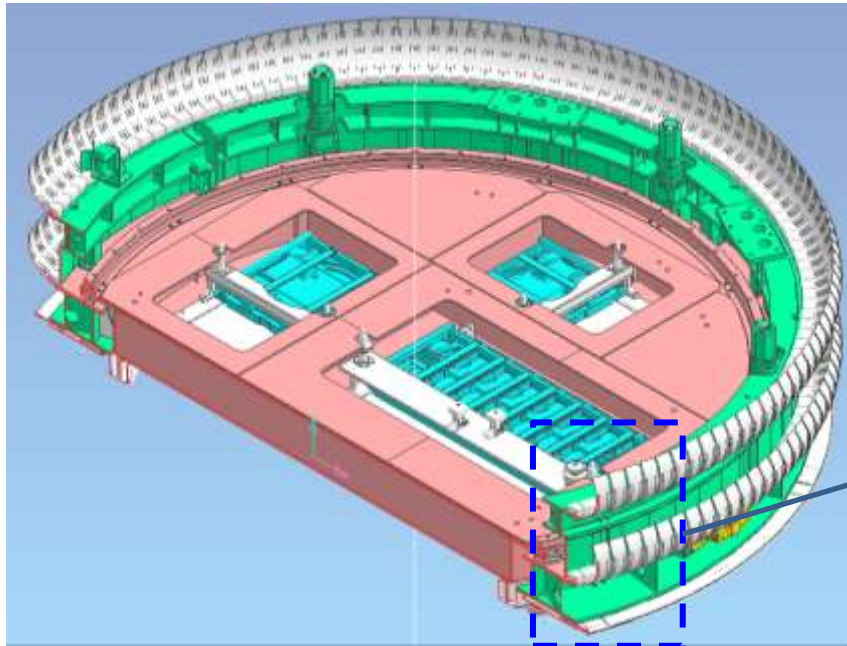
炉内装置全体構成図(案)

3. 本事業の実施状況

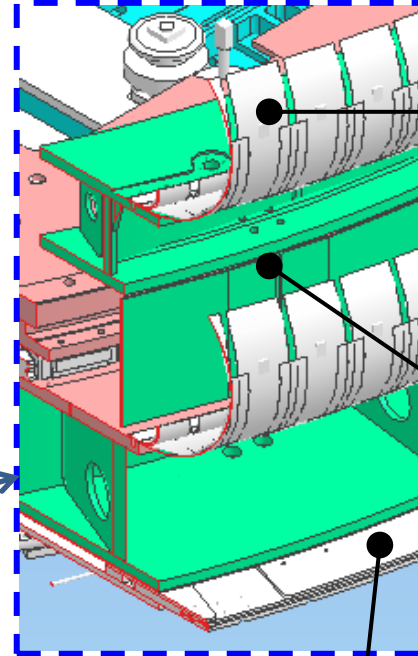
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii)RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

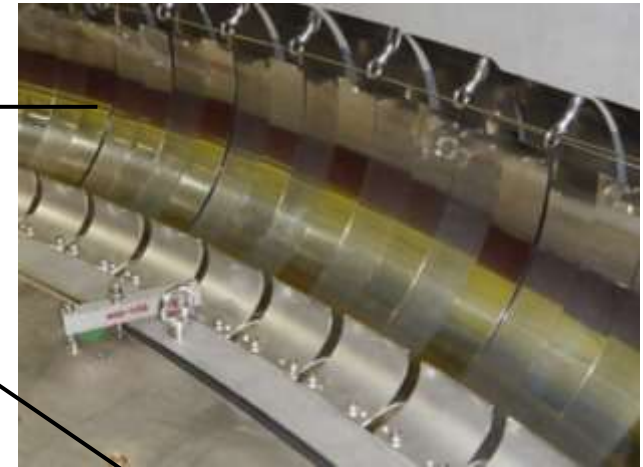
- ①気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験
前年度に要素試験において確認したシール方式を組み合わせることでシール性能の向上を図った。



炉内装置全体(断面図)



シール部拡大



板バネ式シール



ウォーターカーテン



円弧板式シール

【RPV内面シール方式の選定】

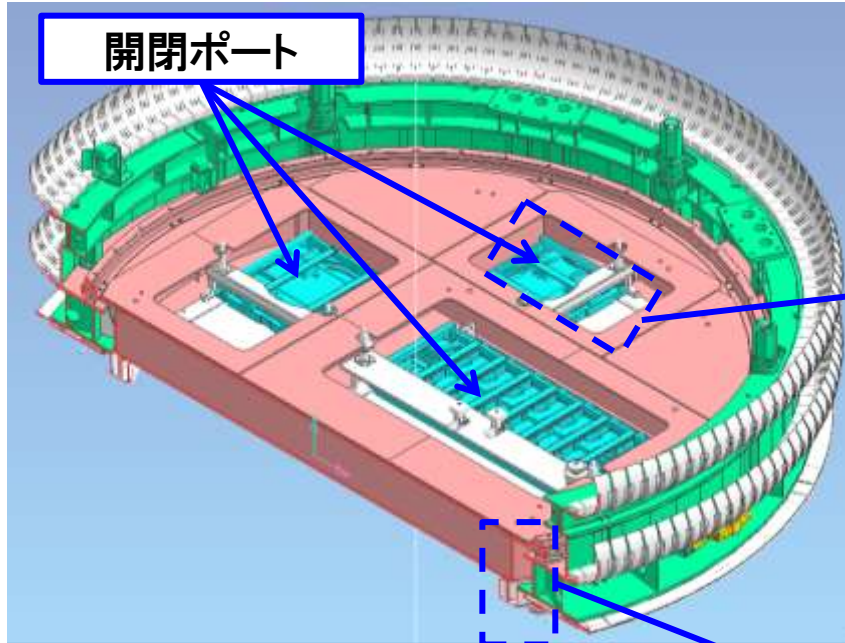
- 前年度に実施したシール性能に関する実機大部分要素試験結果に基づき3つのシール方式を選定した。
- シール方式の組み合わせパターンは、試験パラメータとした。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii)RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

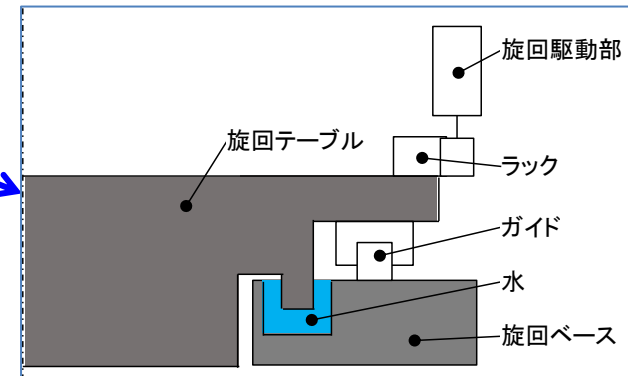
①気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験



炉内装置全体(断面図)



開閉ポート



装置下部(旋回部)シール方式

【開閉ポート、装置下部シールの選定】

- 炉内装置には、加工装置の搬出入や撤去物の搬出を考慮した開閉ポートを設置している。前年度実施したシール性能に関する実機大試験により耐放性を考慮した金属シールを選定した。
- 装置下部(旋回部)は、前年度実施したシール性能に関する試験結果により水シールを選定した。

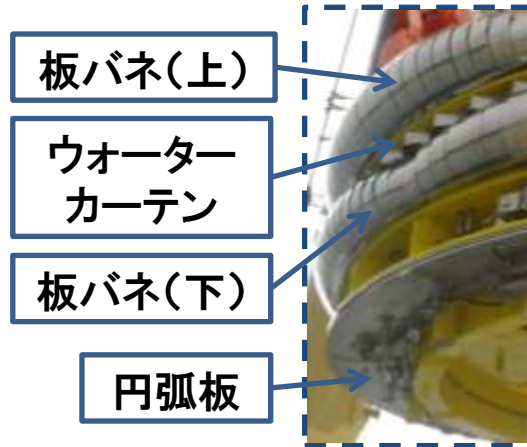
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

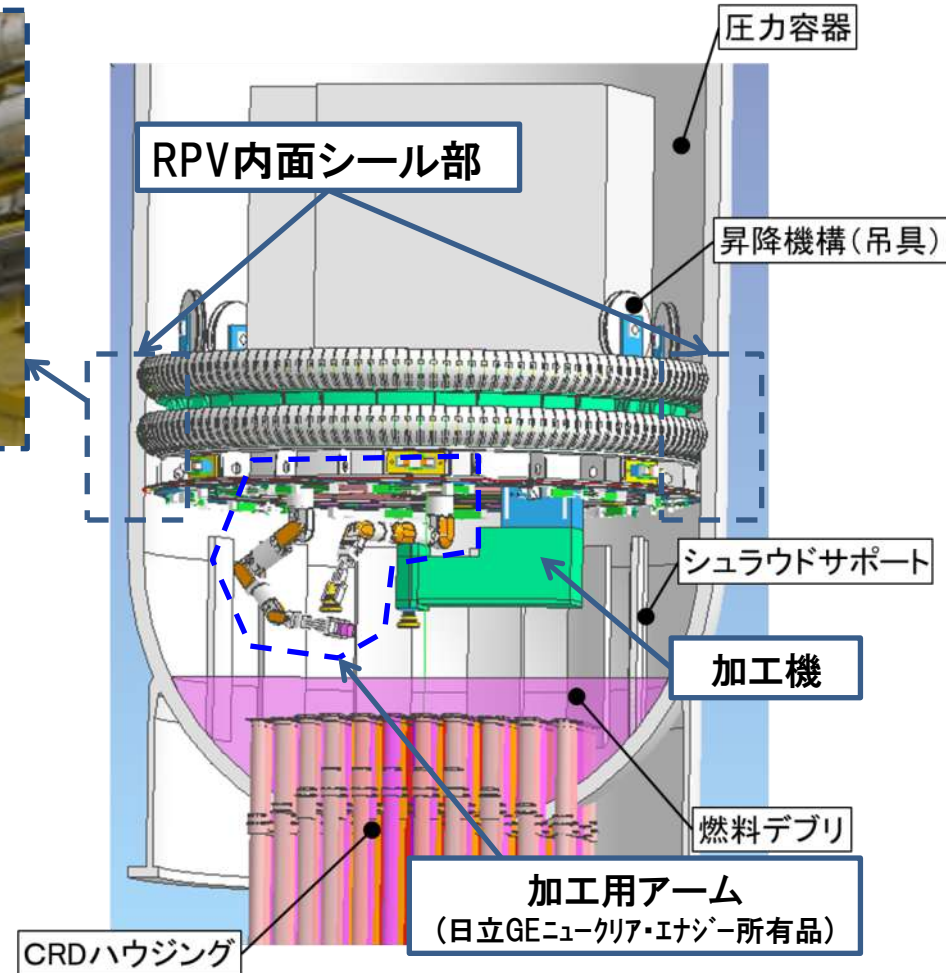
ii) RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

- ① 気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験
前年度実施した要素試験結果から選定したシール方式を備えた炉内装置を製作した。

- RPV内面シール試験は、複数のシール組み合わせによるシール性能を確認した。
- 個別装置(加工機など)を設置する開閉ポートおよび装置下部の旋回に関するシールは、前年度選定したものを適用した。



実機大炉内装置



RPV内面シールイメージ

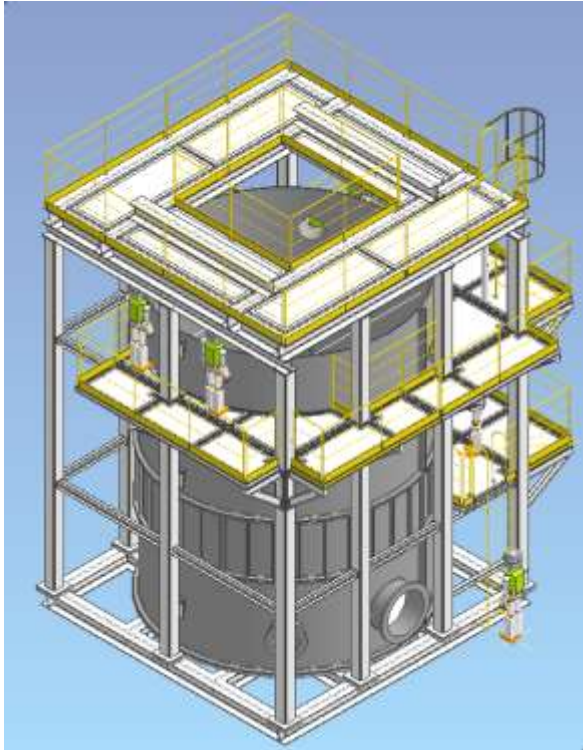
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii) RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

- ① 気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験
RPV内面シールの実現性を確認するために実機大模擬RPV試験設備を製作した。

実機大模擬RPV内面：φ4800mm



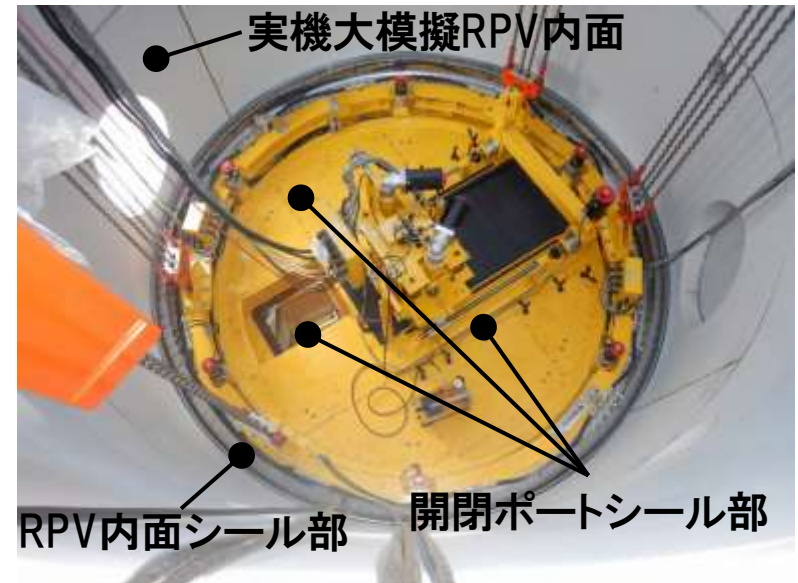
シール性能確認試験
設備イメージ



炉内装置設置時状況

【本試験設備を使用した主な試験項目】

- ▶ 炉内装置を使用した実機大模擬RPV内面の気密およびシール試験の実施。
- ▶ 炉内装置に設置した加工機の振動がシール性能に与える影響の確認。
- ▶ メンテナンス性などに関する課題の抽出。



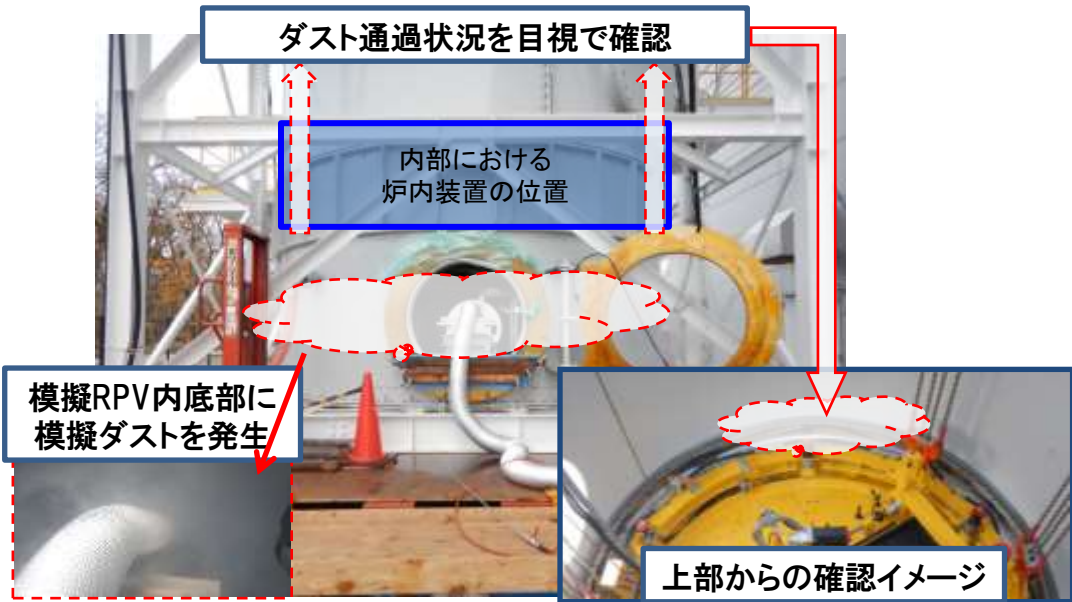
気密およびシール性能確認状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii)RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

①気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験
 RPV内面シールの気密性について試験を実施し、課題を抽出した。



気密性確認試験イメージ

【気密性確認結果】

- 負圧管理システム停止時を考慮した大気圧環境下においても、板バネ(1枚)+ウォーターカーテンでダスト通過をおさえることが可能。(平常時は負圧環境下)
- RPV内の突起物および炉内装置偏心の条件下においてもダスト通過をおさえることが可能。

No.	シール方式				試験条件			試験結果
	円弧板	板ばね (下)	板ばね (上)	ウォーター カーテン	突起物 ※1	偏心 ※2	排気流量 L/min ※3	ダスト通過 度合い ※4
1	○						—	中
2	○					○	—	中
3	○				○		—	やや多
4	○			○			—	少
5	○			○		○	—	少
6	○			○	○		—	やや多
7		○					—	中
8		○				○	—	中
9		○			○		—	少
10		○		○			—	なし
11		○		○		○	—	少
12		○		○	○		—	なし
13		○	○				—	なし
14		○	○			○	—	なし
15		○	○		○		—	少
16		○	○	○			—	少
17		○	○	○		○	—	なし
18		○	○	○	○		—	極少
19	○	○	○	○			—	なし
20	○	○	○	○		○	—	なし

※1: RPV内構造物を想定した突起物。(板厚32mm×幅100mm)
 ※2: 炉内装置の中心を意図的に偏心(50mm)させた条件。
 ※3: 負圧管理システム停止時を考慮し、大気圧環境下で試験を実施。
 ※4: 装置下部の模擬ダストがシール部を通過した状況を目視で確認した結果。

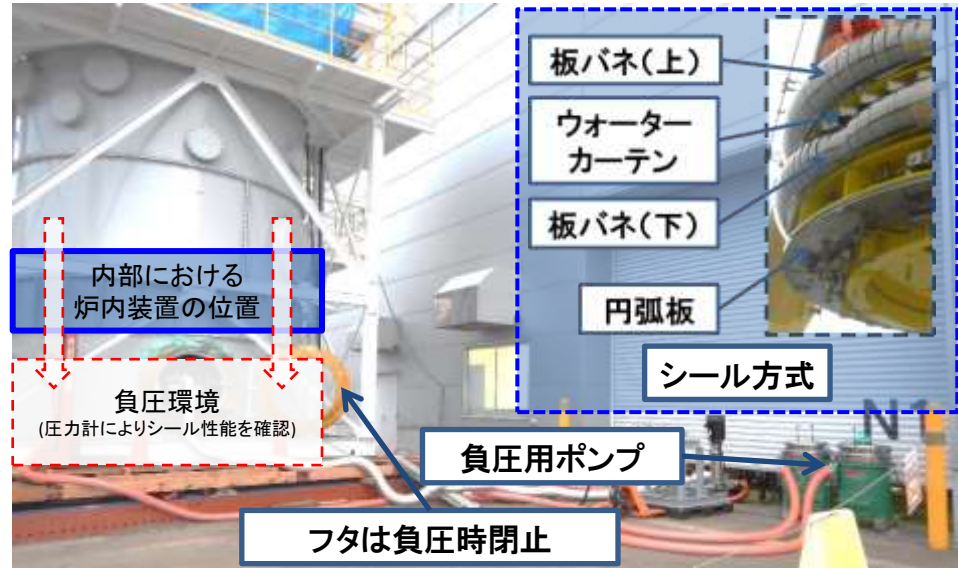
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii)RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

①気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験

RPV内面シールの性能について試験を実施し、課題を抽出した。



シール性能確認試験イメージ

【シール性能確認結果】

- 板バネ(1枚)において、システム側機能要求機能である【-200Pa】を維持することが可能。
- RPV内の突起物および炉内装置偏心の条件下においても負圧環境を維持することが可能。

No.	シール方式				試験条件			試験結果
	円弧板	板ばね(下)	板ばね(上)	ウォーターカーテン 有無	突起物 ※1	偏心 ※2	排気流量 L/min	タンク負圧 Pa
1	○						約20,000	148
2	○					○	約20,000	109
3	○				○		約20,000	48
4	○			○			約20,000	218
5	○			○		○	約20,000	188
6	○			○	○		約20,000	57
7		○					約20,000	838
8		○				○	約20,000	460
9		○			○		約20,000	540
10		○		○			約20,000	1,361
11		○		○		○	約20,000	819
12		○		○	○		約20,000	713
13		○	○				約20,000	709
14		○	○			○	約20,000	523
15		○	○		○		約20,000	389
16		○	○	○			約20,000	1,000
17		○	○	○		○	約20,000	911
18		○	○	○	○		約20,000	490
19	○	○	○	○			約20,000	1,059
20	○	○	○	○		○	約20,000	859

※1: RPV内構造物を想定した突起物。(板厚32mm×幅100mm)

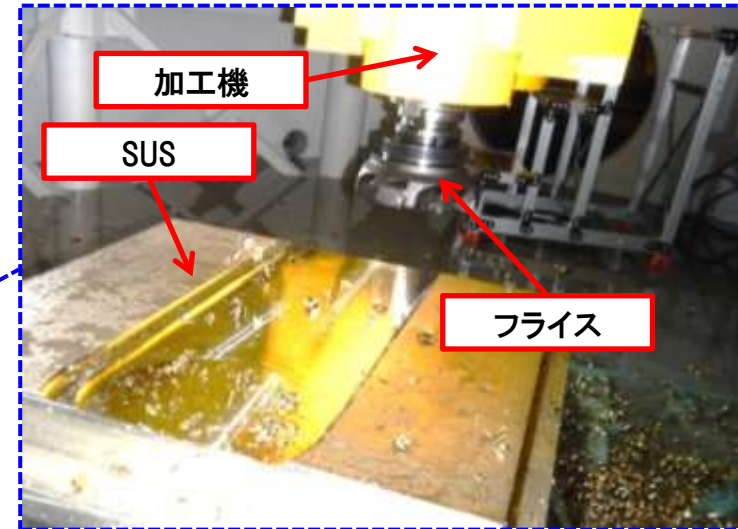
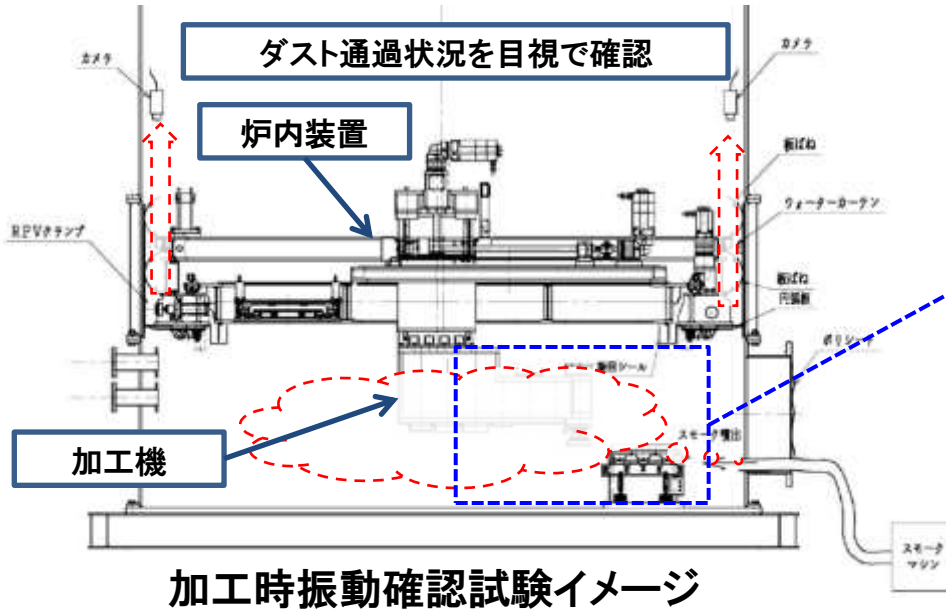
※2: 炉内装置の中心を意図的に偏心させた条件。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii)RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

- ①気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験
RPV内面シールの加工時振動を考慮した気密性について試験を実施し、課題を抽出した。



模擬RPV内 加工機使用状況

【加工時気密性能確認結果】

- フライスによるSUS加工時の振動がある場合においても、円弧板+板バネ(2枚)+ウォーターカーテンにおいて、ダストの上昇をおさえることが可能。(燃料デブリの加工を想定)

【その他の試験確認結果】

- 模擬RPVに設置した突起物(板厚32mm×幅100mm) およびノズル(φ200、φ400、φ1000)があった状態においても板バネありの状態ですり降りし、通過することが可能。
- 開閉ポート用モータを非常回収し交換することが可能。(今回は、手動で交換)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

ii) RPV内燃料デブリの取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 気中一上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置のRPV内面シール及び装置下部シールに関する試験
TRLレベル4に対し、基本的なダスト飛散防止の成立性およびシール性能に対する要求機能【-200Paの維持】が確認できたことから達成度に問題ないと考える。以下に本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【要素試験結果】

- 板バネとウォーターカーテンを使用したシールにより、開閉ポートおよび装置下部シール含めて、システム側の機能要求である1次バウンダリ負圧【-200Pa】を達成可能な見通しを得た。
- 負圧管理システムが停止し、加工時の振動がある場合においても、板バネとウォーターカーテンを使用したシールによりダストの拡散を防止可能な見通しを得た。
- RPV内の干渉物がある場合においても炉内装置の昇降が可能な見通しを得た。
- 開閉ポート用モータを非常回収し交換することが可能。(今回は、手動で交換)

【主な課題】

- 炉内装置に組み込む個別装置(加工機など)について気密化する検討およびカバーでおおうなどの対策が必要。
- 炉内装置そのものの遮へい効果プラス水遮へいを考慮するために、個別装置の防水および炉内装置のある程度の水密の検討が必要。
- 遠隔による炉内装置の操作(カメラ配置など)および遠隔による非常回収とメンテナンスの検討が必要。

【対応方針】

- 個別装置の気密化および炉内装置水遮へいの具体化と要素試験。
- 遠隔作業による操作やメンテナンスの具体化と要素試験。
- 炉内装置に組み込む加工機やマニピュレータにより、炉底部やCRDハウジングなどの撤去方法を具体化するとともに要素試験を実施する。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

① 液圧マニピュレータに関する試験

【目的: 開発目標】

燃料デブリ取り出し用マニピュレータの設計に資する位置制御性に関する基本的な成り立ち及び検討課題が確認されていること。(終了時目標TRL: レベル3)

【試験内容】

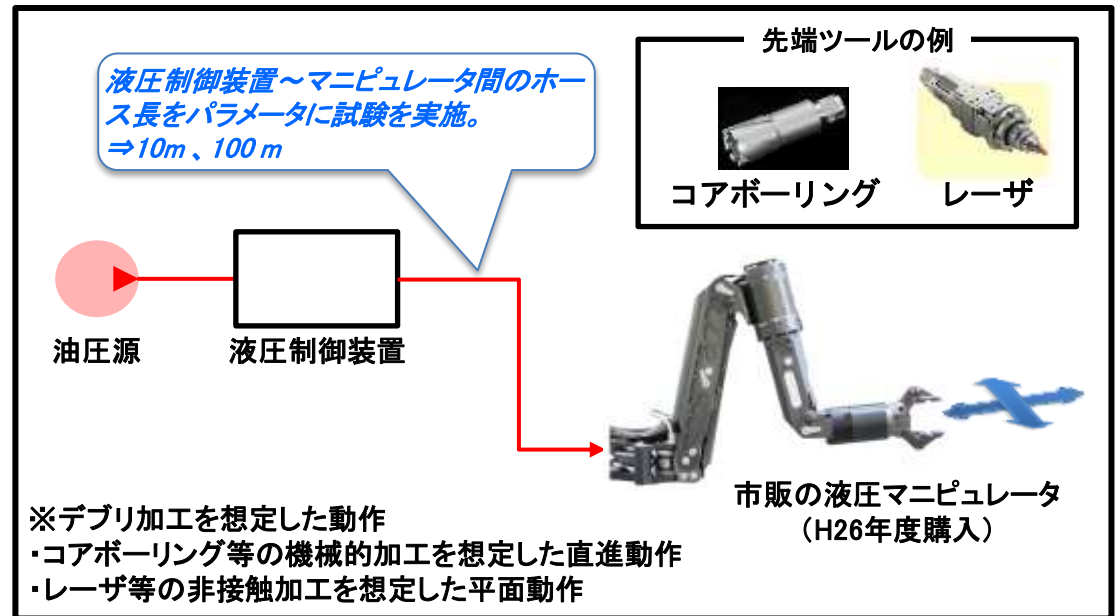
市販の液圧マニピュレータを用いて、下方向(直進)と横方向(平面)の2パターンの動作試験を実施し、位置決め精度、軌跡精度を確認する。

<試験条件>

- ① ホース長 10m、100m
- ② 先端負荷 15kg
- ③ 先端移動速度 2mm/秒程度

<位置制御性>

- ① 目標位置決め精度: $\pm 2\text{mm}$



3. 本事業の実施状況

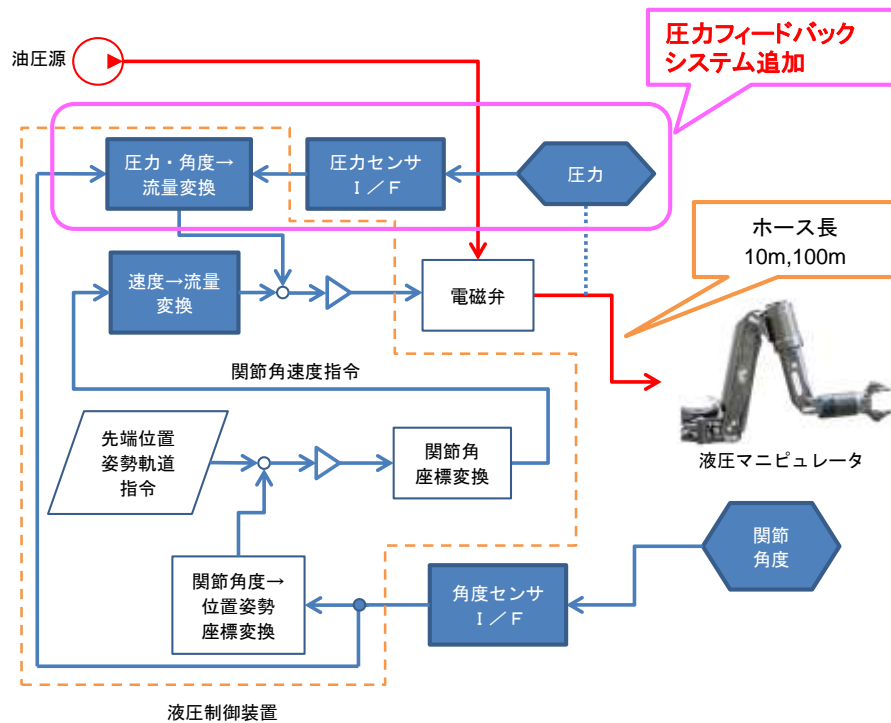
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

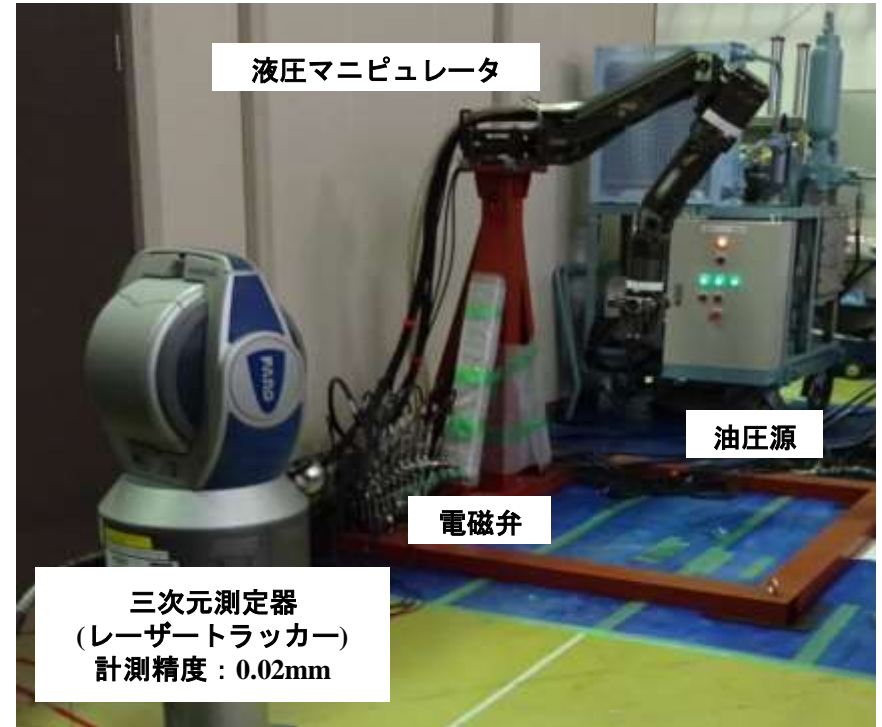
① 液圧マニピュレータに関する試験

【平成28年度検討状況】

圧力フィードバックシステムを追加し、制御特性確認試験を実施。



システム系統



制御特性確認試験状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

① 液圧マニピュレータに関する試験

制御特性確認結果 試験結果

試験条件			動作方向	計測内容	目標精度 [mm]	試験結果	
ホース長 [m]	先端速度 [mm/s]	先端負荷 [kg]				H26年度 [mm]	H27-28年度 [mm]
10	2	15	下(直進)	繰返し位置 決め精度	±2	±2	±1
10	2	15	横(平面)	繰返し位置 決め精度	±2	±4.5	±4
100	2	—	下(直進)	繰返し位置 決め精度	±2	±3(※)	±1.5
100	2	—	横(平面)	繰返し位置 決め精度	±2	±6(※)	±5

※ハンチング中のオーバーシュート部で計測

成果

- 圧カフィードバックシステムの追加により、繰返し位置決め精度が向上したことを確認。また、ホース長100m時においてハンチングしないことを確認。
 - 精度向上のためには高性能センサが必要であることから、ペDESTAL内アクセス装置のロボットアームには、高分解能を有する角度センサを採用し、同制御ロジックにて動作させた結果、繰返し位置決め精度は目標を達成することを確認。
- ⇒ ロボットアームの設計に資する位置制御性に関する成立性を確認できたため、目標TRL:レベル3は達成。

課題

- 液圧ホース長による制御性の低下

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

② 冠水-上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験

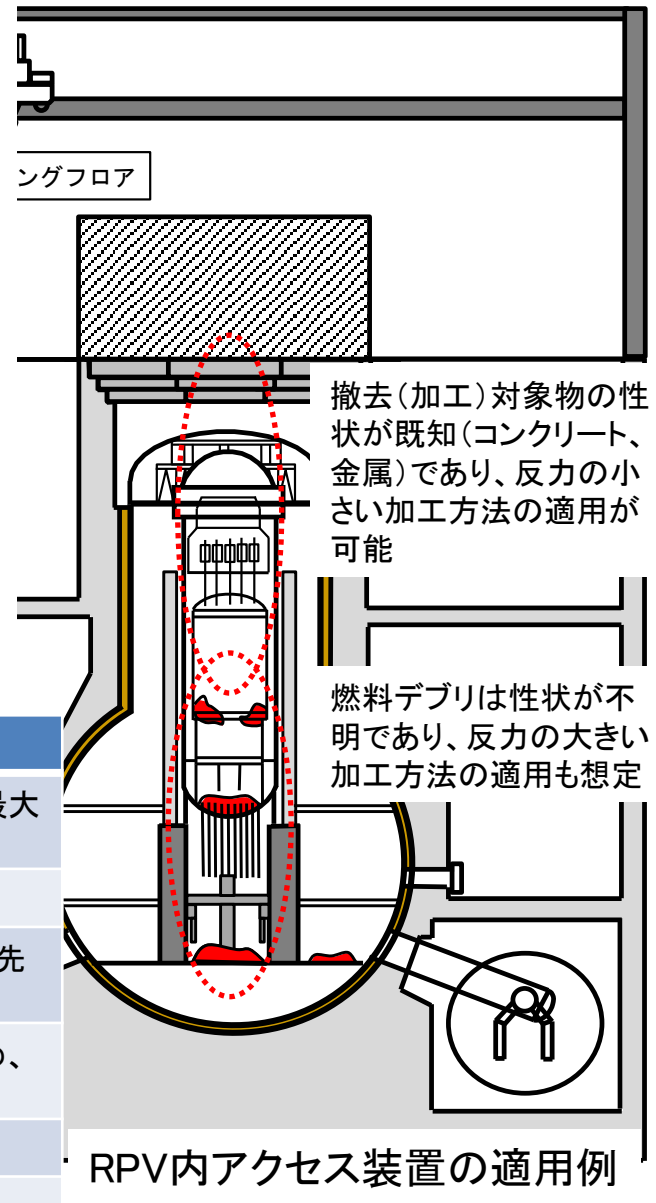
【目的: 開発目標】

RPV内アクセス装置の基本設計が完了し、部分試作、またはスケールモデル試験で成立性を検証する方式が選定されていること。部分試作、またはスケールモデル試験が行われ、装置を成立させるための課題とリスクの抽出・整理がされ、対応方針が検討されていること。(終了時目標TRL: レベル4)

【平成28年度検討内容】

- RPV内アクセス装置について、反力保持機構と反力保持装置システムの要素試験を実施し、課題とリスクの抽出・整理を行い、対応方針を検討した。

要求機能	方式	評価
燃料デブリにアクセス (上下)	ワイヤ吊下げ	従来技術、実績(チェルノブイリのモバイルプラットフォームは最大揚程90m)がある。
	テレスコマスト	原子炉解体等で揚程15m程度まで実績あり。
作業中の位置決め(時間、精度) (上下/水平)	ワイヤ吊下げ+反力保持機構	反力保持機構で位置決め、反力支持。反力保持の方式、相手先の状態等により性能が変わるため、 試験でデータを取得
	ワイヤ吊下げ+張力支持	既存技術。アクセスルートが小さいと支持反力が小さくなるため、反力の小さい加工方法との組合せが必要。
反力支持 (上下/水平)	テレスコマスト	既存技術。反力の小さい加工方法との組合せが必要。
	テレスコマスト+反力支持機構	テレスコマストは既存技術。反力支持機構については上と共通。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

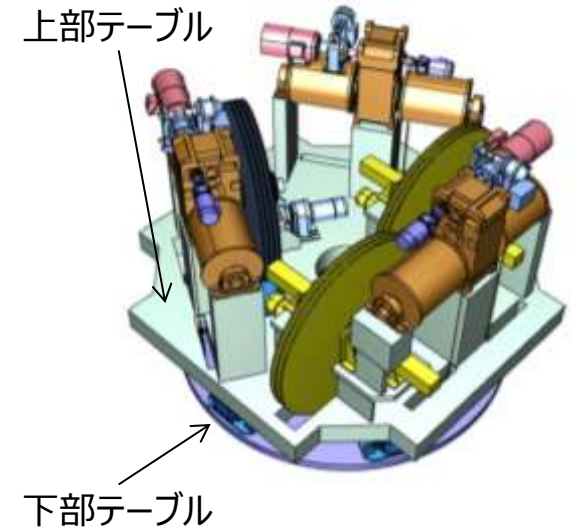
② 冠水-上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験

【RPV内アクセス装置(案)の概要】(右図参照)

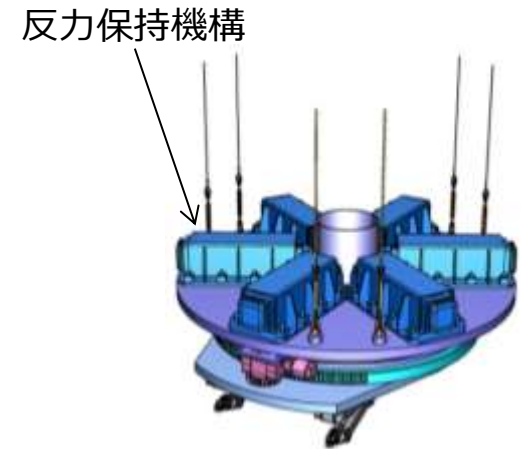
- 上部テーブルはオペフロのセル内に固定・支持
- 下部テーブルの最大揚程は40mとし、上部テーブルからワイヤで吊下げ
- 下部テーブルはφ3000mmの開口を通過できる大きさ
- 下部テーブルに反力保持機構を配置(反力保持装置システム)

【要素試験の概要】

- 反力保持装置システムによる位置決め・反力保持性能を把握するために、1/4スケール組合せ試験体を試作・試験。
- 揚程は約40m模擬で固定。比較のために約20m模擬でも試験を実施。
- 反力保持機構の配置は、水平6方位と3方位×上下2段を比較。
- 反力保持機構の張出し先の状態が未知であることを考慮。
(部分変形、張出し先の圧碎模擬等)
- 反力保持機構の1/1スケール単体試験体でアクチュエータとしての特性を把握。
→1/1スケール反力保持装置システムの設計に反映。



RPV内アクセス装置概念図



下部テーブル概念図

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

② 冠水-上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験

位置決め／反力保持機構の1/1スケール単体試験

■ 1/1スケール試験により、反力保持機構の特性を把握した。

➤ 電動

- ✓ シリンダ伸長速度-発生トルクをパラメータに、発生押付力の特性、制御(位置決め)性を把握

➤ 油圧

- ✓ 流量-圧力をパラメータに、発生押付力の特性、制御(位置決め)性を把握

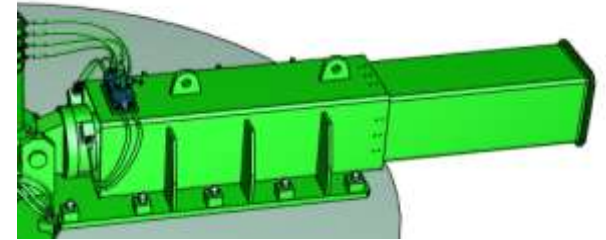
■ 試験項目

➤ 反力保持力発生性能

- ✓ パラメータと発生押付力の関係
- ✓ 押付力の安定性(ばらつき)
- ✓ 押付力の経時変化

➤ 制御性

- ✓ 位置決め精度
- ✓ 停止指示後のオーバーシュート量



実機での反力保持機構イメージ



油圧駆動機構試験装置



電動駆動機構試験装置

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

② 冠水-上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験

反力保持装置システムの1/4スケールモデル試験

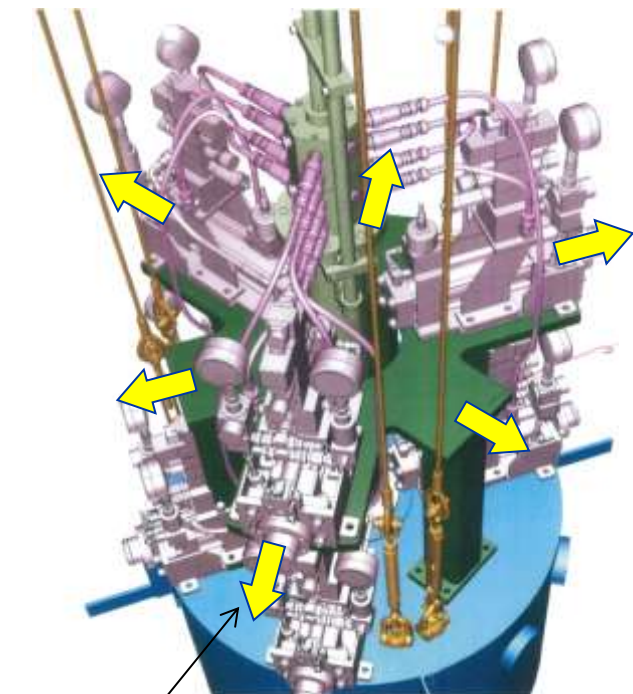
■ 1/4スケール試験により、反力保持装置システムのコンセプトの基本的な成立性を確認

- 反力保持装置システムによる固定・位置決め・作業反力保持
- 実機設計のためのデータ収集、最適オペレーション検討

■ 試験項目

- 固定確認試験
 - ✓ 下部テーブル吊下げ後の揺れ状態から反力保持装置システムによる固定
- 位置決め試験
 - ✓ 固定位置から任意の位置への反力保持装置システムによる移動・位置決め
- 反力保持試験
 - ✓ 固定時・負荷時の荷重(張出し先の負荷)状況把握
- 異常時の耐性・対応試験
 - ✓ RPV内が変形した状態での固定・位置決め
 - ✓ 炉内構造物の圧碎時の下部テーブルの挙動

➡ : 反力保持機構の展開方向



反力保持機構 (6方位×2段に配置可能)

要素試験体の外形図

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

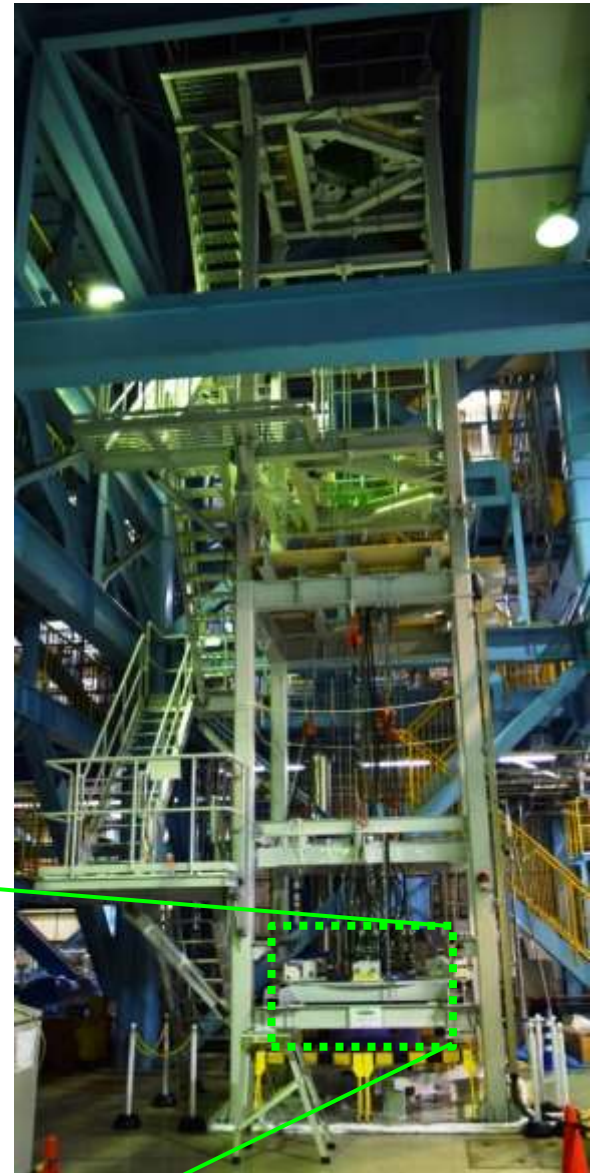
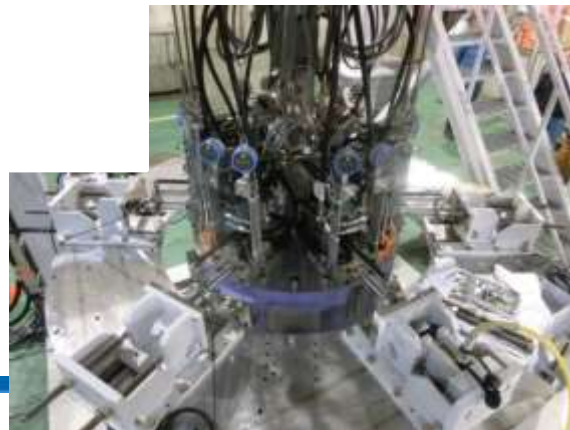
iii) 燃料デブリへのアクセス技術

② 冠水-上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験

反力保持装置システムの1/4スケールモデル試験

■ 以下をパラメータとして固定性能、位置決め性能、反力保持性能のデータを取得。

- 駆動・展開方式: 液圧・直動で固定
 - ✓ ポンプ: 圧力・流量
- 反力保持機構本数: 最大6本を6方位×1、上下2段に配置
- 負荷荷重: 最大30kN相当
- 反力方向: 水平／工具反力方向
- 張出し部(反力保持機構先端)の形状: 平板／球形
- 張出し先(支持部)の状態: 垂直、曲面(炉内壁形状)、平板
- 固定開始位置: (炉に対して)中心、偏芯、部分的な変形模擬
- 異常模擬: 張り出し先(支持部)の反力調整、圧砕
- 吊り長: 5[m]/10[m]
- 重量: 3.8[t]/1.9[t]



要素試験体の外観

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

② 冠水-上アクセス工法におけるRPV内アクセス装置に関する試験

【結果】

RPV内アクセス装置の試験体を製作し、位置決め性・反力保持性の確認試験を行って、その性能を確認するとともに、コンセプトの基本的な成立性を確認した。終了時目標のTRLレベル4を達成したと考える。以下に、本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【まとめ】

- RPV内アクセス装置の下部テーブル(反力保持装置システム)の基本設計を行い、反力保持機構の1/1スケール試験体と、反力保持装置システムの1/4スケール試験体を製作した。
- 要求機能である固定・位置決め・反力保持について、要素試験によりその成立性を確認した。機械的切断を想定した30kN相当の静的荷重に対して、下部テーブルを保持できる見通しを得た。
- 反力保持機構の支持部の異常(張出し時に圧砕、張出し後に変形)を模擬した場合でも、下部テーブルが大きく変動することなく保持できることを確認した。

【課題と対応方針】

- 昇降、地震等、反力保持装置システムを作動していない状態で装置が振れた時の周辺構造物、ユニット缶等との干渉対策。
→ワイヤを鉛直ではなく角度を持たせて自然な揺れに対して保持
- 具体的な作業(燃料デブリの調査、中性子吸収材の施工、飛散防止対策、燃料デブリの加工、燃料デブリの回収等)に対する実寸大機構の成立性の確認と、全体システムでの固定・位置決め性・反力保持性の確認と、一連の作業時間の検証。(作業効率・期間に影響)
→作業内容を想定し、部分モックアップ試験を実施

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験

【目的:開発目標】

実機ベースのプロト機の設計に資するペDESTAL内アクセス装置に関する基本的な成立性及び検討課題が確認されていること。(終了時目標TRL:レベル4)

<試験計画>

➤ ロボットアーム

① 非常脱出性確認

アクチュエータを2重化し、片方が機能喪失した場合の姿勢変更成立性を確認

② 位置決め精度確認

先端ツールの位置決め性確認

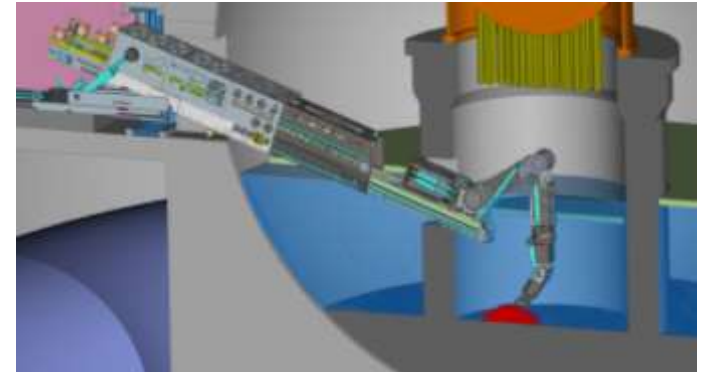
③ 燃料デブリ掘削模擬動作確認

tonオーダー付加時の挙動を確認

➤ アクセスレール

① 遠隔敷設性確認(ペDESTAL内へのアクセス性確認)

カメラ画像による遠隔敷設性を確認



<ロボットアーム仕様>

① 先端負荷: 2,000kg

(径60mm程度のコアボーリングを想定)

② アーム長: 7,100mm

(RPV底部からペDESTAL底面下1.5mまでのアクセスを想定)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験

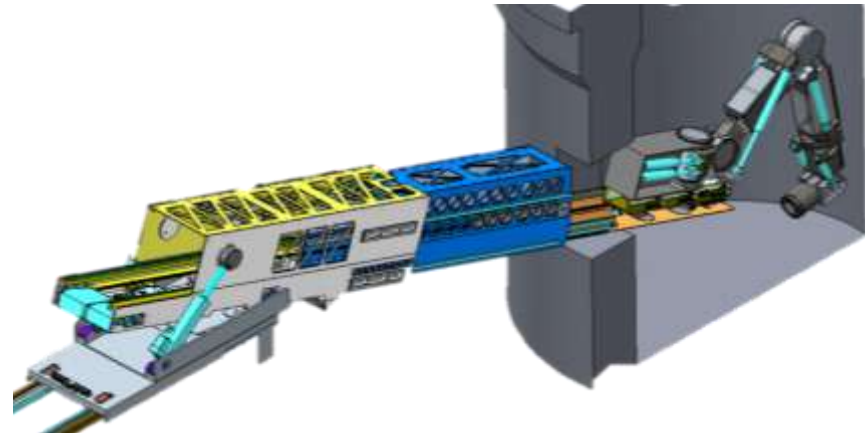
【開発方針】

- (1) 位置、形状、掘削手段が不確定な燃料デブリに対し、加工装置(先端ツール)を任意の姿勢でアクセスさせるため、多軸アーム方式を選定。
- (2) アームはペDESTALのCRD交換用開口にてアクセスするものとし小型・高出力となる油圧駆動を採用。
- (3) ペDESTAL内にアクセスさせる方法として、PCV側面からCRD交換用開口にレールを敷設する方式を選定。

【開発計画】

ロボットアーム、長尺アクセスレールは難易度が高いため、試作を行ない以下の検証を実施。

- (1) ロボットアーム
 - 全体の構成確認
 - 位置決め精度確認
 - ・ 油圧制御システム開発
(制御システムの大阪大学と共同実施)
- (2) アクセスレール
 - 遠隔敷設性の確認



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験

【試作機仕様/機能】

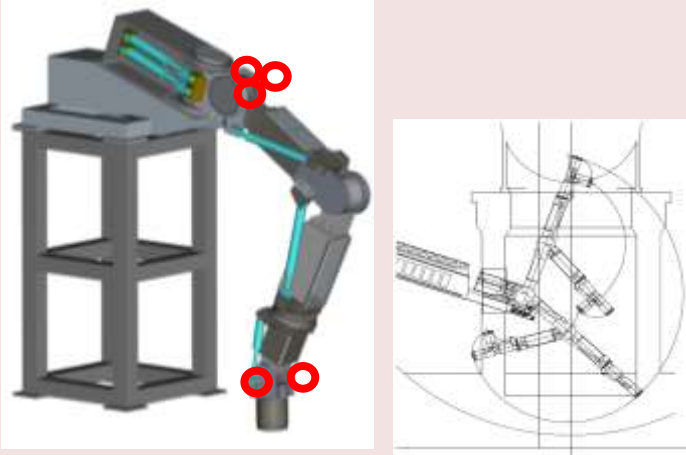
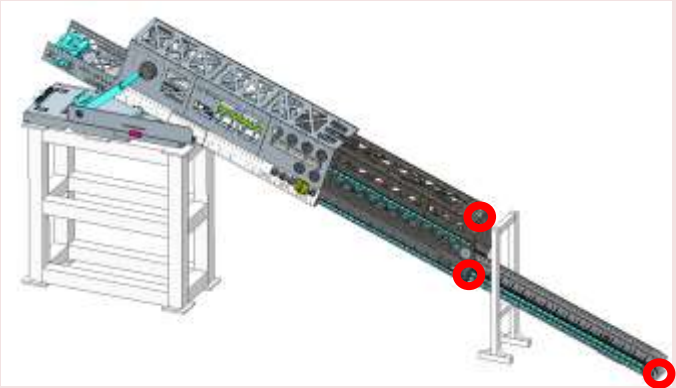
<ロボットアーム仕様>

- ① 先端負荷: 2,000kg
(径60mm程度のコアボーリングを想定)
- ② アーム長: 7,100mm
(RPV底部からペDESTAL底面下1.5mまでのアクセスを想定)
- ③ 多軸: 6軸 (先端ツール位置決めより選定)

<アクセスレール機能>

- ① ロボットアームのペDESTAL内案内
(ペDESTAL中央までの案内を想定)
- ② ユニット缶の、セル⇄ペDESTAL内移動

○ カメラ設置予定位置

	ロボットアーム	アクセスレール
図		
寸法 重量	幅700×アーム長7,100×高さ920mm 質量 : 約3.5ton	幅1,900×長さ8,000(縮時)×高さ2,500mm 長さ17,000(伸時) 質量 : 約14.5ton

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験



<ロボットアーム試験>

- ① 非常脱出性確認
- ② 位置決め精度確認
- ③ 燃料デブリ掘削模擬動作確認

<アクセスレール試験>

- ① 遠隔敷設性確認
- ② 強度確認




3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験






項目	試験結果	試験状況(写真)	
1. 作業性確認	作業性問題無し		
2. 作動確認 (1) 動作範囲確認 (2) 速度確認	(1) ペDESTAL内全域へのアクセス問題なし (2) 移動時50mm/sec、位置決め時2mm/secでの作動問題なし		
3. 強度確認	ウエイト500kg搭載状態でたわみ量16mm → ほぼ解析どおりの値であり、問題なし		
4. 非常脱出性確認	駆動源喪失時に搬出姿勢(左記の無負荷水平姿勢)へ変更可能	 <p style="text-align: center;">無負荷水平状況</p>	
5. 制御パラメータ調整 6. 位置決め精度確認	ゲイン調整終了 位置決め精度約±5mm		
7. 掘削模擬動作確認	下向き2tonの押付で装置挙動に問題なし		

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験

項目	試験結果	試験状況(写真)	
1. 作動確認 (1) 伸縮 (2) 旋回 (3) 傾斜 (4) 固定	作動問題無し	 <p>収縮時</p>	 <p>伸展時</p>
2. 強度確認	ペDESTALでの支えなし状態で強度確認実施 ↓ ・たわみがほぼ解析値と一致、弾性範囲内であることを確認 ・実工事のペDESTALで支えた状態では、たわみ15mmと想定	 <p>ウェイト搭載状況</p>	
3. 遠隔敷設性 確認	カメラ画像による遠隔敷設に問題なし	 <p>模擬ペDESTAL通過状態</p>	 <p>模擬ペDESTAL設置状態</p>

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iii) 燃料デブリへのアクセス技術

③ 気中一横アクセス工法におけるペDESTAL内アクセス装置に関する試験

2016年度 成果と課題

- 実寸大で試作したことにより、装置の必要機能の成立性、設計の妥当性を確認。
- 今後はデータを基にした内挿による設計検討が可能。(アームの小型化や全体の小型化)
- 次年度以降は、ロボットアームは更なる制御性向上を図り、アクセスレールはロボットアーム(模擬)の搬入出性を確認する。

【成果】

<ロボットアーム>

- (1) 下記条件を満足する装置の成立性
 - ① 先端負荷2,000kg、精度10mm(目標)
 - ② ペDESTAL床面下1.5mまでのアクセス
 - ③ ペDESTAL内へアクセス可能な寸法、質量
- (2) 押付反力2,000kg時の装置強度への影響(撓み等)
- (3) 非常脱出(駆動源喪失時の搬出姿勢への変更)可否
(駆動源の2重化等)
- (4) 装置内のケーブル処理可否
(各種先端ツールのケーブルを装置内に収納)

<アクセスレール>

- (1) ペDESTAL内への遠隔敷設性
(カメラ画像による敷設可否)
- (2) ロボットアーム質量の装置強度への影響(撓み等)

【課題】

<共通>

- (1) メンテナンス方針検討
 - ・メンテナンス方法の具体化
 - ・カメラ、先端ツール遠隔交換方法
 - (2) 小型・軽量化
- ##### <ロボットアーム>
- (1) 搬入出時のケーブル処理
(セルからの駆動・制御ケーブル)
 - (2) 先端ツールによる振動等の影響

<アクセスレール>

- (1) ペDESTAL内へのロボットアーム搬入出実証
- (2) デブリ掘削反力、振動の強度への影響(撓み等)
- (3) 非常脱出可否
(縮動作、水平姿勢への変更)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【目的:開発目標】

気中一横アクセス工法を念頭に、遠隔作業用柔構造アームを応用した装置のアクセス性、遠隔作業の操作性およびハンドリングといった作業性が確認されており、基本的な成立性及び検討課題が確認されていること。(終了時目標TRL:レベル4)

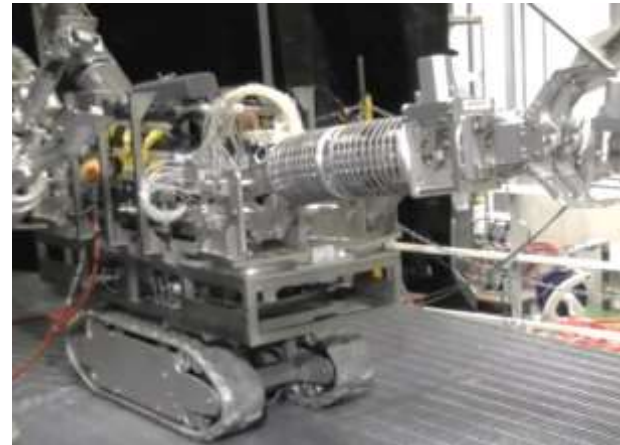
【平成28年度検討内容】

➤ 気中一横取り出しを想定した要素試験を実施し、燃料デブリ取り出しおよび機器撤去について検討している工法への適用性を確認した。



試作機 タイプ I
寸法:全長4350mm
幅630mm
高さ1000mm
重量:約700kg

想定作業
重量物の取り扱い、
前後腕間での受け渡
し作業、組み立て、解
体など



試作機 タイプ I
クローラに変更した場合

想定作業
重量物の取り扱い、
前後腕間での受け渡
し作業、組み立て、解
体など

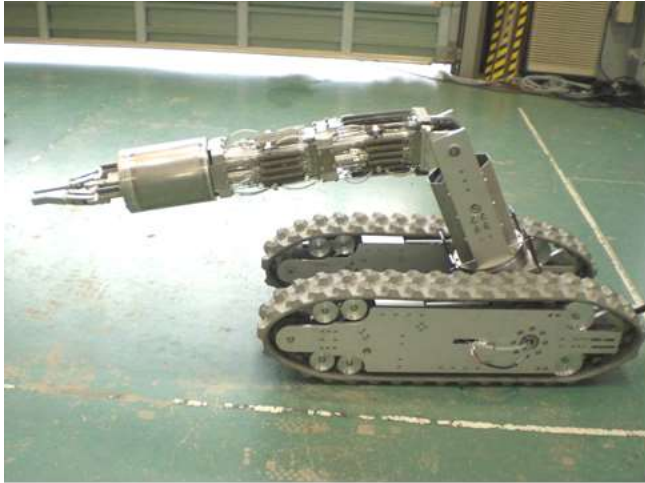
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

作業項目および必要機能に応じた複数の柔構造アームを備えたロボットを開発した。



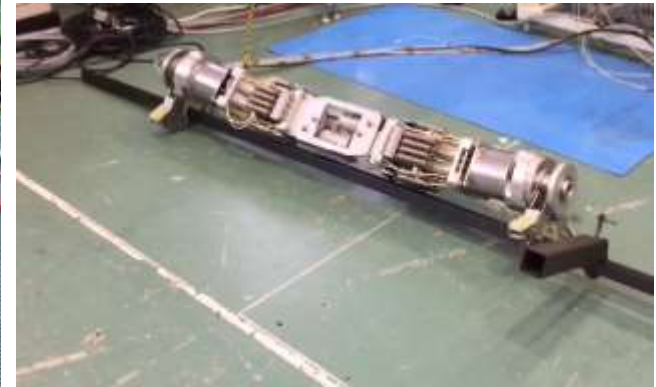
試作機 タイプII
 寸法: 全長2750mm
 幅590mm
 高さ350mm(胴部)
 重量: 約230kg

想定作業
 カメラ設置などの環境整備、試作機タイプIの補助、ケーブルの取り扱いなど



試作機 タイプII
 双腕型

想定作業
 組み立て、解体など



試作機 タイプIII
 寸法: 全長1635mm
 幅430mm
 高さ185mm(胴部)
 重量: 約70kg

想定作業
 狭隘部進入、ウインチとの連携による吊降ろし、「しがみつき」による昇り降り、長尺物吊り上げ

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験



試作機 タイプⅣ
 寸法: 全長2000mm
 幅2800mm
 高さ325mm(胴部)
 重量: 約70kg

想定作業
 人代替作業、狭隘部、
 ぶら下がり移動など



試作機 タイプⅤ
 寸法: 全長1710mm
 幅370mm
 高さ185mm(胴部)
 重量: 約70kg

想定作業
 他ロボットのケーブル整
 線、狭隘箇所での作業

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

気中-横アクセス工法への遠隔作業用柔構造アーム(筋肉ロボット)適用実現性を確認するために試験計画を策定し、試験結果から課題を抽出した。

No.	項目	目的・内容	試験結果概要	主な課題
1	グレーチング切断・取り外し 使用試作機 タイプ I (クローラタイプ)	地下階へアクセスするために、1階グレーチングに開口を設ける。	<ul style="list-style-type: none"> グレーチング切断治具を使用して□500mmの開口を設置することが可能な見通しを得た。 切断したグレーチングをつかんで持ち上げることが可能な見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> グレーチング切断治具の切断位置微調整およびケーブル処理などは、人為作業の補助を必要としたため、完全遠隔化が課題。
2	干渉物切断・解体 使用試作機 タイプ II (双腕型)	機器ハッチからPCV内に進入したロボットがX-6ペネCRDレールに到達するときに障害となる干渉物を切断・解体する。	<ul style="list-style-type: none"> CRDレール到達までに障害となるHVHを模擬し切断試験を実施。 HVHに対し、切断工具による切断試験を行い切断可能な見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> 切断→撤去→搬出までの一連動作における確認。 ロボット側の操作が複雑になるため、切断工具の改良を含めた操作の単純化が必要。 切断工具を撤去物に対し直角に当てるためのカメラによる監視方法。
3	ガレキ拾い、運搬、回収 使用試作機 タイプ II タイプ V	ロボット走行の障害となりうるガレキの撤去を想定し、ロボットでハンドリングできるか確認する。	<ul style="list-style-type: none"> 準備作業となるPCV内への据え置き照明とカメラの設置について、遠隔作業で実施可能な見通しを得た。 PCV内を模擬した暗闇環境において、カメラ画像のみによる操作と、ガレキ拾い、ケーブル切断、運搬、回収が可能な見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> カメラの死角などにより、ロボットのケーブル処理が困難な場合の対処方法。
4	簡易クレーン組み立て 使用試作機 タイプ I (クローラタイプ)	地下階へアクセスするためのクレーンを組み立てる。クレーンは、分割して運搬することを想定する。	<ul style="list-style-type: none"> 分割したクレーンの部品を運搬することが可能な見通しを得た。 分割したクレーンの部品を組み立てることが可能な見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> 部品の設置は可能であったが、位置の微調整は困難であった。(人為作業にて補助) クレーンの固定強化。(現状は、プレートのおもりのみ)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

気中-横アクセス工法への遠隔作業用柔構造アーム(筋肉ロボット)適用実現性を確認するために試験計画を策定し、試験結果から課題を抽出した。

No.	項目	目的・内容	試験結果概要	主な課題
5	機器の吊降ろし 使用試作機 タイプⅠ(クローラタイプ) タイプⅢ	簡易クレーンを使用して地下階へロボットや機器を吊下す。また、地下階からの搬出物を吊り上げる。	• ロボットが、簡易クレーンにより地下階においてガレキを回収し、戻るといった一連の動作が可能な見通しを得た。	• カメラによる監視方法改善。(死角を減少させる) • ロボット作業性の向上。
6	ツール交換 使用試作機 タイプⅡ	解体作業や組み立て作業に必要なツールを手先で交換する。	• カメラ画像による遠隔作業においてツールを交換し、作業することが可能な見通しを得た。	• ツールの電源コードの処理方法。 • 持ちやすいツール取手の検討。
7	遠隔ケーブル接続 使用試作機 タイプⅣ	PCV内で遠隔にてケーブルやホースを接続する。バッテリー交換なども想定する。	• 電源コネクタの遠隔接続について実現可能な見通しを得た。 • 遠隔作業における、カプラ接続試験により課題を抽出した。	• ロボット作業性の向上。
8	視野確保 使用試作機 —	暗闇環境におけるカメラや照明の設置作業が可能か確認する。	• No.3のガレキ撤去準備に関するカメラ設置作業とあわせて、作業性の観点から、PCV内の照明およびカメラの配置計画案を策定した。	• 照明の向きによる視認性の影響。 • ケーブルの処理方法。
9	アクセス性確認 使用試作機 タイプⅡ	不整地移動、狭隘部進入、よじ登りなど、地下階(ペDESTアル内、外)のデブリへアクセスするための移動性を確認する。	• 遠隔操作により、カメラ画像を確認しながら移動することが可能な見通しを得た。	• ケーブルの処理方法。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【グレーチング切断・取り外し試験状況と結果】

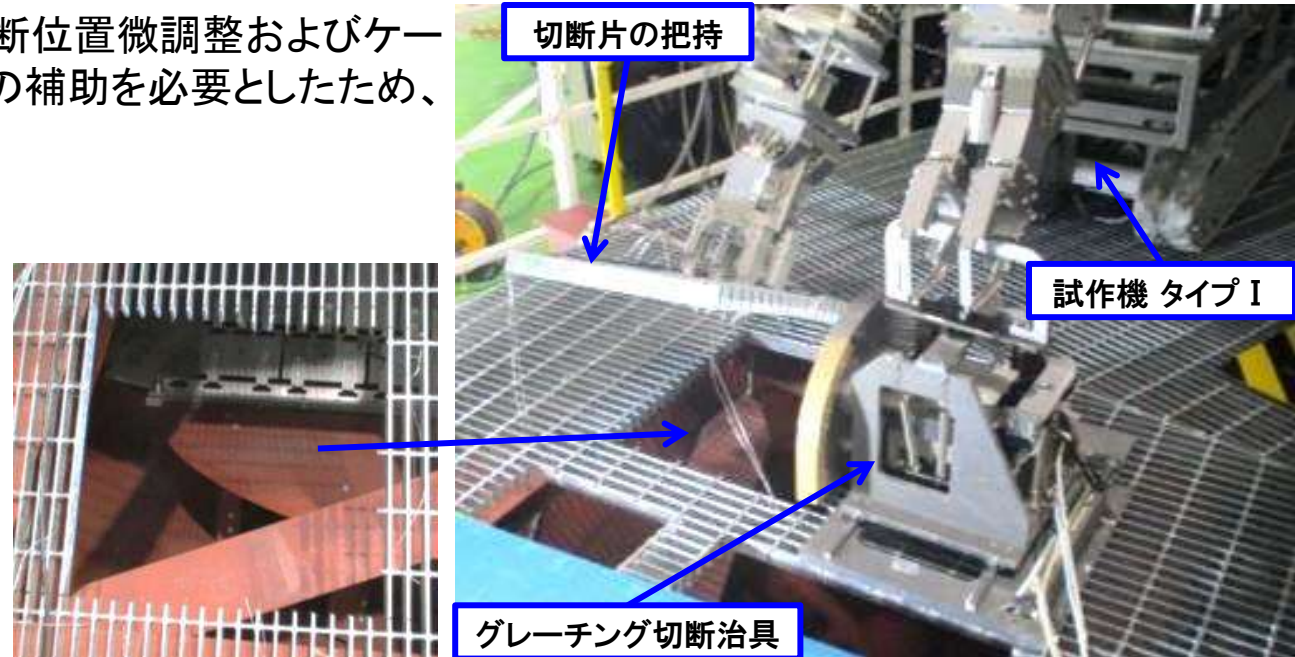
- 地下階にアクセスするために必要となる開口を設置するため、グレーチング切断試験を実施した。
- 試験は、試作機 タイプ I (クローラタイプ)により実施した。
- グレーチング切断治具を使用して□500mmの開口を設置することが可能な見通しを得た。
- 切断したグレーチングをつかんで持ち上げることが可能な見通しを得た。

【主な課題】

- グレーチング切断治具の切断位置微調整およびケーブル処理などは、人為作業の補助を必要としたため、完全遠隔化が課題。

【対応方針】

- グレーチング切断治具の改良と要素試験の実施。
- 複数台のロボット運用によるケーブル処理などの検討および要素試験の実施。



約□500mmの開口

グレーチング切断状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【干渉物切断・解体試験状況と結果】

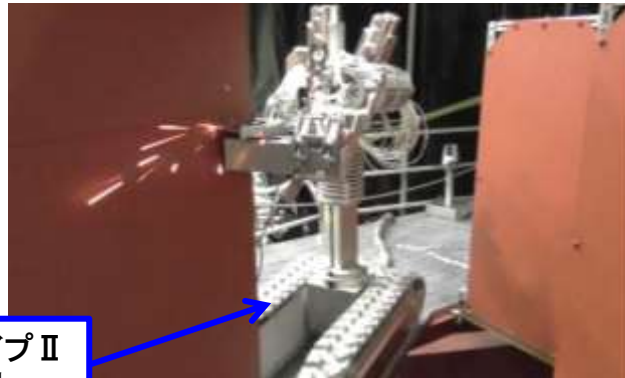
- 機器ハッチからPCV内に進入したロボットがX-6ペネCRDレールに到達するときに障害となる干渉物を切断・解体するための要素試験を実施した。
- 試験は、試作機 タイプⅡ(双腕型)により実施した。
- CRDレール到達までに障害となるHVHを模擬し切断試験を実施した。
- HVHに対し、切断工具による切断試験を行い切断可能な見通しを得た。

【主な課題】

- 切断→撤去→搬出までの一連動作における確認。
- ロボット側の操作が複雑になるため、切断工具の改良を含めた操作の単純化が必要。
- 切断工具を撤去物に対し直角に当てるためのカメラによる監視方法。

【対応方針】

- 課題をふまえた切断撤去手順の検討と要素試験の実施。
- 切断工具をふまえた切断操作の単純化検討と要素試験の実施。
- 切断状況の監視方法検討と要素試験の実施。



試作機 タイプⅡ
双腕型

水平方向切断状況



垂直方向切断状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【ガレキ拾い、運搬、回収試験状況と結果 その1】

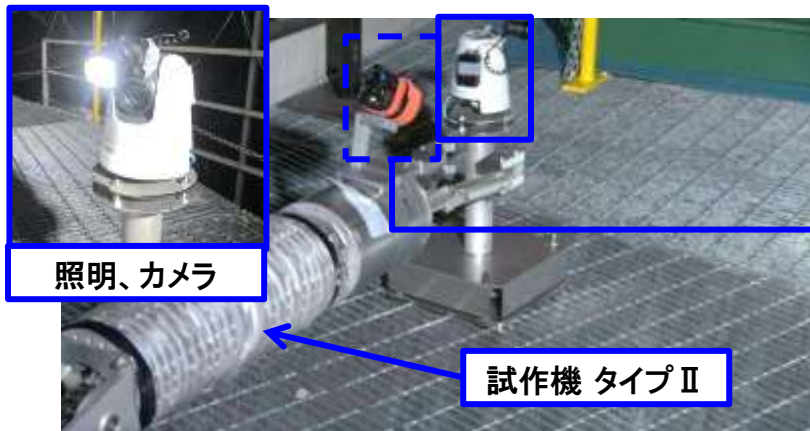
- ロボット走行の障害となりうるガレキの撤去を想定し、ロボットでハンドリングできるか確認する。
- 試験は、試作機 タイプⅡにより実施した。
- 準備作業となるPCV内への据え置き照明とカメラの設置について、遠隔作業で実施可能な見通しを得た。
- PCV内を模擬した暗闇環境において、カメラ画像のみによる操作と、ガレキ拾い、運搬、回収が可能の見通しを得た。

【主な課題】

- カメラの死角などにより、ロボットのケーブル処理が困難な場合の対処方法。

【対応方針】

- 複数台のロボット運用によるケーブル処理などの検討、要素試験の実施。



照明、カメラ設置状況



操作画面



ガレキ回収・運搬

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【ガレキ拾い、運搬、回収試験状況と結果 その2】

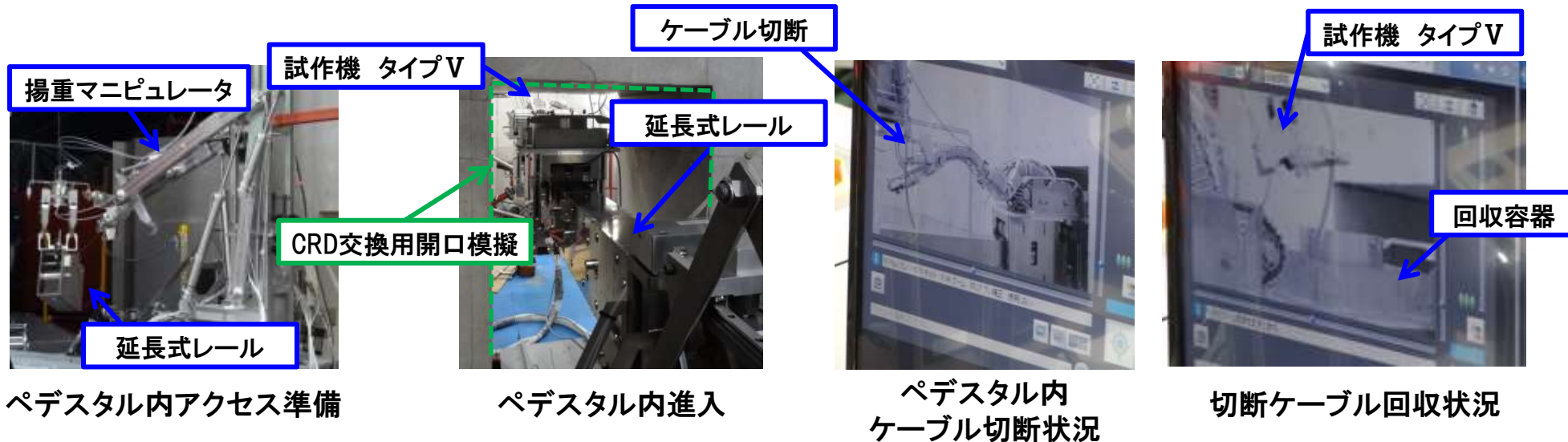
- ペDESTAL内デブリ回収の一環として小型ロボットによるペDESTAL内へのアクセスおよび環境整備として作業の障害となりうるケーブル類の撤去ができるか確認した。
- 試験は、アクセス装置および試作機 タイプVにより実施した。
- 準備作業となるペDESTAL内へのアクセス装置について、遠隔作業で実施可能な見通しを得た。
- ペDESTAL内へのアクセスおよびペDESTAL内進入ルートのカベL撤去が可能な見通しを得た。

【主な課題】

- ペDESTAL内視認性の確保と装置類のカベL処理

【対応方針】

- 照明、カメラ配置の検討と複数台のロボット運用によるカベL処理の検討、要素試験の実施。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【簡易クレーン組み立て試験状況と結果】

- 地下階へアクセスするためのクレーンを組み立てる。クレーンは、分割して運搬する。
- 試験は、試作機 タイプ I (クローラタイプ) により実施した。
- 分割したクレーンの部品を運搬することが可能な見通しを得た。
- 分割したクレーンの部品を組み立てることが可能な見通しを得た。

【主な課題】

- 部品の設置は可能であったが、位置の微調整は困難であった。(人為作業にて補助)
- クレーンの固定強化。(現状は、プレートのおもりのみ)

【対応方針】

- 複数台のロボット運用によるクレーン位置微調整などの検討および要素試験の実施。
- 設置クレーンの改良検討および要素試験の実施。



クレーン部品運搬状況(支柱)



クレーン部品(支柱)設置状況



クレーン部品設置状況



クレーン設置完了

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【機器の吊降ろし試験状況と結果】

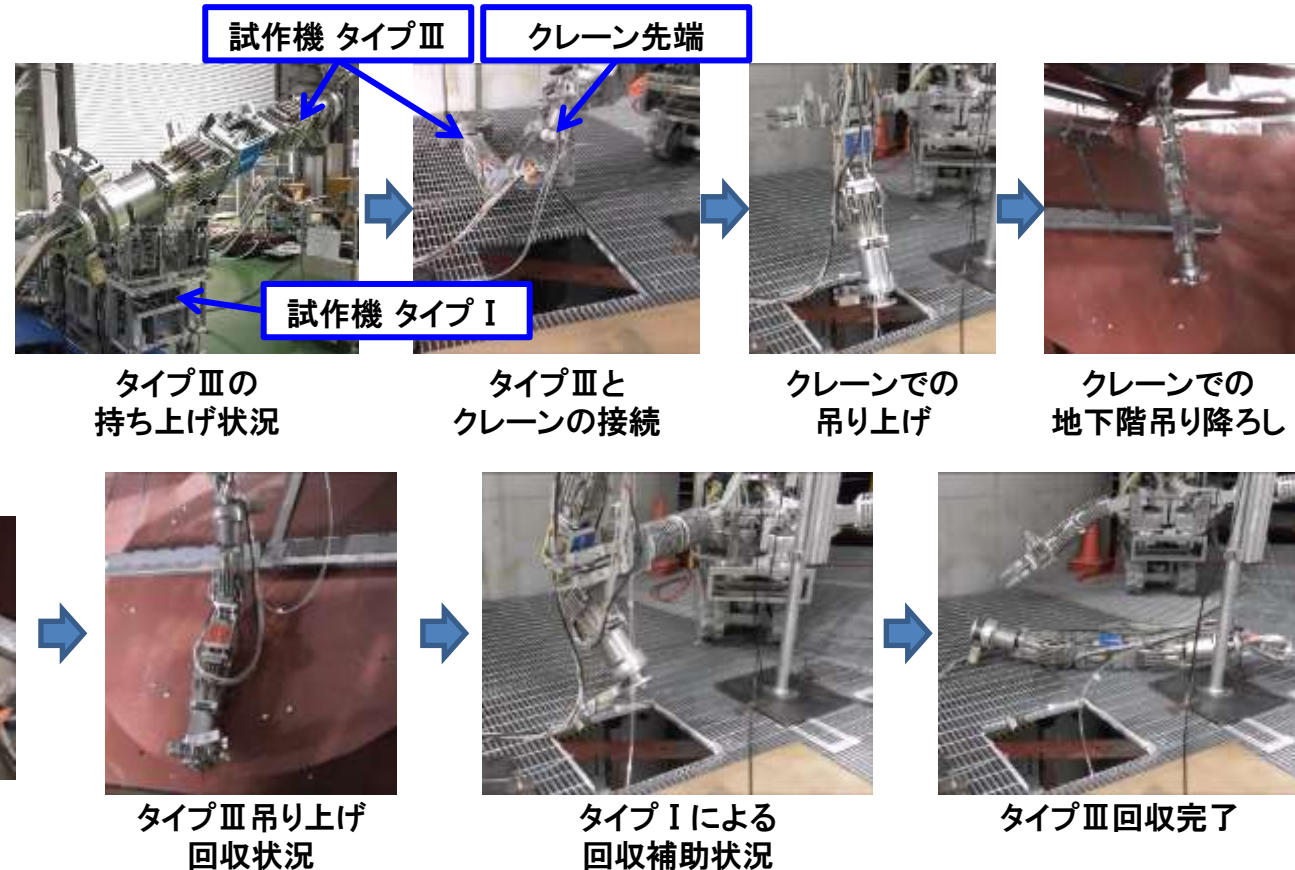
- 簡易クレーンを使用して地下階へロボットや機器を吊下す。また、地下階からの搬出物を吊り上げる。
- 試験は、試作機 タイプⅠ (クローラタイプ) および試作機 タイプⅢにより実施した。
- ロボットが、簡易クレーンにより地下階においてガレキを回収し、戻るという一連の動作が可能な見通しを得た。

【主な課題】

- カメラによる監視方法改善。
(死角を減少させる)
- ロボット作業性の向上。

【対応方針】

- 作業監視方法の改善検討と要素試験の実施。
- ロボット作業効率化の検討と要素試験の実施。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【ツール交換試験状況と結果】

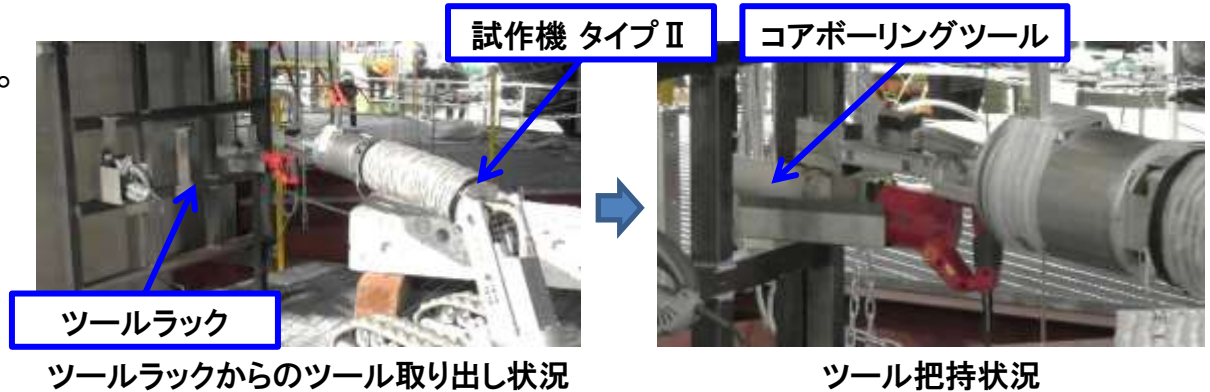
- 解体作業や組み立て作業に必要なツールを手先で交換する。
- 試験は、試作機 タイプⅡにより実施した。
- カメラ画像による遠隔作業においてツールを交換し、作業することが可能な見通しを得た。

【主な課題】

- ツールの電源コードの処理方法。
- 持ちやすいツール取手の検討。

【対応方針】

- 複数台のロボット運用によるケーブル処理などの検討および要素試験の実施。
- ツールに関する運用向上の検討と要素試験の実施。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【遠隔ケーブル接続試験状況と結果】

- PCV内で遠隔にてケーブルやホースを接続することを想定し、ロボットによる電源コネクタの接続確認を実施した。
- 試験は試作機 タイプIVで実施した。
- ロボットで電源コネクタをつかみ、分電盤への接続は可能であり、遠隔での電源接続についての見通しを得た。
- 作業性を向上させるため、水圧ホース用の遠隔カプラを製作し、遠隔によるカプラの接続を試みたが困難であったため、課題を抽出した。

【主な課題】

- 作業性の向上

【対応方針】

- 遠隔接続ツールの検討と要素試験の実施



電源コネクタ接続状況



電源コネクタ



遠隔カプラ接続前



遠隔カプラ接続

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【視野確保試験状況と結果】

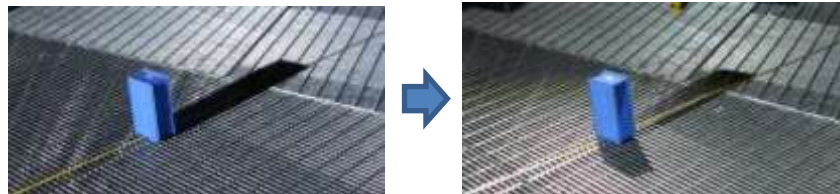
- 暗闇環境におけるカメラや照明の設置作業が可能か確認する。
- 作業性の観点から、PCV内の照明およびカメラの配置計画案を策定した。

【主な課題】

- 照明の向きによる視認性の影響。
- ケーブルの処理方法。

【対応方針】

- 照明型式変更(球状、円筒状の照明)による照明効率向上の検討と要素試験の実施。
- ケーブル整線方法の検討と要素試験の実施。

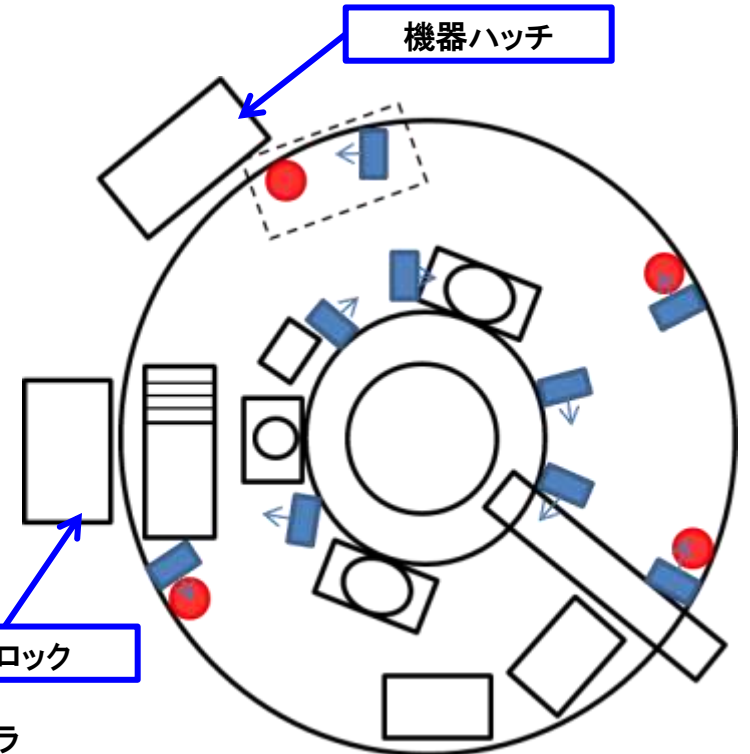


複数照明による影の軽減

暗幕



照明設置状況



エアロック

● : カメラ

■ : 照明

↓ (↓は、照明の方向)

PCV内照明・カメラ配置計画案

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

【アクセス性確認状況と結果】

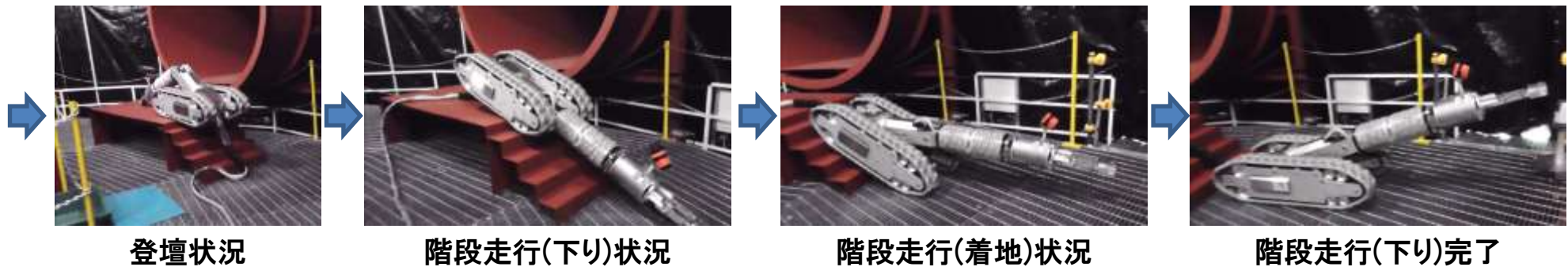
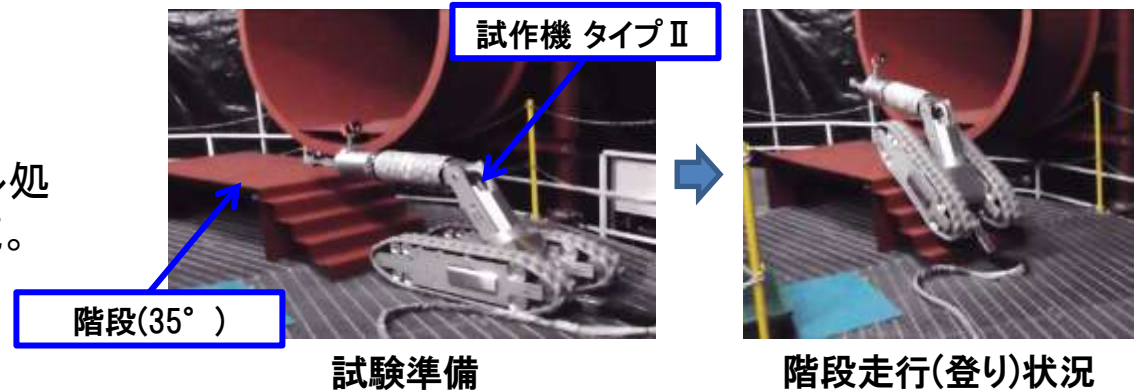
- 不整地移動、狭隘部進入、よじ登りなど、地下階(ペDESTAL内、外)のデブリへアクセスするための移動性を確認をする。
- 試験は、試作機 タイプⅡにより実施した。
- 遠隔操作により、カメラ画像を確認しながら移動することが可能な見通しを得た。

【主な課題】

- ケーブルの処理方法。

【対応方針】

- 複数台のロボット運用によるケーブル処理などの検討および要素試験の実施。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

① 遠隔作業用柔構造アームに関する試験

TRLレベル4に対し、遠隔作業の操作性およびハンドリングといった作業性が確認されており、基本的な成立性及び検討課題が確認されていることから達成度に問題ないと考える。以下に本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【要素試験結果】

- PCV内においてグレーチングに開口を設けロボットを吊り降ろし、ガレキを回収することが可能な見通しを得た。
- PCV内において、ロボットでの組み立て(簡易クレーン)が可能な見通しを得た。
- PCV内の干渉物撤去が可能な見通しを得た。
- PCV内における作業環境構築(照明・カメラなど)の見通しを得た。

【主な課題】

- ロボットやツールのケーブル処理。
- 作業監視方法。死角の対処。
- ロボットやツールの作業効率化。

【対応方針】

- 複数台のロボット運用によるケーブル処理、作業監視、組み立て作業連携などの検討および要素試験の実施。
- ロボット、ツールおよびクレーンなどの作業効率向上の検討と要素試験の実施。
- ロボットやツールの操作方法単純化と改良。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

【目的: 開発目標】

収納缶炉内取扱い装置の基本設計が完了し、部分試作、またはスケールモデル試験で成立性を検証する機構が選定されていること。部分試作、またはスケールモデル試験が行われ、装置を成立させるための課題とリスクの抽出・整理がされ、対応方針が検討されていること。(終了時目標TRL: レベル4)

【要素試験の概要】

- 収納缶をセルから搬出し、保管施設へ移送するまでの間、収納缶内の放射性物質を閉じ込める要求がある。
- 現状、検討している収納缶には水素放出のためのベントがあり、閉じ込め(密封)機能はない。
- セル内で遠隔作業性の観点から、簡易的な遠隔操作による収納缶の密封方式を検討し、要素試験により性能を確認した。

【平成28年度検討内容】

- 収納缶に対する密封化の要求とその実現方法を複数検討した。
- 簡易的な遠隔操作により密封化が可能な閉止方式について、閉止機構(蓋部)の1/1スケール試験体を製作し、シール材との組合せによる密封性の確認試験を実施した。
- 簡易的な遠隔操作による閉止試験を実施し、作業時間等のデータを取得した。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

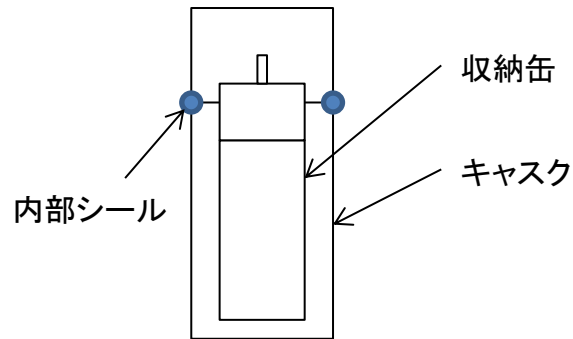
iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

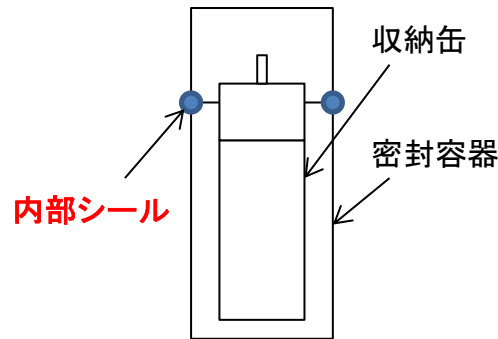
収納缶の密封方法の検討

■ 設計条件・制約条件として以下を考慮

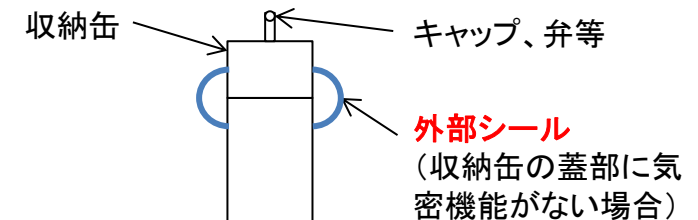
- ✓ 収納缶の蓋部には密封性がないと仮定。(収納缶自体の密封可否は収納缶PJで検討中)
- ✓ クレーン、マスタ・スレーブ・マニピュレータ等の簡易的な遠隔操作で作業できること。
- ✓ 移送の間だけ密封性を維持できること。
移送時間は24時間以内と仮定。
- ✓ 外観上、密封されていることが確認できること。(密封後、耐圧・漏えい等の検査が不要なこと)



例1) キャスクで閉じ込め → 既存技術



例2) 密封容器で閉じ込め



例3) 収納缶で閉じ込め

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

収納缶・密封容器閉止機構の要素試験

- 収納缶・密封容器の閉止方式を検討し、シール材（内部シール、外部シール）との組合せによる密封性能を確認。
- 簡易的な遠隔操作*1による蓋閉め試験を実施。

機能	目的・内容	試験結果概要	主な課題
密封性能	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 密封容器による閉じ込めの場合、20kPaG*2の内圧に対して密封性が維持できること。 ✓ 収納缶による閉じ込めの場合、30kPaG*2の内圧に対して密封性が維持できること。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 密封容器模擬の試験体（内部シール）について、漏れ量が$10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$のオーダーを実現可能なことを確認。 ✓ 収納缶模擬の試験体（外部シール）については、シールテープがきれいに巻けず、良くて20kPaG程度で漏れが生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・異物を混入させない対策（現状は糸くず程度でも漏れが生じる） ・シール材の耐久性（現状は毎回交換と想定） ・容器の除染性
遠隔操作性	簡易的な遠隔操作により、蓋閉めが可能であること。	簡易的な遠隔操作により、蓋閉めが可能であることを確認。蓋の移動+治具による蓋閉めで約10分。（ただし、蓋、治具のつかみの時間は不含）	<ul style="list-style-type: none"> ・容器、蓋、遠隔作業機器（治具を含む）の配置と動線計画

*1:ここでは、クレーン、マスタ・スレーブ・マニピュレータ等+治具による操作を指す。

*2: 収納缶内で24時間に発生する水素量（想定）による内圧上昇分。

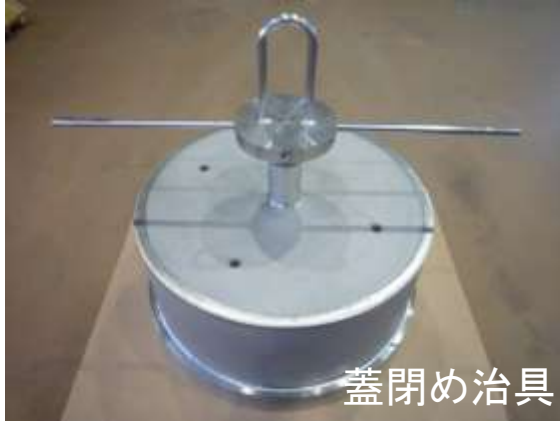
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

密封容器模擬試験(内部シール)体と蓋閉め治具の例



治具の重さでレバーが下りて蓋を閉める構造



治具の重さで治具がピンに沿って回転し、蓋を閉める構造

カムロック方式

バヨネット方式

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

密封容器模擬試験(内部シール)の要素試験

閉止方式	シール材／硬さ		径[mm]	つぶし量※ ¹ [mm]	漏れ量 [Pa・m ³ /s]
カムレバー	O-リング	70	300	-	$\leq 1 \times 10^{-4}$
			500	0.4	$\leq 1 \times 10^{-4}$
	平パッキン	50	300	-	$\leq 1 \times 10^{-4}$
			500	0.6	$\leq 1 \times 10^{-4}$
		75	300	-	$\leq 1 \times 10^{-4}$
			500	0.6	$+1.49 \times 10^{-4}$
バヨネット	特殊パッキン	50	300	-	$\leq 1 \times 10^{-4}$
			500	2.0	$\leq 1 \times 10^{-4}$
		75	300	-	$\leq 1 \times 10^{-4}$
			500	測定不可※ ²	$\leq 1 \times 10^{-4}$

※1: 手動蓋締めによる蓋の押し込み量

※2: 人力にて設計値まで締めることができなかったため、試験終了



カムレバー式(φ500mm)



バヨネット式(φ500mm)

3. 本事業の実施状況

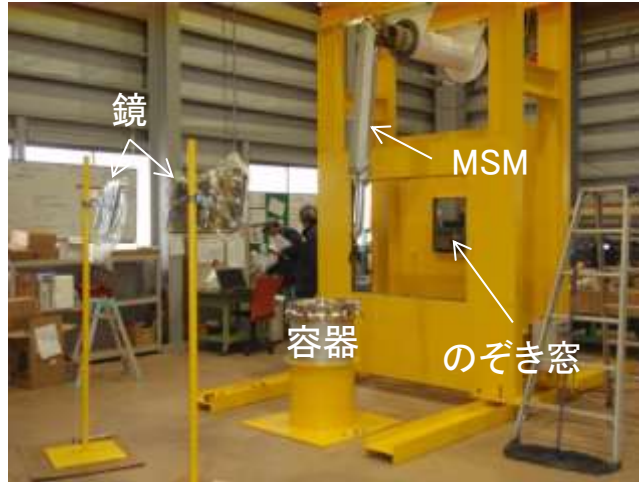
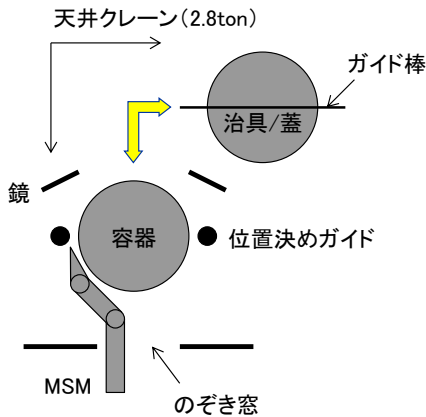
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

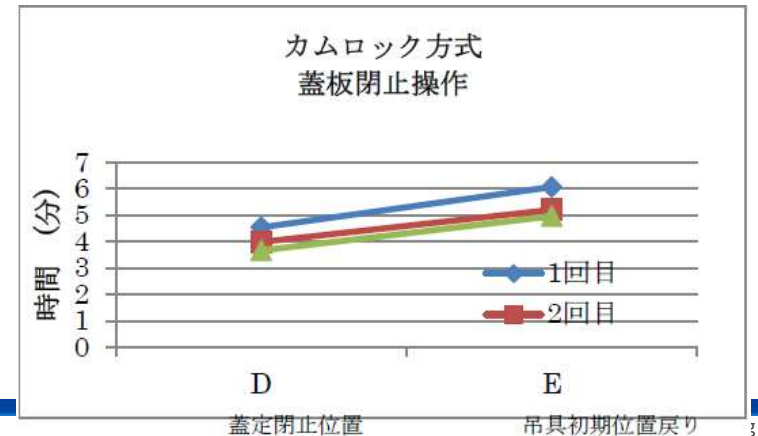
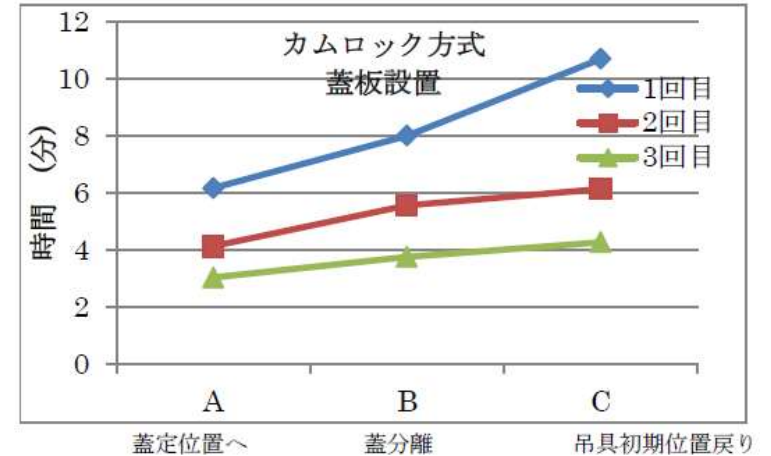
② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

遠隔操作性の確認試験(カムロック方式の例)

- クレーン、機械式マスタ・スレーブ・マニピュレータ(MSM)等の簡易的な遠隔操作による作業。
- 基本的にクレーンによる操作、MSMは必要に応じて治具の操作補助で使用。
- 蓋を容器上に移動、吊具から蓋を外して吊具を元の位置に戻し、蓋閉め治具を蓋上に移動、蓋を閉めて蓋閉め治具を元の位置に戻し、の一連の作業を約10分で行えることを確認。
- バヨネット方式の場合もほぼ同じ作業時間。



遠隔操作性確認試験設備



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

収納缶模擬試験(外部シール)の要素試験(400mm容器の例)

- 収納缶模擬試験体をターンテーブルで回転させ、蓋と胴の継ぎ目にシールテープを押し付けて巻付け。
- 表面状態、シールテープの種類、巻き数、押付け力、ターンテーブルの回転速度を変えて試験。
- いずれの条件でも、最大で20kPa程度で漏えいが生じた。
- シールテープを作業員が巻いても到達圧力は27kPa。

【主な課題】

- テープの取扱い易さ
- 試験体の真円度
(容器側の形状による影響大)
- テーピング工法

【対応方針】

- 厚膜・硬度テープの採用
- テープ押付け力の変更

閉止方式	表面状態	シール材	到達圧力[kPa]* ¹
シールテープ	素材のまま	テープA	15
		テープB	11
		テープC	—* ²
	#120バフ仕上げ	テープA	17
		テープB	14
		テープC	—* ²
	鏡面仕上げ	テープA	0
		テープB	0
		テープC	0

*1: 容器径は400mm、巻き数は1巻き、押付け力は400N、ターンテーブルの回転数は2rpmのケース。

*2: テープが柔らかすぎて容器に巻けず。



外部シール試験体

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

iv) 燃料デブリ取り出しにおける遠隔作業技術

② 燃料デブリ収納缶の取扱い装置に関する試験

【結果】

収納缶・密封容器の閉止機構・閉止治具の試験体を製作し、密封性・遠隔操作性の確認試験を行ってその性能を確認した。終了時目標のTRLレベル4を達成したと考える。以下に、本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【まとめ】

- 収納缶・密封容器の閉止機構・閉止治具の基本設計を行い、蓋部の1/1スケール試験体を製作した。
- 蓋部に対する要求機能である密封性・遠隔操作性について、要素試験によりその成立性を確認した。汎用技術であるクレーン、マスタ・スレーブ・マニピュレータと治具による簡易的な遠隔操作により、短時間の密封を実現できる見通しを得た。
- 要素試験の結果、下記の課題を抽出し、対応方針を検討した。

【課題と対応方針】

- シール部に異物を混入させない対策、異物が付着した場合の対策
→ 蓋側にシール材を取り付ける等、シール部に異物の付着が発生しにくい構造への設計改良
- 現状はどの閉止機構も除染性が良いとは言えず、除染のし易さと簡便な閉止機構の両立が必要
→ 閉止機構の設計改良、除染性の確認試験
- 容器、蓋、遠隔作業機器(治具を含む)の配置と動線計画の策定
→ セル内配置・動線の設計に反映

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

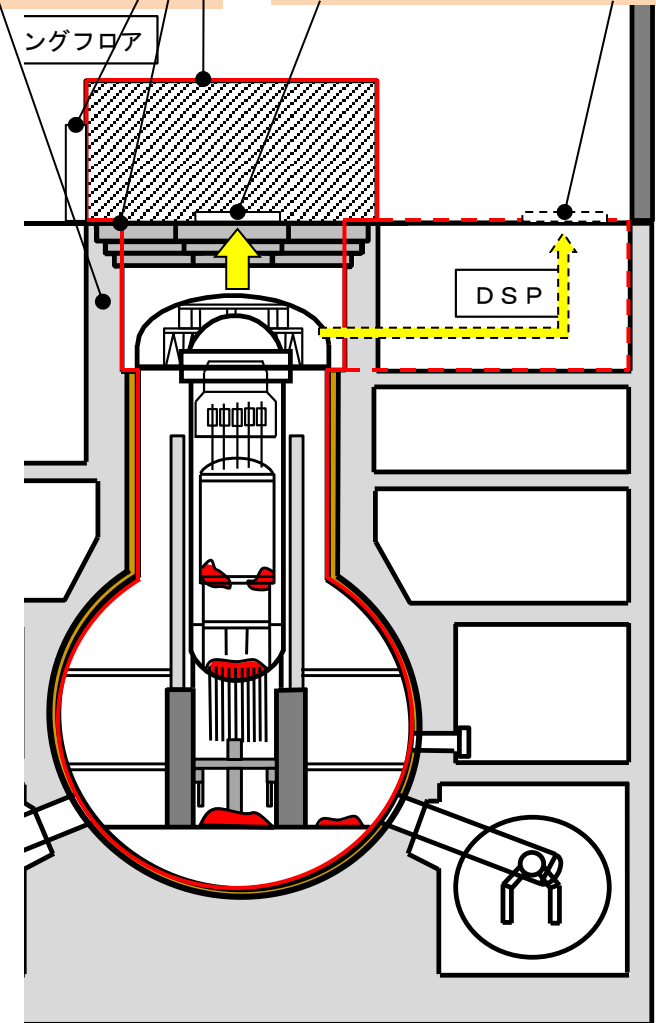
【目的：開発目標】

プラットフォーム／セルの基本設計が完了し、部分試作、またはスケールモデル試験で成立性を検証する方式が選定されていること。部分試作、またはスケールモデル試験が行われ、装置を成立させるための課題とリスクの抽出・整理がされ、対応方針が検討されていること。(終了時目標TRL:レベル4)

【平成28年度検討内容】

- セルの閉じ込め機能に係わる実現性を検討した。
- セル内の汚染を防止・抑制を目的とする閉止扉について、シール性、動作性確認のための要素試験を実施し、課題とリスクの抽出・整理を行い、対応方針を検討した。
- セル内の線量低減を目的とする遮蔽扉について、動作性確認のための要素試験を実施し、課題とリスクの抽出・整理を行い、対応方針を検討した。

- 各種シール技術
 - セル同士の接合部のすき間
 - セルと既存設備とのすき間
 - セルの扉のすき間(閉時)
 - 原子炉ウエルのすき間
- セル内の汚染防止・抑制
 - 閉止扉
 - セル内の線量低減
 - 遮蔽扉



3. 本事業の実施状況

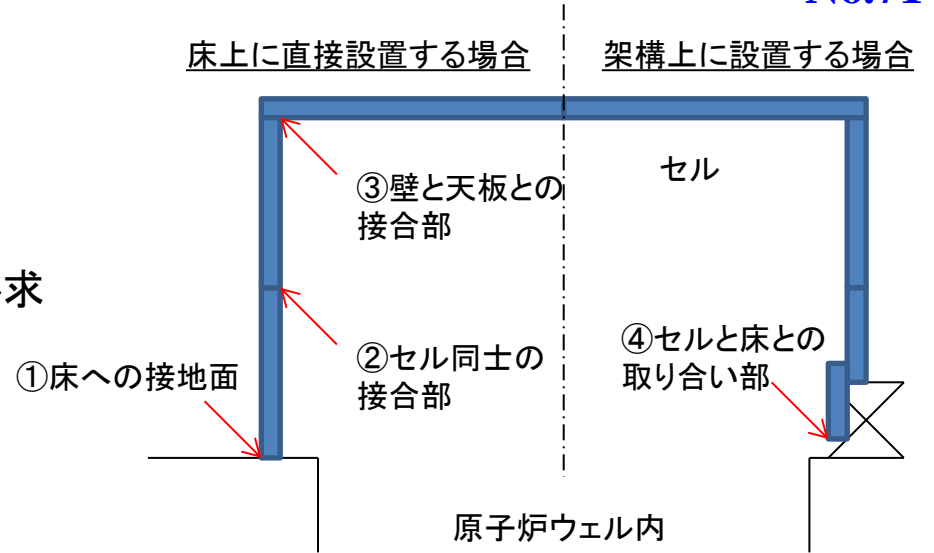
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

セルの閉じ込め機能に係わる実現性検討

- バウンダリ内を負圧に維持するために高いシール性要求
- PCVを補修してシール性を向上させることは困難
新たに設置するセルは可能な限り気密化
- セルのすき間のシール方法を調査し、評価



シールの種類	特徴	適用	技術課題
シール溶接	高いシール性が期待でき、耐放性も優れる。現地溶接は品質管理、作業員被ばくの観点で困難。	①、②、③	なし(現地溶接の場合は遠隔溶接技術)
有機シール材	高いシール性が期待できる。耐放性に限界があるため、遠隔保守が必須。	①、②、③	保守技術
金属シール材	有機シール材に比べて耐放性に優れるが、シール性はシール面の精度・傷等に影響を受ける。	①	なし
液体シール	シール性はあるが汚染拡大防止の観点では不十分。液体を補充するシステムが必要。	④	なし(採用する場合はデータ取りが必要)
金属ベローズ	高いシール性が期待でき、耐放性も優れる。	④	なし
メタルタッチ	当たり面の精度・傷等に影響を受ける。メンテナンスは不要。	①、②、③	なし

➡ 静的なシール部は既存技術の組合せで対応が可能

用語説明
PCV: 原子炉格納容器

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

遮蔽扉の要素試験

- 1/1スケール試験により、遮蔽扉の動作性を確認し、課題の抽出を行った。
- 上記の遮蔽扉について、インフレートシールによる気密性(シール性)を確認し、課題の抽出を行った。

機能	目的・内容	試験結果概要	主な課題
動作性	以下を確認する。 ✓ 扉が円滑に開閉すること。 ✓ 扉が設計上、決められた位置で停止すること。 ✓ 駆動機構の1系統運転が可能であること。	扉の開閉を通常状態、異常時、据付不整(レベル差あり)を考慮した試験を行い、設計想定通りに円滑に開閉することを確認した。	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操作での救援保守性 ・電動品の耐放射性 ・レール上に異物が付着した場合の動作機能への影響
気密性	150PaGの差圧に対して、漏洩率が許容値以下であることを確認する。	インフレートシールについて、差圧300Pa以上の気密試験を行い、設計上定めた漏えい率を満足することを確認した。	<ul style="list-style-type: none"> ・インフレートシール加圧後に大気圧に戻して解放した際、シール状態から解放状態に戻るのに時間がかかる ・シール部への異物付着による気密性能低下の可能性

3. 本事業の実施状況

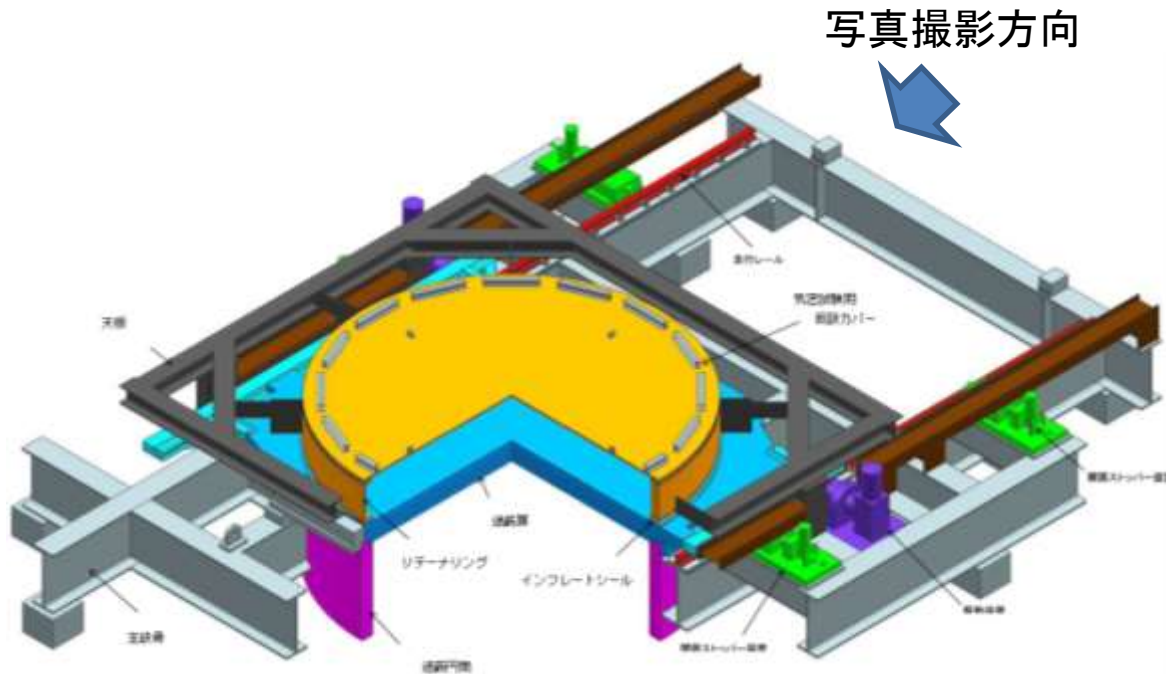
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

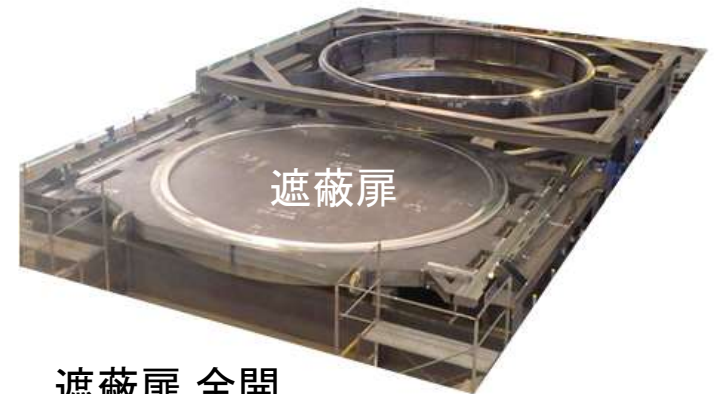
① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【遮蔽扉の動作性確認試験状況と結果】

- 1/1スケール試験により、遮蔽扉の動作性を確認し、課題の抽出を行った。
 - 遮蔽扉の動作試験を実施し、開閉が円滑に行えることを確認した。



遮蔽扉 全閉



遮蔽扉 全開

3. 本事業の実施状況

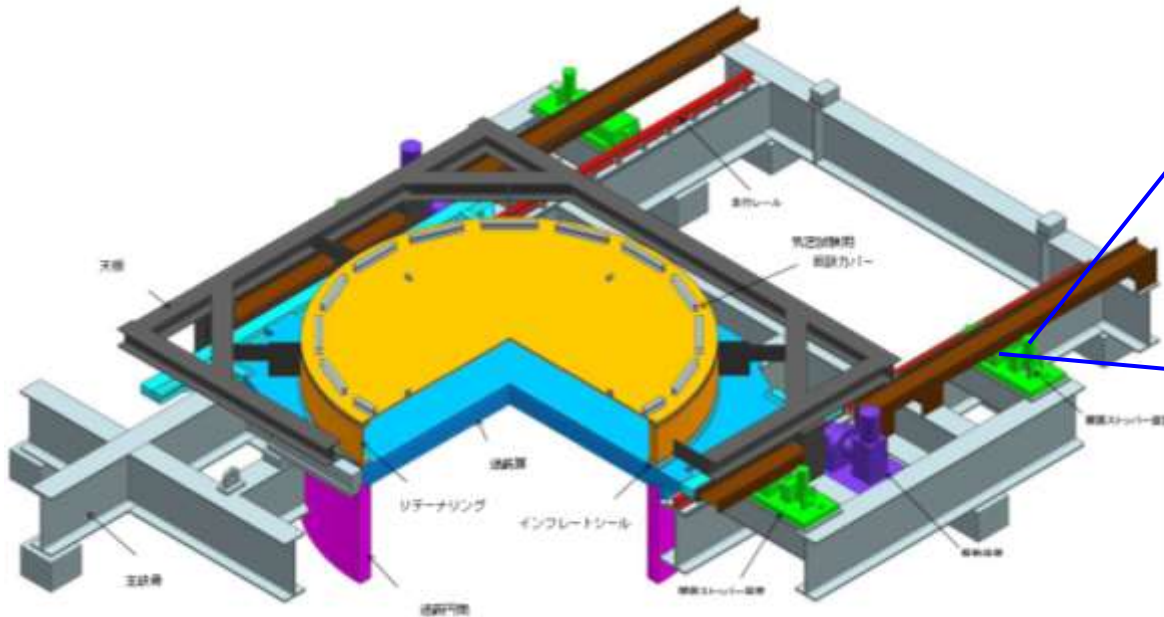
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【遮蔽扉の動作性確認試験状況と結果】

- リミットスイッチによる扉の停止、及びリミットスイッチが機能しない場合でも扉が終端に当たってモータの負荷電流が上昇し停止することを確認した。
- 開限／閉限において、ストッパピンにより扉を固定できることを確認した。(開／閉時の耐震性向上)



3. 本事業の実施状況

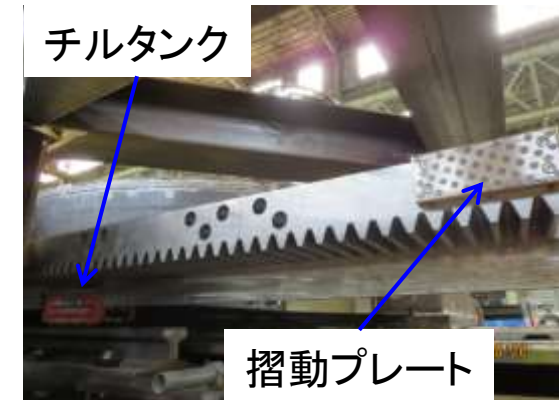
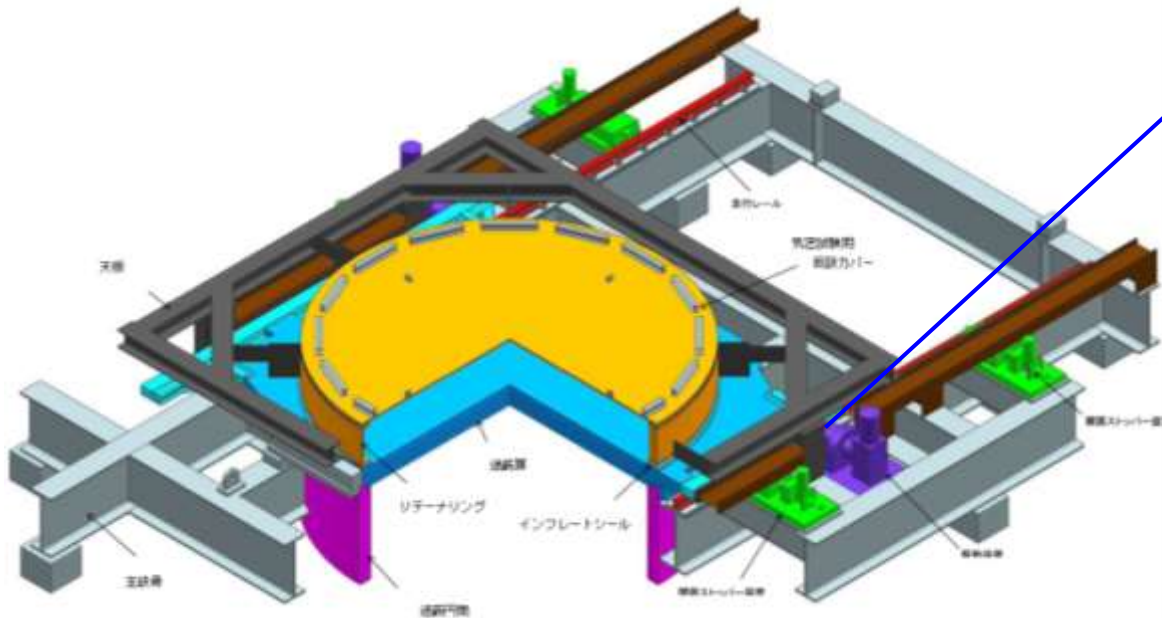
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【遮蔽扉の動作性確認試験状況と結果】

- ラック・ピニオンによる動力伝達とチルトタンク、摺動プレートにより重量扉（約100ton）が円滑に開閉することを確認した。
- 2系統運転、および単一故障を想定した1系統運転でも円滑に開閉することを確認した。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【遮蔽扉の動作性確認試験状況と結果】

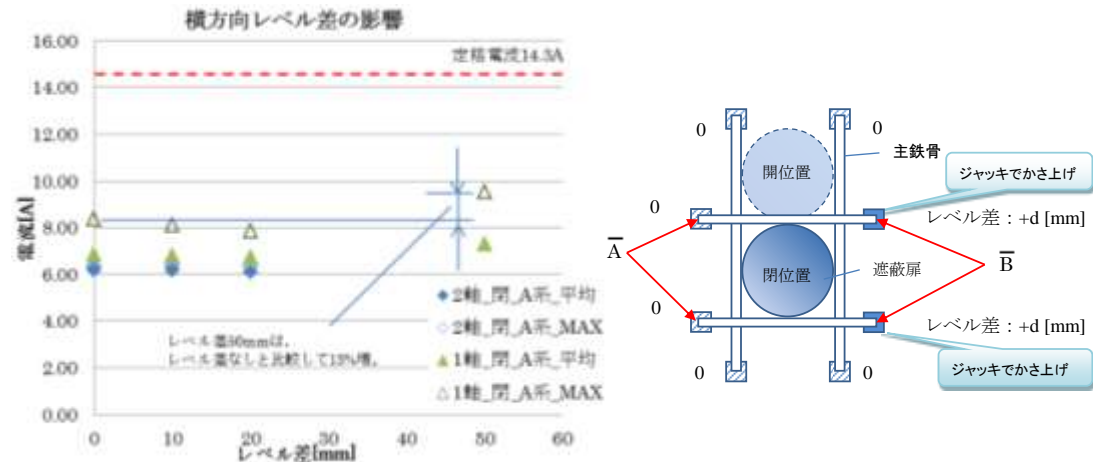
- 据付異常を模擬した試験も実施し、50mmまでの設置面の歪みに対して遮蔽扉の動作に影響がないことを確認した。
- 異常状態を模擬した試験も実施し、動作中の停電やリミットスイッチの故障が遮蔽扉の動作に影響がないことを確認した。

【主な課題】

- 遠隔操作での救援保守性
- レール上に異物が付着した場合の動作機能への影響

【対応方針】

- 遠隔設備の設計とモックアップによる遠隔保守性の確認試験を実施する。
- レール上へ異物が入らないような対策、レール上へ異物が入った場合に除去するような対策を検討する。



横方向に遮蔽扉を傾けた時の動作結果

3. 本事業の実施状況

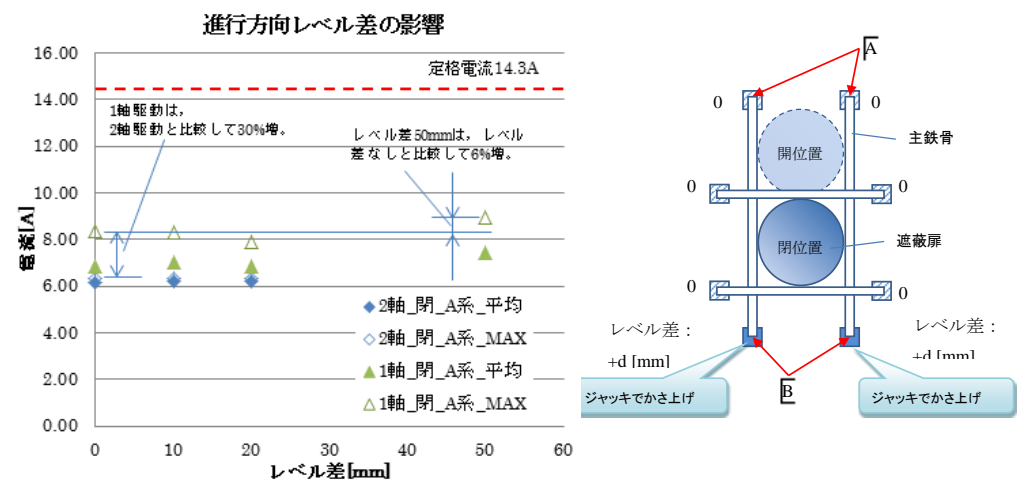
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

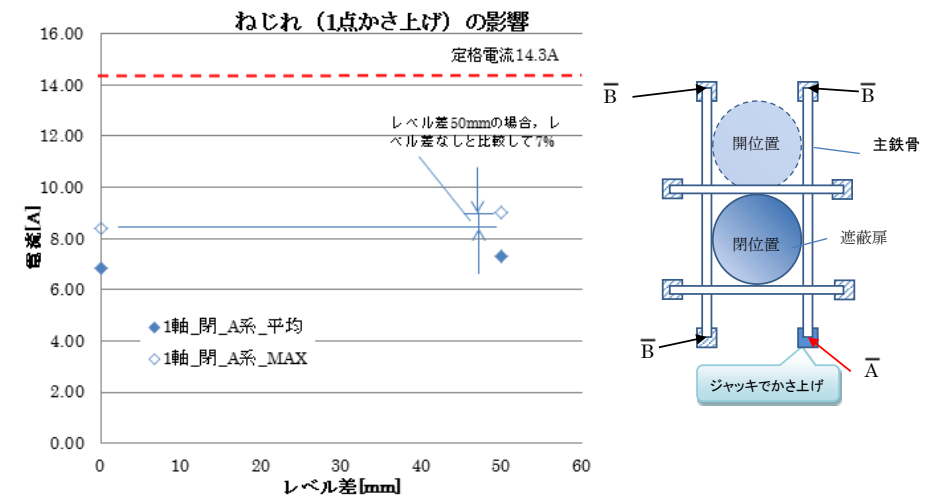
① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【遮蔽扉の動作性確認試験状況と結果】

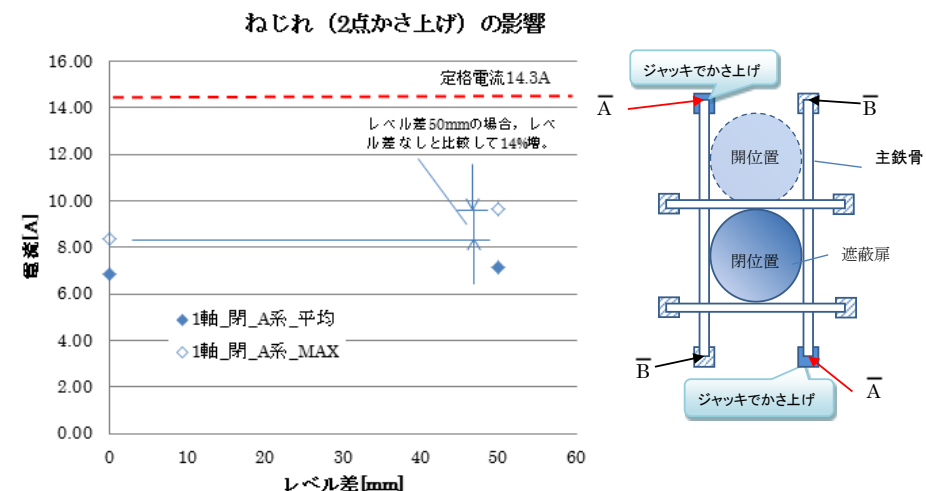
➤ 各種の据付異常を模擬した試験も実施し、50mmまでの設置面の歪みに対して遮蔽扉の動作に影響がないことを確認した。



進行方向に遮蔽扉を傾けた時の動作結果



レールを1か所持ち上げて遮蔽扉を傾けた時の動作結果



レールを2か所持ち上げて遮蔽扉を傾けた時の動作結果

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

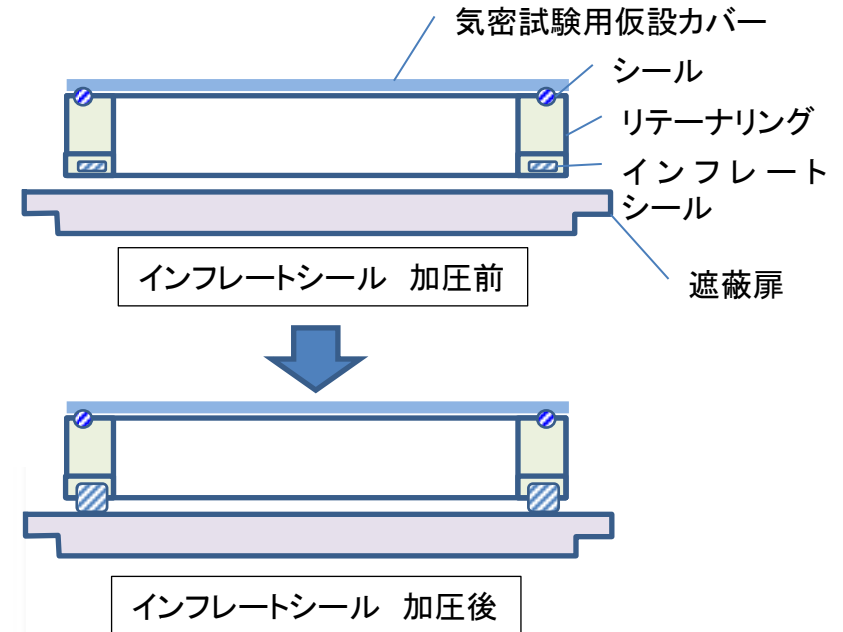
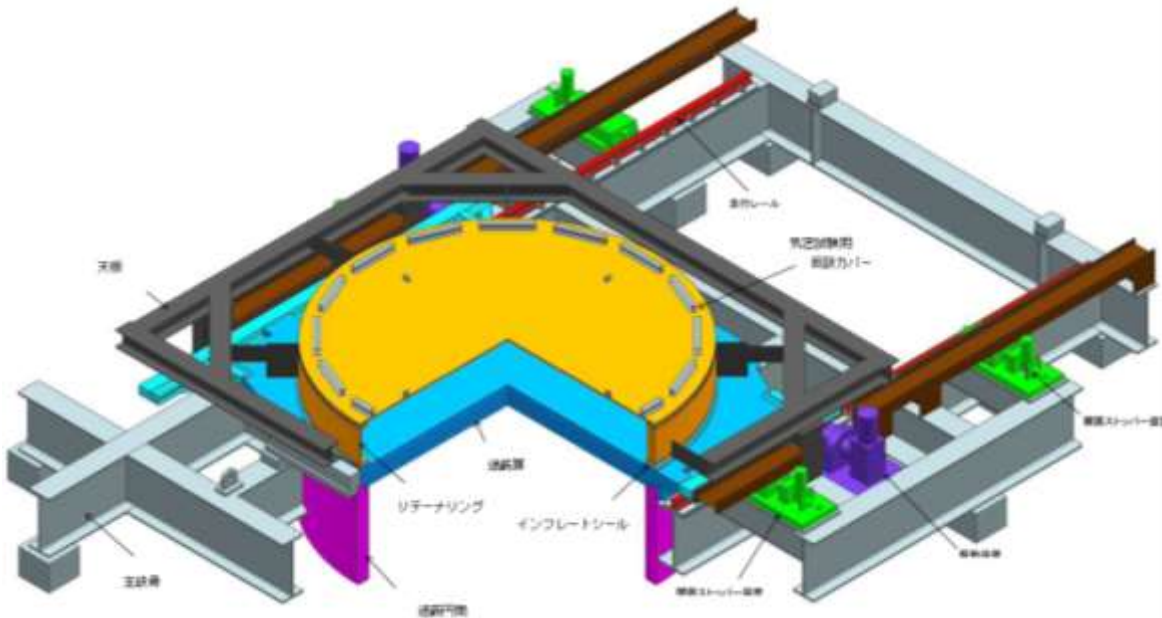
v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【インフレートシールの気密性確認試験状況と結果】

■ 上記の遮蔽扉について、インフレートシールによる気密性（シール性）を確認し、課題の抽出を行った。

- インフレートシールによる気密性を確認。
- インフレートシールのエア圧低下時を模擬した試験も実施し、インフレートシールを用いた気密性能に問題がないことを確認した。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【主な課題】

- インフレートシール加圧後に大気圧に戻して解放した際、シール状態から解放状態に戻るのに時間がかかる。
- インフレートシール部への異物の入り込み、付着による気密性能低下が懸念される。

【対応方針】

- シール状態のモニタ、インフレートシール内圧のバキュームなどの対策を検討する。
- 異物が入らないような対策、入った場合に除去するような対策を検討する。



気密試験実施状況

No.	インフレートシール内圧 [MPa]	設置レベル差 [mm]	漏洩率 [vol%/h]
1	0.25	なし	0.03
2	0.15	なし	0.08
3	0.25	なし	0.11
4	0.25	20(横方向)	0.13

※JIS Z 2332 圧力変化法試験準拠

※漏洩率の判定基準:0.3 vol%/h以下

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

閉止扉の要素試験

- 1/1スケール試験により、閉止扉の動作性、気密性(シール性)を確認し、課題の抽出を行った。

機能	目的・内容	試験結果概要	主な課題
動作性	以下を確認する。 ✓ 扉が円滑に開閉すること。 ✓ 扉が設計上、決められた位置で停止すること。 ✓ 駆動機構の1系統運転が可能であること。	扉の開閉を通常状態、異常時、据付不整(レベル差あり)を考慮した試験を行い、設計想定通りに円滑に開閉することを確認した。	<ul style="list-style-type: none"> ・昇降用モータの容量不足 ・開閉時の動作が不安定 ・潤滑油の耐放性 ・レールの据付異常対策
気密性	150PaGの差圧に対して、漏洩率が許容値以下であることを確認する。	水シールについて、差圧150Pa以上の気密試験を行い、設計上定めた漏えい率を満足することを確認した。	<ul style="list-style-type: none"> ・水封溝サイズの最適化 ・コーキング構造の耐放性

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

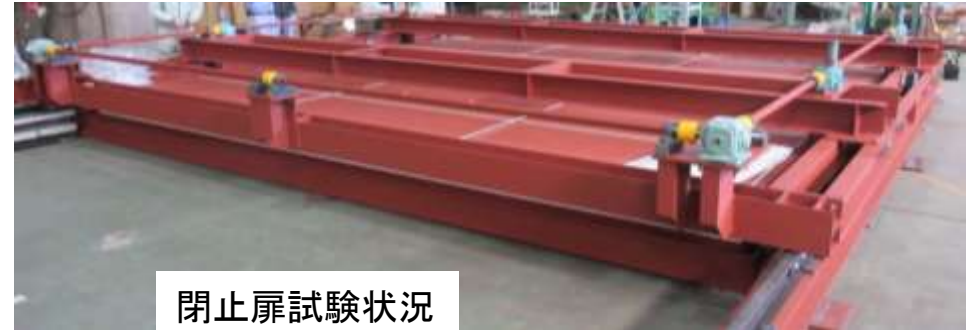
① 冠水工法のプラットフォーム／セルに関する試験

【閉止扉の動作性確認試験状況と結果】

- 駆動機構にプッシュ・プルチェーンを採用し、1系統運転により閉止扉が円滑に開閉することを確認
- 据付異常を模擬した試験も実施し、5mmまでのレールの段差に対して扉の動作に影響がないことを確認

【主な課題】

- 昇降用モータの容量不足
- 開閉時の動作が不安定
- 潤滑油の耐放性
- レールの据付異常対策



閉止扉試験状況

【対応方針】

- 定格電流値を上げる。
- 走行台車とプッシュチェーン固定部を、走行台車中央部とする。
- オイルレス仕様化、遮蔽化、耐放性の強いオイルを適用する。
- 設置時のバラツキを抑える施工とするか、台車車輪にバネ式のジョイントを設け、台車は斜めにならないようにする。

※走行速度は、高速1.9m/min、中速1.0m/min、低速0.43m/min
昇降速度は、高速0.06m/min、中速0.03m/min、低速0.02m/min

No.	走行/昇降 試験	高速 時間	中速 時間	低速 時間
1	開き	3m8s	5m56s	13m57s
2	閉じ	3m8s	5m56s	13m57s
3	昇り	1m28s	3m16s	5m35s
4	降り	1m28s	3m15s	5m35s

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

② 気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験

【目的: 開発目標】

PCVとセルのバウンダリ構築に必要な設計(溶接装置、溶接要領、溶接部の強度)に資する基本的な成立性及び検討課題が確認されていること。(終了時目標TRL: レベル3)

【平成28年度検討結果】

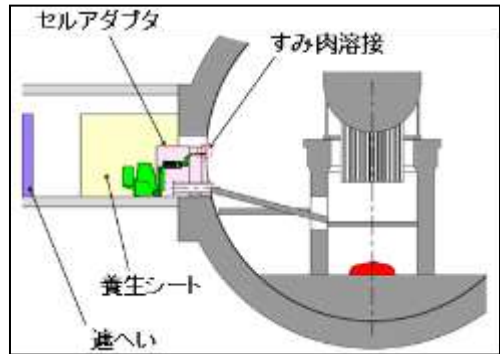
① 実機模擬供試体による溶接試験

目的及び方法

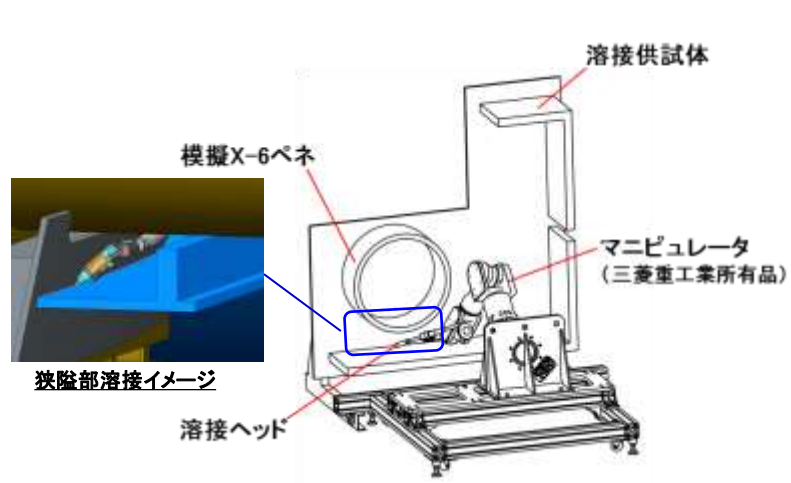
実規模部分モデルを用いた溶接を行い、溶接要領の妥当性を確認する。

パラメータ：狭隘部、溶接姿勢、PCV-セルアダプタ隙間

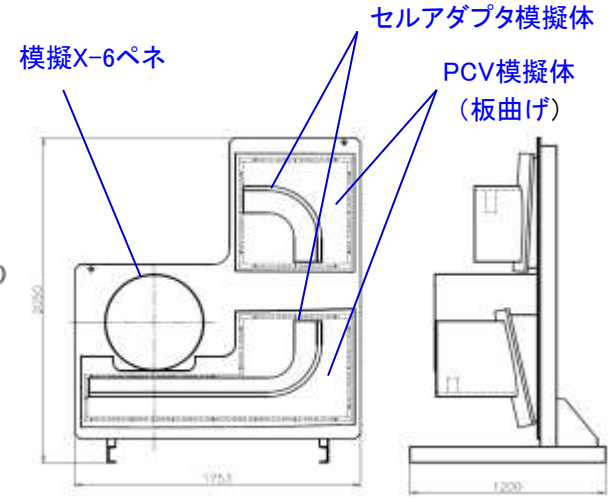
確認方法：溶接後の表面状態確認、断面観察



PCVとセルの溶接



溶接試験装置イメージ



実機模擬供試体

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

② 気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験

① 実機模擬供試体による溶接試験

試験結果

- ・ ギャップ量5mm以下であればいずれの姿勢、狭隘部に対しても溶接施工の基本的な成立性を確認。
- ・ 一部の溶接に溶け込み不良があり、適切な溶接条件等の見直しが今後の課題。
- ・ 僅かだがスパッタを生じる場合あり。補修溶接及び表面手入方法が今後の課題。
- ・ 実機セルアダプタの溶接では、PCVとの開先ギャップを確実に5mm以下とする必要あり。
⇒ 工法及び確認方法の確立が重要。

表 模擬体溶接結果

部位	ギャップ	姿勢等	外観	断面
上部	0mm	水平 コーナ 鉛直	表面は良好 (割れ等なし)	概ね良好。 但し、一部の初層に溶け込み不良あり。
下部	5mm			



図 溶接の様子

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

② 気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験



図 溶接部の外観（上部供試体）



図 溶接部の外観（下部供試体）

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

② 気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験

【平成28年度検討状況】

② 溶接部強度に関する試験

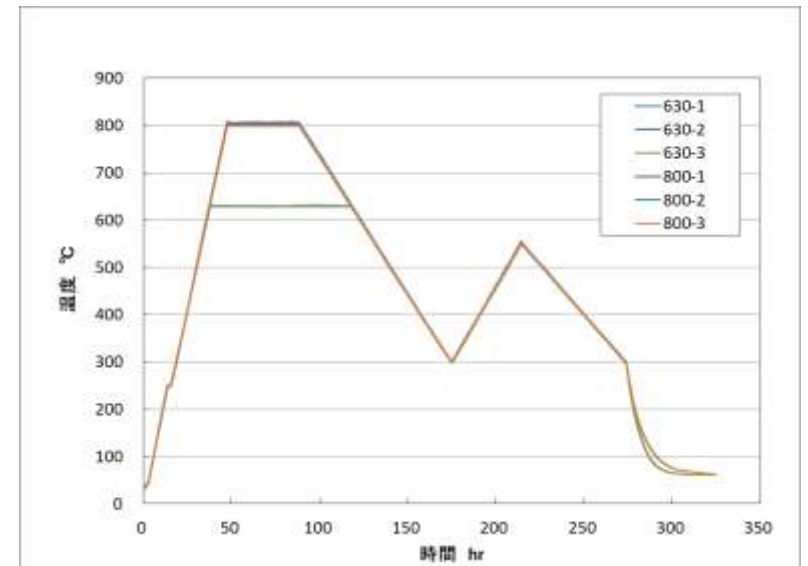
目的及び方法

評価用データの取得のために平板試験片で強度等を確認。

- ・ PCV相当材 (SGV480)
- ・ PCV相当材 (SGV480)とセルアダプタ (SM490B) の溶接材

試験	温度	材料	PCV熱処理
引張試験	室温	・PCV相当材 (SGV480)	熱処理なし
シャルピー試験	-15°C	・溶接材 (SGV480+SM490B)	600°C(炉冷) 800°C(炉冷)

			化学成分[%]					機械特性		
			C	Mn	P	S	Si	Su [N/mm ²]	Sy [N/mm ²]	伸び [%]
PCV相当材	JIS G3118	SGV480	0.28 以下	0.85- 1.20	0.030 以下	0.030 以下	0.15 - 0.40	480 - 590	265 以上	17 以上
1号機 PCV材	ASME	SA212 Gr.B	0.31 以下	0.90 以下	0.04 以下	0.05 以下	0.15 ~ 0.30	485 ~ 585	260 以上	21 以上
2、3号機 PCV材	ASME	SA516 Gr.60	0.23 以下	0.85- 1.20	0.035 以下	0.035 以下	0.15 - 0.40	415 - 550	220 以上	25 以上



SG480熱処理(実績)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

v) 燃料デブリ取り出しにおける汚染拡大防止技術

② 気中一横アクセス工法のセルに係る遠隔シール溶接のためのPCV溶接装置に関する試験

試験結果のまとめ

- セルアダプタ模擬体の溶接試験により、ギャップ量5mm以下であれば溶接可能な装置、要領の基本的な成立性を確認した。
- セルアダプタ模擬体の溶接試験、及び材料試験の結果から、今後溶接条件の見直しは必要であるが、溶接部の強度設計が基本的に実施可能である見通しを得た。
- 今後の課題として、補修溶接、溶接表面の手入れ、溶接条件の見直し、実機施工時のギャップ管理が上げられる。

PCV相当材 材料試験結果

	引張試験	シャルピー衝撃試験
熱処理なし	・L、T方向いずれも降伏点及び引張強さは規格値を満足。	・延性破面は全て100%、吸収エネルギーは300J以上。十分な延性あり。
熱処理あり 630℃ 800℃	・熱処理温度の影響は以下。 降伏点 : 21%低下(630℃)、25%低下(800℃) 引張強さ: 13%低下(630℃)、18%低下(800℃) 伸び : 12%増加(630℃)、22%増加(800℃) ・引張強さは規格値未満。	・T方向(630℃)の3個中1個のみ延性破面率82%、吸収エネルギー214J。 焼き戻し脆化の影響の可能性もあり、今後検討が必要。 ・その他は全て延性破面率100%、吸収エネルギー300J以上。 ・いずれも十分な延性あり。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vi) 燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術

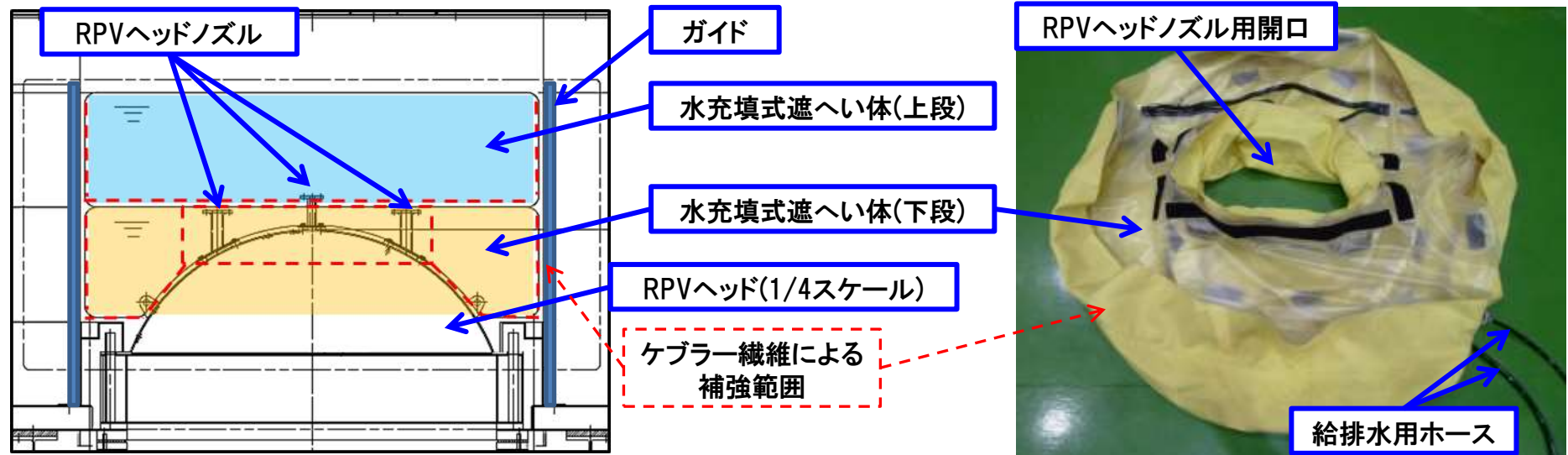
① 上アクセス工法に適用する形状追従、軽量遮へい体に関する試験

【目的: 開発目標】

水充填式遮へい体の試作・試験を実施し、基本的な成立性及び検討課題が確認されていること。
(終了時目標TRL: レベル4)

【平成28年度検討内容】

- 水充填式遮へい体設置装置による水充填式遮へい体の設置性に関する要素試験を実施し、課題を抽出した。
- 1/4スケールモデルと組み合わせてRPVヘッドへの水充填式遮へい体設置に関する要素試験を実施し、課題を抽出した。



RPVヘッドへの水充填式遮へい体設置イメージ

水充填式遮へい体(下段)

3. 本事業の実施状況

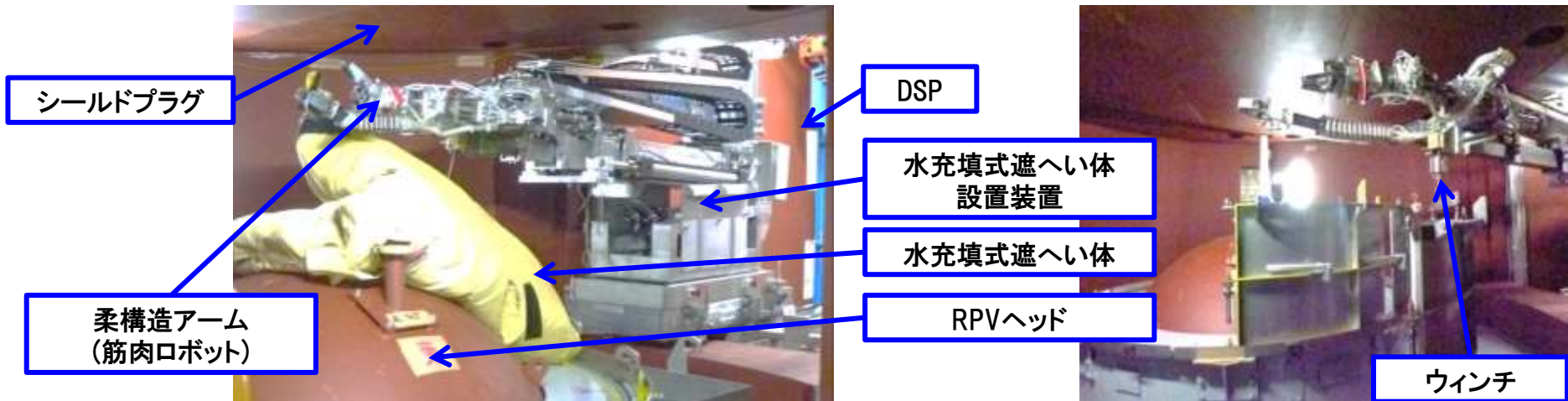
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vi) 燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術

① 上アクセス工法に適用する形状追従、軽量遮へい体に関する試験

【水充填式遮へい体設置装置の試作】

- ▶ 柔構造アーム(筋肉ロボット)を備えた水充填式遮へい体設置装置を試作し、水充填式遮へい体の設置性について確認した。
- ▶ 柔構造アーム(筋肉ロボット)とウィンチによる昇降操作の組み合わせにより作業多様化を図った。
- ▶ ウェル内に設置した4台のカメラにおいて作業内容を確認可能な仕様とした。



水充填式遮へい体設置装置

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

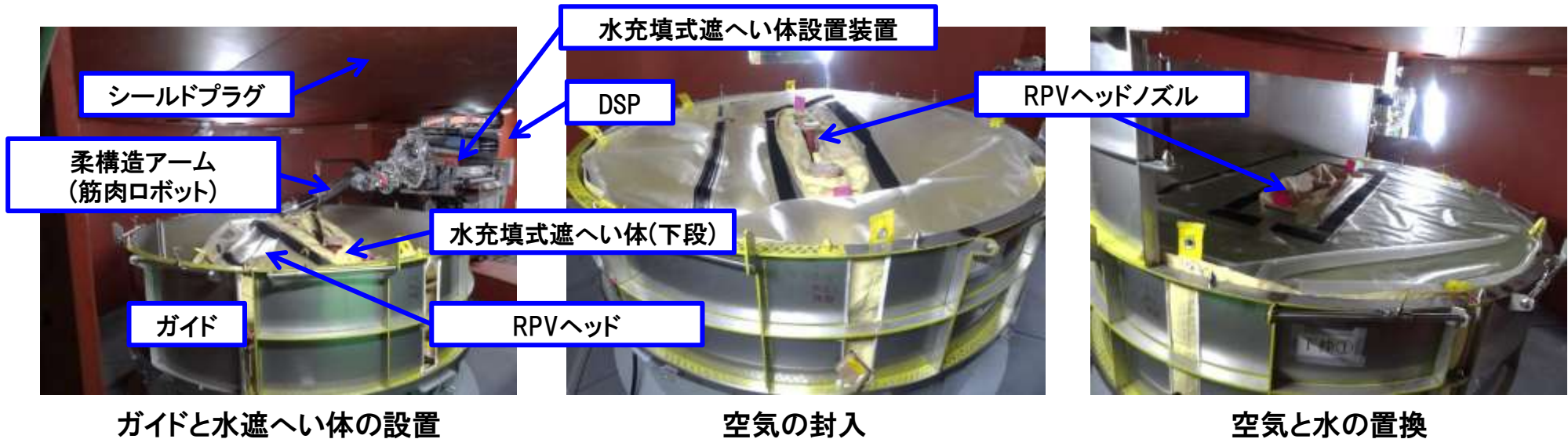
vi) 燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術

① 上アクセス工法に適用する形状追従、軽量遮へい体に関する試験

【水充填式遮へい体設置性の確認】

- 水充填式遮へい体は、水充填により形状が変化する。そのため、位置決めに課題があることがわかった。位置決めと水袋そのものへの荷重軽減措置としてガイドを設置することとした。
- 1/4スケールモデルによる、遠隔柔構造アーム(筋肉ロボット)を使用したRPVヘッド上への水充填式遮へい体の設置性について確認した。
- 水充填式遮へい体は、要素試験により、はじめに空気を封入し、その後水と置換することで偏りなく設置されることがわかった。

【水充填式遮へい体(下段)の設置性の確認】



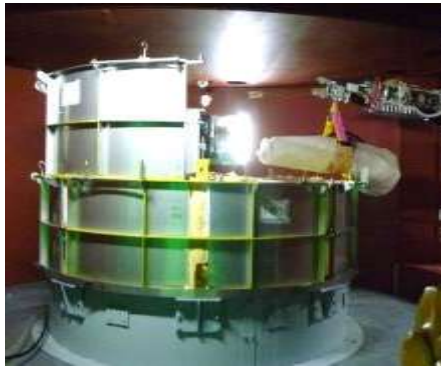
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vi) 燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術

① 上アクセス工法に適用する形状追従、軽量遮へい体に関する試験

【水充填式遮へい体(上段)の設置性の確認】



水充填式
遮へい体(上段)の搬入



水充填式
遮へい体(上段)の展開



水充填式遮へい体
(上段)の空気充填



空気と水の置換および
カメラによる完了確認

【水充填式遮へい体の撤去に関する確認】



ガイド

ガイドの撤去



搬送装置

DSP

ガイドの搬出



水充填式遮へい体(下段)

水充填式遮へい体の撤去



RPVヘッド

搬出容器

水充填式遮へい体の搬出

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vi) 燃料デブリ取り出しにおける作業員の被ばく低減技術

① 上アクセス工法に適用する形状追従、軽量遮へい体に関する試験

TRLレベル4に対し、スケールモデルによる遠隔作業による設置、撤去の確認および基本的な成立性について確認できたことから達成度に問題ないと考える。以下に本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【要素試験結果】

- 柔構造アーム(筋肉ロボット)を備えた水充填式遮へい体設置装置を使用して、遠隔作業により、基本的な設置および撤去作業について適用性が確認できた。
- 水充填式遮へい体は、RPVノズルなどとの干渉による破損を考慮し、ケブラー繊維などによる補強材を追加することで対応可能な見通しを得た。

【主な課題】

- 作業確認方法。遠隔作業の死角がないような照明やカメラの配置とメンテナンス方法。
- 排水処理方法。
- ケーブルやホースの処理方法。
- 作業時間の長期化。

【対応方針】

- 最適な照明とカメラの配置方法の検討および移動可能なカメラなどの検討と要素試験の実施。
- 水充填式遮へい体の水処理方法の検討(システム検討側とも調整)と要素試験の実施。
- ケーブルやホースの取り回しや処理方法の検討と要素試験の実施。
- 水充填式遮へい体設置装置の効率化および操作単純化などによる作業効率の向上。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

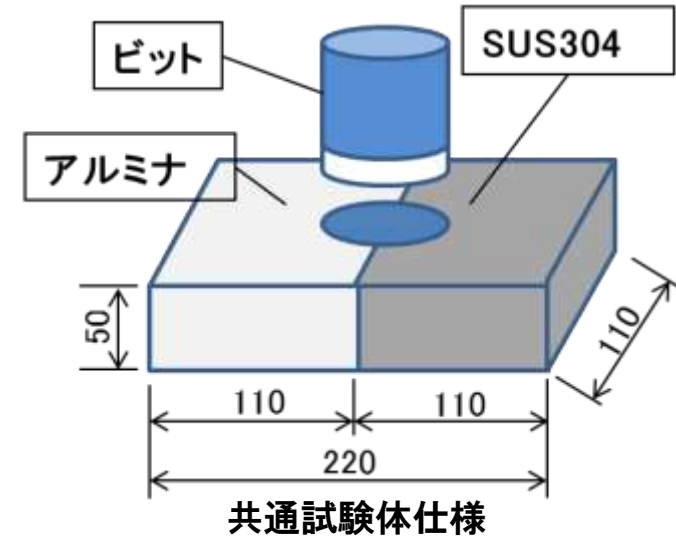
【目的:開発目標】

選定された加工技術について、加工試験が実施され、関係機関※による評価・確認がされていること。
(終了時目標TRL:レベル3)

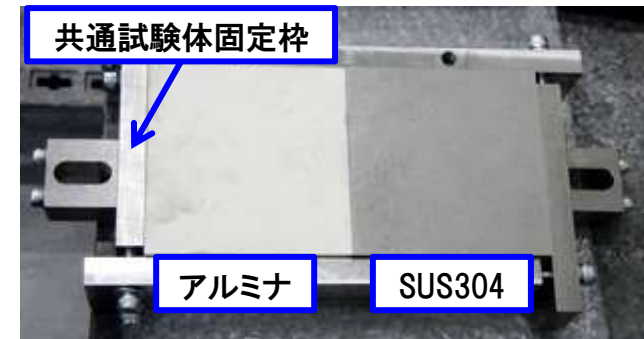
【平成28年度検討内容】

- 改良ビットによる切削初期の安定性および切りくずの排出状況の確認。
- ノンコアビットによる加工性の確認。
- 共通試験体を使用した加工試験の実施。
- 加工時に発生した廃液の分析。
- 角度付試験体の加工性の確認。

※:経済産業省・資源エネルギー庁、(株)三菱総合研究所、原子力損害賠償・廃炉等支援機構など



角度付(30°)試験体の加工状態の例



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

切削初期の安定性および切りくずの排出性を向上させるため改良ビットを製作し要素試験を実施した。主な改良点と試験結果を以下に示す。



従来のΦ66 インプリネイティッドビット



No.1: 外高テーパー1



No.2: 外高テーパー2



No.3: 角Rストレート



No.4: 角R斜め加工

主な改良点

- 外高にすることで切削初期の安定性を高める。
- チップの角を丸めることで長い切りくずの発生を抑え排出性を高める。



従来のΦ66 ストラタビット



No.1: 丸型チップ3個



No.2: 丸型チップ4個



No.3: 丸型チップ5個

主な改良点

- 材料とチップが当たってすぐにチップ先端が欠けることがあったためチップ形状を丸型とした。
- 材料にかみこみにくかったため、チップ数を減らして1個あたりにかかる荷重を増加した。
- 切りくずの排出性を向上させるために本体に溝を追加した。

改良前

改良ビット(1/2)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

切削初期の安定性および切りくずの排出性を向上させるため改良ビットを製作し要素試験を実施した。主な改良点と試験結果を以下に示す。



No.1: φ35 ノンコアビット



No.2: φ65 ノンコアビット



No.3: φ48 ノンコアビット

主な改良点

- 給圧不足と思われる切れ止まりが発生したため、試験体に接触する面積を縮小するなどの対策を講じた。
- 試験体に接触する部分の形状は、切りくずが排出しやすいよう水の流れを考慮した。



従来のφ66 ストラタビット



No.4: ハイブリッド

主な改良点

- ストラタビットは、切削初期段階の安定性に欠ける。一方、インプリビットは、外高とすることで比較的初期の安定性が向上した。ストラタビットに、外高インプリビットのチップを取り付けて切削初期の安定性向上を図った。

改良前

改良ビット(2/2)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

改良ビット(インプリネイティッドビット)における金属切削試験結果

No.	ビット形状	ビット写真	給圧 (kN)	回転数 (min ⁻¹)	金属加工結果 (材質:SUS)	切削初期の 安定性	切りくずの 排出性	備考
1	外高 テーパー1		15	150		良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	
2	外高 テーパー2		15	225		良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	
3	角R ストレート		15	225		可 (加工性に影響がない程度)	良好 (切りくずの詰まりなし)	
4	角R 斜め加工		15	225		可 (加工性に影響がない程度)	良好 (切りくずの詰まりなし)	刃に欠けあり(刃に対し引っぱり方向に欠けた)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

改良ビット(ストラタビット)における金属切削試験結果

No.	ビット形状	ビット写真	給圧 (kN)	回転数 (min ⁻¹)	金属加工結果 (材質:SUS)	切削初期の 安定性	切りくずの 排出性	備考
1	丸型チップ 3個		7	150		安定しない (安定するまで時間がかかる)	良好 (切りくずの詰まりなし)	・切削途中においてチップの脱落あり。 ・チップの欠けあり。
2	丸型チップ 4個		7	150		安定しない (安定するまで時間がかかる)	良好 (切りくずの詰まりなし)	同上
3	丸型チップ 5個		7	150		安定しない (安定するまで時間がかかる)	良好 (切りくずの詰まりなし)	同上
4	ハイブリッド		15	150		良好 (初期から安定している)	可 (加工の継続は可能)	切削初期の安定性向上のためにインプリのチップを追加。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

改良ビットにおけるアルミナ削試験結果

No.	ビット形状	ビット写真	給圧 (kN)	回転数 (min ⁻¹)	加工結果 (アルミナ)	切削初期の 安定性	切りくずの 排出性	備考
1	外高 テーパー1		15	150		良好 (初期から安定し ている)	良好 (切りくずの詰ま りなし)	切りくずは粉状
2	丸型チップ 5個		10	150		安定しない (安定するまで時 間がかかる)	良好 (切りくずの詰ま りなし)	<ul style="list-style-type: none"> 切りくずは粉状 切削初期段階で切 れ味が低下したた め加工中止
3	ハイブリッド		15	150		良好 (初期から安定し ている)	良好 (切りくずの詰ま りなし)	切りくずは粉状

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

改良ビット(ノンコアビット)における切削試験結果(1/2)

No.	ビット形状	ビット写真	試験体種類 (SUS/アルミナ)	給圧 (kN)	回転数 (min ⁻¹)	切削初期の 安定性	切りくずの 排出性	備考
1	φ35 ノンコア ビット		 SUS	9	300	振れ止め 治具を使用	良好 (切りくずの詰 まりなし)	給圧不足と思われる 切れ止まりが発生。
			 アルミナ	9	300	振れ止め 治具を使用	良好 (切りくずの詰 まりなし)	
2	φ65 ノンコア ビット		 SUS	15	225	振れ止め 治具を使用	良好 (切りくずの詰 まりなし)	給圧不足と思われる 切れ止まりが発生。
			 アルミナ	15	150	振れ止め 治具を使用	良好 (切りくずの詰 まりなし)	

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

改良ビット(ノンコアビット)における切削試験結果(2/2)

No.	ビット形状	ビット写真	試験体種類 (SUS/アルミナ)	給圧 (kN)	回転数 (min ⁻¹)	切削初期の 安定性	切りくずの 排出性	備考
3	φ48 ノンコア ビット		 SUS	15	600	良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	継続した加工が可能。
			 アルミナ	15	300	良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	継続した加工が可能。

3. 本事業の実施状況

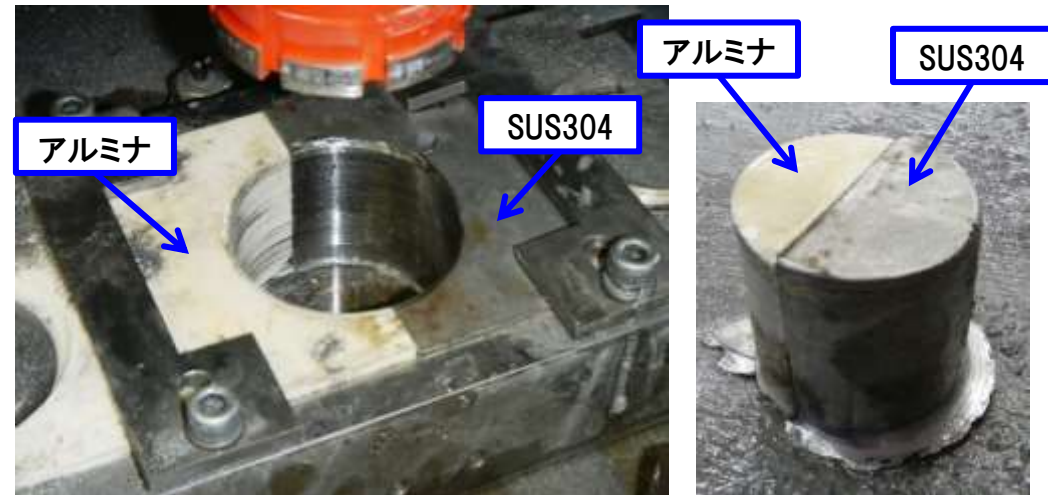
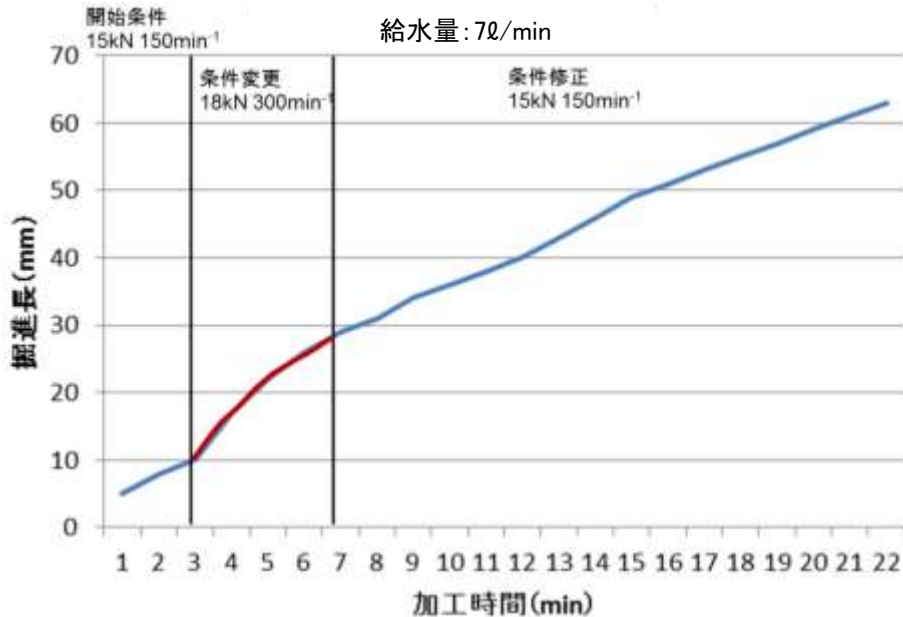
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

模擬燃料デブリを想定した共通試験体(アルミナとSUS304が1:1)を使用した加工試験を実施した。加工可能であり、コアを回収することができた。なお、部分提案者においても同様の試験を実施している。

ビット種類	切削時間 min	掘進速度 mm/min	ビット 磨耗量 g	ビット 磨耗体積 cm ³	試験体 掘削量 g	試験体 掘削体積 cm ³	掘削速度 体積/時間 cm ³ /min	備考
外高 テーパー1	22	2.86	50.20	4.06	457.2	75.9	3.45	掘削面だけの加工量
					1078.7	176.0	8.00	コアも含めた加工量



共通試験体加工状態

回収コア







3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

改良ビット(インプリネイティッドビット)における共通試験体切削試験結果

No.	ビット形状	ビット写真	給圧 (kN)	回転数 (min ⁻¹)	加工結果 (アルミナ/SUS)	切削初期の安定性	切りくずの排出性	備考
1	外高 テーパー1		15	150		良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	材質ごとの加工反力の違いから切削直進性に課題がある。
2	外高 テーパー1		15	225		良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	同上
3	外高 テーパー1		10	150		良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	同上
4	外高 テーパー1		10	225		良好 (初期から安定している)	良好 (切りくずの詰まりなし)	同上

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

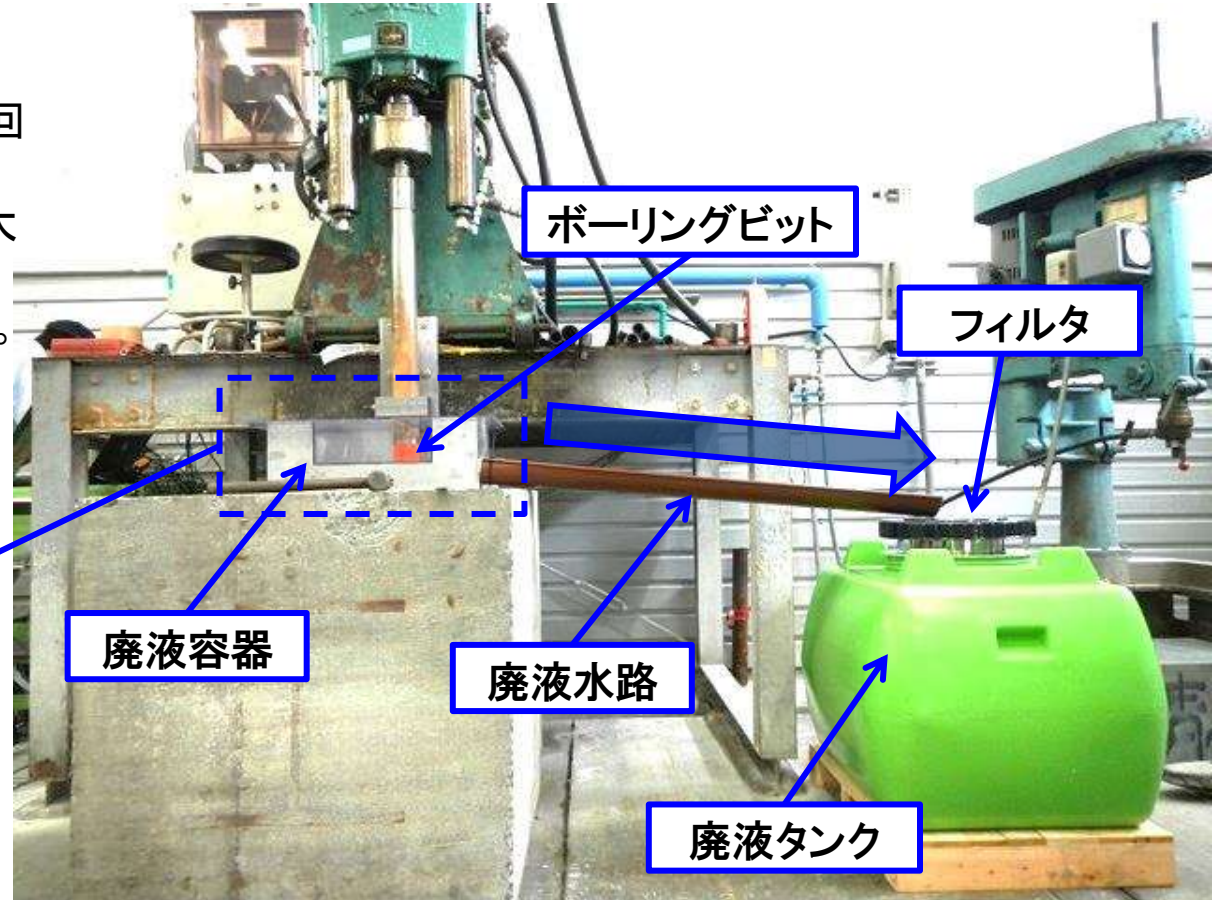
ボーリング加工中は、約7ℓ/minの給水により冷却と切りくずの排出を行っている。加工廃液を回収し、分析を実施した。

【分析方法】

- 加工時に発生した切りくずごと廃液を回収する。
- 廃液タンク入り口にフィルタをセットし大きな切りくずを回収する。
- 廃液容器に残った切りくずも回収する。
- 廃液を分析(粒度分布)する。



廃液容器内加工部拡大



廃液回収設備全体

3. 本事業の実施状況

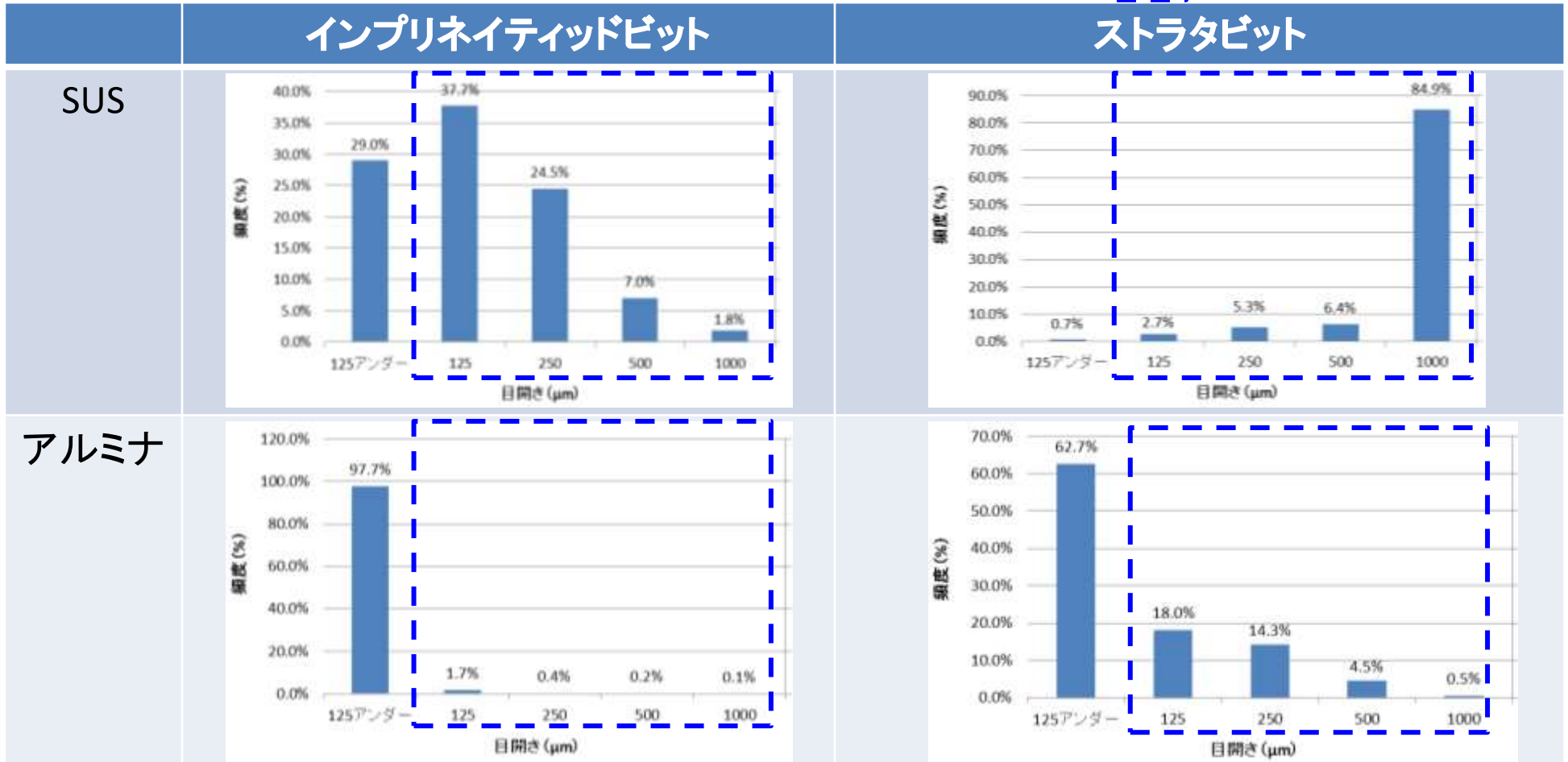
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

フィルタによって回収された範囲を以下に示す。結果からSUSよりアルミナの切りくずが小さく、ストラタよりインプリの方が切りくずが小さいことがわかった。

 : フィルタによる回収範囲



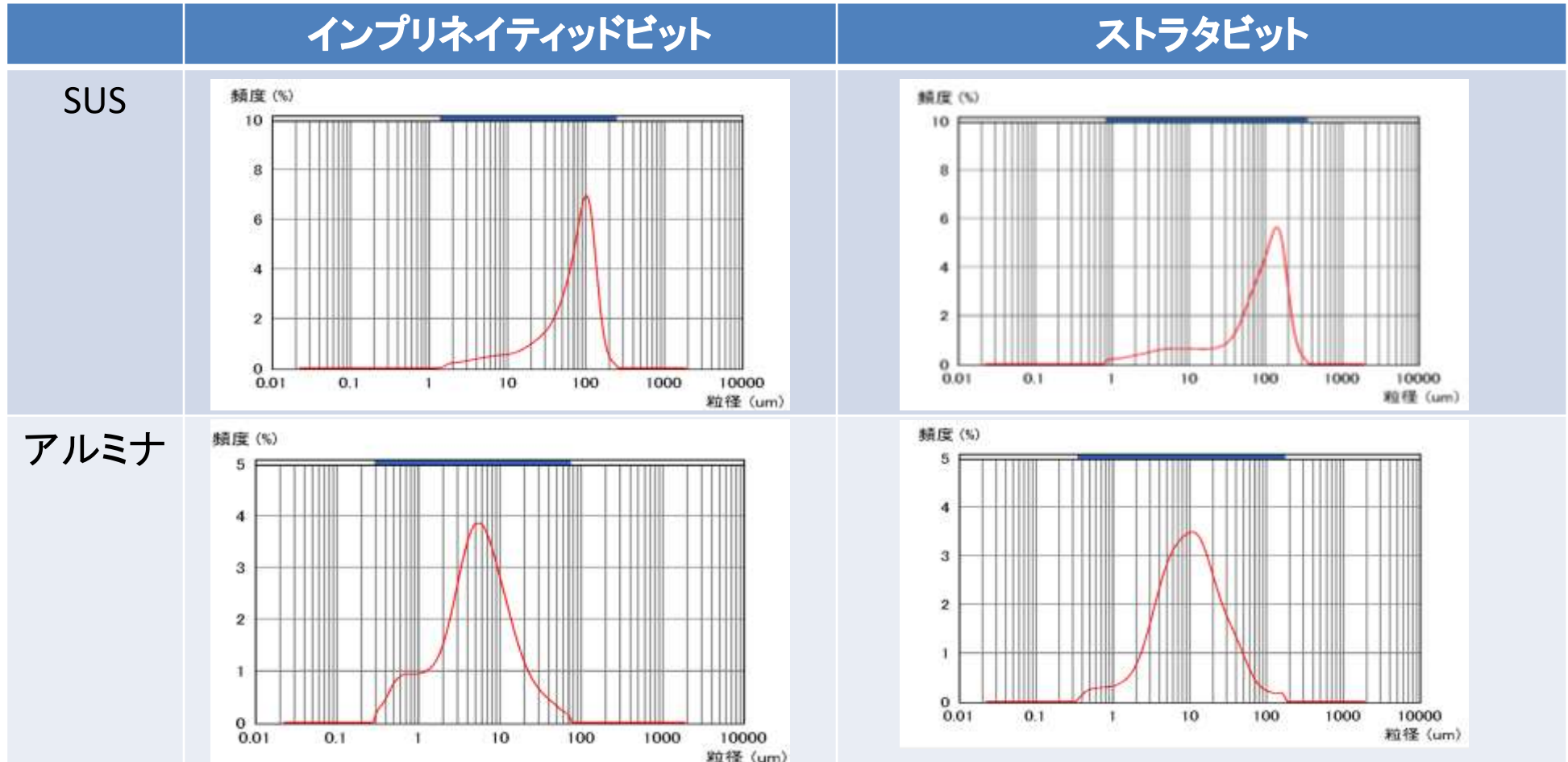
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

フィルタを通過した廃液について粒度分布を測定した。アルミナの方の粒度が小さいことがわかった。




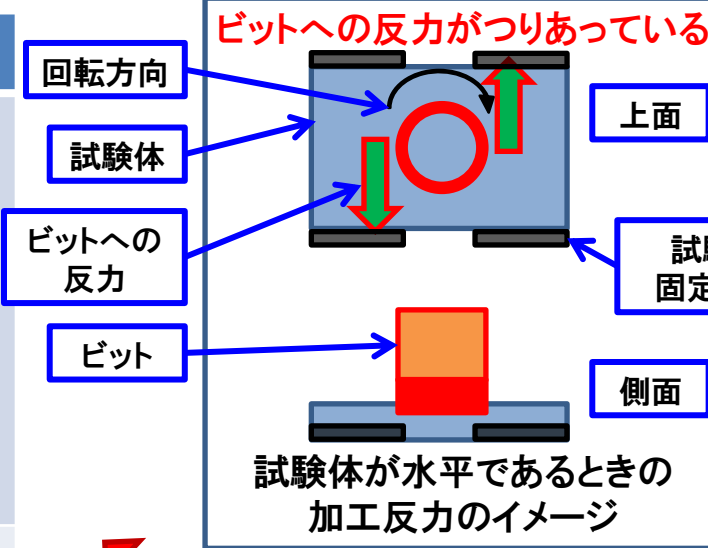
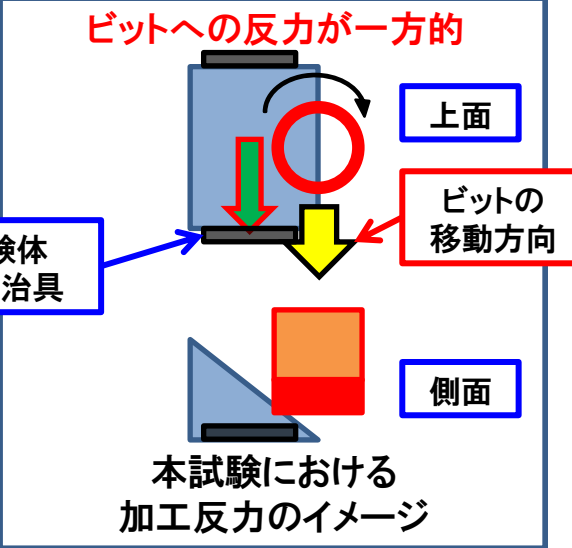


3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

角度付試験体を使用して加工可能か要素試験を実施した。加工初期段階は、加工可能と思われたが、加工面積が多くなると加工反力(回転方向)によりビットがずれることがわかった。

		インプリネイティッドビット	
SUS 30°		 <p>ビットへの反力がつりあっている</p> <p>試験体が水平であるときの加工反力のイメージ</p>	 <p>ビットへの反力が一方的</p> <p>本試験における加工反力のイメージ</p>
アルミナ 30°		 <p>加工反力</p> <p>試験体固定治具</p> <p>30°</p>	<p>【説明】</p> <p>➤ 試験体が水平の場合は、回転力に対する反力がつりあっているが、本試験では一方的に反力が発生するためボーリングビットが移動してしまう。</p>

加工状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

【要素試験結果(インプリネイティッドビット)】

- SUS、アルミナおよび共通試験体の加工は可能であった。
- ビット形状を改良したことにより、SUS、アルミナおよび共通試験体において、切削初期段階の安定性と切りくずの排出性が改善された。

【主な課題(インプリネイティッドビット)】

- SUSを切削する場合においてチップの消耗が早く、深く掘削する場合に切れ止まる可能性があることがわかった。(計算上は、共通試験体加工時で、約90mm掘削により寿命に到達すると推定)

【対応方針(インプリネイティッドビット)】

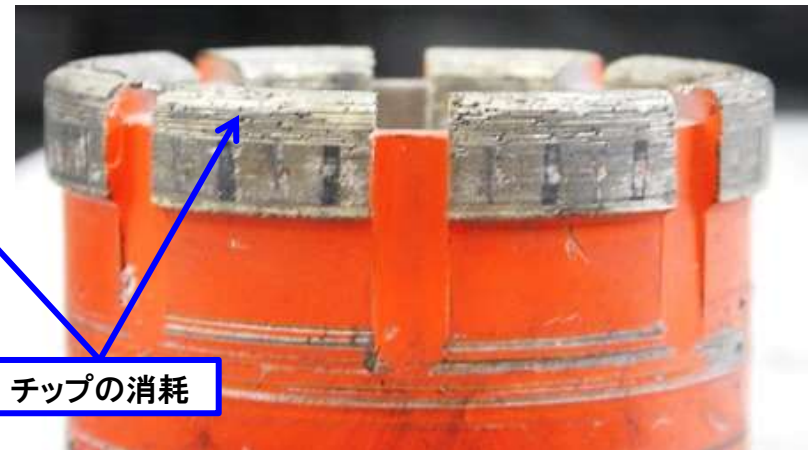
- ビットの交換頻度を少なくすることは燃料デブリ取り出し工事の効率化につながる。そのため、チップの消耗を抑えるなどの長寿命化に関する開発を実施する。



加工前状態



加工後状態



加工後状態チップ拡大

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

【要素試験結果(ストラタビット)】

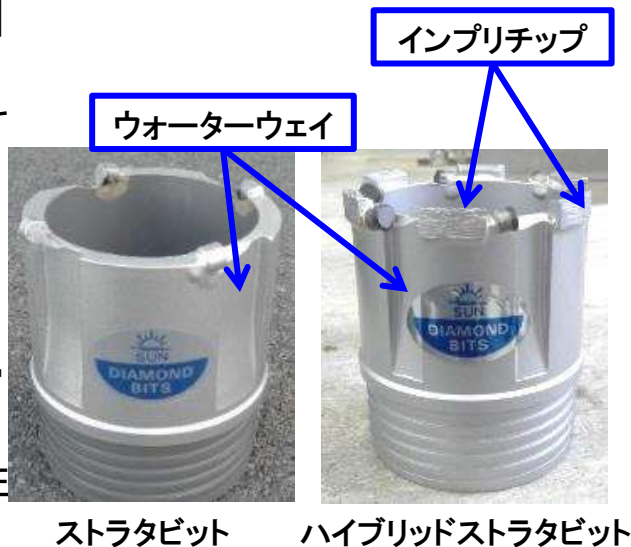
- ストラタビットは、切削初期段階において安定しなかったが、比較的切削初期段階において安定性が高いインプリネイティッドビットと組み合わせることによって、インプリネイティッドビットと同様の切削初期段階の安定性を得ることができた。
- ハイブリッドストラタビットは、SUS加工時において、インプリネイティッドビットの加工速度の4倍だった。

【主な課題(ストラタビット)】

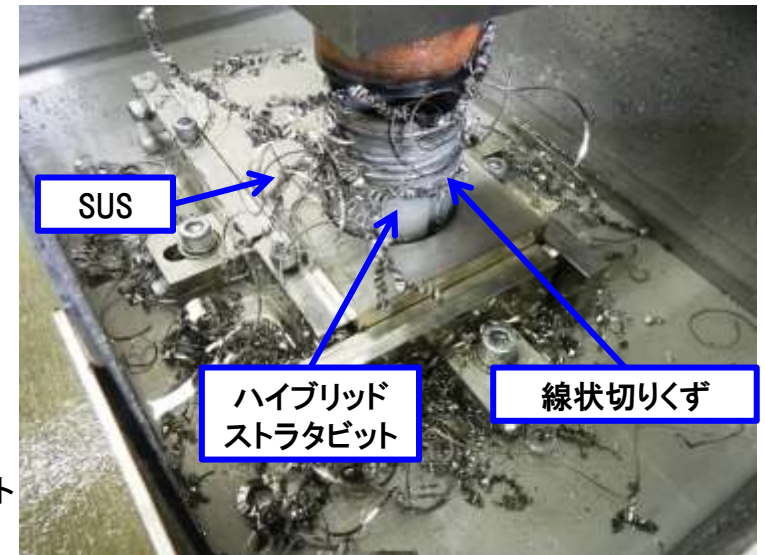
- 加工時に線状の切りくずが発生した。切りくずの排出に問題があると推定する。

【対応方針(ストラタビット)】

- ハイブリッド化するため、インプリチップを取り付ける際に、切りくずが水によって排出されるためのウォーターウェイの幅が狭くなってしまった。そのため線状切りくずが円滑に排出されなかったと考える。切削初期の安定性を確保しつつ切りくずの排出性もよいビットを開発する。



ウォーターウェイ比較



線状の切りくずの発生状況

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削に関する試験(ボーリング加工試験)

TRLレベル3に対し、基本的な加工性の確認がなされていることから達成度に問題ないと考える。また、部分提案事業者に対して共通試験体を供給し、比較項目をあわせた試験結果を提示した。以下に本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【要素試験結果まとめ】

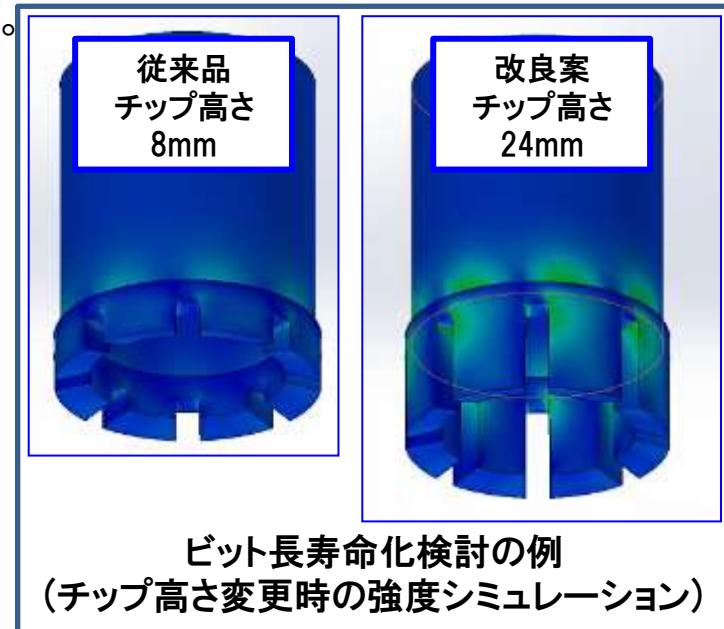
- 改良ビット(インプリネイティッドビット、ストラタビット)によるSUSおよびアルミナの加工は切削初期の安定性が改善された。
- 改良ビット(インプリネイティッドビット)において共通試験体の加工が可能であった。
- φ48ノンコアビットにおいてSUSおよびアルミナの継続的な加工が可能であった。
- 各ビットによる加工時の廃液を回収し粒度分布を分析した。
- 角度付試験体の加工は、ビットへの反力により加工できなかった。

【主な課題まとめ】

- インプリネイテッドビットのチップ消耗が早く、深く掘削する場合に切れ止まる可能性があることがわかった。
- ストラタビットをハイブリッド化して切削初期の安定性が向上したが、切りくずの排出性が損なわれた。
- ノンコアビットの加工性が十分ではない。
- 角度付試験体の加工方法。

【対応方針まとめ】

- 改良ビットの長寿命化の開発と要素試験の実施。
- ストラタビットの切りくず排出性向上の検討と要素試験の実施。
- ノンコアビットの加工性向上と要素試験の実施。
- 角度付試験体の加工時反力対策検討と要素試験の実施。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

【目的: 開発目標】

選定された加工技術について、加工試験が実施され、関係機関による評価・確認がされていること。

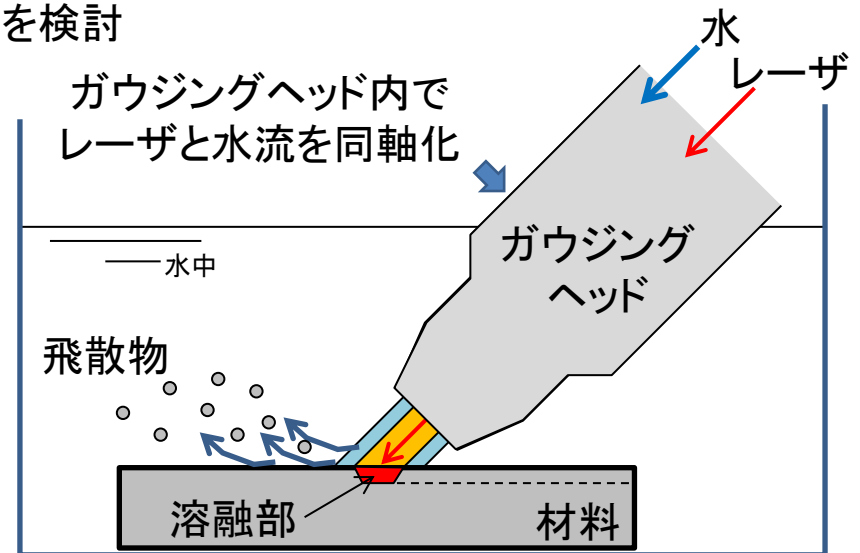
上記の評価・確認の結果を受けて、集塵試験が実施され、試験を実施した集塵技術について性能が示されていること。(終了時目標TRL:レベル3)

【要素試験の概要】

- 性状、形状等が不明の燃料デブリを、レーザの入熱で表面から溶かし、はつり取る(ガウジング)方式の適用性を検討
- 熱的加工の以下の課題に対して、データを取得し、対策を検討
 - ✓ 気中に移行(飛散)するヒュームの抑制
 - ✓ 飛散したヒュームの拡散の抑制
 - ✓ 飛散したヒュームによる換気システムの負荷低減

【平成28年度検討内容】

- 水中及び気中環境で使用可能な水流/レーザ同軸ノズルを設計・試作
- 共通試験体を製作し、部分提案者へ提供
- 加工条件(レーザ出力、ビーム走査速度、ビーム径等)の変化による除去量の変化を評価
- レーザガウジングにより発生する飛散物の評価
- 飛散したヒュームの拡散を簡易解析により評価
- 電気集塵によるヒュームの集塵性能のデータ取得



レーザガウジングの概念図

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

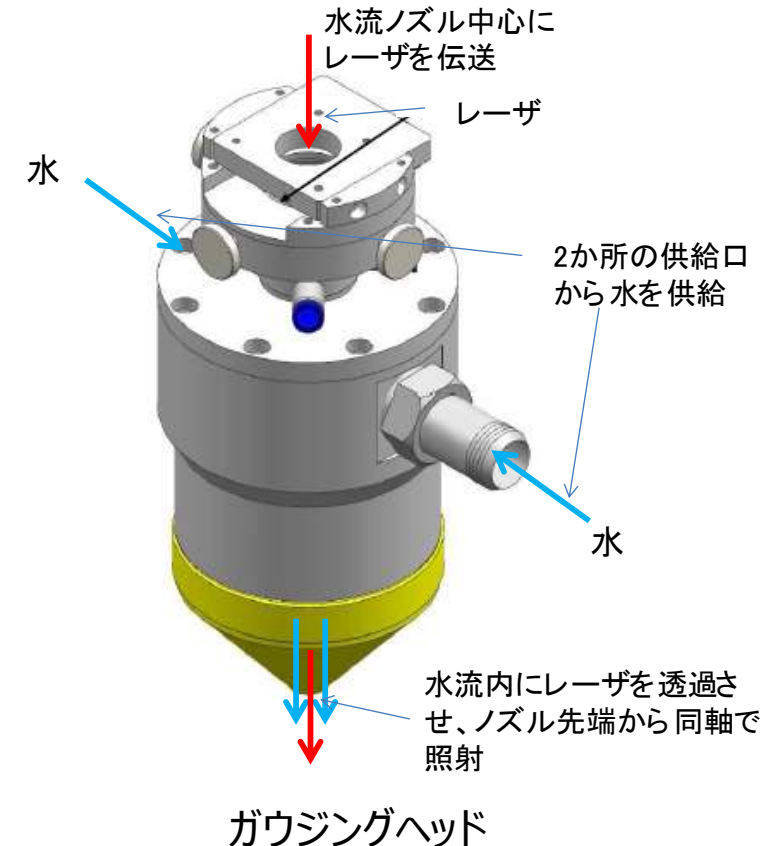
水流／レーザ同軸ノズルの設計・試作

- 昨年までの開発課題となっていた、大気中への水噴射の安定化を達成。
- ノズル先端から約70mmまで安定した水流を形成でき、ガウジング加工可能であることを確認*1。
- ノズル先端／ワーク間距離30～70mmの範囲でガウジング可能な光学系設計*1。
- ガウジングヘッドへの最大投入出力は25kWを確認。水流との同軸化によるガウジング加工検証済み。

*1: ノズル先端からの距離が増加するとレーザ出力減衰が増加するため加工効率は減少する。



レーザガウジング加工状況



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

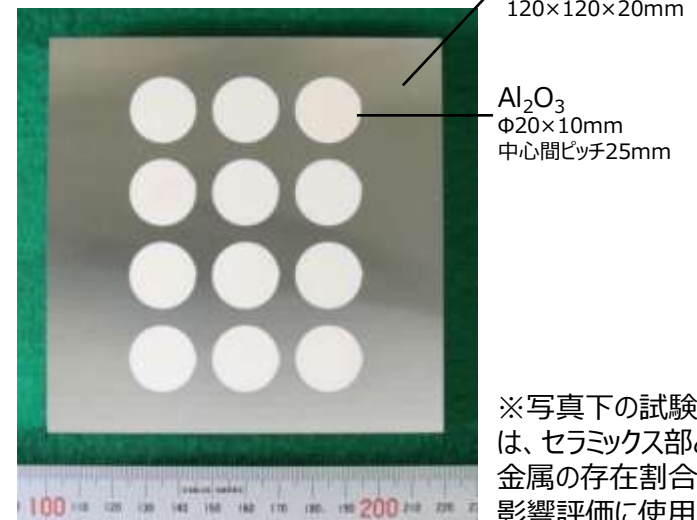
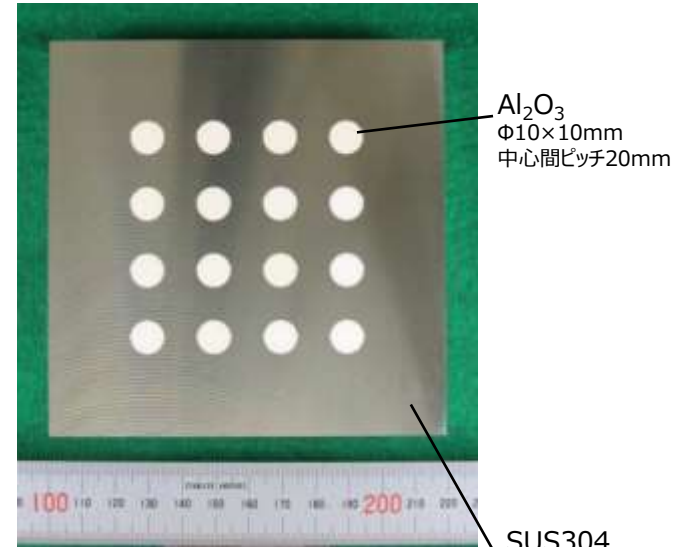
共通試験体の製作・部分提案事業者への提供

① クラスト(岩盤状) 固化物 <炉心部、炉底部>

	対象とする燃料デブリ	試験体
形態	燃料デブリおよび構造物(金属)の混合固化体	レーザ加工の観点から燃料デブリの物性を考慮し、材料選定した試験体。
燃料デブリ部	主成分: (U,Zr)O ₂ ・融点: 2500~2700℃ ・硬さ: 6~14GPa ・靱性: 1~8MPa√m	レーザ加工において重要な融点(T _m)に着目。 ・Al ₂ O ₃ (T _m :2050℃) ⇒(U,Zr)O ₂ より低融点材を飛散抑制試験に使用 ・ZrO ₂ (T _m :2720℃) ⇒融点の影響をみるため、Al ₂ O ₃ とともに切削試験に使用
構造物(金属)部	主成分: ステンレス鋼、Ni基合金、ジルカロイ ・融点: 1400~1800℃ ・硬さ: 1.5~3GPa	炉内構造物に使用されるオーステナイト系ステンレス鋼を選定。 ・SUS304 (T _m :1450℃)

② クラスト(岩盤状) MCCI生成物 <ペDESTAL部>

	対象とする燃料デブリ	試験体(①と同材を使用)
形態	MCCI生成物および構造物(金属)の混合固化体	レーザ加工の観点から燃料デブリの物性を考慮し、材料選定した試験体。
MCCI生成物	主成分: (U,Zr)O ₂ , SiO ₂ , (Zr,U)SiO ₄ ・融点: 2500~2700℃ ・硬さ: 1~20GPa ・靱性: 1~8MPa√m	レーザ加工において重要な融点(T _m)に着目。 ・Al ₂ O ₃ (T _m :2050℃) ⇒(U,Zr)O ₂ より低融点材を飛散抑制試験に使用 ・ZrO ₂ (T _m :2720℃) ⇒融点の影響をみるため、Al ₂ O ₃ とともに切削試験に使用
構造物(金属)部	主成分: ステンレス鋼、Ni基合金、ジルカロイ、低合金鋼 ・融点: 1400~1800℃ ・硬さ: 1.5~3GPa	炉内構造物に使用されるオーステナイト系ステンレス鋼を選定。 ・SUS304 (T _m :1450℃)



Al₂O₃
Φ10×10mm
中心間ピッチ20mm

SUS304
120×120×20mm

Al₂O₃
Φ20×10mm
中心間ピッチ25mm

※写真下の試験体は、セラミックス部と金属の存在割合の影響評価に使用

試験体外観写真

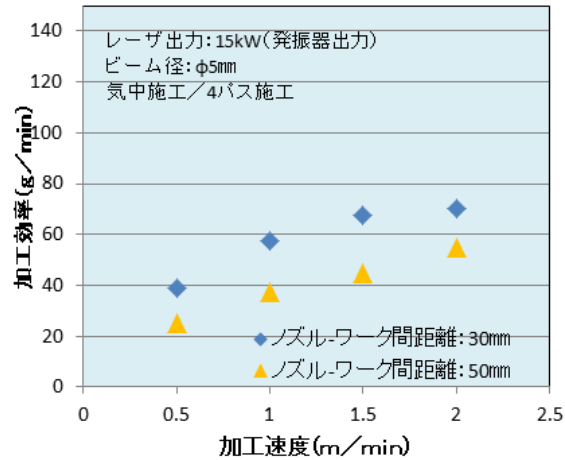
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

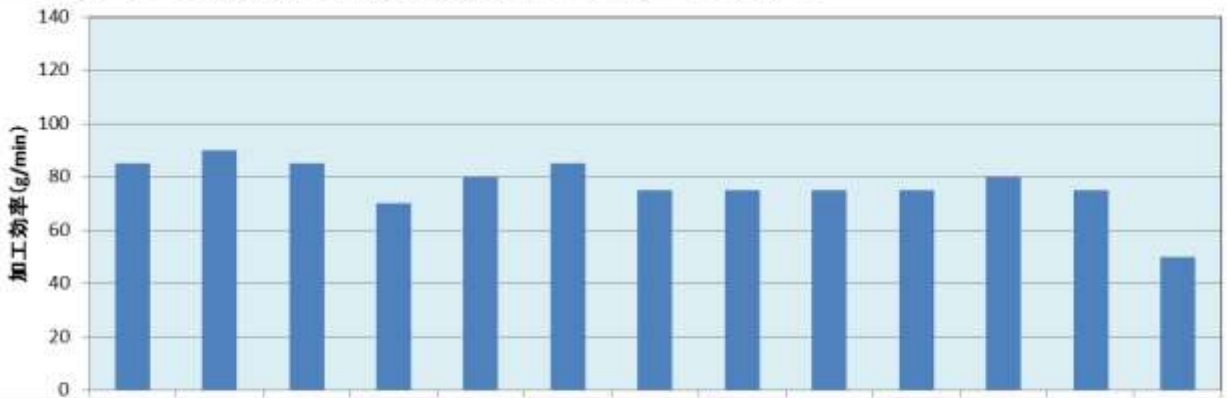
vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

レーザガウジング試験結果(加工条件の変化による除去量の変化)



レーザ出力: 20kW(発振器出力)、加工速度: 2m/min、ビーム径: φ5mm
 ノズル-ワーク間距離: 40mm(水中伝送距離: 50mm)、パス数: 4パス



施工環境	気中	気中	気中	水中	気中	水中	気中	水中	気中	水中	気中	水中	気中
姿勢	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向
照射角度(°)	45	60	75	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
流量(l/min)	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	26	16
ペレット材質	アルミナ	アルミナ	アルミナ	アルミナ	ジルコニア	ジルコニア	アルミナ	アルミナ	ジルコニア	ジルコニア	アルミナ	アルミナ	アルミナ
ペレット径(mm)	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	10	10

- 施工要因と材料要因によらず、加工効率は70~85g/min*1
 → 施工環境、照射角度、材料要因の影響を受けにくい
- 水流流量が16l/minまで低下すると加工効率が明らかに低下
 → レーザが透過する水流の流量の影響を受けるため、流量管理要

*1: 密度 (SUS304 (7.9g/cm³)、アルミナ (4.0g/cm³)、ジルコニア (5.7g/cm³) を考慮すると、体積換算で約10cm³/min程度)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

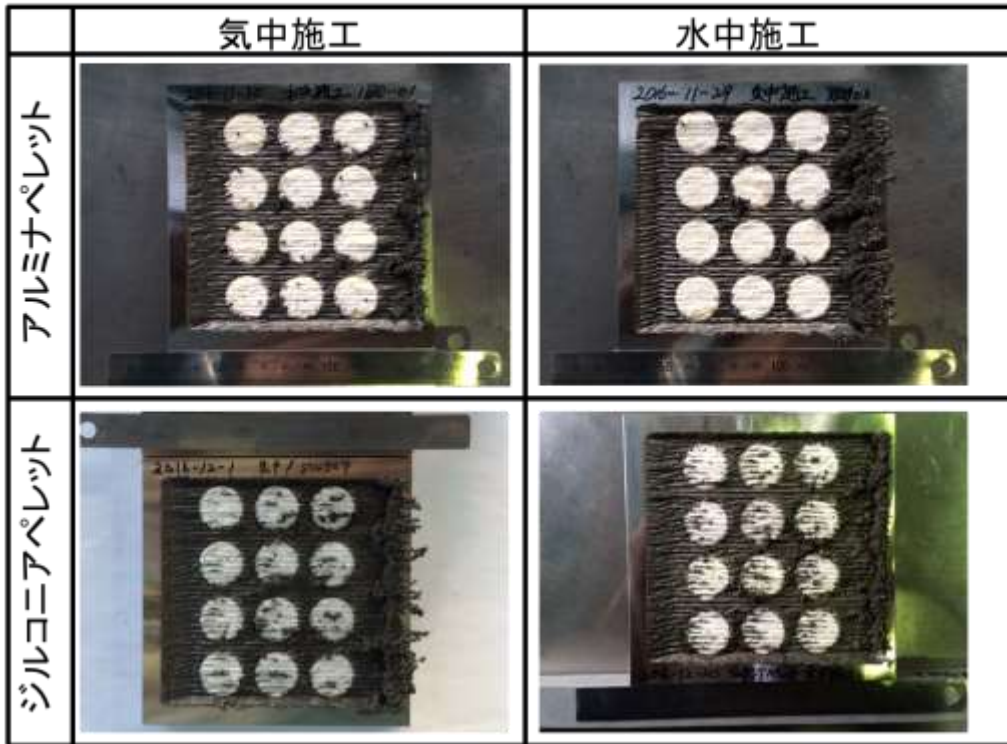
vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

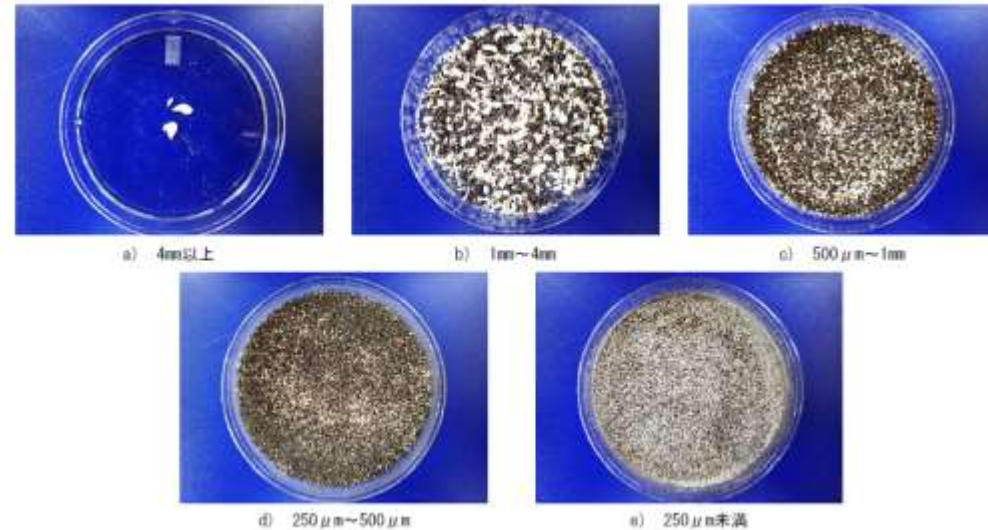
レーザガウジング試験結果(飛散物回収試験)

ペレット材質	施工環境	除去量 (g)	加工効率 (g/min)
アルミナペレット	気中	146	73
	水中	144	72
ジルコニアペレット	気中	157	79
	水中	147	74

粒径	沈殿物回収重量 (g)			
	アルミナペレット		ジルコニアペレット	
	気中施工	水中施工	気中施工	水中施工
4mm以上	0.1	0.5	0.4	0.1
1mm~4mm	16.3	14	13.7	12.8
500 μm~1mm	41	49.6	42.7	49.2
250 μm~500 μm	54.4	58	63	58
250 μm未満	30.8	19.4	34.8	23.4
合計	142.6	141.5	154.6	143.5



加工後の試験体外観と加工量



回収された沈殿物の外観と回収重量
(アルミナ/気中施工の例)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

レーザガウジング試験結果(飛散物回収試験)

粒径	気中飛散物回収重量 (mg)			
	アルミナペレット		ジルコニアペレット	
	気中施工	水中施工	気中施工	水中施工
11 μm 以上	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
7.0~11 μm	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
4.7~7.0 μm	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
3.3~4.7 μm	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
2.1~3.3 μm	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
1.1~2.1 μm	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
0.65~1.1 μm	4.4	<0.3	4.1	<0.3
0.43~0.65 μm	3.2	<0.3	2.6	<0.3
0.43 μm 未満	4.2	<0.3	3.5	<0.3

飛散物回収試験の条件

【加工条件】

レーザ出力(発振器出力)	: 20kW
加工速度	: 2m/min
照射ビーム径	: 約 ϕ 5mm
ノズル/ワーク間距離	: 40mm
加工ピッチ	: 2.5mm
水流流量	: 36 ℓ /min
ノズル内径	: ϕ 12mm
施工環境	: 気中および水中

a) 11 μm 以上b) 7.0~11 μm c) 4.7~7.0 μm d) 3.3~4.7 μm e) 2.1~3.3 μm f) 1.1~2.1 μm g) 0.65~1.1 μm h) 0.43~0.65 μm i) バックアップフィルター
(0.43 μm 未満)

回収された気中飛散物と回収重量
(アルミナ/気中施工の例)

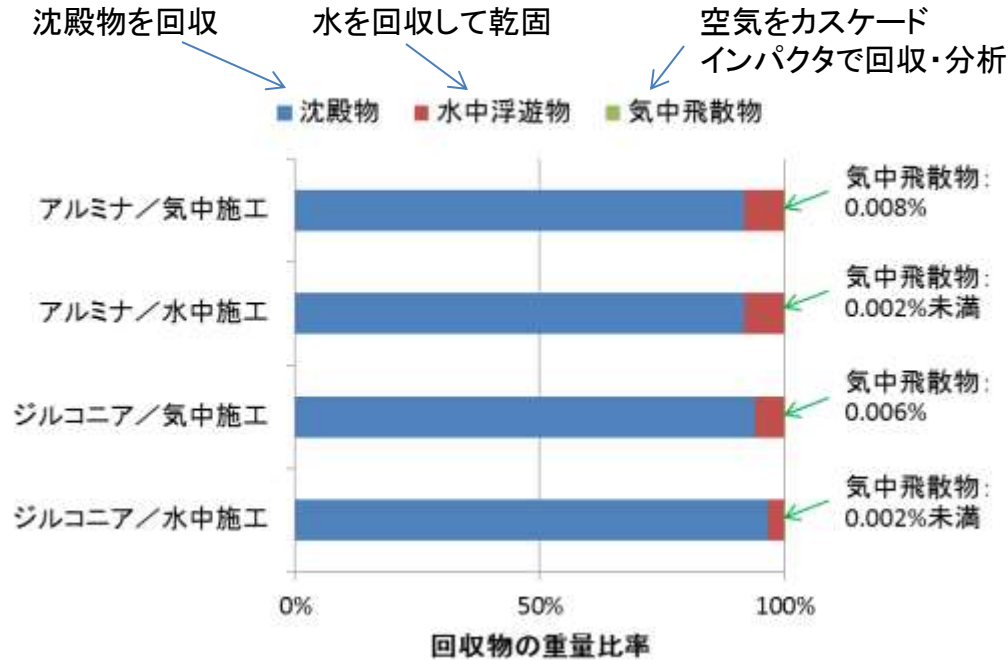
3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

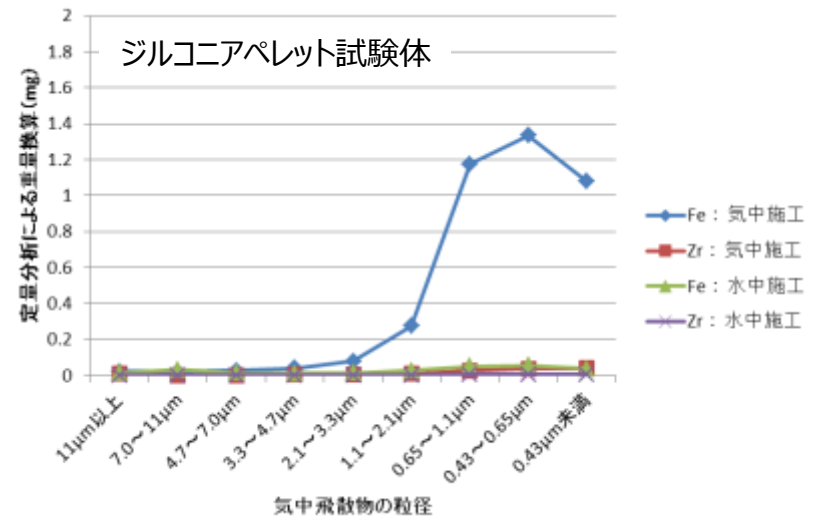
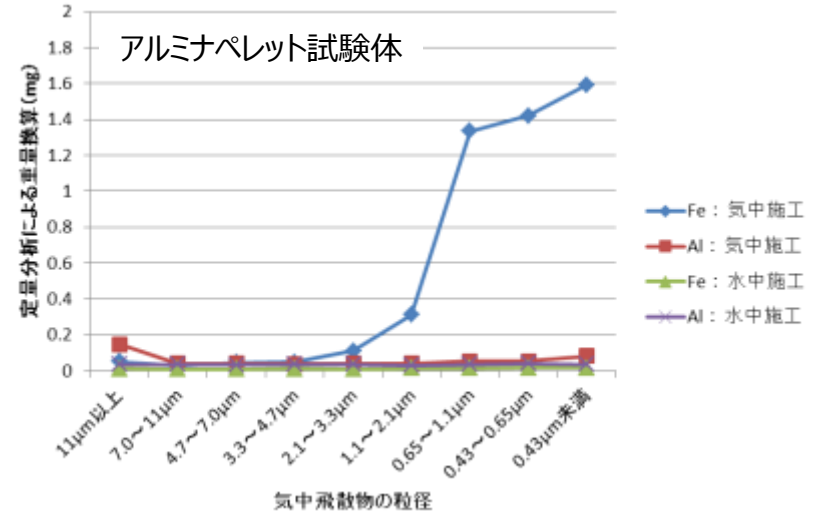
vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

レーザガウジング試験結果(飛散物の評価)



- 気中施工の場合でも気中飛散物の割合は0.006～0.008%程度
→ 水流除去による飛散抑制効果が大い
- 気中施工では粒径が小さくなると、Feの量が増加
- 粒径1 μm以下の粒子が支配的



3. 本事業の実施状況

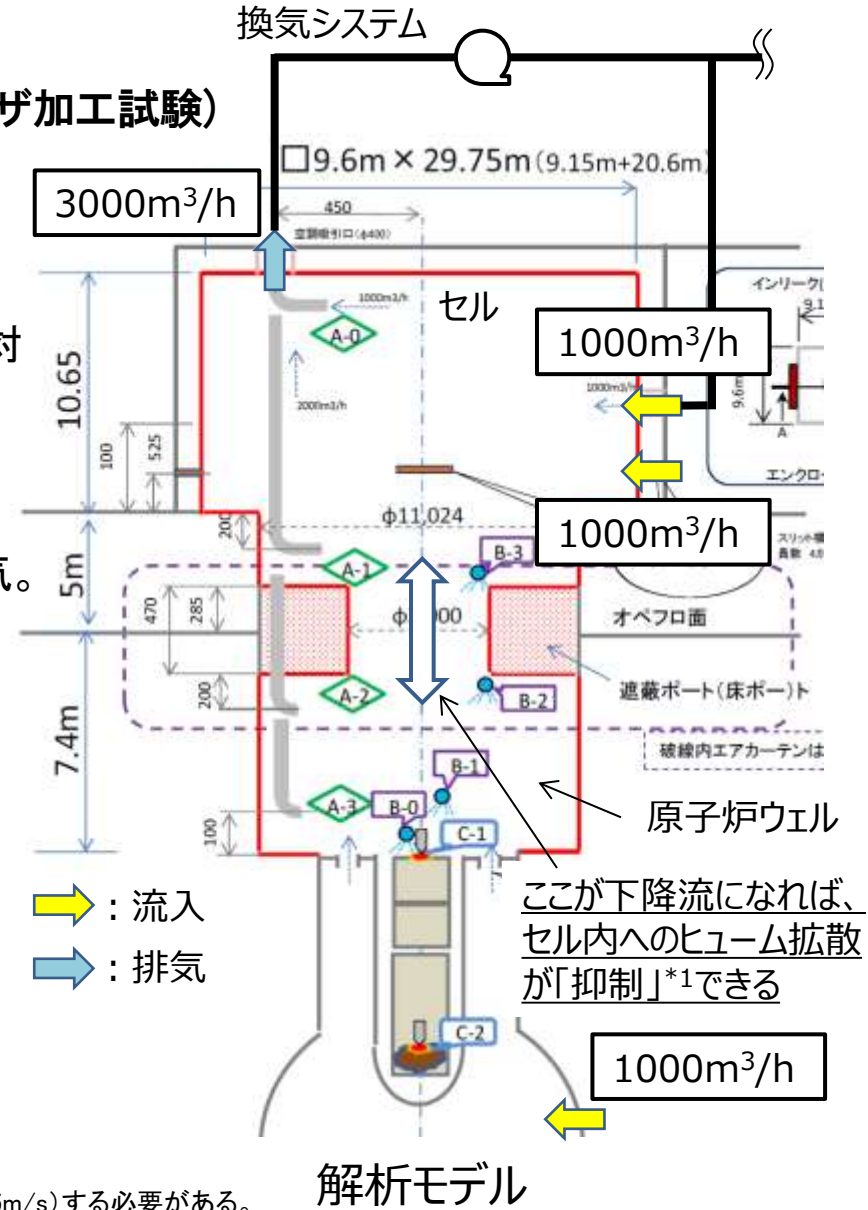
3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

RPV内熱源によるヒューム拡散解析評価(1/2)

- 負圧維持のための排気とレーザ加工の入熱によって、RPV内では上昇流が発生し、ヒュームはセル内に拡散。
- セル内の汚染防止のために、ヒュームが拡散しない条件、対策を検討。
- 主な解析条件
 - ✓ セル内からの排風量は3000m³/h。
 - 水素掃気のため1000m³/hはセルの天井(A-0)から排気。
 - 残りの2000m³/hの排気点はA-1～A-3まで変化。
 - ✓ セル内への流入量は以下と仮定。
 - PCV損傷部からの流入: 1000m³/h
 - セルの換気流量: 1000m³/h
 - 換気システムの再循環流量: 1000m³/h
 - ✓ レーザ加工の入熱は10kWと仮定。
 - ✓ セル／原子炉ウェル間の開口はφ3000mmと仮定。



*1: 「防止」するためには、流速を管理(例:0.5~1.5m/s)する必要がある。

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

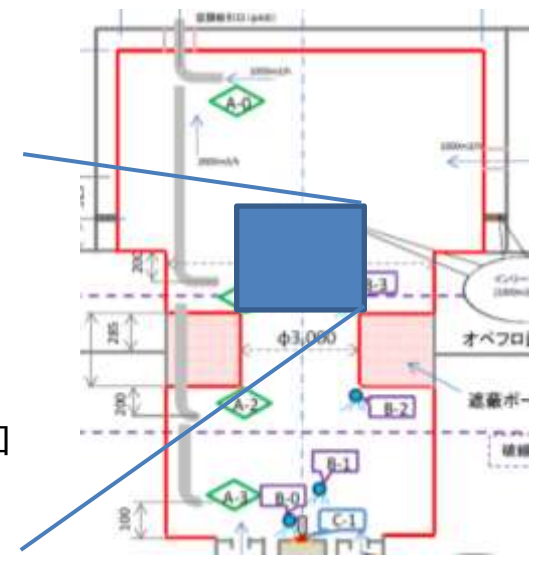
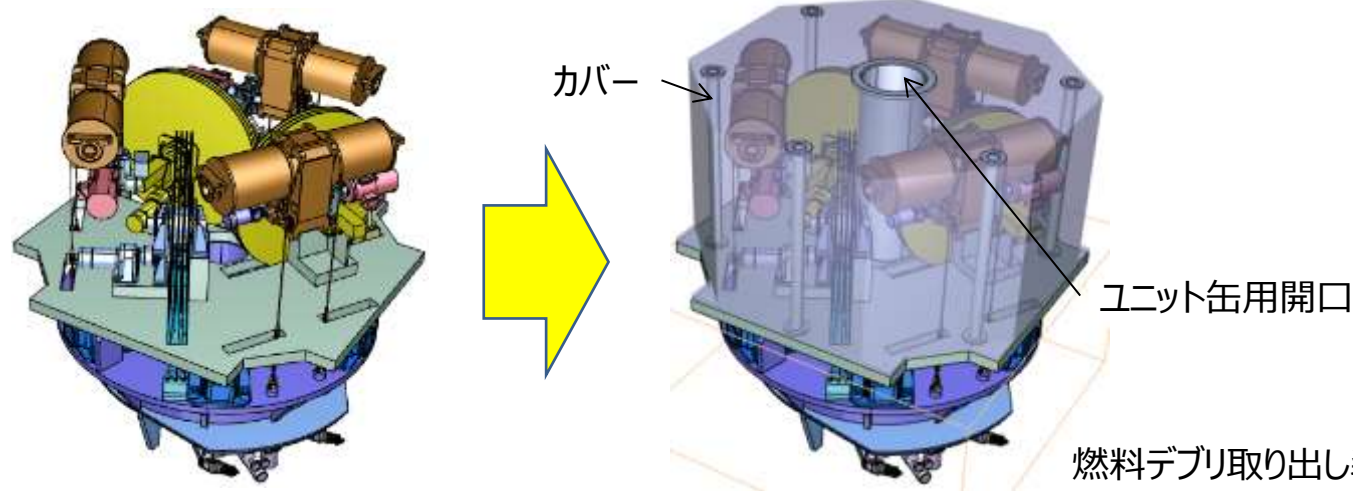
RPV内熱源によるヒューム拡散解析評価(2/2)

■ 解析結果

- ✓ 排気点をセルよりも下の原子炉ウェル内(A-2,A-3)としても、セル内への上昇流を防止できない。
- ✓ ミスト(20ℓ/hr)により上昇流を冷却しても効果は限定的。(PCV内湿度を100%で評価したことが影響)
- ✓ セル／原子炉ウェル間の開口をφ800mm*1まで狭めることで抑制効果が得られるが、今回の条件では上昇流を防止するまでは至らない。
- ✓ セル／原子炉ウェル間の開口より下にエアカーテンを流すことで抑制効果が得られるが、システムが複雑になる。

*1: 現状、検討している収納缶／ユニット缶(φ400mm)の2倍程度の寸法。

- いずれも、単独ではセル内への上昇流を防止することはできず、これらの対策を組み合わせることでシステム・装置を設計する必要がある。



燃料デブリ取り出し装置にカバーを設けて開口を小さくする例

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

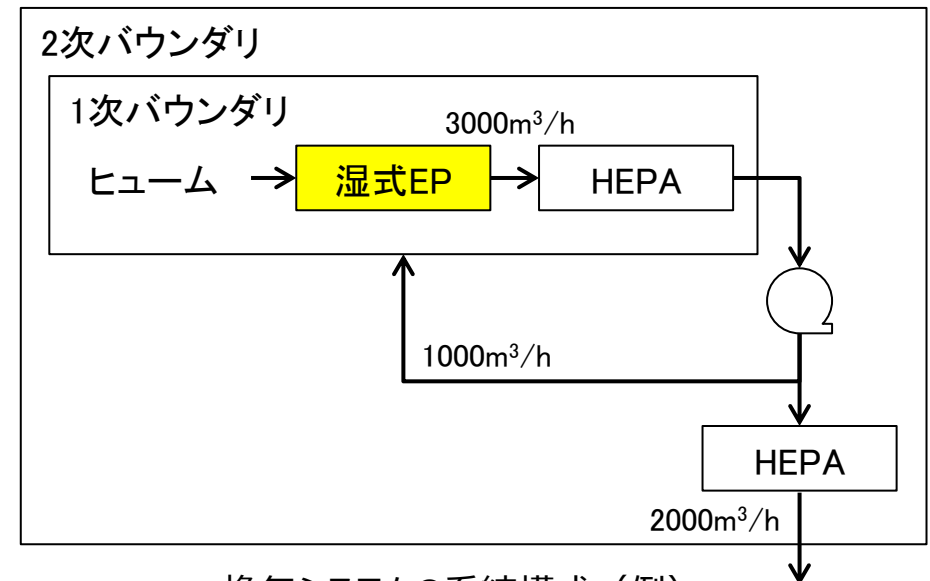
① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

湿式電気集塵機の性能確認試験(1/3)

- レーザ加工により発生するヒュームは局所回収、またはセルの換気システムで捕集。
- ヒュームの捕集にはHEPAフィルタの使用を検討中。
しかし、加工対象物を全て熔融・除去するレーザガウジングではヒュームの発生量が多く、HEPAフィルタの負荷低減のために前処理が有効。
- サブミクロンオーダーのヒュームを除去する設備として湿式電気集塵(湿式EP)に着目し、捕集性能を試験により確認。

■ 主な試験条件

- ✓ 風量: 297m³/h、355m³/h、436m³/h
←297m³/hは、実機の換気風量3000m³/hに相当
- ✓ 模擬粒子: 呼び径0.8μm、0.2μmのシリカ
- ✓ 供給粒子量: 19.2g/h、1.9g/h
←19.2g/hは、10年間で全ての燃料デブリをレーザ加工し、1%がヒュームとして飛散すると仮定した値からの換算量。
- ✓ 電極の洗浄水中の粒子濃度: 0~8g/l
←汚染水低減のため、再利用を想定



換気システムの系統構成 (例)

3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

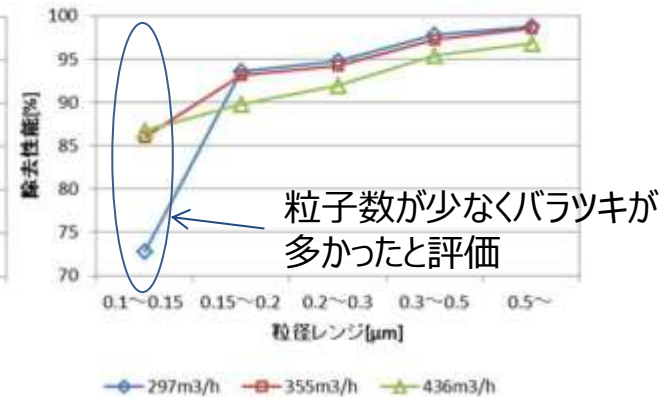
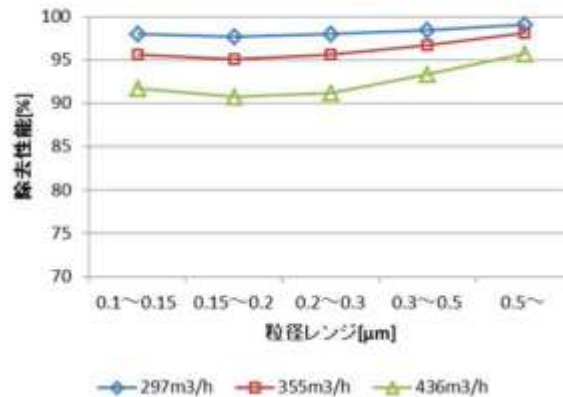
① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

湿式電気集塵機の性能確認試験(2/3)

- 除去性能は概ね90%以上であることを確認した。
- 0.2 μm付近の粒径で除去性能が低下することを確認した。
(一般論と整合する結果)

使用粒子 シリカ I	試験条件	No.1	No.2	No.3
	風量	297m ³ /h	355m ³ /h	436m ³ /h
粒径レンジ μm	0.1~0.15	98.0	95.6	91.7
	0.15~0.2	97.7	95.1	90.8
	0.2~0.3	98.0	95.6	91.2
	0.3~0.5	98.4	96.7	93.3
	0.5~	99.1	98.1	95.7
	Total	98.2	96.2	92.4

使用粒子 シリカ II	試験条件	No.4	No.5	No.6
	風量	297m ³ /h	355m ³ /h	436m ³ /h
粒径レンジ μm	0.1~0.15	72.8	86.0	86.7
	0.15~0.2	93.6	93.1	89.8
	0.2~0.3	94.8	94.2	91.9
	0.3~0.5	97.8	97.3	95.4
	0.5~	98.8	98.5	96.8
	Total	95.0	94.3	91.8



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

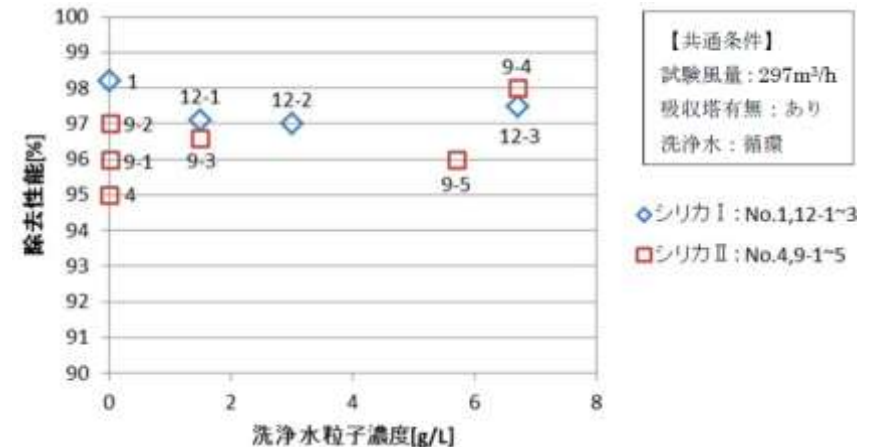
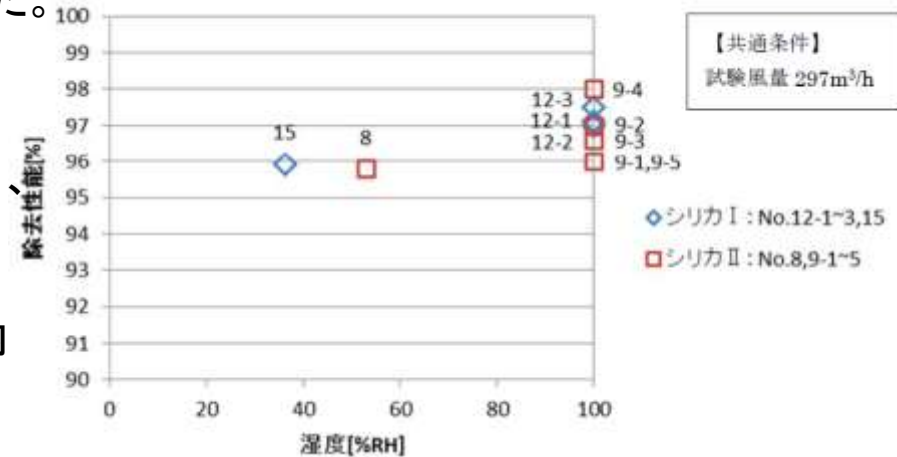
① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

湿式電気集塵機の性能確認試験(3/3)

- 湿度による除去性能の変化は見られないことを確認した。
- 洗浄水の粒子濃度は除去性能に影響しないことを確認した。



- HEPAフィルタの前処理として湿式EPを適用することにより、90%以上のヒュームを除去可能。
→HEPAフィルタの交換頻度を1/10に低減できる見込み。
- 湿式EPは1次バウンダリ内に設置する必要がある、セル内の配置可能性は今後の課題。
→小型化に必要な基礎データは今回の試験で取得。



3. 本事業の実施状況

3.2 工法実現性の見極めに必要な要素試験

vii) 燃料デブリ取り出しにおける切削・集塵、視覚・計測技術

① 燃料デブリの切削・集塵技術の性能に関する試験(レーザ加工試験)

【結果】

レーザ加工による燃料デブリの切削・集塵に関連する試験を実施し、基礎データを取得した。終了時目標のTRLレベル3を達成したと考える。以下に、本要素試験結果のまとめ、課題と対応方針を示す。

【まとめ】

- レーザガウジングによる加工試験を行い、加工条件に対する加工効率の基礎データ、発生する飛散物の基礎データを取得した。
- レーザ加工によって発生するヒュームの上部セル内への拡散の簡易解析を行い、ミスト、開口の縮小、エアカーテン等の複数の対策を組み合わせる必要があることを確認した。
- レーザ加工時に発生するサブミクロンオーダーのヒュームを想定して、これを除去する方式として湿式電気集塵機の基礎データを取得し、1段でDF10程度の性能を有することを確認した。
- 要素試験の結果、下記の課題を抽出し、対応方針を検討した。

【課題と対応方針】

- レーザガウジング加工については、加工効率の向上が必要。
- サブミクロンオーダーのヒュームによる環境影響の低減
→HEPAフィルタ+ α の対策を検討し、性能を検証
- 湿式電気集塵機の小型化・セル内への配置性
→実機設計およびセル内配置・動線の設計時に考慮

用語説明(1/2)

No.	用語	説明	備考
1	PCV	原子炉格納容器	
2	RPV	原子炉圧力容器	
3	CRD	制御棒駆動機構	
4	オペフロ	オペレーティングフロア	
5	DSP	機器貯蔵プール	
6	SFP	使用済燃料プール	
7	X-6ペネ	PCV配管貫通部の一つ	
8	セルアダプタ	PCVとセルを繋ぐピースのこと	
9	テレスコマスト	伸縮式マスト	
10	HVH	空調ユニット	
11	ハンチング	細かく振動して安定しないこと	
12	インプリネイティッドビット	ダイヤモンドパウダーを使用したビット	
13	ストラタビット	ダイヤモンド焼結体を使用したビット	
14	MCCI	溶融炉心-コンクリート相互作用	
15	DF	除染係数	
16	チルトタンク	摩擦を軽減し、重量物をスライドさせる装置	
17	スパッタ	溶接中に飛散するスラグや金属粒	
18	シャルピー試験	試験片の靱性を評価するための衝撃試験	
19	ノンコアビット	コアが残らないビット	
20	給圧	ボーリングビットに供給する圧力	
21	HEPAフィルタ	空気清浄用の高性能フィルタ	
22	摺動プレート	摺動部の摩擦抵抗を低減させ、かじりを防止するためのプレート	

用語説明(2/2)

No.	用語	説明	備考
1	TRL7	実用化が完了している段階。	
2	TRL6	現場での実証を行う段階。	
3	TRL5	実機ベースのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階。	
4	TRL4	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。	
5	TRL3	従来の経験を応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階。	
6	TRL2	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求仕様を設定する作業をしている段階。	
7	TRL1	開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。	