

原子炉格納容器 止水技術の開発

2017年9月6日

廃止措置研究・人材育成等強化プログラム

平成29年度 国内サマースクール

日本原子力研究開発機構 楢葉遠隔技術開発センター

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

開発計画部長

高守 謙郎

この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金の活用により得られたものです。

講演内容

I. 予備知識

II. PCV補修・止水技術の開発状況

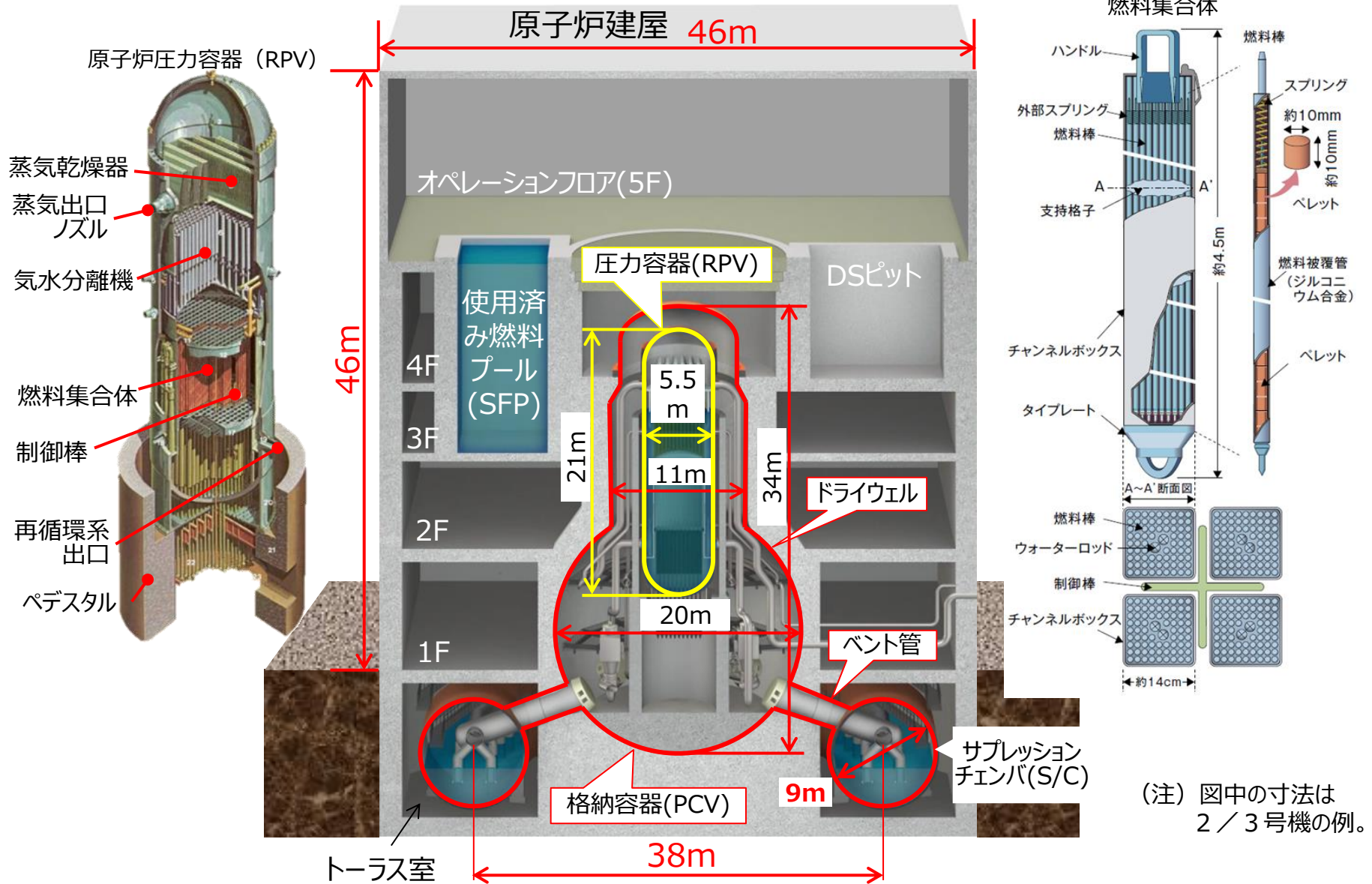
III. 実規模試験の概要

【略語】

- ▶ 福島第一原子力発電所⇒「1 F」
- ▶ 原子炉格納容器⇒「PCV」
- ▶ 燃料デブリ⇒「デブリ」（溶けた燃料と構造物が混ざりあったもの）

I. 予備知識

原子力発電所の構造



PCVの外観（建設写真）

「ドライウェル（D/W）」：S/Cより
上部のPCV

「PCV貫通部」：配管貫通部、
電気配線貫通部等

1号機 約150か所
2号機 約200か所
3号機 約190か所

「機器ハッチ」：大型機器の搬出入口

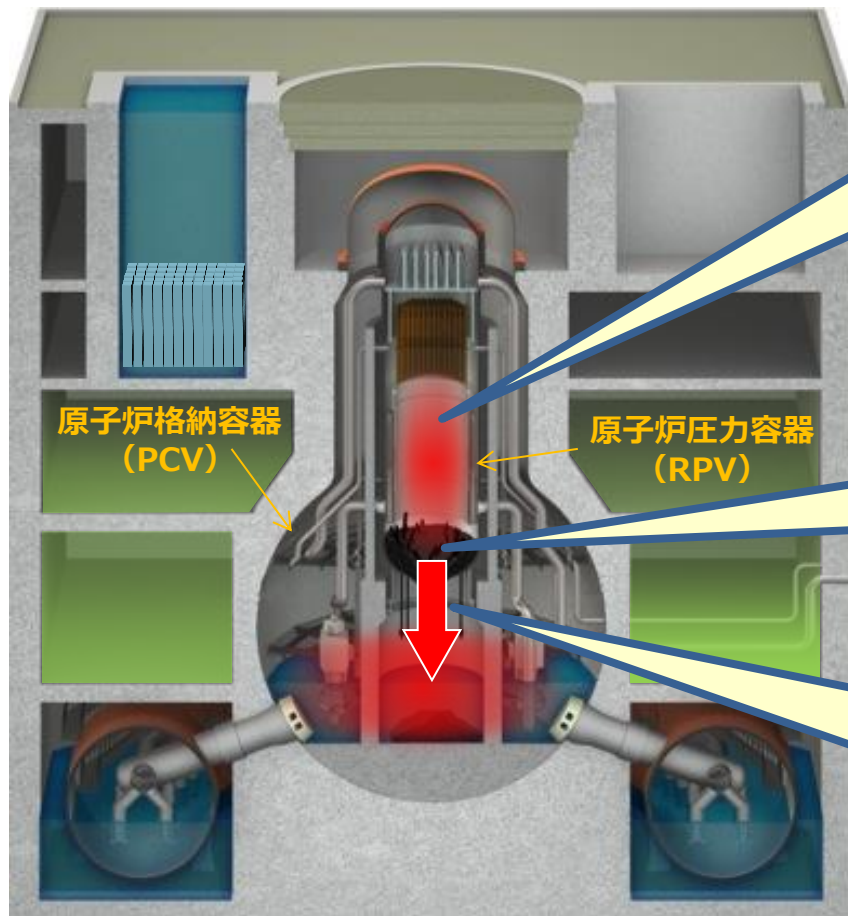
「ベント管」：D/WとS/Cの連絡配管

「サプレッションチェンバ（S/C）」：
事故が起きた時に発生した蒸気を
S/C内の水で凝縮し、PCVの圧力の
上昇を抑える。

「エアロック」：人の出入口

「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

炉心溶融、メルトダウン、メルトスルーの意味は？



原子炉建屋 (R/B) 断面図

「炉心溶融」：炉心の冷却機能が失われ、核燃料の過熱により炉心を構成している燃料集合体や炉心支持構造物が高温で融解すること。

「メルトダウン」：炉心溶融が進み、溶融した燃料デブリが炉心から落下して圧力容器の底に溜まること。

「メルトスルー」：圧力容器の底に溜まった高温の燃料デブリがさらに圧力容器の底まで溶かし、圧力容器の外に流れ出ること。

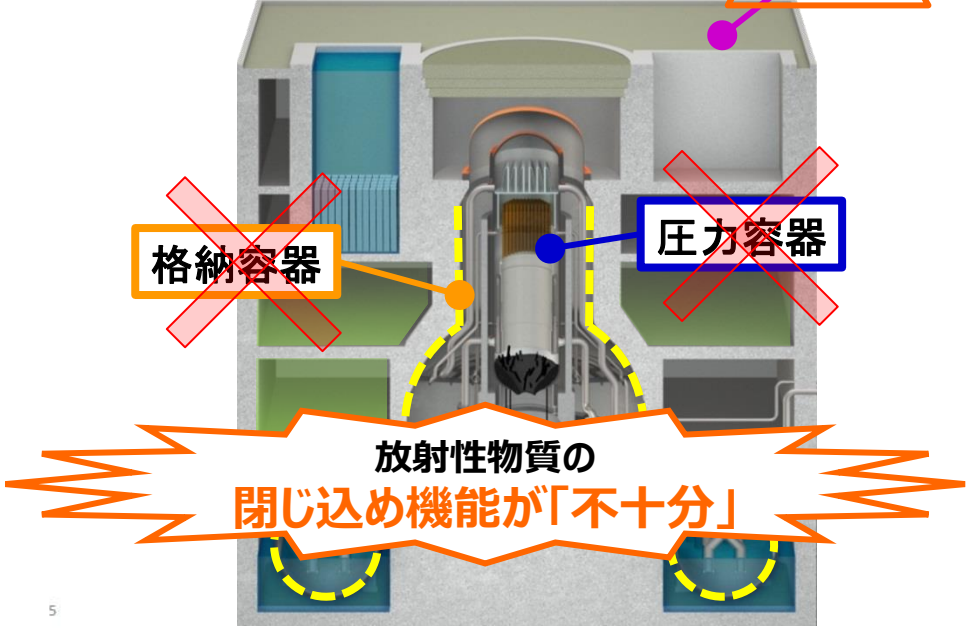
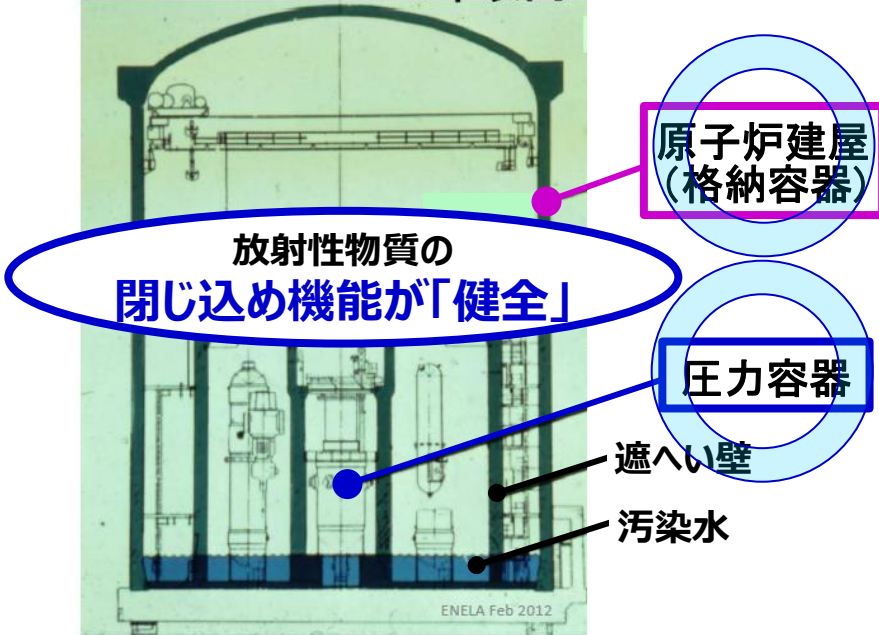
※ 必ずしも「炉心溶融＝メルトダウン」ではない。
区別して使われることがある。

1Fデブリ取り出しの難しさはどこか～TMIとの比較

TMI-2

1F-1,2,3

原子炉建屋



約133トン

デブリ総量

約880トン (3基)

ほぼRPV内、一部が配管内

デブリの拡がり

ペDESTAL底部に落下、底部コンクリートを浸食

(オペフロ線量)
除染・遮蔽後※ :約1mSv/h

放射線量

(オペフロ線量)
現在:数十～数百mSv/h

※ : 事故直後は数十mSv/h

1F廃炉に向けた行程（中長期ロードマップの概要）

（2017年8月現在）

2011年12月
【ステップ2*完了】

2013年11月

2021年12月

プラントの状態を
安定化する取り組み

第1期

第2期

第3期

初号機の使用済燃料
プール内の燃料取
り出し開始まで
(2年以内)

初号機の燃料デブリ
取り出し開始まで
(10年以内)

廃止措置終了まで
(30~40年後)

()内はステップ2完了からの期間



2013年11月18日に4号機使用済
燃料プールから燃料取り出し開始

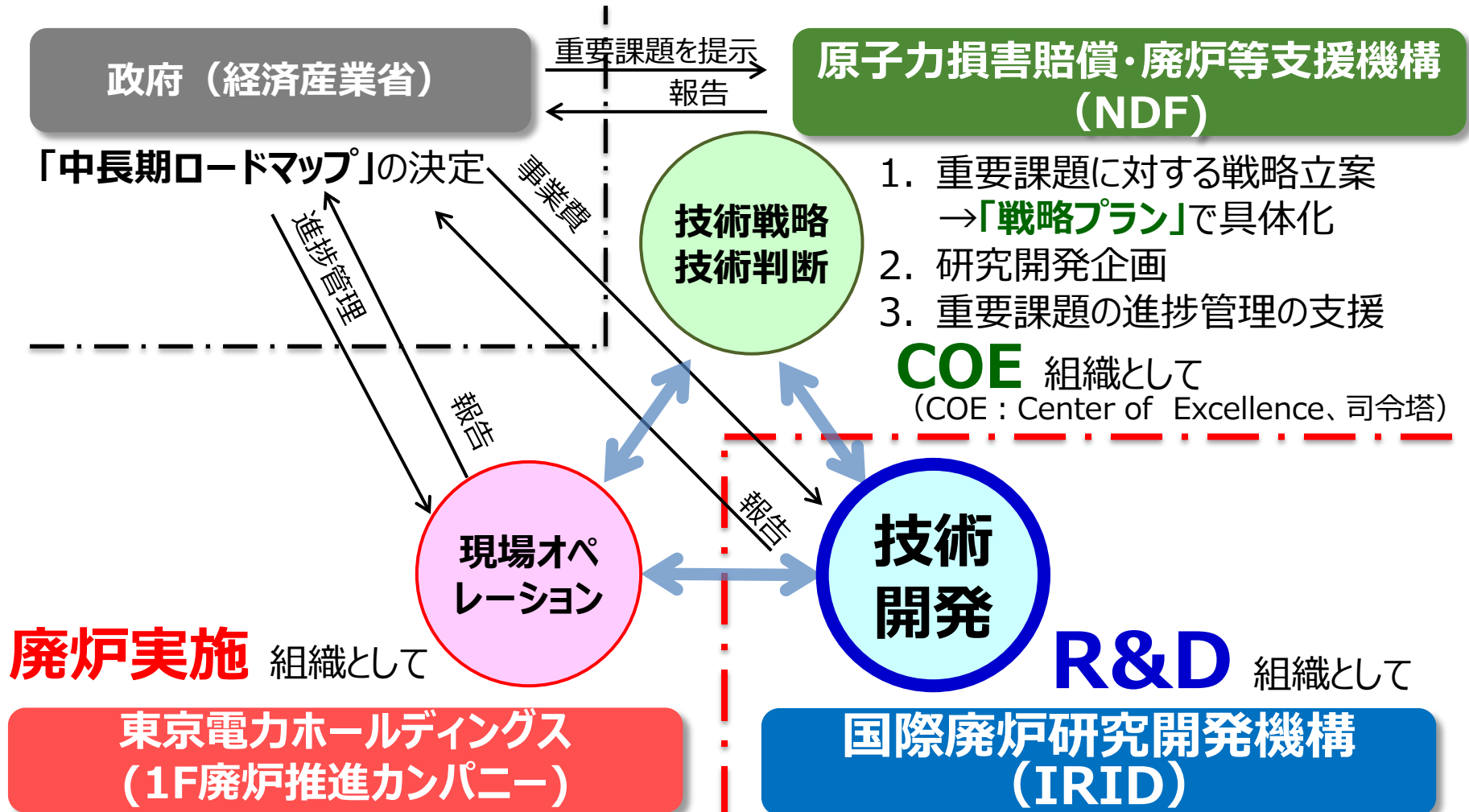
*ステップ2

- 放射性物質放出管理、放射線量大幅低減の達成
- 冷温停止状態の達成

- 中長期ロードマップ（政府の1F廃炉方針）は、**2015年6月12日に改訂**された。
- 目標工程(マイルストーン)の明確化
 - **号機毎**の燃料デブリ取り出し**方針の決定** **2017年夏頃**
 - **初号機**の燃料デブリ取り出し**方法の確定** **2018年度上半期**
 - **初号機**の燃料デブリ取り出しの**開始** **2021年内**

IRIDの役割

- ▶ 4者（政府、NDF、東京電力、IRID）が連携して1F廃炉を推進。
- ▶ **IRIDは技術開発の実施者（R&D組織）**として貢献。

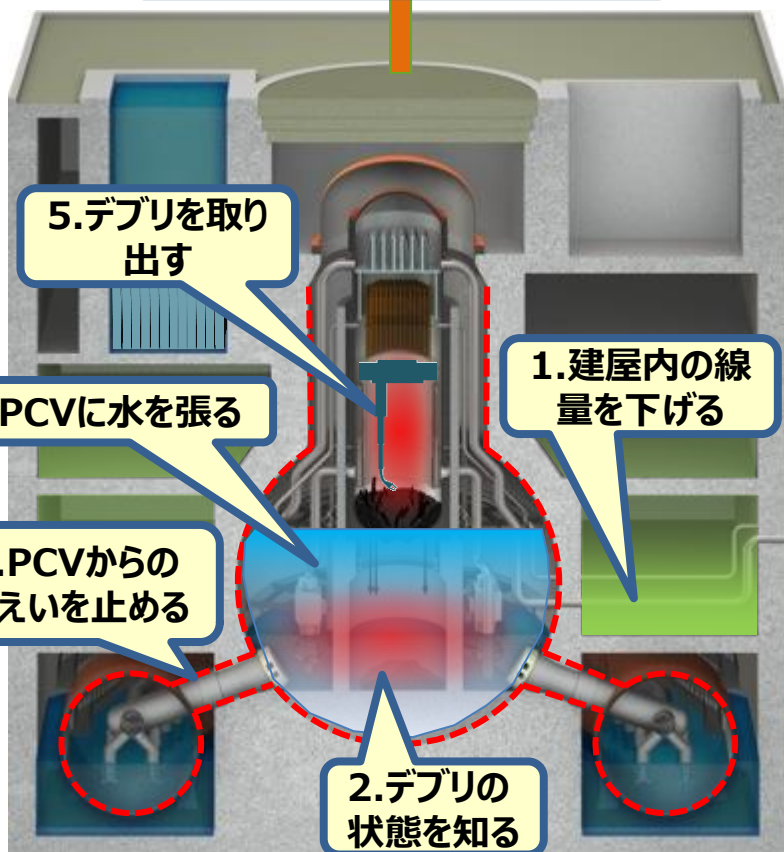


燃料デブリ取り出しに必要な技術開発

1. 建屋内の線量を下げる

- **遠隔除染**装置の開発

6. デブリを収納・移送・保管する



2. デブリの状態を知る

- ◎ 間接的に知る
 - **解析**による炉内状況把握
 - **宇宙線ミュオン**を利用した透視
- ◎ 直接的に知る
 - **PCV内部**調査、**RPV内部**調査

3,4. PCVの漏えいを止める、水を張る

- PCV**補修・止水**技術の開発
- PCV補修・止水**実規模試験**

5. デブリを取り出す

- デブリ取り出し**基盤技術**の開発
- デブリ取り出し**工法・システム**の開発
- **臨界管理**技術の開発

6. デブリを運びだし、保管する

- デブリ**収納・移送・保管**技術の開発

II. PCV補修・止水技術の開発状況

1. PCV補修・止水の目的

<デブリ取り出し>

- PCV内に水を張りPCVを冠水することで、以下を達成する。
 - ① 燃料デブリ・炉内構造物に付着する放射性物質からの放射線の遮へい※1
 - ② 燃料デブリ・炉内構造物の切削・移動時のダストの飛散防止※2
 - ③ 燃料デブリの冷却維持

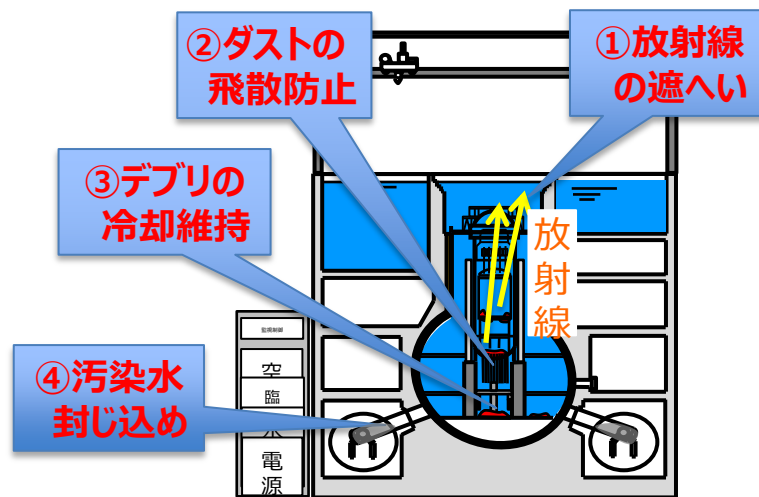
+

<汚染水封じ込め>

- PCV下部（ベント管又はS/C）を止水することで、
 - ④ PCVからR/B（トラス室）へ流れ込む汚染水量を抑制
（水位コントロールによりR/Bから外部への漏えい量はゼロにする）

※ 1：水遮へいにより上部取出しの作業エリアとなるオペフロの線量を低減する

※ 2：燃料デブリを水没させることにより、デブリ切削・移動時に発生するダストを水で捕獲する



2. デブリ取り出し時の放射性物質の閉じ込め

上部取り出しの場合

上部コンテナ ← 本格コンテナ

上部コンテナ

セル(上取り出し)

2次バウンダリ
(R/B、コンテナ)

1次バウンダリ
(PCV、セル)

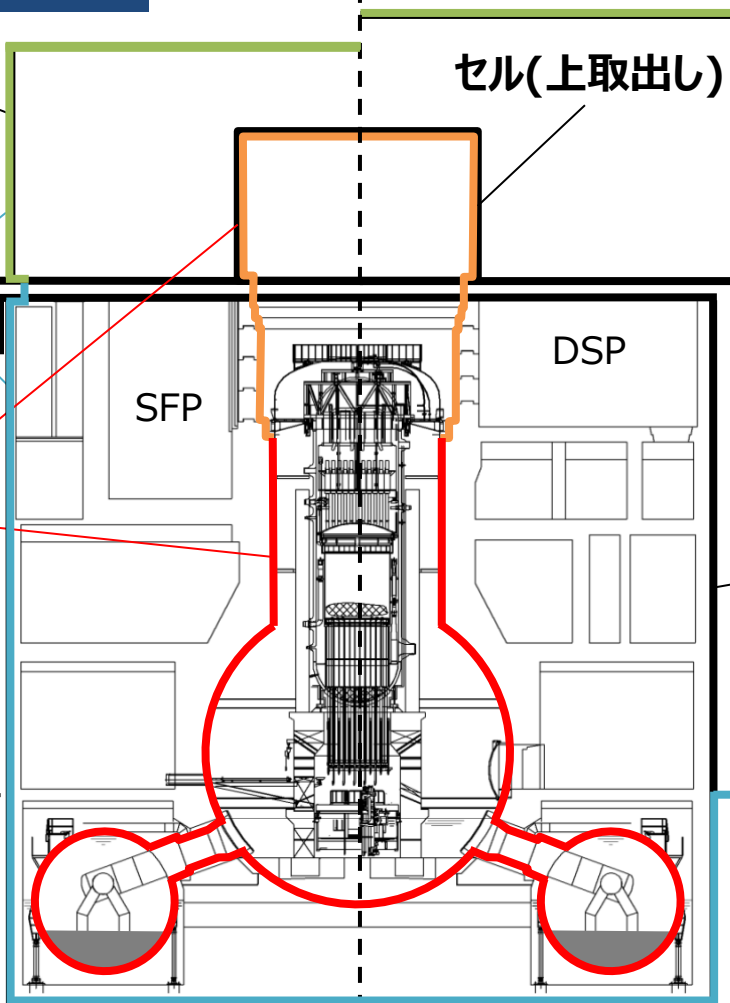
本格
コンテナ

R/B

地上階
↓
地下階

【凡例】

- 1次バウンダリ (既設)
- 1次バウンダリ (新設)
- 2次バウンダリ (既設)
- 2次バウンダリ (新設)



SFP : 使用済燃料プール

DSP : ドライヤー・セパレータ貯蔵プール

<気相部>

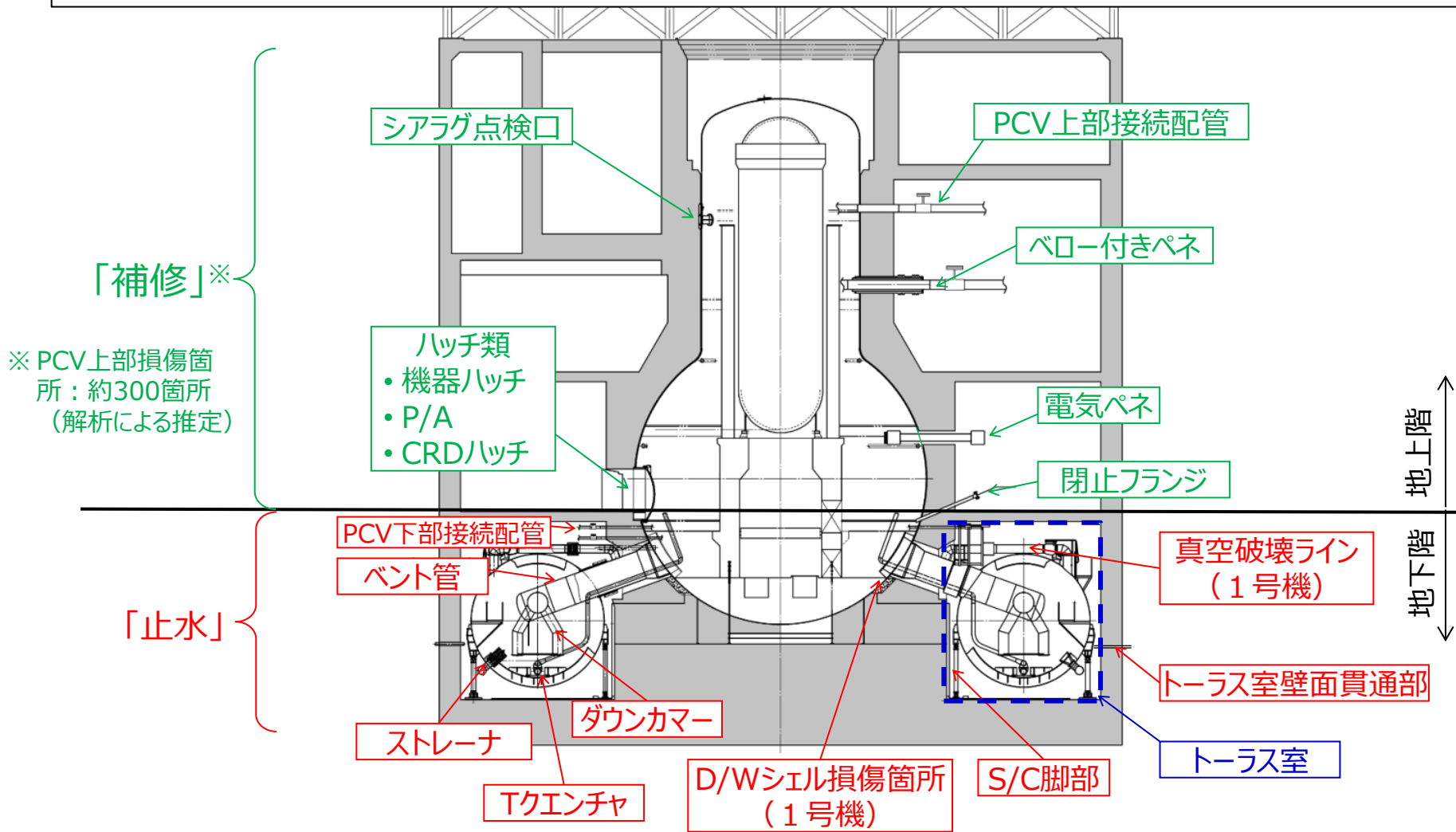
- PCV損傷部の**補修を可能な範囲で行う**。
- さらに、PCV及びR/B内の圧力を**負圧**することにより放射ダストの閉じ込めを行う。

<液相部>

- **PCV下部止水**により汚染水を極力トラス室に流入させない。
- さらに、地下水と建屋内の**水位差管理**（地下水水位 > トラス室水位）により汚染水の閉じ込めを行う。

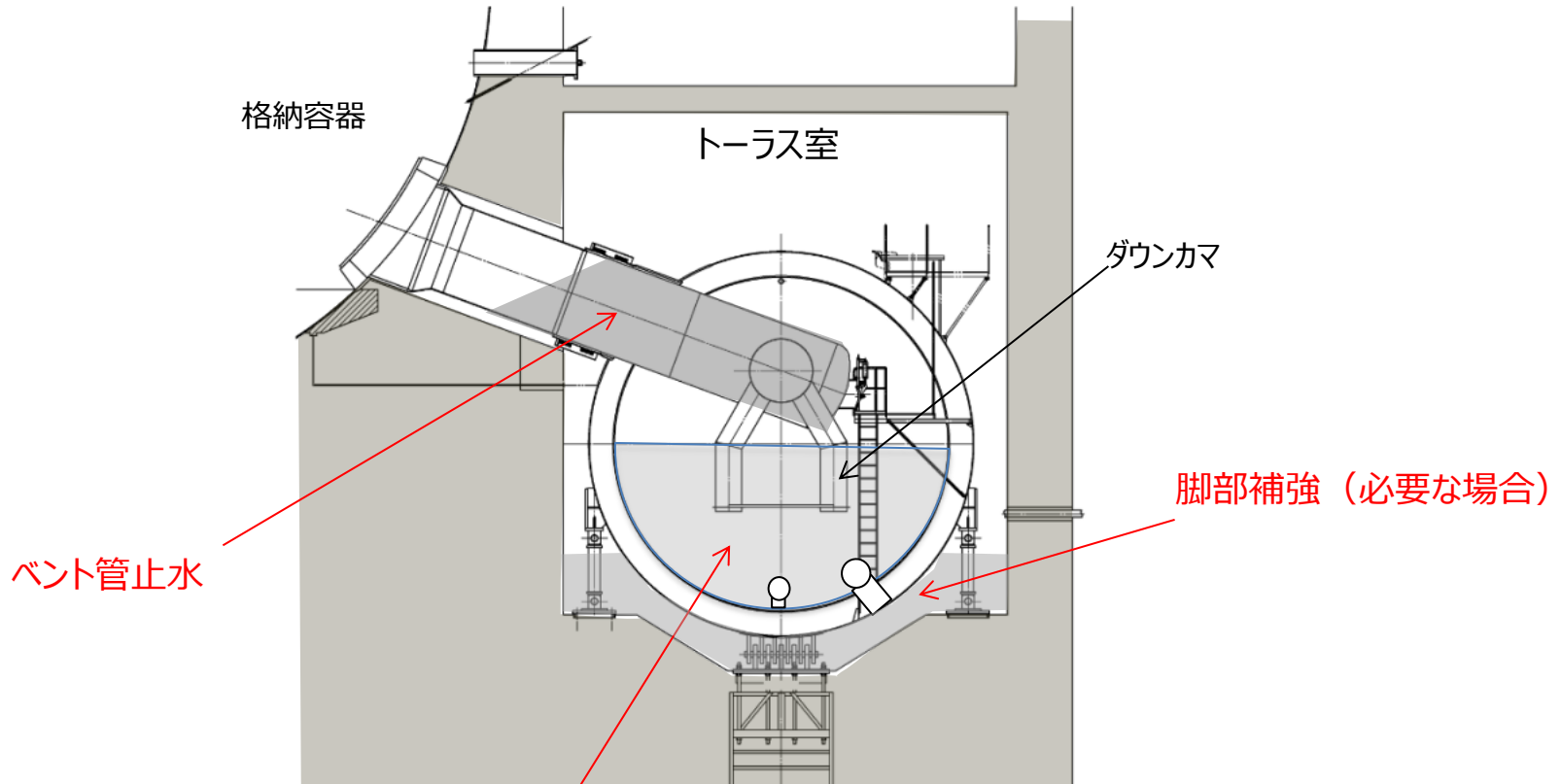
3. PCV補修・止水対象箇所

- 「補修」→漏えい箇所が**気中**となる部分に対する修理（主にR/B**地上階**）。
- 「止水」→漏えい箇所が**水中**となる部分に対する修理（主にR/B**地下階**）



4. 止水・補強の構成

- 冷却水（汚染水）は格納容器側に閉じ込め、循環・浄化
- 止水には開口・漏えい経路に止水材を注入し、閉塞させる



5. 止水・補強の候補材料（要求される機能）

【止水性能】

⇒ 損傷孔の位置が不明のため複雑な構造材にも**回り込んで行き渡る**

【現場条件】S/C内に原子炉から流出した水がある状態で止水する。

⇒ **水中で硬化し、耐放射線性が高い**

【遠隔作業できること】原子炉建屋 1 階から投入する。

⇒ ある程度の**遠距離**からでも投入できる

⇒ 作業員の被ばく低減のため**短時間**に投入できる

【維持】デブリ取出しが完了するまでの期間止水する。

⇒ **長期的に安定性**が維持される

No.	要求仕様の例	目標
1	水中流動距離	10m以上
2	流水環境での流動性	止水対象機器周辺に良好に充填されること
3	水中硬化	対象機器周辺に充填され、止水性能があること(漏水量1L/min以下)
4	流動時間	8時間以上
5	耐放射線性	25MGyで劣化無し
6	圧送距離	130m
7	水頭圧	40m相当の水頭圧に耐えること
8	ひび割れ発生の抑制、拡大防止	ひび割れ指数1.40以上
9	環境影響（耐ほう酸水）	劣化しない

5. 止水・補強の候補材料（例）とこれまでの検討

- 可塑性グラウト（水中不分離性）
 - ・水中遠隔施工で基本的用途に合致
 - ・隙間や水流量が大きい場合の止水能

- ゴム系材料
 - ・ゴム栓効果
 - ・大型構造物への施工実績，施工管理
 - ・放射線環境下での材料収縮（配管との接着）

- 重泥水
 - ・単独では構造を維持できない
 - ・併用により隙間や水流量が大きい場合の止水能良
 - ・漏えい再発時の補修材料として好適

- 自己充填コンクリート

自己充填コンクリートの特徴

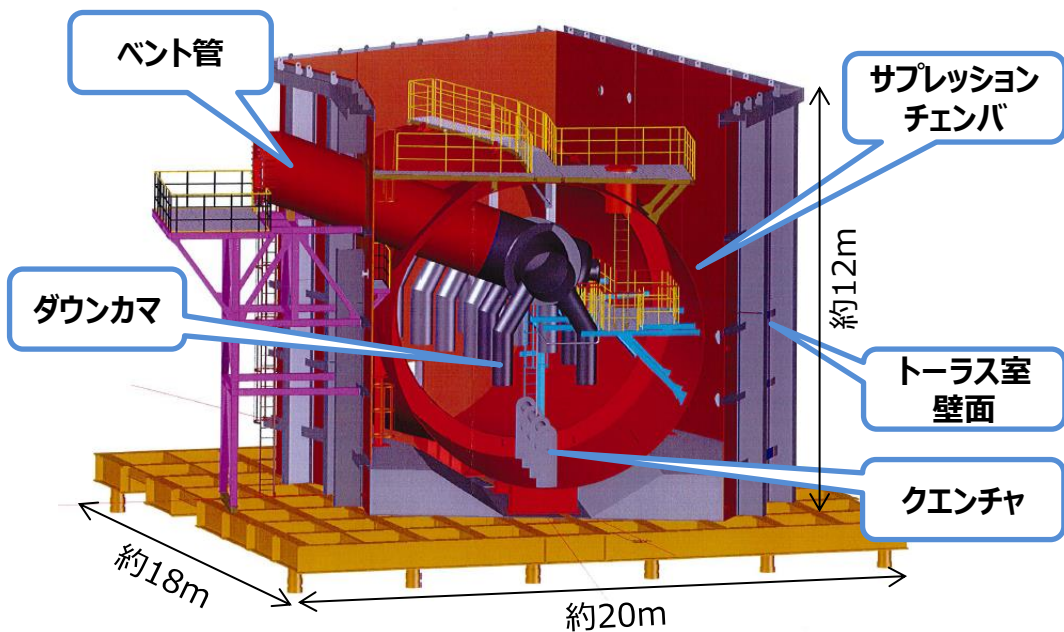
- コンクリートは、鉄筋を有する型枠内に確実に締固められることによって設計通りの性能を発揮。これが不十分だと、強度にのみならず長期耐久性も低下。**締固めには熟練した高度な技術が必要。**
- 自己充填コンクリートは、鉄筋を有する型枠内に**重力の作用のみで確実に充填**するコンクリートで、**汎用の材料のみ**を用いたコンクリート。1988年にプロトタイプが完成。実候構造物や建築物で多くの採用実績あり。



高知工科大大内研究試験でのコンクリート配合試験の様子（H29.5.11撮影）

III. 実規模試験の概要

1. 実規模試験体(1/2)～概要

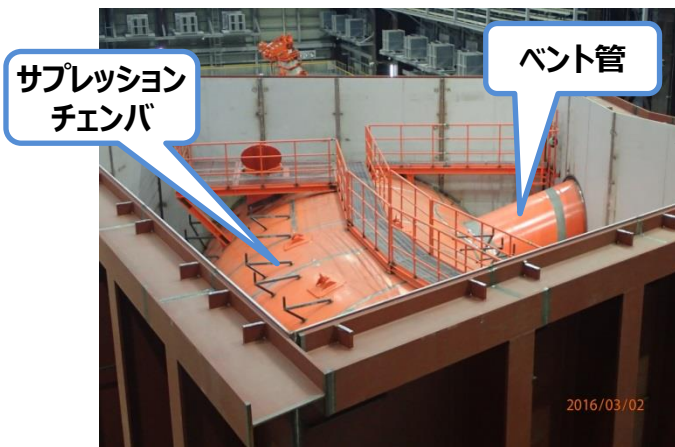


▶ 模擬対象プラント：
2 / 3号機

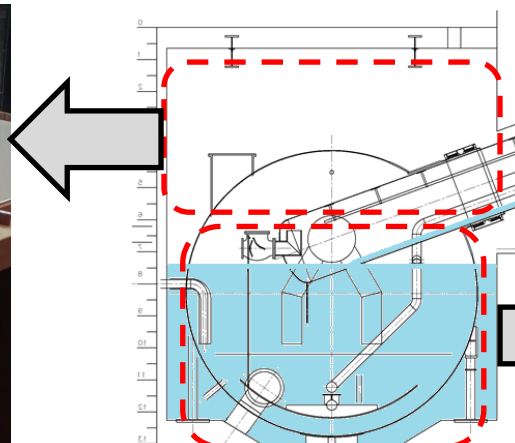
▶ 模擬対象設備：
トーラス室壁面及び原子炉格納容器下部のうち、**1/8エリア**

▶ 試験体サイズ：
約18m×約20m×約12m

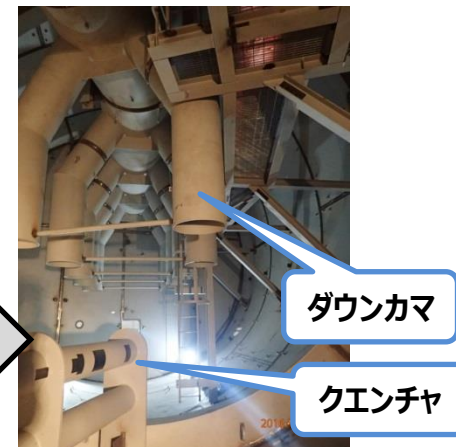
号機	S/C容積	断面直径	S/C環の中心径
1号機	約4800m ³	約8m	約30m
2/3号機	約6500m ³	約9m	約35m



トーラス室壁面上部

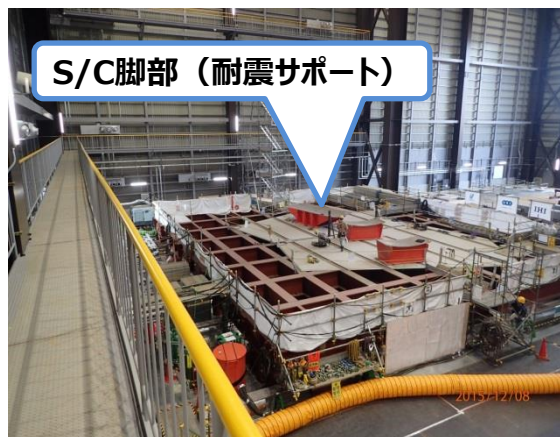


PCV下部断面図



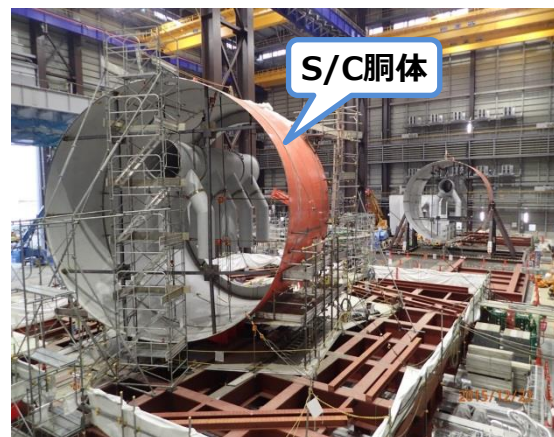
S/C内

1. 実規模試験体(2/2)～製作過程



S/C脚部据付

2015年12月8日撮影



S/C据付

2015年12月22日撮影



トーラス室壁面据付

2016年2月9日撮影



ベント管据付

2016年2月15日撮影

2. 実規模試験の実施項目

- ① ベント管止水技術
- ② サプレッションチャンバー（S/C）内充填止水技術
- ③ サプレッションチャンバー（S/C）脚部補強技術

それぞれについて、施工性確認試験及び打設試験を行う。

<補強・止水材充填量>

工法	材料	充填量	
		1号機	2/3号機
①ベント管止水	ゴム又は自己充填コンクリート	約10m ³ /1本 (ベント管は8本)	
②S/C内充填止水	水中不分離コンクリート	800m ³ ※1	1500m ³ ※2
③S/C脚部補強	水中不分離モルタル	1800m ³ ※3	1500m ³ ※3

※1：ダウンカメラ埋設（かぶり厚さ1500mm） ※2：真空破壊弁埋設 ※3：コラムサポートピン埋設

3. 実規模試験の位置付け(1/2)

(1) 「施工性確認試験」の位置づけ

① 高線量下作業の成立性の確認

1 Fサイトの現場環境を想定し、**高線量下**での機器準備を含む作業が問題なく実施できること。また、実工事計画のための**基礎データ（作業時間、配員等）**を取得する。

② 遠隔操作作業等の成立性の確認

1 Fサイトの現場環境を想定し、**遠隔操作作業**や施工状況の**遠隔監視**が問題なく実施できること。

3. 実規模試験の位置付け(2/2)

(2) 「打設試験」の位置づけ

① 施工システムの成立性の確認

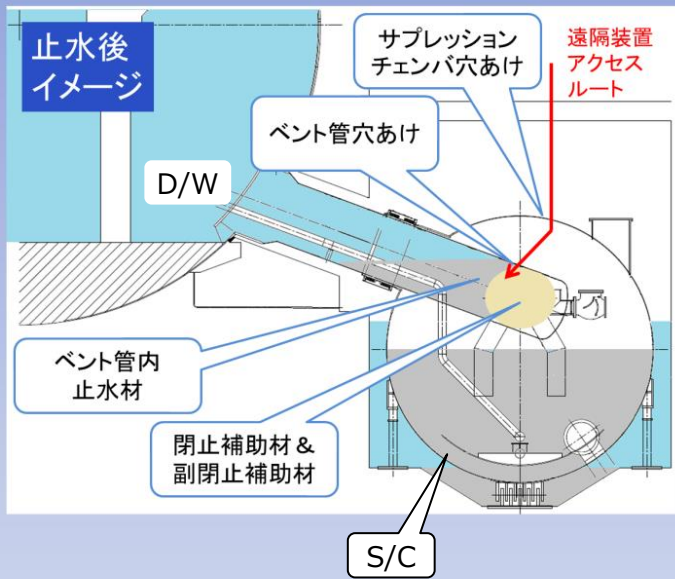
材料供給から打設までの一連作業を再現し、遠隔監視を含む施工システムとして機能し、**問題なく打設が実施できる**こと。また、施工管理に係る**各種データの取得**を行う。

② 補強・止水性能の確認

打設実施後に**止水性能**、**材料強度**や**充填状況**等を確認し、工場試験と同等の性能が確保されていること。

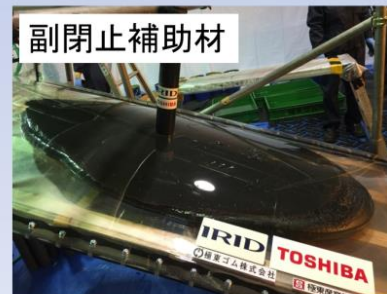
4. ベント管止水技術(1/3)～概要

- D/WとS/Cを連結しているベント管を止水し、**D/W内を水張り**が出来る状態にすることを目的とした技術開発。



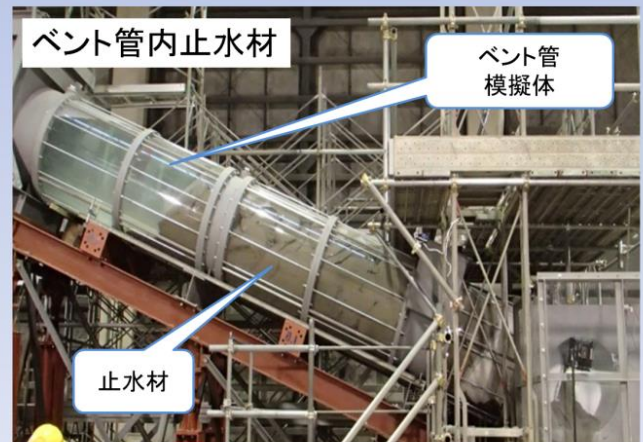
【候補材】

閉止補助材：アラミド系繊維
副閉止補助材：高耐放射性ゴム等
ベント管内止水材：セメント系材料等



【実施手順】

- ① サプレッションチェンバ及びベント管へ穴あけ
- ② ベント管内へ閉止補助材展開及び副閉止補助材による隙間充填
- ③ ベント管内に止水材を打設



4. ベント管止水技術(2/3)～止水方法

止水材

目的：ベント管の止水

材料：**ゴム材又は自己充填コンクリート材**

- ゴム材は1/10スケール要素試験、自己充填コンクリート材は配合試験を実施中。

自己充填コンクリート材



補修材

目的：経年劣化、地震等で生じた水みちの閉塞

材料：ベントナイト

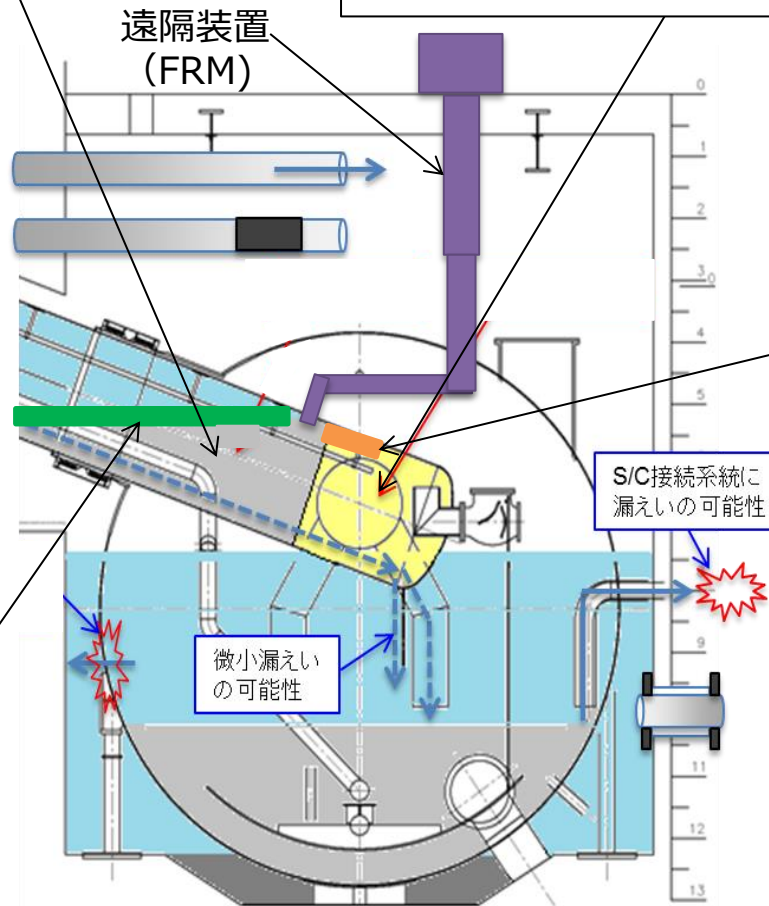
- 放射線試験の結果、低膨潤性ベントナイトは内部に気泡が発生。気泡が発生せず、体積膨張の小さい**高膨潤性ベントナイト**を選択。

閉止補助材

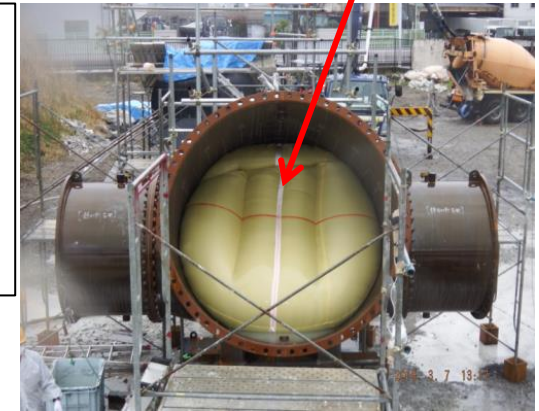
目的：ベント管の仮閉止

材質：ザイロクロス

- 1/1スケール展開試験を行い**良好な結果**が得られた。



閉止補助材



副閉止補助材

目的：閉止補助材と干渉物との隙間の閉塞

材料：重量骨材又はゴム材

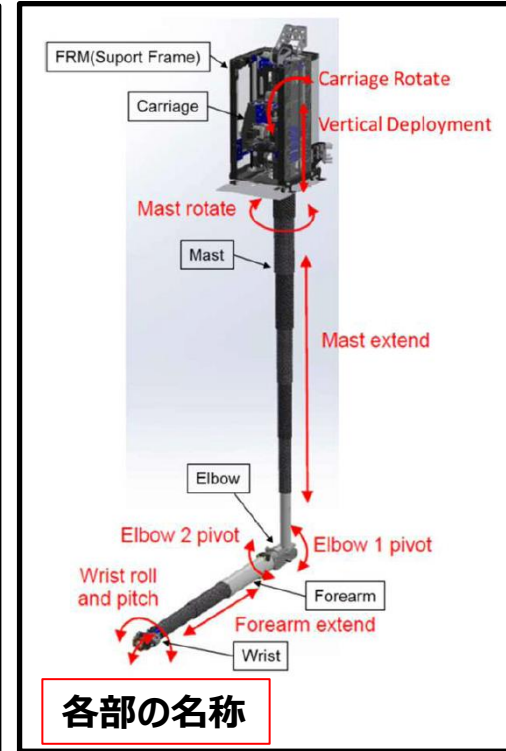
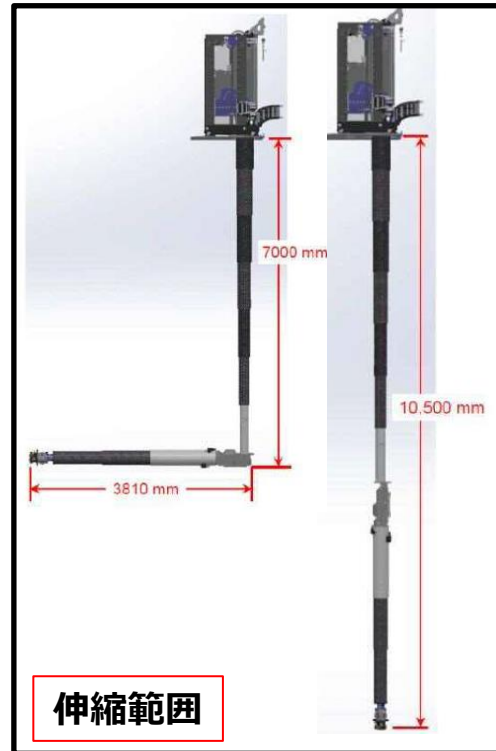
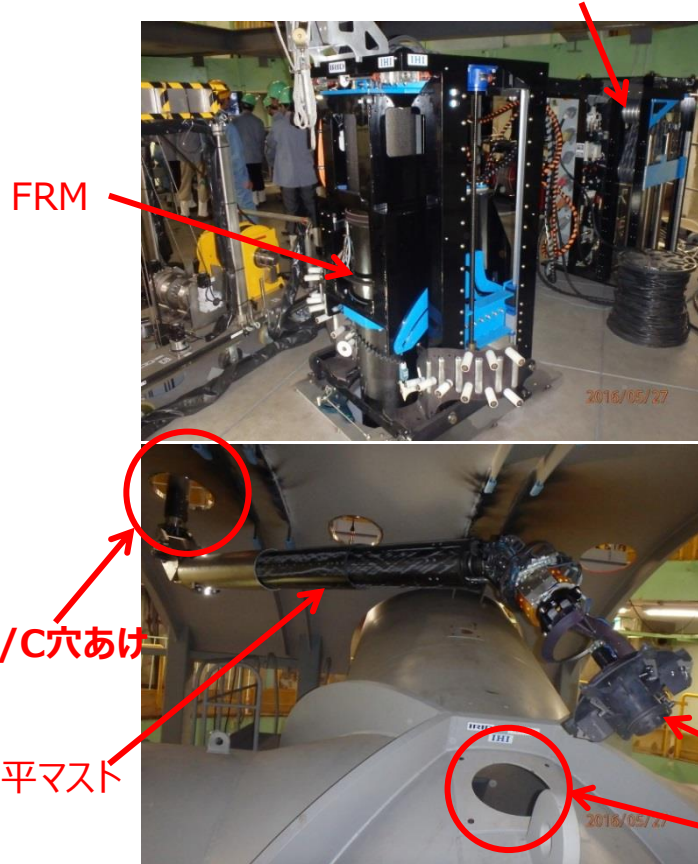
- 1/1スケール目詰め試験を行い**良好な結果**が得られ



重量骨材

4. ベント管止水技術(3/3)～遠隔施工装置 (FRM)

CMF (ケーブルマネジメントフレーム)



- R/B 1 階からS/C及びベント管へアクセスし各種ツールを用いた作業を行う装置。
- あらゆる姿勢において**アーム先端50kgf**までの耐荷重を有する。

5. S/C内充填止水技術～概要

- S/C内外の流路となる**配管端部（クエンチャ、ストレーナ）**を止水することを目的とした技術開発。また、**ダウンカマまでを埋設**してベント管止水のバックアップとしての役割も検討中。

【実施手順】

- ①サブプレッションチェンバへ穴あけ
- ②サブプレッションチェンバ内へ止水材打設
- ③ストレーナ、クエンチャを埋設止水

※ダウンカマ、真空破壊弁を埋設止水（オプション）

工場試験（コンクリート打設中）

工場試験（ストレーナ埋設前）

【候補材】
サブプレッションチェンバ内止水材：
水中不分離性コンクリート

クエンチャ模擬

ストレーナ模擬

5. S/C内充填止水技術～1/1スケール止水試験

- 1/1スケール、2ベイ分の1/8モデルにおいてコンクリート打設を行い、止水対象部であるS/C損傷孔、クエンチャ、ストレナに対する止水性を確認した。



写真1 コンクリート打設状況



写真2 S/C損傷孔の閉塞状況



写真3 S/C内コンクリートの充填状況

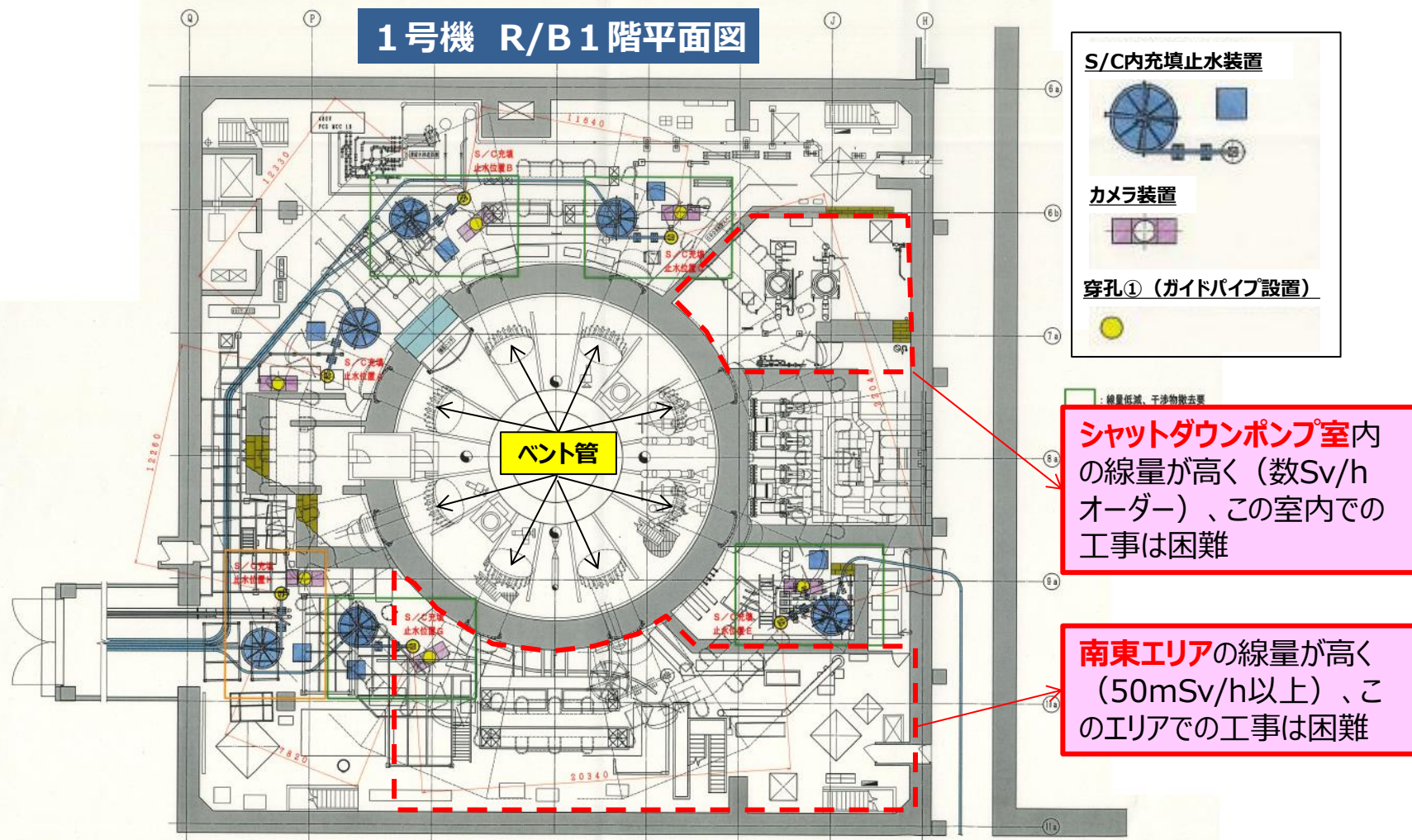


写真4 S/C内コンクリートの充填状況

5. S/C内充填止水技術～充填方法

- 原子炉建屋 1 階床（**1号機：6箇所、2/3号機：8箇所**）を穿孔し、S/C内部まで降ろしたホースからコンクリートを充填する。

1号機 R/B1 階平面図



5. (参考) S/C内充填止水実規模試験

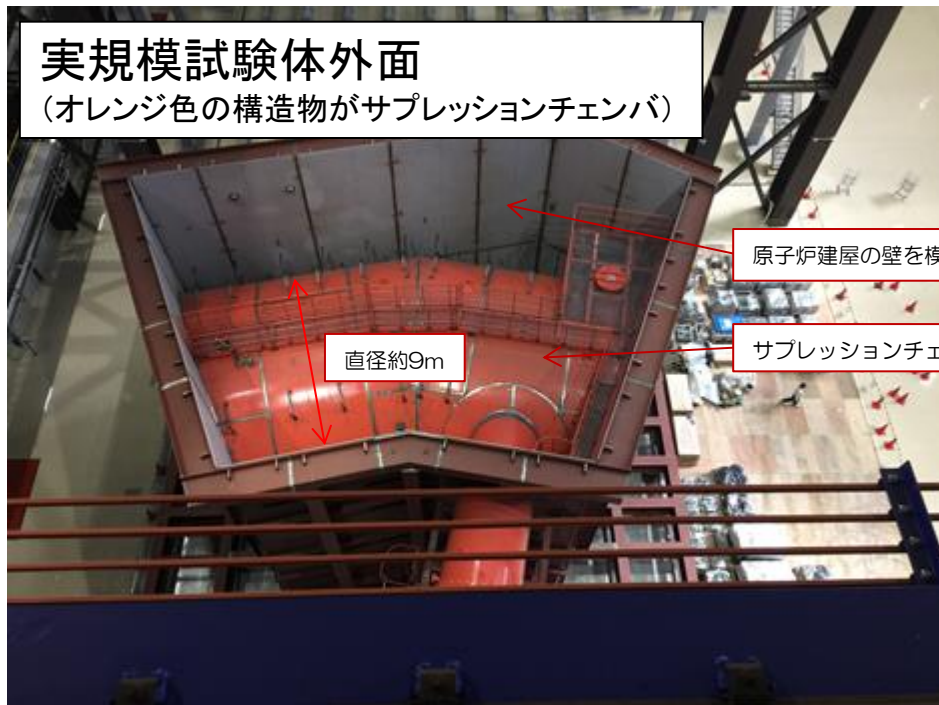
【実規模試験体】

東京電力福島第一原子力発電所2号機（以下、1F-2号機）の原子炉格納容器のうち、サプレッションチェンバと呼ばれるドーナツ状構造体を、1/1スケールで円周全体の1/8の範囲を模擬している。

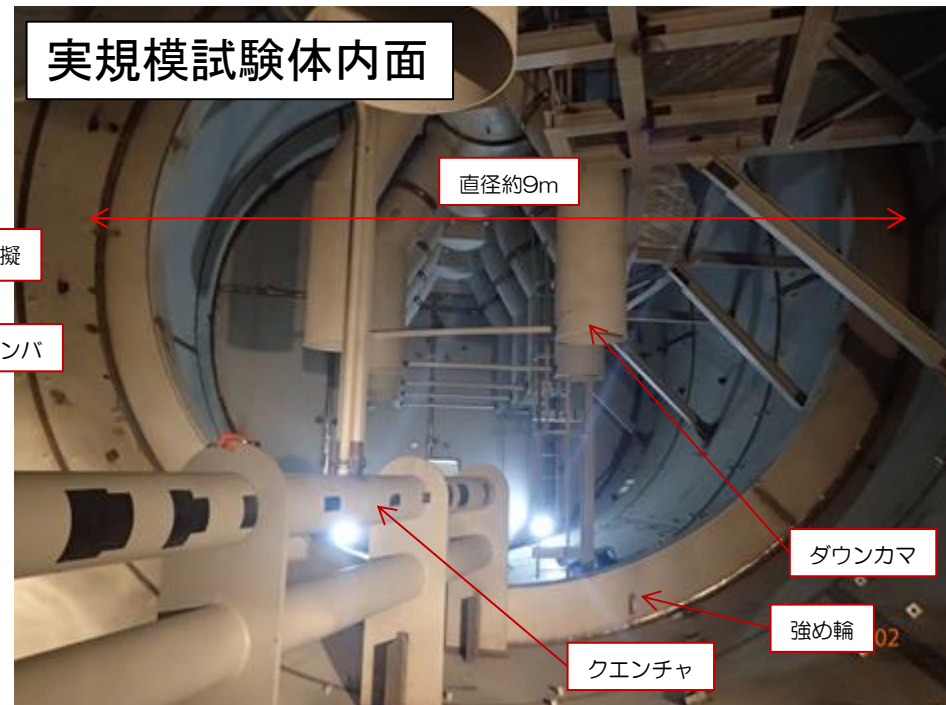
内部には、主要な内部構造物模擬体（ダウンカム、クエンチャ、強め輪等）を設置している。

実規模試験体外面

(オレンジ色の構造物がサプレッションチェンバ)



実規模試験体内面

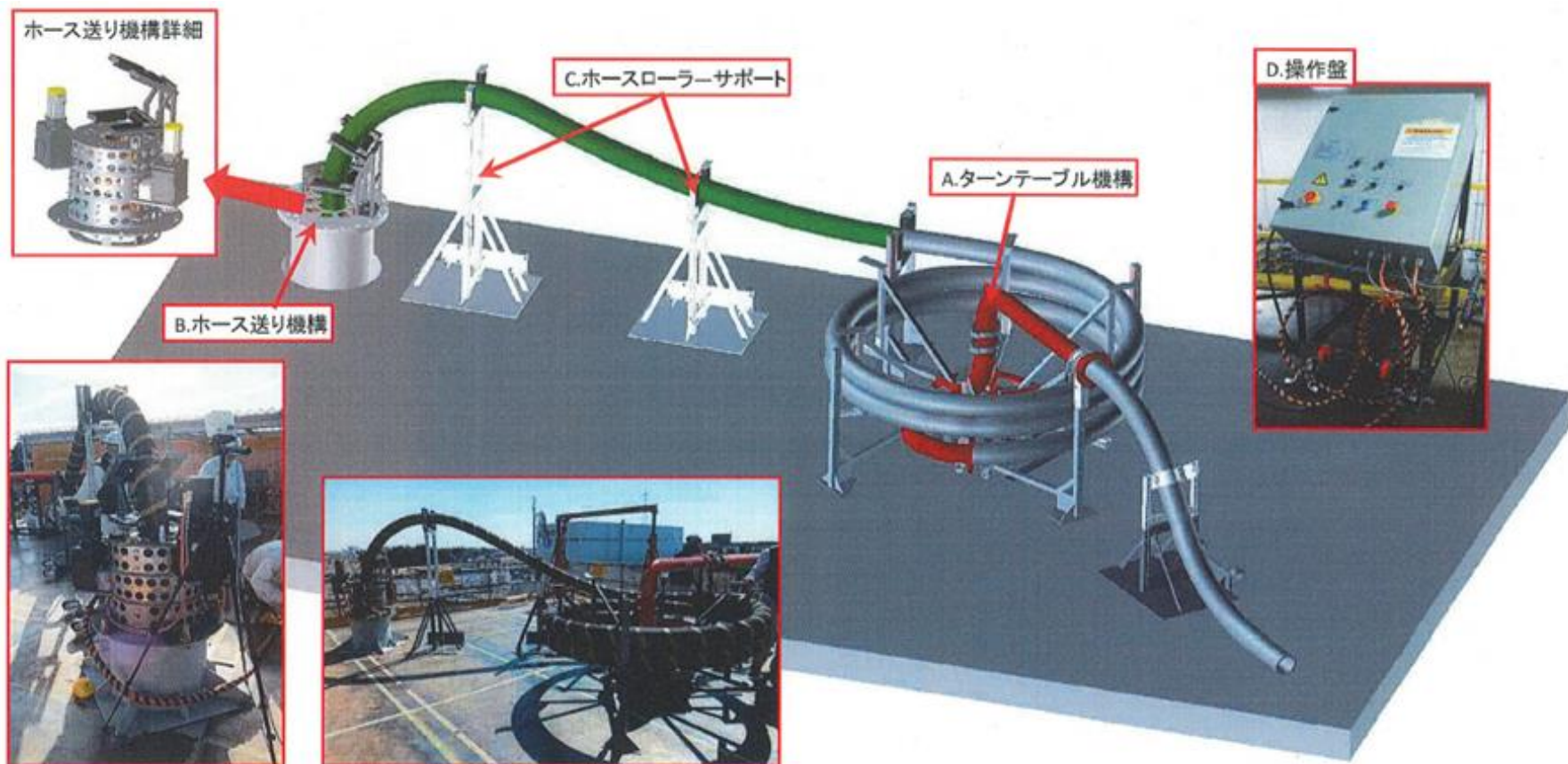


実規模試験体写真

5. (参考) S/C内充填止水実規模試験

【ホース送り回収装置】

止水材の打設用ホースをサブプレッションチェンバ内に送り・回収を行う。
原子炉建屋1階面（本試験では作業フロア）に設置し、遠隔操作にてホースを送り・回収する。
止水材の打設レベルに合わせてホースを引き上げる工法（トレミー工法）を行う。
高線量かつ狭隘な現場に搬入・設置するため、分割して搬入し、組立を行う構造としている。

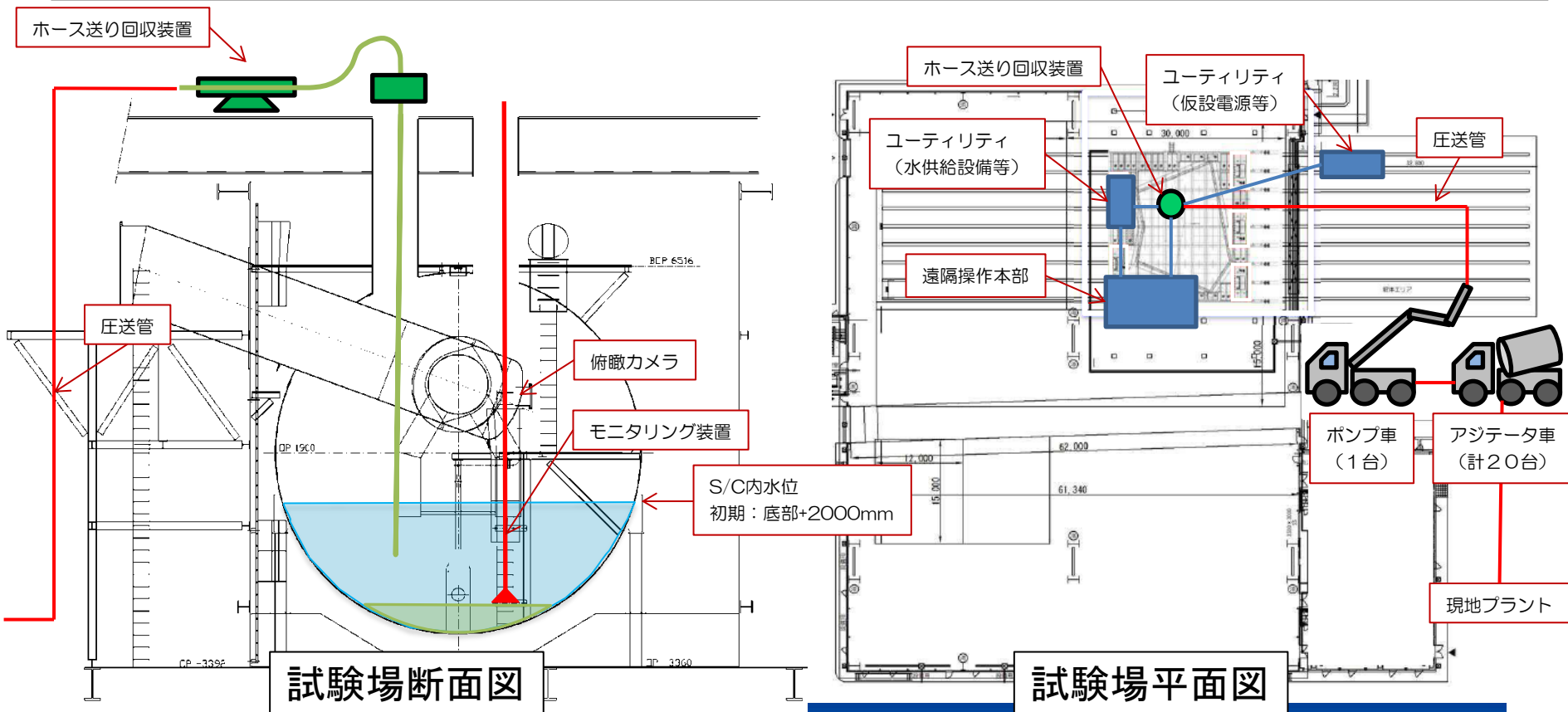


ホース送り回収装置（実機適用時は複数方位からの同時打設を計画。本資料は1方位のみ例示）

5. (参考) S/C内充填止水実規模試験

実規模試験手順

- ①現地生コンクリートプラントから、止水材である水中不分離コンクリートをアジテータ車にて輸送。
- ②ホースを作業フロアからホース送り回収装置にてサプレッションチェンバ内に吊り下ろす。
- ③ポンプ車にて、止水材を圧送配管及びホースを介して、サプレッションチェンバ内に送り込む。
- ④ホースをホース送り回収装置によりサプレッションチェンバから徐々に引き上げる。
- ⑤予定の打設高さに到達した時点で、充填を完了。
- ⑥後日、止水材が固化した時点で止水部(クエンチャ)からの漏えいを確認する。

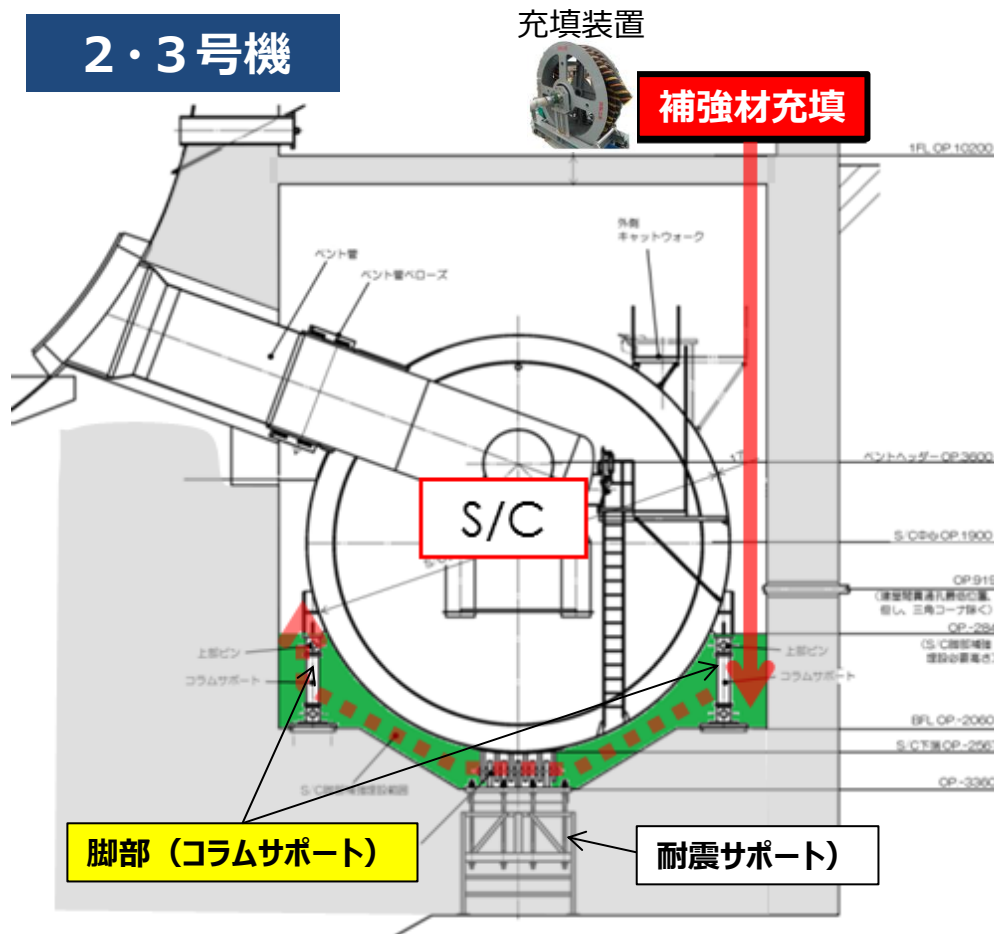


6. S/C脚部の補強技術(1/2)～概要

- S/C内充填止水により止水材の充填による重量増加が見込まれるため、S/Cを支える脚部の**耐震補強**を目的とした技術開発。



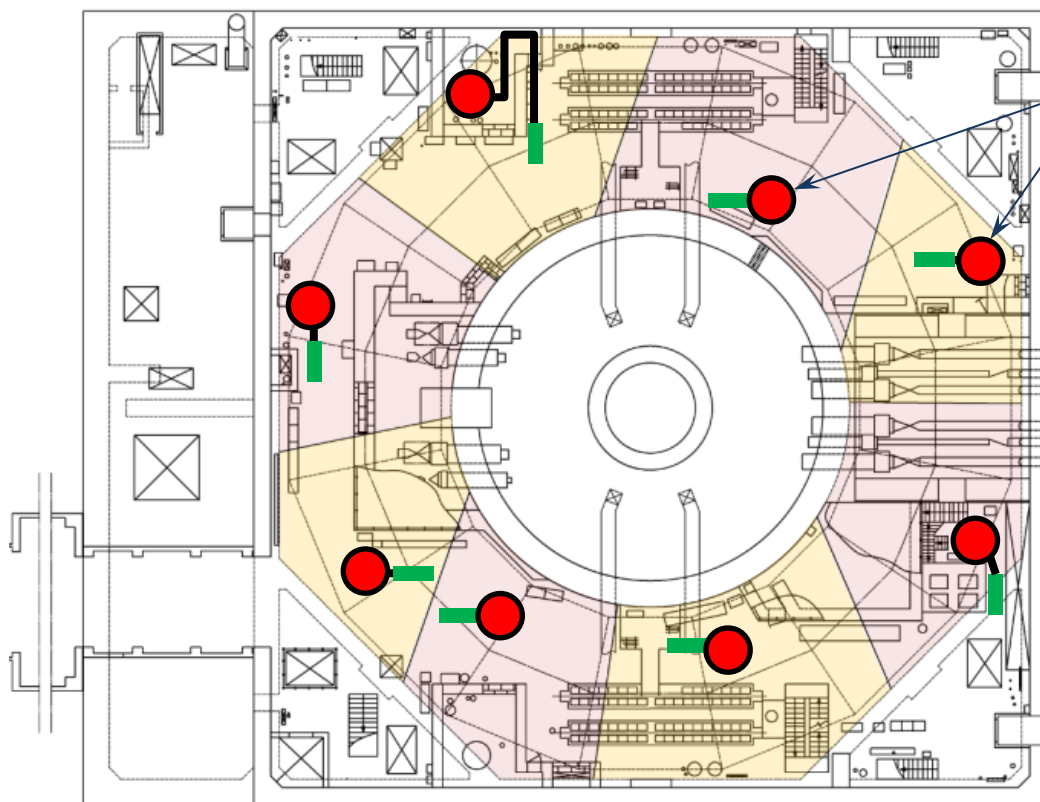
■ : 水中不分離性モルタル



6. S/C脚部の補強技術(2/2)～充填方法

- バッチャープラントで練った**水中不分離性のモルタル**（新規開発品）を原子炉建屋に送り、地下1階(トラス室)床まで降ろしたホースから充填する工事。
- **6～8箇所から同時に**打設する。

2号機 R/B 1 階平面図

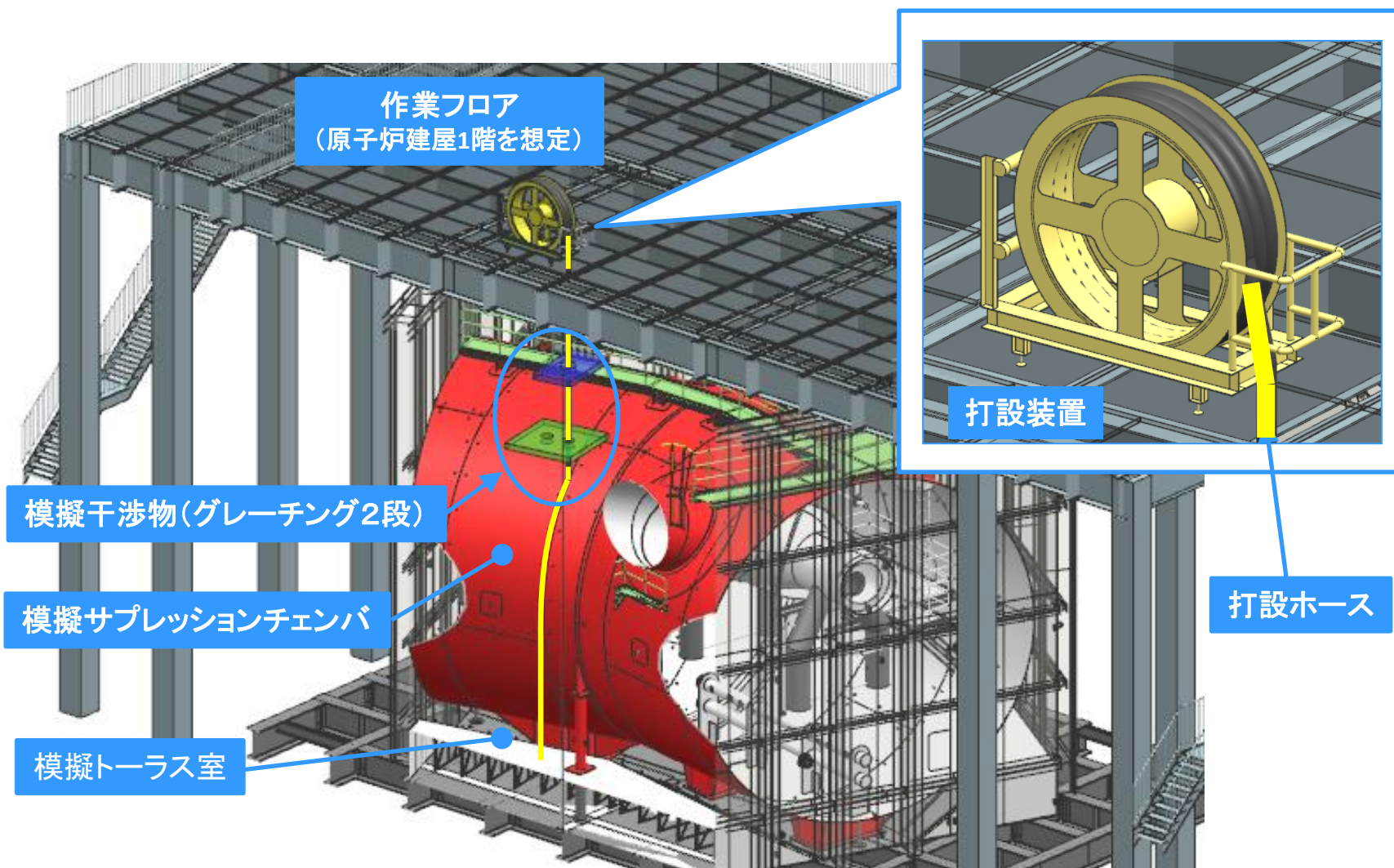


充 填 口

1号機 : 6箇所
2号機 : 8箇所
3号機 : 検討中

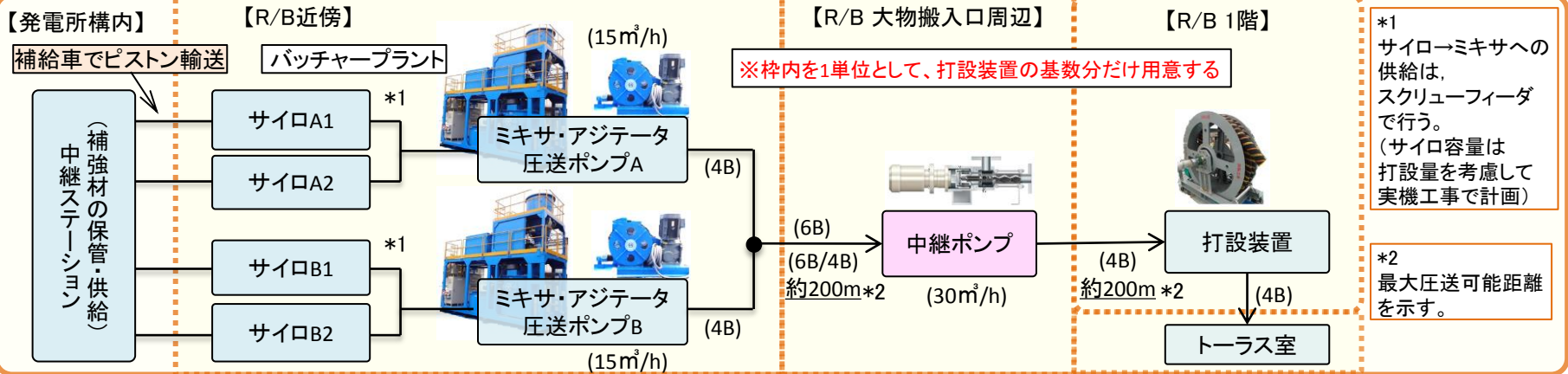
ユニット	トラス室寸法	S/C 直径
1号機	約 42m×42m	約 8 m
2・3号機	約 45m×46m	約 9 m

7. S/C脚部の補強実規模試験

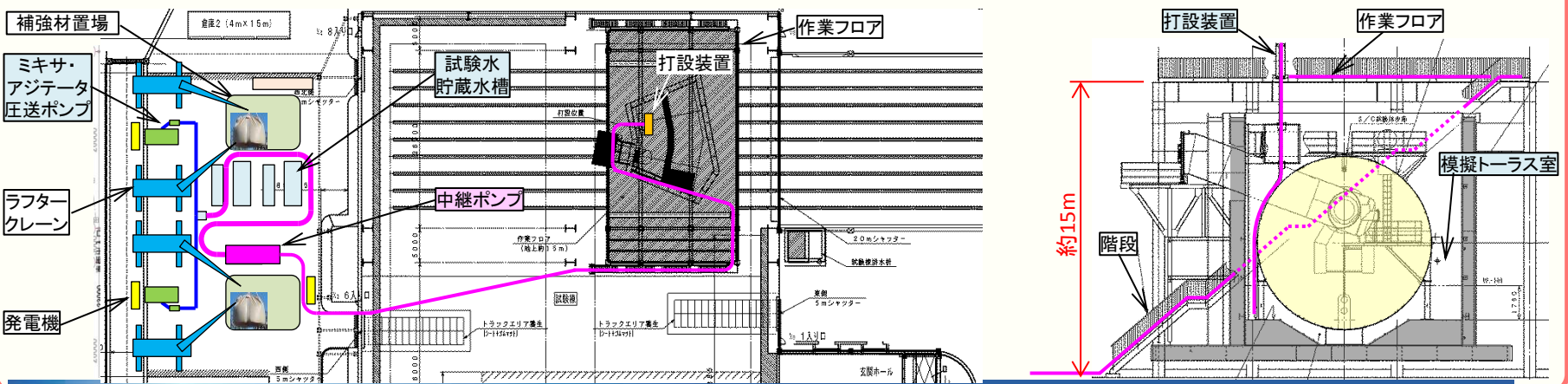
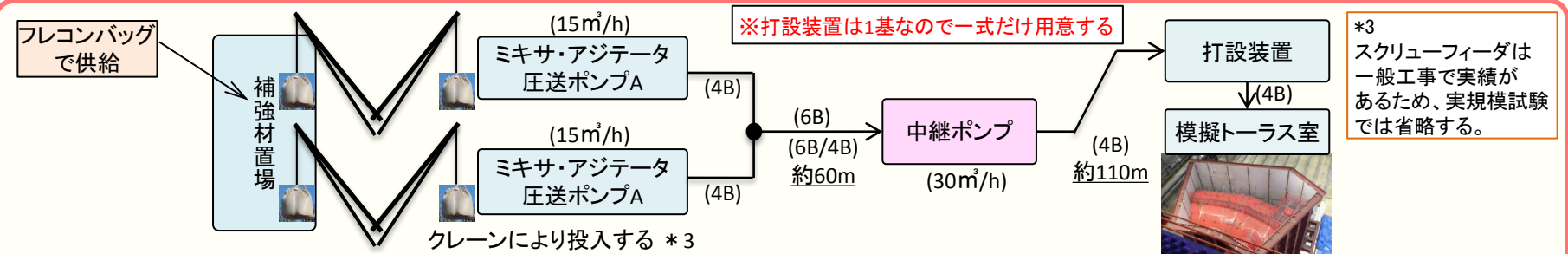


7. S/C脚部の補強実規模試験

実機工事



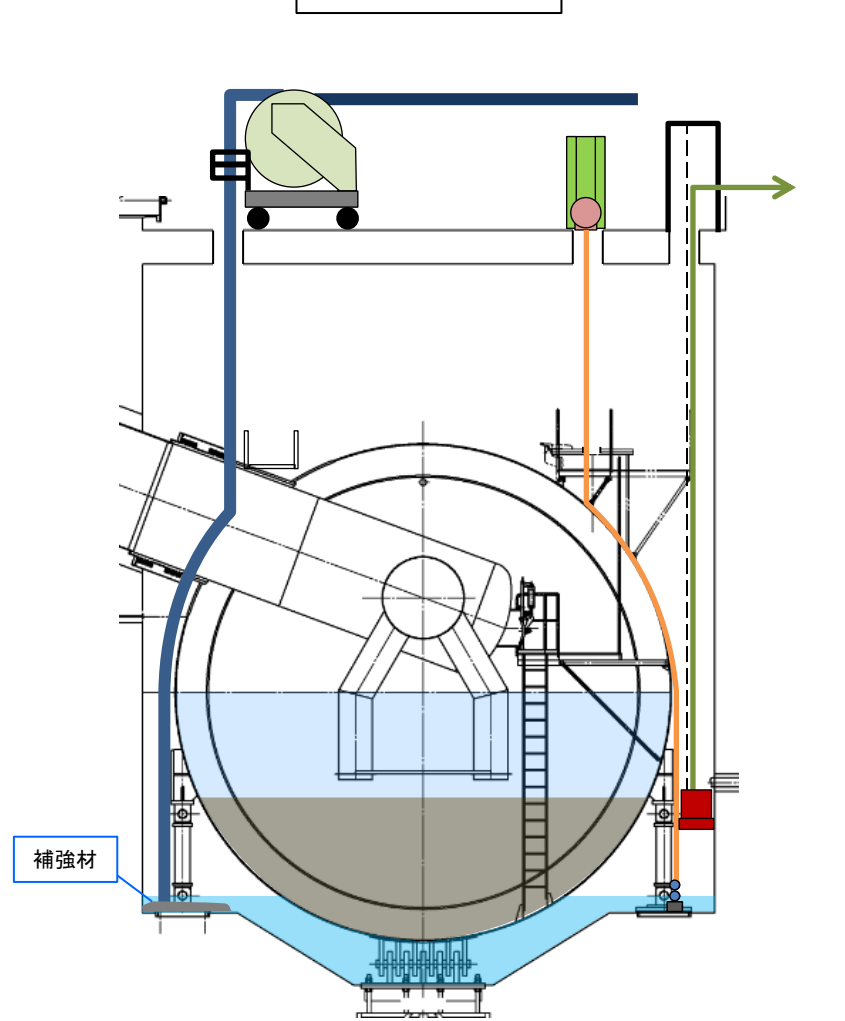
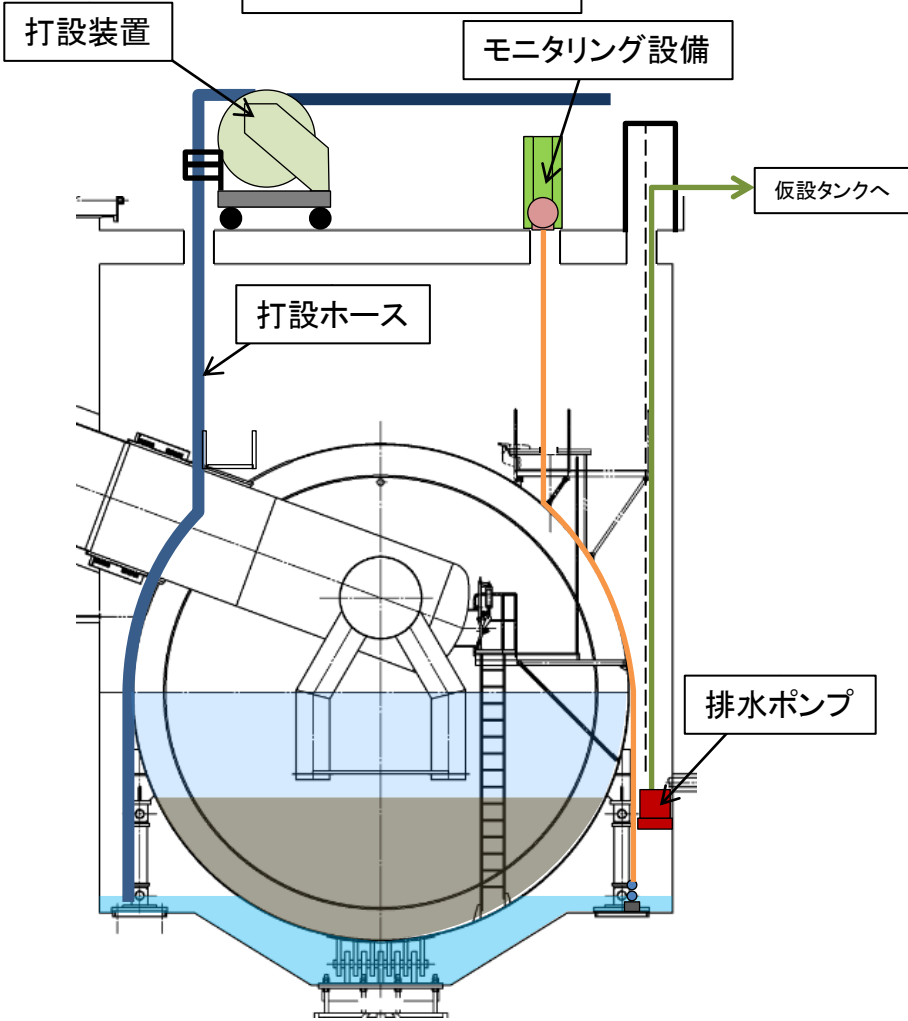
実規模試験(打設試験)



7. S/C脚部の補強実規模試験

打設ホース投入・設定

補強材打設開始



- 1) 干渉物を回避して打設ホースを投入
- 2) モニタリングで水位を確認し、水面から100mm
打設ホースを水中へ送り出し設定

- 1) 打設箇所蓋取外し
- 2) 床面穿孔に打設ホース投入
- 3) トラス室床面+100mmに打設ホース設定
- 4) 補強材圧送開始
- 5) 打設ホース先端カメラで補強材吐出を確認

7. S/C脚部の補強実規模試験

モニタリング, トレミー操作, 滞留水排水

補強材打設終了

打設装置

モニタリング設備

仮設タンクへ

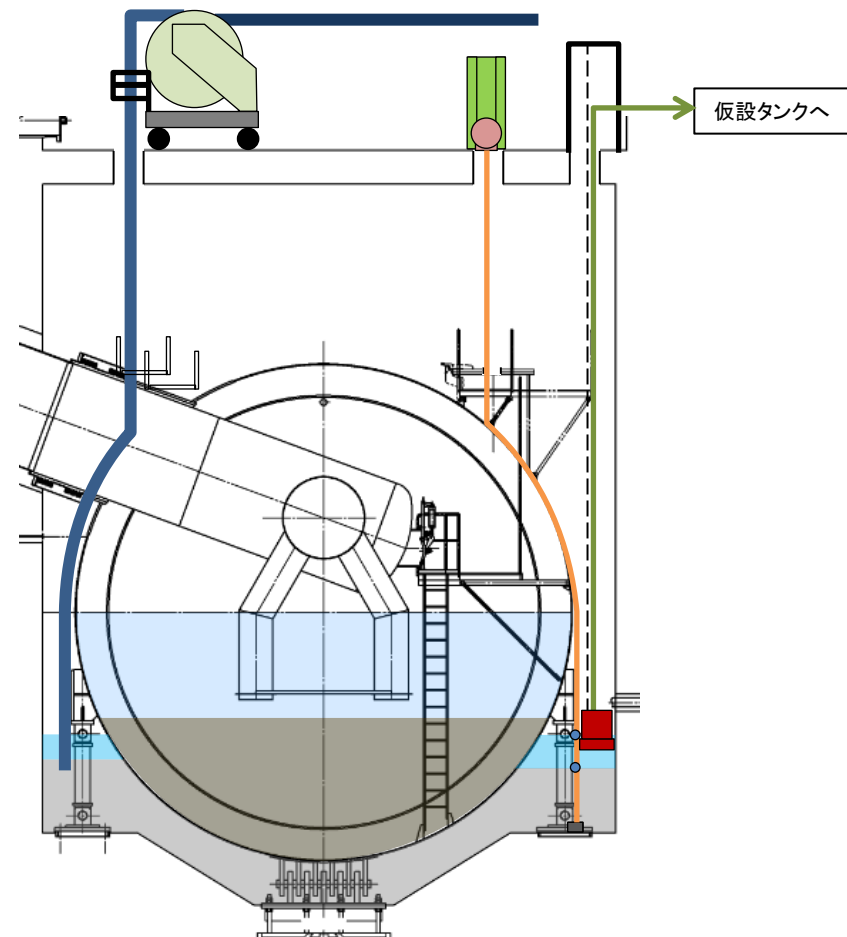
打設ホース

排水ポンプ

仮設タンクへ

滞留水

補強材



- 1) 補強材高さ300mm毎に打設ホーストレミー操作300mm
 - 2) 滞留水水位が所定の高さまで上昇したら排水開始・下降したら停止
- ※補強材・滞留水水位の高さ測定はモニタリングシステムによる。

- 1) モニタリングシステムで最も低い補強材面がOP.-900(床上1160mm)に到達したら打設終了。

ご清聴ありがとうございました。

(参考 1) IRIDの紹介

IRIDとは？

【理 念】 将来の廃炉技術の基盤強化を視野に、**当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発に全力を尽くす。**

■ **名 称** 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 （略称：IRID「アイリッド」）
（International Research Institute for Nuclear Decommissioning）

■ **設 立** 2013年8月1日（認可）

■ **組合員 構成員：835名**（2015年10月1日現在、役員を除く）

• **独立行政法人：2法人**

（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）、（独）産業技術総合研究所（AIST）

• **メーカー等：4社**

（株）東芝、日立GE ニュークリア・エナジー（株）、三菱重工業（株）、（株）アトックス

• **電力会社等：12社**

北海道電力（株）、東北電力（株）、東京電力（株）、中部電力（株）、北陸電力（株）、関西電力（株）、中国電力（株）、四国電力（株）、九州電力（株）、日本原子力発電（株）、電源開発（株）、日本原燃（株）

オールジャパン体制

■ **事業費**

年度	2013年度 (8月～)	2014年度	2015年度	2016年度 (推定)
事業費	約45億円	約120億円	約150億円	約155億円

IRIDの事業内容

▶ IRID事業の3本柱

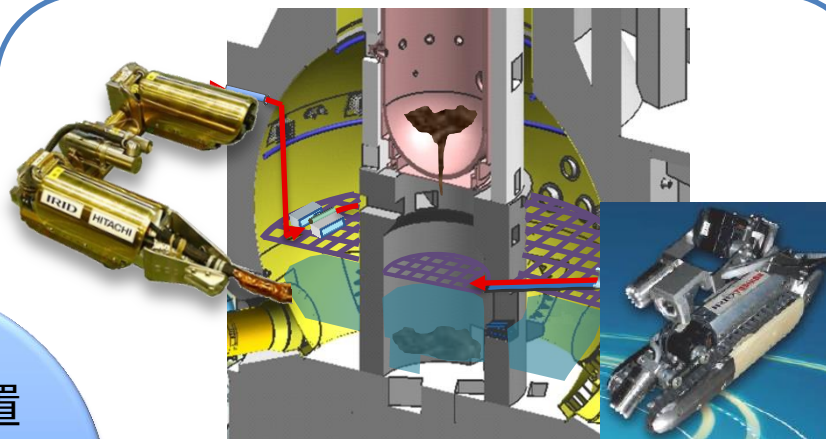


国際顧問との会議

1. 廃止措置
に関する
研究開発
を行います。

2. 廃止措置
に関する
**国際、国内
関係機関と
の協力**を推
進します。

IRID



格納容器内部調査ロボットの開発

3. 研究開発
に関する
人材育成
に取り組めます。



「IRIDシンポジウム2016」
でのロボットのデモ

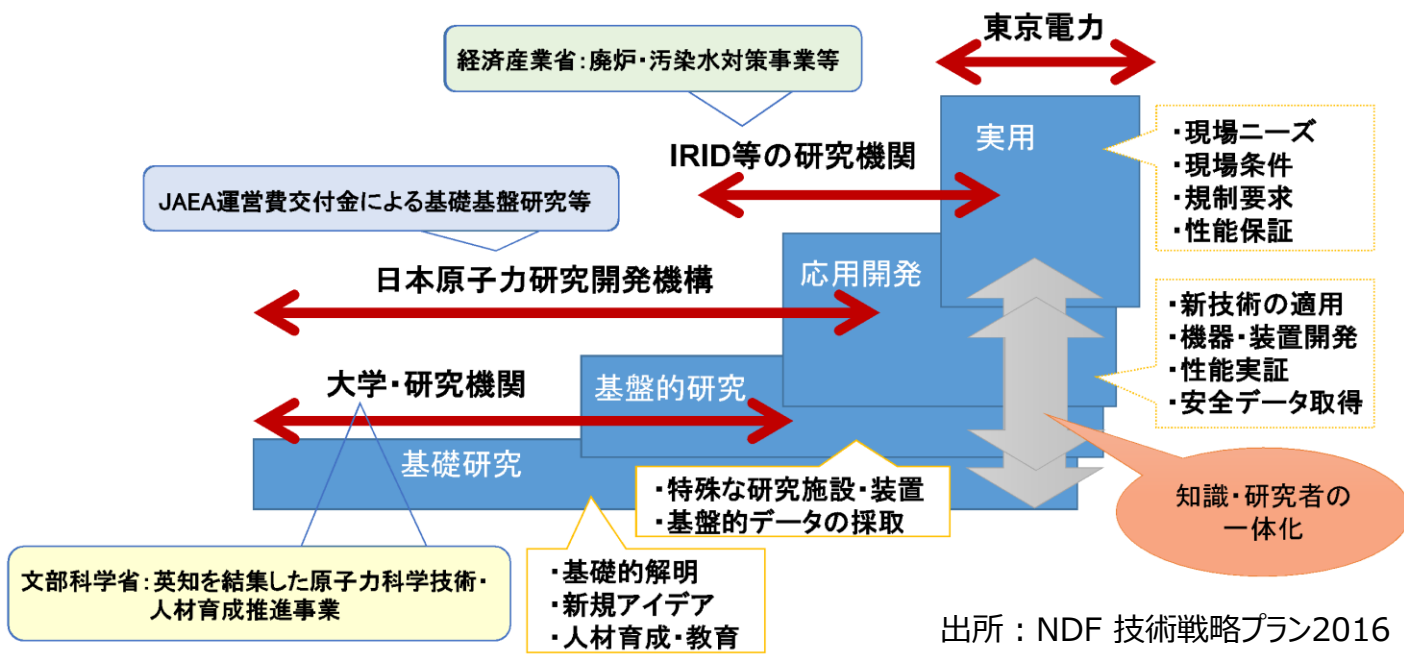
IRIDの研究開発スコープ

廃炉事業

- 原子炉の冷温停止状態の継続
- 滞留水処理（汚染水対策）
- 発電所全体の放射線量低減・汚染拡大防止
- 使用済燃料プールからの燃料取り出し
- 燃料デブリ取り出し
- 固体廃棄物の保管・管理と処理・処分に向けた計画
- 原子炉施設の廃止措置計画

⇒ IRIDはこの分野のR&Dを担当

研究開発の全体像



(参考 2) デブリ取り出し工法・システム技術

デブリ取り出し工法

技術的課題

- **放射性ダストの閉じ込め**機能の確保
- **遠隔操作**技術の確立
- **被ばく低減・汚染拡大防止**技術の確立

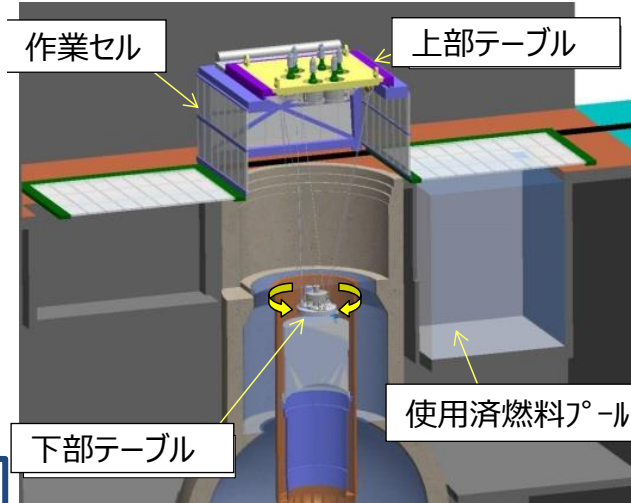
開発目的

- 主要 3 工法について、概念検討および工法詳細ステップ図を作成し、基盤技術開発の成果と合わせ、**工法実現性の評価**を行う。

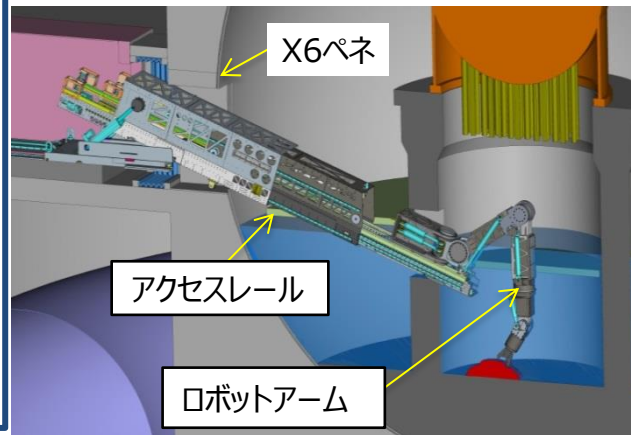
開発期間

2015.9～2017.3

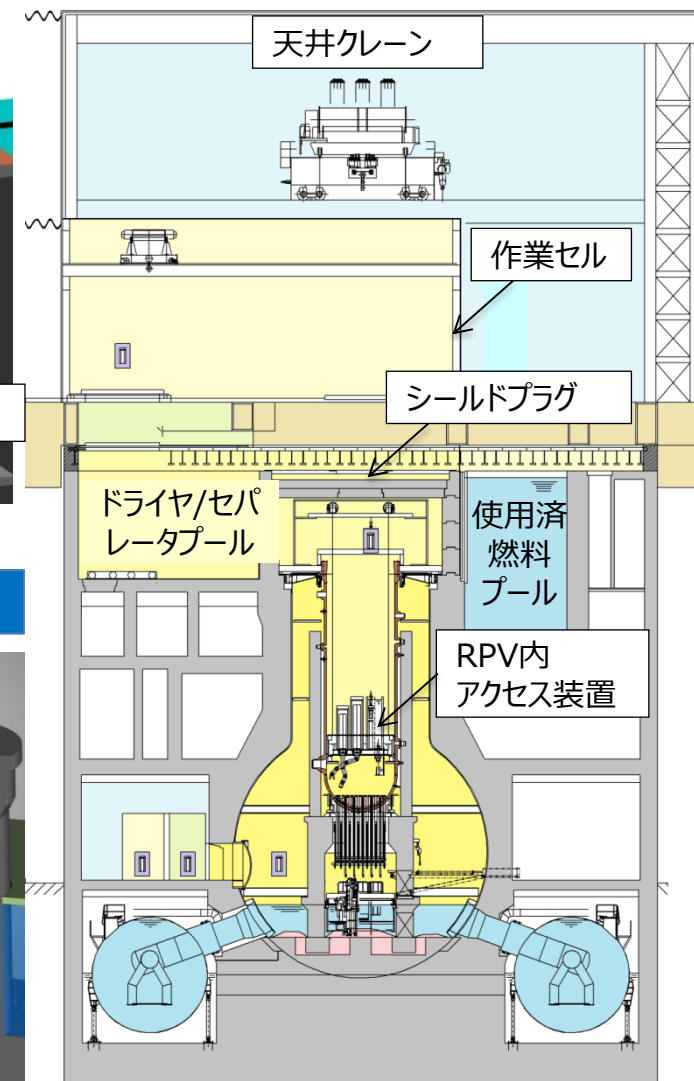
冠水-上アクセス工法（概念）



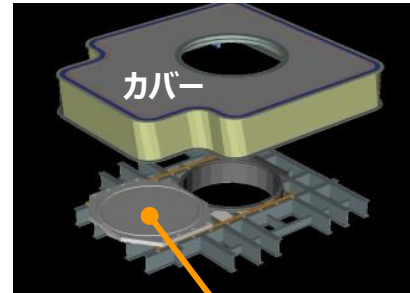
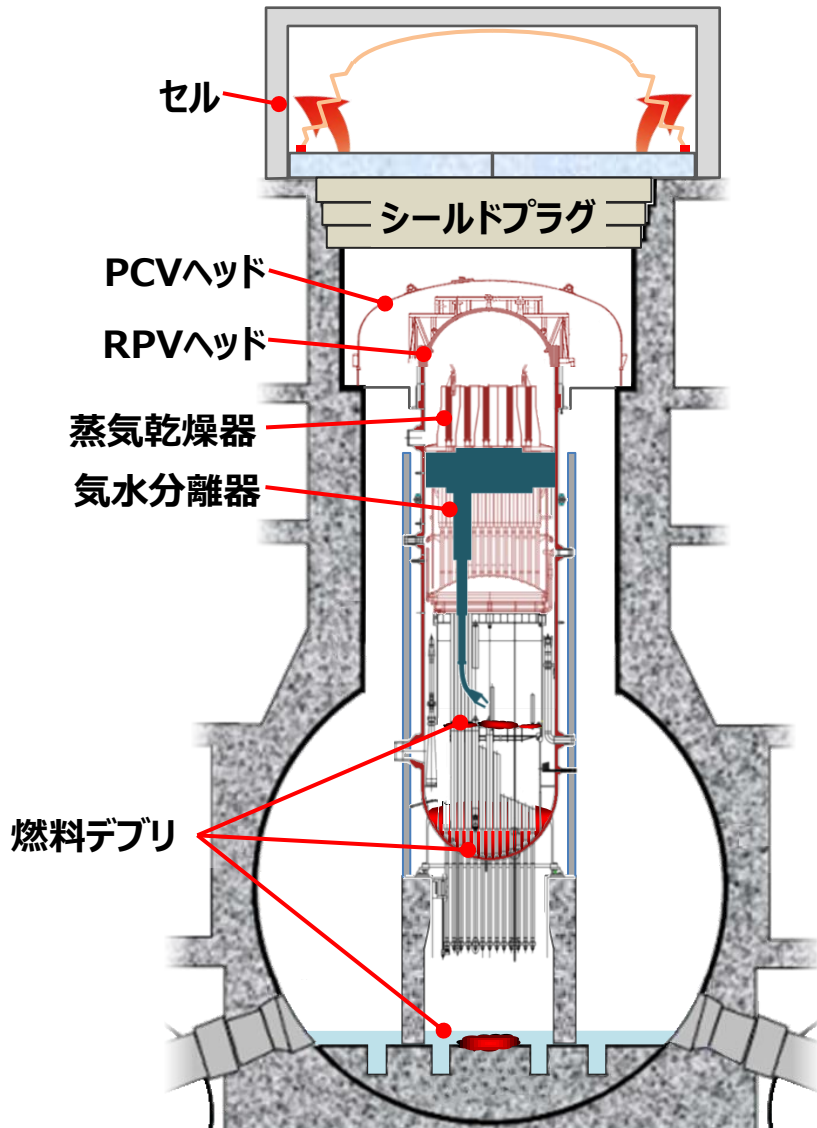
気中-横アクセス工法（概念）



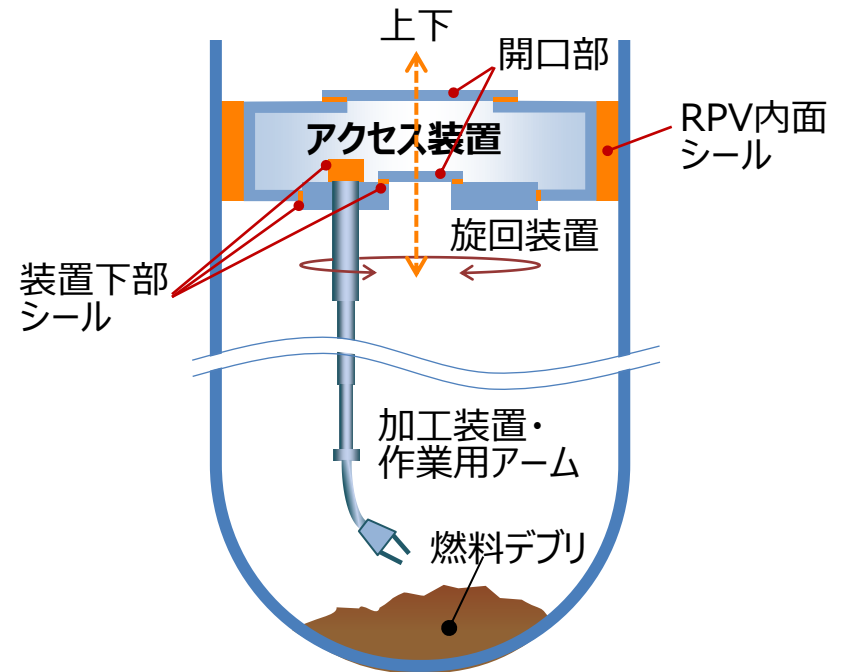
気中-上アクセス工法（概念）



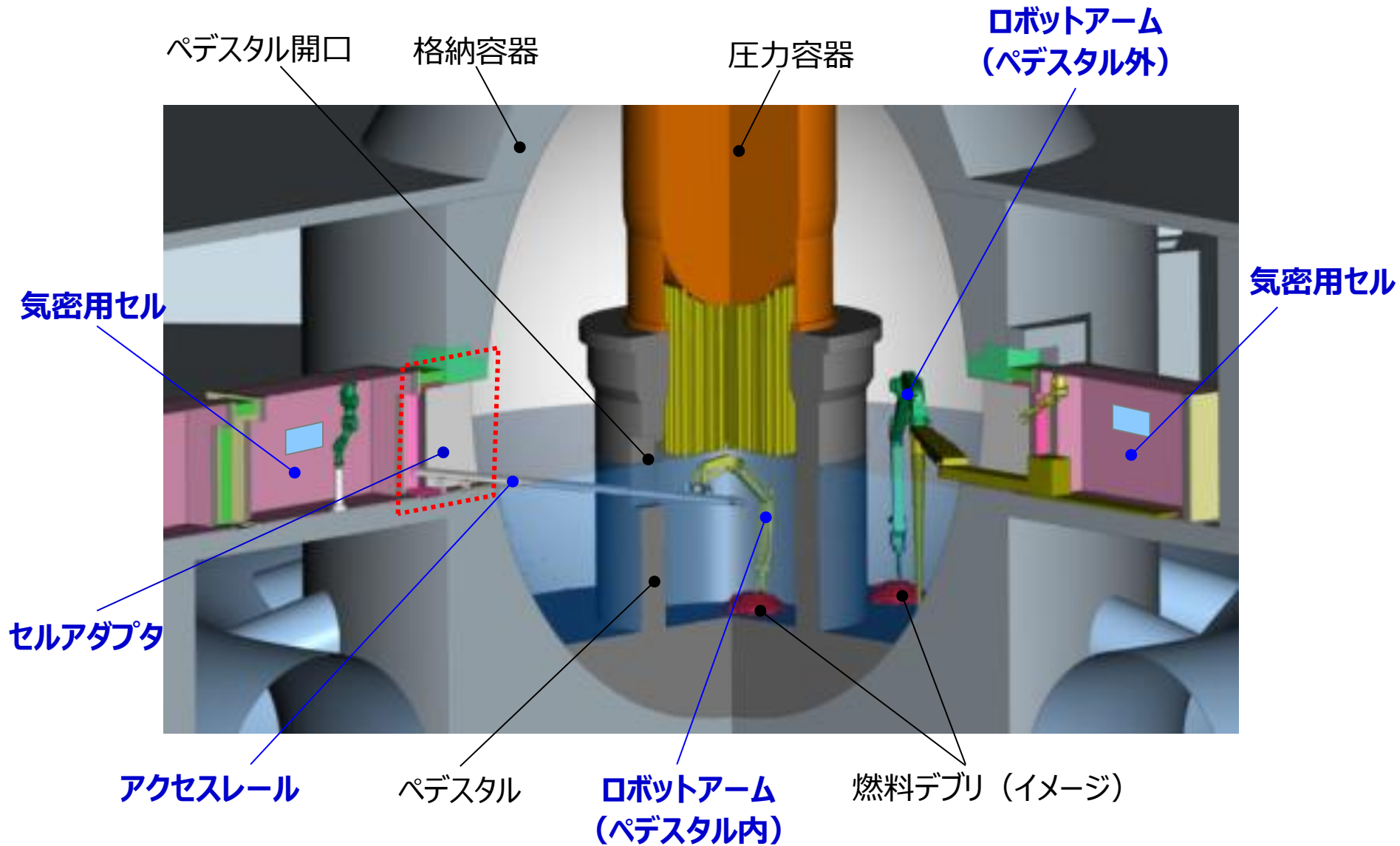
気中-上アクセス取り出し工法 (イメージ)



RPV内アクセス装置 (イメージ)



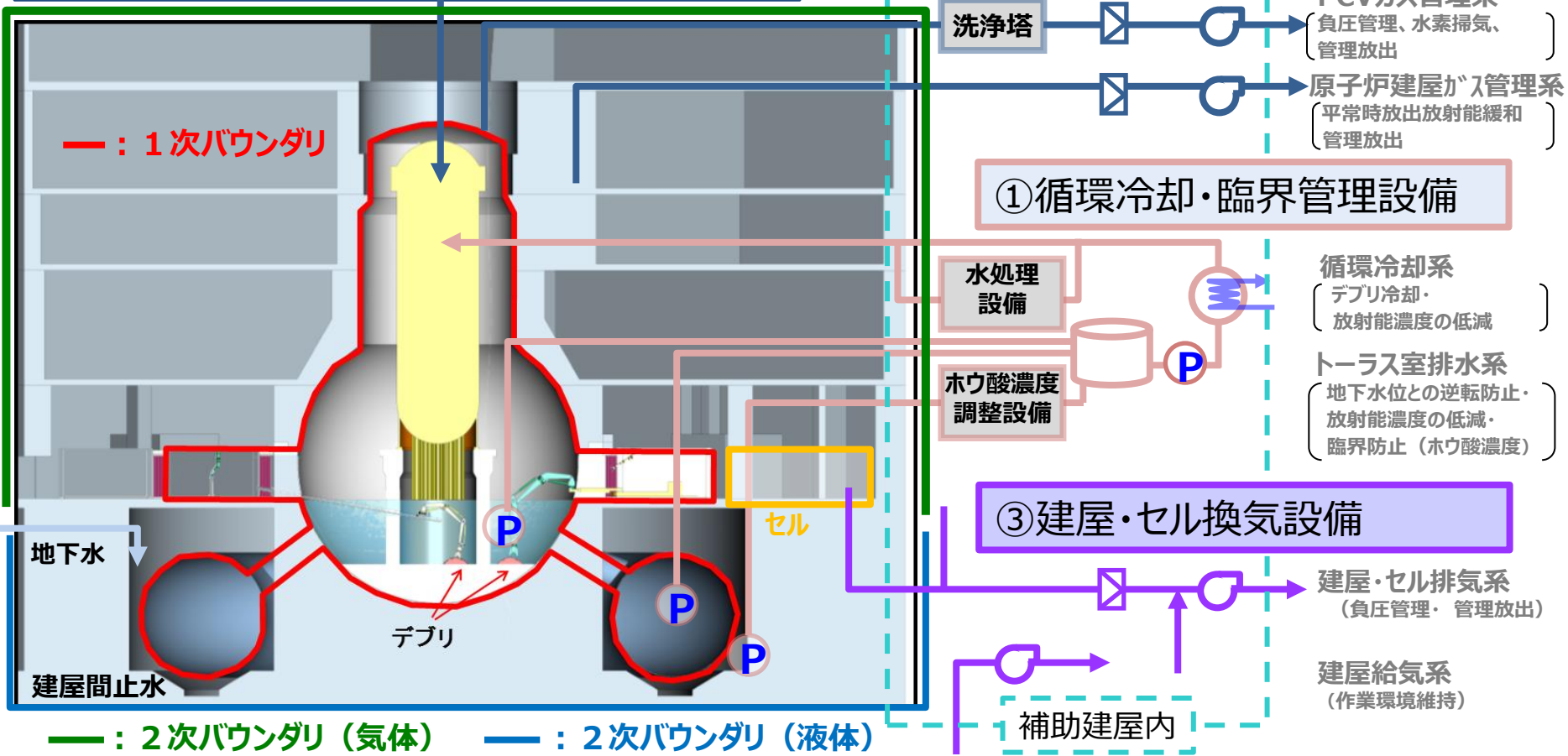
気中-横アクセス取り出し工法 (イメージ)



安全系システム

必要な安全機能

1. 冷却
2. 閉じ込め（負圧，トーラス室水位制御）
3. 不活性化（火災・爆発防護）
4. 未臨界



ご清聴ありがとうございました。