

国際廃炉研究開発機構における 廃炉関連技術の研究開発状況

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
菅沼 希一

※本発表内容は、経済産業省「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業」「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金」「平成25年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金」の成果を含む。
※プラント情報等の一部内容は、東電ホームページより引用。

国際廃炉研究開発機構の概要

1. 名称

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

(IRIDアイリッド: International Research Institute for Nuclear Decommissioning)

2. 設立

2013年8月1日 (経済産業大臣認可)

3. 組合本部

〒105-0003 東京都港区西新橋2-23-1 3東洋海事ビル5F

(電話番号) 03-6435-8601 (代表)

(ホームページアドレス) <http://www.iris.or.jp>

4. 組合員 (18法人)

独立行政法人：日本原子力研究開発機構、産業技術総合研究所

プラント・メーカー：(株)東芝、日立GEニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株)

電力会社等：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)、(株)アトックス

5. 理事会

理事長： 剣田 裕史 副理事長： 新井 民夫 専務理事： 菅沼 希一

理事： 及川 清志、 魚住 弘人、 門上 英、 岸本 邦和、 瀬戸 政宏、

 畠澤 守、 松本 純、 森山 善範

監事： 中谷 哲

IRIDの事業内容

国内外の叡智を結集し、
廃炉のための研究開発に、
一元的なマネジメントで
取り組んでまいります。

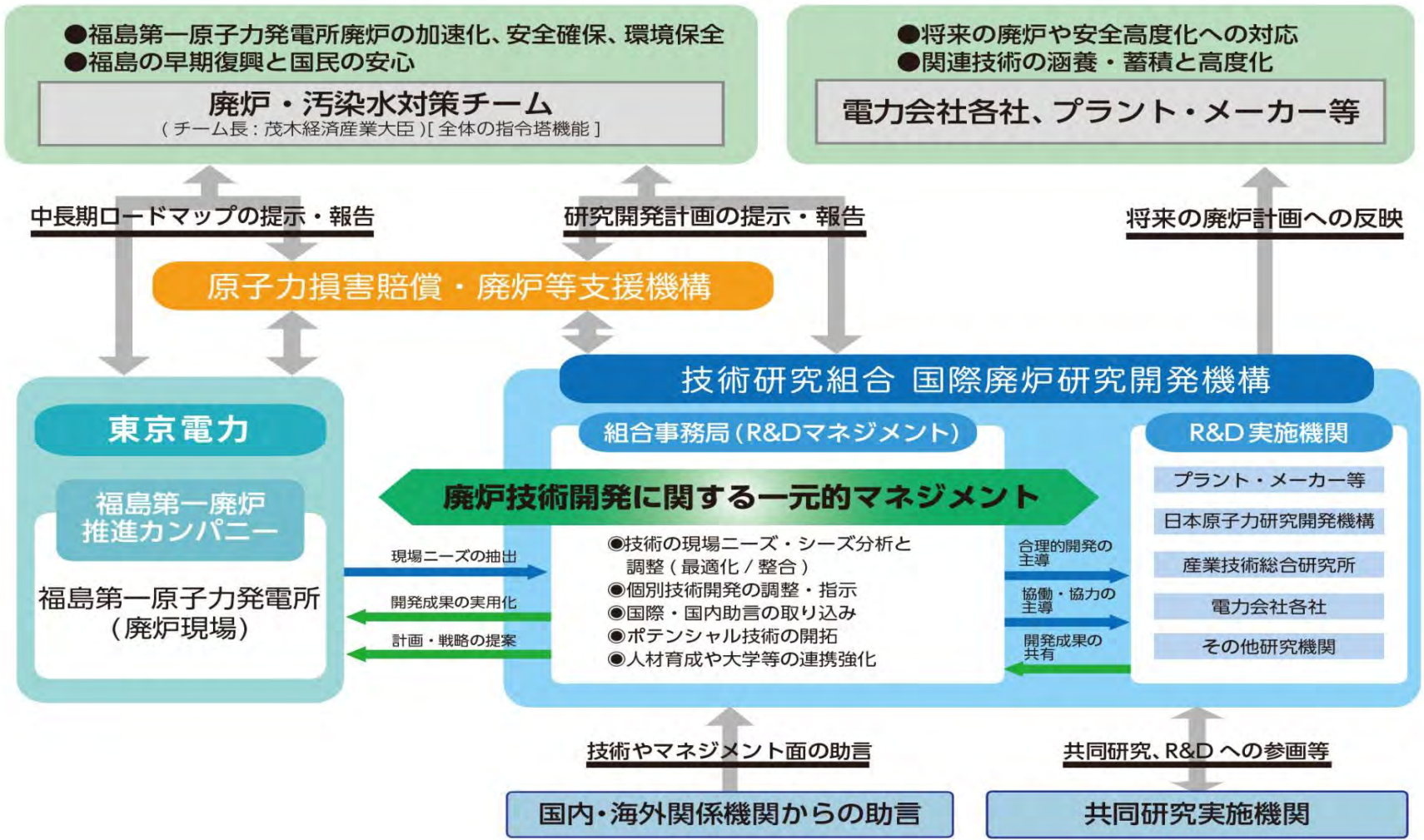
研究内容

- 使用済燃料プールの燃料
取り出しに係る研究開発
- 燃料デブリ取り出し準備に
係る研究開発
- 放射性廃棄物の処理・処分に
係る研究開発

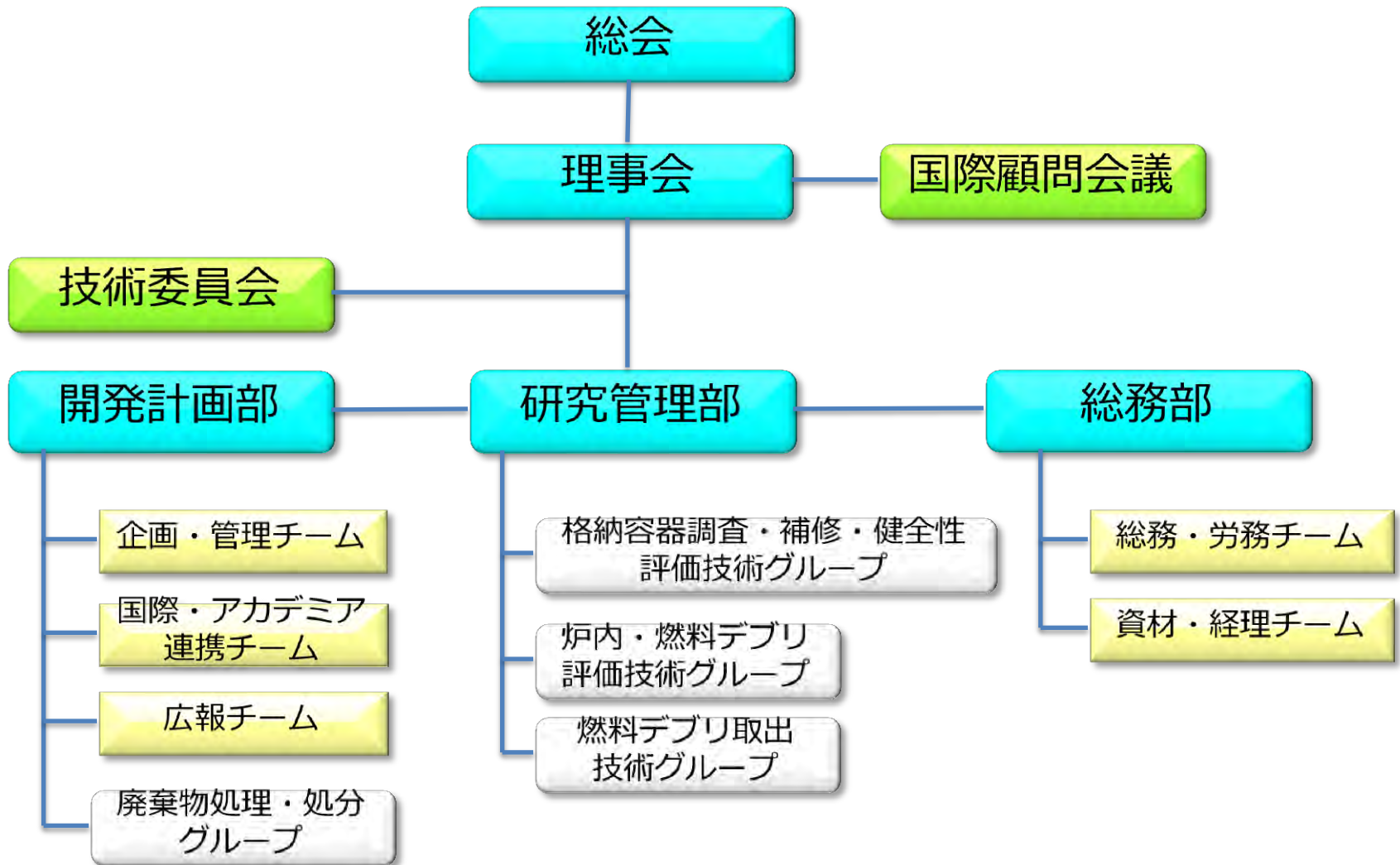


IRIDの役割

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取り組みに注力



IRIDの組織



IRIDの助言機関

外部有識者による以下の2機関を設置。

技術委員会

役割： 研究開発における全体戦略やIRID事業活動全体に関する評価・助言

委員長： 岡本 孝司 (東京大学大学院 工学研究系研究科 教授)
委員： 浅間 一 (東京大学大学院 工学研究系研究科 教授)
渡邊 豊 (東北大学大学院 工学研究科 教授)
山中 伸介 (大阪大学大学院 工学研究科 教授)
朽山 修 (原子力安全研究協会 技術顧問)

国際顧問会議

役割： IRID運営全体に対する助言

顧問： レイク・バレット氏 (米) : 独立コンサルタント(TMI事故時NRC現地対策
ディレクター)
エイドリアン・シンパー氏 (英国) : 英国NDA理事
ルイス・エチャバリ氏 (スペイン) : 元OECD/NEA事務局長

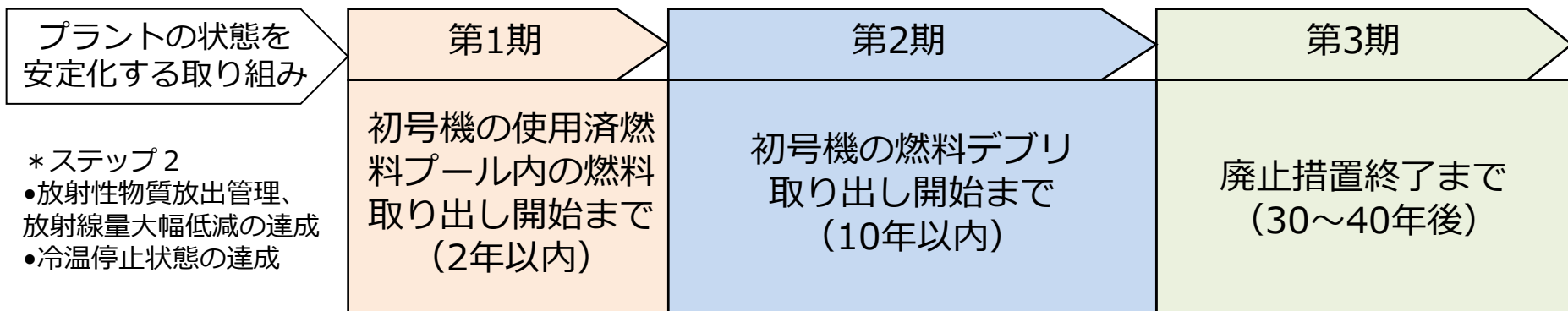
IRIDの研究開発の状況

中長期ロードマップの概要

2011年12月
【ステップ2*完了】

2013年11月

2021年12月



()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

○中長期ロードマップは、平成27(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

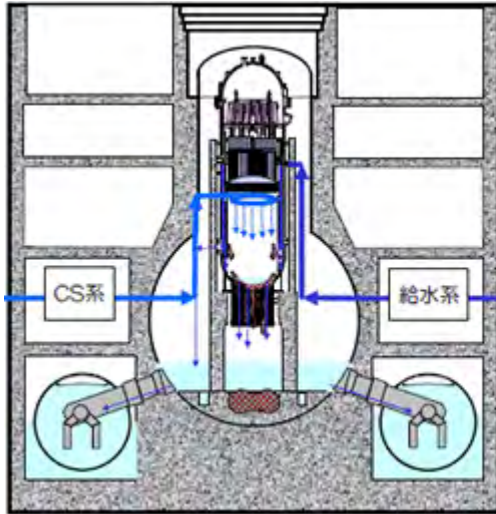
【燃料デブリ取り出し】

- | | |
|---------------------|-----------|
| ・号機毎の燃料デブリ取り出し方針の決定 | 2年後目処 |
| ・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 |

福島第一原子力発電所各号機の状況

1～3号機の炉心・PCVの状況推定(*1)より、開発方針を以下に設定

【1号機】

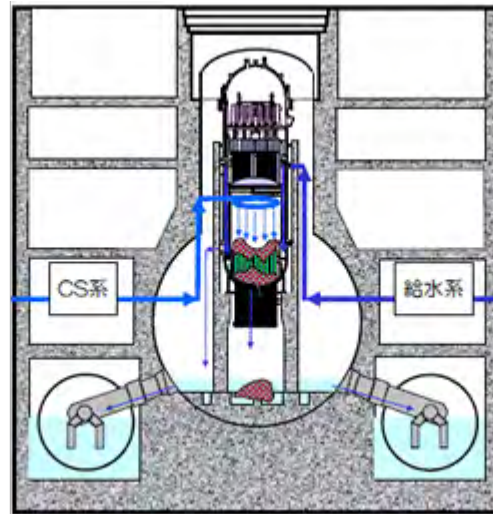


- ・溶融した燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下しており、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在していない。

↓ 開発方針

- ・燃料デブリがペDESTAL外側まで広がっている可能性があり、**ペDESTAL外側の調査を優先**して開発を推進する。

【2号機】

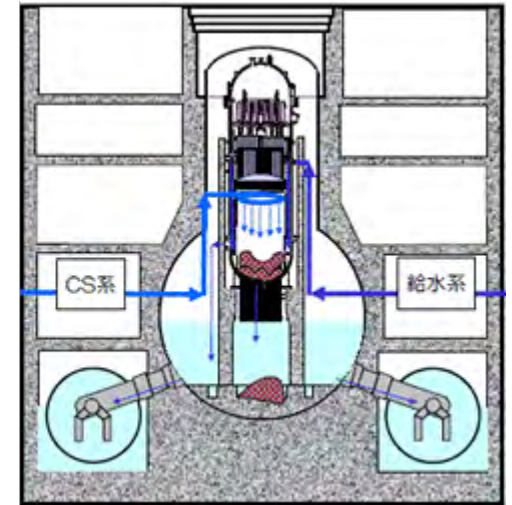


- ・溶融した燃料のうち、一部はRPV下部プレナムまたはPCVペDESTALへ落下し、燃料の一部は元々の炉心部に残存していると考えられる。
- ・尚、3号機では従来の予測よりも多くの燃料がPCV内に落下していると推定。

↓ 開発方針

- ・1号機と比べると、燃料デブリがペDESTAL外側まで広がっている可能性は低く、**ペDESTAL内側の調査を優先**して開発を推進する
- ・尚、3号機はPCV内の水位が高く、1・2号機で使用予定のペネが水没している可能性があり、別方式を検討する必要がある。

【3号機】

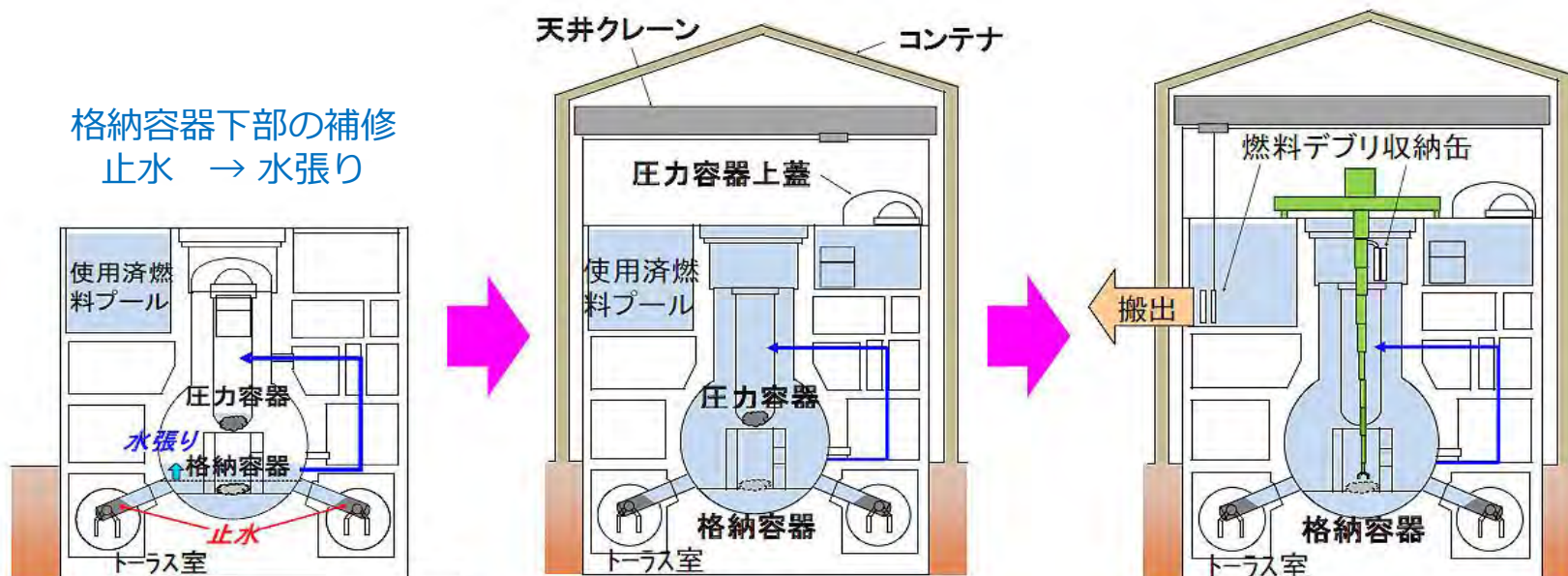


*1：【出典】東京電力ホームページ（平成25年12月13日）「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第1回進捗報告」より抜粋

燃料デブリ取出しの作業イメージ

- 燃料デブリを冠水させた状態で取り出す方法が、作業者被ばく低減の観点から最も有望
- 格納容器の水張りに向けた調査・補修技術を研究中
- 更に、燃料デブリ取り出し・収納・保管に必要な研究開発を推進中
- 燃料デブリ取り出し工法は、候補となる工法（冠水工法、冠水させずに上部または横から取り出す気中取り出し工法など）の中から2018年度上期中に決定する予定。

燃料デブリ取り出し



2015年度実施中のIRIDの廃炉研究開発プロジェクト

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(~2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(~2016年度)

デブリ
臨界管理
(~2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(~2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(~2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(~2016年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(~2015年度)

同実規模
試験
(~2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(~2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(~2015年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(~2015年度)

性状把握

格納容器内部
調査技術
(~2015年度)

燃料デブリ
性状把握
(~2016年度)

使用済燃料の
長期健全性評価
(~2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(~2015年度)

原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

性状把握

格納容器内部
調査技術
(～2015年度)

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

除染後の目標線量率

◆ 除染装置の開発目標

(原子炉格納容器漏えい箇所調査・補修と総合的線量低減シナリオの必要性)

作業エリア : 3 mSv/h

アクセスルート : 5 mSv/h

	1号機	2号機	3号機
線量低減の必要性と線量率			
建屋の状況	<p>線量は全体的に低い：約1~10mSv/h 線量は南側が高く、最南端の数ヶ所の線量は5,000mSv/h</p>	<p>以前の線量：2~60mSv/h (2014年10月下旬部/中部とシールドディングの除染により線量は約5~10mSv/h)</p>	<p>線量率は全体的に高い：約20~100mSv/h</p>

* 原子炉格納容器の調査・補修プロジェクトにおいて計画された作業エリアにおける線量マッピングの数値 (線量低減の必要性)

■ : 3mSv/h ~ 10mSv/h

■ : 20mSv/h ~ 50mSv/h

■ : データ不足により調査不可

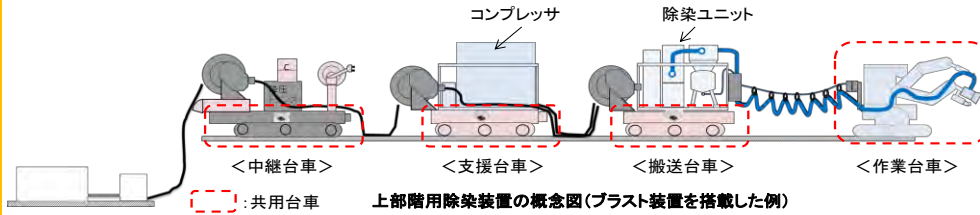
■ : 10mSv/h ~ 20mSv/h

■ : 50mSv/h 以上

除染装置開発の実績・計画

上部階用除染装置

- 平成25年度：設計
- 平成26～27年度：製作、実証試験、実機適用性評価
- ◆「機器ハッチ開口部からのアクセス」を想定し、上部階運用を考慮した各除染技術（吸引・ドライアイス・高圧水・ブリスト）の開発を行うとともに、各除染技術の取扱いが可能な共通システムの開発



◆ 上部階へのアクセスシナリオに基づき、各除染装置及び共用台車の設計を実施した。

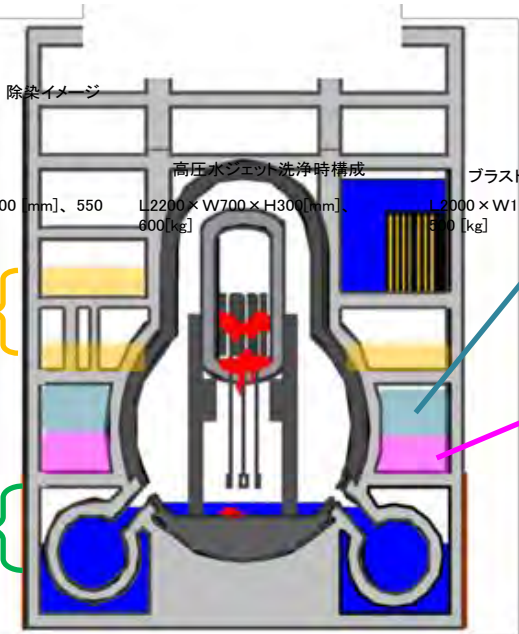
作業台車 搬送/支援台車 中継台車

概念図

寸法・質量
[kg]

除染イメージ

L 1200 × W 740 × H 1700 [mm], 550 [kg]	高圧水ジェット洗浄時構成 L 2200 × W 700 × H 300 [mm], 600 [kg]	プラスト除染時搭載機器構成 L 2000 × W 1100, H 500 [mm], 650 [kg]
--	---	--

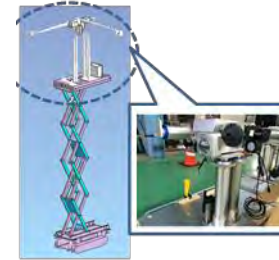


地下階装置

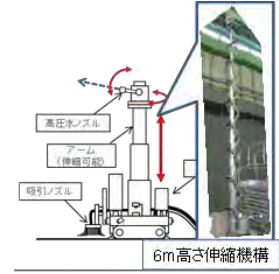
- 平成26年度：技術課題検討、開発立案

高所用除染装置

- 平成25年度：設計、製作
- 平成26～27年度：改良、実証試験、実機適用性評価



ドライアイスブラスト



高圧水ジェット



吸引ブラスト

低所用除染装置 <開発完了>

- 平成23～24年度：設計、製作、2F検証
- 平成25年度：改良、実証試験、1F実証試験



吸引・ブラスト除染装置



高圧水ジェット除染装置



ドライアイスブラスト除染装置

格納容器水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(~2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(~2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(~2015年度)

同実規模
試験
(~2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(~2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(~2015年度)

調査

格納容器内部
調査技術
(~2015年度)

圧力容器
内部調査技術
(~2015年度)

性状把握

燃料デブリ
性状把握
(~2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(~2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(~2016年度)

デブリ
臨界管理
(~2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(~2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(~2016年度)

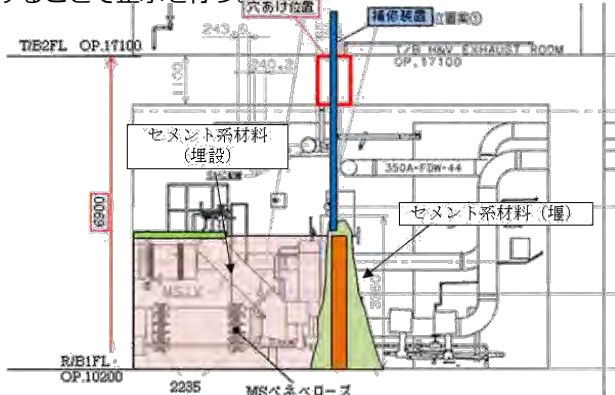
廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(~2016年度)

PCV止水技術開発対象箇所

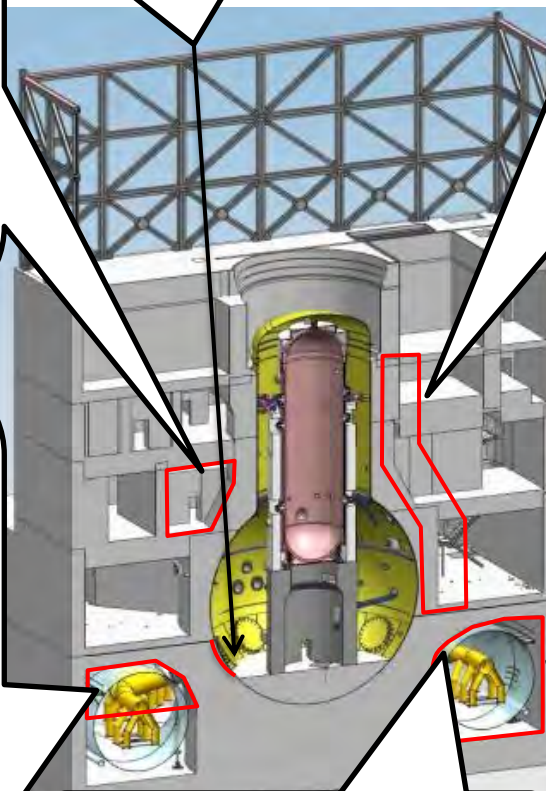
⑤貫通部の止水工法（小部屋内）

PCVを貫通している貫通部のうち、小部屋内に設置されている貫通部については、小部屋内をセメント系材料で埋設することで止水を行う。



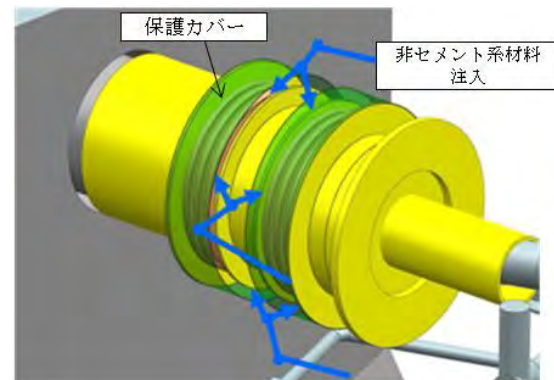
⑧D/Wシェルの補修

調査結果等を踏まえてシェル損傷状態を想定し、補修（止水）方法の検討を行う。



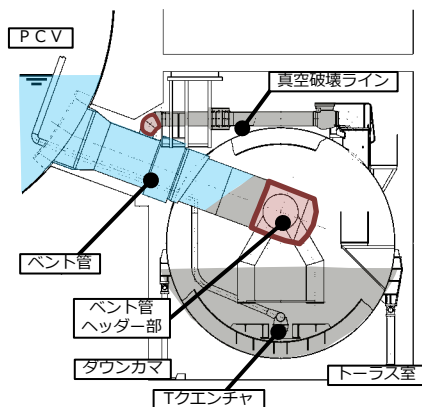
④シール部、⑤配管ベローズ

PCVを貫通している貫通部のうち、開放部に設置されている貫通部については、非セメント系材料で仮止水し、セメント系材料で本止水を実施する。



③-1 ベント管止水技術、③-2 真空破壊ライン止水技術

PCV下部の真空破壊ライン、ベント管、ダウンカム、Tクエンチャは、セメント系材料で止水を行う。

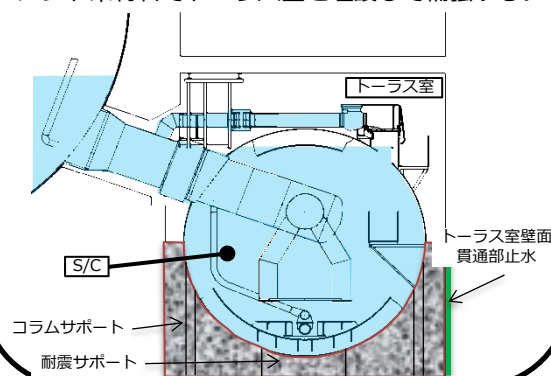


⑥PCV接続配管バウンダリ構築

D/W接続配管のうち、トーラス室に設置されているものはセメント系材料で止水を行う。

①S/C脚部補強、⑦トーラス室壁面貫通部止水

ベント管、ダウンカムをセメント系材料で止水するためには、S/Cを補強する必要があり、セメント系材料でトーラス室を埋設して補強する。



原子炉内燃料デブリ検知技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

調査

格納容器内部
調査技術
(～2015年度)

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

性状把握

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

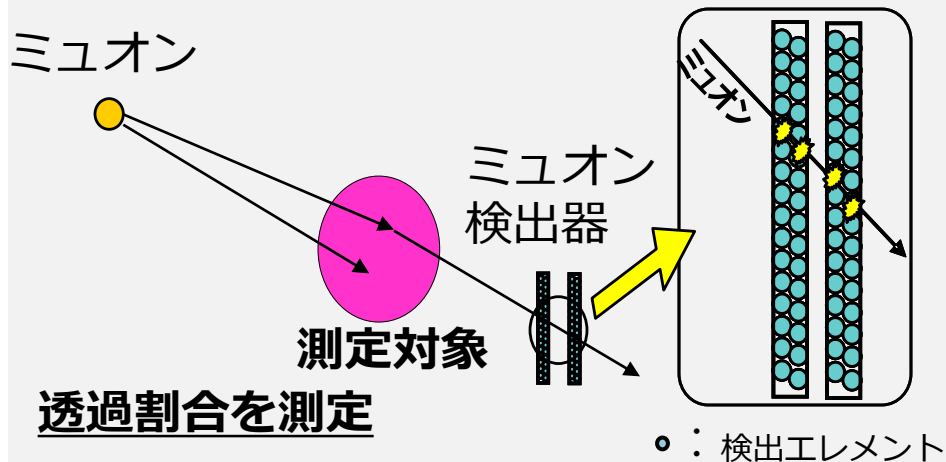
デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

ミュオン観測技術による炉内状況把握

透過法

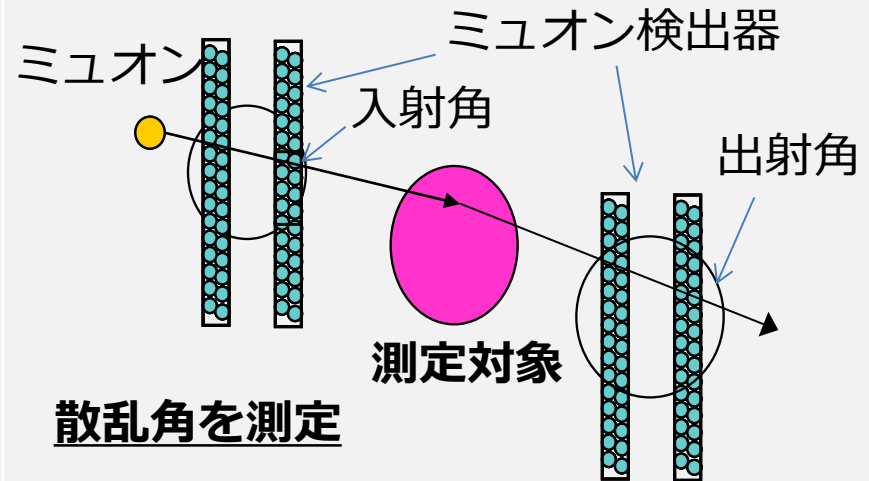


飛来方向の物質有無 (2次元)

識別能力 (燃料デブリ) : 1 m程度

1組の小型ミュオン検出器 (早期適用可)

散乱法



散乱位置の物質有無 (3次元)

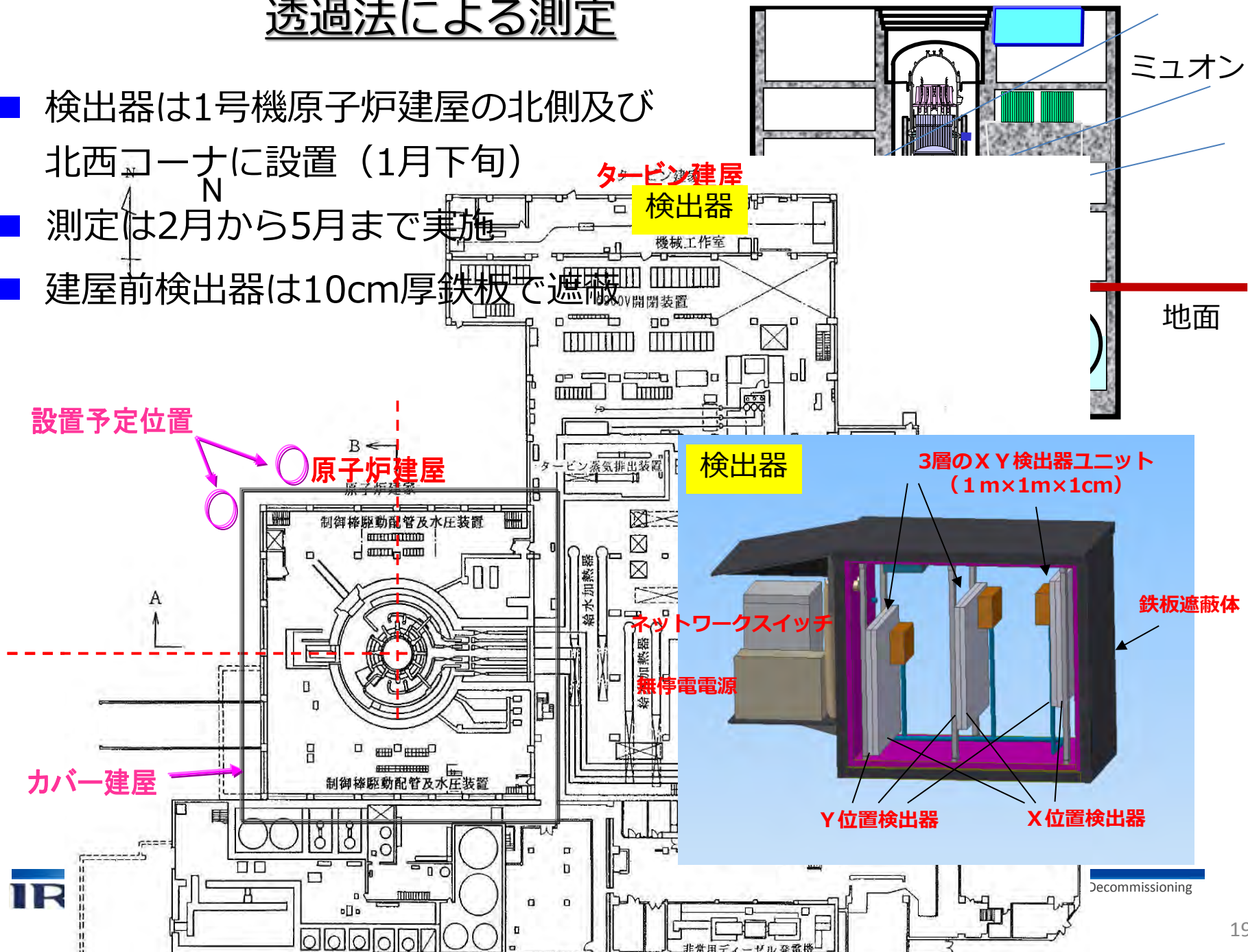
識別能力 (燃料デブリ) : 30 cm程度

2組の大型ミュオン検出器

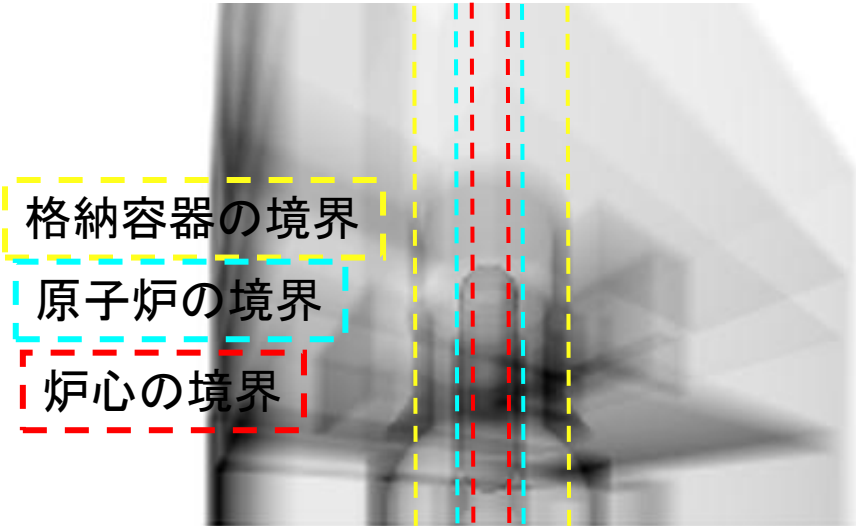
ウラン等の重元素を識別可能

透過法による測定

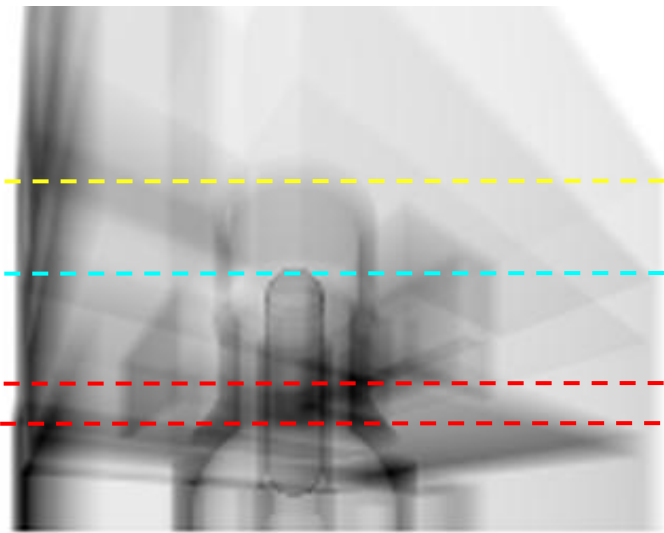
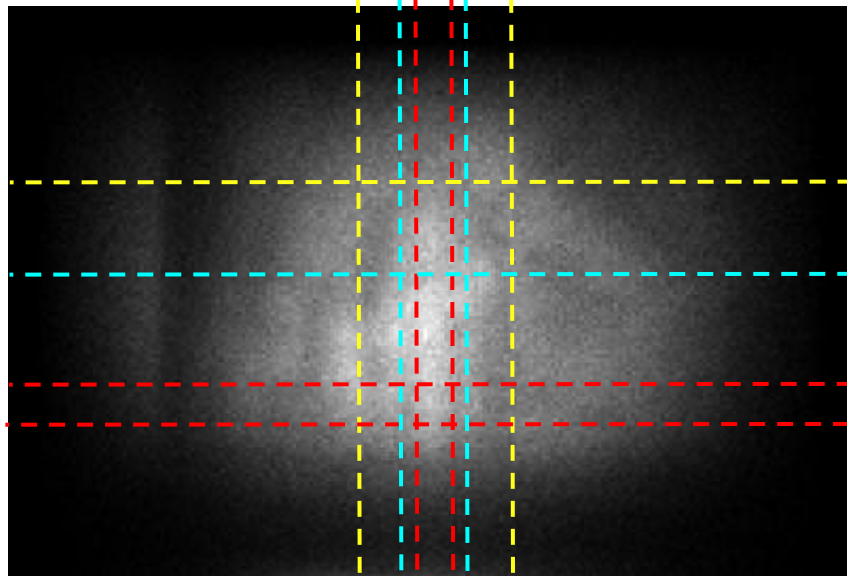
- 検出器は1号機原子炉建屋の北側及び北西コーナーに設置（1月下旬）
- 測定は2月から5月まで実施
- 建屋前検出器は10cm厚鉄板で遮蔽



設計図面画像と測定値比較によるデブリの位置推定（測定器 1）

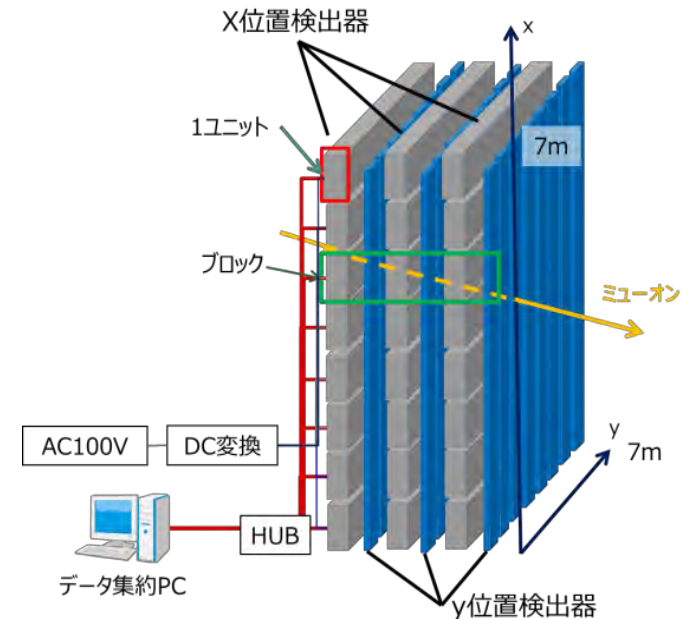
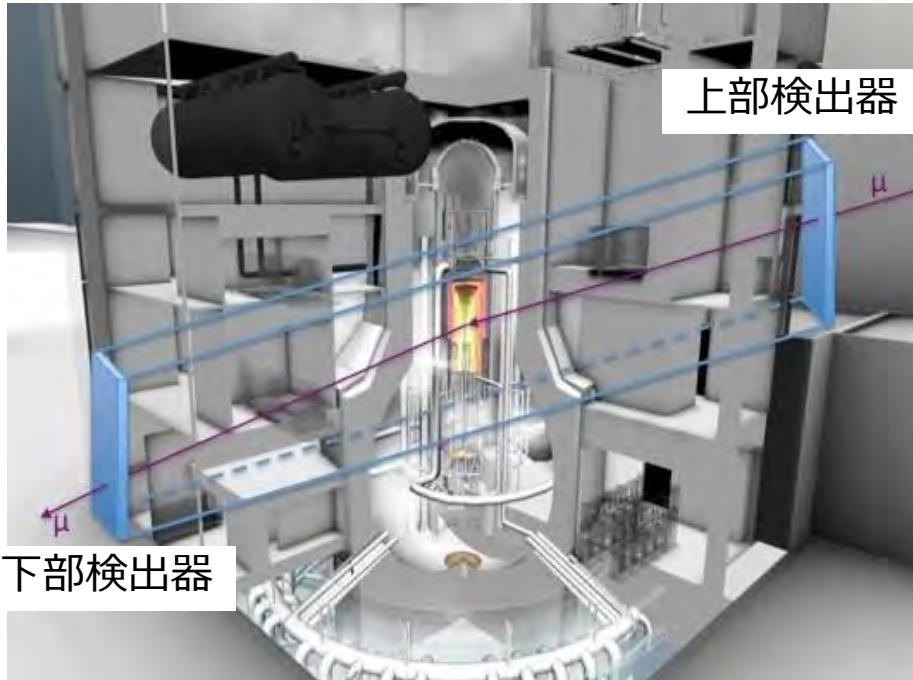
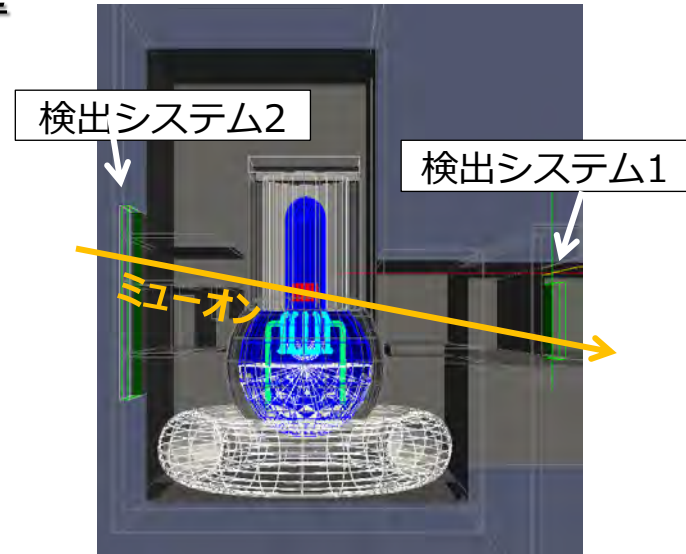


- ◆ 鮮明ではないが、測定データでは、図面から予想される、見えるべき位置に機器等が確認できている
- ◆ また、格納容器・原子炉の境界も一致
- ◆ しかしながら、もともとの炉心位置には高密度物質（燃料）を確認することができない



散乱法による測定

- ◆ 検出器設置位置：2号機建屋前とタービン建屋2F（オペフロ）
- ◆ 遮蔽体とアルゴリズムによるバックグラウンド除去
- ◆ 建屋前検出器は8cm厚鉄板で遮蔽
- ◆ タービン建屋2Fは線量が低いため、遮蔽体なし



格納容器内部調査技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2016年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

格納容器内部
調査技術
(～2016年度)

性状把握

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

格納容器内部調査(1号機)

【調査対象部位】：ペデスタル（外）地下階 作業員アクセス口近傍

【調査及び装置開発ステップ】

(1) X-100Bペネからの調査（～2015年度）

X-6ペネが高線量であり、現状接近可能なX-100B(Φ100mm)を使用して、優先度が高い以下のペデスタル外からの調査を実施・計画

- ① PCV内の1階グレーチング上の情報（地下階アクセス開口部の調査等）を取得。：B1
- ② 2013年11月の水上ボートによるトラス室調査結果を受け、ペデスタル（外）地下階(作業員アクセス口及び近傍ベント管)の映像取得に特化した調査を計画。：B2

(2) X-6からの調査(2016～2017年度)

- ①ペデスタル（外）地下階に対して、デブリ形状計測装置を搭載し更なる状況把握を行う。：B3

追加を検討中

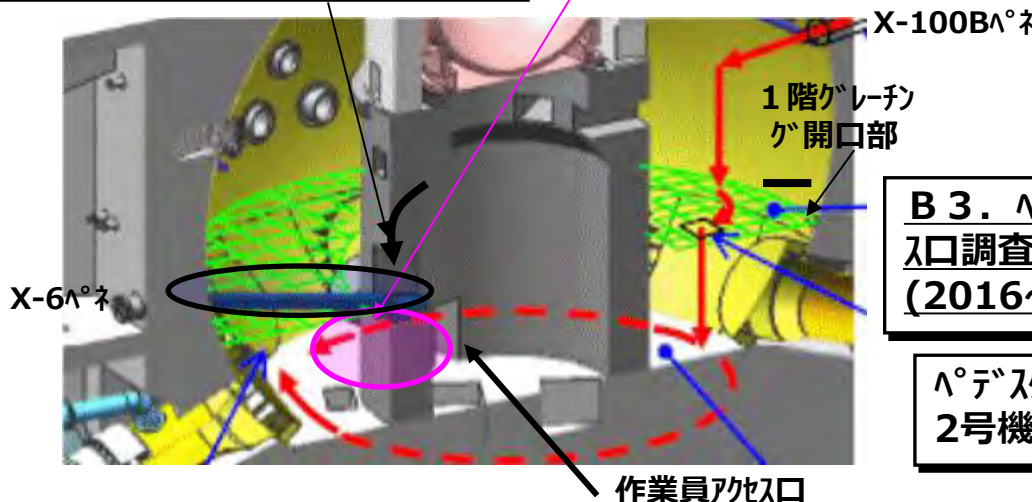
**B 1. ペデスタル外1階グレーチング上調査
(2015年4月完了) : X-100B^α使用**

**B 2. ペデスタル外地下階状況調査
(2015年度計画) : X-100B^α使用**

B2調査の結果を踏まえ実施要否の検討

**B 3. ペデスタル外地下階及び作業員アクセス口調査
(2016～17年度予定) : X-6^α使用**

ペデスタル内部の調査については、
2号機の調査終了後の実施を検討。



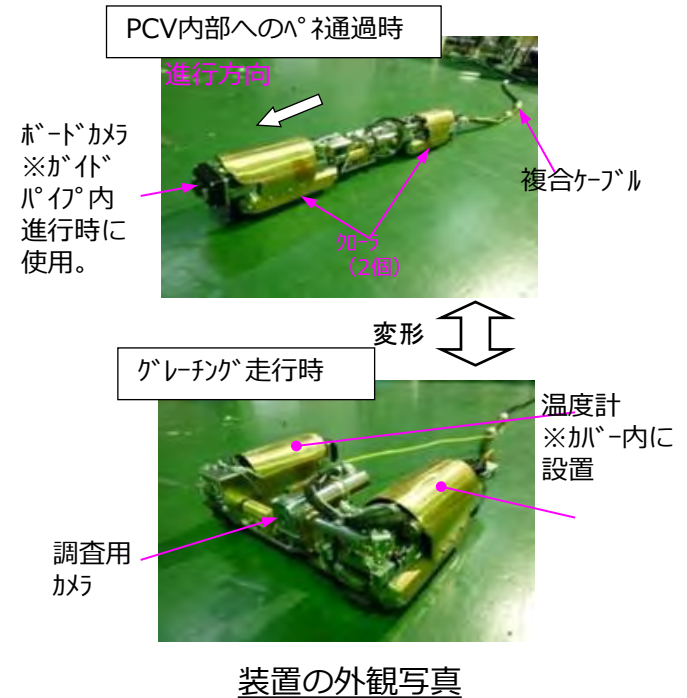
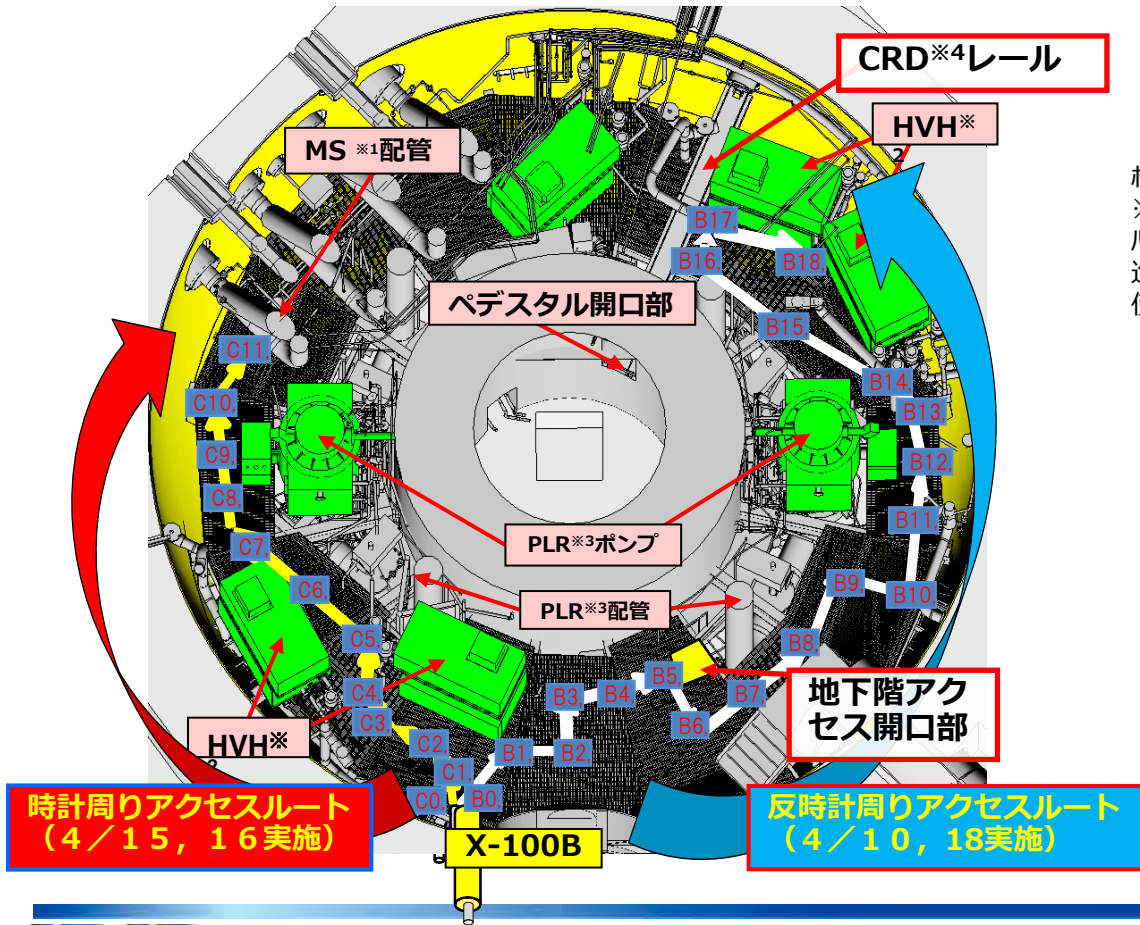
ペDESTアル外 1階グレーチング上調査装置

2015年4月完了 B 1 調査

(1) 装置概要

狭隘なアクセス口(X-100Bペネ貫通口：内径φ100mm)からPCV内へ進入し、グレーチング上を安定走行可能な、**形状変形機構を有するクローラ型装置**

(2) 調査ルート及び装置のイメージ



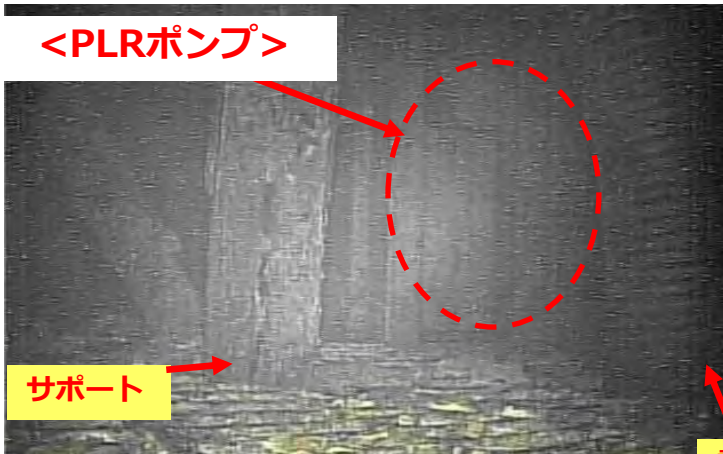
B1調査の成果

調査部位	調査結果
地下階アクセス開口部	<ul style="list-style-type: none"> ・次回B2調査（ペDESTAL外地下階調査）に向け地下階にアクセス可能な開口があり、周囲に干渉物がないことを確認。
CRDレール	<ul style="list-style-type: none"> ・CRDレール未到達。 ・最終到達地点からCRDレール方向のカメラ撮影を実施し画像処理にて評価したが、CRDレールの視認はできなかった。
アクセスルート上	<ul style="list-style-type: none"> ・既設設備（HVH, PLR配管, ペDESTAL壁面など）の大きな損傷は確認されなかった。 ・各調査ポイントで温度、線量情報を取得。

<地下階アクセス開口部>

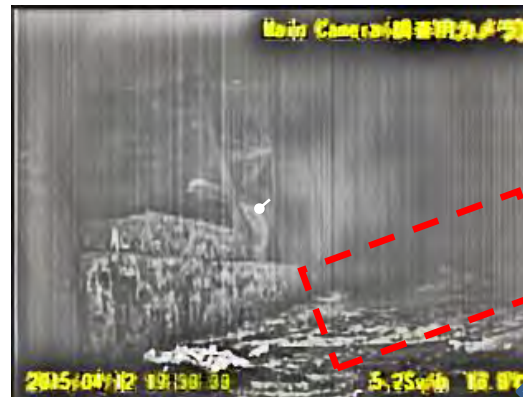


<PLRポンプ>



サポート

電線管



<CRDレール>



(モックアップ施設での映像)

格納容器内部調査(2号機)

【調査対象部位】：プラットホーム上(プラットホーム上面, CRDハウジング下部)及び下(地下階)

【調査及び装置開発ステップ】

(1) X-6ペネ (Φ115mm) からの調査 (～2015年度)

・ X-6より、ペデスタル内部プラットホームの状況調査を計画：A2

(2) X-6 (穴径拡大、またはペネ開放) からの調査 (2016～2017年度)：A3～A4

・ デブリ可視化装置を投入し、ペデスタル内部の調査を行う

A 1. CRDレール状況調査(2013/8実施済)

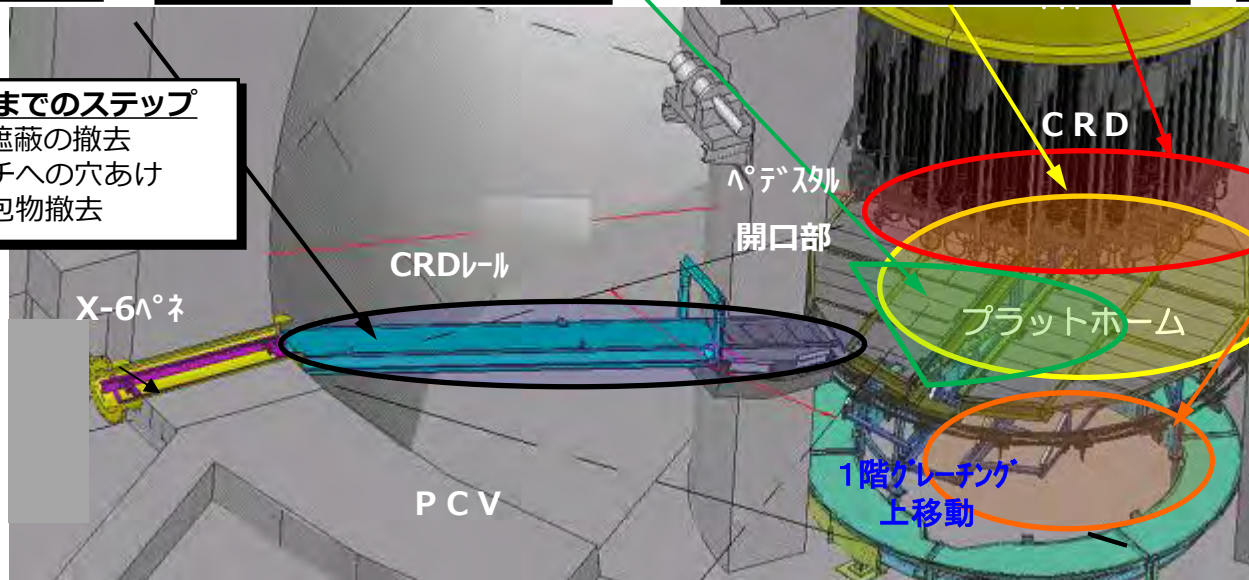
A 2. H°ペスタル内部プラットホーム状況調査 (2015年度予定)

A 3. CRD下部及びプラットホーム状況調査 (2016年度予定)

A 4. H°ペスタル地下階の状況調査(2017年度/下予定)

X-6ペネ使用までのステップ

- ・ ペネ前_遮蔽の撤去
- ・ ペネハッチへの穴あけ
- ・ ペネの内包物撤去



H°ペスタル外部の調査については、A2～A4の内部調査結果を踏まえて実施要否を検討

圧力容器内部調査技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2015年度)

調査

格納容器内部
調査技術
(～2015年度)

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

性状把握

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

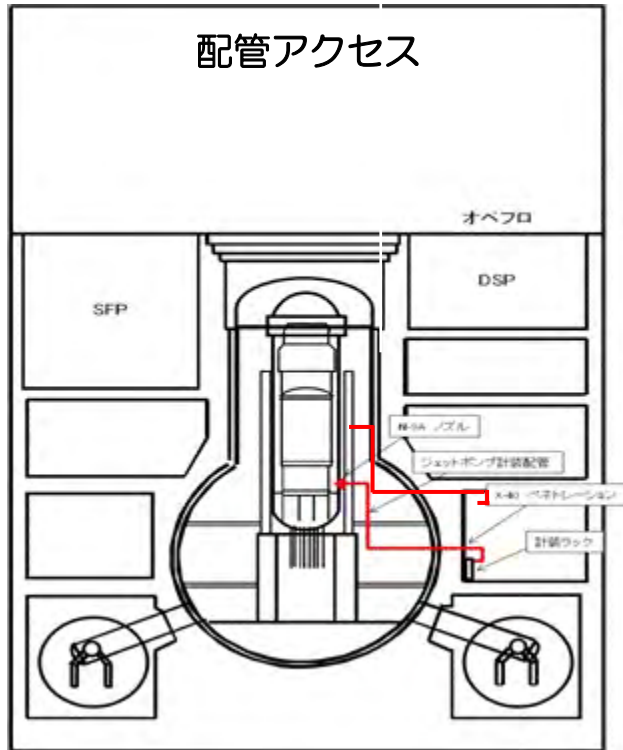
デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

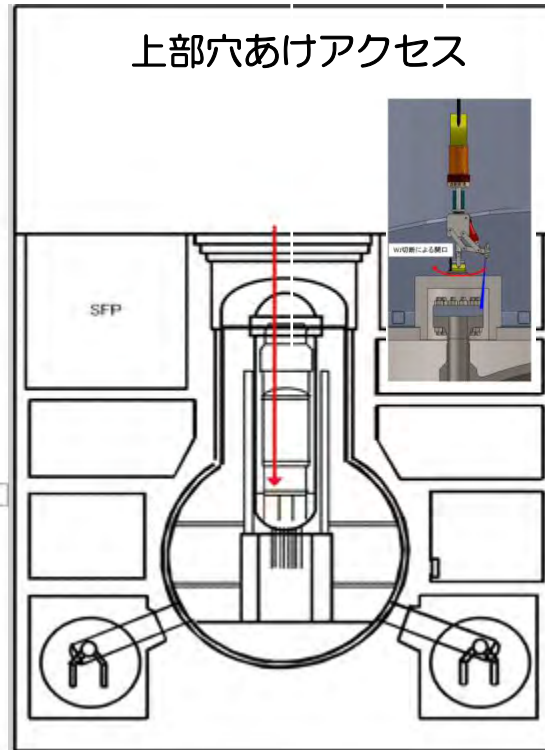
原子炉圧力容器内部調査及び燃料デブリサンプリング技術

◎ これまで検討されたアクセスルート



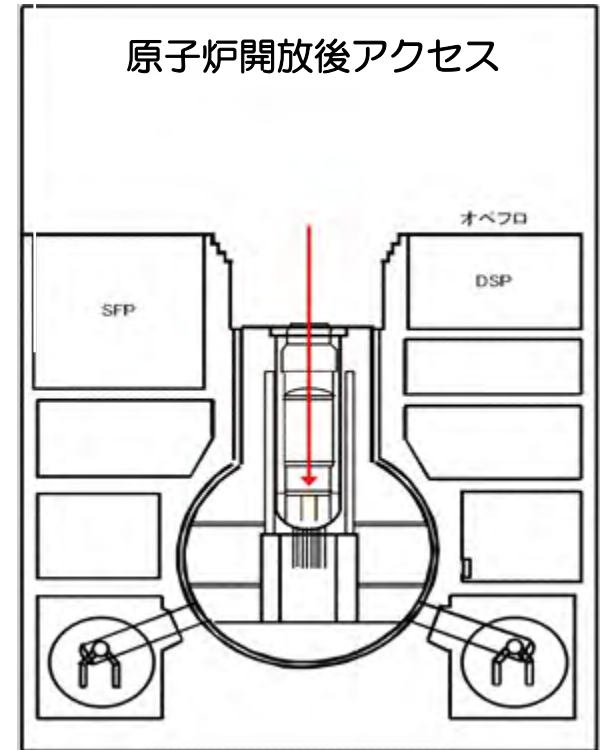
【課題】

- バウンダリの維持
- 弁部の通過
- 炉内構造物の穴あけ



【課題】

- バウンダリの維持
- 炉内構造物の穴あけ



【課題】

- 調査開始可能時期

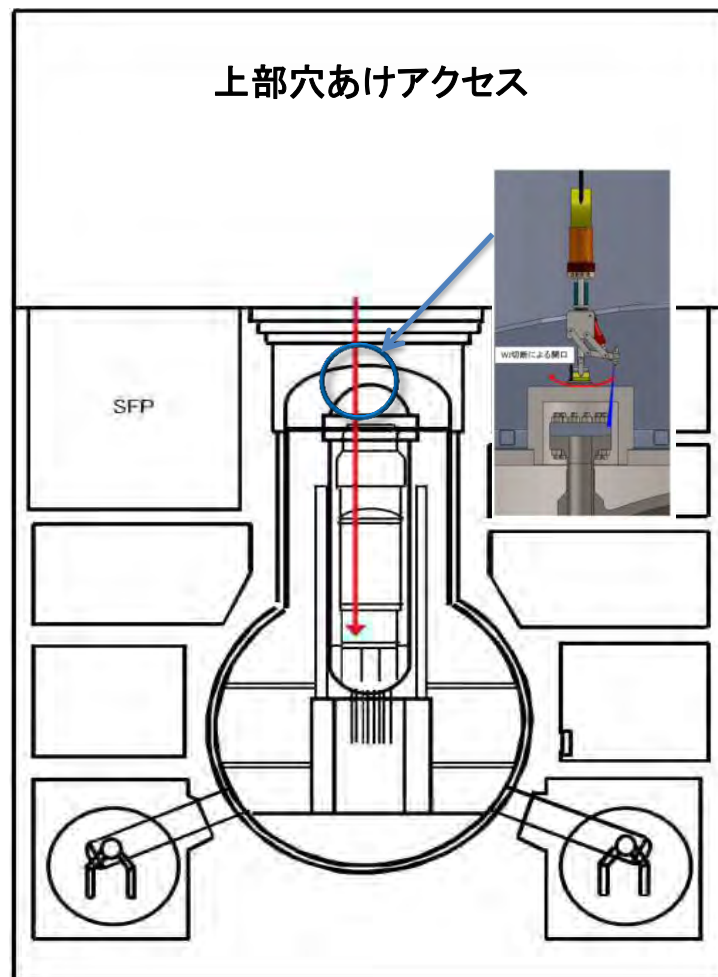
上部穴あけ加工による調査技術検討

◎事業内容

- ・ 2018年度までに原子炉圧力容器上部から炉心部へ到達して調査すること、燃料デブリをサンプリングすることを目標とした開発計画の策定
- ・ 上部穴あけ加工による調査技術の要素試験及び実現性評価
- ・ 燃料デブリサンプリング技術の調査及び実現性評価

【課題】

- ・ バウンダリの維持
- ・ 炉内構造物の穴あけ



模擬デブリ性状把握・処置技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(~2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(~2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(~2015年度)

同実規模
試験
(~2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(~2015年度)

調査

格納容器内部
調査技術
(~2015年度)

圧力容器
内部調査技術
(~2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(~2015年度)

性状把握

燃料デブリ
性状把握
(~2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(~2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(~2016年度)

デブリ
臨界管理
(~2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(~2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(~2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(~2016年度)

想定される1F燃料デブリとTMI-2デブリとの比較

燃料デブリの収納・移送・保管の観点から、1F燃料デブリとTMI-2デブリの比較をすると下表のとおりとなる。大きく異なる点は以下のとおり。

- ・ 1F燃料デブリのほうが燃焼度と濃縮度が高い
⇒放射線、崩壊熱大及び反応度高
- ・ 1F燃料デブリはコンクリートとの溶融生成物が存在すると推定
⇒コンクリート中の水分の放射線分解による水素発生の懸念
- ・ 1F炉内への海水注入、計装ケーブル他との溶融
⇒燃料デブリ中の塩分の影響、多様な不純物の混入

1F固有の課題として
対応が必要

		1F燃料デブリ	TMI-2デブリ
燃焼度（炉心平均）		約25.8GWd/t ^{注1)}	約3.2GWd/t ^{注2)}
濃縮度（バンドル平均（最大））		3.7 wt% ^{注1)}	2.96 wt% ^{注2)}
冷却期間（最短）		約9年（2020年6月時点）	約6年 ^{注3)}
デブリ存在位置		圧力容器内及び格納容器内（推定） ⇒燃料構造材・炉内構造物に加え、コンクリートや計装ケーブル等との溶融生成物が存在すると推定	圧力容器内 ⇒燃料構造材・炉内構造物との溶融生成物
収納物量	デブリ重量	—	134.4t ^{注3)}
	（燃料集合体重量）	3基合計で約450t以上 ^{注4)}	約122t ^{注2)}
	（ウラン重量）（未照射）	3基合計で約260t以上 ^{注5)}	約82t ^{注2)}
その他		炉内に海水を注入	—

注1) 「JAEA-Data/Code 2012-018 福島第一原子力発電所の燃料組成評価、2012.9、JAEA」より1F-1の値

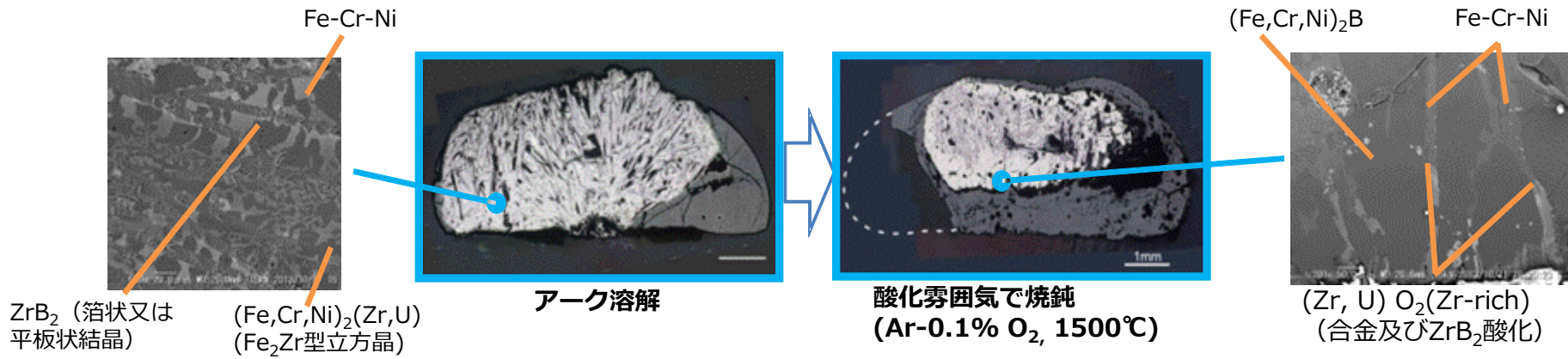
注2) 「DOE/SNF/REP-084 TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis、2003.9、U.S. Department of Energy」より

注3) 「G. Lassahn, Uranium and Plutonium Content of TMI-2 Defueling Canisters, EG&G internal technical report, September 1993」より

注4) 炉心装荷体数×300kgで算出

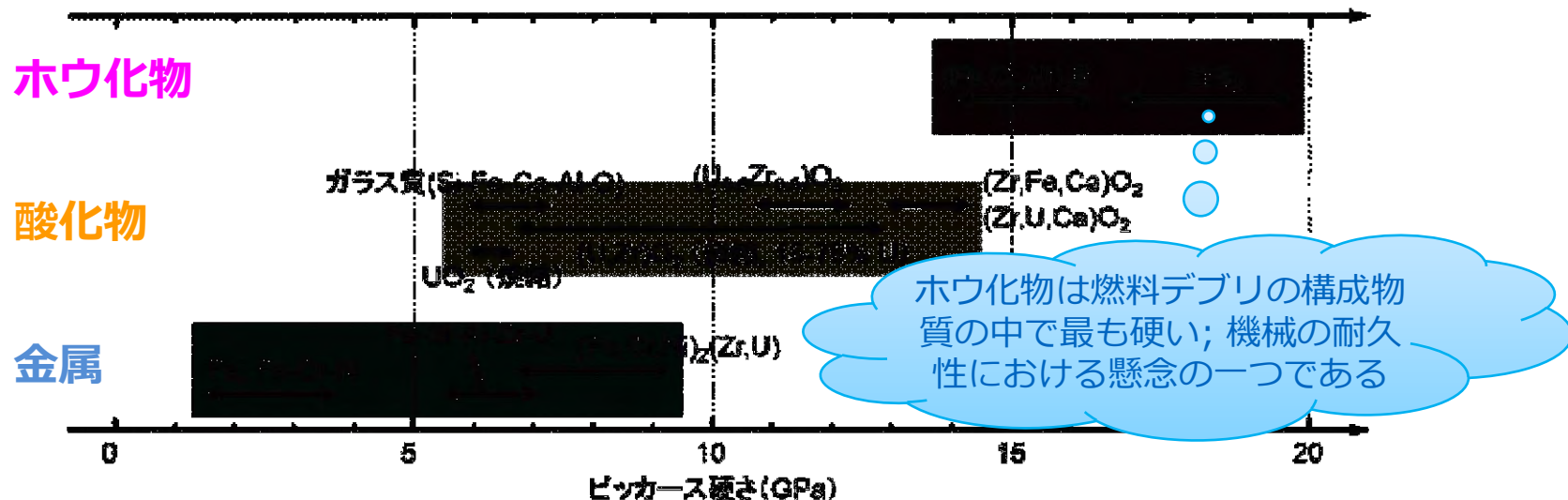
注5) 福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書（1号、2号、3号、4号、5号及び6号原子炉施設の変更） 本文及び添付書類、平成9年12月、東京電力株式会社

模擬デブリを用いた特性の把握（平成25年度成果）



制御材 (B₄C+SUS) との反応 (溶融固化物断面観察像の例)
 (制御棒と燃料が溶融した場合にできる固化物の組織等に係る知見を取得)

生成した各相のビッカース硬さ



(デブリの化学系 (ホウ化物、酸化物、金属) 毎に硬度の分布を推定)

原子炉压力容器/格納容器の健全性評価技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(~2017年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(~2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(~2015年度)

同実規模
試験
(~2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(~2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(~2015年度)

圧力容器
内部調査技術
(~2015年度)

格納容器内部
調査技術
(~2015年度)

燃料デブリ
性状把握
(~2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(~2016年度)

デブリ
臨界管理
(~2015年度)

デブリ収納・
移送・保管
(~2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(~2016年度)

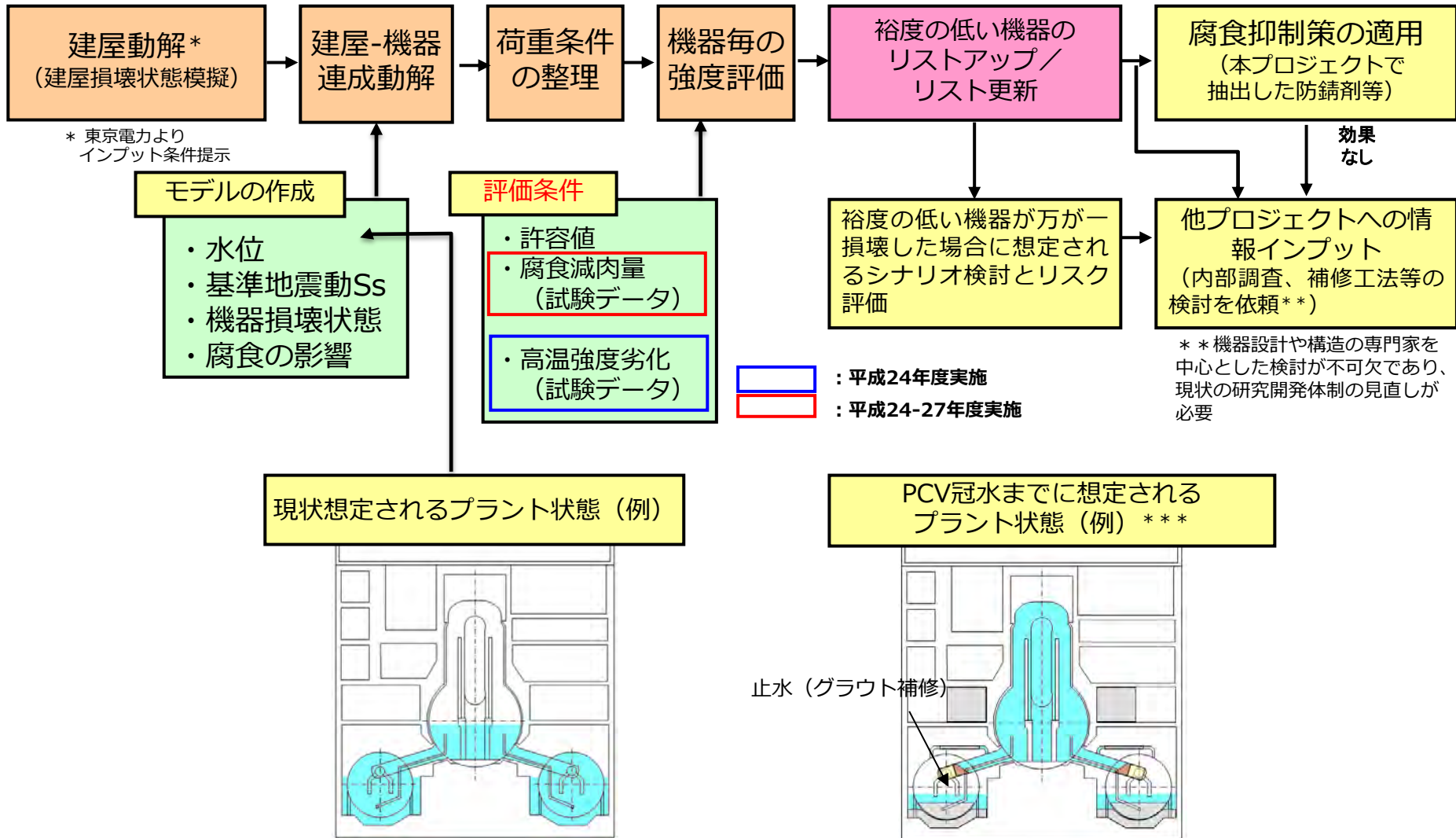
燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(~2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(~2016年度)

健全性評価全体評価フロー

余寿命評価の概略フロー (例)



現状及びPCV冠水までに想定されるプラント状態から推定されるPCV内水位 (例)

*** 他プロジェクト「原子炉建屋漏えい箇所止水・格納容器下部補修技術の開発」からのインプット情報

燃料デブリ臨界管理技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(~2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(~2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(~2015年度)

同実規模
試験
(~2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(~2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(~2015年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(~2015年度)

性状把握

格納容器内部
調査技術
(~2015年度)

燃料デブリ
性状把握
(~2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(~2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(~2016年度)

デブリ
臨界管理
(~2015年度)

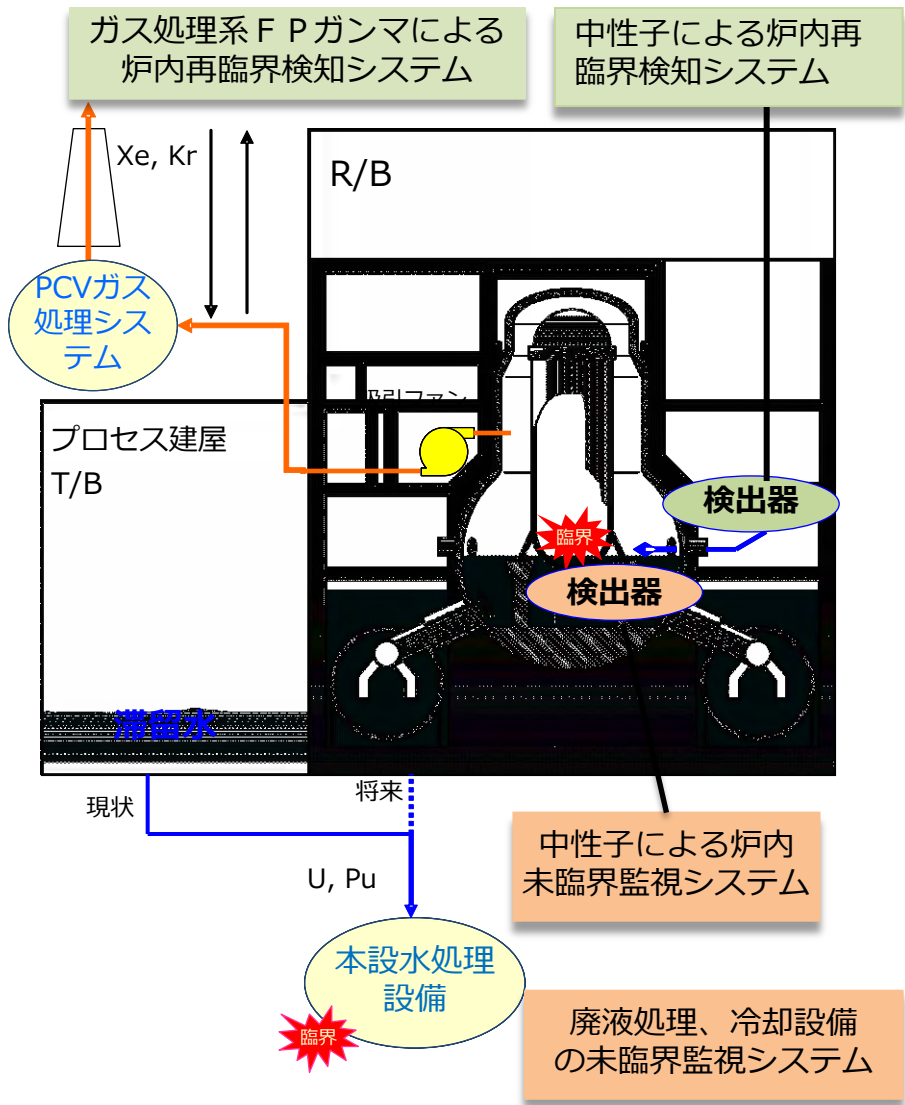
燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(~2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(~2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(~2016年度)

未臨界監視および再臨界検知の概要

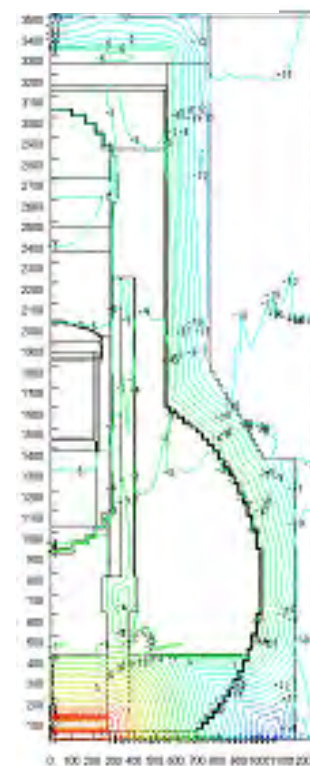


未臨界監視

- 作業員の臨界による被ばくリスクを未然に防ぐ必要がある。

再臨界検知

- PCV/RPV内部において臨界になった場合でも被ばくリスクは極めて小さい。
- それでもやはり比較的広い範囲の状況を監視することが重要である。



PCV内臨界時の中性子線分布

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

性状把握

格納容器内部
調査技術
(～2015年度)

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

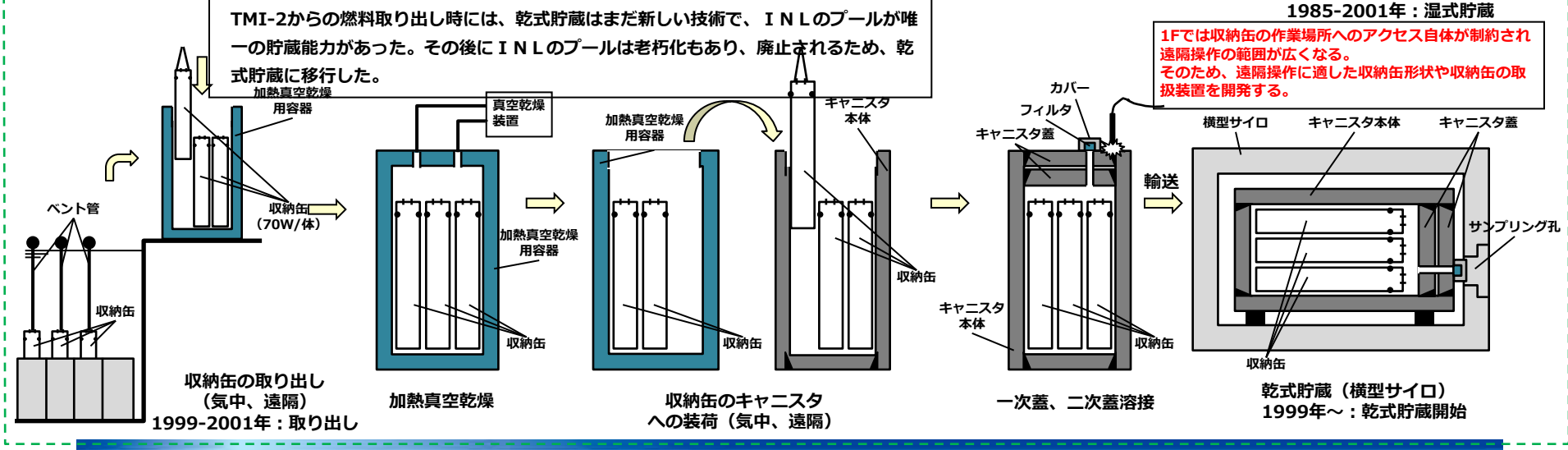
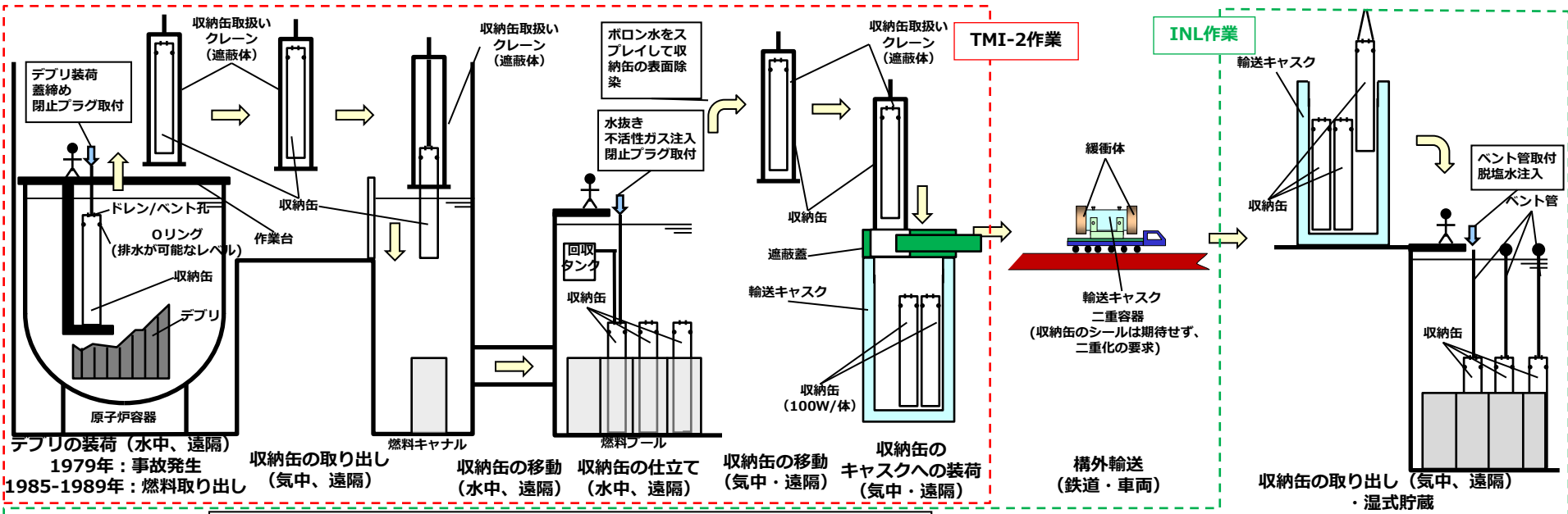
燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

【参考】燃料デブリの収納・移送・保管の概要（TMI-2の例）



燃料デブリ・炉内構造物の取出技術の開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

格納容器内部
調査技術
(～2015年度)

性状把握

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

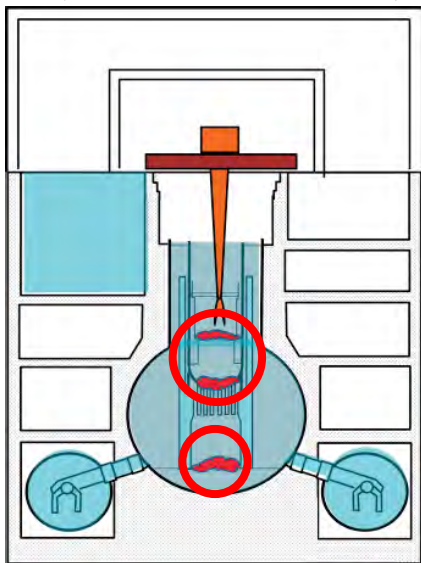
廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

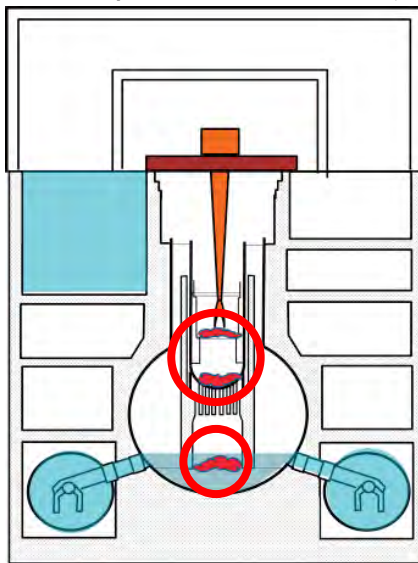
燃料デブリ取り出し工法研究開発の概要

選定した燃料デブリ取り出し工法オプションの概要

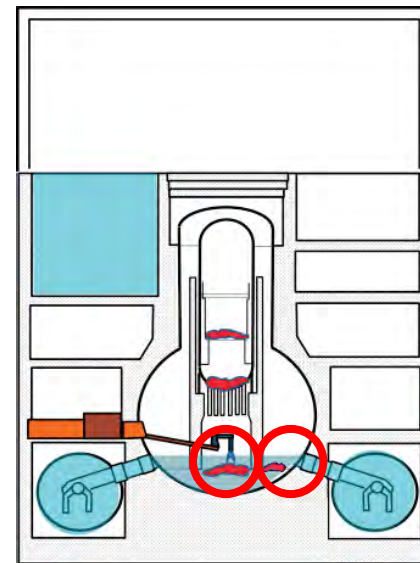
a. 冠水－上アクセス工法



b. 気中－上アクセス工法



c. 気中－横アクセス工法



- ・戦略プラン（※）に基づき、デブリ取り出し工法は上記3工法を対象に検討
- ・主な実施内容（3工法に対して）
 - ①工法実現性検討
 - ②実現性見極めのためのシステムの概念検討
 - ③取り出し装置の設計、開発計画策定
 - ④①～③を踏まえた燃料デブリ・炉内構造物取り出しシステム・装置の開発計画策定

※「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2015」(平成27年4月30日、原子力損害賠償・廃炉等支援機構)

燃料デブリ・炉内構造物取出基盤技術開発の概要

◎事業内容

燃料デブリ取出し3工法を対象として、各工法の実現性を評価するために必要な要素技術の開発・評価を行う

◎燃料デブリ取出し作業の開発課題

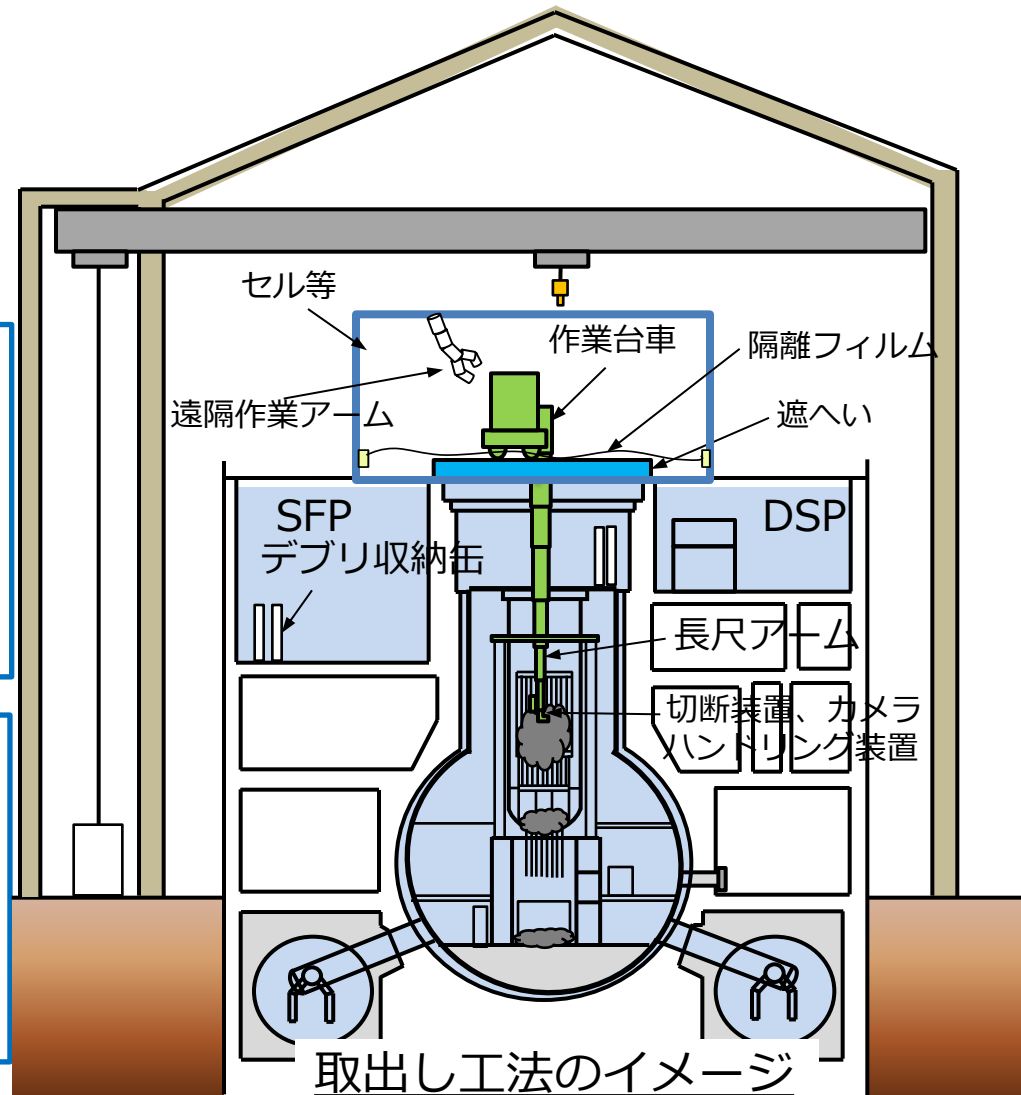
工法によらず、燃料デブリ取出し作業共通の課題で主なものは下記。

- ①燃料デブリ切断
- ②遠隔作業
- ③汚染拡大防止
- ④遮へい
- ⑤臨界防止

◎要素試験

以下の要素試験を実施する

- (1) 汚染拡大防止技術
- (2) 燃料デブリへのアクセス技術
- (3) 遠隔操作技術
- (4) 作業員の被ばく低減技術
- (5) 切削・集塵・視覚・計測技術



気中で上から燃料デブリを取り出す工法の例（1）

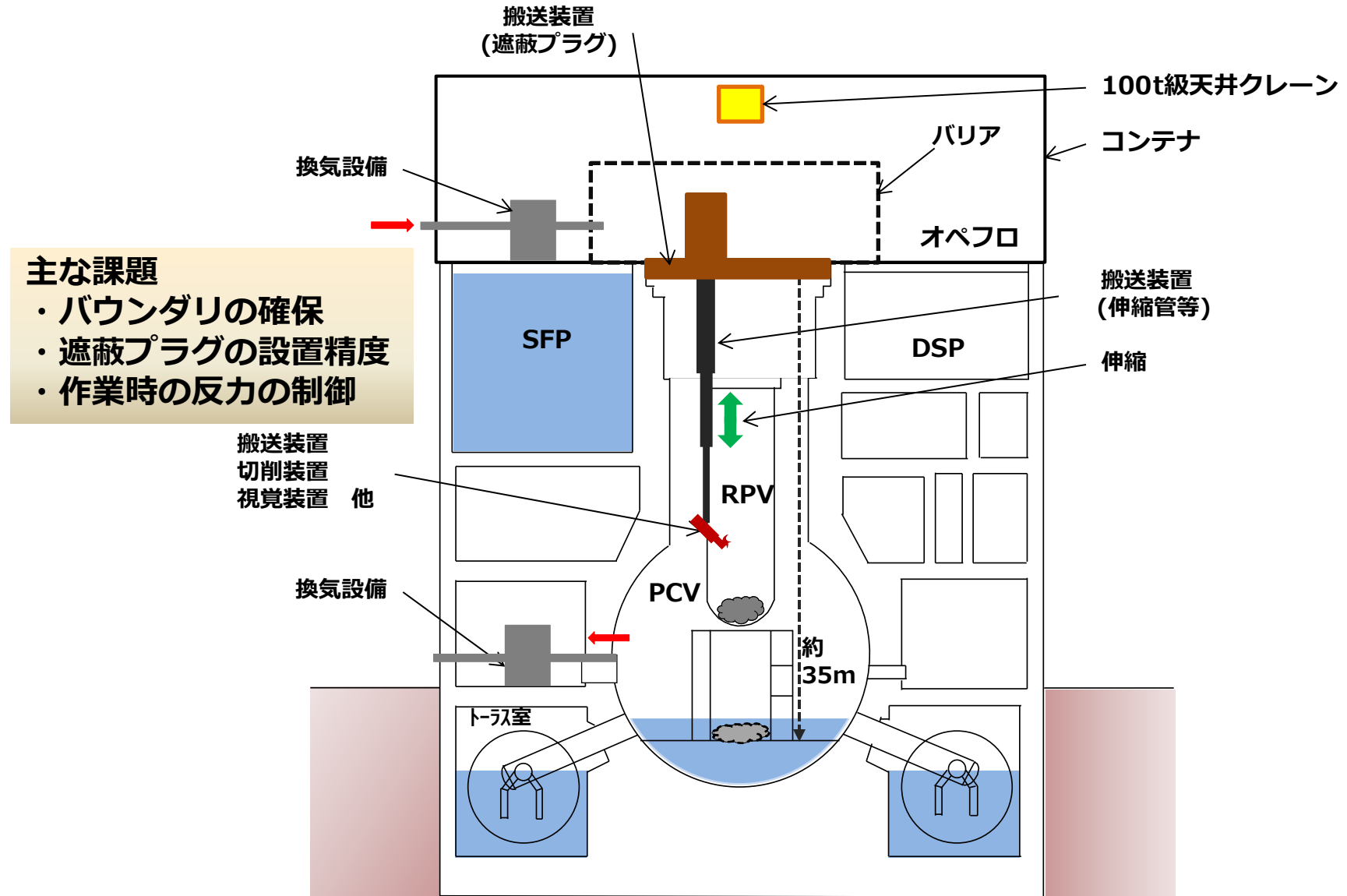


図 気中でオペフロに遮蔽プラグを設置し取り出す工法

気中で上から燃料デブリを取り出す工法の例（2）

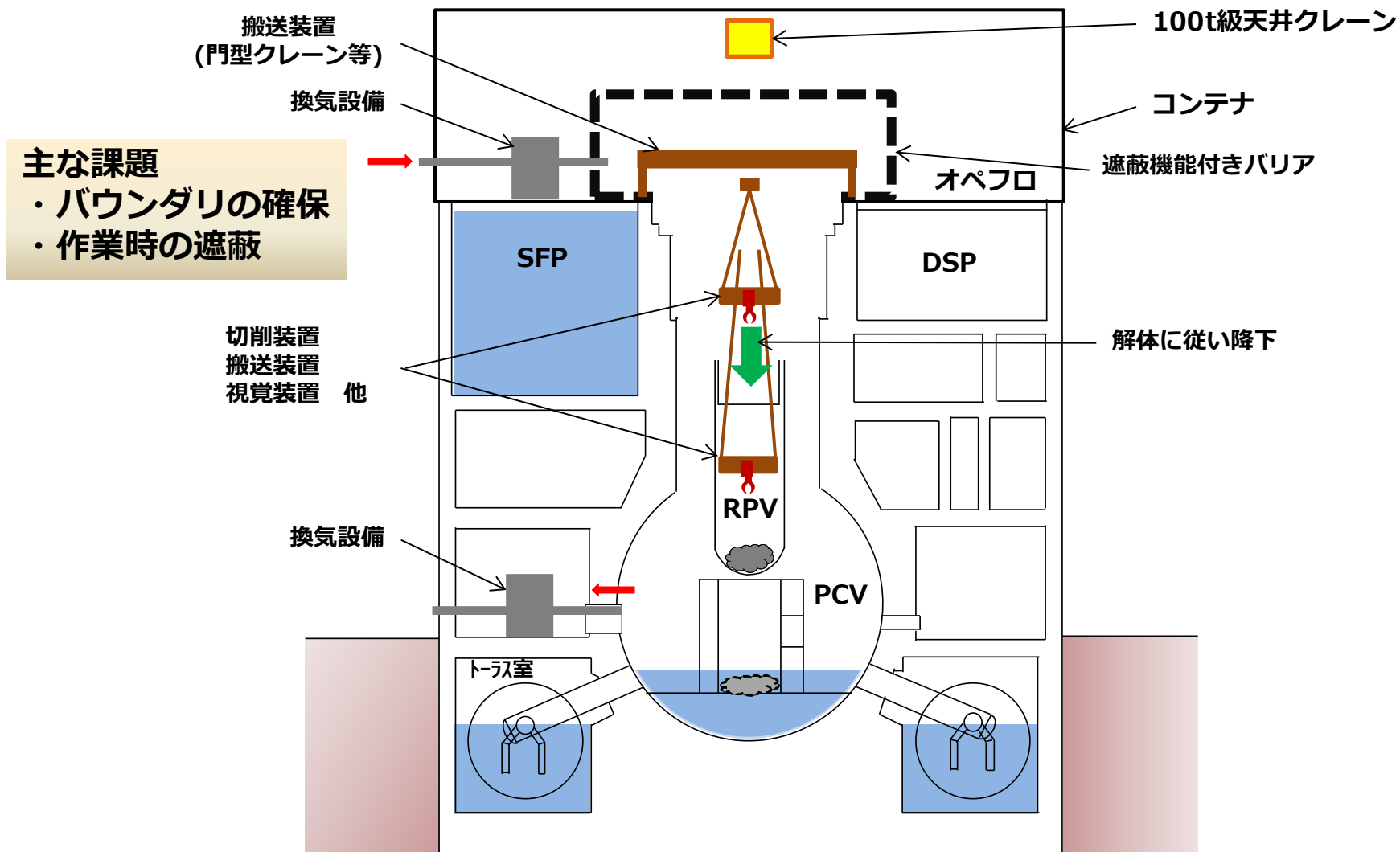


図 気中でオペフロから装置本体を降ろしながら取り出す工法

気中で横から燃料デブリを取り出す工法の例

主な課題

- ・ バウンダリの確保
- ・ 作業時の遮蔽
- ・ 進入開口の位置

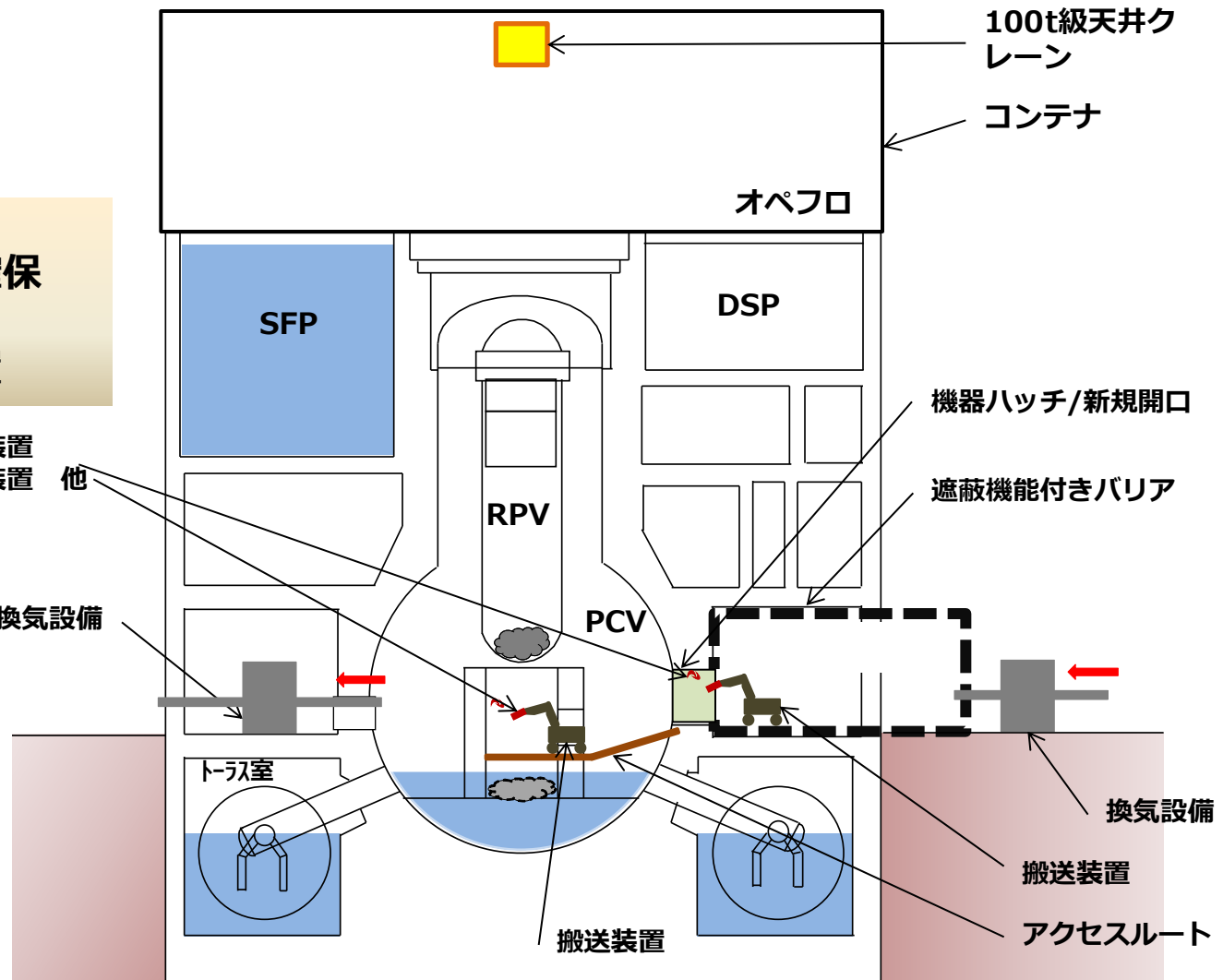


図 気中で側面から取り出す工法

次のステップへのキーポイント

1. 安全性：放射線遮蔽、放射性物質の飛散防止

- これらの機能は、デブリ切削から移送まで一貫して全ての作業行程を通じて、一般にどの取出工法でも必要
- 実現可能性、リスクと改善点を模擬試験によって把握すべき

2. 実用性：遠隔操作、自動操作、保守性

- 超高線量下での極めて厳しい挑戦
- 実現可能性は要素/模擬試験によって把握すべき

3. 検証と訓練

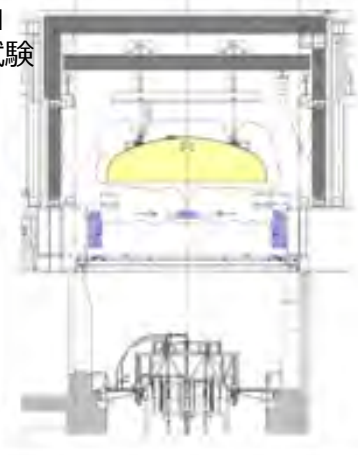
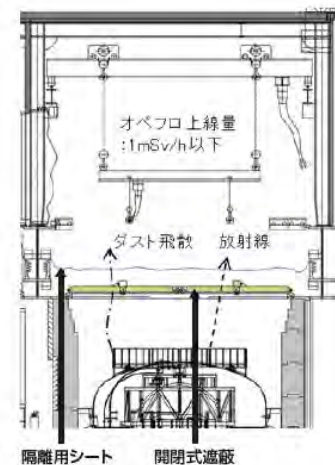
- モックアップ試験は、将来確実に必要になる

4. 安全設計と安全評価

- 安全のための設計方針を確立すべきであり、安全性評価をすべき



遠隔作業用アーム（筋肉口ポット）のハンドリング試験



隔離用シート

放射性廃棄物処理処分の研究開発

使用済燃料の
長期健全性評価
(～2016年度)

除染・線量低減

遠隔除染
装置開発
(～2015年度)

格納容器止水・補修

格納容器
止水技術
(～2015年度)

同実規模
試験
(～2015年度)

炉内調査・分析

原子炉内燃料
デブリ検知技術
(～2015年度)

事故進展解析
による炉内把握
(～2015年度)

調査

圧力容器
内部調査技術
(～2015年度)

性状把握

格納容器内部
調査技術
(～2015年度)

燃料デブリ
性状把握
(～2016年度)

デブリ取出

格納容器/
圧力容器
健全性評価
(～2016年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出基盤技術
(～2016年度)

デブリ
臨界管理
(～2015年度)

燃料デブリ・
炉内構造物
取出工法
(～2016年度)

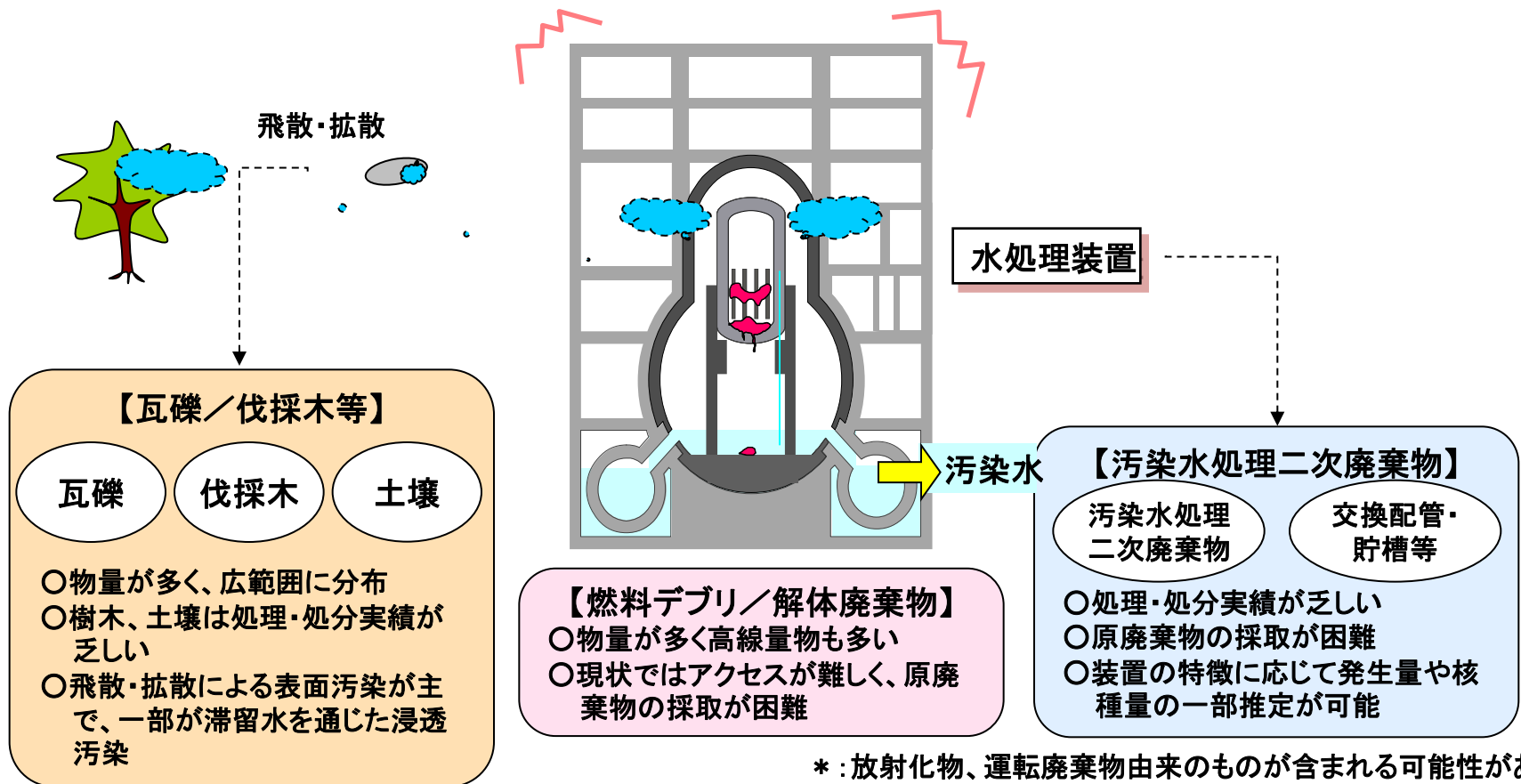
デブリ収納・
移送・保管
(～2016年度)

廃棄物処理・処分

固体廃棄物
処理・処分技術
(～2016年度)

福島第一事故廃棄物の特徴

- 事故によりコントロールできない状態で発生
- 1～3号機の炉心燃料を起源とした汚染*
- 廃止措置作業が状況に応じて変化するため、発生量の想定が困難
- 汚染範囲が広く、高線量箇所もあるため、データが非常に限定的（特に長半減期核種の組成）



福島第一事故廃棄物と操業廃棄物の比較

不確実性の項目	対策の度合い	
	操業廃棄物	事故廃棄物
廃棄物発生【量、種類、時期】	◎	△
ハンドリング（取り出し・区分）【困難性】	◎	△
性状把握【情報の充分性、サンプルの困難性、サンプルの代表性】	○	△
処理・廃棄体化技術	○	? ~ △
埋設・処分方法及び安全評価	△ ~ ○	?
規制・技術基準、ガイドライン、サイティング	△ ~ ○	?

◎：把握している、あるいは充分見通しがある。○：概ね見通しがある。
△：限定的である。?：論じられる段階ではない。

- 操業廃棄物は、課題があるものの比較的管理された状態にある。
 - ・ 現時点の発生量はもとより今後の推移、個別の廃棄物中の含有放射エネルギーや化学物質等の基本的な廃棄物性状に係わる情報は把握されている。
 - ・ 未処理・処理済の双方とも現行の規制に基づく保管管理等が適切に行われている。
 - ・ 処分方法や安全評価方法に加え対応する規制・基準についても整備されてきている。
- 福島第一事故廃棄物は、多数の不確実性が技術的に重要な課題となる。それら不確実性を解消し、管理された状況に置くことが対策並びに技術開発の大きな目標となる。

処理・処分に係る技術/研究開発項目

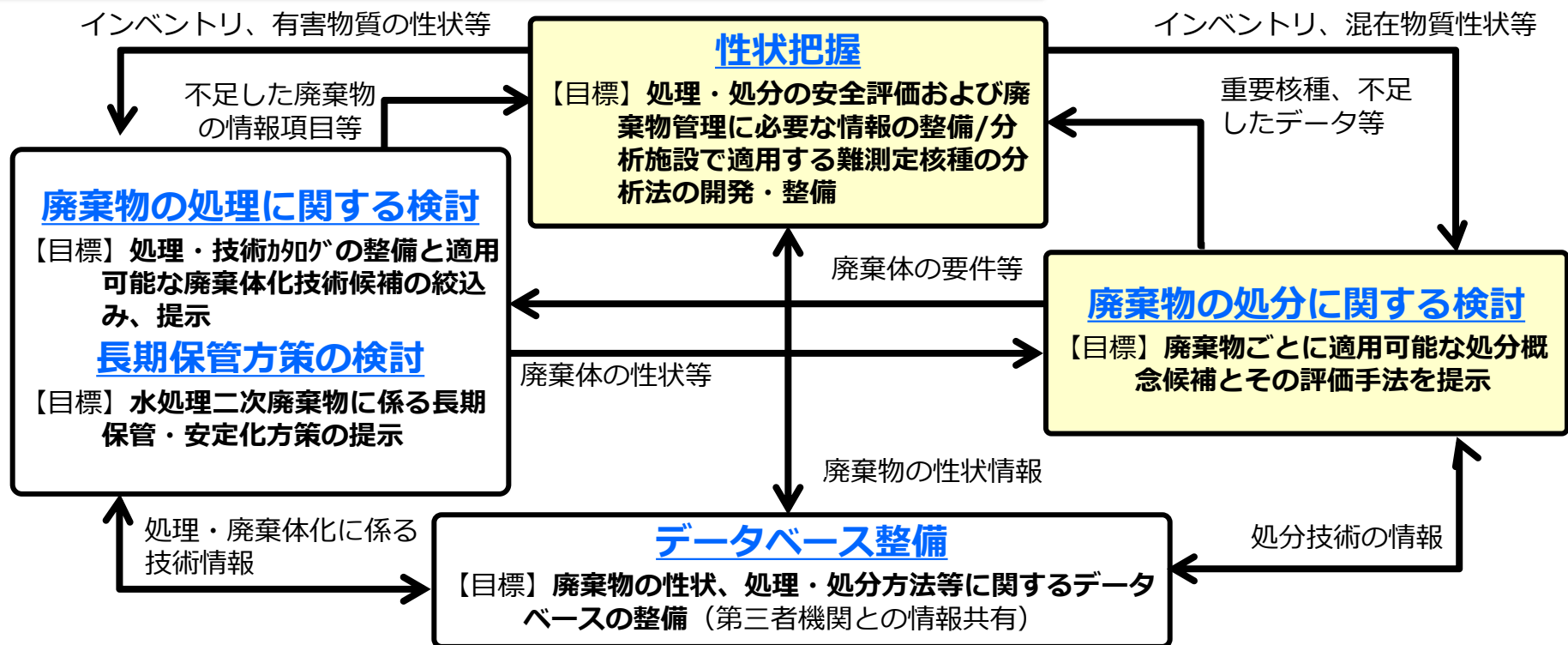
廃棄物ストリームに関する検討

廃棄物ストリーム：事故廃棄物の発生・保管から処理・処分までの一連の廃棄物の取り扱い

処理・処分等に関する技術情報（前提条件を含む）、
政策・制度等に係る情報

個別の研究成果の総合的な判断と調整、安全かつ合理的な処
理・処分の実現に向けて必要な検討課題等の提示

個別研究開発項目（廃棄物ストリームの構築に必要な知見を与える基盤研究開発）



現時点での廃棄物貯蔵量

- ガレキ・伐採木 -

- 事故後に収集された屋外のガレキや燃料集合体/燃料デブリ回収作業で発生したガレキ、並びにタンクや施設を設置する場所を作る作業で発生した伐採木を含む廃棄物は、1F原子力発電所サイト内の数か所に貯蔵されている。



廃棄物保管場所*

廃棄物量(2015年7月31日現在)*

廃棄物の種類	保管方法	保管量
ガレキ	固体廃棄物貯蔵庫	5,100 m ³
	覆土式一時保管施設、仮設保管設備、容器 (1-30 mSv/h)	17,400m ³
	シート養生 (0.1-1 mSv/h)	27,400 m ³
	屋外集積 (<0.1mSv/h)	88,600 m ³
伐採木	屋外集積 (幹・根・枝・葉)	62,400 m ³
	一時保管槽 (枝・葉)	17,400 m ³

* “ガレキ・伐採木の管理状況,” 東京電力, 31 July 2015 .

今後の重要検討事項

- 個別研究開発項目の検討に基づく廃棄物ストリームに関する総合的な検討の実施が重要
- 現段階における重要検討事項
 - ◆ 廃棄物中のインベントリや共存物質に関する情報
 - 分析値と文献値、解析的手法を併用し、様々な不確実性を考慮して、廃棄物中の核種インベントリを設定する。
 - ◆ 汚染水処理廃棄物の処理・長期保管対策
 - セシウムを吸着したフェロシアン化物を含んだ廃棄物の安定固化にはジオポリマーが有効。基礎試験を継続し、データ蓄積、評価精度向上を図る。
 - ◆ 個々の廃棄物の処分区分の見通しと選定論拠の整備
 - インベントリ情報と事故廃棄物の特徴を考慮した情報（処理に関する情報も含む）に基づく廃棄物の処分区分の提示とその論拠の整備。
 - 安全評価結果等を活用した、優先的に取得すべきデータや、処分の安全性に有意な影響を与える条件等の明示。
 - 最新の知見を反映した検討を繰り返すことによる精度の向上。

最後に – 燃料デブリ取り出しに向けて –

- 福島第一における燃料デブリ取り出し作業は、TMI-2と比較して一層の困難が予想される。作業の全体戦略、取り出し工法、デブリ取り出しツールの開発については、国内外の叡智を結集する必要がある。
- 燃料デブリ取り出し達成のためには、関連する各プロジェクトの目的・ゴールを明確にした上で、部分最適ではなく、全体最適となるように計画し、柔軟に技術開発を行う必要がある。
- 戦略の策定にあたっては、End-State（最終的にどうしたいか）を考え、実現可能な様々なオプションを検討し、その結果、第一案だけでなく必ず代替案を準備しておくことが重要である。

ご清聴ありがとうございました。