

NPO 環境ベテランフォームズ EVFセミナー

福島第一原発の廃炉技術とロボット - 廃炉作業ロボットの研究開発の現状と課題 -

2019年3月19日(火) NPO法人新現役ネット会議室

国際廃炉研究開発機構 副理事長 東京大学名誉教授 新井民夫

tamio-arai@irid.or.jp

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。 無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構



本日の構成

- 福島第1原発の現況
- 原子炉の廃炉とは
 - ▶ 原子力の基礎知識
 - > 廃炉・廃止措置
- 廃炉用ロボットとは
 - ▶ 福島第一で使用されたロボット
 - ▶ PCV内部の調査用ロボット
 - ▶ デブリ取り出しシステム
- 廃炉用ロボットの課題
 - ▶ 廃炉用ロボットの特徴
 - > 設計上の課題
- IRIDとは
- エンジニアに何を期待するか



廃炉措置計画

■ 過酷環境:放射性物質のリスク

■ 多分野複合技術: 連携作業、人材

社会

アクセスできる空間や使えるリソースの制約

- 研究開発は国の仕事
- 社会的課題としての廃炉

技術

- 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- あらゆる事態を想定した対処の検討
- 進捗によって廃炉措置全体の構想の変化



● 未踏分野: 開発の立案と変更

● 長期計画: 人材育成、産業技術化



航空機開発

宇宙開発

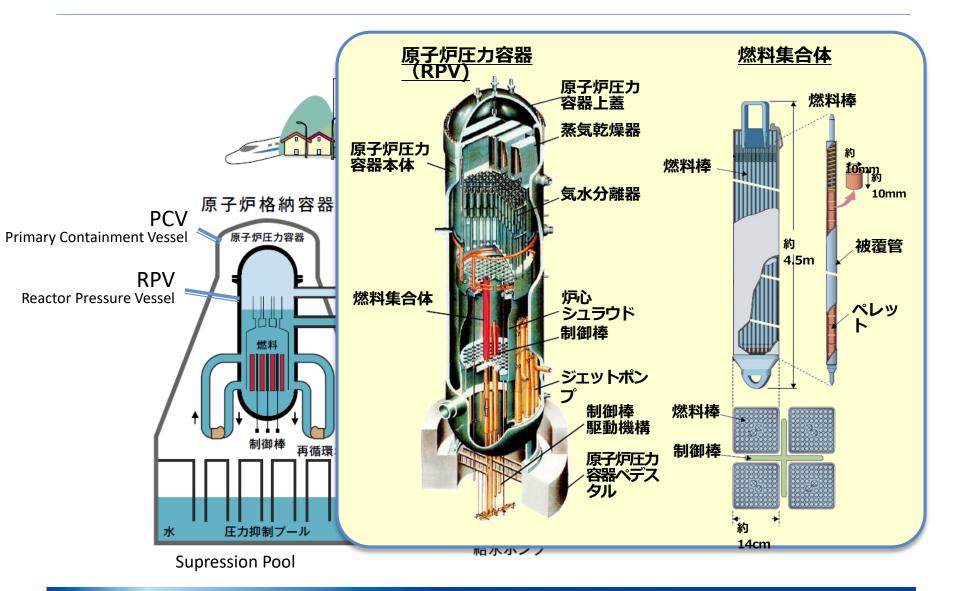


燃料デブリ取り出し(イメージ)

デブリ取出 PCV補修 収納·移送·保管 デブリ調査 使用済み燃料 プールから燃料の 取り出し 圧力容器内部作業 ・燃料デブリ取り出し •内部構造材損傷状況 圧力容器内部調査 ・燃料デブリ形態、拡散状況 作業、移動 ·内部構造材損傷状況 エリアの除染 格納容器内部調査 ・燃料デブリ形態、拡散状況 ・ペデスタル、格納容器 格納容器の水漏 損傷状況 れ調査、止水 周辺機器の止水 ペデスタル内外作業 ・燃料デブリ取り出し •構造材損傷状況



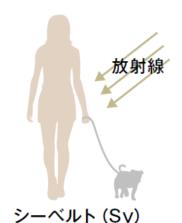
沸騰水型炉(BWR)原子力発電のしくみ



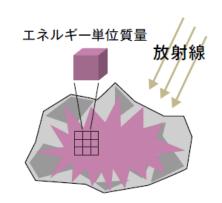


グレイとシーベルトの関係

シーベルトの値=グレイの値 × 放射線荷重係数*1 × 組織荷重係数*2



放射線が「人間」に与える影響



グレイ (Gy) 放射線から「物や人」が単位質量あたりに 受けるエネルギー量

◆放射線荷重係数

放射線の種類	放射線荷重係数
光子(ガンマ線、エックス線)	1
電子(ベータ線)	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20
中性子線	2.5 ~ 20 (エネルギーの連続関数で設定)

※1 放射線の種類による影響の違いを表す

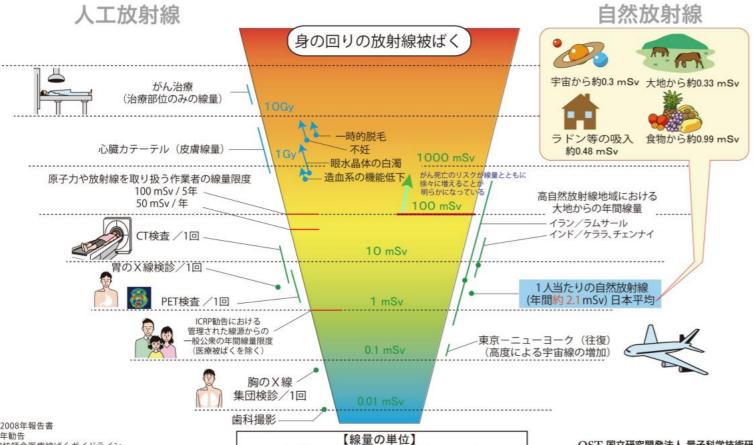
※2 臓器等の組織別の影響の受けやすさを表す

◆組織荷重係数

組織·臓器	組織荷重係数	組織·臓器	組織荷重係数
乳房	0.12	食道	0.04
赤色骨髄	0.12	甲状腺	0.04
結腸	0.12	唾液腺	0.01
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
生殖腺	0.08	脳	0.01
膀胱	0.04	残りの組織・臓器 O.	0.12
肝臓	0.04	が大りの利益報・加収名を 0.12	



放射線被ばくの早見図



- · UNSCEAR 2008年報告書
- ICRP 2007年勧告
- ・日本放射線技師会医療被ばくガイドライン
- 新版 生活環境放射線(国民線量の算定) などにより、放医研が作成 (2013年5月)

- 1)数値は有効数字などを考慮した概数です。
- 2) 目盛(点線) は対数表示になっています。 目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
- 3) この図は、引用している情報が更新された場合 変更される場合があります。

各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)

放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりに どれくらいのエネルギーを受けたのかを表す物理的な量。

実効線量:mSv(ミリシーベルト)

臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について 重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。

各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、 実効線量で1000 mSv に相当する。

OST 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

放射線医学総合研究所

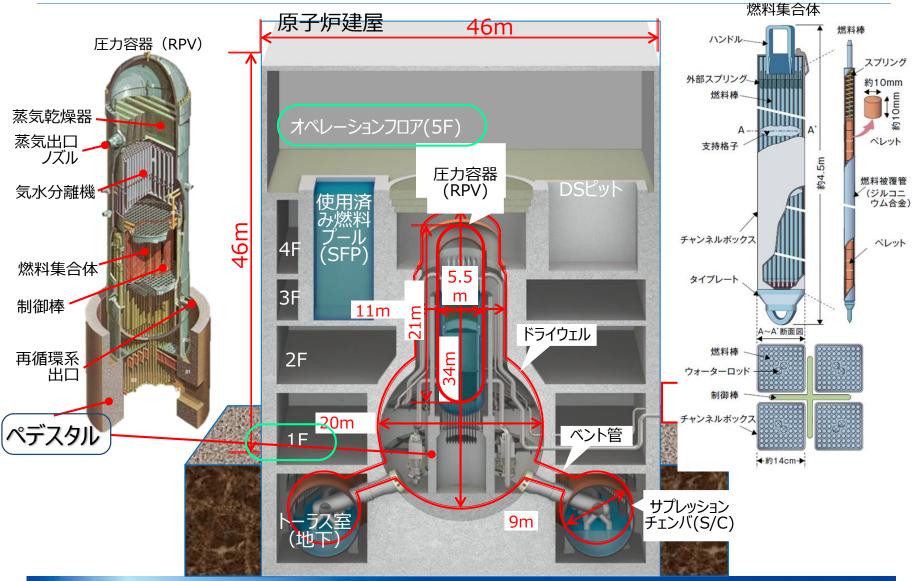
http://www.qst.go.jp



Ver160401



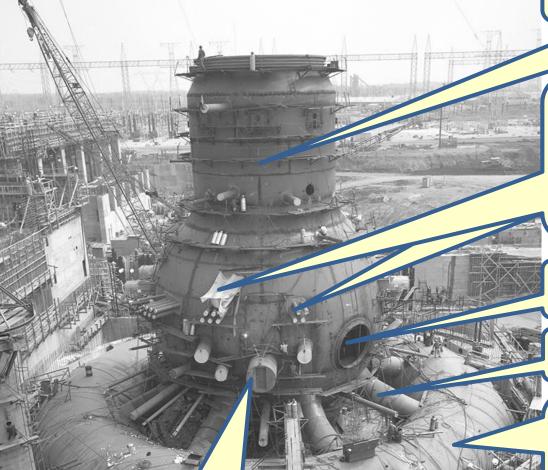
原子力発電所の構造





格納容器(PCV)の外観 (建設時)





「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)」:

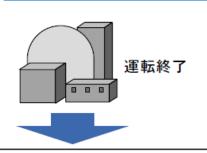
事故が起きた時に発生した蒸気を S/C内の水で凝縮し、PCVの圧力の 上昇を抑える。

「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

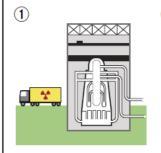


原子力発電所の廃止措置プロセス



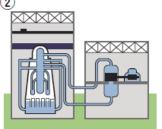


●廃止措置の標準工程^(注):沸騰水型原子炉(BWR)



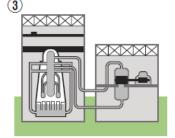
使用済燃料の搬出

使用済燃料や未使用の燃料等を、再処理工場や貯蔵施設等に搬出。搬出先において、使用済燃料等は適切に管理・処理。



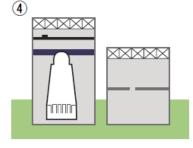
系統除染「洗う」

後の解体撤去作業等を行いや すくするために、施設の配管・容 器内に残存する放射性物質を、 化学薬品等を使って可能な限り 除去。



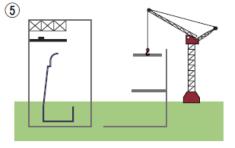
安全貯蔵「待つ」

適切な管理のもと施設を必要 に応じた期間、安全に貯蔵し、放 射能の減衰を待ち、後の解体撤 去作業等を行いやすくする。



解体撤去(1)「解体する(内部)」

放射性物質を外部に飛散させない ように、まず建屋内部の配管・容器等 を解体撤去。その後、建屋内の床や壁 面等の放射性物質の除去作業を行う。

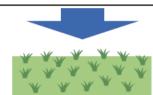


解体撤去(2)「解体する(建屋) |

建屋内の放射性物質を目標どおり除去した ことを確認したうえで、その後は通常のビル 等と同様に建屋の解体作業を行う。

廃棄物処理·処分

廃棄物は、放射能のレベルにより区分し、 それぞれ適切に処理・処分。



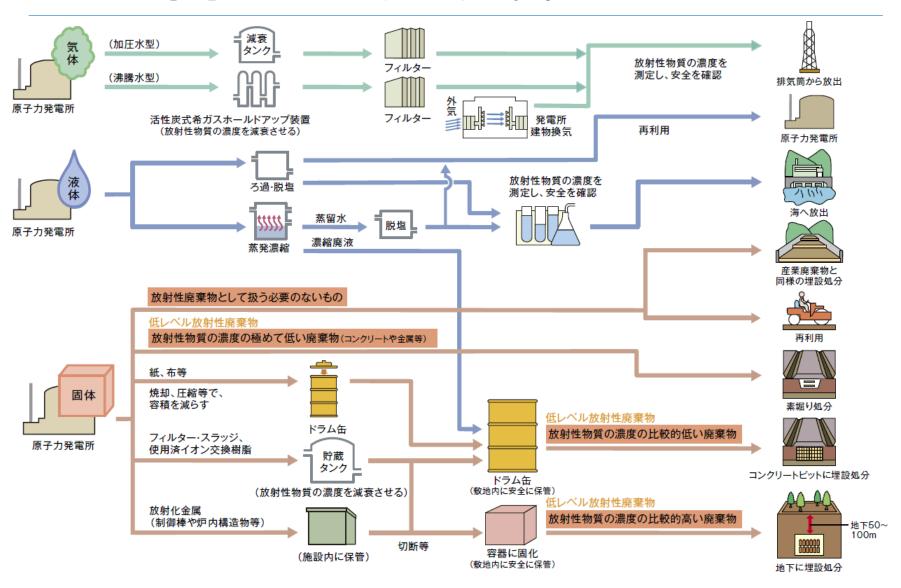
跡地利用

跡地は、法的な手続きを経て、安全性が確認されれば、さまざまな 用途に活用できる。

また現在一つの案として、地域社会との協調を取りながら、引き続き原子力発電用地として有効に利用することも考えられている。



原子力発電所の廃棄物処理方法







本日の構成

- 福島第1原発の現況
- 原子炉の廃炉とは
 - ▶ 原子力の基礎知識
 - ▶ 廃炉・廃止措置
- 廃炉用ロボットとは
 - ➤ 福島第一で使用されたロボット
 - ▶ PCV内部の調査用ロボット
 - ▶ デブリ取り出しシステム
- 廃炉用ロボットの課題
 - ▶ 廃炉用ロボットの特徴
 - > 設計上の課題
- IRIDとは
- エンジニアに何を期待するか



過酷事故直後に福島第一に投入したロボット

名称	投入時期	役割	適用回数
T-Hawk	2011 Apr.	目視調査(上空より)	3
Packbot	Apr.	目視調査、放射線量計測	17
Warrior	Jun.	障害物(ガレキ)除去	2
Quince	Jun.	階上階調査	13
JAEA-3	Sep.	放射線量計測(ガンマカメラ)	1
サーベイランナー	2012 Apr.	トーラス室内部調査	2
4足歩行ロボット	Dec.	トーラス室内部調査	6
FRIGO-MA	2013 Apr.	エアロック室内部調査	1
高所調査ロボット	Jun.	高所・狭隘部の調査	2
ASTACO-SoRA	Jul. ∼ Aug.	障害物(ガレキ)除去	1
磁気クローラ装置	Sep.	S/C 内水位計測	1
水上ボート	Nov.	トーラス室内部調査	2



クローラタイプ・ロボット

Quince



CBRNE災害(科学、生物、放射性物質、核、爆発物)の際に、消防等の隊員に代わって現場に進入し、状況調査を行うことを目的に開発

(国際レスキューシステム研究機構、千葉工業大学、東北大学が共同で開発) ロボカップ2007、2009世界大会運動性能の部で優勝したクローラ型ロボットKenafを改良





サーベイランナー



FRIGO-MA



高い運動性能(階段、段差、ガレキ走破性)をもとに、映像撮影、環境モニタリング、軽量物のハンドリングに威力を発揮

田所諭「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」2011 田所諭「国際レスキューシステム研究機構の活動 | 2011

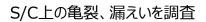
千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) http://www.furo.org/

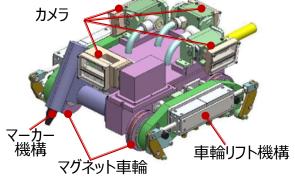


磁気吸着移動ロボット

サプレッションチェンバ(S/C)やベント管上の漏えいなどの調査を行うため、磁力で鋼鉄製壁面に吸着し、全面を移動可能なクローラを開発。

SC-ROV





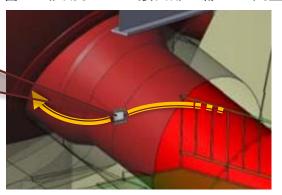


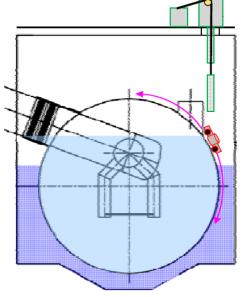
S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査







装置吊り 下ろし・ 回収装置

> S/C内 水位測定 装置



駆動系で分類

水上ボート

ケージに格納し天井孔から滞留水中に着水させる

漏えい箇所調査の水 上移動機構の長尺 ケーブル操作技術を 確立するため、ベント 管下部周辺の状態を 確認

ケーブル処理装置

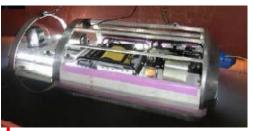
調査カメラ

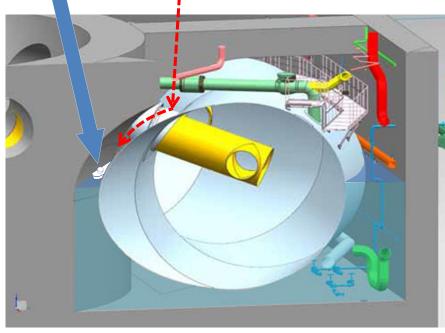
光ケーブル

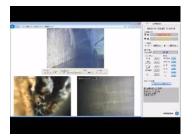
監視カメラ

水中カメラ









1号機ベント管/サンドクッションドレン漏えい(2013.11.13)





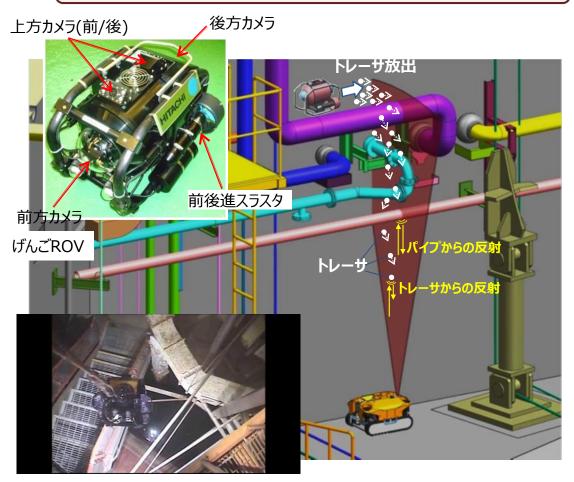
東京電力「福島第一原子力発電所 1号機ベント管下部周辺の調査結果について(1日目)」2013.11.13 遠隔技術タスクフォース WG2「遊泳調査ロボットの技術開発 実証試験の実施について」2013.10.31

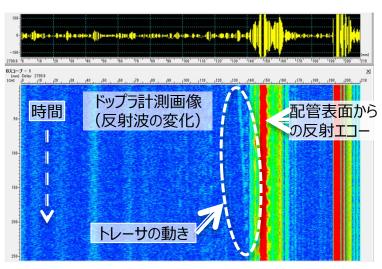


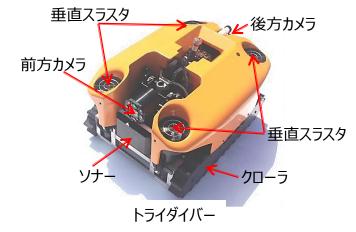
駆動系で分類

水中ロボット(1)

トーラス室壁面の水没したペネ貫通部の漏えいを調査するための水中調査ロボットを開発。水中の漏えいを調査するために、超音波ソナーによるドップラ計測機能を装備する。



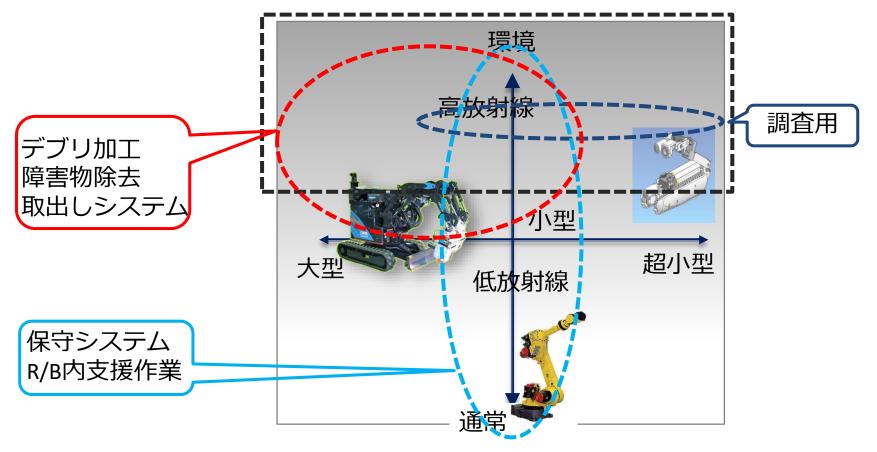






IRIDのロボット開発

- 今までは、炉内調査のため、超小型ロボットを開発してきた。今後は重作業のできる大型ロボット
- 重要機能:耐放射線性、保守性、環境に応じた駆動方式



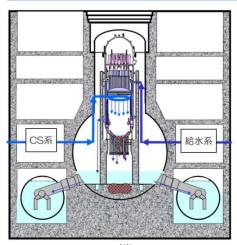


原子炉格納容器(PCV)内部調查

PCV内部調査の目的

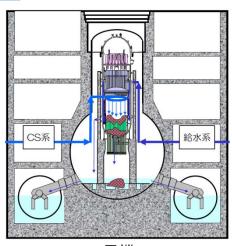
- ●燃料デブリ取り出しに向けて、原子炉格納容器内の燃料デブリの位置、状況を調査する
- ●圧力容器を支持するペデスタル等の状況を確認する

調査および調査装置の開発方針

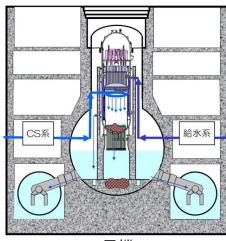


1号機

- ・溶融燃料は、ほぼ全量がRPV下 部プレナムへ落下、炉心部には殆 ど燃料が存在せず
- ・燃料デブリのペデスタル外側までの 拡散の可能性から、ペデスタル外 側の調査を優先



2号機



3号機

- ・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペデスタルへ落下、 燃料の一部は炉心部に残存と推測
- ・ペデスタル外側までの拡散の可能性低く、ペデスタル内側の調査を優先
- ・3号機はPCV内の水位高く、1・2号機で使用予定のペネが水没の可能性あり、別方式の検討要



PCV内部調査 の特徴と対策

課題:

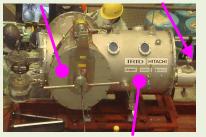
- (1) <u>狭隘空間</u> (Φ100mm) と安定走行の両立
- (2) 過酷環境 (高線量,暗闇,蒸気雰囲気等)
- (3)放射性物質の飛散防止



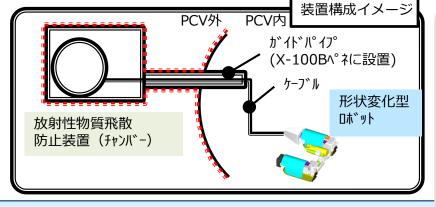
2/3D画像映像(RGB-D) 線量率 温度情報の収集

バウンダリ構築

ケーフ゛ル 送りドラム が小いかとの

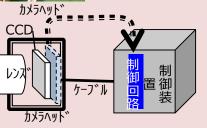


取合部



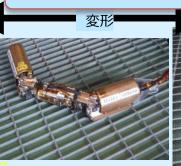
耐放射線 1000Gy





形状変化機構







PCV内部のロボットによる調査(方針)

- 燃料デブリの広がりや格納容器内の損傷状況をさぐる
- 既存のペネトレーション(小口径 直径100mm程度)経由、 故に超小型ロボットで通り抜け、中で活動可能に
 - 1号機格納容器内 ペデスタル外 (B2)
 - グレーチング上を移動し、カメラ付き線量計を水面下に投入して調査
 - 2号機格納容器内 ペデスタル内
 - ➤ CRDレールを経由して直接ペデスタル開口部へ侵入
 - 3号機格納容器内 ペデスタル内
 - ▶ 水位が高いため、遊泳ロボットを採用
 - ▶ 着水後、潜水によりペデスタル入口から内部へ。

A:ペデスタル内部

B:ペデスタル外部

1 & 2:回数



PCV内部のロボットによる調査

ペデスタル外側の調査(1号機)

○形状変化型ロボット(B2調査)

X-100Bペネ

狭隘部走行時



○クローラ型遠隔調査ロボット(A2調査)

走行時

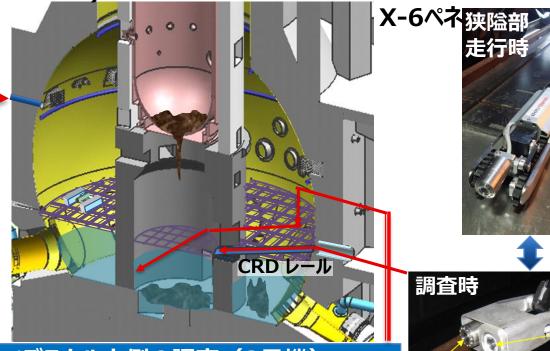




変形



上の写真はB1調査時の ロボットです。



ペデスタル内側の調査(3号機)





前方カメラ

水中遊泳型ロボット X-53ペネ

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



PCV内部のロボットによる調査 技術的課題の例

■ 高線量率環境への対応

- ➤ ~数十 Gy/h, 累積線量~数百 Gy
- 耐放射線性の高い電子機器、測定器、カメラの採用
- > 照射試験による確証、**測定誤差の検証**

■ PCVバウンダリの確保

- ▶ ロボットサイズ < 貫通口径(走破性、搭載機器制約)</p>
- 隔離弁の追設、シール機構、窒素加圧管理
- ▶ チャンバー内にユニット化されたケーブル送り機構、ロボット
- ▶ 現地施工の取合い、PCV外装置設置エリア作業線量率の低減

■ ケーブル,ケーブルマネジメント

- ▶ 乱巻の抑制、干渉物の回避、ロボット放置時の処置
- ケーブル重量 <ロボットのけん引力(調査範囲を制約)</p>
- ▶ ケーブルサイズ・特性 [動力、制御、通信](搭載機器を制約)

■ オペレーション

- > (損傷)環境に応じた**走破性**
- ▶ 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部カメラ、ランドマークの活用
- ▶ 徹底した訓練、実機モックアップ試験

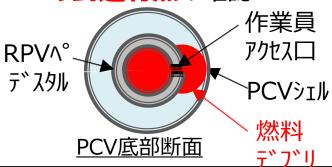
1号機ペデスタル外調査(B2調査)

【1号機】B2 X-100B ピーモルフ

【実施時期】 2017年3月

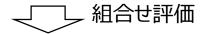
【調査目的】

- 燃料デブリの広がり状況の確認
- ② 燃料デブリのPCVシェルへ の到達有無の確認



【取得情報】

- 降下ポイントの高さ方向の線 量率分布
- 地下階床面の近接映像

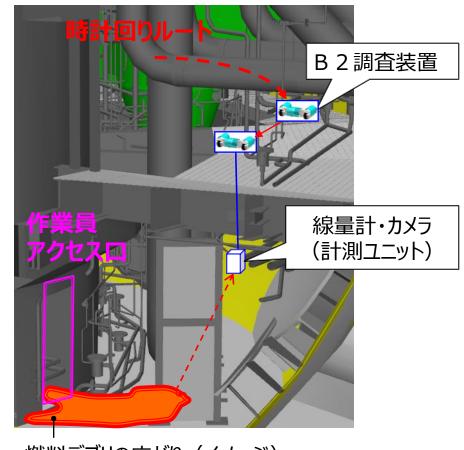


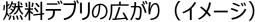
①、②を判定



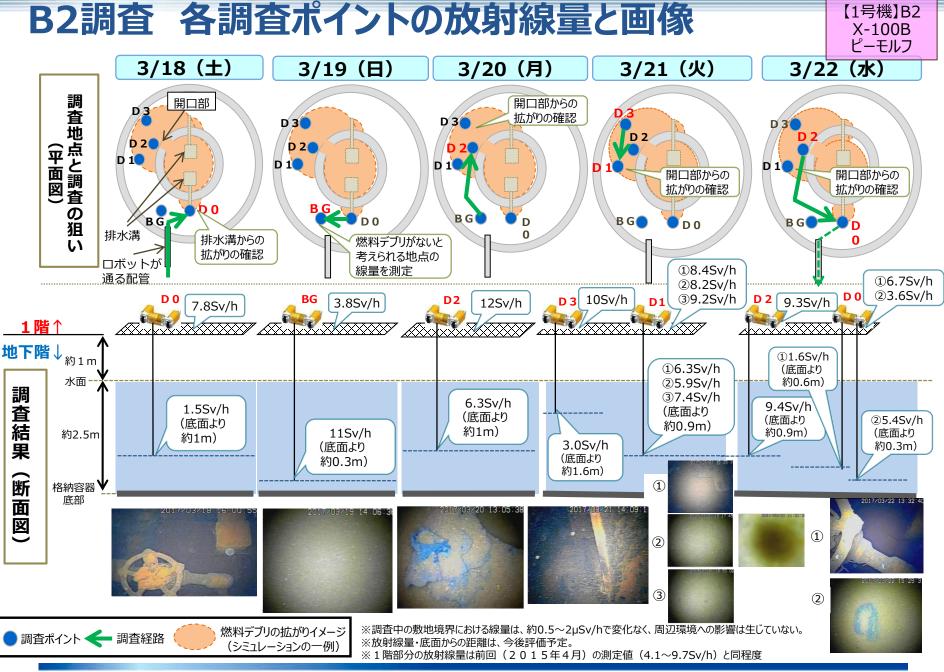
【調査工法】

B 2 調査装置が 1 階グレーチング上を走行。 線量計・カメラを降下させる。







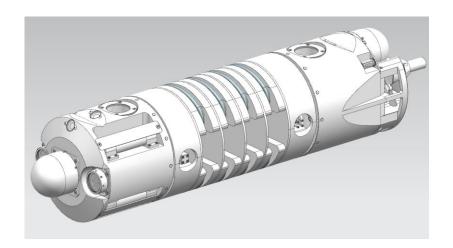




《今後の予定》1号機:ボート型アクセス装置

■格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能な

ボート型アクセス装置を製作中



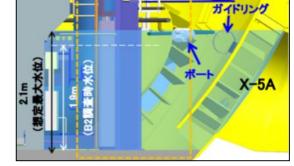
ガイドリング取付用の例

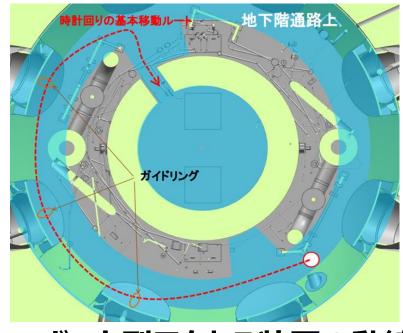
直径: φ 25cm

• 長さ:約1.1m

• 推力:25N以上

ボート型アクセス装置外観





ボート型アクセス装置の動線



≪今後の予定≫1号機:ボート型アクセス装置

(X-2ペネからのPCV内部調査)

潜水機能付ボート型アクセス・ 調査装置については,機能毎に 作業の流れ(イメージ) 実施項目 **6種類**準備する予定。 イ ンストール装置 装置用ケーブル シールボックス設置 アクセス・調査装置 水位 ガイドリング取付 ROV-A ケーブル絡まり防止用 **ガイドリ**ング にPCV内に設置 堆積物 詳細目視 **ROV-A2** パンチルトカメラによ (小型RO√) 静止用アンカー るPCV内の状況確認 燃料デブリ 堆積物3次元形状測定 走査型超音波距離計により, **ROV-B** 「走査型超音波距離計により**)** 堆積物の3次元形状を測定 堆積物の3次元形状を測定 堆積物厚さ測定 **ROV-C** (高出力超音波センサによ) り堆積物厚さを測定 中性子束測定 **ROV-D** (検出器を用いて堆積物表) 面の中性子束を測定 堆積物 **ROV-E** 少量サンプリング 高出力超音波 センサにより 堆積物採取装 堆積物厚さを インストール装置・ 置により採取 測定 シールボックス撤去



2号機ペデスタル内上部調査(A2調査)

【2号機】A2 X-6 さそり

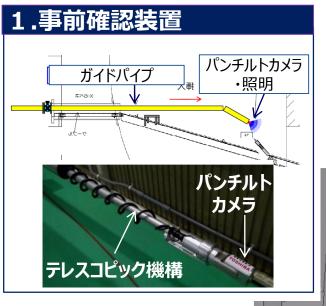
【調査方法】

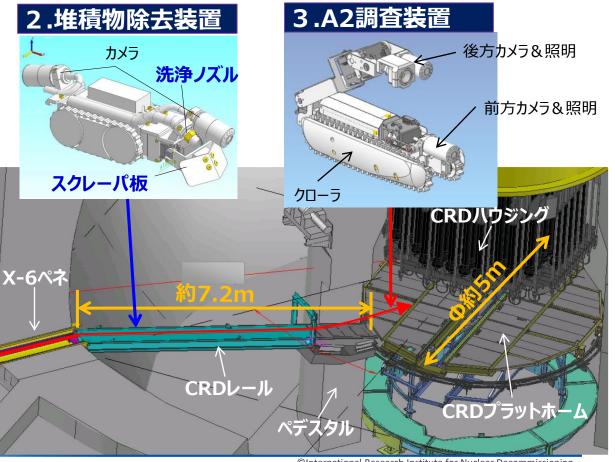
カメラによる撮影

【実施時期】

● 2017年1~2月



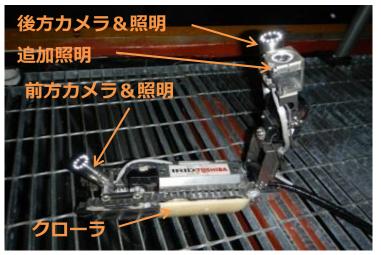




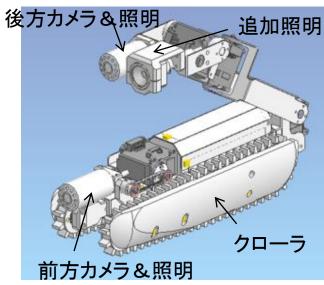


クローラ型遠隔操作ロボット(サソリ型)

- ・内径約φ100mmのガイドパイプを通過。
- ・調査時は後方カメラを起こし、後方カメラによる 高い空間認知性(+起き上がり)を実現。
- ・集光度の高い追加照明により、霧滴中における視認性を向上。
- ・耐放射線性:1000Gy以上(積算)
- 気密性のあるチャンバから装置を送り出すことで 作業中の放射性物質の飛散を防止。



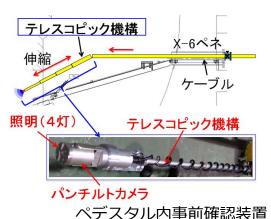
モックアップでのプラットホーム上調査



リスク対策として、CRDレール上の堆積物除去装置及びペデスタル内事前確認装置(代替調査方法)も開発。



堆積物除去装置

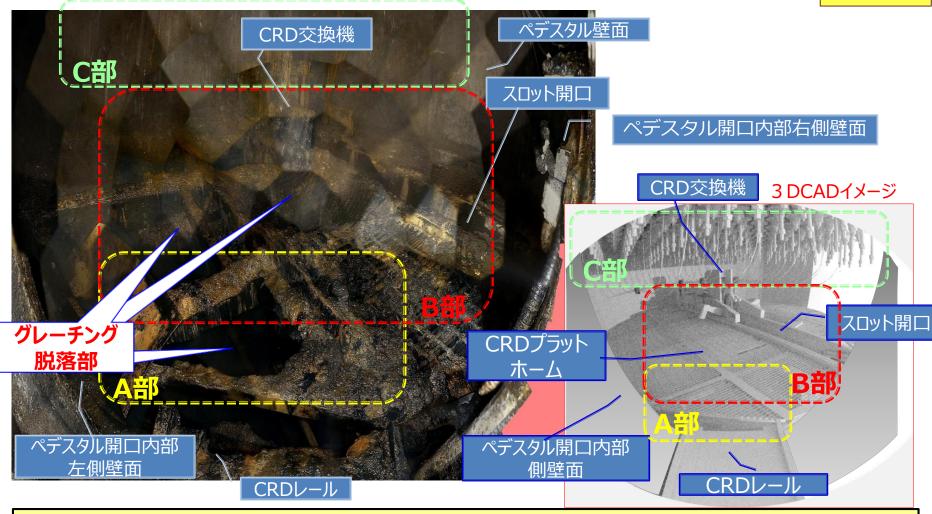




2号機ペデスタル内調査結果

調査日:2017年1月30日

【2号機】A2 X-6 ガイドパイプ



▶ CRDプラットホームのグレーチングが脱落しているが、フレームは残存している。

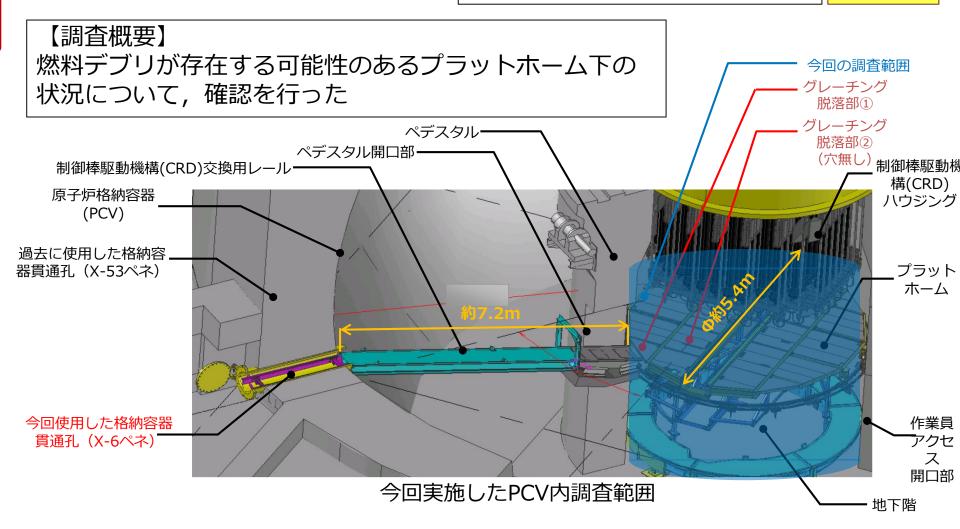
※上記画像は、東電HDにて鮮明化した画像をもとに画質改善したものを全天球化



2号機ペデスタル内下部調査(A2´) 概要

調査日:2018年1月18,19日

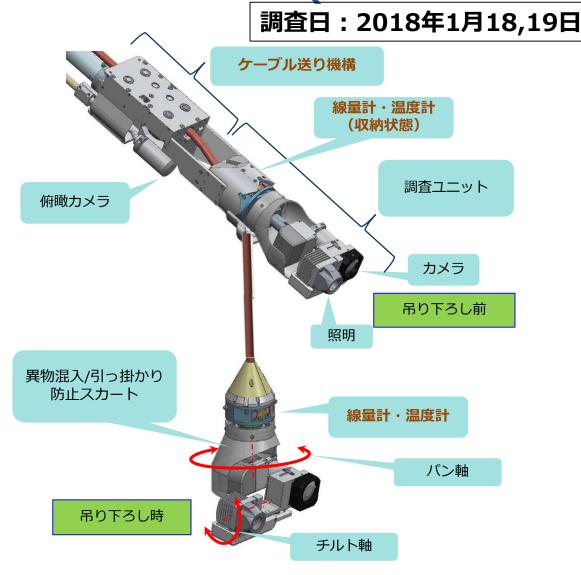
【2号機】A2' X-6 ガイドパイプ+





~2号機ペデスタル内下部調査(A2´)参考~

【2号機】A2' X-6 ガイドパイプ+



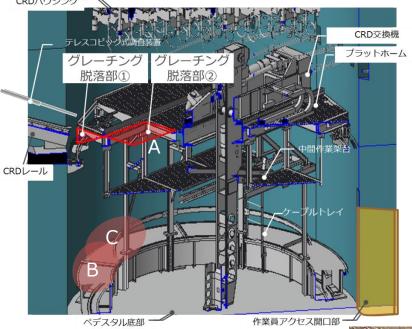
調査装置先端部概要



2号機ペデスタル内下部調査(A2´) 結果(1/3)

調査日:2018年1月19日

【2号機】A2' X-6 ガイドパイプ+



- ペデスタル底部の全体に、小石状・粘土状に見える る堆積物を確認
- 燃料集合体の一部(上部タイプレート)がペデスタル底部に落下しており、その周辺に確認された 堆積物は燃料デブリと推定



撮影場所A グレーチング脱落部②



撮影場所B ペデスタル底部



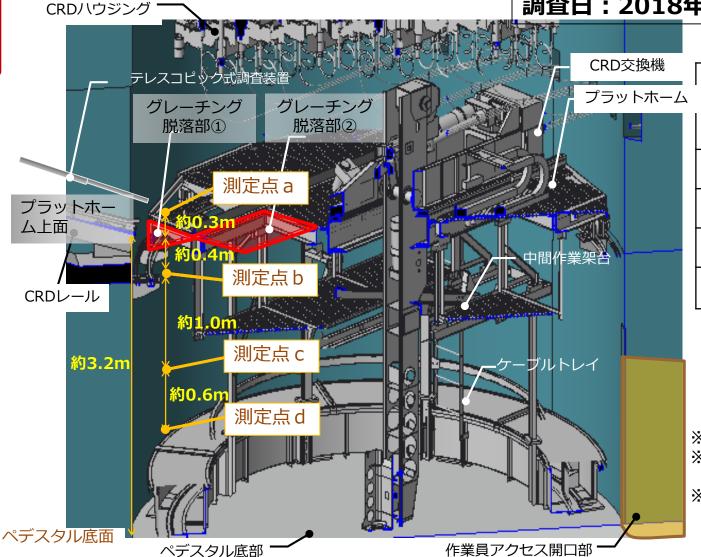
撮影場所C ペデスタル底部



2号機ペデスタル内下部調査(A2´) 結果(3/3)

調査日:2018年1月19日

【2号機】A2' X-6 ガイドパイプ+



測定点	線量率 ※1,2 [Gy/h]	温度 ^{※2} [℃]
а	7	21.0
b	8	21.0
С	8	21.0
d	8	21.0

【参考:ペデスタル外*3】 線量率:最大42[Gy/h] 温度:最大21.1[℃]

※1: Cs-137線源で校正 ※2: 誤差: 線量計±7%

温度計±0.5℃

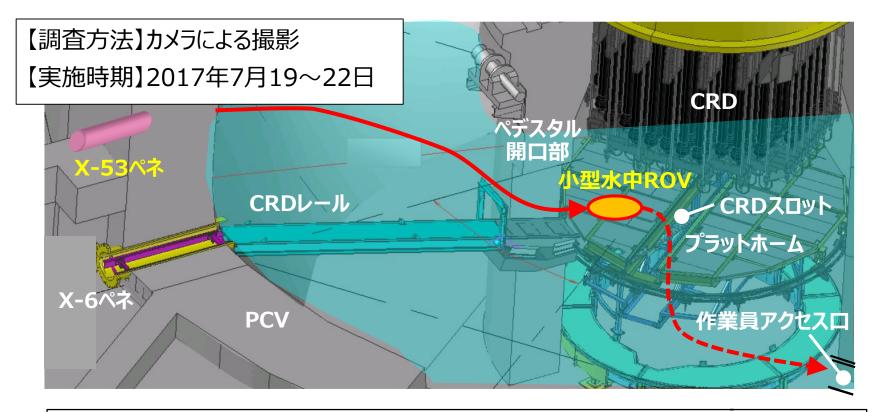
※3:調査装置内に測定器が収納された状態で測定したため参考

値



3号機ペデスタル内調査

調査日:2017年7月19~23日



- ① 配管貫通部 (X-53ペネ) からアクセスしペデスタル内に侵入。プラットフォーム、 CRD下部の損傷状況を確認する。
- ② ペデスタル地下階へのアクセスルートを確認する。
- ③ 地下階への進入が可能であれば、ペデスタル底部デブリの堆積状況や作業員アクセスロからペデスタル外へのデブリの流出状況を確認する。



3号機水中ROV外観(モックアップ機)

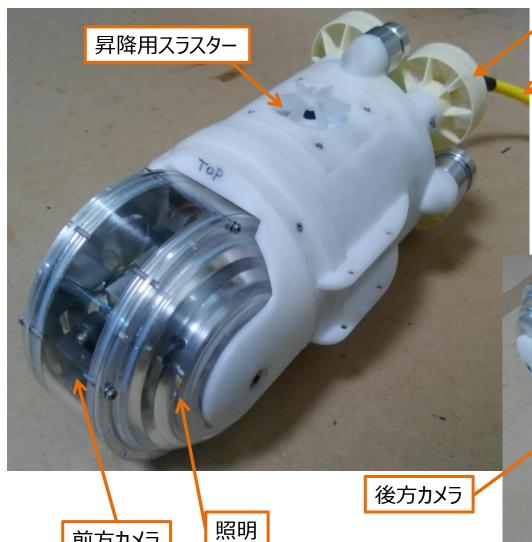
【3号機】A X-53 水中ROV

推進用スラスター

中性浮力ケーブル

	項目	仕様	
外形寸法		外径:φ125mm 全長:約300mm	
	重量	約2000g(気中)	
	耐放射線性	200Gy	





前方カメラ

今後の展開を考える

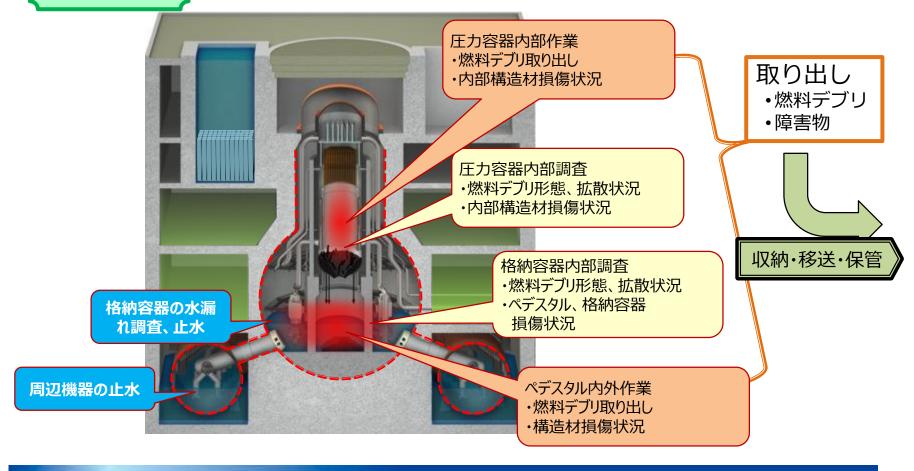
- PCV内調査の拡充:燃料デブリの所在(分布・量)
 - ➢ 得られた情報の活用
 - 獲得したノウハウ (例)
 - バウンダリの確保、ケーブルマネジメント、確実な回収、 耐放射線を考慮した機器、PCV外準備作業 遠隔操作、モックアップ訓練の効果 etc
 - ▶ 教訓·課題(例)
 - 走破性、干渉物(損傷機器)への対応、堆積物
 - 自己位置確認
 - ロボットサイズ、機能拡張、貫通部口径の拡大 etc
- RPV内の調査
- 燃料デブリのサンプリング



燃料デブリ取り出し(イメージ)

除染 デブリ調査 PCV補修 デブリ取出 収納・移送・保管

安全系





安全系システム

必要な安全機能

- 冷却 ②窒素供給・排ガス処理設備 閉じ込め(負圧,トーラス室水位制御) 不活性化(火災・爆発防護) 窒素供給系 (RPV不活性化) 未臨界 PCVガス管理系 洗浄塔 負圧管理、水素掃気、 管理放出 原子炉建屋ガス管理系 平常時放出放射能緩和 1次バウンダリ 管理放出 ①循環冷却·臨界管理設備 循環冷却系 水処理 デブリ冷却・ 設備 放射能濃度の低減 トーラス室排水系 ホウ酸濃度 地下水位との逆転防止・ 調整設備 放射能濃度の低減・ 臨界防止(ホウ酸濃度) ③建屋・セル換気設備 セル 地下水 建屋・セル排気系 (負圧管理・管理放出) デブリ
 - ——:2次バウンダリ(気体)

建屋間止水

---: 2 次バウンダリ(液体)

補助建屋内

建屋給気系

(作業環境維持)

収納·移送·保管技術

除染 デブリ調査

PCV補修 》デブリ取出

収納·移送·保管

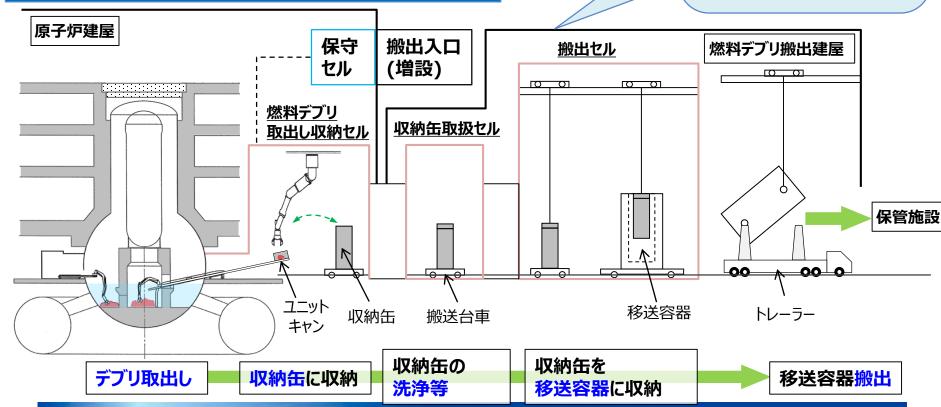
収納缶の設計

- 燃焼度と濃縮度が高い→**反応度高**
- コンクリートとの溶融生成物→コンクリート中の水分の放射線分解による**水素発生**
- 海水注入、計装ケーブル他との溶融→塩分の影響、不純物の混入

移送方法(気中-横アクセス工法の場合:例)

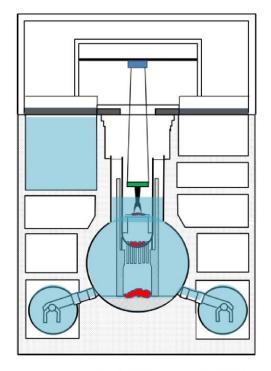
● 多数の自動機

- ・遠隔制御・自動制御 のマニピュレータ
- セル間の分離・結合
- 洗浄
- 機器の点検・保守



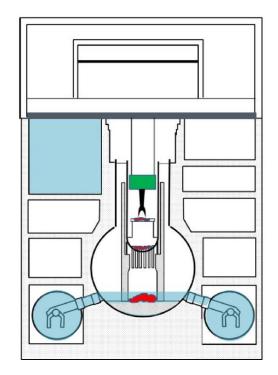
取り出し工法

重点的に検討を進める燃料デブリ取り出し工法



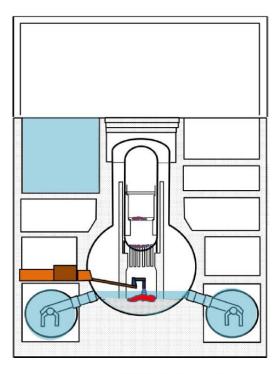
a. . 冠水-上アクセス工法

燃料デブリ上方の炉内構造物取り出しが完了していることを前 提としたイメージ



b. 気中-上アクセス工法

燃料デブリ上方の炉内構造物取り出しが完了していることを前 提としたイメージ



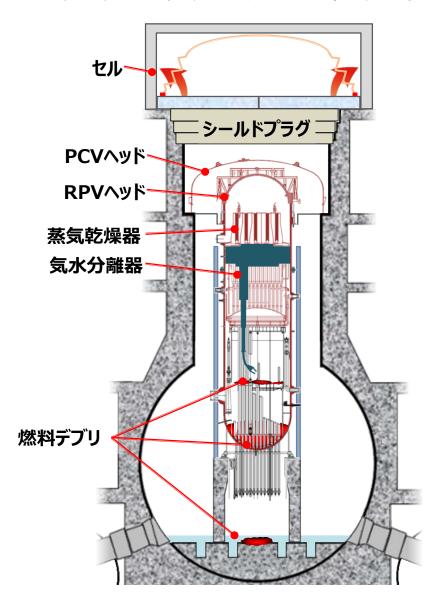
c. 気中-横アクセス工法

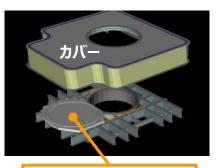
PCV内RPVペデスタル外側の機器、干渉物撤去が完了していることを前提としたイメージ

出所: NDF 技術戦略プラン2016

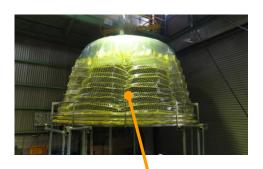


上アクセス工法~デブリ取り出し方イメージ~



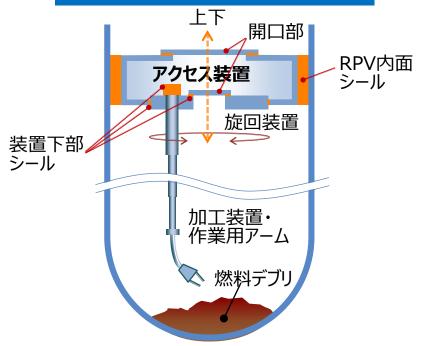






ダスト飛散防止用フィルム

RPV内アクセス装置(イメージ)





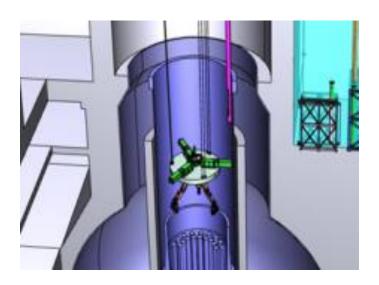
上アクセス工法~デブリ取り出し装置概念~

■ 現状はRPV内部の損傷状況が分らないので、以下の2ケースについて検討。

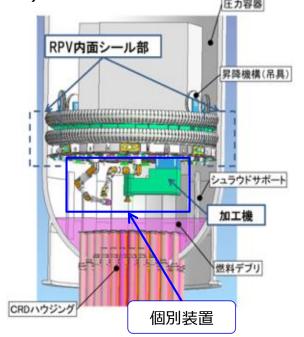
【装置A】

【装置B】

- 装置を小型化
 - ➤ RPV内に吊り下ろす部分を小型化し、構造物の撤去範囲を縮小。
 - ▶ 性状が不明な燃料デブリの加工を想定し、 大きな反力も支持できる機構を設置。

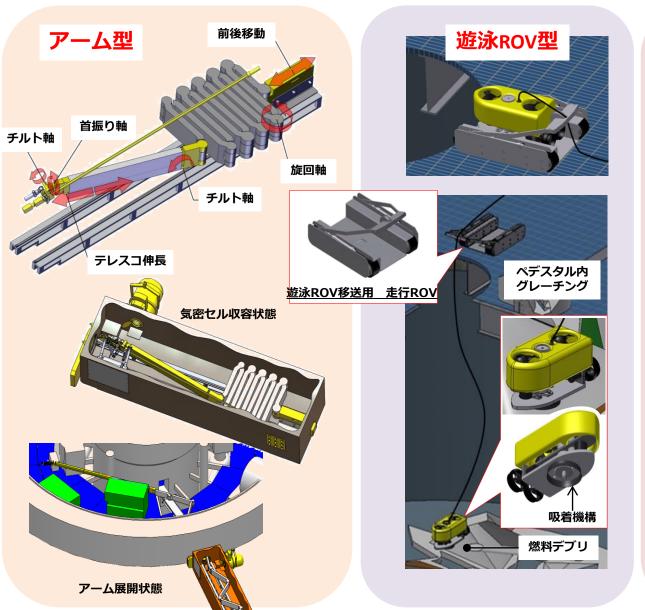


- 高汚染エリアを最小化
 - ▶ 放射性ダストをデブリ近傍で閉じ込めるために、 RPV内面でシール。
 - ▶個別装置はシールを維持したまま交換可能なよう設計 (シールを維持したまま加工ツールを 交換する)。

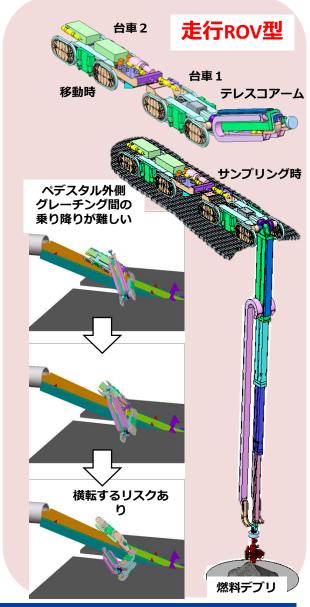




燃料デブリサンプリング(アクセス装置)の検討例

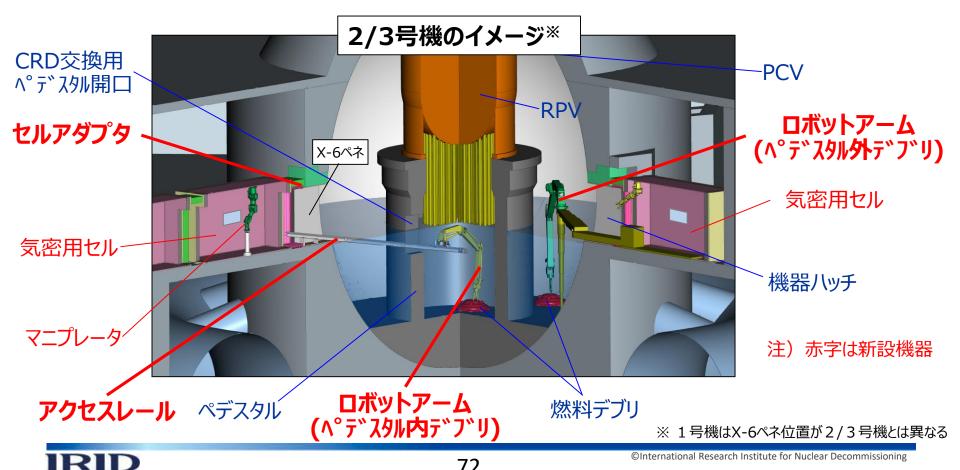


IRID

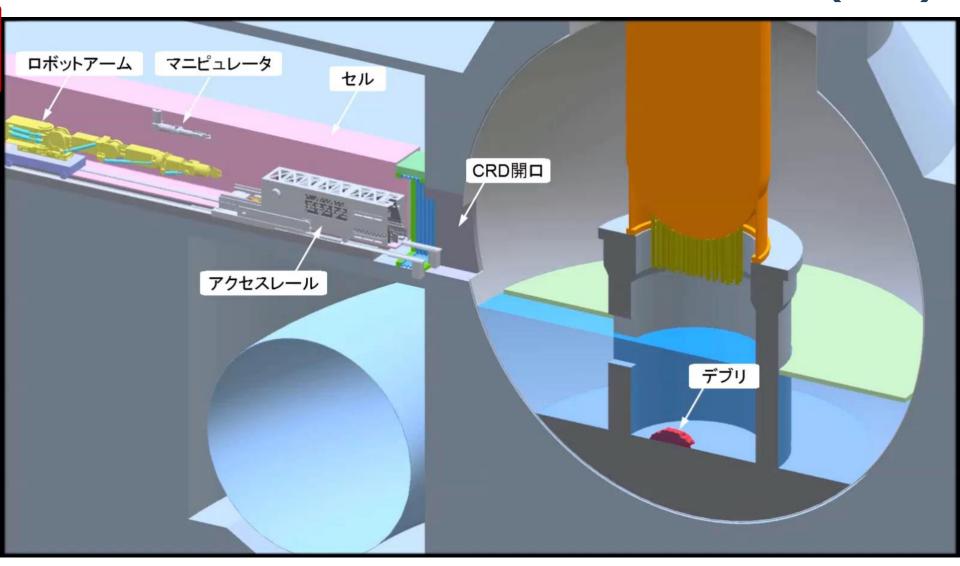


横取出しのイメージ: 【PLAN-A】アクセスレール方式

- ペデスタル「内」デブリ⇒X-6ペネからアクセスレールをペデスタル内に挿入させ、 ロボットアームを使って回収。
- ペデスタル「タト」デブリ⇒機器ハッチから、ロボットアームを使って回収。



【PLAN-A】アクセスレール方式~取り出しイメージ~(動画)

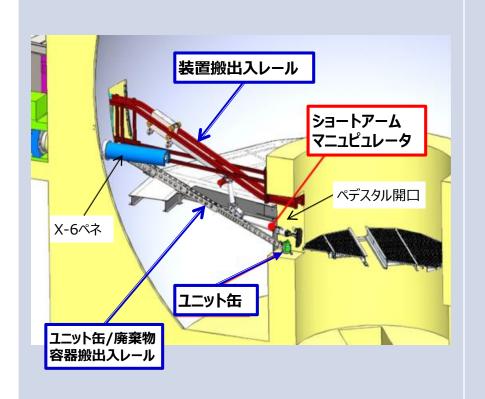


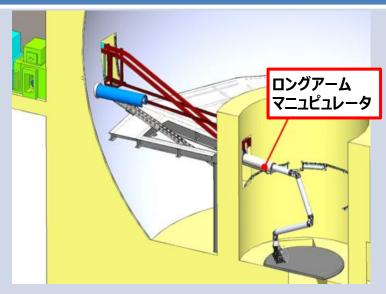


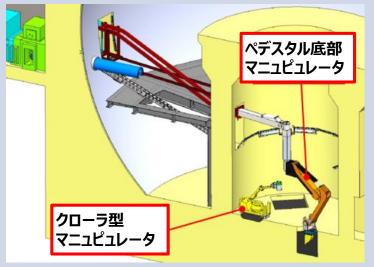
【PLAN-B】PCV新開口方式

ペデスタル内落下物の回収(イメージ)

ペデスタル内デブリの回収(イメージ)









IRIDの研究開発プロジェクト

除染・線量低減技術

<作業環境の確保>

R/B内の 遠隔除染技術

2016.3終了

<u>燃料デブリ取り出し技術(5PJ)</u>

〈安定状態の確保〉

PCV/RPV 耐震・影響 評価

(5)燃料デブリ 臨界管理 技術

〈デブリ取り出し〉 炉内構造物取出 工法・システ 高度化

全15PJが進行中。 内9PJはロボット技術学が重要



補修・止水技術

(2PJ)

(6) 漏えい箇所の 補修技術

PCV 漏えい箇所の 補修技術の 実規模試験

内部調査・分析・評価技術

内部調査

〈直接的調查》5P】) 内部調査

15 PCV 内部調査 詳細化

<関接的調査>

総合的な 把握

の高度化

性状 把握

検出器

基盤技術 高度化

燃料デブリ・ 炉内構造物取出 サンプリンク

燃料デブリ 収納・移送 保管技術

廃棄物 処理・処分 <u>技術(1PJ)</u>

14) 固体廃棄物の われる 処理・処分 技術

<略語>

R/B:原子炉建屋

PCV: 原子炉格納容器 RPV:原子炉圧力容器



電子機器に対する放射線の影響

1号機:原子炉建屋内線量: 1階約数ミリ~約4000mSv/h以上(南側)

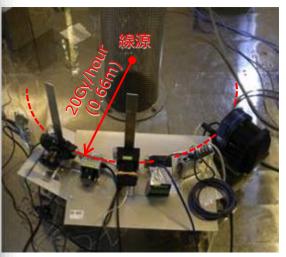
2号機: 原子炉建屋内線量: 1階約数ミリ〜約30mSv/h、オペフロ最大880mSv/h

3号機: 原子炉建屋内線量: 1階約20ミリ~約4000mSv/h以上(北側の一部)、オペフロ最大約2000mSv/h

構成要素部品の放射線耐力を把握し、遮蔽材なしでの高放射線下の運用可能性を検討

参考:ガンマ線の影響を1/10とする遮蔽 = 鉛版:2-30mm / 鋼鉄:7-80mm





ガンマ線照射試験

ガンマ線照射試験 (20Gy/hour-40Gy/hour)

\ / //	,,
スキャナ式レンジセンサ	124Gy
カメラ	169Gy
CPUボード、電池 モータ・ドライバ 無線機、LANハブ 3次元距離画像センサ 広角ネットワークカメラ 通信デバイス等	200Gy以上

1Gy/hourの高放射線下でも100 時間以上の動作が可能

調査はOK,デブリ取出しでは困難

「汎用重機やロボットにおける耐放射線評価と管理方法の基本的な考え方」対災害ロボティクス・タスクフォース 2011年4月27日



原子炉建屋・作業エリアの除染

除染技術開発の課題

従事者の線量限度:

1年間で50mSv、5年間で100mSv

漏えい箇所調査、補修等の各種作業を円滑に進めるためには、作業場所の環境改善が必要 課題

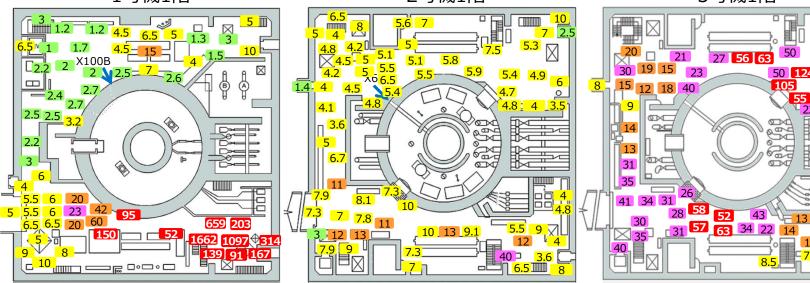
- ●高線量エリアでの作業
- ●多様な汚染形態/多様な作業場所への対応要
- ・遠隔技術の確立
- 対象部位ごとの仕様検討・開発

1~3号機の放射線量状況 2014年~2015年調査

1号機1階

2号機1階

3号機1階



3mSv/h 以下

 $3mSv/h \sim 10mSv/h$

10mSv/h \sim 20mSv/h

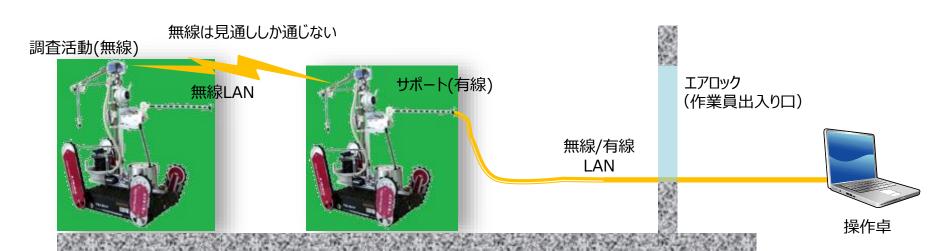
20mSv/h~50mSv/h 50mSv/h 以上

「建屋内の空間線量率について」 東京電力 H25.3.22 を参考に作成

作業エリア: 3 mSv/h、アクセスルート: 5 mSv/h



遠隔制御









移動中に配線がからまる、切れるなどを回避する、 配線の「繰り出し/巻き取り機構」が必要

4足歩行□ボット

光ケーブルリール本体

繰出し装置

千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) http://www.furo.org/ 千葉工業大学 東北大学 国際レスキューシステム研究機構プロジェクトチーム「Qui

千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構プロジェクトチーム「Quinceによる福島原発対応」2011.6.8

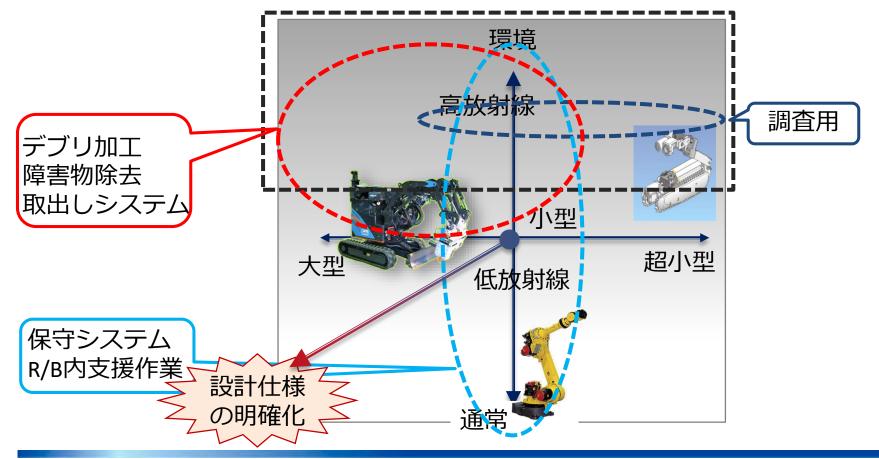
Quince





IRIDのロボット開発

- 今までは、炉内調査のため、超小型ロボットを開発してきた。今後は重作業のできる大型ロボット
- 重要機能:耐放射線性、保守性、環境に応じた駆動方式





いかなる機器を開発しているのか

□ 環境: 通常 ⇔ 低放射線 ⇔ 高放射線

□ 形態: 大型 ⇔ 小型 ⇔ 超小型

■ 制御: 直接 ⇔ 遠隔 ⇔ 自動

□目的:汎用⇔特殊

□ 保守: 使い捨て ⇔ 保守

□作業員被爆 ⇒ □ボットによる保守 □大型機器 ⇒ 保守作業場所の確保



社会技術 安全技術

ステップ バイ ステップ 予備エンジニアリング

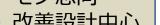
- □ 長期開発:技術の蓄積 ⇔ 散逸
 - データベース化
 - 多様な技術 ⇒ サブシステム分割
 - □ プロジェクト管理
- モノ志向
- 改善設計中心

体系化 大規模設計システム **口 未踏**分野:

□ 仕様:不明確

□ 多様な技術:総合工学

□ 体系化:理論化と設計技術



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

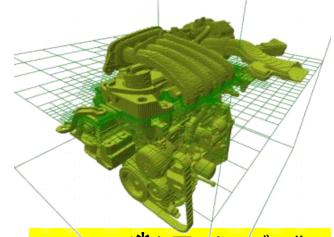
廃炉ロボット用情報システム: (1) 環境モデル

■ 廃炉作業の作業環境

- ▶ PCV/RPV内部調査データを累積可能な構造
- 製品製造・分解システムとの類似性: 3 D CADモデル
 - 核種・線源毎の放射線量の記録が必要。よって6Dモデル表現可能、できれば時間軸を足したモデル
 - 不明部分の表現、仮定を記入可能に
- ▶ 化学プラント制御との類似性
 - プラントとしての制御モデルを組み込んだ作業対象表現
- ▶ 金属固形物のみならず不定形粉末などの表現
 - 堆積物(粉体?)や礫状物体の表現
- ▶ 作業モデル・操作者モデルとの密な接続

■ 作業用表現システム

- > 衝突回避付きの機構学的制御
- ▶ VR(Virtual Reality)、AVR(Augumented VR)との接続。反力検出
- ▶ 放射線量の予測と現況との比較
- ▶ 画像データから形状測定データの入力。画像によるテキスチャデータの貼り込み
- SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)の組み込み
- 動作シミュレータとの密な接続によるトライアル



→ Voxel*を用いたモデル化

http://www.riken.jp/fsi/tawara/papers/ CFDSympo2006_tawara.pdf



認識科学と設計科学

- 設計とは選択の連鎖
- 選択の理由付けとして理論に よる分析結果が必要
- どの理論、どの部品を採用するかは、設計者の選択にかかっている
- 大システムでは、関係するパラメータ調整が必要

学問体系の構築: 力学の成立と利用

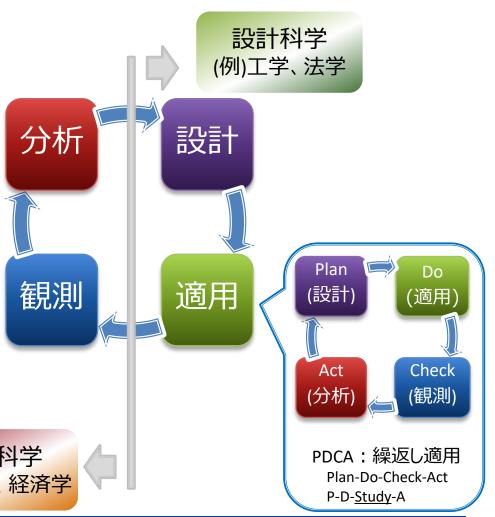
● 観測:惑星の運動を調べる

● 分析:共通の法則を見つける

設計: α = F/mを使って軌道計算

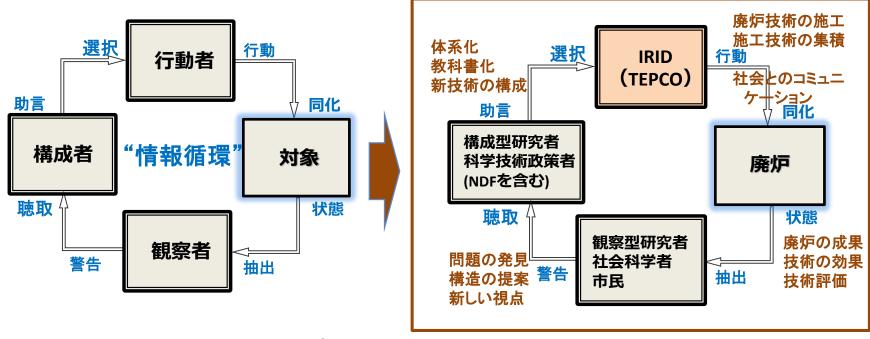
適用:砲弾の着地点制御

認識科学 (例)理学、経済学





ある対象が持続的進化をするための基本構造



2016年7月19日 日本学術会議 公開シンポジウム 「知の統合を如何に達成するか〜総合工学の方向性を探る」 吉川弘之講演資料より引用、一部修正



1. IRIDの概要

【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 ・ 国立研究開発法人: 2法人

日本原子力研究開発機構(JAEA)、産業技術総合研究所(AIST)

・メーカー等:4社

東芝エネルギーシステムズ㈱、日立GE ニュークリア・エナジー㈱、三菱重工業㈱、㈱アトックス

・電力会社等:12社

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

オールジャパン体制

■ 事業費

年度	2013 (8月~)	2014	2015	2016	2017	2018
事業費 「億円]	46	120	148	143	149	同規模



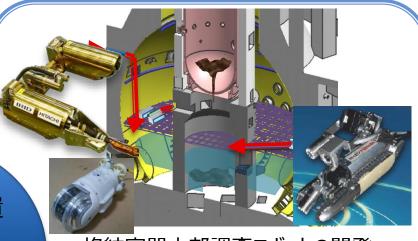
2.IRIDの事業内容

▶IRID事業の3本柱



1. 廃止措置 に関する

を行います。



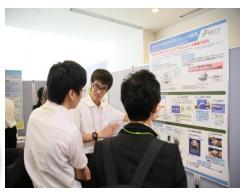
格納容器内部調査ロボットの開発

国際顧問との会議

2. 廃止措置 に関する 国際、国内 関係機関と IRID

3. 研究開発 に関する

に取組みます。



IRIDシンポ2017「燃料デブリ取 出しに挑む」での 大学によるパネル発表



3. 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

プラントの状態を 安定化する取り組み

- *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

第1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)

第2期

初号機の燃料デブリ 取り出し開始まで (10年以内)

第3期

廃止措置終了まで (30~40年後)

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



()内はステップ2完了からの期間

2019年 3月現在

- ○中長期ロードマップは、2017年9月26日に改訂された。
- ○安全確保の最優先・リスク低減重視の姿勢を堅持、廃炉作業全体の最適化

【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 2017年 夏頃 → 決定
- ・初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定 2019年度
- 初号機の燃料デブリ取り出しの開始 2021年内



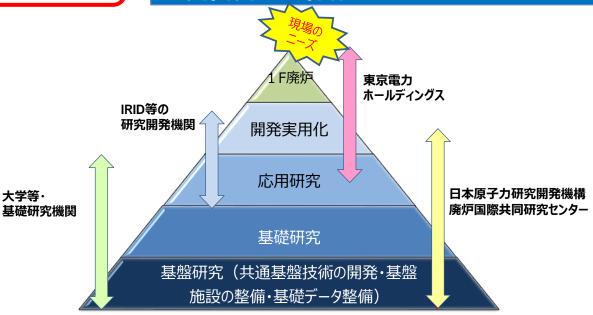
4. IRIDの研究開発スコープ

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

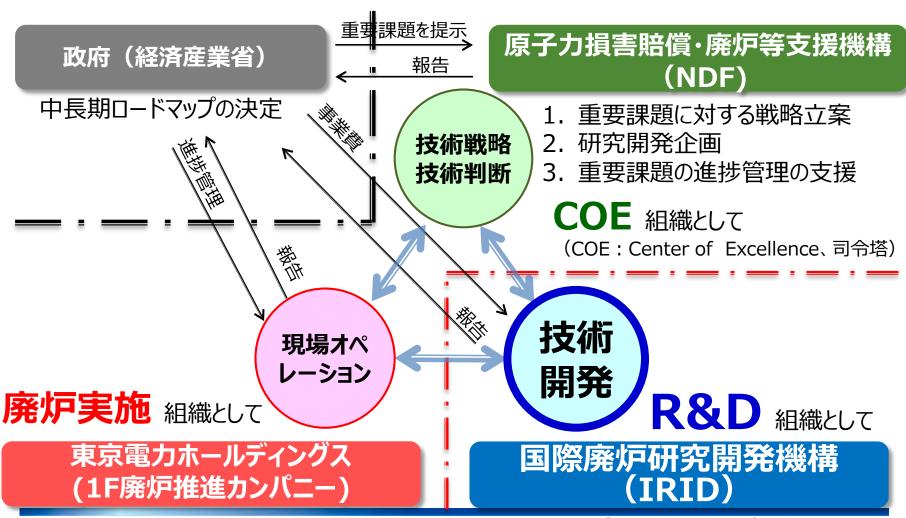


出所: NDF 技術戦略プラン2017



5. 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。



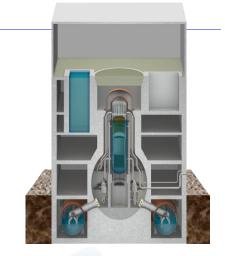
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

研究開発の発想転換

社会 场 術

• 多分野複合技術

- 未踏分野
- 長期計画·PJ管理



モノ志向・情報軽視

改善設計の製造業

整備環境での実験

研究開発成果の体系化と公開

福島イノベーション コーストの利用 リソース(人材・予算)・発想が限定的

失敗を許さない文化

予算の有効活用制度 未踏分野開拓の産業化 シミュレーション 技術を駆使して、 可能性の検証

多分野・多世代の参画

失敗データの解析 と蓄積、そして 有効利用

人材育成と産業育成 フィールド研究による社会課題解決



君に何を期待するか

■ 学生として、社会人として、

- ▶ 福島第1の状況を科学的に理解すること
- ▶ 技術の適用、失敗、そしてその後の対応を深く考えること
- ➤ 社会の技術としての科学技術を広範に眺める力を持つこと

■ 多分野複合技術の研究者として

- ▶ 自分の分野を他の分野から眺める経験を積むこと
- ▶ コミュニケーション能力を高める努力を常に継続すること
- ▶ 社会科学的視点を理解すること

■ 研究プロジェクトリーダーとして、

- ▶ 未踏分野の技術成功率は低いことを理解すること
- ▶ 失敗例を的確な情報として残すこと
- ▶ 部分最適化を避け、全体最適化を図ること

IRID Symposium 2016





おわりに

廃炉は世代をまたいだ長期事業 理解し、記憶し、手助けしよう

国際廃炉研究開発機構へのご支援をお願いします。

新井 民夫 tamio-arai@irid.or.jp

