

日本原子力学会 シンポジウム
東京電力福島第一原子力発電所の廃炉
－ 廃炉の論点と展望 －

【講演4】
ロボット技術への期待

2018年3月18日
大手町サンケイプラザ 301～302号室

技術研究組合 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

今日のメッセージ

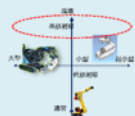
- 福島第一過酷事故以来、7年が経過
- 格納容器内の状況、号機毎の違いが分かってきた。
- デブリ取出しに向け、研究開発中

廃炉作業とは

廃炉用ロボットとは
福島第一で使用されたロボット
PCV・RPV内部での調査&作業システム

技術的課題(2)

廃炉用ロボットの課題



技術的課題(1)

長期的課題

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

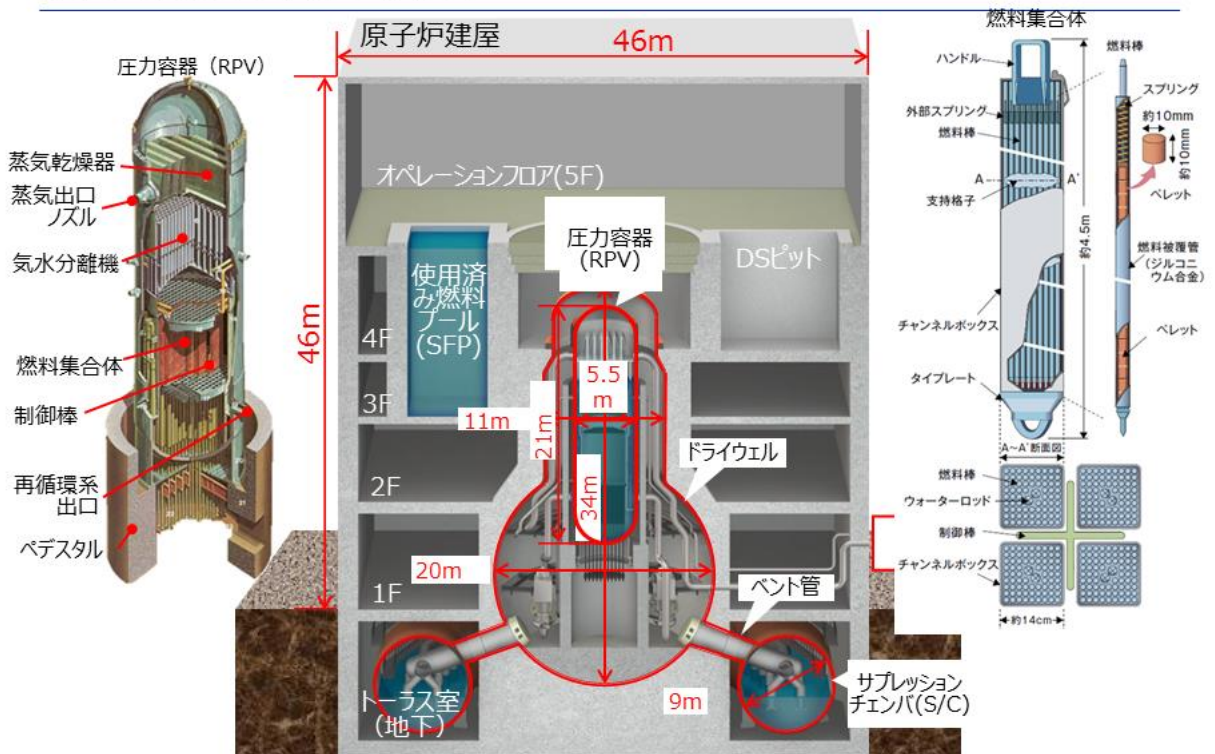
技術

- ・ 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

原子力発電所の構造



燃料デブリ取り出しに必要な技術開発

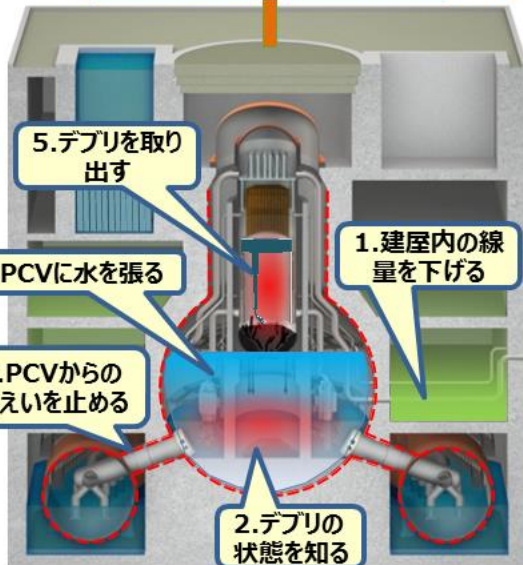
1. 建屋内の線量を下げる

- 遠隔除染装置の開発

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

6. デブリを収納・移送・保管する



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

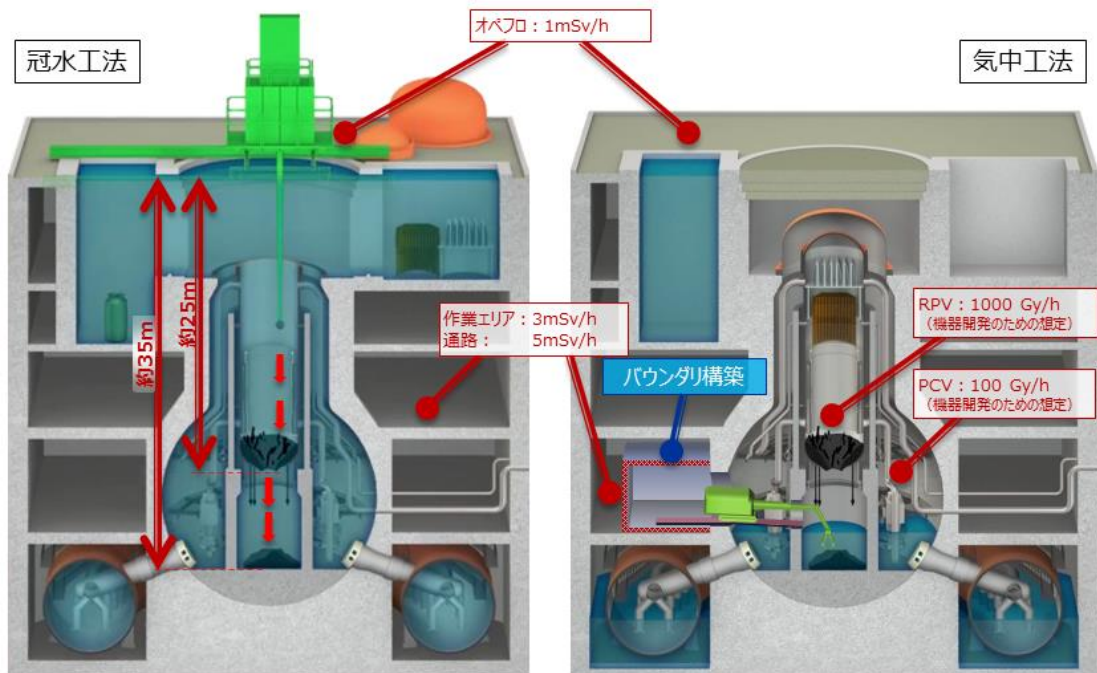
- デブリ収納・移送・保管技術の開発

IRID

8

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

燃料デブリ取り出し（複数案）燃料デブリ取り出し 2021年～



IRID

9

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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.	トラス室内部調査	2
4足歩行ロボット		Dec.	トラス室内部調査	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・狭あい部の調査	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
水上ポート		Nov.	トラス室内部調査	2

駆動系で分類

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

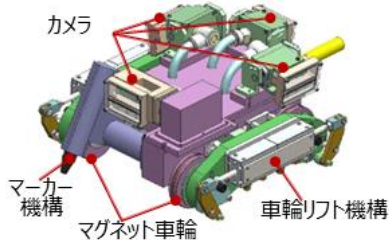
田所論「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」2011
田所論「国際レスキューシステム研究機構の活動」2011
千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>

磁気吸着移動ロボット

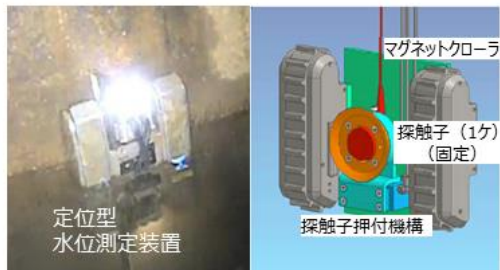
サブレーションチェンバ (S/C) やベント管上の漏えいなどの調査を行うため、磁力で鋼鉄製壁面に吸着し、全面を移動可能なクローラを開発。

SC-ROV

S/C上の亀裂、漏えいを調査

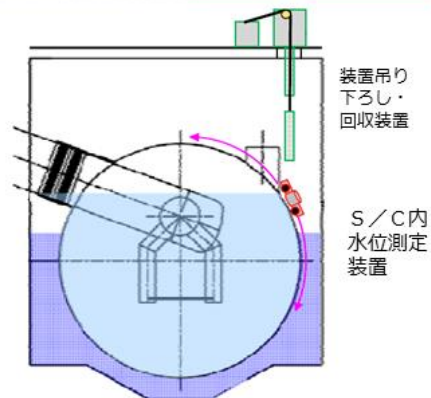


S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



VT-ROV

ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査



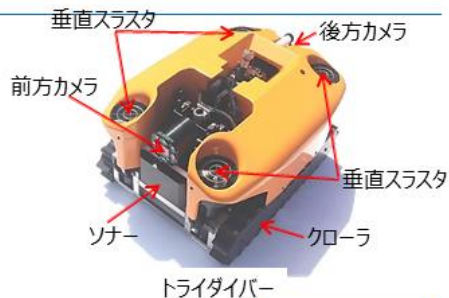
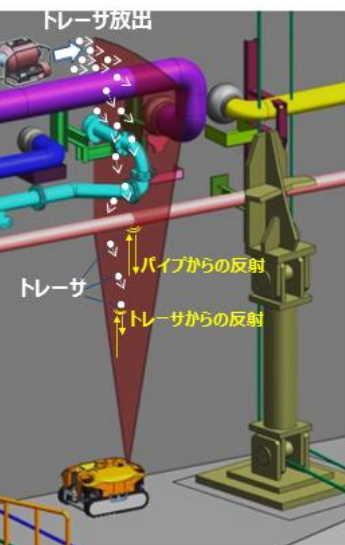
水中ロボット

ト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。

上方カメラ(前/後) 後方カメラ



前方カメラ



推進用スラスタ 中性浮力ケーブル



前方カメラ 照明 3号機水中ROV (モックアップ機)

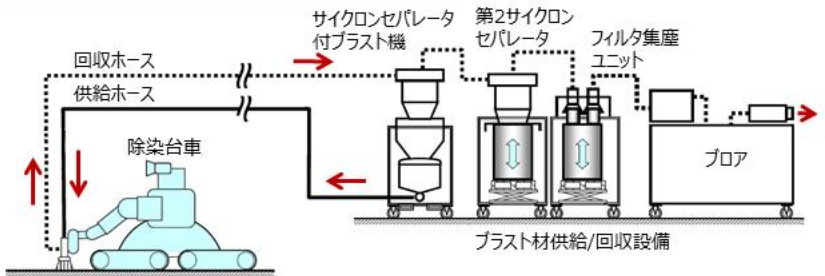
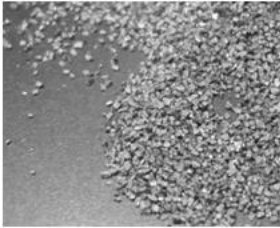
除染ロボット

原子炉格納容器漏えい箇所の調査・補修等の作業環境改善のため、現場の汚染状況にあった遠隔除染装置を開発

プラスト・吸引除染装置



プラスト (径0.3mmスチールグリット)



研磨剤を除染対象に噴射、表面を研削する工法。
噴射後の研削材 (スチールグリット) を回収し、セパレータで汚染と分離後再利用。

高圧水除染装置



ドライアイスプラスト除染装置

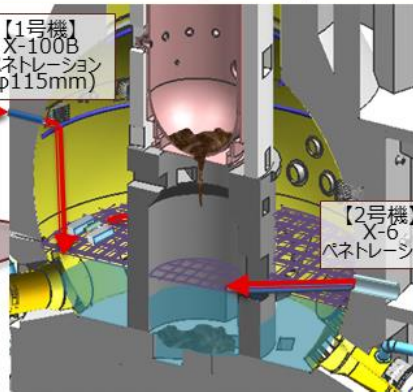
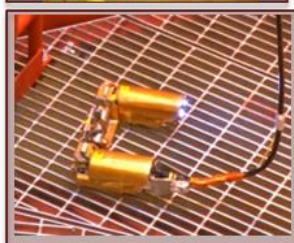
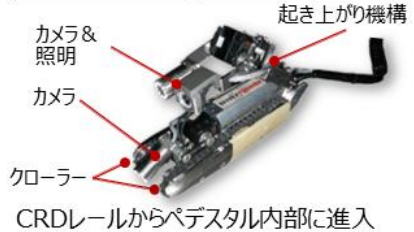


PCV内部調査用ロボット

形状変化型ロボット(1号機)



クローラ型遠隔操作ロボット(2号機)

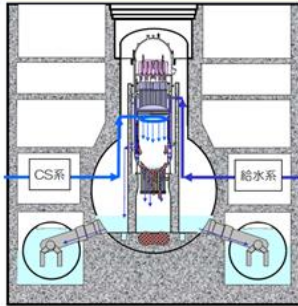


原子炉格納容器 (PCV) 内部調査

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ダスタル等の状況を確認する

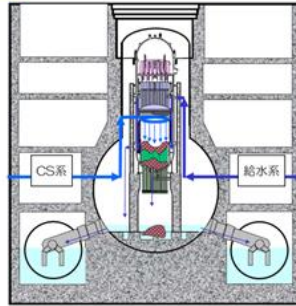
調査および調査装置の開発方針



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

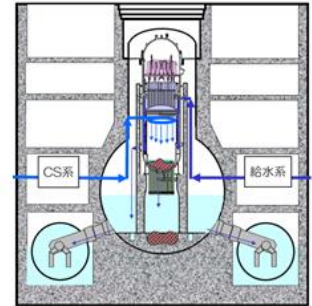
・燃料デブリのペダスタル外側までの拡散の可能性から、ペダスタル外側の調査を優先



2号機

・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペダスタルへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測

・ペダスタル外側までの拡散の可能性低く、ペダ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



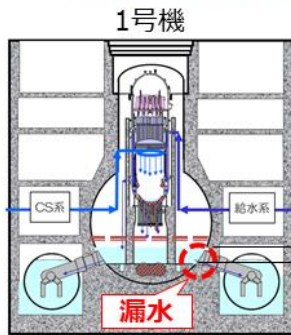
3号機

IRID

20

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

PCV内部調査方針



1号機

水位
約3m

漏水

核燃料：約69トン

デブリ量(トン)

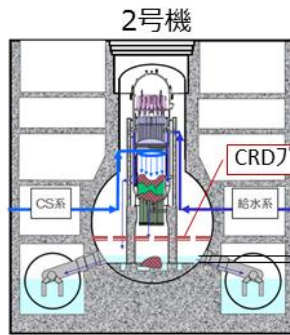
炉内	15ト
炉外	264ト

ペダスタル外側調査を優先(デブリのシェルへの到達状況)



14

IRID



2号機

CRDプラットフォーム

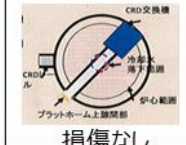
水位
約0.3m

核燃料：約94トン

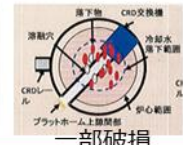
炉外のデブリ量(トン)

解析等	195ト
ミュオン調査	0~30ト

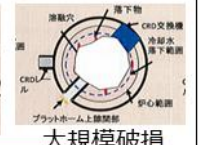
ペダスタル内側調査を優先(プラットフォームの損傷状態)



損傷なし



一部破損



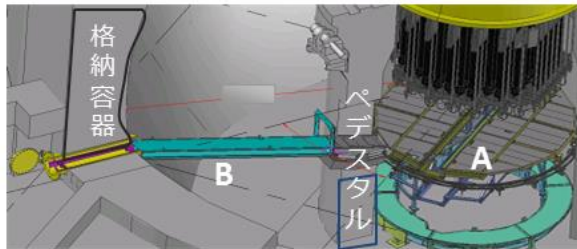
大規模破損

21

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

PCV内部のロボットによる調査

- 燃料デブリの広がりや格納容器内の損傷状況をさぐる
 - 1号機格納容器内 ペDESTAL外(B)
 - 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DESTAL内(A)
 - CRDレールを經由して直接ペDESTAL開口部へ侵入
 - 3号機格納容器内 ペDESTAL内(A)
 - 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DESTAL入口から内部へ



A : ペDESTAL内部
 B : ペDESTAL外部
 1 & 2 : 回数

PCV内部のロボットによる調査

ペDESTAL外側の調査 (1号機)

○形状変化型ロボット (B2調査)



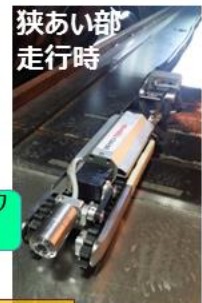
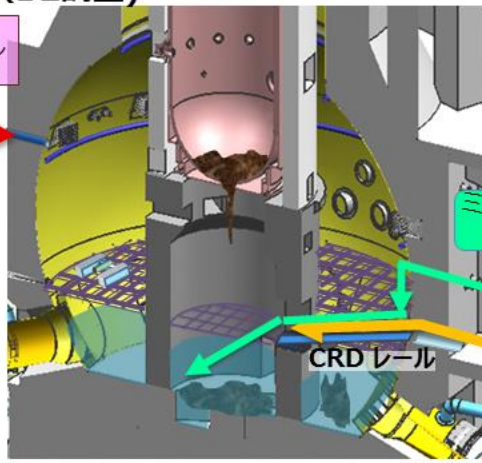
変形



(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

ペDESTAL内側の調査 (2号機)

○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



変形



ペDESTAL内側の調査 (3号機)



1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

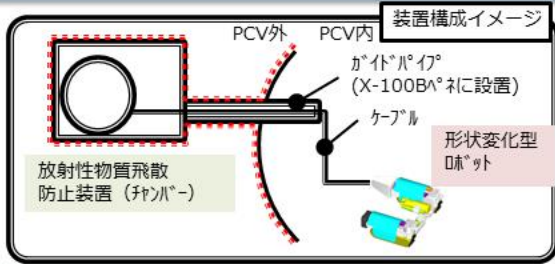
【1号機】
X-100B
ペネトレーション
(φ115mm)

課題：

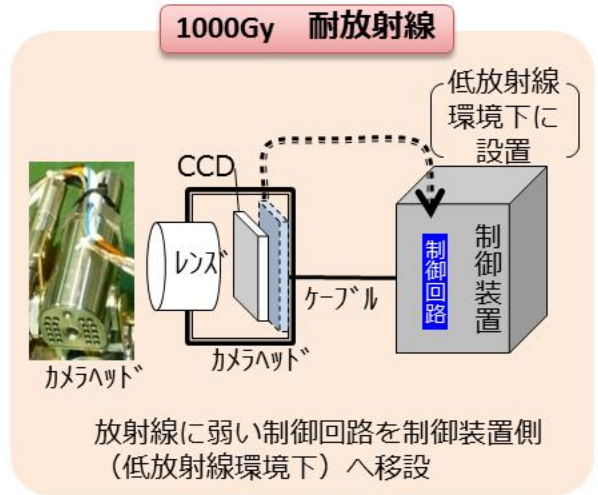
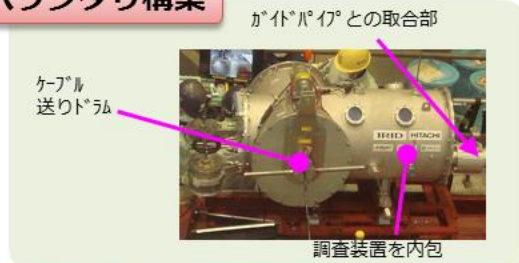
- (1) 狭あい空間 (φ100mm) と安定走行の両立
- (2) 過酷環境 (高線量, 暗闇, 蒸気雰囲気等)
- (3) 放射性物質の飛散防止



「映像」「温度」
「線量率」情報の収集



バウンダリ構築



2号機ペDESTAL内調査結果「サソリ」

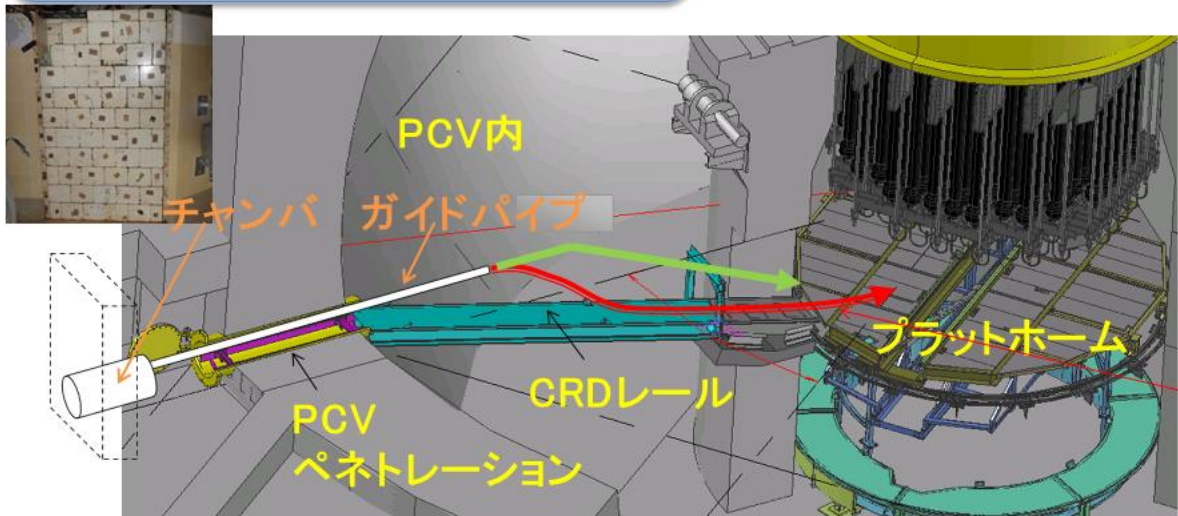
【2号機】
X-6
ペネトレーション

課題：

- (1) 狭あい空間 (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
- (4) 遮へいブロックの遠隔取外し

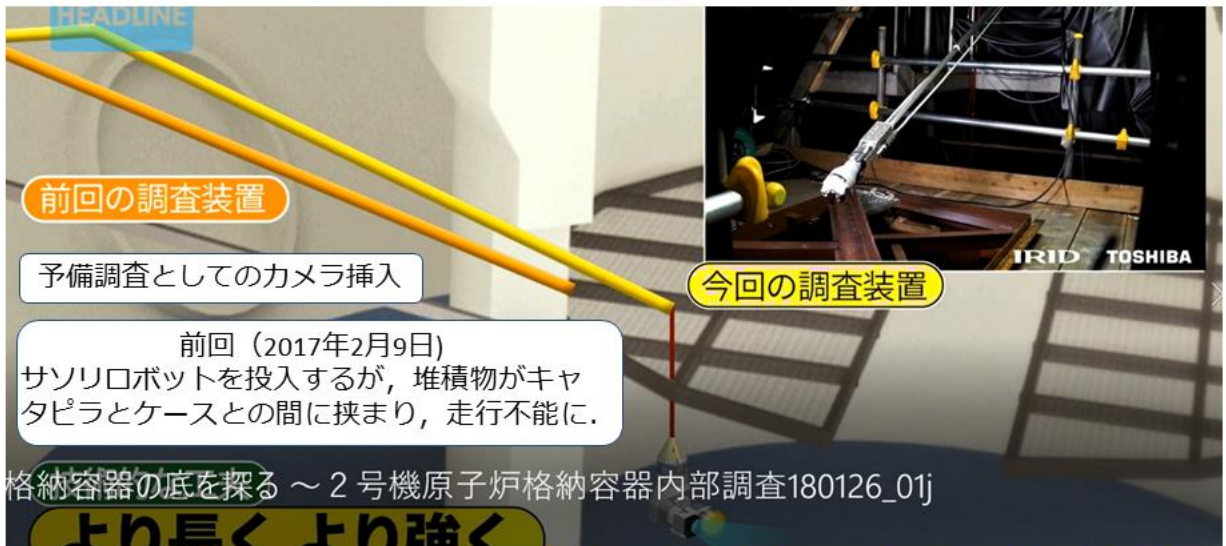


「映像」「温度」
「線量率」情報の収集



2号機内部調査(東京電力VTR)

- “東京電力 格納容器の底を探る”でクリック
- 2018/01/26(金) 格納容器の底を探る～2号機原子炉格納容器内部調査
- 1分～3分部分を再生



http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uuid=t9uimx8f&catid=61709

IRID

26

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

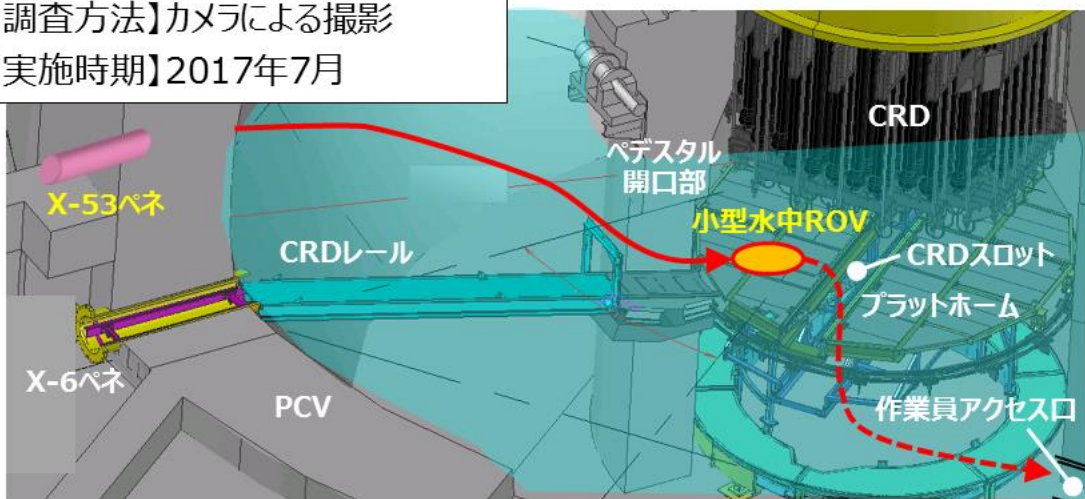
3号機ペDESTAL内調査

調査日：2017年7月19～22日

3号機
ミニマンボウ
X-53ペネ

【調査方法】カメラによる撮影

【実施時期】2017年7月



- ① 配管貫通部 (X-53ペネ) からアクセスしペDESTAL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DESTAL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DESTAL底部デブリの堆積状況や作業員アクセス口からペDESTAL外へのデブリの流出状況を確認する。

IRID

27

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

今後の展開を考える

■ 格納容器(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

■ 圧力容器(RPV)内の調査

■ 燃料デブリのサンプリング・取出し

■ 燃料デブリ・廃棄物の収納・移送・保管

大型遠隔操作ロボット
専用自動機
メンテナンス用機器

収納・移送・保管技術

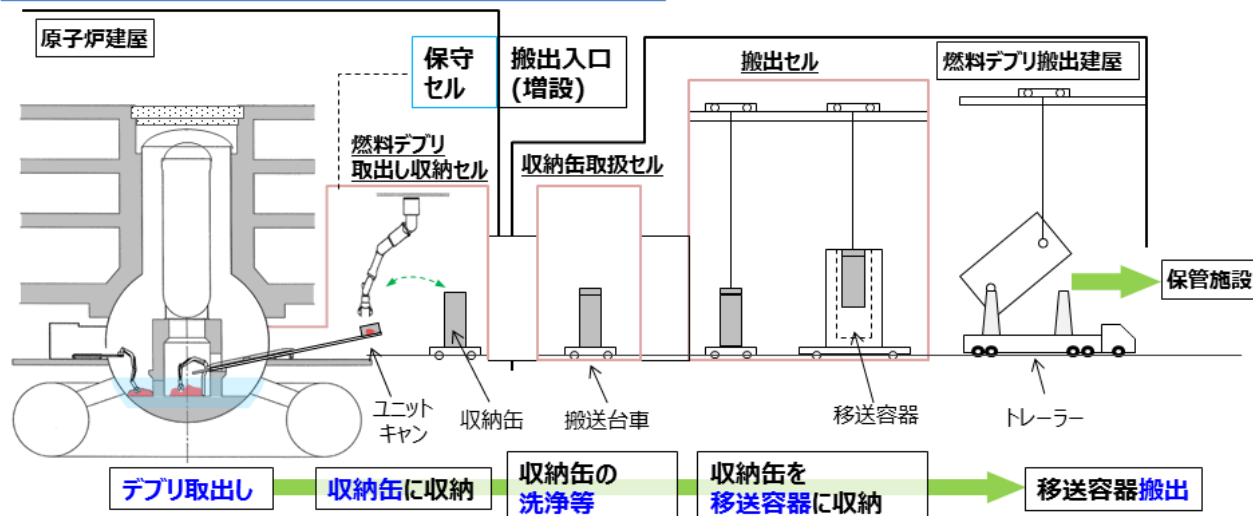
収納缶の設計

⇒TMI-2等での処置経験を基本的に参照。**1F固有の課題**にも対処。

- 燃焼度と濃縮度が高い→反応度の違い
- 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）

・直列の機械システム、半自動+メンテナンス



廃炉ロボットの課題

福島第一原子力発電所の事故対応

放射性物質によるリスクから人や環境を守る

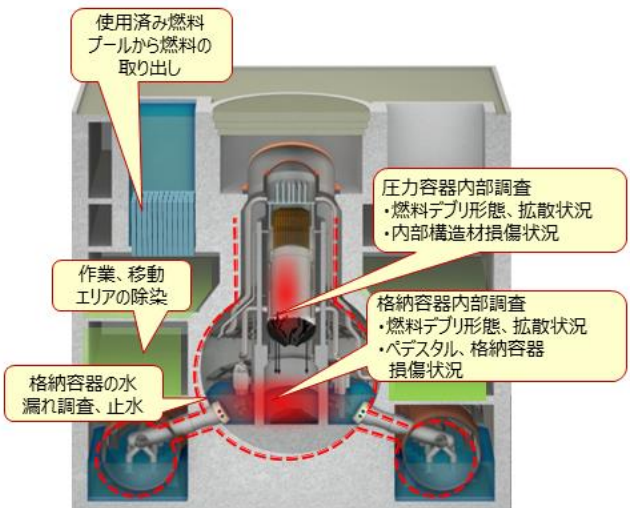
<廃炉措置>

- ・ 人が近づけない高放射線環境
- ・ 安全最優先で着実な調査や作業

→ **ロボット技術を活用した
遠隔基盤技術**

<課題の難しさ>

- ・ 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- ・ アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- ・ あらゆる事態を想定した対処の検討
- ・ 進捗状況によって廃炉措置全体の構想の変化



- ・ 想定ベースの仕様設定
- ・ 高信頼な特注製品
- ・ 人間機械系の導入
- ・ 手戻り防止

IRID

32

©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)
- 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)
- 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、遠隔操作

- (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

IRID ※ 東京電力HD web

33

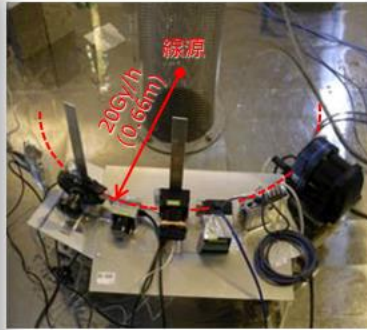
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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、遮へい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とする遮へい= 鉛板：2-30mm / 鋼鉄：7-80mm



ガンマ線照射試験

ガンマ線照射試験 (20Gy/h-40Gy/h)

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/hの高放射線下でも100時間以上の動作が可能

「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

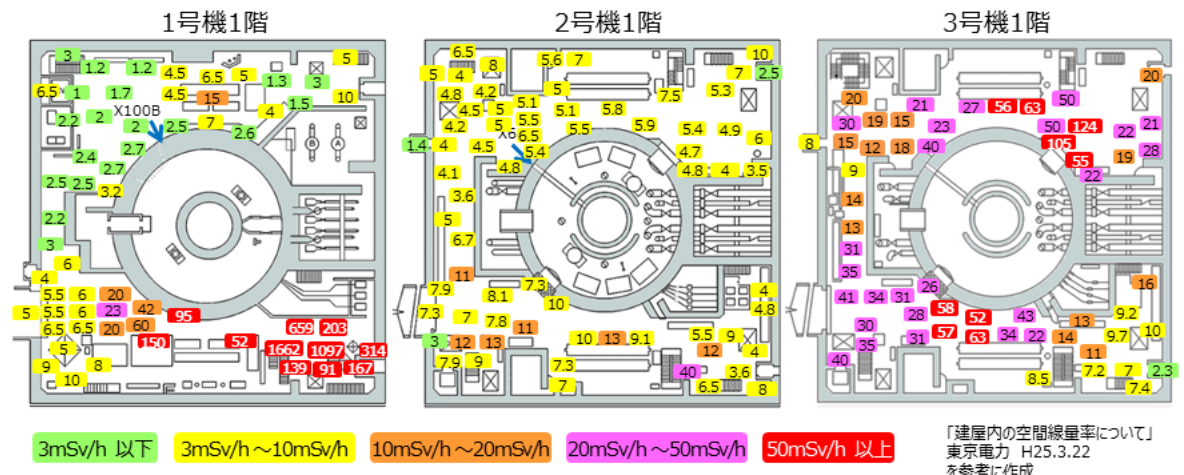
従事者の線量限度：1年間で50mSv、5年間で100mSv
作業エリア：3 mSv/h、アクセスルート：5 mSv/h

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 ⇒ 遠隔技術の確立
- 多様な汚染形態／多様な作業場所への対応要 ⇒ 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

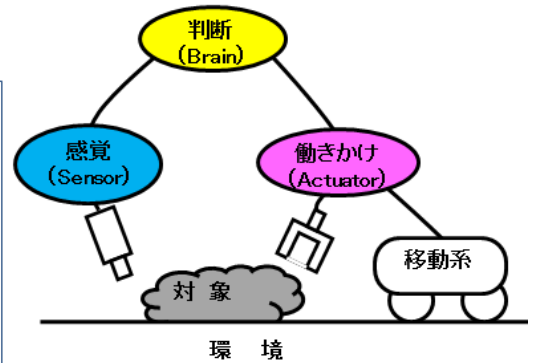


ロボットの設計

- 環境：高放射線、高温多湿、塵埃
未知、特性不明、光なし&地図なし、
- 対象：物理特性不明、臨界、デブリの判別

■ Sensor+Brain+Actuator+Mobilityの組合せ

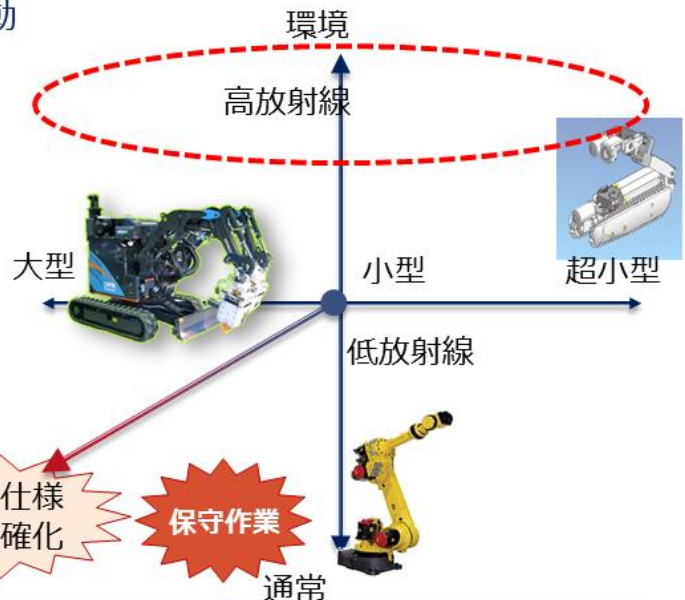
- Sensor: 電子機器の耐放性
- Brain: 人による判断
 - 作業員訓練
 - 判断基準の構築
 - システムによるサポート
- Actuator: 作業依存で多数の機器
 - 手先繰返し位置決め精度、固有振動数
 - 反力の受け、手先交換
- Mobility: 大型(40m程度)、水中&気中
 - 高温多湿、塵埃環境
 - 保守のための出入り



環境の制御
移動能力構築
作業能力構築
保守方法の確立

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
⇒ ロボットによる保守
 - 大型機器
⇒ 保守作業場所の確保
- 仕様：明確 ⇔ **不明確**
- **リスクアセスメント**



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 **構成員: 953名** (2017年10月1日現在、役員を除く)
 ・ **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(株)、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	2017年度
事業費	約45億円	約120億円	約158億円	141億円	約178億円

IRID

41

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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

燃料デブリ取り出し技術(5PJ)

<安定状態の確保> <デブリ取り出し>
 ④ PCV/RPV **耐震・影響** ⑤ **燃料デブリ** **臨界管理**
 評価 技術
 ⑩ **燃料デブリ・**
炉内構造物取出
工法・システム
 高度化

2017年度 全15PJが進行中。

廃棄物 処理・処分 技術(1PJ)

⑭ **固体廃棄物の**
処理・処分
技術

補修・止水技術 (2PJ)

⑥ PCV
漏えい箇所の
補修技術
⑦ 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

<直接的調査(5PJ)> <間接的調査>
 ② **PCV** **内部調査** ③ **RPV** **内部調査** ⑮ **PCV** **内部調査**
詳細化
 ① **総合的な**
炉内状況
把握
の高度化 ⑨ **燃料**
デブリ
性状
把握 ⑧ **小型**
中性子
検出器
⑫ **燃料デブリ・**
炉内構造物取出
サンプリング
⑬ **燃料デブリ**
収納・移送
・保管技術

<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

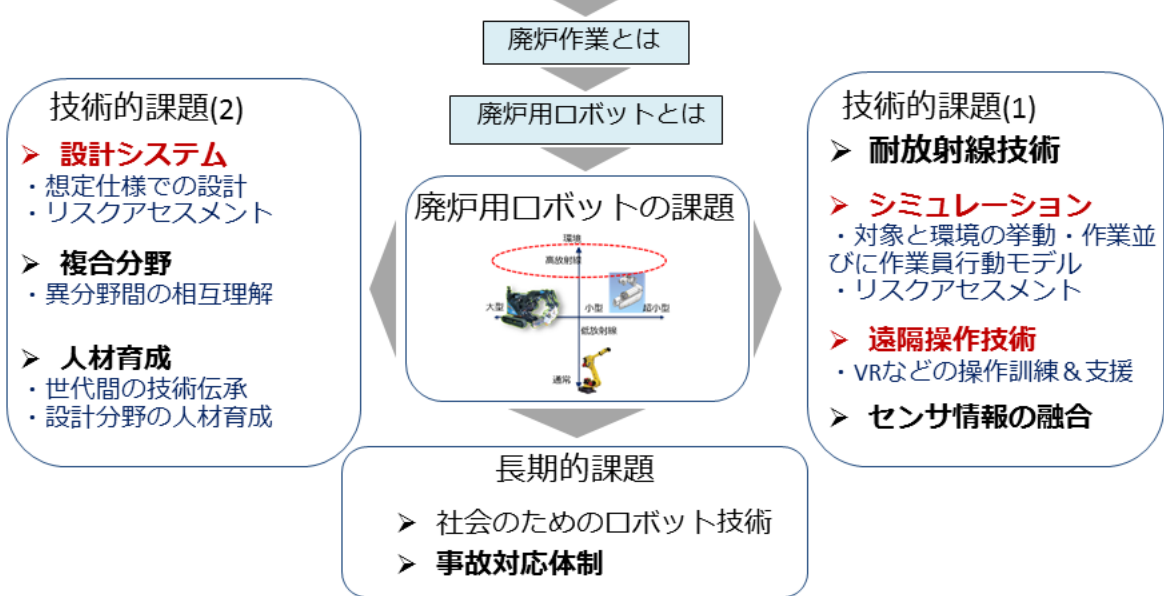
IRID

43

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

ロボット技術への期待

- 福島第一過酷事故以来、7年が経過
- 格納容器内の状況、号機毎の違いが分かってきた。
- デブリ取出しに向け、研究開発中



君に何を期待するか

http://irid.or.jp/_pdf/Sympo2016_Arai.pdf
IRID シンポジウム 2016 新井民夫：「ロボットが担う廃炉技術」

- **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