

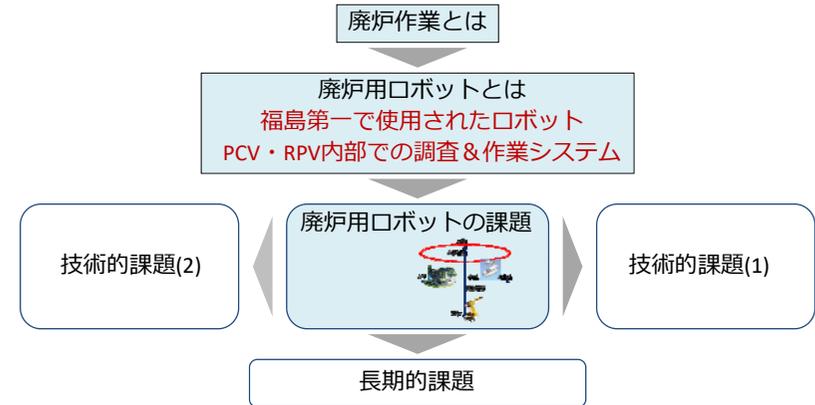
【講演 1】
 廃炉用ロボット技術と学会への期待

2017年9月11日 15:30～16:10
 日本ロボット学会@東洋大学 421教室

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
 日本ロボット学会 Fellow
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、**6年半**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

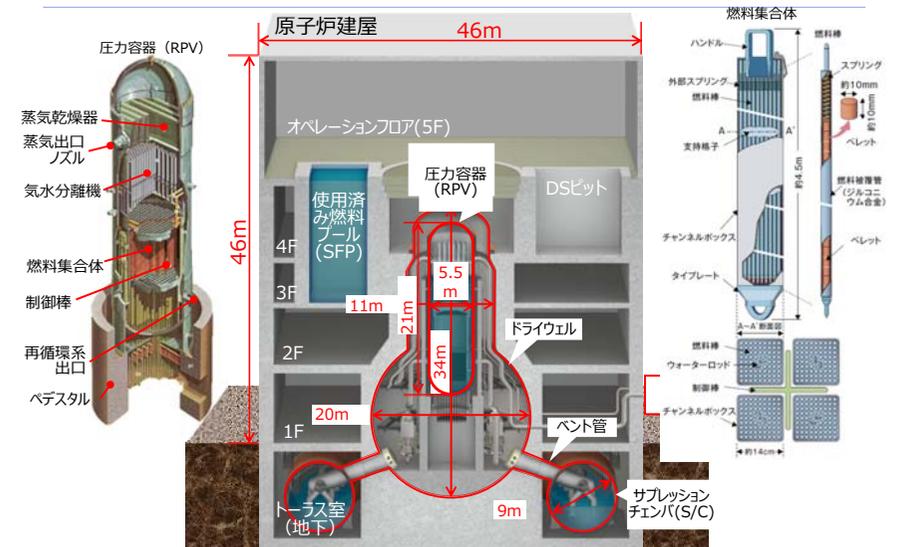


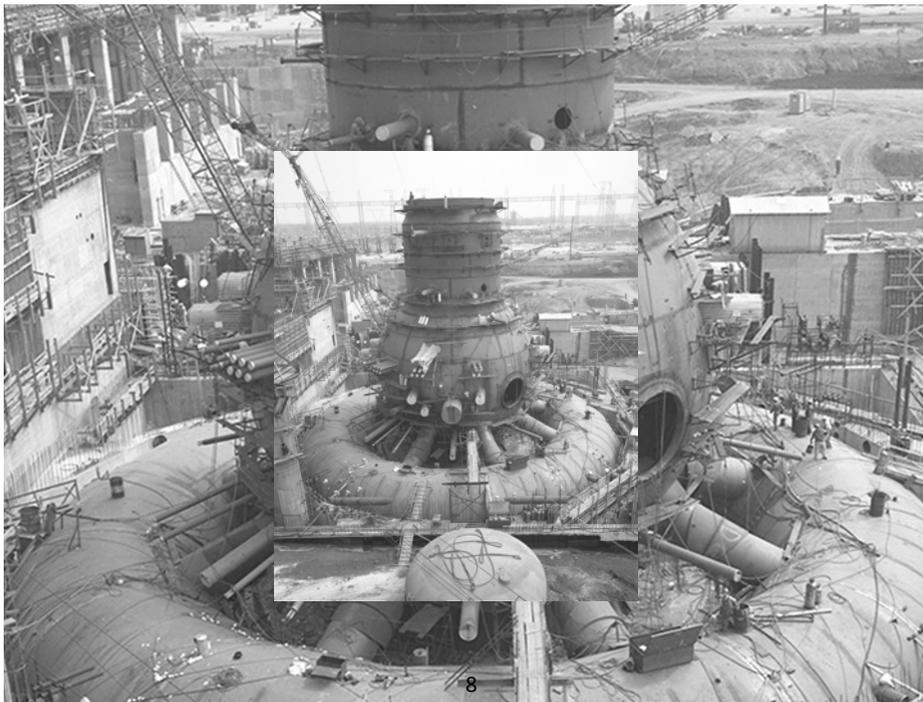
- 社会
- アクセスできる空間や使えるリソースの制約
 - 研究開発は国の仕事
 - 社会的課題としての廃炉

- 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

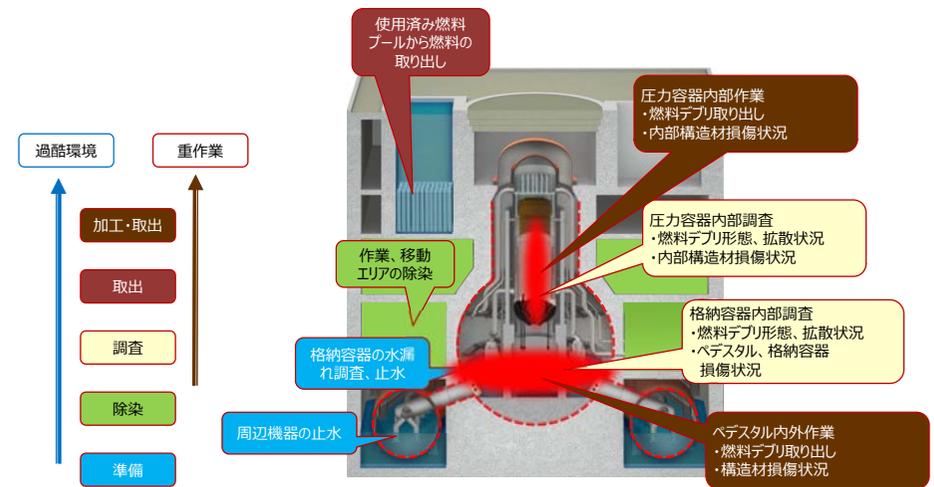
- 未踏分野：開発の立案と変更
- 長期計画：人材育成、産業技術化

原子力発電所の構造

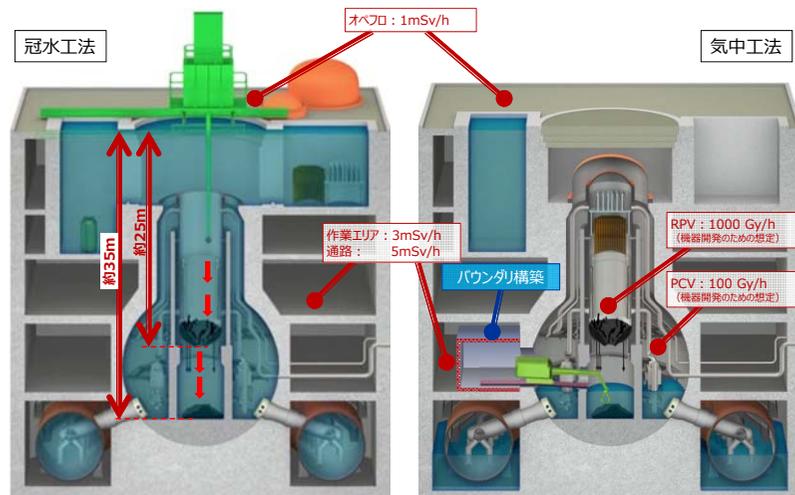




燃料デブリ取り出し（イメージ）



燃料デブリ取り出し（複数案）^{燃料デブリ取り出し 2021年～}



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. | エアロク室内部調査 | 1 |
| 高所調査ロボット | Jun. | 高所・狭陰部の調査 | 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 |

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



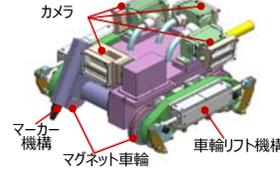
高い運動性能（階段、段差、ガレキ走破性）をもとに、映像撮影、環境モニタリング、軽量物のハンドリングに威力を発揮

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



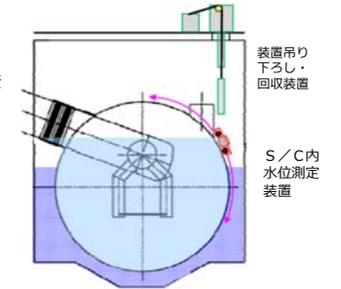
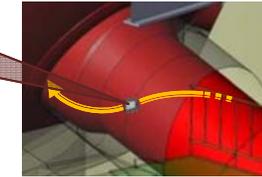
S/C内水位をS/C外より超音波で測定する



VT-ROV



ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査



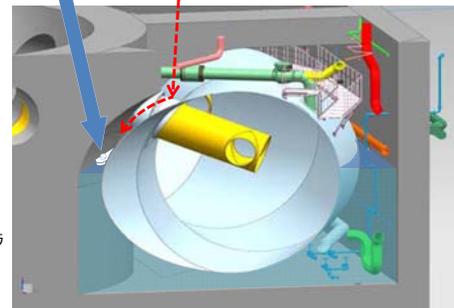
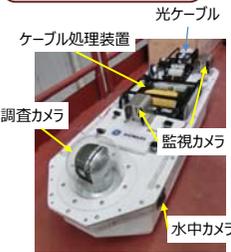
水上ボート

ケーシ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認するため、ベント管下部周辺の状態を確認



1号機ベント管/サンドクッションドレン漏えい(2013.11.13)

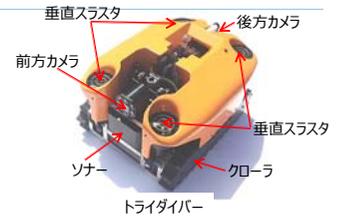
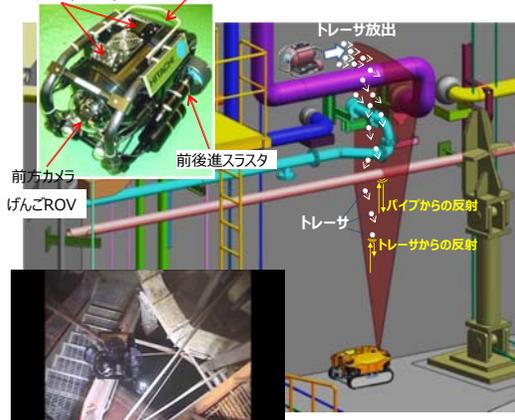


東京電力「福島第一原子力発電所 1号機ベント管下部周辺の調査結果について(1日目)」2013.11.13
遠隔技術タスクフォース WG2「遊泳調査ロボットの技術開発 実証試験の実施について」2013.10.31

水中ロボット

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トプグラフィー計測機能を装備する。

上方カメラ(前/後) 後方カメラ



推進用スラスタ 中性浮力ケーブル



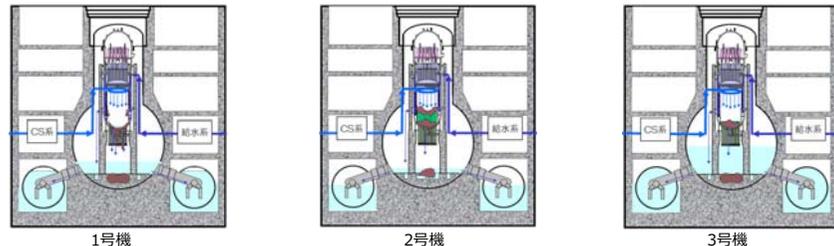
前方カメラ 照明 3号機水中ROV (モックアップ機)

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DESTAL等の状況を確認する

調査および調査装置の開発方針

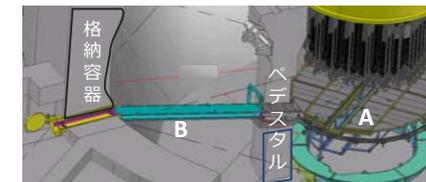


- | | | |
|--|---|--|
| <p>1号機</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶融燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下、炉心部には殆ど燃料が存在せず ・燃料デブリのペDESTAL外側までの拡散の可能性から、ペDESTAL外側の調査を優先 | <p>2号機</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペDESTALへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測 ・ペDESTAL外側までの拡散の可能性低く、ペDESTAL内側の調査を優先 | <p>3号機</p> <ul style="list-style-type: none"> ・3号機はPCV内の水位が高く、1・2号機で使用予定のベネが水没の可能性あり、別方式の検討要 |
|--|---|--|

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 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
 - 照射試験による確認、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
 - (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

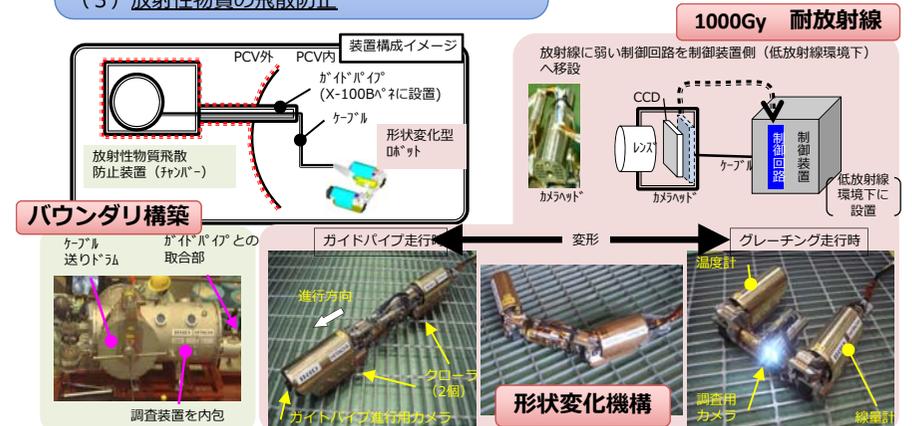
PCV内部調査の特性(1)

課題:

- (1) 狭隘空間 (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

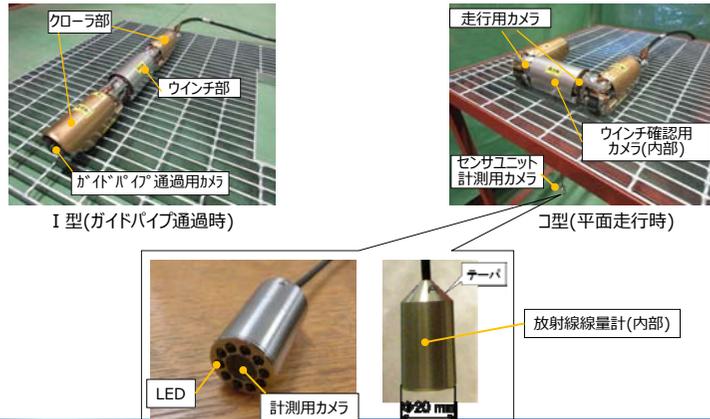
[1号機] X-100B ペDESTレーション (φ115mm)



1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

1号機 B2
PMORPH

| | |
|-----------|---|
| 本体寸法 | ガイドパイプ走行時：長さ699mm×幅72mm×高さ93mm グレーチング走行時：長さ316mm×幅286mm×高さ93mm |
| センサユニット寸法 | 幅20mm×高さ40mm ケーブル：長さ3.5m |
| 重量 | 約10kg |
| スナップ | カメラ×5、放射線線量計×1 |
| 耐放射線性 | 約1000Sv以上 |



IRID

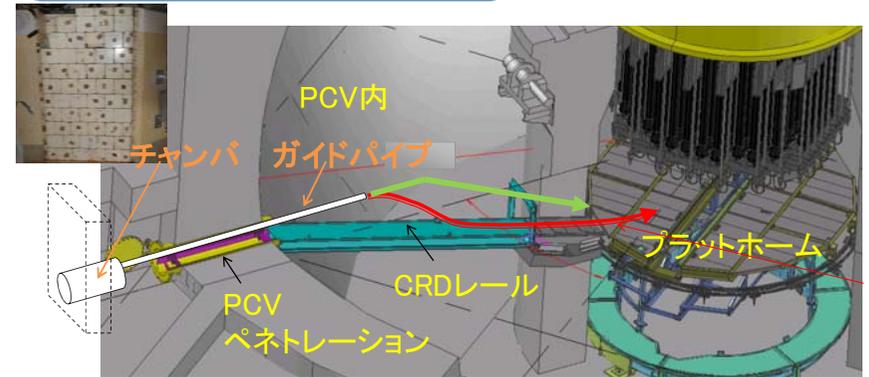
PCV内部調査： PCV内部調査の特性(2)ペDESTAL内部調査

【2号機】
X-6
ペネトレーション

課題：

- (1) 狭隘空間 (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

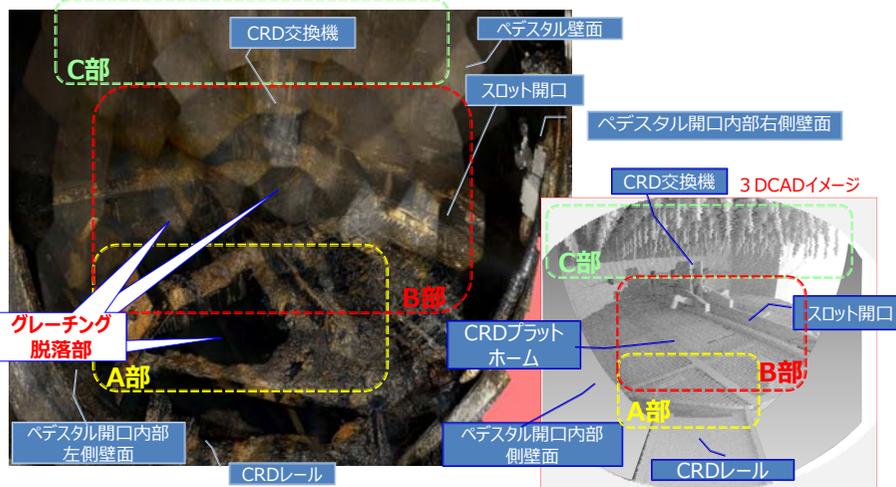


IRID

2号機ペDESTAL内調査結果

調査日：2017年1月30日

2号機 A2
サンリ



▶ CRDプラットフォ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HDIにて鮮明化した画像をもとに画質改善したものを全地球化

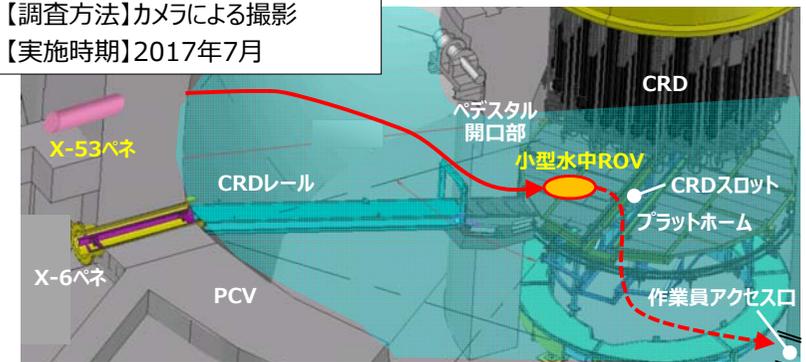
IRID

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

【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ベネ) 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

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

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

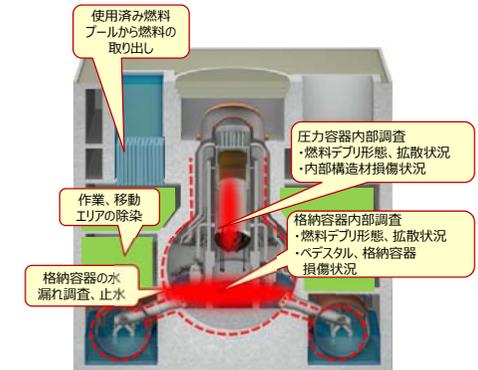
<廃炉措置>

- ・ 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



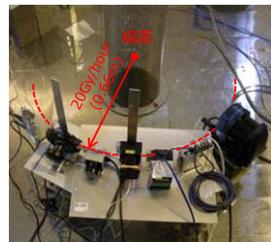
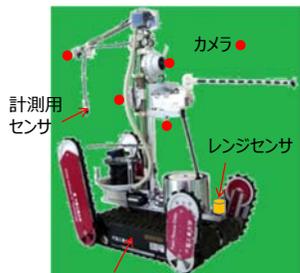
- ・ 想定ベースの仕様設定
- ・ 高信頼な特注製品
- ・ 人間機械系の導入
- ・ 開発途中で仕様変更

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〜約4000mSv/h以上(南側)
- 2号機：原子炉建屋内線量：1階約数ミ〜約30mSv/h、オペロ最大880mSv/h
- 3号機：原子炉建屋内線量：1階約20ミ〜約4000mSv/h以上(北側の一部)、オペロ最大約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

「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

グレイとシーベルトの関係

$$\text{シーベルトの値} = \text{グレイの値} \times \text{放射線荷重係数}^{*1} \times \text{組織荷重係数}^{*2}$$



◆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) |

◆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 | | |
| 肝臓 | 0.04 | 残りの組織・臓器 | 0.12 |

*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

原子炉建屋・作業エリアの除染

除染技術開発の課題

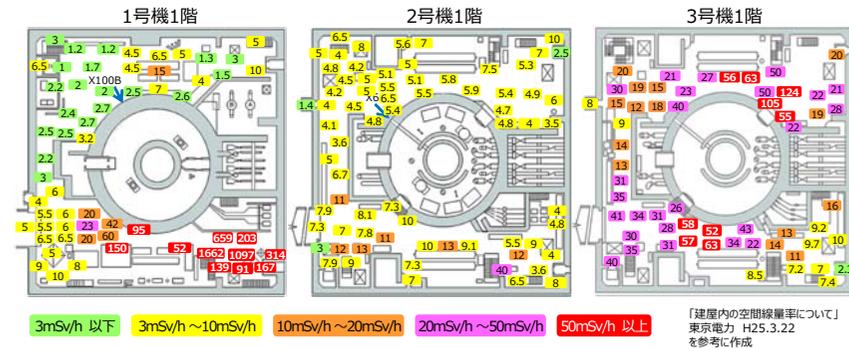
従事者の線量限度：1年間で50mSv、5年間で100mSv
作業エリア：3 mSv/h、アクセスルート：5 mSv/h

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



遠隔制御

無線は見通ししか通じない

調査活動(無線) 無線LAN サポート(有線) 無線/有線 LAN エアロック (作業員出入口) 操作卓

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

Quince 4足歩行ロボット 水上ポート

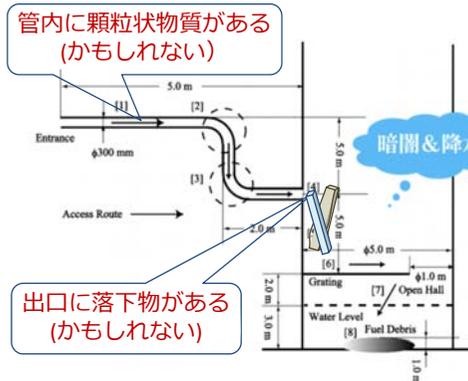
光ケーブルリール本体 繰り出し装置 ケーブル繰出し

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「Quinceによる福島原発対応」2011.6.8

廃炉のためのロボット技術コンペ

■ 日本ロボット学会と原子力学会合同

- 公募説明： https://www.rsj.or.jp/databox/openforum/2016/of01_02.pdf
- 結果報告： <https://www.rsj.or.jp/activity/committees-sg/dec/>



設定した原子炉圧力容器下部のテスト環境と模擬作業

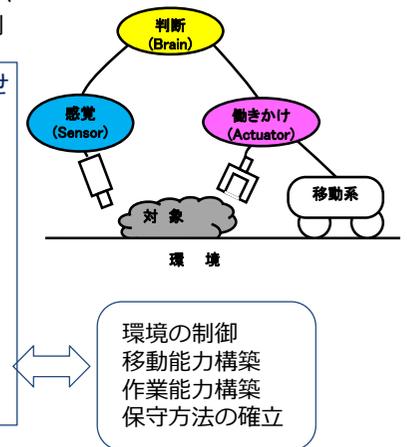
- [1]～[4] 連続曲がり管における移動
- [5] 狭隘部出口からPCV1階への移動
- [6] PCV 1階グレーティングにおける不整地移動・予測不可能な障害物に対する回避
- [7] 地下階からベデスタル下部への移動および水中移動
- [8] 水中におけるデブリサンプリングおよび回収

ロボットの設計(1)

- 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: 電子機器の耐放射性
- 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

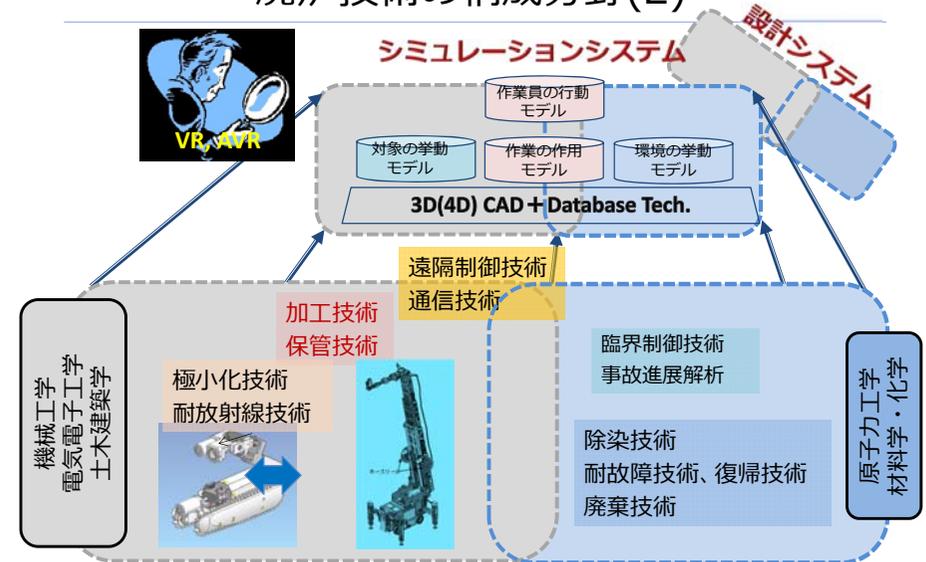


いかなる機器を開発しているのか

- 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
 - 作業員被曝 ⇒ 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



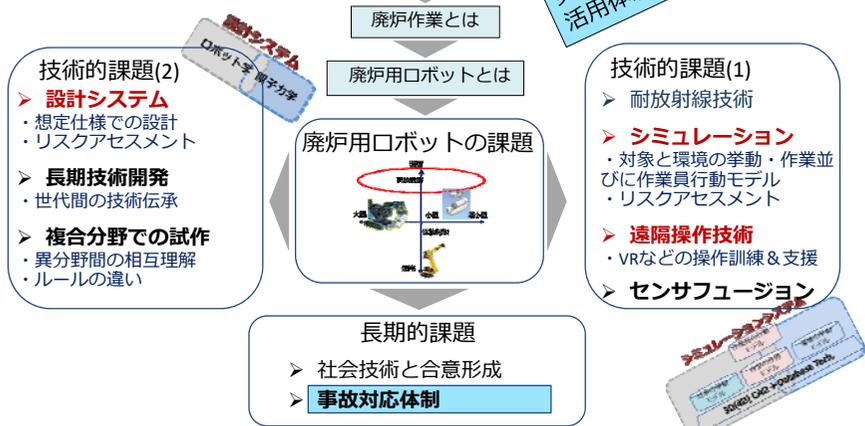
廃炉技術の構成分野(2)



学会への期待

- 福島第一過酷事故以来、6年半が経過
- 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

災害時のロボット活用体制の構築



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