

福島第一で使用されたロボット

目的：福島第一原子力発電所の廃止措置で使われたロボットを理解する

2017年9月13日14:45～16:00 @福島高専

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

Advanced Robotics with Artificial Intelligence
tamio-arai@irid.or.jp

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

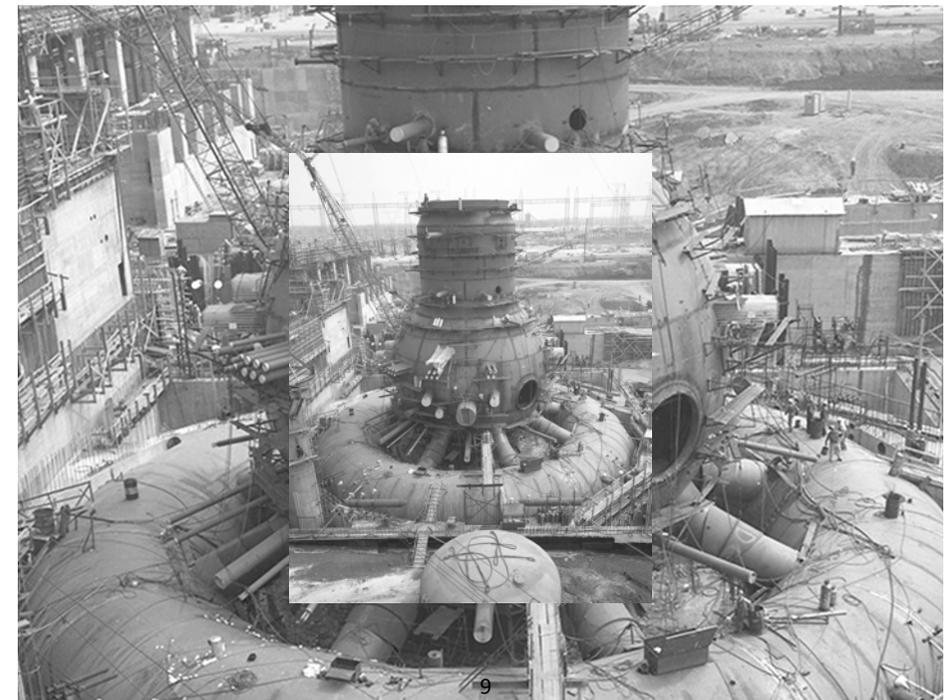
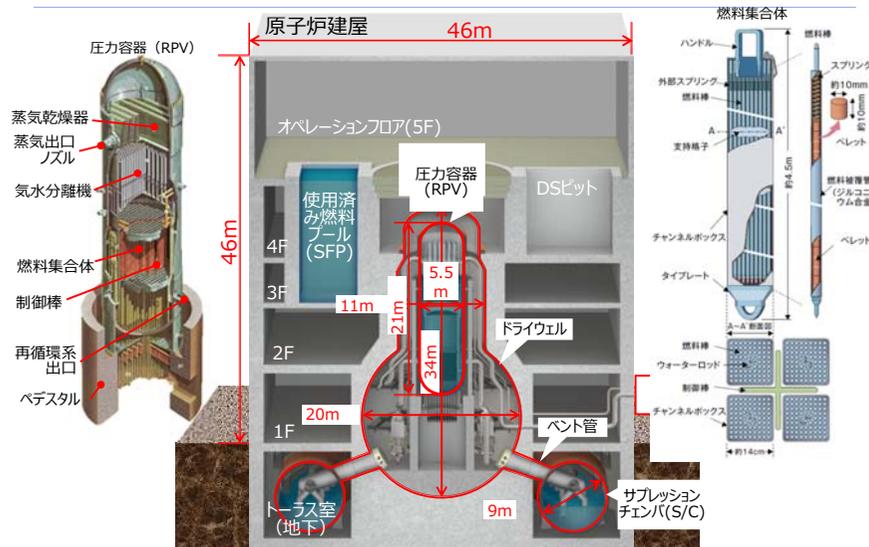
- アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- 研究開発は国の仕事
- 社会的課題としての廃炉

技術

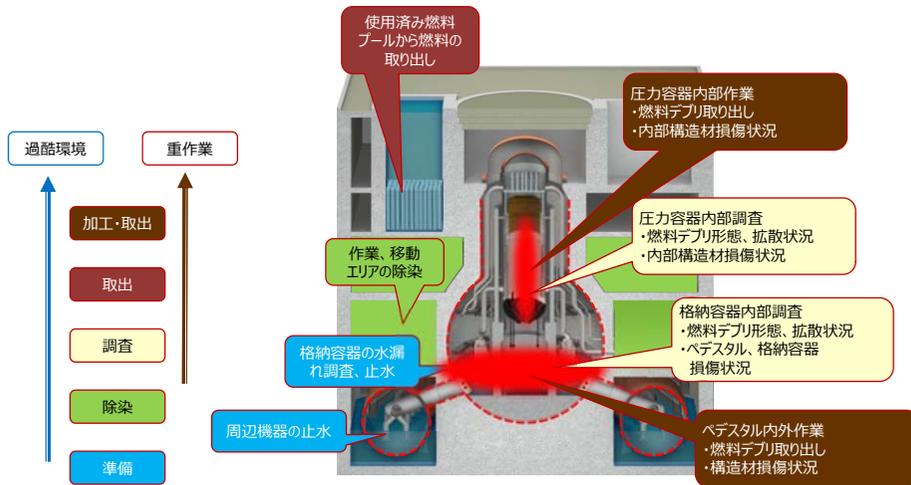
- 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- あらゆる事態を想定した対処の検討
- 進捗によって廃炉措置全体の構想の変化

- 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

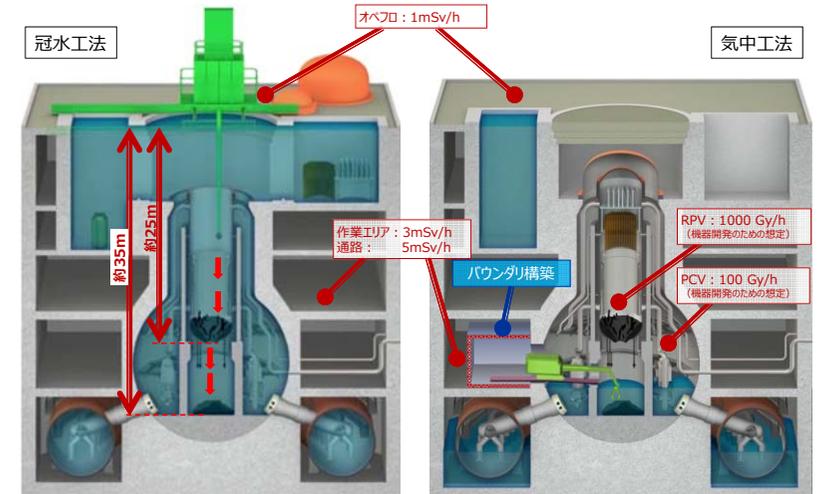
原子力発電所の構造



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） 2021年～



廃炉に向けたロボット開発



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

米国産ロボット

T-Hawk



3号機上空 (2011.4.15)



Warrior



3号機大物搬入口のガレキ撤去 (2011.11.3)



Packbot



3号機建屋への進入 (2011.4.17)



iRobot社では『Packbot』を4500台以上生産



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

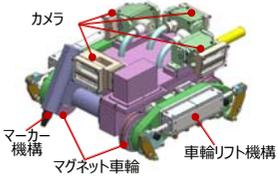
千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>

駆動系で分類

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。

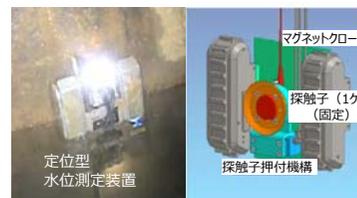
SC-ROV



S/C上の亀裂、漏えいを調査



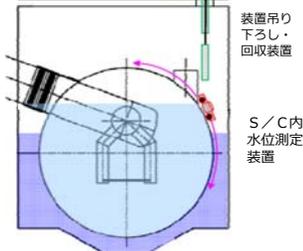
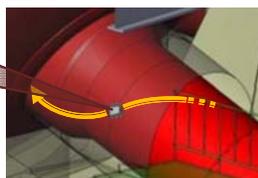
S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



VT-ROV



ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査

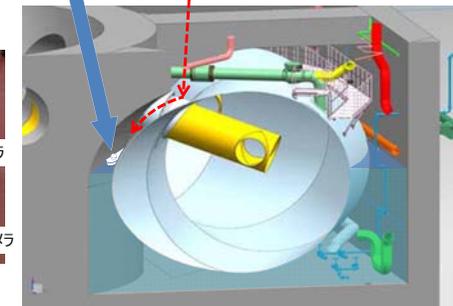
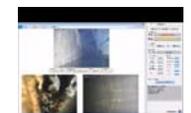


駆動系で分類

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)

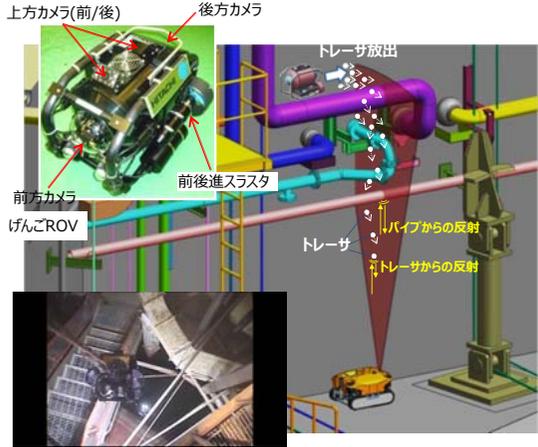


東京電力「福島第一原子力発電所 1号機ベント管下部周辺の調査結果について(1日目)」2013.11.13
遠隔技術タスクフォース WG2「遊泳調査ロボットの技術開発 実証試験の実施について」2013.10.31

駆動系で分類

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ドップラ計測機能を装備する。



作業目的で分類

作業ロボット

除染装置およびPCV内部調査のアクセス確保、ならびに線量低減のために、無人重機を活用

双臂作業ロボット
ASTACO-SoRA



3号機大物搬入口周辺の障害物除去
(2013.7.25-8.23)



建設作業機器のロボット化

破碎ロボット
BROKK(スウェーデン)



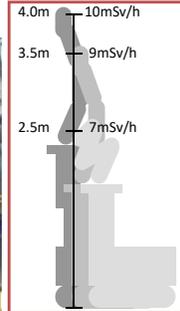
Bobcat



作業目的で分類

高所調査用ロボット

高所の狭い箇所などの構造把握と現場調査を行うため、
・調査対象の周囲の構造物を立体的に表示する技術
・多関節を同時に制御するシステム
・アームが構造物に接触した際にその衝撃を吸収する制御技術を搭載したロボットを、産総研とHondaで共同で開発



産総研プレスリリース『高所調査用ロボット』東京電力福島第一原子力発電所で稼働を開始 2013 <http://www.aist.go.jp/>
Honda『高所調査用ロボット ASIMOの技術、福島第一原発へ』2013 <http://www.honda.co.jp/robotics/>

作業目的で分類

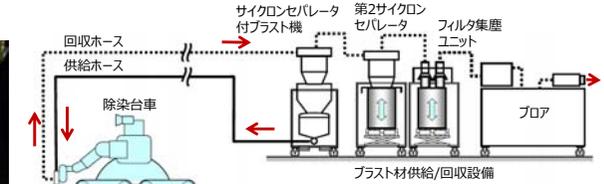
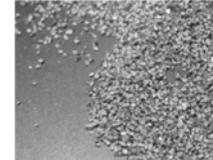
除染ロボット

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、表面を研磨する工法。
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)

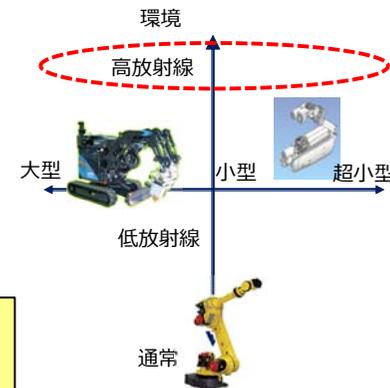
起き上がり機構

【1号機】
X-100B
ペネトレーション
(φ115mm)

【2号機】
X-6
ペネトレーション

いかなる機器を開発したか

- 環境： 通常 ⇔ 低放射線 ⇔ 高放射線
 - 温度： 高温高温、水滴
 - 路面： 平面(荒地、整地)、階段、不定形
 - 表面状態： 乾燥、濡れ地、堆積物
 - 水中： 空中、水中
 - 狭隘空間：
- 形態： 大型 ⇔ 小型 ⇔ 超小型
 - 単独機器、複数機器
- 制御： 直接 ⇔ 遠隔 ⇔ 自動
- 目的： 汎用 ⇔ 特殊



- これからがデブリ取出しの本番
- デブリ取出しシステム
 - ✓ 大型高剛性機械・大型低剛性機械
 - 収納・移送・保管システム
 - ✓ 連動自動機システム
 - 保守用機械システム
 - 作業員支援システム
 - ✓ 重量物移動支援、遮蔽壁保持
 - 環境構造化システム
 - ✓ センサ群配置、ランドマーク配置

PCV内部調査方針

1号機

核燃料：約69トン

2号機

核燃料：約94トン

3号機

核燃料：約94トン

デブリ量(ト)	
炉内	15ト
炉外	264ト

炉外のデブリ量(ト)	
解析等	195ト
ミュオン調査	0~30ト

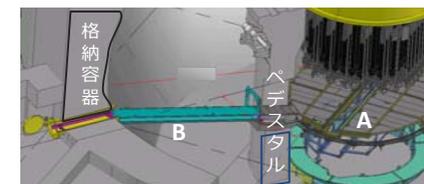
デブリ量(ト)	
炉内	21ト
炉外	343ト

ペDESTAL外側調査を優先(デブリのシェルへの到達状況)

ペDESTAL内側調査を優先(プラットフォームの損傷状態)

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レールを経由して直接ペ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内部調査の特性(1)

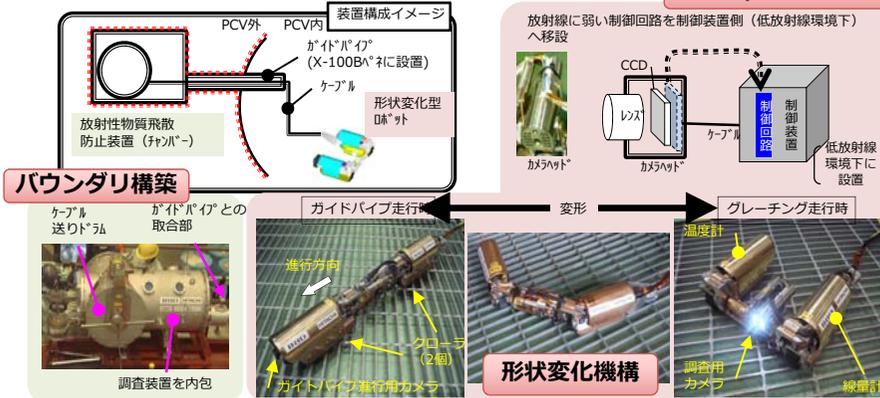
【1号機】
X-100B
ペネトレーション
(φ115mm)

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

1000Gy 耐放射線

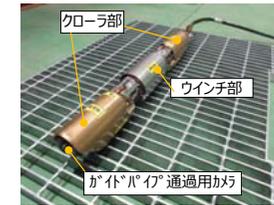


IRID

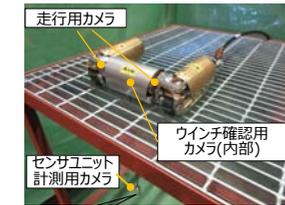
1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

1号機 B2
PMORPH

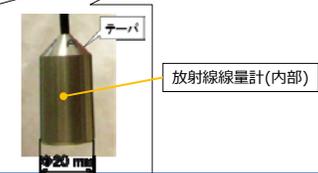
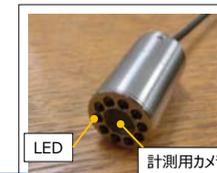
本体寸法	ガイドパイプ走行時: 長さ699mm×幅72mm×高さ93mm
センサユニット寸法	グレーチング走行時: 長さ316mm×幅286mm×高さ93mm
重量	幅20mm×高さ40mm ケーブル: 長さ3.5m 約10kg
スバック	カメラ×5, 放射線線量計×1
耐放射線性	約1000Sv以上



I型(ガイドパイプ通過時)



C型(平面走行時)



IRID

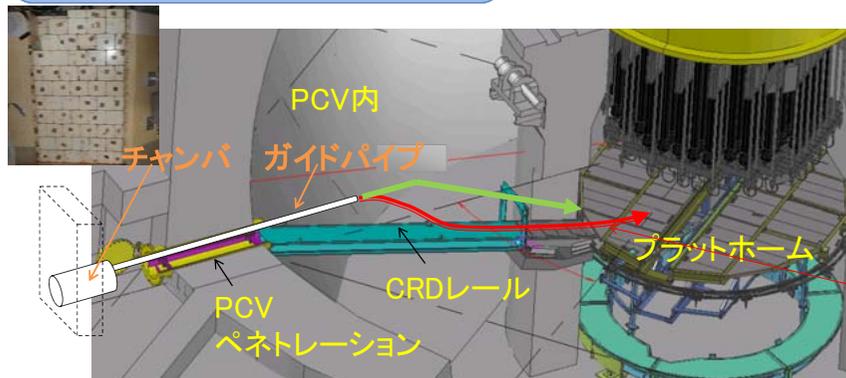
PCV内部調査: PCV内部調査の特性(2)ペDESTAL内部調査

【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

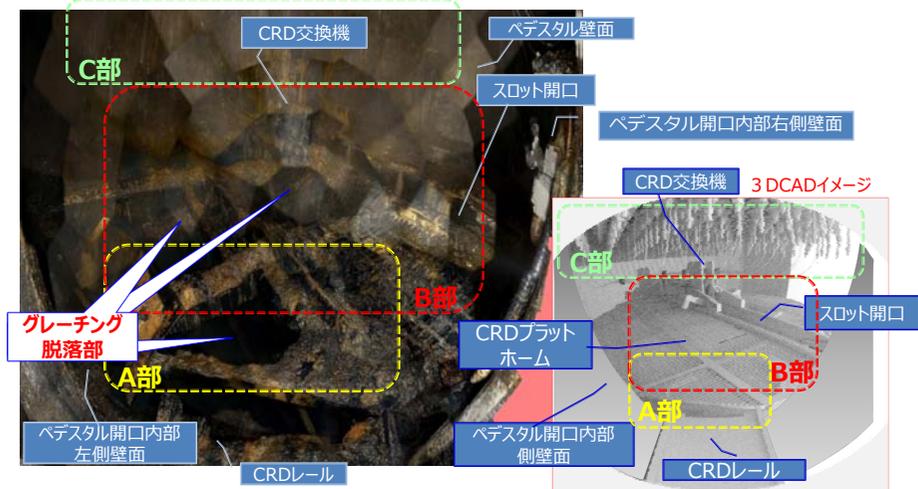


IRID

2号機ペDESTAL内部調査結果

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。

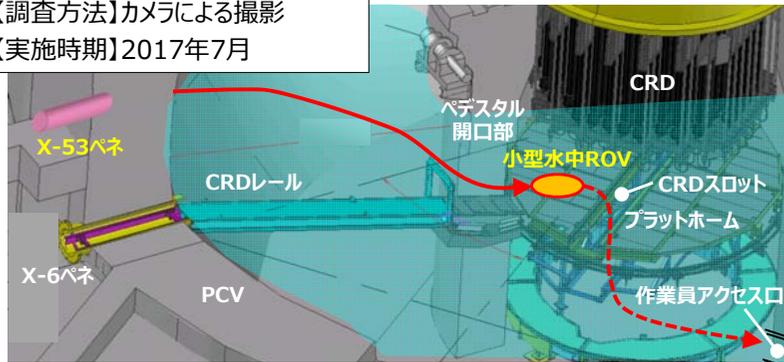
※上記画像は、東電HDにて鮮明化した画像をもとに画質改善したものを全全球化

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

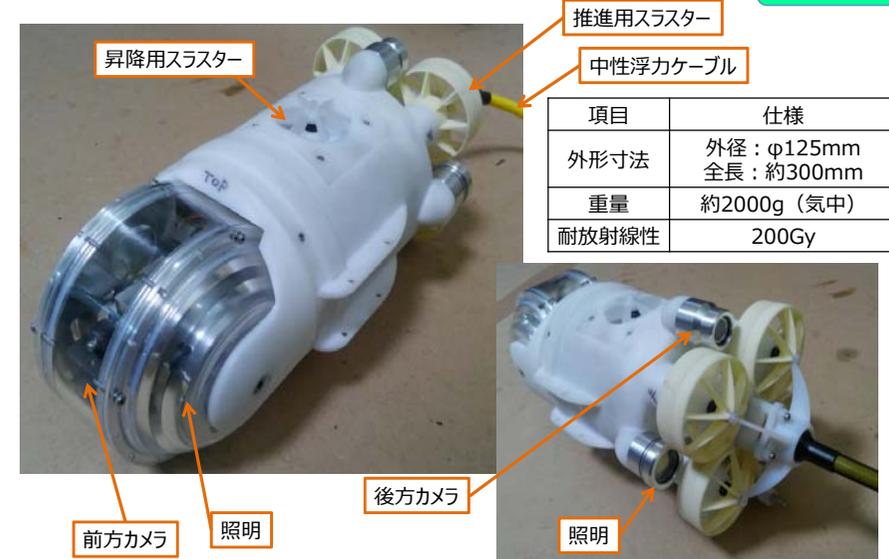
【調査方法】カメラによる撮影
【実施時期】2017年7月



- 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。

3号機水中ROV外観 (モックアップ機)

3号機
ミニマンボウ



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

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

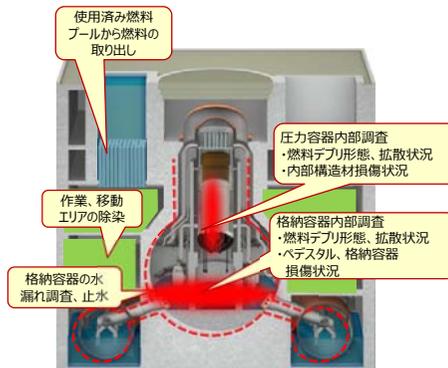
<廃炉措置>

- ・ 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
- ・ 開発途中での仕様変更

PCV内部のロボットによる調査 技術的課題の例(再掲)

■ 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、遠隔操作

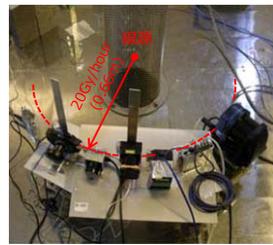
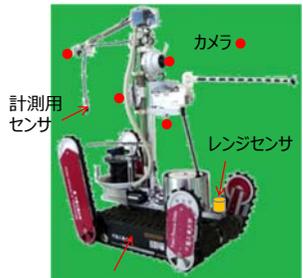
- (損傷) 環境に応じた走破性
- 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部カメラ、ランドマークの活用
- 徹底した訓練、実機モックアップ試験

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 モータドライブ 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、 엑스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	残りの組織・臓器	0.12
肝臓	0.04		

※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

電気事業連合会 デジタルパンフレット「原子力・エネルギー図面集」 <http://fecc-dp.jp/>

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 ⇒ 対象部位ごとの仕様検討・開発

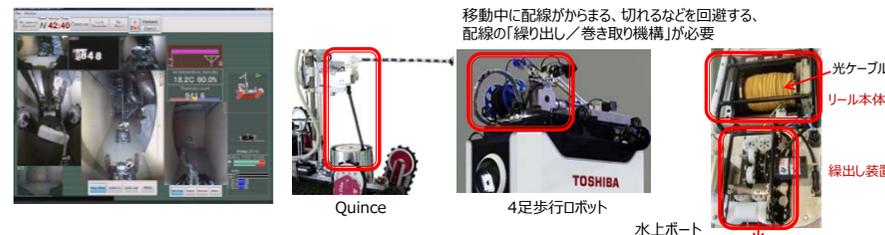
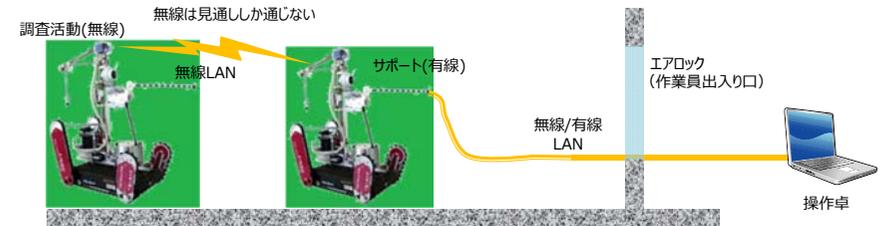
1~3号機の放射線量状況 2014年~2015年調査



3mSv/h 以下 3mSv/h ~ 10mSv/h 10mSv/h ~ 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

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

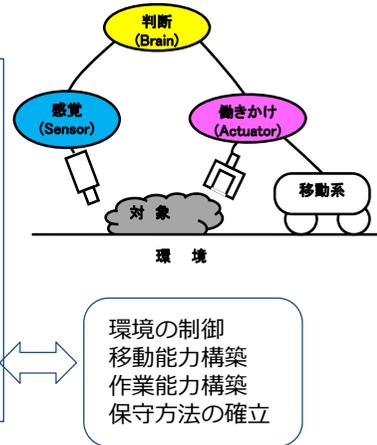
千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>
千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構プロジェクトチーム「Quinceによる福島原発対応」2011.6.8

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**



ロボコンの例：RoboCup

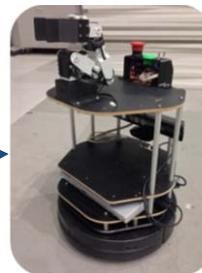
■ RoboCup Four-legged League

- 目的：2050年にWorld Cup勝者に勝つ
- 勝つための戦略、戦術、動作を構築
- 1998~2006 SONY AIBO
- Team ARAIBO Advanced Robots with AI for Ball Operations



■ RoboCup@Home

- 2014~
 - @Home Standard Platform Leagues
 - Toyota Human Support Robot (HSR) as the Domestic Standard Platform
 - SoftBank Pepper Robot as the Social Standard Platform
 - @Home Education
 - Homeロボット、サービスロボットの技術開発
 - 音声認識、発話、顔認識など
 - 多種類形状のハンドリング



廃炉創造ロボコン



■ フィールド環境：

- ①暗闇(環境内照明なし)、②遠隔操作、③電波使用不可

■ 試行時間：10分

■ 課題：

- ①モックアップ階段：(A)5Kgの荷物を1階から2階まで運び、元の場所に戻る。(B)2階の物を調べる。

- ✓ 機能：階段走行 (Up, Down, 斜め、踊り場Turn)、荷造り、荷下ろし、倉庫番問題、照明?、カメラ、... ..
- ✓ 設計時の変数とその許容幅：荷の大きさ、重心位置、摩擦係数、階段形状、踊り場形状、... ..

- ②標準テストフィールド：(A)フィールドの形状 (面積や凹凸など) を調べる。(B)物を調べる。

- ✓ 機能：面積・形状測定方法

リスクアセスメント



- **ハザードとリスク**
(危険性・有毒性)と(身体的影響の重篤度とその可能性)
→ 発生事故と機能的影響、想定状況と許容範囲

(例) 斜め階段下り

- 設計条件：蹴上がり、踏み幅の条件
- 斜め何度で推力不足？、転倒、平地移行困難...

- 利用場面(Use case)を想定して考える
- 設計パラメータの変更も必要
- 要素間の接続方法を早めに決定する



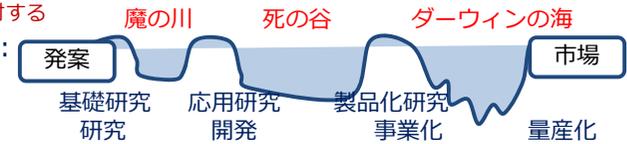
- 要素部品が壊れたら：FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)、故障モード影響解析。要素の故障によるシステムへの影響を調べる。ボトムアップ手法。
- 故障の原因は：FTA(Fault Tree Analysis)、故障木解析。その要因を探る、トップダウン手法

コンペはなぜ必要か

- **技術シードの必要性**

- 発想に基づく実現例を多数示す
- 技術的課題を検討する

- **実現までの困難：**



- ◆ **アイデアを尊重する**

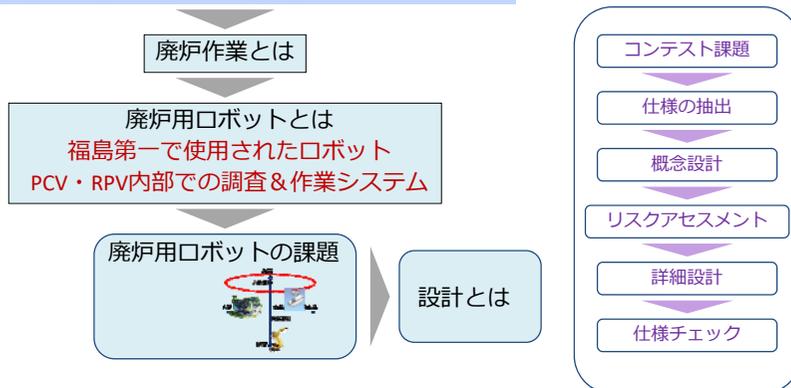
- 解析できなくても良い設計解がある。実験的に確かめる(手間が掛る)。解析できると(短時間で)多くの人に認められやすい。
- 全体のコンセプトは、皆の力を合わせるために重要。

- ◆ **環境と対象への適合性を設計する**

- 「観測→分析→設計→適用」のサイクルを回す。
- 適用ではPDCAを回す。改善が必要。だが、未踏分野開拓では、一発勝負が必要
- 完成度より仕様の余裕度。頑健性(Robust)が重要。
-

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



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