

廃炉用遠隔技術とその設計論

2017年9月6日
 楯葉町 JAEA 楯葉遠隔技術センター

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

本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

新井民夫 自己紹介

- 70 東京大学精密機械工学科卒
- 77 同博士課程修了
「自動組立の研究」で工学博士
- 87～ 精密機械工学専攻教授
- 00～05 東京大学 人工工学研究センター長
- 12 芝浦工業大学教授
東京大学名誉教授
- 13 国際廃炉研究開発機構 副理事長

- 精密工学会会長(08～10)
- サービス学会 初代会長(12～16)
- サービス産業生産性協議会幹事
- 日本学術会議会員(11～17)



- 自動組立・生産システム
 - 丸棒一丸穴挿入作業
 - クレーンとロボットの協制御
 - 産業用ロボット言語の標準化
 - ホロニック生産システム (HMS)
 - セル生産方式の高度化
 - 技能伝達
 - 作業疲労の測定

- ロボット
 - 群ロボット制御
 - ロボカップ(AIBO League)
 - 環境構造化

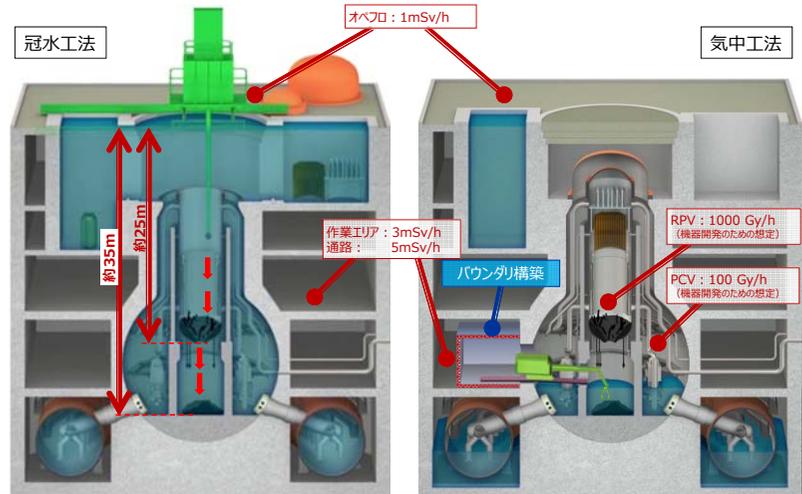
- サービス工学
 - サービスの表現・評価
 - プロダクトサービスシステム (PSS)
 - サービス標準化



本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量化作業
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

燃料デブリ取り出し (複数案) 燃料デブリ取り出し 2021年～



本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量化作業
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

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

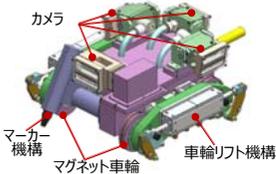
千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>

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



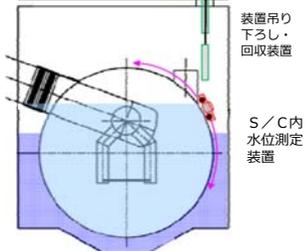
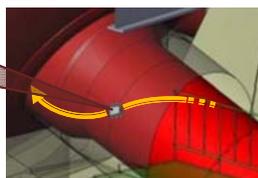
S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



VT-ROV



ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査



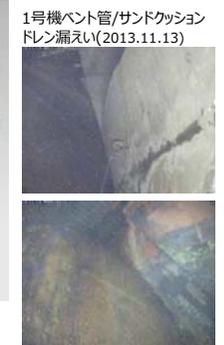
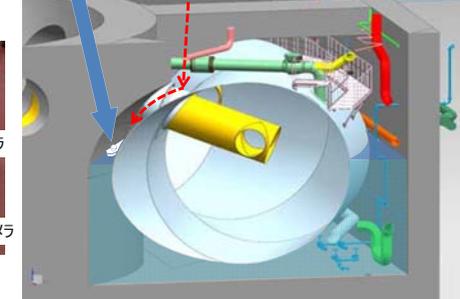
駆動系で分類

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

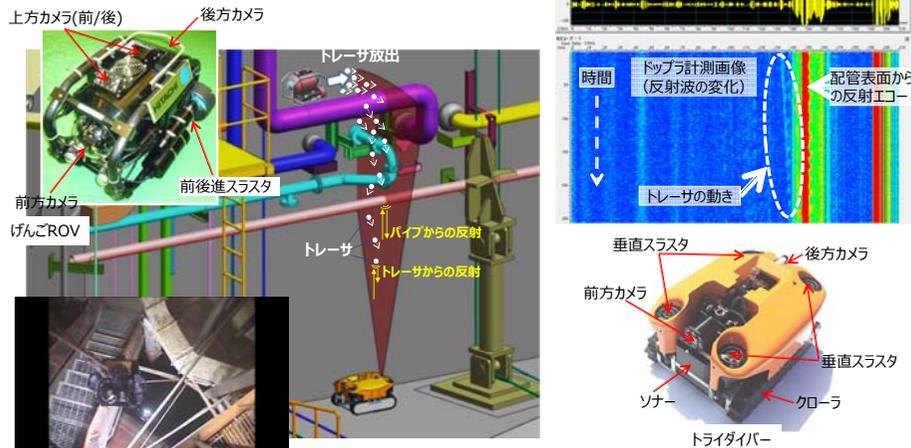


東京電力「福島第一原子力発電所 1号機ベント管下部周辺の調査結果について(1日目)」2013.11.13
遠隔技術タスクフォース WG2「遊泳調査ロボットの技術開発 実証試験の実施について」2013.10.31

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。



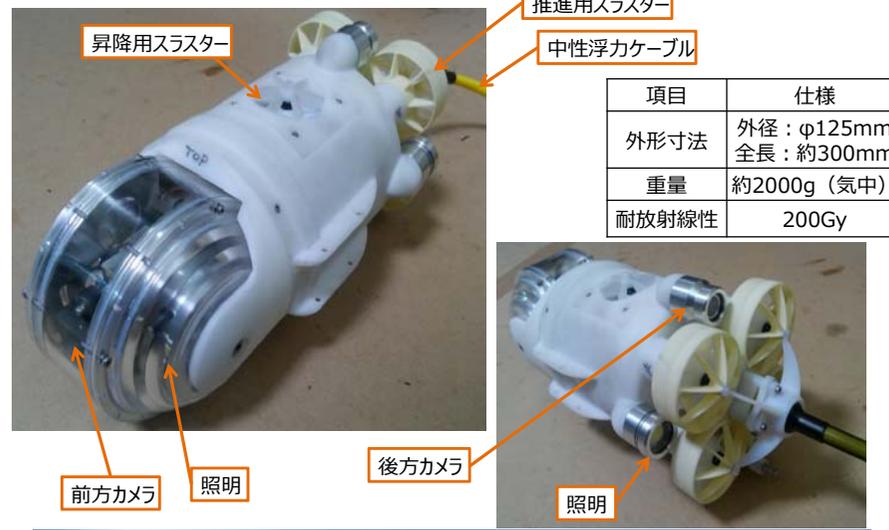
IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

駆動系で分類

水中ロボット(2)

3号機水中ROV外観 (モックアップ機)



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

作業目的で分類

作業ロボット

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

双腕作業ロボット
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



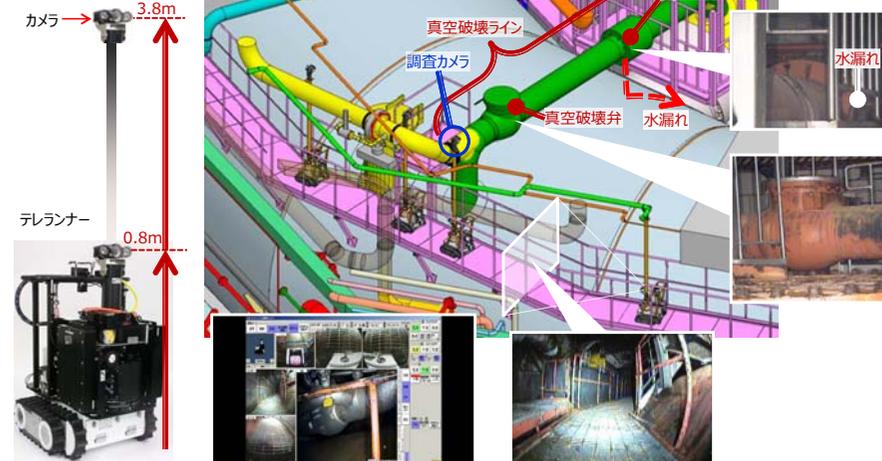
IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

作業目的で分類

S/C上部調査ロボット

サブプレッションチェンバ(S/C)上方の真空破壊弁配管などの漏えいを調査するため、カメラ位置を上下伸縮可能なロボットを開発



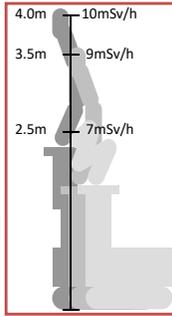
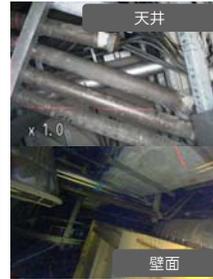
IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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/>

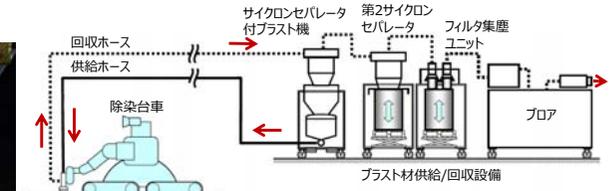
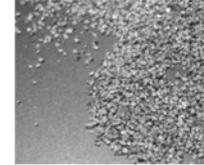
除染ロボット

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

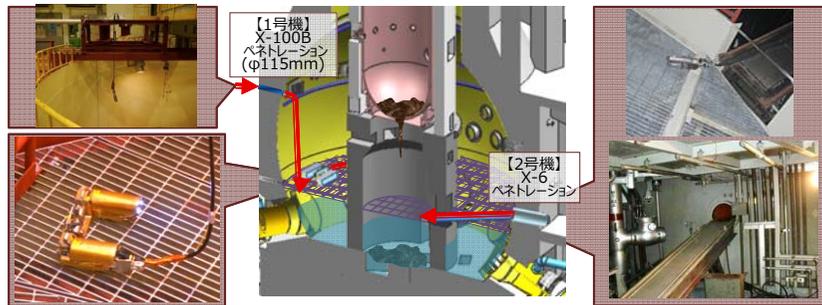
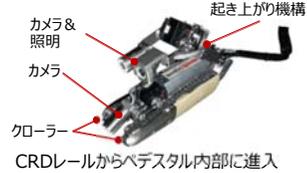


PCV内部調査用ロボット

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)



本日の構成

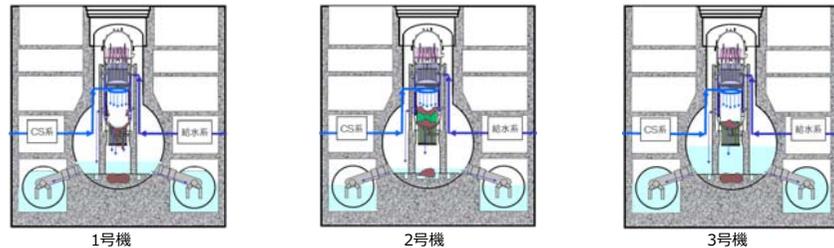
- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
 - 福島第一で使用されたロボット
 - PCV・RPV内部での調査&作業システム
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

原子炉格納容器 (PCV) 内部調査

PCV内部調査の目的

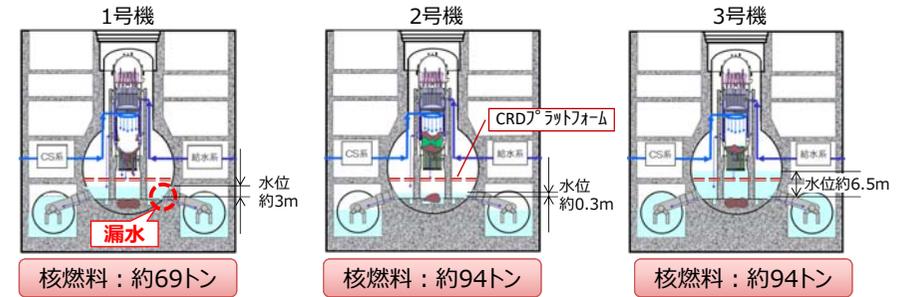
- 燃料デブリ取り出しに向けて、原子炉格納容器内の燃料デブリの位置、状況を調査する
- 圧力容器を支持するベDESTAL等の状況を確認する

調査および調査装置の開発方針



- | 1号機 | 2号機 | 3号機 |
|---|--|-----|
| <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 | <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ベDESTALへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測 | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリのベDESTAL外側までの拡散の可能性から、ベDESTAL外側の調査を優先 | <ul style="list-style-type: none"> ・ベDESTAL外側までの拡散の可能性低く、ベDESTAL内側の調査を優先 ・3号機はPCV内の水位高く、1・2号機で使用予定のベネが水没の可能性あり、別方式の検討要 | |

PCV内部調査方針



1号機		2号機		3号機	
核燃料：約69トン		核燃料：約94トン		核燃料：約94トン	
ベDESTAL外側調査を優先(デブリのシェルへの到達状況)		ベDESTAL内側調査を優先(プラットフォームの損傷状態)		ベDESTAL内側調査を優先(プラットフォームの損傷状態)	
炉内	15トン	解析等	195トン	炉内	21トン
炉外	264トン	ミュオン調査	0~30トン	炉外	343トン
作業員アクセス口 デブリのイメージ		損傷なし 一部破損 大規模破損			

PCV内部のロボットによる調査

ベDESTAL外側の調査 (1号機)

- 形状変化型ロボット (B2調査)



(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

ベ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)



ベDESTAL内側の調査 (3号機)



水中遊泳型ロボット

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 ベDESTAL外
 - 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 ベDESTAL内
 - CRDレールを経由して直接ベDESTAL開口部へ侵入
- 3号機格納容器内 ベDESTAL内
 - 水位が高いため、遊泳ロボットを採用
 - 着水後、潜水によりベDESTAL入口から内部へ

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

PCV内部調査の特性(1)

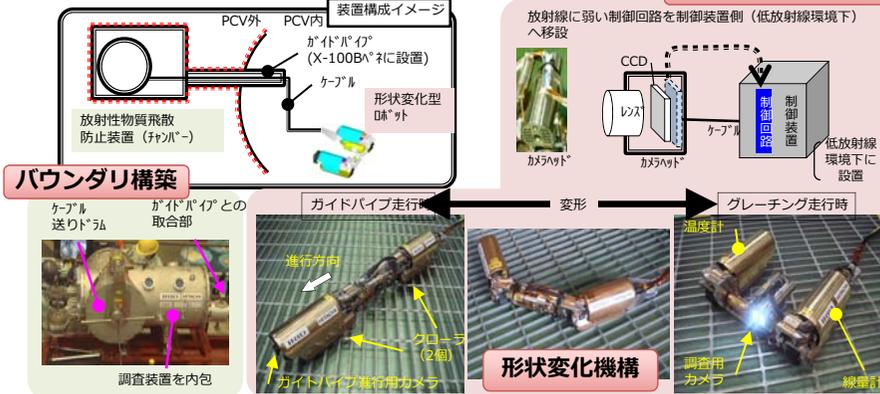
【1号機】
X-100B
ペネトレーション
(φ115mm)

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

29

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

PCV内部調査：

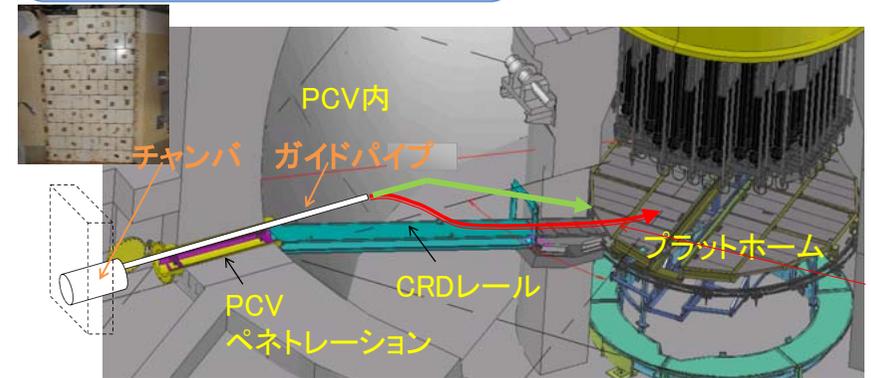
PCV内部調査の特性(2)ペDESTAL内部調査

【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

30

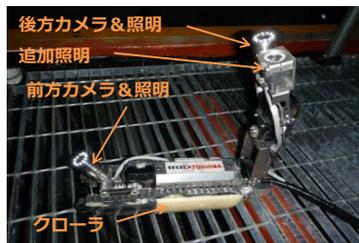
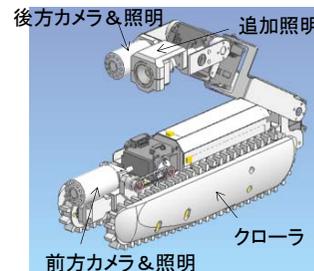
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

PCV内部調査：

クローラ型遠隔操作ロボット(サソリ型)

【2号機】
X-6
ペネトレーション

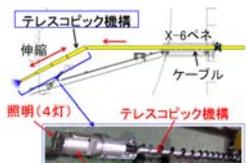
- ・ 内径φ100mmのガイドパイプを通過。
- ・ 調査時は後方カメラを起し、後方カメラによる高い空間認知性 (+ 起き上がり) を実現。
- ・ 集光度の高い追加照明により、霧滴中における視認性を向上。
- ・ 耐放射線性：1000Gy以上 (積算)
- ・ 気密性のあるチャンバから装置を送り出すことで作業中の放射性物質の飛散を防止。



モックアップでのプラットホーム上調査



堆積物除去装置



ペDESTAL内事前確認装置

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

IRID

31

©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

IRID ※ 東京電力HD web

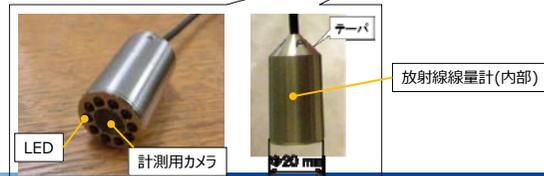
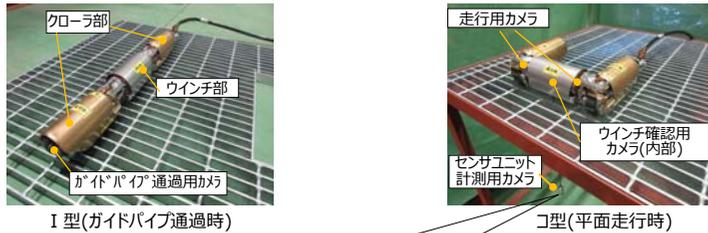
32

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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
スベック	カメラ×5、放射線線量計×1
耐放射線性	約1000Sv以上



1号機ペDESTAL外調査 (B2調査)

1号機 B2
PMORPH

- 【調査目的】
- ① 燃料デブリの広がり状況の確認
 - ② 燃料デブリのPCVシエルへの到達有無の確認



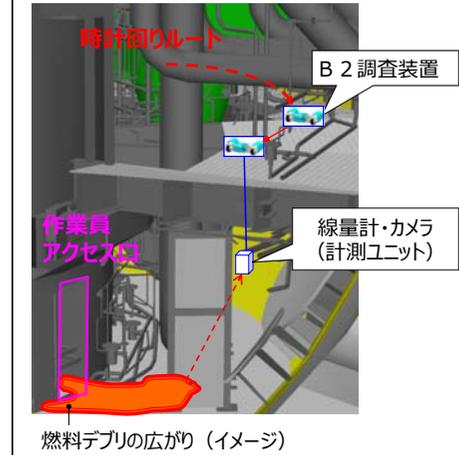
【実施時期】
2017年3月

- 【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

組合せ評価

①、②を判定

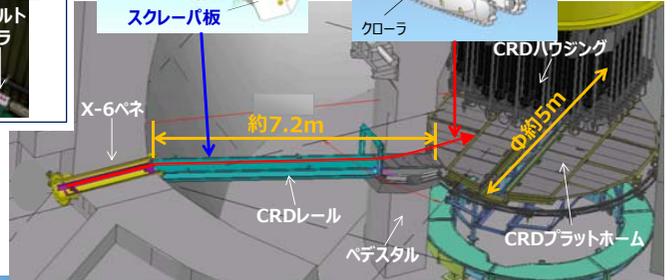
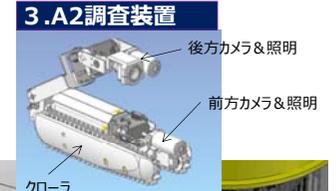
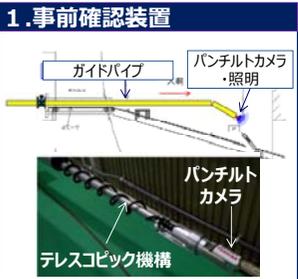
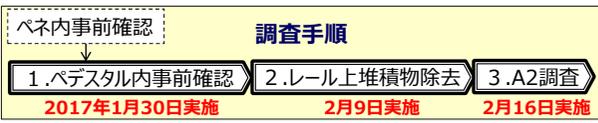
【調査工法】
B2 調査装置が1階グレーチング上を走行。線量計・カメラを降下させる。



2号機ペDESTAL内上部調査 (A2調査)

2号機 A2
サンリ

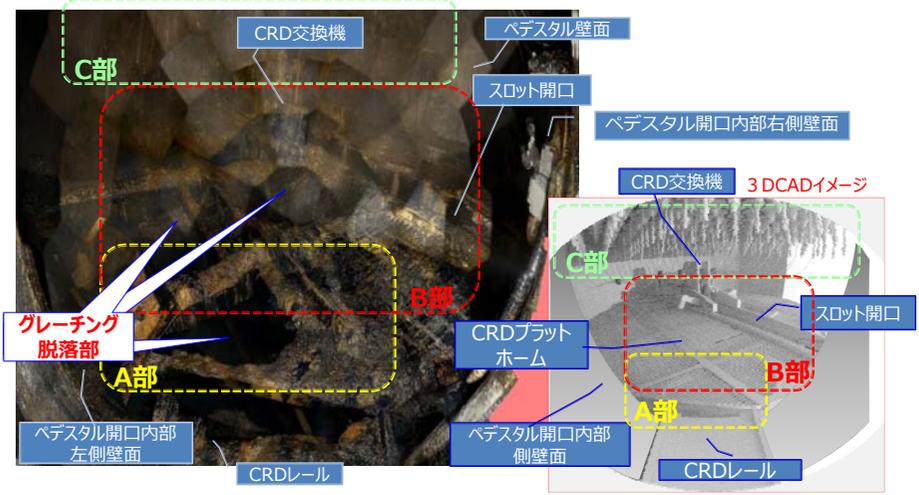
- 【調査方法】
- カメラによる撮影
- 【実施時期】
- 2017年1～2月



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プレー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。

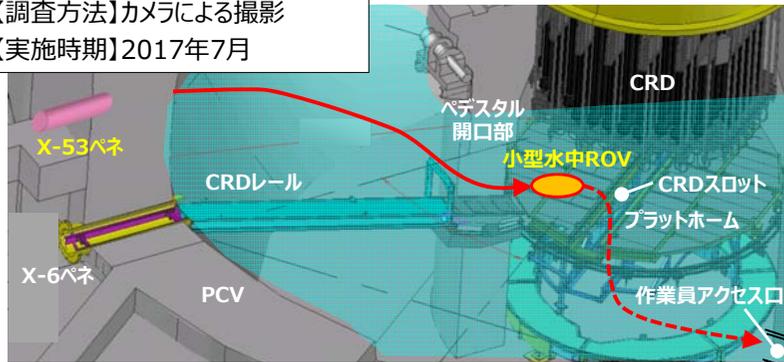
※上記画像は、東電HDにて鮮明化した画像をもとに画質改善したものを全全球化

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) からアクセスしベDESTAL内に侵入。プラットホーム、CRD下部の損傷状況を確認する。
- ② ベ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、ベDESTAL底部デブリの堆積状況や作業員アクセス口からベ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)



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



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



本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(二重調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

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

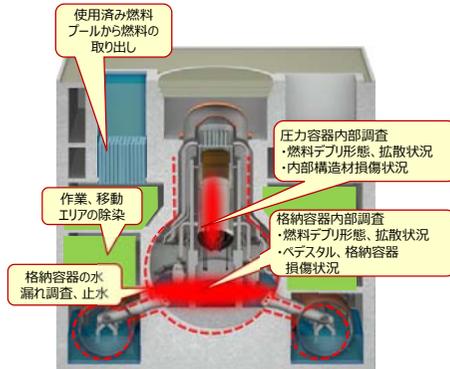
<廃炉措置>

- ・ 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

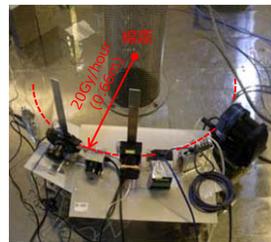
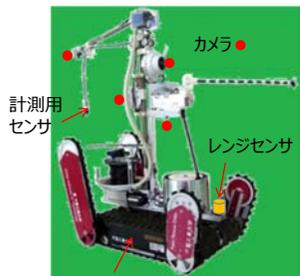
- (損傷) 環境に応じた走破性
- 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部カメラ、ランドマークの活用
- 徹底した訓練、実機モックアップ試験

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性を把握し、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 (エネルギーの連続範囲で設定)

◆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://fepec-dp.jp/>

原子炉建屋・作業エリアの除染

除染技術開発の課題

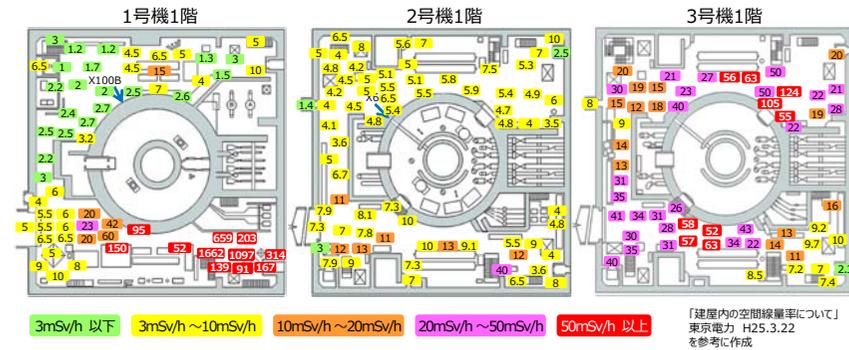
従事者の線量限度：1年間で50mSv、5年間で100mSv
作業エリア：3 mSv/h、アクセスルート：5 mSv/h

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

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

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

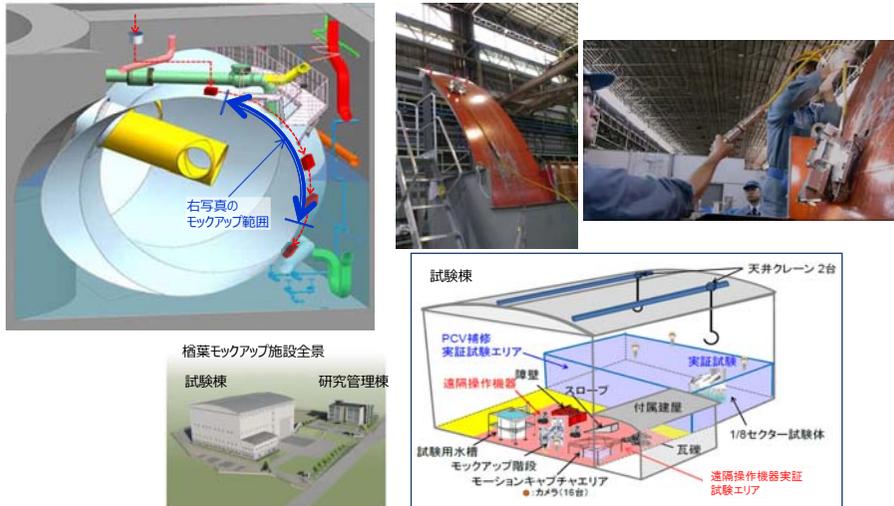
- ・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペダスタルへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測
- ・ペダスタル外側までの拡散の可能性低く、ペダスタル内側の調査を優先

3号機

- ・3号機はPCV内の水位高く、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

燃料デブリ取り出し (複数案) 燃料デブリ取り出し 2021年～

モックアップ試験



福島第一原子力発電所廃止措置のための研究開発拠点整備と将来構想 2014年2月17日 日本原子力研究開発機構

本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

ニーズの洗い出し

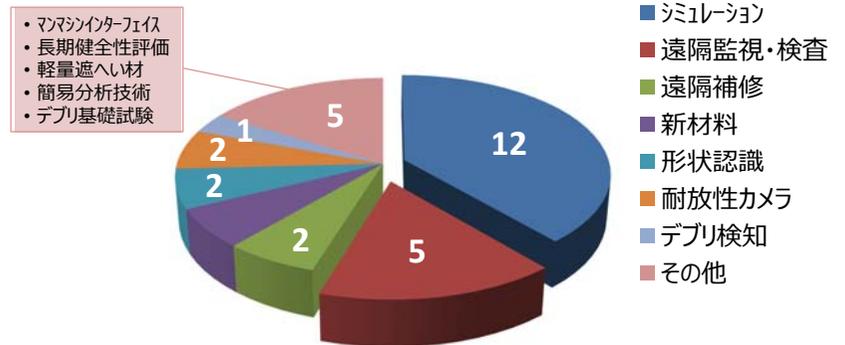
- PJ固有の課題のうち、自分たちだけでは解決が難しく、**大学等研究機関の力を借りたい**、研究開発ニーズ（基礎・基盤技術）を集約。

31件のニーズ※

※：2016.4時点

関連するプロジェクト	ニーズ件数
使用済燃料プールからの燃料取出し技術	2
除染・線量低減技術	1
PCV補修・止水技術	11
内部調査・分析・評価技術	8
燃料デブリ取り出し技術	7
廃棄物処理・処分技術	2

31件ニーズの分類



遠隔除染技術の開発

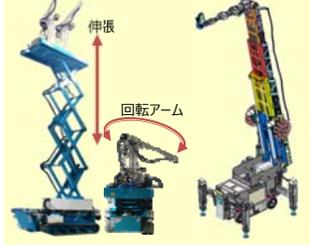
遠隔除染技術の開発方針

- 表面の堆積物を回収あるいは除去 → 吸引
- 表面の固着物を除去 → 高圧水噴射
- 塗膜あるいはコンクリートに浸透した汚染を除去 → ドライアイス・ブラスト
- コンクリートに浸透した汚染をコンクリートごと除去

低所(床、下部壁面)用



高所用ブラスト



上部階用



●操作性

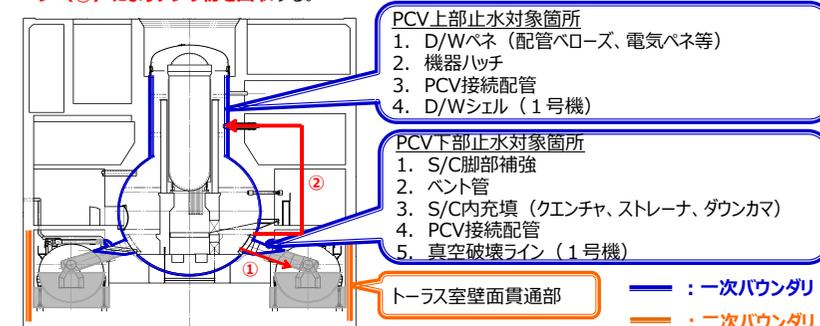
課題 (ニーズ)	分類
3. 遠隔運転技術の操作性を向上させる (オペレーター支援、オペミス回避等)	マンマシン・ユーフェイス技術



格納容器補修・止水技術の開発

補修・止水の目的

- **【目的1】**一次バウンダリのPCVに水を張るため以下に示す止水対象箇所の止水工法を開発する。
- **【目的2】**原子炉建屋 (二次バウンダリ) 地下階のトラス室壁面貫通部から隣接建屋へ漏えいを防止するため、トラス室壁面貫通部の止水工法を開発する。
- **【目的3】**燃料デブリ切削時に発生するデブリ粉 (α核種) を含んだ高濃度汚染水を極力一次バウンダリ (PCV) 内に閉じ込めるため、PCV→トラス室漏えい量 (①) の低減するとともに、PCV小循環ループ (②) によりデブリ粉を回収する。



ベント管止水

止水材

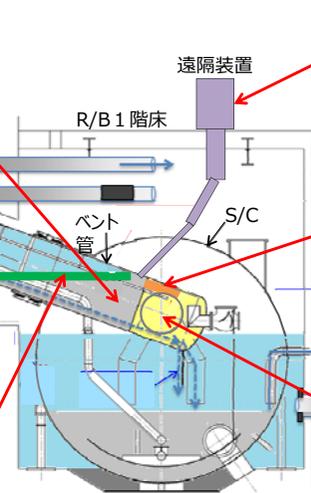
閉止補助材設置後に止水材を投入、S/Cを冠水保有範囲から切り離す。

課題 (ニーズ)	分類
4. 遠隔施工による作業完了確認 (漏えい有無)	遠隔監視技術
5. 経年劣化等による漏えい検知	遠隔監視技術
9. 止水の長期健全性 (放射線、水質、錆、地震等) の評価手法	長期健全性評価技術
20. 追従性の高い止水材の選定 [今期国プロ]	材料

補修材

ベント管膨張への追従・止水劣化対策に用いる補修材が必要。

課題 (ニーズ)	分類
20. 漏えい量が増加した時の追加補修材の選定、補修方法 [今期国プロ]	材料、補修技術



遠隔装置 (マニピュレータ)

S/C・ベント管への穴あけ、干渉物除去等。

課題 (ニーズ)	分類
8. 穿孔作業前の水素濃度の遠隔非破壊測定	残留水素非破壊検知技術

副閉止補助材

閉止補助材設置後に残存する隙間を目詰め、流水経路を縮小する。

課題 (ニーズ)	分類
20. 目詰り性・追従性の高い副閉止補助材の選定 [今期国プロ]	材料

閉止補助材

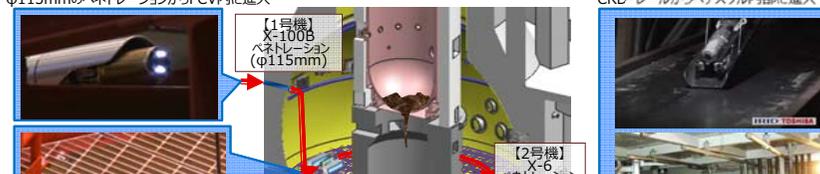
止水材投入前に水みち (隙間) を縮小するための仮堰を構築する。

課題 (ニーズ)	分類
11. 閉止補助材の挙動を解析評価して有効性を事前に確認	シミュレーション技術

格納容器(PCV)内部調査

PCV内部調査ロボットの開発

- 約φ100mmのガイドパイプを通るスリム形状と、PCV内での安定した走行能力の両立
- 過酷環境 (高放射線量、暗闇、蒸気雰囲気等) における運用と、「映像」「温度」「線量率」情報の収集



●燃料デブリ視認

課題 (ニーズ)	分類
15. 滞留水中 (濁水) での視認性向上。	形状認識技術 (濁水中)

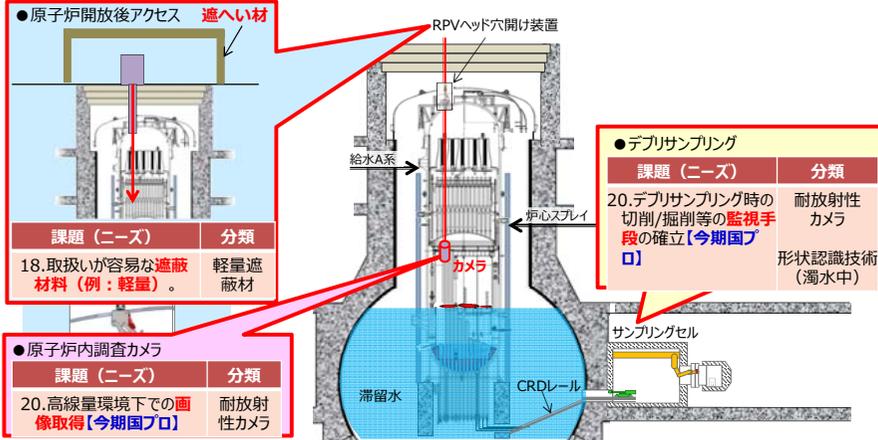
●燃料デブリ検知

課題 (ニーズ)	分類
16. 高γ線下での燃料デブリ検知。	デブリ検知技術

原子炉圧力容器(RPV)内部調査

RPV内部調査の目的

RPV内部の残存燃料や燃料デブリの位置、炉内構造物の損傷状態、RPV内の温度、線量等を取得する。



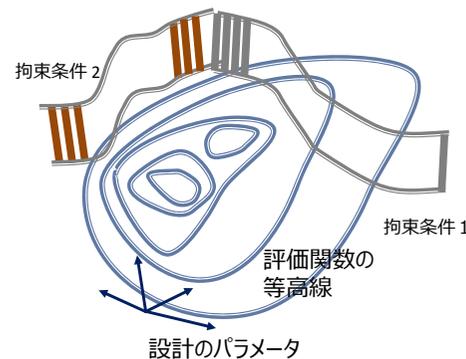
本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

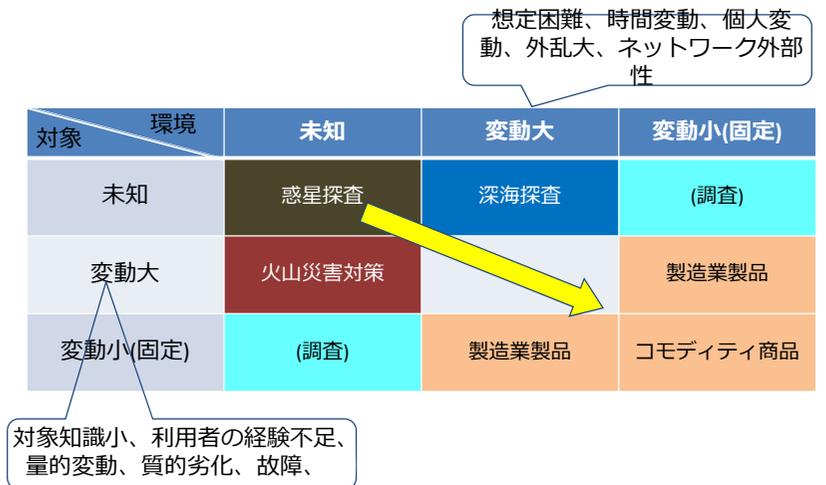
工学的な設計

■ 工学的な設計 = 最適設計

- 設計対象の仕様の枠組みを決める = Domainを定める
- 設計目標を定める = 評価関数を定める
- その他の拘束条件を抽出する
- 最適化を図る



仕様が変動する設計



価値創成モデル by 上田完次

■ クラスⅠ：価値創成モデル(提供型価値)

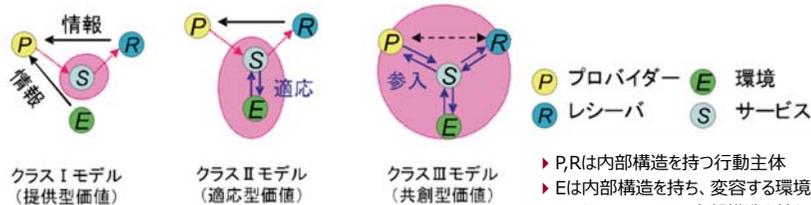
- ▶ 製品やサービスの主体(プロバイダ)と対象(レシーバ)の価値が独立に明示化でき、かつ、環境が事前に確定できる。モデルは閉じたシステムとして完全に記述が可能。最適解探索が課題。

■ クラスⅡ：価値創成モデル(適応型価値)

- ▶ 製品やサービスの主体と対象の価値は明示化できるが、環境が変動し、予測困難である。モデルは環境に開いたシステム。適応的戦略が課題。

■ クラスⅢ：価値創成モデル(共創型価値)

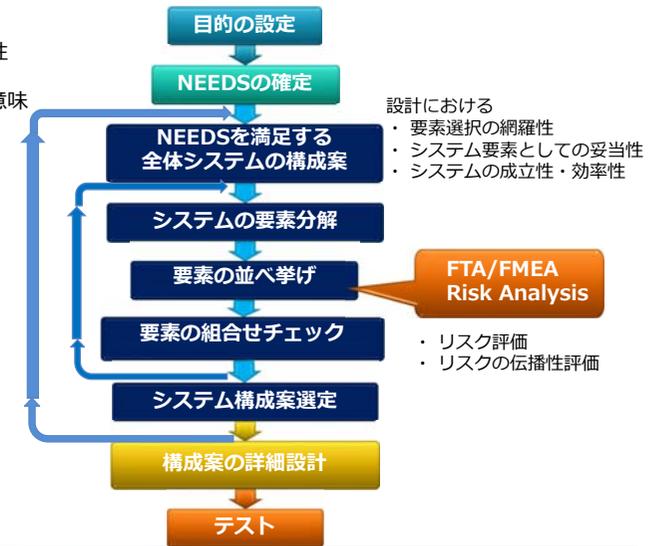
- ▶ 製品やサービスの主体の価値と対象の価値が独立に確定できない。両者が相互作用し分離できない。主体が参入するシステム。共創価値が課題。



システム開発

未踏分野

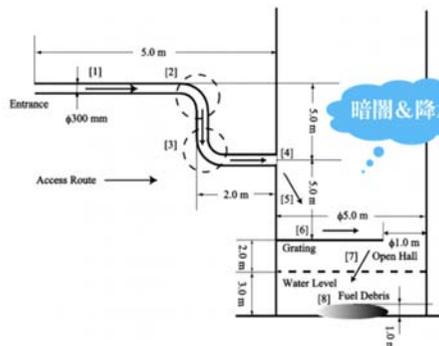
- ・ 想定するニーズの網羅性
- ・ ニーズの重要度
- ・ 得られる成果(情報)の意味
- ・ 代替案の検討
- ・ 代替案の公開
- ・ 開発期間の制限
- ・ 資金の制限
- ・ 合意形成
- ・ 設計の意図開示



廃炉のためのロボット技術コンペ(1)

■ 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] PCV1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] 地下階からペDESTAL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

廃炉のためのロボット技術コンペ(2)

<最優秀賞>

- ミミズ・アメンボ等の生物規範ロボットの協力作業による廃炉システム
山田 泰之, 中村 太郎 (中央大学)

<優秀賞>

- デブリサンプリングのための複数ロボットシステム
内村 裕 (芝浦工業大学), 小林 泰生 (芝浦工業大学), 小宮 幸大 (芝浦工業大学), 法月 広夢 (芝浦工業大学)
- Twin-tube構造による柔軟レール仮設式流体駆動ロボット
塚越 秀行 (東京工業大学)

<奨励賞>

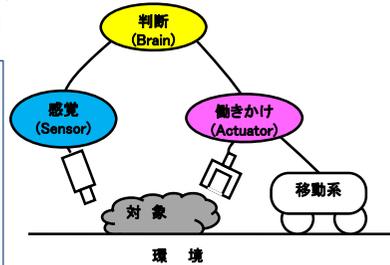
- ワイヤロープ吊り下げ式デブリサンプル採取装置
沖野 晃久 (オキノ工業株式会社), 武田 和久 (オキノ工業株式会社)
- エンドエクスプローラ
下山 未来 (芝浦工業大学), 松日 稔 信人 (芝浦工業大学)
- ヘビ型ロボットによる狭隘空間、水中の移動および弾丸燃料デブリ粉砕吸引回収
植田 聖 (芝浦工業大学), 澤野 凪佐 (芝浦工業大学)

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

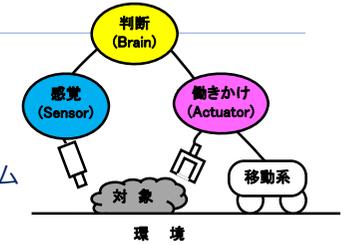
- **Sensor**: 電子機器の耐放射性
- **Brain**: 人による判断
 - 作業員訓練
 - 判断基準の構築
 - システムによるサポート
- **Actuator**: 作業依存で多数の機器
 - 手先繰返し位置決め精度、固有振動数
 - 反力の受け、手先交換
- **Mobility**: 大型(40m程度)、水中&空中
 - 高温多湿、塵埃環境
 - 保守のための出入り



環境の制御
移動能力構築
作業能力構築
保守方法の確立

ロボットの設計(1) ロボットの制御構造

- Open-loop systems 開ループシステム
- Closed-loop systems 閉ループシステム
=Feedback systems フィードバックシステム



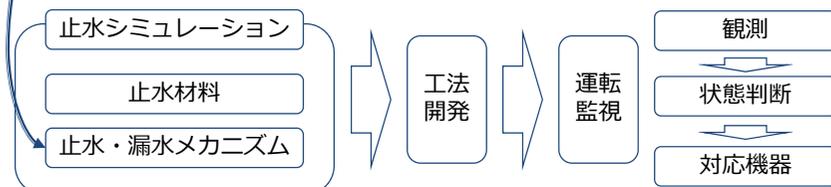
■ 作業：One-trial/Few trials/Repetitive trials

- ➔ 作業のモデル化 = 対象物のモデル、環境のモデル
 - 壊れたロッド
 - セメント
 - 気流、水流、温度
 - PCV内部、構造体
- 働きかけにより、変化するダイナミックなモデル
- ➔ 測定結果とモデル計算結果との突き合わせによる内部状態の高精度推定
- 止水：一回試行、開ループ的
- デブリ取出し：閉ループ、できれば実時間で

格納容器補修・止水システムの開発

■ なぜ補修・止水は難しいのか

1. 保守作業：症状が多様、その原因も多様、対応策も多様
2. 想定外故障：周辺環境の準備が不十分
3. 悪環境：高放射線環境、センサ運用困難
4. 止水：非可逆反応、成功の保証低い
5. 漏水：検知困難、時間遅れあり

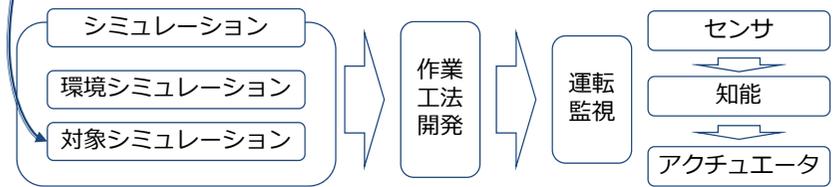


➔ 多くの補修作業共通、最後は実時間でのロボット技術

デブリ取出し用ロボットシステムの開発

■ 何を解析し、条件とするか

1. 作業解析&計画：対象物検知、地図作成、作業計画
機械作業、作業員による遠隔操作、収納作業
2. 保守：リスクアナリシス、故障検知、保守作業
3. 環境対策：汚染物質閉じ込め、臨界管理、作業員被曝対策
4. 対象の特性 (対象、作業・工法)



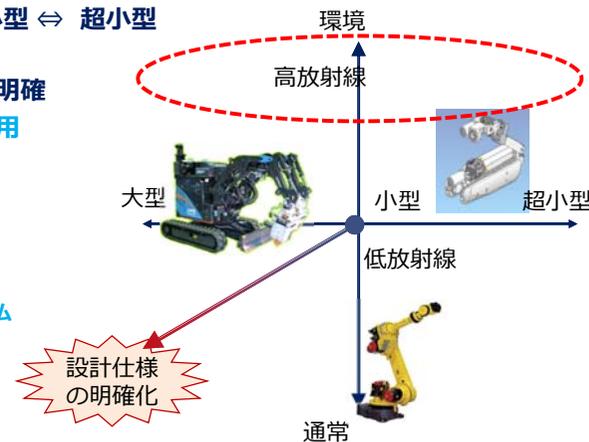
➔ ロボットは全体の一部分

本日の構成

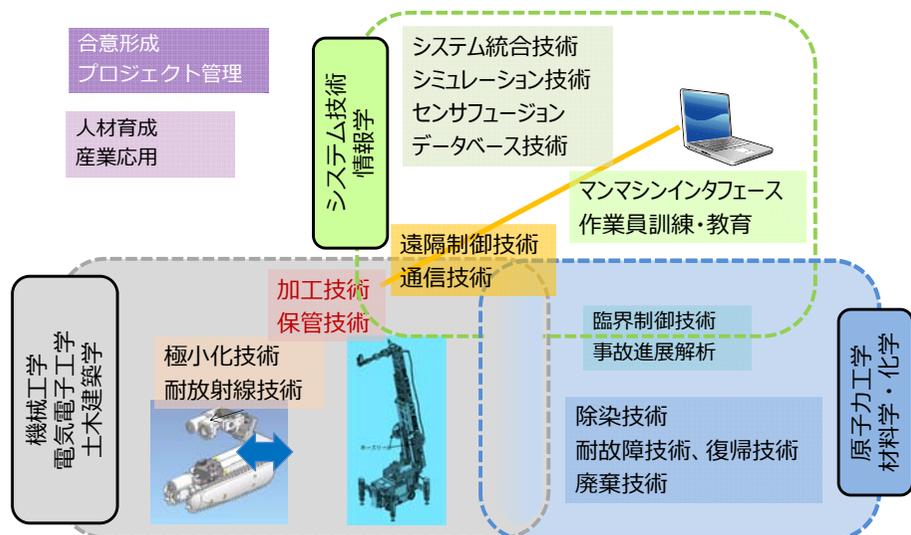
- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
 - 福島第一で使用されたロボット
 - PCV・RPV内部での調査&作業システム
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

IRIDはいかなる機器を開発しているのか

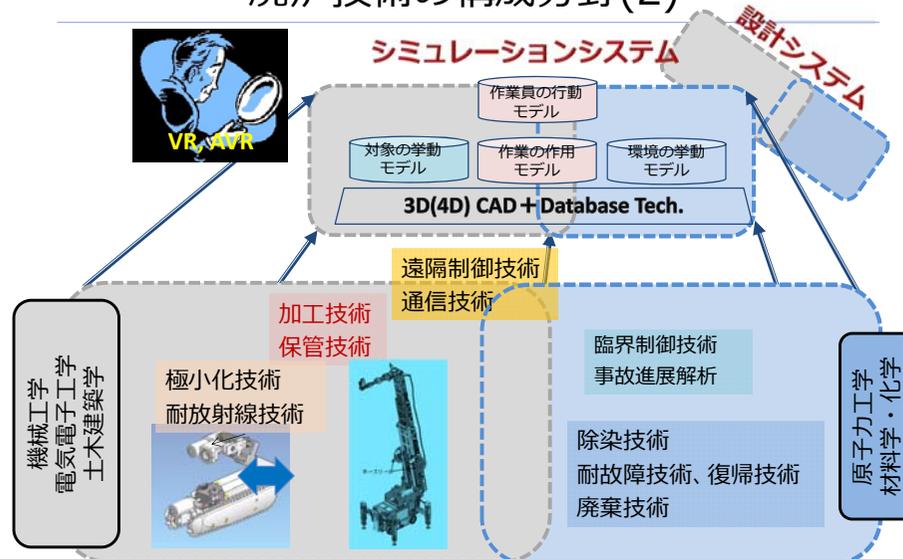
- 環境： 通常 ⇔ 低放射線 ⇔ 高放射線
- 制御： 遠隔 ⇔ 直接
- 形態： 大型 ⇔ 小型 ⇔ 超小型
- 仕様： **不明確** ⇔ **明確**
- 目的： **特殊** ⇔ **汎用**
- **保守： 必要**
 - 作業員被爆
⇒ ロボットによる保守
 - 大型機器
⇒ 共通プラットフォーム



廃炉技術の構成分野

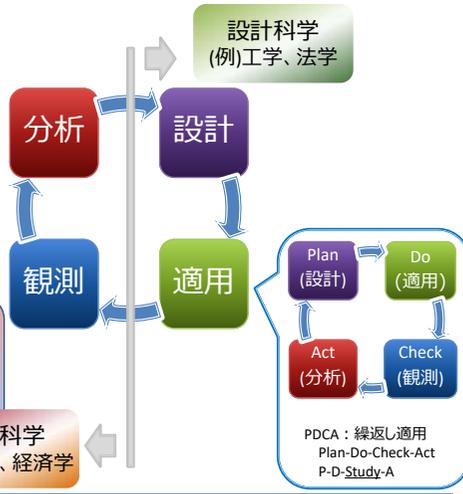


廃炉技術の構成分野(2)



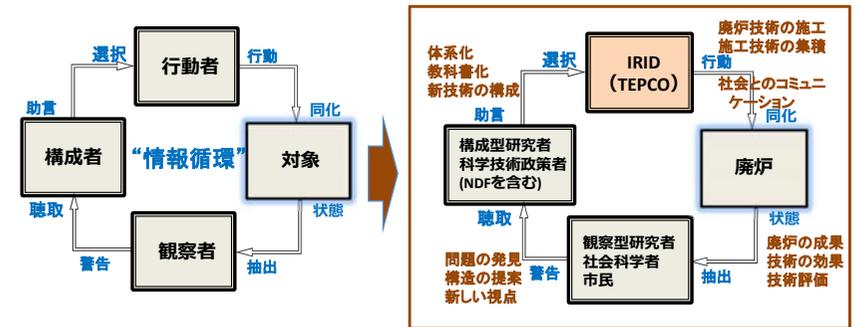
認識科学と設計科学

- 設計とは選択の連鎖である。
- 選択の理由付けとして理論による分析結果を使用する
- どの理論を採用するかは設計者の選択にかかっている



- 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： $\alpha = F/m$ を使って軌道計算
 - 適用：砲弾の着地点制御

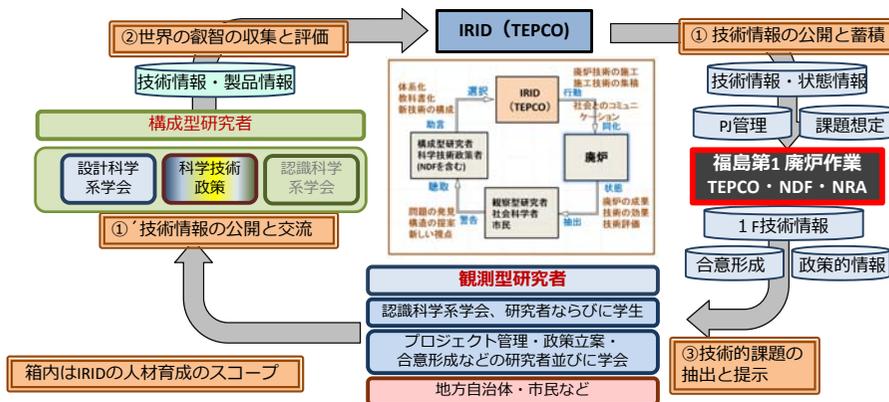
ある対象が持続的進化をするための基本構造



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

廃炉措置が持続的進化をするための基本構造

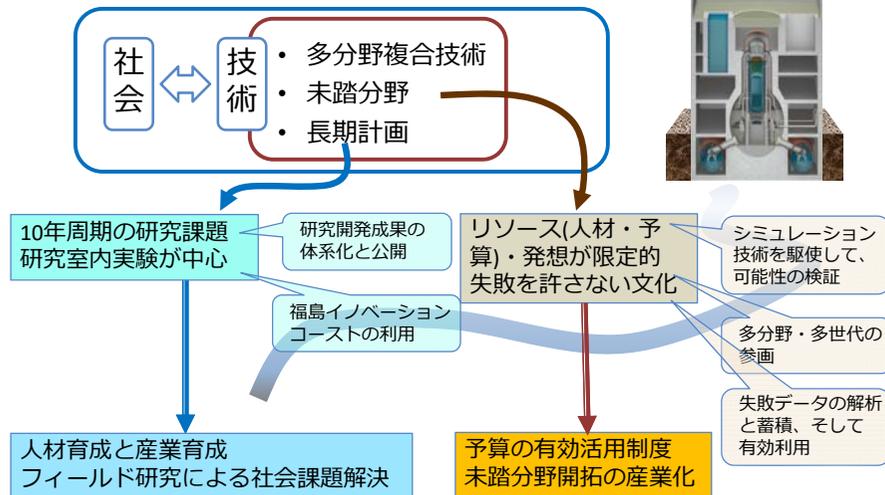
IRIDの役割



本日の構成

- 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
- 廃炉用ロボットの課題
 - 高線量率環境
 - 研究開発課題例(ニーズ調査)
- 設計とは
 - ロボットの設計
 - IRIDの役割
- 君に何を期待するか

廃炉措置の研究開発



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

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
ご支援をお願いします。

新井 民夫
tamio-arai@irid.or.jp