

講演会「ロボット技術の成果と課題」

# 福島第一の廃炉とロボット技術

2017年11月13日(月) 14:00～15:30  
@大阪大学 中之島センター 507

福島第一原子力発電所の廃炉事業は、強い放射線等過酷かつ状況不明の環境内で作業するロボット開発を必要とする。今後30年以上を要する廃炉事業の現状を理解し、廃炉技術と遠隔操作技術との関係から技術開発の課題を考える。

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

主催：精密工学会 生産・経営知識学専門委員会  
大阪大学 創・蓄・省エネデバイス生産技術共同研究講座  
システム制御情報学会 スマート・フレキシブル・オートメーション研究分科会  
精密工学会 総合生産システム専門委員会

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。

## 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 人工物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—丸穴挿入作業
  - クレーンとロボットの協調制御
  - 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

- 国際廃炉研究開発機構(IRID)の紹介
- 廃炉とは？
- 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内部での調査用ロボット
- デブリ取出し作業用ロボット

### ■ 廃炉用ロボットの課題

- 高線量率環境での作業
- 設計上の課題

### ■ 研究者に何を期待するか



Ver.2017.06  
6minまで

## 東京電力による写真・動画データ

### ■ <http://www.tepco.co.jp/decommision/index-j.html>

- 「福島第一原子力発電所は、今～あの日から、明日へ～ (ver.2017.6) [http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video\\_uid=qz11vg7v&catid=61709](http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uid=qz11vg7v&catid=61709)
- 暗闇の水中で見えたもの—福島第一原子力発電所3号機原子炉格納容器内部調査— [http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video\\_uid=i607fvh9&catid=61709](http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uid=i607fvh9&catid=61709)



# 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 構成員: 943名** (2017年10月1日現在、役員を除く)  
**・独立行政法人: 2 法人**  
 (独) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)、(独) 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

年度	2013年度 (8月~)	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度 (計画)
事業費	約45億円	約120億円	約158億円	約141億円	約178億円

IRID

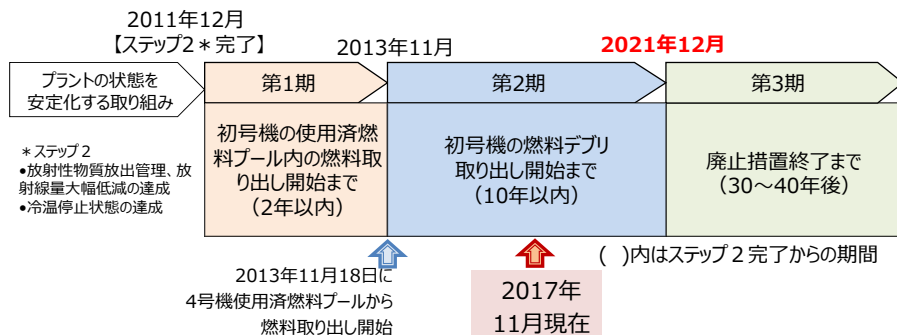
# 3. IRIDの事業内容

## ▶ IRID事業の3本柱



IRID

# 4. 中長期ロードマップの概要



- 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 上半期**
- ・初号機の燃料デブリ取り出しの開始 **2021年内**

IRID

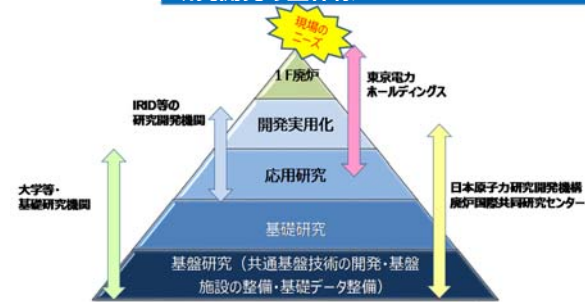
# 5. IRIDの研究開発スコープ

## 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

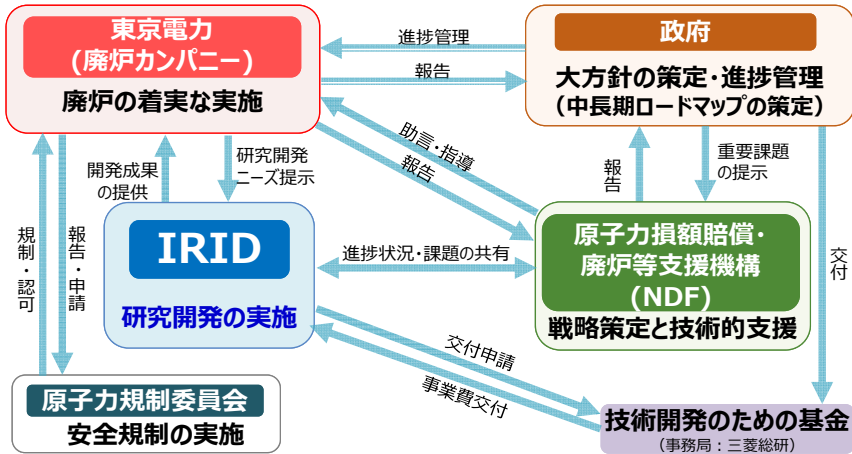


出所: NDF 技術戦略プラン-2017

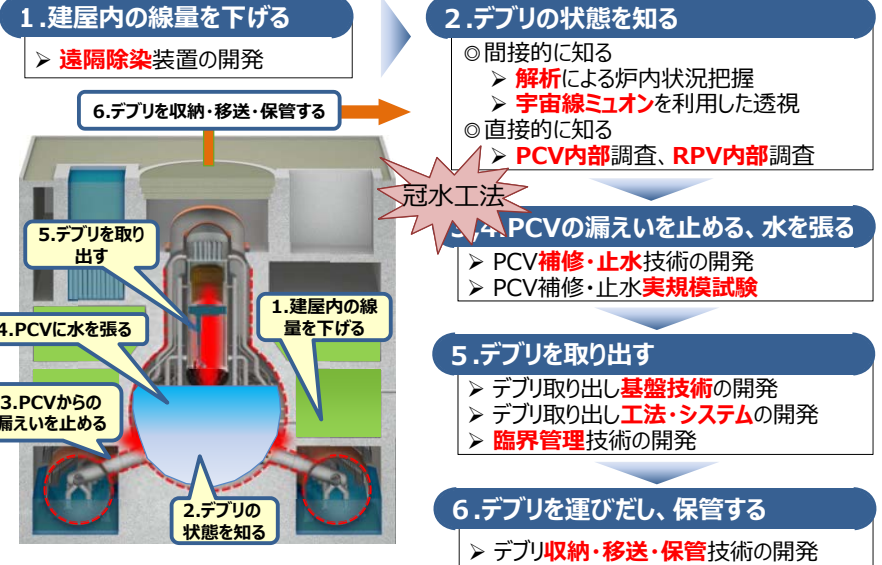
IRID

## 5. IRIDの役割

廃炉技術の基盤強化を視野に、当面の緊急課題にある  
福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取り組みに注力



## 6. IRIDの研究開発プロジェクトとその目的



## 7. IRIDの研究開発プロジェクト



## 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

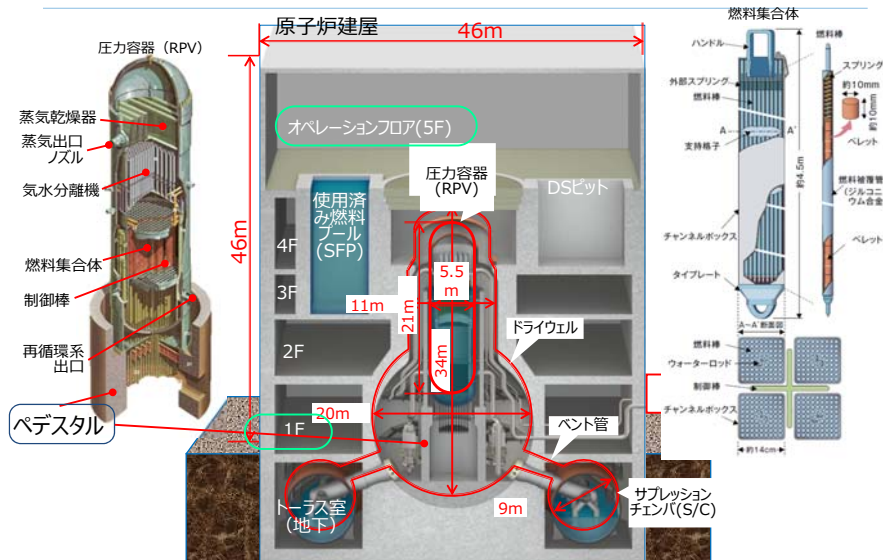
- 社会
- ・ アクセスできる空間や使えるリソースの制約
  - ・ 研究開発は国の仕事
  - ・ 社会的課題としての廃炉

- 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

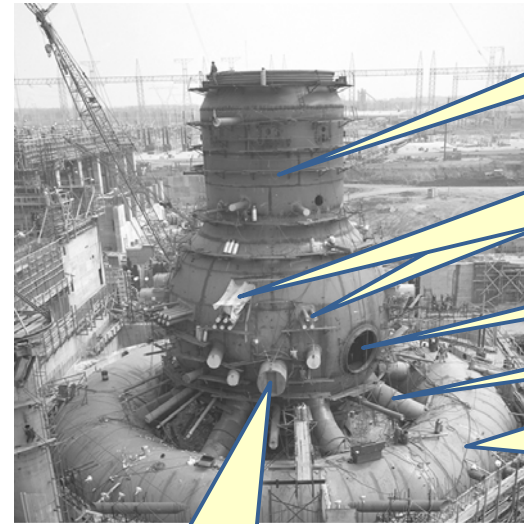


- 未踏分野：開発の立案と変更
- 長期計画：人材育成、産業技術化

## 原子力発電所の構造



## PCVの外観 (建設写真)



「ドライウェル (D/W)」: S/Cより上部のPCV

「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

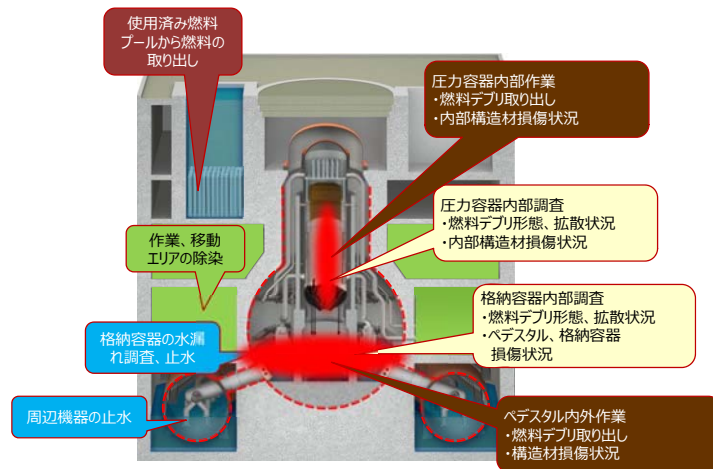
「サブプレッションチェンバ (S/C)」: 事故が起きた時に発生した蒸気をS/C内の水で凝縮し、PCVの圧力の上昇を抑える。

「エアロック」: 人の出入口

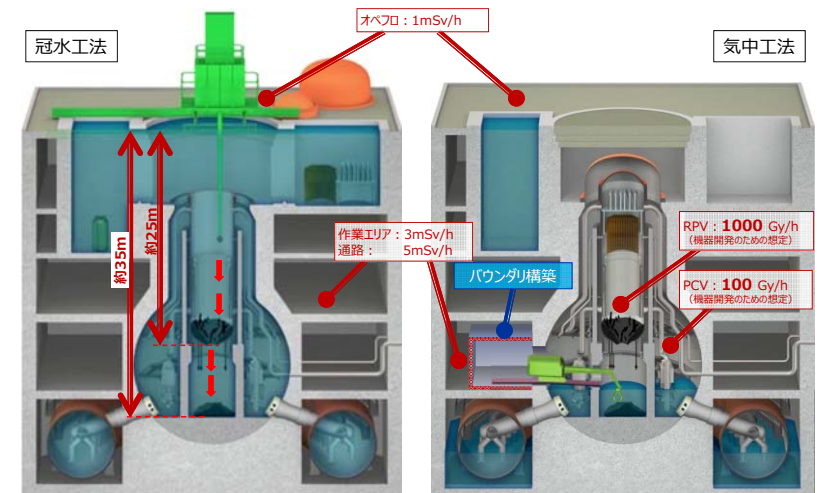
「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep. Tennessee Valley Authority - TVA's 75th Anniversary webpage

## 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



## 燃料デブリ取り出し (複数案) 燃料デブリ取り出し 2021年～



# 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<sup>※1</sup> × 組織荷重係数<sup>※2</sup>



### 放射線荷重係数

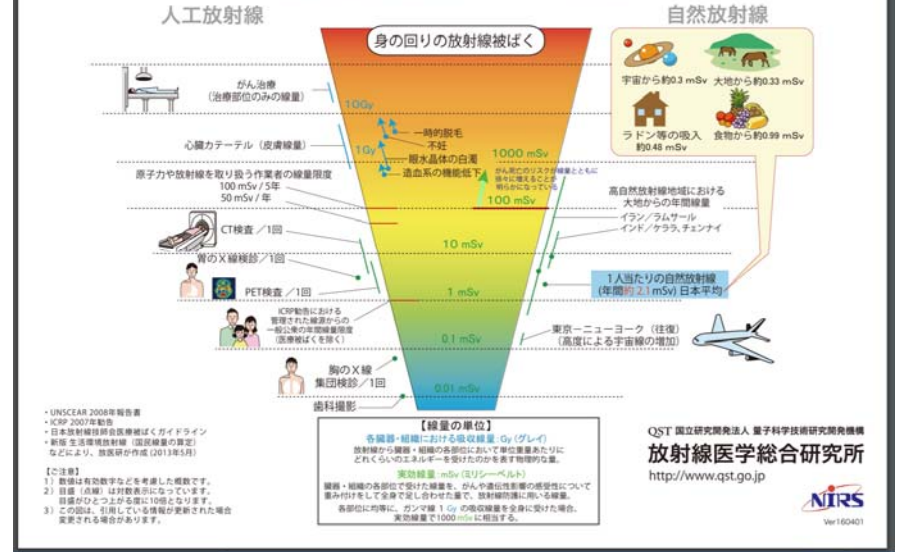
放射線の種類	放射線荷重係数
光子(ガンマ線、エックス線)	1
電子(ベータ線)	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20
中性子線	2.5~20 (エネルギーの連続関数で設定)

### 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	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

# 放射線被ばくの早見図



# 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・狭隙部の調査	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



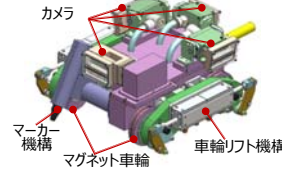
高い運動性能（階段、段差、ガレキ走破性）をもとに、映像撮影、環境モニタリング、軽量物のハンドリングに威力を発揮

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



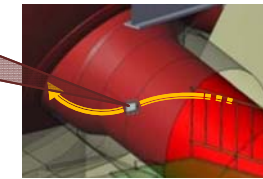
S/C上の亀裂、漏えいを調査



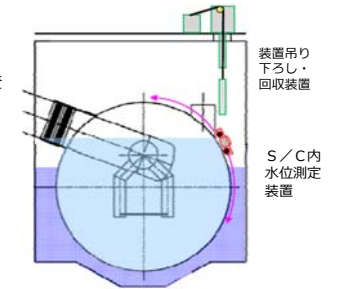
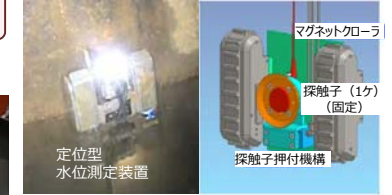
VT-ROV



ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査



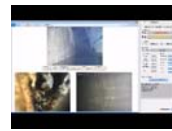
S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



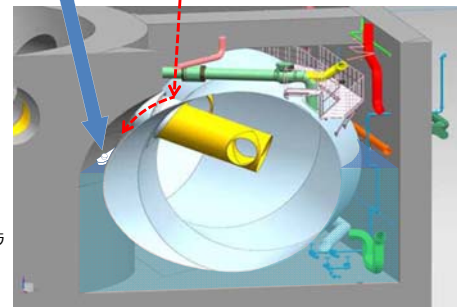
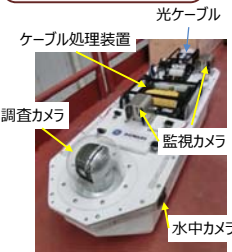
# 水上ボート

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

ケーシに格納し天井孔から滞留水中に着水させる



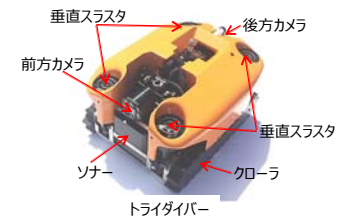
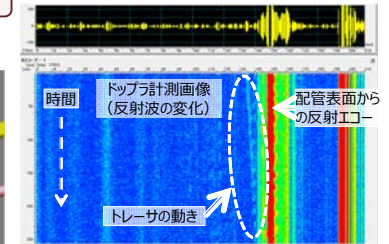
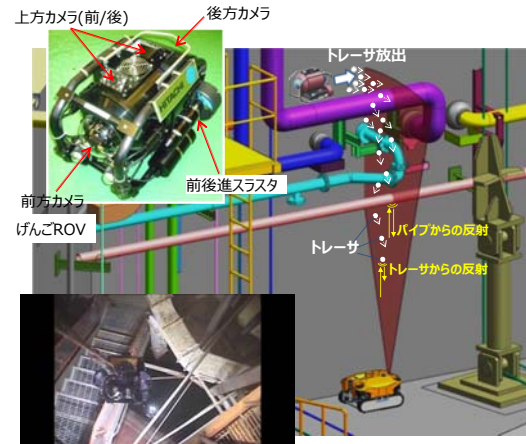
1号機ベント管/サンドクッションドレン漏えい(2013.11.13)



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(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。



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)



推進用スラスタ  
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



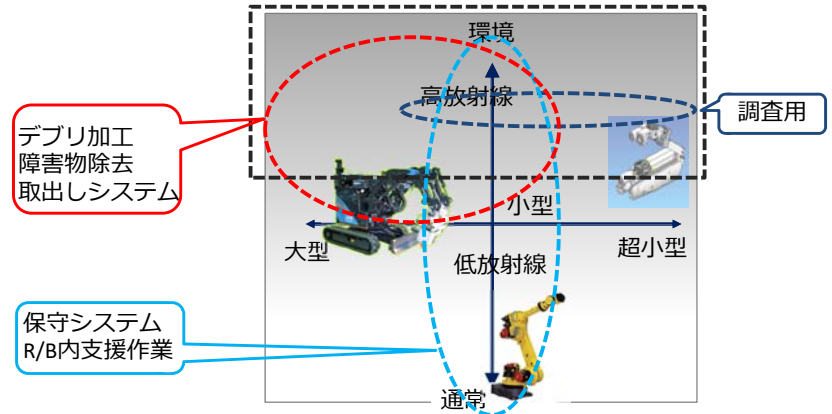
前方カメラ 照明

後方カメラ

照明

### 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

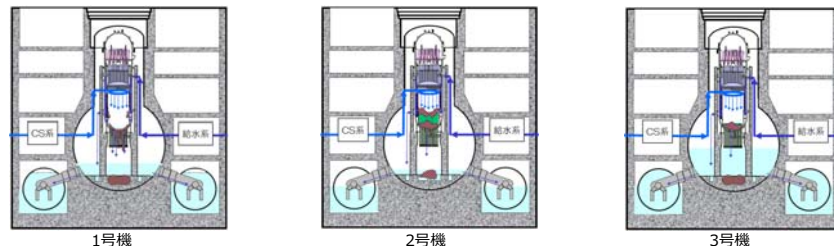


### 原子炉格納容器 (PCV) 内部調査

#### 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



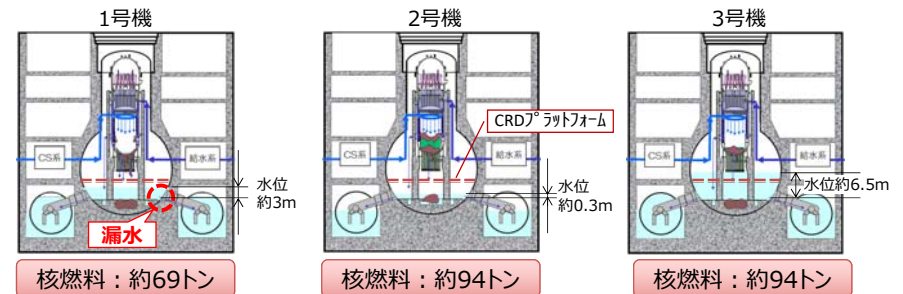
1号機  
・溶融燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下、炉心部には殆ど燃料が存在せず

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DESTALへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測

・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

・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  
・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	
核燃料	約69トン
炉内	15トン
炉外	264トン

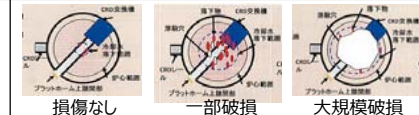
2号機	
核燃料	約94トン
炉内のデブリ量	解析等 195トン
炉外のデブリ量	0~30トン

3号機	
核燃料	約94トン
炉内	21トン
炉外	343トン

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

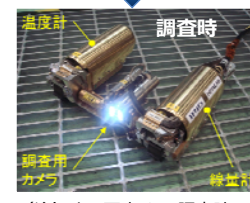
- 燃料デブリの広がりや格納容器内の損傷状況をさぐる
- 既存のペネトレーション(小口径 直径100mm程度)経由、故に超小型ロボットで通り抜け、中で活動可能に
  - 1号機格納容器内 ペDESTAL外
    - グレーチング上を移動し、カメラ付き線量計を水面下に投入して調査
  - 2号機格納容器内 ペDESTAL内
    - CRDレールを経由して直接ペDESTAL開口部へ侵入
  - 3号機格納容器内 ペDESTAL内
    - 水位が高いため、遊泳ロボットを採用
    - 着水後、潜水によりペDESTAL入口から内部へ

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)

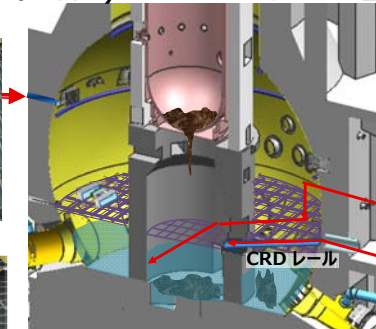
- 形状変化型ロボット (B2調査)
- X-100Bペネ



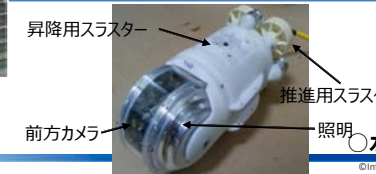
(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

## 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)
- X-6ペネ狭隙部



## ペDESTAL内側の調査 (3号機)



## 水中遊泳型ロボット X-53ペネ

# 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
  - (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

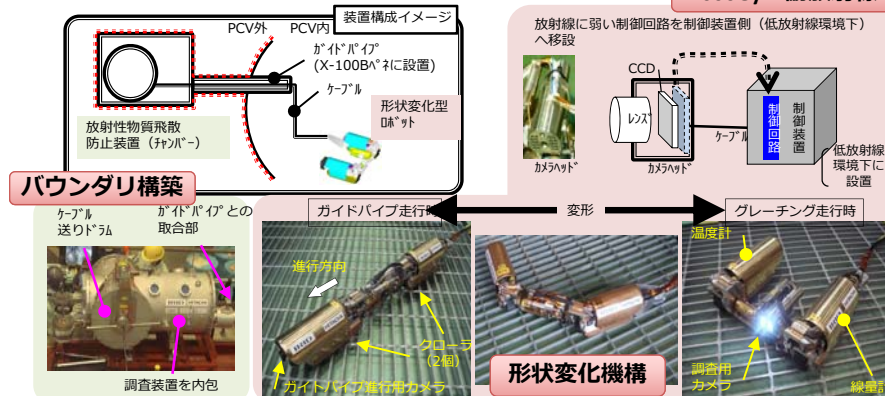
[1号機] X-100B ペネトレーション(φ115mm) PMORPH

[1号機] X-100B ペネトレーション(φ115mm)

- 課題:
- (1) 狭隙空間 (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

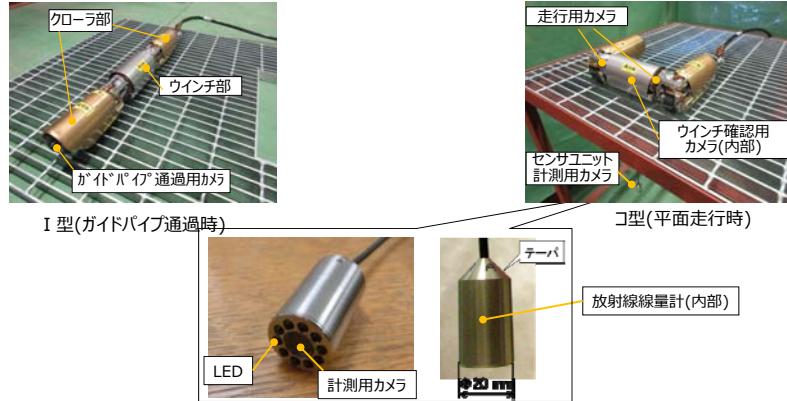
1000Gy 耐放射線





## 1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

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
スペック	カメラ×5、放射線線量計×1
耐放射線性	約1000Sv以上

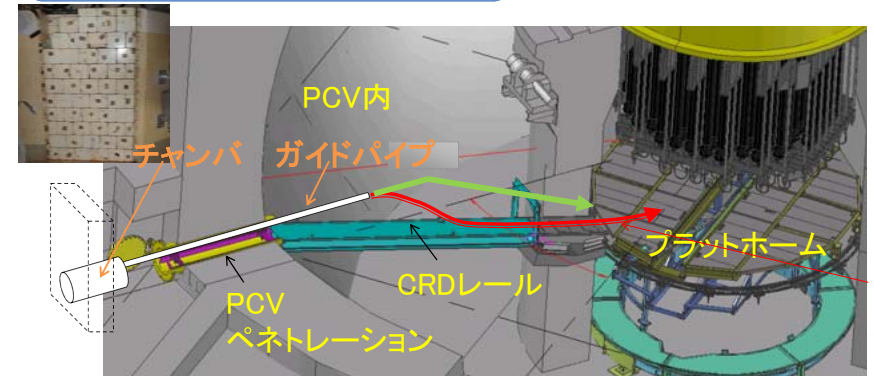


## PCV内部調査の特性(2)：ペDESTAL内部調査

課題：

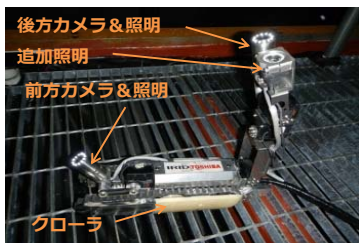
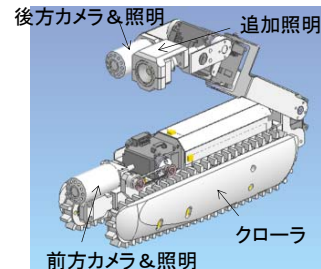
- (1) 狭隘空間 (φ100mm) と安定走行の両立
- (2) 過酷環境 (高線量, 暗闇, 蒸気雰囲気等)
- (3) 放射性物質の飛散防止
- (4) 遮へいブロックの遠隔取外し

「映像」「温度」  
「線量率」情報の収集



## クローラ型遠隔操作ロボット(サソリ型)

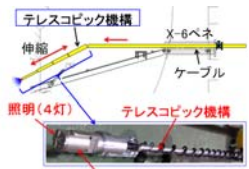
- ・ 内径約φ100mmのガイドパイプを通過。
- ・ 調査時は後方カメラを起し、後方カメラによる高い空間認知性 (+ 起き上がり) を実現。
- ・ 集光度の高い追加照明により、霧滴中における視認性を向上。
- ・ 耐放射線性：1000Gy以上 (積算)
- ・ 気密性のあるチャンバから装置を送り出すことで作業中の放射性物質の飛散を防止。



モックアップでのプラットフォーム上調査



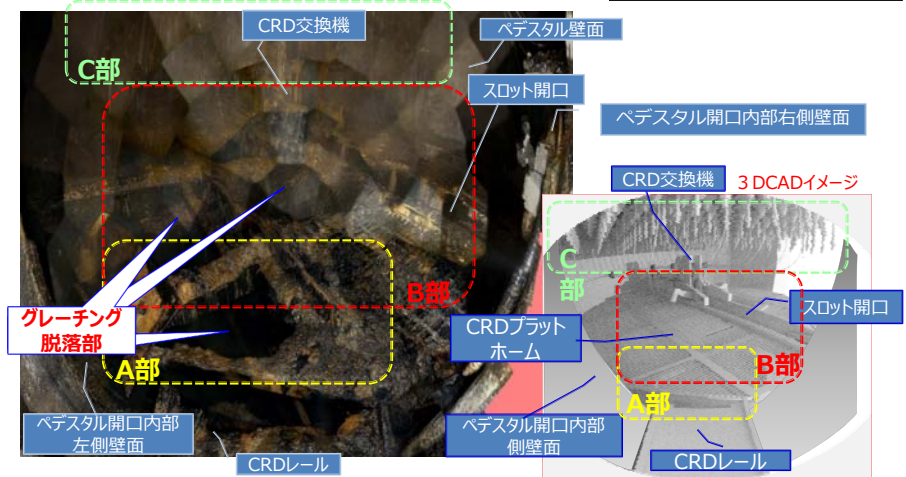
堆積物除去装置



パンチルトカメラ  
ペDESTAL内事前確認装置

## 2号機ペDESTAL内調査結果

調査日：2017年1月30日

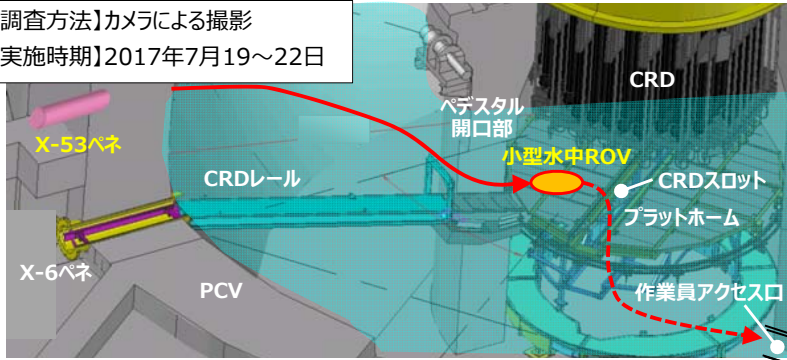


▶ CRDプラットフォームのグレーチングが脱落しているが、フレームは残存している。

※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

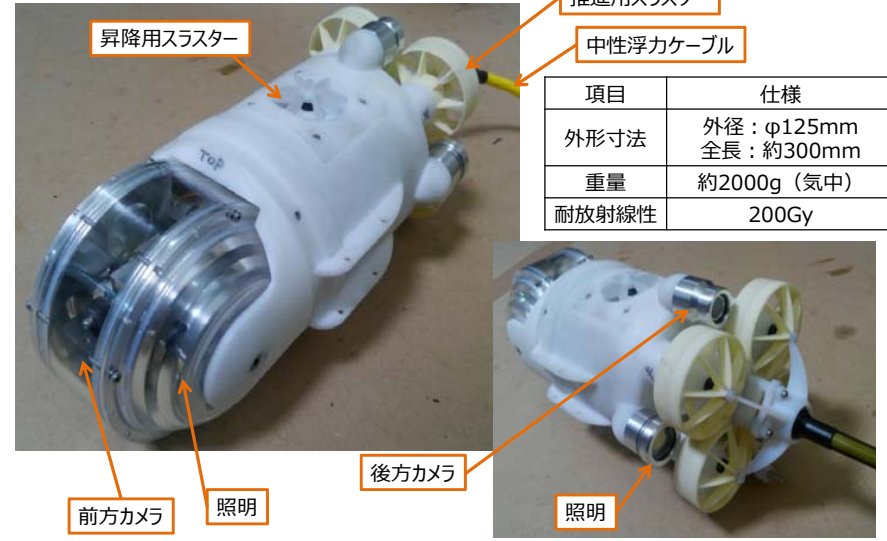
### 3号機ペDESTAL内調査

【調査方法】カメラによる撮影  
 【実施時期】2017年7月19～22日

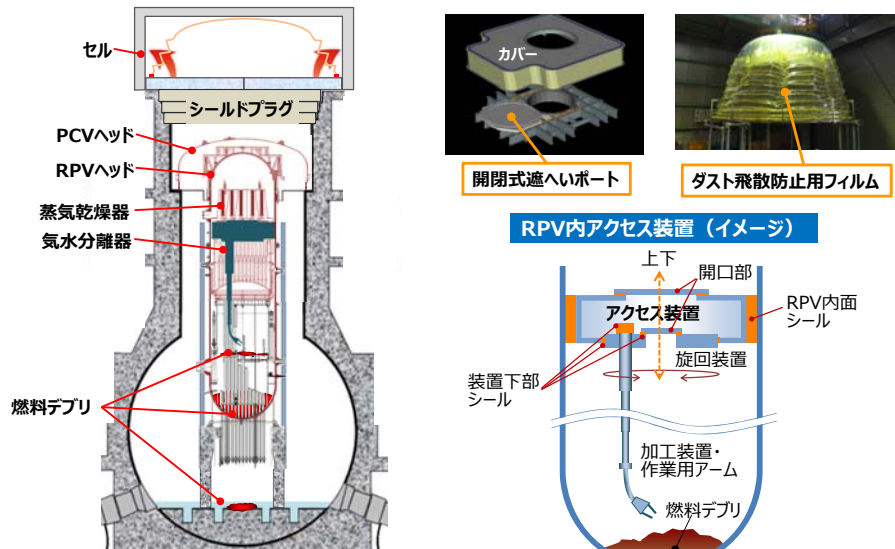


- ① 配管貫通部 (X-53ベネ) からアクセスしペDESTAL内に侵入。プラットフォーム、CRD下部の損傷状況を確認する。
- ② ペDESTAL地下階へのアクセスルートを確認する。
- ③ 地下階への進入が可能であれば、ペDESTAL底部デブリの堆積状況や作業員アクセス口からペDESTAL外へのデブリの流出状況を確認する。

### 3号機水中ROV外観 (モックアップ機)



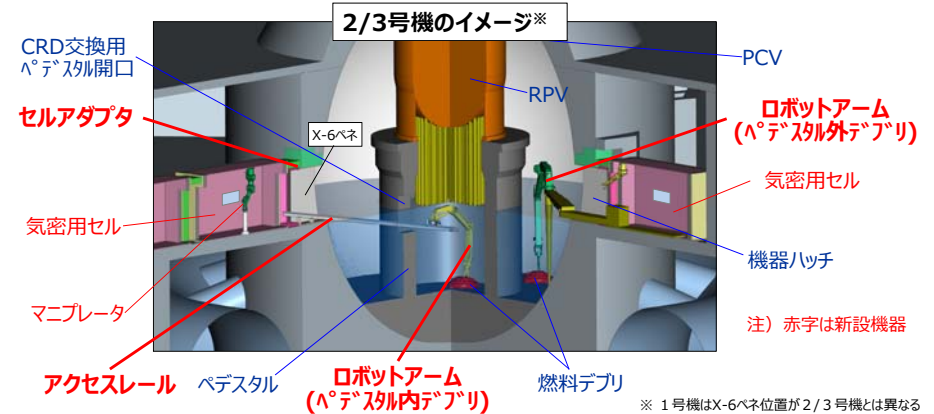
### 上アクセス工法～デブリ取り出し方イメージ～



### 横取出しのイメージ：【PLAN-A】アクセスレール方式

#### デブリ搬出方法

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



# デブリ取出し：横アクセス工法～デブリ搬出ルート

除染 → デブリ調査 → PCV補修 → **デブリ取出** → 収納・移送・保管

号機	1号機	2 / 3号機
配置の基本的な考え方	• 比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「 <b>機器ハッチ</b> 」から。	• 比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「 <b>X-6ベネ</b> 」から。
配置計画	<b>PLAN-A</b> デブリはR/B外壁を開口して搬出 ※ 本図はアクセスレール方式の場合の配置 	<b>PLAN-B</b> デブリはR/B大物搬入口から搬出 ※ 本図はアクセスレール方式の場合の配置 

# 【PLAN-B】PCV新開口方式

ペDESTル内落下物の回収 (イメージ)	ペDESTル内デブリの回収 (イメージ)

# 収納・移送・保管技術

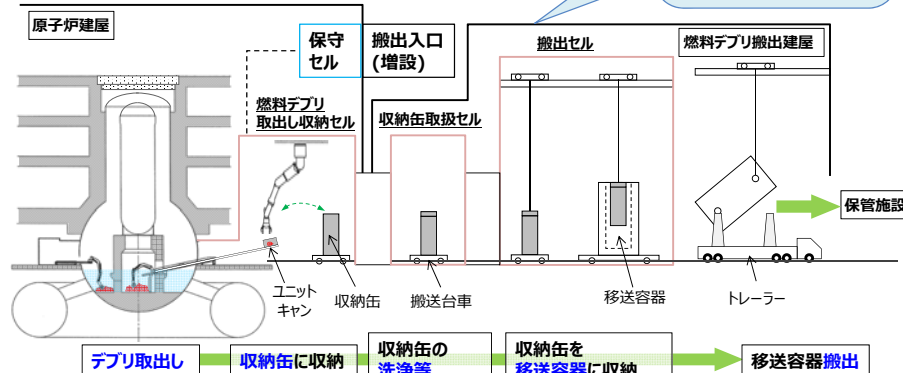
除染 → デブリ調査 → PCV補修 → デブリ取出 → **収納・移送・保管**

## 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

- 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

## 移送方法 (気中-横アクセス工法の場合：例)



# 基盤技術開発

除染 → デブリ調査 → PCV補修 → **デブリ取出** → 収納・移送・保管

## 開発目的

- 取り出し工法の基盤となる技術を**要素試験 (縮尺モデル、実機サイズモデル) により**成立性を確認する。

## 切削技術 (例)

- コアボーリング加工
- レーザガウジ加工

## 汚染拡大防止・遮へい技術 (例)

- 上アクセス工法作業ステップ確認
- 遮へいプラットフォーム
- RPV内面シール

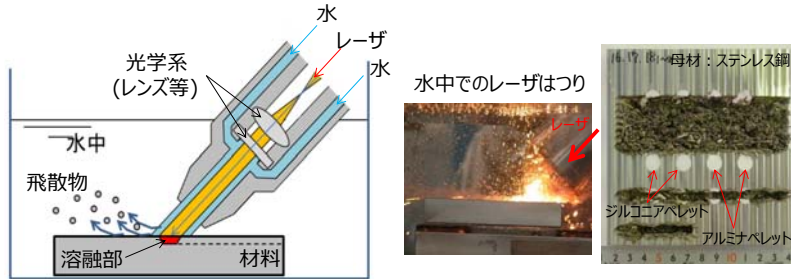
## アクセス技術 (例)

- 反力支持装置
- ペDESTル内アクセスレール
- 柔構造アーム

## レーザガウジング切削試験

### 【レーザガウジングの原理】

- 水流にレーザを透過させて、**水流とレーザを同軸**にして材料表面に照射
- レーザ照射部を加熱、溶融させて、その**溶融物を水流で除去**



レーザはつり加工概略図

H26年度試験結果

### 【レーザはつり加工の特徴】

- 溶融除去した材料の99%以上が水中もしくは沈殿物として水槽内に溜まり、**気中への飛散する加工屑が少ない**
- デブリの硬さに左右されない加工方法**
- レーザが透過可能な**水流を大気中に噴出することが難しい**（現状の課題）

## IRIDの研究開発プロジェクト



## 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

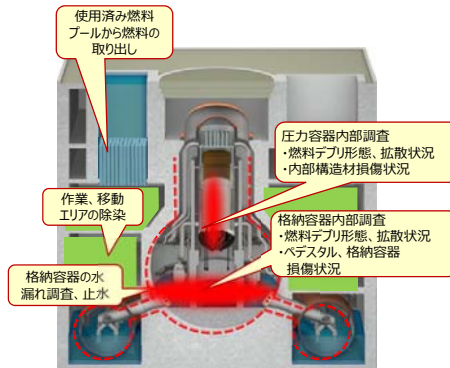
#### ＜廃炉措置＞

- 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



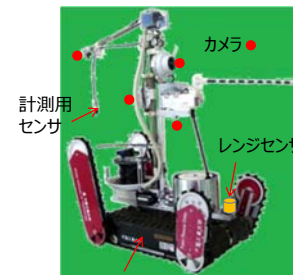
- 想定ベースの仕様設定
- 高信頼な特注製品
- 人間機械系の導入
- 開発途中での仕様変更

## 電子機器に対する放射線の影響

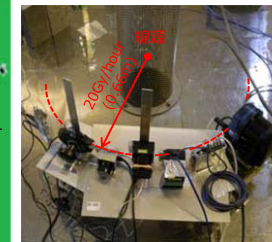
- 1号機：原子炉建屋内線量：1階約数ミリ〜約4000mSv/h以上(南側)
- 2号機：原子炉建屋内線量：1階約数ミリ〜約30mSv/h、オペロ最大880mSv/h
- 3号機：原子炉建屋内線量：1階約20ミリ〜約4000mSv/h以上(北側の一部)、オペロ最大約2000mSv/h

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



電池/CPU/モータードライバ



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 モータードライバ 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

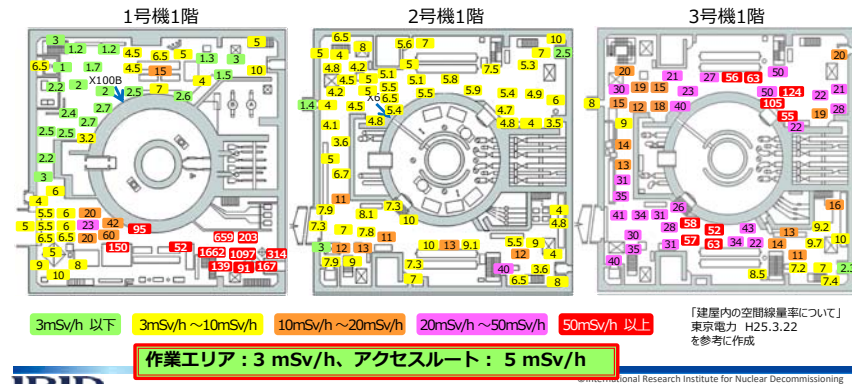
従事者の線量限度：  
1年間で50mSv、5年間で100mSv

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

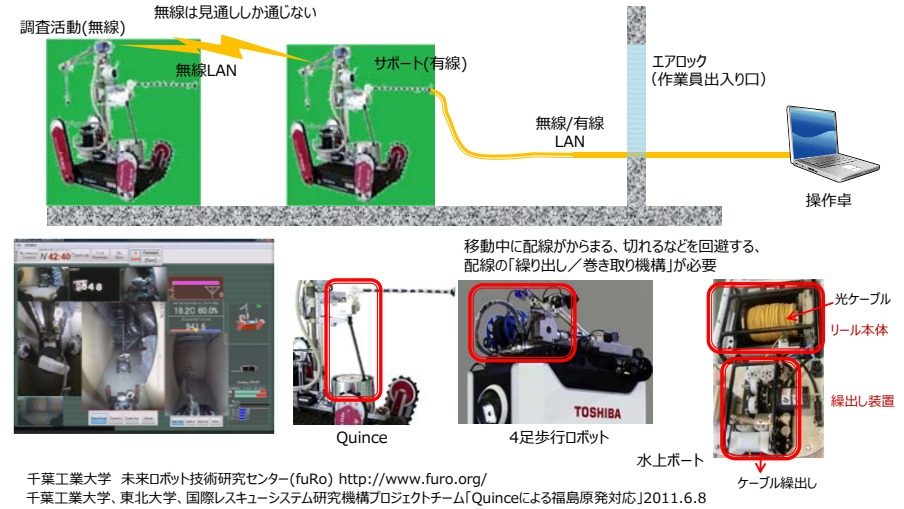
### 課題

- 高線量エリアでの作業 ⇒ 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

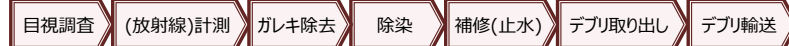
### 1～3号機の放射線量状況 2014年～2015年調査



# 遠隔制御



# 廃炉作業用ロボット開発の要件



### 機能要件

- 移動能力
  - 階段昇降
  - 狭あい部の通過
  - 水中遊泳
  - 曲面上移動
  - 高所への到達
- 遠隔制御 (オペレータが安全な場所から、過酷な環境にあるロボットを操作する)
- 作業能力
  - 視覚情報、放射線情報、温湿度等環境情報の収集
  - 試料サンプリング
  - 除染
  - ハンド機能 (把持、切断、運搬、工具操作...)

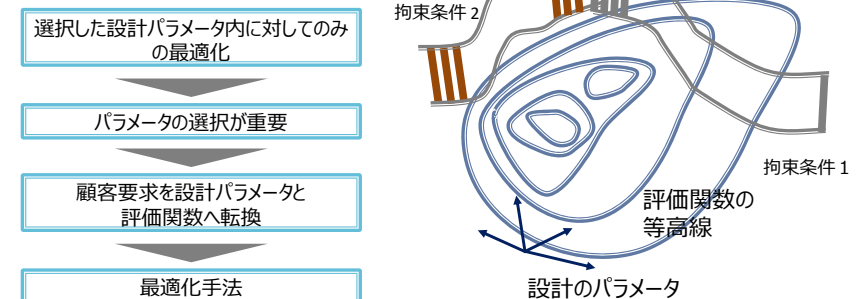
### 過酷環境において安全に使命を達成すること

- 高放射線環境
  - 劣悪な無線通信環境
  - 高温多湿、塵埃環境
  - 照明のない暗がり
  - 電力供給がない
- ⇒
- 実環境と同等な環境(モックアップ)を準備し
    - 機器の機能/動作確認、
    - 作業者の操作訓練を実施することが重要
  - 環境整備・環境構造化が望まれる

# 工学的な設計

## 工学的な設計 = 最適設計

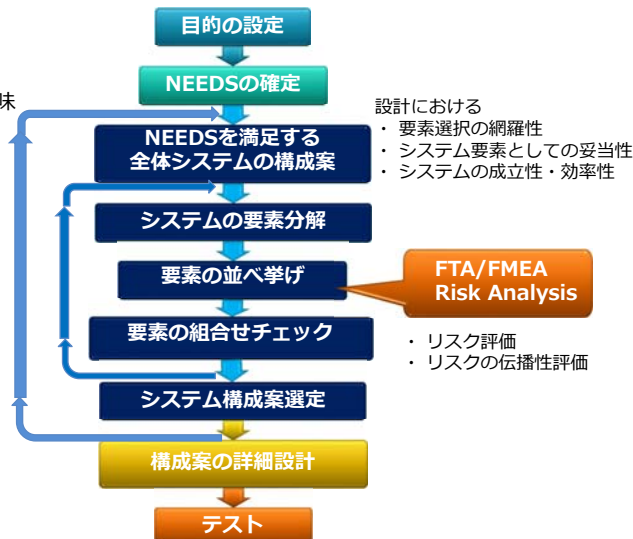
- 設計対象の仕様の枠組みを決める = Domainを定める
- 設計目標を定める = 評価関数を定める
- その他の拘束条件を抽出する
- 最適化を図る



## システム開発

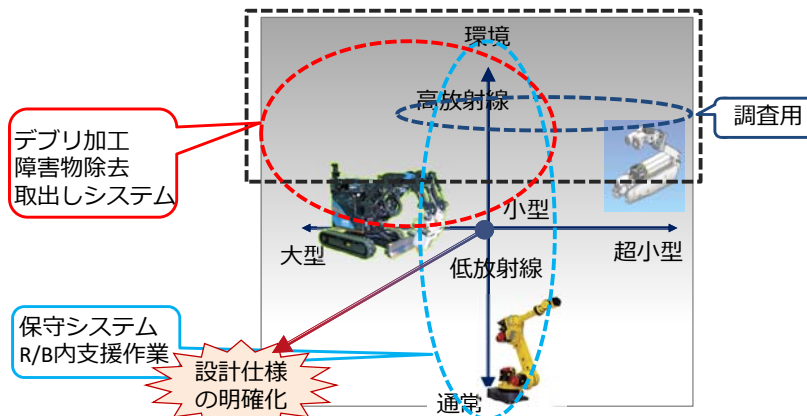
### 未踏分野

- ・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
- ・開発期間の制限
- ・資金の制限
- ・合意形成
- ・設計の意図開示



## 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



## 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)

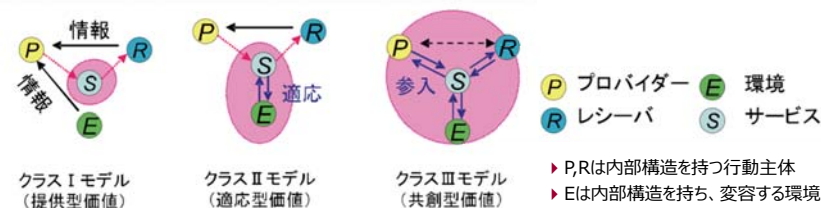
- ▶ 製品やサービスの主体(プロバイダ)と対象(レシーバ)の価値が独立に明示化でき、かつ、環境が事前に確定できる。モデルは閉じたシステムとして完全に記述が可能。最適解探索が課題。

### ■ 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。



クラスⅠモデル  
(提供型価値)

クラスⅡモデル  
(適応型価値)

クラスⅢモデル  
(共創型価値)

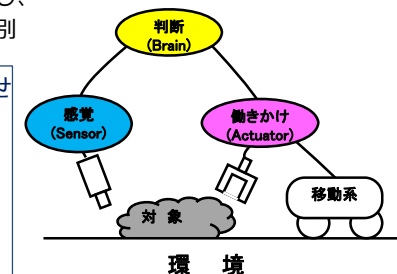
- ▶ P,Rは内部構造を持つ行動主体
- ▶ Eは内部構造を持ち、変容する環境
- ▶ SもクラスⅡ,Ⅲでは内部構造を持たなければならない

## 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

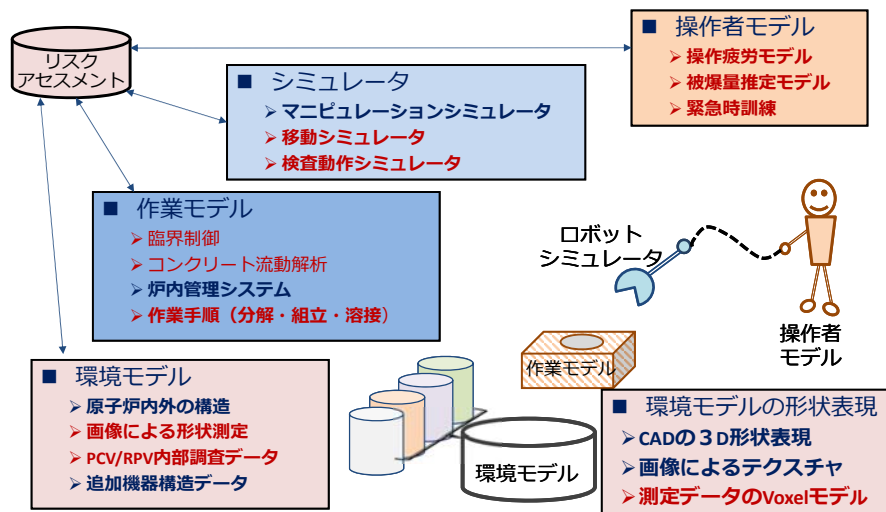
### ■ Sensor-Brain-Actuator+Mobilityの組合せ

- ▶ 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
  - システムによる部分サポート
- ▶ 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
  - 大型・重量機器の制御性(必要時間、速度)
  - 保守のための出入り

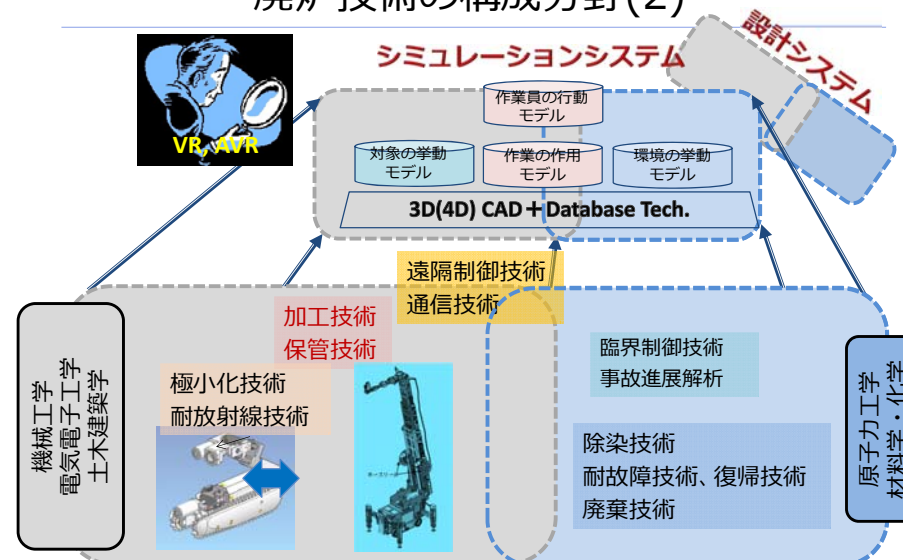


環境の制御  
移動能力構築  
作業能力構築  
保守方法の確立

## ロボットの設計(2) モデル化とシミュレータ



## 廃炉技術の構成分野(2)



## 設計上の課題

### 開発上の課題

- 大型機器ゆえ、長期の開発期間
- 原子力関連の安全管理
- 短く区切られた開発期間

### 内部調査と作業実績で積み重ね

- 調査結果をデータベースとして構築
- 設計経験の集積
- シミュレーション技術の確保

### 目標を絞り込み、状況を多様に想定

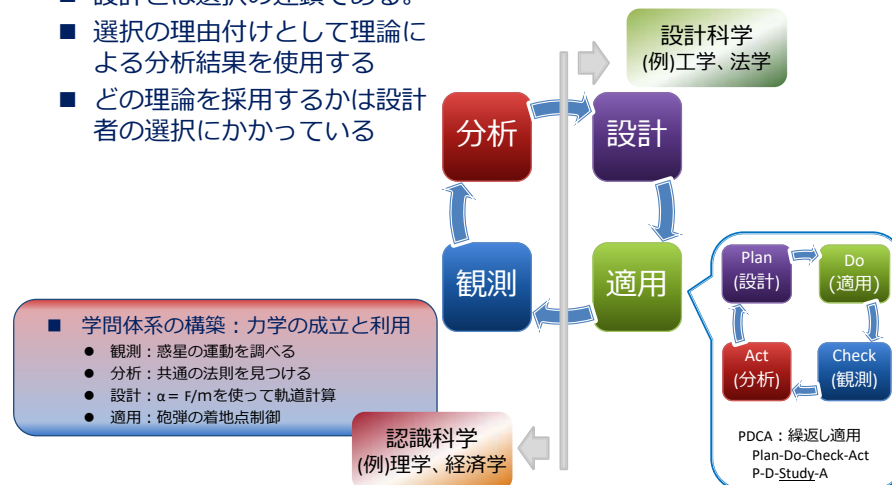
- 想定状況を広げて、複数設計候補を検討
- 専門家によるデザイン・レビュー(既に120回)
- プロジェクト間の連携を強化、基礎技術を抽出して検討
- 手戻りがあった場合に、迅速に対応できる体制
- リスクアセスメントの強化

### 設計仕様が不確定

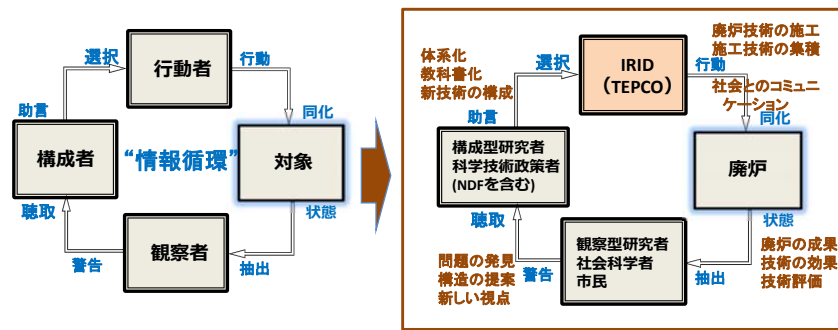
- 内部状態が不明で、状態を想定、作業を想定
- 測定対象の特性が不明。センサの選択が困難
- 炉内部の物質を外部に持ち出しにくい
- 調査段階では、超小型機器が必要

## 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

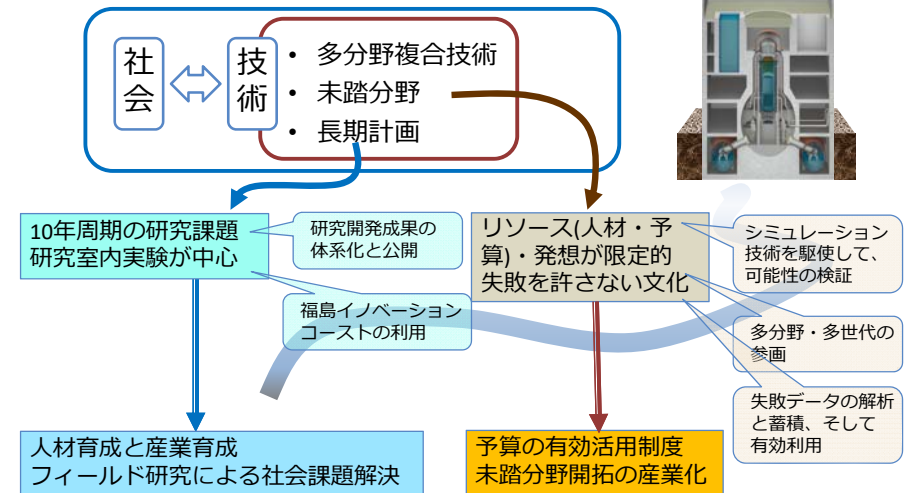


## ある対象が持続的進化をするための基本構造



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

IRID Symposium 2016

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

