

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

2016年 シンポジウム

# ロボットが担う廃炉技術 ～君に期待すること～

2016年8月4日

東京大学武田先端知ビル

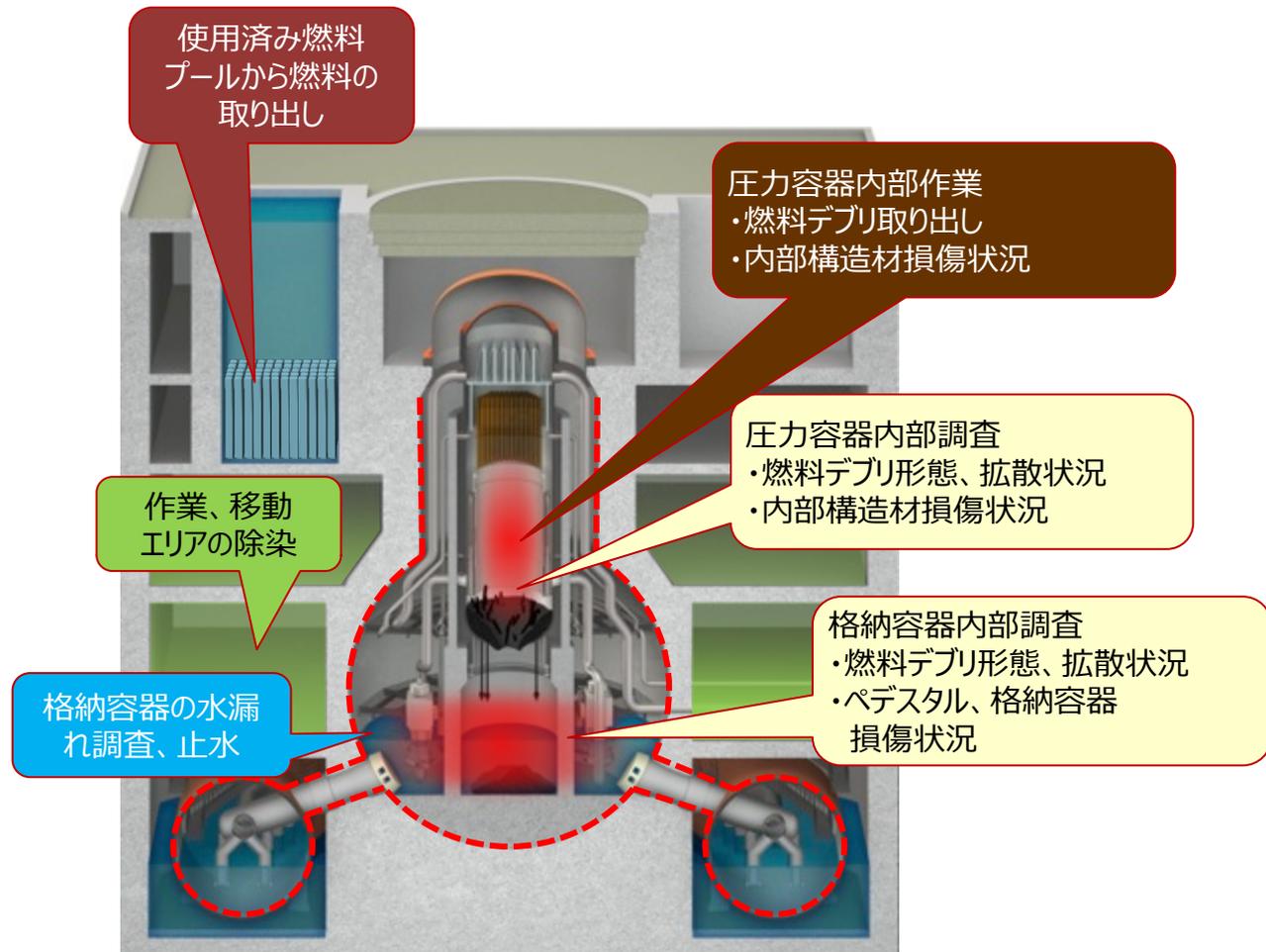
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

芝浦工業大学 教育イノベーションセンター 教授

新井 民夫

<http://www.iris.or.jp/>

# 燃料デブリ取り出し（イメージ）



# 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

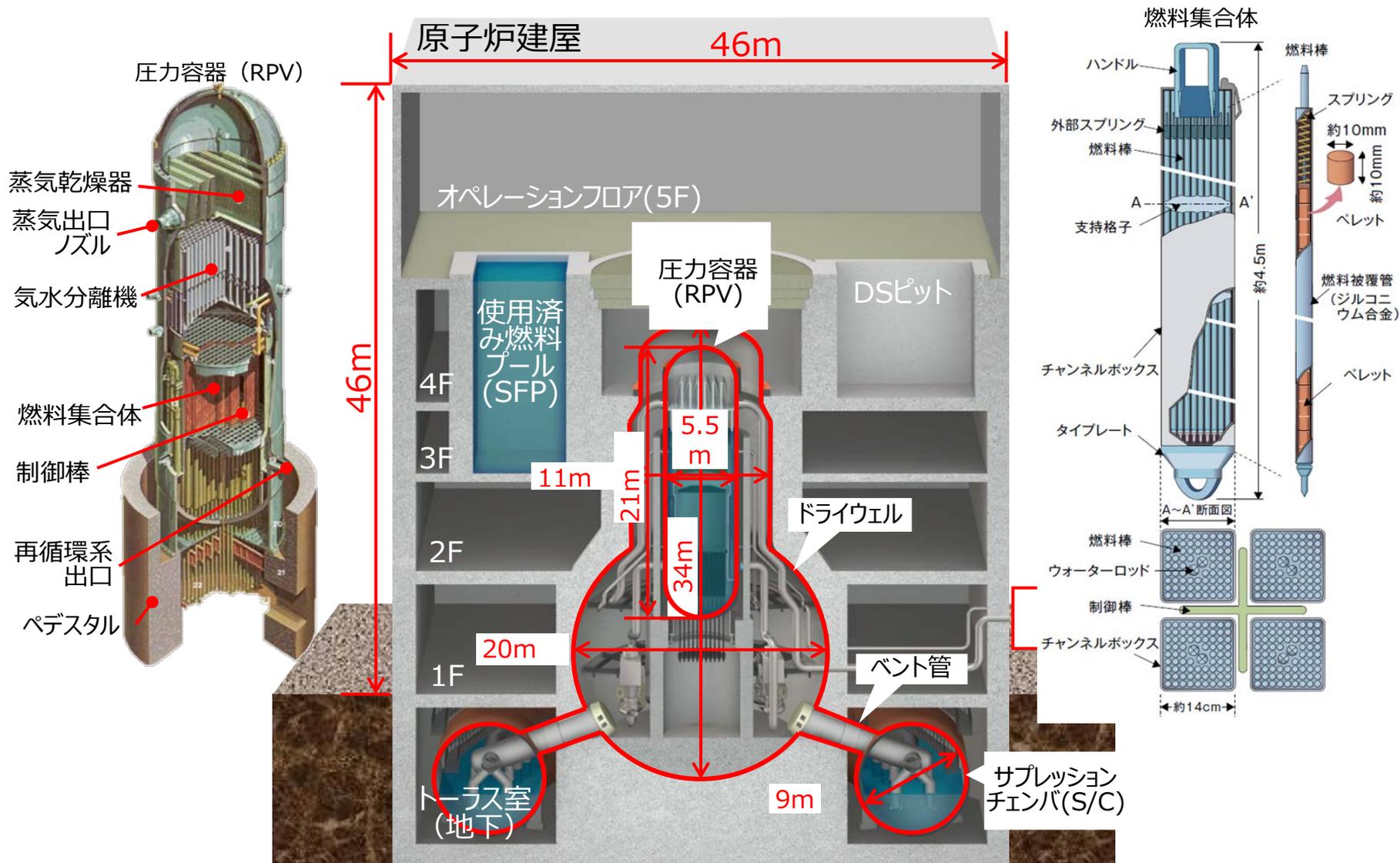


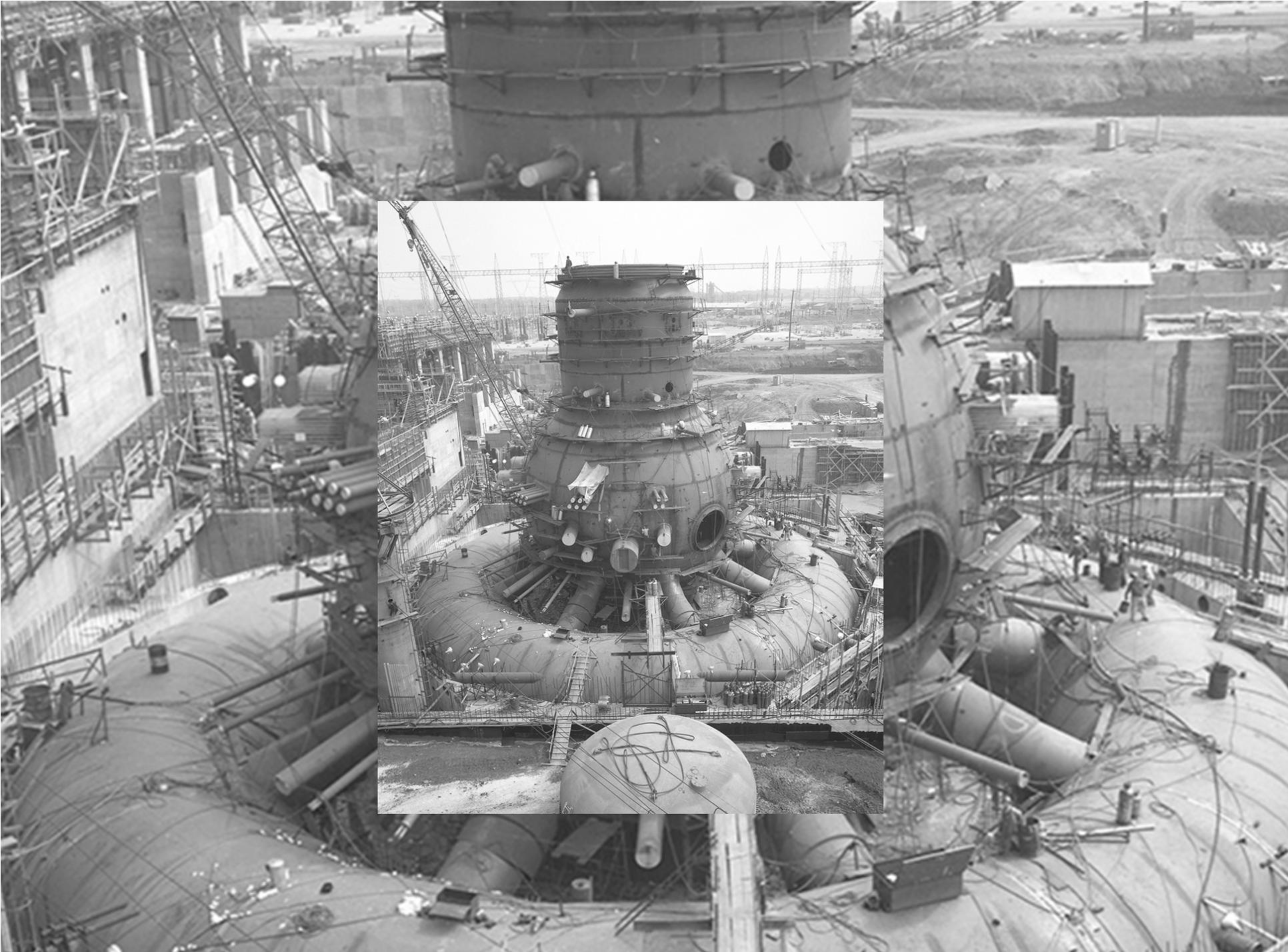
- 未踏分野：開発の立案と変更
- 長期計画：人材育成、産業技術化

# 本日の構成

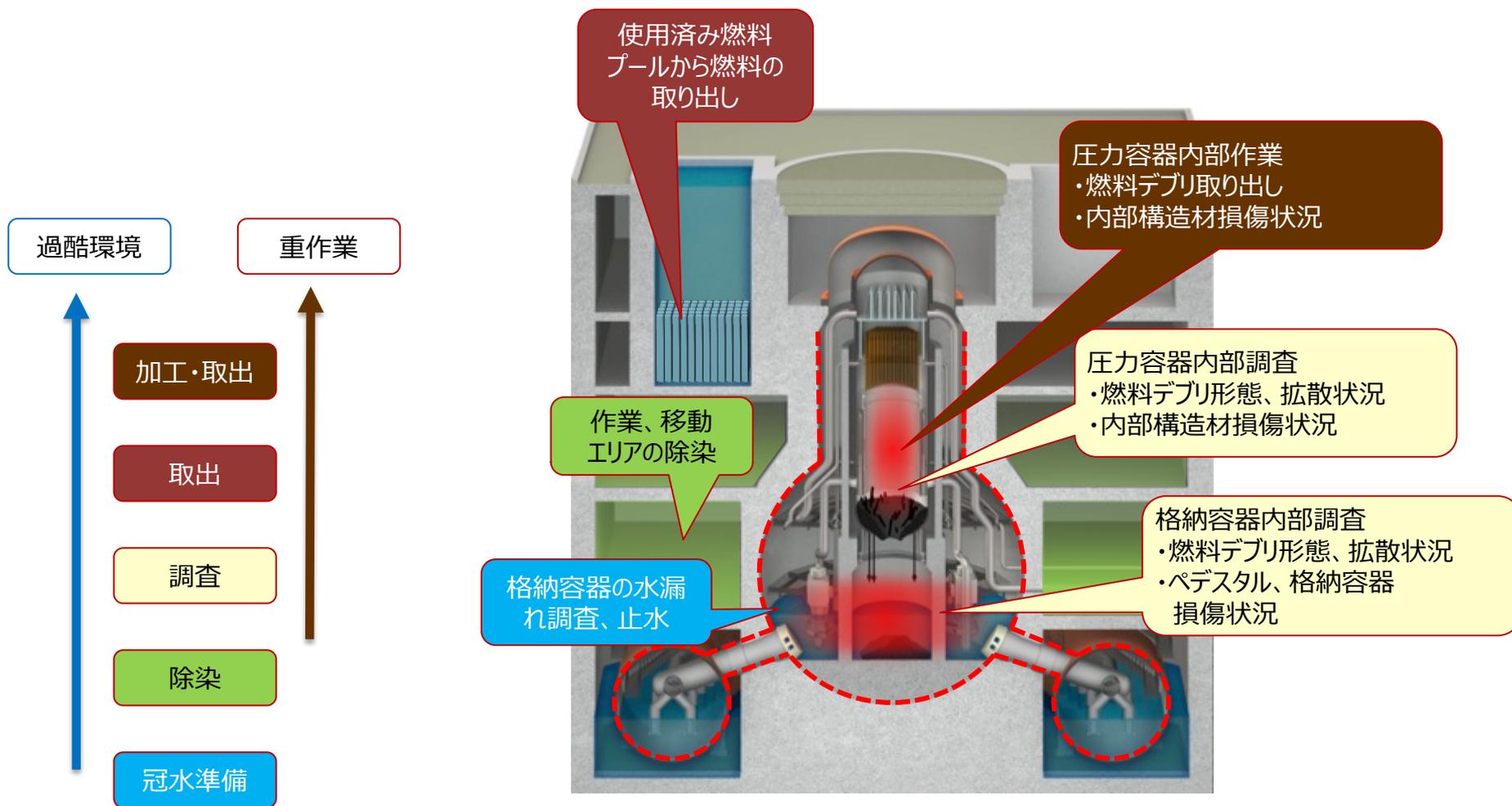
- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
- 廃炉用ロボットの課題
- 大学との連携
- 君に何を期待するか

# 原子力発電所の構造



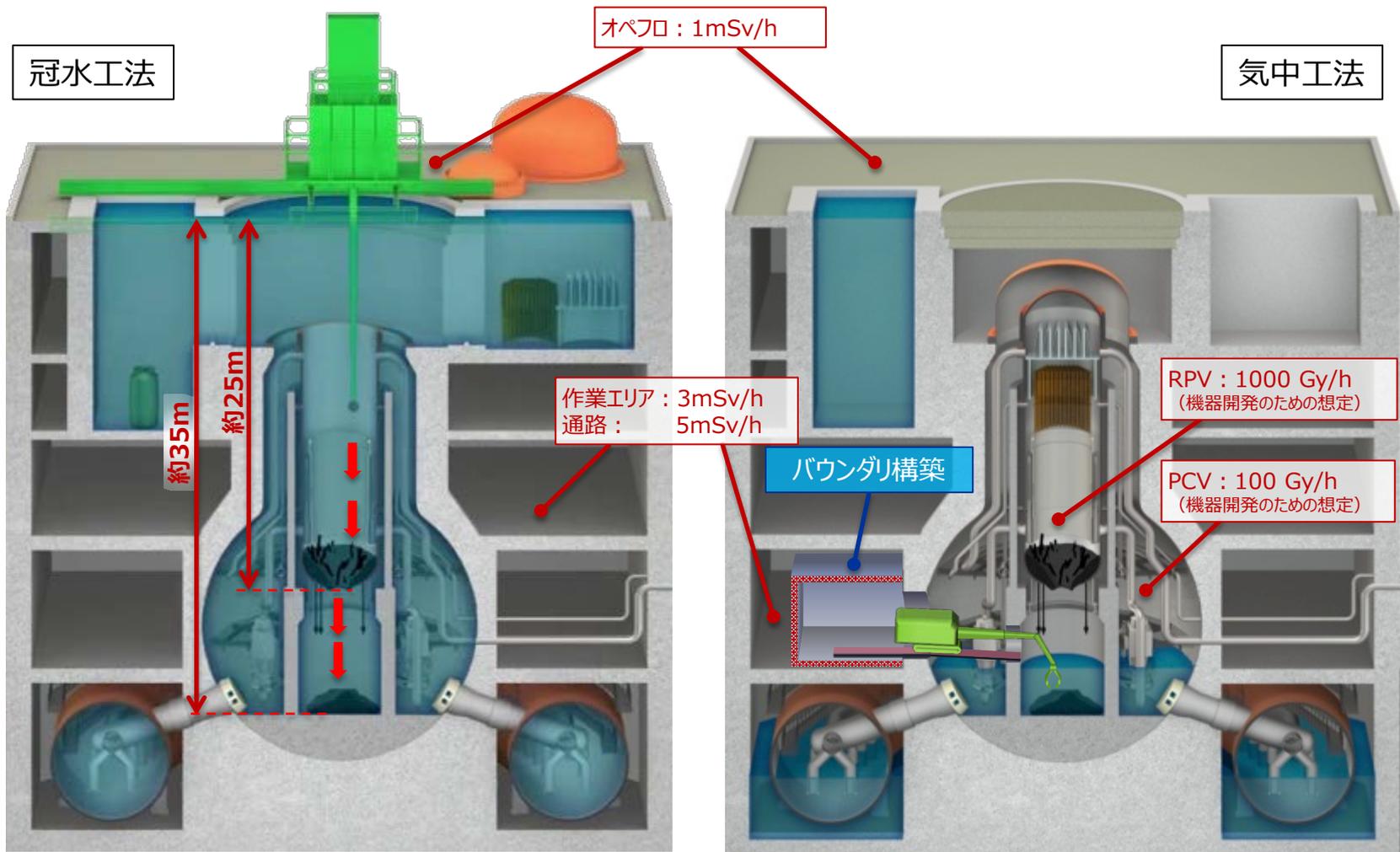


# 燃料デブリ取り出し（イメージ）



# 燃料デブリ取り出し（複数案）

燃料デブリ取り出し  
2021年～



# 本日の構成

- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
- 廃炉用ロボットの課題
- 大学との連携
- 君に何を期待するか

# 廃炉に向けたロボット開発



東京電力ホームページ>写真・映像ライブラリー>写真・動画  
<http://www.tepcoco.jp/tepcconews/library/index-j.html>

# 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

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/>

サーベイランナー



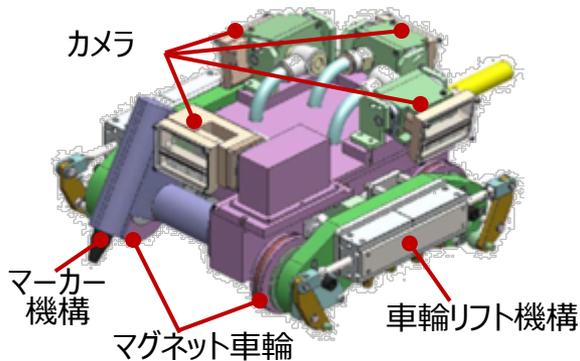
FRIGO-MA



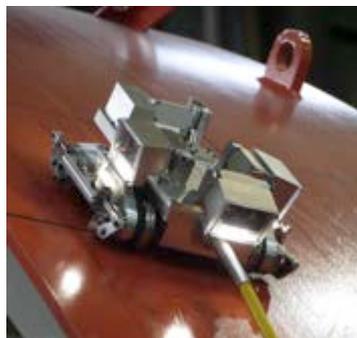
# 磁気吸着移動ロボット

サプレッションチェンバ (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

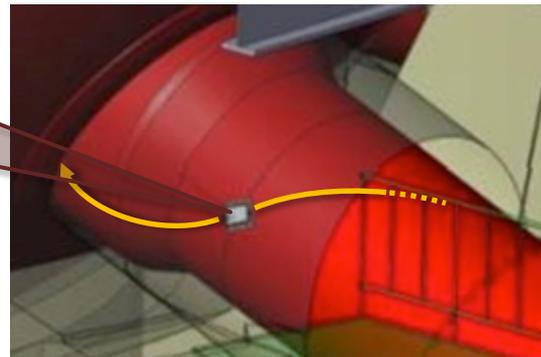


S/C上の亀裂、漏えいを調査

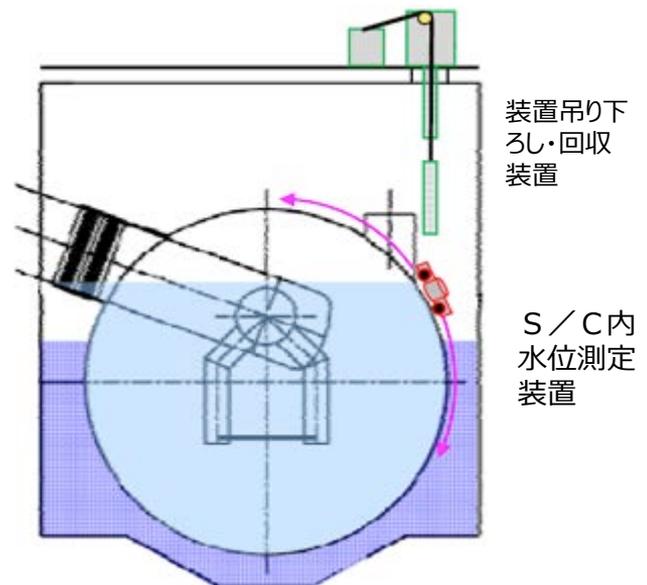
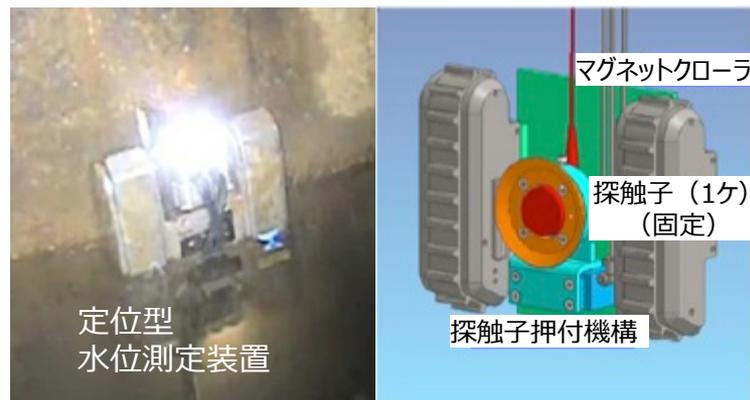


ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査

VT-ROV

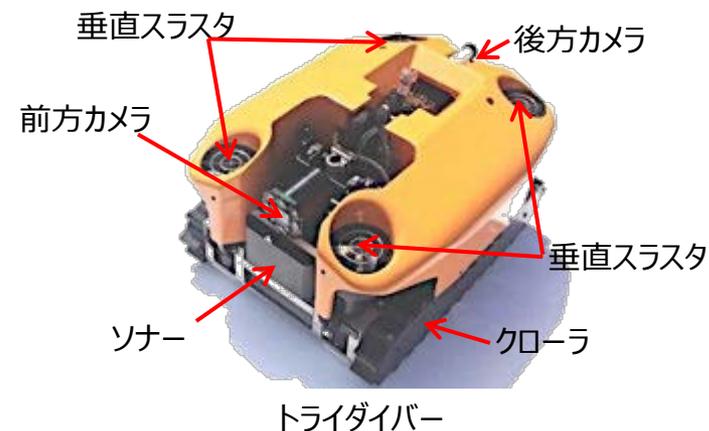
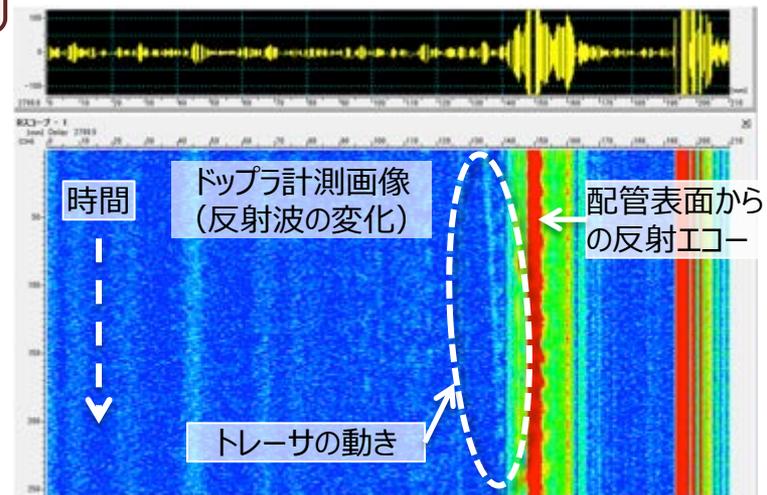
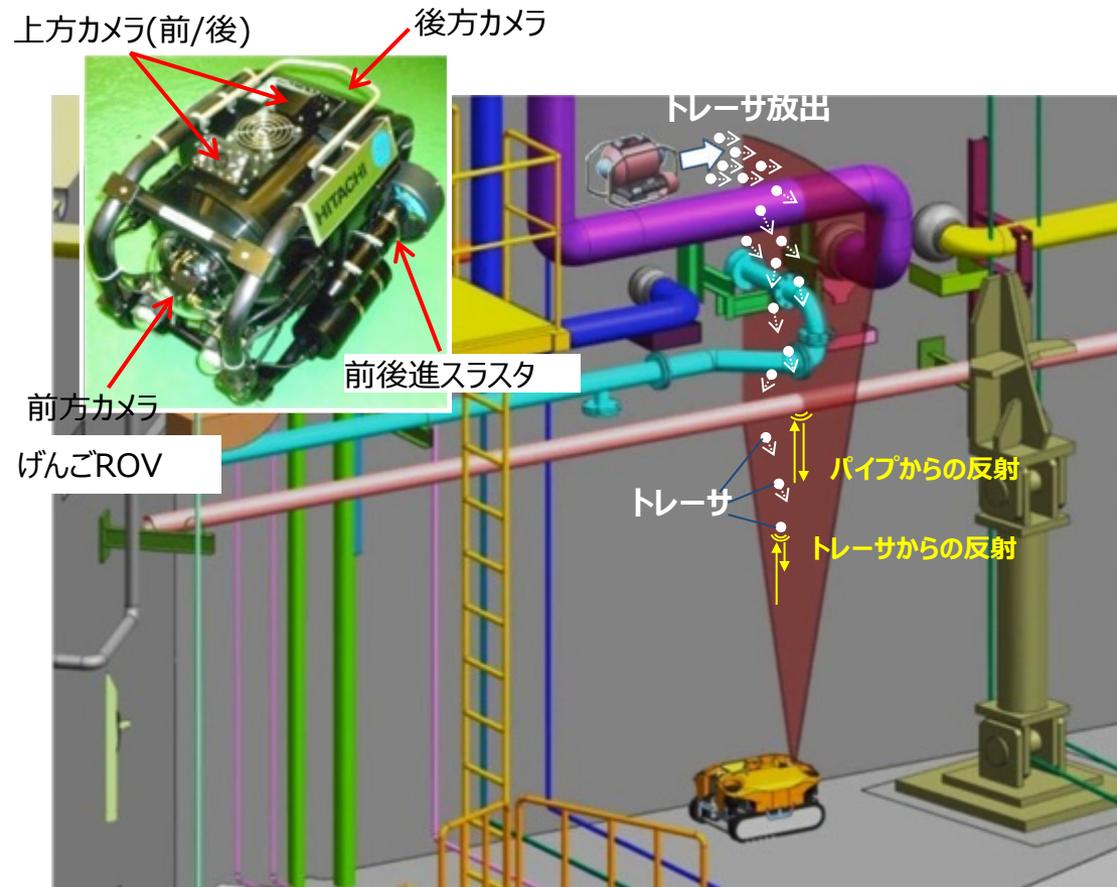


S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



# 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。



# 作業ロボット(その1)

除染装置およびPCV内部調査のアクセスルート確保、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)

破碎ロボット  
BROKK(スウェーデン)



Bobcat



建設作業機器のロボット化



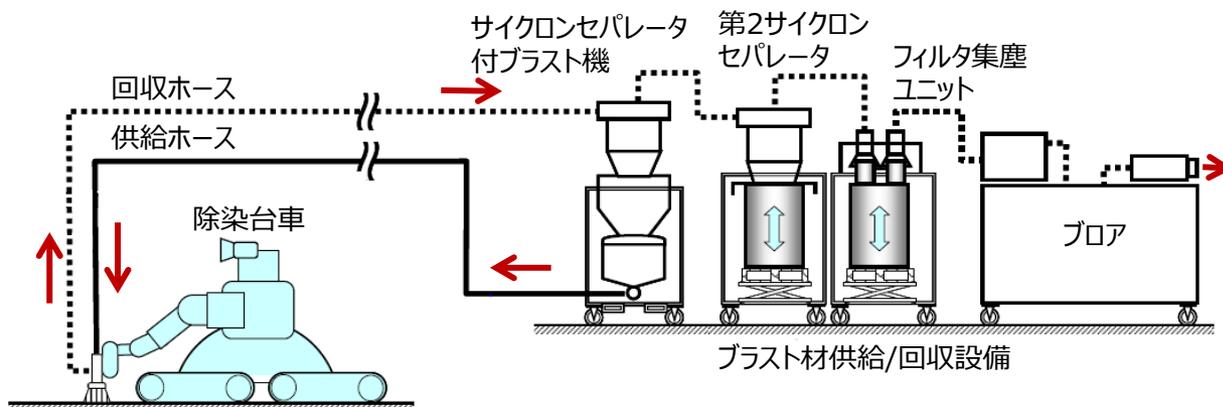
交換先端工具



# 作業ロボット(その2) 除染ロボット

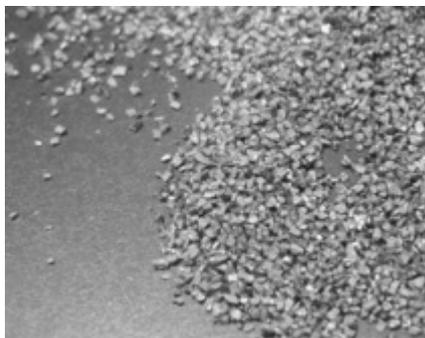
原子炉格納容器漏えい箇所への調査・補修等の作業環境改善のため、現場の汚染状況にあった遠隔除染装置を開発

### ブラスト・吸引除染装置



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。

### ブラスト（径0.3mmスチールグリット）



### 高圧水除染装置



### ドライアイスブラスト除染装置



# 本日の構成

- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
- 廃炉用ロボットの課題
- 大学との連携
- 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>

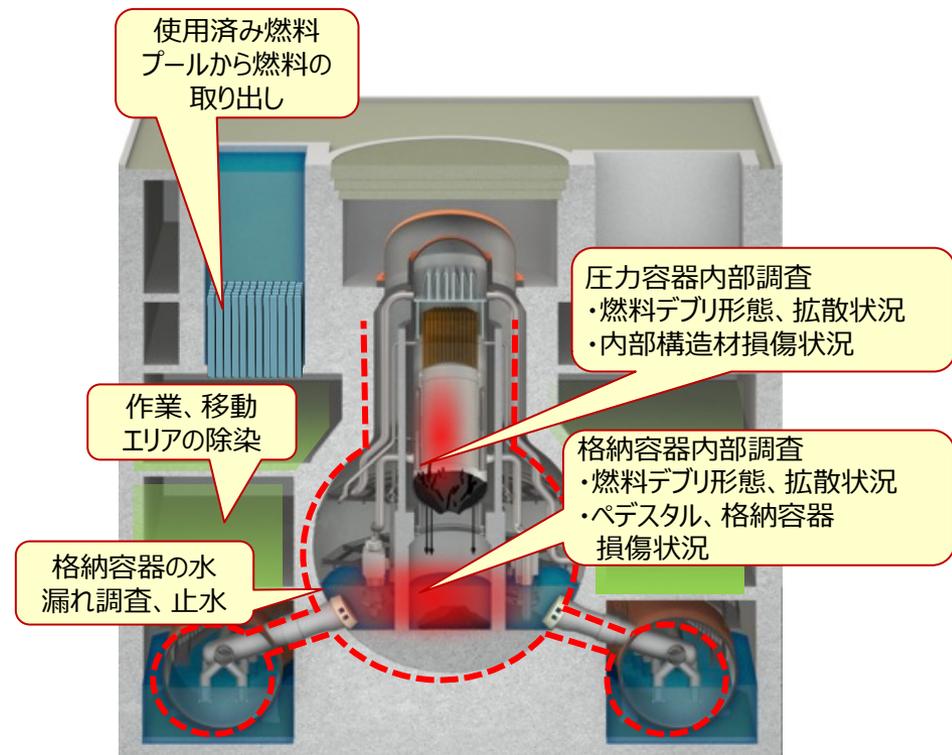
- 人が近づけない高放射線環境
- 安全最優先で着実な調査や作業



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



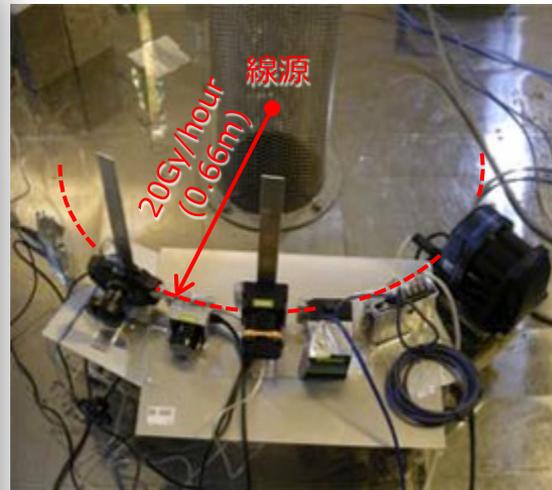
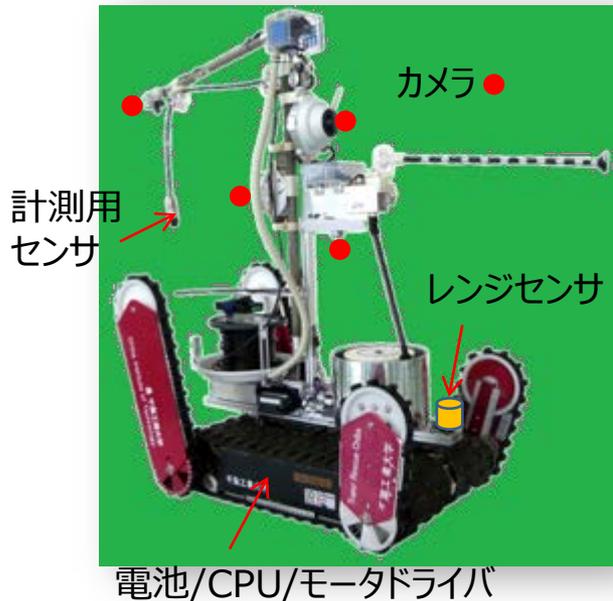
- 想定ベースの仕様設定
- 高信頼な特注製品
- 人間機械系の導入
- 開発途中での仕様変更

# 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)

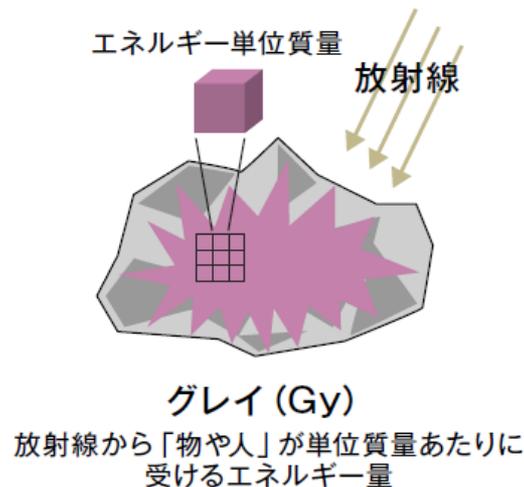
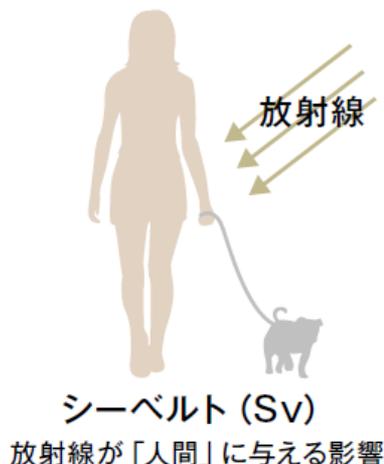
スキャナ式レンジセンサ	124Gy
カメラ	169Gy
CPUボード、電池 モータ・ドライバ 無線機、LANハブ 3次元距離画像センサ 広角ネットワークカメラ 通信デバイス等	200Gy以上

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	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://fepc-dp.jp/>

# 原子炉建屋・作業エリアの除染

## 除染技術開発の課題

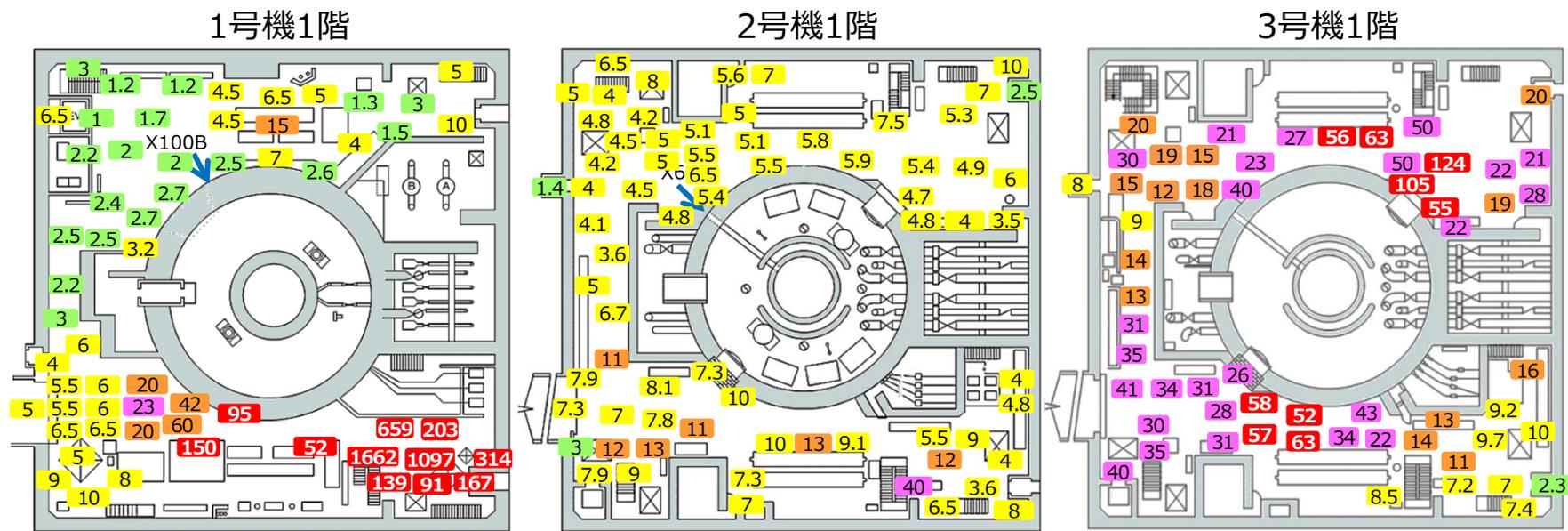
従事者の線量限度：1年間で50mSv、5年間で100mSv  
作業エリア：3 mSv/h、アクセスルート：5 mSv/h

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
  - 多様な汚染形態／多様な作業場所への対応要
- ⇒
- ・遠隔技術の確立
  - ・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

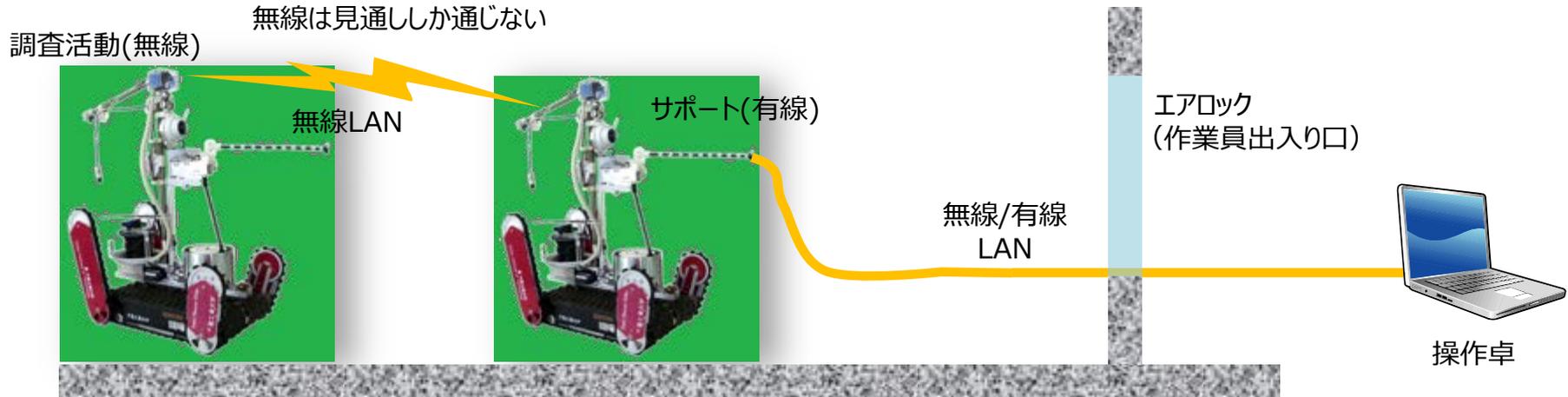
10mSv/h～20mSv/h

20mSv/h～50mSv/h

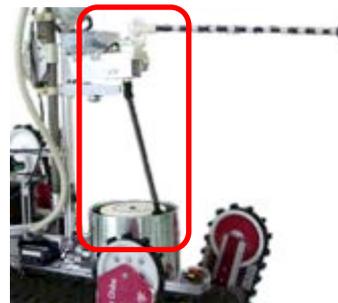
50mSv/h 以上

「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



Quince



4足歩行ロボット



水上ボート

光ケーブル  
リール本体

繰出し装置

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/>

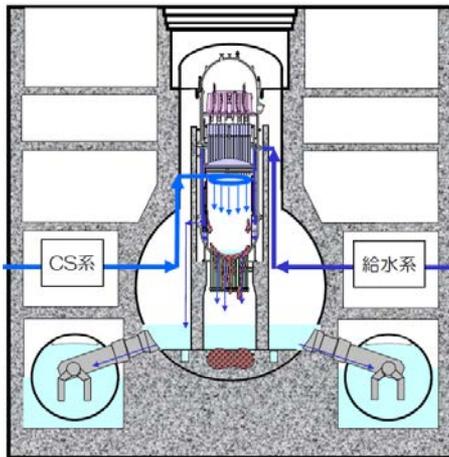
千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構プロジェクトチーム「Quinceによる福島原発対応」2011.6.8

# 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等々の状況を確認する

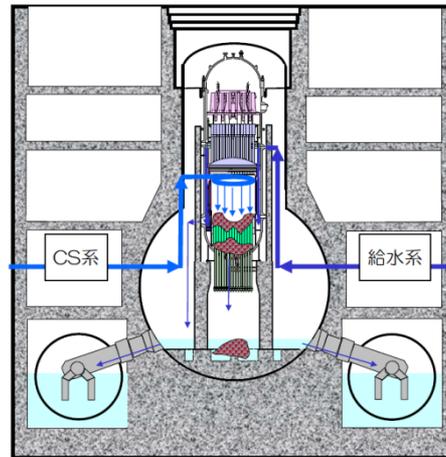
## 調査および調査装置の開発方針



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

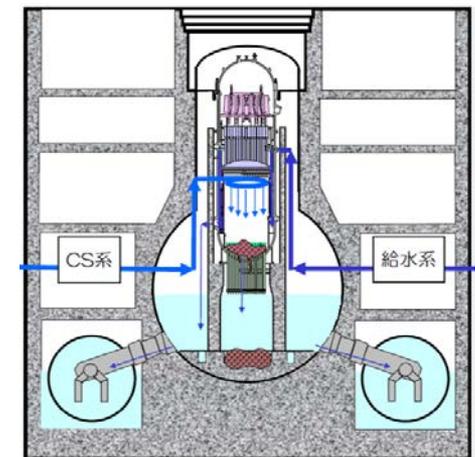
- ・燃料デブリのペDESTAL外側までの拡散の可能性から、ペDESTAL外側の調査を優先



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

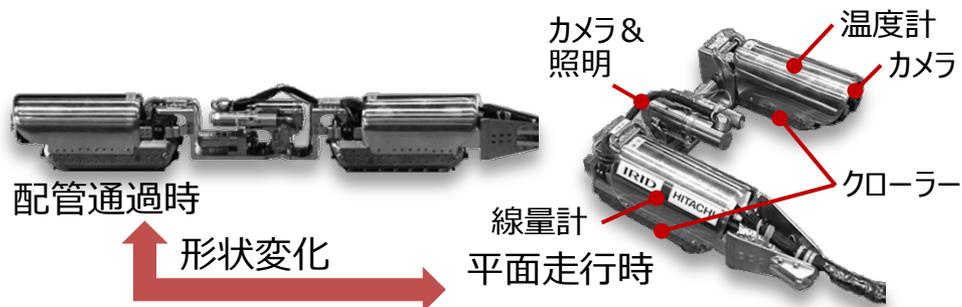
- ・ペDESTAL外側までの拡散の可能性低く、ペDESTAL内側の調査を優先
- ・3号機はPCV内の水位高く、1・2号機で使用予定のペネが水没の可能性あり、別方式の検討要



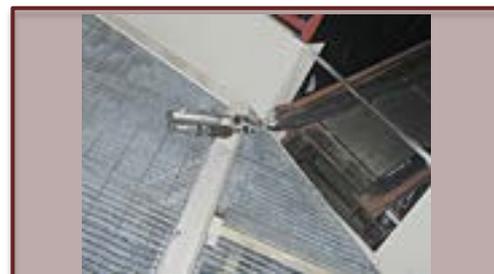
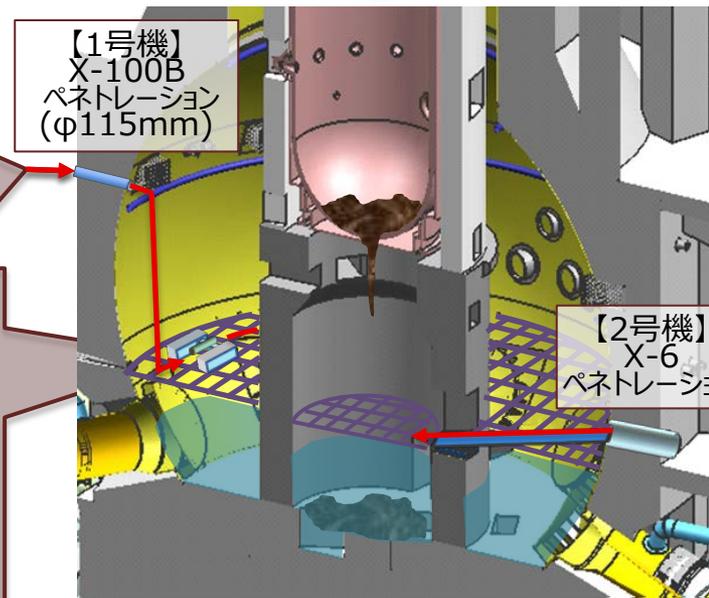
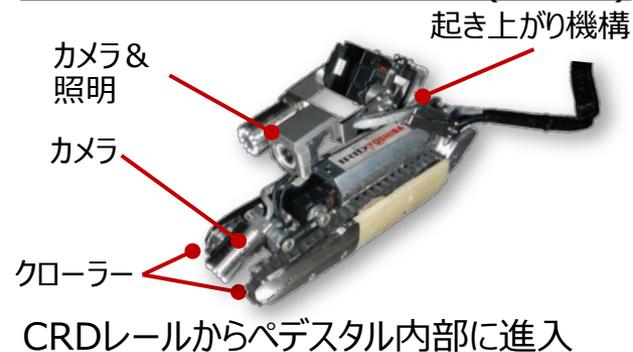
3号機

# 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)



# 形状変化型ロボットの開発

【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



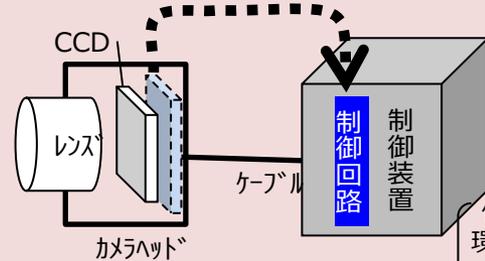
「映像」「温度」「線量率」  
情報の収集

1000Gy 耐放射線

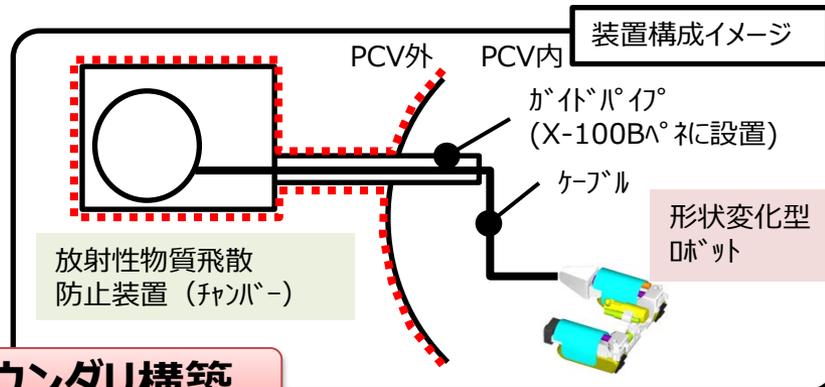
放射線に弱い制御回路を制御装置側 (低放射線環境下) へ  
移設



カメラヘッド

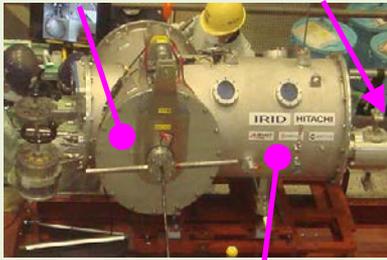


低放射線  
環境下に設  
置



## バウンダリ構築

ケーブル  
送りドラム  
がトパイ°との  
取合部



調査装置を内包

ガイドパイプ走行時



変形

グレーチング走行時



## 形状変化機構



# ペDESTル内部調査

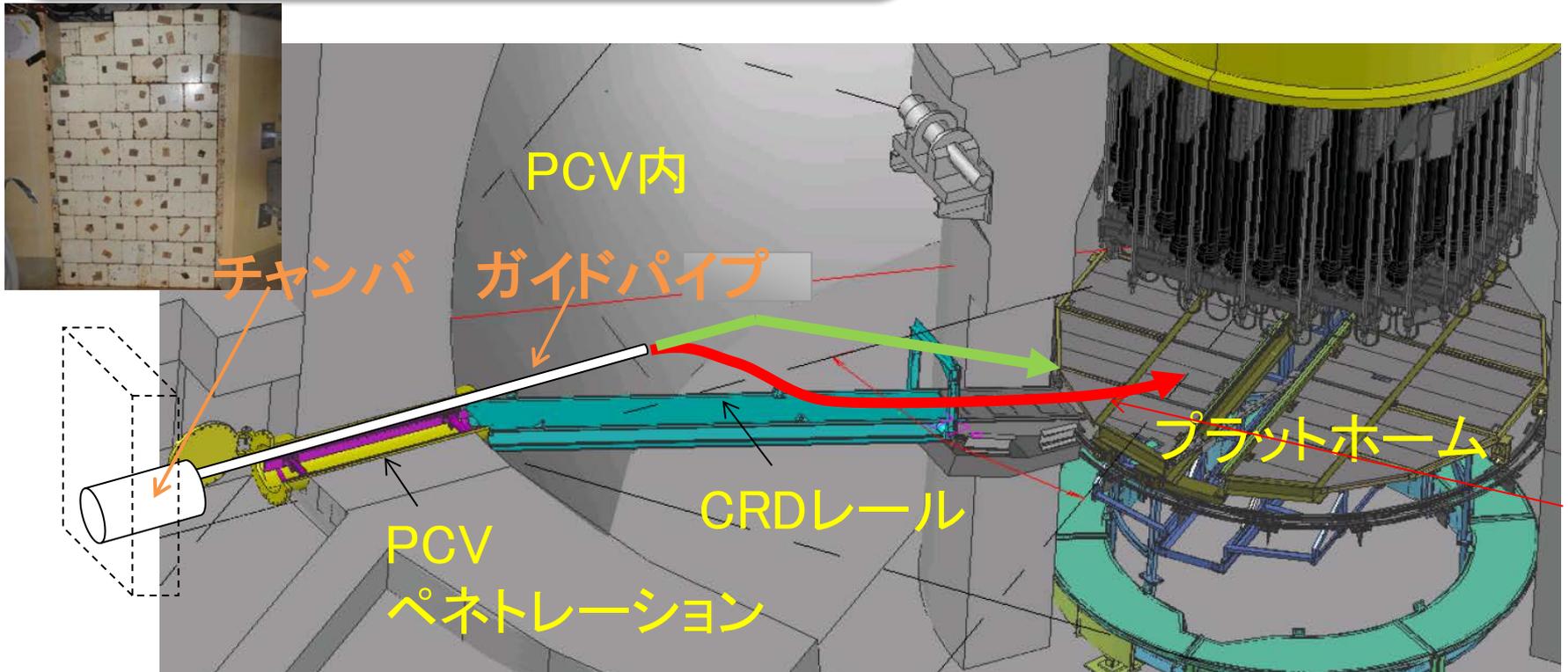
【2号機】  
X-6  
ペネトレーション

## 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



# クローラ型遠隔操作ロボット(サソリ型)

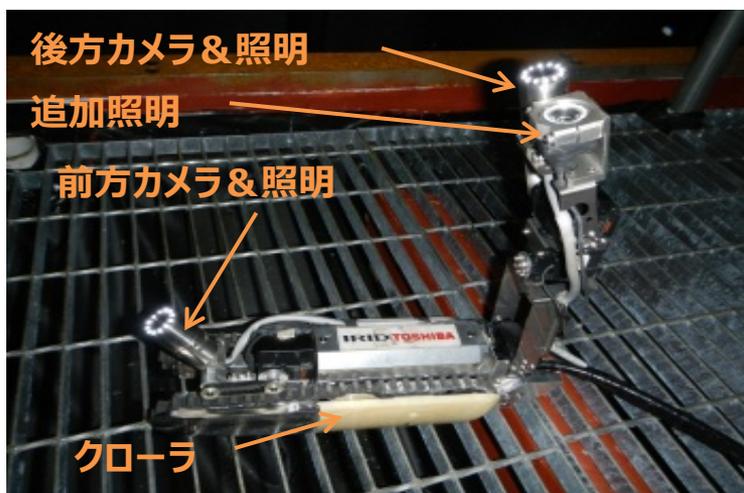
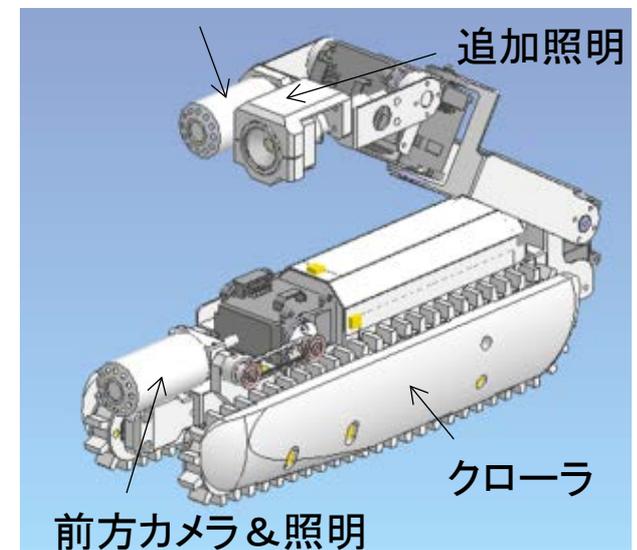
【2号機】

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。

後方カメラ&照明

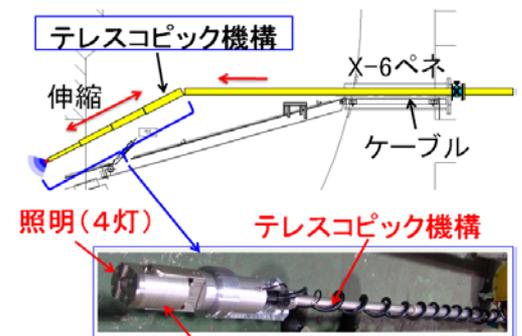


モックアップでのプラットフォーム上調査

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。



堆積物除去装置



パンチルトカメラ

ペDESTAL内事前確認装置

# 開発対象機器の分類軸

□ 通常 ⇔ 低放射線 ⇔ 高放射線環境下

□ 遠隔 ⇔ 直接

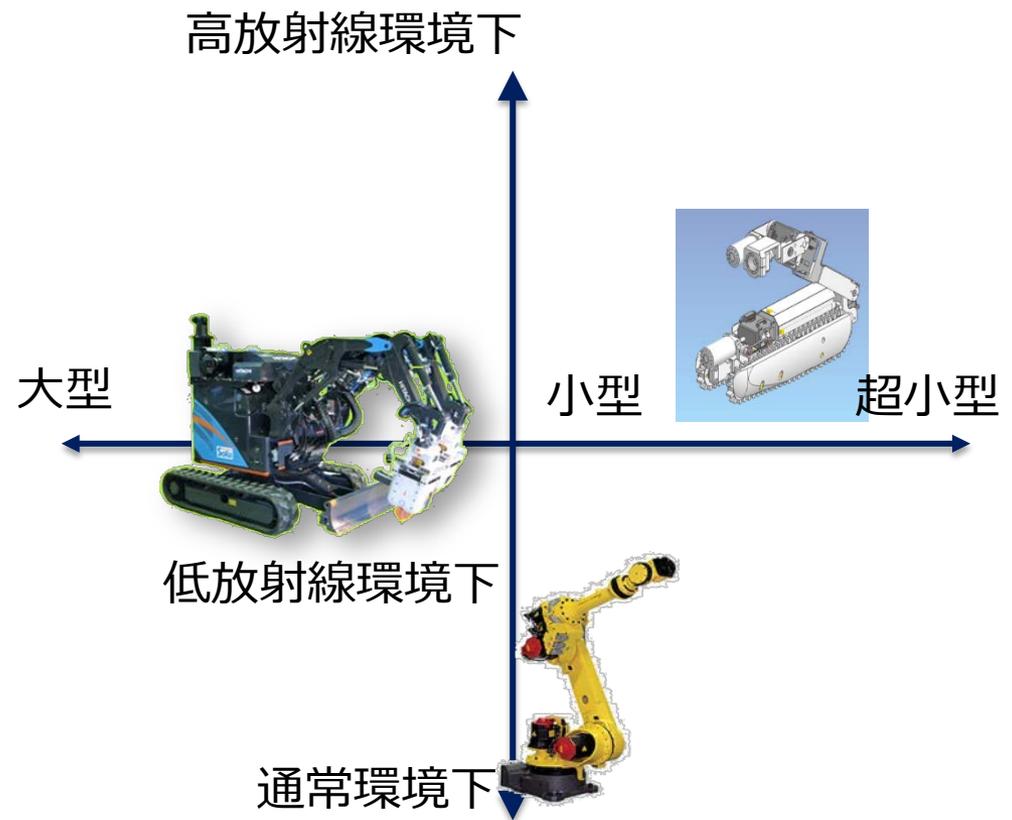
□ 手動 ⇔ 半自動 ⇔ 自動

□ 大型 ⇔ 小型 ⇔ 超小型

□ 特殊目的 ⇔ 汎用目的

測定系と制御系との関係

□ 決定論的 ⇔ 確率論的



# ロボット技術とシステム技術

合意形成  
プロジェクト管理

人材育成  
産業応用

システム統合技術  
シミュレーション技術  
データベース技術

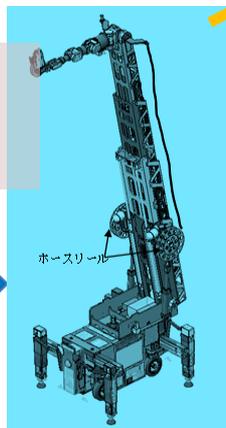
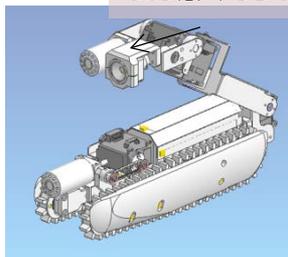


マンマシンインタフェース  
作業員訓練・教育

加工技術  
保管技術

遠隔制御技術  
通信技術

極小化技術  
耐放射線技術



除染技術  
耐故障技術、復帰技術  
ロボット廃棄技術

臨界制御技術  
事故進展解析

原子力工学

# 本日の構成

- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
- 廃炉用ロボットの課題
- 大学との連携
- 君に何を期待するか

# IRIDの事業内容

## ▶ IRID事業の3本柱



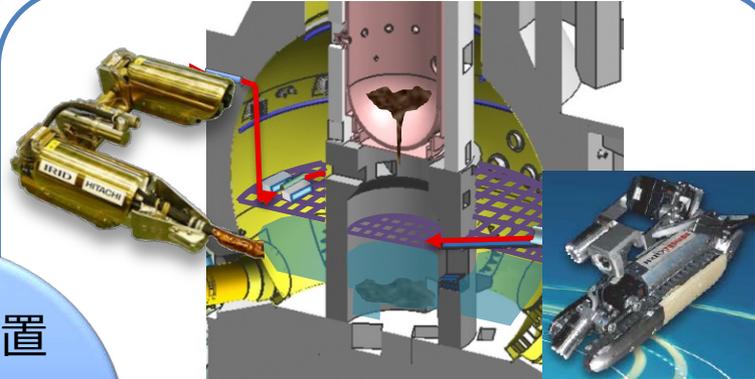
国際顧問との会議

1. 廃止措置  
に関する  
**研究開発**  
を行います。

2. 廃止措置  
に関する  
**国内外機  
関との協力**  
を推進します。

**IRID**

3. 研究開発  
に関する  
**人材育成**  
に取り組みます。



格納容器内部調査ロボットの開発



「サイエンスアゴラ2015」  
での  
廃炉ロボットのデモ

# IRIDの研究開発プロジェクト

## 使用済燃料プールからの燃料取出しに係る研究開発(1PJ)

使用済燃料プールから取出した燃料集合体の**長期健全性**評価

全14PJが  
進行中

### 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>

RPV/PCVの  
**健全性評価**  
技術

燃料デブリ  
**臨界管理**  
技術

<デブリ取り出し>

燃料デブリ・  
炉内構造物取出  
**工法・  
システム**

燃料デブリ・  
炉内構造物取出  
**基盤技術**

燃料デブリ  
**収納・移送  
・保管**技術

**廃棄物  
処理・処分  
技術(1PJ)**

固体廃棄物の  
**処理・処分**  
技術

### 補修・止水技術 (2PJ)

PCV  
漏えい箇所の  
**補修**技術

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)

**PCV  
内部調査**  
技術

**RPV  
内部調査**  
技術

燃料  
**デブリ  
性状  
把握**

<間接的調査>

RPV内  
**燃料デブ  
リ検知**  
技術

総合的な  
**炉内状況  
把握**  
の高度化

<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

# ニーズの洗い出し

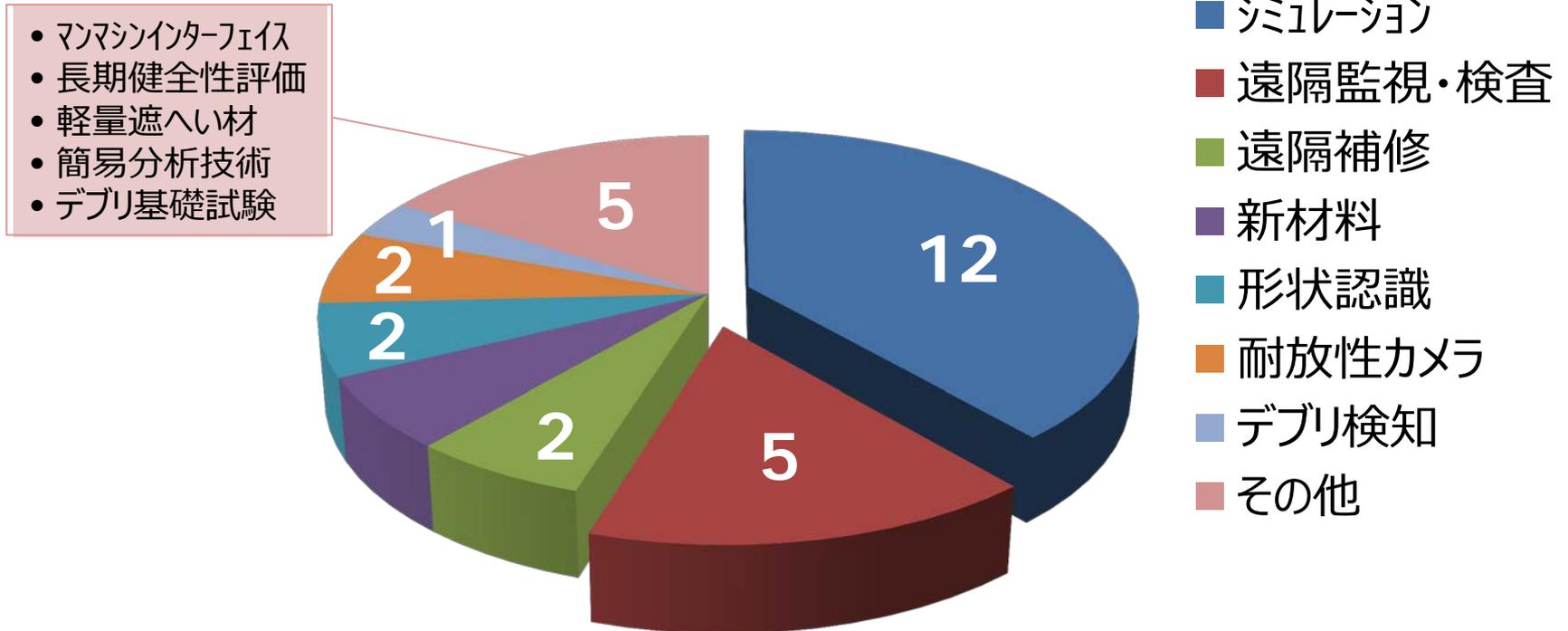
- PJ固有の課題のうち、自分たちだけでは解決が難しく、**大学等研究機関の力を借りたい**、研究開発ニーズ（基礎・基盤技術）を集約。

**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



# 大学との連携事例 ～遠隔除染技術の開発～

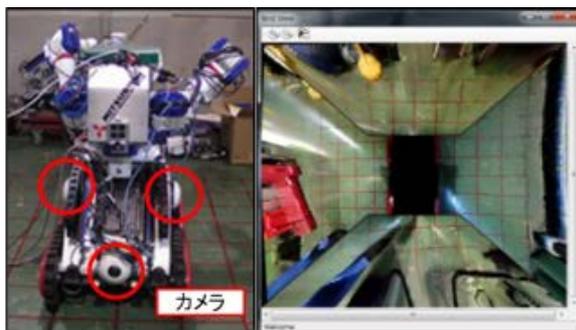
## 技術的課題

- カメラの情報のみでは**周囲の状況を把握しにくく**、ロボットの操作がしにくい。
- 多関節マニピュレータを狭い場所で動かすことは、**操作が複雑**で難しい。



### 周辺把握 1 【東京大 山下研究室】

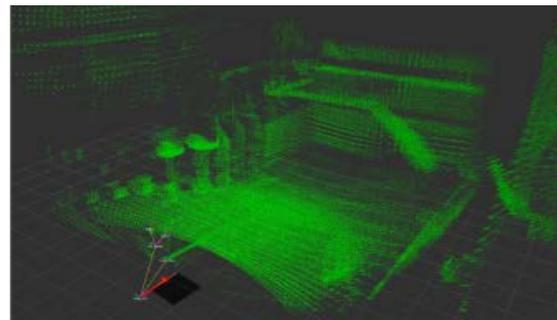
- 複数のカメラ画像を補正した**疑似俯瞰画像**表示技術



MEISTeRの疑似俯瞰画像  
IRID

### 周辺把握 2 【筑波大 坪内研究室】

- カメラやレーザセンサによる**3Dマッピング表示技術**

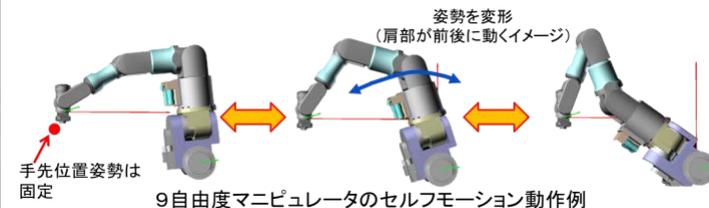


3Dマッピング画像

### 操作性向上 【神戸大 横小路研究室】

- 多自由度マニピュレータの**セルフモーション\***技術

\* : マニピュレータの手先とベースを固定した状態で全体の形を変化させる動作



セルフエモーション動作

# 大学に対するIRIDニーズ ～補修・止水の例～

## 技術的課題

- S/C内充填止水（ダウンカマ止水、クエンチャ止水、ストレナ止水、真空破壊弁止水）の**実規模試験は何度もできない。**

### 課題（ニーズ）

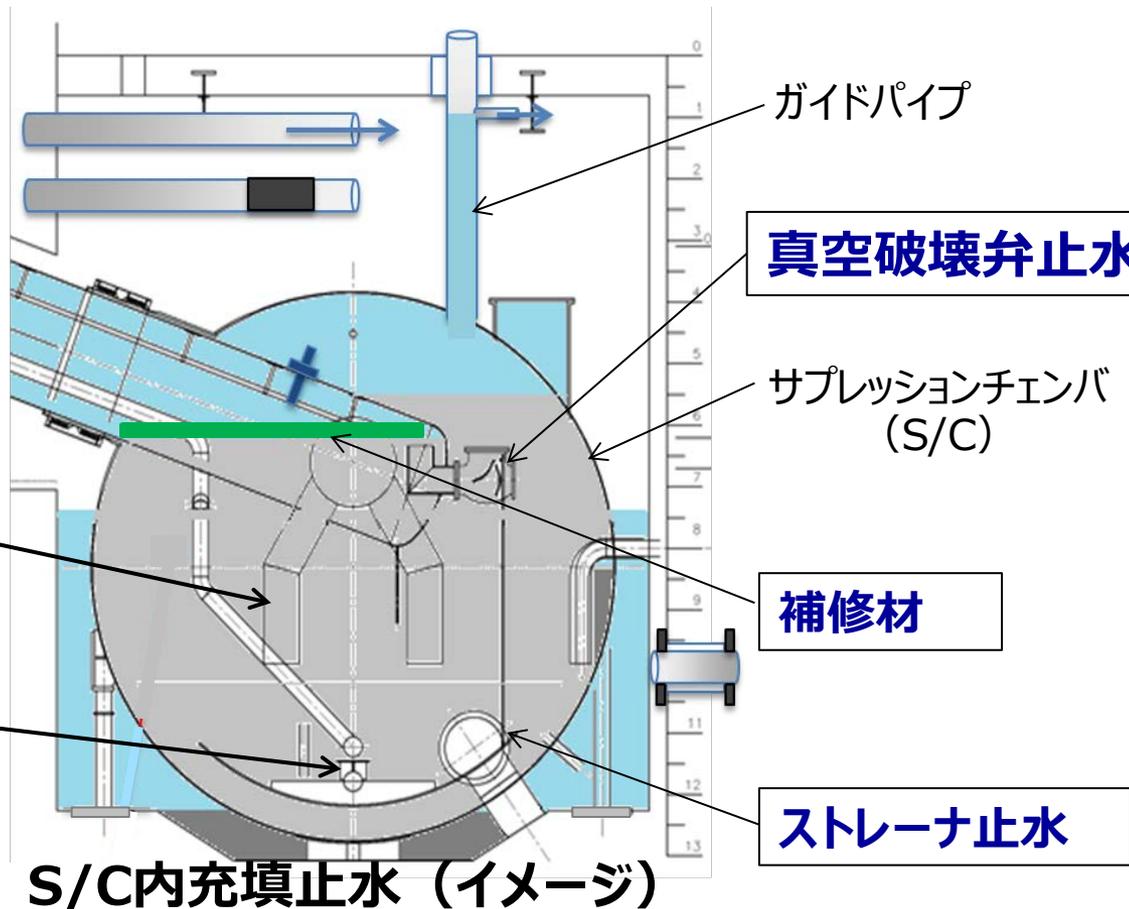
### 分類

セメント系材料を注入した場合の**流動挙動を事前に把握**したい。

シミュレーション技術

ダウンカマ止水

クエンチャ止水



# IRID主催の大学連携

## ■ IRID 受託プロジェクト内での受託企業から大学への委託研究

## ■ IRID 受託プロジェクト内でのIRIDから大学への委託研究（RFP）

## ■ 文部科学省プロジェクトの下でのワークショップ

■ 2013年 14回、2014年 5回、2015年 5回

## ■ IRID主催の大学とのワークショップ

### ■ 筑波大とのスモールワークショップ

- 2016年2月9日（火）PM
- テーマ：ロボット関連技術（知能ロボット研究室 坪内研他）
- 福島の場合／IRIDの研究開発／ロボット関連研究

### ■ 芝浦工業大学とのスモールワークショップ

- 2016年9月26日（月）13～16時
- 芝浦工業大学 機械機能工学科 松日楽研究室
- 福島の場合／IRIDの研究開発／ロボット関連研究

# 大学や研究機関とのワークショップ連携の例

## 文科省、原子力安全研究協会等との連携

### 平成25年度ワークショップ開催実績

14回 研究成果紹介、現状説明

### 平成26年度ワークショップ開催実績

1	1月25日	関東	東京工業大学
2	1月15日	東北	東北大学
3	1月22日	北陸	福井大学
4	3月6日	関東	地盤工学会
5	3月12日	関東・東北	東京大学

### 平成27年度ワークショップ開催実績・計画（事務局 J S T）

1	9月28日	東北	東北大学キックオフ
2	1月7日	関東	地盤工学会
3	1月22日	関東	東工大
4	3月2日	福島	福島大
5	3月16日	合同廃炉カンファ	東北大

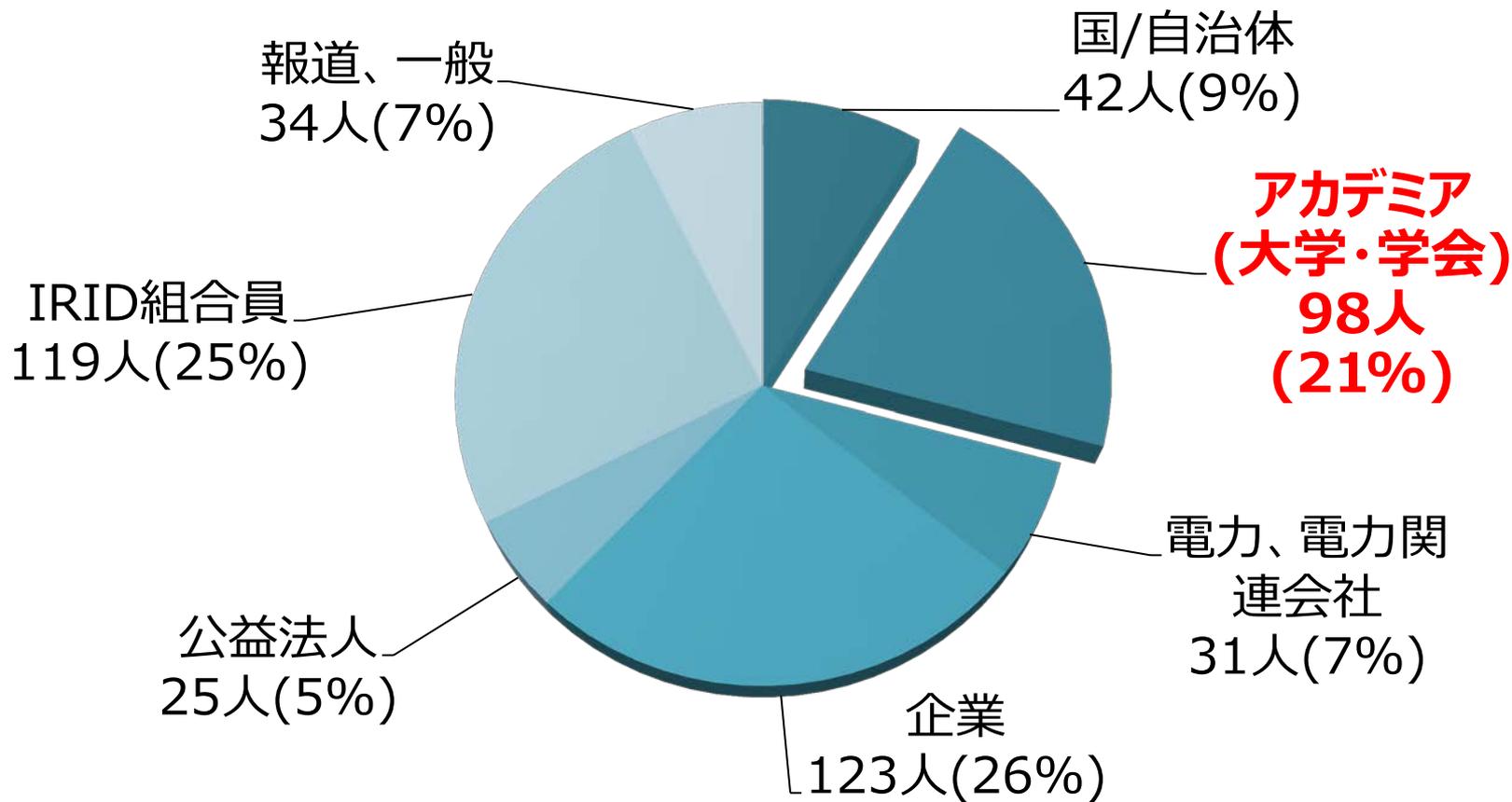


# 本日の構成

- 廃炉作業とは
- 廃炉用ロボットとは
- 廃炉用ロボットの課題
- 大学との連携
- 君に何を期待するか

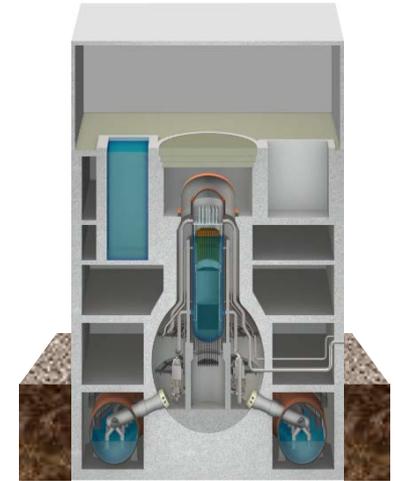
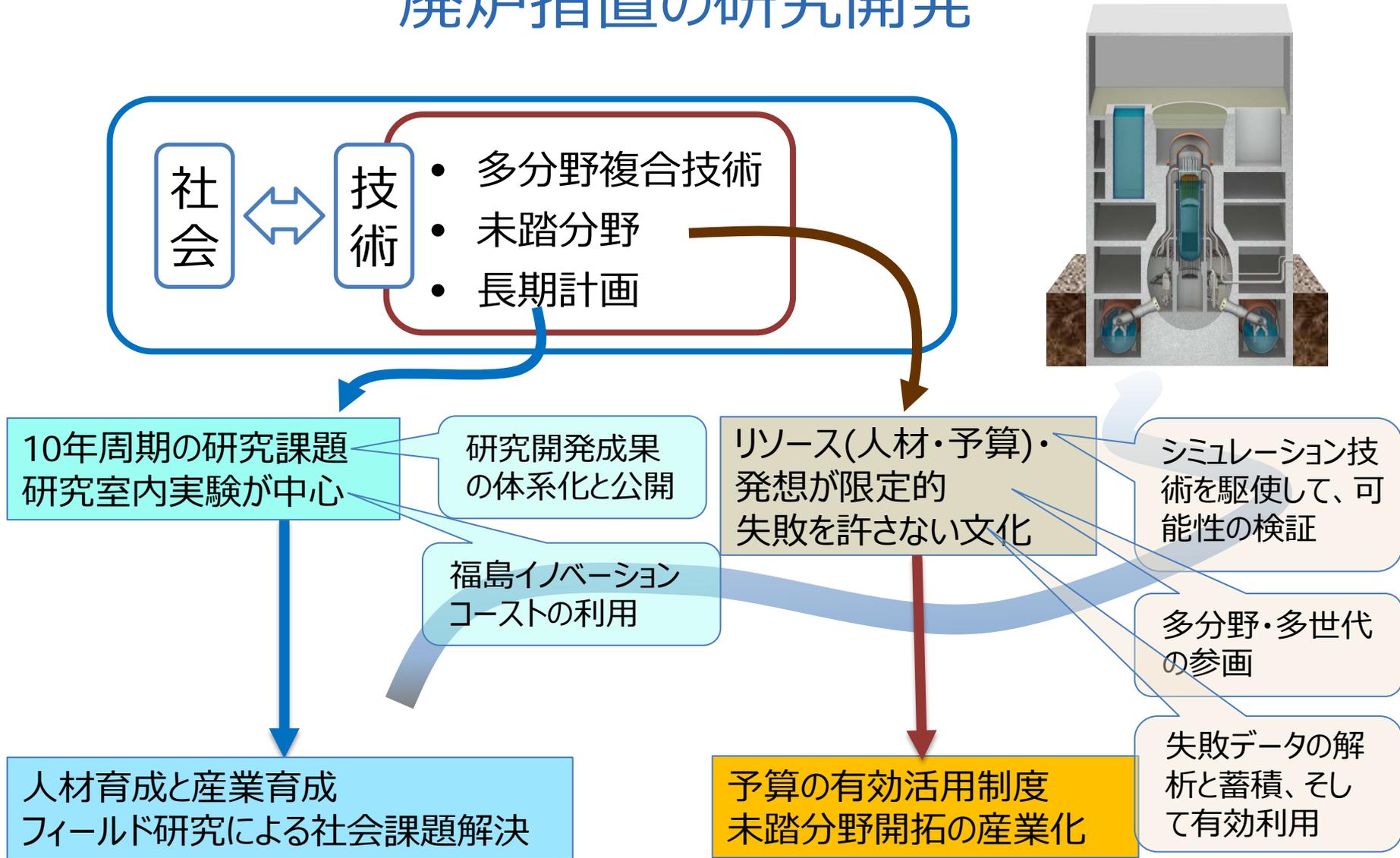
# IRIDシンポジウム2016申込者内訳

申込総数：472(人)※



※：7月19日時点での申し込み状況

# 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

# 1F廃炉の将来の担い手は？

- ▶ 廃炉は世代をまたいだ長期事業
- ▶ 現役技術者⇒次世代技術者へのたすきリレー



**学生の皆さん、  
廃炉の未来・解決に向けて、  
共に力を合わせよう**

ご清聴ありがとうございました

国際廃炉研究開発機構へのご支援をお願いします。

新井 民夫

tamio-aria@irid.or.jp