

福島第一原子力発電所の廃炉に 向けたロボット技術の現状と課題

日本原子力学会「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」委員

日本ロボット学会「廃炉に向けたロボットの調査研究と社会貢献に
関する研究会」委員

中央大学 大隅 久



講演内容

1. ロボット技術とは
2. 福島原発でのロボットの利用実績
 2. 1 利用されたロボット
 2. 2 ロボットの作業実績
 2. 3 ロボットの利用フェーズ
 2. 4 炉内状況の把握
3. デブリ取り出し作業の特殊性
 3. 1 作業・作業環境の特殊性
 3. 2 バウンダリ確保に伴うハードル
4. ロボット技術の課題
 4. 1 遠隔操縦(テレオペレーション)の課題
 4. 2 複雑な大空間での移動技術の課題
5. デブリ取り出しに向けて



1. ロボット技術とは

➤ ロボットは既成概念の無い機械

前例のない用途, 求められる機能, 機械構造

=> 実証(試行錯誤)が必要, 既存機構の流用/改造

➤ ロボットはシステムインテグレーションの成果

開発にはユーザとの連携が必須, 要素技術レベルがロボット性能を決める, エンジニアの力量が問われる

➤ ロボットの利用目的に応じて環境との関連が変わる

環境に合わせてロボットを造り込む(災害ロボット等)

ロボットが利用可能な環境を構築する(工場でのロボット)

これまでに無い用途に対して, ロボットが期待される
ロボット利用への課題はロボット技術だけではない

2. 福島原発でのロボットの利用実績

2.1 利用されたロボット

Packbot

アメリカの軍用ロボット



<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110428-01j.html>



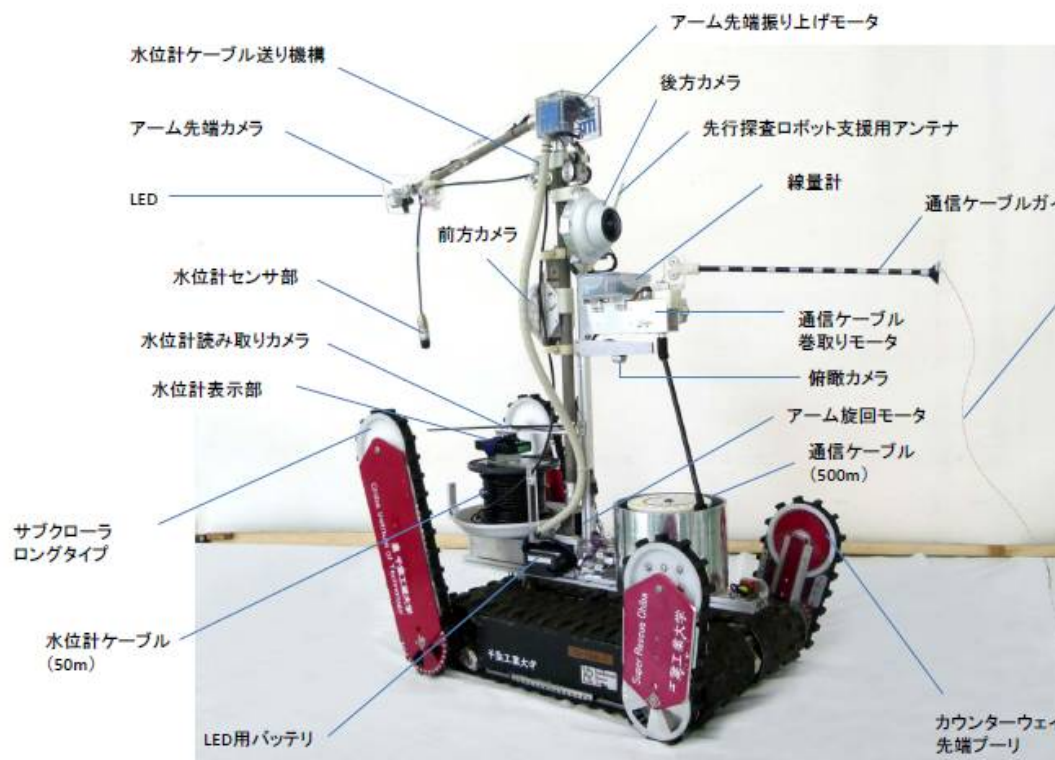
東京電力ホールディングス 写真・動画集 | 福島第一原子力発電所 原子炉建屋内パックボットによる撮影画像(写真) (tepco.co.jp)

<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110419-01j.html>

<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110427-01j.html>

Quince

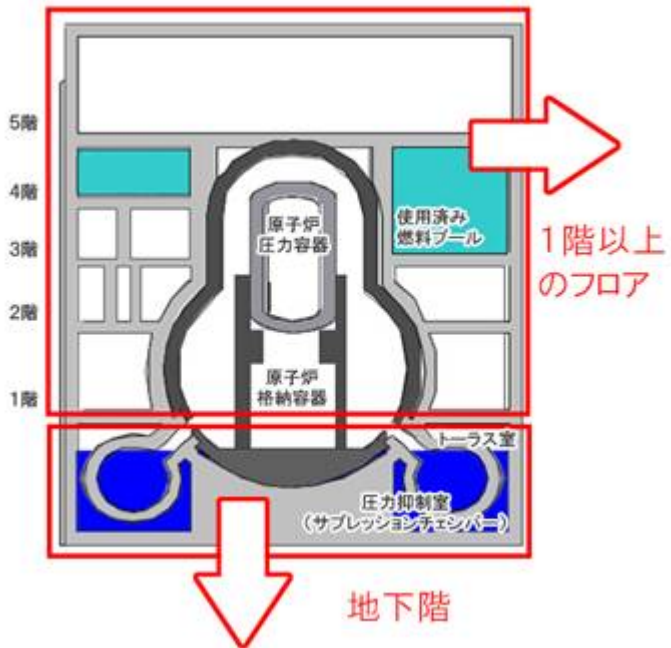
阪神淡路大震災を機に設立されたIRS
(国際レスキューシステム研究機構)により
開発され、造り込みが行われてきた災
害対応ロボット



<https://www.furo.org/ja/robot/quince/110608.html>

<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201107-j/110727-01j.html>

原子炉建屋内のロボット



原子炉建屋外でのロボット技術の利用

建設機械の遠隔操縦(無人化施工技術), コンクリートポンプ車

無人化施工技術による原発構内の瓦礫撤去

<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110428-02j.html>



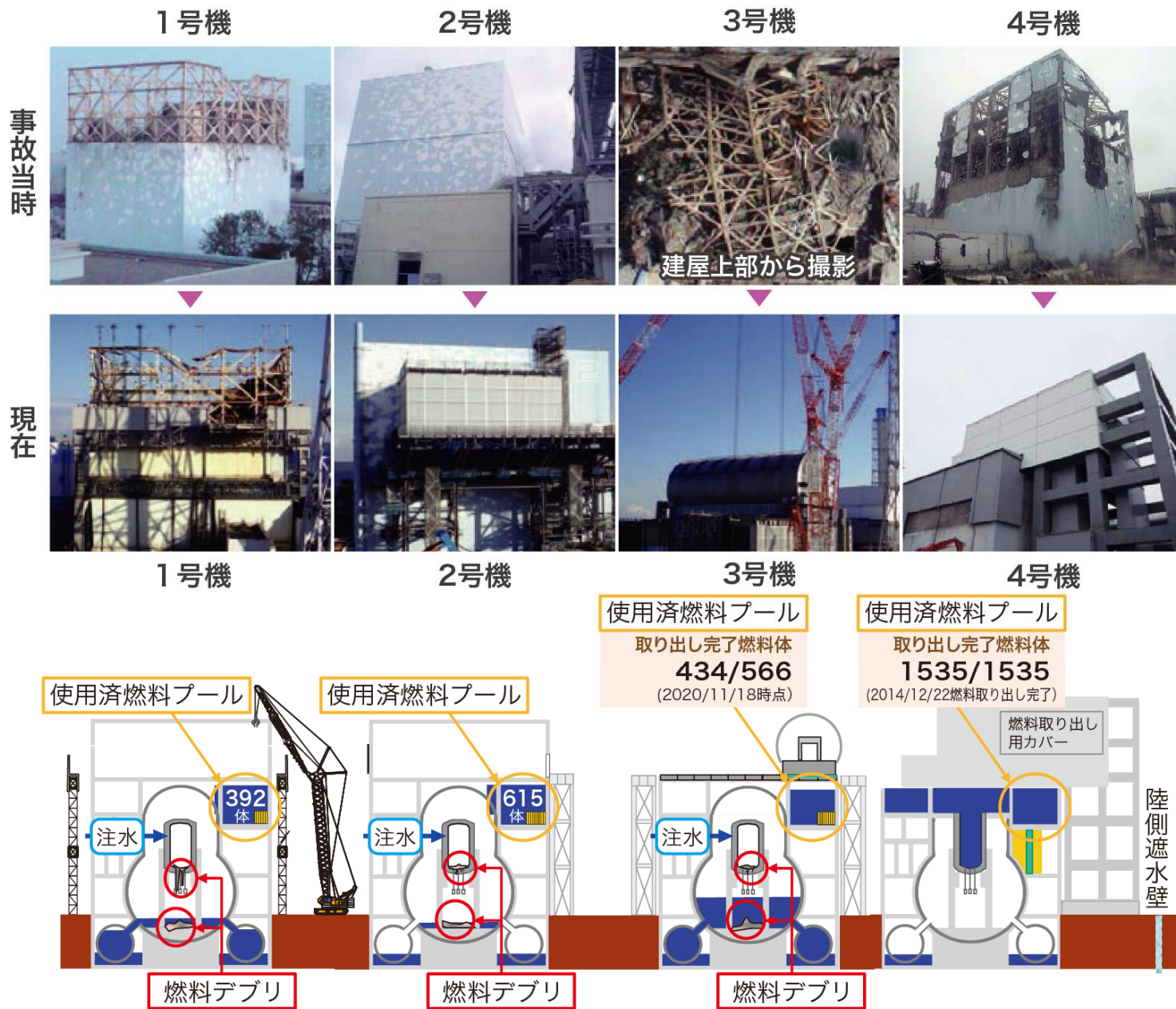
燃料プールの水を確保するためにコンクリートポンプ車の遠隔操作システム開発

https://photo.tepco.co.jp/library/110428_1/110429_1f_12.jpg

[廃炉ロボ技術を磨く・ゼネコンの挑戦\(3\)清水建設、遠隔クレーンにフル装備 | ロボット ニュース | 日刊工業新聞 電子版 \(nikkan.co.jp\)](#)

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/434576>

クレーンでプロペラの搭載されたベースマシンを懸垂することで、懸垂部の回転方向を制御(建屋屋上の瓦礫撤去)





2.2 ロボットの作業実績

事故直後 被災状況調査 (Packbot, Quince, …)
屋外サイトの瓦礫撤去 (無人化施工技術)
屋内瓦礫撤去 (AstacoSora, Warrior, …)

建屋内調査、除染、干渉物撤去…
(Packbot, Quince, AstacoSora, Warrior, …)

プールの瓦礫撤去, 使用済み燃料棒取り出し等
(クレーン, 遠隔技術, 建設ロボット技術)

- これまでは格納容器の外での利用
- 放射線量が極端に高いわけではない

2.3 ロボットの利用フェーズ

➤ 事故直後

- 被害状況調査
- 現場へのアクセス確保

➤ 被害状況調査, 建屋内環境整備

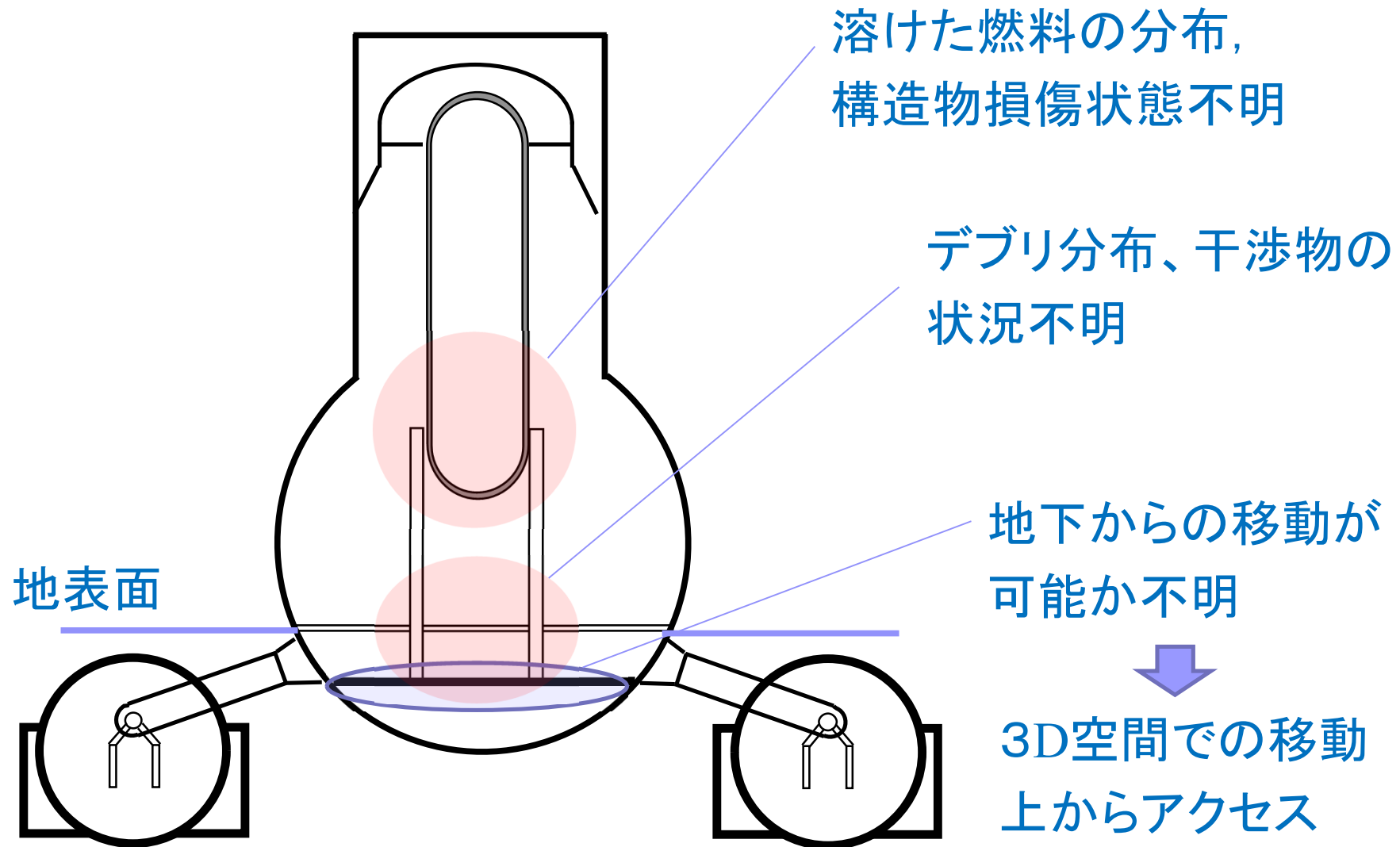
- 瓦礫・干渉物撤去, 除染
- 状況詳細調査

格納容器内部での利用

➤ デブリ取り出し

- 取り出し工法に必要な各種作業

2.4 炉内状況の把握



炉内調査ロボットシステム

ペDESTAL外側の調査（1号機）

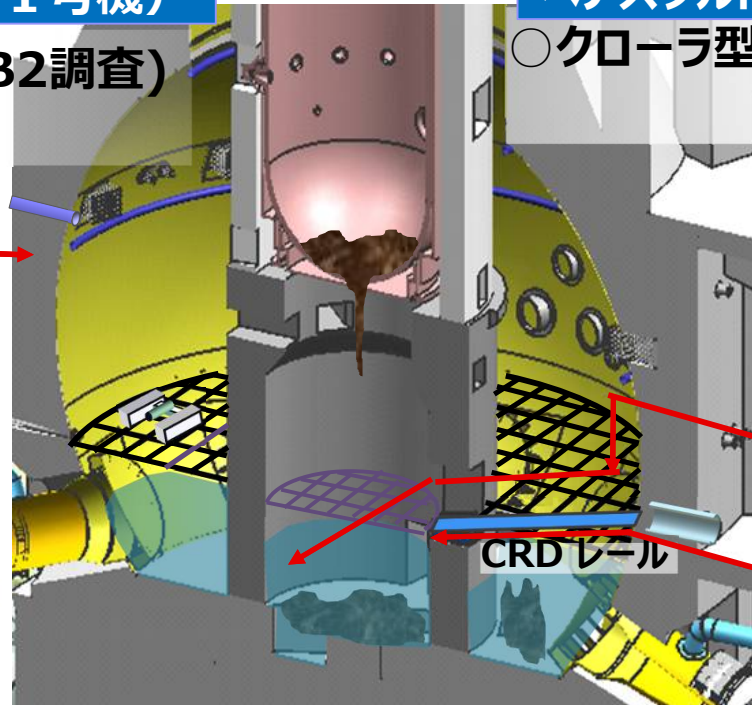
- 形状変化型ロボット（B2調査）
X-100Bペネ



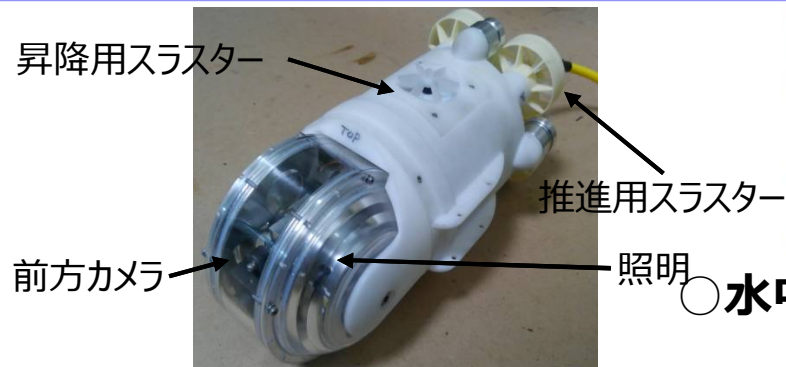
(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

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



ペDESTAL内側の調査（3号機）



- 水中遊泳型ロボット X-53ペネ

3. デブリ取り出し作業の特殊性

3.1 作業・作業環境の特殊性

➤ 格納容器内部での作業

人が**絶対**に近づけない場所での作業

- 全ての作業が遠隔での操縦
- 試行錯誤が難しい(高信頼性)
- 何年にも及ぶ繰り返し作業(メンテナンス性)
- 広範な3次元空間での作業(移動機構)

➤ 放射性物質を直接扱う

- 安全性とバウンダリ確保(アクセス装置, 専用容器)
- 耐放射線性(カメラ, センサ類)

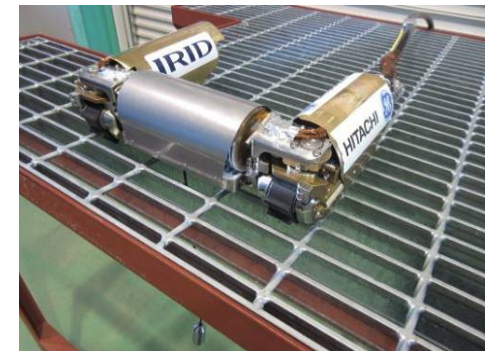
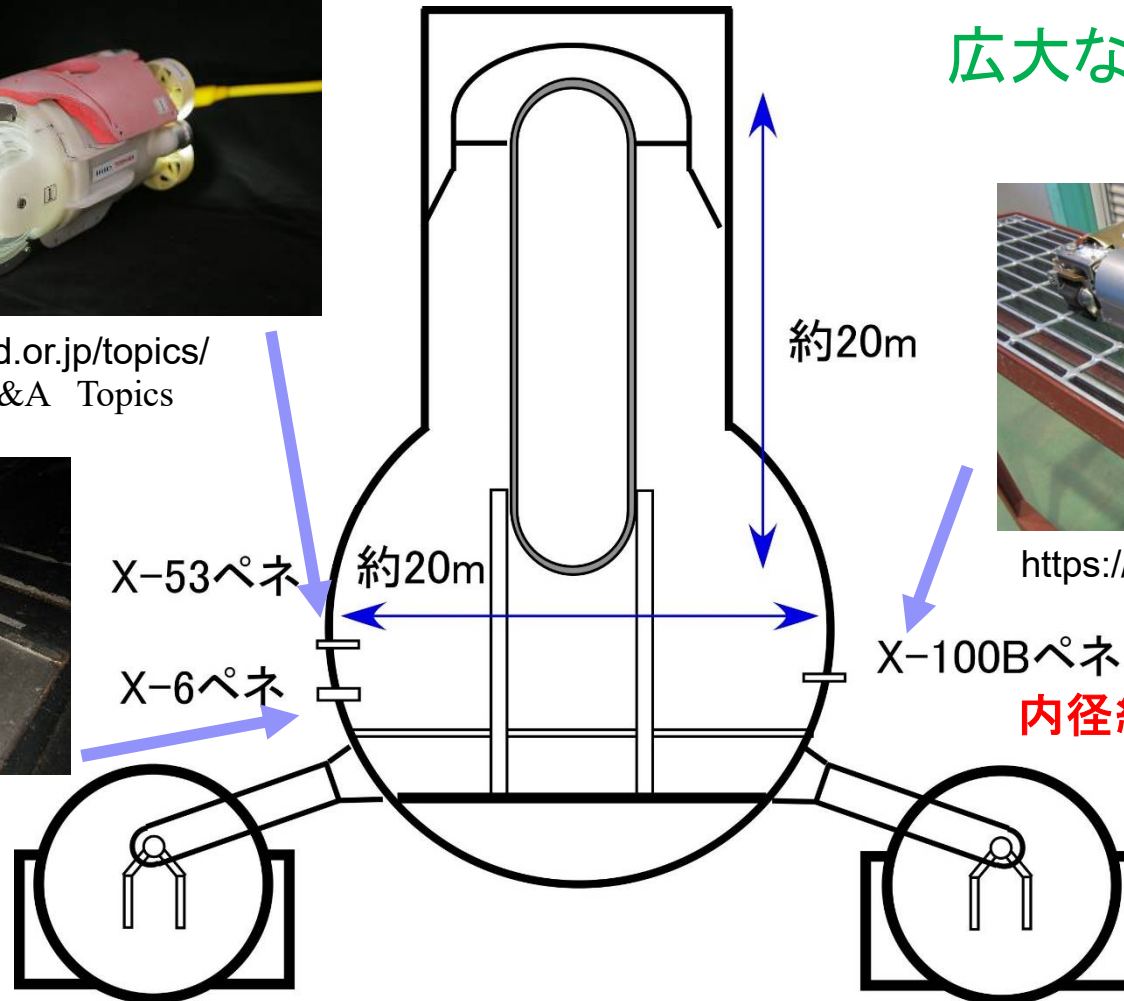
3. 2 バウンダリ確保に伴うハードル

1) 小さな出入口(ペネ)

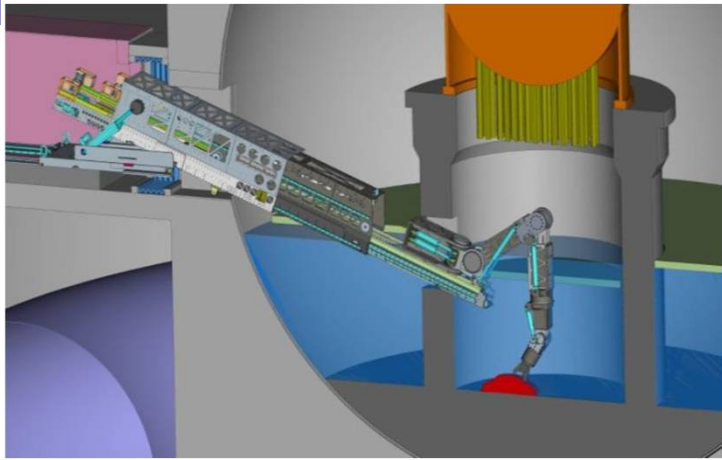
小型ロボットによる
広大な空間の調査



https://irid.or.jp/topics/IRID_R&A_Topics

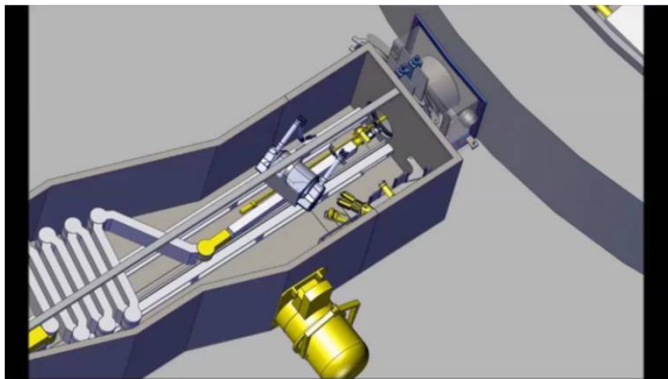


<https://irid.or.jp/topics/page/2/>

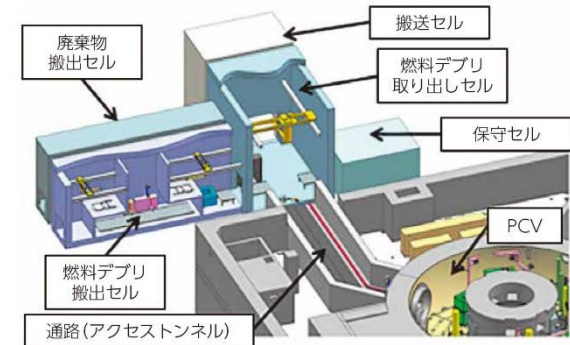


2) 全て囲う必要

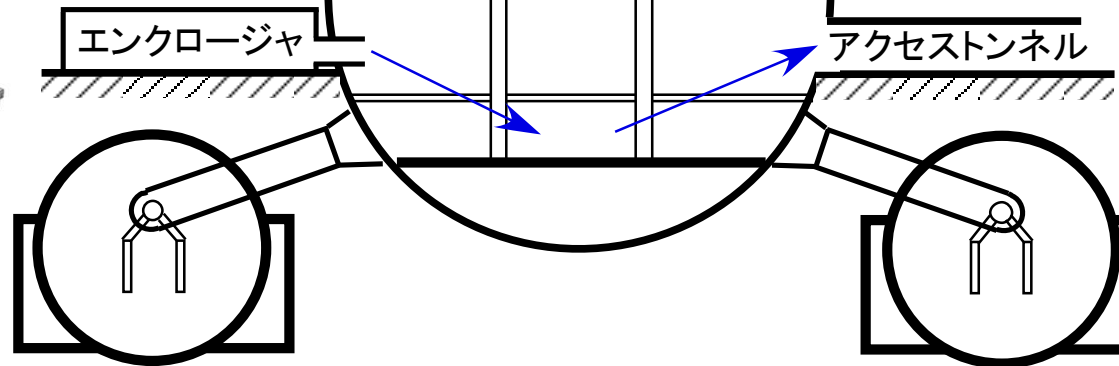
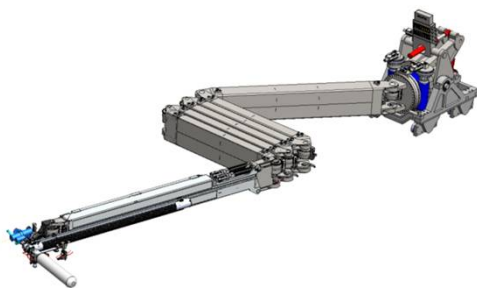
大型容器, プレハブ構造の設置
これらを運び込むのが大変



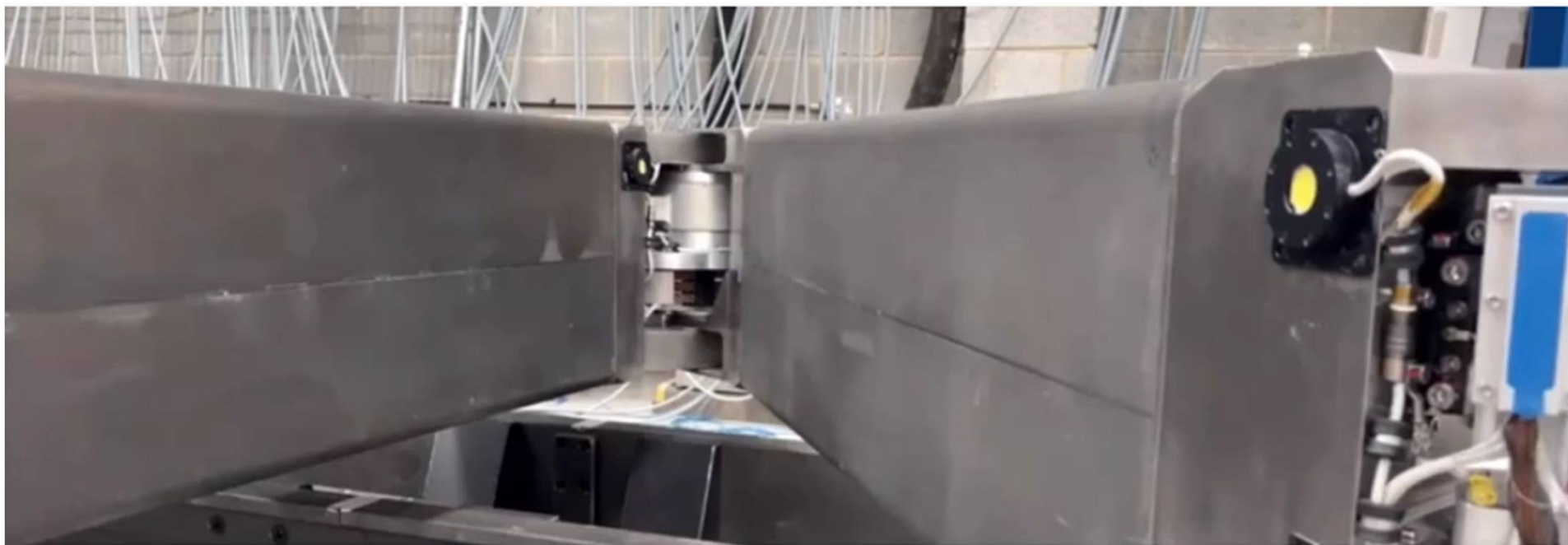
https://irid.or.jp/_pdf/20181011.pdfより引用・修正



https://irid.or.jp/_pdf/pamphleth29.pdf



内部詳細調査用ロボットアーム



原子炉格納容器内試験的取出し・内部詳細調査技術の開発
燃料デブリへアクセスするロボットアーム等の日英共同開発の状況

再生 (k)

IRID MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. VEOLIA

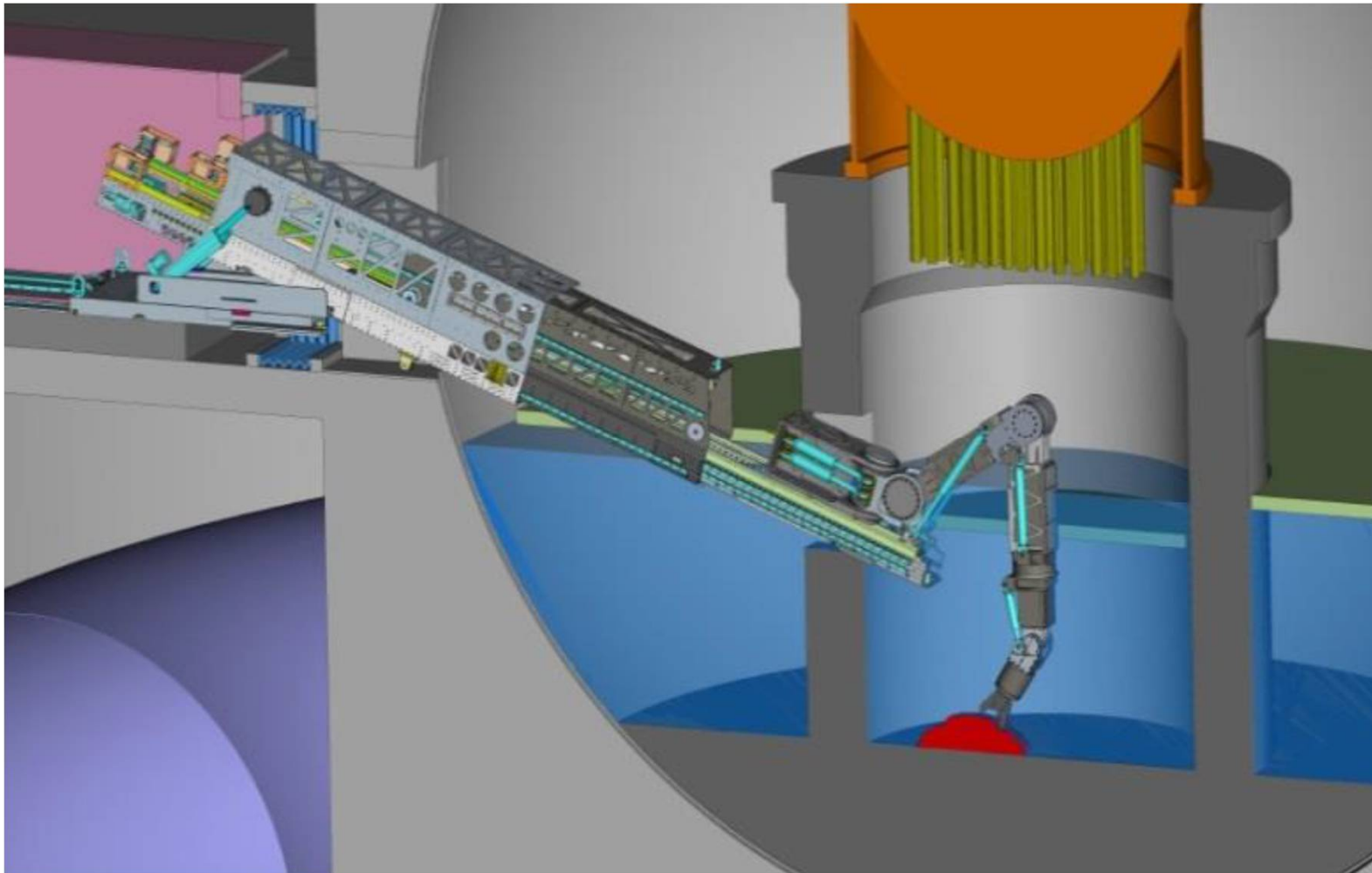


0:00 / 3:32



<https://www.youtube.com/channel/UCmqT4atLBPpSzVFglreLN2w>

デブリ取り出しに向けたロボット(2号機)



https://irid.or.jp/_pdf/20181011.pdfより引用・修正

デブリ取り出しに向けたロボット



TOP > R&D Topics > ペDESTAL内アクセス装置の試験・「ロボットアーム／アクセスレール」の開発状況について[開発担当: 三菱重工業] (2017年3月)

[ロボットアーム 編集動画 - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=XJtnBAw5CMY) <https://www.youtube.com/watch?v=XJtnBAw5CMY>



4. ロボット技術の課題

4.1 遠隔操縦(テレオペレーション)の課題

1) 遠隔での作業内容が多岐に渡る

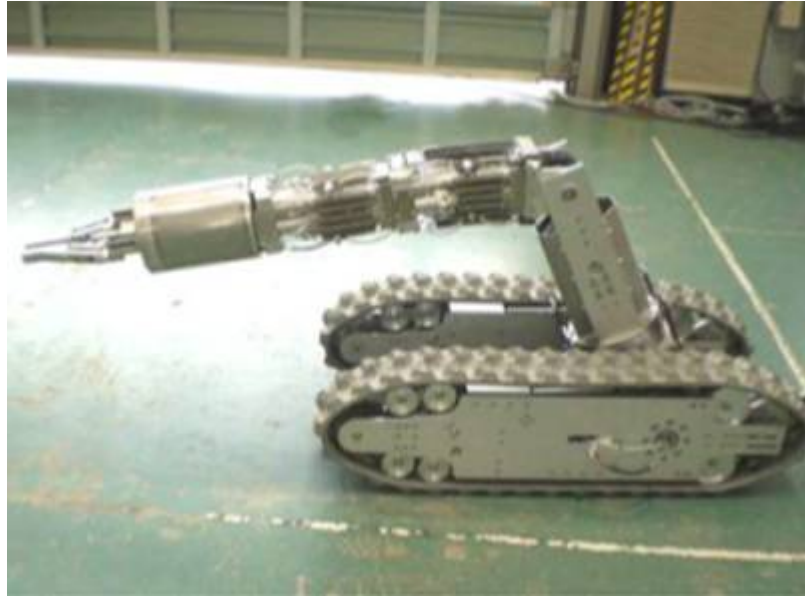
ただ動くだけか、力を出すのか？

力の制御, 機械インピーダンス, 摩擦, 時間遅れ...

筋肉ロボットは良いアイデア

2) オペレータへの情報提示、ユーザインタフェース

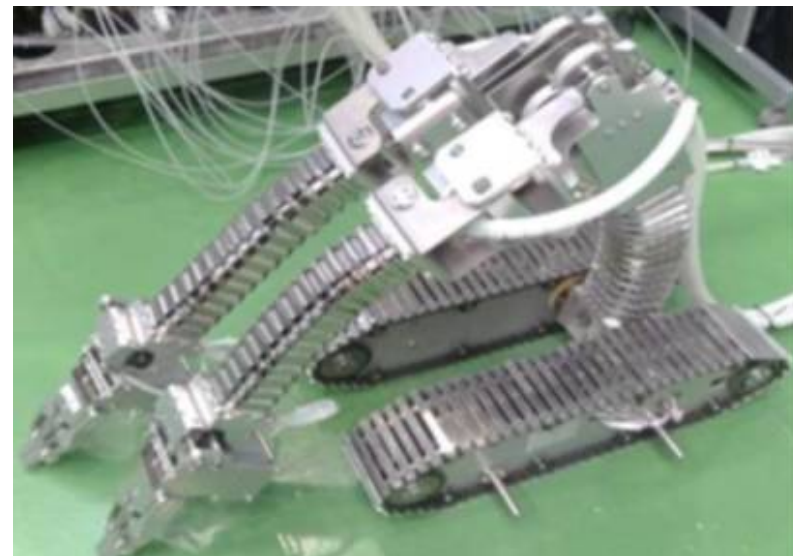
衝突回避(死角, 途中のアームリンク)のためのセンシングとオペレータへの情報提示, スケールファクタ, 照明環境の整備, ...



干渉物の解体／撤去

筋肉ロボット

<https://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/fukushima/index.html>





干渉物分解／撤去 筋肉ロボット

筋肉ロボット 紹介

「試験場所:中外テクノス株式会社」

<https://www.youtube.com/watch?v=wFZ99VASJhM>



4. 2 複雑な大空間での移動の課題

1) ハードウェアに関する技術

3Dでの確実な移動

長尺アーム, ドローン, 水中ROV,
ワイヤ懸垂システム

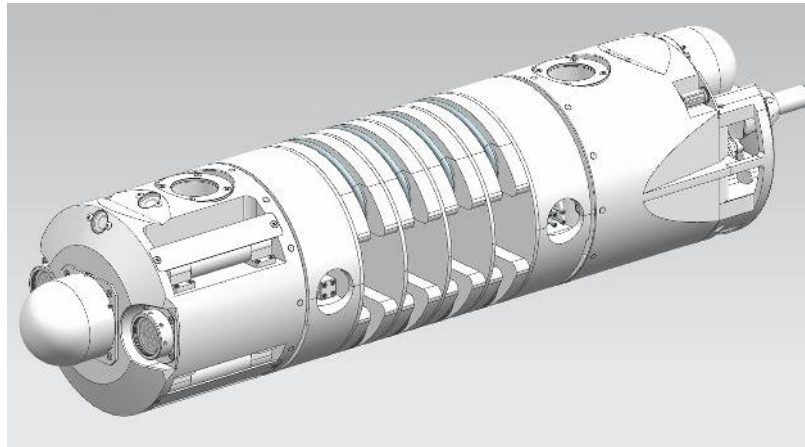
2) 操作系(ユーザインタフェース)の技術

オペレータへの情報の提示のためのセンシング
自己位置同定と環境モデルの生成
照明環境の整備

炉内調査：ボート型アクセス装置

■ 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作中(1号機)

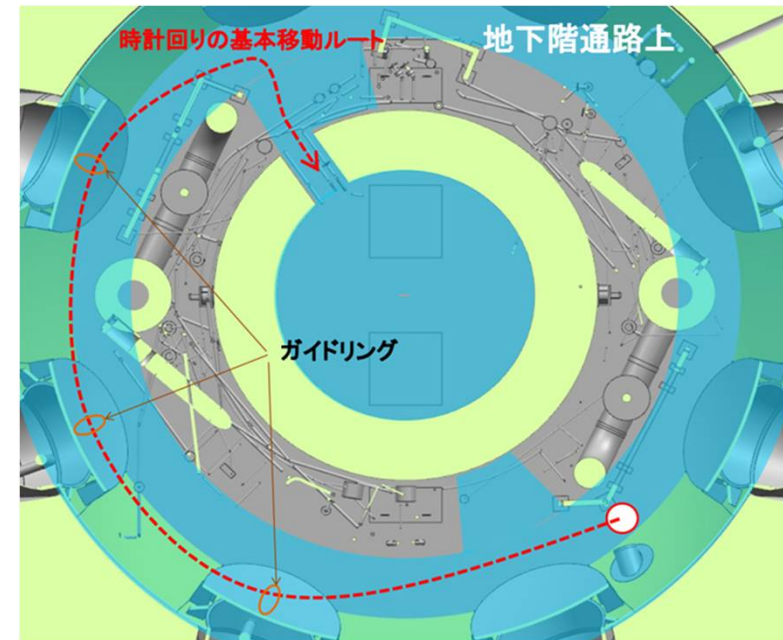
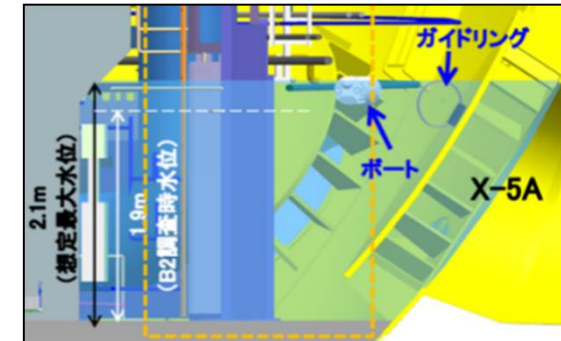
- 炉底の堆積物の厚さ調査
- ケーブルが絡まないようにガイドリング設置



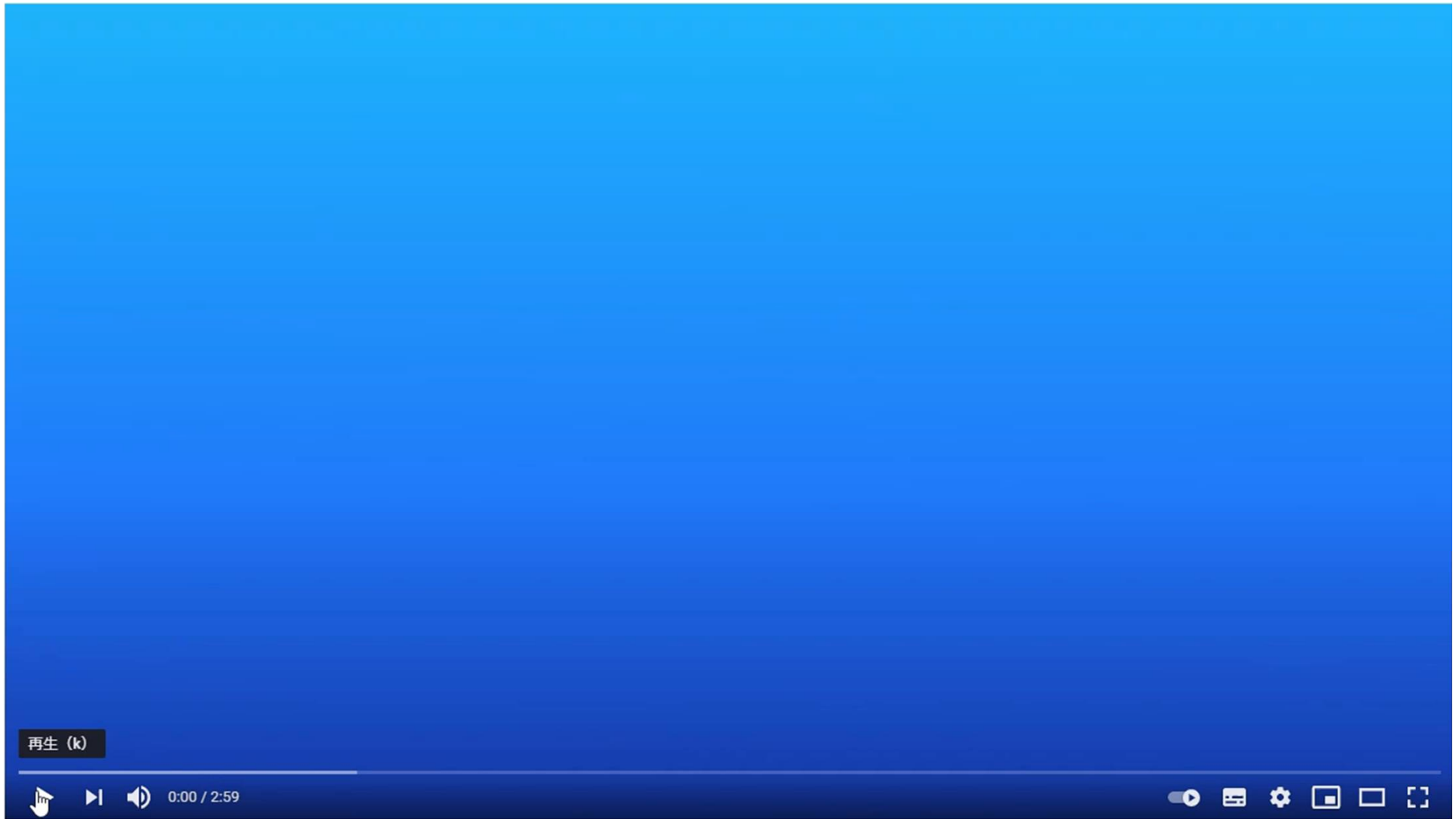
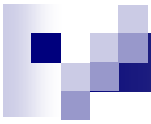
ガイドリング取付用の例

- 直径：φ25cm
- 長さ：約1.1m
- 推力：25N以上


ボート型アクセス装置外観



ボート型アクセス装置の動線



[福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部詳細調査用潜水機能付ボート型アクセス・調査装置について](#) [開発担当: 日立GE
ニュークリア・エナジー株式会社] | [技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 - IRID](#)



5. デブリ取り出しに向けて

- ▶ **ロボットはシステムインテグレーション技術**


- 最新技術チェック(技術カタログ更新)と工法への反映

- ロボットの利用環境の構築(ロボットが使える環境構築)

- ▶ **目標となる開発技術の明確化**

- 継続的なモニタリングとその結果に基づく目標設定更新

- 出来ていない技術の把握と情報共有



5. デブリ取り出しに向けて

➤ 遠隔操縦のための技術開発

多様な作業のための制御, ユーザインタフェース
作業状況のモニタリング

➤ 遠隔地での3次元移動技術

ドローン活用への期待

移動ロボットの自己位置同定

環境のモデル化, 提示による操作者支援

日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会ROBOMECH2021(発表1132件)

原子力施設廃止措置のためのロボティクス・メカトロニクス(講演題目リスト:11件)

センシング・モデリング

LiDARの反射強度及び溜水の計測情報を利用した大域的点群位置合わせによるSLAMの性能向上
被災地環境における直線情報に基づく深度カメラとサーモグラフの融合による移動ロボットを用いた3次元温度情報マッピング
未知環境の温度分布を考慮したdynamic window approachによる遠隔操作移動ロボットの半自律運動生成
原子炉内状態把握のための画像からの立体復元手法の開発

ハードウェア開発

原子炉圧力容器調査のための軽量テレスコピックブームの開発
ワイヤ干渉駆動型長尺多関節アームSuper Dragonの実規模スケールにおける探索動作の位置精度調査
事故炉格納容器内部を常時観察するための屈曲可能なモジュール分割型軌道の開発
原子炉内部調査用モニタリングアームの開発

操作者支援

廃炉作業における操作者支援のための時系列画像からの構造物の立体復元
俯瞰カメラを用いた水中ロボットの自律制御と遠隔操縦援用GUIシステム
ロボットシミュレータを用いた遠隔操作訓練システムの開発

難しいのは格納容器内の環境条件を満たすこと

未知環境 ⇒ 既知環境へ

継続的なステップバイステップの取り組み