

# 1F廃炉の技術マネジメントを考える ～燃料デブリの試験的取り出しを事例に～

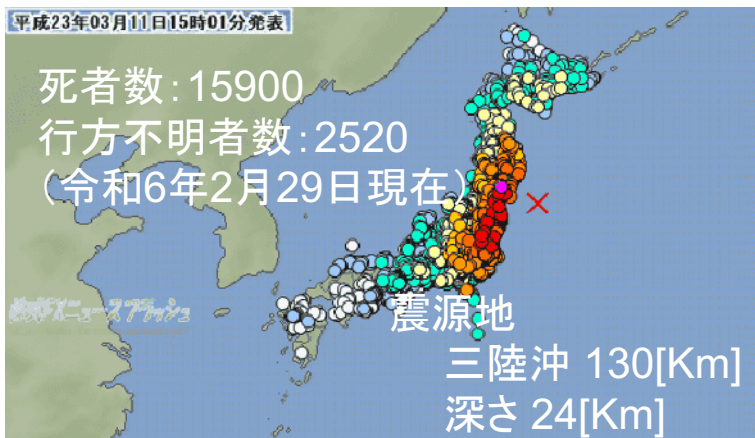
東京大学 国際高等研究所 東京カレッジ  
浅間 一

<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/asamalab/>  
[asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp)

# 東日本大震災(地震, そして津波)

## 地震

- 2011年3月11日14:46
- マグニチュード:M9.0
- 最大震度:7



## 津波

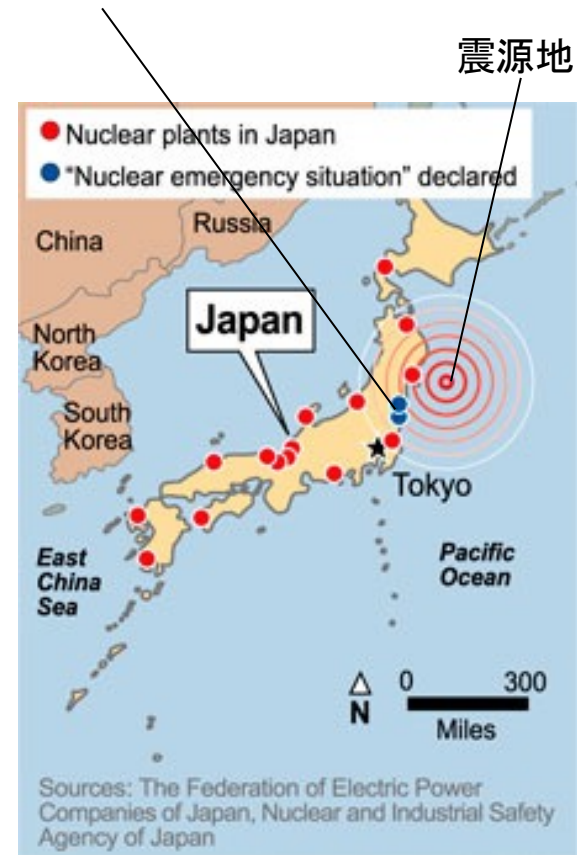
- 30分~1時間後
- 最大波高:40.5[m]



# 福島第一原子力発電所事故

- 地震発生 (14:47)
- 電源停止
- 非常用ディーゼル発電機作動
- 原子炉停止 (SCRAM)
- 津波襲来
- 燃料タンクおよび発電機被災
- 全交流電源喪失(SBO: Station Blackout) (15:39)
- 原子炉および燃料貯蔵プールの冷却系異常
- 冷却水の減少
- メルトダウン
- 水素爆発 (3月12日～15日)

福島第一原子力発電所



By Janet Loehrke, USA TODAY

# 主な原子力施設の事故

- スリーマイル島原発事故(米国)
  - 1979年3月28日
  - Level 5(冷却材喪失)
- チェルノブイリ原発事故(ソビエト)
  - 1986年4月26日
  - Level 7(炉心溶融, 爆発)
- 東海村JCO臨界事故(日本)
  - 1999年9月30日
  - Level 4(臨界事故)
- 福島原発事故(日本)
  - 2011年3月11日
  - Level 7(炉心溶融, 爆発)





# 東海村JCO臨界事故

- 1999年9月30日、JCO東海事業所の核燃料加工施設内で核燃料を加工していた最中、ウラン溶液が臨界に達して核分裂連鎖反応が発生し、この状態が約20時間持続した。これにより、至近距離で多量の中性子線を浴びた作業員3名中、2名が死亡、1名が重症となったほか、667名の被曝者を出した。
- 国際原子力事象評価尺度 (INES) でレベル4(事業所外への大きなリスクを伴わない)の事故

(Wikipedia)

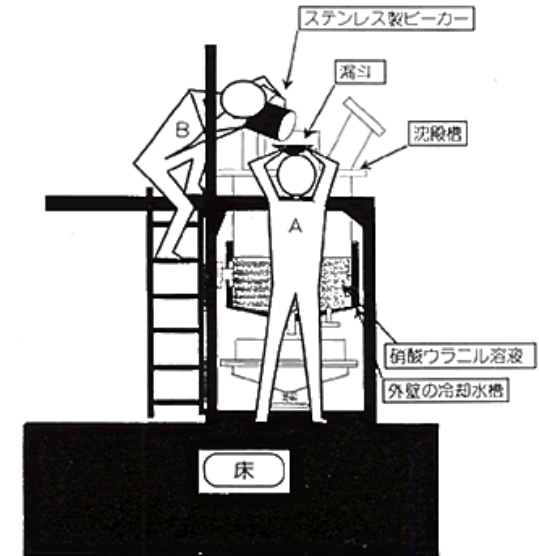
[https://www.ies.or.jp/publicity\\_j/mini\\_hyakka/60/mini60.html](https://www.ies.or.jp/publicity_j/mini_hyakka/60/mini60.html)

(参考)

放射線起爆治療:

放射線障害の治療に当たっては、まず救命が優先される。生命に別状がなければ急ぎ除染を行い医師の診断治療を受ける。治療には、汚染外傷治療や体内汚染治療の除染治療と被ばくによる放射線障害の治療とがある。

[https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_09-03-05-01.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-03-05-01.html)



# 事故直後の様子



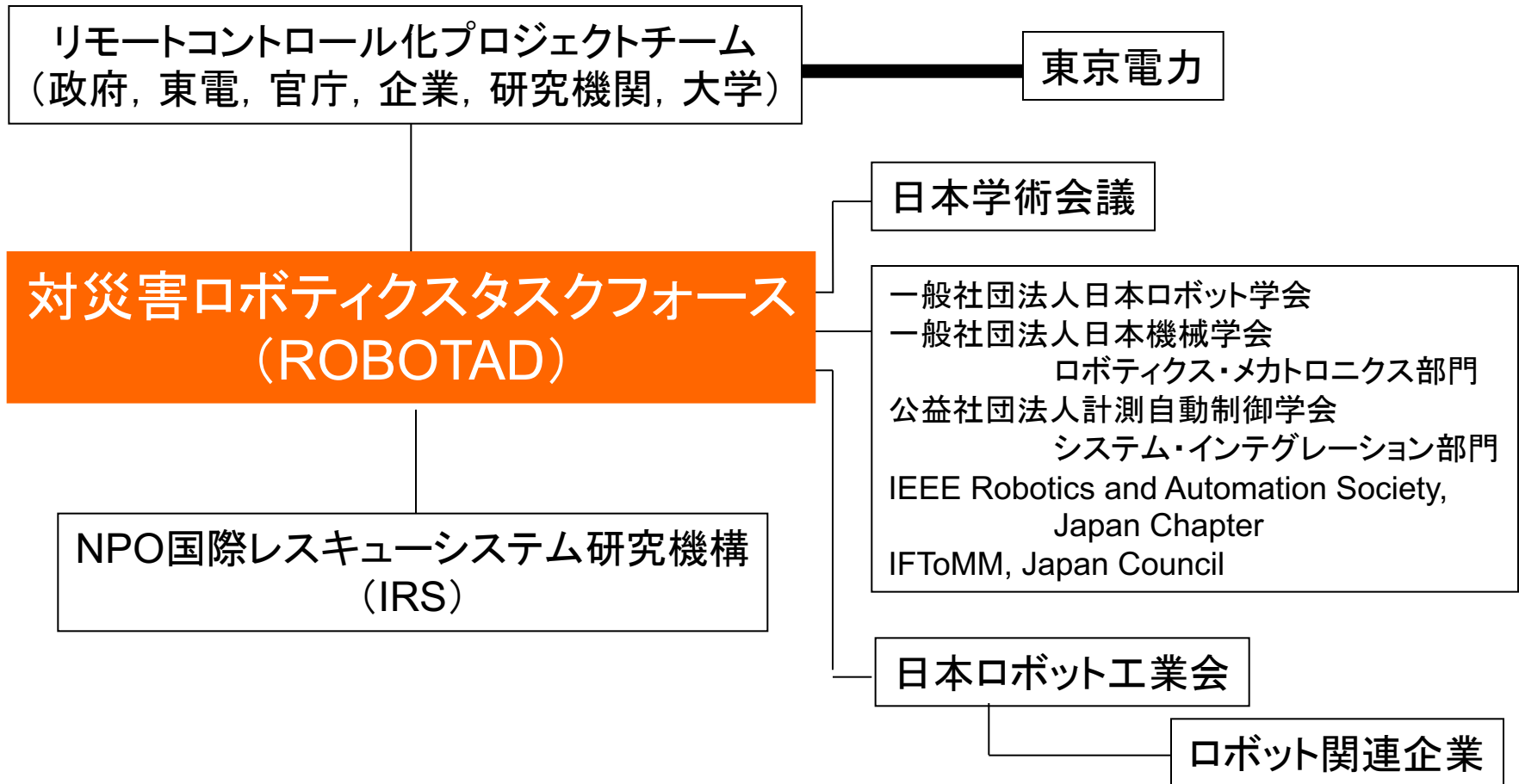
# ROBOTADとは

ROBOTics Task force for Anti-Disaster  
(ROBOTics - Temporary Active Duty)  
<http://roboticstaskforce.wordpress.com/>

Anchorman: 中村仁彦  
Chairman: 浅間 一

- 3月31日設立. ロボット技術に関する専門家・科学者集団
- 東日本大震災と福島原子力災害の対応・復旧・復興のためのロボット技術適用
- 主な活動内容(緊急性の高い活動)
  - 動作環境やミッションに応じた最適なロボット技術・ソリューションの提供
  - 現場での補強, 改造も含めた導入・運用における実働支援
  - そのための技術情報の発信
- これまでの実績
  - ロボット技術導入のための具体的技術的検討(耐放射線機能, 走破性, 通信, 等)
  - HPによる技術的情報や導入実績などの発信
  - リモートコントロール化PTへの協力
- 関連5学会・日本学術会議・産業界との連携
- 窓口: 国際レスキューシステム研究機構(IRS)

# ROBOTADの位置づけ





平成 23 年 4 月 4 日

日本ロボット技術関連学術団体共同声明

東日本大震災およびそれに伴う福島原子力災害に対する  
日本のロボット技術の適用に関する声明

一般社団法人日本ロボット学会

一般社団法人日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門

公益社団法人計測自動制御学会システム・インテグレーション部門

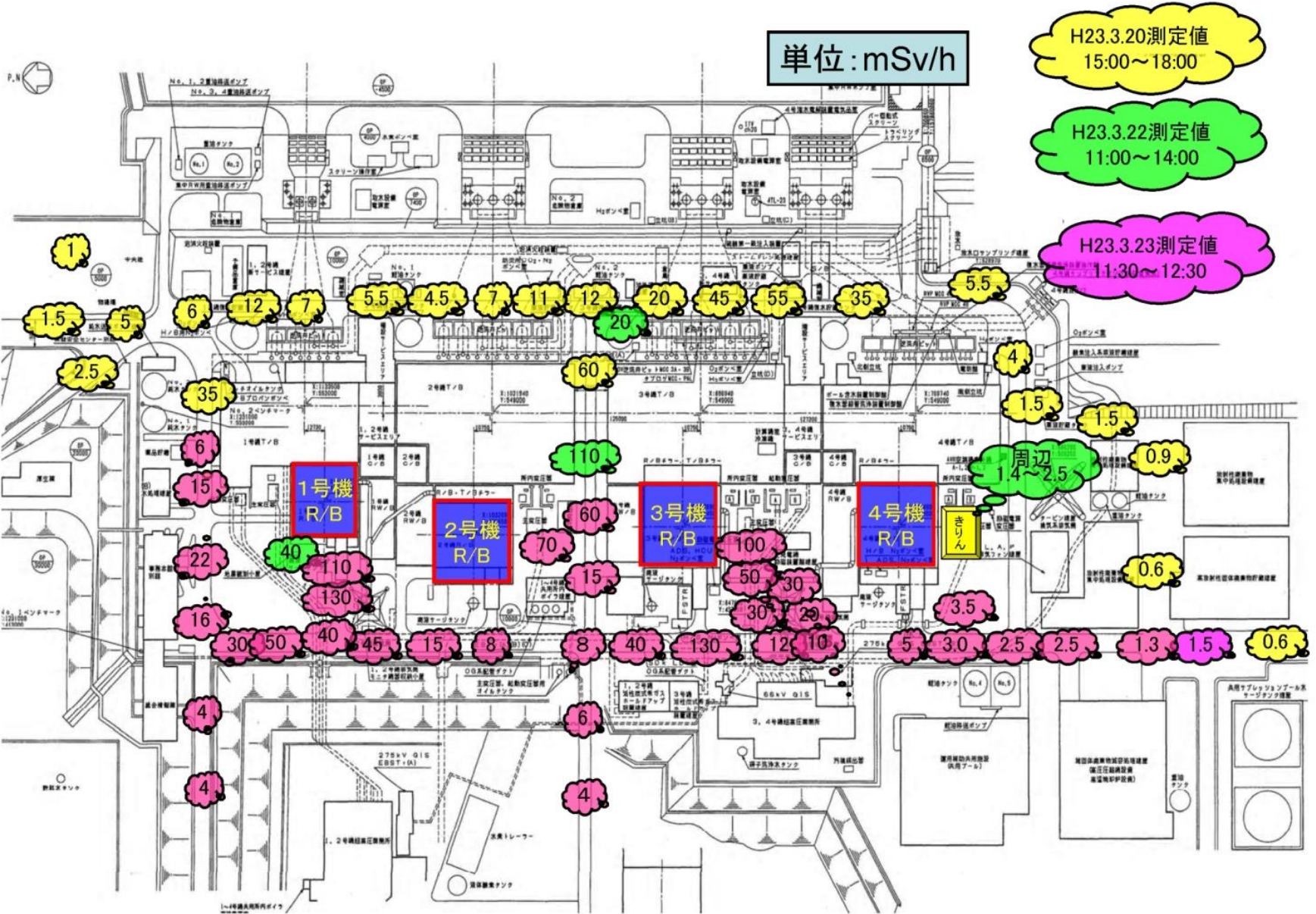
IEEE Robotics and Automation Society, Japan Chapter

声明

東日本大震災およびそれに伴う福島原子力災害への対策およびそれからの復興に向け貢献するとの強い決意のもと、ロボット技術に関連する学術団体が専門の観点から技術上の問題ならびにその適用と運用の方策などに関して発言する。

わが国には災害対策にかかわるロボット技術の研究開発の蓄積がある。また、わが国のロボット技術関連学術団体は世界の災害対策に関わるロボット技術にも深く関与しており、世界の研究

福島第一サーベイマップ(平成23年3月23日現在)





# 福島第一原子力発電所災害対策復旧特別PT



特別PT:

- (1)放射線遮蔽・放射性物質放出低減対策(中長期対策)
- (2)放射線燃料取り出し・移送
- (3)リモートコントロール化
- (4)長期冷却構築
- (5)放射性滞留水の回収・処理
- (6)環境影響評価

# 遠隔技術共通基盤タスクフォース

- 2012年4月設置(委員長:浅間 一)
- METI, TEPCO, プラントメーカー, 学識研究者など
- 現場での事故対応, 廃炉で必要となる遠隔技術の技術的課題のソリューションの検討
- 個別の課題に関してWGを設置
  - 4足歩行ロボットWG(主査:米田 完)
  - 水中遊泳ロボットWG(主査:浦 環)
  - S/C内水位測定WG(主査:松日楽信人)



# 技術カタログ

プラントメーカーが、国内外の各種研究機関や民間会社で所有する、除染技術、除染の遠隔操作関連技術、格納容器の点検／補修等の遠隔操作等の走行機器や計測機器に関連する技術などで、中長期措置における研究開発に適用可能な技術を広く調査・把握し、これを技術カタログとしてまとめ、これを参照しながら開発を進めることとした

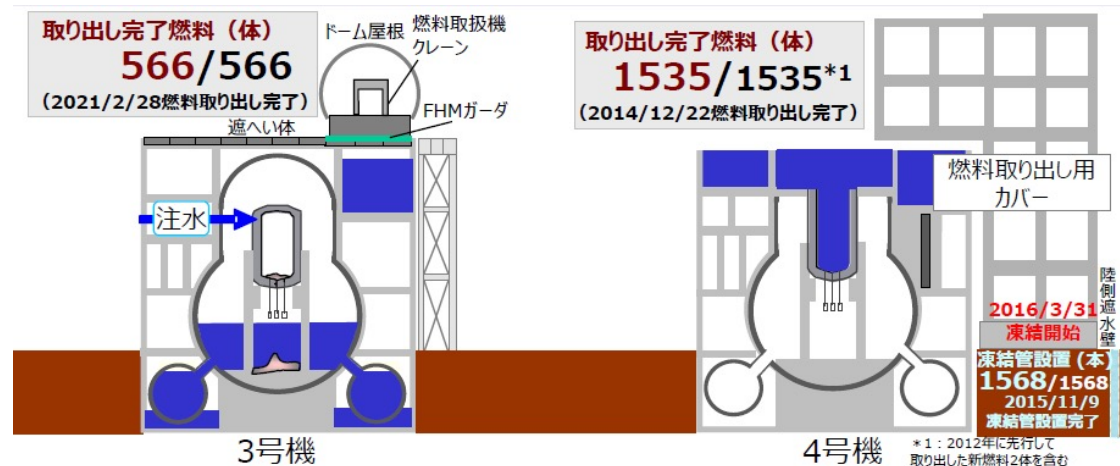
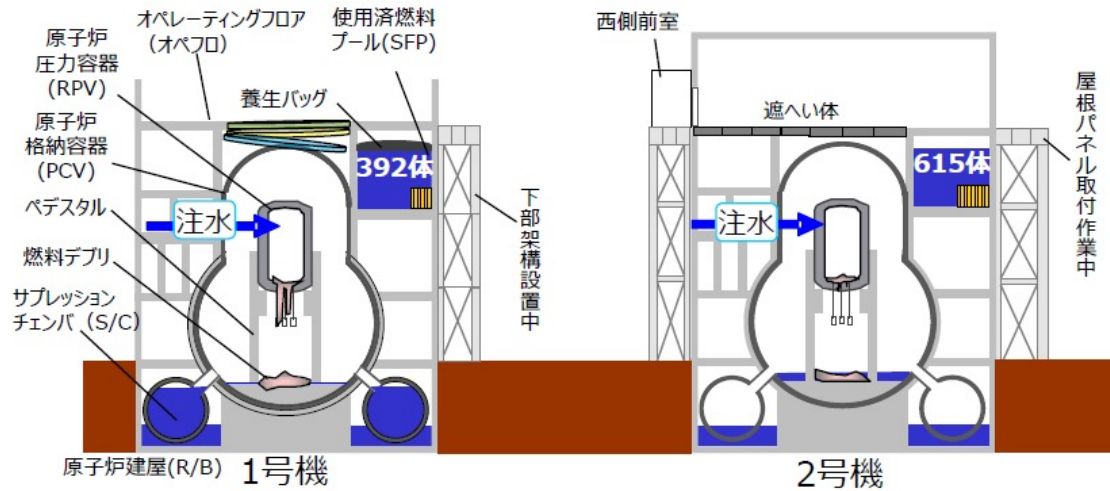
国内外のベンダーを対象として、

- ① 建屋除染に関する技術及び除染システムを搭載遠隔操作に関連する技術
- ② 遠隔操作等の走行機器や計測機器に関連する技術

に関する公募を行い、395件の技術を技術カタログに収録するとともに、この技術カタログをもとに機器の仕様を決め、公募を行うなどして、国内外の有用な技術を調達しながら、開発を進めた

# 各原子炉の状況

廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第129回)資料



# 福島第一原子力発電所災害対策復旧特別PT

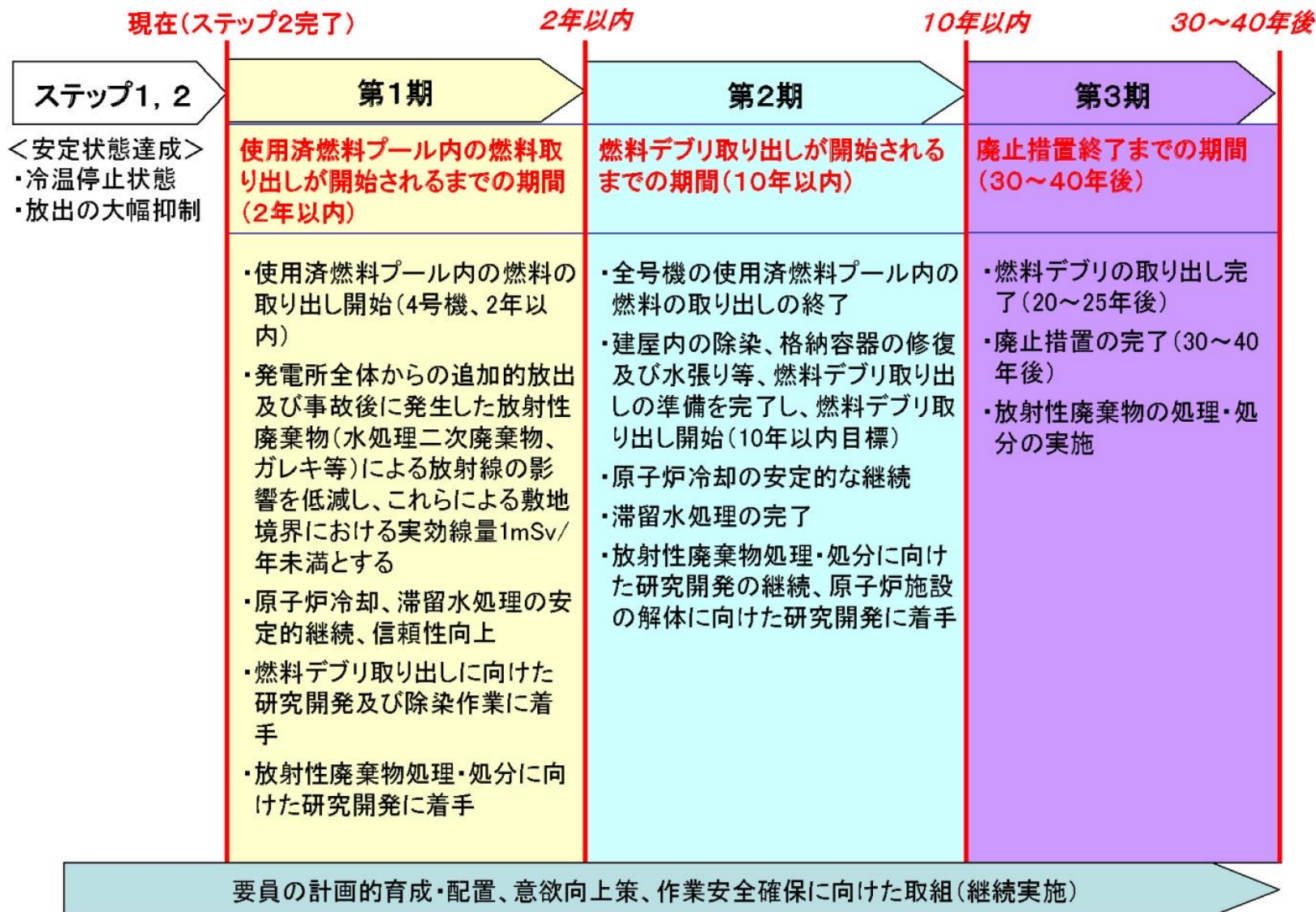


特別PT:

- (1)放射線遮蔽・放射性物質放出低減対策(中長期対策)
- (2)放射線燃料取り出し・移送
- (3)リモートコントロール化
- (4)長期冷却構築
- (5)放射性滞留水の回収・処理
- (6)環境影響評価



# 中長期ロードマップの概要





# 原子力発電所の事故対応・廃止措置における ロボットのニーズ

- ミッション
  - 冷却系の安定化
  - 封じ込め
  - 廃炉
  - 現場作業員の被曝の低減
- タスク
  - 瓦礫除去
  - サーベイマップの自動作成(放射線測定)
  - 建屋(原子炉建屋, タービン建屋)内調査(映像, 放射線量, 温度, 湿度, 酸素濃度, 等)
  - 計測機器などの設置, サンプル採取
  - 遮蔽, 除染
  - 機材の運搬
  - 配管・機器の設置

# 無人化施工機械の導入

## 2011年4月6日

- 瓦礫処理無人化施工開始
- 大成建設・鹿島建設・清水建設JV
- 使用機械 (4/6導入台数／総予定台数)
  - バックホウ(アイアンフォーク) (1台／2台)
  - バックホウ(ニブラ) (0台／1台)
  - クローラダンプ(11t) (1台／3台)
  - オペレータ車 (1台／2台)
  - カメラ車 (1台／9台)

(東京電力提供)



処理前



コンテナ1個分の処理後



積み込み時配置

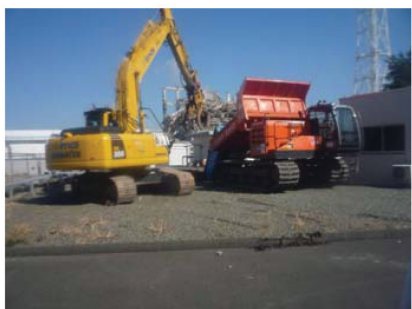


ガレキ積み込み



コンテナふた

ガレキ積み込み作業（約2時間）



仮置き場設置作業



仮置き場状況（コンテナ周辺約2.5mSv/h）

移送・仮置き場設置作業（約1時間）



定置時配置



遠隔操作重機によるガレキ撤去作業

(撤去前)



(コンテナ: 3.2 × 1.6 × 1.1m、約4m<sup>3</sup>)

(撤去後)

1号 原子炉建屋周辺

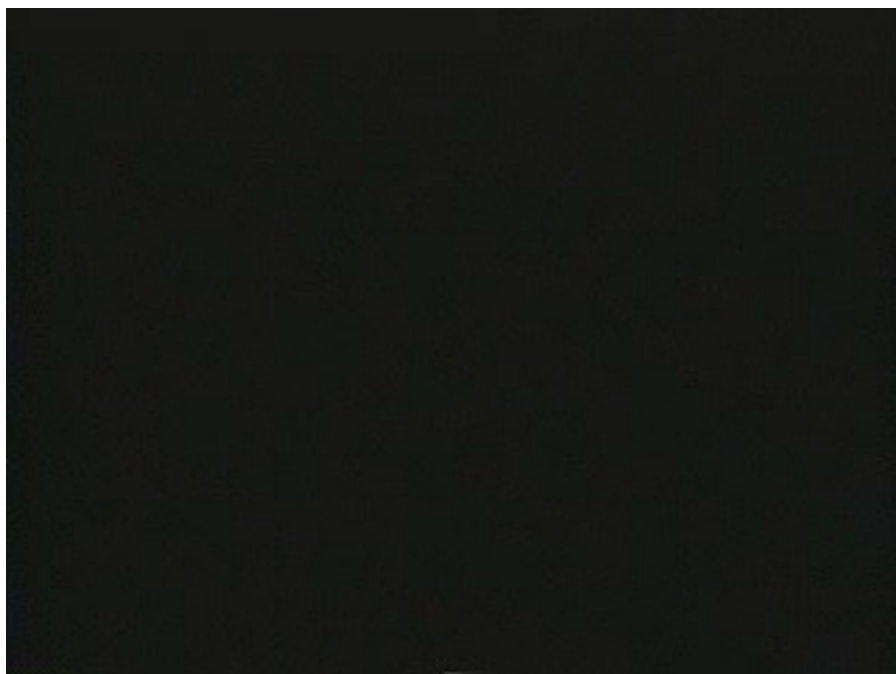


(仮置の瓦礫収集コンテナ)

(東京電力提供)



# 無人化施工技術



1991年 雲仙普賢岳の噴火における対応措置

# 小型無人ヘリコプターの導入

## 2011年4月10日

- 小型無人ヘリコプターによる空撮開始
- 1～4号機原子炉建屋，タービン建屋およびその周辺を撮影
- 使用機械
  - ハニーウェル社(Honeywell(米))製 T-Hawk
  - 操縦範囲:10km程度
  - 航続時間:50分
  - 映像撮影:可動式カメラ・赤外線カメラによる夜間撮影や操作端末への動画伝送など
  - 飛行性能:ホバリングによる空中静止。GPSによる自律飛行・マニュアル飛行が可能。

(東京電力提供)



ハニーウェル社(Honeywell(米))製  
T-Hawk



離陸



操作室



1号機南東角建屋カバー柱



3号機西側より建屋内部



4号機東側より建屋内部

# Packbotの導入

## 2011年4月17, 18日

- 原子炉建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定
- 使用機械
  - iRobot社製Packbot 2台
  - 寸法:長さ70×幅53×高さ(アーム格納時)18 [cm]
  - 重量:35[kg]
  - 機能:各種モニタリング(放射線量, 温度, 湿度, 酸素濃度), カメラ, マニピュレータ



パックポットによる  
原子炉建屋の現場確認





Packbot

(東京電力提供)



Packbotが二重扉を開ける様子



二重扉出口付近



1号機原子炉建屋の現場確認



1号機原子炉建屋1階



2号機原子炉建屋1階

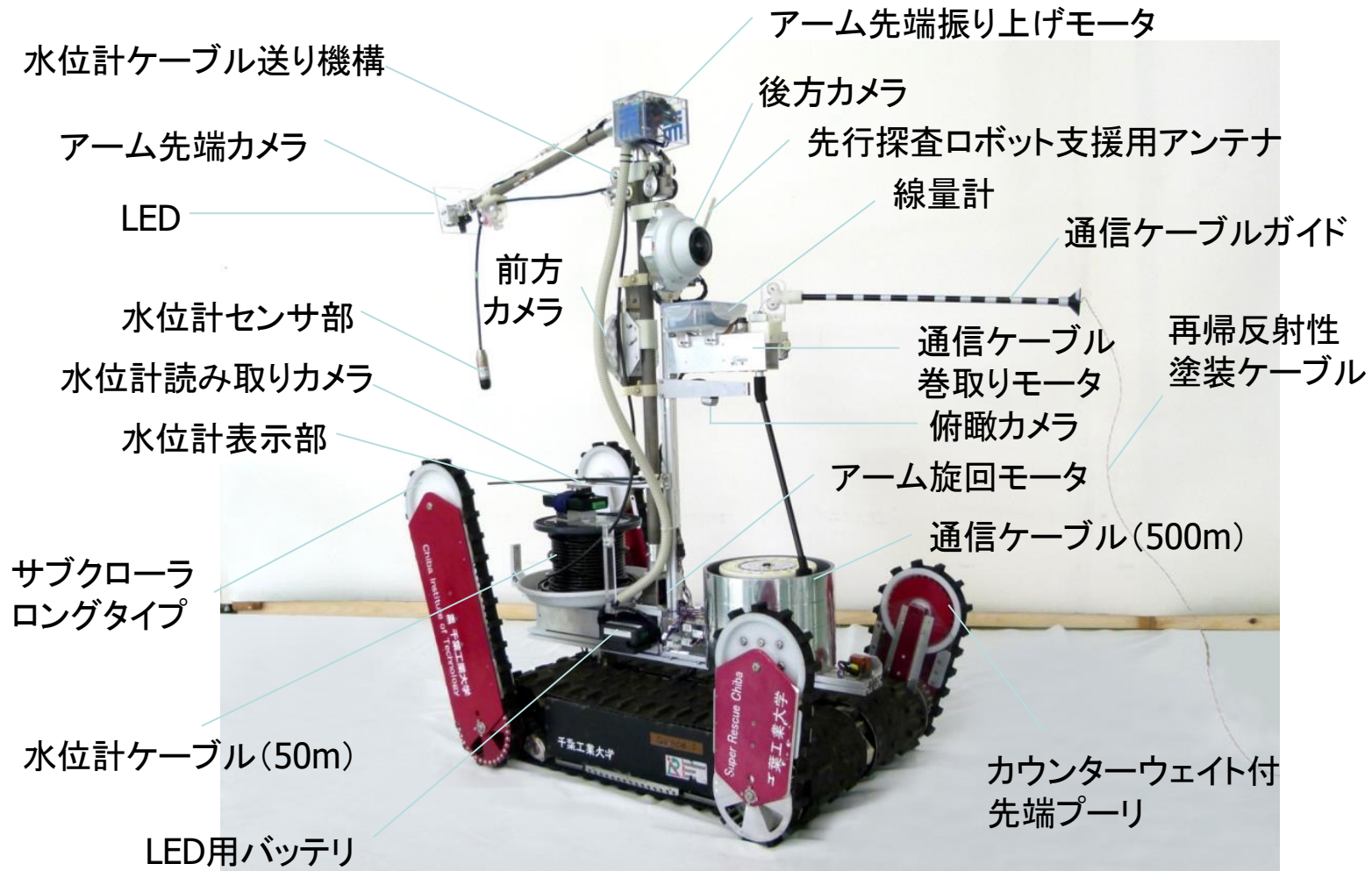


3号機原子炉建屋1階

# Quinceによる サンプリング・水位計設置ミッション 2011年6月24日

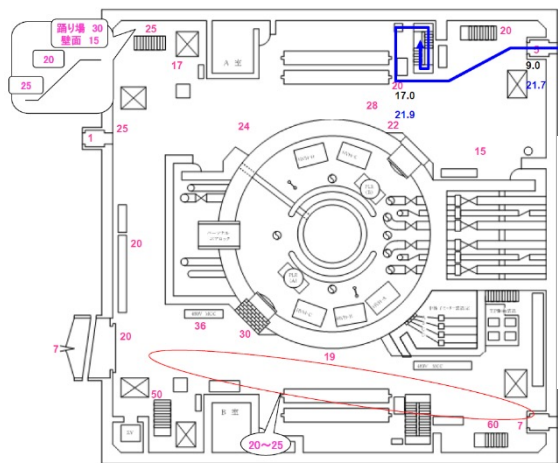


# 水位計設置・汚染水採取のためのQuinceの構成

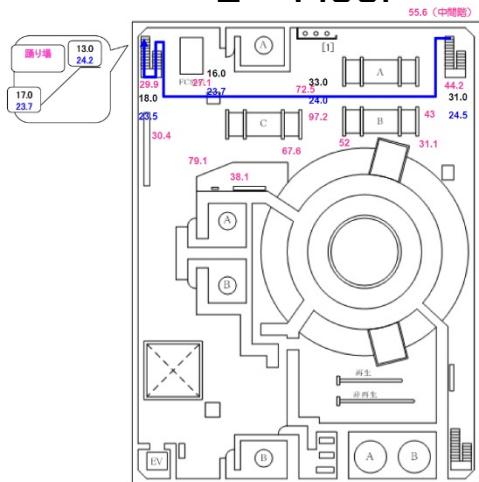


# Quinceによる原子炉建屋内風景 2号機1階～5階(2011年10月20日)

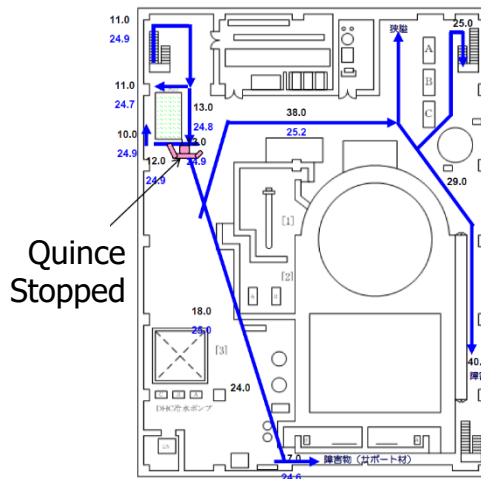
1st Floor



2nd Floor



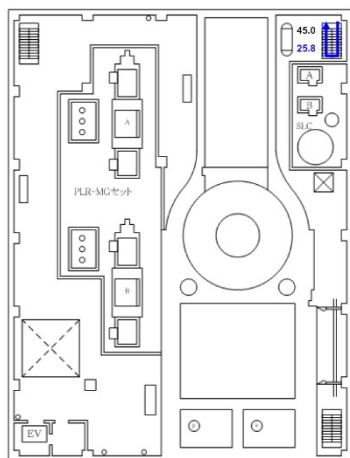
3rd Floor



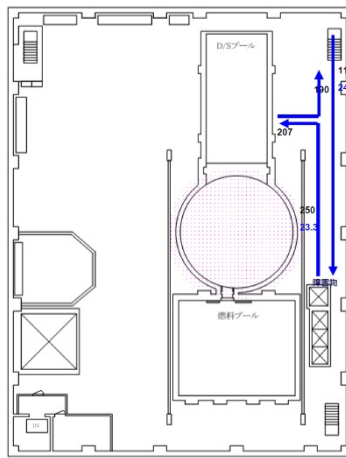
(配管)

雰囲気

4th Floor



5th Floor





# Quinceによる原子炉建屋内風景

2号機1階～5階 (2011年10月20日) 東京電力提供



# PackbotおよびQuinceによる 炉心スプレイ(CS)系の健全性確認

2011年7月22日, 26日

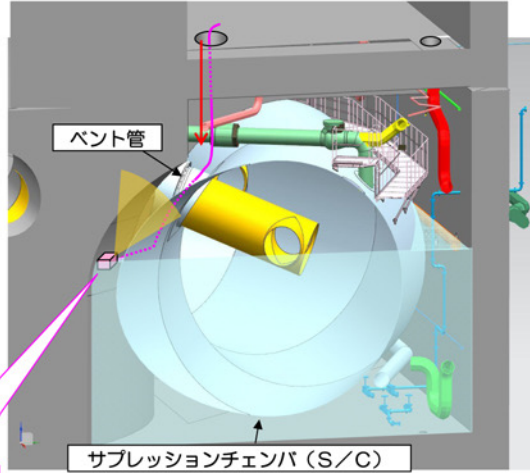
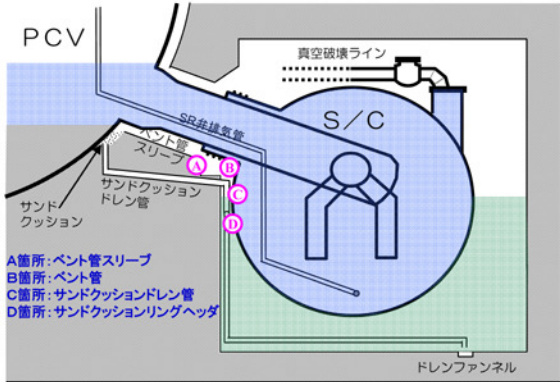
- ロボットと作業員による現地調査によりCS系の注入元弁の電動開閉動作が可能なことを確認
- 燃料上部から直接冷却が可能となる



# 1号機ベント管下部周辺の調査

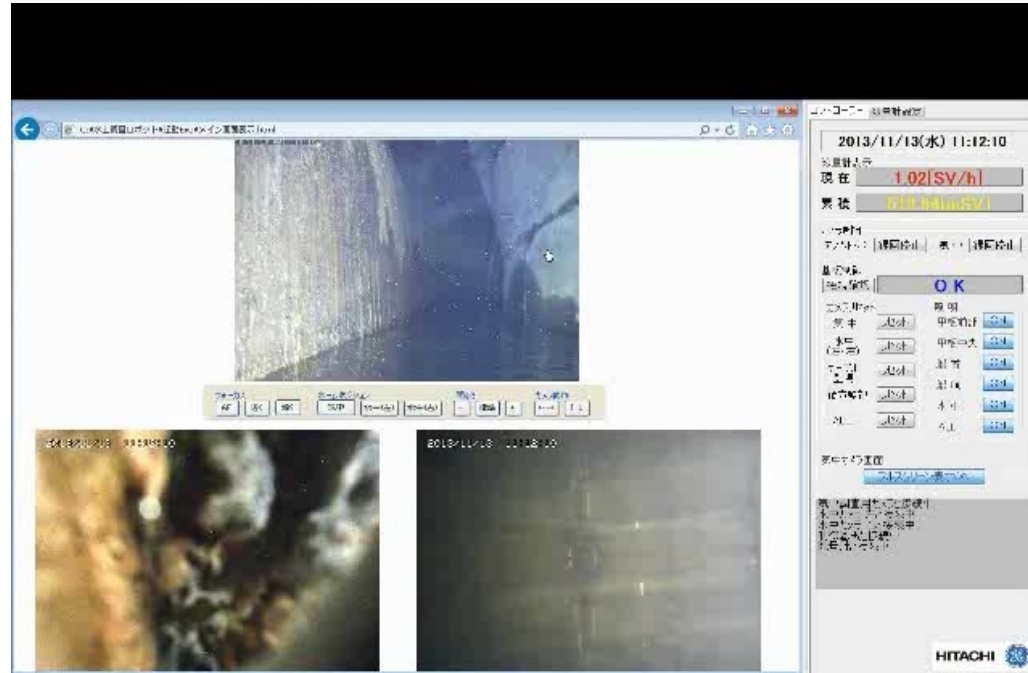
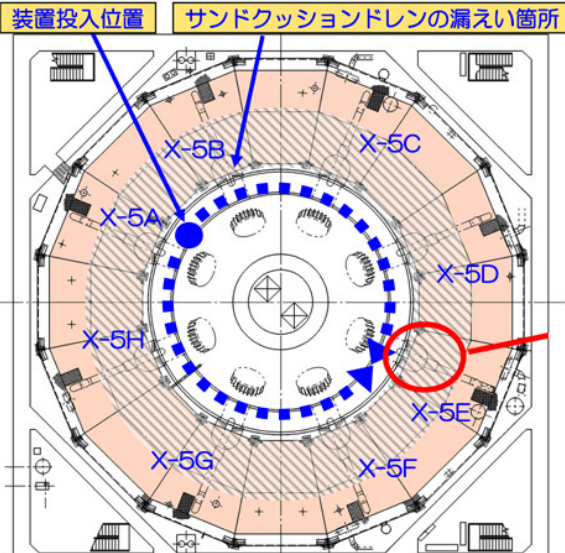
(2013年11月13日)

(東京電力提供)



水上ポート 工場での航行試験の様子

水上ポート





# 2号機原子炉建屋オペレーティングフロア フェンス撤去およびコアサンプル採取

(東京電力提供)

(2014年3月13日～14日)

(2014年3月21日～22日)



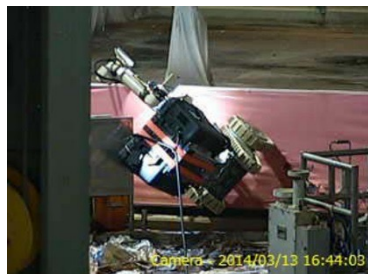
Warrior



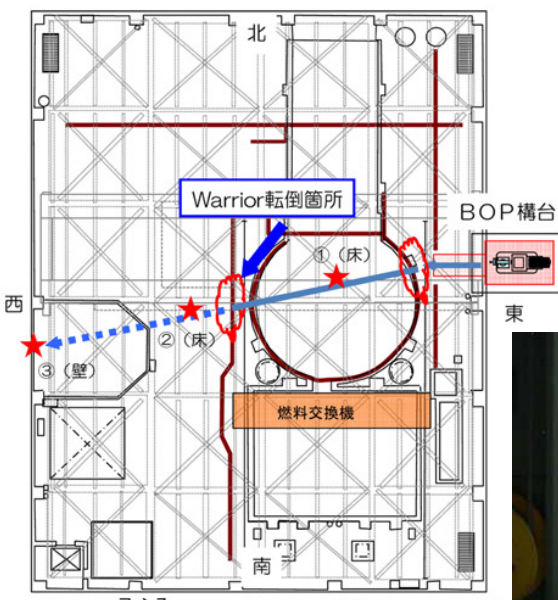
Packbot



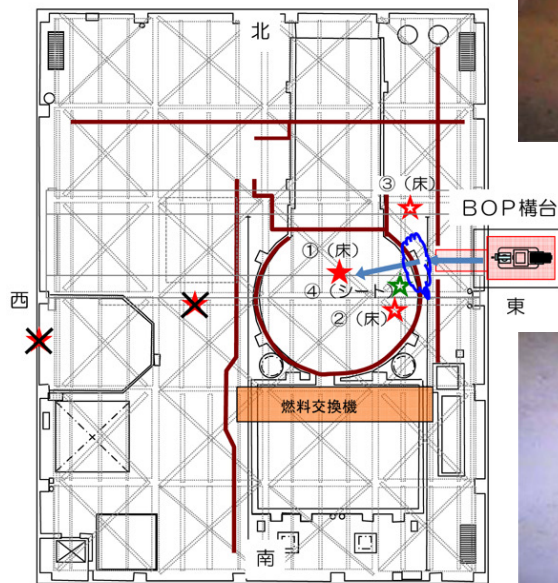
MEISTeR



Warriorのトラブル



- : フェンス
- : コアサンプル採取ロボット動線
- ★ : コアサンプル採取箇所 (当初計画)
- ★ : コアサンプル採取箇所 (当初計画)
- ★ : フェンス撤去予定箇所



- : フェンス
- : コアサンプル採取ロボット動線
- ★ : コアサンプル採取箇所 (当初)
- ★ : コアサンプル採取箇所 (見直し後)
- ★ : 養生シート採取箇所
- ★ : フェンス撤去箇所





# NHKスペシャル 廃炉への道1 放射能"封じ込め"果てしなき闘い

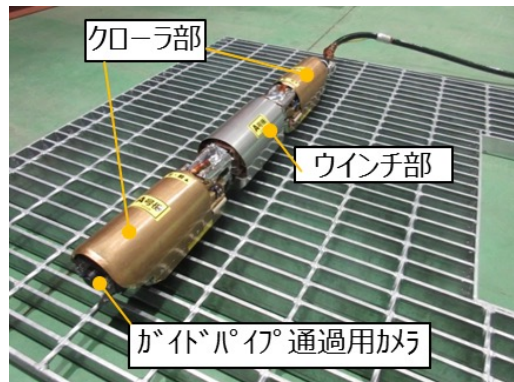


14:20MEISTeR投入

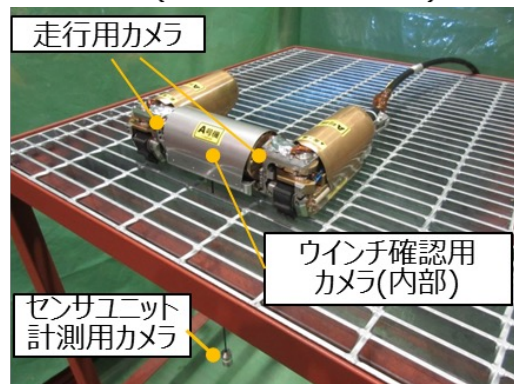
24:20ガンマカメラ計測

# 原子炉格納容器内部のロボット等による調査

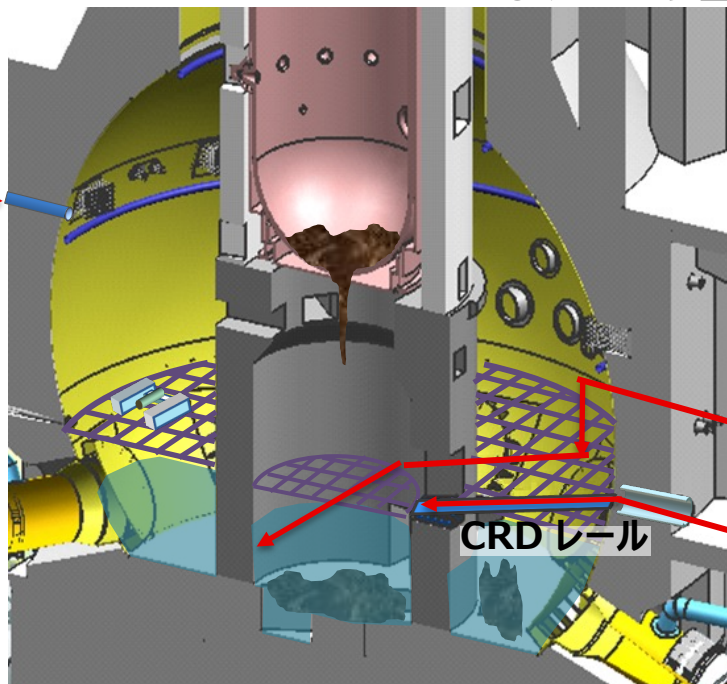
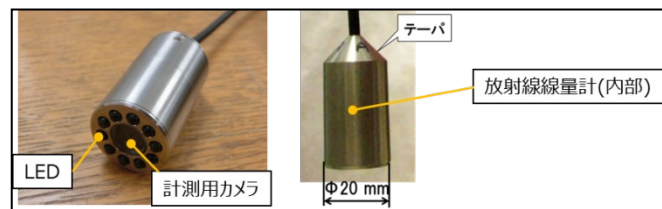
## ペDESTル外側の調査（1号機）



I型(ガイドパイプ通過時)



K型(平面走行時)



## ペDESTル内側の調査（2号機）

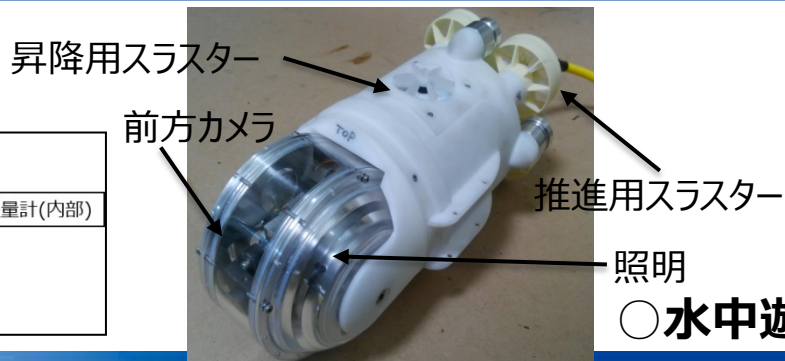
### ○クローラ型遠隔調査ロボット（A2調査）



### ○釣りざお型調査装置（A2'調査）



## ペDESTル内側の調査（3号機）



### ○水中遊泳型ロボット



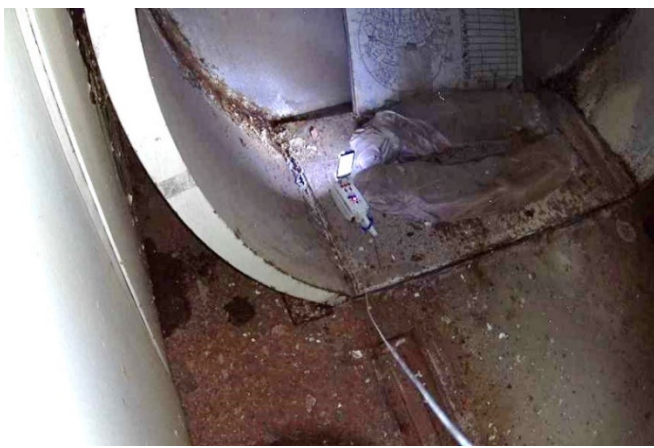
# 2号機ペデスタル内可視化 (2017.7.19-22)

(TEPCO)



# スマホロボットによる3号機機器ハッチ水漏れ調査

(2015年11月27日 東京電力)

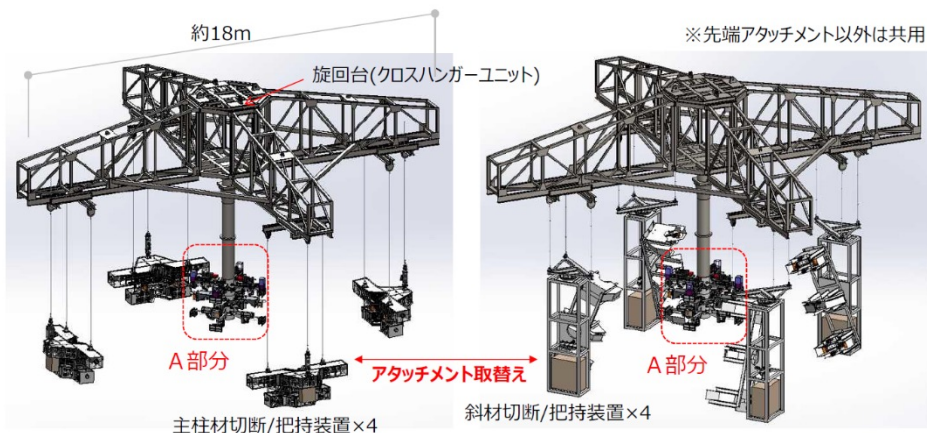
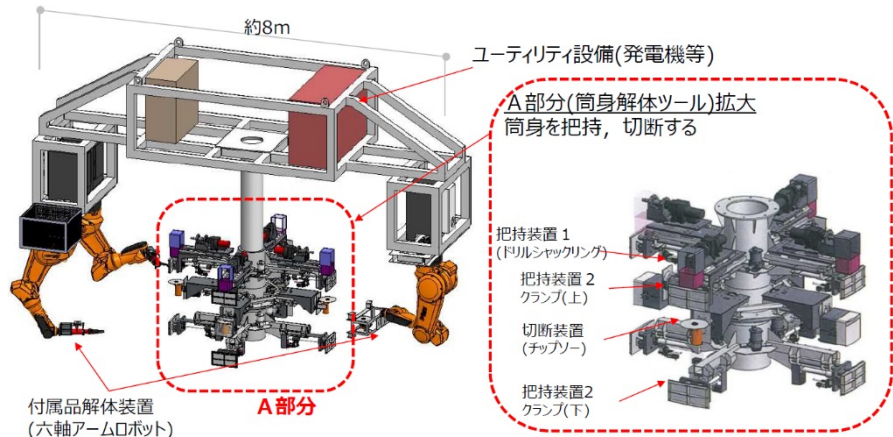
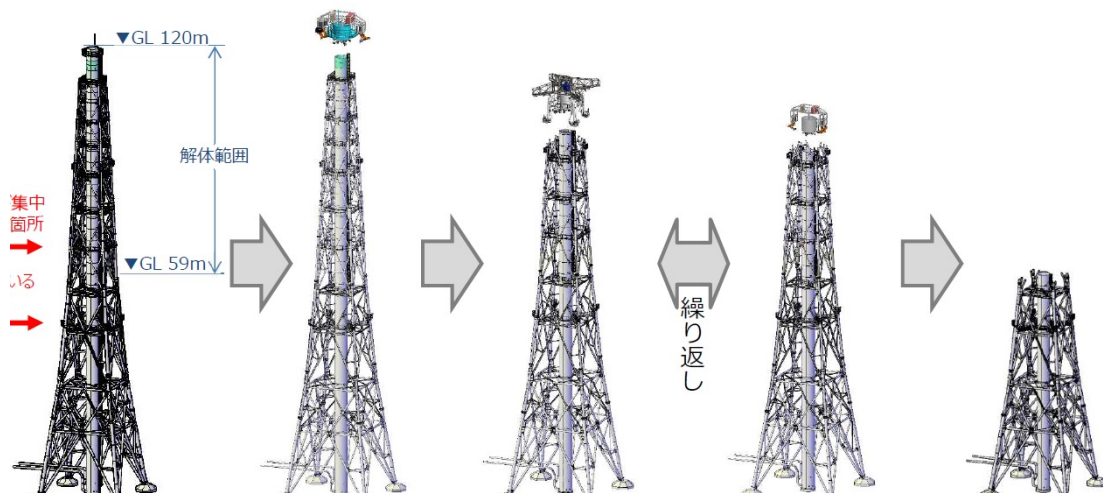


<https://www.youtube.com/watch?v=11jlrSNFrQ>



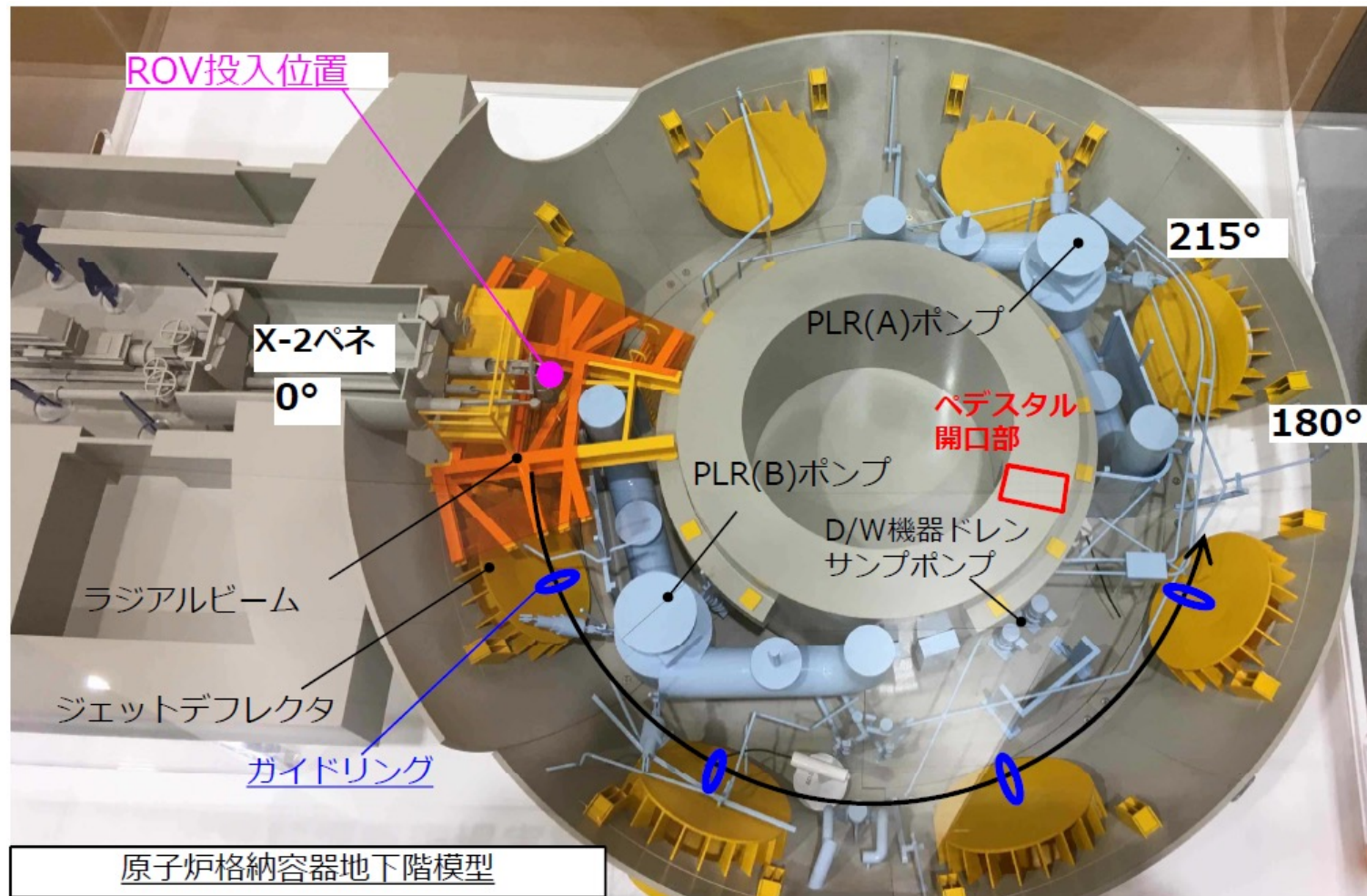
# 1-2号機排気塔解体 (2018年12月～)

(東京電力, エイブル)





# 1号機原子炉格納容器内部調査 (2022年2-3月, IRID & TEPCO)





# 1号機原子炉格納容器内部調査 (2022年2月-3月, IRID & TEPCO)



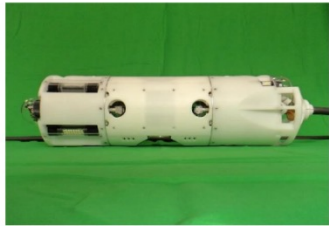
(1) ガイドリング取付用  
(ROV-A)



(2) 詳細目視用  
(ROV-A2)



(3) 堆積物3Dマッピング用  
(ROV-B)



(4) 堆積物厚さ測定用  
(ROV-C)



(5) 燃料デブリ検知用  
(ROV-D)



(6) 堆積物サンプリング用  
(ROV-E)



資料提供：国際原子炉研究開発機構 (IRID)



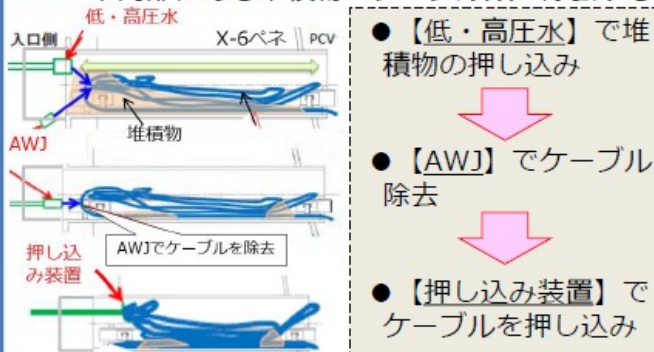
# 2号機PCV内部調査・試験的取り出し

## 1. 隔離部屋設置

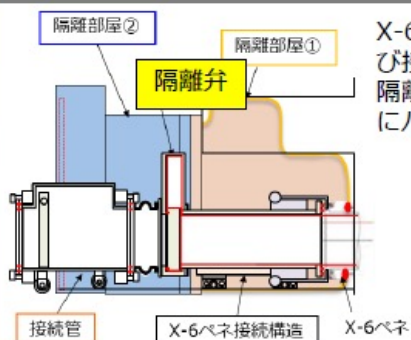
## 2. X-6ペネハッチ開放

## 3. X-6ペネ内堆積物除去

X-6ペネ内部にある堆積物・ケーブル類を除去する



## 4. X-6ペネ接続構造及び接続管設置



X-6ペネに接続構造及び接続管を取り付け、隔離部屋から接続構造にバウンダリを変更

## 5. テレスコ式装置設置

## 6. 試験的取り出し作業 (テレスコ式装置によるデブリ採取)



## 7. ロボットアーム設置



## 8. ロボットアームによる内部調査・デブリ採取

### ①内部調査



(注記)

- ・隔離弁：PCV内/外を仕切るために設置した弁
- ・AWJ (アブレシブウォータージェット) : 高圧水に研磨材 (アブレシブ) を混合し、切削性を向上させた加工機

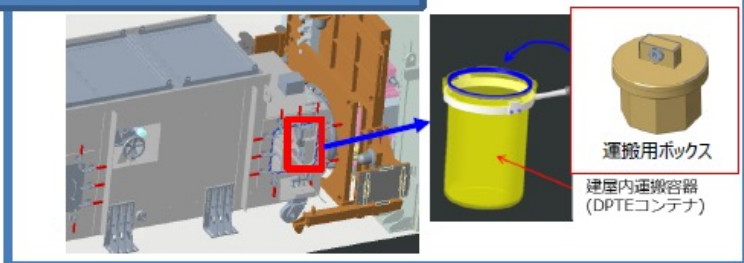
### ②ロボットアームによるデブリ採取



# 2号機PCV内部調査・試験的取り出し

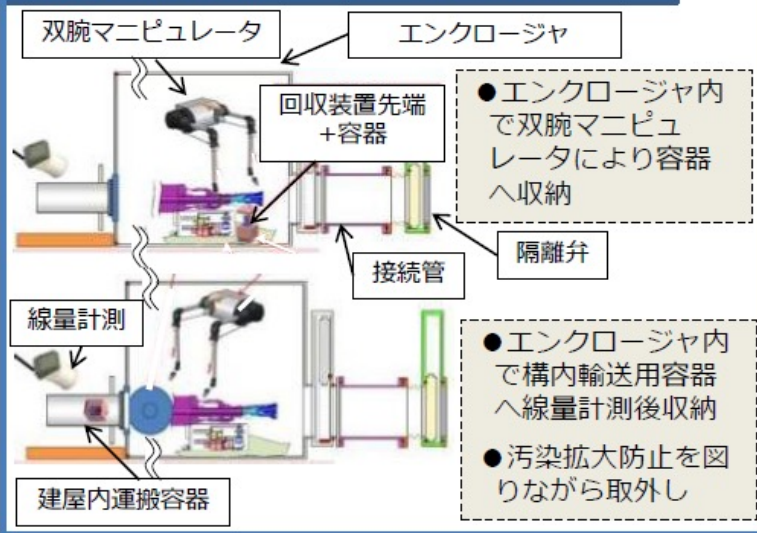
↓(前スライド ステップ6より)

## 9-1. 燃料デブリの収納



↓(前スライド ステップ8より)

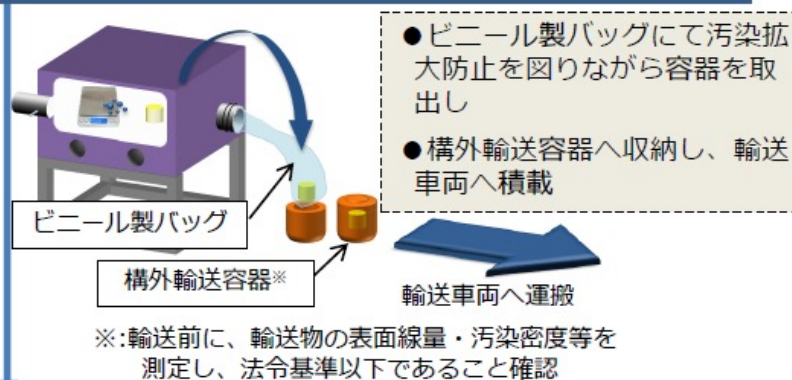
## 9-2. 燃料デブリ回収装置先端部の収納 構内輸送用容器へ収納・線量計測



## 10. グローブボックス受入・計量



## 11. 容器の取出し・輸送容器へ収納・搬出



## 12. 構外輸送及び構外分析

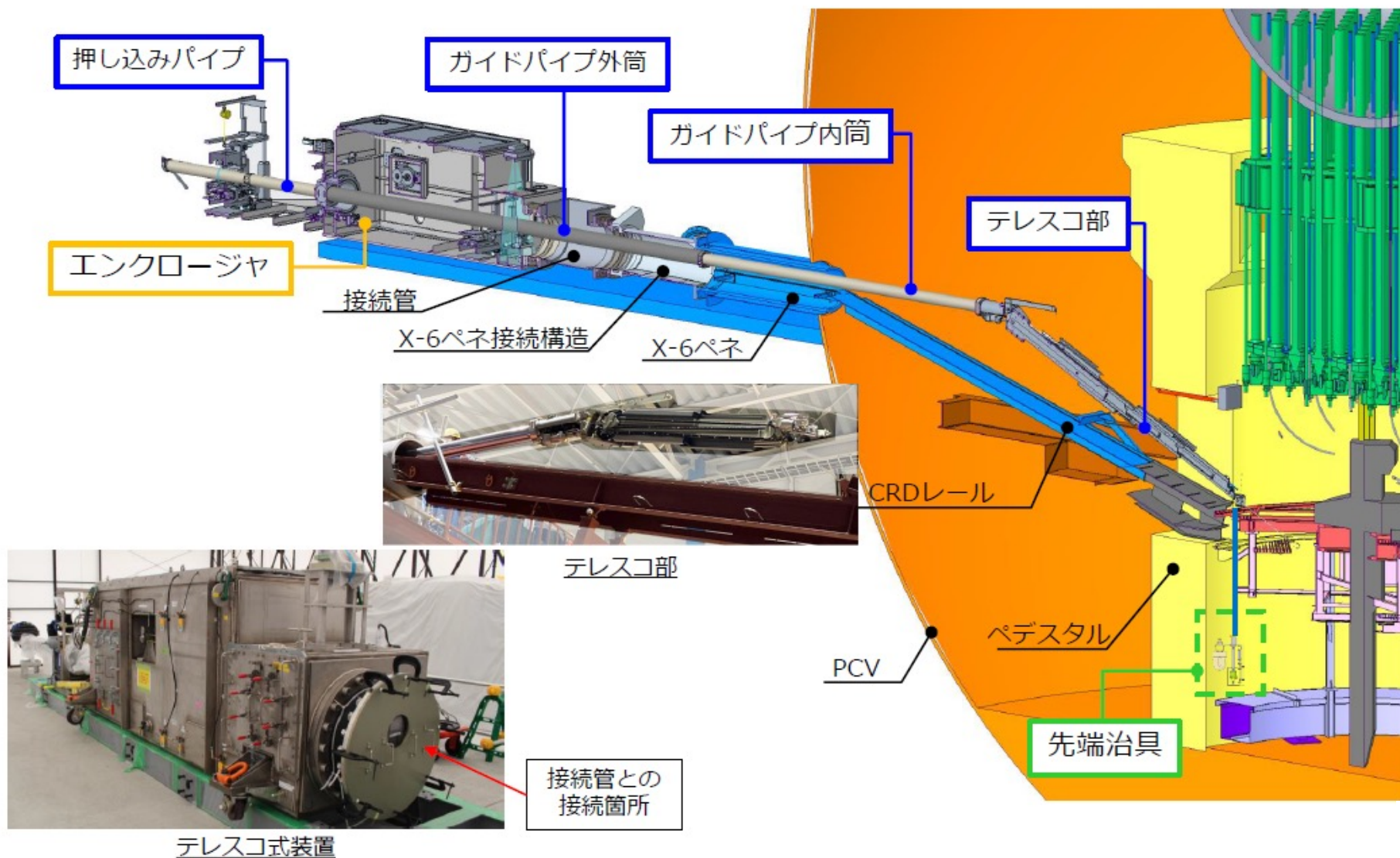
(注記)

・DPTEコンテナ: Double Porte pour Transfert Etancheの略  
コンテナの蓋とグローブボックスのダブルドアが一体となって開閉することで密閉を維持しながら物を移送することが可能なコンテナ



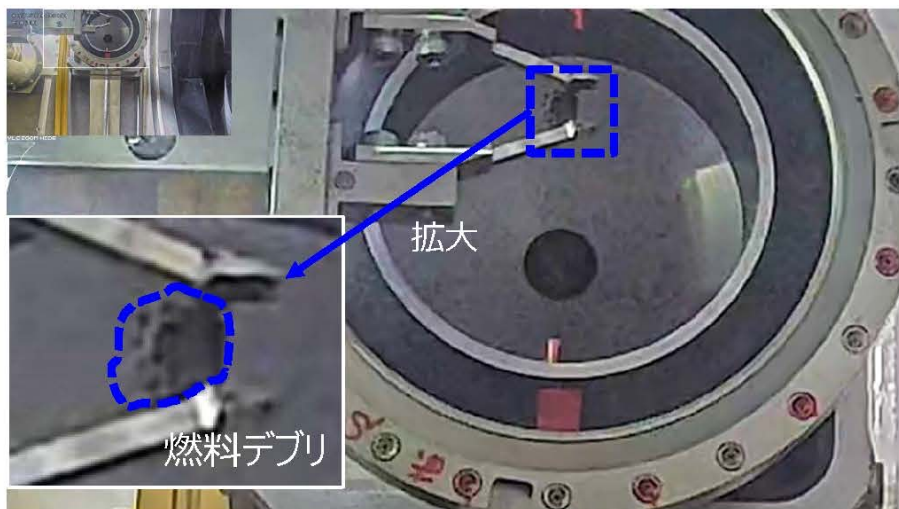
### 3-1. テレスコ式試験的取り出し装置によるデブリ採取

- テレスコ式装置は、X-6ペネからPCV内にアクセスし、燃料デブリの試験的取り出しを行う装置
- エンクロージャは、接続管に接続することで試験的取り出し時におけるPCVバウンダリの機能を有する





- 11月6日に、燃料デブリ回収可否の判断基準「線量率24mSv/h（20cm位置）以下」であることを確認したことから、把持した燃料デブリを運搬用ボックスに回収しています。
- 11月7日は、エンクロージャ側面ハッチを開放後、エンクロージャ外へ運搬用ボックスを取り出し、DPTコンテナへ収納しています。（2号機燃料デブリ試験的取り出し作業の完了は、運搬用ボックスをDPTコンテナへ収納したタイミングをもって完了となります）
- 現在、グローブボックス内にて重量などの測定を行い、構外輸送に向けた準備を進めています。その後、構外分析施設にて燃料デブリの詳細な分析を行う予定です。



把持した燃料デブリを運搬用ボックスに回収する様子  
撮影：2024年11月6日



運搬用ボックスをDPTコンテナへ収納する様子  
撮影：2024年11月7日

2倍速

先端治具監視カメラ

撮影日:2024年10月30日



# 福島原発事故の緊急対応で活用された外国製RT



独Putzmeister社製  
コンクリートポンプ車



米国iRobot社製  
Packbot/SUGV



スウェーデン  
Brokk社製  
Brokk-90



スウェーデン  
Brokk社製  
Brokk-330



米国iRobot社製  
Warrior



米国QinetiQ社製Talon



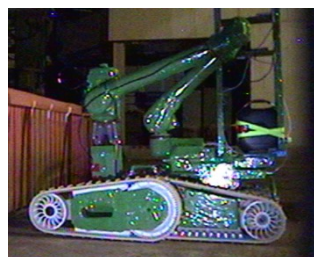
米国Pentek社製  
Moose



米国PaR Systems社製  
Tensile Truss



米国Honeywell社製  
T-HAWK



米国iRobot社製  
Kobra



米国QinetiQ社製Bob Cat



英国Createc社製  
RISER



米国iRobot社製  
Firstlook



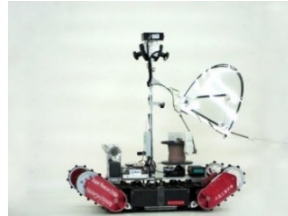
# 福島原発事故の廃炉措置で活用されている国産RT



無人化施工機械



Quince



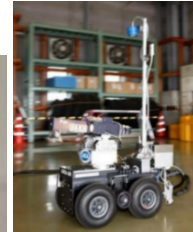
Quince 2



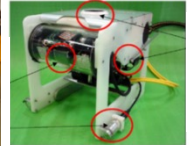
Quince 3



Survey Runner



JAEA-3



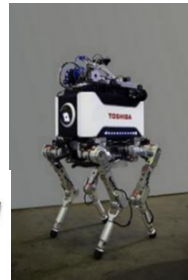
ROV



FRIGO-MA



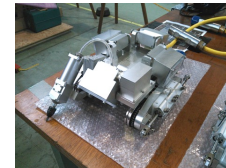
ASTACO-SORA



4足歩行ロボット・小型走行車



高所調査用ロボット



S/C下部外面調査装置



形状変形



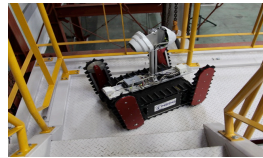
PCV内部調査装置  
サソリロボット



床面除染装置



MEISTeR



Sakura



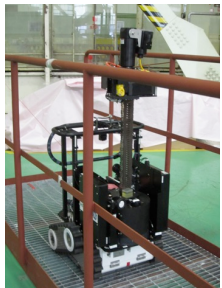
投入支援装置



PCV内部調査装置  
PMORPH



PCV内部調査装置  
ミニマンボウ



S/C上部調査装置



水上ポート型  
ロボット



Rosemary



S/C水位測定  
調査ロボット



水中遊泳ロボット



Arounder

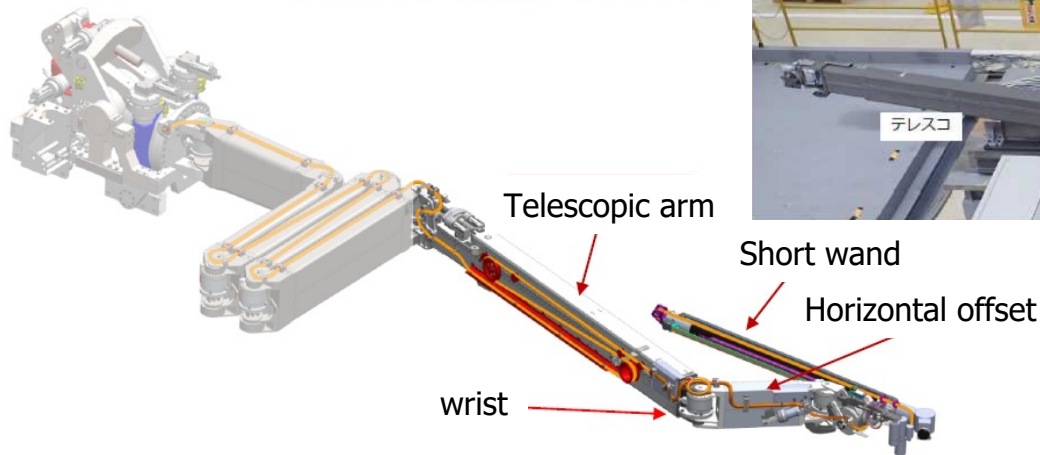
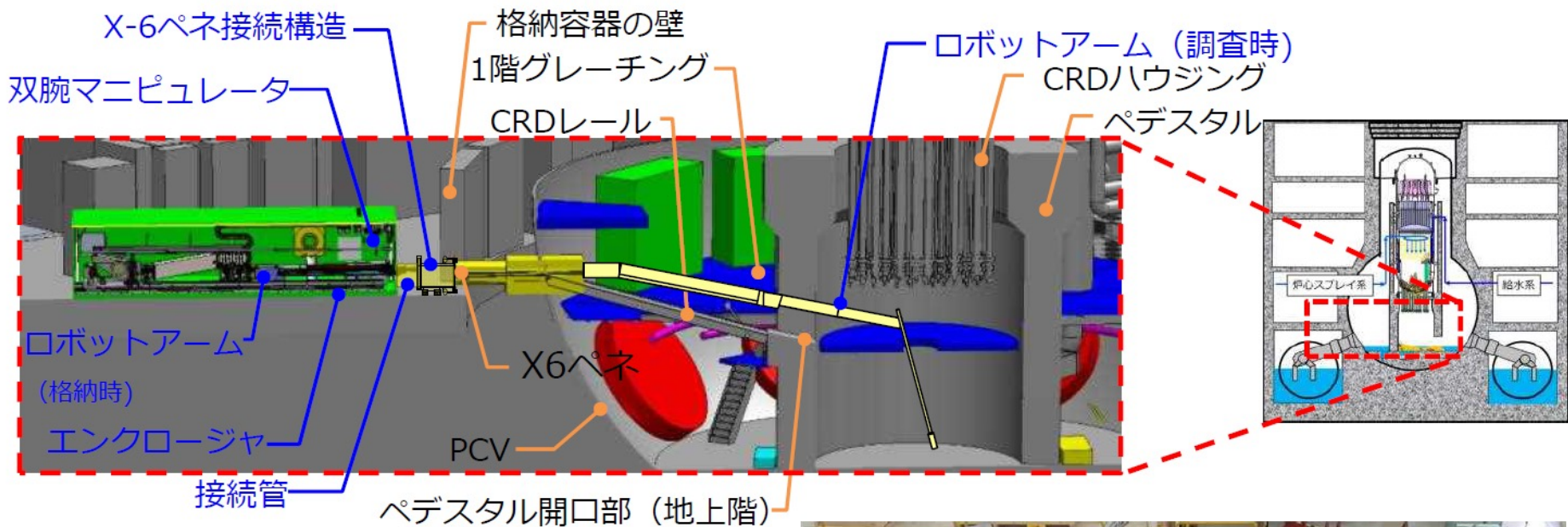


床面走行ロボット



排気塔解体ロボット  
TOKYO

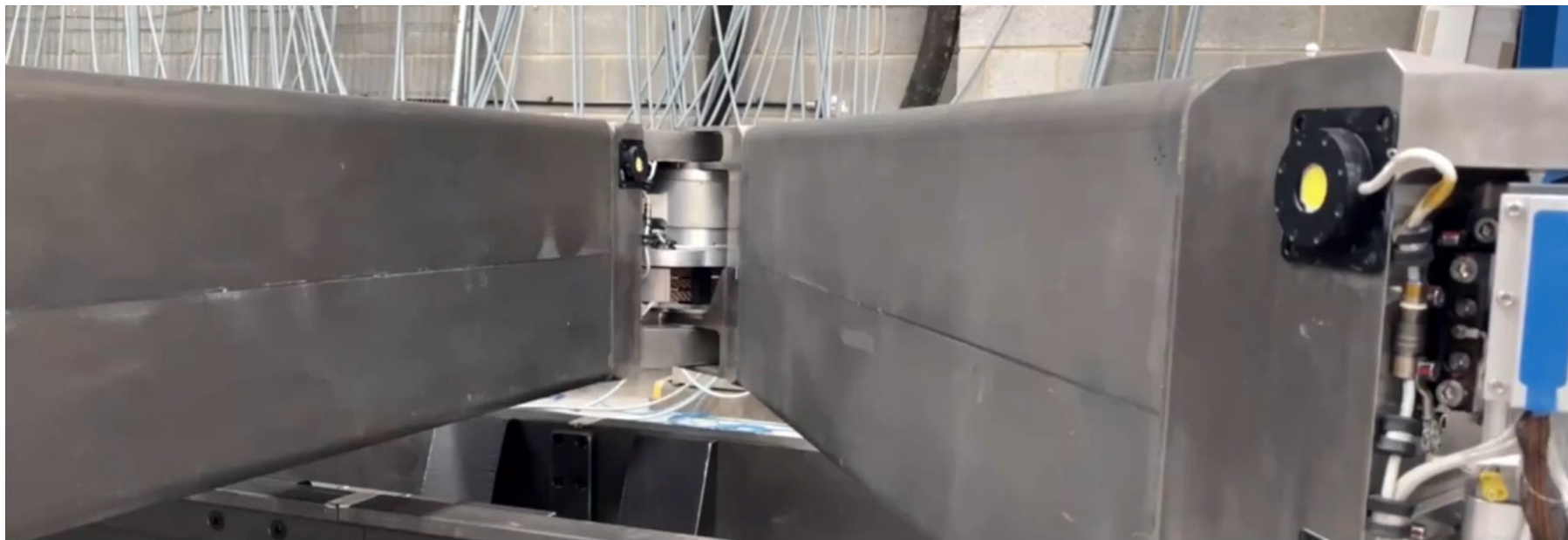
# 2号機PCV内部調査及び試験的取り出し (2022年秋, IRID & TEPCO)



Length: 18 [m] (except for the wand)  
Weight: 4.6 [t]  
Payload: 10 [kg]



# 小規模取り出し用アーム



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

**IRID**  **MITSUBISHI**  
HEAVY INDUSTRIES, LTD.  **VEOLIA**



# 達成できたこと (成功事例)

- 探査, 調査, 計測
  - 状態, 空間線量(線量・分布), 3次元データ, 他
- 瓦礫除去
  - 敷地内(屋外), 建屋内, 使用済み燃料プール内, オペフロ
- サンプルング
  - ダスト, 汚染水, コンクリートコア

# 達成できたこと (不十分もしくはは実施中)

- 除染
- 止水
- サンプルング
  - 燃料デブリ
- 燃料デブリの取り出し, 移送

# 回収不能となったロボット



⇕ 形状変形





# 失敗要因

- 直接的要因
  - 通信の切断
  - 操作ミス
  - 放射線による機能不良
- 間接的要因
  - 開発品（製品ではなくプロトタイプ）
  - 未知環境

# 失敗要因への対策

- 通信の切断
  - 有線と無線の組み合わせ
  - 無線インフラの構築
- 操作ミス
  - トレーニング
  - ヒューマンインタフェースの改良(空間認知性改良)
- 放射線による機能不良
  - 耐放射線性デバイス・メカニカルシステム(半導体不使用)
  - 頑健なシステムの設計
  - 冗長性・機能縮退性
- 開発品(製品ではなくプロトタイプ)
  - リスクアセスメント
  - 実証試験
- 未知環境
  - 事前の調査
  - 様々な状況の想定

# 日本経済新聞記事

2011.4.3記事(滝 順一記者)

すべての科学者が手をこまねているというわけではないが、肝心のときに頼りにならないのは考えものだ。

国民には期待がある。日本にはロボットや情報通信などで優れた技術があるはずだと。

放射線が強くして作業者が近づけないとか、がれきがあって内部が見えないとか、事故現場の苦心が伝えられると、なぜロボットや遠隔操作の計測器が出てこないのかと首をかしげる。

研究費を毎年もらって、そうした研究開発に取り組んでいる大学や研究機関がたくさんあったのではないかと。なぜ出てこないのかと。

巨大津波と原発危機を契機に、科学への信頼が揺るぎかねない。研究室の中にいる時ではない。

【東京特派員レポート】福島の原発事故が、日本社会に大きな衝撃を与えている。この危機を乗り越えるためには、科学者の力を借りる必要がある。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者の役割は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。

とて集まった。

「市民が心配しているのは、原子力発電所が安全かどうかです。安全を確保するためには、科学者の力が求められます。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

中外時評



## いま科学者の役割は何か

共に危機を悩み考えよう

滝 順一

福島の原発事故発生後、科学者の役割は何か、という問いが起きている。市民が心配しているのは、原子力発電所が安全かどうかです。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。

「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

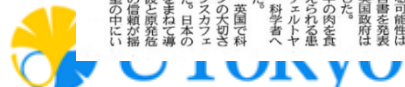
「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

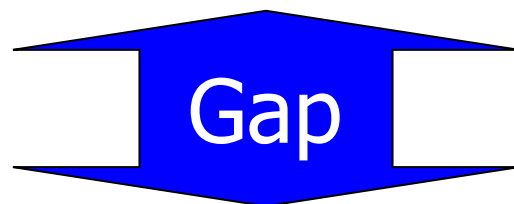
「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」

「科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。科学者は、この危機を乗り越えるために、どのような行動を講じているのか。」





# ロボット技術への期待



現実

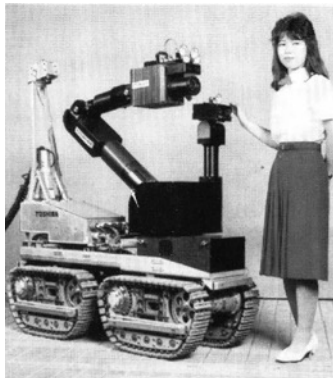
- 災害現場で活用するのに十分な機能を有しているロボット(遠隔操作機器)は、ほとんど存在しなかった。
- 日本で開発されてきたロボット(遠隔操作機器)のほとんどは、研究者が開発したプロトタイプであり、製品ではなかった

ロボット技術の社会実装・普及  
のための問題解決

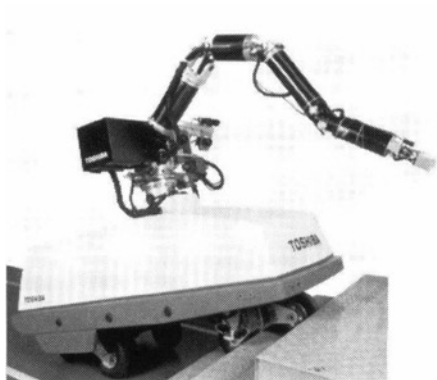
# 原子力ロボット関連プロジェクト

- これまで行われた原子力関連のプロジェクト
  - 原子力プラント点検ロボット(通産省)
  - 極限作業用ロボット(通産省)
  - 原子力基盤技術開発(科学技術庁)
  - JCO 対策原子力防災ロボット(通産省, 科学技術庁, 日本原子力研究所, 原子力安全技術センター, 原子力プラントメーカー)

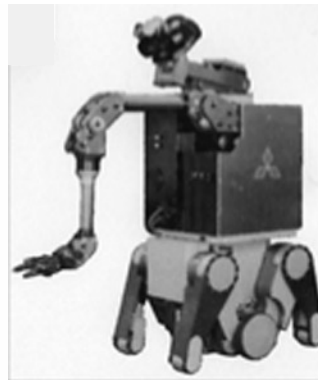
# 原子力関連点検・作業ロボット



格納容器内点検用ロボット  
(東芝)



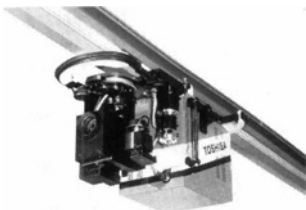
AIMARS  
知能作業ロボット  
(東芝)



格納容器点検作業ロボット  
(三菱重工業)



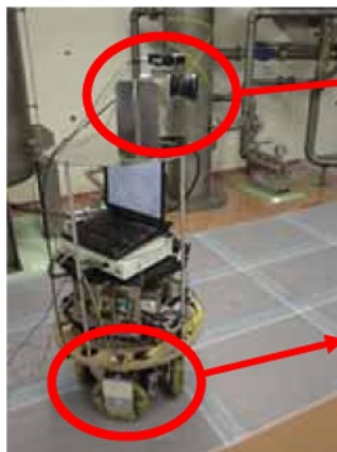
極限作業ロボット  
(原子力発電施設作業用)  
(複数社, 1983-1990)



モノレール式  
点検ロボット



水中  
点検ロボット



CCDカメラ、熱画像カメラ  
チルト:  $-45^{\circ} \sim 90^{\circ}$   
パン:  $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$   
(いずれも水平前方向を原点)



電流センサー、傾斜角  
センサー、エンコーダー等



原子力基盤技術原子力用人工知能  
(点検用)  
(複数研究機関, 1999-2003)



# 原子力防災支援システム (JCO対策) (プラントメーカー各社, 2001)



MARS-A  
(作業用)  
(三菱重工業)



MARS-T  
(重量物運搬用)  
(三菱重工業)



SMERT-K  
(作業監視支援用)  
(東芝)



SMERT-M  
(作業監視支援用)  
(東芝)



MENHIR (耐高放射線性対応用)  
(仏サイバネティクス)



SWAN (小型軽作業用)  
(日立製作所)



# 情報遠隔収集ロボット (JCO対策) (日本原子力研究所, 2001)

RESQ: Remote Surveillance Squad



RESQ-A  
初期情報収集ロボット

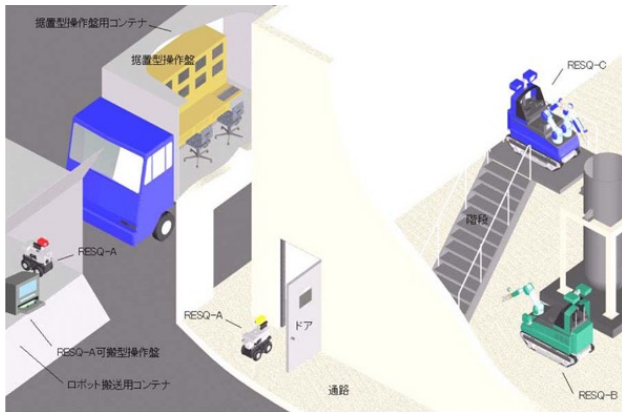


RESQ-B  
詳細情報収集ロボット



RESQ-C  
試料など情報収集ロボット

事故時におけるシステム全体の活動イメージ



小林忠義, 他: 原研における事故対応ロボットの開発(その1)情報遠隔収集ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6, pp.706-709, 2001.

RaBOT: Radiation-proof Robot



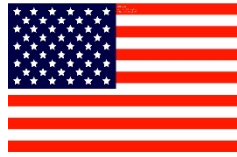
柴沼 清: 原研における事故対応ロボットの開発(その2)耐環境ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6, pp.710-713, 2001.

# 原子力ロボット関連プロジェクト

- これまで行われた原子力関連のプロジェクト
  - 原子力プラント点検ロボット(通産省)
  - 極限作業用ロボット(通産省)
  - 原子力基盤技術開発(科学技術庁)
  - JCO 対策原子力防災ロボット(通産省, 科学技術庁, 日本原子力研究所, 原子力安全技術センター, 原子力プラントメーカー)
- これまでのプロジェクトの成果が活用できなかった原因
  - 基盤技術や要素技術開発(プロトタイプ開発)までに留まる
  - 実用化のための支援策の欠如
  - 調達者不在(企業努力のみでは困難)
  - 開発に対するユーザの消極的関与



# 実用化・事業化の差



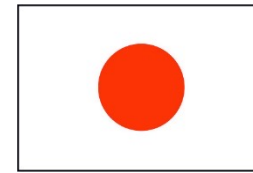
Packbot



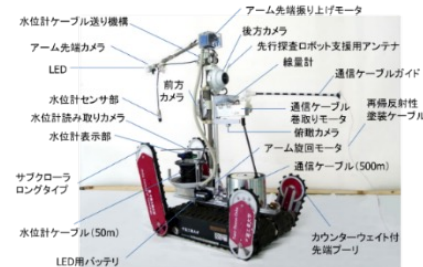
米国iRobot社製  
製品

軍用(偵察用)ロボット  
米軍が3000台調達

アフガニスタンやイラクでの戦争で実績多



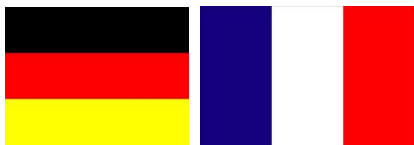
Quince



NEDO  
千葉工大, 東北大, IRS  
プロトタイプ

RoboCupで優勝など

※



KHG  
Groupe Intra

# 一般社団法人 産業競争力懇談会

Council On Competitiveness – Nippon (COCN)

- 発足： 2006年 6月
- 目的： 日本の産業競争力の強化に深い関心を持つ産業界の有志により、国の持続的発展の基盤となる産業競争力を高めるため、**科学技術政策、産業政策**などの諸施策や官民の役割分担を、**産官学協力**のもと合同検討により政策提言としてとりまとめ、関連機関への働きかけを行い、実現を図る活動を行う。
  - ・ 産業競争力強化 *(国の持続的発展の基盤技術開発)*
  - ・ 政策提言 *(科学技術政策、イノベーション政策)*
  - ・ 実施具体化 *(実行組織創設、国家予算支援)*
- 理事長：内山田 竹志 (トヨタ自動車株式会社 代表取締役会長)
- 会員： 日本の産業競争力強化に深い関心を持つ産業界、大学、独法研究所の有志
  - 正会員： 40社 (産業界)
  - 特別会員： 4大学, 2研究所

# COCNにおける 災害対応ロボット／フィールドロボット関連の活動

|                | 2011                              | 2012                              | 2013                           | 2014                        | 2015              | 2016              | 2017              | 2018                        | 2019                        |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| COCN<br>プロジェクト | 災害対応ロボット<br>と運用システムの<br>あり方プロジェクト | 災害対応ロボット<br>と運用システムの<br>あり方プロジェクト | 災害対応ロボット<br>センター設立構想<br>プロジェクト | 災害対応ロボット<br>の社会実装プロ<br>ジェクト |                   |                   |                   |                             |                             |
| COCN<br>認定活動   |                                   |                                   |                                |                             | 災害対応ロボット<br>推進連絡会 | 災害対応ロボット<br>推進連絡会 | 災害対応ロボット<br>推進連絡会 |                             |                             |
| COCN<br>連携活動   |                                   |                                   |                                |                             |                   |                   |                   | フィールドロボットの<br>社会実装推進<br>協議会 | フィールドロボットの<br>社会実装推進<br>協議会 |



# 産業競争力懇談会(COCON) 災害対応ロボットプロジェクト提言

## 研究開発拠点・プロジェクト

- 基盤技術研究(10年プロジェクト)
- 高度実用化研究(5年プロジェクト)
- ソリューション導出・システム化技術開発(競技会)

文科省

経産省

文科省

総科技

## 戦略設計・策定

- 事業化推進
- 開発と使用の継続的循環

総科技

検証

評価



## 防災ロボットセンター

内閣府

- 実証試験, オペレータ訓練
  - テスト・運用フィールド, モックアップ
    - Disaster City Japan
    - 工事フィールド
    - 福島原発モデル, など
- 機能評価・認証(防爆性, 耐放性, 耐久性, 安全性など)
  - 評価センター
- ロボット技術情報の集積化・一元的管理・提供
- 緊急時対応(災害時の配備)

消防庁

国交省

自衛隊

エネ庁

電事連

産総研

国交省

自衛隊

## 標準化活動

- ロボットの機能評価
- インタフェース仕様

文科省

経産省

## 制度設計

- 規制緩和
  - 特区など
- 規制強化
  - 配備の義務化など
- 税制策定
  - 免税措置など
- 環境整備
  - 無線周波数の確保など

経産省

内閣府

財務省

総務省

活用

ニーズ

投入

## 平時の利用

- 社会インフラ・設備の点検・保守
- 危険工事

## 有事の利用

- 災害現場での災害対応
- 事故現場での事故対応



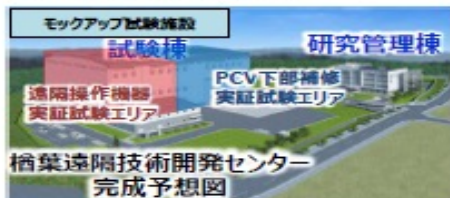
# イノベーション・コースト構想（復興庁）

- 福島県浜通り地域での新産業育成を図る「イノベーション・コースト構想」で復興を加速。
- 東日本大震災の経験を踏まえ、災害などに役立つロボット・ドローンを構想の柱に。

## 既に事業化が進んでいるものの例

### モックアップ試験施設（楢葉町）

- ・ 原子炉格納容器下部の漏えい箇所を調査・補修するロボット等の機器・装置の開発・実証試験等の実施を想定。
- ・ 本年10月19日に開所式を実施（研究管理棟は完成）。来年4月ごろに、試験棟を含めた本格運用開始（予定）。



### 福島浜通りロボット実証区域

- ・ 橋梁、トンネル及びダム・河川その他山野等を利用したロボット実証区域。
- ・ 12月22日時点で、14の開発事業者が31の実証試験を希望。2件の実証試験が行われ、その他については、市町村とマッチング中。



(橋梁点検)



(火山災害調査)



## 平成28年度の経産省の主な取組の方向性

### ロボットテストフィールド 28年度:51.0億円

- ・ 福島浜通り地域において、福島県の重点産業であるロボット分野の地元中小企業や県外先進企業による産業集積を構築し、被災地の自立と地方創生のモデルを形成するため、ロボットテストフィールド及び研究開発施設等を整備する。



イメージ図

### 共同利用施設（ロボット技術開発等関連）

28年度:21.7億円

- ・ 福島県浜通り地域においてロボット分野等の先進的な共同利用施設の整備、設備等の導入等を行う。



イメージ図

### 地域復興実用化開発等促進事業

28年度:69.7億円

- ・ ロボット技術等イノベーション・コースト構想の重点分野について、地元企業との連携等による地域復興に資する実用化開発等の費用を補助する。

### 実現可能性調査（FS調査）

28年度:1.0億円

- ・ 今後プロジェクトの具体化を進めて行くに当たり必要な調査等を実施する。

## 取扱注意

### 福島・国際廃炉研究産業都市構想について（案）

（日本版 Tri-cities）

～原発被災地域の自立的発展に向けて～

平成 25 年 10 月

#### （趣旨）

今後 30～40 年にわたる福島第一原発の廃炉を円滑に進めていくためには、その周辺地域において、ロボット技術をはじめ多岐にわたる研究分野の研究開発拠点を整備することに加え、研究開発や廃炉作業を支える部品・部材、消耗品等の試作・生産拠点、これに従事する研究者・技術者の研修・教育拠点を戦略的に配置していくことが必要である。

また、研究開発から廃炉の実施に至る過程では、多くの研究者や関連産業従事者が同地域において生活することとなるため、帰還する住民に加えて、新たな居住者も視野に入れた生活・交通インフラの整備も併行して進めていくことが求められる。

特に、原発事故で避難指示があった地域の多くは、これまで原子力関連企業の事業活動をベースに地域経済が形成されてきたため、今後、地域の産業基盤を再構築し、地域経済全体の復興を実現していくには、廃炉関連産業を新たな産業・雇用の受け皿として位置づけ、これまでの市町村の枠組を超えた広域圏で、産業集積を構築するために必要な施策を計画的・総合的に展開していく必要がある。

こうした避難指示区域において今後取り組むべき地域産業政策の方向性を明らかにするため、赤羽原子力災害現地対策本部長の私的懇談会として「福島・国際廃炉研究産業都市構想研究会（仮称）」を設置し、産学官の有識者で、今後の廃炉研究開発拠点、人材育成拠点、地域開発の在り方等を検討し、来年春を目的に必要な対策について結論を得る。

### 研究会メンバー（P）

赤羽 原子力災害現地対策本部本部長  
内堀 福島県副知事  
清水 いわき市長  
山田 双葉地方町村会長  
菅野 相馬地方市町村会長  
松本 原子力発電所所在市町村協議会会長  
桜井 南相馬市長  
角山 公立大学法人会津大学理事長兼学長  
浅間 東京大学工学部教授  
森山 原子力研究開発機構理事  
山名 国際廃炉研究機構理事長  
石崎 東京電力福島復興本社代表  
野田 資源1741-庁廃炉・汚染水対策担当室現地事務所長  
徳増 日本立地センター専務理事  
峰久 福島復興再生総局事務局長  
熊谷 原子力災害現地対策本部副本部長

### 検討事項・スケジュール

- 第1回（12月下旬） 研究会の趣旨説明、今後の検討事項等
- 第2回（1月中旬） 研究拠点の在り方（廃炉関係）
- 第3回（2月中旬） 研究拠点の在り方（ロボット関係）
- 第4回（3月中旬） 人材育成、教育研修施設、産学連携拠点
- 第5回（4月中旬） 産業拠点、生活・都市・交通インフラ
- 第6回（5月中旬） 海外調査報告 報告書骨子
- 第7回（6月上旬） 報告書とりまとめ

※通常国会開会前を目的に、米国ワシントン州ポर्टランド現地調査を検討



# 超レジリエンス

- レジリエンス
  - ダメージに対する「回復力」「抵抗力」「復元力」「耐久力」
- 超レジリエンス
  - 災害や事故が発生した際に、元の状態に回復させるだけでなく、その経験をもとに、以前よりもさらに強固で高度化したシステムに進化させていく機能

浅間 一, 倉林大輔: "超レジリエンスのためのロボット技術", 計測と制御, vol. 57, no. 2, pp. 95-100, 2月(2018)

# Disaster City

## TEEX (Texas A&M Univ), Texas, USA



(三菱総研瀬川氏レポート)

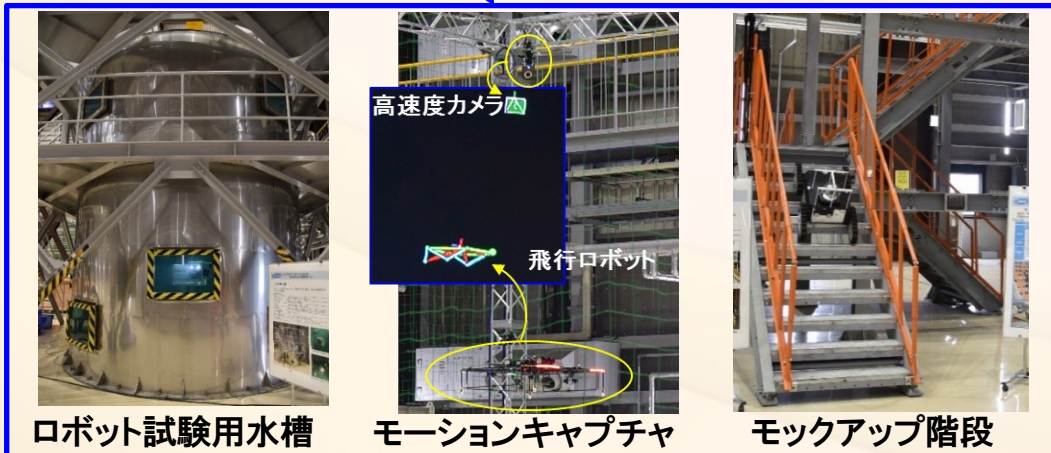
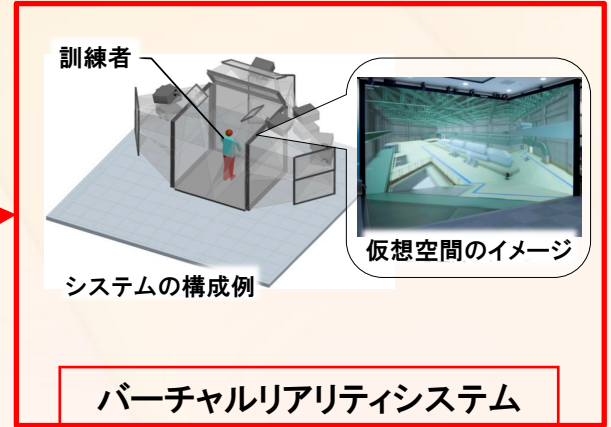
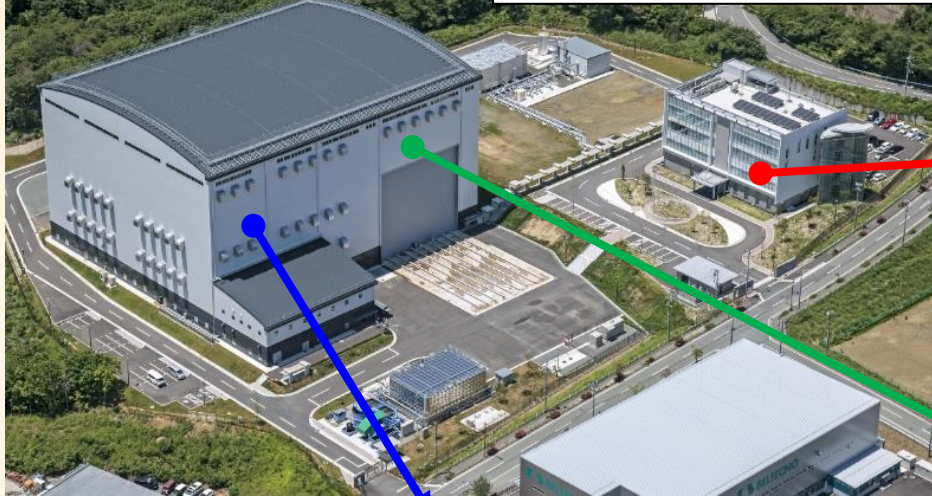




# 日本原子力研究開発機構 楢葉遠隔技術開発センター(モックアップによる試験施設)

試験棟  
(幅60m×奥行80m×高さ40m)

研究管理棟  
(幅35m×奥行25m×高さ20m)



ロボット試験用水槽

モーションキャプチャ

モックアップ階段

ロボット性能評価のための要素試験エリア



# 福島ロボットテストフィールド全景 (福島県南相馬市)



Copyright © 2017 Fukushima Prefecture. All Rights Reserved.

※ 上記のほか、7 浪江町に滑走路及び滑走路付属格納庫を整備



# 無人航空機エリア



固定翼やマルチローターなど無人航空機（ドローン）の実証試験や操縦訓練を行うための試験場です。無人航空機向けとしては国内最大となる飛行空域、滑走路、緩衝ネット付飛行場を整備しており、基本的な飛行から衝突回避、不時着、落下、長距離飛行などの多様な試験環境を提供することで、無人航空機の実用化を推進します。

- 1 南相馬滑走路
- 2 滑走路附属格納庫
- 3 ヘリポート
- 4 浪江滑走路
- 5 滑走路附属格納庫



ドローン用の滑走路（南相馬滑走路は長さ500m、浪江滑走路は400m）で、飛行試験や操縦訓練が行えます。  
広い緩衝地帯を有し、衝突回避、不時着、落下、物件投下などの特殊な飛行試験も行えます。



## 6 通信塔・広域飛行区域

南相馬と浪江の両滑走路間（約13km）で、ドローンの長距離・広域飛行が行えます。  
南相馬と小高に設置されている通信塔により、飛行の安全を確保しています。



## 7 緩衝ネット付飛行場

施設全体をネット（150m×80m×高さ15m）で覆うことで、航空法関連の申請なしで、通常の飛行試験ができるほか、夜間飛行や物件投下などの特殊な試験が行えます。  
初心者でも安心して操縦訓練が行えます。



## 8 風洞棟

風速20m/sまでの風を起こせる装置により、ドローン等の特性を測定する試験や、不規則な風（突風や乱気流）に対する機体安定性の試験が行えます。



# 水中・水面上ロボットエリア



ロボットによる水中のインフラ点検と災害対応の実証試験のために整備した国内唯一の試験場です。ダム、河川、港湾、水没市街地等の水中・水上で発生するインフラの状況や災害現場を再現できます。

## 1 水没市街地フィールド

水害で被災した街の一部を再現しています。  
水・水中での試験や操縦訓練、消防（救助）訓練等が行えます。



## 2 屋内水槽試験棟

大水槽（30m×12m×深さ7m）と小水槽（5m×3m×深さ1.7m）を設置し、ダム、河川の機部・港湾の埠頭等を再現しています。  
強い水の流れや、濁った水を作り出して、点検・調査を行う水中・水上ロボットの試験や操縦訓練、救助訓練が行えます。



## 9 連続稼働耐久試験棟

全体がコンクリートで覆われていることで、安全にドローン等の長時間稼働耐久試験が行えます。



# インフラ点検・災害対応エリア



ロボットによるインフラ点検と災害対応の実証試験のために整備した国内唯一の試験場です。トンネル、橋梁、プラント、市街地、道路等の構造物を設置しており、老朽化したインフラの状況や災害現場を再現できます。

## 1 試験用橋梁

橋の老朽化（コンクリートのひび割れや剥離、ボルトのゆるみ等）や障害物を再現しています。  
ドローンを用いた状況確認、点検試験や操縦訓練が行えます。



## 2 試験用トンネル

トンネル内での交通事故や崩落、老朽化を再現するほか、橋脚のシッターを制御することで、鉄トンネルの中央部も再現できます。  
ロボットを用いた状況確認、点検試験、老朽化点検試験や操縦訓練、救助訓練が行えます。



## 3 試験用プラント

様々な形状の配管、バルブ、螺旋階段、煙突などを設置し、平時・災害時の化学プラントを再現しています。  
ロボットによる点検、情報収集、機器操作試験や操縦訓練が行えます。



## 4 市街地フィールド

住宅、ビルに加え、信号・標識を備えた交差点のある市街地を再現しています。  
車両や瓦礫などを置き、情報収集、障害物除去、人員救助、点検等の試験や操縦訓練等が行えます。



## 5 瓦礫・土砂崩落フィールド

泥でぬかんだ土地や、傾斜15度・30度の坂、陥没・電線・土砂・倒木などがある道路を設置し、災害時の道路遮断現場や土砂崩落現場を再現しています。  
救助・復旧作業等を行うロボットや無人重機の試験や操縦訓練、消防訓練等が行えます。  
長時間の走行耐久を試験する周回路も設けています。



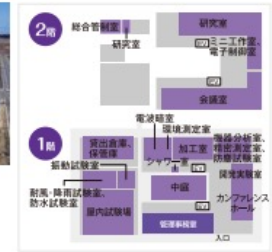
# 開発基盤エリア

## 1 研究棟

福島ロボットテストフィールドの本館としての機能を持ち、各試験の準備、加工・計測に加えて、ロボットの性能評価のための風、雨、防水、防塵、霧、水圧、温度、振動、電波に対する試験を行うことができます。また、研究者の短期～長期の活動拠点としての利用、事務所の開設、大規模会議室・展示場の開催も可能です。  
さらに、棟内に併設する福島県ハイテクプラザ南相馬技術支援センターにより、設備の利用支援やロボット技術等の技術相談、開発支援を行います。

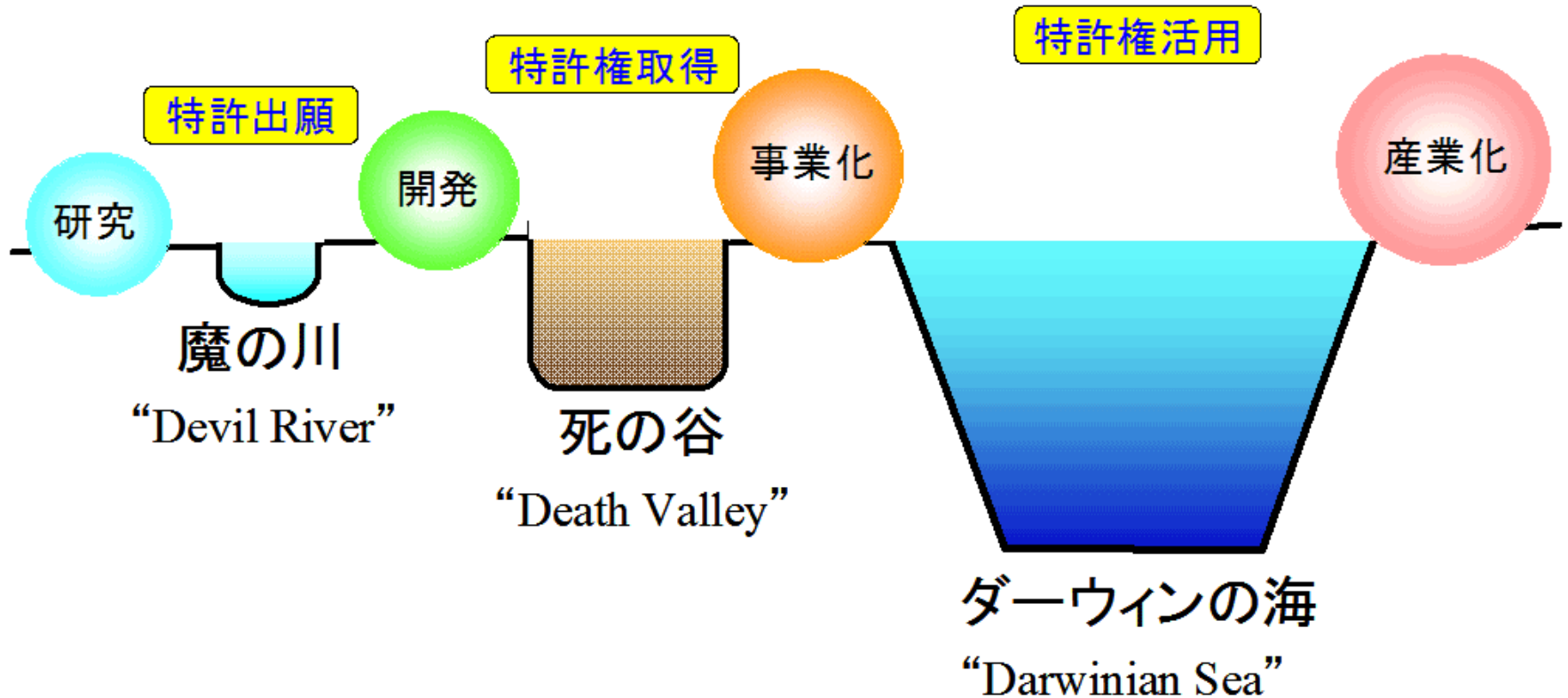


- 2 試験準備棟
- 3 屋外試験準備場
- 4 簡易計測室A
- 5 簡易計測室B



# 研究開発から社会普及まで

## 魔の川 死の谷 ダーウィンの海



[http://www.sangaku.nagoya-u.ac.jp/ipo/04\\_kiso/jittai.html](http://www.sangaku.nagoya-u.ac.jp/ipo/04_kiso/jittai.html)



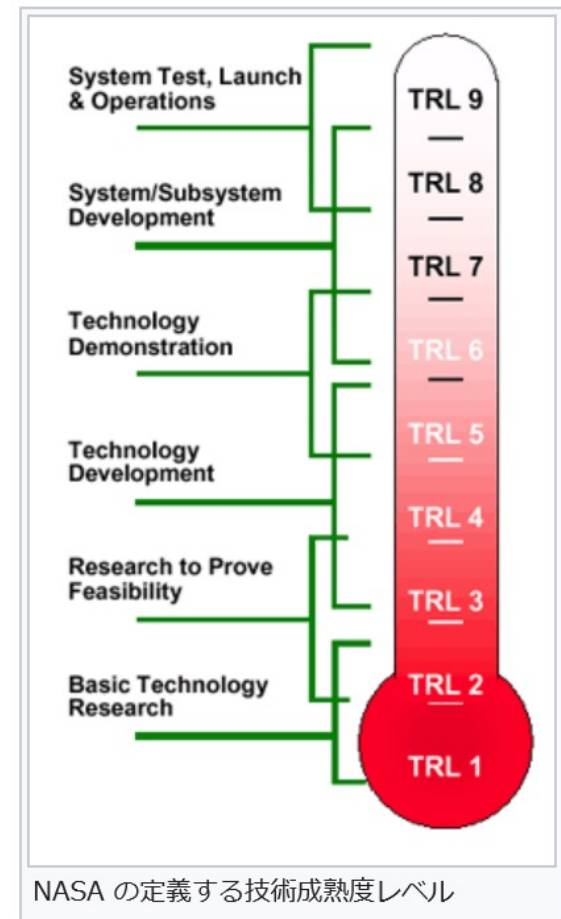
# 技術成熟度レベル

## TRL: Technology readiness levels

(Wikipedia)

### NASAによるTRLの定義

- Level 1 基礎理論の着想段階
- Level 2 技術要素の適応、応用範囲の明確化
- Level 3 技術実証のデモンストレーション(Proof of Concept)この段階から、実証試験等を行い検証を始めていく
- Level 4 ラボレベルでの実証
- Level 5 シミュレート及び実空間での実証
- Level 6 地上でのシステムとしての技術成立性の確認
- Level 7 宇宙空間でのシステムとしての技術成立性の確認
- Level 8 システムの運用テスト、認証試験
- Level 9 最終段階、実運用



# まとめ

- 遠隔技術＝ロボット技術
  - － システムインテグレーション
  - － ソリューションの導出
  - － 知能化(≠AI搭載)
- 世界の英知の結集の必要性
  - － 原子力事故は滅多に起こらない
  - － 知識共有や技術移転における国際的協力
- 開発した技術の他のサイトや応用への普及
  - － 災害対応, 建設, インフラ維持管理・保守  
宇宙, 農林水産業, 自動運転, 医療(手術)
- 若手の人材育成

