

福島第一廃炉国際フォーラム
(2018.8.6 いわき)

福島第一原子力発電所廃炉のための 遠隔技術

東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻
浅間 一

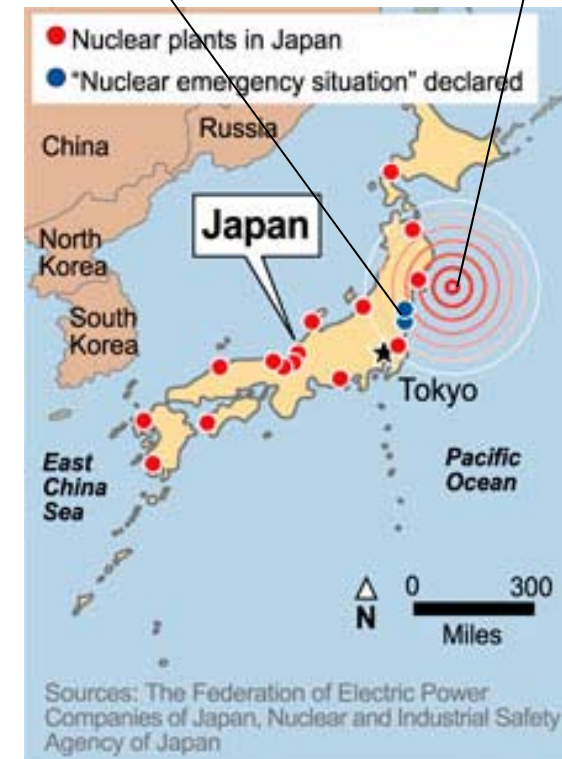
資源エネルギー庁・東京電力 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議委員
原子力損害賠償・廃炉等支援機構 燃料デブリ取り出し専門委員会委員, 研究開発連携会議委員
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID) 技術委員
日本原子力研究開発機構 (JAEA) モックアップ試験施設専門部会長
復興庁 福島イノベーション・コースト構想推進分科会委員

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: Situation of Black Out) (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)

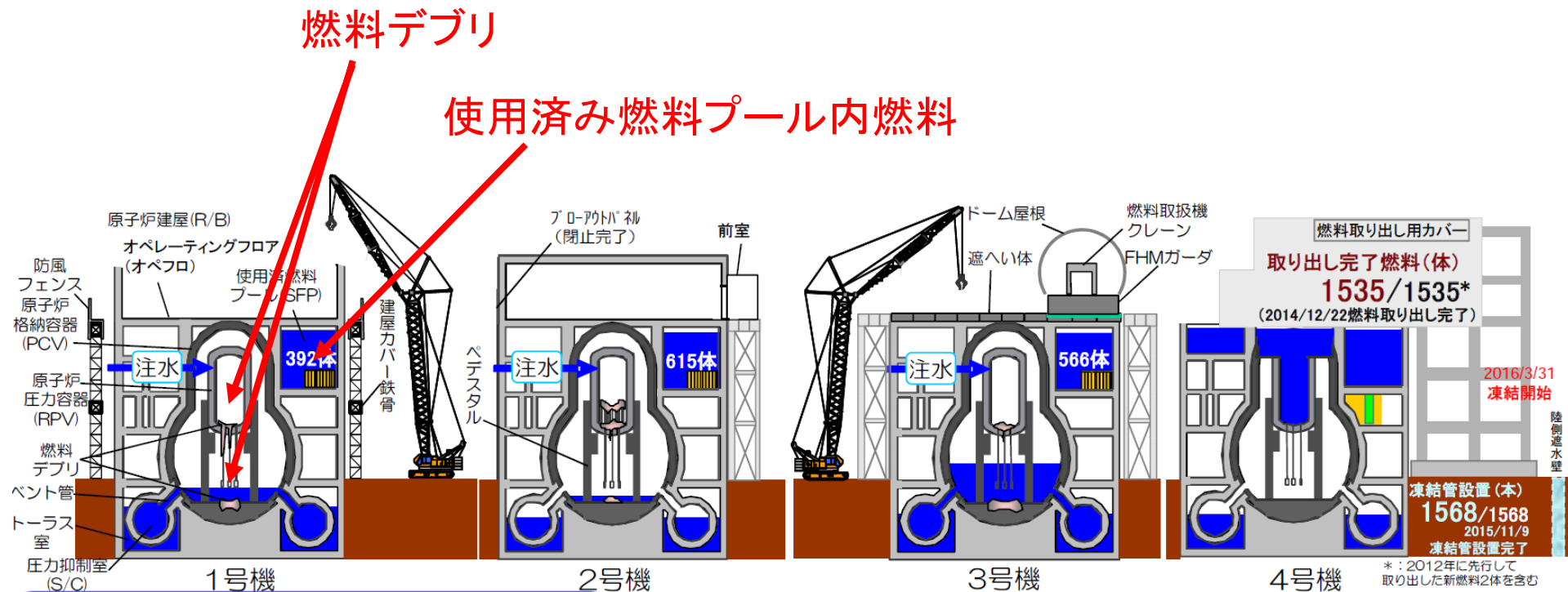
福島第一原子力発電所

震源地



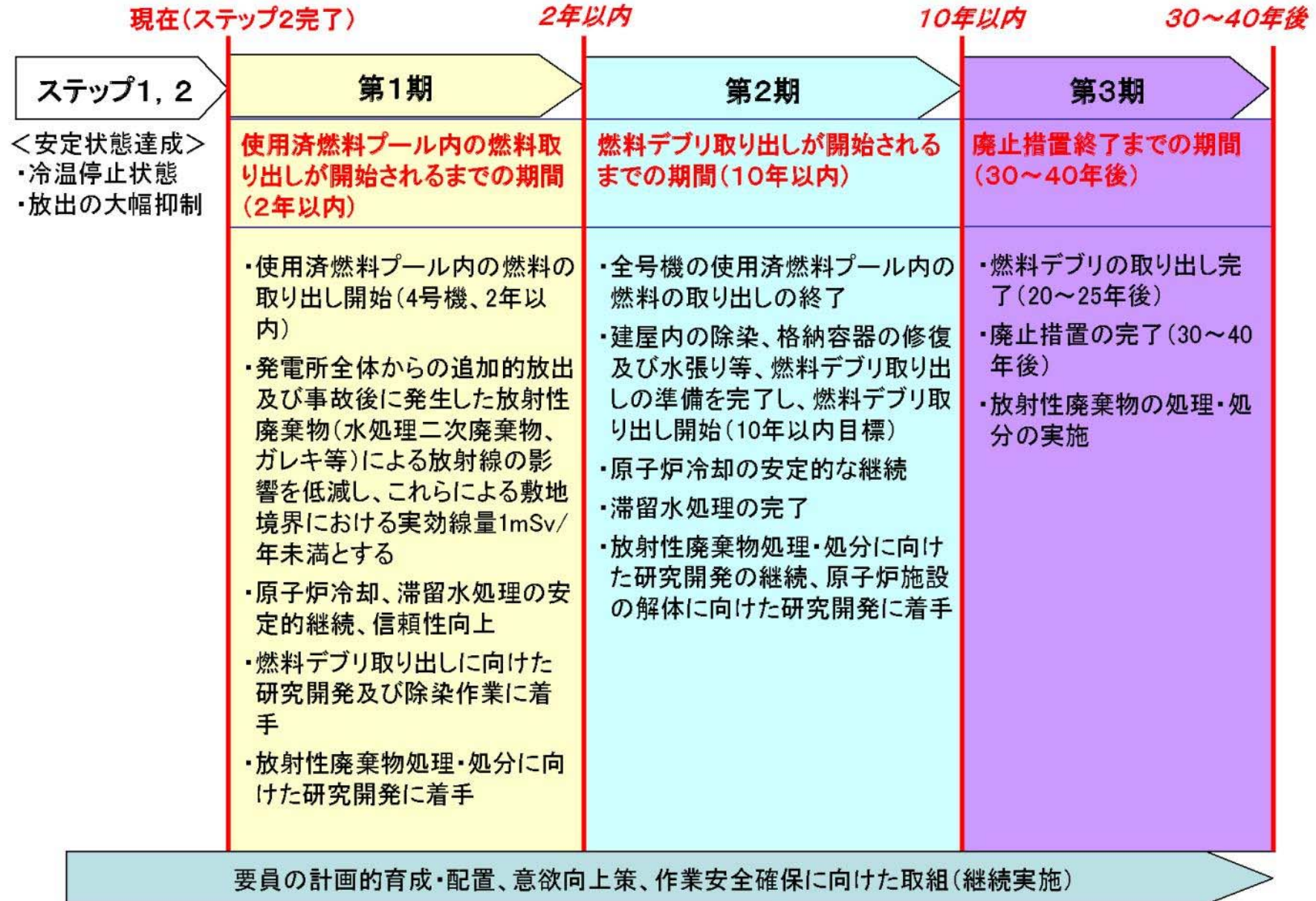
By Janet Loehrke, USA TODAY

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55回)資料

中長期ロードマップの概要



遠隔技術のニーズ(タスク)

- 注水
- 瓦礫・燃料(使用済み燃料, 燃料デブリ)・汚染水等の除去・移送(切断, 吸引, ハンドリング)
- 調査・計測・マッピング(映像, 放射線量, 等)
- サンプルング(ダスト, 汚染水, コンクリートコア, 燃料デブリ, 等)
- 除染, 遮蔽
- 汚染水の止水
- デバイス, 計器, 機材, 施設, 装置のハンドリング, 運搬, 除去, 設置, 解体
- 廃棄物・汚染水処理
- 解体

フェーズに応じたミッション

- フェーズ1: 緊急時フェーズ
 - 冷却系の安定化
- フェーズ2: 安定化フェーズ
 - 封じ込め, システムの再構築, 余震対策
- フェーズ3: 廃炉フェーズ
 - 燃料の取り出し
- 現場作業員の被曝の低減

フェーズ1

既製ロボットや機材の調達(汎用品)



独Putzmeister社製
コンクリートポンプ車



無人化施工機械



米国QinetiQ社製Talon



スウェーデン
Brokk社製
Brokk-90



米国Honeywell社製
T-HAWK



米国iRobot社製
Packbot



米国iRobot社製
Warrior



米国QinetiQ社製Bob Cat



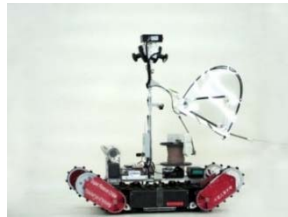
スウェーデン
Brokk社製
Brokk-330

フェーズ2

開発品(システム)の改造



Quince



Quince 2



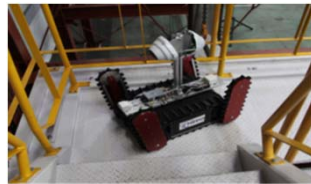
Quince 3



Gamma-ray
Measurement Robot



JAEA-3



Sakura



Rosemary



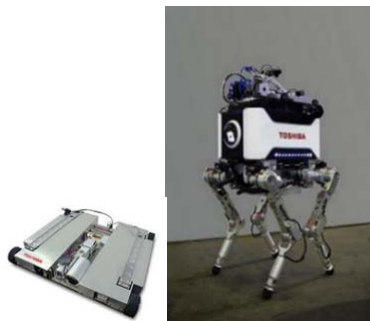
FRIGO-MA



Survey Runner



ROV



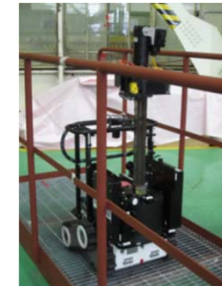
4足歩行ロボット・小型走行車



ASTACO-SORA



MEISTeR



S/C上部調査装置



投入支援装置

フェーズ3 新規開発(特殊用途)



床面除染装置



高所調査用ロボット



S/C水位測定
調査ロボット



形状変形



PCV内部調査装置
PMORPH



水上ボート型
ロボット



S/C下部外面調査装置



PCV内部調査装置
サソリロボット



PCV内部調査装置
ミニマンボウ

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Honeywell社製
T-HAWK



米国iRobot社製
Packbot



米国iRobot社製
Warrior



米国iRobot社製
Kobra



スウェーデン
Brokk社製
Brokk-90

スウェーデン
Brokk社製
Brokk-330



米国QinetiQ社製Talón



米国QinetiQ社製Bob Cat

米国Pentek社製
Moose



英国Createc社製
RISER

福島原発事故の廃炉措置で活用されている国産RT



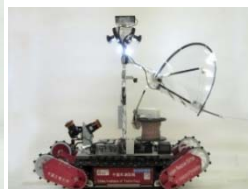
無人化施工機械



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



床面除染装置



MEISTeR



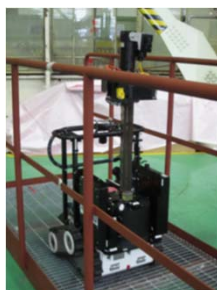
Sakura



投入支援装置



PCV内部調査装置
PMORPH



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



PCV内部調査装置
サソリロボット



PCV内部調査装置
ミニマンボウ



床面走行ロボット

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

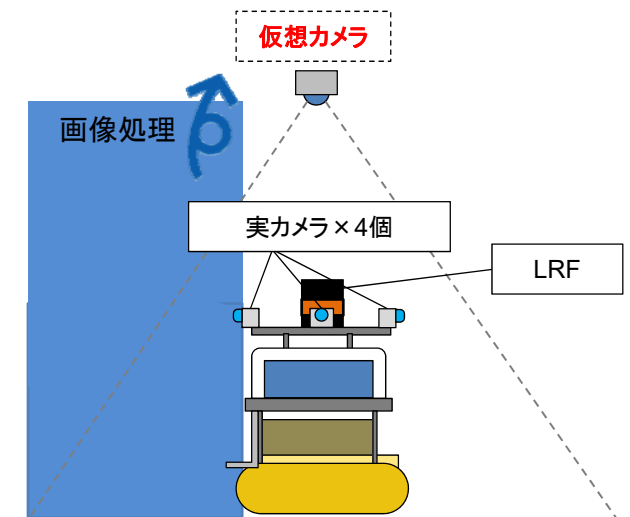
- 直接的要因
 - 通信の切断
 - 操作ミス
 - 放射線による機能不良
- 間接的要因
 - 開発品（製品ではなくプロトタイプ）
 - 未知環境

直接的な失敗要因への対策

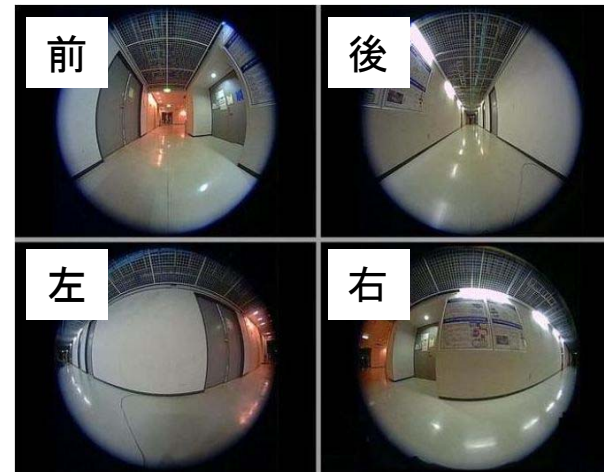
- 通信の切断
 - 有線と無線の組み合わせ
 - 無線インフラの構築
- 操作ミス
 - トレーニング
 - ヒューマンインタフェースの改良(空間認知性改良)

コンセプト

- 複数の魚眼カメラを画像処理して仮想カメラを生成
- LRF (測距センサ) を使用



俯瞰画像コンセプト



複数の魚眼カメラ(視野180°)

実装成果

(NEDO)災害対応無人化システム研究開発プロジェクト



狭い通路



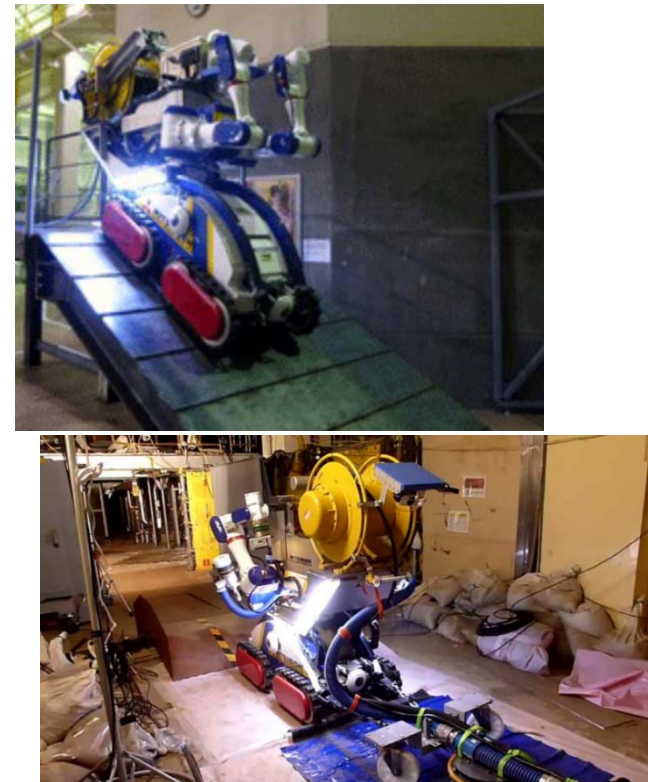
俯瞰画像

福島第一原子力発電所廃止措置のためのロボットへの応用

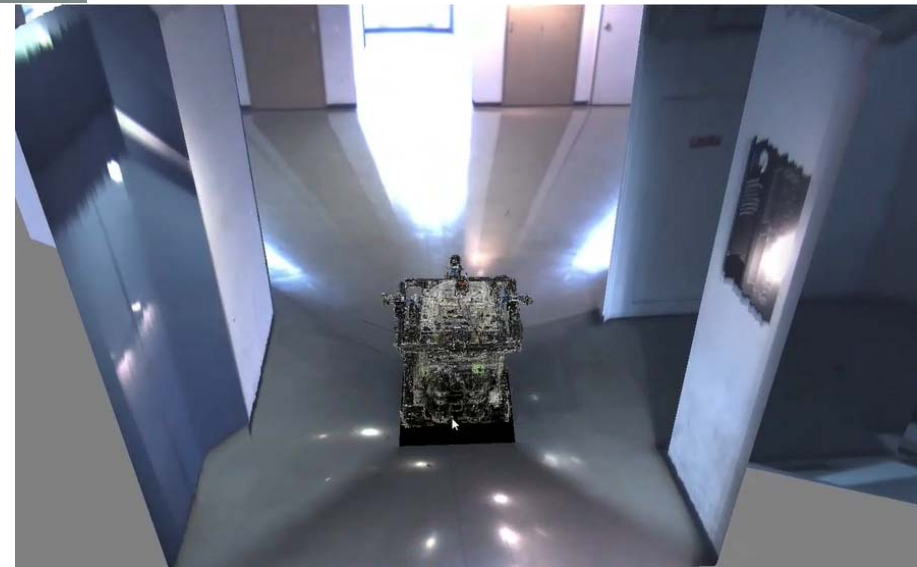
MHI Super Giraffe



MHI MEISTeR



任意視点からの俯瞰映像提示



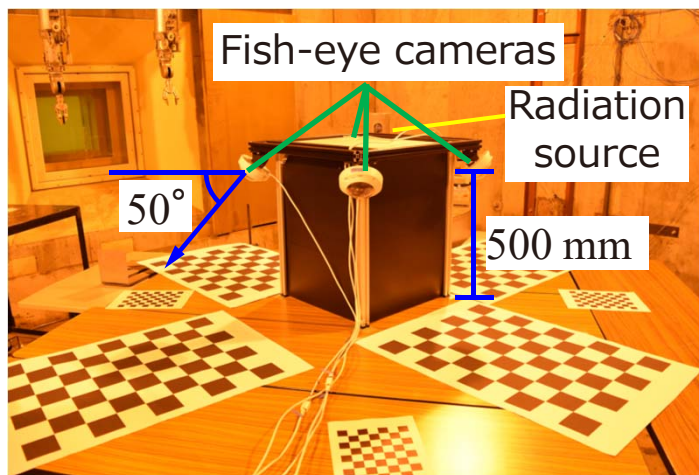
直接的な失敗要因への対策

- 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

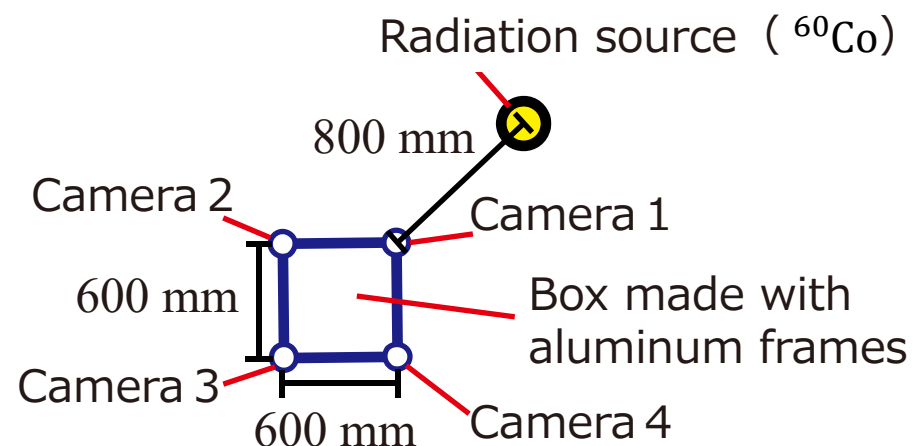
Gamma irradiation experiment

- The gamma irradiation was conducted in the Technology Development Center of ATOX Co., Ltd.

Camera model : AXIS M3007-PV



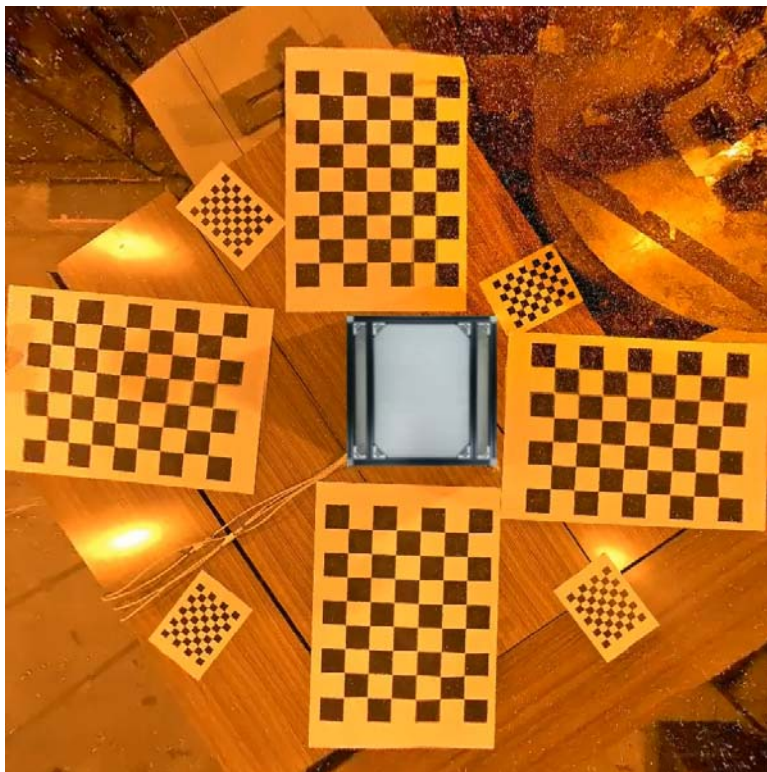
Experimental environment



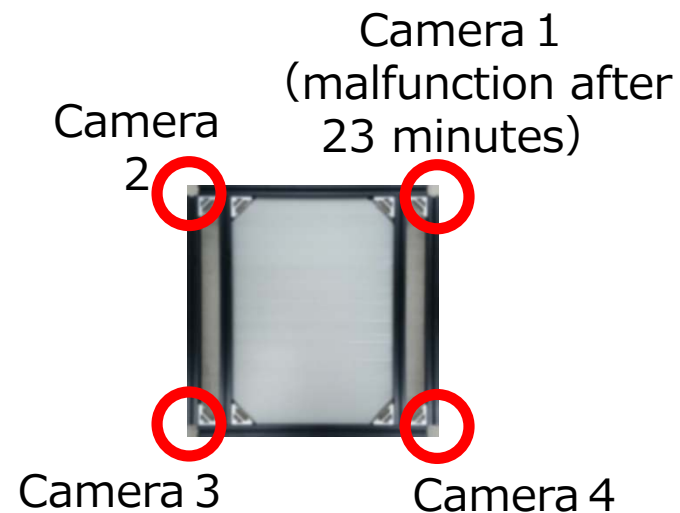
Experimental layout seen from above

Gamma irradiation experiment : Movie

➤ After 23 min irradiation



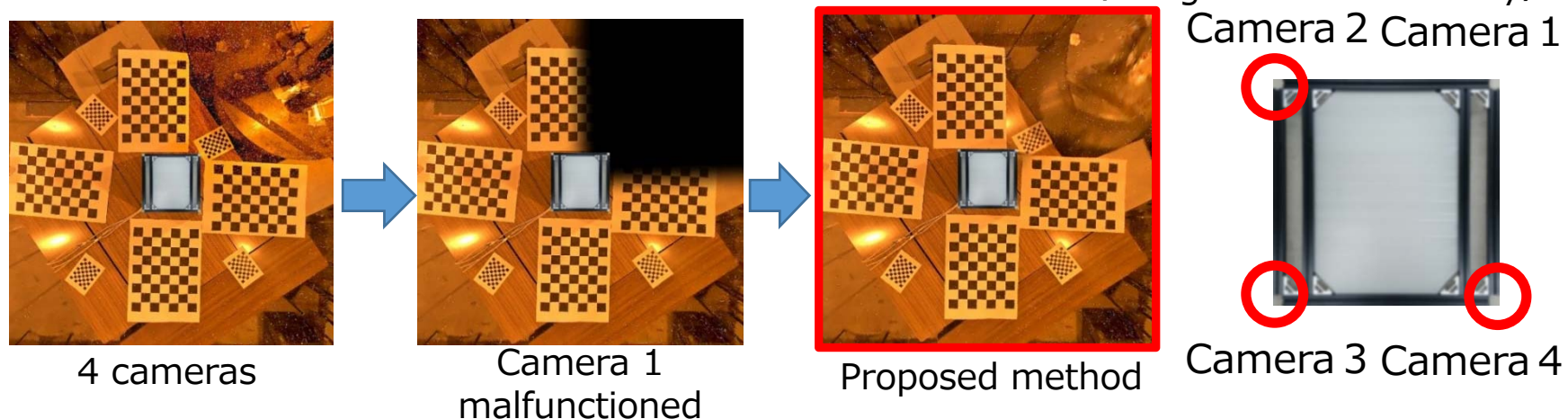
Bird's-eye view



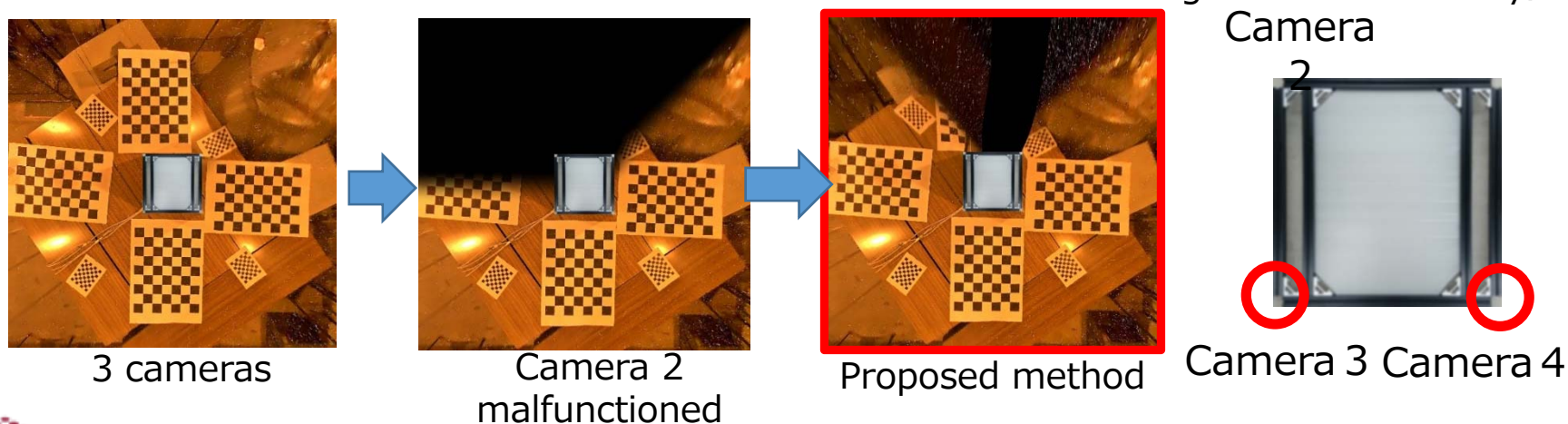
Bird's-eye view generation
corresponding to
camera malfunction

Gamma irradiation experiment : Result(1)

- Camera 1 malfunctioned after 23 min irradiation (Integral dose: 192.1 Gy)

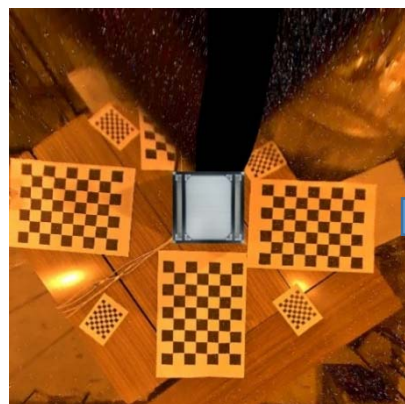


- Camera 2 malfunctioned after 54 min irradiation (Integral dose: 141.3 Gy)

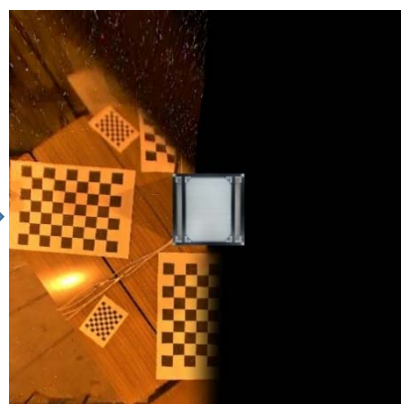


Gamma irradiation experiment : Result(2)

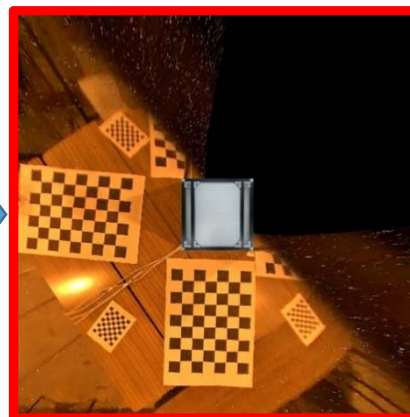
- Camera 4 malfunctioned after 82 min irradiation (Integral dose: 224.1 Gy)



2 cameras



Camera 4
malfunctioned

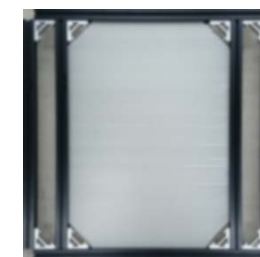


Proposed method



Camera 3 Camera 4

- Camera 3 malfunctioned after 94 min irradiation (Integral dose: 162.9 Gy)



Camera 3

その他の失敗要因への対策

- 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

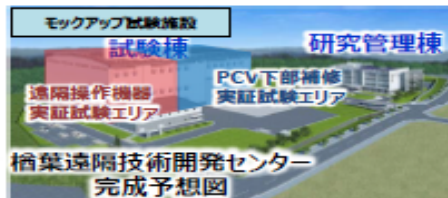
イノベーション・コースト構想（復興庁）

- 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

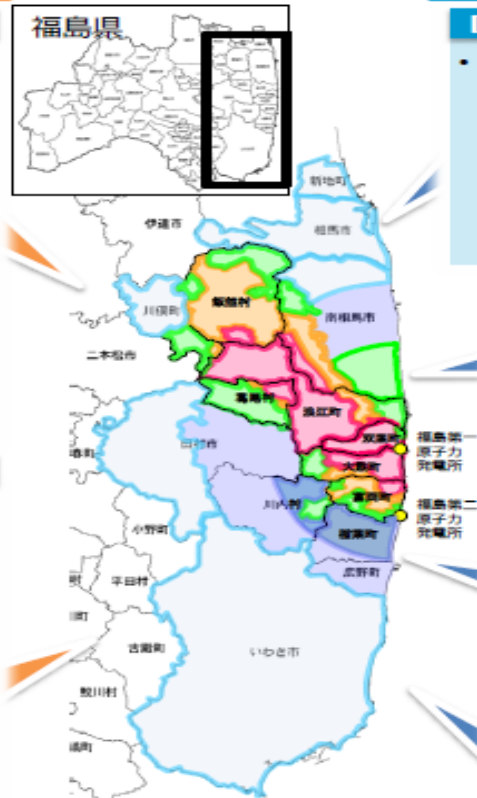
モックアップ試験施設（楢葉町）

- ・ 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。



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。



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。



地域復興実用化開発等促進事業

28年度：69.7億円

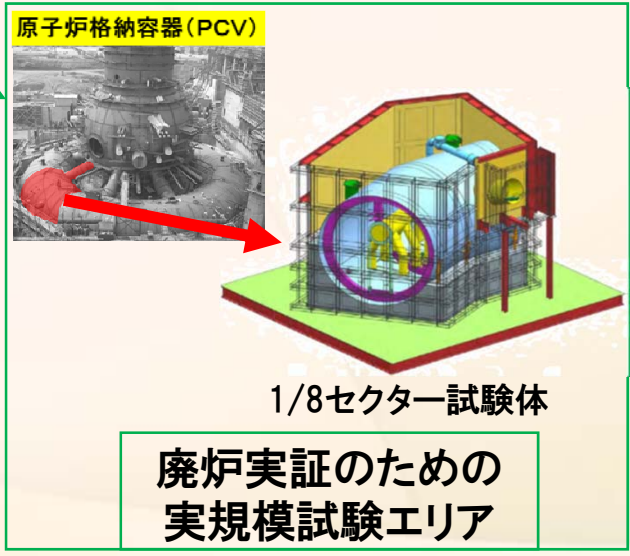
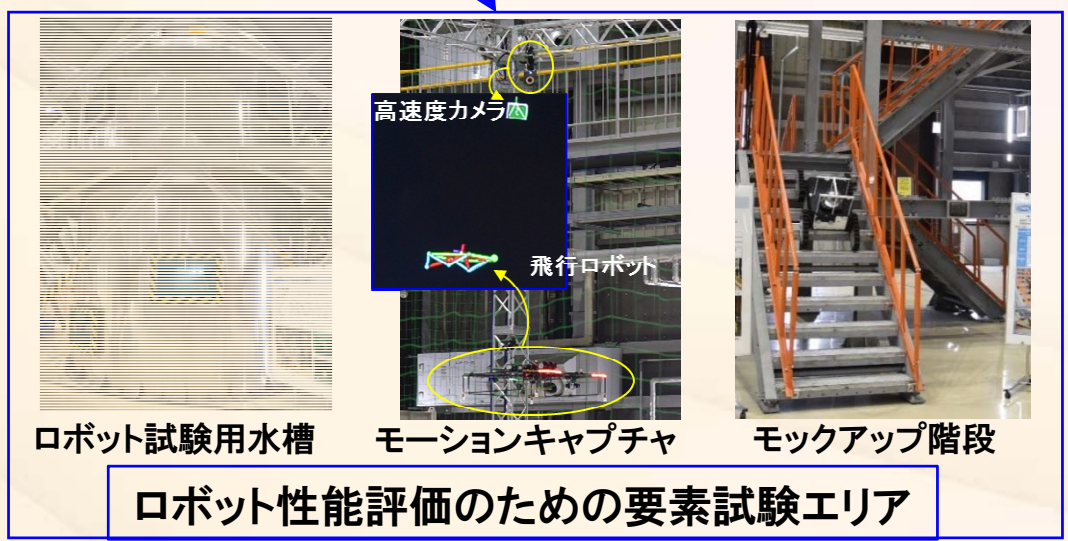
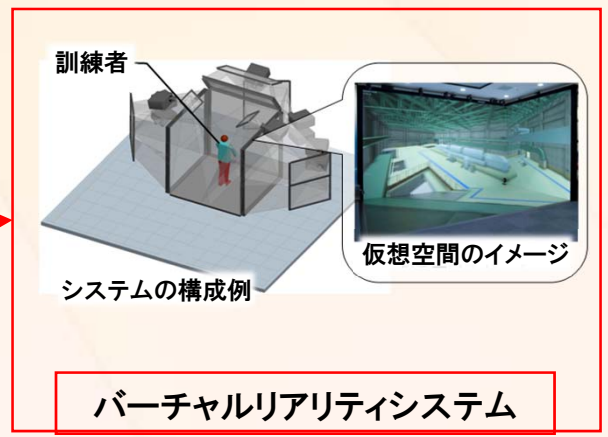
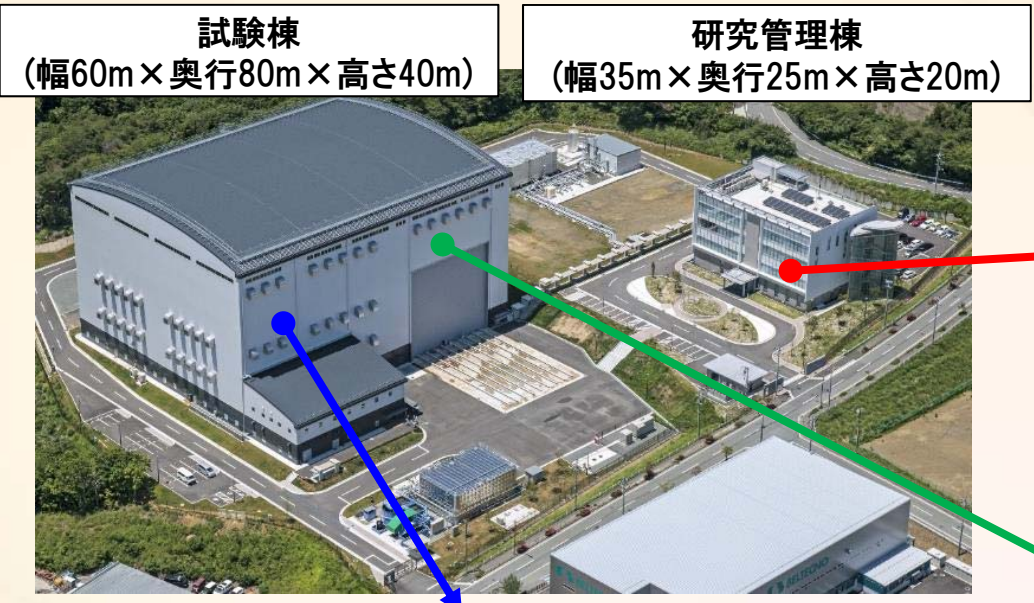
- ・ ロボット技術等イノベーション・コースト構想の重点分野について、地元企業との連携等による地域振興に資する実用化開発等の費用を補助する。

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。

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)



その他の失敗要因への対策

- 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

燃料デブリの取り出しと解体に向けて

- 多様な技術開発（ポートフォリオ）
 - 専用／汎用デバイス・ロボット
 - 切断デバイス，マニピュレータ，ハンドリングデバイス（サンプリング，止水，汚染水処理，燃料デブリ取り出し）
 - 内視鏡型ロボット

技術開発の多様性(ポートフォリオ)

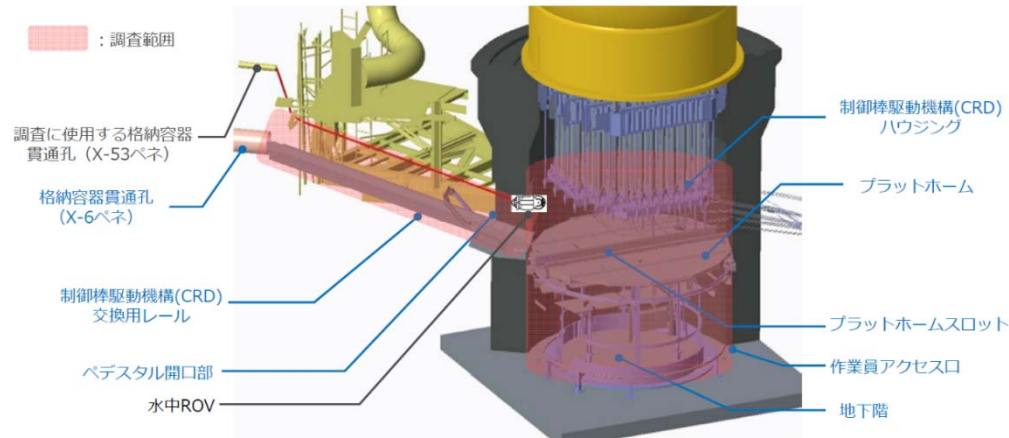
ニーズ	基本機能	環境／対象物	手段
アクセス	移動	環境のタイプ	
		陸上	クローラや車輪(普通, 磁石)による移動, 内視鏡
		空中	マルチコプタ(ドローン), バルーン, 飛行船, 懸垂型, テレスコピックによる移動
		水上・水中	水上ロボット・水中ロボットによる移動
		その他	組み合わせ, 専用機
		環境条件	
		障害物	回避, 押し, 片付け, 乗り越え
		狭隘空間, 配管	通過(能動的／受動的)
		高放射線	耐放射線性
情報収集	センシング	環境のタイプ	
		陸上・空中・水中	カメラ, ガンマカメラ, 線量計, レーザレンジセンサ, 内視鏡
		環境条件	
		障害物	画像処理(オクルージョン対応)
		濁り	超音波(ソナー)
		水滴落下	画像処理
		高放射線	耐放射線性
作業		対象物	
(デブリ除去, 除染, 設置)	マニピュレーション, ハンドリング, 吸引	物質(がれき, デブリ, 遮蔽ブロック, 壁／床)	アーム, グリッパ, 吸引装置, ウォータージェット
	切断, はつり	物質(がれき, デブリ, 遮蔽ブロック, 壁／床)	加工ツール, レーザー切断デバイス, ウォータージェット
(サンプリング)	吸引, 切断, マニピュレーション, ハンドリング	物質(燃料デブリ, コンクリートコア), 気体, ダスト, 砂, 水	吸引装置, 加工ツール, ウォータージェット, アーム, グリッパ

燃料デブリの取り出しと解体に向けて

- 多様な技術開発 (ポートフォリオ)
 - 専用 / 汎用デバイス・ロボット
 - 切断デバイス, マニピュレータ, ハンドリングデバイス (サンプリング, 止水, 汚染水処理, 燃料デブリ取り出し)
 - 内視鏡型ロボット
- 高耐水性デバイス
- 高耐放射線性デバイス
- 遠隔制御システムの自律化・智能化
- 動画からの3次元再構成
 - Structure from Motion

3号機原子炉格納容器内部調査 格納容器ペデスタル内事前調査 (2017.7.19-22)

(IRID/東芝, TEPCO)



Mini Mola Mola



Mola Mola (Sunfish)



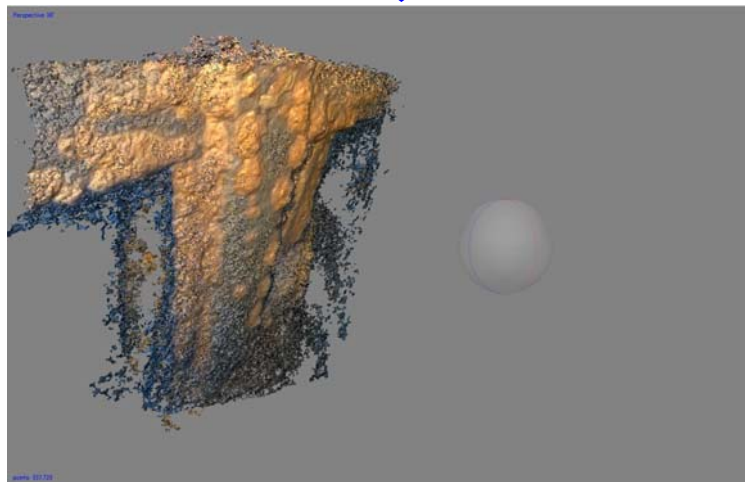
- 構造物
- 溶融物
- 堆積物

3号機ペデスタル内3次元形状復元

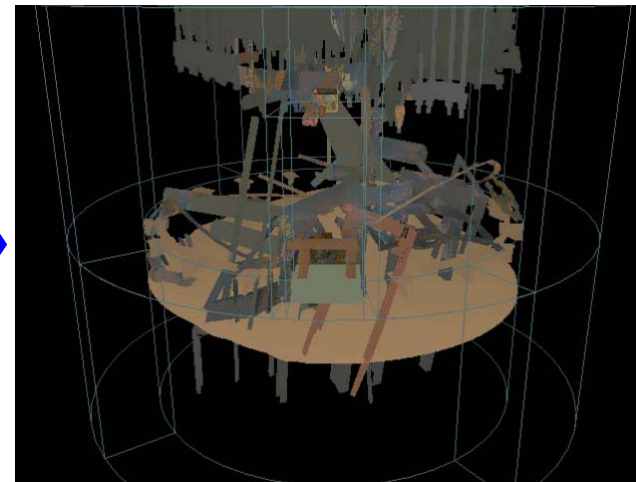
- Structure from Motion (SfM)による3次元形状復元



複数の画像を用いた3次元形状復元



東京大学



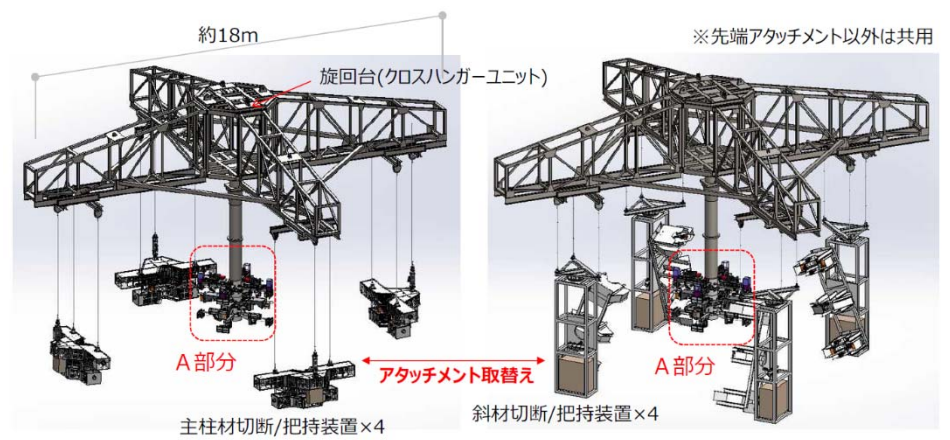
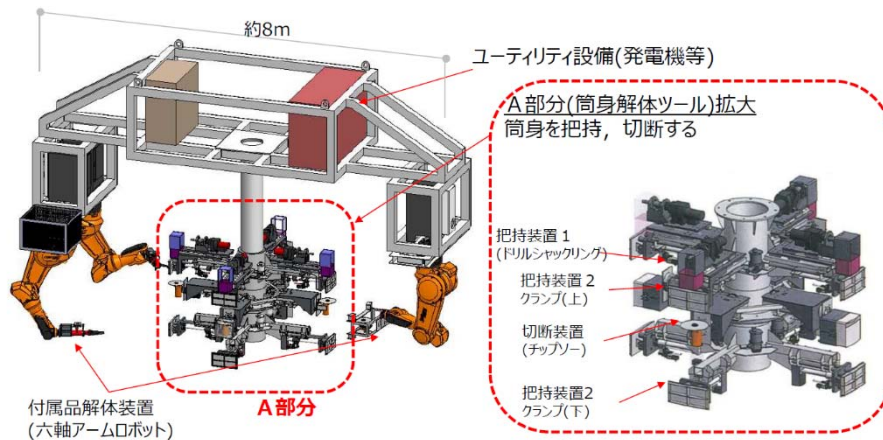
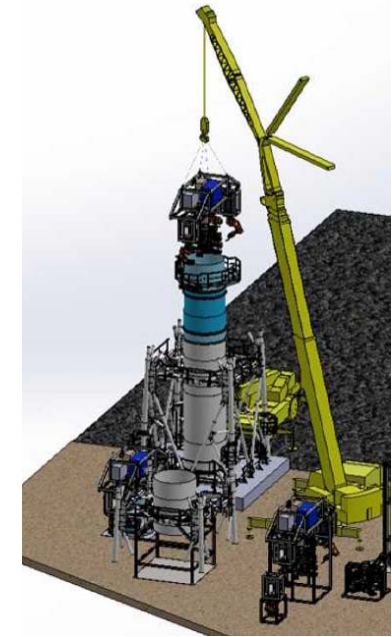
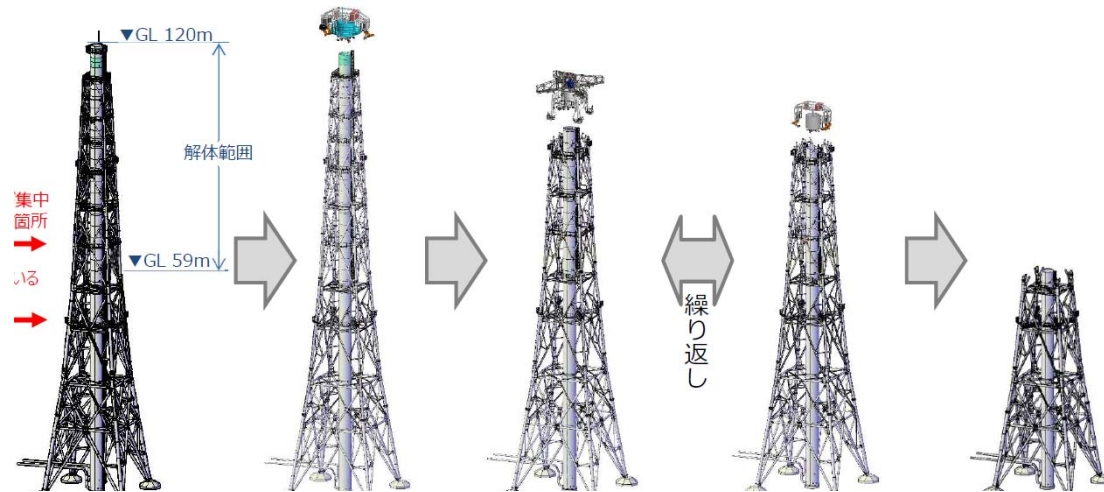
IRID, 東芝

近日導入

- 3号機使用済み燃料取り出し
- 1-2号機排気塔解体
- 1号機格納容器内調査
- 2号機燃料デブリ取り出し

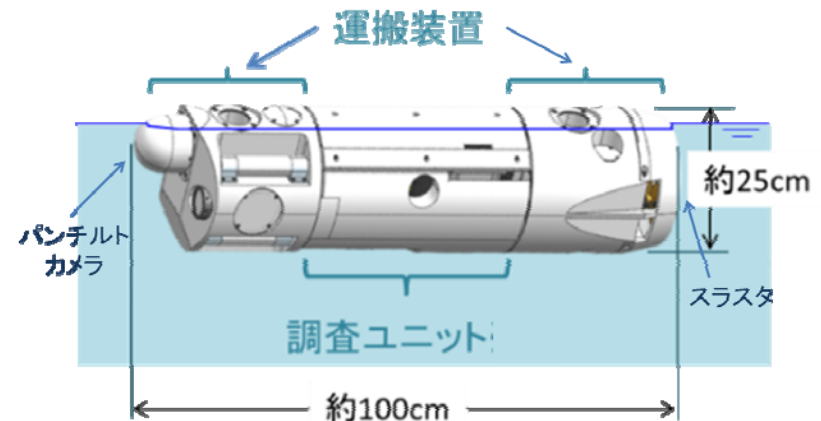
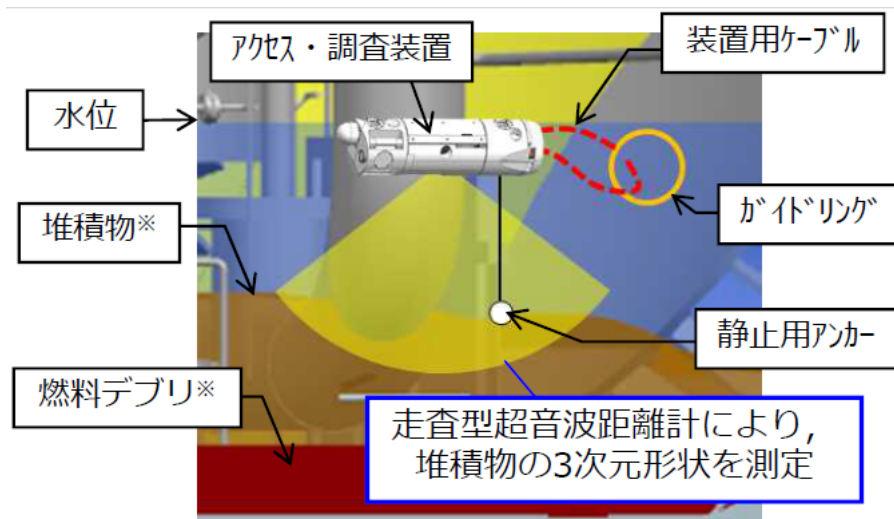
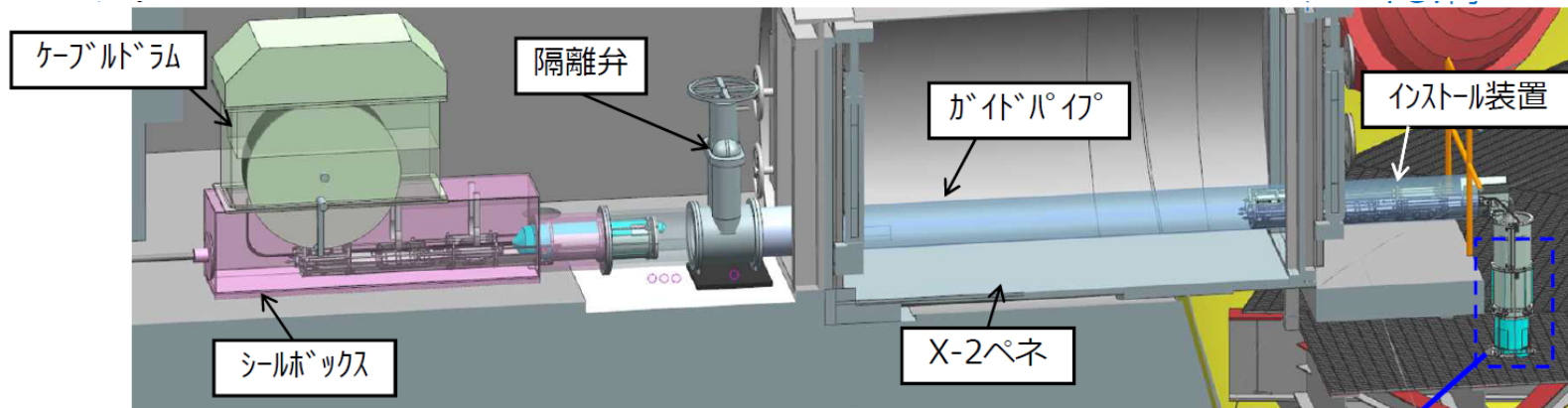
1-2号機排気塔解体 (2018年12月～)

(東京電力, エイブル)



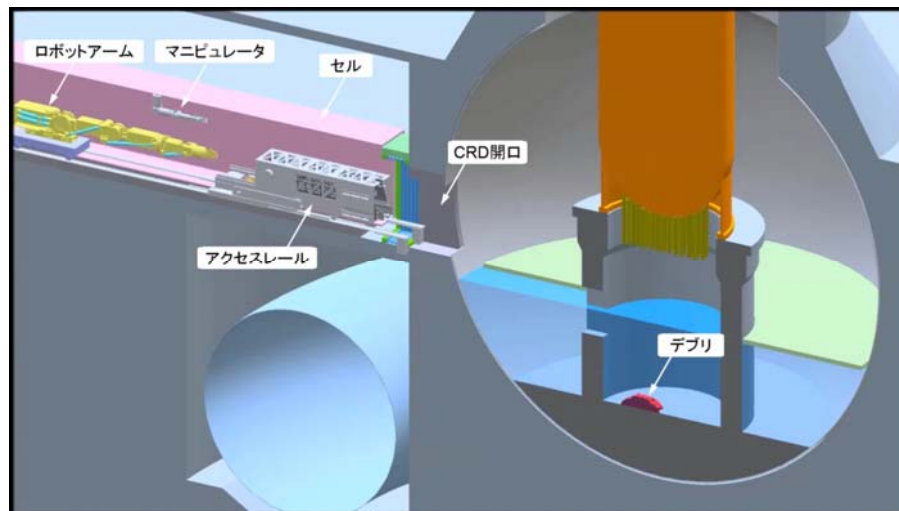
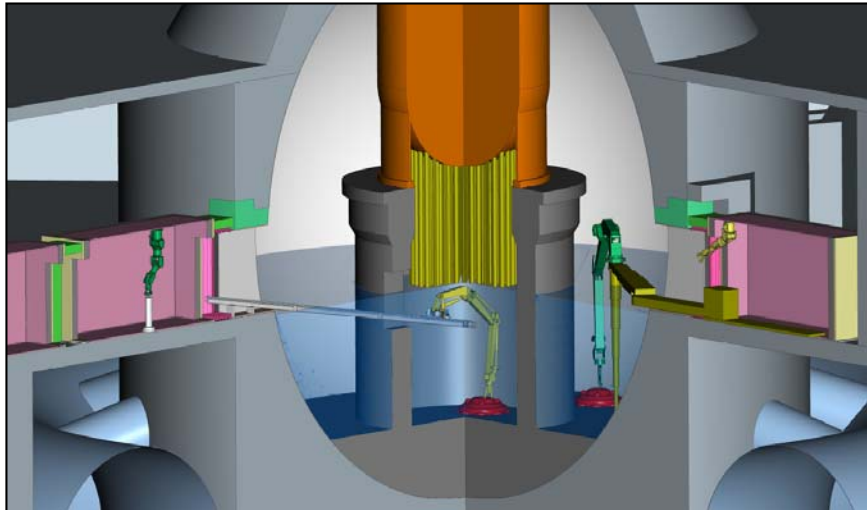
1号機格納容器内調査 (2019年～)

(日立GEニュークリア・エナジー, IRID)



2号機燃料デブリ取り出し (2019年～)

(三菱重工業, IRID)

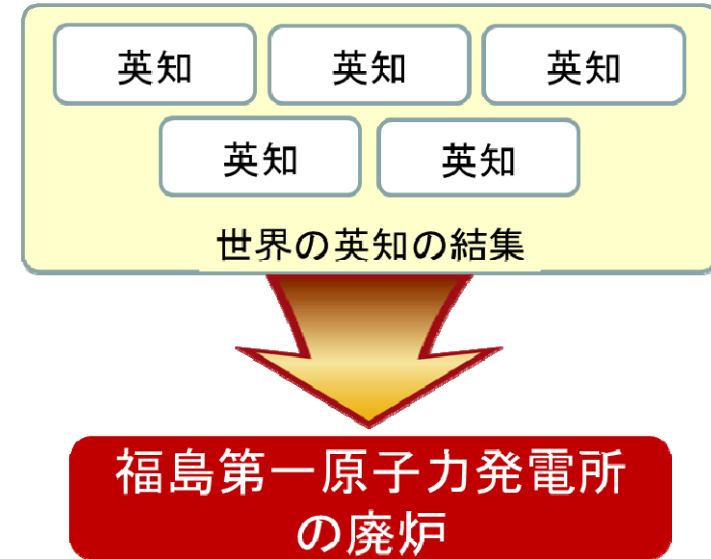


今後の開発に向けて

- 失敗から学ぶ
- 入手可能な技術の活用
 - SLAM, SfM, Drones, AI(深層学習), IoT, etc.
- 効率化: 繰り返し利用するためのシステムティックでダイナミックな設計
- 共通基盤プラットフォーム
 - 専用システムの開発から標準化要素へ

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
- 若手の人材育成



IFAC World Congress 2023

(International Federation of Automatic Control)

Venue:

PACIFICO Yokohama (All-in-One Venue)

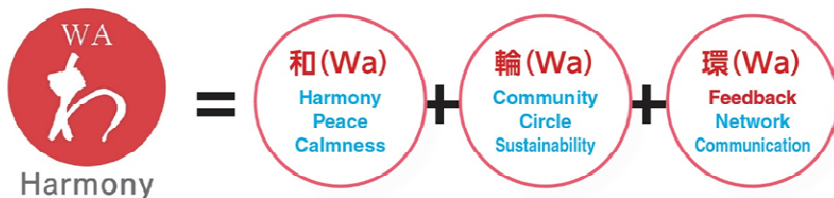
Dates (tentative):

July 9th (Sun) – 14th (Fri), 2023

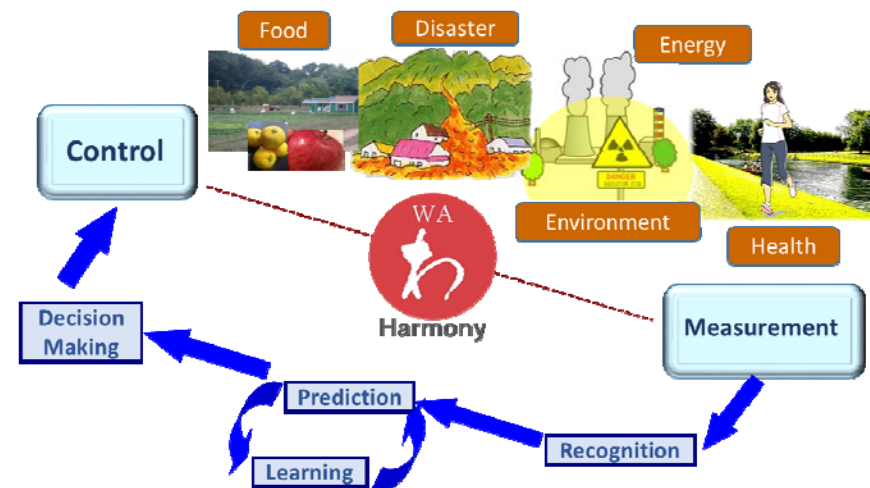


Vision:

Wa: Harmony of Traditional Culture and Innovative Technology



Control for Solving Societal Problems and Creating Social Values



ご清聴ありがとうございました

東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

浅間 一

asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp