令和2年度 福島研究開発部門
成果報告会

福島研究開発部門の活動概況報告

令和2年12月5日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門　企画調整室

宮本　泰明

福島研究開発部門のあゆみ

組織図

2020年12月 現在

- 福島研究開発部門
  - 企画調整室
  - 福島研究開発拠点
    - 安全管理部
    - 計画管理室
    - 福島事業管理部
    - 施設部
    - 廃炉環境国際共同研究センター
    - 楢葉遠隔技術開発センター
    - 大熊分析・研究センター

沿　革

2011.3

- 東北地方太平洋沖地震
- 福島第一原子力発電所（1F）事故

2011.12

- 政府と東京電力による中長期ロードマップ策定

2011

- 1F事故直後から環境モニタリング・除染活動への支援、国・自治体への支援を実施
- 福島支援本部 設立（同年、福島技術本部に組織再編）
- 福島事務所 開設

2013

- 1Fの廃止措置に向けた研究開発を行う福島廃炉技術安全研究所を設置
- 国際廃炉研究開発機構に参画（IRID）

2014.4

- **福島研究開発部門**として組織再編

2015

- いわき事務所 開設
- **福島県環境創造センター環境放射線センターでの業務開始**

2016

- **楢葉遠隔技術開発センター(NARREC)本格運用開始(楢葉町)**

- **福島県環境創造センター研究棟での業務開始**

2017

- **廃炉国際共同研究センター（CLADS）国際共同研究棟 運用開始**

2018

- **大熊分析・研究センター施設管理棟 運用開始**

2020

- 廃炉及び環境回復の研究開発を統合し「廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)」に改組

福島県内の研究開発拠点

廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）【南相馬市】

福島の環境回復に係る環境モニタリング・マッピング技術開発等を実施

※福島県環境創造センター 環境放射線センターに入居し活動

廃炉環境国際共同研究センター（CLADS） 【三春町】

福島の環境回復に係る環境動態研究等を実施

※福島県環境創造センター 研究棟に入居し活動

※JAEA全体で横断的に取り組む福島対応業務に係る関係組織の連携を図るため、核燃料・バックエンド研究開発部門、原子力科学研究部門の各企画調整室及び高速炉・新型炉研究開発部門の戦略・計画室に「福島研究開発推進室」を附置

福島イノベーション・コースト 構想の拠点（廃炉研究）

大熊分析・研究センター 【大熊町】

1Fの廃止措置推進のための放射性廃棄物や燃料デブリの分析・研究を行う施設の整備

廃炉環境国際共同研究センター（CLADS） 【富岡町】

国内外の英知を結集し、安全かつ確実に1Fの廃止措置等を実施するための研究開発、人材育成等を実施

楢葉遠隔技術開発センター(NARREC) 【楢葉町】

1Fの廃止措置推進のための遠隔操作機器（ロボット等）の開発・実証試験を実施

外部利用が可能な施設、詳細は下記URL参照
https://naraha.jaea.go.jp/use/flow.html

連携・協力

補完し合いながら利用者のニーズに対応

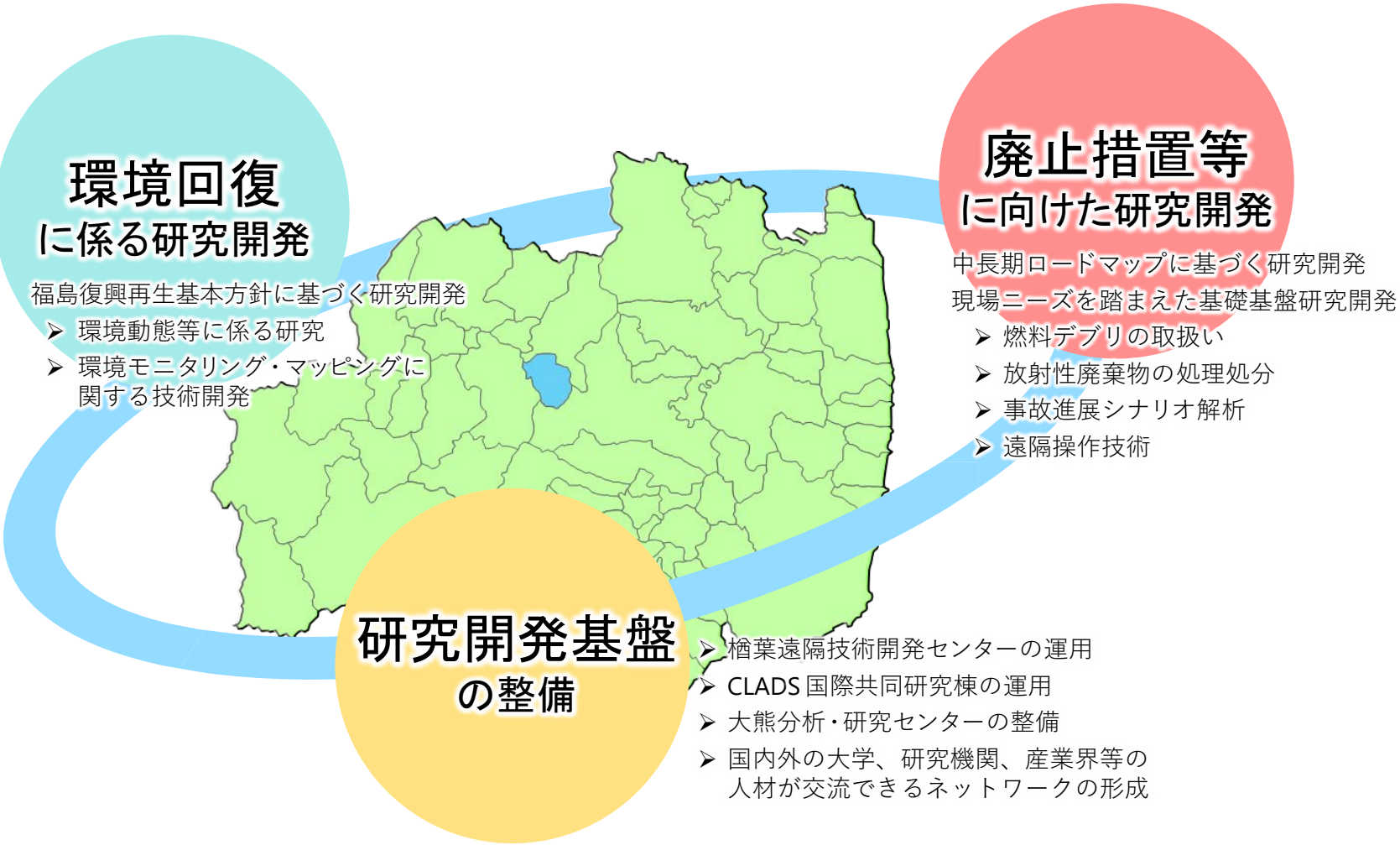
福島イノベーション・コースト構想推進機構｜福島ロボットテストフィールド

物流やインフラ点検、大規模災害などに対応する陸・海・空のロボット・ドローンの研究開発、実証試験、性能評価、操作訓練を行うための、世界に類を見ない一大研究開発拠点を整備

福島研究開発部門の取組み

福島第一原子力発電所事故からの復興に向けて

科学技術的専門性を最大限活用した取組みを実施



他部門との連携

茨城地区の『原子力科学研究所』、『核燃料サイクル工学研究所』、『大洗研究所』及び『敦賀廃止措置実証部門』と連携し、1F由来の廃棄物分析、分析手法の検討及び若手分析技術者の育成に取り組んでいます

福島研究開発部門

1F廃止措置、福島の環境回復に関する研究開発及び福島における研究開発基盤の整備を実施しています

1F由来のサンプルの分析方法の検討を
他拠点の先行施設と連携して実施

◀1Fサンプル分析の様子

茨城地区の先行
施設におけるOJT▶

他拠点の先行施設へ福島部門の若手職員を派遣し、放射性物質分析に必要なノウハウを習得するためのOJTを実施

JAEA 茨城地区研究開発拠点及び敦賀廃止措置実証部門

最大の規模を誇る茨城地区の研究開発拠点と先行して廃止措置を進めている敦賀廃止措置実証部門と連携しています

原子力科学研究所	核燃料サイクル工学研究所	大洗研究所	敦賀廃止措置実証部門
原子力分野における先端及び基礎工学分野の研究開発を実施	核燃料サイクル技術及びバックエンド処理技術に関する研究開発を実施	新型炉及び新型燃料に関する研究開発を実施	『もんじゅ』及び『ふげん』の廃止措置に関する業務を実施

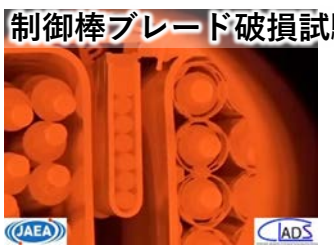
1F廃炉対策タスクフォース

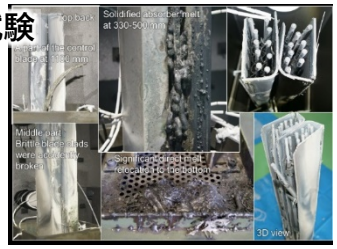
1F廃止措置に係る喫緊の課題を原子力機構全体として、組織横断的に取り組む会議体を構築しました。

『燃料デブリ等分析・評価検討作業部会』
『1F廃棄物管理検討作業部会』
の2つの作業部会を設け、検討メンバーには各部門の若手研究者、技術者を加えることで人材の交流・育成を促進しています。

廃炉環境国際共同研究センターの活動概況

福島第一原子力発電所(1F)廃止措置に関する研究開発



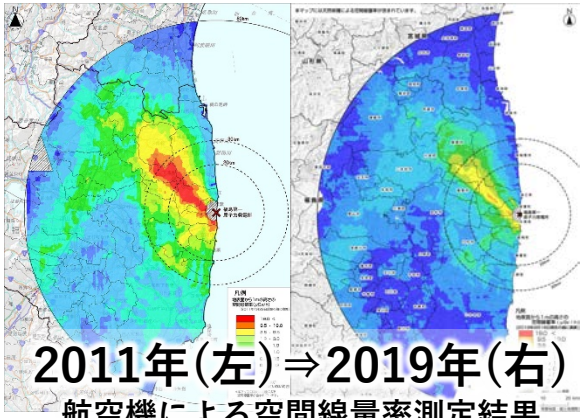


事故シナリオの解明に向けた1F事故を模擬した条件での破損試験や1F建屋内等における放射性物質分布の可視化技術開発などを実施

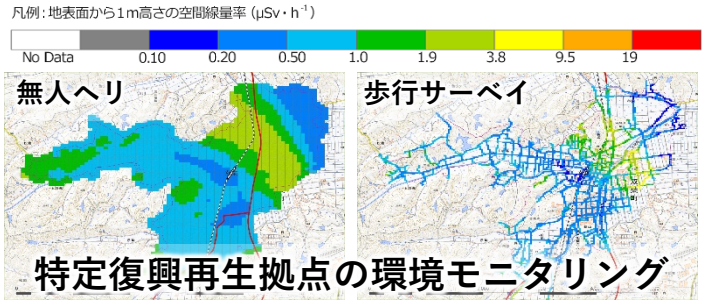
コンプトンカメラによる1F建屋内の放射性物質分布の可視化

燃料デブリ取出し工程及び1F建屋内作業工程の検討に寄与する情報を提供することで、1F廃止措置の推進に貢献

福島の環境回復に係る技術開発



2011年(左)⇒2019年(右)
航空機による空間線量率測定結果



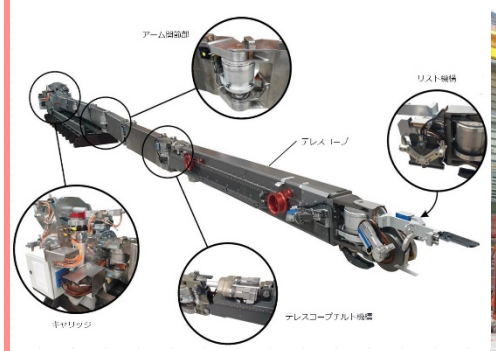
特定復興再生拠点の環境モニタリング

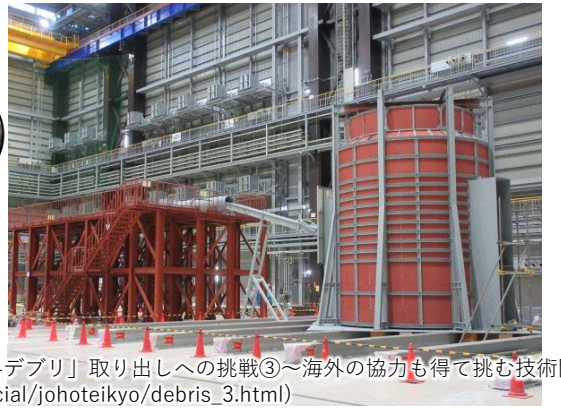
1F事故以来、無人機等を用いた放射線モニタリング活動と職員によるフィールドワークを継続的に実施

自治体へ報告、
一部の帰還困難区域の解除決定に貢献

楢葉遠隔技術開発センターの活動概況

施設利用：燃料デブリ取出し試験





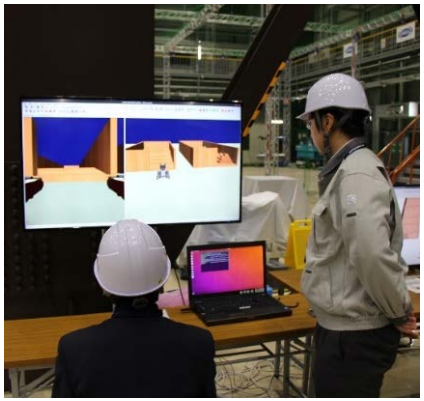
燃料デブリ取り出し等にむけ、国際廃炉研究開発機構（IRID）によるモックアップ試験を予定

このような施設利用を通じて、1Fの廃止措置に貢献

※資源エネルギー庁HP　『福島第一原発「燃料デブリ」取り出しへの挑戦③～海外の協力も得て挑む技術開発の最前線』より引用
(https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/debris_3.html)

この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金により得られたものです

人材育成：ロボット操作実習プログラムの開設



仮想現実（VR）、ロボット操作・シミュレータなどの体験と講義による実習プログラムを開設

地元 福島県の高校をはじめ、大学・企業等が利用

大熊分析・研究センターの活動概況

拠点整備：放射性物質分析・研究施設（第１棟）の建設

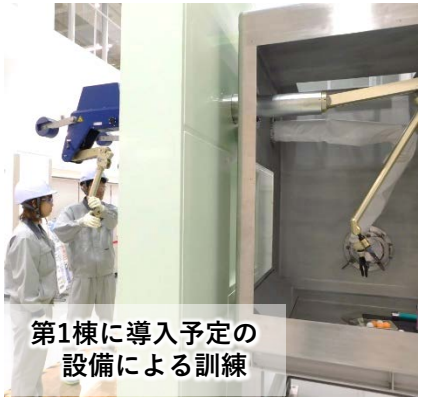
完成予想図

建設中の第1棟
2020年10月撮影

1Ｆで発生する低・中線量のガレキ類、水処理二次廃棄物等の処理処分にむけた分析を行う施設
2021年度6月の運用開始にむけ、建設中

人材育成：分析技術者の育成

施設管理棟


第1棟に導入予定の
設備による訓練

施設管理棟のワークショップを活用して第1棟で行う分析作業を想定した訓練等を実施

第１棟の運用開始にむけ、若手の分析技術者を育成

1F廃止措置に係る研究者・技術者の育成

福島リサーチカンファレンス（FRC）

廃止措置関連の基盤研究を取り扱う国際会議を、2015年より福島県で継続的に開催

国内外の廃止措置の専門家による最先端の英知を結集。人材育成のネットワークを形成

2020年度はWeb形式で12月7日～9日で開催予定

1F廃炉人材育成研修

1F廃炉に携わる技術者等に対して、廃炉に必要な知識等を習得させることを目的に2019年から開催

JAEAとNDFで、関連機関の協力を得ながら、カリキュラム、テキストの検討、各講義内容に精通した講師の選任など、社外共通研修体制を構築

講義（東京電力ホールディングス（株）松本講師）

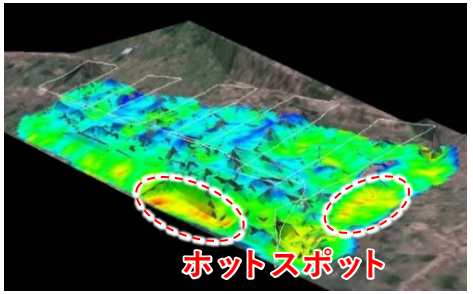
主な研究開発成果①

放射線源の位置推定が可能な小型軽量コンプトンカメラを載せた遠隔放射線イメージングシステムを開発。放射性物質分布の３次元可視化や局所的な汚染（ホットスポット）の把握に成功

本システムは、帰還困難区域内の広いエリアにおけるホットスポットの把握に有効であり、また1F現場への適用も期待されている

2019.5.9　プレスリリース

遠隔放射線
イメージングシステム



航空写真の出典：国土地理院※

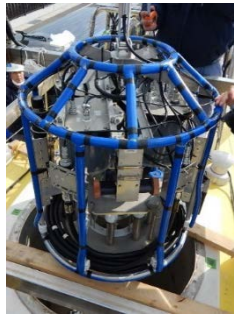
放射性物質分布

1F事故以降の無人船による河口域モニタリングの経験を活かし、福島県浜通りに拠点を持つ企業とともに、放射線測定の他、海底土のコアサンプル採取等、多目的に活用可能な無人船を開発

本無人船では、海底海中の放射線測定に加え、海底土のサンプル採取が可能となり、より詳細な放射能分布を得ることができる

2019.5.24　プレスリリース

開発した無人船



海洋調査用マルチセンサー

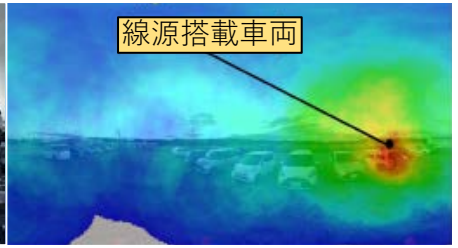
144台のコンプトンカメラとレーザー光を用いた3次元距離測定センサを組み合わせ、全方位型の3次元放射線測定システム車iRIS-Vを開発。車両周辺の放射性物質の分布を短時間で把握可能

あらゆる方向のホットスポットを容易に把握することが可能となり、除染や廃炉作業の円滑な推進に貢献できる

2020.3.27　プレスリリース

▲iRIS-V

全方位型▶
コンプトンカメラ



▲放射線源の可視化結果

※ https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html

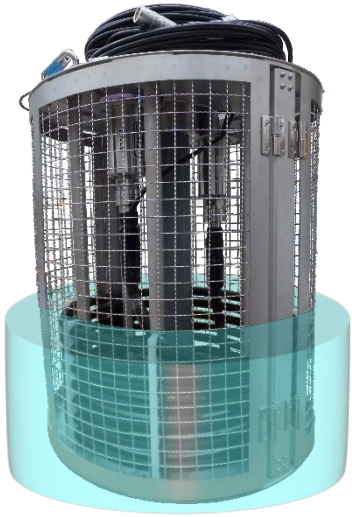
主な研究開発成果②

1F構内排水路の水の放射線測定について、ベータ（β）線とガンマ（γ）線を区別し、かつ実験室でなく現場でリアルタイムに測定できるファイバ放射線モニタを開発

本モニタを利用することで、排水路への汚染水漏えい有無の判断の迅速化および試料採取・分析を行う作業員の負担軽減が期待できる

2020.1.31　プレスリリース

ファイバ型放射線モニタ



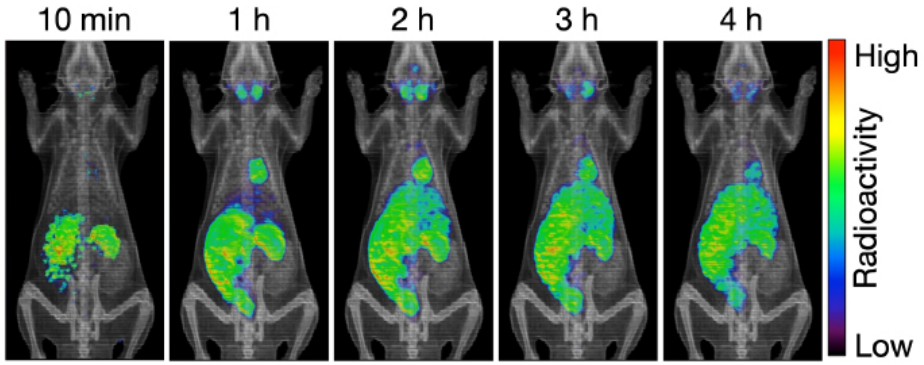
ファイバ部を水に沈めて測定

体内に取り込まれた放射線セシウムの体内での動きをがん検診に用いられる手法(PET：ペット)で追跡するため、陽電子を放出する放射線セシウムを抽出する技術を開発

ラットへ投与しPETで撮像することで、体内に取り込まれたセシウムが体内の様々な臓器へ分布する様子を世界で初めて可視化することに成功

2020.10.15　プレスリリース

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
国立大学法人東北大学
との共同成果



ラット体内のセシウムの動き

主な研究開発成果③

これまで蓄積されてきた環境モニタリングデータを利用して森林から渓流魚に取り込まれる放射性セシウムの経路を解明。継続して、渓流魚の放射性セシウム濃度の将来予測に向けた取組みを実施

本成果は、福島県における内水面漁業の再開に向けた今後の見通しを得るために活用されることが期待できる

2019.12.24　プレスリリース

1F事故由来の放射性セシウムについて、事故後初期に加え、年単位の長期間に対する河川から海への流出量を推定できる計算モデル「MERCUTY（マーキュリー）」を開発

本モデルを利用することで、河川水の農地用水への活用にあたり水門管理などへの利用が期待されている

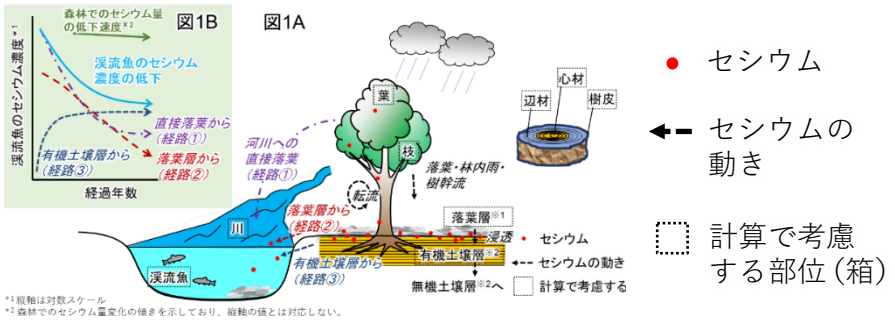
2020.1.15　プレスリリース

事故直後から数多く実施されてきた環境モニタリングの結果について、これまでの知見を集約するため、研究論文210本以上を網羅的に集約し、汚染状況と環境回復状況の全貌を明らかにした

除染等により地面に露出したセシウムの濃度が劇的に低下したことで、河川へ流入するセシウムの濃度の低減をもたらすことを解明

2020.1.15　プレスリリース

国立大学法人筑波大学　国立大学法人福島大学
国立研究開発法人科学技術振興機構　との共同成果



森林内のセシウムの動きと渓流魚への影響（概念図）

降雨の時間変化(実測値)から
河川水流量の時間変化を計算

↓

河川水流量に応じた
懸濁物質の流出量を推定

↓

懸濁物質に付着／水に溶存する
放射性セシウム濃度の時間変化を推定

↓

放射性セシウム流出量を算出

陸域におけるセシウムの移行とモニタリングの模式図▶

まとめ

原子力機構は、我が国唯一の総合的原子力研究開発機関として、国内外の英知を結集し、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（1F）の廃止措置及び福島の環境回復に向けた研究開発に総力を挙げて取り組んでいます

廃止措置の課題解決のための研究開発を主導し、その成果を1Fの廃止措置の現場に橋渡しする取組みを推進し、安全かつ確実な1Fの廃止措置の実施に貢献していきます

福島の環境回復に向けては、環境中の放射性物質の移動量の測定や未来予測など、実効的な研究開発を実施し、安全で安心な生活を取り戻すために貢献していきます

廃止措置は、長期に亘る取組みであることから、国内外の人材育成ネットワークを構築し、人材の確保と育成に努めていきます

【お知らせ】

1F事故から10年という節目の年を迎えるにあたり、事故直後から10年後の現在に至るまでの、原子力機構の福島復興対応に関する活動を10年誌として編纂いたしました。原子力機構ホームページでも公開いたしますので、ぜひご覧ください。

東京電力福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発▶
-ふくしま復興に向けた10年の取り組み-

令和2年度 福島研究開発部門
成果報告会

オフサイトでの活動と成果
（事故直後および環境回復に係る研究開発）

令和2年12月5日

福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）

環境影響研究ディビジョン　環境動態研究グループ　　新里　忠史
環境モニタリングディビジョン 統合解析グループ　　佐々木　美雪

本日の報告内容

- 環境回復に係る取り組みの沿革・概要
- 緊急時対応、初期の活動、除染技術
- 環境動態研究
- 環境モニタリング技術開発
- 成果発信・科学的知見の共有

「環境回復」に係る研究開発の沿革

組織図

2020年4月 現在

- 福島研究開発部門
- 福島研究開発拠点
  - 廃炉環境国際共同研究センター
    - ・環境影響評価ディビジョン
    - ・環境モニタリングディビジョン
  - 楢葉遠隔技術開発センター
  - 大熊分析・研究センター

沿　革

2011.3
- 東北地方太平洋沖地震
- 福島第一原子力発電所（1F）事故

2011.12
- 政府と東京電力による中長期ロードマップ策定

2014.4
- **福島研究開発部門**として組織再編

2016
- **福島県環境創造センター 研究棟（三春町）での業務開始**

2017
- 廃炉国際共同研究センター（CLADS）国際共同研究棟 運用開始

2018
- いわき事務所 開設

2020
- **2020.4**
  廃炉国際共同研究センターと福島環境安全センターを統合し、**廃炉環境国際共同研究センター**に改組

2011
- 福島支援本部 設立（同年、福島技術本部に組織再編）
- 福島事務所 開設

2012
- **福島長期環境動態研究プロジェクト(F-TRACE)開始**

2015
- **福島県環境創造センター 環境放射線センター（南相馬市）での業務開始**

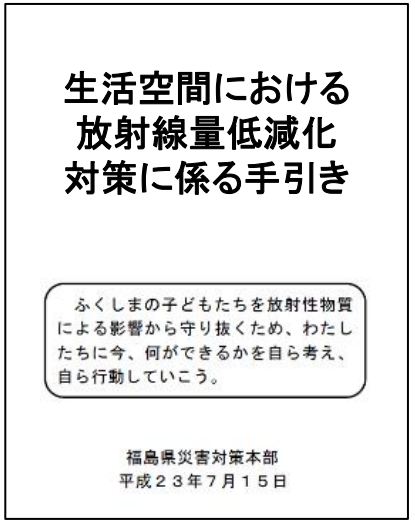
- **1F事故直後から環境モニタリング・除染活動への支援、国・自治体への支援を実施**

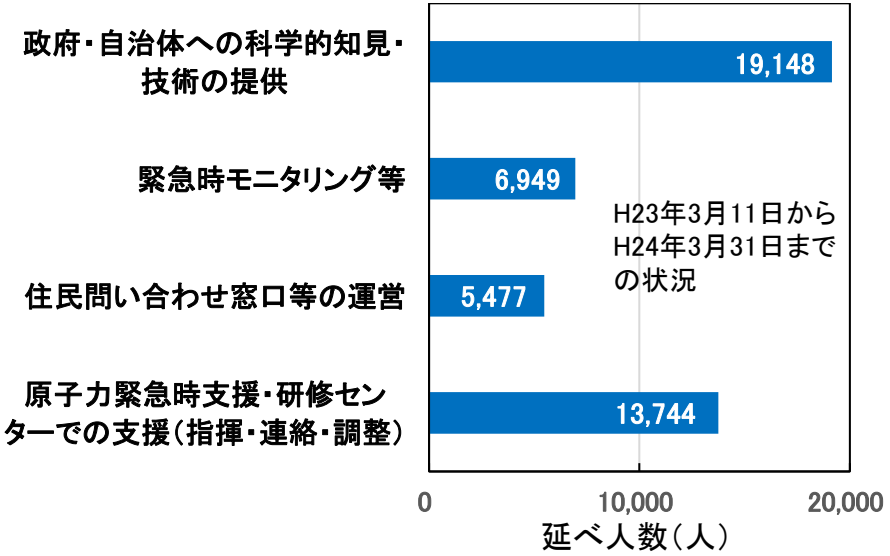
緊急時対応・初期の活動

- 災害対策基本法等の指定公共機関として緊急時支援体制に移行し活動を開始
- 福島県内の学校等での放射線量低減対策試験、低減対策モデル事業支援、プール除染
- 地元の自治体や学校から寄せられる除染作業等への技術指導・支援

緊急時モニタリング活動

「健康相談ホットライン」の開設





放射線管理要員等の育成

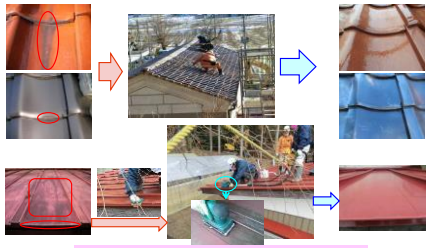
PTAの皆さんとの遊具除染

- 事故後延べ45,000人以上が様々な活動に従事
- 福島県内外の学校、幼稚園等での除染における根拠情報として活用

除染に必要な技術情報等の提供

- 国や自治体が進める除染活動を技術面で支援するため、「除染ガイドライン作成調査業務」および「除染モデル実証事業」の実施
- 広域の除染における事前モニタリング、除染計画の立案、除染の実施、事後モニタリング、除去物の仮置きといった一連の除染に関わる手続きを整理
- 除染の効果を予測する除染活動支援システム（RESET、リセット）を開発

屋根の高圧水洗浄



屋根の拭きとり及び研磨

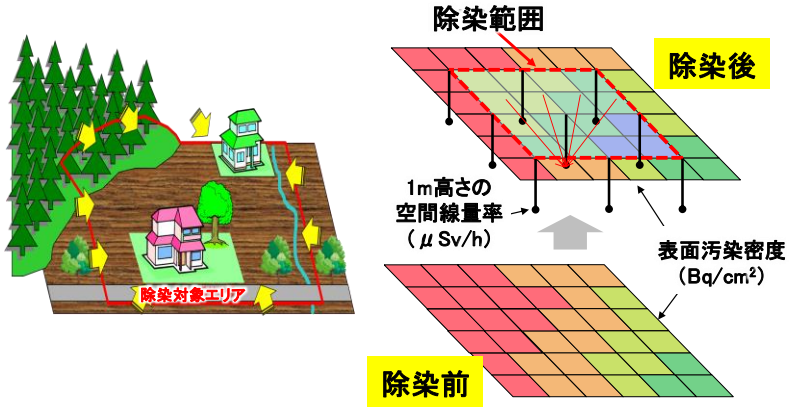
雨樋の清掃

雨樋下部のホットスポット除去

屋根の表層剥ぎ取り

適用した除染方法の例（宅地）

土瓦、陶器瓦では拭き取りで一定の除染効果が得られるが、コンクリート瓦では瓦表面の凹凸により比較的低い除染効果となり研磨も実施



RESET による除染シミュレーションの流れ

1）除染前の1 m高さの空間線量率のデータから除染前の表面汚染密度（単位面積あたりの放射性セシウムの沈着量; Bq/cm^2）を算出

2）除染モデル実証事業で得られた表面汚染の低減係数（除染係数、DF）により、除染後の表面汚染密度を計算

3）除染後の空間線量率を算出

- モデル事業で得られた知見を根拠情報として、環境省による「除染関係ガイドライン」が取りまとめられ、これに基づき、国、自治体による本格除染が進められた→避難指示解除に貢献
- 除染後の線量率予測評価を実施し、自治体へ除染の実施に係る判断材料を提供

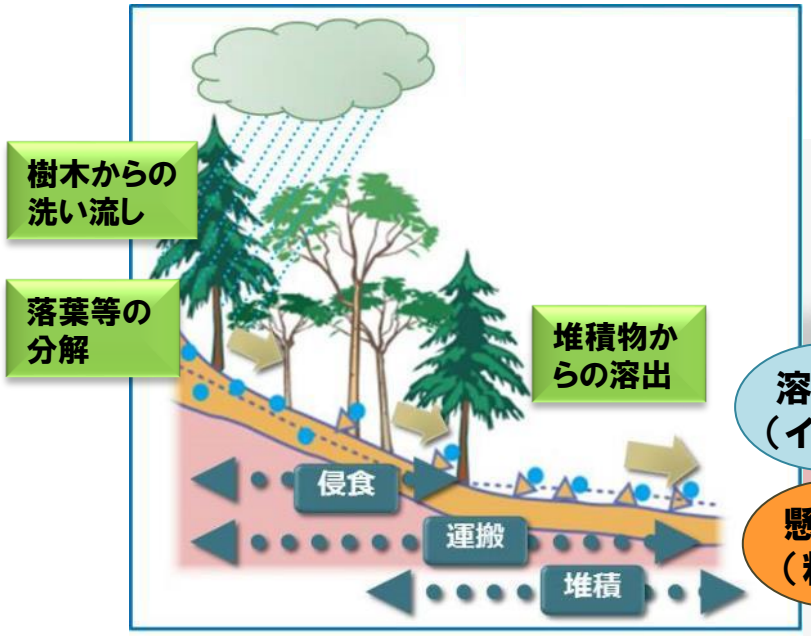
本日の報告内容

- 環境回復に係る取り組みの沿革・概要
- 緊急時対応、初期の活動、除染技術
- **環境動態研究**
- 環境モニタリング技術開発
- 成果発信・科学的知見の共有

環境動態研究；どんな情報が必要とされるか

環境中に残存する放射性セシウムの濃度は、どのように変化するのか。

環境中の放射性セシウムは、生活圏に影響を及ぼさないのか。



- 農作物を作っても100 Bq/kgを超えるのでは
- 50・100 Bq/kgを超えているシイタケ原木・山野草や淡水魚は、いつになったら50・100 Bq/kgを下回るか

- 将来、森林からの流出や河川による運搬で放射性セシウムが生活圏に堆積し、線量率が増加するのでは

- 福島県内の農業・林業・水産業の再開
- 帰還および帰還後の生活

将来の見通し

不安の解消

環境動態研究の経緯

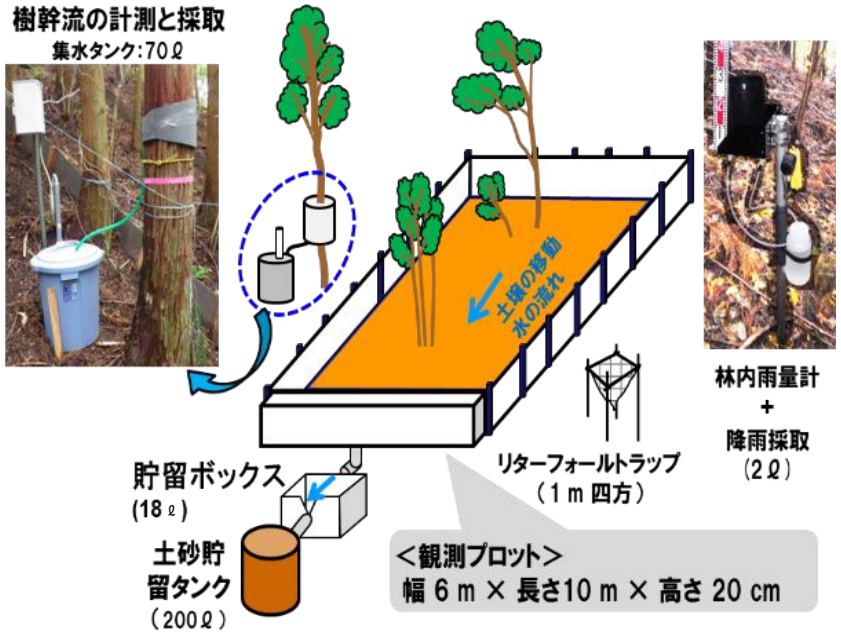
- 社会情勢の変化や自治体等の要望に基づき研究テーマを拡充し、科学的根拠のある情報をタイムリーに提供することにより、福島の復興へ貢献

項目	2011 (H23)	2012 (H24)	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (R1)	2020 (R2)
JAEA内での動き		☆福島長期環境動態研究（F-TRACE）始動 ☆大熊町サテライトラボ運用開始				☆三春町に研究の拠点を移動		☆水域動態チーム：南相馬で活動開始	☆サテライトラボ運用終了	
移行挙動の理解：放射性セシウム分布・流出量（森林、河川水系、生活圏）	除染モデル実証事業 除染ガイドライン作成調査業務 緊急時対応・初期の活動	観測手法と観測点の整備				多様な環境での流出量評価と移動挙動の解明 溶存態セシウム移動挙動の解明				
移行挙動の理解：林産・水産物の放射性セシウム移行挙動の理解						樹木、樹木根、山菜の放射性セシウム移行挙動調査	渓流魚のセシウム移行挙動調査			
移行挙動の理解：移行挙動の理解を支える研究開発（分析手法の確立）			国際認証の品質保証体系下における各種環境試料の分析手法の開発						環境試料の分析適用試料の拡充	
			有機結合型トリチウム（OBT）、極微量Srの分析手法確立						対象試料の拡充 検出下限値の向上	
移行挙動の理解：大規模自然災害等への適用 オンサイト研究への適用							浪江町林野火災の環境影響調査			
						台風・豪雨の環境影響調査				
							オフサイト核種分布・動態に基づくオンサイト初期核種分布推定		試料アーカイブ化 セシウム他核種挙動解明	
モデル開発 成果発信：予測モデル開発			土砂移動、河川水系のセシウム移動に係るモデル開発							
						森林・水域生態系の移行モデル開発			実データとの比較による改良・実予測への適用	
モデル開発 成果発信：福島総合環境情報サイトの整備（FaCE!S、フェイシス）					環境モニタリングデータベース整備					
								根拠情報Q＆Aサイト整備		
									解析事例ベース整備	

森林からのセシウム137流出量

- 自然災害の直後等を除き、森林の斜面からの放射性セシウム流出率は、その場所に分布するセシウム137量の1%未満/年であり、徐々に低下

森林から放射性物質が流出し、再び汚染されるのではないか？



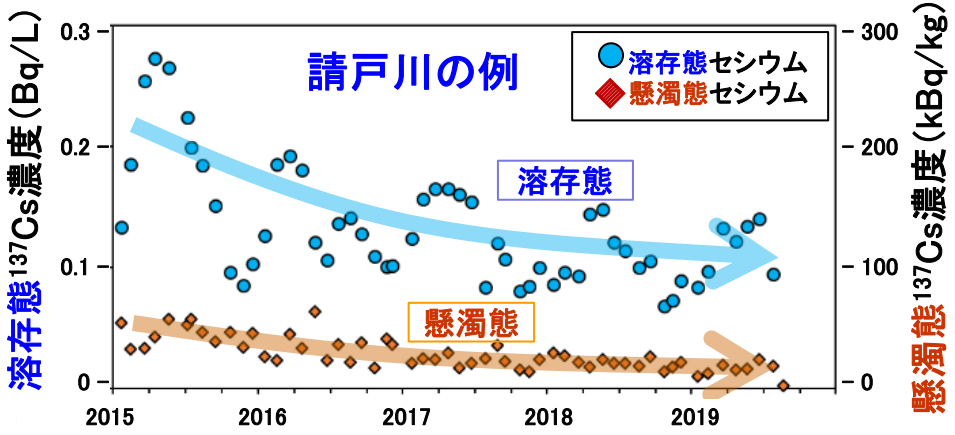
人為的改変のない山林 ・コナラ林;川俣町山木屋地区 ・スギ林;川内村荻地区	コナラ林;0.18→0.07% (2013年→2018年) スギ林 ;0.19→0.07% (2013年→2018年)
除染地 (除染翌年→3年後) ・川俣町山木屋地区	コナラ林;2.55→0.65% (2016年→2018年) ※被覆率;30→82%
林野火災の跡地 (火災当年→2年後) ・浪江町井出地区	スギ林 ;2.60→0.16% (2017年→2019年) ※被覆率;10→95%

- 自治体主催の地域住民説明会の基礎資料として活用
- 人為的改変のない観測地のデータと比較することにより、除染や林野火災の影響が限定的であり、流出量が徐々に低下していくことを示した
- 浪江町除染検証委員会、福島県廃炉安全確保県民会議、県廃炉安全監視協議会環境モニタリング評価部会にて報告し、自然災害時や災害後のセシウム移動に関する不安や懸念払しょくに貢献

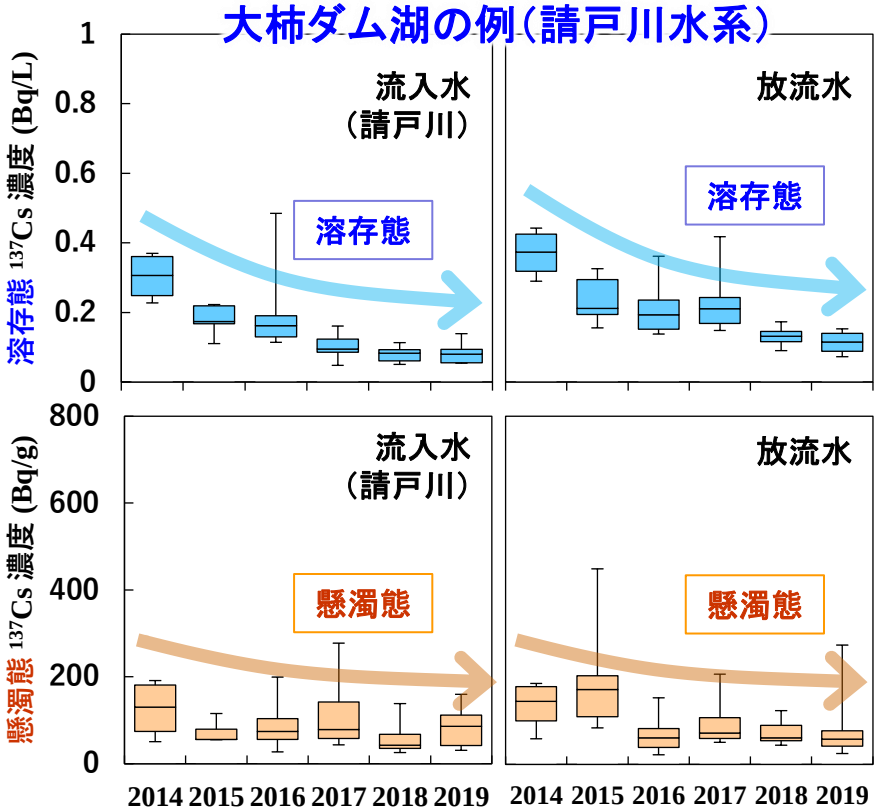
河川水系におけるセシウム137濃度

- 水に溶け込んだセシウム137（溶存態）および土壌粒子に付着して運ばれるセシウム137（懸濁態）の濃度は、観測開始以降、河川とダム湖ともに、徐々に低下

河川を通じて、放射性物質が流れてくるのではないか？



実効半減期（濃度が半分になる年数）	溶存態セシウム	4.8年
	懸濁態セシウム	2.4年



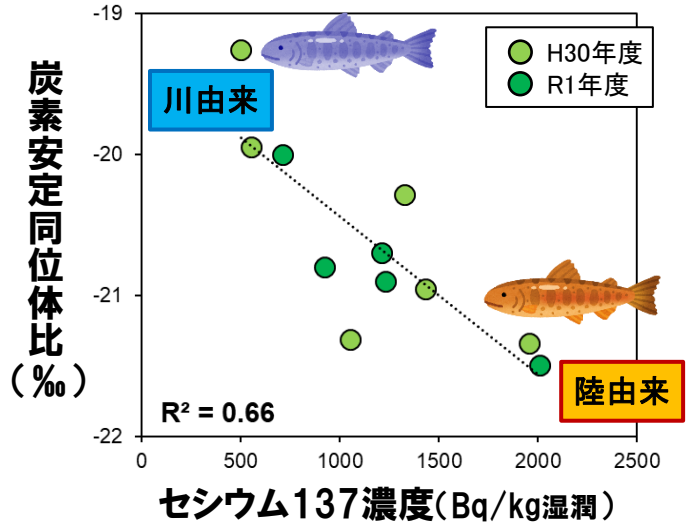
- 河川水のセシウム137濃度は物理的な半減期（30年）より速い速度で低下
  →環境回復に必要な時間の目安を推定、季節的な変動が見られるものの1 Bq/Lを十分に下回る
- 農業・農村の復旧・復興支援を目的とした「大柿ダムの放射性セシウムの実態と対策ー請戸川地区の農業復興に向けてー第2版」（東北農政局、2018年4月）の策定に貢献

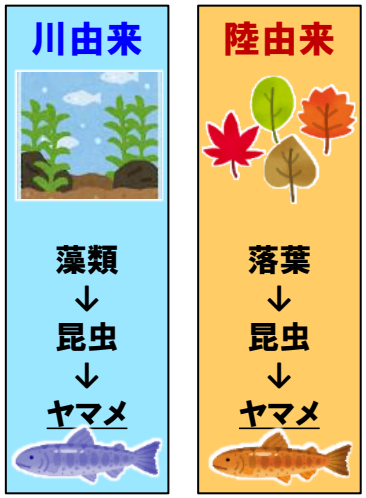
食品中の放射性物質の基準値（食品衛生法）
飲料水 10 Bq/kg

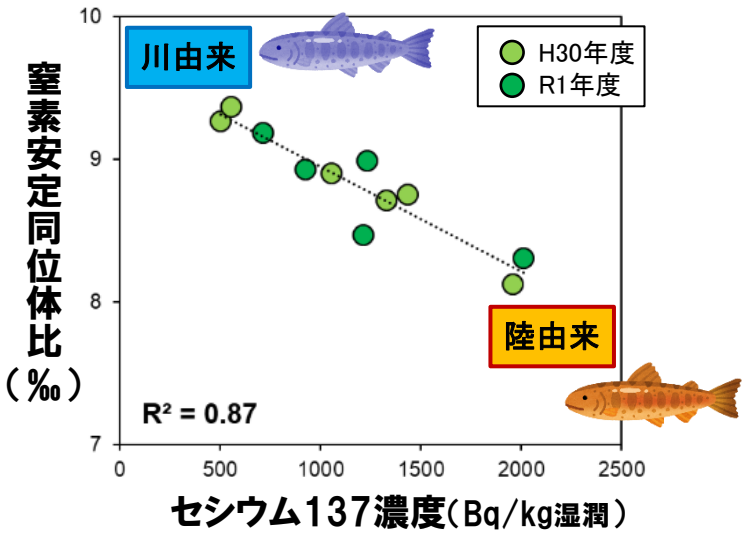
渓流魚のセシウム137濃度

- 放射性セシウム濃度と安定同位体の分析から、渓流に生息するヤマメのセシウム137濃度は、食べ物の違いに関係すると推定

農林水産物に放射性物質が取り込まれるのではないか？







天然ヤマメ筋肉中のセシウム137濃度と炭素・窒素安定同位体比

筋肉中のセシウム137濃度が高いヤマメ ≒ 炭素・窒素安定同位体比が低い

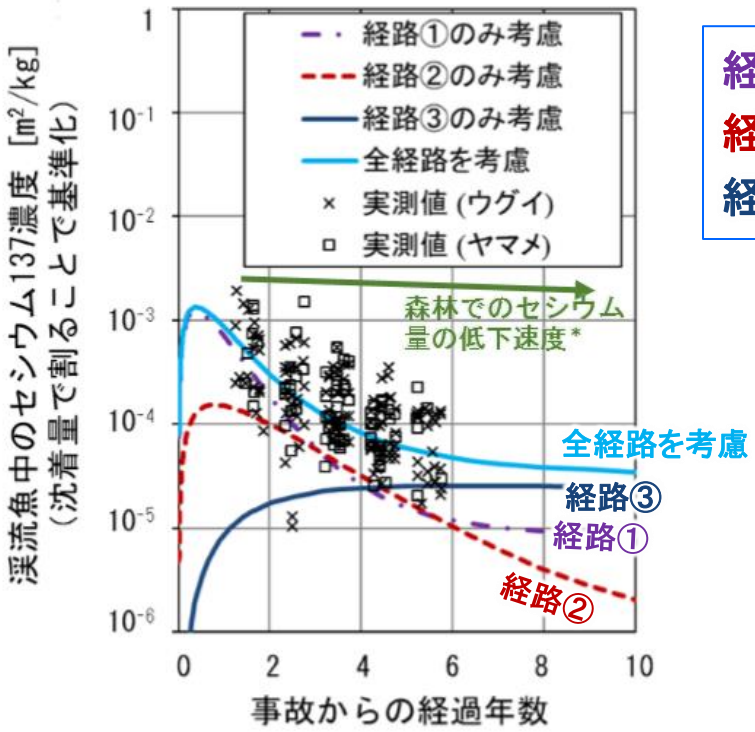
⇒陸由来の食物網にある餌資源を多く利用している

- 天然ヤマメと養殖ヤマメの検討により、餌資源の違いが濃度の違いを生じていることを解明
  →なぜ個体により濃度の違いが生じるか原因を解明し、南相馬市環境回復推進委員会や養殖業者へ知見提供

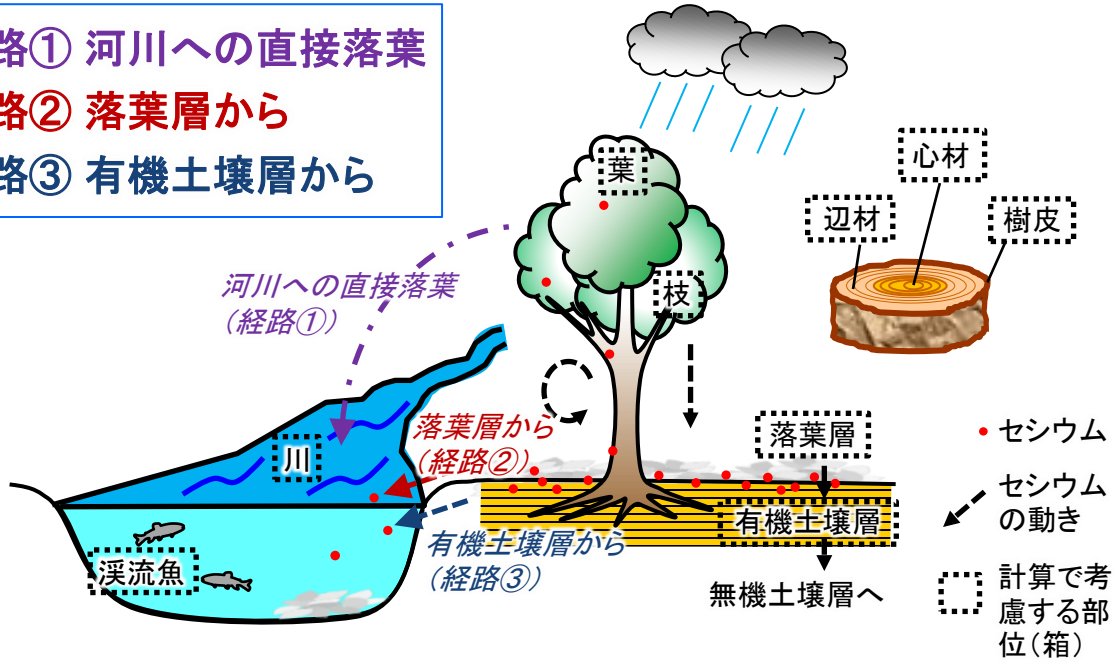
森林のセシウム137と渓流魚への移行評価

- 環境モニタリングデータとモデルを利用して森林から渓流魚へ移動するセシウムの経路を分析
- 渓流魚に取り込まれるセシウムは異なる3つの経路から供給されることを解明
- 葉や落葉層のセシウム濃度が急速に低下したことが渓流魚のセシウム濃度の低下に大きく影響していることが明らかとなった

農林水産物に放射性物質が取り込まれるのではないか？



経路① 河川への直接落葉
経路② 落葉層から
経路③ 有機土壌層から



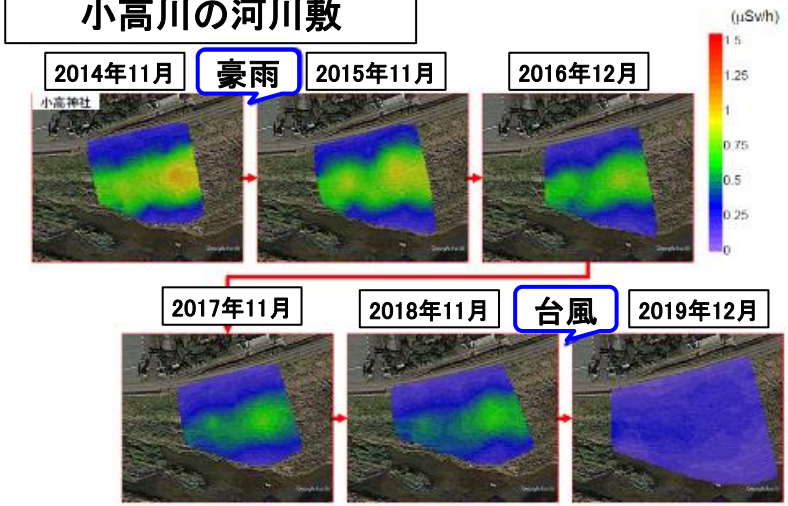
- 渓流魚中のセシウム濃度の将来予測、ひいては内水面水産業の今後の施策に役立つと期待
- きのこ類や樹木、野生鳥獣類への適用を福島県、国立環境研究所と共同で進める予定

大規模自然災害への適用（台風・豪雨）

- 令和元年台風第19号（2019年10月）後の環境影響評価を福島県と共同実施
- 豪雨や台風後に河川敷の空間線量率が低下、そのメカニズムを環境動態研究の長期観測データとセシウム動態から示した

豪雨や台風でセシウムが流れてくるのではないか？

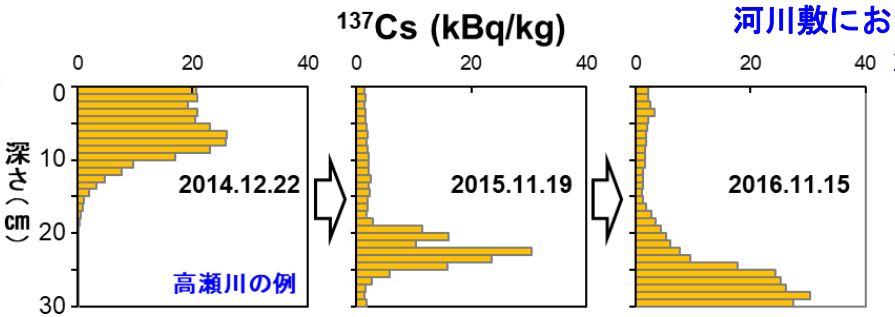
小高川の河川敷



空間線量率の経年変化

- ガンマプロッターによる地上1 mの空間線量率
- 豪雨や台風後に0.4μSv/h以上の範囲（オレンジ～緑）が縮小

河川敷におけるセシウム深度分布の例



セシウム濃度の低い土砂が堆積し、元の地表面が遮へいされる

堆積した土砂の起源および今後の出水時の影響

- ✓ 林内の涸れ沢にはセシウム濃度の低い深い部分の土（涸れ沢の壁）が露出しており、増水時に侵食されやすい
- ✓ 今後の大雨時には、セシウムをほとんど含まない深い部分の土砂が主に流出すると考えられる

- 河川敷の継続モニタリングデータを浪江町除染検証委員会へ報告し、避難指示解除に貢献
- 出水時のセシウム移動と空間線量率の変化の実態を明らかにし、不安払しょくに貢献
- 令和2年度第1回南相馬市環境回復推進委員会（令和2年8月19日開催）にて報告

- 環境回復に係る取り組みの沿革・概要
- 緊急時対応、初期の活動、除染技術
- 環境動態研究
- **環境モニタリング技術開発**
- **成果発信・科学的知見の共有**

モニタリング技術開発の経緯

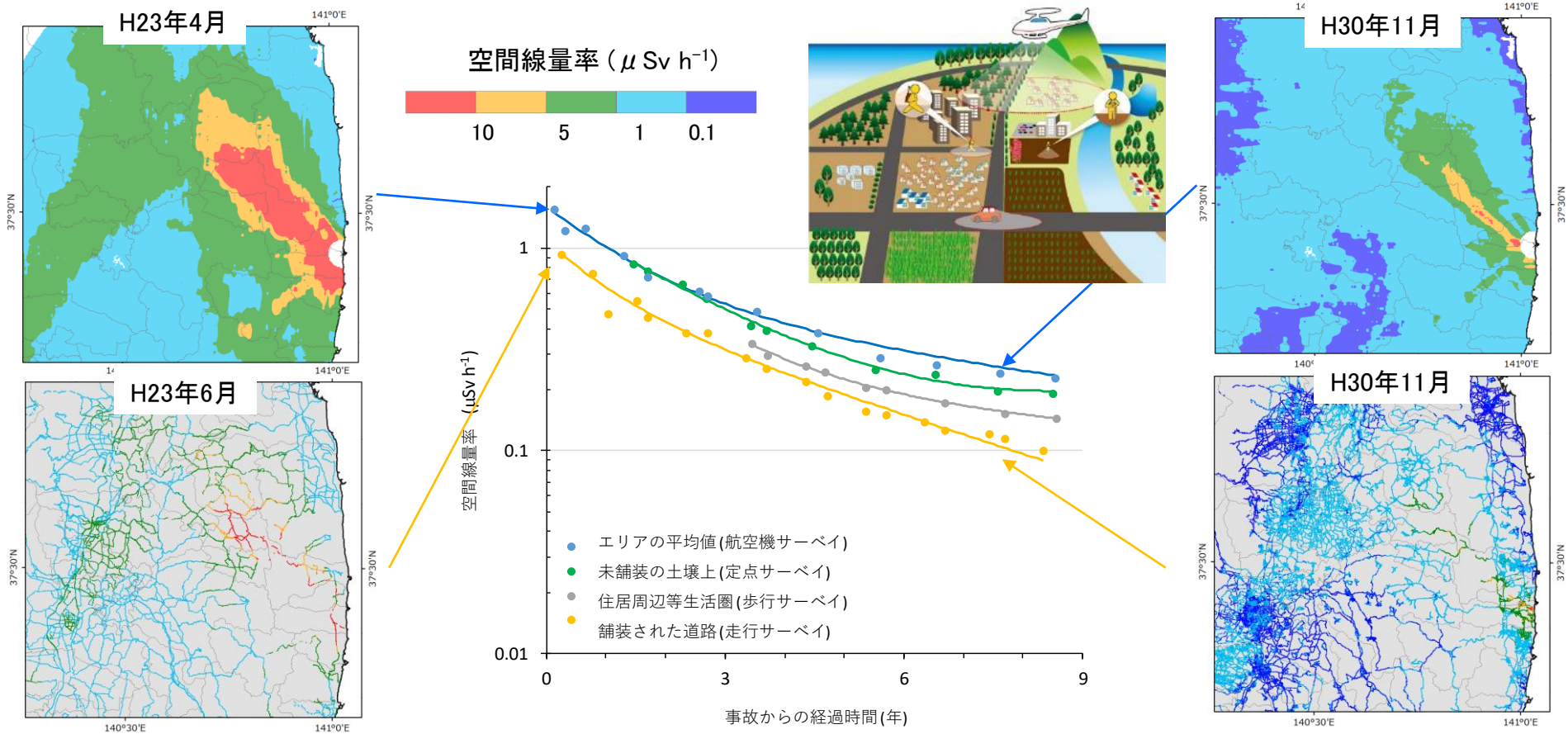
- 事故前にはなかった環境中で広域に放射線分布を計測するというニーズに対応するため、データを取得しつつ技術開発を実施
- データは多数の学術論文にまとめるなど学術的な価値を創造

項目		2011 (H23)	2012 (H24)	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (R1)	2020 (R2)
JAEA内での動き		☆東京事務所内にチーム発足	☆福島大学内に遠隔チーム本格始動		☆いわき事務所に陸モニチーム移動		☆南相馬に遠隔チーム移動 ☆NEAT（ひたちなか）航空機チーム発足			☆NEATモニタリングチーム発足	
地上のモニタリング	広域調査	政府プロジェクトとしての広域調査（～H25: 文部科学省, H26～原子力規制庁）									
空からのモニタリング	航空機モニタリング	手法開発 日本全域調査	政府プロジェクトとしての東日本調査（～H25: 文部科学省, H26～原子力規制庁）								
							防災適用に向けた全国の発電所のBGモニタリング				
	無人機によるモニタリング	手法開発	政府プロジェクトとしての1F周辺調査（～H25: 文部科学省, H26～原子力規制庁）							復興拠点への適用	
水底のモニタリング	農業用ため池底分布測定		手法開発	技術移転と福島県プロジェクトとしての広域モニタリング							
	海域のモニタリング			無人観測船等を用いた手法開発			地域復興・実用化補助金事業			政府プロジェクト	

- 多くの業務が政府プロジェクトとして実施され、公式なデータとして政策に生かされている
- 技術移転により、福島県や原子力事業者がユーザーとして利用する技術も多数

大規模モニタリングプロジェクトの確実な遂行

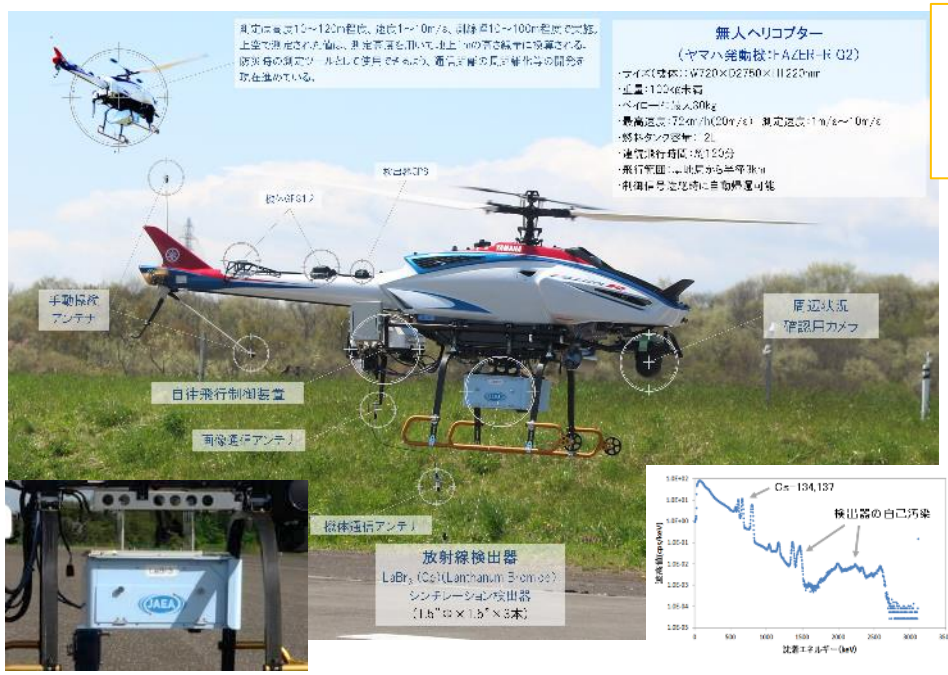
- マップ事業、航空機事業と呼ばれる政府からの大規模モニタリング事業実施の中核となり、事業を確実に実施中。空間線量率の変化を科学的に検証



- 政府の公式データとして、避難指示区域の設定や除染範囲の決定などの政策に反映
- 手法の最適化や政府マニュアルへの反映。科学論文誌に2回特集号が組まれるなど学術価値を創造

無人機のモニタリングへの活用

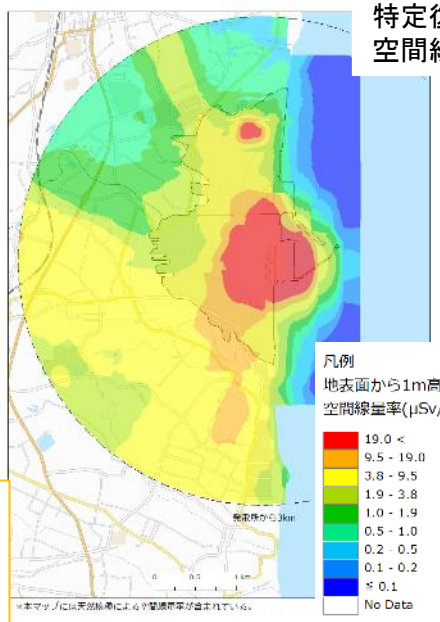
- 事故後いち早く、無人機を環境放射線のモニタリングに活用
- 主に1F周辺のモニタリングに活用され、そのデータは政策に活用されている

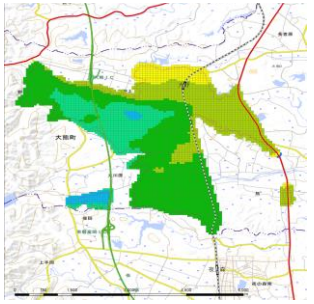


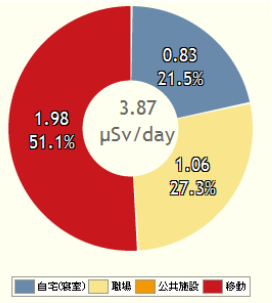
- 1F事故後、民間航空機は、発電所から3km圏内が飛行禁止であった。
- 国交省は、1F敷地内を含む当該エリアの高度1500 m以上について、機構が実施した発電所敷地内の測定結果を踏まえて飛行禁止を解除。
- 年間約1万機が、この航路（太平洋側）を利用でき、代替航路の混雑に伴うリスクの低減や合理的な運航を可能にした。

- 事故から10年経過した現在でも残っている避難指示区域の全解除に向けて特定復興再生拠点が設置
- モニタリングから被ばく評価までパッケージングし、放射線防護対策を講じる上での基礎データを提供し令和2年3月に一部解除を実現

特定復興再生拠点の無人ヘリによる
空間線量率分布(R1/8月時点)と被ばく評価例







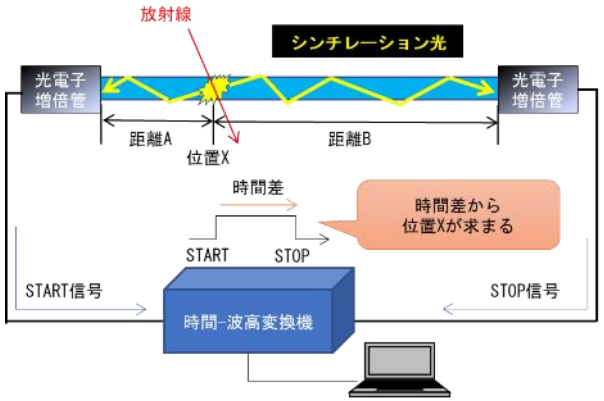
測定に基づき解析した高度
200mの空間線量率分布（H25/12月時点）

- 国土交通省による1F周辺の飛行禁止区域解除に貢献（平成25年2月5日）
- 特定復興再生拠点の一部解除の基礎データを提供（令和2年3月）

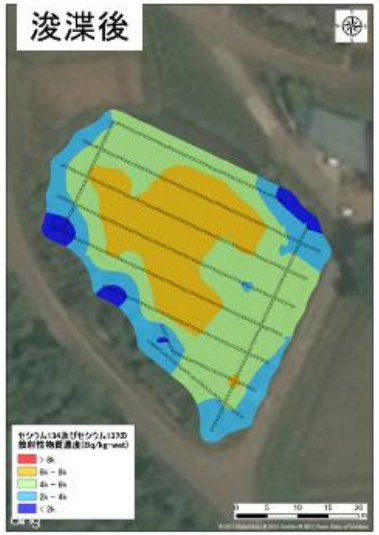
水底のモニタリング技術の移転

- 福島県内3,700か所のため池底の放射性セシウムの蓄積状況について、サンプルを採取することなく現場で直接的に分布を把握する手法の開発。営農再開および除染判断等への反映を目指す。

☆ファイバー型検出器の適用



☆成果の公表、標準化

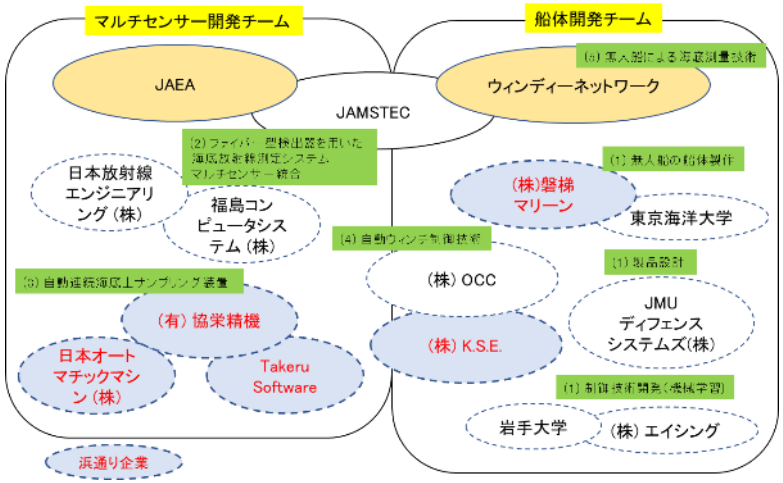


➢ H26年度からの福島県農林水産部による実証事業の助勢（水土里ネット福島との技術指導契約～現在も継続中）。H26年及びH30年に共同でプレス発表を実施。農林水産省の対策マニュアルに採用（H26）。

地元企業と連携した無人船開発

- H28～H30まで「地域復興実用化開発等補助金」の採択テーマとして、無人観測船の開発を実施。海洋研究開発機構（JAMSTEC）や地元企業と協力し、サンプリングや放射能測定の可能な新たな無人船の開発を目指す。

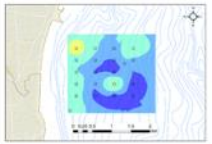
☆地元企業を含めた開発チームのとりまとめ

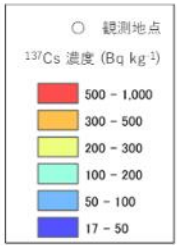


☆無人船の開発

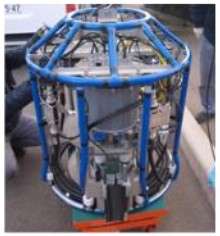
技術ベース

JAEAとウィンディーネットワークが実施してきた福島沖での海底土モニタリング





新型無人船及びマルチセンサーの開発（本事業の成果）



- 定点維持性能の向上
- 小型化
- 大型機材搭載のためのムーンプール（機材の昇降用の穴）

☆放射線測定だけでなく様々な機材搭載可能（漁業、海底測量、物流）

一般産業界への適用例（本事業で実証）

無人船と音波測量の組み合わせによる海底地形図の作成（漁礁管理、海底探査）

- 海底土表層及び海水の放射能測定
- 海底土サンプルの採取
- 水温、電導度、水深の計測
- 音波計測による検出器位置特定

☆海中における放射性物質の挙動解明

プレスリリース

【本件リリース先】
令和元年５月24日(金)16:00
(レク付き資料配付)
文部科学記者会・科学記者会、
原子力規制庁記者会(仮称)、
福島県政記者クラブ
(資料配付)
いわき記者クラブ、いわき記者会

令和元年５月24日
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
株式会社ウィンディーネットワーク
国立研究開発法人海洋研究開発機構

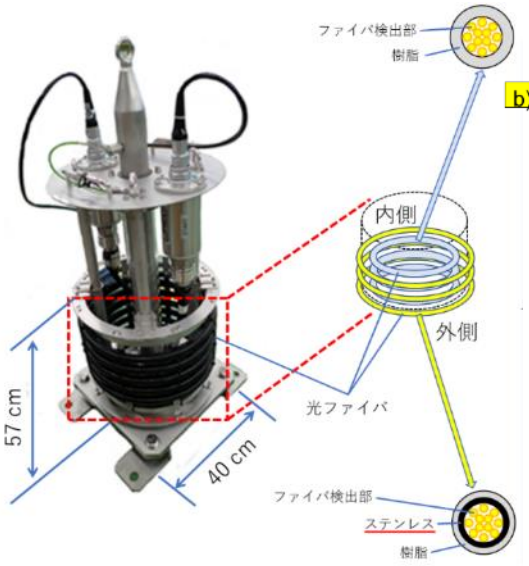
測定・サンプリングなど多目的に使用できる“海洋のドローン”の開発
—無人船開発に浜通り企業の技術を結集—

- 地元企業に本事業を通して技術移転、共同でプレス発表を実施
- 原子力防災ツールとしての活用を視野に、海洋研究開発機構（JAMSTEC）と最適化研究を継続

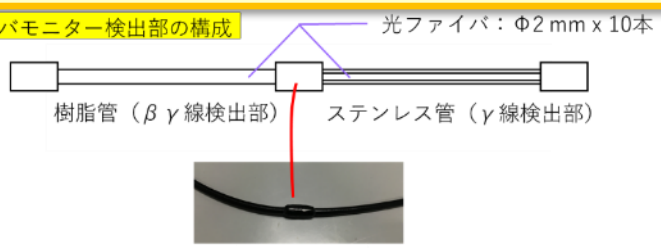
環境測定で培った技術の廃炉現場への適用

- 1F構内における原子炉建屋等に滞留している汚染水の漏洩検知のため、ストロンチウム90のβ線をフォールアウト起源のγ線と区別して計測できるリアルタイムモニタリング技術の確立

○ファイバー型検出器の開発

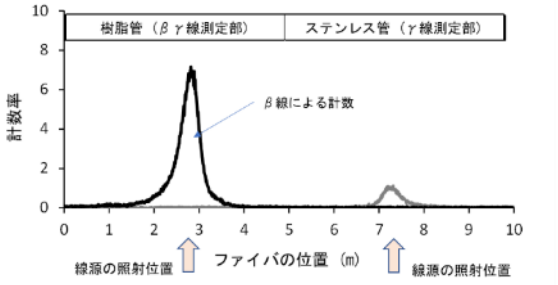


a) 改良型ファイバモニター検出部の構成

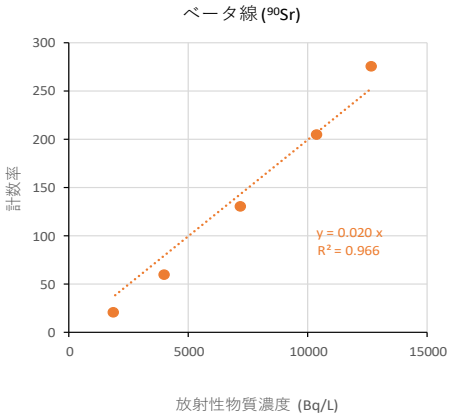


接合部 写真

b) ^{90}Sr線源の照射試験例



○1F構内でのキャリブレーション及び運用開始までのフォロー



【本件リリース先】
令和2年1月30日(木)17:00
(資料配付)
文部科学記者会・科学記者会、
原子力規制庁記者会(仮称)、
福島県政記者クラブ
いわき記者クラブ、いわき記者会

令和2年1月30日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
日本放射線エンジニアリング株式会社

水中のβ線リアルタイムモニタリング技術の開発に成功

－福島第一原子力発電所構内の排水路用放射線モニターとして運用開始－

- 現場適用のためのキャリブレーション等運用開始までの現場試験実施、運用開始（令和2年2月～）
- 技術移転先であるJREC株式会社とのプレス発表

国内外の連携

政府・自治体

- ✓ 原子力規制庁、環境省、文部科学省
- ✓ 福島県、県内市町村
- ✓ 福島県立林業研究センター

大学・研究機関

スコットランド大学連合環境研究センター、東京大学、東海大学、福島大学、千葉大学、筑波大学、京都大学、広島大学、宇宙航空研究開発機構、国立環境研究所、森林総合研究所、Korea Institute of Nuclear Safety

放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点

ERAN Environmental Radioactivity Research Network Center
放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点

認定期間：平成31年4月1日～令和4年3月31日
研究成果の集約及び社会への発信により、一層の社会貢献が期待されています。

民間企業・製造業等

東京電力ホールディングス株式会社、応用地質株式会社、朝日航洋株式会社、中日本航空株式会社、ヤマハ発動機、日本放射線エンジニアリング株式会社、AREVA NP、株式会社エンルート、明星電気株式会社、株式会社NESI

成果を分かりやすく発信し、知識を普及・継承する取組み

- 得られた成果を解説とともに取りまとめ、**「福島総合環境情報サイト」**として公開しています

  ⇒ 略称；**FaCE!S（フェイシス）**

「福島総合環境情報サイト」
（ FaCE!S ）
https://fukushima.jaea.go.jp/ceis/

放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト

- 様々な**観測データ**のデータベース
- データのダウンロードやグラフ作成も可能

根拠情報Q&Aサイト

- 調査でわかったことをQ&A形式で紹介
- **簡単な説明から詳細な解説まで**階層構造で取り揃えているのが特徴

解析事例サイト

- これまで実施した**数値解析の事例**を解説と合わせてご覧いただけます

まとめ

- 東京電力福島第一原子力発電所の事故直後から、除染技術、環境モニタリングおよび環境動態研究などの環境回復に係る研究開発を実施してきた。
- 得られた成果は、国や自治体の除染に係る施策の根拠情報や科学的根拠に基づく技術情報として活用され、避難指示解除や地域の皆さまの不安解消に繋がってきた。
- 今後とも、特定復興再生拠点をはじめとする帰還困難区域の避難指示解除に貢献する研究成果の創出、情報発信に努めていく。
- また、得られた成果の広報や普及、民間への技術移転、学校・関係機関との連携等により、地域の皆様の懸念や不安払しょくにつながる科学的根拠を持った情報発信に努め、地域の復興・産業復興、人材育成に貢献していく。

- 大規模自然災害に伴う放射性物質の移動や農林水産物の濃度予測に当たっては、国・自治体、地域の皆さま、福島県環境創造センターをはじめとする国内外の様々な機関と協力・連携した“継続的な”環境モニタリング、環境中でのセシウム動態研究が必要
- それら成果を広く環境汚染の対処に係る施策決定のために情報提供していく取組みを通じて、福島復興に貢献していく。

令和2年度 福島研究開発部門
成果報告会

燃料デブリは
どのようにして形成されたか？

令和2年12月 5日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉環境国際共同研究センター
炉内状況把握ディビジョン 試験技術開発グループ

永江　勇二

目次

１．福島第一原子力発電所（1F）２号機の内部調査
　　内部調査での堆積物の特徴

２．燃料デブリ形成メカニズムの解明
- 制御棒ブレード破損試験装置（LEISAN）の特徴
- LEISAN試験での成果
  - 制御棒ブレード溶融・移行
  - 圧力容器下部での溶融・移行

３．取り出したデブリの分析結果の評価に向けて

４．今後の計画

５．まとめ

福島第一原子力発電所（1F）の内部調査

- １Ｆ２号機内部調査（TEPCO）＊

2018年１月
　カメラによる内部調査 ⇒ 金属系とみられる物質の堆積、半溶融の集合体部材を検出
2019年２月
　堆積物への接触調査 ⇒ ３種類の堆積物（小石状、プレート状、半溶融物）を確認

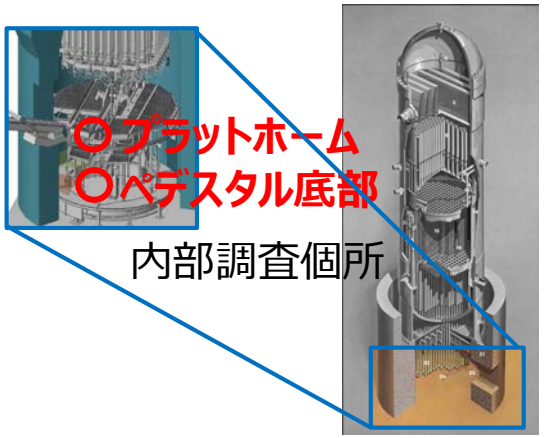
小石状の堆積物

ペデスタル底部

構造物の一部

プレート状の堆積物

プラットホーム
ペデスタル底部



- 「廃炉に向けた中長期ロードマップ」（2019年12月、改定）

2021年内より、燃料デブリの試験的取り出しを2号機から始める方針

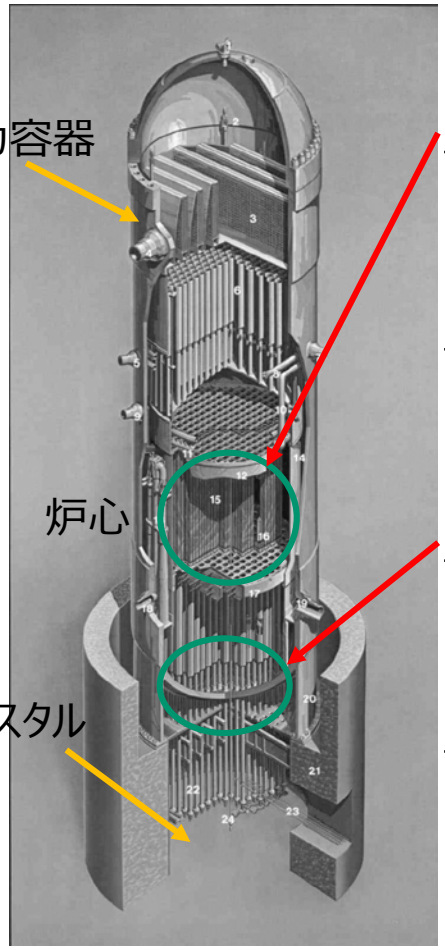
炉内状況推定などから、**燃料デブリは様々な形状で存在する**ことが予想されている。

＊ 東京電力ホールディングス株式会社、福島第一原子力発電所2号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果（速報）2018年1月19日
＊ 東京電力ホールディングス株式会社、福島第一原子力発電所2号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果（速報）2019年2月13日
＊ 東京電力ホールディングス株式会社、「２号機原子炉格納容器内部調査実施結果」、第48回 廃棄・汚染水対策現地調整会議、2019年3月28日

燃料デブリの形成メカニズムの解明

炉心溶融、溶融物の下部への移行、閉塞、下部での再溶融、圧力容器の破損という一連の現象について評価を行う必要がある。

BWR原子炉本体



① **BWR制御棒ブレード溶融・移行挙動の解明（本日のご報告）**
金属系デブリの生成メカニズム・特性の解明

② 燃料溶融反応挙動の解明
UO_2/Zrの拡散挙動を考慮した溶融反応の解明

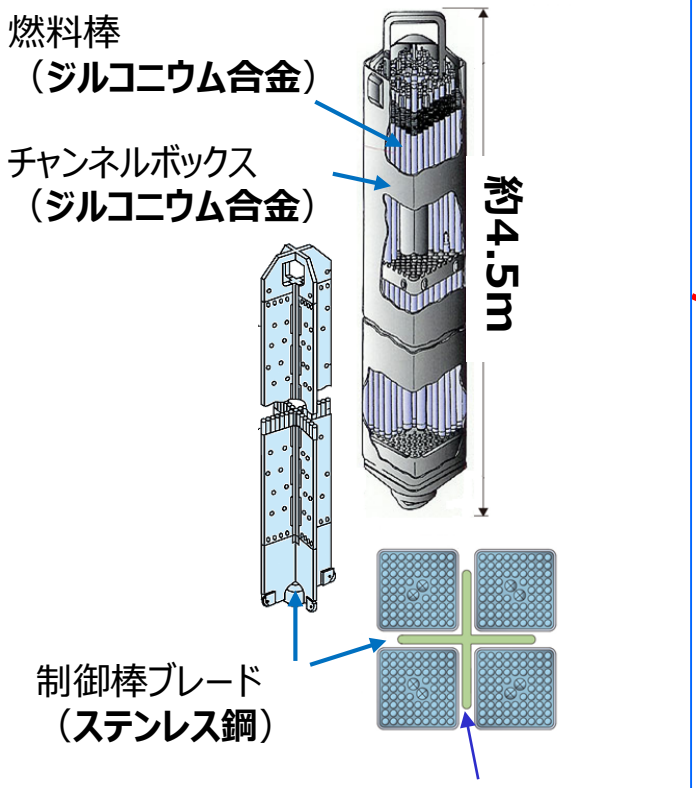
③ **圧力容器下部ヘッド破損挙動の解明（本日のご報告）**
金属系デブリ/下部ヘッド部材との溶融反応挙動の解明

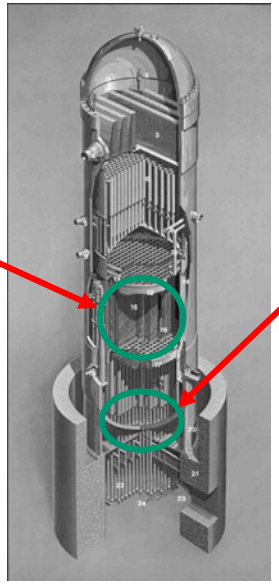
④ 燃料デブリ凝固・偏析挙動の解明
熱力学的手法による燃料デブリ形成過程の解明

沸騰水型軽水炉（BWR、1Fと同型）の特徴

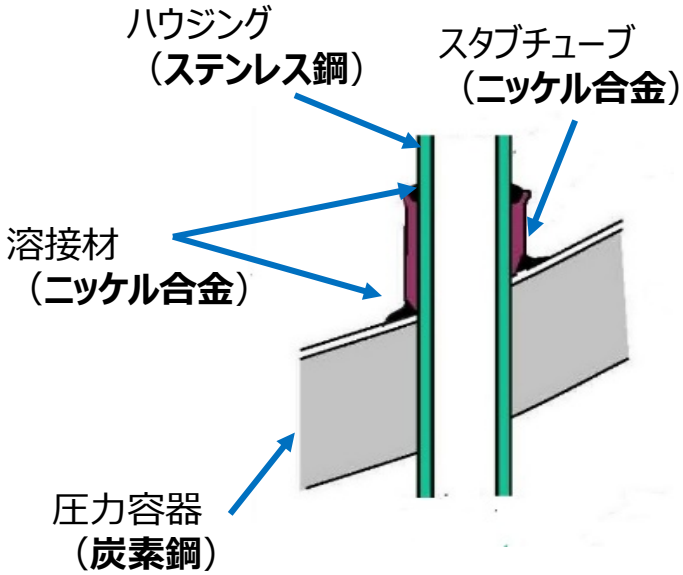
酸化物（UO_2など）よりも1000℃以上も低い温度で溶融する金属材が、多く使用されている。

燃料集合体





圧力容器下部の概略図

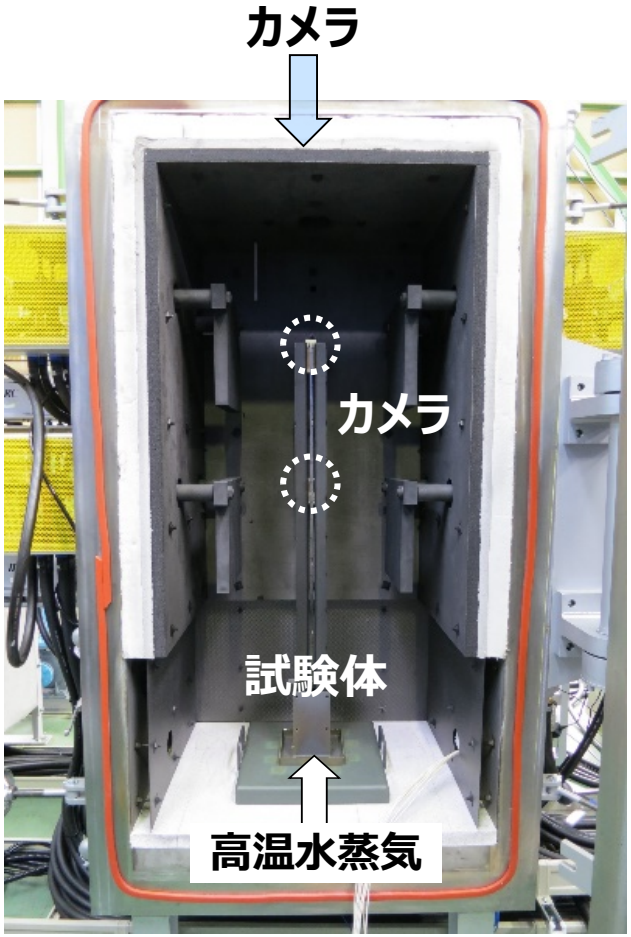


LEISAN装置の開発

LEISAN：Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors
※日本語名 「制御棒ブレード破損試験装置」

画期的な性能をもつ装置

- 急速昇温（0.3～1℃/秒）
  炉心露出時の崩壊熱の違いによる、異なる昇温速度への対応
- 軸方向温度勾配（約500℃/m）
  下部に残る冷却水によって生じる、軸方向の温度勾配への対応
- 水蒸気量可変
  溶融物の閉塞状態などで異なる水蒸気量への対応
- 動画撮影
  溶融・移行・閉塞挙動に関わるリアルタイム情報の取得
- 反応によって発生するガスなどの測定
  溶融・移行・閉塞挙動における水素などのリアルタイム情報の取得
- 実機とほぼ同寸法での試験体の使用
  実際の溶融・移行・閉塞挙動を把握するため

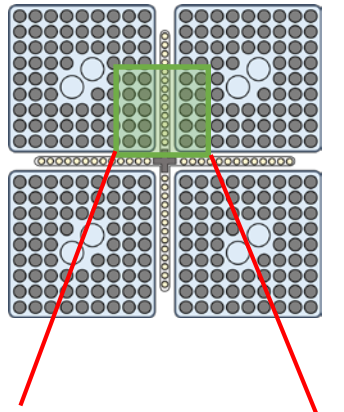


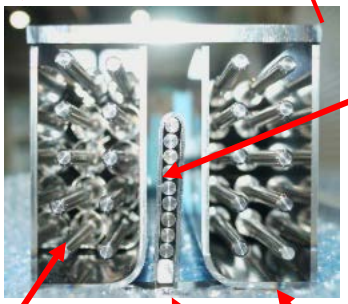
LEISAN装置内部

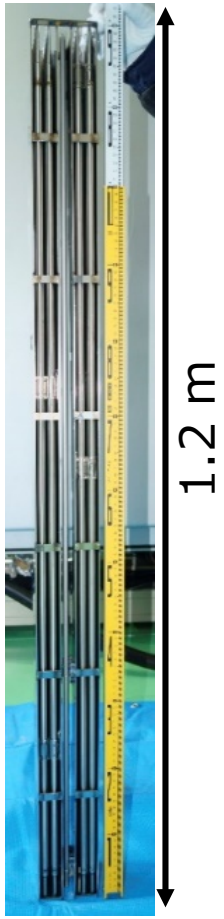
制御棒ブレード溶融・移行に関わる試験

制御棒ブレード破損試験体

BWR燃料集合体断面

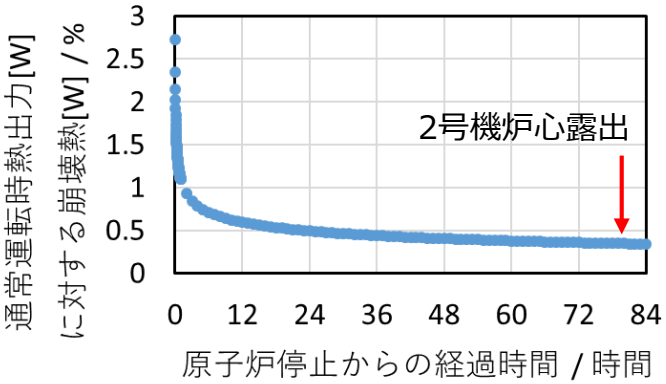






試験条件

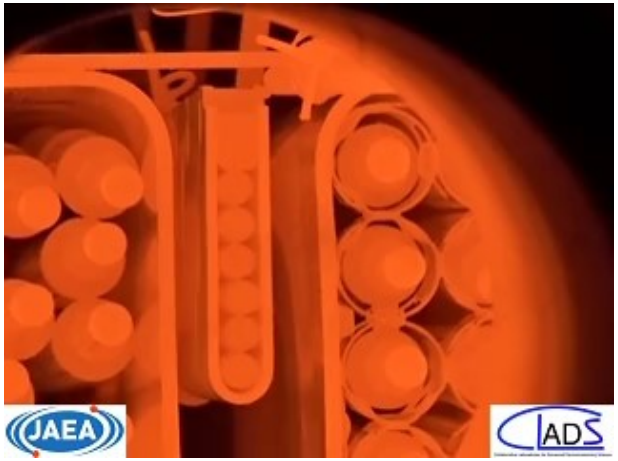
炉心露出時間と崩壊熱の関係例



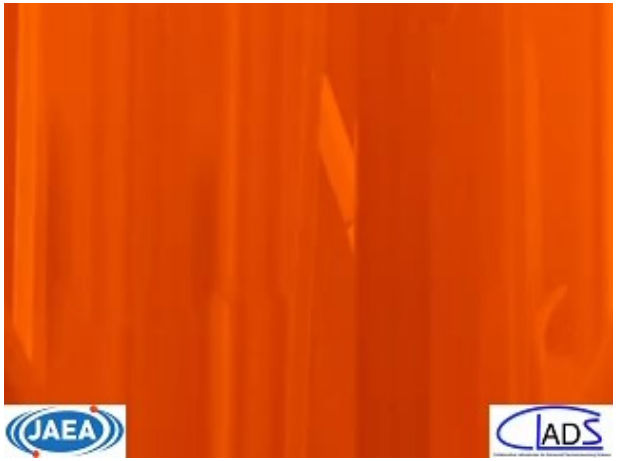
- 初期酸化膜付加：約40μm
  通常運転時に形成する酸化膜
- 昇温速度：0.3℃/秒
  炉心露出時の崩壊熱が小さい条件
- 水蒸気流量：~40g/秒
  知見が不足していた水蒸気が乏しい条件

動画撮影による制御棒ブレード溶融・移行

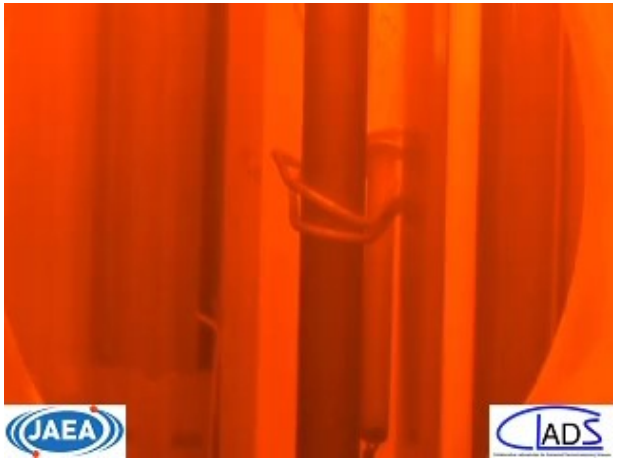
①天井面から



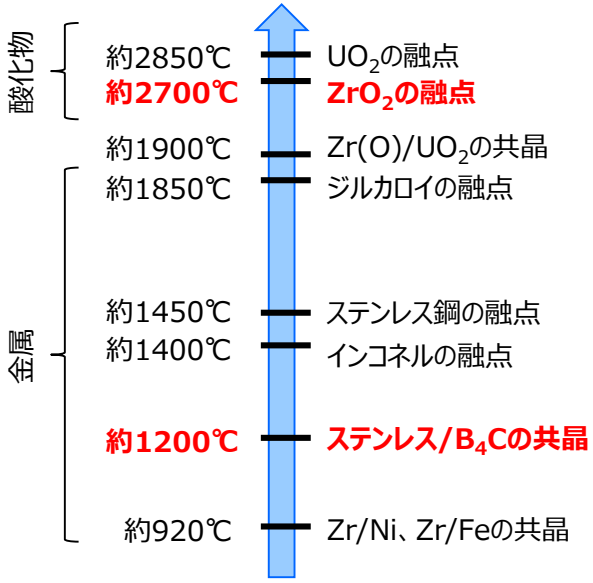
②背面上部から
（底部から約1200 mm）



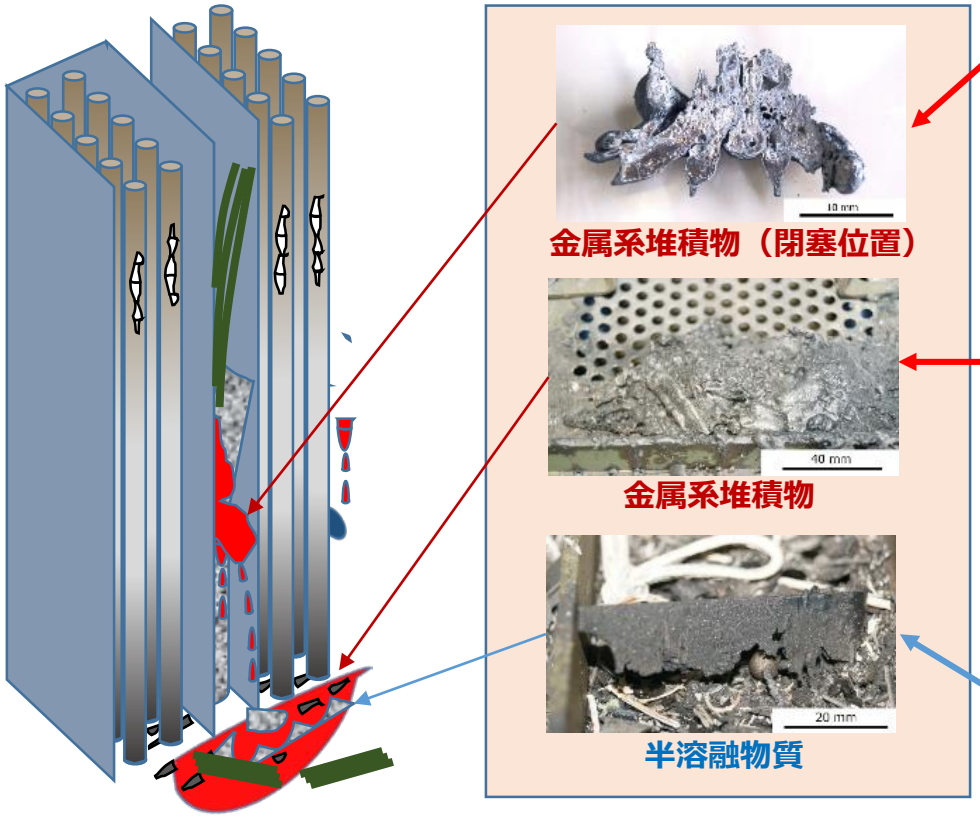
③背面中部から
（底部から約750 mm）



- 一部の制御棒ブレードは溶融（約1200℃）し、一部の制御棒ブレードはその形状を残したまま下部へ落下
- 制御棒ブレード溶解物はチャンネルボックスと反応することなく、下部へ液下
- 制御棒ブレード溶解物が、低温部（1200℃以下）で固まり、冷却ガス流路を閉塞



金属系デブリの生成



金属系デブリの生成挙動
（左図：模式図、右図：生成物の外観）

○ 小石状物質

- 主成分は、ステンレス・ジルカロイ（酸化、または部分酸化）
- 残留B_4Cや燃料の一部が、内部に包まれている可能性
- **破砕・粉体化しやすい**可能性

○ プレート状物質

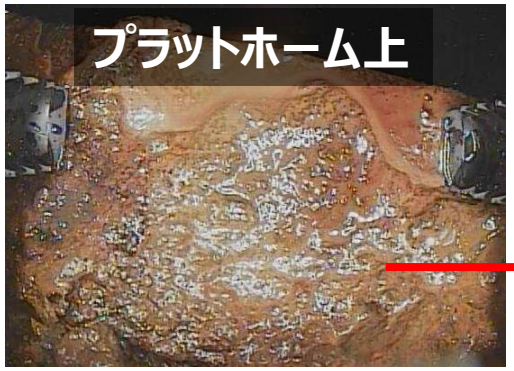
- 主成分は、ステンレス（未酸化）
- 残留B_4Cが内部にくるまれている可能性
- Bの溶融により、**ステンレスが硬化**している可能性

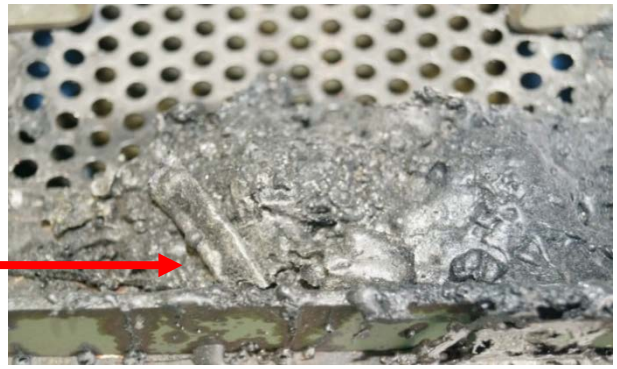
○ 半溶融の金属系物質

- チャンネルボックスなどの一部と推定
- 残留B_4Cや燃料の一部が、内部に包まれている可能性
- **化学活性が残留**している可能性

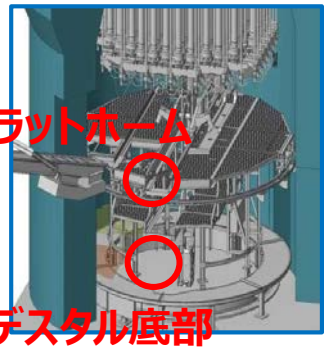
1F内部調査画像と試験堆積物との類似性の検討

1F2号機格納容器内堆積物*　　LEISAN試験生成物





溶融した状態で直接下部へ落下し、冷えて凝固したもの（岩状の堆積物）



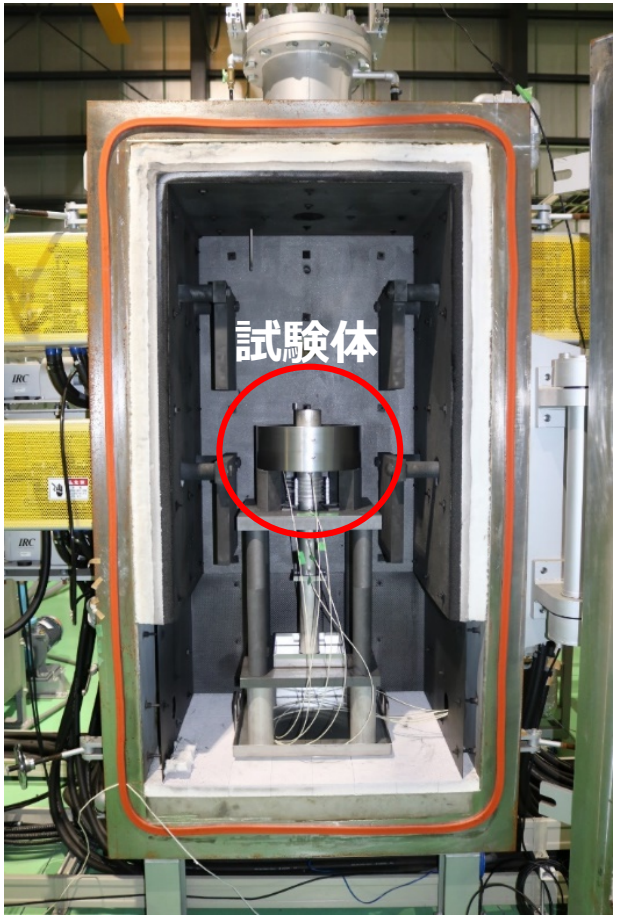
溶融前の形のまま酸化し下部へ崩落したもの（構造物の一部と推定される堆積物）

チャンネルボックスに付着凝固した小石状の堆積物

*東京電力ホールディングス、福島第一原子力発電所　2号機　原子炉格納容器内部調査　実施結果（2019年2月28日）

圧力容器下部での溶融・移行に関わる試験

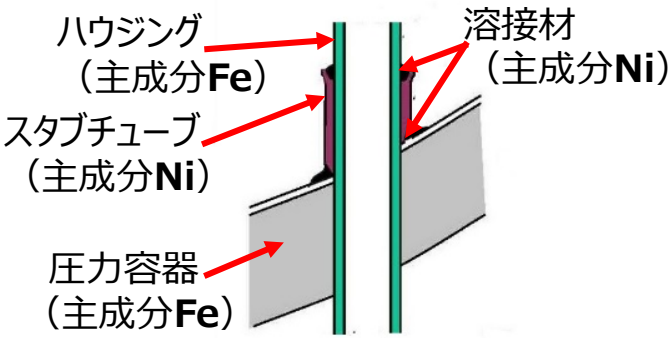
下部ヘッド破損試験体



LEISANに試験体を設置

金属物質の準備

圧力容器下部の拡大模式図



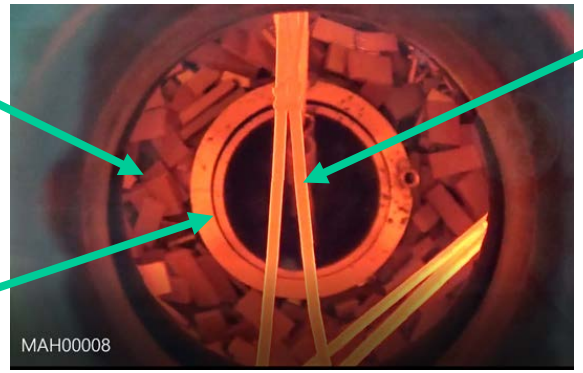
試験条件

- 最高温度：圧力容器材が溶けはじめる約1500℃
- 温度分布：圧力容器内外で約250℃
- 雰囲気：Arガス

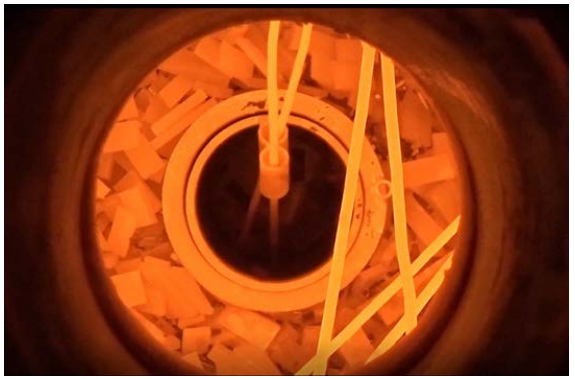
動画撮影による金属系デブリと構造部材との反応挙動

金属デブリが堆積すると、酸化物デブリが溶融する温度より1000℃以上も低い温度で局所的に溶融・反応で破損が起こる可能性が高い。

金属材
- ジルコニウム
- ステンレス鋼
- B_4C

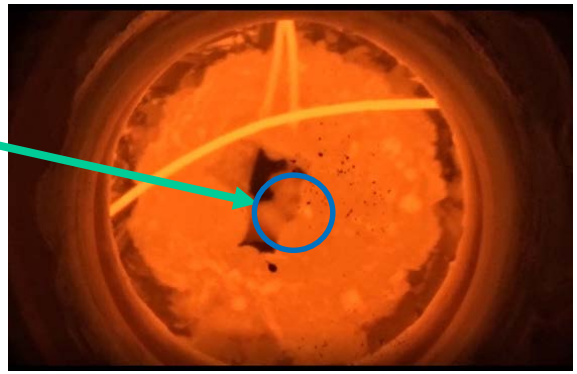


加熱開始時

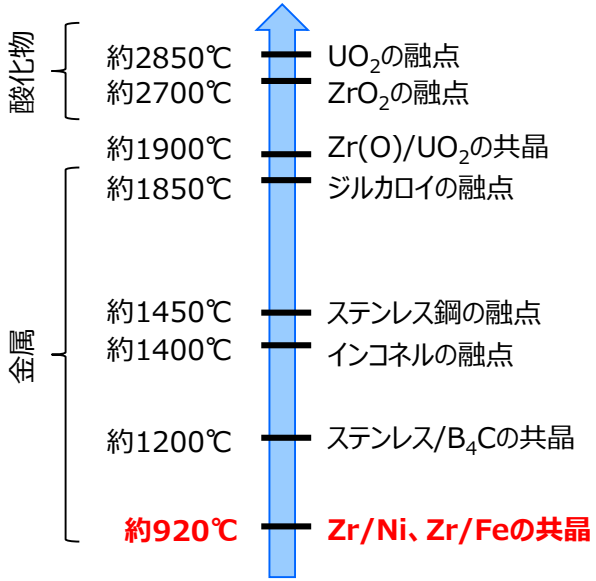


金属系デブリ材が溶融開始（約900℃）

ハウジング内部への流出（約1100℃）

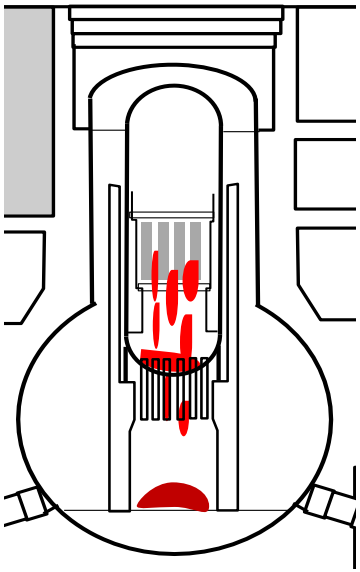


溶融金属デブリが制御棒駆動機構ハウジングを破って、ガイド管内部に流出



試験的に取り出す燃料デブリの分析データの評価

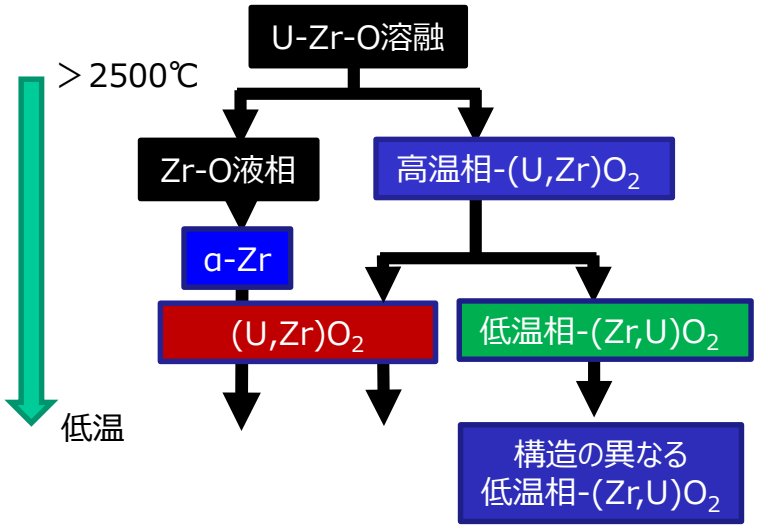
- 燃料デブリ堆積状況把握の高精度化



燃料デブリ取出し

相の同定
各相の量などの分析

多様な燃料デブリ
主な元素：U、Zr、Fe、Ni、B、O
事故条件：水蒸気量、最高温度、冷却速度



例として、
燃料棒の溶融後のデブリ形成
急冷：単相
徐冷：２～３つの相（冷却速度に依存）

今後の計画

➢ 燃料デブリ性状把握の高精度化

- 1F２号機の内部調査から、燃料デブリは、燃料や燃料棒、炉内の構造物等が混合して固まっている、複雑な形態であると推測される。

- 試験的に取り出した燃料デブリの分析データをもとに、
  - 燃料デブリ形成過程（局所領域での挙動）
  - 事故シナリオ（プラント全体での挙動）

  を、総合的に評価することで、燃料デブリがたどってきた過程（温度履歴など）を推測する。

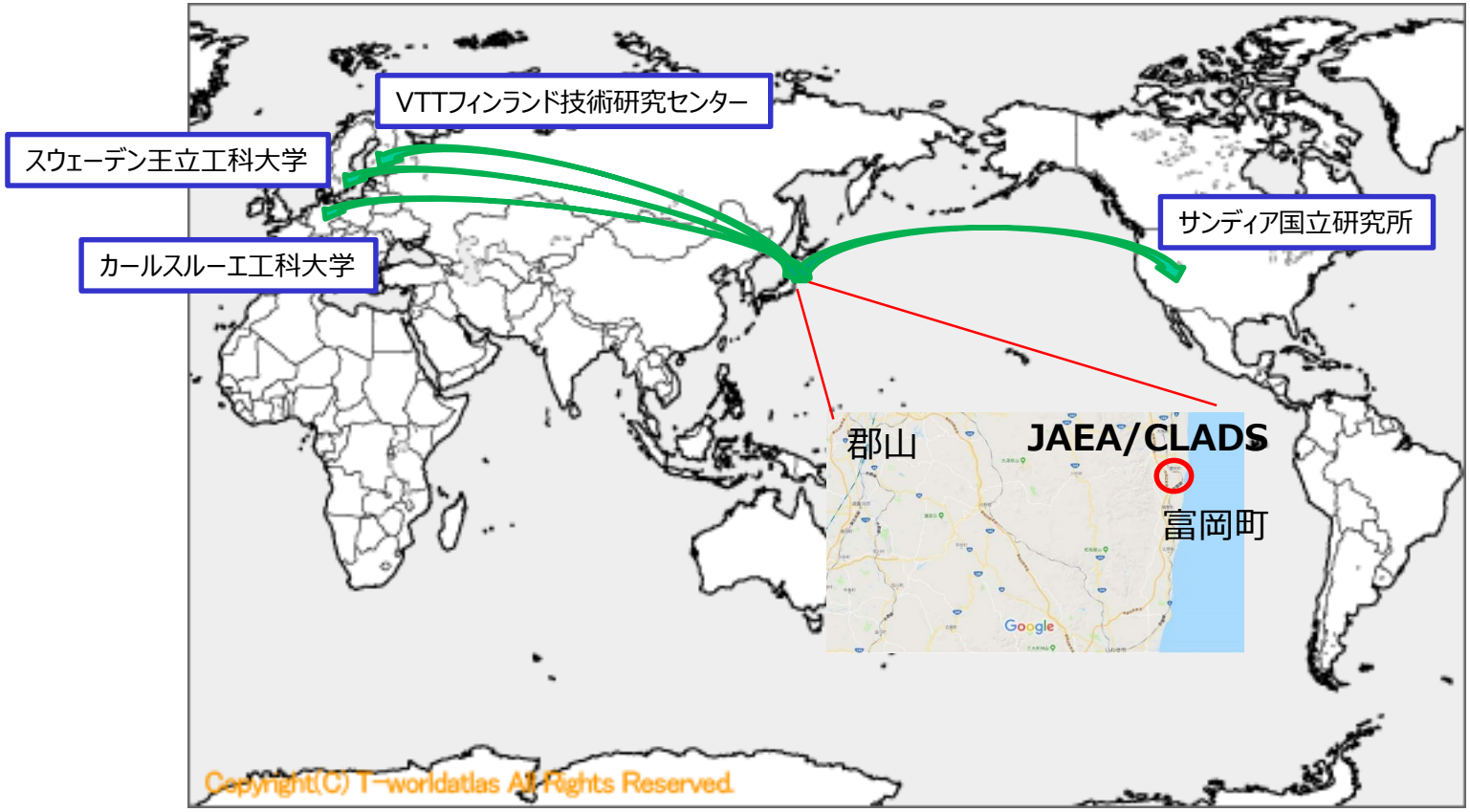
  これをもとにしたデブリ形成過程条件で、
  - LEISAN等の試験装置により模擬物質を作製

燃料デブリの状態把握の高精度化を図り、取出し規模の拡大に向けた、取出し方法の検証・確認に資する。

国際研究機関との共同研究

LEISANは、従来試験装置にない画期的な性能を有しており、

- BWRを保有する国の研究機関等から研究協力の申し入れを受けている。
- 次世代研究者を中心とした国際研究者ネットワークの”ハブ”を富岡町に整備することにも取り組んでいく。



まとめ

- 高温水蒸気雰囲気で、軸方向温度勾配をかけたまま急速昇温することで、溶融・移行・堆積挙動を、試験中の映像で調べることができる、世界初の装置（LEISAN）開発に成功した。この装置は国際的に注目され、装置を利用した国際協力などを通じて、燃料デブリの形成メカニズム解明に挑んでいる。
- これまでに、LEISAN試験で得られた金属系生成物と実堆積物の類似性から、実際の情報が少ない中で、2号機での金属系デブリ堆積を裏付ける知見を得た。
- 今後は、実デブリの形成過程の評価から、燃料デブリの状態把握を高精度化する計画である。この知見により、燃料デブリ取り出し規模の拡大に向けた、取り出し方法の検証・確認に貢献する。

多目的試験棟／CLADS

LEISAN装置

ワンチームでLEISAN試験を実施

令和2年度 福島研究開発部門
成果報告会

廃炉に向けた
空間情報把握のための研究開発

令和2年12月5日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉環境国際共同研究センター　遠隔技術ディビジョン
3Dイメージング技術開発グループ

川端邦明

背景

□ 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉

- 作業環境：事故の影響により想定が困難（Unknown Unknowns）

□ 安全、着実な廃炉作業推進への取組み

- 作業員の被ばく低減：遠隔操作機器（ロボット）の活用
- 作業対象空間について事前調査を行い、Unknownをできるだけ減らす
- 調査で得られたデータ、情報に基づいて作業計画を立案
- 作業実施のために、事前に模擬環境にて訓練やリハーサル

作業対象空間に関するデータや情報の収集・把握

安全，着実な廃炉作業推進の1丁目1番地（必ず通る課題）

目的と取組み

□ 廃炉作業に必要不可欠な作業対象空間のデータ・情報を収集・処理し、提示する技術の研究開発とその応用

- 作業空間内の立体構造の状態　：　作業計画立案、操作時に参照
- 作業空間内の放射線分布状態　：　作業計画立案、安心安全

□ 取り組んでいる研究開発課題：作業環境の状態を計測・推定する技術

- 作業環境の空間構造を取得する技術
  - 画像からの立体復元手法の開発
  - 点群データによる構造物推定技術
- 放射線分布を計測する技術
  - 小型放射線イメージャの開発
  - 高線量率環境における放射線計測技術の開発

画像からの立体復元手法の開発

□ 作業環境が事故の影響でどのようになっているか予想が難しいため、空間構造や状態の把握が重要

- 空間内の作業阻害要因の確認
- 詳細な作業計画の立案
- 模擬環境の設計　　etc.

□ 原子炉建屋内における空間構造や状態の把握に向けて

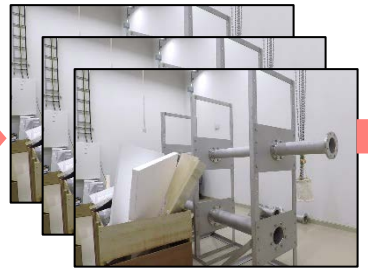
- 現場作業ではカメラが共通的に使用されている（遠隔操作機器にも搭載）
- カメラで得られる画像は2次元情報（奥行き等がわかりにくい）
- 直感的に把握可能であることが望ましい

画像から立体的なモデルを復元する技術の開発
（暗所や照明が限られる条件下での適用
や 遠隔操作機器による作業時のオンデマンド参照）

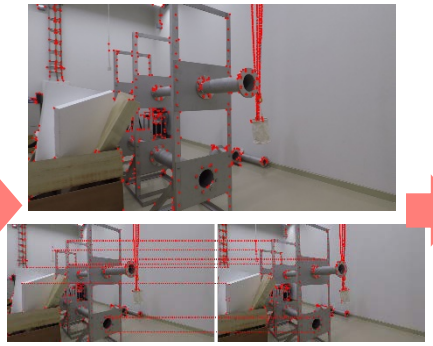
画像からの立体復元処理

□ 2次元画像内の特徴を基にしてつなぎ合わせることで立体（3次元）モデルを生成

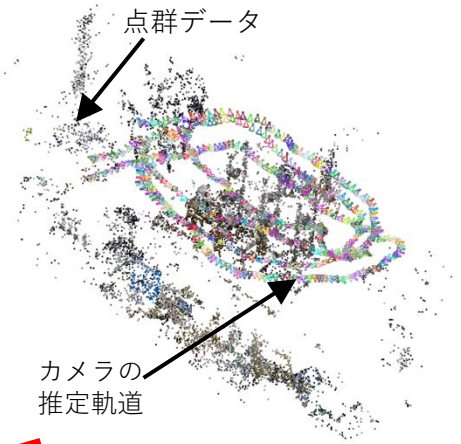
取得した動画



画像抽出



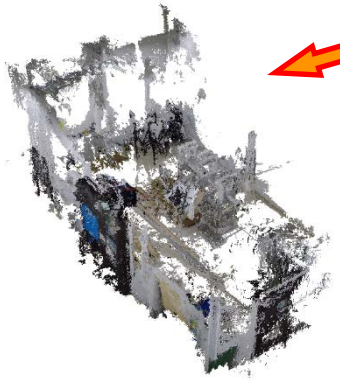
特徴抽出・マッチング計算



疎な3次元点群データ

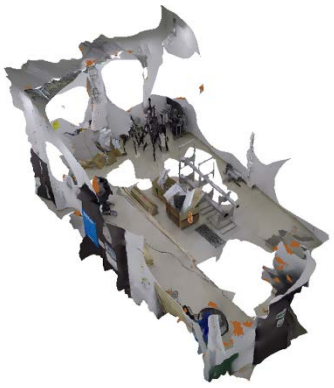
Structure from Motion(SfM)処理

多視点ステレオ(MVS)処理



密な3次元点群データ

メッシュ生成



テクスチャ生成

復元されたモデル

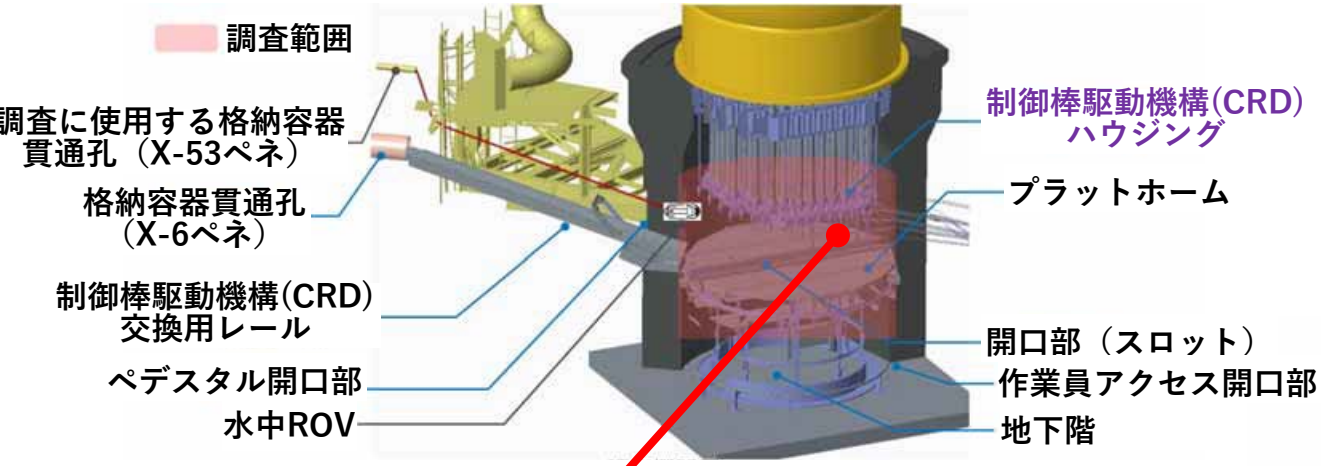
原子炉建屋内の作業環境特性や参照局面を考慮した研究開発が必要

立体復元の適用結果：1F動画（水中ロボット）

□ 典型的な例題によって立体復元の適用可能性を検証

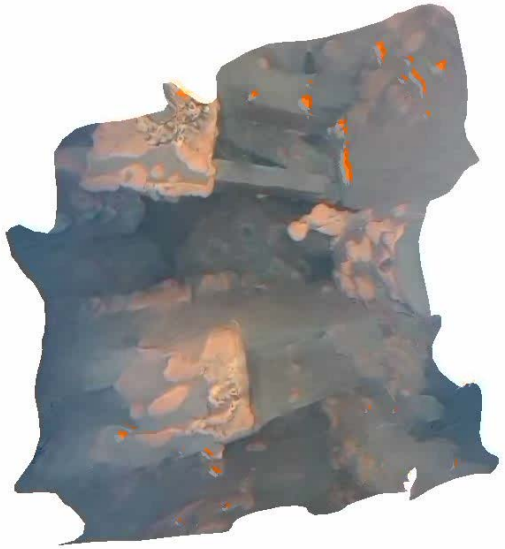
対象：福島第一原子力発電所3号機PCV内部調査(2017/7/21)*水中ロボットの取得映像

調査概要図（出典：東京電力ホールディングス）



CRDハウジング下部調査時の撮影動画

復元された密な点群データ



生成された復元モデル

復元性能の向上が必要

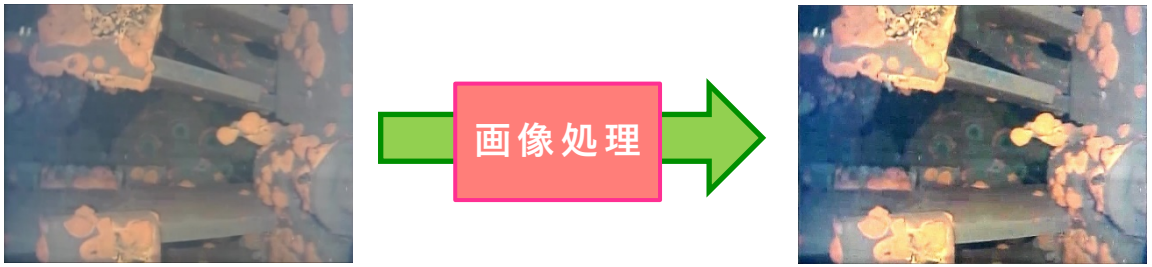
*東京電力ホールディングス:“動画・写真ライブラリー: 3号機PCV内部調査進捗 ～21日調査速報～ (2017/7/21)”, http://photo.tepco.co.jp/date/2017/201707-j/170721-01j.html

画像明瞭化処理の適用

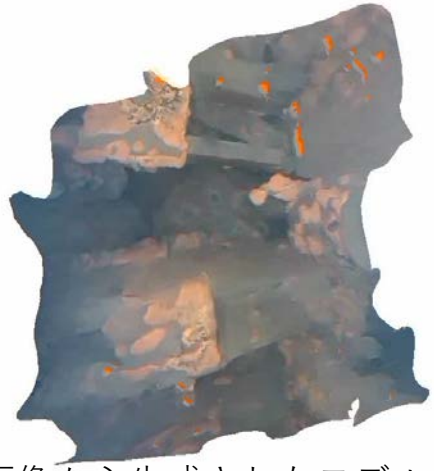
ロ 復元性能低下の要因を分析

- 照明が不十分（奥に行くほど薄暗い）
- 画像間を結びつける特徴量検出向上が必要　⇒　画像明瞭化

ロ アプローチ：コントラスト強調処理 および 鮮鋭化処理 の適用



例）元画像　　例）処理適用後



元画像から生成されたモデル

画像明瞭化処理適用後の画像から生成されたモデル

モデルの3次元復元性能が向上することを確認

立体復元処理の効率化

□ 作業の参照情報としての活用

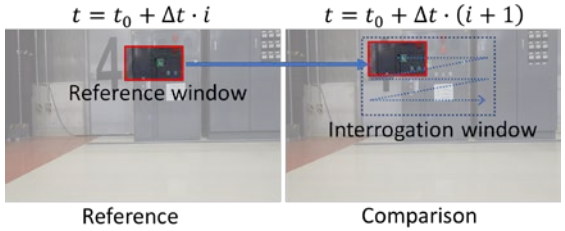
- オンデマンドなデータ参照が望ましい
- 立体復元の計算負荷：使用する画像枚数の増加により計算時間が増加

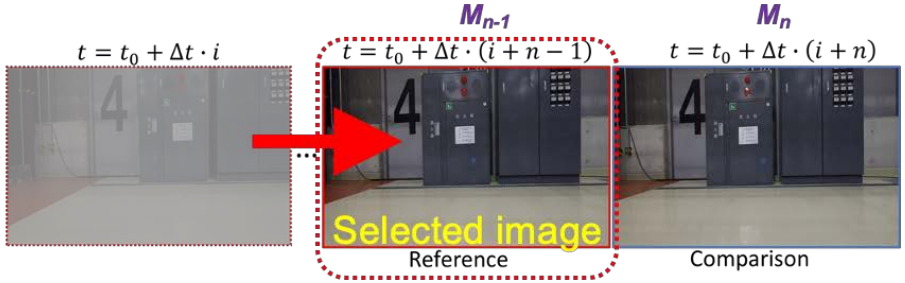
復元処理の効率化が必要

- 低速動作時や停止時の画像は互いに似かよっていて立体復元に寄与しない

□ アプローチ：<u>画像選択手法の開発・適用</u>（似かよった画像は処理対象からはずす）

- 基準画像 $I(t_0+\Delta t\ i)$ と比較対象画像 $I(t_0+\Delta t\ (i+j))$ 間での
  オプティカルフロー（画像移動量の推定値）を計算
- オプティカルフロー量のうち度数が最大値をとるM_jを検出
- M_jと しきい値M_{th}を比較し、$M_j \leqq M_{th}$ の場合 j を増やしていき、
  $M_n > M_{th}$となった場合、画像 $I(t_0+\Delta t\ i+(n-1))$を選択



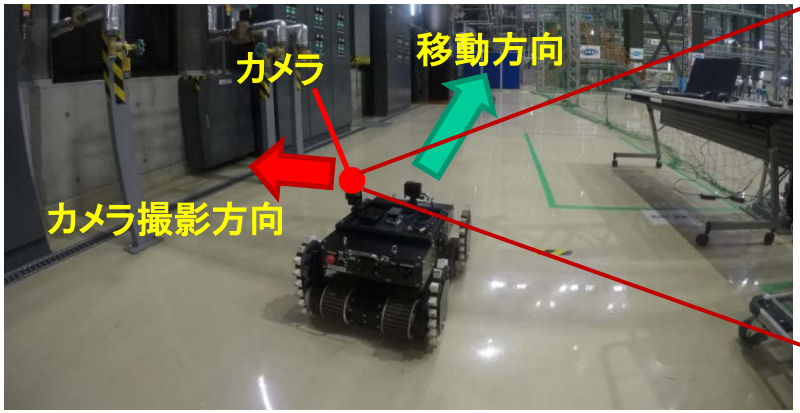


画像間の比較に基づいて変化があるものを選択して立体復元計算に適用

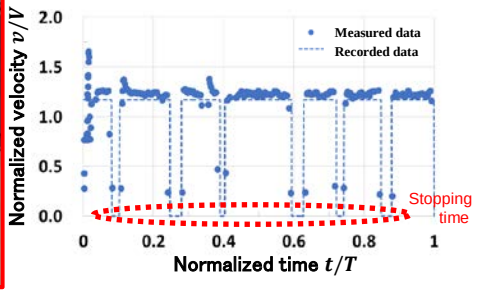
画像選択による効果についての検証実験

□ 検証実験の条件

- 場所：楢葉遠隔技術開発センター（NARREC）・試験棟
- 画像：クローラ式移動ロボットを遠隔操作(間欠直進移動)中に撮影した動画
  （移動速度0.1m/秒，移動時間175秒、
  撮影解像度：1920 x 1080 pixels、30 fpsでの総画像数5248枚）



間欠直進移動時の撮影動画

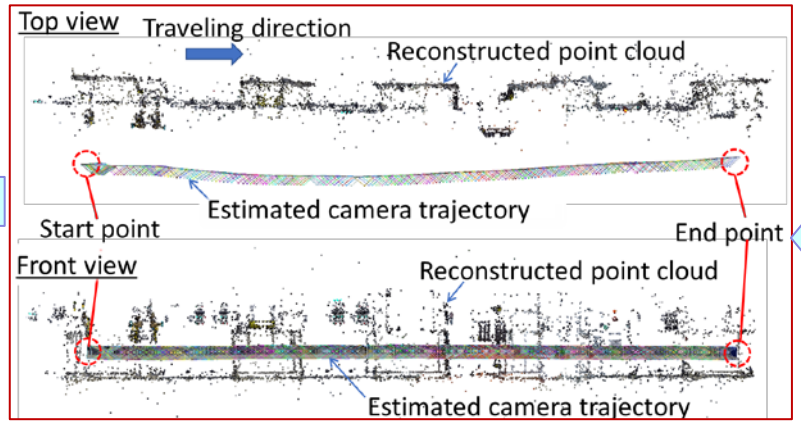


間欠直進動作パターン

画像抽出

画像選択

SfM処理



疎な点群の生成

MVS処理

復元モデル

結果（一定間隔抽出時と提案手法適用時の比較）

ロ 結果の比較

一定間隔(15枚/秒)で抽出した画像から生成したモデル(画像2,625枚を使用)

抽出された画像に対して提案した選択法を適用して生成したモデル (画像207枚を使用)

画像抽出方法	画像枚数（枚）	モデル生成時間（秒）
一定間隔(15枚/秒）で抽出	2,625	30,073
提案手法	207	1,506

⇐ 比較して 約5%の処理時間

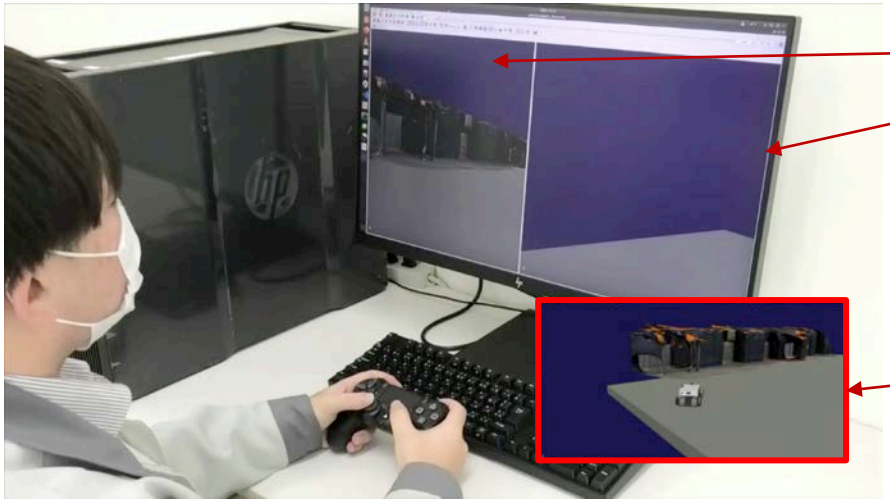
モデルのクオリティを維持しつつ、処理時間短縮化を実現

T, Hanari, K. Kawabata, Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp242-245, 2020

立体復元モデルを活用した例

ロ 楢葉遠隔技術開発センター(NARREC)の施設 VRシステムへの投影例

ロ NARRECで開発しているロボットシミュレータへの投影例



オペレータのモニタ画面
（左：前方向きカメラ、右：側方向きカメラ）

仮想世界における
遠隔操作ロボットの振る舞い

復元モデルを用いた計画立案や遠隔操作の事前確認等への貢献に期待

目的と取組み

□ 廃炉作業に必要不可欠な対象作業空間のデータ・情報を収集・処理し、提示する技術の研究開発とその応用

- 作業空間内の立体構造の状態　：　作業計画立案、操作時に参照
- 作業空間内の放射線分布状態　：　作業計画立案、安心安全

□ 取り組んでいる研究開発課題：作業環境の状態を計測・推定する技術

- 作業環境の空間構造を取得する技術
  - 画像からの立体復元手法の開発
  - 点群データによる構造物推定技術
- 作業環境の放射線分布を計測する技術
  - 小型放射線イメージャの開発
  - 高線量率環境における放射線計測技術の開発

小型放射線イメージャの開発

□ 作業環境が放射性物質（主として放射性セシウム）で汚染されているため、放射性物質分布の把握が重要

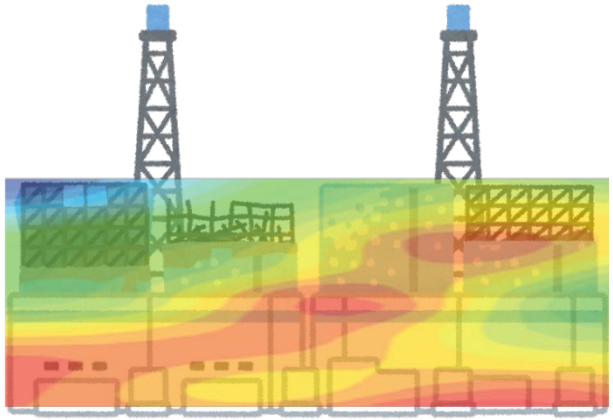
“ガンマ線”放出核種

- 作業員の被ばく線量低減
- 詳細な除染計画の立案、工程管理
- 作業員に安全と安心を提供

□ 原子炉建屋内における放射線物質分布の把握へ向けて

- 従来手法（サーベイメーター等）は線量率の“点”的な測定
- 見落としなく迅速に“面”的な情報として取得されることが望ましい
- 作業員や遠隔機器で容易に運搬可能であることが望ましい

ガンマ線イメージャーの一種である
コンプトンカメラの開発

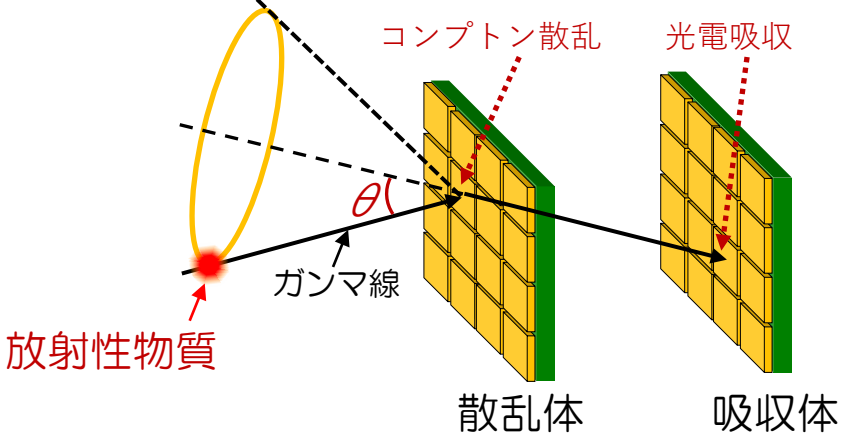


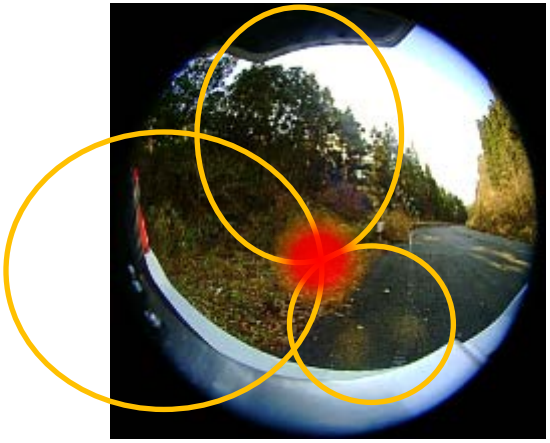
※図はイメージ。実際の環境を示したものではありません。

コンプトンカメラによる放射線イメージング

ロ コンプトンカメラ（ガンマ線イメージャーの一種）の測定原理

・ガンマ線がエネルギーの一部を散乱体に付与
・散乱したガンマ線が光電吸収により吸収体に付与





※図はイメージです

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} - \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}$$

E_1　：散乱体での検出エネルギー
E_2　：吸収体での検出エネルギー
$m_e c^2$：電子の静止エネルギー

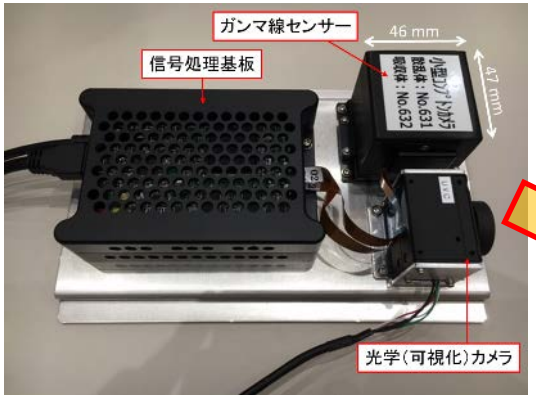
散乱体、吸収体で各々、
“付与エネルギー”と“位置”を測定
⇒ **散乱角θ （コンプトンコーン）**を推定

複数のガンマ線を観測することで、
視野内のコンプトンコーンの交点
に放射性物質があると予想できる

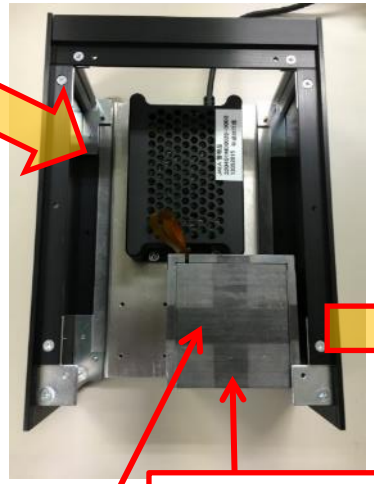
光学画像を重ね合わせて
放射性物質の分布を可視化

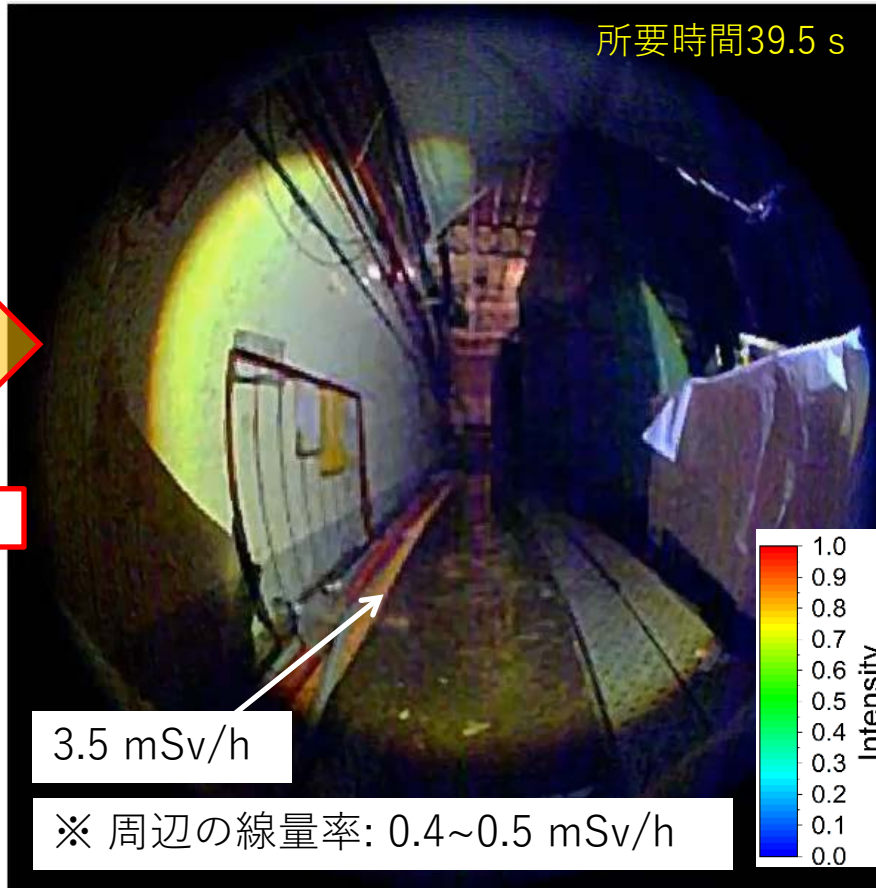
原子炉建屋内での測定を可能とする小型・軽量化が必要

□ 開発したコンプトンカメラ



- 総重量：680 g
- 給電：USBバスパワー
  （5V、0.5A）で動作





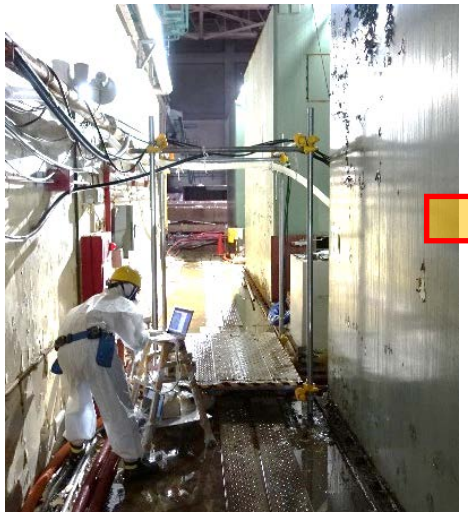
□ 現場での測定実験

- 福島第一原子力発電所3号機タービン建屋内
- 1cm厚さの鉛シールドをガンマ線センサーの上下、左右、背面に装着（使用時装置重量は約3.5 kg）

放射線物質の分布を可視化する小型軽量なイメージャを実現

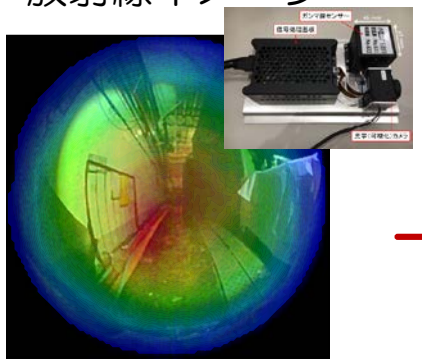
放射線分布イメージと空間構造データとの組み合わせ

ロ 空間的な放射線分布把握のためのデータ統合



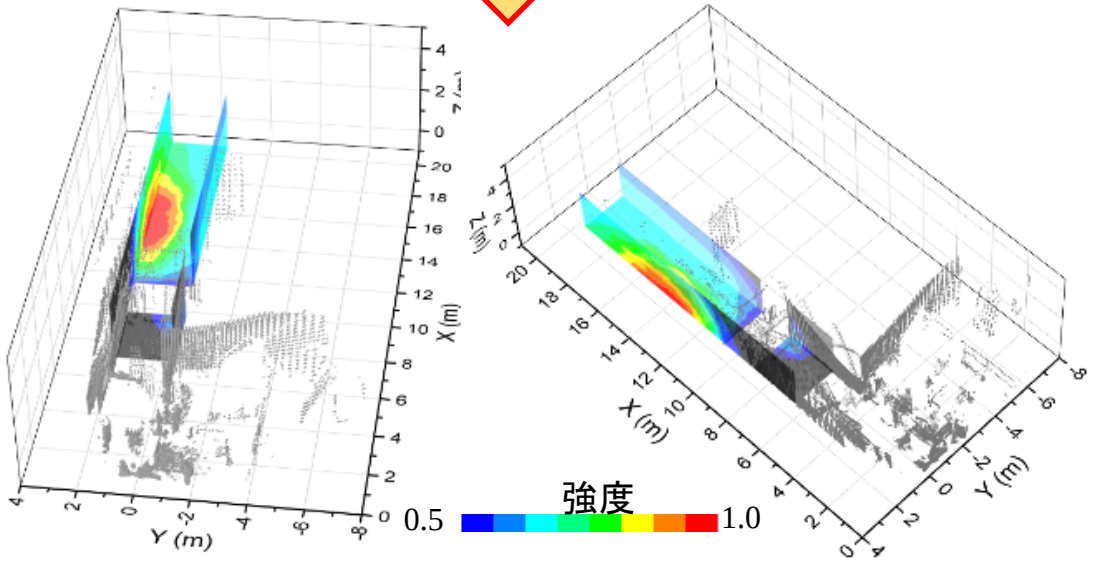
福島第一原子力発電所
3号機タービン建屋内

放射線イメージ



空間構造データ（3次元点群）

3次元測域センサ



任意視点から空間構造を考慮した放射性物質分布が観察可能

Y. Sato, et. al., Journal of Nuclear Science and Technology, 55巻, 965-970頁, 2018年5月21日

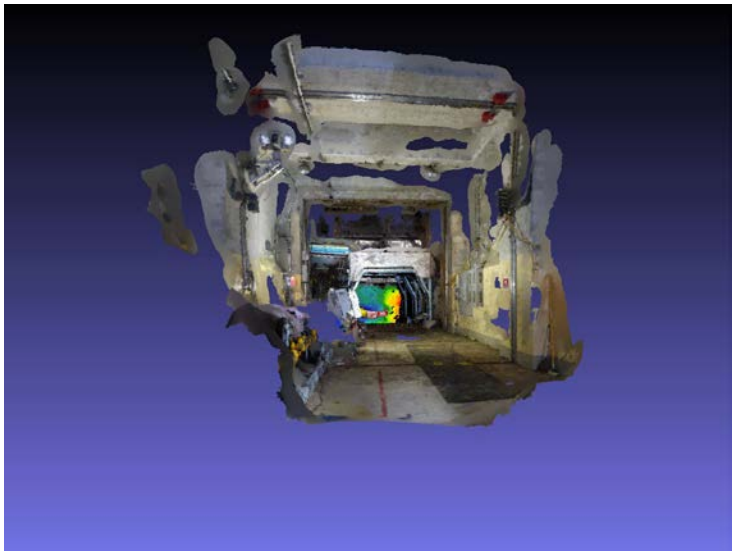
放射線分布と画像からの立体復元モデルによる可視化

□ 現場での測定データによる3次元可視化の試み

・福島第一原子力発電所１号機原子炉建屋内
・コンプトンカメラをクローラー式移動ロボットに搭載(免震重要棟から遠隔操作)
・27 mm厚さの鉛シールドをガンマ線センサーの全方位(６面)に装着
・試験エリアの空間線量率: 5 mSv/h 以上

FLIR社 パックボット

※６倍速にて再生


画像240枚によるモデルと統合

より直感的な放射性物質分布の認識、観察が可能

Y. Sato, et. al., Journal of Nuclear Science and Technology, 56巻, 801-808頁, 2019年2月27日

□ 廃炉に向けた空間情報把握のための研究開発

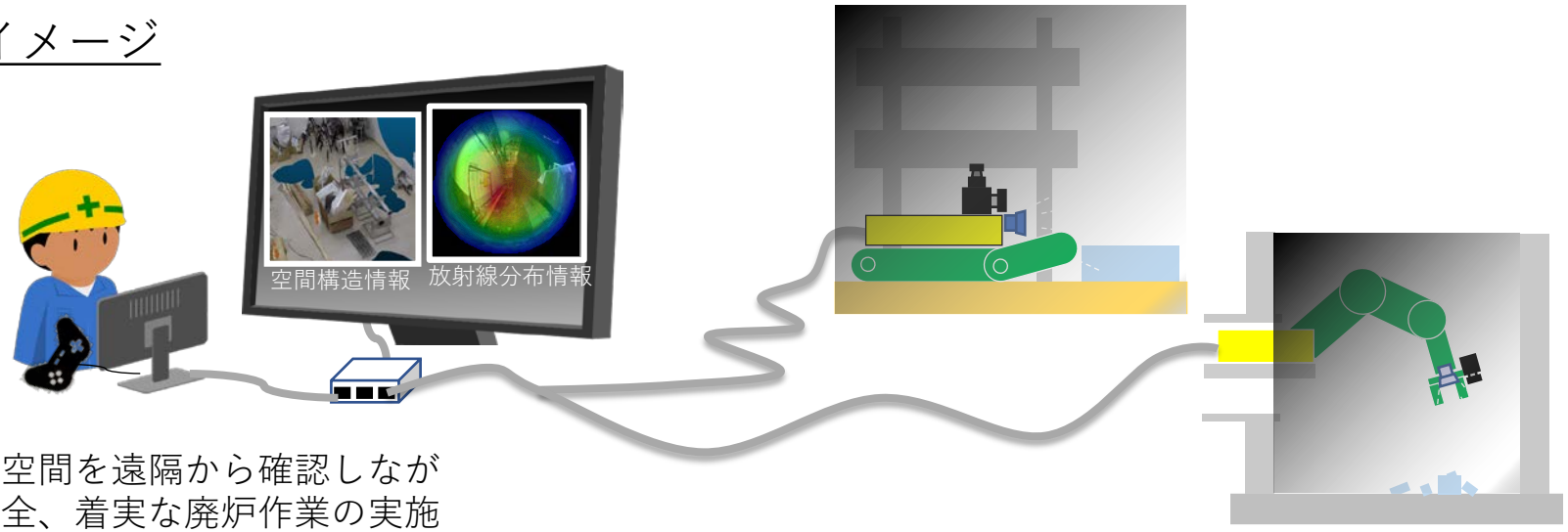
- 廃炉作業に必要不可欠な対象作業空間のデータ・情報を収集・処理し、提示する技術の開発とその応用
  - 作業環境の空間構造を取得する技術：画像からの立体復元手法の開発
    - 照明の限られる状況において画像の明瞭化による復元性能向上
    - 性能を維持しつつ計算負荷を軽減
  - 作業環境の放射線分布を計測する技術：小型放射線イメージャの開発
    - 可搬型コンプトンカメラの開発
    - 空間構造データと組合せによる放射線分布の立体化

今後の展開

- 安全、着実な廃炉作業推進貢献のために研究開発を継続
  - 画像からの立体復元性能向上とモデル生成高速化
  - 高線量率環境での計測可能な放射線イメージャの開発
  - 両者の統合による作業参照情報生成システムの構築

- 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所構内での検証を行うことで、現場に必要・有効な技術開発を実施

イメージ



作業空間を遠隔から確認しながら安全、着実な廃炉作業の実施

令和2年度 福島研究開発部門
成果報告会

放射性物質分析・研究施設の整備と若手技術者の育成

令和２年12月５日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点
大熊分析・研究センター

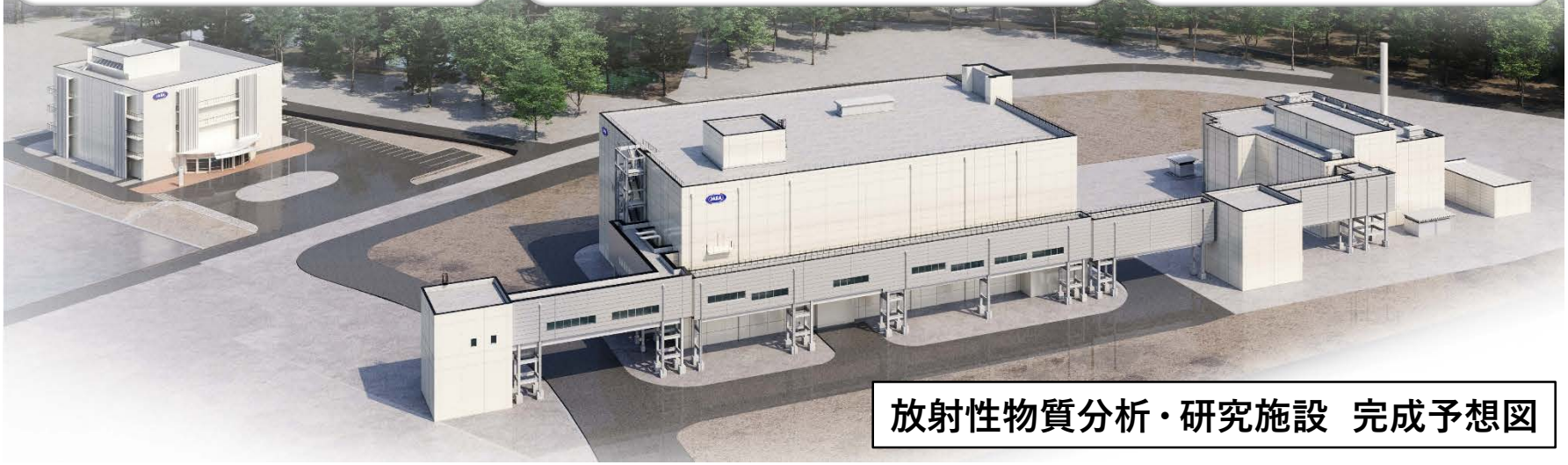
伊藤　正泰

大熊分析・研究センターの概要

大熊分析・研究センターでは、福島第一原子力発電所（1F）事故によって発生した放射性廃棄物や燃料デブリ等の性状を把握するための分析・研究を行う施設（放射性物質分析・研究施設）を1Fに隣接した敷地に整備している。

本施設は、施設管理棟、第1棟及び第2棟から構成される。

施設管理棟	第１棟	第２棟
事務所、ワークショップ（放射性物質は扱わない）	低・中線量の放射性廃棄物の分析を行う施設	燃料デブリ等の分析を行う施設

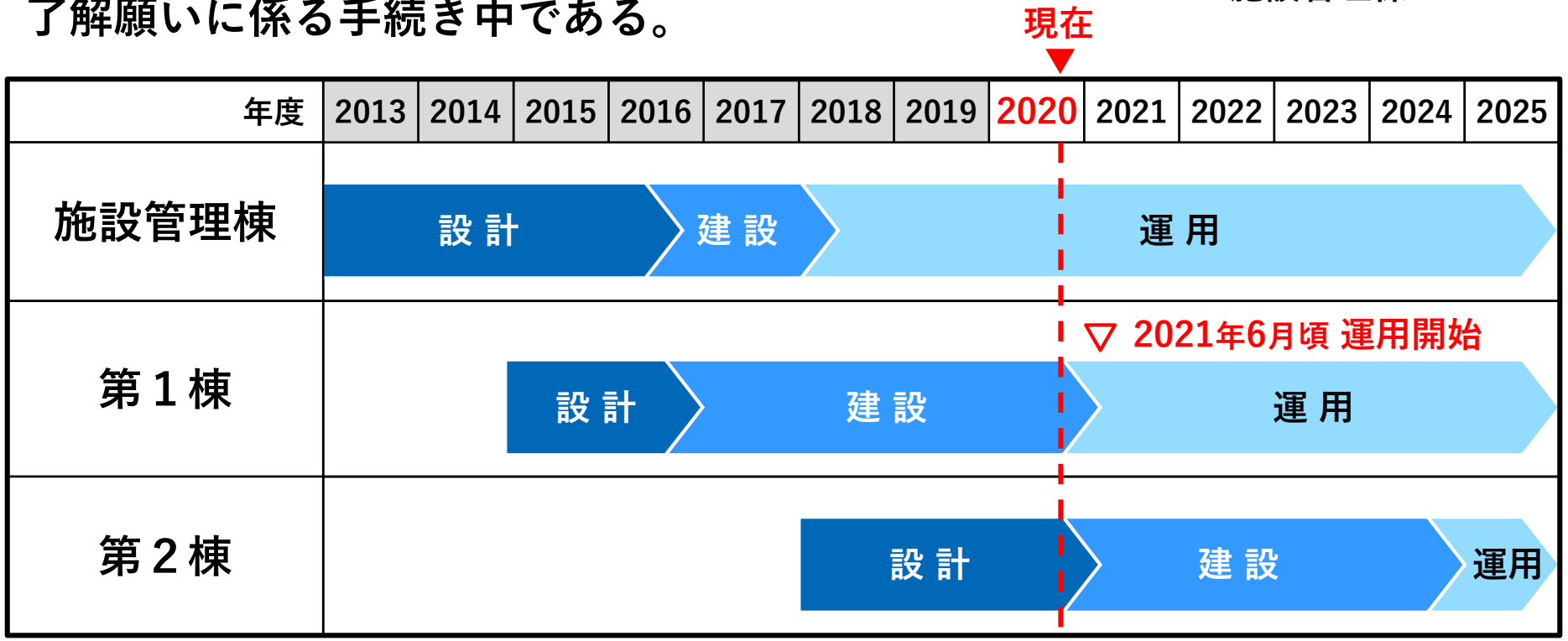


放射性物質分析・研究施設　完成予想図

放射性物質分析・研究施設の整備計画

放射性物質分析・研究施設は帰還困難区域という特殊な環境での整備となるが、2018年3月に運用を開始した施設管理棟をはじめ、整備計画に沿って着実に進めている。現在、第１棟は建設工事中、第２棟は設計並びに原子力規制委員会による実施計画※変更認可の審査中及び地元自治体への事前了解願いに係る手続き中である。

施設管理棟



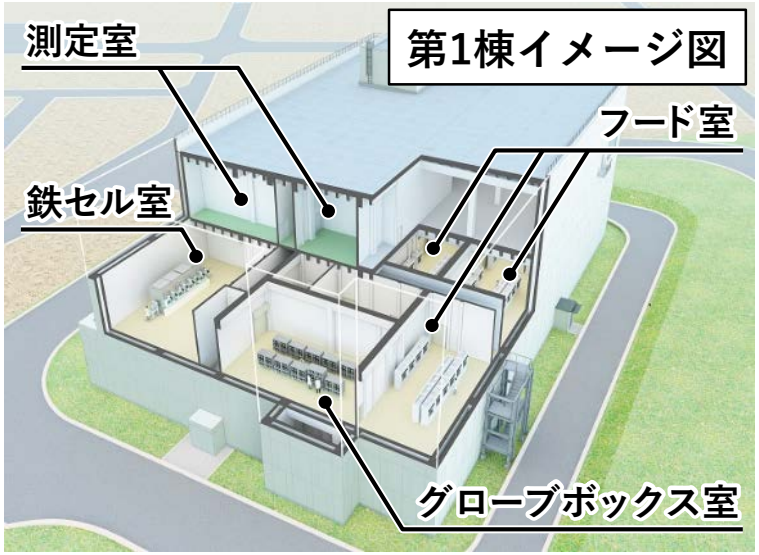
※ 東京電力ホールディングス株式会社「福島第一原子力発電所　特定原子力施設に係る実施計画」

第１棟の概要

第1棟は、1Fで発生するガレキ類、焼却灰、汚染水処理に伴い発生する二次廃棄物等（分析対象物）の性状等を把握し、今後の処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し等を得るための分析等を行う。

■ 分析対象
- 表面線量率が1Sv/h以下のガレキ類、水処理二次廃棄物等
- 年間200受入物を想定

■ 建築概要
- 延床面積：約9,700m^2
- 階数　　：地上3階
- 主要構造：鉄筋コンクリート造、杭基礎



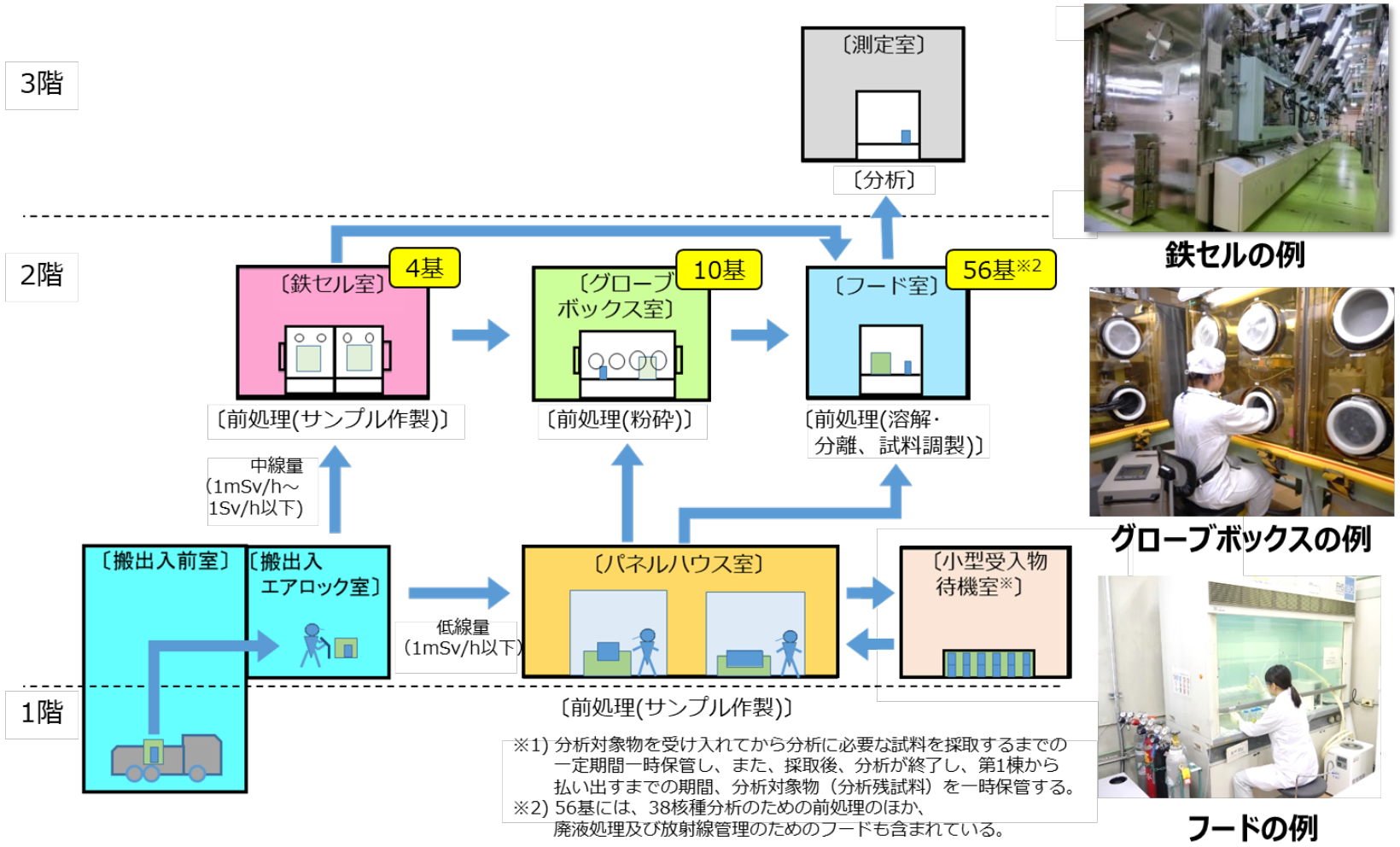
○ 2015年3月　詳細設計に着手
第1棟で行う分析対象項目に対応した分析装置、施設レイアウトなどを基に設計
また、中線量の試料を取扱うため、遮蔽等を考慮した安全対策を施設設計に反映

○ 2016年9月　実施計画変更認可申請 ▶ 2017年3月に認可。建設工事に着手

○ 現在　建屋の躯体工事が完了。2020年9月に受電を開始
鉄セル、グローブボックス、フード等の主要な内装設備の据付けが完了

第１棟の試料動線

1階の搬出入前室に分析対象物を受入れ、2階で前処理を行い分析に必要な試料を採取した後、3階の測定室で分析する。なお、中線量の分析対象物は、放射線に対して十分な遮蔽能力を有する鉄セルで取扱う。



鉄セルの例

グローブボックスの例

フードの例

第１棟の整備状況－建屋工事－

送風機設置状況（2020.7）

監視盤設置状況（2020.7）

受電開始（2020.9）

第１棟の整備状況－内装設備整備－

グローブボックス室 整備状況（2020.6）

グローブボックス内装置の整備状況（2020.11）

鉄セル室 整備状況（2020.11）

フード室 整備状況（2020.10）

第２棟の概要

第2棟は、1Fで発生した燃料デブリ等の性状等を把握し、燃料デブリの取出しの各工程（取出し、収納・移送・保管等）の検討を進めるための分析等を行う。

■ 成果の反映先
- ➢ 燃料デブリ取出し時の臨界安全の確認
- ➢ 燃料デブリ取出し作業時の線量、ガス挙動の把握
- ➢ 燃料デブリ取出し工法へのフィードバック
- ➢ 燃料デブリの収納・移送・保管にあたっての安全確認・評価
- ➢ 燃料デブリの処理・処分方策の検討

■ 分析対象
- ➢ 燃料デブリ等
- ➢ 年間12受入物を想定

■ 建築概要
- ➢ 延床面積：約3,300m^2
- ➢ 階数　　：地上2階、地下1階
- ➢ 主要構造：鉄筋コンクリート造、直接基礎

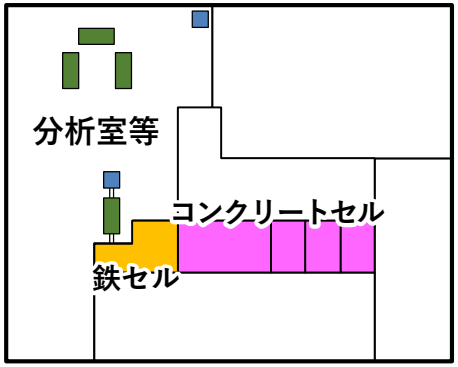
○ 2018年4月　詳細設計に着手
核燃料物質を含む燃料デブリ等を取扱うため、様々な安全対策を施設設計に反映
○ 2020年5月　実施計画変更認可申請 ▶ 審査中

第２棟の安全対策－遮蔽、閉じ込め－

第2棟は、燃料デブリ等を取扱う設備を1階に集約した設計としている。

なお、燃料デブリ等を取扱う設備は、その内部に放射性物質を閉じ込めるとともに、放射線に対して十分な遮蔽能力を有する設計としている。

第2棟 1階のレイアウト



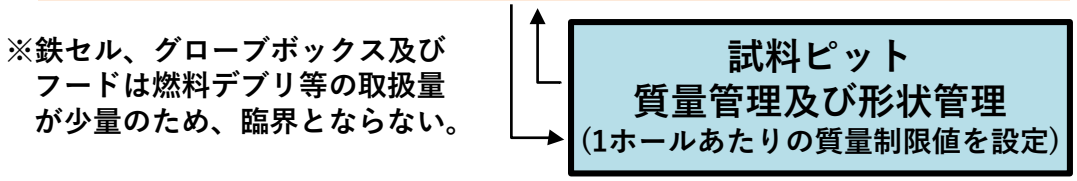
設備名	コンクリートセル	鉄セル	グローブボックス、フード
線量率	高 → 低		
設備例※			
遮蔽体（厚さ）	コンクリート（100cm～）	鉄（16cm～）	－

※各設備の画像はJAEA先行施設のもの

第２棟の安全対策－臨界－

燃料デブリ等は主にコンクリートセルで取扱い、第2棟での一時的な保管は試料ピットで行う。なお、燃料デブリ等は核燃料物質等で構成されているため、第2棟の施設設計では次の臨界安全を考慮している。

- コンクリートセルでは、取扱う燃料デブリ等の質量を制限（質量管理）
- 試料ピットは、複数のホール（孔）から構成されており、1ホールあたりの質量制限を設定（質量管理）し、ホールの形状や間隔等を制限（形状管理）



また、燃料デブリ等が全て燃料成分と想定し、その組成を保守的に設定した条件において、臨界安全評価を行い、臨界に達しないことを確認している。

遮蔽、閉じ込め及び臨界の他、耐震、火災等を考慮した安全対策を施設設計に反映している。

分析に関する工程の合理化に向けた技術開発

第1棟では、多様な分析対象物に対し、各種分析装置に適した前処理を実施した上で、多数の核種を対象とした分析を実施する。この前処理の工程では、核種に応じた複雑な化学分離等の操作が必要となるため、その処理に時間を要することや長時間の作業に伴う作業員の被ばく等の課題がある。

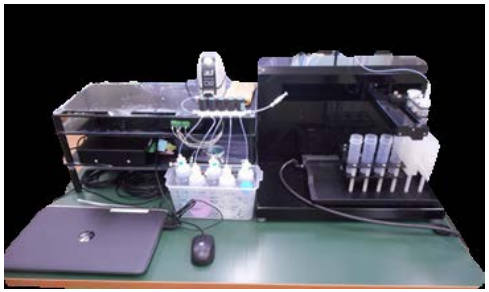
大熊分析・研究センターでは、これらの課題解決に向けた装置や分析手法の開発を実施している。

自動分離装置の開発

核種の分離工程において、必要な分析の基本操作を洗い出し、各操作に対応する装置を組み合わせ、かつ一連の操作を自動で行う技術を開発

分析の基本操作

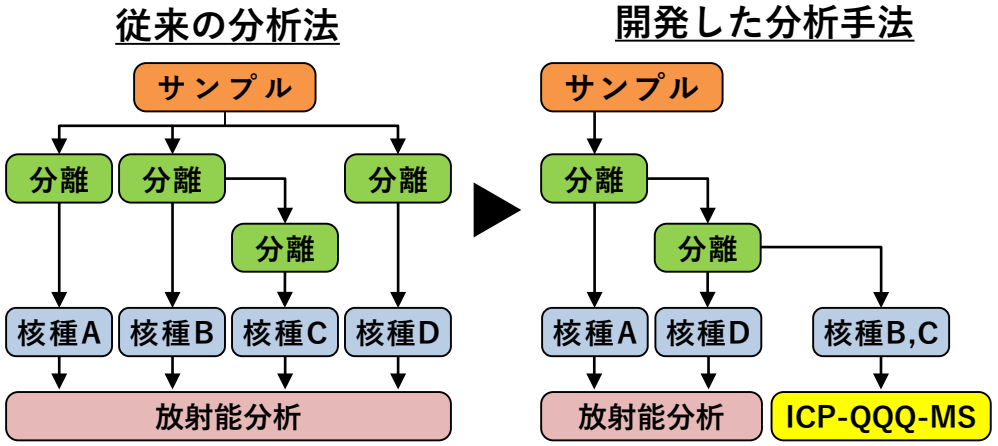
① 試料溶解
② 分取、分注
③ 試薬添加
④ ろ過
⑤ 加熱
⑥ 定容操作
⑦ 精製分画



固相抽出の自動化システム

多核種合理化分析手法の開発

従来の分析手法では、分析を行うための化学分離等の前処理を含め時間を要するため、この一部を新型のICP-MSによる測定に切り替えた分析手法を開発

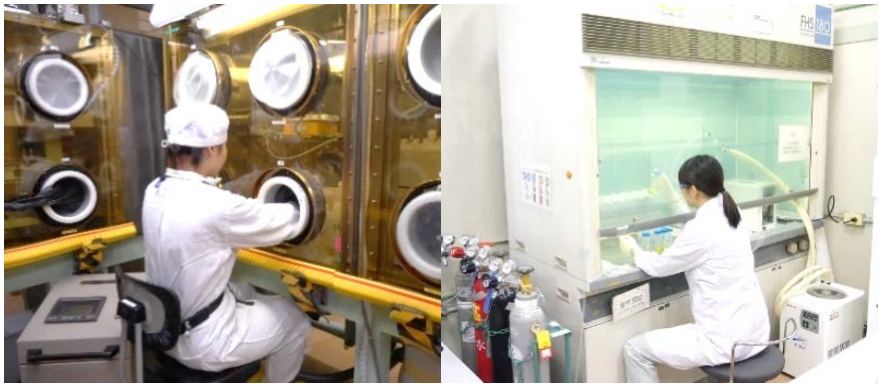


将来の分析・研究を担う若手技術者の育成

大熊分析・研究センターでは、第1棟及び第2棟の運用開始に向けて、分析技術者だけでなく、工務技術者及び放射線管理技術者の育成を実施している。

育成にあたっては、施設管理棟のワークショップを活用する他、JAEA茨城地区の原子力施設を活用した実務研修を実施している。

第1棟で行う分析作業を想定した訓練
（施設管理棟 ワークショップ）



茨城地区の原子力施設における実務研修
（原科研、サイクル研、大洗研）

また、放射性物質分析・研究施設は、特定原子力施設の一部として、東京電力HDの保安管理の下、JAEAが保安活動を実施する。このため、1F施設で分析、設備保守及び放射線管理を行う専門部署に若手技術者を短期間常駐させ実務研修を実施している。

まとめ

大熊分析・研究センターでは、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（1F）の廃止措置に向けた放射性廃棄物及び燃料デブリ等の性状を把握するための分析・研究を行う施設の整備を進めている。

・1F隣接地に整備した施設管理棟を拠点に、2021年度の第１棟の運用開始及び第２棟の建設工事開始とする整備計画を着実に進めている。

・JAEA茨城地区の原子力施設（原科研、サイクル研、大洗研）及び東京電力ホールディングス株式会社の協力のもと、実務研修等を通じて第1棟及び第2棟の運用開始に向けた要員の育成を実施している。

これらの活動を通して、将来の分析・研究を担う若手技術者を育成するとともに、安全かつ確実な1Fの廃止措置の推進及び福島の復興に貢献する。

令和2年度 福島研究開発部門
成果報告会

楢葉遠隔技術開発センターの取組み

令和２年１２月５日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門　福島研究開発拠点
楢葉遠隔技術開発センター

伊藤　倫太郎

目次

- センターの概況
- 施設利用事例・実績
- NARRECにおける技術開発
- 今後の展開
- まとめ

はじめに　～センターの略称について～

NARRECの歩み

★東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所(1F)事故
2011.3

★遠隔技術の試験施設建設決定
(第1回東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議)
2013.3

★楢葉南工業団地内に立地決定
2013.5

★土地取得
2014.7

★研究管理棟竣工
開所式開催
2015.10

★試験棟竣工
2016.2

★本格運用開始
2016.4

現在
（運用開始５年目）

土地取得

研究管理棟
試験棟

建設時

楢葉センター全景

NARRECの役割

遠隔技術開発の中核拠点として廃炉及び福島復興へ貢献

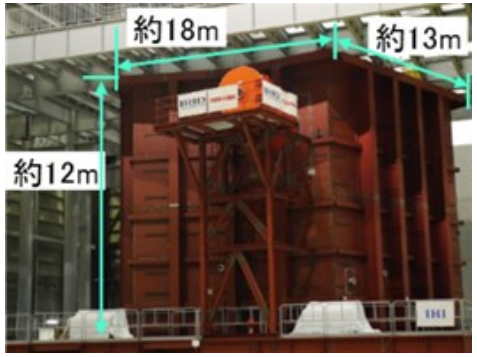
遠隔操作機器・装置(ロボット等)の研究開発・実証試験

試験環境整備
及び施設供用

新たな課題

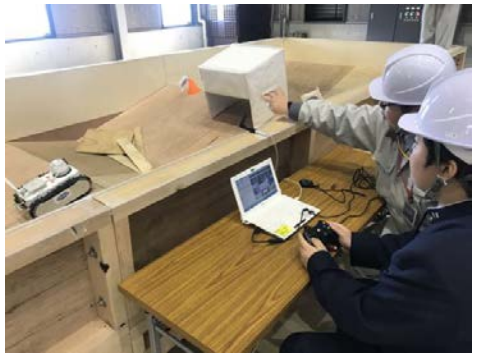
試験設備の高度化

遠隔操作機器等
の技術開発



1F廃止措置への貢献
（1F実規模モックアップ試験）

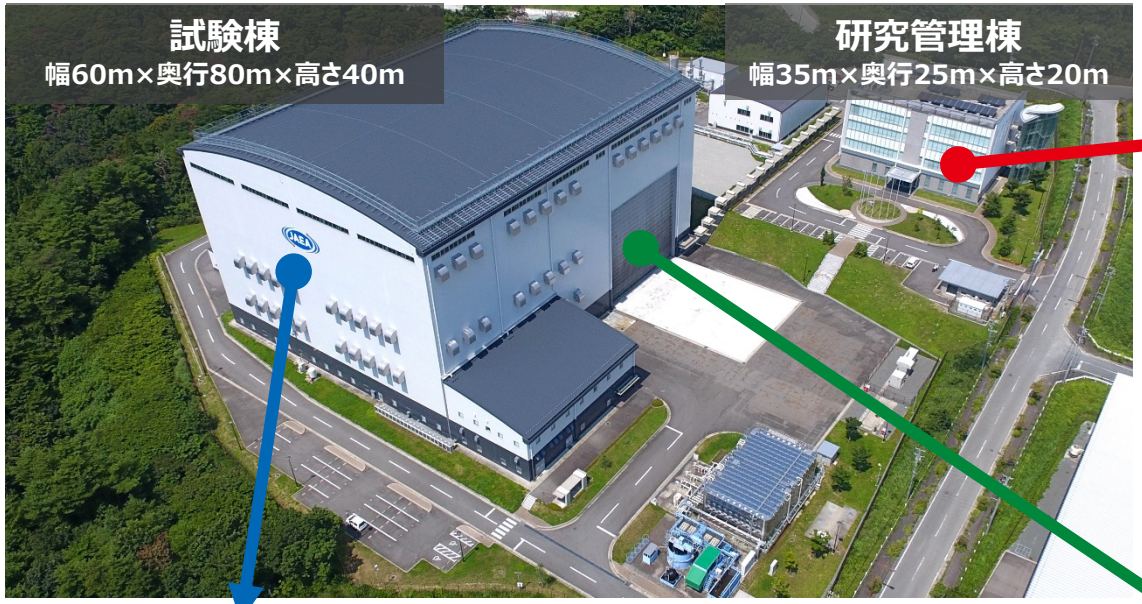
福島復興への貢献
（災害物質輸送UAV開発）



人材育成への貢献
（ロボット操作実習プログラム）

試験設備の高度化
（試験法の開発）

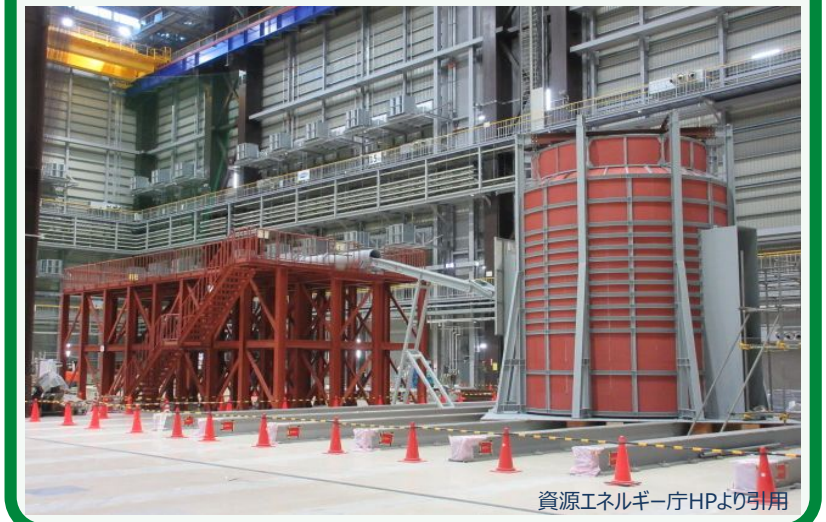
施設概要



バーチャルリアリティ(VR)システム

ロボット性能評価のための要素試験エリア

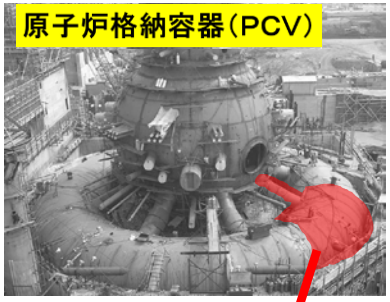
廃炉作業を実証するための実規模試験エリア

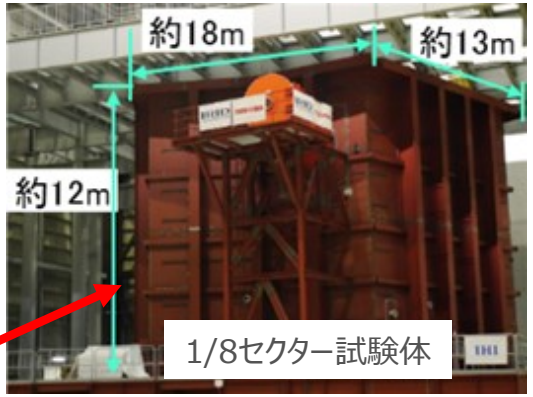


１F廃止措置に係る利用事例①

技術研究組合　国際廃炉研究開発機構(IRID)

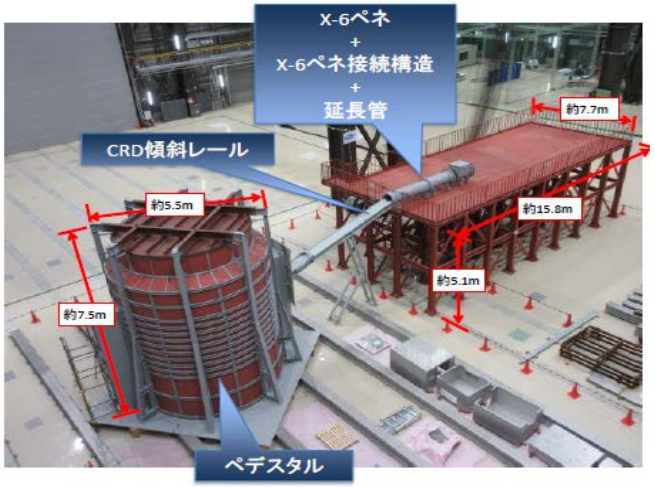
・原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試験
・原子炉格納容器内水循環システム構築技術の実規模試験





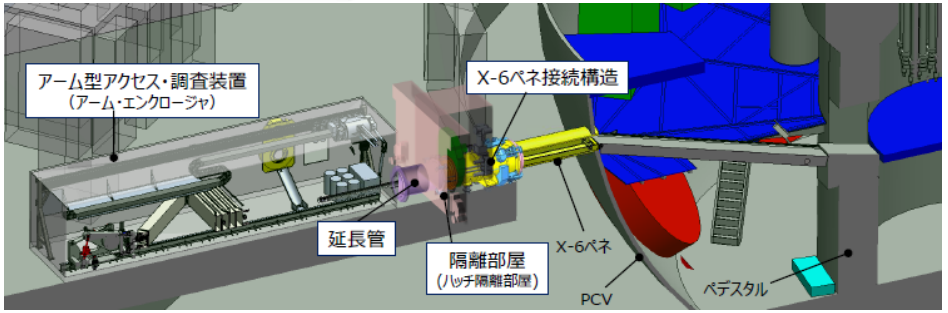
試験体を屋外に移動し
分解・調査後解体

・原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発
（X-6ペネトレーションを用いた内部詳細調査の現場実証）



X-6ペネ（接続構造+延長管接続後）の様子

ペデスタル内部の様子



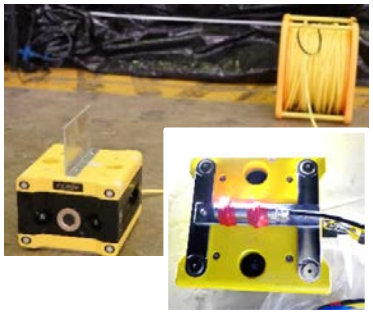
令和3年2月以降に装置が搬入され、2号機の燃料デブリの試験的取り出しモックアップ試験が予定されている

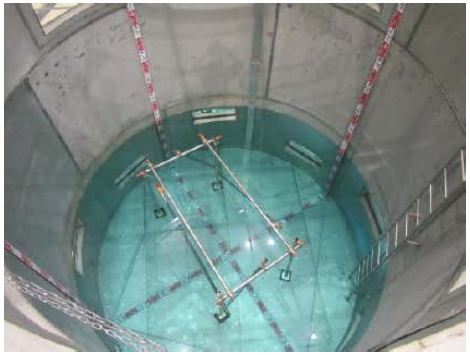
IRID　HP『平成31年度・令和元年度研究開発成果』より引用

１F廃止措置に係る利用事例②

株式会社アトックス

高温焼却炉建屋（HTI）地下階の線量調査のための試験・操作訓練





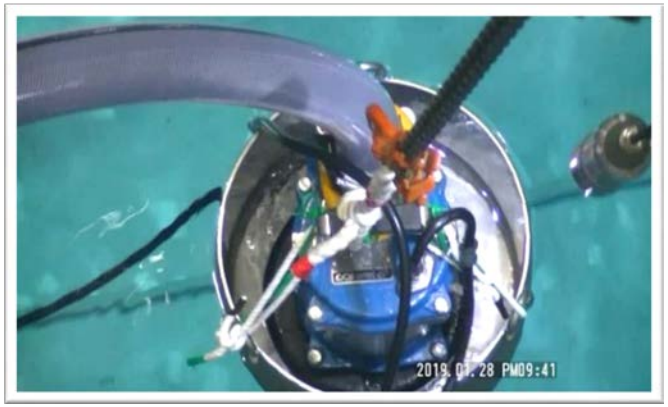
ROV走行時の障害物回避操作訓練

ROV走行時の堆積物舞い上がり確認試験

株式会社エイブル

１F建屋における1階から地下階の滞留水汲み上げ及び油回収の模擬試験

汲み上げ状況の確認



水中ポンプによる汲み上げ

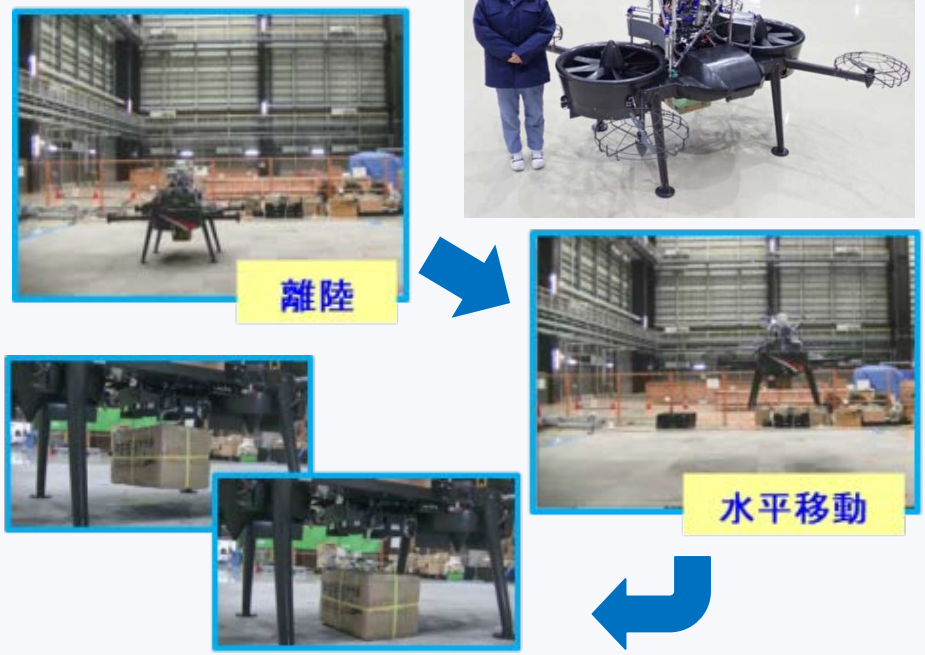
福島イノベーション・コースト構想に係る利用事例

福島イノベーション・コースト構想は東日本大震災及び原子力災害によって失われた浜通り地域等の産業を回復するため、当該地域の新たな産業基盤の構築を目指す国家プロジェクト

NARREC ➡ 本構想における廃炉分野の拠点

株式会社IHI

災害救援物資輸送ダクテッド・ファンＵＡＶの実用化開発
（改良機の全機試験）

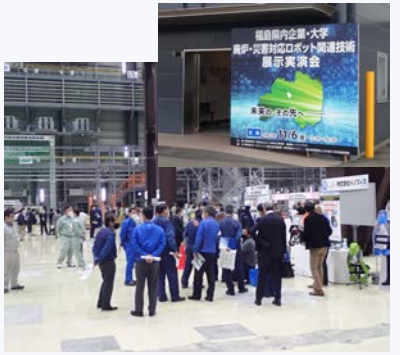


タカワ精密株式会社

PCV内部調査を想定した小型水中探査ロボット「ラドほたるⅡ」開発に伴う機能性試験

福島県廃炉・災害対応ロボット研究会

福島県内企業・大学 廃炉・災害対応ロボット
関連技術展示実演会

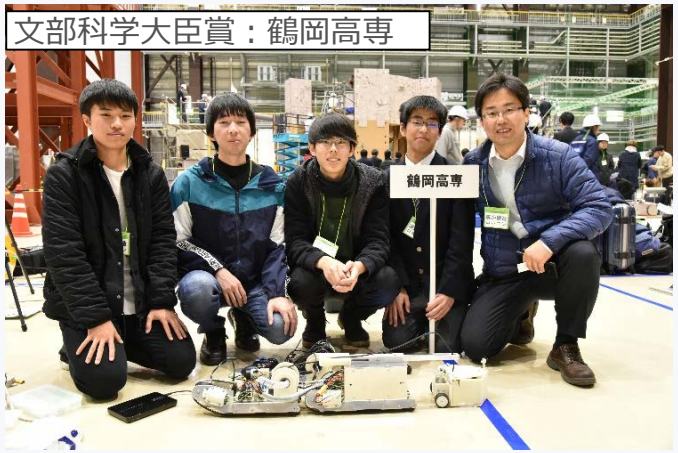


人材育成に係る利用事例①

第４回廃炉創造ロボコン (17校・18チーム参加)

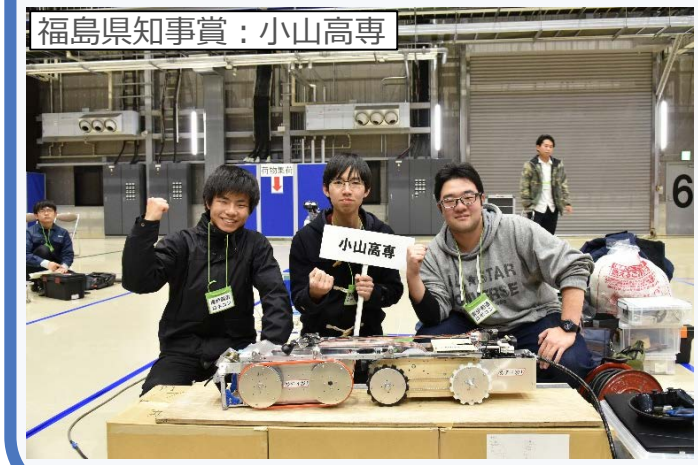
将来の福島第一原子力発電所廃炉を担う人材の育成を目指したロボット技術の競技会

文部科学大臣賞：鶴岡高専



原子力機構理事長賞：福島高専

福島県知事賞：小山高専



【参加校】

- 旭川高専
- 一関高専（２チーム）
- 鶴岡高専
- 福島高専
- 小山高専
- 茨城高専
- サレジオ高専
- 富山高専
- 鈴鹿高専
- 舞鶴高専
- 奈良高専
- 大阪府大高専
- 神戸市立高専
- 高知高専
- 呉高専
- 熊本高専
- マレーシア工科大学

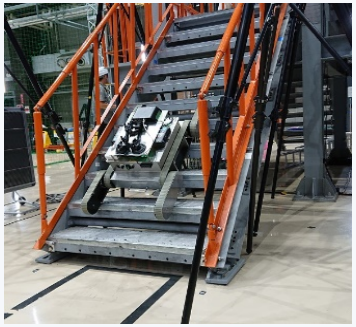
審査員特別賞：マレーシア工科大学

人材育成に係る利用事例②

教育機関による研究開発

東京工芸大学

レスキューロボットの階段走行性能の確認、LiDARによる物体計測とロボットの移動経路を用いたSLAMによる3次元地図作成用データ取得

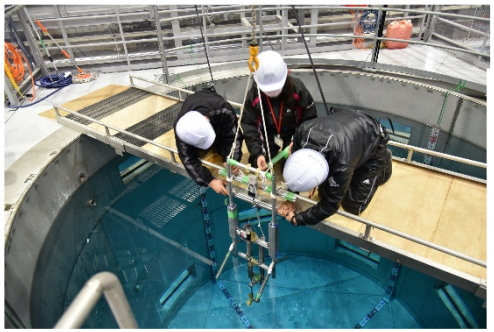


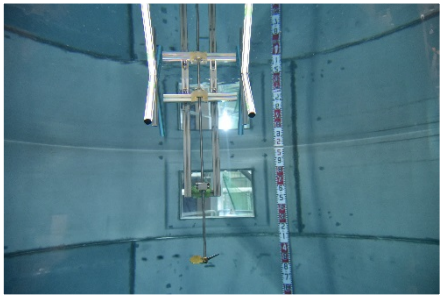
東京大学

慣性センサーにおける慣性情報（加速度、角速度)による位置推定の精度を検証するためにモーションキャプチャでの人間の移動（歩行、走行、這い歩き等)を計測

福島大学

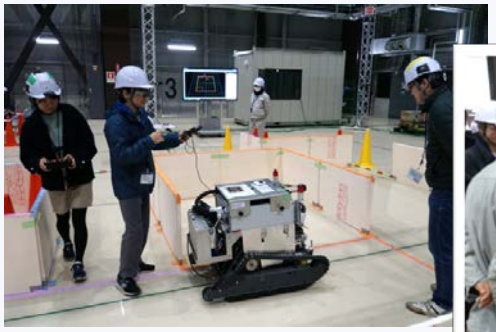
水中ロボットの推力発生装置に使用するスクリュースラスタの特性試験

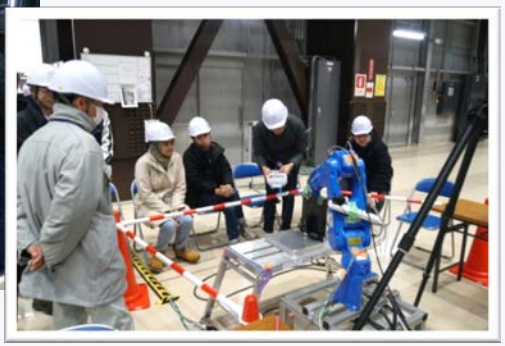




若狭湾エネルギー研究センター

廃止措置セミナーにおけるモーションキャプチャを用いた「ロボットレーザー除染機実習」と「ロボット軌道計画実習」



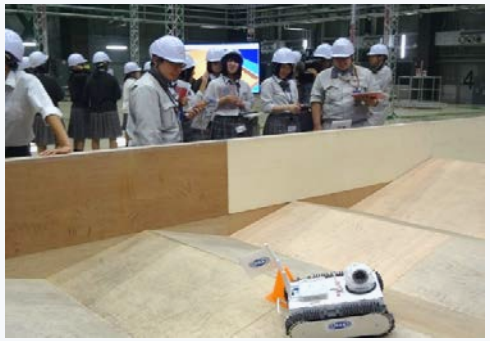


ＮＡＲＲＥＣにおける人材育成

○ ロボット操作実習プログラム

ロボット等の遠隔技術に係る人材育成の一環として2019年度よりロボット操作実習プログラムを開設
福島イノベーション・コースト構想推進機構と連携し、県内高校を中心とした人事育成に貢献

福島県立相馬高校



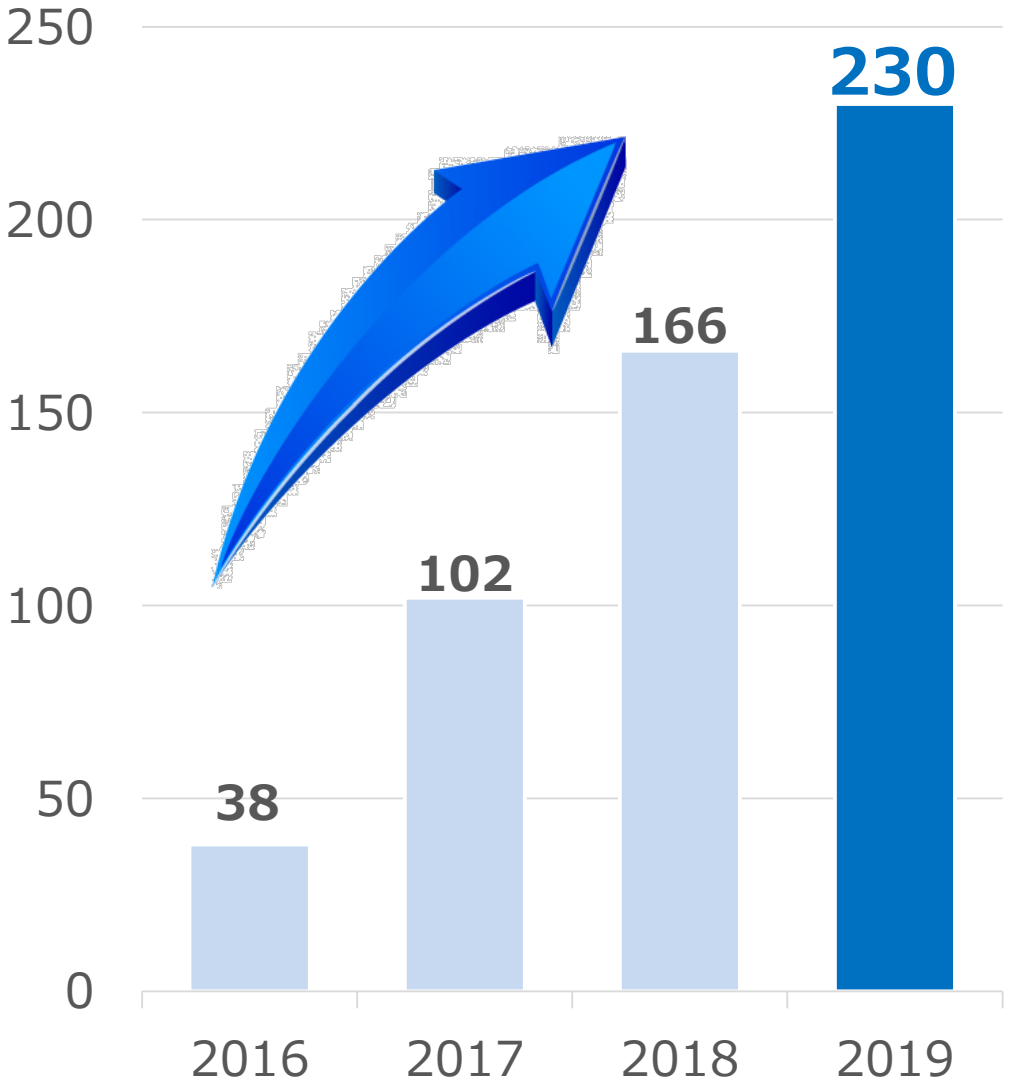
福島工業高等専門学校
(The GREEN Program)

福島県立小高産業技術高校

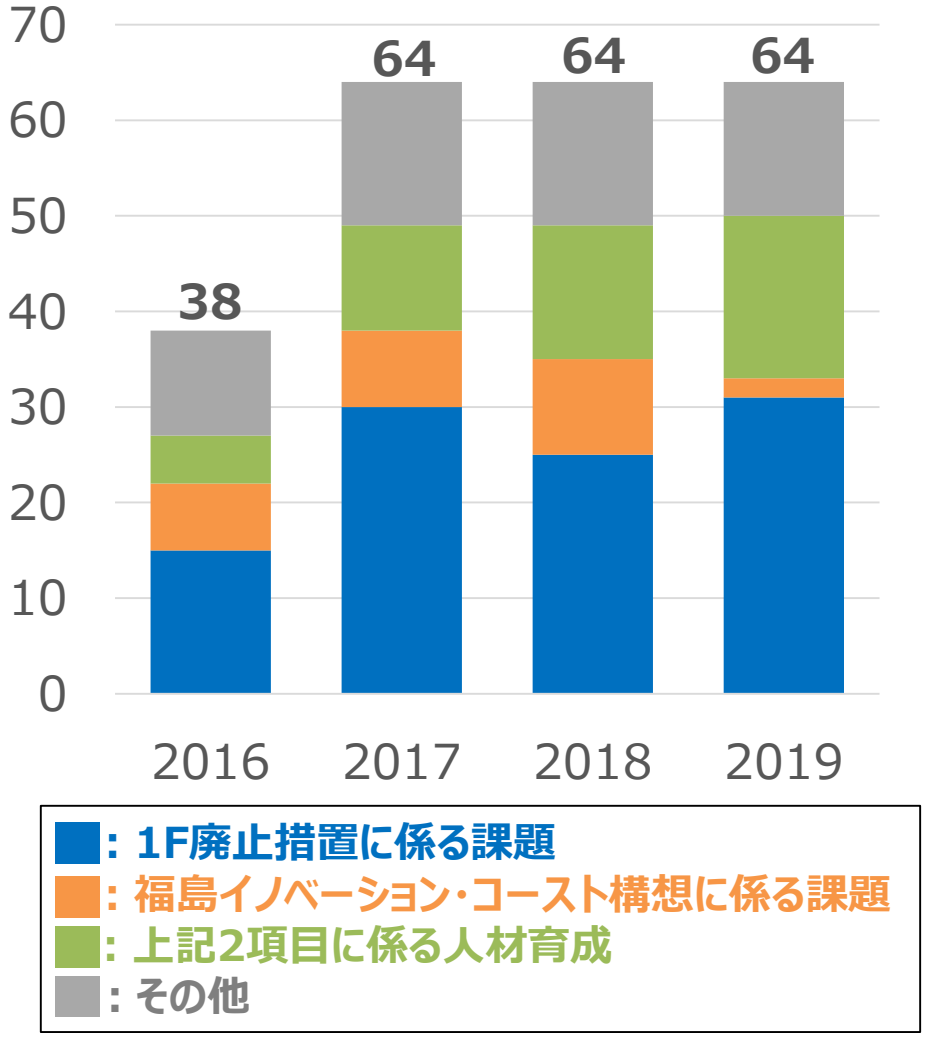
福島県立塙工業高校

施設利用実績

累積利用件数



年度毎の目的別利用件数



ＮＡＲＲＥＣにおける技術開発①

○　実証試験とシミュレータ・VRの連携

実証試験

ロボットの性能等を定量的に評価する試験法の開発

モックアップ階段走行試験

配管走行試験

両者の相互利用により
効率的なロボット開発

シミュレータ・VRの開発

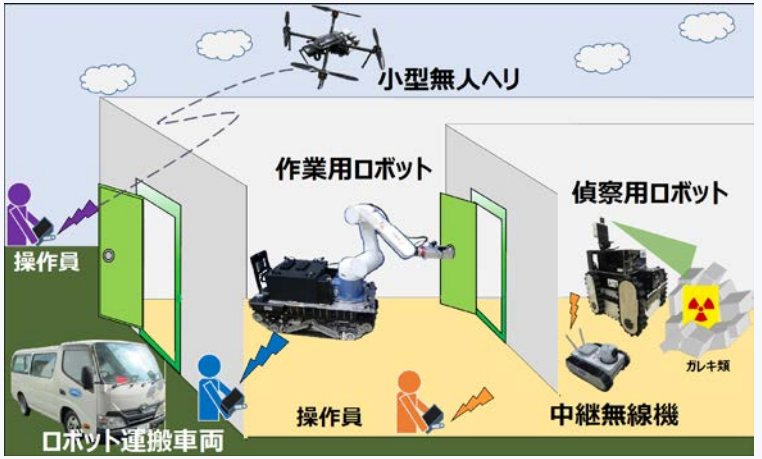
ロボット設計等の検証、操作訓練の高度化

ロボットシミュレータ

VRシステムによる３Ｄシミュレーション操縦訓練

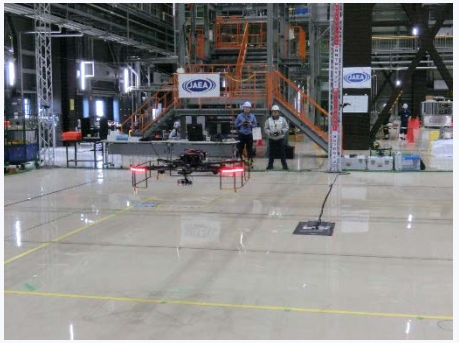
○　JAEA施設の原子力緊急事態のための遠隔機材の整備及び操作訓練

遠隔操作資機材による現場対応イメージ



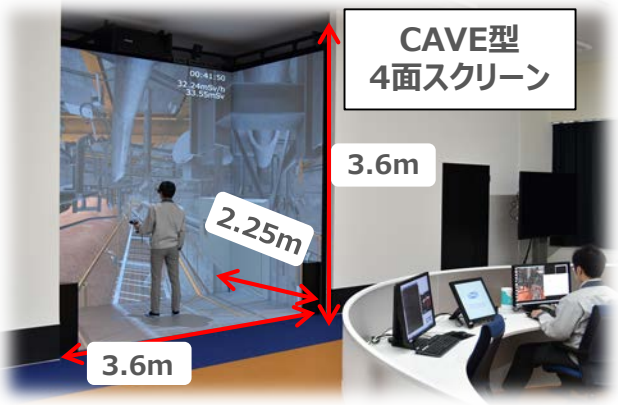
訓練の様子

作業用ロボット



小型無人ヘリ

○ VRシステムの開発



- ✓ VR技術を用いて、1F現場を疑似体験できるシステムを開発
- ✓ 作業者訓練、作業計画の検討・立案をおこなえる環境を提供
- ✓ 3Dデータ持ち込んで実寸大でスクリーンに投影することも可能
- ✓ 現在1F1~3号機の原子炉建屋のデータを順次整備中
- ✓ 1Fデータは利用者の研究室等、センター外で利用することも可能

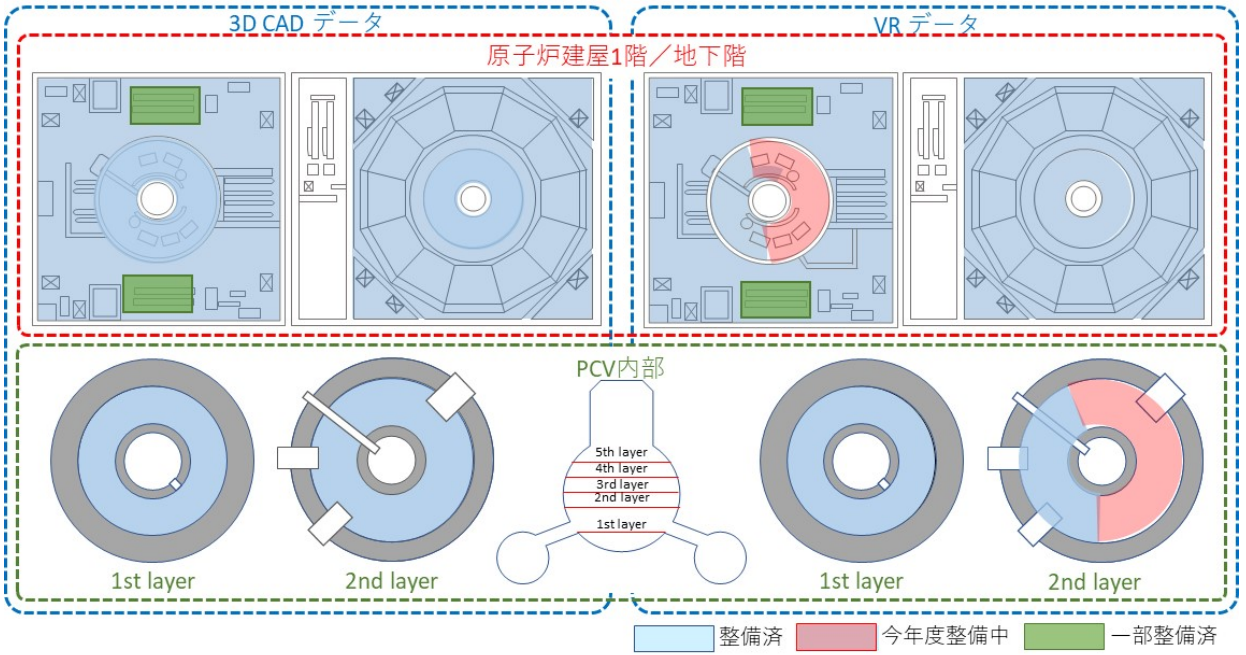
距離計測

照明設定

線量率分布・
積算線量表示

物体投入・
干渉箇所提示

2号機の原子炉建屋内の整備状況



ＮＡＲＲＥＣにおける技術開発③

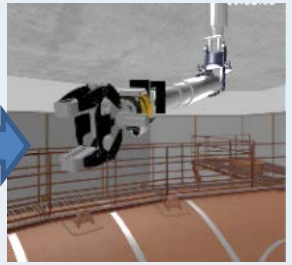
○ VR、シミュレータ、モーションキャプチャが連携した訓練機能の開発

IRIDが実施した「PCV下部漏えい箇所の補修・止水技術の実規模試験」におけるマニプレータ（FRM）の一連の作業工程が訓練可能な機能を開発

開発プロセス

基本機能の構築	⇨	精度アップ	⇨	検証・評価
・FRM設計段階の情報を用いてVRデータを整備 ・枢要な作業手順を模擬 ⇒ **基礎訓練の実施が可能となった**		・詳細設計情報と操作経験者からのヒヤリングをもとに精度アップ ・操作卓を実機と同等に模擬 ・FRM操作機能の追加等精度アップ ⇒ **幅広い訓練の実施が可能となった**		・モーションキャプチャ等を用いて実機の実測データを測定 ・VRシステムと実機の比較検証を実施 ・VRシステムの有効性評価を実施 ⇒ **実機の実測データを反映**

ヒヤリング結果



参考：実機操作卓

【シミュレータにより得られる効果】

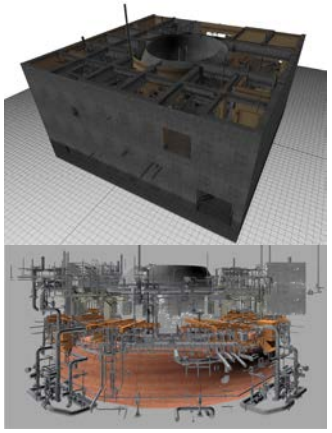
- 周辺機器の稼働が不要なため低コストに訓練可能
- 実機を破損させる恐れがない
- ＶＲシステム上にシミュレータを投影することで操作時の距離感等を効率的に習得可能

○ NARRECにおけるデジタル技術の１Ｆ廃止措置への展開

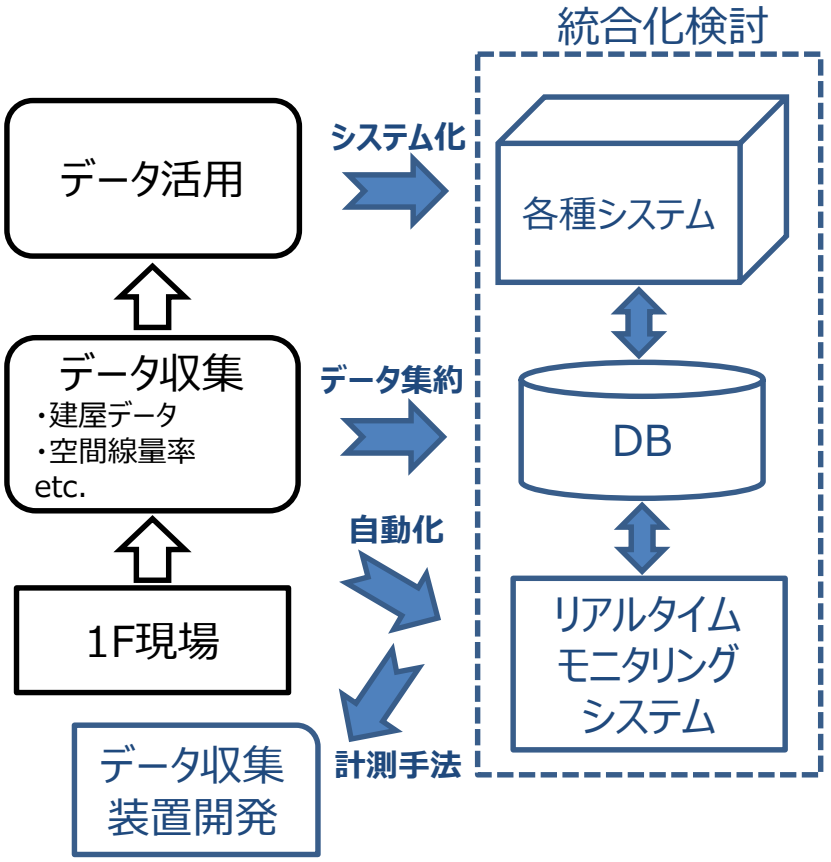
これまでNARRECで得られたＶＲ・シミュレーション等のデジタル技術に関する知見をもとに１Ｆ廃止措置の合理化・効率化のために廃炉作業のデジタル化開発を推進する。

1F現場
（フィジカル空間）

DT（デジタルツイン）の構築



ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ上の1F
（サイバー空間）



DTを活用した廃止措置の運用管理用管理

- ・遠隔機器等の開発、工法検討
- ・作業計画の立案
- ・作業員の被ばく管理
- ・作業員の機器操作訓練
- ・未臨界維持、環境放射能評価
- ・取り出した燃料デブリ・廃棄物の管理
- ・現場、機器等構造物の除染　等

まとめ

- NARRECは、2016年度4月より本格運用を開始し、２００件を超える利用に遠隔技術開発の実証フィールドとして貢献。
- これまでに原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試験等の大規模なモックアップ試験にも活用され、今後、2号機の燃料デブリの試験的取り出しモックアップ試験が予定されている。
- その他、1F廃止措置のみならず様々な遠隔技術の開発にも活用されている。
- 人材育成においては、大学の研究や高専機構が開催する廃炉創造ロボコンの場として活用されているほか、「ロボット操作実習プログラム」を開設し、県内高校を中心とした人材育成に貢献
- 今後は上記に加え、これまでのVR技術の知見や1F現場データの集約等より得られた知見をもとに１Ｆ廃止措置の合理化・効率化のために廃炉作業のデジタル化開発を推進する。

これらの活動を通して遠隔技術開発の中核拠点として、今後も１F廃止措置並びにふくしまの復興に貢献してまいります。