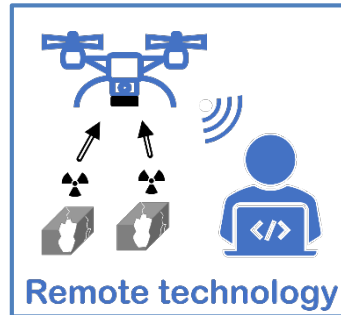




部門報告④

共通基盤技術の現場実装に係る研究開発



廃炉環境国際共同研究センター
遠隔技術ディビジョン
佐藤 優樹

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
------	------	------	------	------	------	------

▼ 大熊第1棟
運用開始

大熊第
2棟竣工

復興事業全体の
在り方見直し

取り出し規模の更なる拡大
(1/3号機)

2030年頃までの
望ましい姿

第3期の主な成果

- ◆ 放射線可視化ツールの開発
 - ◆ 放射線と材料に関する技術開発
 - ◆ CLADS国際研究棟、楢葉センターの竣工、大熊センターの一部竣工
 - ◆ 技術基盤マップの構築
 - ◆ 国際協力の推進
- 研究成果により、技術基盤構築と研究ハブ構築に寄与。
→ 今後、成果の現場実装に向け、橋渡しの仕組みが課題。

基礎基盤研究の成果が現場で活用され、1F廃炉、環境回復の安全性が向上していることが期待される。

- 福島第一原子力発電所内の放射性物質分布の可視化データを用いた安全管理
- トリチウムなどの極低レベル放射性物質の挙動可視化と情報発信
- 放射性物質分析技術の標準化による、安全確保
- 長期的な構造健全性や保管安全性に与える放射線影響
- 放射線関連データベースと、安全安心のための情報発信

演繹
成果と課題

俯瞰

の反映

第4期の
主要課題

①被ばく量の
低減

放射性物質の分布を可視化し、被ばく量の低減に寄与する。

②分析技術
高度化

放射性物質・核燃料物質の分析技術の高度化に寄与する。

③長期健全
性・安全性

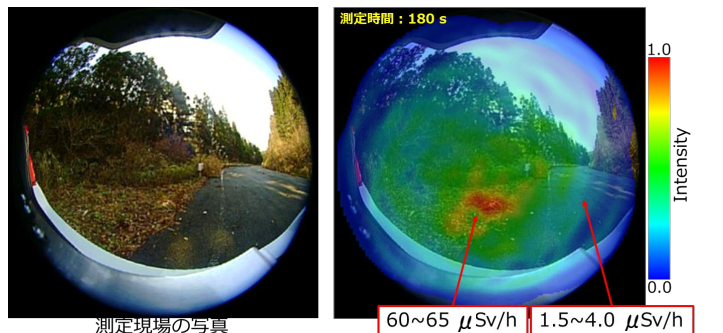
放射線と腐食・材料劣化の関係を明らかとし、長期健全性・安全性に寄与する。

④体制強化と
データベース

研究基盤となる仕組み、体制の強化。

放射性物質の分布を**可視化**して
被ばく量を**低減**

ガンマ線放出核種の可視化（外部被ばく）

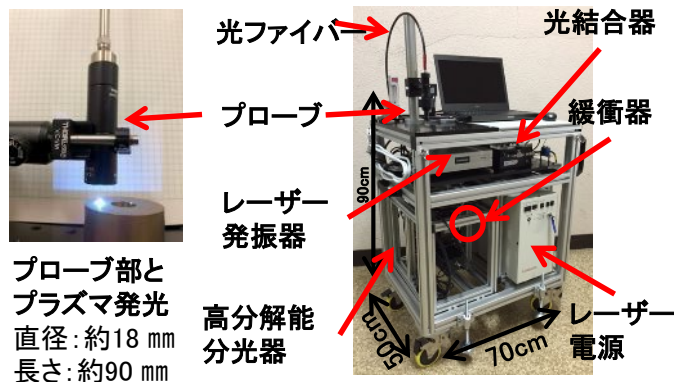


ホットスポットをイメージング可能！！
(汚染が周囲と比較して高い領域)

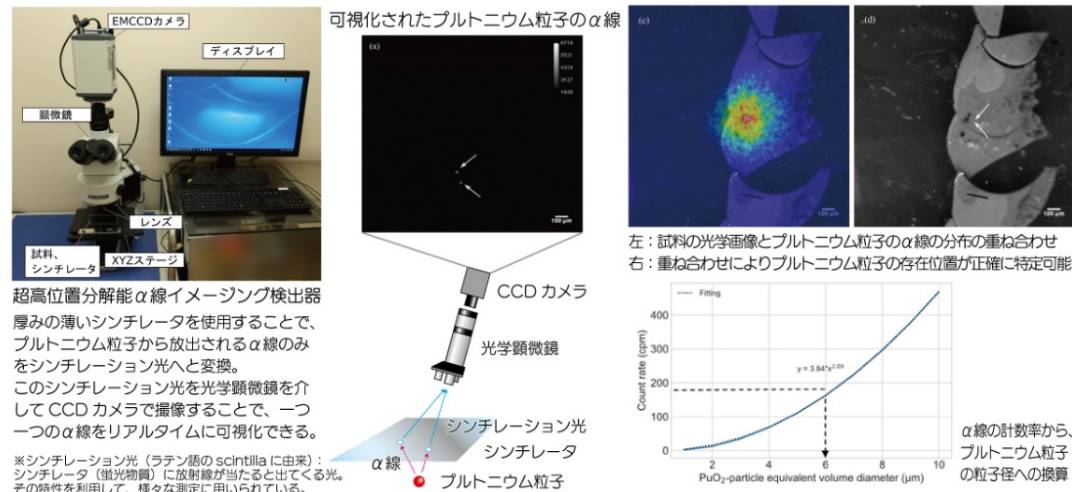
放射性物質・核燃料物質の 分析技術の高度化

レーザー光で元素組成を分析する技術

【可搬型LIBS装置】

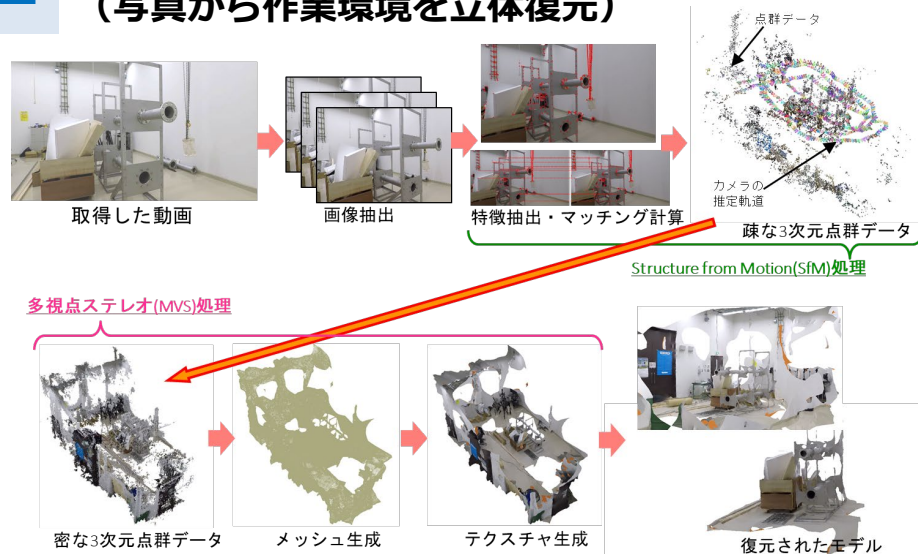


アルファ線放出核種の可視化（内部被ばく）



研究基盤

原子炉建屋内における空間構造や状態の把握に向けて (写真から作業環境を立体復元)



放射線は、
目に見えない

放射能汚染の
“見える化”

作業者が
危険箇所を把握

作業者の
被ばく低減

作業現場の
効果的な除染

社会的課題である“福島第一原発廃炉”を進めるために重要なこと

放射線計測・原子力 × 異分野技術

従来（サーベイメータ）

放射線が
あらゆる方向から飛来



測定器の位置
“点”で測定

測定時間の増加に伴う作業員の被ばく

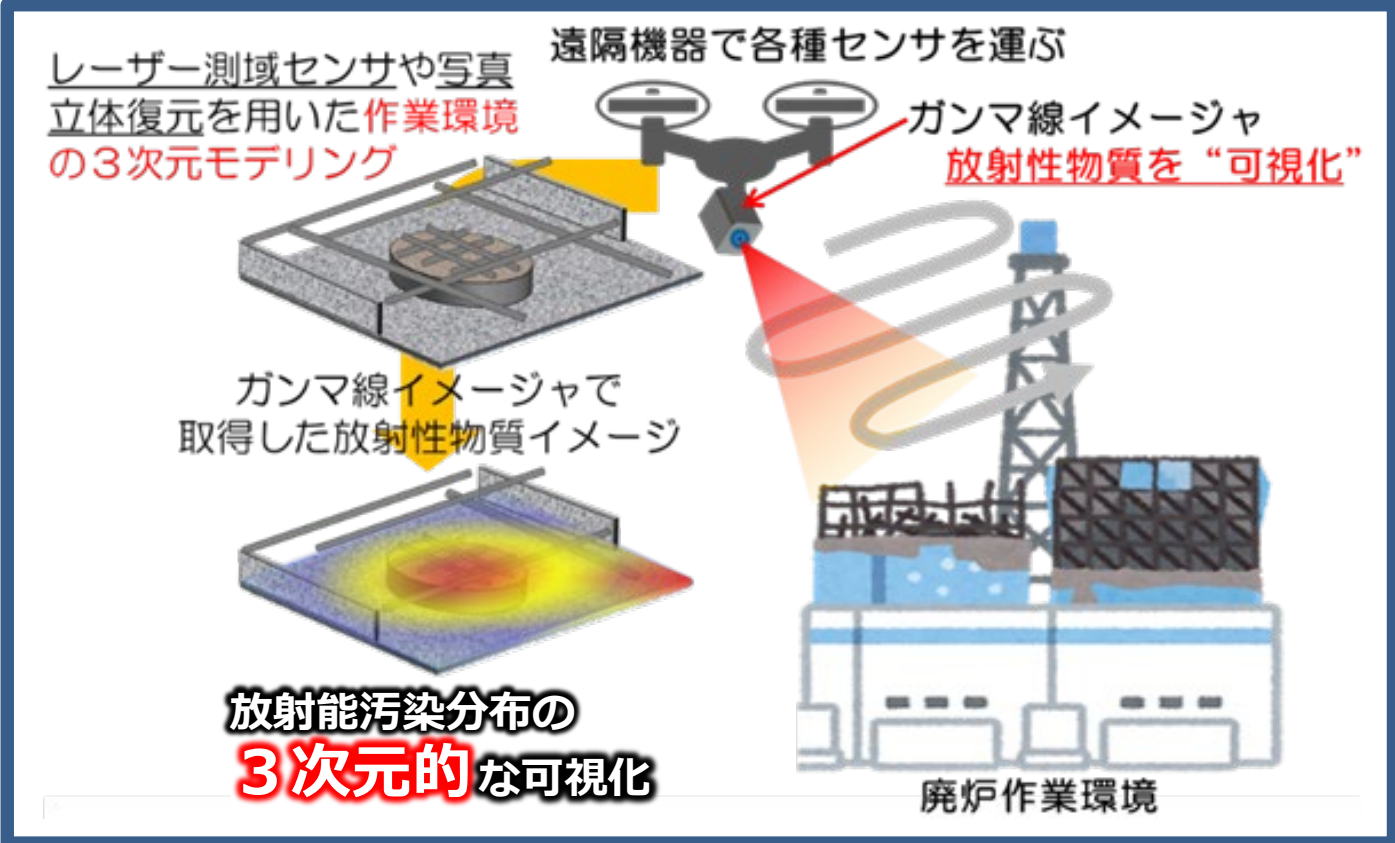
広範囲エリア測定時のホットスポットの見落とし

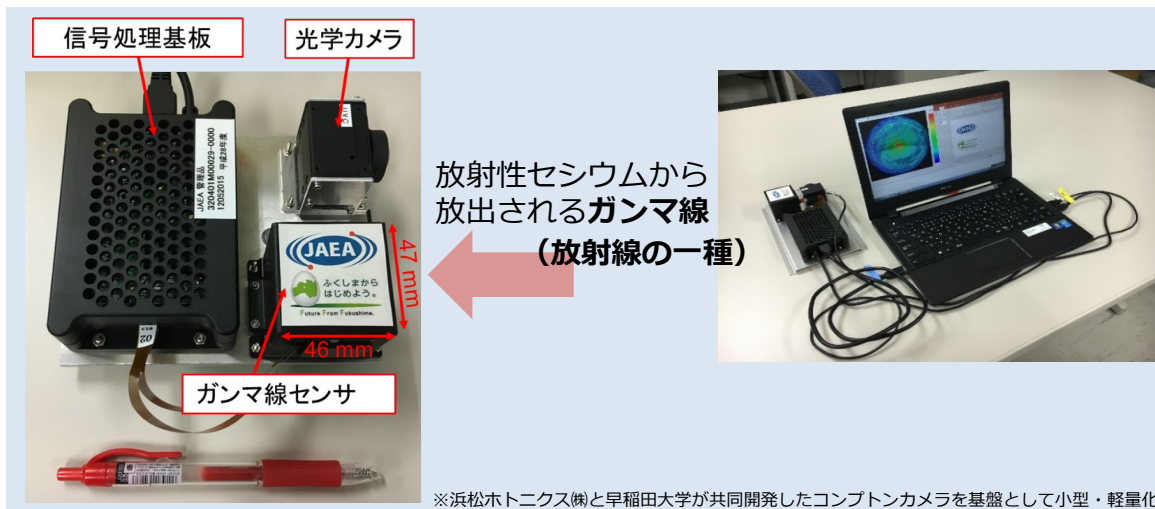
ガンマ線イメージャ

放射能汚染の分布を
可視化するカメラ



放射性物質の分布を
“面”的に捉える





- ・総重量：680 g※
(※1Fで使用する際は遮へい装備を施すため、その分の重量が加算される)
- ・給電：USBバスパワー
- ・ノートPC一台で動作

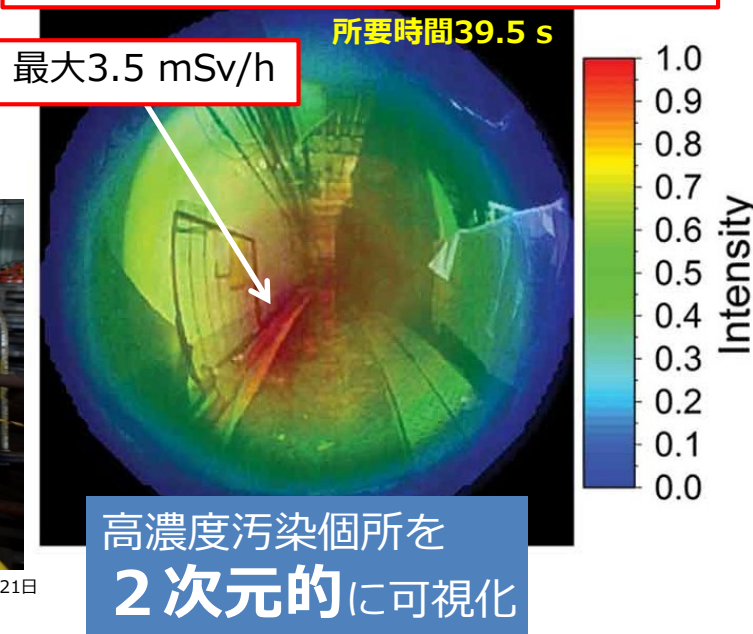
※ホットスポット周辺：0.4~0.5 mSv/h

1F3号機タービン建屋内部での実証試験

- タイベック、全面マスク、ゴム手…
- ⇒ 動きにくさ、視界の狭さ、作業の困難さについて、身をもって体験
- ⇒ 装置の優れた可搬性を活かして円滑な測定を可能とした



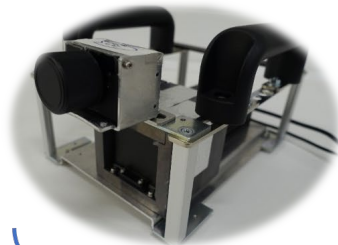
Y. Sato, et. al., Journal of Nuclear Science and Technology, 55巻, 965-970頁, 2018年5月21日



新システムを携帯したオペレータが
現場を移動スキャン

汚染箇所や空間線量率を可視化した
3次元マップ

コンプトンカメラ



サーベイメータ



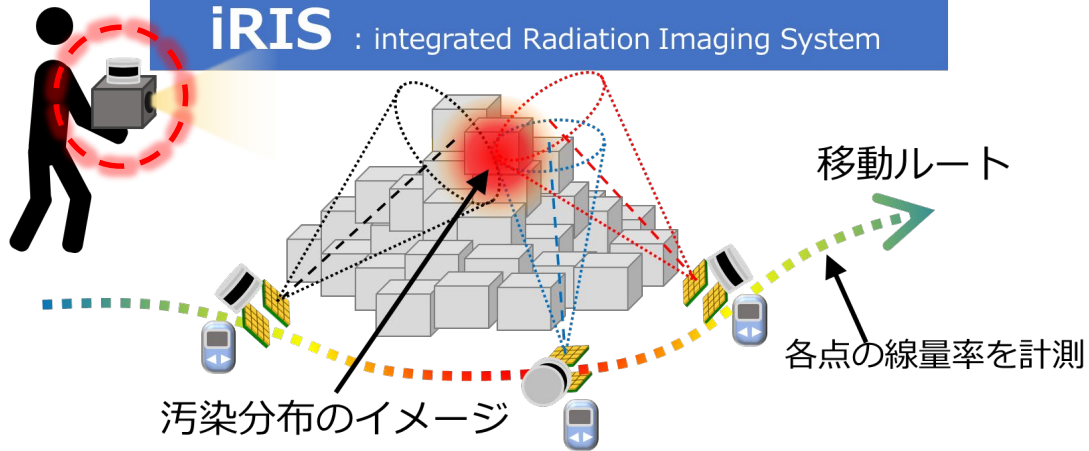
3次元測域センサ



+

+

統合型放射線イメージングシステム
iRIS : integrated Radiation Imaging System



測域センサ：自己位置・姿勢の推定および周辺環境の3次元地図生成

コンプトンカメラ：汚染分布のイメージを生成

サーベイメータ：歩行ルート上の線量率データを取得

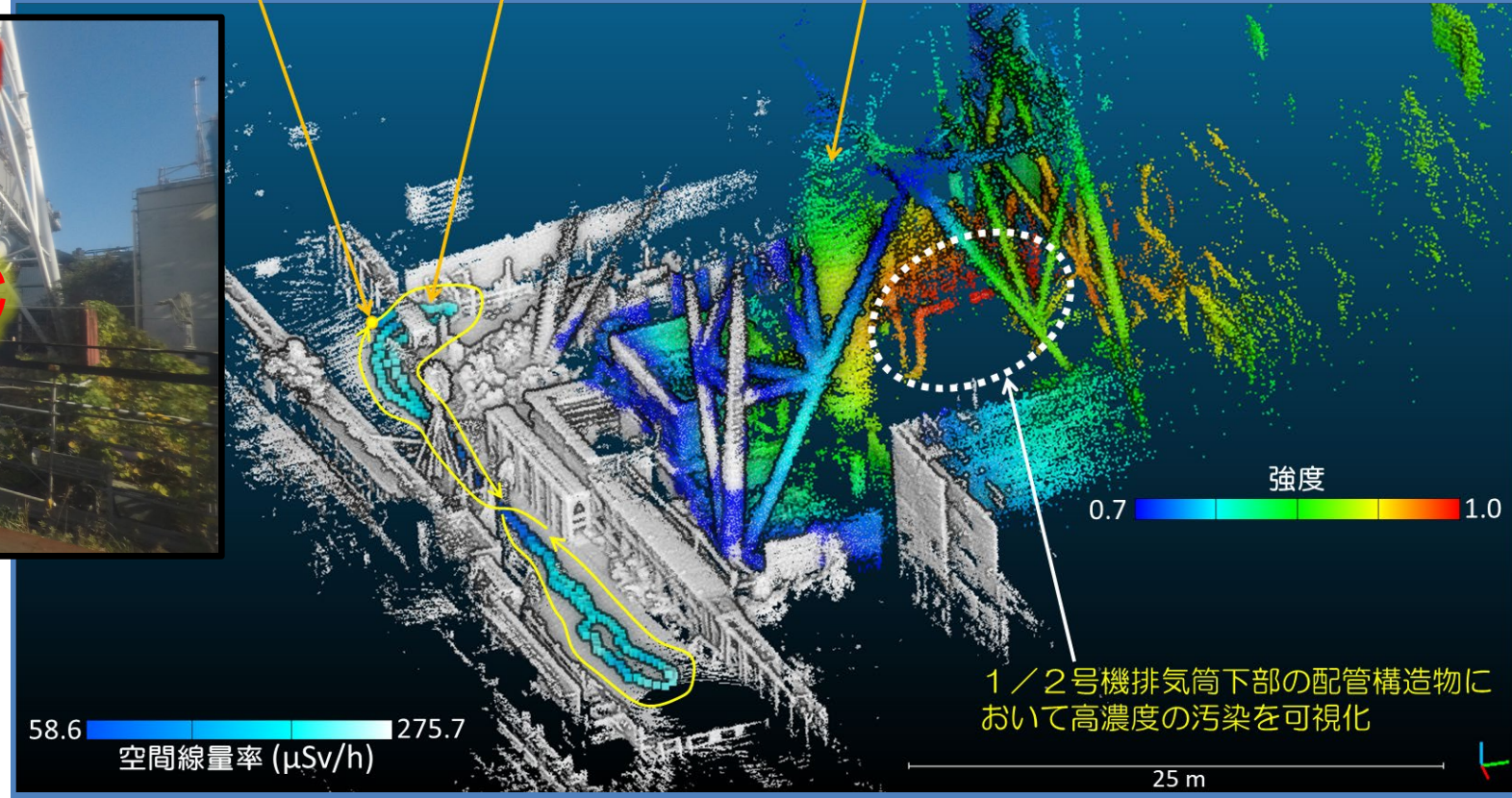
汚染箇所や空間線量率を可視化した 3 次元マップ

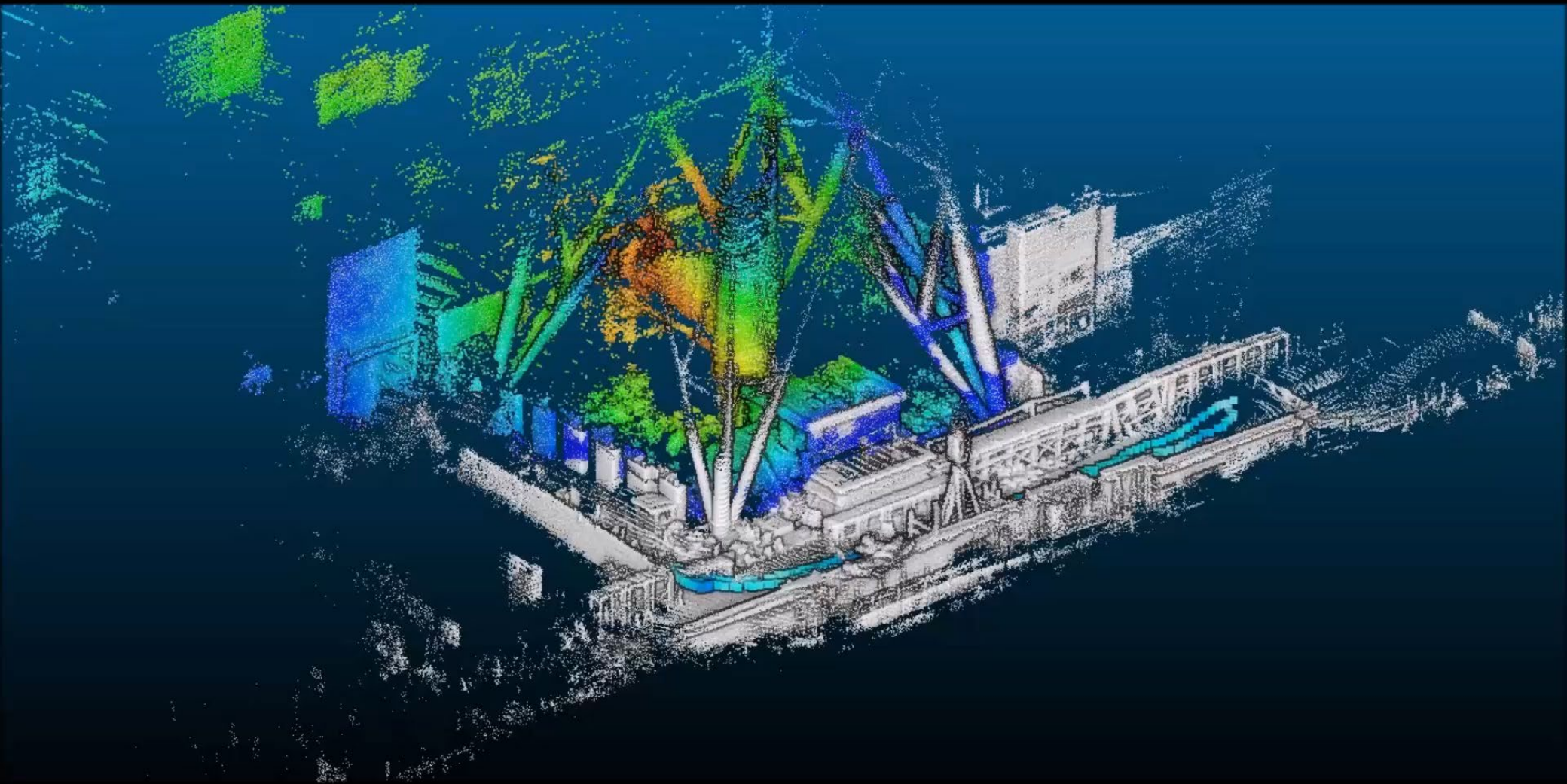
スタート&ゴール オペレータの歩行ルート 1 / 2号機排気筒



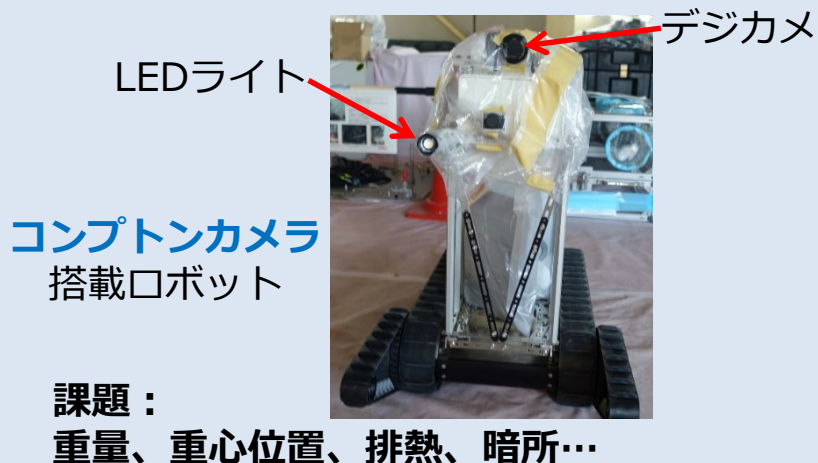
1F1/2号機排気筒

高濃度汚染が
報告されていた領域



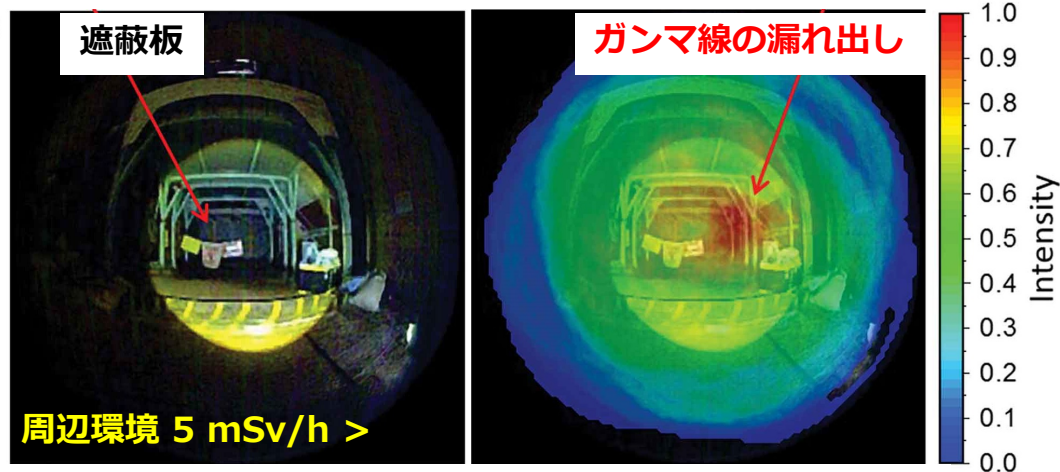


1F原子炉建屋内における実証例



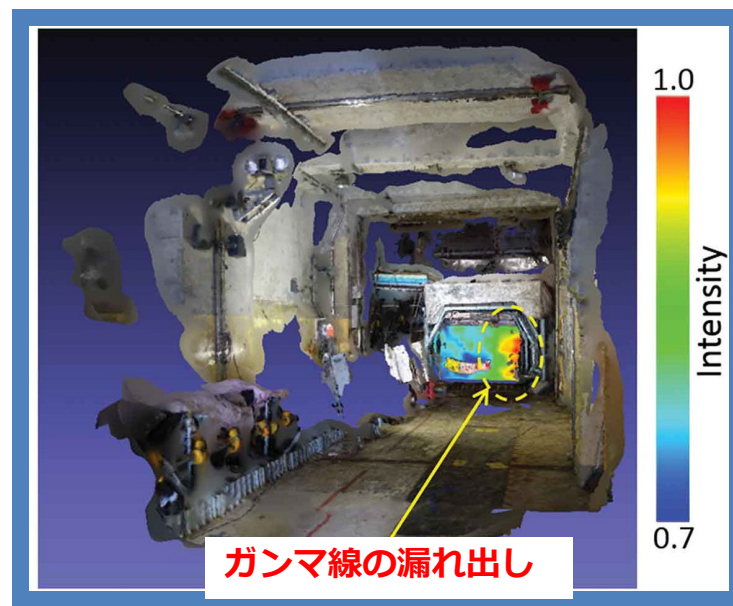
コンプトンカメラ+ロボット
⇒ 遠隔 2次元イメージング

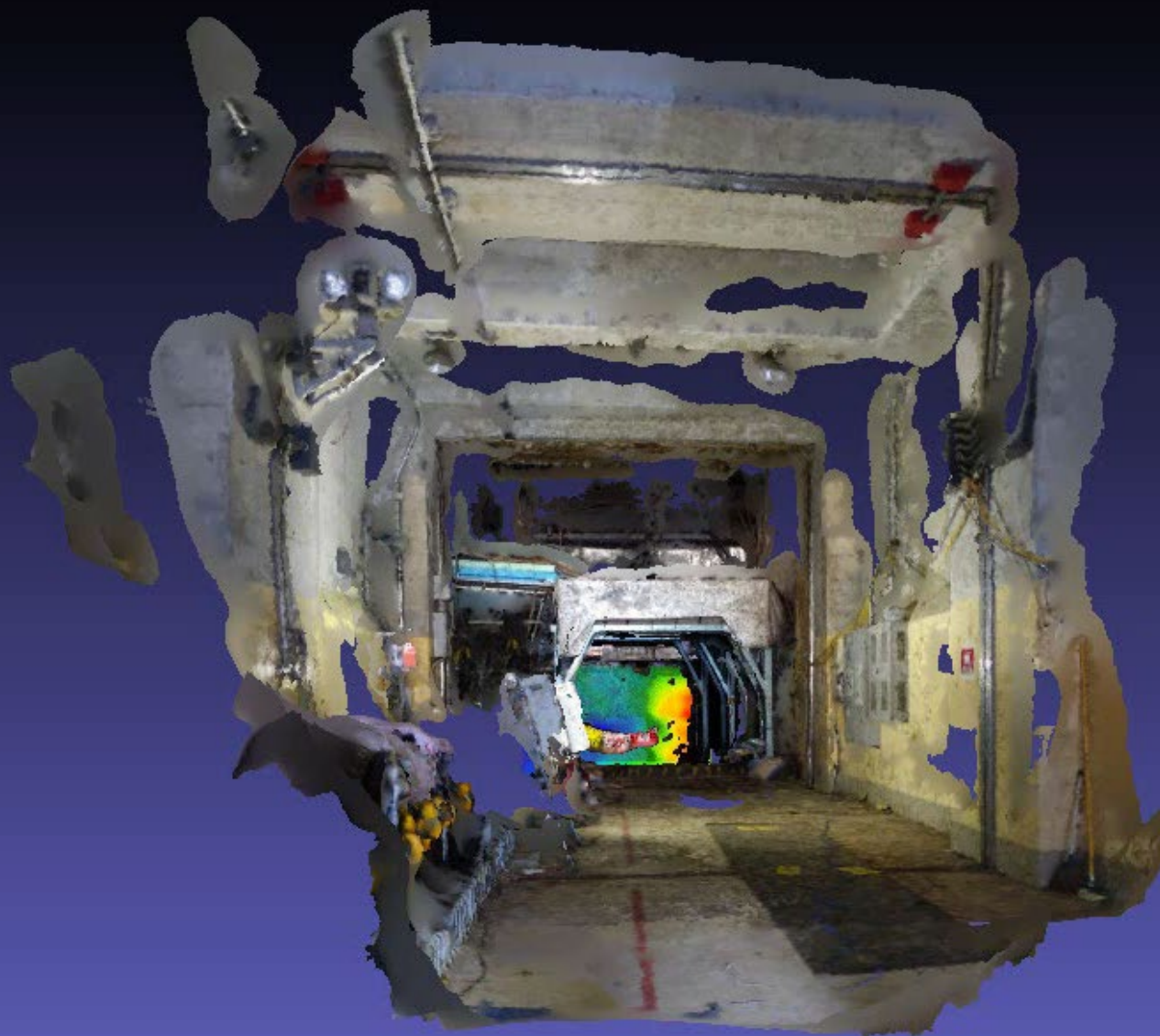
※ 1F1号機原子炉建屋 入口付近



コンプトンカメラ+ロボット
+ 環境認識技術 (写真立体復元)
⇒ 遠隔 3次元イメージング

ホットスポットを
遠隔にて 3次的 に可視化





福島イノベーション・コースト構想

福島イノベーション・コースト構想の実現に向けた重点的取組



大学研究/教育・人材育成 P11-13

① 浜通り地域等の高等学校

企業や高等教育機関等と連携した特色あるキャリア教育を展開。

- トップリーダー分野 磐城高校・相馬高校・原町高校
工業分野 平工業高校・相馬工業高校・川俣高校
農業分野 磐城農業高校・相馬農業高校

② 浜通り地域等で研究活動を行っている大学

- 東京大学(磐城町) ● 慶応義塾大学(田村市)
● 東北大学(磐城町) ● 早稲田大学(武蔵町)
● 近畿大学(川俣町) ほか県内外の高等教育機関



ふくしま大学磐城校(イメージ)



環境・リサイクル P10

太陽光パネルや石炭灰等の先進的なリサイクル技術開発等の取組を推進



福島エコリサイクル株式会社



農林水産 P8-9

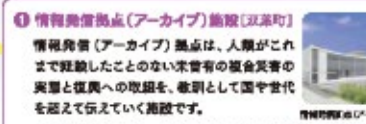
- ① (仮称)水産海洋研究センター(いわき市)
② (仮称)水産資源研究所(相馬市)
③ 浜地域産業再生研究センター(南相馬市)

農林水産分野の主な取組

- ① 先端技術等の導入による新しい農業の推進
② 県産品の新たな需要創出など



(仮称)水産海洋研究センター (仮称)水産資源研究所 浜地域産業再生研究センター



情報発信拠点(アーカイブ)施設(仮称)

① 情報発信拠点(アーカイブ)施設(仮称)
情報発信(アーカイブ)拠点は、人類がこれまで経験したことのない未曾有の複合災害の災害と復興への取組を、教訓として国や世代を超えて伝えていく施設です。
● 平成32年度のオープンを目指し、現在整備を進めています。

福島イノベーション・コースト構想とは

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の産業を回復するため、被災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です。農業、ロボット、エネルギー、農林水産等の分野におけるプロジェクトの連携を進めるとともに、産業集積や人材育成、交流人口の拡大に取り組んでいます。



炉研究 P2-3

- ① 複合燃料技術開発センター(相馬町)
② 炉内共同研究センター(宮田町)
③ 大規模分析・研究センター(大熊町)

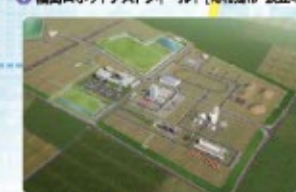


複合燃料技術開発センター 炉内共同研究センター 大規模分析・研究センター



ロボット P4-5

- ① 福島ロボットテストフィールド(南相馬市・浪江町)



福島ロボットテストフィールド



エネルギー P6-7

- ① 再エネ由来大型機水素製造実証拠点(浪江町)
② 天然ガス(LNG)火力発電(磐城町)
③ 高効率石炭火力発電(IGCC)(いわき市・成野町)
④ 浮体式洋上風力発電設備(双葉郡沖)
⑤ 循環バイオマス・エネルギー実証施設(南相馬市)
⑥ 沿岸部・阿武隈地域北用道電線による再エネ導入エリア

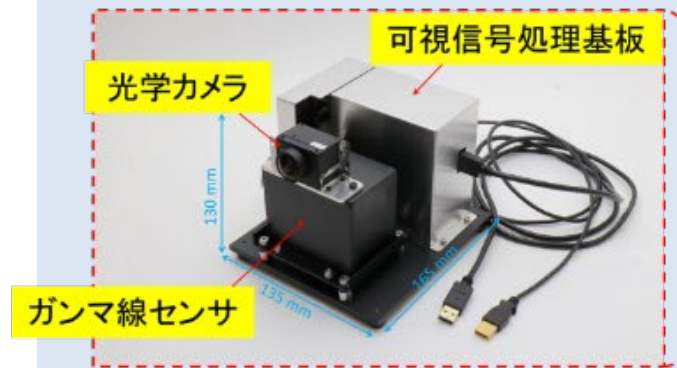


再エネ由来大型機水素製造実証拠点(イメージ) JAEA RESEARCH CENTER

出展:福島県Webページ

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list275-1006.html>

(株)千代田テクノルと共同開発



コンプトンカメラ
(千代田テクノル社製
“ガンマキャッチャー”と同仕様)



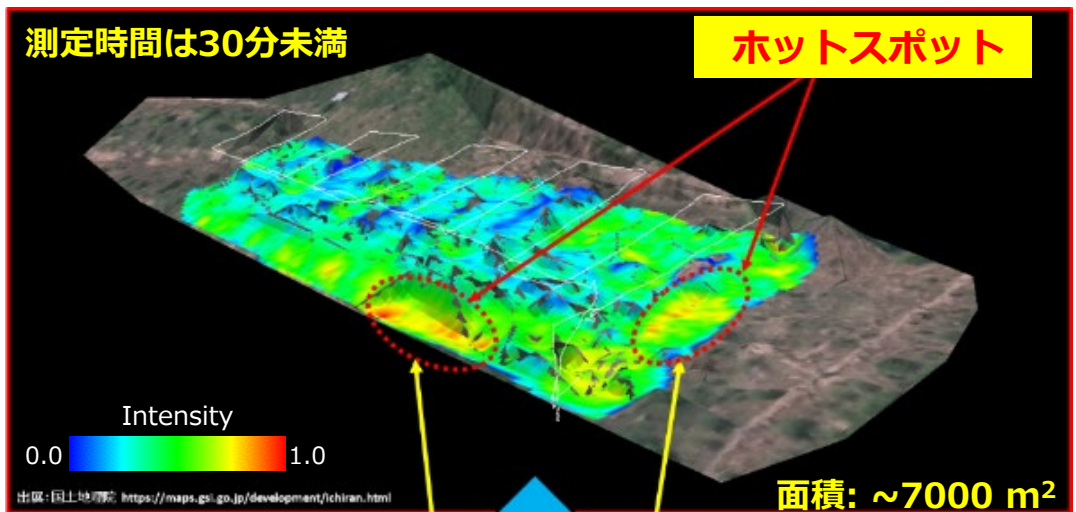
交換して使用

3次元地形モデル + 航空写真

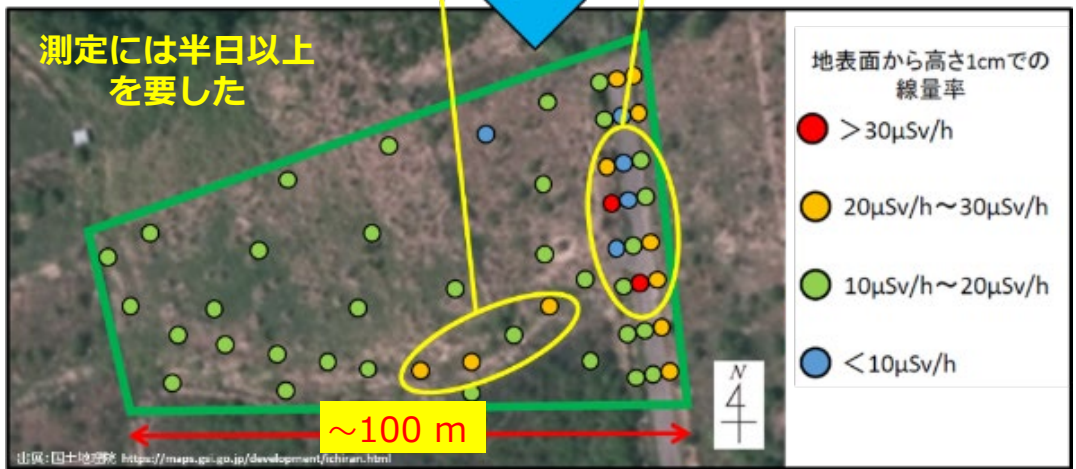


部品製作 & システム化において
南相馬市(株)栄製作所のサポート
⇒ 福島県浜通りから
先端技術を展開したい

航空写真は国土地理院の公開する地図を使用
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>



↓ 手持ちサーベイメータによる測定結果



上2つの航空写真は国土地理院の公開する地図を使用 <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
JAEA & Chiyoda Technol Corporation, press release, 9th May, 2019

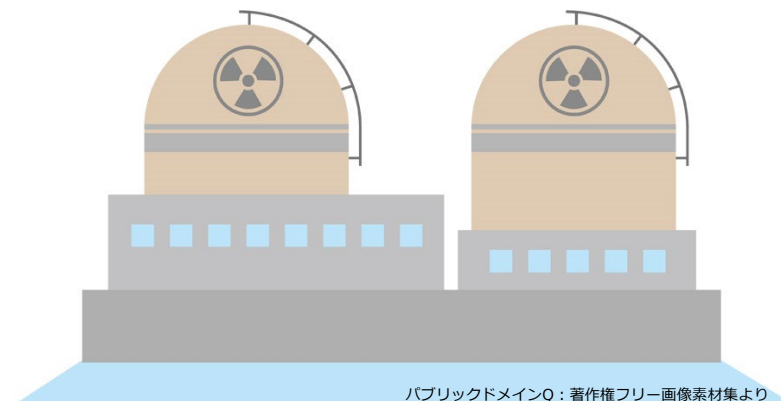


広範囲において**短時間**で**簡便**に
ホットスポットを可視化

※関連技術について特許出願中
※(株)千代田テクノル殿より製品化済

放射能汚染 “見える化”は
福島第一原子力発電所の廃炉・
福島県環境回復だけに利用するの？

No



パブリックドメインQ：著作権フリー画像素材集より

廃炉が決定した国内の原子力発電所※1

24基

※1 2021年9月28日時点

建設中：19か国
53基

世界33か国・地域
で運転中の原子力発電所※2
442基

運転年数30年以上
300基

運転年数40年以上
123基

世界の多くの原子力発電所は今後、廃炉を迎える
放射線 “見える化” 技術の継続・高度化が重要

※1 経済産業省 資源エネルギー庁「日本の原子力発電所の状況」より

※2 (一社) 日本原子力産業協会情報・コミュニケーション部「2020年の主な世界の原子力発電開発動向」2021年3月より

原子力発電所・放射線作業
だけに有益？

No

イベント会場での放射性核種を悪用した
テロ行為の監視

誰かが放射性核種を持ち込んだら...

放射線見える化 × セキュリティ



放射線計測 × 異分野技術によるイノベーション

ロボット

“地面”を走行して1F建屋内の汚染可視化



既製品ロボット

(移動可能範囲に制限あり)

“空”から帰還困難区域の汚染を可視化



福島県イノベーション・コースト構想補助事業
特許出願・(株)千代田テクノルより製品化済



放射線計測 × 異分野技術
イノベーション

(国研) 日本原子力研究開発機構
にて基盤技術 iRIS を開発・
プロジェクトマネジメント

VR

1F作業を
オフィスでトレーニング



クモ型ロボットによる
移動可能範囲の拡大

(狭隘部、階段等)

(株)シマノにて開発

ニューノーマルにおける
お茶の間観光に応用

渋谷駅付近を
仮想空間に投影



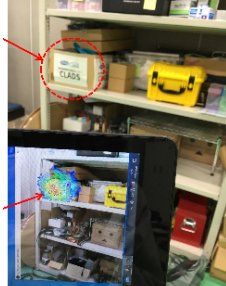
【渋谷駅周辺750m四方 3Dデータ】、

©【PASCO CORPORATION】、【表示4.0 国際】ライセンス
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> を改変して作成

AR

現実空間に
汚染源を可視化

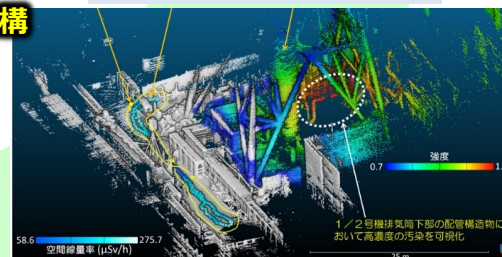
放射線源が
入った箱



線源イメージ
をAR表示

大規模イベント等の
核セキュリティ分野へ波及

マッピング技術



(株)ヴィジブルインフォメーションセンター
よりソフトウェア製品化 (令和3年内予定)

世界の廃炉現場へ展開

放射線環境のデジタルツイン構築

都市デジタルツインなどの防災ツールと統合

放射性廃棄物管理、燃料デブリ安全に係る被ばくリスク低減、長期安全への寄与

放射線作業の効率化

放射線作業計画の立案、除染シミュレーション、被ばく線量シミュレーション

デジタルツインを基本概念とした3Dマッピング (AR/VR)

汚染マップ、線源マップ、デブリ・廃棄物マップ

波及効果

世界の原子力施設の廃炉に貢献、核セキュリティ分野への貢献、etc...

安定的効果的な遠隔作業

遠隔機器操作支援、格納容器内センサデリバリー、燃料デブリ搬送

共通基盤技術

放射線計測技術・(可視化(3D))システム

γ線可視化と3D測域センサ等の統合(iRIS)、汚染分布評価、高線量率イメージングセンサ

デジタルトランスフォーメーション(DX)を見据えたデジタル化の推進

放射線場の再現技術の開発、遠隔操作支援技術の開発、3D可視化技術の開発

燃料デブリの簡易分析技術 廃棄物の簡易分析技術 遠隔簡易分析技術の高度化

レーザーを用いた元素分析(LIBS)、同位体分析(共鳴分光)、レーザー分析の高度化及び標準化
民間への技術移転・供給

ダスト計測

αダストの可視化、粒子径の評価、天然核種との識別、内部被ばく線量評価の高度化

遠隔操作支援技術・システム

遠隔空間認識支援情報操作システム、遠隔操作に係る情報提示機能・インターフェース、ロボット自動制御機能を有する操作システム

ご清聴ありがとうございました。

謝辞

本成果を得るにあたり、ご協力いただいた皆様に深くお礼申し上げます。

- ◆ V.I.C.の根本誠氏、峯本浩二郎氏には、放射能汚染可視化ソフトウェアの開発においてご協力いただきました。
- ◆ コンプトンカメラの小型・軽量化に際し浜松ホトニクス株式会社の中村重幸氏、平柳通人氏、早稲田大学の片岡淳教授ならびに岸本彩氏にご協力いただきました。
- ◆ コンプトンカメラ搭載ドローンシステムの共同開発において、千代田テクノルの小澤慎吾氏にご協力いただきました。
- ◆ 栄製作所の鈴木力社長には、当該システムの部品加工や装置のシステム化の面でご協力いただきました。
- ◆ (株)シマノの嶋野寛之社長には、ロボットの製作ならびに運用方法についてご助言をいただきました。
- ◆ 1Fにおける実証試験では東京電力HDの宇津木弥氏、佐藤航氏、大浦正利氏にご協力いただきました。
- ◆ 最後に、iRISの共同発案者である福島大学の鳥居建男教授および、多くの試験にご同行いただいた原子力機構の寺阪祐太氏に御礼申し上げます。
- ◆ 本稿には、地域復興実用化開発等促進事業費補助金採択課題「無人飛行体をプラットフォームとする放射線分布の 3D 可視化技術の開発」の成果が含まれます。

④ 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発

ー 放射能汚染を見える化する新システム“iRIS” ー

廃炉環境国際共同研究センター 遠隔技術 Div.
放射線システム開発Gr. 佐藤 優樹

(1) はじめに

1Fの事故から10年半の歳月が経過しましたが、1F建屋内には作業者の立ち入りや長時間作業が困難な高線量率エリアが残されているほか、帰還困難区域には周囲に比べて局所的に線量率が高いホットスポットが残されたままのエリアが存在します。これらの作業現場において、放射能汚染の分布やホットスポットの位置を把握することは、作業者の被ばく低減や作業計画の立案を進めるうえで極めて重要です。

このような背景を踏まえて原子力機構のCLADSに勤務する著者は、作業環境の放射能汚染分布を3次元的に見える化する統合型放射線イメージングシステム [iRIS (アイリス): integrated Radiation Imaging System] を提唱し、その実証を進めています。

(2) iRIS 及びその関連技術の製品化

iRISは、放射性物質見える化カメラであるガンマ線イメージャをはじめとした放射線測定器、環境認識デバイス、ロボット並びにxR技術等、複数のセンサ・機器・可視化技術を統合することにより、遠隔にて放射能汚染の分布を3次元的に測定し、把握する概念です。

これまで、ガンマ線イメージャの一種であるコンプトンカメラとレーザを利用したSLAM (自己位置推定と環境地図作成の同時実行) 機器を組み合わせ、移動しながら一度に作業環境の汚染分布をスキャンできるシステムを開発しました。実証試験は東京電力の協力のもと、2020年11月に1Fサイト内1/2号機の排気筒付近で実施しました。当該排気筒の下部は線量率が高く、作業者の長時間の滞在が難しいエリアです。コンプトンカメラを用いた従来の定点測定 (汚染の2元分布測定) では、高濃度汚染箇所の特定のためには複数点から対象エリアを測定せねばならず、コンプトンカメラの設置や移動、測定を繰り返す必要がありました。一方で新システムでは、排気筒下部に進入することなく比較的線量率の低い通路を歩行移動しながら連続的に測定を実施することにより、遠隔にて、わずか5分未満で測定できました。

さらに、コンプトンカメラ、SLAM機器及びサーベイメータの複数のセンサ情報を入力データとし、数回のボタン操作で3次元汚染分布を描画できる専用ソフトウェア [COMRIS (コムリス): Compton camera for Radiation Imaging System] を新たに開発しました。このソフトウェアを用いて、SLAM機器で取得した作業現場の3次元モデルに、コンプトンカメラで取得した汚染イメージを赤く投影することによって、排気筒下部の配管に高濃度汚染箇所を可視化した3次元マップを描画しました (図1)。

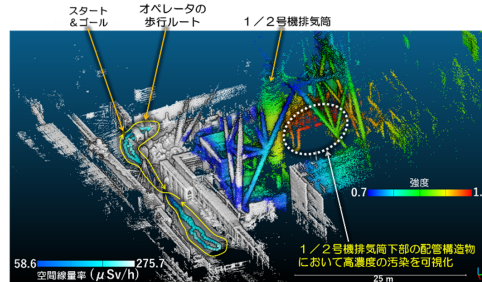


図1 1F 1/2号機排気筒付近における空間線量率と高濃度汚染箇所を可視化した3次元マップ。

オペレータの歩行ルート上の線量率と、コンプトンカメラで可視化した高濃度汚染箇所をカラー表示しました。(Y.Sato and Y. Terasaka, J Nucl Sci Technol. in press,

同時に、サーベイメータで取得したオペレータの移動ルート上の線量率を3次元マップ上に表示可能です。このCOMRISについては、2021年内に㈱ヴィジブルインフォメーションセンター (V.I.C.) から販売開始予定です。また、3次元マップはパソコンやタブレットを用いて任意の視点から観察することができ、ホットスポットが存在するエリアや空間線量率の状況を俯瞰できます。さらに、市販の仮想現実 (VR) ゴーグルを用いることにより、仮想空間に再現した廃炉環境を汚染分布とともに体感することが可能となり、作業者の事前トレーニングへの活用利用できます。

現在、仮想空間に再構成した1F作業現場について、市販のVRゴーグルを用いて体験可能とするソフトウェアを開発中であり、これについても2022年中に製品化・販売開始を予定しています。

加えて、福島県イノベーション・コースト構想に基づく補助事業である地域復興実用化開発等促進事業費補助金事業において、㈱千代田テクノロと共同でコンプトンカメラとドローンを組み合わせた遠隔放射線可視化システムを開発しました。実証試験を実施した福島県帰還困難区域内の約7,000 m²の広範囲エリアは、草木の手入れがされておらず足元も悪かったため、従来のサーベイメータを用いたホットスポット探索のためのデータ取得には半日以上を要しました。一方で本システムを用いることにより、上空から30分未満という短時間でデータ取得を完了できました。上空から遠隔での測定が可能であることから、作業者の被ばくや怪我などの安全に対するリスクを低減することにも有効です。

本システムの開発では、南相馬市の地元企業である㈱栄製作所に部品加工や装置のシステム化の面でご協力頂きました。本技術開発を基盤として、㈱千代田テクノロが販売するコンプトンカメラ (ガンマキャッチャー) をドローンに搭載したシステムが同社にて製品化されました。

さらに原子力機構の成果展開事業において、㈱シマノと共同で、クモ型ロボットとガンマ線イメージャを組み合わせたシステムの開発を進めています。建屋内に存在する配管を潜り抜ける、階段を昇るといった、従来のロボットではアクセスが困難であったエリアの調査を可能とすることを目的としており、こちらは2023年の販売開始を目指しています。

上述のようにiRISの開発では、1F廃炉や福島県の環境回復という社会的課題の解決を目指して、原子力機構を中心に中小企業が連携し、様々な分野 (原子力・放射線計測・データ可視化・ロボティクス・関連技術の販売戦略) を融合する体制を構築し、オープンイノベーションの考えのもと、課題解決に取り組んでいます (図2)。

(3) 今後の取り組み

コンプトンカメラを基盤としたシステムについて、遮へい構造や画像再構成手法を改良することにより、1F原子炉建屋内部における高線量率環境でのホットスポット探索を実施するとともに、1F作業現場への本格導入を目指します。加えて、1F廃炉への貢献だけでなく、世界の原子炉が今後直面していく廃止措置において、本システムへの需要が高まると考えられます。さらに昨今、都

市構造をデジタル空間に再現し、その中で防災やインフラ整備のシミュレーションを実施する取り組み、いわゆるデジタルツインの利用が盛んに進められています。本技術は放射線作業環境のデジタルツイン構築を見据えたものであり、これが実現すれば、サイバー空間上において作業者の被ばく低減の検討や作業計画の策定実施が可能となることが期待されます。iRISの開発を通して、放射線環境における作業者の安全・安心を担保したいと考えています。

謝辞

本成果を得るにあたり、コンプトンカメラの小型・軽量化に際しては、浜松ホトニクス㈱の中村重幸氏、平柳通人氏、早稲田大学の片岡淳教授並びに岸本彩氏に、コンプトンカメラ搭載ドローンシステムの共同開発においては、㈱千代田テクノロの小澤慎吾氏にご協力頂きました。栄製作所の鈴木力社長には、当該システムの部品加工や装置のシステム化の面で、またV.I.C.の根本誠氏、峯本浩二郎氏には、COMRISの開発においてご協力頂きました。㈱シマノの嶋野寛之社長には、ロボットの製作並びに運用方法についてご助言頂き、1Fにおける実証試験では東京電力の佐藤航氏、大浦正利氏にご協力頂きました。最後に、iRISの共同発案者である福島大学の鳥居建男教授及び、多くの試験にご同行頂いた原子力機構の寺阪祐太氏に御礼申し上げます。本稿には、地域復興実用化開発等促進事業費補助金採択課題「無人飛行体をプラットフォームとする放射線分布の3D可視化技術の開発」の成果が含まれます。

放射線計測 × 異分野技術によるイノベーション



図2 放射線計測と異分野技術の融合からなるiRIS関連技術の展開を示した図

1Fや帰還困難区域の放射能汚染の測定だけでなく、今後廃止措置がなされる原子力発電所におけるモニタリングや、放射性物質を用いたテロ行為等の監視といった核セキュリティ分野への応用が考えられます。また、VRやAR技術は原子力以外の分野への波及効果が期待できるものであり、さらには放射線作業環境のデジタルツイン構築への発展が期待できます。