



福島第一原子力発電所における 放射能汚染分布の測定技術

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
廃炉環境国際共同研究センター
佐藤優樹

福島第一原子力発電所（1F） 建屋内外で廃炉作業が進行中

放射能汚染は、
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

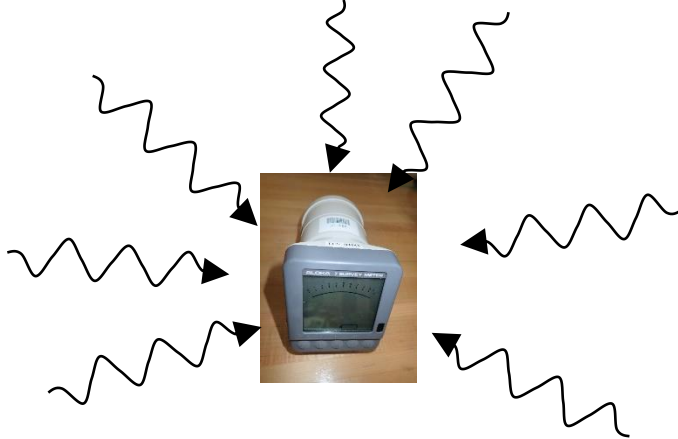
作業現場の
効果的な除染

“ガンマ線”放出核種

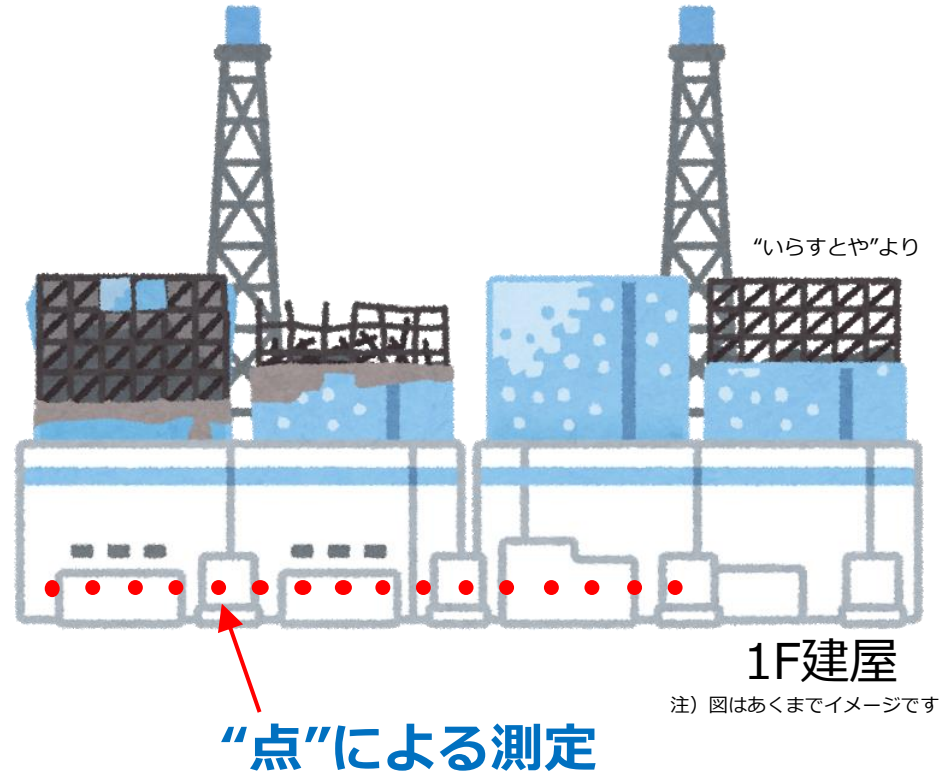
作業環境が放射性物質（**主として放射性セシウム**）で汚染されている

従来の測定手法
サーベイメータ

ガンマ線が
あらゆる方向から飛来



測定器の位置**“点”**で測定



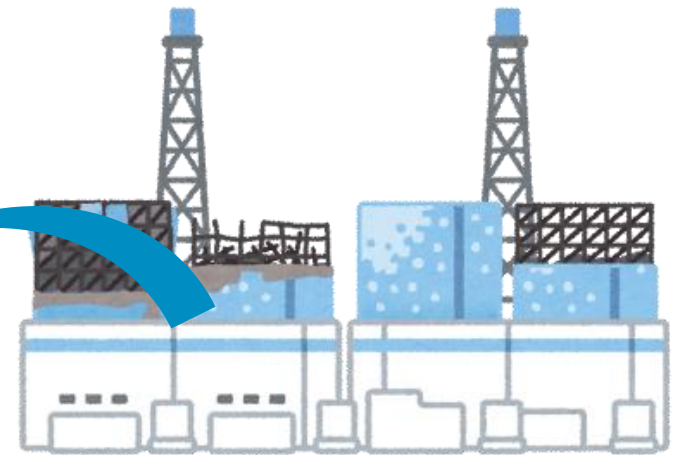
注) 図はあくまでイメージです

懸念事項

- ・ 広範囲エリア測定時の**ホットスポットの見落とし**
- ・ 測定時間の増加に伴う**作業員の被ばく**
- ・ **作業員が侵入できない**高線量率環境の存在

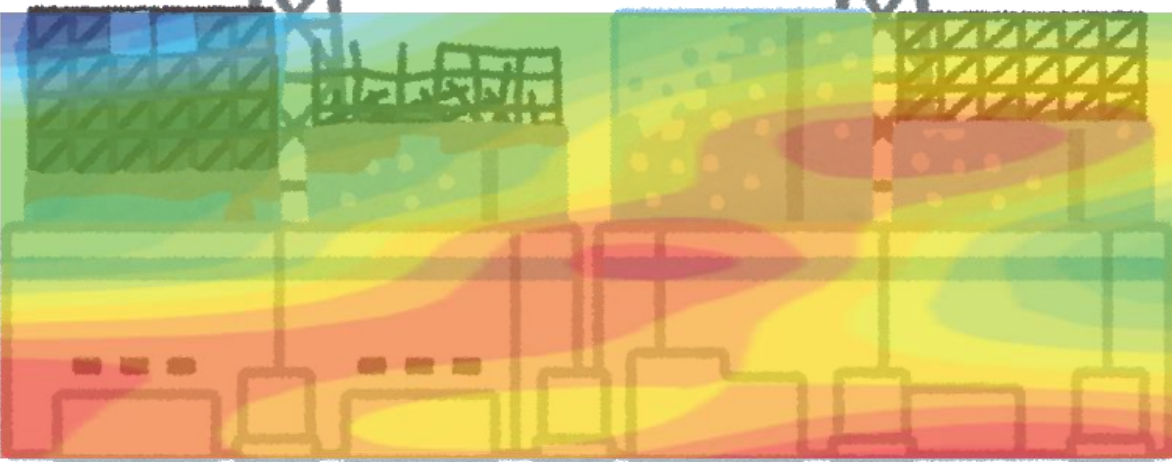
“迅速”に“広範囲”の測定
を可能としたい。

赤い部分が**高線量**



“いらすとや”より

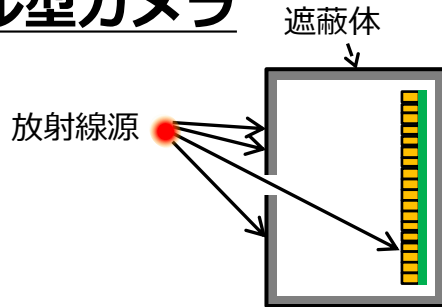
“面”的に放射能汚染の
分布を把握することが
望ましい



※図はあくまでイメージです。実際の汚染分布を示したものではありません。

ガンマ線イメージャ

ピンホール型カメラ

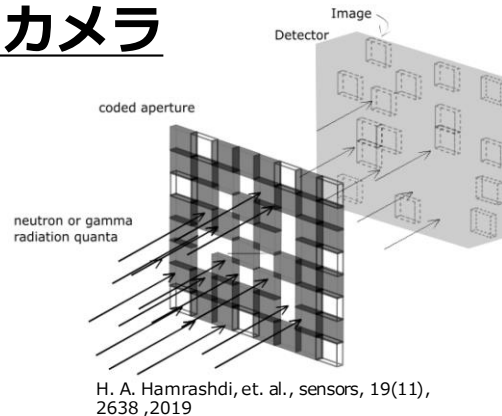


✓ 視野をピンホールで絞るために、ピンホール部分以外は遮蔽が必要

✓ 1F建屋内の主要な汚染核種である放射性セシウム ^{137}Cs (662 keV- γ), ^{134}Cs (604 keV, 795 keV- γ) 強度を1/10に落とすには、鉛でcmオーダーの遮蔽が必要であり**数10 kgの重量になる**

✓ 優れたイメージング分解能

符号化開口カメラ

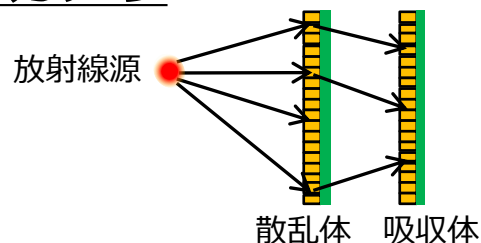


✓ 符号化開口マスクは重たい遮蔽材料 (例: W) で構成される

✓ 視野サイズはピンホールカメラより広く、コンプトンカメラより狭い

✓ 放射線源イメージの再構成手法は複雑

コンプトンカメラ



✓ コンプトン散乱 (ガンマ線の散乱) の運動学を解いてガンマ線の飛来方向を推定

⇒ **原理的に遮蔽は必要なし**

⇒ **小型化・軽量化に有利**

⇒ **視野が広い**

✓ イメージング分解能は他のイメージャに劣る

ピンホール型カメラ (株)日立製作所 の利用例

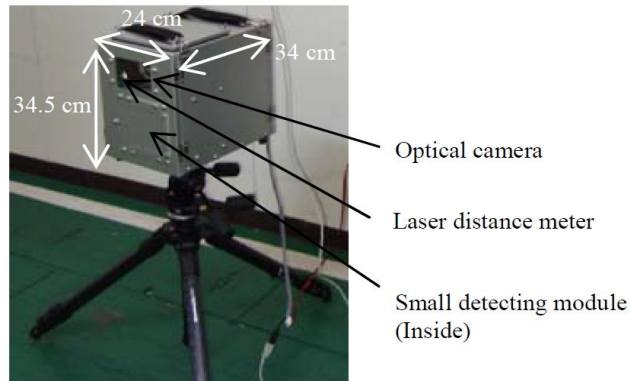


Figure 1. Overview of the gamma camera. A laser distance meter, an optical camera and a small detecting module are embedded inside the gamma camera.

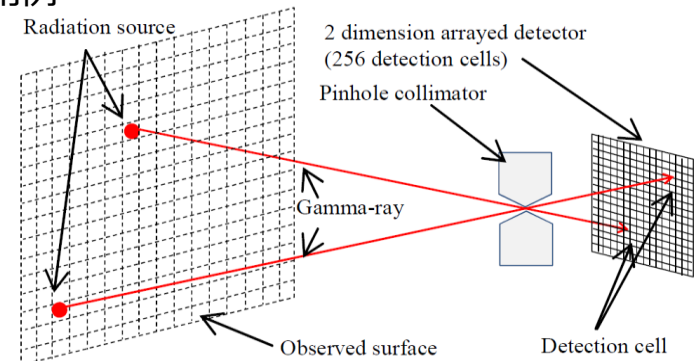


Figure 3. Concept to obtain gamma-ray intensity distribution. A pinhole collimator limits an area observed by the detection cells. By identifying a cell detecting a gamma-ray, the direction from which the gamma-ray comes is identified.

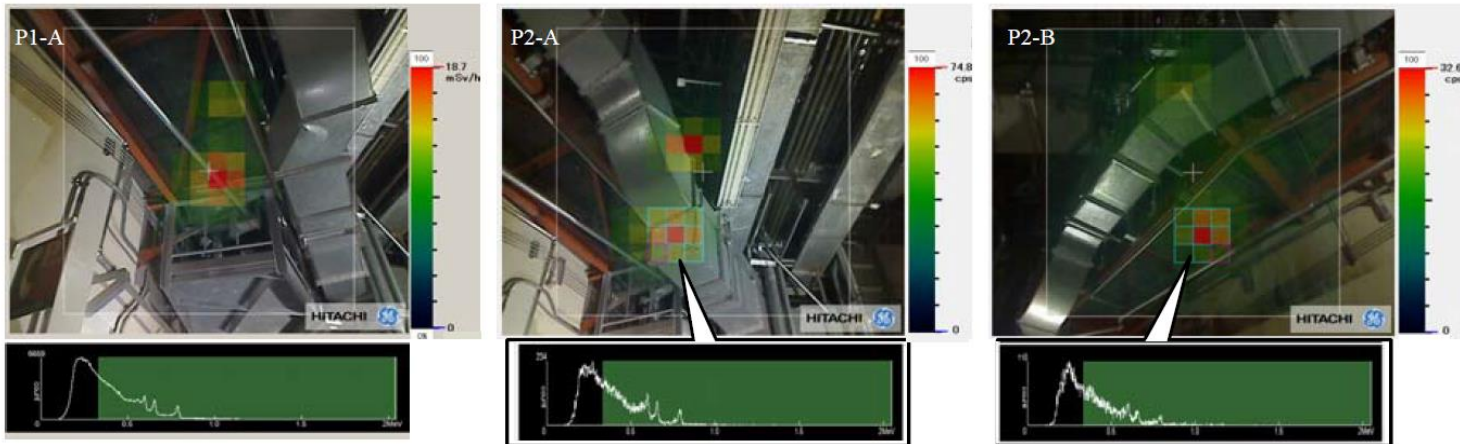
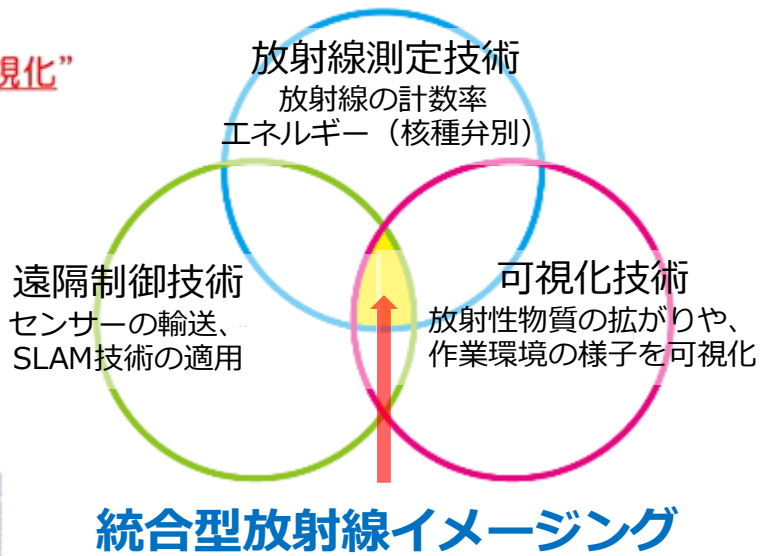
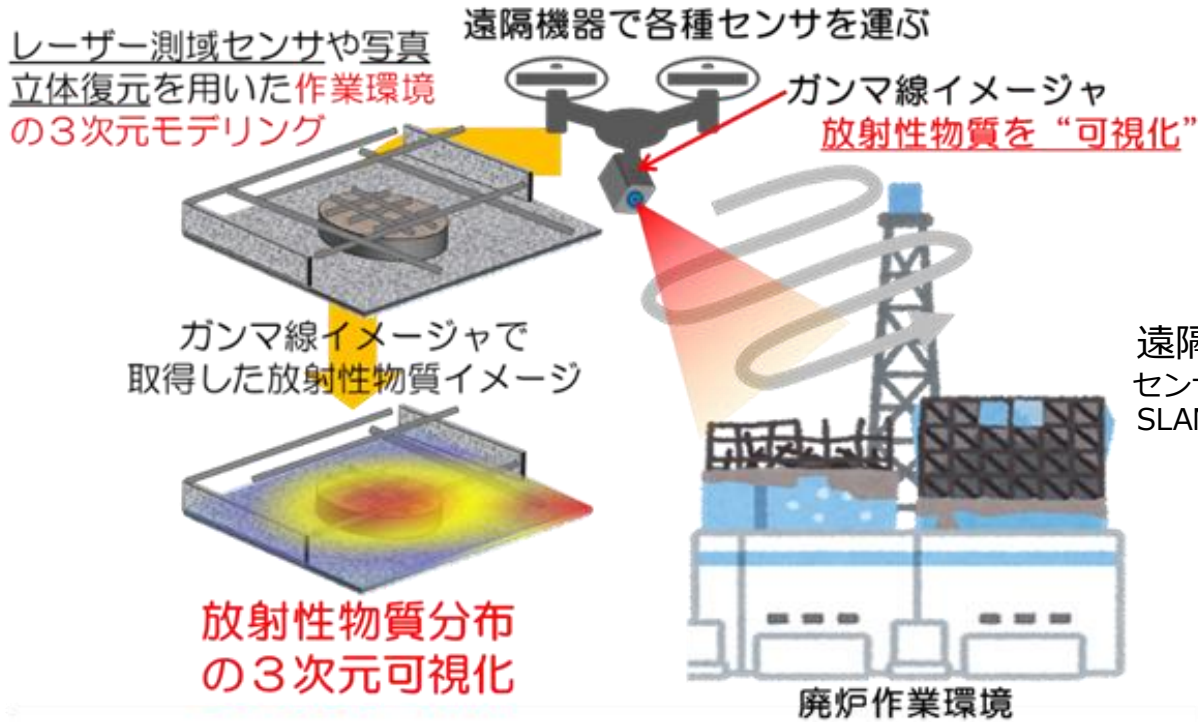


Figure 8. Visualization results in the reactor building of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. P1-A and P2-A are images of the same penetration holes observed from the same direction. P2-B is an image of a penetration hole observed from all detection cells. The spectra under the images show the accumulation at bottom.

原子炉建屋内のホットスポットを可視化

従来のガンマ線イメージングは **2D**

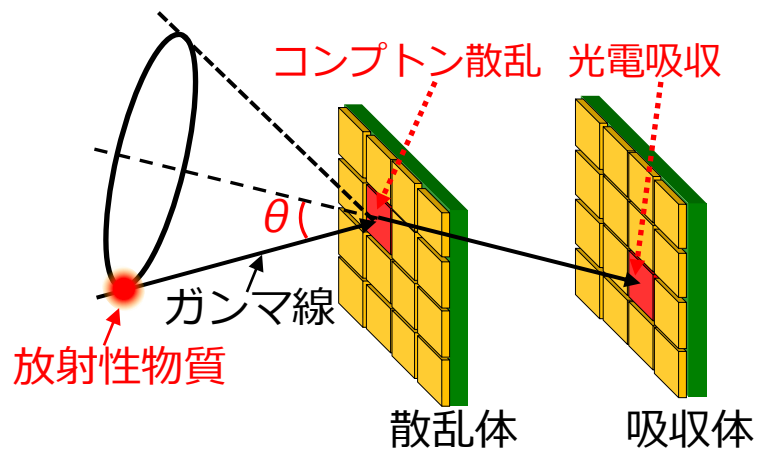
1Fには、複数の機器、設備、ガレキなどが存在する
3D にてイメージングすることが望ましい



integrated Radiation Imaging System (iRIS)

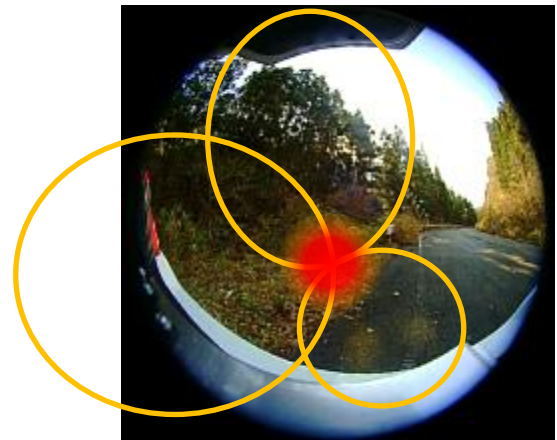
コンプトンカメラ (ガンマ線イメージャーの一種)

- ・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**



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

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 (コンプトンコーン)** を推定



※図はイメージです

複数のガンマ線を観測することで
**コンプトンコーンの交点に
放射線源があると予想**

光学画像と重ね合わせて
放射線源を可視化

従来のガンマカメラは重量数十kg



浜松ホトニクス（株） & 早稲田大学
ポータブルコンプトンカメラを開発

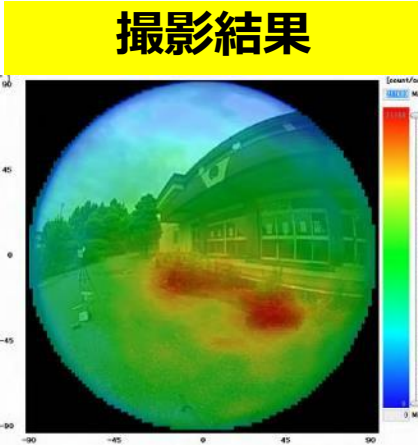
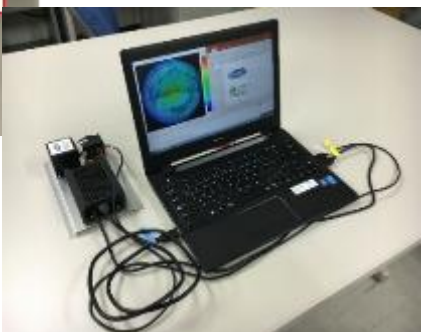
カメラ本体
1.9 kg



作業員が携行可能



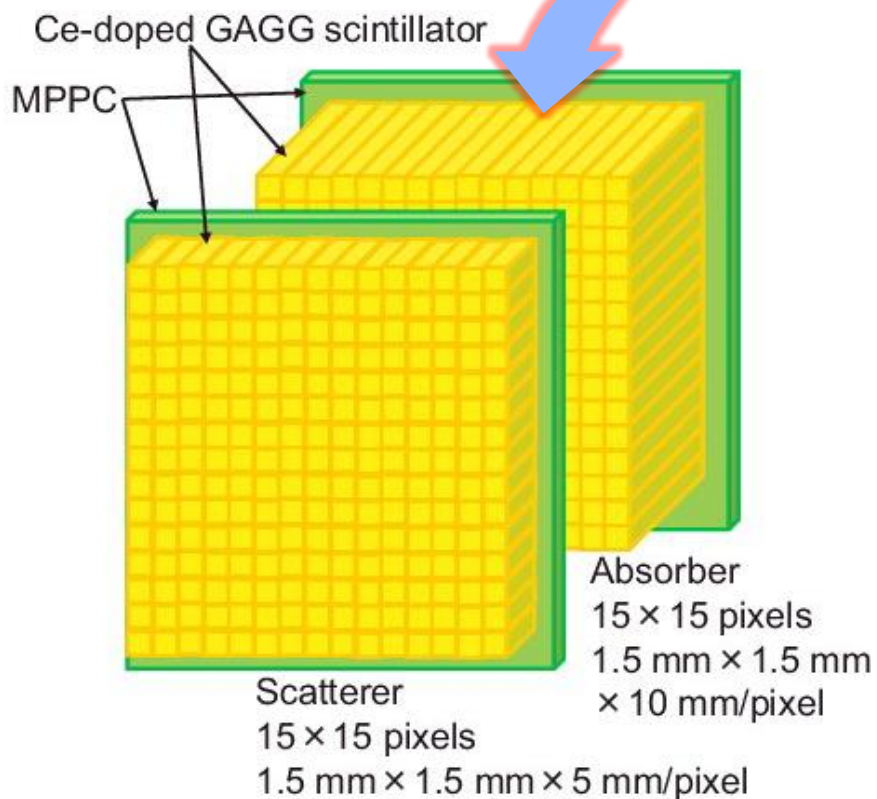
小型・軽量コンプトンカメラ (JAEA製作)



平成25年9月10日プレス発表資料より転載
早稲田大学
浜松ホトニクス株式会社
科学技術振興機構 (JST)

- 総重量：**680 g**
- 給電：USBバスパワー
(5V, 0.5A) で動作
- ノートPC一台あれば現場で動作可能

小型・軽量コンプトンカメラ (JAEA製作)



信号処理基板

光学カメラ

ガンマ線

47 mm

46 mm

ガンマ線センサー

- 総重量 : **680 g**
- 給電 : USBバスパワー (5V, 0.5A) で動作
- ノートPC一台あれば現場で動作可能

※本装置は(株)千代田テクノル社製ガンマキャッチャーを基盤として小型・軽量化したものです

ロボット

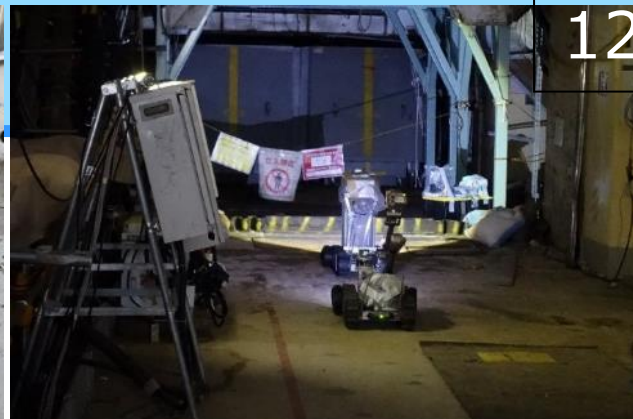


1号機原子炉建屋内部における ホットスポット探索

- ・コンプトンカメラをクローラーロボットに搭載
- ・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
- ・測定は免震重要棟から遠隔実施

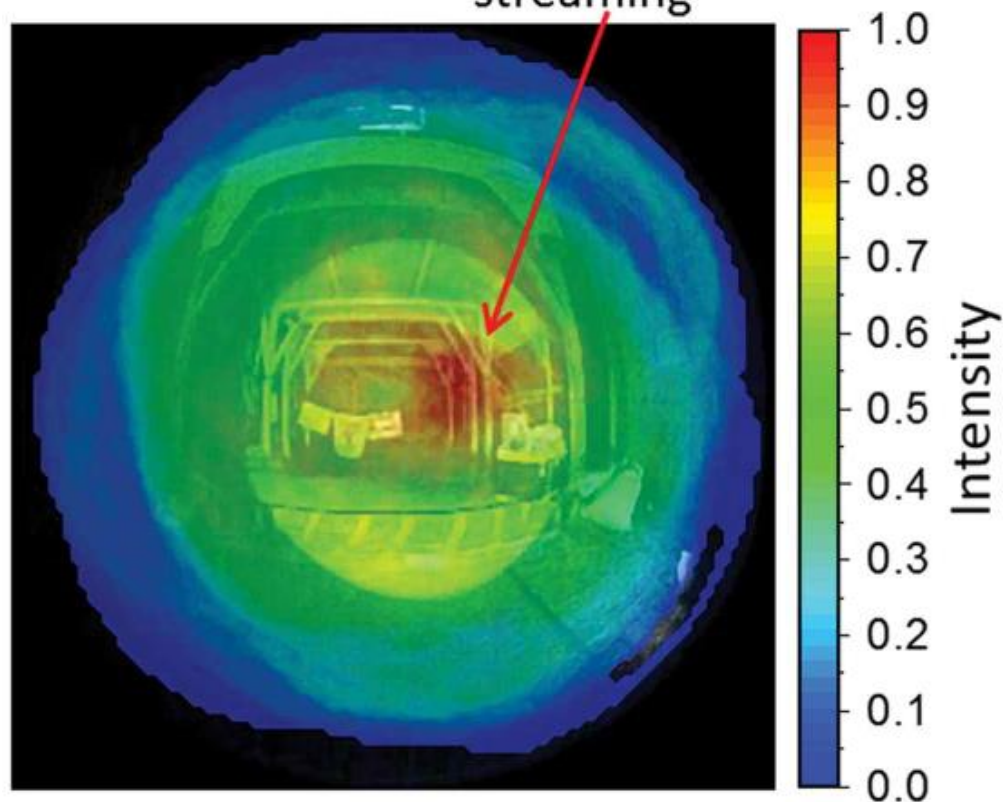


ロボット

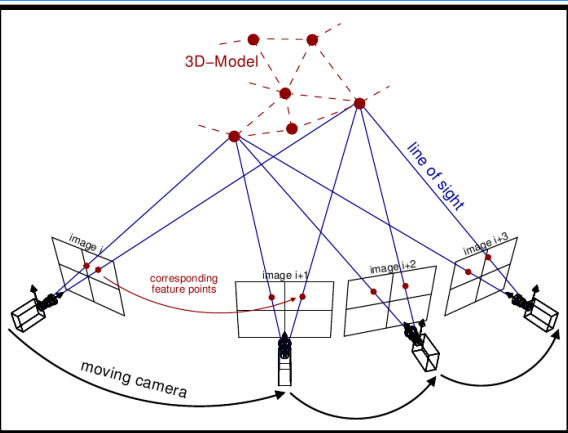


1号機原子炉建屋内部における ホットスポット探索

- ・コンプトンカメラをクローラーロボットに搭載
- ・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
- ・測定は免震重要棟から遠隔実施

 Gamma-ray
streaming


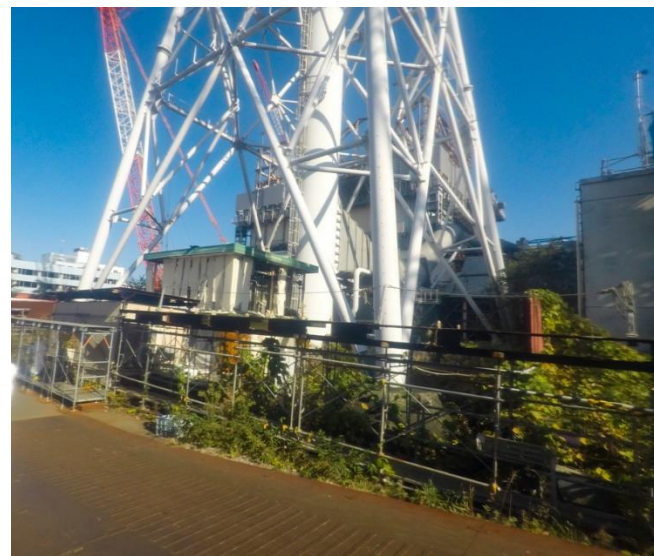
ホットスポットのイメージを 3次元モデルデータに投影する



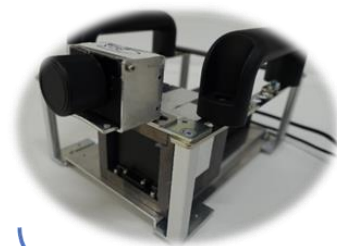
Theia Vision Library
<http://theia-sfm.org/sfm.html>



↓ 1 / 2号機排気筒



コンプトンカメラ



サーベイメータ

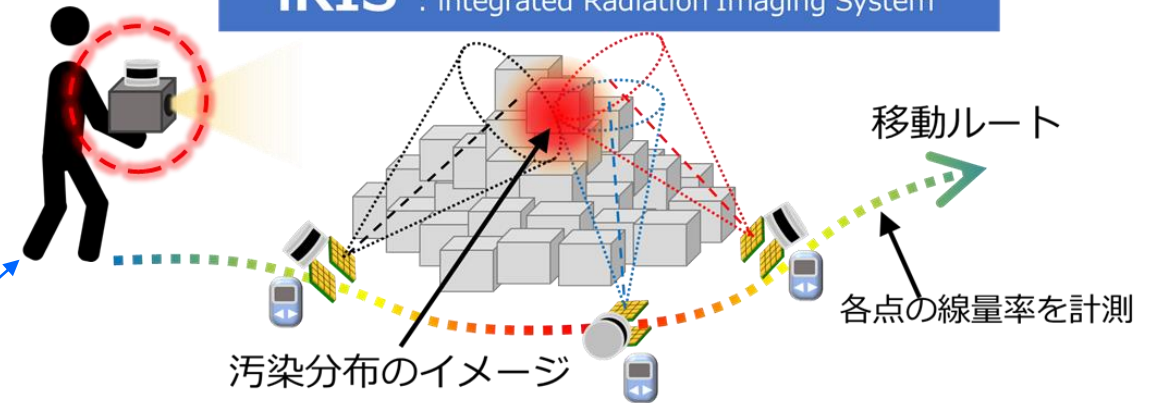


3次元測域センサ



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

移動体
(人・ロボット)

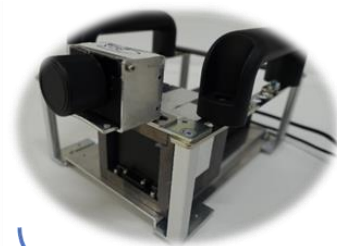


- 測域センサ：自己位置・姿勢の推定および周辺環境の3次元地図生成
- コンプトンカメラ：汚染分布のイメージを生成
- サーベイメータ：歩行ルート上の線量率データを取得



サイズ
 高さ:約25cm
 幅:約15cm
 奥行き:約20cm

コンプトンカメラ



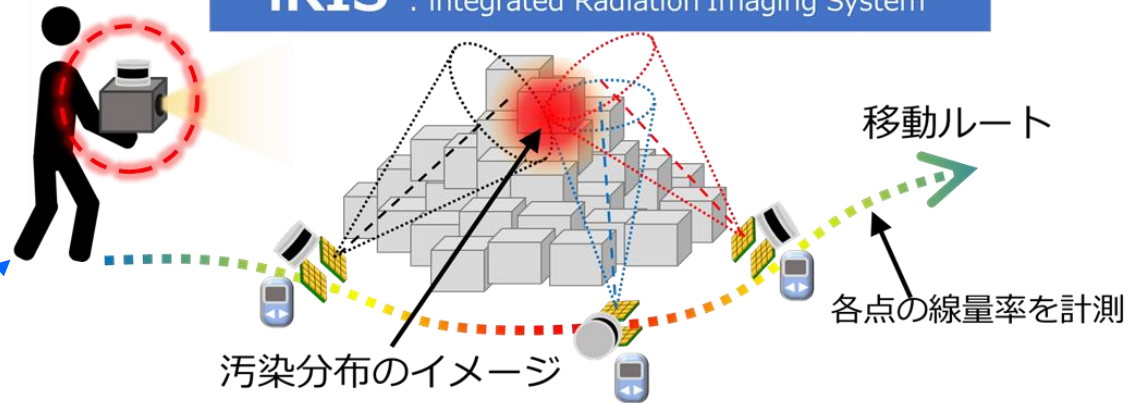
サーベイメータ



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



移動体
 (人・ロボット)

- 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

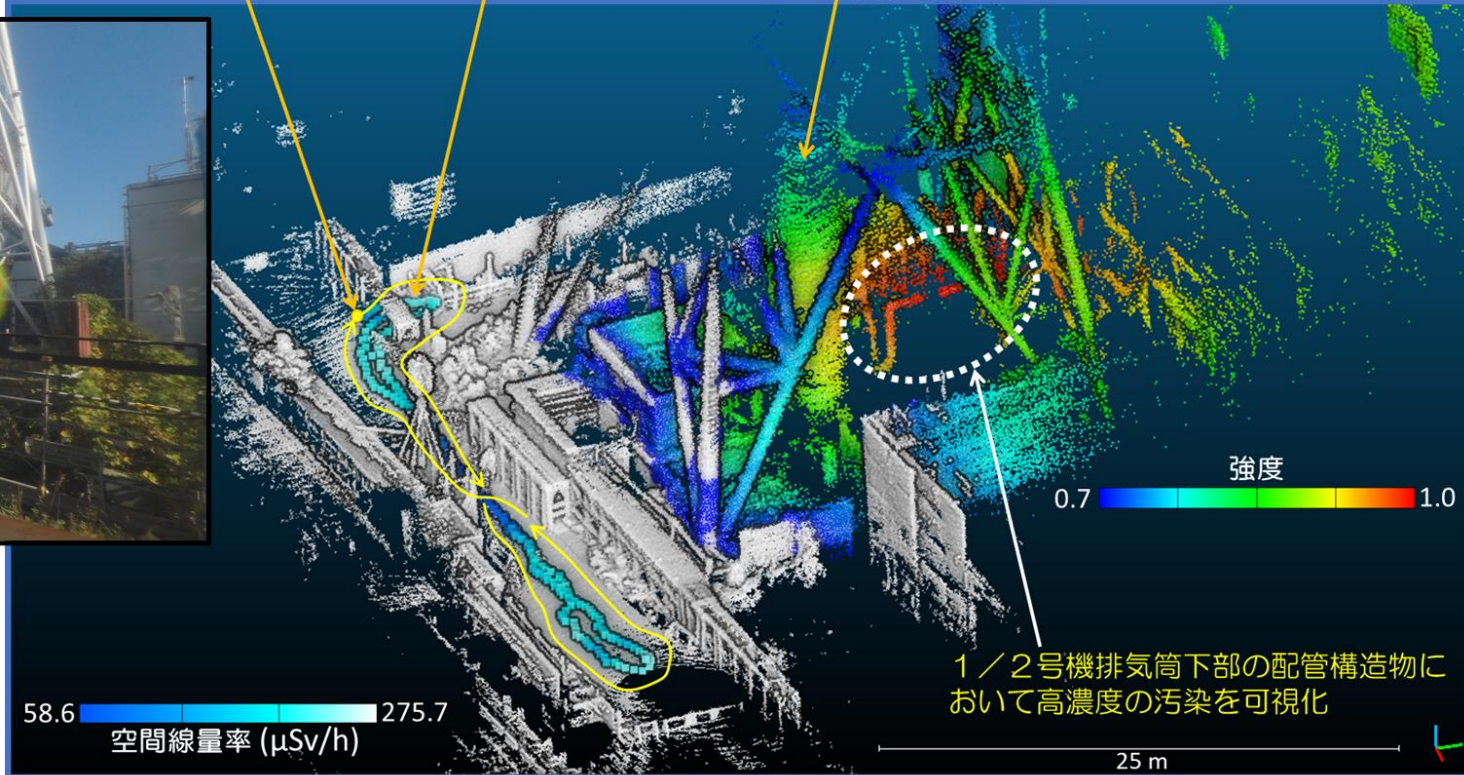
JAEA 未来へげんき No.59 (2021) pp. 7-9

汚染箇所や空間線量率を可視化した 3次元マップ

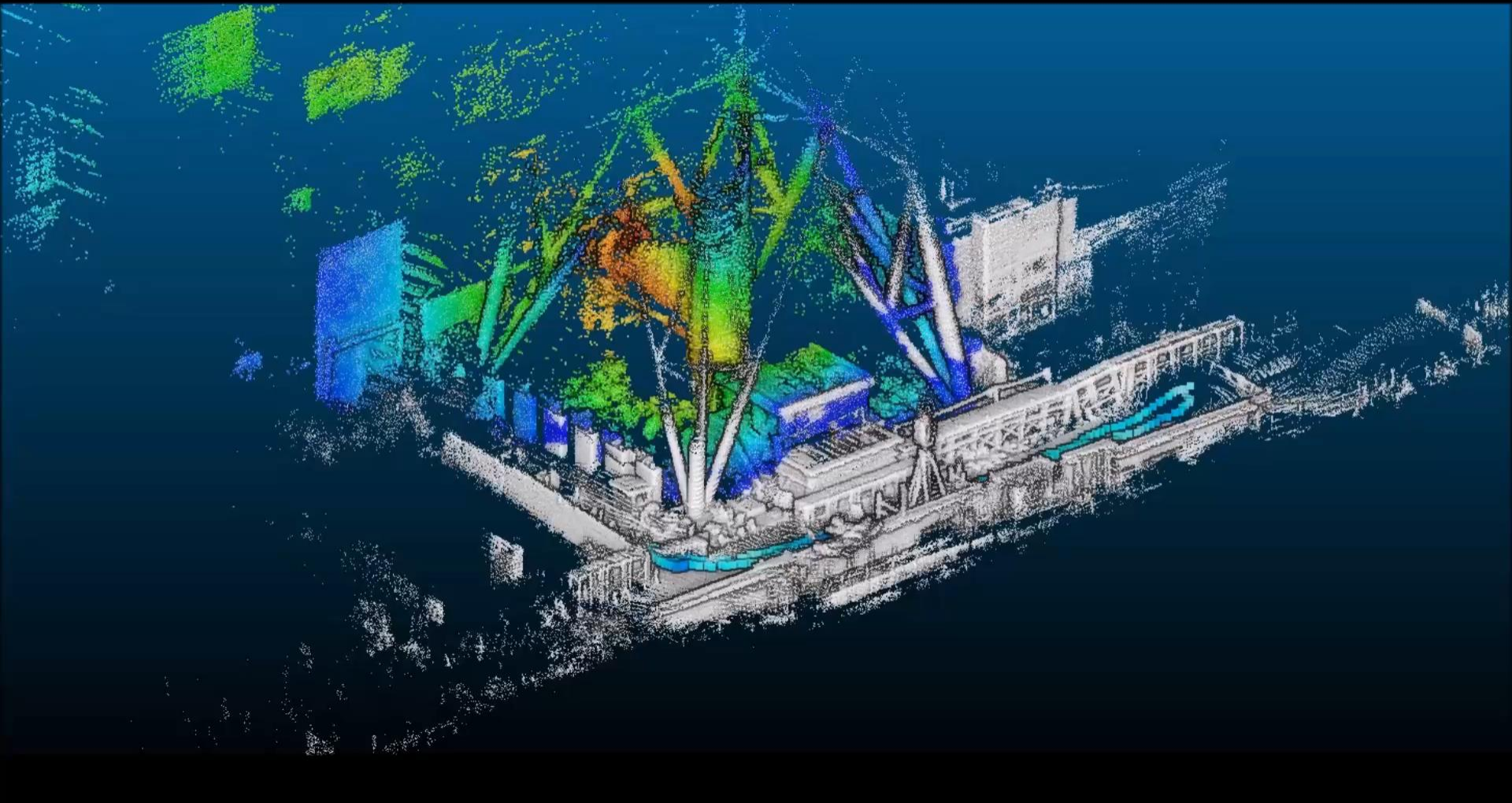
スタート&ゴール オペレータの歩行ルート 1/2号機排気筒



高濃度汚染が報告されていた領域



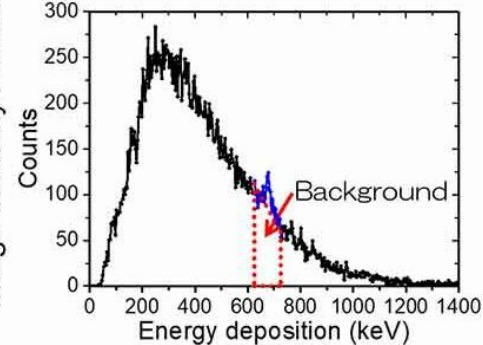
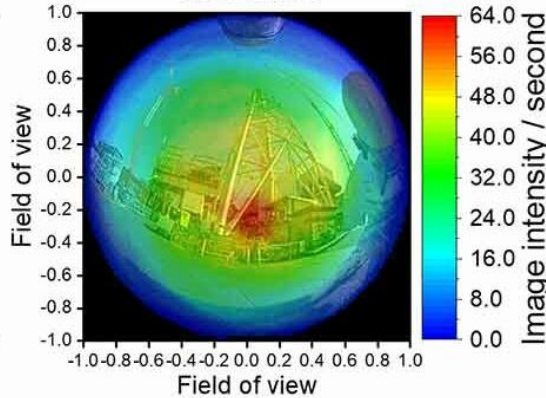
高線量率箇所（排気筒下部）に進入することなく、
移動しながらホットスポット可視化のためのデータを取得



1 / 2号機排気筒下部



~2次元の可視化結果~



放射能が既知の可視化結果から、未知線源の放射能を推定

イメージ強度

距離の逆2乗でガンマ線カウント数が減衰することを補正

求めたい放射能

比例定数

(既知の放射能と、その時のイメージ強度から導出)

空気 (遮蔽) による減衰を補正

数え落としの補正

BGの補正



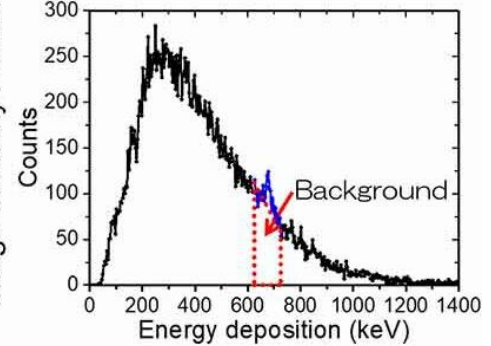
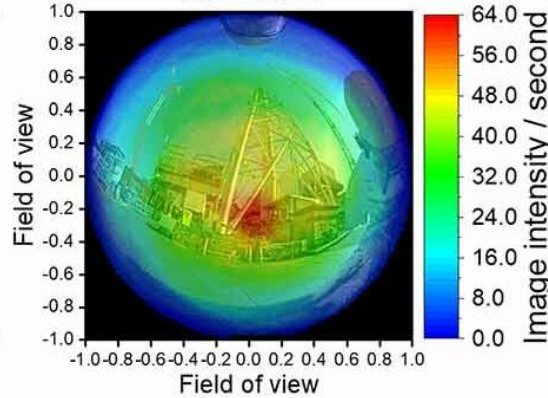
放射能

$$Q = (3.0 \pm 0.5) \times 10^{12} \text{ Bq}$$

$$Q = C \cdot \frac{I \cdot d^2}{e^{-\mu d} \cdot \epsilon_{loss} \cdot \epsilon_{eff}}$$

1 / 2号機排気筒下部

~2次元の可視化結果~



放射能が既知の可視化結果から、未知線源の放射能を推定

イメージ強度

距離の逆2乗でガンマ線カウント数が減衰することを補正

$$Q = C \cdot \frac{I \cdot d^2}{e^{-\mu d} \cdot \epsilon_{loss} \cdot \epsilon_{eff}}$$

↑ 求めたい放射能

放射能推定

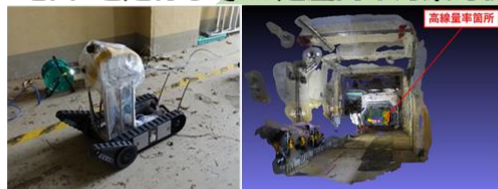
周辺の空間線量率の導出

作業者の被ばく線量の推定

遮蔽・除染の効果の検討

※1 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※2



福島県イノベーション・コースト構想補助事業

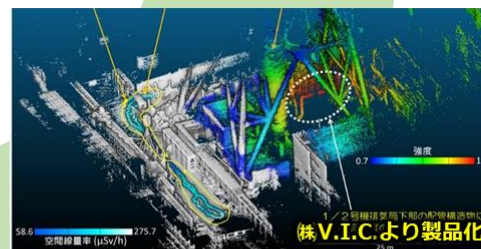
大規模イベント等の
核セキュリティ分野へ波及

iRIS

Integrated Radiation Imaging System

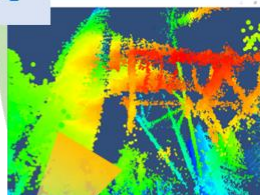
放射線計測 × 異分野技術
イノベーション

※3,4
マッピング技術



世界の廃炉現場へ展開

※4 VR



1F作業を
オフィスでトレーニング

Observer in an office

※5
AR

現実空間に
汚染源を可視化

放射線源の
入った箱

放射線源の
ARイメージ



都市デジタルツインなどの防災ツールと統合
放射線環境のデジタルツイン構築

複数の要素技術の統合によって、放射性物質可視化を進化させる

※1 Y. Sato, Y. Terasaka, W. Utsugi, et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 56巻, 801-808頁(2019). ※2 Y. Sato, S. Ozawa, Y. Terasaka, et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 57巻, 734-744頁 (2020). (国研) 日本原子力研究開発機構 (株) 千代田テクノロ 令和元年5月9日プレスリリース ※3 Y. Sato, and Y. Terasaka, J Nucl Sci Technol, 59巻, 677-678頁 (2022). ※4 (株) ヴィジブルインフォメーションセンター、佐藤優樹、放射能汚染可視化ソフトウェアCOMRIS、http://vic.co.jp/?page_id=15#COMRIS. ※5 Y. Sato, PhysicsOpen, 7巻, 100070 (2021). ※6 株式会社シマノ (国研) 日本原子力研究開発機構 成果展開事業

◆ 放射能汚染の可視化と放射能の定量評価

1Fにおけるガンマ線イメージャの有効利用を推進

◆ 測定環境の3次元モデルと汚染イメージの重ね合わせ

⇒ **視覚的に理解しやすい汚染分布図の提供**

◆ 移動体の利用・移動しながらのデータ取得

・ ロボットを利用した**遠隔でのデータ取得**

・ **移動しながらの短時間かつ効率的なデータ取得**

⇒ **原子炉建屋深部における実証試験実施**

◆ 異なる放射線種・核種の可視化も必要

・ α → 内部被ばく

・ β → 目の水晶体被ばく

・ n → 燃料デブリ検知のためのキー線種

JAEA-CLADSでは、 **α 、 β 、 n の測定技術開発**にも取り組んでいます。

本成果を得るにあたり、
ご協力いただいた皆様に深く感謝申し上げます。

(敬称略)

- ◇株式会社アトックス
- ◇株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター
 - ◇株式会社千代田テクノル
 - ◇東京電力ホールディングス株式会社
 - ◇浜松ホトニクス株式会社
 - ◇早稲田大学