

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

- 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）

□ 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

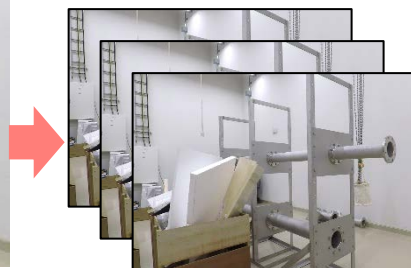
- 作業環境の空間構造を取得する技術
 - 画像からの立体復元手法の開発
 - 点群データによる構造物推定技術
- 放射線分布を計測する技術
 - 小型放射線イメージャの開発
 - 高線量率環境における放射線計測技術の開発

や遠隔操作機器による作業時のオンデマンド参照)

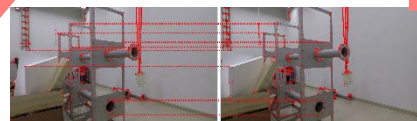
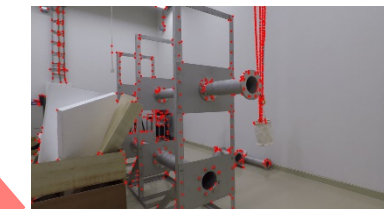
□ 2次元画像内の特徴を基にしてつなぎ合わせることで 立体（3次元）モデルを生成



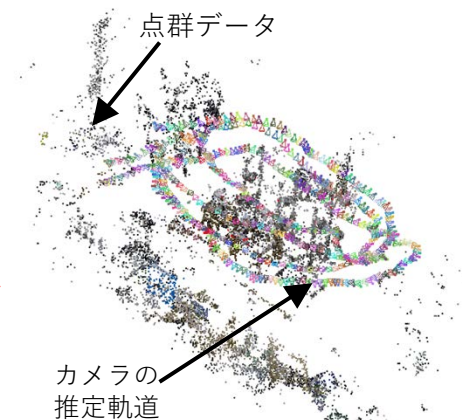
取得した動画



画像抽出



特徴抽出・マッチング計算



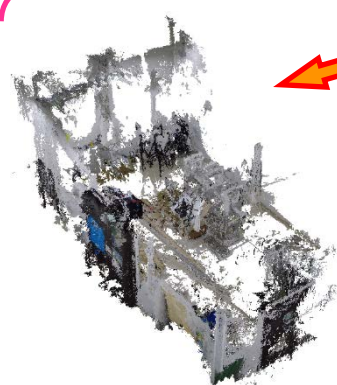
点群データ

カメラの
推定軌道

疎な3次元点群データ

Structure from Motion(SfM)処理

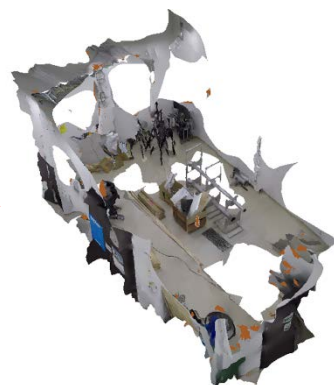
多視点ステレオ(MVS)処理



密な3次元点群データ



メッシュ生成



テクスチャ生成



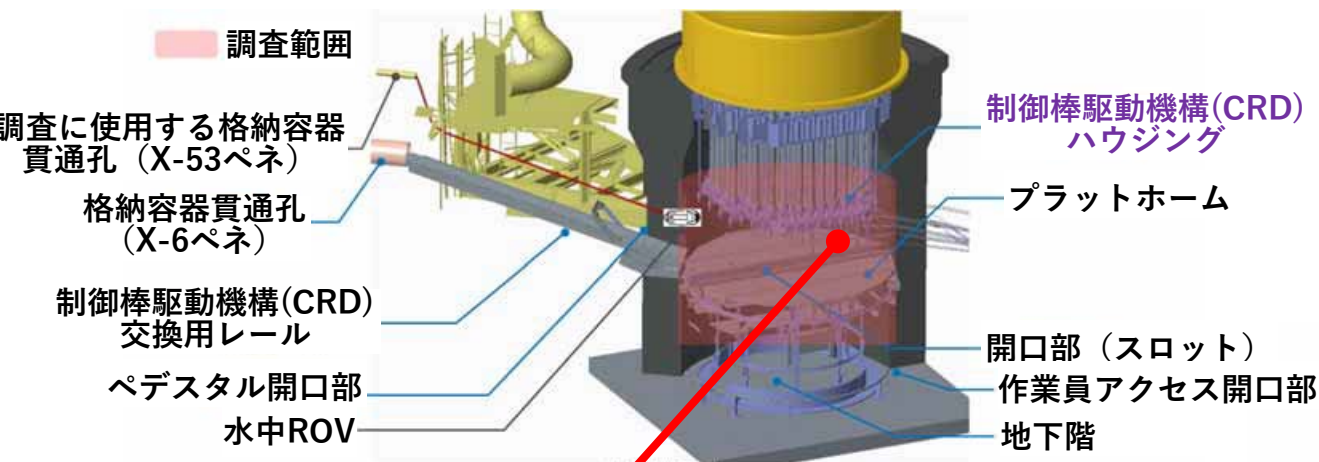
復元されたモデル

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

□ 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

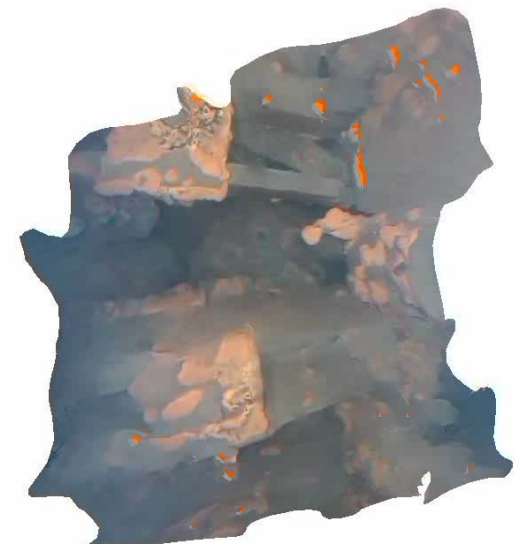
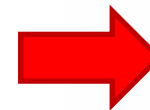
調査概要図（出典：東京電力ホールディングス）



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



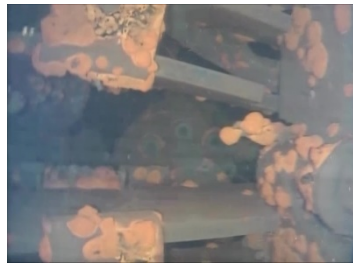
生成された復元モデル

復元性能の向上が必要

□ 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

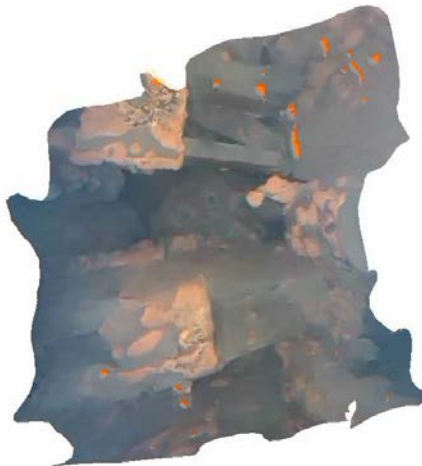
□ アプローチ：コントラスト強調処理 および 鮮鋭化処理 の適用



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

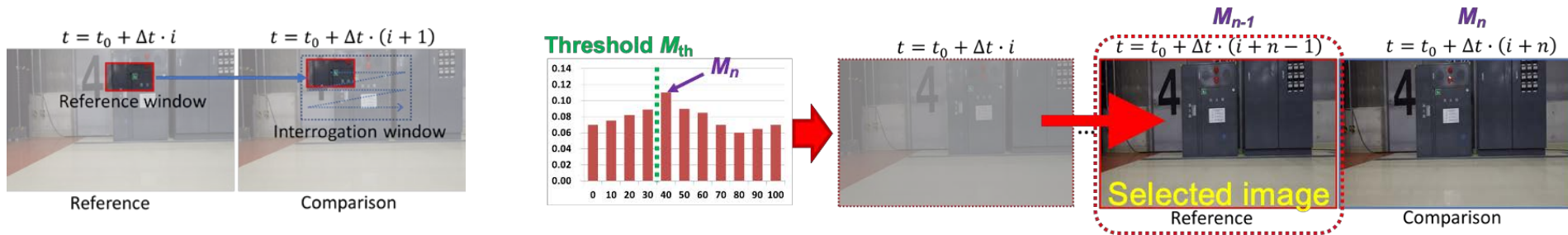
モデルの3次元復元性能が向上することを確認

□ 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：画像選択手法の開発・適用（似かよった画像は処理対象からはずす）

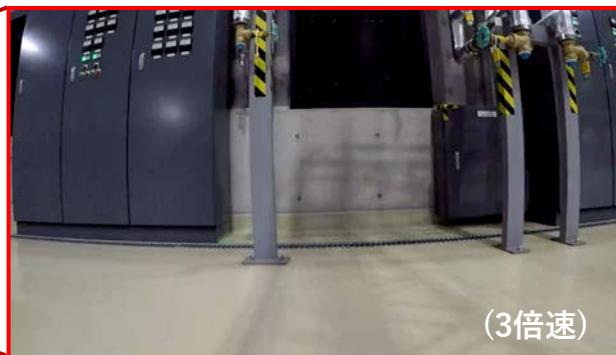
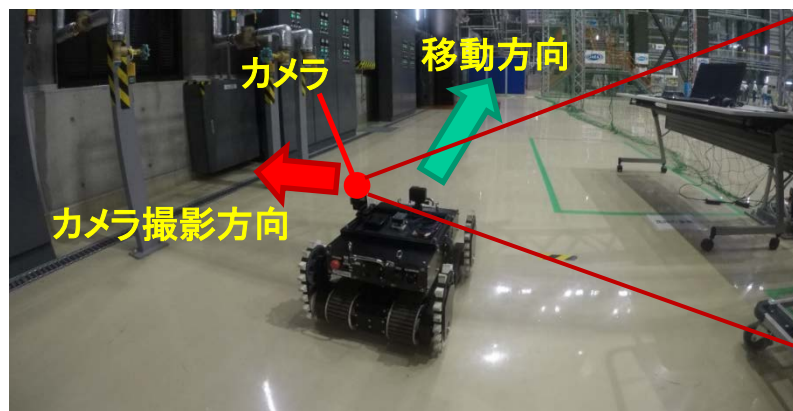
- 基準画像 $I(t_0 + \Delta t \cdot i)$ と比較対象画像 $I(t_0 + \Delta t \cdot (i+j))$ 間での
オプティカルフロー（画像移動量の推定値）を計算
- オプティカルフロー量のうち度数が最大値をとる M_j を検出
- M_j としきい値 M_{th} を比較し、 $M_j \leq M_{th}$ の場合 j を増やしていき、
 $M_n > M_{th}$ となった場合、画像 $I(t_0 + \Delta t \cdot i + (n-1))$ を選択



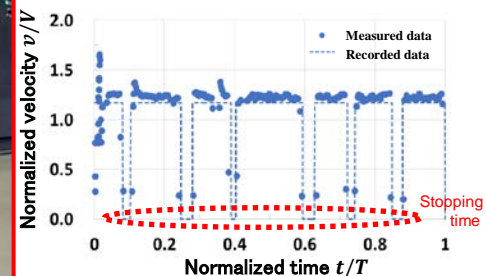
画像間の比較に基づいて変化があるものを選択して立体復元計算に適用

□ 検証実験の条件

- 場所：櫛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)



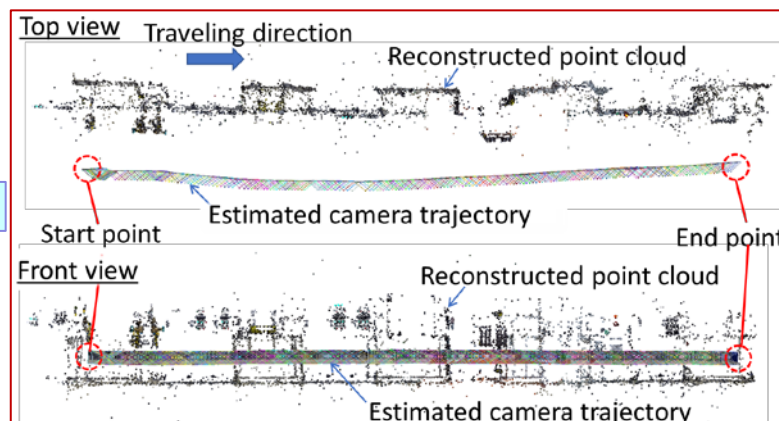
間欠直進移動時の撮影動画



間欠直進動作パターン

MVS処理

復元モデル



疎な点群の生成

画像抽出

画像選択

SfM処理

□ 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

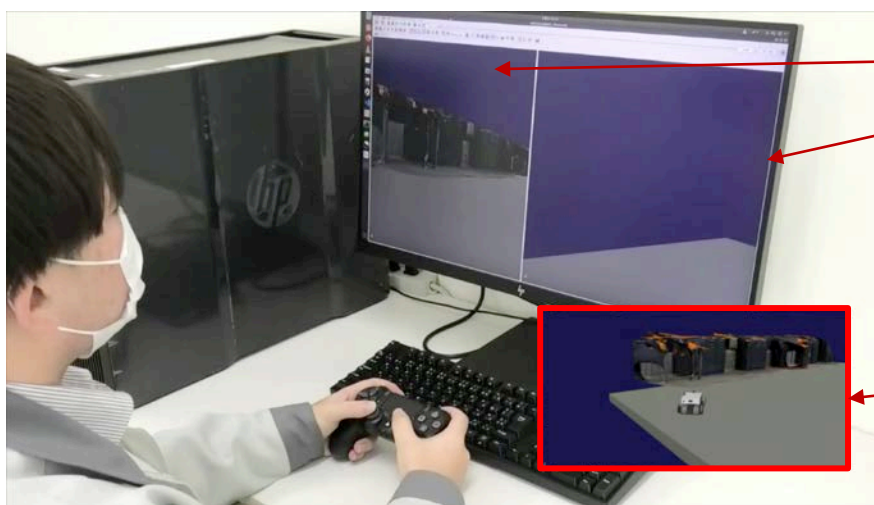
比較して
⇐ 約5%の処理時間

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

□ 櫛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



□ 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ー画面
(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

□ 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

□ 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

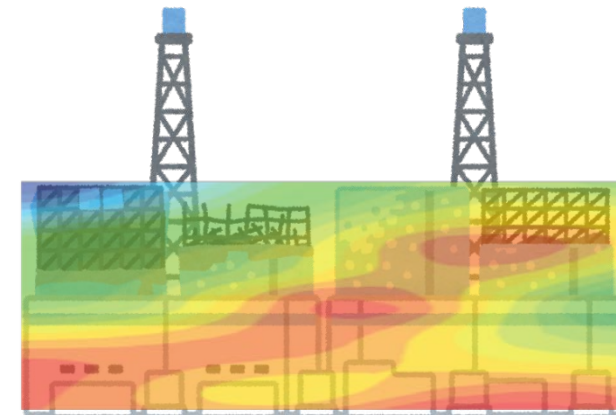
- 作業員の被ばく線量低減
- 詳細な除染計画の立案、工程管理
- 作業員に安全と安心を提供

□ 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



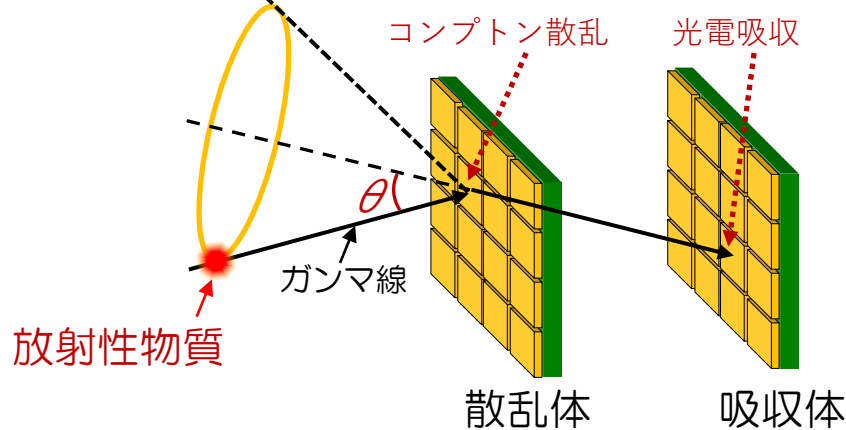
ガンマ線イメージャの一種である
コンプトンカメラの開発



※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（ガンマ線イメージャーの一種）の測定原理

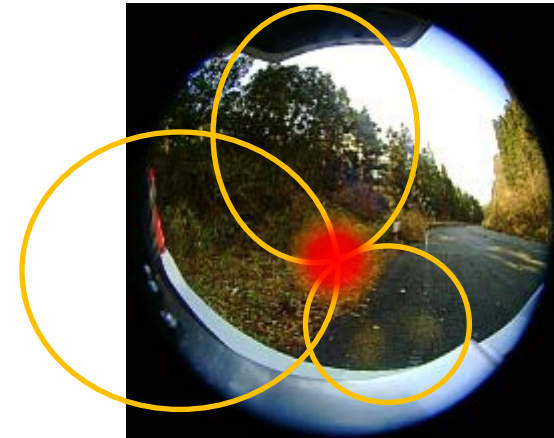
- ・ ガンマ線がエネルギーの一部を散乱体に付与
- ・ 散乱したガンマ線が光電吸収により吸収体に付与



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

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



※図はイメージです

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



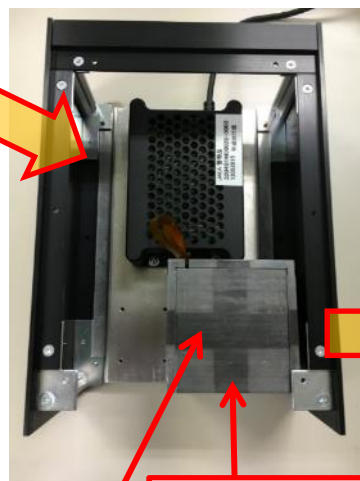
光学画像を重ね合わせて
 放射性物質の分布を可視化

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

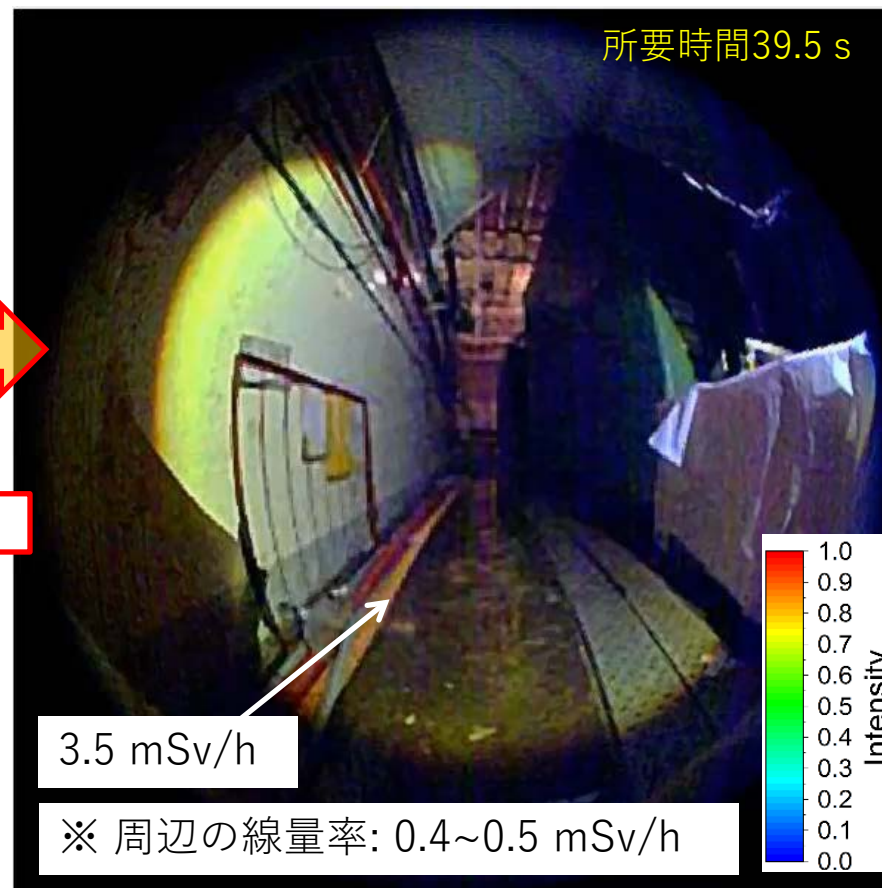


ガンマ線センサ

鉛でガンマ線センサ
の上下、左右、背面
を遮蔽 (厚さ1 cm)

□ 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)



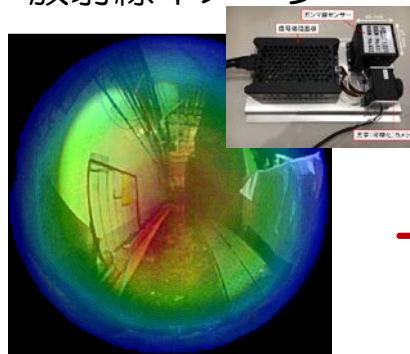
放射線物質の分布を可視化する小型軽量なイメージャを実現

□ 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

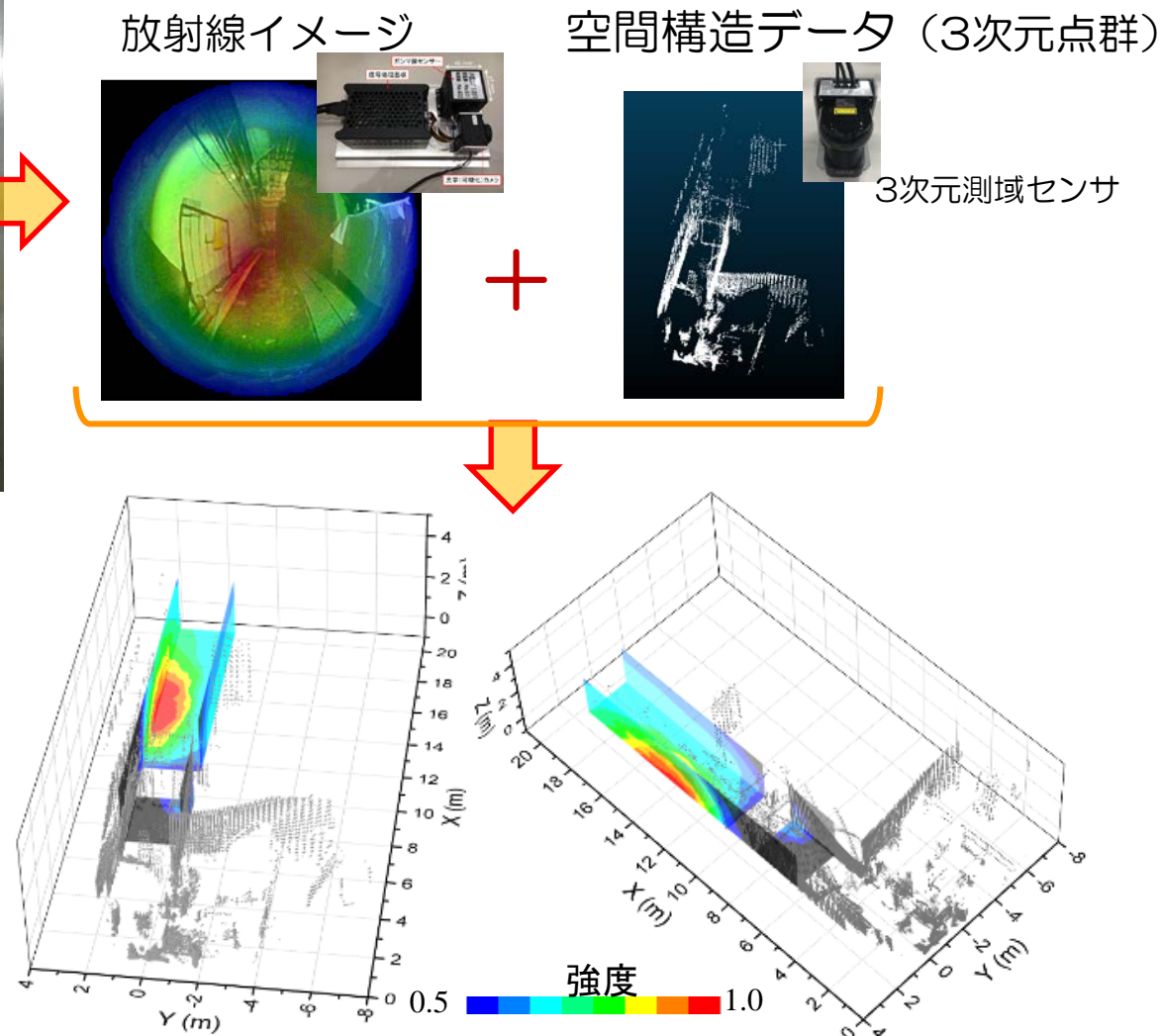
放射線イメージ



空間構造データ（3次元点群）



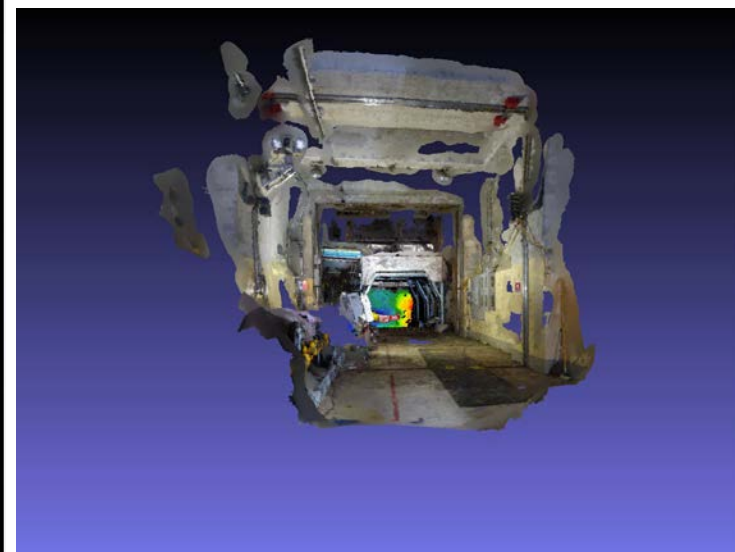
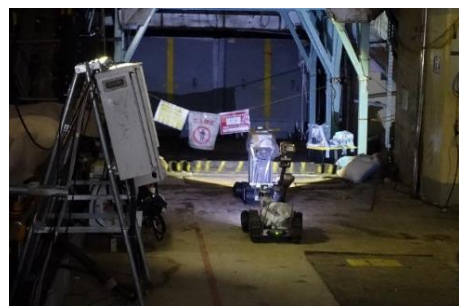
3次元測域センサ



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

□ 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



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

□ 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



- 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

