

## 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」廃炉に向けた技術開発の現状  
Progress of R&D for the decommissioning of The Fukushima Daiichi NPS

## (2) 福島第一原子力発電所建屋内での3次元放射線イメージング技術の開発

## (2) Development of 3D radiation imaging technology in the Fukushima Dai-ichi NPS building

\*佐藤 優樹<sup>1</sup><sup>1</sup>原子力機構

## 1. 緒言

2011年の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（以下、「東京電力HD」、「1F」という）で起きた事故後、放射性物質の分布を直感的に把握できる放射線の可視化への要求が高まり、ガンマカメラと呼ばれる放射線イメージング装置の開発が進められてきた。サーベイメータ等による“点”の測定とは異なり、放射性物質の存在を見落とすことなく、広範囲を“面”的にその広がりを認識できる装置は、今後ますます開発とその利用が進むと思われる。1Fの廃炉を円滑に進めるためには、このような装置の小型化と遠隔操作、及び建屋構造物の3次元モデリング技術との統合が重要となる。ここでは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）が1Fで実施してきたコンプトンカメラを基盤とした研究開発の現状について述べる。

## 2. はじめに

1F事故により、放射性物質が発電所のサイト内から環境中まで広い範囲にわたって拡散した。廃炉作業を円滑に進めるためには、高濃度汚染物の撤去等による除染が重要であり、そのためにはまず放射性物質がどのように分布しているのかを把握する必要がある。しかし、1F建屋内は床面だけでなく壁や天井、機器、ガレキ等も汚染されているため放射性物質は3次元的に分布しており、加えて散乱線も多く存在することから、単に建屋内の放射線量を測定するだけでは除去すべき汚染源を特定することは困難である。さらに、建屋内は高線量率環境であるが故に、作業者が長時間作業を実施できない、もしくはそもそも入城が難しい、といったエリアが存在する。このような高線量率環境において3次元的な放射性物質の分布を遠隔にて測定することにより、汚染源を特定し、効率的な除染や効果的な遮へい等の対策に役立てることができれば、廃炉作業の一層の加速に資することができる。

そのために放射性物質を可視化するという要求が高まり、ガンマカメラと呼ばれる放射線のイメージング装置の開発が進められ、複数のメーカーから販売されるようにもなっている。その場の空間線量率を“点”の情報として測定できるサーベイメータとは異なり、ガンマ線を放出する放射性物質を可視化する装置があれば放射性物質の存在を見落とすことなく、“面”的にその広がりを認識できる。このような特徴を持つガンマカメラについて、高線量率環境で動作可能であり、かつ作業者に代わって高線量率エリアに進入するロボットに搭載可能な小型・軽量の装置の開発が求められていた。

これまでに、小型・軽量のコンプトンカメラ（ガンマカメラの一種）の開発が早稲田大学と浜松ホトニクス株式会社によって共同で進められ、1.9 kgの重量と既存装置からの高感度化が達成されていた[1]。原子力機構の廃炉国際共同研究センター遠隔技術ディビジョンでは、この装置をベースにさらなる小型軽量化を図り、遮蔽体の体積を極力小さくすることが出来て現場に持ちこみ易く、ドローンや小型クローラーロボットにも搭載可能な約680 gのコンプトンカメラを製作した。現在、製作したコンプトンカメラをドローンに搭載することによる遠隔放射線イメージングシステムの開発を株式会社千代田テクノと共同で開発を進めており、福島県の帰還困難区域に飛散した放射性物質の分布を迅速に測定・把握することを目的として実証試験を進めている[2]。このようなロボットを用いた遠隔放射線イメージング技術は、1Fサイト内における放射性物質分布測定にも資することができる技術である。



図1 小型・軽量コンプトンカメラの外観図。大きさを比較するためにボールペンを配置した。

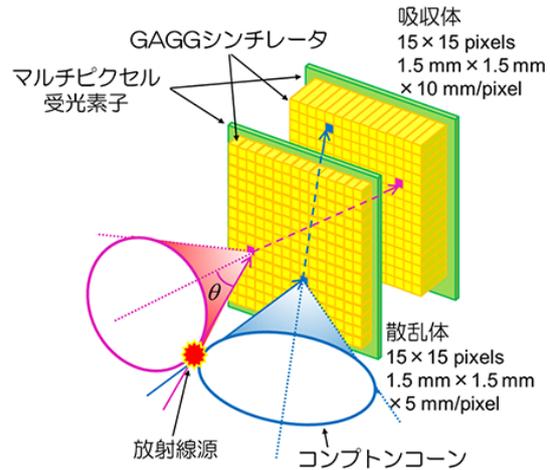


図2 コンプトンカメラの動作原理。センサー前方に仮想コーンを描画し、コーンの交点に放射性物質を見出す。

一方で、1F 建屋内部における測定では放射性物質の可視化技術とともに、建屋構造物内部の3次元モデルを取得・構築する技術が必要となる。建屋構造物の3次元的な寸法を含んだ構造物モデルに、コンプトンカメラで取得される汚染分布の情報を重ね合わせることで、実空間における汚染分布の拡がりにより詳細に議論することが出来るようになる。そこで、本研究開発ではフォトグラメトリ技術やレーザー光を利用した測域センサーを用いた建屋構造物の3次元モデル構築技術の整備にも着手した。

本発表では、コンプトンカメラによる放射線イメージングと、上述の3次元モデル構築技術を組み合わせたシステムを用いた、1F建屋内部における放射性物質の分布マップの描画に向けた技術開発について紹介する。

### 3. 福島第一原子力発電所建屋内における放射性物質分布可視化試験

我々は東京電力HDの協力のもと、1Fの建屋内外において、コンプトンカメラを基盤とした3次元放射線イメージングシステムを用いた放射性物質の可視化に関わる実証試験を進めている。図1に、試験に使用した小型・軽量コンプトンカメラの外観を示す。本装置は放射性物質から放出されるガンマ線を測定するためのガンマ線センサーと、センサー出力信号を処理するための信号処理基板、及び光学画像を取得するための光学カメラから成る。ガンマ線センサーは1.5mm角の15×15ピクセルのGAGGシンチレータが2層になっており、主要な汚染源である放射性セシウムからのガンマ線が1層目（散乱体）と2層目（吸収体）の各々で相互作用した位置と付与したエネルギーを計測する。これらの情報を用いてガンマ線の飛来方向を推定してコンプトンコーンを装置前方の仮想空間に描画し、コーンの交点に放射性物質を見出す（図2）。このコンプトンカメラを用いて、これまでに1F3号機タービン建屋内部の空間線量率が0.4～0.5 mSv/hといった従来のコンプトンカメラでは動作が困難な高線量率エリアにおいて、表面線量率が最大3.5 mSv/h程度のホットスポットの検知に成功している[3,4]。

本稿では一例として、平成30年3月に実施した1号機原子炉建屋内部における放射線イメージング試験の結果を紹介する。試験では、小型・軽量コンプトンカメラを東京電力HD保有の小型クローラーロボット（米国iRobot社、パックボット）に搭載し、1号機原子炉建屋内部のホットスポットの遠隔での探知を試みた。この試験では、作業環境の写真や動画を撮影するためにデジタルカメラ及びLEDライトもロボットに搭載した。ロボット及びコンプトンカメラの操作は、免震重要棟から遠隔にて実施した。

試験の結果、図3に示すように大物搬入口突き当りの遮蔽板右側の隙間に、ホットスポットを映し出すことに成功した[5]。この結果は、コンプトンカメラに備え付けられた光学カメラで撮影した作業現場の光学写真に、ガンマ線センサーで取得したガンマ線イベントをもとに再構成したホットスポットのイメージを重ね合わせたものである。映し出されたホットスポットは、原子炉建屋深部からのガンマ線が遮蔽板の隙間から漏れ出していることが形成要因であると考えられる。この測定では、作業員の容易な立ち入りが困難な高線

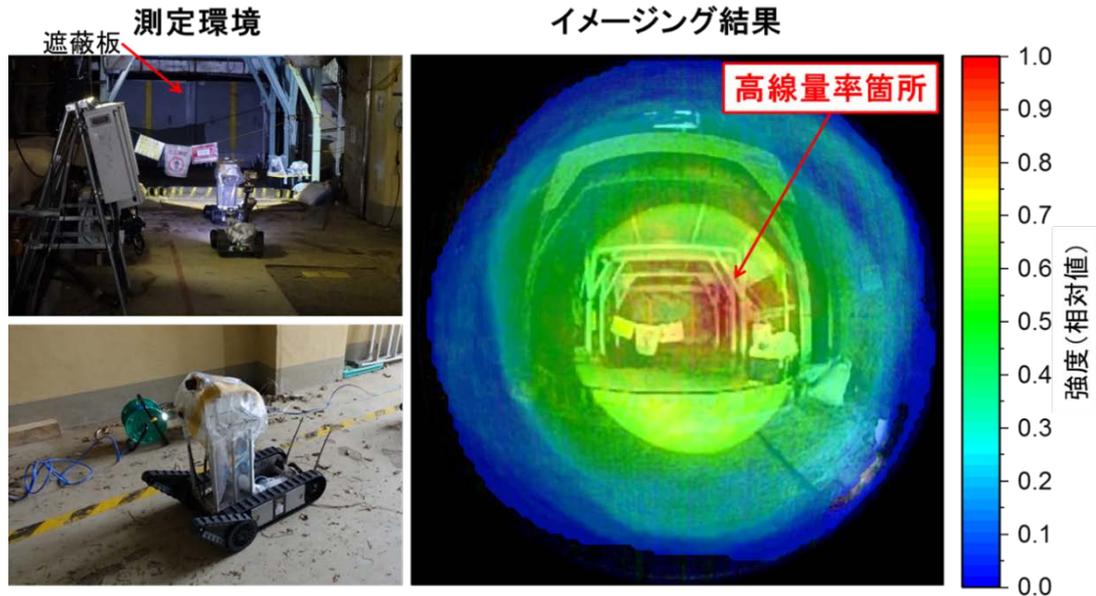


図3 左上：1F1号機原子炉建屋内部における放射線イメージング試験の様子。左下：小型・軽量コンプトンカメラを搭載した小型クローラロボットの外観。右：コンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージ図。通路奥の遮蔽板の右脇からのガンマ線の漏れ出しを検知した。（これらの図は原子力機構平成30年8月28日プレス発表資料より転載）

量率のエリア ( $> 1 \text{ mSv/h}$ ) においてロボットを走行させて測定を実施し、遠隔で、かつリアルタイムにホットスポットを可視化できることを実証した。さらに、試験で取得した複数枚の写真（動画から抽出した静止画を含む）を組み合わせて、作業環境の3次元モデルをフォトグラメトリ技術によって仮想空間に構築し、ここにホットスポットのイメージを描画することを行った（図4）[5]。本手法は写真をもとに復元した現場の3次元モデルを用いることから、そこに写された機器や瓦礫の状態といった現場環境を把握しやすい特徴を有しており、放射性物質の作業環境中の位置を容易に視認することができる[6]。

#### 4. まとめと今後の予定

原子力機構では、小型・軽量コンプトンカメラを基盤として、ロボットや環境認識技術と組み合わせることにより、遠隔にて3次元的な放射性物質分布を取得可能なシステムの開発を進めている。これまでに、1F建屋内の3次元モデルに、コンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージを重ね合わせるにより、建屋情報を含んだ放射性物質分布図を描画することに成功した。この分布図には実環境の寸法や外観を反映させることができるため、作業者がホットスポットの在りかをこの分布図を用いて視認することにより、注意喚起に伴う被ばく線量の低減や、除染計画の立案に資することができる。今後、未だ調査が実施されていない1F原子炉建屋内部において、ロボットに本システムを搭載し、遠隔にて詳細な3次元放射性物質分布が把握できるよう研究開発を進め、汚染源の効率的な撤去や効果的な遮蔽により廃炉作業の推進に貢献することを目指す。



図4 複数枚の写真からフォトグラメトリ技術を用いて再構築した建屋内3次元モデルに、コンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージを描画した。（原子力機構平成30年8月28日プレス発表資料より転載）

**謝辞**

小型・軽量コンプトンカメラの開発に際し、ご助言くださった早稲田大学の片岡淳教授、岸本彩氏、ならびに浜松ホトニクス株式会社の中村重幸氏、平柳通人氏に感謝します。加えて、コンプトンカメラ搭載ドローンシステムを共同で開発している株式会社千代田テクノ小澤慎吾氏に感謝します。最後に、1Fにおける実証試験にご協力いただいた東京電力 HD の宇津木弥氏、菊地弘幸氏、清岡英男氏、高平史郎氏及び測定に協力していただいた同僚諸氏に感謝いたします。

**参考文献**

- [1] 浜松ホトニクス株式会社, 早稲田大学, 科学技術振興機構 (JST), プレスリリース, “放射性物質の除染作業を効率化するガンマ線撮像用コンプトンカメラを製品化”, 2013年9月10日.
- [2] Y. Sato, S. Ozawa, Y. Terasaka, et al. “Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone”. J. Nucl. Sci. Technol., 55: 90–96 (2017).
- [3] Y. Sato, Y. Tanifuji, Y. Terasaka, et al. “Radiation imaging using a compact Compton camera inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station building”. J. Nucl. Sci. Technol., 55: 965–970 (2018).
- [4] 原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター, 東京電力 HD, “1F3号機タービン建屋内における小型コンプトンカメラによる放射線分布測定試験結果報告”, 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第43回), 2017年9月28日.
- [5] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, プレスリリース, “福島第一原子力発電所の作業現場の汚染箇所を遠隔で検知し仮想空間上に可視化する技術を開発”, 2018年8月28日.
- [6] Y. Sato, S. Ozawa, Y. Tanifuji, et al. “A three-dimensional radiation image display on a real space image created via photogrammetry”. JINST, 13: P03001 (2018).

---

\*Yuki Sato<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAEA