

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の現状と技術戦略

Present status and the technological strategy of Fukushima Daiichi NPS decommissioning

(3) 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

(3) Measurement technology for radioactivity distribution in the Fukushima Daiichi NPS

*佐藤 優樹¹¹原子力機構

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災に端を発する東京電力ホールディングス株式会社(東京電力HD)福島第一原子力発電所(1F)の事故から、11年の月日が流れた。1Fではこれまでに、除染や地面の舗装等の実施により、一般服と防塵マスクで作業可能なエリアが敷地面積の大半を占めるようになった。しかし一方で、原子炉建屋内部のように高線量率環境かつ詳細な放射性物質の分布が明らかとなっていないエリアが存在しており、除染や作業の計画立案を実施するためには、迅速かつ簡便に放射性物質の分布を把握するための技術開発が求められている。本講演では、主として作業環境の線量率を上昇させている放射性セシウムの分布を把握するための装置・手法について、原子力機構が進める技術開発を中心に紹介する。

2. ガンマ線イメージャを用いた放射性物質の可視化

2-1. 背景

1F事故後、放射性物質の分布を測定するための装置であるガンマ線イメージャの開発が、複数の機関で実施された。これを受けて、サーベイメータを用いた空間線量率の“点”での測定に加えて、1Fにおける放射性物質の“面”的な測定が実施されるようになった。ガンマ線イメージャにはいくつかの種類が存在し、①ピンホールを設けた遮蔽体で位置敏感型ガンマ線センサを覆い、センサ内のガンマ線検出位置とピンホールの位置関係から放射線源の存在する方向を推定するピンホールカメラ方式、②ガンマ線が物質と衝突することにより引き起こすコンプトン散乱の式を解くことにより、ガンマ線の飛来方向を推定して放射線源の位置を推定するコンプトンカメラ方式、③位置敏感型ガンマ線センサ前方に特殊なパターンに沿って開口部が設けられた遮蔽体(符号化開口マスク)を設置し、ガンマ線入射に対してセンサ面に投影される影の形状から、放射線源の位置を解析的に推定する符号化開口方式、が挙げられる。

例えば、(株)日立製作所製のピンホールカメラは、1号機原子炉建屋内のペネトレーションホール付近においてホットスポット(局所的に放射性物質が集積している箇所)の可視化に成功している[1]。加えて、類似のピンホールカメラは1/2号機間の排気筒下部付近ならびに2号機オペレーションフロアの測定にも利用されている[2,3]。一方で、全方位に感度を有するコンプトンカメラを用いた試験も1F構内の屋外環境で実施されており、ホットスポットを可視化した報告例がある[4]。併せて原子力機構においても、後述するようにコンプトンカメラを基盤とした放射性物質可視化技術を開発している。また、符号化開口方式を用いた測定結果についても、東京電力によって報告がなされている[5]。

なお、上述の測定で得られた結果は、2次元的に放射性物質の分布を可視化したものであった。この理由として、ガンマ線イメージャはガンマ線の飛来方向を推定する装置であるが、同じ角度方向においてそのガンマ線が近くから飛来したのか、もしくは遠くから飛来したのかを判別することができず、線源位置の奥行き情報を得られないためである。しかしながら1Fサイト内は放射性物質が多数の機器や配管、施設、瓦礫といった様々な物体に付着しており、放射線源が3次元的に広がっていることは明らかである。このような環境では、2次元的なイメージしか測定できない従来の定点観測による測定では、放射線源の位置を3次元的に特定し、その形状を正確に把握することは難しい。さらに定点観測では、ガンマ線イメージャと測定対象

の間に遮蔽物が存在する場合、ホットスポットを可視化できずに見落としてしまう可能性がある。このため、複数の視点から作業エリア全域を測定し、ホットスポットを含む放射性物質の分布を3次的に把握することが望ましい。

このような背景を踏まえて著者らは、ガンマ線イメージャの一種であるコンプトンカメラで取得した放射性物質イメージに、作業環境の3次元モデルデータを統合することにより、放射性物質分布を表示した3次元マップを生成する統合型放射線イメージングシステム iRIS (integrated Radiation Imaging System) を開発した。

2-2. 統合型放射線イメージングシステム iRIS の開発と実証試験結果

原子炉建屋を含む 1F 構内に沈着する放射性物質の分布を3次的に可視化するために、iRIS では放射性物質の分布を2次的に可視化するコンプトンカメライメージングに、レーザスキャナ(3D-LiDAR)や写真立体復元を基盤とした3次元環境モデリングを統合した。

図1は、1Fにおける実証試験で用いたセットアップおよび測定原理を示した概略図である[6]。コンプトンカメラに、レーザ測域センサを基盤とした SLAM (Simultaneous Localization and Mapping、自己位置推定と環境地図作成を同時実行) デバイス (米国 KAARTA 社、Stencil2) およびその場の空間線量率を測定するサーベイメータ (株式会社千代田テクニカル、PRD-ERJ) を組み合わせた。このセットアップを携帯した作業者もしくは搭載したロボットが現場を移動しながら全域をスキャンすることにより、放射性物質分布を3次的に可視化したマップを生成するものである。

ここで、作業者が携帯する、もしくはロボットに搭載するという観点から、各種のセンサは小型かつ軽量であることが望ましい。コンプトンカメラについては、浜松ホトニクス(株)と早稲田大学が共同開発した小型軽量コンプトンカメラをベースとして、ガンマ線センサの体積を減らすとともに小型の遮蔽体をセンサ周囲に設けた装置を用いた[7, 8]。ガンマ線センサは図2に示すように、1.5 mm 角の 15×15 ピクセルの Ce:GAGG シンチレータとマルチピクセル光子計測デバイス (浜松ホトニクス(株)、MPPC) を組み合わせたものが2層構造 (散乱体と吸収体) となっており、放射性セシウムからのガンマ線が散乱体と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からガンマ線の飛来方向を推定するものである [9]。



図1. 統合型放射線イメージングシステム iRIS の概略図。コンプトンカメラと3次元測域センサ (SLAM 機器) およびサーベイメータを組み合わせた。オペレータが携帯もしくはロボットに搭載したシステムを用いて作業現場をスキャンし、ホットスポットや移動ルート上の線量率を可視化した3次元マップ生成のためのデータを取得する (令和3年度 福島研究開発部門 成果報告会資料より転載[6])。

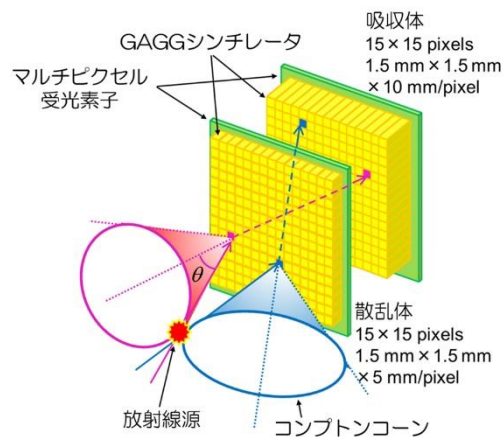


図2. コンプトンカメラの模式図。ガンマ線が散乱体と吸収体の各々で相互作用した位置と、付与したエネルギーからガンマ線の散乱角 (θ) を計算する。次に、この角度を元とした仮想的なコーン (コンプトンコーン) をカメラ前方に描画することにより、コーンの交点に放射性物質を見出す。(日本原子力研究開発機構プレス発表資料 (令和3年5月14日) より転載[9])。

本システムでは、コンプトンカメラのガンマ線イメージング技術に SLAM 技術を組み合わせることにより、従来の定点観測とは異なり、移動しながら作業エリア全体をスキャンする測定が可能となった。具体的には、図 1 に示すように、SLAM により移動中の各時刻におけるコンプトンカメラの自己位置および姿勢の情報を逐一記録するとともに、これをコンプトンカメラのガンマ線検出時刻と同期することにより、移動中の各位置において、ガンマ線の飛来方向を推定することが可能となる。さらに、同じく SLAM で取得した作業環境の 3 次元モデルデータにホットスポットのイメージを投影することにより、その位置や形状を表示した 3 次元マップを生成するものである。なお、従来の定点観測において作業エリア全体を測定するためには、設置、測定、次の測定点への移動、を繰り返す必要があり、作業効率の低下が懸念された。また、ホットスポットの見落としを防止するためには、複数視点からの測定数を増やす必要があったが、本システムの開発によりこれらの課題を改善することができる。

図 3 は、1F1/2 号機間の排気筒付近で実施した実証試験の結果である[10]。上段の図は現場の写真であり、中段と下段は排気筒下部のホットスポット（汚染した配管）を赤色で可視化した 3 次元マップである。この測定において測定者は排気筒下部の高線量率箇所には進入しておらず、排気筒下部と比較して線量率の低い離れた通路を歩きながら、5 分未満の短い測定で取得したデータを用いて、ホットスポット位置を可視化した 3 次元マップを生成することに成功した[9]。併せて、測定者の移動軌跡上の空間線量率もマップにプロットした。

3. 今後の取り組みについて

現在、コンプトンカメラ、SLAM 機器ならびにサーベイメータをロボットに搭載して、原子炉建屋内部のより高線量率環境において、ホットスポットの位置を把握するための取り組みを進めている。また、

これまで放射性物質分布の可視化を中心に技術開発を進めてきたが、現在、その放射能を定量的に推定するための技術開発を進めている。例えば上述した 1/2 号機間の排気筒下部のホットスポットについて、定点観測で取得したイメージデータの強度および測定対象地点までの距離から放射能を算出するとともに、他グループの推定結果と矛盾しないことを確認している[2, 10]。放射能を定量的に評価することにより、ホットスポットが周辺環境の空間線量率をどの程度上昇させるかを議論することが可能になり、同時にそのホットスポットを除去することにより、周囲の空間線量率がどの程度低下するかを見込むことができるようになる。なお、ガンマ線イメージャで取得したデータを用いて周辺環境の放射能分布ならびに空間線量率を推定する技術として、英国 CREATEC 社の線量測定・解析システムである N-Visage が 1F で利用されており、このような技

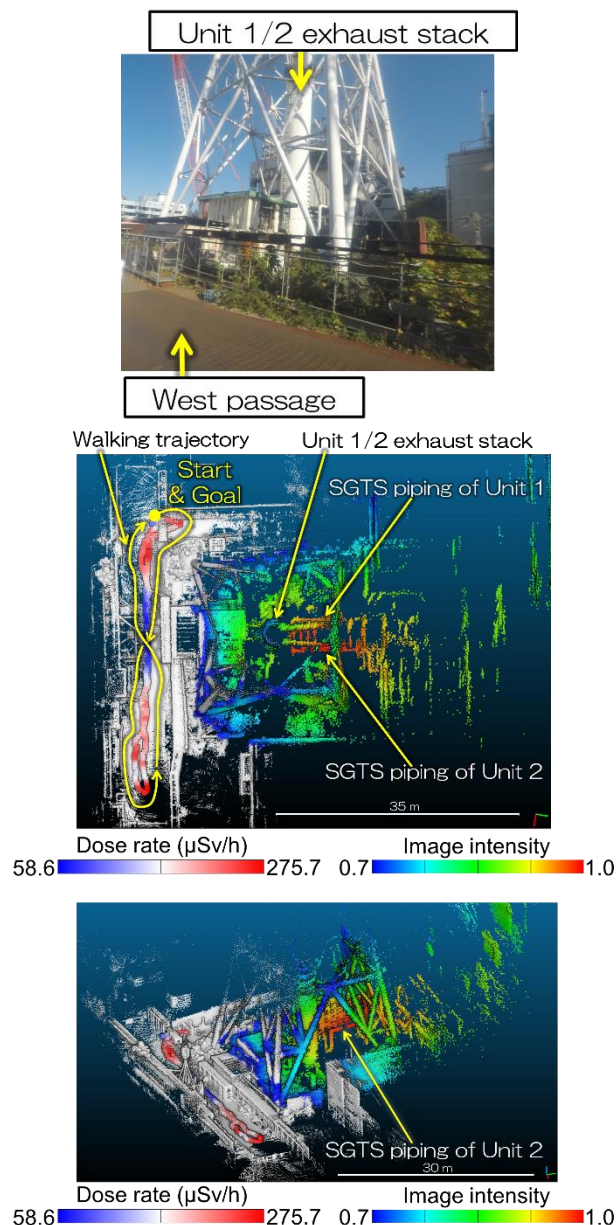


図 3. 上段：実証試験を実施した 1F1/2 号機の排気筒付近の様子。中段、下段は空間線量率とホットスポット（赤色）を可視化した 3 次元マップ。測定者の歩行ルート上の線量率と、コンプトンカメラで可視化したホットスポットをカラー表示した。中段と下段は同じマップについて、視点を変更したものである。（Y. Sato, Y. Terasaka, J Nucl Sci Technol. DOI: 10.1080/00223131.2021.2001391 より転載[10]）。

術についても注視し、1F 廃炉に貢献しうる役立つ知見・技術を本システムに組み込んでいきたいと考えている[11]。

本システムを通して建屋内に存在する汚染箇所や線量率の分布を直感的に俯瞰できる3次元マップを作業者の皆様に提供するとともに、今後は可視化結果の定量評価手法も推し進めて1F 現場に有益な情報を提供したい。

なお本稿の記述は、著者らのこれまでの報告内容を含むものである[6, 9, 10, 12-14]。

4. 謝辞

3次元マップ生成用ソフトウェア COMRIS の開発において、(株)ヴィジブルインフォメーションセンターの根本誠氏、峯本浩二郎氏、黒澤直弘代表取締役にご協力いただいた。併せて、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)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いた。1F における実証試験では東京電力 HD の佐藤航氏、大浦正利氏にご協力いただいた。最後に、iRIS の共同発案者である福島大学の鳥居建男教授ならびに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る。

5. 引用文献

- [1] Okada K, Tadokoro T, Ueno Y, et al., Development of a gamma camera to image radiation fields. Prog Nucl Sci Tech. 4 (2014) pp. 14-17.
- [2] 平山 英夫, 林 克己, 岩永 宏平, その他 2 名, ピンホール型ガンマカメラによる ^{137}Cs 放射能の測定. 日本原子力学会論文誌. 19 (2020) pp. 152-162.
- [3] 原子力規制委員会, 第 11 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会, 資料 3-1, 2 号機オペフロのガンマカメラによる測定結果について, 令和 2 年 3 月 27 日.
- [4] Katagiri H, Satoh W, Enomoto R, et al., Development of an all-sky gamma-ray Compton camera based on scintillators for high-dose environments. J Nucl Sci Technol. 55 (2018) pp. 1172-1179.
- [5] 原子力規制委員会, 第 90 回特定原子力施設監視・評価検討会, 資料 3, 2 号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況および今後の計画について [東京電力], 令和 3 年 4 月 19 日.
- [6] 佐藤優樹, 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発, (国研) 日本原子力研究開発機構 令和 3 年度 福島研究開発部門 成果報告会資料, 令和 3 年 12 月 7 日.
- [7] 株式会社千代田テクノロ, 放射線可視化カメラ「ガンマ キャッチャー」 <https://www.c-technol.co.jp/product/radiationvisualizationcamera/>
- [8] Kataoka J, Kishimoto A, Nishiyama T, et al., Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nucl Instrum Methods A. 732 (2013) pp. 403-407.
- [9] (国研) 日本原子力研究開発機構, 廃炉現場の汚染分布を 3 次元マップで“見える化” — 見えない汚染を仮想空間で把握し、作業員の被ばくを低減 —, 令和 3 年 5 月 14 日プレス発表.
- [10] Sato Y, and Terasaka Y, et al., Radiation imaging using an integrated Radiation Imaging System based on a compact Compton camera under unit 1/2 exhaust stack of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. J Nucl Sci Technol. 59 (2022) pp. 677-687.
- [11] 石川 晃大, 小林 峰人, 建屋内環境改善工事に向けた N-Visage システムによる線量評価技術の展開. アトックス技報. 10 (2018) pp. 18-21.
- [12] 佐藤優樹, 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発 — 放射能汚染を見える化する新システム “iRIS”, 令和 4 年 1 月 21 日, (国研) 日本原子力研究開発機構 令和 3 年度 福島研究開発部門 成果報告会資料, Web にて公開.
- [13] 佐藤優樹, 統合型放射線イメージングシステムの開発, 日本工業出版, 検査技術, 2022 年 5 月号.

[14] 佐藤優樹, 統合型放射線イメージングシステム iRIS を用いた放射能汚染の3次元可視化, 日本アイソトープ協会, Isotope News, 2022年6月号.

*Yuki Sato¹

¹JAEA