

福島原発事故後 10 年間の放射線工学分野における活動と今後の展望

2. 事故後に開発・適用された放射線の計測・マッピング技術

福島大学, 日本原子力研究開発機構, 鳥居 建男
福井大学

日本原子力研究開発機構 眞田 幸尚, 佐藤 優樹

福島第一原子力発電所の事故から 10 年が経過した。事故により福島第一原子力発電所建物やサイト内だけでなく環境中にも広く放射性物質が拡散沈着したことから、事故発生直後より放射線源の空間分布を直感的に把握できる放射線源の可視化への要求が高まり、環境中における放射線分布のマッピングやガンマカメラと呼ばれる放射線のイメージング装置の投入と開発が進められてきた。ここでは、事故後に開発され運用されてきた放射線分布の計測技術について紹介するとともに、今後の展望について述べる。

KEYWORDS: *Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Radiation Measurement, Imaging*

I. はじめに

福島第一原子力発電所(以下、「福島第一原発」という)事故による環境中への放射性物質の放出の影響を調査するためにこれまでさまざまなモニタリングが実施されてきた。事故から 10 年に際し、モニタリングは継続的に実施されており、避難指示区域の解除や除染などの政策決定の基礎データとして活用されている¹⁾。

環境中での放射線の分布を素早く把握するという放射線計測へのニーズに対し、事故直後に有人ヘリコプタを用いたモニタリングが行われた。事故直後に、固定翼のプロペラ機やヘリコプタを用いた航空機モニタリングを最初に実施したのは、米国エネルギー省(以下、DOE)であり、その技術は日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)に技術移転され、現在も原子力規制庁の事業として、定期的なモニタリングが実施されている。航空機モニタリングにおいて、GPS と放射線情報を結合させ確立された地上値に換算する技術は、地理情報システム(GIS)によるマッピング可視化技術とともに、パッケージングした技術として発展してきた²⁾。

また、有人のヘリコプタだけでなく、農薬散布等で用いられている国産の無人ヘリコプタ(以下、「無人ヘリ」という)や近年技術革新の著しい小型のドローンなどの遠隔機器がモニタリングに活用や適用性の研究がなされている。これらのデータは、広範囲に拡散した放射性物

質の影響を迅速に知ることができ、さまざまな防護対策等に活用されてきた。有人の機体を用いた航空機モニタリングと同様に、GIS と組み合わせ、同じ地域を定期的に測定し放射線マップを作成することにより、汚染分布とその推移の把握や除染技術への利用など、有効に適用されてきた。さらに、これらのデータは事故後 10 年間のビックデータとして蓄積されており、さまざまな視点からの解析により分布状況や変化傾向が明らかになりつつある⁴⁾。これらのデータをもとに住民の生活行動パターンを想定した詳細な被ばく評価が可能となりつつある¹⁾。福島第一原発周辺のモニタリングに活用されている国産の無人ヘリは、国内で開発された技術として洗練されてきていることもあり、メンテナンス性や安全性に優れている⁵⁾。さらに、最近では、ドローンに加えて、固定翼の無人機を用いたモニタリングシステムの研究も進められており、福島事故の影響調査だけでなく、原子力防災分野での適用研究が期待されている⁶⁾。

一方、福島第一原発構内での放射線計測技術として、放射線の飛来方向を計測し放射性物質の分布を求めるために、ガンマカメラと呼ばれる放射線のイメージング装置による放射線の可視化技術の開発が進んでいる。ガンマカメラには、 γ 線検出器を囲む遮蔽体に小さな穴を開けてそこを通る放射線を遮蔽体内に格子状に配置した位置敏感型 γ 線検出器でその位置を測定し、穴と検出器の位置関係から放射線源の方向を求めるピンホールカメラ方式と、 γ 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を利用して解析的に線源の位置を求めるコンプトンカメラと呼ばれる方式に大別される。ガンマカメラは福島第一原発事故後、いろいろな測定器が開発され、市販されるようになってきている。こうしたガンマカメラは原子力施設等で一般的に用いられるサーベイメータ

Activities in the field of radiation engineering for 10 years after the 1F accident and future prospects (2) ; Radiation measurement and mapping technology developed/applied after the FDNPS accident : Tatsuo Torii, Yukuhisa Sanada, Yuki Sato.

(2021 年 11 月 6 日 受理)

による“点”の測定と異なり，“面”的な広がりを測定できるため、放射性物質の存在の見落としが少ないと考えられ、放射性物質の分布測定等に期待されている。

ガンマカメラは、小型の光学カメラ(デジタルカメラ)とセットで用いられ、放射性物質の分布とデジタルカメラの写真と重ねることによって、線源位置を直感的に捉えられる。しかしながら、福島第一原発の建屋内には放射性物質が床面だけでなく多数の機器や配管、天井や瓦礫にも含まれていることから、放射線源が3次元的に広がっている。こうした場では、放射線源が多数あること、およびそれぞれの線源強度も異なること、また、放射線源とガンマカメラの間に重量物が γ 線の遮蔽となっている場合が多いことなどから、その絶対強度(汚染密度)や表面線量率を求めることが課題となっている。

そこで、原子力機構では、福島第一原発の構内や建物内の廃炉作業現場での活用を目的とし、小型軽量のコンプトンカメラとそれを用いた放射線源の3次元可視化技術の開発を行い、作業環境での放射線分布の計測に適用している。

本稿では、福島第一原発事故後開発された、環境中および廃炉現場での放射線測定技術の概観と今後の課題についてまとめる。

II. 事故後開発された放射線測定技術

1. 放射線分布マップ

航空機モニタリングは、国が行う主要なモニタリングに位置付けられ、除染範囲の決定や避難区域の解除等の政策の基礎データとなっており、現在でも年1回を目途

に定期的実施されている。

データの取得には、有人のヘリコプタに大型 NaI シンチレーション検出器(シンチレータ体積: $2 \times 4 \times 16$ インチ, 3本)を用いた放射線検出器(RSX-3, Radiation solution Inc., Canada)2基をヘリコプタに搭載し、対地高度を約 300 m に保ちながら行われる。

航空機モニタリングデータの結果例について、図1に示す。本図では、地形を表す陰影図を背景としており、福島第一原発から北西方向に比較的高い線量率の範囲が地形に沿って広がっていることが分かる。事故初期の2011年4月のデータと比較して、2020年10月のデータは $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以上の範囲が小さくなっており、全体的に線量率の減少が確認できる。

有人のヘリコプタは航空法の規制があり、福島第一原発から 3 km 以内でのフライトによる測定はできない。そこで、原子力機構は事故後、無人ヘリを用いたモニタリングを福島第一原発の近傍を中心に行ってきた。無人ヘリは、コンピュータ制御であらかじめ飛行経路をプログラムできることから、より詳細な放射性物質の分布計測が可能である。有人ヘリコプタを用いた航空機モニタリングによる測定結果と無人ヘリによる測定結果の比較分布図を図2に示す。有人ヘリコプタは飛行の測線間隔が 600 m であるのに対して、無人ヘリは測線間隔が 50~80 m であること、また飛行高度も 50~80 m と低いことから、分布のギザギザ(ジャギー)が目立たない。また、図2(右)のように、それらの測定結果は、ほとんどシームレスに接続されている。

また、無人ヘリによる測定は、河川周辺でも行われ、河川敷周辺や河川の合流部に放射性物質が堆積している

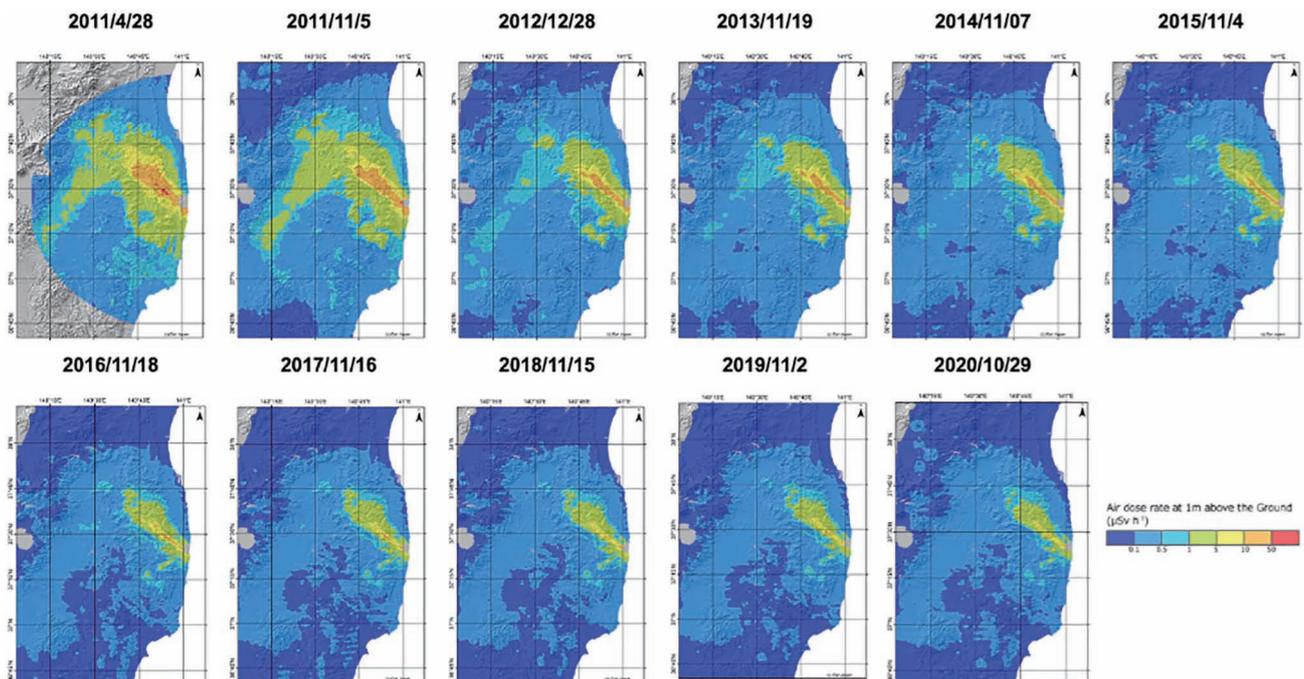


図1 事故直後からの航空機モニタリングによる放射線量率分布の変遷

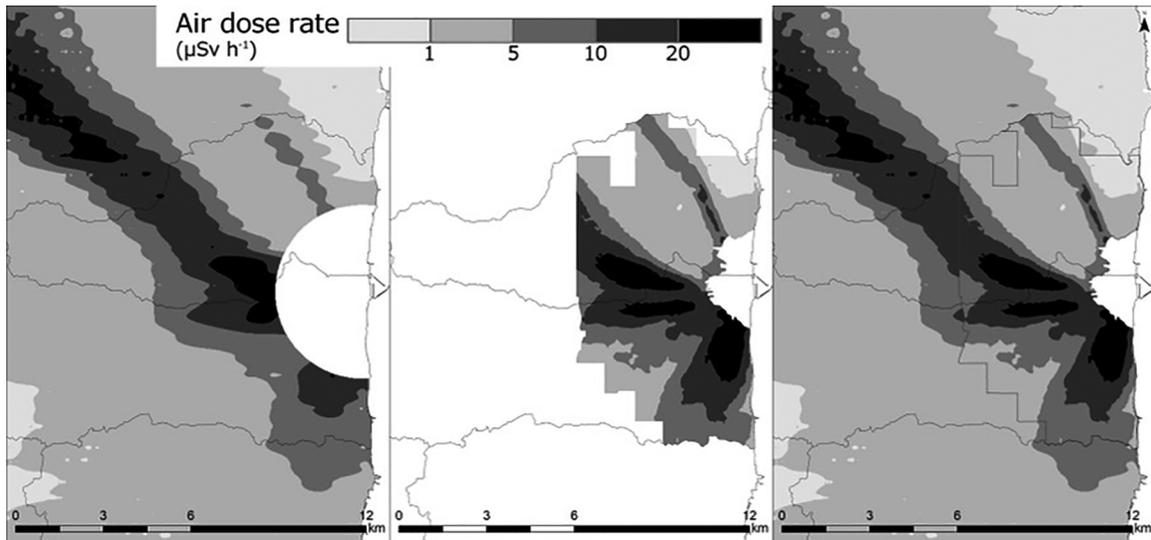


図2 航空機モニタリングによる放射線分布マップ(左:2014年11月測定)と無人ヘリによる福島第一原発周辺の放射線分布マップ(中:2014年7月測定)の測定例, およびその重ね合わせ(右)

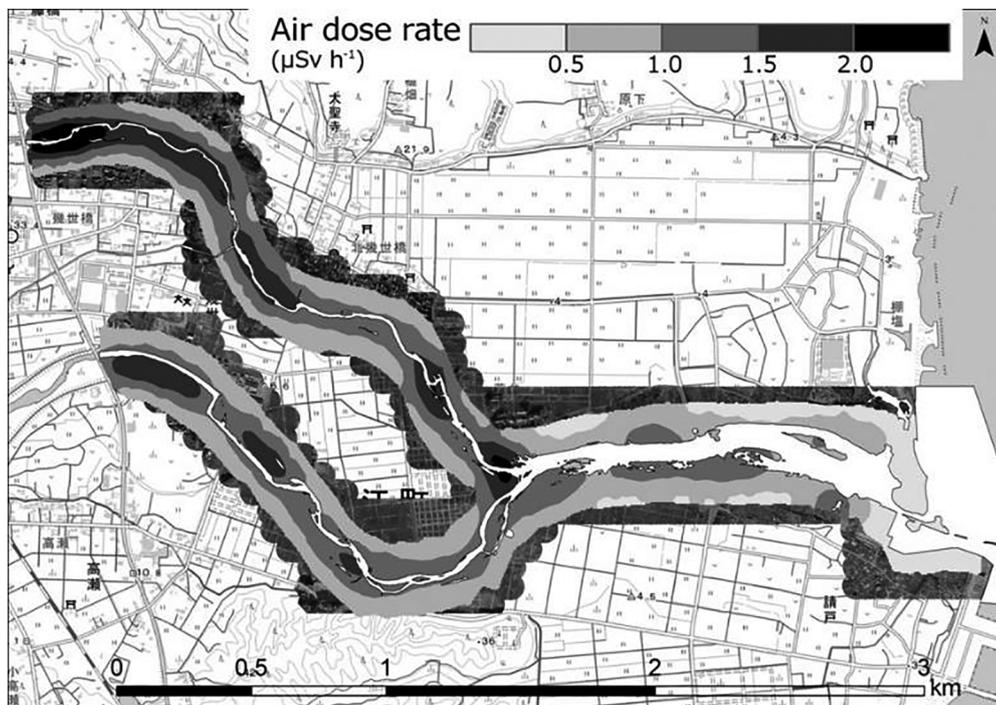


図3 請戸川流域における放射性物質の沈着分布の測定結果例(2014年1月測定)

ことが確認された(図3)。本測定は、定期的に行われ、放射性物質の沈着量減少やその場所の変動も捉えられており、放射性物質の環境動態研究にも利用されている⁷⁾。

これらの研究は、より詳細な分布マップの作成を目指して、測定解析技術の高精度化研究も進められており、地形効果の解析についても機械学習を用いることにより、位置分解能が向上している⁸⁾。

2. ガンマカメラによる放射線分布の可視化技術

福島第一原発の建屋内では空間線量率が1 mSv/h 以上の場所も稀ではなく、局所的に極めて線量率が高い場

所も少なくない。また、原子炉建屋内では調査が行き届いていない場所もある。そのような高線量率の場所で放射線分布を可視化するためには、高線量率でも測定できる放射線検出器が必要となる。検出器は放射線と相互作用してエネルギーを吸収することによってその量を計測することから、多量の放射線が入射しないように小型化が欠かせない。一方、小型化すると検出器内で、エネルギーを失う量が減ることから密度の高いシンチレータや半導体センサーの適用が必要となる。また、高線量率な場所などでは、周りを厚い遮蔽体で囲むか指向性の高い検出器の検討も必要となる。さらに、高線量率の場所に



図4 小型軽量コンプトンカメラの外観

おける作業者の放射線防護のため、人が近づかなくても良いようにロボットやドローンなどの無人で遠隔操作できる機器に搭載できることも重要な要素となる。

福島第一原発では、日立製作所(株)が開発した高密度(5.85 g/cm^3)のテルル化カドミウム(CdTe)半導体を用いたピンホールカメラを導入し、いち早く建屋内の放射線分布を測定している⁹⁾。東京電力ホールディングス株式会社(以下、「東京電力」という)では、このガンマカメラを1号機の原子炉建屋でロボットに搭載して放射線分布を測定し、配管系に高線量率な場所があることを確認した。しかし、このガンマカメラはCdTe検出器の周りを厚い遮蔽体で覆っているため、重量が約80 kgとなり可動性に課題があった。

その後、より軽いガンマカメラを用いた建屋内測定として、英国 Createc 社と Bluebear 社が開発した RISER (Remote Intelligent Survey Equipment for Radiation) による測定が実施された¹⁰⁾。これはドローンにテルル化亜鉛カドミウム(CZT)半導体検出器(密度 5.81 g/cm^3)を搭載し測定するシステムである。

早稲田大学の片岡らは GAGG($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}(\text{Ce})$) シンチレータを用いた軽量のコンプトンカメラを開発している¹¹⁾。原子力機構では、このコンプトンカメラをベースに小型軽量のコンプトンカメラを開発した(図4)。重さ約680 gまで小型軽量化したコンプトンカメラは、現場に持ちこみ易く、ドローンにも搭載可能である¹²⁾。このコンプトンカメラは、 γ 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、および光学画像を取得するための光学カメラからなっている。 γ 線センサーは1.5 mm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 ^{137}Cs からの γ 線が散乱体と吸収体の各々で相互作用した位置

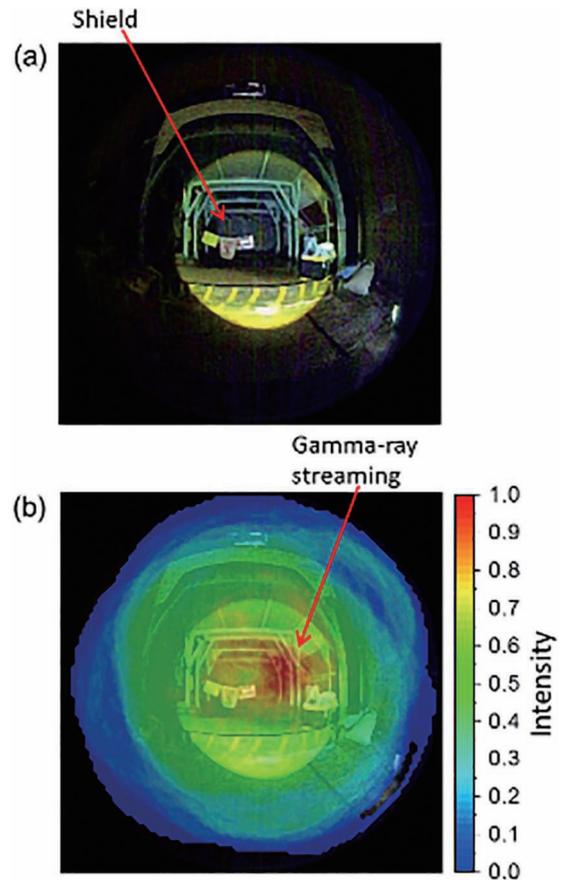


図5 ロボットにコンプトンカメラを搭載して1号機原子炉建屋内で測定した放射線画像¹³⁾CC BY-NC-ND 4.0

と、付与したエネルギーから γ 線の飛来方向を特定している。これまで、ドローンにコンプトンカメラを搭載し、上空から遠隔にて、周囲に比べて汚染強度が高いホットスポットの可視化に成功した¹²⁾。

その後、この検出器を福島第一原発の建屋内の測定に適用する取り組みが精力的に行われている。前述のとおり放射性物質が床面だけでなく多数の機器や配管、天井や瓦礫にも含まれている。こうした場では、放射線源が多数あり、放射線源が3次的に広がって分布している場合が多い。放射線源とガンマカメラの間に重量物が遮蔽となっている場合があること、および線源強度も異なることから、その絶対強度(汚染密度)や表面線量率を求めることが難しい。こうした放射性物質の位置、形状を詳細に特定するため、福島第一原発建屋内部の3次元モデルを取得・構築する技術との組み合わせが欠かせない。

手法としては、写真立体復元技術(フォトグラメトリ)で作成した建屋内構造物の3次的なモデルに、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手法、もしくは、レーザー光を利用した測域センサー(LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging)で取得した建屋構造物の3次元モデルを作成し、放射線源の分布を統合する2種類の手法が挙げられる。

原子力機構では、この小型軽量コンプトンカメラを東

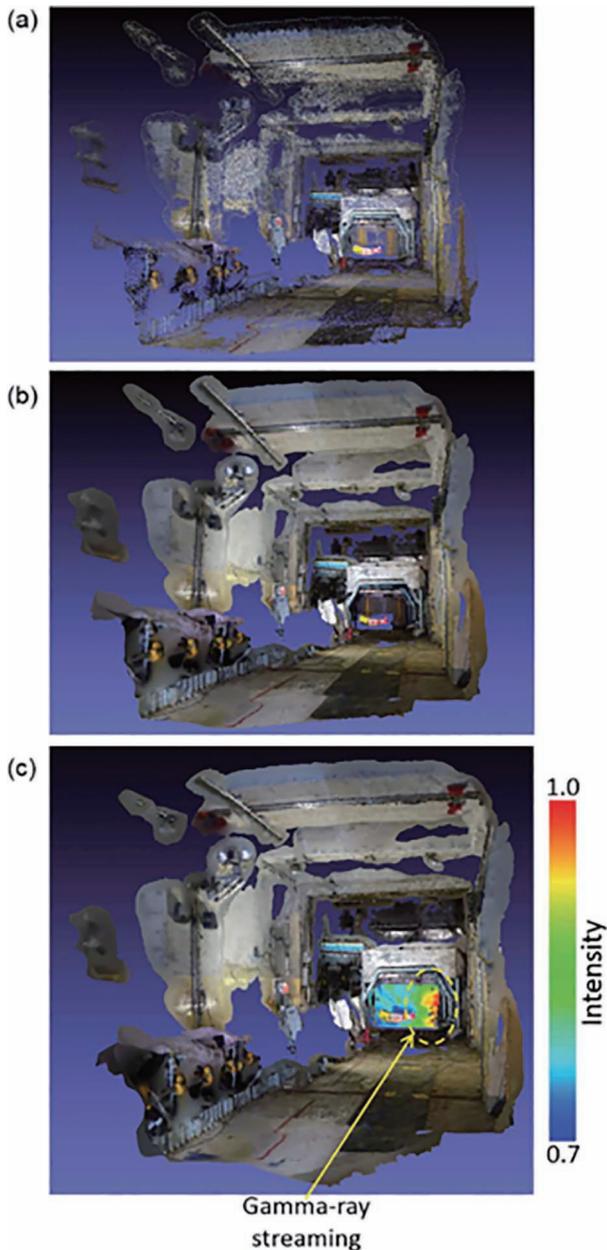


図6 コンプトンカメラとフォトグラメトリを用いた3次元画像¹³⁾CC BY-NC-ND 4.0

京電力所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, 遠隔操作により放射線源を検知する実証試験を実施した。図5に, コンプトンカメラ, デジタルカメラおよびLEDライトをロボットに搭載し, 1号機原子炉建屋内部のホットスポットの遠隔検知を行った例を示す。コンプトンカメラ, デジタルカメラおよびLEDライトをロボットに搭載し, 1号機原子炉建屋内部のホットスポットの遠隔検知に成功した。なお, ロボットおよびコンプトンカメラの操作は, 1Fの免震重要棟から遠隔にて実施している¹³⁾。

また, 図6は, 測定エリアの写真と, 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た3Dイメージ図である。正面奥にある遮蔽板右側の隙間

に強い結像が見られたが, これは原子炉建屋の深部からのガンマ線に起因するものと考えられる。このように本結果は, 作業者の容易な立ち入りが困難な高線量率のエリア(>1 mSv/h)において, 遠隔にてロボットを操作し, かつホットスポット検知を実施した例である。

このように, 新しい放射線測定技術と, 車両の自動運転等を目標として開発されてきた位置情報特定技術を組み合わせ, 福島第一原発の廃炉作業に役に立つ技術開発の取組が進められている。

Ⅲ. まとめ

放射線工学分野における活動の例として, 福島第一原発事故後に行われた放射線計測にかかる研究の知見をまとめた。福島環境回復と廃炉作業に共通する放射線計測における技術的課題として, 放射線分布を可視化する技術の研究開発が挙げられる。ここで紹介したように, 使用方法のニーズとしては, 定点観測することによって測定するモニタ型の方法と, 移動しながら広範囲を測定するサーベイ型の方法がある。前者は, 環境動態や廃炉作業の進捗に伴い放射線分布がどのように変化するか, どのようにすれば線量率が下がるかの判断材料を提供することになる。後者は動きながら測定して放射線源分布の全体像を把握できる。とりわけ福島第一原発建屋内の高線量率な場所では, 小型ロボットやドローンに搭載して動きながら短時間で測定により作業員が作業できるかどうかを速やかに判断するための情報提供が重要となる。そのためには放射線測定器は小型軽量であることは言うまでもないが, 測定器が今どこにあり, 周囲の環境はどうなっているかを知る必要がある。福島第一原発の建屋内はGPSも使えないことから, 位置を認識するためにLIDARを用いたSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術が重要となる。一方, 光学カメラで複数地点から撮影した画像の視差情報を解析することにより3次元画像を構築するフォトグラメトリ技術も進んでおり, 作業環境の3次元画像上に放射性物質のイメージを描画する手法の開発を進めている。今後, こうした放射線分布の可視化と位置認識技術の融合研究がさらに重要になってくると考えられる。

また, γ 線の可視化だけでなく, α 線や β 線放出核種の分布の可視化も放射線防護の観点から重要である。廃炉現場では, バックグラウンド γ 線の影響を受けず, 高い位置分解能を有する α 線検出器の開発も進められている。今後, 広い面積の α 核種や β 核種の分布計測技術の進展が必要と考えられることから, 放射線工学分野の研究者がこれまでの経験を生かした研究開発の推進を期待する。

－ 参考文献 －

- 1) 眞田幸尚ら, 避難指示区域の解除に向けた特定復興再生拠点の放射線モニタリングと被ばく評価, 日本原子力学会和文論文誌, 20, 62-73, 2021.
- 2) 眞田幸尚ら, 有人ヘリコプタを用いた放射線モニタリング, 分析化学, 66, 149-162, 2017.
- 3) 眞田幸尚ら, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプタを用いた放射線測定, JAEA-research 2013-049, pp. 129, 2014.
- 4) Sanada, Y., Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, J. Environ. Radioact., 210, 105816, 2019.
- 5) 柴田英貴, 自律無人ヘリコプタ RMAX-G1 の開発, 日本航空宇宙学会誌, 54, 140-144, 2006.
- 6) 普天間章ら, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, pp. 128, 2021.
- 7) 東北農政局, 大楯ダムの放射性セシウムの実態と対策-請戸川地区の農業復興に向けて-(第2版)pp. 26, 2018.
- 8) Sasaki, M., et al., New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks., Sci. Rep., 11, 1857, 2021.
- 9) Okada K, et. al., Development of a gamma camera to image radiation fields. Prog. Nucl. Sci. Tech. 2014; 4: 14-17.
- 10) 齊藤大祐, ドローンを用いた建屋内線量調査技術, ATOX 技報, 9, 8-9, 2017.
- 11) Kataoka J., et al., Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nucl. Instrum. Methods A. 2013; 732: 403-407.
- 12) Sato Y., et al., Remote radiation imaging system using a

compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. J. Nucl. Sci. Technol. 2017; 55: 90-96.

- 13) Sato Y., et al., Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. J. Nucl. Sci. Technol. 2019; 56: 801-808.

著者紹介

鳥居建男 (とりい・たつお)



福島大学環境放射能研究所, 日本原子力研究開発機構, 福井大学附属国際原子力工学研究所

(専門分野・関心分野)放射線計測, 大気電気学

眞田幸尚 (さなだ・ゆきひさ)



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

(専門分野/関心分野)放射線計測, 環境放射線

佐藤優樹 (さとう・ゆうき)



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

(専門分野/関心分野)放射線計測・放射線測定器とロボットおよび環境認識デバイスを統合した放射線イメージングシステムの開発と実証