

2024年2月8日作成

第81回(通算第206回)放射線防護研究会

「原子力発電所における放射線可視化カメラの利活用」の概要報告

日時：2023年12月9日(土)13:30~17:00

場所：ZOOM Webinar 及び株式会社千代田テクノル本社2階会議室による
ハイブリッド開催

コロナ感染拡大防止の対策として現地参加は先着20名とした。

参加者：43名

開催趣旨

放射線の可視化は、放射線防護策を講じるためのよい情報源となり、福島第一原子力発電所において、廃炉作業を円滑に進めるべく、廃炉作業では放射線量の高い状況でも正確に作動する遠隔ロボットを用いた放射線イメージング測定のために、小型軽量コンプトンカメラやピンホールカメラなどといったガンマカメラが活用されています。また、高汚染・高線量率下においては、放射線の可視化だけではなく、放射線・放射能の情報も重要であり、ガンマカメラを利用した定量や核種同定にも期待されます。

第81回放射線防護研究会では、放射線可視化カメラに焦点をあて、これらの技術の現状と利活用について専門家からご紹介いただき、放射線防護の観点から、今後の放射線可視化カメラに必要な機能や利活用、どのような課題や見通しがあるのかなどについて討論する予定です。

記

1. 日時、場所

日時：2023年12月9日(土)13:30~17:00

場所：ZOOM Webinar 及び株式会社千代田テクノル本社2階会議室によるハイブリッド開催

コロナ感染拡大防止の対策として現地参加は先着20名とした。

2. プログラム

司会：工藤 幸清 放射線安全フォーラム 企画委員(弘前大学 大学院保健学研究科 教授)

講演：

(1) 「統合型放射線イメージングシステムの開発と放射能汚染可視化の実証」

佐藤 優樹 日本原子力研究開発機構 主任研究員

(2) 「ピンホール型ガンマカメラによる ^{137}Cs 放射能の測定」

平山 英夫 原子力規制庁 高エネルギー加速器研究機構

(3) 「福島第一原子力発電所での線量測定・解析について」

河野 秀紀 株式会社アトックス 海外事業室

総合討論

本研究会での、録画並びに録音等については一切禁止いたします。

3. 参加費:(放射線安全フォーラム会員は無料)

一般：2,000円

学生：無料(HP 申込時に学校名、学部・学科、大学院の場合、研究科・専攻、
下一桁を除いた学生番号を記入してください)

12月1日(金)までに、以下の口座に振込をお願いします。

振込名義が申込者と異なる場合は、必ず振込依頼人欄に申込者の名前を入力
してください。

<振込先口座> 三菱UFJ銀行 虎ノ門支店

普通預金口座 0054856 特定非営利活動法人放射線安全フォーラム

4. 参加申込み：ホームページよりお申込み下さい。 <https://www.rsf.or.jp>

事前登録制です。

参加される方は必ず受付フォームより参加申込みをお願いいたします。上記サイトより申し込みされていない方、参加申し込みのない方は、当日参加できない可能性もございます。なお、定員に達した後、または、受付期間終了後の参加お問い合わせは、事務局までお願いします。

5. 申込期日：2023年12月1日(金) 17:00

6. 問合せ：mail@rsf.or.jp

[懇親会] プログラム終了後、現地参加者が参加可能な懇親会を、17時30分から

2時間程度を予定しております。併せてご参加いただければ幸いです。懇親会参加費は別途3,000円です。(支払い方法は上記の口座振り込みと同様です。)

以上

開催概要

講演 1 : 「統合型放射線イメージングシステムの開発と放射能汚染可視化の実証」

佐藤 優樹 日本原子力研究開発機構 主任研究員

福島第一原子力発電所（1F）の建屋内外で廃炉作業が進行中である。作業環境が放射性物質で汚染されており、作業員の安全を確保するためには、作業員の被ばく線量低減が求められ、そのためには、詳細な除染計画の立案、工程管理が必要となる。

周辺環境の把握には、サーベイメータが用いられてきたが、広範囲エリア測定時のホットスポットの見落としや測定時間の増加に伴う作業員の被ばくなどが懸念される。

コンプトンカメラは、散乱体、吸収体で各々、“付与エネルギー”と“位置”を測定し、散乱角（コンプトンコーン）を推定することで、放射性物質の拡がりを“面”的に捉えることができる。ガンマ線センサーの遮へいが必要になることはあるが、ピンホールカメラに比べると感度は劣るが重量を軽くできる。

コンプトンカメラをクローラー・ロボットに搭載し、遠隔測定が可能で、動きながら 1F サイト内の高濃度汚染を可視化できる¹。講演では開発された装置を用いて撮影した福島第一原発建屋内における作業の様子が示された²。異なる視点からの測定にて 2 次元では詳細把握が困難な 1 / 2 号機排気筒下部の同一箇所放射性物質

¹ Y. Sato, et. al., Journal of Nuclear Science and Technology, 55 巻, 965-970 頁, 2018 年 5 月 21 日

² Y. Sato, et. al., Journal of Nuclear Science and Technology, 56 巻, 801-808 頁, 2019 年 2 月 27 日

可視化と線源強度推定にも成功し³、線源周辺の3次元モデルをPHITSにインポートすることで線源分布の質を高めている⁴。

さらに市販のVRゴーグルを用いて“場所を問わず”作業環境を体感できるシステムも開発され⁵、シンプルな“指向性検出器”を用いることで、Cs-137とAm-241の混合場で、核種であるAm-241線源の特定にも成功し⁶、“樹脂”コリメータを用いることで放出核種の遠隔可視化も進められている⁷。

また広範囲において、短時間で簡便に、可視化ドローンを用いたイメージングでホットスポットを検出するシステムも開発されている^{8,9}。このように、1F廃炉現場の3次元マップを仮想空間に描画し、任意の視点から汚染箇所を観察を可能とするシステムである「iRIS」に関して詳細なご説明があった。

質疑

iRISでの可視画像や3D情報と線源情報の重ね合わせについて、光学カメラやLiDARと、コンプトンカメラの位置のずれが3次元の位置精度に影響しないか質問があった。現状では問題は生じておらず、より精度を向上させた際に不具合が出るようであれば、さらに補正したいとのことであった。

³ JAEA, press release, 14th, May 2021, Sato, Y., and Terasaka, 2021. J Nucl Sci Technol. 59. Pages 677-687, 2022

⁴ Y. Sato, et. al., Applied Radiation and Isotopes, 185 巻, 110254, 2022

⁵ Y. Sato, Physics Open, 7 巻, 100070, 2021

⁶ Y. Sato, et. al., Radiation Measurements, 142 巻, 106557, 2021

⁷ Y. Sato, et. al., Journal of Instrumentation, 16, C10008, (2021)

⁸ Y. Sato, et. al., Journal of Nuclear Science and Technology, 57 巻, 734-744 頁, 2020 年 1 月 30 日

⁹ JAEA & Chiyoda Technol Corporation, press release, 9th, May 2019

講演 2 : 「ピンホール型ガンマカメラによる ^{137}Cs 放射能の測定」

平山 英夫 原子力規制庁 高エネルギー加速器研究機構

日立製作所製のピンホール型ガンマカメラ HGD-E1500 の「 ^{137}Cs 線の全エネルギー吸収ピークモード」を使った ^{137}Cs 放射能の推定方法¹⁰を説明された。

^{137}Cs の全エネルギー吸収ピークは、「検出器に ^{137}Cs の 0.662 MeV の 線が入射する直接線」でないと生じない。直接線は、線源情報(核種)と線源と検出器の間にある物質の材質と厚さかが分かっているならば、解析的に計算できる。

カスケードモンテカルロ計算コード eg5 を使って角度依存特性を確認し、線源を用いてピクセル毎の全エネルギー吸収ピーク検出効率を求め、定量性を検証し、線源放射能 を 88 ~ 90 % の精度で推定できる。

その上で 2 号機の屋外非常用ガス処理系配管(SGTS 配管)の汚染量の推定値を「点減衰核計算 による推定」と「東京電力が SGTS 配管上部で電離箱による測定に基づく推定」が比較されていた。

質疑

天からも降ってくる成分があるように見受けられるが、原子炉建屋の屋上は開いている状況なので、遮へい体を透過よりもむしろダストや炉心の方から漏れ出る放射線が散乱して見えたと考えて良いか(総合討論で扱われた)?

講演 3 : 「福島第一原子力発電所での線量測定・解析について」

河野 秀紀 株式会社アトックス 海外事業室

¹⁰ 平山英夫、林克己、岩永宏平、近藤健次郎、鈴木征四郎、“ピンホール型ガンマカメラによる ^{137}Cs 放射能の測定”、日本原子力学会和文論文誌、Vol. 19, No. 3 (2020) 152-162 <https://doi.org/10.3327/taesj.J19.026>

廃炉作業を進めるには労働者の安全確保が不可欠である。労働者の放射線安全を確保するためには除去可能な線源を取り除く必要がある。線源は構内の様々な場所にあるがピットに集積した放射性物質への対応が豊富な現場の写真を用いて説明された。

線源を特定するには計測が必要である。英国 CREATEC 社の線量測定・解析システムである N-Visage システムの活用状況が示された。このシステムは線量測定ツールと解析ソフトからなり、計測ツールとして Gamma Imager は CZT 検出器を用いた放射線計測器でレーザー距離計と光学カメラなどが利用できる。Gamma Imager 据置き型であるが、回転しながら三次元形状情報及びパノラマ写真、線量率、線スペクトル情報を取得する。

Recon は、光学カメラ、放射線検出器を搭載したハンドヘルド型の測定ツールで、手持ちや走行ロボットを用いて移動しながら三次元形状情報及び線量率、線スペクトル情報を取得する。

線量解析ソフトウェア N-Visage は、線量測定ツールで取得したデータの解析ツールで、放射性物質の分布を推計するだけでなく、除染効果が予測できる。

このシステムを活用することで、建屋内の効果的・効率的な線量低減・環境改善工事の計画立案がなされ、実際に線源が除去できた例の紹介があった。

質疑

Q. スラッジの保管場所や取り出したスラッジの保管場所や保管方法は？¹¹

Q. アンフォールディングでビルドアップを考慮しているか？

A. 一定の考慮がなされている。

Q. ビルドアップで形状や元素組成を考慮するとより推計の質が良くなるのではないか。

A.現状では解析者が設定した遮蔽にのみビルドアップを適用している。形状が多重層になると、現実とは離れた結果になる可能性がある。

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉作業では、線量率や放射エネルギーのオーダー感が分かればとりあえず十分と考えられ、現状では困らない精度である。ただし、廃炉が進むと、将来的にはより詳細な分析を求められていく可能性が高いと考えられる。このため妥当性を説明できる方法を今のうちから検討していく必要がある。

総合討論：

講演後に工藤幸清企画委員の司会で総合討論が行われた。

このテーマは当初は、医療機関での可視化ツールを扱うことが想定されていた。医療分野では、管理区域内で労働者が高い線量率にさらされることになる。手指だと100 mSv超がいまだに観測され¹²、かつては線量限度超過もあった¹³。ただし、労働基準監督署への報告例が皆無であった。このような状況下で労災認定例は、『いずれも慢性放射線皮膚障害の認定要件である25,000mSv以上被ばくしていた』¹⁴、さらに事例が増えている。また、眼の水晶体の等価線量だと20 mSvを超過する例が相当数ある¹⁵。

労働者を守るために、照射条件が巧みに制御され、遮へい体なども活用されている。このため、複雑な放射線場になっており、可視化ツールの活用が期待される。

¹² https://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/pdf/2023/no552.pdf

¹³ https://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/pdf/18/no347.pdf

¹⁴ <https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10801000-Iseikyoku-Soumuka/0000191785.pdf>

¹⁵ <https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2023/08/FBN561.pdf>

また、比較的数量が大きい線源を扱うために、管理区域外でも看護学生の実習で線源集積¹⁶に気付かれることがあり、この検知にも可視化ツールが役立つ¹⁷。

1Fでは可視化ツールが活用されており、幅広い分野に参考となる講演があったが、原子力施設を扱うことから、社会的な観点も重要となる。また、東京電力福島第一原子力発電所での廃炉作業を扱ったことから、「廃炉」の捉え方（規制庁と東電のそれぞれの想定とそのギャップ）に関して一般の方からご質問があった。本防護研究会で扱うテーマの根幹としての問題意識に基づく廃炉計画の根本を問うご質問であり、「廃炉」の定義があまりに曖昧との認識に基づいていた。この認識は、原子力学会の専門家の意見¹⁸にも沿ったものであると考えられるだろう。また、その背景として、『廃炉』を急がず、処理水の海洋放出を後回しにしてより減衰させてはどうかとのアイデアがある。しかし、このアイデアは地権者の気持ちを全く考えていないものである。この問いかけには誰も答えられなかったが、あなたは、どのようにこの課題を整理できるだろうか？

ここでのとりあえずの問いは、皆様の作業が何を目指しているかであると考えられるだろう。作業では目標設定も重要となる。その目標は、県民とも共有されているだろうか？

このような前提の確認は重要であるが、発表内容とは直接の関係がなく学会だと研究仮説あり方を問うことはあるかもしれないが、本論とは外れすぎで不適切なものだと受け止められかねない（強い反発を感じられた方もおられるのではないだろうか）。（本来の目的を考えると必ずしも大きな意味がないまま複雑化されてきた線量の概念などいたずらに）学ぶことが困難な課題を扱い、著しい情報の非対称性がある中でのNPOとしての研究会では、このように一般の方からも根本を問う問い

¹⁶ 講演3で取りあげられた事例の規模が小さいものと考えられる。

https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/images/waste/l_131_pipe.png

¹⁷ Muraishi, H., Enomoto, R., Katagiri, H., Kagaya, M., Watanabe, T., Narita, N., Kano, D. Visualization of Low-Level Gamma Radiation Sources Using a Low-Cost, High-Sensitivity, Omnidirectional Compton Camera. J. Vis. Exp. (155), e60463, doi:10.3791/60463 (2020).

¹⁸ <https://digital.asahi.com/articles/ASR992VT8R97ULBH006.html>

かけがなされてきた経緯もある。なお、この方は、地域の方々とも協働し、事故後も地域で様々な活動を展開してこられており、本 NPO 関係では、まさに可視化ツールの現場でも御協力を頂き、自治体の首長や自治体の職員に、このような技術の存在を知らせてくださっていた¹⁹。

また、ここでの発表とは関係はないが、測定の質にも関係した疑念として、UNSCEAR 2020/2021 報告書の甲状腺被ばく線量が主に ATDM を扱った論文であり、講演 2 の演者である平山先生のモニタリングポストによる推計値と二桁異なることへの考え方に質問があった²⁰。最もプルーム濃度が高かった 2011 年 3 月 15 日の濃度が平山先生の推計に比べて、ARDM の推計では約 1/100 に過ぎず UNSCEAR が不当に過小評価しているのではないかと疑念である。二桁の違いがあまりに大きすぎると捉えられている。

ATDM の精度を考えると 100 km 先のプルーム到達時刻と最大濃度を推計することには大きな不確かさがある。実際、質問者が参照した検証では、それよりも線量寄与が小さいものの測定値に比べて ATDM が過小評価しているプルームもあった。このためピンポイントでの比較には大きな限界がある。また、計測では SPM ろ紙試料を用いた方法も有益であるが、当時の霧状況では、得られた濃度データとその解釈も課題となる。いずれにしても、検証を深めることが望まれるが、今回の講演とは直接の関係持たない論点であったので、この研究会では扱われなかった（規制庁として見解が問われていたので）。

平山先生のピンホールカメラに関するご発表で空から入射する 662 keV の光子があるかのような計測結果が提示されていたことに対して、（コリメータを突き抜けた分だと思われるので）BG として補正してはどうかとの意見があり、それに対して、必ずしも現象が厳密に解析できていないので、仮定に基づくデータの操作は避けたいとの回答が平山先生からあった。

講演 3 では、ビルドアップに関して解析者が設定した遮蔽にのみの適用となっている現状が示され、現在の作業環境の特性から線量率や放射エネルギーのオーダー感が分かればとりあえずは十分であるとのことだったが、より厳密な定量性を考え、より

¹⁹ <https://nimosaku.blog.ss-blog.jp/2013-11-09-2>

<https://nimosaku.blog.ss-blog.jp/2014-06-02-1>

²⁰ <https://fukushimakyoto.namaste.jp/akiraka/20230331N03.html>

詳細なモデル化が有益ではないかとの質問があった。現状では、厳密な定量ではなく、大まかな情報把握を目的としているが、特殊な状況では、ビルドアップの条件依存性がより効いてくるかもしれない。

この研究会では東京電力福島第一原発での比較的高線量場をターゲットにした議論がなされたが、最後のまとめで述べられたように線量レベルや核種などによって測定方法は変わり、線源由来の可視化イメージングも目的に応じた課題設定が必要となる。測定システムの保護の課題は、2024年1月に発生した能登半島地震でも通信障害による機能不全として露呈し、さらなる対策が試みられている。

線源由来イメージングは医療放射線分野でも新しい取り組みが進められているが、現場のスタッフの力にもなる技術であることが示された。放射線管理測定においてイメージング技術は現場の管理を変えていくのではないかと思われた。

(担当：山口一郎(放射線安全フォーラム理事))