

原子炉からの微弱な放射性ガス拡散の動画撮像に成功

—放射能拡散のオンライン可視化に成功—

概要

京都大学大学院理学研究科 谷森達 教授（現：名誉教授）、高田淳史 同助教らの研究グループは 2017 年に世界初の放射線の 3 成分の 1 つであるガンマ線の完全可視化技術^{*1}を開発し、Cs 汚染のガンマ線撮像を報道しました（2017 年 2 月 3 日^{参考 1}）。2022 年には、銀河中心拡散ガンマ線を世界で初めて直接検出することに成功したことも国際学術誌で発表しています。また同技術の社会貢献として「放射線施設の画像線量モニタリング技術」を開発しました。廃炉工事による放射性物質飛散の初期段階での検知に利活用することを目指しています。その試験として、今回、駆動中の小型原子炉において、法令基準よりもはるかに微量な放射性ガスの流出の動画検出に成功しました。従来の定点測定では検出不可能な微弱な放射性ガスの流出を放射場所、拡散変化を動画として検出し（図 1）、今まで不可能だった原子力施設の微弱な異常をオンラインイメージングで検出、AI 等の判断技術と合わせ、異常初期段階での発見と対応を可能にする技術であることを実証しました。原子炉建屋外で同様な画像モニタリングが可能であり、原子炉からの放射性物質の流出を可視化し、迅速な異常の検知、迅速な対応と災害予測を実現できる可能性が出てきました。

本成果は 2022 年 3 月 16 日に行われた、日本物理学会 77 回年次大会で報告しました。

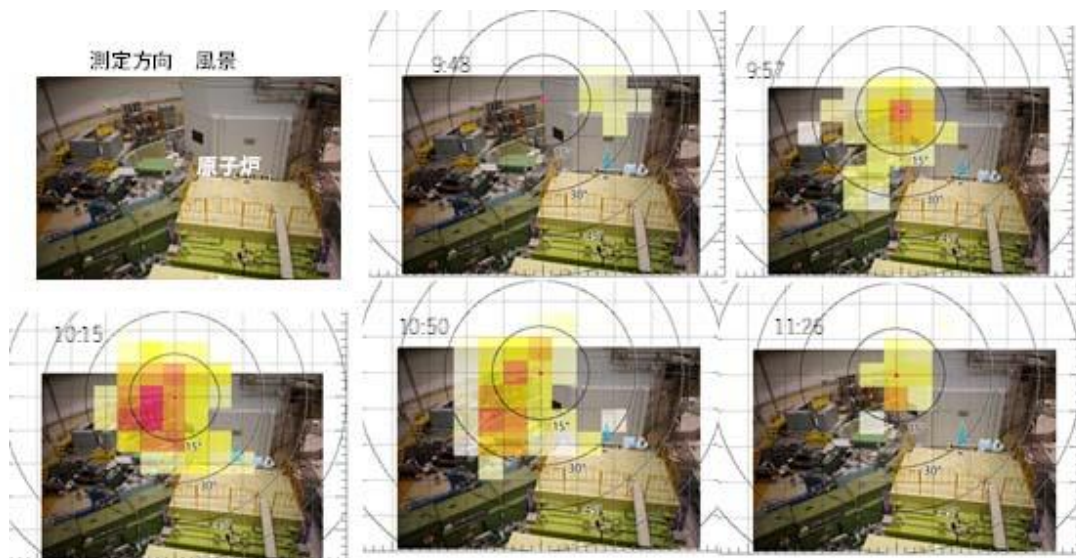


図 1; 2021 年 12 月 16 日午前 10 時前後における、アルゴン 41（放射性同位体）1.29 百万電子ボルトの放射線の空間分布の時間変化。10 時 15 分に最高値（瞬間でも法令の 5 分の 1 以下、測定時間平均では約 100 分の 1）、実際は 7 分間隔で画像がある。測定線量は原子炉建屋内線量の 100 分の 1 の小さい変動でしかない。今までは測定環境と同程度の変動しか画像化できなかった。

1. 背景

放射線を発生する原子力施設や加速器施設内および施設外縁部では、放射線検出器を多数配置して常時線量計測を実施することで安全確認が行われています。しかし、この測定は点での測定であり、施設全域、例えば施設上部などの線量分布が常にモニタリングされているわけではありません。そのため、異常が発生し放射線が基準より多く漏洩してもすぐに検出されるとは限らず、発生場所もすぐには特定できないことが多くあります。そのため大きな事故に繋がる可能性もあります。異常が発生したその場所で、かつ初期の小さな段階で検知できれば施設の安全性は飛躍的に向上します。しかしそのためにはその場所の環境放射線よりはるかに微弱的な線量変化を画像として迅速に捉えるガンマ線のイメージングモニタリング技術が必要です。しかし、ガンマ線の画像化は福島第一原子力発電所（1F）事故の後、周囲の放射線環境より強い放射線源の位置がわかる疑似的画像法によるガンマ線カメラが一部で使用された程度です。また数10mの近距離内でしか線源が見えず、検出されたガンマ線源の定量的線量解析や空間的な広がりもわからないため、使用できる場面は限られていました。

我々は2017年に、ガンマ線の方法を決定でき、光学レンズと同様に計算機上で集光するガンマ線の完全可視化を実現しました。具体的には、光学カメラと同じ原理の画像が得られる電子飛跡検出型コンプトンカメラ（Electron-Tracking Compton Camera, ETCC）を開発し、福島の汚染地区を撮像し、セシウム汚染の広がりや大気からの散乱ガンマ線を世界で初めて画像化しました。しかし当時は装置の感度も低く、原理実証がやっとであり実用にはいたりませんでした。

しかし2018年に、大型のETCCをJAXAの気球で豪州から宇宙に打ち上げ、南天を観測し、世界で初めて太陽系外の宇宙からの約100万電子ボルトの核ガンマ線、いわゆる放射線のガンマ線の直接観測に世界で初めて成功しました。この一連の研究成果をまとめた論文が5月に米国の国際天文学会学術誌に掲載されました。また、同じ技術を用いた可搬型ガンマ線カメラを開発しました（図2）。さらには、2018年から文科省と日本原子力研究開発機構（JAEA）が実施している「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」に採択され、このカメラを用いて2020年には1Fの原子炉全景を含む1km四方を一度に撮像し、100か所以上のガンマ線スペクトルを得ることに成功しました^{参考2}。その成功を受け2021年12月に京大複合原子力科学研究所の稼働中の小型実験用原子炉の建屋内の撮像も実施しました。



2. 研究手法・成果

原子炉内では、稼働時には内部の空気が放射線に当たり、空気中のアルゴンの一部が放射性同位体アルゴン41に変わり、一部はごく微量ですが原子炉外に放出されます。その量は最大でも瞬間で法定基準の5分の1以下で、時間積算すれば数100分の1という微量です。そのような微弱な線量変化であっても、ETCCは動画として撮像に成功しました（図1）。動画のため放出箇所やその後の空気中への拡散が瞬時にわかります。この線量は原子炉建屋内線量の100分の1以下で、他のカメラでは検出が不可能です。今までアルゴン41の放出は広く知られている事象ですが、あまりに微弱で従来の技術では測定も困難なため放出箇所などの詳細は不明でした。まさしく「百聞は一見に如かず」です。

今回の成功はETCCのような完全なガンマ線可視化により、原子炉の微量な変化がオンライン画像でモニタ

リングできることを示しました。当然、原子炉建屋外でも本手法は使用可能です。2020年の1F原子炉全景の撮像能力と合わせれば、原子力発電所の周囲、1kmぐらい遠方から数台のETCCで発電所全域を画像モニタリングすることで、環境放射線程度の微弱な変化でも、異常放射線放射があれば画像として検知可能なことを示しました。

ETCCは光学カメラと同じ可視化原理のため一般的なステレオ投影法を用いて、2か所以上の異なる方向から撮像すれば3次元画像が得られます。本測定では1台のETCCを移動させ、異なる4か所の方向から順次原子炉を撮像しました。今回発表する動画は1つの方向のみの撮像ですが、大半の原子炉からのガンマ線の時間変動は小さく、時間平均することで異なる4か所から同時撮像したのと同様なガンマ線画像を得ることができます。このガンマ線画像から放射線源の3次元分布を求めることを目的として、共同研究者であるJAEAの原子力基礎工学研究センター環境動態研究グループで解析が行われています。

3. 波及効果、今後の予定

従来のガンマ線画像化法は、ガンマ線の方向が不完全であり、また雑音ガンマ線との識別が困難なため、近傍数10m程度の最も強いガンマ線源が分かる程度であり、遠方の弱い線源の強度や広がりなどの定量的な測定は不可能でした。放射線施設の画像モニタリングにはkmスケールの広範囲な地域において、正確な線量分布計測が必要です。放射線施設の測定は法令に従い、線量の定量的評価が当然必要ですが、従来のガンマ線画像検出器では困難でした。しかしETCCは光学カメラ同様な完全可視化を実現しているため可能となります。これは世界で初めて、放射性物質の放出に対して定量計測を実現出来る技術です。

今後、我々はJAEAグループが放射性物質拡散予測のために開発した世界版緊急時環境線量情報予測システム(WSPPEEDI)とETCCの画像計測技術を組合せることで、WSPPEEDIに正確な初期の放射性物質拡散情報を3次元で与え、その予測精度を飛躍的に改善していきます。図3に示す

ように放射線施設から放射性物質が放出された時点でETCC計測システムがその放出量、方向、広がりを検知、その時間変化も捉え、WSPPEEDIに情報を与え、WSPPEEDIが放射性物質の拡散を予測します。さらに中間地点のETCCで実際の拡散を測定し、WSPPEEDIの予測と比較、修正することで遠方での予測精度を飛躍的に改善します。このように将来、放射線施設の安全管理に貢献できればと考えています。

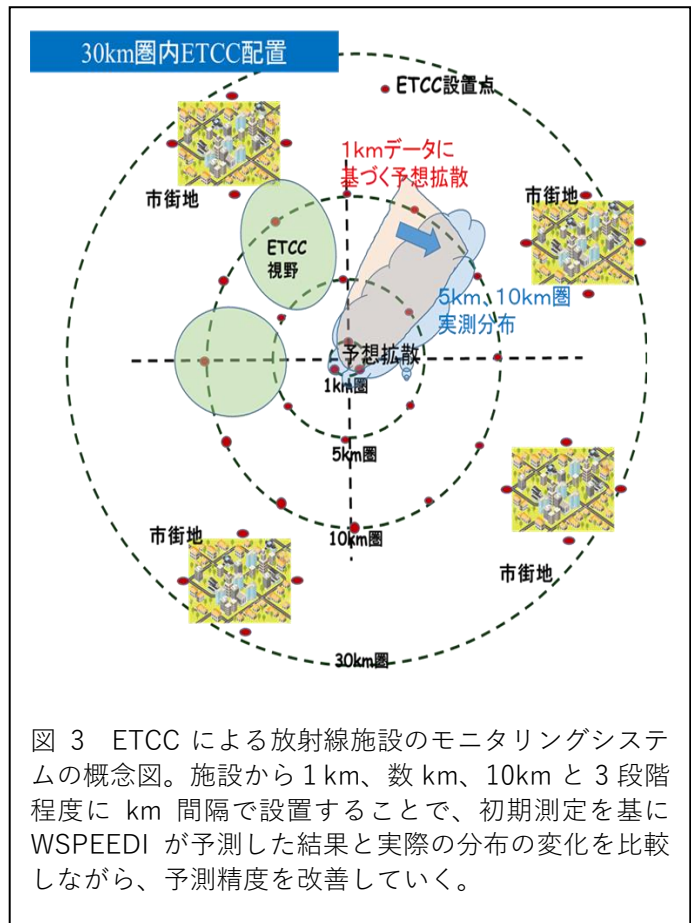


図3 ETCCによる放射線施設のモニタリングシステムの概念図。施設から1km、数km、10kmと3段階程度にkm間隔で設置することで、初期測定を基にWSPPEEDIが予測した結果と実際の分布の変化を比較しながら、予測精度を改善していく。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、京都大学大学院理学研究科（谷森達）と日本原子力研究開発機構（JAEA）原子力基礎工学研究センターの連携のもと、JAEA「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」H30年度課題解決型廃炉研究プログラム 課題名「ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法」の支援を受けて実施されました。

<参考資料>

(参考1) <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2017-02-14>

(参考2) JAEA Review 2020-044, DOI:10.11484/jaea-review-2020-044

<用語解説>

※1 **放射性ガンマ線完全可視化**：ガンマ線が物質の電子と散乱するコンプトン散乱反応を、ガンマ線毎に散乱ガンマ線と反跳電子の両方の方向・エネルギーを測定し、運動量保存則を用いて入射ガンマ線の方向を求め、集光を行い画像化しています。光学カメラと同様、方向と画像の位置が1体1写像となり全単射画像が得られ、数学的に定量性が保証されます。つまり完全な可視化の実現です。一方、普通のコンプトンカメラは困難な電子飛跡の方向を測定しないため、ガンマ線の方向が円環状に広がり、空間の異なる方向の信号が混合するため全単射画像になりません。そのため画像が大きくぼけ、定量性も保証されません。法令基準等に適合が必要な放射線施設などの喪にタイリングには定量性が重要です。

<研究者のコメント>

いわゆる放射能の“ガンマ線”測定では、検出効率が高い“重元素”の使用が鉄則です。しかし核ガンマ線の方向を決定するには微弱な反跳電子の方向測定が不可欠で、重元素では不可能です。我々はこの鉄則をやぶり対極の“希薄なガス”を用いることでこの問題をクリアしました。まさしく“逆転の発想”です。しかし、長らく専門家にはこの手法を受け入れてもらえず、1研究室で約20年間、学生、研究員と共に頑張ってきました。予算獲得にも苦勞し、宇宙以外にも、この手法が有用と考えられる医療や環境にもチャレンジを行い、ここまで研究を継続できました。しかし「捨てる神あれば拾う神あり」で、医療などで鮮明な画像が出ると大変評価していただき、大きな励みにもなりました。（谷森 達）

<論文タイトルと著者>

1. 2022年3月16日 日本物理学会、77回年次大会（オンライン）
講演番号 16pA123-7 題目「電子飛跡検出型コンプトンカメラによる原子炉炉室内のガンマ線イメージング試験」園田真也他。
2. 令和3年度の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の成果報告会
「ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布発表動画（WEBの放射線計測部門） <https://clads.jaea.go.jp/video/>
3. JAEA Review 2020-044, DOI:10.11484/jaea-review-2020-044)

<参考図表>

Ar-41 の拡散状況をイメージング <https://youtu.be/Sz3BNc2YU2s>

2021 年 12 月 16 日午前 10 時前後における、アルゴン 41（放射性同位体）1.29 百万電子ボルトの放射線の空間分布の時間変化。10 時 15 分に最高値（瞬間でも法令の 5 分の 1 以下、測定時間平均では約 100 分の 1）、実際は 7 分間隔で画像がある。