最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

第2回 1Fの廃炉と環境回復をめざして(2)

佐藤 優樹, 川瀬 啓一, 飯島 和毅, 小林 卓也

今回は福島第一原子力発電所(1F)事故への対処のための研究のうち、廃炉の取り組みを紹介した。今回はその続きと、1F事故対処のもう一つの大きな柱である福島環境回復について紹介する。

KEYWORDS: Japan Atomic Energy Agency, Fukushima daiichi NPS, decommissioning, Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Fukushima Environmental Safety Center, Cesium concentration, Ocean pollution

I. 1F 建屋内の放射性物質を可視化

“見えない放射線を見る”—これは、放射線から人を守ることはもちろん、その場所がどういうところかを知るためにも重要となる。福島第一原子力発電所(1F)の廃炉作業においても、目に見えない放射性物質を可視化することにより、作業員の被ばく線量を少なくし、かつ除染を効率的に進める手助けをすることができる。

1F 建屋内では床面や壁、天井、機器、がれきなどのさまざまな物体に放射性物質が付着しており、3次元的に広がった汚染が存在している。また、建屋内は作業員が侵入できない、長時間作業が実施できないといった放射線量率が高いエリアが存在する。

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で測定することにより、汚染源を特定し、効率的な除染に役立てることができれば、廃炉作業の一層の加速につながる。

放射性物質の拡がりを“見える化”

飛散した放射性物質の分布を測定するための装置として、ガンマカメラという放射線測定器が有望視されている。しかし、従来のガンマカメラは数 kg から数十 kg と重く、廃炉現場での活用が容易ではなかった。このような中、早稲田大学の片岡淳教授や浜松ホトニクスに

図1 仮想空間に再現した原子炉建屋にホットスポットのイメージを重ねた。奥の白丸部分がホットスポット

よって小型・軽量ガンマカメラが開発され、重さ 1.9 kg とかなり軽量化が図られた。

原子力機構ではこれらの技術を基盤として、線量率が高い現場でも持ちこみやすく、小型ロボットにも搭載可能な小型軽量化したコンプトンカメラ(ガンマカメラの一種)を開発した。このカメラを東京電力の地上走行型遠隔ロボットに搭載して、1号機原子炉建屋内の調査を実施した結果、周囲に比べて線量率が局所的に高いホットスポットを遠隔にて可視化することに成功した。加えて、作業現場で撮影した写真や動画を組み合わせることによって現場の3次元モデルを仮想空間上に構築し、ここにホットスポットを表示することによって、ホットスポットの在りかを3次元的に把握できるようにした(図1)¹⁾。

また、このような遠隔にて放射性物質を可視化する技

Fukushima Daiichi Decommissioning and Fukushima Remediation (2): Sato Yuki, Kawase Keichi, Iijima Kazuki, Kobayashi Takuya.

■前回のタイトル

第1回 1Fの廃炉と環境回復をめざして(1)

術は、1F サイト内に限らず福島県の帰還困難区域において屋外環境に飛散・沈着した放射性物質の分布測定にも応用されつつある。原子力機構は㈱千代田テクノと共同で、福島県の復興を目的として実施されている地域復興実用化開発等促進事業費補助金事業において浜通り地域の地元企業と連携し、コンプトンカメラをドローンに搭載した遠隔放射線イメージングシステムを開発した²⁾。同システムを用いた帰還困難区域における実証試験では、点在した複数のホットスポットを従来のサーベイメータを用いた測定よりも短時間で検知・可視化することに成功した。

上述した遠隔での放射線イメージング技術について、今後は、1F の建屋内でドローンやロボットにコンプトンカメラを搭載し、高線量な場でも遠隔で詳細な3次元汚染分布が把握できるよう研究開発を進めるとともに、これらの詳細な3次元汚染分布に関する情報を提供することにより、汚染源の効率的な撤去を通して廃炉作業の円滑な推進に貢献することを目指す。

Ⅱ. セシウムはどう動くのか

ここまでは原子力機構が取り組んでいる 1F 事故への対処のうち、廃炉に関する研究を紹介してきた。ここからは事故対処のもう一つの大きな柱である環境回復について紹介する。

原子力機構は「ふくしま」の環境回復に取り組むために事故直後から、ヘリコプターや自動車、あるいは徒歩により放射線量率を調べ、それらをまとめた分布マップを作成してきている。また、除染技術のモデル実証や環境動態研究、さらには住民からの質問に答える「放射線に関する質問に答える会」を実施してきている。その拠点となっているのが、当機構の福島環境安全センターである。同センターは現在、福島県が設置した福島県環境創造センター内にあり、県や国立環境研究所と協力・連携

図2 現地調査：水源めざし、やぶの中を進む

して業務を進めている。

現在、力を入れて取り組んでいる研究の一つが、事故によって環境中に放出された放射性物質が、未除染の森林から河川水系を通して河口域に至るまで、環境中でどう動いているのか、これからどう動くのか、を調べる「環境動態研究」である。研究は、「現地調査」と「シミュレーション開発」の二本柱で成り立っている。ここでは、この研究の二本柱のあらましについて例をまじえて紹介する。

「現地調査」では、森林、河川、河口域などの様々な構成物(土壌、水、植物等)を採取し、そこに含まれる放射性セシウム濃度の経時変化や、地域ごとの放射性セシウムの分布状況の違いを調べることにより、放射性セシウムの起源や移行プロセスを明らかにし、シミュレーションに必要なモデル(物理・化学現象を表す数式)を確立することを目的としている。

福島県東部に位置する南相馬市と浪江町にまたがって流れる太田川の源流域には、深い森が広がる。ここで進められている源流域調査では、河川水に含まれる放射性セシウムのうち、溶存態(イオンのように水に溶けているもの)の起源を突き止めることが目的だ。溶存態は植物や魚などの生態系に移行しやすいといわれており、これらの濃度の将来予測をする上で重要なものであるが、その濃度は時間とともに減少している。現在は全ての河川で 1 Bq/L 未満と非常に低く(最も高い河川でも 0.1 Bq/L 程度)、食品衛生法上の飲料水の基準値(10 Bq/L)と比較しても問題のないレベルである。

林道の終点で車を降り、源流まで沢を詰める(図2)。湧水点付近では、地表からしみ出す湧水、地表を数 m 流下した渓流水、付近の落葉層等を採取した。

下流のダム湖では深度 40 m の湖底の堆積物、深さごとの湖水を採取し、さらにその下流の河川では、自動観測装置を用いて、水位・濁度を継続観測するとともに、水位上昇時には自動で河川水を採水した。河口域では、河口前面の数地点で、海水・堆積物を採取した。多様な環境で継続的な調査を行っているのは、陸域から水域にかけた放射性セシウムの移行挙動について、包括的に理解することを目的としているためである。

これらの現地調査の結果、溶存態放射性セシウムは、湧水点から森林表土を流出する過程で水に溶出していること、放射性セシウムの物理減衰より早い速度で濃度が減少していること、夏場は高く、冬場は低い濃度になる季節変動を示すことなどを、明らかにしている(図3)。これらは、溶存態の起源や移行プロセスを明らかにする上で重要な知見で、微生物が活発になる時期などと比較しながら、解明を進めていく。

シミュレーション開発：様々な条件下での濃度を予測
「シミュレーション開発」では、「現地調査」で得られた

図3 下流域で測定した河川水中に溶存する放射性セシウム濃度の経時変化(請戸川の例)

図4 シミュレーションによる大雨時の高瀬川請戸頭首工における河川水中セシウム濃度の経時変化予測

知見・モデルに基づき、様々な環境条件下での放射性セシウムの挙動を表現できるコンピューターシミュレーションツールを整備することを目的としている。主なツールは二つで、一つは環境中で最もダイナミックな河川水による移動挙動のシミュレーション、もう一つは生態系も含めた環境中の様々な構成物間の移行挙動のシミュレーションである。このうち、河川水系移動挙動シミュレーションは、地質構造を基に地下を3次元、標高データを基に地表を2次元でモデル化し、地表水と地下水を同時に計算して、得られた水循環場から土砂、セシウムの動態を予測する。予測結果と観測結果を比較したところ、現地調査で確認されている溶存態濃度の季節変動等を十分再現できなかったものの、土壌粒子等に吸着

された放射性セシウム(懸濁態)の挙動は良好に再現できた。

このシミュレーションを用いると、例えば様々な降雨を想定した際の各水門における放射性セシウムの濃度変化を予測できる(図4)。その結果、ある水門では、比較的強い雨が降ると、放射性セシウム濃度のピークが2回あることが明らかとなった。降雨時には、放射性セシウムは主に懸濁態として流れるが、1回目のピークは比較的沈着量が多い中流域から流出してきたもので、川の濁りがそれほど多くなくても放射性セシウム濃度は高くなる。一方、2回目のピークは比較的沈着量が少ない上流域から流出してきたもので、川の濁りは非常に多くなるが、放射性セシウム濃度のピークは小さくなる。つまり、農地への影響を少なくするためには、1回目のピークより前に、すなわち、川の水の濁りのピークより前に水門を閉めたほうが良いということが言える。

「福島総合環境情報サイト」を開設

原子力機構では、放射性物質の沈着分布やその経過を把握し、住民の方々の被ばく線量の推定や除染の計画立案の基本情報として整理し、関係機関によるデータを集約した「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」を公開している。

また、これまでの環境動態研究等で得られた知見を、Q&A形式で整理し、「根拠情報Q&Aサイト」として公開している。本サイトは、住民の方々のニーズの高いQを出発点としていること、知りたい情報の詳細度に応じて階層的に情報を整理し、根拠となる論文まで追跡できることが特徴である。

さらに、開発したシミュレーションツールを用いて環境中の空間線量率や放射性セシウムの動きについて様々な環境条件下での解析の結果をまとめた「解析事例サイト」を整備し、これまでに公開してきた各サイトと合わせて「福島総合環境情報サイト」を平成31年3月に公開した³⁾。このサイトでは、実際の観測データ、現地調査に基づく放射性セシウムの分布や動き、それらに基づく数値解析の結果等多角的に情報を知ることができる。このように、研究開発で得られた知見・情報を分かりやすく提供することで、住民の方々の疑問解消はもちろん、自治体・関係機関の施策検討まで、幅広く役立てていただけるよう努めている。

このような環境動態研究の成果は、福島県での復興の進展に合わせて、毎年自治体や国等の関係機関に取りまとめて提供しており、避難指示解除の判断根拠や、農林水産業の復興計画策定のための基盤情報として活用いただいている。これらの貢献を評価いただき、平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)をいただいた。今後も、将来の放射性セシウムの挙動を予測する上でカギとなる溶存態の生成・移行プロセ

図5 2011年4月15日におけるセシウム137の海表面濃度分布

スを中心に調査研究を進め、シミュレーションツールの精度向上と、分かりやすい多角的な情報の発信を継続してまいりたい。

Ⅲ. 事故による海洋汚染を予測する

原子力施設等で万一の事故により放射性物質が環境中に放出されると、放射性物質は大気・陸域経由または直接海洋へ放出され、海洋汚染を引き起こす。海洋環境の汚染状況を把握し緊急時対策を検討するために、事故により放出された放射性物質の分布と移行過程を予測することは重要である。

このため原子力機構では放射性物質の海洋拡散モデルの開発を進めてきており、福島第一原発事故の際には、その海洋拡散モデルを福島沿岸域に適用し、海水中における放射性物質の移行過程を再現した。

しかし、これらは事故が発生してから数週間経過してから過去の海流場を用いて計算を実施したものであり、「将来の汚染状況を把握する」計算の即時予測性能はなかった。同時に、計算に必要な海流等の入力データの作成や妥当な計算条件の設定に3週間程度かかるなどの課題があった。

1ヵ月後までの海洋汚染を3時間で予測

そこで原子力機構では、2014年8月から配信が開始された気象庁の海象予報オンラインデータを活用することなどにより、日本周辺の海域や海水中および海底堆積物中の放射性物質の濃度を1ヵ月先まで迅速に予測することができる緊急時海洋環境放射能評価システム(STEAMER: Short-Term Emergency Assessment system of Marine Environmental Radioactivity)⁴⁾を開発した。

このシステムは、原子力機構が開発した放射性物質の大気拡散を予測する緊急時環境線量情報予測システム(世界版 WSPEEDI)とあわせて用いることで、大気を経由して海洋へ降下する放射性物質の分布も予測すること

が可能である。

このシステムには、日本を含む東アジア諸国の原子力施設と米国の原子力艦船の停泊港の位置情報が登録されており、これらの施設で事故が発生した際には、単位放出条件を用いて速やかに海洋拡散予測計算を実施することができる。

また、登録された施設から海洋への直接放出を仮想した事前予測計算を毎日自動で実行する機能も備えている。事故発生から30日後までの予測に必要な計算時間は約3時間である。

登録地点以外で原子力事故が発生した場合や、放射性物質の施設から海洋への直接放出に加えて大気を経由して海洋へ降下する場合、そして放射性物質の放出量情報が事故の進展に伴い明らかになった場合は、計算条件の変更が必要となる。そのため詳細計算機能として、放射性物質の種類、放出海域の位置・深度、放射性物質の放出モードの形態、放出量情報の時間変化等の計算条件を詳細に設定して予測計算を行うことが可能である。

このシステムの計算モデルの予測性能を確認するために、1F事故によって発生したセシウム137による海洋汚染の再現計算を実施した。WSPEEDIで計算された大気から海洋への降下量と海洋への直接放出量を入力して計算した結果、東京電力、文部科学省、そして各研究機関が測定した本州沿岸から沖合海域におけるモニタリング値を良好に再現できたことを確認した。2011年4月15日におけるセシウム137の表層濃度分布を再現したのが図5である。さらに試験運用として、原子力施設からセシウム137が1 Bq/hの放出率で海洋へ直接放出することを仮想した計算を2014年9月から2019年10月(執筆時現在)まで毎日実行し、システムの安定性と堅牢性を確認した。

このシステムの開発により、海洋汚染の予測情報に基づいて海水を採取する場所の設定、分析結果を用いた放射性物質の海洋への放出量推定と汚染分布の再現、これらに基づく禁漁海域や航行禁止海域の設定など、緊急時対策の検討や事故の詳細解析に役立てることも可能となる。このほか沿岸部での詳細な予測機能の追加⁵⁾を手がけていく予定である。

なお、1F事故後の海洋汚染については本誌にいくつかの解説記事等が公表されている。ここではそれらの記事のあらましと本研究との関連について紹介する。

日下部正志「環境における放射性核種の分布と動態 3. 海洋における人工放射性核種の動態」(2011)は、環境に放出された人工放射性核種がその後どのような分布挙動をするかについて、過去の研究成果を総括することにより、その後の調査研究に示唆を与えることとなったものである。

中野政尚「長期的な海洋環境影響は？」(2011)は1F事故直後に放出された放射性物質が地球規模では長期的に

どのように海洋拡散するかを、原子力機構が開発した計算コード LAMER を用いて広域的な海水中濃度を 2041 年まで予測し、それによる海産物摂取による被ばく線量を推定したものである。

青山道夫「福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウム同位体の北太平洋における総量と分布」(2012)は、事故に由来する放射性セシウムが北太平洋全域にどのように拡散し、これからどうなるのかを、過去の研究成果と当時の観測結果をもとに推定したものである。

なお中野、青山の論文は 1F 事故発生から間もない時点での限定的な情報と当時の計算コードにもとづいて書かれたものであり、実測データはその後相当程度、拡充された。また、将来の予測についても、LAMER は計算の容易さを特徴としているため、低分解能の計算格子で単純な物理モデルを解いており、概況を把握することはできたが、今回紹介した STEAMER のような高分解能で詳細な物理則にもとづいて計算された海象データを援用するならば、より精確な予測が可能となることが期待される。

本多牧生、乙坂重嘉「福島原発事故由来の放射性物質が付着した海底堆積物の再懸濁と水平輸送過程」(2016)は、1F 事故由来の粒状態放射性セシウムが、海洋内でどのように移動しているかを 3 年間にわたって調べたもので、その結果、放射性セシウムが沈着した海底堆積物が大陸斜面に水平方向に移動していることがわかったことを紹介したものである。今となってはさらに、沿岸域における表層堆積物中のセシウム 137 濃度減少には、生物攪乱等による堆積物の鉛直混合に伴う希釈が最も大きく寄与する⁶⁾などの知見が得られている。

青山道夫、山澤弘実、永井晴康「福島第一原発事故の大気・海洋環境科学的研究の現状 事故の何が分かったか、事故から何がわかったか」(2018)は、1F 事故により大気や海洋に放出された核種や放出量、放出の時間経過について、2017 年までに明らかになったことをまとめたものである。

－ 参考文献 －

- 1) Y. Sato, Y. Terasaka, W. Utsugi et. al., Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, Vol. 56, pp. 801-808, doi:10.1080/00223131.2019.1581111
- 2) (国研)日本原子力研究開発機構, (株)千代田テクノル, プレスリリース “空からすばやく環境中の放射性物質分布を 3 次元で可視化”, 令和元年 5 月 9 日, <https://www.jaea.go.jp/02/press2019/p19050901/>
- 3) <https://fukushima.jaea.go.jp/ceis/>
- 4) T.Kobayashi, et al., “Development of a short-term emergency assessment system of the marine environmental radioactivity around Japan”, Journal of Nuclear Science and Technology, 2017, Vol. 54, p. 609-616.
- 5) Y. Kamidaira, et al., “Development of regional downscaling capability in STEAMER ocean prediction system based on multi-nested ROMS model”, Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, Vol. 56, p. 752-763.
- 6) S. Otosaka, “Processes affecting long-term changes in ¹³⁷Cs concentration in surface sediments off Fukushima”, Journal of Oceanography, 2017, Vol. 73, p. 559-570.

著者紹介

執筆順, 所属はすべて日本原子力研究開発機構

佐藤優樹 (さとう・ゆうき)

(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組み合わせた遠隔放射線イメージングシステムの開発と実証

川瀬啓一 (かわせ・けいいち)

(専門分野・関心分野)除染・環境回復

飯島和毅 (いいじま・かずき)

(専門分野・関心分野)陸域・地質環境における放射性核種移行

小林卓也 (こばやし・たくや)

(専門分野・関心分野)海岸工学・砕波帯における波浪の現地観測