解説シリーズ

環境回復の取組の概要と遠隔放射線モニタリング

原子力機構による環境回復の取組(1)

日本原子力研究開発機構 米谷 雅之, 眞田 幸尚

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故より3年が経過し、放射性物質に汚染された環境を修復するための技術開発の加速化が求められている。原子力機構は、事故以来、福島復興に向けて環境汚染への対処のため様々な活動を行ってきた。ここでは、解説シリーズの第1弾として、原子力機構における活動の概要及び放射線分布を測定するための遠隔放射線モニタリング手法の現状と課題について解説する。

KEYWORDS: *Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Accident, environmental recovery, remote radiation monitoring, JAEA*

I. はじめに

東日本大震災による東京電力第一原子力発電所事故(以下、発電所事故)により環境中に放射性物質が放出された。我が国唯一の総合的な原子力の研究機関である国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、これまで培ってきた放射性物質を取り扱う技術のノウハウを駆使して、環境中のモニタリングによる汚染状況の把握や環境回復の基本的な手法として除染が有効であることを、政府からの受託事業を通じて実証してきた。この成果を踏まえ、福島県を中心に各自治体等で復興計画の策定や除染事業が進められている。

緊急時の対応の一環として、原子力機構が取り組んできた環境回復に係る研究開発は、平成27年度までの政府が示した集中復興期間を終えるとともに、今後は平成27年度より福島県内に開設・運営が開始される「環境創造センター」を中心に展開される。

事故から4年経過した現在及び今後の原子力機構の環境回復に向けた取組について、3回シリーズで報告する。

II. 原子力機構における環境回復の取組

1. 国の取組方針と法的措置

平成23年11月11日に「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故

Outline of the activity for the environmental recovery and the R&D of remoteradiation monitoring: activities for the environmental recovery by JAEA (I) Masayuki Yoneya, Yukihiisa Sanada.

(2015年5月13日 受理)

により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」に基づく基本方針が閣議決定され、ここに示された方針に従い、原子力機構は福島県やその周辺の環境の修復に向けた活動を開始した。さらに、平成24年7月13日に定められた「福島復興再生特別措置法」に基づき、「福島復興再生基本方針」が閣議決定され、この方針に従い原子力機構は研究開発に係る諸活動を進めてきた。第1図に、原子力機構の主な環境回復に関わる活動についてまとめる。

2. 環境モニタリング及び環境動態研究

発電所事故後、日本全国の汚染状況を確認するために有人ヘリを用いた放射線モニタリングが文科省と米国エネルギー省により開始された。事故以前には日本において確立されていなかった本技術は、原子力機構により標準化され、現在も原子力規制庁により継続的な調査が行われている¹⁾。本手法で描かれたマップは、日本中に広がりつつあった放射線に対する不安を払しょくするとともに、除染の区域や避難区域を決定する基礎資料となった。本技術をベースとした遠隔モニタリング技術は最近、技術革新の著しい無人機をプラットフォームとして新たな展開を見せており、その詳細について述べる。

また、地上からは、原子力機構を初めとし放射線に関係した研究を行っていた大学等の国内の研究機関が文部科学省のもとに集結し、線量率の測定やサンプリングによる測定をベースとした放射線等の分布マップを作成する事業が行われた²⁾。本事業は、その後「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」として継続的に行われ、環境中での放射性物質の移

第1図 原子力機構の主な環境回復にかかる活動経緯

行に関する知見や予測シミュレーションなどの研究成果を提供している。一方、地層処分の評価のため放射性核種の移行等をテーマとしていた研究者を中心に、長期的な放射性核種の環境動態研究を行う「福島長期環境動態研究(F-TRACE)プロジェクト」³⁾を立ち上げ、詳細な環境動態に関する知見を得るための研究を実施している。これら環境動態研究の詳細については、シリーズ発表の第2回目以降に報告する。

3. 除染活動の先鞭となるモデル事業の実施及び自治体の支援活動

震災後まもなくの平成23年6月、原子力機構は福島県福島市内に拠点を構え、住民不安の解消のための放射線に関する知識の普及活動などさまざまな緊急時対応を行った。その後、同年10月より内閣府「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」(略称：除染モデル事業)を機構は受託した。同事業が環境回復におけるさまざまな取り組みの起点となっている。

本事業では、事故後の汚染に対して、環境回復のために除染技術が適用可能であることを、避難区域の11市町村を対象に具体的に示した。また、学校の校庭や公園の汚染された土壌面を剥ぎ取る深さを決定する方法として、土壌の深度方向の放射性セシウムの分布測定が行われた。これらの知見は、環境動態研究として森林や河川敷等、さまざまな土壌の汚染状況の把握に生かされている。

さらに、同事業では除染により発生した廃棄物を中間貯蔵開始前に仮置きすることについても注力した。仮置きであるため、強固な固定施設とした場合、費用増大や

建設期間が長期となり適さないが、他方、放射線を遮蔽することなど一定の安全性の確保が求められ、両方の相反する要求を満たすため、機構のこれまで培ってきた放射性廃棄物の取扱技術を活用した。除染技術の実証及びその後の本格除染時の自治体への支援活動等については、シリーズ発表の第2回目以降に報告する。

Ⅲ. 遠隔放射線測定技術の概要

発電所事故直後、原子力機構は環境への放射性物質の拡散状況を調査するために、有人のヘリコプター(以下、有人ヘリ)や無人の飛行体を用いた空からの放射線測定技術の開発・運用を開始した。事故の影響を調査する上で、上空からの放射線測定技術は、山林や田畑などの人が容易に入れない場所の測定が可能であること、広い範囲の空間線量率や地表面に沈着した放射性セシウムの分布を視覚的に把握できることから極めて有用な技術である。

原子力機構が開発した自律型の無人のヘリコプターを用いた放射線測定システムは、線量率の高いエリアや河川敷等の調査で活用されている⁴⁾。さらに1回の航続距離の長い無人飛行機や急速に普及が進んでいるドローンに放射線検出器を搭載したシステムの開発も進んでいる。

これらの技術は、現状の発電所事故からの環境回復に役立てるだけでなく、将来的に原子力防災のツールとして整備することを目標としている。本稿では、発電所事故により放出された放射性セシウムの分布測定に使用されている、もしくは研究開発が行われている遠隔放射線モニタリングツールとそれを用いた放射線測定技術及び今後の課題について概説する。

IV. 遠隔放射線モニタリングの手法

1. プラットフォーム

プラットフォームとしての飛行体は、それぞれの特徴に応じて、適用先が分けられる。有人ヘリは、基本的に測定できない場所はないが、航空法の制約を受けるため、低空で飛ぶことが難しい。また、測定が大がかりなものであり、実施するには十分な準備と態勢が必要である。それに対して、農薬散布等で多くの使用実績のある無人ヘリコプターにプログラム飛行の機能を付加した自律型の無人ヘリコプター(ヤマハ発動機社製 R-MAX G1, 以下, 無人ヘリ)は、低空での飛行による詳細なモニタリングが可能であるが、無線でコントロールする地上局との離間距離が最大 3km 程度と測定範囲が限られる。また、標高 1,000m を超えるような山間地や無線電波が届きにくい入り組んだ地形の地域では測定は困難である。有人ヘリと無人ヘリを補間する技術として、原子力機構では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と共同で無人航空機を用いた放射線測定システム(Unmanned Airplane Radiation Monitoring System: 以下, UARMS)の開発を行っている⁵⁾。UARMS の特徴は、長距離通信での無人飛行が可能(最大約 100km)及び航続距離が長い(最大約 6 時間)ことが挙げられ、将来的には原子力防災ツールとして適用が可能と考えている。また、マルチローター(複数の回転翼)の小型無人ヘリコプター(ドローン)を用いた測定技術についても開発が進められている。ドローンの利点は操作がしやすく、コストがかからない点である。第 1 表にこれらの遠隔放射線モニタリングツールの特徴についてまとめる。

2. 測定システム

搭載する検出器は、NaI や LaBr₃等の γ 線エネルギー弁別の可能なシンチレーション検出器が使用される。検出器の大きさは、適用するプラットフォームの最大のペイロードや飛行の高度によって選択される。有人ヘリの場合は、40cm×10cm×5cm×6 本(12L)の NaI シンチレーション検出器、無人ヘリには、直径 3.8cm × 高さ 3.8cm(0.13L)の円柱型の LaBr₃シンチレーション検出器が使用されている。UARMS には、直径 7.62cm × 高さ 7.62cm(0.13L)の円柱型の LaBr₃シンチレーション検出器、ドローンには、1cm×1cm×2cm の立方体型の GAGG シンチレーション検出器が採用されている。

これらの検出器を搭載した機体で、目的のエリアをくし形に一定速度でフライトを行いながら、一定時間ごとに γ 線スペクトルデータと同時に全地球測位システム(Global Positioning System: GPS)により対応する位置情報(緯度、経度、海拔高度)を取得する。

3. 解析手法

遠隔放射線モニタリングによる一般的な地上における線量率及び放射性セシウムの沈着量への換算手法について、第 2 図に示す。まず、上空で取得した γ 線スペクトルから、宇宙線や機体や検出器に含まれる自己汚染による計数を減算する。その後、地形が平坦で地上の線量率が均一な場所において、地上でのサーベイメータや Ge 検出器を用いた測定値と比較することによって求めた換算係数により、地上の線量率や放射性セシウム濃度に換算する。NaI シンチレーション検出器など放射性セシウムと天然由来の放射性核種との弁別が難しい検出器の場合には、地表における放射性セシウムの浸透具合を表す

第 1 表 遠隔放射線モニタリングに使用されているプラットフォームとしての機体の種類と特徴

	有人ヘリコプター	無人ヘリコプター	無人飛行機	ドローン

最大飛行時間	2時間程度	90 分	6時間	15分
ペイロード	100 kg 以上	10 kg	10 kg	3 kg
遠隔操作の距離	-	3 ~ 5 km	100 km 程度	数100 m 以下
モニタリング上の利点	遠距離飛行可能	プログラム飛行が可能 校正のためのホバリングが可能	プログラム飛行が可能 燃費がよく長距離の遠隔操縦が可能	プログラム飛行が可能 操縦が簡単
モニタリング上の欠点	搭乗員の被ばく 航空法の制限	遠隔操縦の距離が短い 操縦のための訓練要	校正のためのホバリング ができない 操縦のための訓練要	遠隔操縦の距離が短い ペイロードが小さい
地形追従	パイロットの操縦による	パイロットの操縦による	DEMデータを基にした オートパイロット	パイロットの操縦による
安全性	飛行実績豊富	冗長系などの安全性考慮、 農薬散布等実績多い	実績が少ないが、冗長系 などの安全性機能	飛行実績少ない、安全性 機能少ないが軽量
経済性	使用料が高額	初期投資が必要	無人ヘリコプターに比べると 安価	安価
その他	民間ヘリ運航会社を利用	国内で実績がある自律型 はヤマハ発動機製のみ	JAEAとJAXAで 共同開発中	国内外で開発

第2図 遠隔放射線測定における一般的な解析フロー

係数である重量緩衝深度(β)を仮定することにより求めた線量率から地表面の放射性セシウム濃度に換算する係数⁶⁾を使用することにより、放射性セシウムの沈着量を算出する。これらの測定結果は、Inverse Distance Weighted (IDW) 法や Kriging 法を用いて内挿しコンター図として表示している。内挿法に用いるパラメータは、測定の範囲やツールによって最適化している。

4. 地上の測定結果との比較

本手法の妥当性は、地上でのサーベイメータなどでの測定値と比較して検証している。第3図(a)に検証例として、原子力規制庁の行った平成26年度の有人ヘリによる航空機モニタリングの結果及び同時期における地上測定の結果を比較した例を示す。ここでは、地上測定点と上空の測定点の距離が近い点(300m 以内)を抽出し、比較している。

また、前述のとおりマップの作成には、測定点間の値を内挿法により推定しているため、上空で測定した点から離れるに従って地上の線量率とのマッチングが悪くなることが想定される。第3図(b)に内挿の妥当性についても検証した例を示すため、比較した例を示す。ここでは、地上測定点と上空の測定点の距離が遠い点(300m 以上)を抽出し比較している。

このように、両結果とも、0.5~2.0 倍の範囲に分布しており、上空からの測定結果は、地上での測定結果をよく再現できているといえる。また、現状の放射線分布に対し設定している測点の間隔や速度などの条件が合理的であることも示している。このように、遠隔放射線モニタリングの目的は地上における線量率や放射性物質濃度を評価することにあるため、地上での測定値と様々な観点で比較しその妥当性を評価することが必要である。

第3図 有人ヘリによる測定結果と地上測定値の比較

(a: 上空での測定点と直下の地上測定データの比較;
b: 上空での測定点から距離がある場所(内挿点)と地上測定データの比較)

V. 測定結果例

1. 有人ヘリによる広域な放射線モニタリング

有人ヘリによるモニタリングは事故直後から原子力発電所を中心とした放射性セシウムの影響の比較的高い地域について、継続的に測定が実施されており、線量率の変化状況が可視化されている。特に、発電所から80km 圏内の測定は計8 回行われている。第4図に結果の一部を示す。測定の時期とともに、線量率の高い暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。

本データは、除染等の区域設定の基礎資料となっているだけでなく、環境放射能の研究者にも用いられている。また、小学生の教科書の副読本中に採用されているなど⁷⁾、住民への説明資料として活用されている。

2. 無人ヘリによる発電所から5km 圏内におけるモニタリング

東京電力福島第一原子力発電所から3km 圏内については、航空法による飛行制限区域(平成25年2月5日までは飛行禁止区域、現在は高度1,500m までの飛行制限

第4図 上段：有人ヘリモニタリングによる発電所から約80 km 圏内の線量率マップの時間変化
下段：無人ヘリモニタリングによる発電所から約5 km 圏内の線量率マップの時間変化

区域)となっており、有人ヘリによる航空機モニタリングは実施されていない。また、地上での測定結果も限られており、別の手法による全体像の把握が必要であった。そこで、平成24年度より無人ヘリを用いて発電所から3km圏内のモニタリングを開始した。発電所周辺は、線量率が高く避難指示区域に設定されているが、詳細測定により放射性物質の拡散状況を細かく把握できると考えられる。本地域では、原子力規制庁の実施している「放射性物質の長期的影響把握手法の確立事業²⁾」の一環として、過去6回のデータが取得されており、線量率の変化傾向が示されている。第4図に結果の一部を示す。有人ヘリのモニタリングと同様に、線量率の高い暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。同地域は、除染廃棄物の中間貯蔵場が多く建設されるエリアでもあり、今後も無人ヘリによる継続的なモニタリングが必要である。

3. 線量率分布の変化傾向

モニタリング時期による変化を、より定量的に比較するために、第4図に示した有人ヘリのモニタリング区域を250mメッシュに分割し、2011年11月の測定結果を基準とし、各測定結果の同メッシュのデータの比(相対

減衰率)を求め、更に比を平均化し、経過時間とともに第5図にプロットした。同図には比較のため、重量緩衝深度を一定($\beta = 1$)として放射性セシウムの沈着量と地上1m高さでの空間線量率の換算係数と放射性セシウムの物理的半減期から計算した線量率の変化(実線)を示す。このように、経過日数が長くなるにつれて、物理的半減期から計算した線量率の変化よりも有人ヘリによる実測値は減少率が大きい傾向にあることが分かる。一方、事故後、継続的にスクレーパープレート(フレームで規定された範囲の土壌を、表層から順に任意の厚さで削り取る土壌採取器具)を用いて土壌中の放射性セシウムの深度分布を調査した結果を見ると、事故後から年々深度が深くなってきていることが報告されている²⁾。この報告結果から重量緩衝深度の変化を考慮し線量率を計算することができる。重量緩衝深度が、経過時間と一次関数の関係にあると仮定し、文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法⁶⁾」に重量緩衝深度毎に与えられている換算係数から、理論的な線量率の変化を計算した。計算結果を、第5図に示す(点線)。このように、有人ヘリの測定結果と計算結果はよく一致することが分かる。

この結果は、土壌中への浸透度合いが線量率の変化に

第5図 有人ヘリによる避難指示区域のモニタリング結果における変化傾向(誤差棒は比の標準偏差)

大きな影響を与えることを示唆している。しかしながら上空からの測定の場合、平坦で攪乱の少ない土壌の場所だけでなく、森林、山林や住宅地なども測定範囲に含むため、単純な重量緩衝深度の考え方が適用できない場所も多い。今後、土地利用状況との関連や森林や構造物の上空を測定した場合の評価方法の検討が必要と考える。

V. 成果と今後の課題

発電所事故以来、有人ヘリや無人ヘリによるモニタリングが日本で実施されて4年目となり、パラメータの精度やシステムの定期的な保守及び軽微なトラブルへの対応経験により、作成する放射線量率マップの精度は高まってきているといえる。発電所事故直後から、米国エネルギー省は航空機モニタリングを実施しており、有効なデータを残している。これらのデータは、国内の研究者により事故直後の ^{131}I の分布図⁸⁾や海水面における放射性物質の分布図として公表されている⁹⁾。今後、米国や英国のような、航空機モニタリング先進国と同様に現在の技術を維持するとともに、国際間で方法を比較手法の標準化を目指すことが必要だと考える。

有人ヘリと無人ヘリによるモニタリングを補間する技術として、前述のとおり、原子力機構はJAXAとの共同研究により、UARMSの開発を行っている。このシステムは、発災現場から100km以上離れた場所においてコントロールしながら飛行することができることから、操作員の安全を確保しながら測定でき、緊急時においても広い範囲を遠隔でモニタリング可能なツールとして有用であると考えている。しかしながら、まだ開発段階にあり、有人ヘリや無人ヘリのような実績はないため、システム全体としても安全性、危険を回避する能力を十分に確保できるよう実用化に向けて開発が必要である。

ドローンによる放射線測定は、今後、利用法も含めて将来性の高い分野と言えよう。しかしながら、安価で簡便な手法だけに、安全性を確保する技術の開発も必要になる。また、低高度は周辺の放射線の影響を受けやすいことが想定されることから、線量の評価技術も今後の課

題である。

事故以前には、“点の集合”であった放射線モニタリングが、航空機モニタリングを初めとする遠隔モニタリングの実施により、“面”のモニタリングとして情報提供が可能となった。今後、福島第一原発周辺でのモニタリングだけでなく、原子力防災ツールとして、それぞれの長所を組み合わせるモニタリングシステムを整備していくことが重要であろう。

— 参考資料 —

- 1) 原子力規制庁ホームページ：航空機モニタリング結果
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/List/191/List-1.html> (2015年4月閲覧)。
- 2) 原子力規制庁ホームページ：文部科学省による放射線量等分布マップ(線量測定マップ)の作成について
http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5044/24/5600_080218.pdf(2015年4月閲覧)。
- 3) 原子力機構ホームページ：福島県における放射性核種の環境中移動調査・研究～福島長期環境動態研究(F-TRACE)プロジェクト～
<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/project.pdf> (2015年4月閲覧)。
- 4) 眞田幸尚, 他, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, (2013)。
- 5) 佐藤昌之, 他, Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-, 計測自動制御学会論文集, 51, 215-225(2015)。
- 6) 文部科学省, ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法, 放射能測定法シリーズ 33(1992)。
- 7) 文部科学省ホームページ：小学生のための放射線副読本, http://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afieldfile/2014/03/03/1344729_1_1.pdf(2015年4月閲覧)。
- 8) 鳥居建男, 事故後初期の航空機モニタリングから得られたヨウ素 131 沈着量の分布, 日本原子力学会誌, 55, 702-706 (2013)。
- 9) Inomata, Y. et al., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey, J. Nucl. Sci. Technol., 51, 1059-1063(2014)。

著者紹介

米谷雅之 (よねや・まさゆき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)高レベル放射性廃棄物処理

眞田幸尚 (さなだ・ゆきひさ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線管理