

福島第一原子力発電所近傍における放射能除染技術と除染の現状

泉 雄一
Izumi Yuuichi

1. はじめに

2011年3月の東京電力(株)福島第一原子力発電所における電源喪失と、これによる放射能放出事故から約3年が経過した。当初、原発から半径20kmに設定されていた警戒区域は年間線量により再編され、帰還困難区域(50 mSv/年超)、居住制限区域(20 mSv/年超 50 mSv/年以下)、避難指示解除準備区域(20 mSv/年以下)となった。

居住制限区域及び避難指示解除準備区域では、住民の帰還を早期に実現するため除染作業が行われており、これらの国直轄除染地域以外に100か所を超える市町村の汚染状況重点調査地域でも自治体によって徐々に除染作業が進められている。この除染作業に携わる作業員の安全管理を目的として除染電離則が制定され、どのように除染するかなどをまとめた除染関係ガイドライン¹⁾が公開された。

以上のことから、本稿では除染作業の分類や線量率低減効果、課題などをまとめることとした。なお、放射性核種としては、線量率に最も大きく寄与している放射性セシウム(¹³⁷Csと¹³⁴Cs、以下単にセシウムと記す)を中心に取り上げることとした。

2. 汚染の状況

原発事故によって放出された放射性物質の総量が原子力安全保安院(当時)により推定され

ている。この値から放射性物質の重量を算出すると、¹³⁴Csで約4,700g、¹³⁷Csでは約380gとなる。重量にすればこれだけのものではあるが、環境に放出されたことで甚大な被害をもたらすことになった。

今までに汚染の状況を把握するために自治体を含めて、各種学会、大学、研究機関などによる精力的な汚染調査、特に土壌中セシウム濃度の測定が行われてきた。

その結果、土壌の深さ方向のセシウムの分布は、畑作地、樹園地や校庭などで深さ3cmないし5cmまでに90%以上のセシウムが含まれていることが分かっている。さらに、土壌中では大半が粘土鉱物に吸着され、粒径の小さな土壌成分の濃度が高いとの報告がある。これは粘土鉱物の表面付近に、より多くのセシウムが含まれていることにより、重量当たりの表面積が影響しているものと思われる。

また、事故直後に実施されたGe半導体検出を用いた分析結果では、¹³⁷Csと¹³⁴Csとの濃度の比率が、多くの試料でほぼ1であったことが報告されている。このことから、¹³⁷Csと¹³⁴Csの濃度比や線量率の時系列な変化が算出できる。さらに、ある時点での合計濃度が分かれば、¹³⁷Csと¹³⁴Csのそれぞれの濃度が分からなくても、その後の濃度推移も推定できる。なお、セシウムの生成過程や濃度比については、河田燕らによる解説²⁾を参照されたい。ちなみに、全放出量の推定値では濃度比は0.83であり、また大阪大学の公開資料³⁾では平成23年

*放射能測定・除染技術等に関する調査検討専門委員会

6月時点で、ほとんどの地点で濃度比の実測値は0.9~1.1となっている。

3. 除染方法の分類と効果

事故後、試験的な除染や実証事業などが継続して実施され、多くの除染技術について、その除染効果や課題が報告されてきた。例えば、道路の除染試験、住宅や公共施設などの建築物についての除染試験結果は(独)日本原子力研究開発機構(以下JAEA)により、水田などの農地の除染についての技術資料は農林水産省からまとめられている。その他、森林の除染、除染に使用した機器自体の除染に関する資料や除染廃棄物の減容などに関する資料などがある。

これらの除染では、高圧水による洗浄機のほか、道路の除染には道路の保守などに使用されていた大型機器が、農地除染では一般的に用いられている農業機器を用いる方法が多い。これは、一般市場に提供されていた機器の適用を考慮したものと思われる。

また、土壤除染では表面を3~5cm取り除くことで線量率がかなり低下するものの、透水性アスファルトなどでは高圧洗浄による効果はあまり上がっていないとされる。このため、アスファルトやコンクリートなどでは表面を数mm削る方法や圧力を上げた洗浄機器の適用が提案されている。例えば、圧力が10MPa程度のもものでは30~50%程度の除染効果であるが、200MPa以上ではより除染効果が高く、90%以上の除去率があるとされている。

一般的に、表層を削るなど“はつり回収”して取り除く方法が可能であれば除去率が高く、多孔質の構造物などでは内部まで汚染が浸透していることが多いため除去率が低くなる傾向がある。

4. 除染の課題

前記のように、数多くの除染対象物について試験結果や手順の具体例などの整備が進められており、参考となる資料も多くの団体から公開

されている。

しかし、生活圏全体の広域での除染作業には多くの問題が残されている。中間貯蔵施設の設置箇所が確定していないため仮置き場が必要であるが、市街地では調整が難航していることが多い。このような場合は、除染で発生した廃棄物はコンテナバッグに収納され、放射性物質が漏出しないように対策を施して除染区域に保管されているのが実情である。

さらに、次のような課題が挙げられる。

1) 除染効果の目標設定

除染作業によりどの程度線量率を低下させることができるかという目標を設定することは容易ではない。汚染レベルが高い区域では除染効果が高いものの、低い区域では除染効果が低い傾向にある。

線量率の低減効果は汚染状況や使用する機器などによって異なるため、現状では明確な除染効果の目標は設定されていないことが多い。

除染関係ガイドラインでは平成24年8月~平成25年8月の間に線量率を50%に低下させることを目標としている。前述したセシウムの濃度比率を基に計算すると、この間に線量率は物理的な減衰で81%に減少する。よって、この期間中に実施される除染作業自体の低減目標は約62% ($81\% \times 62\% \div 50\%$)となる。

除染作業の最終目的は線量率の低減であるから通常NaIシンチレーションサーベイメータを用いることになるが、除染作業自体の効果を判定する際にはGMサーベイメータによる表面汚染の低減率で評価することもある。また、作業後に何%に低減したかという“低減率”の記載と、何%を除去したかという“除去率”の記載が混在していることもあり、誤解される要因ともなっている。

2) 再汚染と再除染

一般的に、ウェザリングによってセシウムが移動するため線量率が低下したり、場合によっては上昇したりする。

このため、除染作業が終了しても、その後の

定期的なモニタリングで再び線量率が上昇することもあり、場合によっては再除染が必要になる。ウェザリングなどの影響を知るには、環境中でセシウムがどのように移動するかを把握することが重要である。

このことから、文部科学省により森林、土壌、地下水や河川水などの包括的な移行調査が開始された。また、JAEAによる研究では河川やダムでの移行調査、河口での拡散モデルなどが検討されている。

しかし、セシウムの移行状況は単純ではなく、多くのパラメータが必要であり、モデルの構築や検証にも多くの時間を要すると思われる。

なお、当初、再除染は実施しないとされてきたが、除染で取り切れなかった部分など、一部では再除染する方向で検討が進められている

3) 河川底土の除染

大半の河川で河川水にはセシウムは検出されていないが、河川や湖沼の底土では濃度が高いことが環境省から報告されている。

現状では水による遮蔽によって線量率が低くなっていたことで、底土の処理は進展していない（例えば、厚さ 50 cm の水により、セシウムの γ 線の量はほぼ 2% に低下する）。

しかし、水源としての利用や水産資源への影響を考えると、セシウム濃度の高い河川では河川底土を固定化して流出を防止することも検討されるものと思われる。

4) 廃棄物の減容処理

土壌を中心とする除染作業で発生した廃棄物を減容することで保管する施設の施工が容易になる。また、将来、中間貯蔵施設から最終処分場に移すまでにできる限りの減容が求められている。

森林除染で発生する落葉、枝葉や樹皮などはセシウム濃度が高いが、燃焼することによってかなり容積を減少させることができる。JAEAの燃焼試験報告では 1/20 程度に減容できるとされている。

また、高圧洗浄などで用いられた洗浄水は凝集沈殿により効率的に処理することが可能で、処理水にはほとんどセシウムが検出されないことが多くの試験で報告されている。

これに対し、回収した汚染土壌の減容は容易ではない。JAEAの研究では粘土鉱物が湿潤状態になることで、粘土鉱物の端部にセシウムが取りこまれると推定されている。前述のように土壌中では粒径の小さい成分でセシウム濃度が高いことから、分級することで濃度を低減できると思われる。さらに、物理的に衝突させて磨砕することによって粘土鉱物表面の研磨を組み合わせると、よりセシウム濃度を低減できると推定される。しかし、問題となるのはその量である。環境省によれば除染によって生じる除去土壌量は 1,500 万 m^3 を超えるものと推定されている。実際に、この量を分級処理するには、高濃度の廃棄物のみを選択したとしても大規模な処理設備と多くの時間とエネルギーを要すると思われる。

5. 樹木の除染

生活圏の線量率低減を目標とする除染以外に、もう 1 つの除染が実施されたことがある。これは果樹の表面を除去することによって、生産される果実のセシウム濃度を下げることが目的であった。

福島県農業総合センターによる報告では、様々な果樹の表皮を高圧洗浄することで樹皮表面の表面汚染を 15% 程度に減少させることができ、この作業によって、果実中のセシウム濃度がほぼ 70% に低下したとされる。

前述のように、土壌の深さ方向の測定結果では砂質土壌などを除けば、表層から 10 cm より下にはほとんどセシウムが浸透していない。果樹などの木本では養分を吸収する吸収根の領域は 15 cm より下とされていることから、セシウムは幹や枝に付着し、主として樹皮の皮目を經由して内部に取り込まれ、“転流”したものと推定されている。

6. 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ について

放射性物質汚染対処特措法に基づいて 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域を汚染状況重点調査地域として、各自治体によって除染作業が実施されている。

この 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ という値は次のような仮定により算出された。

- ①大地からの自然放射線による線量率は一定で 0.04 $\mu\text{Sv/h}$ とする。
- ②屋外に 8 時間、屋内に 16 時間滞在する。
- ③木造家屋での遮蔽効果を 0.4 とする。

しかし、古田定昭はサーベイメータで測定される実用量である 1 cm 線量当量率 (0.23 $\mu\text{Sv/h}$) と防護量である実効線量 (年間追加線量 1 mSv) とは必ずしも一致しないと指摘している⁴⁾。

また、この木造家屋の遮蔽効果については IAEA-TECDOC-225 「Planning for off-site response to radiation accidents in nuclear facilities」の p.53 Table IV が根拠になっているが、日本における木造家屋を想定しているわけではない。例えば、泉幸男らは木造家屋の低減係数を実測したところ、0.68 であり IAEA の値である 0.4 より大きい (遮蔽効果が小さい) 結果となったと報告している⁵⁾。

除染領域を確定するために採用された線量率は、除染作業を実施する面積に直結することから、除染作業量にも発生する廃棄物の量にも大きく影響する。

いずれにしても、除染作業の基準となった 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ という値は、多くの仮定を経て算出されたことを理解しておく必要がある。

なお、サーベイメータによる測定以外に、個

人被ばく線量計を用いて、被ばく線量を実測し、除染作業の参考とすることも計画されている。

本稿では環境省を中心とする諸官庁のウェブサイトのほか、多くの報道発表資料、自治体や研究機関が実施した除染実証事業や除染試験に関する報告などを参考としたが、全ての引用を記載することができないため、省略せざるを得なかった。

また、事故に関する文献や著書も網羅するにはあまりにも多く、ごくわずかなものにとどまっている。あらかじめご了承ください。

除染作業の進捗状況や、除染効果のデータ、除染手順その他、多くの試料の測定結果などは常に新しいデータが多くの団体により公開されている。興味のある方は是非、入手、閲覧されることをお勧めする。

参考文献

- 1) 環境省, 除染関係ガイドライン平成 25 年 5 月第 2 版 (2013), http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=22255&hou_id=16614
- 2) 河田燕, 他, 原子力事故により放出された放射性セシウムの $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比について, *Isotope News*, No.697, 16-20 (2012)
- 3) 福島土壌調査, <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/dojo/>
- 4) 古田定昭, 除染基準 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ は本当に年間 1 mSv なのか?, *Isotope News*, No.718, 46-49 (2014)
- 5) 泉幸男, 他, 福島第一原発事故に伴う各種建屋による低減係数の調査, *Isotope News*, No.702, 30-34 (2012)

((株)日本環境調査研究所 技術開発室)