



**HAL**  
open science

## 福島復興に向けた除染のあゆみ

Atsushi Nakao, Olivier Evrard

► **To cite this version:**

Atsushi Nakao, Olivier Evrard. 福島復興に向けた除染のあゆみ. Journal of the Atomic Energy Society of Japan, 2020, 62 (12), pp.712-716. <10.3327/jaesjb.62.12\_712>. <cea-03140910>

**HAL Id: cea-03140910**

**<https://cea.hal.science/cea-03140910>**

Submitted on 15 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 福島復興に向けた除染のあゆみ

## — 震災後9年を振り返る —

京都府立大学 中尾 淳,

フランス原子力・代替エネルギー庁 Evrard Olivier,

東京電力福島第一原子力発電所の事故（福島原発事故）を受け、放射性物質による環境汚染が課題となった福島では、「除染なくして、福島の復興無し」をスローガンに、大規模な除染が進められてきた。大部分の避難指示解除準備区域、居住制限区域が解除され、残る帰還困難区域の解除に向けて検討が進んでいる。事故から9年が経過した現在、福島における除染と復興の関係性が見直されようとしている。

**KEYWORDS:** *Decontamination, Intensive contamination survey areas (ICAs), Interim storage, Radiocesium, Soil recycling, Special decontamination zones (SDZs), The annual additional effective dose*

### I. 福島の除染と復興

放射性核種は放射線を出した後で安定な別の元素に変わるため、人が手を加えずともいつかは環境から無くなるものである。ただし福島原発事故由来の主要排出核種であるセシウム137の半減期は約30年と長い。何もせずにおいたままでは、事故の影響を強く受けた地域で安全に暮らせるまでに非常に長い年月を要することから、一日も早い福島の復興・再生のためには除染が不可欠であった。

除染された居住区域や農地では、確かに放射線量が大幅に低下した。ただし、除染作業や除染廃棄物の輸送・管理に多大な労力と費用がかかったのも事実である。福島県でこれまでに発生した除去土壌・廃棄物量は約1,400万 $m^3$ であり、除染の総費用は少なくとも約4兆円と試算されている<sup>1),2)</sup>。また、双葉町と大熊町に設置された中間貯蔵施設に貯蔵された除去土壌・廃棄物は、貯蔵から30年以内に福島県外に移設しなければならない。最終処分場をどれだけの規模でどこに設置するのか、また、未除染地域をどう扱うかによって、追加費用は大きく変わるだろう。その費用は誰が負担していくのか。

除染費用は国が一旦支払った後、東京電力に請求する

The decontamination following the Fukushima nuclear accident : Atsushi Nakao, Olivier Evrard

(2020年8月 日受理)

ことになっているが、実際は原子力損害賠償支援機構を通じて国から東京電力への資金援助が行われている。また、森林再生、地域産業再生などの費用の一部は国費で賄われている。つまり、国民1人1人が除染費用を負担している利害関係者である。特に、これから就労人口の中核を担う若者世代は、除染計画に応じた費用負担の変化の影響を強く受ける当事者であるため、福島の除染と復興に関する「最適解」を探すための議論の輪に加わっていくことが期待される。

しかし残念ながら、2018年に環境省が実施したWEBアンケート (n = 3600) の調査結果<sup>3)</sup>では、福島県外に住む約8割の人が県外除去土壌等の県外最終処分が法律で定められていることを「聞いたことがなかった」あるいは「聞いたことはあるが、内容は全く知らなかった」と答えている。著者が学内外で行う福島原発事故に関連した講義でも「そもそも除染されていたこと自体知らなかった」という感想が年々増えてきている。福島関連のニュースが報道される機会も年々減少しており、福島の除染と復興は国民的議論からは程遠い場所に位置付けられているのが現状ではないだろうか。

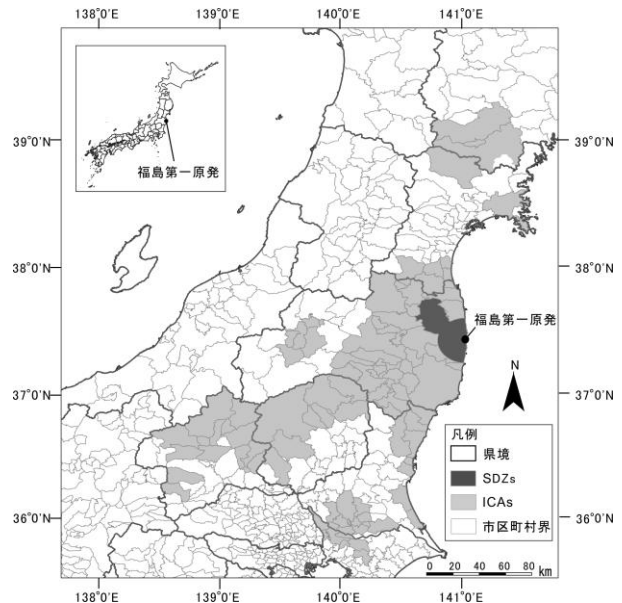
そこで本解説では福島原発事故の発生から9年間の除染のあゆみを振り返り、震災10年目を以降の福島復興に対する除染の役割について考えるための土台となる情報の提供を目的とした。この解説の骨子となったのは、共同執筆者であるエブラール氏とともに欧州地球科学連合が出版する学術誌“SOIL”に昨年発表した福島の除染に関するレビュー論文である<sup>4)</sup>。欧州には原子力発電を利用する国が多く、かつてチェルノブイリ原発事故による汚染影響を受けた経験もあることから、福島原発事故からの復興に関心を持つ人が多い。しかし除染の全体像を記した英語の文献が限られていたことから、このレビューのとりまとめに至った次第である。また、本原稿を執筆するにあたり、万福裕造氏（農研機構）、保高徹生氏（産総研）には貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を示したい。

## II. 除染体制の確立

大きな問題を解決するためには、状況を整理し、解決方法を見つけ、その方法を計画的に実行する必要がある。そもそも福島原発事故が起きた当時の日本では、原子力発電所から放射性物質が広域拡散し環境を汚染することが想定されていなかったため、その対処に関する法制度がなかった。そこで議員立法により「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（平成23年8月30日法律第110号）」（「放射性物質汚染対処特措法」以下「特措法」という）が制定され2012年1月1日に全面施行されたことで、国の管理下で統一した除染が行えるようになった<sup>5)</sup>。

特措法では、事故由来放射性物質による環境汚染が著しいと認められる地域を除染特別地域（SDZs）とし、この地域内での汚染状況の調査、除染等の措置、除去土壌等の保管等は国の責任によって実施されることが定められた。「著しい汚染」の基準は、事故後の積算線量が20 mSv/年を超えるおそれがあるかどうかである。この基準は、国際放射線防護委員会（ICRP）の2007年勧告で定められた緊急被ばく状況における公衆被ばく線量限度範囲20～100 mSv/年のもっとも安全側の値に基づいている。特措法基本方針では、除染の長期目標として追加被ばく線量を1 mSv/年以下にすることが定められたが、追加被ばく線量が20 mSv/年以上の地域については、段階的かつ迅速にその面積を縮小することが目標とされ、具体的な数値目標は据え置かれた。

除染特別地域に指定されたのは、福島原発から半径20 km圏内の「警戒区域」、または「計画的避難区域」と重なる、福島県内の11の市町村（楡葉町、富岡町、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村および飯舘村の全域、ならびに田村市、南相馬市、川俣町および川内村の一部地域）であり、延べ面積は1117 km<sup>2</sup>であった。なお、この基準以下の汚染レベルであっても、現場測定での空間線量率が0.23μSv/hr以上であり、追加被ばく線量が1 mSv/年以上になり得ると試算された



地域が福島県内外の94市町村、延べ面積7826 km<sup>2</sup>に広く分布した。これらの地域は汚染状況重点調査地域（ICAs）に定められ、市町村が中心となって除染を行うこととなった（図1）。

図1 特別除染地域（SDZs）と汚染状況重点調査地域（ICAs）の分布図（Evrard et al., 2019を参考に作成）

除染特別地域の除染の方針（除染ロードマップ）が環境省から公表されたのは、2012年1月26日である。このロードマップでは、積算線量が50 mSv/年を超えるかどうかで除染特別地域が大きく2つに分けられ、それぞれ異なる除染工程が適用された。積算線量が50 mSv/年以下の区域（「避難指示準備区域」あるいは「居住制限区域」）では、早ければ2012年内に、遅くとも2015年内には本格的な除染が開始され、2017年3月末までに計画された全ての除染が完了している。一方、積算線量が50 mSv/年を超え、事故後6年経過しても20 mSv/年を下回らないおそれのある区域、すなわち帰還困難区域は当面除染事業の対象外となり、除染効果の把握を目的としたモデル実証事業のみが実施されてきた。ただし、2017年5月の法改正によって帰還困難区域内に居住可能区域（「特定復興再生拠点区域」以下「拠点区域」）を定めることが可能となったため、これを受けて、帰還困難区域を持つ6つの市町村（双葉町、大熊町、浪江町、富岡町、飯舘村、葛尾村）では拠点区域の除染が進められている。2023年の春頃までには拠点区域の全域での避難指示が解除される予定である。

このように、除染特別地域の除染は段階的に進められてきたが、実際に除染されたのは人の健康保護の観点から除染の優先順位が高いと判断された居住区域や農用地、生活圏周辺（家屋から20 m以内）の森林等の限られた空間のみである。土地面積の7～8割を占める森林については、ほとんど手付かずのまま残されている。

表1. 特別除染地域および汚染状況重点調査地域における除染効果と除染費用 (Yasutaka and Naito 2016より抜粋)

土地利用	除染方法	空間線量低減率	単価 (千円/ha)	発生するフレコンバック の数 (/ha)	対象地域
農地	除草, 表土5 cm除去, 覆土	0.34-0.80	9500	815	特別除染地域
	除草, 表土5 cm除去, 覆土なし	0.34-0.80	6250	815	特別除染地域
	反転耕, ゼオライト&カリウム資材施用	0.34-0.80	3100	0	特別除染地域および汚染状況重点調査地域
	深耕, ゼオライト&カリウム資材施用	0.21-0.50	330	0	特別除染地域および汚染状況重点調査地域

### III. 除染の方法とその効果

#### 1. 除染関係ガイドライン

除染開始までに1年以上要したのは法整備だけが理由ではない。放射性物質によって汚染された環境の大規模除染は世界的にも例が無い場合、チェルノブイリ原発事故後に実施された線量低減の試験等を参考に、福島に適用可能な除染技術を確立するための様々な除染モデル実証事業が展開された。それらの成果を踏まえ、環境省が除染等の措置の基準などを具体的に示した除染関係ガイドラインを公表したのは2011年12月14日であった(2013年に改訂)。

このガイドラインでは除染対象が、工作物及び道路、土壌、草木、その他の4項目に分けられ、対象ごとに除染方法が細かく設定されている。どの項目でも共通しているのは、セシウム137が付着した物質をその場から取り除く、いわば物理除染のアプローチが取られていることである。一方で、物理除染に伴い発生する廃棄物の量を可能な限り減らしつつ、空間線量を下げる工夫がなされている。例えば農地土壌の場合、表土の放射セシウム濃度が5000 Bq/kg以下であれば深耕や反転耕(表土と下層土の入れ替え)を行うことで廃土の持ち出しを避け、それ以上の汚染濃度であった場合のみ、5cm程度の厚さを基準に表土を物理的に剥ぎ取り、同じ厚さの非汚染土壌(近隣の山から採取した真砂土など)を客土することが推奨された。Yasutaka and Naito (2016)<sup>6)</sup>は、農地を対象に表土除去を行った場合発生する除染費用は、行わなかった場合と比べて倍以上となることを試算している(表1)。もし、特別除染地域の約7倍の面積をもつ汚染状況重点調査地域の農地に対しても、物理除染を行っていた場合、除去土壌の量および除染にかかる費用は何倍にも膨れ上がっていたかもしれない。

#### 2. 物理除染以外の検討について

本格除染の実施に先立って行われた実証事業の中で、薬剤を利用した化学除染や植物の吸収を利用した生物除染(ファイトレメディエーション)など、放射性廃土を出さない除染方法も試されたが、現実的に折り合いのつく方法はなかった。

非加熱の酸または塩溶液で土壌を化学処理しても、取り除かれるセシウム137はせいぜい10~20%程度である。一方、100°Cまたはそれ以上高温の酸または塩溶液で化学処理すれば、土壌から大半のセシウム137を取り除くことは可能だが、その方法を広域的に実施するには、土壌を剥ぎ取り、専用的大型処理施設に持ち運ばなくてはならない。さらに、化学処理を経た土壌は構造が破碎され、酸や塩で汚染されるため、生態

系サービスの基盤物質としての機能を完全に失ってしまう。いわば土壌の残骸となった物質を元の場所に戻すメリットは無いため、結局は廃土として処分しなくてはならない。

ヒマワリを用いたファイトレメディエーションは環境負荷が小さく特別な施設や資材が無くても実行できる浄化技術としてテレビ番組等でも紹介され、その実証試験が大学や政府系研究機関だけでなく民間団体によっても大々的に展開された。しかし実際はほとんど効果が無く、福島県農業総合センターおよび独立行政法人・食品産業技術総合研究機構東北農業研究センター-福島拠点が実施した研究によると、同手法による土壌からの放射性セシウムの除去率は最大でわずか0.058%であった<sup>7)</sup>。2011年当時、著者はヒマワリ戦略の大規模展開に至った経緯を知れる立場になかったが、その根拠となった論文がヒマワリの水耕栽培試験だったことは衝撃と共に記憶している。

水耕と土耕栽培で何が違うのか簡単に説明する。放射性が安定核種かによらず、セシウムというアルカリ金属元素は陽イオンとして水によく溶ける。水に溶けたセシウムが根から植物に吸収されるには、同じアルカリ金属元素であるカリウムの膜輸送体を通る必要があるため、カリウムはセシウムの吸収に対して高い阻害効果を持っている<sup>8)</sup>。裏を返せば、カリウムをほとんど含まない培養液で水耕栽培すれば、培養液中のセシウムの大部分は植物によって吸収されてしまう。ところが、その培養液を土壌と混ぜて土耕栽培すると、植物のセシウム吸収量は劇的に減少する。土壌にはセシウムを吸着して溶液に戻りにくくする機能と、カリウムを放出してセシウム吸収阻害を高める機能が備わっているためである<sup>9)</sup>。

土壌がセシウム137の移動性を著しく低下させる性質を持っていたことから、化学的あるいは生物学的なアプローチによるセシウム137の除去技術の広域的な適用は現実的ではなかった。つまり、除染を行うと決めた以上、物理除染以外の選択肢はなかったことは、ここで改めて強調しておきたい。

#### 3. 物理除染の効果について

特別除染地域における除染の効果については、空間線量率の推移という形で環境省の除染情報サイト(<http://josen.env.go.jp/>)で確認することが出来る。除染特別地域のある全市町村で主に2017年に実施された事後モニタリングによると、空間線量率が追加被ばく線量1 mSv/年に相当する0.23 μSv/hr以下まで低下しているエリアが大きく拡大していることが分かる。空間線量率の低下だけでなく、旧避難指示区域に帰還した住民の被ばく線量が非常に低いことも最新の研究で明らかになってきている<sup>10)</sup>。

また著者らの研究グループは2016年11月に、富岡町からの受託調査として同町内全域（帰還困難区域を除く）に分布する除染済み農耕地約200地点を対象に、空間線量率と表層土壌セシウム137濃度の分析調査を実施した。その結果、空間線量率と表層土壌セシウム137濃度ともに、除染前と比べるとおよそ2割程度まで低下していることが確認できた<sup>11)</sup>。これは実証モデル事業で見込まれていた除去効率の上限に近い高い値であった。余談だが、この受託調査を通じて200地点近くの除染直後の農地を1つ1つ見て回る中で実感したのが、除染作業の丁寧さである。役場の近くの大通りに面した大規模農地であろうと、中山間部の人目に付きにくい小規模農地であろうと、表土掘削と客土材の投入および下層土との混合が徹底して行われていたことは、当時の現地の様子を知る第三者としてここに記しておきたい。

## IV. 除去土壌等の減容化と再利用

### 1. 可燃性廃棄物の焼却と焼却灰の処分

除染により発生した有機廃棄物（森林リター、雑草、木材、または木の枝など）は、概ね市町村ごとに設置された仮焼却施設で焼却され、大幅に減容化される。焼却後に残る灰（焼却灰）は中間貯蔵施設に設置された仮設灰処理施設での熔融処理によりさらに減容化される。除去土壌の土嚢袋に含まれる有機廃棄物についても、受入・分別施設での篩別処理によって土壌から分離され、焼却・灰処理により大幅に減容化される。

放射性廃棄物の焼却炉で使用される温度は、都市廃棄物を処理するプラントで使用される温度と同じ800～950℃程度である。焼却の際に炉の底に集められるボトムアッシュと呼ばれる重い粒子と比べてバグフィルターで捕捉されるフライアッシュと呼ばれる、軽い粒子に含まれるセシウム137は溶出率が高い。そのため、焼却・灰処理によって減容化された焼却灰は専用コンテナに封入した状態で中間貯蔵施設の廃棄物貯蔵施設で管理される。

### 2. 除去土壌の再生利用について

除染により発生した除去土壌は、中間貯蔵施設内の受入・分級施設で有機廃棄物等を取り除いた後に、土壌貯蔵施設に保管される。土壌貯蔵施設では、底面に遮水シートを敷き、外部への漏水を防ぐとともに、貯蔵土に接した水は全て水処理施設で放射線計測を行った後に放流するように設計されている。土壌貯蔵施設には最大で2200万m<sup>3</sup>の除去土壌が貯蔵されることが見込まれている。この除去土壌全量を県外の最終処分場に移設することは、必要な規模の最終処分場の確保等の観点から容易ではないため、環境省では、最終処分対象となる除去土壌をできる限り減らすために、一部を安全性を確保しつつ公共事業等で再利用することが検討されている。

2019年3月に環境省から公表された再利用の手引き（案）<sup>12)</sup>では、放射能濃度が4000～8000 Bq/kg以下の除去土壌について、厚さ10～100 cm以上の非汚染土やコンクリートで覆

い追加被ばく線量の低減を図ることで、主に公共事業における再生利用を可能とする案が提案された。現在、8000 Bq/kg以下の除去土壌は、約1000万m<sup>3</sup>と推定されており、全除去土壌量の半分に相当する。分級処理などの減容技術を併用することで、将来さらに多くの除去土壌が再利用可能になる可能性がある。

一方で、再生利用を検討する上では、当該地域のベネフィット、関係するステークホルダーの社会受容性や手続き的な公正性を担保した合意形成が重要である<sup>3)</sup>。

## V. 今後の課題と次世代人材育成の重要性

これまで述べてきたように、福島を除染は法整備や除染効果の実証試験等を踏まえて慎重かつすみやかにすすめられ、計画された除染作業はすべて完了した。ただし計画除染が完了しても残された課題は多く、福島の復興は道半ばである。まず、除染が行われた農地ではセシウム137濃度が大きく減少した一方で、肥沃度の低下や耕耘機の阻害となる石礫の混入、生育ムラの発生など、営農再開にあたり様々な障害が見つかるため、これらの改善が急務である。除染により中間貯蔵施設に運ばれた土壌については、減容化とともに福島県内での再生利用の道が模索されているが、利用の用途は立っておらず、除去土壌の県外最終処分場の候補地も決まっていない。未除染エリアの取り扱いについても、意見が分かれており、いずれの課題についても、理解醸成を含めたコミュニケーションや合意形成に関する議論を続けていく必要がある。

そのために重要な取り組みの1つが、地域住民に説明する自治体担当者、若手技術者など次世代を担う人材の育成である。例えば、2018年度よりJESCO「除去土壌等の減容等技術実証事業」において、次世代を担う人材への除去土壌等の管理・減容化・再生利用等の理解醸成を目的としたプロジェクト<sup>13)</sup>が開始されている。このプロジェクトでは、除染等の技術的内容への理解促進のみならず、除染等に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的な視座を養うことを目的に実施されている。

福島の復興に対する国際的な関心は高い。復興のカギである除染問題を理解し、将来の道筋を提案し、取り組んだ成果を国内外に発信する若きリーダーたちが育っていくことを強く願っている。

－ 参考資料 －

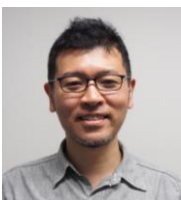
- 1) 環境省、福島県全体の除去土壌の輸送量・割合、中間貯蔵施設情報サイト、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/transportation/>
- 2) 環境省環境再生・資源循環局、除染の現状について、[https://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/law-jokyo06/lj06\\_mat02.pdf](https://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/law-jokyo06/lj06_mat02.pdf)
- 3) 保高徹生、除去土壌の限定再生利用・県外最終処分

に関する認知と合意に向けた課題，第30巻第1号，廃棄物資源循環学会誌，2019年

- 4) Evrard, O., Laceby, J.P., Nakao, A. Effectiveness of landscape decontamination following the Fukushima nuclear accident: a review, 5, 333-350. SOIL, 2019.
- 5) 岡山信夫，農地除染の経緯と課題，第70巻第3号，農林金融，2017年
- 6) Yasutaka, T., Naito, W. Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan, J. Environ. Radioactiv., 151, 512-520, 2016
- 7) 佐藤睦人，ファイトレメディエーションによる放射性セシウム除去効果の検証，第85巻第2号，日本土壤肥料学雑誌，2014年
- 8) 頼泰樹，河端美玖，土壤，そして植物への放射性セシウムの動態-新たに解明されたイネのセシウムの吸収機構，第58巻第6号，化学と生物，2020年
- 9) 中尾淳，高橋嘉夫，化学から見た放射性核種の環境動態と長期予測—土壤吸着による放射性セシウムの不動態はどのように評価すればよいか？—，第69巻第2号，Radioisotopes, 2019年
- 10) Nomura, S., Murakami, M., Naito, W., Yasutaka, T., Sawano, T., Tsubokura, M. Low dose of external exposure among returnees to former evacuation areas: a cross-sectional all-municipality joint study following the 2011 Fukushima Daiichi nuclear power plant incident, J. Radiol., Prot., 40, 1-18, 2019.
- 11) Kurokawa, K., Nakao, A., Tsukada, H., Mampuku, Y., Yanai, J. Exchangeability of <sup>137</sup>Cs in soils of agricultural fields after decontamination in the eastern coastal area of Fukushima. Soil Sci. Plant Nutr., 65, 401-408, 2019.
- 12) 環境省，福島県内における除染等の措置に伴い生じた土壤の再壊死利用の手引き 参考資料（案），中間貯蔵施設情報サイト，[http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative\\_commission/pdf/investigative\\_commission\\_guidance\\_ref\\_1903.pdf](http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_guidance_ref_1903.pdf)
- 13) 万福裕造，保高徹生，鈴木伸一，大迫政浩，武田宜人，菊間由隆，次世代を担う人材への除去土壌等の管理・減容化・再生利用等の理解情勢人材育成プログラム，第8回環境放射能除染学会発表資料，2019.

#### 著者紹介

中尾淳（なかお・あつし）  
（現職）京都府立大学生命環境科学研究科，准教授  
（専門分野/関心分野）土壤学，地球



化学，粘土鉱物学，セシウムの土壤吸着，土壤機能解析



Evrard Olivier（エブラール・オリビエ）  
（現職）フランス原子力・代替エネルギー庁，研究員  
（専門分野/関心分野）堆積学，同位体トレーサー研究，土壤侵食，放射性物質の環境動態解析