

NATIONAL  
INSTITUTE FOR  
ENVIRONMENTAL  
STUDIES

# 災害環境研究の

# 今

第3号

除去土壌・除染廃棄物の  
適正管理と再生利用に  
向けた技術

LATEST UPDATE ON  
ENVIRONMENTAL  
EMERGENCY  
RESEARCH



No. **03**

2022.12





表紙写真について

- 1|農地の反転耕 2012年 (写真提供|福島県郡山市)
- 2|中間貯蔵施設 2018年
- 3|サイエンストークで講義する遠藤和人室長
- 4|ライシメーターの人工降雨装置の管
- 5|水に溶けている重金属の分析中
- 6|ライシメーター上の土壌を取り除く様子



## 「災害環境研究の今」とは何か

「災害環境研究の今」は、

国立環境研究所が福島地域協働研究拠点を中心に進めている

災害環境研究の最新の成果を、

災害等で生じた様々な課題の解決に向けて

社会の最前線で取り組んでいる方々へ

お届けするための冊子です。

現場の課題を私たちがどのような問題構造で

とらえているのかを概説し、

関連する代表的な研究成果とともに

分かりやすくお伝えします。

本冊子を通して、

災害と環境にかかわる現場の課題解決と、

安全で安心な暮らしの実現に

少しでも貢献できれば幸いです。



# 除去土壌・除染廃棄物の適正管理と再生利用に向けた技術

遠藤和人

福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 室長

## 1. 除去土壌と除染廃棄物

東京電力福島第一原子力発電所の事故によって放出された放射性セシウムをはじめとする放射性物質により、東日本の多くの地域が汚染され、空間線量率(地上高さ1mにおける放射線量)が上昇しました。住民が受ける追加被ばく線量が年間で20mSvを超える恐れがあるとされた「計画的避難区域」と、発電所から半径20km圏内の「警戒区域」については、「除染特別区域」に指定されました。具体的には、福島県の楡葉町、富岡町、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村、飯舘村の7町村と、田村市、南相馬市、川俣町、川内村で警戒区域または計画的避難区域であった地域の合計11市町村が指定されました。一方、追加被ばく線量が年間20mSvを下回るが、年間1mSvを上回ると想定される地域は「汚染状況重点調査地域」として指定されました。指定された地域は8県(南北方向では岩手県から千葉県まで)にまたがり、全部で104市町村ありました。

除染特別区域は国が、汚染状況重点調査地域は市町村が除染を実施することとなりましたが、除染という行為自体が初めてのため、国は除染関係ガイドラインを整備しつつ、内閣府が除染モデル実証事業として、効果的な除染のために必要となる技術等の実証試験が除染特別区域内で実施されました。除染により相当程度の空間線量率を低減できるものの、除染技術には限界もあることが認識されました。汚染状況重点調査地域では、住民が受ける追加被ばく線量を年間1mSv以下にするため、空間線量率0.23  $\mu$ Sv/hという目標値が決められました。既に空間線量率が0.23  $\mu$ Sv/hを下回っている場合には除染せず、上回っている領域だけを除染して、効率的に除染を推進することが求められました。これら除染は、いわゆる“面的除染”と呼ばれる措置になります。

除染モデル実証では、放射性セシウムは表土に留まっていること、草木の葉や幹に付着していること、建物の壁や屋根にも付着していること、などの汚染状況の把握も行われました。モデル的に除染を行った結果、土については表層5cmをはぎ取り、道路は高圧洗浄等で洗浄して

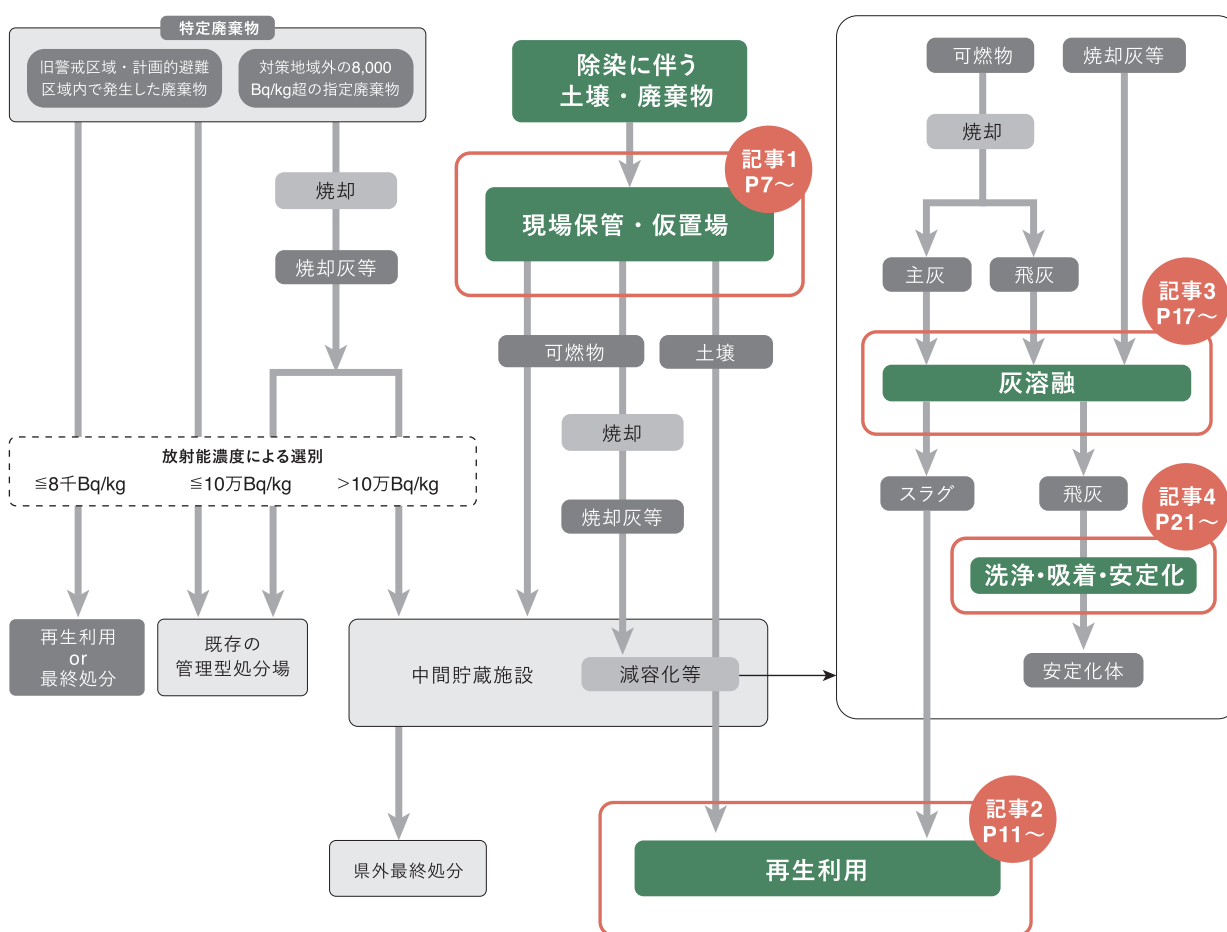
付着物を回収し、屋根については拭き取りを行い、草木については枝葉の除去を行うことなどが決められました。このうち、はぎ取られた土壌や、高圧洗浄によって出て来た付着物(泥状)のものを「除去土壌」と呼び、拭き取ったウエス等や、刈り取った枝葉や落葉などは「除染廃棄物」として分類されました。これは、不燃物と可燃物に分ける行為と同じ考えになります。日本では、明治初期に焼却技術をヨーロッパから輸入し、独自の技術として躍進させて輸出するほどになった焼却技術大国です。国土が狭いこともあり、焼却によってごみを減容化してから最終処分することが実施されてきました。日本の焼却技術は最初から優れていたわけではありません。昭和の高度成長期までは今では想像もできないような状況でしたが、その後の環境問題の高まり、微量化学物質の分析技術の向上などによって高度な環境制御が可能となり、同時に省エネ、ごみ発電などの技術開発によって今日に至っています。そのような背景にある日本ですので、可燃物はそのまま保管すると腐敗して環境影響を引き起こす可能性があるため最終的には焼却(熱処理)する、ということが除染当初から考えられていました。

## 2. 仮置場と中間貯蔵施設

除染によって集められた除去土壌や除染廃棄物はどこかに保管しなければなりません。空間線量率の低下を目的に除去したものを1ヶ所に集めるため、線量上昇に対する対応などの技術的な措置のほか、どこに仮置場を作るか、という大きな課題がありました。ごみの焼却炉や最終処分場と同じく、除染仮置場というのも迷惑施設です。仮置場ですので、一時的に置くわけですが、それでも、本当に中間貯蔵施設に持ち出されるのか、そこに置きっ放しにするのではないかと、空間線量率が上昇したり、放射性セシウムが漏れ出すのではないかと、といった多くの不安と懸念によって仮置場の選定は困難を極めました。仮置場が作れないので、仮置場などと呼ばれる簡易的な置場が整備されたり、仮置場が用意できない場合には、現場保管を選択する自治体もありました。現場保管



【図1】 福島県内における特定廃棄物・除去土壌の処理フローと各記事の位置付け  
 出典 | 環境省 放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト 福島県における取組 [http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives\\_fukushima/](http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/) (2022年9月確認) をもとに作成



とは、放射性物質を含まない土壌による覆土30～50cm以上を確保した上で除染した場所に埋めておく、という措置になります。**【詳しくは記事1 (p7～)参照】**  
 除去土壌と除染廃棄物は仮置場(現場保管を含む)に一時的に置かれた後、中間貯蔵施設に運搬することになっています。中間貯蔵施設は警戒区域(現在は帰還困難区域)の大熊町と双葉町にまたがる形で整備することが計画されていましたが、当然、その地域の方々は容易に

承できる筈もなく、中間貯蔵施設の整備も困難を極めていました。当初、発災から3年以内に中間貯蔵施設を整備して、除去土壌等を運搬するので、仮置場も3年以内に撤去するという約束をしていました。しかしながら、3年を経過しても仮置場の除去土壌等を移動することはできず、10年経過する今なお残存している状況となっています。3年以内に移動するので、除去土壌等を入れた大型土のう袋などは“3年間の耐候性を有すること”が仕



様として盛り込まれていましたが、3年を経過してもなお仮置場にあるため、大型土のう袋の耐久性という課題も浮上しました。また、除染初期の仮置場は、置きっ放しになって最終処分場になってしまうという不安から、仮設的な作りにしなければならない、という条件がありました。しかし、仮設的な作りはやはり仮設なので種々の不具合が生じたため、途中から仮置場自体の設計や材料を見直し、全体的に耐久性のある仮置場構造となるように変化してきました。

### 3. 最終処分に向けた減容化

中間貯蔵施設に運ばれた除去土壌と除染廃棄物は、30年以内に福島県外で最終処分することが約束され、そのことは改正JESCO法と呼ばれる法律に明記されています。将来的に中間貯蔵に集められる除去土壌等の総量は約1,400万m<sup>3</sup>と試算されており、それら全てを県外に持ち出して最終処分することは物理的にもコスト的にも困難であることから、除染廃棄物は焼却処理して減容化して焼却灰に、焼却灰を更に溶融して飛灰とスラグにすること等が計画されています。【詳しくは記事3 (p17～) 参照】

8,000 Bq/kg以下の除去土壌については地盤材料として有効利用し、それ以上のものについては県外に持ち出すか、除去土壌から放射性セシウムを除去して8,000 Bq/kg以下として有効利用しつつ、除去した放射性セシウムを集めて濃縮して減容化すること等が計画されています。有効利用については環境省が実証事業として試験盛土等を構築しており、国立環境研究所福島地域協働研究拠点でもライシメーターと呼ばれる模型実験や、実証試験盛土 (JESCOとの共同研究) などを通して有効利用時の安全性について検証しています。【詳しくは記事2 (p11～) 参照】

焼却灰には、主灰と飛灰の2種類がありますが、飛灰は、焼却後の気体と共に煙突に向かって移動する灰のことで、煙突に到達する前にバグフィルターで捕集されます。放射性セシウムは焼却温度で揮発し、バグフィルターで200℃以下に冷却されると固体に戻ることが知られている

ため、放射性セシウムは飛灰として集められることとなります。飛灰の体積は、焼却した除染廃棄物や除去土壌の体積の数十分の1程度になるため、容量を小さくでき、大きな減容効果が得られます。この他にも、化学薬品を使って除去土壌から放射性セシウムを取り出す技術や、放射性セシウムが細かい粒子に付着していることを利用して、細粒分だけを除去土壌から取り出して濃縮する方法などが考えられています。このような技術の多くは実証段階であり、今もなお精力的な技術開発が継続されています。

減容化の技術開発は、焼却・溶融して飛灰にして放射性セシウムを濃縮することで終わりません。飛灰に含まれる放射性セシウムは水に溶けやすい性質を持つため、最終処分するには十分に安定した状態とはいえません。最終処分に値する安定した状態 (安定化体) は、水に溶け出さず、化学的に反応せず、物理的に風化しない状態です (揮発はしないので、揮発は考慮しません)。そのため、飛灰を洗浄して放射性セシウムを取り出し、取り出した放射性セシウムを高効率な吸着材に吸着させて濃縮し、その吸着材が変質せずに安定的に処分するための技術開発が進められています。【詳しくは記事4 (p21～) 参照】

先に示した化学薬品抽出や細粒分の分級なども含め、飛灰洗浄や安定化などの一連の技術開発は2024年までに終了させる、という戦略目標が掲げられています。その後、開発された技術を元に、具体的な県外最終処分の方法について議論する予定となっています。技術以外にも、県外のどこに設置するのか、県外最終処分の安全と安心をどのように確保するのか、放射性セシウムの確実な遮蔽への考え方など、社会的な合意を得るためのプロセスが必要です。3年間という約束だった仮置場設置、30年間を約束している中間貯蔵施設の整備においても地域住民との合意プロセスがありましたが、県外最終処分はそれとは比較にならない長期にわたる管理が求められる施設です。そのため、国民的な理解醸成という大きな課題も残っています。



column1

## 除染特別地域と汚染状況重点調査地域は 何が違うのでしょうか？

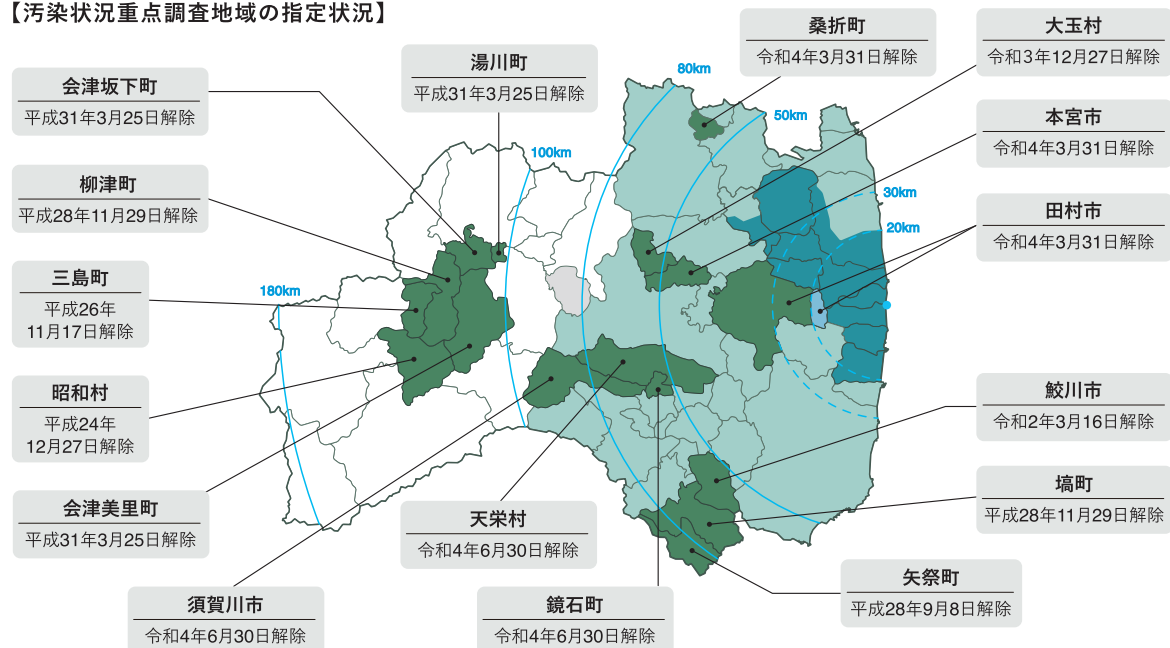
遠藤和人（福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 室長）

除染特別地域は国が除染を行う地域です。この地域は法律によって指定されています。東京電力福島第一原子力発電所から半径20km圏内の「警戒区域」と、事故後1年間の積算線量が20mSvを超えるおそれのあった「計画的避難区域」が除染特別地域となっています。除染特別地域は市町村毎に指定されないため、同じ市町村の中でも国が除染を行う地域とそうでない地域が存在する場合があります。

一方で、汚染状況重点調査地域は、市町村が中心となって除染を行う地域です。この地域も法律によって指定され

ています。汚染状況を調査する地域が指定されているため、市町村が汚染状況（空間線量率等）を調査し、ある一定の汚染があると確認された区域を対象として除染実施計画を策定して除染する、ということになります。「ある一定の汚染」とは、1年間の追加被ばく線量が1mSvを超えるとされる1時間当たりの空間線量率が0.23 $\mu$ Sv以上になります。毎時0.23 $\mu$ Sv以上あった場合、市町村、県、国等が除染を実施します。平成30年3月19日までに、除染実施計画に基づく除染は全て終了しました。

### 【汚染状況重点調査地域の指定状況】



■ 除染特別地域（国が直轄で除染を行う地域）（10）
 ■ 除染特別地域の指定解除地域（1）
 ■ 汚染状況重点調査地域（市町村が中心となって除染を行う地域）（25）
 ■ 汚染状況重点調査地域の指定解除地域（16）
 ※（ ）内は該当市町村数

出典|ふくしま復興ステーション 各市町村の除染実施状況 <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/progress.html>（2022年9月確認）をもとに作成



この研究により  
解決したい課題

除染事業（以下、「除染」と表記）に伴い発生する除去土壌の保管方法を定めるためには、地域住民の合意が不可欠です。この研究では、地域社会の除染や除去土壌の保管に係る行政と住民の合意形成の成否を規定する要因を探索しました。

この研究による貢献

地域社会の除染や除去土壌の保管に係る行政と住民の合意形成の成否を規定する要因として、地権者や周辺住民との交渉を担う交渉主体としての地域住民組織の構成、仮置場候補地の土地所有状況が挙げられる点を示唆しました。

2012年4月17日 農地の反転耕(喜久田町) 提供 | 福島県郡山市

Research 01

## 除染事業および 除去土壌の保管に係る 地域社会の対応 —福島県郡山市を事例として

辻岳史

福島地域協働研究拠点 地域環境創生研究室 主任研究員

### 放射性物質汚染対処特措法にもとづく 市町村における除染の実施

2011年8月30日に放射性物質汚染対処特措法が公布されました。この法律にもとづいて、放射線量が $0.23\mu\text{Sv/h}$ 以上の地区を含む8県104市町村は汚染状況重点調査地域に指定されました。この地域では、住民が居住を継続することが可能ですが、放射性物質による汚染の影響が及びました。このため、政府は地域固有の事情や住民ニーズを把握している市町村が除染を行うことが効果的と判断し（原子力災害対策本部「市町村による除染実施ガイドライン」p.1）、市町村が除染の方針、実施区域、実施手法等を定めた除染実施計画を策定したうえで、除染を実施することが義務づけられました。とはいえ、市町村行政や住民にとって除染や除去土壌の保管は未経験の課題です。そのため、市町村行政を含む地域の諸団体はこれらの課題に取り組むにあたって、相互に連携しながら合意形成が重ねられました。



私たち国立環境研究所福島地域協働研究拠点は、汚染状況重点調査地域における行政と住民のコミュニケーションに焦点をあてて、各地域の除染や除去土壌の保管に係る合意形成の成否を規定する要因を探索することを目的とした研究を進めました。方法としては、地域資料の収集と分析(具体的には、新聞記事、行政計画、議会議事録、自治体広報誌、地域住民組織が発行する広報誌など)と、除染や除去土壌の保管に関わった団体(市町村行政、地域住民組織など)へのインタビュー調査を実施しました。本稿では、福島県郡山市における事例研究の結果を解説します。

### 除染に係る基礎自治体の政策過程 —福島県郡山市の事例から

汚染状況重点調査地域に指定された市町村が直面した課題として、除去土壌を保管するための仮置場の確保が挙げられます。除去土壌を保管する方法としては、公有地や民有地に設置した仮置場に除去土壌を集約して保管する方法と、除染を実施した場所の地上あるいは地下に除去土壌を現場保管する方法があります。福島県の調査によると、福島県内の汚染状況重点調査地域52市町村では1,016箇所の仮置場が設置され、190,722箇所で除去土壌の現場保管がなされました(福島県資料「市町村が設置する仮置場等の状況」令和元年12月31日時点)。なお市町村にお

ける除去土壌の保管方法は、市町村行政と住民とのコミュニケーションを経て決定されました。除染実施計画の策定段階で住民とコミュニケーションをとらなかった市町村において、仮置場設置の局面で住民の反対がみられ、仮置場の用地が確保できない事例もありました(磯野2015:233-234)。

図1は、郡山市の除染に係る政策過程を示しています。郡山市は人口335,444名(2010年国勢調査)、福島県における商工業の中心都市です。2011年の事故発生直後の空間放射線量は2.14 $\mu$ Sv/hでした。(測定地点は郡山市役所、2011年4月1日・福島県県北地方環境放射能測定結果)郡山市が策定した除染実施計画では住宅49,141戸、農地1,508ha等が除染対象に設定されました。

郡山市では、主に除去土壌を現場保管する方法が採用されました。市が現場保管を採用した背景には以下の二点が挙げられます。第一に、土地(用地)不足です。市では市街化が進んでいたことから未利用地が少なく、市内の除染作業で発生する大量の除去土壌を保管できる規模の仮置場の用地を確保することが困難でした。第二に、原発事故発生直後の仮置場の設置をめぐる行政の住民説明会での経験です。郡山市行政は原発事故直後の2011年4月27日～5月2日にかけて、他市町村にさきがけて市内の保育所・幼稚園・小中学校の校庭・園庭の表土除去を実施



2018年6月16日 郡山市東山霊園除土壌積込場

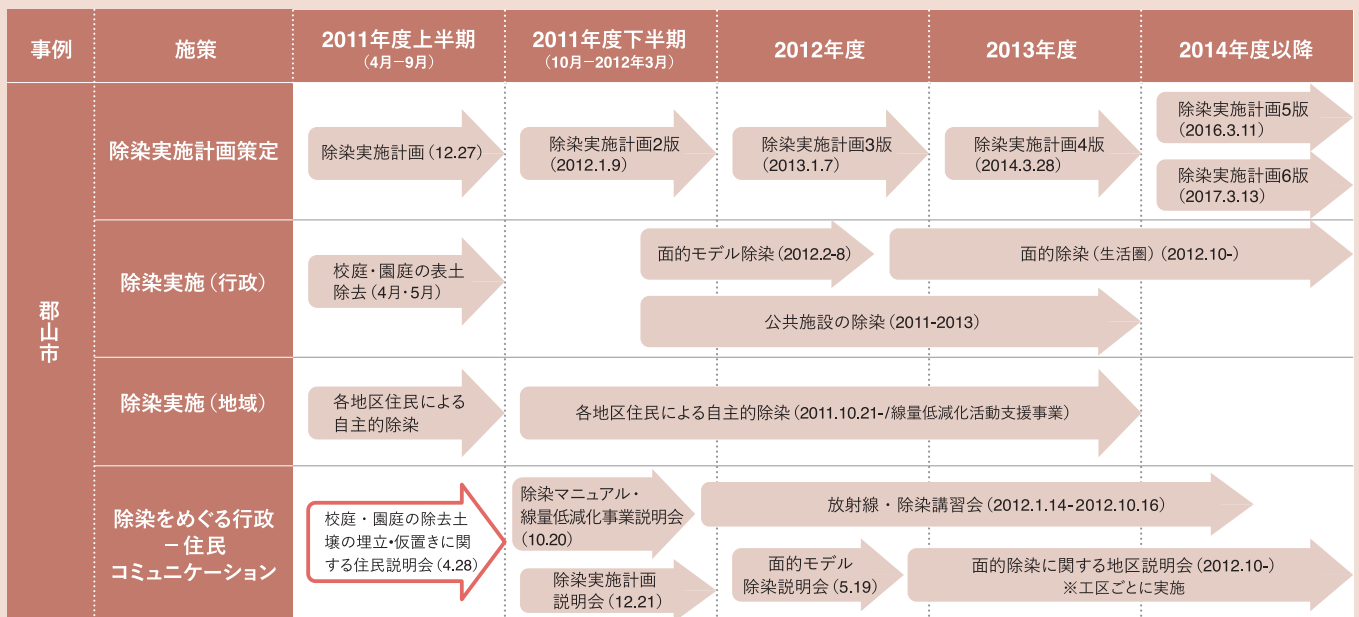


2017年6月4日 郡山市開成1丁目地区除去土壌詰替場  
※詰替場とは、集約輸送の拠点である積込場に運び込む前に、各住宅から出した除去土壌を大型土のうに詰め替える場所

しました(図1の赤枠の矢印)。市行政は当初、校庭・園庭の除去土壌を市内の一般廃棄物最終処分場に搬入する予定でした。しかし、4月27日に開催した住民説明会にて、最終処分場の周辺住民から反対の意思を示され、除去土壌の最終処分場への搬入を凍結しました(『福島民友』2011.4.26 / 2011.4.27)。

リスク研究者のP. Slovicはリスク認知の心理的因子として、「未知であること」と「恐ろしさを感じる」との二つの因子があると指摘しています(Slovic 1987)。市

【図1】 郡山市の除染に係る政策過程



出典 | Fukushima Action Research on Effective Decontamination Operation (2013) p.20 図3を参照して筆者作成





1 | 2011年4月27日 土木業者の方による表土除去の様子  
 2 | 2012年7月11日 芝生除去後の張替え  
 3 | 小学校の除去土壌等の掘り起し  
 4 | 2012年4月25日 プール底を吸引式高圧洗浄機で除染  
 写真提供 | 福島県郡山市

行政が住民説明会を開催した2011年4月末の時点では、放射性物質を含む除去土壌がもたらす被ばくのリスクは住民にとって未知のものであり、恐ろしいものとして認識されていたと推察されます。この住民説明会を機に、市行政は仮置場の設置に向けた行政と住民の調整には困難が伴うことを認識しました(2018年7月6日に実施した市原子力災害対策直轄室へのインタビュー調査より)。市行政は住民説明会が開催された2011年4月以降、除去土壌は主として現地保管する方針を定め、除染を進めました。

### 除去土壌の保管に対する地域住民組織の役割

郡山市では市行政が除染のマニュアル(『郡山市放射性物質除染マニュアル(2011年10月1日策定)』)を整備する前から、町内会・自治会などの地域住民組織が自主的に除染を実施しました。福島県は2011年8月2日に線量低減化活動支援事業実施要領を施行し、地域住民組織による自主的な除染活動に補助金を交付しました。郡山市では平成23～25年度にかけて、同事業に延べ919団体が申請しました。そして、市行政は2012年10月より高線量

地区から面的除染(住宅・道路などの生活圏の一定範囲をくまなく除染すること)を実施していきました。自主的除染と面的除染に伴う除去土壌の発生をうけて、郡山市行政は現場保管の方針を維持しつつ、地域住民組織と連携しながら、仮置場の設置を進めました。本研究では、郡山市の各地区における仮置場の設置に地域住民組織が果たした役割に焦点をあてて、仮置場を設置した地区と設置できなかった地区の差異を分析しました。

表1は郡山市内3地区における仮置場設置の結果と、仮置場設置への地域住民組織の関わりを示しています。3地区の空間放射線量は同程度です。A地区とC地区には農地が多く、住民に占める農業従事者の割合が高くなっています。他方でB地区は住宅地開発が進んでおり住民に占める農業従事者の割合は低くなっています。A地区とB地区では仮置場が設置されました。他方でC地区では、仮置場候補地周辺の住民から反対があがり、設置されませんでした。

本研究で着目したのは、地域住民組織の構成と仮置場候補地の土地所有状況です。郡山市の各地区には、複数の隣組等から構成される町内会・自治会・行政区などの地域住民組織(以下、「単位組織」と

表記)、単位組織の連合体である連合町内会などの地域住民組織(以下、「連合組織」と表記)がみられ、地域住民組織は多層的に構成されています。線量低減化活動支援事業の実施にあたって、各地区では事業を申請するか否かを検討し、事業を実施する場合には時期・範囲などを調整する必要が生じましたが、その調整主体はA地区とB地区では連合組織、C地区では単位組織と異なりました。仮置場候補地の地権者は、A地区とB地区が集落組織(集落の共有地を管理する組織)、C地区が市でした。これらのことが、仮置場設置における候補地の地権者や周辺住民との交渉主体の各地区の差異に反映されました。A地区とB地区では、連合組織のリーダーを介して交渉が行われた一方で、C地区では、市担当課が交渉を行いました。C地区では、仮置場の設置に関して住民間で賛否が分かれた際に、意見を調整する主体がおらず、設置には至りませんでした。分析結果は、仮置場の設置に関する合意形成に向けて、地権者や周辺住民との交渉を誰が担うのかという点が重要になることを示唆しています。郡山市の事例分析の結果は、地域の土地所有状況や地権者の顔を熟知している地域住民組織のリーダーによる交渉が機能したこと





2011年4月27日 表土除去作業 写真提供 | 福島県郡山市

を示しています。特に単位組織の除染実施や仮置場設置に係る意向をまとめ、地権者との利害調整を担う連合組織の役割が重要であったことが示唆されました。先述のとおり、政府は地域固有の事情や住民ニーズを把握している市町村が除染を行うことが効果的と判断しましたが、除染や除去土壌の保管に係る合意形成をまとめるためには、市町村行政職員の力だけではなく、地域住民組織を担うリーダーの力が求められるといえるでしょう。

### 今後の除去土壌の管理に係る政策的・社会的課題

政府は2021年度までに仮置場に保管された除去土壌の搬出を完了する方針です。仮置場は市町村有地や民有地に設置されていますので、原状復帰後、地域社会においていかに仮置場のあった土地を活用するかという課題が残されています。さらに、中間貯蔵施設で保管される除去土壌は、2045年3月までに福島県外で最終処分を行うことになっていますが、県外最終処分の候補地は未定です。以上をふまえると、今後も地域社会の除染や除去土壌の保管に係る合意形成に関する研究の積み重ねが必要です。

【表1】郡山市内各地区の仮置場設置に対する地域住民組織の関わり

観察項目	A 地区	B 地区	C 地区
調査対象者	区長会	町内連合会	区長等連絡協議会
地区の空間放射線量	0.65~1.06 $\mu$ Sv/h	0.83 $\mu$ Sv/h	0.65 $\mu$ Sv/h
地区類型(農業地域類型)	平地農業地域 中間農業地域	都市的地域 ※旧住宅地	平地農業地域
線量低減化活動支援事業の調整主体	連合組織	連合組織	単位組織
仮置場候補地の地権者	集落組織	集落組織+地域住民	市(元財産区有地)
仮置場候補地の地権者との交渉	連合組織のリーダーが交渉	連合組織のリーダーが交渉	市担当課が交渉
仮置場の設置	設置	設置	設置できず

出典 | 各地区の連合組織へのインタビュー調査の結果をもとに筆者作成

注 | 地区の空間線量は2011年8月の自動車走行サーベイモニタリング調査結果に基づく

### 今後のとりくみ

- 除染や除去土壌の保管に係る地域リーダーおよび地域住民の態度(現場保管への賛否等)を規定する要因を明らかにする必要があります。
- 本研究で得られた知見が他の地域で適用可能かを検討するとともに、除染や除去土壌の保管に係る合意形成の実態と規定要因について、空間放射線量や地域の特性(人口や産業等)をふまえて、地域類型ごとに整理する必要があります。

#### ● 参考文献

● Fukushima Action Research on Effective Decontamination Operation [FAIRDO] (2013)『除染』の取り組みから見えてきた課題—安全・安心、暮らしとコミュニティの再生をめざして(第二次報告)』公益財団法人地球環境戦略研究機関(IGES)。● 磯野弥生(2015)「除染と「健康に生きる権利」」除本理史・渡辺淑彦編『原発災害はなぜ不均等な復興をもたらすのか—福島事故から「人間の復興」、地域再生へ』ミネルヴァ書房:227-247。● Slovic, P. (1987) Perception of risk. Science, 236, 280-285.



# 除去土壌を地盤材料として 使用するために

遠藤和人

福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 室長

この研究により  
解決したい課題

空間線量率を低減させるために除去した表層5cmの土壌のうち、放射能の低いものを地盤材料として再生利用する際の安全性を確認します。

この研究による貢献

分別された除去土壌の特性を知り、再生利用(減容化方策の一つ)を安全に実施して、適正な県外最終処分を目指します。

## 除去土壌と地盤材料

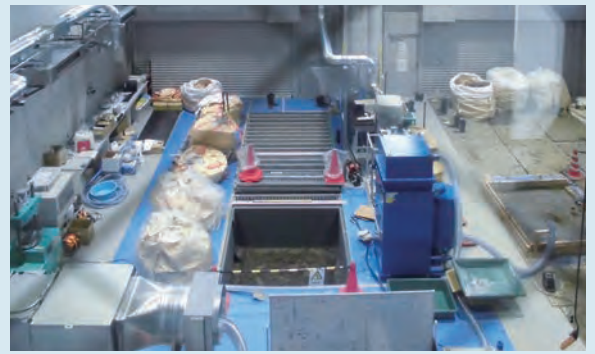
福島第一原子力発電所の事故後、被災地では放射性セシウムによって上昇した空間線量率を低減させるため、除染事業が実施されました。放射性セシウムは土との親和性が高いため、事故後の数年間は、空から降下した放射性セシウムはほぼ全量が土壌表面に表層数cmに留まっていた。そのため、表層5cmを目安に表層土壌を除去するという除染方針が取られました。除去する土壌は、学校や遊園地の校庭だけでなく、住宅の庭や田畑や水田なども対象であり、その総量は福島県内だけで1,400万m<sup>3</sup>にのぼると試算されています。このような除染事業は福島県外でも実施されており、それらの土壌は庭先の土中や、市町村等が保有する公有地の土中に埋められています。福島県内では、これらの除去土壌は浜通りに整備されている中間貯蔵



施設に集約されることとなっており、現在、多くの輸送車両による運搬が実施され、2021年度内にはほぼ完了する予定となっています。なお、福島県外では、除去土壌を貯蔵施設等に集約することは想定されていません。

大型土のう袋等に集められた除去土壌は、中間貯蔵施設に搬入された後、同施設内において、分別施設に運ばれてから取り出され、混入しているごみ等を除去してから土壌貯蔵施設に貯蔵されます。搬入された除去土壌の放射能濃度は除染前の想定よりも低く、8,000Bq/kg以下が75.9%を占めていることが報告されています(2021年8月末までのデータ)。想定よりも放射能濃度が低い理由は、事故から時間が経過し、放射性セシウム(特にCs-134)が核崩壊により大きく減少したことに加え、土壌のはぎ取り方にも原因があると考えています。先程、表層5cmをはぎ取ると書きましたが、仮に

福島地域協働研究拠点  
実証実験室内のライン  
メーター



技術実証フィールドで  
構築中の実験盛土



その下の放射性物質がほぼ含まれていない1cm分の土壌を含めて6cmまではぎ取ってしまうと、放射能濃度は約2割ほど減少します。例えば、表層5cmの土壌の放射能濃度が3,000Bq/kgだったとして、6cmをはぎ取ると約2,500Bq/kgになります。8cmをはぎ取ってしまうと、2,000Bq/kg以下となります。

はぎ取った除去土壌は、いわゆる「土」なので地盤材料として利用することができますが、表層5cmの「土」ということを忘れてはいけません。校庭などを除いて、表層の土は肥沃なことが一般的です。肥沃なら良いのでは?と思うかもしれませんが、肥沃であるということは、土壌微生物がたくさんいて、栄養分となる窒素やリンなども豊富で、草木類の根や昆虫などの遺骸も多いということです。肥沃であるということは植物にとっては良いことですが、土材料、いわゆる地盤材料として土木工事で使用する時には必ずしも良いことではありません。例えば、土に植物や木の根が多く入っていたとします。それらの根っこは長い年月をかけて分解されてしましますが、分解されるとそこには空間ができます。盛土などで使用した場合、その空間が潰れると、地盤が沈下してしまいます。また、栄養分や有機物が多く含まれているため、雨水が浸透してくると水質汚濁の原因ともなるこれらの

成分が流れ出るかもしれません。世の中には数多くの土木工事があり、多くの地盤材料が使用されてきましたが、表層の土だけを使った事例はありません。一方で、表層の土よりも有機物を多く含む有機質土や泥炭などは地盤材料として利用されてきたことがあります。表層5cmの土は、それら泥炭などに比較すれば、とても穏やかな性質を有していますので土木技術によって十分に有効活用できると考えられます。したがって表層5cmの土壌を地盤材料として利用しても特段の問題は生じないと考えられますが、我々は研究者として、除去土壌がどのような性質で、それを地盤材料として利用した時にどのような現象が生じるのかということを理解し、「地盤材料として利用可能である」ことを説明するための科学的な根拠を得たいと考えています。

そこで、実際の除去土壌を用いた実験を行っています。実験といっても、白衣を着て、ガラス器具などを使った実験ではなく、大型土槽実験や盛土実証試験という、白衣よりも作業着が必要な研究を進めています。

### 大型土槽実験

国立環境研究所の福島地域協働研究拠点の1階の実験室の床には2m×2mの真四角





大型土槽実験を行うため、ライシメーターに土壌を入れ準備を行う様子

の穴が2つ開いています。この穴の深さも2mです。これは、中型ライシメーターとも呼ばれ、この中に土壌を入れて、大きな土槽実験をするための実験設備です。弊所に見学に来られた方々は、2階通路の窓から見下ろす形でご覧いただいたことと思います。2つのライシメーターの片方には除去土壌のみを充填し、もう片方には除去土壌に改質剤(除去土壌に含まれる夾雑物を分別しやすくするために添加する粉体)を3%を加えた改質除去土壌を充填しています。人

工降雨装置もあり、通常観測される5倍の量の雨を降らせて、近い将来のセシウムの挙動や土壌中の状態を予測するような実験を行っています。

この実験を通して、中間貯蔵施設の分別施設等で使用されている改質剤が放射性セシウムや有機汚濁成分(正確には有機炭素量など)などの移動を抑制する効果があることが分かってきました。したがって、分別施設では、除去土壌に含まれるごみや草木の根っこ等を除去するだけでなく、分別過

程での改質剤の添加による環境保全の役割も担っている可能性があることとなります。この実験は現在進行中のため、「こうなります!」とはっきり言うことができません。もう少し研究を進め、そのメカニズムが明らかになったとき、改めて皆様にご報告したいと考えています。

#### 盛土実証試験

除去土壌は、工学的な分類として2種類に





**【ライシメーターの構造】**

**A 人工の雨を降らせる装置**

400本の注射針から水滴を落とします。

**B 土の中にたまったガスを採るための管**

**C 放射性セシウムを含まない土**

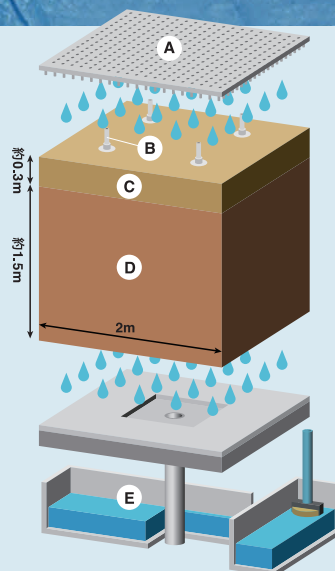
除去土壌を覆うことで、実験室の空間放射線量を低減します。

**D 除去土壌**

放射性セシウムに汚染された土です。水が通り抜けます。

**E 水タンク**

除去土壌を通り抜けた水が集まってきます。たまった水は毎週1回、回収します。







技術実証フィールドで構築された実験盛土

分けられています。除染した場所がどこか、ということヒント(大型土のう1つ1つが二次元バーコードで管理されている)にして、校庭等であれば砂質土(砂質土や砂っぽい除去土壌)、田畑や水田であれば粘性土(粘土のような細粒分の多い除去土壌)としています。砂質土よりも粘性土の方が柔らかいので、盛土に利用するためには工夫が必要です。砂質土と粘性土を混ぜることも1つの方策です。我々は、粘性土に砂やそれよりも大きな粒径の礫(れき)を混ぜて強度をあげた除去土壌(粘性土)について盛土試験を行っています。もう一つ、粘性土の強度をあげるための改良方法として、石灰やセメントを混ぜる方法があります。そこで、生石灰を粘性土系の除去土壌に混合したものについても、高さ3.2m、上面

約2×2m、下面約11×11 mの四角錐台という形の盛土試験を実施しているところです。こちらの試験も始めたばかりであり、まだ結論をお伝えできる結果が出ておりませんが、今後数年間は継続して実施する予定です。

### 再生利用のために

「除去土壌を再生利用する」とは、言い換えると、除染で持ち出した土をもう一度土として利用する、ということです。一見、何を言っているんだ?と思われるかもしれませんが、当然ながら、放射能濃度が高い土を使用することはしません。せっかく空間線量率を下げたのに、再生利用してもう一度、空間線量率を上げようと考えている訳

でもありません。時間の経過とともに放射能が低減した土壌を、地中で利用しようというもので、地表での利用も想定していません。各種の土木工事において、山を切り崩して得た土が利用されていますが、そうした土の代わりに、放射性セシウムを含んでいるが十分に制御できる低い濃度の除去土壌を、地中で使う用途のみで使おう、という考え方です。除去土壌を安全に再生利用できれば、県外に持ち出し、県外で最終処分する除去土壌の量を減少させることができます(県外最終処分量の減容化の一つの方策)。県外最終処分量が減少すれば、立地選定などにも有利ですし、運搬のためのコストや二酸化炭素排出量を抑えることが可能です。

土中で利用した除去土壌は、豪雨等の侵食を受けても露出しないように、除去土壌全体を放射性セシウムを含んでいない土(清浄土)で覆います。除染の目的である空間線量率の低減は果たしているものの、除染して出したものをまた戻す、という行為自体には抵抗を感じる方々も多いように思います。この問題を解決していくためには、技術論だけでなく、地域住民の皆様との対話や、対話のためのツール作りなどにも注力していく必要があると考えています。



覆土の浸水性をはかる試験



## 除去土壌を有効利用するための基本的な考え方

遠藤和人 福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 室長

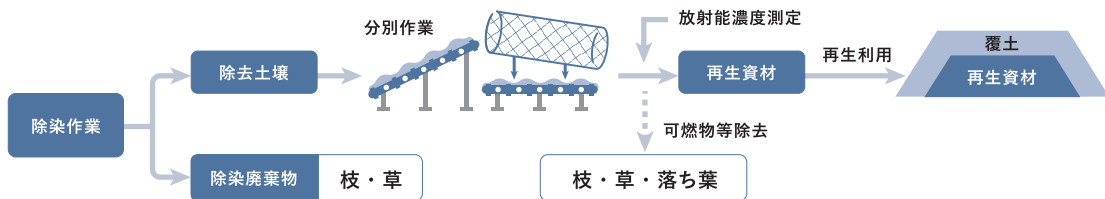
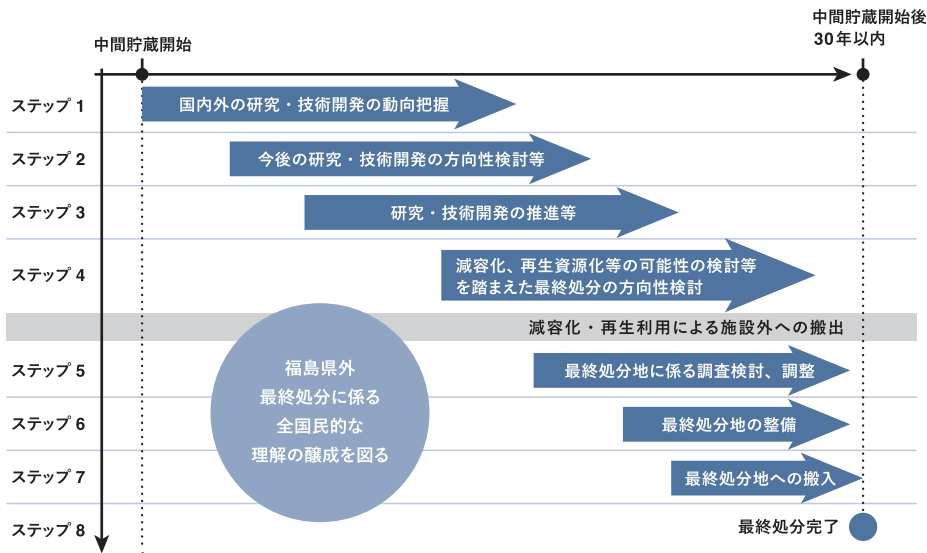
除染は、生活空間の放射線量を減らす(空間線量率を低くする)ことを目的としており、除染の方法は、放射性物質やそれにより汚染されたものを取り除く、さえぎる、遠ざける、のいずれかを実施することです。除去土壌とは、除染方法の一つである、「取り除く」を実施した土壌です。除去土壌は、生活空間などから「遠ざけたり」、汚染されていない土壌を被せて「さえぎったり」して仮置きされた後、中間貯蔵施設へと運ばれています。除去土壌は、中間貯蔵施設(正確には土壌貯蔵施設)で保管された後、県外で最終処分することが約束されています。

中間貯蔵開始後30年以内に県外最終処分を完了させるため、2016年4月に除去土壌等の減容・再生利用に関する技術開発戦略が策定されました。その中で、周辺住民や作業員に対する放射線の安全性確保を大前提として、除去土壌を再生資材化し、適切な管理の下で有効利用する基本的考え方が示されました。これは、最終処分量を減らさないと、県外最終処分の現実味が薄れてしまうためです。

生活空間から取り除いた土壌を、また生活空間に戻すのか、という疑問もあるかもしれません。除染の方法は、取り除く、以外に、さえぎるという方法も採ることができます。本来、土壌は、道路などの土木構造物を建設する時の資材や、作

物を育てる農地の材料など、様々な活用することのできる貴重な資源なのです。そのため、除染によって取り除かれた除去土壌を、適切な処理や汚染の程度を低減させて資源化し、さえぎるという方法を併用することで有効利用し、県外最終処分量を減らす方法が考えられました。

基本的考え方では、有効利用できる場所は、市町村や国のような公共が管理している道路盛土や鉄道盛土、防潮堤など、むやみに掘削されない場所に限定されています。また、有効利用に伴う作業等者の追加的な被ばく量を年間1mSv以下にすることとされています。再生資材として利用可能な放射能濃度は、8,000Bq/kg以下が原則とされ、用途等の条件から作業等者の追加被ばく量を年間1mSv以下とする濃度がこれを下回る場合は、その濃度以下とされています。さらに、一般公衆の被ばく量を年間0.010mSv以下にするように覆土等の厚さを確保する措置を講じることとされています。このような考え方のもと、除去土壌を資源として安全に有効利用できるよう、国立環境研究所福島地域協働研究拠点も各種の実証実験に携わっています。除去土壌がいかに貴重な資源であるとしても、実際の利用は、地域住民の方々の理解や信頼があってこそ実現できるものであることはいまでもありません。



【上図】最終処分までの流れ 【下図】除去土壌の再生利用 出典 | 環境省 除去土壌などの中間貯蔵施設について [http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/briefing\\_session/pdf/dojyou\\_cyukan.pdf](http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/briefing_session/pdf/dojyou_cyukan.pdf) (2022年9月確認) P24 福島県外での最終処分に向けた取組の図をもとに作成



# 除染廃棄物の 熱的減容化技術の開発

倉持秀敏

資源循環領域 副領域長

この研究により  
解決したい課題

除染廃棄物等のガス化溶融処理において、放射性セシウム(Cs)をガスとして分離させ、放射性Cs濃度が極めて低いスラグを排出する技術を確認します。

この研究による貢献

中間貯蔵施設において本開発技術が実装され、高度な放射性Cs分離性能を示し、放射性Cs濃度が極めて低いスラグを排出できる運転を実現しました。



## 除染廃棄物等をガス化溶融するメリット

2011年3月の福島第一原子力発電施設の事故により放射性セシウム(Cs)などの放射性物質が環境に大量に放出されたことから、人の健康又は生活環境に及ぼす影響を速やかに低減することを目的として、国が除染を実施する除染特別地域や市町村が中心となって除染を実施する除染状況重点調査地域が指定され、2012年1月から放射性物質により汚染された土壌等の除染の措置が進められてきました。除染特別地域では、除染作業で発生した除染廃棄物や家屋解体等の廃棄物のうち、可燃物(図1参照)については減容化を目的に仮設焼却施設において焼却処理されています。除染廃棄物等の焼却処理では、残渣(処理後に残ったもの、主に灰分)として燃え殻(主灰)と排ガスに含まれる細かい灰(ばいじん、飛灰)が排出され、それらの放射性物質の濃度が減容化前に比べて数倍～数十倍も高くなります。除染特別地域では、これらの残渣は、一般の廃棄物と同じように処分や再利用ができるように定められた放射性物質濃度、つまり「クリアランスレベル」(放射性Cs濃度では100Bq/kg以下)を満足することはなく、特別に処分されることになります。もし、減容化処理において廃棄物中の放射性Csのより多くを取り除くことが



【図1】 除染廃棄物中の可燃物

でき、浄化物が土木資材等へ利用できれば、処分する容量を劇的に小さくさせることができます。例えば、熱的減容化技術の一つであるシャフト式ガス化溶融技術(図2参照)では、廃棄物を高温に加熱し、液状に溶かします。この液状物(通常、溶融物と呼ばれます)を急冷することでスラグと呼ばれるガラス状の固体が得られます(図3参照)。このスラグが前述のクリアランスレベルを満たすようであれば、土木資材やセメント原料としてスラグを利用することが可能になります。これが減容化における溶融技術の大きなメリットです。また、シャフト式ガス化溶融技術では、除染廃棄物が収納されているフレキシブルコンテナをそのまま処理することができます。焼却処理であればコンテナの破袋などの前処理が必要になりますので、シャフト式ガス化溶融技術は前処理スペースの削減や放射性Csの二次汚染防止についても大きなメリットがあるといえます。さらに、アルカリ金属としてのCsは化学形態によっては沸点が低いため、



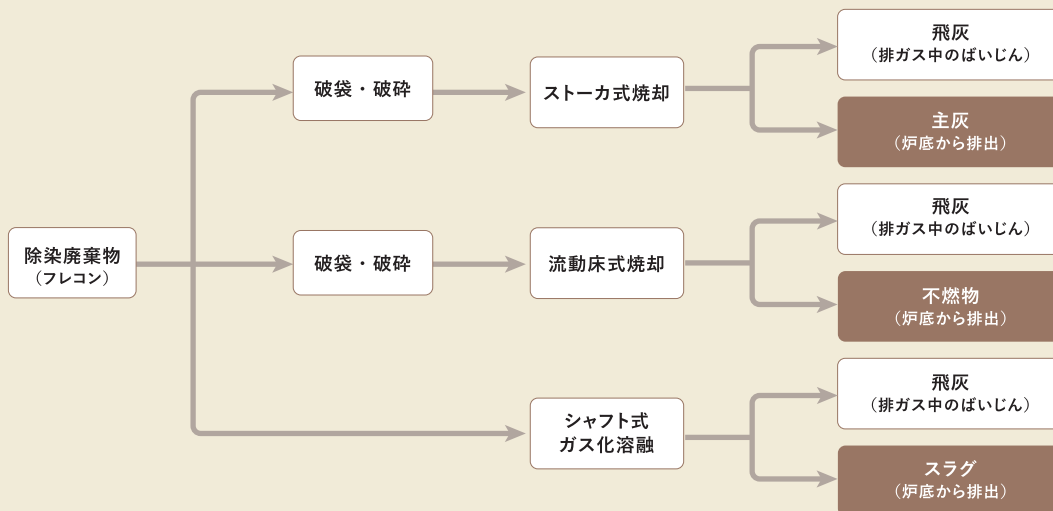
【図3】 シャフト式ガス化溶融炉から排出されたスラグ

溶融処理温度においてガスとして放射性Csを揮発させることができます。揮発したガス状の放射性Csは排ガスへ移行しますが、排ガスが冷却される処理においてガス状の放射性Csは飛灰の表面に固体化し、バグフィルターと呼ばれるフィルターによって排ガスから飛灰とともに分離・回収されます。実際に、我々の調査では、シャフト式ガス化溶融処理において放射性Csの98%程度は揮発して飛灰へ移行し、放射性Cs濃度の低いスラグが得られること、すなわち溶融技術は放射性Csを揮発分離する機能を有することを確認しました<sup>1,2)</sup>。

## 放射性セシウムの揮発をさらに促進する方法

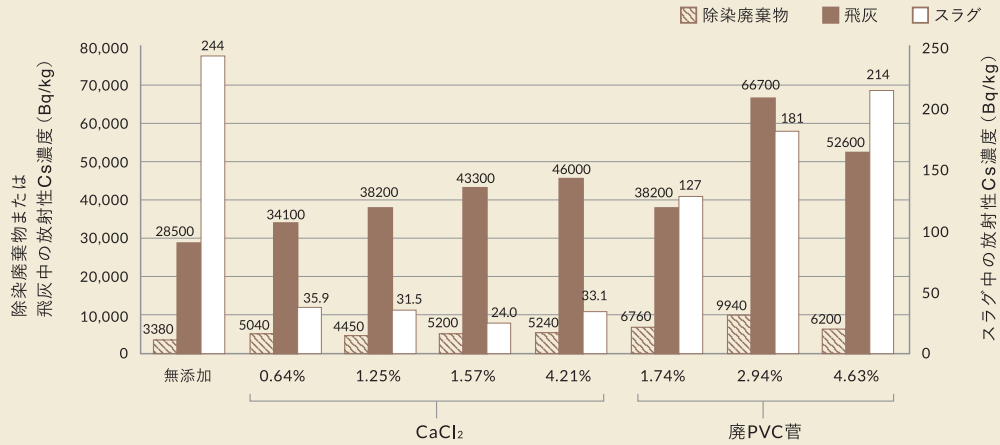
シャフト式ガス化溶融技術は、溶融炉内において1,700～1,800°Cの高温を発生させ、前述したように放射性Csのほとんどを揮発させることができます。しかしながら、我々の調査では、除染廃棄物を溶融処理して得られたスラグに対する放射性Cs濃度は244Bq/kgであり<sup>2)</sup>、除染廃棄物中の放射性Cs濃度に依存するものの、この揮発分離能ではスラグをクリアランスレベル以下

【図2】 除染廃棄物の減容化処理

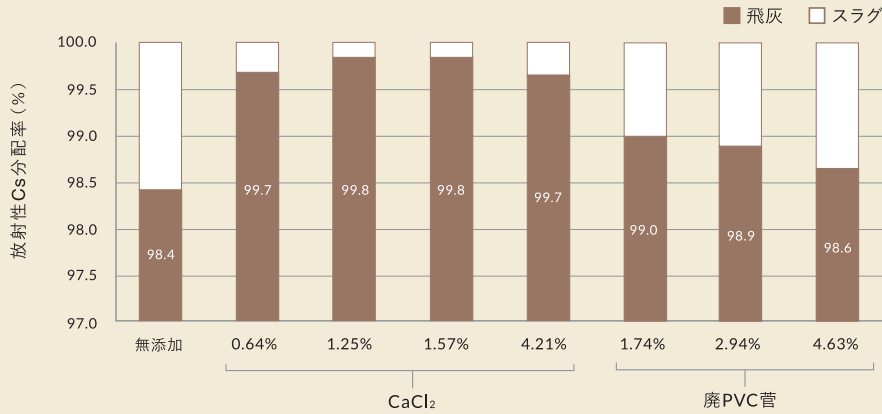




【図4】スラグ及び飛灰に対する放射性Cs濃度と添加剤量（投入物に対する塩素濃度に換算）の関係（実機試験）



【図5】スラグ及び飛灰への放射性Csの分配率と添加剤量（投入物に対する塩素濃度に換算）の関係（実機試験）



にすることは難しいと考えられます。そこで、放射性Csの揮発量をより多くさせるために、添加剤を熔融炉内へ投入して放射性Csを塩化セシウム (CsCl、融点：645℃、沸点：1297℃<sup>3)</sup>) という比較的揮発し易い化学形態に変換させて、揮発促進を行うことを検討しました。熔融炉内においてCsClガスを生成させるためには、塩素 (Cl) が必要になります。二種類のClを含む化合物を選定し、添加剤として用いました。一つ目は、塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>) です。シャフト式ガス化熔融技術では、廃棄物に加えて、高温にするためのコークス及び溶け易くするための石灰 (CaO) を加えています。溶け易くするためにCa分を必ず投入しなければならないので、Caに加えて揮発に必要なClを含むCaCl<sub>2</sub>を添加しました。もう一つは、ポリ塩化ビニル (PVC) の廃管です。これは解体等による廃棄物に混入していることから、これを一緒に処理することでClを供給する添加剤となりうると考えました。

### 添加剤が放射性セシウムの揮発促進に及ぼす効果

処理量80t/日スケールの実機 (p19扉写真参照) において、CaCl<sub>2</sub>及び廃PVC管を除染廃棄物に対してある割合で添加した場合に、排出されたスラグと飛灰に対する放射性Cs濃度を図4に、スラグと飛灰への放射性Csの分配率を図5に示します。CaCl<sub>2</sub>を添加した場合には、その添加量が増えるにつれ、飛灰中の放射性Cs濃度が高くなり、飛灰への分配率も増加する傾向が得られました。飛灰への分配率は最大で99.8%に達しました。ここで、添加剤がない場合の分配率との差は僅か1.4%ですが、スラグ中の放射性Cs濃度に着目すると、濃度レベルが一桁低くなることが確認できます。すなわち、廃棄物自体の放射性Cs濃度が高い場合には、この僅かな差がスラグ中の放射性Cs濃度を大きく左右することになります。また、今回の試験で得られたスラグ中の放射性Cs濃度はクリアランスレベル以下となってお

り、放射性Cs濃度に関しては規制なく土木資材等として利用できる可能性を示すことができました。一方、廃PVC管を添加した場合には、CaCl<sub>2</sub>の場合に比べてスラグ中の放射性Cs濃度が劇的には低下しませんでした。PVCは加熱すると300～400℃付近でClがガス状物質として揮発し、速やかに熔融炉外へ排出されてしまうからです<sup>2)</sup>。したがって、放射性Csの揮発量を多くするには、適切な添加剤を選定することが重要です。2020年3月よりCaCl<sub>2</sub>を添加して熔融する技術は中間貯蔵施設に実装され、熔融処理が開始されました。開始後のスラグ及び飛灰に対する放射性Cs濃度が報告されています<sup>4)</sup>。飛灰中の放射性Cs濃度に対するスラグ中の放射性Cs濃度の比を計算すると、濃度比は0.0003～0.0052 (中央値：0.0008) の範囲にありました。我々の技術開発時の濃度比 (0.0006～0.0010) と概ね一致することから、中間貯蔵施設の実機においても、シャフト式ガス化熔融技術は高度な放射性Cs分離性能を発揮できていると考え



られます。

以上のように、スラグ中の放射性Cs濃度をクリアランスレベル以下まで低減できることが確認されましたが、スラグの利用時にスラグから放射性Csが溶出してしまうと二次的な環境汚染を引き起こす可能性があります。そこで、スラグからの放射性Csの溶出性についても調べました。既報の論文に<sup>5)</sup>スラグの塩基度(CaO/SiO<sub>2</sub>)が高いと、アルカリ金属の溶出率も高くなる傾向が報告されているからです。我々の研究でも放射性Csの溶出率(64日の長期溶出試験における累積溶出率)は塩基度に比例する関係が示唆され、塩基度1.2以上のスラグにおいては溶出率が最大14%に達しました。一方、最も低い塩基度(0.84)を有するスラグでは溶出率が1%を超えないこともわかりました。スラグをより安全に利用するためには、スラグの塩基度を例えば1よりも高くないように管理することが望ましいと考えられます。

## 今後のとりくみ

中間貯蔵施設では、他の溶融処理技術を用いて、除染廃棄物ではなく、除染廃棄物の焼却後に発生する主灰や飛灰を溶融する灰溶融施設が本格稼働していますが、放射性Csに関する学術的な知見は極めて限られています。そこで、これらの施設についても放射性Csの挙動を把握し、課題の解決や安定運転に向けた技術的提案を行う予定です。現在、灰溶融施設から排出される飛灰から放射性Csを水で洗い出し、洗浄液に放射性Cs吸着剤を投入して高濃縮物とする減容化方法が検討されています。このような処理も踏まえた最適溶融条件について検討する予定です。

### ● 参考文献

- 1) Fujiwara H., Kuramochi H., Maeseto T., Nomura T., Takeuchi Y., Kawamoto K., Yamasaki S., Kokubun K., Osako M. (2018) Influence of the type of furnace on behavior of radioactive cesium in municipal solid waste thermal treatment. Waste Management, 81, 41-52.
- 2) Noda K., Kuramochi H., Yui K., Ito K., Yoshimoto N., Yoshimoto Y., Nagata T., Koshida H., Suzuki H., Takaoka M., Osako M. (2020) Behavior of radioactive cesium during a direct melting treatment of decontamination waste with and without Cl-containing additives. Process Safety and Environ. Protection, 143, 186-195.
- 3) Yaws C. L., 1999, Chemical properties handbook, New York: McGraw-Hill
- 4) [http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives\\_fukushima/waste\\_disposal/futaba/pdf/futaba\\_01\\_seiseibutsu\\_2004.pdf](http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/futaba/pdf/futaba_01_seiseibutsu_2004.pdf) (2020年6月22日アクセス)
- 5) 釜田陽介, 佐藤淳, 上林史朗, 阿部清一 (2015) 廃棄物溶融スラグからの鉛溶出挙動に及ぼすスラグ組成の影響. 廃棄物資源循環学会論文誌, 26, 49-60.

## column3

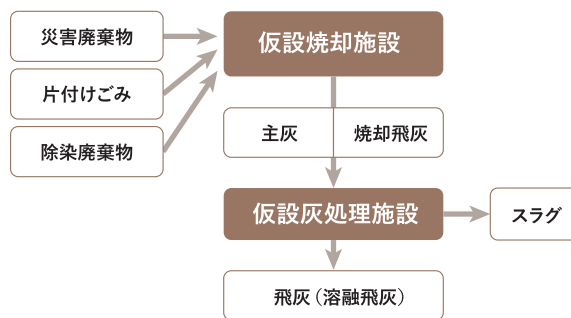
## 熱的減容化について

飯野成憲 福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 主任研究員

熱的減容化とは、焼却処理や溶融処理により廃棄物の最終処分量を減らすことです。焼却は名前のとおり燃やすことであり、廃棄物を燃やした後は主灰(燃え殻)と焼却飛灰(固体の微粒子)が発生します。主灰や焼却飛灰を焼却よりも高温で熱処理(この場合は溶融という)することで更なる減容化が可能です。溶融では焼却と同様に飛灰(溶融飛灰)が発生しますが、主灰は発生せず、スラグが生成されます。スラグは砂に近い性状であり、路盤材等の土木資材として有効利用することができます。

放射性Csに汚染された廃棄物については、県外最終処分量を可能な限り減容化するため、主灰と焼却飛灰を溶融処理(福島県内では灰処理施設と呼ばれています)しています。ここではその減容化処理の例を図1に示します。津波がれきや被災家屋等の解体に伴い発生する廃棄物(災害廃棄物)、住民の方々が片付けを行って廃棄されたごみ(片付けごみ)、除染作業に伴い発生する可燃性廃棄物(除染廃棄物)等を仮設焼却施設で焼却し、発生した主灰と焼却飛灰を仮設灰処理施設で溶融することにより、スラグと飛灰(溶融飛灰)が生成します。溶融過程で積極的に放射性Csを飛灰に移行させ、

【図1】減容化処理の例



有効利用可能なスラグへと移行させないため、薬剤を添加することも行われています<sup>1)</sup>。灰処理施設で生成されたスラグについては、一部が既に有効利用されており、更なる有効利用先を確保するため、物性や安全性等の検討が進められています。また、安全かつ着実な県外最終処分の実現に向け、飛灰を更に減容化するための洗浄・吸着等による放射性Cs濃縮技術が検討されており、濃縮物の安定化についても技術開発が進められています。

### ● 参考文献

- 1) 倉持秀敏: 熱的減容化の現状と今後の展開, 廃棄物資源循環学会誌, 30 (1), 31-38.





Research 04

## 放射性セシウムに汚染された 焼却残渣の熱的溶融処理で 発生した飛灰の最終処分に 向けた検討

有馬 謙一

資源循環領域 資源循環基盤技術研究室 特別研究員

この研究により  
解決したい課題

2020年3月より双葉町の減容化施設において、放射性物質に汚染された焼却残渣の熱的溶融処理（熱的減容化の一つ）が行われています。ここで発生する放射性物質が濃縮された飛灰の処理と処分の方法が未定です。

この研究による貢献

飛灰の処理についてさまざまな研究が実施されています。この研究では、実際の処理に適用したときの「発生物＝スラグ＋飛灰」の質量と放射能濃度を予測するための手法を開発しました。これにより、処理方法による処分方法や経済性の定量的な比較が可能となりました。





福島県双葉町細谷地区に建設された仮設焼却施設(2020年11月8日社岳史撮影)

## 焼却残渣の熱処理と発生する飛灰の処理について

中間貯蔵施設に搬入される放射性物質に汚染された土壌や廃棄物のうち、焼却残渣(焼却炉で発生した主灰と飛灰)は38万 $m^3$ と推定されています<sup>1)</sup>。焼却残渣に対しては、「除染廃棄物の熱的減容化技術の開発」に詳述されているように、2020年3月より減容化施設において熱的熔融処理(以下熱処理)が行われています。熱処理ではスラグと飛灰が発生し、スラグは放射能濃度が低く再生資材としての利用が予定されていますが、飛灰は放射能濃度が数十万 $Bq/kg$ と高く、その処理方法が決まっています。この飛灰の処理方法について多くの基礎研究が実施されていますが、その中心となるのは飛灰中の放射性セシウムを、挙動が

ほぼ同じである安定セシウム(以下、合わせてCs)とともにさらに濃縮して減容化する技術です。例えば洗浄によりCsを水中に溶出させ、そのCsを吸着材により選択的に吸着させ、その吸着材を安定化して安定化体とする方法です。この方法を実際の処理に適用した場合、飛灰の減容化処理によりどのような物質がどれだけ発生し、Csがどの発生物にどれだけ移行するか(以下マスバランス)を予測する手法がありませんでしたので、今回新たに開発しました。

### マスバランスの計算手法について

焼却残渣に対して想定される減容化プロセスを図1に示します<sup>2,3)</sup>。焼却残渣(可燃性の廃棄物が焼却処理により既に減容化されている)をさらに減容化するために、より高い

温度の熱処理をして、そこで発生する飛灰をさらに減容化するために、洗浄処理、吸着処理、安定化処理を行うもので、いくつかの組合せが想定されます。熱処理については「除染廃棄物の熱的減容化技術の開発」に記述されていますので、その他について説明します。

**a) 洗浄処理** | 飛灰に水を加えて洗浄し、Csを洗浄水中に溶出させます。飛灰には、アルカリ金属(Na、Kなど)の塩化物などとともに、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $CaCO_3$ などが含まれています。アルカリ金属の塩化物などはCsとともに水中に溶出して洗浄溶液となりますが、水に溶けにくい $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $CaCO_3$ などは洗浄残渣となります。

**b) 吸着処理** | 洗浄溶液にはアルカリ金属などのイオンが含まれていますが、吸着材によりCsを濃縮して回収します。洗浄溶液中



にはK、NaなどがCsよりも大量に含まれるため、Csを選択的に吸着する吸着材であるフェロシアン化物、ケイチタン酸塩などが使用されます。

**c) 安定化処理**：使用後の吸着材に安定化材を加えて安定化し、最終処分可能な形態(以下、安定化体)とします。セメントのほか、ジオポリマー、ガラスなどによる安定化について基礎的な研究が行われています。

**d) 固化処理**：飛灰に固化材を加えて固化し、最終処分可能な形態(以下、固化体)とします。現在10万Bq/kg以下の特定廃棄物については、特定廃棄物セメ

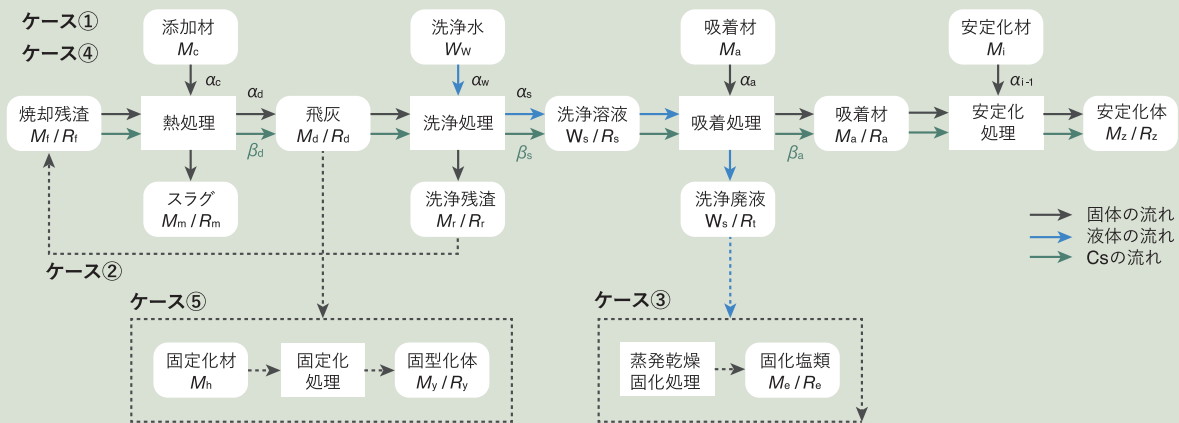
ント固化処理施設でセメント固化処理が行われ<sup>4)</sup>、特定廃棄物埋設処分施設で埋設処分されています。

図2に洗浄・吸着処理施設のイメージ図(飛灰洗浄ベンチ試験装置のイメージ図<sup>5)</sup>より)を示します。

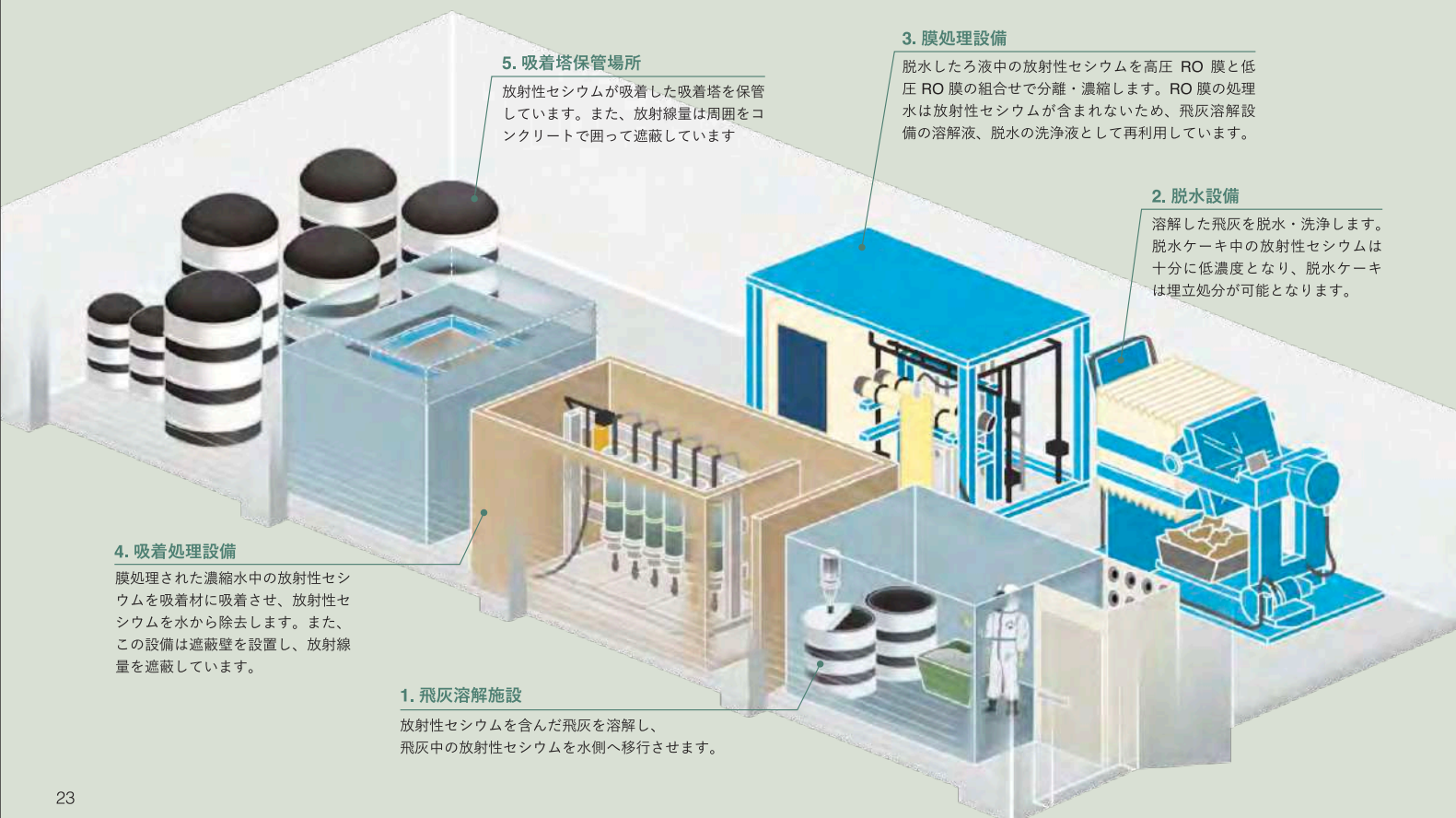
そのマスバランス計算方法について、詳細は文献<sup>2,3)</sup>に示しますが、焼却残渣の質量 $M$ と放射能濃度 $R$ に対して、表1に示す各処理の運転パラメータである質量比 $\alpha$ とCs移行率 $\beta$ を与え、熱処理、洗浄処理、吸着処理、固化処理の順に、入口と出口の物質の質量と放射能の収支を計算するも

のです。例えば、熱処理では、添加材の質量比を $\alpha_c$ 、飛灰の質量比を $\alpha_d$ 、Csの揮散率を $\beta_d$ として、スラグ、飛灰の質量(それぞれ $M_m$ と $M_d$ )と放射能濃度(それぞれ $R_m$ と $R_d$ )を計算します。運転パラメータは文献調査をもとに与えましたが、例として、後述する想定ケース①で設定した運転パラメータで計算した結果を図3に示します。ここで、Cs溶出率 $\beta_s$ と洗浄残渣の放射能濃度 $R_r$ の関係を図4に示します。 $\beta_s$ が95%のとき $R_r$ は3.6万Bq/kgとなりますが、例えば $R_r$ の目標値を(「除去土壌を有効利用するための基本的な考え方」より)8,000Bq/kgとすると、

【図1】 焼却残渣の減容化プロセス例(ケース①～⑤は後述する想定ケース)



【図2】 洗浄・吸着処理施設イメージ図(飛灰洗浄ベンチ試験装置イメージ図<sup>5)</sup>より) 出典 | 国立環境研究所/福岡大学/株式会社神鋼環境ソリューション

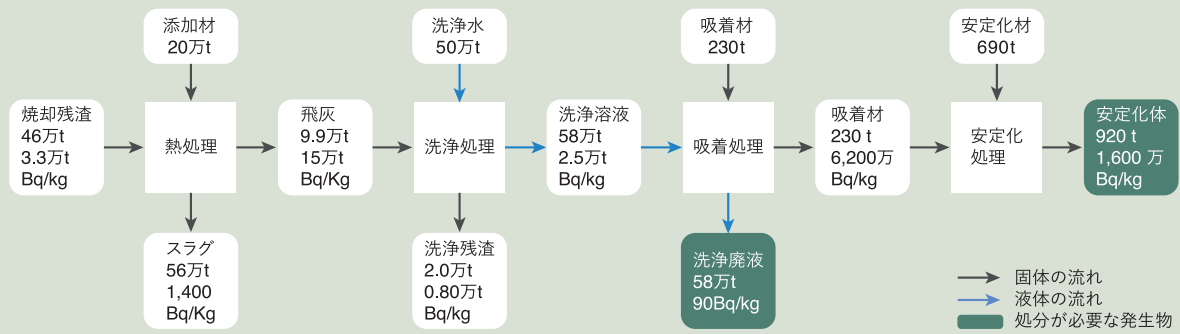




【表1】マスバランス計算における運転パラメータ

処理	運転パラメータ	記号	ケース				
			①	②	③	④	⑤
熱処理	添加材比	$\alpha_c$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
	飛灰発生比	$\alpha_d$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	セシウム揮散率	$\beta_d$	95%	95%	95%	95%	95%
洗浄処理	洗浄水比	$\alpha_w$	5	5	5	5	-
	飛灰溶解比	$\alpha_s$	0.8	0.8	0.8	0.8	-
	セシウム溶出率	$\beta_s$	99%	95%	99%	99%	-
吸着処理	吸着処理比	$\alpha_a$	2,500	2,500	2,500	2,000	-
	セシウム吸着率	$\beta_a$	99.7%	99.7%	96%	99.7%	-
安定化処理	安定化材比	$\alpha_i$	3	3	3	3	-
固化処理	固化材比	$\alpha_j$	-	-	-	-	1

【図3】運転パラメータの代表値でのマスバランス（ケース①の計算例）



必要な $\beta_s$ は99%となります。また、Cs吸着率 $\beta_a$ と洗浄廃液の放射能濃度 $R_r$ の関係を図5に示します。 $\beta_a$ が99%のとき $R_r$ は260Bq/Lとなりますが、例えば $R_r$ の目標値を90Bq/Lとすると、必要な $\beta_a$ は99.7%となります。このように、実際の処理における目標値を与えることも可能です。

### 減容化プロセスのケーススタディ

飛灰の減容化プロセスとして、下記の5ケースを想定しました。図1を参照ください。

#### ■ケース①

基本となるプロセスで、飛灰を洗浄してCsを洗浄溶液中に溶出させ、溶出したCsを吸着材で吸着し、使用後吸着材を安定化処理します。洗浄残渣と洗浄廃液は、それぞれ放射能濃度を目標値以下として処分あるいは放流するとしました。

#### ■ケース②

ケース①において、洗浄処理におけるCs溶出率に限界があり洗浄残渣の放射能濃

度が目標値を超える場合を想定して、洗浄残渣を熱処理に再投入するとしました。

#### ■ケース③

ケース①において、洗浄廃液の放流が困難な場合を想定して、洗浄廃液を蒸発・乾燥・固化処理し、固化塩類として処分するとしました。

#### ■ケース④

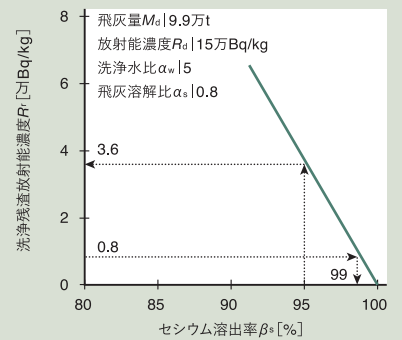
ケース①と同じ減容化プロセスですが、ケース①よりもCsの吸着性能に優れた吸着材を使用し、より高度な減容化を行うとしました。

#### ■ケース⑤

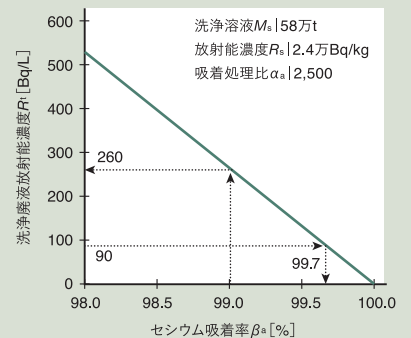
飛灰を洗浄して減容化するのではなく、そのまま固化処理して処分するとしました。

これらと比較・検討するためには、発生物の質量と放射能濃度を把握する必要があります。各ケースで設定した運転パラメータを表1に、結果を図6と図7に示します。熱処理によりスラグが56万t発生しますが、再生利用が想定されているため、この図には

【図4】洗浄処理におけるセシウム溶出率と洗浄残渣の放射能濃度の関係



【図5】吸着処理におけるセシウム吸着率と洗浄廃液の放射能濃度の関係





表示していません。

### ■ケース①

吸着材安定化体が920 t発生し、焼却残渣に対して1/500の減量化となりました。放射能濃度の低い発生物として洗浄廃液、洗浄残渣が発生し、その大部分を占める洗浄廃液は58万tですが、吸着処理により放射能濃度が環境中に放流しても問題ないレベルとして放流すると、処分の対象は吸着材安定化体と洗浄残渣となり大きく低減されました。

### ■ケース②

ケース①に比べて吸着材安定化体の発生量が4%程度増加しましたが、洗浄残渣の処分が不要となり、吸着材安定化体だけが処分の対象となりました。

### ■ケース③

ケース①に比べて処分の対象となる固化塩類が増加しました。洗浄残渣、固化塩類、吸着材安定化体を合わせた質量は飛灰とほぼ同じで、焼却残渣を3種類の物質に分離することになります。

### ■ケース④

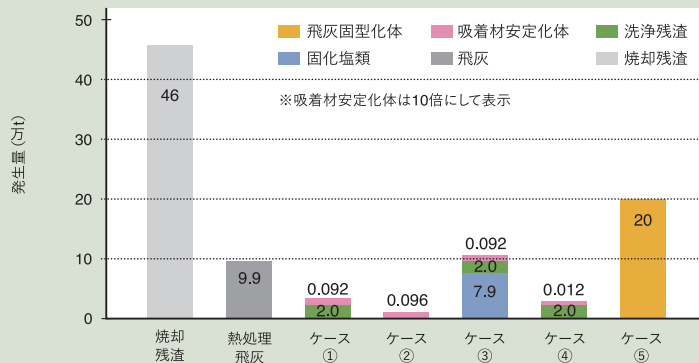
洗浄残渣の発生量はケース①と同じのまま、吸着材安定化体の発生量が920 tから120 tに減少し、焼却残渣に対する減量化比は1/3,800と減量化の効果がさらに大きくなりました。ただし、吸着材安定化体の放射能濃度が1,600万Bq/kg(ケース①)から1億2,000万Bq/kg(ケース④)まで増加するため、より高度な放射線防護対策が必要になると考えられます。

### ■ケース⑤

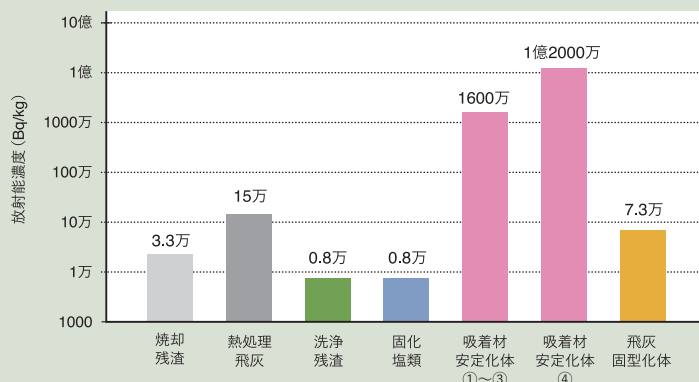
飛灰固型化体の体積が飛灰の2.1倍に増加して、焼却残渣に対する減量化比は1/2.3に留まり、ケース①から④に比べて処分対象物が増加します。一方、洗浄、吸着などの装置は不要となるとともに、飛灰固型化体の放射能濃度が7.3万Bq/kgと比較的低いため、取り扱いが比較的容易になると考えられます。

このように、各ケースでの発生物の体積と放射能濃度を計算し、比較・検討することが可能となりました。なお、焼却残渣には重金属類も含まれており<sup>6)</sup>、同じように重金属類の挙動と処理についても検討する必要があります。

【図6】処分が必要な発生物の体積の比較(スラグは再生利用、洗浄廃液は放流)



【図7】発生物の放射能濃度の比較



## 今後のとりくみ

熱処理で発生した飛灰の減容化プロセスの発生物の質量と放射能濃度を計算し、比較・評価することが可能となりました。今後、放射能濃度に応じた放射線防護対策や重金属類の処理も含めて各ケースにおける経済性を試算するとともに、処分における社会的合意形成や法規制などについても検討し、総合的に比較・評価する予定です。なお、各処理においては技術的に未検証な項目もあり、処分側から想定される放射能濃度をもとに、処理の目標値として設定した運転パラメータもあります。中間貯蔵・環境安全事業株式会社では、2021年度より3年間の予定で、熱処理設備で発生した飛灰を使用して減容化処理プロセスの実証試験を実施します。国立環境研究所はこの実証試験に協力し、減容化プロセスの実現性を確認するとともに、マスバランス計算と経済性試算の精度向上に必要なデータを取得する予定です。

### ●参考文献

- 1) 環境省 | 減容・再生利用技術開発戦略 進捗状況について, 第9回中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会の資料4, pp.43-53 (2018).
- 2) 有馬謙一、山田一夫、大迫政浩、保高徹生、芳賀和子 | 福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合的比較(第1報) 焼却残渣の熱処理・灰洗浄を含む減容化プロセスの定量的評価方法の開発, 環境放射能除染学会誌, 7 (4), 241-252 (2019).
- 3) 有馬謙一、大迫政浩、保高徹生、篠崎剛史 | 福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合的比較(第2報) 焼却残渣に対する減容化プロセス5 CASEの比較, 環境放射能除染学会誌, 8 (3), 147-159.
- 4) 環境省: 固型化処理施設の概要, 特定廃棄物の埋設処分事業情報サイト, 2022年1月閲覧, [http://shiteihaiki.env.go.jp/tokuteihaiki\\_umetate\\_fukushima/-cement\\_solidification\\_plant/about.html](http://shiteihaiki.env.go.jp/tokuteihaiki_umetate_fukushima/-cement_solidification_plant/about.html)
- 5) 国立環境研究所: 放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術資料 第四版), 第8章 焼却飛灰の水洗浄による放射セシウムの除去, p.138, 国立環境研究所 (2014).
- 6) T. Sekito, Y. Dote, H. Sakanakura, K. Naklamura: Characteristics of element distribution in an MSW ash melting treatment system. Waste Management, 34, 1637-1643 (2014).



## 環境放射能除染学会の 「県外最終処分技術戦略研究会」の紹介

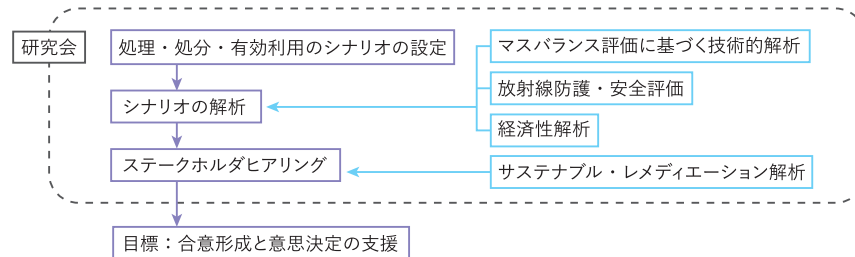
山田一夫 福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 フェロー

帰還困難区域を除き面的除染作業も終了し、除染作業に伴い発生した除去土壌と除染廃棄物は1000カ所を超える仮置き場に貯蔵されてきましたが、2015年から中間貯蔵施設に運搬されており、30年後の2045年までに福島県外に最終処分される計画となっています。そのうち、可燃物は焼却減容化し、その焼却灰は熔融炉によるさらなる熱的減容化が始まっています。しかし、県外最終処分の具体像は提示されておらず、環境省のロードマップでは2024年に県外最終処分の戦略目標が設定される見通しです。

環境省の事業を支援することを目的に、現時点での制度論・社会論的な制約を考慮せず、純粋に技術論の視点から、学側の活動を国立環境研究所は提案してきました。すなわち一般社団法人環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会（通称、環境放射能除染学会）に、「県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方に関する研究会

（通称：県外最終処分技術戦略研究会）」を設置することを働きかけ、2018年10月から活動を行ってきました。委員長は国立環境研究所資源循環廃棄物研究センターの大迫政浩センター長です。構成員は、有害廃棄物処分、放射性廃棄物処分、安全評価、健康影響、産業技術、リスクコミュニケーション（リスコミ）、など多様な分野の専門家からなります。研究会の活動概要を図に示します。まず、県外最終処分までの工程、「減容化処理、安定化、再利用/廃棄、処分場」を組み合わせた複数の特徴的なシナリオを設定し（表1に例示）、各シナリオに対し、処理・処分のマスマバランス評価（別項目で概要を説明）、安全評価、経済性について検討しています。さらに、合意形成を得るための情報としてステークホルダヒアリングを行い、得られた情報をサステナブルレメディエーションの手法で解析も行っています。活動状況は2019年7月および2020年9月の除染学会企画セッションとして報告し<sup>1,2)</sup>、海外発信もしています<sup>3)</sup>。

【図】環境放射能除染学会での県外最終処分技術戦略研究会の活動内容



【表1】県外最終処分技術戦略研究会で検討中の処理・処分シナリオの例

想定シナリオ0 これまでの技術開発の流れに整合的	処理済み物は再利用。焼却残渣と高濃度土壌は熱処理・灰洗浄濃縮後、 県外の遮断型相当の施設で処分。
想定シナリオ1 コスト最小化の可能性を考慮	処理済み物は中間貯蔵後に造成地として発展的有効利用。熱処理濃縮物と高濃度土壌に 対しては、できるだけ処理を行わず、一定期間保管後、管理型相当の処分場で処分。
想定シナリオ2 最大濃縮	処理済み物は想定シナリオ1と同じ。汚染廃棄物を最大濃縮し（6m <sup>3</sup> ）、 県外の遮断型相当の施設にて処分、もしくは、長期保管後、原因者に最終処分を委ねる。

### ● 参考文献

- 1) 山田一夫, 大迫政浩, 飯本武志, 大越実, 杉山大輔, 宮本泰明, 保高徹生, 山田正人, 遠藤和人, 有馬謙一 (2019) 企画セッション：環境放射能除染学会「県外最終処分技術開発戦略ありかた研究会」成果報告「県外最終処分に向けたシナリオ」. 第8回環境放射能除染研究発表会パネルディスカッション, 同, 8, 9

1 環境放射能除染学会は、今般の福島原発事故により発生した放射能の大規模除染に対処するため、その除染のための研究や技術発展に関する情報交換や成果の発表の場として、2011年11月に発足した学会。http://khjosen.org/index.html

2 ここでは、処理対象物の量を把握し、処理・処分の各工程で、その廃棄物と処理済み物の量がどのように変化していくかを定量的に表したものをマスマバランスと呼ぶ。

3 サステナブルレメディエーションとは、環境的側面だけでなく、社会的側面、経済的側面を考慮した上で、ステークホルダーの意見や価値観を踏まえ、適切な意思決定を行う取り組みである。近年、土壌汚染分野で推進されている。

保高徹生, 古川靖英, 張銘 (2017) わが国と諸外国のサステナブル・レメディエーションへの取り組み、環境情報科学46 (2), 43-47, 2017

- 2) 大迫政浩, 遠藤和人, 山田一夫, 有馬謙一, 万福裕造, 保高徹生, 大越実, 宮本泰明, 杉山大輔 (2020) 環境放射能除染学会「県外最終技術開発戦略の在り方研究会」第二回成果報告～最終処分実現に向けた技術合理性のあるシナリオと社会合意形成～、第9回環境放射能除染研究発表会パネルディスカッション

- 3) Yamada K., Osako M., Yasutaka T. (2020) Study on the strategy for final disposal and reuse of decontamination wastes after the Fukushima Daiichi NPP accident. WM2020 Conference, Abstracts, 20426





災害環境研究  
の今