

平成 2 5 年度除染技術選定・評価等業務

報告書

—環境省 平成 2 5 年度除染技術実証事業—

平成 25 年 12 月

独立行政法人日本原子力研究開発機構

目次

1. 目的	1
2. 概要	3
3. 個別試験結果	6
4. 総合評価	19
5. まとめ	28
参考文献	31

付録1：平成25年度除染技術実証事業概要書

付録2：個別試験結果と評価詳細

付録3：各技術のまとめ

1. 目的

平成 23 年 3 月 11 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が、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、平成 23 年 8 月 30 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[1]」が成立し、平成 24 年 1 月 1 日より全面施行された。国は、除染、汚染廃棄物の処理、汚染土壌の減容化等の技術開発等を実施することとされた。

また、平成 23 年 11 月 11 日に定められた特別措置法の基本方針では、国は、環境汚染への対処に係る新規技術、材料等について、実用可能性や費用対効果を評価・公表する仕組みを構築し、産学官の研究開発の効果を活用するものとしている。

これらを踏まえ、環境省では、今後除染作業等に活用し得る技術を発掘し、除染効果、経済性、安全性等を確認するため、「平成 25 年度除染技術実証事業」（以下、「実証事業」という。）として、実証事業の対象となる除染技術等について、平成 25 年 2 月 14 日（木）より平成 25 年 5 月 24 日（金）まで、広く公募を行った。本事業の公募期間に応募のあった 136 件の提案について、有識者により構成される委員会において厳正な審査を行い、実証試験の対象となる除染技術等として表 1-1. に示した 11 件の技術を選定した。[2]

本報告は 11 件のそれぞれの提案に対し除染技術等に関して、これまでの内閣府平成 23 年度除染技術実証試験事業[3、4]、環境省平成 23 年度除染技術実証事業[5、6]及び環境省平成 24 年度除染技術実証事業[7、8]より得られた知見を活用し、実施に係る適切な助言と、実証事業の結果等の取りまとめを行い、今後の除染事業に役立てることを目的とする。

表 1-1. 環境省 平成 25 年度除染技術実証事業において選定された 11 件の除染技術

対象物	手 法	特 徴	実施代表者の所属機関	No.
土 壤	フッ化物塩	常温、常圧下でのフッ化物塩を用いた Cs 溶出	水 ing 株式会社	1
	真空加圧	セメントを用いた固型化と真空加圧による脱水減容	前田建設工業株式会社	2
底 質	分級	原位置での底質の分級	あおみ建設株式会社	3
有機物	破砕、吸引、回収	破砕、吸引システムによる緑地除染の省力化	福島小松フォークリフト株式会社	4
	乾燥、破砕	植物と土壌の混合物の乾燥、破砕後の分級	株式会社大林組	5
モニタリング	無人ヘリによる モニタリング	無人ヘリによる超低高度計測による空間線量率マップの作成とハイパースペクトル技術による植生・土地被覆現況図の作成	国立大学法人千葉大学	6
	容器単位の モニタリング	容器単位での放射能濃度の簡易測定	株式会社東芝	7
焼却灰	洗浄	焼却灰中 Cs の高効率洗浄	株式会社フジタ	8
	洗浄、磁気分離	吸着剤を担持した磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からの Cs 回収	大成建設株式会社	9
廃棄物	有機酸	車両のアルミ製熱交換品の有機酸（主成分）による除染	株式会社 E&E テクノサービス	10
	ブラスト	重曹ブラストによるリサイクル廃家電製品の除染	中外テクノス株式会社	11

2. 概要

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）は、「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」及びその基本方針に基づき、今後の除染や汚染廃棄物の処理に活用しうる技術、またこれらを効果的に実施していくための技術について、その効果、経済性、安全性等を評価することを目的として、次の業務を行った。

（1）実証事業実施者の提案評価・選定の補助

環境省が公募を行った実証事業に対し応募された提案内容について、中立的・公平かつ高い知見を有した立場から審査・選定の補助を行った。また、審査・選定については、環境省が指定した有識者により構成される委員会を開催し、その助言を得ながら進め、委員会で審査し、11件の技術提案を採択した。

（2）除染技術実証事業者の事業実施に係る技術的助言

選定された11件の除染技術実証事業について、その実施計画策定及び実施に当たり、これまでの専門的知見を有効に利用しながら、助言を行うとともに、必要に応じて現地調査及び事業実施へ同行、技術的な助言を実施した。なお、実施計画策定への助言に当たっては、現地条件（対象規模、インフラストラクチャーの状況、除去物保管の場所や方法）への適合性・汎用性があるか、次項（3）に示す評価項目を適切に検証できるものとなっているか等を考慮した。表2-1. に原子力機構が各企業に実施した技術指導実績を記す。技術指導は、個別ヒアリング、現場確認、中間報告等の際に実施し、主な技術指導の観点は、測定方法、評価方法、放射性物質を扱う上で確認すべき事項である。プレスがある場合には、現地に職員を派遣する等の対応を行った。

表 2-1. 技術指導実績

対象物	手法	特徴	実施代表者の所属機関	No.	個別ヒアリング	現場確認	中間報告	マスコミ・プレス対応等
土壌	フッ化物塩	常温、常圧下でのフッ化物塩を用いたCs溶出	水ing株式会社	1	7月11日	10月16日 11月7日	11月7日	—
	真空加圧	セメントを用いた固化と真空加圧による脱水減容	前田建設工業株式会社	2	7月12日	8月28日	11月11日	—
底質	分級	原位置での底質の分級	あおみ建設株式会社	3	7月11日	9月10日 10月3日 10月15日	11月12日	◆9月25～27日：RADIEX2013出展
有機物	破碎、吸引、回収	破碎、吸引システムによる緑地除染の省力化	福島小松フォークリフト株式会社	4	7月11日	9月18日	11月5日	◆7月15日：福島テレビ放映 ◆9月25～27日：RADIEX2013出展 ◆10月30日：テレビ朝日取材
	乾燥、破碎	植物と土壌の混合物の乾燥、破碎後の分級	株式会社大林組	5	7月11日	9月25日 11月21日	11月11日	◆9月25～27日：RADIEX2013出展 ◆11月21日：テレビ朝日取材
モニタリング	無人ヘリによるモニタリング	無人ヘリによる超低高度計測による空間線量率マップの作成とハイパースペクトル技術による植生・土地被覆現況図の作成	国立大学法人 千葉大学	6	7月11日	11月27日	10月29日	—
	容器単位のモニタリング	容器単位での放射能濃度の簡易測定	株式会社東芝	7	7月11日	9月11日 10月23日	10月23日	◆9月25～27日：RADIEX2013出展
焼却灰	洗浄	焼却灰中Csの高効率洗浄	株式会社フジタ	8	7月12日	9月3日	10月30日	—
	洗浄、磁気分離	吸着剤を担持した磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からのCs回収	大成建設株式会社	9	7月12日	10月10日	11月14日	—
廃棄物	有機酸	車両のアルミ製熱交換品の有機酸(主成分)による除染	株式会社 E&Eテクノサービス	10	7月12日	9月19日	11月8日	—
	プラスト	重曹プラストによるリサイクル廃家電製品の除染	中外テクノス株式会社	11	7月12日	9月20日	10月30日	—

(3) 除染技術実証結果の評価

除染技術実証事業の実施者が取りまとめた結果をもとに、下記の項目について評価を行った。

- ・効果（除染効果、減容率 等）
- ・コスト（単位面積当たりのコスト、単位量当たりのコスト 等）
- ・作業人工、作業速度 等
- ・安全性評価（作業に伴う被ばく量評価 等）
- ・その他必要と認められる項目

評価に当たっては、環境省が指定する有識者から構成される委員会を2回開催し、助言を得ながら評価を行った。そのうち1回は、有識者への個別ヒアリングにより委員会に代えるものとした。

(4) 技術報告書の作成

11件の実証事業について(3)で評価を行った結果を取りまとめるとともに、内閣府等で実施された技術実証試験事業及び環境省平成23年、平成24年度除染技術実証事業の成果等を踏まえ、従来技術との比較等を行いつつ技術報告書の作成を行った。

また、(3)に掲げる項目のほか、実証事業の実用化に当たっての課題の抽出及びその他の考慮すべき事項等についても検討の上、報告書の作成を行った。

本報告書は、「3. 個別試験結果」、「4. 総合評価」、「5. まとめ」の本文と、各実証事業の概要（実施内容、結果等）を記載した付録1、試験結果と先の(3)の評価項目を各事業でまとめた付録2、一覧表に評価項目をまとめた付録3から構成される。

3. 個別試験結果

以下に各技術個別の試験結果を記す。なお、放射能濃度の記載において、本文等で注釈がない場合は Cs-134 と Cs-137 の合計の放射能濃度とした。

3.1 土壌

3.1.1 土壌細粒分等からの常温常圧下での Cs 溶離および溶離した Cs の吸着・濃縮による減容化技術（水 ing 株式会社）（付録 1-1 及び 2-1）

本技術はフッ化物塩を主とした溶液で高濃度に汚染された土壌細粒分等から放射性セシウムを溶離させ、吸着剤で溶離したセシウムイオンを濃縮回収するものである。湿式分級で得られた土壌細粒分のスラリーに、酸性フッ化物塩（酸性フッ化アンモニウム）、を添加・攪拌し、セシウムイオンを溶離させたのち、フェロシアン化ナトリウムを添加し、生成したフェロシアン化鉄によってセシウムイオンを吸着させる。溶液は吸着処理沈殿物（廃吸着剤：セシウムを吸着したフェロシアン化物）と廃液に固液分離し、廃液は中和処理後、沈殿物（廃スラッジ）を取り除き、回収薬液として土壌細粒分からのセシウムの溶離に再利用する。

実証試験では、293,000Bq/kg と放射能濃度の高い土壌細粒分が 69,000Bq/kg に低減され、10 万 Bq/kg を超える放射性廃棄物は廃吸着剤のみで約 99%減容化された（付録 2-1-2 参照）。また、処理後の土壌に不溶化剤（海水マグネシア系（MgO）金属不溶化剤で、フッ素汚染土壌に対しても適用可）を 3wt%添加した不溶化処理土のフッ素含有量は 2,900mg/kg であり、不溶化処理後のフッ素溶出量は 19mg/L～22mg/L（土壌汚染対策法 [9]に基づく溶出試験結果）となり、土壌汚染対策法基準値（第二溶出量基準値：24mg/L、含有基準値：4,000mg/kg）を満たすことができた。また 5,100Bq/kg の砂分に同様に本技術を適用したところ、処理後の砂分は 2,100Bq/kg となり、不溶化処理後のフッ素溶出量は 0.3mg/L～0.7mg/L で、同基準値（溶出量基準値：0.8mg/L、含有基準値：4,000mg/kg）

を満足した（付録 2-1-7 及び 2-1-8 参照）。放射能濃度が 253,000Bq/kg と高濃度に汚染した砂粒子に本技術を適用したところ、放射能濃度を約 50,000Bq/kg に低減でき、除去率は約 80%であった。

3.1.2 真空加圧脱水法による除染廃棄物に含まれる放射性物質の固定化・減容化同時処理技術の実証（前田建設工業株式会社）（付録 1-2 及び 2-2）

本技術は、「真空加圧脱水固化処理工法（以下、「SVP 工法」という。）」と言われ、高含水土（濁水処理で生じる汚泥等のスラリー）にセメントを添加し、土粒子を凝集させるとともに、加圧と真空による負圧を同時に作用させて脱水する工法である。本 SVP 工法は、福島第二原子力発電所にて沈澱池に貯留した泥土を脱水固化し、場内盛土として利用した工事等で実績がある。

SVP 工法で処理された脱水ケーキに対し、強度試験、各種溶出試験（有姿攪拌試験、水浸漬後溶出試験等）を行い土壌細粒分の溶出抑制効果を検証するとともに、セメント添加量と脱水時間の関係について確認を行った。なお、本試験で実施した有姿攪拌試験（JIS K 0058-1）では土粒子の脱水ケーキからの流出による放射性セシウムの溶出抑制効果を検証するため、試験溶液については、ろ過処理を行わず溶出液の放射能濃度の分析試料とした。

SVP 工法による脱水ケーキへ行った有姿攪拌試験では、材齢（1 週、2 週）やセメント添加量（3%、5%、10%）の条件によらず、5Bq/L 未満で、試験において目標値とした 10Bq/L を下回った。従来設備であるフィルタープレスによる脱水ケーキへの有姿攪拌試験では、1 週材齢は 2Bq/L、4 週材齢で 12Bq/L と、養生期間である材齢が長くなると、目標値の 10Bq/L を超えた。また 4 週材齢の溶出液の SS（溶液中の浮遊物質）濃度が高くなったことから、脱水ケーキから放射性セシウムの付着した土粒子の流出が確認された（付録 2-2-5 及び 2-2-6 参照）。

フィルタープレスによる脱水ケーキが雨水等に接触すると再泥化する経験から、24 時間、脱水ケーキを水へ浸漬したのちに溶出（水浸漬後溶出）試験を行った。フィルタープレスによる脱水ケーキは 300Bq/L を超えたが、SVP 工法の脱水ケーキでは放射性セシウムは検出されず、目標値 10Bq/L より低くなった（付録 2-2-7 及び 2-2-8 参照）。

強度試験ではセメント添加量を増やし、養生期間が経過するほど、改良強度が増加する結果となり、セメント添加量が少ない添加量 3%の試験においても 28 日間養生させた場合には、一軸圧縮強度が第 4 種改良土相当（70kN/m²）となった（付録 2-2-9 参照）。

減容化率については従来設備の脱水ケーキとほぼ同程度であったが、SVP 工法で処理された脱水ケーキは従来設備の脱水ケーキより含水比が低下し、密度が大きくなることを確認した（付録 2-2-10 参照）。

3.2 底質

3.2.1 水底土砂の原位置分級除染工法（あおみ建設株式会社）（付録 1-3 及び 2-3）

本技術は、ため池等の底質に水中分級ロッドを設置して、ロッド内の攪拌水流により底質を洗浄し、振動フルイを用いて分級を行い、放射性セシウムの濃度が低い粗粒分については原位置に存置（ため池の水底に残す）したまま、放射性セシウム濃度の比較的高い細粒分のみを分級除染することにより、陸上へ回収される底質土量を低減する技術である。

分級除染前後における底質の深度方向の放射性セシウム濃度をコアサンプル採取により確認したところ、底質の表層から 10cm の深さまでに放射性セシウムのほとんどが存在していることがわかった。そこで、底質の表層 10cm を本技術で施工したところ、水底面から 5cm までの深さ方向における放射性セシウム濃度は 4,920Bq/kg から 211Bq/kg に低減したことが確認された（付録 2-3-2 参照）。施工時の濁りについては、濁度計測を行うことにより確認し、その結果、施工前、施工中に変化は見られず、濁りを発生させずに

施工できることを確認した（付録 2-3-8 参照）。また底質深さ 10cm までを改良対象土として、水中ロッド内で分級洗浄と振動ふるいを行うことにより、粒径約 100 μ m 以下の細粒分は陸上に回収し、約 12%の粗粒分を原位置に存置した（付録 2-3-11 参照）。

3.3 有機物

3.3.1 緑地除染における省力化【緑地・土壌・破砕吸引システム】（福島小松フォークリフト株式会社）（付録 1-4 及び 2-4）

本技術は、芝生地や笹竹群生地等の緑地において深刈りによる除染を実施する際に、通常人力で行っている作業を、破砕吸引システムを用いることにより作業の効率化等を図ることを目的とするものである。

本試験では、試験エリアの刈払い後の表土を除染の対象とし、人力による施工との比較を行い、破砕吸引システムの効果を確認した。

試験では、事前に行った対象土壌の深さ方向の放射能濃度の測定結果により表層 2cm 程に放射性セシウムの大部分が含まれていることが確認されたことから、深刈りの目標値を 3cm と設定して実証試験のための除染作業を実施した（付録 2-4-4 参照）。

対象土壌の除染の効果を確認するために、施工前と施工後において空間線量率及び表面汚染密度を評価した結果、人力施工と破砕吸引システムを用いた施工においては、ほぼ同じような除染効果が得られ、破砕吸引システムを用いた施工でも十分な除染効果が得られることを確認できた（付録 2-4-5 参照）。また、作業効率については、破砕吸引システムを使用することで人力施工よりも少ない人数で同じ面積を作業できることが確認され、芝生地では約 30%短縮、笹群生地では約 60%の作業時間が短縮できると評価された（付録 2-4-10 参照）。

除去物量については、人力施工において芝生地で 528.0kg、笹竹群生地で 742.0kg 発生したが、破砕吸引システムの場合は芝生地で 484.5kg、笹竹群生地で 310.0kg となり、

それぞれ人力施工と比べ 10%～60%程度、除去物量が少なく、効率的な除染により除去物量を低減できることが確認された（付録 2-4-9 参照）。

3.3.2 植物及び土砂混合物の乾燥分級方法の実証（株式会社大林組）（付録 1-5 及び 2-5）

本技術は、除染により回収された落ち葉、雑草、剪定枝等の含水比が高く、長期間放置して腐植した植物（有機物）とそこに混入した土砂（植物土砂混合物）を、外部熱源を必要としない粉碎乾燥機とフルイ（2mm）、風力分級機を用いて省エネルギーで粉碎・乾燥し、分離することにより焼却処理対象物を減量化することを目的とするものである。

小型機、実証機（大型機）による試験では植物（牧草）と土砂（真砂（砂質）土・ローム（粘性）土）を 1:1～1:4 の割合で混合し、水道水を含水比 60%～150%になるように添加後、3～4 週間養生（腐敗）させた試験体を使用し、粉碎・乾燥処理の乾燥効果と省エネ性、分級による焼却対象物の減量効果を評価した。試験の結果、乾燥効果については、含水比が 120%～160%程度の植物土砂混合物を粉碎乾燥機により、植物から土砂を分離し、含水比を 20%～40%程度にまで低下できることを確認した（付録 2-5-2 参照）。省エネ性の評価については、粉碎と乾燥を同時に処理することのできる本技術と従来技術（ハンマークラッシャーによる粉碎と、攪拌しながら乾燥する回転（熱風）方式の組合せ）を比較し、牧草・真砂土混合物で 21%～44%、牧草・ローム土混合物で 10%～43%、平均で約 30%の粉碎・乾燥に関わるエネルギーの低減効果を確認した（付録 2-5-2 参照）。焼却対象物の減量効果については、焼却対象物から分離した焼却しないものの重量（脱水分を含む）の割合（＝投入した試料の総重量－分離できた焼却対象物の乾燥重量）／投入した試料の総重量）で評価した。牧草:土砂の配合割合が 1:2 と 1:3 の場合の結果として、2mm フルイと小型分級機において 53%～89%、2mm のフルイと実証分級機では 51%～74%となった。

乾燥・分級効果の評価とともに、焼却対象物の放射能濃度低減効果の把握のため、放射能汚染されていない雑草と、放射能汚染された細砂主体の土砂を混合した試験体を用いた試験も実施した。植物に混入する土砂細粒分の量をフルイと風力分級で減らすことにより、投入した混合物に対し焼却対象物の放射能濃度を 50%程度低減できることを確認した（付録 2-5-10 参照）。

3.4 モニタリング

3.4.1 無人ヘリによる超低高度計測による空間線量率マップの作成とハイパースペクトル技術による植生・土地被覆現況図の作成（国立大学法人千葉大学）（付録 1-4 及び 2-4）

本技術は、低高度自律航行可能な無人ヘリコプターにより簡便、安全に、森林斜面上を含めた 1m 高度の空間線量率分布を地図化し、ハイパースペクトル(超高精度分光計測)による土地被覆・植生現況図と重ね合わせて除染及び放射能管理計画の策定に寄与することを目的としている。空間線量率分布に加え、ハイパースペクトルにより、常緑針葉樹、落葉広葉樹、牧草地等植生や、家及び建物の屋根の素材等の情報が得られることで、より詳細な除染計画、除染後の経過把握ができること等が期待される。

小型無人ヘリコプター（エンジンヘリコプターYAMAHA/RMAX）による計測システムでは、空間線量率計測システムを 3m の距離でワイヤーに固定し、小型無人ヘリコプターに搭載した遠隔操作可能なウィンチによって計測対象との距離を調節し、同時に 2 つの高度でのデータ取得が可能であることが確認された（付録 2-6-4 及び 2-6-5 参照）。

高度別空間線量測定では、周辺の地形等の影響を受けるため、地上からの距離の 2 乗に反比例する関係は認められず、地上から 5m 高さのあたりからわずかに空間線量率が上がる現象が観察された（付録 2-6-6 参照）。

電動マルチコプターによるモニタリングシステムでは、人が容易に近づけない場所（建

物の屋根や仮置き場等の上空等) に対して、空間線量率測定を行うことができた。1m 高さの歩行サーベイの結果と電動マルチコプターを 1m 高度で飛行させて測定した空間線量率の結果は、同一の地点を計測できているわけではないが、良好に一致した(付録 2-6-7 から 2-6-9 参照)。

ハイパースペクトル画像による植生・土地被覆現況図の作成では、地形、建物、植生等の土地被覆現況の詳細な情報とともに空間線量率を記録していくことで、時系変化を把握し、除染の優先順位を考える際の有効な解析手法の一つになる可能性が示された。

3.4.2 容器単位での放射能濃度の簡易測定技術の検証(株式会社東芝)(付録 1-7 及び 2-7)

本技術は、NaI シンチレーション検出器等を収納した簡易測定装置を用い、容器単位(本実証試験ではフレキシブルコンテナ 1 個単位)で焼却灰や土壌等の汚染物の除去物を対象に、放射能濃度を現場で測定するものである。

本装置の測定値から放射能濃度(Cs-134 と Cs-137)へ換算する放射能換算係数は、測定体系を 3 次元で模擬し、モンテカルロシミュレーション計算で求めた。

均一容積線源に対してモンテカルロシミュレーション計算で求めた放射能換算係数の妥当性は、フレキシブルコンテナ容器内の各位置に標準点線源を空間配置し、その各位置における検出器の測定値に、各点線源で割り当てた容積で重み付けをして、フレキシブルコンテナ全体で平均化することで均一模擬容積線源とみなしたものと比較して確認した。その結果、誤差は-13%であり、±20%以内で一致した(付録 2-7-5 参照)。

現地試験では、充填されている除去物等の放射能濃度が不均一なフレキシブルコンテナの両端にそれぞれ 1 台ずつ検出器を設置し、測定対象物の向きを 30°ピッチで回転させ計 6 点で測定を行った。同時にサーベイメータ型線量率計にて計 36 点の表面線量率と、容器形状把握のため、凹凸寸法と直径を測定した。重量測定は装置備え付けの重量計で行った。

現地試験における測定結果と照らし合わせて分析し、本技術としての総合誤差、そして「事故由来廃棄物等処分業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」における放射濃度の簡易測定手順[10]との比較を行った。

総合誤差は、実証試験で測定したフレキシブルコンテナ容器 41 検体のデータ（放射能濃度レベル：数千 Bq/kg～一万数千 Bq/kg、バックグラウンドレベル：～0.3 μ Sv/h 程度）において、2 台の検出器による不均一性の推定補正を行うことで、1 回測定（回転無）では、 $\pm 20\%$ ～ $\pm 35\%$ 、2 回測定（90°回転有）では $\pm 20\%$ ～ $\pm 25\%$ の誤差範囲で放射能濃度を測定できることを確認した（付録 2-7-9 及び 2-7-10 参照）。

ガイドラインにある放射能濃度の簡易計算法は事故由来廃棄物等を収納した容器が 1 万 Bq/kg、50 万 Bq/kg、200 万 Bq/kg を下回っているかどうかの判別法である。事故由来廃棄物等を収納した容器の放射線量率を測定し、最も大きい値（単位 μ Sv/h）に、予めガイドラインに記載されている測定日と容器の種類（フレキシブルコンテナか 200L ドラム缶等）に応じた係数を乗じ、事故由来廃棄物等を収納した容器の重さで除して求める。このガイドラインにおける線量計での表面線量率からの放射能濃度簡易計算法と本技術で求めた放射能濃度は、概ねの相関を示した。また得られた近似直線の傾きから、ガイドライン簡易計算法の放射能濃度は、本技術の測定結果よりも、焼却灰で約 1.8 倍、土壌では約 4.4 倍高い値であった。これはガイドラインの簡易計算法では、過小評価とならないようにするため、測定した放射線量率の最大値を用いて計算していることが一因と考えられる。

3.5 焼却灰

3.5.1 焼却灰中放射性セシウムの高効率洗い出し技術の実証（株式会社フジタ）（付録 1-8 及び 2-8）

本技術は、間欠散水と通気を利用し、焼却飛灰中の放射性セシウムを少ない水量で高効率に洗い出すことにより、発生する廃水量の大幅削減を目的とするものである。

小規模のカラム試験では、実証試験の試験条件を決定するためにキレート処理された飛灰に対し、一日当りの散水する量及び期間、飛灰粒径の大きさ、通気の種類とその有無を変化させた 13 条件で試験を行った（付録 2-8-5 参照）。散水強度 320mm/日以上では放射性セシウムの洗い出し量が減少する傾向が確認された。このことから、散水強度を上げることにより水みちが形成され、洗い出し量の減少が考えられるため、適切な散水強度の設定が必要である。通気の有無、通気ガスの種類（窒素と二酸化炭素）による洗浄効果の違いは確認されなかった（付録 2-8-6 参照）。飛灰の粒径の違い（9.5mm、19mm、53mm）による放射性セシウムの洗い出しでは、粒径が大きいものが多いカラムほど放射性セシウムの洗い出し量が減少する傾向が認められた（付録 2-8-6 参照）。

実証試験ではカラム試験の結果を受けて、キレート処理された飛灰を破碎し 53mm 以下にフルイ分けして、水切り機能のあるフレキシブルコンテナに充填し、一日当りの散水する量・通気をパラメータとした 4 条件を設定し試験を行った。初めに、試験試料の飛灰が飽和状態になるまで含水させ、その後洗浄のために液固比 0.5 を目標とした水量の洗浄水を散水し、設定した散水量に達した時点で洗浄を終了として分析評価を行った。実証試験の結果、洗浄前に平均約 1,250Bq/kg であった放射能濃度が、試験後には平均で約 510Bq/kg となり、約 60%低減されていることが確認された（付録 2-8-2）。また、飛灰 350kg 処理に伴い発生した廃液は 226L～230L、700kg の飛灰を処理した際に発生した廃液は 386L であった。これらの結果は、従来の洗浄方法（環告 13 号法：液固比 10、6 時間振とう）と比べ、約 1/10 相当である液固比 0.55 でありながら、ほぼ同等の洗い出

し効果が得られていることを示しており、洗浄廃水量の大幅な削減が可能であることを確認できた。

3.5.2 磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からの放射性セシウム回収技術（大成建設株式会社）（付録 1-9 及び 2-9）

本技術は、攪拌・解砕槽で焼却飛灰に加水したスラリーへ吸着剤を担持した磁性ナノ粒子（以下、「ナノ磁性除染剤」という。）を添加・混合した後、ローラー形状の磁力選別機（マグネットセパレータ）を通過させて放射性セシウムを吸着したナノ磁性除染剤を回収するものである。磁力選別にネオジム磁石を使用した小型汎用機を使用し、除染済みスラリー（洗浄飛灰）は凝集沈殿槽（ポリ硫酸第二鉄と高分子凝集剤を添加）及び小型真空脱水装置で処理する一連のコンパクトな放射性セシウム回収システムの有効性を検証した（付録 2-9-6 参照）。試験は 2 種類の飛灰（平均放射能濃度①41,000 Bq/kg、②28,000 Bq/kg）を使用し、固液比（1:5、1:10）、回収除染剤の添加率（飛灰の投入重量に対し 0.2%、0.5%、1%）、攪拌時間（30 分、60 分）、磁力選別機への流量（5L/分、10L/分、20L/分）、回収除染剤の繰り返し使用（1 回、3 回）といった各条件を組み合わせ、全 10 ケース（除染剤の繰り返し使用の試験を含めると 14 ケース）で実施した。結果、除染率は 67.4%～92.0%、処理後飛灰の放射能濃度は 2,700 Bq/kg～13,000 Bq/kg の範囲であり、平均 82%の除染率であったことを確認した（付録 2-9-2 参照）。ただし、磁力選別に十分接触できなかった流量 5L/分のケース 1（除染率 36.9%）は除いた。また、小型真空脱水機で回収した洗浄後飛灰の再溶出試験（環告 13 号準拠）で検出された放射能濃度は 13Bq/kg 未満～206Bq/kg で、水溶出率（ろ液中の放射能濃度の 10 倍に対する初期放射能濃度の割合%）は平均 24%（6%未満～41%）であった。小型真空脱水機より得られたろ液中及び凝集反応槽での上澄み液中の放射能濃度においては、1 回洗浄で 0.5%ナノ磁性除染剤を添加した場合までは公共の水域の濃度限度（Cs-134/60+Cs-137/90

≦1) [11]を満足することを確認した（付録 2-9-8 参照）。

洗浄水のその他の水質分析で、ナノ磁性除染剤由来の全シアンについて、一部の試験ケースで排水基準（1mg/L 以下）を超過したが、ナノ磁性除染剤 0.2%～0.5%の添加量で pH10 未満にコントロールすれば低濃度に抑制できることを確認した。飛灰由来の鉛及びカドミウムについては一部の試験ケースで排水基準（いずれも 0.1mg/L 以下）を超過した。ろ過処理（ろ紙 5C 通過）を施したところ、鉛は全て排水基準に合致したが、カドミウムについては一部ケースで 0.1mg/L を依然として上回る結果であった（付録 2-9-9 参照）。

3.6 廃棄物

3.6.1 車両及びアルミ製熱交換品の除染実証試験（株式会社 E&E テクノサービス）（付録 1-10 及び 2-10）

本技術は、有機酸であるスルホン酸を主体とする除染溶剤（他にキレート剤と界面活性剤を添加）を用い、原子力災害の影響を受けた地域で稼働した各種車両及び重機や、空調設備の特に熱交換器類のような汚染レベルが高く、除染が困難な物を除染する技術である。

実証試験に先立ち、車両等の汚染状況を確認した後、汚染部位を試験片ピースとして切り出し、ビーカースケールによる各種除染液（市販アルカリ洗浄剤、市販中性洗浄剤、シュウ酸溶液、除染溶剤）との比較試験を実施した。試験の結果、シュウ酸溶液と除染溶剤の除染率はともに 90%程度で、除染効果は同程度の結果であった。シュウ酸溶液は、毒物及び劇物取締法の適用や、シュウ酸カルシウム等の反応生成物の有毒性等、取扱上の観点から使用せず、スルホン酸を主体とした除染溶剤を選択した（付録 2-10-5 参照）。

実証試験は、試験片表面を 10cm メッシュに区切り、GM 計数管及び NaI 式サーベイメータにより表面汚染を測定後、5 倍希釈した除染溶剤に浸漬して洗浄を実施した。また、

時間経過による除染効果の進捗を確認するため 10 分毎にサンプルを引き上げ、表面汚染測定を実施した。除染終了後のサンプルは蒸留水による洗浄、乾燥を行った後測定を実施し、除染前後の測定値から除染効果を検証した。車両のラジエータ、コンデンサ及び、家電コンデンサは除染前の汚染レベルに関わらずバックグラウンドレベルまで除染された。車両のラジエータとコンデンサについては、大手中古車販売会社の自主基準 $0.3\mu\text{Sv/h}$ 以下に除染できた。また、実車両の除染では、除染前、最大値の線量当量率で $\geq 30\mu\text{Sv/h}$ あったエンジンルームが、ふき取り等の除染後には、エンジンルームの線量当量率の平均値で $2.65\mu\text{Sv/h}$ となった（付録 2-10-10 及び 2-10-11 参照）。なお、除染により発生した廃液 ($10,872\text{Bq/kg}$) は、ゼオライトを用いた吸着処理により 72.5Bq/kg まで廃液中の放射性セシウムを除去することができ、約 200L の溶剤を約 22 kg、重量比 89.7%、体積比 84.6%まで減容できることが確認された（付録 2-10-9 参照）。

3.6.2 重曹ブラスト(スーパーブラストシステム)によるリサイクル廃家電製品の除染(中外テクノス株式会社) (付録 1-11 及び 2-11)

本技術は、リサイクル対象廃家電製品を対象とした、粒子表面に細かな凹凸加工がされた重曹を研削材とするブラスト除染技術である。重曹は除染対象物の金属よりも硬度が低く、除染対象物を削らずに汚れだけを取り除くことができる。また、ブラスト時に水をカーテン状に噴射させるウェットブラスト工法により、除染物の飛散防止、重曹の溶解による廃棄物の低減を図るものである。

実証試験に先立ち、ウェット重曹ブラスト工法を評価するための基礎試験を行った。サンドブラスト、アルミナブラストとの比較を同時間、同研削材量のもと行ったところ、重曹は最も硬度が小さく、対象材質を傷めないことから処理後の廃棄物を低減させることができ、アルミニウムやプラスチック等の素材の除染に適していることが確認された。

実証試験では、リサイクル対象廃家電のエアコン室外機を解体して、各部材（ラジエ

ータ、その他エアコン室外機部材)を対象に実物大の状態での除染試験を行った。除染前の表面線量率(バックグラウンドを除いた値)が $0.35\mu\text{Sv/h}$ ~ $1.10\mu\text{Sv/h}$ のエアコン室外機について、ウェット重曹ブラスト処理によりラジエータの表面線量率(バックグラウンドを除いた値)を $0.04\mu\text{Sv/h}$ 程度まで除染することができ、家電リサイクル事業所の自主基準値(ラジエータについて表面線量率が $0.2\mu\text{Sv/h}$ ~ $0.4\mu\text{Sv/h}$)を十分下回ることが確認された。最も除染効果が高かったラジエータの場合、表面汚染で最大98.1%を低減できたが、防音材のような繊維の中に放射性セシウムが入り込んでいる部材に対しては除染効果が低い結果であった(付録2-11-2参照)。なお、ウェット重曹ブラスト処理で発生する廃水は、ゼオライト内貼りの透水性バックによるろ過処理により、今回の実証試験の廃水で最大の放射能濃度であった $1,570\text{Bq/L}$ を 54Bq/L に低減した(付録2-11-8参照)。

4. 総合評価

前項で 11 件の実証試験で各試験結果等を述べたが、本項では各技術の評価を記載する。

4.1 土壌

放射性セシウムに汚染された土壌細粒分や砂から、常温常圧下にてフッ化物塩を主とした薬液で処理して、放射性セシウムを溶離させる技術（3.1.1）においては、放射性セシウムを溶離させる薬液である酸性フッ化アンモニウムは毒物ではないが、劇物であるものの、本技術における使用濃度は 4%未満であるため、使用時は劇物の指定から外れる。固体の状態では、金属及びガラスを腐食する恐れがあるため、ポリエチレン樹脂やフッ素樹脂の内張りのある容器に保管する必要がある。実装置化においては、当然ながら耐腐食性を考慮する必要があるが、既存技術で対応可能と考えられる。使用時の液性が酸性であることから、フッ化水素ガスが発生する可能性があったため、フッ化水素ガス濃度測定を実施したところ、 $<0.05\text{ppm}$ であった。実装置化に当たっては、通常の局所排気設備及びアルカリスクラバ処理設備を設けることで安全を確保できると考えられる。薬液については回収して繰り返し使用できることが確認され、薬液中のフッ化物塩の 65%を回収し再利用可能であり、薬品のコストを低減できることを確認したが、フッ素化合物を含む廃棄物を減らすために、フッ化物塩の回収率をさらに向上させることが期待される。溶出させた放射性セシウムを回収した廃吸着剤が処理土壌量に対し、重量で 1%発生（付録 2-1-9 参照）しているため、放射性セシウムを効率的に回収して、廃吸着剤の発生量を低減させることが今後、望まれる。本技術は高濃度の放射性セシウムを含む土壌細粒分を扱うことから、放射線防護対策を適切に行う必要がある。

濁水処理で生じる高含水の汚泥等に対して、SVP 工法（3.1.2）で処理した脱水ケーキへ、有姿攪拌試験、長期溶出試験、乾湿繰返後溶出試験、中性子促進後溶出試験、水浸漬後溶出試験を実施したところ、溶出液の放射性セシウム濃度は目標とした 10Bq/L 未満

であった（付録 2-2-5 から 2-2-8 参照）。従来のフィルタープレスと比較して、SVP 工法による脱水ケーキは、放射性セシウムが付着した細粒分の脱水ケーキからの流出抑制効果がさらに高く、保管の際に、降雨による水の浸入対策として、防水シートや防水性を有する容器への脱水ケーキの封入、屋根付きの施設等は必要ないと考えられる。SVP 工法では、セメント添加量を増やすほど、脱水効率が向上した。セメント添加量 3%の場合で、脱水の処理速度は、従来のフィルタープレスの 1.7 倍速くなることが確認され、従来法より作業時間が短縮可能となり、作業員の被ばく量の低下に寄与できることがわかった（付録 2-2-9 及び 2-2-10 参照）。減容化については、セメントを添加する SVP 工法ではあったものの、従来のフィルタープレスと同程度であった。処分場へ搬入する脱水ケーキの状態は、まだ決定されていないが、SVP 工法による脱水ケーキの固化体は放射性セシウムを付着した細粒分の溶出を抑制できることや、本実証試験の範囲内のセメント添加量であれば固化後も固化体を割ることが可能で、次の処理を行える硬さであることから、現時点では保管する際の固化方法に対する提案のひとつとして有効であると思われる。

以上の技術の実用化においては、取扱対象が土壌の細粒分であり、放射能濃度が 10,000Bq/kg を超える可能性があるため、電離放射線障害防止規則の適用の検討が必要である。

4.2 底質

水中分級ロッドによる放射性セシウムで汚染された水底土砂の除染（3.2.1）では、同一地点でのコア採取による水底面から 5cm までの深さにおける底質の放射能濃度が、除染前の 4,920Bq/kg から、除染後には 211Bq/kg に低減できることが確認された。今回実証試験を行った、ため池は底質が比較的硬かったため、人力では深さ 20cm 以降のコアを採取することができなかったが、基本的にはほとんど汚染していないレベルまでの深さ

方向の水底土の分析結果を示す必要がある。シンチレーションファイバーによる底質の放射線量の確認を行ったところ、流入付近での線量が高く、流入箇所にもっとも近い取水箇所へ向けて比較的高線量のエリアが存在した。地上に回収された底質は、濁水の状態で回収されることから、凝集沈殿処理を行った。その際の上澄み水の放射能濃度は検出限界以下であり、適切に水処理が行われたことを確認した（付録 2-3-7 参照）。施工時の濁りについては、濁度計測を行うことにより確認し、濁りを発生させずに施工できることが確認された（付録 2-3-8 参照）。試験で使用した水中ロッドは、底質をロッド内で分級、洗浄し、粗粒分を水底に残す技術であることから、試験を行ったため池における地上に回収した土量に対する洗浄後水底に残した土量の割合（減量率）を評価した結果、約 12%であった（付録 2-3-11 参照）。ため池によっては砂画分の多い底質の場合もあり、そのような底質を除染対象とすれば、減量率は高くなると思われる。

4.3 有機物

緑地除染における省力化を目的とした緑地・土壌向け破砕吸引システム（3.3.1）により、今回除染対象とした芝生地、笹竹群生地、雑草地（それぞれの対象面積は 16m²）に対し、手作業と同等程度に除染できることが確認された。本破砕吸引システムは、吸引先端部、ホース（25m～50m まで対応可）、回収物を収納するフィルター付き集塵ボックス、吸引の動力となるエンジン式ブロワーから構成されている。このシステムによる除染を機器作業とし、手作業を 1 として作業効率を比較した場合、機器作業は芝生地で約 1.5 倍、笹竹地で約 2.5 倍のとなり、作業の効率化が図れた（付録 2-4-2 参照）。機器作業では、自生植物や堆積物、地下茎を粉砕しながら回収するため、減容の効果が確認された。また手作業は、地下茎や土質等の緑地状況から受ける影響が大きいため均一な掘削は難しいが、機器作業ではほぼ均一に掘削できるため、除去物量の管理がしやすくなることが確認された。また本装置は、ホースの長さが 25m から 50m まで対応可能であ

り、これまで手作業に頼るしかなかった住宅地の庭の奥や狭所、住宅等近隣の林縁から 20m の範囲の緑地除染に適用可能となり、作業時間の短縮と粉碎機能による地下茎等除去物の減容化ができると考えられる。人力施工と破碎吸引システム施工による除染の効果は同程度であり、破碎吸引システム施工は、人力施工より廃棄物量の減容化と作業時間が効率化できることを確認した。今後の検討として、作業者の負荷をさらに低減する工夫や、1日の作業可能面積に相当する広い領域を除染対象とした場合の集塵ボックス内からの除去物搬出効率の向上が求められる。

除染された植物には、回収時に多くの放射性セシウムに汚染された土砂が混入しており、湿潤状態のまま仮置きされ、腐敗している。土砂が混入したまま焼却すると土砂により焼却残渣が増加することから、焼却処理前に植物と土砂を分離する必要がある。このため、乾式分級により、除染された植物と除染の際に混入した土砂との混合物から植物と土砂に分離する技術（3.3.2）の実証試験を行った。植物と土砂の混合物を粉碎乾燥器に入れ、粉碎乾燥したものを 2mm のフルイにかけたところ、2mm 以上として回収されたもののうち、重量で 65%～83%が植物であった。2mm のフルイで回収されるものの大半が植物であることがわかった（付録 2-5-5 参照）。2mm のフルイの後、2 台の風力分級機（サイクロンセパレーター）で植物と土砂の分離を試験し、3 種類の回収物を得たが、それぞれの回収物の植物と土砂の割合が変化し、ある程度の分離が確認できた場合と、その割合がほぼ一定で植物と土砂の分離ができなかった場合があった。植物と土砂の分離が、ばらついたのは、分離対象物の乾燥具合等の性状によるものが原因と思われる。今回の試験において分離がある程度できた場合で、混合物の植物の約 77%と土砂の約 44%が焼却対象（付録 1-5-2 参照）となり、焼却への土砂の混入を半分近くにすることができたが、十分な植物と土砂分離ができているとはいえないため、分離効率の改善が必要である。

4.4 モニタリング

自律飛行可能な無人ヘリコプター（エンジンヘリコプターYAMAHA/RMAX、電動マルチコプター）を活用し、山地斜面や屋根等の多様な領域において低コストかつ簡便に空間線量率を計測し、同時にその場所の属性（土地利用、植生等）をマッピングするシステムを開発することを目的に実証試験（3.4.1）を行った。空間線量率計測システムの開発では、GPS 連動型空間線量率自動記録システムを、無人ヘリコプターに搭載可能な軽量かつ十分な機能（空間線量率・位置情報の計測、モニター写真の計測）を持つシステムとして再構築し、今回の実証試験で使用した。エンジンヘリコプターYAMAHA/RMAXによる空間線量率測定においては、空間線量率を計測するシンチレーターを直接ヘリコプター本体に装着するのではなく、対象に近づけて空間線量率を計測できるように、3mの距離をおいたシンチレーター2個をウィンチの付いたワイヤーケーブル（70m）で吊り下げる形態であった。森の樹冠や建物の屋根に検出器を近づけて測定することができたが、ウィンチの追従性の改良や、構造的に2個の検出器を吊り下げたワイヤーの絡み、及び吊り下げた検出器を測定対象物へ引っかけることがないようにする等の安全対策が必要と思われる。電動マルチコプターでは10分間程度でセットアップでき、屋根の上や、河道近傍等の人の接近が危険な領域でも計測が可能であった。ハイパースペクトル画像撮影、地理情報システムの活用についても検証を行った。以上のように、今回の実証試験では各要素技術の実施可能性を確認することはできたが、今後、地域の除染計画に資するためには、各技術を統合するための手順等を整備していく必要がある。

容器単位での放射能濃度の簡易測定技術の実証試験（3.4.2）では、実証試験で測定した各フレキシブルコンテナの結果について、不均一分布を推定することにより、±30%以内での測定ができることが確認された。この測定誤差を考慮することで、スクリーニング判定におけるスクリーニングレベルの評価ができる。実証試験では測定時間は5分間に設定していたが実用性を考えた場合には短縮化が望まれるため、放射能濃度が

26,850Bq/kg の土壌に対し、バックグラウンド 0.25 μ Sv/h のもと、5 秒、10 秒、30 秒、60 秒で測定を行い、Cooper の方法の式[12]を用いて各測定時間における放射能濃度の検出下限値を算出した。その結果、バックグラウンド約 0.3 μ Sv/h レベルにおいては、測定時間は 1 分程度にて、Cs-137 に対し検出下限値 1,000Bq/kg 以下の測定が達成できる見込みであることが示された。しかしながら、種々のバックグラウンドや放射能濃度の条件において、できるだけ多くの数の実物の焼却灰や除去土壌等が充填されたフレキシブルコンテナでの測定を行い、その上でのさらなる評価が望まれる。

4.5 焼却灰

機械攪拌等を行うことなく、間欠散水を利用して、焼却飛灰中の放射性セシウムの洗い出し技術 (3.5.1) では、約 1/10 相当である液固比 0.55 (廃水量に対する初期飛灰の重量の比) で、産業廃棄物に含まれる金属等の検定法 (環告 13 号法) とほぼ同等の放射性セシウムの洗い出し効果が得られた。本試験では、飛灰の粒径の違い (9.5mm、19mm、53mm) による放射性セシウムの洗い出しの評価を行っており、粒径が大きいものが多いほど放射性セシウムの洗い出し量が減少する傾向が認められた。このため、処理対象とした飛灰がキレート処理により、固化や塊状化している場合は、重機や粉砕機による飛灰の破碎を行う必要があることがわかった。散水の強度を上げることにより水みちが形成され、洗い出し量の減少の可能性があることから、適切な散水強度の設定を行わなければならないことを確認した。水切り機能を底面に持つフレキシブルコンテナ (以下、「水切りフレコン」という。) に飛灰をいれ、間欠散水により洗い出しを行った現地での実証試験では、洗い出し後に、断面、深度方向の飛灰の放射能濃度測定を行ったところ、顕著な分布は確認されず、水切りフレコン内の飛灰がほぼ一様に洗い出されていることが確認された。機械攪拌等による焼却飛灰の洗い出しでは、処理に使用した水を浄化し再利用する場合が多く、この水の再利用を繰り返すことで機械攪拌等においても液固比が小

さくなる。そのため、本技術においても水の再利用を検討すべきと思われる。今回実証した洗い出し技術により、易溶出性の放射性セシウムを含有する飛灰の放射能濃度低減と洗浄後飛灰の溶出の危険性を低減できると考えられる。また本技術は、廃水が少ないこと、可動部が少なくスケールアップしやすいことから、低エネルギーの技術であるといえる。

磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からの放射性セシウム回収技術（3.5.2）では、飛灰スラリーにナノ磁性除染剤を対飛灰重量割合で 0.2%～1%を直接添加し、ネオジム磁石利用のセパレータで回収後、除染済みスラリーは小型真空脱水装置で固液分離する一連の処理システムの検証がなされた。ナノ磁性除染剤により、飛灰から溶出した放射性セシウムイオンの吸着と、スラリーからの磁気分離を行えることが確認された。ナノ磁性除染剤を用いた本技術により、処理後飛灰の除染率は平均 82%であった。ナノ磁性除染剤を3回繰り返して使用したところ、除染率が 92%（1回目）から 76.2%（3回目）に低下した（付録 2-9-7 参照）。ナノ磁性除染剤の繰り返し使用はコスト低減には効果があるものの、除染率が低下していくため、使用時には注意が必要である。また、小型真空脱水機で回収した洗浄後飛灰（処理飛灰）に対し、溶出試験を行ったところ、ナノ磁性除染剤の繰り返し使用により、放射性セシウムの溶出が多くなることが確認された（付録 2-9-8 参照）。これはナノ磁性除染剤の繰り返し使用による除染率の低下のため、処理飛灰中に溶出性の放射性セシウムが多く残留したためと考えられる。処理後の洗浄水について、ナノ磁性除染剤由来の全シアン濃度を測定したところ、ナノ磁性除染剤を添加するときの pH が 10 未満であれば、全シアンの排水基準値 1mg/L 以下にできることが確認された（付録 2-9-9 参照）。今回の実証試験において、焼却飛灰を取り扱うことから、粉じん測定を行ったが、高濃度粉じん作業（10mg/m³）には該当しなかった。しかしながら、本技術の実用化においては、放射能濃度が高い焼却飛灰を取り扱うことになるため、粉じん対策の必要がある。また除染に使用したナノ磁性除染剤は放射線量率が高くなること

から、放射線防護対策を適切に行うことが求められる。実用化では、電離放射線障害防止規則の適用の検討が必要である。

4.6 廃棄物

車両及びアルミ製熱交換器の除染実証試験（3.6.1）では、車両用ラジエータ及びコンデンサ、空調用熱交換器を実サイズで、本試験で使用した除染溶剤（スルホン酸系有機酸にキレート剤、界面活性剤を添加したもの）に浸漬させたところ、バックグラウンドレベルまで除染できることが確認された。熱交換器への放射性セシウムの固着要因を解析するため、走査型電子顕微鏡で表面観察を行い固着物の位置を特定した後、その部位のエネルギー分散型 X 線分光法分析を行った（付録 2-10-5 及び 2-10-6 参照）。その結果、固着物の成分は、カルシウム化合物及びシリカ化合物と推定され、これらの化合物とともに放射性セシウムも固着したと思われる。本技術では、除染廃液の処理に、ゼオライトを充填したカートリッジを使い、100Bq/kg 以下まで放射能濃度を低減できたが、カートリッジの容量や通液速度が原因で時間がかかってしまった。酸性廃液を通液したゼオライトを充填したカートリッジについては、使用後に水洗浄を行うべきと考える。今後はこれらの課題の対策を行い、効率的に除染廃液処理ができるようになることを期待したい。また、浸漬洗浄では有機酸を含んだ除染溶剤を使用することから、保護具の着用等を作業員に徹底することが必要である。除染溶剤の酸とラジエータ等部材のアルミニウムが反応し、水素ガスが発生することから、室内の換気等の対策をとらなければならない。除染コストの低減として、洗浄時の洗浄対象となる表面積と液量比の最適化や洗浄液の利用終点の判定方法の確立も望まれる。

重曹ブラストによるリサイクル廃家電製品の除染（3.6.2）では、エアコン室外機のアルミ製ラジエータを 83.5%から 98.1%の除染率で除染できることが確認された。ファンやモーターについても、除染効果があった。しかしながら、防音材のような繊維の中に

放射性セシウムが入り込んでいる部材には対しては、噴射されたブラスト材が汚染箇所
に到達できず、研掃されないため、除染効果が低く、本技術は除染に適さないことを確
認した。ラジエータに対する除染において、ウェット重曹ブラスト、サンドブラスト、
アルミナブラストの比較を行ったところ、ブラスト材がサンド（珪砂）やアルミナより、
重曹はやわらかいため、ラジエータのアルミフィンに傷めないことがわかった。さらに
サンドやアルミナのブラスト材ではアルミフィンを潰してしまい、アルミフィンの隙間
を噴射されたブラスト材が通過できなくなり、重曹よりも効率的にアルミフィンの表面
の研掃が行われないことが確認された。これらのことからラジエータのアルミフィンの
除染のブラスト材としては、重曹が適していることがわかった。実証試験では、ドライ
とウェットの工法の違いによる重曹ブラストの除染効果に差がないことを基礎試験で確
認できていたが、ウェット工法の方がドライ工法より作業中の粉じん発生量が少なく作
業性がよいことからウェット重曹ブラスト工法を選定した。なお、ドライ重曹ブラスト
工法は高濃度粉じん作業に該当することから、必要な対策をとらなくてはならない。部
材ごとの適したウェット重曹ブラスト施工方法の検討結果として、重量 2.74kg～3.89kg
のラジエータに対し必要な研削材量が 1.9kg となった（付録 2-11-10 参照）が、廃棄物発
生量を低減させるため、研削材量の削減が今後の課題である。

5. まとめ

これまでの内閣府平成23年度除染技術実証試験事業と環境省平成23及び24年度除染技術実証事業の成果に追加された新たな知見等を次にまとめる。

5.1 土壌

3.1.1 のフッ化物塩による土壌細粒分等からの常温常圧下での放射性セシウムの溶離及び溶離した放射性セシウムの吸着、濃縮による減容化技術では、放射能濃度が高濃度の土壌細粒分等からの放射能濃度を低減できることが確認できた。これまでの実証事業では、土壌の湿式分級により、放射能濃度の高い細粒分をフルイ分ける技術等の実証が行われたが、3.1.1 のように、放射能濃度が高い細粒分からの放射性セシウムの溶離については、今回の実証試験により成果が得られた。また土壌の湿式分級では、靱摺り洗いを併用し、繰り返し洗浄しても放射能濃度を低減できなかった砂粒子について、3.1.1 の技術により放射能濃度を低減できることがわかった。これは 3.1.1 が溶液処理であるため、砂粒子の割れ目や凹んだ部分に付着した放射性セシウムに薬液が到達し、放射性セシウムを溶出できたと考えられる。

3.1.2 の真空加圧脱水法は、濁水処理や土壌の湿式分級で生じる細粒分の脱水方法として、従来のフィルタープレス工法（脱水時間 3 時間）と比較して、3%～10%のセメント添加量で、処理速度が 1.7 倍から 4.8 倍速くなり、含水比も約 25%程度低くなった。減容化率はフィルタープレス工法と同等であった。SVP 工法での脱水ケーキは、放射性セシウムが付着した細粒分の流出抑制効果がさらに高いため、保管時に雨水等の水の浸入防止策が必要ないと考えられる。

5.2 底質

3.2.1 の水中分級ロッドによる水底土砂の原位置分級除染工法は、これまでの実証事業

で行ったパドルミキサーとスクリーフイーダをもつ回収機による工法やポンプ式工法、密閉二重構造グラブ浚渫工法と除染の効果は同程度であった。

5.3 有機物

3.3.1 の緑地・土壌向け破碎吸引システムでは、芝生地や笹竹群生地等の緑地に対し、手作業と比較して、除染対象となる緑地を均一な掘削で短時間に除染作業（深刈り）ができ、自生植物やその地下茎等を粉碎しながら回収するので除去物の容量を減らすことが可能である。除染の効果は、本技術と手作業は同程度であった。

除染作業での除去物である植物と土砂の混合物に対する 3.3.2 の乾燥分級法では、植物と土砂の分離性能を高めることが課題である。植物と土砂の混合物の分離は、焼却減容での焼却灰の低減等の効果があることから、他の方法との比較を含め、引き続き検討が必要である。

5.4 モニタリング

モニタリングについては、平成25年度の環境省除染技術実証事業から公募の内容に加わった項目であった。

3.4.1 の無人ヘリコプターによる空間線量率マップの作成とハイパースペクトル技術による植生、土地被覆現況図の作成において、今回の実証事業では、各要素技術の実施可能性の確認にとどまった。空間線量率と植生被覆現況図を重ね合せて、除染や放射能管理計画を策定し、現地の除染作業に資するためには、今後、各要素技術の統合のための手順等の整備をしなければならない。作成する空間線量率マップの使用目的により、航空機モニタリングと、電動マルチコプターによるモニタリングを使い分けていくことがよいと思われる。

3.4.2 の容器単位で放射能濃度の簡易測定を行う技術の検証では、今回の実証試験で測

定した焼却灰や除去土壌を充填したフレキシブルコンテナに対して、放射能濃度測定における精度や検出下限値が求められた。

5.5 焼却灰

3.5.1 の焼却灰中放射性セシウムの洗い出し技術により、約 1/10 相当の液固比で、洗浄廃水量を削減し、易溶出性の放射性セシウムを含有する飛灰の放射能濃度を低減できた。本技術は処理時間がかかるものの、可動部が少なくスケールアップしやすく、低エネルギーの技術である。

3.5.2 の磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からの放射性セシウム回収技術では、一連の処理システムが検証された。磁性ナノ粒子の繰り返し使用により、処理飛灰からの放射性セシウムの溶出量が増加する。飛灰からの放射性セシウム回収については、これまでに実証された技術と同程度であった。

5.6 廃棄物

3.6.1、3.6.2 の有機酸による除染や重曹ブラスト除染により車両用ラジエータや車両用コンデンサ、空調用コンデンサ（熱交換器）をバックグラウンドレベルまで除染できた。しかしながら、有機酸除染については、放射性セシウム除去後の高濃度有機物廃液処理、重曹ブラストについては放射性セシウムを含む重曹廃棄物処理方法の確立が必要である。

参考文献

- [1] “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”,
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H23/H23HO110.html>
- [2] 環境省, “「平成 25 年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の募集及び「平成 24 年度除染技術実証事業」の採択技術の概要について（お知らせ）”,
<https://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16312>
- [3] （独）日本原子力研究開発機構, “平成 23 年度「除染技術実証試験事業」公募結果について（お知らせ）”, <http://www.jaea.go.jp/02/press2011/p11110901/>
- [4] （独）日本原子力研究開発機構, “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 報告書 分冊 III 除染技術実証試験事業編”,
http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report.html
- [5] 環境省, “「平成 23 年度除染技術実証事業」に係る 実証試験対象技術の選定結果について（お知らせ）”, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15000>
- [6] （独）日本原子力研究開発機構, “平成 23 年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書”, <http://fukushima.jaea.go.jp/information/20121026.html>
- [7] 環境省, “「平成 24 年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成 23 年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について（お知らせ）”,
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15864>
- [8] （独）日本原子力研究開発機構, “平成 24 年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書”, http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/entry07_24.html
- [9] 土壌汚染対策法について（法律、政令、省令、告示、通知）
<http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html>

[10] 厚生労働省, “事故由来廃棄物等処分業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン (平成 25 年 4 月 12 日付け基発 0412 第 2 号)”

<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudoukijunkyokuanzeniseibu/0000030856.pdf>

[11] 環境省, “放射能濃度等測定方法ガイドライン (平成 25 年 3 月第 2 版)”

http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/haikibutsu-gl05_ver2.pdf

[12] 放射能測定法シリーズ No.7、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー, p179, 1992 年, 文部科学省