

平成24年度除染技術評価等業務報告書

平成24年10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. 個別試験結果と評価	4
4. 総合評価	18
5. 技術指導実績	28
6. まとめ	30
参考文献	32

付録1：平成23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。

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 23 年度除染技術実証事業」として、実証試験の対象となる除染技術を平成 23 年 12 月 28 日（水）より平成 24 年 2 月 29 日（水）まで公募した。本事業の公募期間に応募のあった 295 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として表 1. に示した 22 件の技術を選定した。

本報告は、22 件のそれぞれの提案に対し、除染技術に関して高い知見を有した立場から、実施に係る適切な助言を与えつつ、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. 環境省 平成 23 年度除染技術実証事業において選定された 22 件の除染技術

対象物	手 法	特 徴	実施代表者の所属機関	No.
路面・ コンクリート等	高圧水洗浄	高圧水洗浄、汚水回収・処理・循環	福島小松フォークリフト株式会社	1
	超高圧水洗浄	吸着・自走式装置による壁面等の超高圧水洗浄	村本建設株式会社	2
	超高圧水洗浄、剥離	大型・中型・小型の超高圧水洗浄装置、塗膜剥離	東電工業株式会社	3
土 壤	分 級	湿式分級、擦りもみ洗浄(湿式)、濃縮残渣処理の自動化	清水建設株式会社	4
		混気ジェットポンプ、螺旋式分級装置(湿式)	前澤工業株式会社	5
		混気ポンプ、篩式分級(湿式)	財団法人 原子力研究/バックエンド推進センター	6
		解砕・分級(乾式)、表面研磨(乾式)	富士古河E&C株式会社	7
	表土剥ぎ	光ファイバーによる面的な線量測定、表土剥ぎ取り	株式会社IHI	8
ため池など の底土	凝集沈殿	凝集沈殿(高速)	三菱化工機株式会社	9
	浚渫、分級	浚渫装置、遠心分離式分級(湿式)	東洋建設株式会社	10
有機物	減容	灰化(低温燃焼)	国立大学法人 東北大学	11
	炭化	炭化(可搬式)	株式会社 山口製作所	12
	バイオマス発電、 エタノール製造	熱分解によるガス化・炭化、発生ガスの利用	鉄建建設株式会社	13
		エタノール製造(草本・木質系)	株式会社 コンティグ・アイ	14
		ファイトレメディエーション、エタノール製造(多糖類植物)・ガス化発電	財団法人 日本グラウンドワーク協会	15
	熱分解(炭化・ガス化)、炭の燃焼	株式会社 鴻池組	16	
パーク	洗 浄	摩砕洗浄	会津土建株式会社	17
		水洗、圧縮成型	遠野興産株式会社	18
焼却灰	固化(超流体工法)	固化剤と外部振動による焼却灰の固化・減容化	株式会社 間組	19
	洗 浄	飛灰からの Cs 溶出、プルシアンブルーでの Cs 吸着	郡山チップ工業株式会社	20
瓦礫	研削	ウェットプラスト	マコー株式会社	21
	摩砕・分級	水分固化、摩砕分級(乾式)	高砂熱学工業株式会社	22

2. 概要

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、機構）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、環境省が除染事業の技術的方針を策定するために、除染技術の情報収集・技術的助言・評価等を実施することを目的として、以下の業務を行った。

（1）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 22 実施機関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って、高い専門的知見を有した立場か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、技術的な助言を行った。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、（2）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。

（2）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。

(3) 技術報告書の作成

22 の実施機関の実証事業について(2)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、(2)に掲げる項目のほか、実証事業の実用化にあたっての課題の抽出及びその他の課題の抽出についても検討の上、報告を行った。

3. 個別試験結果と評価

以下に各技術個別の試験結果と評価を記す。

3.1 路面・コンクリート等

3.1.1 アスファルト・コンクリート面除染における省力化(高圧洗浄・循環ろ過システム)

(福島小松フォークリフト株式会社)(付録2-1)

本技術は、市販されている汎用機器を組み合わせることで水を回収・処理後に再利用できる高圧水洗浄(最大20MPa)システムである。試験は、水圧、水量、吸引力の最適化、複数回洗浄における除染効果の確認を行った。約1,000~2,500cpmの表面汚染に対し、バックグラウンド値を引かない値(以下、グロス値)で200~600cpmに低減できることを確認した。また、90%以上の水を回収し、回収した水はフィルタや凝集沈殿を行うことで70,000Bq/kgの放射能濃度を10Bq/kg以下に処理できることを確認した。

3.1.2 吸着自走式ウォータージェットはつりロボットを用いたコンクリート壁面除染技術 (村本建設株式会社) (付録 2-2)

本技術は、吸着・自走式装置によるコンクリート壁面の超高压水洗浄(最大 200MPa)である。試験では、吸着自走することから吸引力のパラメータはほぼ固定し水圧と水量、移動速度をパラメータとした試験を行った。

その結果、100MPa 以上の超高压水によって、約 500~1,300cpm の表面汚染の擁壁に対し、バックグラウンド値を引いた値(以下、ネット値)で 100cpm 以下に低減できることを確認した。また、切削深さが 0.8mm 程度の場合でも十分な除染効果を得ることができたことから、除去物量が少ない除染が可能であることがわかった。

水処理については、繊維ろ過材を用いるとコストが上昇するが、基本的には凝集沈殿によって 500Bq/kg の水を 5Bq/kg 以下に処理できることを確認した。

3.1.3 真空吸引式超高压除染装置及び塗膜剥離型除染剤による平面・立面の立体除染、並びに排水処理機能を持つ総合除染システムの実証(東電工業株式会社) (付録 2-3)

本技術は、大型・中型・小型の装置による超高压水洗浄(最大 250MPa)、及び塗膜剥離による立面の除染である。幅 1 m の大型装置にて 3m²/min 程度の速度で除染を行った場合、18,000~21,000cpm のアスファルトがグロス値で約 1,400~3,100cpm、3 回洗浄を実施して 700~1,500cpm 程度となった。幅 200mm の中型装置にて、0.6 m²/min 程度の速度で除染を行った場合、13,000~19,000cpm のアスファルトがグロス値で約 500~2,300cpm、3 回洗浄を実施して 400~1,300cpm 程度となった。立面については、汚染度合が低く塗膜剥離の効果は十分に確認できなかった。大型装置は吸引が悪く水の回収率も 66%、中型装置で 81%であった。

また、水処理は 4,100Bq/L の水に対して、凝集沈殿だけで 68Bq/L にまで処理できることを確認した。

3.2 土壌

3.2.1 減容率の最適化および濃縮残渣処理の自動化を特徴とする土壌洗浄技術の実証（清水建設株式会社）（付録 2-4）

本技術は、擦りもみ洗浄を特徴とする土壌の湿式分級である。

試験では、平均 19,940Bq/kg の原土に対し、除染後の粒径 75 μ m \sim 2mm の土壌は平均 2,556Bq/kg まで除染でき、85 \sim 90%の除染率であった。減容率（容積比）は一例のみであるが 84%であった。コストは 20,000 円/m³であった。

3.2.2 可搬式吸引洗浄機と車載式分級・濃縮・脱水装置による洗浄水クローズシステム（前澤工業株式会社）（付録 2-5）

本技術は、可搬式混気ジェットポンプ及び螺旋式分級装置を特徴とする土壌の回収と湿式分級による土壌洗浄である。汚染汚泥の凝集沈殿以降に分離した水は再利用する。特に側溝内の土壌回収では人力で作業を行うより約 50%の作業時間短縮が図られた。

また、混気ジェットポンプによる微粒子を剥離する洗浄効果は認められるものの、除染効果を明確にすることはできなかった。回収した 2 mm未満の粒径の土壌には凝集沈殿を実施した。上水は再利用することが最も効率的であることがわかった。

3.2.3 低線量汚染された土壌の放射性物質減量化（財団法人 原子力研究バックエンド推進センター）（付録 2-6）

本技術は、混気ポンプを特徴とする土壌の湿式分級である。凝集沈殿以降に分離した水は再利用する。混気ポンプで搬送し篩機によって分級する。

コストは混気ポンプで 15,000 円/t、水処理で 2,000 円/t であった。

3.2.4 「乾式分級」と「表面研磨」を組み合わせた土壌洗浄処理技術による放射能汚染土壌の減容化（富士古河E & C株式会社）（付録2-7）

本技術は、解砕及び表面研磨を特徴とする土壌の乾式分級である。水を使わないため汚染水は発生しない。分級点を $32\mu\text{m}$ と $75\mu\text{m}$ としてそれぞれを比較した。

田んぼの場合、粘土分が多いことから $75\mu\text{m}$ の分級で放射能濃度は $7,700\text{Bq/kg}$ が $1,600\text{Bq/kg}$ に低減し、この濃度の土の重量は除染前の 30% であった。 $32\mu\text{m}$ では放射能濃度が $4,800\text{Bq/kg}$ に減じていた。この濃度の土の重量は除染前の 57% であった。

畑の場合は、 $75\mu\text{m}$ の分級で放射能濃度は $2,200\text{Bq/kg}$ が 300Bq/kg に低減し、この濃度の土の重量は除染前の 34% であった。 $32\mu\text{m}$ の分級では放射能が 600Bq/kg に減じていた。同濃度の土の重量割合は除染前の 48% であった。

森林の場合は、 $75\mu\text{m}$ の分級で放射能濃度は $38,000\text{Bq/kg}$ が $14,000\text{Bq/kg}$ に低減し、この濃度の土の重量は除染前の 27% であった。 $32\mu\text{m}$ では放射能が $18,000\text{Bq/kg}$ に減じていた。この濃度の土の重量は除染前の 36% であった。

今後の課題には、除染処理した後の放射能濃度が高い土壌の減容化がある。この課題の解決として、既存の技術である脱気・圧縮、固化する工程を追加することによって、容積を 50% 程度減容することが可能と思われる。これによって仮置き、中間貯蔵等に必要なスペースをさらに少なくすることが期待できるので、土壌の乾式除染の総合的効果を評価するために今後、脱気・圧縮、固化による減容効果を把握することが望まれる。

3.2.5 線量測定による表土剥ぎ取り量の最小化および剥ぎ取り作業の効率化（株式会社 I H I）（付録2-8）

本技術は、プラスチックシンチレーションファイバ（PSF）を搭載した自走式放射線量測定装置と設定した深さで精密な剥ぎ取りが可能な機械（ターフストリッパ）による土壌の表土剥ぎを効率的に実施する技術である。

ターフストリッパを用いることで従来手法に比べ、33%の無駄な剥ぎ取り低減が図られ、作業時間は50%の効率化を図ることができた。剥ぎ取り土壌の飛散やこぼれ防止対策としてカバーの取り付けを実施するとともに、わだち部分の剥ぎ取り残し対策としてターフストリッパをクローラータイプの重機にも取り付けられるように改造を行い、動作を確認した。

1m×1m メッシュで定点測定する従来手法の測定方法に比べ PSF を利用することで94%の時間短縮が図られた。

3.3 ため池などの底土

3.3.1 汚水及び洗浄排水中の放射性物質の処理技術（三菱化工機株式会社）（付録 2-9）

本技術は、回転傾斜板型高速沈殿装置と凝集剤を用いて、ため池の泥（シルト及び粘土）を対象に高速凝集沈殿処理を行うものである。

試験に先立ち、ため池内の汚染分布を調べたところ、深さ方向は5cm~10cm程度まで汚染していることがわかった。このことから、ため池であっても底土を5cm程度はぎ取ることで除染できることがわかった。また、汚染の50~77%は75 μ m以下の粘土分に付着しており、陸上と同じ傾向であることが確認できた。

そこで、本実証試験では、ため池の底泥5cmを吸い上げて、除染効果を調べることにした。底土を5cm剥ぎ取り、回収した泥水を凝集沈殿することで171~200Bq/kgの放射能濃度を処理水として検出限界（2.6Bq/kg）未満まで処理できることを確認した。また、高速沈殿装置を用いることで通常の凝集沈殿に比べ5.5~6.4倍の高速化が可能となった。

3.3.2 水域（湖沼・河川等）の底質を対象とした除染・減容化技術の開発（東洋建設株式会社）（付録 2-10）

本技術は、浚渫装置及び遠心分離式分級装置による溜池の底泥の浚渫と分級による減容化である。試験に先立ち、ため池内の汚染分布を調べたところ、深さ方向は 5cm~15cm 程度まで汚染していることがわかった。従来の浚渫工法では 30cm 深さまではぎ取ることから工法を薄層吸引できるように改良し、10cm 程度のはぎ取り可能になるようにした。これにより除去物発生量を約 1/3 にすることが可能となった。

減容化については、152,300Bq/kg の底土に対し、除染後の粒径 75 μ m~2mm の洗浄砂は 1,945Bq/kg まで除染でき、98.7%の除染率であった。回収量は全体の約 27%であり、洗浄砂の粒度構成比率とほぼ同程度の回収率であった。回収水は凝集沈殿処理することで検出限界（1Bq/kg）未満であった。

3.4 有機物

3.4.1 低温燃焼による放射能汚染菜の花・稲わら等の減容化・安全処理技術（国立大学法人東北大学）（付録 2-11）

本技術は、600℃程度の低温燃焼による菜の花・稲わらの減容化である。

試験では、1 kg の試料を加熱温度 600℃、処理時間 2 時間で密閉加熱した場合の減量率は約 70%であった。また、放射性セシウムは揮発・漏えいせず、90%程度が加熱処理物（灰）に留まることを確認した。なお、加熱温度、空気流れ等の処理条件によって、灰の重量を変化させ、減量率を 90%以上にすることも可能である。コストについては、試料 1t あたり 7,037,000 円である。

3.4.2 可搬式連続炭化減容装置による放射性物質に汚染された有機物の減容（株式会社山口製作所）（付録 2-12）

本技術は、可搬式炭化装置による有機物の減容化である。試験では、落葉を炭化処理した際の減容率は 96%、減量率は 90%、処理能力は 2.1m²/h（表面 5cm の落葉等の有機物を対象）であった。また、ほぼ全ての放射性セシウムが炭に留まり、大気への飛散がないことを確認した。

本技術は、汚染有機物を発生場所で安全に炭化・減容化する有効な手法である。試験当初、バーク等、かさ密度が低い対象物が装置内で詰まる問題が生じたが、投入口の大型化及び対象物をスクリープレスでペレット化することにより改善した。なお、処理対象となる有機物によっては、水分量等の違いから十分な減容・減量効果を得られない可能性がある。対象物に適した処理条件を検討する必要がある。

コストについては、落ち葉のかさ密度 0.14g/cm³とした場合、25.7 万円/t となる。

3.4.3 熱分解による放射性有機廃棄物の減容処理技術の実証（鉄建建設株式会社）（付録 2-13）

本技術は、熱分解による有機物の減容化である。熱分解で発生するガス及び熱分解の副生成物であるタールとチャーを水蒸気と反応させることで発生するガスをバイオマス発電の燃料として活用することを想定している。放射性セシウムを含むチャーは燃焼させた際に、排気側へセシウムが移行する可能性があるため、チャーを燃焼させず、水蒸気と反応させ、チャーからのガス化を行うこととした。このガス化の試験は安定同位体セシウムを使用した。

試験では、熱分解処理による減容率は 99.9%であった。なお、ほぼ全ての放射性セシウムが炭に留まり、燃料ガス中には含まれないことが確認されている。

得られた炭からの放射性セシウムの溶出試験を JIS K0058-1 有姿攪拌試験に基づき

実施したところ、放射性セシウムの溶出率は2～10%であった。

ガス化のエネルギー効率を冷ガス効率（冷ガス効率%=生成ガスの高位発熱量/原料の高位発熱量×100）で評価したところ、67%であった。

本技術は、減容化に有効な手法である。試験装置で処理対象物が装置内で詰まる問題が生じたが、対象物をペレット化することで解決した。なお、この問題は規模が小さい試験装置に固有のものである。

処理コストは、年間処理量3,300 tのとき30,000円/t程度である。放射能の減容化を図る場合、熱分解の加熱用にガスの一部を利用するため、発電量は放射能がない場合の1/3となる。

3.4.4 汚染廃棄物のうち木質系廃棄物および草本系廃棄物の減容化・除染とバイオエタノール生産による再資源化技術の実証（株式会社コンティグ・アイ）（付録2-14）

本技術は、一般的にバイオエタノール化が困難な草本系廃棄物及び木質系廃棄物の減容化・除染とバイオエタノール製造を行うものである。

試験では、草本系廃棄物10,418Bq/kg（粉砕後放射能濃度）の洗浄済残渣は352Bq/kgとなり、96.6%の除染率であった。除染済残液の¹³⁴Cs、¹³⁷Csの放射能濃度はそれぞれ21Bq/L、31Bq/Lであり、放射性物質汚染対処特措法施行規則第33条第1号ロに定める $134\text{Cs}/60+137\text{Cs}/90 \leq 1$ を満たしている。減量率は90%であり、減容率については94%であった。木質系廃棄物では、14,232Bq/kg（粉砕後放射能濃度）の洗浄済残渣は373Bq/kgで、除染率は97.4%、除染済残液は¹³⁴Csが23Bq/L、¹³⁷Csが41Bq/Lで先の規則を満たした。減量率は90%、減容率については96%であった。

なお、洗浄による放射能濃度低減は割合でしか落ちないことが確認されている。また、バイオエタノール中に放射性セシウムが含まれないことを確認した。

コストは11,200円/tであるが、取り扱う原料のバイオエタノール製造効率、残渣・

残液の除染処理の手間等により、通常のバイオエタノール製造より 1t あたり約 1,000 円コスト高である。

3.4.5 エタノール製造装置とガス化発電システムを活用した除染・汚染廃棄物処理システムの構築（財団法人日本グラウンドワーク協会）（付録 2-15）

本技術は、バイオエタノール化が容易でファイトレメディーション効果が高い植物を利用した農地の除染、バイオエタノール製造及びバイオマス発電を行うものである。

放射性セシウムで汚染された農地（放射能濃度が約 1,000～5,000Bq/kg）に、ファイトレメディーション効果の高い品種のスイートソルガムを栽培したところ、移行係数は 0.12 であった。移行係数は、植物体の放射性セシウム（Bq/kg）／土壤中の放射性セシウム（Bq/kg）で求めた値である。なおスイートソルガムの収穫時には、スイートソルガム表面への土壌付着を防ぐために、刈り取られたスイートソルガムがブルーシート上に倒れるようにした。

昨年収穫された放射性セシウムで汚染した米（約 90Bq/kg）を使用して、エタノール製造を行った。製造された約 40 体積%のエタノールからは、放射性セシウムは検出されなかった。しかしながら発酵残渣と廃液からは放射性セシウムが検出されたため、発酵残渣のバイオマス利用や水の再利用を行えなかった。

放射性セシウムで汚染した木質チップとバークをバイオマス原料としてキルン炉にいれ、熱分解を行った。原料として投入された放射性セシウムの 94%が主にチャー（炭）とタール等凝縮水に含まれることが確認された。

処理コストは、年間処理量 4,320t のとき、約 30,000 円/t である。

3.4.6 除染に伴い発生する有機物のバイオマスガス化発電による減容化及びエネルギー回収（株式会社鴻池組）（付録 2-16）

本技術は、熱分解（炭化・ガス化）及び炭の燃焼による有機物の減容化である。熱分解で発生するガスと炭をバイオマス発電の燃料として活用することを想定している。

試験では、熱分解処理による減量率は 67.3～77.4%、減容率は 63.5～74.9%であり、炭の燃焼処理による原燃料換算での減量率は 96.1%、減容率は 99.6%であった。ガス化のエネルギー効率を評価する冷ガス効率（冷ガス効率%＝生成ガスの高位発熱量／原料の高位発熱量×100）は、61～70%であった。

また、熱分解処理においては、ほぼ全ての放射性セシウムが炭に留まり、炭の燃焼処理においては約 8 割が飛灰側に移行することを確認したが、主灰からも 30%程度のセシウム溶出が確認された。

本技術は、減量化・減容化に有効な手法である。コスト試算の結果、FIT 制度（再生可能エネルギー固定買い取り制度）の未利用木材を利用したバイオマス発電（33.6 円/kWh、ただし原料購入費 5,000 円/t-dry を見込む）を想定した場合、初期投資を含め 14.6 年で回収可能であり、事業として成立する。この場合、処理費用なしで放射性セシウム含有バイオマスの減容化が可能である。

なお、売電などを行わず、減容化処理施設（廃棄物処理施設）として運用した場合の処理コストは、12,000 円/t である。

3.5 樹皮（バーク）

3.5.1 森林から排出される木質系廃棄物の洗浄による汚染濃度低減技術（会津土建株式会社）（付録 2-17）

本技術は、摩砕洗浄機による木質系廃棄物（樹皮、枝・葉、リター）の洗浄である。洗浄により発生した汚染水は、薬剤により凝集沈殿させ、その上澄み水は再利用する。

試験では、研磨剤（砂利）を加えることで、試験目標とした洗浄後放射能濃度（樹皮、枝・葉 240Bq/kg 以下、リター8,000Bq 以下）であった。なお、除染率は樹皮 96.4%、枝・葉 95.3%、リター92.1%であった。

本技術は、木質系廃棄物の除染に有効な方法であるが、リターの洗浄においては洗浄物の残存率が 10～20%と低くなっており、洗浄条件及び洗浄機の改良が必要と考えられる。コストは 1m³あたり 12,000 円（20m³/h）である。

3.5.2 放射能汚染されたバークの圧縮成型による減容化（遠野興産株式会社）（付録 2-18）

本技術は、水洗によるバークの洗浄及び圧縮成型によるバークの減容化である。

試験では、水流攪拌洗浄（固液比 1:50）の除染率は概ね 50%以上、最大で 78.6%、攪拌羽根による洗浄の除染率は概ね 50～60%であった。また、圧縮成型による減容率は 60%前後であった。

本技術により、汚染バークの放射能濃度によっては、バークを再利用可能なレベル（農林水産省が定めた、肥料・土壌改良材・培土の暫定許容値：400Bq/kg（製品重量））に除染することが可能であることを確認できた。また、バークを圧縮成型することで保管性・輸送性が改善される。コストは、水洗・排水除染で 23,300 円/t（0.45t/hr）、成型では 3,900 円/t（3.88t/hr）である。

3.6 焼却灰

3.6.1 除染可燃物焼却時に生じた高濃度汚染焼却灰の特殊固化技術による処理（株式会社間組）（付録 2-19）

本技術は、超流体工法による焼却灰（一般廃棄物焼却灰）の減容化技術である。試験では、飛灰のみの固化体は 20～40%の減容、飛灰と主灰の質量比 1:1 混合固化体は 35～45%の減容化が可能であった。また、銅スラグを混入することにより放射能濃度

が 20～50%低減した。

なお、固化体の物理性状（強度、透水係数）・化学特性（化学組成、鉱物組成、重金属類の溶出）は目標値を達成した。しかしながら、固化体中の放射性セシウムは、有姿条件において、飛灰の固化体で 20～40%が溶出することが確認されている。

本技術は、減容化には有効な手法であるが、放射性セシウムの溶出対策を検討する必要がある。20%の添加率でゼオライトを固化体へ加えたところ、有姿条件において、セシウムの溶出率は 3%となり、ゼオライトの添加による放射性セシウムの溶出の抑制を確認することができたが、コストは高くなる。

3.6.2 植物等焼却灰からのセシウム除去による減容化技術の確立（郡山チップ工業株式会社）（付録 2-20）

本技術は、焼却灰（落葉樹バーク）の水洗浄及びプルシアンブルー含有水による洗浄技術である。試験では、水洗による焼却飛灰（約 260,000Bq/kg）からの放射性セシウム除去率は 71～73%、焼却主灰（26,400Bq/kg）で 7%であった。焼却飛灰（267,000Bq/kg）を洗浄し、さらに 3 回の追洗浄を行ったところ、焼却飛灰は 62,400Bq/kg となり、放射能濃度減少率は 77%であった。

プルシアンブルーによる洗浄水の除染試験では、24,080Bq/kg の洗浄水に対し、凝集剤添加なしの場合で、1 回目の除染率は 95.2%、2 回目 96.4%以上となり、全体の除染率は 99.8%以上となった。また洗浄水（6,220Bq/kg）に対し、プルシアンブルーに凝集剤添加の場合で、静置時間 60 分の場合で除染率は 99.6%であった。これらの結果から、プルシアンブルーは高い吸着効果を示すことが確認された。

なお、プルシアンブルーは、固液比 1:1000 で添加するので、放射性セシウムを吸着したプルシアンブルーは、放射能濃度が非常に高くなる。

本試験では、焼却炉内の耐火レンガの汚染検査を実施した。放射性セシウムによる

耐火レンガの汚染は、0～5mm 層に集中しており、また燃焼時間が経過（120 時間まで試験を実施）するにつれて放射能濃度が高くなる傾向であった。120 時間経過後の耐火レンガの深さ別の放射能濃度は、5～10mm で 123～2286Bq/kg、10～15mm においては検出限界値未満 (<25Bq/kg) ～783Bq/kg であった。作業員の放射線防護の観点から実機の焼却炉において、炉内のメンテナンスを安全に実施するためにも、今後さらに長時間にわたる耐火レンガの汚染検査のデータが望まれる。

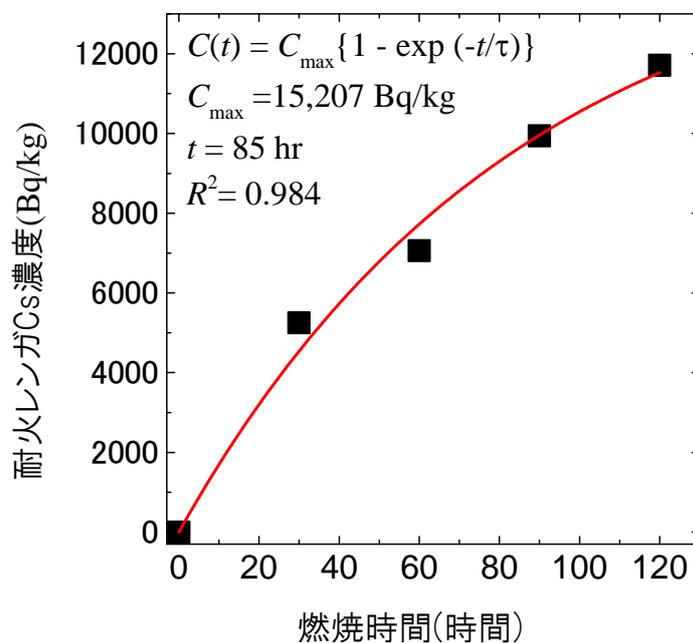


図 3.6.2-1 焼却炉内の耐火レンガの表面から深さ 5mm までにおける経過時間ごとの汚染濃度（郡山チップ工業株式会社）

3.7 瓦礫

3.7.1 ウェットブラストによる汚染瓦礫の自動除染システム（マコー株式会社）（付録 2-21）

本技術は、ウェットブラストによる瓦礫等の研削による除染技術である。水と研磨剤の混合液（スラリー）を噴射し対象を物理的に研磨する。

試験では、砂利で 50～60%/11 時間、コンクリートで約 90%/6 時間、木材で約 90%/50 時間の除染効果であった。容量比 8 倍の大型化により処理時間は 4～6 倍の効率化が図られると評価されており、効率化を図った状態でのコストは砂利で 6,300 円/t、コンクリートで 4,800 円/t、木材で 35,900 円/t である。

3.7.2 乾式磨砕分級システムによる「がれき」の除染（高砂熱学工業株式会社）（付録 2-22）

本技術は、放射性物質を含んでいる土壌類（粘土・シルト等）が付着している「がれき」に対し、凍結等を用いて水分を固定化し、付着した粘土・シルト分を乾式によって磨砕分級することで、「がれき」から放射性物質を分離除去させる除染、減容化技術である。

試験では、31,974Bq/kg-dry の原料に対し、除染後の粒径 20mm 以上の瓦礫は 9,533Bq/kg-dry まで除染でき、70.2%の除染率であった。また、処理量 11.92kg-dry に対して除去物発生量 7.72kg-dry で、除去物発生率は 65%であった。コストは 6,500 円/t であった。

4. 総合評価

4.1 路面・コンクリート等

吸引式の超高压水、高压水洗浄技術は高い除染効果を得ることが確認できた。超高压水洗浄については、内閣府技術実証事業[2]で確認された除染効果同様に特に高い除染効果が得られた。3.1.1の試験結果より、除染効果の最適パラメータは吸引力と水圧が高く、水量が少ないことである。基本的には、3.1.1の結果のように水圧と吸引力を高くし、水量を少なくすることが洗浄した際の除去物の回収率を上げることになるため、最も除染効果が高い。3.1.1と3.1.3をgross値で比較すると路面を500cpm以下にできる技術であることがわかった。3.1.3はより汚染の低い地域でも500cpm以下にできる技術であることがわかる。しかし、除染速度を速めた場合、吸引が追い付かないために十分除染できないこともわかった。目的によって使い分けることが重要であると考えられる。例えば、高線量地域における除染作業員の被ばく低減のために動線上汚染を、時間をかけずに下げたい場合には超高压水洗浄で速度を速く除染する。住民帰還のために線量率を十分に下げたい場合には速度を遅く、吸引が間に合うように除染を実施する必要がある。また、民家などでは小型のハンディタイプ装置なども有効な手法である。擁壁については、路面よりも汚染は低いですが、3.1.2の技術は遠隔操作が可能であり作業員の被ばく低減に寄与できる。よって、高線量地域、特に発電所内の除染等に応用できると期待できる。環境中においては、ロボットによる遠隔操作であることと汚染状況が路面より低いことから費用対効果の面で路面の超高压水洗浄に比べ割高であると考えられる。

また、従来の吸引しない高压水洗浄との比較を図4.1-1に示す。

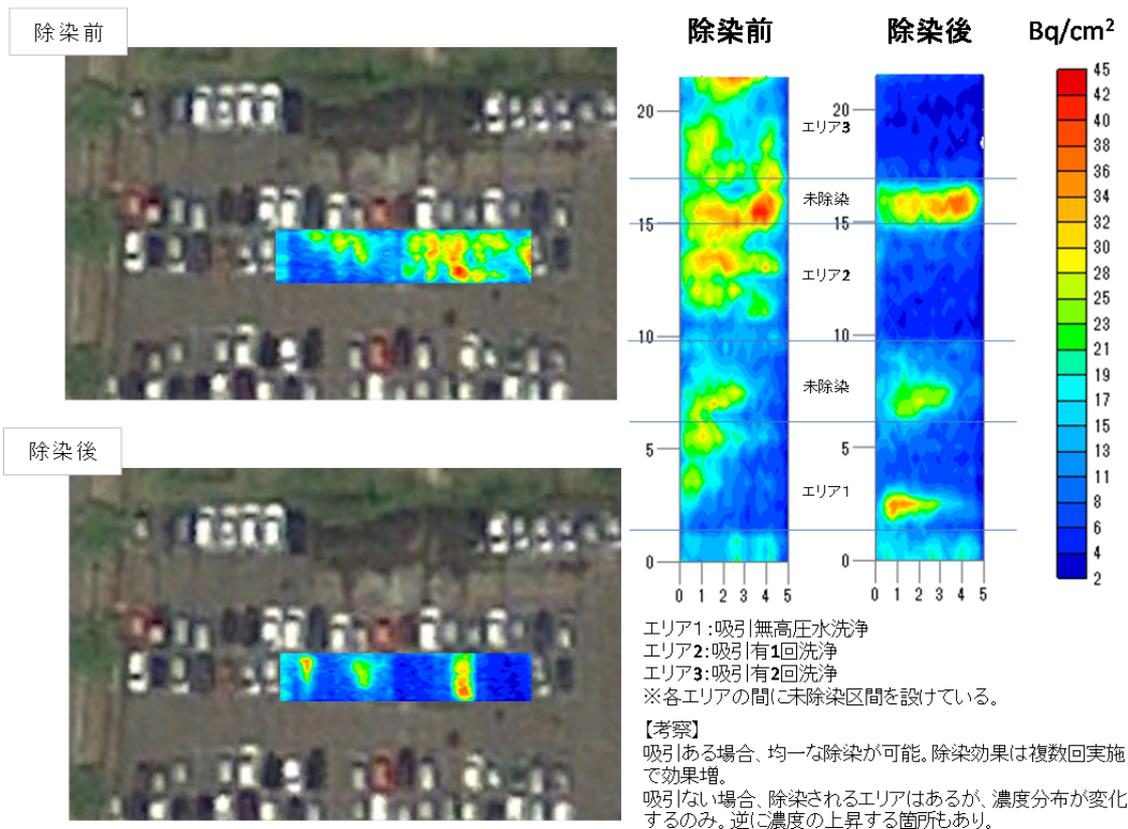


図 4.1-1 アスファルト・コンクリート面除染における省力化（高圧洗浄・循環ろ過システム）（福島小松フォークリフト株式会社）内で実施された吸引なし高圧水除染との比較。測定は、JAEA が協力しプラスチックシンチレーションファイバを用いて実施している。

図 4.1-1 より、水の吸引を実施した場合、均一な除染を行うことができ、吸引しない場合は除染されるエリア内の汚染濃度分布が変わるだけで放射性セシウムが取り除かれることはない。また、水たまりになりやすい箇所では除染前より高くなる傾向がある。よって従来の除染手法である高圧水除染に比べ、3.1.1～3.1.3 のような水を吸引回収する方法が均一に除染でき、空間線量率を低減させるという意味でも効果的であることがわかった。

水処理については、凝集沈殿だけで放射性物質汚染対処特措法施行規則第 33 条第 1 号ロに定める $134\text{Cs}/60+137\text{Cs}/90 \leq 1$ は達成できるが、市町村によってはより厳しい基準を設けている場合もあるため 3.1.3 程度の水処理では不十分である場合も考えら

れる。その時に、凝集沈殿だけでなくろ過材等を用いた場合、3.1.2 でコスト評価されているとおり水処理費用によって平米単価が追加される場合がある。また、2次廃棄物を増やす結果にもなるため使用は必要最小限に留めることが重要である。

4.2 土壌

3.2.1 から 3.2.3 は湿式分級である。内閣府技術実証事業においても湿式分級の結果、約 80%の除染が確認されており、そのメカニズムを確認したところ原土の粒度分布と放射能の関係から 75 μ m 以下の粒度に 70~80%の放射能が存在し、それらを分級によって回収し、より粒度の大きなものの表面を摩砕等によって削ることで除染効果を高めることが分かっている。土壌洗浄による除染効果の評価は放射能濃度ではなく乾燥状態での放射エネルギーのマスマランスによって評価すべきである[3]。3.2.1 は、機械的な摩砕効果の代わりに薬剤を用いたスクラビングフローテーションというすり揉み洗いによって実現したものである。但し、コストは内閣府技術実証事業で実施した湿式分級の約 2 倍である。

3.2.2 と 3.2.3 は原理的にはほぼ同様な構造である混気ジェットポンプと混気ポンプを用いて土壌を搬送し、分級する技術である。3.2.2 より混気ジェットポンプ自体の除染効果を定量的に示すことはできなかった。3.2.3 は、除染前の粒度分布毎の放射能濃度が 85 μ m 以下に 84%含まれていることから、篩による分級効果が支配的であると考えられる。但し、実際の試験の分級点は 65 μ m であり除染後の粒度毎の放射能濃度も不明であることから除染前後を 1 対 1 に評価することはできなかった。

3.2.4 は乾式分級である。内閣府技術実証事業や 3.2.1~3.2.3 の湿式分級では約 80%の除染効果であるのに対し、50~85%程度の除染効果となっている。これは乾式であるため、摩砕等で擦り合わせる際に小さな粒度毎に摩砕されるのではなく粘土分等の細粒分が塊を形成し、摩砕されにくくなるために除染効果が湿式に比べ低減していると

考える。一方で水処理は不要であるというメリットはあるが、3.2.1~3.2.4 に共通なのは、土壌洗浄後の再利用基準がないことから何をもって洗浄土であるかを判断できないことである。現状、クリアランスレベルの 100Bq/kg で評価するならば土壌洗浄ほどの技術も適用できないことになる。

3.2.5 はターフストリッパと PSF を用いることで効率的に表土の剥ぎ取りを実施することができた。線量低減は従来技術同様の低減率であるが剥ぎ取り面を一様にすることが可能であり、除染後のホットスポット探しが容易にできるメリットがある。PSF については、土壌だけではなく、道路等の汚染分布を測定することにも応用できると考える。

4.3 ため池などの底土

ため池などの底土について、5~15cm 程度（図 4.3-1）の深さまでが主たる汚染であることがわかった。これは、陸上の 3~5cm 程度よりもやや深いものの汚染されている土壌粒度分析の結果 75 μ m 以下のいわゆる粘土分が 50%以上の汚染であることがわかった。これは、陸上での汚染傾向と同じである。また、池の形態によって異なるだろうが、水の流入口は流れにより砂質となり粘土分が流れるため底泥表層の汚染は小さく、少し深い深度部の放射能濃度が高い傾向にあることがわかった。一方で、3.3.1 はポンプ、3.3.2 は重機を用いた浚渫であるがいずれの場合も凝集沈殿による水処理で放射能濃度を十分低減できることがわかった。但し、分級による減容は再利用基準が明確でないことや回収率が低いことから本当に分級が必要であるかは疑問があるところである。

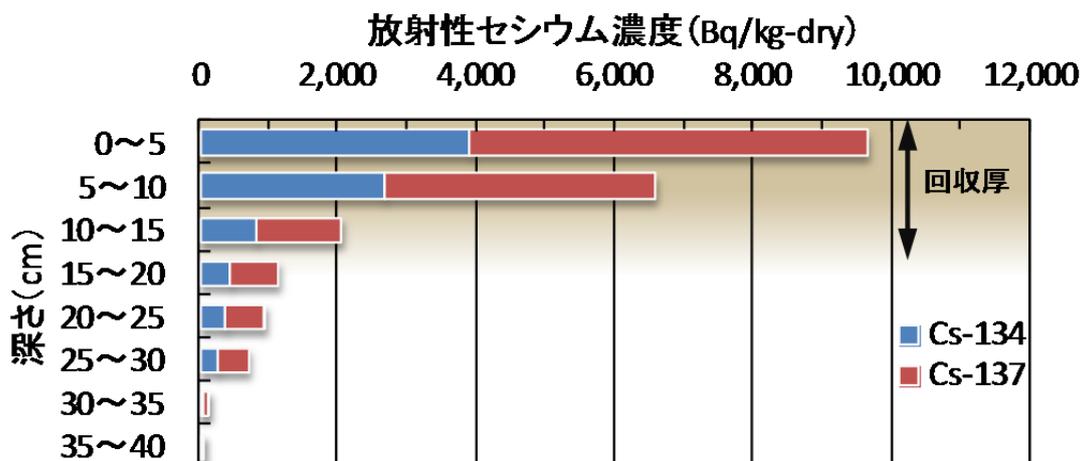


図 4.3-1 水域（湖沼・河川等）の底質を対象とした除染・減容化技術の開発（東洋建設株式会社）内で実施した底泥深さ方向の汚染状況

4.4 有機物

有機物については、炭、バイオエタノールやバイオガス等によるエネルギー化による影響を確認した。3.4.1~3.4.3 は低温加熱による炭化では、炭に放射性セシウムが残留することを確認。3.4.6 でもプロセスの中で炭化が発生（図 4.4-1）するが、この場合も炭に放射性セシウムが残留することが確認された。このことから炭化の場合、排気等にはセシウムは移行しないことがわかった。炭化同様に、エタノールの製造においてもエタノールに放射性セシウムが移行することはなかった。3.4.4 では、残渣が固体肥料（堆肥）や液肥となる。放射能が残留したものの固体肥料は洗浄することでクリアランスレベル以下となった。但し、汚染濃度がより高い場合にはクリアランスレベルを達成できない可能性があるため、濃度のより高い場合には試験により洗浄後の固体肥料、液肥の放射能濃度の測定が必要である。また、焼却灰についてはフィルタで捕獲できることが確認できたことから発電を伴わない焼却炉にも応用可能である。

コストについては、3.4.1 が研究室レベルでの試算をスケールアップしたため非常に高くなっている。3.4.3、3.4.5、3.4.6 は発電収入を見込んでいるが 3.4.3 の場合、減容化のために熱利用するため売電収入は 1/3 となる。3.4.6 は、初期投資含めたコスト回

収に 14.6 年を要すると評価している。

バイオ発電については、森林が 7 割の福島県においては一見有利な手法であるが、材料となる木材等の運びだしコストを抑えるため、建築残材として捨てている木材等の回収などの工夫やそれに伴う仕組みの変更が必要であるとする。

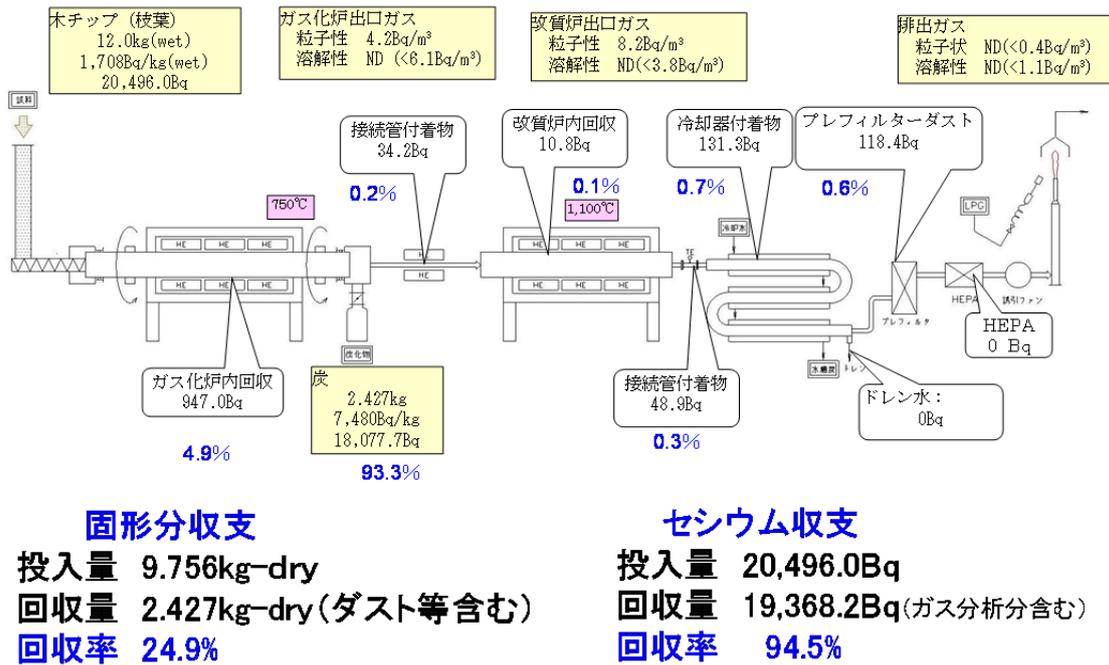


図 4.4-1 除染に伴い発生する有機物のバイオマスガス化発電による減容化及びエネルギー回収 (株式会社鴻池組) 内で実施された、枝葉の炭化処理による系内のセシウムマスバランス試験結果。フィルタ通過後のガスからはセシウムは検出されず。

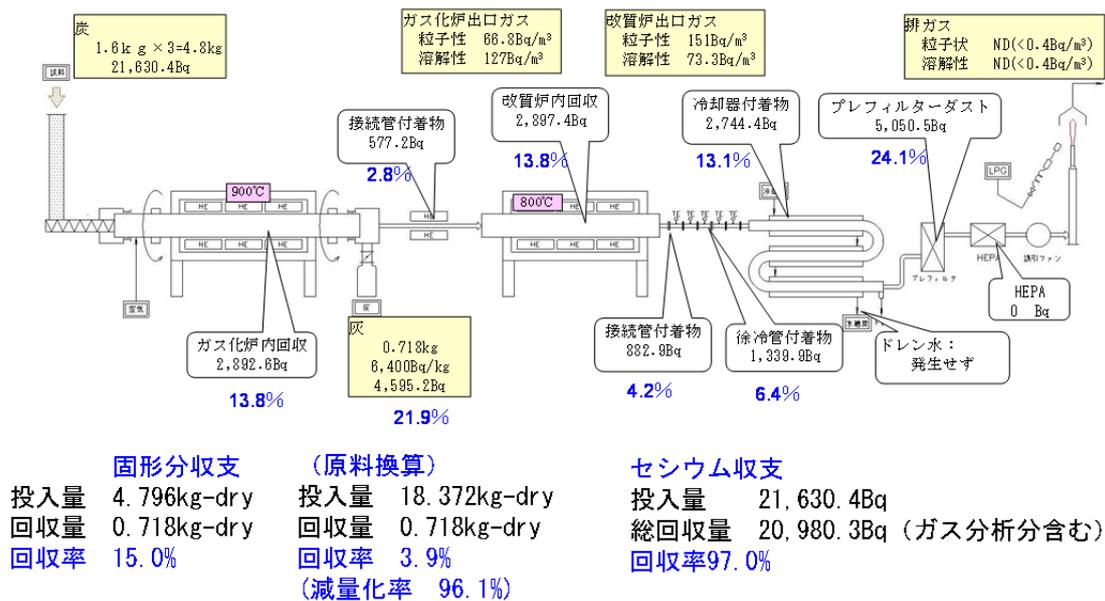


図 4.4-2 除染に伴い発生する有機物のバイオマスガス化発電による減容化及びエネルギー回収 (株式会社鴻池組) 内で実施された、炭化処理前の原料換算で減量率は 96.1%。セシウム回収率は 97%。フィルタ通過後のガスからはセシウムは検出されず。

4.5 樹皮 (バーク)

バークについて、3.5.1 で摩砕機による洗浄と 3.5.2 で水洗後にペーラーによる圧縮成型による減容化を行った。3.5.1 で 90%以上、3.5.2 では肥料・土壌改良材・培土の暫定許容値の 400Bq/kg 以下にまで除染できることが確認され、圧縮成型によって約 60%の減容化が図られた。

バークの除染については一定の用途が得られたものの肥料・土壌改良材・培土の暫定許容値 400Bq/kg 以下でも風評により購入されない現実等から、堆肥用、燃料用、敷料用とも需要が従来の約 2 割程度に落ち込んでいる。行き場のないバークは、堆積保管しているが、バークの発酵により、保管時に発火の危険性があり、堆積高さを低く保つ等の注意が必要である。このような保管バークによる 2 次被害を考えた場合、焼却による減容、安定化等が必要であると考えられる。例えば 4.4 で実施したバイオ発電への利用なども有効な手段であることから今後の検討が必要である。3.5.2 により圧縮成型

による保管時の安定化の有効性の確認と保管場所を減少させることができたが、抜本的な解決には至っていないため、引き続き検討が必要である。

4.6 焼却灰

焼却灰が水に浸漬された場合、例え固化体であったとしても 70%以上のセシウムが溶出することが 3.6.1 よりわかった。よって、3.6.2 のようなプルシアンブルーを用いた水洗浄によって 2 次廃棄物を極力少なくし、セシウムを吸着・安定化させることが重要である。

プルシアンブルーは長年顔料や青剃りの材料[4]として使用されてきた歴史とともに、放射性セシウムの内部被ばく薬として承認されている[5, 6]ことや、南欧地域では、歴史的に農地に散布されてきた[7]ことから、通常の管理においては大きな問題は発生しないと考えられる。プルシアンブルーナノ粒子造粒体の熱重量・示差熱同時測定を行った結果を図 4.6-1 に示す。この場合、270°Cで発熱反応が起こり、重量が大きく減少した。熱重量・示差熱同時測定後の反応物の赤外吸収スペクトル測定を行ったところ、プルシアンブルーやその類似体に特徴的な 2100cm⁻¹前後のシアノ (-CN) 基に起因するピークが消失していたことから、酸化反応が進行し、-CN 基は分解もしくは乖離により反応物より放出されたと考えられる。このことから、常温保管においては、分解はほとんど認められないが、プルシアンブルーを分解させることなく、安定に管理するためには、200°C以上に放射性セシウム吸着後のプルシアンブルーナノ粒子が置かれないような保管が望ましい。またプルシアンブルーはアルカリ環境下で分解することが知られているため、アルカリ性であるコンクリートやセメントの保管庫にプルシアンブルーを直接保管することも望ましくない。

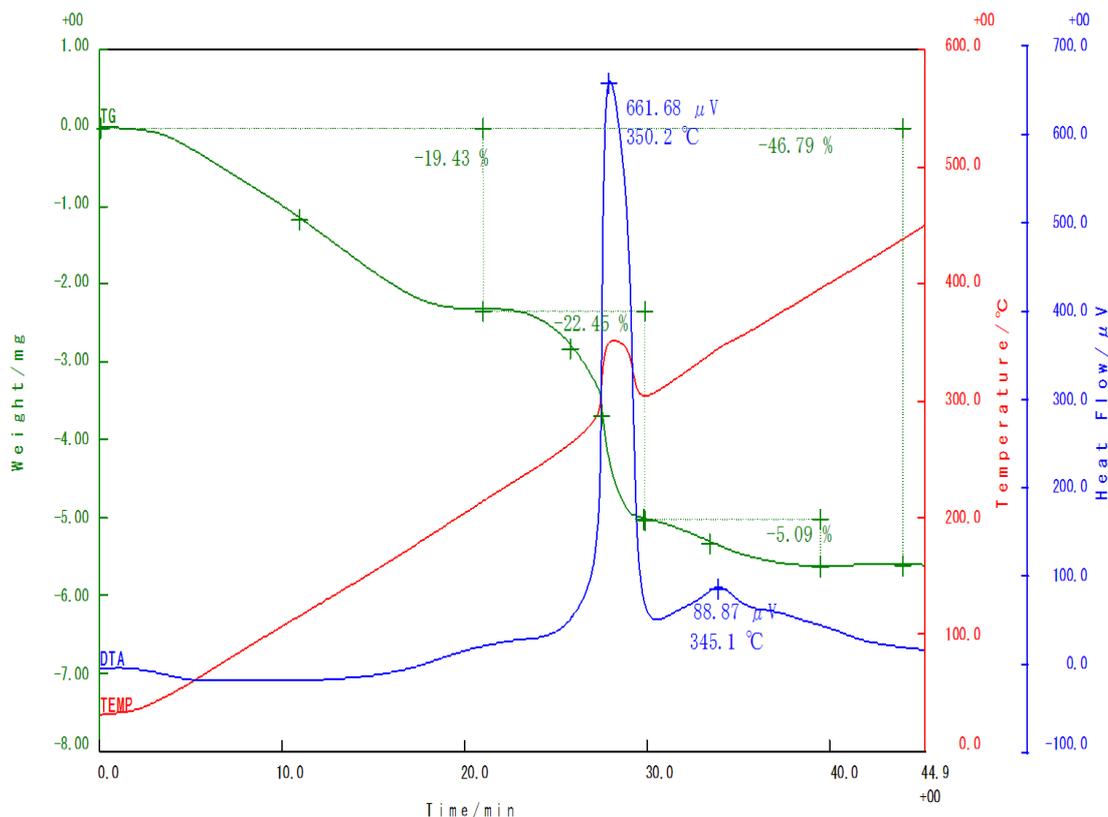


図 4.6-1 プルシアンブルーナノ粒子造粒体の熱重量・示差熱 (TG/DTA) 測定結果 (郡山チップ工業株式会社)

一方で、焼却灰の減容化も重要な課題である。特に 3.4.6 で示されたようにバイオマスによって発生する灰は、一般廃棄物焼却灰ではセシウムが溶出しにくいと言われる主灰からも溶出が確認された。焼却灰からのセシウム溶出に対し、3.6.1 では、ゼオライト等の骨材を加えて固化することで、溶出率を抑制できることが確認された。また、主灰と飛灰を混合し超流体工法によって、約 30~40%程度の減容が可能であることも確認できた。銅スラグ混入により放射能低減を図ったが希釈された効果以上の遮へいの効果はみられなかった。セシウム溶出抑制や超流体工法による減容化における課題はコスト高になることである。

4.7 瓦礫

3.7.1 は、コンクリートには有効であるが、砂利は除染効果が得られにくく、木材は時間が多くかかりコスト高であることから適用しにくいと考える。また、コスト評価時にオペレーターが1名で計算されているため、実用化においては、コストはさらに高くなる可能性がある。

3.7.2 は、いずれの試験ケースにおいても 8,000Bq/kg を下回る放射能濃度となることはなかったことから、本技術単体で 30,000Bq/kg 程度のがれきに対して適用することはできない。一方で、より低濃度ながれきには適用できる可能性が残されているが、2 mm以上の粒度にしか適用できないのでは、実用的ではない。一方で、水を利用せずに簡便に除染できることから水洗浄前の前処理として利用し、水洗浄量を減らすための方法としては利用できると考える。内閣府技術実証ではドライアイスを用いて同様の試験がなされ、ドライアイスに比べれば約 1/4 に低減されているものの、課題は本技術と水処理の両方を行った場合のコスト増が許容できるかである。

5. 技術指導実績

表 5-1 に機構が各企業に実施した技術指導実績を記す。なお、Eメールや電話等による指導は随時行ったが表中には記載していない。主な技術指導の観点、測定方法、評価方法、放射能を扱う上で確認すべき事項である。

表 5-1 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	プレス		
路面・ コンクリート等	高圧水洗浄	高圧水洗浄、汚水回収・処理・循環	福島小松フォークリフト株式会社	1	4月13日	7月5日 7月20日 8月11日 8月7日	8月3日	8月20日：日経新聞		
	超高圧水洗浄	吸着・自走式装置による壁面等の超高圧水洗浄	村本建設株式会社	2	4月13日	6月8日 7月4日 7月26日	8月7日	6月21日：建設新報社、建設福島		
	超高圧水洗浄、 剥離	大型・中型・小型の超高圧水洗浄装置、塗膜剥離	東電工業株式会社	3	4月13日	7月11日 8月3日	8月27日	-		
土壌	分級	湿式分級、擦りもみ洗浄(湿式)、濃縮残渣処理の自動化	清水建設株式会社	4	4月12日	7月3日 8月9日	9月2日	8月9日：新聞各社、NHK		
		混気ジェットポンプ、螺旋式分級装置(湿式)	前澤工業株式会社	5	4月11日	7月4日	7月25日	-		
		混気ポンプ、篩式分級(湿式)	財団法人 原子力研究/バックエンド 推進センター	6	4月12日	7月2日 8月23日	8月23日	-		
	表土剥ぎ	解砕・分級(乾式)、表面研磨(乾式)	富士古河E&C株式会社	7	4月11日	7月4日 7月11日 7月26日	8月6日	-		
ため池など の底土	凝集沈殿	光ファイバーによる面的な線量測定、表土剥ぎ取り	株式会社IH	8	4月12日	8月29日 8月30日	6月25日	8月22日：日経新聞		
	凝集沈殿	凝集沈殿(高速)	三菱化工機株式会社	9	4月11日	7月3日 7月11日	9月11日	8月20日：日経新聞		
有機物	減容	浚渫・分級	東洋建設株式会社	10	4月11日	7月5日 7月26日	8月24日	8月20日：日経新聞		
	バイオマス発電、 エタノール製造	炭化	灰化(低温燃焼)	国立大学法人 東北大学	11	4月4日	8月10日	8月10日	8月20日：日経新聞	
		バイオマス発電、 エタノール製造	炭化	炭化(可搬式)	株式会社 山口製作所	12	4月5日	-	9月6日	-
			バイオマス発電、 エタノール製造	熱分解によるガス化・炭化、発生ガスの利用	鉄建建設株式会社	13	4月5日	7月3日 8月7日 8月9日	8月29日	4月18日：日刊建設工業新聞 9月18日：週刊循環経済新聞
				エタノール製造(草本・木質系)	株式会社 コンティグ・アイ	14	4月4日	7月5日 7月11日 7月24日 8月21日 9月6日	9月6日	7月24日：テレビ朝日 7月24日：中部日本放送 8月20日：日経新聞 8月21日：NHK岐阜 9月6日：フジテレビ
				ファイトレメディエーション、エタノール製造(多糖類植物)・ガス化発電	財団法人 日本グラウンドワーク協会	15	4月4日	7月2日 8月7日	9月11日	6月13日：読売新聞等
熱分解(炭化・ガス化)、炭の燃焼	株式会社 鴻池組	16	4月4日	7月4日	8月8日	4月10日：朝日新聞科学医療部 5月9日：日経エコロジー 8月21日：日経新聞 8月24日：朝日小学生新聞				
パーク	洗浄	摩砕洗浄	会津土建株式会社	17	4月5日	7月3日 7月11日	9月6日	-		
		水洗、圧縮成型	遠野興産株式会社	18	4月6日	7月2日 8月23日	8月20日 8月24日 8月25日	-		
焼却灰	固化(超流体工法)	固化剤と外部振動による焼却灰の固化・減容化	株式会社 間組	19	4月6日	7月20日	8月31日	8月20日：日経新聞		
	洗浄	飛灰からのCs溶出、ブルシアンブルーでのCs吸着	郡山チップ工業株式会社	20	4月12日	7月5日	9月11日	7月3日：テレビ朝日 7月30日：テレビ朝日		
瓦礫	研削	ウェットブラスト	マコー株式会社	21	4月13日	7月26日	7月29日	4月30日：読売新聞		
	摩砕・分級	水分固化、摩砕分級(乾式)	高砂熱学工業株式会社	22	4月6日	-	9月11日	9月17日の週：日本経済新聞		

6. まとめ

内閣府技術実証事業から追加された新たな知見をまとめる。

路面等については、吸引バランスが非常に除染効果を高める上で重要であることがわかった。高圧水、超高压水に限らず、圧力高く、水量少なく、吸引力が強いことが除染効果を高めるパラメータである。

土壌については、内閣府技術実証事業と同程度の効果が得られることが確認できた。土壌洗浄については技術ではなく、再利用基準などの整備が望まれる。

ため池底土については、底土汚染の深さ分布が把握され、5~15cm程度まで汚染されていることがわかった。一方で深くまで浸透していないため底土の表層を取り除けば除染できることがわかった。

有機物については、炭化した場合は炭に放射性セシウムが残留しバイオエタノール等には放射性セシウムは移行しないことがわかった。プラントの運用コストは放射性物質を取り扱った方が割高となるが発電等によって、収入が得られる場合には、15年程度で減価償却可能であることもわかった。但し、費用対効果を高めるためには、建築資材等の伐採時に発生する林地残材などの未利用木材の山間部における収集・運搬等に必要コストを最小とする仕組みの構築等が必要[8]となる。また、一般廃棄物焼却灰の主灰からは放射性セシウムが5.6%溶出するとの報告[9]があるのに対しバイオマスを燃焼した際的主灰からは30%溶出する結果が得られたことから、バイオマス利用時には飛灰だけでなく主灰からの溶出にも注意しなければならない。プラント設計時には主灰の放射能対策が必要であることがわかった。

バークについては、洗浄等で流通できるレベルに除染できるが需要が乏しいことから減容・安定化のための熱分解や焼却等を今後の技術開発として実施した方がよいと考える。また、焼却灰については減容化できる見通しが立ったものの飛灰は固化しても放射性セシウムが溶出するため骨材としてゼオライト等のセシウム吸着材を添加する

など溶出防止の研究開発は継続して実施する必要があると考える。

瓦礫については、内閣府技術実証事業と同程度の効果が得られることが確認できた。

コストは低減傾向にあるが除染効果との費用対効果が受け入れられるかが課題である。

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] (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
- [3] 田川明広, “土壌除染技術の評価方法”, 土木施工, Vol.53, No.8, P23-25
- [4] Prussian blue: Artists' Pigment and Chemists' Sponge, M. Ware, J. Chem. Edu. 85, 2008, P612
- [5] 厚生労働省医薬食品局審査管理課事務連絡平成 22 年 10 月 27 日、
<http://www.hourei.mhlw.go.jp/hourei/doc/tsuchi/T101104I0010.pdf>
- [6] プルシアンブルー使用に関する注意喚起、放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター、
http://www.nirs.go.jp/data/pdf/prussian_blue.pdf
- [7] VOSSEN blue for the Dyeing of Fungicides, Degussa Technical Bulletin Pigments, No. 50, 1986.
- [8] 環境省, 環境回復検討会, “今後の森林除染在り方に関する当面整理について”,
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=20719&hou_id=15731
- [9] (独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター, “放射性物質の挙動からみた適正な廃棄処理分 (技術資料 第二版) ”,
http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r2_120326s.pdf