

放射性物質を含む汚染土壌等の洗浄と減容

豊原治彦*・佐藤敦政¹

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、東京電力福島第一原発からの大量の放射性物質の漏洩を引き起こし、これまでに人類が経験したことのない、未曾有の大規模汚染をもたらした。汚染地域においては、環境省の指針に従って除染が進められているが、中間貯蔵施設の建設の遅れから、避難住民の帰還が遅れているだけでなく、仮置き場に汚染物質が山積みされ安全面からの問題が指摘されている（図1）。



図1. 仮置き場の現状（福島県伊達郡川俣町）。中間貯蔵施設の建設が遅れているため、集められた汚染土壌や瓦礫は山積みされたままになっている。

今後、限られた中間貯蔵施設において効率的に汚染物質を貯蔵するためには、除染作業によって取り除かれた土壌等を効率的に洗浄し、国が計画している中間貯蔵施設で保管する土壌（8,000 Bq/kg 以上）の体積をできるだけ減らすことが重要となる。また除染作業によって発生する草木等の有機物からなる除染廃棄物や、放射性物質を含む下水汚泥ならびに一般廃棄物においては、焼却処理によってその体積は減るが、高濃度の放射性物質を含む焼却灰が大量に発生するため同様に更なる減容化が求められている。

土壌や焼却灰における放射性物質の分布

土壌等の減容化の方法として、多くの放射性 Cs (134Cs、137Cs) は土壌中の粘土成分に吸着されていることから、土壌中の礫・砂成分とシルト・粘土成分（直径約 75 μm 未満）に分け、粘土成分を回収することにより、礫・砂成

分の放射能濃度を 8,000 Bq/kg 未満とし、保管が必要な土壌体積を減容化することが有効である。¹⁾ 焼却灰については、水で洗浄することにより、多くの放射性 Cs (134Cs、137Cs) は水に溶出するため、焼却灰微粒子と懸濁水とに分離し、8,000 Bq/kg 未満の焼却灰微粒子を回収することにより、保管が必要な焼却灰体積を減容化することが有効である。

図2に示すように、土壌の粒子サイズはグラウンド表土、側溝汚泥、焼却灰、田畑の表土の順に小さくなり、放射性セシウムの大半は粘土と細かなシルト成分に含まれていた。この情報を参考に、筆者らは現在までに福島県伊達市のグラウンド表土（礫・砂成分率 80%）、福島県郡山市の側溝汚泥（礫・砂成分率 26%）、さらに福島県南相馬市の田畑の表土（礫・砂成分率 15%）及び、栃木県などの一般廃棄物処分場から排出される焼却灰を対象に、ナノバブル水洗浄と微粒子洗浄分級サイクロンを組み合わせて洗浄減容化実験を行ない、この方法が汚泥と焼却灰からの放射性セシウム除去と減容化に有効であることを実証してきた。^{2,3)}

洗浄と減容化の方法

グラウンドの表土の洗浄試験

（1）第一段洗浄・分級工程：表面から深さ 5 cm までを剥ぎ取った土壌約 65,600 kg（乾燥重量換算）を使用した。粒度分布測定分析の結果、75 μm 以上の砂成分は 78.6%であった。全 Cs の放射能濃度は 3940 Bq/kg(乾燥)であった。トロンメルを用いナノバブル水中で土壌を攪拌し、洗浄・分級を行った。5 mm 以上の礫は再利用可能土として回収した。

（2）第二段洗浄・分級工程：ドラムスクラバーを用いナノバブル水中で攪拌し、洗浄・分級を行った。75 μm ～5 mm の砂は再利用可能土として回収した。

（3）水処理工程：凝集沈殿剤は、焼成貝殻を主成分とするものを使用した。

（4）脱水工程：フィルタープレスを用い凝集物をろ過、脱水した。処理後の水は循環利用した。

*著者紹介 京都大学大学院農学研究科応用生物科学専攻（准教授） E-mail:toyohara@kais.kyoto-u.ac.jp

¹アース株式会社 HP: <http://earthprotector.jp/>

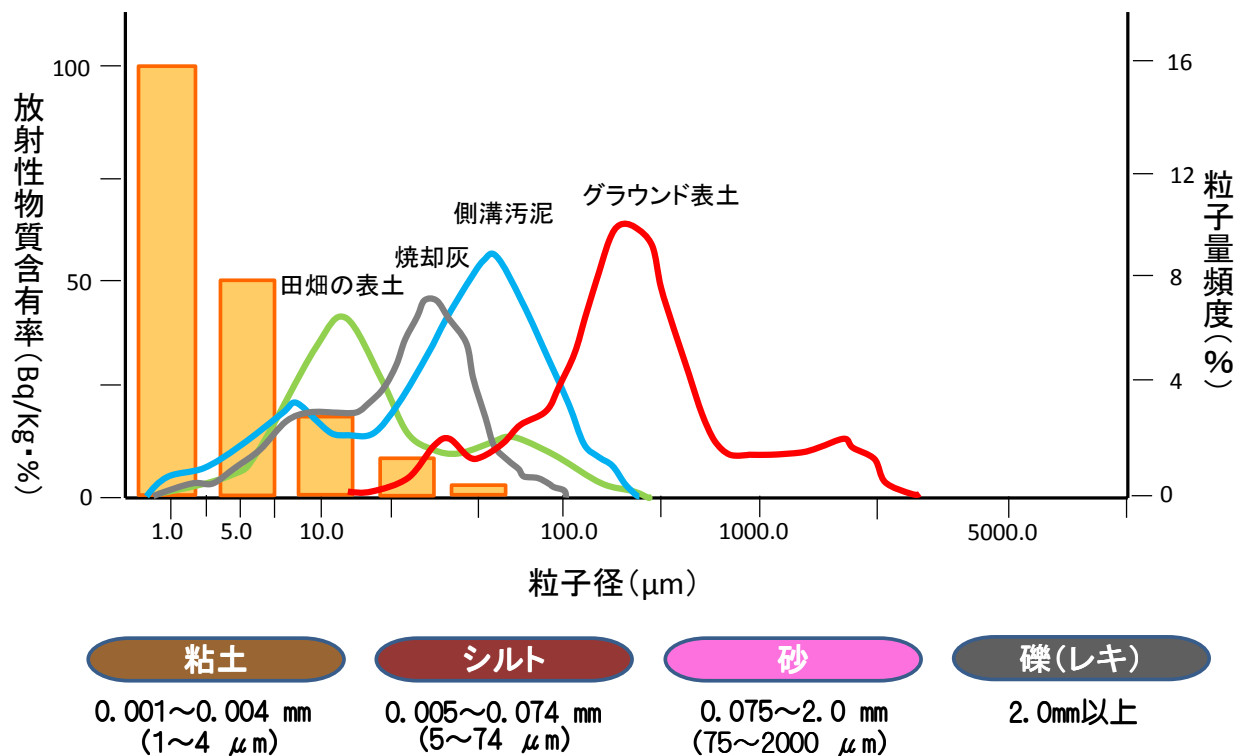


図2. 土壌・焼却灰粒子における放射性セシウムの分布

側溝汚泥の洗浄試験

(1) 浸漬処理工程：汚染地区の側溝汚泥約 500 kg を使用し洗浄・減容化試験を行った。粒度分布測定分析の結果、75 μm 未満のシルト・粘土成分は 8.8% であった。全 Cs の平均放射能濃度は 8,748 Bq/kg(湿潤) であった。コンクリート破片等を取り除いた側溝汚泥をナノバブル水に所定時間浸漬し、シルト・粘土成分を浸出した。

(2) 分級工程：浸漬済みの側溝汚泥を水流攪拌機で攪拌しつつ振動篩い分級洗浄装置に供給し、礫・砂と 75 μm 未満のシルト・粘土に篩い分けた。

(3) サイクロン処理工程：篩い分け後の 75 μm 未満のシルト・粘土を含んだスラリー溶液を、一次サイクロン及び二次サイクロンに通し、約 5 μm 以下のシルト成分・粘土成分を分離した。

(4) 吸着・凝集沈殿工程：二次サイクロンのトップから出てきた溶液に吸着・凝集沈殿剤を加えてシルト・粘土成分を沈殿させ回収した。

田畑の表土、焼却灰の洗浄試験

(1) 浸出処理工程：汚染地区の田畑の表面から深さ 10 cm までの土壌を 853 g (乾燥)、及び汚染地区の一般廃棄物処分場から排出される焼却灰を 1,500 g (乾燥) 使用し、

洗浄・減容化試験を行った。田畑の表土は 75 μm 未満のシルト・粘土成分は 62.8% であり、焼却灰の 75 μm 未満の微粒子の割合は 71.4% であった。全 Cs の平均放射能濃度は田畑の表土は 13,797 Bq/kg(乾燥) であり、焼却灰は 8,400 Bq/kg(乾燥) であった。田畑の表土または焼却灰を、ナノバブル水を用いて所定時間攪拌洗浄し、砂・シルト・粘土粒子または焼却灰粒子から放射性物質を粒子画分から水面分へ浸出した。

(2) 一次サイクロン処理工程：攪拌洗浄済みの田畑の表土または焼却灰スラリー溶液を、一次サイクロンに通し、約 20 μm 以上の大粒子とそれ以下の小粒子に篩い分けた。

(3) 二次サイクロン処理工程：篩い分け後の約 20 μm 以下の小粒子スラリー溶液を、二次サイクロンに通し、約 5 μm 以下のシルト成分・粘土成分または焼却灰小粒子成分・微粒子成分を分離した。

(4) 吸着・凝集沈殿工程：二次サイクロンのトップから出てきた溶液に吸着・凝集沈殿剤を加えて約 5 μm 以下のシルト・粘土成分または焼却灰微粒子成分を沈殿させ回収した。

これらの工程を図3にまとめた。

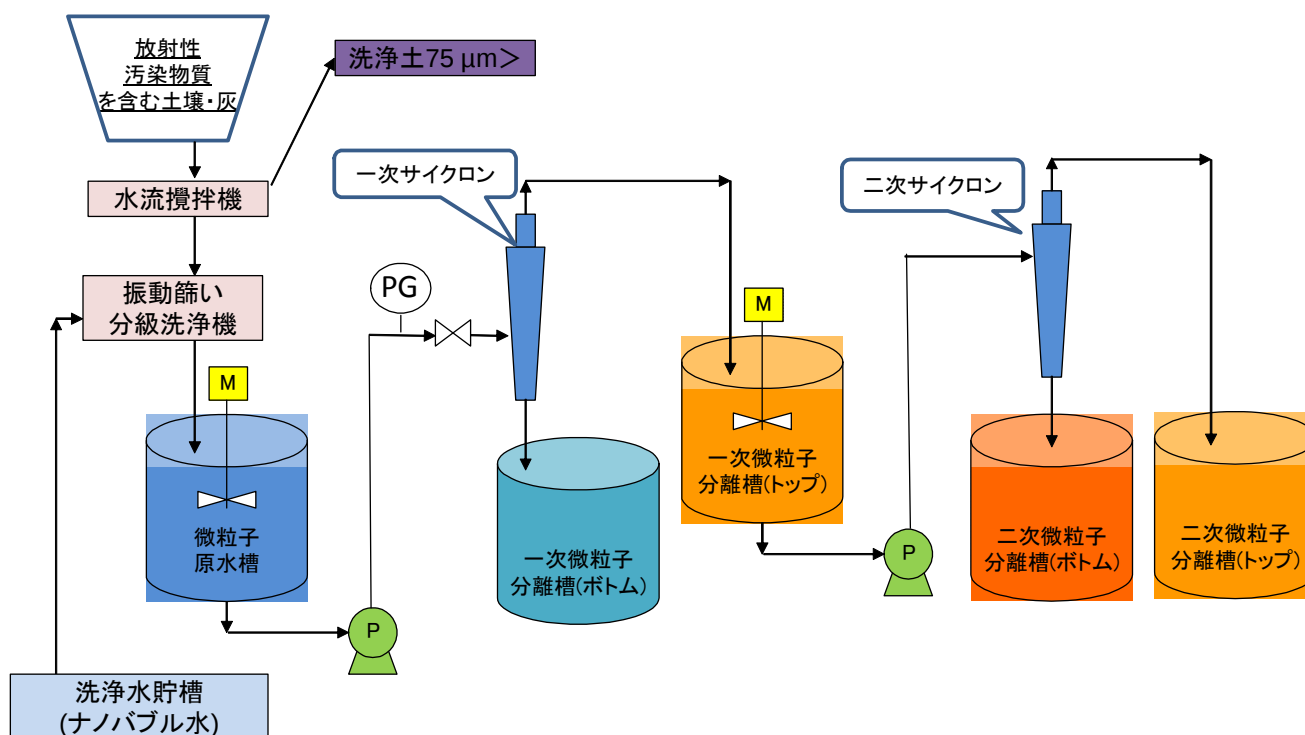


図3. 田畑の表土及び焼却灰の減容化方法.

M:モーター、P:ポンプ、PG:プレッシャーゲージ

結果と考察

元グラウンド表土のうち、トロンメル分級洗浄装置及びドラムスクラバー分級洗浄装置から出てくる土壌重量割合は97.2%(乾燥)で、放射能濃度は300 Bq/kg未満に除染された土壌であることから、中間貯蔵施設で保管が必要な土壌重量は、2.8%まで減量化されると評価された。

元側溝汚泥のうち、振動篩い分級洗浄装置(上段、下段)及び一次ボトムから出てくる土壌重量割合は94.2%(湿潤)で、放射能濃度は3,000 Bq/kg未満に除染された土壌であることから、中間貯蔵施設で保管が必要な土壌重量は、5.8%まで減量化されると評価された。

元田畑表土のうち、振動篩い分級洗浄装置(75 μm<)及び一次ボトムから出てくる土壌重量割合は84.8%(乾燥)で、放射能濃度は2,000 Bq/kg未満に除染された土壌であることから、中間貯蔵施設で保管が必要な土壌重量は、15.2%まで減量化されると評価された。

元焼却灰のうち、一次ボトム及び二次ボトムから出てくる焼却灰重量割合は98.9%(乾燥)で、放射能濃度は1,000 Bq/kg未満に除染された土壌であることから、中間貯蔵施設で保管が必要な土壌重量は、1.1%まで減量化されると評価された。

土壌及び焼却灰中の粘土及び微粒子成分割合は、試験装置の下流側になるにつれて高くなり、微粒子槽最終段で回

収されたそれぞれの試料の放射能濃度は、グラウンド表土は元土壌の放射能濃度に対し、約34倍に、側溝汚泥は元側溝汚泥の放射能濃度に対し、約28倍に、田畑表土は元土壌の放射能濃度に対し、約14倍に、焼却灰は元焼却灰の放射能濃度に対し、約81倍に濃縮されていた。

元グラウンド表土中の放射能(全Cs)のうち、トロンメル分級洗浄装置及びドラムスクラバー分級洗浄装置から出てくる土壌(礫、砂)中の放射能量は6.6%で、残りの放射能はシルト・粘土成分と共に下流側に移行し、吸着・凝集剤によってシルト・粘土成分が分離・回収された。回収されたシルト・粘土成分の重量は元グラウンド表土の2.8%であるが、元グラウンド表土中の全放射能の93.4%が含まれていると評価された。

元側溝汚泥中の放射能(全Cs)のうち、振動篩い分級洗浄装置及び一次サイクロンから出てくる土壌(砂、砂利、シルト)中の放射能量は19%で、残りの81%の放射能は粘土成分と共に下流側に移行し、二次サイクロンを通して粘土成分が分離・回収された。二次サイクロンで回収された粘土成分の重量は元側溝汚泥の5.8%であるが、元側溝汚泥中の全放射能の81%が含まれていると評価された。

元田畑表土中の放射能(全Cs)のうち、振動篩い分級洗浄装置及び一次サイクロンから出てくる土壌(砂、シル

ト)中の放射エネルギーは6.3%で、残りの93.7%の放射エネルギーは粘土成分と共に下流側に移行し、二次サイクロンを通して粘土成分が分離・回収された。二次サイクロンで回収された粘土成分の重量は元田畑表土の15.2%であるが、元田畑表土中の全放射エネルギーの93.7%が含まれていると評価された。

元焼却灰中の放射エネルギー(全Cs)のうち、一次サイクロン、二次サイクロンボトムから出てくる焼却灰中の放射エネルギーは3.5%で、残りの96.5%の放射エネルギーは微粒子成分と共に下流側に移行し、二次サイクロントップを通して吸着・凝集剤によって微粒子成分が分離・回収された。二次サイクロントップで回収された微粒子成分の重量は元焼却灰の1.1%であるが、元焼却灰中の全放射エネルギーの96.5%が含まれていると評価された。

また、すべての洗浄に使用したナノバブル水溶液は、静置又は吸着・凝集剤を添加して粘土成分を沈殿分離することにより、浄化後の水中の放射エネルギー濃度はいずれもCsの測定下限値未満であった。

本試験では、放射エネルギー濃度が比較的高い土壌及び焼却灰を対象に、ナノバブル水を使用して汚染対象物を洗浄し、更に洗浄水中に移行した放射エネルギーを多く含む粘土及び微粒子成分を一次及び二次サイクロンで分離・回収する試験を実施し、高い洗浄減容効果が確認された。

焼却灰は、放射性物質が水に溶出しやすく、ナノバブル水の高い洗浄効果により、さらに効率よく水に移行した放射性物質を微粒子と共に回収出来ることが確認できた。土壌については、除染回収された土壌の発生場所が事前に判別できれば、土粒子の粒径ごとに洗浄工程を変えることで、さらに効率よく減容化が出来ることが考えられる。

ナノバブル水と汚染対象物の混合接触洗浄を十分行い、粘土及び微粒子成分を水側により多く移行するように工夫すること、また、洗浄された個体粒子と放射性物質が移行した水とをより効率よく分離することにより、汚染対象物中の放射エネルギーの回収率(除染効果)を更に高めることができると考えられる。

また、ナノバブル水中の極微小気泡は、通常の気泡、マイクロバブルの気泡に比べ安定しているので、浄化したナノバブル水は繰り返し土壌洗浄に使用することが可能である。

今後、本洗浄減容化システムが本格除染に適用され、高性能分級サイクロンシステムとナノバブル水の特性・機能を生かしてあらゆる除染廃棄物の洗浄・減容化が行われ、汚染地域の早期の環境回復に寄与されることを期待したい。

参考文献

- 1) 豊原治彦ら：その他物理学的手法による放射性セシウム汚染土壌の洗浄技術, 東日本大震災後の放射性物質汚染対策—放射線の基礎から環境影響評価, 除染技術とその取り組み(斎藤勝裕編), 株式会社 エヌ・ティー・エス p.146 (2012).
- 2) 佐藤敦政、豊原治彦：放射性物質を含む汚染土壌処理システム、特許第5062579 (2012).
- 3) 佐藤敦政ら：ナノバブル水を用いた放射性物質汚染側溝汚泥の洗浄減容化実証試験、公益財団法人原子力バックエンド推進センター、デコミッションング技報特別号、30 (2013).