

高炉スラグ微粉末を利用した磁選による 放射性セシウム汚染土壌の乾式分級

白石 祐彰^{1*}、 檜木 正成²、 三苫 好治³

¹ 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

² 株式会社奥村組 東日本支社土木工務部 (〒108-0014 東京都港区芝 5-6-1)

³ 県立広島大学 (〒727-0023 広島県庄原市七塚町 562)

Dry Classification of Radioactive Cesium Contaminated Soil by Magnetic Selection Using Blast Furnace Slag Fine Powder

Hiroaki SHIRAISHI^{1*}, Masanari KASHIKI², and Yoshiharu MITOMA³

¹ Technical Research Institute, Okumura Corporation (387 Ohsuna, Tsukuba, Ibaraki 300-2612, Japan)

² Civil Engineering Division, East Japan Branch Office, Okumura Corporation
(5-6-1 Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan)

³ Faculty of Life and Environmental Science, Prefectural University of Hiroshima
(562 Nanatsuka-cho, Shobara, Hiroshima 727-0023, Japan)

Summary

Finer soil particles tend to be associated with greater contamination concentration by radioactive cesium. Classification treatment, which means separating fine-grained contaminated soil from coarse grained soil satisfying reference values, allows reuse of coarse-grained soil. Wet classification with water has been conducted for contaminated soil. However, cohesion precipitation processing of the turbid water generated by wet classification becomes difficult as the particle sizes of the fine particles become smaller. As the properties of the turbid water change, cohesion precipitation processing becomes unstable. Using simulated cesium contaminated soil, we explored a dry classification testing method that does not produce any wastewater. Using ground granulated blast-furnace slag as a magnetic material, after magnetic separation using two-step lattice type magnet, We found that about 20 wt% of the sample was classified as magnetized fine fraction which had more cesium concentration by about 2.7 times than the sample without the classification treatment. Subsequent tests assessed radioactive cesium contaminated soil using a drum-type magnetic separator to separate fine and coarse fractions. The results indicated the radioactive cesium concentration in the coarse fraction samples had dropped by between 39% and 46%. The number of execution processes of dry classification was comparatively less than wet classification, so the flow of classification processes of contaminated soil at fields can be simplified.

Key Words: Radioactive cesium contaminated soil, Ground granulated blast-furnace slag, Dry classification, Magnetic sorting, Drum-type magnetic separator

1. はじめに

福島県で発生した、除染で取り除いた土や放射性物質に汚染された廃棄物を、最終処分するまでの間、安全に集中的に管理・保管するための中間貯蔵施設を福島県内に設置することとしている。中間貯蔵施設に搬入される除去土壌等は最大約 2200 万 m³ と推計され、全量をそのまま最終処分することは、必要な規模の最終処分場確保等の観点から実現性が乏

しい。最終処分が必要となる量を減少させるためには、除去土壌等を本来貴重な資源である土壌として何らかの形で利用することが考えられるが、放射性物質を含む除去土壌等はそのままでは利用が難しい。このため、適切な前処理や減容技術の活用により除去土壌等を処理することで放射能濃度の低い土壌等を分離し、管理主体や責任主体が明確となっている一定の公共事業等に限定し再生利用する。この再生利用の

*Corresponding author: E-mail: hiroaki.shiraishi@okumuragumi.jp

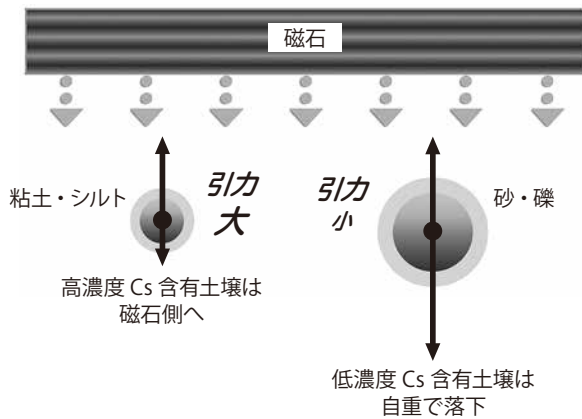


図1 磁着分離の概念図

対象となる土壌等（浄化物）の量を可能な限り増やすことにより、最終処分量の低減を図る¹⁾。

環境省が2016年3月30日に開催した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（第3回）において、再生資材の放射性セシウム濃度は8,000 Bq/kg以下を原則とする旨が示された。放射性セシウム汚染土壌は土粒子が小さいほど汚染濃度が高くなるため、細粒土からなる汚染土壌と基準値（8,000 Bq/kg以下）を満たす粗粒土を分けること（分級処理）により、粗粒土は再生利用ができる。

従前は、水を使用して汚染土を湿式分級し、シルト・粘土の微細粒子を除去していた。その際、湿式分級に伴い細粒分を含んだ濁水が発生する。発生した濁水は凝集沈殿処理を行い、脱水ケーキとして処分する。しかし、細粒分の粒径が小さくなると熟練した技術者が対応しない限りポリ塩化アルミニウム（PAC）と高分子ポリマーによる凝集沈殿処理は難しくなる。また、濁水の性状が変化すると凝集沈殿処理が安定しなくなるといった課題がある。

そこで、全く廃水を出さずに乾式処理で高濃度の細粒分を

優先的に分離することが可能な手段として、土粒子に鉄粉を固着させて、土粒子と磁石との引力（鉄粉が固着した土粒子の磁力と重力の差）の大きさの違いを利用する選別技術を開発した（図1）¹⁾。複数の磁性材料を用いて乾式分級試験を実施し、入手が容易な高炉スラグ微粉末が磁性材料になること、また資源リサイクルなどの現場で導入されているドラム型磁選機が磁力選別機として分級処理に適用できることを模擬セシウム汚染土で確かめた。そして実現場で実践するために、放射性セシウム汚染土壌を用いて乾式分級試験を実施したことについて報告する。

2. 材料

(1) 磁性材料

a) 鉄および酸化Caを含有する粉砕物

鉄および酸化Caを含有する粉砕物は、鉄粉、酸化Caおよび金属Caを2:5:2の混合比とし不活性ガス雰囲気下、遊星ボールミルを用いて400 rpmで1時間粉砕処理を行い、得られた粉砕混合物であるナノサイズの複合体である²⁾。

鉄および酸化Caを含有する粉砕物は土壌の間隙水や表面付着水と反応して、全ての土壌に対して一定の厚みの被膜を形成することができる（図2）^{3,4)}。その被膜内に共存する鉄粉と土壌粒子サイズ、外部磁力との関係から乾式処理で土壌微粒子のみを選択的に分離することが可能となる⁵⁾。

b) 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、製鉄所の高炉より副生される高炉水砕スラグを微粉砕して製造され、高炉セメント原料や生コンクリート混和材などとして広く使用されている。

鉄および酸化Caを含有する粉砕物の代わりに以下の3種類を磁性材料として使用した。

- ・ 炉前水砕スラグを遊星ボールミルを用いて粉砕処理を行い作成した高炉スラグ微粉末
- ・ JIS A6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）に定められ

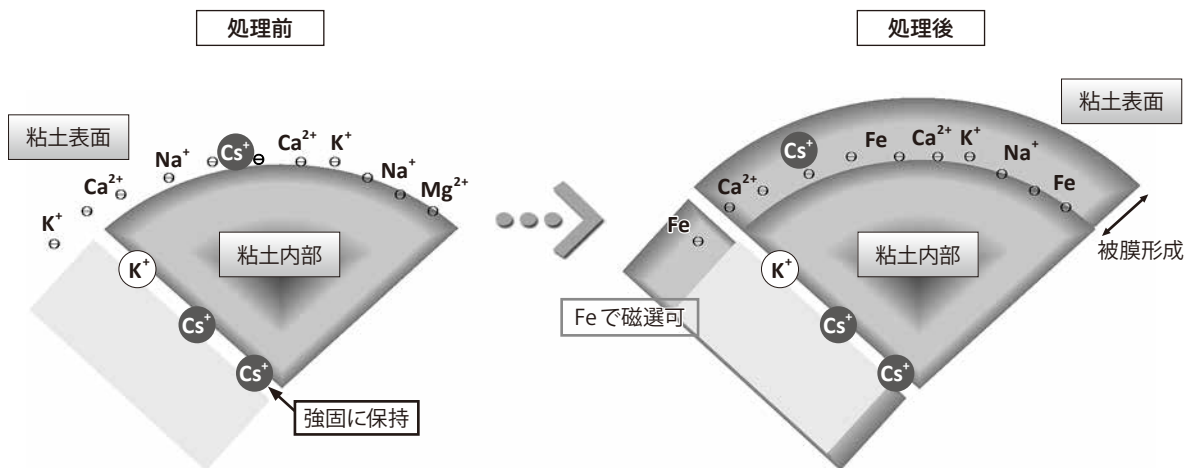


図2 鉄および酸化Caを含有する粉砕物による粘土表面での被膜形成



写真1 模擬セシウム汚染土壌の調製

ている高炉スラグ微粉末 8000

- 遊星ボールミルによりさらに細かくした高炉スラグ微粉末 8000 の粉砕物 (粒径 $0.1 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$)

(2) 土壌

a) 模擬セシウム汚染土壌

マサ土を風乾し、マサ土 10 kg に塩化セシウム水溶液 (100 mg/500 ml) を噴霧器により少量ずつ加えながら、ポッドミキサーを3分間回転させた (写真1)。その後、目開き 2 mm の篩でふるい、ふるい下の 2 mm アンダーの土壌を試験に用いた。

b) 放射性セシウム汚染土壌

福島県内にある中学校の校庭の土壌表層をすき取った放射性セシウム汚染土壌を目開き 5 mm の篩でふるい、5 mm アンダーの土壌を試験に用いた。

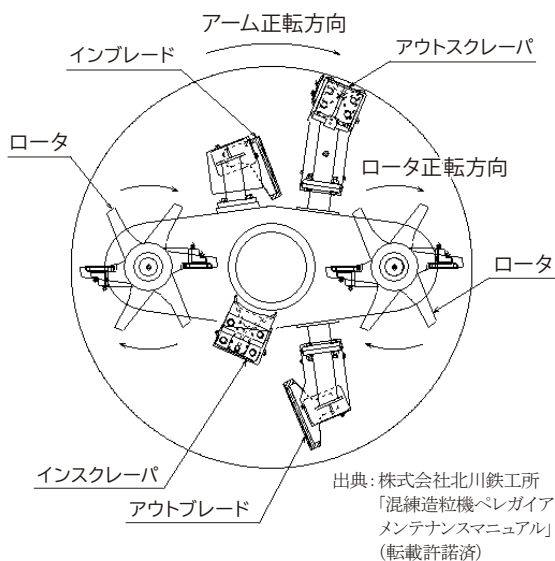


図3 ドラム内部

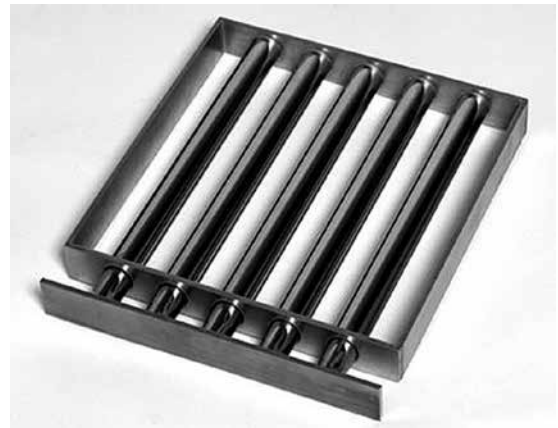


写真2 格子型マグネット

3. 機材

(1) 攪拌機

パン型ドラムに遊星回転する多段混練羽根を複数軸備えた攪拌ミキサーを用いてセシウム汚染土壌とナノカルシウムを混合攪拌した。ドラム内部を図3に示す。公転アームが多段混練羽根の全体を回転させて、自転ロータがせん断混合の働きをする。そのほかの羽根によって材料をドラム内で対流混合させる。また、攪拌機の違いによる磁着分離性能を評価する実験を行ったときには、写真1のポッドミキサーを使用した。

(2) 磁力選別機

a) 格子型マグネット

写真2に示す2段式格子型マグネット (日本マグネティックス株式会社製) を磁力選別に使用した。マグネットの磁束密度は 10,000 ガウスである。

b) ドラム型磁選機

ドラム内部に磁石 (最大磁束密度は約 6000 ガウス) が内蔵されていて回転する。ドラム表面に磁着した試料が磁石の回転により移動することで分離分別を行う (図4)。

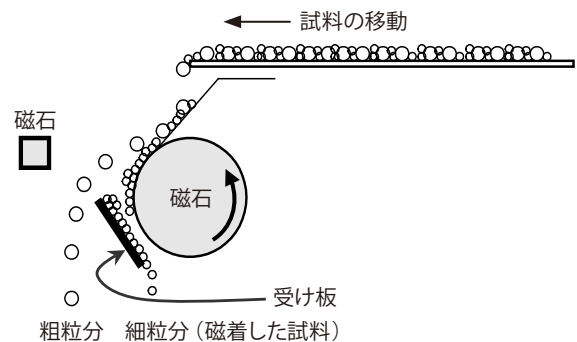


図4 ドラム型磁選機を用いた分級の概略

4. 試験方法

(1) 模擬セシウム汚染土壌の乾式分級

a) 鉄および酸化Caを含有する粉砕物を用いた攪拌機の違いによる磁着分離性能の評価

模擬汚染土壌を風乾し(含水率=0.9%)、攪拌機に模擬汚染土壌 50 kgと鉄および酸化Caを含有する粉砕物 5 kgを投入した。ロータを低速(140 rpm)で3分間、アームを低速(13 rpm)で3分間、両者を同時に運転して攪拌した。攪拌後、試料 10 kgを2段式格子型マグネットを用いて写真3～5のような磁着および脱磁作業を1回行って磁力選別した。磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量とセシウム濃度と粒度分布(ふるい分析および沈降分析)を計測した。セシウム濃度は、試料3～5 gに硝酸 10 mL、硫酸 3 mLを加



写真3 格子型マグネットによる磁力選別



写真4 磁着した試料



写真5 脱磁による分級

表1 試験ケース(パン型ドラム)

No.	表面研掃		攪拌	
	ロータ	アーム	ロータ	アーム
1	なし	なし	低速 3 分	低速 3 分
2	なし	高速 10 分	低速 3 分	低速 3 分
3	低速 5 分	低速 5 分	低速 3 分	低速 3 分

表2 試験ケース(ポッドミキサー)

No.	回転時間
4	10 分
5	30 分

えて約 250 ～ 300℃にし、2 ～ 3時間加熱した後にICP-MS分析により測定した。

砂分の土壌粒子の表面に吸着しているセシウムに対して、土壌粒子表面全体を削り取る(表面研掃)ことでセシウムを削り取られた細粒分に移行させることを目的に、鉄および酸化Caを含有する粉砕物の投入前に模擬汚染土壌をアームで高速(20 rpm)10分間運転した。アームが多段混練羽根を回転させることで土壌の一部が羽根により攪拌機の底面で擦れる効果を期待した。さらに、自転ロータのせん断混合による表面研掃を目的に、鉄および酸化Caを含有する粉砕物を投入する前に模擬汚染土壌をロータで低速5分間、アームで低速5分間、両者を同時に運転した。試験ケースを表1に示す。

また、攪拌機の違いによる磁着分離性能を評価するため、写真1のポッドミキサーに模擬汚染土壌 50 kgと鉄および酸化Caを含有する粉砕物 5 kgを投入した。投入後、ポッドミキサーを10分間回転させた試験ケース4と30分間回転させた試験ケース5を設けた(表2)。

b) 高炉スラグ微粉末を用いた格子型マグネットによる分級

鉄および酸化Caを含有する粉砕物の代替として高炉スラグ微粉末が磁性材料となることを確かめるため、以下の試験を実施した。

模擬セシウム汚染土壌 50 kgと炉前水砕スラグを粉砕処理した高炉スラグ微粉末 5 kgを攪拌後に風乾し(含水率 = 2.2%)、試料 5 kgを2段式格子型マグネットで磁力選別した。ただし、1回あたりの磁着量が少なかったため、磁着しないで格子型マグネットを通過した試料を集めて、写真3～5の磁着および脱磁を繰り返した。磁着および脱磁を30回繰り返したときに1回あたりの磁着量がおよそ 20 gとなり、見た目に少量となったため磁力選別を終了した。その後、磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量とセシウム濃度と粒度分布を計測した。

高炉スラグ微粉末 8000 は市販品であり、炉前水砕スラグより入手が容易である。そこで、炉前水砕スラグを粉砕処理した高炉スラグ微粉末の代替として高炉スラグ微粉末 8000 が

磁性材料となることを確かめるため、以下の試験を実施した。

模擬セシウム汚染土壌 50 kg と高炉スラグ微粉末 8000 の 5 kg とを攪拌後に風乾し（含水率 = 2.2%）、試料 5 kg を 2 段式格子型マグネット で磁力選別した。その結果、1 回あたりの磁着量が少なかったため、磁着しないで格子型マグネット を通過した試料を集めて、写真 3 ～ 5 の磁着および脱磁を繰り返した。1 回あたりの磁着量がおおよそ 20 g になるまで、磁着および脱磁を 20 回繰り返した。その後、磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量とセシウム濃度、粒度分布を計測した。

c) 高炉スラグ微粉末を用いたドラム型磁選機による分級

2 段式格子型マグネット での磁力選別により炉前水砕スラグ を粉砕処理した高炉スラグ微粉末が磁性材料となることを確かめられたが、磁着および脱磁を繰り返す作業は現実性が乏しいので、現場適用性の向上のため、磁力選別機を 2 段式格子型マグネット からドラム型磁選機に代えて以下の試験を実施した。含水率を 2.4% に調整した模擬セシウム汚染土壌 50 kg と炉前水砕スラグ を粉砕処理した高炉スラグ微粉末 5 kg を攪拌後に風乾し（含水率 = 0.7 ～ 1.9%）、試料 1 kg をドラム型磁選機で磁力選別した。その後、磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量と粒度分布を計測した。

(2) 放射性セシウム汚染土壌の分級

対象土壌を模擬セシウム汚染土壌から放射性セシウム汚染土壌に代えて以下の試験を実施した。含水率 2.5% 程度まで風乾させた土壌 62.5 kg と高炉スラグ微粉末 8000 の粉砕物 5 kg を攪拌後に風乾し（含水率 = 1.2 ～ 2.1%）、試料 7 kg をドラム型磁選機で磁力選別した。パラメータとして以下の磁選機の可変条件を設定した。試験ケースを表 3 に示す。

- 振動フィーダによる粉体移動速度
- 振動フィーダの位置(図 5、6)
- 受け板角度(図 7)
- 受け板長さ

表 3 磁選機の設定条件
(高炉スラグ微粉末 8000 の粉砕物を用いた試験)

試料	インバータ目盛*	フィーダ位置**	受け板長さ	受け板角度
No.1	55	-0.5 cm	115 mm	33°
No.2	55	-0.5 cm	115 mm	25°
No.3	55	-0.5 cm	117 mm	33°
No.4	55	-0.5 cm	117 mm	33°
No.5	55	+0.5 cm	117 mm	36°
No.6	65	-0.5 cm	117 mm	25°

* インバータ目盛が大きいほど振動フィーダによる粉体移動速度が大きくなる

** フィード位置が -0.5 cm は、振動フィーダの位置を後ろへ -0.5 cm 移動した

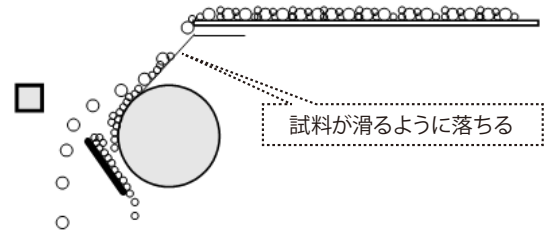


図 5 振動フィーダの位置を後ろにずらした場合

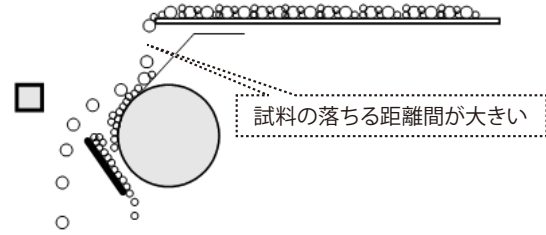


図 6 振動フィーダの位置を前にずらした場合

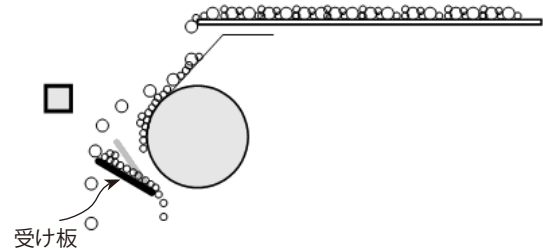


図 7 受け板角度を調整した場合

その後、磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量と放射性セシウム濃度（ゲルマニウム半導体検出器法）、粒度分布を計測した。

また、高炉スラグ微粉末 8000 を用いて同様の分級試験を実施した。試験ケースを表 4 に示す。

表 4 磁選機の設定条件
(高炉スラグ微粉末 8000 を用いた試験)

試料	インバータ目盛	フィーダ位置	受け板長さ	受け板角度
No.7	55	-0.5 cm	115 mm	33°
No.8	55	-0.5 cm	117 mm	33°
No.9	55	-0.5 cm	119 mm	33°
No.10	55	-0.5 cm	117 mm	38°
No.11	65	-0.5 cm	117 mm	25°

表5 分級後の重量

No.	磁着 (g)	残渣 (g)
1	3,297	6,630
2	3,763	6,232
3	3,396	6,577
4	2,406	7,562
5	2,296	7,700

5. 結果および考察

(1) 模擬セシウム汚染土壌の乾式分級

a) 鉄および酸化Caを含有する粉砕物を用いた攪拌機の違いによる磁着分離性能の評価

試料 10 kg に対し磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量を表5に示す。磁着試料と残渣試料の重量の合計は全てのケースで 9.9 kg 以上となり、回収率は 99% 以上であった。

パン型ドラムで模擬汚染土壌と鉄および酸化Caを含有する粉砕物を攪拌した試験ケース1～3では磁着量と残渣量はおよそ 35:65 の割合であった。一方、ポッドミキサーで攪拌した試験ケース4、5ではおよそ 24:76 となり、パン型ドラムとポッドミキサーとの攪拌機の違いにより磁着性能が異なった。セシウム汚染土壌と鉄および酸化Caを含有する粉砕物は、ポッドミキサーでは回転するミキサー内の数枚の羽根によってすくい上げられ、自重(重力)によって落下することで混合される。一方、パン型ドラムでは、攪拌羽根で強制的に動かされて混合される。そのため、ポッドミキサーは攪拌力がパン型ドラムより小さく、全ての土粒子に対して一定の厚みの被膜を鉄および酸化Caによって形成することができないため、磁着量が少なくなったと推察した。

模擬セシウム汚染土壌のセシウム濃度は 7.7 mg/kg で、目開き 2 mm の篩でふるって、篩に残った 2 mm オーバーのセシウム濃度は 3.6 mg/kg であった。試験ケース1～3の分級処理前後のセシウム濃度を表6に示す。分級前の試料のセシウム濃度は 10.5 mg/kg 前後であったが、磁着した試料のセシウム濃度は 17～20 mg/kg となり、1.7～2 倍の濃度になっていた。磁着しなかった残渣試料のセシウム濃度は 5.3～5.9 mg/kg となり、およそ半減していた。

表6 分級前後のセシウム濃度

No.	分級前 (mg/kg)	磁着 (mg/kg)	残渣 (mg/kg)
1	9.9	17	5.9
2	10	20	5.6
3	11	20	5.3

分級前の試料および磁着試料と残渣試料の粒度分布から試験ケース1～3の試料を粘土(<0.005 mm)、シルト(0.005 mm～0.075 mm)、砂および礫(0.075 mm～)に区分し、試料 10 kg に対しての区分毎の重量を求めた。粘土分を図8に、シルト分を図9に、砂および礫分を図10に示す。粘土分には、鉄および酸化Caを含有する粉砕物が 910 g 含まれている。

試料中の粘土分はほぼ全量磁着された。しかし、シルト分は残渣試料に残っており、全量磁着することはできなかった。また、砂分ではおよそ 20% が磁着された。

シルト分では、分級前よりも分級後(磁着試料+残渣試料)の方が重量が大きく、砂分では分級前よりも分級後の方が重量が小さいことから、砂分が表面研掃されたときに発生した微細粉体はシルト分に相当したと推察できる。試験ケースNo.1でロータを低速(140 rpm)で3分間、アームを低速(13 rpm)で3分間、両者を同時に運転して攪拌することによる表面研掃の効果が認められたが、試験ケースNo.2でその効果は最も大きく表れた。これは、攪拌機の公転アームの回転による多段混練羽根の働きによって砂分の土壌粒子の表面研掃が促進されたためと考えられた。

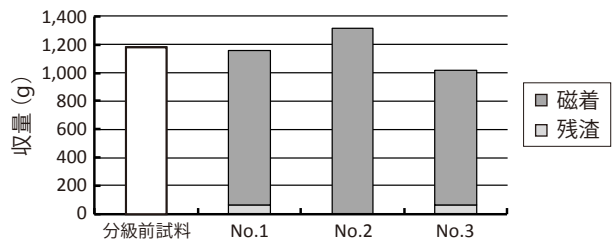


図8 粘土分の分級前、磁着、残渣試料の重量

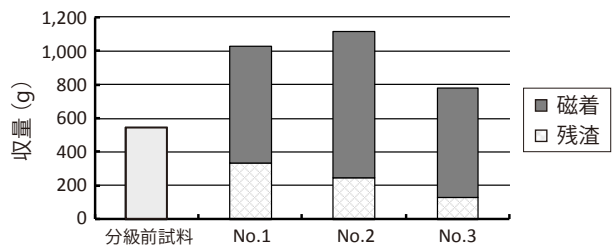


図9 シルト分の分級前、磁着、残渣試料の重量

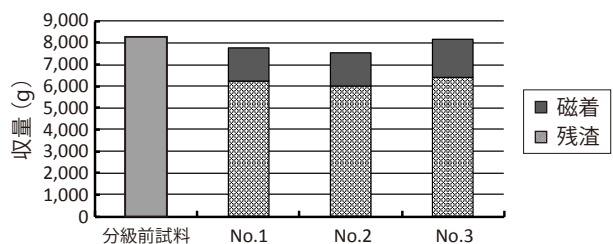


図10 砂・礫分の分級前、磁着、残渣試料の重量

b) 高炉スラグ微粉末を用いた格子型マグネットによる分級
 模擬セシウム汚染土壌と炉前水砕スラグを粉砕処理した高炉スラグ微粉末を攪拌した試料 5 kg を 2 段式格子型マグネット で 磁力選別を 30 回繰り返したときの 1 回ごとの磁着量の変化および磁着量の累計を図 11 に示す。磁着および脱磁を 30 回繰り返した結果、磁着量の合計は 982 g に達した。炉前水砕スラグを粉砕処理した高炉スラグ微粉末が磁性材料として成立することが分かった。粒度分布の計測結果から磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の粒径 0.25 mm 以上の重量を図 12 に示す。粒径 0.25 mm 以上の試料のおよそ 9 割は磁着しないで格子型マグネットを通過した。

分級前の 2 mm アンダー試料のセシウム濃度は 7.1 mg/kg、分級後の磁着および残渣試料のセシウム濃度は 19 mg/kg、4.5 mg/kg であった (表 7)。分級により磁着試料は、分級前の 2 mm アンダーの約 2.7 倍のセシウム濃度となり、その重量は分級前の約 20% であった。一方、残渣試料は、分級前のセシウム濃度を約 4 割減少させることができた。

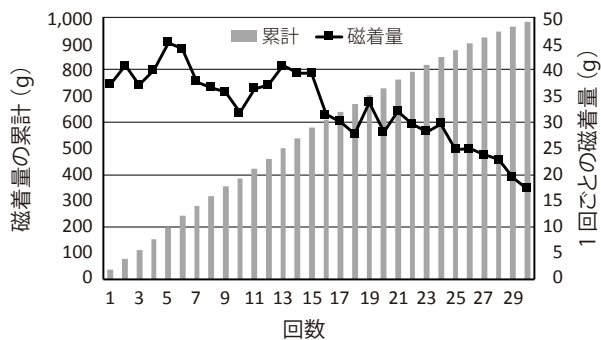


図 11 1 回ごとの磁着量の変化および磁着量の累計
 (炉前水砕スラグの粉砕物を用いた試験)

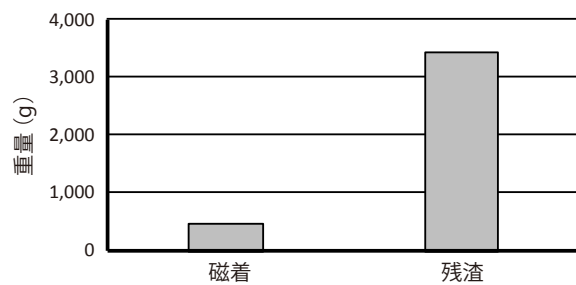


図 12 磁着および残渣試料の粒径 0.25 mm 以上の重量
 (炉前水砕スラグの粉砕物を用いた試験)

表 7 各試料のセシウム濃度
 (炉前水砕スラグの粉砕物を用いた試験)

試料	セシウム濃度 (mg/kg)	備考
分級前 2 mm アンダー	7.1	分級前試料: 5,000 g
分級後 磁着	19.0	分級後試料: 982 g
分級後 残渣	4.5	分級後試料: 4,018 g

模擬セシウム汚染土壌と高炉スラグ微粉末 8000 を攪拌した試料 5 kg を 2 段式格子型マグネット で 磁力選別を 20 回繰り返したときの 1 回ごとの磁着量の変化および磁着量の累計を図 13 に示す。磁着および脱磁を 20 回繰り返した結果、磁着量の合計は 1,293 g に達した。高炉スラグ微粉末 8000 が磁性材料として成立することが分かった。粒度分布の計測結果から磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の粒径 0.25 mm 以上の重量を図 14 に示す。粒径 0.25 mm 以上の試料のおよそ 8 割は磁着しないで格子型マグネットを通過した。

分級前の 2 mm アンダー試料のセシウム濃度は 6.5 mg/kg、分級後の磁着のセシウム濃度は 18 mg/kg であった (表 8)。分級により磁着試料は、分級前の約 2.8 倍のセシウム濃度となり、その重量は分級前の約 26% であった。

c) 高炉スラグ微粉末を用いたドラム型磁選機による分級

2 段式格子型マグネットでの磁力選別において、磁着および脱磁を繰り返す作業は現実性が乏しいので、現場適用性

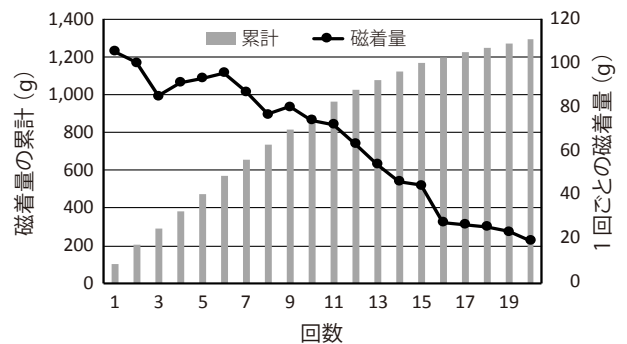


図 13 1 回ごとの磁着量の変化および磁着量の累計
 (高炉スラグ微粉末 8000 を用いた試験)

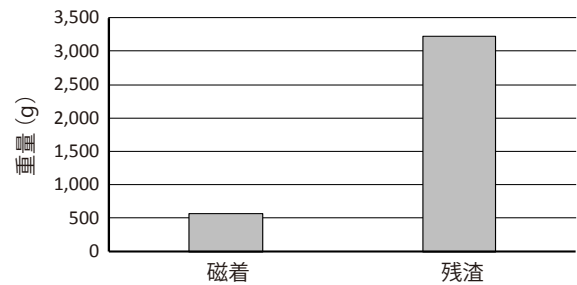


図 14 磁着および残渣試料の粒径 0.25 mm 以上の重量
 (高炉スラグ微粉末 8000 を用いた試験)

表 8 各試料のセシウム濃度
 (高炉スラグ微粉末 8000 を用いた試験)

試料	セシウム濃度 (mg/kg)	備考
分級前 2 mm アンダー	6.5	分級前試料: 5,000 g
分級後 磁着	18.0	分級後試料: 1,293 g
分級後 残渣	4.5	分級後試料: 3,707 g

の向上のため、磁力選別機を2段式格子型マグネットからドラム型磁選機に代えて試験を実施した。

模擬セシウム汚染土壌と炉前水砕スラグを粉碎処理した高炉スラグ微粉末を攪拌した試料1 kgをドラム型磁選機で磁力選別した。磁選前の試料の含水率と磁着量および残渣量との関係を表9に示す。磁着量が326 g～424 gであったことから、試料1 kgに対し、磁着量は30%を超え、最大42%に達した。磁着前の試料（マサ土+炉前水砕スラグ）および残渣試料について粒径0.25 mm未満と粒径0.25 mm以上に分けて図15に示す。粒径0.25 mm未満の試料が残渣に含まれていたのは磁着前試料の約6～12%であった。

(2) 放射性セシウム汚染土壌の分級

5 mmアンダーの土壌の放射性セシウム濃度は1,998 Bq/kg、土壌62.5 kgと高炉スラグ微粉末8000の粉碎物5 kgを攪拌後の試料の放射性セシウム濃度は1,764 Bq/kgであった。

ここでは、磁選機の主な可変条件（粉体移動速度、試料の落下距離、受板の長さや角度）を選択することにより6ケースの実験を行った（表3、図5～7）。磁着しなかった残渣試料（粗粒分）の放射性セシウム濃度および磁着試料（細粒分）と残渣試料（粗粒分）の重量を表10に示す。粗粒分は686～818 Bq/kgとなり、試料の放射性セシウム濃度1,764 Bq/kgに対して39～46%に低下した。粗粒分の重量とセシウム濃度との間に明瞭な相関関係は認められなかったが、これは、試料の不均一性などに起因するガンマ線スペクトル分析における不確かさや同一試料を繰り返し分析した時のば

表9 磁選前の試料の含水率と磁着量および残渣量

試料 No.	磁選前の含水率 (%)	磁着量 (g)	残渣量 (g)
1	0.7	424	568
2	0.8	412	574
3	1.0	412	586
4	1.8	326	667
5	1.9	351	640

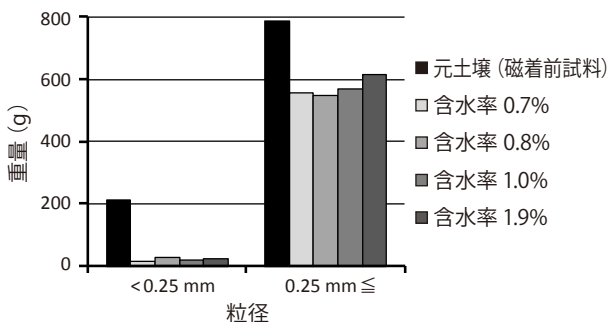


図15 粒径0.25 mm未満と粒径0.25 mm以上の磁着前の試料および残渣試料

表10 粗粒分のセシウム濃度および細粒分と粗粒分の重量

試料名	濃度 (Bq/kg)		重量 (g)	
	粗粒分	細粒分	細粒分	粗粒分
No.1	757	4,628	2,397	
No.2	749	2,553	3,545	
No.3	815	2,944	2,406	
No.4	838	3,941	3,129	
No.5	746	3,951	3,108	

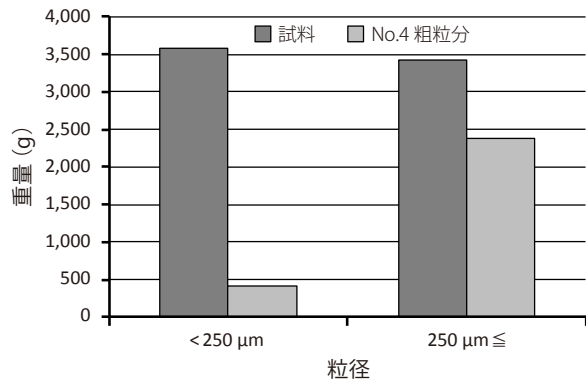


図16 試料とNo.4粗粒分の粒径の違いによる重量の差

らつきの程度について評価をしていないことが原因の一つと考えられた。

試験ケースNo.4は、磁選機に試料を約7,000 g投入し、細粒分4,187 gと粗粒分2,807 gに分級され、細粒分と粗粒分の割合は60:40であった。このときの試料およびNo.4の粗粒分の粒径0.25 mm未満と粒径0.25 mm以上の土壌の重量を図16に示す。No.4の粗粒分は分級処理によって試料の粒径0.25 mm未満の土壌のおよそ9割が分離されたことが分かる。この分級効果からNo.4の粗粒分のセシウム濃度は試料の43%に低下した。

また、高炉スラグ微粉末8000の粉碎物の代わりに磁性材料として高炉スラグ微粉末8000を用いて同様の分級試験を実施した。5 mmアンダーの土壌62.5 kgと高炉スラグ微粉末8000の5 kgとを攪拌後の試料の放射性セシウム濃度は1,584 Bq/kgであった。

磁選機の主な可変条件を選択することにより5ケースの実験を行った（表4）。磁着しなかった残渣試料（粗粒分）の放射性セシウム濃度および磁着試料（細粒分）と残渣試料（粗粒分）の重量を表11に示す。粗粒分の濃度は746～838 Bq/kgとなり、試料の放射性セシウム濃度1,584 Bq/kgに対して47～53%に低下した。

磁性材料として、高炉スラグ微粉末8000の粉碎物を用いた場合と高炉スラグ微粉末8000を用いた場合の磁選後の粗粒分のセシウム濃度を比較すると、前者は粗粒分の放射性セシウム濃度が686～818 Bq/kgとなり、試料の放射性セシウム濃度が1,584 Bq/kgに対して47～53%に低下した。

表 11 粗粒分のセシウム濃度および細粒分と粗粒分の重量
(高炉スラグ微粉末 8000 を用いた分級試験)

試料名	濃度 (Bq/kg)		重量 (g)	
	粗粒分	細粒分	粗粒分	細粒分
No.7	757	4,628	2,397	
No.8	749	2,553	3,545	
No.9	815	2,944	2,406	
No.10	838	3,941	3,129	
No.11	746	3,951	3,108	

ウム濃度 1,764 Bq/kg に対して 39 ~ 46% に低下した (表 10)。一方後者は、粗粒分の放射性セシウム濃度が 746 ~ 838 Bq/kg となり、試料の放射性セシウム濃度 1,584 Bq/kg に対して 47 ~ 53% に低下した (表 11)。そして前者は、高炉スラグ微粉末 8000 を遊星ボールミルによりさらに細かく粉砕するという工程が増えるが、後者は市販品をそのまま磁性材料とすることができる。

6. まとめ

模擬セシウム汚染土壌の分級試験により、以下の結果が得られた。

- 炉前水砕スラグを粉砕処理した高炉スラグ微粉末を用いて 2 段式格子型マグネットで磁力選別した結果、磁着試料は、分級前の 2 mm アンダーの約 2.7 倍のセシウム濃度を分級前の約 20% の重量に濃縮できた
- 高炉スラグ微粉末 8000 を用いて 2 段式格子型マグネットで磁力選別した結果、磁着試料は、分級前の約 2.8 倍のセシウム濃度を分級前の約 26% の重量に濃縮できた
- 炉前水砕スラグを粉砕処理した高炉スラグ微粉末を用いてドラム型磁選機で磁力選別した結果、粒径 0.25 mm 未満の試料が磁着しなかった残渣試料 (粗粒分) に含まれていたのは磁選前試料の約 6 ~ 12% であった

また、放射性セシウム汚染土壌の分級試験から以下の結果が得られた。

- 高炉スラグ微粉末 8000 の粉砕物を用いてドラム型磁選機で磁力選別した結果、磁着しなかった残渣の放射性セシウム濃度は 686 ~ 818 Bq/kg となり、磁選前試料の放射性セシウム濃度 1,764 Bq/kg に対して 39 ~ 46% に低下した
- 高炉スラグ微粉末 8000 を用いてドラム型磁選機で磁力選別した結果、磁着しなかった残渣の放射性セシウム濃度は 746 ~ 838 Bq/kg となり、磁選前試料の放射性セシウム濃度 1,584 Bq/kg に対して 47 ~ 53% に低下した以上の試験結果から、ドラム型磁選機による磁力選別により細粒分と粗粒分に分級できることが明らかとなった。実現場における乾式分級の処理フローを図 17 に示す。プロセス

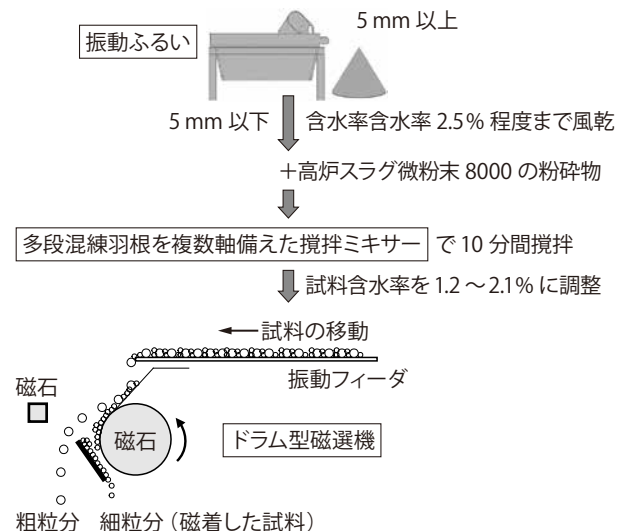


図 17 実現場における乾式分級の処理フロー

数が湿式分級よりも比較的少なく、処理の流れが単純になっている。

7. あとがき

汚染土壌と高炉スラグ微粉末とを攪拌混合して試料を調製する際には、土の粒子に高炉スラグが付着するために土壌水分が無くてはならない。しかし、含水率が高い場合、高炉スラグ同士や高炉スラグが付着した土粒子同士が接着されることになるため、含水率を 2.3% 以下にする必要がある⁶⁾。磁選を行う際には、基本的に水分量が少ない方が土粒子同士が離れやすく分級効果が高まるが、含水率がある程度以下になると細粒分の重量が軽くなりすぎて大気中に拡散してしまう。このような水分調整を大量の現地汚染土壌に対し円滑に行う手法の検討が必要と考えている。

参 考 文 献

- 1) S. R. Mallampati, Y. Mitoma, T. Okuda, S. Sakita, M. Kakeda: Total immobilization of soil heavy metals with nano-Fe/Ca/CaO dispersion mixtures. *Environ. Chem. Lett.*, **11** (2), 119-125 (2013), doi: 10.1007/s10311-012-0384-0.
- 2) 環境省:「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略 (案)」, p. 3 (2016).
- 3) 三苦 好治, 福岡 猛三, 松江 英彰, 小林 秀匡, 白石 祐彰, 梶谷 幹男: ナノカルシウムによる放射セシウム汚染土壌の除染技術.「福島環境回復技術」(デコミッション技報特別号), pp. 24-29, 公益財団法人原子力バックエンド推進センター (2013).
- 4) 三苦 好治, S.R. Mallampati, 小林 秀匡, 松江 英彰,

- 福岡 猛三：ナノカルシウムによる土壤中放射性セシウムの乾式迅速分離及び不溶化（特集放射性物質の環境モニタリングデータと分析技術動向）。産業と環境 **41** (4), pp.63-66, (2012).
- 5) 白石 祐彰, 三苫 好治：ナノカルシウムによる模擬セシウム汚染土壌の乾式分級試験。第2回環境放射能除染研究発表会要旨集, p.16 (2013).
- 6) 白石 祐彰, 三苫 好治：「汚染物質を含有する固体の処理方法」, 特開 2017-148719 (2017).
- 2018 年 8 月 20 日受付
2019 年 1 月 10 日受理
(第 6 回研究発表会 座長推薦論文)

和 文 要 約

放射性セシウム汚染土壌は土粒子が小さいほど汚染濃度が高くなるため、細粒土からなる汚染土壌と基準値を満たす粗粒土を分けること（分級処理）により、粗粒土は再生利用ができる。従前は、水を使用して汚染土を湿式分級していた。しかし、湿式分級で発生する濁水は、細粒分の粒径が小さくなると凝集沈殿処理が難しくなり、濁水の性状が変化すると凝集沈殿処理は安定しない。そこで、全く廃水を出さない、模擬セシウム汚染土壌の乾式分級試験方法を検討した。高炉スラグ微粉末を磁性材料として用い、2段式格子型マグネットで磁力選別した結果、磁着試料（細粒分）は分級前の約 2.7 倍のセシウム濃度となり、分級前の約 20% の重量に濃縮できた。次に、放射性セシウム汚染土壌で試験を実施し、ドラム型磁選機により細粒分と粗粒分に分級した結果、粗粒分は試料の放射性セシウム濃度に対して 39 ～ 46% に低下した。乾式分級の処理プロセス数は湿式分級よりも比較的少なくでき、実現場における汚染土壌の分級処理の流れが単純になった。

