

環境対策 特集

鉛散弾分別回収システムとリサイクル

—射撃場の環境保全対策技術—

吉岡由郎・西村良平・大山 将

近年、射撃場場内に蓄積した鉛散弾による土壌・水質汚染が顕在化しており、鉛散弾が混入した鉛含有土壌を適切に回収・撤去することが求められている。鉛散弾分別回収システムは、風力選別と鉛の導電性を利用した磁力選別との併用により、汚染土壌から「鉛散弾」「標的のクレー破片」「薬莖内で散弾を包むコロス」を機械的に分別回収することを可能とし、国内で初めて環境保全対策工事に適用したものである。分別回収した鉛散弾は有価物、土壌はセメント原料としてリサイクルし、クレー、コロスはセメント工場の原料や燃料に使用した。本報文では、本システムの概要と施工実績について報告する。

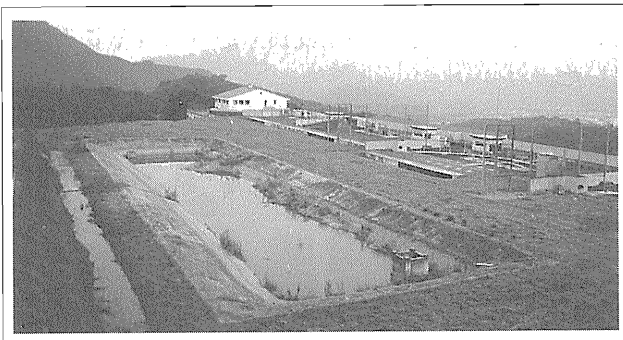
キーワード：環境保全対策，リサイクル，射撃場，鉛散弾，クレー，コロス，磁力選別，風力選別

1. はじめに

全国各地の射撃場では、場内に蓄積した鉛散弾による土壌・水質汚染が顕在化している。また水鳥が小石と間違えて釣りの錘や鉛散弾を飲み込み、中毒死を起こすケースが全国で報告されており¹⁾、過去に環境中に放出された鉛散弾等を適切に回収・撤去することが求められている。

散弾銃より撃ち出された鉛散弾は大気や水にさらされることにより風化作用を受け、金属鉛表面には白色の皮膜が形成される。この皮膜は炭酸鉛 (PbCO_3) や炭酸水酸化鉛 ($2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$; 鉛白) からなり、やがて鉛散弾から剥離して微粉末となる。これらの風化作用の過程で、鉛散弾から鉛成分 (懸濁性鉛および溶解性鉛) が水中に遊離し、また土壌中に蓄積すると考えられている²⁾。

埼玉県長瀨総合射撃場 (写真—1) は 1994 年 6 月の



写真—1 施工前の埼玉県長瀨総合射撃場

開場以来、約 8 万人が利用していた。2001 年 11 月～2002 年 3 月に実施された環境保全対策調査で鉛汚染の分布が確認され、水質では国の定めた環境基準 (0.01 mg/L) の最大 16 倍、土壌では最大 280 倍の鉛溶出が明らかとなった。

株式会社鴻池組 (以下、当社) は風力選別と鉛の導電性を利用した磁力選別との併用により、汚染土壌から「鉛散弾」「標的のクレー破片」「薬莖内で散弾を包むコロス」を機械的に分別回収するシステムを開発し、国内で初めて埼玉県長瀨総合射撃場の環境保全対策工事に適用した。本報文では、鉛散弾分別回収システムの概要と施工実績について報告する。

2. 鉛散弾分別回収システムの構築

(1) システムの設計条件

設計条件として次の 2 項目を設定した。

- ① 鉛散弾は再生鉛として再資源化する
精錬施設受入れ基準は鉛含有率 90% 以上とする。
- ② 鉛含有土壌はセメント材料としてリサイクルする
セメント工場受入れ基準は鉛含有濃度 4,000 mg/kg (0.4%) 以下とする。

(2) 室内トリータビリティ試験 (基本システム構築)

長瀨総合射撃場において採取した 4 種類の鉛散弾混入土壌を用いて室内トリータビリティ試験を実施した。

(a) 原土壌の調査

表一1に試料土壌の鉛含有量、鉛溶出量および土質試験結果を示す。

表一1 鉛含有量・溶出量および土質試験結果

	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D	
鉛散弾混入率 (%)	1.7	15.9	20.3	18.1	
鉛散弾混入土壌の鉛含有量 (mg/kg) ^{*)}	18,000	164,800	206,300	183,600	
鉛散弾除去後土壌	鉛含有量 (mg/kg)	1,000	5,800	3,300	2,600
	鉛溶出量 (mg/L)	0.47	2.67	0.60	0.18
	pH	6.4	5.2	6.4	5.2
	含水比 (%)	24.9	16.1	11.1	35.9
	強熱減量 (%)	8.5	11.8	8.8	18.4
	土粒子密度 (g/cm ³)	2.670	2.634	2.713	2.692
	粒度区分				
	礫分 (%)	37.9	29.3	46.3	30.6
	砂分 (%)	29.8	34.3	30.8	23.8
	シルト以下 (%)	32.3	36.4	22.9	45.6
土質分類	細粒分質砂質礫 (GFS)	細粒分質礫質砂 (SFG)	細粒分質砂質礫 (GFS)	細粒分質砂質礫 (GFS)	

*) 鉛散弾の鉛含有率を100%として鉛散弾混入率から算出

鉛散弾除去後土壌の溶出試験は平成3年環境庁告示第46号に、また、含有量試験は「底質調査方法」に従って実施した。鉛含有量は全ての土壌で含有量参考値(環境庁,1999年)の600 mg/kgを超過していた。鉛溶出量は全ての土壌で土壌環境基準0.01 mg/Lを大幅に超過しており、試料Dを除いて埋立て処分基準である0.3 mg/Lを超過していた。

粒度試験の結果、試料土は礫質土および砂質土に分類されるが、シルト以下の細粒分が23~46%程度と比較的多かった。鉛散弾混入率は試料Aが1.7%と低かったが、試料B~Dは16~20%程度と多量に混入していた。目視による観察では、草の根に付着した土塊の内部にもかなり多くの散弾が混入していた。

(b) 乾式および湿式分別による土壌処理方法の検討
鉛散弾分別および汚染土壌の浄化について、まず湿式分級・洗浄による処理を検討した。試料土壌はシルト以下の細粒分が23~46%と多いこと、鉛散弾除去後の粒度区分別の鉛溶出量(表一2)は、ほとんどの粒度区分で埋立て処分基準(0.3 mg/L)を超過していることから、鉛散弾は回収できるが汚染土壌の減容化効果は期待できないと考えられた。

表一2 鉛散弾分別後および高圧洗浄後の鉛溶出量

		単位: mg/L			
	粒度区分	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
乾式分別	26.5 mm 以上	0.37	1.29	0.26	0.13
	26.5~2.8 mm	0.37	0.89	0.66	0.21
	2.8~1.4 mm	0.27	1.61	1.04	0.39
高圧洗浄	2 mm 以上	0.18	0.46	0.24	0.14

また、汚染土壌の浄化を検討するために、洗浄効果が大きいと考えられる2 mm以上の礫分に対して高圧水洗浄実験を実施した。その結果、多少の洗浄効果は見られたが、洗浄後の鉛溶出量が土壌環境基準(0.01 mg/L)の10倍以上を依然として示しており、土壌環境基準を満足する土壌を回収することはできなかった。

以上の結果より、鉛散弾の分別は乾式で行い、鉛散弾分別後の粒度の大きい土壌についても洗浄せず、セメント原料として全量をセメント工場へ場外搬出することが最も効果的な処理方法であると判断した。

(c) 鉛散弾分別方法の検討

原土壌調査結果から、草の根に付着した土塊の内部にもかなり多くの散弾が混入しており、乾式による分別で鉛散弾を回収するためには土塊を適切に解砕すること、土壌をある程度乾燥させることが重要であると考えられた。

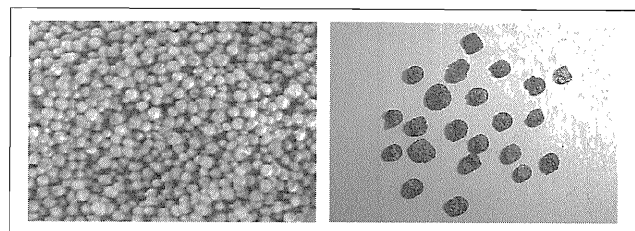
土壌を一昼夜風乾し、団粒化した土壌を丁寧にほぐしながら26.5 mm, 2.8 mm および1.4 mmのふるいで分級した後に、風力により鉛散弾と土壌に分別した。ふるい目は鉛散弾径2.7~1.7 mmから選定した。

粒度区分別の鉛混入率(表一3)から、2.8~1.4 mmの土壌に鉛散弾のほとんどが含まれること、それ以外の土壌への混入率は0.0~0.4%であることを確認した。

表一3 粒度区分別の鉛散弾混入率 単位: %

粒度区分	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
全体	1.7	15.9	20.3	18.1
26.5 mm 以上	0.4	0.0	0.0	0.1
26.5~2.8 mm	0.3	0.2	0.1	0.4
2.8~1.4 mm	10.9	38.5	49.4	70.8
1.4 mm 以下	0.0	0.0	0.0	0.0

また乾燥・解砕後の土壌では風力により鉛散弾を分別・回収することが可能であるが、扁平形状や破片などの変形弾(写真一2)は選別しにくいことが判明した。このため非鉄金属選別機(磁力選別機)による選別試験を行い、変形弾が精度良く選別できることを確認した。

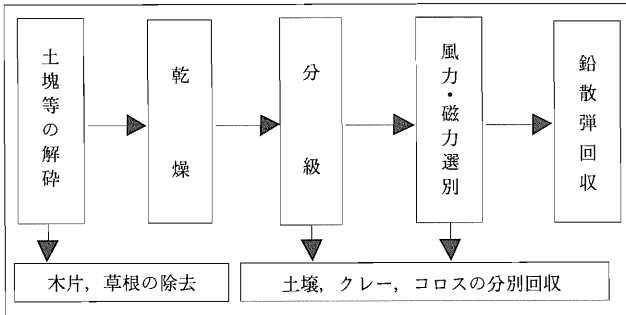


写真一2 分別回収した鉛散弾(左)と変形弾(右)

(d) 基本システムの構築

室内トリータビリティ試験の結果、鉛散弾混入土壌は適切に乾燥、解砕して分級および風力、磁力で選別することで、鉛散弾を分別回収することが可能であることを確認した。

この結果に基づき図一に示す鉛散弾分別回収の基本システムを構築した。



図一 鉛散弾分別回収システムの基本フロー

(3) 実証試験（実規模システムの構築）

(a) 使用試料および各設備概要

室内トリータビリティ試験を基に構築したシステムの性能を確認するため、長瀨総合射撃場で再度採取した土壌（表一4）を用いて実証試験を行った。

表一4 実証試験使用試料

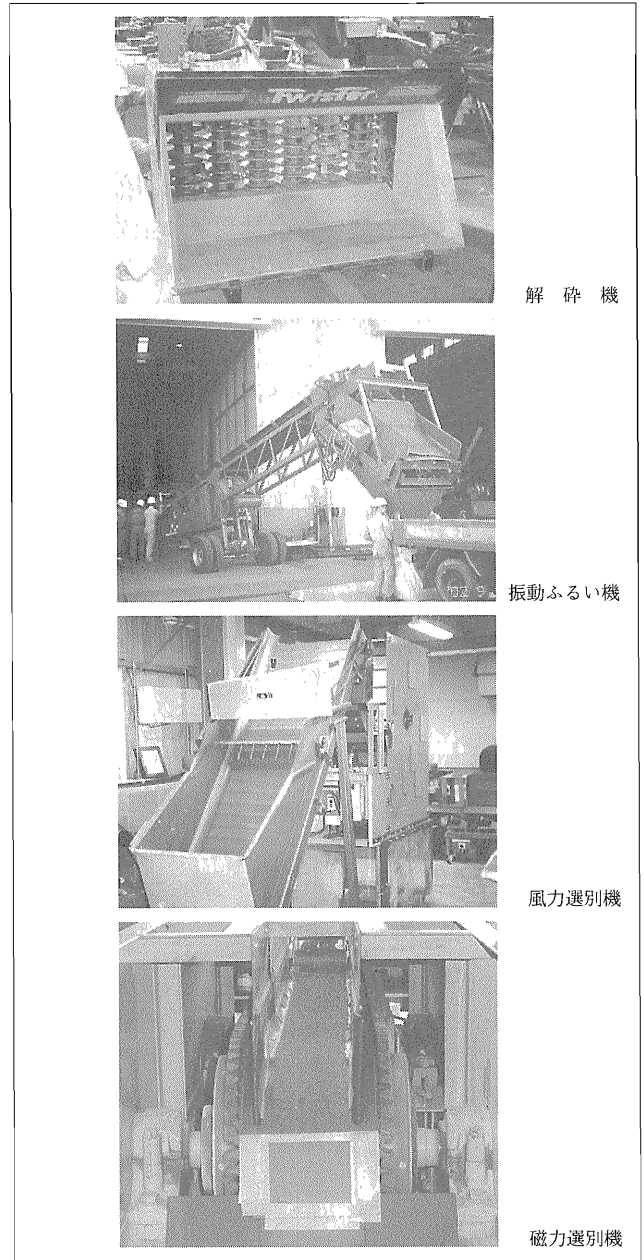
	試料E	試料F	試料G	試料H
混入物	コロス、木、根：少	クレー、コロス、木、根：多	木、根：多	クレー、コロスが主体
含水比(%)				
乾燥前	21.0	11.0	20.1	9.0
乾燥後	14.4	8.1	13.6	2.9

試験に使用した設備の仕様を表一5に、外観を写真一3に示す。

また、風力選別機と磁力選別機の原理を表一6に示す。

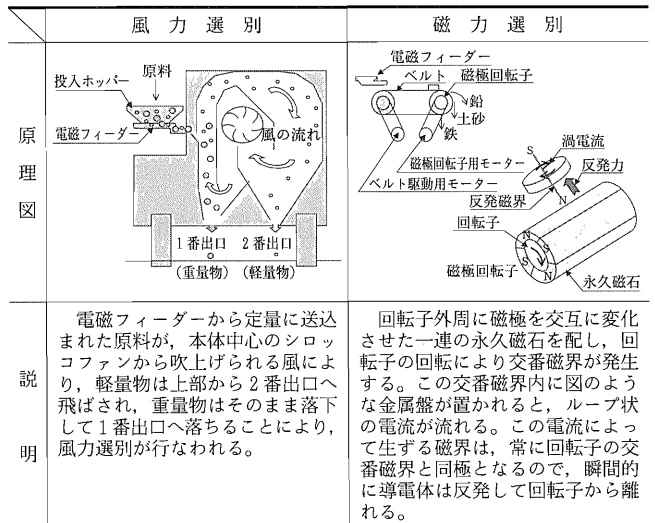
表一5 実証試験設備仕様

解砕機	アタッチメント型、メッシュ：60mm
乾燥機	送風機
振動ふるい機	ふるい目：1次 15mm 2次 3mm 3次 1mm
風力選別機	密閉循環式 フィーダ幅：750mm
磁力選別機	フィーダ幅：150mm ベルト表面最大磁束密度：約 3,900 Gauss



写真一3 実証試験使用設備

表一6 風力選別と磁力選別の原理説明



(b) 実証試験結果

分別の結果(表一7), 回収した鉛散弾側の鉛含有率91.8%以上となり, 精錬所の受入れ下限値90%を満足した。

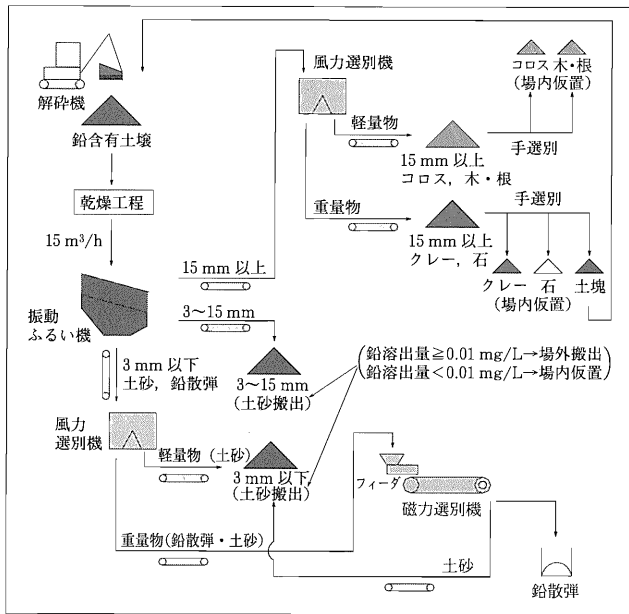
また, 鉛散弾を除去した土壌側での鉛散弾混入率0.18%以下となり, セメント会社受入れ上限値0.4%および鉛散弾除去後の土壌に含まれる鉛含有量とから設定した処理管理値0.2%未満を満足した。

表一7 分別後の鉛含有率および鉛散弾混入率 単位: %

	試料E	試料F	試料G	試料H	管理値
鉛側	93.1	91.8	96.2	96.9	≥90.0
土壌側	0.02	0.06	0.08	0.18	<0.2

(c) 実規模システムの構築

実証試験結果を基に構築したシステムを図一2に示す。



図一2 鉛散弾分別回収システムフロー図

3. 環境保全対策工事への適用

平成14年11月から飛散防止と雨対策用の建屋, 分別回収プラント(写真一4)を設置し, 11月下旬から鉛散弾分別作業を開始した。

工事概要を表一8に示す。なお, 工期は平成14年9月~平成15年5月であった。



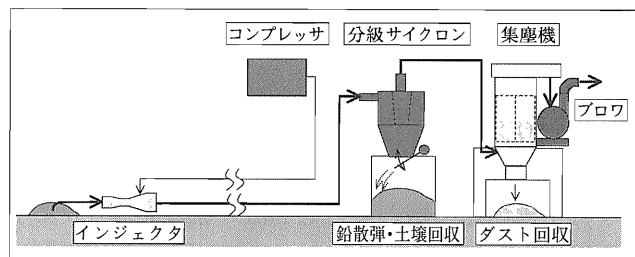
写真一4 プラント建屋およびプラント全景

表一8 工事概要

工事名称	長瀬総合射撃場環境保全対策工事	
工事場所	埼玉県秩父郡長瀬町大字野上下郷地内	
発注	埼玉県環境防災部みどり自然課	
工事内容	土壌等収集・運搬工	8,426 m³
	土壌等分別工	8,426 m³
	クレーン, コロス集積工	1,046 m³
	土壌運搬・処理工	3,456 m³
	鉛運搬	417 t

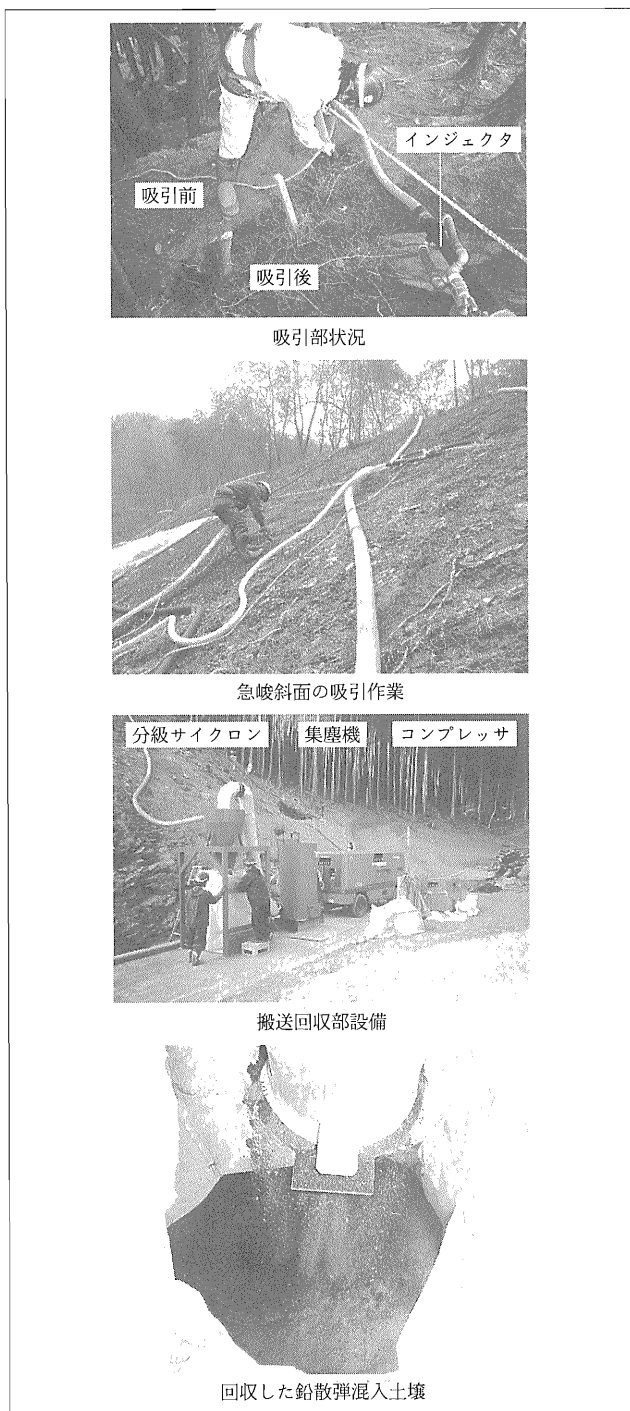
(1) 表層土壌除去

鉛散弾が混入した表層土壌は手作業で収集後, バックホウでクローラキャリヤに積込み, 分別ヤードまで運搬した。しかしながら, 射撃場内の急峻な場所や竹や木の根が繁茂する場所, 金網養生されている傾斜地などでは人手による除去が困難となるため, 高圧空気により吸引搬送する設備を導入した(図一3, 写真一5)。



図一3 鉛散弾混入土壌吸引搬送フロー図

表層土壌はインジェクタの吸引力(-40~-50 kPa)により吸引され, 搬送ホース内をコンプレッサの圧縮空気によって空気搬送される。分級サイクロンで鉛散弾混入土壌を回収し, 後段の集塵機でダストを除去する。本設備により鉛散弾混入表層土壌の除去対象面積約69,000 m²のうち, 人手により除去できない約15,500 m²を吸引搬送した。



写真一五 土壤吸引搬送設備

(2) 土壤乾燥

工期中の12月から3月の平均の日最高平均気温は8.4℃、日最低平均温度は-2.6℃、平均相対湿度は69%、年末年始を除いた降雨は5日間、降雪は6日間であった。この気象条件により、プラント建屋内にキルンタイプの土壤乾燥機(約25万kcal)を設置して土塊解砕後の土壤の乾燥に対処した。土壤の含水比が高い場合、風力・磁力選別機内部等への土壤細粒分付着により分別精度の低下を招くため、含水比の管理を適切に行う必要があった。図-4に土壤の含水比と分

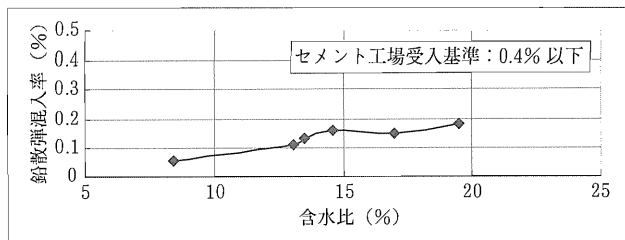


図-4 含水比と鉛散弾混入率

別後土壤の鉛散弾混入率の関係を示す。

(3) 品質管理と分別精度

現場で実施した品質管理項目の一例を表-9に示す。写真-6に収集された土壤と分別後の鉛散弾、クレー、コロスを示す。分別後の土壤側の鉛散弾混入率は平均0.2%以下となり(表-10)、分別後土壤は全てセメント工場でリサイクルされた。また鉛側では鉛含有率95%以上を確保でき、分別鉛散弾は全て精錬所で再生された。クレー、コロスもセメント工場で原料や燃料として使用された。

なお、木片や草根については場内に残置した。

表-9 品質管理項目(一例)

測定項目	頻度	対応
鉛溶出量	1回/50t	環境基準以下は場内残置
鉛含有量	1回/100t	—
鉛散弾混入率	1回/25t	0.2%以上は再分別

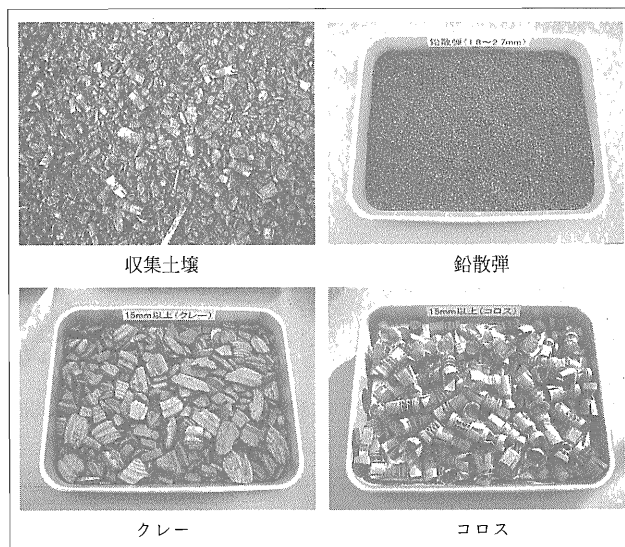


写真-6 収集土壤と分別物

表-10 鉛散弾混入率(分別後)

	平均	最大
土砂主体の鉛含有土壤	0.13%	0.33%
クレー、コロス主体の鉛含有土壤	0.02%	0.15%

(4) 作業環境

鉛散弾の分別回収作業時のプラント建屋内における作業環境を測定した結果を表-11に示す。

表-11 作業環境測定結果

	測定値 (第1評価値)	管理濃度
浮遊粉塵濃度	1.31	2.9
鉛及び化合物濃度	0.03	0.1

粉塵対策として設置した集塵機 (300 m³/min) および密閉循環式の風力選別機の効果により第1管理区分と総合評価され、作業環境管理が適切であることが確認された。

(5) 適用の成果

分別後の鉛散弾、鉛含有土壌、クレー、コロスは処理先の受入れ基準を満足する分別精度で全てリサイクルできた。この結果より、乾式による土壌の3mm以下の分級技術と非鉄金属である小径鉛散弾の分別技術を確立することができた。

4. おわりに

再資源化およびリサイクルできる商品を現場で製造するという観点で鉛散弾分別回収システムを構築し、適用工事では処理先の受入基準を満足するように鉛散弾、クレー、コロス、鉛含有土壌等の分別精度向上に努めた。

このような分別技術は廃棄物の分別、回収にも有効

であり、今後は不法投棄廃棄物の原状回復や最終処分場の延命化等に適用範囲を拡大し、近年顕在化している環境保全対策事業に役立てられればと考えている。

最後に、当システムの施工にあたり、ご協力頂いた埼玉県環境防災部の皆様に深く感謝の意を表します。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 神和夫：日本におけるガンガモ類及びワシ類の鉛汚染の実態解明に関する研究，第11回環境化学討論会講演要旨集，pp.6-7 (2002)
- 2) Chen, M., Daroub, S., Ma, L., Harris, W.G. and Cao, X.: Characterization of Lead in Soils of a Rifle/Pistol Shooting Range in Central Florida, *Soil & Sediment Contamination*, Vol. 11, No. 1, pp.1-17 (2002)

【筆者紹介】

吉岡 由郎 (よしおか よしろう)

株式会社鴻池組

大阪本店

土木技術部

機電グループ

部長



西村 良平 (にしむら りょうへい)

株式会社鴻池組

土木本部

技術統括部

課長



大山 将 (おおやま しょう)

株式会社鴻池組

技術研究所

土木・環境技術研究部門

研究員



建設機械用語集

- 建設機械関係業務者一人一冊必携の辞典。
- 建設機械関係基本用語約2000語(和・英)を収録。
- 建設機械の設計・製造・運転・整備・工事・営業等業務担当者用辞書として好適。

B5判 200頁 定価2,100円(消費税込)：送料600円

会員1,890円(消費税込)：送料600円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289