#### **特集>>>** 地球温暖化対策,環境対策

# オンサイトにて重金属汚染土壌の全量再生を実現する M・トロン

### 荒 崎 拓 也・伊 藤 圭二郎・石 神 大 輔

砒素などの重金属類を含む地盤を掘削する工事において、発生土の合理的な処理方法が求められており、近年、オンサイトで浄化処理する技術に注目が集まっている。筆者らは、従来の分級洗浄のみでは洗浄しきれない細粒分の土壌に対し、鉄粉を混合し、これに重金属等イオンを吸着させ、超電導磁石を用いた大容量の磁気分離により、鉄粉と共に重金属を回収して浄化する「M・トロン」を開発した。本技術を用いることにより、泥水シールド工事で発生する自然由来の砒素を含有する泥水や土砂、工場跡地における砒素や鉛といった人為的な汚染土壌に対し、オンサイトでの全量浄化を実現した。

キーワード:オンサイト、土壌洗浄、分級洗浄、土壌浄化、鉄粉、超電導磁石、磁気分離、重金属

#### 1. はじめに

2010年の土壌汚染対策法の改正以降,改正前には記述が曖昧であった自然由来の重金属等有害物質が含まれる土壌についても、基準を満たさなければ"汚染土壌"の扱いとされることとなった。自然由来の重金属類として代表的な砒素や鉛は、それ自体を分解・無害化することはできないことから、対策工事は掘削除去(場外処分)に頼らざるを得ず、汚染土壌が大量に発生する工事では、掘削土の場外処分費用が高騰するという課題があった。また、処分場の受入量の逼迫による工事遅延や、汚染土壌運搬ダンプによる環境影響、周辺住民とのリスクコミュニケーション不足など、様々な要因により工事が遅延することが多く、ときには工事の一時中断に至るケースもあった。

このような課題解決には、汚染土壌を工事エリアから外部に持ち出す必要のないオンサイト浄化技術として、水洗いによる分級工法が普及している。この工法では、まず汚染土壌を75μm程度の閾値で分級し、対象土壌を細粒分と粗粒分に分離する。分離する過程において砒素などの重金属類は細粒分に濃縮するので、相対的に重金属類の濃度が低下した粗粒分を浄化土として埋戻しに再利用する工法である。重金属類を含む細粒分は産業廃棄物として場外処分の対象となるが、対象土壌の細粒分の比率が高い場合、産業廃棄物として場外処分する量が多くなり、埋戻しに利用できる浄化土も少なくなることから、全量場外処分と比較し、工法適用によるコストメリットが生じないといっ

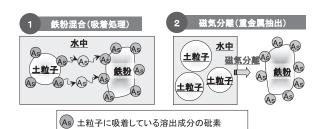
た課題があった。

筆者らは、これまでの水洗いによる分級工法における課題であった細粒分についても、浄化できる M・トロン(以下「本システム」という)を開発、実用化した。本システムは、分級後に泥水として回収される細粒分に鉄粉を混合し、重金属類を吸着させ、さらに超電導磁石を用いた磁気分離によりその鉄粉を回収することで浄化する技術である。鉄粉による重金属類の吸着や、磁石を用いた鉄粉回収は既知の技術ではあるが、本システムは超電導磁石の特長である広い範囲に発生する高磁場空間を生かし、大量の泥水中から確実かつ連続的に鉄粉を捕捉・回収することを実現した。また、本システムは、水洗いによる分級工法や鉄粉洗浄時に使用する水の循環利用が可能である。

## 2. 鉄粉洗浄磁気分離の仕組み

#### (1) 鉄粉洗浄技術の浄化原理

鉄粉洗浄技術の浄化原理を図—1に示す。この技術は、土を泥水化して浄化することを前提にしており、泥水に鉄粉(写真—1)を混合して砒素などの有害な重金属類を吸着させ、磁気分離で重金属類の吸着した鉄粉を泥水から分離する方法である。使用する0価の鉄粉が、水と反応して鉄粒子表面に水酸化鉄を生成し、土から溶出して水中に存在する砒酸イオン $(H_2AsO_4^-$ 等)や鉛イオン( $Pb^2$  +、Pb(OH) +)を水酸化鉄が電気的に吸着するものである 1)。ここで、砒酸イオンや鉛イオンは、土への吸着量と水中への溶出量



▲ 水中に溶出した砒素 ▲ 鉄粉に吸着した砒素図─ 1 鉄粉洗浄技術の原理



写真-1 鉄粉の外観(JFEミネラル社製)

に一定の平衡定数があり、水中の砒素や鉛の濃度が低下すれば、土から水中に溶出することになる。このため、鉄粉を泥水中に混合することで、土に吸着している砒酸イオンや鉛イオンが継続的に水中に溶出し、鉄粉に吸着させることができる。その後、磁気分離を行うことで、鉄粉とともに泥水中から砒素や鉛を分離、抽出することが可能となる。

# (2) 超電導磁石を用いた磁気分離による鉄粉回収 技術本システムの原理

#### (a) 本システムの磁気分離装置

本システムは**図**—2の装置概要に示すように,重 金属類を含む泥水に鉄粉を混合して撹拌する鉄粉混合 タンクと,泥水から鉄粉を磁力回収する磁気分離装置 の二つから構成される。装置は一体化させることによ り**写真**—2のように省スペースでの設置が可能である。

磁気分離装置は写真—3に示すように超電導磁石(最大磁場2.5テスラ)を用いた装置となっている。超電導磁石の広範かつ強力な磁場により鉄粉を高効率で回収できることが本システムの特長である。具体的なシステムとしては、詳細構造(図—2左)に示すように、超電導磁石の外側の強い磁場圏内に回転式メッシュベルト(図中の点線)を設置する。これにより、鋼製のメッシュベルト近傍に高勾配磁場が発生す



写真一2 本システムの外観

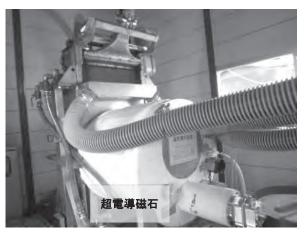
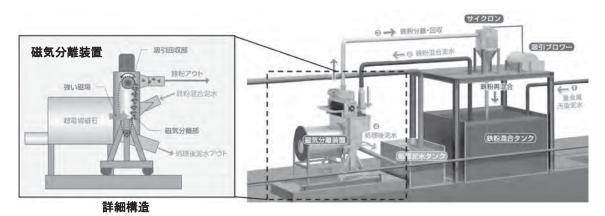


写真-3 本システムの磁気分離装置



図―2 本システムの装置概要

る。鉄粉を含む泥水をこのメッシュベルトに接触させると、メッシュベルトが鉄粉を捕捉する。さらにベルトが回転し、超電導磁石から離れ、磁場が弱まる吸引回収部に達すると後段の吸引ブロアにより鉄粉が吸引回収される。

#### (b) 磁場内での鉄粉の捕捉

超電導磁石による鉄粉磁気分離の大きな特長は、従来の永久磁石を用いたドラム式磁選機のように磁石本体で磁選するのではなく、広い範囲に発生する高磁場空間を活かして鋼製の回転式メッシュベルトを磁化させることにより、大量の泥水中から確実かつ連続的に鉄粉を捕捉・回収できることにある。

磁力線が並行して走る磁場内に、鋼製メッシュが存在すると磁力線がメッシュに集中する。高い磁力により磁化されたメッシュに鉄粉を含む泥水が通過すると、磁性の強い鉄粉はメッシュに捕捉され、一方で磁性の弱い土粒子はメッシュを素通りする。この鉄粉捕捉のイメージを図一3に示す。なお、本磁気分離方法により最大で150 m³/h の泥水連続処理を実現している。

#### (c) 鉄粉の繰り返し利用による環境負荷低減

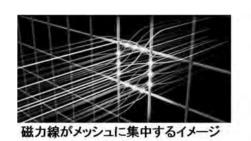
磁気分離装置により回収した鉄粉は鉄粉混合タンク に再度投入し、再利用される。ただし、鉄粉は使用す るたびに砒素を吸着する能力が減少する。吸着能力が 低下した鉄粉は砒素を含む産業廃棄物として処分されるが、実績ではその発生量は浄化対象とする細粒分の 乾燥重量に対して1wt%以下と極めて少なく、産業 廃棄物処理の観点で、環境負荷の低い工法であるとい える。

#### 3. 本システムの適用事例

#### (1) シールド工事への適用

砒素などの自然由来重金属類を含む地盤を泥水シールド工法で掘進する場合には、砒素含有泥水が発生する。砒素含有泥水は、通常の泥水シールドでは分級プラントにて、砂分とシルト・粘土分(脱水ケーキ)に分けられる。この分級された砂および脱水ケーキの分析値が環境基準値を超過していると、汚染土もしくは汚染汚泥として場外処分することとなり、コストが増大するほか、搬出処理先の受入れ容量の逼迫により工事自体の遅延を引き起こす恐れがある。こうした背景から、図―4に示すように、泥水式シールド工事の泥水処理プラントに鉄粉洗浄磁気分離装置本システムを導入し、オンサイトにて泥水中の砒素を浄化できることを茨城県内の泥水シールド工事(φ2.3 m)で実証した。

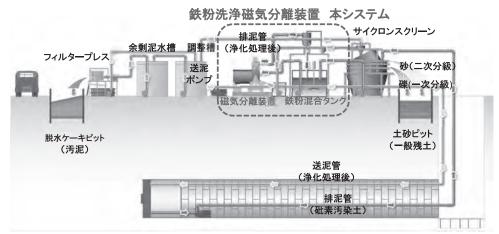
泥水シールド工事での本システムによる処理前およ



磁力線に沿って鉄粉がメッシュに引き

磁力線に沿って鉄粉がメッシュに引き 寄せられ捕捉されるイメージ

図─3 磁場内でのメッシュによる鉄粉捕捉のイメージ



図─4 泥水式シールド丁事における木システムの適用概要

び処理後の土壌溶出試験結果を表―1に示す。処理 前の砒素濃度は基準値を超過している場合がほとんど であるが、処理後には基準値以下に浄化できている結 果が得られた。このように、鉄粉洗浄技術である本シ ステムにより砒素を吸着・分離することで、砒素含有 泥水を、シールドの掘進速度に合わせて連続的に浄化

表一1 砒素の土壌溶出試験結果

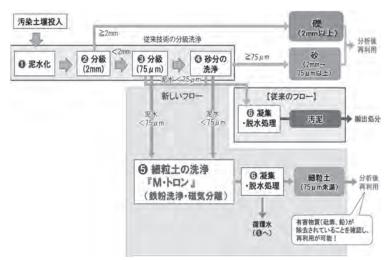
	泥水中の土の土壌溶出試験	
実験日数(日)	砒素濃度(mg/L)	
	処理前	処理後
1	0.021	0.001
2	0.008	0.001
3	0.045	0.001
4	0.036	0.005
5	0.033	0.007
6	0.045	0.008
7	0.027	0.006
基準値	0.01	

処理することが可能となった。

#### (2) 工場跡地における汚染土壌浄化工事への適用

シールド工事以外では、工場跡地における人為的な 砒素と鉛の汚染土壌について、これまでの水洗いによる分級工法では浄化しきれない細粒分に対し、本システムを適用することで、細粒分を含む全ての土砂の浄化を実現した<sup>2)</sup>。ここでは、現場内から掘削した汚染土壌約7,000 m³を対象として、時間当たり150 m³の泥水処理能力のある本システムを付帯した土壌洗浄プラントにより浄化を行った。その結果、約3ヵ月間で 細粒分を含む掘削土すべてを鉛と砒素について基準値以下まで浄化し、全量を埋戻し土として再利用することができた。

前処理の分級洗浄から本システムによる全量再利用の一連の全体処理フローを図—5(分級洗浄プラントから発生する泥水処理について、従来の分級洗浄におけるフローは「従来のフロー」、本システム適用の場



図―5 分級洗浄及び本システムの全体処理フロー

表一2 本システムによる効果のまとめ

	汚染土の処理・処分に関する 場外処分と再利用(埋戻し)の質量割合	汚染土掘削場所への埋戻し土に関する 購入土と洗浄土の体積割合	搬出車両
全て場外処分 (敷地内で処理しない)	場外処分 場外処分 砂礫 細粒土	山砂など購入土	極めて多い
分級洗浄	埋戻し 場外処分 砂礫 細粒土(※1) ※1 分級洗浄後の細粒土の含水比が50%と仮定	洗浄土	ψ
分級+本システム	埋戻し 埋戻し 場外処分 砂礫 鉄粉 (※2) 細粒土 ※2 細粒土乾燥質量に対して約0.3wt%	洗浄土	極めて少ない

合は「新しいフロー」に記載)に示す。

本工事における本システムによる効果を**表**―2に まとめる。全ての汚染土壌を敷地外の土壌浄化施設に て処理する場合と比べると、これまでの水洗いによる 分級工法であっても大幅に掘削土の有効利用が可能で ある。しかしながら、当該分級工法では、細粒分は場 外処分となることから、コストメリットの観点で、細 粒分の割合が少ない場合のみに適用が限定されてい た。また、計画時にボーリングデータなどから対象土 壌の細粒分の割合が低いと想定されていたとしても, 実際の細粒分の割合が計画より多い場合には、実施の 段階で場外処分量が増大し、想定外の処理コストの高 騰や、搬出車両の増加により周辺住民の生活環境に影 響を与えるというリスクがあった。こういった課題に 対して、細粒分も含め掘削土すべてを浄化し、埋め戻 しに利用できる本システムの実用化により、 分級工法 の適用範囲が拡大され、また、仮に細粒分の割合が計 画より多かった場合でも、それによる前述のリスクを 低減できるようになった。

#### 4. おわりに

今後予定されている大規模事業において、自然由来 重金属を含む建設発生土が大量に発生する工事には、 オンサイトにて連続的に浄化処理ができる技術のニー ズがある。これに対して、鉄粉に重金属を吸着させ、 超電導磁石を用いた磁気分離により鉄粉を回収して浄 化する本システム「M・トロン」を開発・検証し、今 後、自然由来重金属を含む地盤におけるシールド工事 や,工場跡地等の浄化工事において,積極的に本システムを提案していく予定である。また,現状,本システムの適用対象物質が,砒素,鉛,カドミウム,フッ素に限定されることから,対象物質をさらに増やすべく改良を重ね,適用範囲の拡大を図る。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 石神大輔・押田裕之・渡辺哲哉・伊藤久裕・澤渡祥 (2014): 鉄粉を 用いた自然由来重金属の処理検討, 第 20 回 地下水・土壌汚染とその 防止対策に関する研究集会, pp.589 ~ 593.
- 2) 伊藤圭二郎・川端淳一・伊藤康則・辻本宏・高柳克也 (2016): 鉛・砒素汚染土壌の分級洗浄と鉄粉洗浄磁気分離による浄化事例, 第22回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.555 ~ 559.



[筆者紹介] 荒崎 拓也 (あらさき たくや) 鹿島建設㈱ 環境本部 環境リノベーショングループ 課長代理



伊藤 圭二郎 (いとう けいじろう) 鹿島建設㈱ 技術研究所 岩盤・地下水グループ 上席研究員



石神 大輔 (いしがみ だいすけ) 鹿島建設㈱ 技術研究所 岩盤・地下水グループ 研究員