

自然的原因の低濃度重金属汚染土壌の 措置対策資料

2007（平成19）年7月



自然的原因の低濃度¹重金属汚染土壌の措置対策資料

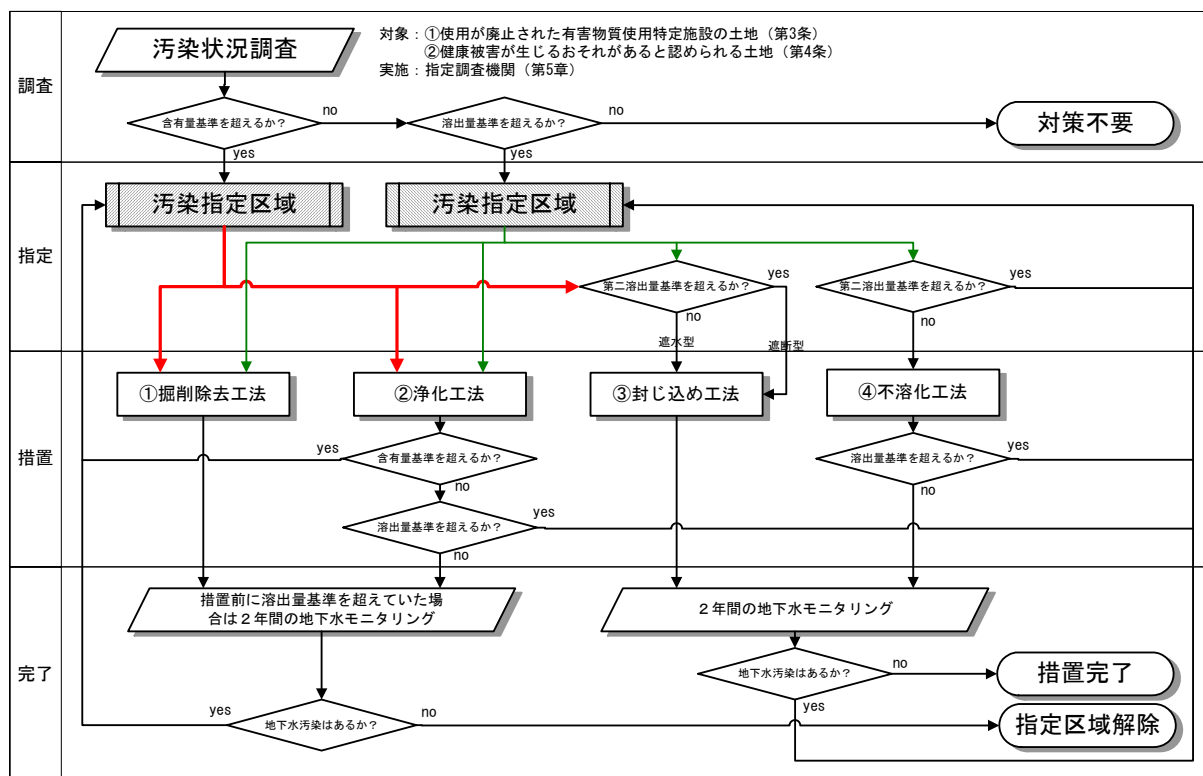
1. 法的取り扱い

A. 汚染土壌の措置について

土壌汚染対策法では、直接摂取によるリスクと地下水等の摂取によるリスクの観点から二つの指定基準概念を導入し、前者を土壌含有量基準（以下、含有量基準）、後者を土壌溶出量基準（以下、溶出量基準）と定義している。第一種特定有害物質（揮発性有機化合物）と第三種特定有害物質（農薬等）については溶出量基準、第二種特定有害物質（重金属等）については両基準が指定されている。

特定有害物質の区分と含有量基準・溶出量基準および第二溶出量基準に適合か不適合かにより、適用できる措置対策と完了までの手順概要を図表1に示す。

土壌汚染対策法に基づく調査から措置フロー



含有量基準は第二特定有害物質（重金属等）のみ

図表1 土壌汚染対策法にもとづく調査から完了までの作業フロー

土壌汚染対策法施行規則では両基準および第二溶出量基準に適合か不適合によって、適用する措置対策が決められている（図表2）。

¹重金属等（第二種特定有害物質）の溶出量基準に不適合の汚染土壌で、第二溶出量基準および含有量基準に適合するものをいう。

特定有害物質 適用する措置	第一種特定有害物質 揮発性有機化合物		第二種特定有害物質 重金属等			第三種特定有害物質 農薬等	
	第二溶出量基準		第二溶出量基準		含有量基準	第二溶出量基準	
	適合	不適合	適合	不適合	不適合	適合	不適合
舗装・盛土・立入禁止	×	×	×	×	△	×	×
掘削除去（土壌入換え）	○	◎	○	○	◎	○	◎
原位置浄化・掘削浄化	○	○	○	○	○	○	○
原位置不溶化・掘削不溶化	×	×	△	×	×	×	×
原位置封じ込め	◎	×	◎	◎※	○	◎	×
遮水工封じ込め	○	×	○	○※	○	○	×
遮断工封じ込め	×	×	○	○	○	○	◎

◎：原則として命ずる措置

○：土地所有者と汚染原因者の双方が希望する場合に命ずることができる措置

△：土地所有者が希望した場合に命ずることができる措置

×：適用不可能な措置

※：不溶化により第二溶出量基準に適合の上で実施

■：汚染指定区域の解除に至る措置対策

図表2 指定基準にもとづいた措置対策の適用

B. 自然的原因の汚染土壌

通達「土壌汚染対策法の施行について」（環水土第20号、平成15年2月4日）の（別紙1）「土壌中の特定有害物質が自然的原因によるものかどうかの判定方法」2項では、自然的原因の汚染土壌の取り扱いについて次のように指導している。

「自然的原因によるものであると判断され、法の適用対象とならない場合にも、指定基準に適合しない状態にある土壌が当該土地の外に搬出され、不適切に処分等されることは適当ではなく、法にもとづく措置とは別に、当該土壌にかかわる適切な対応が図られることが望ましい。（中略）また、土壌含有量基準に適合しない場合には、自然的原因によるものであっても、都道府県においてその情報を記録して整理しておくとともに、現状のままでは人の健康にかかわる被害が生ずるおそれがある場合には、都道府県は必要に応じ、自らの負担で盛土等の法に規定する直接摂取の観点からの措置を参考にして、適切な措置を実施することとされたい。」

通達を要約すれば下記の3点である。

- ① 建設工事にもなう自然的原因の重金属汚染発生土（ズリ）は、土壌汚染対策法の適用外である。
- ② 土壌汚染対策法にもとづく措置とは別に、適切な対応が図られることが望ましい。
- ③ 土壌含有量基準に適合しない場合には、法に規定する直接摂取の観点からの措置を参考にして適切な措置を実施すること。

2. 措置対策の比較

汚染土壌の大半を占める重金属等には二つの基準があるため、含有量と溶出量の濃度分布状況や対象土壌量にもとづいた、適切な措置対策の選択や有効な組み合わせと総合的なコスト評価が必要である。

対策工法は原理と施工と両方の良否が問われる。原理が正しくなければ措置対策として問題外であるが、原理が正しくても施工方法や管理技術の完成度が高くないと目標品質は得られない。原理と施工と共に完成され実績を積んでいる対策工法は、市場で宣伝されている割には意外と少ない。

わが国で商品化されて市場にて実績をもっている土壌汚染の改良工法に関して、工法概要、適用、工費、工期、効果・特徴などについての総括的比較表を示す（図表3）。

また、重金属の溶出量を抑制する不溶化あるいは固定化工法についても、工法概要、適用、工費、工期、効果・特徴などについての比較総括表を示す（図表4）。

対策区分	封じ込め		不溶化			浄化						掘削除去	
処理場所	原位置・掘削後		原位置・掘削後			原位置・掘削後						処分場	
工法	遮水工	遮断工	化学的不溶化	セメント 固化法	地化学的 固定化法	揚水抽出法	電気分解法	熱処理法	掘削洗浄法 原位置洗浄法	バイオ処理法	薬剤処理法	掘削除去	
工法の概要	第二溶出量基準適合の汚染土壌を遮水壁で封じ込め	厚さ35cm以上の鉄筋コンクリート遮断壁で汚染土壌を封じ込め	塩化第二鉄等の薬剤を利用して、化学的に無害化	セメントによる固体化	新結晶鉱物中に特定有害物質を固定化	ボーリング孔利用の水の強制循環抽出、	電流により電気分解させ金属イオンを回収	加熱して揮発あるいは燃焼させ、回収または空中放散	分級洗浄あるいは超高压洗浄水により特定有害物質を除去	異地性あるいは現地性の微生物の代謝機能を利用して分解	鉄粉・過マンガン酸カリなどによる還元や酸化分解	中間処理を経て処分場処理、一部セメント資源化処理	
適用	第一種特定有害物質	△第二溶出量基準適合のみ	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	
	第二種特定有害物質	△第二溶出量基準適合のみ	○	△第二溶出量基準適合のみ △第二溶出量基準不適合は封じ込めと融合 ×含有量基準を超える場合は不適			○	○	△ 揮発性のもの に限る	○	×	×	○
	第三種特定有害物質	△第二溶出量基準適合のみ	○	×	×	○	×	○	○	○	○	○	
長期的な安定性	△封じ込め構造物の劣化監視が必要		△再溶出の可能性あり	△再溶出の可能性あり	○地化学的に安定	○特定有害物質が減少する △結合度の高い重金属等は適用が難しい	○特定有害物質が減少する	○特定有害物質が減少する	○特定有害物質が減少する ×粘土質の場合は廃棄物が多くなる	◎特定有害物質が減少、やがて除去される	◎特定有害物質が減少、やがて除去される	◎特定有害物質が除去される	
工期 (例 3,000m ³)	○数ヶ月		◎1ヶ月以内	◎1ヶ月以内	◎1ヶ月程度	×数ヶ月～1年			△1～数ヶ月	×数ヶ月～数年		◎1ヶ月以内	
工費 1m ³ 当たり	△比較的高い 2～5万円		◎安い 1万円以下	◎安い 1万円以下	○比較的安い 1.5万円前後	△比較的高い 2.0～4万円			△算定条件が難しい			×高い 4～8万円	
総合的特徴	△土地の再利用がきわめて制限される ×近隣住民の理解が得難い		△長期的な安定に疑問 △複合汚染では薬剤が複数	△長期的な安定に疑問	○長期的に安定 ○第二溶出量以下や自然的原因の汚染土壌改良に最適	△重金含有量の除去率は30～70%で、数10%以上残留する ×浄化後に残留した重金属が再溶出し、溶出量基準を超える事例がある △各工法の完成度の吟味と対象物質による適応条件の慎重検討が必要 △工法によっては非常に長期間を要する			×適用の場や条件を誤ると汚染を拡散する			×汚染土壌の受け入れ施設少ない ×不法投棄等による汚染拡散の可能性	

※①一般的概要の比較で対象土量や施工条件等によって異なる

②研究開発される新規工法については技術の完成度や適応条件等について複数の専門家の意見を十分聞くことが重要

図表3 汚染土壌のおもな対策工法比較

1	工法名・使用物質	対象物質	原理・効果	特徴	概算工費	総合評価		
物理的固定化法	セメント固定法 (高炉セメント)	重金属一般	セメント固化にともなう固体化	普通ポルトランドセメントより安価だが、改良後の初期強度が低い	安価 1万円以下/m ³	① 高アルカリ土となり植栽が制限される ② pH値が10を超えると砒素・鉛など再溶出する ③ 強度が上がりすぎて重機工作が困難		
	セメント固定法 (普通セメント)			高炉セメントと比較してpH値が高い				
	ガラス固定法	重金属類、ダイオキシン類、PCB、放射性廃棄物等	超高電圧流で汚染土壌を溶融・ガラス固化体にする	① 有機・無機の汚染物質が混在する複合汚染にも対応可能 ② 処理後はガラス固化体となり減容効果が大きい(約65%)	高い 5万円以上/m ³	① 高エネルギーを要しながら溶融固化効果は局部的で、実績きわめて少ない ② 実証試験段階で商業実用化していない ③ 固化すると土地の再利用が制限される		
地化学的固定化法	水熱反応固定法	重金属一般	ケイ酸カルシウム結晶中に固定化	中温度(120~250℃)および中高压で、ケイ酸カルシウム結晶中に固定化	比較的安価 1~1.5万円/m ³	① 土壌質が粒状個体に変化する ② 常設処理装置までの移動運搬費が必要 ③ オンサイト処理は装置小型化が課題		
	酸化マグネシウム工法		吸着機能により固定化	吸着機能のみで固定化効果が比較的小さい			安価 1万円前後/m ³	① 10年の施工歴と各地公共事業の実績をもつ ② 処理後も物理的・化学的に土壌の特性を有するため再利用可能 ③ シュベルトマナイトの安定的な供給と価格が今後の課題
	シーリングソイル工法		珪酸塩鉱物中に固定化	①各地で産する天然ゼオライトを利用 ②珪酸塩鉱物が形成できれば長期安定的				
	シュベルトマナイト工法		シュベルトマナイト中に固定化	添加量が微量で不溶化効果が大きい				
化学的不溶化法	硫化ナトリウム	カドミウム、鉛、水銀	難溶性の硫化物を生成	悪臭をとまなう硫化水素が発生する	安価 1万円以下/m ³	① 複合汚染の場合、複数の薬品による相互反応に十分留意する ② ほかの物質の溶解性を増加させる場合がある ③ 化学反応により、分離・分解などほかの浄化工法が利用できない場合がある ④ 化学反応が可逆的に進行して再溶出する場合がある		
	硫酸第一鉄	六価クロム	無毒性の三価クロムに還元	酸化反応により六価クロムに戻る場合がある				
		シアン	難溶性塩を生成	重金属との錯塩を形成している場合は適用が困難				
	次亜塩素酸ナトリウム	シアン	酸化分解					
	硫酸第二鉄	砒素	難溶性の砒酸鉄を生成	砒酸鉄生成後に硫酸イオンが大量に残留する				
	塩化第二鉄	砒素	難溶性の砒酸鉄を生成	砒酸鉄生成後に塩素イオンが大量に残留する				
キレート剤	重金属一般	キレート化合物を形成し不溶化	化学反応が瞬時に起こり、取り扱いが難しい	高い 3万円程度/m ³	① 薬剤が高価なため処理費が高くなる ② 効果のパラツキが大きい			

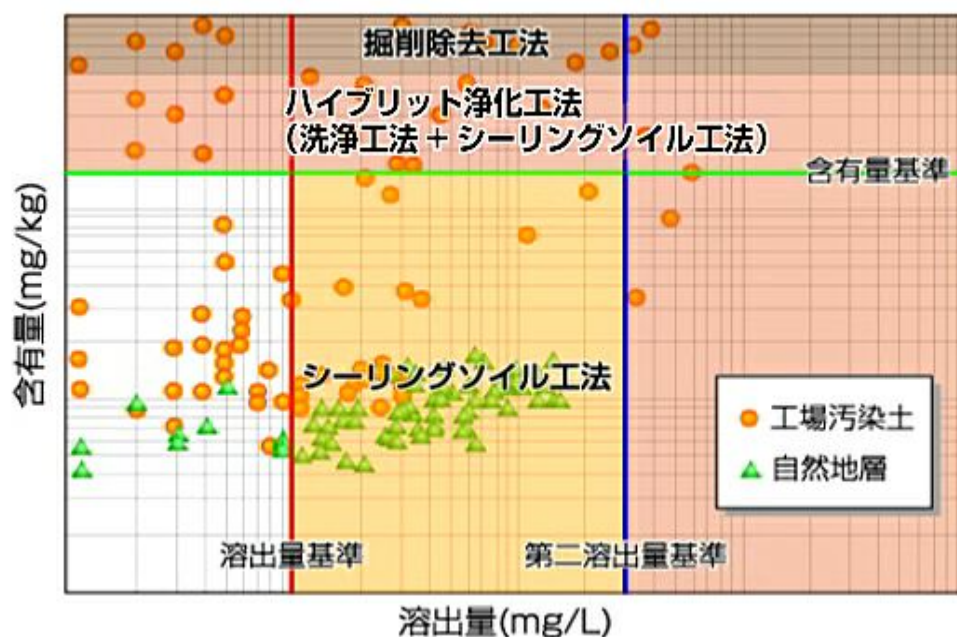
※概算工費は3.000m³程度を対象としているがサイト条件や汚染度合いによって異なる

図表4 重金属等の不溶化・固定化工法の比較表

3. 効率的な重金属汚染土壌の改良措置

A. 汚染濃度による工法選択

重金属等（第二種特定有害物質）を含む自然的原因の汚染土壌の措置対策は、一括して工法を決定すると必要以上に施工費の上昇を招くことになる。含有量と溶出量にもとづいて図表5のように適切な工法を組み合わせることが、コスト効果と品質確保にとっても重要なことである。



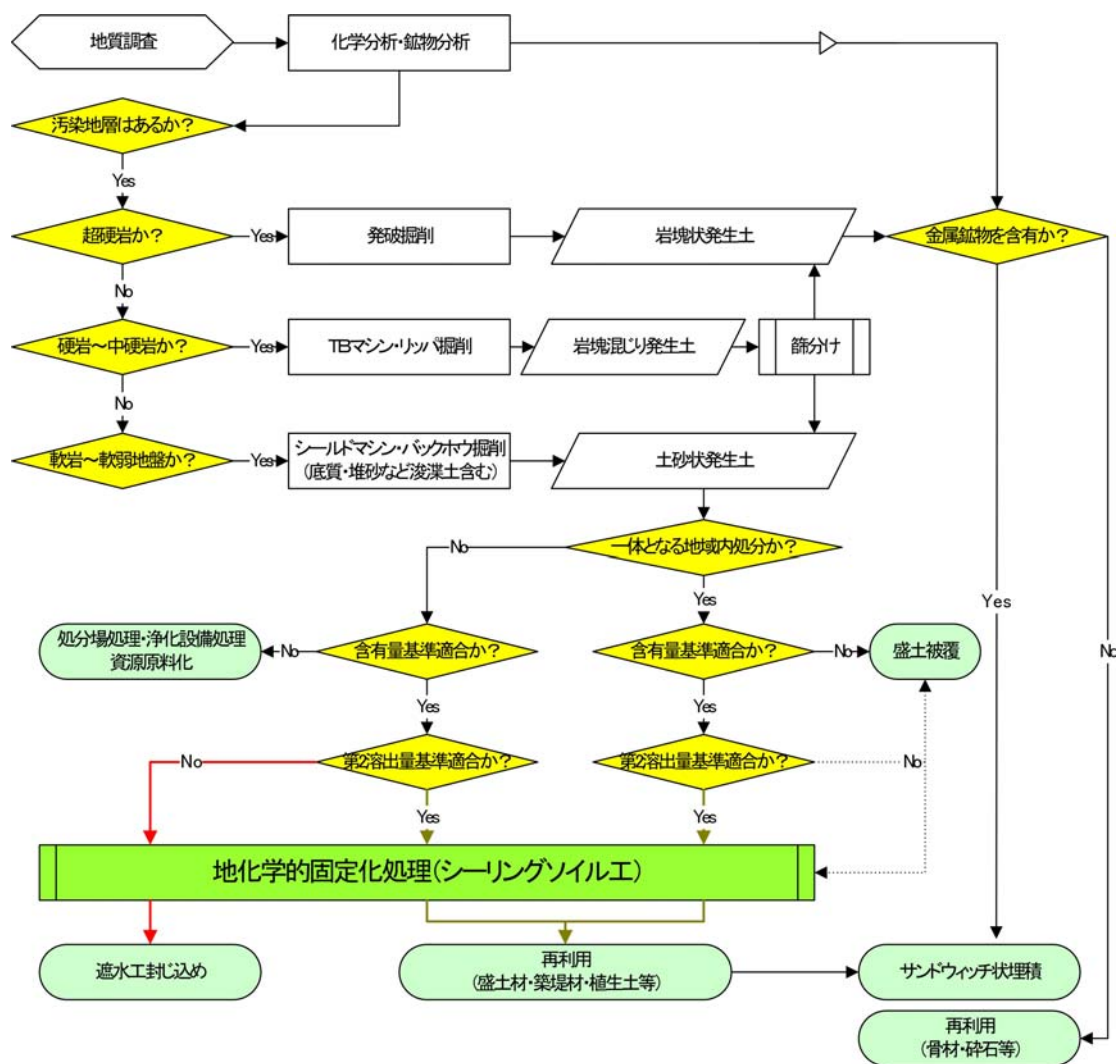
図表5 含有量と溶出量を考慮した効率的な工法

- ① 低濃度汚染土壌（含有量基準および第二溶出量基準適合で溶出量基準不適合）はオンサイトにおいて重金属を地化学的固定化（シーリングソイル工法）し、重金属溶出量を基準適合まで改良して埋土・盛土・植生土等に再利用する。
- ② 中濃度汚染土壌（含有量基準不適合で第二溶出量基準不適合）はオンサイトにおける洗浄工法により含有量と溶出量を基準適合まで低減する。さらに、重金属を地化学的固定化して将来にわたって残留する重金属の再溶出を抑止し、埋土・盛土・植生土等に再利用する。
- ③ 高濃度汚染土壌（含有量が含有量基準の数倍以上）は中間処理を経て最終処分場処理となるが、処理費がもっとも高額のため詳細調査およびオンサイト分析によって最小限に限って対象とする。

B. 処理方法による工法選択

発生土の最終的な処分方法を考慮した場合の適法適切な工法選択フローを提案する（図表6）。自然的原因の低濃度重金属汚染土壌については土壌汚染対策法の適用外であり、適切な処理を施し基準適合であれば「建設発生土利用技術マニュアル」（（財）土木研究センター）にもとづいて、公共用地で将来形質が変更される可能性が少ない土地での再利用が可能である。

- ① 盛土・築堤材・植生土などとして場内外で再利用する場合は、改良品質が高く処理後に長期安定性が検証されているシーリングソイル工法による地化学的固定化処理が望ましい。
- ② 場内あるいは近隣に埋め戻す場合や比較的長期に仮置する場合は、近隣環境を保全するためやはりシーリングソイル工法による地化学的固定化処理が望ましい。
- ③ 場外の残土処分場あるいは最終処分場に搬出処理する場合は、当該地の環境行政の指導と相談を得て可能ならば化学的不溶化処理が廉価である。



図表6 自然的原因の重金属汚染発生土の処理フロー

4. 重金属汚染発生土（ズリ）の性状と処分対策

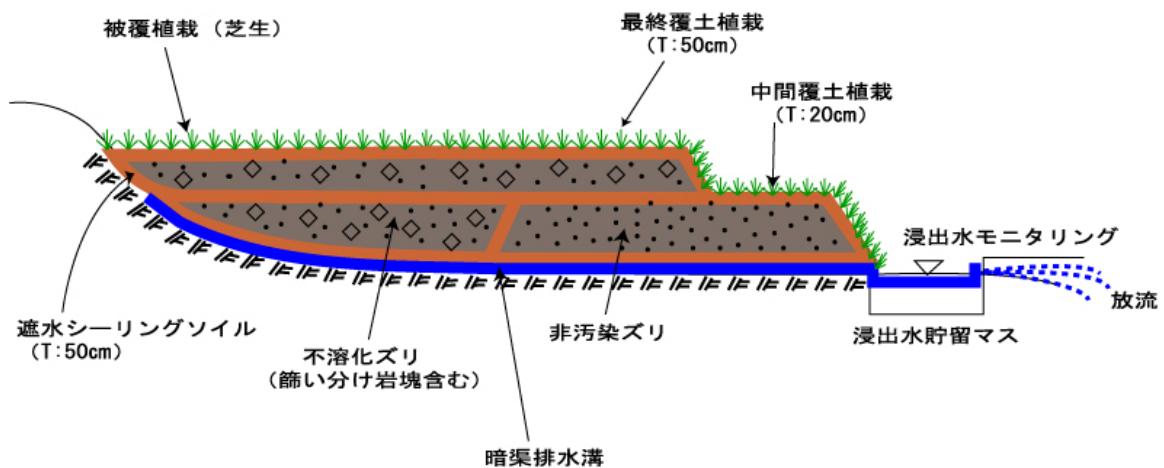
トンネルマシンあるいはシールドマシン等で掘削した場合の発生土（ズリ）は軟弱地盤あるいは軟岩では土砂状に、中硬岩では礫混じり土砂状になる。また発破掘削による硬岩では岩塊状となるなど、岩塊の大きさや発生土（ズリ）の性状が大きく異なることが特徴である。したがって、発生土（ズリ）の性状に合致した処分対策が必要となる。

土砂状発生土（ズリ）：水（降雨・地下水）や空気と接触する被表面積が大きいため、含まれる重金属の酸化・溶出反応が促進され早期に汚染発生源となる。したがって土砂に含まれる重金属を固定化し溶出量を基準適合まで改良する。

岩塊状発生土（ズリ）：岩塊あるいは礫に含有する重金属は早期に溶出することはないが、長期的な風化によって重金属が溶出し汚染源となる可能性がある。したがって遮水性素材で覆土あるいは包埋することによって、水や空気との接触機会を停止させ溶出を抑制する。

上記の視点にもとづいてもっとも効率的な処分対策を提案する。

- ① 15～20cm メッシュのスケルトンにて発生土（ズリ）の篩い分け作業を事前におこない、土砂状発生土（ズリ）と礫状発生土（ズリ）とを分ける。
- ② 土砂状発生土（ズリ）は、天然鉱物系改良材がもつ重金属の吸着機能・イオン交換機能を利用したシーリングソイル工法（添付資料 1 参照）により、重金属を地化学的に固定化し溶出を抑制する。
- ③ 篩い分けした径 15～20cm 以上の岩塊状発生土（ズリ）は、「土壤汚染にかかわる環境基準（環告 46 号）」に示される公定法分析の対象物ではない。長期間の風化により含まれる重金属が酸化溶出する可能性があるため、地化学的固定化処理した土砂状発生土（ズリ）と混合して埋め戻し、シーリングソイル工法処理した粘土による表面遮水工を施す（図表 7 参照）。表面は芝等により被覆植栽処理する。



図表 7 処理土壌の盛土例

なお、岩塊～礫状の発生土（ズリ）を含まない土砂状の場合は、事前の篩分けおよび処理後の混合は不用となる。

5. シーリングソイル工法

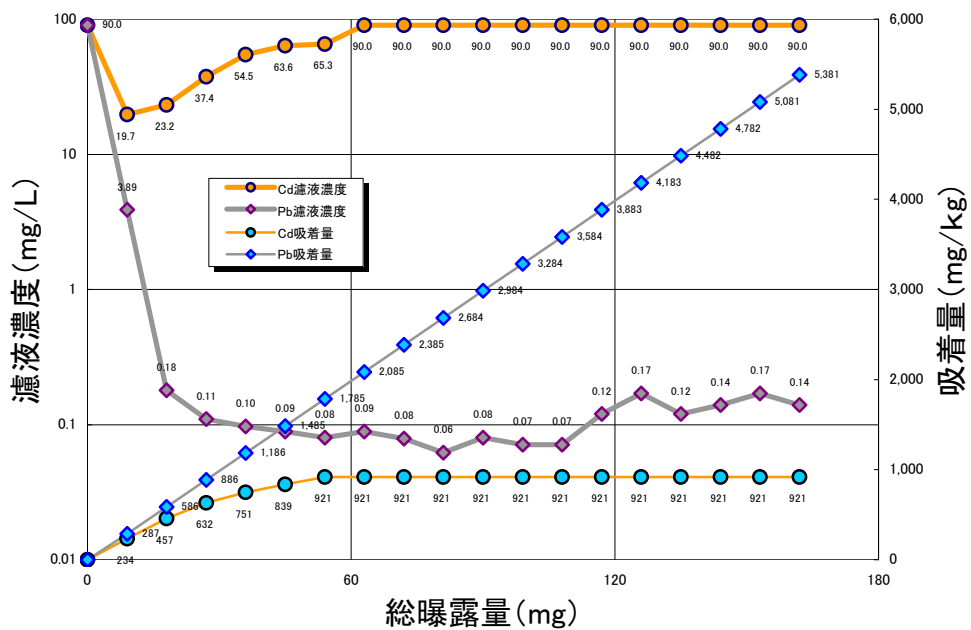
重金属等汚染土壌の改良を目的として湊 秀雄博士（東京大学名誉教授）ほかが開発した、天然鉱物資源を改良材とする地化学的固定化工法である。

A. 科学的原理

本工法は、天然鉱物系改良材の機能と反応による2段階の固定化作用により成立する。

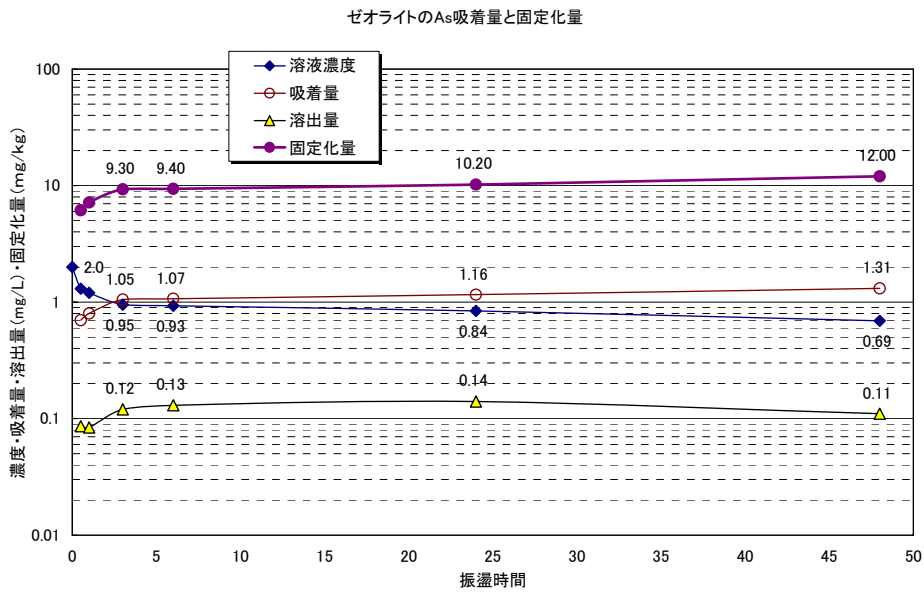
①短期的固定化

天然ゼオライトがもつ吸着機能・陽イオン交換機能により、重金属の速やかな固定化を図る。1kgのゼオライトは、カラム浸透試験によると陽イオンのカドミウムで900mg/kg、鉛で5,000mg/kgを超える量を吸着する（図表8）。



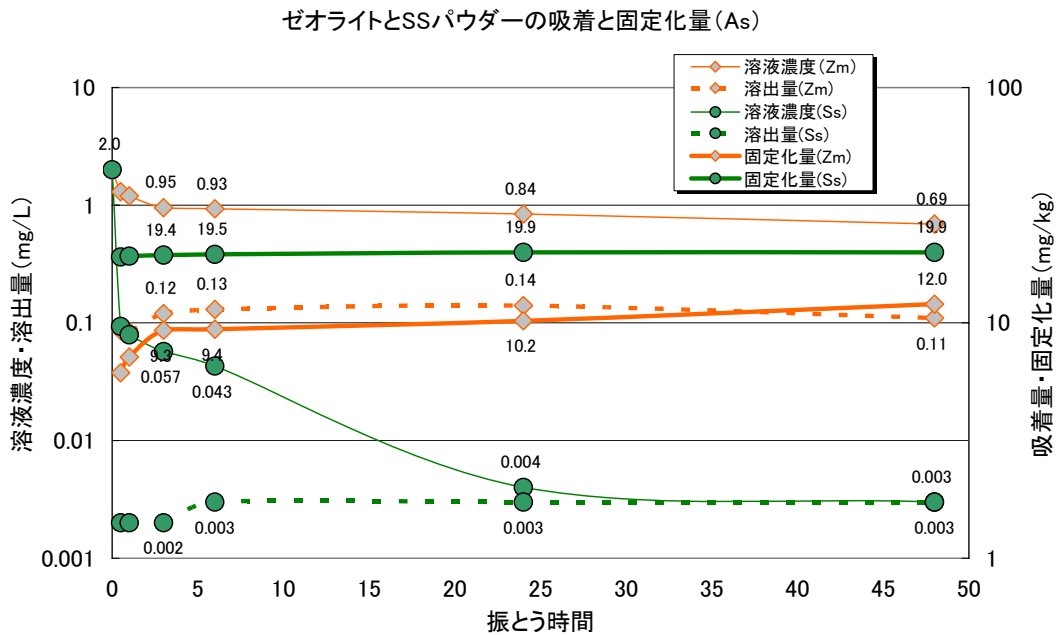
図表8 天然ゼオライトの陽イオン吸着特性

陰イオンの砒素でも、振盪試験の結果ではゼオライト単体で12mg/kgの固定化量（吸着量－溶出量）を有する（図表9）。



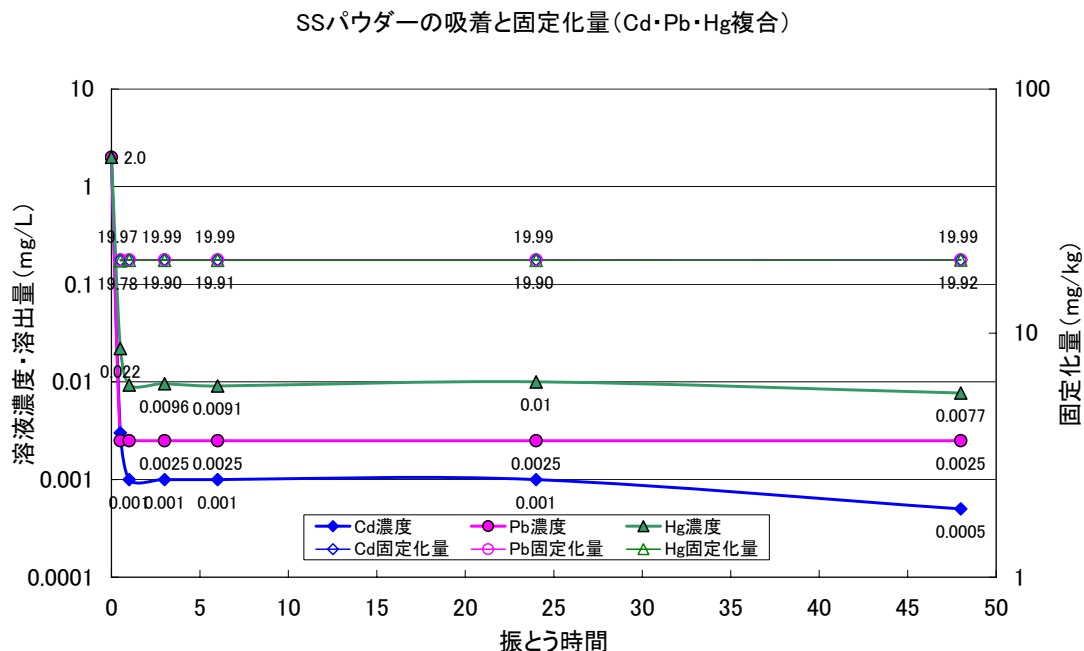
図表9 天然ゼオライトの砒素固定化特性

シーリングソイル工法は、火山性風化粘性土に比較的多く含まれるアロフェンやイモゴライトの重金属イオンに対する吸着機能を利用している。シーリングソイル工法にもちいるゼオライト・火山性風化粘性土・苦土消石灰等の天然鉱物系改良材を混合したSSパウダーでは、砒素の吸着量と固定化量はゼオライト単体に比較して大幅に増加する(図表10)。



図表10 ゼオライト (Zm) とSSパウダー (Ss) の砒素固定化量

また SS パウダーは、鉛・カドミウム・水銀の複合汚染の場合でも各イオンに対して速やかな吸着機能を発揮する（図表 11）。

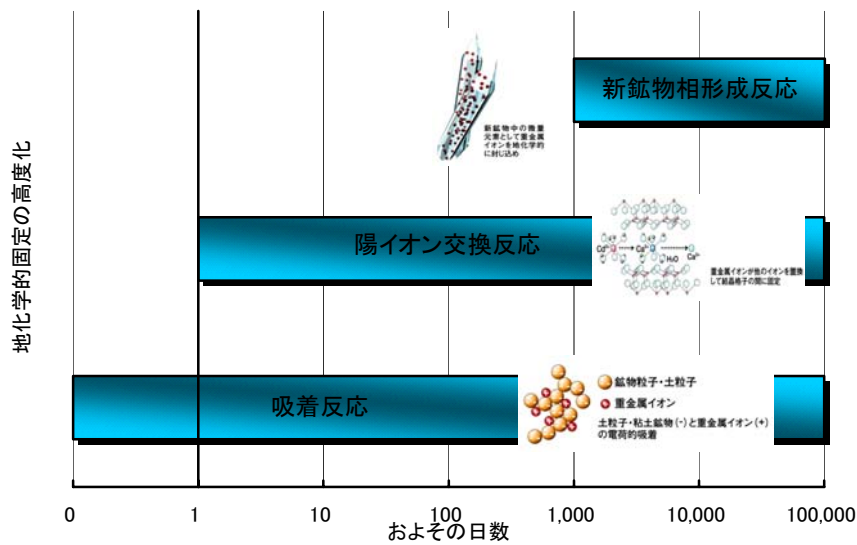


図表 11 SS パウダーによる重金属イオンの吸着と固定化

六価クロムおよび陰イオンの砒素については、前処理材として必要最小限の硫酸鉄等を加えて吸着・固定化の効率化を図る場合があります。また、効果的な吸着機能・陽イオン交換機能を図るため、微量の消石灰やMgの多い苦土消石灰などの炭酸塩鉱物を加えることもある。

②長期的固定化

風化粘性土に含まれる珪酸および鉄・アルミナ等の含水性非晶質物、アロフェンやイモゴライトなど低結晶性の粘土鉱物が、長期間を経てやがて高度に結晶化するともなって、新鉱物中に重金属等を微量成分として強固に固定化する（図表 12）。



図表 12 固定化の概念図

B. 特徴と証明された高い完成度

シーリングソイルリ法は、おもに下記のような特徴を持っている。

- ① 天然鉱物系改良材がもつイオン吸着機能やイオン交換機能などと反応を利用するため、低負荷型の改良工法である。
- ② 対象土量・改良ヤード・工期などの条件に応じて、もっとも適切な機材を用いて施工するため施工上の制約はない。
- ③ 改良材により対象土量が 10%程度増量する。
- ④ 施工費用は対象土量・ヤード面積・工期等の条件によって異なるが、1m³ 当たり 10,000～15,000 円/m³ である。

シーリングソイル工法は重金属の溶出を抑制ないし停止する技術であるため、含有量基準を越える汚染土壌には不適である。しかしながら重金属汚染土壌の中でも大半を占める、含有量基準以下でかつ第二溶出量基準以下の低濃度汚染土壌や、土壌汚染対策法適用外の自然的原因の汚染土壌に対してコスト的にも優位でかつ有効な措置である。

県営C射撃場の鉛汚染土壌の対策にかかわり、不溶化工法の効果検証のため実施された公開試験結果を図表 13 に示す。均質に調整された鉛汚染土壌（含有量 4,900mg/kg、溶出量 1.60mg/L）が分配され、各工法の技術者が改良材を添加混合し県委託者が公定法分析をおこなった結果である。溶出量が原汚染土壌より低減したのも、溶出量基準(0.01mg/L)に適合したのはシーリングソイル工法による改良 3 試料と合わせて僅か 2 工法 4 改良試料であった。

適用条件の不適切からか中にはむしろ溶出を促進させ原土壌の 100 倍以上も溶出量が増加した工法まであった。この公開試験の結果は、不溶化工法の中には全く未成熟なものがある一方で、シーリングソイル工法は技術的完成度がきわめて高いことを実証されている。

工法区分	剤品名・商標名	添加量 (重量%)	溶出量 (mg/l)
液体キレート系	E	0.01	0.67
		0.05	0.99
		0.10	1.12
		0.2	1.3
		0.5	2.2
		2.0	2.5
	O	1.0	1.2
		5.0	0.2
		10.0	0.24
液体キレート+化学的固定化系	E+塩化第二鉄	0.10	310.00
		0.20	260.00
		0.50	200.00
化学的固定化系	硫化ナトリウム	0.1	3.2
		0.5	14
		1.0	26
	G	A	<0.005
		B	0.023
地化学的固定化系	シーリングソイル工法	A	<0.005
		B	<0.005
		C	<0.005

図表 13 射撃場の高濃度鉛汚染土壌の固定化公開試験結果

不溶化処理した重金属汚染土壌の安定化を評価するため、(社) 土環センター・重金属不溶化検討部会が各社・各工法で不溶化処理した土壌を収集し、pH 値を変化させて溶出量分析をおこなった。

シーリングソイル工法による改良試料 (No. 30) は、公定法 (環境省告示第 46 号、pH5.8~6.3) の溶出試験では 0.006mg/L、硫酸添加 (酸性環境、酸性雨に曝される場合を想定) の溶出試験では 0.006mg/L、消石灰添加 (アルカリ性環境、セメント構造と接する場合を想定) の溶出試験では 0.005mg/L であった (図表 14、橋本・王、2004)。不溶化処理後 2 年を経た改良土壌が、公定法ではもとより酸性環境下でもアルカリ性環境下でも溶出量は大きくなり、本工法の経年的な安定性が証明されている。

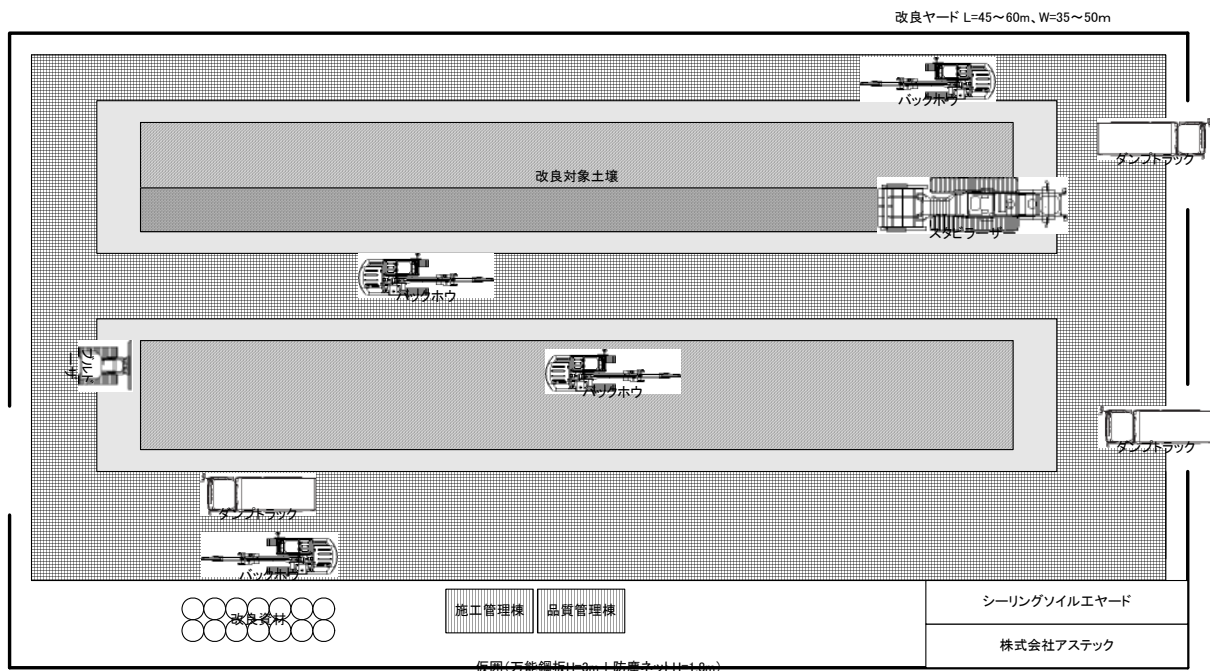
	不溶処理法	分析項目	単位	硫酸添加 溶出試験I	環境告示 第16号試験	消石灰添加 溶出試験I	不溶処理土壌	
							溶出量 (µg/L)	含有量 (µg/kg)
2	鉄系化合物 現場不溶処理 2009年	pH	-	7.5	7.4	10.1		
		CRP	mV	410	360	340		
		Pb	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.3	190*
3	鉄系化合物 現場不溶処理 1999年	pH	-	7.9	7.8	10.2		
		CRP	mV	410	380	320		
		Cd	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.3	<5*
		Hg	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005~0.005	0.31*
		Pb	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.3	40*
		As	mg/L	0.001	0.006	0.060	0.01~0.3	9.8*
4	鉄系化合物 机上不溶処理 2002年	pH	-	7.8	7.6	9.9		
		CRP	mV	400	390	340		
		Pb	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.02	150*
5	金属系化合物 机上不溶処理 2002年	pH	-	7.5	7.4	9.7		
		CRP	mV	410	390	340		
6	金属系化合物 机上不溶処理 2002年	pH	-	4.3	4.5	6.4		
		CRP	mV	520	510	430		
7	マグネシウム系化合物 現場不溶処理 2004年	pH	-	9.7	9.7	10.1		
		CRP	mV	330	310	310		
		F	mg/L	0.18	0.19	0.18	1.6~2.0	<100**
8	マグネシウム系化合物 現場不溶処理 2004年	pH	-	9.3	9.4	10.3		
		CRP	mV	330	330	320		
		F	mg/L	0.27	0.24	0.28	0.81~2.3	<100**
9	カドミウム系化合物 現場不溶処理 2008年	pH	-	9.1	9.1	9.5		
		CRP	mV	330	300	310		
		As	mg/L	0.008	0.007	0.005	0.05	2**
10	カドミウム系化合物 現場不溶処理 2008年	pH	-	7.6	7.8	8.4		
		CRP	mV	330	340	330		
		Se	mg/L	0.008	0.005	0.005	0.5***	20**
		As	mg/L	0.30	0.26	0.25	50***	10,000**
11	マグネシウム系化合物 机上不溶処理 2004年	pH	-	10.0	10.1	10.7		
		CRP	mV	320	300	300		
		F	mg/L	0.84	0.97	1.1	3.0	-
12	銅物 机上不溶処理 2004年	pH	-	7.1	7.0	7.7		
		CRP	mV	420	430	330		
		CN	mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	0.4	18**
		As	mg/L	0.002	0.002	0.004	0.038	<1**
15	マグネシウム系化合物 机上不溶処理 2003年	pH	-	9.8	9.7	10.0		
		CRP	mV	340	360	350		
		Pb	mg/L	<0.001	<0.003	<0.001	7.9***	-
16	マグネシウム系化合物 机上不溶処理 2003年	pH	-	10.0	10.0	10.3		
		CRP	mV	280	270	270		
		CN	mg/L	0.06	0.06	0.02	5.6***	1.5**
17	鉄系化合物 机上不溶処理 2003年	pH	-	7.6	7.7	9.7		
		CRP	mV	370	400	350		
		As	mg/L	0.001	<0.001	0.007	0.024	2**
18	カルシウム系化合物 現場不溶処理 1994-1997年	pH	-	3.0	3.2	3.7		
		CRP	mV	630	650	580		
		As	mg/L	0.042	0.032	0.017	0.01~0.1	220**
19	カルシウム系化合物 机上不溶処理 2004年	pH	-	6.0	6.2	7.0		
		CRP	mV	440	420	400		
		F	mg/L	0.11	0.17	0.17	2.0	
26	銅物 机上不溶処理 2003年	pH	-	7.2	7.4	9.7		
		CRP	mV	540	550	400		
		As	mg/L	0.003	0.004	0.12	0.033	28**
27	銅物 机上不溶処理 2003年	pH	-	7.3	7.6	9.9		
		CRP	mV	430	470	370		
		Cr(VI)	mg/L	0.02	0.03	0.03	0.077	4.3**
28	銅物 机上不溶処理 2003年	pH	-	7.5	7.6	9.3		
		CRP	mV	330	380	330		
		Se	mg/L	0.012	0.012	0.11	0.041	3.0**
29	カルシウム系化合物 現場不溶処理 2003年	pH	-	7.5	7.4	9.2		
		CRP	mV	400	390	340		
		F	mg/L	0.59	0.64	1.2	1.4	220**
30	銅物 現場不溶処理 2002年	pH	-	9.4	9.7	10.5		
		CRP	mV	440	420	370		
		As	mg/L	0.006	0.006	0.005	0.045	8.5*

*: 底層調査 **: 環境告示第19号 基準適合

図表 14 不溶化処理土壌についての溶出試験の結果 (橋本・王、2004)

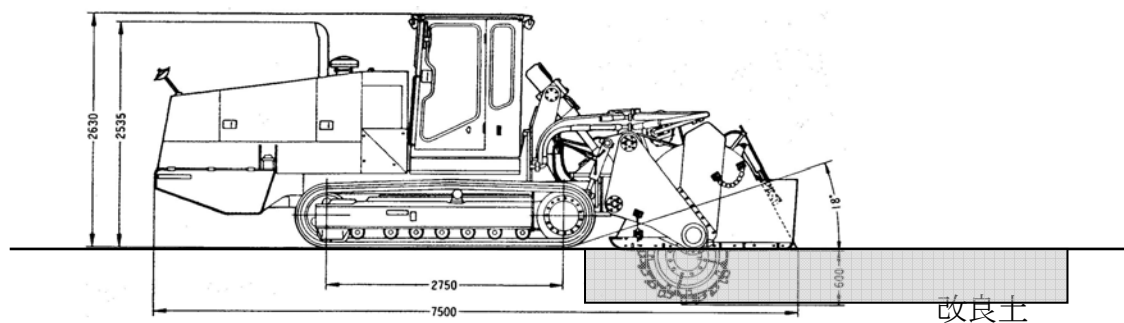
C. 施工例（概要）

- ① 当該地の面積や施工条件に応じて適当な面積の改良サード（L=45～60m、W=35～50m）に、近隣環境対策のため防音・防塵の仮囲いを設置する（図表 15）。
- ② 汚染発生土（ズリ）仮置場から 100m³ の汚染土壌（ズリ）を、バックホウ・モーターグレーダーとダンプトラックにて混合ヤードまで運搬し、混合ヤードにブルドーザにて均一に敷均しする（例として幅 5m、延長 40m、層厚 0.5m）。



図表 15 改良ヤード標準例

- ③ 敷均した汚染土壌（ズリ）のうゑに硫酸第二鉄水溶液（乾燥重量比 0.5～2.0%）を散布する。なお、硫酸第二鉄水溶液散布後、乾燥状態にならないように特に注意する。
- ④ 散布後、スタビライザー（KOMATSU 製クローラー式 CS360、作業深 700mm）により、一回目の混合作業をおこなう（図表 16）。



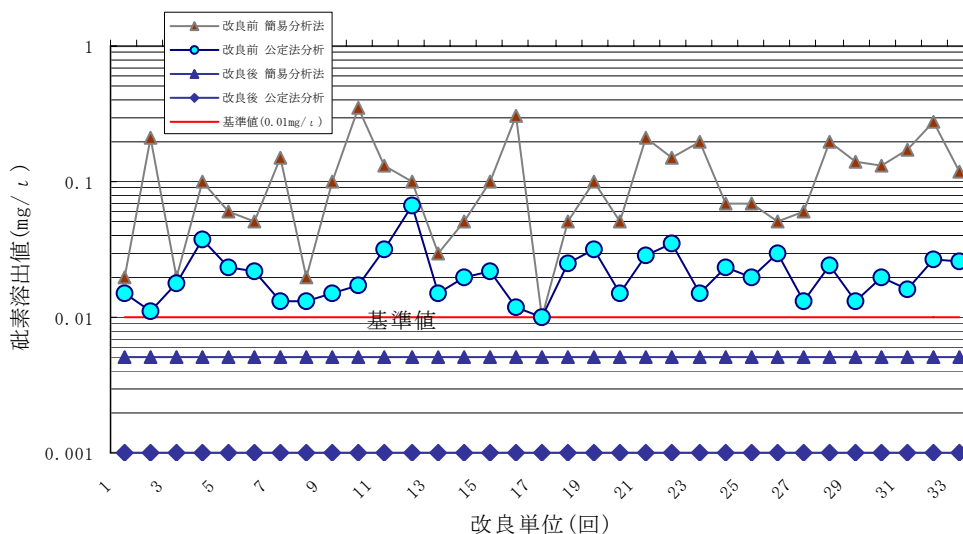
図表 16 混合施工概念図

- ⑤ 一次混合土のうえに、天然ゼオライトを3～5%、焼成ドロマイト0,5～1%を層状に敷き均す。
- ⑥ 敷均し後、スタビライザーによる二回目の混合作業をおこなう。
- ⑦ 二次混合土のうえにブルドーザにて火山性風化粘性土を敷均し（土量比10%程度）する。
- ⑧ 火山性風化粘性土を敷均した後、スタビライザーによる三回目の混合作業をおこなう。
- ⑨ 三回目の混合作業後にできた改良土を混合ヤードからバックホウ・モーターグレーダーとダンプトラックにて改良土置場に運搬する。なお、公定法分析による結果速報値が明らかになるまでその改良土は仮置きとする。
- ⑩ 改良土量およそ100m³毎に砒素の簡易分析、公定法分析による分析をおこない、環境基準をクリアしていることの確認検査をおこなう。
- ⑪ 改良土が公定法にて万一基準を超えた場合は、対象ロットに各改良材を混合し再改良をおこなう。

なお実際の施工に際しては、改良土壌の量やヤード条件（面積）ならびに近隣環境等を考慮して、もっともコスト効果が高く良好な改良品質が維持される機材を配置して施工する（添付図参照）。

D. 改良品質例

自然的原因である低濃度砒素汚染土壌の改良前後の試料について簡易分析法と公定分析法による品質管理例を示す（図表17）。砒素溶出量は簡易分析法でも公定分析法でもすべて溶出量基準に適合であり、シーリングソイル工法による砒素汚染土壌の改良品質はきわめて良好である。



（公定法の検出限界（<0.002）は1/2の0.001mg/l、簡易分析法値の検出限界（<0.01）は同じく0.005mg/lとしてグラフに表現した）

図表17 砒素汚染土壌の改良品質例

別サイトの砒素汚染土壌の例では、措置後の土壌は溶出量基準（0.01mg/L）適合まで改良され、土壌 pH は植生に影響を与えない 8～9.5 の弱アルカリに調整されている（図 18）。

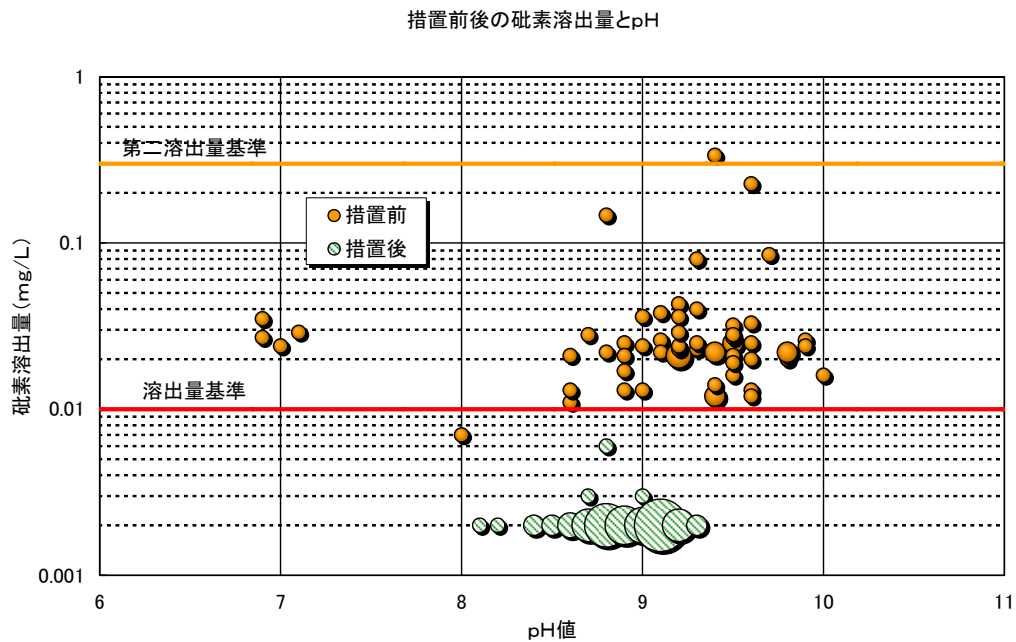


図 18 措置前後の溶出量と pH

以上のようにシーリングソイル工法は、開発からすでに 10 年を超える施工実績をもち、低コストと低負荷と高品質を同時に実現した画期的な改良工法と高い評価を得ている。主要な重金属に対して汎用的に効果があるため、重金属が複合した汚染土壌の改良等で民間のみならず各地の公共事業でも採用されている（実績表参照）。