

# シーリングソイル工法の原理と安定性 (技術概要)

## シーリングソイル工法の原理と安定性

土壤汚染対策法施行以前の重金属汚染に対する対策は、化学薬剤により重金属等を水に溶出し難い物質に変化させる化学的不溶化、セメントで土壤を物理的に固化して重金属の溶出を抑制するセメント固化法が、コストも安いことから多く採用された。

しかし、化学薬剤によって還元処理された汚染土壤から再び六価クロムが検出されたり、セメント混合により物理的に封じ込めてもやがて再溶出したり、pH値の上昇が新たに重金属の溶出を促進させるなどの事例が発覚し、これらの不溶化工法に対する信頼性は低かった。

土壤汚染対策法では重金属等に含有量基準が新たに指定され、不溶化工法の適用が制限された。これを機に、多くの不溶化工法は撤退し、手っ取り早い土壤入換え（掘削除去）が主流となった。

しかしながら一昨年後半頃から、関係学会で不溶化技術に関する研究報告に増加傾向が見られ、公共建設工事にもなう重金属汚染発生土に不溶化工法による対策が発注されるようになった。

この要因として次のことが上げられる。

- ① 大都市圏で地価が上昇傾向に転じたとは言え、地方都市圏の地価の底値状態が続く現状で高価な掘削除去は採用し難い。
- ② 所有者と地目を変更しない土地については、不溶化工法を含む汚染拡散防止措置で継続利用するのが現実的である。
- ③ 自然的原因の重金属汚染土壤に対して土壤汚染対策法は適用外であり、不溶化工法の適用制限はない。
- ④ 長期実績や研究開発等により、信頼性のある不溶化工法に対する認識が高まった。

最近注目される不溶化工法は、ゼオライトやアロフェンなどの天然鉱物系改良材、マグネシウム（Mg）や鉄（Fe）など無機材を用いた利用した地化学的不溶化工法である。

シーリングソイル工法は重金属等汚染土壤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、天然鉱物系改良材とする地化学的固定化工法である。開発からすでに 10 年を越える施工実績を持ち、完成度が高く低コストと低負荷と高品質を同時に実現した改良工法と高い評価を得て、最近は各地の公共事業での採用もおこなわれている。

## 1. 科学的原理

本工法は、天然鉱物資源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。

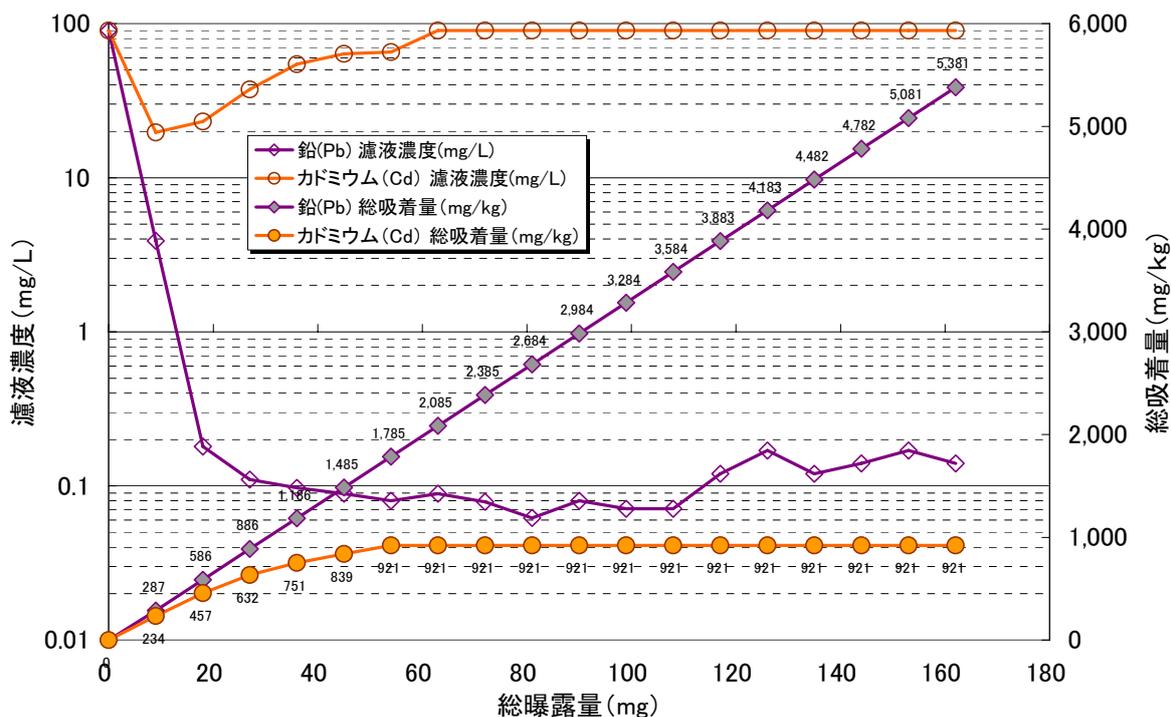
### A. 短～中期的固定化

おもに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る固定化を図る。同時に風化粘性土に多く含まれる、アロフェンやイモゴライトの重金属等吸着機能もあわせて利用する。

この際、陽イオン交換機能・吸着機能をもっとも効率的に維持するための pH コントロール剤として、微量の消石灰や苦土消石灰などの炭酸塩鉱物を加える。

#### ①陽イオンの吸着機能

ゼオライトは鉛・カドミウムなど陽イオンに対する吸着機能は特異であり、全含有量（底質調査法）で示すと鉛では 5,400mg/kg (5.4g/kg) 以上、カドミウムでは 900mg/kg を吸着する（図表 1）。



図表 1 ゼオライトの鉛・カドミウムイオン吸着特性

#### ②陰イオンの吸着機能

ゼオライトを混合しても溶出量が基準適合に至らない事例をもって、ゼオライトを使用するシーリングソイル工法は不適當と評価する人がいるが、これは全く当たらない。

砒素濃度 2mg/L の溶液に天然ゼオライト (Zm) と、シーリングソイル工法に使用する複数の天然鉱物系混合改良材 (Ss) を入れた場合の、接触 (振盪) 時間による吸着量と固定化量の差異を計測した (図 2)。その結果、ゼオライト単体 (Zm) では砒素濃度は 48 時間後で 0.69mg/L までしか低下せず、分離したゼオライトの砒素溶出量は 0.11mg/L で溶出量基準を上回った。

それに対して、天然鉱物系改良材混合体 (Ss) では砒素濃度が 0.003mg/L まで低下し、分離した混合体の砒素溶出量は 0.003mg/L と、基準適合まで砒素を確実に固定化していることを実証している。

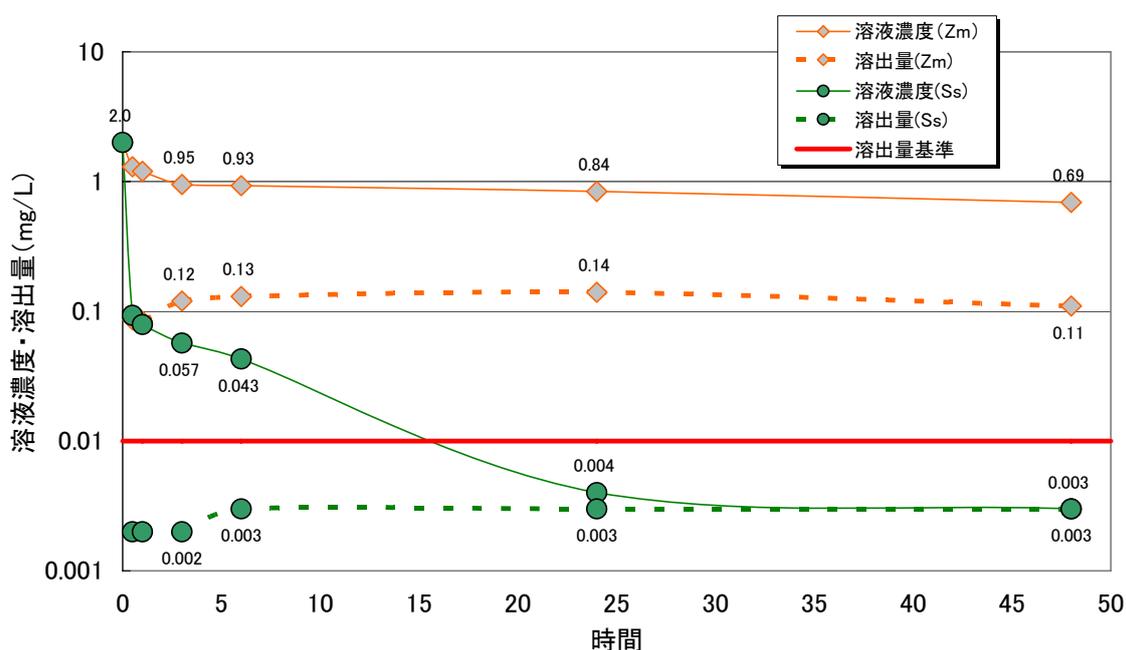


図 2 ゼオライト (Zm) と混合体 (Ss) の砒素吸着特性

また混合改良材 (SS) は、鉛・カドミウム・水銀の複合汚染の場合でも、30～60 分と比較的短時間に各重金属イオンに対し、共に吸着機能を発揮することが実験で証明されている。

火山性風化粘性土に多く含まれる非晶質アルミノ珪酸塩鉱物であるアロフェン ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) は、表面にふっ素等の吸着する能力を保持している。アロフェンを比較的多く含む火山性風化粘土の添加率とふっ素溶出量は相関性をもっている (図 3)。溶出量 8.3mg/L のふっ素汚染土壌に火山性風化粘性土 10% (重量比) を添加したところ、溶出量は 5.4mg/L まで低減した。単なる希釈効果ではなくふっ素に対して吸着機能を発揮していることは明瞭である。しかしながら、ふっ素の溶出量基準 (0.8mg/L) に適合させるには相当量の火山

性粘性土が必要となる。そこで、不溶化効果を促進させる事前処理剤（液体）を僅か添加することによって、粘性土の添加率を抑えても基準適合まで溶出量を減少させることが可能となっている。

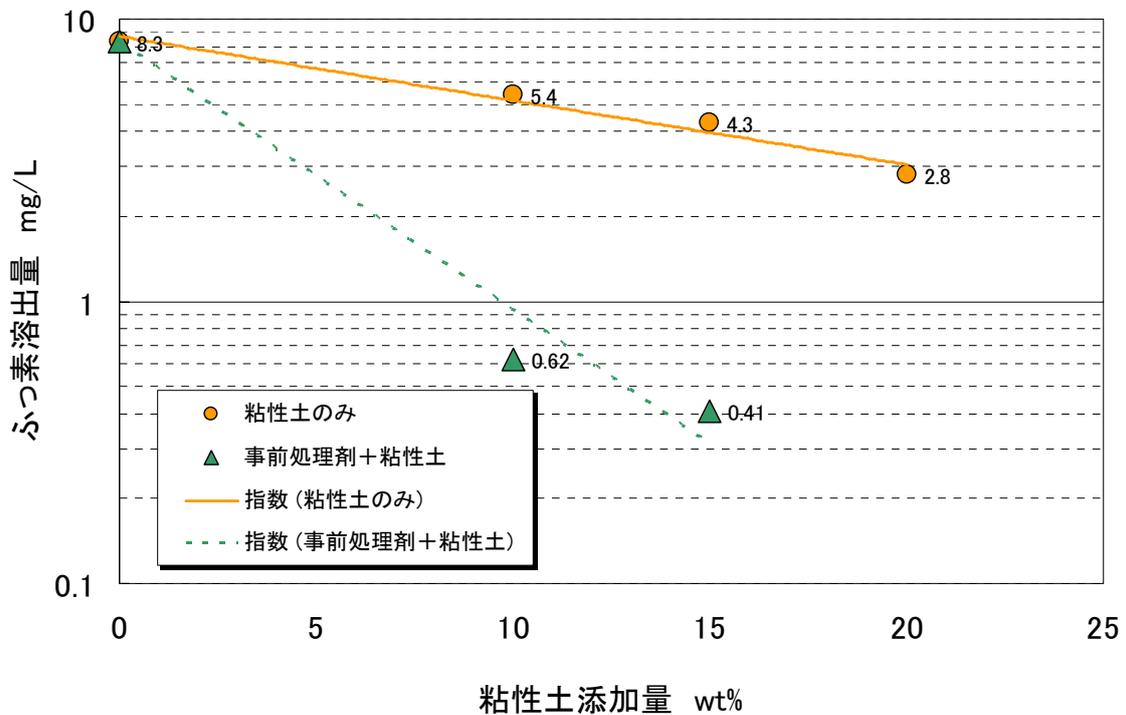
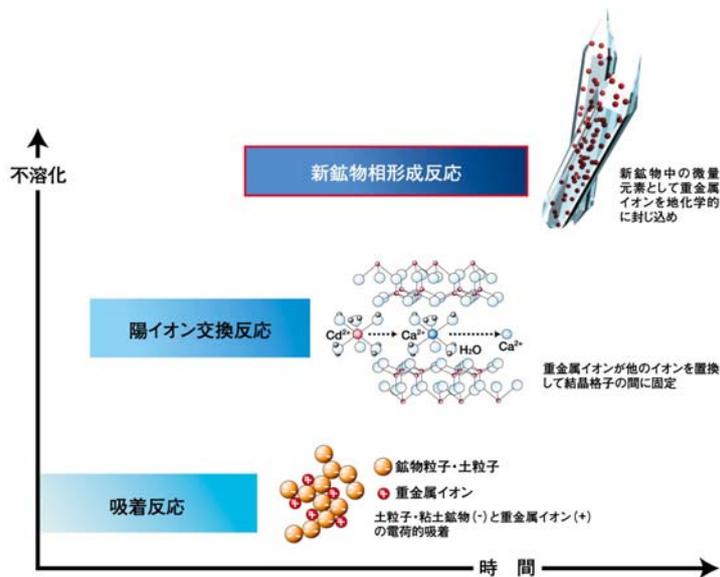


図3 風化粘性土の添加率とふっ素溶出量

### B. 長期的固定化

長期的には、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、およびアロフェン・イモゴライト等の低結晶性粘土鉱物がより高度に結晶化するにともなって、重金属等を新鉱物中の微量成分として高度に固定化する（図表3）。

長期間を要するが最終的にはもっとも安定的な珪酸塩鉱物相の中に微量成分として地化学的に固定・安定化され、水による溶出などを起こさないすなわち環境基準を満足する。



図表3 地化学的固定化の概念図

独立行政法人産業総合研究所の丸茂克美博士の研究によっても、風化粘性土中のアロフェン等の粘土の重金属固定化能がきわめて高いことが知られている。(図4)



図表4 丸茂博士の研究成果を紹介する新聞記事

## 2. 特徴と証明された高い完成度

シーリングソイル工法は、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制約はない。
- ③ 他工法に比較して低コストでかつ長期実績における安定性が検証されている。
- ④ 改良材により対象土量が 10%程度増量する。
- ⑤ オンサイト処理工法のため搬出搬入土量が少なく、ダンプ往来による排ガス・騒音・交通障害等の近隣環境問題を抑えることができる。

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壤には不適である。しかしながら重金属汚染土壤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壤や、土壤汚染対策法適用外の自然的原因の汚染土壤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射撃場の鉛汚染土壤の対策にかかわり、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5に示す。均質に調整された鉛汚染土壤（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。溶出量が原汚染土壤より低減したものでも、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壤の 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5 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) 土壌環境センター・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 6、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らず、本工法の経年的な安定性が証明されている。

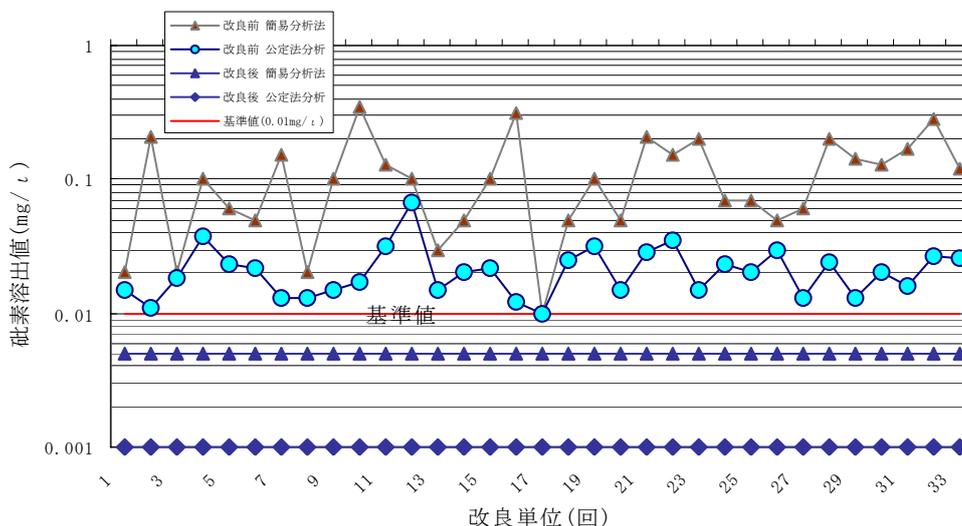
	不溶化処理法	分析項目	単位	硫酸添加 溶出試験 I	環境省告示 第46号試験	消石灰添加 溶出試験 I	不溶化処理前土壌	
							溶出量 (mg/L)	含有量 (mg/kg)
2	鉄系化合物 現場不溶化処理 2000年	pH	-	7.5	7.4	10.1		
		ORP	mV	410	360	340		
		Pb	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.3	190*
3	鉄系化合物 現場不溶化処理 1999年	pH	-	7.9	7.8	10.2		
		ORP	mV	410	380	320		
		Cd	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.3	<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*
4	鉄系化合物 机上不溶化処理 2002年	As	mg/L	0.001	0.006	0.030	0.01~0.3	9.8*
		pH	-	7.8	7.6	9.9		
		ORP	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 机上不溶化処理 2002年	pH	-	7.5	7.4	9.7		
		ORP	mV	410	390	340		
		Pb	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	0.01~0.02	150*
6	金属系化合物 机上不溶化処理 2002年	pH	-	4.3	4.5	6.4		
		ORP	mV	520	510	430		
		CN	mg/L	0.06	0.06	0.37	0.7	
7	マグネシウム系化合物 現場不溶化処理 2004年	pH	-	9.7	9.7	10.1		
		ORP	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 現場不溶化処理 2004年	pH	-	9.3	9.4	10.3		
		ORP	mV	350	330	320		
		F	mg/L	0.27	0.24	0.28	0.81~2.3	<100**
9	アルミニウム系化合物 現場不溶化処理 2003年	pH	-	9.1	9.1	9.5		
		ORP	mV	330	300	310		
		As	mg/L	0.008	0.007	0.005	0.05	2**
10	アルミニウム系化合物 現場不溶化処理 2003年	pH	-	7.6	7.8	8.4		
		ORP	mV	330	340	330		
		Se	mg/L	0.008	0.095	0.095	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 机上不溶化処理 2004年	pH	-	10.0	10.1	10.7		
		ORP	mV	320	300	300		
		F	mg/L	0.84	0.97	1.1	3.0	-
12	錳物 机上不溶化処理 2004年	pH	-	7.1	7.0	7.7		
		ORP	mV	420	430	390		
		CN	mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	0.4	18**
		As	mg/L	0.002	0.002	0.004	0.058	<1**
		F	mg/L	0.23	0.28	0.64	3.9	180**
15	マグネシウム系化合物 机上不溶化処理 2003年	pH	-	9.8	9.7	10.0		
		ORP	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 机上不溶化処理 2003年	pH	-	10.0	10.0	10.3		
		ORP	mV	280	270	270		
		CN	mg/L	0.06	0.05	0.02	5.6***	1.5**
17	鉄系化合物 机上不溶化処理 2003年	pH	-	7.6	7.7	9.7		
		ORP	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 現場不溶化処理 1994-1997年	pH	-	3.0	3.2	3.7		
		ORP	mV	660	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 机上不溶化処理 2004年	pH	-	6.0	6.2	7.0		
		ORP	mV	440	420	400		
		F	mg/L	0.11	0.17	0.17	2.0	
26	錳物 机上不溶化処理 2003年	pH	-	7.2	7.4	9.7		
		ORP	mV	540	550	400		
		As	mg/L	0.003	0.004	0.12	0.033	28**
27	錳物 机上不溶化処理 2003年	pH	-	7.3	7.6	9.9		
		ORP	mV	480	470	370		
		Cr(VI)	mg/L	0.02	0.03	0.03	0.077	4.3**
28	錳物 机上不溶化処理 2003年	pH	-	7.5	7.6	9.3		
		ORP	mV	390	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 現場不溶化処理 2003年	pH	-	7.5	7.4	9.2		
		ORP	mV	400	390	340		
		F	mg/L	0.59	0.64	1.2	1.4	220**
30	錳物 現場不溶化処理 2002年	pH	-	9.4	9.7	10.5		
		ORP	mV	440	420	370		
		As	mg/L	0.006	0.006	0.005	0.045	8.5*

\*: 底質調査法      \*\*: 環境省告示第19号      基準不適合

図表6 不溶化処理土壌についての溶出試験の結果 (橋本・王、2004)

### 3. 改良品質例

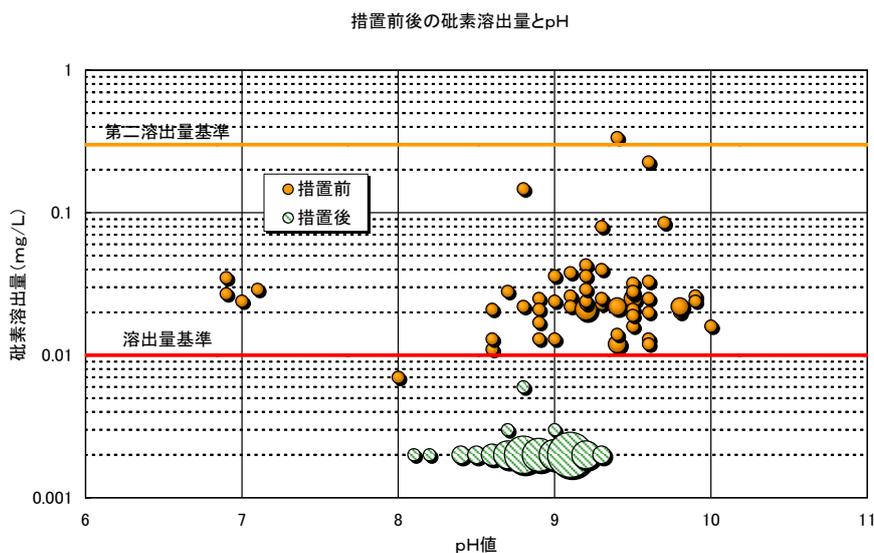
低濃度砒素汚染土壌の改良前後の試料について簡易分析法と公定分析法による品質管理例を示す（図表7）。砒素溶出量は簡易分析法でも公定分析法でもすべて溶出量基準に適合であり、シーリングソイル工法による砒素汚染土壌の改良品質はきわめて良好である。



（公定法検出限界（ $<0.002$ ）は1/2の $0.001\text{mg/l}$ 、簡易分析法検出限界（ $<0.01$ ）は同じく $0.005\text{mg/l}$ として表記）

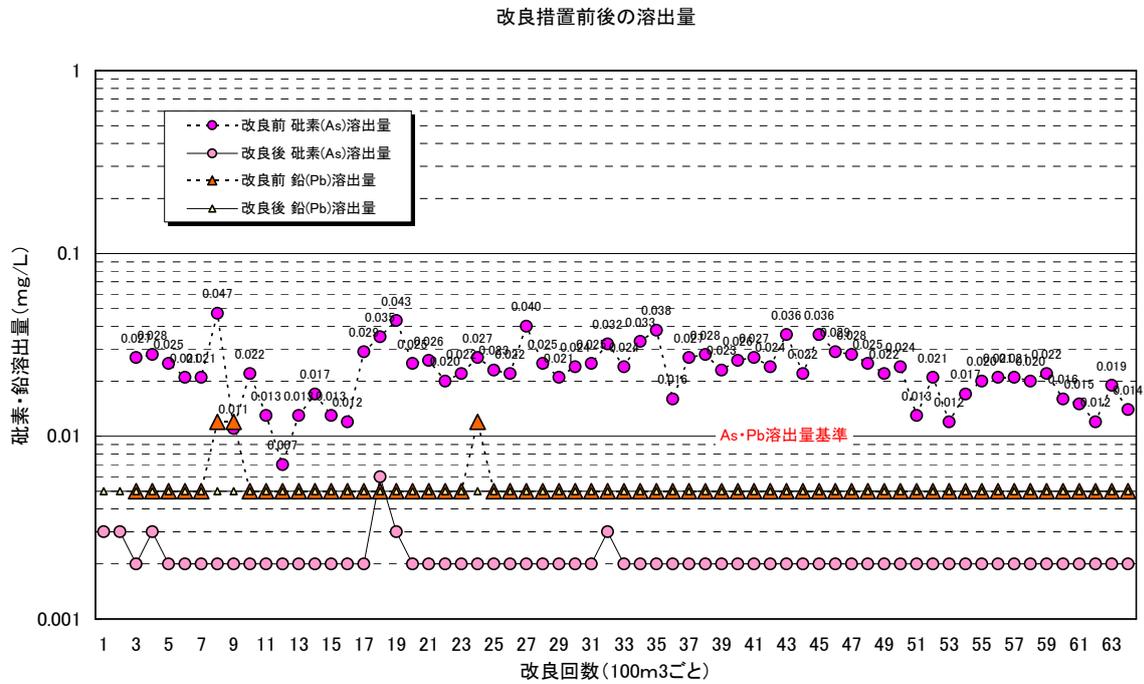
図表7 砒素汚染土壌の改良品質例

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（ $0.01\text{mg/L}$ ）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（図表8）。



図表8 措置前後の溶出量と pH

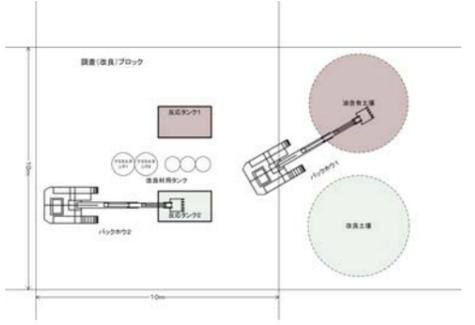
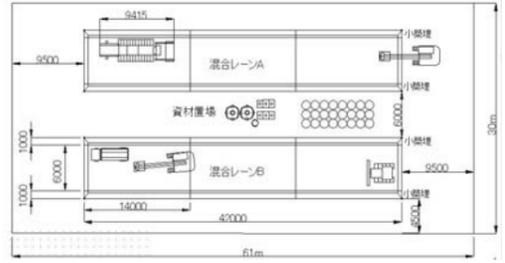
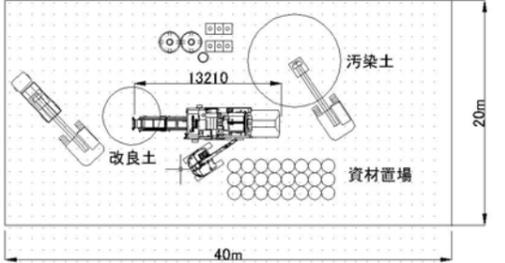
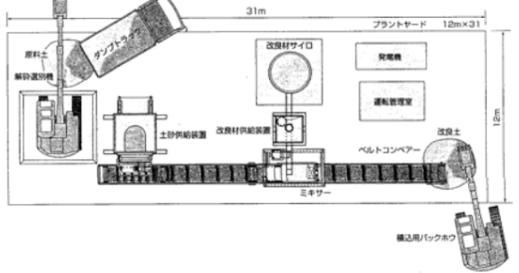
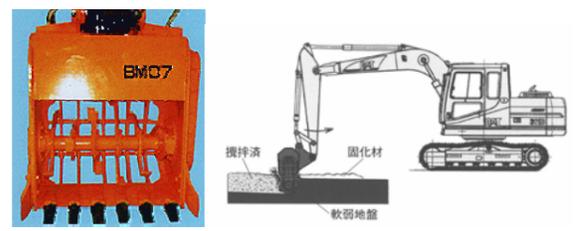
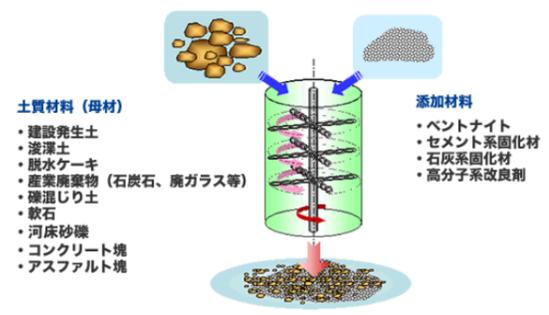
砒素と鉛の複合汚染土壌の改良事例を下図に示す。原土壌の砒素は5倍以内であるが全て溶出量基準（0.01mg/L）を超えており、鉛は基準の2倍以内で超えたのは3回（300m<sup>3</sup>）である。シーリングソイル工法による改良後は、砒素溶出量は全て基準適合、鉛溶出量は全て検出限界である。



図表9 砒素と鉛の汚染土壌の改良例

別添資料

対象土量および汚染状況等サイト条件に応じた混合機材の選定

混合法	反応タンク	スタビライザー	移動式混合機	仮設プラント
対象土量m3	2,000m3 未満		1,000m3 以上	
ヤード面積m2	10m×20m	30m×60m	20m×40m	12m×31m
工法の概要	10～15m3 の水タンクに汚染土壌を投入し、設計に従って改良材を順次添加し、バックホウで丁寧に攪拌混合する。2セットで効率的な処理ができる。	6m×50m 程度の改良レーンを設置して、幅・延長・厚さを一定にして汚染土壌を敷均し、設計に従った改良材を添加、スタビライザーで攪拌混合。複数レーンにより処理量を増加できる。	土壌混合機のバケットに汚染土壌を連続的に投入し、ホッパーから設計に従った改良材を添加して混合する。必要に応じて液体散布装置も装着できる。	土壌混合機のバケットに汚染土壌を連続的に投入し、ホッパーから設計に従った改良材を添加して混合する。改良材をサイロ式にすると密閉システムとなり、粉塵発生が抑制できる。
標準配置図				
施工概況				
主な重機構成	バックホウ 0.5 級 2 台、10～15m3 水タンク 2 基	スタビライザー 1 機、バックホウ 0.8 級 3 台、ブルドーザ 7ton1 台	自走式土壌混合機 1 機、バックホウ 0.8 級 3 台、	プラント 1 基、バックホウ 0.8 級 3 台
標準人員構成	管理 1、普通作業員 2、特殊運転手 2	管理 1、特殊作業員 1、普通作業員 3、特殊運転手 5	管理 1、特殊作業員 1、普通作業員 3、特殊運転手 3	管理 1、特殊作業員 1、普通作業員 3、特殊運転手 3
処理量 (m3/日)	60～80m3	150～300m3	120～180m3	100～150m3
材料費 (m3)	3, 150～3, 400 円/m3			
工法使用料 (m3)	400 円/m3			
工費 (m3)	材工共に 10,000～13,000 円/m3	材工共に 12,000 円～8,000 円/m3 (改良工のみ、土量・搬入条件・ヤード条件によって異なる)		
適用条件	狭隘な土地、大型機材の搬入が困難な土地、対象土量が少ないサイト	改良ヤードが広い土地、対象土量が大い場合	改良ヤードが比較的狭い土地、移動式のため全面改良する土地	居住環境が近接する土地で騒音・粉塵対策に細心の留意を要する場合
適用困難・留意点	対象土量が多い場合、工期が短い場合	居住環境が隣接する粉塵・騒音対策	居住環境が隣接する騒音対策、高含水土壌	全面改良の場合プラント移動が必須
特殊なサイトへの適用機材	パワーショベル or パワーブレンダー	三軸攪拌混合機	ツインスター	建設汚泥固化ユニット FBF
			 <b>土質材料 (母材)</b> ・建設発生土 ・浚渫土 ・脱水ケーキ ・産業廃棄物 (石灰石、廃ガラス等) ・凍混じり土 ・軟石 ・河床砂礫 ・コンクリート塊 ・アスファルト塊 <b>添加材料</b> ・ベントナイト ・セメント系固化材 ・石灰系固化材 ・高分子系改良剤	
適用条件	小規模&浅層サイト	小規模でかつ深部汚染サイト	礫混じり粘土質	高含水土壌&強度改良