

平成28年6月1日  
愛知土壤・地下水汚染対策研究会

自然由来重金属等含有土の浄化処理方法  
～DME®工法について～



株式会社ダイセキ環境ソリューション 成田尚宣

Daiseiki

**JSTA** 一般社団法人 日本汚染土壤処理業協会

**処理拠点**

1

Daiseiki

**JSTA** 一般社団法人 日本汚染土壤処理業協会

事業目的

汚染土壤の適正処理の推進及び、適正な運搬と処理技術の研究、研賛等に係る事業並びに汚染土壤処理業に係る諸制度の確立を促進すること等により、汚染土壤処理業の健全な発展に寄与することをもって国民の健康の保護に寄与すること。

**DME®工法は日本汚染土壤処理業協会推奨工法です。**

Daiseiki

2

内容

1. 自然由来重金属等含有土について
2. 重金属等含有土の処理方法について
3. DME®工法について
4. DME®工法による処理結果について
5. 長期安定性について
6. 岩ズリへの適用について
7. まとめ

Daiseiki

3

# 1. 自然由来重金属等含有土について

## 1.1 自然由来重金属等含有土とは

日本列島を構造する地質には、鉛やヒ素等のさまざまな重金属を含有しています。土壤汚染対策法の特定有害物質（重金属等）を自然的に含む岩盤や未固結堆積物を「自然由来重金属等含有土」といいます。

身近にある自然由来の重金属

鉱山・鉱床	銅、鉛、亜鉛、砒素 など
温泉	砒素、ホウ素、フッ素 など
海水	ホウ素、フッ素 など
海成堆積物	砒素、カドミウム、鉛、セレン など

## 1.2 自然由来重金属等含有土の環境リスク

- トンネル工事などで環境基準を超過する自然由来重金属等含有土が顕著化
- 土壤汚染対策法第4条調査における自然由来重金属等含有土の発覚
- 掘削岩の盛土への流用により浸透水が酸性水として流出し環境を悪化
- 東京オリンピックや中央リニア新幹線などの国家事業での大量発生

## 1.3 自然由来重金属等含有土の発生量予測（関東から中部）

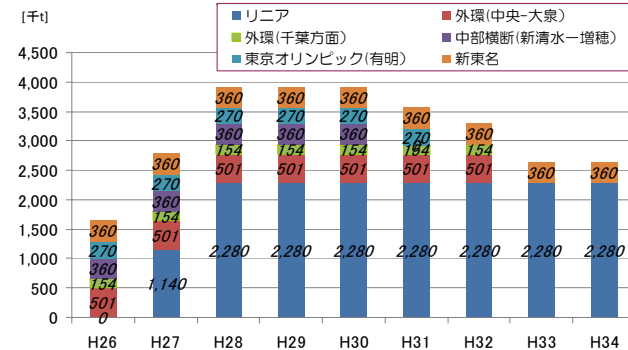


図 今後の自然由来重金属等含有土の発生量予測  
 (各工事の残土発生量に20%を乗じ、工期で除して平滑化。比重1.8で試算)

自然由来重金属等含有土だけで最大約4百万t/年の発生予測

※日本汚染土壌処理業協会による推計(2014)

## 2. 重金属等含有土の処理方法について

8

Daiseki

### 2.1 汚染土壌の処理法について

措置	状況	土壌溶出のみ 不適合	土壌溶出と地下水が共に基準不適合					
			第一種(VOC)		第二種(重金属)		第三種(農業)	
			土壌溶出	第二溶出	土壌溶出	第二溶出	土壌溶出	第二溶出
①地下水水質の測定		○						
②土壌汚染の除去		○	○	○	○	○	○	○
③原位置封じ込め		○	○	■	○	■	○	
④遮水工封じ込め		○	○	■	○	■	○	
⑤原位置不溶化		○			○			
⑥不溶化埋め戻し		○			○			
⑦遮断工封じ込め		○			○	○		○
⑧地下水汚染の拡散の防止		○	○	○	○	○	○	○

○: 指示措置                      ○: 指示措置と同等以上の措置  
 ■: 第二溶出基準を満たした後の指示措置

環境省水・大気環境局 土壌環境課, 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン(改定第2版)より抜粋

Daiseki

### 2.2 重金属等含有土の処理法について

処理方法	原理概略	分類
洗浄分級処理	・ 重金属が濃縮した細粒区分を分離	浄化
鉄粉磁選処理	・ 土壌スラリーに鉄粉を入れ、重金属を鉄粉へ吸着させた後、磁選で分離(湿式鉄粉磁選法 比重による分離の例有)	浄化
不溶化処理	不溶化剤を土壌に混合して重金属を溶出抑制し、その後管理する。	管理
管理(封じ込め等)	・ 管理型処分場、遮水工等にて埋立管理。 ・ 重金属吸着層上に盛り土し、浸出水管理。 ・ リスク管理の考えに基づき、敷地境界への汚染地下水の流出がない程度に、盛土管理。	管理
セメント副原料利用	セメント工場にて、約1450℃のロータリーキルンで焼成	原料利用

浄化技術は洗浄分級処理と鉄粉磁選処理のみ

10

Daiseki

### 2.3 浄化技術の比較

■ 浄化土は現地への残置、盛土利用など再利用が可能

項目	洗浄分級処理	鉄粉磁選処理
原理	可溶性重金属の水洗による除去 重金属を濃縮して含有するシルト・粘土分の分離除去	添加した鉄粉への可溶性重金属の吸着・磁選回収。
可溶性重金属の挙動	土壌吸着<水溶解	土壌吸着<水溶解<<鉄粉吸着
処理の確実性	複数回の洗浄操作が必要な場合あり	通常1回の処理で浄化可能
浄化土の収率	粘土分の多い土壌では浄化土収率が低い。(別途処理の濃縮土多い)	鉄粉混合量は1wt%以下と僅か、浄化土収率が高い。(別途処理の濃縮土少ない)

11

Daiseki

## 2.4 鉄粉と重金属類の反応

水溶液中で鉄粉表面に形成される局部電池反応により陽イオン・陰イオンを吸着

**Anodeでの反応**

鉄共沈反応+還元+難溶性塩生成  
 $Cr^{6+}$ : 還元+水酸化Crの生成  
 As: 砒酸鉄生成  
 Se: 亜セレン酸鉄生成  
 F: フッ化鉄生成  
 CN: 紺青生成

**Cathodeでの反応**

化学的・物理的な吸着  
 (meta化によるセメンテーションも条件によっては起こりうる)

As, F,  $Cr^{6+}$ , Se, CN

陰(-)

Pb, (Cd, Hg)

陽(+)

鉄粉表面は (+) に荷電      鉄粉表面は (-) に荷電

電子の移動

通常は水素発生

鉄粉表面

結晶粒界

鉄粉

鉄の溶解と水酸化鉄生成pH9以下で表面は(+)に荷電

Daiseki

12

## 2.5 乾式と湿式の鉄粉磁選法

### 鉄粉磁選法

掘削土が泥水状態  
(泥水シールド工法)

↓

湿式工法

掘削土が乾いた状態  
(山岳工法・開削)

↓

乾式工法(DME)

Daiseki

13

## 2.6 湿式鉄粉磁選法の原理

- ① 汚染土スラリー
- ② 特殊鉄粉および酸をスラリーに混合
  - : 可溶性重金属 (溶存)
  - : 難溶性重金属 (安定)
  - : 土壌粒子
  - : 水

特殊鉄粉への可溶性重金属の吸着

●: 鉄粉 (酸の添加により表面が活性化)
- ③ 磁選により鉄粉回収
 

濃縮土

鉄粉とともに可溶性重金属を回収
- ④ 機械脱水 (篩・フィルタープレス等)
 

浄化土

鉄粉を用いた土壌の浄化方法、特開2000-51835に公開の技術。排水処理技術の鉄粉法を応用し、種々の重金属類に適用できることが示される。

関連特許 特許第3245071

Daiseki

14

## 2.7 湿式鉄粉磁選法の課題

泥水で土壌が掘削される場合は有利  
 ⇒開削で発生する土壌に湿式鉄粉磁選法を適用すると？

- 処理フローが複雑で、運転管理が難しい。
- 土壌をスラリー化するため、大量の水の確保が必要。→同量の排水が必要となる。
- 粘性土等の細粒分が多い土壌に対応するには大きな固液分離・脱水設備が必要。→特に脱水設備としてフィルタープレスがあげられるが、設置にかかる投資コストが大きい。

もっと簡単で、コストのかからない設備にならないか？

**乾式鉄粉磁選法(DME®工法)の提案**  
**【Dry Magnetic Extraction工法】**

Daiseki

15

### 3. DME®工法について

Daiseki

16

水を使用しない浄化処理技術  
 自然由来重金属含有土壌  
**乾式磁力選別処理**  
**DME**  
 Dry Magnetic Extraction Method  
 従来型処理法との比較



設備構成がシンプル  
**低コスト処理**

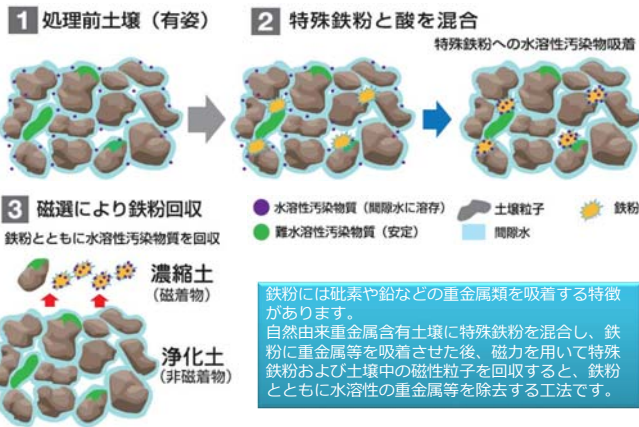
分離する重金属濃縮土壌の  
 発生量が少ない  
**浄化土収量が多い**

※DME工法はDOWAエコシステム株式会社の特許工法です。(特許第5647371号)  
 土壌汚染対策法 汚染土壌許可施設 (秋田県 No.0051001102)

Daiseki

17

#### 3.1 DME工法の原理



Daiseki

18

#### 3.2 エコシステム花岡 (株) 設備 (全景)



- ①投入ホッパー
- ②スクリーン
- ③破砕機
- ④混合機
- ⑤磁選機
- ⑥濃縮土ヤード

■ 許可数量	100 t/hr
■ 許可上の処理法名称	抽出 (磁選)
■ 設置面積	3,950 m <sup>2</sup>
・ プラント設置面積	1,200 m <sup>2</sup>
・ 仮置きヤード面積	1,750 m <sup>2</sup>
■ 設備総電力	300 kW

Daiseki

19

### 3.2 設備②

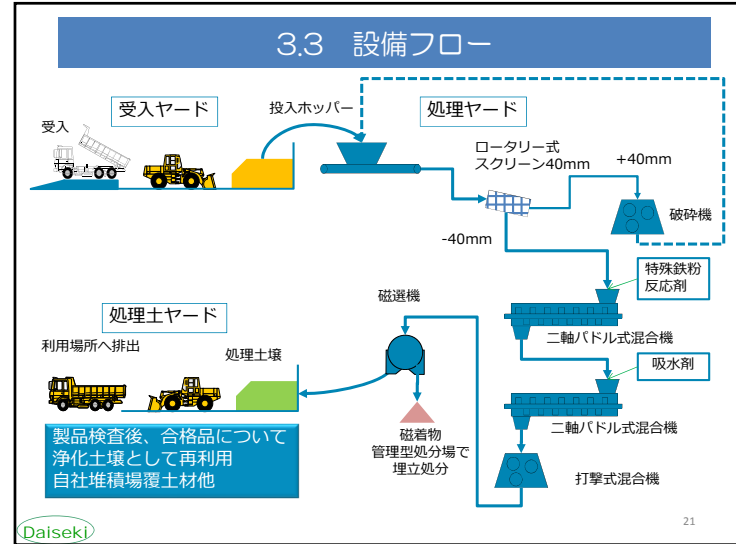
**土壌投入状況**

**混合機**

**磁選機**

**磁選産物排出状況**

Daiseiki 20



### 3.4 DME工法の適用範囲について

**処理対象物質 (重金属等)**

項目	As	Pb	Cd	Hg	Cr <sup>6+</sup>	Se	CN	F	B
適否	○	○	—	—	○	○	○	○	×

※ ○: 適用可、 ×: 適用不可、 —: 効果未確認

**対応可能濃度**

**溶出量で概ね 10 倍程度 (目安)**

※適用時は処理条件確定のために、実土壌試料を用いた机上の評価試験を事前に実施します。  
 ※水溶性の重金属の除去を原理としているため、含有量の大幅な低減は期待できません。

Daiseiki 22

## 4. DME®工法による処理結果について

Daiseiki 23

### 4.1 土質による処理量の一覧

8案件(土質) : 23,338トン処理

案件	処理数量 [T]	平均処理量 [T/Hr]	最大処理量 [T/Hr]	土質
A案件	3,903	60.6	75.0	砂質土
B案件	4,646	69.7	91.1	砂質土
C案件	789	18.0	38.1	礫混じり粘土
D案件	1,054	40.2	45.2	固結シルト岩
E案件	6,345	49.9	70.9	砂混じり礫質土
F案件	1,399	67.9	79.8	シルト混じり砂質土
D案件	2,011	45.0	70.9	礫混じり粘土
H案件	3,192	49.0	84.1	砂混じりシルト
合計	23,338	50.9	-	-

24

### 4.2 試験結果例 (1) As含有土壌

■試験方法

```

    graph TD
        A[処理前土壌] -- "濃硫酸O ~ 5 ml/kg程度  
鉄粉0.5 ~ 1wt%" --> B[混合1min程度]
        B --> C[養生5min程度]
        C --> D[0.15-0.7 T 磁選]
        E[中性吸湿材O-10wt%程度] --> D
        D --> F[磁着物]
        D --> G[非磁着物  
(浄化土)]
    
```

■試験結果

産物	重量分布 [wt%]	As含有量 [mg/kg]	As溶出量 [mg/L]	pH
IN 処理前土壌	100.0	8.5	0.028	7.7
IN 鉄粉	1.0	-	-	-
IN 中性吸湿材	12.1	-	-	-
OUT 処理後土壌	104.9	7.3	<0.001	7.2
OUT 磁着物	8.2	11	-	-

発生場所：東北地方、汚染原因：自然由来、土質：粘土混じり砂礫、色感：黄土色、処理前水分：18%  
硫酸添加量0.5ml/kg、鉄粉1wt%、養生時間10min、中性吸湿材10wt%、分離磁力0.15T

25

### 4.2 試験結果例 (2) Se含有土壌およびPb、Cr6+含有土壌

■Se含有土壌

産物	重量分布 [wt%]	Se含有量 [mg/kg]	Se溶出量 [mg/L]	pH
IN 処理前土壌	100.0	0.52	0.022	8.3
IN 鉄粉	1.2	-	-	-
IN 中性吸湿材	11.7	-	-	-
OUT 処理後土壌	93.9	0.44	0.004	7.3
OUT 磁着物	17.9	0.56	-	-

発生場所：中部地方、原因：自然由来、土質：粘土混じり砂礫(軟岩)、色感：青灰色、処理前水分：15%  
硫酸添加量3ml/kg、鉄粉1wt%、養生時間10min、中性吸湿材10wt%、分離磁力0.15T

■Pb、Cr6+含有土壌

産物	重量分布 [wt%]	Pb含有量 [mg/kg]	Cr含有量 [mg/kg]	Pb溶出量 [mg/L]	Cr6+溶出量 [mg/L]	溶出pH
IN 処理前土壌	100.0	6978	327	0.099	1.0	8.3
IN 鉄粉	1.3	-	-	-	-	-
IN 中性吸湿材	13.1	-	-	-	-	-
OUT 処理後土壌	99.6	6183	283	0.009	0.031	7.2
OUT 磁着物	13.4	6084	338	-	-	-

発生場所：関東地方、原因：顔料の飛散、土質：粘土混じり砂、色感：褐色、処理前水分：23%  
硫酸添加量0ml/kg、鉄粉1wt%、養生時間10min、中性吸湿材10wt%、分離磁力0.15T

26

### 4.2 試験結果例 (3) F含有土壌およびCN含有土壌

■F含有土壌

産物	重量分布 [wt%]	F含有量 [mg/kg]	F溶出量 [mg/L]	pH
IN 処理前土壌	100.0	192	1.0	7.7
IN 鉄粉	1.0	-	-	-
IN 中性吸湿材	0.0	-	-	-
OUT 処理後土壌	94.4	189	0.3	7.2
OUT 磁着物	6.6	204	-	-

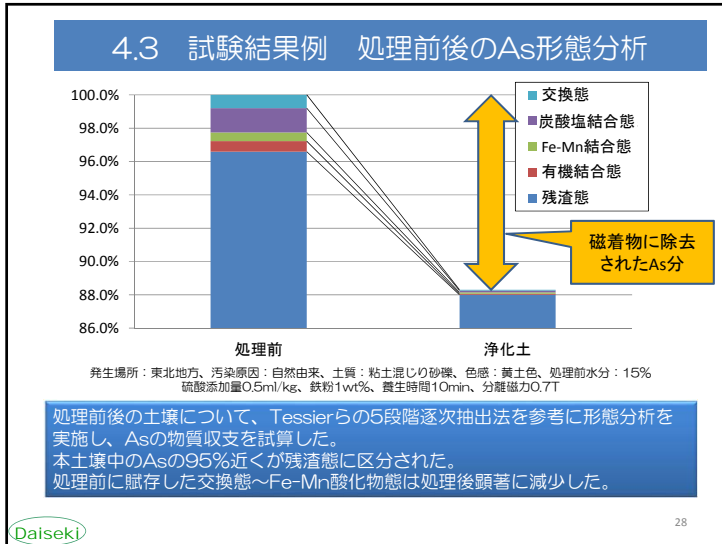
発生場所：関東地方、汚染原因：人為、土質：ローム、色感：灰色、処理前水分：18%  
硫酸添加量0.5ml/kg、鉄粉1wt%、養生時間10min、中性吸湿材10wt%、分離磁力0.15T

■CN含有土壌

産物	重量分布 [wt%]	CN含有量 [mg/kg]	CN溶出量 [mg/L]	pH
IN 処理前土壌	100	122	1.3	7.8
IN 鉄粉	1.0	-	-	-
IN 中性吸湿材	10.6	-	-	-
OUT 処理後土壌	84.8	119	<0.1	6.7
OUT 磁着物	15.2	140	-	-

発生場所：関東地方、汚染原因：人為、土質：ローム、色感：黄土色、処理前水分：18%  
硫酸添加量0.5ml/kg、鉄粉1wt%、養生時間10min、中性吸湿材10wt%、分離磁力0.15T

27



## 5. 長期安定性について

Daiseki 29

### 5.1 長期安定性の検討

- 酸Ⅰ・Ⅱ、アルカリⅠ・Ⅱ溶出試験・・・本来は不溶化土壌の安定性評価  
 通常の溶出試験に硫酸あるいは消石灰を入れて評価
- 酸性雨に曝されることを考慮(pH4.0, 降水量2,000mm/y, 1m<sup>3</sup>)
  - ・ 酸Ⅰ：100年分相当の硫酸
  - ・ 酸Ⅱ：500年分相当の硫酸 (38.5mmol/kg-乾土)
- コンクリート構造物およびその周辺に配されることを考慮
  - ・ アルカリⅠ：38.5mmol/kg-乾土相当の消石灰
  - ・ アルカリⅡ：385mmol/kg-乾土相当の消石灰
- 繰り返し溶出試験
  - ・ 固液比1：10、時間20hr/回、0.45μmろ過の溶出試験を複数回実施。

Daiseki 30

### 5.2 用いた試料

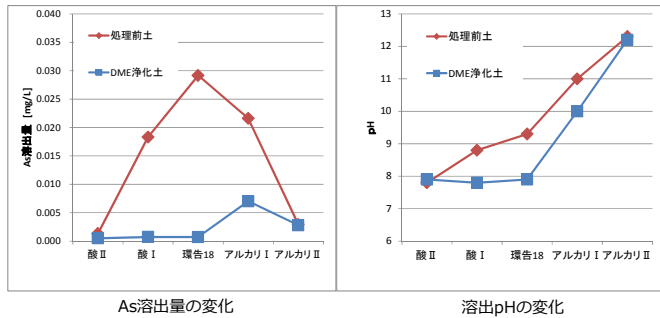
実際の自然由来重金属含有土壌

発生場所	含有量[mg/kg]		溶出量[mg/L]		溶出pH	土質
	砒素	セレン	砒素	セレン		
関東	6.3	-	0.029	-	9.3	シルト・粘土
指定基準 (土対法)	150	150	0.01	0.01	-	

Daiseki 31

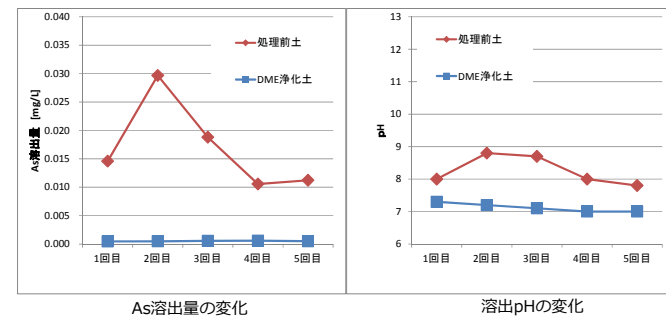


### 5.3 結果① 酸アルカリ溶出試験



- Asは、処理前土よりもDME浄化土の方が安定な傾向。
- 酸側、アルカリ側でも安定な傾向。
- 溶出pHはいずれも酸側で緩衝能が認められる。
- 特にDME浄化土はその効果が顕著に認められた。
- 一方、アルカリに対しては緩衝能は認められなかった。

### 5.3 結果② 繰返し溶出試験結果



- Asは処理前土よりもDME浄化土の方が安定。
- いずれも溶出回数を繰り返すごとに、As溶出量は減少傾向。
- 溶出pHの変化はほとんどなし。

## 6. 岩ズリへの適用について

### 6.1 岩ズリへDME工法を適用する場合の課題

※スレーキング：乾湿の繰り返しによる、岩の細粒化が進む現象。

スレーキングする岩ズリへDME工法を適用する場合の課題

スレーキングするような岩には適用できないのではないか？  
長期的に基準以下である状態が継続できるか！？

⇒DME工法は粒子の表面に賦存する汚染物を除去する方法。

岩中の汚染物は除去できない。

⇒土対法上、処理後の分析は2mm以下に対して実施。

浄化されても、粗い粒子(+2mm)がスレーキングすると再汚染されるおそれあり。

⇒浄化土と判定された土壌でも再汚染のリスクがある。



### 6.2 スレーキング試験 ①試験方法

Daiseiki
36

### 6.3 スレーキング試験 ②試験結果

DME処理前の岩ズリの分析結果

項目		-2mm	-40mm有姿	-40mm粉砕物
含有量 [mg/kg]	As	4.9	—	4.8
	Se	1.2	—	1.2
溶出量 [mg/L]	As	0.006	0.013	0.016
	Se	0.004	0.006	0.006

項目		-2mm	-40mm有姿	-40mm粉砕物
含有量 [mg/kg]	As	5.4	—	5.0
	Se	1.1	—	1.1
溶出量 [mg/L]	As	0.001	0.001	0.003
	Se	0.003	0.003	0.005

Daiseiki
37

## 7. まとめ

Daiseiki
38

### 7 DME工法のまとめ

- 用水・排水がほとんど必要ない（メンテ、清掃の洗浄水程度）。
- 洗浄処理に比較して、濃縮土壌の発生量が少ない。
- 対応可能物質（以下の項目について効果を確認しています）  
As, Pb, Cr<sup>6+</sup>, F, Se, CN
- 対応可能濃度 各物質、溶出量で概ね10倍程度が目安
- 薬剤の使用量は、事前のトリータビリティ試験により確認
- 酸アルカリ溶出試験、繰り返し溶出試験において、試験した範囲では処理前土壌よりも処理後土壌の方が安定。
- 岩ズリに対しても、スレーキング試験により安全性を確認

Daiseiki
39