

## 1-7 建設分野におけるダイオキシン類の汚染土壌対策技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 12～平 14

担当チーム：土質チーム

研究担当者：恒岡 伸幸、森 啓年

### 【要旨】

近年の各地で廃棄物処理場に起因するダイオキシン類汚染が顕在化していることを背景として、建設事業においてもダイオキシン類汚染に遭遇した場合に適切な対策を行うこと求められている。このため、本研究は水域と陸域において遭遇したダイオキシン類汚染の拡大を防止する対策工法を開発することを目標として実施するものである。

その結果、土壌中のダイオキシン類の大部分は懸濁態のダイオキシン類として土粒子とともに移動するため、土粒子の移動を抑制する覆土・敷土工法、遮水壁工法、固化工法は陸域の汚染土壌の対策工法としての適用性が高いことが明らかになった。また、水域の汚染底質の対策工法としては袋詰脱水処理工法を用いた封じ込め工法の実験を行い、99.9%以上のダイオキシン類を袋内に封じ込めるとともに脱水・減量化可能であることを確認した。キーワード：ダイオキシン、対策、カラム試験、袋詰脱水処理工法

### 1. はじめに

国民の健康の保護を図ることを目的に「ダイオキシン類対策特別措置法(以下、特措法)」が平成 11 年 7 月 16 日に告示され、平成 12 年 1 月 15 日から施行された。それと同時に旧環境庁(現環境省)からの告示において大気・水質・土壌のダイオキシン類に関する環境基準が設定され、その後底質の環境基準についても平成 14 年 7 月に告示された。

ダイオキシン類は微量でも毒性が強いとされ、廃棄物の不法投棄や清掃工場に起因するダイオキシン類による汚染が発見された場合は社会的に関心と呼び、新聞・テレビなどの報道においても大きな注目を集める。公共工事においても、このような世の中の動きとは無縁ではなく、ダイオキシン類による汚染土壌の問題が顕在化している現場が存在するとともに、全国数カ所で底質の汚染が発見され、今後ダイオキシン類に汚染された土壌や底質への対策が必要となる現場が増加することが予想される。

具体的に公共工事においてダイオキシン類汚染が問題となる場合としては、水域では河川や湖沼の底質が汚染されている浚渫工事、陸域では廃棄物不法投棄地あるいは廃棄物処分場跡地などの掘削工事などがあげられる。実際にダイオキシン類による汚染が発見された場合の対策では、特措法に基づき環境基準や排水基準を上回る土壌や排水に対して浄化や除去などの対策が求められる場合があるが、公共工

事で遭遇するダイオキシン類に汚染された対象物は極めて膨大な量となり、現在の浄化技術の処理能力やその費用を考えるとそのような対策を容易に実行できないことは容易に想像できる。そのため今後事業の遂行に支障が出るおそれがある。

こうした背景のもとで、本研究では公共工事において遭遇するダイオキシン類汚染に実際に適用できる技術として、ダイオキシン類汚染の拡大を防止する対策工法を開発することを目的としている。

### 2. 陸域の対策工法の開発(覆土・敷土工法、遮水壁工法、固化工法)

#### 2.1 概要

陸域の対策工法として、覆土・敷土工法、遮水壁工法、固化工法のダイオキシン類に汚染された土壌への適用性に関する検討を行った。これらの工法は土粒子の移動を抑制することを主眼に行われる封じ込め対策であるため、ここでは主にダイオキシン類の土壌中の挙動を明らかにすることにより、各工法の有効性を検証するという視点から実験を行った。

ダイオキシン類は土壌中においてほとんど移動しないことが Freeman<sup>1)</sup>らにより確認されている。彼らの観測および実験結果によると、ダイオキシン類は土壌の表層(0~5cm)に大部分が滞留し、12 年間に 10cm 程度の移動が観測されている。このように既往の研究成果はあるものの、実際のダイオキシン類汚

染土壌から地下水への非懸濁態ダイオキシン類(実質的に水に溶解していると考えられるダイオキシン類)の拡散特性や、雨水や地下水等の土壌への浸透に伴うダイオキシン類の移動特性についての定量的なデータはあまり存在しない。それらを明らかにするため汚染サイトから採取したダイオキシン類汚染土壌を用いた実験を行った。

## 2. 2 非懸濁態ダイオキシン類に関する実験

### 2. 2. 1 目的

本調査は、起源が異なる二種類のダイオキシン類汚染土壌を対象に、懸濁態ダイオキシン類(土粒子(SS、コロイドも含む)に吸着されているダイオキシン類)と非懸濁態ダイオキシン類を定量的に測定し、汚染土壌からのダイオキシン類溶出を定量的に把握しようとするものである

### 2. 2. 2 実験

清掃工場に起因するダイオキシン類汚染土壌である試料1(含有量 63,000pg-TEQ/g)と農業工場に起因するダイオキシン類汚染土壌である試料2(含有量 790pg-TEQ)について調査を行った。各試料に対して、2mmのふるい粉碎を行った後、固液比1:10にて6時間振とうを行った。その後、振とう液に対して以下の操作を行った。

- ① 試料に対して、2mmのふるいを用いて粉碎を行った後、固液比1:10にて6時間振とうを行う。振とう液はpH、濁度、SSの測定を行う。
- ② 振とう液に1 $\mu$ m-GFPを用いて固液分離し、GFPに残った固相部分はダイオキシン類含有量測定を行うとともにろ過した液相はpH、濁度、SS、ダイオキシン類濃度測定を行う。
- ③ ②の液相に0.45 $\mu$ m-MFを用いて固液分離し、MFに残った固相部分はダイオキシン類含有量測定を行うとともに、ろ過した液相はpH、濁度、SS、ダイオキシン類濃度測定を行う。
- ④ ③の液相に遠心分離(3000rpm, 20min)を用いて得た固相部分のダイオキシン類含有量測定を行うとともに、上澄み液はpH、濁度、SS、ダイオキシン類濃度測定を行う。

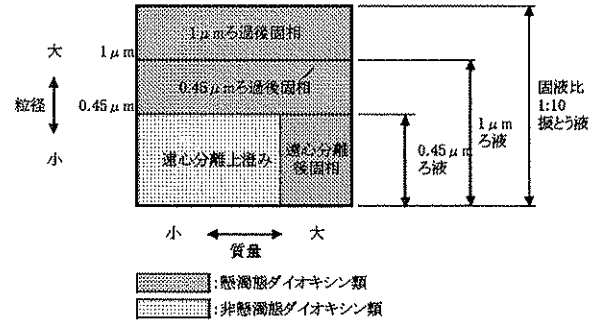


図-1 懸濁態と非懸濁態ダイオキシン類の分類

### 2. 2. 3 結果

実験結果を図-2、表-1,2に示す。遠沈上澄液を非懸濁態のダイオキシン類と仮定すると、そのダイオキシン類は土壌に含まれるダイオキシン類の $6.4\sim 7.5\times 10^{-6}$ と僅かである(環境庁告示 46号法の条件下)。

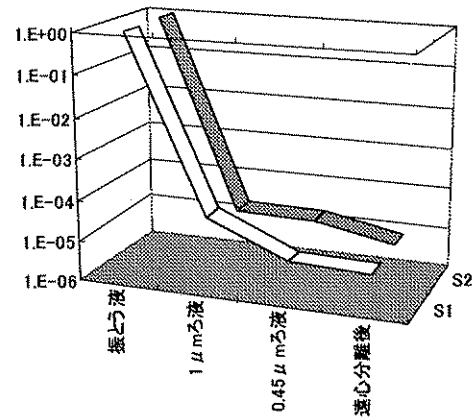


図-2 実験結果 (S1: 試料1、S2: 試料2)

非懸濁態ダイオキシン類は土壌中に含有されるダイオキシン全体と比較する僅かであった。これは、ダイオキシン類のオクタノール/水分配係数( $K_{ow}$ )が非常に大きく、水に溶解しにくく土粒子に吸着しやすいこととよく対応する。ただ、文献値から計算で求めたダイオキシン類の水への溶解度( $1.0\times 10^{-6}\sim 10^{-12}$ )と比較すると非懸濁態のダイオキシン類の割合( $6.4\sim 7.5\times 10^{-6}$ )はやや大きいものとなっている。これは非懸濁態ダイオキシン類の中には0.45 $\mu$ m未満の微粒子に吸着したダイオキシン類が含まれているためと考えられる。

したがって、ダイオキシン類に汚染された土壌からの非懸濁態ダイオキシン類に起因する汚染の拡大はほとんどなく、汚染土壌からのダイオキシン類の拡大は大部分が土粒子の移動に伴うものであると考

表-1 実験結果 (試料 1: 63,000pg-TEQ/g)

		ダイオキシン類	pH	濁度	SS	濃度 / 初期濃度
振とう液		6,072,000 pg-TEQ/l *計算値	7.28	12,200	93,000	1
1 μm	残渣	24,000pg-TEQ/g				
	通過液	320pg-TEQ/l	7.12	2.03	7.5	$5.3 \times 10^{-5}$
0.45 μm	残渣	54,000pg-TEQ/g				
	通過液	47pg-TEQ/l	7.45	0.86	7.5	$7.4 \times 10^{-5}$
遠沈	沈殿物	430pg-TEQ/g				
	上澄液	39pg-TEQ/l	7.38	0.51	-	$6.4 \times 10^{-5}$

表-2 実験結果 (試料 2: 790pg-TEQ/g)

		ダイオキシン類	pH	濁度	SS	濃度 / 初期濃度
振とう液		76,000pg-TEQ/l 計算値	3.30	15,600	90,500	1
1 μm	残渣	440pg-TEQ/g				
	通過液	1.5pg-TEQ/l	3.41	0.63	1.3	$2.0 \times 10^{-5}$
0.45 μm	残渣	660pg-TEQ/g				
	通過液	1.4pg-TEQ/l	3.37	0.00	測定不可	$1.8 \times 10^{-5}$
遠沈	沈殿物	測定不可				
	上澄液	0.57pg-TEQ/l	3.37	0.00	-	$7.5 \times 10^{-5}$

えられる。

## 2. 3 ダイオキシン類の移動特性に関する実験

### 2. 3. 1 目的

ダイオキシン類は土粒子へ強く吸着するため、土壌中のダイオキシン類の拡散の大部分はダイオキシン類が吸着した土粒子が土壌中を移動することに伴うものであることが前述の実験により明らかとなった。そこでここでは、土壌中のダイオキシン類の拡大に関するカラム試験を行い、汚染土壌からのダイオキシン類の拡散量やそれに影響を与える要因について実験を行い検証した。

### 2. 3. 2 実験

カラムに充填する土壌などが異なる4ケースについて実験を行う。ケース1~3は汚染土壌からのダイオキシン類拡散、ケース4は無汚染土壌のダイオキシン類移動抑制効果について検証した。

① 透水係数が  $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  程度となるように、ダイオキシン類汚染土壌もしくは無汚染土壌を充填し、通水カラム(直径 10cm)を作成する。必要であれば透水係数を確保するため、汚染土壌に砂質土(まさ土)を混合する。

② 純水により下方より飽和状態にした後、通水速度は 1ml/min ( $\approx 4.25 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ ,  $\approx 20\text{L}/2 \text{ 週}$ ) 程度で上方から下方へと通水を行う。

③ 通水し、所定の通水量毎に通過水のダイオキシ

ン類の定量分析を行う。

④ ケース4では非懸濁態ダイオキシン類の挙動を把握するため、無汚染土壌を充填したケースでは、汚染水と通過水のダイオキシン類濃度の測定とともに、毎分 3000回転で遠心分離を行った後 0.45 μm-MF を通した検体についても分析を行う。

### 2. 3. 3 結果

実験の結果を表-3 に示す。ケース1~3については土粒子の移動量、ケース4については無汚染土壌を通過したダイオキシン類の割合を、カラム通過水のダイオキシン類濃度から求め、表-4 に示す。

まず、充填した土の乾重量を 1kg(充填密度  $1.3\text{g/cm}^3$ )と仮定すると、ケース1~3の結果から流出した土量は 1L あたり最大で全体の  $10^{-4}$  程度であった。ケース1,3と比較してケース2の流出土量が大きなものとなっている理由として、汚染土壌に砂質土(まさ土)を混合したことに伴い、透水係数が上昇し、土粒子が移動しやすい環境になったためと考えられる。

また、無汚染土壌(関東ローム)の存在により、ダイオキシン類の移動を 1L あたり最大で  $10^{-6}$  程度にまで低減した。さらに通過するダイオキシン類は懸濁態と比較して非懸濁態は 10 倍以上通過する割合が高いことが確認された。

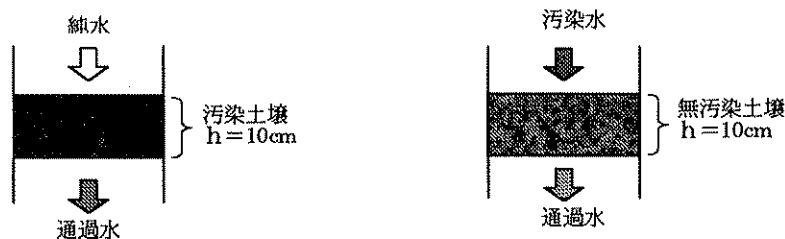


図-3 実験装置 (左:ケース1~3、右:ケース4)

表-3 実験結果

ケース	通水試料		充填土		結果(pg-TEQ/l)			
			濃度 (pg-TEQ/g)	充填厚 (cm)	0~2L	2~20L	20~40L	40~60L
1	純水		61,000	10	150		45	25
2			5,300	10	220	32 (2~22L)	50 (22~42L)	-
3			790	10	12	0.26 (2~22L)	-	-
4	汚染水	136 pg-TEQ/L	無汚染土壌 (関東ローム)	10	0.0099		0.0056	1.6
	うち 非懸濁態	0.15 pg-TEQ/L			0.0088		0.0020	0.011

表-4 カラムから流出したダイオキシン類量

ケース	カラム通過前の ダイオキシン類量 (pg-TEQ)		カラム通過後の ダイオキシン類量 (pg-TEQ)	通過水量 (l)	流出土量 (mg) 【1Lあたり】	通過した割合(%) 【1Lあたり】
1	純水		4400	60	72 【1.2】	-
2			2080	42	392 【9.3】	
3			29.2	22	37 【1.7】	
4	汚染水	8160	32.31	60	-	0.396 【 $6.6 \times 10^{-3}$ 】
	うち非懸濁態	9	0.436		4.84 【0.081】	

以上の結果から、汚染土壌に含有されるダイオキシン類の移動は全体の土量を考えると僅かであると考えられる。また、その量は地盤の透水係数に影響を受けると考えられる。さらに、周辺土壌へ移動したダイオキシン類も大部分が周辺土壌に捕捉され、移動が抑制される。

## 2.4 まとめ

以上の既往の研究結果と実験結果から、以下のことが確認された。

- ① 非懸濁態ダイオキシン類の量は土壌に含まれるダイオキシン類全体の  $10^{-5}$  以下であった。これは実際に文献などから推定されるダイオキシン類の水への溶解度と比較するとやや高い。このことは  $0.45 \mu\text{m}$  未満の微粒子に付着しているダイオキシン類が非懸濁態としてカウントされたためと考えられる。
- ② 地盤中のダイオキシン類は主に雨水や地下水の通過に伴って土粒子の移動とともに汚染土壌から拡散すると考えられる。実験の結果、汚染土壌に含有されるダイオキシン類の移動は地盤の透水係数に依存するが全体としては僅かであり、また周辺土壌へ

移動したダイオキシン類も懸濁態、非懸濁態ともに大部分が捕捉され、移動が抑制される。

したがって、土粒子の移動を制限することにより、ダイオキシン類の汚染拡大を防止することが可能であることから、土粒子の移動を抑制する覆土・敷土工法、遮水壁工法、固化工法はダイオキシン類の汚染土壌対策として有効であると考えられる。現在、建設現場で適用可能な各工法のマニュアルを作成中である。

## 3. 水域の対策工法の開発(袋詰脱水処理工法)

### 3.1 概要

「袋詰脱水処理工法(写真-1)」はジオテキスタイル製袋を用いて浚渫土などの建設発生土を脱水・減量化するとともに再利用する工法であり、土木研究所と民間各社により既に実用化されている。本研究はその袋詰脱水処理工法を改良することにより、高含水比のダイオキシン類に汚染された土壌・底質を封じ込めるとともに脱水・減量化させる「『高機能型』袋詰脱水処理工法」の開発を目的として行った。

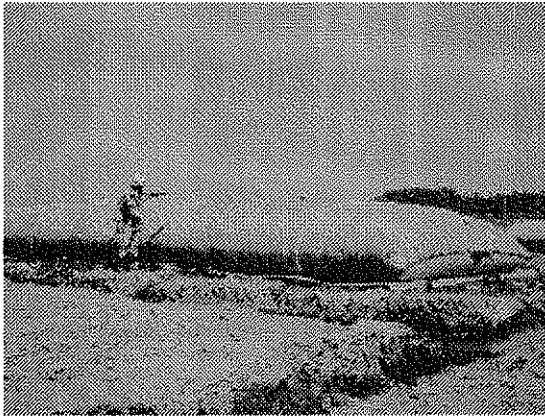


写真-1 袋詰脱水処理工法

### 3.2 実験

#### 3.2.1 目的

本実験では、ジオテキスタイル製袋の持つダイオキシン類を含む濁質のろ過性能の確認と、袋材および凝集剤のろ過性能への影響を明らかにするために、袋へのダイオキシン類汚染試料の充填実験を行った。

#### 3.2.2 試料と方法

実験は、試料、袋材、凝集剤について以下に述べるものを利用して行った。試料には、以下に述べる

3種類の試料を用いた。① 廃棄物焼却場の排煙に起因するダイオキシン類を含有する試料1、② 試料1を10倍の質量の真砂で希釈した試料2、③ 農薬工場からの排水に起因するダイオキシン類を含有する試料3である。各試料に対して基本的な土質試験とダイオキシン類含有量試験を行った結果を表-2に示す。また、袋材としては、一般的な土木工事で用いられるジオテキスタイルである布材1とろ過性能を高めるため高密度に織られたジオテキスタイルである布材2の2種類を用いた。各布材の基本特性について表-6に示す。さらに、凝集剤としては、無機凝集剤であるPAC(ポリ塩化アルミ)とともに、高分子凝集剤としてカチオン系凝集剤を用いた。なお、アニオン系凝集剤については、予備実験において排水速度を加速させる効果はあったものの、ろ過性能がカチオン系凝集剤と比較して小さかったため本実験では用いなかった。

封じ込め実験では、これらの底質・土壌を含水比600%に調整し、20Lの大きさの袋では土槽からの自然流下、200Lでは電動ポンプを用いて袋へ充填した。その後、袋からの排水を一定量毎に瓶を用いて採取し、対象となる有害物質の濃度を測定した。実験

表-5 土質試験結果

	土の密度	含水比 (%)	液性限界 (%)	強熱減量 (%)	含有量(平均)
					ダイオキシン類(pg-TEQ/g)
試料1	2.665	66.3	51.7	6.63	71,500
試料2	2.64	20.96	-	1.67	3,600
試料3	2.596	27.05	48.9	6.62	790

表-6 袋材特性

	材質	厚さ(mm)	単位重量 (g/m <sup>2</sup> )	引張強さ (N/cm)	透水係数 (cm/s)	A.O.S.* (mm)
袋材1	織布 ポリエステル	0.35	210	716	1.5*10 <sup>-3</sup>	0.108
袋材2	織布 ポリエステル	0.225	155.2	274	4.3*10 <sup>-4</sup>	<0.068mm

\*布の開口径、ガラスピースにより測定

表-7 実験ケース

Case	濃度	袋材	大きさ	凝集剤
1	試料1	袋材1	20L	-
2	試料1	袋材1	20L	PAC50ppm
3	試料2	袋材1	20L	カチオン系 800ppm
4	試料3	袋材2	200L	カチオン系 1000ppm

表-8 袋内に封じ込められたダイオキシン類の割合  
(袋内に封じ込められたダイオキシン類量/注入したダイオキシン類量)

Case	濃度	袋材	凝集剤	割合	平均排水濃度 【SS(mg/l)】
1	71,500pg-TEQ/g	袋材1(20L)	-	99.51%	94,000pg-TEQ/l 【838】
2			添加	99.83%	37,000pg-TEQ/l 【299】
3	3,600pg-TEQ/g	袋材2(200L)	添加	99.82%	2,000pg-TEQ/l 【250】
4	790pg-TEQ/g		99.98%	5.5pg-TEQ/l 【25.6】*	

\*赤褐色の排水が観測された。試料中の鉄が酸化したものと考えられる。

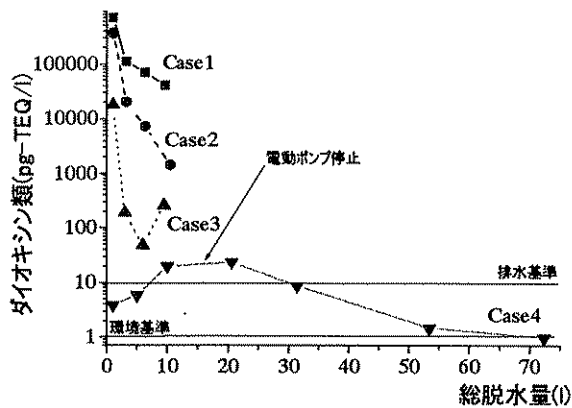


図-4 実験結果(濃度)

ケースを表-7に示す。

### 3. 2. 3 結果

実験結果を図-4,5に示す。なお、いずれの実験についても袋からの排水が観測されなくなるまで20Lの袋のケースで2時間、200Lで24時間程度であった。また、各ケースについて、排水の平均濃度と注入した土壌・底質に含まれる有害物質のうち袋内に残留した割合を表-8に示す。これらの結果から、ろ過性能の高い布材や凝集剤添加を使用することにより、通常の充填と比較して排水中のダイオキシン類の濃度が減少することが確認された。また両者を併用することにより99.9%以上のダイオキシン類を袋内に封じ込めるとともに脱水・減量化できた。

袋材1を用いたケースでは、脱水・減量化が進行するにつれて排水中のダイオキシン類濃度が低下した。これは、ジオテキスタイルの内側に充填試料による膜(膜ろ過では汚れと称される)が生じ、排水が進むにつれその膜が成長していくことによりろ過性能が高まるためと考える。一方、ろ過性能の高い袋材2では注入開始後排水中のダイオキシン類濃度が上昇し電動ポンプ停止後低下した。これは、試料の充填が進むにつれ袋に張力が大きくなり袋材の目が開くことで濃度が上昇し、電動ポンプ停止後排水が進むにつれ張力が低下し袋材の目が小さくるとともに充填試料による膜が形成され濃度が低下したと考える。袋材1でそのような現象がみられないのは、試料の充填量が少なく張力がほとんど働かなかったことや袋材の強度が比較的高かったこと、袋材のろ過性能と比較して充填試料による膜の持つろ過性能の寄与する割合が高いためと考えられる。

### 3. 3 まとめ

袋からの排水中のダイオキシン類の濃度は、充填

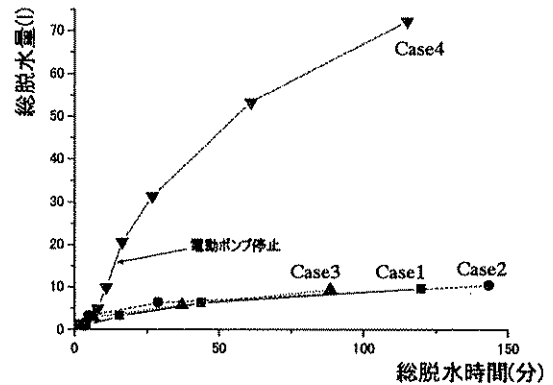


図-5 実験結果(脱水量)

する底質や土壌のダイオキシン類含有量とともに粒径分布などに左右されると考えられる。したがって、実際に使用する際には、実験などを行い排水中のダイオキシン類の濃度を把握し、必要であれば排水処理を併用し、排水中のダイオキシン類の濃度を定められた基準以下にし放流する必要がある。現在、建設現場で適用可能なマニュアルを作成中である。

## 4. 結論

本研究の成果は以下の通りである。

- ① 既往研究と実験結果から土壌中のダイオキシン類の99.999%以上は懸濁態のダイオキシン類として土粒子とともに移動することを確認し、土粒子の移動を抑制する覆土敷土工法、遮水壁工法、固化工法は汚染土壌の封じ込め工法としての適用性が高いことを検証した。
- ② 底質対策としての袋詰脱水処理工法の開発では、ろ過性能の高い袋材と凝集剤を組合せることによりダイオキシン類の捕捉率の向上を実現し、汚染底質に含まれるダイオキシン類の99.9%以上を封じ込めながら脱水・減量化が可能であることを実験により確認した。

## 参考文献

- 1) Freeman R A, Schroy J M: "Modeling the Transport of 2, 3, 7, 8TCDD and other Low Volatility Chemicals in Soils". Environ Prog, Vol.5, No.1, pp.2833, 1986
- 2) Freeman R A, Schroy J M: Comparison of the Rate of TCDD Transport at Times Beach and at Eglin AFB. Chemosphere Chem Biol Toxicol Relat Environ Probl, Vol.18, No.1/6, pp.13051312, 1989