

国立環境研究所で実施してきたテストセルおよびライシメータ実験について



独立行政法人国立環境研究所

1

目次

(1) イントロダクション

- 1) ライシメータとは？
- 2) ライシメータとカラムの違いは？
- 3) カラム、ライシメータ、テストセルの実験規模
- 4) 室内および模擬実験の位置づけ

(3) まとめ

(2) NIESのやってきた実験

(2-1) ライシメータ実験の紹介

- 1) 覆土通気性に関する実験(2005)
- 2) 安定セシウムの溶出挙動(2012)
- 3) 縦横比による溶出挙動(2011)
- 4) 硫化水素発生メカニズムの把握(2004)

(2-2) テストセル実験の紹介

- 1) 埼玉テストセル1号(2003～)
- 2) 岡山テストセル(2004～)
- 3) 寄居テストセル2号(2005～)
- 4) タイテストセル(2009～)

2

(1) イントロダクション

3

ライシメータとは？

“lysimeter”は、“ほぐす”と“測る”を意味するGreekの“lysi”と“meter”から由来。

ライシメータはsoil science分野で自然の土壌環境(field soil environment)を模擬するために作られた土壌タンク(soil container)であり、土壌からの蒸発量および土壌層内の水、ガス、有害物などの移動を把握するために使い始めたものである。

(Aboukhaled et al., 1982; Bergström, 1990; Winton and Weber, 1996; Corwin, 2000; ABDOU and FLURY, 2004).

一方、埋立地管理分野(landfill management)では、



安定化促進
埋立技術の
妥当性評価

安定化
メカニズムの
解明

有害物質の
挙動把握

4

ライシメータとカラムの違いは？

研究者によっては、“ライシメータ”と“カラム”の言葉を混用する。
また、同じ大きさに関わらず、違う名前と呼んでいる。(Ohte et al., 1997)

Abdou(2004)は、**ライシメータ**とはfield scaleとsmall laboratory scale(カラム試験と呼ぶ)の中間的なアプローチであり、natural field soilをminic(模擬)したものであると述べる。

Winton(1996)らは、下記のように述べる。

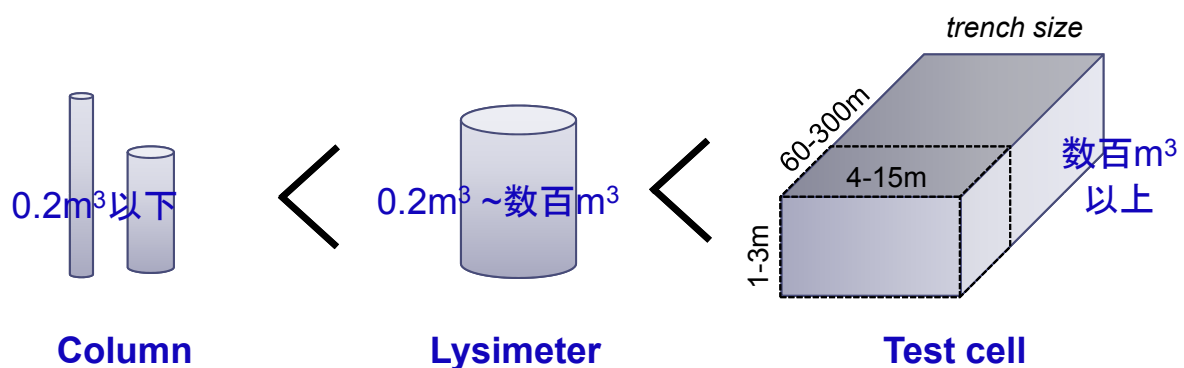
*“**Lysimeters** had a various size ranging from 5cm to 2m in diameter and from 0.4 to 2m in depth, and were round, square or rectangular, constructed of concrete, steel, fiberglass or plastic in soil science field.”*

Christensen (1992)は、0.2m³以下のものはラボスケールに、0.2m³以上であり実際埋立地のセル以下のものはライシメータに分類している。

5

カラム、ライシメータ、テストセルの実験サイズ

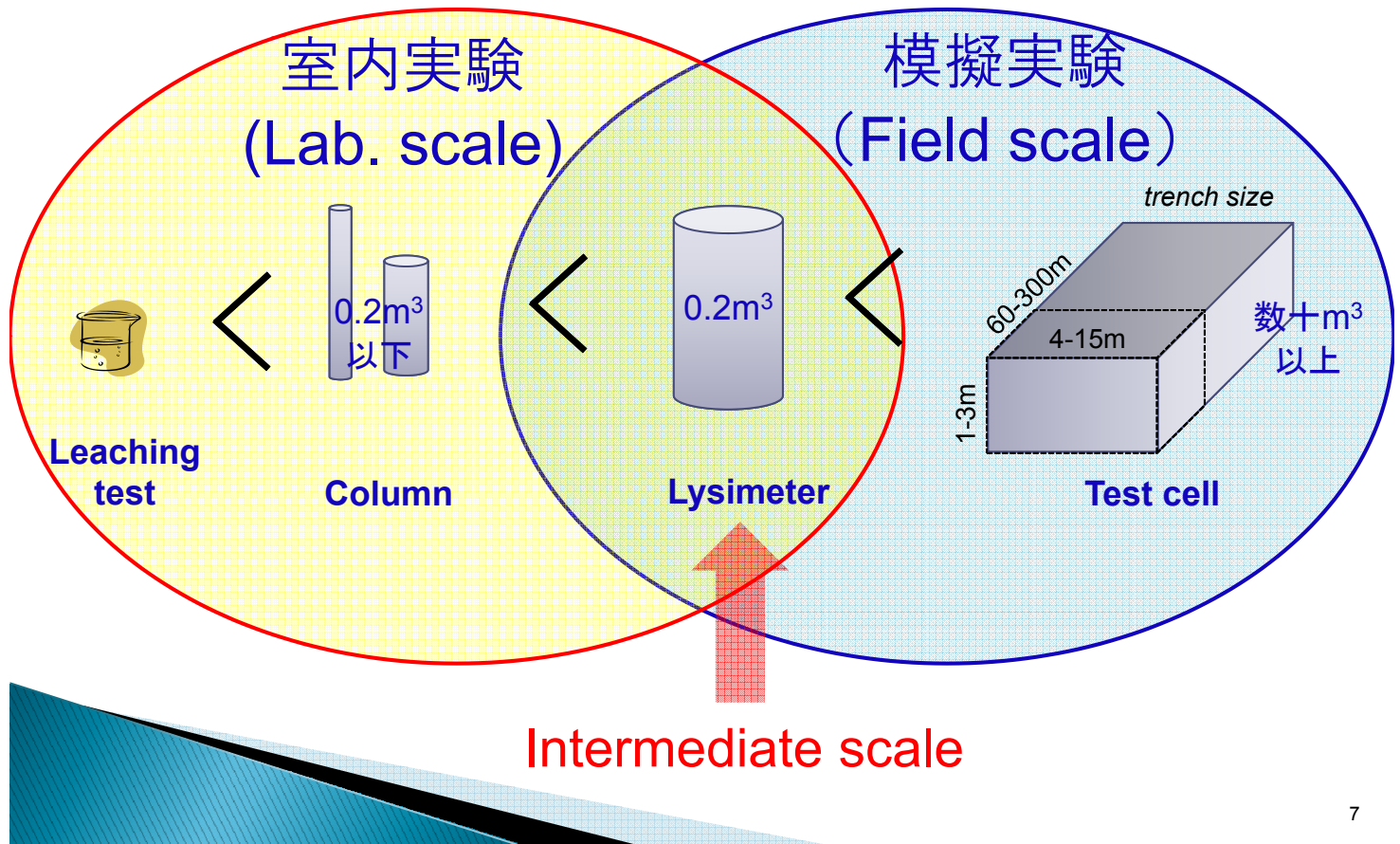
以上の文献結果からみた実験規模のまとめ



しかし、未だに明確な定義はされていない。
したがって、用途や規模などの基準を明確にし、
新たな分類基準を立てる必要がある。

6

各実験の位置づけ

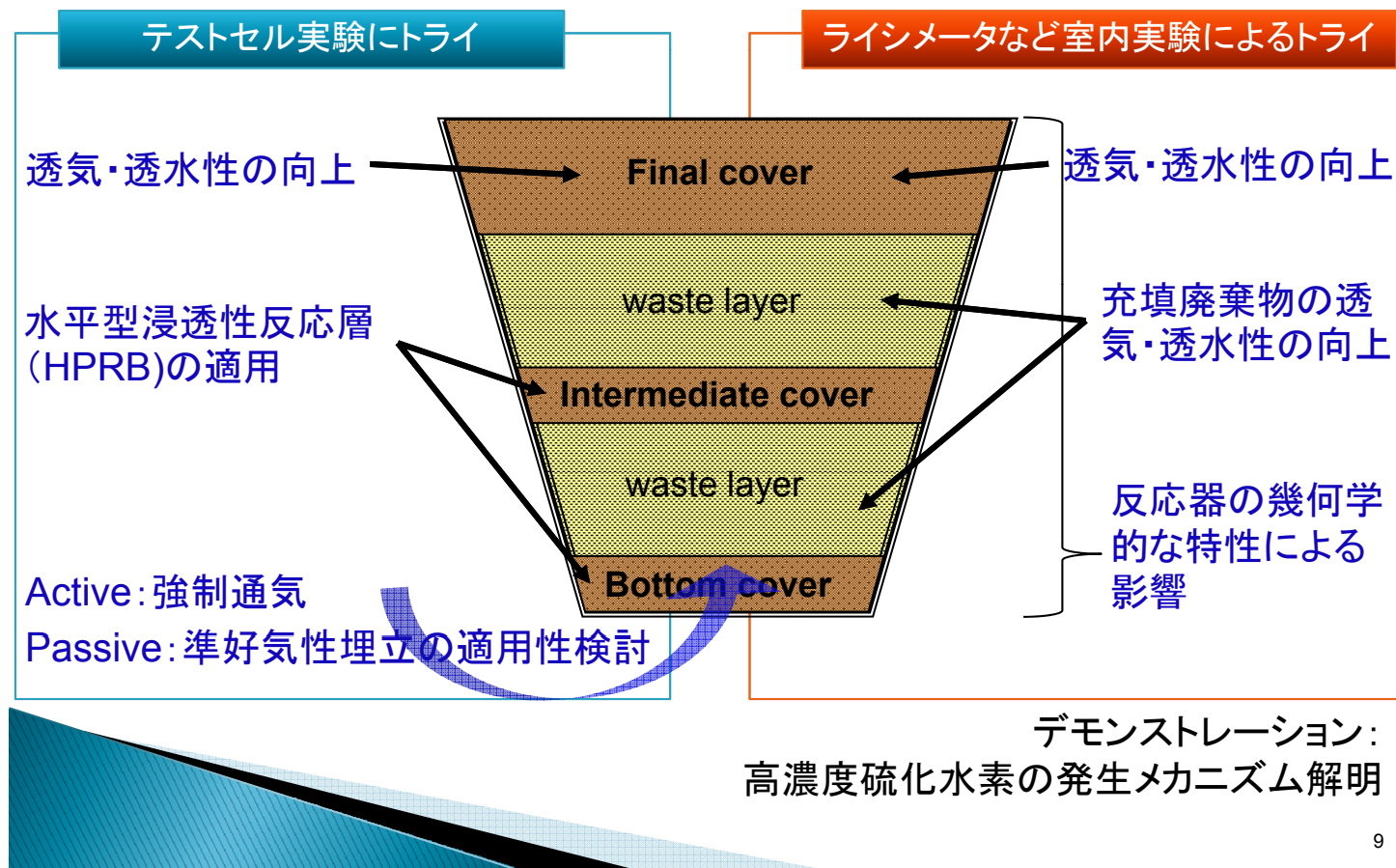


7

(2) NIESのやってきた実験

8

埋立地の安定化促進のためのNIESのトライ



9

(2-1)ライシメータ実験の紹介

- 1) 硫化水素発生メカニズムの把握(2004)
- 2) 覆土通気性に関する実験(2005)
- 3) 安定セシウムの溶出挙動(2012)
- 4) 縦横比による溶出挙動(2011)

覆土の透水性向上による安定化促進

2004年～2005年

目的: **覆土の透水・透気性向上**による, 廃棄物層の安定化促進効果の検討

パラメータ: **層内の酸素や二酸化炭素濃度分布(プロファイル)**、浸出水水質の挙動

対象廃棄物: 建廃ふるい下残さ, 不燃物(シュレッダ残さ), 鋳さいスラグ、燃え殻、コンポスト

11

大型ライシメータ装置の概要

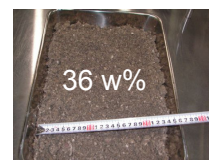
2種類の覆土（高透水，難透水）

覆土の透水係数:

LM1: $>10^{-2}$ cm/s

LM2: $<10^{-4}$ cm/s

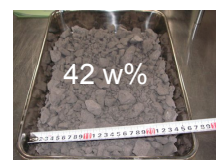
混合廃棄物試料



建廃
ふるい下残渣



不燃物
シュレッダー残渣

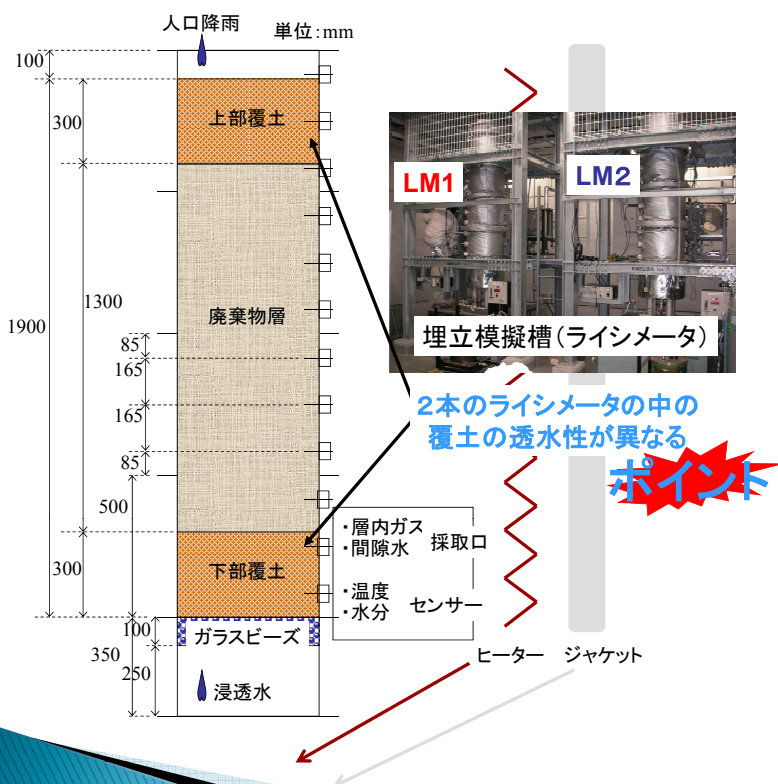


鋳さいスラグ



燃え殻

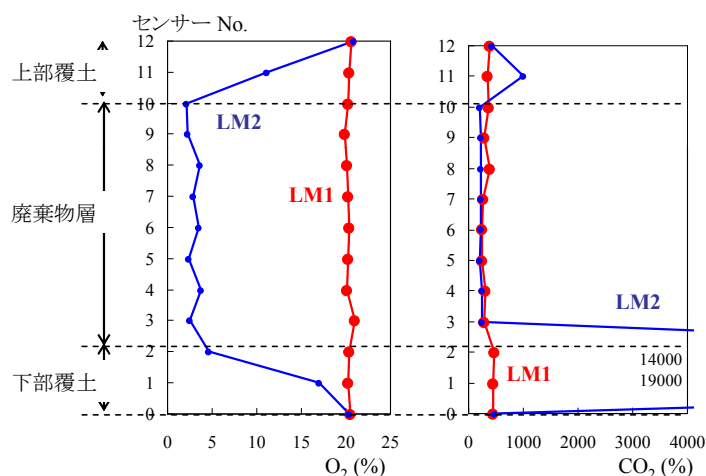
廃棄物の透水係数: 10^{-3} cm/s



12

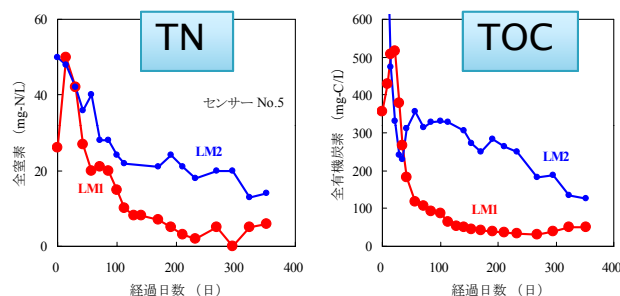
大型ライシメータ実験の結果

層内の酸素(O₂)と二酸化炭素(CO₂)
(100日目の鉛直方向分布)



LM1: 層内の酸素供給量が十分
LM2: 層内の酸素濃度が低い

層内水中の全窒素と全有機炭素
(経過日数による推移)



減少速度: LM1 > LM2

高透水性の覆土を用いたほうが、層内水の浄化が速やかであった。

13

2) 大型ライシメータ

ライシメータ実験装置を用いた処分場内における安定セシウムの挙動

2012年3月～2012年10月

目的: 土嚢に収められた廃棄物を水中ならびに海中投入した際の、**安定セシウムの溶出挙動**の実証試験を実施することで、挙動解明や今後の放射性物質汚染廃棄物等の埋立処分の安全性確保に向けた知見を得る。

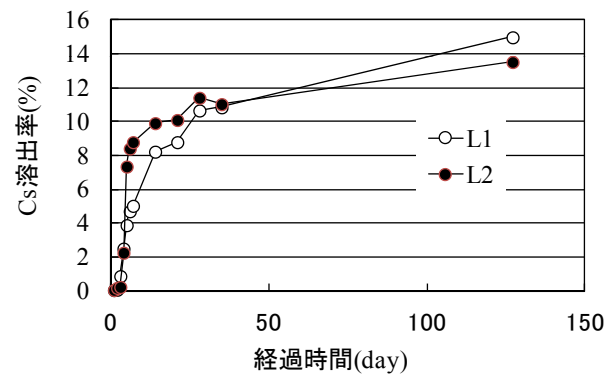
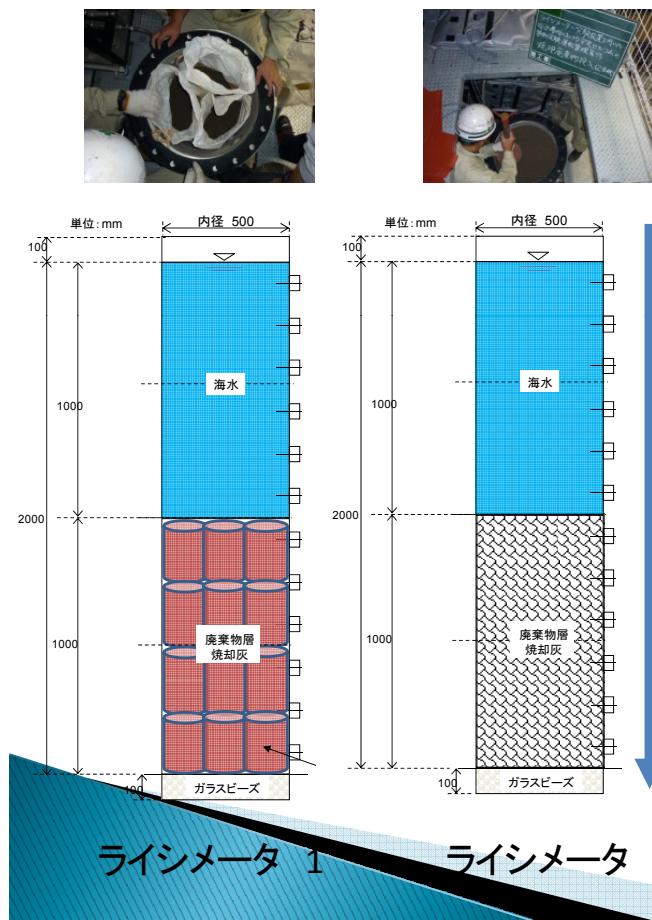
実験方法: 焼却灰1kg当たり、塩化セシウム3.025gを添加し、**フレコン**に充填したものとそのまま充填したもののセシウム溶出挙動を評価した。

パラメータ: **水中や層内間隙水中の安定セシウム濃度の変動**

対象廃棄物: 放射性セシウムに汚染されていない焼却灰

14

大型ライシメータの概要と結果



- ✓ ライシメータ1と2、両方とも海水中のセシウム濃度がゴミ層内の濃度に比べ最大20倍まで低い。
- ✓ 焼却灰をフレコンにして充填しても、セシウムの溶出濃度には大きな差が見られない。
- ✓ ライシメータ1と2、両方ともゴミからのセシウム溶出率は徐々に上昇し、127日目で約13-15%まで達する。

15

3) カラム実験

反応器の縦横比による建設混合廃棄物 破碎選別残渣の溶出挙動に関する研究

2011年2月～現在

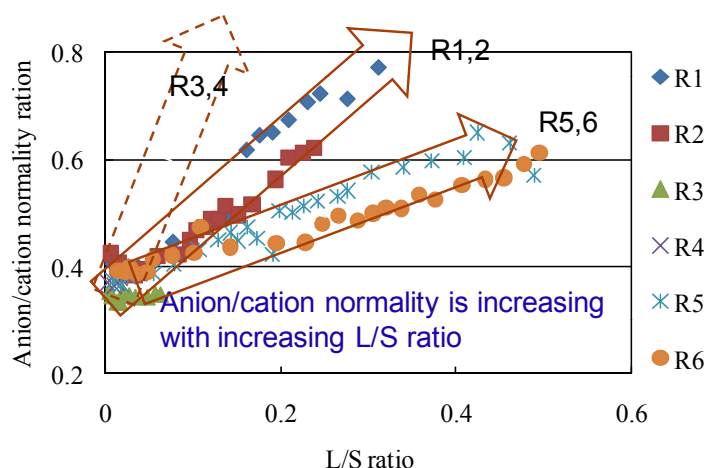
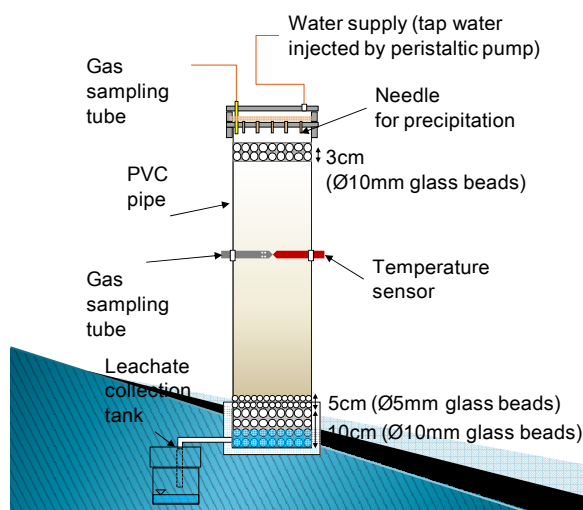
目的: 1) 反応器の縦横比が浸出水中の無機物質溶出挙動に及ぼす影響を明らかにする。2) ライシメータを用いた室内実験の標準化のための基礎データを得る。

パラメータ: 反応機の縦横比による無機イオン類の溶出濃度

対象廃棄物: 建設混合廃棄物残さ(<5mm以下のもの)

16

カラムの概要と結果



- I. ライシメータの長さと幅による建設混合廃棄物からの溶出挙動の違いが見られた。
- II. その理由は壁面流れによるごみ層の部分的な洗い出し効果のためである。
- III. このような影響を防ぐためには、十分なライシメータの幅($\geq 0.3\text{m}$)を確保するか、壁面流れの防止対策を行う必要がある。

17

4)大型ライシメータ デモンストレーション実験

安定型処分場における 高濃度硫化水素の発生原因の解明

2004年2月～2004年8月(約200日)

目的:(1)実証実験を含めた硫化水素の発生メカニズムに明確な回答を導き出す(特に石膏ボード原因説への解答)(2)搬入規制をも含めた明確な対策技術を提示

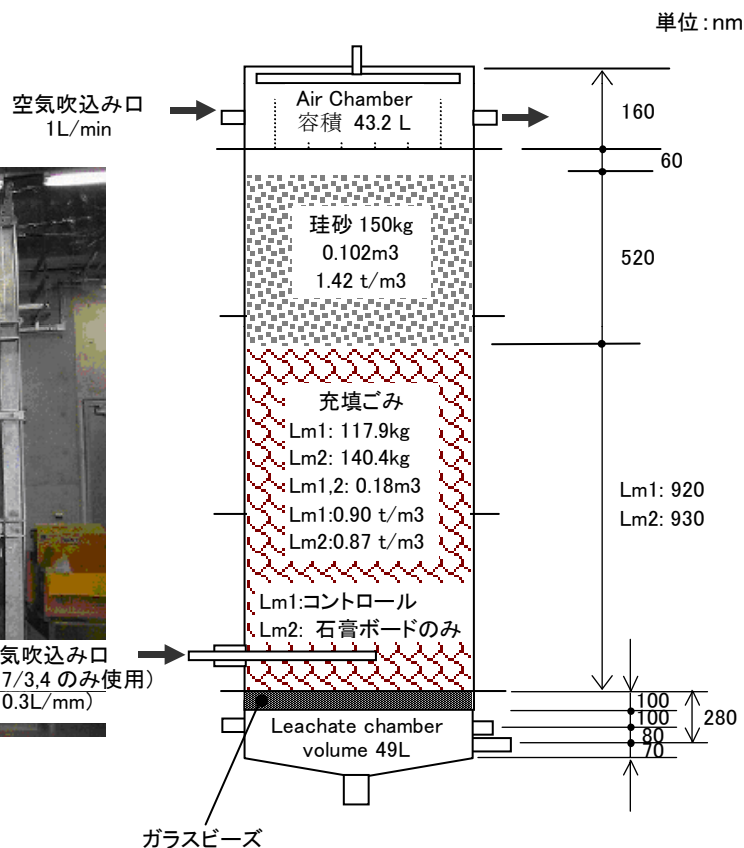
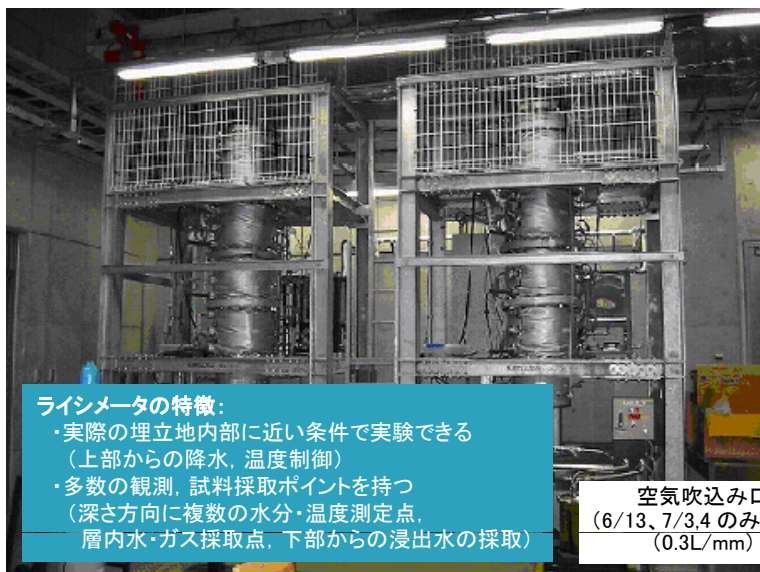
パラメータ:ごみ層内の深さ方向の温度、水分、ガス組成の**プロファイル**

対象廃棄物:廃石膏ボード(粒状+粉体)、難燃プラ(有機物汚濁無し)と廃プラ(汚濁有り)を混合

18

大型ライシメータ装置の概要

組成 (%)	LM1	LM2
廃石膏ボード(粒状)	58	43
廃石膏ボード(粉状)	19	15
難燃性廃プラヘレット	0	43
廃プラ(5×5)	23	0

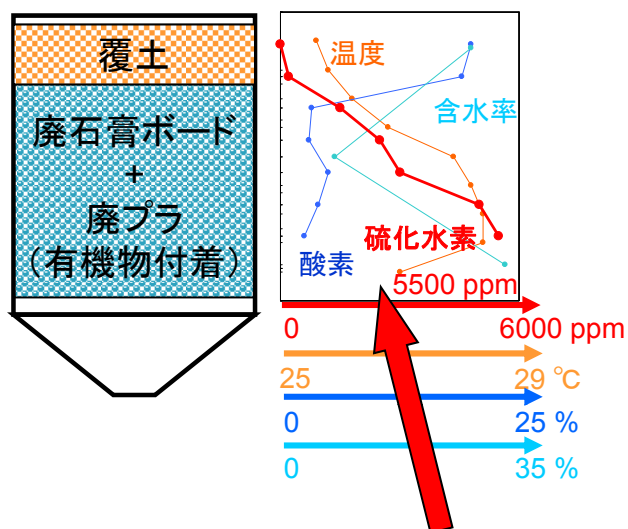


全ての物理・化学的な初期条件を把握

19

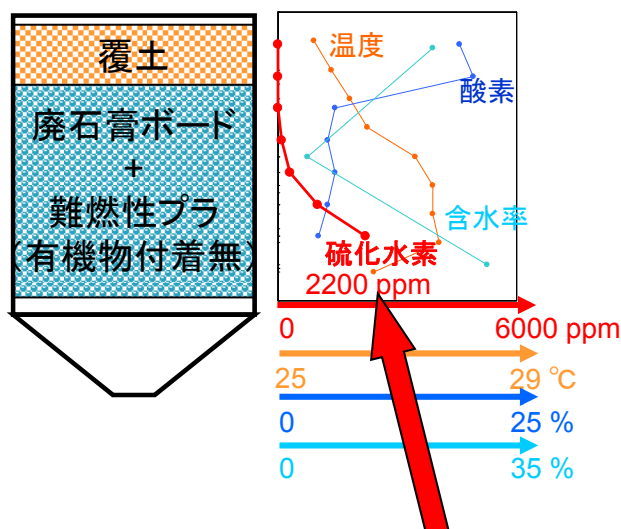
廃石膏ボードからの 高濃度硫化水素の発生メカニズム

ライシメータ1



廃プラに含まれる有機物
によって
高濃度硫化水素を発生

ライシメータ2



廃石膏ボードに含まれる
グルコース糊のみで
高濃度硫化水素を発生

20

(2-2)テストセル実験の紹介

- 1) 寄居テストセル1号(2003～)
- 2) 岡山テストセル(2004～)
- 3) 寄居テストセル2号(2005～)
- 4) タイテストセル(2009～)

21

1) 寄居テストセル1号

テストセルによる焼却灰・シュレツダダスト混合廃棄物の安定化促進実験

2003年3月～2004年3月

目的: 最終処分場に3基のテストセルを建設し、実際と全く同じように埋立廃棄物の生物学的安定化を促進するための**好気性および嫌気性埋立用バイオリアクター**の運転特性を検討する。

パラメータ: **強制通気と浸出水循環**による浸出水水質と埋立ガスの挙動

対象廃棄物: MSWI焼却灰およびシュレツダダスト

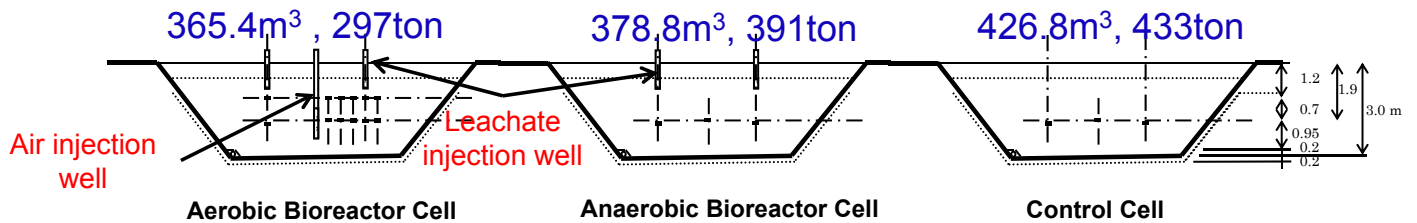
本実験の注意点: 各セルに投入したごみの割合が異なる。

研究結果: 1) 好気性埋立処分場バイオリアクターの運転により、有機物および窒素の除去を促進することができた。2) 焼却灰/シュレツダダスト比が、廃棄物層内のpHを決定し、かつ、微生物の活動の開始に影響を及ぼす決定的な要因であることが示された。したがって、浸出水による新規充填廃棄物の現場水洗並びに通気運転を提案した。

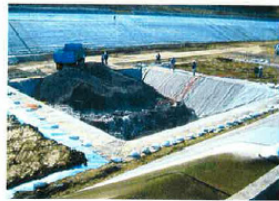
22

テストセルの概要

逆さピラミッド構造(底部が7.5m×7.5m、頂部が17m×17m)



比率(%)	好気性	嫌気性	コントロール
シュレッダーダスト	60	47	34
焼却灰	40	53	66



23

2) 岡山テストセル

透水性反応層による効果

2004年12月～2006年

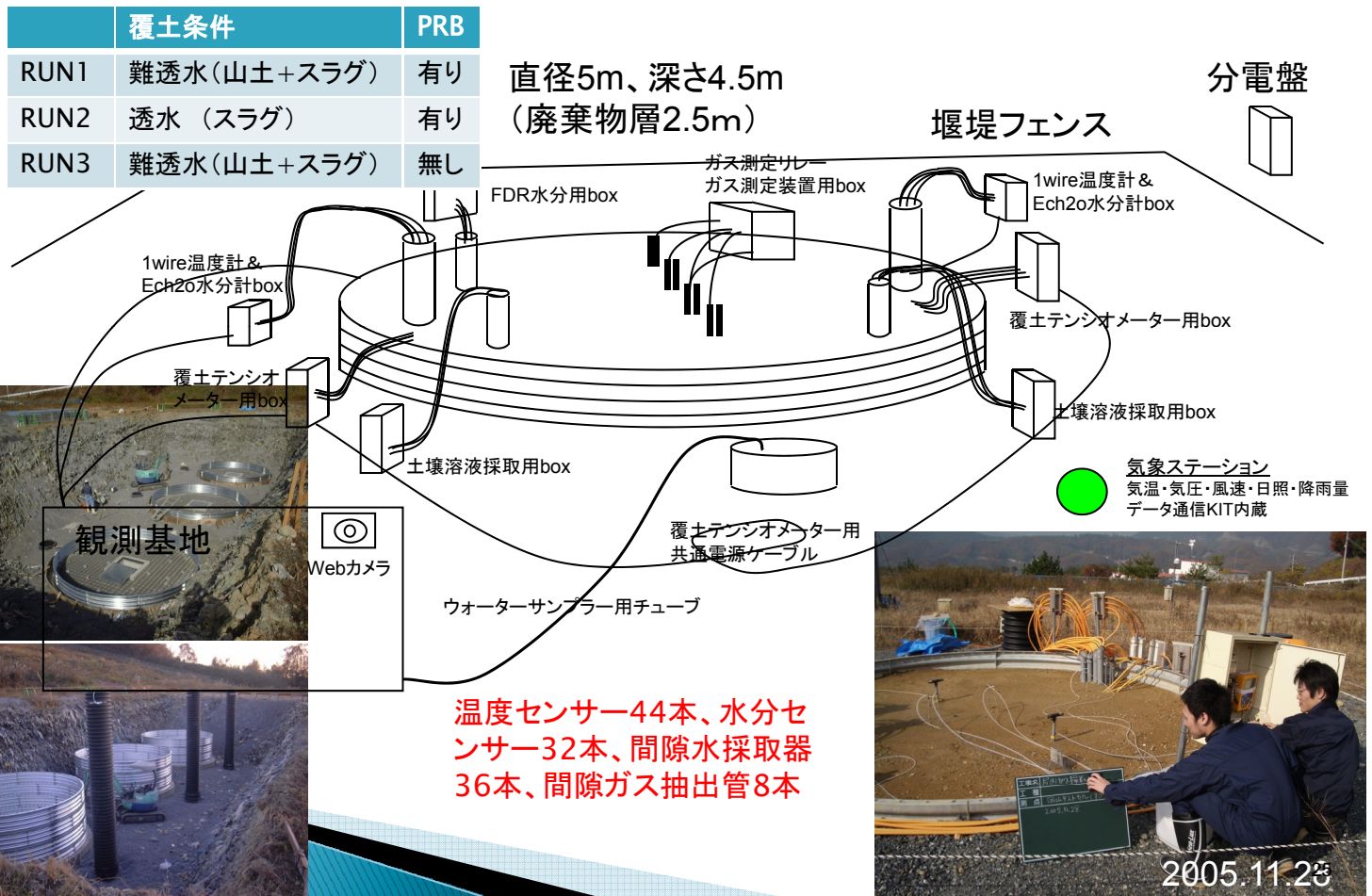
目的: 最終覆土の透水性(スラグ)による安定化効果と透水条件による水平型浸透性反応層(HPRB)の効果を検討する。

パラメータ: 透水性覆土やHPRBによる内部保有水水質変動

対象廃棄物: 飛灰(セメント固化灰): 破碎後不燃物: バーク堆肥=5:4:1 (V%)

結果: 1) 埋立層内の温度や水分率のモニタリングが可能となり、室内実験の条件設定のための有用なデータを得ることができた。2) また、内部保有水のモニタリング結果、PRB層では、pHの安定化や有機炭素濃度の減少など浸出水における有害物質の負荷が軽減することが示された。

岡山テストセル概要



3) 寄居テストセル2号

水平型浸透性反応層による有害物質 捕捉技術の確立と長期性能評価

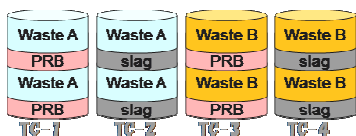
2005年9月～現在

目的: 埋立廃棄物から溶出する有害物質、環境汚染物質の捕捉効果のある中間、**底部覆土(HPRB)**を敷設することによる水処理負荷軽減と地下水汚染等リスク軽減。

パラメータ: HPRBによる浸出水水質と埋立ガスの挙動

対象廃棄物: 焼却灰、粗大ごみの破砕物、産業廃棄物破砕物、コンポスト

研究結果: 1) HPRBによる有機物の補足効果が見られた。2) PRBにより補足された有機物の好気性分解によって、メタンガスの排出量は減り、二酸化炭素の排出量は増えた。



各テストセルにおける炭素収支

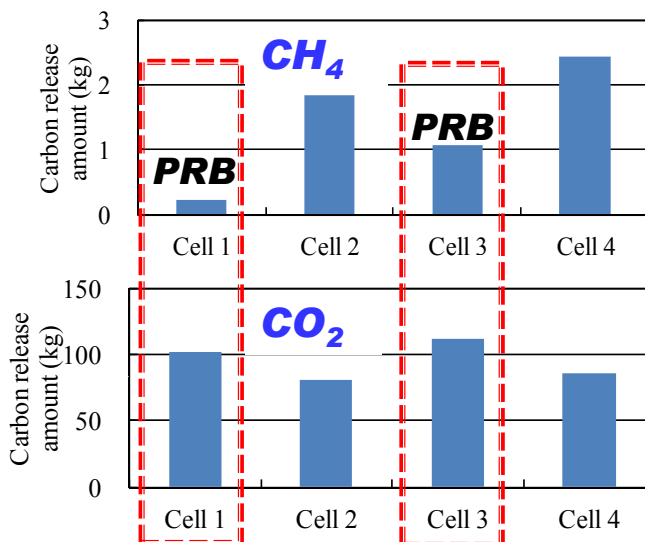
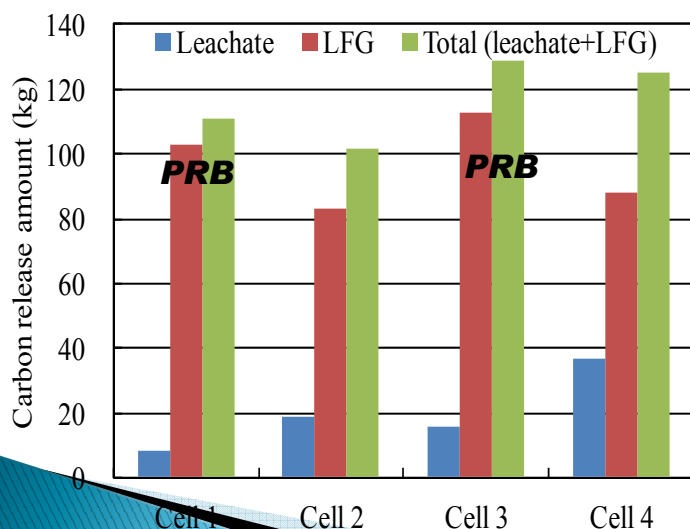
LFGによる炭素放出量

$$\sum_{i=1}^n (\text{Flux}_{ei} \times T_{ei} \times A/2 + \text{Flux}_{wi} \times T_{wi} \times A/2)$$

where i is sampling time, Flux_{ei} and Flux_{wi} are gas flux from eastern and western surface, T_{ei} and T_{wi} are the elapsed time between i and $i+1$ sampling time, A is surface area of test cell.

浸出水による炭素放出量

$$\text{Leachate emission (L)} \times \text{TOC (mg/L)}$$



Total emissions depend on HPRB

27

4) タイテストセル

東南アジア地域に対する準好気性埋立工法の適用性に関する研究

2009年5月～現在

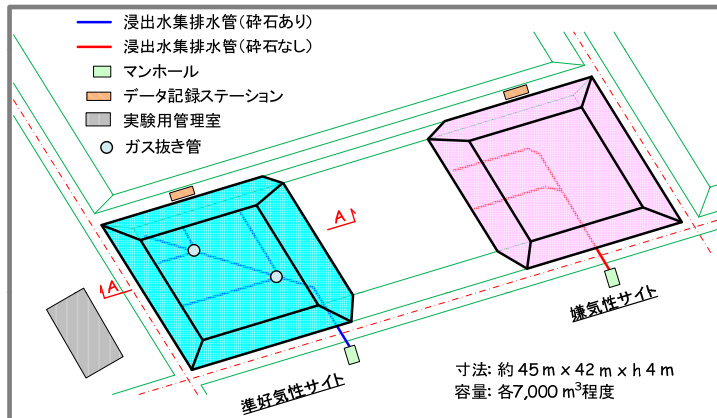
目的: 1) 高温多雨気候である東南アジアの廃棄物処分場における準好気性埋立の適用性に関する評価 2) 東南アジアにおける準好気性埋立設計方法の提案と費用対効果(高い気温によって微生物分解(安定化)が促進されるのか、スコール等の集中型降雨に対する集排水性能の評価) 3) 準好気性埋立による温室効果ガス排出量削減

パラメータ: 高温多雨気候地域において、準好気性埋立工法による埋立ガスの放出挙動

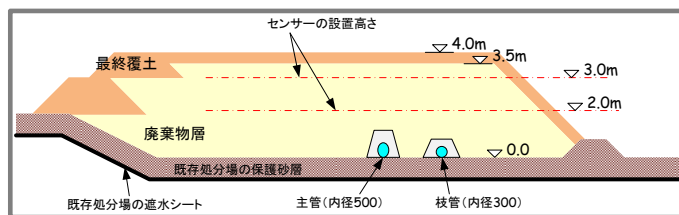
対象廃棄物: タイの生ごみ

28

テストセル概要



デモンストレーションサイトの平面図(左が標準気性サイト)



標準気性セル



嫌気性セル



センサーの埋設状況



データ記録ステーション
温度と水分のデータをログ



ガス抜き管からのガスサンプリングの様子



結果

一年経過した時点まで、

- ✓ 嫌気性テストセルからのLFG放出量は、標準気性テストセルより大きい。
- ✓ 嫌気性と標準気性テストセルのメタンガスの放出量は、経過時間とともに減少しているが、両セルの差が小さくなっている。

以上の結果から、

- ✓ 1) 標準気性埋立地の安定化促進において、一番重要なパラメーターはごみ層内の含水率の制御と排水率であり、2) メタン放出量の差が見られないのは、**嫌気性テストセルにも覆土の斜面を通じて空気が侵入しているためであると考えられる。**

(3) まとめ

31

NIESのライシおよびテストセル実験まとめ

目的	充填物	容積 [m3]	充填密度 [ton/m3]	通気条件	パラメータ
大型ライシメーター	建廃2, シュレッダ1, 鋤さい1, 燃え殻1 + 有機物源(コンポスト)	1.5		嫌気	覆土の通気性向上による層内の酸素や二酸化炭素濃度分布、浸出水水質の挙動
大型ライシメーター	Csに汚染されてない焼却灰	1.5	1.1	完全水没(嫌気)	水中や層内間隙水中の安定セシウム濃度の変動
大型カラム	建設混合廃棄物残さ(く5mm以下)	0.01-0.066	1.1	嫌気	反応機の縦横比による無機イオン類の溶出濃度
大型ライシメーター	廃石膏ボード(粒状+粉体)、難燃プラ(有機物汚濁無し)と廃プラ(汚濁有り)を混合	1.5	0.87-0.9	嫌気	ごみ層内の深さ方向の温度、水分、ガス組成のプロファイル
寄居テストセル1号	MSWI焼却灰およびシュレッダーダスト	365-426	0.83-1.03	嫌気と好気	強制通気による浸出水水質と埋立ガスの挙動
岡山テストセル	焼却灰、破碎後不燃物、パーク堆肥	90	1.5	嫌気	透水性覆土やHPRBによる水質挙動
寄居テストセル2号	焼却灰、粗大ごみの破碎物、産業廃棄物破碎物、コンポスト	137	1.39-1.46	準好気(一時期通気)	HPRBによる浸出水水質と埋立ガスの挙動
タイテストセル	タイの生ごみ	7000		嫌気と準好気	高温多雨気候地域において、準好気性埋立工法による埋立ガスの放出挙動

32

室内実験やテストセル実験の メリットとデメリット

実証段階へ

ライシメータ
(カラム)

- 正確な測定、繰り返し実験と観察が可能 (i.e. 再現性確認)
- 実験条件のコントロールの良さ (e.g. 降雨量、通気量など)
- 短期間で長期挙動まで評価 (e.g. L/Sによる溶出量)
- 低コスト

テストセル

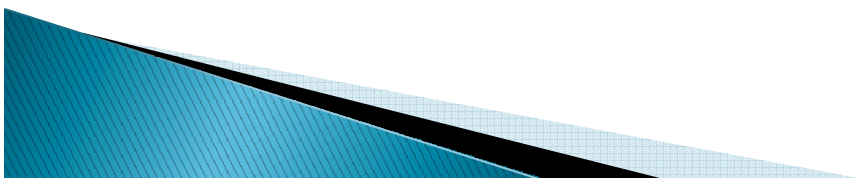
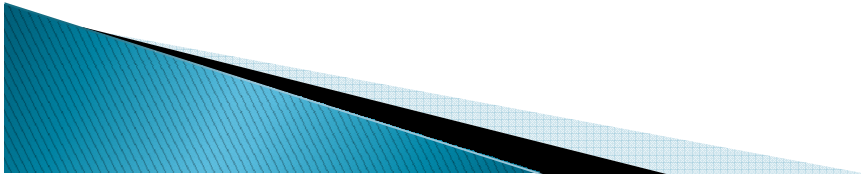
- 熱環境 (放熱が少ない)
- 幅や深さ方向の温度、水分、ガスなどのプロファイル確認
- 粒子の大きさ (実物を粉砕無しで充填可能)
- 適用性

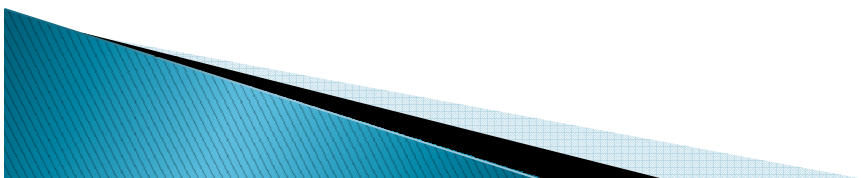
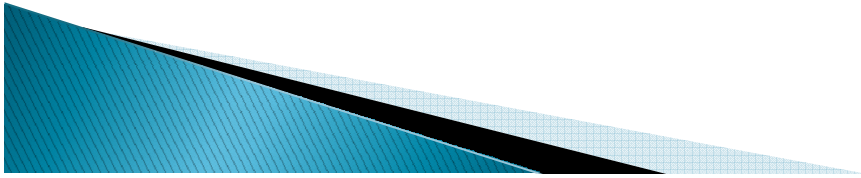
フィードバック

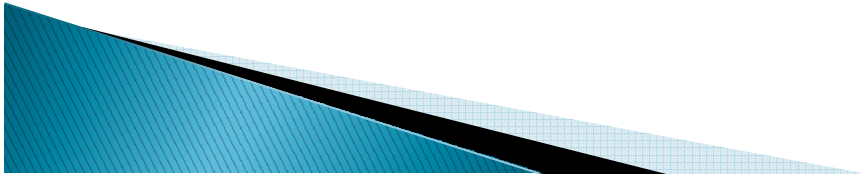
33

ご清聴
ありがとうございました。

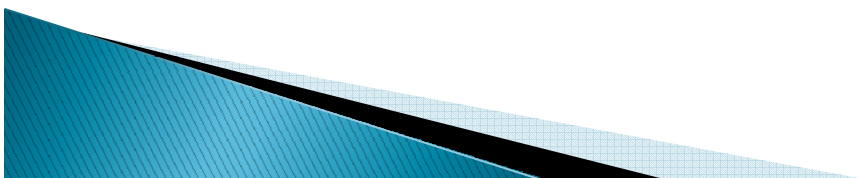
34



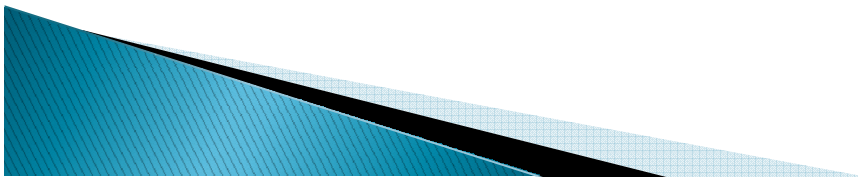




予備スライド

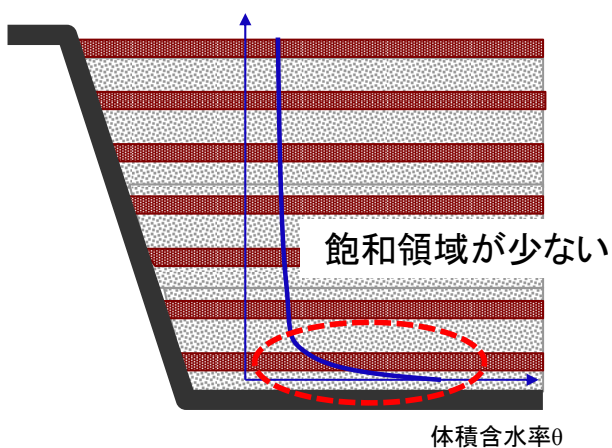


(5) その他の話題

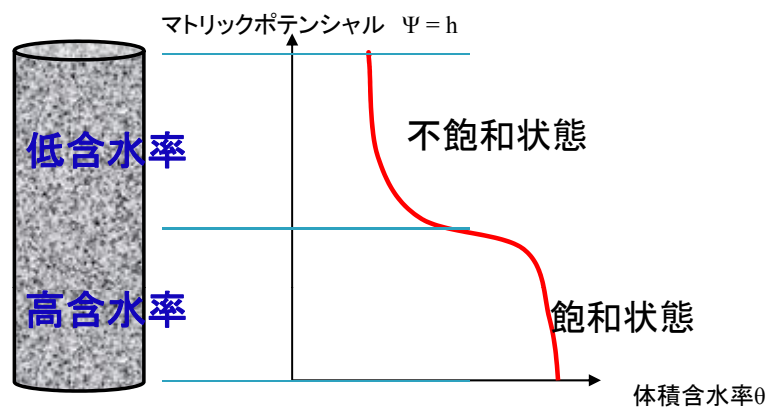


41

①飽和領域の違いによる影響



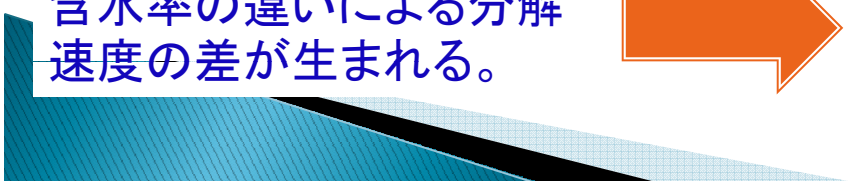
実際埋立地の飽和領域より、過大評価される恐れがある。



含水率の違いによる分解速度の差が生まれる。

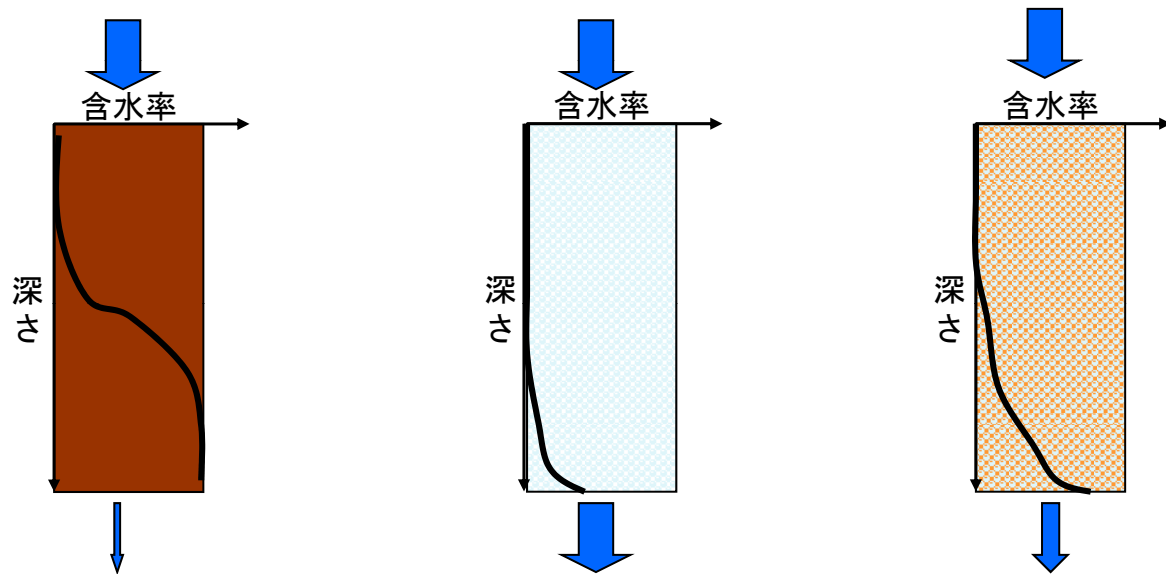


無視しても良いのか？



42

② 充填密度による水分分布の違い



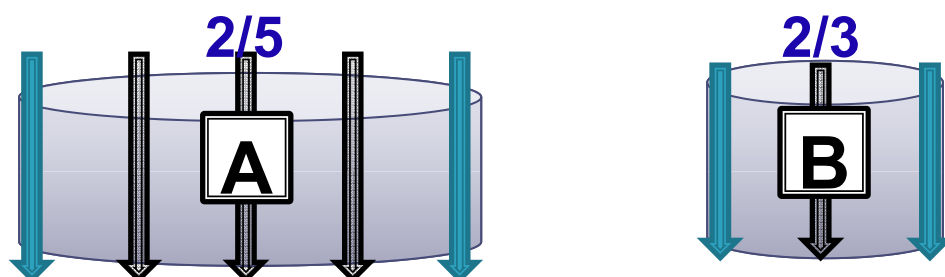
充填密度の違いにより、深さ方向の含水率が異なることによって、実験条件が変わる可能性がある。

43

③ 水みちや壁面流れによる影響

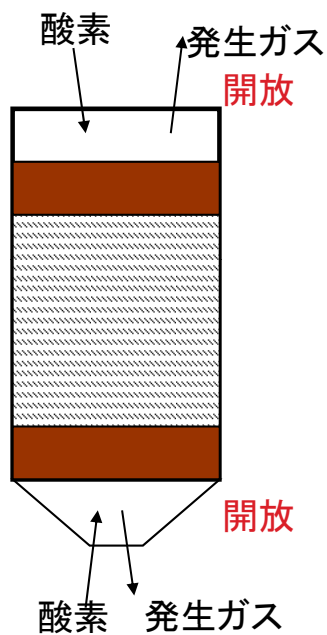
汚染物質の長期挙動、溶出ポテンシャルなどの観点で、水みちの影響はどう評価すべきか？

反応器の縦横比による壁面流れの影響をどう評価すべきか？無視して良いのか？



44

④ 準好気性や好気性実験での難点

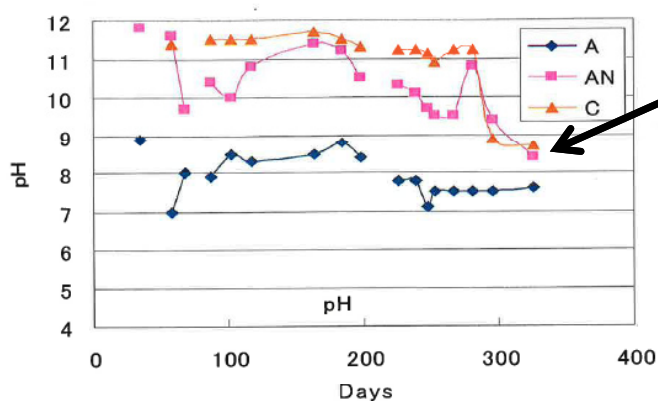


嫌気的条件(上下端密閉)ではないので,
ガスの発生量が分からない

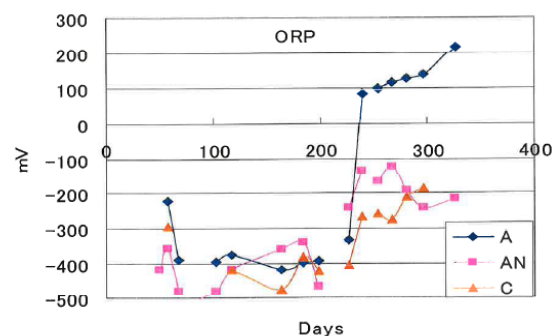
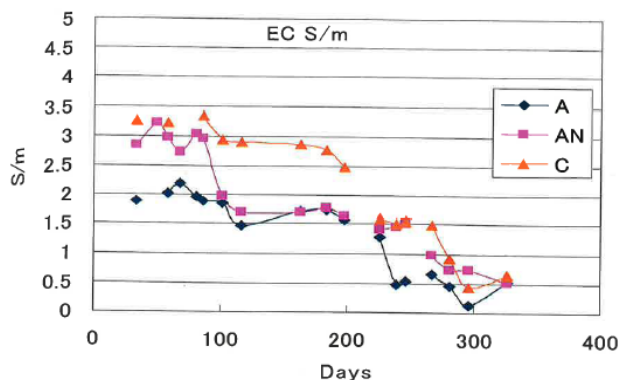
↓
有機物の収支が取れない

45

埼玉テストセル1号の結果



焼却灰の多いコントロールセルや嫌気性セルのpHが高い。



46

岡山テストセルの概要

表 2.1 岡山テストセルの覆土の配合率と物性

底部覆土	配合率 (容積比)
スラグ	75
大山黒ボク土壌	20
ゼオライト	4
鉄粉	1
湿潤密度 (t/m ³)	1.722
透水係数 (cm/s)	7.9×10^{-4}

表 2.2 岡山テストセルの埋立廃棄物層の配合率と物性

埋立廃棄物層	単位	廃棄物層
深さ	m	2.5m 1層
配合		
セメント固化灰 (一般廃棄物可燃物)	V%	50
破碎後不燃物 (一般廃棄物)	V%	40
パーク堆肥	V%	10
透水係数 (摂氏 15℃換算)	cm/s	1.04×10^{-3}
湿潤密度	t/m ³	1.502
含水比	%	29.3

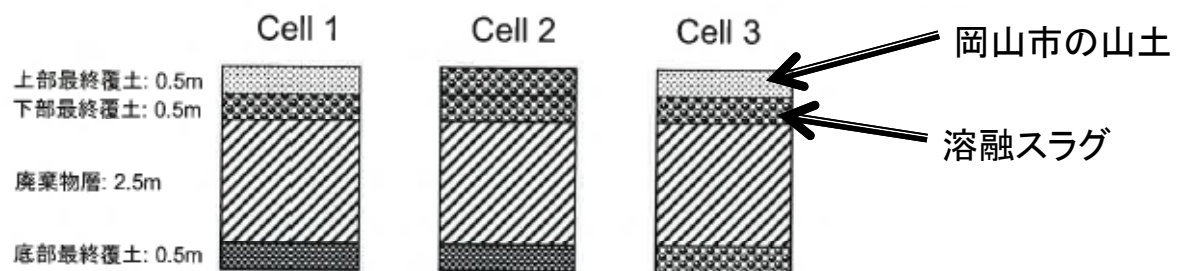


図 2.1 岡山テストセル実験区

47

岡山テストセルのまとめ

セメント固化物（焼却飛灰のセメント固化物）のような極端に塩類濃度の高い廃棄物を埋め立てた岡山セルでは、高濃度塩類（K, Na, Ca）が流出したが、PRB 処理により幾分濃度を下げることができた。また、底部覆土に PRB 処理を施した Cell 1 および Cell 2 では目詰まり現象（塩の析出による「つらら」の発生）が起これにくかった。この原因について未だ解明されていないが、PRB 層は Slag 層に比べ保温効果が高いため急激な温度低下がないため、高塩類の塩析による目詰まりを起こすことがなかったものと推察される。

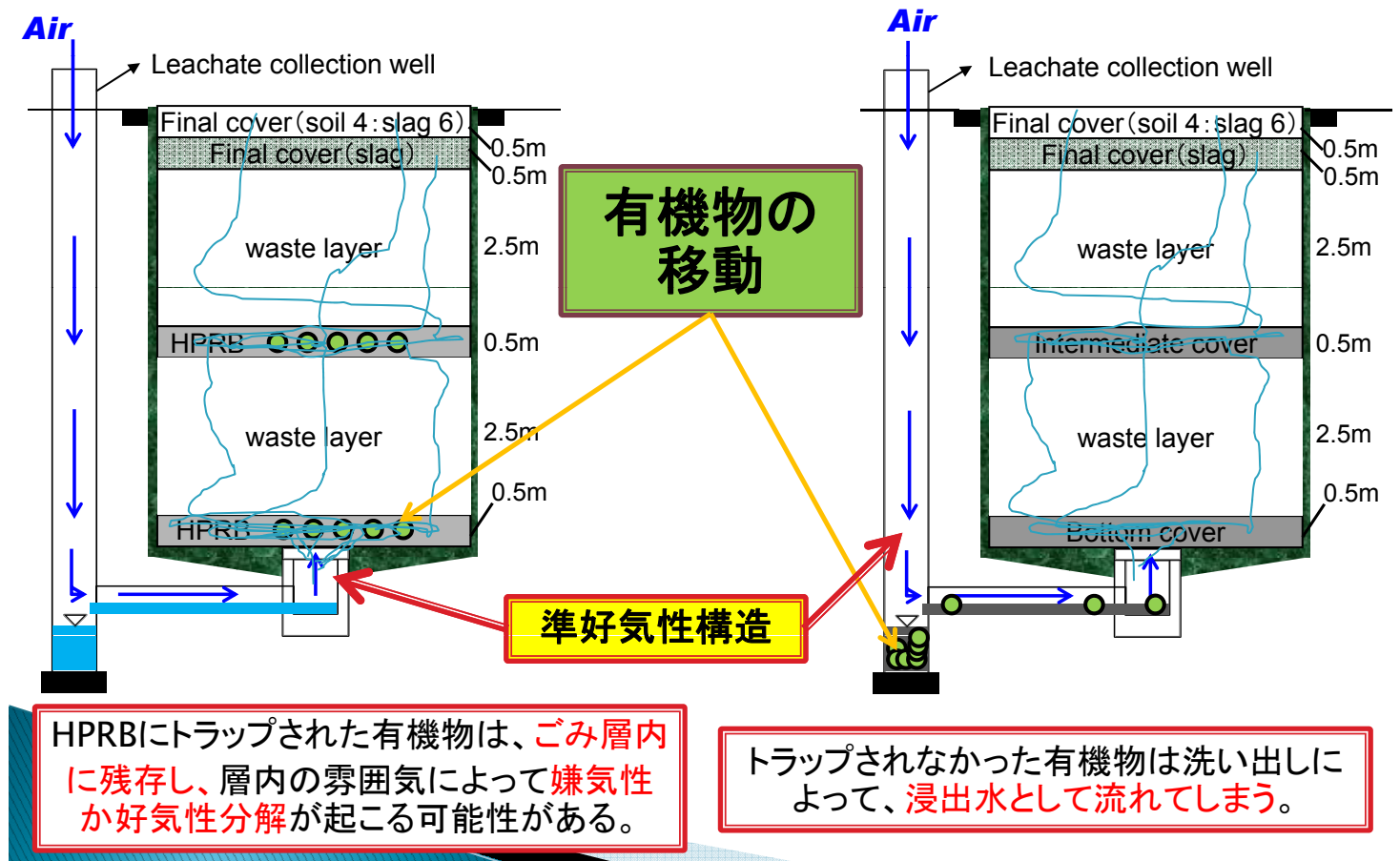
Ni, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd のような重金属類は、PRB 処理によって浸出水中の濃度を低下させることができた。しかし、B や Fe については、PRB 処理効果が認められなかったが、Fe の流出量が増加すると、B が低下する傾向が観察された。このことから、PRB に添加した鉄粉の効果も確認できたが、鉄粉量を増加する必要性も認められた。

以上のように、塩類濃度の高い焼却飛灰のセメント固化物の埋立でも、PRB 処理効果を確認できたが、埼玉セルほど大きな PRB 処理効果は認められなかった。

今後の課題としては、塩類の溶解速度の高い飛灰のセメント固化物の改良が必要であり、特に、急速な塩類の溶解度を制御したセメント固化物を作ることが必須である。そのようなセメント固化物ができれば、多機能型 PRB 資材の機能や反応型埋立地（準好気性埋立など）の機能も十分に発揮されるであろう。

48

埼玉テストセル2号 HPRBにおける有機物移動メカニズム



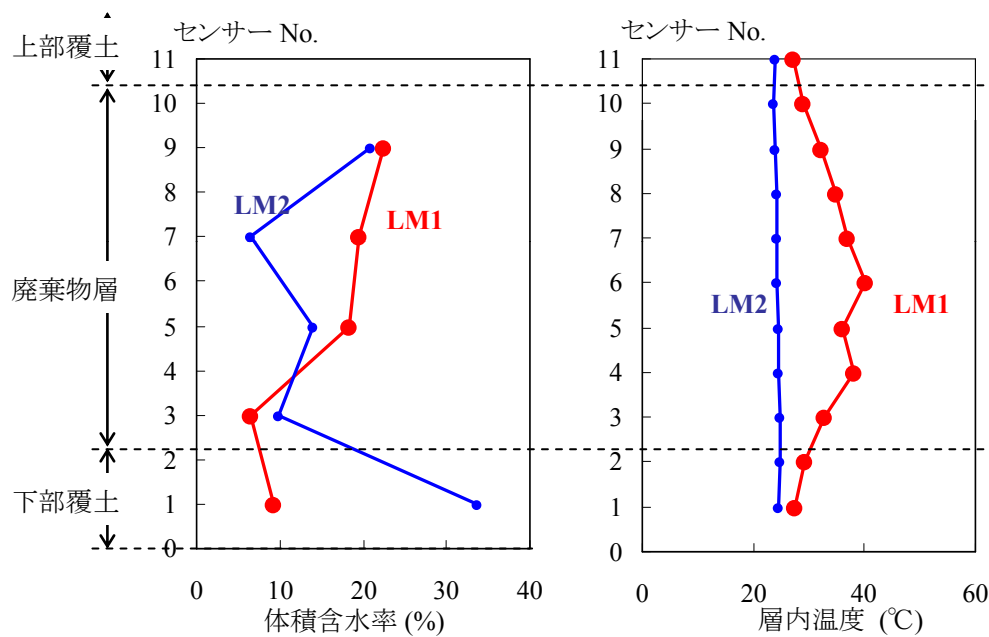
1) 大型ライシメータ

高濃度の硫化水素が発生する 可能性が高くなる場合

- ① 硫酸塩還元菌が存在する
- ② 硫酸イオン (SO_4^{2-}) が存在する
- ③ 硫酸塩還元菌の増殖に十分な有機物が存在する
- ④ 硫酸塩還元菌の増殖に適当な温度・水分・嫌気的狀態が保持されている
- ⑤ 発生した硫化水素を捕捉する物質（鉄等）が少ない

覆土の透水性向上による安定化促進

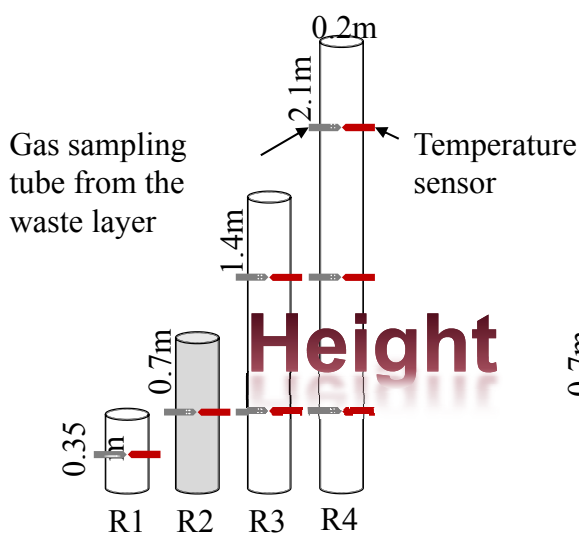
層内の含水率と温度(100日目の鉛直方向分布)



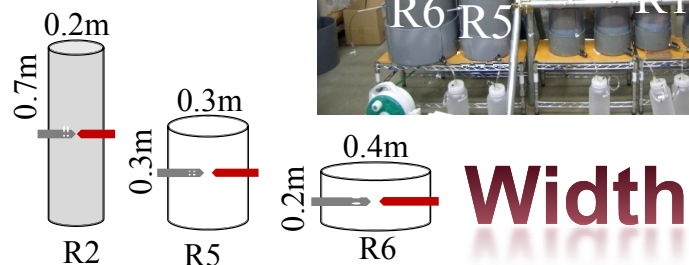
LM1: 覆土の水が抜けている, 温度高い
LM2: 覆土が水で飽和, 温度は室温と同じ

51

ライシメータの概要



a) ライシメータの長さによる影響
(表面積は同様)



b) ライシメータの幅による影響
(容積は同様)



ライシメータを二つのグループに分け、
ライシメータの高さや幅(表面積)が無機物質の溶出挙動に及ぼす影響を明らかにする。

52

室内実験からテストセルへ

- ▶ 実証試験のデータとして有効に使える。
 - ▶ しかし、Idealなパラメーターのコントロールが出来ないため、不明確な点が発生した際に、その理由を把握しにくい。
- テストセルの実験は、室内カラム試験や小型ライシメーター実験などで十分な検討を行ってから実施すべきである。

53

NIESのカラム試験

54

埋立廃棄物の混合処理による 透気・透水性の向上

2005年

目的:カラム:安定化促進をねらった廃棄物層の透水・透気性の向上。

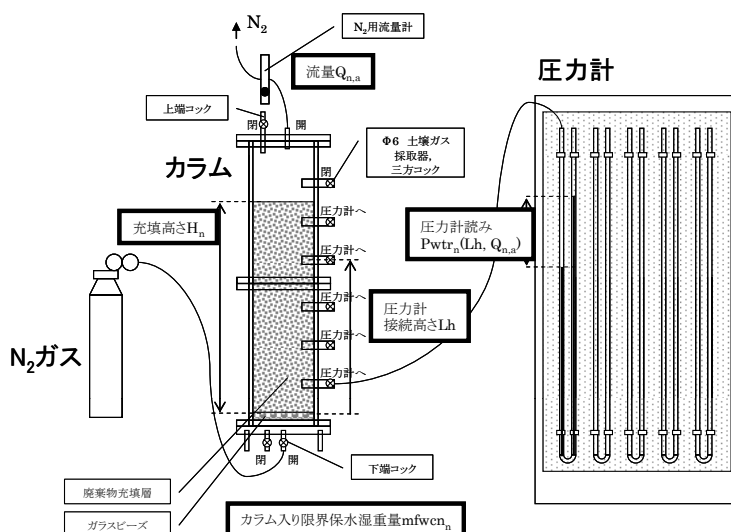
パラメータ:不透材と混合材の割合による透水性と透気性の变化

対象廃棄物:難透水・透気性の試料(不透材)として、汚泥(建設汚泥, 浄水汚泥, 化学工業汚泥)を、透水・透気性の高い試料(混合材)として、鉱さい(スラグ), 建設系混合廃棄物(建廃), (焼却灰)を用いる。

55

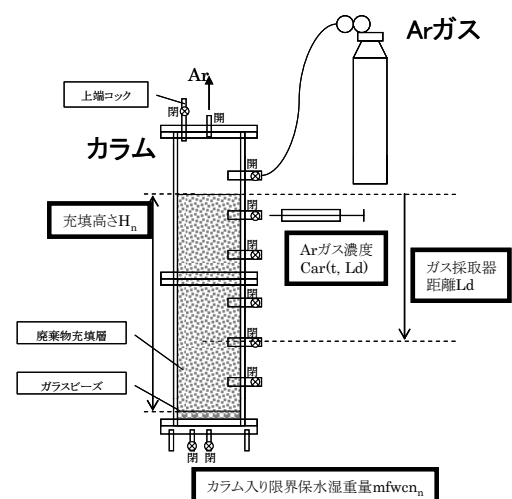
カラム試験の概要

透気係数



廃棄物層にN₂ガスを通気し、
圧力損失を測定する

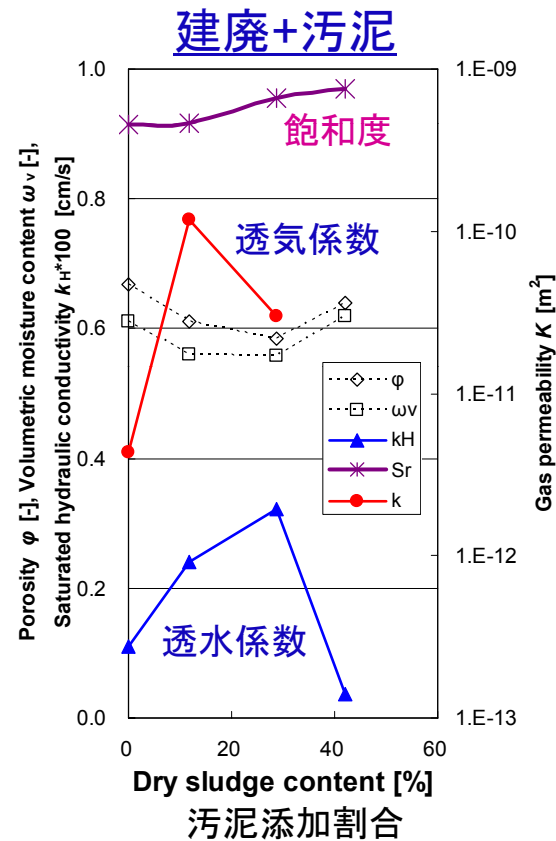
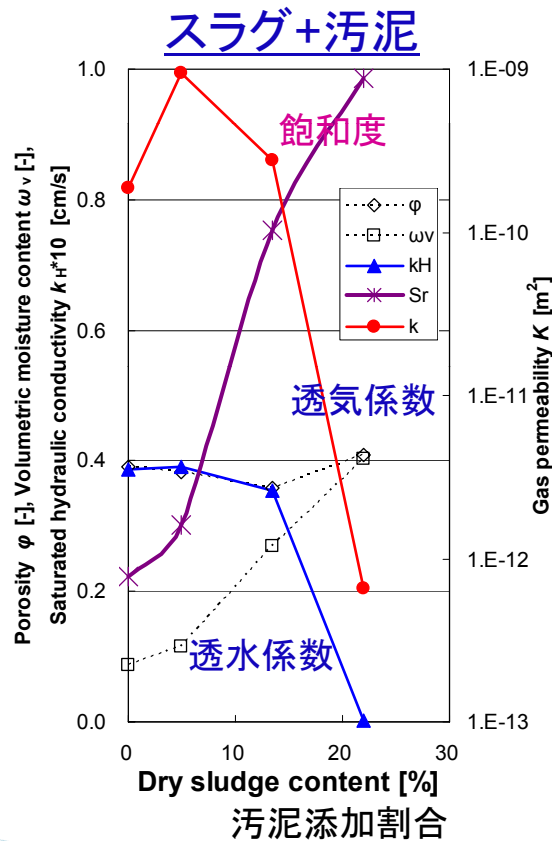
屈曲率



N₂ガスで充満した廃棄物層に、
Arを拡散侵入させ、Ar濃度変化を
測定する

56

透水・透気性



汚泥添加10～30%までは透水・透気係数が極端に減少しない

57

2) 小型カラム実験

大気導入による内部水質改善

2006年

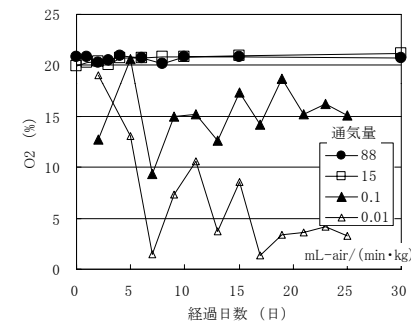
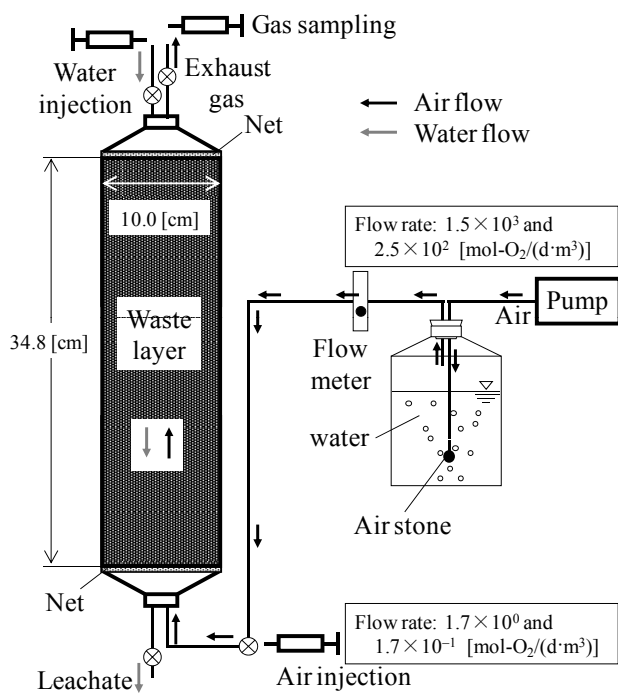
目的：小型カラムを用いて、一定の充填ごみ重量に対して、異なる大気導入量を設定し、流量と安定化速度の関係、過剰な流量、および大気導入によって流出する浸出水質がさらに悪化する流量の有無を把握することを目的とした

パラメータ：通気量を4通りに設定(88, 15, 0.1および0.01 mL-air/min・kg)、流出ガス質(O_2 , N_2 , CO_2 および CH_4)および浸出水質(pH, ECおよびTOC)をモニタリングした。

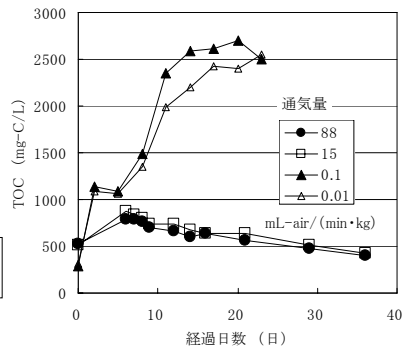
対象廃棄物：埼玉テストセルの充填廃棄物と同様(有機混合試料：焼却灰+シュレッダー+コンポストと無機混合試料：焼却灰+シュレッダー)

58

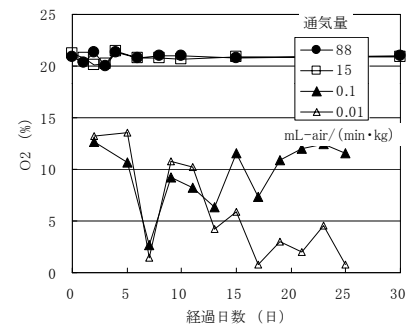
小型カラム実験装置概要と結果



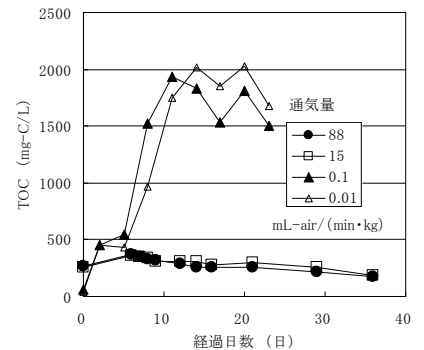
有機混合試料カラム流出ガス



有機混合試料カラム浸出水TOC



無機混合試料カラム流出ガス



無機混合試料カラム浸出水TOC

Schematic diagram of apparatus for aeration

通気量 15 mL-air/(min·kg) 以上で浸出水中へのTOCの溶解量に見合った分解量を確保できることが分かった。