

環境研究総合推進費 3-1802（体系的番号：JPMEERF20183002）

遮断型最終処分場の長期的な 環境安全性の評価に関する研究

平成30～32年度：研究代表者 国立環境研究所 山田正人

遮断型最終処分場に埋め立てられた焼却灰や汚泥、その固型化体に含まれる重金属類について、**100年程度の期間**に生ずる処分場内での形態変化、ガスや水を介しての施設外への移行フラックス、人間生活圏への到達濃度を**数値埋立工学モデル**で予測することで、導入した多重安全技術のレベルと将来起こりうる天災による破壊などのイベントに対応した遮断型最終処分場の**環境安全性**を評価する。

1. はじめに（研究背景等）

- **遮断型最終処分場**は、遮断のために鉄筋コンクリート製の仕切設備が処分場であるが、施設数が少なく、これまであまり注目されてこなかった。
- 廃水銀のように**再生利用が断たれた有害物質**を集約的に環境から隔離する確固たる方法として、遮断型最終処分場という技術を再検討すべきである。
- 我が国の低レベル放射性廃棄物のピット処分施設では、核種が施設から人間生活圏へ移行して健康に影響を与える可能性、すなわち**安全性の評価**が行われる。
- 隔離の機能を確実にするためには、構造物が破綻しても急激な放出が起こらない固型化や、施設外の物質移動を緩和する人工・天然バリアなどの、**多重安全技術**を追加することも考えられる。
- 設置の場や廃棄物の特性に合わせて**合理的な技術を選択し、施設の廃止の可否を判断する**ために、遮断型最終処分場に科学的に精度の高い安全性評価は必須である。

2. 研究開発目的

本研究では、遮断型最終処分場において、長期的な重金属類の保管・処分に必要十分な技術や、施設廃止の可否を示すため、長期的な安全性を評価する**数値埋立工学モデル**を構築することを目的とする。

遮断型最終処分場に埋め立てられた特別管理産業廃棄物相当の焼却灰、汚泥、およびその固型化体に含まれる重金属類について、**100年程度の期間**に生ずる処分場内での形態変化、ガスや水を介しての施設外への移行フラックス、人間生活圏への到達濃度を数値埋立工学モデルで予測することで、導入した多重安全技術のレベルと将来起こりうる天災による破壊などのイベントに対応した**遮断型最終処分場の長期的な環境安全性を評価**する。

3. 研究目標

- 遮断型最終処分場に埋め立てられた焼却灰や汚泥、およびその処理物に含まれる有害重金属について、100年程度の期間に生ずる処分場内での形態変化、ガスや水を介しての施設外への移行フラックス、人間生活圏への到達濃度を数値埋立工学モデルで予測することで、導入した多重安全技術のレベルと将来起こりうる天災による破壊などのイベントに対応した遮断型最終処分場の環境安全性を評価する。遮断型最終処分場の機能をより確固とするため、構造、維持管理ならびに廃止に関する技術上の基準を改定また設定するための具体的な方法を示す。

1. 数値埋立工学による長期的環境安全性の評価に関する研究（国環研・山田正人）

- 物質の収脱着や形態変化および化学平衡と多孔質内気液二相流を連成した**数値埋立工学モデル**を構築し、施設に水が侵入した場合に有害物質が外界へ移行するフラックスと人間生活圏への到達濃度を求める。そのために、遮断型最終処分場を調査し、数値埋立工学モデルの初期・境界条件を設定するとともに、廃棄物をコンクリート固型化する際のガス発生や硫酸塩膨張による破壊過程を評価し、生物学的過程の重金属類等の化学形態変化への寄与を明らかにする。これらとサブテーマ2と3から得られた条件ならびにパラメータを数値埋立工学モデルへ適用する。加えて、地震等の自然変動、掘削など人為変動、設備の経年劣化など、100年程度で生ずる変動のシナリオを設定する。

2. 処分場内における重金属類等の長期動態の評価に関する研究（北大・東條安匡）

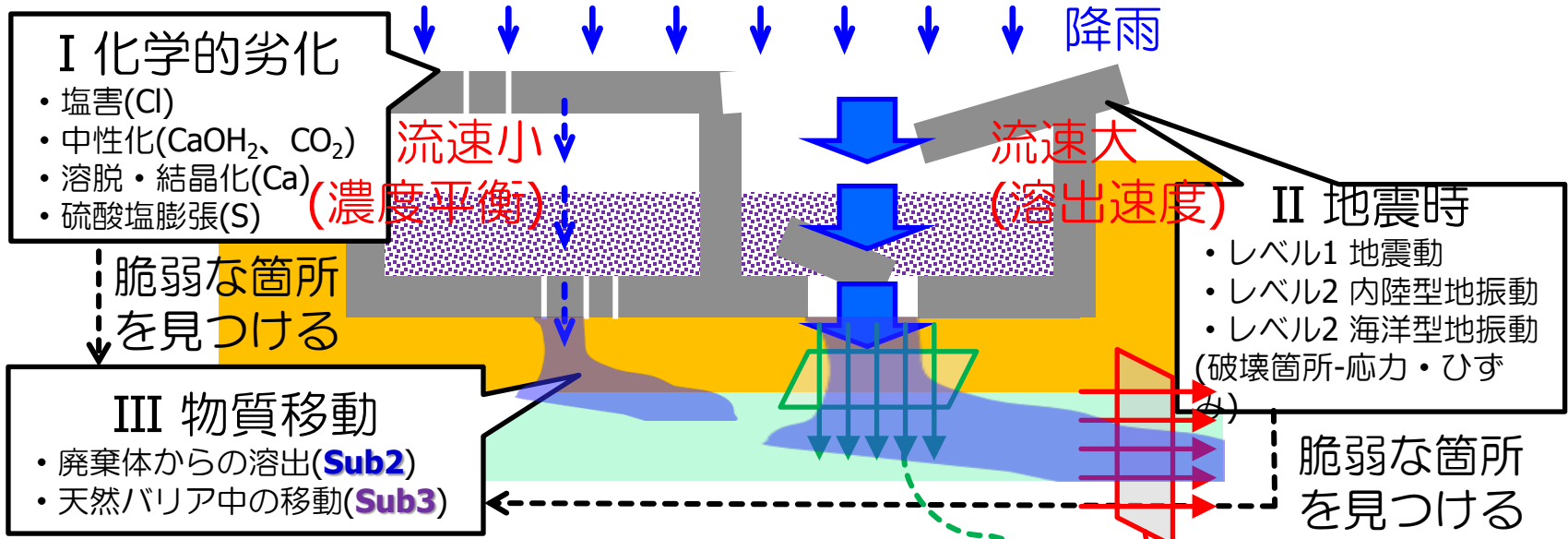
- 遮断型最終処分場に埋め立てられた廃棄物等に含まれる**重金属類**について、100年程度の期間内における溶出性の変化を明らかにする。処分場内で想定される環境を、より強く発現させる風化加速試験を、廃棄物およびその処理物について実施して溶出平衡定数および溶出速度を導出し、施設構造が破綻しても急激な放出リスクを低減しうる**溶出抑制対策**と望ましい処分場内雰囲気制御方法を示す。

3. 人工および天然バリアにおける物質移動の評価に関する研究（国環研・遠藤和人）

- 各劣化段階にある施設構造物、施設外における**人工バリア**（ベントナイト層や改良地盤）ならびに**天然バリア**（自然地層）における重金属類の移行パラメータを求める。放射性廃棄物埋設処分の安全性評価で用いられている情報を参照するとともに、カラム通水試験等によりパラメータの不足部分を補完する。

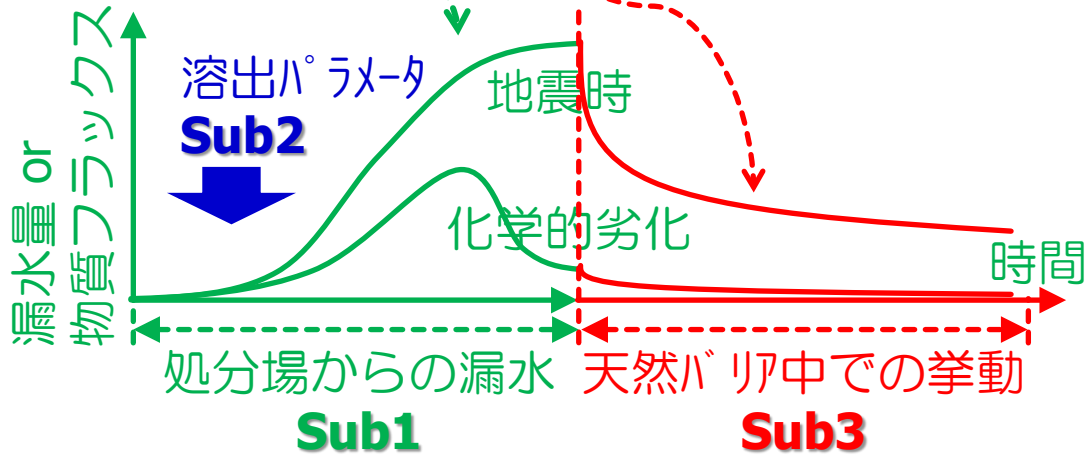
4. 研究開発内容(サブテーマ1)

遮断型処分場のモデル化と研究課題



本研究で実施した内容

- I~IIIを考慮した数理モデル
地震・構造・鉄筋腐食・移流分散解析
- 特別管理廃棄物のパラメータ
長期溶出・カラム溶出・固型化等
- 実際の遮断型処分場を対象に
100年の環境安全性を評価
⇒本報告会で発表



4. 研究開発内容(サブテーマ1)

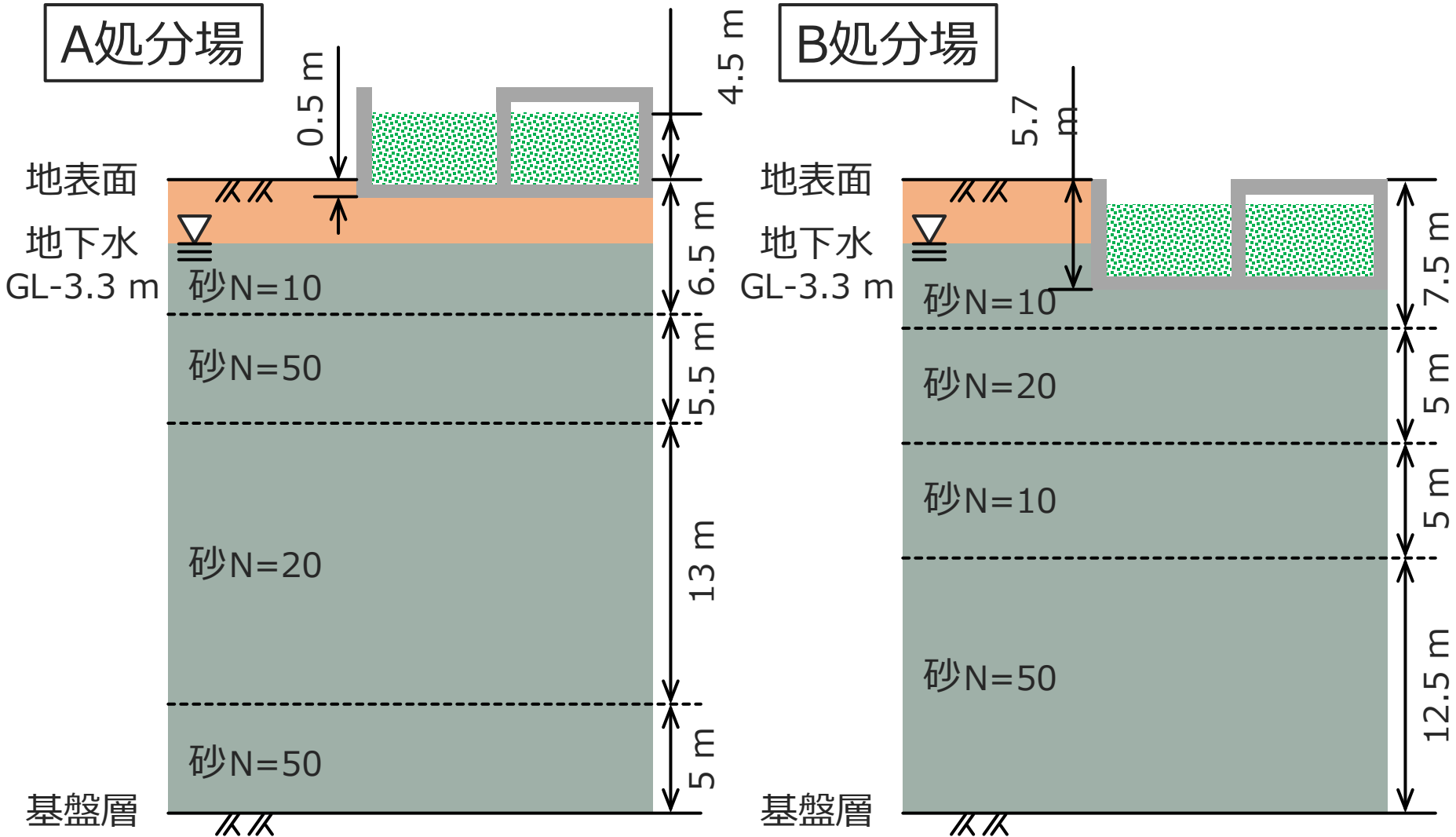
実際の遮断型処分場を対象にしたシナリオ解析 ～No.01処分場(地上)と、No.11処分場(地中)～

項目		No.01	No.2	No.03	No.04	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14
場所		北海道	愛知県	長野県	長野県	北海道	熊本県	熊本県	北海道	北海道
施設稼働日		H12.12	H05.08	H05.09	H07.01	H10.10	H01	H25.11	H.24.04	S53.10
立地条件		海から 3km	河川から 100m	平地	河川から 100m	平地	海近傍	海近傍	海から 5km	山中
N値		30前後	15前後	40前後	30前後	10前後	10前後	30前後	(データ無)	20前後
土質		砂	砂・シルト	砂・シルト・粘土	砂・粘土	砂・シルト・粘土	砂・シルト	シルト・粘土	(データ無)	砂・シルト
地下水位		GL-3.3	GL-1.0	GL-0.5	GL-4.7	GL-3.5	GL-3.3	(データ無)	(データ無)	GL-4.8
年間降雨量 過去最大		2101 mm/yr	1648 mm/yr	1251 mm/yr	2255 mm/yr	1829 mm/yr	3680 mm/yr	3183 mm/yr	1595 mm/yr	1011 mm/yr
時間降雨量 過去最大		84 mm/hr	55 mm/hr	46 mm/hr	79.7 mm/hr	95 mm/hr	83 mm/hr	77 mm/hr	51.3 mm/hr	48 mm/hr
気温	過去最大	33.1℃	38.9℃	36.7℃	37.7℃	34.7℃	38.1℃	37.9℃	32.8℃	36.4℃
	過去最小	-20.8℃	-4.6℃	-18.3℃	-16.5℃	-24.3℃	-7.4℃	-7.3℃	-13.4℃	-28.7℃
	温度差	53.9℃	43.5℃	55.0℃	54.2℃	59.0℃	45.5℃	45.2℃	46.2℃	65.1℃
埋立物				石綿	石綿		汚泥、カーバト			

4. 研究開発内容(サブテーマ1)

No.01 = 地上型処分場(A)

No.11 = 地中型処分場(B)の解析断面



※ 地盤構造は近傍のボーリング調査データを引用した

4. 研究開発内容(サブテーマ1)

埋立廃棄物と周辺地盤条件(共通)

～埋立廃棄物は実際の採取試料の性状に合わせて設定～

埋立廃棄物

項目	値
埋立物	ばいじん: 汚泥赤: 汚泥黒 = 50: 30: 20%
真密度	2870 kg/m ³
含水比	17.5%
強熱減量	15.68%
湿潤密度	1190 kg/m ³
乾燥密度	1010 kg/m ³
間隙率	65.0%

地盤条件

項目	単位	砂	粘土
真密度	kg/m ³	2650	2650
含水比	%	10	50
湿潤密度	kg/m ³	1950	1600
乾燥密度	kg/m ³	1770	1070
間隙率	%	33	59
ポアソン比	1	0.48	0.48
変形係数	MPa	357	138

溶出パラメータ

塩素 Cl			クロム Cr			鉛 Pb		
K	a	c _{max}	K	a	c _{max}	K	a	c _{max}
804	1.86	73540	0.97	1.88	158	44.3	0.86	1090

K: 初期溶出速度 (mg/kg/d)、a: 溶出指数、c_{max}: 最大濃度 (mg/L) であり、バッチまたはカラム溶出試験より求めた。

N値はボーリングデータより入手し、次式より、せん断波速度とせん断剛性を算出した。

せん断波速度: $V_s = aN^{1/3}$

せん断剛性率: $G = \rho_t V_s^2$

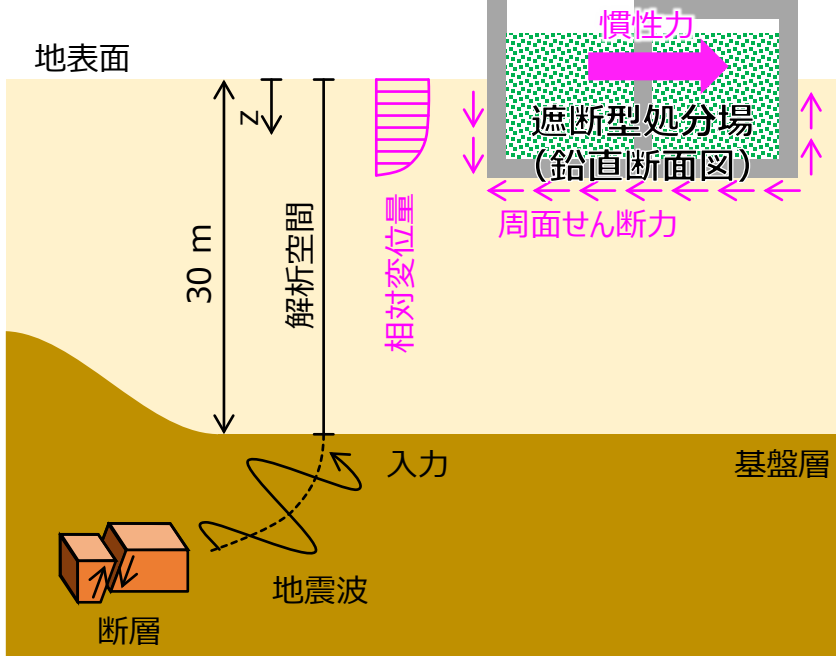
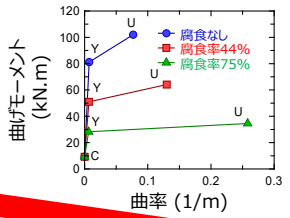
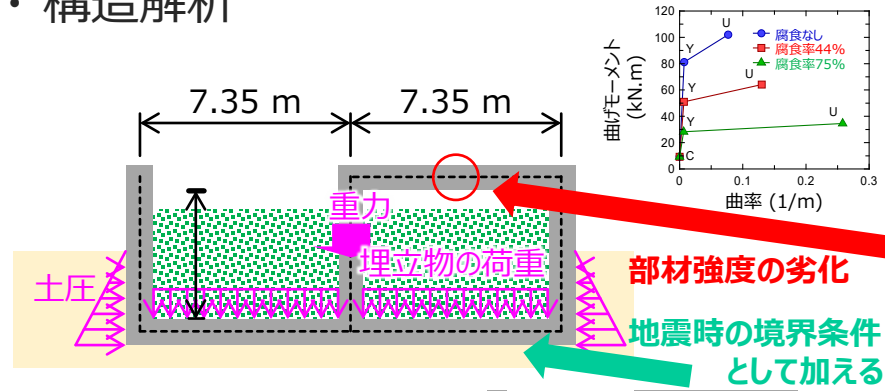
地盤の非線形性には土研の式を用いた。

4. 研究開発内容(サブテーマ1)

地震応答解析と物質動態解析(数値埋立工学モデル)を組み合わせた解析手順

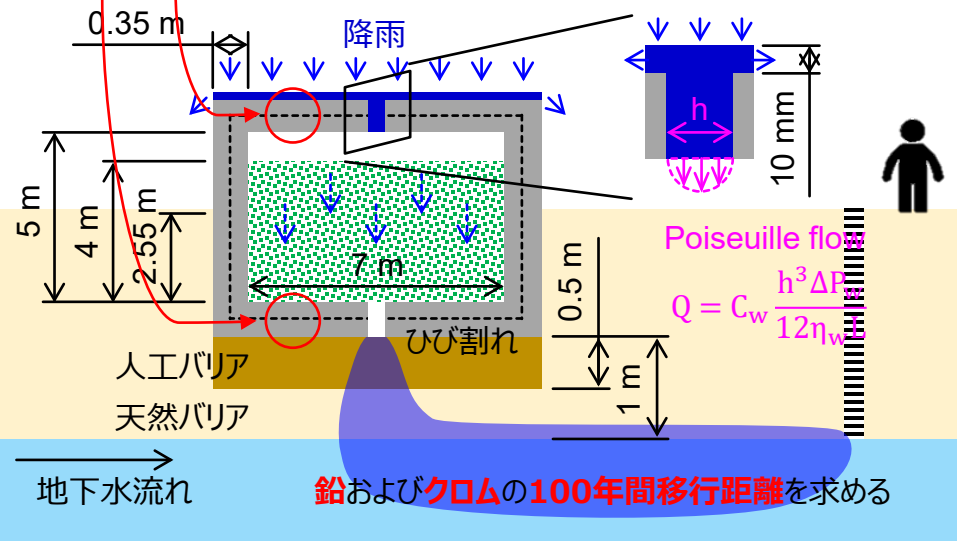
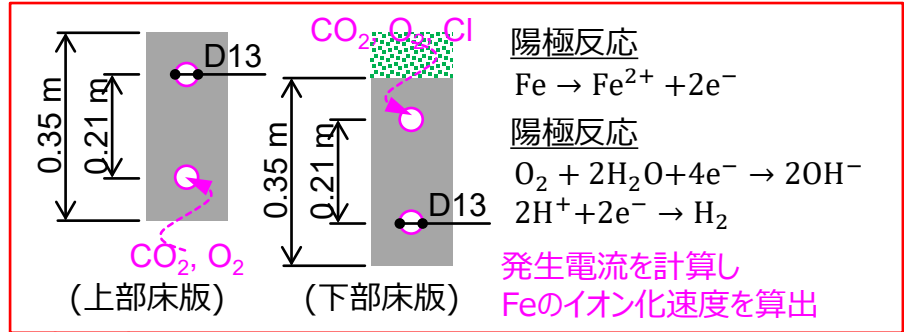
地震応答解析

- 地盤の変形解析
- 構造解析



物質動態解析

- 気液二相流解析(水、ガス)
- 移流拡散解析(CH₄、CO₂、O₂、N₂)
- 移流分散解析(Cl、重金属等)
- 中性化/腐食解析(Cl、DO、電流密度)



4. 研究開発内容(サブテーマ1)

最終処分場から分離した尿素加水分解細菌による有害金属の不溶化

< 研究の背景 >

最終処分場において細菌による尿素加水分解反応が生じれば、有害金属の移動性・溶出性に影響を及ぼす可能性がある(図1)

< 目的 その1 >

- 尿素加水分解細菌の生息状況の把握
- 細菌の尿素加水分解活性の測定

< 目的 その2 >

最終処分場から分離した菌株の尿素加水分解反応による有害金属(Pb)の不溶化効果を評価する

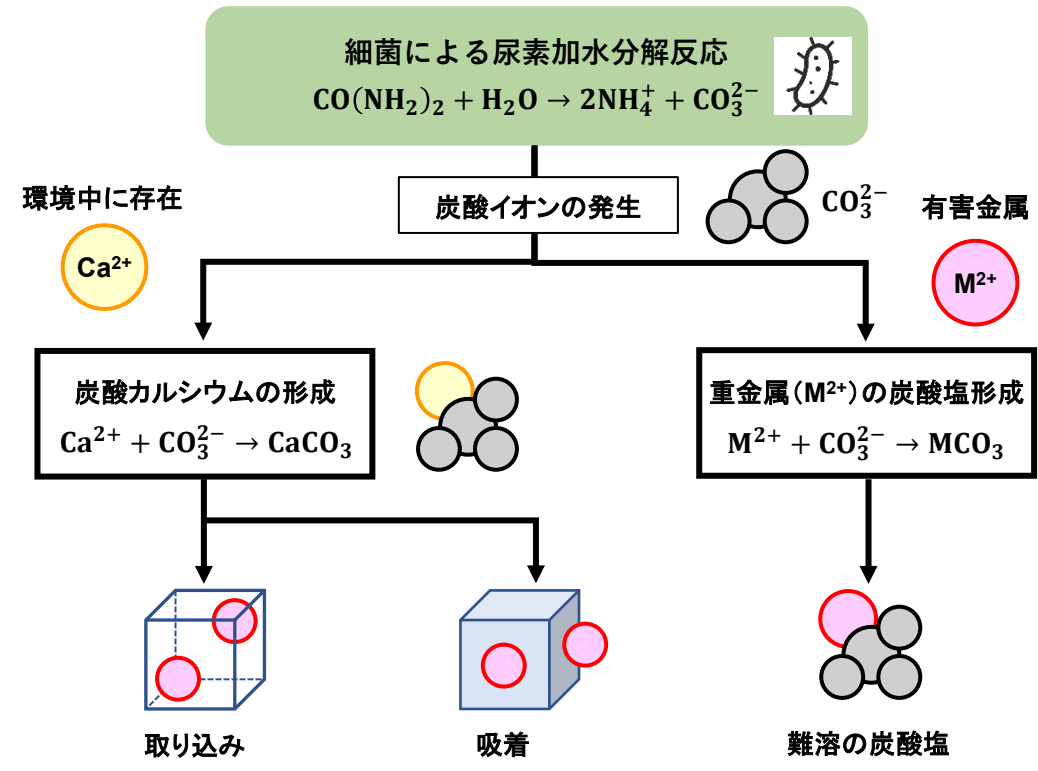


図 細菌の尿素加水分解反応による有害金属の不溶化機構

- 実験に用いた細菌の菌株
 - 最終処分場のコア試料から分離した菌株(B-2-15)
 - 高い尿素加水分解活性を有する細菌の標準菌株【*Sporosarcina pasteurii*(ATCC11859)】

4. 研究開発内容（サブテーマ2）

処分場内における重金属類等の長期動態の評価に関する研究

目的：遮断型処分場に処分された廃棄物中の重金属類について

1. 溶出特性は処分後の埋立期間中にどう変化するのか？
2. 場内雰囲気を積極的に制御すれば溶出特性は変わるか。

5つの検討を実施

1) 遮断型処分場の稼働状況と搬入物の実態調査

現在、国内には幾つの遮断型処分場が何処で稼働しており、具体的に何が埋め立てられているのかが明確ではない。

- ①環境省の統計資料、都道府県の多量排出事業者処理実施状況報告書
→特別管理産業廃棄物の流れを調査。
- ②都道府県へ提出される産業廃棄物処分実績報告書を開示請求で入手
→稼働中の遮断型処分場を特定
- ③当該処分場へ処分を委託している事業者へアンケート・ヒアリングの実施
→搬入物を具体的に明確化。

2) 遮断型処分場搬入物の風化加速試験(1) 炉内耐火物

遮断型処分場の場内環境を制御すれば、炉内耐火物からの溶出特性は変わるか。

試料：廃棄物溶融炉の使用済み炉内耐火物（レンガ）（六価クロム溶出濃度：3mg/L）

ボールミルで粉碎後、デシケータ内で静置

デシケータ内雰囲気：乾燥／湿潤、大気／N₂ 計4条件（追加としてCO₂を2条件実施）

期間：10週間、1週毎に溶出試験を実施。

4. 研究開発内容（サブテーマ2）

3) 遮断型処分場搬入物の風化加速試験(2) 電炉ばいじん

1) の調査から電炉ばいじんも主要な搬入物 場内環境が電炉ばいじんからの重金属溶出へ与える影響

試料: ばいじん(産業廃棄物処理業者から入手)

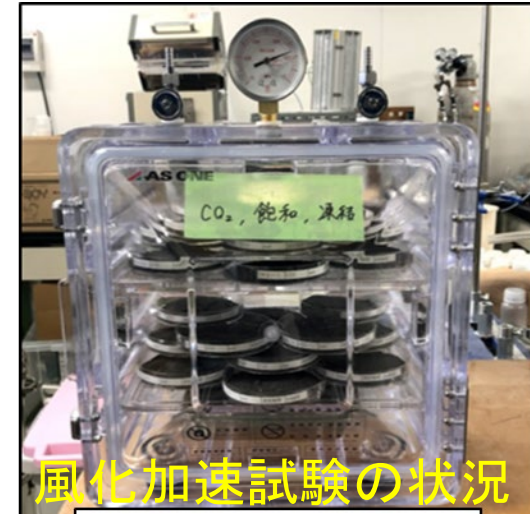
溶出試験: Cd(50mg/L)、Pb(7mg/L)、判定基準を超過

試料をシャーレに入れ、デシケータ内に静置

デシケータ雰囲気: ガス(大気/N₂/CO₂)、乾燥/湿潤、常
温/凍結融、計12系列

期間: 10週間、一週間毎に溶出試験を実施

Cd、Pb、Ca、Cr、Fe、Mn、Ni、Si、Zn: ICP発光分析



風化加速試験の状況

4) 一般廃棄物焼却飛灰の遮断型処分場搬入を想定した風化加速試験

一廃焼却飛灰は溶出抑制処理後、管理型処分場にて埋立処分。本研究では遮断型処分場に処分されることを仮定して検討

試料: 一般廃棄物焼却施設から入手

溶出試験: Pb(63mg/L)、判定基準を超過

デシケータ雰囲気: ガス(大気/N₂/CO₂)、乾燥/湿潤、計6系列

期間: 10週間、一週間毎に溶出試験を実施、測定元素等はばいじんと同様

5) 遮断型処分場内の場内雰囲気飛灰からの重金属溶出に与える影響に関する数値計算

分担研究者らが開発した埋立シミュレーターにおいて、雨水侵入なし、飛灰初期含水率(実測)、ガス雰囲気(CO₂ガス濃度: 350ppm、50%、80%、100%)とし、100年間の計算を実施。

4. 研究開発内容 (サブテーマ3)

吸着試験の必要性 (サブテーマ3の背景)

サブ3の目的

人工バリアならびに自然バリア内における重金属類の**吸着パラメータ**を**文献調査**ならび**実験**により把握し、数値埋立工学モデルに与える

吸着パラメータの課題

✓ 国内外の主要テストガイドラインに相違点がある

- 対象試料や吸着質が異なるため、土壌選択のガイダンスや最低使用量等の**考え方**が異なる
- ガイドラインに従っても、相関性の高い吸着等温式や分配係数を得られない場合がある
- 初期濃度や液固比によって、得られる吸着等温式が異なる (**指定の理論式にならない**)
- 試験条件の幅が広いため、実験者によってパラメータ一値に**ばらつき**が生じる

ガイドラインの相違点

項目	土対法	US EPA法	原子力学会法
対象試料	土地の土壌	あらゆる土壌	吸着剤等
最低試料量	5 g	1 g	数g
最低溶液量	0.5 L	無	10 mL
予備試験	無	有	無
液固比範囲	4~200 L/kg	適宜	1~1000 mL/g
最低吸着率	10 %	20 %	無
振とう時間	24時間	適宜	1時間~数か月
吸着等温式	Henry	Freundlich	Henry

✓ 文献の出典元によりパラメータが異なる

例) 鉛の分配係数 天然バリア(砂) : **2.7~27000 L/kg**、人工バリア(ベントナイト) : **0.001~62 m³/kg**

✓ 吸着試験データが少ない (∴安全側評価)

JAEA-SDB : 文献**670件**・分配係数**46,000点**以上

砒素やクロム等の吸着性の低い物質は特に少ない (鉛やセシウムは、たくさんある)



安定的に (実験者を問わず失敗しない) 吸着等温式と分配係数を導出するための吸着試験条件を模索し、吸着パラメータを実験的に得る

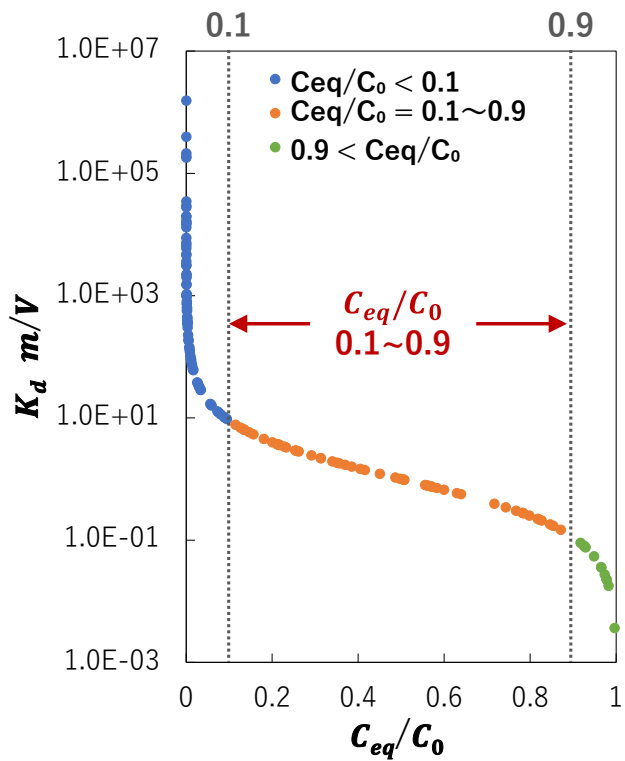
4. 研究開発内容 (サブテーマ3)

吸着パラメータを安定的に導出するためのポイント

C_{eq}/C_0 理論 (考え方)

$$K_d \frac{m}{V} = \frac{1}{\frac{C_{eq}}{C_0}} - 1$$

K_d : 分配係数 (mL/g)
 C_0 : 初期濃度 (mg/L)
 C_{eq} : 平衡濃度 (mg/L)
 V : 溶液量 (mL)
 m : 試料量 (g)



C_{eq}/C_0 が0.1未満の場合は最大10万倍
0.9を超える場合は最小1/100まで変動
(分配係数の過大または過少評価となる)

① 適正な初期濃度の決定

- (1) 試料の吸着能を網羅的に把握するために、初期濃度 10, 100, 1000 mg/L で予備試験する (液固比 = 10)
- (2) 予備試験の結果が $C_{eq}/C_0 = 0.5$ に最も近い初期濃度を本試験で採用

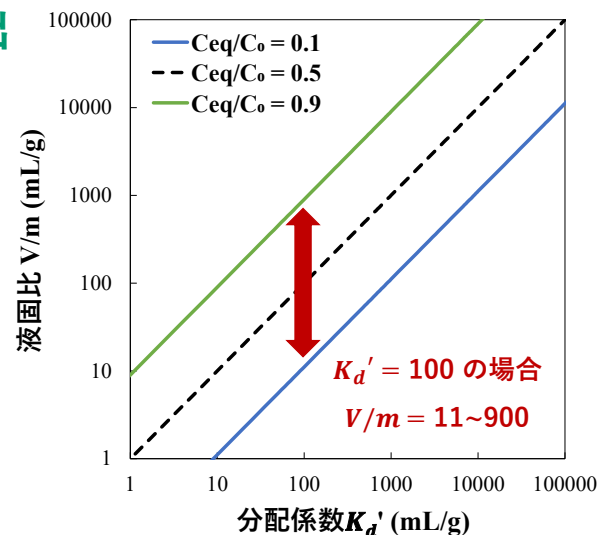
※ 採用した初期濃度の分配係数を暫定分配係数 K_d' とする

② 適正液固比の算出

- (1) 暫定分配係数 K_d' より適正液固比を計算

$$\frac{V}{m} = \frac{K_d \frac{C_{eq}}{C_0}}{1 - \frac{C_{eq}}{C_0}}$$

※ 適正液固比は、試料の吸着能 (分配係数) によって異なる



- (2) 本試験の液固比は、算出した適正液固比の範囲内で行う

吸着試験において、初期濃度および液固比の設定は重要である
→ 試験の繰り返し負荷を軽減 (トライアンドエラーを抑制)

4. 研究開発内容(サブテーマ3)

本研究で提案する吸着試験方法

※ 天然バリア (真砂土) を例示

① 使用試料・使用試薬

- 試料: 真砂土 (粒径2 mm以下, 茨城県笠間産)
- 吸着質: **Pb** (塩化鉛)
Cd (塩化カドミウム)
As (三酸化砒素)
Cr (ニクロム酸カリウム)
Cs (塩化セシウム)
- 純水系: イオン交換水
- 海水系: 人工海水 (ニューマリンメリット, (有)マツダ)

② 事前試験

ブランクテスト (容器の検討)

- 使用容器に吸着質1 mg/L溶液を50 mL入れた
- 24時間 水平振とう (120 rpm, 振とう幅4~5 cm) 後、溶液濃度をICP-MSで測定

予備試験 (目安の K_d を確認)

- 使用ブランクテストで決定した材質の (PP) 容器に、吸着質を溶解した初期濃度10, 100, 1000 mg/L溶液300 mLと試料30 gを液固比が10になるように入れた
- 以下、同じ手順

③ 本試験

予備試験より、暫定分配係数 K_d'

C_{eq}/C_0 0.1~0.9の範囲内に入る初期濃度および液固比を決定する

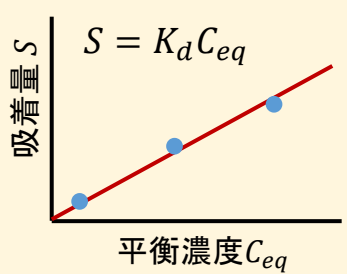
$$K_d = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_{eq}} \frac{V}{m}$$

$$\frac{V}{m} = \frac{K_d' \frac{C_{eq}}{C_0}}{1 - \frac{C_{eq}}{C_0}}$$

- PP容器に、予備試験から得られた初期濃度, 適正液固比 (5水準) になるように溶液と試料を入れた
- 以下、同じ手順

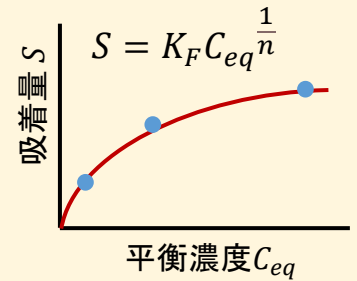
④ パラメーターの導出(吸着等温式, K_d)

Henry型 (線形近似)



分配係数 K_d (mL/g)

Freundlich型 (曲線近似)



吸着定数 K_F (mL/g), n

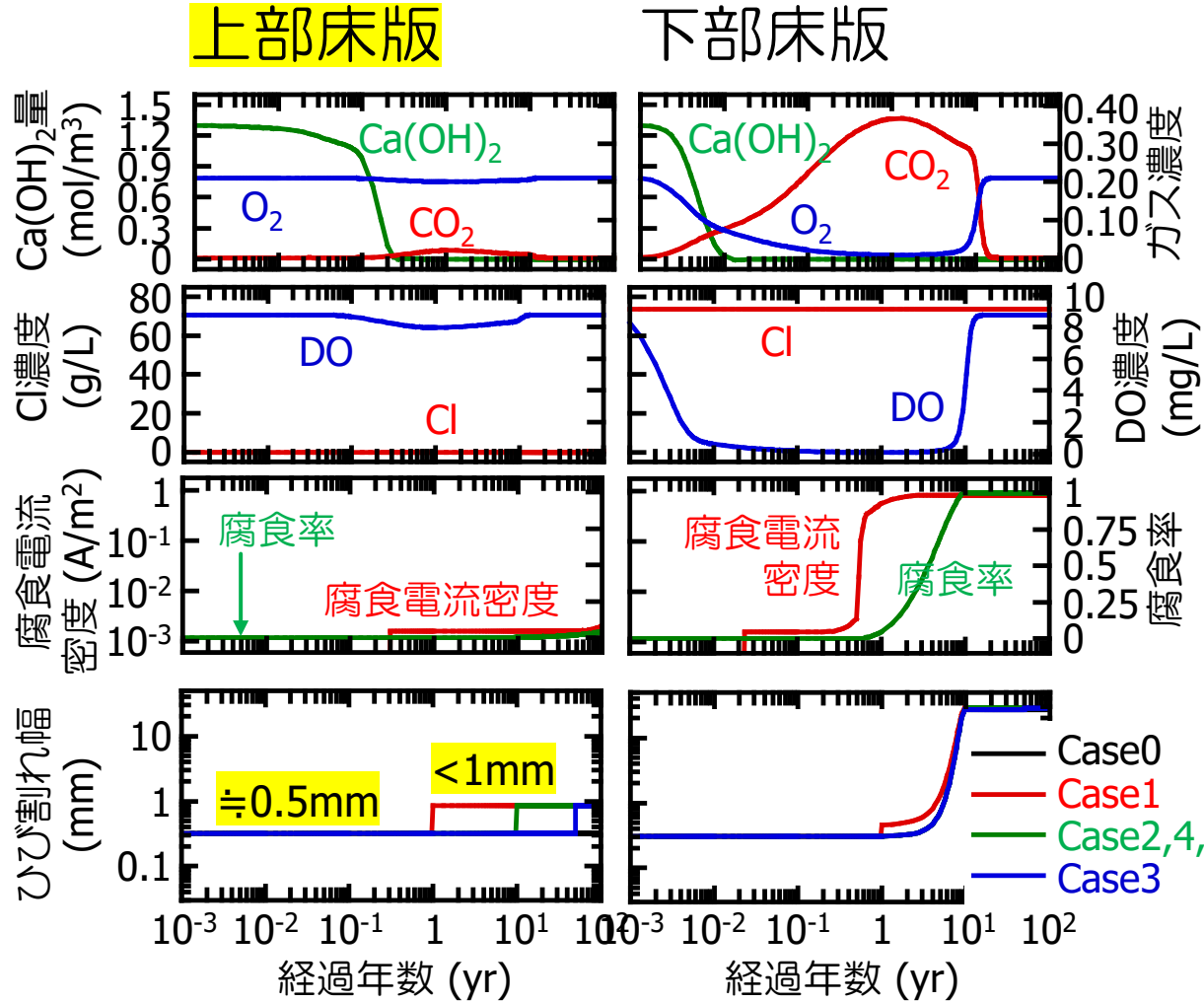
本研究で提案する試験方法は、実験者を問わずに再現性が高く、吸着パラメーターを容易に導出できる (試験の再現性は、3機関のクロスチェックで確認できた)

5-1. 成果の概要(サブテーマ1)

(地上型) 100年にわたる上部床版と下部床版の、腐食率とひび割れ幅の変化

A処分場

Case0= 地震無、Case1= 1年目L2地震、Case2= 10年目L2地震、
Case3= 50年目L2地震、Case4= Case2+人工バリア、Case5= Case4+固型化



- 上部床版は、塩素に触れなければ100年経過した時点でも腐食率は10%未満である。
- そのため、ひび割れ幅は地震時でも1 mm未満であった。
- 下部床版は地震の有無に関わらず腐食率100%にも達する。そのため地震が発生しなかった(Case 0)としても、19mm幅のひび割れが発生した。

参考

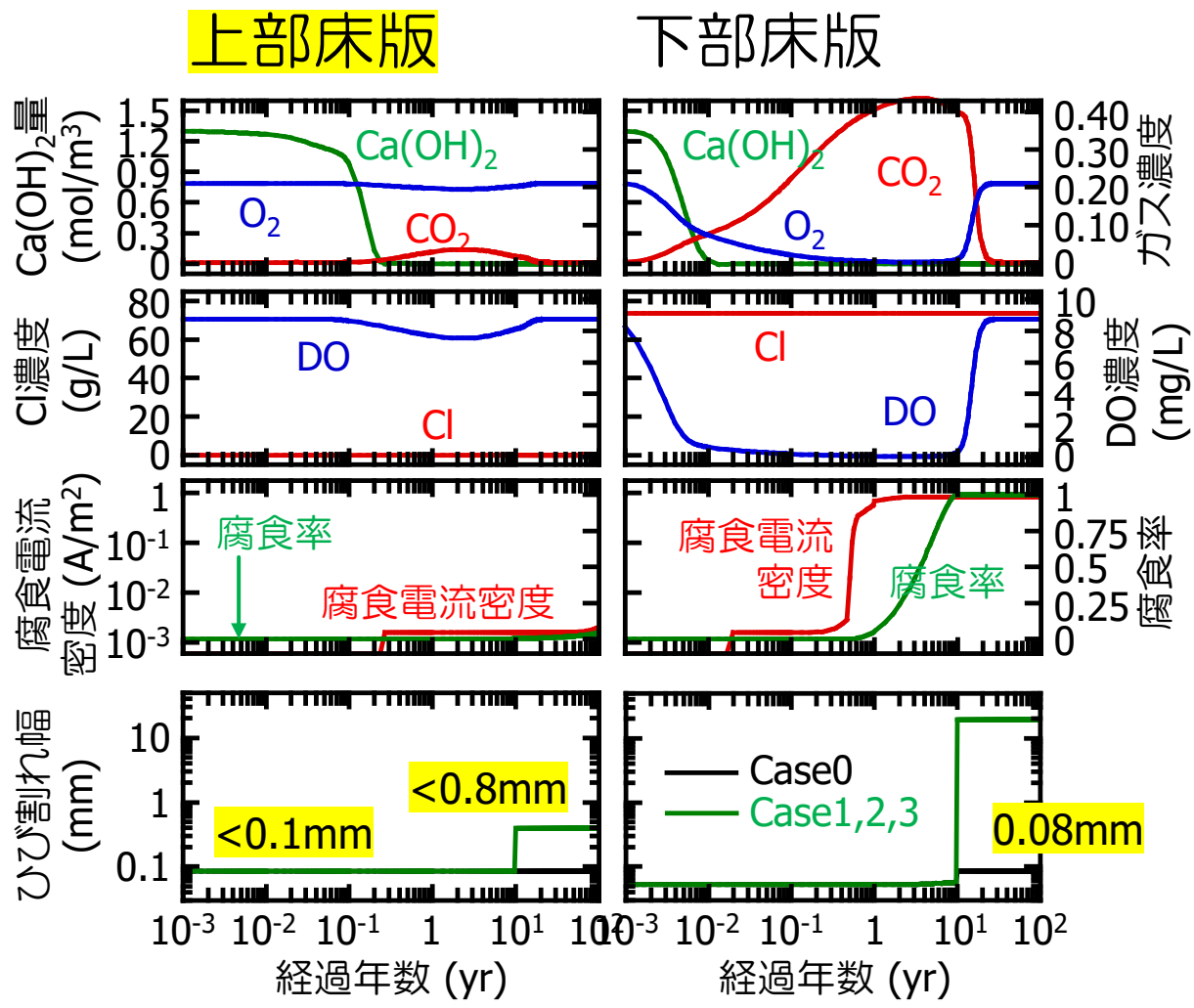
ひび割れ幅	浸透量
0.05 mm	0.007 L/s/cm
0.5 mm	0.223 L/s/cm
1 mm	0.563 L/s/cm
20 mm	0.836 L/s/cm

5-1. 成果の概要(サブテーマ1)

(地中型) 100年にわたる上部床版と下部床版の、腐食率とひび割れ幅の変化

B処分場

Case0= 地震無、 Case1= 10年目L2地震+水没、
Case2= Case1+人工バリア、 Case3= Case2+固型化



- 上部床版は、塩素に触れなければ100年経過した時点でも腐食率は10%未満である。
- 加えて側方からの土圧による拘束が期待できるため、ひび割れ幅は地上型よりも小さい。
- 下部床版は地震の有無に関わらず腐食率100%にも達する点は同じだが、土圧による拘束のため地震が発生しなければ(Case 0)、ひび割れ幅は0.08mmであった。

5-1. 成果の概要(サブテーマ1)

最終処分場における尿素加水分解細菌の生息状況と有害金属の不溶化効果

- 最終処分場内には尿素加水分解細菌が普遍的に生息している(下図 左:27コア試料中、22試料で確認)
- 最終処分場内から分離した尿素加水分解細菌の活性は既報と比較すると低い(下図 右)

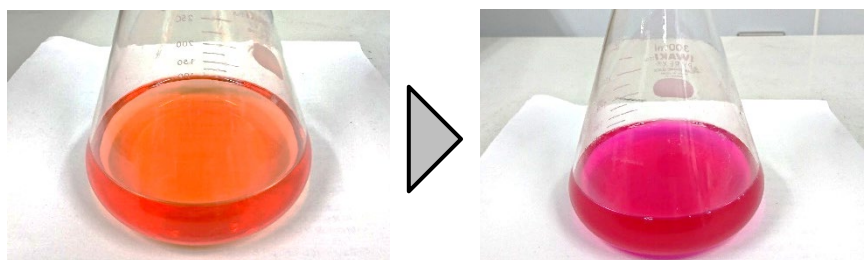


図 分離菌株の培養の様子(橙色 → 赤色へ変化)

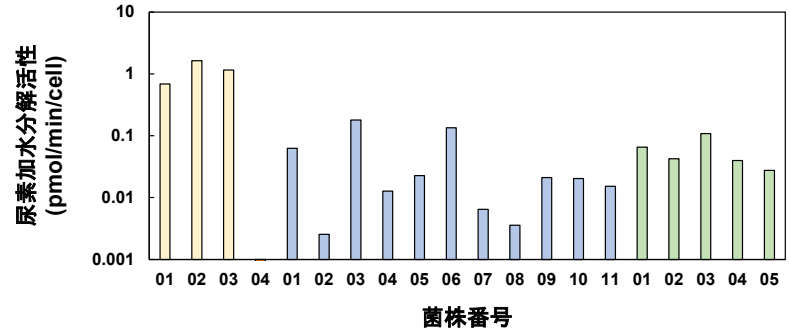


図 分離菌株の酵素活性測定結果の一例

- 細菌の尿素加水分解反応により、標準菌株ではcalcite (CaCO_3)、B-2-15株ではvaterite (CaCO_3) が生成
- 炭酸カルシウムの種類によらず、**どちらの菌株も高いPb不溶化率**を示した(下図)

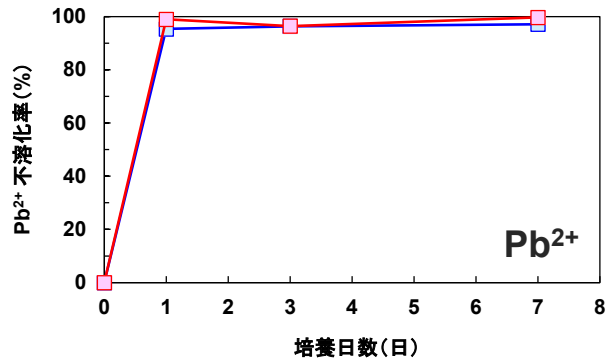
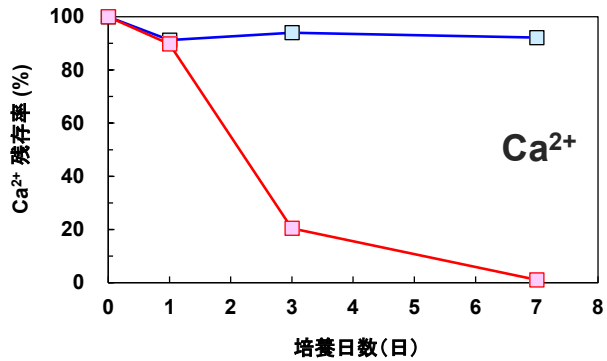
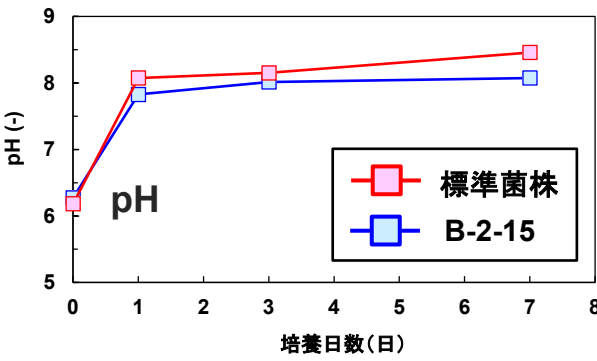


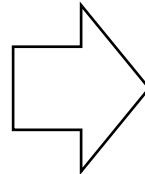
図4 培養期間中における Ca^{2+} 、 Pb^{2+} 濃度、pHの経時変化

5-1. 成果の概要（サブテーマ2）

1) 遮断型処分場の稼働状況と搬入物の実態調査

国内に存在する遮断型処分場の数(環境省:2015)

	事業者	処理業者	公共	計
北海道	2	8	0	10
東北地方	2	0	0	2
関東地方	1	0	0	1
中部地方	1	6	0	7
近畿地方	1	0	0	1
中国地方	0	0	0	0
四国地方	0	0	0	0
九州地方	1	1	1	3
計	8	15	1	24



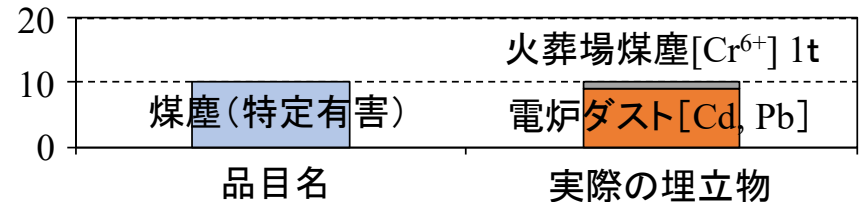
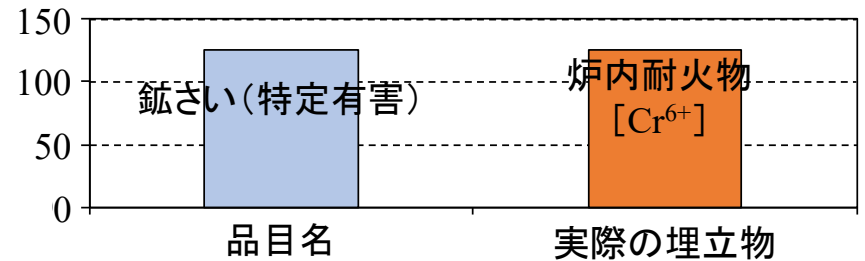
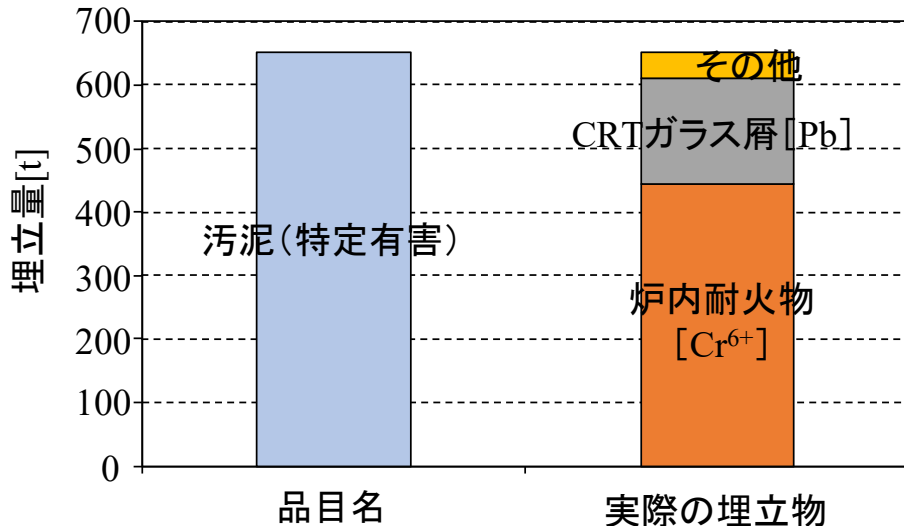
維持管理報告、ヒアリング、現地調査、実績報告等から判明した稼働状況事業者別に整理

事ID	所在自治体	状況	事ID	所在自治体	状況
1	北海道	稼働中	11	北海道	埋立終了
2	愛知	稼働中	12	熊本	埋立終了
3	長野	石綿のみ	13	熊本	埋立終了
4	長野	石綿のみ	14	いわき[自]	埋立終了
5-9	北海道	埋立終了	15	北海道	稼働なし
10	北海道	埋立終了	16	北海道[自]	稼働なし

自ID:事業者ID

その他[17(いわき)、18(千葉)、19-20(愛知)、21(名古屋)、22(豊田)、23(兵庫)、24(大牟田)]については情報なし(都道府県等の実態調査報告に記載がないことからすでに埋立終了か稼働なし)

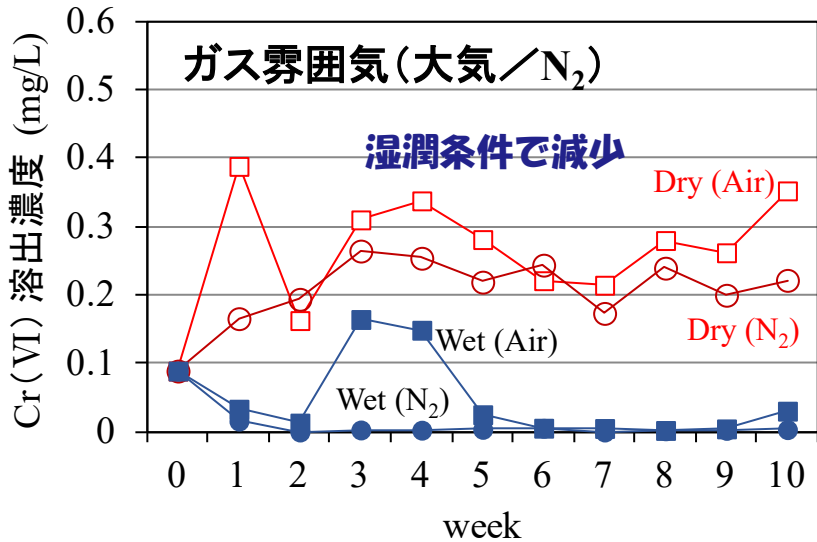
産業廃棄物行政組織等調査報告書より



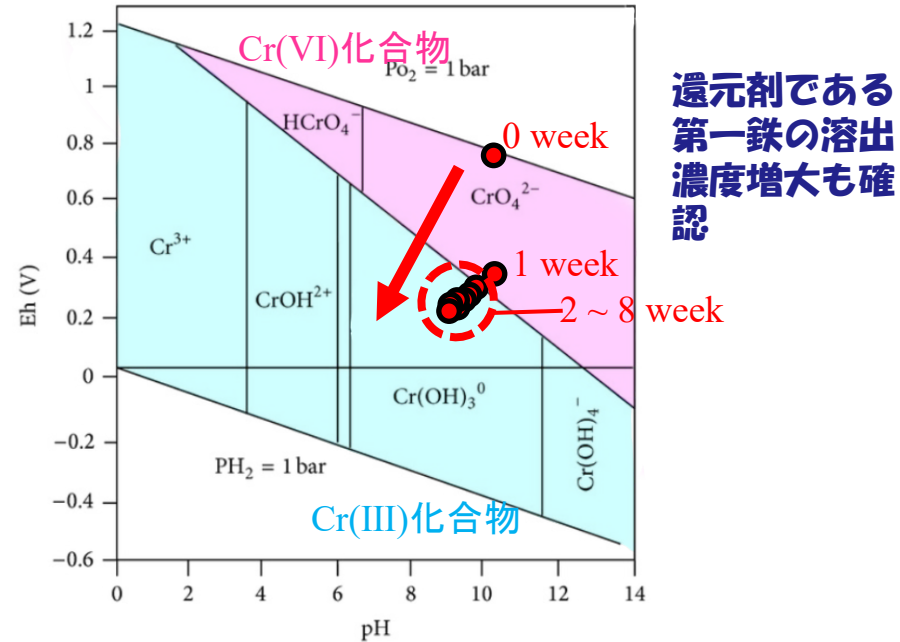
稼働中の遮断型処分場に処分されていた廃棄物

5-1. 成果の概要（サブテーマ2）

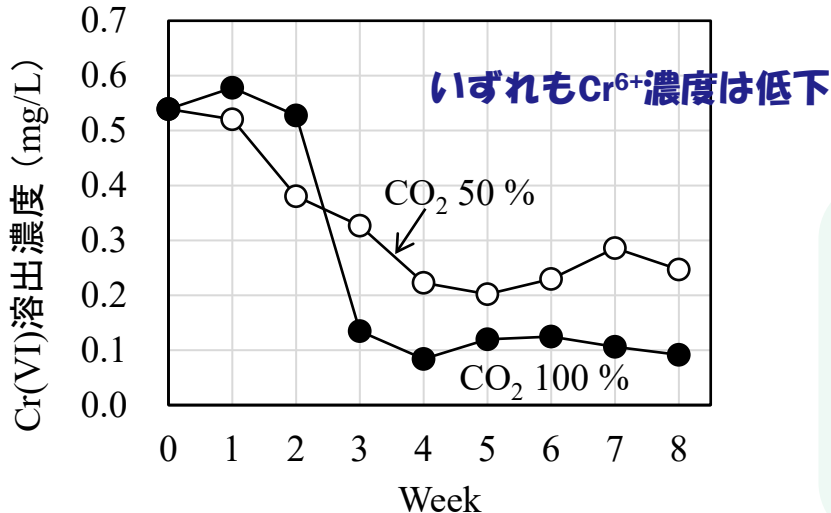
2) 遮断型処分場搬入物の風化加速試験(1) 炉内耐火物



試験開始0週目は六価が安定な範囲にあるが、時間経過と共に三価が安定な位置に推移



ガス雰囲気(CO₂=50%/100%)、湿潤雰囲気



CO₂ガス雰囲気(100%)でのpH、酸化還元電位の推移

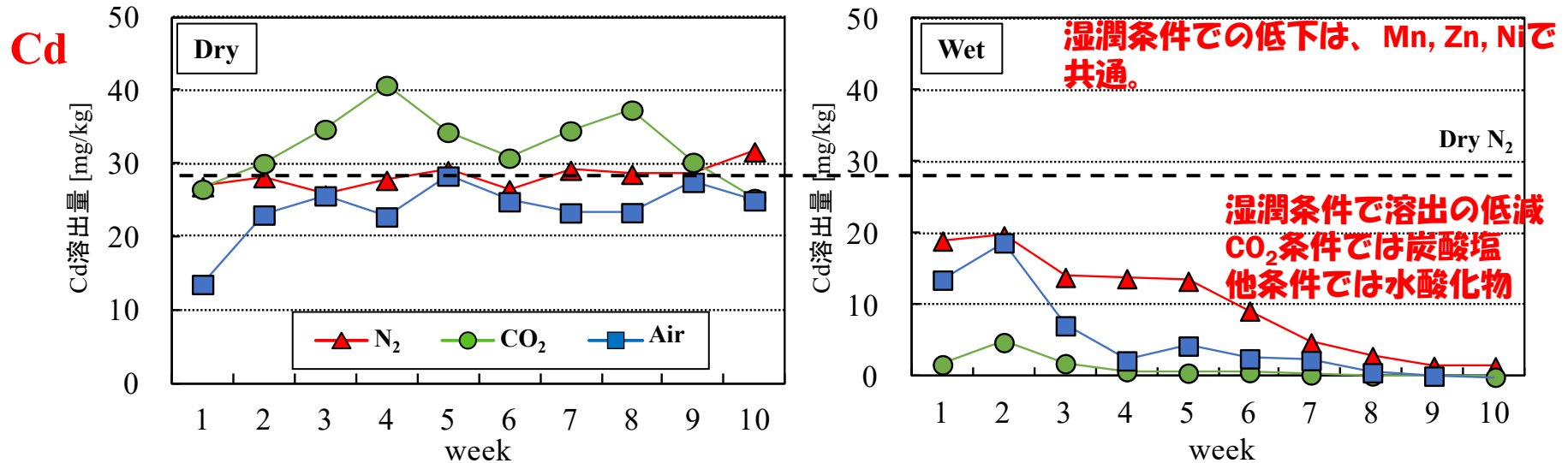
遮断型処分場実際に処分されている、Cr⁶⁺を含有する耐火物に対して、雰囲気の異なる条件に10週間暴露し、溶出特性の変化を検討。

→Cr⁶⁺の濃度は、湿潤雰囲気下で低下。

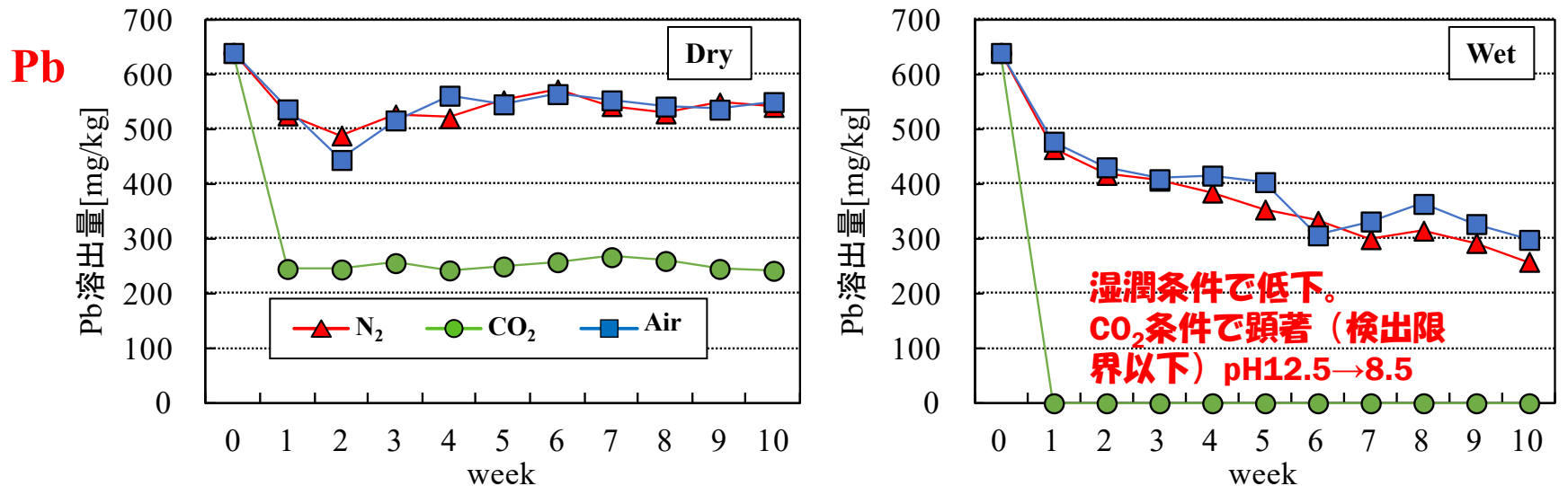
遮断型処分場で処分する場合、内部環境を湿潤雰囲気に制御するとCr⁶⁺の溶出を抑制できる可能性。

5-1. 成果の概要（サブテーマ2）

3) 遮断型処分場搬入物の風化加速試験(2) 電炉ばいじん



4) 一般廃棄物焼却飛灰の遮断型処分場搬入を想定した風化加速試験



炉内耐火物、電炉ばいじん、飛灰：溶出特性は変化。いずれも湿潤条件（高い湿度）が有効

5-1. 成果の概要 (サブテーマ3)

吸着等温式と分配係数の結果

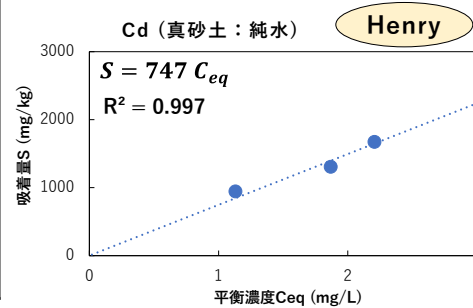
天然バリア (真砂土)

元素	溶液	吸着等温式	液固比 (mL/g)	分配係数 (mL/g)	決定係数
Pb	純水	Henry	200~250	501	0.999
Cd		Henry	100~200	747	0.997
As		Henry	10~15	8.9	0.994
Cr		Henry	2.5~10	1.0	0.992
Cs		Henry	2~8	7.6	0.995
Pb	海水	Henry	50~120	404	0.995
Cd		Henry	8.6~12	4.1	0.999
As		Freundlich	2.5~15	$K_F = 20,$ $n = 2.4$	0.993
Cr		(吸着せず)	2.5	0	-
Cs		Henry	7~20	29	0.999

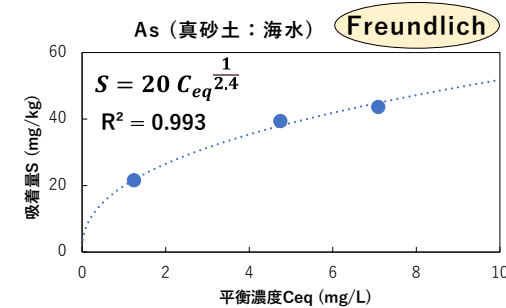
人工バリア (ベントナイト)

元素	溶液	吸着等温式	液固比 (mL/g)	分配係数 (mL/g)	決定係数
Pb	海水	Henry	300~12000	2259	0.999
Cd		Henry	12.5~17.5	3.7	0.999
As		Henry	12.5~25	5.7	0.999
Cr		(吸着せず)	12.5~40	0	-
Cs		Henry	40~100	16	0.996

線形近似



曲線近似



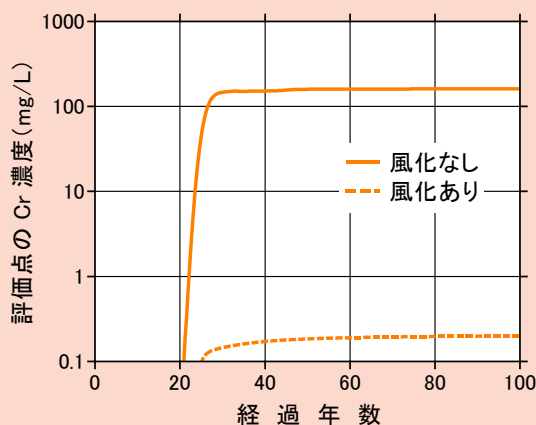
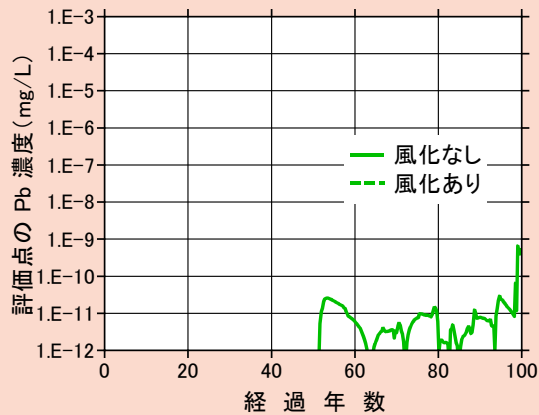
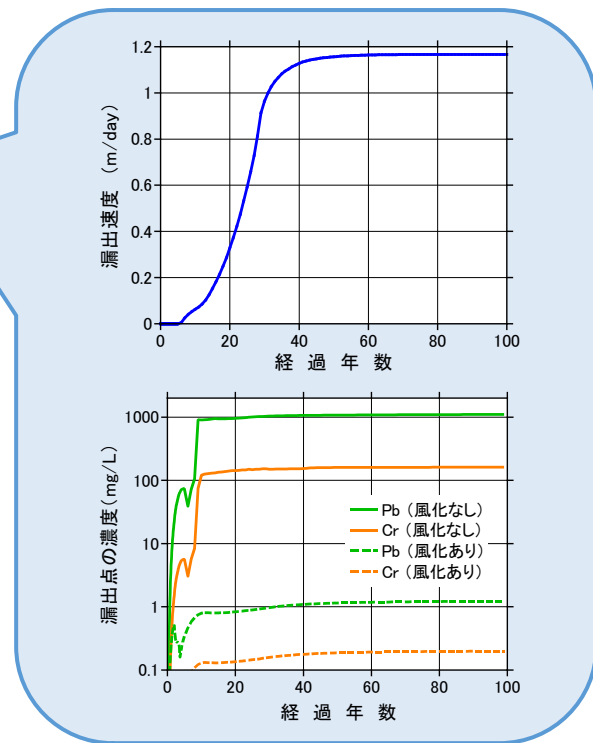
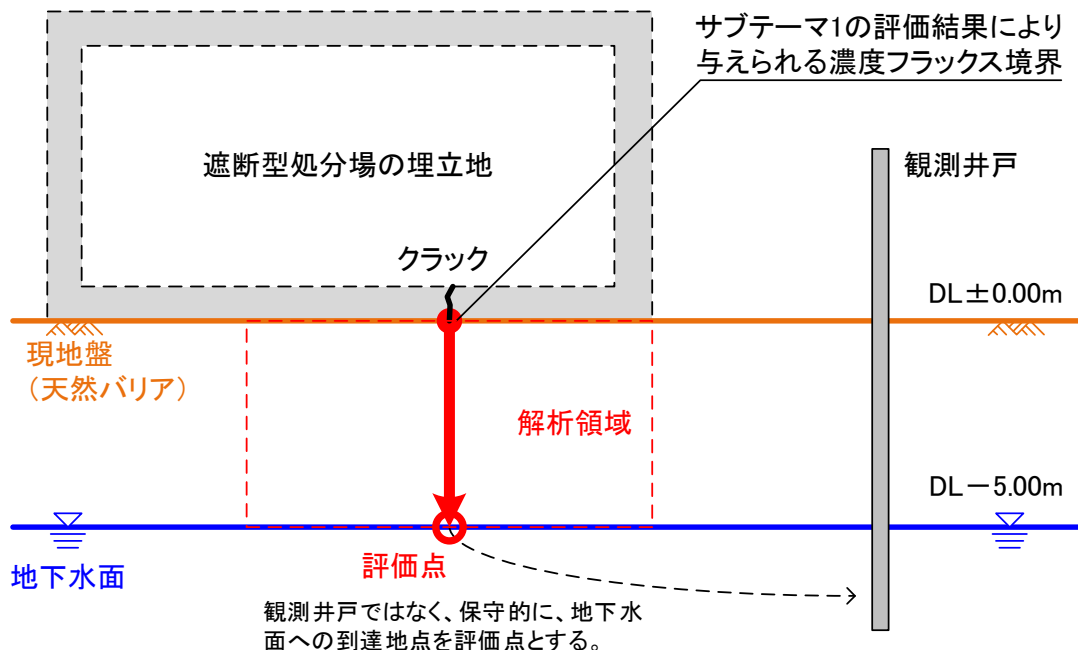
- 実験値5点のうち、原点を通過して決定係数が最も大きくなる3点を選んだ
- 決定係数 R^2 が**0.9以上**となり、相関性の高い吸着等温式を得られた
- Henry型, Freundlich型の吸着等温式を判別でき、**吸着パラメーター**を導出できた

実験的に得た吸着パラメーターを用いて、遮断型処分場の漏洩シミュレーションを行う

5-1. 成果の概要 (サブテーマ3)

天然バリアの汚染物質移動抑制

サブテーマ1との連携



- 鉛に対しては天然バリアは有効に機能する
- クロムに対しては機能しない
- 埋立廃棄物の風化による溶出抑制効果は大きい
- クラック発生等の事故時を考慮するのであれば、クロムについては更なる溶出抑制対策が必要

5-1. 成果の概要(サブテーマ1)

各シナリオに応じた長期的な環境安全性評価結果

地上型遮断型処分場Aのシナリオ

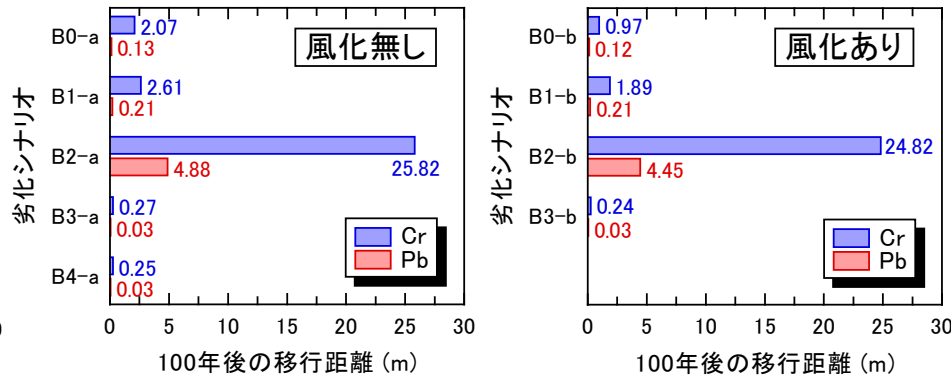
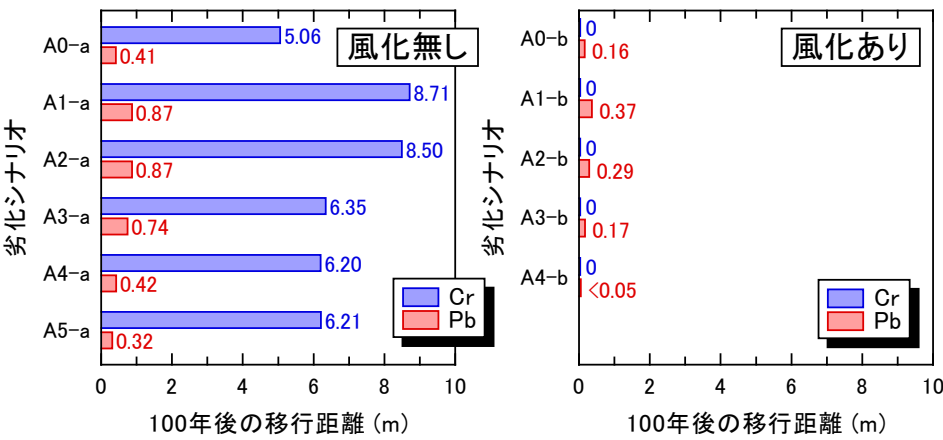
埋立方法	劣化イベント	人工バリア	風化/鉱物化	
			無し	あり
ばら埋	経年劣化	なし	A0-a	A0-b
ばら埋	経年劣化 + 1年後L2地震	なし	A1-a	A1-b
ばら埋	経年劣化 + 10年後L2地震	なし	A2-a	A2-b
ばら埋	経年劣化 + 50年後L2地震	なし	A3-a	A3-b
ばら埋	経年劣化 + 10年後L2地震	あり	A4-a	A4-b
固型化	経年劣化 + 10年後L2地震	あり	A5-a	

地中型遮断型処分場Bのシナリオ

埋立方法	劣化イベント	人工バリア	風化/鉱物化	
			無し	あり
ばら埋	経年劣化	なし	B0-a	B0-b
ばら埋	経年劣化 + 10年後L2地震	なし	B1-a	B1-b
ばら埋	経年劣化 + 10年後L2水没	なし	B2-a	B2-b
ばら埋	経年劣化 + 50年後L2水没	あり	B3-a	B3-b
固型化	経年劣化 + 10年後L2水没	あり	B4-a	

L2水没 = L2地震後に処分場内部全域が湛水する

土壤吸着性の強い鉛と、土壤吸着性の弱いクロムに着目



成果

遮断型処分場の劣化イベントに応じて、有害物質漏洩の可能性、およびそれに伴う周辺環境への長期安全性を評価するための数値解析モデル構築できた。2つの実処分場を対象に評価を行った。

5-2. 環境政策等への貢献

- 国内で稼働中の遮断型処分場が極めて限定的であることが明らかにした。
- 遮断型処分場コンクリート構造物の埋立物由来の劣化と地震動によるひび割れを評価し、現行施設の寿命を示した。
- 廃棄物の処分に適した具体的な多重安全技術を提示した。
 - 場内雰囲気制御による鉱物化の促進
 - 人工バリアと天然バリア、それらの機能（分配係数）の評価方法
- **遮断型最終処分場の長期的な環境安全性評価のための数値解析モデルを開発した。豪雨や地震など様々なシナリオにおける施設の評価法と移動フラックス、生活圏への到達濃度、到達時間等の指標を提示した。**

6. 研究成果の発表状況

主な査読付き論文

1. Sato M., Ishigaki T., Endo K., Yamada M. (2020) Emission Control of Mercury from Stabilized and Solidified Products under Monofill Conditions. *Global Environmental Research*, 24 (1), 3-10
2. Inoue D., Yang J., Takaoka M., Sei K., Ishigaki T. (2020) DNA-based Evaluation of Biological Mercury Methylation Potential in Waste Landfill. *Global Environmental Research*, 24 (1), 19-25
3. Ishimori H., Hasegawa R., Endo K., Sakanakura H., Ishigaki T. (2020) Numerical Simulations of Leaching and Volatilization Behaviors from Stabilized and Solidified Mercury Metal Waste in Landfill. *Global Environmental Research*, 24 (1), 11-18
4. Ishimori H., Suzuki T., Sakanakura H., Ishigaki T. (2020) Establishing soil adsorption testing methods for gaseous mercury and evaluating the distribution coefficients of silica sand, decomposed granite soil, mordenite, and calcium bentonite. *Soils and Foundations*, 60, 496-504
5. Tojo Y., Ikeda T., Matsuo T., Matsuto T. (2020) The effect of inside circumstance of the hazardous waste landfill on the leaching behavior of harmful heavy metals, *International Journal of GEOMATE*, 18 (66), 129-134 (IF:0.27)
6. Ishimori H., Hasegawa R., Ishigaki T. (2021) Long-term Leaching and Volatilization Behavior of Stabilized and Solidified Mercury Metal Waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 741-754
7. 三浦拓也、遠藤和人、山田正人, バッチ吸着試験における失敗しない土壌の分配係数の導出方法に関する一考察, *地盤工学会誌* (査読中) .