

環境研究総合推進費

3-1701

**廃水銀処理物の長期適正管理のための
地上保管対策に関する研究**

研究代表者：

京都大学大学院工学研究科 教授 高岡昌輝

**研究実施期間：平成29年度～令和元年度
研究経費（累計額） 70,092千円**

研究体制

サブテーマ1：廃水銀処理物の長期安定性評価試験・管理手法の開発

京都大学大学院工学研究科

高岡昌輝 教授

日下部武敏 助教

サブテーマ2：廃水銀処理物の地中埋立時の水銀挙動に関する研究

福岡大学環境保全センター

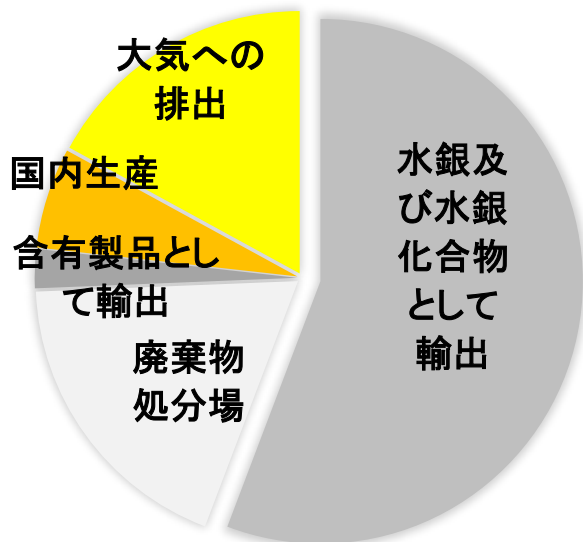
柳瀬龍二 教授

サブテーマ3：廃水銀処理物の処分・保管時のリスクコミュニケーションに関する研究

東京工業大学環境・社会理工学院 高橋史武 准教授

研究背景・研究開発目的

水銀の マテリアルフロー



廃水銀

Hg

廃水銀処理物

水銀に関する水俣条約(2017年8月に発効)
水銀廃棄物の適正管理(11条)

廃棄物処理法施行令・施行規則の改正
(H28/4/1～、H29/10/1～)

水銀廃棄物ガイドライン
(平成28年度末)

高濃度水銀は回
収、硫化・固型化
して、廃水銀処理
物として地中埋立
を想定

- ・ 廃水銀処理物の長期安定性及び適切な処分方法については継続的に検証・検討を進めていく必要。
- ・ 固化体からの水銀漏洩の早期確認、住民の安心確保の観点

地上保管が一時的措置として検討対象となることから、地上保管時の管理要件、手法を提示し、水銀保管・処分施設導入に資することを目的とする。

研究のアプローチ・概要

S1: 廃水銀処理物の長期安定性 評価試験・管理手法の開発

高岡昌輝・日下部武敏
(京都大学)

発ガス性・耐熱性
耐ガス透過性・耐
水性など

管理基準
管理手法

事故・災害時
リスク評価

地上保管

地上保管に
適した新たな
固型化技術

廃水
銀処
理物

水銀挙動
比較

阻害
要因

受容性

S3: 廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

高橋史武(東京工業大学)

廃棄物処理法施行令
(平成29年10月1日～)

廃水銀

Hg

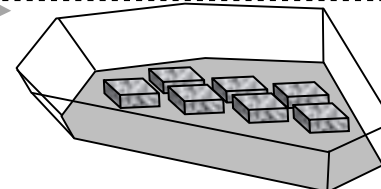
硫化・固型化
(HgS+改質硫黄)



S2: 廃水銀処理物の地 中埋立時の水銀挙動 に関する研究

柳瀬龍二(福岡大学)

最終処分
(管理型/遮断型)



サブテーマ（１）

廃水銀処理物の長期安定性評価試験・ 管理手法の開発

研究の目的・概要

- ✓ 廃水銀処理物を地上保管することを想定し、まず、**地上保管に応じた評価法**の確立と**新たな固型化技術**を開発し、既存の改質硫黄による処理物と比較し、評価する。

具体的目標

- ✓ 評価手法として**ヘッドスペース法**を確立し、樹脂系固型化剤を用いた廃水銀処理物については、環境庁告示第13号法で**0.5 $\mu\text{g/L}$** 以下、大気への揮発は**1 $\mu\text{g/m}^3$** 以下、**0.98 MPa**以上の圧縮強度を達成する。加えて耐熱性、耐ガス透過性等を評価する。

年度計画

平成29年度	平成30年度	令和元年度
- ヘッドスペース法の評価・確立 - 樹脂系固型化技術 - 硫化水銀との配合比 - 溶出・発ガス・強度から評価	- ヘッドスペース法の評価・確立 - 樹脂系固型化技術 - 固型化材の種類の違い - 新たな劣化試験方法 - 凍結融解試験 - 耐ガス透過性 - 耐微生物性など	- 樹脂系固型化技術 - 紫外線の影響 - 耐熱性 - 耐腐食性 - 火災時の副生ガス - 改質硫黄固化体との比較 - 最終的に管理手法を提示。

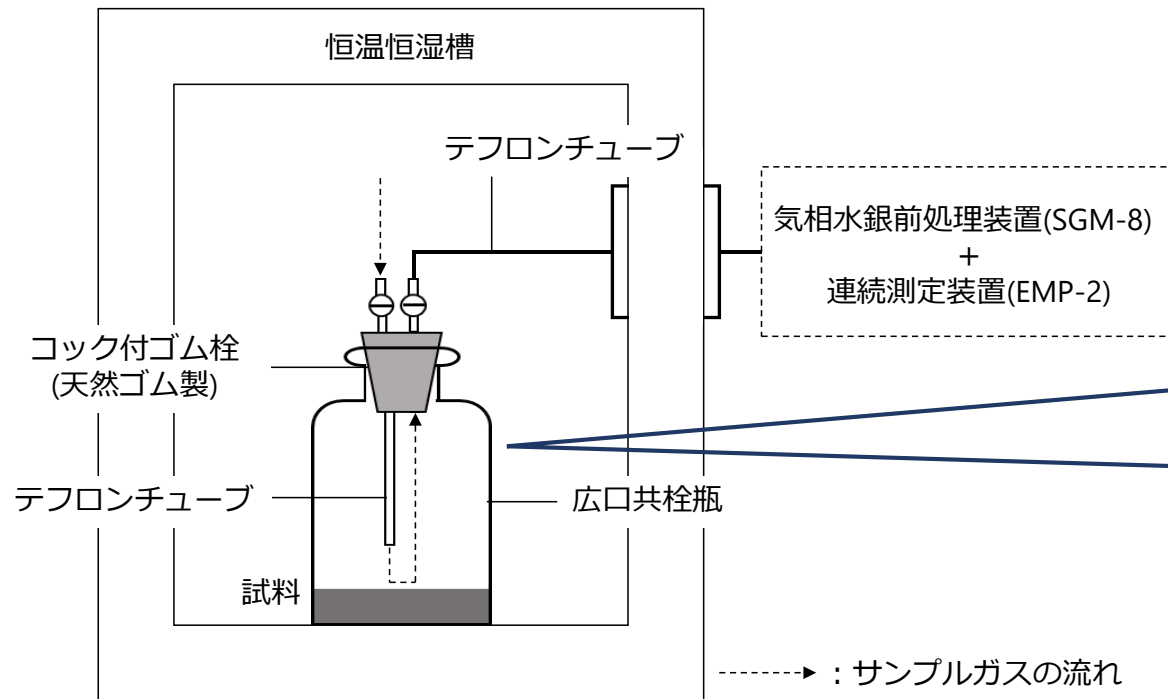
ヘッドスペース試験方法の確立

ヘッドスペース試験とは？

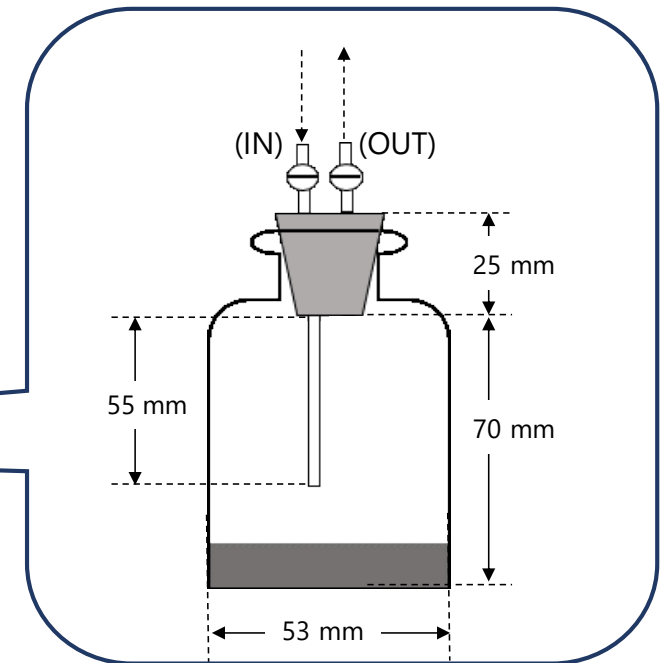
- 先行研究(福田, 2011)において水銀の硫化処理物の大気汚染ポテンシャルを評価し、硫化処理が完了しているかを判断するために発案された試験法
- 一定条件下における容器上部(ヘッドスペース)の水銀濃度を測定

<基本条件>

- ✓ 先行研究: 試料量10 g、湿度60%RH、温度10, 20, 30, 40℃
- ✓ 水銀廃棄物ガイドライン: 試料量10 g、温度25℃、湿度60%RH、ガス流量1 L/min、1時間静置+連続3時間測定



<ヘッドスペース試験概要図>



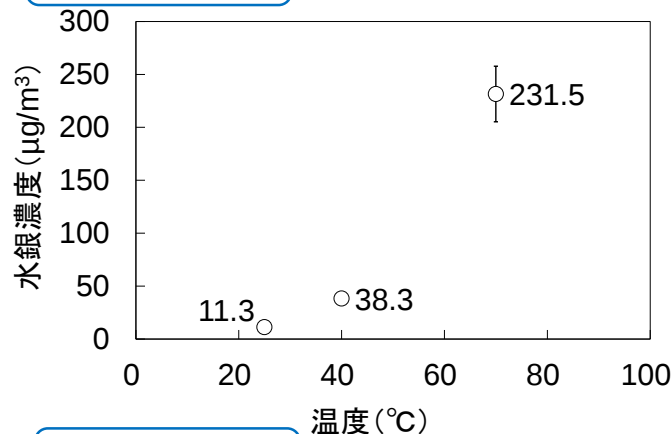
<容器のジオメトリー>

ヘッドスペース試験方法の確立

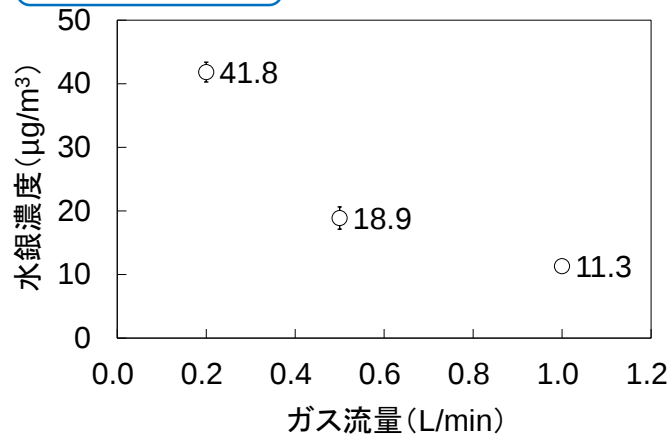
参照サンプル: 硫化水銀、水銀発生チューブ

検討したパラメーター: 試料量 (10, 30, 50 g) 温度 (25, 40, 70°C)、湿度 (0, 60, 90%RH)、
ガス流量 (0.2, 0.5, 1.0 L/min)、試験時間 (静置あり／なし)

温度



ガス流量

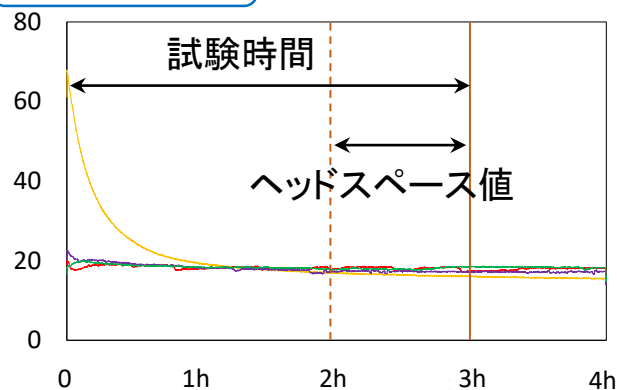


温度、ガス流量の影響は大



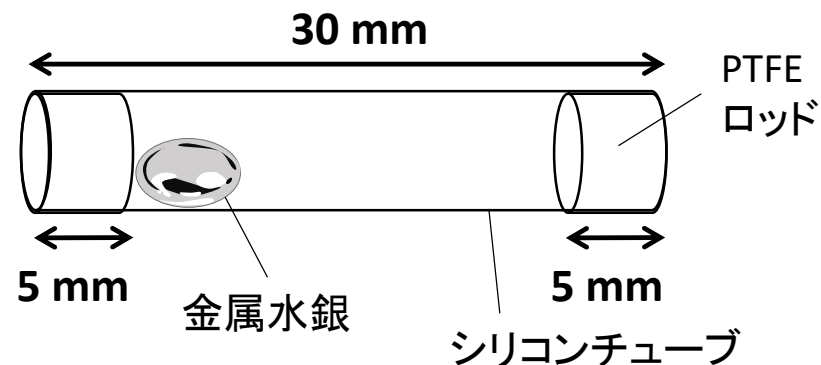
試料量、湿度の影響は小

測定時間



- ✓ 静置の必要なし
- ✓ 試験時間を3時間
- ✓ 最後の1時間分のデータの平均値をHS値として採用

<水銀発生試料概要図>



【本研究で決定した試験条件】

試料量 10 g、温度 25°C、湿度 60%RH、ガス流量 0.5 L/min、試験時間 3時間 (静置なし)

樹脂系固型化技術の開発・適用

最適配合の決定
(約120 g)

最適配合で評価試験
(約600 g)

主剤＋HgS
手練りで1分間混合

主剤＋HgS
200rpm, 10分間
攪拌機で攪拌

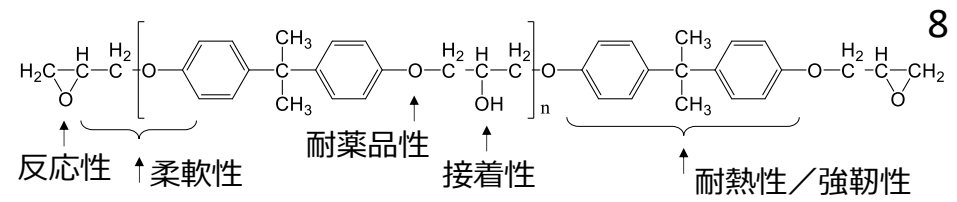
硬化剤を加え
手練りで1分間混合

硬化剤を加え
200rpm, 10分間
攪拌機で攪拌

JIS A 1132規定サミットモールド缶
(φ50×100 mm)に移し
40° Cで16時間硬化

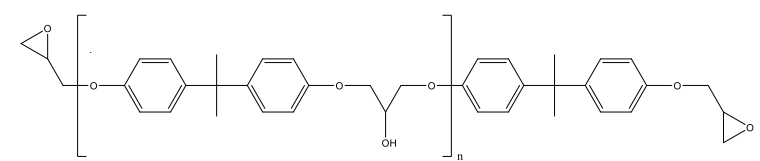
エポキシ樹脂固化体として回収
⇒評価試験へ

最適配合は、主剤1、硬化剤C、HgS最大80wt%まで固型化



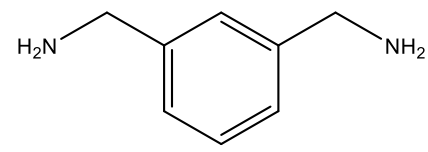
エポキシ樹脂の化学構造式

主 剤 ビスフェノールA型液状エポキシ樹脂

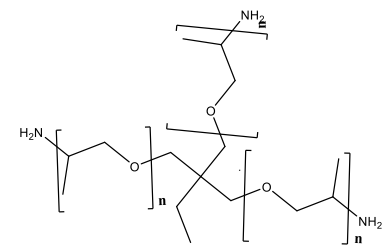


主剤2は主剤1の低粘度グレード

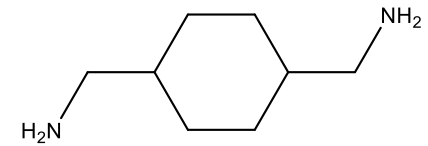
硬化剤



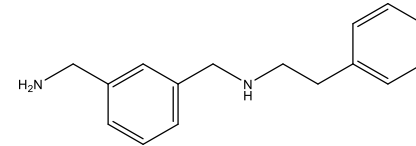
硬化剤A



硬化剤B



硬化剤C



硬化剤D

樹脂系固型化技術の開発・適用

評価項目、指標など	目標値	改質硫黄固化体	エポキシ樹脂固化体
硫化水銀配合率 (wt%)	-	50	80
一軸圧縮強度 (MPa)	≥ 0.98	30.6	107.0
環告13号溶出試験 ($\mu\text{g/L}$)	≤ 0.5	0.05 ± 0.01	0.09 ± 0.01
ヘッドスペース試験 ($\mu\text{g/m}^3$)	≤ 1.0	< 0.1	< 0.1
タンクリーチング試験 ($\mu\text{g/L}$)	≤ 0.5	< 0.01	< 0.01
作業環境下の水銀濃度 ($\mu\text{g/m}^3$)	25 ^{*1}	Max. 5.0	Max. 1.0
材料費 (円) ^{*2, *3}	-	3,494 ^{*4}	508 ^{*5}
減容比 ^{*6}	-	1.0	0.5
ガス透過係数 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$)	-	2.70×10^{-10}	3.03×10^{-11}

^{*1} 労働安全衛生法上の管理濃度 (作業環境評価基準)、^{*2} ラボでの購入実績に基づく試算であり、市場実勢価格ではないことに注意されたい。
^{*3} 硫化水銀 1kgを固型化処理するのに必要な固型化材のみの費用 (使用電力料などは含まない。)、^{*4} 粉末硫黄、改質剤DCPDのみ、^{*5} 主剤1、硬化剤Cのみ、^{*6} 硫化水銀 1kgあたりの固化体容積 (対改質硫黄固化体)

水銀廃棄物ガイドラインに規定されている改質硫黄を用いた固型化技術と比べて、エポキシ樹脂を固型化材とする新たな固型化技術の優位性は十分にある。

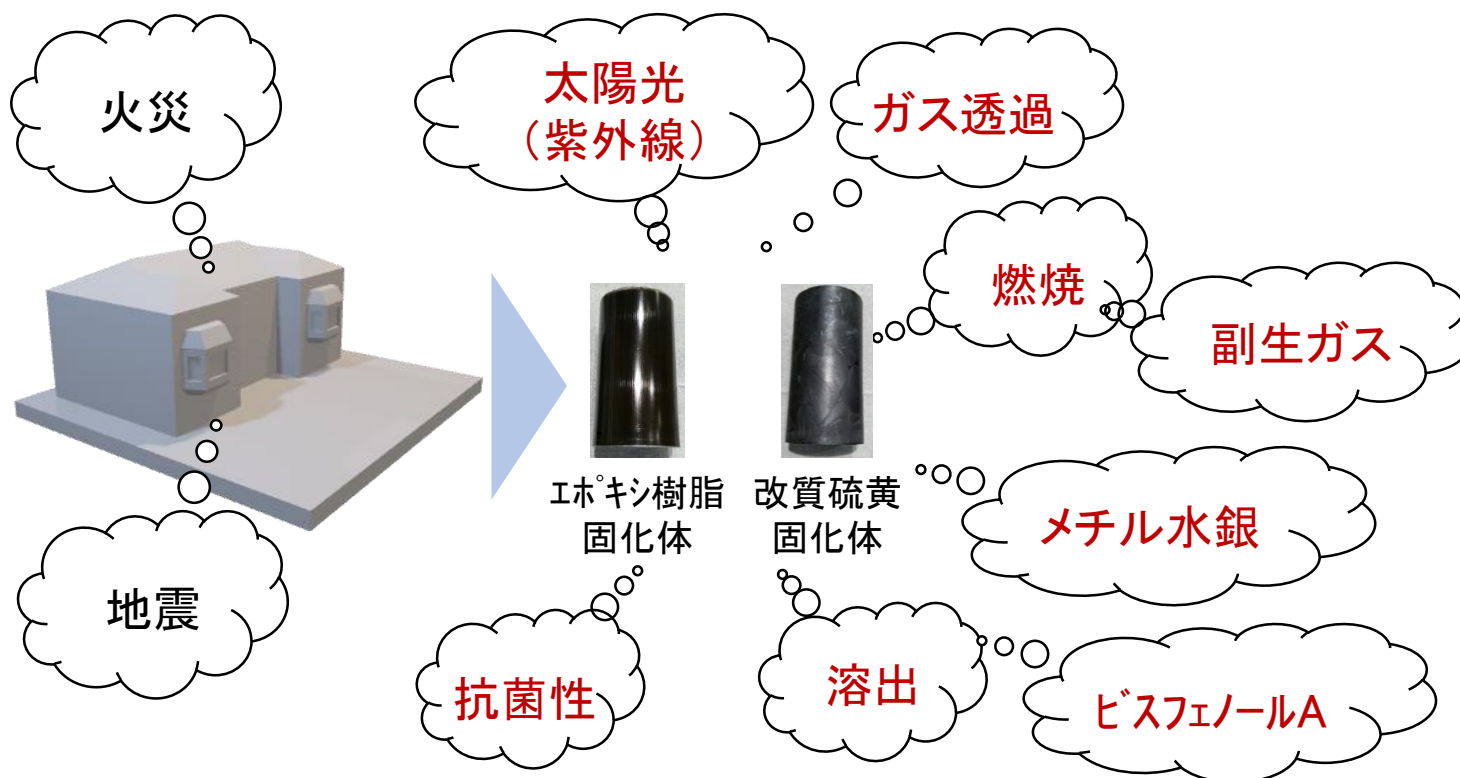
劣化試験および特性把握

水銀廃棄物ガイドライン



一軸圧縮強度試験
環告13号溶出試験
ヘッドスペース試験
タンクリーチング試験

地上保管や地中処分を想定



ガス透過試験
小ガス炎着火試験
TG-DTA-MS分析
電気炉加熱実験
抗菌性試験
凍結融解試験
耐候性試験
UV促進劣化試験
耐腐食性試験

+

メチル水銀分析
ビスフェノールA分析
X線CTスキャン
表面コーティング

劣化試験および特性把握

		エポキシ樹脂固化体 (HgS 80 wt%)	改質硫黄固化体 (HgS 50 wt%)
固化体の 物性評価	ガス透過性試験	◎ $3.03 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$ 硫化水銀配合による物性の低下なし	○ $2.70 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$ 硫化水銀配合による物性の低下ややあり
	抗菌性試験	◎ 黄色ぶどう球菌：抗菌活性値 > 4.2 大腸菌：抗菌活性値 > 5.5	○ 黄色ぶどう球菌：抗菌活性値 3.4 大腸菌：抗菌活性値 0.1
	X線CT観察	○ 二値化による硫化水銀割合（断面積） 上部53%、中部55%、下部61%	○ 二値化による硫化水銀割合（断面積） 34%
	ビスフェノールA溶出試験	◎ 22 µg/L ヒト健康リスクおよび生態リスクは低い	—
	メチル水銀分析	△ 強アルカリ条件下ではメチル水銀が検出 酸性条件下ではメチル水銀が検出されず	—
温度変化に 関する評価	凍結融解試験	○ HS分析、圧縮強度、JLT No.13基準値を満足 タンクリーチング試験で1条件のみ超過	◎ HS分析、圧縮強度、JLT No.13、 タンクリーチング試験で基準値を満足
	小ガス炎着火試験	◎ 第二類の危険物に該当しない	◎ 第二類の危険物に該当しない
	示差熱天秤-質量分析法 (HgS 0 wt%)	約200℃で重量減少開始 約200℃でCO、CO ₂ が発生	約70℃で重量減少開始 約170℃でSO ₂ が発生
	電気炉を用いた加熱試験 (HgS 0 wt%)	純空気条件では276℃でCOが発生 窒素条件では296℃でCOが発生	純空気条件では239℃でSO ₂ が発生 窒素条件では285℃でSO ₂ が発生
	熱重量・示差熱分析	純空気条件では168℃で重量減少開始 窒素条件では208℃で重量減少開始	純空気条件では178℃で重量減少開始 窒素条件では179℃で重量減少開始
光に 関する評価	耐候性試験	○ HS分析、圧縮強度、JLT No.13基準値を満足 タンクリーチング試験で1条件のみ超過	◎ HS分析、圧縮強度、JLT No.13、 タンクリーチング試験で基準値を満足
	UV-LED促進劣化試験	○ カルボニル基 ($1,710 \text{ cm}^{-1}$) 増加傾向 HS分析基準値を満足	◎ ラマンスペクトルのピーク減少なし HS分析基準値を満足

結論：エポキシ樹脂を用いた固型化処理は十分に適用可能である。

サブテーマ（２）

廃水銀処理物の地中埋立時の 水銀挙動に関する研究

研究の目的・概要

- ✓ 廃水銀処理物の地中埋立処分時の環境動態を模擬実験により明らかにし、地上保管時の水銀挙動と比較検討する。

具体的目標

- ✓ 実環境を模擬した処分場セルにて水銀廃棄物の長期評価実験を継続し、液相、固相、気相への移行率、メチル水銀の生成割合等を明らかにし、地上保管から想定される結果と比較する。加えて水銀廃棄物の環境保全上の最適な埋立手法を提案する。

年度計画

平成29年度	平成30年度	令和元年度
- 埋立実験を継続 - 埋立地における水銀収支 - 埋立地内部での水銀挙動（水銀のメチル化や廃棄物層内での移動特性） - 硫化水銀とその固化物からの気化水銀特性の基礎調査	- 埋立実験の継続調査 - 水銀廃棄物中の水銀の溶出に与える影響因子（pHの影響、浸出水中の共存イオン（塩素イオン、硫酸イオン、陽イオン等））について検討	- 埋立実験の継続調査 - 埋立実験槽を解体し、埋立廃棄物中の層状別水銀含有量等を調査及び水銀収支 5年間に亘る水銀廃棄物の埋立特性から、安全で安心できる最適な埋立手法を提案

廃水銀処理物の地中埋立実験条件及び埋立槽

(埋立条件)

①埋立処分方法

(完全混合、層状、固化体)

- 混合廃棄物(燃え殻:下水汚泥堆肥=8:2)
- 燃え殻単独

②廃棄物に対する水銀量過負荷(約100倍)

③埋立構造の違い

(準好気性、嫌気性)

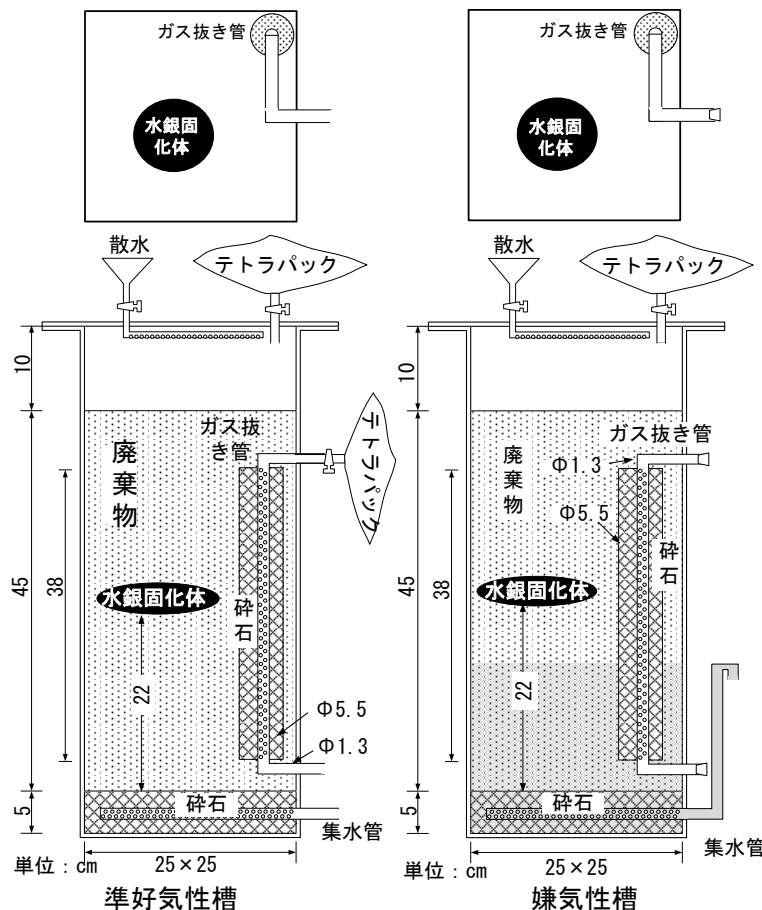
④水銀の埋立特性

- 浸出水への水銀流出特性とメチル水銀(M-Hg)生成の可能性
- 水銀の気化特性

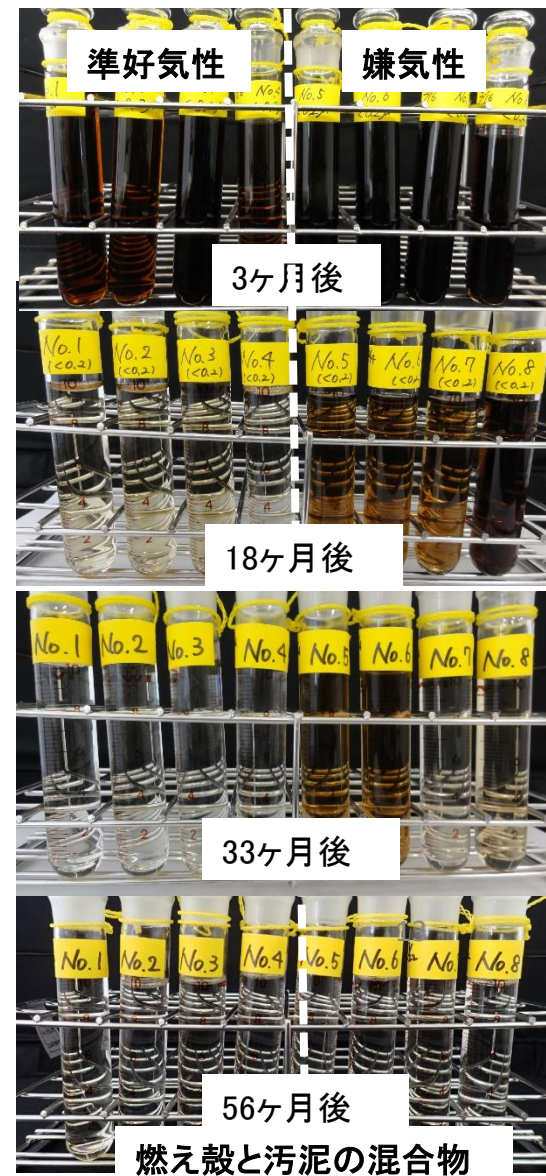
⑤5年後の解体調査

- 水銀濃度分布(含有量・マッピング)
- 水銀形態(XAFS)
- 溶出試験・気化試験

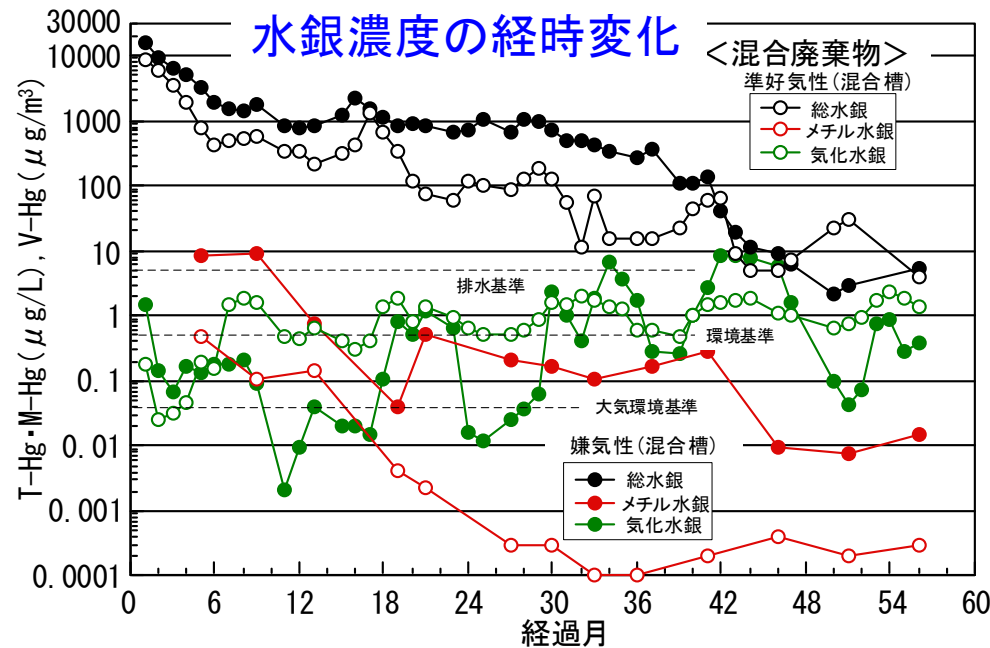
(埋立槽)



(浸出水の状況)



混合廃棄物（混合槽）：準好気性槽と嫌気性槽



●5年間の経時変化

T-Hg(浸出水) : 準好気性<嫌気性, 排水基準<両槽

M-Hg(浸出水) : 準好気性<嫌気性, 嫌気性槽が初期に流出

M-Hg/T-Hg=1/100~1/1000→非常に低濃度で検出

V-Hg(気化水銀): 両槽とも大気環境基準を超えて発生

嫌気性<準好気性→嫌気的環境の方が低い

●埋立実験槽解体後

T-Hg(含有量) : 両槽とも10,000mg/kg前後で存在

下層<上層→下層部のHgが浸出水に流出

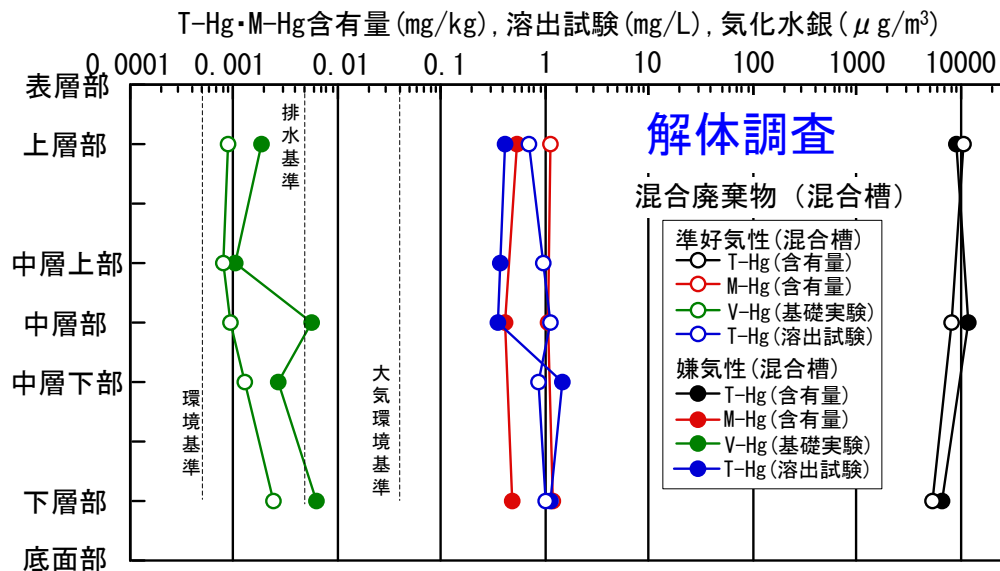
T-Hg(溶出試験) : 両槽とも埋立基準(0.005mg/L)を超える

準好気性は上層から下層まで1mg/L前後溶出

嫌気性は上層部0.5mg/L、下層部1mg/L前後溶出

M-Hg(含有量) : 嫌気性<準好気性、上層≒下層

嫌気性は滞水部も変化なし→M-Hg生成は小さい



<硫化水銀と廃棄物の混合埋立>

①浸出水への水銀流出は下層域から流出の可能性

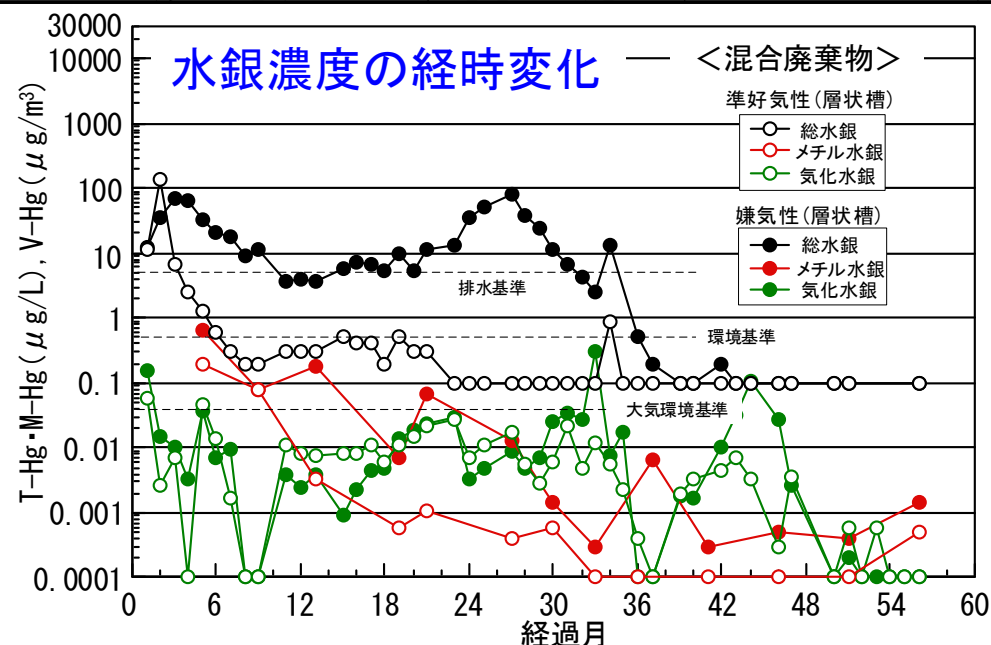
法規制値を超えて長期間に亘って流出

②解体後の溶出試験で水銀が埋立基準を超えて溶出

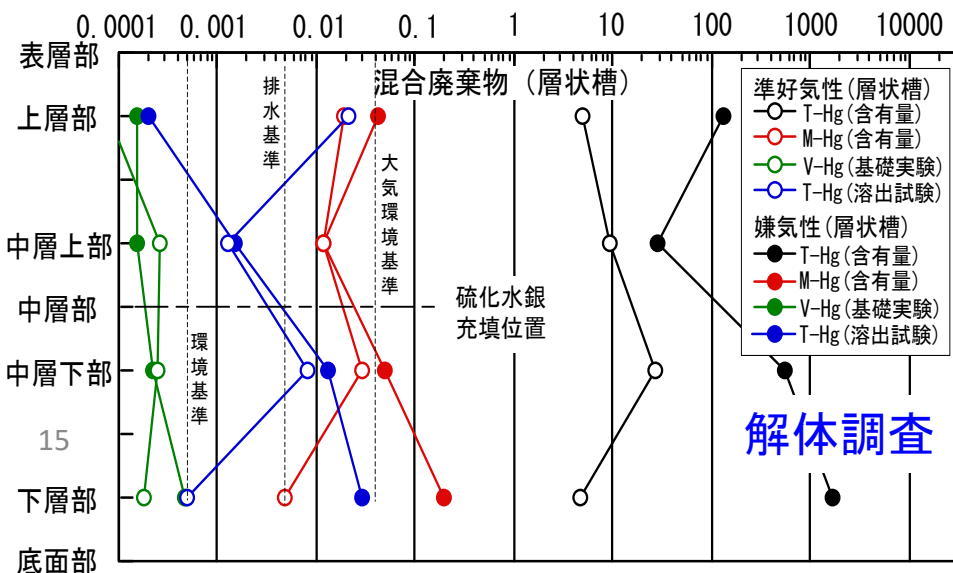
③滞水部でのメチル水銀の生成の可能性は小さい

④気化水銀は上層表面に存在する硫化水銀から
大気環境基準を超えて大気拡散の傾向

混合廃棄物（層状槽）：準好気性槽と嫌気性槽



T-Hg・M-Hg含有量 (mg/kg), 溶出試験 (mg/L), 気化水銀 (μg/m³)



●5年間の経時変化

T-Hg(浸出水): 準好気性<嫌気性

準好気性: 埋立3ヶ月以降は排水基準又は環境基準以下

嫌気性: 埋立3年間に亘って排水基準を超えて流出

→ 滞水部及び高含水部からのHg流出が想定

M-Hg(浸出水): 準好気性<嫌気性

両槽とも低濃度で洗出しで徐々に低下→ M-Hg生成は小

V-Hg(気化水銀)

両槽とも大気環境基準以下で発生→ 硫化水銀の気化は小さい

●埋立実験槽解体後

T-Hg(含有量): 硫化水銀充填の下部(中層下部)で高濃度化

→ 充填水銀が下層部へ移動(準好気性<嫌気性)

→ 嫌気性の滞水部と高含水部への水銀移動が大きい

T-Hg(溶出試験): 水銀含有量と同傾向で溶出

M-Hg(含有量):

両槽とも0.01~0.1mg/kgで、含有量の約1/1000で同傾向

硫化水銀の影響が小さい上層部でも検出→ M-Hg生成は小



<硫化水銀を塊で槽中央部に充填(層状槽)>

① 浸出水への水銀流出は準好気性槽が埋立初期に基準値

以下、嫌気性槽は3年間に亘って基準値を超える流出

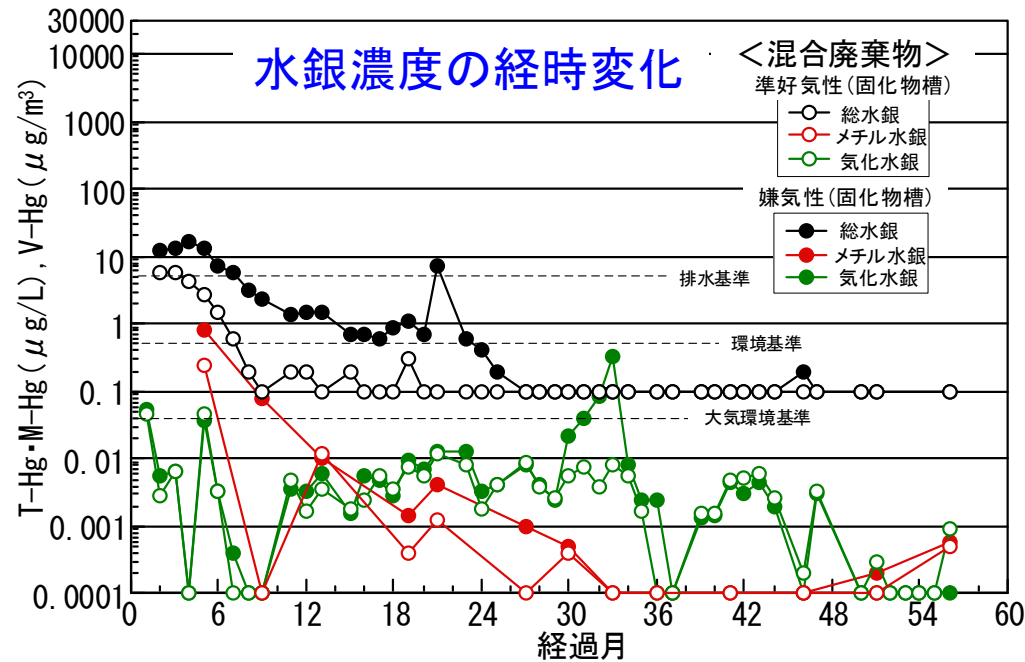
② 充填水銀の上層部からの気化は小さい

③ 充填水銀が両槽とも直下(中層下部)に移動し、嫌気

性(滞水部と高含水部)への移動が大きい

④ 充填水銀のメチル水銀生成は小さい

混合廃棄物（固化物槽）：準好気性槽と嫌気性槽



●5年間の経時変化

T-Hg(浸出水): 両槽とも埋立初期に排水基準以下

M-Hg(浸出水): 両槽とも埋立初期に低濃度で検出

V-Hg(気化水銀): 両槽とも大気環境基準以下で発生

●埋立実験槽解体後

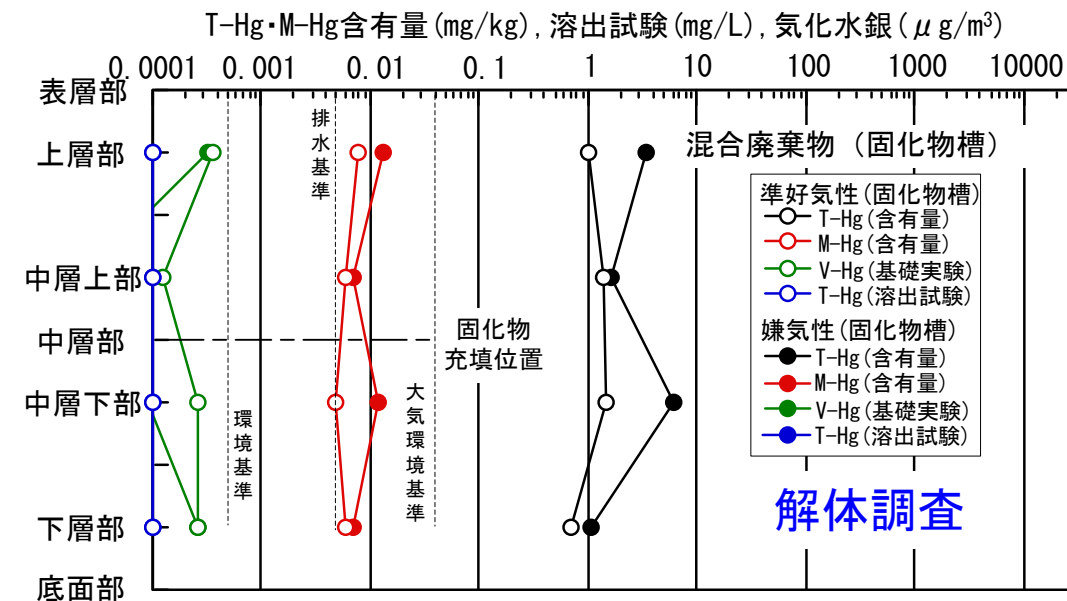
T-Hg(含有量): 準好気性<嫌気性

準好気性: 上層から下層までの同程度の濃度

嫌気性: 固化物充填の下部(中層下部)でHgが高い

T-Hg(溶出試験): 両槽とも上層から下層まで不検出

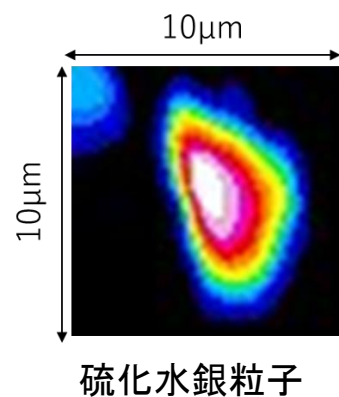
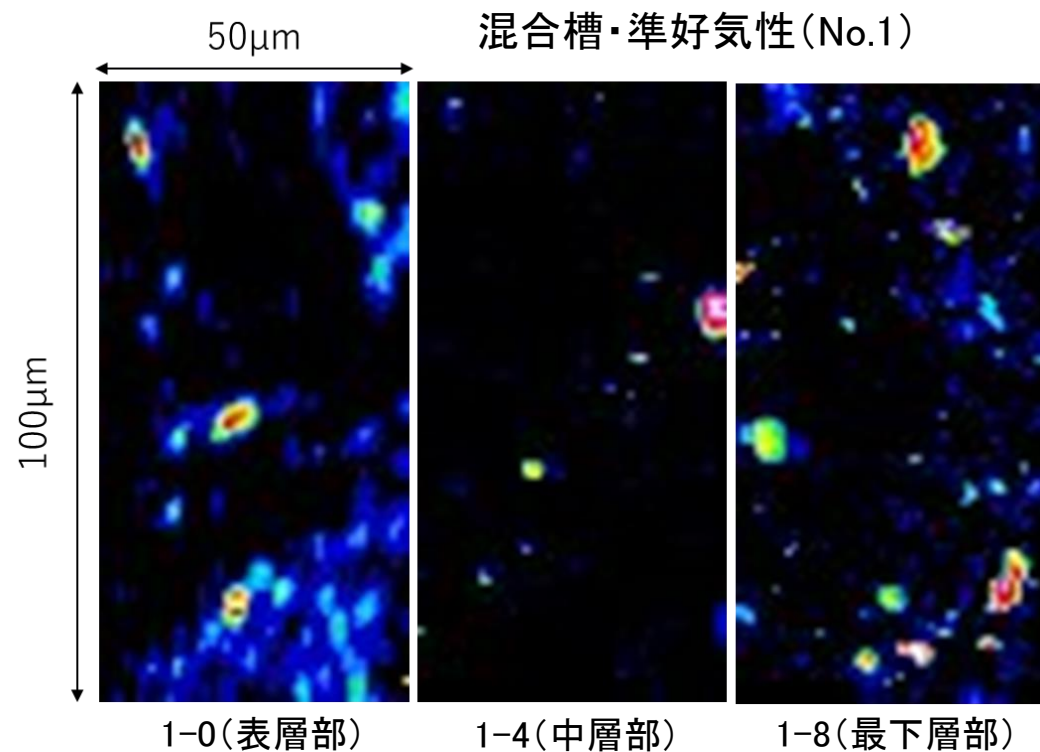
M-Hg(含有量): 両槽とも上層から下層まで約0.01mg/kg



<セメント固化物を槽中央部に充填>

- ① 浸出水への水銀流出は埋立初期に廃棄物由来の水銀流出で、固化物中の水銀の流出はない
- ② 固化物中水銀の上層部からの気化はほとんどない
- ③ 嫌気性槽に充填した固化物中水銀が滞水又は高含水の影響を受け、直下の中層下部へ微量流出している可能性あり
- ④ 固化物から流出した水銀によるメチル水銀生成はほとんどない

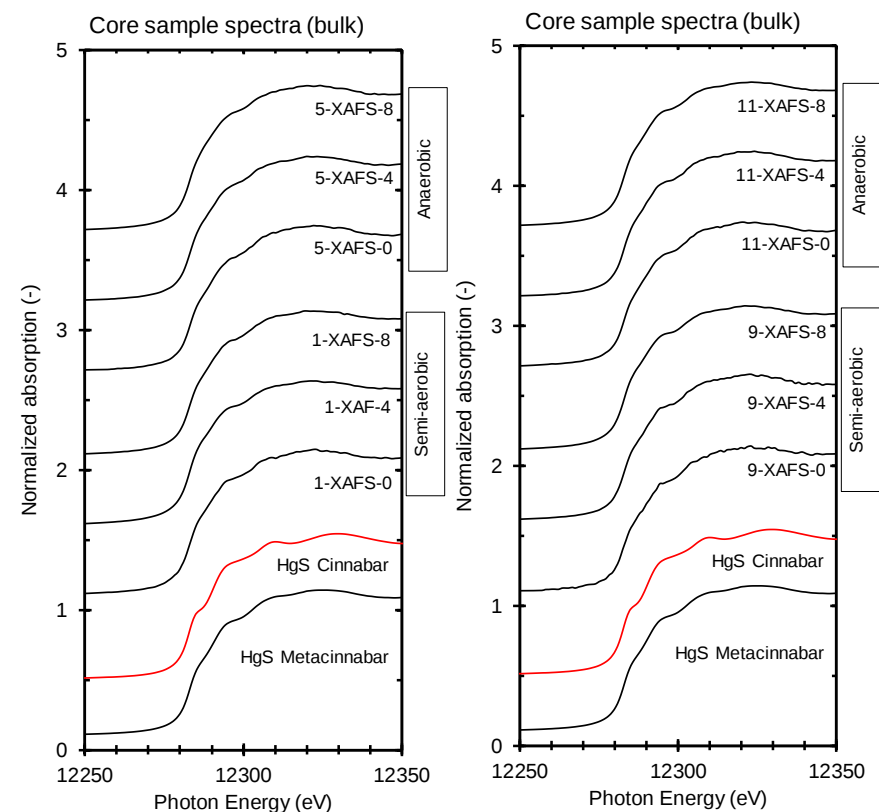
埋立層中水銀分布と化学形態



- 混合槽・準好気性(No.1)
- マイクロオーダーのレベルで 水銀粒子群が点在
- 槽中央部に水銀廃棄物を充填した層状槽 (No.2, No.6) 及び固化物槽 (No.3, No.7) 全体に水銀粒子が少ない。一部点在
→ 廃棄物由来



充填した水銀廃棄物中の水銀は移動していない



- 各埋立層中の水銀の化学形態をX線吸収微細構造分析(XAFS)で調べたところ、すべて黒色硫化水銀で存在。5年間の埋立期間で、混合埋立であっても、セメント固化物であっても化学形態は変化無し
- 黒色硫化水銀を層状で充填した嫌気性槽 (No.6: 層状・嫌気性) の32%が赤色硫化水銀に変化

水銀廃棄物の本埋立実験における5年間の挙動のまとめ

水銀廃棄物の最適な埋立手法は①準好気性埋立構造を有し、②埋立地の中層・上層部に、③水銀廃棄物の固化物を埋立処分することで、埋立地系外（浸出水+大気拡散）への水銀流出率を0.01%以下に抑制が可能。

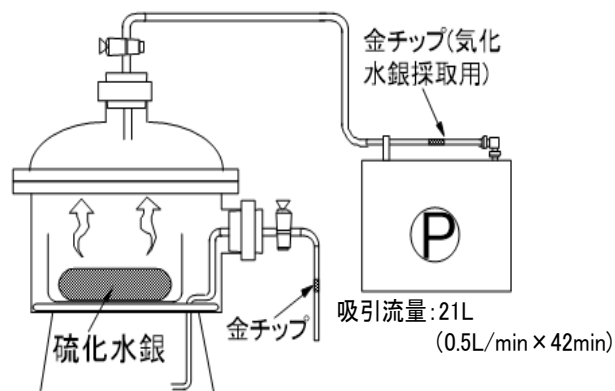
埋立廃棄物	埋立構造	水銀廃棄物の埋立方法	5年間の経時変化			解体後（5年後）の廃棄物			総合
			T-Hg (浸出水)	M-Hg (浸出水)	V-Hg (気化水銀)	T-Hg (含有)	T-Hg (溶出)	M-Hg (含有)	
混合廃棄物	準好気性槽	混合槽	×	△	×	—	×	△	×
		層状槽	△	△	○	—	△	△	△
		固化物槽	○	○	○	—	○	○	○
	嫌気性槽	混合槽	×	△	×	—	×	△	×
		層状槽	×	△	○	△	△	△	×
		固化物槽	△	△	○	△	○	△	△
燃え殻単独	準好気性槽	混合槽	×	△	×	—	×	△	×
	嫌気性槽	混合槽	△	△	×	—	×	△	×

T-Hg・V-Hg : ○規制基準値以下, △:埋立期間中に規制基準値超え, ×:規制基準値を超える
M-Hg : ○メチル水銀の生成可能性が小、△:生成の可能性・不明

水銀廃棄物の基礎実験

(1) 水銀気化試験

地上保管の前処理として、固化物の表面に付着している硫化水銀の影響を把握するため、固化物の前処理(洗浄前と洗浄後)による水銀の気化特性を把握する。



<気化水銀発生量>

- ・セメント固化物
→ 洗浄 < 未洗浄
- ・改質硫黄固化物
→ 洗浄 ≒ 未洗浄



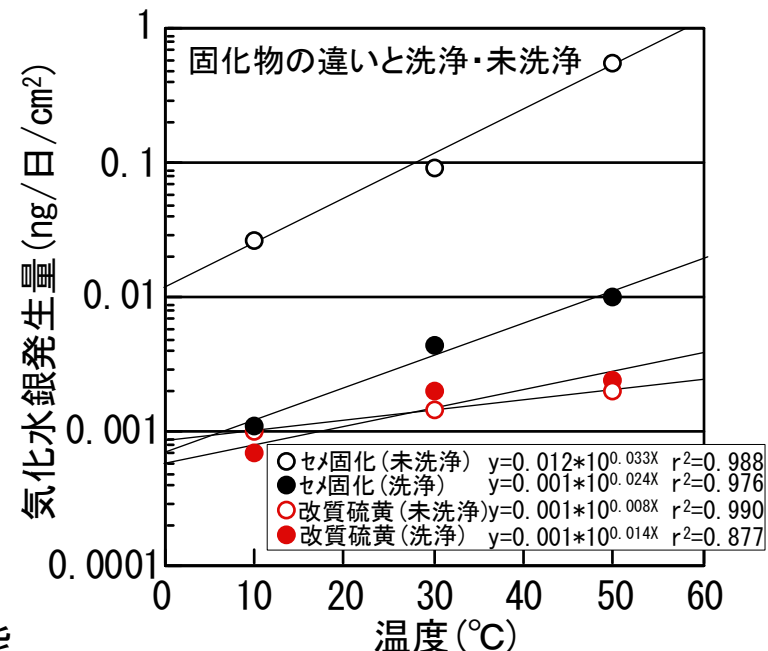
洗浄によるリスク低減化が可能

(2) 共存イオンの影響(溶出試験)

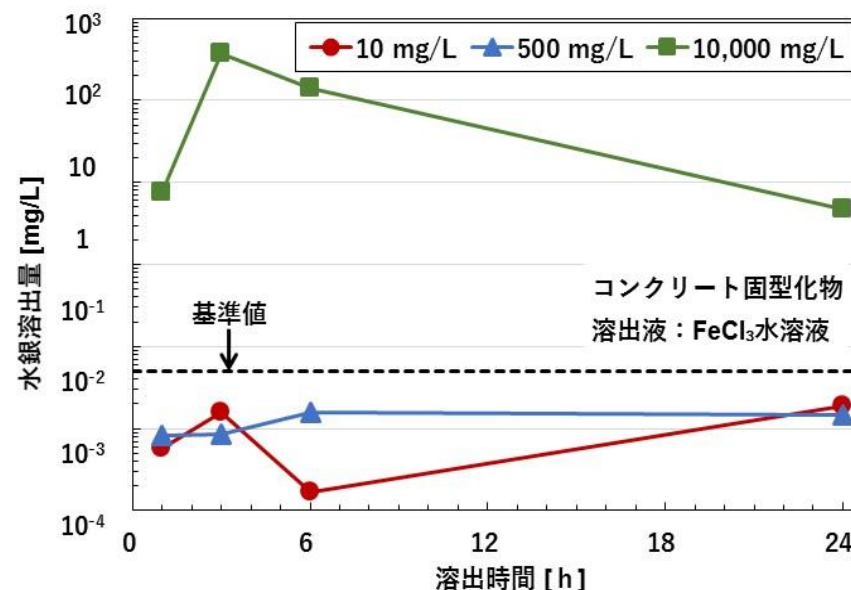
水銀廃棄物を埋立処分した場合に想定される共存イオンの影響を把握する。

影響因子	黒色硫化水銀	セメント固化物
pH	アルカリで溶出	基準値以下
陽・陰イオン	基準値以下	基準値以下
酸化剤	全濃度域で基準値超	高濃度で基準値超

固化物からの水銀気化



溶出試験(酸化剤の影響)



サブテーマ（3）

廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

研究の目的・概要

- ✓ 水銀保管・処分施設導入におけるリスクコミュニケーションに関して研究することで住民合意形成への一助とする。

具体的目標

- ✓ 地上保管時におけるリスク評価は、シナリオを設定して結果を示し、管理基準に反映する。本施設の建設のためのリスクコミュニケーションにおける住民のリスク受容性及び阻害要因を調査し、ボトルネックの要因を明らかにする。

年度計画

平成29年度	平成30年度	令和元年度
管理外となってしまうシナリオ条件の探索とそのリスク評価	- 水銀保管施設に対する住民のリスク受容性調査 - リスク受容を阻害する要因 - 物理条件 - 環境リスクの大きさ（通常時と事故・災害時） - リスクの不確実性	- 水銀保管施設に対するリスク受容をサポートする条件について検討 - 合意形成シナリオを設計し、リスク受容性を評価

廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

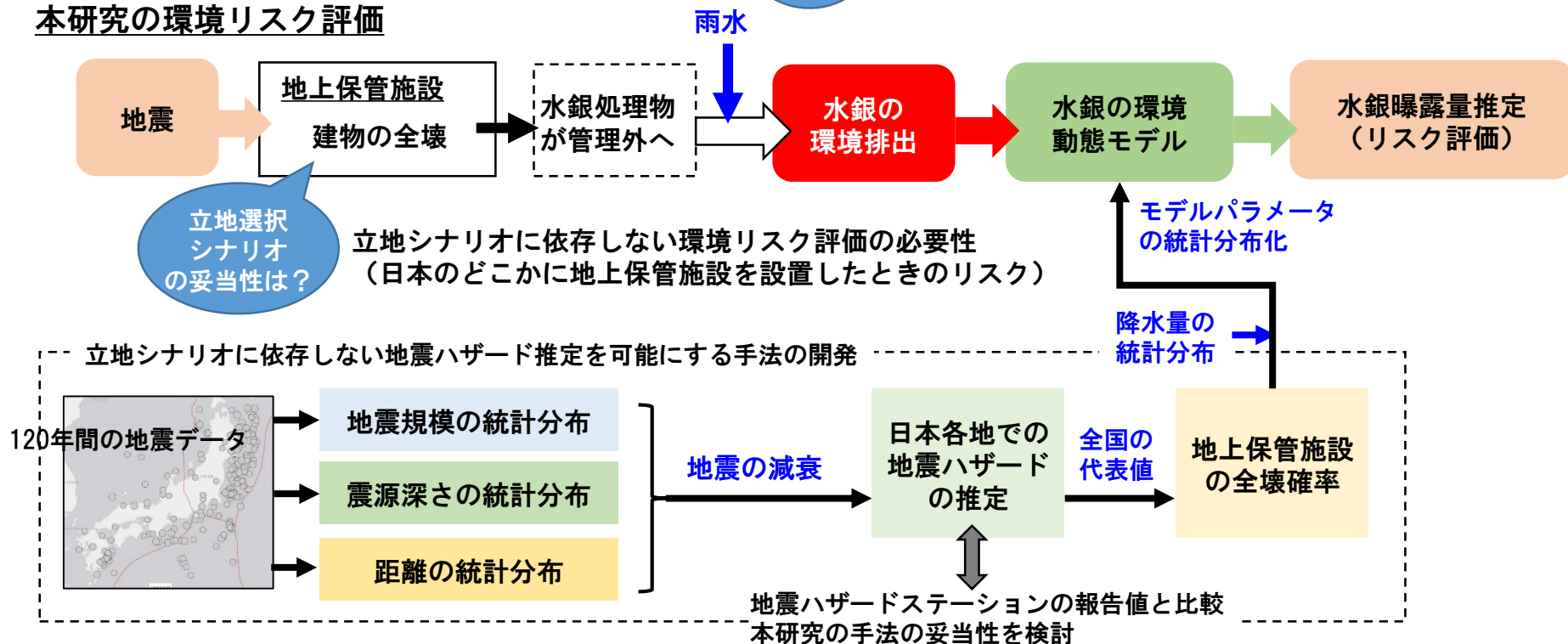
1. 地上保管施設の環境リスク評価

人為的ケースと非人為的ケースにおいて、水銀が管理外となることを認知できず、対策に物理的限界があるシナリオ、つまり地震に伴う環境リスクを評価対象とした。

従来の研究スキーム（地震ハザード）



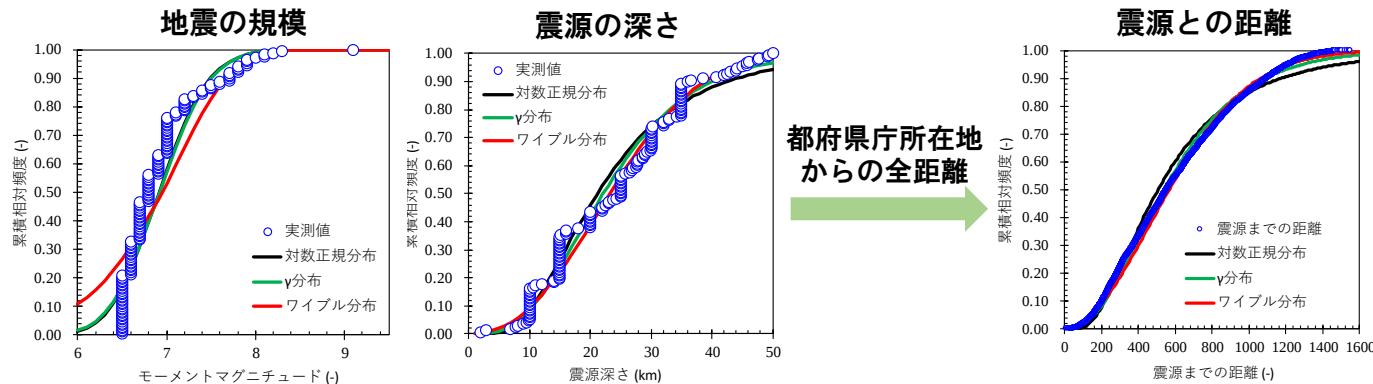
本研究の環境リスク評価



廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

1. 地上保管施設の環境リスク評価

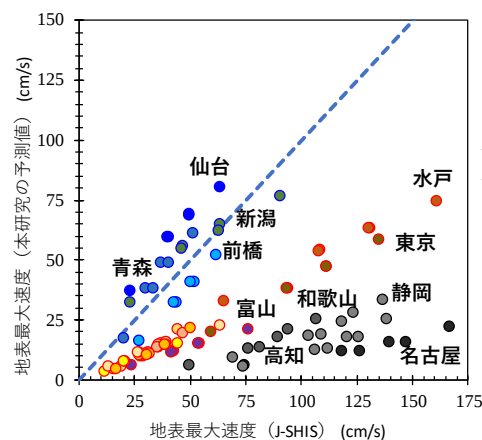
立地シナリオに依存しない地震ハザード推定手法の妥当性



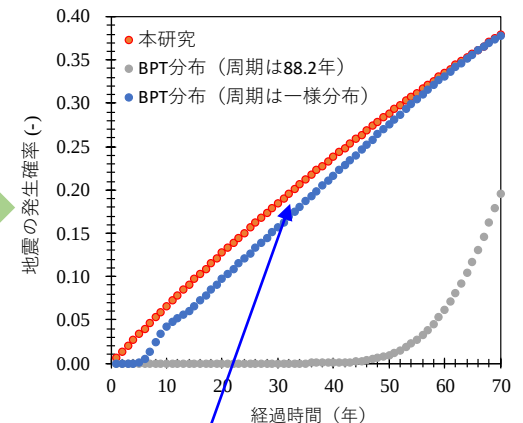
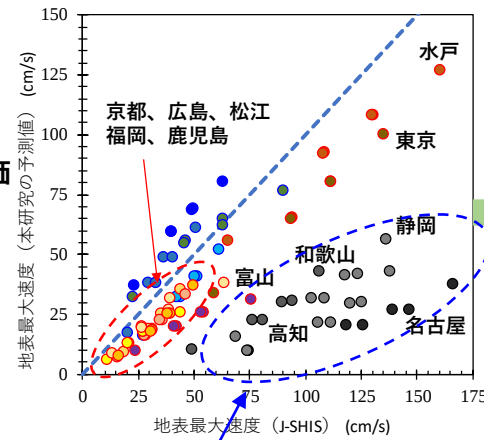
都府県庁所在地での地表最大速度（30年間で3%と6%、50年間で2%、5%、10%、39%の超過確率）で検証

南海トラフ地震：BPT分布で確率推定

▶ 本手法での推定と一致するか検証



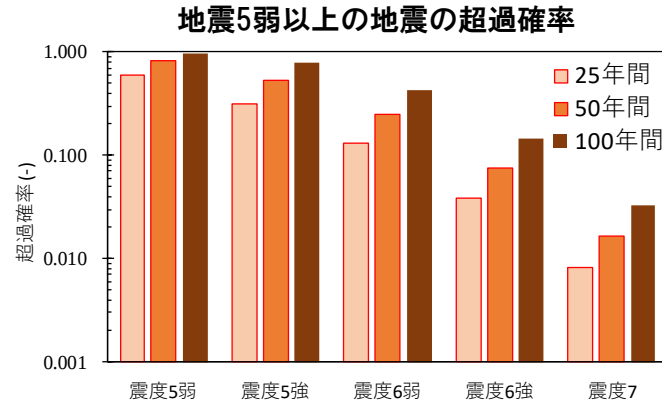
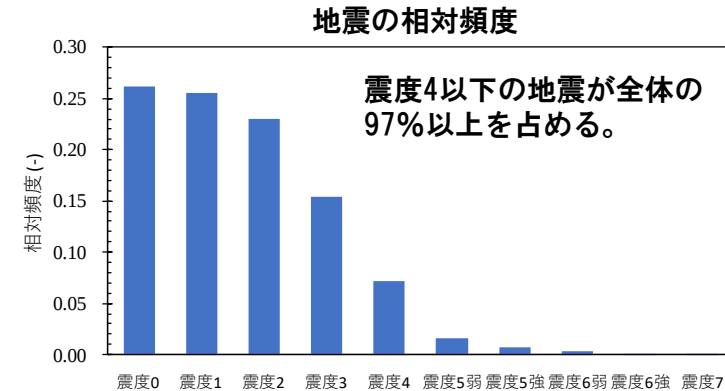
南海・東南海トラフ地震の直撃を受ける都市を過小評価



廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

1. 地上保管施設の環境リスク評価

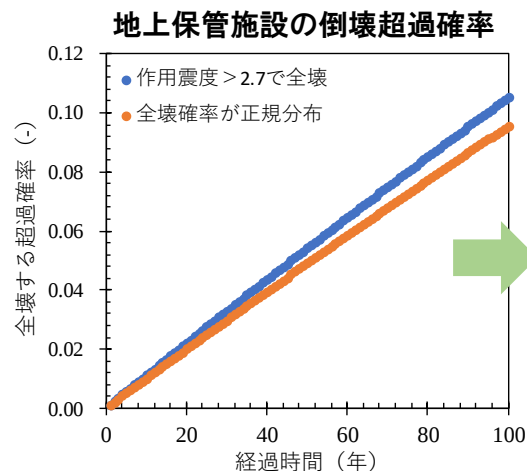
地上保管施設付近での震度・超過確率、水銀溶出量および水銀曝露量



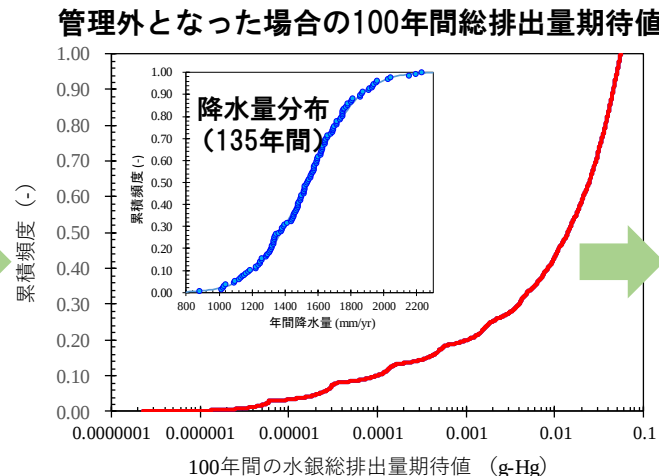
震度7の場合、超過確率は
25年間までで0.83%
50年間までで1.7%
100年間まで3.3%



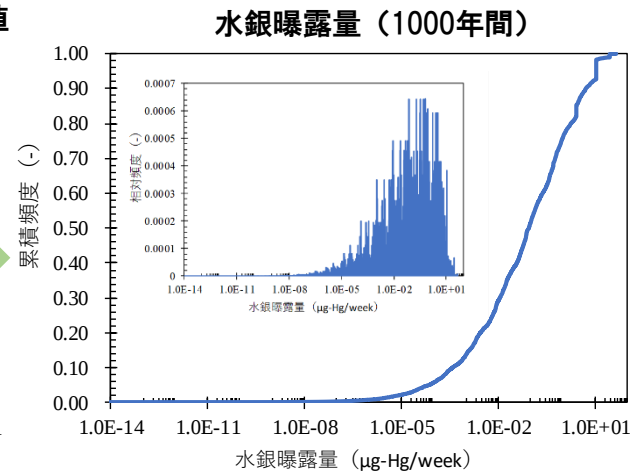
日本のどこに地上保管施設
を設置しても、平均的には
100年間で3.3%のリスク



兵庫県南部地震（1995）のデータ
より倒壊確率を推定
（過大推定の可能性が高い）



95パーセンタイル範囲の上限値で50.4 mg-Hg
であり、中央値は13.3 mg-Hg。
水銀の流出は極めて限られている。



水銀曝露量が耐容摂取量を超過する確率は
0.01%以下と推定。
地上保管の環境リスクは限定的である。

廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

2.水銀への嫌悪感の定量化と最終処分場建設に対する態度への影響

NIMBY施設への合意形成に大きな影響を与える要因はリスク認知、期待される便益、態度^[1]、および信頼性や知識、個人差も重要な要因である^[2]。

[1] Slovic et al (1991) Science, 254(5038), 1603–1607

[2] Gupta et al (2012) Public Underst. Sci., 21(7), 782-789

□ 水銀に対する嫌悪感の研究例はなく、嫌悪感が水銀の最終処分場建設に対する態度決定に与える影響は分かっていない。

□ 近隣住民が水銀の埋立処分について安全性を判断する際、重視・信頼するものは何か？



Webアンケート調査を実施（サンプルサイズは420～1030を複数回。男女比＝1、20～60代まで均等配分）

水銀への嫌悪感の定量化

- 心理刺激に対する興奮量を心理モデルによって定量化する手法（Thurstone法）と分散分析の手法を援用して統計的に定量化する手法（Scheffe法）を用いて、定量化する。
- アンケート回答データのランダム回答性を一意性係数、一致性係数の χ^2 検定で確認し、回答データの品質を検討する。
- 水銀と他の有害性物質（放射性廃棄物、ダイオキシンなど）との相対的評価とする。

水銀への嫌悪感が最終埋立地建設に対する態度への影響

- 水銀の認知度と嫌悪感の関係を比較する
- 個人レベルでの嫌悪感と最終処分場への態度（許容～拒絶）を比較する。
- 最終処分場までの物理的距離や行政区分的距離（隣市、隣県）が態度へ与える影響を検討する。

環境中への水銀溶出に対するリスク認知

- 溶出確率と溶出に至るまでの時間がリスクへの態度（許容～拒絶）に与える影響を検討する。
- 最終処分場建設への態度が変化する際の、溶出確率と時間の関係を検討する。

埋立処分の安全性を判断するときの信頼感の定量化

- 嫌悪感と同様に、Scheffe法を用いて項目別の信頼感を定量化する。

廃水銀処理物の処分・保管時の リスクコミュニケーションに関する研究

2.水銀への嫌悪感の定量化と最終処分場建設に対する態度への影響

水銀への嫌悪感の定量化

- 水銀は放射性廃棄物の次に強い嫌悪感を受けている。
- 男性では年齢差が無いが、女性では年齢の増加で減少傾向にある。

水銀への嫌悪感が生じた最終埋立地建設に対する態度への影響

- 最終処分場建設を拒絶する人ほど、嫌悪感が強い。
- 受容する人においても嫌悪感が強くなる傾向になる。
- ▶ 嫌悪感を感じつつ、**理知的に受容的態度を取っている。**
- 物理的距離や行政区分が態度へ与える影響は小さい。

環境中への水銀溶出に対するリスク認知

- リスク受容は、溶出確率よりも時間の影響が大きい。
- 1000年で態度変化（拒絶→受容）する割合が高い。

埋立処分の安全性を判断するときの信頼感の定量化

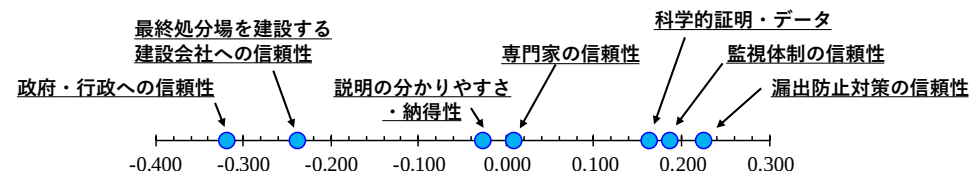
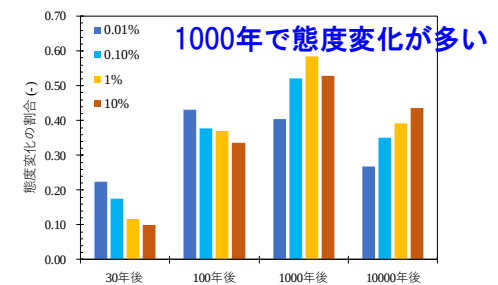
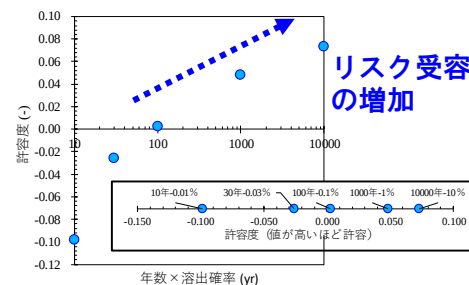
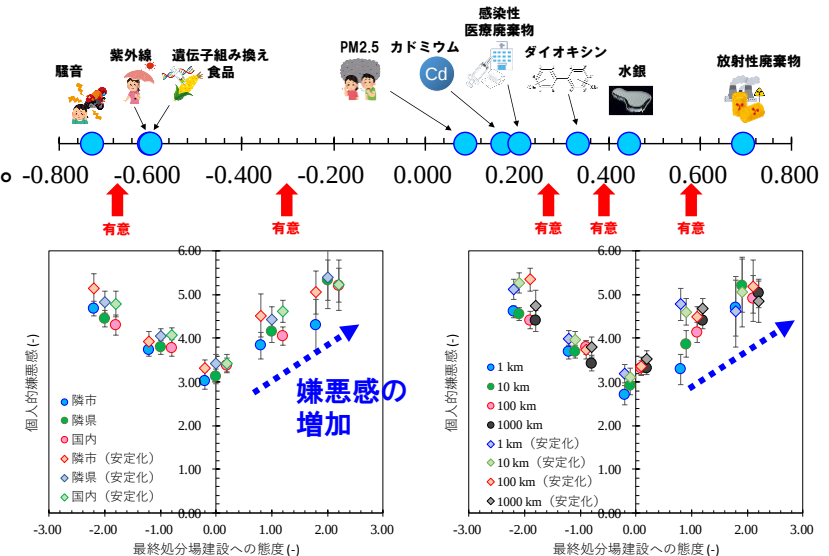
- 漏出防止対策、監視体制の信頼性を最も重視
- 説明の分かりやすさ・納得性よりもエビデンス重視



最終処分場のリスク認知には水銀の溶出確率よりも溶出に至るまでの時間の方が重要視される。

⇒ 安全期間の目安として1000年が提案される。

最終処分場建設へ許容的態度の裏には嫌悪感と理知的判断の相克があり、合意形成に向けて注意深い対応が必要である。



本研究により得られた主な成果

- 地上保管に必要な発ガス評価試験として、基礎実験及び熱力学的平衡計算に基づいてパラメータを検討し、**ヘッドスペース試験法**の基本条件を、試料量10 g、温度25℃、湿度60%RH、ガス流量0.5 L/min(空気)、試験時間3時間(静置なし)と**決定**した。
- **エポキシ樹脂による廃水銀処理物の固型化**を検討し、種々の試験から、エポキシ樹脂固化体は概ね基準値を満たし、改質硫黄固化体とほぼ同等の安定な固化体であることが確認でき、**科学的に安定な固型化技術**を開発した。
- 5年にわたる水銀廃棄物の埋立実験及び解体調査から、有機物を含む廃棄物との混合埋立は不適であること、黒色硫化水銀と他廃棄物との混合も望ましくなく、**固型化処理が水銀流出防止には重要で、固化物の地中処分とすべき**ことを明らかにした。
- 固化体の保管前処理として、**洗浄や表面コーティングが有効**であることを示した。
- 地上保管施設からの水銀漏出リスク評価において、地震の発生確率と規模の確率のみならず、震源までの距離についても確率的統計分布を導入することで、「**場所を特定しない**」条件においても**地震に伴う被害のリスク評価を可能**とする手法を開発した。
- 心理的嫌悪感を心理モデルおよび統計モデルの両方で定量化し、良い一致が得られることを見出した。そして、**NIMBY施設への態度は拒絶・許容ともに嫌悪感が増加**する傾向にあることを見出した。

本研究により得られた成果の主な活用

- 本研究で決定したヘッドスペース試験の方法・条件、エポキシ樹脂を用いた新たな固型化技術は、水銀廃棄物ガイドラインへの追記が見込まれる。
- 固化体の表面コーティングは、水銀の封じ込めや、固化体の耐候(光)性、耐久性などの向上に効果が見込まれるため、今後のデータの蓄積・他固化体への適用等の追加的検討は必要であるが、将来的に採用可能なリスク低減方法である。
- 水銀廃棄物の埋立処分手法について、すでに水銀廃棄物ガイドラインに記載されている埋立要件を裏付けるデータ(固化物の優位性、帯水域や高含水域の回避、有機物との混合埋立の禁止等)や追加要件(固化体の事前洗浄、準好気性埋立構造の優位性)が得られたことから、水銀廃棄物ガイドラインへの追記が見込まれる。
- 地震の発生や水銀の環境動態における不確実性まで含めた上で地上保管施設の環境リスクを評価したことから、環境リスクとその不確実性を具体的な数値幅として提示することが可能である。
- 最終処分場建設の合意形成において、科学的証明やデータは、住民が最終処分場の安全性を判断する上で重要な情報と認知されていること、建設への許容的態度をとる場合でも背後に嫌悪感と理知的判断の相克があることに注意が必要で、リスクの認知には水銀の溶出確率よりも溶出に至るまでの時間の方が重要視され、安全期間の目安として1000年間が提案される。

研究成果の発信(学術面および社会面)

・「国民との科学・技術対話」4件 ・査読付き論文8編

- 2017.10.1 高岡昌輝:夢ナビライブ「水銀?人類が使わないことを決めた元素」(主催:FROMPAGE、マリンメッセ福岡、観客約154名)にて高校生向け講義
- 2018.9.22 高岡昌輝、日下部武敏:京都大学アカデミックデイ2018「水銀の行方」(主催:京都大学、時計台記念館、総来場者:437名)にて、一般市民、高校生向けに研究紹介
- 2019.3.18 高岡昌輝、日下部武敏、柳瀬龍二、高橋史武:一般公開セミナー「有害重金属廃棄物の長期管理・処分に関するセミナー」(廃棄物資源循環学会:京都大学東京オフィス、参加者61名)
- 2019.10.11高橋史武:一般公開セミナー「埋立処分委託契約書・最終処分場維持管理マニュアル説明会」(主催:全国産業資源循環連合会, AP浜松町, 参加者約200名, 廃棄物最終処分場に対する社会心理学的評価ー嫌悪感という視点ーと題して基調講演)

・受賞 6件

- 土木学会 第54回環境工学研究フォーラム・論文賞: 高橋史武 (2018)
- 優秀ポスター賞: 5件 (国際会議3件、国内会議2件)

・口頭発表等27編

- 1)高橋史武: 土木学会論文集G, Vol.73, No.7, III_307-III_314 (2017) 水銀の環境リスク推定における環境動態モデルシミュレーションの不確実性評価
- 2)R. Tshumah-Mutingwende, F. Takahashi, E.M. Cukrowska, J. Lusilao-Makiese: *Applied Environmental Research*, 40, 2, 17-31 (2018) *Cladophora* sp. biosorption of metal-contaminated water
- 3)R. Tshumah-Mutingwende, F. Takahashi: *Environmental Pollution*, 252, 627-636 (2019) Physio-chemical effects of freshwaters on the dissolution of elemental mercury
- 4)Y. Xiong, M. Takaoka, T. Kusakabe, K. Shiota, K. Oshita, T. Fujimori: *J Mater Cycles Waste Manage.*, 22, 354-364 (2020) Mass balance of heavy metals in a non-operational incinerator residue landfill site in Japan
- 5)T. Kusakabe and M. Takaoka: *Global Environment Research*, 24, 27-33 (2020) Sulfurization and Solidification of Wastes Consisting of Elemental Mercury
- 6)A. Sano, K. Kawase, R. Yanase, M. Takaoka, A. Matsuyama, F. Takahashi, T. Kato: *Global Environment Research*, 24, 35-43 (2020) Long-term Mercury Behavior in Sulfurized/Solidified Mercury Wastes by a Simulated Landfill Experiment Using Lysimeters
- 7)F. Takahashi: *Global Environment Research*, 24, 45-52 (2020) Cognitive Aversion of Mercury Scaled by Pairwise Comparison Method with Thurstone's Law of Comparative Judgement
- 8)Y. Cheng, K. Shiota, T. Kusakabe, K. Oshita, M. Takaoka: *Chemical Engineering Journal*, 402 (2020) 126225, Characterizing the mechanisms of gas-phase elemental mercury adsorption with iodine-impregnated activated carbons using Brunauer-Emmett-Teller analysis, X-ray diffraction, X-ray photoelectron spectroscopy, and X-ray absorption near-edge structure analysis

謝辞

多くの方にお世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

研究協力機関： 国立水俣病総合研究センター

研究協力者：

福岡大学工学部化学システム工学科

佐野 彰

福岡大学環境保全センター

川瀬 敬三

国立水俣病総合研究センター

松山 明人

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

宮原 睦

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

上西 隆太

研究協力会社：野村興産株式会社、株式会社環境管理センター、日本インスツルメンツ株式会社