

# 環境研究総合推進費戦略的研究開発課題（SII-6）

## 事後評価ヒアリング 安全確保部会

### SII-6-1

# 人為的活動下での水銀制御・管理技術と 健康リスク予測に関する研究 (JPMEERF20S20610)

2023年6月30日（金）13:40～14:10 @Web会議システム（Webex）

研究代表機関：国立大学法人京都大学

テーマ1リーダー：高岡昌輝（京都大学）

サブテーマ1：高岡昌輝、日下部武敏（京都大学）、柳瀬龍二、佐野彰、平田修（福岡大学）

サブテーマ2：高橋史武（東京工業大学）、林岳彦（国立環境研究所）

研究実施期間：令和2年度～令和4年度

研究分担機関名：国立環境研究所、福岡大学、東京工業大学

# 1. はじめに（研究背景等）

- 水銀に関する水俣条約の発効
- 採掘から使用、排出、廃棄等に至る水銀のライフサイクル全体への包括的規制
- 条約の有効性評価を行うため、科学的エビデンスに基づいた評価のあり方を議論

対策を講じ、モデル・シナリオの開発、将来の健康リスク予測を行い、条約の有効性を評価

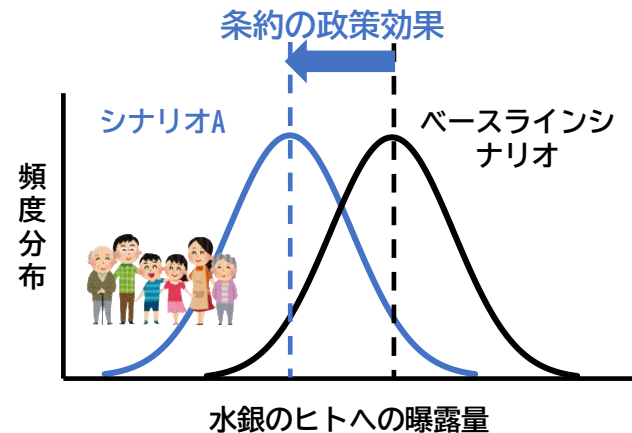
- モデル作成の最初の入口となる対策技術の現状評価・将来技術の開発・評価
- 利用されなくなった水銀・水銀廃棄物の管理技術及び長期安定性の評価
- 水銀廃棄物の長期管理方法が環境上適正か健康リスクの観点から評価
- 現状及び将来の水銀曝露量の推定及びリスクの予測

	小規模金採掘	石炭燃焼	廃棄物焼却	セメント	非鉄金属	鉄鋼
大気						
水						
廃棄物						
水						
土壌						
廃棄物						
土壌						

環境の地域性

気候変動

水銀制御・  
管理技術



健康リスクの推移、変動

## 2. 研究開発目的

サブテーマ1：人為的活動下での水銀制御・管理技術の変遷調査と将来予測

今後の気候変動の影響などを考慮して水銀制御・管理技術を整理・評価する

サブテーマ2：ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測

ヒトへの水銀曝露およびそれに伴う健康リスクを推定・予測する

テーマ1：人為的活動下での水銀制御・管理技術と健康リスク予測に関する研究

1(1)人為的活動下での水銀制御・管理技術の変遷調査と将来予測

- ・ 人為的活動下での水銀制御技術の整理と将来予測
- ・ 最終処分施設における水銀廃棄物の長期管理手法の検討

1(2)ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測

- ・ 水銀廃棄物の最終処分施設における健康リスクの地域性及び将来変動性
- ・ 全球モデルの計算結果を利用した健康リスク計算と推移予想

将来技術・対策  
排出係数等

【テーマ2】



【テーマ3】

全球での魚介類  
水銀含有量

全テーマの研究成果を統合し、水俣条約の有効性を評価する

### 3. 研究目標（テーマ1全体）

- 大気排出規制対象5発生源を含む主要発生源における水銀の排出・管理で将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報を整理・評価する。
- その基礎情報をSII-6-2に提示して、介入シナリオの策定に貢献する。
- 水銀廃棄物の長期管理手法を複数の加速試験及び模擬埋立実験等で検討し、最終処分施設から漏洩する水銀量等の情報をサブテーマ2のリスクの将来予測に提示する。
- SII-6-3から得られた情報を元に水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を可視化する。
- サブテーマ1からの情報を考慮して水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクとその地域性や将来変動性を可視化する。
- 本プロジェクト全体の成果を水俣条約の有効性評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ反映できるように、技術的基礎情報として整理し、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等のアップデートへ貢献する。

### 3. 研究目標（サブテーマ1・サブテーマ2）

#### サブテーマ1

- ▶ 介入シナリオの根拠となる人為的活動下での水銀制御・管理技術の状況を把握し、規制対象5発生源を含む主要発生源における水銀の排出・管理で将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報を整理・評価する。その基礎情報をSII-6-2に提示して、介入シナリオの策定に貢献する。また、水銀の最終的なシンクとなる最終処分施設における水銀廃棄物の長期管理手法を複数の加速試験及び模擬埋立実験等で検討し、最終処分施設からの漏洩する水銀量等の情報をサブテーマ2のリスクの将来予測に提示する。
- ▶ 本プロジェクト全体の成果を水俣条約の有効性評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ反映できるように、技術的基礎情報として整理し、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等のアップデートへ貢献する。

#### サブテーマ2

- ▶ サブテーマ2では、SII-6-3から得られた情報を元に水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を可視化する。そしてサブテーマ1からの情報を考慮して水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクとその地域性や将来変動性を可視化する。

# 4. 研究開発内容：サブテーマ1（水銀制御技術関連）

## 現在及び将来の水銀制御技術の文献調査

### 文献調査



UNEP (DTIE)/Hg/INC.2/1 (2010);  
ECE/EB.Air/116 (2013);  
Cost Effectiveness of Options for  
a Global Legally Binding  
Instrument on Mercury (2012);  
他多数

石炭火力発電

産業用燃焼ボイラー

非鉄金属

廃棄物

セメント

鉄鋼

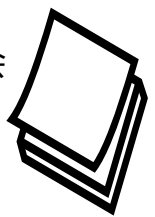
バイオマス  
燃焼



### ヒアリング

日本産業機械工業会  
日本鋳業会  
日本環境衛生施設工業会  
セメント協会  
企業A, B

### H30年度 水銀排出施設データ（環境省）

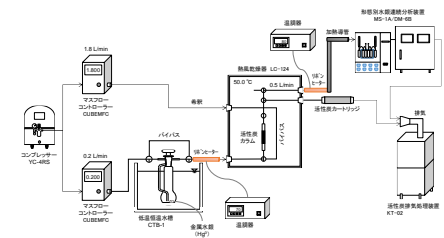


- (別紙1) 水銀排出施設の構造  
設置年月日、原料の処理能力、等
- (別紙2) 水銀排出施設の使用の方法  
原料、水銀濃度、排ガス量、等
- (別紙3) 水銀等の処理の方法  
処理施設(処理方法)、水銀濃度、O<sub>2</sub>濃度、等
- (様式第7の2) 水銀濃度測定記録表  
水銀濃度(全、ガス状、粒子状)、等

テーマ2へ提供

## 将来の水銀制御技術の実験的研究

・高機能化処理剤（32種類）の評価、実証試験



・CCUS（新規技術）の評価

文献調査  
ラボ試験 (Hg<sup>0</sup>, Hg<sup>2+</sup>)  
現地調査 (2カ所)

現在

将来  
(2050年)



# 4. 研究開発内容：サブテーマ1（水銀廃棄物模擬埋立試験）

## 最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査

埋立実験の目的と条件(2020年～2022年)

(1) 目的

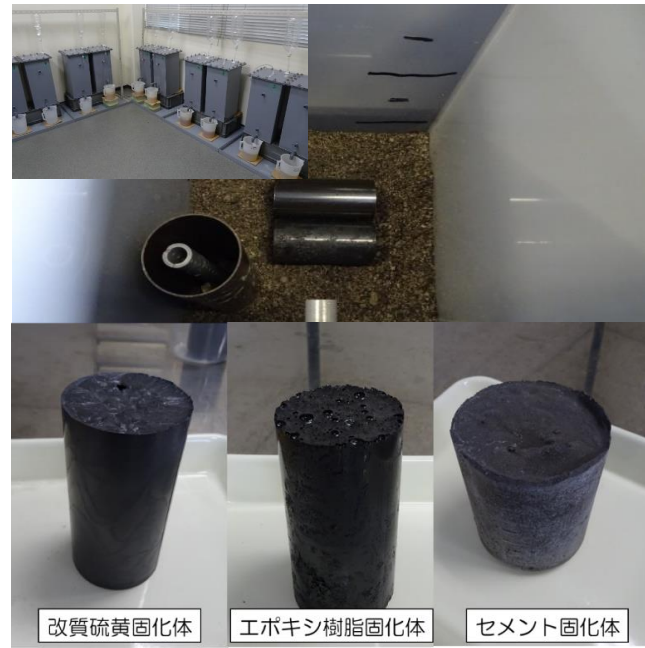
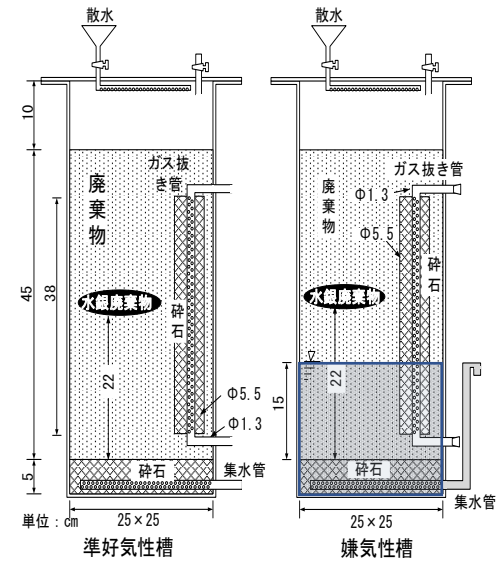
水銀廃棄物ガイドラインに準じた水銀廃棄物固化体の埋立処分における水銀の流出特性の評価

- ・ガイドライン固化体 → 改質硫黄固化体
- ・新たな手法の固化体 → エポキシ樹脂固化体
- ・従来法の固化体 → 低アルカリセメント固化体

(2) 実験条件

実験槽		水銀廃棄物		廃棄物		水銀廃棄物固化体		総水銀量 (g/槽)
				充填量(kg/槽)	水銀量 (g/槽)	充填量 (g/2試料)	水銀量 (g/槽)	
混合廃棄物	準好気性	No. 1	改質硫黄固化体	焼却残渣 :28.8 コンポスト: 7.2 単位体積重量 :1.29kg/ℓ	0.079	1041.9	449.059	449.138
		No. 2	エポキシ樹脂固化体			1009.3	696.013	696.092
		No. 3	セメント固化体			1050.0	362.040	362.119
		No. 4	ブランク			—	—	0.079
	嫌気性	No. 5	改質硫黄固化体	焼却残渣 :27.9 コンポスト: 7.0 単位体積重量 :1.25kg/ℓ	0.077	1046.4	450.998	451.075
		No. 6	エポキシ樹脂固化体			1213.7	836.968	837.045
		No. 7	ブランク			—	—	0.077
焼却残渣	準好気性	No. 8	改質硫黄固化体	焼却残渣 :42.3 単位体積重量 :1.50kg/ℓ	0.113	985.8	424.880	424.993
		No. 9	セメント固化体			1093.7	377.108	377.221
		No. 10	ブランク			—	—	0.113

水銀廃棄物固化体は未洗浄の状態で充填  
 混合廃棄物は焼却残渣：コンポスト=8：2で混合作成  
 水銀含有量は焼却残渣が灰分10mm以下、コンポストが10mm以下を測定  
 廃棄物中の水銀濃度(湿潤)：焼却残渣=3.2mg/kg、コンポスト=0.39mg/kg  
 物理組成：焼却残渣(含水率11.9%、灰分10mm以下95%)、コンポスト(含水率22%、灰分100%)



# 4. 研究開発内容：サブテーマ1（水銀廃棄物加速試験）

## 加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価

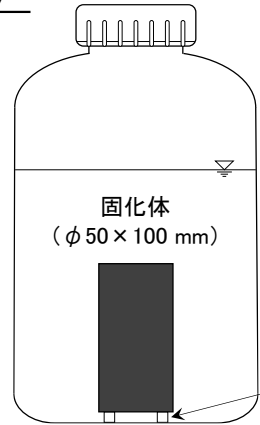
(L/S=100まで、約500年程度を想定)



### 連続バッチ溶出試験（固化体）、上向流カラム通水試験（粉砕物）

条件			
pH	中性	NEU	H <sub>2</sub> O
	酸性	ACD	5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	アルカリ性	ALK	5% NaOH
ORP	酸化	OXI	3% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
	還元	RED	0.1% N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> +N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>+</sup>
無機塩	H <sub>2</sub> O	H2O	H <sub>2</sub> O
	NaCl	NaCl	5% NaCl
	Na <sub>2</sub> S	Na2S	0.5% Na <sub>2</sub> S

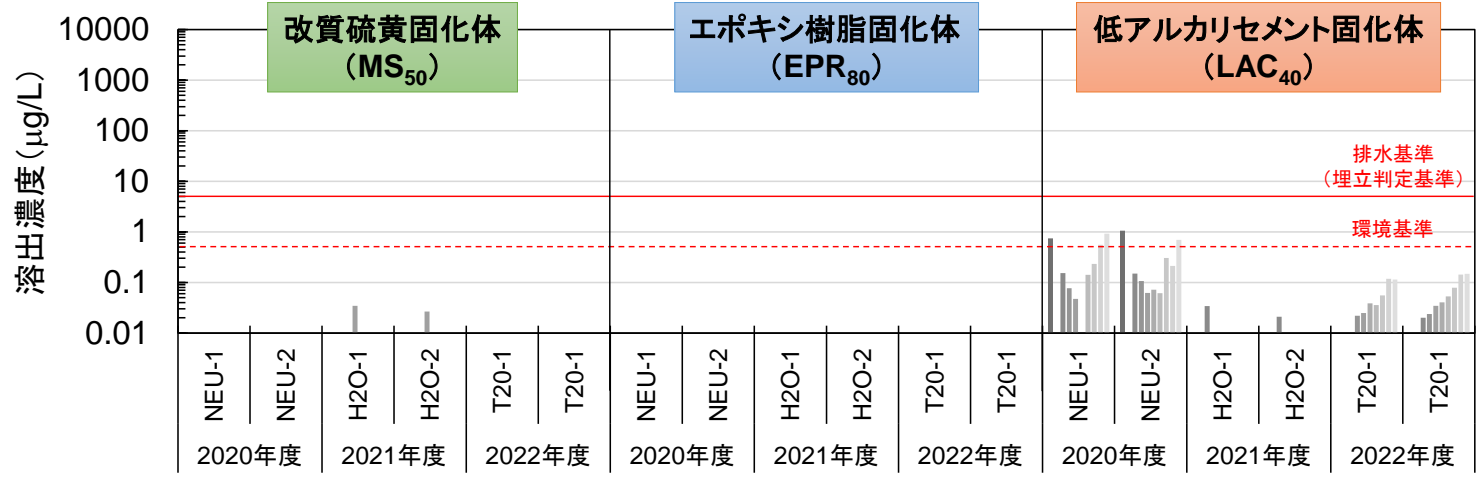
条件			
有機酸	酢酸	ACE	5% CH <sub>3</sub> COOH
	タンニン酸	TAN	5% タンニン酸
温度	20 °C	T20	H <sub>2</sub> O
	45 °C	T45	H <sub>2</sub> O (MS <sub>50</sub> , EPR <sub>80</sub> のみ)
	70 °C	T70	H <sub>2</sub> O
微生物	土壌(覆土)の水抽出液		



主な試験条件  
L/S(L/kg) : 10  
期間(日) : 28  
温度(°C) : 20.0

一部条件は13号溶出試験も実施

■ L/S=10 ■ L/S=20 ■ L/S=30 ■ L/S=40 ■ L/S=50 ■ L/S=60 ■ L/S=70 ■ L/S=80 ■ L/S=90 ■ L/S=100



水を用いた通常の連続バッチ溶出試験で、3種類の固化体が長期安定性（500年間）を有していることを実験的に確認できた。



# 4. 研究開発内容：サブテーマ2（全球モデル健康リスク）

## 全球モデルの計算結果を利用した健康リスク計算と推移予測

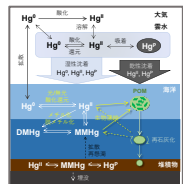
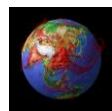
目的：水銀条約による水銀曝露量および健康リスクの変化量の計算法を開発し、施策の有効性を評価する

水銀による健康アウトカムの既存知見の集約

水銀による検討アウトカムの既存知見の集約

優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの選定

全球モデルを利用した健康リスク計算法の開発

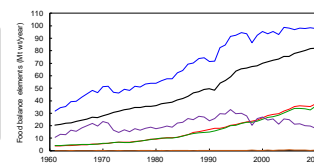


【1】 全球モデル (FATE-Hg)

↓ 多媒体動態と生物移行  
POM中のメチル水銀濃度を計算

【3】 水産統計データ (FAO)

漁獲海域, 魚種分類, 国毎の海産物の食料バランスデータ (漁獲, 養殖, 輸入, 輸出, 非食料利用等)



【2】 食物網蓄積

魚種分類毎の海産物中のメチル水銀濃度を計算

【4】 海産物摂取によるメチル水銀の週間摂取量を計算

$$W_{ic} = \sum_{fg} (DFS_{ic,fg} \times C_{ic,fg} + IFS_{ic,fg} \times C_{fg}) / BM_{ic} / 52$$

各曝露シナリオ下での曝露量予測データの入力 (テーマ3より)

曝露の集団内分布等の考慮による高度化

- 確率的リスク評価手法を用いた集団内での曝露量の個人差を考慮した健康アウトカムの分布の算出
- 将来の漁獲トレンドも考慮した各曝露シナリオ下での健康アウトカムの分布の比較を行い、健康リスクの推移を計算

➡ 水俣条約に基づく規制等の有効性を健康リスクの観点から定量的に比較・検討

# 4. 研究開発内容：サブテーマ2（処分施設健康リスク）

## 水銀廃棄物の最終処分施設における健康リスクの地域性及び将来変動性

令和2年度  
環境動態モデル  
パラメータの  
環境・地域依存性

水銀の環境動態モデルにおいて、幾つかの重要なパラメータはその環境依存性や地域依存性が大きい。

特に生物濃縮係数は報告値が数桁オーダーで変動する

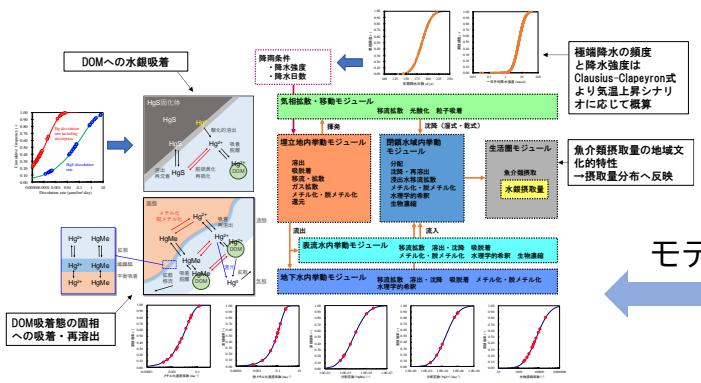
水銀の“溶出速度”にもとづいた環境動態モデルが皆無（リスクを過大評価）

文献調査による報告値のメタ分析

文献調査によるメタ分析+実験的検討

パラメータの不確実性は統計分布として評価し、水銀の環境動態モデルへ導入

令和3年度  
環境動態モデルの拡張化  
(統計的手法の挿入)



- 水銀漏出モデルを拡張し、統計分布化したモデルパラメータを水銀環境動態モデルへ挿入
- 環境動態モデルの計算アルゴリズムを改良

モデルの検証

最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査 (サブテーマ1-1)

令和4年度  
健康リスクの  
地域・将来変動性  
と市民的認知

水銀曝露量を推定し、水銀曝露の地域依存性や気候条件に対する変動性を評価

水銀廃棄物の最終処分施設に対する認知や態度について評価

水俣条約の有効性評価へ貢献できる基礎情報として研究成果をまとめる

# 5-1 成果の概要：サブテーマ1（水銀制御技術関連）

## 現在及び将来の水銀制御技術の文献調査

### 水銀制御技術の現状整理（概要）

	石炭燃焼分野	非鉄金属分野	廃棄物分野	セメント分野
排出係数 (排出係数個票)	<ul style="list-style-type: none"> <li>石炭火力(PP)、産業用ボイラー(IND)に分けて整理</li> <li>石炭種ごとに整理(HC-A, HC-B, BC-L, BC-S)</li> <li>一部の国・地域については個別の数値を設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>銅, 鉛, 亜鉛の一次原料(CU-P, PB-P, ZN-P)について整理</li> <li>一部の国・地域については個別の数値を設定</li> <li>二次原料については情報が限られる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>制御焼却とそれ以外に分類</li> <li>都市ごみ由来水銀濃度は環境省データを採用</li> <li>廃棄物量は、人口を考慮して決定</li> <li>焼却率は、各国の一人当たりのGDPから推計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原料と燃料に分けて設定</li> <li>燃料については産業用の数値を適用</li> </ul>
BAT/BEP (技術個票) 費用(初期, O&M), 寿命, 除去効率, 投入エネルギー/マテリアル	<ul style="list-style-type: none"> <li>BAT: 23技術(ESP, FF, FGD, SCR, ACI-FF, 他)</li> <li>BEP: 2方法(石炭洗浄, 石炭混合)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>APCD: のべ22技術</li> <li>硫酸プラント: 2規模</li> <li>水銀削減技術: のべ5技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>BAT: 16技術(ESP, FF, ACI, 他)</li> <li>BEP: 1方法(廃棄物分離)</li> <li>今後は、ACI+FFが主流</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>BAT: 9技術(ESP, FF, FF+AC, 他)</li> <li>BEP: 3方法(インプットコントロール, スタシヤトリング, 他)</li> </ul>
Technology profile (Technology profile 個票) 技術レベルごとの除去効率, 国グループごと(1~5)の導入率	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術レベル(Level 0~5)ごとの除去率を反映</li> <li>ヒアリングに基づき、1960年から2050年までの各国・地域の国グループを設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>一次製錬(精鉱)に対しては技術レベルをLevel 0~4で設定</li> <li>二次製錬(リサイクル原料等)に対しては技術レベルをLevel 0~3で設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術レベル(Level 0~5)ごとに除去率を設定</li> <li>2050年までの各国・地域の国グループを設定</li> <li>乾式の中で技術を移行させていく国と日本、ヨーロッパのように湿式を一部含みながら移行していく国の2パターンを想定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヒアリングに基づき、石炭ボイラーを参考に2050年までの各国・地域の国グループを設定</li> </ul>
ヒアリング先	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本産業機械工業会</li> <li>企業A</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本鉱業協会</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本環境衛生施設工業会</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>セメント協会</li> <li>企業B</li> </ul>
水銀排出施設データ (H30年度)	208施設データ -石炭火力発電所 153施設 -産業用石炭燃焼ボイラー 55施設	147施設データ(銅, 亜鉛, 鉛) -一次製錬 35施設 -二次製錬 112施設	3,571施設データ -一般廃棄物 2,290施設 -産業廃棄物 1,003施設 -下水汚泥 272施設	53施設データ

PP: power plant, IND: industrial, HC-A: hard coal (anthracite), HC-B: hard coal (bituminous), BC-L: brown coal (lignite), BC-S: brown coal (sub-bituminous), CU-P: copper (primary production), PB-P: lead (primary production), ZN-P: zinc (primary production), ESP: electrostatic precipitator, FF: fabric filter, FGD: flue gas desulfurization, SCR: selective catalytic reduction, ACI: activated carbon injection, APCD: air pollution control device.

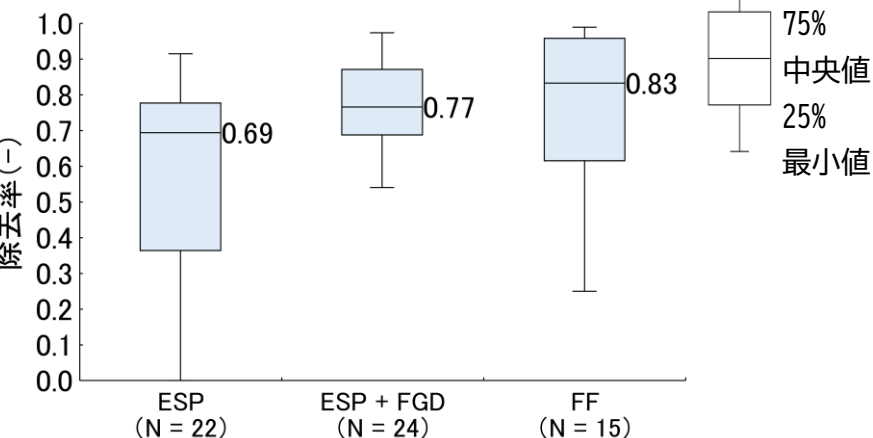
- ✓ **水銀制御技術の現状を整理**した。
- ✓ ヒアリング調査等により、石炭燃焼、廃棄物、セメント、非鉄金属分野における**将来推計**を行った。
- ✓ UNEPでは未設定の**非鉄金属（二次製錬）**について、技術個票とTechnology profileを整備した。

# 5-1 成果の概要：サブテーマ1（水銀制御技術関連）

## 現在及び将来の水銀制御技術の文献調査

### H30年度 水銀排出施設データの整理

#### 石炭燃焼分野（全208施設データ）



ESP: 電気集塵機, FGD: 脱硫装置, FF: バグフィルター,  
WS: 湿式スクラバー, AC: 活性炭

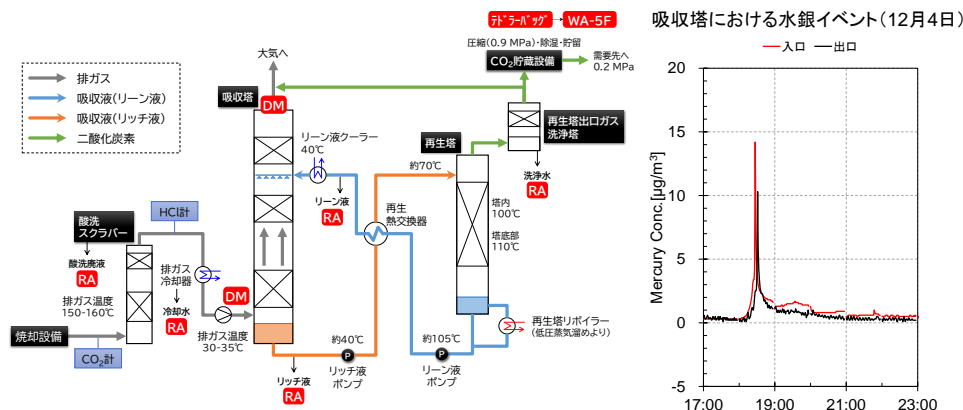
- ✓ 水銀排出施設の届出情報と水銀濃度の測定データを活用して、**技術ごとの水銀除去率**を整理。
- ✓ 石炭燃焼分野では、ばいじん対策として**バグフィルターへの更新**が進み、水銀対策にもなっている。
- ✓ 廃棄物焼却分野では、今後、BATとして**バグフィルター+活性炭**が主流になっていく。
- ✓ 排ガス処理装置の**入口での水銀濃度測定**や**活動量**を更新するためには、事業者等の協力体制の構築や仕組みの検討が望ましい。

## 将来の水銀制御技術の実験的研究

### 高機能化処理剤の評価、実証試験

- ✓ 市販の水銀除去用活性炭の3倍以上の吸着容量をもつ**CaCl<sub>2</sub>担持活性炭**を開発した。
- ✓ 焼却炉排ガスを用いた**KI添着活性炭素繊維**の水銀除去実証試験により、水銀濃度のピークカットに適していることを確認した。

### CCUS（新規技術）の評価

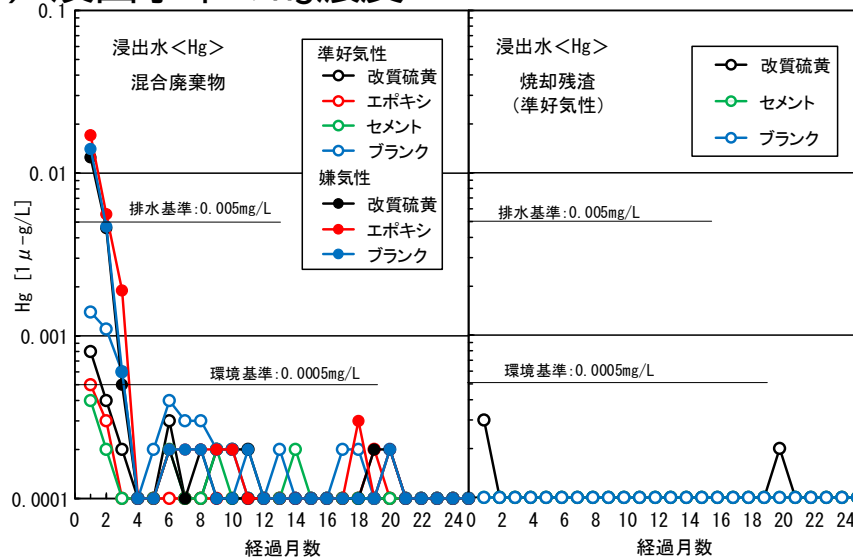


- ✓ **CCUS技術**の文献調査、ラボ試験、現場調査（2カ所）により、APCDs及び前処理設備において水銀濃度が低減されていれば、水銀の化学形態にかかわらず、CC設備において**51%**の水銀除去が見込める。

# 5-1 成果の概要：サブテーマ1（水銀廃棄物模擬埋立試験）

## 最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査

### (1) 浸出水中のHg濃度



### (2) 埋立実験槽系外への水銀流出率

		水銀量		水銀量 (g/槽)		25ヵ月間の水銀流出量 (mg)			
実験槽		水銀廃棄物固化体		廃棄物	固化体	総水銀量	浸出水	気化水銀	総流出量 (%)
混合廃棄物	標準好気性	No. 1	改質硫黄	0.079	449.056	449.138	0.0298	0.0000220	0.0298 (0.000007)
		No. 2	エポキシ樹脂		696.013	696.092	0.0233	0.0000320	0.0233 (0.000003)
		No. 3	低アルカリセメント		362.040	362.119	0.0244	0.0000350	0.0244 (0.000007)
		No. 4	ブランク		—	0.079	0.0461	0.0000090	0.0462 (0.058418)
	嫌気性	No. 5	改質硫黄	0.077	450.998	451.075	0.0766	0.0000030	0.0766 (0.000017)
		No. 6	エポキシ樹脂		836.968	837.045	0.1070	0.0000660	0.1071 (0.000013)
		No. 7	ブランク		—	0.077	0.0804	0.0000030	0.0804 (0.104388)
焼却残渣	標準好気性	No. 8	改質硫黄	0.113	424.880	424.993	0.0215	0.0002150	0.0217 (0.000005)
		No. 9	低アルカリセメント		377.108	377.221	0.0193	0.0002160	0.0195 (0.000005)
		No. 10	ブランク		—	0.113	0.0201	0.0002090	0.0203 (0.018002)

### <浸出水中のHg濃度>

- ✓ 廃棄物の違い、埋立構造の違いに関係なく概ね排水基準値以下
- ✓ 固化体中の水銀流出は極めて小さい
- ✓ **メチル水銀は全て不検出**

### <気化水銀濃度>

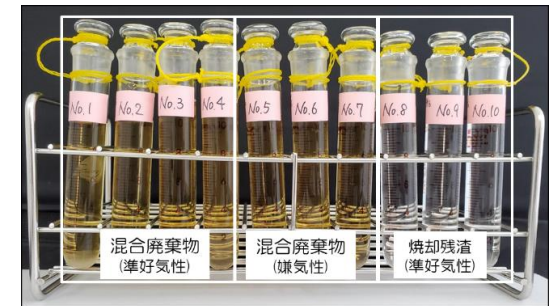
- ✓ 埋立構造の違い（混合廃棄物）  
嫌気性槽 < 大気環境基準 < 標準好気性槽
- ✓ 埋立廃棄物の違い：混合廃棄物 < 焼却残渣

### <総水銀（固化体+廃棄物）の系外（浸出水+気化水銀）への流出率>

- ✓ **0.000013%以下**でほとんど流出していない



**水銀廃棄物固化体中の水銀流出は長期に亘って極めて低いと推測**



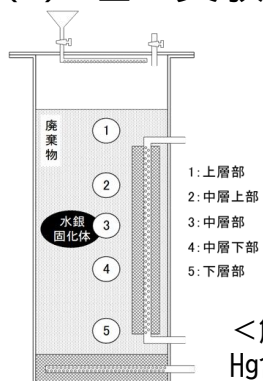
埋立1ヶ月後の浸出水



# 5-1 成果の概要：サブテーマ1（水銀廃棄物模擬埋立試験）

## 最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査（解体廃棄物からの水銀流出）

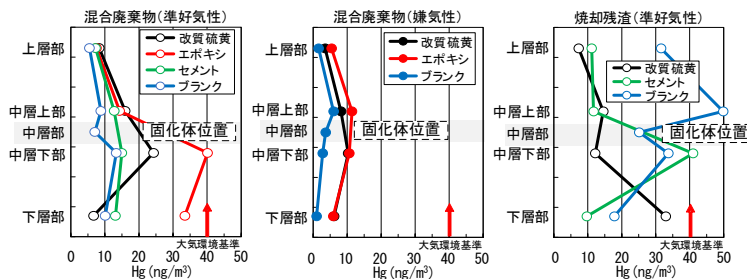
### (1) 埋立実験槽解体



No.	採取位置
①	上層：0～6.5cm
②	中層上部：13～19cm
③	中層：19～25cm
④	中層下部：25～31cm
⑤	下層部：38～45cm

<解体廃棄物の調査内容>  
Hg含有量試験、溶出試験、気化試験

### ※気化水銀

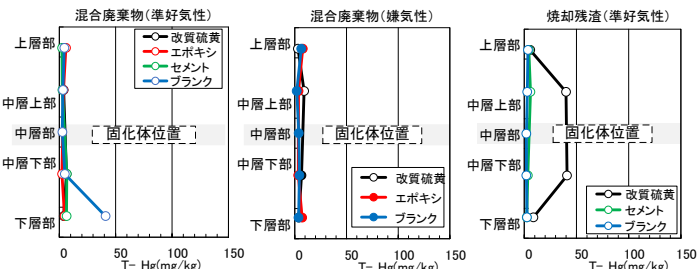


- ・ほぼ全ての位置で大気環境基準【40ng/m<sup>3</sup>】以下
- ・混合廃棄物の準好気では固化体の下部で増加。→ 固化体からの可能性
- ・嫌気性の下部では低い濃度 → 滞水している下部では流出した水銀が硫化水銀化している可能性
- ・焼却残渣はブランクの値が高く、充填廃棄物からの流出が主体。

### (2) 解体廃棄物からの水銀流出

※溶出試験：全槽溶出基準(0.005mg/L)以下

※総水銀（含有量試験）



- ・ほとんどの廃棄物層でブランクと類似した値。
- ・焼却残渣・改質硫黄の上下で高い値 → 混合廃棄物のブランクで同程度の値。充填廃棄物由来の可能性。
- ・固化体充填位置の上下で含有量の増加がない。

固化体からの水銀流出はほとんど無い

## 浸出水によるタンクリーチング試験

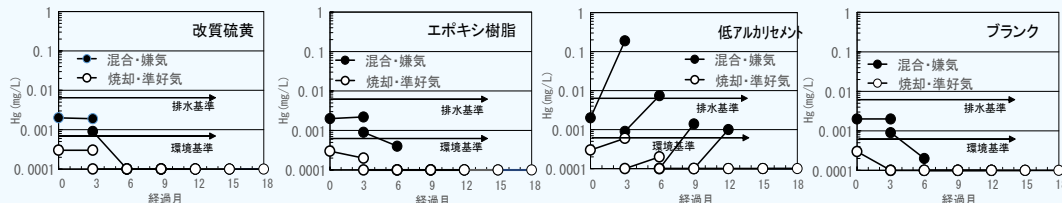
### (1) 実験条件



固化体				浸出水		
種類	重量(g)	容積(cm <sup>3</sup> )	表面積(cm <sup>2</sup> )	種類	充填量(L)	水銀量(mg)
改質硫黄	541.8	194.1	195.24	混合廃棄物・嫌気性槽 (混合・嫌気)	5.0	0~0.01
エポキシ樹脂	650.0	192.1	195.71			
低アルカセメント	534.2	214.6	205.04			
ブランク	-	-	-			
改質硫黄	543.0	193.5	195.24	焼却残渣・準好気性槽 (焼却・準好気)	5.0	0~0.0015
エポキシ樹脂	656.7	192.9	195.71			
低アルカセメント	552.0	228.5	205.04			
ブランク	-	-	-			

※恒温槽内設定温度20℃、液固比 (L/S)=10、1サイクル/3カ月

### (2) 水銀流出特性



水銀濃度：低アルカセメントだけ（特に混合・嫌気）水銀が溶出（0.0004%以下）  
→ 有機物濃度が高く、pHが8.5～10の浸出水で水銀溶出が確認。  
→ 第4サイクル以降は水銀が検出されない。

# 5-1 成果の概要：サブテーマ1（水銀廃棄物加速試験）

## 加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価

### 連続バッチ溶出試験（固化体）

判定 最大累積 溶出率(%)	水	酸性	アルカリ性	酸化	還元	NaCl	Na <sub>2</sub> S	酢酸	タニン酸	高温 (70℃)
MS <sub>50</sub>	◎	◎	×	×	◎	◎	×	◎	◎	◎
			0.0017	0.0030			5.3			
EPR <sub>80</sub>	◎	◎	○	×	◎	◎	×	◎	◎	◎
			0.0000032	0.0045			0.071			
LAC <sub>40</sub>	○	◎	×	×	○	○	×	◎	×	○
	0.0000084	(硫酸劣化)	0.0015	0.14	0.000017	0.000012	4.8	(酢酸劣化)	0.00011	0.000010

【判定基準】 ◎:すべて環境基準値未満、○:すべて排水基準値未満、×:排水基準値以上のデータあり

- ✓ 廃水銀等処理物は、**アルカリ性、酸化、Na<sub>2</sub>S**条件で高い水銀溶出の可能性がある。
- ✓ 埋立環境が主に還元雰囲気かつアルカリ条件と想定するならば、**エポキシ樹脂固型化 (EPR<sub>80</sub>) は、改質硫黄固型化 (MS<sub>50</sub>) と同等かそれ以上の水銀保持能がある**。ただし、**硫化処理**はMS<sub>50</sub>と比べてより強めに行う必要がある。
- ✓ **低アルカリセメント固化体 (LAC<sub>40</sub>) は各種劣化に注意を要するが、それほど悪くない**。最も溶出率の高かった酸化条件でも、ほとんどの水銀 (99%以上) が固化体内に保持されていた (Na<sub>2</sub>S条件を除く)。
- ✓ 粉砕物で溶出濃度が高くなる傾向があり、劣化や地震等によって**固化体が崩れないような対策**が必要である。
- ✓ **エポキシ樹脂コーティング**は、いずれの固化体に対しても水銀溶出抑制に有効な追加対策である。

# 5-1 成果の概要：サブテーマ2（全球モデル健康リスク）

## 全球モデルの計算結果を利用した健康リスク計算と推移予測

【R2年成果：既存知見の整理に基づく、優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの選定】

- ✓ 高感受性と対象人口規模の大きさから「**小児の神経発達への影響**」を優先的に評価する健康アウトカムとして選定
- ✓ 対象人口規模の大きさから「**市場を経由した海産物の摂取によるリスク**」を優先的に評価する曝露経路として選定

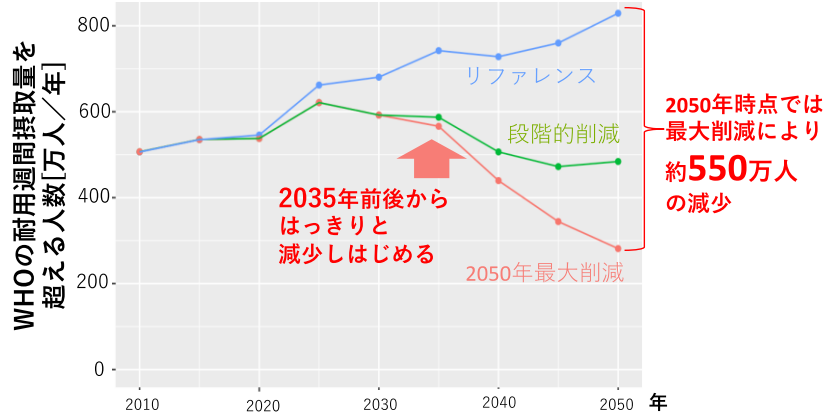
【R3年成果：全球モデルの計算結果を利用した健康リスク計算方法の開発】

- (1) 全球モデルから得られた海洋プランクトン中のメチル水銀濃度の推定値から、海産物中水銀濃度を計算
- (2) 海産物中水銀濃度と海産物の漁獲・流通統計データから、249国におけるメチル水銀の週間摂取量を計算

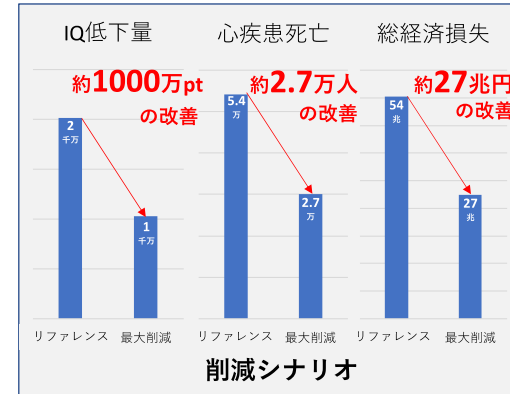
【R4年成果：全球モデルの計算結果を利用した健康リスク計算方法の開発】

- ✓ 健康リスクを(1)WHO参照値の超過人口、(2)IQ低下量、(3)心疾患死亡数、(4)総経済コストを指標として定量化
- ✓ モデル推定の不確実性については感度分析・モンテカルロシミュレーションにより定量化

WHOの耐用週間摂取量(毛髪中濃度換算 $2.5\mu\text{g/g}$ )を超える人数の推移



2050年時点での対策によるコスト改善の予測

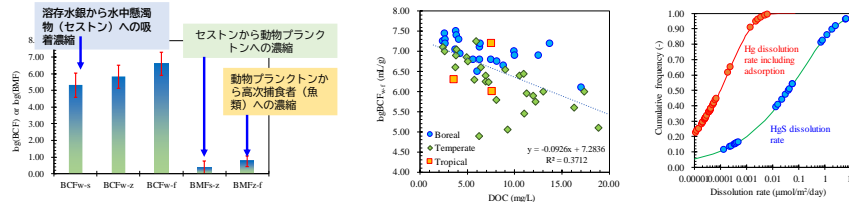


- ✓ 排出削減対策の実施により、2050年時点での健康リスクの程度には大きな違いが生じる
- ✓ 水銀の排出削減を実施した場合、全ての影響指標において2035年前後から健康リスクが大幅に低下し、水銀による経済損失が減少する（最大削減シナリオではリファレンス比で27兆円/年の経済損失が防止）
- ✓ 対策の影響が現れるまでにはタイムラグがあり、**早期からの対策を行うことが効果的**である

# 5-1 成果の概要：サブテーマ2（処分施設健康リスク）

## 水銀廃棄物の最終処分施設における健康リスクの地域性及び将来変動性

### 【R2年成果：環境動態モデルパラメータの環境・地域依存性】

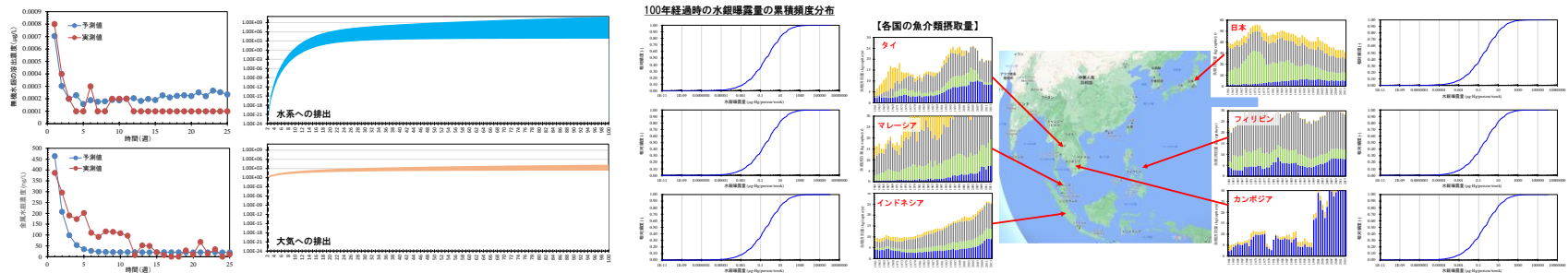


- 生物濃縮では、溶存水銀から水中懸濁物への吸着濃縮が最も重要
- 溶出速度 (HgS) はワイブル分布が最適な統計分布
- 溶存有機物はHgS、Hg<sup>0</sup>の溶出速度を増加させるが、特にHg<sup>0</sup>を1~2桁オーダーで増加させる
- Hg<sup>0</sup>の溶出速度はHgSのものより6桁以上大きい

### 【R3年成果：環境動態モデルの拡張化（統計的手法の挿入）】

- 水銀漏出モデルを拡張し、DOMと水銀の反応および統計分布化したモデルパラメータを水銀環境動態モデルへ導入
- 環境動態モデルの計算アルゴリズムを改良

### 【R4年成果①：不確実性を組み込んだモデルによる水銀曝露量の推移およびその変動性の推定】



- 水銀の埋立処分において**気候変動が健康リスクに与える影響は無視できる**
- 魚介類摂取量は水銀曝露量に大きな影響を与えるものの、他のパラメータの不確実性も同時に加味された場合、水銀曝露量の分布に大きな違いは現れない。
- WHOでの耐容摂取量を超える確率は約5.3%と推定。他のアジア地域においても±0.3%ポイント程度の変動であり、**地域性が与える影響は小さい**

### 【R4年成果②：水銀の最終処分に関する市民的認知の分析】

- **不溶化への強い信頼性**。鉱物学的不溶化は信頼性が高く、セメント固化など物理的不溶化への信頼性は低い。
- 1000年以上であれば、**不溶化処理として十分**であると態度変化する割合が高い

## 5-2 環境政策等への貢献（行政等が既に活用した成果）

### 1) 大気排出抑制対策及び未知排出源からの水銀排出量推計への貢献

- ✓ 環境省・水銀大気排出抑制対策検討会にて、水俣条約の有効性評価に向けた水銀大気排出制御技術の現状整理とそこから見えた課題、大気排出に係る調査結果及び2050年に向けた水銀排出量試算結果を提示。
- ✓ 大気汚染防止法5年後見直しに向けた検討や2050年に向けた水銀排出抑制対策の検討（例えば、バイオマス燃焼の寄与）に貢献。

### 2) 水銀マテリアルフローの精緻化への貢献

- ✓ 環境省・令和4年度水銀マテリアルフローに関する研究会において、大気汚染防止法による届出データを解析した結果及び文献調査結果（バイオマス燃焼に関するデータ）を提供。
- ✓ マテリアルフロー作成の基礎データに採用され、バイオマス燃焼からの水銀排出量推計に貢献。

### 3) 水銀廃棄物の適正処理への貢献

- ✓ 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課へ適宜、水銀廃棄物の長期安定性評価の最新情報を提供。
- ✓ 今後の水銀廃棄物、特に廃金属水銀等の処理・処分・管理及び水銀廃棄物ガイドライン改訂に向けた施策策定に貢献。



## 5-2 環境政策等への貢献（行政等が活用することが見込まれる成果）

### 1) 水銀排出施設における大気排出の実態調査

- ✓ 排ガス処理装置の水銀除去率を実態調査データをもとに算出し、技術ごとの除去率を序列化（BATの抽出）。
- ✓ 出口濃度測定は義務付けされているが、入口濃度測定及び活動量の更新も併せて実施することが重要。
- ✓ CCUS設備の導入によって、水銀大気排出抑制の共便益効果が期待できる。

### 2) 水銀廃棄物の適正な管理技術に関する科学的データ、知見

- ✓ 現在の水銀廃棄物ガイドラインに規定された「改質硫黄固化体」に加え、「エポキシ樹脂固化体」、「低アルカリセメント固化体」の長期に亘る埋立処分の可能性に関する科学的データを提示。
- ✓ 廃水銀等処理物は、アルカリ性、酸化、 $\text{Na}_2\text{S}$ 条件、固化体の粉碎試料において溶出濃度が高い傾向がある。
- ✓ 強い硫化処理やエポキシ樹脂コーティングは水銀溶出抑制に有効。

### 3) 全球規模での健康リスクの推移

- ✓ 排出削減対策シナリオに応じて、2050年時点での健康リスクの程度には大きな違いが生じることを提示。
- ✓ 水銀の排出削減を実施した場合、全ての影響指標（IQ低下量や心疾患死亡数）において2035年前後から健康リスクが大幅に低下し、水銀による経済損失が減少することを提示（リファレンスシナリオと比較した場合、最大削減シナリオでは27兆円／年の経済損失が防止される）。
- ✓ 対策の影響が現れるまでにはタイムラグがあり、早期からの対策が有効。

### 4) 水銀の埋立処分に伴う健康リスクの地域依存性

- ✓ 気候変動に伴う降水条件の変化が健康リスクに与える影響は限定的
- ✓ 環境的変動性が大きいパラメータの不確実性が大きいため、健康リスクに大きな地域的変動性は現れない
- ✓ 健康リスクが地域に強く依存せずに共通的であるため、日本での対策が共通して有効な効果

### 5) 市民的認知から捉えた水銀の安定化処理やモニタリングのあり方

- ✓ 水銀の不溶化処理への高い信頼性。ただしセメント処理などの物理的不溶化は信頼性が低い傾向
- ✓ 不溶化処理で担保されるべき安全期間（年数）は1000年以上が目安
- ✓ 水銀漏出を検知するモニタリングにおいて、モニタリング終了条件は「100年間の未検知」が目安

## 5-3 研究目標の達成状況（テーマ1）

### ○目標を上回る成果をあげた。

#### 目標

- 本研究では、介入シナリオの根拠となる人為的活動下での水銀制御・管理技術の状況を把握し、**規制対象5発生源**を含む主要発生源における水銀の排出・管理で将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報を整理・評価する。その基礎情報を**SII-6-2に提示**して、介入シナリオの策定に貢献する。また、水銀の最終的なシンクとなる最終処分施設における**水銀廃棄物の長期管理手法を複数の加速試験及び模擬埋立実験等で検討**し、最終処分施設からの漏洩する水銀量等の情報を**サブテーマ2のリスクの将来予測に提示**する。
- サブテーマ2では、SII-6-3から得られた情報を元に**水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を可視化**する。そしてサブテーマ1からの情報を考慮して水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクとその地域性や将来変動性を可視化する。
- 最終的に、本プロジェクト全体の成果を水俣条約の有効性評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ反映できるように、技術的基礎情報として整理し、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等のアップデートへ貢献する。

#### 達成状況

- 主要発生源における将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報をSII-6-2に提供。
- SII-6-3から提供される全球モデルでのメチル水銀予測データをもとに、水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測。
- テーマ1内においてもサブテーマ1からサブテーマ2へ安定化処理した水銀に関する研究成果を提供し、サブテーマ2でのモデル検証実施。
- **規制対象外のバイオマス燃焼に関する知見。**
- **実際のCO<sub>2</sub>回収設備での水銀挙動を調査。**
- **新規水銀除去技術の実証試験も併せて実施し、実用化に目途。**
- 水銀の長期安定性評価に関し、特に水銀廃棄物の**中間処理（硫化・固型化）とその確認方法**に今後検討すべき課題を見出し、整理。
- 水銀排出削減対策により2050年時点での健康リスクの程度には大きな違い。2035年から低下。タイムラグあり。（時間的・シナリオ的推移）。
- 赤道付近の小島嶼開発途上国における健康リスクが大きい（空間的推移）
- 最終処分施設からの水銀曝露に至る健康リスクについてはその地域性や将来変動性を試算。
- 最終まとめはオピニオンペーパー作成（全体）

## 5-3 研究目標の達成状況（サブテーマ1）

### ○目標を上回る成果をあげた。

#### 目標

#### 達成状況

- 介入シナリオの根拠となる人為的活動下での水銀制御・管理技術の状況を把握し、**規制対象5発生源**を含む主要発生源における水銀の排出・管理で将来予測に必要な**対策・技術・排出係数等の基礎的情報を整理・評価**する。その基礎情報を**SII-6-2に提示**して、介入シナリオの策定に貢献する。また、水銀の最終的なシンクとなる最終処分施設における水銀廃棄物の長期管理手法を**複数の加速試験及び模擬埋立実験**等で検討し、最終処分施設からの漏洩する水銀量等の情報を**サブテーマ2のリスクの将来予測に提示**する。
  - 本プロジェクト全体の成果を水俣条約の有効性評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ反映できるように、**技術的基礎情報として整理し、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等のアップデートへ貢献**する。
- 当初の目標に加え、規制対象外の**バイオマス燃焼に関する基礎的情報を整備してSII-6-2に提示**。その将来推計に貢献するとともに、環境政策としても今後の検討事項として取り上げられた。
  - 実際の**CO<sub>2</sub>回収設備での水銀挙動**を調べるとともに、**新規水銀除去技術の実証試験も実施し、実用化に目途**をつけた。
  - 模擬埋立実験では、改質硫黄、エポキシ樹脂、低アルカリセメント固化体ともに混合廃棄物や焼却残渣と埋立処分を行っても固化体自体から水銀が系外へ流出する可能性は低いことを明らかにした。このデータはサブテーマ2に提示。
  - 長期安定性評価では改質硫黄、エポキシ樹脂に加えて、**低アルカリセメント固化体も評価対象**とした。有機酸の影響評価では、**酢酸、タンニン酸の2条件**で評価。模擬実験槽からの**実浸出水を用いたタンクリーチング試験も実施**。過去のタンクリーチング試験のサンプルを分析し、長期安定性を**追加評価**。エポキシ樹脂コーティングした固化体の連続バッチ溶出試験によりその**有効性**を示した。一連の溶出試験結果から、水銀廃棄物の**中間処理（硫化・固型化）とその確認方法の課題を整理**した。これらの成果は水銀廃棄物ガイドラインやバーゼル条約の水銀廃棄物の環境上適正な管理のガイドラインを改訂する際に有用である。

## 5-3 研究目標の達成状況（サブテーマ2）

### ○目標どおりの成果をあげた。

#### 目標

- サブテーマ2では、SII-6-3から得られた情報を元に水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を可視化する。そしてサブテーマ1からの情報を考慮して水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクとその地域性や将来変動性を可視化する。

#### 達成状況

- 計画通り、SII-6-3での研究成果をもとに水銀曝露による健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を定量的に評価。
- 具体的には、排出削減対策の実施により、2050年時点での健康リスクの程度には大きな違いが生じることを示した。水銀の排出削減を実施した場合、全ての影響指標（IQ低下量や心疾患死亡数）において2035年前後から健康リスクが大幅に低下し、水銀による経済損失が減少する。無対策のケースと比較した場合、最大削減シナリオでは27兆円／年の経済損失が防止されると期待される。ただし対策の影響が現れるまでにはタイムラグがあり、早期の対策が効果的であることが示された。
- サブテーマ1での研究成果を元に水銀の挙動モデルを検証し、その妥当性を示した。水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクについて気候変動に伴う降水条件の変化は大きな影響を与えない反面、局所的環境条件に依存する他のパラメータの不確実性が大きいため、結果として水銀曝露量（健康リスク）の分布は地域依存性が小さく現れることを示した。



## 6. 研究成果の発表状況

### 査読付き論文：13件

- 1) Y. Cheng, Y. Asaoka, Y. Hachiya, N. Moriuchi, K. Shiota, K. Oshita, M. Takaoka: J. Hazard. Mater., 423 (2022) Mercury emission profile for the torrefaction of sewage sludge at a full-scale plant and application of polymer sorbent, (IF=14.224)
- 2) Habuer, T. Fujiwara and M.Takaoka: J. Clean. Prod., 129089, 323 (2021) The response of anthropogenic mercury release in China to the Minamata Convention on Mercury: A hypothetical expectation (IF=9.297)
- 3) M. Takaoka, Y. Cheng, K. Oshita, T. Watanabe, S. Eguchi: Process Saf. Environ. Prot., 148(5), 323-332 (2021) Mercury removal from the flue gases of crematoria via pre-injection of lime and activated carbon into a fabric filter (IF=4.966).
- 4) M. Takaoka, T. Kusakabe, K. Shiota, O. Hirata, K. Kawase, R. Yanase, K. Nitta: J. Mater. Cycles Waste Manage., (2023) Microscopic synchrotron X-ray analysis of mercury waste in simulated landfill experiments (IF=3.579)
- 5) F. Takahashi: J. Mater. Cycles Waste Manage., (2023) The impact of cognitive aversion toward mercury on public attitude toward the construction of mercury wastes landfill site (IF=3.579)
- 6) F. Takahashi, A. Sano, R. Yanase, A. Matsuyama, M. Takaoka: J. Mater. Cycles Waste Manage., (2023) 100-year simulation of mercury emissions from landfilled stabilized mercury waste (IF=3.579)

### 知的財産権：2件

- 1) 鮫島良二、三宅伴憲：株式会社プランテック、吉川正晃：大阪瓦斯株式会社、高岡昌輝、日下部武敏：国立大学法人京都大学；「バグフィルタ、添着活性炭素繊維ユニットを再生する方法及び排ガス処理システム」、特許第7007653号、令和3年6月3日
- 2) 坪井裕基：東ソー株式会社、高岡昌輝、日下部武敏：国立大学法人京都大学；「水銀処理剤」、特開2022-46931（特願2020-152579）、令和4年3月24日

その他発表件数	件数
査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	3件
口頭発表（学会等）	40件
「国民との科学・技術対話」の実施	11件
マスコミ等への公表・報道等	3件
本研究費の研究成果による受賞	3件
その他の成果発表	3件



## 6. 成果の発信

- ✓ NHK 時論公論「水俣条約発効5年 教訓をどう受け継ぐ」(2022.8.19)
- ✓ SII-6セミナー「水銀に関する水俣条約の有効性を考える ～条約発効5周年を機に～」(環境省と共催、195名参加、NHK熊本で紹介)(2022.9.5)
- ✓ 水銀廃棄物に関して国際会議での特別セッション実施(約60名の参加、2023.3.13)
- ✓ 金属誌(第90巻第1号, 2020年)における特集号企画「水銀に関する水俣条約に資する有効性評価の開発を目指して」
- ✓ 廃棄物資源循環学会誌(第32巻第5号, 2021年)における特集号企画「地球規模での水銀循環とその管理を目指して」
- ✓ Journal of Material Cycles and Waste Management (IF=3.579) における特集号企画(2023年)「Mercury cycles and its management」