

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

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)

令和2年度～令和4年度

Future Projections on Mercury Control Technologies and Health Risk  
from Exposure to Mercury

〈研究代表機関〉

国立大学法人 京都大学

〈研究分担機関〉

福岡大学

国立大学法人 東京工業大学

国立研究開発法人 国立環境研究所

〈研究協力機関〉

国立大学法人 岡山大学

令和5年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	2
3. 研究目標	2
4. 研究開発内容	3
5. 研究成果	5
5-1. 成果の概要	5
5-2. 環境政策等への貢献	13
5-3. 研究目標の達成状況	14
6. 研究成果の発表状況	16
6-1. 査読付き論文	16
6-2. 知的財産権	17
6-3. その他発表件数	17
7. 国際共同研究等の状況	17
8. 研究者略歴	18
II. 成果の詳細	
II-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 （国立大学法人京都大学、福岡大学）	19
要旨	19
1. 研究開発目的	20
2. 研究目標	20
3. 研究開発内容	20
4. 結果及び考察	24
5. 研究目標の達成状況	34
6. 引用文献	34
II-2 ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測 （国立大学法人東京工業大学、国立研究開発法人国立環境研究所）	35
要旨	35
1. 研究開発目的	35
2. 研究目標	35
3. 研究開発内容	35
4. 結果及び考察	40
5. 研究目標の達成状況	47
6. 引用文献	47
III. 研究成果の発表状況の詳細	48
IV. 英文Abstract	53

## I. 成果の概要

課題名 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  
課題代表者名 高岡昌輝 (国立大学法人京都大学大学院工学研究科 教授)

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

### 研究経費

104,806千円(合計額)  
(各年度の内訳: 令和2年度: 34,957千円、令和3年度34,931千円、令和4年度: 34,918千円)

### 研究体制

- (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(国立大学法人 京都大学) (JPMEERF20S20601)  
(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(国立大学法人 東京工業大学) (JPMEERF20S20602)

### 研究協力機関

国立大学法人 岡山大学

本研究のキーワード 水銀、大気排出、水銀制御技術、廃棄物管理、長期安定性、健康リスク

## 1. はじめに(研究背景等)

水銀及び水銀化合物による汚染から人の健康及び環境を保護することを目的に、水銀に関する水俣条約が2017年8月に発効したことにより、人為的な水銀の排出・放出・利用は厳しく制限されることになった。全世界において、水俣条約の着実な履行のためには、製品中の脱水銀化や製造プロセスの転換、より高度な排出制御技術の適用等、様々な技術及び制度を複数組み合わせることで対策を講じていくことが求められている。これらの対策の有効性を評価するには、現状と対策効果を盛り込んだシナリオ・評価モデルが必要で、このシナリオには将来の気候変動問題への対応といった変化を考慮したものでなければならない。したがって、対策技術の現状評価、将来技術・シナリオ開発、将来の環境動態の変化に伴う健康リスクの予測が可能となるモデル開発が必要である。

モデル作成の最初の入口となる対策技術の現状評価としては、大気への主な排出源における水銀排出制御技術の現状整理が必要であり、将来技術としては、今後導入が想定される二酸化炭素回収技術での水銀挙動の解明や高度水銀排出低減技術の開発等が求められる。一方で、利用されなくなった水銀や排ガスから除去された水銀は、有害廃棄物として扱われる。水銀は残留性有機汚染物質とは異なり、分解できないことから最終的な管理が必要である。このためには長期安定性を見通すための管理技術が必要となるが、これまで実績がないことから加速環境や模擬環境下での実験により水銀廃棄物からの水銀挙動に関する知見を蓄積することが求められている。

水銀廃棄物の長期的な管理方法が環境上適正であるか評価するためには、すでに環境中へ放出された水銀、また今後排出されるであろう水銀による健康リスクとの相対的な比較を踏まえ、社会的有効性の視点を含めて評価される必要がある。自然環境中の水銀は処分のために管理された形であれ、地球温暖化に伴う気候変動など長期かつ様々な外的要因によって影響を受けるため、長期的な視野を持った健康リスク評価が求められる。一方、水俣条約の有効性評価の主要なアウトカムはヒト健康への影響である。全球レベルで移動し、様々な物理的・化学的・生物学的反応を受ける自然環境における水銀挙動に、人為的活動や水銀対策による影響も考慮された上での水銀曝露量の推定及びそのリスクの予測が求められている。

## 2. 研究開発目的

サブテーマ1においては、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・評価することを目的として、まず、人為的活動下における大気への水銀制御技術に関する調査を行う。様々な発生源からの水銀制御に関する将来予測に必要な基礎的情報（排出係数等）を整理、あるいは実験的に求めて、テーマ2（SII-6-2）のインプットデータとする。また、一方で、利用されなくなった水銀や排ガスや排水から除去された水銀は有害廃棄物として扱われるため、処理・処分・管理施設の設置がいずれの国においても必要である。したがって、水銀廃棄物の最終処分に関する模擬環境下及び加速試験による検討から長期管理手法としての知見を集積する。得られたデータはサブテーマ2の水銀廃棄物最終処分施設の健康リスク評価のインプットデータとする。

サブテーマ2では、ヒトへの水銀曝露及びそれに伴う健康リスクを推定・予測することを目的とする。気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を明らかにすることを狙い、全球モデルで計算された各地域での海産物中の水銀濃度から推定曝露量を求めて存在形態別及び曝露経路別のリスク計算を行うことで健康リスクの推移を予測すること、水銀廃棄物の最終処分施設からの漏洩・拡散といったケースにおける健康リスクの地域性及び将来変動性を予測する。

最終的に、テーマ2、テーマ3と合わせて本研究全体から得られた水銀制御対策を評価して、水俣条約の有効性評価枠組み策定や同条約の有効性向上に資する施策につなげるかを検討する。

## 3. 研究目標

全体目標	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及び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。
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
サブテーマリーダー /所属機関	高岡昌輝／国立大学法人京都大学
目標	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	ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測
サブテーマリーダー /所属機関	高橋史武／国立大学法人東京工業大学
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・シナリオの推移を可視化する。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

##### 4-1. 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【サブテーマ1】

###### (1) 人為的活動下での水銀制御技術の整理と将来予測

既存の水銀制御技術については、水俣条約の規制対象5発生源について水俣条約でのBAT/BEPガイドラインや最新論文等を参考にしながら、日本における規制後の最新の水銀排出施設データを集め、排出係数を技術ごとに整理した。規制対象5発生源については、2050年までのより詳細な技術導入率を推計するため、業界団体や企業に対するヒアリング調査、最新のデータベース、論文等を調査して各国あるいは地域の水銀排出レベルの将来的な変化を推計した。規制対象外の発生源として鉄鋼及びバイオマス燃焼については、文献調査に基づいて原燃料中水銀濃度や水銀制御技術の現状整理を行った。介入シナリオの策定に必要なこれらの基礎的情報を排出係数、技術個票、技術普及シナリオとして整理したものをSII-6-2グループに提示した。将来の水銀排出制御技術については、カラム吸着試験によって高機能化処理剤を評価し、実証試験を実施した。新規技術として、気候変動対策として将来の導入が見込まれる二酸化炭素分離回収・利用・貯留（CCUS）技術における水銀低減効率をラボ試験と2ヵ所の現地調査によって評価した。

###### (2) 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

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検討するため模擬埋立実験槽やタンクリーチング試験を用いて、最終処分施設から漏洩する水銀量等の情報を得て、これらの情報をサブテーマ2に提供した。本検討では、模擬埋立実験槽を用いた廃水銀等処理物（水銀廃棄物固化体）中の水銀流出の評価を行うために、3種類の水銀廃棄物固化体（水銀廃棄物ガイドラインに準じた水銀廃棄物の改質硫黄固化体：MS<sub>50</sub>、新たな手法で作成したエポキシ樹脂固化体：EPR<sub>80</sub>、従来の低アルカリセメント固化体：LAC<sub>40</sub>）の埋立処分に伴う系外への水銀流出特性を評価した。さらに、タンクリーチングによる水銀廃棄物固化体から浸出水中への水銀流出特性を調査するために、模擬埋立実験槽から発生した実浸出水を用いて水銀廃棄物固化体を浸漬させることによる水銀の流出特性を把握した。

水銀廃棄物固化体の長期安定性評価のため、3種類の固化体（MS<sub>50</sub>、EPR<sub>80</sub>、LAC<sub>40</sub>）に対して連続バッチ溶出試験を、粉砕物に対して上向流カラム通水試験を実施した。本研究で評価した影響因子はpH、酸化還元電位（ORP）、無機塩、有機酸、温度、微生物で、微生物以外の因子については、濃度や温度の負荷を高く設定することで最終処分場で考えられるよりも極端な加速条件下での水銀溶出挙動を評価した。試薬条件は予備検討を踏まえて設定した。本研究では、L/S = 100で500年程度の長期安定性を評価できるとした。水銀溶出濃度の高かった条件については、連続バッチ溶出試験後の固化体に対してSEM-EDSによる断面観察及び元素分析を行った。水銀溶出濃度の高かった酸化条件については、3種類の固化体をエポキシ樹脂でコーティングして、連続バッチ溶出試験によりその有効性を検証した。さらに京都大学実験室内で保管していた過去に実施したタンクリーチング試験のサンプルを分析し、それらの長期安定性

評価を追加で実施した。一部の条件については、補足的に粉碎した固化体を用いて環告13号溶出試験を行い、評価した。

#### 4-2. ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測【サブテーマ2】

##### (1) 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

##### 1) 水銀の健康リスクおよび曝露シナリオの既往知見の整理と優先的に評価すべき範囲の選定

水銀曝露による健康アウトカムの既往の研究知見について、過去の総説や公的報告書等から情報を集約し整理した。それぞれの曝露レベルを基に曝露経路ごとの健康リスク懸念の状況を整理した。

①健康アウトカムの鋭敏性、②既往知見の蓄積状況、③ Well-beingへの影響の大きさ、④曝露人口の大きさ、の観点から優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定を行った。

##### 2) 水銀全球モデルの計算結果に基づく水銀曝露量の計算

海産物中水銀濃度の実測データからヒトの水銀摂取量を推計した先行研究であるLavoieら(2018)の計算法を基に、全球モデルからのモデル推計値を利用する計算法への拡張を行った。

海産物中のメチル水銀濃度の計算: SII-6-3(1)で開発されている全球モデルFATE-Hgから得られた2010年におけるプランクトン中のメチル水銀濃度推定値を基に、水棲動植物国際標準統計分類の魚種分類毎の平均栄養段階を考慮し、食物網蓄積係数を利用して海産物中メチル水銀濃度を計算した。

水産統計データの取得と整理: 各地域における各海産物グループの消費量を、生産量、輸入量、輸出量、非食料使用、ストック変化量に関する統計データを基に計算を行った。

国別のメチル水銀の週間摂取量の計算: 海産物摂取による国ごとのメチル水銀の週間摂取量は、国内供給による摂取と輸入供給による摂取を区別して計算した。

水銀濃度の実測値を利用した補正: 毛髪中水銀濃度等について信頼できる疫学データ等が入手可能であった21国のデータについては、実測データを利用して週間摂取量の値を補正した。

魚介類の摂取量の将来変化を考慮した補正: FAOのカロリーベースでの魚介類の予測消費量データを利用して、将来の水銀摂取量の変化に対応する補正を行った。

##### 3) メチル水銀による健康リスク推移予測の計算

Zhangら(2021)の計算法及びパラメータ値を主に参照し、健康リスク推移予測を行った。

水銀摂取によるIQ低下量の計算: 国*c*でのIQ低下量 ( $\Delta IQ_c$ ) の計算を以下の式で行った。

$$\Delta IQ_c = \Delta EDI_c \times BW \times DitBL \times BLtH \times HtIQ \times POP_{c,NB}$$

ここで、 $\Delta EDI_c$ は国*c*での推定一日摂取量の変化量、*BW*は体重、*DitBL*は一日摂取量から血中濃度の換算係数、*BLtH*は血中濃度から毛髪中濃度の換算係数、*HtIQ*は毛髪中濃度からIQ低下量の換算係数、*POP<sub>c,NB</sub>*は国*c*の出生数である。

水銀摂取による心疾患死亡数増加量の計算: 国*c*での致死的心筋梗塞に起因する死亡数の増加量 ( $\Delta FHA_c$ ) の計算を以下の式で行った。

$$\Delta FHA_c = [1 - \exp(-\Delta EDI_c \times BW \times DitBL \times BLtH \times HtFHA)] \times U_\omega \times FR \times (POP_{c,F} \times IHD_{c,F} + POP_{c,M} \times IHD_{c,M})$$

ここで、*HtFHA*は毛髪中濃度から致死性心筋梗塞への換算係数、*U<sub>ω</sub>*は水銀が心疾患を引き起こすことの包括的な不確実性、*POP<sub>c,F</sub>*と*POP<sub>c,M</sub>*は国*c*の女性と男性の40歳以上人口、*FR*は心筋梗塞の致死率、*IHD<sub>c,F</sub>*と*IHD<sub>c,M</sub>*は女性と男性の虚血性心疾患の発生率である。

IQ低下量および心疾患死亡数増加量の経済的損失への換算: 国*c*でのIQ低下量からの経済的損失 ( $\Delta EV_{IQ,c}$ ) の計算は以下の式で行った。

$$\Delta EV_{IQ,c} = \Delta IQ_c \times IQtM \times (GDP_{PPPperCapita,c} / GDP_{PPPperCapita,US})$$

ここで、*IQtM*はIQ低下量の経済価値換算係数である。*GDP<sub>PPPperCapita,US</sub>*と*GDP<sub>PPPperCapita,c</sub>*はそれぞれ米国と国*c*の購買力平価調整済GDPである。心疾患死亡からの経済的損失への換算は以下の式で行った。

$$\Delta EV_{FHD,c} = \Delta FHA_c \times VSL \times (GDP_{PPPperCapita,c} / GDP_{PPPperCapita,US})$$

ここで $\Delta EV_{FHD,c}$ は、国*c*での心疾患死亡に起因する経済損失、*VSL*は統計的生命価値である。

WHO参照値超過を指標としたリスク計算: 水銀の健康リスクの定量指標として、WHOによる耐容摂取量に

対応する毛髪中水銀濃度である2.5 μg/gを超過する人口を国ごとに算出した。

パラメータ値の不確実性の影響の分析：上記のリスク計算でのパラメータ値の不確実性の影響を分析するため、各パラメータの背景知識から想定される下限および上限値を用いたシミュレーションと、複数のパラメータの不確実性を統合的に調べるため各パラメータの値を確率的にサンプリングするモンテカルロシミュレーションによる感受性分析を行った。

(2) 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

1) 最終処分施設からの水銀漏出に伴う水銀の環境挙動のモデル化および地域環境や気候変動などによるモデルパラメータの不確実性評価

水銀の環境動態モデルにおけるパラメータについて、既往の知見を収集してその環境依存性、地域依存性を分析した。

2) 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

水銀の環境動態モデルにおいて様々な値が報告されているパラメータについて、その不確実性を適切な統計分布によって表現し、モデル計算に反映させた。最適な統計分布はベイズ情報量規準 (BIC) によって決定した。本研究では3つの水銀挙動モデルで水銀曝露量を求めた。埋立地内での水銀挙動および水銀放出量を推定するモデル1、大気や表流水、地下水を経て半閉鎖性水域で生物濃縮を受け、人体への水銀曝露に至る挙動を表現するモデル2、大気から沈降した水銀が畜産物経由で人体への曝露に至る挙動を推定するモデル3である。

3) 水銀の最終処分に関する市民的認知の分析

Webアンケート調査を行い、水銀の最終処分に関する市民的認知について分析した。水銀対策の優先順位や不溶化処理技術における認知的安全性、モニタリングの終了条件に対する認知的条件などである。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

5-1-1. 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【サブテーマ1】

(1) 人為的活動下での水銀制御技術の整理と将来予測

水俣条約の規制5発生源について、文献等の公開情報だけでは入手が困難な実情をヒアリング調査で補完することで、水銀制御技術の現状を整理した(表-1.5)。最新の日本における水銀排出施設データを環境省より入手・解析して、技術ごとの除去率を明らかにした(図-1.4)。規制5発生源については、2050年までのより詳細な技術導入率を推計するため、業界団体や企業に対するヒアリング調査、最新のデータベース、論文等を調査して各国あるいは地域の水銀排出レベルの将来的な変化を推計した。規制

表-1.5 水銀制御技術の概要

	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)	・石炭火力(PP)、産業用ボイラー(IND)に分けて整理 ・石炭種ごとに整理(HC-A, HC-B, BC-L, BC-S) ・一部の国・地域については個別の数値を設定	・銅、鉛、亜鉛の一次原料(CU-P, PB-P, ZN-P)について整理 ・一部の国・地域については個別の数値を設定 ・二次原料については情報が限られる	・制御焼却とそれ以外に分類 ・都市ごみ由来水銀濃度は環境省データを採用 ・廃棄物量は、人口を考慮して決定 ・焼却率は、各国の一人当たりのGDPから推計	・原料と燃料に分けて設定 ・燃料については産業用の数値を適用
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/メタリヤル	・BAT: 23技術(ESP, FF, FGD, SCR, ACI-FF, 他) ・BEP: 2方法(石炭洗浄、石炭混合)	・APCD: のべ22技術 ・硫酸プラント: 2規模 ・水銀削減技術: のべ5技術	・BAT: 16技術(ESP, FF, ACI, 他) ・BEP: 1方法(廃棄物分離) ・今後は、ACI+FFが主流	・BAT: 9技術(ESP, FF, FF+AC, 他) ・BEP: 3方法(インプラントコントロール, ダストシャドリング, 他)
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	・技術レベル(Level 0~5)ごとの除去率を反映 ・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	・一次製錬(精鉱)に対しては技術レベルをLevel 0~4で設定 ・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	・技術レベル(Level 0~5)ごとに除去率を設定 ・2050年までの各国・地域の国グループを設定 ・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	・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
ヒアリング先	・日本産業機械工業会 ・企業A	・日本鉱業協会	・日本環境衛生施設工業会	・セメント協会 ・企業B
水銀排出施設データ (H30年度) 排ガス中水銀濃度の測定結果, 処理施設, 原燃料, 届出情報 他	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.



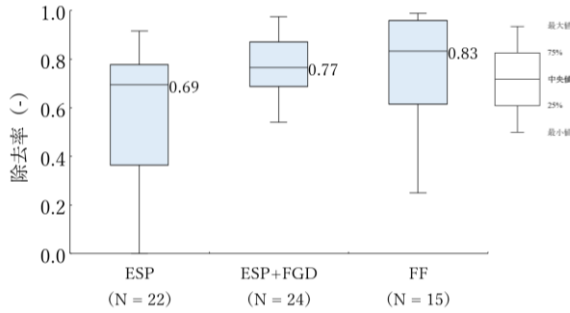


図-1.4 国内データに基づいた技術ごとの水銀除去率（石炭燃焼）

吸収塔における水銀イベント（12月4日）

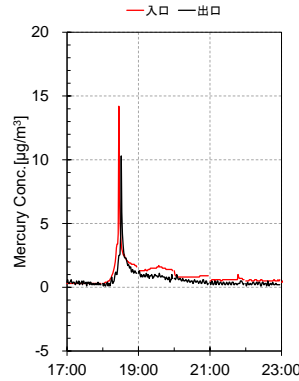


図-1.5 佐賀市清掃工場CO<sub>2</sub>分離回収設備の吸収塔におけるHg<sup>0</sup>濃度の経時変化

対象外の発生源のバイオマス燃焼については、SII-6-2において気候変動対策として石炭のバイオマス系燃料への転換が進むことによる水銀排出増が示唆されたことからバイオマス種ごとに排出係数を調査・整理した。将来の水銀制御技術として添着活性炭の開発に取組み、市販の活性炭の3倍以上の吸着能をもつCaCl<sub>2</sub>担持活性炭を開発し、特許を出願した。また、都市ごみ焼却施設において通風抵抗が低いヨウ化カリウムを添着した活性炭素繊維をバグフィルタの後段に設置し、水銀除去実証試験を行い、水銀濃度のピークカットに適していることを確認した。今後の気候変動対策として導入が期待されているCO<sub>2</sub>分離回収（CC）設備について、ラボ実験と2カ所の実プラントで水銀挙動を調査した。その結果、排ガス処理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%（イベント3回の算術平均除去率）の更なる水銀除去が気候変動対策の共便益として期待できた（図-1.5）。

（2）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) 模擬埋立実験槽を用いた水銀廃棄物固化体からの水銀流出評価

既存研究での、埋立地における水銀の環境リスクを低減させる最適条件は、黑色硫化水銀のセメント固化体を、準好気性埋立地の中層部に処分する手法であった。そこで、さらなる水銀の流出リスクの低減化手法を検討するため、作成手法の異なる2種類の水銀廃棄物固化体（改質硫黄固化体、エポキシ樹脂固化体）を加えて、さらに25ヵ月間の長期埋立実験を行い、浸出水や大気中への水銀流出挙動、さらに埋立実験槽解体後の充填廃棄物を用いた固化体からの水銀溶出挙動について調査を行った。埋立条件などの詳細は表-1.1に示す。埋立実験槽は実験開始から25ヵ月経過後に解体し、埋立廃棄物及び水銀廃棄物固化体を回収した。そして、埋立廃棄物中の総水銀（含有量試験）、溶出試験、及び気化水銀発生試験に供し固化体中からの水銀移動について確認した。

表-1.1 水銀廃棄物の埋立条件

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 準好 気性	No.1 改質硫黄固化体	焼却残渣: 28.8	0.079	1041.9	449.059	449.138
	No.2 エポキシ樹脂固化体	汚泥肥料: 7.2		1009.3	696.013	696.092
	No.3 セメント固化体	単体体積重量 : 1.29kg/ℓ		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	0.077	1046.4	450.998	451.075
	No.6 エポキシ樹脂固化体	汚泥肥料: 7.0		1213.7	836.968	837.045
	No.7 ブランク	単体体積重量 : 1.25kg/ℓ		—	—	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	0.113	985.8	424.880	424.993
	No.9 セメント固化体	単体体積重量 : 1.50kg/ℓ		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の充填  
 混合廃棄物は焼却残渣・汚泥肥料=0.2で混合作成  
 水銀含有量は焼却残渣が灰分10mm以下、汚泥肥料が10mm以下を測定  
 廃棄物中の水銀濃度（湿潤）：焼却残渣-3.2mg/kg、汚泥肥料-0.39mg/kg  
 物理組成：焼却残渣（含水率11.9%、灰分10mm以下96%）、汚泥肥料（含水率22%、灰分100%）

水銀廃棄物固化体を廃棄物層に埋め立てた25ヵ月の実験期間における系外への水銀流出率を算出した（表-1.6）。その結果、25ヵ月間の水銀流出量は浸出水で最大0.1070mg（No.6）、気化水銀で0.0002mg（No.9）となり、最大総流出量は0.1071mg（No.6）であったが、その溶出率は0.000013%と極微量であった。総流出量は水銀固化体を充填していないブランク槽と同程度か、それ以下となっていることから水銀固化体からの系外への流出は殆ど無いことが判った。本実験は当初の目標通りの成果を達成した。次に、水銀廃棄物固化体の埋立地内部でのさらなる安全性を確認するため、3種類の固化体を上記実験槽



から発生した実浸出水に浸漬させるタンクリーチング試験を表-1.2に示す実験条件で連続的(18ヵ月)に行いその水銀溶出状況を確認した。3ヵ月1サイクルの試験を6サイクル行い各サイクルで流出した水銀量を累積して全体からの溶出率を算出した(表-1.7)。その結果、混合・嫌気(No. 7)の実験槽から発生した浸出水に

表-1.6 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	酸化水銀	総流出量 (%)
混合廃棄物	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		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	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)

浸漬した低アルカリセメント固化体からの溶出率が0.0004%と最も高く、それ以外では水銀溶出はほとんど確認されない結果となった。また、低アルカリセメント固化体からの溶出も、第4サイクル以降は検出されなかった。さらに、改質硫黄やエポキシ樹脂において水銀溶出は検出されず、実浸出水中に固化体を浸漬させた条件下においても、固化体の安定性が確認できた。本検討も当初の目標通りの成果を達成した。

表-1.2 タンクリーチング実験条件

固化体(溶質)				浸出水(溶媒)			水銀総量 (g)
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	270.90
エポキシ樹脂	650.0	192.1	195.71				520.00
低アルカリセメント	534.2	214.6	205.04				213.68
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	271.50
エポキシ樹脂	656.7	192.9	195.71				525.36
低アルカリセメント	552.0	228.5	205.04				220.80
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ヵ月

表-1.7 水銀廃棄物固化体からの水銀溶出量と溶出率

	改質硫黄		エポキシ樹脂		低アルカリセメント	
	混合・嫌気性	焼却・準好気	混合・嫌気性	焼却・準好気	混合・嫌気性	焼却・準好気
水銀含有量(g)	270.9	271.5	520	525.4	213.7	220.8
累積溶出量(mg)	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.964	0.0025
累積溶出率(%)	<0.0000001	<0.0000001	0.0000004	<0.0000001	0.000356	0.0000001

2) 加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価

溶媒として水を用いた連続バッチ溶出試験 (L/S = 100) により、3種類の固化体ともに500年間の長期安定性を有することが実験的に確認された (図-1.10)。加速環境下の連続バッチ溶出試験では、3種類の固化体に共通してアルカリ性、酸化、Na<sub>2</sub>S条件では水銀が溶出することが明らかとなった (表-1.8)。これは、主に硫化水銀との直接的な反応に起因すると考えられるため、これらの条件が調わないようにする必要があります。さらに、SEM-EDS分析の結果、Na<sub>2</sub>S条件では改質硫黄がひどく浸食されていたことが明らかとなったため、多重防護の観点から固化体を保護するための何らかの対策を講じる必要がある。

MS<sub>50</sub>の連続バッチ溶出試験の結果、アルカリ性、酸化、Na<sub>2</sub>S条件下では排水基準を超過したが、それら以外の条件では環境基準を満たした (図-1.11)。SEM-EDS分析によって、酸化及びNa<sub>2</sub>S条件では、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>お

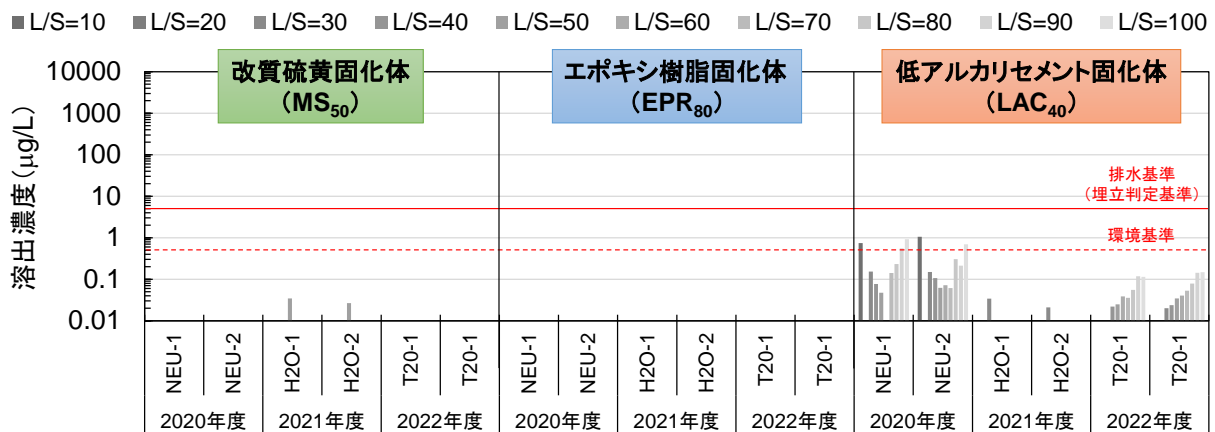


図-1.10 溶媒として水を用いた連続バッチ溶出試験の結果

表-1.8 連続バッチ溶出試験のまとめ

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滿、○:すべて排水基準値未滿、×:排水基準値以上のデータあり

よびNa<sub>2</sub>SがMS<sub>50</sub>内部へ侵入して硫化水銀を溶出させたのに対し、アルカリ性条件では固化体表面の硫化水銀が溶出したと考えられた。EPR<sub>80</sub>は、MS<sub>50</sub>とは異なり、アルカリ条件下では水銀が若干溶出するもののエポキシ樹脂固化により水銀溶出が抑制可能であった(図-0.1)。廃水銀等処理物の最終処分環境が、主に還元雰囲気かつアルカリ条件と想定するならば、EPR<sub>80</sub>は、MS<sub>50</sub>と同等かそれ以上の水銀保持能がある。エポキシ樹脂の水銀の封じ込め性能の高さはその耐水性、耐薬品性が高いことによる。EPR<sub>80</sub>の温度条件(20、45、70℃)の溶出サンプル中ビスフェノールA(BPA)濃度を分析したところ、温度依存的にBPA溶出することが明かとなった。しかしながら、京都大学での過去の研究結果を踏まえると、エポキシ

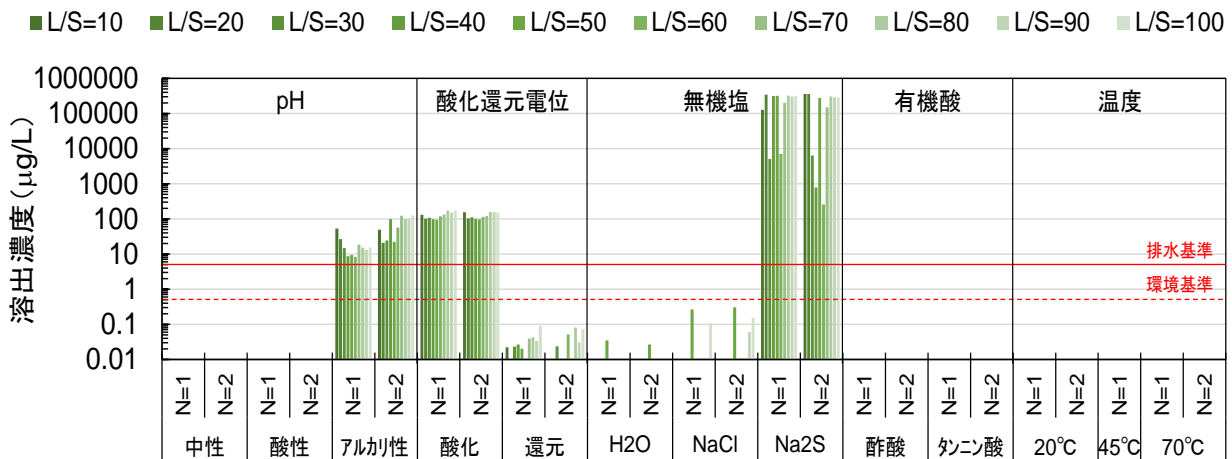


図-1.11 改質硫黄固化体 (MS<sub>50</sub>) の連続バッチ溶出試験の結果

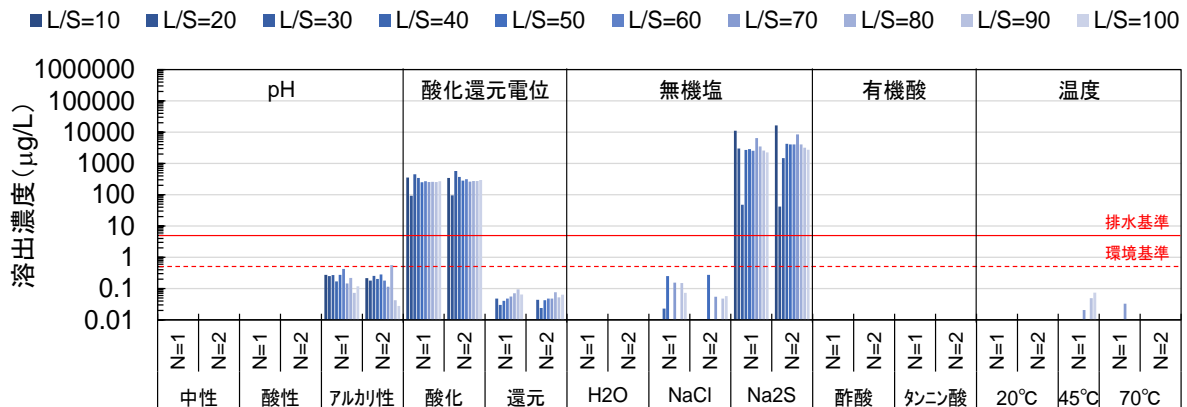


図-0.1 エポキシ樹脂固化体 (EPR<sub>80</sub>) の連続バッチ溶出試験の結果

樹脂固型化によりBPA溶出は粉砕物と比べて2桁程度抑えられた。酢酸条件下でメチル水銀及びエチル水銀が生成するか確認したところ、MS<sub>50</sub>、EPR<sub>80</sub>ともに不検出 (< 0.01ppm) であった (LAC<sub>40</sub>は酢酸劣化のため評価不能)。LAC<sub>40</sub>は、各種劣化には注意を要するが、Na<sub>2</sub>S条件を除くと水銀を99%以上保持できたことから、低アルカリセメントを用いた固型化はそれほど悪くない。溶出濃度の高かった酸化条件において、エポキシ樹脂コーティングの効果を連続バッチ溶出試験 (L/S = 100) により検証した結果、簡易的なエポキシ樹脂コーティングであっても、溶出濃度が100 µg/Lを超えるような酸化条件において、固化体からの水銀溶出を1桁以上抑制する効果を確認できた (図-1.13)。エポキシ樹脂はふっ素樹脂より耐候性や耐久性に劣るが、安価に塗布できる利点もあり有効な追加対策技術の一つと言える。粉砕物を用いた上向流カラム通水試験結果で溶出濃度が高くなる傾向が見られたことから、破壊までいかなくとも経年的に生じると想定される亀裂や欠けには何らかの対策を講じておくことが必要である (表-1.9)。エポキシ樹脂はコンクリート構造物のひび割れ補修材や塗床材としても使用されることから、エポキシ樹脂コーティングによる補強と水銀封じ込めはいずれの固型化法においても有効な追加対策の一つと考えられる。土壌や底質中にはビスフェノールA (BPA) を分解する細菌の存在が報告されており、BPA型エポキシ樹脂は好気条件などが調った場合には微生物分解される可能性があることに留意が必要である。過去のタンクリーチング試験のサンプルを分析した結果、EPR<sub>80</sub>で5年以上、セメント固化体 (OPC<sub>60</sub>、LAC<sub>60</sub>) で4年以上経過しても溶出濃度は低く維持されており、水銀が長期間安定して保持されていることを実験的に確認できた。

一部の条件において環告13号溶出試験での固化体からの水銀溶出挙動を確認した。MS<sub>50</sub>は強アルカリ環境や高濃度の酸化剤 (FeCl<sub>3</sub>を使用) が存在する時しか水銀溶出の影響が見られず、それ以外の環境下では高い安定性を示した。EPR<sub>80</sub>は、酸化剤による影響は見られたが、pH5~9の環境下では比較的安定していた。LAC<sub>40</sub>はその性質から浸漬や経年劣化等によりアルカリ成分が溶出し、どの条件でもMS<sub>50</sub>やEPR<sub>80</sub>と比べて高い結果を示した。これらの結果から上向流カラム通水試験との整合性も確認された。

エポキシ樹脂で固型化する場合、たとえ硫化水銀が環告13号溶出試験等をクリアしたとしても、硫化処理が十分でない可能性が考えられた。したがって、エポキシ樹脂を用いて硫化水銀を固型化する場合には、振動ボールミルよりも遊星ボールミルのメカノケミカル効果によって水銀をより安定化しておく

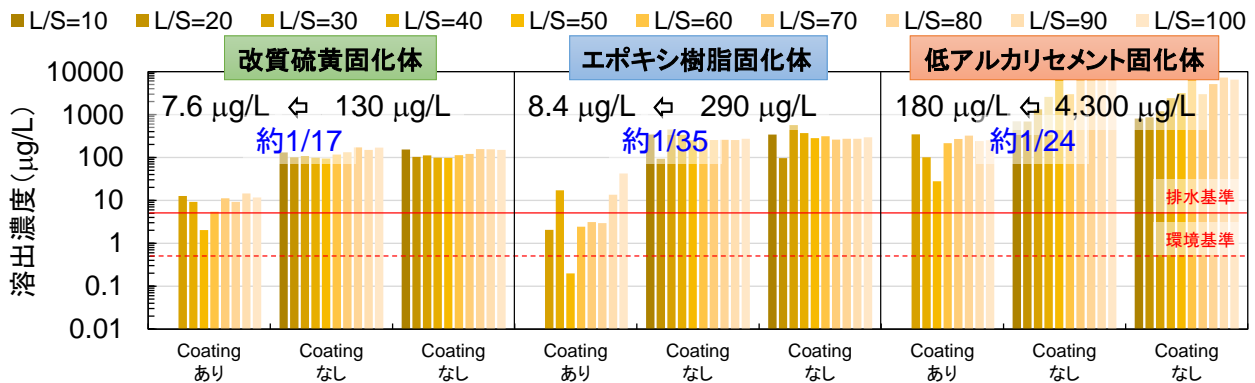


図-1.13 エポキシ樹脂コーティングによる水銀溶出抑制効果

表-1.9 上向流カラム通水試験における累積溶出率 (%)

累積溶出率 (%) (最終L/S)	中性	酸性	アルカリ性	酸化	還元	微生物
MS <sub>50</sub>	0.00000027 (109.4)	0.0000011 (107.5)	0.0022 (107.3)	0.0073 (109.3)	0.0000080 (108.8)	0.00000016 (109.4)
EPR <sub>80</sub>	0.00064 (107.3)	0.00044 (107.2)	0.015 (108.9)	0.19 (108.7)	0.000024 (110.5)	0.0000045 (112.8)
LAC <sub>40</sub>	0.035 (109.4)	0.0010 (106.7)	0.039 (107.9)	0.080 (109.0)	0.00072 (107.1)	0.0035 (107.1)

ことが望ましい。そして、水銀をより安定化させることは、加速環境下での水銀溶出を抑制できることにもつながり、長期安定性の向上に資する。中間処理が適切にできたかを判定するためのヘッドスペース試験では、連続水銀測定装置の使用は操作が簡便であるものの、ヘッドスペース値が高値となった場合には水銀以外の何らかの成分を検出している可能性が示唆されるため、KMnO<sub>4</sub>吸収法、金アマルガム法等の他の方法でも確認しておくことが望ましいといえる。

本検討で行った実験条件による水銀流出の総合評価を表-1.11にまとめた。その結果、改質硫黄固化体を実埋立地内で処分することへの水銀溶出リスクは低く、水銀流出に対する高い安定性を持つことが判った。また、エポキシ樹脂固化体での埋立処分は、準好気性構造の埋立地に処分することでさらなるリスク低減が可能であることが判った。また、低アルカリセメント固化体はアルカリ成分の溶出に伴い水銀溶出が促進する可能性はあるが、埋立実験槽やタンクリーチング試験による結果から、その可能性は低く、埋立管理を十分に行えば、その安定性は十分確保できると考える。以上の結果から、全ての水銀廃棄物の固化体で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が明らかとなった。

表-1.11 水銀廃棄物固化体の埋立処分時の水銀流出性からみた評価

廃棄物	水銀固化体	埋立構造	埋立実験槽		タンクリーチング	溶出試験	総合評価
			浸出水への流出特性	大気拡散			
混合廃棄物	改質硫黄	準好気性	◎	○(低下傾向)	◎	◎	◎
		嫌気性	○(ブランクと類似)	◎			
	エポキシ樹脂	準好気性	◎	○(低下傾向)	◎	○	○
		嫌気性	○(ブランクと類似)	△(1,000前後)			
	低アルカリセメント	準好気性	◎	○(低下傾向)	△	△	△
焼却残渣	改質硫黄	準好気性	◎	○(ブランクと類似)	◎	◎	◎
	エポキシ樹脂		—	—	◎	○	(◎)
	低アルカリセメント		◎	○(ブランクと類似)	○(環境基準以下)	△	○

## 【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

### (1) 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

#### 1) 水銀の健康リスクおよび曝露シナリオの既往知見の整理と優先的に評価すべき範囲の選定

##### 水銀曝露による健康アウトカムおよび曝露経路についての既往の研究知見の集約

メチル水銀の曝露による健康アウトカムの知見の集約の結果、複数の質の高い研究が「胎児期の曝露による小児の神経発達への影響」が最も鋭敏なアウトカムであることを支持していた。また近年、メチル水銀の曝露により心疾患死亡が増加する可能性が示唆されている。

##### 優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定

健康アウトカムとして、① もっとも鋭敏な健康アウトカムであること、② 既存の知見の蓄積があること、③ 無視できないWell-beingへの影響が存在すること、から「胎児期の曝露による小児の神経発達への影響」を優先的に評価すべき健康アウトカムとして選定した。また、その潜在的なリスクの大きさから「心疾患死亡」も健康アウトカムとして選定した。曝露シナリオとして、対象となる人口規模の面から現代の水銀曝露の主要な経路と言えることから、「市場を経由した魚介類の摂取による健康リスク」を優先的に評価すべき曝露シナリオの範囲として選定した。

#### 2) 水銀全球モデルの計算結果に基づく水銀曝露量の計算

##### 海産物中メチル水銀濃度の検証

海産物中メチル水銀濃度の重み付け全球平均濃度の計算値と、実測濃度の全球平均値を比較した。モデル推定濃度はおおむね実測濃度に近い値となったが、栄養段階の大きい海産魚はモデル推定濃度が実測濃度と比べて過少評価となる傾向があった。

##### 国別のメチル水銀平均週間摂取量の推定



平均週間摂取量の上位国は海産物への依存度が高く、赤道付近の小島嶼開発途上国で特に大きくなる傾向がみられた。同様の傾向は実測ベースの先行研究でも確認されている。

3) 健康リスクの推移予測

水銀曝露によるIQ低下量の推移予測

魚介類経由で摂取されるメチル水銀によるIQ低下量の推移予測を図-2.2に示す。この結果から、最大削減のための対策をとった場合には効果が現れるまでにはタイムラグがあるものの、2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は約-1,000万ポイントとなっており、対策によるIQ低下量の削減量は大きいことが示唆された。

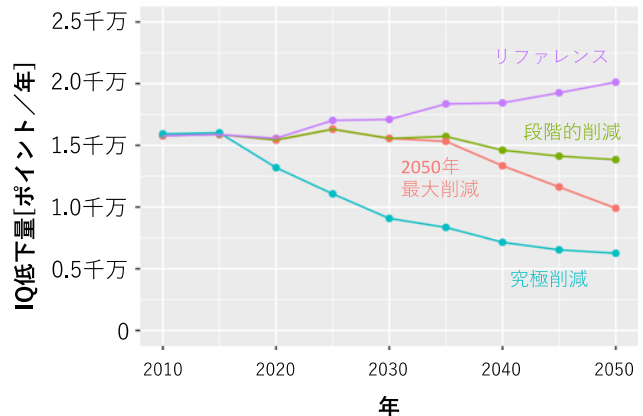


図-2.2 水銀摂取によるIQ低下量の推移予測

水銀曝露による心疾患死亡数の推移予測

魚介類経由で摂取されるメチル水銀による心疾患死亡数の推移予測を図-2.3に示す。2050年最大削減シナリオでは、2035年までは増加が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年には約27,000人/年となった。2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は約-27,000人となっており、対策による心疾患死亡数の改善量は大きいことが示唆された。

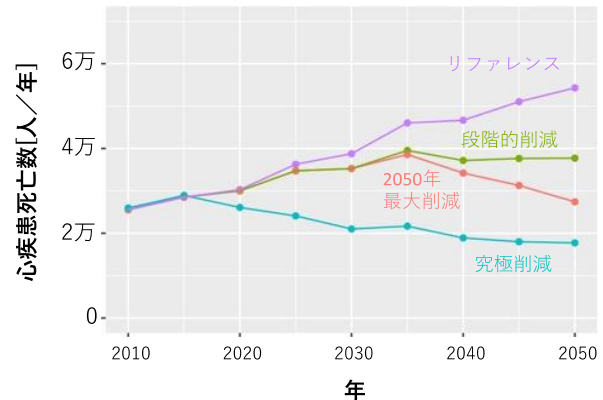


図-2.3 水銀摂取による心疾患死亡数の推移予測

水銀曝露による経済的損失の推移予測

魚介類経由で摂取されるメチル水銀による経済的損失の推移予測を図-2.4に示す。2050年最大削減シナリオでは、2035年までは増加が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年には約2,000億ドル/年となった。2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は約2,000億ドルとなった。3%の割引率を考慮した場合には、リファレンスシナリオでの2050年の損失額は約1,200億ドル/年であった。

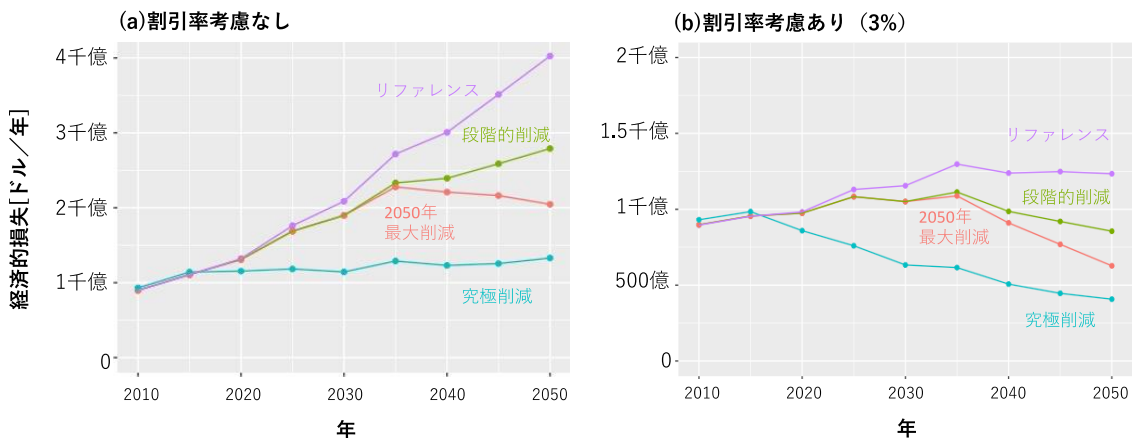


図-2.4 水銀摂取による経済的損失の推移予測

参照値 (WHO耐容週間摂取量) の超過に基づく予測のシナリオ間比較

WHO耐容週間摂取量 (毛髪中水銀濃度換算2.5 μg/g) の超過人口の推移予測については、2050年最大削減シナリオでは、2035年までは横ばい状況が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年には約280万人/年となった。

パラメータ値の不確実性の影響の分析

パラメータ値を変化させた場合の感受性分析の結果から、パラメータ値の設定に依存して経済的損失

の絶対値の予測結果は数倍程度の変化はあるものの、各シナリオの結果の相対的關係は推定パラメータの設定に関わらず比較的に頑健であることが示唆された。

### 健康リスクの推移予測のまとめ

魚介類摂取経路でのメチル水銀による健康リスクについての諸指標の推移予測から、最大削減シナリオに準ずる対策を行うことにより、長期的には大きな効果が見込めることが一貫して示された。また対策の効果が現れるまでにはタイムラグがあることから、できるだけ早期から対策を行うことが重要であることが示唆された。

## (2) 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

### 1) 最終処分施設からの水銀漏出に伴う水銀の環境挙動のモデル化および地域環境や気候変動などによるモデルパラメータの不確実性評価

水銀の環境動態モデルにおけるパラメータについて、既往の知見を収集してその環境依存性、地域依存性を分析した。安定化処理した水銀（硫化水銀）の水銀溶出速度は、硫化水銀の鉱物学的形態（ $\alpha$ -HgSと $\beta$ -HgS）に依存する。本研究にて水銀溶出速度の統計分布を検討した結果、ワイブル分布が最適な分布であると評価された。一方、金属水銀の溶出速度の場合、溶存有機物濃度の影響が大きい。金属水銀の水銀溶出速度は硫化水銀の水銀溶出速度よりも6桁以上大きいため、金属水銀の安定化処理における処理効率が、水銀溶出速度を大きく支配することを見出した。

### 2) 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

気候変動に伴う集中豪雨の頻発化などを再現した降雨シナリオを作成し、埋立地からの水銀排出量に与える影響を評価した。気候変動に伴う降水条件の変化は、特に降水量が多い地域ほど埋立地からの水銀排出量に大きな影響を与えないと結論づけられる。一方、他のパラメータの不確実性の影響は大きく、埋立地からの水銀排出量（100年経過時）は約7桁の変動幅を示す。アジアの各地域における降水条件および魚介類摂取量をもとに、水銀の埋立処分に伴う水銀曝露量（100年経過時）を推定したものを図-2.13に示す。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ていない。10～90パーセントイルでの水銀曝露量が0.01～42.8  $\mu\text{g}/\text{person}/\text{week}$ であり、WHOでの耐容摂取量を超えるケースは5.3%と推定された。水銀の埋立処分における健康リスクにおいて、リスクが懸念される確率に地域性が与える影響は小さいと結論づけられる。

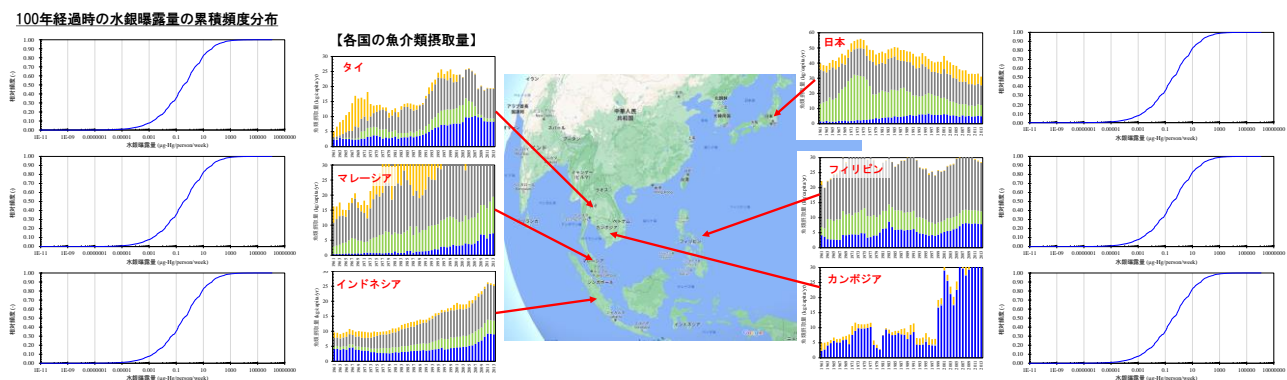


図-2.13 アジア各地域での水銀曝露量分布

### 3) 水銀の最終処分に関する市民的認知の分析

水銀対策に対する優先性は高く認知されており、放射性廃棄物の次に位置していた。水銀の埋立処分における認知的安全性の強さは、不溶化処理>物理的封入>埋立地からの漏出防止対策>モニタリング体制>深度埋立の順であった。不溶化が最も強く安全性が認知されているが、化学的形態変化や鉱物学的形態変化に伴う不溶化への認知的信頼性が高く、セメント固化やガラス固化、樹脂封入などの物理的不溶化への認知的信頼性は低い。不溶化処理で担保されるべき期間（年数）において、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。水銀漏出を検知するモニタリングでは、100年かそれ以上の期間で漏出未検知であることが終了条件として受け入れる場合が多かった。



## 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

環境省令和3年度第1回水銀大気排出抑制対策検討会（2021年8月2日）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を、令和4年度第1回水銀大気排出抑制対策調査検討会において、本研究成果のうち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した。これら検討会において、本研究成果をもとに提供された情報は大気汚染防止法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）に貢献した。

#### 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、本研究成果として、大気汚染防止法による届出データを解析した結果（特に、バイオマス燃焼に関するデータ）を提供し、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した。

#### 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し、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した。

### <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

より詳細な実態解明のためには、排ガス処理装置（可能であれば、単位操作ごと）の入口における水銀濃度測定も併せて実施することが欠かせないことが本研究で明らかとなった。事業者負担もあるため、毎年の更新は難しいとしても、水俣条約の有効性評価に対して強力な科学的エビデンスを提供するためにも、排ガス処理施設の入口における水銀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である。また、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、新たな手法で作成したエポキシ樹脂固化体、従来型のセメント固化体の埋立処分において水銀流出は極めて小さく、水銀廃棄物固化体中の水銀の流出リスクを回避した長期に亘る埋立処分が可能であると推測される。また、今回用いた固化体で硫化水銀の配合率が高かったエポキシ樹脂固化体を採用することで、水銀処分量の増大が見込める。水銀廃棄物は、熱やアルカリ条件に弱いことは既に知られているが、本研究により酸化及び $\text{Na}_2\text{S}$ 条件でも水銀溶出濃度が高くなることが実験的に明らかとなった。埋立処分場内の適正な環境維持に注意が必要である。固化体の粉碎試料において、水銀溶出濃度が高い傾向が見られることから、劣化や地震等によって固化体が崩壊しないような対策、措置が取られることが望ましい。水銀廃棄物ガイドラインに別の固型化方法を追加する際、硫化処理が適切であるかの判定が環告13号溶出試験では不十分である可能性があり、留意が必要である。また、中間処理が適切であるかをヘッドスペース試験で判定する際、連続水銀測定装置で高値となった場合には水銀以外の成分を検出している可能性があるため別の方法で確認することが望ましい。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と考えられる。

#### 3) 全球規模での健康リスクの推移

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が本研究で示された。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。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、早期からの対策を行うことが効果的である。

#### 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は埋立地からの水銀排出量に影響を与えるが、局所的な水銀汚染に伴う健康リスクに与える影響は限定的である。一方、水銀のメチル化反応や生物濃縮の強さなど環境の変動性が大きいパラメータはその不確実性が大きいため、その結果として推定される健康リスク（水銀曝露量）には大きな地域の変動性が現れない。これは水銀の埋立処分に伴う健康リスクが地域に強く依存せずに通ずることを意味しており、日本での埋立処分対策が他の地域（東南アジア等）でも共通して有効な効果をもたらすことが期待される。つまり日本での対策を国際的に共有することが重要である。

#### 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

水銀の埋立処分における安全性は、不溶化処理が最も信頼され、物理的封入や埋立地からの漏出防止対策、モニタリング体制などは相対的に信頼性が低い傾向にある。不溶化処理では水銀の化学的形態や鉱物学的形態を変化させる不溶化処理への信頼性が高く、セメント固化やガラス固化、樹脂封入などの物理的不溶化への信頼性は相対的に低い。不溶化処理で担保されるべき安全期間（年数）が1000年以上であれば、不溶化処理として十分との肯定的な態度変化が最も大きく現れる。水銀漏出を検知するモニタリングにおいて、1日1回以上の頻度を望むケースが最も多く、モニタリングを終了する条件としては「100年間の未検知」で肯定的な態度変化が最も大きく現れる。高頻度かつ長期間のモニタリングを望む傾向が強いため、合意形成にはこの点での認知的安全性をいかに保障していくかが重要である。

### 5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>当初の計画通り、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（表-1.5）をSII-6-2に提供し、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できた（図-2.2～5）。また、テーマ1内でもサブテーマ1から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でのモデル検証につなげた（図-2.9）。</p> <p><u>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知見もSII-6-2に提示し、テーマ2での主要成果の一つであるバイオマス燃焼の水銀排出におけるトレードオフ効果を見出すことに成功した。また、当初計画から拡張して実際のCO<sub>2</sub>分離回収設備での水銀挙動を調査したこと（図-1.5）、新規水銀除去技術の実証試験も併せて実施し、実用化に目途をつけた。これらは当初の目標を上回る成果である。併せて、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、整理した。</u>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においても有効活用されることが期待される。</p> <p>水銀曝露による健康リスクとその推移を予測</p>

	<p>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できた(図-2.1～5)。特に、水銀の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。対策の影響が現れるまでにはタイムラグがあり、早期からの対策が効果的であることを示した。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は、気候変動性、地域依存性が与える影響は他の不確実性の高いパラメータと比べて相対的に小さいことを示した(図-2.10,11,13)。</p>
--	---

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
<p>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。</p> <p>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。</p>	<p>目標を上回る成果をあげた。</p> <p>当初の目標に加え、<u>想定していなかった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に提示し、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。</u>また、<u>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(図-1.5)、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。</u></p> <p>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(表-1.6, 11)。</p> <p>長期安定性評価では改質硫黄、エポキシ樹脂に加えて、<u>低アルカリセメント固化体も評価対象とした(表-1.8, 9)。</u>有機酸の影響評価では、<u>酢酸、タンニン酸の2条件で評価した。</u>模擬実験槽からの実浸出水を用いた<u>タンクリーチング試験も実施した(表-1.7)。</u><u>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した。</u><u>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(図-1.13)。</u>一連の溶出試験結果から、<u>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。</u>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。</p>
サブテーマ2 目標	目標の達成状況

<p>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。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>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できた(図-2.1~5)。</p> <p>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(図-2.2~5)。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。リファレンスシナリオと比較した場合、<u>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(図-2.4)</u>。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を示した。</p> <p>サブテーマ1での研究成果を基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(図-2.10,11,13)。</p>
--	---

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

13件

<主な査読付き論文>

- 1) Habuer, T. Fujiwara and M. Takaoka: Chem. Eng. Trans, 83, 7-12 (2021) Anthropogenic Mercury Release Flow in China (IF=0.760).
- 2) Habuer, T. Fujiwara and M. Takaoka: Chem. Eng. Trans, 89, 301-306 (2021) Environmental impact of anthropogenic mercury release in China (IF=0.760).
- 3) Habuer, T. Fujiwara and M. Takaoka: J. Clean. Prod., 323, 129089 (2021) The response of anthropogenic mercury release in China to the Minamata Convention on Mercury: A hypothetical expectation (IF = 9.297)
- 4) 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).

- 5) Y. Cheng, Y. Asaoka, Y. Hachiya, N. Moriuchi, K. Shiota, K. Oshita, M. Takaoka: J. Hazard. Mater., 423(B), 127186 (2022) Mercury emission profile for the torrefaction of sewage sludge at a full-scale plant and application of polymer sorbent, (IF=14.224)
- 6) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: Data in brief, 42, 108280 (2021) Developing a dataset for the expected anthropogenic mercury release in China in response to the Minamata convention on mercury (IF=0.131).
- 7) 山田裕史, 松浦雄之介, 高岡昌輝, 日下部武敏, 吉川正晃: 環境衛生工学研究, 36(1), 8-14 (2022)、活性炭素繊維を用いた廃棄物焼却炉排ガスからの水銀除去
- 8) M. Takaoka, T. Kusakabe, K. Shiota, O. Hirata, K. Kawase, R. Yanase, and K. Nitta: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) Microscopic synchrotron X-ray analysis of mercury waste in simulated landfill experiments (IF=3.579)
- 9) F. Takahashi: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) The impact of cognitive aversion toward mercury on public attitude toward the construction of mercury wastes landfill site (IF=3.579)
- 10) F.Takahashi, A.Sano, R.Yanase, A.Matsuyama, M.Takaoka: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) 100-year simulation of mercury emissions from landfilled stabilized mercury waste (IF=3.579)

## 6-2. 知的財産権

- 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

## 6-3. その他発表件数

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

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究者略歴

研究代表者

高岡 昌輝

京都大学工学部卒業、博士（工学）、現在、京都大学大学院工学研究科教授

研究分担者

- 1) 目下部 武敏  
岡山大学環境理工学部卒業、博士（工学）、現在、京都大学大学院工学研究科助教
- 2) 柳瀬 龍二  
福岡大学工学部卒業、博士（工学）、現在、福岡大学環境保全センター教授
- 3) 佐野 彰（2020年4月1日～2020年12月24日）  
名古屋大学工学部卒業、博士（工学）、福岡大学工学部助教
- 4) 平田 修（2021年2月1日～2023年3月31日）  
イタリア国立パドヴァ大学工学部卒業、博士（学術）、現在、福岡大学環境保全センター助教
- 5) 高橋 史武  
東京大学工学部卒業、博士（工学）、現在、東京工業大学環境・社会理工学院准教授
- 6) 林 岳彦  
東北大学理学部卒業、博士（理学）、現在、国立環境研究所社会システム領域主任研究員



## II. 成果の詳細

### II-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

国立大学法人 京都大学

大学院工学研究科 都市環境工学専攻

高岡昌輝

大学院工学研究科 都市環境工学専攻

日下部武敏

福岡大学

環境保全センター

柳瀬龍二

環境保全センター

佐野 彰 (2020年4月1日～2020年12月24日)

環境保全センター

平田 修 (2021年2月1日～2023年3月31日)

<研究協力者>

国立大学法人 京都大学

程英超 (令和4年度)

福岡大学

川瀬敬三

国立大学法人 岡山大学

藤原健史、哈布尔

#### [要旨]

本プロジェクトの最初の段階として、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・排出係数等について、業界団体や企業に対するヒアリング調査、最新のデータベース、論文等を調査して各国あるいは地域の水銀排出レベルの将来的な変化等を評価・整理して、SII-6-2グループに提供した。特にバイオマス燃焼が気候変動対策とともに増加することから基礎情報を整理した。今後気候変動対策とともに導入が増加すると考えられるCO<sub>2</sub>分離回収設備について2つの実施設での調査を行うとともに、ラボ試験によりCO<sub>2</sub>分離回収設備での水銀挙動を明らかにした。実施設では50%程度の除去率が期待された。水銀に特化した技術としては添着活性炭及び添着活性炭繊維を開発、それぞれ特許出願及び後者については都市ごみ焼却施設における実証試験を行い、ピークカットに利用可能であることを示した。最終的な水銀のシンクとしては水銀廃棄物の管理が不可欠であることから、水銀廃棄物の長期管理手法としての知見を集積することを目的に、水銀廃棄物ガイドラインに準じて処理された改質硫黄固化体とガイドライン以上に安定性を強化したエポキシ樹脂固化体、さらに従来の低アルカリセメント固化体を対象に、実験的検討を行った。また、これらの固型化手法の見直しも同時に実施した。実埋立環境を再現するために、埋立実験槽(充填物:燃え殻+汚泥堆肥、燃え殻のみ)を用いた長期的な模擬実験と実浸出水を用いた溶出試験を実施した。さらに、様々な加速環境下での水銀固化体の安定性について、pH、酸化還元電位(ORP)、無機塩、有機酸、温度、微生物といった因子の影響を連続バッチ溶出試験や上向流カラム通水試験で評価した。模擬埋立槽を用いた結果、全ての水銀廃棄物の固化体で混合廃棄物や焼却残渣と埋立処分を行っても固化体から水銀が系外へ流出する可能性は低かった。加速溶出試験では、改質硫黄固化体とエポキシ樹脂固化体は、低アルカリセメント固化体より多くの因子に対して水銀安定性が高いことが示されたが、アルカリ、酸化、Na<sub>2</sub>Sは水銀溶出に大きく影響を与えることがわかった。また、エポキシ樹脂コーティングによる固化体の補強と水銀封じ込めはいずれの固型化法においても有効な追加対策として確認された。

#### 1. 研究開発目的

サブテーマ1においては、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・評価することを目的として、まず、人為的活動下における大気への水銀制御技術に関する調査を行う。様々な発生源からの水銀制御に関する将来予測に必要な基礎的情報(排出係数等)を整理、あるいは実験的に求

めて、テーマ2 (SII-6-2) のインプットデータとする。また、一方で、利用されなくなった水銀や排ガス、排水から除去された水銀は有害廃棄物として扱われ、処理・処分・管理施設の設置がいずれの国においても必要である。したがって、水銀廃棄物の最終処分に関する模擬環境下及び加速試験による検討から長期管理手法としての知見を集積する。得られたデータはサブテーマ2の水銀廃棄物最終処分施設の健康リスク評価のインプットデータとする。

## 2. 研究目標

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。

## 3. 研究開発内容

### 3-1 人為的活動下での水銀制御技術の整理と将来予測

既存の水銀制御技術については、水俣条約の規制対象5発生源（石炭火力発電所、産業用石炭燃焼ボイラー、非鉄金属製造施設、廃棄物焼却設備、セメントクリンカー製造施設）について水俣条約でのBAT/BEPガイドライン、UNEPツールキット、Global Mercury Assessment 2018のTechnical Background Report、EUのBAT参照文書、最新論文等を参考にしながら、日本における規制後の最新の水銀排出施設データを集め、排出係数を技術ごとに整理した。本研究では、非鉄金属は鉛、亜鉛及び銅を対象とした。規制対象5発生源については、2050年までのより詳細な技術導入率を推計するため、業界団体や企業に対するヒアリング調査、最新のデータベース、論文等を調査して各国あるいは地域の水銀排出に関わる国グループの将来的な変化を推計した。国グループとは当該国の経済状況や技術レベルを反映したもので、一般的な大気汚染制御設備（APCDs）及び水銀制御技術の導入率すなわち水銀除去率を規定するもので、水銀大気排出量の推計に用いられる。規制対象外の発生源として鉄鋼及びバイオマス燃焼については、文献調査に基づいて原燃料中水銀濃度や水銀制御技術の現状整理及び将来推計を行った。介入シナリオの策定に必要なこれらの基礎的情報を排出係数（原燃料中水銀濃度）、技術個票（技術あるいは技術の組合せごとの水銀除去率、初期費用、O&M費用等）、技術普及シナリオ（国グループごとの技術導入率、国グループの2050年までの将来推計）として整理したものをテーマ2に提示した。

将来の水銀制御技術については、カラム吸着試験等によって高機能化処理剤（活性炭のべ32種類、活性炭素繊維1種類）の10%破過吸着量を評価した。無添着炭及び市販の水銀除去用活性炭を比較対象として、無機塩類（塩化物等）や有機系キレート類を添着した活性炭を調整して供試した。添着活性炭素繊維（ACF）は、都市ごみ焼却施設のバグフィルタクリーンルームに設置することを想定した実炉排ガスをを用いた実証試験を実施して水銀排出低減効果を評価した。新規技術について、気候変動対策として将来の導入が見込まれる二酸化炭素分離回収・利用・貯留（CCUS）技術に着目し、基礎的なラボ実験によりアミンを用いた化学吸収法における水銀の排出低減効率を評価した。本研究で使用したアルカノールアミン類は二酸化炭素分離回収（CC）のベンチマークとして用いられている2-aminoethanol（MEA）で、30wt%水溶液を基本条件とした。ラボ実験では、MEA濃度を変化させて $Hg^0$  loadingを求め、 $Hg^{2+}$ 吸収プロファイルから30wt% MEA水溶液の $Hg^{2+}$ 吸収率を評価した。次に、国内で稼働しているCCUS設備等で水銀挙動調査（2カ所）を行った。国内の都市ごみ焼却施設で唯一 $CO_2$ 分離回収（CC）設備が稼働している佐賀市清掃工場において水銀挙動調査を実施した（図-1.1）。佐賀市清掃工場の排ガス処理の特徴はバグフィルタを二段備えている点にあり、活性炭/消石灰噴霧も行われている。その後、CC設備の排ガス前処理設備

で湿式スクラバーで塩化水素を取り除き、CO<sub>2</sub>吸収効率を高めるため冷却器で排ガス温度を下げた排ガスが吸収塔に供給されている。吸収塔ではアミン系吸収液を採用しており、吸収塔の入口と出口それぞれに形態別水銀連続測定装置MS-1A/DM-6B（日本インストルメンツ）を設置し、3週間の水銀挙動を調査した。もう一カ所はクリーンプラザふじみで稼働中のCO<sub>2</sub>分離回収実験プラントで、同様の水銀挙動調査を実施した。

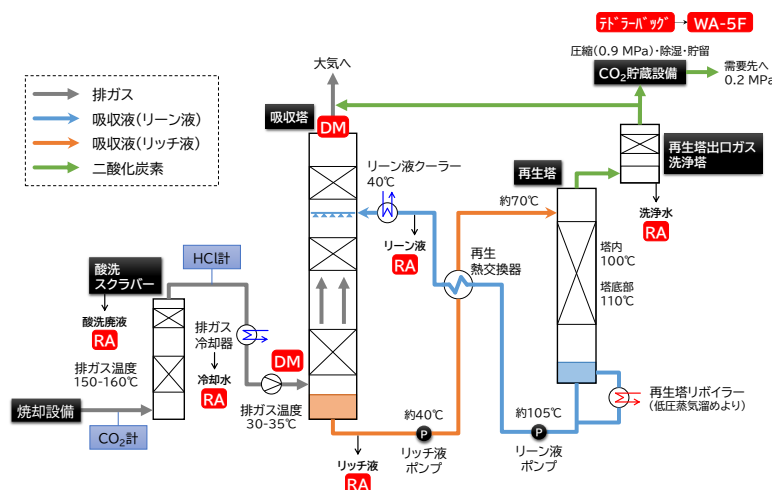


図-1.1 佐賀市清掃工場・CO<sub>2</sub>分離回収設備における水銀挙動調査（概要）

### 3-2 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

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模擬埋立実験及び複数の加速溶出試験で検討し、最終処分場からの系外への水銀流出をできる限り抑制可能な長期保管手法を提案した。また、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に提示し、健康リスクの将来予測に貢献した。

以下に、まず、模擬埋立実験及び加速溶出試験に共通する水銀固化体の検討方法を示す。模擬埋立実験及び加速溶出試験で使用した廃水銀等処理物（固化体）は、年度ごとに振動ボールミルで硫化処理された硫化水銀 (HgS<sub>2020</sub>、HgS<sub>2021</sub>、HgS<sub>2022</sub>) を使用し、年度ごとに3種類の結合材（改質硫黄、エポキシ樹脂、低アルカリセメント）で固型化した。改質硫黄固化体 (MS<sub>50</sub>) は、水銀廃棄物ガイドラインに準拠して作製した (HgS含有率50wt%) (写真-1.1)。前回の環境研究総合推進費3-1701「廃水銀処理物の長期適正処理のための地上保管対策に関する研究 (2017~2019年度)」で開発したエポキシ樹脂固化体 (EPR<sub>80</sub>) は上西らの方法に従い、HgS含有率が80wt%となるようにビスフェノールA型エポキシ樹脂で固型化処理を行った (写真-1.2)。当初計画していなかったが、低アルカリセメント (アーウィン系、3CaO・3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・CaSO<sub>4</sub>) を用いて固化体 (HgS含有率40wt%) を作製して追加評価した (写真-1.3)。セメント固型化は有害廃棄物の封じ込めで実績があり、固型化が簡便で、かつアルカリ条件で水銀が溶出しやすいことから、低アルカリセメントを用いた固型化によって水銀溶出の低減を狙ったものである。



写真-1.1 MS<sub>50</sub>



写真-1.2 EPR<sub>80</sub>



写真-1.3 LAC<sub>40</sub>

固型化に使用した硫化水銀は、環告13号溶出試験（基準値：5 μg/L以下）、ヘッドスペース試験（基準値：1 μg/m<sup>3</sup>未満）、X線回折法 (XRD) により評価した。3種類の固化体は、水銀廃棄物ガイドラインに規定されている一軸圧縮強度試験（基準値：0.98 MPa以上）、環告13号溶出試験、ヘッドスペース試験（固化体、固化体の粉砕物）に加え、タンクリーチング試験（基準値：0.5 μg/L以下）（固化体）や三次元スキャナによる固化体の外表面積と体積の計測を実施した。固化体の粉砕物は環告13号溶出試験に準拠し、固化体を圧縮破壊した後、ワンダーブレンダーを用いて粉砕し、ステンレス製ふるいを用いて粒径を0.5 mm以上5 mm以下に調整した（以下、粉砕物）。ヘッドスペース試験は可搬型水銀測定装置EMP-2（日本インストルメンツ）を使用し（EMP-2法）、EPR<sub>80</sub>等の一部のサンプルではKMnO<sub>4</sub>吸収法により評価した。最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査には2020年度に作製した固化体を、加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価には年度ごとに作製した固化体及びその粉砕物を供した。1年目のHgS<sub>2020</sub>の環告13号溶出試験結果は不検出（< 0.02 μg/L）であったが、HgS<sub>2020</sub>を使用したEPR<sub>80</sub>の環告13号溶出試験では高い水銀溶出濃度が検出された。その原因を探るため、仕込み量、混練

方法、投入順、硬化温度条件、遊星ボールミルによる追加硫化処理の影響を調べた。

### 3-2-1 最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査

前回の環境研究総合推進費「廃水銀処理物の長期適正処理のための地上保管対策に関する研究（2017～2019）」より得られた研究成果を踏まえ、埋立構造（準好気・嫌気）で設計された埋立実験槽（充填物：燃え殻+汚泥堆肥、燃え殻のみ）を組み立て、水銀廃棄物ガイドラインに準じて処理された改質硫黄固化体とガイドライン以上に安定性を強化したエポキシ樹脂固化体、さらに従来の低アルカリセメント固化体を対象に水銀等処理物の埋立実験を行った。

また、固化体から流出してくる水銀の溶出挙動を調べるため、これらの埋立実験槽から発生する実浸出水を用いて、連続バッチ溶出試験（タンクリーチング試験）を実施し埋立実験槽の結果と比較検討を行った。さらに、25ヵ月後に実験槽を解体し実験槽内での水銀廃棄物の配置から見た水銀流出ポテンシャルを把握し、水銀溶出に寄与する埋立環境要因とその長期的なリスクを整理し、安定化処理技術によるリスク低減を評価した。

#### (1) 模擬埋立実験槽を用いた水銀廃棄物固化体からの水銀流出評価

既存研究で、水銀を不溶化した黒色硫化水銀を用いて、3種類の埋立手法で約6年に亘る埋立実験を行った結果、埋立地における水銀の環境リスクを低減させる最適条件は、黒色硫化水銀のセメント固化体を、準好気性埋立地の中層部に処分する手法であった。そこで、水銀廃棄物の埋立処分において、さらなる水銀の流出リスクの低減化手法を検討するため、作成手法の異なる2種類の水銀廃棄物固化体（改質硫黄固化体、エポキシ樹脂固化体）を加えて、さらに25ヵ月間の長期埋立実験を行い、浸出水や大気中への水銀流出挙動、さらに埋立実験槽解体後の充填廃棄物を用いた固化体からの水銀溶出挙動について調査を行った。

#### 1) 実験条件

水銀廃棄物を埋立処分する基本条件は、既存研究より得られた研究成果を踏まえ、水銀廃棄物ガイドラインに準じて処理された改質硫黄固化体とガイドライン以上に安定性を強化したエポキシ樹脂固化体、さらに従来の低アルカリセメント固化体を対象に3種類の固化体（写真-1.1～1.3）と2種類の埋立構造（準好気性・嫌気性）、さらに2種類の充填廃棄物を組み合わせた埋立実験を開始した。定期的な散水管理下で、モニタリングや大気拡散ガス・浸出水サンプリングを進め、水銀濃度を含むガス分析や水質分析データを収集した。

本実験の埋立条件を表-1.1に示す。水銀廃棄物の埋立実験は10基の実験槽を設置し、混合廃棄物（焼却残渣80%+汚泥肥料20%）を充填したNo.1～No.7までの埋立実験槽と、焼却残渣のみを充填したNo.8～No.10に分かれる。水銀廃棄物として①改質硫黄固化体を「混合廃棄物」に充填した槽（No.1, No.5）と「焼却残渣」に充填した槽（No.8）、②エポキシ樹脂固化体を「混合廃棄物」に充填した槽（No.2, No.6）、③低アルカリセメント固化体を「混合廃棄物」に充填した槽（No.3）と「焼却残渣」に充填した槽（No.9）の3パターンの水銀廃棄物の埋立方法を採用した。また、比較対象として固化体を充填していない条件の「空白槽」（No.4, No.7,

表-1.1 水銀廃棄物の埋立条件

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 汚泥肥料: 7.2 単固体積重量: 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
混合廃棄物 嫌気性	No.4 ブランク	焼却残渣: 27.9 汚泥肥料: 7.0 単固体積重量: 1.25kg/L	0.077	—	—	0.079
	No.5 改質硫黄固化体			1046.4	450.998	451.075
	No.6 エポキシ樹脂固化体			1213.7	836.968	837.045
焼却残渣 準好気性	No.7 ブランク	焼却残渣: 42.3 単固体積重量: 1.50kg/L	0.113	—	—	0.077
	No.8 改質硫黄固化体			985.8	424.880	424.993
	No.9 セメント固化体			1093.7	377.108	377.221
焼却残渣 嫌気性	No.10 ブランク			—	—	0.113

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

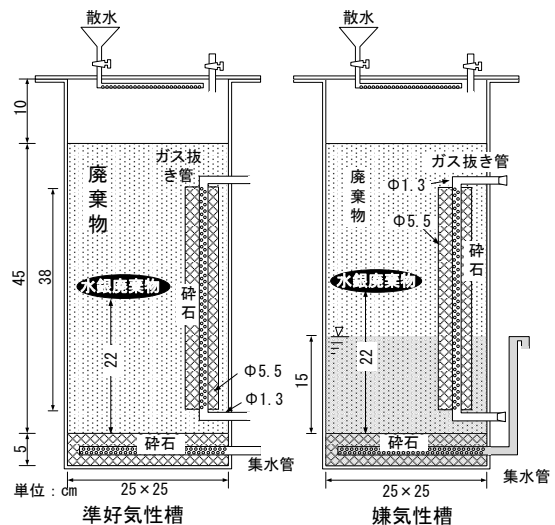


図-1.2 水銀廃棄物の埋立槽図



No. 10) も設置した。使用した埋立実験槽の概要図を図-1.2に示した。埋立実験は塩ビ製の実験槽 (25cm × 25cm × 60cm) を使用し、埋立密度は実際の焼却残渣主体の処分場の値を参考に1.2t/m<sup>3</sup>とした。埋立構造は準好気性埋立と嫌気性埋立 (常時15cm滞水) を採用し、散水条件は福岡市の年降水量1600mm/年を参考に、日平均降雨量5mm/日を2回/週にまとめて散水した。また、実験槽底部から流出した浸出水の水質分析と実験槽上部に設置したガス抜き管 (測定時のみコックを開) から大気拡散した気化水銀の分析を1回/月の頻度で実施した。メンブレンフィルターでろ過した浸出水サンプルは、総水銀、メチル水銀 (4ヵ月/回) や各種水質分析 (pH、COD<sub>Mn</sub>、Cl<sup>-</sup>) に供した。気化水銀の測定は実験槽上部の空間部 (6.25L) に発生した気化水銀を吸引ポンプで吸引し (10L : 0.5L/分×20分)、水銀捕集管に捕集した。水銀分析は日本インスツルメンツ製加熱気化全自動水銀測定装置MA-3000を使用した。

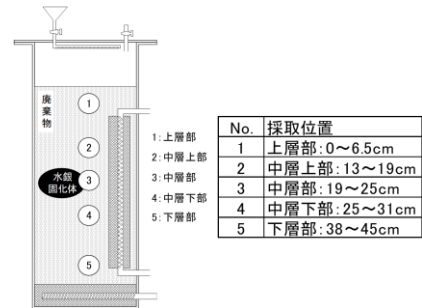


図-1.3 解体廃棄物の採取位置

2) 埋立実験槽の解体

埋立実験槽を実験開始から25ヵ月経過後に解体し、埋立廃棄物及び水銀廃棄物固化体を回収した。埋立廃棄物の試料採取位置は、実験槽上部から、上層部、中層上部、中層部、中層下部、下層部の5ヵ所とした (図-1.3)。ただし、中層部はブランク槽のみの回収で、水銀固化体のある実験槽は回収していない。採取した試料は総水銀 (含有量試験)、溶出試験及び気化水銀発生試験に供した。

(2) タンクリーチング試験による水銀廃棄物固化体中の水銀流出特性

水銀廃棄物固化体の埋立地内部でのさらなる安全性を確認するため、前述した固化体を浸出水に浸漬させるタンクリーチング試験を連続的に行った。

タンクリーチング試験では未洗浄の固化体3種を、模擬埋立実験槽から発生した浸出水に液固比L/S = 10L/kg (溶媒5L、固化体約500g) で保管容器内に浸漬させた (表-1.2参照)。保管容器は恒温器内 (20℃設定) に設置し、3ヵ月 (1サイクル) の頻度で浸出水を交換した。使用した浸出水は長期埋立実験で得られたNo. 4 (以下、混合・嫌気と略す) と、No. 10 (以下、焼却・準好気と略す) の2種類を用いた。浸漬開始時に分析した浸出水の水質と、3ヵ月後の浸出水の水質を比較して検討した。3ヵ月後に浸出水を新しく準備したものと全量交換し、固化体は同じものを使用して実験を続けた。浸出水は、水質試験法を基に pH、EC、ORP、COD<sub>Mn</sub>等を分析した。また、水銀測定装置 (MA-3000/RH-MA3、日本インスツルメンツ) により浸出水の水銀濃度を測定した。本実験では6サイクル (18ヵ月) の期間で行った。

表-1.2 タンクリーチング実験条件

種類	固化体 (溶質)				浸出水 (溶媒)			水銀総量 (g)
	重量 (g)	容積 (cm <sup>3</sup> )	表面積 (cm <sup>2</sup> )	水銀量 (g)	種類	充填量 (L)	水銀量 (mg)	
改質硫黄	541.8	194.1	195.24	270.90	混合廃棄物・嫌気性槽 (混合・嫌気)	5.0	0~0.01	270.90
エポキシ樹脂	650.0	192.1	195.71	520.00				520.00
低7μカリセメント	534.2	214.6	205.04	213.68				213.68
ブランク	-	-	-	-	焼却残渣・準好気性槽 (焼却・準好気)	5.0	0~0.0015	-
改質硫黄	543.0	193.5	195.24	271.50				271.50
エポキシ樹脂	656.7	192.9	195.71	525.36				525.36
低7μカリセメント	552.0	228.5	205.04	220.80				220.80
ブランク	-	-	-	-	-	-	-	-

3-2-2 加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価

廃水銀等処理物 (水銀廃棄物固化体) の長期安定性評価のため、ISO 21268-3/-4、USEPA LEAF Method 1314/1315、タンクリーチング試験等を参考にして、固化体に対して連続バッチ溶出試験を、粉砕物に対して上向流カラム通水試験を実施した。本研究で評価した影響因子はpH、酸化還元電位 (ORP)、無機塩、有機酸、温度、微生物で、微生物以外の因子については、濃度や温度の負荷を高く設定することで最終処分場で考えられるよりも加速条件下での水銀溶出挙動を評価した (表-1.3)。実際の埋立環境や予備検討の結果、酸性条件はHNO<sub>3</sub>ではなくH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>に、酸化条件はAirではなくH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>に、還元条件はN<sub>2</sub>曝気ではなくN<sub>2</sub>H<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>曝気に変更した。DOM (有機酸) については、厨芥類との混埋立を想定した酢酸と、安定化した土壌 (覆土) の有機物を想定したタンニン酸の2条件とした。微生物影響は、連続バッチ溶出試験 (無曝気-静置系) では維持が難しいと判断し、実際の埋立処分場から採取した土壌 (覆土) の水抽出液を空気曝気しながら上向流カラム通水試験に供することで評価した。最終処分後に懸念される事態の一つは、

地震や津波、洪水等によって最終埋立処分された水銀廃棄物固化体が地表に露出あるいは流出し、さらに物理的に破壊されることである。想定しうる悪条件下での水銀溶出挙動を、加速環境下での上向流カラム通水試験によって評価した。

酒井らによれば、一般廃棄物埋立地での試算としてL/Sが10に達するには17～40年程度かかり、オランダのアベイラビリティ試験 (NEN 7341) ではL/S = 100で500年程度の影響を把握できる<sup>1)</sup>。本研究では、L/S = 100が500年間の影響評価に相当すると設定した。連続バッチ溶出試験 (N = 2) ではL/S = 10の28日間溶出試験を10回繰り返すことによって、上向流カラム通水試験 (N = 1) では粉碎物を充填したガラスカラムにL/S = 100を超えるまで試薬溶液を通水することによって、水銀廃棄物固化体の500年程度の長期安定性を評価した。試験温度は20.0℃を基本とした。水銀分析の前処理として、0.45 μm PTFEフィルターを用いたろ過と適宜希釈を行った。溶出サンプルの水銀測定には還元気化水銀測定装置RA-4300 (日本インスツルメンツ) を用い、マトリクスの影響が強かった条件 (Na<sub>2</sub>S、タンニン酸) の溶出サンプルは加熱気化水銀測定装置MA-3000 (日本インスツルメンツ) を使用した。RA-4300測定の検出限界値 (MDL) 及び定量下限値 (MQL) はそれぞれ0.02 μg/L及び0.05 μg/Lであった。本研究では水銀溶出濃度がMDL (0.02 μg/L) 以上の数値はそのまま使用し、水銀溶出率の算出ではMDL (0.02 μg/L) 未満の場合はMDLの1/2 (0.01 μg/L) とした。水銀溶出濃度の高かった酸化条件については、3種類の固化体をエポキシ樹脂でコーティングして、連続バッチ溶出試験 (N = 1) によりその有効性を検証した。水銀溶出濃度の高かった条件については、連続バッチ溶出試験後の固化体に対してSEM-EDSによる断面観察及び元素分析を実施した。京都大学の実験室内で保管していた過去に実施したタンクリーチング試験のサンプルを分析し、それらの長期安定性評価を追加で実施した。

また、粉碎物については環告13号溶出試験においても表-1.4に示す条件で、水銀溶出傾向を確認した。13号試験で埋立地から発生する浸出水のpHを弱酸性からアルカリ性までの範囲で想定し、pHの影響試験ではpHを3～11の範囲で変化させた。また、金属水銀は酸化剤 (FeCl<sub>3</sub>等) が存在するとイオン化する特性を有し、最終処分場に埋立処分される埋立廃棄物中には、鉄イオンや塩化物イオンなど酸化剤となり得る物質が存在することから、酸化剤としてFeCl<sub>3</sub>を用いて溶出試験を行った。

表-1.3 試薬溶液の条件

影響因子	条件	
pH	NEU	中性 (H <sub>2</sub> O)
	ACD	酸性 (5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
	ALK	アルカリ性 (5% NaOH)
ORP	OXI	酸化 (3% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
	RED	還元 (0.1% N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> +N <sub>2</sub> パーズ)
無機塩	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
	NaCl	5% NaCl
	Na <sub>2</sub> S	0.5% Na <sub>2</sub> S
有機酸	ACE	5% 酢酸
	TAN	5% タンニン酸
温度	T20	20℃ (H <sub>2</sub> O)
	T45	45℃
	T70	70℃
微生物	土壌微生物 (覆土の水抽出液)	

表-1.4 溶出試験条件

供試溶液	共存イオン	濃度 (mg/L)				
pH (3, 5, 7, 9, 11)	HCl	-				
	NaOH					
酸化剤	FeCl <sub>3</sub>	100	300	500	1000	2000

※環告13号試験に準ずる (試料粒径範囲: 0.5～5mm)

## 4. 結果及び考察

### 4-1 人為的活動下での水銀制御技術の整理と将来予測

水俣条約・附属書Dで規定されている主要5発生源について、整理した水銀制御技術の概要を表-1.5に示す。分野ごとに情報の質と量に偏りがあり、文献等の公開情報だけでは入手が困難な実情をヒアリング調査で補完、補強することで、水銀制御技術の現状を整理した。最新の日本における水銀排出施設データを解析して、技術ごとの除去率を明らかにした。図-1.4には、一例として石炭燃焼分野における技術ごとの除去率を示した。

ヒアリングによれば、環境対策 (APCDsの更新) は水銀対策にもなっていることが明らかとなった。石炭燃焼、廃棄物、セメント、非鉄金属分野では、ヒアリング調査や一人当たりのGDP、最新データベースから国ごとあるいは地域の水銀抑制技術の導入率 (Country group) の将来推計を行った。UNEPでは考慮されていない非鉄金属分野の二次製錬 (リサイクル) は、二次製錬の技術個票とTechnology profileを作成した。これらの基礎的情報を排出係数、技術個票、技術普及シナリオとして整理したものをSII-6-2へ提示し、介入シナリオの策定に貢献した。また、中国が最大の水銀排出国であることから、研究協力者とともに中国の排出技術や係数などの精査も行った。今後の規制対象外発生源の一つとして火葬炉があるが、基本的な導入率などを調査するとともに過年度の排ガス処理データについても再解析を行った。



水俣条約の規制対象外の鉄鋼分野については、京都大学での過去の研究成果をSII-6-2へ提供するとともに、文献情報から排出係数を整理しSII-6-2へ提示した。気候変動対策として石炭のバイオマス系燃料への転換が進められており、その排出係数(Wood系とCrop residue系)を整理してSII-6-2へ提示した。

表-1.5 水銀制御技術の概要

	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, ダストシャドリング, 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)	<ul style="list-style-type: none"> <li>排ガス中水銀濃度の測定結果、処理施設、原燃料、届出情報 他</li> <li>208施設データ</li> <li>石炭火力発電所 153施設</li> <li>産業用石炭燃焼ボイラー 55施設</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>147施設データ(銅、亜鉛、鉛)</li> <li>一次製錬 35施設</li> <li>二次製錬 112施設</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3,571施設データ</li> <li>一般廃棄物 2,290施設</li> <li>産業廃棄物 1,003施設</li> <li>下水汚泥 272施設</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>53施設データ</li> </ul>

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.

将来の水銀制御技術として、カラム吸着試験等による高機能化処理剤を評価した結果、最も10%破過吸着量が高かったのはCaCl<sub>2</sub>を添着した処理剤で、その吸着量は153 mg/gで、市販の水銀除去用活性炭のそれ(46 mg/g)の3倍以上の処理剤を開発できた。ヨウ化カリウム(KI)を添着した活性炭素繊維(KI添着ACF)は同様のラボ試験により10%破過吸着量は285 mg/gと評価され、高い吸着能が確認された。そこで、KI添着ACFのユニットを都市ごみ焼却施設内に設置したところ、平均水銀除去率は52.9%であった。本実証試験では通風抵抗を考慮してKI添着ACFユニットの充填率を40%程度に設定したことを踏まえると、高い水銀除去性能を発揮したと言える。試算によると、一般的な都市ごみ焼却施設であれば5年以上の耐用が見込めた。

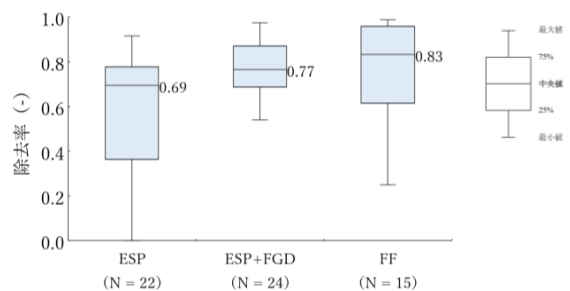


図-1.4 国内データに基づいた技術ごとの水銀除去率(石炭燃焼)

Hg<sup>0</sup>のアミン吸収実験において、Hg<sup>0</sup> loadingを求めるため、MEA濃度を0wt%から50wt%まで変化させて水銀吸収量をプロットした。その結果、Hg<sup>0</sup> loadingは6.1×10<sup>-11</sup> mol-Hg<sup>0</sup>/mol-MEAと求まり、MEAとHg<sup>0</sup>は特異的な相互作用をせず、MEA水溶液によるHg<sup>0</sup>の吸収は物理吸収プロセスと考えられた。30wt% MEA水溶液によるHg<sup>2+</sup>吸収プロファイルから水銀吸収率を計算すると76%となった。新規技術であるCC技術(アミン化学吸収法)における水銀挙動を形態別にラボ実験によって評価できた。Hg<sup>0</sup>はアミン吸収液にはほとんど吸収されない一方、Hg<sup>2+</sup>はアミン吸収液に吸収されたことから気候変動対策としてCCUSが導入されると水銀大気排出削減の共便益効果が期待できる。

佐賀市清掃工場・CO<sub>2</sub>分離回収設備における調査期間中、1回だけ吸収塔入口で水銀排出イベントを捉え、検出されたピークトップの水銀濃度は14.2 μg-Hg<sup>0</sup>/m<sup>3</sup>及び0.3 μg-Hg<sup>2+</sup>/m<sup>3</sup>であった(図-1.5)。入口、出口のプロファイルから吸収塔における水銀(Hg<sup>0</sup>)除去率を計算すると41%であった。なお、Hg<sup>2+</sup>は排ガス処理設備や酸洗スクラバー、冷却器でほとんどが除去され、ベースライン(約0.2 μg-Hg<sup>2+</sup>/m<sup>3</sup>)との切り分けが困難であった。佐賀市清掃工場(活性炭・消石灰噴霧+バグフィルタ2段)のように排ガス処理で水銀濃度が低減されていれば、主な存在形態がHg<sup>0</sup>であってもCC設備において約40%の更なる水銀除去

が見込めることが明かとなった。クリーンプラザふじみでの調査において吸収塔入口で2回の水銀ピークを捉え、検出されたピークトップにおける総水銀濃度は2.4  $\mu\text{g-Hg}^T/\text{m}^3$ 及び2.9  $\mu\text{g-Hg}^T/\text{m}^3$ であった。入口、出口のプロファイルから吸収塔における水銀 ( $\text{Hg}^T$ ) 除去率を計算するとそれぞれ47%及び65%であった。本研究において2ヵ所で実施した水銀挙動調査の結果をまとめると、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% (算術平均) の更なる水銀除去が見込める。したがって、全国の一般廃棄物焼却施設において気候変動対策としてCCUS設備が導入されると、共便益効果として水銀大気排出量を半減できる計算となり、決して少なくない数字と言えよう。なお、今回の現地調査で捉えられたイベント数が限られること、投入ごみ質やアミン吸収液の劣化の程度によって結果が変わる可能性があることに留意が必要である。

吸収塔における水銀イベント(12月4日)

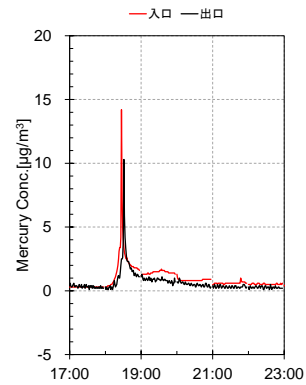


図-1.5 佐賀市清掃工場CO<sub>2</sub>分離回収設備の吸収塔におけるHg<sup>0</sup>濃度の経時変化

#### 4-2 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

##### 4-2-1 最終処分模擬環境下での水銀廃棄物の挙動調査

###### (1) 模擬埋立実験槽を用いた水銀廃棄物固化体からの水銀流出評価

###### 1) 実験槽からの排水水銀

図-1.6に25ヵ月間の埋立期間における浸出水中の水銀濃度の経時変化を示す。実験開始時に水銀の排水基準である0.005mg/Lを超えて溶出したのは嫌気性埋立構造を採用した混合廃棄物からの浸出水のみであった。しかし、その傾向は同様に水銀廃棄物固化体を充填していないブランク槽でも確認されたことから、充填した混合廃棄物からの溶出による影響と考える。また、それ以外の実験槽においても実験開始から4ヵ月までは水銀の環境基準0.0005mg/Lを超える濃度が検出されているが、これらも上記同様にブランク槽と類似した濃度を示していることから、水銀固化体から浸出水中への水銀溶出の可能性は低いことが確認された。なお、浸出水中のメチル水銀は実験期間を通して全て不検出であった。

次に、埋立実験槽上部に発生した気化水銀濃度の経時変化を図-1.7に示す。混合廃棄物を充填した準好気性槽は各槽 (No. 1~No. 4) と埋立初期~12ヵ月まで大気環境指針値 (40ng/m<sup>3</sup>) を超える気化水銀が継続して検出された (400~700ng/m<sup>3</sup>) が、12ヵ月目以降は、大気環境基準値付近 (0.1~40ng/m<sup>3</sup>) で推移する傾向を示した。これに対し、改質硫黄固化体を充填した嫌気性槽のNo. 5は埋立初期から実験終了まで大気環境基準値以下で推移した (0.1~40ng/m<sup>3</sup>)。ここで、廃棄物のみを充填したブランク槽 (No. 4、No. 7) においても類似した気化水銀が発生していることから、実験槽上部に発生した気化水銀は水銀廃棄物固化体、及び充填廃棄物由来の可能性が考えられた。また、埋立構造で比較すると、嫌気的雰囲気

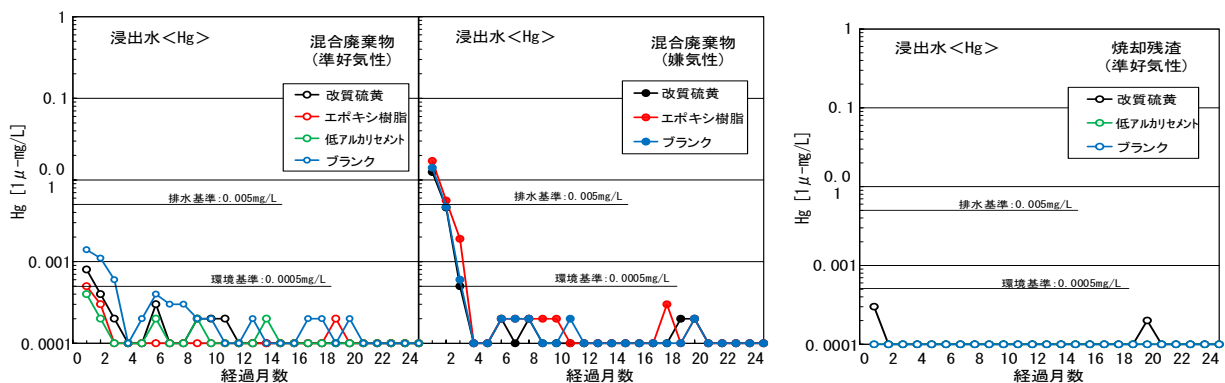


図-1.6 浸出水中の水銀濃度の経時変化

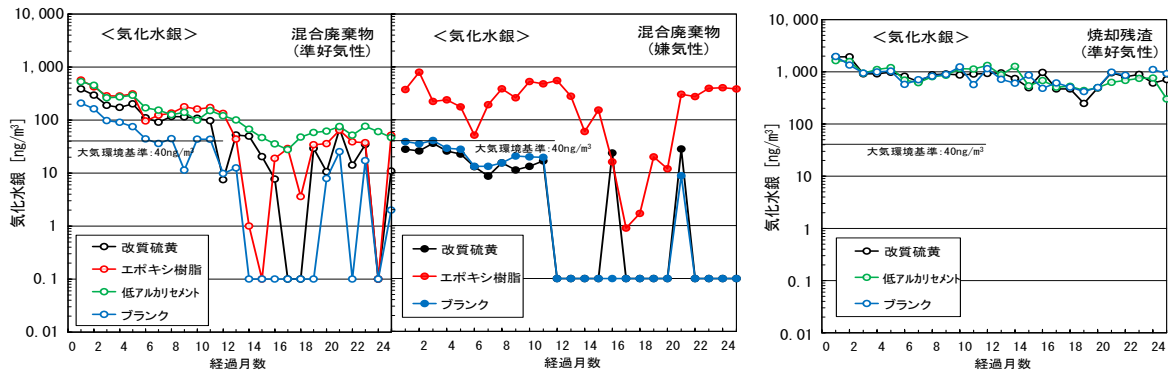


図-1.7 実験槽上部に発生した気化水銀濃度の経時変化

にある嫌気性槽の方が気化水銀の発生を抑制していることが確認された。これは、埋立地内部に滞水層を持つことで、実験槽内部が嫌氣的雰囲気であるため、固化体から発生した気化水銀が再硫化したことで、気化水銀量が準好気性に比べ減少した可能性が考えられた。しかし、エポキシ樹脂固化体を充填した実験槽 (No. 6) における気化水銀の発生挙動は、他の実験槽と異なり、大気環境指針値を超える気化水銀が継続して検出された。ここで、埋立実験終了後に解体し回収した水銀固化体を確認すると、No. 6に充填したエポキシ樹脂固化体2体のうち1体において表面樹脂の損傷が激しいことが確認された(写真-1.4)。埋立地内部でエポキシ樹脂が損傷を受けた要因については明らかにならなかったが、埋立実験開始時から影響を受けたことで継続して気化水銀濃度が高くなったことが想定される。



写真-1.4 埋立実験後のエポキシ樹脂固化体 (No. 6)

次に、焼却残渣を充填した実験槽の気化水銀は、埋立初期に2,000ng/m<sup>3</sup>検出し、その後、緩やかに減少しながらも300~1,000ng/m<sup>3</sup>の範囲で推移した。ブランク槽 (No. 10) の気化水銀発生量との比較でも

顕著な差は見られなかったことから、実験槽上部に発生している気化水銀は焼却残渣由来の可能性が考えられた。更に、同じ準好気性槽で充填廃棄物の違い (混合廃棄物と焼却残渣) を比較すると、実験槽上部に発生した気化水銀は焼却残渣の方が混合廃棄物よりも高い値を示したことから、混合廃棄物中の汚泥堆肥が気化水銀の発生抑制に寄与している可能性も考えられた。

以上の結果から、水銀廃棄物固化体を廃棄物層に埋立処分した際の実験槽系外への水銀流出率を算出した(表-1.6参照)。その結果、25ヵ月間の水銀流出量は浸出水で0.1070mg (No. 6)、気化水銀で0.0002mg (No. 9) となり、総流出量は0.1071mg (No. 6) であったが、その溶出率は0.000013%と極微量であった。また、総流出量は水銀固化体を充填していないブランク槽と同程度か、それ以下となっていることから水銀固化体からの系外への流出は殆ど無いことが判った。本実験は当初の目標通りの成果を達成した。

2) 水銀廃棄物固化体からの水銀流出

埋立実験終了後の実験槽を解体し、各層ごとに充填廃棄物の総水銀量、溶出水銀量、気化水銀量を測

表-1.6 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	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		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	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)

定した。その結果を図-1.8に示す。総水銀量においては、ほとんどのサンプルでブランク槽と類似した値が検出されているが、焼却残渣のみに設置した改質硫黄固化体 (No. 8) の上下層の充填廃棄物において40mg/kgの水銀が確認された。また、混合廃棄物を充填した準好気性槽のブランクの下層部でも類似した濃度で検出されていることから、この水銀溶出は充填廃棄物が固化体が要因か明確ではない。また、それ以外のサンプルにおいては、固化体充填位置(中層部)の上下における含有量の増加は見られなかった。さらに、溶出試験や気化水銀においても、ほぼ全ての層においてブランクと類似した値、もしくは基準値以下の値で推移する結果となった。以上の結果から、25ヵ月の埋立実験期間で明らかな水銀固化体からの水銀移動を示す結果は確認されなかった。

(2) タンクリーチング試験による水銀廃棄物固化体中の水銀流出特性

各サイクルにおける浸出水中への水銀溶出量の変化を図-1.9及び6サイクル終了後の累積溶出率を表-1.7に示す。改質硫黄、エポキシ樹脂では第1、2サイクルで3ヵ月間の浸漬後に0.002mg/Lの水銀濃度を示したが、ブランクと同程度の濃度を示しており、浸出水中に元来存在していた水銀であると考えられる。しかし、低アルカリセメントを浸漬した浸出水では充填時の水銀濃度から浸漬後に上昇が確認され、最大で0.188mg/Lの濃度を示し、排水基準(0.005mg/L)を超過する値であった。また、焼却・準好気性の浸出水でも低アルカリセメントは、第1サイクルで0.0006mg/L、第2サイクルで0.0002mg/Lを示し、浸出水中に水銀が溶出され

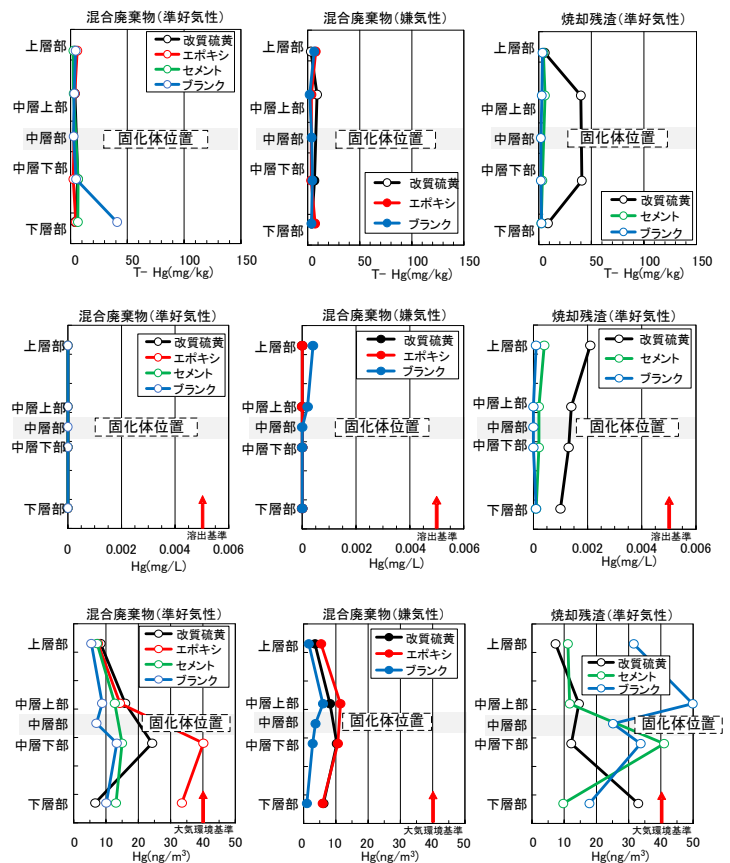


図-1.8 解体実験槽内の充填廃棄物における水銀濃度 (上：総水銀(含有量)、中：溶出水銀、下：気化水銀)

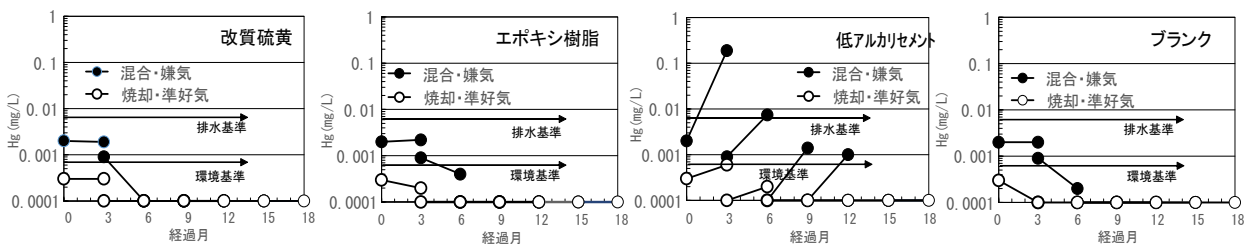


図-1.9 浸漬前後の水銀濃度

表-1.7 水銀廃棄物固化体からの水銀溶出量と溶出率

	改質硫黄		エポキシ樹脂		低アルカリセメント	
	混合・嫌気性	焼却・準好気	混合・嫌気性	焼却・準好気	混合・嫌気性	焼却・準好気
水銀含有量(g)	270.9	271.5	520	525.4	213.7	220.8
累積溶出量(mg)	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.964	0.0025
累積溶出率(%)	<0.0000001	<0.0000001	0.0000004	<0.0000001	0.000356	0.0000001



たことが確認された。本報告での実験期間に固化体から溶出した累積水銀量と累積溶出率を表-1.7に示した。その結果、混合・嫌気の浸出水に浸漬した低アルカリセメントからの溶出率が0.0004%と最も高く、それ以外では水銀溶出はほとんど確認されなかった。また、低アルカリセメントからの溶出も、第4サイクルまでは確認されたが、それ以降は検出されない結果となった。さらに、改質硫黄やエポキシ樹脂においても水銀溶出は検出されず、実浸出水中に固化体を浸漬させた条件下においても、その安定性が確認できた。本実験も当初の目標通りの成果を達成した。

#### 4-2-2 加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価

##### (1) 固型化手法の検討

固型化に使用した硫化水銀はすべて環告13号溶出試験及びヘッドスペース試験のそれぞれの基準をクリアした。また、振動ボールミルで合成された硫化水銀のX線回折パターンは、遊星ボールミルで合成された硫化水銀のそれと同様であった。次に、3種類の固化体の諸元を三次元スキャナで計測した結果、ばらつきは小さく、概ね同等の固化体がそれぞれ作製できた。固化体の一軸圧縮強度はすべて基準を満たした。固化体の環告13号溶出試験及びタンクリーチング試験の結果より、MS<sub>50</sub>は両試験で基準を満たした。EPR<sub>80</sub>は1年目の環告13号溶出試験で基準を超過したが、それ以外は基準を満たした。固化体(有姿)のまま供試するタンクリーチング試験で基準を満たしていることから、EPR<sub>80</sub>は粉砕すると水銀が溶出しやすくなることが示唆された。1年目の環告13号溶出試験の結果が他の年度よりも3桁高いことから別途実験を行って原因を検討した(後述)。LAC<sub>40</sub>は環告13号溶出試験で基準を大幅に超過した一方、タンクリーチング試験では概ね良好な結果であったが1年目のみ基準を超過した。LAC<sub>40</sub>の環告13号溶出試験でpHが高いにもかかわらず溶出濃度が低いことから、低アルカリセメントによる固型化は水銀の封じ込めに一定程度有効であることが確認できた。しかし、EPR<sub>80</sub>同様、LAC<sub>40</sub>は粉砕すると水銀が溶出しやすくなるため、実際に適用する際には何らかの対策が必要となる。固化体とその粉砕物のヘッドスペース試験の結果より、MS<sub>50</sub>のヘッドスペース試験では粉砕物で2年目に基準を超過したが、それ以外は固化体及び粉砕物で基準を満たした。EPR<sub>80</sub>のヘッドスペース試験では、3年目の固化体で基準を満たしたが、それ以外は基準を超過した。また、環告13号溶出試験と同様、固化体、粉砕物ともに1年目にヘッドスペース値が高い傾向が見られ、固化体よりも粉砕物の方が高値となった。LAC<sub>40</sub>のヘッドスペース試験では、KMnO<sub>4</sub>吸収法では3年目の固化体と粉砕物で基準を満たしたものの、EMP-2法ではすべてのサンプルで基準を超過した。したがって、EMP-2法は連続測定可能で操作が簡便であるものの、ヘッドスペース値が高値となった場合は水銀以外の何らかの成分を検出している可能性が示唆された。EMP-2法が高値を示すことは安全側評価と言えるが、KMnO<sub>4</sub>吸収法、金アマルガム法等の他の方法でも確認しておくことが望ましい。

1年目に作製したEPR<sub>80</sub>の環告13号溶出試験での溶出濃度が高い原因を検討した結果、仕込み量や充填量、すなわち硬化熱の影響を減らすことと、遊星ボールミルによる追加硫化処理が効いていることが示唆された。このことは、たとえ硫化水銀が環告13号溶出試験などをクリアしたとしても、エポキシ樹脂で固型化する場合、硫化処理が十分でない可能性が考えられる。したがって、エポキシ樹脂を用いて硫化水銀を固型化する場合には、振動ボールミルよりも遊星ボールミルのメカノケミカル効果によって水銀をより安定化しておく必要がある。また、いくつかの検討条件では、5% NaOH水溶液を用いた環告13号溶出試験も並行して実施した。その結果、水を用いた環告13号溶出試験結果よりも溶出濃度は高いものの、両者の間に相関( $R^2 = 0.728$ )があったことから、余剰水銀をより安定化させることは、加速環境下での水銀溶出を抑制できることも期待できる。

##### (2) 種々の加速環境下での水銀廃棄物の長期安全評価

溶媒として水を用いた連続バッチ溶出試験を参照条件(NEU、H2O、T20)として毎年度実施した。その結果、すべての試験で排水基準を下回ったが、LAC<sub>40</sub>は2020年度のみ5回環境基準を超過した(図-1.10)。前述の通り1年目に用いた硫化水銀の安定化が不足していたことがその一因と考えられた。溶媒として水を用いた通常の連続バッチ溶出試験(L/S = 100)によって、中間処理(硫化・固型化)が適切に行われていれば、3種類の固化体ともに500年間の長期安定性を有することが実験的に確認された。

MS<sub>50</sub>の連続バッチ溶出試験の結果、アルカリ性、酸化、Na<sub>2</sub>S条件下では排水基準を超過したが、それら

以外の条件では環境基準を満たした(図-1.11)。Mohamed & El-Gamalによると、硫黄セメント(=改質硫黄)は普通ポルトランドセメント(OPC)と比べて酸と塩に強く操作性が良い一方で、熱に弱く、強アルカリ、酸化剤、芳香族・塩素化炭化水素には弱い<sup>2)</sup>。他方、硫化水銀は硫化ナトリウムと作用して水溶性の多硫化物イオン([HgS<sub>2</sub>)<sup>2-</sup>)を生成する。0.5% Na<sub>2</sub>S水溶液のpHは約12.8であり、多硫化物イオンの生成がアルカリ条件で促進されることから、0.5% Na<sub>2</sub>S条件下で著しく水銀溶出濃度が高くなったことは順当な結果と考えられる。

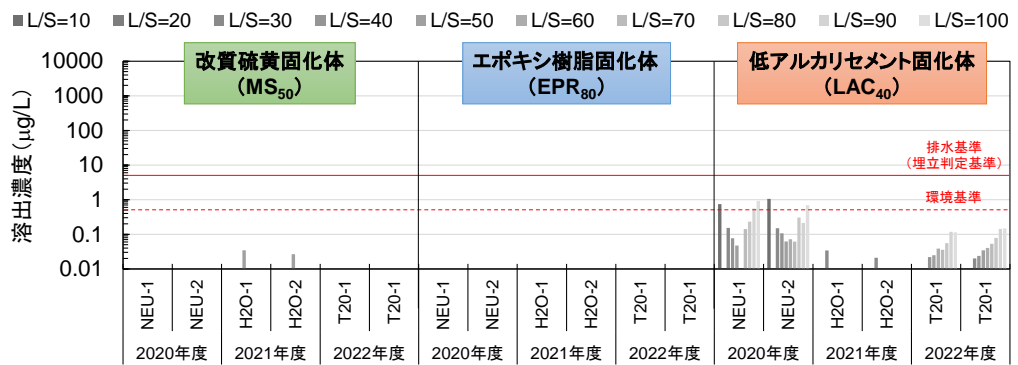


図-1.10 溶媒として水を用いた連続バッチ溶出試験の結果

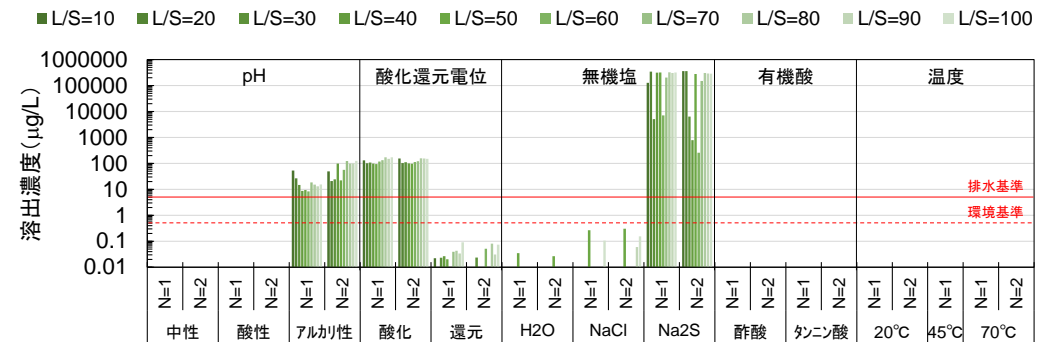


図-1.11 改質硫黄固化体 (MS<sub>50</sub>) の連続バッチ溶出試験の結果

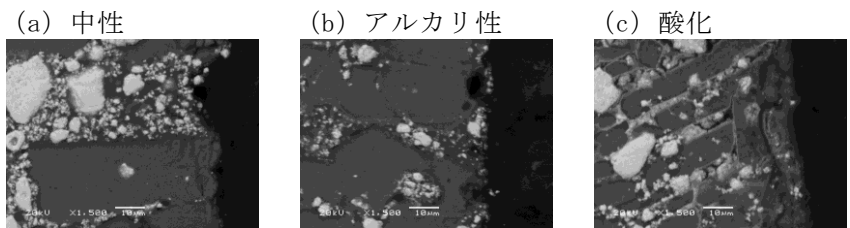


図-1.12 改質硫黄固化体 (MS<sub>50</sub>) の断面SEM画像 (×1,500)

試験後の外観は、中性条件では変化はなかったが、アルカリ性、酸化、Na<sub>2</sub>S条件では硫化水銀が抜けて白く変化した。SEMによる断面観察の結果、固型化(冷却)時のマイクロな収縮亀裂(皺)は、外部からの試薬侵入経路(水みち)になった可能性が高い。酸化条件では、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>が固化体内部へ侵入し、硫化水銀を溶解させた形跡(空洞)が見られた(図-1.12(c))。一方、アルカリ性条件では空洞は見られず、固化体表面の硫化水銀が溶出したと考えられた(図-1.12(b))。亀裂を減らすためには、固型化容器を予熱(130℃付近)し、徐冷することが有効であろう。他の2種類の固化体と比べて、MS<sub>50</sub>は硫化水銀が分散せずに集塊している箇所も散見されるため(図-1.12(a))、固化体表面付近に存在する硫化水銀の集塊にひとたび試薬が到達すると、そこからの水銀溶出が多くなってしまふことは避けられない。硫化水銀の分散状況の改善と表面コーティングが、有効な対策になると考えられる。

EPR<sub>80</sub>の連続バッチ溶出試験の結果、酸化、Na<sub>2</sub>S条件下では排水基準を超過したが、それら以外の条件ではおおむね環境基準を満たした。MS<sub>50</sub>とは異なり、アルカリ条件下では水銀が若干溶出するもののエポキシ樹脂固型化により水銀溶出が抑制できていた。EPR<sub>80</sub>は酸化、Na<sub>2</sub>S条件の固化体も外観に変化は認められなかった。エポキシ樹脂の水銀の封じ込め性能の高さはその耐水性、耐薬品性が高いことによる。SEMによる断面観察の結果、混練やモールド缶への注入時に混入したと考えられる気泡が多く確認された。MS<sub>50</sub>とは異なり、酸化条件でも試薬溶液の内部への侵入の痕跡はなく、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>が固化体表面近傍の硫化水銀に作用して水銀溶出させた可能性が高い。したがって、EPR<sub>80</sub>に対しても表面コーティングが有効な対策となる。

LAC<sub>40</sub>の連続バッチ溶出試験の結果、MS<sub>50</sub>とEPR<sub>80</sub>と比べて、中性、酸性、酸化、還元、NaCl、タンニン酸、70℃の条件下で水銀溶出が多くなる傾向があり、短期的には低アルカリセメントからのアルカリ溶



出による影響を抑制する対策が必要である。加えて、酸性（5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）と酢酸条件下では環境基準を超過することはなかったが、固化体が激しく劣化したため各種劣化（中性化、塩害、凍害、化学的腐食など）には注意が必要である。外観も条件によって白（アルカリ性、酸化）や濃緑（N<sub>2</sub>S<sub>2</sub>）に変化した。SEMによる断面観察の結果、混練やポリ瓶への注入時に混入したと考えられる気泡が多く確認された。LAC<sub>40</sub>は、他の固化体とは異なり乾燥による亀裂が目立った。EDS元素分析の結果より、（連続バッチ溶出試験後の）固化体表面から0.5～1 mm程度まではCaが液側へ溶出したと考えられた。水が固化体内部へ浸入し、Ca(OH)<sub>2</sub>等の水溶性アルカリ成分と接触して作り出される高pH条件が硫化水銀を溶解させ、水銀とアルカリ成分が固化体外部へ拡散することで溶出したと考えられる。さらに、酸化条件ではH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>の作用（HgS酸化）も加わり、他の固化体と比べてより高い水銀溶出濃度になったと考えられた。EDS元素マッピングの結果より、Alリッチの環境下ではCaが溶出した領域であっても硫化水銀が残存しているケースが見られたことから、Alを含む何らかの成分が硫化水銀を保護する機能を有しているかもしれない。脱泡、成分調整、表面コーティングが、今後の検討課題になると考えられる。

連続バッチ溶出試験の結果を整理したものを表-1.8に示す。廃水銀等処理物の最終処分環境が、主に還元雰囲気かつアルカリ条件と想定

表-1.8 連続バッチ溶出試験のまとめ

判定	水	酸性	アルカリ性	酸化	還元	NaCl	Na <sub>2</sub> S	酢酸	タンニン酸	高温 (70℃)
最大累積溶出率(%)										
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

と言える。また、酢酸条件下で有機水銀が生成するか確認したところ、MS<sub>50</sub>、EPR<sub>80</sub>ともに不検出（< 0.01ppm）であった。温度条件（20、45、70℃）の溶出サンプル中BPA濃度を分析したところ、それぞれ不検出（< 0.05 μg/L）、0.10 μg/L、0.30 μg/Lとなり、温度依存的にBPA溶出することが明らかとなった。京都大学での過去の研究によると、EPR<sub>80</sub>の粉碎物の溶出サンプル中BPA濃度が22 μg/Lであったことから、EPR固化体によりBPA溶出は2桁程度抑えられた。

1年目に水銀溶出濃度が最も高かった酸化条件において、エポキシ樹脂コーティングの効果を連続バッチ溶出試験（L/S = 100）により検証した結果、エポキシ樹脂コーティングによって、MS<sub>50</sub>、EPR<sub>80</sub>、LAC<sub>40</sub>の水銀溶出濃度はそれぞれ約1/17、約1/35、約1/24に低減された（図-1.13）。簡易的なエポキシ樹脂コーティングであっても、溶出濃度が100 μg/Lを超えるような酸化条件において、固化体からの水銀溶出を1桁以上抑制する効果を確認できた。エポキシ樹脂はふっ素樹脂より耐候性や耐久性に劣るが、安価に

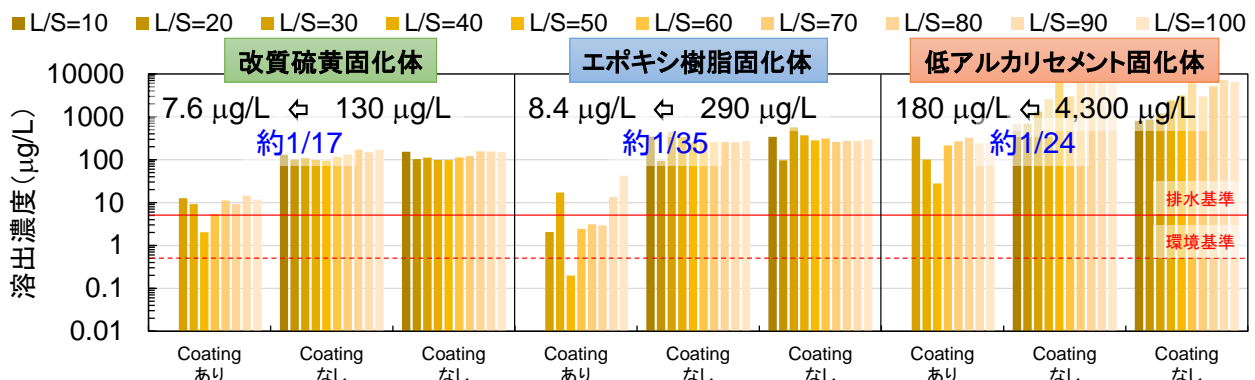


図-1.13 エポキシ樹脂コーティングによる水銀溶出抑制効果

塗布できる利点もあり有効な追加対策技術の一つと言える。

過去のタンクリーチング試験のサンプルを分析した結果、5年以上経過してもEPR<sub>80</sub>では溶出濃度は不検出 (< 0.02 µg/L) となり、水銀が安定して保持されていることを実験的に確認できた。さらに、配合や養生方法は異なるが、普通ポルトランドセメントや低アルカリセメントで固型化したサンプル (OPC<sub>60</sub>、LAC<sub>60</sub>) で、4年以上経過しても溶出濃度はそれぞれ0.09±0.06 µg/L及び0.04±0.01 µg/Lと低い濃度であることが明らかとなった。

固化体の粉砕物

に対して行った上向流カラム通水試験の結果を表-1.9に示す。連続バッチ溶出試験の結果と同様、アルカリ性及び酸化条件下で水銀溶出率が高い結

表-1.9 上向流カラム通水試験における累積溶出率 (%)

累積溶出率(%) (最終L/S)	中性	酸性	アルカリ性	酸化	還元	微生物
MS <sub>50</sub>	0.00000027 (109.4)	0.00000011 (107.5)	0.0022 (107.3)	0.0073 (109.3)	0.00000080 (108.8)	0.00000016 (109.4)
EPR <sub>80</sub>	0.00064 (107.3)	0.00044 (107.2)	0.015 (108.9)	0.19 (108.7)	0.000024 (110.5)	0.0000045 (112.8)
LAC <sub>40</sub>	0.035 (109.4)	0.0010 (106.7)	0.039 (107.9)	0.080 (109.0)	0.00072 (107.1)	0.0035 (107.1)

果であった。また、EPR<sub>80</sub>の酸化条件が最も累積溶出率が高くなったが、これは1年目に使用した硫化水銀の安定化の不足によるものと考えられた。固化体に対して実施した連続バッチ溶出試験と、悪条件を想定して粉砕物に対して実施した上向流カラム通水試験における累積溶出率について、MS<sub>50</sub>では還元条件で最大11倍の開きがあるものの、他の条件では数倍の開きであったことから概ね同等の結果とみなしてよい。一方、EPR<sub>80</sub>及びLAC<sub>40</sub>は固化体の粉砕によって上向流カラム通水試験における累積溶出率が最大数1000倍となった。1年目に使用した硫化水銀の安定化の不足を考慮したとしても、破壊までいかなくとも経年的に生じると想定される亀裂や欠けには何らかの対策を講じておくことが必要である。エポキシ樹脂はコンクリート構造物のひび割れ補修材や塗床材としても使用されることから、エポキシ樹脂コーティングによる補強と水銀封じ込めはいずれの固型化法においても有効な追加対策の一つと考えられる。

次に、最終埋立環境を想定するならば微生物による固化体自体の劣化や水銀のメチル化が懸念される。水銀のメチル化に關与する硫酸塩還元菌は偏性嫌気性細菌で、改質硫黄やエポキシ樹脂を分解する硫黄酸化細菌やBPA分解菌は好気性細菌である。本研究ではまずは固化体からの水銀溶出及び固化体の劣化に注目し、最終埋立処分場から採取した覆土の水抽出液（好気性土壌微生物を含む）を用いた上向流カラム通水試験によって、固化体（粉砕物）からの水銀溶出に及ぼす微生物影響を評価した。LAC<sub>40</sub>は初期溶出が見られたものの、MS<sub>50</sub>及びLAC<sub>40</sub>(L/S >30)は不検出 (< 0.02 µg/L) であった。一方、EPR<sub>80</sub>は試験開始直後から微生物なし (Neg.) と比べて微生物あり (Pos.) の方が溶出濃度が高く、L/S = 60を超えたあたりから微生物あり (Pos.) は増加を始め、L/S = 80付近で環境基準を超過し、その後も増加傾向が続いた。一般に熱硬化性樹脂は熱可塑性樹脂と比べて生分解性が低く、既存化学物質安全性点検調査ではBPA型エポキシ樹脂の生分解性は難分解性と判定されている。しかしながら、土壌や底質中にはビスフェノールA (BPA) を分解する細菌の存在が報告されており、好気条件などが調った場合にはエポキシ樹脂は微生物分解される可能性があることに留意が必要である<sup>3)</sup>。

粉砕物に対する環告13号溶出試験の結果を図-1.14に示す。まず、pHの影響については改質硫黄がpH11で溶出を確認したのに対し、低アルカリセメントでは、pH領域に関係なく溶出基準を超過する値が確認された。ここで、振とう前後のpH変化を見ると(表-1.10)、改質硫黄ではpHに変化が見られなかったが、低アルカリセメントでは振とう後にpHの上昇が確認されたことから、セメント成分の溶出に伴いpHが上昇し、水銀廃棄物固化体からの水銀溶出に影響を与えたと考えられた。

続いて、酸化剤の影響については、エポキシ樹脂と低アルカリセメントは低濃度の酸化剤 (FeCl<sub>3</sub> : 100mg/L) でも影響を受け、溶出基準値を超える水銀溶出が確認されたが、改質硫黄では高濃度(500mg/L)での水銀溶出が確認され、低濃度では酸化剤の影響を受けにくいことがわかった。酸化剤が異なっても傾向は同じであった。以上の結果から、上向流カラム通水試験と同様の結果であり、環告13号試験からも確認された。

4-3 長期安全管理手法の総括

最終処分施設における水銀廃棄物固化体の長期管理手法を模擬埋立実験等で検討し、最終処分施設から流出する水銀量等の把握を行い、以下に示す結果が得られた。①最終処分場を模擬した実験槽に充填した全ての水銀廃棄物固化体（改質硫黄、エポキシ樹脂、低アルカリセメント）から、系外への水銀流出は殆ど無かった。②充填廃棄物の違い（混合廃棄物と焼却残渣）を比較すると、気化水銀の発生量は焼却残渣の方が高い値を示したことから、汚泥堆肥が気化水銀の発生抑制に寄与している可能性が示唆された。本検討で行った実験条件による水銀流出の総合評価を表-1.11にまとめた。改質硫黄固化体を実埋立地内で処分することへの水銀溶出リスクは低く高い安定性を持つことが判った。また、エポキシ樹脂固化体での処分は準好気性構造の埋立地に処分することでリスク低減が可能であることが判った。また、低アルカリセメント固化体においても、埋立実験槽やタンクリーチング試験による結果から、その安定性は十分であると考えられる。

また、加速溶出試験により酸化及びNa<sub>2</sub>S条件でも水銀溶出濃度が高くなることが実験的に明らかとなった。埋立処分場内の適正な環境維持に注意が必要である。固化体の粉碎試料において、溶出濃度が高い傾向が見られることから、劣化や地震等によって固化体が崩壊しないような対策、措置が取られることが望ましい。水銀廃棄物ガイドラインに別の固型化方法を追加する際、硫化処理が適切であるかの判定が環告13号溶出試験では不十分である可能性があり、留意が必要である。また、中間処理が適切であるかをヘッドスペース試験で判定する際、連続水銀測定装置で高

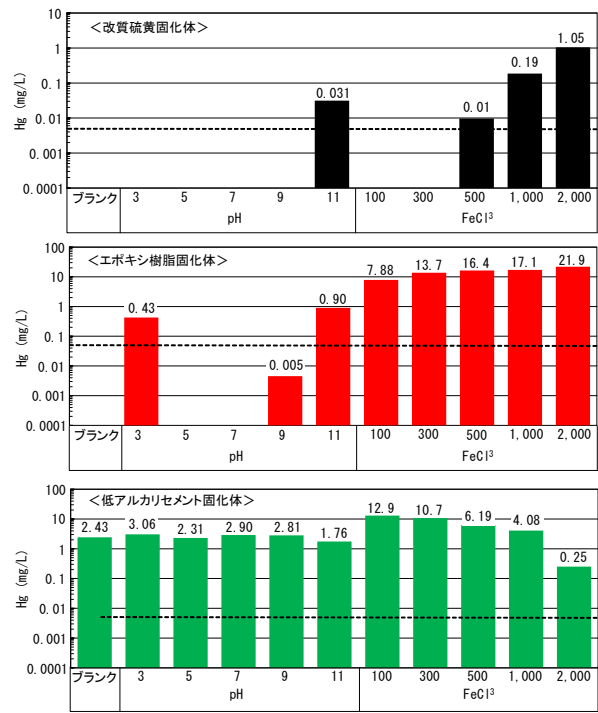


図-1.14 溶出実験の結果(上：改質硫黄、中：エポキシ樹脂、下：低アルカリセメント)

表-1.10 振とう前後の pH 変化

固化体	振とう前 pH	3.0	5.0	7.0	9.0	11.0
改質硫黄	振とう後 pH	2.9	4.2	4.8	7.0	11.3
エポキシ樹脂	振とう後 pH	3.0	5.2	7.1	8.1	11.3
低アルカリセメント	振とう後 pH	10.8	11.0	11.0	11.0	11.3

(網掛け：水銀溶出あり)

表-1.11 水銀廃棄物固化体の埋立処分時の水銀流出性からみた評価

廃棄物	水銀固化体	埋立構造	埋立実験槽		タンクリーチング	溶出試験	総合評価
			浸出水への流出特性	大気拡散			
混合廃棄物	改質硫黄	準好気性	◎	○(低下傾向)	◎	◎	◎
		嫌気性	○(ブランクと類似)	◎	◎	◎	◎
	エポキシ樹脂	準好気性	◎	○(低下傾向)	◎	○	○
		嫌気性	○(ブランクと類似)	△(1,000前後)	◎	○	○
	低アルカリセメント	準好気性	◎	○(低下傾向)	△	△	△
焼却残渣	改質硫黄	準好気性	◎	○(ブランクと類似)	◎	◎	◎
	エポキシ樹脂	準好気性	—	—	◎	○	(◎)
	低アルカリセメント	準好気性	◎	○(ブランクと類似)	○(環境基準以下)	△	○

値となった場合には水銀以外の成分を検出している可能性があるため別の方法で確認することが望ましい。また、外部の影響要因等から水銀の流出をより抑制する手法として、水銀ガイドライン第3版<sup>4)</sup>にある図-1.15のように水銀廃棄物固化体周辺に遮へい処置を施し、埋立地中層部に埋立処分する方法は有効であると考えられる。その際、改質硫黄固化体だけでなく今回対象にしたような水銀含有割合が高いエポキシ樹脂固化体を用いた埋立においても埋立地からの水銀溶出リスクは低いことが判った。さら

に、低アルカリセメント固化体を用いる際には内部保有水位などの埋立地の運転管理を適切に行うことで水銀溶出リスクを抑えることが可能であると考えられる。

## 5. 研究目標の達成状況

目標を上回る成果をあげた。

介入シナリオの根拠となる人為的活動下での水銀制御技術の現状を把握し、規制5発生源を含む主要発生源ごとの技術・排出係数等を整理した。国内の水銀排出施設の最新データを集めて整理し、技術ごとの除去率を整理した。水銀制御技術の将来予測では、ヒアリング調査等を通じて将来における技術導入率や国グループ等を設定した。排出係数、技術個票、技術普及シナリオの基礎的情報を整理したものをSII-6-2へ提示し、介入シナリオの策定に貢献するとともに、環境省・水銀大気排出抑制対策検討会や水銀マテリアルフロー検討会での情報提供を行った。当初の目標に加え、想定していなかった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に提示し、将来推計に貢献した。将来技術として高機能化処理剤およびCCUS技術における水銀低減効率を評価した。

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模擬埋立実験及び加速溶出試験等で検討し、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に提示し、リスクの将来予測に貢献した。長期安定性評価では改質硫黄固化体、エポキシ樹脂固化体に加えて、低アルカリセメント固化体も評価対象とした。DOM（有機酸）の影響評価では、酢酸、タンニン酸の2条件で評価した。模擬実験槽からの実浸出水を利用したタンクリーチング試験も実施した。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した。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）及びその確認方法の課題を整理した。

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、技術的基礎情報の整理及びオピニオンペーパーとして発信することで国内の施策に貢献するとともに、来るべき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向けて環境省関係課室と引き続き連携している。

## 6. 引用文献

- 1) 酒井伸一, 水谷 聡, 高月 紘: 溶出試験の基本的考え方, 廃棄物学会誌, 7(5), pp.383-393(1996)
- 2) Mohamed, Abdel-Mohsen Onsy, and Maisa El-Gamal: Sulfur concrete for the construction industry: a sustainable development approach. J. Ross Publishing (2010)
- 3) 厚生労働省, 経済産業省, 環境省: 優先評価化学物質のリスク評価 (一次), 生態影響に係る評価 II, 4,4'- (プロパン-2,2-ジイル)ジフェノール 11 (別名4,4'-イソプロピリデンジフェノール又は12 ビスフェノールA), 優先評価化学物質通し番号 75 (2014)
- 4) 環境省: 水銀廃棄物ガイドライン第3版 (2021)

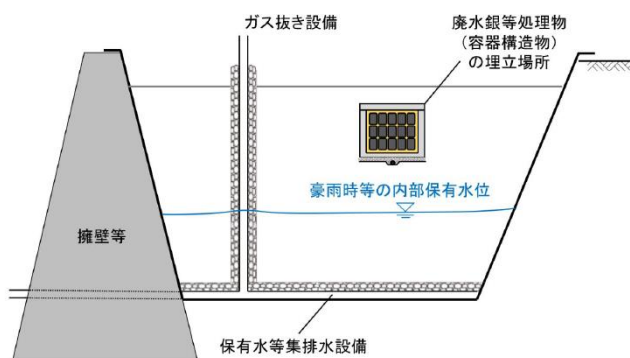


図-1.15 水銀廃棄物固化体の埋立方法の例<sup>4)</sup>



## II-2 ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測

国立大学法人 東京工業大学 環境・社会理工学院

高橋史武

国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域

林岳彦

### [要旨]

サブテーマ2-1では、水銀曝露による健康アウトカムとリスクについての既往知見を整理した。健康アウトカムとして、「胎児期の曝露による小児の神経発達への影響」を優先的に評価すべき健康アウトカム、また、その潜在的なリスクの大きさから「心疾患死亡」も健康アウトカムとして選定した。曝露シナリオとして、対象となる人口規模の面から現代の水銀曝露の主要な経路と言えることから、「市場を経由した魚介類の摂取による健康リスク」を優先的に評価すべき曝露シナリオの範囲として選定した。モデル計算により、排出削減対策の実施によって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が本研究で示された。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。リファレンスシナリオ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、早期からの対策を行うことが効果的であることが示された。また、水銀の埋立処分による局所的な健康リスクをモデル計算により推定した。埋立地内の水銀の挙動モデルはサブテーマ2-2での水銀埋立槽実験での実測データより、その妥当性が示された。水銀廃棄物の埋立処分における健康リスクは、気候変動に伴う降水条件の変化に対して大きな影響を受けない。一方、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明らかにした。

### 1. 研究開発目的

サブテーマ2では、ヒトへの水銀曝露およびそれに伴う健康リスクを推定・予測することを目的とする。気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を明らかにすることを狙い、全球モデルで計算された各地域での海産物中の水銀濃度から推定曝露量を求めて存在形態別及び曝露経路別のリスク計算を行うことで健康リスクの推移を予測すること、水銀廃棄物の最終処分施設からの漏洩・拡散といったケースにおける健康リスクの地域性及び将来変動性を予測する。

### 2. 研究目標

気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を明らかにし、水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測すること、そ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及び将来変動性を推定・評価する。前者はSII-6-3の研究結果を活用して健康リスクの推移予測へと結実させることを狙うものであり、後者はサブテーマ1から得られる知見を活用して最終処分施設の健康リスク評価とその変動性予測へとつなげることを狙うものである。

### 3. 研究開発内容

#### 3-1 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

##### 3-1-1 水銀の健康リスクおよび曝露シナリオの既往知見の整理と優先的に評価すべき範囲の選定

#### 1) 水銀曝露による健康アウトカムとリスクについての既往知見の整理

過去の総説や公的報告書から、水銀曝露による健康アウトカムの既往の研究知見を集約し整理した。また、本研究プロジェクトの目的に基づき、①市場経由での海産物摂取、②非市場経由（地域内自家消費）での海産物摂取、③金鉱山関連での水銀摂取、からの曝露の既往情報を過去文献から集約し整理した。また、それぞれの曝露レベルを基に曝露経路ごとの健康リスク懸念の状況を整理した。

#### 2) 優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定



前項での検討を踏まえ、優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定を、①健康アウトカムの鋭敏性、②既往知見の蓄積状況、③ Well-beingへの影響の大きさ、④曝露人口の大きさ、の観点から行った。

### 3-1-2 水銀全球モデルを利用した水銀曝露量の計算法の開発

#### 1) 計算法の概要

本計算法の開発は、Lavoie ら<sup>1)</sup>の方法の枠組みを基に、全球モデルFATE-Hg<sup>2)</sup>から得られた推定値を利用する方法で行った。具体的には、(1)全球モデルFATE-Hgより推定されたプランクトン中メチル水銀濃度の結果に基づき、食物網蓄積を計算して海産物中のメチル水銀濃度を計算し、(2)この結果と、食料バランスに関する水産統計データを統合することで、海産物摂取によるメチル水銀の週間摂取量を国毎に推計した。

#### 2) 水銀全球モデルによる解析データ

全球モデルFATE-Hgは、大気-海洋-陸域-生物圏に亘る水銀の生物地球化学的な物質循環を推定する全球多媒体モデルである。今回の地域ごとの平均水銀摂取量の推計においては、全球モデルから得られた2010年のシミュレーション結果を用いた。モデルプロセスおよび入力データ等の詳細は既報<sup>2)</sup>に記載されている。

#### 3) 海産物中のメチル水銀濃度の計算

ヒトの水銀摂取量を推計するためには、全球モデルから推定結果として得られるプランクトン中濃度から各種海産物中濃度への換算を行う必要がある。まず、海産物をFAOの水棲動物植物国際標準統計分類に基づきグループ化を行い、全球モデルからのプランクトン中メチル水銀濃度と食物網蓄積係数を利用して、各FAO主要漁獲海域における海産物グループごとの海産物中メチル水銀濃度を推計した。食物網蓄積係数の設定では、Lavoieら<sup>1)</sup>および他7文献から得た食物網蓄積係数の実測データの平均値（平均±STD=0.21±0.07）を一律に用いた。

#### 4) 水産統計データの取得と整理

海産物消費によるヒトの水銀摂取量の推計には、各地域での各海産物グループの消費量データが必要である。本計算法では、FAOによる食料バランス（生産量、輸入量、輸出量、非食料使用、ストック変化量）に関する統計データを基に計算を行った。生産量データは、漁獲海域等に関するより詳細な情報がある「Global Fishery and Aquaculture Production Statistics v2019.1.0」を用いた。

#### 5) 国別のメチル水銀の週間摂取量の計算

海産物摂取による国毎のメチル水銀の週間摂取量 ( $WI_c$ ) は、国内供給による摂取と輸入供給による摂取を区別し、以下の式により計算した。

$$WI_c = \sum_f (DFS_{c,f} \times C_{c,f} + IFS_{c,f} \times C_f) / BM_c / 52$$

ここで、下付き文字の  $c$  は国、 $f$  はFAOSTATによる海産物の分類（底生魚、遠洋魚、その他の海産魚、甲殻類、頭足類を除く軟体動物、頭足類）を表し、 $DFS_{c,f}$  は国内供給による海産物の摂取量、 $IFS_{c,f}$  は輸入供給による海産物の摂取量、 $C_{c,f}$  は対応する国で漁獲された海産物分類グループにおける重み付け平均メチル水銀濃度であり、 $C_f$  は  $C_{c,f}$  の全球平均値である。 $BM_c$  は平均体重であり、52は年間摂取量を週間摂取量に換算するための係数である。 $DFS_{c,f}$  と  $IFS_{c,f}$  は

$$\begin{aligned} DFS_{c,f} &= Pr_{c,f} + \alpha_{c,f} \times (Sv_{c,f} - Ex_{c,f} - Nf_{c,f}) \\ IFS_{c,f} &= Im_{c,f} + (1 - \alpha_{c,f}) \times (Sv_{c,f} - Ex_{c,f} - Nf_{c,f}) \\ \alpha_{c,f} &= Pr_{c,f} / (Pr_{c,f} + Im_{c,f}) \end{aligned}$$

より計算した。ここで、 $Pr_{c,f}$  は生産量、 $Sv_{c,f}$  はストック変化量、 $Ex_{c,f}$  は輸出量、 $Nf_{c,f}$  は非食料使用量、 $Im_{c,f}$  は輸入量である。 $Sv_{c,f}$ 、 $Ex_{c,f}$ 、 $Nf_{c,f}$  は国内供給と輸入供給のどちらかが判別できないため、係数  $\alpha_{c,f}$  を用いて一律に比例配分した。 $C_{c,f}$  の値については、国内供給による摂取量の計算には国および魚種分類毎の濃度を用いているため、国毎の漁獲海域の相違が考慮されている。

#### 6) 水銀濃度の実測値を利用した補正

全球モデルから得られた各国の週間摂取量の推定値と実測値を比較すると、概ね数倍の違いがみられ

た。これは全球モデルを基とした推定値としては妥当な精度と言えるものであるが、リスク計算の際にはこの数倍の違いによるリスクの違いは大きなものとなる。近年、信頼性の高い疫学調査から毛髪中や血液中の水銀濃度の豊富な実測データが得られている事例も多い。そうした実測データが入手可能であった21国については、全球モデルを基に推定された $c$ 国における週間摂取量 $WI_{\text{モデル推定},c}$ を、以下の式により $WI_{\text{モデル+実測値補正},c}$ へと補正した。

$$WI_{\text{モデル+実測値補正},c} = WI_{\text{モデル推定},c} \times (WI_{\text{実測},c} / WI_{\text{基準年のモデル推定},c})$$

ここで、 $WI_{\text{実測},c}$ は毛髪中濃度等の実測データから変換された週間摂取量の推定値、 $WI_{\text{基準年のモデル推定},c}$ は標準化の際に基準とした年のモデル推定値である。これは例えば、国 $c$ において全球モデルからの推定値が実測値の3倍であった場合に、国 $c$ の全球モデル推定値を1/3の値に補正する計算となる。この計算により、摂取量のモデル推定値の絶対値は実測値に整合したものとなる一方で、全球モデルからの予測値は絶対値の予測ではなく時系列上の相対的推移変化の予測に対応するものとなる。今回の推定の目的は各対策シナリオ下でのリスク推移予測であるため、この補正は目的に対して合理的なものと考えられる。今回の解析では基準年を2010年とした。特に断りの無い限り、実測値補正を行った21国の計算では補正値の方を使用した。

### 7) 魚介類の摂取量の将来変化を考慮した補正

全球モデルからの週間摂取量計算の段階では、魚介類の国別消費量は2010年のまま固定されていると仮定した。しかし、実際には国別消費量も将来的に変化すると考えられるため、将来予測データを用いた補正計算を行った。将来の国別消費量そのものの予想データは存在しないが、FAOのカロリーベースでの予測消費量データから、水銀摂取量の変化は魚介類からのカロリー摂取量の変化にそのまま比例するものと仮定し、以下の式で $WI_c$ から $WI_{\text{消費量補正},c}$ への補正を行った。

$$WI_{\text{消費量補正},c} = WI_c \times (CAL_{\text{year},c} / CAL_{\text{基準年},c})$$

ここで $CAL_{\text{year},c}$ は $c$ 国での $\text{year}$ 年のカロリー摂取量、 $CAL_{\text{基準年},c}$ は基準年のカロリー摂取量である。FAOのデータの初年度が2012年のため、2012年を基準年とした。補正がない場合には、将来海産物の消費が伸びた場合にもその変化が反映されないが（常に $\frac{CAL_{\text{year},c}}{CAL_{\text{基準年},c}} = 1$ に相当）、上記の補正により基準年と将来のカロリーベースでの消費量との比に応じて週間摂取量の推定値が重み付けられる。以下のリスク計算では補正後の値を使用した。

### 3-1-3 メチル水銀によるリスク推移予測の計算

上記で計算した国毎の週間摂取量の予測データを利用して、メチル水銀の健康リスクの計算を行った。本計算において、モデル式およびパラメータの値は、特に記載の無い限りZhangら<sup>3)</sup>に準拠した。

#### 1) 水銀摂取によるIQ低下量の計算

国 $c$ での水銀摂取に起因するIQ低下量（ $\Delta IQ_c$ ）の計算は以下の式で行った。

$$\Delta IQ_c = \Delta EDI_c \times BW \times DItBL \times BLtH \times HtIQ \times POP_{c,NB}$$

ここで、 $\Delta EDI_c$ は国 $c$ での推定一日摂取量の変化量 [ $\mu\text{g}/\text{Kg}$ 体重/day]であり、 $WI_c/7$ に相当する。 $BW$ は体重である。本計算ではこの体重の項と、以下の換算係数 $DItBL$ の値の設定の際に想定されている体重の項が相殺関係となっており、体重の設定値は上式の計算結果に影響しない。 $DItBL$ は、一日摂取量から血中濃度の換算係数（設定値は $0.58 \mu\text{g}/\text{L}$  per  $\mu\text{g}/\text{day}$ <sup>4)</sup>）、 $BLtH$ は血中濃度から毛髪中濃度の換算係数（設定値は $0.25 \mu\text{g}/\text{g}$  per  $\mu\text{g}/\text{L}$ <sup>4)</sup>）、 $HtIQ$ は毛髪中濃度からIQ低下量の換算係数（設定値は $0.3$  IQ points per  $\mu\text{g}/\text{g}$ ）、 $POP_{c,NB}$ は国 $c$ の出生数である（データはWorld Population Prospectsサイトより入手）。なお、上記の式は、水銀の毒性の閾値を考慮しない閾値無し線形モデルを仮定しており、また、魚介類摂取による健康上の利益も考慮されていないことから、魚摂取経路の水銀リスク評価としては基本的に安全側のモデル上の想定に立ったものである点には一定の留意が必要である。

#### 2) 水銀摂取による心疾患死亡数増加量の計算

国 $c$ での水銀摂取に起因する致死的心筋梗塞による死亡数の変化（ $\Delta FHA_c$ ）の計算は以下の式で行った：

$$\Delta FHA_c = [1 - \exp(-\Delta EDI_c \times BW \times DItBL \times BLtH \times HtFHA)] \times U_\omega \times FR \times (POP_{c,F} \times IHD_{c,F} + POP_{c,M} \times IHD_{c,M})$$

ここで、 $HtFHA$ は毛髪中濃度から致死性心筋梗塞への換算係数（設定値は0.066 per  $\mu\text{g/g}$ ）、 $U_\omega$ は水銀が心疾患を引き起こすことの包括的な不確実性（設定値は0.3）、 $POP_{c,F}$ と $POP_{c,M}$ は国 $c$ の女性と男性の40歳以上人口（データはWorld Population Prospectsサイトより入手）、 $FR$ は心筋梗塞の致死率（設定値は0.5）、 $IHD_{c,F}$ と $IHD_{c,M}$ は女性と男性の虚血性心疾患の発生率（年齢調整済；データはGlobal Health Data Exchangeサイトより入手）である。なお、近年の水銀リスク評価では心疾患死亡はデフォルトのアウトカムとして考慮されてきているものの、水銀摂取と心疾患死亡の因果的関係はIQとの関連と比較した場合にはまだ不確実な部分が多いことには一定の留意が必要である。

### 3) IQ低下量および心疾患死亡数増加量の経済的損失への換算

国 $c$ でのIQ低下量に起因する経済的損失（ $\Delta EV_{IQ,c}$ ）の計算は以下の式で行った。

$$\Delta EV_{IQ,c} = \Delta IQ_c \times IQtM \times (GDP_{PPPperCapita,c} / GDP_{PPPperCapita,US})$$

ここで、 $IQtM$ はIQ低下量の経済価値換算係数である（設定値は18,832米ドル/ $\Delta IQ$ ）。なお、この係数は米国におけるIQ低下による生涯賃金の低下量のデータに基づくものであり、あくまで生産性の観点からの換算であることと、米国の労働市場を前提とした値であることから、この換算係数の使用は定性的にも大きな不確実性をもつことには留意が必要である。また、国による貨幣価値の違いの調整のため、評価年の国 $c$ と米国の購買力平価調整済GDP（ $GDP_{PPPperCapita,US}$ ）の比を用いた補正を行っているが、これは経済力の弱い国の生命価値や健康価値を比較的小さく見積もる側面があることにも留意が必要である。もし割引率を考慮した場合、 $t$ 年後の経済的損失の計算は以下の式で行った：

$$\Delta EV_{IQ,割引} = \Delta EV_{IQ} \times [1 / (1 + DR)^{t-2010}]$$

ここで $DR$ は割引率である（割引率を考慮する場合には設定値は3%）。計算上の割引率の基準年は2010年とした。心疾患死亡による経済的損失（ $\Delta EV_{FHD,c}$ ）への換算も上記と同様に行った。具体的には

$$\Delta EV_{FHD,c} = \Delta FHD_c \times VSL \times (GDP_{PPPperCapita,c} / GDP_{PPPperCapita,US})$$

の式で換算を行った。 $VSL$ は統計的生命価値である（設定値は6300000米ドル）。本解析では上記のIQ低下と心疾患死亡に起因する経済的損失の合算を「水銀摂取に起因する経済的損失」とした。

### 4) WHO参照値超過を指標としたリスク計算

水銀の健康リスクの定量指標として、WHOなどの参照値の超過確率や超過人口が用いられることも多い。それらの超過確率等の計算には曝露濃度の分布情報が必要となる。本計算では、標準偏差パラメータが疫学データ等から得られる国についてはそれらの実測データに基づく標準偏差パラメータを使用した。そうした疫学データが得られない国については、既存の疫学データ等<sup>5)</sup>から推定した平均値と標準偏差の回帰関係をもとに、全球モデルから得られた平均値パラメータから曝露分布の標準偏差パラメータを外挿的に推定した。これらの分布パラメータから、WHOによる耐容週間摂取量に対応する毛髪中水銀濃度である2.5  $\mu\text{g/g}$ <sup>5)</sup>を超過する確率および超過する人口を国ごとに計算した。

### 5) パラメータ値の不確実性の影響の分析

上記のリスク計算でのパラメータ値の不確実性の影響を調べるために不確実性分析を行った。まず、個々のパラメータ値への感受性を調べるため、各パラメータの背景知識から想定される下限および上限の値を用いた場合のシミュレーションを行った。各パラメータの下限値-上限値は、 $HtIQ$  [0.17-0.567]、 $HtFHA$  [0-0.16]、 $IQtM$  [8013-18832]、 $VSL$  [1000000-10000000]、 $DR$  [0-0.07]と設定した。また、複数のパラメータの不確実性を統合的に調べるため、上記の範囲から各パラメータの値を確率的にサンプリングするモンテカルロシミュレーションによる感受性分析も行った。

## 3-2 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

### 3-2-1 最終処分施設からの水銀漏出に伴う水銀の環境挙動のモデル化および地域環境や気候変動などによるモデルパラメータの不確実性評価

水銀の環境動態モデルにおけるパラメータについて、既往の知見を収集してその環境依存性、地域依

存性を分析した。特に、生物濃縮における濃縮移行ステージごとの知見や、溶存有機物が生物濃縮や水銀の溶出速度に与える影響について知見を収集、整理した。また、日本や他の地域における降雨条件および魚介類摂取量についてもその知見を整理した。つぎに最終処分施設からの水銀の環境漏出シナリオについて、溶存有機物が水銀の溶出に關与するシナリオを検討し、水銀の環境動態モデルへ組み込んだ。

### 3-2-2 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

#### 1) 水銀の環境動態モデルにおけるパラメータ値の不確実性

水銀の環境動態モデルにおいて様々な値が報告されているパラメータについて、その不確実性を適切な統計分布によって表現し、モデル計算に反映させた。検討対象としたパラメータは降雨日数、降雨強度、メチル化速度係数、脱メチル化速度係数、最大吸着量（酸化水銀とメチル水銀）、吸着平衡定数（酸化水銀とメチル水銀）、水相と底質間の分配係数（酸化水銀とメチル水銀）、生物濃縮係数、半閉鎖水域での水理学的滞留時間、魚介類摂取量、DOM濃度である。最適な統計分布は以下の式で示すベイズ情報量規準（BIC）によって決定した。

$$BIC = -2\ln(L) + p\ln(N)$$

ここで $\ln(L)$ は最大対数尤度、 $p$ はパラメータ数（本稿ではどの分布でも2）、 $N$ は報告値の数（サンプルサイズ）である。候補とした統計分布は、対数正規分布、ワイブル分布、 $\gamma$ 分布である。

#### 2) 水銀の環境動態モデルの詳細および条件

水銀廃棄物を埋立地に地中処分した後、水銀が埋立地内を溶出、移動して埋立地外へ排出され、表流水や地下水、大気を経由して半閉鎖性水域（湖沼や海灣など）へと至り、魚介類へ生物濃縮される。そして魚介類および畜産物経由で人体へ曝露されるモデルとした。これより本モデルは埋立地での挙動を表現するコンポーネントモデル1、地下水や表流水、大気を経由した半閉鎖水域へ至り、生物濃縮を経て魚介類経由で人体への水銀曝露に至るコンポーネントモデル2、大気から地表へ沈降した水銀が植物、それを食す畜産物を経由して水銀曝露に至るコンポーネントモデル3から構成されている。

#### 3) 埋立地内での水銀挙動モデル（モデル1）

埋立地内での水銀挙動モデル（モデル1）では、固相、液相、気相の3相のうち固相率は0.5で一定、液相率および気相率は水分移動によって変動するとした。埋立地表面から埋立地内部への雨水浸透は不飽和浸透流れとし、Van Genuchtenモデルで記述した。水銀は酸化水銀（ $Hg^{2+}$ ）、メチル水銀（ $HgMe$ ）、および金属水銀（ $Hg^0$ ）の3種を考慮し、液相中での拡散ならびに移流に伴う移動、土壌（固相）への吸着および固相からの溶出、還元反応（酸化水銀 $Hg^{2+}$  → 金属水銀 $Hg^0$ ）に伴う金属水銀の気相への気化、気相中の拡散による移動を表現している。なお、水銀相から水相への溶解および土壌（固相）から液相への水銀の吸脱着については、Noyes-Whitney modelモデルで表現した。水銀の化学種間の変化については、メチル化細菌によるメチル化反応（酸化水銀 $Hg^{2+}$  → メチル水銀 $HgMe$ ）、脱メチル化細菌による脱メチル化反応（メチル水銀 $HgMe$  → 酸化水銀 $Hg^{2+}$ ）を水相および固相で考慮し、水銀還元細菌による還元反応（酸化水銀 $Hg^{2+}$  → 金属水銀 $Hg^0$ ）を水相でのみ考慮した。なお、これらの反応は既往研究と同様に1次反応モデルを用いた。なお、本モデルはサブテーマ1-1で得られた水銀埋立実験槽のデータよりモデル予測値の妥当性について検証した。

#### 4) 半閉鎖水域での魚介類への生物濃縮モデル（モデル2）

半閉鎖水域での魚介類への生物濃縮モデル（モデル2）では、地下水、表流水および半閉鎖水域において水銀の生物学的形態変化（メチル化・脱メチル化）を考慮した。半閉鎖水域では、水相と底質間での沈降および再溶解を平衡分配とし、水相のメチル水銀のみが魚介類へ生物濃縮され、魚介類摂取を通じて人体への水銀曝露に至るとしている。

#### 5) 半閉鎖水域での魚介類への生物濃縮モデル（モデル3）

埋立地表面から放出された金属水銀（ $Hg^0$ ）は大気を拡散移動し、オゾン酸化によって金属水銀が酸化水銀（ $Hg^{2+}$ ）へ変化し、ただちに浮流粒子に吸着する。そして浮流粒子の地表沈降に伴った乾性沈着を考慮した。地表へ沈着した酸化水銀は土壌に長期滞在するとし、清水らの先行研究<sup>12)</sup>を適用して植物および畜産物へ水銀移行量を求め、畜産物経由での水銀曝露量を求めた。

### 3-2-3 水銀の最終処分に関する市民的認知の分析

Webアンケート調査を行い、水銀の最終処分に関する市民的認知について分析した。水銀を含む有害性物質や健康への影響が懸念されている物質、事象を対象に、それらの対策の優先順位がどのように認知されているかScheffeの対比較法を用いて調査した。より安全であると認知される水銀の処理方法や処分方法、埋立地の管理方法について調査するとともに、モニタリングに求める頻度やモニタリング終了を判断する期間についても調査した。

## 4. 結果及び考察

### 4-1 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

#### 4-1-1 水銀の健康リスクおよび曝露シナリオの既往知見の整理と優先的に評価すべき範囲の選定

##### 1) 水銀曝露による健康アウトカムとリスクについての既往知見の整理

ヒトへの毒性が特に強いメチル水銀の知見を中心に、水銀のヒトへの毒性について過去の複数の総説等およびその中で引用されている文献等から情報を集約し整理した（代表的なものとして<sup>4,6-10</sup>）。

神経発達影響 高濃度曝露下での影響の主要な知見は、水俣病およびイランでの水銀中毒事故の事例から得られている。これらの事例の体内負荷量と障害の関連の分析に基づき、IPCSクライテリア101は最も感受性の高い成人に最初の神経症状が現れる毛髪中水銀濃度は50-125  $\mu\text{g/g}$ とまとめている。低濃度曝露下（ここでの”低濃度”は事故的な高濃度状況との比較としての意味である）での影響に関する最も信頼性の高い知見は、1980年代後半から実施されているフェロー諸島とセイシェル諸島を対象とした2つの出生コホート研究から得られている。セイシェルコホート研究からは魚由来の血漿n-3多価不飽和脂肪酸の小児神経発達栄養への有益な影響を統計学的に調整すると、毛髪中水銀濃度と神経発達の間に関連があることが報告されている。

循環器系影響およびその他の影響 既存の諸研究において必ずしも一貫した結果は得られてはいないものの、メチル水銀が心筋梗塞などの原因となる可能性が示唆されている。

有害な影響を及ぼさないとみなせる曝露量の検討 成人で影響が出始めるレンジは毛髪中水銀濃度で50-125  $\mu\text{g/g}$ 程度であると考えられている。セイシェルとフェローの2つの対象の集団の疫学研究の結果から、その暫定耐容週間摂取量の計算において子供に有害な影響を及ぼさないとみなせる曝露量に対応する母体の毛髪中水銀濃度の推定値として14  $\mu\text{g/g}$ が採用されている。また、胎児性曝露による非顕性影響の臨界濃度をベンチマークドース法により算出した既往研究からは、出生時の母親毛髪中水銀濃度が概ね6-14  $\mu\text{g/g}$ 程度のレンジが臨界濃度として報告されている。

健康アウトカムの知見のまとめ メチル水銀の曝露による健康アウトカムの知見集約から、複数の質の高い研究が「胎児期の曝露による小児の神経発達への影響」が最も鋭敏な健康アウトカムであることを支持していた。また近年、メチル水銀の曝露により心疾患死亡が増加する可能性が示唆されている。

##### 2) 優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定

環境中に排出された水銀の主要な曝露経路として、(1) 市場経由での魚摂取、(2) 非市場経由（地域内自家消費）での魚摂取、(3) 金鉱山関連での水銀摂取、を経由した曝露レベルに関する既往知見を整理した。

市場経由での魚摂取経路での曝露レベル 魚摂取量は地域特性に依存するため、以下では地域特性ごとに知見を整理する。沿岸や島などの地域にある集団では一般に、内陸と比較して魚の消費量が多いため水銀の曝露レベルも高い傾向がある。Sheehanら<sup>11)</sup>では、102の沿岸集団から得られている毛髪中水銀濃度の中央値は0.8（上限値は6.8） $\mu\text{g/g}$ と報告されている。内陸部からの34地域集団の中央値は0.4（上限値は2.9） $\mu\text{g/g}$ であった。

非市場経由（地域内自家消費）での魚摂取経路での曝露レベル 非極域の水銀排出のある水域から地域内自家消費で魚を消費している25地域集団での毛髪中水銀濃度の中央値は0.8（上限値は4.6） $\mu\text{g/g}$ であった。北極域の21地域集団での毛髪中水銀濃度の中央値は2.1（上限値は9.8） $\mu\text{g/g}$ であった。



金鉱山関連での水銀摂取 小規模金鉱山周辺の43地域集団の母親および幼児における毛髪中水銀濃度の中央値は5.4（上限値は23.1） $\mu\text{g/g}$ であった。

曝露経路の知見のまとめ 曝露経路についての既往の研究知見の集約の結果、複数の質の高い研究が、「市場経由での海産物の消費」によって最も広範な水銀曝露が生じていることを支持していた。

### 3) 優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定

健康アウトカムとして、① もっとも鋭敏な健康アウトカムであること、② 既存の知見の蓄積があること、③ 無視できないWell-beingへの影響が存在すること、から「胎児期の曝露による小児の神経発達への影響」を優先的に評価すべき健康アウトカムとして選定した。また、その潜在的なリスクの大きさから「心疾患死亡」も健康アウトカムとして選定した。曝露シナリオとして、対象となる人口規模の面から現代の水銀曝露の主要な経路と言えることから、「市場を経由した魚介類の摂取による健康リスク」を優先的に評価すべき曝露シナリオの範囲として選定した。

なお、比較的に限定された地域であるため以下の解析での優先的な評価項目としては選定しないものの、金採掘に起因する深刻なレベルの水銀曝露のケースも多く報告されており、水銀条約においても、鉱山周辺での排出源への適切なリスク管理および曝露のモニタリング等の措置が必要である。

## 4-1-2 全球モデルからの曝露量の推計

### 1) 海産物中メチル水銀濃度の検証

推定された海産物中メチル水銀濃度の重み付け全球平均濃度と、実測濃度の全球平均値を主要漁獲海域グループ毎に比較したところ、モデル推定濃度はおおむね実測濃度に近い値となったが、栄養段階の大きい海産物のグループではモデル推定濃度が実測濃度と比べて過少評価となる傾向があった。この検証の誤差は設定した食物網蓄積係数の不確実性によるところが大きいと考えられた。

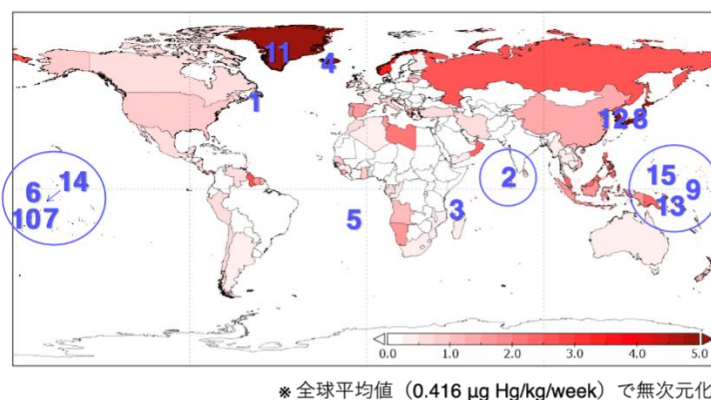


図-2.1 海産物摂取によるメチル水銀の週間摂取量の推定結果（比較のため相対値を使用）

### 2) 国別のメチル水銀平均週間摂取量の推定

平均週間摂取量の上位国は海産物への依存度が高く、赤道付近の小島嶼開発途上国で特に大きくなる傾向がみられた（図-2.1）。同様の傾向は実測ベースの先行研究<sup>1)</sup>でも確認されている。

## 4-1-3 健康リスクの推移予測

### 1) 水銀曝露によるIQ低下量の推移予測

魚介類経由で摂取されるメチル水銀によるIQ低下量の推移予測を図-2.2に示す。2010年時点では全世界での総IQ低下量は約1500万ポイント/年と推測された。リファレンスシナリオでは、低下量は常に増加しつづけ、2050年には約2000万ポイント/年に至った。一方、2050年最大削減シナリオでは、2035年まではほぼ横ばいの状況が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年には約1000万ポイント/年となった。このことは、最大削減のための対策をとった場合には効果が現れるまでにはタイムラグがあるものの、2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は約-1000万ポイントとなっており、対策によるIQ低下量の削減量は大きいことを示唆している。また、段階的削減シナリオではリファレンスシナリオと比較した場合にはIQ低下量は減少しているものの、2010年比からの改善度合いは長期的にも限定的なものとして予測された。

### 2) 水銀曝露による心疾患死亡数の推移予測

魚介類経由で摂取されるメチル水銀による心疾患死亡数の推移予測を図-2.3に示す。全体の定性的な

トレンドは前節の心疾患死亡のものと同様であり、リファレンスシナリオでは、死亡数は常に増加しつづけ、2050年には約54000人／年に至った。一方、2050年最大削減シナリオでは、2035年までは増加が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年には27000人／年となった。2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は-27000人となっており、対策による心疾患死亡数の削減量は大きいことが示唆された。

3) 水銀曝露による経済的損失の推移予測

魚介類経由で摂取されるメチル水銀による経済的損失の推移予測を図-2.4に示す。割引率を考慮しない場合には、2010年時点では全世界での心疾患死亡数は約1000億ドル／年と予測された。定性的なトレンドは前節の心疾患死亡のものと同様であり、2050年時点でのリファレンスシナリオと2050年最大削減シナリオとの結果の差は-約2000億ドルとなった。なお、経済的損失の内訳については、IQ低下によるものと心疾患による損失は概ね同程度であった。

3%の割引率を考慮した場合には、リファレンスシナリオでの2050年の損失額は約1200億ドル／年であった。これは、3%の割引率の下では、40年後の経済価値は割引率がない場合の約30%になることを素直に反映したものである。

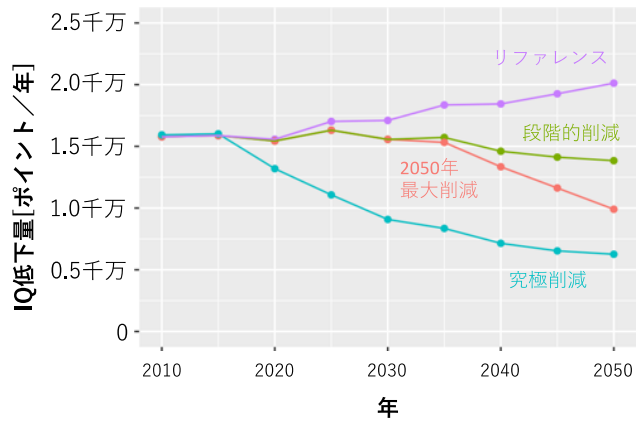


図-2.2 水銀摂取によるIQ低下量の推移予測

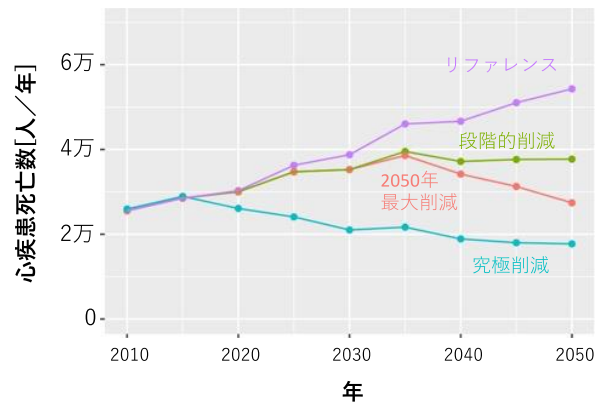


図-2.3 水銀摂取による心疾患死亡数の推移予測

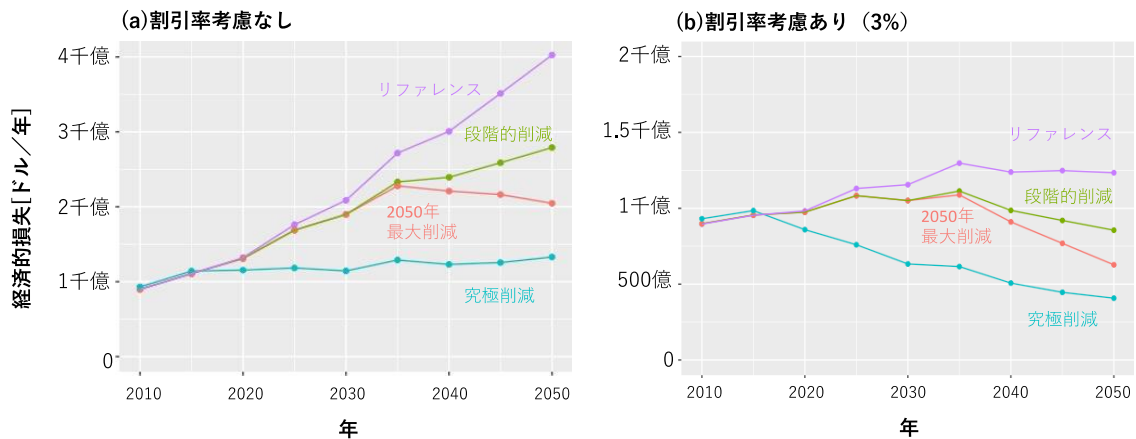


図-2.4 水銀摂取による経済的損失の推移予測

4) 参照値 (WHO耐容週間摂取量) の超過に基づく予測のシナリオ間比較

WHO耐容週間摂取量 (毛髪中水銀濃度換算 2.5 μg/g) の超過人口の推移予測を図-2.5に示す。2010年時点では全世界での超過人口は約500万人／年と予測された。リファレンスシナリオでは、超過人口は常に増加しつづけ、2050年には約830万人／年となった。一方、2050年最大削減シナリオでは、2035年までは横ばい状況が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年には約280万人／年となった。2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は-約550万人であり、最大削減による超過人口の低下は大きいことが示唆された。これらのトレンドは前節までの閾値無しモデルに基づく予測と概ね一致しており、リスク計算における毒性閾値の考慮の有無はリスク計算に定性的な影響は与えないことを示唆するもので

ある。

5) パラメータ値の不確実性の影響の分析

パラメータ値を変化させた場合の感受性分析の結果を図-2.6に示す。それぞれのバーの左端、右端は各パラメータを下限設定値、上限設定値に変化させた場合の2050年の経済的損失の値に対応する。モンテカルロシミュレーションの場合には、経済的損失の計算結果の10パーセンタイル値と90パーセンタイル値に対応する。この図から、総じて、パラメータ値の設定に依存して経済的損失の絶対値の予測結果には数倍程度の違いが示された。一方、定性的には、リファレンス、段階的削減、最大削減、究極削減の順で経済的損失の分布が低い方にスライドする傾向は一貫していた。このことから、各シナリオの結果の相対的關係は推定パラメータの設定に関わらず比較的頑健であると考えられた。

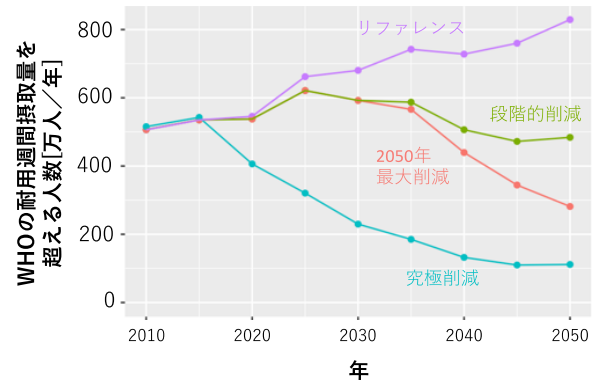


図-2.5 WHOの耐容摂取量（毛髪中水銀濃度換算 2.5 µg/g）を超える人数の推移予測

このことから、各シナリオの結果の相対的關係は推定パラメータの設定に関わらず比較的頑健であると考えられた。

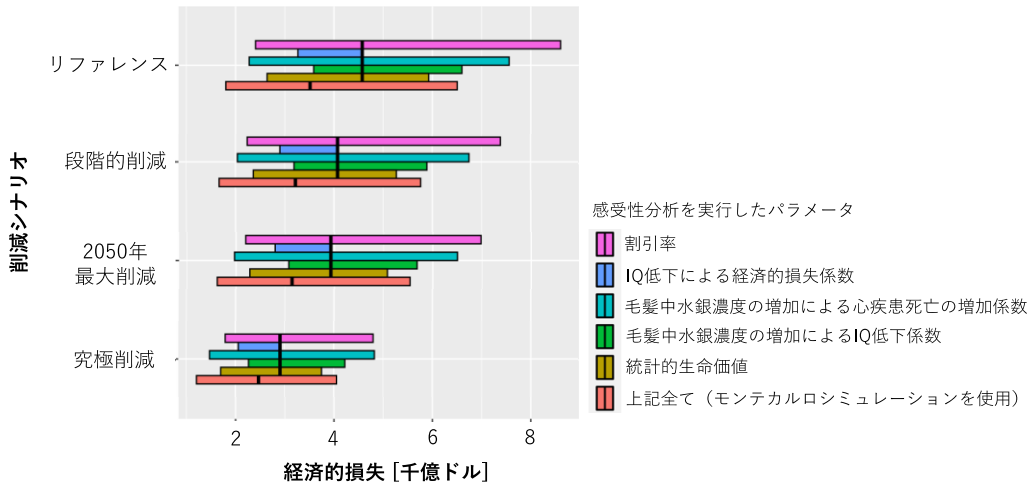


図-2.6 パラメータの不確実性についての感度分析の結果

6) 健康リスクの推移予測からのシナリオ間の比較のまとめ

上記の諸結果からの一貫した結論として、最大削減シナリオに準ずる対策を行うことにより、長期的には大きな効果が見込めることが示された。また対策の効果が現れるまでにはタイムラグがあることから、できるだけ早期から対策を行うことが重要であることが示唆された。さらに、段階的削減シナリオは、絶対的なリスクの総量を減少トレンドに転換させるところまでは至らない可能性が示唆された。

4-2 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

4-2-1 最終処分施設からの水銀漏出に伴う水銀の環境挙動のモデル化および地域環境や気候変動などによるモデルパラメータの不確実性評価

生物濃縮プロセスにおいて、水中からセストン（懸濁物：BCFw-s）、セストンから動物プランクトン（BMFs-z）、動物プランクトンから高次捕食者（BMFz-f）への生物濃縮係数を図2-7に示す。また、水中から動物プランクトン（BCFw-z）、水中から高次捕食者（BCFw-f）への生物濃縮係数についても併せて示す。水中からセストンへの濃縮は39,000~1,120,000倍であるのに対し、セストンから動物プランクトンへの濃縮は1.0~5.8倍、動物プランクトンから高次捕食者への濃縮は3.0~11倍程度であった。セストンのメチル水銀濃度は高次捕食者のメチル水銀濃度と良い相関を示し、水中からセストンへの濃縮係数も高次捕食者のメチル水銀濃度と良い相関を示す（図2-7）。また、生物濃縮係数は環境条件、特に温度の影響を受ける。高い温度ほど溶存有機物濃度が高く、セストンへの水銀吸着を低下させる。高次捕食

者への生物濃縮は、水中からセストンへの吸着濃縮が最も強く関与しているため、このプロセスでの環境条件（や地域条件）が与える影響が、生物濃縮係数の不確実性に強く関与している。

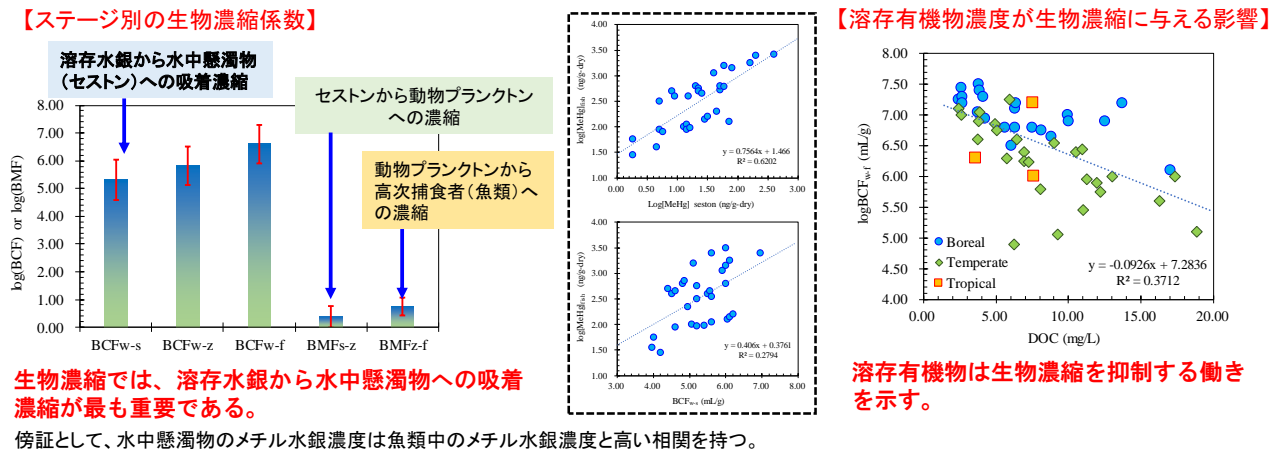


図-2.7 ステージ別での生物濃縮係数の分布および溶存有機物の影響

安定化処理した水銀（硫化水銀）からの水銀溶出速度は、硫化水銀の鉱物学的形態（ $\alpha$ -HgSと $\beta$ -HgS）に依存する。 $\beta$ -HgSの溶解速度（平均±標準偏差で $0.0169 \pm 0.017 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , N=10）よりも $\alpha$ -HgSの溶解速度（平均±標準偏差で $1.54 \pm 2.27 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , N=13）の方が統計的に有意に高い（ $P=0.016$ ）。ただし、再吸着を加味した溶出速度の場合、 $\alpha$ -HgSの水銀溶出速度（平均±標準偏差で $0.290 \pm 1.28 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , N=25）よりも $\beta$ -HgSの水銀溶出速度（平均±標準偏差で $1.73 \pm 1.80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , N=9）の方が統計的に有意に高い結果となり（ $P=0.025$ ）、溶解速度と相異なる傾向を示す。水銀溶出速度の統計分布を検討した結果、ワイブル分布が最適な分布であると評価された（図-2.8）。一方、金属水銀の溶出速度の場合、pHやRe数に比べて溶存有機物濃度の影響は大きい（図-2.8）。金属水銀の水銀溶出速度は硫化水銀の水銀溶出速度よりも6桁以上大きいいため、金属水銀の安定化処理における処理効率が、水銀溶出速度を大きく支配する。よって本研究では99%、99.9%、99.99%の処理効率をシナリオ条件とした。

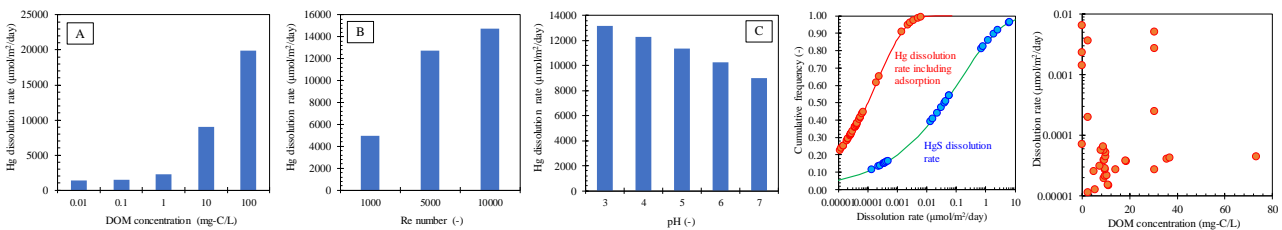


図-2.8 金属水銀および硫化水銀の水銀溶出速度

#### 4-2-2 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

##### 1) 埋立地内での水銀挙動モデル（モデル1）の検証

サブテーマ1-1で実施された水銀埋立実験での実測値とモデル1での予測値を比較したものの図-2.9に示す。本稿では準好気性条件にて改質硫黄で水銀を安定化させたケースでの結果を示す。浸出水量、浸出水中の無機水銀濃度およびメチル水銀濃度、気相中の金属水銀濃度は予測値が良い一致を示した。一方、土壌への水銀吸着量（残留量）については予測値が過小評価されており、特に水銀の埋設層よりも上部にて水銀吸着量が過小に予測されている。本モデルでは埋設層より上部への水銀移動は気相での拡散移動および晴天時での水相での拡散移動となるが、毛管力などによる上部への水分移動に伴う移流が関与している可能性が挙げられる。他の項目では予測値と実測値で良い一致を得ており、水銀挙動モデル（モデル1）の妥当性が示されたと考えられる。

##### 2) 降水条件および他の条件が埋立地からの水銀排出に及ぼす影響

東京都での約100年間の降水量データより、降雨時間は正規分布、降雨強度は対数正規分布が最適な統



計分布であった。年間降雨量が一定の条件で降雨時間および降雨強度を変化させ、気候変動に伴う集中豪雨の頻発化などを再現した降雨シナリオを作成し、埋立地からの水銀排出量に与える影響を評価した(図-2.10)。降雨時間が長く、降雨強度が大きいほど水銀排出量を増加させる傾向にあるが、最大でも8.9%程度の変動に留まっている。よって気候変動に伴う降水条件の変化は、特に降水量が多い地域ほど埋立地からの水銀排出量に大きな影響を与えないと結論づけられる。

一方、他のパラメータの不確実性の影響は大きく、埋立地からの水銀排出量(100年経過時)は約7桁の変動幅を示す(図-2.11)。特にDOM濃度(溶解速度への影響)、メチル化速度係数、脱メチル化速度係数、土壌への吸着パラメータが支配的な影響を与える。これらのパラメータは埋立地の局所的条件に強く依存するため、その地域的代表的値を評価する手法の開発が今後の課題である。また、気候変動に伴う間接的な影響でこれらの局所的条件がどの程度変動するかについても今後の検討を要する。

3) 降水条件および他の条件が水銀曝露に伴う健康リスクに及ぼす影響

3つの水銀挙動モデル(モデル1、モデル2、モデル3)で用いられたパラメータが水銀曝露量に与える影響について、その結果を図-2.12に示す。なおモデル3より畜産物経由での水銀曝露量は0.01%以下であったため、モデル3でのパラメータについては感度解析結果から除外してある。埋立地や半閉鎖水域でのメチル化速度係数および脱メチル化速度係数、メチル水銀の分配係数、生物濃縮係数、魚介類摂取量およびDOM濃度が水銀曝露量に大きな影響を与えており、降水条件の影響は小さい。よって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と結論づけられる。

次にアジアの各地域における降水条件および魚介類摂取量をもとに、水銀の埋立処分に伴う水銀曝露量(100年経過時)を推定したものを図-2.13に示す。魚介類摂取量は水銀曝露量に大きな影響を与える

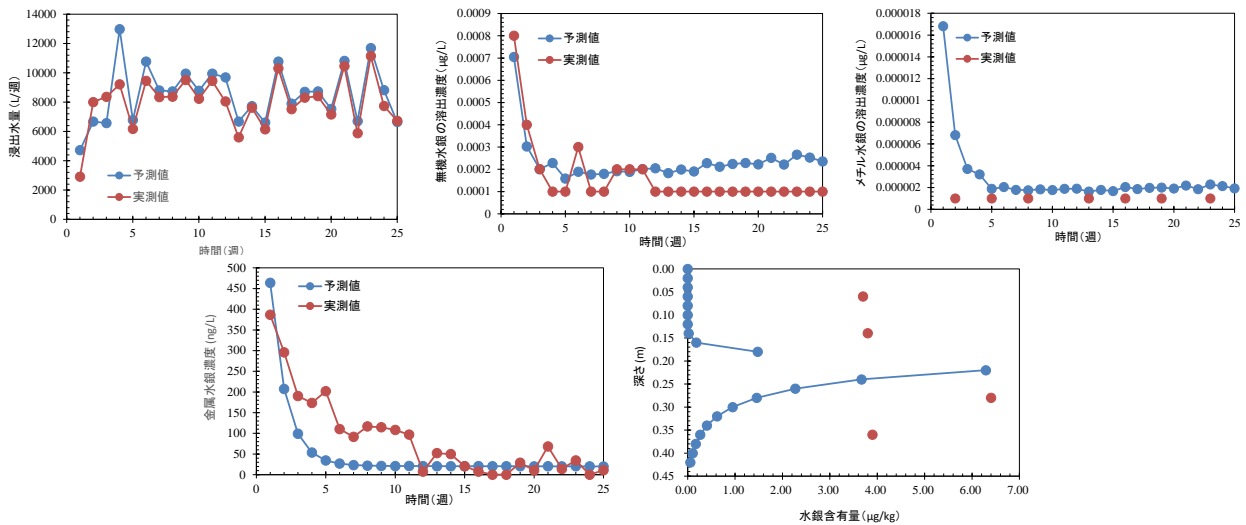


図-2.9 水銀実験槽での実測値およびモデル予測値の比較(浸出水量、浸出水の無機水銀濃度、浸出水のメチル水銀濃度、気相の金属水銀濃度、固相中の水銀吸着量(残留量))

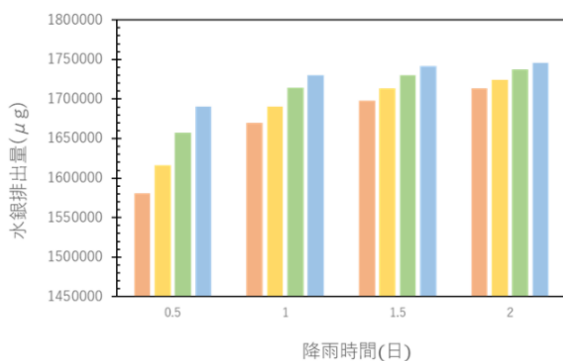


図-2.10 降水条件が水銀排出量に与える影響

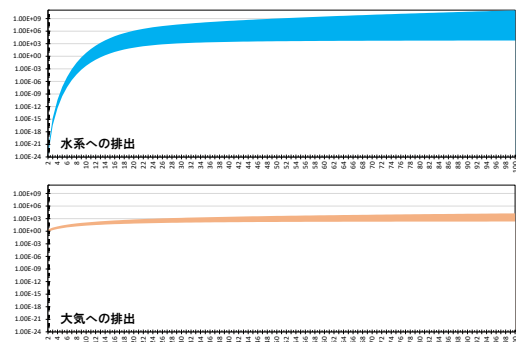


図-2.11 100年経過時の埋立地からの水銀排出量の変動



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ていない。10～90パーセントイルでの水銀曝露量が0.01～42.8 μg/person/weekであり、WHOでの耐容摂取量を超えるケースは5.3%と推定された。これは他のアジア地域においても±0.3%ポイント程度の変動内に収まっており、水銀の埋立処分における健康リスクにおいて、リスクが懸念される確率に地域性が与える影響は小さいと結論づけられる。

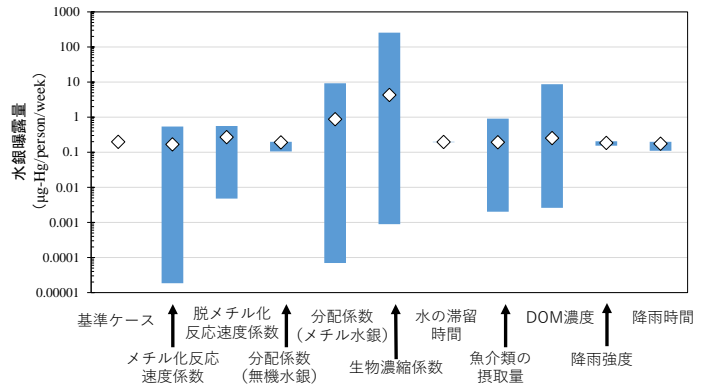


図-2.12 水銀曝露量に対する感度解析結果

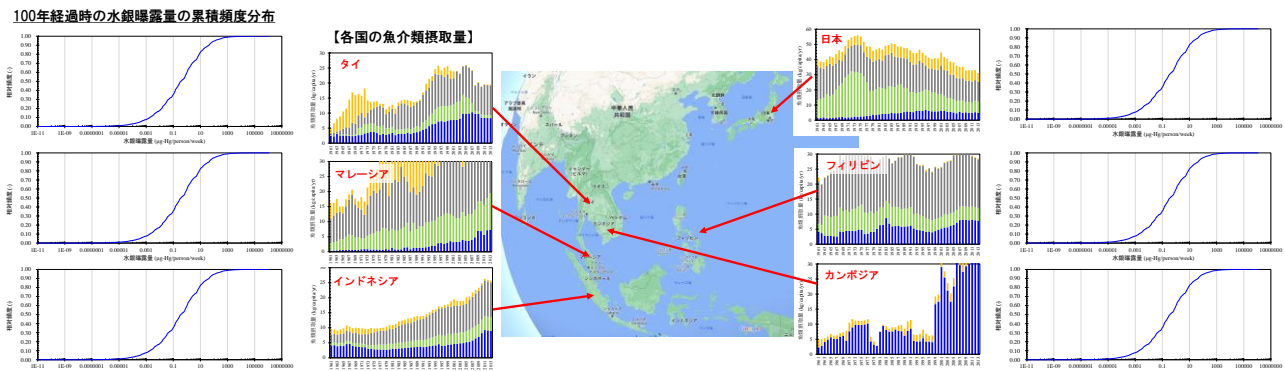


図-2.13 アジア各地域での水銀曝露量分布

#### 4-2-3 水銀の最終処分に関する市民的認知の分析

水銀対策に対する優先性は高く認知されており、放射性廃棄物に次に位置している。それ以降はダイオキシン、PM2.5、感染性医療廃棄物の順であった(図-2.14)。

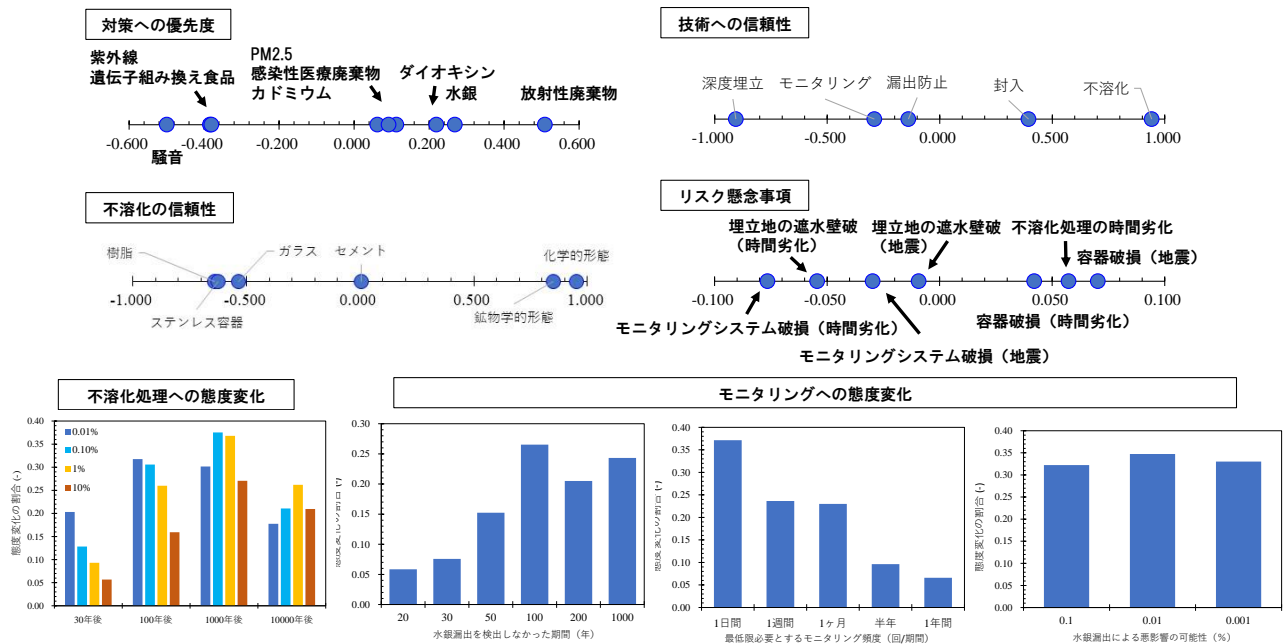


図-2.14 対策の優先度や不溶化処理、モニタリングに対する認知

水銀の埋立処分における認知的な安全性担保は不溶化>物理的封入>埋立地からの漏出防止対策>モニタリング体制>深度埋立の順での強さであった。不溶化が最も強く安全性担保として認知されているが、化学的形態変化や鉱物学的形態変化に伴う不溶化への認知的信頼性が高く、セメント固化やガラ

ス固化、樹脂封入などの物理的不溶化への認知的信頼性は低い。不溶化処理で担保されるべき期間（年数）において、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。水銀漏出を検知するモニタリングにおいて、モニタリングの頻度としては1日1回以上を望むケースが最も多かった。モニタリングを終了する条件としては100年かそれ以上の期間で漏出未検地である場合に終了を受け入れる方向で態度変化する割合が高い反面、漏出によって悪影響が生じる確率（1%、0.1%、0.01%、0.001%）でモニタリングの終了条件を表現した場合、態度変化は確率に依存しなかった。

## 5. 研究目標の達成状況

目標どおりの成果をあげた。

サブテーマ2では、ヒトへの水銀曝露およびそれに伴う健康リスクを推定・予測することを目的とした。気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を明らかにすることを狙い、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・シナリオ的推移を可視化した。また、サブテーマ1での研究成果を用いて開発したモデルの妥当性を検証し、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評価できた。以上より当初の予定通りに研究目標を達成できたと考える。

## 6. 引用文献

- 1) R. A. Lavoie, T. D. Jardine, M. M. Chumchal, K. A. Kidd, L. M. Campbell : Biomagnification of mercury in aquatic food webs: A worldwide meta-analysis, *Environ. Sci. Technol.*, 47(23), pp.13385–13394 (2013)
- 2) T. Kawai, T. Sakurai, N. Suzuki : Application of a new dynamic 3-D model to investigate human impacts on the fate of mercury in the global ocean, *Environ. Model. Softw.*, 124, pp104599 (2020)
- 3) Y. Zhang, H. Li, J. Yin, L. Zhu : Risk assessment for sediment associated heavy metals using sediment quality guidelines modified by sediment properties. *Environmental Pollution*, 275, 115844.(2021)
- 4) Joint FAO/WHO expert committee on food additives : Evaluation of certain food additives and contaminants: Sixty-first report of the joint FAO/WHO expert committee on food additives, Joint Expert Committee on Food Additives (Ed.), WHO technical report series, WHO: Geneva (2004)
- 5) M. Bellanger, C. Pichery, D. Aerts, M. Berglund, A. Castaño, M. Cejchanová, P. Crettaz, F. Davidson, M. Esteban, M. Fischer, A. Gurzau, K. Halzlova, A. Katsonouri, L. Knudsen, M. Kolossa-Gehring, G. Koppen, D. Ligoicka, A. Miklavčič, M. Reis, P. Rudnai, J. Tratnik, P. Weihe, E. Budtz-Jørgensen, P. Grandjean; DEMO/COPHES: Economic benefits of methylmercury exposure control in Europe: Monetary value of neurotoxicity prevention. *Environmental Health*, 12(1), 3. (2013)
- 6) 食品安全委員会：魚介類等に含まれるメチル水銀について (2005)
- 7) J. Poulin, H. Gibb, A. Prüss-Üstün : Mercury: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels, WHO (2008)
- 8) 坂本峰至, 安武章：魚介類とメチル水銀について, *モダンメディア*, 57 (3), pp.86–91 (2011)
- 9) 村田勝敬, 吉田稔, 坂本峰至, 岩井美幸, 柳沼梢, 龍田希, 岩田豊人, 荻田香苗, 仲井邦彦：メチル水銀毒性に関する疫学的研究の動向, *日本衛生学雑誌*, 66 (4), pp.682–695 (2011)
- 10) 荻田香苗, 坂本峰至, 吉田稔, 龍田希, 仲井邦彦, 岩井美幸, 岩田豊人, 前田恵理, 柳沼梢, 佐藤洋, 村田勝敬：メチル水銀, 水銀およびセレンに関する研究動向 —疫学研究を中心に—, *日本衛生学雑誌*, 71(3), pp. 236–251 (2016)
- 11) M. C. Sheehan, T. A. Burke, A. Navas-Acien, P. N. Breyse, J. McGready, M. A. Fox : Global methylmercury exposure from seafood consumption and risk of developmental neurotoxicity: A systematic review, *Bull. WHO*, 92(4), pp.254-269F (2014)
- 12) 清水香奈, 山本浩平, 東野達：東アジア地域における環境運命モデルを用いた水銀の影響評価, *土木学会論文集G*, 66(3), 136-148 (2010)

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

##### 【サブテーマ1】

- 1) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: Chem. Eng. Trans, 83, 7-12 (2021) Anthropogenic Mercury Release Flow in China (IF=0.760).
- 2) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: Chem. Eng. Trans, 89, 301-306 (2021) Environmental impact of anthropogenic mercury release in China (IF=0.760).
- 3) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: J. Clean. Prod., 323, 129089 (2021) The response of anthropogenic mercury release in China to the Minamata Convention on Mercury: A hypothetical expectation (IF=9.297)
- 4) 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).
- 5) Y. Cheng, Y. Asaoka, Y. Hachiya, N. Moriuchi, K. Shiota, K. Oshita, M. Takaoka: J. Hazard. Mater., 423(B), 127186 (2022) Mercury emission profile for the torrefaction of sewage sludge at a full-scale plant and application of polymer sorbent, (IF=10.588)
- 6) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: Data in brief, 42, 108280 (2021) Developing a dataset for the expected anthropogenic mercury release in China in response to the Minamata convention on mercury (IF=0.131).
- 7) 山田裕史, 松浦雄之介, 高岡昌輝, 日下部武敏, 吉川正晃: 環境衛生工学研究, 36(1), 8-14 (2022)、活性炭素繊維を用いた廃棄物焼却炉排ガスからの水銀除去
- 8) Y. Cheng, K. Nakajima, K. Nansai, J. Seccatore, M. M. Veiga, M. Takaoka: Resour. Conserv. Recycl., 185, 106461 (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity (IF=13.716)
- 9) Y. Cheng, T. Watari, J. Seccatore, K. Nakajima, K. Nansai, M. Takaoka: Resour. Policy, 81, 103370 (2023) A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM), (IF=8.222)
- 10) M. Takaoka, T. Kusakabe, K. Shiota, O. Hirata, K. Kawase, R. Yanase, and K. Nitta: J. Mater. Cycles Waste Manage., (2023) Microscopic synchrotron X-ray analysis of mercury waste in simulated landfill experiments (IF=3.579)

##### 【サブテーマ2】

- 1) F. Takahashi: Global Environmental Research, 24, 1, 45-52 (2020) Cognitive aversion of mercury scaled by pairwise comparison method with Thurstone's law of comparative judgement.
- 2) F. Takahashi: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) The impact of cognitive aversion toward mercury on public attitude toward the construction of mercury wastes landfill site (IF=3.579)
- 3) F.Takahashi, A.Sano, R.Yanase, A.Matsuyama, M.Takaoka: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) 100-year simulation of mercury emissions from landfilled stabilized mercury waste (IF=3.579)

##### <その他誌上発表 (査読なし) >

##### 【サブテーマ1】

- 1) 高岡昌輝, 須田恵理子, 鈴木規之: 金属, 90, 12, 986-994 (2020) 「水銀に関する水俣条約とその有効性評価の課題と展望」
- 2) 日下部武敏, 高岡昌輝: 廃棄物資源循環学会誌, 32, 5, 336-346 (2021) 「水銀大気排出制御技術の動向」

##### 【サブテーマ2】

- 1) 林岳彦, 河合徹: 廃棄物資源循環学会誌, 32 (5), 384-391 (2021) 全球モデルを利用した水銀の健康リスク計算手法の開発

## (2) 口頭発表 (学会等)

### 【サブテーマ1】

- 1) 高岡昌輝, 北谷拓也, 日下部武敏: 第61回大気環境学会年会 (2020) 有機系キレート剤を添着した活性炭の金属水銀除去評価 (誌上開催)
- 2) 高岡昌輝, 江川奨一, 日下部武敏, 坪井裕基, 増田隆洋, 服部正寛: 第61回大気環境学会年会 (2020) 脱着挙動による活性炭吸着材中水銀種の推定 (誌上開催)
- 3) 川瀬敬三, 柳瀬龍二, 佐野彰, 高岡昌輝, 日下部武敏, 高橋史武: 第42回全国都市清掃研究・事例発表会 (2021) 水銀廃棄物固化体の埋立処分に伴う水銀気化特性の検討 (その4)
- 4) Habuer, T. Fujiwara, M. Takaoka, The 7<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2021) Quantification of anthropogenic mercury releases by category in China in response to Minamata Convention on Mercury
- 5) 高岡昌輝: 活性炭技術研究会 (2021) 添着活性炭等を用いた気相中の水銀除去とその吸脱着挙動
- 6) 山田裕史, 松浦雄之介, 高岡昌輝, 日下部武敏, 吉川正晃: 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム(2021) 活性炭素繊維を用いた廃棄物焼却炉排ガスからの水銀除去
- 7) 江川奨一, 日下部武敏, 塩田憲司, 大下和徹, 高岡昌輝: 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021) 廃水銀等処理物の連続バッチ溶出試験による長期安定性評価
- 8) 平田修, 川瀬敬三, 柳瀬龍二, 高岡昌輝: 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021) 処分場内に設置したボーリング孔周辺環境が水銀ガス濃度に与える影響
- 9) 伊東賢生, 川瀬敬三, 平田修, 柳瀬龍二, 加藤貴史, 高岡昌輝, 日下部武敏, 高橋史武: 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021) 最終処分場における水銀廃棄物固化体の埋立特性
- 10) Habuer, T. Fujiwara, M. Takaoka: 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021) Anthropogenic mercury inputs and outputs in China in response to the Minamata Convention on Mercury
- 11) O. Hirata, R. Yanase, K. Kawase, M. Takaoka, T. Kusakabe, F. Takahashi: SARDINIA2021 (10th International Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling (2021) Mass Balance of Mercury by a Simulated Landfill Lysimeter with Different Landfill Pattern and Waste Type
- 12) Habuer, T. Fujiwara and M. Takaoka: 7th International Conference on Low Carbon Asia & Beyond (Virtual Conference) (2021) Environmental Impact of anthropogenic mercury releases in China in response to Minamata Convention on Mercury
- 13) 川瀬敬三, 伊東賢生, 平田修, 柳瀬龍二, 加藤貴史, 高岡昌輝, 日下部武敏: 第43回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集 (2022)水銀廃棄物固化体の埋立処分における気化水銀流出特性の検討
- 14) 伊東賢生, 川瀬敬三, 平田修, 柳瀬龍二, 加藤貴史, 高岡昌輝, 日下部武敏, 高橋史武: 第43回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集 (2022) 最終処分場における水銀廃棄物固化体の埋立特性
- 15) Habuer, T. Fujiwara. M. Takaoka: 第17回日本LCA学会研究発表会論文集 (2022) Potential Mercury Distributions to Different Sinks in China in Response to the Minamata Convention on Mercury
- 16) Habuer, T. Fujiwara, M. Takaoka: The 8<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2022) An Expected Anthropogenic Mercury Release from Extraction and Combustion of Natural Resources in China
- 17) K. Kusakabe: The 5th Kyoto University–Mahidol University On-site Laboratory Workshop (2022) Abatement of Mercury Emissions and Treatment of Waste Mercury
- 18) T. Kusakabe, S. Egawa, M. Takaoka: ICMGP2022 (The 15<sup>th</sup> International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Virtual event) (2022) The Influence of pH and Redox Conditions on Long-term Mercury Leaching from Sulfurized, Solidified Waste Mercury by a Serial Batch Leaching Test

- 19) 花岡達也, 中島謙一, 森本高司, 福田真耶, 南斉規介, リ ショウレイ, ヴィシュワナタン サリタ, 日下部武敏, 高岡昌輝: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022) 世界の水銀排出削減シナリオおよび脱炭素化による共便益効果の評価
- 20) 平田 修, 川瀬敬三, 柳瀬龍二, 日下部武敏, 高岡昌輝: 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 (2022) 浸出水中に浸漬した廃水銀等処理物からの水銀溶出挙動に関する検討
- 21) 伊東賢生, 川瀬敬三, 平田修, 柳瀬龍二, 加藤貴史, 高岡昌輝, 日下部武敏, 高橋史武: 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 (2022) 最終処分場における水銀廃棄物固化体の埋立特性 (その2)
- 22) Habuer, T. Fujiwara, M. Takaoka: 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 (2022) Life Cycle Impact Assessment on Time-series Total Mercury Release in China
- 23) M. Takaoka : EcoBalance2022 Partner events, Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining (2022) Intervention scenarios and global mercury modelling for effectiveness evaluation of the Minamata Convention on Mercury
- 24) 伊東賢生, 川瀬敬三, 平田修, 柳瀬龍二, 加藤貴史, 高岡昌輝, 日下部武敏, 高橋史武: 第44回全国都市清掃研究・事例発表会 (2023) 最終処分場における水銀廃棄物固化体の埋立特性 (4)
- 25) 川瀬敬三, 伊東賢生, 平田修, 柳瀬龍二, 加藤貴史, 高岡昌輝, 日下部武敏: 第44回全国都市清掃研究・事例発表会 (2023) 水銀廃棄物固化体の埋立処分における気化水銀流出特性の検討 (その2)
- 26) 安藤伴憲, 松浦雄之介, 山田裕史, 高岡昌輝, 日下部武敏, 吉川正晃: 廃棄物資源循環学会関東支部研究発表会 (2023) 活性炭素繊維を用いた廃棄物焼却炉排ガスからの水銀除去
- 27) Habuer, T. Fujiwara, M. Takaoka: The 9<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2023) Managerial Implication of Mercury Release: A Case Study in Waste Treatment Sector in China
- 28) O. Hirata, K. Kawase, R. Yanase, M. Takaoka, T. Kusakabe: The 9<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2023) Mercury diffusion from sulfide/solidified mercury waste in landfill lysimeters
- 29) M. Takaoka, T. Kusakabe, O. Hirata, R. Yanase, F. Takahashi: 2023 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management (2023), Technical trial of long-term safe disposal for waste consisting of mercury (2023.5.18予定)

## 【サブテーマ2】

- 1) 高橋史武: 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2020) 水銀に対する嫌悪感に関する研究 (その2) : 2つの定量化手法での比較, Vol.31, 67-68. 北海道大学 (オンライン), 9月16-18日
- 2) F.Takahashi, T.Wannomai: 7th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management "3RINCS2021" (2021) Accepting attitude toward a final disposal facility of mercury wastes with increase of cognitive aversion toward mercury, B-4, Online, 15-19th Mar.
- 3) 河合徹, 武内章記, 林岳彦, 近都浩之, 丸本幸治, 多田雄哉: 第29回環境化学討論会 (2021) 全球モデルを用いたメチル水銀の摂取量予測
- 4) 高橋史武: 廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021) 水銀に対する嫌悪感に関する研究 (その3) : 水銀や水俣病への認知度との関係性, Vol.32, 33-34. 岡山コンベンションセンター/オンライン, 10月25-27
- 5) F.Takahashi: 8th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management "3RINCS2022" (2022) Attitude shift from reject to acceptance toward mercury emission risk with increase of duration time of mercury emission below environmental standard, 181-182, Online, 14-18th Mar.
- 6) T.Kawai, T.I.Hayashi: (2022) 2022 Ocean Sciences Meeting. Assessing human exposure to methylmercury from seafood consumption using a global model
- 7) T.Kawai, A.Takeuchi, T.I. Hayashi: The 15th International Conference on Mercury as a Global Pollutant



(ICMGP) (2022) Assessing Impacts of Climate Change on Mercury Dynamics and Human Exposure Using a Global Model.

- 8) 高橋史武：廃棄物資源循環学会研究発表会（2022）水銀に対する嫌悪感に関する研究（その4）：水銀への嫌悪感と水銀廃棄物埋立地への態度の関係性, Vol.33, 51-52. 宮崎大学/オンライン, 9月20-22日
- 9) 田中渉, 高橋史武：廃棄物資源循環学会研究発表会（2022）埋立処分された水銀廃棄物からの水銀排出量に対する降雨条件の影響, Vol.33, 401-402. 宮崎大学/オンライン, 9月20-22日
- 10) F.Takahashi: 11th China-Japan joint conference on material recycling and waste management (2022) Stochastic approach of location-independence earthquake disaster risk estimation for mercury waste landfill, 4-3-O, Online, 17-18th Nov.
- 11) F.Takahashi: 9th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management "3RINCS2023" (2023) Stochastic estimation of location-independence earthquake disaster risk of temporal storage facility of mercury wastes, OL4-2, Kyoto/online, 13-18th Mar.

### (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

#### 【サブテーマ1】

- 1) 高岡昌輝：エコプロ Online 2020 環境省（水俣条約と日本の優れた水銀対策技術）にて動画を公開、2020年  
「水俣条約と有効性評価への取組」 <https://youtu.be/Y2MXBjhQ0Yo>  
「大気への水銀排出規制と抑制技術の現状」 <https://youtu.be/ZNNtOTTyAx4>  
「水銀のマテリアルフローと水銀廃棄物の処理処分」 [https://youtu.be/6lGBNz\\_WHg](https://youtu.be/6lGBNz_WHg)
- 2) 高岡昌輝：国立環境研究所 夏の大会：最終処分場研究の最前線、2021年、水銀廃棄物の登場、<https://youtu.be/3AeSeN6AGTM>
- 3) 高岡昌輝：日本インスツルメンツ(株)主催ウェビナー、2022年、水銀大気排出動向と廃棄物管理
- 4) 日下部武敏：京都大学アカデミックデイ2022（2022年6月19日、来場者670名）にて成果紹介、来場者との対話
- 5) 高岡昌輝：環境研究総合推進費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～（2022年9月8日、現地・オンライン参加者195名）を企画・冒頭説明
- 6) 日下部武敏：環境研究総合推進費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～（2022年9月8日、現地・オンライン参加者195名）にて成果紹介「水銀排出削減・管理技術の現状と将来」
- 7) 高岡昌輝：EcoBalance2022 Partner events, Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining (Date : October 30, 2022, Venue :Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)) にて研究プロジェクトを紹介
- 8) 高岡昌輝：Special Session on Mercury Waste Management, The 9<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management、第9回3R国際会議にて水銀廃棄物のセッション（2023年3月13日、オンライン参加者60名）を企画・冒頭説明
- 9) 平田修：Special Session on Mercury Waste Management, The 9<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management、第9回3R国際会議にて水銀廃棄物のセッション（2023年3月13日、オンライン参加者60名）にて発表

#### 【サブテーマ2】

- 1) 林岳彦：環境研究総合推進費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～（2022年9月8日、現地・オンライン参加者195名）にて成果紹介「水銀曝露リスクの推移」
- 2) 高橋史武：Special Session on Mercury Waste Management, The 9<sup>th</sup> 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management、第9回3R国際会議にて水銀廃棄物のセッション

ョン（2023年3月13日、オンライン参加者約60名）を企画・閉会挨拶

#### （4）マスコミ等への公表・報道等

##### 【サブテーマ1】

- 1) NHK 時論公論（2022年8月19日、水俣条約発効5年 教訓をどう受け継ぐ、土屋解説委員から研究成果が紹介された）、<https://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/100/472417.html>
- 2) NHK熊本 NEWS WEB（2022年9月8日、「水俣条約発効5年でオンラインセミナー 水銀の現状などを紹介」、<https://www3.nhk.or.jp/lnews/kumamoto/20220908/5000016875.html>）

##### 【サブテーマ2】

- 1) NHK熊本 NEWS WEB（2022年9月8日、「水俣条約発効5年でオンラインセミナー 水銀の現状などを紹介」、<https://www3.nhk.or.jp/lnews/kumamoto/20220908/5000016875.html>）

#### （5）本研究費の研究成果による受賞

- 1) 令和2年廃棄物浄化槽研究開発功労者環境大臣表彰、環境省、令和2年10月22日、高岡昌輝
- 2) 優秀ポスター賞、廃棄物資源循環学会研究発表会、令和4年9月20-22日、高橋史武
- 3) 優秀ポスター賞、廃棄物資源循環学会関東支部研究発表会、令和5年3月3日、安藤伴憲、松浦雄之介、山田裕史、高岡昌輝、日下部武敏、吉川正晃

#### （6）その他の成果発表

##### 雑誌特集号の企画

- 1) アグネ技術センター金属誌(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」
- 2) 廃棄物資源循環学会誌（第32巻第5号, 2021年9月）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」
- 3) 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」

#### IV. 英文Abstract

##### **Future Projections on Mercury Control Technologies and Health Risk from Exposure to Mercury**

Principal Investigator: Masaki TAKAOKA

Institution: C cluster, Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto City, JAPAN

Tel: 075-383-3335 / Fax: 075-383-3338

E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp

Cooperated by: Fukuoka University, Tokyo Institute of Technology, National Institute of Environmental Studies

[Abstract]

**Key Words:** Mercury, atmospheric emission, mercury control technology, waste management, long-term stability, health risk

This study evaluated mercury control/management technologies, which are countermeasures necessary for assessing the effectiveness of the Minamata Convention, considering future changes in social trends. We predicted human exposure to mercury from the mercury concentration in marine products calculated using the global scenario analysis model (SII-6-2) and global environmental dynamic model (SII-6-3).

Measures, technologies, emission factors, etc. required for future projections of mercury emissions at major sources were investigated by surveying industry groups and companies and examining the most recent databases, papers, etc. The results were evaluated and assigned to the SII-6-2 group. As future mercury emission control technologies, we examined mercury behavior in CO<sub>2</sub> capture devices and activated carbon-based high-performance adsorbents. Since mercury waste management is essential for achieving a final mercury sink, we conducted simulated landfill experiments using lab-scale lysimeters and accelerated leaching tests to establish long-term management methods for waste consisting of mercury. Based on the lab-scale lysimeters, the possibility of mercury leaching from solidified mercury waste was low, even if all the solidified mercury waste was landfilled with mixed waste or incineration residue. The accelerated leaching tests showed that mercury wastes solidified with modified sulfur or epoxy resin were more stable than those with low alkali cement, but alkali, oxidizers, and Na<sub>2</sub>S had significant effects on mercury leaching. Reinforcing the solidified material with an epoxy coating was identified as an effective additional measure for solidified mercury waste. In addition, results from the lab-scale lysimeters validated the model of mercury behavior in landfills. Model simulations also reflected the inevitably large uncertainty in the local environmental risk of landfilling solidified mercury waste.

We also investigated the health risks of mercury exposure. The health outcomes selected were “Effects of prenatal exposure on neurodevelopment in children: IQ reduction” and “Cardiac deaths”. “Health risk from the consumption of seafood via markets” was selected as an exposure scenario. Model calculations showed that implementing emission reduction measures would result in a significant difference in health risk by 2050. Compared to no action, the maximum reduction scenario should prevent economic losses of 27 trillion yen/year. However, there is a time lag before the impact of countermeasures becomes apparent, indicating the importance of implementing countermeasures early.