

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-6-2 有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発 (JPMEERF20S20620)

令和2年度～令和4年度

Development of global scenario model for effectiveness evaluation of the Minamata Convention on Mercury

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

立命館大学

〈研究協力機関〉

広島大学

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

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）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの 開発設計と解析 （国立研究開発法人国立環境研究所）	17
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析 （立命館大学）	32
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	44
IV. 英文Abstract	49

I. 成果の概要

課題名 【SII-6-2】有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発
 課題代表者名 中島 謙一 (国立研究開発法人国立環境研究所資源循環領域
 国際資源持続性研究室 主幹研究員)

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

91,951千円(合計額)

(各年度の内訳: 令和2年度: 30,880千円、令和3年度30,537千円、令和4年度: 30,534千円)

研究体制

(サブテーマ1) 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発
 設計と解析(国立研究開発法人 国立環境研究所) (JPMEERF20S20603)

(サブテーマ2) ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析(立命館
 大学) (JPMEERF20S20604)

研究協力機関

広島大学、三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

本研究のキーワード 水銀に関する水俣条約、気候目標、有効性評価、将来シナリオ

1. はじめに(研究背景等)

石炭や石油等を含む鉱物資源に支えられる人類の経済活動は、歴史的な水銀の排出・放出と密接に係わる。日本における水俣病(水俣, 1956年; 新潟, 1965年)やイラクでの中毒禍(1971年)、近年、深刻化する小規模な金の採掘・製錬(Artisanal Small-Scale Gold Mining: ASGM)に伴う南米・アフリカ諸国等における水銀汚染等の顕在化は、水銀問題に対する社会の関心を高めた。これら深刻化する水銀問題を背景に、国連環境計画(UNEP)では、2002年より人への影響や地球規模の汚染等に関する報告書を発信しており、海洋・土壌への水銀蓄積の増大とその原因としての人為的な水銀の排出・放出の影響等を指摘してきた。

そして、2017年には、歴史的な国際合意と言える『水銀に関する水俣条約(Minamata Convention on Mercury)』が発効した。この条約は、水銀及びその化合物の人為的な排出及び放出から人の健康及び環境を保護することを目的とし、採掘から貿易、使用、排出、放出、廃棄等に至る水銀のライフサイクル全体を包括的に規制する国際条約である。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・放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。加えて、水俣条約では、第22条にて有効性の評価の実施が明記されており、締約国会議は、この条約の効力発生の日から6年以内に、及び、その後は、締約国会議が決定する間隔で定期的にこの条約の有効性を評価することが定められている。有効性評価の枠組み等については、2019年11月に開催された水銀に関する水俣条約第3回締約国会議、2022年3月に開催された水俣条約第4回締約国会議を経て、有効性評価の枠組み・指標に関する議論が継続している状況である。なお、有効性評価においては、4つの政策的質問(a. 締約国は、水俣条約を実施するための行動を起こしたか、b. aの行動は、水銀の供給、使用環境への排出・放出の変化をもたらせたか、c. bの変化は、環境中、生態中、脆弱な人間集団中の水銀の水準の変化をもたらしたか、それは水俣条約の実施に起因するものか、d. 現在の対策は、水銀から人の健康と環境を守るという水俣条約の目的に合致しているか)が設定されている。

有効性を評価する上では、各国からの報告と共に、科学的な知見から政策的質問cおよびdの議論を検証するために、更には、将来における追加的措置の必要性を議論する上で対策による中長期的な効果・影響の把握のために、人為的活動と水銀排出、環境動態、人健康影響を包括的に記述する統合分析モデルの開発が望まれている。先駆的な学術研究としては、Zhangら(2021)があげられるが、将来にかけての水銀排出シナリオが、人健康影響(IQ低下や心疾患の増大)の損失や対策効果の算定において大きな影響を与えることが示されている。しかし、Zhangらの研究では2010年前後の研究をもとに将来シナリオを設定しており、水銀の排出挙動にも大きな影響を与える鉱物資源の急速な拡大や気候目標と合致した脱炭素対策の進展・強化を含めて、近年の社会経済システムの急速な変化は考慮されていない。

2. 研究開発目的

水俣条約が適切に履行されることで、世界的な水銀の需要・供給の削減、更には、水銀の排出・放出の削減が期待される。しかし、将来の社会経済の状況や対策の履行状況を考慮すると、主要排出源(石炭等の燃焼部門、ASGMやセメント製造を含む鉱工業部門など)において、大幅な水銀排出量の増大が懸念される。特に、アジア・アフリカ地域における急速な人口増加や経済発展は、経済活動を支える鉱石(鉄鉱石、銅鉱石など)や石炭など水銀を含有する鉱物資源の利用拡大を伴う事が予想されることから、適切な水銀の対策・管理が講じられない場合には、汚染の拡大を招き、条約の有効性を損ないかねない。また、BAT/BEP等に代表される対策技術の導入等が、負の側面として、他資源の利用やその利用に起因する他の課題を誘発する可能性も懸念される。

この背景を踏まえ、本研究では、世界全体を対象として 国・地域別の人為的起源による大気への水銀排出量の動態の将来推計を可能とするシナリオ分析モデルを開発し、国・地域別の水銀排出シナリオを定量的に描く。水銀の大気排出の最小化に資する科学的知見として、対策シナリオごとの削減量と共に、残存する排出源(国・地域、セクター)、更には、生じ得る副次的影響・トレードオフを同定し提供することで、有効性評価の為の議論を支援する。本テーマは、以下の2つのサブテーマで構成する。

- サブテーマ1 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析
- サブテーマ2 ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析

サブテーマ1の主たる役割は、グローバル・シナリオモデルの設計・開発と将来シナリオの定量化である。一方、サブテーマ2の主たる役割は、個別の対策技術のトレードオフの有無の未然把握である。なお、将来の水銀排出シナリオの定量化は、入力データとして、テーマ1(およびテーマ2サブテーマ2)から提供される技術情報等を踏まえて解析を実施する。また、出力データとして得られる将来の水銀排出量(水銀排出インベントリ)情報を解析用の基礎データとしてテーマ3に提供する。

また、本研究を遂行する過程で、2022年3月に開催された「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議第2部」(COP4.2)では、議長国であるインドネシア政府の主導により、水銀の違法貿易を防止するための国際協調を強化することを目的とした「バリ宣言」が表明された。これを受けて、水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の設計・開発に取り組むと共に、主たる排出源であるASGM対策に関する議論にも注力した。一連の研究を通じて、有効性評価の手法確立に資する学術的知見の提供と共に、排出管理を実現するための監視・規制立案の科学的支援を目指した。

3. 研究目標

全体目標	人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルの開発した上で、国・地域別の将来の水銀排出シナリオを定量的に描く。加えて、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無を同定する。
------	--

サブテーマ1	資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析
サブテーマリーダー /所属機関	中島 謙一／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行および気候変動対策を考慮した複数の将来シナリオを作成し、中長期の水銀排出シナリオを定量的に描く。

サブテーマ2	ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析
サブテーマリーダー /所属機関	山末 英嗣／立命館大学
目標	対策技術の導入による水銀使用量低減と他の環境影響指標とのトレードオフの有無を同定し、市場への影響を定量化する。

4. 研究開発内容

4-1. 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析 (サブテーマ1)

主たる研究開発項目として、人為起源による大気への水銀排出量の推計のためのグローバル・シナリオモデルの設計・開発(図-0.1, ①～⑤)に取り組んだ。加えて、2022年3月に開催された「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議第2部」(COP4.2)にて、議長国であるインドネシア政府の主導により、水銀の違法貿易を防止するための国際協調を強化することを目的とした「バリ宣言」が表明されたことを受けて、本サブテーマでは、水銀の排出管理を実現するための監視・規制立案の科学的支援を目指し、水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の開発設計に取り組んだ。

水銀の排出削減には、水銀の排出源でのBAT/BEPの導入に加え、脱炭素対策の一環としての石炭消費量の削減や製鉄等の工業プロセスの脱炭素化なども原燃料起源の水銀排出の削減に貢献することが期待できる。本研究では、パリ協定で合意した2℃目標およびグラスゴー気候合意で注目された1.5℃目標の実現にむけた気候変動対策と、気候変動対策に伴う水銀排出削減の共便益効果の定量化に取り組むと共に、その限界について評価した。解析に際しては、IPCC第5次評価報告書以降に世界のモデル比較プロジェクトで用いられている共通社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)をもとにSSP2(中庸)に相当する活動量を整備した上で、ベースラインとなるシナリオ(リファレンスシナリオ(REF))を含めて、将来の社会変化を想定した複数の水銀排出シナリオの作成を進めた。具体的には、削減対策シナリオ(RDC)として、水銀対策を想定した3種類のシナリオ(a-1.段階的削減シナリオ: エキスパートジャッジに基づく削減シナリオ、a-2.2050年最大削減達成シナリオ: 現状で実装されている最高レベルの技術に、2050年に全ての国・地域が到達する事を想定した削減シナリオ(2050年に究極削減シナリオを達成すると想定)、a-3.究極削減シナリオ: 現存技術による究極的な削減シナリオ)と共に、気候変動対策を想定した2種類のシナリオ(b-1.2℃目標相当シナリオ、b-2.1.5℃目標相当シナリオ)を設定した。

水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の設計・開発に際しては、統計値や報告値等の情報間の不整合(Discrepancies / Inconsistencies)に着目する。不整合は、水俣条約の有効性評価の枠組み設計にむけて、条約事務局で準備を進める報告書計画(Plan for the report on Trade, Supply, and Demand of Mercury)でも取り上げられているキーワードである。違法貿易への対処を支援すべく、i. 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合、ii. 二国間貿易における報告値の不整合に着目した検出手法の開発に取り組んだ。

SII - 6 | テーマ2 サブテーマ(1) | 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析 (国立環境研究所)

- 成果目標**
- ・世界全体での水銀の動態(フロー・ストック・排出など)の把握の為のグローバル・シナリオモデルの開発
 - ・気候変動枠組み条約及び水俣条約の履行を含む将来の水銀排出削減シナリオ(国・地域別の水銀排出量)の作成

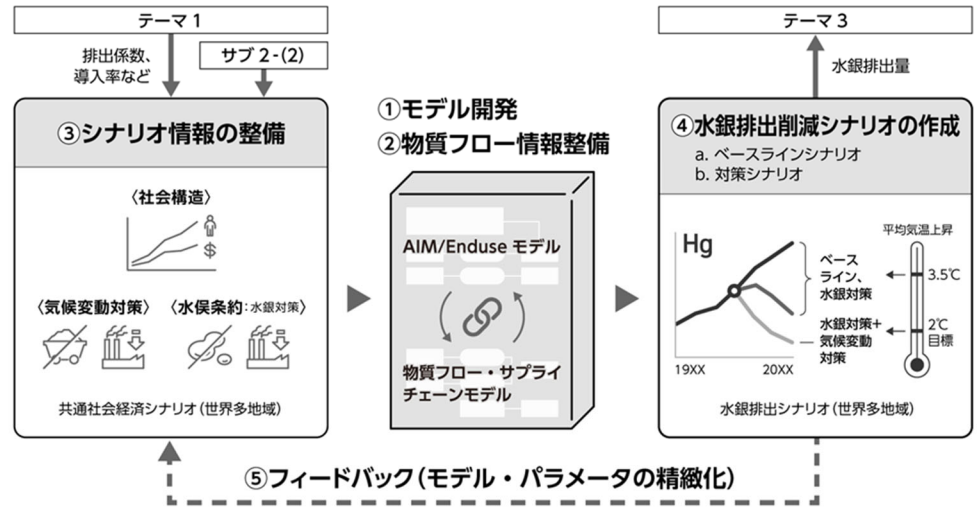


図-0.1 サブテーマ1の概観

4-2. ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析 (サブテーマ2)

水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無について、ライフサイクル思考に基づき定量的に評価を行う。まず水銀排出量との関連性が高い製錬プロセスとして、プレコンシューマー型産業であるASGM、鉄鋼製錬、銅製錬を対象として対策技術の影響を定量化する。また、水銀を含有するポストコンシューマー製品の代表として照明機器を選定した評価も行う。さらには水銀含有一般廃棄物(乾電池、照明)の処理への水銀対策の導入による効果と副次的影響、そして回収水銀の処理についても検討を行う。

SII - 6 | テーマ2 サブテーマ(2) | ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析 (立命館大学)

- 成果目標** 水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無の同定

The graph plots 'Hg' (Mercury) on the y-axis and 'Hg利用' (Hg utilization) on the x-axis. A line shows a decrease in Hg as utilization increases. A 'トレードオフ' (Trade-off) box is placed between the y-axis and the line. Other indicators include 'GWP 資源コスト' (GWP Resource Cost) and 'GHG_e' (GHG emissions).

【実施内容】

- 水俣条約を履行する為の製品・製造プロセスにおける対策等の抽出・整理
- 対策プロセス等のインベントリデータ(プロセス情報、環境負荷情報など)の整備
- 対策プロセス等の導入による影響を評価しトレードオフの有無を同定、市場への影響を定量化

ライフサイクルな視点での評価

- ・インベントリ分析
- ・種々の指標(地球温暖化・資源利用(TMR)、コストなど)による多角的な評価
- ・市場への影響を把握

図-0.2 サブテーマ2の概観 (図-2.1)

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

5-1-1. 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析（サブテーマ1）

(1) 将来シナリオ：人為起源による水銀排出量

水銀対策の導入により、追加的な対策を講じない場合(Ref_FIX；4.1千トン(2050年))と比較して、大幅な水銀排出削減が見込めるが、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度(2.1千トン)に留まることから、人為起源による水銀の大気排出の最小化のためには、最大限の水銀対策の即時導入が求められる事が明らかとなった(図-0.3i)。また、脱炭素対策の共便益効果により、相当量の削減が可能であることが示された(図-0.3ii)。但し、脱炭素対策としてバイオマス発電が増加する場合、発電方式及びバイオマス種によっては、水銀排出量を増大させる可能性があるため、注意が必要であることが示された。

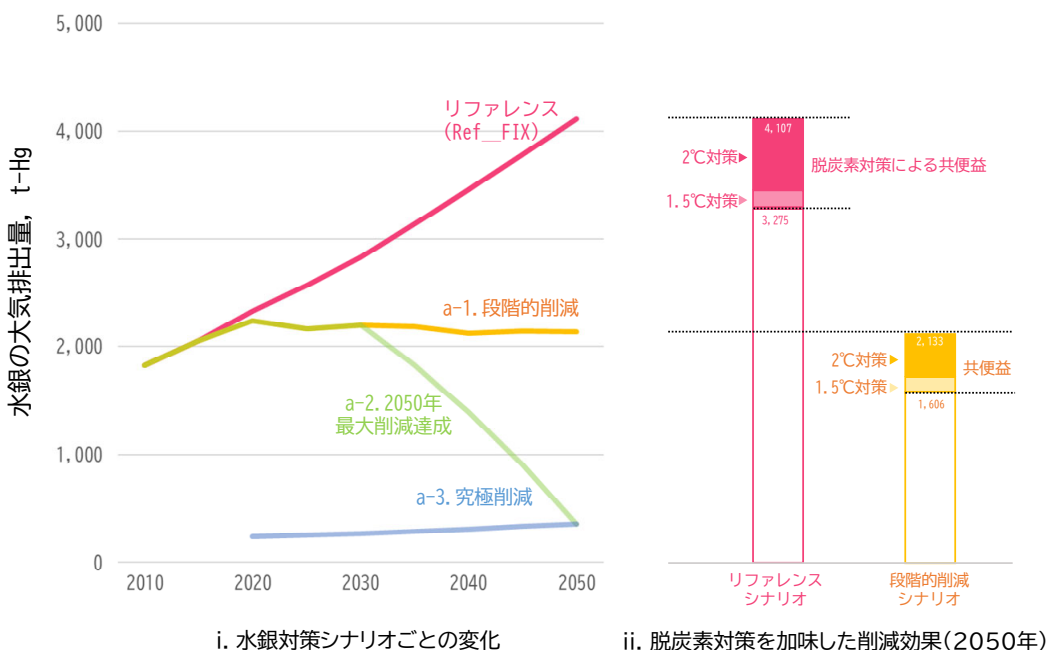


図-0.3 2050年までの水銀排出量の変化と脱炭素対策による共便益効果（総排出量）（図-1.2）

また、図-0.4に、水銀削減シナリオごとの水銀排出量の推移と排出源内訳（セクター別内訳と国・地域別内訳）を示した。水銀対策による削減効果は、追加的な対策を講じない場合(Ref_FIX；4.1千トン(2050年))と比較して、大幅な水銀排出削減が見込めるが、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度(2.1千トン)に留まることから、人為起源による水銀の大気排出の最小化のためには、最大限の水銀対策の即時導入が求められる事が明らかとなった。追加的な対策を講じない場合は、産業部門別の排出源として、鉱工業部門(ASGM:2倍、他金属鉱業：2.6倍、セメント産業：1.7倍)や発電部門(2倍)における顕著な増大、そして、国・地域別の排出源として、アフリカ地域(4.5倍)・中国(1.7倍)・インド(2.8倍)などを中心に増大が示された。一方、現状で実装されている最高レベルの技術に2050年に全ての国・地域が到達する事を想定した場合には、より多くの削減が期待できることが示された。2050年におけるa-2. 2050年最大削減達成シナリオ、および、a-3. 究極削減シナリオで想定される人為起源による水銀の大気排出量は約0.35千トンであり、同年のリファレンスシナリオと比較して約3.8千トン、2015年の水銀排出量と比較した場合でも約1.7千トンの削減が見込める。全ての産業部門そして国・地域において、大幅な削減が期待できると得られた。この事は、日本を含めて各国において、依然として大きな削減ポテンシャルがある事を示唆していると言えよう。

加えて、削減効果には地域偏在性があり、国・地域別に排出量が残存する部門の特徴が異なることが判明した(図-0.5)。ASGM対策や金属鉱業部門への水銀対策、更には、脱炭素対策に伴う共便益により、大幅な削減効果が期待できるが、依然として、一部の国・地域やASGMを含む特定の排出源において、排出量が高い水準に留まるという結果が得られた。更に、脱炭素対策としてバイオマス発電が増加する場合、発電方式及びバイオマス種によっては、水銀排出量を増大させる可能性があるため、注意が必要であることが示された。今後、水銀排出の最小化に向けて、中国や南米・アフリカ諸国を対象に、排出量が残存する部門へ更なる対策の強化が不可欠であると言える。具体的には、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的ではない地域では、脱炭素対策によるHg削減が、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的な地域では、除去対策によるHg削減が効果的であると考えられる。

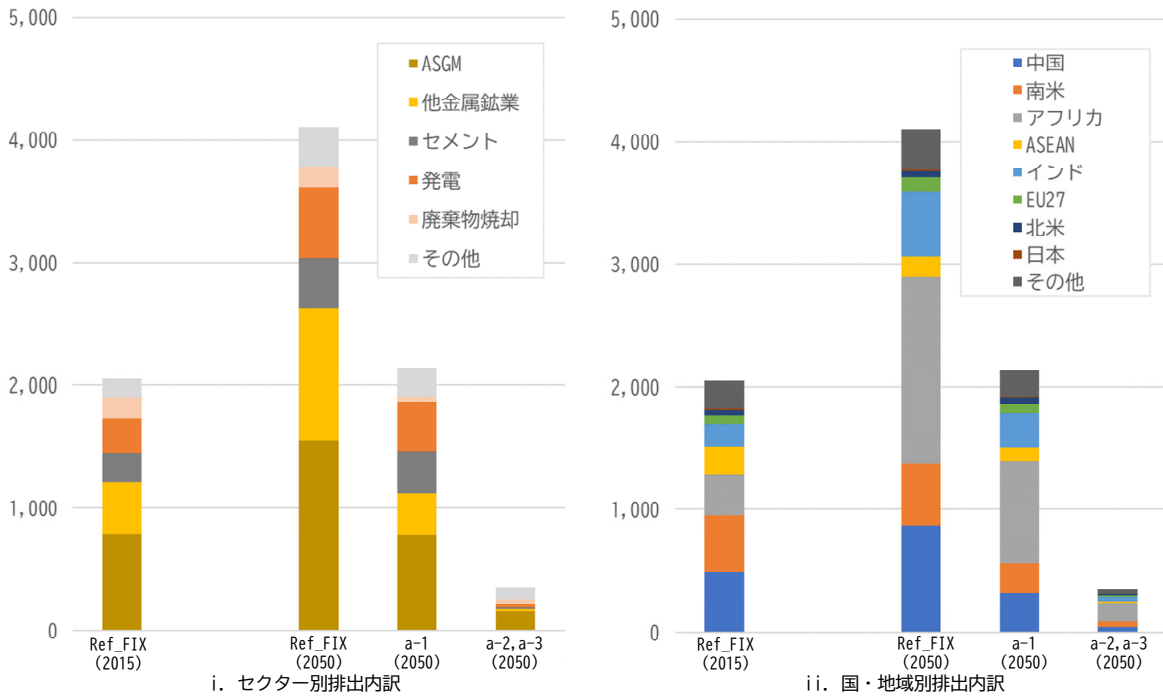


図-0.4 ii. 2015年および2050年における排出内訳 (図-1.3)

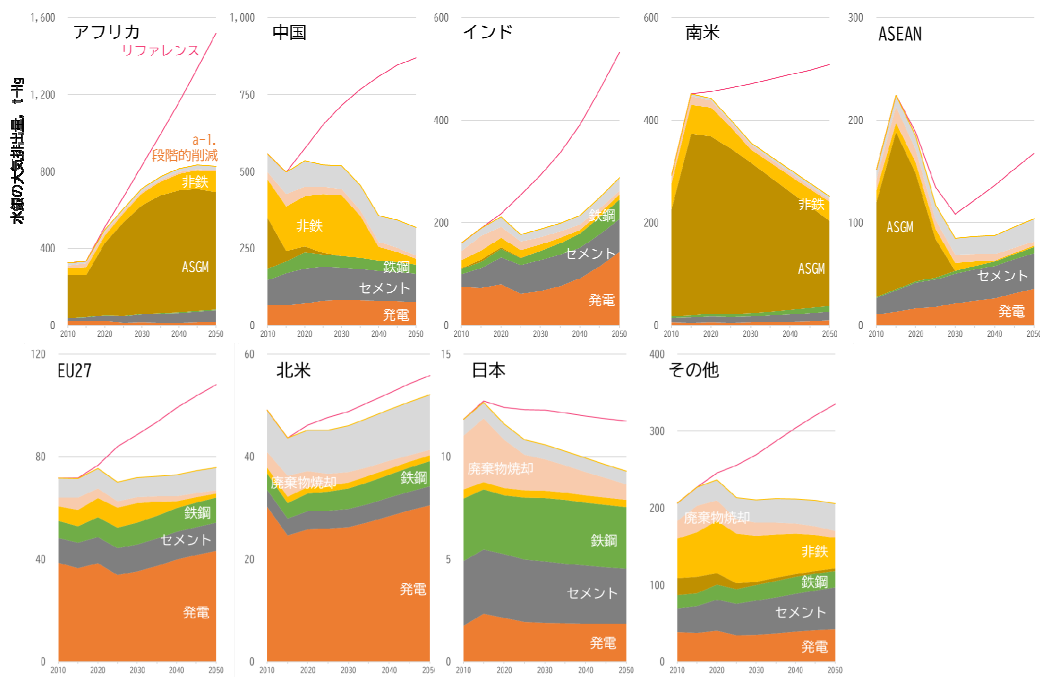


図-0.5 水銀対策による2050年までの水銀排出量の変化 (国・地域別排出量) (図-1.4)

(2) 不適切な水銀の貿易・使用の検出

水銀の違法貿易への対処を支援すべく、i. 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合、ii. 二国間貿易における報告値の不整合に着目した2種類の検出手法の開発を達成した。本手法を、貿易の監視・管理ツールや通知・情報共有システムの開発に組み込むことで、水銀の違法貿易の調査を支援する事が期待できる。

図-0.6に、国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量に関する解析結果の概観を示した。図中央の縦棒グラフは、2010年から2018年にかけての地域ごとの金生産に伴う水銀利用量(赤)と地域ごとの水銀の見掛け消費量(青)の累積値を示している。また、両脇の横棒グラフは、国・地域別に、両者の数値の差を示しており、正值が大きいほど、ASGMにおける水銀利用量が水銀の見掛け消費量を上回る矛盾が生じている事を意味する。解析により、中南米・アフリカ、アジアの一部の国において、水銀の消費・利用に係わる報告値に顕著な不整合が検出された。アフリカ諸国は水俣条約 (Minamata Convention, MC) の締約国であり、多くの国が国家行動計画 (NAP) を提出しているが、最も大きな不整合を示したスーダンがMCの締約国ではなく、NAPも提出していない。なお、現在、MCに加盟、受諾、承認、または加盟している国は137か国であり、18か国がNAPを提出している。ASGM活動を行っている80か国のうち、39か国が調査され、33か国がMCの加盟国であり、12か国がNAPを提出している。水銀の不適切な使用・流通の廃絶・最小化のためには、締約国のみならず全ての国・地域の協調が不可欠であると言えよう。

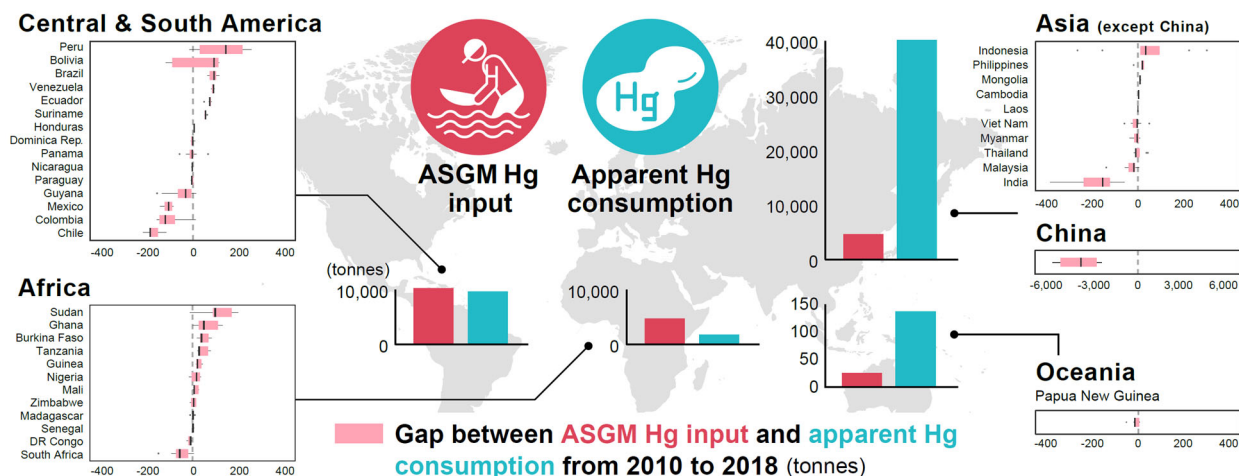


図-0.6 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合

また、二国間貿易を対象とする解析では、貿易統計の不整合問題（輸出国報告値と輸入国報告値が一致しない問題）を応用する事で、水銀の違法国間貿易の検出に取り組んだ。具体的には、医療分野の検者間信頼性指標として使用される級内相関係数 (intraclass correlation coefficients : ICC) を採用することで、輸出国と輸入国でそれぞれ報告される輸出報告値と輸入報告値をもとに、不整合の度合いを定量化した。解析の結果、欧州の水銀輸出規制、米国の水銀輸出規制、水俣条約などの水銀貿易規制が強化される中で、不適切な水銀の国間貿易の存在が減少する傾向を把握する一方で、主要な水銀輸出国または水銀輸入国の一部で、不適切な水銀の国間貿易が続いている可能性が明らかとなった。これには、新興国間の貿易だけではなく、高所得国が関与する貿易についても不整合が存在する事が示された(図-0.7)。加えて、詳細な解析の結果、先行調査により不適切な流通への関与が指摘される国(インドネシア・中国・スーダン・トーゴなど)を含む複数の国・地域において、報告値間の不整合を検出した。本研究は、ICCを駆使することで不適切な水銀の国間貿易の存在を効率的に検出する方法と言える。

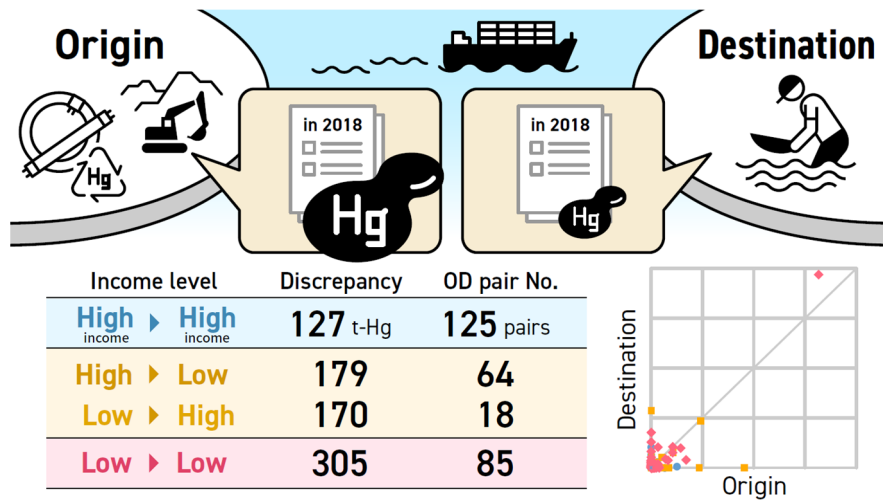


図-0.7 二国間貿易に伴う不整合の概観

5-1-2. ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析 (サブテーマ 2)

(1) インベントリデータの構築

LCAに用いられる国内の主要なLCIデータとしてのIDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) について、本研究では、環境省の水銀大気排出インベントリや水銀マテリアルフローにおける水銀排出プロセスに対応するIDEAv2.3のプロセスを同定するとともに、対応する水銀排出量の各プロセスへの合理的な割り付け方法を検討した。なお、得られたデータはIDEAの開発者とディスカッションをおこない、IDEAへの掲載をするための準備を進めている。

(2) 製錬プロセス

大気水銀廃棄量の中でもその発生源として大部分を占めるのが零細・小規模金採掘 (ASGM) である。ここでは、水銀の排出量あるいは使用量の削減・廃絶が期待される3種類の対策 (排出抑制: 蒸留器による回収、使用抑制: 精鉱法への転換、使用廃絶: 青化法への転換) を取り上げ、2050年にかけて各従事国における導入効果を推定した。その結果、蒸留器や青化法の導入に伴う水銀排出量の大幅な削減が2050年までに達成できると試算された。その一方で、これら対策技術の介入に伴って、廃棄物として適切かつ恒久的に管理する必要がある水銀が発生するという点、また新たな健康被害をもたらすシアン化水素が排出されるという点が副次的影響として特定された (図-0.8)。また、蒸留器による回収廃水銀の2050年までの累積隔離管理コストを算定したところ、世界全体では1.68億ドル (累積値) に達すると推定された。これは、地球環境ファシリティによる過去20年の累積ASGMファンド (5億ドル) の約33%に相当することから、排出削減と共に、廃水銀の適正管理を実現する為には追加的な予算措置などを含めた検討が必要であることがわかった。

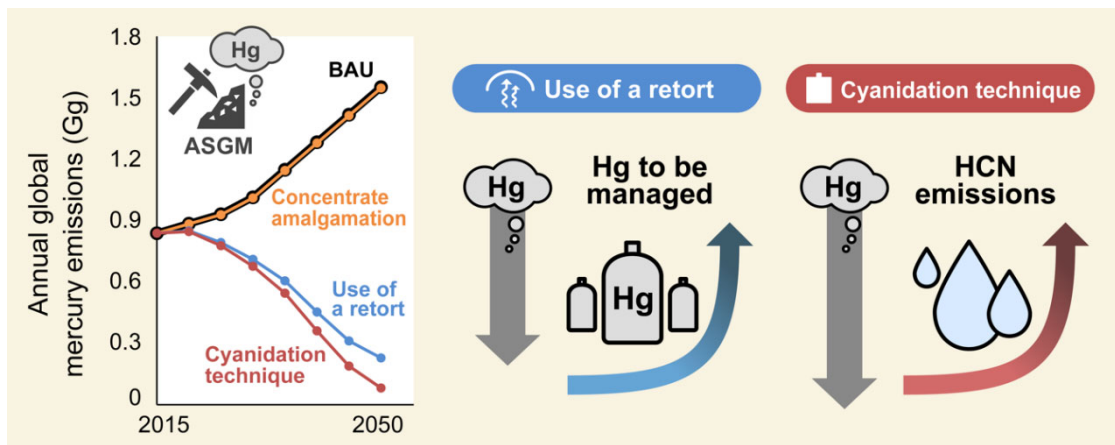


図-0.8 ASGMにおける水銀排出低減に伴う副次的影響を踏まえたトレードオフの概要

鉄鋼業に関して、水俣条約では規定は設けられていない。一方で、日本においては、大気汚染防止法の観点から要排出抑制施設となっており、水銀の大気排出抑制の自主的取り組みが求められていることから、追加的な分析を実施した。その結果、粗鋼1トンあたりの総括水銀排出係数については、鉄鉱石や鉄スクラップといった鉄源に由来する水銀排出が多くを占めていることから、天然ガスを用いる直接還元鉄へのシフトは水銀排出の提言に寄与することが分かった。一方で、電力由来の水銀排出が総括水銀排出係数に与える影響は相対的に小さいことが判明した。また、水素製鉄への転換が進んだ際の2050年の予測水銀排出量は2019年のものと比較して大きな増減は見られなかった。

非鉄製錬業に関しても、銅製錬を対象として、2050年までの銅需要量の推計を行うとともに、銅のリサイクル推進と水銀除去技術の導入の有効性を評価した。その結果、対象として主要銅生産国全体における2050年での水銀大気排出量は、なりゆきシナリオにおいては、2022年の推計値と比べて約36%増加するが、銅リサイクル推進シナリオ、水銀除去技術導入シナリオ、銅リサイクル推進及び水銀除去技術導入シナリオにおいては、それぞれ約5.7%、約99.0%、約99.3%減少すると推計された。銅のリサイクル推進によって水銀排出を一定程度減らすことができるが、水銀排出対策技術の導入による削減効果がより大きいことが示唆された。また、現状での銅製錬由来水銀排出のほとんどがChina、Russia、Iranの3カ国からの排出であり、対象主要国全体での排出量の約98%を占めたことから、これらの国での対策技術導入が比較的大きな削減効果をもたらす結果となった。

(3) 水銀含有製品

水銀含有機器はその技術転換によって大気排出量が大きく変化すると考えられる。そこで水銀を含有するポストコンシューマー製品の代表として照明機器を選定し、発展途上国の一つであるマレーシアを例に、2050年までにおいて照明機器の対策技術の導入による水銀排出量と資源利用量の推移変化をライフサイクルの観点から推定した(図-0.9)。照明機器は白熱電球、小型蛍光灯、発光ダイオード電球を対象とし、資源使用量の指標として、資源開発のための採掘活動によって生じる土地撹乱の規模を表す関与物質総量を用いた。結果として、マレーシアにおいて家庭用照明機器の技術転換により資源使用量(TMR)は減少していくものの、水銀大気排出量の増加が一時的に確認された。これは蛍光灯の廃棄量の増加に起因する。特に急速な技術転換は蛍光灯の使用をより増加させ結果として、遅滞な技術転換に比べ、水銀排出量がより急増することが推定された。さらに、家庭用廃電球のうち、適切に処理されリサイクルされているのは全体の13%に過ぎないことから、推定以上の水銀が拡散されている可能性が示唆されており、発展途上国における水銀含有機器の適切な技術転換及び処理システムの構築が急務であると言える。

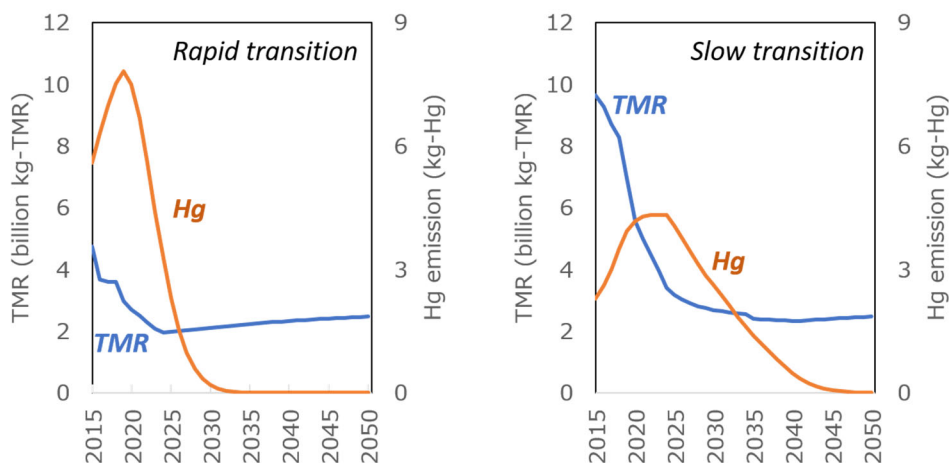


図-0.9 マレーシアにおける家庭用水銀含有照明機器の対策速度が資源 (TMR) と水銀大気排出量に与える影響(図-2.8)

(4) 水銀処理

国内の多くの地方自治体では水銀含有一般廃棄物を別途収集し、水銀の環境への拡散を避けるための処理を実践している。しかし、当該処理に伴う環境影響は評価されていない。そこで、本研究では水銀含有一般廃棄物の処理およびリサイクルに伴う温室効果ガス排出量および資源消費への影響について評価した。まず、主要自治体に調査票を送付し、水銀含有一般廃棄物（乾電池、蛍光灯）のリサイクルルート、処理量、輸送方法等を調査した。全国110自治体に送付し、71自治体より回答を得た。また主要なリサイクルルート別に燃料消費量、資材使用量等を調査した。特に、水銀回収プロセスについては国内の主要水銀回収事業者の協力を得て、実際のインベントリデータを収集した。

さらに、回収された水銀は有価物として国内外にて資源として再利用されているが、水俣条約の発効に伴い、水銀は将来需要が減少することが考えられる。そこで、国内で廃棄物より回収された水銀を安定固化・埋立処分する将来を想定し、当該プロセスにおける環境影響を評価した(図-0.10)。その結果、乾電池に関してはニッケル回収に伴う環境負荷低減効果が大きいため、鉄成分に加え、ニッケル成分の適切な回収・リサイクルが重要であることが示された。蛍光灯のリサイクルにおいては、破碎せずに輸送すると輸送効率が低いため、温室効果ガス排出量および資源消費量が破碎するケースに比べて明確に多いことが示された。使用済み蛍光灯の回収量の多い自治体においては事前処理（破碎処理）による輸送効率向上が重要であることが示された。

水銀の最終処分においては、水銀と硫黄を反応させ、硫化水銀を合成する。さらに、硫黄を加えて固型化物を生成させる。その後、管理型処分場に埋立処分をする。そこで、当該方法に基づき最終処分に要する資材等の必要量を算定し、それに伴う環境影響を評価した。その結果、最終処分するケースは温室効果ガス排出量、資源消費量とも増加するが、その差はわずかであることが示された。将来回収された水銀を最終処分するよう処理方法を変更しても、それに伴う環境影響（気候変動および資源消費への影響）は小さいため、長期保管に伴う水銀漏洩を適切に管理することが重要である。

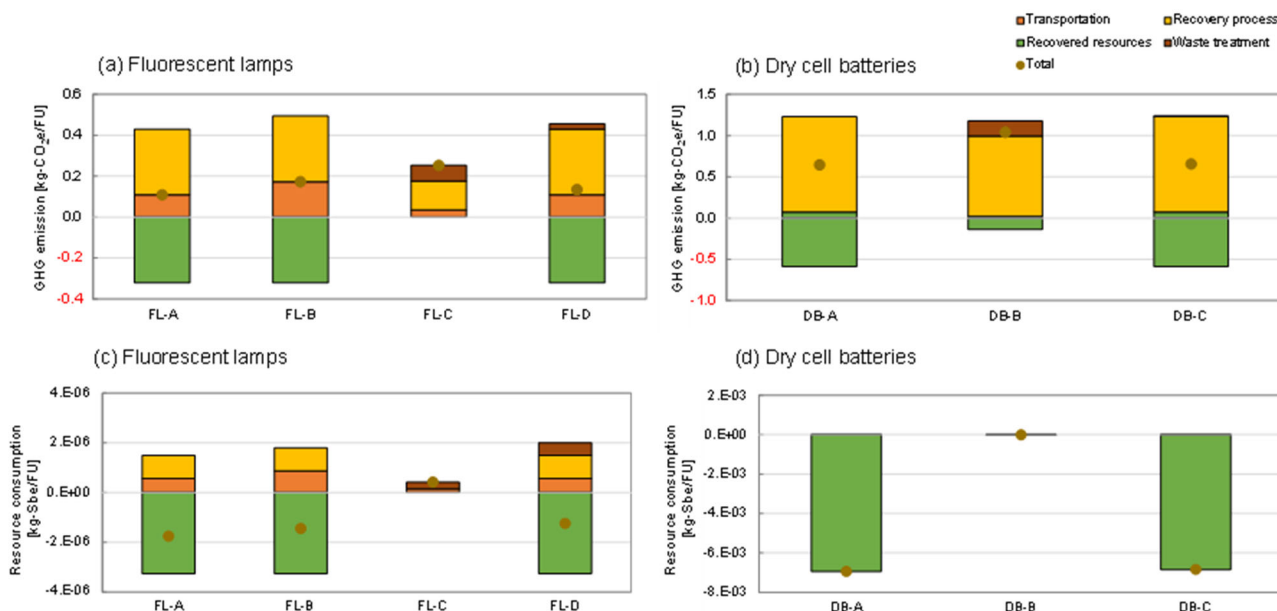


図-0.10 使用済み乾電池および蛍光灯の処理に関わる温室効果ガス排出量・資源消費量(図-2.10)

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

- 水銀マテリアルフローに関する研究会(環境省、事務局：株式会社エックス都市研究所)にて、本

研究で行った水銀フローに関する検討の知見を適時インプットした。

- UNEP Global Mercury Partnershipへの知見提供を行った。知見の一部は、UNEP Global Mercury Partnership Advisory Group Thirteenth meetingの報告書 (Report on activities undertaken within the United Nations Environment Programme Global Mercury Partnership) を通じて、共有されている。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

- 本課題により得られた水銀の使用・貿易に関する研究成果および人為起源による水銀の大気排出とその将来シナリオに関する研究成果をもとに、環境省を通じて、条約事務局等で作成を進める報告書 (Plan for the report on Trade, Supply, and Demand of Mercury、および、Plan for “Emissions and Releases Data Summary” to inform the Effectiveness Evaluation of the Minamata Convention) への知見の提供を果たした。
- また、環境省および水俣条約事務局の協力のもと、Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining (Date : October 30, 2022, Venue : Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)) を開催した。国際連合 (水銀に関する水俣条約事務局の行政官)、環境省、チリ、カナダからの有識者を含め15名の発表者のほか、TAUWやEPA(アメリカ合衆国環境保護庁)、台湾、日本国内等からオンサイトおよびオンラインで計38名が視聴参加し、水銀の使用・貿易、そして環境汚染等の課題に関する活発な情報交換が行われた。また、会議を通じて、条約事務局等で作成を進める上述の報告書への更なる知見の提供を果たした。
- 水銀に関わる製品やプロセスに関して、より詳細な水銀排出量を含むLCIデータベースを構築した。また、小規模金採掘におけるコスト評価を行ったことにより、水銀蒸留装置の導入及び従事者の水銀の取り扱いに関する試算が可能となった。資源採掘に関わる指標 (TMR) データベースを構築したことにより、水銀対策に伴う他の環境影響として、「採掘活動量」に関わるデータベースを使用することが可能となった。
- ASGM問題や不適切な水銀の流通・使用に関する研究成果に関して、成果発信用のコンテンツとして、サイエンスアニメーションを活用した動画やインフォグラフィックスを作成した。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルの開発した上で、国・地域別の将来の水銀排出シナリオを定量的に描く。加えて、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無を同定する。</p>	<p><u>目標を大きく上回る成果をあげた。</u></p> <p>目標であるシナリオモデルの設計・開発、シナリオの定量化を達成した。成果である対策シナリオごとの削減量(図-0.3)、残存する排出源(国・地域、セクター；図-0.4~図0.5)に関する情報は、人為起源による水銀の大気排出の最小化に資する知見である。また、併せて、対策導入に伴うトレードオフの有無と影響の同定を達成した(図-0.8)。これは、水銀の排出抑制・使用抑制・使用廃絶を含む対策技術により生じる影響の未然把握と事前対処を支援する知見である。</p> <p>加えて、当初の目標を超える成果として、「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議」(特に、</p>

	<p>COP4.2における水銀の違法貿易に関する「バリ宣言」)を背景に、不適切な水銀の使用・貿易の検出手法の開発(図-0.6~図-0.7)やASGM対策コストの試算を達成し、水俣条約事務局や環境省への情報提供を果たすとともに、主催した国際セミナー(Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining)を通じて国際社会への情報発信を達成した(図-0.11)。</p> <p><効率化></p> <p>入力情報となる技術情報(主に、テーマ1やテーマ2サブテーマ2)や出力情報となる推計結果(主に、テーマ3)の共有用データフォーマットを作成することで、効率的な情報共有を実現した。また、Web会議ツールを活用により、意思疎通を深める短時間・高頻度な運営を心がけた。副次的に、予算の効率的運用につながった。</p> <p>研究成果の発信のために、サイエンスアニメーションやインフォグラフィックスを活用することで、効果的、且つ、効率的な情報発信に繋げた。(例.)</p> <p>https://mfi.nies.go.jp/movie/NIESN_1_13_Video_Aug_23_2022.mp4</p>
--	---

サブテーマ1目標	目標の達成状況
<p>人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為にグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行および気候変動対策を考慮した複数の将来シナリオを作成し、中長期の水銀排出シナリオを定量的に描く。</p>	<p><u>目標を大きく上回る成果をあげた。</u></p> <p>研究目標であるグローバル・シナリオモデルの開発および水銀排出シナリオの定量化を達成した(図-0.3~図-0.5)。加えて、COP4.2におけるバリ宣言を受けて、水銀の違法貿易への対処を支援すべく、水銀の不適切な使用・流通の検出方法を確立(図-0.6~図-0.7)するなど当初の目標を大きく超える成果を得た。これらの成果は、5報の国際学術論文誌における誌上発表や4報のその他の誌上発表として公表した。また、一連の成果を、水俣に関する水俣条約事務局、および、環境省に提供した。これにより、研究計画を大きく超えた成果を得られたと判断した。</p> <p><効率性></p> <p>排出係数・実装状況等の技術情報については、先</p>

	行研究を広くレビュー・活用することで、効率的な情報収集に努めた。これにより、データ整備の負荷が低減され、モデルの設計・開発、および、シナリオの定量化に注力することができた。
--	--

サブテーマ2目標	目標の達成状況
対策技術の導入による水銀使用量低減と他の環境影響指標とのトレードオフの有無を同定し、市場への影響を定量化する。	<p><u>目標を上回る成果を上げた。</u></p> <p>水銀の最大の排出源であるASGMを含む6分野を対象に対策導入等によるトレードオフと市場への影響の同定を達成した(図-0.8~図-0.10)。特に、ASGMにおける水銀対策については、副次的な課題としての回収後の廃水銀について、当初の目標を超えて、隔離管理等を含む対策コストの試算に取り組むことで、資金面を含めた水銀管理を実現する上の課題を明らかとした。これらの成果は、4報の国際学術論文誌における誌上発表、および、4報のその他の誌上発表を含めて、計画を超えた成果を得られた。</p> <p><必要性> なお、整備したインベントリデータは、LCAを含む環境負荷分析の分野で広く利用されることを目指して、IDEA((Inventory Database for Environmental Analysis))への掲載にむけた準備(開発者とのディスカッション、データフォーマットの確認)を進めている。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

9件

<主な査読付き論文>

- 1) Watari T., Nansai K., Nakajima K., Giurco D. (2021) Sustainable energy transitions require enhanced resource governance. Journal of Cleaner Production, 312 (20), 127698 (IF: 11.072)
- 2) Fuse M., Oda H., Noguchi H., Nakajima K. (2022) Detecting Illegal Intercountry Trade of Mercury Using Discrepancies in Mirrored trade Data. Environmental Science & Technology, 56, 13565-13572 (IF: 11.357)
- 3) Zhaoling Li, Tatsuya Hanaoka: Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO2 emissions in China's iron and steel sector, One Earth, 5, 932-943 (2022) (IF: 14.944)

- 4) Cheng Y., Nakajima K., et al. (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. *Resources, Conservation & Recycling*, 185, 106461 (IF: 13.716)
- 5) Cheng Y., Watari T., Seccatore J., Nakajima K., Nansai K., Takaoka M. (2023) A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resources Policy*, 81, 103370Y. (IF: 8.222)
- 6) Kosai S., Nakajima K., Yamasue E. (2023) Mercury Mitigation in Artisanal and Small-scale Gold Mining: Cyanide Emissions and the Need for Retorted Mercury Management as Unintended consequences, *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106708 (IF: 13.716)
- 7) Kosai S., Badin A. B., Qiu Y., Suh S., Matsubae K., Yamasue E. (2021) Evaluation of resource use in the household lighting sector in Malaysia considering land disturbances through mining activities, *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105343 (IF: 13.716)
- 8) Yamamoto, R., S. Dente, S. Hashimoto: Scenarios of copper-smelting-related mercury emission reductions by promoting recycling and introducing countermeasure technology in major copper-producing countries, *Journal of Material Cycles and Waste Management* (Online available: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01656-1>) (IF: 3.579)
- 9) Nakano K, Kosai S, Yamasue E, Takaoka M.: “Recycling or chemical stabilization? Greenhouse gas emissions from treatment of waste containing mercury under the Minamata Convention”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, (Online available: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01714-8>) (IF: 3.579)

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

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）	8件
口頭発表（学会等）	32件
「国民との科学・技術対話」の実施	10件
マスコミ等への公表・報道等	5件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	3件

7. 国際共同研究等の状況

研究交流と連携強化を目的とし、国際連合(Eisaku Toda, Secretariat of the Minamata Convention on Mercury, Senior Programme Officer)や環境省の行政官に加えて、海外研究機関に所属する下記の3名を招聘し、Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining (Date : October 30, 2022, Venue : Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)) を開催した(図-0.7)。

Marcello M. Veiga	University of British Columbia	Professor Emeritus
Jacopo Seccatore	Universidad Adolfo Ibáñez	Professor
Tatiane Marin	Universidad Adolfo Ibáñez	Post-doctoral senior researcher

共同研究を通じて、以下の共同執筆論文等に関する研究成果を得られた。

Cheng Y., Nakajima K., Nansai K., Seccatore J., Marcello M. Veiga, Takaoka M. (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. *Resources, Conservation & Recycling*, 185, 106461 (IF: 13.716)

- Cheng Y., Watari T., Seccatore J., Nakajima K., Nansai K., Takaoka M. (2023) A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resources Policy*, 81, 103370Y. (IF: 8.222)

Partner Events of EcoBalance 2022

Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining

FREE EVENT!

Date
October 30, 2022

Venue
Fukuoka Convention Center,
Fukuoka, Japan

Contact
ecobalance@ilcaj.org
<https://www.ecobalanceconference.org/conference/2022/index.html>

Organized by Material Cycles Division, National Institute for Environmental Studies
Co-organized by Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Speakers and Topics

- Inconsistencies of mercury flow in global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity
Yingchao Cheng National Institute for Environmental Studies
- Exploring illegal trade of mercury from discrepancy with trade statistics
Masaaki Fuse Hiroshima University
- Monitoring Artisanal and Small-Scale Gold Mining using Satellite Images
Kazuyo Hirose Japan Space Systems
- Tailings management as a key challenge to curb mercury dissemination in and around ASGM sites
Satoshi Murao Geotec Institute of Technology
- Human health risk assessment of mercury vapor around ASGM area - perspective from field measurement
Koyomi Nakazawa Toyama Prefectural University
- Mercury mitigation in artisanal and small-scale gold mining: cyanide emissions and the need for reformed mercury management as unintended consequences
Shoki Kosai Ritsumeikan University
- Mercury use related to ASGM and its reduction by novel refining process
Akihiro Yoshimura Chiba University

Discussants

- Tatiane Marin**
Post-doctoral senior researcher, Adolfo Ibañez University
- Jacopo Seccatore**
Professor, Adolfo Ibañez University
- Eisaku Toda**
Senior Programme Officer, Secretariat of the Minamata Convention on Mercury, UN
- Marcello M. Veiga**
Professor Emeritus, University of British Columbia
- Hitoshi Yoshizaki**
Deputy Director, Ministry of the Environment, Japan

図-0.11 Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining

8. 研究者略歴

研究代表者

中島 謙一

2003年 筑波大学大学院工学研究科 博士課程修了，博士(工学)。2005年 東北大学大学院環境科学研究科 助教などを経て、2007年 国立環境研究所に入所、現在、国立環境研究所 資源循環領域 主幹研究員。

研究分担者

【サブテーマ1】

1) 花岡 達也

2004年 東京大学大学院工学系研究科 博士課程修了，博士(工学)。2004年 国立環境研究所 研究員、現在、国立環境研究所 社会システム領域 室長。

2) 南斉 規介

2001年 京都大学大学院エネルギー科学研究科 博士課程修了，博士(エネルギー科学)。2001年 国立環境研究所NIESポスドクフェロー、現在、国立環境研究所 資源循環領域 室長・物質フロー革新研究プログラム総括。

3) 程 英超 (参画期間： 令和2年4月～令和4年11月)

2020年 京都大学工学研究科・都市環境工学 博士課程後期修了、博士(工学)。国立環境研究所資源循環領域 特別研究員。現在、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 特定研究員。

4) LI Zhaoling(李 照令) (参画期間： 令和2年4月～令和4年1月)

2017年 筑波大学大学院 生命環境学研究科 博士課程修了、博士(環境学)。2018年 国立環境研究所社会環境システム研究センター 特別研究員、現在、上海大学 経済学院 准教授。

5) VISHWANATHAN Saritha

2018年 インド経営大学院アーメダバード校 博士課程修了、博士(経営)。2018年 インド経営大学院アーメダバード校 特別研究員を経て、現在、国立環境研究所 社会システム領域 特別研究員。

【サブテーマ2】

1) 山末 英嗣

2000年 東京工業大学大学院理工学研究科 博士課程修了、博士(工学)。2000年 京都大学大学院エネルギー科学研究科 助教などを経て、2016年 立命館大学理工学部准教授。2019年より同教授。

2) 橋本 征二

2000年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)。(独)国立環境研究所主任研究員、東京大学大学院客員准教授、Yale大学Visiting Fellow等を経て、2011年より立命館大学教授

3) 中野 勝行

2011年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士(工学)。2003年産業環境管理協会に入社。同LCA事業室長を経て、2018年より立命館大学政策科学部准教授。

4) 光斎 翔貴 (参画期間： 令和2年4月～令和4年3月)

2020年 京都大学大学院エネルギー科学研究科 博士課程修了、博士(エネルギー科学)。現在、立命館大学 グローバル・イノベーション研究機構 助教。2022年度より准教授

5) 柏倉 俊介 (参画期間： 令和4年1月～令和4年3月)

2010年 東北大学大学院環境科学研究科 博士課程終了、博士(環境科学)。2010年 東北大学金属材料研究所 助教を経て、現在、立命館大学理工学部 講師。

II. 成果の詳細

II-1 資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環領域	国際資源持続性研究室	中島 謙一
資源循環領域	国際資源持続性研究室	南斉 規介
社会環境システム領域	地球持続性統合評価研究室	花岡 達也
社会環境システム領域	地球持続性統合評価研究室	VISHWANATHAN Saritha
資源循環領域	国際資源持続性研究室	程 英超 (令和2年度～令和4年度)
社会環境システム領域	地球持続性統合評価研究室	LI Zhaoling (令和2年度～令和3年度)

<研究協力者>

広島大学

大学院先進理工学系科学研究科 布施正暁

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

政策研究事業本部 地球環境部 森本 高司

政策研究事業本部 地球環境部 福田 真耶

[要旨]

国連環境計画では、海洋・土壌への水銀蓄積の増大を指摘すると共に、その最大の原因として人為的な水銀の排出・放出の影響を指摘している。『水銀に関する水俣条約』(2017年発効)が適切に履行されることで、世界的な水銀の需要・供給の削減、更には、水銀の排出・放出の削減が期待される。しかし、将来の社会経済の状況や対策の履行状況を考慮すると、主要排出源(石炭等の燃焼部門、零細・小規模金採掘(Artisanal and Small-scale Gold Mining: ASGM)やセメント製造を含む鉱工業部門など)において、大幅な水銀排出量の増大が懸念される。

そこで、本サブテーマでは、主たる研究開発項目として、人為起源による大気への水銀排出量の推計のためのグローバル・シナリオモデルの開発設計に取り組んだ。水銀の排出削減には、水銀の排出源でのBAT/BEPの導入に加え、脱炭素対策の一環としての石炭消費量の削減や製鉄等の工業プロセスの脱炭素化なども原燃料起源の水銀排出の削減に貢献することが期待できる。本研究では、パリ協定で合意した2℃目標およびグラスゴー気候合意で注目された1.5℃目標の実現にむけた気候変動対策と、気候変動対策に伴う水銀排出削減の共便益効果の定量化に取り組むと共に、その限界について評価した。解析の結果、水銀対策の導入により、追加的な対策を講じない場合(4.1千トン、2050年)と比較して、大幅な水銀排出削減が見込めるが、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度(2.1千トン)に留まる事が示された。従って、共便益が期待できる脱炭素対策の導入と同時に、最大限の水銀対策の即時導入が求められる。また、削減効果には地域偏在性があり、国・地域別に排出量が残存する部門の特徴が異なることが判明した。ASGM対策や金属鉱業部門への水銀対策(4-1-1節)、更には、脱炭素対策に伴う共便益(4-1-2節)により、大幅な削減効果が期待できるが、依然として、一部の国・地域やASGMを含む特定の排出源において、排出量が高い水準に留まるといった結果が得られた。加えて、脱炭素対策としてバイオマス発電が増加する場合、発電方式及びバイオマス種によっては、水銀排出量を増大させる可能性があるため、注意が必要であることが示された。今後、水銀排出の最小化に向けて、中国や南米・アフリカ諸国を対象に、排出量が残存する部門へ更なる対策の強化が不可欠であると言える。具体的には、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的ではない地域では、脱炭素対策による水銀削減が、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的な地域では、除去対策による水銀削減が効果的であると考えられる。

また、2022年3月に開催された「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議第2部」(COP4.2)にて、議長国であるインドネシア政府の主導により、水銀の違法貿易を防止するための国際協調を強化することを目的とした「バリ宣言」が表明されたことを受けて、本サブテーマでは、水銀の排出管理を実現するため

の監視・規制立案の科学的支援を目指し、水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の開発設計に取り組んだ。違法貿易への対処を支援すべく、i. 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合、ii. 二国間貿易における報告値の不整合に着目した検出手法の開発を達成した。解析の結果、中南米・アフリカ、アジアの一部の国において、水銀の消費・使用に係わる報告値に顕著な不整合を検出した（4-2-1節）。また、二国間貿易を対象とする解析では、先行調査により不適切な流通への関与が指摘される国を含む複数の国・地域において、報告値間の不整合を検出した（4-2-2節）。本手法を、貿易の監視・管理ツールや通知・情報共有システムの開発に組み込むことで、水銀の違法貿易の調査を支援する事が期待できる。

1. 研究開発目的

国連環境計画では、海洋・土壌への水銀蓄積の増大を指摘すると共に、その最大の原因として人為的な水銀の排出・放出の影響を指摘¹⁾している。『水銀に関する水俣条約』が適切に履行されることで、世界的な水銀の需要・供給の削減、更には、水銀の排出・放出の削減が期待される。しかし、水銀排出量の将来推計²⁻³⁾などが示すように、社会経済の状況と対策の履行状況によっては、主要排出源である石炭等の燃焼部門、ASGMやセメント製造を含む鉱工業部門などにおいて、大幅な水銀排出量の増大が懸念される。加えて、近年は、新興国の経済発展に伴う資源利用の拡大、更には、国際的に気候変動対策が急速に進展していることから、脱炭素を支える技術や社会の転換による水銀排出量への正負の影響を未然に把握することも水銀サイクルの管理の観点からは不可欠であると言える。

この問題を背景に、サブテーマ1では、資源の採掘・利用等の活動に起因する水銀量等を含めて、人為起源による大気への水銀排出量の推計のためのグローバル・シナリオモデルの設計・開発設計に取り組む。水銀の排出削減には、水銀の排出源でのBAT/BEPの導入に加え、脱炭素対策の一環としての石炭消費量の削減や製鉄等の工業プロセスの脱炭素化なども原燃料起源の水銀排出の削減に貢献することが期待できる。そこで、パリ協定で合意した2℃目標およびグラスゴー気候合意で注目された1.5℃目標の実現にむけた気候変動対策と、気候変動対策に伴う水銀排出削減の共便益効果の定量化に取り組むと共に、その限界について評価する。これにより、気候変動枠組み条約で定められた2℃目標を達成しつつ、同時に水俣条約に基づいた水銀排出削減にむけた国・地域別の水銀排出シナリオを定量的に描く。水銀の大気排出の最小化に向けた知見として、対策シナリオごとの削減量と共に、残存する排出源（国・地域、セクター）を同定し提供する。

また、2022年3月に開催された「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議第2部」(COP4.2)では、議長国であるインドネシア政府の主導により、水銀の違法貿易を防止するための国際協調を強化することを目的とした「バリ宣言」が表明されたことを受けて、水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の開発設計に取り組む。これにより、水銀の排出管理を実現するための監視・規制立案の科学的支援を目指す。

2. 研究目標

人為起源による大気への水銀排出量の将来推計の為にグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行および気候変動対策を考慮した複数の将来シナリオを作成し、中長期の水銀排出シナリオを定量的に描く。

3. 研究開発内容

サブテーマ1では、主たる研究開発項目として、人為起源による大気への水銀排出量の推計のためのグローバル・シナリオモデルの設計・開発（3-1節）に取り組んだ。加えて、水銀の排出管理を実現するための監視・規制立案の科学的支援を目指し、水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の設計・開発（3-2節）に取り組んだ。

3-1. 人為起源による水銀排出量の推計：モデルの設計開発と将来シナリオの定量化

人為起源による大気への水銀排出量の将来推計を可能とするシナリオモデルの開発(図-1.1(i), ①)に取り組んだ。具体的には、気候変動対策および大気汚染対策の分析に用いられてきた世界多地域多部

門の技術積み上げ型の統合評価モデルであるAIM/End use [Global]モデル⁴⁾を核として、水銀排出及び除去対策に関する情報を組み込み、将来排出量および技術的な削減ポテンシャルの分析を実施した。また、水銀動態に関する物質フロー・サプライチェーン情報を整備(②)した上で、より細分化した部門での解析が必要と考えられる部門(ASGMを含む各種の鉱工業)については、物質フロー・サプライチェーンモデルを開発し、資源の採掘・利用に起因する水銀排出量の推計に取り組んだ。また、パラメータ等のシナリオ分析に必要な情報(経済指標など)の共有を含めてモデルの連携(ソフトリンク)を進めた。水銀の主要な大気排出源の選定および部門別の排出係数の設定に際しては、既存研究(Streets et al. 2017, UN environment, Global Mercury Assessment 2018など)を積極的に活用することで効率的な研究推進(モデル開発とシナリオデータ整備への注力)を実施した。加えて、シナリオ情報の整備(③)については、テーマ1およびテーマ2(2)と連携しつつ、水俣条約の履行に関わる技術や水銀の排出挙動の変化に関わる気候変動の対策技術の情報収集とパラメータの整備に取り組んだ。将来シナリオに関しては、IPCC第5次評価報告書以降に世界のモデル比較プロジェクトで用いられている共通社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)をもとにSSP2(中庸)に相当する活動量を整備した上で、ベースラインとなるシナリオ(リファレンスシナリオ(REF))および将来の社会変化を想定した複数の水銀対策シナリオの作成(④)を進めた。具体的には、削減対策シナリオ(RDC)として、水銀対策を想定した3種類のシナリオ(a-1. 段階的削減シナリオ: エキスパートジャッジに基づく削減シナリオ、a-2. 2050年最大削減達成シナリオ: 現状で実装されている最高レベルの技術が、全ての国・地域で、2050年までに到達する事を想定した削減シナリオ(2050年に究極削減シナリオを達成すると想定)、a-3. 究極削減シナリオ: 現存技術による究極的な削減シナリオ)と共に、気候変動対策を想定した2種類のシナリオ(b-1. 2°C目標相当シナリオ、b-2. 1.5°C目標相当シナリオ)を設定した(図-1.1(ii))。モデルの開発・設計に際しては、解析結果を踏まえて、⑤フィードバック(モデル・パラメータの精緻化)に取り組んだ。以上より、気候変動対策、水銀除去対策を組み合わせ、本研究で考慮した13通りのシナリオの概要を表-1.1に示した。

表-1.1 脱炭素対策と水銀対策の組み合わせを考慮したシナリオの概要

シナリオ群	シナリオ名 (code)	対策の組み合わせ				
		除去対策強化	削減強度			
			発電部門 再エネ強化	全部門 省エネ強化	需要部門 電化強化	需要部門 水素強化
Reference	Ref_FIX					
	Ref_BaU					
気候変動対策のみ	2D (b-1)		★★	★★	★★	★
	1.5D (b-2)		★★★	★★★	★★★	★
水銀除去対策のみ	Hg-EPS (a-1)	段階的削減				
	Hg-EPM (a-2)	2050最大削減				
	Hg-EPU (a-3)	究極削減				
水銀除去対策 と 気候変動対策 の組み合わせ	2D-Hg-EPS	段階的削減	★★	★★	★★	★
	2D-Hg-EPM	2050最大削減	★★	★★	★★	★
	2D-Hg-EUP	究極削減	★★	★★	★★	★
	1.5D-Hg-EPS	段階的削減	★★★	★★★	★★★	★
	1.5D-Hg-EPM	2050最大削減	★★★	★★★	★★★	★
	1.5D-Hg-EUP	究極削減	★★★	★★★	★★★	★

[Ref_FIX: レファレンスシナリオ(技術固定)]気候変動対策および水銀除去対策の双方とも、追加的な対策の導入は想定せず、将来にわたって2015年レベルと同等としたシナリオ。[Ref_BaU: レファレンスシナリオ(なりゆき)]現状の気候変動対策の傾向が将来もなりゆきで続いていくと想定したシナリオ。ただし、水銀除去対策については、追加的な対策の導入は想定せず、将来にわたって2015年レベルと同等。[2D(2度目標相当シナリオ)]パリ協定で合意した2°C目標の実現に向けて、世界のCO₂排出量を2050年までに2010年比で半減するシナリオ。再生可能エネルギーのうち、特に地域別の太陽光や風力の導入割合についてはIEAによる将来展望の報告書を参考に想定。ただし、水銀除去対策については、追加的な対策の導入は想定せず、将来にわたって2015年レベルと同等。[1.5D(1.5度目標相当シナリオ)]グラスゴー気候合意で注目された1.5°C努力目標に向けて脱炭素対策を強化し、先進国諸国では2050年頃、途上国では2060年頃までカーボン・ニュートラル(すなわちCO₂の正味排出量をゼロに近づける)を目指すシナリオ。2°C目標シナリオよりも、水素、太陽光、風力、CO₂回収・貯留(CCS: Carbon Capture and Storage)付きのバイオマス発電などを更に導入していく想定。ただし、水銀除去対策については、追加的な対策の導入は想定せず、将来にわたって2015年レベルと同等。[Hg-EPS: 水銀除去対策の段階的導入シナリオ] UNEP GMA2018による水銀除去対策の各国・各部門の想定および専門家へのヒアリングをもとに、現在までの水銀除去対策の傾向が、将来にわたって続いていくと想定したシナリオ。ただし、気候変動対策については、追加的な対策は導入せず、レファレンス(なりゆき)の想定。[Hg-EPM: 水銀除去対策の2050年最大削減シナリオ] 2030年までは段階的導入シナリオと同等。2050年までに最高削減効率(Best Available Technology)の水銀除去対策が世界各国で100%普及するように、2030年以降に水銀除去対策の導入を強化するシナリオ。ただし、気候変動対策については、追加的な対策は導入せず、レファレンス(なりゆき)の想定。[Hg-EPU: 水銀除去対策の究極削減シナリオ] 「もし、2020年からすでに最高削減効率の水銀除去対策が世界全体に100%普及していたら」と仮定した究極的な想定。ただし、気候変動対策については、追加的な対策は導入せず、レファレンス(なりゆき)の想定。

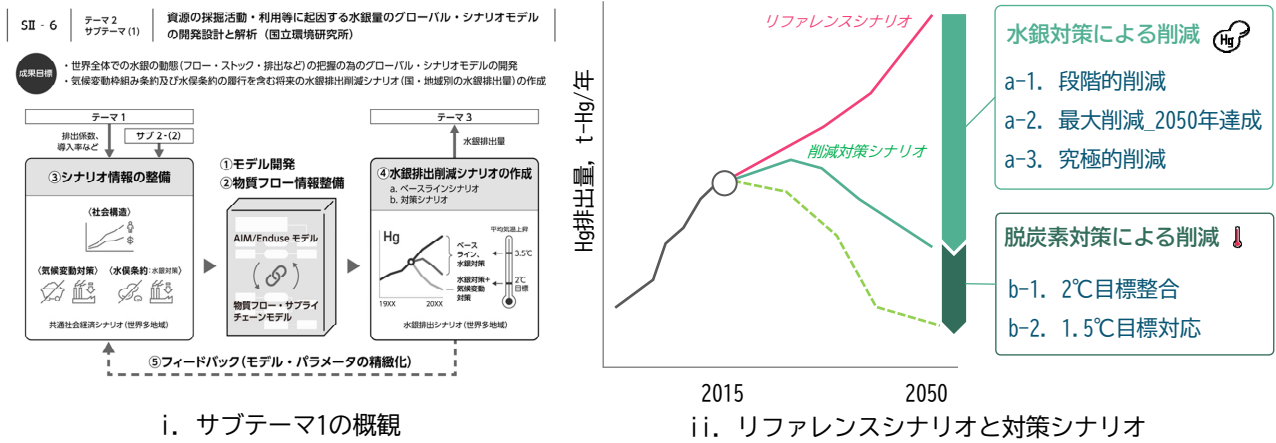


図-1.1 サブテーマ1の概観と対策シナリオ

3-2. 不適切な水銀の貿易・使用の検出

ASGMは、水銀の最大の使途、且つ、排出源である。2017年に発効した水銀に関する水俣条約では、条約上、ASGMにおける水銀使用を削減し、可能な場合には廃絶する事が指向されている。また、2022年3月に開催された「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議第2部」(COP4.2)では、議長国であるインドネシア政府の主導により、水銀の違法貿易を防止するための国際協調を強化することを目的とした「バリ宣言」が作成された。しかしながら、条約等により、水銀貿易・水銀採掘・ASGMに対する規制が厳しくなるなか、依然として、水銀の違法採掘や違法貿易の存在が指摘されている。そこで、本研究では、違法貿易への対処を支援すべく、報告値の不整合に着目した上で、水銀の不適切な貿易・使用の検出手法として、以下の2種類の検出手法を開発した。

3-2-1. ASGM実施国における不適切な水銀フローの検出⁵⁾

違法な水銀の国間貿易の存在を検出するために、本研究ではASGM実施国における不適切な水銀フローの存在を検出する手法を開発した。具体的には、対象国内における水銀管理に関する国家行動計画を考慮し、ASGM活動に用いられた水銀量(I)と国内で入手可能な水銀総量(A)を比較した。その結果をもとに、水俣条約の発効後に水銀量の需要と供給に大きな変化がみられた対象国をスクリーニングし、不適切な水銀フローの検出手法を開発した。解析に際して、対象国jにおける水銀フローの差(G)は、以下の式で求めた。ここで、 $I > A$ のとき、ASGM活動に用いられた水銀量は国内で入手可能な水銀総量よりも多いことを示し、報告されている統計情報に矛盾がある可能性がある。

$$G_j = I_j - A_j$$

ここで、ASGM活動に用いられた水銀量(I_j)の推計(2010~2018年)は、以下の式で行った。推計に際して、ASGM実施国はUN environment 2018¹⁾を、ASGMによる金生産量は、Metals Focusの推定値⁶⁾を、そして、Hg:Au比(アマルガム化に用いられた水銀と金の比率)は主にYoshimuraら⁷⁾の値を参照した。

$$\text{ASGM活動に用いられた水銀量}(I) = \text{ASGMによる金生産量} \times \text{Hg:Au比}$$

また、ASGM実施国内で入手可能な水銀総量(A_j)の推計(2010~2018年)は、Nakajimaら(2018)による物質の見掛け消費量の算定方法⁸⁾をもとに以下の式で行った。水銀の輸出入量の算定に際して、水銀含有製品は、Base pour l'Analyse du Commerce International (BACI) database (CEPII)⁹⁾を調査し、112品目(鉱石・化石燃料、原材料、部品・最終製品)を選定した。また、各国の入手可能な水銀総量とともに、貿易による水銀フローについても算出した。

$$\text{ASGM実施国内で入手可能な水銀総量}(A) = \text{水銀生産量} + \text{水銀輸入量} - \text{水銀輸出量}$$

加えて、各国の水銀管理状況として、正規化された水銀フローの差($\text{normG}=\text{G}/\text{A}$)を求めた。水銀関連製品の貿易量は国ごとに異なるため、Gの結果だけでは特定の国の水銀管理状況の質や量を判断することは困難である。そこで、2010年から2018年までの平均値を用いて normG を算出した。閾値を1.2と設定し、 $\text{normG} > 1.2$ や極端に高い場合、統計情報の不整合や水銀管理状況が適切でないと判断した。

3-2-2. 不適切な国間貿易の検出¹⁰⁾

本研究では、不適切な水銀の国間貿易を検出するために、貿易統計の不整合問題に注目する。不整合問題とは、輸出国貿易統計報告値とその貿易相手国である輸入国貿易統計報告値が本来一致すべきところが一致しない問題を指す。このような不整合問題が発生する要因として、関税や貿易規制を免れるための税関申告時の過少申告や品目名の虚偽申告が知られている。本研究では、貿易統計の不整合問題を逆利用することで、不適切な水銀の国間貿易の存在を検出する方法を提案する。ここでは、医療統計分野の検者間信頼性指標として使用される級内相関係数 (intraclass correlation coefficients : ICC) を採用する。輸出国と輸入国でそれぞれ報告される輸出量と輸入量の不整合を不適切な貿易の度合いと見なし、不整合価指標としてICC値を活用するものである。

二元配置分散分析を基礎とするICCは、貿易統計報告国やその報告値に由来するバイアスとして現れる不適切な水銀の国間貿易を統計的に識別することに優れている。本研究では、複数検者によって複数の被検者を測定する場合の検者間信頼性評価に適したCase2のICCを採用する。Case2のICCは、次式で与えられる分散分析の二元配置変量モデルを基本とする。

$$x_{ij} = \mu + a_i + b_j + (ab)_{ij} + e_{ij}$$

ここで、 i は輸出国 (Origin) と輸入国 (Destination) の組み合わせであるODペア、 j は輸出報告国と輸入報告国、 x_{ij} はODペア別報告国別水銀輸出入報告値である。 μ は期待値、 a_i はODペアの効果、 b_j は報告国の効果、 $(ab)_{ij}$ はODペアと報告国の交互作用、 e_{ij} は測定誤差である。以上の各モデルパラメータの分散から、ODペア間平均平方和BMS、報告国間平均平方和JMS、残差平均平方和は次式から得られる。

$$BMS = k\sigma_T^2 + \sigma_I^2 + \sigma_E^2$$

$$JMS = n\sigma_T^2 + \sigma_I^2 + \sigma_E^2$$

$$EMS = \sigma_I^2 + \sigma_E^2$$

ここで、 σ_T^2 はODペアの効果の分散、 σ_I^2 は報告国の効果の分散、 σ_T^2 はODペアと報告国の交互作用の分散、 σ_E^2 は測定誤差の分散、 k はODペア数、 n は報告国数 (この場合は2カ国) である。BMS、JMS、EMSより、ICC値は次式のように導出される。ICC値は-1から1の間の値を取り、医療統計分野の判定基準を参考に、0.2未満のICCを持つ場合、国間輸出入報告値間での不整合が頻出するため、不適切な水銀の国間貿易が発生している可能性が高いと判定する。本研究は、国連貿易統計データベースであるUN Comtradeから入手した1999年から2018年における196カ国貿易統計の水銀に関する輸出入報告値に対して、年ベース、輸出国ベース、輸入国ベースでICC値を計算する。

$$ICC = \frac{BMS - EMS}{BMS + (k - 1)EMS + k(JMS - EMS)/n}$$

4. 結果及び考察

4-1. 人為起源による水銀排出量

水銀対策の導入により、大幅な水銀排出削減が見込めるが、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度に留まる。よって、共便益が期待できる脱炭素対策の導入

と同時に、最大限の水銀対策の即時導入が求められる（図-1.2）。また、削減効果には地域偏在性があり、国・地域別に排出量が残存する部門の特徴が異なることが判明した。ASGM対策や金属鉱業部門への水銀対策（4-1-1節）、更には、脱炭素対策に伴う共便益（4-1-2節）により、大幅な削減効果が期待できるが、依然として、一部の国・地域やASGMを含む特定の排出源において、排出量が高い水準に留まるといった結果が得られた。加えて、脱炭素対策としてバイオマス発電が増加する場合、発電方式及びバイオマス種によっては、水銀排出量を増大させる可能性があるため、注意が必要であることが示された。今後、水銀排出の最小化に向けて、中国や南米・アフリカ諸国を対象に、排出量が残存する部門へ更なる対策の強化が不可欠であると言える。具体的には、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的ではない地域では、脱炭素対策による水銀削減が、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的な地域では、除去対策による水銀削減が効果的であると考えられる。以下に、結果の詳細を示した。

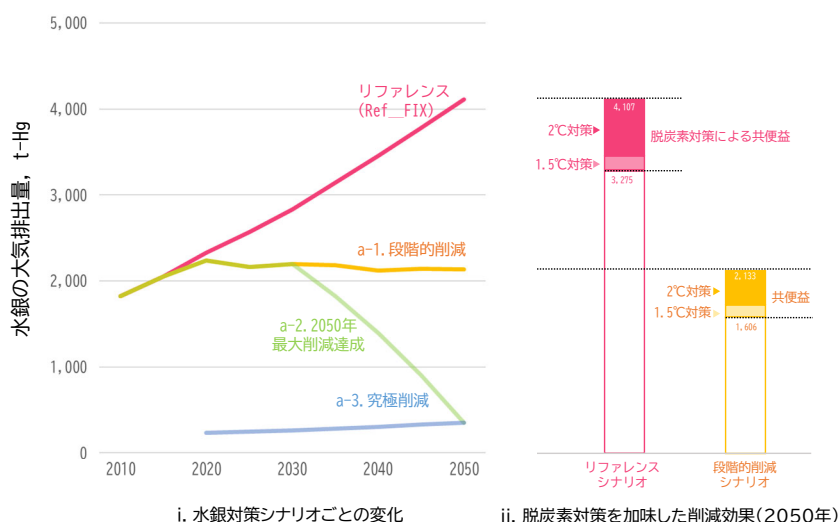


図-1.2 2050年までの水銀排出量の変化と脱炭素対策による共便益効果（総排出量）

4-1-1. 国・地域別内訳、セクター別内訳

グローバル・シナリオモデルを用いて、国・地域の内訳（南米諸国やアフリカ諸国含む33の国・地域）、セクター別の内訳（ASGM、セメント、鉄鋼を含む21の部門）を定量化したところ、削減効果には地域偏在性があり、国・地域別に排出量が残存する部門の特徴が異なることが判明した。推計結果をもとに、図-1.3に、水銀削減シナリオごとの水銀排出量の推移と排出源内訳（セクター別内訳と国・地域別内訳）を示した。

はじめに、グローバルな傾向（図-1.3 i）をみると、リファレンスシナリオ（Ref_FIX）においては、経済成長に伴って、人為起源による水銀の大気排出量は、2050年には約4.1千トンに達すると得られた。これは、追加的な対策を講じない場合、2015年における水銀の大気排出量（約2.1千トン）の約2倍に排出量が増大する事を意味する。一方で、水銀対策を講じることにより、2050年における水銀の大気排出量（a-1：約2.1千トン、a-2およびa-3：約0.35千トン）は、2050年のリファレンスシナリオと比較して、大幅な水銀排出削減が見込めると得られた。しかし、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度に留まることから、人為起源による水銀の大気排出の最小化のためには、最大限の水銀対策の即時導入が求められる事が明らかとなった。

次に、2050年時点の排出源内訳（図-1.3 ii）をみると、追加的な対策を講じない場合（Ref_FIX）は、2015年と比較して、産業部門別の排出源は、鉱工業部門（ASGM：2倍、他金属鉱業：2.6倍、セメント産業：1.7倍）や発電部門（2倍）における顕著な増大、そして、国・地域別の排出源は、アフリカ地域（4.5倍）・中国（1.7倍）・インド（2.8倍）などを中心に増大が示された。また、a-1. 段階的削減シナリオでは、産業部門別の排出源は、セメント（1.4倍）・発電部門（1.4倍）における増大が示されたが、廃棄物焼却部門（0.3倍）では大幅な減少が期待できることが示された。国・地域別の排出源としては、アフリカ地域（2.5倍）・インド（1.5倍）等の国・地域における増大が示されたが、中南米地域（0.6倍）・中国（0.6

倍)・日本(0.7倍)における減少が期待できることが示された。更に、現状で実装されている最高レベルの技術に2050年に全ての国・地域が到達する事を想定した場合には、より多くの削減が期待できることが示された。2050年におけるa-2. 2050年最大削減達成シナリオ、および、a-3. 究極削減シナリオで想定される人為起源による水銀の大気排出量は約0.35千トンであり、同年のリファレンスシナリオと比較して約3.8千トン、2015年の水銀排出量と比較した場合でも約1.7千トンの削減が見込まれ、全ての産業部門、および国・地域において、大幅な削減が期待できると得られた。この事は、日本を含めて各国において、依然として大きな削減ポテンシャルがある事を示唆していると言えよう。

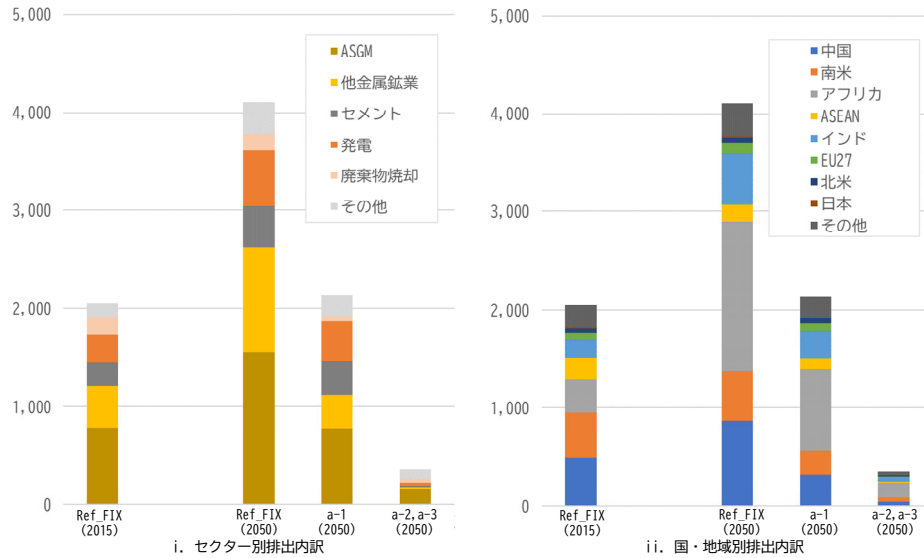


図-1.3. 2015年および2050年における排出内訳 (左図：セクター別、右図：国・地域別)

但し、国・地域別の排出傾向および削減効果には地域偏在性があり、国・地域別に排出量が残存する部門の特徴が異なる (図-1.4) ため、早期に削減を実現する為には、国・地域ごとの特性を踏まえた対策設計が不可欠である。今後、人為起源による水銀の大気排出の最小化・廃絶にむけて、南米・アフリカ地域については、排出量が残存する部門へ更なる対策の強化が必要であろう。特に、主要な排出源であるASGMには、可及的速やかな対象に対策の導入・支援と監視・管理が求められると言えよう。

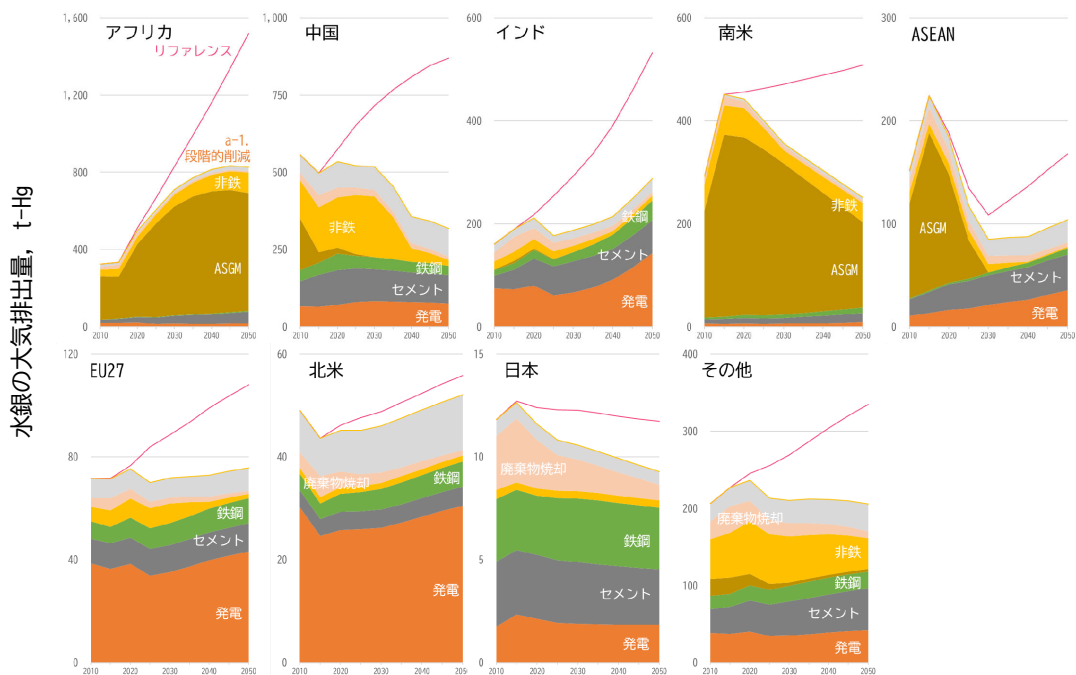


図-1.4 水銀対策による2050年までの水銀排出量の変化 (国・地域別排出量)

4-1-2. 脱炭素対策による共便益

図-1.5に2℃目標および1.5℃目標に向けた世界の水銀排出経路と、気候変動対策に伴う水銀排出削減の共便益効果について示す。2℃目標相当シナリオ(b-1)では、主に発電、産業および運輸部門におけるCO₂削減ポテンシャルが大きいと、特に発電部門と産業部門は水銀の主要な排出源でもあるため、気候変動対策を導入することによって、ある一定の共便益水銀削減効果が期待されることが分かる。ただし、世界の水銀排出量はレファレンスシナリオにおいて2050年までに2010年比で約2倍と大きく増加するため、2度目標における2050年水銀排出量は依然として2010年よりも大きく、2050年年CO₂排出量の削減傾向（2010年比半減）とは大きく異なる特徴を示す。そこで、グラスゴー気候合意で注目された1.5℃目標にむけて先進国諸国は2050年頃、途上国が2060年頃にカーボン・ニュートラルの実現を目指した結果、1.5℃目標相当シナリオ(b-2)が示すように、水銀排出削減の共便益効果も増加していることが分かる。ただし、共便益水銀削減効果には限界があり、国別に主な水銀排出源の傾向が異なるため、気候変動対策による共便益水銀削減効果には地域偏在性が見られた。例えば、国別総水銀排出量に対して、発電部門に由来する水銀排出の割合が大きいインドやASEAN諸国では、気候変動対策による共便益水銀削減効果は期待できるが、セメントや鉄鋼の生産プロセスに由来する水銀排出の割合が大きいアメリカ、南米、中国においては、気候変動対策による共便益水銀削減効果は限定的である。よって、世界全体で大幅な水銀排出削減を実現するには、気候変動対策と同時に、セメントや鉄鋼の生産プロセスに由来する水銀排出に対して効果的な水銀除去対策の導入が必要である。

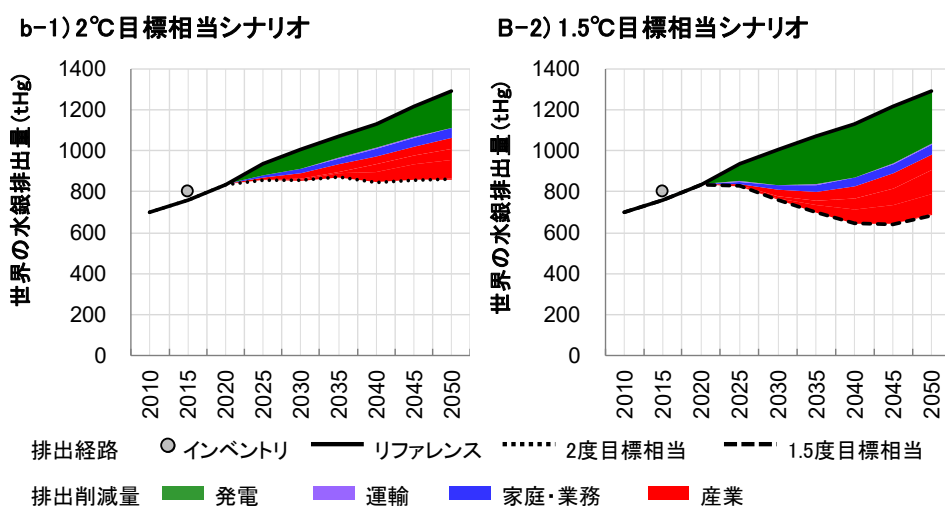


図-1.5 世界における水銀排出経路と気候変動対策に伴う水銀排出削減の共便益効果

また、図-1.5に示す1.5度目標相当シナリオ(b-2)の世界の水銀排出経路をみると、2040年頃までは減少傾向であったものが、2040年以降は増加傾向に転じることが示唆され、発電部門におけるバイオマス燃焼に由来する排出が主な要因であることが分かった。そこで、その要因となるOECD諸国について、発電部門の発電電力量、電源構成および水銀排出経路を図-1.6に示す。OECD諸国では2050年頃までにカーボン・ニュートラル（すなわちCO₂の正味排出量をゼロ）を実現するために、石炭火力は段階的に大きく廃止し、一方でカーボン・ニュートラルな太陽光、風力およびバイオマスを大幅に導入することが必須である。特にCO₂正味排出ゼロを実現するには他部門による残存GHG排出量を相殺するために、ネガティブ・エミッション技術であるCCS付バイオマス発電を普及させる必要がある。しかし、図-1.6b)に示すように、バイオマスの種類（木質バイオマスか、エネルギー作物か）によって水銀含有量が異なり、またバイオマス発電の方式の違い（直接燃焼か、ガス化か）によって水銀排出量が異なるため、水銀排出傾向が大きく異なることが示唆された。したがって、2050年カーボン・ニュートラルの実現にむけて、CCS付バイオマス発電に依存しすぎると、石炭火力の廃止による共便益水銀削減効果を打ち消してしまうほど水銀排出量が急増する可能性がある。

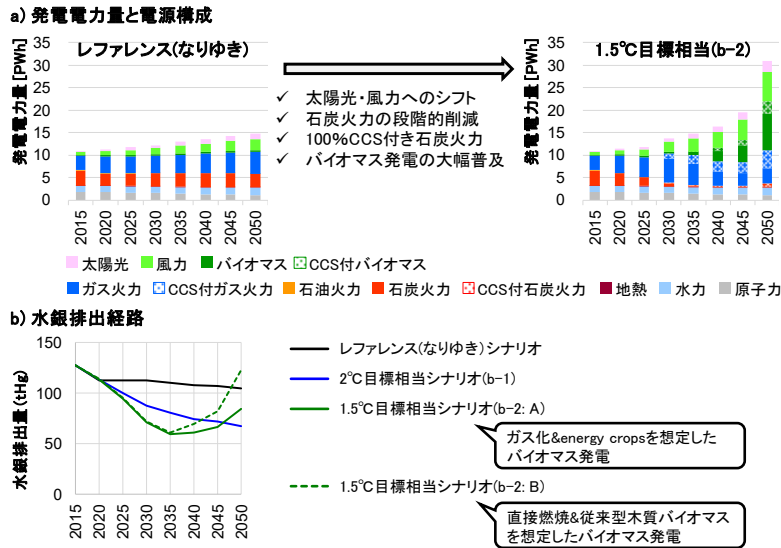


図-1.6 OECD諸国における気候変動対策シナリオ下の電源構成と気候変動対策に伴う水銀排出経路

人為起源の水銀排出を大幅に削減するためには、気候変動対策に伴う共便益削減効果だけでなく、セメントや鉄鋼の生産プロセスに由来する水銀排出量やバイオマス発電の増加に伴う水銀排出量に対して水銀除去対策を導入するのが効果的である。そこで、表-1.1に示した水銀除去対策と気候変動対策を組み合わせたときの、水銀排出経路を分析した結果を図-1.7に示す。UNEP GMA2018による水銀除去対策の各国・各部門の想定や専門家へのヒアリングをもとに、現在までの水銀除去対策の傾向を想定したa-1. 段階的削減シナリオでは、水銀削減効果は限定的であることが分かった。しかし、部門別・エネルギー種別に最高効率の水銀除去対策を、2050年までに世界全体で最大導入 (=100%普及) を想定したa-2. 2050年最大削減達成シナリオでは、気候変動対策と同時に水銀除去対策を組み合わせることで、2050年までに人為起源の水銀排出量を大幅に削減することは技術的に可能であることが示唆された。特に、1.5度目標にむけてCCS付バイオマス発電を大幅導入した際に生じる水銀排出量の増加効果を水銀除去対策の普及によって打ち消すことが可能である。

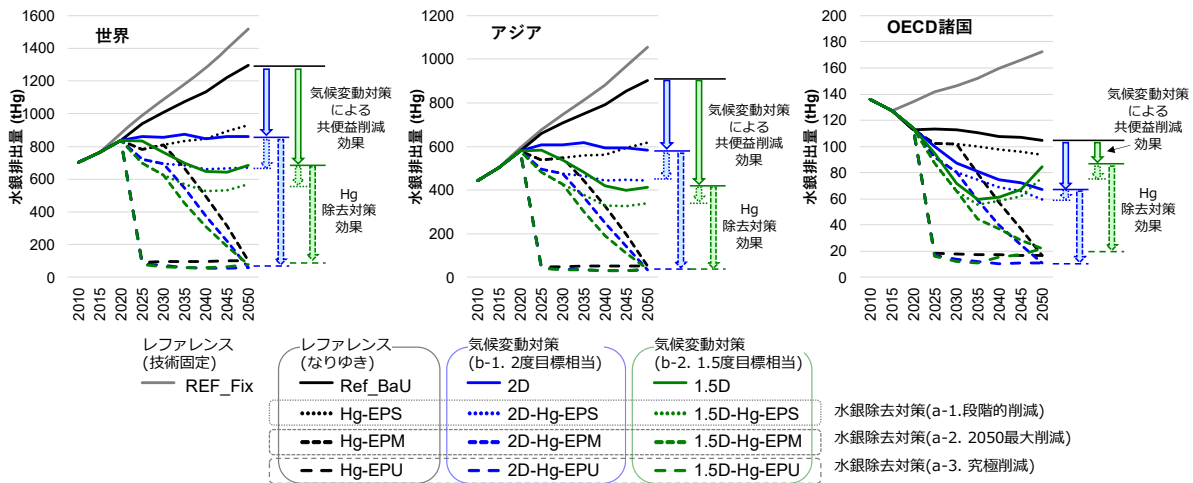


図-1.7 気候変動対策と水銀除去対策の組み合わせによる水銀排出経路を削減効果

本研究では、UNEP GMA2018による水銀排出係数および水銀除去対策の普及レベルの情報を元に、2015年のエネルギー別、資源別、部門別、国別の排出係数を設定したが、排出係数の設定の差異が排出量の不確実性に与える影響は大きい。そこで、UNEP GMA2018による水銀排出係数の高位、中位、低位の推計値の情報に基づいて、将来の水銀排出量の不確実性の幅を分析した結果を図-1.8に示す。2050年の不確実性の範囲は、レファレンスシナリオが最も大きく、特に途上国における不確実性の影響が大きい。現

在、アジアからの水銀排出量は世界全体の半分以上を占めているが、アフリカと南米からの排出量は将来にわたって大幅に増加するため、2050年の世界の水銀排出量の不確実性に対して、アジア、アフリカ、南米の不確実性の影響が大きい。

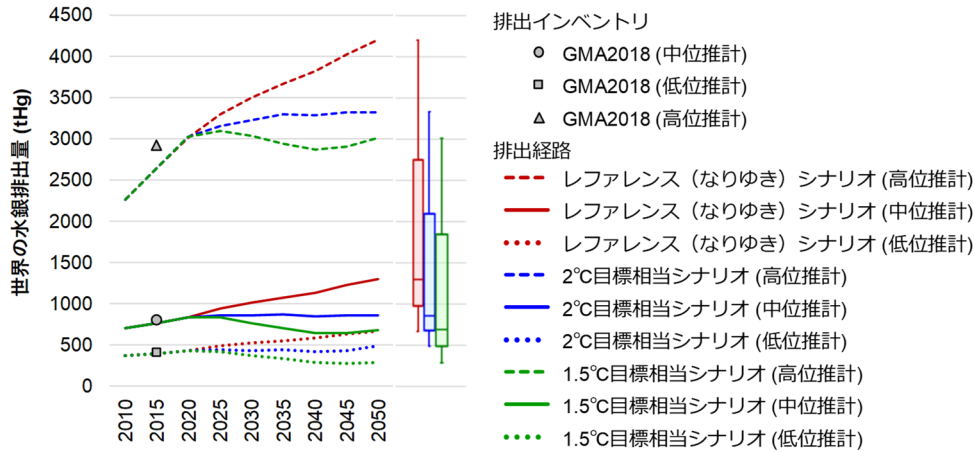


図-1.8 世界の水銀排出量の不確実性の幅

4-2. 不適切な水銀の貿易・使用の検出

情報間の不整合 (i. 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合、ii. 二国間貿易における報告値の不整合)に着目した2種類の検出手法の開発を達成した。解析の結果、中南米・アフリカ、アジアの一部の国において、水銀の消費・使用に係わる報告値に顕著な不整合を検出した (4-2-1節)。また、二国間貿易を対象とする解析では、先行調査により不適切な流通への関与が指摘される国を含む複数の国・地域において、報告値間の不整合を検出した (4-2-2節)。本手法を、貿易の監視・管理ツールや通知・情報共有システムの開発に組み込むことで、水銀の違法貿易の調査を支援する事が期待できる。以下に結果の詳細を示した。

4-2-1. ASGM実施国における不適切な水銀フローの検出

1) 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合

地域別では、2010年から2018年にかけて中南米とオセアニアにおいてASGM水銀利用量と水銀見かけ消費量が同等で、毎年約1,000トンの水銀が消費された (図-1.9)。アフリカは2016年までは同等だったが、その後ASGM水銀利用量が増加し、水銀見かけ消費量が減少した。しかし、アジアは異なり、ASGM水銀利用量は375-530トンで安定しており、ピークは2011年に発生し、水銀見かけ消費量は2011年に急激に減少し、その後増加した。2018年には、アジアで6,000トン以上の水銀が消費された。

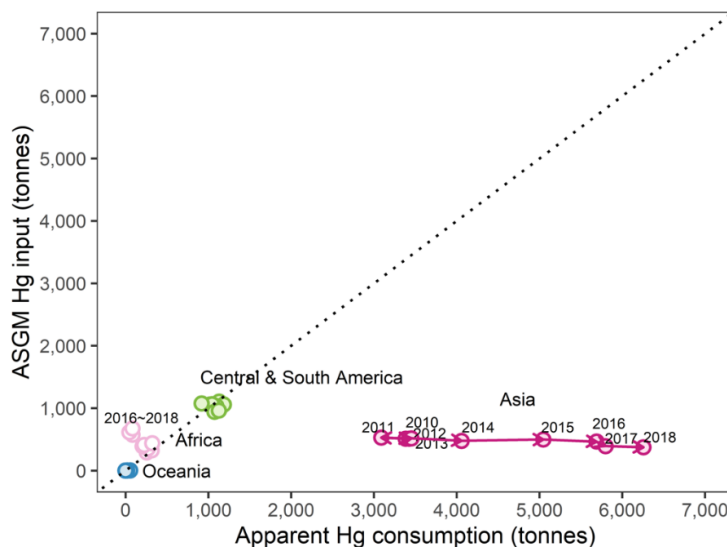


図-1.9 アフリカ、アジア、中南米、オセアニアにおける水銀の見掛け消費量とASGMにおける利用量

次に、国地域別にみると、南アフリカ共和国とコンゴ民主共和国（DRコンゴ）のみ、ASGM水銀利用量が水銀見かけ消費量より低いことが示された（図-1.10）。アフリカ諸国（DRコンゴと南アフリカを除く）のASGMによって適用された水銀量は一般的に高く、報告されていない水銀が流入している可能性がある。アフリカ諸国は水俣条約（Minamata Convention, MC）の締約国であり、多くの国が国家行動計画（NAP）を提出しているが、最も大きな不整合を示したスーダンはMCの締約国ではなく、NAPも提出していない。なお、現在、MCに加盟、受諾、承認、または加盟している国は137か国であり、18か国がNAPを提出している。ASGM活動を行っている80か国のうち、39か国が調査され、33か国がMCの加盟国であり、12か国がNAPを提出している。水銀の不適切な使用・流通の廃絶・最小化のためには、締約国のみならず全ての国・地域の協調が不可欠であると言えよう。

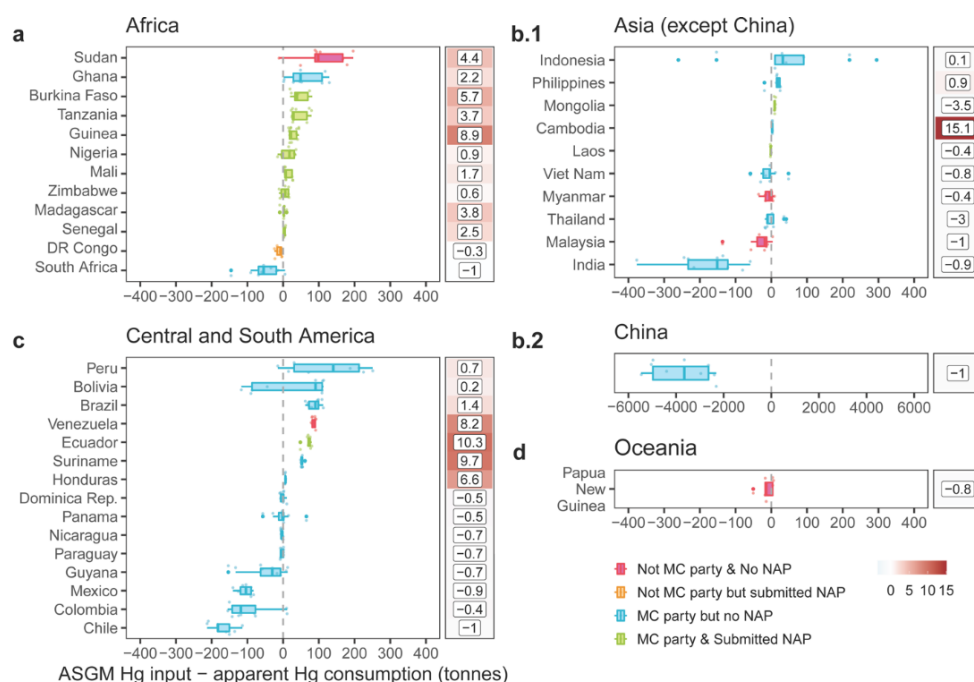


図-1.10 各国のASGM水銀利用量と水銀見かけ消費量のギャップ（単位：トン）。各国の箱ひげ図には、中央値に加えて、各年のASGM水銀利用量と水銀見かけ消費量の差がドットで示される。各グラフ右側のカラーバーには、平均正規化ギャップ（normG）を表示

水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合は、水銀あるいは水銀含有製品の輸出入と密接に関係する。2017年には、アフリカの多くの国で水銀の輸入量がわずかに減少したが、一部の国では増加した（表-1.2）。一方、マダガスカル、タンザニア、ジンバブエなどの一部の国では、Hgの鉱石や化石燃料における減少があったが、これはMCと関係がない可能性がある。アフリカへの水銀輸入総量は、2010年から2016年までの平均96.6トンから2017年には17.8トンに減少した。アジアでは、中国が主に水銀の鉱石や化石燃料を輸出している。2017年には、アジアの一部の国で水銀の原材料の輸入が増加し、一方で原材料の輸出が増加した。輸入された水銀の総量は、2010年から2016年までの747.8トンから2017年には573.3トンに減少したが、わずかに増加した。中南米に輸入された水銀総量は増加したが、輸出量は減少した。これは、主にチリやメキシコの輸出減少に起因する。ただし、MCの効果については、商品の調査が必要である。総じて、2017年において、アフリカ、アジア、オセアニアにおける水銀の総輸入量は大幅に減少したが、総輸出量はわずかに増加した。これに対し、中南米においては輸入が増加した。研究された国々全体における2017年の輸入および輸出レベルは、2010年から2016年の平均値に匹敵する。したがって、MCが水銀管理に効果的であったかどうかは、一般的な貿易フローのデータからは明確ではなく、特定の商品の調査が必要である。

表-1.2 ASGM水銀投入量と水銀見かけ消費量の差、水俣条約および水銀管理に関する国家行動計画 (NAP) の状況、グローバル貿易における水銀フロー

Region/Country	G Gap in 2017	I ASGM Hg input in 2017 (tonnes)			A Apparent Hg consumption in 2017 (tonnes)	H Hg production in 2017 (tonnes)	Import from 2010-2018 (Hg in tonnes)	Export from 2010-2018 (Hg in tonnes)	Status of Minamata Convention	Submission year of National Action Plan
		min	mean	max						
Africa										
Burkina Faso	74.1	37.2	74.3	1137.9	0.1	1.3	0.02	1.2	Ratification	2020
DR Congo	-3.7	8.0	31.7	55.6	35.5	41.3	0.3	6.1		2020
Ghana	117.9	29.7	118.8	267.2	0.9	0.5	0.4	0.1	Ratification	
Guinea	40.6	28.4	40.4	52.5	-0.2	0	0.2	0.4	Ratification	2021
Madagascar	3.0	0.8	3.2	5.5	0.2	0	0.2	0.01	Ratification	2018
Mali	26.9	6.8	27.0	60.9	0.0	0	0.1	0.01	Ratification	2020
Nigeria	33.9	21.2	42.3	63.5	8.4	17.7	0.2	9.5	Ratification	2021
Senegal	6.2	4.4	6.3	8.3	0.1	0.01	0.1	0.004	Ratification	2019
South Africa	5.4	0.8	3.1	5.3	-2.3	7.9	16.2	26.4	Ratification	
Sudan	179.2	22.5	179.2	470.6	0	0.02	0	0	Signature	
Tanzania	73.1	18.6	74.1	129.7	1.0	1.0	0.2	0.3	Ratification	2020
Zimbabwe	16.4	4.1	16.5	37.1	0.1	0.03	0.03	0.002	Ratification	2019
Subtotal	573.1	182.6	616.8	2294.0	43.7	69.8	96.6*	17.8	36.3*	43.9
Asia										
Cambodia	2.2	1.2	2.3	3.5	0.1	0	0.1	0.01	Ratification	
China	-5028.5	2.4	19.2	33.7	5047.8	4929.4	244.8	126.5	Ratification	
India	-244.3	5.4	14.5	27.1	258.8	65.6	230.6	37.3	Ratification	
Indonesia	-153.5	114.6	305.6	573.0	459.1	594.1	19.6	154.6	Ratification	
Laos	-0.5	1.1	2.2	3.3	2.8	6.7	0.01	3.9	Accession	2021
Malaysia	-14.0	0.3	1.1	1.9	15.0	26.0	7.7	18.7	Signature	
Mongolia	8.9	1.4	5.7	12.9	-3.2	14.0	0.03	17.2	Ratification	2020
Myanmar	-16.4	2.8	11.1	19.5	27.5	12.9	21.1	6.4		
Philippines	15.9	6.7	26.9	60.6	11.0	4.8	11.1	4.9	Ratification	
Thailand	41.8	0.3	1.1	1.9	-40.7	12.1	10.8	63.6	Accession	
Viet Nam	-16.1	0.6	2.3	4.0	18.4	8.2	27.5	17.3	Approval	
Subtotal	-5404.6	136.9	392.1	741.5	5796.7	5673.8	747.8*	573.3	404.9*	450.5
Central and South America										
Bolivia	-90.2	84.5	120.8	157.0	210.9	44.4	175.7	9.2	Ratification	
Brazil	96.1	68.3	136.7	205.0	40.6	40.1	26.2	25.7	Ratification	
Chile	-150.3	1.3	5.2	9.1	155.5	209.2	6.0	59.7	Ratification	
Colombia	9.7	53.1	141.5	265.3	131.8	130.8	10.1	9.1	Ratification	
Dominican Republic	0.3	0.3	0.9	1.6	0.7	0.4	0.6	0.3	Ratification	
Ecuador	70.4	26.5	70.7	132.5	0.3	0.3	0.3	0.3	Ratification	2020
Guyana	8.4	5.1	20.4	46.0	12.0	1.5	10.5	0	Ratification	
Honduras	6.5	3.3	6.5	9.8	0.1	0.4	0.2	0.5	Ratification	
Mexico	-407.3	2.5	9.8	17.1	417.0	283.0	385.7	251.7	Ratification	
Nicaragua	-0.9	0.4	1.2	2.4	2.1	0.3	1.8	0.01	Ratification	
Panama	-12.1	0.5	2.0	3.4	14.1	1.8	12.3	0.01	Ratification	
Paraguay	-4.4	0.3	0.9	1.6	5.3	0.7	4.7	0.1	Ratification	
Peru	212.7	106.6	284.3	533.1	71.6	174.4	6.0	108.8	Ratification	
Suriname	53.6	37.6	53.7	69.8	0.01	0.004	0.01	0.01	Accession	
Venezuela	78.6	33.3	88.7	166.3	10.1	10.2	0.3	0.4	Signature	
Subtotal	-128.9	423.6	943.3	1619.9	1072.2	897.7	439.0*	640.3	519.0*	465.9
Oceania										
Papua New Guinea	6.1	0.6	2.1	3.8	-4.0	2.0	2.2	8.2		
Subtotal	6.1	0.6	2.1	3.8	-4.0	2.0	6.2*	2.2	5.3*	8.2
Total	-4954.3	743.6	1954.3	4659.1	6908.6	6643.3	1289.5*	1233.7	965.5*	968.4

4-2-2. 不適切な水銀の貿易の検出

年ベース、輸出国ベース、輸入国ベースの水銀国間貿易のICC計算結果とその95%信頼区間を図1-11~12に示す。図-1.11は1999年から2018年を対象とする。また、図-1.12では、2014年から2018年を対象として水銀輸出量、輸入量における上位10カ国の結果を示した。

図-1.11の年ベースのICC計算結果から、水俣条約が採択された2013年を機に、当該条約が発効する2017年を介して、最新の2018年にかけて、ICC値は0.2から0.8に増加する傾向が見られた。これは、水

候条約を中心に水銀撲滅の機運が高まる中で、不適切な水銀の国間貿易の存在が減少している可能性が
いえる。例えば、最も低いICC値が確認された1999年の輸出国報告値と輸入国報告値の散布図に着目す
ると、100tを超える輸出国報告値または輸入国報告値に対して、それぞれの相手国報告値が存在しない
不整合が散見している（x軸上もしくはy軸上にプロットされる点）。一方、最も高いICC値が確認され
た2018年の輸出国報告値と輸入国報告値の散布図では、そのような大規模な不整合は見られなかった。

図-1.12(i)の輸出国ベースのICC計算結果から、主要な水銀輸出国である米国、スペイン、インドネ
シアにおいて0.2未満の低いICC値が得られた。これは、2013年から水銀の輸出を禁止している米国、
2011年から水銀の輸出を禁止しているスペイン、2017年から水銀の採掘を規制しているインドネシアに
おいて、不適切な水銀輸出の存在を検出できた。特に、最も低いICC値が得られたスペインの輸出報告
値とその相手国の輸入報告値の散布図を見ると、100tを超える水銀の国間貿易について、スペインが報
告する輸出量に対してその相手国が輸入量を報告しない不整合を複数ODペアで確認できる。

図-1.12(ii)の輸入国ベースのIC計算結果から、主要な水銀輸入国であるトーゴ、スーダン、日本に
おいて0.2に近い低いICC値を観測し、不適切な水銀輸出の存在を検出した。特に、最も低いICC値が得
られたトーゴの輸入報告値とその相手国輸出値の散布図を見ると、トーゴが報告する輸入量に対してそ
の相手国が輸出量を報告しない不整合パターンに加えて、トーゴが報告する輸入量に対してその相手国
が輸出量を過大に報告する不整合パターンを確認できる。また、日本での不整合パターンは、日本が報
告する輸入量に対してその相手国であるインドネシアが輸出量を過大に報告するケースであり、図2で
確認されたインドネシアの不適切な国間貿易に関わるものである。

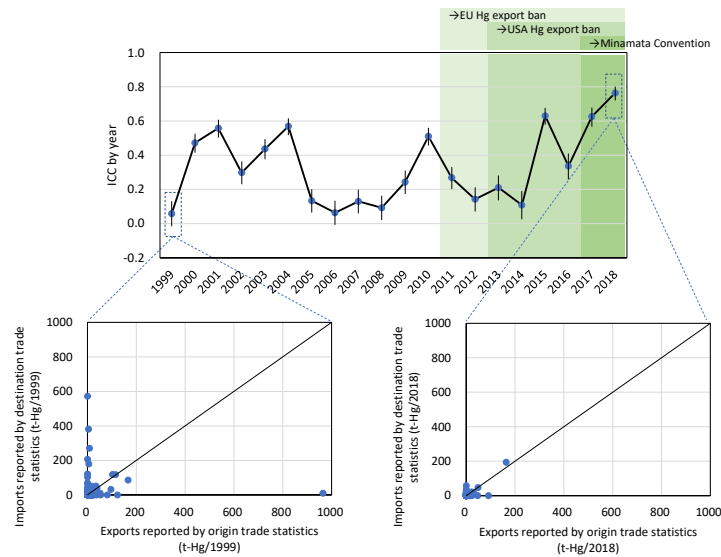
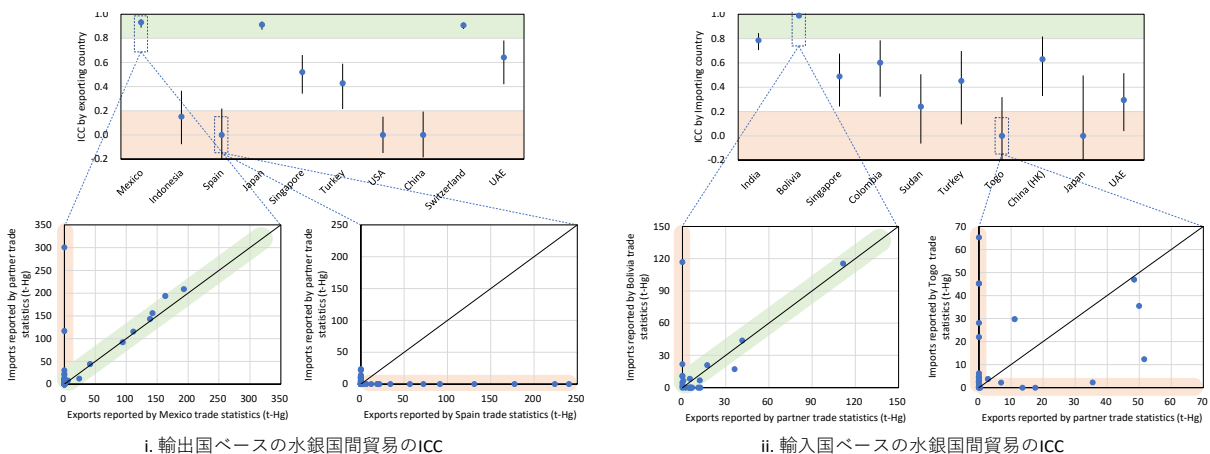


図-1.11 年ベースの水銀国間貿易のICC計算結果（1999年から2018年）



i. 輸出国ベースの水銀国間貿易のICC

ii. 輸入国ベースの水銀国間貿易のICC

図-1.12 輸出国ベースの水銀国間貿易のICC計算結果（2014年から2018年）

以上の年ベース、輸出国ベース、輸入国ベースのICC計算結果より、欧州の水銀輸出規制、米国の水銀輸出規制、水俣条約などの水銀貿易規制が強化される中で、不適切な水銀の国間貿易の存在が減少する傾向を把握する一方で、主要な水銀輸出国または水銀輸入国の一部で、不適切な水銀の国間貿易が続いている可能性を明らかにした。本研究のICC計算を通じて不適切な水銀の国間貿易の存在が検出されたインドネシア、中国、スーダン、トーゴは、国連環境計画の現地調査により違法水銀貿易国として報告されており^{11,12)}、本研究で提案した不適切な水銀国間貿易検出手法の妥当性を示すものである。

不適切な水銀の国間貿易は、水俣条約の中の水銀貿易規制に対する実効性評価において重要な評価スコープの一つである。本研究は、ICCを駆使することで不適切な水銀の国間貿易の存在を効率的に検出する方法を考案し、既往貿易統計から不適切な水銀の国間貿易の存在の検出に成功した。そこで、本研究の不適切な水銀国間貿易検出法は、水俣条約の実効性評価における水銀貿易モニタリングの有効な手段の一つとして期待される。本手法は不適切な水銀国間貿易の存在の検出に有効であるが、不適切な水銀国間貿易「量」の評価も、実効性評価の観点からは重要である。本研究で考案した不適切な水銀国間貿易検出法は、不適切な水銀国間貿易量を効率的に評価する第一ステップと位置付けられる。本手法により検出した不適切な水銀国間貿易を対象に不整合量（輸出報告値と輸入報告値の乖離量）を計算することで、不適切な水銀国間貿易量の効率的な評価が可能となる。

最後に、本研究の限界について記す。輸出国とその輸入相手国の両国税関で申告されない密輸は、両国貿易統計で輸出入報告値が報告されないため、不整合問題自体が観測できない。このような密輸は、本手法でその存在を検出することは不可能である。両国貿易統計で観測されない密輸の検出には、4-2-1で使われた不適切な水銀フローの検出法を輸出国と輸入国に適用することが考えられる。ASGM実施国の水銀の消費・使用の報告値を参照し、貿易統計値との顕著な不整合が生じた場合、その理由として、密輸の存在が考えられる。

5. 研究目標の達成状況

研究目標（人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行および気候変動対策を考慮した複数の将来シナリオを作成し、中長期の水銀排出シナリオを定量的に描く。）を達成した。加えて、水銀の違法貿易への対処を支援すべく、水銀の不適切な使用・流通の検出方法を確立した。以下の5報の学術論文誌における誌上発表（他3報が査読中）、および、4報のその他の誌上発表を含めて、“目標を大きく上回る成果をあげた”。

まず、AIM/End use [Global]モデルとサービス需要量モデルを核として、人為起源による水銀の大気排出量の将来推計を可能とするグローバル・シナリオモデルの開発を達成した(図-1.2~図-1.6)。推計については、排出経路の不確実性を分析することで、UN Environment2018¹⁾が示す排出インベントリとその不確実性を概ね達成できていることを確認した(図-1.7~図-1.8)。活動量の精査¹³⁾、事例解析¹⁴⁾を含む複数の論文が学術論文誌に掲載された。

また、水銀の不適切な使用・流通の検出方法として、統計・報告値等の情報間の不整合に着目した2種の検出手法（国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀使用量の不整合⁵⁾、二国間貿易における報告値の不整合¹⁰⁾）の開発を達成した(図-1.9~図-1.12, 表-1.2)。ASGMにおける金生産量・水銀使用量・水銀排出量に関するレビュー論文¹⁵⁾を含めて、複数の論文が学術論文誌に掲載された。

加えて、環境省および水俣条約事務局の協力のもと、Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining（Date：October 30, 2022, Venue：Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)）を開催¹⁶⁾した。国際連合（水銀に関する水俣条約事務局の行政官）、環境省、チリ、カナダからの有識者を含め15名の発表者のほか、TAUWやEPA（アメリカ合衆国環境保護庁）、台湾、日本国内等からオンサイトおよびオンラインで計38名が視聴参加し、水銀の使用・貿易、そして環境汚染等の課題に関する活発な情報交換が行われ、今後も各国・地域の関係者が引き続き尽力するとともに、課題解決に向けてより一層の連携および技術支援を進めていく必要性を共有した。また、会議を通じて、条約事務局等で作成を進める報告書への知見の提供を果たした(図-0.11)。すでに、一部の

成果は、UNEP Global Mercury Partnership Advisory Group Thirteenth meetingの報告書 (Report on activities undertaken within the United Nations Environment Programme Global Mercury Partnership) を通じて、広く共有されている。

6. 引用文献

- 1) UN Environment, 2019, United Nations Environmental Programme, Global mercury assessment 2018, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27579/GMA2018.pdf>
- 2) Streets D.G., Horowitz H.M. et al. 2017, Total Mercury Released to the Environment by Human Activities, *Environ. Sci. Technol.*, 51, 5969-5977
- 3) Zhang, Y., Song, Z., Huang, S. et al. 2021, Global health effects of future atmospheric mercury emissions. *Nat Commun* 12, 3035.
- 4) Hanaoka T, Masui T. Exploring effective short-lived climate pollutant mitigation scenarios by considering synergies and trade-offs of combinations of air pollutant measures and low carbon measures towards the level of the 2 ° C target in Asia. *Environmental Pollution*. 2020 Jun;261:113650.
- 5) Cheng Y., Nakajima K., et al. (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. *Resources, Conservation & Recycling*, 185, 106461
- 6) Metals Focus, 2020. Gold focus. <https://www.metalsfocus.com/wp-content/uploads/2020/11/GOLD-FOCUS-2020.pdf>.
- 7) Yoshimura, A., Suemasu, K., Veiga, M.M., 2021. Estimation of mercury losses and gold production by artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *J. Sustain. Metall.*
- 8) Nakajima, K., Daigo, I. et al., 2018. Global distribution of material consumption: nickel, copper, and iron. *Resour. Conserv. Recycl.* 133, 369-374.
- 9) CEPII (2017): CEPII. Base pour l'Analyse du Commerce International, <http://www.cepii.fr/anglaisgraph/bdd/baci.htm>.
- 10) Fuse M., Oda H. et al. (2022) Detecting Illegal Intercountry Trade of Mercury Using Discrepancies in Mirrored trade Data. *Environmental Science & Technology*, 56, 13565-13572
- 11) UNEP. Global Mercury Supply, Trade, and Demand, 2018. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21725/global_mercury.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- 12) UNEP. The Illegal Trade in Chemicals. <https://www.unep.org/resources/assessment/illegal-trade-chemicals>
- 13) Watari T., Nansai K., Nakajima K., Giurco D. (2021) Sustainable energy transitions require enhanced resource governance. *Journal of Cleaner Production*, 312 (20), 127698
- 14) Zhaoling Li, Tatsuya Hanaoka. (2022) “Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO2 emissions in China’s iron and steel sector” , *One Earth*, 5, 932-943
- 15) Cheng Y., Watari T., Seccatore J., Nakajima K., Nansai K., Takaoka M. (2023) A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resources Policy*, 81, 103370
- 16) Report of an event for international information exchange concerning artisanal and small-scale gold mining (ASGM) <https://www.nies.go.jp/whatsnew/20221129-e/20221129-e.html>

II-2 ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析

立命館大学

理工学部	機械工学科	教授	山末英嗣
理工学部	環境都市工学科	教授	橋本征二
政策科学部	政策科学科	准教授	中野勝行
理工学部	機械工学科	講師	柏倉俊介（令和3年度-令和4年度）
グローバル・イノベーション研究		准教授	光斎翔貴（令和2年度-令和4年度）

【要旨】

ライフサイクル思考を適用することで、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無を定量的に把握した。まず関連プロセスのインベントリデータを整備した¹⁾。水銀排出量との関連性が高い製錬プロセスとして、ASGM、鉄鋼製錬、銅製錬を対象として対策技術の影響を定量化した。ASGMについては、蒸留器や青化法の導入に伴う水銀排出量の大幅な削減が2050年までに達成できると試算された。その一方で、これら対策技術の介入によって新たな重大な問題が生じることが明らかとなった。また副次的影響の中でも、排出抑制を目的とした蒸留器による回収廃水銀の隔離管理コストをグローバルスケールにおいて算定した結果、最も厳しい廃棄物水銀管理ガイドラインをASGM従事国に適用した場合、回収水銀の廃棄物管理コストを確保することが必須であることが分かった^{2) 3)}。次に、粗鋼生産においては主要な水銀の排出源は鉄鉱石と石炭であることがわかった。一方で、電力二由来する水銀はたかだか全体の1割前後であり、再生可能エネルギーの導入割合の増大による水銀排出量の削減効果は限定的であった。今後の対策としては、水素製鉄の導入が有効であることが明らかとなり、その背後に二酸化炭素と水銀の排出量にトレードオフは見られず、共便益効果が存在することが示唆された⁴⁾。銅製錬については、各国の銅製錬由来水銀大気排出量を推定した。その結果、中国、イラン、ロシアは他国に比べ水銀除去率が低いため、2022年はこれら3カ国のみで対象国全体の排出量の約98%を占めていた。これらの対策技術について、銅リサイクルにも一定の効果はあるが、水銀排出削減対策技術の導入による削減効果がより大きいことが明らかとなった⁵⁾。

水銀を含有するポストコンシューマー製品の代表として照明機器を選定し、発展途上国の一つであるマレーシアを例に、2050年までにおいて照明機器の対策技術の導入の影響を調査した。その結果、対策技術が進まない場合、2025年に向けて大気水銀排出量が増加する可能性が推定された。またアンケート調査により、家庭用廃電球のうち、適切に処理されリサイクルされているのは全体の13%に過ぎず、そこに含まれる水銀が拡散されている可能性が示唆された⁶⁾。

水銀含有一般廃棄物（乾電池、照明）の処理への水銀対策の導入による効果と副次的影響についても調査を行った。国内自治体へのアンケートにより、使用済み乾電池については国内に5か所の主要なリサイクル拠点があるものの、特に北海道のリサイクルプラントへの搬入量が多いことが明らかになった。また特段の事前処理も行われていないことが分かった。蛍光灯については、水銀を抽出・リサイクルしているプラントは国内に2か所存在していることが分かった。一部の自治体は蛍光灯を破碎せずに輸送しているが、破碎する場合に比べ環境影響が大きいことが示された⁷⁾。

最後に、回収水銀の処理について検討した。硫黄を用いた安定固化、およびベントナイト等を用いた最終処分に要する資材等製造による温室効果ガス排出量および資源消費量は、水銀含有廃棄物の処理・処分に関わる他のそれら影響に比べて軽微であることが明らかになった。将来回収された水銀を最終処分するよう処理方法を変更しても、それに伴う環境影響（気候変動および資源消費への影響）は小さく、長期保管に伴う水銀漏洩を適切に管理することが重要であることも明らかになった。

1. 研究開発目的

科学的知見として、水銀の使用や排出の抑制・廃絶を実現するための対策技術の効果の定量化と共に、技術の実装に伴って生じ得る副次的影響を、事前に同定し提供する。これにより、円滑な対策の実装と共に生じ得る問題に対する修正や対処に関する議論を支援する。具体的には、ライフサイクル思考を適用することで、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無を定量的に把握する。具体的には水銀排出量との関連性が高い製錬プロセスを対象として対策技術の影響を定量化するだけでなく（プレコンシューマー）、水銀を含有する製品を廃棄する際処理方法の影響を算定する（ポストコンシューマー）。さらに回収された水銀をリサイクルする場合と最終処分する場合の環境負荷評価の算定も行う。また、ケーススタディー等を通じて得られる排出係数等に関する情報について、LCAを含む環境負荷分析等の分野で広く利用できることを目指してインベントリデータとしての公開を目指す。

2. 研究目標

対策技術の導入による水銀使用量低減と他の環境影響指標とのトレードオフの有無を同定し、市場への影響を定量化する。

3. 研究開発内容

水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無について、ライフサイクル思考に基づき定量的に評価を行った。まず水銀排出量との関連性が高い製錬プロセスとして、プレコンシューマー型産業であるASGM、鉄鋼製錬、銅製錬を対象として対策技術の影響を定量化する。また、水銀を含有するポストコンシューマー製品の代表として照明機器を選定した評価も行う。さらには水銀含有一般廃棄物（乾電池、照明）の処理への水銀対策の導入による効果と副次的影響、そして回収水銀の処理についても検討を行う。

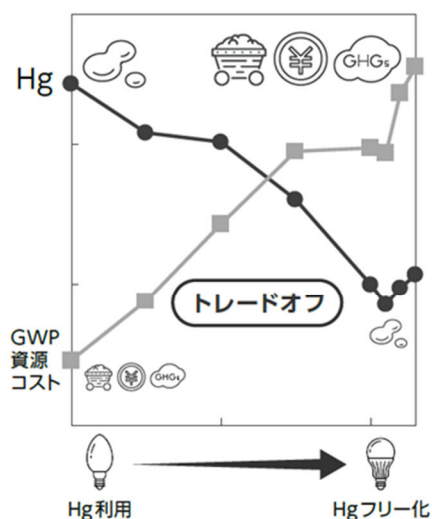
SII - 6

テーマ2
サブテーマ(2)

ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析
(立命館大学)

成果目標

水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無の同定



【実施内容】



水俣条約を履行する為の製品・製造プロセスにおける対策等の抽出・整理



対策プロセス等のインベントリデータ（プロセス情報、環境負荷情報など）の整備



対策プロセス等の導入による影響を評価しトレードオフの有無を同定、市場への影響を定量化

ライフサイクル視点での評価

- ・インベントリ分析
- ・種々の指標（地球温暖化・資源利用(TMR)、コストなど）による多角的な評価
- ・市場への影響を把握

図-2.1 サブテーマ2の概観

3-1. 水銀に関するLCAインベントリデータの作成

LCAに用いられる国内の主要なLCIデータとしてはIDEA (Inventory Database for Environmental

Analysis)がある。水銀排出量に関しては、化学物質排出移動量届出制度（PRTR）のデータが利用されているが、データの網羅性や正確性については課題が指摘されている。本研究では、環境省の水銀大気排出インベントリーや水銀マテリアルフローにおける水銀排出プロセスに対応するIDEAv2.3のプロセスを同定するとともに、対応する水銀排出量の各プロセスへの合理的な割り付け方法を検討した。対象とする水銀排出プロセスは、環境省の水銀大気排出インベントリーや水銀マテリアルフローで扱われているプロセスのうち、自然由来の排出や排出が検出限界以下のものを除いたものを対象した。

3-2. 零細・小規模金採掘への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定

大気水銀廃棄量の中でもその発生源として大部分を占めるのが零細・小規模金採掘（ASGM）である。近年特にASGMにおける世界の水銀使用量と排出量の推定に関する研究の注目度が高まり、ASGMに関連する問題に対する認識が向上してきた。しかし、水銀に関する水俣条約に基づき、世界の水銀使用量と排出量を緩和するための特定の介入戦略の具体的な効果については、ほとんど注目されていない。そこで、水銀の排出量あるいは使用量の削減・廃絶が期待される3種類の対策（排出抑制：蒸留器による回収、使用抑制：精鉱法への転換、使用廃絶：青化法への転換）を取り上げ、2050年にかけて各従事国における導入効果を推定した。さらに対策技術の導入に伴い生じ得る副次的影響を算定した。同定された副次的影響の中でも特に、排出抑制を目的とした蒸留器による回収廃水銀の隔離管理コストを最も厳しい規制基準の元グローバルスケールにおいて算定した。

3-3. 鉄鋼製錬への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定

二酸化炭素の排出量シェアが最も大きい鉄鋼産業において、その二酸化炭素排出量の大幅な削減を試みるための方策として、鉄鉱石の還元剤を石炭由来の кокスから水素に置換する試みが世界各国でなされている（以降、水素製鉄と呼称）。この水素製鉄は還元剤としての水素を大量に必要とするが、その精製には再生可能エネルギーによる余剰電力を活用した水電解による期待されている。しかしながらこれらの発電にもその背後に水銀排出が存在する。そのため、水素製鉄の拡大は二酸化炭素の排出削減とのトレードオフとして、ライフサイクルにおける水銀排出の増大を招く恐れがあるが、この影響についてはほぼ議論されていない。そこで、2050年へ向けて、粗鋼生産量、粗鋼生産方法の比率、再生可能エネルギーの導入割合、水銀の除去率の推移をパラメータとして、水銀排出量の将来推計を行った。また、粗鋼生産時の水銀排出濃度に石炭火力発電並みの排出規制がかけられた際においても水銀排出量の将来推計を行った。

3-4. 銅製錬への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定

将来の銅需要量の変化に伴い、主要な銅生産国（China、DR Congo、Germany、Iran、Japan、Russia、South Korea、the United States）における製錬由来の水銀排出量がどのように変化するかを推計した。銅需要量については、stock-driven approachを用いた動的MFAを行い、SSPsの3つのGDPシナリオ（SSP1～3）を用いて、2050年までの値を推計した。推計された銅の需要量に基づき、下式を用いて2050年までの水銀大気排出量を推計した。

$$E_t = (I_t \times Z_t) \times (1 - R_t) \times C_t \times d_t \times D_t \times (1 - r_t)$$

ここで、 E_t はt年における水銀大気排出量(g-Hg/year)、 I_t はt年における銅需要量(t/year)、 Z_t はt年における銅需要量に対する銅製錬量の比(-)、 R_t はt年における銅のリサイクル率(-)、 C_t はt年における電気銅1tの生産に用いられる銅精鉱量(t/t)、 d_t はt年における銅鉱石中の水銀含有量(g-Hg/t)、 D_t は溶融スラグに含まれる水銀を考慮した分配係数(-)、 r_t はt年における大気排出水銀の除去率(-)である。

銅リサイクルと水銀除去技術の有効性を評価するために、 R_t と r_t が(I)2050年まで変化しない、(II) R_t のみ上昇、(III) r_t のみ上昇、(IV) R_t と r_t がともに上昇するケースについて水銀大気排出量を推計した。 R_t については、2050年に50%となるように単調増加するものとした。 r_t については、2050年に

99.97%(BATの最大水銀除去率)となるように単調増加するものとした。

3-5. 水銀含有機器（照明）への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定

水銀含有機器の中でも照明機器はその技術転換によって大気排出量が大きく変化すると考えられる。そこで発展途上国の一つであるマレーシアを例に、2050年までにおいて照明機器の技術転換の速さが照明機器の廃棄物に含まれる水銀排出量と資源利用量にどの程度影響を及ぼすかライフサイクルの観点から推定した。照明機器は白熱電球（INC）、小型蛍光灯（CFL）、発光ダイオード（LED）電球を対象とし、資源使用量の指標として、資源開発のための採掘活動によって生じる土地攪乱の規模を表す関与物質総量を用いた。また、マレーシア社会における照明技術の移行の速さに基づく2つのシナリオを考慮して、2015年から2050年の期間中、マレーシアの家庭部門におけるそれぞれの照明機器の生産量、ストック量、廃棄量を動的マテリアルフロー分析を用いて推定した上で、各シナリオにおいて2015-2050年のマレーシアの家庭用照明セクターにおける国レベルの水銀排出量と資源使用量を推計した。

3-6. 水銀含有一般廃棄物（乾電池、照明）の処理への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定

国内の多くの地方自治体では水銀含有一般廃棄物を別途収集し、水銀の環境への拡散を避けるための処理を実践している。しかし、当該処理に伴う環境影響は評価されていない。そこで、本研究では水銀含有一般廃棄物の処理およびリサイクルに伴う温室効果ガス排出量および資源消費への影響について評価した。まず、主要自治体に調査票を送付し、水銀含有一般廃棄物（乾電池、蛍光灯）のリサイクルルート、処理量、輸送方法等を調査した。全国110自治体に送付し、71自治体より回答を得た。また主要なリサイクルルート別に燃料消費量、資材使用量等を調査した。特に、水銀回収プロセスについては国内の主要水銀回収事業者の協力を得て、実際のインベントリデータを収集した。

3-7. 水銀リサイクルと最終処分環境負荷評価の算定

現在、回収された水銀は有価物として国内外にて資源として再利用されているが、水俣条約の発効に伴い、水銀は将来需要が減少することが考えられる。そこで、国内で廃棄物より回収された水銀を安定固化・埋立処分する将来を想定し、当該プロセスにおける環境影響を評価した。評価に際しては、環境省ガイドライン等より処理プロセス、最終処分プロセスを想定し、最終処分に要するセメント、硫黄、ベントナイト等の資材使用量、最終処分場建設に運用に伴うエネルギー量等を推計し、気候変動への影響および資源消費への影響を評価した。

4. 結果及び考察

4-1. 水銀に関するLCAインベントリデータの作成^{引用文献1)}

対象とした23プロセスのうち、水銀排出量の多いプロセスの対応例を表-2.1に示す。セメント製造施設については、IDEAv2.3の5つのプロセスが対応する。セメント製造施設における水銀排出源はクリンカ製造プロセスであるため、その排出量をIDEAv2.3の「セメントクリンカ」プロセスに割り付けた。鉄鋼製造施設については、IDEAv2.3の17のプロセスが対応する。一次製鉄施設における水銀排出源は、焼結鉄製造プロセス、コークス炉副生ガス/高炉副生ガス利用プロセスであるため、それぞれの排出量をIDEAの「焼結鉄」「コークス炉ガス(COG)の燃焼エネルギー」「高炉ガス(BFG)の燃焼エネルギー」プロセスに割り付けた。また、二次製鉄施設における水銀排出源は電気炉であるため、IDEAv2.3の「粗鋼（電炉法）」プロセスに割り付けた。なお、「粗鋼（電炉法）」プロセスの投入フローには「電気炉ガス(EFG)の燃焼エネルギー」は含まれていない。なお、これらの成果はIDEAの開発者とディスカッションをおこない、IDEAへの掲載をするための準備を進めている。

表-2.1 プロセスの対応例と水銀排出量

環境省水銀マテリアルフロー におけるプロセス		IDEAv2.3におけるプロセス		水銀排出量
			分類コード	
セメント製造施設		ポルトランドセメント	222111000	
		セメントクリンカ	222112000	109.691 mg-Hg/製品t
		その他の水硬性セメント	222119000	
		高炉セメント, B種	222119200	
		フライアッシュセメント, B種	222119201	
鉄鋼製造施設	一次製鉄施設	コークス	183111000	
		コークス, 鉄鋼用	183111101	
		コークスの燃焼エネルギー	183111801	
		コークスの燃焼エネルギー, 鉄鋼用	183111803	
		燃料ガス(高炉ガス・コークス炉ガスを含む)	183112000	
		コークス炉ガス(COG)の燃焼エネルギー	183112801	1.74E-11 mg-Hg/MJ
		高炉ガス(BFG)の燃焼エネルギー	183112802	1.08E-09 mg-Hg/MJ
		転炉ガス(LDG)の燃焼エネルギー	183112803	
		焼結鉱	231111000	16.2 mg-Hg/製品t
		鉄ベレット	231112000	
		高炉銑 (製鋼用銑)	231113000	
		高炉銑	231113100	
		鋳物用銑 (高炉)	231114000	
	二次製鉄施設	粗鋼	231115000	
		粗鋼 (転炉法)	231115201	
		電気炉ガス(EFG)の燃焼エネルギー	183112804	
		粗鋼 (電炉法)	231115202	25.8 mg-Hg/製品t

4-2. 零細・小規模金採掘への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定^{引用文献2, 3)}

ASGMにおいて水銀の排出量あるいは使用量の削減・廃絶が期待される3種類の対策を取り上げ、2050年にかけて各従事国における導入効果を推定し、対策技術の導入に伴い生じ得る副次的影響を算定した。その結果、蒸留器や青化法の導入に伴う水銀排出量の大幅な削減が2050年までに達成できると試算された(図-2.2)。

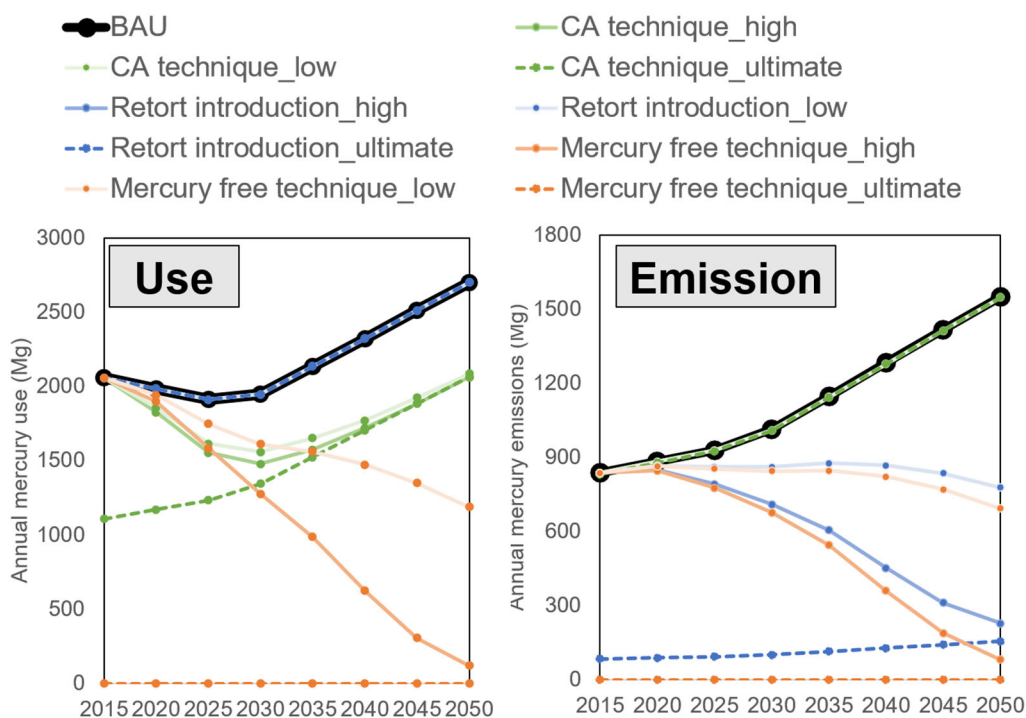


図-2.2: ASGMにおける全世界の水銀使用量と排出量変化

その一方で、これら対策技術の介入によって新たな重大な問題が生じたことが明らかとなった。つまりこれらの副次的影響として、廃棄物として適切かつ恒久的に管理する必要がある水銀量が世界で2050年には最大で1740 Mg発生するという点、また新たな健康被害をもたらさうるシアン化水素が世界で2050年には最大で46,700 Mg排出されるという点が挙げられる(図-2.3)。この結果は、水銀に関する水俣条約に従って水銀の使用と排出を緩和する取り組みだけでは、ASGMにおける持続可能性を実質的に危うくする新たなリスクを生み出す可能性があることを示唆している。ASGM実施国における国家行動計画には、このような意図しない副次的影響も考慮した包括的な水銀対策に関する戦略まで含まれるべきものであると言える。

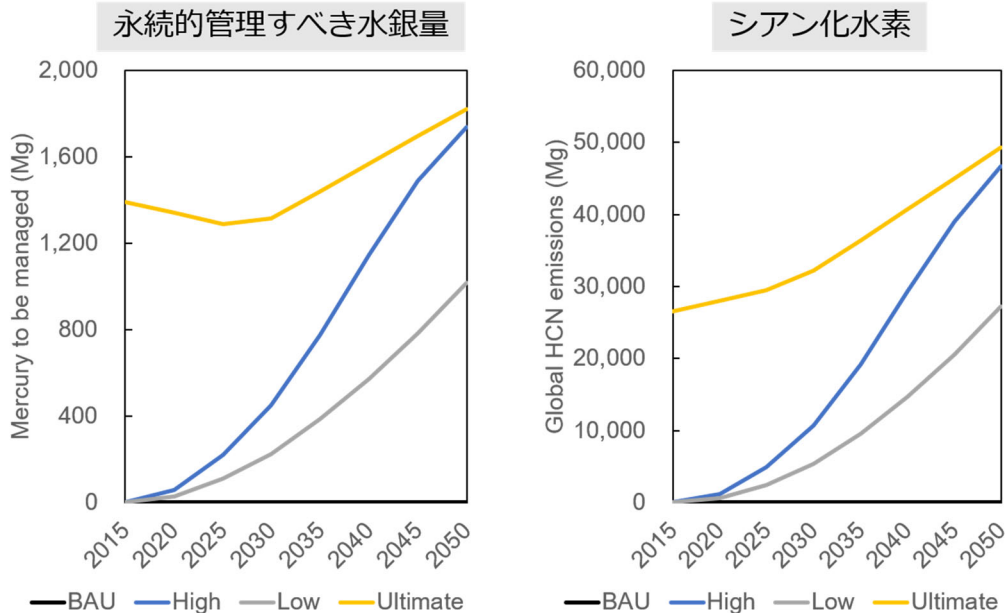


図-2.3 ASGMにおける水銀対策技術導入に伴う副次的影響

また、副次的影響の中でも、排出抑制を目的とした蒸留器による回収廃水銀の隔離管理コストをグローバルスケールにおいて算定した(図-2.4)。最も厳しい廃棄物水銀管理ガイドラインをASGM従事国に適用した場合、蒸留器による回収水銀の廃棄物管理コストは、グローバルスケールにおいて2050年には最大で1660万ドルに達すると推定され、これは2050年までにおける累積蒸留器購入コストの44.7倍となることがわかった。

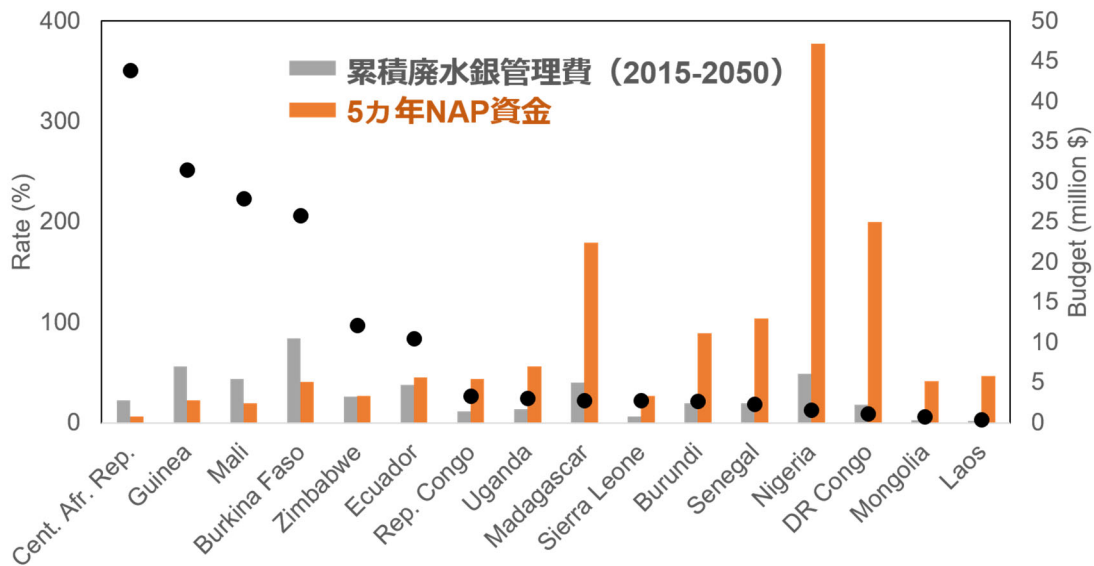


図-2.4 ASGM従事国における累積廃水銀管理費と5カ年NAP資金の関係

このように、水銀排出削減のために蒸留器を導入する場合、回収水銀の廃棄物管理コストを確保することが必須であることを示唆している。一方で、ASGM従事国の多くはガバナンスレベルが低く、5年間の短期国家行動計画（NAP）予算が過小評価されており、金銭面に加え管理ガバナンスにおいても課題が抽出されその実現は困難であるとも考えられる。これまで球環境ファシリティのASGM資金拠出額（約5億ドル^{引用文献4)}のうちの約33%の追加予算を、2015年から2050年における累積回収水銀の適切な廃棄物管理コストとして新たに計上する必要があることが分かった。新たに必要と試算されたコストに対し、各国の金消費量に対する地球環境ファシリティのASGM資金拠出額から同定されたASGMの適正化への貢献度の低い国々に対する国際的な働きかけが、財政面から水銀廃棄物管理の適正化に向けて重要であることが示唆された。

4-3. 鉄鋼製錬への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定^{引用文献5)}

水素製鉄の導入拡大に伴う、2050年までの水銀排出量の将来推計を行った。考慮したパラメータは世界全体の粗鋼生産量、及び世界各国における粗鋼生産手法の比率、再生可能エネルギーの導入割合、及び水銀除去率であった。これらのデータは国際エネルギー機関(International Energy Agency, IEA)と各種の文献から収集した。図-2.5には各製鉄手法別における粗鋼生産1トン当たりの水銀排出量（水銀含有量×水銀除去率）を示した。以降この値は総括水銀排出係数と呼称する。粗鋼生産において主要な水銀の排出源は鉄鉱石と石炭であった。一方で、電力由来の水銀排出が全体が占める割合は全体の1割前後、あるいはそれ以下であり、再生可能エネルギーの導入割合の増大による水銀排出量の削減効果は限定的であった。主要な排出源である鉄鉱石については今後の低品位化（T-Fe換算で62%から55%）が予測されており、ここに示す総括水銀排出係数は将来的に微増する傾向にあると考えられる。また、鉄スクラップ中に含まれる水銀は鉄スクラップそのものではなく、不適切に混合された電池などが由来である。この不適切な混合については、バーゼル条約に呼応する形で日本国内においてはバーゼル法などの法整備による輸出管理の厳格化が今後さらに加速すると見られており、世界規模でも同様の対応が求められる。

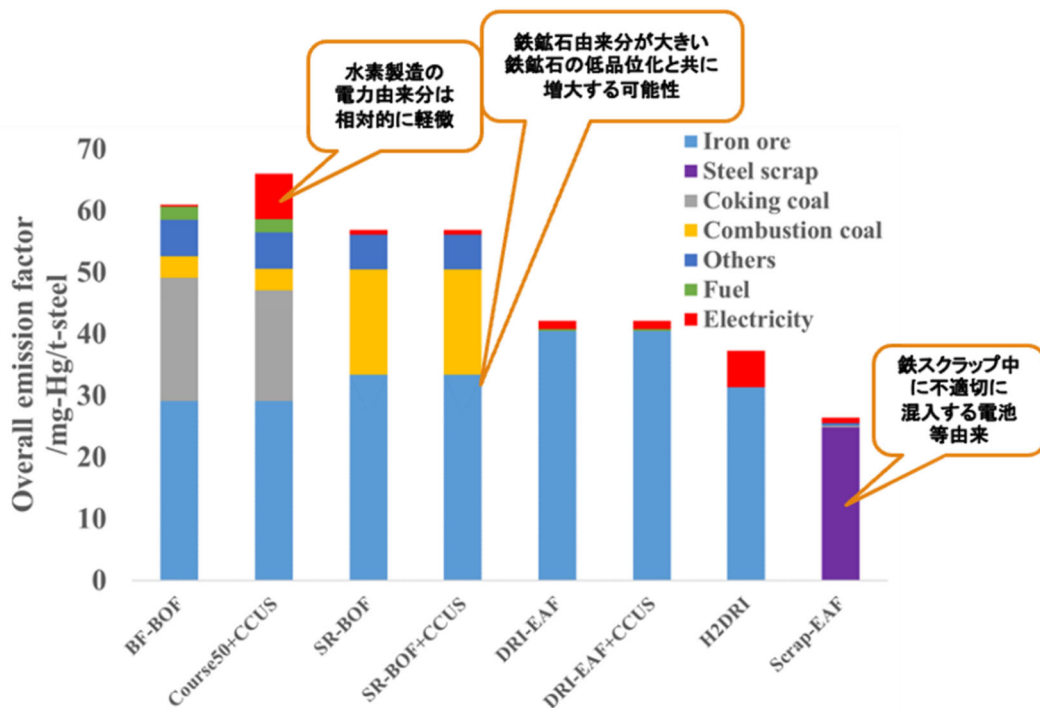


図-2.5 種々の製鉄法における大気水銀排出量の推算値

こうして計算された粗鋼1トン当たりの水銀排出量に、2050年までの粗鋼生産量及び粗鋼生産比率を乗じて計算された水銀排出量の予測推移が図-2.6となる。この図の上部に着目すると、現行の政策のみが取られ続けると仮定されるシナリオであるSTEPS(Stated Policies Scenario)におい

ては高炉-転炉法による生産比率が十分に低下せず、粗鋼生産量も2019年の1.8 Gtから2050年には2.6 Gtにまで拡大するとされているため、水銀排出量もそれに呼応して95.9 tから113.7 tにまで増大した。一方で、 -1.5°C シナリオに呼応するシナリオであるSDS(Sustainable Development Scenario)、あるいは独自に設定した水素製鉄拡大シナリオであるUlt-H₂においては、水銀排出量が89.4t、あるいは75.1 tにまで減少した。また、図2.5の下部においては、ここから更に水銀排出濃度の排出濃度規制の施行を仮定し、水銀除去率を現行の72.9%（ボイラー関連施設）あるいは47.9%（その他の施設）から、その両方において9割以上に増加させていくシナリオを想定した。その結果、水銀排出濃度を $5\mu\text{g-Hg}/\text{Nm}^3$ 以下とした場合には、水銀排出量が40-50 tにまで減少することが明らかとなった。以上より、水素製鉄の拡大においては二酸化炭素と水銀の排出量にトレードオフは見られず、共便益効果が存在することが示唆された。

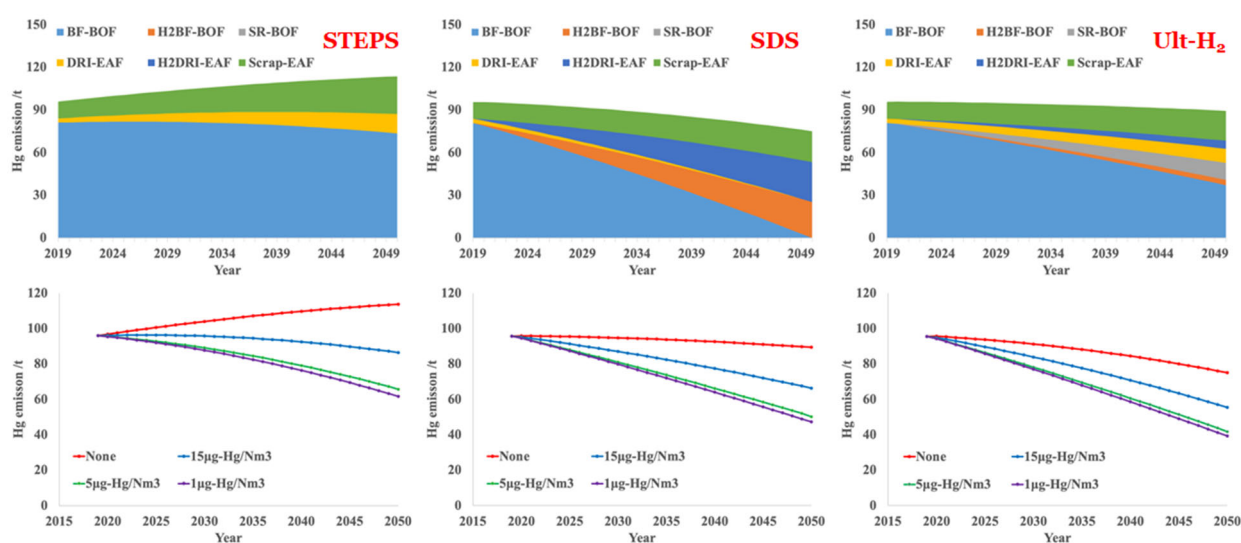


図-2.6 各鉄鋼製造シナリオ毎の大気水銀排出量の推定結果

4-4. 銅製錬への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定^{引用文献6)}

対象とした主要銅生産国のSSP2(中道)での2050年における銅ストック量は合計約451Mtと推計された。2022年での推計値約314Mtと比較すると、約44%増加する結果となった。特にChinaにおける増加が顕著であり、2050年における対象国全体の推計値の約60%を占める結果となった。また、同銅需要量は合計約16Mtと推計された。2022年での推計値約25Mtと比較すると、約37%減少する結果となった。これは各国の銅ストック量が飽和し、需要が減少していくためであると考えられる。特にChinaでは2022年から2050年まで銅需要量は減少し続けた。

SSP2(中道)、シナリオIV(リサイクル推進と水銀除去技術導入)における各国の銅製錬由来水銀大気排出量の推計結果を図-2.7に示す。China、Iran、Russiaは他国に比べ水銀排出量が大きく、2022年では3カ国で対象国全体の排出量の約98%を占める結果となった。これは、これらの国における現状の水銀除去率が他国と比べ低いことがある。また、SSP2(中道)での対象国全体の2050年における水銀大気排出量は2022年の推計値と比較すると、シナリオI(なりゆき)においては約36%増加した。一方、シナリオII(リサイクル推進)、III(水銀除去技術導入)、IV(リサイクル推進と水銀除去技術導入)においてはそれぞれ約5.7%、約99.0%、約99.3%減少した。以上のことから、銅リサイクルにも一定の効果はあるが、水銀排出削減対策技術の導入による削減効果がより大きいことが示唆された。また、China、Iran、Russia等の水銀大気排出量の大きな国にどの程度の排出削減対策技術を適用できるかが、今後の世界全体での銅製錬由来水銀大気排出量に大きな影響を与えるといえる。なお、これらの国は銅ストック量が飽和しておらず、その飽和値の大小によっても水銀大気排出量が一定程度変動すると考えられる。

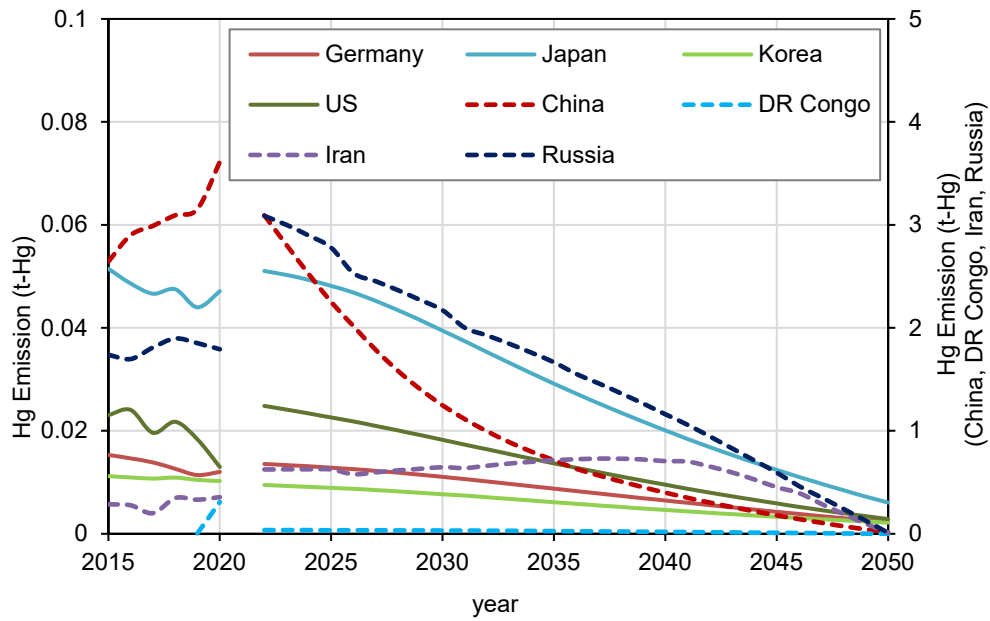


図-2.7 水銀大気排出量の推計結果(SSP2, シナリオIV, China, DR Congo, Iran, Russiaは右軸)

4-5. 水銀含有機器（照明）への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定^{引用文献7)}

発展途上国の一つであるマレーシアを例に、2050年までにおいて照明機器の技術転換の速さが照明機器の廃棄物に含まれる水銀排出量と資源利用量にどの程度影響を及ぼすかライフサイクルの観点から推定した。まず資源使用量の結果として、3種類の電球の中でLED電球の製造にかかる資源使用量が最も高かった一方、LED電球のエネルギー効率の高さから、700時間稼働後のLEDの総資源使用量は評価した3種類の照明の中で最も低いことがわかった。また、使用頻度の低い電球の場合、資源利用の観点から、CFL電球がLED電球より優れている可能性があることが示唆された。また、図-2.8に示すように、マレーシアにおいて家庭用照明機器の技術転換により水銀大気排出量の増加が一時的に確認された。これは蛍光灯の廃棄量の増加に起因する。特に急速な技術転換は蛍光灯の使用を増加させ結果として、LEDも徐々に増えていく遅滞な技術転換に比べ、水銀排出量が急増することが推定されたものの、2050年にむけて家庭用照明機器に関わる資源使用量及び水銀排出量の低減が見込まれることが分かった。また2020年のマレーシアにおけるアンケート調査により、家庭用廃電球のうち、適切に処理されリサイクルされているのは全体の13%に過ぎないことがわかった。つまりCFL電球に多大に含まれる水銀が拡散されている可能性が示唆された。

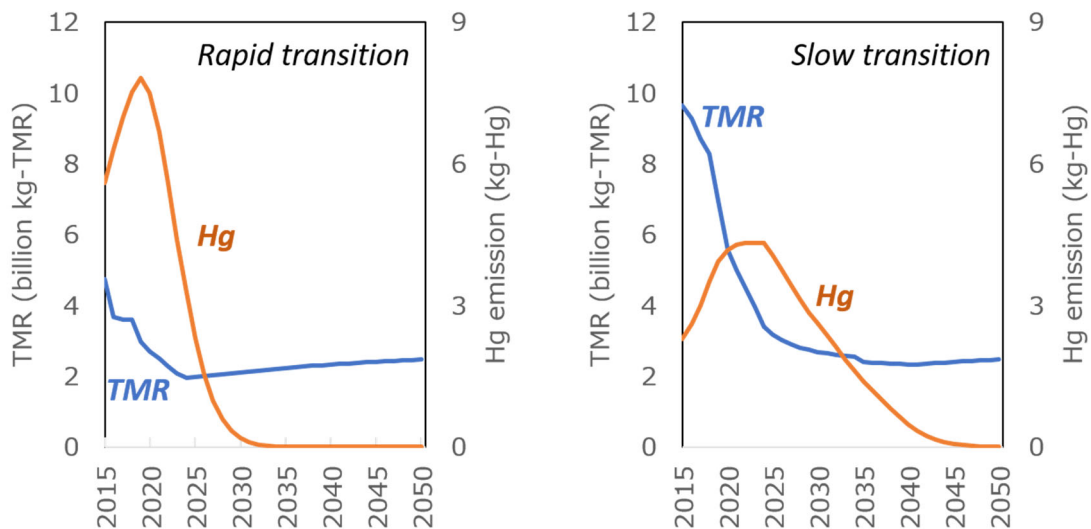


図-2.8 マレーシアにおける家庭用水銀含有照明機器の対策速度が資源（TMR）と水銀大気排出量に与える影響

4-6. 水銀含有一般廃棄物（乾電池、照明）の処理への水銀対策の導入による効果と副次的影響の算定^{引用文献8-9)}

自治体へのアンケートにより水銀含有一般廃棄物（乾電池、照明）のリサイクルルートを一覧にした（図-2.9）。その結果、使用済み乾電池については国内に5か所の主要なリサイクル拠点があるものの、特に北海道のリサイクルプラントへの搬入量が多いことが明らかになった。また後述の蛍光灯と異なり、特段の事前処理なく各プラントへ輸送していることが明らかになった。また、一部のプラントでは乾電池に含まれる鉄成分のみを回収し、ニッケルを回収していないことが明らかになった。そこで、下記に示す処理ケースについてLCA手法を用いて温室効果ガス排出量および資源消費量を評価した。

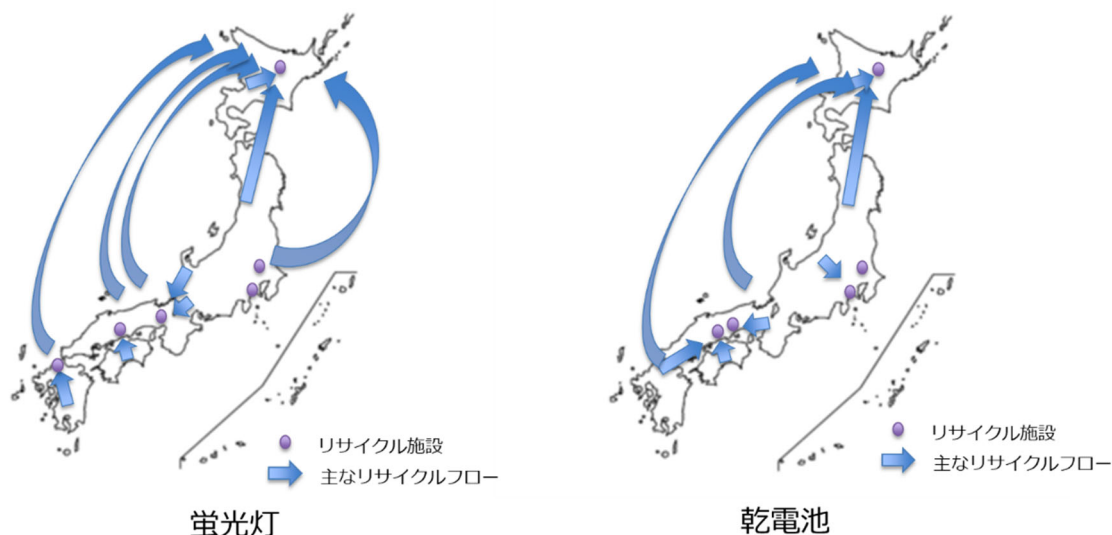


図-2.9 使用済み蛍光灯と乾電池の主なリサイクルルート。なお図中の●はリサイクル施設、矢印は主なリサイクルフローを意味する

【使用済み蛍光灯】

- ・ Case FL-A: 回収・破碎後、輸送し、水銀回収プラントにて再資源化
- ・ Case FL-B: 回収後、破碎せずに輸送し、水銀回収プラントにて再資源化
- ・ Case FL-C: 回収後、破碎し、焼却処理。残渣は埋立
- ・ Case FL-D: 回収された水銀は固化し埋立処理。他はFL-Aと同様。

【使用済み乾電池】

- ・ Case DB-A: 回収後、輸送し、水銀回収プラントにて再資源化
- ・ Case DB-B: 自治体にて可燃ごみと共に焼却処理。鉄スクラップのみ回収・再資源化。
- ・ Case DB-C: 回収された水銀は固化し埋立処理。他はDB-A:と同様。

各ケースの評価結果を図-2.10に示した。ニッケル回収に伴う環境負荷低減効果は大きいため、乾電池に含まれる鉄成分に加え、ニッケル成分の適切な回収・リサイクルが重要であることが示された。蛍光灯のリサイクルにおいては、水銀を抽出・リサイクルしているプラントは国内に2か所存在していることが示された。しかし、主に北海道のリサイクルプラントにて水銀が回収されている。蛍光灯を破碎してから輸送したり、もしくは水銀が含まれる粉末のみを輸送するなどして輸送効率を向上させている自治体があるものの、一部の自治体は破碎せずに輸送していることが明らかになった。破碎せずに輸送するケースにおける温室効果ガス排出量および資源消費量を評価すると、明確に破碎するケースよりも環境影響が大きいことが示された。これは、水銀回収プラントが国内に少ないため、輸送に伴う影響が無視できないことが原因と言える。そのため、使用済み蛍光灯の回収量の多い自治体においては事前処理（破碎処理）による輸送効率向上が必要であることが示された。また、少数であるが、一部の自治体

では蛍光灯を一般廃棄物と共に焼却処理している実態が明らかになった。これら自治体では適切に水銀の大気放出量をコントロールしているとしているが、温室効果ガス排出量および資源消費という視点では有用資源の回収量が少ないため、環境影響が大きいという評価結果となった。地方部においては回収ルートの構築が困難なケースも考えられるが、可能な範囲でリサイクルを模索することが望ましいことが明らかになった。

使用済み蛍光灯に関しては、回収した水銀を販売（リサイクル）するケースがFL-Aであり、回収した水銀を最終処分するケースFL-Dである。最終処分するFL-Dがより温室効果ガス排出量、資源消費量とも多いが、その差はわずかであることが示された。また、使用済み乾電池に関しては回収した水銀を販売するケースがDB-Aであり、最終処分するケースがDB-Cである。温室効果ガス排出量および資源消費量とも僅かに悪化しているものの、その差はほぼない。そのため、硫黄を用いた安定固化、およびベントナイト等を用いた最終処分に要する資材等製造に要する温室効果ガス排出量および資源消費量は、水銀含有廃棄物の処理・処分に関わる他のそれら影響に比べて軽微であることが明らかになった。これら廃棄物に含まれる水銀の量が微量であるため、廃棄物の処理・リサイクルに伴う環境影響が大部分であり、水銀処理の影響は相対的に小さいことが理由として挙げられる。将来回収された水銀を最終処分するよう処理方法を変更しても、それに伴う環境影響（気候変動および資源消費への影響）は小さいため、長期保管に伴う水銀漏洩を適切に管理することが重要である。

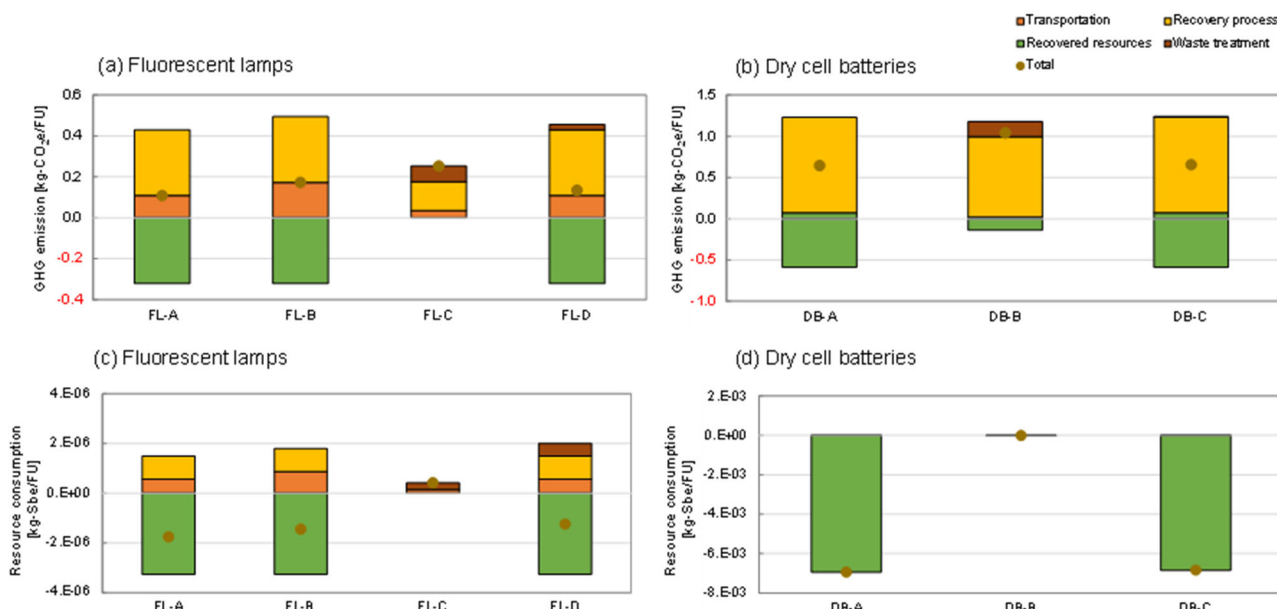


図-2.10 使用済み乾電池および蛍光灯の処理に関わる温室効果ガス排出量・資源消費量

5. 研究目標の達成状況

目標（対策技術の導入による水銀使用量低減と他の環境影響指標とのトレードオフの有無を同定し、市場への影響を定量化）を達成した上で、以下の成果を得られた。3報の学術論文誌における誌上発表(他3報が査読中)、および、4報のその他の誌上発表を含めて、“目標を上回る成果をあげた”。

水銀の関わる市場で最も影響度の高いASGMについて、対策技術の導入におけるトレードオフ（シアン法の導入によるシアン化水素による健康影響のリスク増加；図-2.3）を定量的に明らかにし、計画書の中では述べていなかったコスト（図-2.4）に関しても算出を行うことで、資金システムに対する提言まで行うことができた^{2, 3)}。また、石炭燃焼（製鉄）、非鉄製錬（図-2.7）についてのトレードオフ評価も行った（ASGM、石炭燃焼、非鉄製錬で世界の水銀排出の約70%を占める）結果、製鉄部門における水銀排出量が予想以上に大きく、対策の重要性を抽出できた^{5, 6)}（図-2.5~図-2.6）また、照明に代表される水銀含有製品（蛍光灯）から対策製品（LED照明）のトレードオフについても評価を行い、照明機器ではトレードオフが生じないことが明らかになった⁷⁾（図-2.8）。更に、日本国内においては、製品に含まれる水銀の最終処理に関わる対策技術の環境影響や資源評価もおこなった^{8, 9)}（図-2.9~図-2.10）。こ

のように水銀に関わる製品のライフサイクルの種々のステージにおいて、対策技術による他の環境影響変化トレードオフの有無を定量的に抽出できた。

加えて、再掲となるが、ASGM研究の成果について、環境省および水俣条約事務局の協力のもと、Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Miningを開催し、情報交流・発信を果たすと共に、会議を通じて、条約事務局等で作成を進める報告書への知見の提供を果たした(図-0.11)。すでに、一部の成果は、UNEP Global Mercury Partnership Advisory Group Thirteenth meetingの報告書 (Report on activities undertaken within the United Nations Environment Programme Global Mercury Partnership) を通じて、広く共有されている。

6. 引用文献

- 1) 青木一将、橋本征二、田原聖隆：ライフサイクル水銀排出量の分析に向けた LCI データの作成、環境科学会 2020 年大会 (2020 年 9 月 19-20 日、オンライン)
- 2) Shoki Kosai, Kennichi Nakajima, Eiji Yamasue: “Mercury Mitigation in Artisanal and Small-scale Gold Mining: Cyanide Emissions and the Need for Retorted Mercury Management as Unintended consequences”, Resources, Conservation and Recycling, vol.188, (2023), 106708 (IF = 13.716)
- 3) Shoki Kosai, Shion Yamao, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue, Ishigaki, Kenichi Nakajima.: Global waste management cost for retorted mercury in artisanal and small-scale gold mining. Journal of Material Cycles and Waste Management, (submitted) (IF = 3.579)
- 4) Global Environment Facility Independent Evaluation Office (GEF IEO): “GEF Interventions in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining Sector”. Evaluation Report No. 146, Washington, DC: GEF IEO, 2022.
- 5) Shunsuke Kashiwakura, Shoki Kosai, Eiji Yamasue, Future projections of global life-cycle mercury emissions of crude steel production under CO2 emission constraint toward 2050, Journal of Cleaner Production (submitted) (IF = 11.072)
- 6) Yamamoto, R., S. Dente, S. Hashimoto: Scenarios of copper-smelting-related mercury emission reductions by promoting recycling and introducing countermeasure technology in major copper-producing countries, Journal of Material Cycles and Waste Management (Online available: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01656-1>) (IF: 3.579)
- 7) S. Kosai, A. B. Badin, Y. Qiu, S. Suh, K. Matsubae, E. Yamasue: “Evaluation of resource use in the household lighting sector in Malaysia considering land disturbances through mining activities”, Resources, Conservation and Recycling, Vol.166, March, (2021), 105343, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105343> (IF = 13.716)
- 8) Nakano K, Kosai S, Yamasue E, Takaoka M.: “Recycling or chemical stabilization? Greenhouse gas emissions from treatment of waste containing mercury under the Minamata Convention”, Journal of Material Cycles and Waste Management, (Online available: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01714-8>) (IF: 3.579)
- 9) Nakano K, Kosai S, Yamasue E, Takaoka M. (2023) Life Cycle Assessment of Recycling on Mercury Collected from Spent Mercury Containing Products in Japan. The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management

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) Watari T., Nansai K., Nakajima K., Giurco D. (2021) Sustainable energy transitions require enhanced resource governance. *Journal of Cleaner Production*, 312 (20), 127698 (IF: 11.072)
- 2) Fuse M., Oda H., Noguchi H., Nakajima K. (2022) Detecting Illegal Inter-country Trade of Mercury Using Discrepancies in Mirrored trade Data. *Environmental Science & Technology*, 56, 13565-13572 (IF: 11.357)
- 3) Zhaoling Li, Tatsuya Hanaoka: “Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO2 emissions in China’s iron and steel sector”, *One Earth*, 5, 932-943 (2022) (IF: 14.944)
- 4) Cheng Y., Nakajima K., Nansai K., Seccatore J., Marcello M. Veiga, Takaoka M. (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. *Resources, Conservation & Recycling*, 185, 106461 (IF: 13.716)
- 5) Cheng Y., Watari T., Seccatore J., Nakajima K., Nansai K., Takaoka M. (2023) A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resources Policy*, 81, 103370Y. (IF: 8.222)

【サブテーマ2】

- 1) Shoki Kosai, Kennichi Nakajima, Eiji Yamasue: “Mercury Mitigation in Artisanal and Small-scale Gold Mining: Cyanide Emissions and the Need for Retorted Mercury Management as Unintended consequences”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol.188, (2023), 106708 (IF = 13.716)
- 2) S. Kosai, A. B. Badin, Y. Qiu, S. Suh, K. Matsubae, E. Yamasue: “Evaluation of resource use in the household lighting sector in Malaysia considering land disturbances through mining activities”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.166, March, (2021), 105343 (IF = 13.716)
- 3) Yamamoto, R., S. Dente, S. Hashimoto: Scenarios of copper-smelting-related mercury emission reductions by promoting recycling and introducing countermeasure technology in major copper-producing countries, *Journal of Material Cycles and Waste Management* (Online available: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01656-1>) (IF: 3.579)
- 4) Nakano K, Kosai S, Yamasue E, Takaoka M.: “Recycling or chemical stabilization? Greenhouse gas emissions from treatment of waste containing mercury under the Minamata Convention”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, (Online available: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01714-8>) (IF: 3.579)

<その他誌上発表 (査読なし) >

【サブテーマ1】

- 1) 中島謙一, 花岡達也, 南斉規介, 程 英超: 「人為的活動に伴う水銀の大気排出量のベースラインシナリオと排出削減への課題」, *廃棄物資源循環学会誌*, Vol.32, No.5, (2020), pp376-383
- 2) 中島謙一, 花岡達也, 南斉規介, 程 英超 (2020) 有効性評価に資するグローバルシナリオモデル

の開発：人為的起源による水銀排出量の将来予測のために，金属，Vol. 90, No. 12, (2020), pp20-26

- 3) 花岡達也，中島謙一，森本高司，福田真耶，南斎規介，リ ショウレイ，ヴィシウワナタン サリタ，日下部武敏，高岡昌輝（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，第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，pp. 335-340
- 4) 花岡達也（2022）気候変動対策による共便益効果 - 水銀排出削減と水俣条約への貢献 -、国立環境研究所ニュース Vol. 41 No. 2, pp6-8

【サブテーマ2】

- 1) 橋本征二：我が国の水銀マテリアルフローの概要とその課題、金属、Vol. 90、No. 12、pp. 1009-1014 (2020. 12)
- 2) 山末英嗣，光斎翔貴，柏倉俊介，中野勝行，橋本征二：「身近な水銀利用製品としての照明」，金属，Vol. 90, No. 12, (2020), pp. 1022-26 (査読無し)
- 3) 山末英嗣，光斎翔貴，柏倉俊介：「グリーンイノベーションの資源パラドックス問題」，日本LCA学会誌，Vol. 14, No. 1, (2021), p. 22-28
- 4) 山末英嗣，光斎翔貴，柏倉俊介：「土地改変インパクトの評価指標 - 関与物質総量について -」，日本LCA学会誌，Vol. 18, No. 4, (2022), pp. 205-212

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) CHENG Yingchao, 中島謙一, 南斎規介：第16回日本LCA学会研究発表会(2021)，小規模金採掘 (ASGM) 実施国への不適切な水銀フロー
- 2) Cheng, Y., Nakajima, K., Nansai, K. (2021). "Evaluation of improper mercury trade flow to the artisanal and small-scale gold mining (ASGM) sector." World Resources Forum' 21(Virtual).
- 3) Cheng, Y., Nakajima, K., Nansai, K., Seccatore, J. (2021). "Detection of improper mercury flow to countries with artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities." icRS 2021 International Conference on Resources Sustainability (Virtual).
- 4) Cheng, Y., Nakajima, K., Nansai, K. (2021). "Global mercury trade and use for artisanal and small-scale gold mining (ASGM)." International Industrial Ecology Day 2021 (Virtual).
- 5) Cheng, Y. (2021). "Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM) and Mercury Trade Flow." 6th International Forum on Sustainable Future in Asia (Virtual).
- 6) Hanaoka, T. (2022) Carbon-Neutrality Pathways in Asia and the cobenefits and trade-off effects, International Conference on Systems Analyses for Enabling Integrated Policy Making, Virtual, New Delhi, India (2022, 8)
- 7) Hanaoka, T. (2022) Exploring Global Carbon-Neutrality and Cobenefit-Tradeoff Effects on Non-CO2 Emissions Projections - Impacts and Meanings of "Coal Phase-down" in Asia - 7th International Forum on Sustainable Future in Asia / 7th NIES International Forum, Virtual, Japan (2022, 1)
- 8) Hanaoka, T. (2022) Meaning of Coal Phase-Down in Asia and Considering its cobenefit effects, Responding to Glasgow Climate Pact; Phase-down of Unabated Coal Power Plant, Virtual, Indonesia (2022, 1)
- 9) Cheng, Y., Watari, T., Nakajima, K., Nansai, K.; Seccatore, J., Veiga M.M. (2022). "Gold production and mercury consumption from artisanal and small-scale mining." , EcoBalance 2022, Japan.

- 10) Nakajima K., Hanaoka T., Cheng Y., Kosai S., Fuse M., Yamasue E., Matsubae K., Nansai K., Takayanagi W. (2022) Mercury legacy: Use, trade, and anthropogenic emission. The 15th Biennial International Conference on Ecobalance, -
- 11) Oda H., Noguchi H., Nakajima K., Fuse M. (2022) International trade in mercury and its uncontrolled risk. The 15th Biennial International Conference on EcoBalance, -
- 12) Cheng, Y., Nakajima, K., Nansai, K., Seccatore, J., Veiga, M.M., Takaoka, M. (2022). "Inconsistencies of mercury flow in global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity." Partner Event of EcoBalance 2022, Japan.
- 13) Cheng, Y., Watari, T., Seccatore, J., Nakajima, K., Nansai, K. (2022). "A Comprehensive Review on Gold Production, Mercury Consumption and Emission in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)." ICMGP Mercury as a global pollutant (Virtual).

【サブテーマ2】

- 1) Shunsuke Kashiwakura, Shoki Kosai, Eiji Yamasue, Future projections of global life-cycle mercury emissions of crude steel production under CO2 reduction target toward 2050, Ecobalance 2022
- 2) Nakano K, Kosai S, Yamasue E, Takaoka M. (2023) Life Cycle Assessment of Recycling on Mercury Collected from Spent Mercury Containing Products in Japan. The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management
- 3) Nakano K, Kosai S, Yamasue E, Takaoka M. (2022) Estimation of Greenhouse gas emissions from Mercury-contaminated municipal solid waste treatment in Japan. The 15th International Conference on EcoBalance
- 4) Yamamoto, R., S. Hashimoto: Copper-smelting-related mercury emissions reduced by promoting recycling and introducing countermeasure technology in major copper-smelting countries, EcoBalance 2022 (2022年10月30日-11月2日、Fukuoka)
- 5) Le, T.V., R. Yamamoto, S.M.R. Dente, S. Hashimoto: Estimation of future copper demand and scrap in Vietnam, 3RINCs (2023年3月13-18日、Kyoto)
- 6) Kosai S, Nakajima K, Yamasue E, (2021) Estimation of global mercury emissions from artisanal and small-scale gold mining in 2050, icRS2021
- 7) 中野勝行, 光斎翔貴, 山末英嗣, 高岡昌輝 (2022) 「使用済み水銀含有製品からの水銀リサイクルおよび水銀最終処分の環境影響評価」, 第17回日本LCA学会研究発表会
- 8) 青木一将, 橋本征二, 田原聖隆: ライフサイクル水銀排出量の分析に向けたLCIデータの作成、環境科学会2020年大会 (2020年9月19-20日、オンライン)
- 9) 青木一将, Sebastien Dente, 橋本征二: 水銀非含有製品への転換による水銀排出削減効果のライフサイクル評価、第16回日本LCA学会研究発表会 (2021年3月3-5日、オンライン)
- 10) 山本涼太, 青木一将, 橋本征二: 銅のリサイクルによる製錬由来水銀排出量の削減効果、第16回日本LCA学会研究発表会 (2021年3月3-5日、オンライン)
- 11) 山本涼太, 橋本征二: 中国における銅リサイクルおよび対策技術導入による製錬由来水銀排出量の削減効果、環境科学会2021年会 (2021年9月10-11日、オンライン)
- 12) 山本涼太, 橋本征二: リサイクルおよび対策技術導入による銅製錬由来水銀排出量の削減効果～主要国を対象として、第17回日本LCA学会研究発表会 (2022年3月2-4日、オンライン)
- 13) 山本涼太, 橋本征二: リサイクル推進および対策技術導入による銅製錬由来水銀排出量の削減効果～主要な銅生産国を対象とした分析、第18回日本LCA学会研究発表会 (2023年3月8-10日、オンライン)
- 14) 山尾清音, 光斎翔貴, 柏倉 俊介, 山末 英嗣, 中島 謙一: 小規模金採掘における水銀対策技術導入に伴うコスト評価、第18回日本LCA学会研究発表会 (2023年3月8-10日、オンライン) LCA学会,

2023年

- 15) 青木一将、橋本征二、田原聖隆：ライフサイクル水銀排出量の分析に向けたLCIデータの作成、環境科学会2020年大会（2020年9月19-20日、オンライン）
- 16) 青木一将、Sebastien Dente、橋本征二：水銀非含有製品への転換による水銀排出削減効果のライフサイクル評価、第16回日本LCA学会研究発表会（2021年3月3-5日、オンライン）
- 17) 山本涼太、青木一将、橋本征二：銅のリサイクルによる製錬由来水銀排出量の削減効果、第16回日本LCA学会研究発表会（2021年3月3-5日、オンライン）
- 18) 中澤侑希、光斎翔貴、山末英嗣：水銀条約に関する小規模金採掘の対策技術のトレードオフ評価、第16回日本LCA学会研究発表会（2021年3月3-5日、オンライン）
- 19) Le, T. V., R. Yamamoto, S. M. R. Dente, S. Hashimoto: Future copper demand and secondary reserves of Vietnam、第18回日本LCA学会研究発表会（2023年3月8-10日、オンライン）

（3）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) Y. Cheng: 6th International Forum on Sustainable Future in Asia, Tsukuba, Japan, 2021. Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM) and Mercury Trade Flow（主催：国立環境研究所，2021年1月19日，オンライン，登録者約150名）
- 2) 花岡達也（2022）パリ協定1.5℃目標に向けてーアジアにおける気候変動対策と共便益効果ー，国立環境研究所 公開シンポジウム2022, Virtual, (2022, 6)
- 3) 程英超，中島謙一(2022). 黄金の輝きの影ー金の採掘と水銀の不適切な流通ー国立環境研究所 公開シンポジウム2022・未来につなぐ世界との絆ー持続可能な地球を目指してー，Virtual, (2022, 6)
- 4) 花岡達也（2022）水銀排出の現状と将来～気候変動対策と水銀対策～、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～」，東京，（2022, 9）
- 5) 中島謙一（2022）水銀の使用と貿易．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～」，東京，（2022, 9）
- 6) EcoBalance2022 Partner events, Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining（Date：October 30, 2022, Venue：Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)）

【サブテーマ2】

- 1) 山末英嗣，名古屋大学大学院講義，2021年7月，Low Carbon Society “Resource issue of metals”
- 2) 山末英嗣，広島大学大学院講義，2022年1月，Advanced Environmental Systems Engineering “Resource issue of metals”
- 3) 山末英嗣，名古屋大学大学院講義，2022年6月，Low Carbon Society “Resource issue of metals”
- 4) 山末英嗣，広島大学大学院講義，2022年12月，Advanced Environmental Systems Engineering “Resource issue of metals”

（4）マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

- 1) プレスリリース (EurekaAlert! 他) “New approach to exposing illegal and informal mercury trading” (News Release 19-Jul-2022) <https://www.eurekaalert.org/news->

releases/959167

- 2) プレスリリース (EurekaAlert! 他) “Researchers detect illegal intercountry trade of mercury using discrepancies in mirrored trade data” (News Release 20-Nov-2022)
- 3) プレスリリース (国立環境研究所, 筑波研究学園都市記者会、環境記者会、環境省記者クラブ同時配信) 『零細および小規模金採掘における水銀に関する国際的な情報交換を行うイベント開催について (報告) 』, (2022年11月29日)
<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20221129/20221129.html>
- 4) プレスリリース (国立環境研究所) “Report of an event for international information exchange concerning artisanal and small-scale gold mining (ASGM)”, (2022年11月29日) <https://www.nies.go.jp/whatsnew/20221129-e/20221129-e.html>

【サブテーマ2】

- 1) プレスリリース (EurekaAlert! 他) “Unintended consequences: analyzing interventions on mercury use and emissions in artisanal gold mining” (News Release 24-Oct-2022)
<https://www.eurekaalert.org/news-releases/968846>

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項は無い

(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」

サイエンスアニメーションを活用した情報発信

- 1) New Method for Evaluating Illegal and Informal Mercury Trading

https://mfi.nies.go.jp/movie/NIESN_1_13_Video_Aug_23_2022.mp4

IV. 英文Abstract

Development of global scenario model for effectiveness evaluation of the Minamata Convention on Mercury

Principal Investigator: Kenichi NAKAJIMA

Institution: National Institute for Environmental Studies

Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN

Tel: +81-29-850-2744 / Fax: -

E-mail: nakajima.kenichi@nies.go.jp

Cooperated by: Ritsumeikan University

[Abstract]

Key Words: Minamata convention on mercury, Climate targets/goals, Effectiveness evaluation, Scenario analysis

Appropriate implementation of the Minamata Convention on Mercury may reduce global supply and demand for mercury and anthropogenic mercury emissions and releases to the environment. However, there are concerns regarding the significant increase of mercury emissions from major sectors depending future socio-economic conditions.

This study has developed a global scenario model for estimating anthropogenic emissions of mercury into the atmosphere. The findings indicate that significant reductions in mercury emissions can be expected with the implementation of measures compared to the reference scenario without additional measures (4.1×10^9 g, 2050). However, the “Step-wise reduction” scenario by implementing mercury removal measures (2.1×10^9 g, 2050) only offset the increase in emissions from economic growth after 2015. Thus, this study also analyzed the cobenefit and tradeoff effects of reduced or increased mercury emissions brought by deep decarbonization measures towards the global carbon-neutral target. Decarbonization measures toward the carbon-neutral target would have large cobenefit mercury mitigations. But mercury emission reductions reach a ceiling at about 50% compared to the reference scenario in the OECD developing countries for example, even if CO₂ emissions reach the nearly 100% reduction target by 2050. Bioenergy with carbon capture and storage is one of the silver-bullets for achieving carbon neutrality, but triggers the tradeoff effect of higher mercury emissions. Thus, mercury removal measures need to be implemented to further reduce remaining or increasing mercury emissions. In conclusion, measures to reduce mercury emissions need to be strengthened and introduced immediately, and it would be possible to reduce mercury emissions drastically by 2050 with maximum implementation of both decarbonization measures and mercury removal measures.

This study also assessed trade-offs of countermeasures in mercury emission sources (Artisanal and small-scale gold mining (ASGM), Ferrous and non-ferrous metal industries, etc.). The findings indicate that the retort and cyanidation methods can significantly reduce mercury emissions in the ASGM by 2050, although they also reveal potential risks on other health issues associated with such interventions, and highlights the need to review the financial mechanism to achieve waste mercury management.

In addition, data driven approaches to exposing illegal and informal trade and use of

mercury were developed. As a result of the analysis, significant inconsistencies were found in reported values related to mercury consumption and use in Central and South America, Africa, and some countries in Asia. We also succeeded in detecting illegal intercountry trade of mercury using discrepancies in mirrored trade data from UN Comtrade.