

環境研究総合推進費 令和2年度戦略研究開発課題(SII-6)

課題名 : 水俣条約の有効性評価に資するグローバル水銀挙動のモデル化及び介入シナリオ策定(JPMEERF20S20600)

実施期間 : 2020年度~2022年度

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

SII-6-2(1), JPMEERF20S20603

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

中島 謙一・花岡 達也・南斉 規介・

(※)程 英超・(※)LI Zhaoling・VISHWANATHAN Saritha (国立環境研究所)

SII-6-2(2), JPMEERF20S20604

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

山末 英嗣・橋本 征二・中野 勝行・光斎 翔貴・柏倉 俊介 (立命館大学)

※は退職者

1. 研究背景：プロジェクトの役割とテーマ2の位置づけ

開発が求められる水俣条約の有効性評価手法¹

水俣条約の有効性評価に関する議論

水俣条約第22条では、条約の有効性評価について、以下のとおり規定されている。

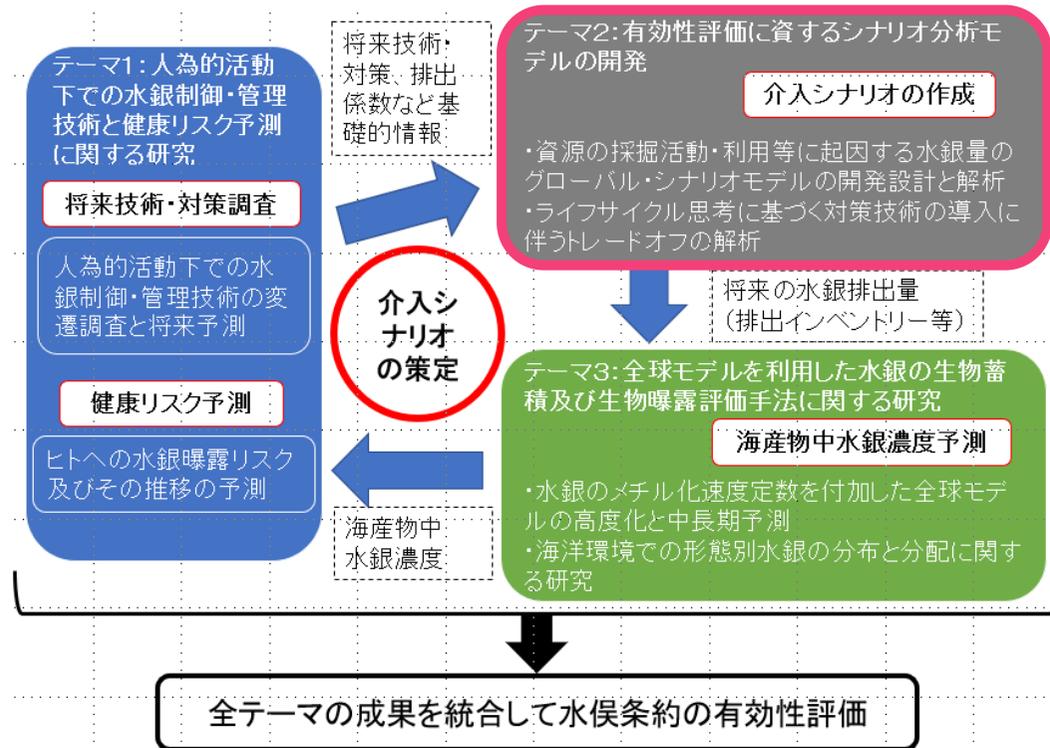
- 締約国会議は、この条約の効力発生の日から6年以内及びその後は締約国会議が決定する間隔で定期的に、この条約の有効性を評価する。
- 締約国会議は、評価を円滑にするため、その第1回会合において、環境における水銀及び水銀化合物の存在及び移動に関する比較可能な監視に基づくデータ並びに生物学的媒体及び被害を受けやすい人々に認められる水銀及び水銀化合物の水準の傾向に関する比較可能な監視に基づくデータの提供を受けるための取決めを行うことを開始する。
- 評価は、次のものを含む利用可能な科学、環境、技術、資金及び経済に関する情報に基づいて実施される。
 - 2の規定により締約国会議に提供される報告その他の監視に基づく情報
 - 前条の規定により提供される報告（※条約の履行状況に関する国別報告）
 - 第15条（※実施遵守委員会）の規定に従って提供される情報及び動向
 - この条約に基づいて設ける資金援助、技術移転及び能力形成の取決めを運用することについての報告その他の関連する情報

- 以下の4つの政策的質問が設定されている。
- 締約国は、水俣条約を実施するための行動を起こしたか？
 - 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したか？
 - 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、それは水俣条約の実施に起因するものか？
 - 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？

必要性

上記c&dに答えるためには、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モデルの開発が求められる。特に、対策による中長期的な効果・影響の未然把握が不可欠。

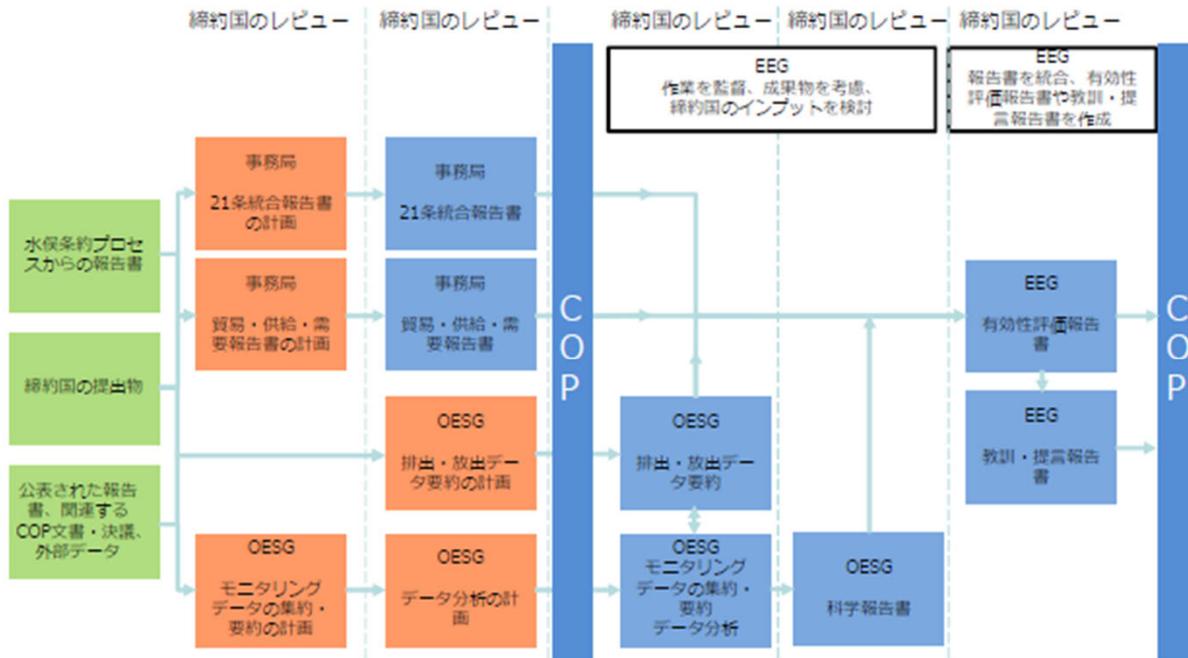
SII-6課題におけるテーマ2の位置づけ 公募資料より



1. 研究背景： COP4における議論（有効性評価の枠組み、バリ宣言など）

水俣条約の有効性評価の枠組み

- 水俣条約第4回締約国会議（COP4）では、条約の有効性評価を実施するための枠組み（体制、スケジュール等）を議論。
- 下記の枠組みと、科学グループ（OESG）の設置について合意。
- COP5において、有効性評価グループ（EEG）の設置要綱を再度議論予定。



水俣条約の有効性評価に関する議論（～COP4）

- COP3～COP4にかけて、有効性評価の枠組みや利用するデータについて、以下の3つのプロセスが進行した。

有効性評価の実施体制・スケジュール

関心国が協議し、有効性評価のスケジュール、構成する要素、役割分担（有効性評価委員会、科学的助言機関等）に関する決議文案を作成。

有効性評価のためのモニタリングガイダンス

事務局が専門家の協力を得てモニタリングガイダンス案を作成。
 ・主要なモニタリング対象を大気、生物圏、ヒトの3つとし、サンプリング手法・分析手法等を整理。
 ・新たに有効性評価に資するモニタリングプログラムを開始する場合に参照可能な「段階的なモニタリング・アプローチ」(Tiered Approach) を提案。

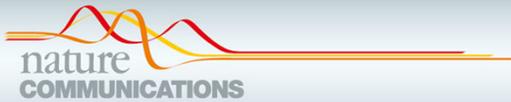
有効性評価の評価指標

事務局が、COP3で提示されていた有効性評価の評価指標（案）に対する各国の意見を整理。
 ・条約の各条文に対応し、政策的質問(a)（締約国による条約の実施）、(b)（水銀の供給、使用、環境への排出・放出）及び(c)（環境中、生態中、脆弱な人間集団中の水銀の水準）を定量的に示すための指標とその情報源を設定。

また、**水銀の違法貿易への対処**に関する**バリ宣言** (Bali declaration on combating the illegal trade in mercury) が表明

1. 研究背景：経済活動と水銀と健康影響のモデリング

繋がり (人為的活動-排出-環境動態-人健康影響) に着目したモデル研究



ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23391-7>

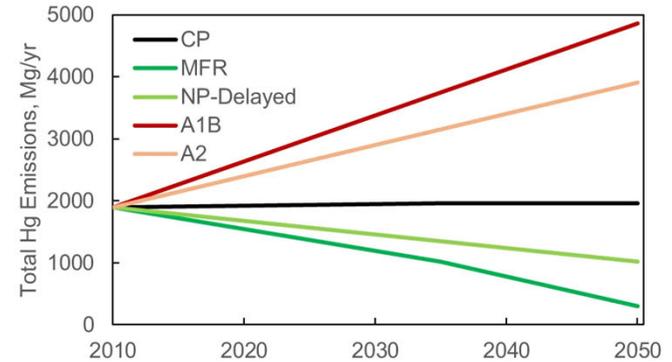
OPEN



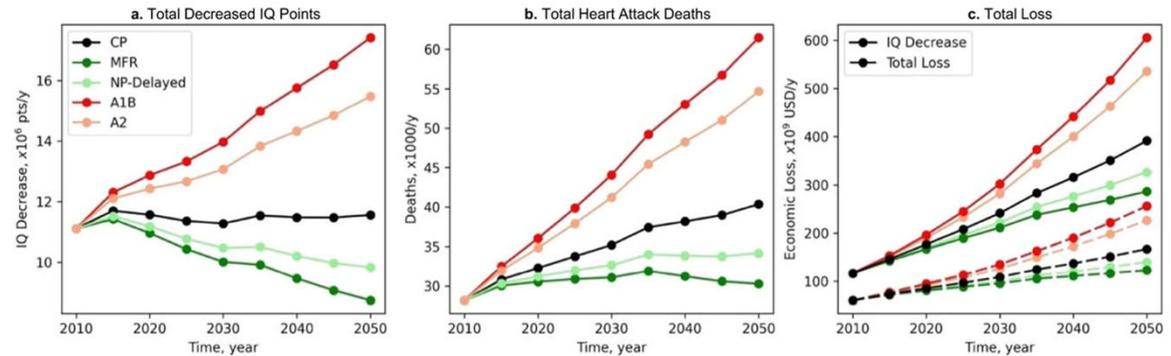
Global health effects of future atmospheric mercury emissions

Yanxu Zhang¹, Zhengcheng Song¹, Shaojian Huang¹, Peng Zhang¹, Yiming Peng¹, Peipei Wu¹, Jing Gu¹, Stephanie Dutkiewicz², Huanxin Zhang^{3,4}, Shiliang Wu^{4,5}, Feiyue Wang⁶, Long Chen⁷, Shuxiao Wang^{8,9} & Ping Li¹⁰

Mercury is a potent neurotoxin that poses health risks to the global population. Anthropogenic mercury emissions to the atmosphere are projected to decrease in the future due to enhanced policy efforts such as the Minamata Convention, a legally-binding international treaty entered into force in 2017. Here, we report the development of a comprehensive climate-atmosphere-land-ocean-ecosystem and exposure-risk model framework for mercury and its application to project the health effects of future atmospheric emissions. Our results show that the accumulated health effects associated with mercury exposure during 2010-2050 are \$19 (95% confidence interval: 4.7-54) trillion (2020 USD) realized to 2050 (3% discount rate) for the current policy scenario. Our results suggest a substantial increase in global human health cost if emission reduction actions are delayed. This comprehensive modeling approach provides a much-needed tool to help parties to evaluate the effectiveness of Hg emission controls as required by the Minamata Convention.



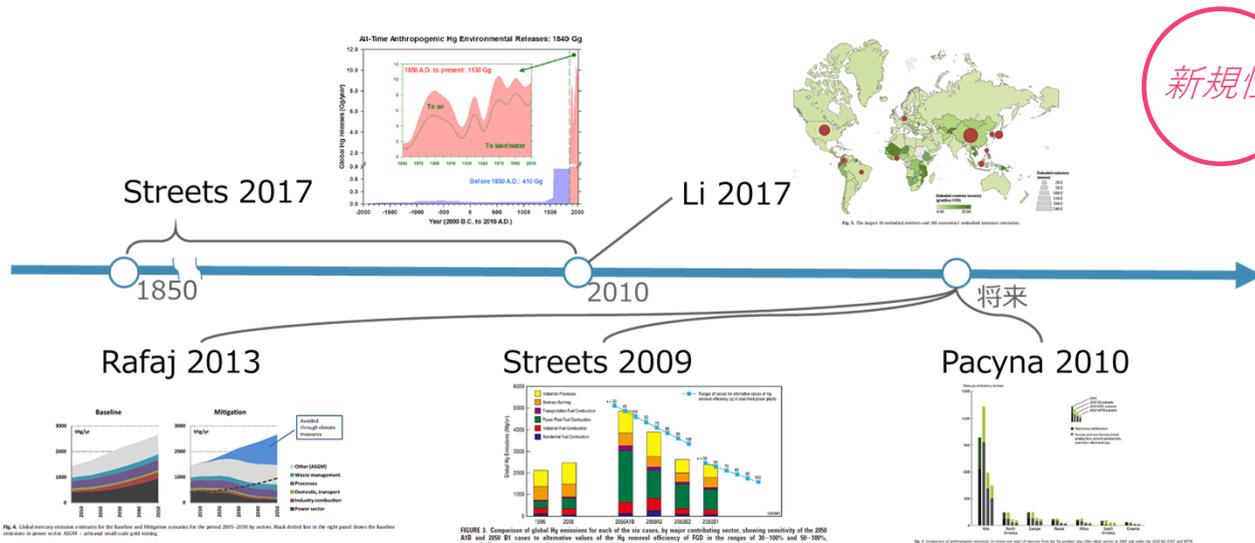
CP (current policy) scenario assumes a near to constant emissions through 2050. A1B and A2 are for business as usual and a divided world scenarios with increasing emissions, respectively. MFR (maximum feasible reduction) assumes the application of the best available technologies and aggressive emission reductions. NP-Delayed (new policy delayed) assumes the 2035 goal of the MFR scenario is delayed to 2050.



(a) Total intelligence quotient (IQ) decrements of newborns; (b) Total heart attack deaths; (c) Economic valuation of health effects: total valuation (solid lines) and from IQ decrements (dashed lines). Five scenarios are included: A1B (business as usual), A2 (divided world scenario), CP (current policy), NP-Delayed (new policy delayed), and MFR (maximum feasible reduction).

1. 研究背景：先行研究と課題

グローバルスケールでの人為的な水銀排出量の推計



新規性

気候変動対策と水俣条約の対策の双方の考慮
 社会変化の拡充・精査と空間解像度の向上

- 気候目標と合致した気候変動対策の進展・強化
- 鉱物資源の急速な需要拡大
 意図的水銀利用：ASGMなど
 非意図的水銀利用：石炭燃焼、鉄鋼、セメントなど

Zhang 2021, Global health effects of future atmospheric mercury emissionsでも活用

	Streets 2017	Li 2017	Rafaj 2013	Streets 2009	Pacyna 2010
排出源	主要排出源	鉱業	主要排出源	燃焼・鉱業	主要排出源
空間解像度	全世界 7地域区分	全世界・ 186国・地域	全世界・ 8地域区分	全世界・ 17地域区分	全世界・ 7地域区分
対象年次	1850-2010	2010	2000-2050	1996,2006, 2050	2005, 2020
将来シナリオ	-	-	気候変動対策(POLES)	気候変動対策(SRES)	水銀対策(LRTAP)

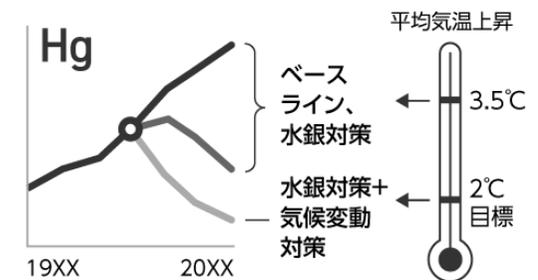
2. 研究開発目的：

有効性評価手法の開発支援、水銀の排出管理の科学的支援

水銀の排出量推計の観点からの

- 有効性評価の手法確立に資する学術的知見の提供

分析モデル、定量情報&データベースなど



- 排出管理を実現する為の監視・規制立案の科学的支援

不適切な水銀貿易対策、ASGM対策の実装に伴う副次的影響の未然把握など



3. 研究目標： モデル開発、排出シナリオの定量化、トレードオフの同定

サブテーマ1

目標
1

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・シナリオモデルの設計・開発

目標
2

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）の定量的描画

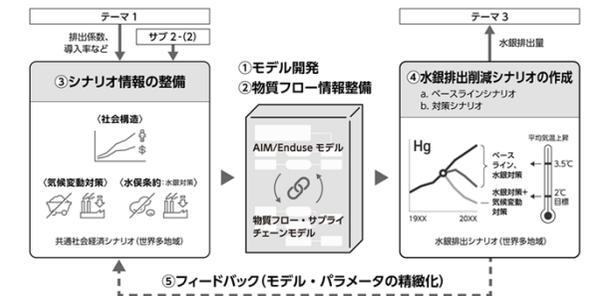
サブテーマ2

目標
3

水俣条約を履行する為の対策プロセスの導入に伴う
トレードオフの同定と市場への影響の定量化

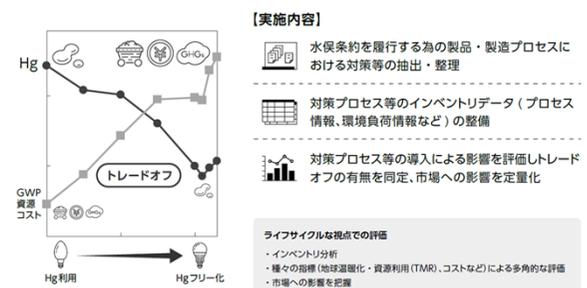
SII-6 | テーマ2 サブテーマ(1) | 資源の探掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析 (国立環境研究所)

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



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



4. 研究開発内容：モデル開発

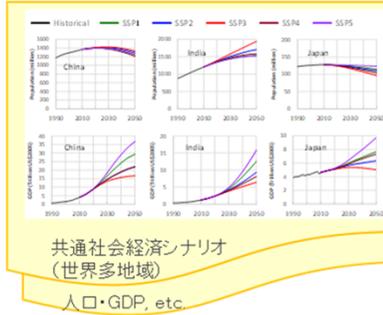
AIM/End use[Global]モデルおよびサービス需要量モデル

効率性
有効性

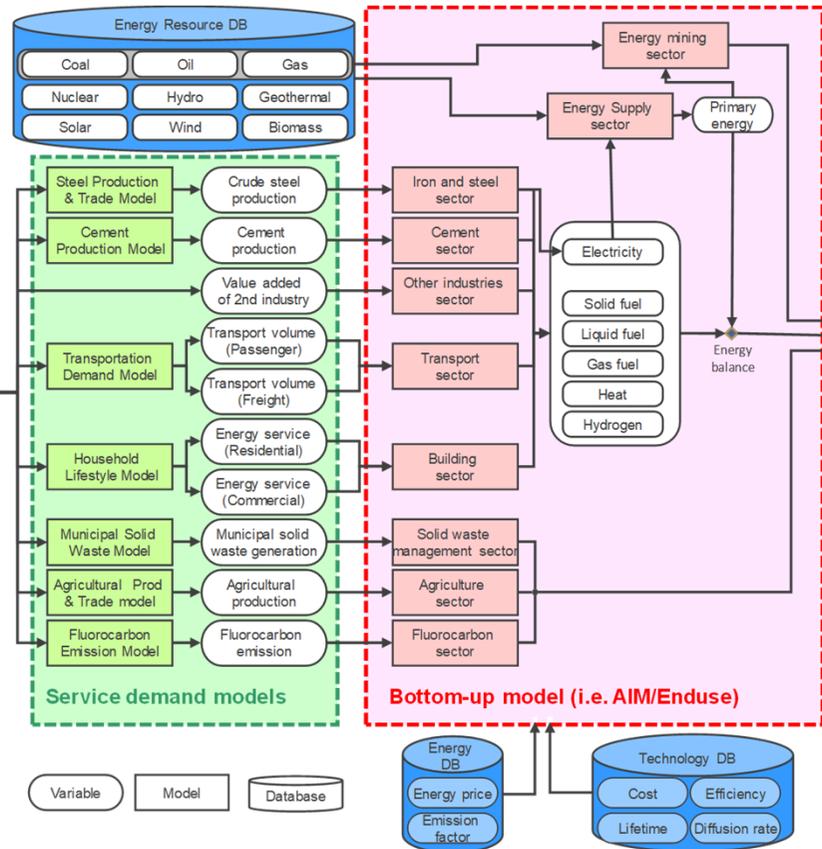
GHG排出量の軽減および地域大気汚染の抑制に関連する政策分析の為の
技術選択フレームワークの活用

空間解像度：32地域

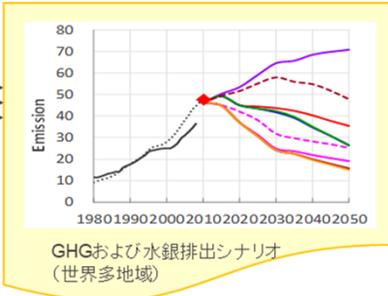
定性的シナリオ, 定量的シナリオ



テーマ・サブテーマ連携のもとで、新たに、水銀の排出係数や技術の導入率等を設定

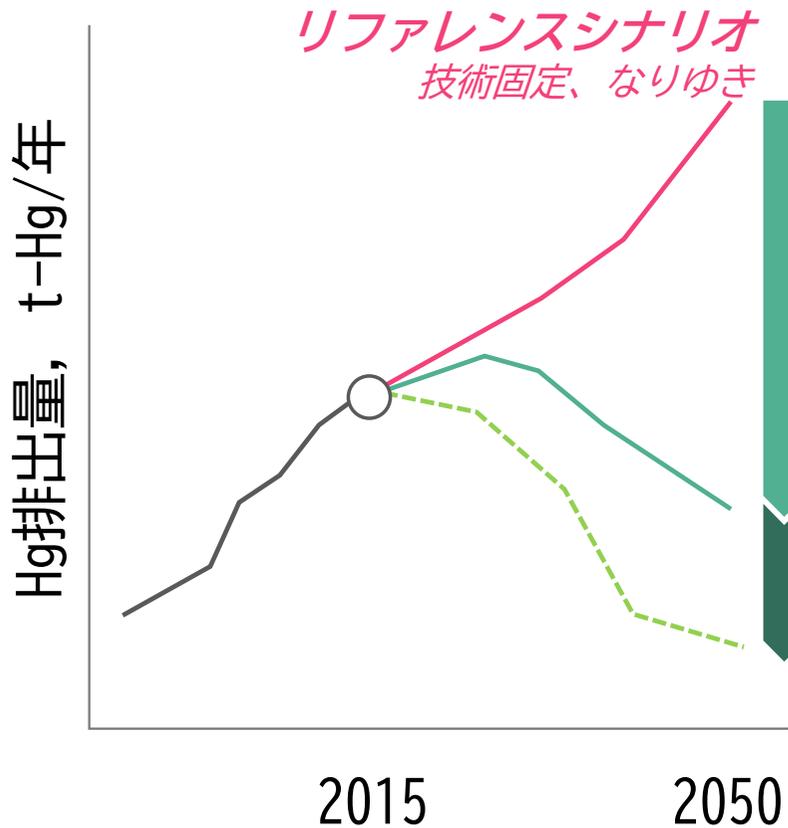


物質フロー・サプライチェーンモデルで、資源の採掘・利用に起因する水銀排出量の推計を拡充・補完



排出源の選定および基礎データの整備には、積極的に既往研究の成果を活用 (GMA2018, Streetsら2017など)

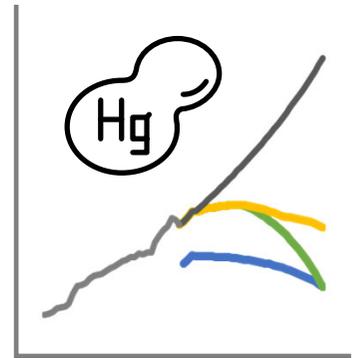
4. 研究開発内容：シナリオデータの整備



削減対策シナリオ

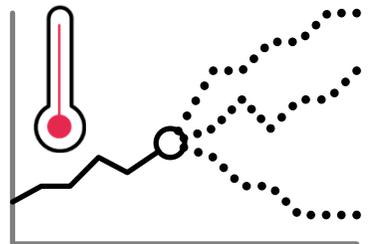
水銀対策による削減（3種）

- a-1. 段階的削減
(orエキスパートジャッジ)
- a-2. 最大削減_20XX年達成
- a-3. 究極的削減



脱炭素対策による削減（2種）

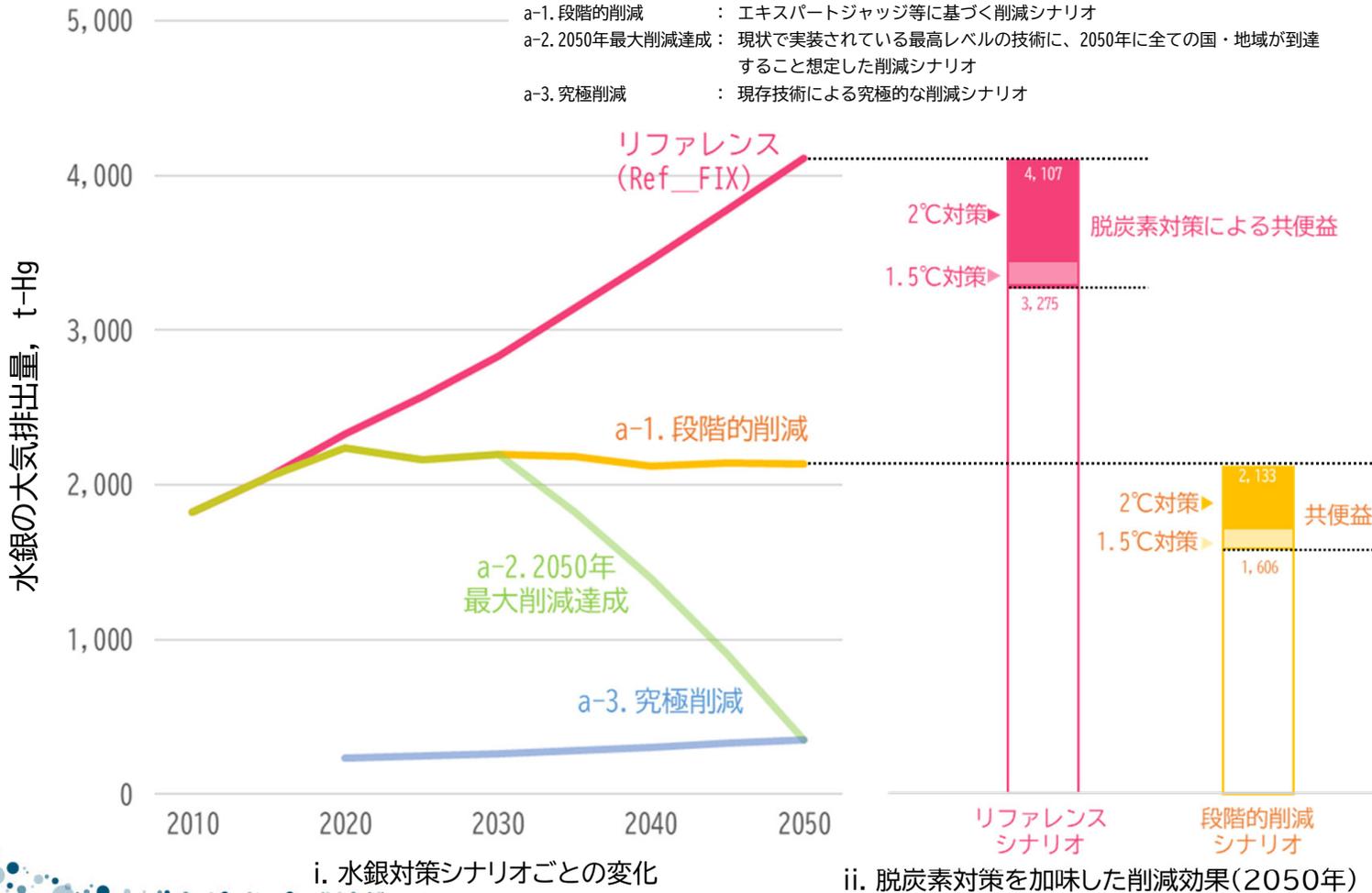
- b-1. 2°C目標対応
- b-2. 1.5°C目標対応



5-1. 成果の概要：

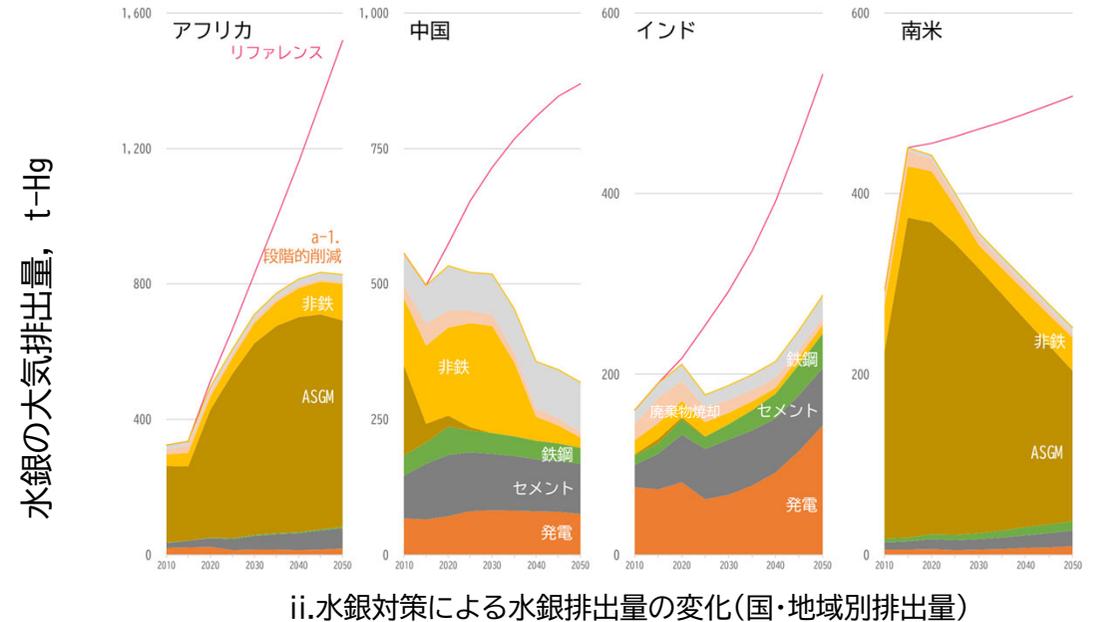
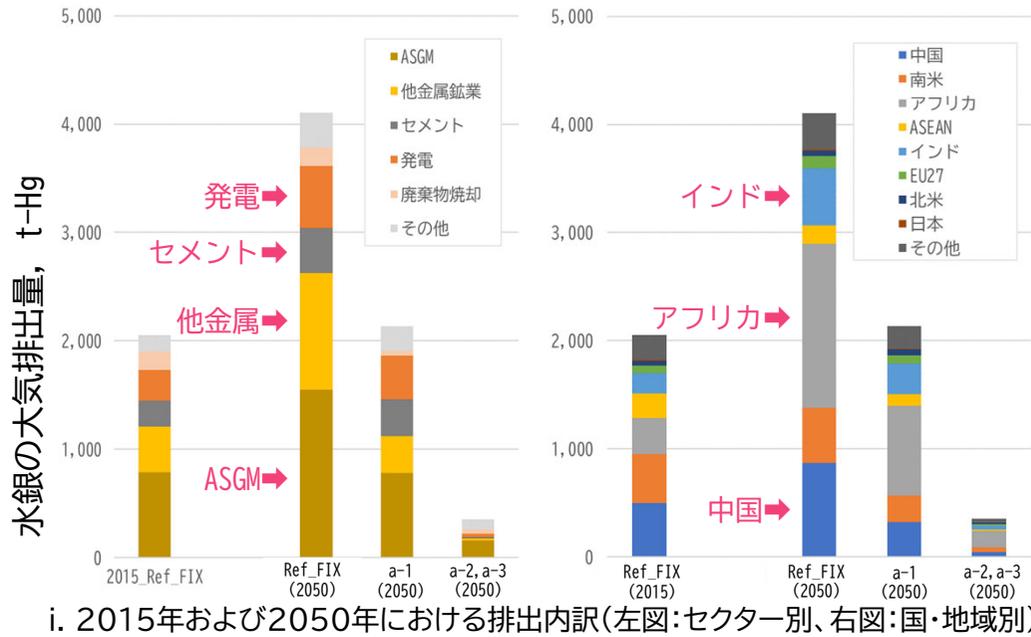
[総論] 水銀対策による排出量の変化と脱炭素対策による共便益削減効果

- a-1. 段階的削減 : エキスパートジャッジ等に基づく削減シナリオ
- a-2. 2050年最大削減達成 : 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・地域が到達すること想定した削減シナリオ
- a-3. 究極削減 : 現存技術による究極的な削減シナリオ



- 水銀対策により、大幅な水銀排出削減が見込める。
- 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气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。
- また、追加的な削減効果として、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。

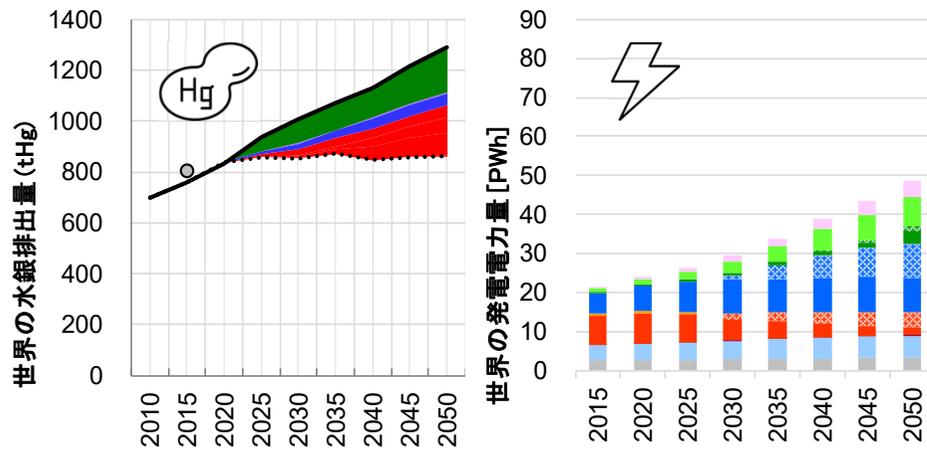
5-1. 成果の概要： 水銀対策による2050年までの水銀排出量の変化（排出源内訳）



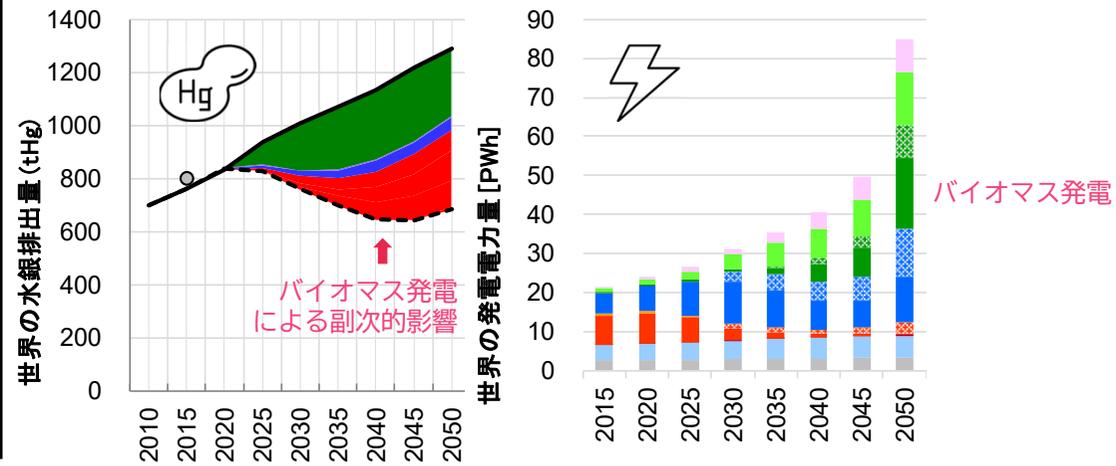
- 追加的な対策を講じない場合、セクター別では、鉱工業部門(ASGM、他金属鉱業、セメント産業)や発電部門における顕著な増大、国・地域別では、アフリカ地域・中国・インドなどを中心に増大。一方、現状で実装されている最高レベルの技術に全ての国・地域が到達する事を想定した場合、より多くの削減が期待できる。
- 排出傾向と削減効果には地域偏在性が存在。中国や南米・アフリカ諸国を対象に、排出量が残存する部門へ更なる対策の強化が不可欠。

5-1. 成果の概要： 脱炭素対策による共便益と副次的影響

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



排出経路 ○ インベントリ — リファレンス 2度目標相当 - - - 1.5度目標相当
 排出削減量 ■ 発電 ■ 運輸 ■ 家庭・業務 ■ 産業
 発電電力量 ■ 太陽光 ■ 風力 ■ バイオマス ■ CCS付バイオマス ■ ガス火力 ■ CCS付ガス火力 ■ 石油火力 ■ 石炭火力 ■ CCS付石炭火力 ■ 地熱 ■ 水力 ■ 原子力

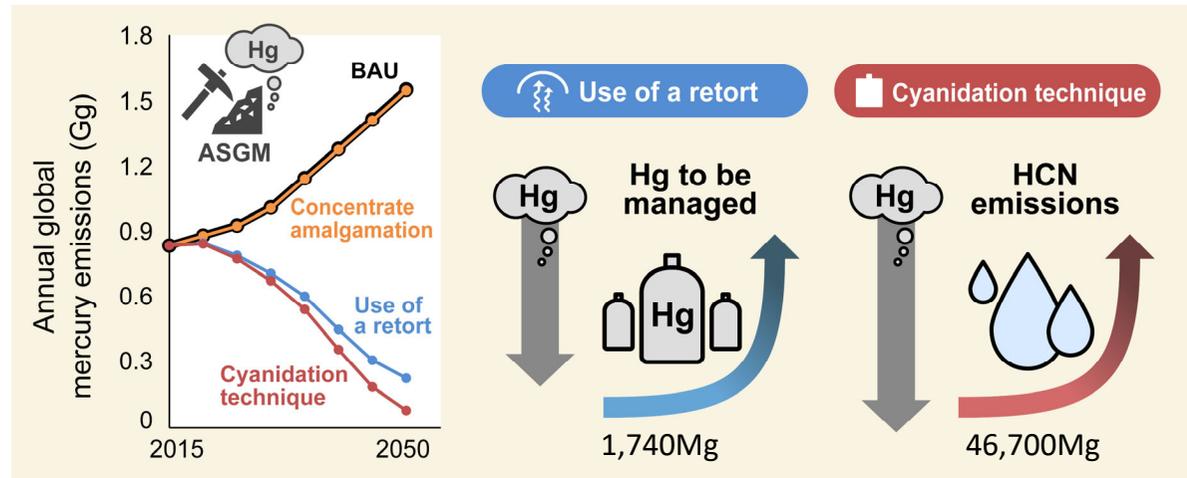
世界における水銀排出経路と脱炭素対策に伴う水銀排出削減の共便益効果(ASGMや非鉄金属鉱業などを含めない)

- 脱炭素対策を導入することで、共便益による水銀の排出削減効果が期待できる。しかし、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。

5-1. 成果の概要：

水銀対策による削減効果とトレードオフ・副次的影響（ASGM）

零細・小規模金採掘（ASGM）は、水銀の最大の用途、且つ、排出源である。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。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：精鋳法への転換、使用廃絶：青化法への転換）について、導入効果と共に、生じ得る副次的影響を算定。加えて、回収した廃水銀の隔離管理コストを算定。



GEF ASGM funding
(2002~2022)

506 million dollars

Accumulative waste
management cost
(2015-2050)

168 million dollars

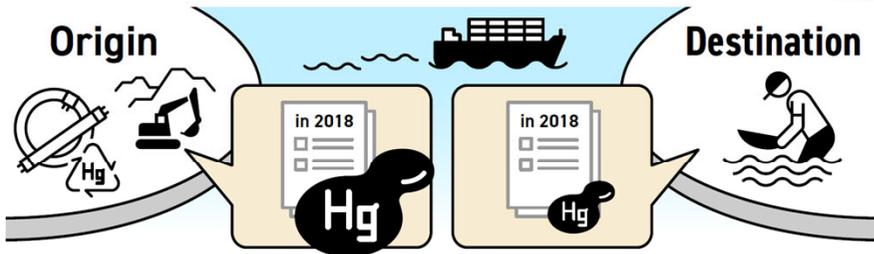
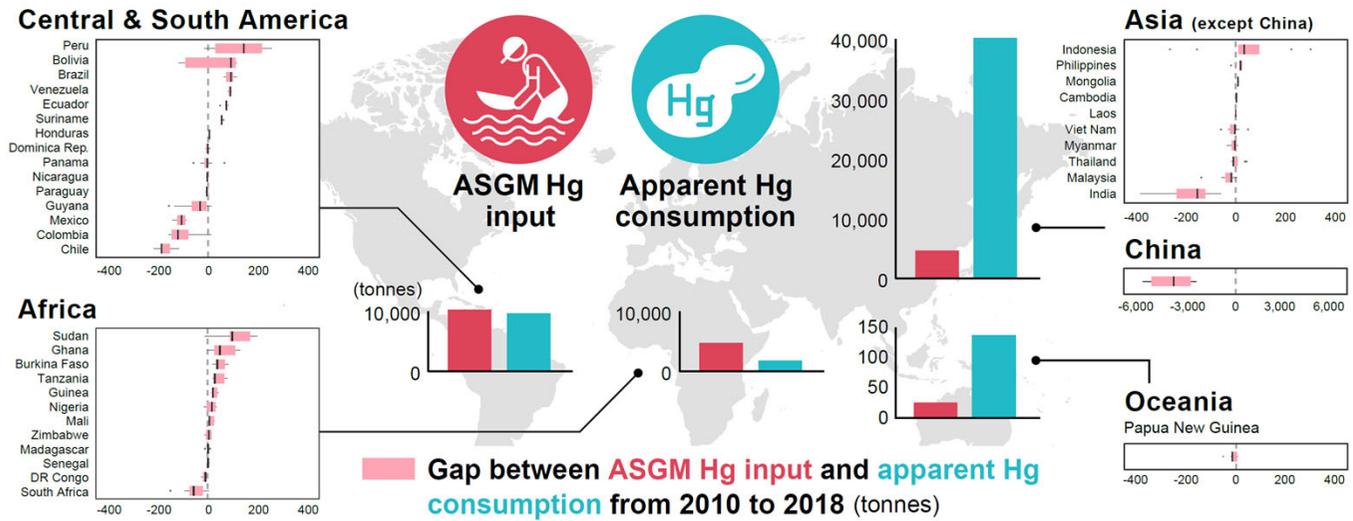
蒸留器・精鋳法の併用や青化法への転換により大気水銀排出量を大幅に削減できる一方、回収された廃水銀の適正管理にかかる膨大なコスト及びシアン化水素による新たな健康被害のリスクが露呈。

水銀対策技術の支援と共に、廃水銀の隔離管理を含めて、副次的に生じ得る課題への対策費用を含めた資金システムの見直し・支援などが求められる。

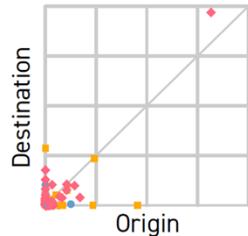
5-1. 成果の概要 (COP4.2 バリ宣言を受けて) : 不適切な水銀の使用・貿易の検出支援

バリ宣言(COP4.2)を受けて、水銀の違法貿易を防止するための国際協調の強化が求められている。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2種の検出手法を開発。

- a. 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
- b. 二国間貿易における報告値の不整合



Income level	Discrepancy	OD pair No.
High income ▶ High income	127 t-Hg	125 pairs
High ▶ Low	179	64
Low ▶ High	170	18
Low ▶ Low	305	85



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。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。

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可能性。

5-2. 環境政策への貢献：

行政等が既に活用した成果

1. 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。
2. 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

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。

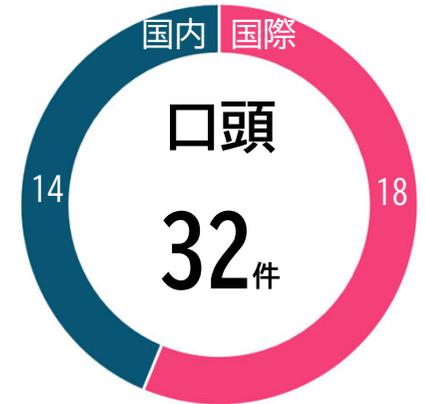
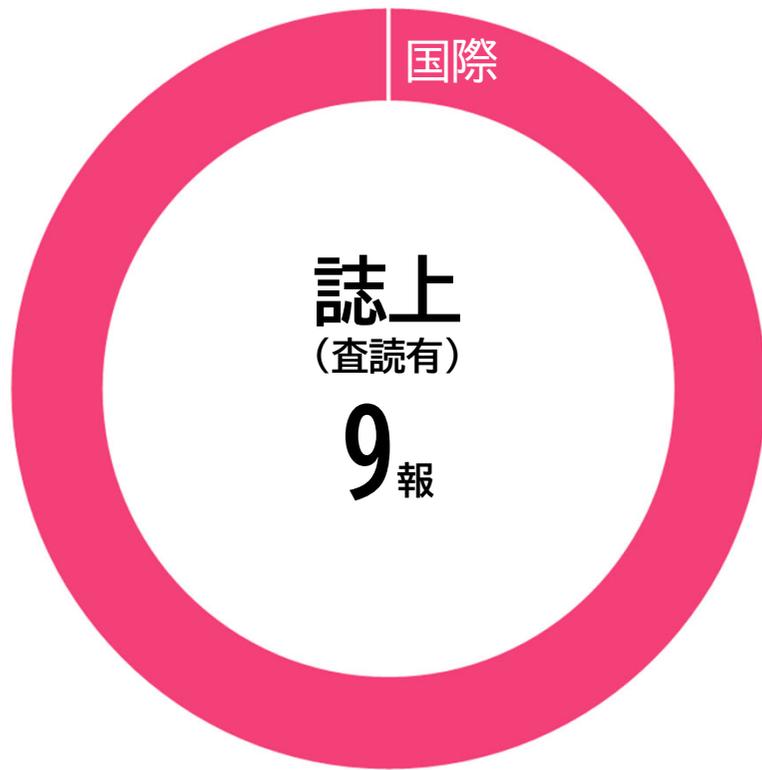
5-3. 研究目標の達成状況： 目標を大きく上回る成果をあげた。

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にグローバル・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。

- 
 シナリオモデルの設計・開発、シナリオの定量化を達成。人為起源による水銀の大気排出の最小化に資する知見として、対策シナリオごとの削減量、残存する排出源(国・地域、セクター)に関する情報を定量化。
- 
 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、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。
- 
 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、効率的な情報発信を実現。
 (例. https://mfi.nies.go.jp/movie/NIESN_1_13_Video_Aug_23_2022.mp4)

6. 研究成果の発表状況



One Earth (IF: 14.944), Resources, Conservation & Recycling (IF: 13.716)
Environmental Science & Technology (IF: 11.357), Resources Policy (IF: 8.222)など

ご清聴ありがとうございました。

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