

5RF-1952 (JPMEERF20195R52)
途上国での水銀使用抑制へ向けた
環境調和型金精錬プロセスの適用と
水銀排出の削減ポテンシャルの評価

重点課題: ⑭ (主), ③ (副)
研究領域: 5 (安全確保領域), 1 (統合領域)
行政ニーズ: 5-12
(気候変動の複合的影響を考慮した水俣条約の有効性評価の
ための全球規模での水銀動態の長期予測に関する研究)

研究代表者: 千葉大学大学院 工学研究院 吉村彰大

研究期間: 2019年4月～2021年5月

本発表の流れ

1. はじめに (研究背景)
2. 研究開発目的
3. 研究目標
4. 研究開発内容
5. 研究成果

トピック1: 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

トピック2: 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

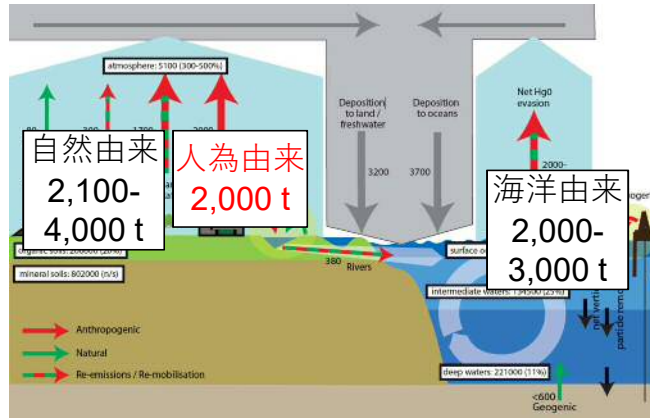
研究成果総括: 環境政策への貢献・研究目標の達成状況

6. 研究成果の発表状況

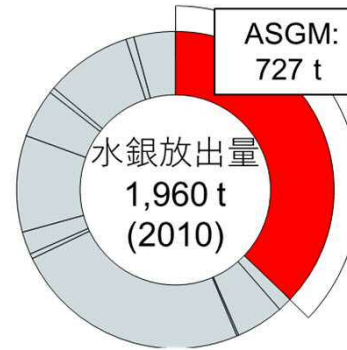
背景(1): 水銀消費と大気放出



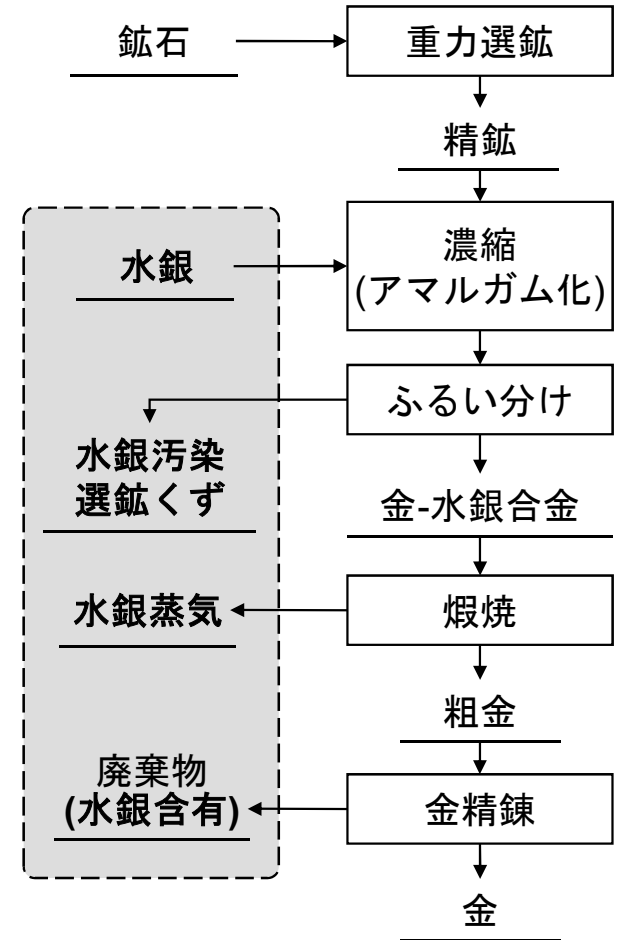
用途別の
水銀消費量^[1]



世界規模での水銀の物質循環^[2]



用途別の
水銀大気放出量^[4]

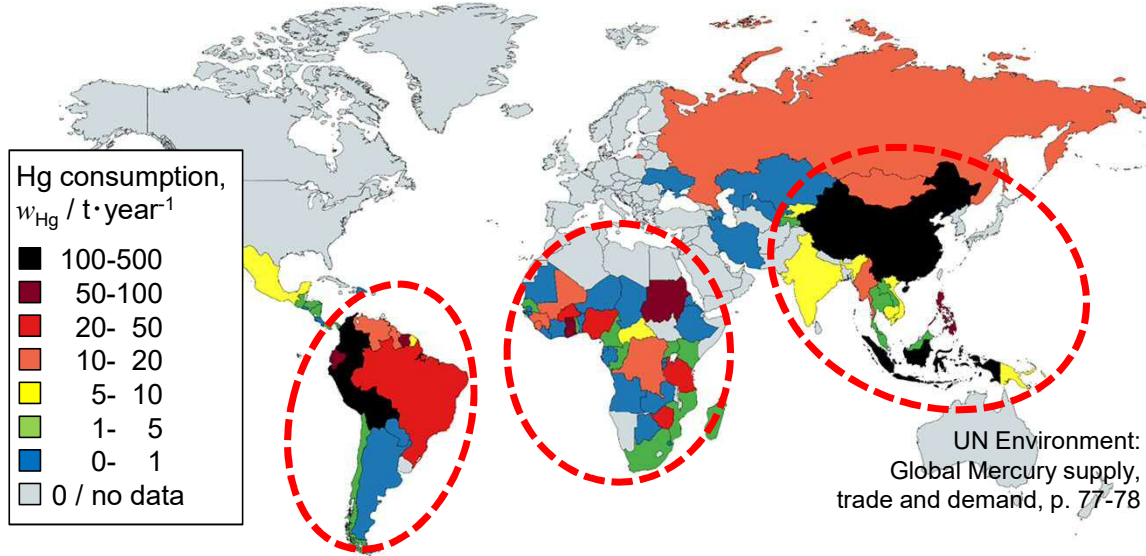


- ✓ 小規模零細金採掘(Artisanal Small-Scale Gold Mining: **ASGM**)での水銀消費(**アマルガム法**)は全体の1/3以上^[1]
- ✓ 統計に現れない消費もあるとされ^[2]、影響は更に大きい
- ✓ 大気放出の20-30%が人為由来^[3]で、その1/3程度以上がASGM由来^[4]

[1] UN Environment: Global Mercury supply, trade and demand, p. 62 より作成
[3] UNEP: Global Mercury Assessment 2013, p. 5 より作成

[2] 同左, p. 41
[4] 同左, p. 9 より作成

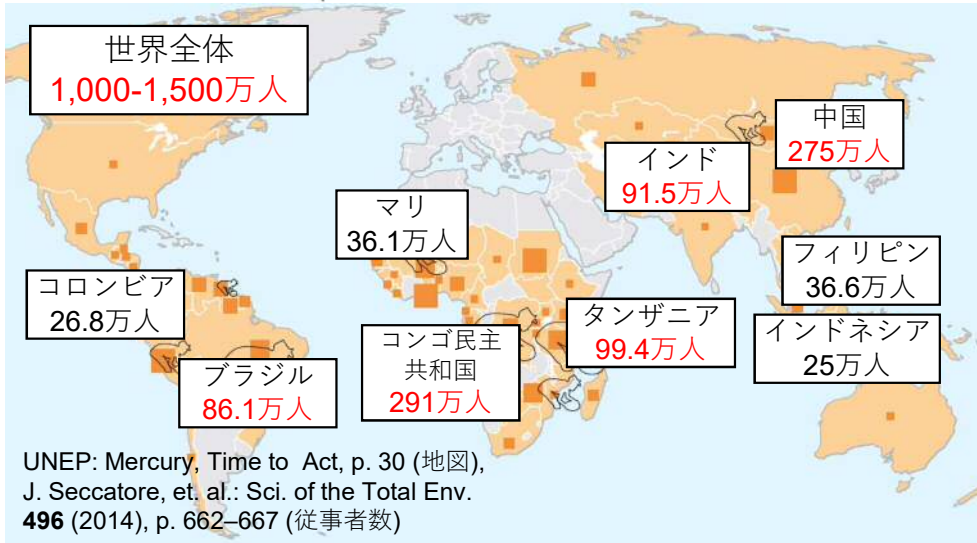
背景(2): ASGMにおける水銀消費と労働問題



- ASGMにおける水銀消費
- ✓ 2015年で900-2,600 tの消費
 - ✓ 東南アジア、アフリカ、南米で深刻



**環境汚染や健康被害抑制には
ASGM対策が有効**



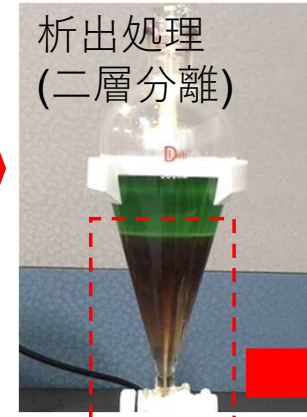
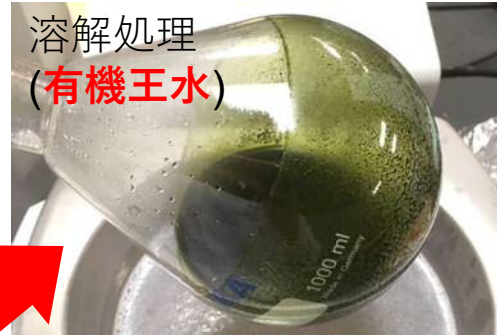
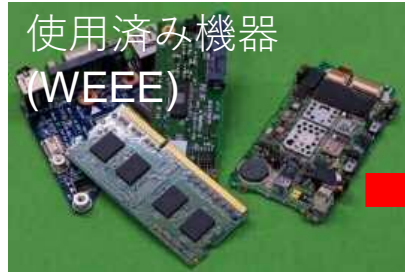
ASGMの労働問題

- ✓ 女性・児童含む1,000-1,500万人が従事
- ✓ 重要な産業・収入源であることから
単純な規制・禁止は不可能



アマルガム法を代替する手法が必要

背景(3): 有機王水による金のリサイクル技術



[1] K. Takatori, et. al.:
J. Jpn. Inst. Met. Mater.,
82 (2018), p. 467-475

- ✓ 有価金属^[1]:
Au, Ag, Cu など
- ✓ その他共存金属^[2]:
Al, Fe, Ni, Pb, Sn, Zn など

- ✓ 有機王水: ハロゲン化銅 (CuBr_2 , CuCl_2)含有有機溶媒 → 金を溶解・回収可能
- ✓ WEEEリサイクルでは、適切な前処理で選択的・高効率に金を回収^[1]
- ✓ 単純な析出処理、少ない廃液量など、コストを抑えつつ従来より低環境負荷

リサイクル手法を鉍石からの精錬に応用

研究開発目的と研究目標

研究開発目的

- ✓ 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発
 - WEEEへの適用結果を元に開発
 - 水銀フリーなプロセスを構築
 - 途上国での運用を考慮した条件を検討
- ✓ 水銀排出の削減ポテンシャルの評価
 - ASGMにおける水銀消費実態の把握
 - 精鉱処理の拡大や有機王水の普及など、複数のシナリオを設定し、水銀消費の削減ポテンシャルを検討



研究開発目標

「有機王水」による金のリサイクル手法を、主に水銀を用いて金を精錬するASGMに適用することで、安全かつ環境負荷が小さく、また経済的な新規プロセスを開発する。並行して物質フロー分析を行い、水銀消費の実態の把握を進め、データ精度の評価を行い、また削減ポテンシャルを推計する。

研究開発内容 (サブテーマ中トピック)

トピック1: 有機王水を用いた
環境調和型金精錬プロセスの開発

研究目標

有機王水を用いた精錬法を開発し、
環境中への水銀放出や従事者の曝露を
防ぎ、環境負荷の軽減を目指す



研究開発内容

- ✓ 模擬鉱石に対する処理
 - 有機王水の水銀物への影響を評価
- ✓ 実際の精鉱に対する処理
 - 実プロセスを想定した精鉱からの溶出・回収率の評価
 - 法的規制・コスト評価も含めた途上国での運用に適した操業条件探索

トピック2: 水銀排出の
削減ポテンシャルの評価

研究目標

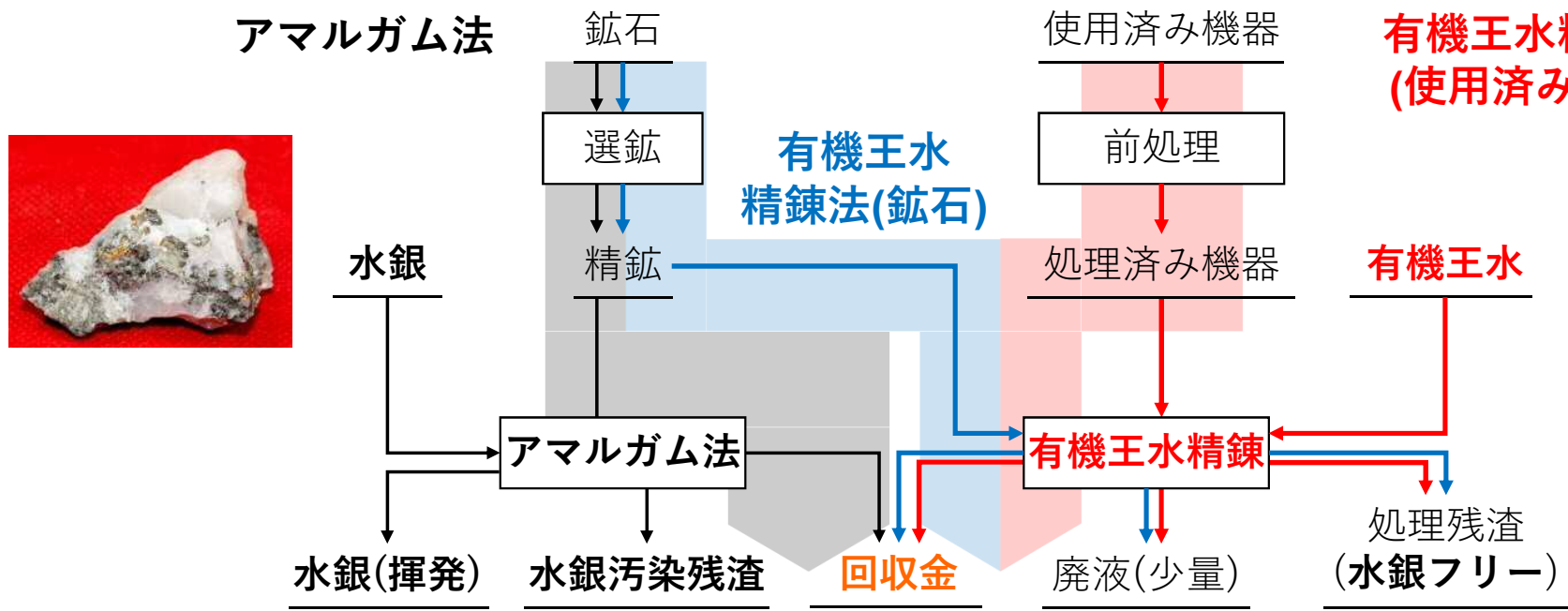
新精錬法の確立による水銀排出の削減
ポテンシャルを、物質フロー分析の
手法で評価する



研究開発内容

- ✓ ASGMでの水銀消費実態把握
 - 水銀消費原単位(U_{Hg})を国別で推計
 - 全鉱石/精鉱処理の割合と比較、密輸ルートの把握・可視化を実施
- ✓ 水銀消費削減ポテンシャルの推計
 - 精鉱処理の拡大や有機王水の普及など、複数のシナリオを設定、検討

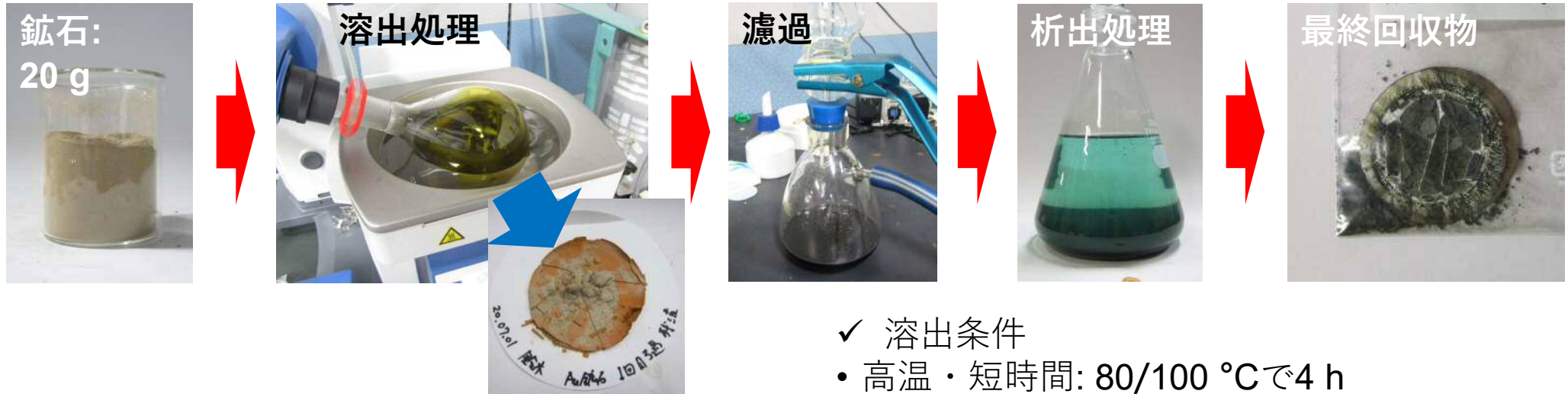
研究成果: 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発 (1) 有機王水による金リサイクルプロセスの応用



[1] K. Takatori, et. al.:
J. Jpn. Inst. Met. Mater.,
82 (2018), p. 467-475

- ✓ 有機王水による使用済み機器からの金リサイクル技術は開発済み[1]
→ 鉱石を使用済み機器と見立て、精錬に応用
- ✓ 途上国での操業を想定して最適な条件を探索(コスト面、法規制など)

研究成果: 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発 (2) 有機王水による金精錬プロセスの開発と条件検討



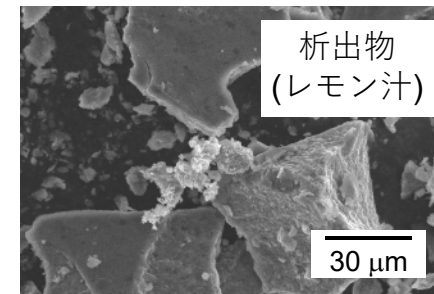
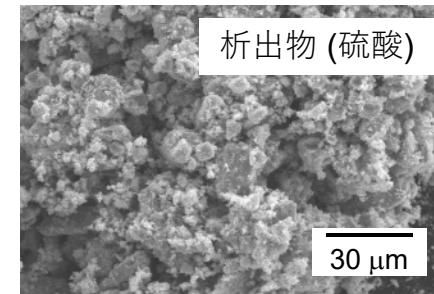
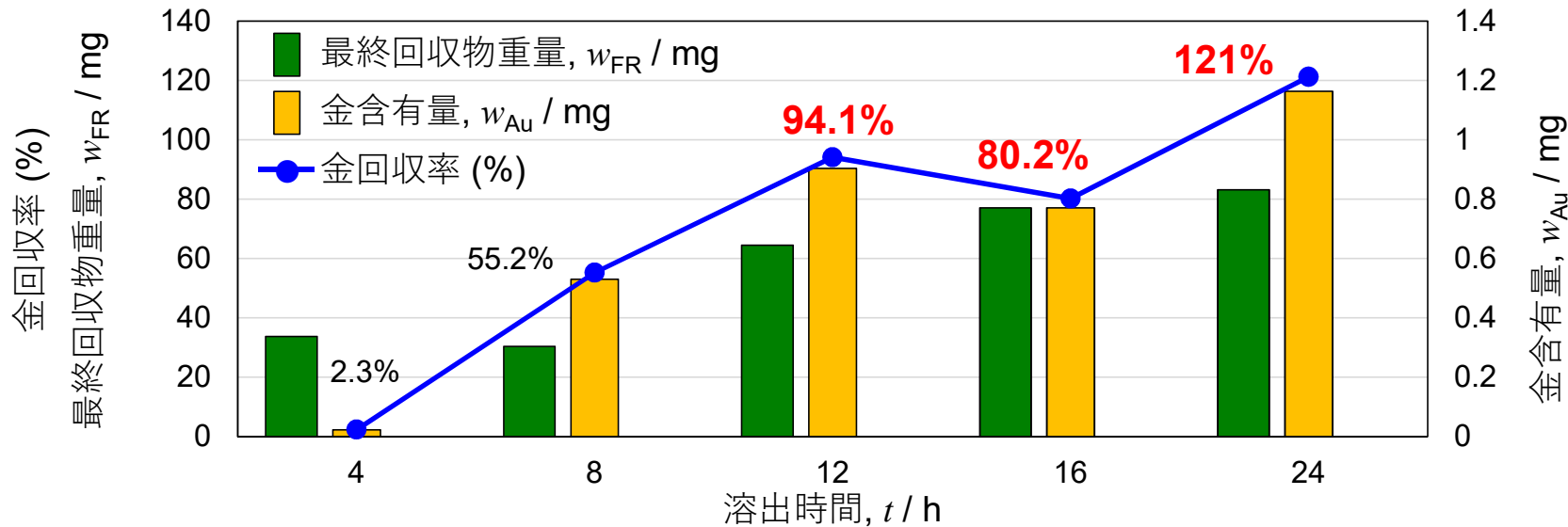
- ✓ 有機王水組成 (DMSO: 100 mL):
CuBr₂(3.2 g)とKBr(1.2 g)を含有
- ✓ 溶解後、鉍石残渣を除去して
溶媒を回収 (溶出した金含有)
- ✓ 分離した溶媒に酸性水溶液を
添加、析出物を回収

- ✓ 溶出条件
 - 高温・短時間: 80/100 °Cで4 h
 - 低温・長時間: 40 °Cで4-24 h
- ✓ 析出条件
 - 硫酸の他、酢酸、レモン汁を添加
 - 最終回収物から溶出・回収率を評価

途上国でも運用可能な
操業条件を探索

研究成果: 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

(3) 金精錬プロセスの開発結果

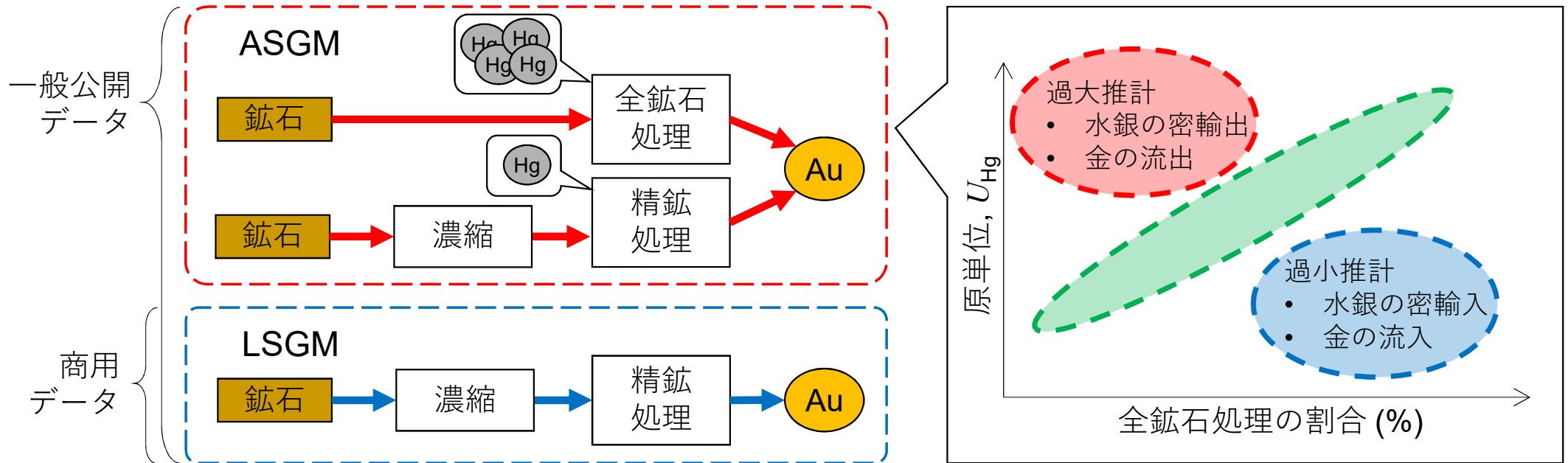


- ✓ 溶出: 高温・短時間 ↔ 低温・長時間の両条件で全量溶出
- ✓ 析出: 硫酸の添加で溶出量がほぼ全量回収可能
他にレモン汁での析出でもほぼ全量回収
- ✓ コスト: 固形試薬のみでは既存プロセス並、DMSOの算入で大幅に上回る → プロセスの最適化の必要性

➡ 途上国での運用に適した条件で操業可能

研究成果: 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

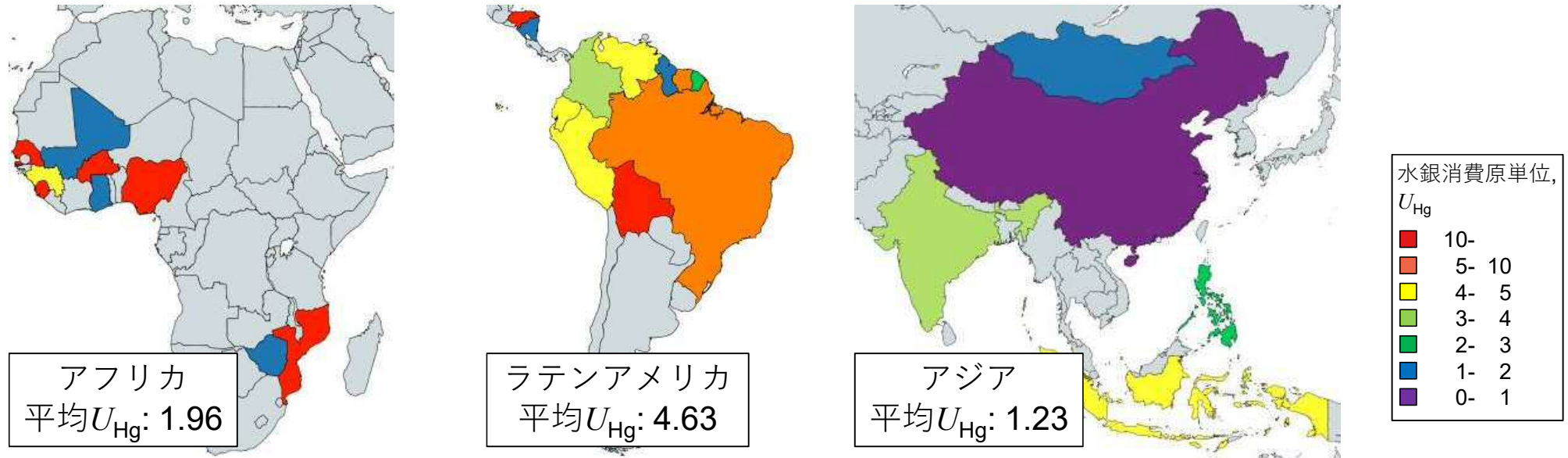
(1) ASGMでの水銀消費原単位推計と検討



- ✓ 金の生産はASGM/LSGM由来に分類可能
→ ASGMではアマルガム法のみ利用と仮定
- ✓ ASGMは全鉱石処理と精鉱処理に分類
- ✓ 消費原単位は全鉱石処理>精鉱処理

- (1) 一般公開データと商用データからASGM由来の金生産量を推計
- (2) 水銀消費量から、金生産時の消費原単位(U_{Hg})を推計
- (3) 全鉱石処理の割合と比較して推計結果の正確性を評価

研究成果: 水銀排出の削減ポテンシャルの評価 (2) 地域別の水銀消費傾向

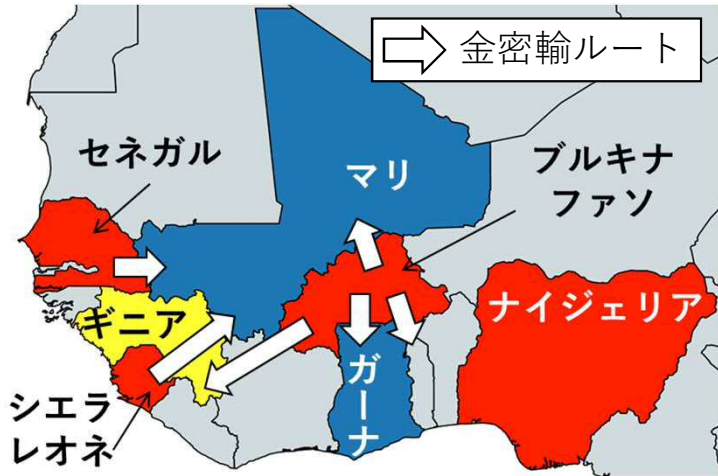


アフリカ: 大半の国で精鉱のみを処理 ↔ U_{Hg} に大きなばらつき

ラテンアメリカ: 全鉱石処理の割合が高い ↔ U_{Hg} の極端に小さな国が存在
→ 水銀や金の密輸ルートが存在が示唆

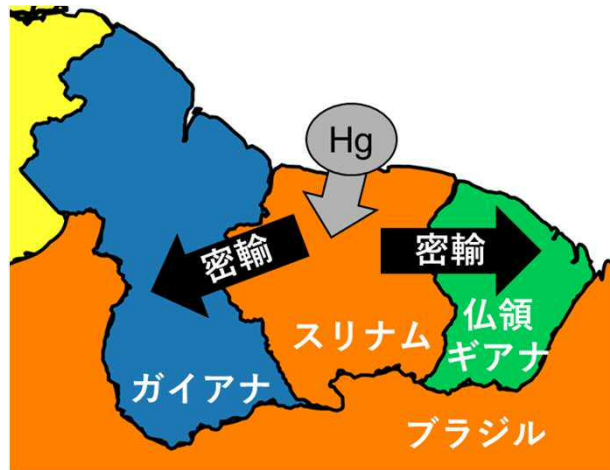
アジア: 全鉱石処理の割合が高い ↔ U_{Hg} の地域平均値が極端に小さい
→ 中国に関するデータの不正確性

研究成果: 水銀排出の削減ポテンシャルの評価 (3) ASGMでの水銀・金密輸ルート of 把握



- 西アフリカ地域 (西アフリカ諸国経済共同体) [1]
- ✓ ECOWAS と呼ばれる共同体を形成
 - ✓ トーゴから流入した水銀がブルキナファソを経由して各国へ流出
 - ✓ 各国から密輸された金がマリへ流入、UAEへ密輸
- 国ごとに極端に異なる U_{Hg} の推計結果

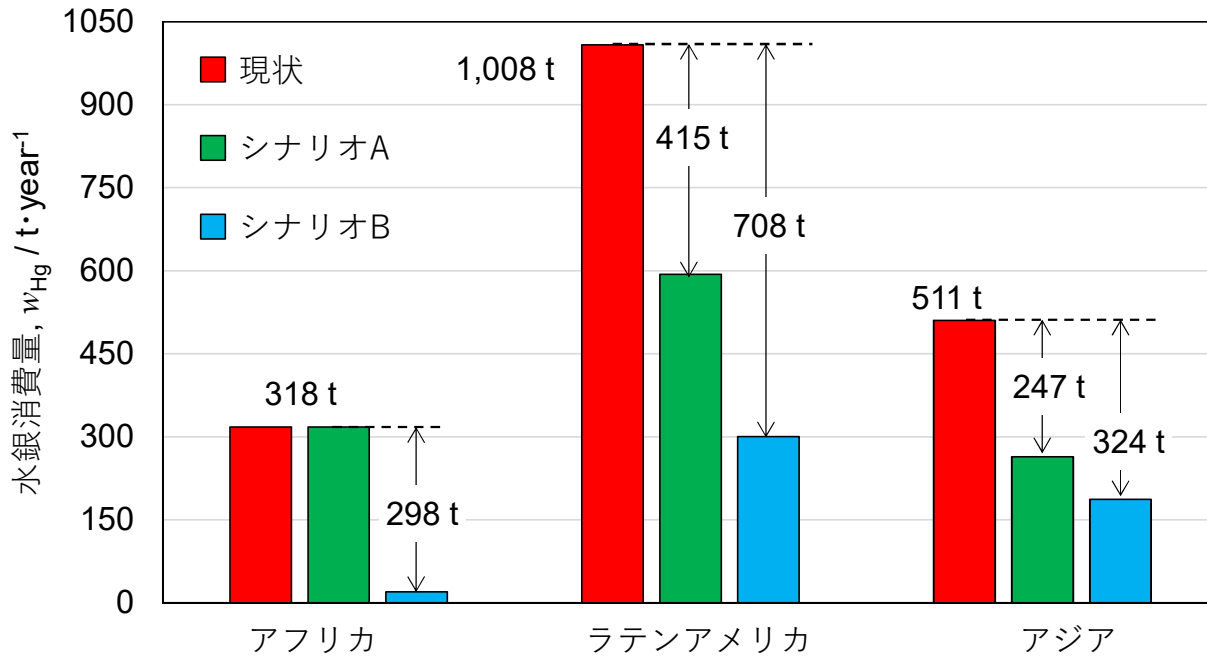
[1] Hunter M (2018) Curbing Illicit Mercury and Gold Flows in West Africa: Options for a Regional Approach. UNIDO



- ギアナ地方 (ガイアナ・スリナム・仏領ギアナ)
- ✓ 3カ国中、スリナムのみが水銀の輸入が可能
 - ✓ スリナムに流入した水銀が隣国のガイアナ、仏領ギアナへ流出 [2]
- U_{Hg} : スリナム > ガイアナ・仏領ギアナ

[2] Sutherland IG (2019) The Political Ecology of Mercury within the Small-Scale Gold Sector GUYANA REPORT. IUCN.

研究成果: 水銀排出の削減ポテンシャルの評価 (4) 地域別の水銀排出削減ポテンシャルの検討



シナリオA:

- 精鉱処理はそのまま
- 全鉱石処理は精鉱処理へ変更
- 有機王水の導入はなし

シナリオB:

- 精鉱処理は有機王水処理へ変更
- 全鉱石処理は精鉱処理へ変更

- ✓ すでに精鉱処理が大半のアフリカではシナリオAの効果小
- ↔ 全鉱石処理の割合が大きいラテンアメリカではシナリオAの効果大
- ✓ 有機王水処理の導入により水銀排出量を大幅に削減
- ✓ 削減ポテンシャル: シナリオAで661 t、シナリオBで1,329 t (現状: 1,836 t)

研究成果: 総括

トピック1: 有機王水を用いた 環境調和型金精錬プロセスの開発

- ✓ 有機王水による金精錬プロセス構築
 - 有機王水による精鉱(金品位: 48 ppm)からの金溶出を確認
 - 溶出した金(を含む化合物)の回収を確認
- ✓ 実プロセスを想定した条件探索
 - 溶質量を削減した条件での金溶出
 - レモン汁による溶出した金の回収
 - コスト試算による操業可能性の検討

トピック2: 水銀排出の 削減ポテンシャルの評価

- ✓ ASGMでの水銀消費実態把握
 - 全鉱石/精鉱処理割合と U_{Hg} に一定の相関
 - 外れ値を示す国: 水銀や金の密輸入
 - 地域別にデータ精度を評価
 - U_{Hg} 比較での密輸ルート可視化の可能性
- ✓ 水銀排出削減ポテンシャルの推計
 - 現状に対して精鉱処理普及で1/3程度、有機王水普及で2/3程度の削減が可能

- ✓ 途上国でも操業可能な有機王水による金精錬プロセスを構築
- ✓ 新プロセスによる水銀排出削減ポテンシャルを定量的に評価

「水銀に関する水俣条約」に大きく寄与

研究成果: 環境政策への貢献

有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

✓ 「有機王水」による精鉱からの金の溶出・回収を確認

→ **完全に水銀フリーな精錬プロセスを開発**

✓ 法的規制やコスト面も考慮した、途上国でも運用可能な

操業条件での利用可能性も確認 (レモン汁の利用、DMSOの再利用など)

→ **途上国への技術供与の可能性を開拓**

水銀排出の削減ポテンシャルの評価

✓ データベースの活用によりASGMにおける金生産・水銀消費実態を把握

✓ 地域性の評価、および金・水銀の密輸ルートを検討

→ **「水俣条約」の実効的な推進に際して重点的な対策地域を可視化**

✓ 複数シナリオを考慮した水銀排出の削減ポテンシャル評価

→ **現状に対して大幅な削減が可能なことを定量的に示した**

研究成果の発表状況 (論文・学会)

論文

- ✓ Akihiro Yoshimura, Koyo Suemasu, Marcello M. Veiga:
Journal of Sustainable Metallurgy (IF: 2.347)
Estimation of mercury losses and gold production by artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in countries with major consumption of mercury

学会

- ✓ Akihiro Yoshimura, Takumasa Suzuki, Omotayo Fadina, Pariya Torkaman, Yasunari Matsuno, Marcello M. Veiga: Ecobalance 2020
“Novel Refining Process of Gold from Ore Using “Organic Aqua Regia” as An Alternative Procedure of The Amalgamation in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)”
- ✓ Koyo Suemasu, Akihiro Yoshimura, Marcello M. Veiga: Ecobalance 2020
“Estimation of Mercury Use and Lost in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)”