

京都大学大学院地球環境学堂

博士学位論文

有害廃棄物の長期管理に向けた

社会システムに関する研究

－水俣条約後の水銀廃棄物を例として－

2018 年

袖野 玲子

## 初出

### 第3章

袖野玲子・高岡昌輝 (2017) 水俣条約による日本の水銀マテリアルフローへの影響と将来推計, 廃棄物資源循環学会論文誌, 2017 ; 28, pp. 128-139

### 第4章

袖野玲子・高岡昌輝 (2017) 水俣条約後の水銀需給に基づく世界と日本の余剰水銀の将来予測, 土木学会論文集 G(環境), 2017;73(3), pp. 112-120

### 第5章

袖野玲子・高岡昌輝 (2017) 管理型最終処分場における埋立終了後の維持管理期間に関する要因分析, 土木学会論文集 G(環境), 2017;73(7), pp. 297-306

# 目次

要旨.....	- 3 -
第 1 章 序論.....	- 5 -
1.1 研究の背景.....	- 5 -
1.2 研究の目的.....	- 6 -
1.3 論文の構成.....	- 7 -
第 2 章 水俣条約と水銀廃棄物の最終処分.....	- 10 -
2.1 廃棄物化する水銀.....	- 10 -
2.1.1 水銀に関する水俣条約の概要.....	- 10 -
2.1.2 我が国の水俣条約への対応.....	- 13 -
2.1.3 我が国における水俣条約の影響.....	- 15 -
2.2 有害廃棄物の最終処分制度における問題.....	- 19 -
2.2.1 我が国における水銀廃棄物の最終処分制度.....	- 19 -
2.2.2 最終処分場の埋立終了後の維持管理のリスク.....	- 23 -
2.2.3 民間事業者による永続的管理のリスク.....	- 25 -
2.3 欧米における廃水銀の処分.....	- 26 -
2.3.1 EU における廃水銀の規制.....	- 26 -
2.3.2 アメリカにおける廃水銀の規制.....	- 30 -
2.4 まとめ.....	- 31 -
第 3 章 水俣条約による日本の水銀フローへの影響と将来推計.....	- 33 -
3.1 概説.....	- 33 -
3.2 推計手法.....	- 33 -
3.2.1 推計の対象範囲.....	- 33 -
3.2.2 水銀使用廃製品からの水銀排出量推計.....	- 34 -
3.2.3 水銀使用廃製品から排出される水銀の大気と廃棄物等への分配.....	- 36 -
3.2.4 工業過程からの水銀排出量推計.....	- 38 -
3.2.5 工業過程における改正大気汚染防止法の影響.....	- 48 -
3.3 推計結果と考察.....	- 49 -
3.3.1 水銀使用製品からの水銀排出量.....	- 49 -
3.3.2 工業過程からの水銀排出量.....	- 50 -
3.3.3 大気と廃棄物等への水銀分配.....	- 53 -
3.3.4 推計結果のまとめと考察.....	- 56 -
3.4 まとめ.....	- 57 -
第 4 章 国際的な水銀需給バランスと日本における余剰水銀発生予測.....	- 59 -
4.1 概説.....	- 59 -
4.2 研究手法.....	- 59 -
4.2.1 国連貿易統計にみる国際的な水銀需給.....	- 59 -
4.2.2 世界の水銀需給の見通し.....	- 60 -
4.2.3 日本の余剰水銀の見通し.....	- 61 -

4.3 推計結果と考察 .....	- 63 -
4.3.1 国連貿易統計にみる国際的な水銀需給 .....	- 63 -
4.3.2 国際的な水銀需給の見通し .....	- 65 -
4.3.3 日本における余剰水銀の見通し .....	- 70 -
4.4 まとめ .....	- 71 -
第5章 最終処分場における維持管理期間に関する要因分析 .....	- 73 -
5.1 概説 .....	- 73 -
5.2 研究手法 .....	- 74 -
5.2.1 調査方法 .....	- 74 -
5.2.2 分析方法 .....	- 75 -
5.3 研究結果と考察 .....	- 76 -
5.3.1 調査結果 .....	- 76 -
5.3.2 分析結果 .....	- 85 -
5.3.3 考察 .....	- 88 -
5.4 まとめ .....	- 89 -
第6章 結論 .....	- 91 -
6.1 結論 .....	- 91 -
6.2 今後の研究課題 .....	- 93 -
6.3 有害廃棄物の長期管理に向けて .....	- 94 -
参照文献一覧 .....	- 98 -
図表一覧 .....	- 105 -
謝辞 .....	- 108 -
Appendix I 廃棄物最終処分場の維持管理期間等に関するアンケート調査票 .....	- 109 -
Appendix II EU水銀廃棄物政策担当者インタビュー調査結果 .....	- 117 -
Appendix III 水銀硫化処理工場の見学報告（スイス：BATREC社） .....	- 123 -

## 要旨

---

2013年に採択された「水銀に関する水俣条約」の影響を受け、今後、条約による世界的な水銀需要の低下により、回収水銀の輸出を主流とする日本の水銀フローは大きく影響を受ける可能性がある。特に、これまで有価物として取り扱われてきた回収水銀のうち、余剰となったものが廃棄物化し、国内で処分される事態が将来想定され、これまでの廃棄物処理制度では想定していなかった対応が求められる。しかし、2015年の廃棄物処理法施行令改正により、水銀廃棄物の処理に関する法制度は整備されたが、実際の処分体制の整備はこれからであり、未だ目途はたっていない。水銀の硫化による安定化技術は、埋立処分における溶出基準を満たすことが報告されているものの、処分実績のない当該処理物の長期的な安定性を実環境で確認することはできないことから、長期的に見れば、潜在的な水銀溶出のリスクを内包している。このため、本研究では、水銀廃棄物の長期管理に向けた社会システムを検討した。

処分体制の検討に当たり、余剰水銀の発生量の見通しを把握することは喫緊の課題である。このため、条約による国内水銀マテリアルフローへの影響を踏まえ、主要排出源である工業過程と水銀使用廃製品からの水銀排出量を推計し、水銀バランスを考慮して、大気、廃棄物（埋立）及び水銀回収への排出量を算出した。この結果、2010年度から2050年度までの水銀の排出変化として、大気排出量は約31トンから約13トンに、埋立処分量は約12トンから約6トンにと半減する一方、水銀回収量は約42トンから約52トンに増加すると予測された。水銀使用製品由来の水銀排出はこの数年で急減しており、製品への水銀使用抑制策による入口規制の効果が示されるとともに、特に蛍光灯及び血圧計からの水銀回収に注力すべきことが示唆された。工業過程では、最大排出源である非鉄金属製錬業において排出増加が予測された。改正大気汚染防止法による大気排出抑制効果は約8%と試算され、条約の趣旨どおり、環境中への水銀排出が削減される一方、水銀回収が増加し、回収量は年間約44～59トンと推計された。

続いて、条約の影響を踏まえた国際的な水銀需給バランスを予測し、これに基づいた水銀輸出シナリオを設定して、上記で推計した回収水銀量の約50トンのうち、我が国において廃棄物として処分しなければならない余剰水銀量の発生量の将来推計を行った。欧米を除く世界の水銀需給バランスは、今後、需要・供給ともに縮小していき、一次鉱出がなければ、2020年は需要が供給を上回り、2030年以降は供給が需要を上回る見通しが示された。中国における水銀需給の不確実性が大きいものの、我が国においては、主な製品用途の水銀需要がなくなる2020年頃より余剰水銀が発生すると予測された。また、2050年における余剰水銀のストック量は世界で約24千～25千トン、日本国内で約600～1,400トンと推計された。以上より、中間処理による容積増加を考慮すれば、2050年までに1000 m<sup>3</sup>規模の処理容量の最終処分場の整備が必要なことが明らかとなった。

さらに、有害廃棄物の最終処分制度の課題として、処分場における埋立終了後の維持管理のあり方を検討するため、埋立終了から廃止までの期間（維持管理年数）及び費用

に関連があると考えられる要素について自治体及び処分場設置事業者にアンケート調査を行い、重回帰分析により、維持管理年数を規定する要因を検討した。この結果、管理型最終処分場における埋立終了後の年間維持管理費用は、平均 58,000 千円/年、埋立容量当たりで 350 円/m<sup>3</sup>年であり、維持管理年数は平均 13.1 年であった。また、事業者の有害物質含有廃棄物の受入れ許容度として、半数の事業者が有害物質含有廃棄物の受け入れに消極的な実態が示された。重回帰分析の結果からは、汚泥割合と維持管理年数との関連性が新たに示唆された。埋立終了処分場における回帰式を稼働中の処分場に適用すると、処分場の 45%において、維持管理年数が計算値よりも短く見積もられていることが示唆され、将来に渡って適正な維持管理が確保されるのか懸念が残った。今後、廃止済み処分場の維持管理年数に係る実績データを収集・分析し、維持管理年数に影響を与える要素のより一層の解明が求められた。

廃水銀等処理物の最終処分に当たっては、雨水浸入防止措置が維持管理基準に規定されており、当該措置による維持管理年数の長期化が調査結果より示唆された。想定より維持管理年数が長期化すれば、積立金不足やそれに伴う不適正な維持管理、さらには環境への悪影響が懸念されることになる。このため、適切な維持管理年数の設定に資する根拠情報を早急に整備するとともに、想定よりも長期化した処分場への対応を検討する必要がある。また、水銀のような有害物質には、従来の洗い流しによる処分場の「安定化」という考え方は馴染まず、遮断型最終処分場にも通じる有害物質の「封じ込め」へ考え方を転換し、長期管理に向けた制度の構築が求められる。以上を踏まえ、有害廃棄物の長期管理に向けた方向性として、(1)最終処分場の廃止規定の見直し、(2)管理費用の確保・保障、(3)公的関与の検討を提示した。

# 第1章 序論

---

## 1.1 研究の背景

2013年10月に熊本にて約140か国・地域の政府関係者、国際機関等が出席した外交会議において採択された「水銀に関する水俣条約」は、発効要件である50か国以上の締結を受け、2017年8月16日に発効することとなった。本条約は、水銀を鉱出から廃棄までライフサイクルを通じて環境上適正に管理しようとしている点が包括的かつ画期的であるが、今後、条約による世界的な水銀需要の低下により、回収水銀の輸出を主流とする日本の水銀フローは大きく影響を受ける可能性がある。特に、これまで有価物として取り扱われてきた回収水銀のうち、余剰となったものが廃棄物化し、国内で処分される事態が将来想定される。これまで日本国内においても概ね100ppm以下の低濃度の水銀廃棄物は硫化等の中間処理を経て、溶出基準を満たすものは管理型最終処分場に処分されてきたが<sup>[1]</sup>、今後は、有価で取引されていた高純度の金属水銀の最終処分を行うという、これまでの廃棄物処理制度では想定していなかった対応が求められることとなる。

廃棄物処理法（昭和45年法律第137号）において、重金属等の有害物質を含む廃棄物は、埋立処分に係る判定基準に基づき、基本的には、有害物質の溶出量が基準値以下のものは管理型最終処分場、溶出基準を超過するものは遮断型最終処分場に最終処分を行うこととなっている。しかし、従来の制度設計には、長期的にみると、以下の環境リスクが挙げられる。

### (1)最終処分場廃止後の環境リスク

最終処分場の主流である管理型最終処分場は、いずれ処分場が「安定化」するとの前提の下、処分場からの浸出水の有害物質濃度が処分場の廃止基準を満たせば、廃止できる（管理が不要となる）制度設計になっている。しかし、水俣条約により将来廃棄物化が想定される水銀廃棄物などの有害物質含有廃棄物は、有機系の廃棄物と異なり、有害物質は埋立処分後も「安定化」することはないため、キレート処理等により封じ込められ、処分場の廃止時には溶出しなかった有害物質が将来溶出する可能性がある。福田・高岡ら<sup>[2]</sup>により水銀の硫化処理技術は一定の目途がつつあるものの、その長期的な安定性は確認できておらず、処分場廃止後に水銀が溶出する潜在的な環境リスクが指摘されている

### (2)民間事業者に永続的な処分場管理を求める環境リスク

遮断型最終処分場は、処分場の具体的な廃止基準が定められておらず、安全ではない有害廃棄物（管理が必要）を事実上長期保管しておくための例外的な処分方法と言え<sup>[3]</sup>、半永久的な保管義務を民間事業者に課している経済的・社会的に不安定な制度という課題がある。事業者の倒産等により管理者不在又は不適切な管理状況となった場合、有害廃棄物による環境リスクは大きい<sup>[4]</sup>。

また、2017年の廃棄物処理法施行規則等の改正により、廃水銀等の処理物の処分に当たって、管理型最終処分場における雨水浸入防止措置等の処分基準が定められたが、この措置により処分場の安定化が進まず、廃止までの期間が長期化するおそれがある。廃棄物最終処分場においては、埋立が終了した後も、処分場が安定化し、施設の廃止が認められるまで、浸出水の処理等、継続して維持管理が必要である。廃棄物処理法により、最終処分場の設置者は、施設の廃止までの維持管理費用を積み立てることとされているが、埋立終了から廃止までの期間（維持管理年数）を予測する方法は確立されていない。このため、廃止までの期間が予測よりも長期化すれば、積立金が不足し、処分場の管理ができなくなることで、処分場を汚染源とした環境汚染のリスクが懸念される。

上記のとおり、有害廃棄物の長期管理という観点で見れば、現行の処理制度は脆弱な体制にある。有害物質の環境中への放出を防ぐために、様々な過程において大気や水、土壌への排出規制は行われているものの、最終的な環境のシンクとしての廃棄物最終処分場においては、処分場の廃止後は特段の管理が不要となることから、有害物質による環境汚染の潜在的なリスクを有する。しかしながら、工学的見地からの水銀の処理方法に関する研究<sup>[2]</sup>や有機物に着目した処分場の安定化に関する研究<sup>[5] [6] [7] [8] [9] [10]</sup>、特定の水銀使用製品のストック量調査<sup>[11] [12]</sup>などは実施されているものの、有害物質含有廃棄物の最終処分制度をも含めた社会システムに関する統合的な研究はこれまでなされていない。高濃度に水銀を含有する廃棄物の最終処分に向け、現行制度の枠組み内で処理基準は制定されたものの、未だ処分体制の整備の目途が立っていない状況にある。

このため、水銀など有害物質含有廃棄物からの有害物質の溶出による潜在的な環境リスクにも長期的に対応できる社会システムを明らかにすることが求められている。

## 1.2 研究の目的

従来制度では、廃棄物となった余剰水銀を処分した際に長期的な安全性に懸念があり、水俣条約が発効した今、処分しなければならない廃水銀の発生が近い将来想定されることから、長期的に安全な水銀廃棄物の処理システムの確立は喫緊の課題である。このため、水俣条約の採択に伴い、日本において新たに制定された水銀廃棄物の処理システムをケースとして、当該環境リスク及び社会的受容性の観点から、水銀廃棄物の長期管理に向けた社会システムを明らかにすることを研究の目的とする。

水銀廃棄物の処理体制を検討するにあたっては、まず、我が国における水銀のマテリアルフローを把握し、将来、水銀廃棄物がどれくらい排出される見込みなのかを明らかにする必要がある。現在、我が国で回収された水銀は、大半が輸出されていることから、世界的な水銀の需給バランスの将来を推計し、日本からの水銀の輸出見通しを踏まえて、日本において最終的に廃棄物化する水銀の量を検討する。

また、水銀廃棄物の最終処分先とされている管理型最終処分場については、埋立終了から処分場の廃止までの維持管理期間について実態が明らかでないことから、これを明らかにし、維持管理年数を規定する要因や水銀廃棄物の受入れ許容度を分析した上で、水銀廃棄物の最終処分体制の課題について考察する。



以上を踏まえ、我が国における水銀廃棄物の長期管理に向けた適正な社会システムを検討し、有害物質含有廃棄物の最終処分に係る今後の政策検討への貢献を目指す。

### 1.3 論文の構成

本研究の全体のフレームワークを図 1-1 に示す。

はじめに、文献レビューと関係者インタビューから、水俣条約の策定の背景と規制内容、条約を受けた日本政府の対応、我が国における有害廃棄物の最終処分制度、欧米における対応をレビューし、条約が我が国に与える影響を分析するとともに、水銀廃棄物の最終処分体制における問題を特定する。

次に、最終処分体制の検討に当たって必要な水銀廃棄物の発生量の将来見通しを推計する。本研究では、我が国の主要な水銀排出源である工業過程と水銀使用廃製品からの水銀排出に焦点を当て、2010～2050 年の水銀マテリアルフローを推計し、大気及び廃棄物（埋立処分と水銀回収）への水銀排出量を算出する。また、水俣条約を批准するために整備が進められた国内法制度を踏まえ、水銀回収事業者や環境省へのヒアリング調査を行い、水俣条約の対応措置が国内の水銀マテリアルフローに与える影響を定量的に検証する。

続いて、上記で試算された回収水銀量のうち、どの程度が廃棄物化するか、世界的な水銀需給バランスの予測に基づき、将来見通しを推計する。まず、国連貿易統計から水銀の世界的なフローを把握し、日本から輸出された水銀の使用用途について、国内大手水銀回収事業者へヒアリングを行い、条約が認める用途に基づき輸出シナリオを設定する。さらに、条約の規制効果を反映した 2010～2050 年の水銀の需要と供給を業種別、地域別に推計する。これらを踏まえ、2050 年における世界と日本の余剰水銀ストック量を算出する。

並行して、管理型最終処分場における埋立終了後の管理問題への対応を検討する。まず、実態が不明な維持管理期間のデータを収集するため、自治体の産業廃棄物担当者と管理型最終処分場設置事業者に対してアンケート調査を実施する。調査項目は、処分場の埋立終了から廃止までの期間（維持管理年数）及び費用と関連のありそうな要素を選定するほか、潜在的溶出リスクを有する有害物質含有廃棄物の受入れ許容度や水銀廃棄物の受入れ意向、埋立終了した処分場における維持管理年数の見込みとの差や要因等も調査し、処分場における有害廃棄物の受入れ許容度を分析する。また、維持管理年数の予測手法が明らかでないことから、維持管理年数を目的変数とした重回帰分析を行い、維持管理年数に影響を与える因子の検討を行う。さらに、埋立終了した処分場における分析結果から維持管理年数の計算値を求め、稼働中の処分場における事業者の維持管理年数の予測の妥当性について検討する。これらを踏まえ、維持管理積立金制度の改善策を考察する。

最後に、本研究の成果をとりまとめ、水銀廃棄物を例に、これらを踏まえた有害廃棄物の長期管理に向けた社会システムの方向性を工学及び法制度の観点から検討する。

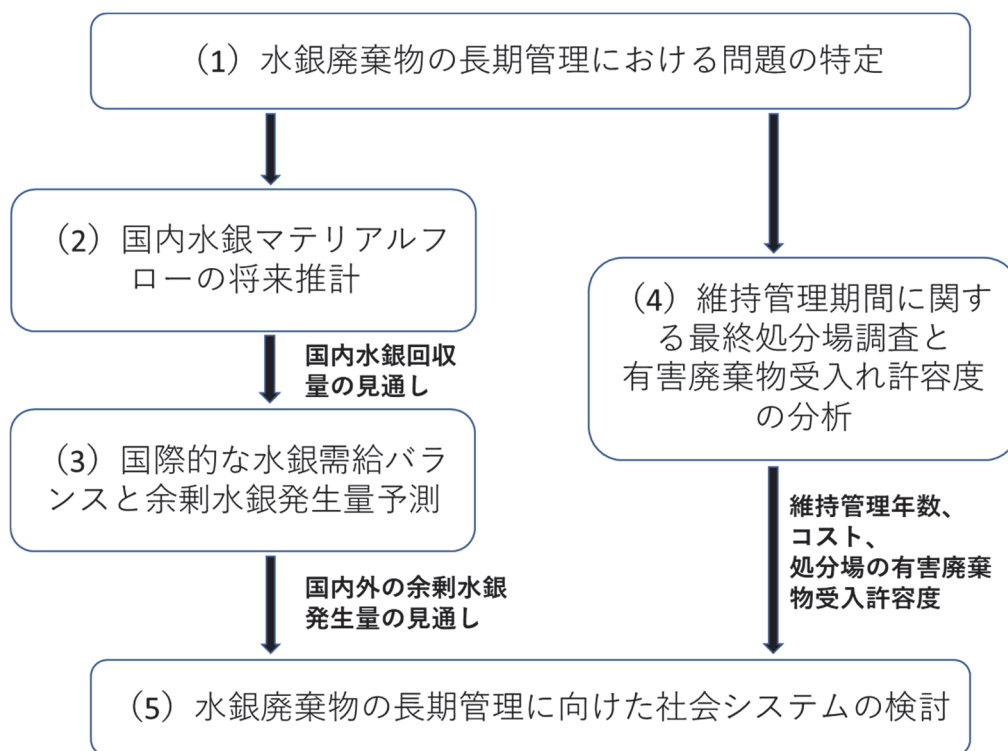


図 1-1 研究のフレームワーク

本論文は以下の 6 章より構成される。

**【第 1 章】**

本研究の背景と目的、研究方法を概説する。

**【第 2 章】**

水銀に関する水俣条約の制定の背景や条約の規定内容を概観し、我が国における水俣条約の影響を特定する。また、水俣条約を受けた日本の対応を整理した上で、我が国の有害物質含有廃棄物の最終処分体制における問題点を特定し、水銀廃棄物の処分に関して懸念される課題を明らかにする。さらに、欧米における水銀廃棄物の処分についてレビューし、我が国の対応と比較する。

**【第 3 章】**

水俣条約による国内の水銀マテリアルフローへの影響を踏まえ、水銀使用廃製品及び工業過程から、大気、廃棄物（埋立処分）、水銀回収への水銀排出の推移を 2010

年から 2050 年まで推計し、我が国の水銀排出の将来見通しや条約を受けた各種政策による水銀排出抑制効果を定量的に明らかにするとともに、回収水銀の発生量の見通しを示す。

#### 【第 4 章】

水銀及び水銀化合物の貿易フローを分析し、世界的な水銀フローを概説する。また、水俣条約の影響を踏まえた世界の水銀需給の見通しを地域別、業種別に推計し、国際的な水銀需給バランスを示す。さらに、世界の水銀需給を踏まえた潜在的な余剰水銀の発生量の将来見通しを明らかにし、これを踏まえた我が国における廃水銀のストック量の予測を 3 つの輸出シナリオ別に示す。

#### 【第 5 章】

最終処分場の埋立終了から処分場の廃止までの期間に関する課題を概説した上で、自治体及び最終処分場設置事業者を対象とした維持管理期間に関するアンケート調査の結果を示す。また、適正な維持管理積立金額の算定に資するよう、特に有害物質含有廃棄物の受入れ許容度に注目して、維持管理年数に影響を与える因子を検討する。さらに、有害物質を含有する廃棄物の最終処分体制について、調査結果を踏まえて考察する。

#### 【第 6 章】

本研究の成果をとりまとめ、これらを踏まえた有害廃棄物の適正な長期管理に向けた社会システムの方向性を示す。

## 第2章 水俣条約と水銀廃棄物の最終処分

### 2.1 廃棄物化する水銀

#### 2.1.1 水銀に関する水俣条約の概要

2013年10月に熊本にて約140か国・地域の政府関係者、国際機関等が出席した外交会議において「水銀に関する水俣条約（Minamata Convention on Mercury）」が採択された。有機水銀に起因する健康被害と環境汚染の経験を有する水俣の名前を冠する当該条約は、50か国以上による締結という条約発効要件を満たし、2017年8月16日に発効することとなった。

水俣条約の制定の背景には、国際社会における水銀による地球規模での環境汚染や健康被害への懸念の高まりがあった。国連環境計画（UNEP）管理理事会からの要請に基づき作成され、2002年に公表された世界水銀アセスメントレポート [13]によれば、①水銀の環境中濃度が産業革命以降に世界的規模で急激に増加していること、②様々な人為発生源から環境中に排出され、分解されることなく地球規模で循環・蓄積し続けること、③毒性が強く特に人の発達途上の神経系に有害であること等が報告された。こうした水銀による全球的な環境汚染の状況を受け、2009年のUNEP管理理事会決定を経て具体的な条約交渉が開始されることとなり、水銀及び水銀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た水俣条約が2013年に採択された。

UNEPの報告 [14]によれば、産業革命前から現在までの約一世紀半の間に北極圏の海洋動物中の水銀濃度は平均約12倍に増加しており（図2-1）、この増加は人為的排出に起因していると考えられている。環境中に蓄積された水銀は食物連鎖を通じた生物濃縮等によって大型の海洋生物等の体内に高濃度に蓄積されることから、そうした魚介類の摂取を通じた人への健康影響も懸念される。水銀の排出量は、2010年時点で世界全体で約2000トンと推計されており [14]、図2-2に示すとおり、零細小規模金採掘（ASGM）、石炭の燃焼、非鉄金属の生産、セメント製造工程からの排出が大半を占めている。特にASGMは、環境保全上の適切な設備がない中、金鉱石から金を取り出すために水銀を加えて加熱する方法（水銀アマルガム法）がとられ、使用された水銀は環境中にほとんどが排出されることから、背景にある貧困や児童労働などの社会問題も伴ってASGMからの水銀排出の削減が大きな課題となっている。

表2-1に水俣条約の主な規定事項を示す。有害廃棄物の越境移動を規制するバーゼル条約や、有機汚染物質（POPs）の製造・使用・排出規制を主眼としたストックホルム条約などのこれまでの有害物質に関する環境条約と異なり、水俣条約は水銀を鉱出から廃棄までライフサイクルを通じて環境上適正に管理しようとしている点が包括的かつ画期的である。水銀の人為的発生源からの環境中への排出を削減すべく、供給規制、使用規制、排出規制が盛り込まれており、今後、市場における水銀の流通は縮小していくことが予想される。ASGMについては、少なくない従事者を抱える国々の事情を考慮



表 2-1 水俣条約の主な規定事項

前文		水銀のリスクの再認識、水俣病の重要な教訓 等
第1条	目的	水銀及び水銀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
第2条	定義	用語の定義
第3条	供給及び貿易	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水銀＝水銀濃度が全重量の95%以上</li> <li>・クロルアルカリ設備の廃棄から生ずる余剰水銀は回収・再利用をさせない。</li> </ul> <p>【水銀の採掘規制】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新規鉱山開発は各締約国の条約発効後禁止。</li> <li>・既存の鉱山からの水銀産出は各締約国における条約発効から15年以内に禁止。</li> </ul> <p>【国際貿易の規制】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・締約国への水銀輸出は、①条約で認められた用途、②環境上適正な暫定保管に限定。</li> <li>・輸入国の書面による事前同意が必要。</li> <li>・非締約国からの水銀輸入は、新規鉱山または塩素アルカリ施設以外の供給源に限定。</li> </ul>
第4条	水銀添加製品	附属書Aに掲げる水銀添加製品（電池、スイッチ、ランプ、農薬、計測機器など）の製造・輸出入の段階的規制（原則2020年までに禁止）、歯科用アマルガムに対する措置の実施。
第5条	製造工程	附属書Bに掲げる製造工程での水銀使用を削減（塩素アルカリ工業2025年まで、アセトアルデヒド製造2018年まで、塩化ビニルモノマー2020年までに半減など）
第6条	適用除外	附属書A及びBに掲げる製造等禁止期限の適用除外の登録
第7条	零細及び小規模の金採掘	<ul style="list-style-type: none"> <li>・零細小規模金採掘（ASGM）における水銀の環境放出を削減。実行可能な場合には廃絶。</li> <li>・行動計画の策定。</li> </ul>
第8条	大気への排出	<ul style="list-style-type: none"> <li>・附属書Dに掲げる発生源（石炭火力発電所、産業用石炭燃焼ボイラー、非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程、廃棄物の焼却設備、セメントクリンカーの製造設備）における大気への排出の規制、排出目録の作成</li> <li>・新施設：条約発効から5年以内にBAT（利用可能な最良の技術）/BEP（環境のための最良の慣行）を義務付け</li> <li>・既存施設：条約発効から10年以内に①排出管理目標、②排出限度値、③BAT/BEP、④水銀の排出管理に効果のある複数汚染物質管理戦略、⑤代替的措置から一つ以上を実施</li> </ul>
第9条	水・土壌への放出	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放出削減の対象となる発生源を特定。</li> <li>・水・土壌への放出の規制（①放出限度値、②BAT/BEP、③水銀の排出管理に効果のある複数汚染物質管理戦略、④代替的措置から一つ以上を実施）、放出目録の作成</li> </ul>
第10条	暫定的保管	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水銀廃棄物以外の水銀及び水銀化合物は、環境上適正に暫定的保管。</li> <li>・締約国会議（COP）は暫定的保管に関する指針を採択</li> </ul>
第11条	水銀廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「水銀廃棄物」とは、①水銀又は水銀化合物から成る物質又は物体、②水銀又は水銀化合物を含む物質又は物体、③水銀又は水銀化合物に汚染された物質又は物体</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>・水銀廃棄物は、バーゼル条約に基づくガイドラインを考慮し、COPが定める必須条件に基づいて、環境上適正に管理。</li> <li>・廃棄物からの水銀回収、リサイクル等は、条約上認められる用途又は環境上適正な処分に限定。</li> <li>・バーゼル条約を遵守した環境上適正な処分以外は水銀廃棄物の越境移動を禁止。</li> </ul>
第12条	汚染サイト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水銀により汚染された場所の同定と評価のための戦略の構築に努める。</li> <li>・汚染サイトの管理のための手引きをCOPで採択。</li> </ul>
第13、14条	資金・技術支援	資金源及び資金メカニズム、技術支援等
第15～22条	普及啓発、研究等	情報交換、公衆の情報・注意喚起と教育、研究・開発とモニタリング、健康的側面、実施計画、報告、有効性の評価

### 2.1.2 我が国の水俣条約への対応

水俣病による甚大な被害を経験したことにより、我が国では水銀対策が早くから進められてきた。塩素アルカリ製造やアセトアルデヒド製造等における水銀を使用しない製造工程への転換や、水銀添加製品の無水銀化・無水銀化の結果、1964年のピーク時には約2,500トンに達した我が国の水銀需要は急減し、近年は10トン程度で推移している（図2-3）。

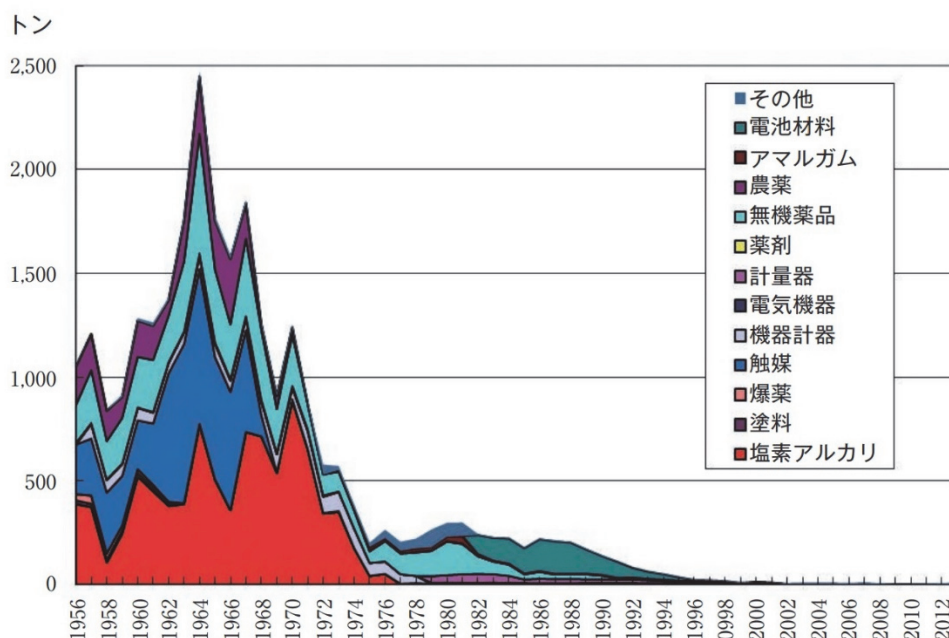


図2-3 我が国における水銀需要の推移 [15]

(出典：資源統計年報・非鉄金属等需給動態統計より環境省作成)

また、環境中への水銀排出規制についても、水質汚濁防止法（昭和 45 年法律第 138 号）及び土壌汚染対策法（平成 14 年法律第 53 号）による水銀排出規制、大気汚染防止法（昭和 43 年法律第 97 号）による水銀排出抑制、廃棄物処理法（昭和 45 年法律第 137 号）による水銀廃棄物の適正処理が既に実施されている。

このため、水俣条約で定められた事項については、鉱出（該当なし）、輸出入規制（規制済み）、水銀使用（製造工程においては転換済み、水銀添加製品については概ね対応済み）、環境中への排出（概ね規制済み）、廃棄（規制済み）と、概ね措置済みの状況であった。図 2-4 に水俣条約と国内担保措置との関係を示す。政府は条約の批准に向けて国内担保措置の検討を進め、2015 年に①既存の法令では規定できない事項について「水銀による環境の汚染の防止に関する法律」（平成 27 年法律第 42 号）を新たに制定し、②大気汚染防止法の改正、③廃棄物処理法下位法令の改正を行った。大気汚染防止法改正は、水銀排出施設に係る届出制度を創設するとともに、水銀排出施設から水銀を大気排出する者に BAT/BEP に基づく排出基準の遵守を義務付けたものである。また、廃棄物処理法政令改正では、既存の最終処分における水銀の溶出基準に加えて、一定程度の水銀を含有する廃棄物や廃金属水銀の処理方法を新たに定めた。これらの国内担保措置が整ったことから、我が国は 2016 年 2 月に条約を締結し、23 番目の締約国となった。

なお、国内担保措置の検討の中で、大きな論点のひとつに、水銀の全面輸出禁止を打ち出すかどうかという点があった。しかし、世界的には水銀の需要は当面見込まれており、一次鉱出からの水銀供給よりも日本のリサイクル水銀による供給の方が環境保全上望ましいとの考え方もあって、水銀の輸出は原則禁止としつつ、ASGM を除く条約で認められた用途への輸出は、エンドユーザーと用途の確認を行った上で認めるという対応方針で決着が図られた。

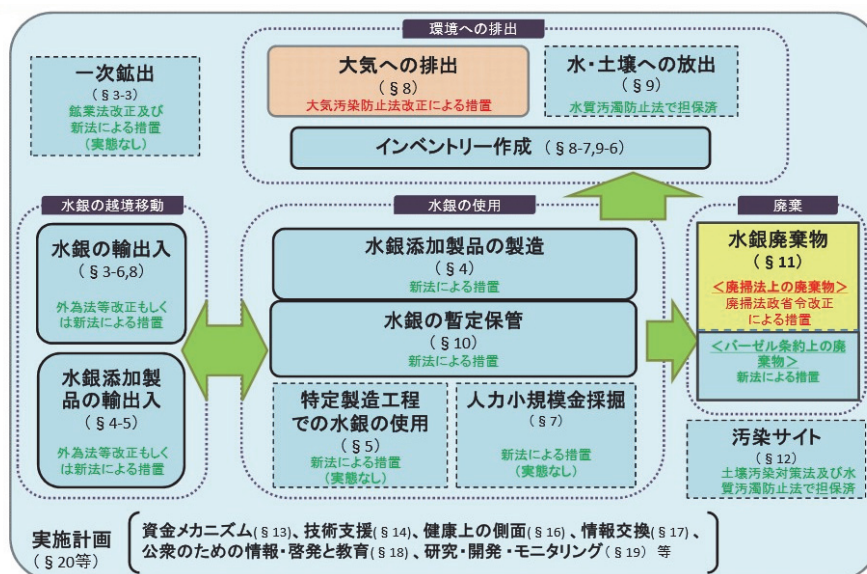


図 2-4 水俣条約と国内担保措置との関係 [16]



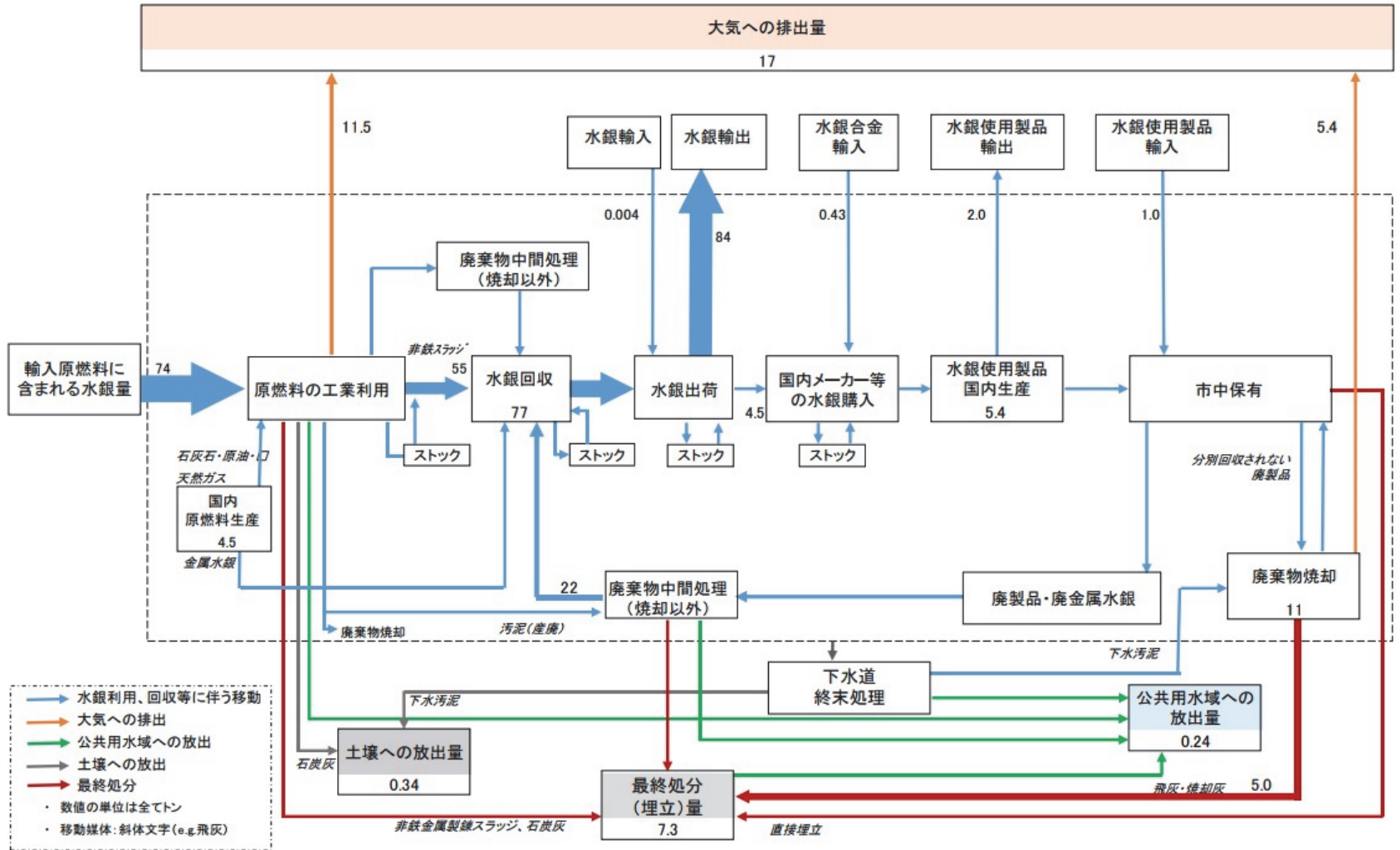
### 2.1.3 我が国における水俣条約の影響

我が国の2010年度と2014年度の水銀マテリアルフロー（図2-5、2-6）[17]によれば、水銀の大部分は原燃料中に不純物として含まれる形で非意図的に輸入され（64～74トン）、主に非鉄金属製錬業等の工業利用過程から排出されている。これら副産物や廃棄物に含まれる水銀は回収・精製され、大半が輸出されている（72～84トン）。

水俣条約を受け、我が国においては、大気中への水銀排出の抑制、水銀使用製品の減少による需要低下、廃製品からの水銀回収の促進等の影響が考えられる。

特筆すべきは、今後、条約による世界的な水銀需要の低下により、回収水銀の輸出を主流とする日本の水銀フローが大きな影響を受ける可能性があるということである。これまで回収水銀は有価物として取り扱われてきたが、水銀需要の低下により、余剰となったものが廃棄物化する事態が将来想定される。これまで日本国内においても、概ね100ppm以下の低濃度の水銀廃棄物は不溶化処理を経て、溶出基準を満たすものは管理型最終処分場に処分されてきたが（図2-7）[18]、今後は、有価で取引されていた高純度の金属水銀の最終処分を行うという、これまでの廃棄物処理制度では想定していなかった対応が求められることとなる。

EUでは2011年3月より、米国では2013年1月より域外への水銀の輸出が禁止され、現在その影響か、市場への水銀供給が低下しつつあり、ECの報告によれば[19]、水銀の市場価格（2011-2013年平均）は規制導入前（2008-2010年平均）の約3倍で取引されている。日本からの水銀輸出については、図2-8に示すとおり年によって輸血量及び価格に変動があるが、欧米の水銀輸出禁止以降、国内の年間水銀回収量を上回る量の輸出が示唆される。2016年の日本からの水銀輸出価格は、1トン当たり平均24,626USドルであったが、今後いつ水銀の需要が供給を下回り、水銀が廃棄物化するか予断を許さない状況にある。



※本マテリアルフローは、現時点で入手可能な統計情報、文献、事業者等へのアンケート・ヒアリング調査結果等に基づき算出・推計した値を用いて作成しており、全ての使用量、排出、移動量等を網羅したものではない。

※図は2014年度の単年度における各ステージの水銀量を表したものであり、個別の水銀のライフサイクルにわたる動きを表したものではない。

図 2-5 我が国の水銀に関するマテリアルフロー (2014 年度ベース) 2017 年 6 月版 [17]



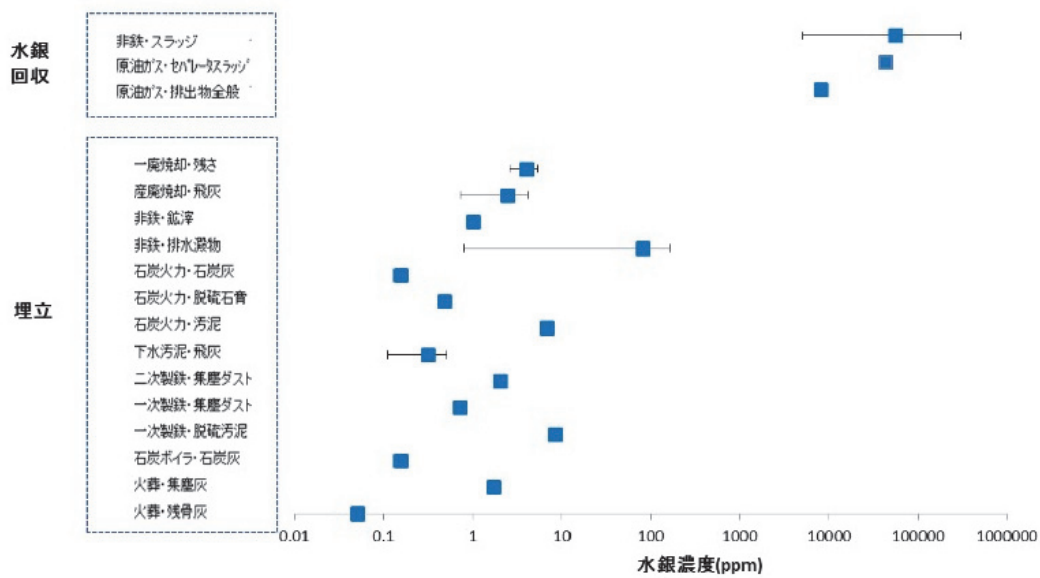


図 2-7 水銀回収又は埋立処分される水銀汚染物の水銀濃度<sup>[18]</sup>

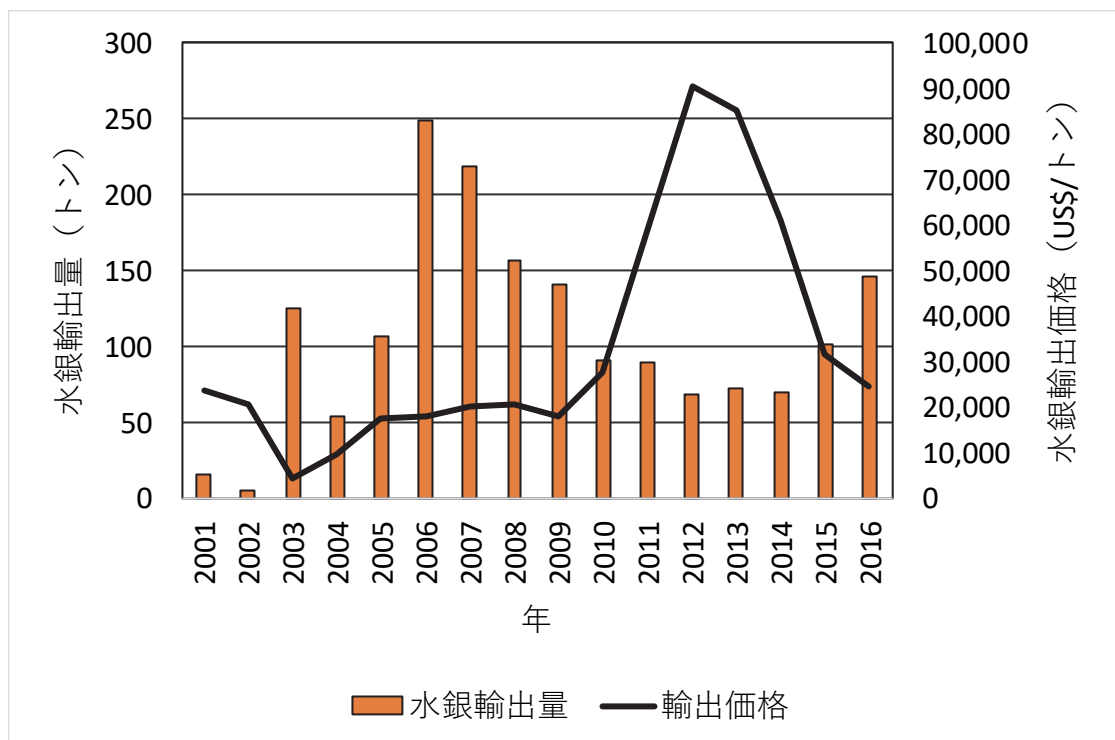


図 2-8 日本からの水銀輸出量と輸出価格の推移

(出典：UNcometrade<sup>[20]</sup>の HS コード 280540 (水銀) より算出して筆者作成)

## 2.2 有害廃棄物の最終処分制度における問題

### 2.2.1 我が国における水銀廃棄物の最終処分制度

水俣条約では、「水銀廃棄物」を①水銀又は水銀化合物から成る物質又は物体、②水銀又は水銀化合物を含む物質又は物体、③水銀又は水銀化合物に汚染された物質又は物体、と3つの分類で定義している（第11条）。これらのうち、条約では有価で取引されリサイクルされるものも含めて「水銀廃棄物」に該当するが、我が国においては、廃棄物処理法上のいわゆる不要物に該当するものが廃棄物処理法に基づき処分される。表2-2に廃棄物処理法上の分類を整理した。

我が国では、廃棄物処理法において、重金属等の有害物質を含む廃棄物は、埋立処分に係る判定基準に基づき、基本的には、有害物質の溶出量が基準値以下のものは管理型最終処分場、溶出基準を超過するものは遮断型最終処分場に最終処分を行うこととなっている（図2-9）。水銀を含む廃棄物については、水銀の溶出基準が0.005mg/L（アルキル水銀化合物は検出されないこと。）と、諸外国と比しても厳しい基準が課せられている。

表 2-2 水俣条約と廃棄物処理法の水銀廃棄物の分類

水俣条約の分類	廃棄物処理法の分類	対象となる水銀廃棄物
水銀又は水銀化合物から成る物質又は物体（廃金属水銀等）	廃水銀等 （特別管理一般廃棄物、又は特別管理産業廃棄物）  ＊令第1条第1の2号、規則第1条第1項、令第2条の4第5号ニ、規則第1条の2第5項、規則別表第1	① 以下の施設において生じた廃水銀又は廃水銀化合物（水銀使用製品産業廃棄物を除く） <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水銀若しくは化合物が含まれている物又は水銀使用製品廃棄物から水銀を回収する施設</li> <li>2. 水銀使用製品の製造の用に供する施設</li> <li>3. 灯台の回転装置が備え付けられた施設</li> <li>4. 水銀を媒体とする測定機器を有する施設</li> <li>5. 国又は地方公共団体の試験研究機関</li> <li>6. 大学及びその附属試験研究機関</li> <li>7. 試験研究を行う研究所</li> <li>8. 専門教育を行う高等学校、高等専門学校、専修学校、各種学校、職員訓練施設又は職業訓練施設</li> <li>9. 保健所</li> <li>10. 検疫所</li> <li>11. 動物検疫所</li> <li>12. 植物防疫所</li> <li>13. 家畜保健衛生所</li> <li>14. 検査業に属する施設</li> <li>15. 商品検査業に属する施設</li> <li>16. 臨床検査業に属する施設</li> <li>17. 犯罪鑑識施設</li> </ol> ② 水銀若しくはその化合物が含まれている物（一般廃棄物を除く。）又は水銀使用製品が産業廃棄物となったものから回収した廃水銀

水銀又は水銀化合物を含む物質又は物体(水銀使用製品)	一般廃棄物	家庭から排出されるランプ、体温計等
	水銀使用製品産業廃棄物 *令第6条第1項第1号ロ、規則第7条の2の4	水銀使用製品が産業廃棄物となったもの(電池、ランプ、スイッチ及びリレー、農薬、計測機器等) ①「新用途水銀使用製品の製造等に関する命令(平成27年内閣府・総務省・財務省・文部科学省・厚生労働省・農林水産省・経済産業省・国土交通省・環境省令第2号)」第2条第1号又は第3号に該当する水銀使用製品 ②①を材料又は部品として用いて製造される水銀使用製品(一部除く。) ③①②のほか、水銀又はその化合物の使用に関する表示がされている水銀使用製品
水銀又は水銀化合物に汚染された物質又は物体(水銀汚染物)	一般廃棄物又は特別管理一般廃棄物 *令第1条第2号、令第5条第1項	一般廃棄物焼却施設で生じる水銀を含むばいじん等
	特別管理産業廃棄物 *令第2条の4第5号へ、チ、ル、判定基準省令	①鉱さい、ばいじん、汚泥、それらの処理物、廃酸・廃アルカリの処理物であって溶出試験において水銀濃度が0.005mg/Lを超過したもの。 ②廃酸・廃アルカリであって水銀濃度が0.05mg/Lを超過したもの。
	水銀含有ばいじん等 *令第6条第1項第2号ホ、規則第7条の8の2	水銀又はその化合物が含まれているばいじん、燃え殻、汚泥、廃酸、廃アルカリ又は鉱さいであって、水銀又はその化合物中の水銀をその重量の15mg/kg(廃酸、廃アルカリの場合は15mg/L)を超えて含有するもの(特別管理産業廃棄物を除く。)

注) 「令」：廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令(昭和46年政令第300号)  
「規則」：廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行規則(昭和46年厚生省令第35号)  
「判定基準省令」：金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令(昭和48年2月17日総理府令第5号)

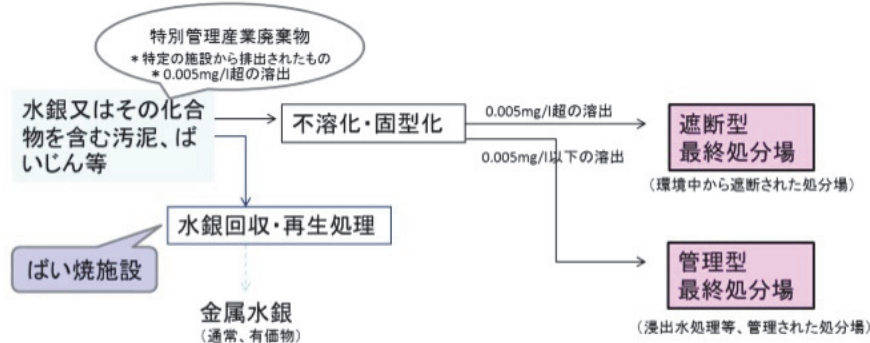


図 2-9 水銀を含む廃棄物の処理フロー(現行)

前述のとおり、これまで水銀は有用な金属として有価で取引されていたことから、回収への経済的インセンティブが働き、水銀使用製品や水銀汚染物から水銀が回収され、水銀濃度の低い廃棄物のみが不溶化処理を経て最終処分されてきた。しかし、水俣条約を受けて、今後、水銀需要は低下していく見込みであり、回収水銀が余剰となれば、廃水銀等を最終処分しなければならない事態が想定される。このため、廃水銀等の処理に関しては、2015年の廃棄物処理法政省令改正により、水銀を精製し、硫化して硫化水銀として安定化させた後、硫黄ポリマーによって固型化するという中間処理方法及び、処理物からの水銀の溶出濃度が0.005mg/l以下であれば管理型最終処分場、超過すれば遮断型最終処分場という処理方策が従来の制度的枠組みの延長上に示された。

また、水銀を安定した硫化水銀に変換するためには、高純度の水銀である必要があることがこれまでの試験結果から得られたことから[18]、水銀を0.1%以上含むばいじん、汚泥等の水銀汚染物からの水銀回収が世界に先駆けて義務付けられた。さらに、廃水銀等処理物の長期的な安定性については、前例のない処分方法であり実環境での確認ができないことから、管理型最終処分場に処分するにあたっては、入念的に、雨水浸入防止措置や他の廃棄物との混合理立の禁止措置などが上乘せして規定された。廃水銀等の処分に関連して新たに規定された基準を表2-3に示す。

廃水銀等の処理費用については、2014年に環境省<sup>[21]</sup>が試算した現行からの追加費用を表2-4に示す。中間処理として定められた黒色硫化水銀+硫黄ポリマーによる固型化の処理費用は、330円/kg・Hgであった。

表 2-3 廃水銀等の処分に関連する新規設定基準

<p>水銀使用製品からの水銀回収義務</p> <p>*令第6条第1項第2号ホ、規則第7条の8の3</p>	<p>以下の水銀使用製品産業廃棄物は、あらかじめ水銀を回収すること。</p> <p>スイッチ及びリレー、気圧計、湿度計、液柱形圧力計、弾性圧力計、圧力伝送器、真空計、ガラス製温度計、水銀充填圧力式温度計、水銀体温計、水銀式血圧計、灯台の回転装置、水銀トリム・ヒール調整装置、差圧式流量計、浮ひょう形密度計、傾斜計、積算時間計、ひずみゲージ式センサ、電量計、ジャイロコンパス、握力計</p>
<p>水銀汚染物からの水銀回収義務</p> <p>*令第6条第1項第2号ホ(2)、規則第7条の8の3第2号、令第6条の5第1項第2号チ、規則第8条の10の3の2</p>	<p>水銀含有ばいじん等又は特別管理産業廃棄物であって、水銀を1,000mg/kg（廃酸又は廃アルカリの場合は1,000mg/L）以上含有するものを処分する場合は、あらかじめ水銀を回収すること。</p>
<p>廃水銀等の中間処理基準</p> <p>*令第4条の2第2号ロ、令第6条の5第1項第3号ル、</p>	<p>廃水銀等を処分する場合は、硫化・固型化すること。</p> <p>【硫化】</p> <p>①あらかじめ廃水銀等を精製すること</p>

<p>194 号告示、昭和 52 年環境庁告示第 5 号</p>	<p>②精製した水銀の純度は、それを蒸留した際の留出物が重量の 99.9%以上、若しくは、残留物が 0.1%以下、又はこれらと同等以上  ③混合する硫黄と水銀とのモル比 (S/Hg) が 1.05 以上 1.1 以下  ④硫化に用いる硫黄は粉末状で、純度は 99.9%以上  【固型化】  ①硫化水銀を固型化すること  ②結合材は改質硫黄で、配合量は硫化水銀 1 kg 当たり 1 kg 以上  ③固型化物の強度は、埋立処分を行う際における一軸圧縮強度が 0.98MPa 以上  ④固型化物の形状及び大きさは、体積と表面積との比が 1 以上、最大寸法と最小寸法との比が 2 以下、最小寸法が 5cm 以上</p>
<p>廃水銀等処理物の埋立基準   *令第 3 条第 3 号ヌ(1)、令第 6 条の 5 第 1 項第 3 号ヲ(1)、令第 3 条第 3 号ヌ(2)(3)、令第 6 条の 5 第 1 項第 3 号ロ、ハ、規則第 1 条の 7 の 5 の 2、判定基準省令、令第 3 条第 3 号ヌ(2)、令第 6 条の 5 第 1 項第 3 号ロ、令第 3 条第 3 号ヌ(3)、令第 6 条の 5 第 1 項第 3 号ヲ(2)、規則第 1 条の 7 の 5 の 3、規則第 8 条の 12 の 3、最終処分基準省令</p>	<p>(1)水面埋立処分しないこと。  (2)廃水銀等処理物の溶出試験の結果が埋立判定基準を満たさない場合は、遮断型最終処分場で処分すること。埋立判定基準を満たす場合は、追加的措置をとった管理型最終処分場で処分することができる。  (3)管理型最終処分場に埋立処分する場合は、従来の処分基準に加え、次のように埋立処分すること。  ①最終処分場のうちの一定の場所において、埋め立てる廃水銀等処理物が分散しないように行うこと。  ②その他の廃棄物と混合するおそれのないように他の廃棄物と区分すること。  ③埋め立てる廃水銀等処理物が流出しないように必要な措置を講ずること。  ④埋め立てる廃水銀等処理物に雨水が浸入しないように必要な措置を講ずること。</p>
<p>最終処分場の維持管理基準  *最終処分基準省令</p>	<p>埋め立てる処理物についての記録及び埋立位置を示す図面を処分場の廃止までの間、保存すること。</p>
<p>最終処分場の廃止基準  *最終処分基準省令</p>	<p>埋め立てた処理物に雨水が浸入しないように必要な措置を講ずること。</p>
<p>最終処分場廃止後の形質変更の制限   *規則第 12 条の 40</p>	<p>廃水銀等処理物が地下にあることが指定区域台帳から明らかな場合の土地の形質の変更にあたっては、通常基準に加え、土地の形質の変更により水銀の溶出による生活環境の保全上の支障が生ずるおそれがないよう必要な措置を講ずること。</p>

注) 「令」：廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令 (昭和 46 年政令第 300 号)

「規則」：廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行規則 (昭和 46 年厚生省令第 35 号)

「判定基準省令」：金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令 (昭和 48 年 2 月 17 日総理府令第 5 号)

「最終処分基準省令」：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令 (昭和 52 年総理府厚生省令第 1 号)

「194 号告示」：特別管理一般廃棄物及び特別管理産業廃棄物の処分又は再生の方法として環境大臣が定める方法 (平成 4 年厚生省告示第 194 号)



表 2-4 金属水銀 1 トン当たりの処理費用の変化

処理方法	硫化+固型化 (管理型)	硫化+固型化 (遮断型)	金属水銀+容器 (遮断型)	硫化+容器 (遮断型)
追加費用	+約 29 万円	+約 81 万円	+約 76 万円	+約 93 万円

注) ・収集運搬費用、最終処分場における上乗せ規制は考慮していない。  
 ・埋立期間を 50 年、管理型最終処分場は 34,000m<sup>3</sup>、遮断型最終処分場は 412.5m<sup>3</sup>を 6 か所で計算。  
 ・容器保管は、ステンレス製ドラム缶の 2 段積みを想定。

(出典：環境省試算結果<sup>[21]</sup>より筆者作成)

## 2.2.2 最終処分場の埋立終了後の維持管理のリスク

近年のリサイクルの進展により、循環型社会形成推進基本法の制定された 2000 年度と比べて現在の最終処分される産業廃棄物量は 2 割程度になるなど<sup>[22]</sup>、埋立量は大きく減少しており、最終処分場における埋立廃棄物はリサイクルが困難な廃棄物として有害物質を含む汚泥や燃え殻等の割合が増加していると考えられる。このため、廃水銀等の処理物のように、埋立廃棄物の質の変化に伴い、従来の制度設計では有害廃棄物による潜在的な環境リスクに長期的には対応できない恐れがある。

我が国における有害廃棄物の処理方法は、溶出基準を満たすように中間処理を行い、管理型最終処分場に埋立処分されるのが一般的である。1977 年に廃棄物最終処分場の技術上の基準（構造基準、管理基準）が定められ、管理型最終処分場においては、遮水工の設置や放流水の水質基準を満たされるよう浸出水の処理が義務付けられた。これにより、埋立地から浸出する有害物質による水域や土壌、地下水への汚染が引き起こされないよう処分場の管理が行われている。最終処分場の主流である管理型最終処分場は、いずれ処分場が「安定化」するとの前提の下、処分場からの浸出水の有害物質濃度が処分場の廃止基準を満たせば、廃止できる（管理が不要となる）制度設計になっている。

しかし、こうした処分場の埋立終了後の長期にわたる管理については、小林<sup>[23]</sup>は、制度上、以下のような問題点を指摘している。

- ・ 「廃止」の意味が明確でない。
- ・ 埋立終了から廃止までにどの位の期間が必要か予測できる状態になっていないため、どのくらいの管理費用が必要になるか不明である。
- ・ 廃止によって排出事業者の責任はなくなるのか、廃止後であっても埋めたものによる問題が発生すれば排出事業者の責任を追及できるのか明確ではない。
- ・ 基準等が変わり、追加的な措置が必要になったときの責任と経費負担に関する手当てがなされていない。
- ・ 処分場の管理放棄や管理者不在のケースは深刻であり、埋立終了後、長期にわたり管理を要する処分場を安定的に維持管理するための管理主体のあり方と費用負担の検討が必要である。

廃棄物最終処分場においては、埋立が終了した後も、処分場が安定化し、施設の廃止が認められるまで、浸出水の処理等、継続して維持管理が必要である。廃棄物の最終処分場が適正に管理されなければ、有害物質による土壤汚染や地下水汚染など環境が汚染され、環境修復には莫大な費用と何十年もの歳月がかかることになる。

このため、埋立が終了し、収入がなくなった後の処分場管理に必要な費用を確保するため、廃棄物処理法第8条の5第1項（第15条の2の4において準用する場合を含む）の規定により、最終処分場の設置者は、埋立が終了するまでの間に、施設の廃止までの維持管理費用を積み立てることとされている。積立金額は、毎年度、都道府県知事が事業者からの報告に基づき算定し、処分場設置事業者は通知された金額を独立行政法人環境再生保全機構に積み立てることとされている。埋立終了後は、事業者からの請求に基づき維持管理に必要な金額が支払われる制度である。維持管理費用の積み立てと取り戻しの推移を図2-10に示す<sup>[24]</sup>。しかし、積立金額の算出に当たっては、埋立終了から廃止までの期間（維持管理年数）をどう見積もるかが重要となるが、環境省の維持管理費用算定ガイドライン<sup>[25]</sup>に示された情報は限られており、積立額の妥当性が判断できない状況にある。廃止までの期間が予測よりも長期化すれば、積立金が不足し、処分場の管理ができなくなることで、処分場を汚染源とした環境汚染が懸念される。

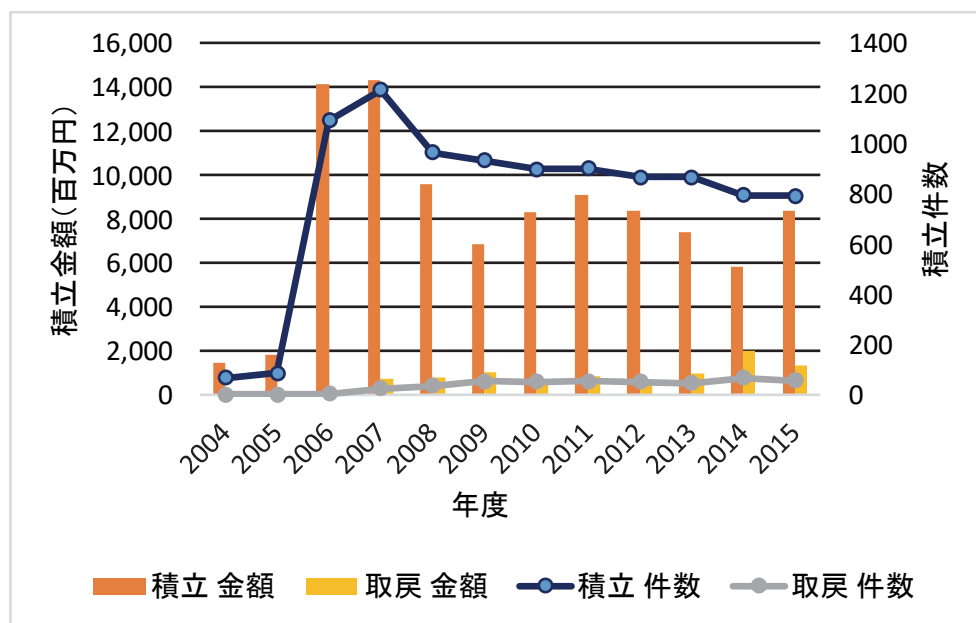


図 2-10 維持管理積立金の積み立てと取り戻しの推移

(出典：独立行政法人環境再生機構の報告<sup>[24]</sup>より筆者作成)

ヨーロッパの廃棄物処分場指令<sup>[26]</sup>や米国の資源回収保全法<sup>[27]</sup>では、有害廃棄物の処分場は埋立終了後から少なくとも30年は管理が必要とされているが、日本の場合は、早ければ2年で廃止することが可能である。実際、筆者の実施したアンケート調査（第5章にて後述する。）によれば、埋立終了から廃止までの期間の事業者見込みは平均13.1年（n=159）と、30年に比べれば半分以下の短さであった。しかし、時間が経てば分解

される有機物と異なり、水銀のような有害物質は分解されることはなく、未来永劫存在し続ける。こうした有害物質の「安定化」とは、いわゆる「洗い流し」が実情であって、浸出液中の有害物質濃度が基準値以下になるまで、雨水や散水によって有害物質を埋立地から洗い流すというものである。

水銀の硫化処理技術は一定の用途がきつ々あるものの、その超長期的な安定性は確認できないため、処分場廃止後に水銀が溶出する潜在的な環境リスクが指摘されている。2017年6月に公布された改正廃棄物処理法施行規則に定める雨水浸入防止や専用埋立等の上乗せの埋立基準により、処理物から水銀が溶出することは直ちには考えにくい。逆に、処分場の廃止後、管理する者が不在の状況下で、一般環境から隔離されていた埋立地の条件が破られた場合、水銀処理物は雨水にさらされ、長期的に見れば環境への漏出のリスクを抱える。

万が一、水銀が溶出した場合、高橋ら<sup>[28]</sup>の水銀環境動態モデルによる試算では、埋立地から水銀が漏出し、人への健康被害が出るリスク顕在化時間は約1400年である。廃棄物最終処分場の管理はこの30年ほどで制度が整備されたものであり、千年単位でのスパンでの管理は視野になかったと言えよう。今後は、有害物質を封じ込めた埋立地の廃止後の管理をも視野に入れた対策の検討が求められる。

### 2.2.3 民間事業者による永続的管理のリスク

上記では、廃棄物最終処分場の主流である管理型最終処分場における課題を述べたが、続いて、溶出基準を超過した有害廃棄物が処分される遮断型最終処分場の課題を検討する。こうした有害廃棄物は漏水が環境上重大な問題を起こし得ることから、遮断型最終処分場は、コンクリートの壁に囲まれ、環境から遮断された構造の処分場である。雨水も遮断されているため、水処理が不要であり、管理が行いやすいという利点がある。ただし、遮断型最終処分場は、処分場の具体的な廃止基準が定められておらず、安全ではない有害廃棄物（管理が必要）を事実上長期保管しておくための例外的な処分方法と言える。田中<sup>[3]</sup>によれば、最終処分は、土中に廃棄物を保管する間に有限の時間で安定化し、その容器構造が破壊されても問題がない時期がいずれ来る土壌還元でなければならないが、遮断型処分場は保管という意味で完全であるが、安定化される可能性は乏しく、永久に管理し続けなければならない一時厳重保管場所である。このため、半永久的な保管義務を民間事業者課している不安定な制度という課題がある。事業者の倒産等により不適切な管理状況で放置された場合、有害廃棄物による環境リスクは大きい<sup>[4]</sup>。

また、特に有害な廃棄物を扱う遮断型最終処分場は、設置への周辺住民の理解が得にくく、新規設置が非常に厳しい状況にある。2017年の環境省の報告<sup>[29]</sup>によれば、遮断型最終処分場の設置数は、2015年4月1日現在、16（自社処分場を除く。）と限られており、実際に稼働している処分場は数えるほどしかない。図2-10に遮断型最終処分場の残余容量の推移を示すが、残余容量は処理業者で約7千m<sup>3</sup>と限られている<sup>[29]</sup>。このため、継続的に発生する産業廃棄物の最終処分先として十分な容量が見込めず、処分先を遮断型最終処分場に限定するという政策は、現実にはとりづらい状況にある。

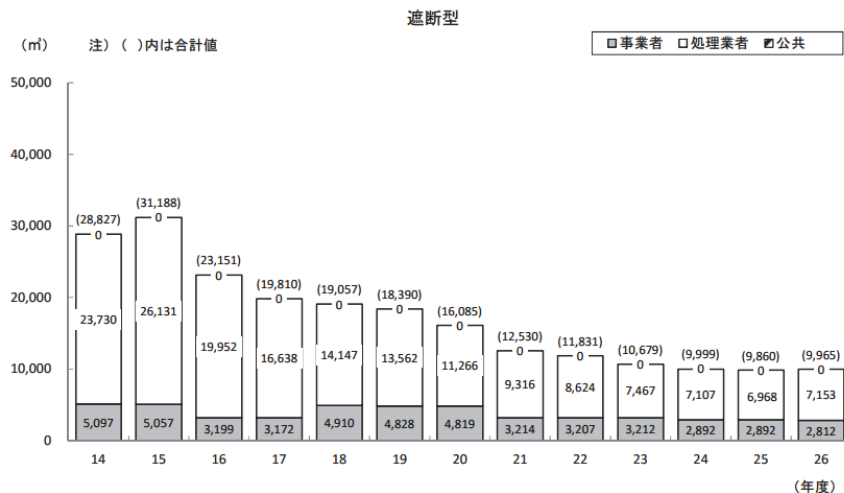


図 2-11 遮断型最終処分場の残余容量の推移<sup>[29]</sup>

## 2.3 欧米における廃水銀の処分

### 2.3.1 EUにおける廃水銀の規制

EUでは、2008年10月に、「Regulation (EC) No 1102/2008 on the banning of exports of metallic mercury and certain mercury compounds and mixtures and the safe storage of metallic mercury」(「金属水銀並びに水銀化合物及び混合物の輸出禁止並びに金属水銀の安全な保管に関する規則」(以下、水銀輸出禁止規則という。))<sup>[30]</sup>を採択した。この規制の背景には、当時のEU域内には、水銀法を採用していたクロロアルカリ工業において、金属水銀が12,000~15,000トンほど存在しており、これらが今後、水銀セルの廃止・解体される際に大量に世界の水銀市場に放出される事態への危機感があった<sup>[31]</sup>。大量の水銀が途上国に流れ込めば、ASGM用途等により、環境汚染や健康問題が懸念されるとともに、長期的には、大気汚染や食物連鎖による水銀濃縮の結果としての健康被害という形で地球的規模に影響があり得る。これに対処するために、欧州委員会は、2005年に水銀に関するEUの方針として政策文書「水銀に関する欧州共同体戦略」<sup>[32]</sup>を発表し、2006年から水銀輸出禁止に関する規則案が理事会及び欧州議会で審議された。水銀輸出禁止規則の主な内容は以下のとおりである。

- 水銀の域外輸出禁止 (第1条)  
2011年3月15日以降、EU域外への水銀の輸出を禁止する。対象は、金属水銀、辰砂、塩化第一水銀、酸化第二水銀、水銀の重量濃度95%以上の混合物である。ただし、研究開発、医療又は分析の用に供する水銀化合物は輸出禁止の適用除外。
- クロロアルカリ工業等由来の水銀の廃棄物指定 (第2条)  
クロロアルカリ工業、天然ガス精製、非鉄金属製造業、辰砂由来の金属水銀は、廃棄物に関する指令2006/12/ECで定める廃棄物とみなし、指令に従って処分しなければならない。

- 保管(storage)方法 (第 3 条)

廃棄物となった金属水銀は、次の方法で封じ込める：(a)岩塩坑かそれと同等の安全性を示す地中深く(deep underground)の硬い岩盤層(hard rock formations)中に、一年を超える暫定期間又は永続的に保管(処分)する、又は、(b)金属水銀の暫定保管のために装備された地上の施設に、一年を超える暫定期間保管する。

- 水銀保管量の報告 (第 6 条)

塩素アルカリ工業、天然ガス精製業、非鉄金属製造業は、水銀の使用量及び施設保管量(又は、水銀発生量)、搬送量と搬送先の情報を毎年報告し、欧州委員会はこれを公表する。

なお、埋立地への廃棄物の受入れ基準は、廃棄物埋立指令(1999/31/EC)<sup>[26]</sup>に規定されており、2011年の理事会指令(2011/97/EU)により、金属水銀の暫定保管の基準を追加したが、第 3 条第 1 項(a)で規定された金属水銀の最終処分(final disposal operation)の方法は、知見が不足しているとして規定されなかった。

その後、2013年の水俣条約の採択を受け、EUにおいても条約批准に向けた域内制度の検討が行われ、2017年5月に、規則(EU)2017/852<sup>[33]</sup>により水銀輸出禁止規則を改正した上で、同月18日に水俣条約を締結した。本改正で注目すべき点は、金属水銀の最終処分基準が規定されたことにある(第13条第3項)。新規則において、水銀廃棄物の廃棄に関する規定は第4章に定められており、概要は以下のとおりである。

- 廃棄物 (第 11 条)

クロロアルカリ工業、天然ガス精製、非鉄金属製造業、辰砂由来の水銀及び水銀化合物は、純粋か混合物かは問わず廃棄物とみなし、廃棄物枠組み指令2008/98/EC<sup>[34]</sup>で定める廃棄物として、水銀回収につながらないように、処分しなければならない。

- 大規模発生源の報告(第 12 条)

クロロアルカリ工業、天然ガス精製業、非鉄金属製造業の事業者は、自社施設内に保管している水銀廃棄物量、保管・処理施設への搬送量と搬送先の詳細情報、保管・処理業者が発行した証明書(certificate)の写しを各国の当局に毎年提出する。

- 水銀廃棄物の保管 (storage of mercury waste) (第 13 条)

—2023年1月1日まで、金属水銀は、廃棄物埋立指令(1999/31/EC)に定める水銀廃棄物の暫定保管に係る規定に従い、暫定保管のために装備された地上施設に、液状で暫定的に保管される。ただし、欧州委員会は、暫定保管の期間を3年間まで延長することができる。

—永久廃棄(permanently disposed of)に先立って、水銀廃棄物は転換(conversion)されなければならない。地上施設に永久廃棄する場合は、転換と固型化(solidification)されなければならない。永久廃棄は、有害廃棄物処分の許可をもつ次の永久保管施設に限る。：(a)岩塩坑かそれと同等又はそれ以上の安全性と封じ込め性(confinement)を示す地中深くの硬い岩盤層中、又は(b)岩塩坑と同等又はそれ以上の安全性と封じ込め性を示す水銀廃棄物の永久廃棄のために装備された地上施設

—永久廃棄施設の事業者は、水銀廃棄物の処理物は他の廃棄物と分けて保管し、保管室は廃棄ごとに封印(sealed)しなければならない。

なお、新規則でいう水銀廃棄物”mercury waste”は、金属水銀の廃棄物と定義されており（第2条(5)）、水俣条約の水銀廃棄物の定義より狭義であることに注意が必要である。EUにおいては、規則（Regulation）は発効同時に加盟国においても直接効力をもつため、2018年1月1日より当該規定は施行される。

欧州委員会の水俣条約の法令担当者によれば（Appendix II 参照）、永久廃棄処分の基準は、2008年時点では各国の合意が得られず、制定できなかったとのことである。また、当時は岩塩坑に液状の金属水銀の処分を認めるかで大きな議論があったが、今次改正により、液状での暫定保管には5年間の猶予期限が設けられ、基本的に、水銀廃棄物は、安定化処理を行った上で永久廃棄を求めることになった。第13条の“conversion”はいわゆる硫化・安定化のことである。永久廃棄先として、(b)地上であっても岩塩坑と同等の安全性が認められたものが挙げられているが、同等かどうかの判断は各国に委ねられており、EU内に(a)のような岩塩坑をもつ国はドイツなどに限られているため、加盟国の異なる事情によりこのような記載となったとのことである。ヒアリングの結果、スウェーデン環境エネルギー庁の担当者は、硬質岩盤層への処分が最も安全との考えであったが、反対に、スペイン環境省の担当者は、地中深くの永久処分は、事故があったときに取り返しがつかず、信用ができないため、地上で監視するのが安全との考えであり、加盟国によって考え方が異なる。

日本では、非鉄金属製錬業における副産物からの回収水銀が水銀の最大の発生源であるが、EUにおいては、こうした水銀含有汚泥は“mercury waste”に該当せず、水銀を回収するインセンティブはないため、通常有害廃棄物として、埋立指令に基づき最終処分が行われている。改正水銀輸出禁止法の第12条に基づき、大規模水銀排出事業者には水銀処理量の報告義務が課せられているが、図2-12に示すとおり、近年、水銀処理量は10トン未満であり、水銀回収は積極的には行われていないことがうかがえる。

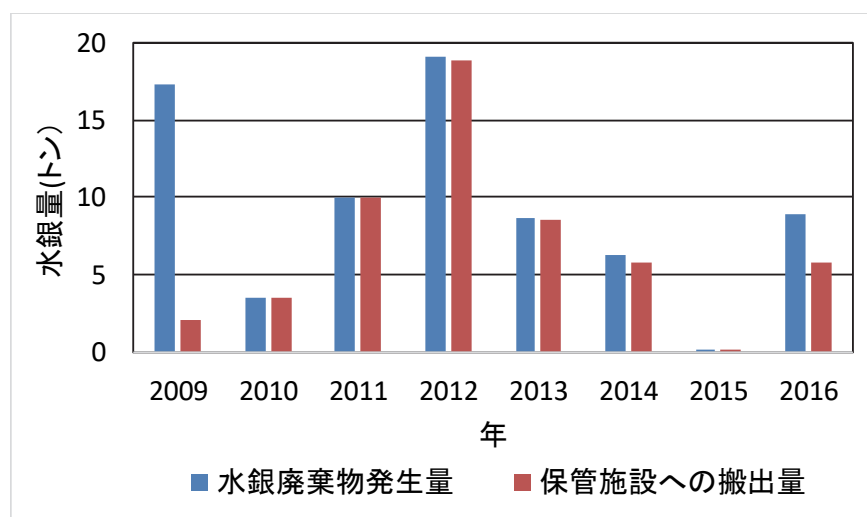


図2-12 EUにおける天然ガス精製・非鉄金属製造業における水銀処理量  
 (出典：事業者報告データ<sup>[35]</sup>より筆者作成)

## ○実施体制

EUにおいては、水銀輸出規制の動機ともなったクロロアルカリ工業が抱える大量の水銀ストックの処分が最大の関心事である。欧州委員会の担当者によれば、クロロアルカリ業界は、自社での水銀保管を嫌がり、早期の永久廃棄を希望しているとのことである。このため、EU域内の処分体制が整えば、ストックされている水銀は最終処分に向かうとの見込みである。しかし、永久廃棄基準は決まったものの、まだ実施能力が不足しており、暫定保管が認められている2023年までに能力拡充に努めるとのことであった。

欧州においても、水銀の硫化処理をできる事業者は限られており、実質2社(ドイツとスイス)である。スウェーデンとスペイン当局の水銀廃棄物担当者と事業者ヒアリングの結果から、ヨーロッパにおける水銀廃棄物処理事業者の状況を表2-5にまとめる。

欧州委員会の2015年の水銀輸出禁止規則の影響評価報告書<sup>[9]</sup>においては、金属水銀を容器に入れて岩塩坑に保管する場合、運搬費用を除いて水銀1トン当たり900～2,000ユーロ、前処理して永久保管する場合、水銀1トン当たり最低2,000ユーロと試算されている。

表 2-5 ヨーロッパにおける水銀廃棄物の主な処理事業者

種別	事業者名	概要
硫化	REMONDIS	ドイツ、水銀の違法な横流し事件により倒産した水銀処理大手のDELA社の後継。最終処分はK+Sに搬送
処分場	K+S	ドイツ、岩塩坑会社 受入れ基準：①有毒ガスが発生しない(→2重梱包すればOK)、②引火性がないこと。溶出試験は不要。
硫化	BATREC	スイス、元は乾電池の処理工場、2016年より硫化事業を開始、湿式処理で廃水銀1200t/年の処理能力 最終処分はドイツのK+Sに搬送(1,000ドル/t-Hg程度) 水銀販売は、歯科用アマルガム、試薬、ランプ用途。年間20トン程度。エンドユーザーを確認。25ドル/kgで売却。 硫化費用は5ドル/kg-Hg(コンテナ代、レポート代、最終処分代含む。スイスまでの輸送代は別)
硫化	ECON	ドイツ、DELAから独立、可動式処理装置を開発(実用化はまだ)
硫化	MAYASA	スペイン、旧水銀鉱山 環境当局の許可はあるが、稼働はまだしていない 経済悪化により水銀事業を行わない可能性がある
処分場	BOLIDEN	スウェーデン、非鉄金属製造事業者、自社処分場を硬質岩盤層に建設中、他国からは受け入れない

### 2.3.2 アメリカにおける廃水銀の規制

アメリカにおいても、国内外の市場への金属水銀の供給を制限するため、2008年10月に Mercury Export Ban Act of 2008（水銀輸出禁止法）<sup>[36]</sup>が制定され、連邦政府は管轄下の水銀の移動、売却、配布、輸出を禁止し、エネルギー省（DOE）が国内の金属水銀の長期保管施設を指定することとされた（2013年1月1日施行）。アメリカの水銀ストックの特徴としては、戦略物質として国防省とエネルギー省が最大の保有者であることが挙げられる。このため、水銀の長期管理に関しては、国自らが保管施設を指定、管理することとされた。長期保管に係る主な規定（第5セクション）は以下のとおりである。

- 長期保管施設の指定(a)  
エネルギー省長官が2010年1月1日までに米国内で発生する金属水銀の長期管理・保管の施設を指定する。2013年1月1日までに当該施設を稼働させ、長期保管目的の水銀を受け入れる。
- 費用(b)  
エネルギー省は水銀保管希望者から水銀搬送時に管理費用を徴収する。管理費用は、施設の稼働及びメンテナンス、セキュリティー、監視、報告、人材、管理、検査、訓練、防火、閉鎖及びその他適用される法律を遵守するために必要な費用が含まれ、2012年10月1日までに公開し、毎年見直す。
- 施設の管理基準(d)  
2009年10月1日までに、エネルギー省は、環境保護庁（EPA）や関係省庁と協議の上、保管の手順や基準等に関する長期保管プログラムの利用者向けのガイドラインを策定する。また、当該施設には、Solid Waste Disposal Act（固体廃棄物処分法）の規定も適用される。
- 調査(h)  
2014年7月1日までに、エネルギー省は、環境保護庁と協議の上、長期保管プログラムの影響について評価し、議会に報告する。

なお、米国における長期保管は、最終的な処分方法が決まるまでの保管という位置づけであり、施設立地選定のための環境影響評価書（EIS）では保管期間を40年として評価している<sup>[37]</sup>。DOEは、2011年と2013年の補足EISにおいて、水銀長期保管施設の候補地をDOEの施設を中心に10か所提示し、住民説明会やパブリックコメントも行っているが<sup>[38]</sup>、未だ指定には至っていない。Giannotto et.al.<sup>[39]</sup>によれば、2013年9月に、DOEはテキサス州 Andrews 近くの Waste Control Specialists, LLC（低レベル放射性廃棄物の処分許可を保有する企業）を最終候補地として特定したとのことであるが、今後の指定の見通しは不透明である。このため、DOEが水銀保管施設として要件を満たしていると認めた8か所の廃棄物処理施設において、DOEの長期保管施設が稼働するまでの間、暫定的な保管が行われている<sup>[40]</sup>。このように、水銀廃棄物への対応は進んでいないが、水銀の環境上適正な暫定保管に係る条約上の対応はできていると解し、水俣条約を2013年11月6日に批准し、最初の締約国となった。



表 2-6 の廃水銀インベントリーに示すとおり、米国内では、今後 40 年間で、合計 8,500～9,700 トンの廃水銀が見込まれている。経常的に発生する水銀量は、金採掘と廃棄物からの水銀回収から、年間約 170 トンである。EU と同様、水銀含有汚泥等からの水銀回収のインセンティブはない。環境保護庁<sup>[41]</sup>によれば、アメリカにおける大手水銀回収業者は次の 5 社である：AERC Recycling Solutions, Bethlehem Apparatus Company, Inc., D.F. Goldsmith Chemical & Metal Corporation, Veolia Environmental Services, Waste Management Mercury Waste Inc.

環境保護庁（2007）の試算<sup>[42]</sup>によれば、水銀保管施設において水銀を 40 年間 保管した場合の費用は、保管量 7,500 トンの場合、水銀 1 トン当たり年間 173～413 ドル（全期間で 6,920～16,520 ドル）であった（表 2-7）。保管施設のシナリオ別の差はそれほどないが、各シナリオにおける費用の大きな差は、信託基金における保管施設の閉鎖（closure）シナリオによる差である（低費用は、施設を新しい運営者が引き継ぐシナリオ、高費用は施設を閉鎖し、全水銀を安定化・処分するシナリオ）。

表 2-6 米国の廃水銀インベントリー

水銀廃棄物の排出源	水銀量（トン）
クロロアルカリ工場の水銀セルの廃止	1,100
ネバタ州とサウスダコタ州の金採掘の副産物	3,700-4,900 (92.5-122.5t/y)
水銀廃棄物からの水銀回収業者	2,500 (62.5t/y)
テネシー州オークリッジの国家安全複合施設	1,200
合計（40 年間）	8,500-9,700

（出典：DOE 報告書<sup>[38]</sup>より筆者作成）

表 2-7 米国の水銀保管費用の試算（7,500 トン、40 年間のケース）

（単位：USD）

費用項目	賃貸シナリオ	建設シナリオ	政府施設
総費用（割引なし）	59.5 - 144.2 百万	50.0 - 137.7 百万	78.9 - 99.8 百万
総費用の現在価値	18.5 - 39.9 百万	17.8 - 41.0 百万	25.6 - 30.0 百万
年間費用	1.4 - 3.0 百万	1.3 - 3.1 百万	1.9 - 2.2 百万
水銀 1 トンあたりの年間費用	187-400	173-413	253-293

（出典：EPA 報告書<sup>[42]</sup>より筆者作成）

## 2.4 まとめ

2013 年に採択された「水銀に関する水俣条約」の影響を受け、今後、条約による世界的な水銀需要の低下により、回収水銀の輸出を主流とする日本の水銀フローは大きく

影響を受ける可能性がある。特に、これまで有価物として取り扱われてきた回収水銀のうち、余剰となったものが廃棄物化し、国内で処分される事態が将来想定され、これまでの廃棄物処理制度では想定していなかった対応が求められる。

しかし、2015年の廃棄物処理法施行令改正により、水銀廃棄物の処理に関する法制度は整備されたが、実際の処分体制の整備はこれからであり、未だ目途はたっていない。水銀の硫化による安定化技術は、埋立処分における溶出基準を満たすことが報告されているものの、処分実績のない当該処理物の長期的な安定性を実環境で確認することはできないことから、長期的に見れば、潜在的な水銀溶出のリスクを内包している。また、廃棄物最終処分場において、埋立終了してから廃止までの期間が明らかでないことから、予想より長期化すれば、維持管理費用が不足して、適正な処分場の管理が維持できず、処分場を発生源とする環境汚染が懸念される。

水銀の輸出禁止規制により、欧米では日本に先行して、水銀が廃棄物化し、域内・国内での保管が行われているが、最終処分の実績は、ヨーロッパにおける硫化処理した水銀をドラム缶に詰めて地中深くの岩塩坑に処分したものである。表 2-8 に日欧米の水銀処分方法の評価を示す。前処理による水銀処理物の安定性は、日本式が最も優れているが、長期的な環境リスクは、実環境で確認ができないため不明である。地震などの自然災害の多い日本においては、EU 式の岩塩坑や硬質岩盤層への地中処分は地質的に採用できない。アメリカ式は、金属水銀のままの暫定保管であり、最終処分体制が構築されるまでの暫定保管を検討する際には参考になるが、水銀漏出の環境リスクは高く、いずれにせよ将来最終処分が必要となる。経済性については、前提となる処理費用の対象範囲が異なるため、直接には比較できないが、いずれ最終処分が必要となるアメリカ式は、経済性でも劣り、水銀の中間処理費用は日欧でそれほど差はないものの、比較的安価に最終処分が可能な EU 式が最も経済性は優れている。社会的受容度については、アメリカと日本で保管施設や最終処分地の確保が難航しているのに対し、ヨーロッパでは既に有害廃棄物の地中処分について実績があることから、社会的受容度は最も高いと考えられる。

表 2-8 日欧米の水銀処分方法の評価

	水銀処理物の安定性	長期的な環境リスク	経済性	社会的受容度
【アメリカ式】 金属水銀＋容器＋地上保管	×	×	×	△
【EU 式】 硫化水銀＋容器＋地中処分	△	○	○	○
【日本式】* 硫化水銀＋固型化＋埋立処分	○	△～○? 実績なし	△	△

\*：EUにおいても、制度上は日本式の処分方法が規定されているが、実績なし。

# 第 3 章 水俣条約による日本の水銀フローへの影響 と将来推計

---

## 3.1 概説

2013 年に水俣条約が採択されたことを受け、今後、世界的な水銀需要の低下により、回収水銀の輸出を主流とする日本の水銀フローは大きく影響を受ける可能性がある。特に、これまで有価物として取り扱われてきた回収水銀のうち、余剰となったものが廃棄物化し国内で処分される事態が将来想定される。このため、廃水銀等の国内処分体制を今後新たに整備しなければならないことから、当該回収水銀の発生量の見通しを把握することは喫緊の課題である。

水俣条約においては、利用可能な最良の技術（BAT）及び環境のための最良の慣行（BEP）に基づき大気中への水銀排出の抑制が求められている。2015 年の大気汚染防止法改正を受け、大気への水銀排出抑制が進めば廃棄物への水銀排出の増加もあり得る一方、水銀添加製品の国内生産や輸入の減少により、製品由来の水銀廃棄物は減少が予想される。

これまで、非鉄金属製錬からの水銀回収量予測<sup>[43]</sup>や家庭に退蔵された水銀のストック量推計<sup>[11]</sup>等、特定分野における水銀動態の研究はみられるものの、日本全体の水銀フローの将来見通しに関する詳細な研究はない。このため、本章では、水俣条約による国内の水銀マテリアルフローへの影響を 2050 年度まで推計し、大気及び廃棄物への水銀分配を試算し、我が国の水銀排出の将来見通しを明らかにする。

## 3.2 推計手法

### 3.2.1 推計の対象範囲

環境省が公表する水銀マテリアルフロー（2010 年度ベース）<sup>[44]</sup>から、条約の影響が見込まれる図 3-1 に示す主要フローを対象に、水銀使用廃製品及び工業過程から、大気、廃棄物（埋立処分）、水銀回収への水銀排出の推移を 2010 年度から 2050 年度まで推計する。また、水俣条約への対応として、政府において法制度設計の詳細が審議中であり、2016 年 5 月現在の検討状況を前提としている。

環境省が公表する水銀マテリアルフロー（2010 年ベース）から、条約の影響が見込まれる図 3-1 に示す主要フローを対象に、水銀使用廃製品及び工業過程から、大気、廃棄物（埋立処分）、水銀回収への水銀排出の推移を 2010 年から 2050 年まで推計する。

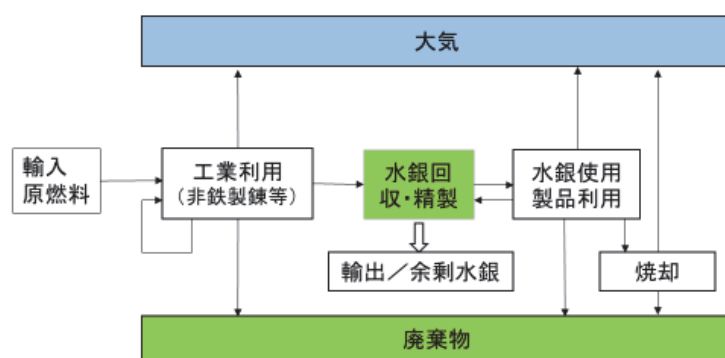


図 3-1 国内の主要な水銀マテリアルフロー

### 3.2.2 水銀使用廃製品からの水銀排出量推計

水銀使用製品については、水俣条約附属書 A に定めるスケジュールに従い、多くの用途において 2020 年を目途に水銀の使用が制限される。ここで、廃製品からの水銀排出については、製品の生産時から廃棄時までタイムラグが生じることに注意が必要である。ある製品が製造されてから  $t$  年後までに故障する累積割合は、この製品のワイブル関数に従う場合、 $\eta$  を製品の平均使用年数とすると、 $1 - \exp\{-(t/\eta)^m\}$  で表される<sup>[45]</sup><sup>[46]</sup>。本研究では、環境省の調査結果(表 3-1)を基に、ランプ類及び電池について、ワイブル形状パラメータ  $m$  に電気製品一般の 2.4<sup>[45]</sup>を適用し、故障した製品がその年に廃棄されると仮定して廃製品の排出予測を 2010 年度から 2050 年度までに更新した。また、将来シナリオについては、環境省による業界ヒアリング結果等に基づき、本研究では表 3-2 のとおり設定した。

水銀体温計については、国内生産は終了しているものの、家庭に退蔵されている体温計中の水銀量は、既存の実態調査結果<sup>[12]</sup>の 0.5 本/世帯に基づけば 21 トンと推計される。自治体における 21 の回収事例<sup>[47]</sup><sup>[48]</sup>から人口一人当たりの水銀回収量を求めると、図 3-2 に示すとおり、人口が少ない市町村ほど水銀回収原単位が高くなる傾向がみられたことから、平均水銀回収量を人口 50 万人以上の自治体では 0.0026g/人年、50 万人未満では 0.0046 g/人年とそれぞれ求めた。また、平常時から水銀体温計を分別回収している自治体と環境省モデル事業により一定期間の回収キャンペーンを実施した自治体とで、水銀回収原単位に明確な違いがみられなかったことから、体温計回収促進策の実施時においても同じ原単位を適用して回収量を計算した。

一方、医療機関に保有される水銀血圧計については、ストック量は推計 20 トン<sup>[49]</sup>～38 トン<sup>[1]</sup>とされ、処理コストが排出者負担となる産業廃棄物であることから、処理費用の負担軽減が見込まれる回収促進施策には一定の効果が期待できるとした。

なお、スポット的に排出される退蔵水銀は、これまでの環境省調査の結果、研究用途の大強度陽子加速器中の水銀標的 21 トン<sup>[1]</sup>、灯台用回転灯器 8 トン<sup>[1]</sup>、歯科用水銀 3 トン(20%の歯科医療機関が 240g/施設の水銀を保有していたとの調査結果<sup>[50]</sup>と歯科診療所数<sup>[51]</sup>より推計)を除けば、多量の水銀保有事例はなかったことから、推計の対象外としている。

表 3-1 水銀添加製品の排出予測の前提条件

水銀添加製品	平均使用年数	生産台数出典	水銀含有量出典
酸化銀電池	2年	経済産業省生産動態統計	2014年電池工業会データ
蛍光ランプ	4.1年(家庭用) 2.5年(事業用)	経済産業省生産動態統計を用途比率(家庭用:事業用=54:46)で分配	2012年日本電球工業会ヒアリング調査結果
冷陰極ランプ	900日	経済産業省生産動態統計	2012年日本電球工業会ヒアリング調査結果
高圧ランプ(HID)	3年	経済産業省生産動態統計を日本照明工業会自主統計で補正	2014年日本照明工業会ヒアリング調査結果

注) 参考文献 [1]、[21]を基に筆者作成。

表 3-1 水銀使用製品の将来シナリオ

水銀使用製品	将来シナリオ	(参考)2010年度製造時水銀使用量(t-Hg)
電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国内の酸化銀電池は、水銀含有量が条約の規制値以下であるが、無水銀化技術があることから<sup>[52]</sup>、2020年度に2014年度比で生産量が50%に、以降同レベルで使用と想定。</li> <li>・補聴器用途の空気亜鉛電池は代替困難なため<sup>[52]</sup>使用は同レベルで、2015年度以降、出生中位・死亡中位仮定による65歳以上の将来推計人口<sup>[53]</sup>に連動して今後も使用すると想定(使用期間は2週間程度のため生産年に廃棄されるとする)。</li> <li>・アルカリ電池は、輸入玩具等に水銀含有電池が組み込まれている恐れがあるが、条約上2020年度以降は製造・輸出入が禁止されることからゼロとする。</li> </ul>	0.996
ランプ類	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国内のランプ類は、一部の高圧ランプ以外、水銀含有量が条約の規制値以下であるが、LED化が急速に進められていることから、蛍光ランプの出荷数は2020年度に2013年度比半減<sup>[54]</sup>、2030年度にゼロに、冷陰極ランプは2013年度に生産ゼロと想定。</li> <li>・高圧ランプの特殊用途(34%)<sup>[1]</sup>は同レベルで今後も使用と想定。</li> </ul>	3.04
医療用計測機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水銀血圧計は使用年数を10年<sup>[1]</sup>、2020年度までに生産がゼロになると想定。回収促進施策が予定されている2016~2017年度<sup>[55]</sup>に、通常の排出に加えて2018~2025年度の排出見込み量の45%(平成26年度川崎市医師会アンケート調査結果<sup>[1]</sup>によれば、55%の医療機関が今後も水銀血圧計を使用すると回答した。)が排出されると想定。</li> </ul>	1.9

	・体温計は今後も同じレベルで排出が続き、2020 年度以降、排出量が半減すると想定。	
工業用計測機器	精密な計測用途は代替困難とされており、同レベルで今後も使用と想定。	0.85
その他 (銀朱等)	伝統・慣習的用途のため、同レベルで今後も使用と想定。	1.19

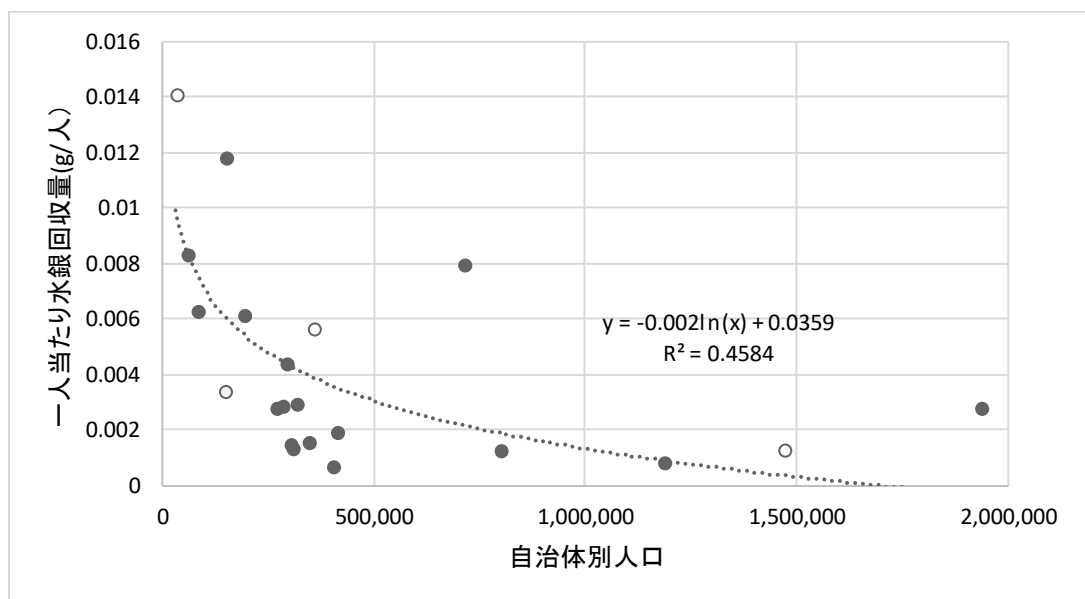


図 3-2 家庭からの水銀体温計回収事例における一人当たり水銀回収量

注) 参考文献 [47]を基に、体温計 5g/本、水銀含有量 1.2g/本として筆者作成。

### 3.2.3 水銀使用廃製品から排出される水銀の大気と廃棄物等への分配

水銀使用廃製品については、今後、水銀使用の表示や廃棄物データシート (WDS) への記載等の水銀回収促進策<sup>[18]</sup>により分別回収が進むことが予想される。また、2015年11月11日に公布された改正廃棄物処理法に基づき、破損等により水銀飛散の恐れのある計測機器類(産業廃棄物)は水銀回収処理が義務付けられ、上流対策の進むランプ類や電池は、大気排出抑制対策を講じている施設での処理の義務付けや直接埋立の抑制が見込まれる<sup>[18]</sup>。

現在の廃製品の処理方法の割合は、環境省調査結果から導かれた処理量(体温計については市町村数)<sup>[13]</sup>より計算した。産業廃棄物については、アンケート回答数が59社(ランプ)、12社(電池)、8社(計測機器)と限られており、水銀使用製品として認識されずに処理されるケースが含まれないため、信頼性はやや低いことに留意が必要である。特に、ランプ類や計測機器の水銀回収の割合は、回収量の実績値に照らすと、実際よりも高いと考えられる。この現在の廃製品の取扱状況と本稿において試算した2010

年度の廃製品からの水銀回収率（3.3で後述）を踏まえ、2016年度以降の水銀回収率をそれぞれ計測機器90%、電池80%、ランプ類50%と仮定した。

これらを踏まえ、表3-3に示すとおり、大気排出、水銀回収、廃棄物(埋立処分)の分配割合を設定した。焼却処理については、3.4で後述する廃棄物焼却施設における大気と廃棄物等の分配割合を適用した。ランプ類、体温計及び計測機器の破損率は、蛍光管における破損率は1~3割が多いというアンケート調査結果<sup>[56]</sup>を参考に1割と設定した。また、2010~2015年度の分配割合については、水銀回収は2010年度の水銀回収率（3.3で後述）、廃棄物（埋立処分）は現在の割合(表3-3)、残りを大気排出として計算した。

さらに、2016年度以降の水銀回収率については、不確実性が高いため、回収率の変化による水銀回収量への感度分析を行った。BAUシナリオ（3.3で後述する2010年度の推計回収率が継続した場合）、及び本稿で設定した回収シナリオは計測機器優先であるため、その逆のランプ優先シナリオ（回収率：計測機器50%、電池80%、ランプ類80%）についても分析した。

表3-3 水銀使用廃製品から排出される水銀の分配割合

水銀使用製品種類	2010年度推計水銀回収率	処理方法	現在の割合 <sup>[21]</sup> から計算	将来の割合	予想される排出先	排出先分配割合
ランプ類（一般廃棄物）	20%	可燃ごみ	0.0%	0%	大気	—
		不燃ごみ	3.3%	0%	大気	—
		分別回収（全都清ルート）	24.7%	50%	水銀回収 大気	45% 5%（破損）
		分別回収（他）	71.9%	50%	廃棄物	50%
ランプ類（産業廃棄物）	20%	破碎	13.8%	0%	大気	—
		焼却	0.0%	0%	大気	—
		セメント固化、硫化	8.8%	50%	廃棄物	50%
		水銀回収	77.4%	50%	水銀回収 大気	45% 5%（破損）
電池（一般廃棄物）	96%	可燃ごみ	0.0%	0%	大気、 廃棄物	—
		不燃ごみ	1.5%	0%	廃棄物	—
		分別回収(他)	71.7%	20%	廃棄物	20%
		分別回収（全都清ルート・メーカー自主回収）	26.8%	80%	水銀回収	80%
電池（産業廃棄物）	96%	破碎+金属リサイクル	44.1%	0%	大気、 廃棄物	—
		焼却	0.0%	0%	大気、 廃棄物	—
		セメント固化	2.0%	20%	廃棄物	20%
		水銀回収	53.8%	80%	水銀回収	80%

体温計	4%	可燃ごみ	2%	0%	大気、 廃棄物	—
		不燃ごみ	28%	0%	大気	—
		分別回収	70%	100%	水銀回収 大気	90% 10% (破損)
計測機器	7%	焼却溶融	0.6%	0%	大気、 廃棄物	—
		セメント固化	1.5%	0%	廃棄物	—
		水銀回収	97.9%	100%	水銀回収 大気	90% 10% (破損)
その他	—	焼却等	—	—	大気 廃棄物	52% 24%

### 3.2.4 工業過程からの水銀排出量推計

日本の水銀マテリアルフローにおいて、水銀の大部分は原燃料中に含まれる形で非意図的に輸入され、非鉄金属製錬業等の工業利用過程から排出されている。環境省の推計によれば、表 3-4 に示すとおり、2010 年度は大気中に 15~20 トン、廃棄物等（水銀を高濃度に含有する有価物を含む。）に 50~63 トン水銀が排出されており、大気にはセメント製造施設から、廃棄物等には非鉄金属製造施設からの排出が多い。

工業過程からの水銀排出量の予測は、基本的に原単位を環境省調査結果より設定し、活動量を 2010~2014 年度は入手可能な統計値から、2015 年度以降を業界団体が発表する低炭素社会実行計画に示す見通し等より表 3-5 に示す将来シナリオを設定して、2010 年度から 2050 年度までの推計を行った。

石炭火力発電と廃棄物焼却においては、施設の廃止と更新が明らかに見込まれることから、施設設置年と施設寿命から推計した将来予測をシナリオに反映した。石炭火力発電については、気候変動対策の観点から、設置後 40 年経過した発電施設は廃止され、全国の設備容量の減少に応じて電力量も減少すると仮定した。廃棄物焼却施設については、一般廃棄物と産業廃棄物の施設使用開始年の分布を図 3-3 に示す。施設寿命を 35 年とし、施設の更新に当たっては、BAT 未設置の施設において、BAT 導入による水銀大気排出削減が見込まれると想定した。また、今後、人口減少を受けて一般廃棄物焼却施設の広域化が進むと考えられる<sup>[57]</sup>ことから、都道府県別人口動態<sup>[59]</sup>に応じて焼却施設数が減少すると仮定し、施設の更新シナリオを設定した。

水銀排出量は、以下の計算式で求められる。原燃料中の水銀濃度が概ね一定と考えられる場合は①原燃料中水銀量方式で推計を行い、廃棄物等の利用により原燃料の変動が大きく、インプットの水銀量の把握が難しい場合は、②総括排出係数方式で推計を行った。特に、大気排出係数（EFA）は、2015 年度に全国的に実施された環境省水銀排出実態調査結果より算出しており、他の原単位よりも信頼性がより高いと考えられることから、(3)式を優先して適用した。また、大気移行割合（DRA）の情報がある場合には、インプットとアウトプットの水銀バランスの確認を行い、整合を図った。



① 原燃料中水銀方式

$$E_{\text{air}} = \sum_i (\text{CHG}_i \times \text{AC}_i \times \text{AF}_i \times \text{DRA}_i) \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{\text{waste}} = \sum_i (\text{CHG}_i \times \text{AC}_i \times \text{AF}_i \times (1 - \text{DRA}_i) \times \text{DRW}_i) \dots\dots\dots (2)$$

- $E_{\text{air}}$ : 水銀大気排出量 (t)
- $E_{\text{waste}}$ : 廃棄物等への水銀排出量(t)
- CHG: 原燃料／廃棄物中の水銀濃度
- AC: 活動量 (原燃料使用量又は廃棄物焼却量)
- AF: 活動量変動係数 (原則 2014 年度比)
- DRA: 大気への移行割合 (%)
- DRW: 排出物中水銀の埋立処分及び水銀回収への移行割合 (%)
- $i$ : 施設分類

② 総括排出係数方式

$$E_{\text{air}} = \sum_i (\text{EFA}_i \times \text{AA}_i \times \text{AF}_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$E_{\text{waste}} = \sum_i (\text{EFW}_i \times \text{AA}_i \times \text{AF}_i) \dots\dots\dots (4)$$

- $E_{\text{air}}$ : 水銀大気排出量(t)
- $E_{\text{waste}}$ : 廃棄物等への水銀排出量(t)
- EFA: 大気排出係数 (活動量当たり)
- EFW: 廃棄物等排出係数 (活動量当たり)
- AA: 活動量 (生産量又は廃棄物焼却量)
- AF: 活動量変動係数 (原則 2014 年比)
- $i$ : 施設分類

表 3-2 工業過程から排出される水銀量 (2010 年度ベース)

施設分類	大気排出量 (t-Hg/年)	廃棄物等排出量 (t-Hg/年)	合計
石炭火力発電所	0.83-1.0	0.61	1.4-1.6
石炭焚き産業ボイラー	0.21	0.002	0.2
非鉄金属製造施設	0.94	37.2	38.1
廃棄物焼却施設	一般廃棄物焼却施設	9.4-19.0	12-30
	産業廃棄物施設	0.67-3.8	
	下水汚泥焼却施設	0.05-0.23	
セメント製造施設	5.3	0	5.3
鉄鋼製造施設	一次製鉄施設	0.04	4.8
	二次製鉄施設	0.62	
その他	0.84	2.2	3.0
合計	15-20	50-63	65-83

注) 参考文献 [44]、[60]、[61]を基に筆者作成。

表 3-5 水銀を排出する工業過程の将来シナリオ

工業過程分類	推計の前提と出典	将来シナリオ
石炭火力 (石炭発電所・石炭ボイラー)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭中水銀濃度：0.038mg/kg<sup>[62]</sup></li> <li>・石炭消費量：資源エネルギー庁総合エネルギー需給バランス表（事業用発電＋自家用発電＋自家用蒸気発生）（2010～2014年度）<sup>[63]</sup></li> <li>・大気移行割合：35.3%</li> <li>・発電電力量：エネルギー白書</li> <li>・排出物のうち廃棄物等移行割合：21.4%<sup>[60]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2030年度の石炭発電電力量は2,810億kWh<sup>[64]</sup>と想定。</li> <li>・発電所の寿命を40年、気候変動対策の観点から更新はないとし、計画中（2016年2月現在）の新規発電所は設置、2030年度以降は新規設置ゼロと仮定。</li> <li>・2030年度以降は、設備容量の減少<sup>[65]</sup><sup>[66]</sup>より推計に応じて発電電力量も減少すると想定。</li> </ul>
非鉄金属製錬	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気排出係数：0.60g-Hg/t<sup>[67]</sup>より計算</li> <li>・廃棄物等排出係数：16.34g-Hg/t<sup>[60]</sup>より計算</li> <li>・非鉄金属生産量：経済産業省生産動態統計年報（電気金、電気銅、電気鉛、亜鉛）（2010～2014年度）<sup>[68]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2020年度の生産量を2010年度比1.05<sup>[68]</sup><sup>[69]</sup>より計算、2030年度を0.98<sup>[70]</sup>より計算とし、間の年を線形推計。2030年度以降一定と想定。</li> <li>・鉱石の品位が2020年度に2010年度比で10%<sup>[69]</sup>悪化し（鉱石消費量が1.11倍）、以降は年0.5%悪化する<sup>[70]</sup>と想定。</li> </ul>
廃棄物焼却	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気排出係数<sup>[67]</sup>より計算：42.52mg-Hg/一般廃棄物t、8.18mg-Hg/産業廃棄物t、1.36mg-Hg/下水汚泥t-dry</li> <li>・廃棄物焼却量：環境省一般廃棄物処理実態調査、環境省産業廃棄物処理実態調査（中間処理量）、国土交通省下水汚泥統計調査（2010～2013年度）</li> <li>・大気移行割合：19.4%（一般廃棄物）<sup>[62]</sup><sup>[67]</sup>より計算、52.1%（産業廃棄物、下水汚泥）<sup>[44]</sup></li> <li>・排出物のうち廃棄物等移行割合<sup>[60]</sup>の平均値：74.5%（一般廃棄物）、99.9%（産業廃棄物）、23.5%（下水汚泥）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2014年度以降、産業廃棄物焼却施設の水銀排出量の42%（医療廃棄物焼却施設の水銀排出割合）<sup>[44]</sup>と一般廃棄物焼却施設の水銀排出量は2.2で推計した廃製品からの水銀排出量の将来推移に応じて減少すると想定。</li> <li>・一般廃棄物焼却施設の寿命を35年とし、都道府県別人口動態<sup>[59]</sup>に応じた施設数に更新されると仮定。</li> <li>・産業廃棄物焼却施設の寿命を35年とし、廃止施設は更新されると仮定。</li> <li>・BAT未設置施設の更新による水銀削減効果は26%<sup>[62]</sup><sup>[71]</sup>より計算と想定。</li> <li>・下水汚泥焼却施設からの排出は一定と想定。</li> </ul>
セメント製造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気排出係数：89.96mg-Hg/t<sup>[67]</sup>より計算</li> <li>・セメント生産量：セメント協会統計データベース（生産高）（2010～2014年度）<sup>[72]</sup></li> <li>・廃棄物等への排出はない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・セメント生産量を2020年度に56,210千トン、2030年度に51,730千トン<sup>[73]</sup><sup>[74]</sup>と想定。</li> </ul>
鉄鋼製造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気排出係数：22.56mg-Hg/t<sup>[67]</sup>より計算</li> <li>・廃棄物等排出係数：1.16mg-Hg/t<sup>[60]</sup>より計算</li> <li>・粗鋼生産量：経済産業省生産動態統計年報（2010～2014年度）<sup>[68]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粗鋼生産量を2020年度に119,660千トン<sup>[75]</sup>、2030年度に1.2億トン<sup>[76]</sup>、以降は一定と想定。</li> </ul>

その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気排出はカーボンブラック製造、火葬等から 0.62t (2014 年度) [67]</li> <li>・廃棄物等への排出は原油天然ガス生産施設等より 2.2t (2010 年度) [60]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原油天然ガス生産は、2013 年度比で 2020 年度 0.88、2030 年度 0.9、2040 年度 0.86 と想定。 [77]のリファレンスケースより計算</li> <li>・その他は同レベルで排出。</li> </ul>
-----	--	---

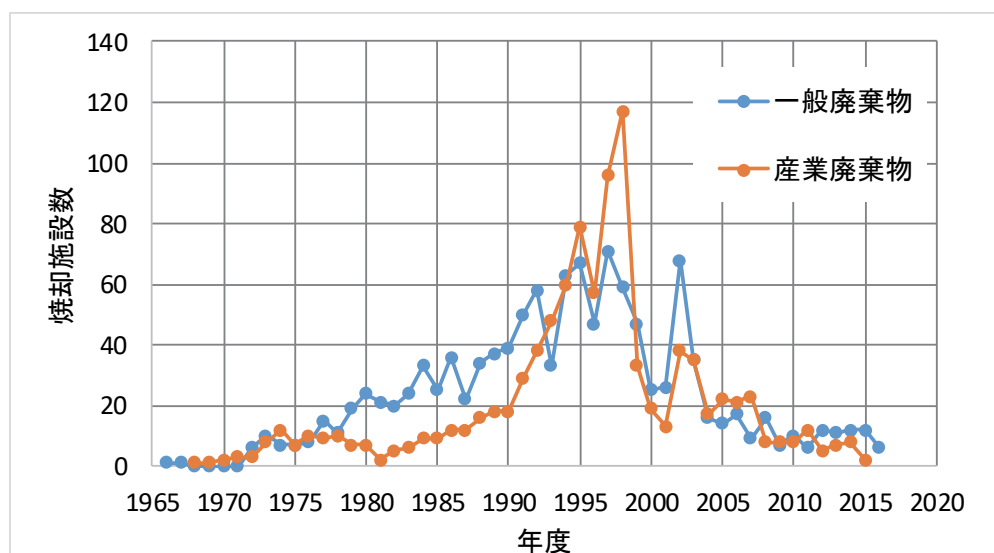


図 3-2 廃棄物焼却施設の使用開始年分布

注1) 参考文献 [78] [79]を基に筆者作成。

注2) 産業廃棄物施設は、一般廃棄物焼却施設及びセメント製造施設を除いている。

業種別の推計手法の詳細とデータの信頼性評価は以下のとおりである。なお、総括排出係数(大気)の算出においては、環境省の 2015 年度水銀大気排出実態調査結果 [62]のうち、測定方法を統一した「環境省法」(サンプリング量を 5 倍に増量、ガス状水銀及び粒子状水銀を同時に測定。)によるデータを採用した。

### (1) 石炭火力発電

石炭火力発電については、水銀排出量を(1)(2)式より計算した。

#### 【インプット】

石炭中水銀含有量  $CHG=0.038\text{mg/kg}$  (863 データの平均値) [62]に 2010 年度の石炭消費量 (事業用発電+自家用発電+自家用蒸気発生) 98,209 千トン [63]を乗じて、水銀量 3.73 トン (2010 年度) を算出した。

#### 【アウトプット】

2015 年度環境省水銀大気排出実態調査(69 施設の実測濃度)から導かれた排出係数 (大気)  $13.425\text{mg/t-石炭}$  [67]より大気排出量 1.32 トン (2010 年度) を算出し、インプットの水銀量から大気排出移行割合  $DRA=35.3\%$ を設定した。水銀収支から、廃棄物及び循環資源 (石炭、脱硫石膏、汚泥のうち再利用されるもの) への水銀排出量は、2.41

トン（2010 年度）と算出され、このうち、埋立処分される水銀量は、水銀移行割合 DRW=21.4%<sup>[60]</sup>から 0.52 トン（2010 年度）を求めた。

なお、2002 年度の 9 発電所における DRA の報告値は 27.1%<sup>[44]</sup>であり、当該割合で算出すると、2010 年度の大気排出量は 1.01 トンであった。しかし、2015 年度の大気排出実態調査の方が調査年度が新しく、データ数も多いことから、より信頼性が高いと考えられ、2002 年度の DRA の報告値は本稿では採用しなかった。また、2010 年度の廃棄物及び循環資源への水銀排出量は、業界ヒアリングの結果から推計すると 2.87 トン（2010 年度の廃棄物及び循環資源への水銀排出量<sup>[60]</sup>の合計）であった。しかし、廃棄物中の水銀濃度は代表値の設定が難しいことから、より信頼性は低いと考えられ、本稿では採用しなかった。表 3-6 に推計手法別の試算結果を示す。推計手法によって本研究の推計値から-23%~+17%の幅がみられた。

表 3-6 水銀排出量の試算結果(2010 年度)の比較

(単位：トン)

	本研究：大気排出調査結果から (DRA=35.3%)	大気移行割合のヒアリング結果 <sup>[44]</sup> から (DRA=27.1%)	廃棄物等への排出状況のヒアリング結果から <sup>[60]</sup>
大気への排出量	1.32	1.01	—
大気以外への排出量	2.41	2.72	2.87
うち、廃棄物（埋立）への排出量	0.52	0.58	0.61

#### 【将来シナリオ】

将来シナリオについては、国の長期エネルギー需給見通しに従い 2030 年度の石炭火力発電量を 2,810 億 kWh<sup>[64]</sup>とし、2030 年度まで電力量は線形に減少すると想定した。また、以降も気候変動対策の観点から、発電施設の新規設置はなく、設置後 40 年経過した発電施設は廃止され、表 3-7 に示すように、全国の設定容量（施設寿命を 40 年とし、施設設置年と設備容量<sup>[65][66]</sup>から算出した。）の減少に応じて電力量も減少すると仮定した。

表 3-7 石炭火力発電における活動量の将来推計

年	全国の石炭火力発電の設備容量 (万 kW)	活動量比	石炭火力による推計発電量 (億 kWh)
2030	5021	1	2,810
2031	4886	0.97	2,734
2032	4836	0.96	2,706
2033	4766	0.95	2,667
2034	4636	0.92	2,594
2035	4460	0.89	2,496
2036	4460	0.89	2,496

2037	4225	0.84	2,364
2038	4025	0.80	2,252
2039	3755	0.75	2,101
2040	3698	0.74	2,069
2041	3277	0.65	1,834
2042	3116	0.62	1,744
2043	2798	0.56	1,566
2044	2598	0.52	1,454
2045	2349	0.47	1,315
2046	2328	0.46	1,303
2047	2328	0.46	1,303
2048	2280	0.45	1,276
2049	2265	0.45	1,268
2050	2205	0.44	1,234

## (2) 非鉄金属製錬

### 【アウトプット】

非鉄金属製錬については、スクラップや副産物を原料に利用するため、インプットの水銀量が把握困難なことから、(3)(4)式より計算した。

排ガス測定値から推計された2014年度大気排出量1.4トン(銅0.21トン、亜鉛0.82トン、鉛0.32トン、金0.00011トン)<sup>[67]</sup>と2014年度の非鉄金属生産量(電気銅1,538千トン、亜鉛589千トン、電気鉛200千トン、電気金107トン)<sup>[68]</sup>から、大気排出係数EFA0.60g-Hg/t(4鋼種合計)(鋼種別:0.14g-Hg/銅t、1.39g-Hg/亜鉛t、1.60g-Hg/鉛t、1.03g-Hg/金t)を求めた。2010年度の大気排出量は、環境省大気排出インベントリーから0.94トン<sup>[44]</sup>を採用している。

廃棄物等については、業界ヒアリング結果から推計された2010年度の廃棄物等への排出量37.2トン(水銀回収量36.2トン+排水澱物等の最終処分量1.0トン)<sup>[60]</sup>より、2010年度の非鉄金属生産量(4鋼種合計)<sup>[68]</sup>からEFW=16.34g-Hg/tを求めた。

なお、2014年度の大気排出量は、国内41施設の水銀排出量(平均水銀濃度×排ガス量)の合計値であり、日本鉱業協会の会員カバー率100%であることから、比較的信頼性は高いものと考えられる。ただし、原燃料に循環資源の利用があることから、水銀濃度の変動に留意する必要がある。2010年度大気排出量0.94トン<sup>[44]</sup>からEFAを算出すると0.41g-Hg/tであり、本稿のEFAよりも-31%であった。

また、廃棄物等への排出量については、非鉄製錬業界から排出されるスラッジ等からの水銀回収は全て大手回収業者1社に委託されていることから、回収量のデータの信頼性は高いと考えられる。一方、廃棄物(埋立処分)への排出量については、現在は水銀回収への経済的なインセンティブが働くため、工程内で水銀を蓄積させてから水銀回収を委託しており、埋立処分される廃棄物中の水銀含有が微量のため、原単位への信頼性は低いと判断される。

また、日本鉱業協会ヒアリングから算出したインプット(リサイクル原料、精鉱等、副資材)の水銀量52.8トン<sup>[60]</sup>で水銀バランスを検証したところ、アウトプットが13トン(インプットの25%に相当する。)少なく、循環利用され工程内に蓄積している量を含め、水銀動態の更なる解明の必要性が示唆された。

### 【将来シナリオ】

非鉄金属生産量の将来推移については、日本鉱業協会の低炭素社会実行計画に示された生産量の見通し（2020年度に2,730千トン(2008年度比5%増)<sup>[69]</sup>、2030年度に2,560千トン<sup>[70]</sup>）はニッケルとフェロニッケルの生産量も含まれるため、鋼種別の生産割合は一定として、2010年度生産量比1.05(2020年度)と0.98（2030年度）をそれぞれ算出した。間の年は線形推定し、2030年度以降は一定とした。

また、鉱石の品位が2020年度に2010年度比10%悪化<sup>[69]</sup>（鉱石消費量が1.11倍になる。）、2020年度から年0.5%悪化<sup>[70]</sup>（鉱石消費量が1.005倍になる。）すると想定し、活動量変動係数AF（2010年度比）を算出した。2020年度のAFは1.11、2030年度は1.17（ $=1.11 \times 1.005^{10}$ ）である。

なお、鉱石の品位の将来見通しについては不確実性が高い。品位が2020年度以降一定であった場合と2020年度以降も年1%で悪化した場合で試算すると、2050年度の活動量において-14%～+16%の幅がみられた。

### (3) 廃棄物焼却

廃棄物焼却施設からの水銀排出量については、(2)(3)式より計算した。

#### 【インプット】

一般廃棄物については、焼却対象物中の水銀濃度CHG=0.219mg/kg（10データの平均値：0.019～0.56mg/kg）<sup>[62]</sup>から2013年度の廃棄物焼却量を乗じて、水銀量7.62トン(2013年度)を算出した。産業廃棄物と下水汚泥については、大気移行割合DRA=52.1%（排出低減効率47.9%<sup>[44]</sup>より計算）と大気排出量から、それぞれ2013年度の水銀量4.70トンと2.75トンを算出した。

なお、下水汚泥中の水銀濃度CHG=0.793mg/kg(36データの平均値:0.02～3.6 mg/kg)<sup>[62]</sup>から2013年度のインプットの水銀量を計算すると0.84トンであった。しかし、CHGのばらつきが大きく、比較的信頼性の高いと考えられる2015年度大気排出実態調査(データ数33)に基づく大気排出量1.48トン<sup>[67]</sup>よりも少ないことから、精度が低いと判断し採用しなかった。

#### 【アウトプット】

水銀大気排出量は、排ガス濃度実測値から推計された2013年度大気排出量<sup>[67]</sup>と2013年度廃棄物焼却量より、大気排出係数EFAを求めた。詳細を表3-8に示す。産業廃棄物については焼却量が不明であることから、中間処理量を適用している。また、一般廃棄物については、2013年度の水銀収支より、大気移行割合DRA=19.4%を算出した。

廃棄物等（埋立+水銀回収）への水銀排出量は、石炭火力の場合と同様に水銀収支を考慮し、(2)式より計算した。2013年度の排出量は、循環資源（再利用される溶融スラグ、焼却残さ、飛灰、汚泥等）を含む排出物のうち、廃棄物等への水銀移行割合DRWから算出した。

表 3-8 計算方法の詳細

	一般廃棄物	産業廃棄物	下水汚泥
大気排出量 (2013 年度) <sup>[67]</sup>	1.48 トン	2.45 トン	1.43 トン
廃棄物焼却量 (2013 年度)	34,804 千トン	299,642 千トン (中間処理量)	1,055 千トン (乾重量)
大気排出係数 EFA	42.52mg-Hg/t	8.18 mg-Hg/t	1.36 mg-Hg/t-dry
大気移行割合 DRA	19.4%	52.1%	52.1%
大気以外への排出量(2013 年度)	6.14 トン	2.25 トン	1.32 トン
廃棄物等移行割合 DRW (水銀排出量 <sup>[60]</sup> の平均値から計算)	74.5% (埋立 67.3%+回収 7.2%)	99.9% (埋立)	23.5% (埋立)
廃棄物等への排出量(2013 年度)	4.57 トン	2.25 トン	0.31 トン

また、表 3-9 に推計手法別の試算結果を示す。2010 年度に推計年度を揃えて比較すると、本研究の推計値は概ね他の推計手法による推計値の範囲内にあるが、下水汚泥については、本推計が過大評価である可能性に留意する必要がある。また、廃棄物焼却施設からの水銀排出量は、インプットの水銀量の変動が大きいことが想定され、全体的に信頼性が低いと判断される。インプットが±20%で変動した場合、2013 年度の廃棄物焼却施設からの排出量は、大気に 4.29～6.44 トン、廃棄物等に 5.71～8.56 トンの幅が見込まれる。

表 3-9 水銀排出量の試算結果の比較 (2010 年度)

(単位：トン)

	推計手法	一般廃棄物	産業廃棄物	下水汚泥
大気 排出量	本研究 (2010 年度)	1.44	2.42	1.39
	環境省推計 (2010 年度) <sup>[60]</sup>	1.3～1.9	0.73～4.1	0.17～0.85
	一般廃棄物焼却施設の総括 排出係数から (EFA=43) <sup>[67]</sup>	1.50	-	-
	下水汚泥中水銀濃度から (CHG=0.793mg/kg) <sup>[62]</sup>	-	-	0.42
廃棄物 等への 排出量	本研究 (2010 年度)	4.44	2.20	0.30
	環境省推計 (2010 年度) <sup>[60]</sup>	2.31～4.11	0.67～3.8	0.05～0.23
	一般廃棄物焼却施設の総括 排出係数から (EFA=43) <sup>[67]</sup>	4.61	-	-
	下水汚泥中水銀濃度から (CHG=0.793mg/kg) <sup>[62]</sup>	-	-	0.09

【将来シナリオ】

2014年度以降、産業廃棄物焼却施設の水銀排出量の42%（医療廃棄物焼却施設の水銀排出割合）<sup>[44]</sup>と一般廃棄物焼却施設の水銀排出量は、2.2で推計した廃製品からの水銀排出量の減少に応じて減少すると想定した。

焼却施設の更新については、供用年数が概ね20~25年で廃止を迎える一般廃棄物焼却施設が多いが<sup>[57]</sup>、近年、施設の長寿命化が促進されていることから、焼却施設の施設寿命を35年と仮定した。また、今後、人口減少を受けて一般廃棄物焼却施設の広域化が進むと考えられる<sup>[58]</sup>ことから、都道府県別人口動態<sup>[59]</sup>と焼却施設数動態に線形性があると仮定して、将来の施設数を推計した（表3-10に示す。）。これらを踏まえ、施設設置から35年経過した一般廃棄物焼却施設は、更新又は廃止され、産業廃棄物焼却施設は更新されるとした将来シナリオを設定した。廃棄物焼却施設の更新による水銀削減効果は、改正大気汚染防止法の基準値設定の前提に基づき、既設BAT(バグフィルター/スクラバー)設置施設から新設BAT(バグフィルター/スクラバー+活性炭処理)設置施設へ更新が行われた場合に見込まれると仮定した。既設BAT設置施設の平均水銀排出濃度 $11\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  ( $n=292$ )<sup>[71]</sup>に対する新設BAT設置施設の平均水銀排出濃度 $8.1\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  ( $n=83$ )<sup>[68]</sup>の割合より削減割合は26%と算出した。これを更新される施設のうち、新設BAT未設置の焼却施設（全体の38%（一般廃棄物）及び90%（産業廃棄物））<sup>[71]</sup>に適用した。

下水汚泥焼却施設については、水銀排出量は一定と想定した。

表3-10 人口減少に伴う一般廃棄物焼却施設数の将来予測

年	2014	2020	2025	2030	2035	2040	減少数 (2015- 2040)	減少 割合
全国	1,161	1,132	1,095	1,053	1,008	960	201	17%
北海道	66	64	61	58	55	52	14	22%
青森県	16	15	14	13	12	11	5	29%
岩手県	19	18	17	16	15	14	5	26%
宮城県	19	19	18	18	17	16	3	14%
秋田県	16	15	14	13	12	11	5	32%
山形県	9	9	8	8	7	7	2	25%
福島県	25	24	23	22	21	19	6	22%
茨城県	30	29	28	27	26	25	5	17%
栃木県	17	17	16	16	15	14	3	17%
群馬県	24	23	23	22	21	20	4	17%
埼玉県	52	51	50	49	47	45	7	13%
千葉県	47	46	45	44	42	41	6	13%
東京都	54	54	53	52	51	50	4	8%
神奈川県	35	35	34	34	33	32	3	9%
新潟県	34	33	31	30	28	27	7	22%
富山県	6	6	6	5	5	5	1	21%
石川県	10	10	10	9	9	8	2	15%



福井県	11	11	10	10	9	9	2	19%
山梨県	12	12	11	11	10	10	2	20%
長野県	26	25	24	23	22	21	5	20%
岐阜県	29	28	27	26	25	24	5	18%
静岡県	38	37	36	34	33	31	7	18%
愛知県	41	41	40	40	39	38	3	8%
三重県	25	24	24	23	22	21	4	17%
滋賀県	14	14	14	14	13	13	1	8%
京都府	22	22	21	20	20	19	3	15%
大阪府	48	47	46	44	42	41	7	15%
兵庫県	43	42	41	40	38	36	7	16%
奈良県	26	25	24	23	22	21	5	20%
和歌山県	21	20	19	18	17	16	5	25%
鳥取県	14	13	13	12	12	11	3	22%
島根県	12	11	11	10	10	9	3	24%
岡山県	27	26	26	25	24	23	4	16%
広島県	26	25	25	24	23	22	4	15%
山口県	14	13	13	12	11	11	3	24%
徳島県	19	18	17	16	15	14	5	24%
香川県	8	8	7	7	7	6	2	20%
愛媛県	25	24	23	22	21	19	6	22%
高知県	11	10	10	9	9	8	3	26%
福岡県	25	25	24	23	23	22	3	13%
佐賀県	11	11	10	10	9	9	2	18%
長崎県	27	26	25	23	22	21	6	24%
熊本県	20	19	19	18	17	17	3	17%
大分県	14	14	13	13	12	11	3	18%
宮崎県	11	11	10	10	9	9	2	19%
鹿児島県	36	35	33	32	30	29	7	20%
沖縄県	26	26	26	26	26	25	1	3%

#### (4) セメント製造

##### 【アウトプット】

セメント製造については、循環資源の利用が多く、インプットの水銀量の把握が困難なことから、2014年度の大気排出量 5.5 トン<sup>[67]</sup>より大気排出係数 EFA=89.96mg-Hg/t を求め、(3)式より計算した。2010年度の大気排出量は、セメント協会から環境省への報告値に基づく 5.3 トン<sup>[67]</sup>を採用している。排出物は全て再資源化されるため、廃棄物の排出はない。

なお、2014年度の大気排出量は、国内全 51 施設の水銀排出量（平均水銀濃度×排ガス量）の合計値であり、カバー率 100%と高いものの、原燃料に循環資源の利用が多いことから、水銀濃度の変動に留意する必要がある。2010年度大気排出量 5.3 トン<sup>[67]</sup>から EFA を算出すると 94.56 mg-Hg/t であり、本稿で採用した EFA よりも+5%であった。

## (5) 鉄鋼製造

### 【アウトプット】

鉄鋼製造については、スクラップや副産物を利用するため、インプットの水銀量の把握が困難なことから、(3)(4)式より計算した。

排ガス測定値から推計された 2014 年度大気排出量（一次製鉄施設＋二次製鉄施設）2.5 トン<sup>[67]</sup>より、一次製鉄と二次製鉄の生産割合を一定と仮定して、2014 年度の粗鋼生産量 109,844 千トン<sup>[68]</sup>から大気排出係数  $EFA=22.56\text{mg-Hg/t}$  を求めた。2010 年度の大気排出量は、環境省大気排出インベントリーから 4.72 トン<sup>[44]</sup>を採用している。

廃棄物等については、業界ヒアリング結果から推計された 2010 年度の廃棄物等への排出量（一次製鉄施設＋二次製鉄施設）0.128 トン<sup>[60]</sup>より、 $EFW=1.16\text{mg-Hg/t}$  を求めた。

なお、鉄鋼製造施設が改正大気汚染防止法の水銀排出施設に指定されなかったこともあり、水銀大気排出量は、業界自主測定に基づく報告値からの推計である。一次製鉄施設 26 施設（カバー率 100%）と二次製鉄施設 60 施設（カバー率 93.8%）からの報告値であることから、信頼性は比較的高いと考えられる。一方、廃棄物等への排出量は、サンプル数が限定的であり、信頼性は低い。また、水銀含有排出物の多くは、工程内に再投入されるか、セメント製造業や非鉄金属製錬業において再生利用されており、廃棄物等への水銀排出量の変動する可能性に留意が必要である。

### 3.2.5 工業過程における改正大気汚染防止法の影響

水俣条約の対応のため、2015 年には改正大気汚染防止法（平成 27 年法律第 41 号）が公布され、「水銀排出施設」として政令で定めるものは、環境省令で定める排出基準を遵守しなければならないこととされた。2016 年 5 月現在、環境省において排出基準や対象施設の詳細が審議中であるが、条約附属書 D に掲げる石炭火力発電所、産業用石炭燃焼ボイラー（大気汚染防止法では、石炭火力発電所と産業用石炭燃焼ボイラーを一つの施設分類として扱う見込みであることから<sup>[71]</sup>、本研究においても「石炭火力」として一括して扱う。）、非鉄金属（鉛、亜鉛、銅、金）製錬及びばい焼の工程、廃棄物焼却炉、及びセメントクリンカーの製造設備は水銀排出施設として指定される見込みである。また、附属書 D の対象ではないが、日本では水銀排出量の多い鉄鋼製造施設は、要排出抑制施設として自主基準に応じた水銀排出抑制が求められる<sup>[18]</sup>。水銀の大気排出抑制は、大気のみならず、廃棄物への水銀排出にも影響があることに注意が必要であり、本研究では、水銀マテリアルフローへの影響を試算対象とした。

改正大気汚染防止法（2020 年 4 月 1 日施行見込み）による水銀排出規制の効果として、水銀大気排出実態調査結果<sup>[62]</sup>より、各施設区分における全水銀濃度分布のヒストグラムから排出削減割合を算出した。算出においては、排ガス量が同じと仮定して、基準値（既存施設）を超過した水銀排出が基準値以下に 2020 年度に削減されると想定した。また、小型石炭混焼ボイラーからの水銀排出量が不明なことから、小型石炭混焼ボイラーの排ガス量を石炭ボイラーの 10 分の 1 として計算した。鉄鋼製造に関しては、削減目標が公表されていないことから、本試算対象に含めていない。

また、各施設区分における BAT と想定された排ガス処理技術の導入状況等から<sup>[64]</sup>、大気排出削減方を想定し、水銀マテリアルフローへの影響を試算した。即ち、排ガス処理設備の更新は大気排出削減分が廃棄物等へ排出され、反対に、水銀含有量の少ない原燃料への変更は、大気排出削減と同様に廃棄物排出も削減されるとして、上記推計結果を 2020 年度以降の大気及び廃棄物等への水銀排出量の推計に反映した。

### 3.3 推計結果と考察

#### 3.3.1 水銀使用製品からの水銀排出量

ワイブル関数にて設定した水銀使用製品の排出（廃棄）台数の推移は、例えば、家庭からの廃蛍光ランプの場合、図 3-4 のように推計される。また、体温計の水銀回収原単位から拡大推計した体温計からの水銀排出量は年間 0.55 トンと推計された。

水銀使用製品からの水銀総排出量（大気、廃棄物、水銀回収への排出量の合計）の予測結果は、図 3-5 に示すとおり、2020 年に向けて製品の水銀フリー化が急速に進むことにより、2010 年度の約 18 トン<sup>[49]</sup>から、2020 年度に約 5 トン(2010 年度比 27%)、2030 年度に約 3 トン(2010 年度比 16%)と減少し、2030 年度以降は代替が困難な用途からの排出のみになると推計された。また、本推計結果から、今後 10 年間において、重点的に水銀回収の対応が必要な廃製品は、蛍光ランプ及び血圧計であることが明らかになった。

なお、医療用水銀血圧計については、医療機関へのアンケート結果<sup>[1][49]</sup>から示されるように、使用終了後も退蔵され、廃棄されない場合を考慮する必要があるため、本推計結果より緩やか、かつ長期間にわたる水銀排出となる可能性が考えられる。

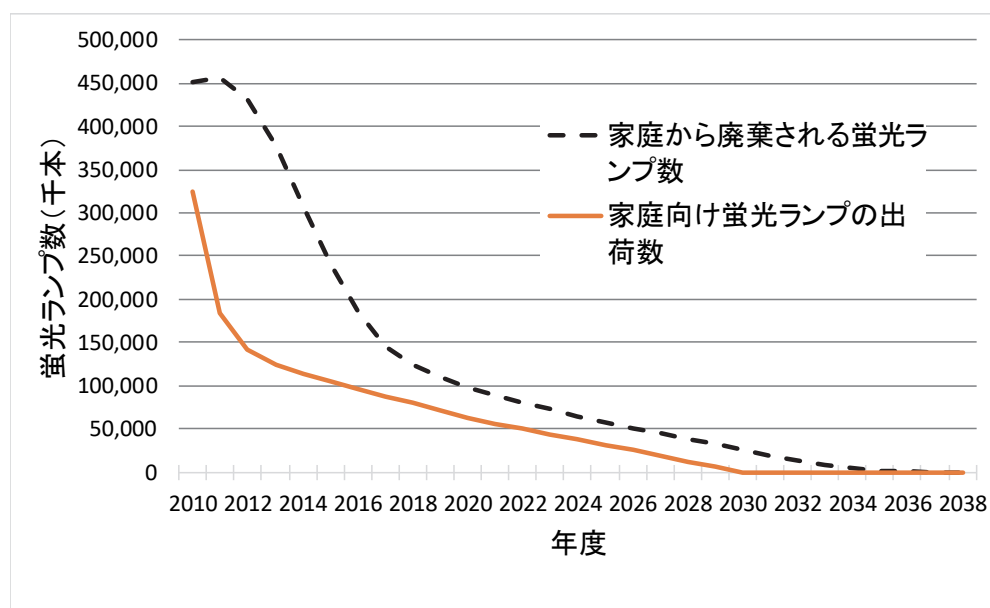


図 3-3 蛍光ランプ（家庭向け）の出荷と廃棄の将来予測

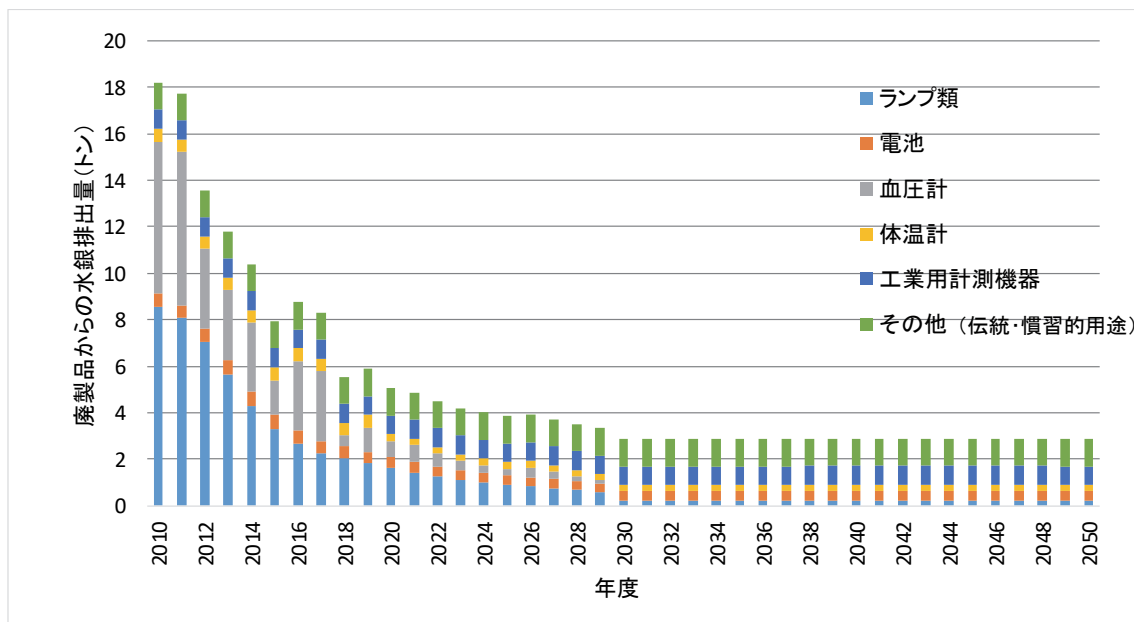


図 3-4 水銀使用廃製品からの水銀排出量予測

### 3.3.2 工業過程からの水銀排出量

#### (1) 改正大気汚染防止法及び施設更新による影響

改正大気汚染防止法による水銀の大気排出抑制効果の試算結果を表 3-11 に示す。既存施設に対しては、非鉄金属製錬の鉛 2 次施設において 64%、亜鉛 2 次施設において 16%、一般廃棄物焼却施設において 15%、セメント製造施設において 14%と、廃棄物を原燃料に使用している分野において、特に排出削減効果が高い。2014 年度の排出実績から見込まれる大気排出削減量は合計 1.32 トン、約 8%の排出削減があると試算され、一定の効果が見込めることが明らかとなった。一方で、排出削減が必要な業種は廃棄物を原燃料としているセメント製造業や非鉄金属製錬業等であり、BAT 技術と考えられるばい煙処理設備が多くの既存施設に導入されていることもあり、削減対策が再生資源の循環利用の抑制につながる可能性は否定できない。

一般廃棄物焼却施設については、廃製品からの水銀排出量の減少率が 2020 年度に 2015 年度比 37%であることから (3.3.1 の推計結果より)、大気汚染防止法による排出規制よりも製品への入口規制の方が排出削減効果は 2.5 倍程度大きい結果となった。

また、一般廃棄物焼却施設数の将来予測は 2040 年度に 906 施設と 2015 年度比で 17%減少する結果となった。廃棄物焼却施設の更新による水銀排出削減効果は、表 3-11 に示すとおり、産業廃棄物焼却施設の方が新設向け BAT 未設置の既存施設が多いため更新による削減効果が高い。特に 2020 年代後半に施設の更新の増加に応じて削減割合が上昇し、2050 年度には更新がない場合と比べて 10% (一般廃棄物)、23% (産業廃棄物) に達するとの推計結果となった。

表 3-11 改正大気汚染防止法による水銀排出削減効果の試算

施設区分		規制対象施設数 <sup>[80]</sup>	既存施設の基準値案 <sup>[71]</sup> ( $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ )	排ガス中全水銀濃度分布(平均値) <sup>[62]</sup> ( $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) ( $n$ =データ数)	施設区分における排出削減割合	2014年度比大気排出削減量(t)	BAT導入状況 <sup>[71]</sup> から予想される削減方策
石炭火力	石炭ボイラー	約 220	10	0.1-4.4(1.2) ( $n=51$ )	0%	0	—
	小型石炭混焼ボイラー		15	<0.1-16(1.9) ( $n=87$ )	1%	0.002	水銀含有量が少ない原燃料を選択
非鉄金属製造 <sup>[80]</sup>	1次銅	5事業所	30	<0.1-1.2 (0.5) ( $n=28$ )	0%	0	—
	2次銅	6事業所	400	0.1-360(66) ( $n=23$ )	0%	0	—
	1次亜鉛	6事業所	50	0.1-39(9.4) ( $n=20$ )	0%	0	—
	2次亜鉛	14事業所	400	<0.1-1100(90) ( $n=49$ )	16%	0.08	高度な排ガス洗浄等排ガス処理設備の改修
	1次鉛	1事業所	50	20内( $n=1$ )	0%	0	—
	2次鉛	23事業所	400	<0.1-2300(290) ( $n=36$ )	64%	0.02	高度な排ガス洗浄等排ガス処理設備の改修
	1次金	1事業所	30	5-10内( $n=1$ )	0%	0	—
	2次金	2事業所	50	<0.1-11(2.0) ( $n=6$ )	0%	0	—
廃棄物焼却	産業廃棄物	約 1300	50,100 (30) <sup>注2)</sup>	<0.1-380(8.7) ( $n=350$ )	9% (26%)	0.20	活性炭処理等排ガス処理設備の改修
	一般廃棄物	約 1000	50 (30) <sup>注2)</sup>	<0.1-130(17) ( $n=64$ )	15% (33%)	0.23	廃製品分別の徹底
	下水汚泥	130		<0.02-58(11) ( $n=33$ )	2% (7%)	0.03	活性炭処理等排ガス処理設備の改修
セメント製造	30事業所	80 (140) <sup>注3)</sup>	0.9-260(46) ( $n=98$ )	14%	0.76	水銀含有量が少ない原燃料を選択	

注 1) 非鉄金属製造において、1次施設は鉱石及び精鉱を主な原料とする炉、2次施設はリサイクル原料を主な原料とする炉のことである。

注 2) 廃棄物焼却施設の排出基準値案は、既存施設であって、水銀回収義務付け産業廃棄物及び水銀含有再生資源を取り扱うものは  $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、それ以外は  $50 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、水銀廃棄物を取り扱わない新設施設は  $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  である<sup>[71]</sup>。本試算では、産業廃棄物焼却施設には  $100 \mu$

g/Nm<sup>3</sup>を適用しているが、最も厳しい 30 μg/Nm<sup>3</sup>が適用した場合の削減割合をカッコ内に記した。

注 3) セメント製造施設のうち、原料とする石灰石中の水銀含有量が 0.05mg/kg 以上であるもの（5 施設を想定）については、自治体に届けた上で、140 μg/Nm<sup>3</sup>の排出基準が適用される<sup>[71]</sup>。本試算では、150 μg/Nm<sup>3</sup>を超過した 6 データが 140 μg/Nm<sup>3</sup>に排出削減されると想定した。

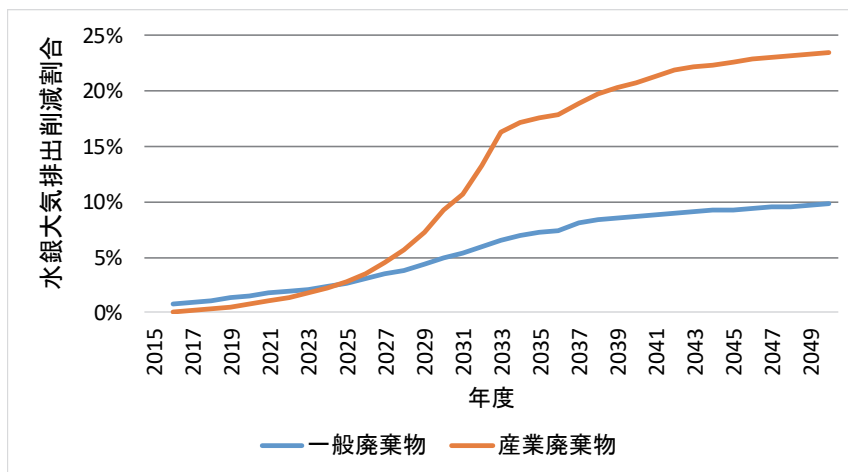


図 3-5 焼却施設の更新による水銀大気排出削減割合

## (2) 工業過程からの水銀排出量

工業過程からの水銀排出量の将来推移は、大気への排出は、2010年度の約 19 トンから緩やかに減少し、2020年度に約 15 トン、2050年度に約 13 トンと推計され、改正大気汚染防止法や水銀使用製品の減少の効果が示される結果となった（図 3-7）。一方、廃棄物等への水銀排出は、2010年度の約 47 トンから 2030年度まで約 50 トンで緩やかに増減した後、2050年度に約 56 トンまで増加が推計される結果となった（図 3-8）。非鉄金属製錬施設からの排出が総排出量の約 7 割を占めており、水銀の排出増加は、原料鉱石の品位低下が主な要因であるといえる。

なお、原燃料に循環資源を利用しているセメント製造、非鉄金属製錬、鉄鋼製造においては、その循環利用過程において水銀が蓄積されていく可能性があり、今後注意が必要である。また、筆者が水銀回収業者に行ったインタビュー調査によると<sup>[81]</sup>、2013年度、2014年度とも水銀回収量は本推計結果を上回る勢いで増加していることから、水銀インプットの増加によるものか、処理方策の変化によるものか、今後の動向に注視が求められる。

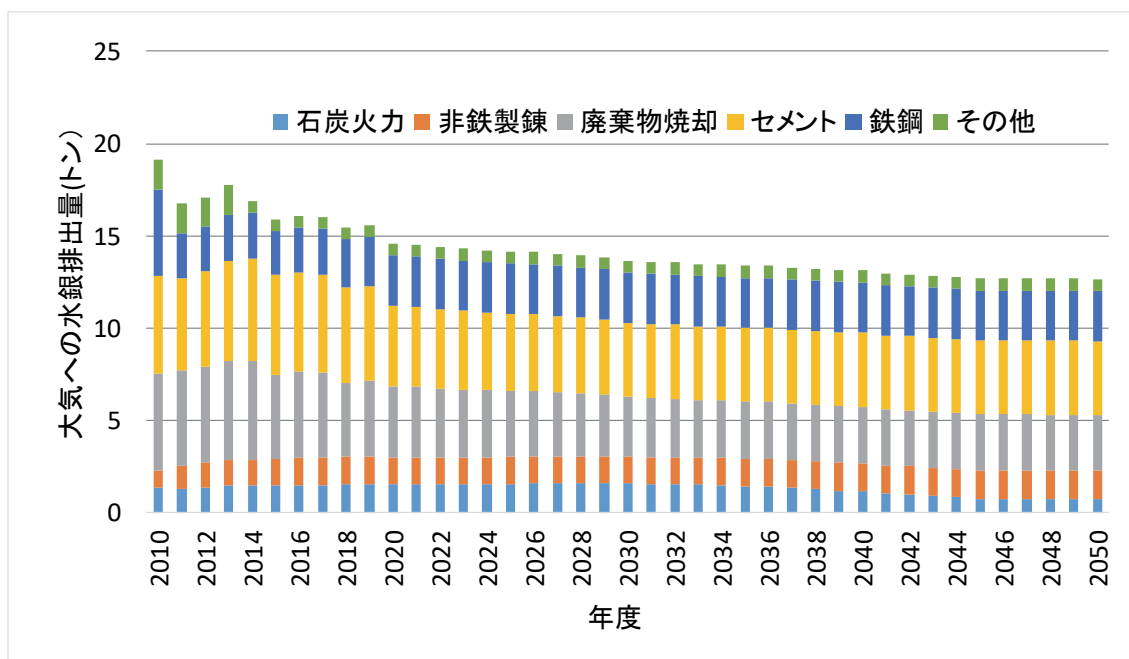


図 3-6 工業過程からの大気への水銀排出量予測

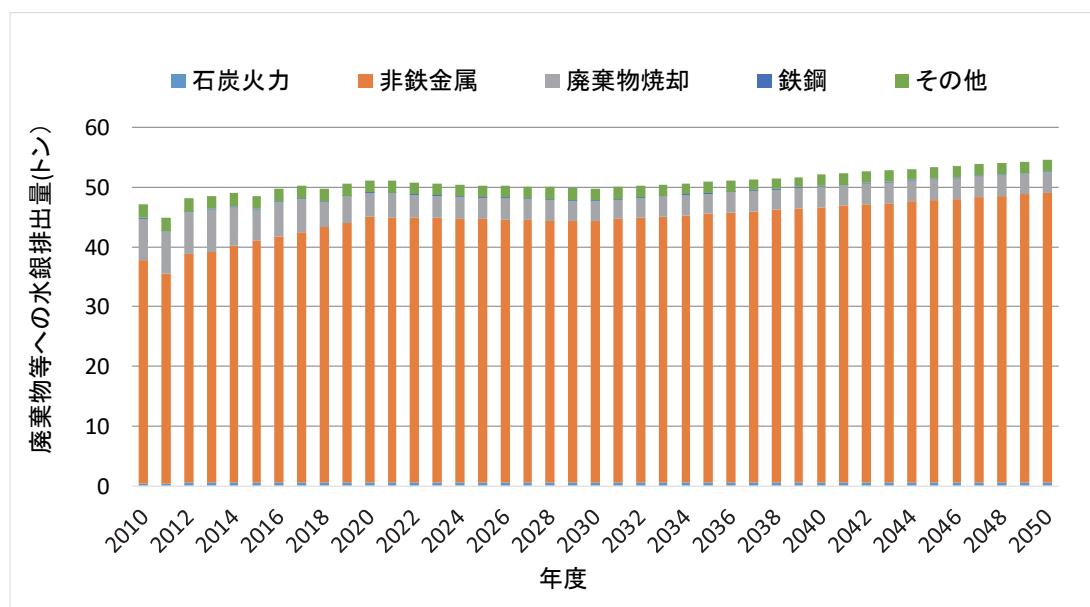


図 3-7 工業過程からの廃棄物等への水銀排出量予測

### 3.3.3 大気と廃棄物等への水銀分配

#### (1) 水銀使用廃製品からの水銀分配

廃製品からの水銀回収率は、2010年度の水銀回収実績と3.3.1で推計した排出量を分母に計算すると、表3-12に示すとおり、電池は9割を超えているが、ランプ類は2

割、計測機器類、体温計は1割以下となった。ただし、水銀回収実績値は環境省調査で把握できた回収量のみのため、実際の回収率は本試算結果よりも高い可能性はある。表3-3に示した処理業者へのアンケート調査に基づく水銀回収割合に比べると、電池は高く、ランプ類、計測機器類は低い計算結果となった。

また、水銀排出分配割合（表3-3）に基づき計算した廃製品からの水銀排出先を図3-9に示す。2016年度の水銀大気排出量は、廃製品からの排出量削減及び水銀回収促進の効果により約1トンと大幅に減少した(2010年度比約9割減)。水銀回収量は約6トンに増加する(2010年度比約2倍)と推計され、以降は水銀回収の割合が多くを占める結果となった。

水銀回収シナリオによる感度分析の結果を図3-10に示す。BAUシナリオ(2010年度回収率)に比べ、いずれの水銀回収シナリオでも2020~2050年度の間約1~2トンの範囲で水銀回収量が多く、その分大気排出が少ない推計結果であった。また、ランプ優先シナリオでは、2050年度に0.4トン回収量が多い結果となったことから、ランプ類よりも計測機器類の回収率が回収量推計結果に効いていることが示唆された。

表 3-12 廃製品からの水銀回収率の試算結果(2010年度)

廃製品種類	水銀回収量(t)	推計水銀排出量(t)	回収率
電池	0.556	0.578	96%
ランプ類	1.691	8.565	20%
計測機器	0.503	7.338	7%
体温計	0.021	0.547	4%

注) 水銀回収量は、環境省調査<sup>[21]</sup>による2010年度の回収実績値(積み上げ)

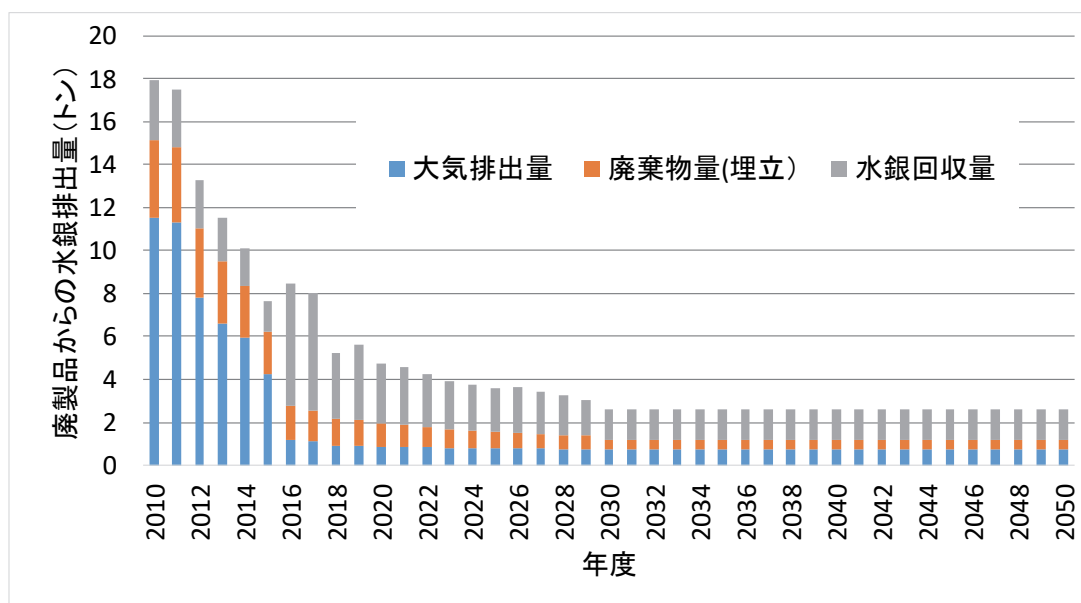


図 3-9 水銀使用廃製品からの水銀排出先の推測



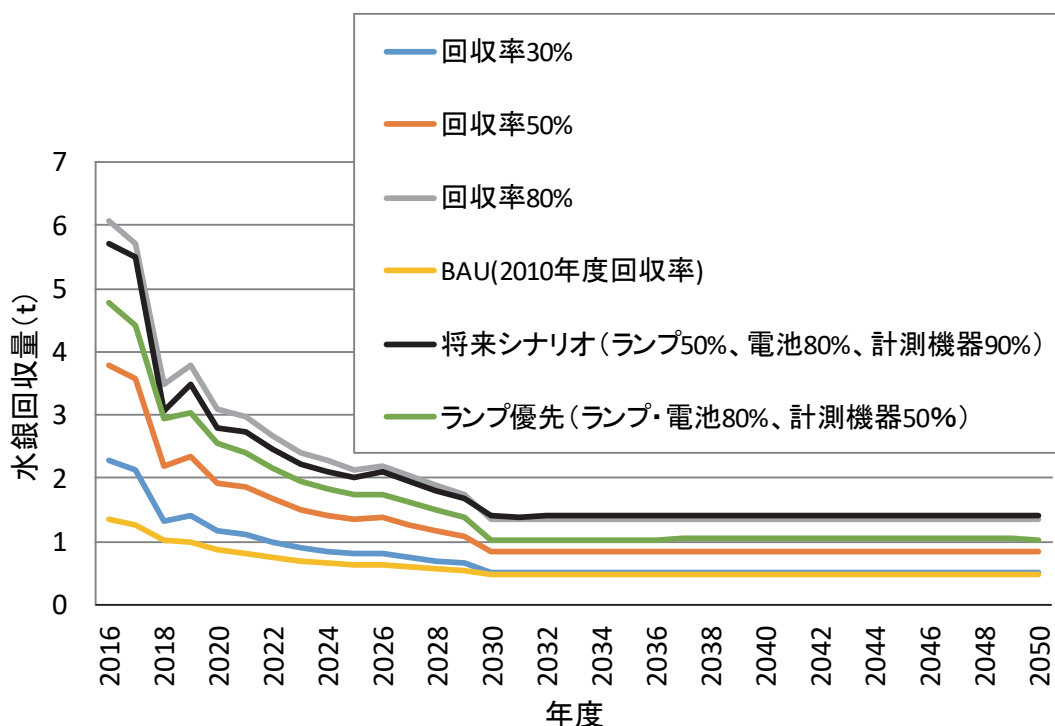


図 3-10 水銀使用廃製品からの水銀回収シナリオ別水銀回収量

## (2) 水銀排出量全体の水銀分配

改正廃棄物処理法令により一定濃度以上に水銀を含有する水銀汚染物はあらかじめ水銀回収が義務付けられることから、工業過程からの水銀回収は現在と同様に回収が行われると仮定した場合、日本の水銀排出全体における大気、廃棄物（埋立処分）、水銀回収への水銀分配は図 3-11 に示す結果となった。前述のとおり、2010～2014 年度の活動量は入手可能な統計情報に基づいており、2015 年度以降は将来シナリオに基づいて推計されたものである。大気排出量は 2010 年度の約 31 トンから 2050 年度の約 13 トンに半減し、廃棄物量（埋立処分）も 2010 年度の約 12 トンから 2050 年度の約 6 トンに半減する一方、水銀回収量は 2010 年度の約 42 トンから 2050 年度には約 52 トンに増加した。

なお、水銀使用廃製品と工業過程からの水銀排出の整合性を検証すると、2013 年度の一般廃棄物焼却施設への水銀のインプットは、焼却対象物中平均水銀濃度<sup>[64]</sup>から求めた 7.6 トンであるのに対し、家庭からの水銀使用廃製品の排出は約 4 トン（家庭用ランプ＋電池＋体温計）と少なく、焼却施設への水銀投入量が過大推計なのか、家庭用水銀使用廃製品以外の水銀含有廃棄物の混入があるのか不明である。こうした廃棄物を原燃料とする工業過程の水銀フローの実態解明については今後の課題である。

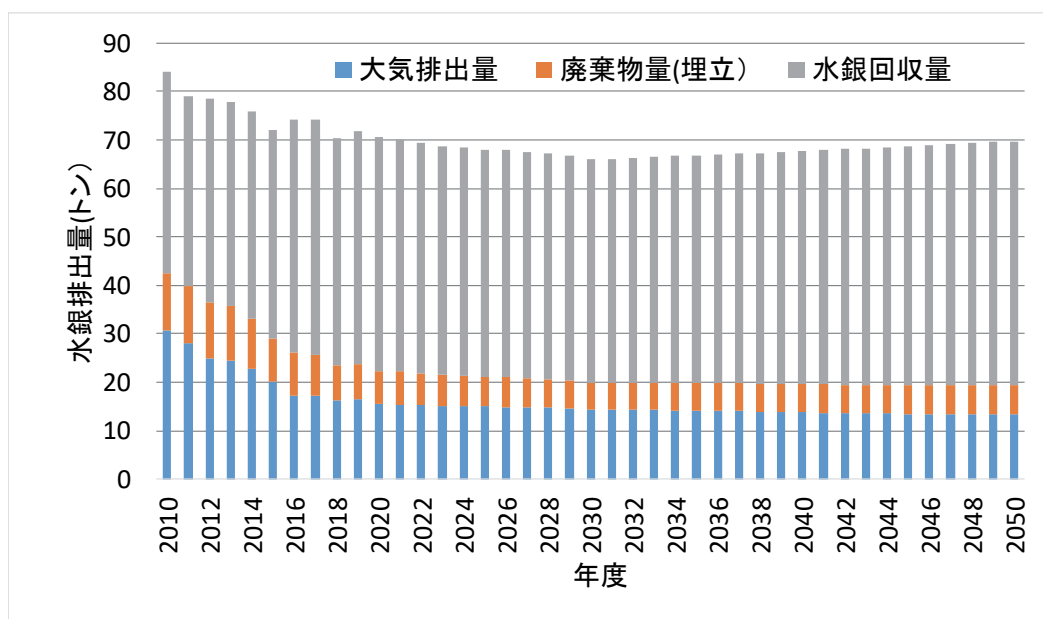


図 3-11 我が国全体における水銀排出の大気、廃棄物(埋立)、水銀回収への分配

### 3.3.4 推計結果のまとめと考察

水銀使用製品由来の水銀総排出量は、製品の代替化等により 2020 年度には約 5 トンにまで急減するため (2010 年度から約 7 割の削減)、今後数年が廃製品の回収に注力すべき時期となる。特に排出量の多い蛍光灯及び血圧計への回収促進効果は大きいと考えられる。2020 年度の廃製品からの水銀回収量は約 3 トンであるが、将来の回収率の設定によっては 1~2 トン少ない可能性もある。なお、退蔵された体温計や血圧計等からの排出については不確実性が大きく、精度の向上には保有実態と回収実績の蓄積が必要である。

工業過程からの水銀総排出量は、年間 65 トン近辺で推移する見通しであった。特に水銀回収量の 9 割以上を占める非鉄金属製錬業からの水銀排出の動向は、我が国の水銀管理を検討する上で鍵となる要素である。また、改正大気汚染防止法による水銀大気排出の削減効果は約 1 トンと試算された。将来の排出量の推計は活動量の将来シナリオに大きく依存するが、今回の設定では、石炭火力を除き、活動量に大きな変化を見込んでいない。しかし、最も影響が大きい非鉄金属製錬において、鉱石の品位の低下が排出量推計結果に効いており、品位の見通しによっては±15%程度の排出幅があり得る。また、廃棄物及び循環資源を原燃料としている業種においては、水銀量の代表値の把握が難しいため、信頼性がやや低いことに留意が必要である。

これら水銀排出の推計結果を踏まえ、2010 年度と 2050 年度の我が国における主要な水銀フローを図 3-12 に示す。環境省公表の 2010 年度大気排出量 14~18 トン<sup>[44]</sup>と比較すると、本研究は 31 トンと大きく見積もっているが、これは、本研究では水銀使用製品からの水銀排出を含めているためであり、水銀回収や埋立処分が報告されていない水銀使用製品中の水銀量は全て大気に排出されたものとして、安全側に計算した結果である。水銀回収量は、2010 年度の約 42 トンから 2050 年度の約 52 トンに増加するとの推

計結果であり、非鉄鉱石の品位の幅を考慮すると年間約 44～59 トンの回収量が見込まれる。水銀の環境中への排出を可能な限り抑制し、水銀廃棄物を適正に管理するという水俣条約の趣旨に合致した方向へ国内水銀フローの変化が示されていると言える。

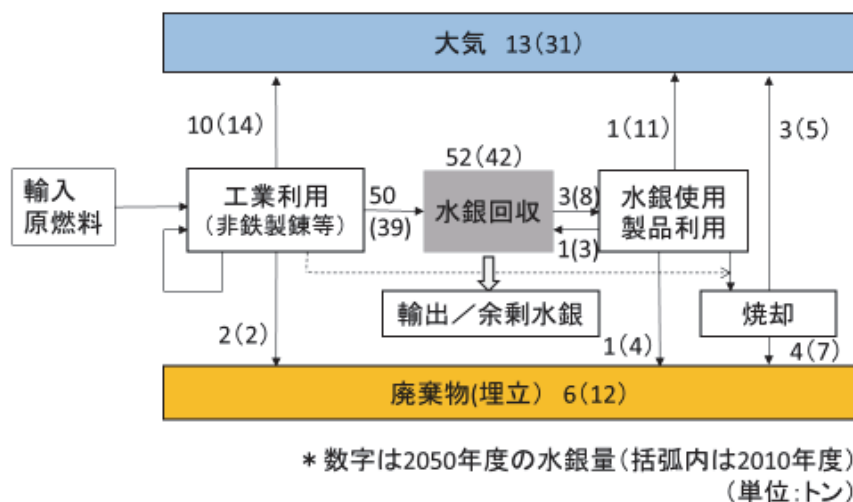


図 3-12 水俣条約を踏まえた国内水銀フローの変化の予測

### 3.4 まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- 水俣条約の影響により、日本の水銀排出は大気・埋立への排出が減少し、水銀回収が増加する見通しであることが明らかとなった。2010 年度から 2050 年度までの水銀の排出変化として、大気排出量は約 31 トンから約 13 トンに、埋立処分量は約 12 トンから約 6 トンにと半減する一方、水銀回収量は約 42 トンから約 52 トンに増加すると予測された。
- 我が国の水銀マテリアルフローにおいて、排出の 9 割を占める非鉄金属製錬由来の水銀の動向は今後、重要な要素である。非鉄鉱石の品位の幅を考慮すると、年間約 44～59 トンの回収量が推計された。
- 製品由来の水銀排出は今後急速に減少すると予測され、入口規制と水銀フリー製品への転換の効果が示された。
- 水俣条約を受けた国内施策の水銀排出削減の効果として(2020 年度時点)、①製品への水銀使用抑制策により約 5 トン削減、②廃製品からの水銀回収促進策により約 2 トン削減、③改正大気汚染防止法の大気排出抑制策により約 1 トン削減が見込まれ、水銀使用製品への入口規制が最も削減効果が大きいと評価された。

本研究により、一定の前提に基づく推計ではあるものの、2050年までの我が国の水銀マテリアルフローの将来見通しを概観することができた。今後は、廃水銀等の最終処分体制をこれから整備しなければならない現状を鑑みると、毎年50トン強発生する回収水銀のうち、条約で認められている用途への輸出を考慮して、最終処分が求められる水銀量の見通しを明らかにすることが必要であり、次章において検討する。

## 第 4 章 国際的な水銀需給バランスと日本における 余剰水銀発生予測

---

### 4.1 概説

2013 年に水俣条約が採択されたことを受け、今後、水銀の工業利用や製品への利用等が制限され、世界的に水銀需要の低下が見込まれる。我が国では、水銀代替技術の普及により水銀の国内需要は既に年間 10 トン以下と少ないものの、水銀供給としては、非鉄金属製錬業等工業過程から非意図的に排出された副産物や水銀使用廃製品から回収される水銀が約 50 トン（2010 年）あり<sup>[44]</sup>、そのほとんどが精製された後、輸出されている。しかし、水銀はこれまで有価物として取り扱われてきたが、条約による国際的な水銀需要の低下を受け、回収水銀を廃棄物として国内処分をしなければならない事態が将来想定される。2015 年の廃棄物処理法施行令改正により廃水銀等の処理に関する法整備は進んでいるものの、実際の最終処分体制はこれから整備しなければならない。このため、処理施設の処理能力や最終処分場の容量を検討するに当たり、余剰水銀の発生見通しを把握することは喫緊の課題である。

第 3 章で示されたように、将来、毎年 50 トン強の国内回収水銀の発生が予測されるものの、このうち、条約が認める用途への国内利用、輸出を除いた余剰水銀量の将来推移に関する詳細な研究はない。また、水銀の将来の需給見通しについては、2009～2010 年に UNEP がアジア、南米、東欧・中央アジア・ロシアの余剰水銀の見通しを 2005 年実績に基づき 2010～2050 年まで推計<sup>[82][83][84]</sup>しており、全地域において 2020 年には余剰水銀が発生する<sup>[85]</sup>としているが、欧米の水銀輸出規制による影響やクロロアルカリ製造業の水銀ストックの市場供給の禁止等の条約採択後の最新の状況を踏まえた見直しとともに、推計対象地域の拡大が必要である。このため、本章では、水俣条約の影響を踏まえた世界の水銀需給の見通しを推計し、国際的な水銀需給バランスを踏まえた潜在的な余剰水銀の発生量の将来見通しを明らかにする。

### 4.2 研究手法

#### 4.2.1 国連貿易統計にみる国際的な水銀需給

水銀の国際需給を把握するため、国連貿易統計<sup>[20][86]</sup>より 2014 年の水銀（HS コード 280540）及び水銀化合物（HS コード 2852）の貿易フローを分析した。また、日本からの輸出された水銀の使用用途について、国内大手水銀回収事業者へヒアリングを行った。

## 4.2.2 世界の水銀需給の見通し

### a) アジア、南米、ロシア・中央アジア・東欧

本稿では、UNEP 推計 [82] [83] [84] 及び高岡ら [49]が更新したアジアの推計結果を基に、本研究で求めた日本の回収水銀量予測を反映し、クロロアルカリ製造用途の水銀消費量 [87]及び水銀鉍出量 [88]を更新した。将来シナリオについては、原則、水俣条約の規定通りに水銀の需給量が削減されるとし、将来のフェイズアウトのスケジュールが決定されていないものは、UNEP 推計の将来シナリオを採用した。具体的には、塩ビモノマー製造用途は、条約の附属書 B に従い 2020 年に 2010 年比半減とした上で、以降、UNEP 推計の 2030 年に全廃されるシナリオを採用した。ASGM 用途は、条約第 7 条において、実行可能な場合は廃絶と定められているものの、見通しは不明であり、UNEP 推計の 2020 年に 2010 年比半減、以降、年 5% ずつの削減とした。

また、UNEP 推計では、非鉄金属製錬業界からの水銀回収の将来シナリオとして、日本における 9 割を超える水銀回収率をアジア全体に適用しているが、日本の非鉄金属製錬業界における鉍種別の分業・相互補完体制は日本独自に発展した特殊なものであり、汚泥からの水銀回収に特化した大型設備整備を各国が行うことは現実的ではないと考えられる。このため、非鉄金属製錬業界の副産物からの水銀回収状況について、文献調査及び関係者ヒアリングの結果から、表 4-1 のとおり将来シナリオを見直した上で、当該地域の水銀需給の見通しを分析した。

UNEP の南米域の推計では鉍出水銀の世界最大輸出国であるメキシコが含まれていないため、2020 年以降は他地域の鉍出量と同じと仮定し、鉍出量を追加した。また、ロシア・中央アジア・東欧域の推計では、UNEP 推計の最大値と最小値の平均値を採用したが、その幅は供給で±50%、需要で±20%程度と同じ桁であり、平均値での推計で大きな問題はない。蓄積水銀廃棄物や水銀汚染地域からの水銀回収は約 3.3 万トンと見積もられているが、不確実性が大きいいため本推計では水銀供給に含めていない。

本推計では、UNEP 推計における前提条件と同様、3 つの地域間の水銀移動はないと仮定している。条約発効後、各国の輸出規制が厳格に運用されると地域での利用も難しくなる可能性はあるが、循環資源や有害廃棄物はある一定の規模で管理することが想定されることから、本研究ではリージョン単位で考えることとした。

表 4-1 アジアの非鉄金属製錬業における水銀回収シナリオ

		将来シナリオ	【参考】UNEP シナリオ
水銀回収設備の回収率		2030 年まで 30% <sup>注1)</sup> 以降 81% 注2)	93%
水銀回収の 実施割合	中国	2015 年以降 10%, 2030 年以降 50%, 2040 年以降 80%	2015 年以降 100%
	中国・日本以 外のアジア	2030 年以降 50%	2015 年で 50%, 2025 年以降 100%

注 1) UNIDO による中国の亜鉛製錬プロジェクトにおける水銀回収実績 [89]、亜鉛製錬量 [90]、水銀排出係数 [91]から計算すると、水銀回収率は 30%であった。

注 2) フィンランドの亜鉛製錬業における水銀回収量 [92]、亜鉛製錬量 [92]、水銀排出係数 [91]から計算すると、回収率は 81%であった。

#### b) EU、北米、オセアニア

余剰水銀に関する将来推計の報告がない EU、北米、オセアニアについては、大気排出インベントリー<sup>[91]</sup>、政府・産業界公表資料、統計データを基に、将来シナリオを設定して、2050年までの水銀需給の見通しを推計した（詳細は表 4-2 参照）。水銀使用製品については、UNEP 推計(アジア)と同様の将来シナリオとし、工業由来については、水銀需給が均衡していれば副産物からの水銀回収へのインセンティブは低いと考えられることから、水銀回収状況は現状維持とした。特に、EU 及び米国では、水銀の輸出禁止規制導入の動機ともなったクロロアルカリ製造の水銀セル廃止に伴う大量の水銀ストックがあることから、工業過程の副産物からは現状よりも積極的な水銀回収は行われなかったとした。

また、同様のリージョン単位の情報として、大気排出インベントリー<sup>[91]</sup>から、水銀供給源と関連する水銀大気排出量（ASGM（零細小規模金採掘）由来の水銀は回収困難のため供給源からは除く。）及び水銀需要と関連する製品への水銀使用量を地域別に算出した。大気排出量は、水銀供給量に直結するものではないが、将来の水銀供給源は製造業等からの回収水銀であることから、潜在的な供給源の規模を示していると考えられる。

#### c) 世界の水銀需給の見通し

上述の結果から、2050年における世界の水銀ストック量を試算し、非鉄金属製錬業からの水銀回収シナリオによる変動幅も試算した。また、世界の水銀需給の見通しについては、水銀輸出を禁止している EU 及びアメリカは世界の水銀需給に影響を与えないことから、欧米を除いた各地域の水銀需給を単純合計した。さらに、①クロロアルカリ製造で不要となった水銀は、条約第 3 条第 5 項(b)に基づき再利用が禁止されることから、2020 年以降の供給量から除いたシナリオ、②水銀需要の減少により水銀採掘量の調整が進むとして一次鉱出の供給を 2020 年以降除いたシナリオ、③2020 年以降の ASGM 需要を除いたシナリオについても示した。

#### 4.2.3 日本の余剰水銀の見通し

我が国においては、ASGM 用途への水銀輸出を避けるため、水俣条約発効後は輸出水銀の最終需要者の確認が輸出承認の手続きの際に求められることになる<sup>[93]</sup>。本研究では、日本における余剰水銀の発生について、上述の水銀の国際需給を踏まえ、水銀輸出量の 36%（2014 年実績<sup>[94]</sup>より計算）である製品用途の輸出が 2020 年に減少し、世界的に余剰水銀が発生する 2025 年以降輸出がなくなる場合（シナリオ 1）と試薬や医療用途の輸出が毎年 10 トン続く場合（シナリオ 2）、毎年 30 トン続く場合（シナリオ 3）の 3 つのシナリオで、回収水銀量から輸出量と国内需要を引いて計算した。

表 4-2 EU、北米、オセアニアにおける水銀需給の推計方法

分野	ベースデータ	将来シナリオ		
水銀供給	非鉄金属製錬から回収	EU:2010、2015年データは水銀輸出禁止令第6条に基づく事業者報告 <sup>[95]</sup> 2020年以降同レベル		
	北米:2010、2015年(2013年データを適用)の亜鉛製錬量はUSGS <sup>[90]</sup> ・水銀排出係数 31.5g/t-Zn(米)、25.6g/t-Zn(加)と水銀除去効率 98%はUNEP/AMAP <sup>[91]</sup> ・大規模金採掘からの水銀回収はアメリカのみ年間100トン <sup>[92][37]</sup>	2020年以降亜鉛製錬量は同レベル、副産物からの水銀回収率は50%と仮定。 大規模金採掘からの回収量は同レベルと仮定 <sup>[96]</sup>		
	豪:2010、2015年(2013年データを適用)の亜鉛製錬量はUSGS <sup>[90]</sup> ・水銀排出係数 118.2g/t-Zn(豪)と水銀除去効率95%はUNEP/AMAP <sup>[91]</sup> ・大規模金採掘からの水銀回収なし <sup>[97]</sup>	2015年以降亜鉛製錬量は同レベル、副産物からの水銀回収は2020年までなし、以降10%と仮定 <sup>[98]</sup>		
	天然ガス精製	・EU:2010、2015年データは水銀輸出禁止令第6条に基づく事業者報告 <sup>[95]</sup> ・北米、オセアニアでの回収なし 2020年以降同レベル(EUは2010~2015年実績の平均値)		
クロロアルカリ製造	2010、2015年データはWCC <sup>[87]</sup>	2020年に向けて廃止(北米にメキシコ含む)		
廃製品からの回収	以下の水銀需要推計結果より	2020年まで回収率8.8%(プロファイル1より)、以降25% <sup>[77]</sup>		
水銀需要	クロロアルカリ製造	2010、2015年データはWCC <sup>[87]</sup>	2020年に向けて廃止	
	電池	2010年のデータはUNEP/AMAP <sup>[91]</sup> の地域別データ	UNEP推計(アジア) <sup>[82]</sup> と同じと仮定	2015年までに75%削減、2025年までにゼロ
	計測機器			2015年までに60%削減、2025年までにゼロ
	ランプ			2015年までに20%削減、2050年までに更に20%削減
	電子機器			2015年までに55%削減、2050年までに更に55%削減
	その他(試験研究、医薬等)			2020年までに25%削減、2050年までに更に50%削減
歯科用アマルガム	2015年までに15%削減、2050年までにゼロ			



## 4.3 推計結果と考察

### 4.3.1 国連貿易統計にみる国際的な水銀需給

国連貿易統計<sup>[20][86]</sup>による2011年から2014年の水銀の輸出の推移によれば(表4-3)、2014年の世界全体の輸出量は2,120トンであり、2011年の2,930トンから継続して減少している。また、輸出上位8カ国で世界全体の輸出量の96%を占めており、日本は第7位の70トン(3%)である。EUでは2011年3月より、米国では2013年1月より域外への水銀の輸出が禁止されており、EU域内の移動であるスペインとドイツ、及び中継地と考えられるシンガポール、香港を除けば、事実上メキシコ、カナダ、スイス、日本が水銀の輸出国と解される。

また、輸入推移においても世界全体の輸入量は一貫して減少しており、2014年は2010年の約半分である1,448トンであった。貿易収支は、エチオピア、キューバ、コロンビア、ペルーで100トン以上輸入過多となっており(図4-1)、10トン未満の輸入量の国が多い。なお、2014年の輸入量は、同じ年の輸出量2,120トンよりも約600トン少なく、貨物の輸送による報告年のズレを考慮しても、過去の貿易統計における輸出入量の差と比較すれば、輸入量における過少申告の可能性が示唆される。ASGM用途の水銀は、輸入国において正確に申告されていない可能性が高いことから<sup>[99]</sup>、図4-1に示す水銀移動のフローは輸出国データに基づき作成した。EU域内での移動が貿易の大半を占めており、特にスペインからEU諸国への輸出が多いことがわかる。

表 4-3 世界の水銀貿易量の推移

(単位：トン)

年		2011	2012	2013	2014		
輸出	輸出量合計	2,930	2,895	2,471	2,120		
	上位 8カ 国	スペイン	824	951	1,009	1,123	53%
		メキシコ	134	262	268	301	14%
		カナダ	124	73	29	179	8%
		シンガポール	444	478	293	112	5%
		香港	211	245	149	102	5%
		スイス	54	165	133	87	4%
		日本	90	69	73	70	3%
		ドイツ	238	103	116	58	3%
輸入	輸入量合計	3310	2950	2083	1448		
	上位 8カ 国	エチオピア	0	0	171	218	15%
		キューバ	118	—	0	177	12%
		カナダ	96	5	1	144	10%
		コロンビア	84	101	100	127	9%
		シンガポール	567	609	328	113	8%
		ペルー	176	111	169	102	7%
		インド	187	123	183	78	5%
		米国	111	249	38	49	3%

同様に、2014年の水銀化合物の移動のフローを図4-2に示す（水銀化合物の移動量は化合物としての量。以下同じ。）。貿易収支は、ベルギー、フランス、英国で千トン以上輸入過多となっている。世界全体の輸出量は約1,600～3,600トンで変動しており（2014年は2,700トン）、2014年の最大輸出国は英国とタイの約470トンである一方、日本の輸出は1トン未満で推移している。2013年に発効した米国の輸出禁止令は水銀化合物の輸出を禁止していないため、水銀化合物に形を変えた水銀輸出のおそれが指摘されていたが、輸出量が約1,400トンと突出して多かった2012年を除けば、概ね300トン弱で推移しており（9割以上がカナダ向け。）、懸念されていた大規模な水銀輸出は統計上確認されなかった。米国環境保護庁では、水銀化合物のうち大規模金採掘の副産物として供給される塩化第一水銀が国内最多（金属水銀量は約25トン）と推計しており<sup>[100]</sup>、関係者ヒアリング結果<sup>[101][102]</sup>によれば、水銀化合物の輸出は、主に医薬用途が考えられるとのことであった。

近年の日本からの水銀輸出量は、70トン(2014年)と102トン(2015年)であり<sup>[86]</sup>、国内大手水銀回収業者<sup>[94]</sup>によれば、水銀塩用途（試薬、医薬品等、2014年度は49%）やランプ用途（18%）、クロロアルカリ用途(15%)が多い。

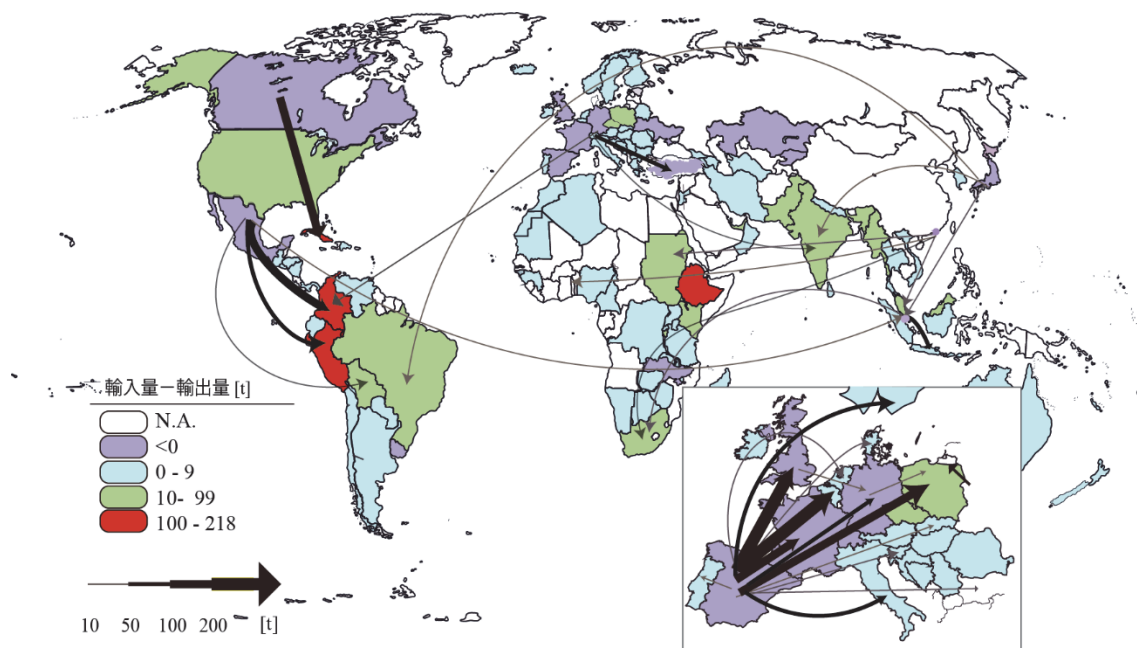


図4-1 水銀の輸出入バランスとフロー（2014年）

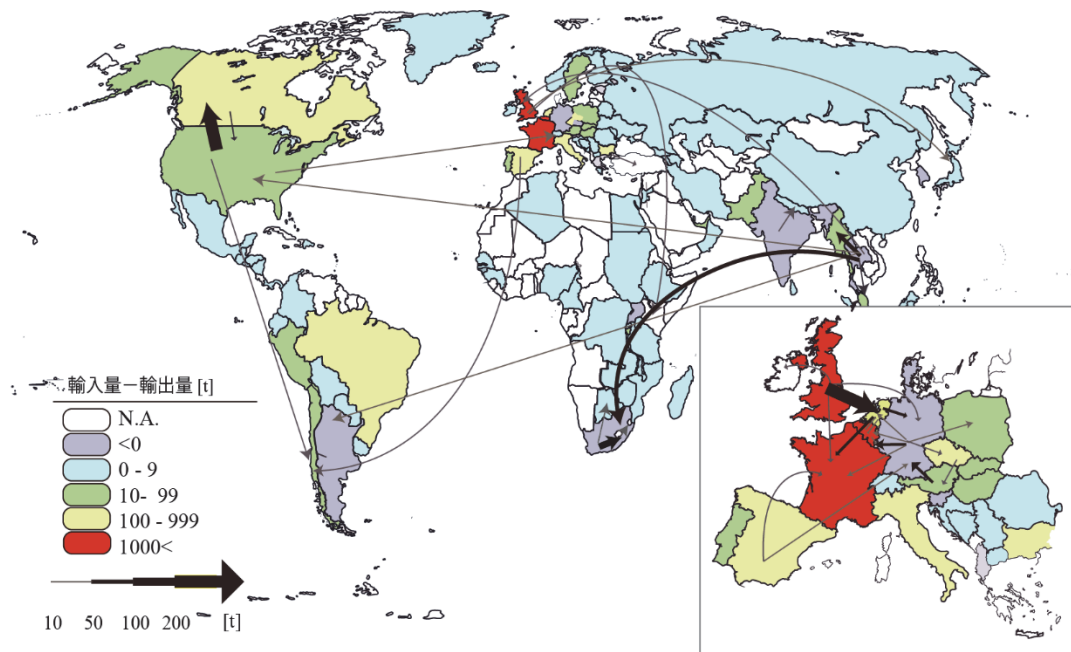


図 4-2 水銀化合物の輸出入バランスとフロー (2014 年)

以上のことから、水俣条約の影響により、近年金属水銀の需要は世界的に緩やかな減少傾向にあると考えられるが、水銀化合物への影響は明らかではなく、用途によっては条約の規制の対象外であることから、今後も一定の水銀化合物の需要があると考えられる。

#### 4.3.2 国際的な水銀需給の見通し

##### a) アジア、南米、ロシア・中央アジア・東欧

アジア、南米、東欧・中央アジア・ロシアの水銀需給バランスをそれぞれ図 4-3～5 に示す。なお、クロロアルカリ製造廃止由来の余剰水銀は、条約第 3 条第 5 項(b)に基づき市場への供給は禁止されるが、便宜上、図の供給側に記してある。

水銀供給において大きなセクターは、各地域とも一次鉱出であるが、2015 年には（データは 2014 年）需要量の減少に応じた鉱出量の減少は想定されていたよりも進んでいないことが明らかになった。条約第 3 条第 4 項により、水銀採掘は条約が効力を生じた日より最長 15 年間可能であり、条約が 2017 年に発効したので 2032 年までであるが、水銀需要の減少に伴い供給は減少すると考えられ、以降は非鉄金属製錬業からの回収水銀が主要な供給源となる。非鉄金属製錬業からの水銀回収量は、将来シナリオの見直しにより、アジアでは 2050 年で UNEP 推計よりも 55 トン少ない見積もりとなった。

水銀需要において大きなセクターはアジアでは塩ビモノマー製造（中国のみ）と ASGM、南米では ASGM と水銀使用製品製造、ロシア等ではクロロアルカリ製造と水銀使用製品製造であるが、製造工程における水銀使用の制限により、2030 年以降は概ね水銀使用製品製造となる。なお、ASGM 用途の水銀需要は、実態把握が難しく、2010 年の需要量に±50%の幅が見込まれる<sup>[91]</sup>など不確実性に留意が必要である。

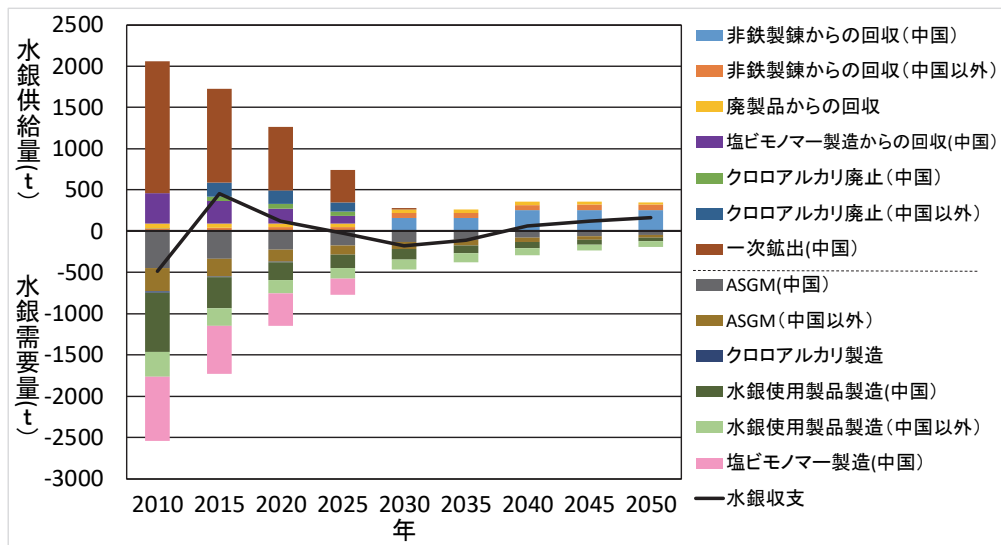


図 4-3 アジアにおける水銀需給の見通し  
(対象エリアは東アジア、東南アジア、南アジア)

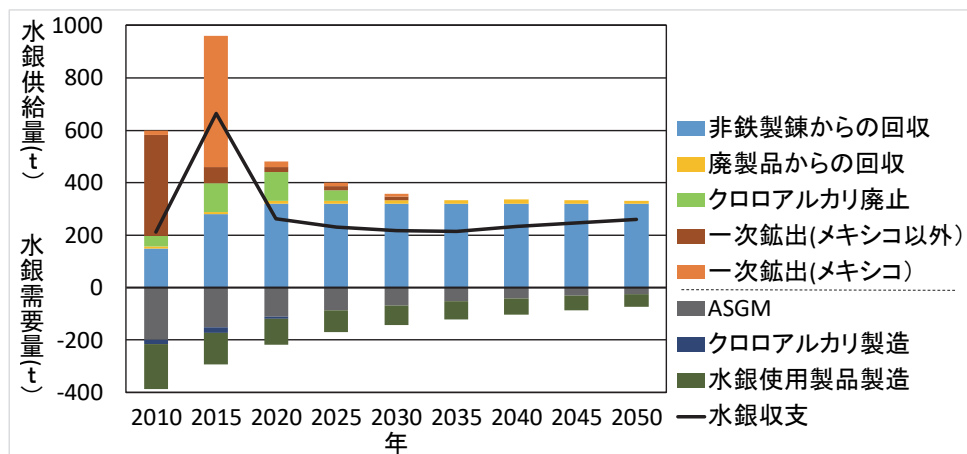


図 4-4 南米における水銀需給の見通し

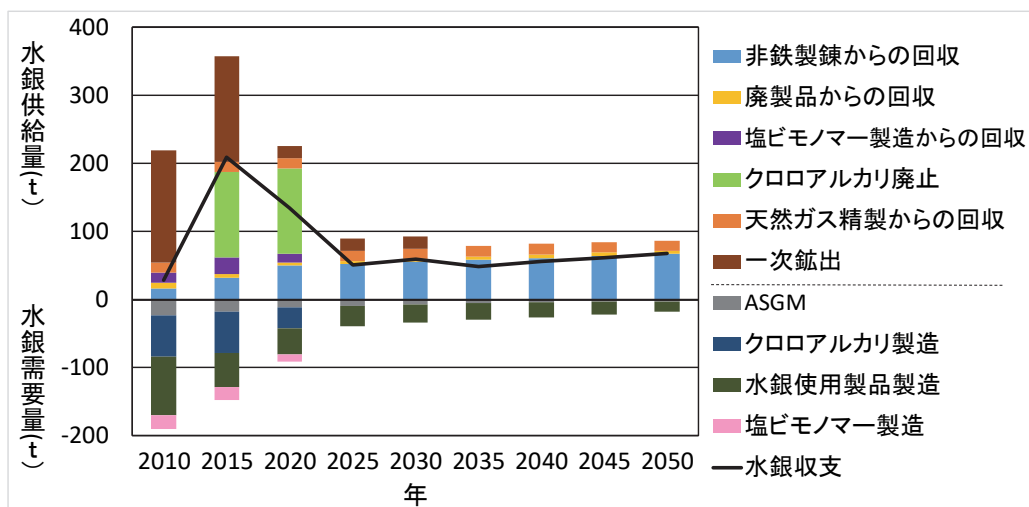


図 4-5 ロシア・中央アジア・東欧における水銀需給の見通し

地域別にみると、アジアが 2010 年時点で水銀供給量が約 2000 トン、需要量が約 2,500 トンと需給量ともに多く、2030 年に向けていずれも需給が縮小し、2050 年には供給量が約 300 トン、需要量が約 200 トンに落ち着いていく。南米では、2010 年時点で水銀供給量が約 600 トン、需要量が約 400 トンであり、一次鉱出による供給量が一旦増加するものの、2050 年には供給量が約 300 トン、需要量が約 70 トンに減少し、供給過多で推移する。ロシア域では、2010 年時点で水銀供給量、需要量がともに約 200 トンであり、一次鉱出とクロロアルカリ廃止による供給量が一時増加するものの、2050 年には供給量が約 90 トン、需要量が約 20 トンに減少する。いずれにしても、2015 年において水銀需給いずれも世界(EU とアメリカを除く)の約 6 割を占める中国の動向が将来の世界の水銀需給バランスに大きな影響を与えることがわかる。

#### b) EU、北米、オセアニア

EU、北米、オセアニアにおける水銀需給の見通しをそれぞれ表 4-4~6 に示す。いずれの地域でも製品への水銀使用の抑制効果により、2050 年に向けて水銀需要は着実に減少し、水銀供給については、EU では廃製品からの回収水銀、北米では大規模金採掘からの回収水銀、オセアニアでは廃製品からの回収水銀が主要な供給源である見通しであった。EC 報告<sup>[92]</sup>によれば、2005 年の非鉄金属製錬業からの回収水銀量は約 50 トンと推計されていたが、水銀輸出禁止令 (Regulation (EC) No 1102/2008) 第 6 条に基づく事業者報告<sup>[95]</sup>によれば、2010 年以降、非鉄金属製錬業から水銀の回収は行われていない。また、オーストラリアの金生産量は、2015 年実績で米国の 1.5 倍であり<sup>[96]</sup>、国内水銀大気排出量の約半分が大規模金採掘 (含む金製錬) 由来であるが<sup>[97]</sup>、水銀回収が行われていない。今後水銀価格が回収コストを大幅に上回るようであれば、将来水銀回収が行われる可能性がある。

水銀需給については、EU 及び北米では、クロロアルカリ製造における水銀セル廃止に伴う大量の水銀ストックが存在するが、これを除けば、北米では 2020 年、オセアニアでは 2025 年に余剰水銀が発生し、EU では需要が供給を上回る予測となった。

表 4-4 EU における水銀需給見通し

(単位：トン)

年	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
水銀供給合計	70	52	23	43	39	34	30	25	21
非鉄製錬から回収	0	0	0	0	0	0	0	0	0
天然ガス精製	10	0	8	8	8	8	8	8	8
クロロアルカリ製造 <sup>注)</sup>	38	35	0	0	0	0	0	0	0
廃製品からの回収	22	17	15	35	31	26	22	17	13
水銀需要合計	268	256	165	141	123	105	87	69	51
クロロアルカリ製造	15	61	0	0	0	0	0	0	0
水銀使用製品	253	195	165	141	123	105	87	69	51
収支	-198	-204	-142	-98	-84	-71	-57	-43	-30

注) クロロアルカリ製造における水銀セルの廃止に伴う水銀は含まない。

なお、EU の水銀セル中における水銀量は 2009 年末現在で 7,600 トン [103]、2014 年末現在で 5,346 トン [95]。

表 4-5 北米における水銀需給見通し

(単位：トン)

年	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
水銀供給合計	137	127	122	137	134	132	129	126	124
非鉄製錬から回収	113	112	112	112	112	112	112	112	112
クロロアルカリ製造 <sup>注)</sup>	6	3	0	0	0	0	0	0	0
廃製品から回収	19	13	11	25	22	20	17	14	12
水銀需要合計	213	169	119	101	90	79	69	58	47
クロロアルカリ製造	0	26	0	0	0	0	0	0	0
水銀使用製品	213	143	119	101	90	79	69	58	47
収支	-76	-42	3	37	45	53	61	69	77

注) クロロアルカリ製造における水銀セルの廃止に伴う水銀は含まない。

なお、アメリカの水銀セル廃止に伴う水銀量は1,100トンと見積もられている<sup>[37]</sup>。

表 4-6 オセアニアにおける水銀需給見通し

(単位：トン)

年	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
水銀供給合計	1	1	1	7	7	7	7	7	6
非鉄製錬から回収	0	0	0	6	6	6	6	6	6
廃製品から回収	1	1	1	1	1	1	1	1	1
水銀需要合計	17	10	8	6	5	5	4	3	3
水銀使用製品	17	10	8	6	5	5	4	3	3
収支	-16	-9	-7	1	2	2	3	3	4

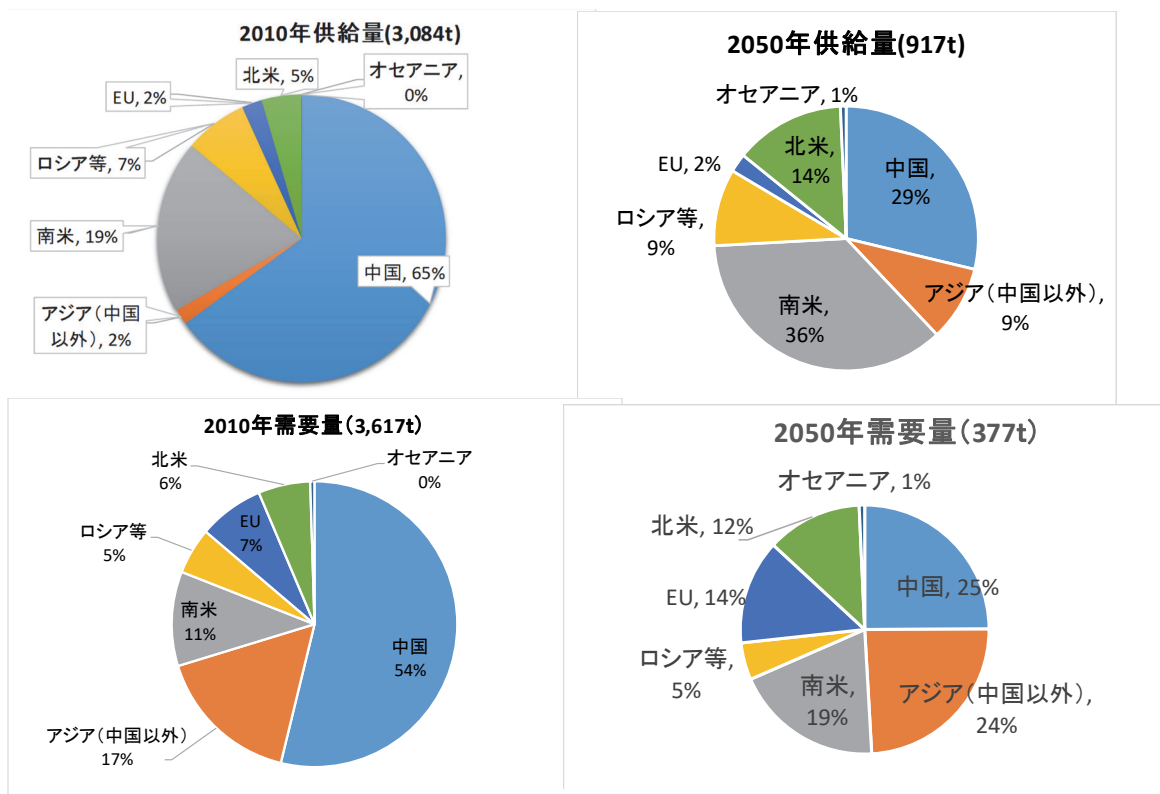


図 4-6 地域別水銀需給量予測 (2010年と2050年)

図 4-6 に 2010 年と 2050 年の地域別の水銀需給量の予測を示す。将来は需給量ともに縮小する見通しであり、現在は需給ともに中国が多いが、今後南米の割合も増加の見通しであった。

また、表 4-7 に ASGM を除いた大気排出量と製品中水銀使用量を示す。本研究では、中東及びアフリカを除く地域を推計対象としたが、これらを見ると中東・アフリカの寄与は少なく、本研究で対象としている需給はほぼ世界全体の需給を示していると言えよう。ただし、これらは水銀排出過程からの水銀回収が考慮されていないため、考慮に入れば、水銀供給の評価に影響を及ぼすと考えられる。

表 4-7 地域別の水銀排出量と水銀使用量 (2010 年)

地域	主要な水銀排出源	水銀供給関連		水銀需要関連	
		水銀大気排出量(トン) *除く ASGM	世界に占める割合	製品への水銀使用量(トン)	世界に占める割合
アジア	石炭、ASGM、非鉄、セメント	714	62%	633	44%
ロシア・東欧・中央アジア	石炭、非鉄	103	9%	63	4%
EU	石炭	88	8%	253	18%
中南米	ASGM、非鉄、大規模金採掘	87	8%	147	10%
北米	石炭	61	5%	213	15%
中東	セメント、石炭	37	3%	53	4%
アフリカ	ASGM、石炭	42	4%	54	4%
オセアニア	大規模金採掘	18	2%	17	1%

(AMAP/UNEP レポート<sup>[91]</sup>より作成)

### c) 世界の水銀需給の見通し

水銀の輸出を禁止している EU 及び米国は地域内で水銀移動が閉じていると想定し、その他の地域を対象に世界的な水銀の需給バランスを図 4-7 に示す。2005 年の推計需給量<sup>[82] [83] [84]</sup>は、供給量で±約 200 トン、需要量で±約 600 トンの推計幅があり、本推計においても同程度の変動があり得る。

今後の世界の水銀需給バランスは、不確実性に留意する必要があるものの、条約の効果によりクロロアルカリ廃止に伴う水銀の市場への再供給を禁止することで 2020 年に約 300 トンの供給減が期待でき、ASGM 需要にもよるが、一次鉱出がなければ 2020 年はまだ需要が供給を上回る。2030 年以降ほどのシナリオにおいても供給が需要を上回り、これまでのストックに加えて余剰水銀が発生する見通しであることがわかった。また、2050 年においても水銀需要は全世界で 200 トン弱あり、現在はメキシコの一次鉱出水銀が世界の主要な供給源となっているが、将来は廃製品や非鉄金属製錬業からの回収水銀が供給源となることを見込まれる。現在は回収水銀の主な輸出国は日本とスイスとみられるが、今後、中国やロシアなど、非鉄金属製錬業や水銀汚染地からの水銀回収

の余地がある潜在的な水銀供給国の動向が日本の回収水銀の輸出に影響を与えることが予想される。

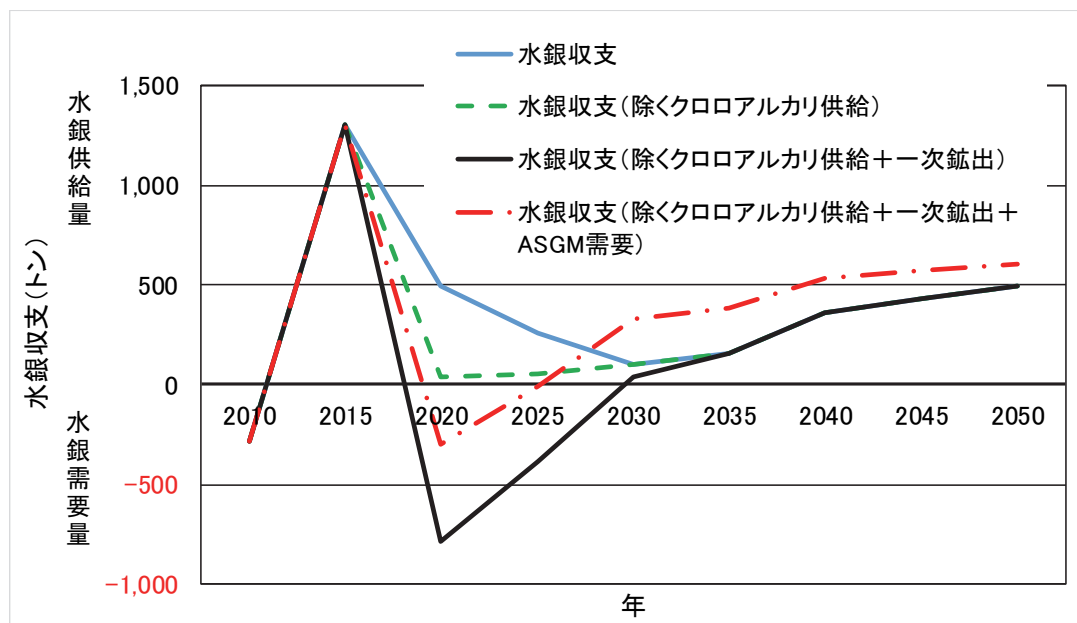


図 4-7 世界の水銀需給見通し  
(欧米を除く地域の合計)

以上の結果から、世界全体の余剰水銀ストック量は、欧米の抱えるクロロアルカリ製造由来の水銀も含めて、2050年に約24千～25千トンと試算され、UNEPによる推計28千～46千トン<sup>[85]</sup>と比べると、低めの推計結果となった。また、非鉄金属製錬業からの水銀回収が行われない場合と積極的に行われる場合で余剰水銀量を試算すると、約-2～35千トンで変動し、非鉄金属製錬業からの水銀回収の動向が世界の余剰水銀発生量に大きな影響を与えることが示唆された。

### 4.3.3 日本における余剰水銀の見通し

日本における余剰水銀の見通しについては、輸出がなくなる場合（シナリオ1）から代替困難な用途への水銀輸出が年間10トン（シナリオ2）、年間30トン続く場合（シナリオ3）の3つのシナリオにおいて推計を行ったところ、主な製品用途の水銀需要がなくなる2020年より余剰水銀が発生し、クロロアルカリ製造用途の水銀需要がなくなり、世界的に余剰水銀が発生する2025年以降余剰水銀量が増大する結果となった（図4-8）。また、2050年における余剰水銀のストック量は約600～1,400トンと試算された。ファイブ9の高純度を達成している日本の再生水銀は、中国等の回収水銀と競合することはなく、精度が求められる計測器等において今後も一定の需要はあるとの見方もあり<sup>[94]</sup>、水銀使用製品の代替化の進捗においても今後の動向に注意が必要である。



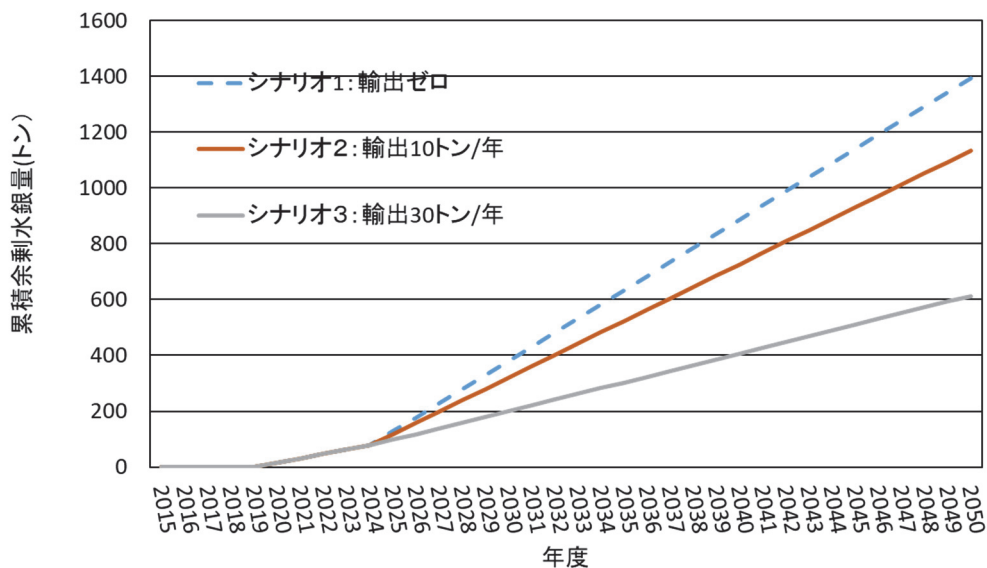


図 4-8 日本における余剰水銀累積量の見通し

#### 4.4 まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- 世界の水銀の供給は、アジア、南米、ロシア域において、一次鉱出が最も多いが、今後減少し、将来は、非鉄製錬と水銀使用製品からの回収水銀が供給源となる。水銀の需要は、水銀使用製品用途に加え、中国の塩ビモノマー製造と、アジアと南米の ASGM 用途が多いが、将来は、ほぼ水銀使用製品用途となる見込みであり、2050 年においても製品用途の需要は全世界で年間 200 トン弱あると推計された。
- 水銀の域外輸出を禁止している欧米を除いた世界の水銀の需給バランスは、鉱出の生産調整が進んでおらず、現在は供給過多となっている。今後、供給量、需要量とも縮小していくが、条約のクロロアルカリ製造由来の水銀の再供給禁止規定により、2020 年時点で約 300 トンの供給削減効果が見込まれ、一次鉱出がなければ、2020 年は需要が供給を約 800 トンほど上回る。2030 年以降は供給が需要を上回り、余剰水銀が発生する見通しであることが示された。
- 欧米も含む世界全体の余剰水銀ストック量は、2050 年に約 24 千～25 千トンと推計された。非鉄金属製錬業からの水銀回収シナリオによって約 2～35 千トンで変動し、非鉄金属製錬業からの水銀回収の動向が世界の余剰水銀発生量に大きな影響を与えることが示唆された。
- 日本においては、主な製品用途の水銀需要がなくなる 2020 年より余剰水銀が発生し、2050 年における余剰水銀のストック量は約 600～1,400 トンと推計された。

水俣条約を受けて、世界の水銀の需要及び供給はいずれも縮小しつつある。我が国は非意図的な水銀排出として、主に非鉄金属製錬由来の水銀が今後も継続して発生することが見込まれているが、世界的な水銀需要の低下により、こうした回収水銀が廃棄物化し、最終処分が求められる事態はあと数年で起こり得る。このため、余剰水銀が行き場を失うことのないよう、環境上適正な廃水銀等の最終処分体制の構築を急がねばならない。2050年までに余剰水銀のストック量が1,400トン発生するとした場合、容積は約100m<sup>3</sup>であり、中間処理による容積増加も考慮すれば、1,000 m<sup>3</sup>規模の施設整備が求められる。2015年の改正廃棄物処理法施行令により法制度は整いつつあるが、実際の処分体制の整備はこれからであり、水銀の硫化処理施設や最終処分場の早期整備に向けた対策が必要である。同時に、世界的に余剰水銀が発生する中、水銀管理が適正に行われるよう国際的な協調、協力が求められる。

# 第 5 章 最終処分場における維持管理期間に関する 要因分析

## 5.1 概説

廃棄物最終処分場においては、埋立が終了した後も、処分場が安定化し、施設の廃止が認められるまで、浸出水の処理等、継続して維持管理が必要である。有害な廃棄物が違法に処分され、1990 年の摘発以降も未だ原状回復に至っていない香川県の豊島事件に代表されるように、廃棄物の最終処分場が適正に管理されなければ、有害物質による土壤汚染や地下水汚染など環境が汚染され、環境修復には莫大な費用と何十年もの歳月がかかることになる。

埋立が終了し、収入がなくなった後の処分場管理に必要な費用を確保するため、廃棄物処理法（昭和 45 年法律第 137 号）第 8 条の 5 第 1 項（第 15 条の 2 の 4 において準用する場合を含む）の規定により、最終処分場の設置者は、埋立が終了するまでの間に、施設の廃止までの維持管理費用を積み立てることとされている。しかし、積立金額の算出に当たっては、埋立終了から廃止までの期間（以下、「維持管理年数」という。）をどう見積もるかが重要となるが、環境省の維持管理費用算定ガイドライン<sup>[25]</sup>に示された情報は限られており、維持管理年数の妥当性の判断が難しい状況にある。廃止までの期間が予測よりも長期化すれば、積立金が不足し、処分場の管理ができなくなることで、処分場を汚染源とした環境汚染が懸念される。このため、維持管理年数に影響を与える因子の解明が求められている。

管理型最終処分場の維持管理年数については、9 割以上が 5 年以内( $n=11$ )との 2008 年の調査報告<sup>[104]</sup>と、事業者の予測として、5~32 年（平均 16 年、 $n=28$ ）との環境省（2006）の報告<sup>[25]</sup>があるだけであり、実態と事業者見込みとに大きな乖離についても解明が必要である。廃棄物中の燃え殻等（燃え殻、焼却灰、ばいじん、鉱さい。以下同じ。）の割合が高く<sup>[25]</sup>、埋立開始時期が古い<sup>[105]</sup>ほど維持管理年数の見積もりが長期化する傾向が示唆されているが、データ数が少なく、どのような要素が維持管理年数を決定するのか、その影響度は不明である。また、2009 年に全国産業廃棄物連合会は稼働中の最終処分場における維持管理の取組状況を調査分析している<sup>[106]</sup>が、埋立終了後の維持管理期間に関する同種の報告はこれまでなく、実態は把握されていない。埋立終了後の維持管理費用については、一般廃棄物最終処分場の試算結果<sup>[107]</sup><sup>[108]</sup>が報告されているが、受け入れ廃棄物の種類が多様な産業廃棄物の処分場における試算は見当たらない。

このため、本研究では、適正な維持管理積立金額の算定に資するよう、特に有害物質含有廃棄物の受け入れ許容度に注目して、産業廃棄物管理型最終処分場を対象に維持管理期間に係る調査を実施し、維持管理年数を決定する因子を検討した。また近年、水銀廃棄物の処分基準が規定される等、埋立廃棄物の質に変化があることから、有害物質を含有する廃棄物の最終処分体制について、調査結果を踏まえ考察した。

## 5.2 研究手法

### 5.2.1 調査方法

管理型最終処分場における維持管理期間のデータを収集するため、自治体の産業廃棄物担当者と管理型最終処分場設置事業者に対してアンケート調査を実施した。調査に当たっては、事前に自治体産業廃棄物担当者と管理型最終処分場設置事業者に回答可能な調査設計となるようヒアリングを行った。調査の概要を表 5-1 に示す。両調査で同じ調査項目には下線を付した。自治体には、処分場設置事業者から自治体に報告されている維持管理年数と費用予測のデータ、及びこれらとの関連が考えられる因子として、既往研究<sup>[25][107]</sup>で関連性の報告がある埋立開始年、廃棄物中の燃え殻等の割合、水処理におけるキレート処理の有無、埋立容量に加え、埋立期間、日水処理量を調査した。

表 5-1 調査の概要

	自治体向け	最終処分場設置事業者向け
調査対象	都道府県政令市産業廃棄物担当者	管理型最終処分場設置事業者
調査方法	e-mail	郵送（産業廃棄物処理業者情報検索システム <sup>7)</sup> より宛先を把握）、回答は郵送又はweb入力
調査期間	2016. 12. 22～2017. 1. 27	2017. 1. 20～2. 10
発送数	116	171
回答数	65	56（紙 41+web15）
回答率	56.0%	32.7%
回答処分場数	167（稼働中 154、埋立終了 13）	69（稼働中 52、埋立終了 16、廃止 1）
調査項目	管理型処分場情報 処分場設置事業者名、 埋立容量、埋立開始年・終了年・ 廃止年、燃え殻等割合、埋立終了 後の年間維持管理費用、維持管 理年数、日水処理量、キレート処 理の有無	(1)事業者属性 会社名、資本金、情報公開の有無 (2)管理型処分場情報 設置場所、埋立容量、維持管理年数、燃 え殻等・汚泥・13号廃棄物割合、維持管 理年数設定根拠 (3)有害物質を含有する廃棄物の受入れ 廃棄物処理費用、有害物質含有廃棄物の 受入許容度・受入条件、浸出水原液中の 有害物質検出状況 (4)水銀廃棄物の受入れ 水銀廃棄物の受入れ意向・条件・拒否理 由、雨水浸入防止措置の影響
	維持管理積立金制度の問題	(5)埋立終了/廃止した処分場 維持管理費用の見込みとの差、維持管理 年数の見込みとの差、維持管理期間が長 期化した場合の問題

注) 下線は、両調査で同じ調査項目。

事業者には、受入れ廃棄物中の有害物質含有廃棄物の種別（燃え殻等、汚泥、13号廃棄物）の割合、廃棄物処理費用、維持管理年数の設定根拠、有害物質含有廃棄物の受入れ許容度（受け入れる、条件付きで受け入れる、受け入れないの3段階を設定）、浸出水原液中の有害物質の検出状況、水銀廃棄物の受入れ意向等について調査を行った。また、既に埋立終了又は廃止した処分場については、維持管理年数及び費用の見込みとの差及び維持管理年数が長期化した場合の問題点について調査した。

回答数は自治体 65（回答率 56%）、事業者 56（回答率 33%）であった。回答のあった処分場数はそれぞれ 167 と 69 であり、自社処分場を除いた全国の管理型最終処分場数 527（2014年4月1日現在）<sup>[109]</sup>を分母とすると、カバー率はそれぞれ 31.7%、13.1%であった。なお、両調査ともに回答を得られた処分場数は 13 であった。

### 5.2.2 分析方法

まず、得られた調査結果からデータの加工なしに、各要素間の相関関係を検討した。年間維持管理費用と維持管理年数については本論文の主題であるため、他の要素との散布図を作成し、相関関係を確認した。

次に、調査項目によって有効回答数が異なるため、全ての調査項目が有効回答であったデータセットを対象として、四分位範囲から外れ値を除外した上で、相関関係を分析した。調査項目の維持管理費用と日水処理量については、埋立容量当たりについても求めて、同様に分析を行った。また、有害物質を含有する廃棄物の受入れ状況と維持管理の関係を検討するため、水処理におけるキレート処理の有無別の維持管理費用の差、及び有害物質含有廃棄物受入れ許容度別の維持管理年数の差について、t検定を行った。

続いて、埋立終了後の維持管理年数を規定する影響因子を明らかにするため、維持管理年数を目的変数、維持管理年数と関連性があり得る要素を目的変数とした重回帰分析を行った。説明変数については、正規確率プロットと正規性の検定を行い、正規性を呈さなかった埋立容量は、対数変換により正規分布にした上で分析した。なお、変数選択には  $F=2.0$  を基準とした増減法を用いた（統計ソフトはエクセル統計 BellCurve ver.2.03 を使用した。）。また、埋立が終了した処分場は維持管理年数の見通しの確度がより高いと考えられることから、事業者調査における埋立終了の処分場データを抽出して同様の重回帰分析を行った。

これらを踏まえ、埋立が終了した処分場データの分析結果から導かれた維持管理年数と影響因子の関係式を稼働中の処分場データに適用し、稼働中の処分場における事業者の維持管理年数の予測の妥当性について検討した。

## 5.3 研究結果と考察

### 5.3.1 調査結果

#### (1) 集計結果

自治体調査及び事業者調査の回答のうち、維持管理年数の項目が有効回答であったデータの記述統計量をそれぞれ表 5-2、表 5-3 に示す。個別の処分場が特定される恐れのある埋立容量の最大値は概数で示した。

両調査で同じ調査項目については、処分場の埋立容量は、平均（括弧内は中央値）が自治体調査で 94 万（35 万） $m^3$ 、事業者調査で 124 万（41 万） $m^3$ であり、事業者調査結果の方がやや大きかった。また、廃棄物中の燃え殻等の割合は、図 5-1 の分布に示すとおり、自治体調査では「少し（1-20%）」の回答が全体の 29%と最も多く、事業者調査の結果と同様の傾向であった。

また、表 5-3 で示した調査項目以外の調査項目の集計結果を表 5-4 に示す。廃棄物の処理料金は、廃棄物の種類等によって幅のある回答となっており、図 5-2 に示すとおり、廃棄物 1 トン当たりの処理料金は 1~5 万円/トンが多かった。

表 5-2 自治体調査結果の記述統計量

	変 数	<i>n</i>	平 均	標準偏差	最小値	最大値	中央値
(a)	埋立開始年	116	1995	10.5	1972	2016	1994
(b)	埋立終了年	116	2026	18.8	2006	2187	2022
(b)-(a)	埋立期間（年）	116	30.5	22.5	4	207	29
(c)	埋立容量( $m^3$ )	116	940,000	1,930,000	1,500	15 百万	352,605
(d)	燃え殻等の割合 1. なし(0%) 2. 少し(1-20%) 3. やや多い(21-50%) 4. 多い(51-80%) 5. ほとんど(80%以上)	66	2.8	1.3	1	5	3
(e)	日水処理量 ( $m^3$ /日)	99	309	829	0	7,000	90
(e)/(c)	埋立容量当たり日水処理量( $m^3$ /日 $\cdot m^3$ )	99	0.00042	0.00058	0	0.00361	0.00023
(f)	水処理におけるキレート処理 1. している 2. していない	106	1.8	0.4	1	2	2
(g)	埋立終了後の年間維持管理費用（千円/年）	114	58,000	112,000	0	614,091	14,870
(g) $\times$ 1000/(c)	埋立物容量当たり年間維持管理費用（円/ $m^3$ )	114	350	1,450	0	13,882	59
(g) $\times$ (h) $\times$ 1000/(c)	埋立容量当たり総維持管理費用（円/ $m^3$ )	114	3,600	14,400	0	138,818	670
(h)	埋立終了後の維持管理年数（年）	116	12.7	7.6	2	48	10

表 5-3 事業者調査結果の記述統計量

変数	n	平均	標準偏差	最小値	最大値	中央値
埋立容量 (m <sup>3</sup> )	62	1,240,000	2,330,000	6,435	13 百万	410,297
燃え殻等の割合 (%)	59	27.0	24.8	0	100	20
汚泥の割合 (%)	60	24.5	25.9	0	100	17.8
第 13 号廃棄物の割合 (%)	55	0.6	2.3	0	15.0	0
廃棄物量当たり平均処理料金 (円/t)	44	32,400	22,500	1,500	103,500	28,500
維持管理年数(年)	62	14.3	10.8	0	55	12

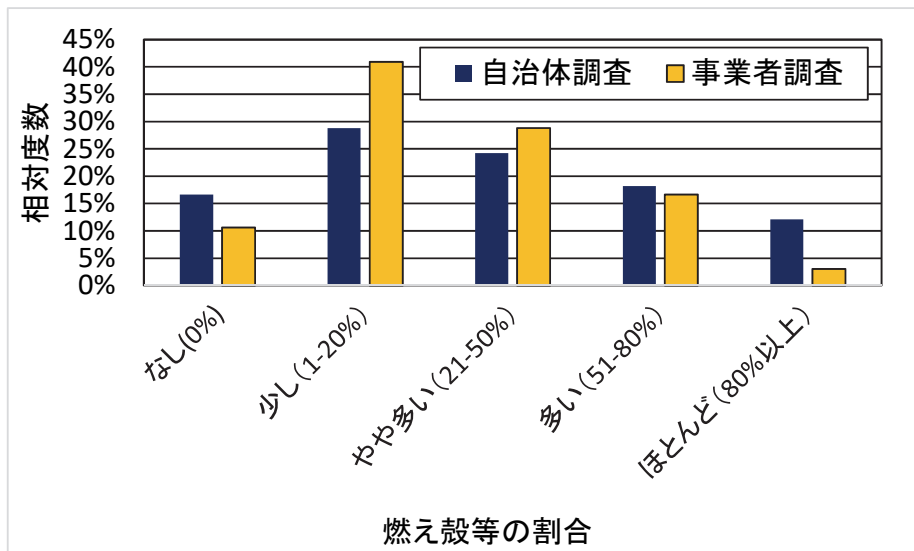


図 5-1 廃棄物中の燃え殻等の割合

表 5-4 事業者調査の集計結果

調査項目	回答数	割合
資本金・出資金		
500 万円以下	4	7.4%
1,000 万円以上～5,000 万円未満	23	42.6%
5,000 万円以上～1 億円未満	17	31.5%
1 億円以上～10 億円未満	6	11.1%
10 億円以上	4	7.4%
優良産廃処理業者認定制度の情報公開		
情報公開している	30	52.6%
情報公開していない	27	47.4%

維持管理年数設定根拠(複数回答可)		
環境省の維持管理費用算定ガイドライン	29	53.7%
自治体からのアドバイス	10	18.5%
これまでの経験	7	13.0%
埋め立てた廃棄物の種類	6	11.1%
水質モニタリングの結果	2	3.7%
その他	4	7.4%
未回答	2	3.7%
有害物質含有廃棄物の受入れ許容度		
判定基準適合であれば全く問題ない	32	46.4%
条件付きで受け入れる	18	26.1%
受け入れないようにしている	19	27.5%
有害物質含有廃棄物を受け入れない理由		
排出水の水質悪化を防ぐため	7	50.0%
地元対応のため	2	14.3%
廃止に影響する可能性があるため	1	7.1%
その他	4	28.6%
埋立終了処分場の維持管理費用予測との差		
見込みより安い	0	0%
見込みどおりである	4	27%
見込みより高い	2	13%
わからない	9	60%
埋立終了処分場の維持管理年数予測との差		
見込みより短い	0	0%
見込みどおりである	4	27%
見込みより長い	4	27%
わからない	7	47%
維持管理期間の長期化の問題		
全く問題ない	5	38%
少し問題がある	4	31%
大きな問題がある	4	31%

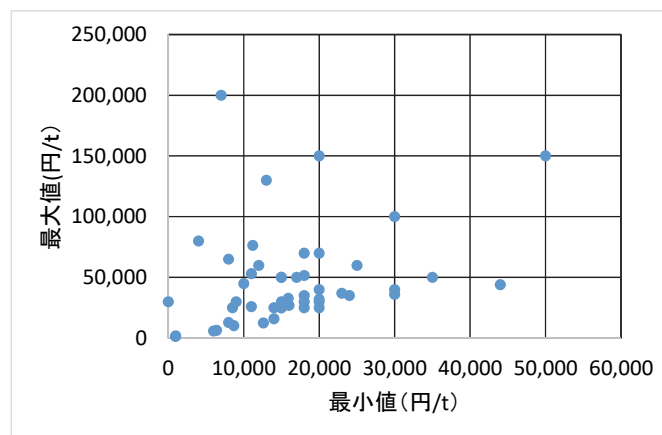


図 5-2 廃棄物 1 トン当たりの処理料金の分布



## (2) 維持管理費用

埋立終了後の年間維持管理費用は、平均 58,000 千円/年（中央値：14,870 千円/年）、埋立容量当たりで 350 円/m<sup>3</sup>年（中央値：59 円/ m<sup>3</sup>年）であった。既往研究における一般廃棄物最終処分場の試算結果の 47,110 千円/年<sup>[108]</sup>及び 200~800 円/m<sup>3</sup>年<sup>[107]</sup>と比較すると、平均値の桁は合致していたが、産業廃棄物管理型最終処分場の方が維持管理費用の低い施設が多いと考えられた。なお、処分場設置事業者が独立行政法人環境再生保全機構に積み立てた維持管理積立金からの実際の 2015 年度の 1 件当たり平均取り戻し金額（埋立終了後の処分場設置事業者からの請求に基づくもの。）は 22,464 千円/年（*n*=60）<sup>[24]</sup>より算出であり、安定型最終処分場のデータも含まれているため、少なめの金額である可能性があるが、桁は一致していた。

また、年間維持管理費用と埋立容量（10 百万 m<sup>3</sup>以上の 3 データを除外）、及び埋立容量当たりの年間維持管理費用（1,000 円以上の 5 データを除外）と日水処理量との関係を図 5-3、5-4 に示す。いずれも弱い正の相関傾向がみられた。

また、水処理過程でキレート処理をしている処分場の年間維持管理費用の平均は約 84,636 千円で、処理をしていない処分場の約 56,519 千円よりも高かった（表 5-5）。キレート処理の有無別の母集団についてランク化 t 検定の結果、*p*=0.032 であり、有意水準 5% で有意な差が認められた。

埋立処分が終了した処分場設置事業者による維持管理費用の見込みとの差に関する回答は、「わからない」が 60% で最も多かったが、「見込みより高い」の回答も 13% あった（表 5-4）。その要因としては、維持管理期間の長期化や跡地利用のための対応等が挙げられた。

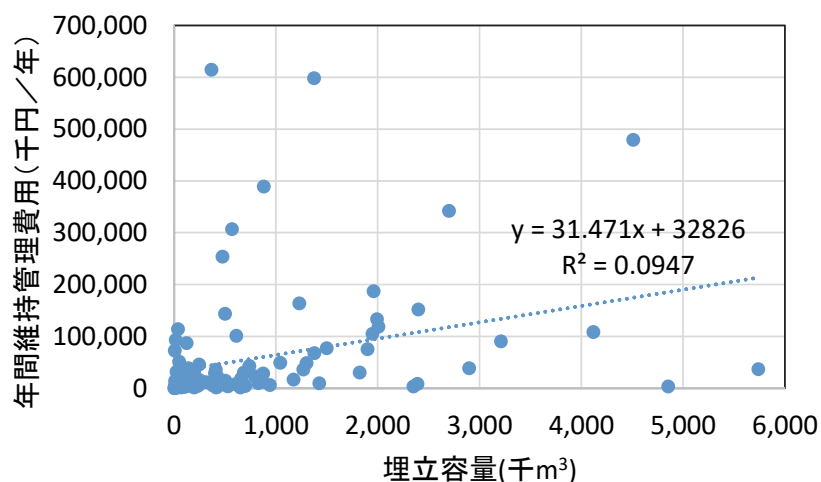


図 5-3 年間維持管理費用と埋立容量の関係（*n*=156）

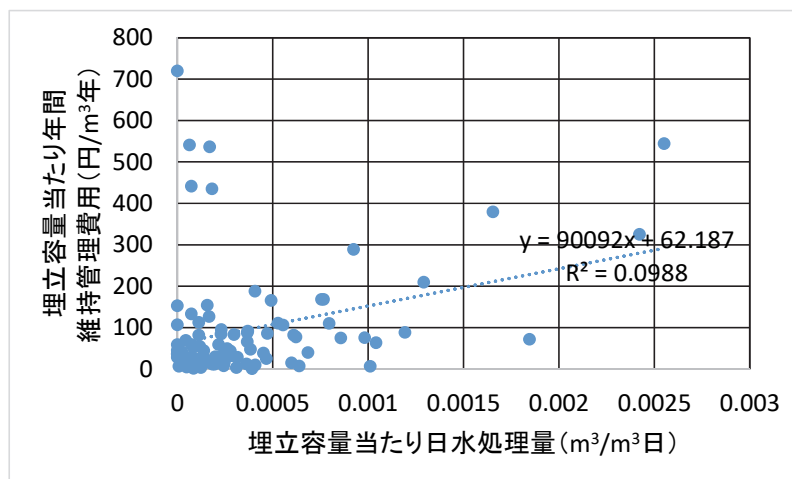


図 5-4 埋立容量当たり年間維持管理費用と日水処理量の関係 (n=92)

表 5-5 水処理過程のキレート処理の有無別の年間維持管理費用

キレート処理	n	平均(千円)	標準偏差
あり	20	84,636	137,728
なし	82	56,519	112,498

### (3) 維持管理年数

両調査結果から得られた埋立終了後の維持管理年数の分布を図 5-5 に示す。平均年数は、13.1 年（標準偏差 9.0）であった。

維持管理年数（50 年未満）について、図 5-6 に示す廃棄物中の燃え殻等の割合との関係は、環境省ガイドライン<sup>[25]</sup>で示された傾向と同様、正の相関関係が確認された（ $p < 0.05$  で有意）。一方、埋立開始年との関係は、ガイドライン<sup>[25]</sup>で示された負の相関傾向は認められなかった（図 5-7）。表 5-4 に示したとおり、維持管理年数の設定根拠として、環境省ガイドラインを参照していると回答した事業者が約半数と最も多いものの、維持管理年数と関連要素との関係性の傾向は必ずしも明確ではなかった。

また、維持管理年数と埋立期間、及び埋立容量との関係を図 5-8、5-9 にそれぞれ示すが、いずれも明らかな相関関係は認められなかった。

さらに、図 5-10 に示すとおり、埋立処分が終了した処分場データを抽出して（維持管理年数 50 年以上の 1 データは除外）、維持管理年数と燃え殻等割合及び汚泥割合の関係を検討したが、統計的に有意な相関傾向は認められなかった。

埋立終了した処分場設置事業者による維持管理年数の見込みとの差に関する回答は、「わからない」が 47% で最も多かったが、「見込みより長い」の回答も 27% あった（表 5-4）。その要因としては、浸出水の水質が廃止基準を満たすまでに予想より時間を要する点が挙げられた。

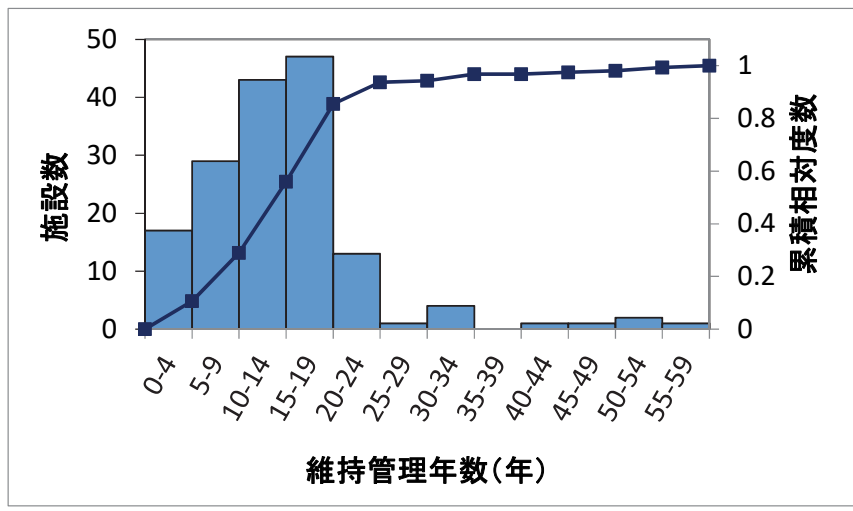


図 5-5 維持管理年数の分布 (n=159)

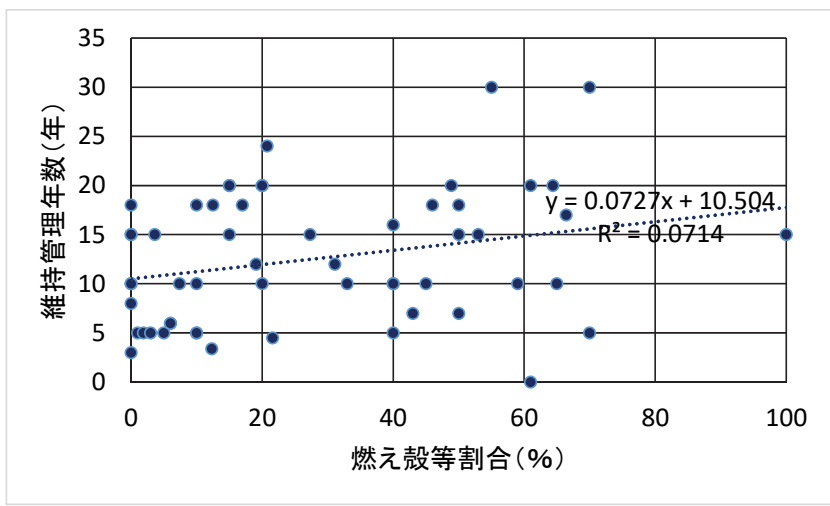


図 5-6 維持管理年数と燃え殻等の割合の関係 (n=56)

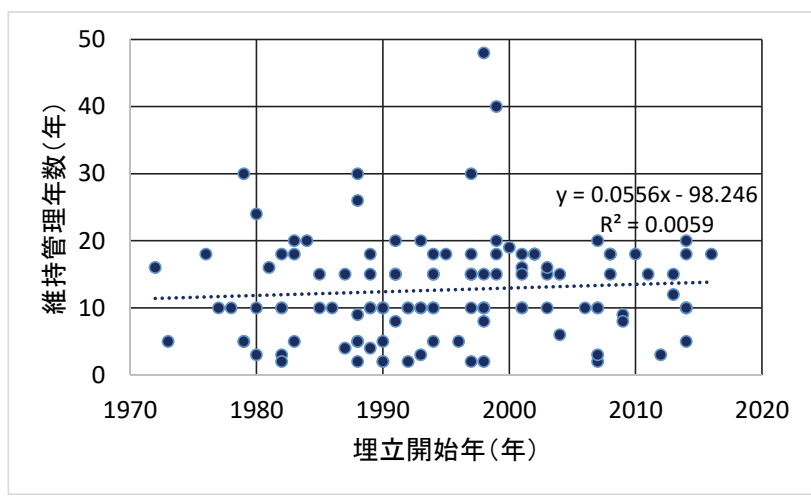


図 5-7 維持管理年数と埋立開始年の関係 (n=116)

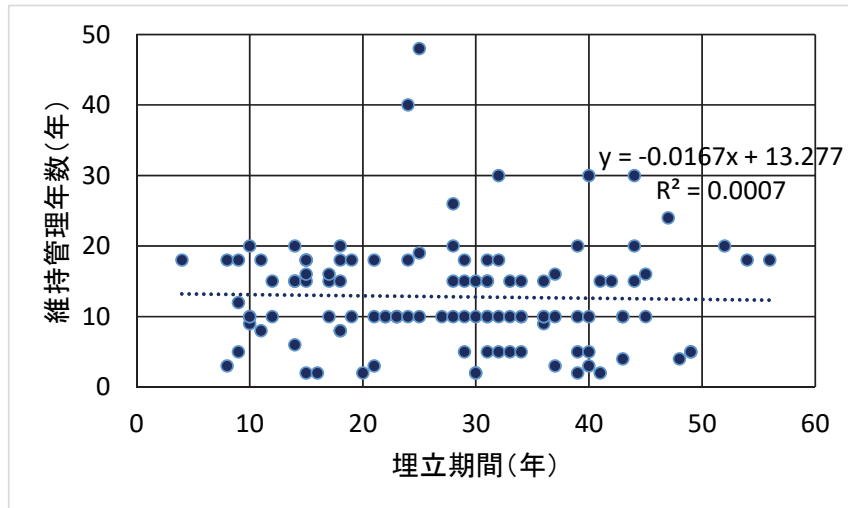


図 5-8 維持管理年数と埋立期間の関係 (n=113)

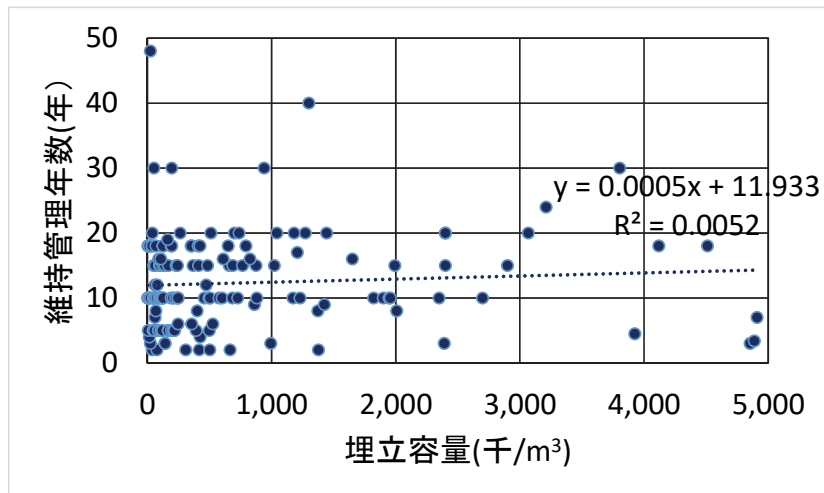


図 5-9 維持管理年数と埋立容量の関係 (n=153)

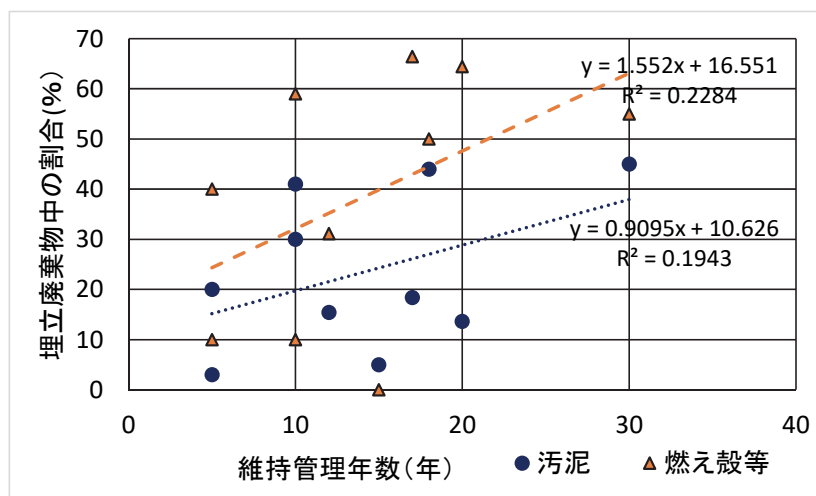


図 5-10 埋立終了処分場における維持管理年数と廃棄物種類との関係 (n=10)

#### (4) 有害物質含有廃棄物の受入れ許容度

事業者の有害物質含有廃棄物の受入れ許容度として、「有害物質の溶出が埋立判定基準以下であれば受入れは全く問題ない」と回答した事業者が約半数と多かったものの、「条件付きで受け入れる」が26%、「受け入れない」が28%もあった(表5-4)。有害物質含有廃棄物を受け入れないとしている理由は、「排出水の水質悪化を防ぐため」を挙げた事業者が約半数であった。また、受入れに条件を設けている事業者は、判定基準よりも厳しい自社基準の設定や、含有量に合わせた受け入れ量の調節を実施していた。

有害物質含有廃棄物受入れ許容度と浸出水原液中の有害物質検出状況の関係を表5-6に示す。有害物質含有廃棄物の受入れをしていない処分場においては、有害物質の検出の割合が6%と少ないが、条件付き受入れの処分場では57%、受入れ条件を設けていない(法定の基準適合のみ)処分場では22%検出されていた。受け入れ条件を設けていない処分場は、浸出水原液の測定を実施していない割合も17%あることから、有害物質の検出はもっと高い可能性がある。検出された有害物質は、多い順番に鉛、ヒ素、カドミウム、セレン等であった。

有害物質含有廃棄物の受入れ許容度別の維持管理年数についてt検定を行ったが、統計的に有意な差はみられなかった。

表5-6 有害物質含有廃棄物受入れ許容度と有害物質検出状況

	検出あり	不検出	測定なし	浸出水なし	総計
判定基準適合であれば受入れは全く問題ない	5	14	4	-	23
	22%	61%	17%		100%
条件付きで受け入れる	8	6	-	-	14
	57%	43%			100%
受け入れないようにしている	1	12	2	1	16
	6%	75%	13%	6%	100%

#### (5) 水銀廃棄物の受入れ意向

水銀廃棄物の受入れ意向については、事業者の約8割が受け入れたくないと回答した(表5-7)。その理由として、「周辺住民の理解が得られないため」が最も多く(30.6%)、次いで、上乘せの埋立基準への対応の難しさ、排出水の水質悪化への懸念、跡地利用に不利等の理由が挙げられた。一方で、条件付きも含め、受け入れてもよいとした回答が5件あり、水銀処理物の安定性が条件として挙げられた。

また、水銀廃棄物の埋立基準として規定された雨水浸入防止措置による維持管理年数への影響については、「わからない」と「長期化する」の回答がともに約4割と多かった。長期化すると考える理由は、降雨による洗い流しがなく、処分場の安定化が進まないためほとんどであった。

表 5-7 事業者における水銀廃棄物の受入れ意向

水銀廃棄物の受入れ意向	回答数	割合
① 受け入れてもよい	2	3.8%
② 条件を整えば受け入れてもよい	3	5.7%
③ 受け入れたくない	40	75.5%
④ わからない	8	15.1%
→ ②受入れの条件（自由回答）		
<ul style="list-style-type: none"> <li>・安定化している水銀化合物であること</li> <li>・廃棄物処理法に基づく埋立基準に合致していること</li> <li>・埋立方法が明確に決まり、処理物の安定性が認知されること</li> </ul>		
→ ③受け入れない理由（自由回答）		
周辺住民の理解が得られないため	11	30.6%
区分埋立や雨水浸入防止措置など上乗せの埋立基準への対応が難しいため	6	16.7%
浸出水の水質の悪化防止	5	13.9%
処分場の跡地利用に不利	5	13.9%
受入れの排出事業者・廃棄物を限定しているため	5	13.9%
影響が不明であり、将来に不安を残すと考えるため	4	11.1%
廃止に影響がでる可能性があるため	2	5.6%
できる限り回収されるべきと考えるため	1	2.8%
その他	3	8.3%
雨水浸入防止措置の維持管理年数への影響		
長期化すると考える	20	40.8%
影響はないと考える	6	12.2%
短期化すると考える	0	0.0%
わからない	22	44.9%

(6) 維持管理費用積立制度への問題意識

維持管理費用積立制度に関する問題意識については、表 5-8 に示すとおり、自治体担当者の約半数が問題なしと考えているが、積立金不足や維持管理年数の不確実性を問題視している回答も一定程度みられた。また、埋立終了・廃止した処分場設置事業者の約 6 割は、維持管理年数が想定よりも長期化すれば問題があると回答しており（表 5-4）、その理由として、維持管理費用の増加や積立金の不足、跡地利用への影響等が挙げられた。

表 5-8 維持管理費用積立制度への自治体の問題意識

回答	件数	割合
問題はない	27	48%
積立金不足が懸念される	9	16%
維持管理年数が不確実	6	11%
制度前の処分場の積立額が不十分	3	5%
その他	8	14%
記入なし	3	5%

### 5.3.2 分析結果

#### (1) 相関関係

管理型最終処分場の各要素間の関連を分析した相関行列を表 5-9、5-10 に示した。

自治体調査においては、埋立終了後の年間維持管理費用と統計的に有意な相関がみられた要素は、 $p<0.01$  で埋立容量及び日水処理量であり、埋立容量当たりの年間維持管理費用と相関がみられた要素は埋立容量当たり日水処理量 ( $p<0.05$ ) であった。また、維持管理年数と埋立開始年に  $p<0.05$  で相関関係がみられた。このほかの要素間の関連としては、 $p<0.01$  で埋立期間と埋立開始年、日水処理量と埋立開始年及び埋立容量、キレート処理と埋立開始年及び埋立期間、 $p<0.05$  で埋立容量と埋立開始年、日水処理量と埋立期間、埋立容量当たり日水処理量と埋立容量に有意な相関が認められた。

事業者調査の結果においては、維持管理年数と汚泥割合に有意な相関関係 ( $p<0.05$ ) がみられた。また、 $p<0.01$  で資本金と埋立容量、燃え殻等割合と廃棄物処理料金、 $p<0.05$  で浸出水有害物質検出状況と埋立容量の要素間に有意な相関がみられた。

既報<sup>[110]</sup>においても、埋立開始年と高度処理（キレート処理など）、埋立容量と水処理能力の関連が報告されており、本稿においても同様の相関関係が確認された。

表 5-9 処分場の各要素間の相関（自治体調査）（ $n=34$ ）

	埋立開始年	埋立期間	埋立容量	燃え殻等割合	日水処理量	埋立容量当たり日水処理量	キレート処理	年間維持管理費用	埋立容量当たり年間維持管理費用
埋立期間	-0.879**								
埋立容量	0.355*	-0.243							
燃え殻等割合	0.143	-0.167	0.303						
日水処理量	0.479**	-0.429*	0.667**	0.314					
埋立容量当たり日水処理量	0.206	-0.172	-0.350*	-0.234	0.030				
キレート処理	-0.495**	0.505**	-0.196	-0.305	-0.235	-0.027			
年間維持管理費用	0.276	-0.236	0.515**	0.248	0.589**	-0.030	-0.227		
埋立容量当たり年間維持管理費用	-0.146	0.296	-0.329	-0.301	-0.208	0.428*	0.099	-0.009	
維持管理年数	0.344*	-0.131	0.060	-0.289	-0.037	0.195	0.085	-0.116	0.184

(\* :  $p<0.05$  \*\* :  $p<0.01$ )

表 5-10 処分場の各要素間の相関（事業者調査）（ $n=26$ ）

	資本金	埋立容量	廃棄物処理料金	有害物質含有廃棄物受入許容度	浸出水有害物質検出状況	燃え殻等割合	汚泥割合	第13号廃棄物割合
埋立容量	0.590**							
廃棄物処理料金	0.040	-0.041						
有害物質含有廃棄物受入許容度	-0.336	-0.115	-0.118					
浸出水有害物質検出状況	-0.048	0.437*	-0.091	0.149				
燃え殻等割合	0.274	0.307	-0.496**	0.038	0.087			
汚泥割合	-0.135	0.040	0.019	0.089	0.056	0.023		
第13号廃棄物割合	-0.028	0.168	-0.162	-0.100	-0.140	-0.131	-0.059	
維持管理年数	-0.060	0.313	-0.301	0.326	0.047	0.264	0.401*	0.331

(\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

(2) 重回帰分析の結果

維持管理年数の規定因子を検討するため、重回帰分析を行った。

自治体調査については、上述の要素間の相関やデータ数、維持管理年数との相関を考慮し、説明変数に埋立開始年、埋立容量、燃え殻等割合（1～5）、水処理におけるキレート処理状況（あり：1、なし：2）を投入した。表 5-11 に相関行列を記す（ $n=46$ ）。重回帰分析の結果、表 5-12 に示すとおり、燃え殻等割合、埋立開始年が抽出された（ $R^2=0.218$ ）。

表 5-11 重回帰分析に用いた各要素の相関行列（自治体調査）（ $n=46$ ）

	埋立開始年	埋立容量	燃え殻等割合	キレート処理
埋立容量	0.189			
燃え殻等割合	0.113	0.204		
キレート処理	-0.514**	-0.180	-0.228	
維持管理年数	0.257	0.075	-0.358*	0.045

(\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

表 5-12 維持管理年数の規定因子（自治体調査）

変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P値
埋立開始年	0.191	0.301	0.032*
燃え殻等割合	-2.077	-0.392	0.006**
定数項	-363.863		0.040*
決定係数 $R^2$ (補正 $R^2$ )	0.218 (0.181)		

(\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )



表 5-13 重回帰分析に用いた各要素の相関行列（事業者調査）（ $n=45$ ）

	有害物質含有 廃棄物受入れ 許容度	埋立容量	燃え殻等 割合	汚泥割合
埋立容量	-0.134			
燃え殻等の割合	-0.063	0.276		
汚泥割合	-0.151	-0.084	0.174	
維持管理年数	0.134	0.267	0.300*	0.329*

(\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

表 5-14 維持管理年数の規定因子（事業者調査）

変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P値
汚泥割合	0.149	0.393	0.007**
埋立容量	4.122	0.332	0.020*
有害物質含有廃棄物 受入れ許容度	1.679	0.238	0.092
定数項	-15.660		0.124
決定係数 $R^2$ (補正 $R^2$ )	0.250 (0.196)		

(\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

表 5-15 埋立終了・廃止処分場の維持管理年数の規定因子（事業者調査）

変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P値
汚泥割合	0.412	0.880	$p < 0.001$ **
定数項	6.073		0.090
決定係数 $R^2$ (補正 $R^2$ )	0.864 (0.774)		

(\*\* :  $p < 0.01$ )

表 5-16 重回帰分析に用いた各要素の相関行列（埋立終了・廃止処分場）（ $n=10$ ）

	有害物質含有廃 棄物受入れ許容度	埋立容量	燃え殻等割合	汚泥割合
埋立容量	-0.272			
燃え殻等割合	-0.237	0.562		
汚泥割合	0.497	-0.462	-0.184	
維持管理年数	0.613	-0.264	-0.082	0.880**

(\*\* :  $p < 0.01$ )

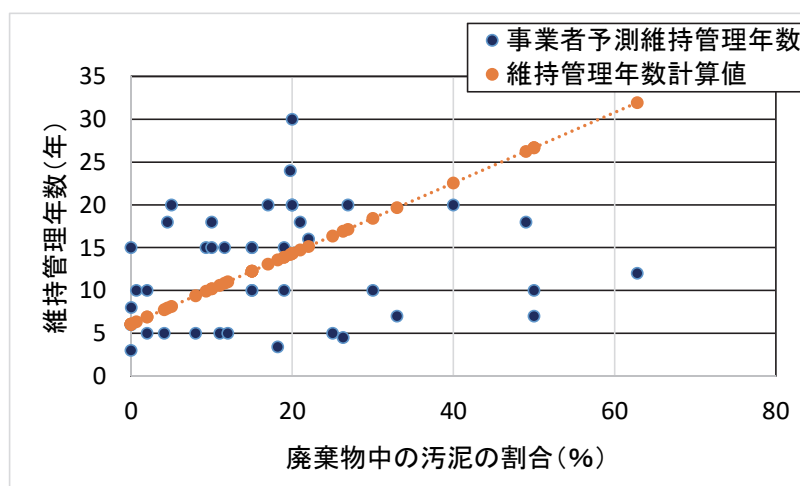


図 5-11 稼働中の処分場における維持管理年数の予測と計算値との比較

同様に、事業者調査については、有害物質含有廃棄物の受入れ許容度（1：受け入れる、2：条件付きで受け入れる、3：受け入れない）、埋立容量、燃え殻等割合、汚泥割合を説明変数として分析した。表 5-13 に各要素の相関行列（ $n=45$ ）を示す。重回帰分析の結果、表 5-14 に示すとおり、汚泥割合、埋立容量、有害物質含有廃棄物の受入れ許容度が抽出され（ $R^2=0.250$ ）、偏回帰係数は、汚泥割合と埋立容量が有意であった。

また、埋立が終了した処分場について、データ数が少ないものの（ $n=10$ ）、説明変数に埋立容量、燃え殻等割合、汚泥割合、有害物質含有廃棄物の受入れ許容度を投入したところ、汚泥割合が抽出され、決定係数が 0.864 と回帰式がよく説明できる結果となった（表 5-15）。相関行列を表 5-16 に示す。

### 5.3.3 考察

自治体調査の重回帰分析の結果からは、埋立開始年が新しく、燃え殻等割合が少ないほど、維持管理年数が長いことが示唆された。しかし、事業者調査の単相関の分析結果では、反対に燃え殻等割合と維持管理年数に正の相関関係がみられ（ $p<0.05$ ）、規定因子の影響度の妥当性は判断できない。自治体調査では、燃え殻等の割合を実数値ではなく、ダミー変数で設定したことにより、解析結果の違いに影響を与えた可能性が考えられる。

また、事業者調査の結果からは、廃棄物中の汚泥の割合が高く、埋立容量が大きく、有害物質含有廃棄物の受入れに消極的なほど、維持管理年数が長いことが示唆された。ただし、有害物質含有廃棄物の受入れ許容度については、維持管理年数との相関が弱く、寄与度は小さいと考えられる。回帰式からは、同規模の処分場で、汚泥割合が同程度であれば、有害物質を含有する廃棄物を受け入れないようにしているリスク管理に敏感な処分場の方が、有害物質の含有量に拘らない処分場よりも維持管理年数を安全側に長めに設定しているとの解釈があり得る。もしくは、浸出水中の有害物質の検出状況を考慮すると、有害物質含有廃棄物受入れ許容度が実際の受入れ状況を反映していない可能性

が考えられ、受入れ許容度のデータの信頼性が低いとの解釈も考えられる。実際の有害物質含有廃棄物の受入れ状況をどう把握するかは今後の課題である。

埋立が終了した処分場の維持管理年数は、稼働中の処分場よりも確度が高く、規定因子との関係もより明確になっていると考えられた。重回帰分析の結果からは、汚泥の割合と維持管理年数に正の有意な関連性が認められた。以上のことから、維持管理年数を規定する要素として、汚泥割合が特に重要と考えられる。

埋立終了処分場における回帰式「維持管理年数=0.412×汚泥割合+6.073」を稼働中の処分場に適用すると、図5-11に示すとおり、処分場の45%において、維持管理年数が計算値よりも短く見積もられていることがわかる。維持管理年数を決定する因子は汚泥割合のみと限らず、一つの試算結果ではあるものの、少なくない数の処分場において維持管理年数が短く設定されているとすれば、将来に渡って適正な維持管理が確保されるのか懸念が残る。

以上、本調査研究により、これまで実態が不明であった埋立終了後の管理型最終廃棄物処分場における維持管理年数の状況や規定因子の影響度をある程度明らかにすることができた。汚泥割合と維持管理年数との関連性が新たに示唆されたが、一般的に汚泥は処分場の通気性、透過性を低下させ、早期安定化を阻害し得ることから、概ね妥当な結果だといえる。

しかし、維持管理年数の規定因子の特定や影響度の検討はまだ不十分である。これは、稼働中の処分場では維持管理年数の設定根拠が弱く、各要素間の明確な相関関係が確認できないためと考えられる。本来であれば、維持管理年数の実情を反映する廃止済みの処分場のデータを基に分析を行うことが望ましいが、今回の調査では、埋立終了済みや廃止済みの処分場のデータは十分に集めることができなかった。アンケート調査結果からも自治体や事業者の維持管理積立金制度への不安が見てとれ、今後、維持管理年数に係る実績データを収集・分析し、維持管理年数に影響を与える要素のより一層の解明が求められる。

## 5.4 まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- 埋立終了後の年間維持管理費用は、平均 58,000 千円/年(中央値:14,870 千円/年)、埋立容量当たりで 350 円/m<sup>3</sup>年(中央値:59 円/m<sup>3</sup>年)であった。また、埋立終了後の維持管理年数の平均年数は、13.1 年(標準偏差 9.0)であったが、埋立終了した処分場の約 3 割は、浸出水の水質が廃止基準を満たすまでに予想より時間を要し、維持管理年数が見込みより長いとしていた。
- 過半数の事業者が有害物質含有廃棄物の受け入れに消極的であり、事業者の有害物質含有廃棄物の受入れ許容度が低い実態が示された。事業者の約 8 割が水銀廃棄物を受入れ不可としており、その理由として、周辺住民の理解が得られない、上乗せの埋立基準への対応の難しさ、浸出水の水質悪化への懸念、跡地利用に不利等が挙げられた。また、水銀廃棄物の埋立基準として規定された雨水浸入防止措置により、維持管理年数が長期化するとの見立てが多かった。

- 重回帰分析の結果から、埋立開始年が新しく、燃え殻等割合が少ないほど、また、廃棄物中の汚泥割合が高く、埋立容量が大きく、有害物質含有廃棄物の受入れに消極的なほど、維持管理年数が長いことが示唆された。
- 埋立が終了した処分場においては、重回帰分析から、汚泥の割合と維持管理年数に正の有意な関連性が認められ、維持管理年数を規定する要素として、汚泥割合が特に重要と考えられた。
- 得られた回帰式から維持管理年数の理論値を算出すると、稼働中の処分場の 45% において、維持管理年数が短く見積もられており、少なくない処分場において将来の適正な維持管理の確保が懸念される状況が示唆された。

近年、リサイクルの進展により廃棄物の最終処分率は減少しており、最終処分場に埋立処分される廃棄物はリサイクル困難な燃え殻や汚泥等の有害物質を含有する廃棄物の割合が増加していると考えられる。本稿の結果から、埋立廃棄物中の汚泥の割合の増加は維持管理年数を長期化させる可能性があり、想定より維持管理年数が長期化すれば、積立金不足やそれに伴う不適正な維持管理、さらには環境への悪影響が懸念されることになる。また、近年、新たな廃棄物への対応として、放射性物質汚染廃棄物や廃水銀等処理物の処分に当たっては、雨水浸入防止措置が維持管理基準に規定されており、本稿の調査結果からも明らかなように、当該措置による維持管理年数の長期化も懸念される。

このため、維持管理積立金が不足することのないよう、適切な維持管理年数の設定に資する根拠情報を早急に整備するとともに、想定よりも長期化した処分場への対応を検討する必要がある。また、水銀のような有害物質には、従来の洗い流しによる「安定化」という考え方は馴染まず、雨水浸入防止措置を講じる処分場においては、遮断型最終処分場にも通じる有害物質の「封じ込め」へ考え方を転換し、長期管理に向けた制度の構築が求められる。

## 第6章 結論

---

### 6.1 結論

2017年8月に水俣条約が発効し、水銀対策は我が国において喫緊の課題である。本研究では、我が国における条約を踏まえた新規施策と現行制度を分析し、これまで有価で取り扱われてきた水銀が廃棄物化した際に、現行の有害廃棄物の最終処分制度が抱える課題を特定し、水銀廃棄物の長期的な管理に向けた対応策を検討した。

まず、国内の水銀フローの将来見通しを推計したところ、水俣条約の影響により、水銀排出は大気・埋立への排出が減少し、水銀回収が増加する見通しが明らかとなった。2010年度から2050年度までの水銀の排出変化として、大気排出量は約31トンから約13トンに、埋立処分量は約12トンから約6トンにと半減する一方、水銀回収量は約42トンから約52トンに増加すると予測された。

水銀使用製品由来の水銀総排出量は、製品の代替化等により2020年度には約5トンにまで急減する一方、工業過程からの水銀総排出量は、年間65トン近辺で推移すると推計された。特に、水銀回収量の9割以上を占める非鉄金属製錬業からの水銀排出の動向は、我が国の水銀管理を検討する上で鍵となる要素である。非鉄鉱石の品位の幅を考慮すると、年間約44～59トンの水銀回収量が見込まれる。

条約を受けた国内施策の水銀排出削減の効果として、①製品への水銀使用抑制策により約5トン削減、②廃製品からの水銀回収促進策により約2トン削減、③改正大気汚染防止法の大気排出抑制策により約1トン削減が見込まれ、水銀使用製品への入口規制が最も削減効果が大きいと評価された。

本研究により、一定の前提に基づく推計ではあるものの、2050年までの我が国の水銀マテリアルフローの将来見通しを概観することができた。

続いて、上記で推計した回収水銀量の約50トンのうち、我が国において廃棄物として処分しなければならない余剰水銀量を試算した。まず、世界の水銀需給バランスの見通しを推計したところ、水銀供給において大きなセクターは、現在は一次鉱出であるが、条約の鉱出規制により、将来は非鉄製錬業と廃製品からの回収水銀が主要な供給源となる。水銀需要において大きなセクターは、水銀使用製品用途に加え、中国の塩ビモノマー製造とアジア・南米のASGM用途であるが、条約による製造工程への水銀使用の制限やASGM廃絶への努力により、2030年以降は主に条約上認められた水銀使用製品用途となる。現在の世界の水銀需給バランスは、一次鉱出により供給過多となっているが、いずれの地域でも今後、水銀の供給及び需要ともに減少する見通しであり、2020年は需要が供給を約800トンほど上回るが、2030年以降は供給が需要を上回り、これまでのクロロアルカリ製造等の水銀ストックに加えて、余剰水銀が発生する見通しであることがわかった。

全世界の余剰水銀のストック量は2050年に約24千～25千トンと推計された。非鉄金属製錬業からの水銀回収が行われない場合と積極的に行われる場合では約2～35千トンで変動し、非鉄金属製錬業からの水銀回収の動向が世界の余剰水銀発生量に大きな

影響を与えることが示唆された。特に、中国の水銀回収の今後の動向は、日本の水銀フローに影響を及ぼすと考えられる。

我が国においては、主な製品用途の水銀需要がなくなる 2020 年頃より余剰水銀が発生し、2050 年における余剰水銀のストック量は約 600～1,400 トンと推計された。我が国では非意図的な水銀排出として、主に非鉄金属製錬由来の水銀が今後も継続して発生することが見込まれているが、当該水銀の最終処分が求められる事態はあと数年で起こり得ることが示唆された。このため、余剰水銀が行き場を失うことのないよう、環境上適正な廃水銀等の最終処分体制の構築しなければならない。本研究により、2050 年までに余剰水銀のストック量が 1,400 トン発生するとした場合、中間処理による容積増加を考慮すれば、1000 m<sup>3</sup> 規模の処理容量の最終処分場の整備が必要なことが明らかとなった。

さらに、有害廃棄物の最終処分制度の課題として、処分場における埋立終了後の維持管理のあり方を検討するため、維持管理期間に関するアンケート調査による実態把握と維持管理年数を規定する要因を分析した。調査の結果、埋立終了後の年間維持管理費用は、平均 58,000 千円/年（中央値：14,870 千円/年）、埋立容量当たりで 350 円/m<sup>3</sup> 年（中央値：59 円/ m<sup>3</sup> 年）であった。また、埋立終了後の維持管理年数の平均年数は、13.1 年（標準偏差 9.0）であったが、埋立終了した処分場の約 3 割は、維持管理年数が見込みより長いとされていた。

また、過半数の事業者が有害物質含有廃棄物の受け入れに消極的であり、事業者の有害物質含有廃棄物の受入れ許容度が低い実態が示された。事業者の約 8 割が水銀廃棄物を受入れ不可としており、その理由として、周辺住民の理解が得られない、上乗せの埋立基準への対応の難しさ、浸出水の水質悪化への懸念、跡地利用に不利等が挙げられた。また、水銀廃棄物の埋立基準として規定された雨水浸入防止措置により、維持管理年数が長期化するとの見立てが多かった。本調査結果から、有害物質含有廃棄物の埋立処分は、浸出水への有害物質の溶出リスクを高め、埋立終了後の維持管理年数の長期化や維持管理費用が不足する可能性が示唆された。

重回帰分析の結果からは、汚泥割合と維持管理年数との正の関連性が新たに示された。埋立終了処分場における回帰式を稼働中の処分場に適用すると、処分場の 45%において、維持管理年数が計算値よりも短く見積もられていることが示され、将来に渡って適正な維持管理が確保できるのか懸念される状況が明らかになった。このことから、持管理積立金が不足することのないよう、適切な維持管理年数の設定に資する根拠情報を早急に整備するとともに、想定よりも長期化した処分場への対応を検討する必要性が改めて強調された。

廃水銀等処理物の最終処分に当たっては、雨水浸入防止措置が維持管理基準に規定されており、本調査結果からも明らかなように、当該措置により維持管理年数の長期化があり得る。想定より維持管理年数が長期化すれば、積立金不足やそれに伴う不適正な維持管理、さらには環境への悪影響が懸念されることから、埋立終了後も長期の管理が必要な処分場への対応を検討する必要がある。改正廃棄物処理法施行令により法制度は整備されたが、水銀硫化施設や最終処分場等、実際の処理施設の整備はこれからである。本研究で明らかとなった 1000m<sup>3</sup> 規模の水銀処理物の最終処分体制となれば、限られた

数の処分場で集中管理が可能といえる。廃水銀等の処理物の埋立後も長期的な管理が維持できる社会システムの構築とともに、世界的に余剰水銀が発生する中、グローバルに水銀管理が適正に行われるよう国際的な協調、協力が求められる。

## 6.2 今後の研究課題

本研究の限界と今後の課題としては、以下が挙げられる。

まず、国内水銀マテリアルフローの将来推計手法については、工業過程からの水銀排出量推計において、本研究では、原燃料中水銀方式と総括排出係数方式の両方で計算を行い、業種ごとに信頼性の高いと考えられた方式を採用することとしたが、廃棄物焼却や循環資源を原燃料としているセメント製造及び鉄鋼製造では、廃棄物や原燃料中の水銀含有量の原単位を設定することが困難であり、原燃料中水銀方式の信頼性が低くなってしまった。また、水銀の大気排出量については、改正大気汚染防止法により事業者への排ガス中水銀濃度の測定義務が課されたため、今後実態把握が進むと考えられるが、廃棄物への排出は、水銀含有量にばらつきがあり把握が難しい。推計の精度を高めるためには、分析サンプル数を増やし、廃棄物や循環資源中の水銀含有量に関するより詳細な調査が求められる。また、水銀の排出量の推計において、インプットとアウトプットのマスバランスを検証したところ、非鉄金属製錬業では、アウトプットがインプットよりも25%少なかった。水銀が工程内で循環し蓄積されているのか、工程中の水銀動態の定量的な分析が期待される。

水銀使用製品からの水銀排出推計においては、体温計等の退職品からの水銀回収予測は不確実性が大きく、今後の水銀回収促進政策の効果などを踏まえ、保有実態の調査や回収実績の蓄積が必要である。実際の製品の廃棄量を把握することは困難であるが、廃製品からの水銀の回収率を算出するにあたり、分母の水銀総排出量の予測精度を高めることが求められる。

将来シナリオについては、本研究では、影響の大きい非鉄金属製錬業における鉱石の品位を業界団体の予測に基づき設定したが、今後、より水銀含有量の低い原料を選択するシナリオも考え得る。また、石炭火力発電についても、本研究では国の長期エネルギー需給見通しに従うとしたが、気候変動対策に向けた社会的な動きの中で、想定よりも早期に石炭火力の撤退があり得る。こうした将来シナリオは不確実性が高いため、本研究では推計に反映しておらず、今後の課題である。

世界の水銀需給バランスの将来予測については、特に、ASGM用途の水銀需要はデータの信頼性が低く、UNEPの推計でも大きな幅が見込まれているが、現在、最も需要の多い用途ともみられており、より信頼性の高い統計データの整備が課題である。水銀の貿易統計においても、輸出国側と輸入国側の申告が一致しておらず、正確さに欠ける。今後、水俣条約に基づき、締約国は、条約対応の措置や水銀の供給源と貿易、水銀を使用する製造工程、ASGM対応、大気排出インベントリ等に関する情報を条約事務局へ報告することとされており、あわせて統計データの整備が進めば、より精緻な将来予測が可能となることが期待される。

将来シナリオについては、依然として大きな不確実性がある。塩ビモノマー製造や ASGM 等、条約において全廃スケジュールの決定が先延ばしされた水銀需要の動向や、供給過多となっているにも関わらず調整が進んでいない一次鉱出の動向、UNEP の推計ほど進んでいない非鉄金属製錬業からの水銀回収の動向等を注視し、今後、将来予測に反映していくべきである。特に、世界の水銀需給バランスに大きな影響を及ぼす中国の動向には注意が必要である。日本における余剰水銀発生量予測に影響を与える輸出シナリオの設定については、本研究では、安全側にみて、輸出ゼロのシナリオも検討したが、高純度な日本の再生水銀は、中国等の回収水銀と競合することはなく、精度が求められる計測器等において今後も一定の需要があるとの見方もあり、水銀使用製品の代替化の進捗においても今後の動向に注意が必要である。

廃棄物最終処分場の維持管理期間に関する検討においては、本研究では、維持管理年数と汚泥割合とに新たに関連性を認めたが、全体的に、説明変数との明確な関連性が見えず、維持管理年数の規定因子の特定や影響度の検討はまだ不十分である。これは、稼働中の処分場では維持管理年数の設定根拠が弱く、各要素間の明確な相関関係が確認できないためだと考えられた。本来であれば、維持管理年数の実情を反映する廃止済みの処分場のデータを基に分析を行うことが望ましいが、本研究では、埋立終了済みや廃止済みの処分場のデータは十分に集めることができなかった。今後、維持管理年数に係る実績データを収集・分析し、維持管理年数に影響を与える要素のより一層の解明が求められる。

また、本研究では、有害物質含有廃棄物の受入れ許容度に注目して分析を行ったが、浸出水中の有害物質の検出状況とのクロス分析の結果を考慮すると、有害物質含有廃棄物受入れ許容度が実際の受入れ状況を反映していない可能性が考えられた。実際の有害物質含有廃棄物の受入れ状況をどう把握するかは今後の課題である。

重回帰分析においては、本研究では、維持管理年数と燃え殻等割合の相関に、自治体調査と事業者調査で負と正の異なる関係が認められた。ダミー変数の設定が適切ではなかった、処分場の母集団に偏りがあつた等が解釈として考えられたが、今後、こうした維持管理年数に係る調査を重ねることで、解明が進むことが期待される。

### 6.3 有害廃棄物の長期管理に向けて

本研究の結果から、水銀廃棄物を例に、有害廃棄物の長期管理に向けて検討すべき方向性として大きく3つ、(1)最終処分場の廃止規定の見直し、(2)管理費用の確保・保障、(3)公的関与を挙げたい。

#### (1)最終処分場の廃止規定の見直し

第一に、遮断型最終処分場の廃止の位置づけの再整理である。有害廃棄物の最終処分地として、管理型と遮断型の2種類あるうち、遮水構造という観点からは、遮断型最終処分場が優れているものの、制度上、遮断型最終処分場の廃止の位置づけが曖昧である。現在は、技術上処理が困難な有害廃棄物を処理できる時がくるまで保管しておく有害廃



棄物の「長期保管」が実態となっているが、長期的にみれば構造物の劣化は避けられず、有害物質の溶出リスクを内包することから、定期的な修繕などにより、周辺環境からの永続的な遮断構造を維持しなければならない。このため、有害廃棄物を処分した遮断型最終処分場の廃止は認められない(管理が不要にはならない)ことを制度上明らかにし、埋立終了後も長期の管理を維持すべきである。

第二に、廃水銀等処理物を埋立処分した管理型最終処分場の廃止基準の見直しである。廃水銀等の処理物の長期的に安全な管理のためには、雨水や他の廃棄物との接触を断つ隔離環境を永続的に確保することが最重要であることから、管理型最終処分場であっても、遮断型様のクローズドな環境が望ましい。管理型最終処分場においても、屋根付きコンクリート造のクローズドな処分場が近年自治体を中心に整備されてきており、強固な遮水構造をもつ処分場は管理型最終処分場の分類下でも整備可能である。クローズド処分場では、計画的な散水により処分場の安定化を図っているが、廃水銀等処理物を埋立処分する場合には雨水浸入防止措置を講じることになり、浸出水の水質で処分場の廃止を判断するという廃止基準とは矛盾しかねない。廃水銀等処理物とその他廃棄物の埋立区画の独立性にもよるが、廃水銀等処理物を埋立処分した管理型最終処分場については、従来の浸出水の水質に主眼を置いた廃止基準に加え、遮水構造の堅牢性や廃水銀等処理物の長期安定性の観点からの基準も検討すべきである。

第三に、処分場の廃止後の跡地管理に係る規定の検討である。廃水銀等処理物を最終処分した処分場の廃止を認める場合には、処分場の遮水構造を永続的に保守管理できるよう、跡地管理の徹底が必要である。廃水銀等処理物を処分した管理型最終処分場が廃止される場合、都道府県知事が指定区域に指定し、埋立記録の管理が行われるほか、土地の形質変更の制限が追加的措置として課せられているが、処分場の遮水構造の保持に向けた予防的な維持管理は求めている。このため、長期的に見れば、土地の形質変更の予定がない場合、管理者不在のまま構造物の劣化が放置される危険性を内包している。処分場の跡地に雨水等が浸入し、廃水銀等処理物の浸水状態が継続するとすれば、直ちに水銀の溶出がないとしても、世代を超えた長期視点で見た際に、環境リスクが高まる恐れがあり、雨水浸入防止措置の保持について、土地管理者に対する一定の跡地管理を義務付けることについて検討すべきである。特に、自然災害の多い日本においては、水銀廃棄物の処分地の管理は慎重になされるべきで、多重防護の観点から、火災、風水害、雪害、地震・火山災害などの災害も考慮した対応策の検討が求められる。本研究が示した約 1,000m<sup>3</sup> という廃水銀等処理物の規模、かつ、主要排出者が限られていることから、厳重な管理という観点からは、限られた数の処分場において集中的に管理するとの方向性が効率的かつ効果的だといえよう。

## (2) 管理費用の確保・保障

廃棄物最終処分場においては、埋立が終了した後も長期的な管理が必要となる。特に、水銀廃棄物については、水銀が無害化されることはないため、処分場内に安定した形態で永続的に封じ込めるための管理が欠かせない。管理型最終処分場においては、維持管理積立金制度により、処分場設置事業者が埋立終了から廃止までの期間の維持管理費用を事前に積み立てることとされているが、本研究で指摘したように、維持管理年数が短く予測され、将来、維持管理積立金不足に陥る危険性がある。適正な維持管理費用の確保のためには、既に廃止済みとなった処分場の実態調査等を踏まえ、事業者に適正な維

持管理年数の予測手法を提示する必要がある。さらに、廃水銀等処理物を埋立処分した処分場については、埋立終了から廃止まで最低限確保すべき維持管理年数として、現行の2年間では水銀処理物の長期安定性は確認できないため、欧米並みの30年間も念頭に、より長期間に見直すべきである。万が一、水銀が溶出した際に、漏洩箇所がすぐわかるよう、目視による点検が可能な処分方法もリスク管理の観点から当分の間採用するのも一つの選択肢である。

また、遮断型最終処分場や廃水銀等処理物を埋立処分した管理型最終処分場であって、廃止ができない又は廃止時期が見通せないほど長期間の管理が求められる場合、維持管理費用をどうやって確保するかが課題となる。ただし、この場合は、処分場の雨水浸入防止措置により、維持管理費用の多くを占める水処理の費用が不要となるため、法定の環境モニタリングと数十年に1回の構造物の修繕だけの対応であれば、通常の管理型最終処分場の維持管理費用に比べて十分安くなることが想定される。長期にわたる維持管理費用を確保するためには、処分場設置事業者が自ら積み立てておく保険方式か、現役の水銀排出事業者の処理費用に追加して負わせる年金方式かが考えられるが、保険方式で、先が見通せないほど長期の維持管理費用を積み立てるのは、不確実性が大きすぎ困難だと言わざるを得ない。そうすると年金方式であり、水銀排出事業者、つまり、非鉄製錬事業者や天然ガス製造事業者等が排出する水銀量に応じて、埋立終了となった処分場の維持管理費用も拠出する方向性が考え得る。処分場の維持管理費用は、元々は排出事業者から廃棄物処理費用として処分場設置事業者を支払われているものであり、本研究が示したとおり、我が国の主要な水銀排出者と水銀回収業者の構図は変わらない見通しであることから、関係者の数が限られていれば、複雑な制度設計にはならないと考えられる。例えば、不法投棄等事案では、投棄者不明や資力不足の場合に、生活環境保全のために都道府県等が行う支障除去の行政代執行に対して、産業界及び自治体、国の三者が出えんした基金から財政支援が行われており、こうした基金制度も検討の参考になろう。

廃棄物最終処分場の維持管理費用は、処分場の所有者が負担すべきものであるが、事業者が適切な措置をとらなかった場合に、水銀漏出の未然防止のために自治体が行政代執行に必要な費用の支援が得られる保障は、社会的な安心感の向上に資する。

### (3) 公的関与

処分場から水銀が漏出していないかの監視については、処分場が廃止されるまでは、処分場の設置事業者が定期的に放流水や処分場周辺の地下水の水質を測定することとされているが、水銀処理物の長期安定性が確認できない以上、処分場の廃止後も監視が望まれる。公共用水域や地下水の水質調査は、これまでも水質汚濁防止法に基づき、自治体により定期的に行われているが、万が一、処分場から水銀が漏出する場合に備えて、重点的に処分場周辺を監視すべきである。万が一に備えたセーフティーネットとしての対策は、公的な機関が関与することで、長期的に見て安定した管理を実施することができよう。

また、施設の整備に当たっても、本研究で示されたとおり、廃水銀等処理物の受入れ意向を示した最終処分場設置事業者は非常に限られており、最終処分の目途がたっていない現状を鑑みれば、廃水銀等処理物の最終処分場の新規整備はハードルが高いと言わざるを得ない。我が国では、かつて地元の反対等により PCB の処理施設を整備できず、

処分が進まなかったために、30年以上に及ぶ長期保管中に廃 PCB の紛失や漏洩の不適正事案が発生した。このため、国が全額出資した PCB の処理会社（JESCO）を設立して処理がようやく進んだという例がある。水銀の場合は、水銀汚染防止法により、廃棄物化する前の暫定保管の段階から適正管理が義務付けられているとはいえ、PCB の教訓を踏まえれば、水銀廃棄物が行き先を失い、不適正処理につながることはないよう、排出者責任の原則は堅持しつつも、地元の理解を得るための一助として、最終処分体制の整備に向けた公的な関与も視野に入れておくことが考えられる。

将来、より一層のリサイクル技術や処理技術の進展により、最終的に埋立処分される廃棄物の中で、使用が許されなくなった有害物質を含む有害廃棄物の増加が考えられる。本研究では、水銀廃棄物を例に、長期管理に向けた方向性を検討したが、現行の最終処分制度では、世代を超えた長期の管理体制が整っているとはいえ、将来に備えて、本研究で示した有害廃棄物の長期管理に向けた社会システムの構築が求められる。

さらに、本研究により、水銀管理政策において、水銀の使用抑制等の入口規制が最も水銀排出の削減効果が大きいことが明らかとなった。このことから、有害物質の管理においては、そのライフサイクルを通して適正に管理するとの考え方が重要である。有害物質の製造、使用、廃棄全てのプロセスを通じて環境中への有害物質の放出を抑制するとともに、有害物質の使用そのものを可能な限り抑制し、最終的には有害物質を環境のシンクとしての廃棄物最終処分場に封じ込めるという方向性が今後求められるであろう。

## 参考文献一覧

---

- [1] 環境省，平成 26 年度水銀廃棄物の環境上適正な管理に関する調査業務報告書(平成 27 年 3 月)，(株) エックス都市研究所，2015.
- [2] 福田尚倫，高岡昌輝，大下和徹，森澤眞輔，水野忠雄，“長期保管を想定した金属水銀の安定化手法の検討，” 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，22，p. 244，2011.
- [3] 田中信寿，“環境安全な廃棄物埋立処分技術，” 廃棄物学会誌，10(2)，pp. 118-127，1999.
- [4] 田中勝，“有害廃棄物による環境リスクとその管理，” 廃棄物学会誌，5(3)，pp. 188-196，1994.
- [5] 田中信壽，“循環型社会に向けた埋立処分研究の展望：今、どんな埋立技術研究が必要か，” 土木学会論文集，724，pp. 1-14，2002.
- [6] 香村一夫，山崎康廣，“廃棄物層の安定化問題に関わる場の把握の重要性，” 廃棄物学会論文誌，15(1)，pp. 11-18，2004.
- [7] 朴祥徹，楠田哲也，島岡隆行，松藤康司，花嶋正孝，“埋立廃棄物層の通気性が浸出水水質の安定化に及ぼす影響について，” 廃棄物学会論文誌，5(1)，pp. 19-28，1994.
- [8] 田中宏和，田中博義，橘治廣，中屋亮二，山田正人，遠藤和人，大家清紀，小林克至，“管理型産業廃棄物最終処分場における経過期間と浸出水水質の相関分析，” 廃棄物学会研究発表会講演論文集，2007.
- [9] 長森正尚，小野雄策，河村清史，山田正人，小野芳朗，“浸出水質による一般廃棄物最終処分場の評価，” 廃棄物学会論文誌，18(5)，pp. 325-334，2007.
- [10] 吉崎耕大，堀井安雄，内田正信，中島健一，樋口壯太郎，武下俊宏，花嶋正孝，“廃棄物埋立地の早期廃止・安定化促進に関する研究，” 廃棄物学会研究発表講演論文集，17，pp. 959-961，2006.
- [11] 浅利美鈴，山下真貴子，酒井伸一，“家庭系有害廃棄物（製品）の保有実態把握のための家庭訪問調査，” 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，22，p. 36，2011.
- [12] 浅利美鈴，“平成 22 年度環境研究総合推進費補助金研究事業結果報告書「循環型社会における回収水銀の長期的安全管理に関する研究」第 6 章「水銀含有製品の保有・退蔵実態に関する調査」 p170，” 2011.
- [13] UNEP，Global Mercury Assessment，2002.
- [14] UNEP，Global Mercury Assessment 2013:Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport，2013.
- [15] 環境省，水銀規制に向けた国際的取組：「水銀に関する水俣条約」について，2014.
- [16] 経済産業省・環境省，“産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会制度構築ワーキンググループ・中央環境審議会環境保健部会水銀に関する水俣条約対応検討小委員会 第 5 回合同会合（2014 年 12 月）資料編，” 2014.
- [17] 環境省，水銀等による環境の汚染の防止に関する計画 ～「マーキュリー・ミニマム」の環境の実現を目指して～，水銀に関する水俣条約関係府省庁連絡会議（平成 28 年 10 月），2016.

- [18] 中央環境審議会, “水俣条約を踏まえた今後の水銀廃棄物対策について (答申) (平成 27 年 2 月 6 日),” 2015.
- [19] COWI, BiPRO, Ratification of the Minamata Convention by the EU: Complementary assessment of the mercury export ban (June, 2015), EC, 2015.
- [20] United Nations, “UN comtrade Database,” [オンライン]. Available: <http://comtrade.un.org/data/>. [アクセス日: 23 2 2016].
- [21] 環境省, “水銀廃棄物の環境上適正な管理に関する検討報告書, 水銀廃棄物に関する環境上適正な管理に関する検討会 水銀の回収・処分に関するワーキンググループ (平成 26 年 3 月),” 2014.
- [22] 環境省, 産業廃棄物の排出及び処理状況等 (平成 26 年度実績) (平成 28 年 12 月), 2016, p. 7.
- [23] 小林康彦, “埋立地再生を取りまく環境,” 廃棄物学会誌, 16(3), pp. 123-131, 2005.
- [24] 独立行政法人環境再生機構, “維持管理積立金の積立て及び取戻し状況,” [オンライン]. Available: [https://www.erca.go.jp/erca/guide/guide/saisyu\\_iji.html](https://www.erca.go.jp/erca/guide/guide/saisyu_iji.html). [アクセス日: 25 4 2017].
- [25] 環境省, “最終処分場維持管理積立金に係る維持管理費用算定ガイドライン (平成 18 年 4 月),” 2006.
- [26] EC, Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, 1999.
- [27] USEPA, Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), Code of Federal Regulations, Title 40 - Protection of Environment, Subpart G - Closure and Post-Closure, 246.117, 2014.
- [28] 高橋史武, 小椋山早帆, “埋立地での水銀保管における環境リスク評価モデルのパラメータ評価 (その 2),” 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, 2014:25, 2014.
- [29] 環境省, “産業廃棄物行政組織等調査報告書 (平成 27 年度実績) (平成 29 年 4 月),” 2017.
- [30] EU, “REGULATION (EC) No 1102/2008 on the banning of exports of metallic mercury and certain mercury compounds and mixtures and the safe storage of metallic mercury,” Official Journal of the European Union, 2008.
- [31] EC, “REPORT FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL, COM(2002) 489 final,” 2002.
- [32] EC, “COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT Community Strategy Concerning Mercury, COM (2005) 20 final,” 2005.
- [33] EU, “Regulation (EU) 2017/852 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2017 on mercury, and repealing Regulation (EC) No 1102/2008,” Official Journal of the European Union, 2017.
- [34] EC, “Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives,” 2008.
- [35] EC, “Quantities of metallic mercury reported according to Article 6 of the Regulation,” 2017. [オンライン]. Available:

- [http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/regulation\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/regulation_en.htm). [アクセス日: 27 11 2017].
- [36] US, “Mercury Export Ban Act of 2008, PUBLIC LAW 110-414-OCT. 14, 2008,” 2008.
- [37] US Department of Energy (DOE), “Long-term management and storage of elemental mercury, Environmental Impact Statement, January 2011,” 1 2011. [オンライン]. Available: <http://energy.gov/sites/prod/files/EIS-0423-FEIS-Summary-2011.pdf>. [アクセス日: 5 8 2016].
- [38] US Department of Energy (DOE), “EIS-0423-S1: Final Supplemental Environmental Impact Statement,” 2013. [オンライン]. Available: [file:///C:/Users/Sodeno/Dropbox/%E7%A0%94%E7%A9%B6/12%20%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E9%9C%80%E7%B5%A6%E7%A0%94%E7%A9%B6/%E3%82%A2%E3%83%A1%E3%83%AA%E3%82%AB/2013DOE\\_EIS-0423-S1-FEIS-Summary-2013.pdf](file:///C:/Users/Sodeno/Dropbox/%E7%A0%94%E7%A9%B6/12%20%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E9%9C%80%E7%B5%A6%E7%A0%94%E7%A9%B6/%E3%82%A2%E3%83%A1%E3%83%AA%E3%82%AB/2013DOE_EIS-0423-S1-FEIS-Summary-2013.pdf). [アクセス日: 20 11 2017].
- [39] S. Giannotto, S. Brewer, “Responsible Mercury Management Post-MEBA,” ROCKY MOUNTAIN MINERAL LAW FOUNDATION JOURNAL, 51(1), 2014.
- [40] US Department of Energy (DOE), “Permitted Mercury Storage Facility Notifications,” 2014. [オンライン]. Available: <https://energy.gov/em/downloads/permitted-mercury-storage-facility-notifications>. [アクセス日: 28 11 2017].
- [41] USEPA, “2015 Subpoena and Information Request from EPA to Mercury Recyclers,” 2015.
- [42] USEPA, “Mercury Storage Cost Estimates final report,” 2007.
- [43] 吉元直子, 高岡昌輝, 大下和徹, 水野忠雄, “非鉄金属製錬からの水銀回収量の将来予測に関する研究,” 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, 2011.
- [44] 環境省, “我が国における水銀のマテリアルフロー調査結果,” 2013.
- [45] 小口正弘, 亀屋隆志, 田崎智宏, 玉井伸明, 谷川昇, “電気・電子製品 23 品目の使用年数分布と使用済み台数の推計, 廃棄物学会論文誌, 17(1),” 2006.
- [46] 小塩真史, 橋本征二, “小型家電中レアメタルの地域別蓄積量・廃棄量の推計,” 日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2011.
- [47] 環境省廃棄物リサイクル対策部廃棄物対策課, “市町村等における水銀使用廃製品の回収事例集(平成 27 年 12 月 1 日),” [オンライン]. Available: [https://www.env.go.jp/recycle/waste/mercury-disposal/h2712\\_guide2-1.pdf](https://www.env.go.jp/recycle/waste/mercury-disposal/h2712_guide2-1.pdf). [アクセス日: 4 12 2015].
- [48] 環境省, “平成 28 年度第 7 回水銀廃棄物適正処理検討専門委員会御指摘事項への対応, 中央環境審議会循環型社会部会水銀廃棄物適正処理検討専門委員会 (第 8 回) 資料 1-2, p12 (平成 28 年 9 月 12 日),” 2016.
- [49] 高岡昌輝, 貴田晶子, 守富寛, 高橋史武, 浅利美鈴, 小口正弘, “平成 25 年度環境研究総合推進費補助金研究事業結果報告書「水銀など有害金属の循環利用における適正管理に関する研究(平成 26 年 3 月), P52,” 2014.
- [50] 環境省, “水銀廃棄物の適正処理に向けた検討状況, 中央環境審議会循環型社会部会水銀廃棄物適正処理検討専門委員会 (第 6 回) (平成 27 年 11 月 24 日) 資料 2-2, p6,” 2015.
- [51] 厚生労働省, “医療施設動態調査 (平成 27 年 11 月末概数) (2016),” [オンライン]. Available: [http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/iryosd/m15/dl/is1511\\_01.pdf](http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/iryosd/m15/dl/is1511_01.pdf). [アクセス日: 14 2 2016].

- [52] 一般社団法人電池工業会, “水銀添加製品としてのボタン電池の状況, 産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会制度構築ワーキンググループ中央環境審議会環境保健部会水銀に関する水俣条約対応検討小委員会合同会合 (第2回) 資料3-2, p7(平成26年9月12日),” [オンライン]. Available: <http://www.env.go.jp/council/05hoken/y0512-02b.html>. [アクセス日: 4 12 2015].
- [53] 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の将来推計人口(平成24年1月推計), 表1-1(2012),” [オンライン]. Available: <http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/con2h.html>. [アクセス日: 4 12 2015].
- [54] 一般社団法人日本照明工業会, “水俣条約に関する報告, 産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会制度構築ワーキンググループ中央環境審議会環境保健部会水銀に関する水俣条約対応検討小委員会合同会合 (第2回) 資料3-1, p6(平成26年9月12日),” [オンライン]. Available: <http://www.env.go.jp/council/05hoken/y0512-02b.html>. [アクセス日: 4 12 2015].
- [55] 環境省, “水俣条約対応ロードマップ(廃棄物), 中央環境審議会循環型社会部会水銀廃棄物適正処理検討専門委員会(第6回)資料2-1(平成27年11月24日),” 2015.
- [56] 環境省, 平成23年度廃棄物処理施設等からの水銀排出状況調査業務報告書(平成24年3月), p6, (株)東和テクノロジー, 2012.
- [57] 環境省, “廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引き(ごみ焼却施設編)(平成22年3月、平成27年3月改訂), p.9,” 2015.
- [58] 山本司, 盛岡通, 尾崎平, 北詰恵一, “ごみ焼却施設の更新シナリオの構築に基づく広域化とエネルギー回収を評価する手法の開発, 土木学会論文集G(環境), 68(6): II\_89-II\_98,” 2012.
- [59] 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の地域別将来推計人口(平成25(2013)年3月推計),” [オンライン]. Available: [http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/2gaiyo\\_hyo/gaiyo.asp](http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/2gaiyo_hyo/gaiyo.asp). [アクセス日: 14 4 2016].
- [60] 環境省, 平成25年度水銀廃棄物の環境上適正な管理に関する調査業務報告書(平成26年3月), (株)エックス都市研究所, 2014.
- [61] 中央環境審議会, “水俣条約を踏まえた今後の水銀大気排出対策について(答申)(平成27年1月23日), 別紙表2,” 2015.
- [62] 環境省, “水銀大気排出実態調査の結果, 平成27年度第2回水銀大気排出抑制対策調査検討会資料2(平成28年1月25日),” 2016.
- [63] 資源エネルギー庁, “総合エネルギー統計(2010年度~2014年度),” [オンライン]. Available: [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html#headline5](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline5). [アクセス日: 16 2 2016].
- [64] 経済産業省, “長期エネルギー需給見通し(平成27年7月), p7,” 2015.
- [65] 気候ネットワーク, “全国の石炭火力発電所一覧(2014年6月更新),” [オンライン]. Available: <http://sekitan.jp/data/>. [アクセス日: 4 12 2015].
- [66] 気候ネットワーク, “石炭火力発電所新設ウォッチ,” [オンライン]. Available: [http://sekitan.jp/plant-map/ja/v/table\\_ja](http://sekitan.jp/plant-map/ja/v/table_ja). [アクセス日: 16 2 2016].

- [67] 環境省, “水銀大気排出インベントリー案, 平成 27 年度第 3 回水銀大気排出抑制対策調査検討会資料 1 (平成 28 年 3 月 4 日),” 2016.
- [68] 経済産業省, 生産動態統計年報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 (2010~2014 年度).
- [69] 一般社団法人日本経済団体連合会, 経団連低炭素社会実行計画 (2013 年 1 月 17 日、2016 年 5 月 31 日改訂), 「日本鉱業協会の低炭素社会実行計画」, p. 17, 2016.
- [70] 一般社団法人日本経済団体連合会, “経団連低炭素社会実行計画 (フェーズ II) (2015 年 4 月 6 日、2016 年 6 月 3 日改訂), 「日本鉱業協会の低炭素社会実行計画フェーズ II」, p. 17,” 2016.
- [71] 環境省, 水銀大気排出抑制対策について (案), 平成 27 年度第 3 回水銀大気排出抑制対策調査検討会 資料 2 (平成 28 年 3 月 4 日), 2016.
- [72] 一般社団法人セメント協会, “生産高 (2016 年 1 月 20 日閲覧),” [オンライン]. Available: [http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2\\_0900.pdf](http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2_0900.pdf). [アクセス日: 20 1 2016].
- [73] 一般社団法人セメント協会, “低炭素社会実行計画 (2013 年 1 月 17 日), p1,” [オンライン]. Available: [http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1k\\_01.pdf](http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1k_01.pdf). [アクセス日: 4 12 2015].
- [74] 国家戦略室エネルギー・環境会議, “エネルギー・環境に関する選択肢(平成 24 年 6 月 29 日) 詳細シナリオ(慎重ケース) (2012),” [オンライン]. Available: <http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-111/ref02.pdf>. [アクセス日: 22 1 2016].
- [75] 一般社団法人日本経済団体連合会, “日本鉄鋼連盟の低炭素社会実行計画,” 経団連低炭素社会実行計画 (2013 年 1 月 17 日、2016 年 5 月 31 日改訂), p. 10, 2016.
- [76] 一般社団法人日本経済団体連合会, “日本鉄鋼連盟の低炭素社会実行計画フェーズ II,” 経団連低炭素社会実行計画 (フェーズ II) (2015 年 4 月 6 日、2016 年 6 月 3 日改訂), p. 8, 2016.
- [77] 日本エネルギー経済研究所, “アジア世界経済エネルギーアウトック 2015,” 2015.
- [78] 環境省, “廃棄物処理技術情報, 平成 26 年度調査結果, 施設整備状況 (2016),” [オンライン]. Available: [http://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/h26/index.html](http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h26/index.html). [アクセス日: 14 4 2016].
- [79] 環境省廃棄物リサイクル対策部産業廃棄物課, “提供資料 (2016 年 4 月 22 日)” .
- [80] 環境省, “主な検討事項について, 平成 27 年度第 1 回水銀大気排出抑制対策調査検討会資料 3 (平成 27 年 12 月 3 日),” 2015.
- [81] *国内大手水銀回収業者ヒアリング結果*. [インタビュー]. 23 3 2016.
- [82] UNEP, “Assessment of Excess Mercury in Asia, 2010-2050,” 2009.
- [83] UNEP, “Assessment of Excess Mercury in Eastern Europe and Central Asia, 2010-2050,” 2010.
- [84] UNEP, “Assessment of Excess Mercury in Latin America and the Caribbean, 2010-2050,” 2009.
- [85] UNEP, “Mercury Acting Now,” 2013.



- [86] International Trade Centre (ITC), [オンライン]. Available: <http://www.trademap.org/Index.aspx>. [アクセス日: 23 2 2016].
- [87] World Chlorine Council (WCC), “Annual Report, 2014,” [オンライン]. Available: <http://www.worldchlorine.org/publications/unep-chlor-alkali-mercury-partnership/>. [アクセス日: 23 3 2016].
- [88] U.S. Department of the Interior, “U.S. Geological Survey (USGS), 2014 Minerals Yearbook, Mercury [Advance Release],” February 2016.
- [89] UNIDO, “Reducing mercury emissions in China’s zinc smelting plants,” April 2016. [オンライン]. Available: <http://www.unido.org/news/press/reducing-mercury-emissions-in-chinas-zinc-smelting-plants.html>. [アクセス日: 1 8 2016].
- [90] U.S. Department of the Interior, “U.S. Geological Survey (USGS), Minerals Yearbook 2013, Zinc,” February 2016.
- [91] AMAP/UNEP, “Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013,” 2013.
- [92] Concorde, “Mercury flows and safe storage of surplus mercury, European Commission, Directorate General for Environment,” August 2006.
- [93] 経済産業省, “平成 27 年 11 月 11 日付け「特定の水銀, 水銀化合物及び水銀使用製品等の輸出承認について」(輸出注意事項 27 第 25 号),” 2015.
- [94] 国内大手水銀回収業者ヒアリング結果. [インタビュー]. 2016 年 3 月 23 日.
- [95] EC, “Quantities of metallic mercury reported according to Article 6 of the Regulation, May 2016,” [オンライン]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/regulation\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/regulation_en.htm).
- [96] U.S. Department of the Interior, “U.S. Geological Survey (USGS), Mineral Commodity Summaries, Gold,” February 2016.
- [97] P. Nelson, H. Nguyen, A. Morrison, H. Malfroy, M. Cope, M. Hibberd, S. Lee, J. McGregor, M. Meyer, “Transportation & Fate of Mercury in Australia - Final Report to DEWHA December 2009, pp36,” 2009. [オンライン]. Available: <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Mercury/Documents/para29submissions/Australia-Hg%20inventory.pdf>. [アクセス日: 5 8 2016].
- [98] Minerals Council of Australia (MCA), “Comment on the proposal for Australia to ratify the Minamata Convention on Mercury,” 7 2014. [オンライン]. Available: <https://www.environment.gov.au/submissions/minimata-convention/minerals-council-of-australia.pdf>. [アクセス日: 5 8 2016].
- [99] E. Damanhuri, “Mercury Utilization in Artisanal and Small Scale Gold Mining (ASGM) in Indonesia, the 15th Expert Meeting on Solid Waste Management Experts in Asia and Pacific Island (SWAPI), Special Session I Appropriate Management of Mercury Waste,” December 23, 2015.
- [100] USEPA, “Report to Congress, Potential Export of Mercury Compounds from the United States for Conversion to Elemental Mercury,” 2009.
- [101] UNEP-IETC ヒアリング結果. [インタビュー]. 22 7 2016.
- [102] 国内大手水銀回収業者ヒアリング結果. [インタビュー]. 2016 年 7 月 21 日.
- [103] Euro Chlor, “EURO CHLOR POSITION PAPER ON THE SAFE PERMANENT STORAGE OF SURPLUS MERCURY, September 2010,” [オンライン]. Available: <http://www.eurochlor.org/media/9041/3-4->

- l\_the\_euro\_chlor\_position\_paper\_\_september\_2010\_.pdf. [アクセス日: 5 8 2016].
- [104] 社団法人全国産業廃棄物連合会, “最終処分場の維持管理に係るアンケート調査結果報告 (平成 20 年 6 月),” 2008.
- [105] 環境省, “最終処分場最終処分場に係る維持管理積立金制度に関する緊急調査結果,” 2002.
- [106] 社団法人全国産業廃棄物連合会, “最終処分場の構造および維持管理に関する調査報告書 (平成 21 年 3 月),” 2009.
- [107] 遠藤和人, 山田正人, 井上雄三, 小野雄策, “廃棄物最終処分場のライフサイクルコストに関する一考察,” 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, 21, p.263, 2010.
- [108] 澤部咲余, 中山裕文, 島岡隆行, “一般廃棄物最終処分に関わる費用の増減要因に関する一考察, 土木学会西部支部 (2011 年 3 月 5 日),” 2011.
- [109] 環境省, “産業廃棄物行政組織等調査報告書 平成 25 年度実績 (平成 28 年 4 月), p.28,” 2016.
- [110] 環境省, “産業廃棄物処理業者情報検索システム,” [オンライン]. Available: <https://www.env.go.jp/recycle/waste/sanpai/>. [アクセス日: 25 11 2016].

## 図表一覧

---

- 図 1-1 研究のフレームワーク
  
- 図 2-1 現在の生物中の水銀濃度に対する相対値の歴史的推移
- 図 2-2 世界の排出源別の大気排出量割合 (2010 年)
- 図 2-3 我が国における水銀需要の推移
- 図 2-4 水俣条約と国内担保措置との関係
- 図 2-5 我が国の水銀に関するマテリアルフロー (2014 年度ベース) 2017 年 6 月版
- 図 2-6 我が国の水銀に関するマテリアルフロー (2010 年度ベース)
- 図 2-7 水銀回収又は埋立処分される水銀汚染物の水銀濃度
- 図 2-8 日本からの水銀輸出量と輸出価格の推移
- 図 2-9 水銀を含む廃棄物の処理フロー (現行)
- 図 2-10 維持管理積立金の積み立てと取り戻しの推移
- 図 2-11 遮断型最終処分場の残存容量の推移
- 図 2-12 EU における天然ガス精製・非鉄金属製造業における水銀処理量
  
- 図 3-1 国内の主要な水銀マテリアルフロー
- 図 3-2 家庭からの水銀体温計回収事例における一人当たり水銀回収量
- 図 3-3 廃棄物焼却施設の使用開始年分布
- 図 3-4 蛍光灯 (家庭向け) の出荷と廃棄の将来予測
- 図 3-5 水銀使用廃製品からの水銀排出量予測
- 図 3-6 焼却施設の更新による水銀大気排出削減割合
- 図 3-7 工業過程からの大気への水銀排出量予測
- 図 3-8 工業過程からの廃棄物等への水銀排出量予測
- 図 3-9 水銀使用廃製品からの水銀排出先の推測
- 図 3-10 水銀使用廃製品からの水銀回収シナリオ別水銀回収量
- 図 3-11 我が国全体における水銀排出の大気、廃棄物 (埋立)、水銀回収への分配
- 図 3-12 水俣条約を踏まえた国内水銀フローの変化の予測
  
- 図 4-1 水銀の輸出入バランスとフロー (2014 年)
- 図 4-2 水銀化合物の輸出入バランスとフロー (2014 年)
- 図 4-3 アジアにおける水銀需給の見通し
- 図 4-4 南米における水銀需給の見通し
- 図 4-5 ロシア・中央アジア・東欧における水銀需給の見通し
- 図 4-6 地域別水銀需給量予測 (2010 年と 2050 年)
- 図 4-7 世界の水銀需給見通し
- 図 4-8 日本における余剰水銀累積量の見通し
  
- 図 5-1 廃棄物中の燃え殻等の割合

- 図 5-2 廃棄物 1 トン当たりの処理料金の分布
- 図 5-3 年間維持管理費用と埋立容量の関係 (n=156)
- 図 5-4 埋立容量当たり年間維持管理費用と日水処理量の関係 (n=92)
- 図 5-5 維持管理年数の分布 (n=159)
- 図 5-6 維持管理年数と燃え殻等の割合の関係 (n=56)
- 図 5-7 維持管理年数と埋立開始年の関係 (n=116)
- 図 5-8 維持管理年数と埋立期間の関係 (n=113)
- 図 5-9 維持管理年数と埋立容量の関係 (n=153)
- 図 5-10 埋立終了処分場における維持管理年数と廃棄物種類との関係 (n=10)
- 図 5-11 稼働中の処分場における維持管理年数の予測と計算値との比較

- 表 2-1 水俣条約の主な規定事項
- 表 2-2 水俣条約と廃棄物処理法の水銀廃棄物の分類
- 表 2-3 廃水銀等の処分に関連する新規設定基準
- 表 2-4 金属水銀 1 トン当たりの処理費用の変化
- 表 2-5 ヨーロッパにおける水銀廃棄物の処理業者
- 表 2-6 米国の水銀廃棄物インベントリー
- 表 2-7 米国の水銀保管費用の試算 (7,500 トン、40 年間のケース)
- 表 2-8 日欧米の水銀処分方法の評価

- 表 3-1 水銀添加製品の排出予測の前提条件
- 表 3-3 水銀使用製品の将来シナリオ
- 表 3-3 水銀使用廃製品から排出される水銀の分配割合
- 表 3-4 工業過程から排出される水銀量 (2010 年度ベース)
- 表 3-5 水銀を排出する工業過程の将来シナリオ
- 表 3-6 水銀排出量の試算結果 (2010 年度) の比較
- 表 3-7 石炭火力発電における活動量の将来推計
- 表 3-8 計算方法の詳細
- 表 3-9 水銀排出量の試算結果の比較 (2010 年度)
- 表 3-10 人口減少に伴う一般廃棄物焼却施設数の将来予測
- 表 3-11 改正大気汚染防止法による水銀排出削減効果の試算
- 表 3-12 廃製品からの水銀回収率の試算結果 (2010 年度)

- 表 4-1 アジアの非鉄金属製錬業における水銀回収シナリオ
- 表 4-2 EU、北米、オセアニアにおける水銀需給の推計方法
- 表 4-3 世界の水銀貿易量の推移
- 表 4-4 EU における水銀需給見通し
- 表 4-5 北米における水銀需給見通し
- 表 4-6 オセアニアにおける水銀需給見通し
- 表 4-7 地域別の水銀排出量と水銀使用量 (2010 年)

- 表 5-1 調査の概要
- 表 5-2 自治体調査結果の記述統計量
- 表 5-3 事業者調査結果の記述統計量
- 表 5-4 事業者調査の集計結果
- 表 5-5 水処理過程のキレート処理の有無別の年間維持管理費用
- 表 5-6 有害物質含有廃棄物受入れ許容度と有害物質検出状況
- 表 5-7 事業者における水銀廃棄物の受入れ意向
- 表 5-8 維持管理費用積立制度への自治体の問題意識
- 表 5-9 処分場の各要素間の相関（自治体調査）（n=34）
- 表 5-10 処分場の各要素間の相関（事業者調査）（n=26）
- 表 5-11 重回帰分析に用いた各要素の相関行列（自治体調査）（n=46）
- 表 5-12 維持管理年数の規定因子（自治体調査）
- 表 5-13 重回帰分析に用いた各要素の相関行列（事業者調査）（n=45）
- 表 5-14 維持管理年数の規定因子（事業者調査）
- 表 5-15 埋立終了・廃止処分場の維持管理年数の規定因子
- 表 5-16 重回帰分析に用いた各要素の相関行列

## 謝辞

---

本研究を進めるにあたり、親身にご指導いただきました京都大学大学院地球環境学堂高岡昌輝教授に心より感謝申し上げます。高岡先生には、私が環境省産業廃棄物対策課在任中に水俣条約の批准に向けた国内対策をご審議いただきましたが、日本で水銀廃棄物処理の第一人者である高岡先生のご指導を賜れたことは、大変幸運かつ光栄でした。また、本論文の副査としての確なご助言を賜りました藤井滋穂教授、勝見武教授、大下和徹准教授、浅利美鈴准教授、及びゼミにてお世話になりました高岡研の藤森助教にもお礼申し上げます。

本研究では、水銀に関する詳細データが必要となりましたが、まさに水俣条約対応の法制度審議中のお忙しい中、調査にご協力いただいた環境省環境再生・資源循環局、環境保健部、水・大気環境局の関係者の皆様にも感謝いたします。三重県廃棄物リサイクル課の池田克弥様には、維持管理期間に関するアンケートの調査設計に現場からの貴重なご助言をいただきました。野村興産株式会社の藤原悌社長、UNEP-IETCの本多俊一様、株式会社エックス都市研究所の岡かおる副部長からは、公表資料には表れてこない最新の情勢分析を拝聴することができました。このほか、お忙しいところ時間を割いてヒアリング調査にご協力いただいた EC 環境局の Pavlos、スウェーデン環境エネルギー庁の Eric、スペイン環境省の Ana、スイスの BATREC 社、アンケート調査にご協力いただいた自治体、事業者の皆様にも感謝いたします。

また、懐かしい母校で、自身の関心事であった水銀廃棄物の長期管理に関する研究に取り組む機会をいただき、職場の環境省及び慶應義塾大学に厚くお礼申し上げます。校正作業をお手伝いいただいた堀江里衣子様にも感謝いたします。

最後に、仕事、家事、育児の中で研究時間の捻出には非常に苦労しましたが、家族の温かい理解と協力があったからこそ、論文を書き上げることができました。本当にどうもありがとうございます。

これまで、研究の進展ごとに環境省の担当者には成果を共有してきましたが、水銀のような有害物質を含有する廃棄物の最終処分のあり方については、今後更なる議論が必要です。本研究がそうした政策の検討の一助になることを願っています。

**産業廃棄物最終処分場の維持管理期間等に関するアンケート調査**

調査主体: 慶応義塾大学環境情報学部 袖野研究会

平成 28 年 12 月 22 日

都道府県政令市  
産業廃棄物最終処分場担当者 殿

慶応義塾大学環境情報学部  
准教授 袖野玲子

産業廃棄物最終処分場の維持管理期間等に関する調査へのお願い

時下ますますご清祥のこととお喜び申し上げます。

さて、産業廃棄物最終処分場については、廃棄物処理法第 15 条の 2 の 3 の規定により、処分場設置者は、埋立処分の終了後に必要な維持管理を適正に行うため、施設の廃止までに必要な維持管理費用を積立金として積み立てることとされています。維持管理費用の算出には、維持管理期間の見積もりが必要ですが、廃棄物の種類や処理方法は様々であり、維持管理期間の実態について知見の充実が求められているところです。

このため、産業廃棄物最終処分場における維持管理期間等の実態を把握するためのアンケート調査を実施いたしますので、貴自治体に設置されている管理型及び遮断型最終処分場に関して、下記調査票への回答にご協力をお願いいたし、よろしくごお願い申し上げます。ご多用中恐れ入りますが、平成 29 年 1 月 27 日までに、調査票返送先にまでご返送頂きますようお願いいたします。

なお、調査結果は統計的な処理を行いますので、個別の最終処分場の情報が公開されることはありません。

記

1. 添付のエクセルファイル「管理型処分場維持管理調査票」（維持管理積立金の額及びその算定の基礎に関する既存の電子情報がありましたら、添付ファイルに代えてそちらをご提供いただいても構いません。）
2. 次ページの調査票

調査票返送・問い合わせ先：  
慶応義塾大学環境情報学部 袖野研究会  
〒252-0882 藤沢市遠藤 5322  
Tel: 0466-49-3475, E-mail: sodeno@sfc.keio.ac.jp

(調査票)

都道府県 政令市名			
回答者名		所属	
電話番号		e-mail	

設問 1 現行の維持管理積立金制度で問題だと感じている点があれば、記述してください。

( )

以下は、遮断型最終処分場が設置されている自治体にお聞きします。

設問 2 遮断型最終処分場への立入検査はどれくらい行っていますか。

- ① 年・月に ( ) 回
- ② 問題があったときのみ実施
- ③ 近年、行っていない
- ④ その他 ( )

設問 3 遮断型最終処分場において問題はありますか？

- ① 問題はない。
- ② 維持管理が不適切なことがあった。  
( 具体的に : )
- ③ 周辺住民とのトラブルがあった。  
( 具体的に : )
- ④ 処分場設置者の資本金力が脆弱で長期の維持管理に不安がある。
- ⑤ その他 ( )

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。



管理型最終処分場の維持管理期間に関する調査 調査票

自治体名：

基本情報	稼働状況		埋立物中の燃え殻等 (燃え殻、焼却灰、ばいじん、鉱さい)の割合	埋立終了後の維持管理(含む予定)			水処理におけるキレート処理			
	処分場設置者名	処分場埋立容量 (m3)		稼働開始年	埋立終了年 (含む予定)	埋立廃止年		埋立終了後から 廃止までの年間 維持管理費用 (千円/年)	維持管理年 数の見込み (年)	日水処理 量 (m3/日)
例	㈱フジサワサービス	210,000	1983	2023	-	4	63,000	18	60	1
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										

雨水の入らぬ施設の場合は、  
は〇と記入ください。  
水処理量が不明の場合は、  
施設能力を記入ください。

稼働中の場合は、終了予  
定年を記入ください。

廃止してない場合は、  
「-」を記入してください。

**産業廃棄物最終処分場の維持管理期間等に関するアンケート調査**  
**<管理型最終処分場>**

平成 29 年 1 月 20 日

産業廃棄物最終処分場設置事業者 殿

慶應義塾大学環境情報学部  
准教授 袖野玲子

**産業廃棄物最終処分場の維持管理期間等に関する調査へのお願い**

時下、ますますご清祥のこととお喜び申し上げます。

さて、産業廃棄物最終処分場については、廃棄物処理法第 15 条の 2 の 3 の規定により、処分場設置者は、埋立処分の終了後に必要な維持管理を適正に行うため、施設の廃止までに必要な維持管理費用を積立金として積み立てることとされています。維持管理費用の算出には、維持管理期間の見積もりが必要ですが、廃棄物の種類や処理方法は様々であり、維持管理期間の実態について知見の充実が求められているところです。

このため、当研究会では、産業廃棄物管理型最終処分場における維持管理期間の実態を把握するためのアンケート調査を実施することといたしました。つきましては、管理型最終処分場に関して、調査へのご協力を賜りたく、よろしくお願い申し上げます。ご多用中恐れ入りますが、平成 29 年 2 月 10 日までに、同封の調査票をご返送いただくか、又はインターネット (<https://goo.gl/forms/zJyt30tEe8a8wYWT2>) よりご回答頂きますようお願いいたします。

なお、調査結果は統計的な集計・処理を行いますので、個別の最終処分場の情報が公開されることは一切ありません。本調査は、環境省環境研究総合推進費「水銀廃棄物の安定処分技術及び評価に関する研究 (3K143002)」により実施されます。

問い合わせ先：  
慶應義塾大学環境情報学部 袖野研究会  
〒252-0882 藤沢市遠藤 5322  
電話: 0466-49-3475 (火木のみ)  
E-mail: sodeno@sfc.keio.ac.jp

(調査票)

会社名			
回答者名		所属	
電話番号		e-mail	

設問1 貴社について、お答えください。

資本金・出資金	
情報公開 (○をして下さい。)	優良産廃処理業者認定制度の情報公表をしている ・ していない

設問2 貴社が所有している管理型最終処分場についてお答えください。

\*4つ以上、処分場を所有されている場合は、埋立終了年の早いものを3つお答えください。

\*これまでの埋立物中の燃え殻等、汚泥、第13号廃棄物のおよその割合(%)をお答えください。

処分場	①	②	③
処分場設置場所 * 都道府県政令市名			
埋立容量	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
維持管理年数(予定) * 埋立終了～廃止	年	年	年
燃え殻等 * 燃え殻、焼却灰、 ばいじん、鉱さい	%	%	%
汚泥	%	%	%
13号処理物	%	%	%

設問3 維持管理年数の設定根拠をお答えください。

- ① 自治体からのアドバイス
- ② 環境省の維持管理費用算定ガイドライン(平成18年4月)
- ③ 埋め立てた廃棄物の種類から推測
- ④ これまでの経験
- ⑤ その他 ( )

稼働中の処分場についてお聞きします。所有していない場合は設問5に進んで下さい。

設問 4-1 廃棄物 1 トン当たりのおよその処理費用をお答えください。

( ) ～ ( ) 円

設問 4-2 有害物質を含有している廃棄物の受入れ許容度をお答えください。

- ① 溶出が埋立判定基準以下であれば、受入れは全く問題ない。
- ② 条件付きで受け入れる。→ 条件をお答えください。

条件：(例) 排出工程や性状が一定であること。有害物質の含有が微量であること。

- ③ 受け入れないようにしている。→理由をお答えください。

理由：(例) 溶出があった場合に、水処理設備で対応できないため。

設問 4-3 浸出水原液中の有害物質濃度を測定していますか？測定している場合は、有害物質の検出状況をお答えください。

- ① 測定していない。
- ② 測定しているが、これまで不検出。
- ③ 測定しており、これまでに検出されたことがある。

→ 検出された有害物質に○をつけてください。

(水銀、鉛、カドミウム、六価クロム、ヒ素、その他\_\_\_\_\_)

設問 4-4 平成 27 年の廃棄物処理法施行令改正により、金属水銀を埋立処分する際には、あらかじめ硫化・固型化することが規定されましたが、今後、埋立判定基準を満たす廃水銀等の処理物を貴社の管理型最終処分場に受け入れてもよいとお考えですか？

- ① 受け入れてもよい。
- ② 条件が整えば、受け入れてもよい。→ 条件をお答えください。

条件：(例) 処理物の安定性が世の中に広く知られていること。  
(例) 雨水浸入防止措置等の特別な対応に対して補助金等の優遇措置があること。

③ 受け入れたくない。→理由をお答えください。

理由：（例）周辺住民の理解が得られないと考えるから。  
（例）形質変更の制限は、処分場の跡地利用に不利になると考えるから。

④ わからない。

設問 4-5 水銀処理物の埋立処分に当たっては、雨水浸入防止措置をとることが規定されていますが、当該措置は、処分場の終了から廃止までの期間に影響があるとお考えですか？その理由もお答えください。

- ① 長期化すると考える。
- ② 影響はないと考える
- ③ 短期化すると考える。
- ④ わからない。

理由：（例）処分場の安定化が進まないため、長期化すると考える。  
（例）水銀処理物の埋立区画に限定した措置のため、影響はない。

**【参考】廃水銀等の埋立処分について**

平成 27 年の廃棄物処理法施行令改正により、金属水銀を埋立処分するには、あらかじめ硫化・固型化することが規定されました。埋立判定基準を満たす廃水銀等の処理物は管理型最終処分場へ埋立処分できますが、以下のような上乘せ措置が規定される見込みです（詳細は環境省のホームページをご覧ください。）。

- ・埋め立てる処理物に雨水が浸入しないように必要な措置を講ずること
- ・他の廃棄物と区分して埋立を行うこと
- ・土地の形質の変更により水銀の溶出による支障がないよう必要な措置を講ずること、等

埋立終了した管理型最終処分場を所有していない場合、アンケートは以上で終了です。  
ご協力ありがとうございました。

**埋立終了、又は廃止した管理型最終処分場についてお聞きします。**

設問 5-1 埋立終了後の年間の維持管理費用は、埋立終了前に見込んでいたとおりですか。

- ① 見込みより安い。(約\_\_\_\_\_%安い)
- ② 見込みどおりである。
- ③ 見込みより高い。(約\_\_\_\_\_%高い)
- ④ わからない。

→ 見込みと違った場合は、その要因がお分かりになればお答えください

( )

設問 5-2 処分場の廃止までの期間（予定を含む。）は、埋立終了前に見込んでいたとおりですか。

- ① 見込みより短い。(\_\_\_\_\_年短い)
- ② 見込みどおりである。
- ③ 見込みより長い。(\_\_\_\_\_年長い)
- ④ わからない。

→ 見込みと違った場合は、その要因がお分かりになればお答えください

( )

設問 5-3 処分場の廃止までの期間が見込みよりも長くなった場合、処分場の維持管理に問題はありますか。

- ① 全く問題ない。
- ② 少し問題がある。
- ③ 大きな問題がある。

→ 問題があると考える場合は、その内容をお答えください

( )

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。

## APPENDIX II EU 水銀廃棄物政策担当者インタビュー調査結果

---

### 1. スウェーデン環境庁インタビュー結果メモ

日時：2017年8月24日14:00～16:00

場所：スウェーデン環境エネルギー庁（ストックホルム）

相手：Mr. Erik Westin（水銀チームの廃棄物担当），

Ms. Sofia Tingstorp（交渉担当），Deputy Director Division for Chemicals  
Ministry of Environment and Energy

○聴取内容は以下のとおり。

(1) スウェーデンにおける水銀廃棄物の規制の状況

・スウェーデンでは、水俣条約対応に環境庁から3名、化学の専門家などをいれた5名ほどのチームでこの数年やってきた。

・（大気排出インベントリデータを示しつつ、）スウェーデンからの水銀の排出量は少ない（年間0.25トン程度）。非鉄製錬業からの大気排出も含まれている。現在の廃棄物への排出は不明。環境庁で行っているモニタリングの3本柱は、大気、人の毛髪、魚中の水銀濃度。

・スウェーデンの場合、金属水銀は安定化（HgS）させてから、地中深く（deep rock）に処分することとしている。非鉄製錬業などから排出される水銀含有廃棄物については、水銀回収や安定化は不要で、0.1%（1000 mg/kg）以上の水銀を含有する廃棄物は地下深くに処分することとなっている。安定化を必要とするドイツ、スペインとはEU内でポジションが違う。ドイツの専門家は安定化しても不安だと言っていた。スウェーデンは、水銀含有物を焼却すれば、ダイオキシンなど別の問題を発生させる可能性もあるので、そのまま地中深くに処分する方法が最も安全だと考えている。

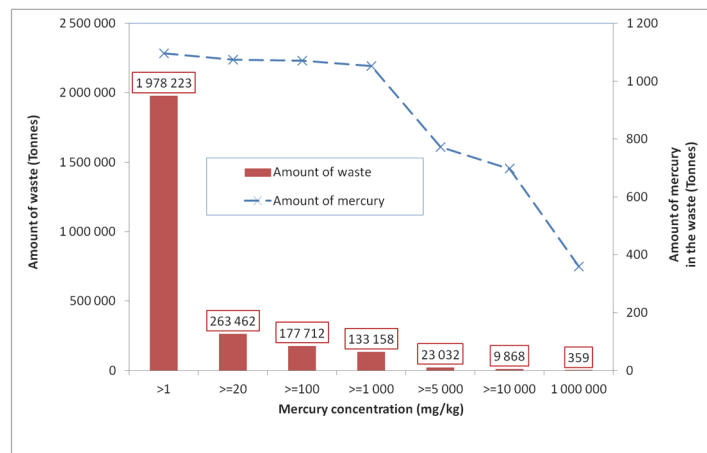
・元々は、国内に廃水銀の処分場を新設するには、国内の水銀廃棄物量が少な過ぎると評価していた。しかし、知ってのとおり、DELAの事件で自国に最終処分場をもたないリスクを痛感した（スウェーデンからDELAに処分を委託した電池からの回収水銀が、岩塩抗に処分されずに違法に売却された）。このため、現在、非鉄製錬業者が自らの敷地の地下深くに最終処分地（保管地）を建設予定である。処分場の許可は環境裁判所が与える。処分場の詳細は、非鉄製錬業者（Boliden）に聞くとよい。

・スウェーデン国内の水銀廃棄物は全て1社が請け負っている。会社はFORTUM（旧FKOKEM）。この会社を通じて水銀廃棄物はDELAに流れていた。現在はDELAの後継で、REMONDISが経営を引き継いでいる。

・スウェーデン環境庁では、低濃度の水銀汚染廃棄物にまで規制をかけるのは現実的ではないと考えている。（水銀規制が始まる前の国内水銀廃棄物のインベントリを示しつつ、）低濃度の水銀汚染廃棄物は量が多い。金属水銀はクロロアルカリ工業由来の359トンに対し、例えば0.1～0.5%の水銀濃度の汚染物は133,158トンもあった。

・POPs含有物などと混合された水銀汚染物への対応は難しい。

・水銀含有廃棄物の輸出はスウェーデンでは禁止。



Inventory of Swedish mercury waste (modified from SEPA 1997<sup>1</sup>)

(2) EU 各国の水銀廃棄物規制へのポジション

- EU では、ドイツ、スペイン、スウェーデンが水銀の最終処分に最大の関心を有する国。さらに追加するならデンマークなど北欧諸国。ドイツは岩塩抗での水銀処分ビジネスがあり、スペインは水銀鉱山があり、3 か国とも非鉄製錬業を有しているからではないか。
- 現在、EU 内ではどの程度の水銀を含有すれば水銀含有廃棄物とみなすのか検討中。
- 新しい EU の水銀規則では、永久処分に当たって安定化は不要 (←後で EC の法令担当に確認したが、安定化は必要。水銀汚染物についての話か?)、固化 (solidification) も必須ではない。

(3) その他

- スウェーデンでは歯のアマルガムからの火葬時の水銀排出が問題となっている。またリサイクル過程における労働者への健康被害への関心が高まっている (特に事件があったわけではない)。
- (例えば、日本や途上国が水銀処理物の最終処分を希望した場合、スウェーデンは受け入れるかと聞いたところ、) Boliden の処分場は自社内の廃棄物に限っており、受け入れないだろう。しかし、地球規模での水銀の適正管理を本気で考えるならば、本当は硬い岩盤があり、地震のないスウェーデンのような国が受け入れるべきなのかもしれない。

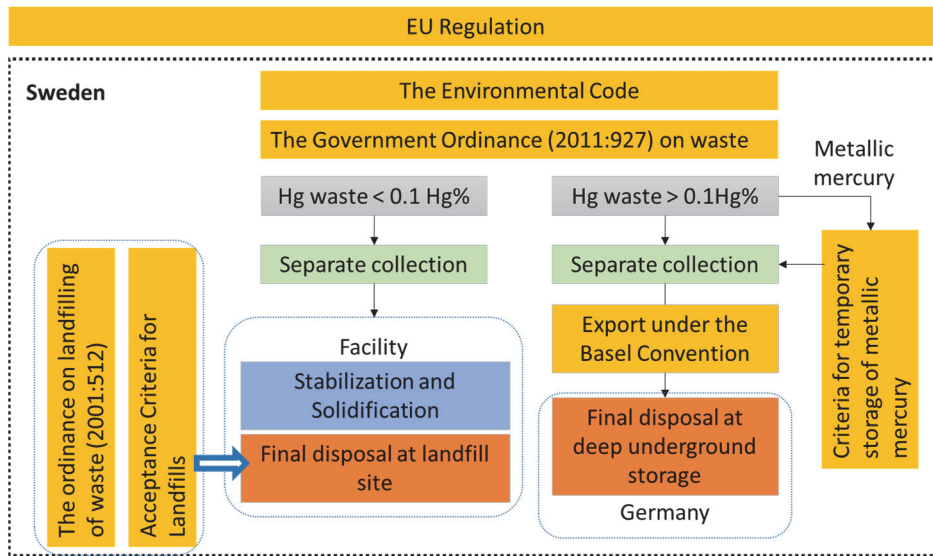
○入手資料は以下のとおり。

- \*1 パンフレット : Mercury management in Sweden
- \*2 水銀廃棄物の規制値を検討した際の資料 : Lars Olof Höglund, Kemakta Konsult AB (2015) ” Information on threshold concentrations of mercury in waste”
- \*3 UNEP 作成の国別ファクトシートの暫定版

<sup>1</sup> SEPA (1997): Final disposal of mercury – Mercury containing waste in Sweden – Inventory, characterization and prioritizing. Karin Pers, Lars Gunnar Karlsson, Lars Olof Höglund, Kemakta Konsult AB, report to Swedish Environmental Protection Agency (SEPA) Rapport 4768 (in Swedish).



スウェーデンにおける水銀廃棄物規制のスキーム\*3



スウェーデンの水銀廃棄物の概要\*2

Mercury content	Example of uses/products/waste streams	Total Hg amount in Swedish inventory (tonnes)	Total amount of waste in Swedish inventory (tonnes)	Total volume of waste in Swedish inventory (m <sup>3</sup> )	Fraction of total Swedish Hg inventory (% of Hg)	Fraction of total volume in Swedish Hg inventory (% of volume)
Commodity grade (>99%)	Chloralkali Thermometers Manometers Electrical switches	359	359	27	33%	0.002%
10 - 99% (100 000 - 990 000 ppm)	Hg-sludge, button cell batteries, amalgam, chemical waste	163	815	136	15%	0.02%
1 - 10% (10 000 - 100 000 ppm)	Low grade dental waste, sludges and gas purification dust from smelters	165	8 700	5 770	15%	0.7%
0.5 - 1% (5 000 - 10 000 ppm)	Dust and sludge from smelters	75	13 200	8 800	7%	1%
0.1 - 0.5% (1 000 - 5 000 ppm)	Alkaline batteries, sulphide sludge, high grade demolition rubble from chloralkali plants	280	110 400	73 600	26%	8%
0.01 - 0.1% (100 - 1 000 ppm)	Low grade demolition rubble, metal hydroxide sludge, lime sludge from arsenic manufacturing	19	45 000	30 000	1.7%	3.4%
0.002 - 0.01% (20 - 100 ppm)	Contaminated demolition rubble, sludges from lead manufacturing, contaminated soil	4	86 000	58 000	0.3%	6.5%
0.000 1 - 0.002% (1 - 20 ppm)	Other batteries, dredged material, lead slags, ashes and dust from smelters	10	1 050 000	700 000	0.9%	80%

## 2. EC 環境局インタビュー結果

日時：2017年8月29日 13:00~15:00

場所：EC DG-Environment（ブリュッセル）

相手：Pavlos Mouratidis, Policy Officer（ECの水銀法制の担当者）

当方からは事前に質問状と日本の水銀排出の将来推計に関する論文を送付。聴取内容は以下のとおり。

### (1) EUにおける水銀廃棄物規制

- ・EUの水銀に関する規制は複数の法律にまたがり複雑である。
- ・Regulation (EU) 2017/852 on mercury（水銀規則）で Regulation(EC)No1102/2008（水銀輸出禁止・安全保管規則）を改正した。
- ・埋立に関する規制は、Directive1999/31/EC（廃棄物埋立指令）に基づく。埋立地への廃棄物の受入れ基準は AnnexII に規定されており、Decision2003/33/EC に溶出基準値などの詳細が定められている。Directive2011/97/EU により埋立指令を改正し、金属水銀の暫定保管の基準を追加した。
- ・Regulation は発効同時に加盟国においても直接効力をもつが、Directive は加盟国がそれぞれの国の事情に応じて立法化するため、すぐには実施されない。各国がより厳しい上乗せ規制を行うことも自由。
- ・国によって実施に大きな違いが出ないように、加盟国からの専門家から構成される技術委員会において decision やガイドラインを策定することもある。加盟国によって事情が異なるため、曖昧な表現にならざるを得ないこともある。
- ・水銀規則における第13条第3項でこれまで定められていなかった永久処分の基準を定めた。2008年の時点では各国の合意が得られず、基準を制定できなかった。当時は岩塩航などに液体のままの金属水銀の処分を認めるかで大きな議論があった。
- ・“conversion” はいわゆる硫化・安定化のこと。処分先は、許可を受けた施設（permanent storage facilities）として、(a)岩塩坑又は硬い岩盤の地中深く、又は(b)地上であっても同等の安全性が認められたもの、としている。（地上にそのような施設があるのか問うたところ、）同等かどうかは各国が判断する。(b)は、加盟国の異なる事情によりこのような書きぶりになった。EU内に(a)のような施設を持つ国はドイツなどに限られている。
- ・水銀規則でいう“mercury waste”は、定義にもあるように金属水銀のことである。このため、非鉄精錬などから出る水銀含有汚泥はこれの対象ではなく、処分は埋立指令に従う。

### (2) 規制の実施状況と今後の見込み

- ・そもそも水銀輸出禁止令の背景にはクロロアルカリ製造セクターの水銀セル廃止に伴い大量に発生する水銀を市場に流出させてはいけないとの危機感からであった。欧州クロロアルカリ協会は自主的に2020年までのフェイズアウトを約束しており、制度上も、2017年には水銀セルはBATと認められない。法律上、クロロアルカリ工業やガス精製、非鉄製錬分野から出てきた水銀は「廃棄物」とみなされることがヨーロッパの特徴。
- ・これらのセクターから排出された金属水銀の保管量は報告義務があり（→水銀規則第12条）、web上で公開される（→クロロアルカリ工業では2015年末時点で水銀セルと自社保

管も合計すると 5804.5 トン)。知つてのとおり、非鉄精錬業からはほとんど水銀は排出されていない(→水銀を回収するインセンティブはなく、通常の有害廃棄物として処分されている模様)。汚染物に含有される水銀量は今のところ把握されていないが、来年にはデータが揃う予定。

・クロロアルカリセクターは、水銀の保管を嫌がり、早く永久処分したがる。このため、体制を整えば、ストックされている水銀は最終処分に向かうであろう。

・EU においても水銀の硫化ができるのは 3 社だけ(ドイツ 2 社 (DELA の後継と、DELA から独立してオンサイトでの硫化できる設備を開発している会社)、スペイン 1 社)。

このため、最終処分の基準は決まったものの、まだ実施能力が不足しており、暫定保管は 2023 年まで認められているので (5 年猶予)、それまでに能力拡充に努める。

(3) 有害廃棄物埋立処分場の埋立終了後の after-care 期間

・モニタリングや報告義務がある。

・詳細は、有害廃棄物担当の Madalina Caprusu に聞いてほしい。彼女からは以下のレポートが参考になろうと聞いている。

<http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/definition%20classification.pdf>

### 3. スペイン環境省インタビュー

日時：2017 年 9 月 27 日 (木) 10:00-10:30

場所：ジュネーブ Centre International de Conférences Genève (CICG)

先方：Ms. Ana Garcia Gonzalez (水銀廃棄物担当)

Jefa del Area de Coordinación Institucional Subdirección General de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

#### 【概要】

・スペインの水銀処理会社 Almaden は 2012 年には運用開始と言っていたが、どんどん稼働を延期している。この前は 2017 年夏には稼働すると言っていたがまだ動いていないようだ。許可も揃っており、何故稼働しないのか不明。

・環境省は Almaden の水銀安定化技術開発に補助金も出しており、早期に稼働してほしいと考えている。

・Almaden に日本から非鉄金属業界の団体の視察が以前あった。

・スペインでは水銀含有汚泥からの水銀回収義務はない。国内のクロロアルカリ由来の水銀ストック処理が大きな課題。

・業者は安全を宣伝しているが、最終処分先として岩塩坑は信用できない。これまでも放射性廃棄物を最終処分した岩塩坑で事故があった。一度、水が坑道に入ってしまうと、有害廃棄物を取り出すこともできず環境を汚染するしかない。水銀の最終処分は、地上で目に見える形で監視すべきだと考える。

- ・また、ドイツの最終処分では、硫化水銀にして終わりだが、飛散拡散しやすいあのようなパウダー状では十分に安全とは言えない。固形化もすべきだと考えている。
- ・De1a の事件のこともある。横流しで売却された水銀は 800 トンほどと言っているが、実際はもっと多いとみている。ヨーロッパの水銀ストック量は、以前は 8000 トンと言われていたが、いつのまにか 6000 トンに減っている。
- ・技術の詳細や稼働の見込みは会社に直接問い合わせしてほしい。

## APPENDIX III 水銀硫化処理工場の見学報告（スイス：BATREC 社）

---

日時：2017年9月26日（水）

場所：スイス BATREC 社（3752 Wimmis, Switzerland）

先方説明者：Dr. Dieter Offenthaler

Managing Director, General management

### ○BATREC の概要

- ・スイス政府の国策により、1989年に電池の処理工場として設置された。その後、リサイクル会社として発展。
- ・廃棄物メジャーの VEOLIA（仏：174,000人、25,000百万ユーロ）に買収され、今はグループの一員。
- ・水俣条約を受け、最近、水銀の硫化事業を開始した。

### ○処理方法

- ・受け入れた水銀廃棄物は、①安定化（wet polysulfide方式、赤色 HgS、粉状のままドラム缶詰め）して岩塩坑に最終処分（独 K+S）、又は②99.9999%に精製してリサイクル。
- ・まず 650-850 度でローストし、吸着剤に吸着した水銀を追い出す。→スクラバーで洗う（5度まで冷却される）→水銀が濃縮される。排ガスは連続測定で  $10\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  未満、排水は  $10\mu\text{g}/\text{リットル}$  以下
- ・水銀の安定化は、バッチ式、全工程で4時間ほど。処理能力は 1200 トン・Hg/年（水銀廃棄物で 3500 トン/年）
- ・活性硫黄と水銀を混合して硫化水銀を水の中で生成（特許）。混合割合は、水銀 1000 に対して活性硫黄 100。活性硫黄は 200 回ほど繰り返し利用可能。水も循環していてクロロズドシステム。
- ・生成された硫化水銀は、水銀蒸発が  $10\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  以下。溶出試験は  $2\text{mg}/\text{kg-Hg}$  以下（技術担当者によると 1ppm? くらい）
- ・世界で水銀を処理できるのは大手 4 社（日、米、独、スイス）。アメリカは国内でフローが閉じているので、実質 3 社。
- ・高温でガス化した水銀と硫黄を反応させる方法は、コストがかかる上に、運転が安定しない。
- ・当初は、日本と同じ黒色硫化水銀で処理を考えていたが、湿式の方がエネルギーを無駄なく使え、水銀の排出がないことから、優れた技術だと考えている。
- ・工場内は、エポキシ樹脂で被覆された床、排水溝、火災検知システムとスクラバーが設置。

### ○処理実績

- ・受入れ廃棄物の 95%はスイス国外から（英、豪、インドネシア、タイ、ナイジェリア、ポリビア）。天然ガス製造由来の吸着剤、クロロアルカリ由来の金属水銀、混合廃棄物（アマルガムなど）を処理。
- ・受入れ廃棄物は、平均 2-3%の水銀含有（多くても 10%）。mixed metal では 25ppm 以下、活性炭は 1ppm 以下と低い。

- ・水銀売却の用途は、試験用途や参照用途、歯科アマルガム用途のみで、9割以上がアマルガム。年間20トンほど。
- ・ASGM用途やトレーダーには売却しないようにしており、エンドユーザーと用途を確認している。毎月、売却実績を政府に報告している。

#### ○処理コスト

- ・水銀安定化費用は5ドル/kg-水銀（コンテナ代（クロロアルカリからの水銀。2トン入り）、レポート代、最終処分代含む。スイスまでの輸送代は別）
- ・水銀をリサイクルして売却する場合は、25ドル/kgで売却。
- ・最終処分を望む顧客は増えているとはいえ、75%の顧客が水銀売却を選択している。
- ・最終処分場（K+S）への支払いは、1000ドル/トン-Hgくらい。

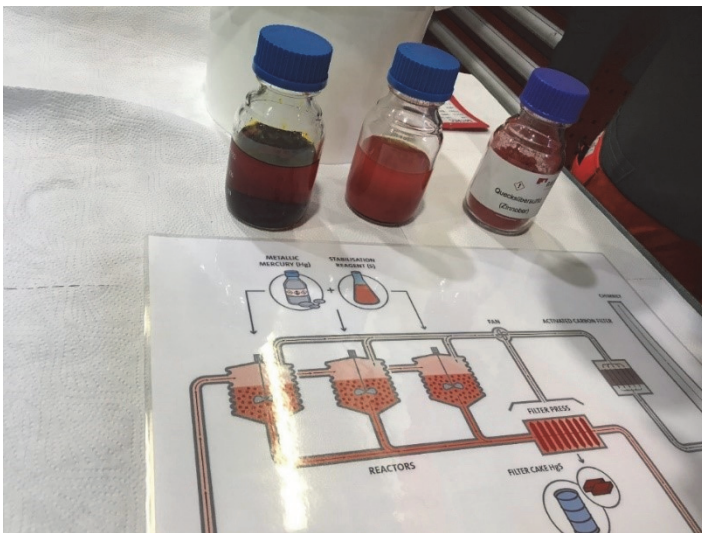
#### ○今後の見通し

- ・当面はヨーロッパのクロロアルカリ由来の水銀処理で手がいっぱい。
- ・工業用金採掘からの副産物には多くの水銀が含まれており、市場に供給されていると考えている。300トン以上？この水銀供給の動向に注目している。
- ・アジアの天然ガス製造では特に多くのHgを排出する。タイは水銀排出のホットスポット。水銀を吸着した吸着剤は、タイは規制しているが、マレーシアやインドネシアはそのまま埋め立てられている。
- ・非鉄製錬の汚泥については取り扱いが難しいので、受入れ予定はない。汚泥からの水銀回収義務がないので、今のところメリットはない。
- ・バーゼル条約の越境移動規制がスイスに持ってくる際の障害になっていることがある。
- ・歯科用アマルガムの需要は、南米とアフリカで増加している。
- ・EU域内では水銀の値段は下がっているが、域外では上昇している。
- ・クロロアルカリからは、2025年までに1100トン（南米）と1000トン（それ以外）の水銀が排出される見込み。
- ・インドのアーユルヴェーダの水銀需要は月に10トンと大きい。
- ・供給は、中国の不確実性が高い。VCMは5年で代替化と言っている。
- ・水銀硫化技術の海外展開は考えていない。世界で見ても処理対象となる水銀量は少ないので、スイスに集めて安定化し、ドイツに最終処分するのが最も安全だと考えている。
- ・いずれ水銀は最終処分が主流になるとしても、現在は一次鉱出が増えているので、それよりリサイクル水銀を供給する方が環境には良いと考えている。



←ドラム缶につめられた硫化水銀

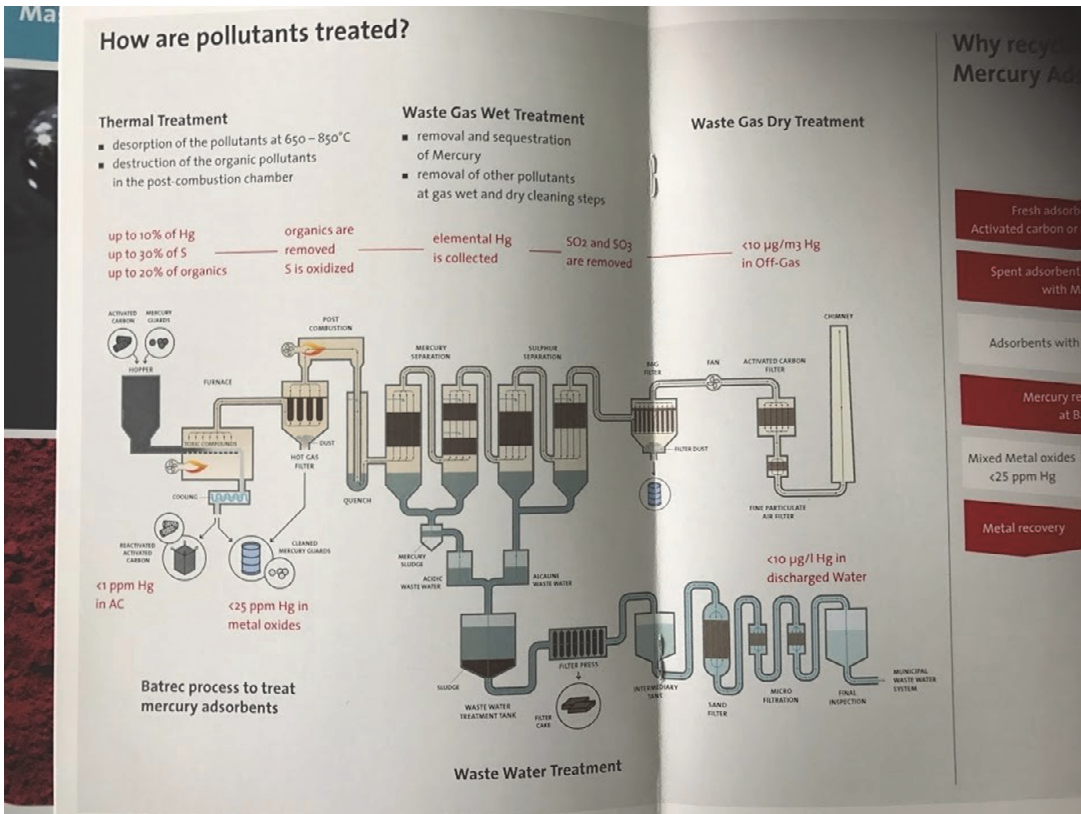
クロロアルカリ製造業者からのコンテナ入り水銀(2トン)。コンテナの下から水銀を押し出して、工程に投入される。



↑硫化の工程



↓ 硫化設備



水銀汚染廃棄物の処理工程





↑スクラバー



↑ホッパー