

水俣条約を踏まえた 国内余剰水銀量の将来推計

袖野 玲子¹・高岡 昌輝²

¹正会員 慶應義塾大学准教授 環境情報学部 (〒252-0882 神奈川県藤沢市遠藤5322)
E-mail: sodeno@sfc.keio.ac.jp

²正会員 京都大学教授 地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp

2013年に採択された水銀に関する水俣条約を受け、今後、世界的な水銀需要の低下により、これまで有価物として取り扱われてきた回収水銀が廃棄物化する事態が将来想定され、水銀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、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、本研究では主要排出源である工業過程と水銀使用廃製品を対象に、条約の影響を踏まえ2010年から2050年までの水銀排出量を推計し、大気、廃棄物（埋立）及び水銀回収への排出量を算出した上で、水銀需給の動向から余剰水銀量の将来推計を行った。この結果、我が国では大気と埋立への水銀排出が減少する一方、水銀回収が増加し、回収量は毎年50トン強と推計され、2050年における余剰水銀の国内ストック量は約700～1,500トンと試算された。

Key Words : surplus mercury, recovery, material flow, emission inventory, Minamata Convention

1. はじめに

2013年に「水銀に関する水俣条約」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が国際的な水銀需要の低下を受け、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ことから、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、当該余剰水銀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、BAT/BEPに基づき大気中への水銀排出の抑制が求められており、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や家庭に退職された水銀のストック量推計等、特定分野における水銀動態の研究はみられるものの、日本の余剰水銀の将来見通しに関する詳細な研究はない。このため、本研

究では、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踏まえ、2010年から2050年までの大気、廃棄物（埋立）及び水銀回収への水銀排出量を試算した上で、国際的な水銀需給の動向から、当該回収水銀量のうち国内処分が必要となる余剰水銀量の将来見通しを明らかにすることを目的とする。

2. 研究の手法

(1) 工業過程からの水銀排出

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、将来活動量を業界団体が発表する地球温暖化防止自主行動計画に示す見通しより、表1に示す将来シナリオを設定し¹⁾、水銀収支を確認しつつ、以下の式で表される原燃料中水銀量法又は総括原単位法により2010年から2050年までの水銀排出量を求めた。

表-1 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）	・石炭中水銀濃度：0.038mg/kg²⁾ ・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）³⁾ ・大気移行割合：35.3% ・排出物（石炭灰、脱硫石膏、汚泥）のうち、最終処分物への水銀移行割合：21%⁴⁾より計算、	・2030年の石炭発電電力量は2,810億kWh⁵⁾と想定、 ・発電所の寿命を40年、現在計画中の新規発電所は計画通り設置、2030年以降は新規設置ゼロと仮定して、2030年以降の設備容量の将来推移⁶⁾に応じて発電電力量も推移すると想定、
非鉄金属製錬	・総括排出係数（大気）：0.034～16g-Hg/t²⁾ ・総括排出係数（廃棄物）：15.9g-Hg/t⁴⁾より計算 ・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）	・2020年の生産量を2,730千トン⁸⁾、2030年に2020年比1.08倍⁹⁾と想定、 ・鉱石の品位が2020年に2010年比で10%⁸⁾悪化し（鉱石消費量が1.11倍になる、）、以降は一定と想定、
廃棄物焼却	・総括排出係数（大気）²⁾より計算：35.1mg-Hg/一般廃棄物t、8.8mg-Hg/産業廃棄物t、1.36mg-Hg/下水汚泥t-dry ・廃棄物焼却量：環境省一般廃棄物処理実態調査（2010～2013年度）、環境省産業廃棄物処理実態調査（中間処理量）（2010～2012年度） ・大気移行割合：19.4%（一般廃棄物）²⁾より計算、47.9%（産業廃棄物、下水汚泥）¹⁰⁾ ・排出物（飛灰等）のうち、廃棄物等（埋立＋水銀回収）への水銀移行割合：62%（一般廃棄物）⁴⁾より計算、70%（産業廃棄物）¹¹⁾より計算、29%（下水汚泥）⁴⁾より計算	・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）¹⁰⁾より計算と一般廃棄物焼却施設の水銀排出量は(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 ・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¹²⁾に応じた施設数に更新されると仮定、 ・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 ・施設の更新による水銀削減効果は26%³⁾より計算と想定 ・下水汚泥焼却施設からの排出は一定と想定
セメント製造	・総括排出係数（大気）：89.96mg-Hg/t²⁾より計算 ・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）¹³⁾	・セメント生産量を2020年に56,210千トン、2030年に51,730千トン¹⁴⁾と想定、
鉄鋼製造	・総括排出係数（大気）：22.59mg-Hg/t²⁾より計算 ・総括排出係数（廃棄物）：1.17mg-Hg/t²⁾より計算 ・粗鋼生産量：経済産業省生産動態統計年報（2010～2014年度）	・粗鋼生産量を2020年に119,660千トン、2030年に1.2億トン¹⁵⁾、以降は一定と想定、
その他	・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）²⁾ ・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）²⁾	・原油天然ガス生産は、2013年比で2020年0.88、2030年0.9、2040年0.86と想定¹⁶⁾のリファレンスケース ・その他は同レベルで排出

a) 原燃料中水銀方式

$$E_{air} = \sum_i (CHG_i \times AC_i \times AF_i \times ERA_i) \quad (1)$$

$$E_{waste} = \sum_i (CHG_i \times AC_i \times AF_i \times (1 - DRA_i) \times DRW_i) \quad (2)$$

E_{air} : 水銀大気排出量(t)

E_{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年比）

DRA: 大気への移行割合(%)

DRW: 排出物中水銀の埋立/回収への移行割合(%)

i: 施設分類

E_{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

b) 総括排出係数方式

$$E_{air} = \sum_i (EFA_i \times AA_i \times AF_i) \quad (3)$$

$$E_{waste} = \sum_i (EFW_i \times AA_i \times AF_i) \quad (4)$$

E_{air} : 水銀大気排出量(t)

また、改正大気汚染防止法の影響として、各施設区分における排ガス中全水銀濃度分布²⁾から、基準値案（既存施設）以上の水銀排出が基準値案以下に2020年に削減されると仮定し、各施設の排ガス量が同じと仮定して削減割合を算出した。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。石炭火力発電と廃棄物焼却においては、施設の廃止と新規設置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。

(2) 水銀使用廃製品からの水銀排出

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。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ため、廃製品の排出予測は、本研究では表-2のとおり将来シナリオを設定し、ランプ類及び電池については、ワイブル関数で故障率を設定して予測を2010年から2050年までに更新した。ストックが問題となる血圧計及び体温計については、自治体や医師会の回収事例から平均水銀回収量0.0057g/人年を求め、水銀排出量を試算した。

将来の水銀回収率は、改正廃棄物処理法令に基づき、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¹⁷⁾ことから、環境省調査結果¹⁸⁾より把握された現在の廃製品の取り扱い状況を踏まえ、2016年度以降は計測機器の水銀回収率を90%、ボタン電池を80%、ランプ類を50%と仮定した。

(3) 余剰水銀の発生予測

水銀の国際需給を把握するため、国連貿易統計²³⁾より2014年の水銀（HSコード280540）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。世界の水銀需給の見通しについては、UNEPが推計したアジア、南米、東欧・中央アジア・ロシア域の余剰水銀²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾の見通しに、高岡ら²⁷⁾が更新したアジアの推計結果及び上述の日本の回収水銀量の将来予測を反映し、2015年までの統計データ²⁸⁾²⁹⁾を更新し、メキシコの鉱出量を2020年以降他地域の鉱出と同量と仮定して追加した。これら国際需給の動向を踏まえ、日本における余剰水銀の発生について、3つの輸出シナリオを設定して推計を行った。

表-2 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	・酸化銀電池の平均使用年数を2年と設定¹¹⁾ ・国内の酸化銀電池は、無水銀化技術があることから¹⁹⁾、2020年に2014年比で生産量が50%に、以降同レベルで使用と想定。 ・補聴器用途の空気亜鉛電池は代替困難なため、使用は同レベルで、2015年以降出生中位・死亡中位仮定による65歳以上の将来推計人口²⁰⁾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）。 ・アルカリ電池は、条約上2020年以降は製造・輸出入が禁止されることからゼロとする。	0.996
ランプ類	・蛍光ランプの平均使用年数を4.1年(家庭用)、2.5年(事業用)、冷陰極ランプ900日、高圧ランプ3年¹¹⁾ ・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年に2013年比半減²¹⁾、2030年にゼロに、冷陰極ランプは2013年に生産ゼロと想定。 ・高圧ランプの特殊用途(34%)¹¹⁾は同レベルで今後も使用と想定。	3.04
医療用計測機器	・水銀血圧計は使用年数を10年¹¹⁾、2020年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²²⁾に、通常の排出に加えて2018～2025年の排出見込み量の45%¹¹⁾が排出されると想定。 ・体温計は今後も同レベルで排出が続き、2020年以降半減と想定。	1.9
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

注) ワイブル関数の形状パラメータは、電気製品一般の24を使用。

3. 研究の結果と考察

(1) 工業過程からの水銀排出

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年の約19トンから緩やかに減少し、2020年に約16トン、2050年に約14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-1)。改正大気汚染防止法による水銀の大気排出抑制効果については、2014年度の排出実績から見込まれる削減量は合計1.32トン、約8%の削減効果があると試算された。また、廃棄物等への水銀排出は2010年の約46トンから2020年に約54トン、2050年に約57トンと増加が予測され、非鉄金属製錬施設からの排出が9割以上を占める結果となった(図-2)。排出増加は特に非鉄金属の原料鉱石の品位悪化が主要因と考えられる。

(2) 水銀使用廃製品からの水銀排出

廃製品からの水銀排出については、図-3に示す通り、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年の約18トンから2020年に約5トン(2010年比27%)、2030年に約3トン(2010年比16%)と急減し、以降は代替が困難な用途からの排出のみになる結果となった。また、製品への入口規制及び回収促進施策の効果により、2016年度の水銀回収量は約6トンに増加すると推計された。

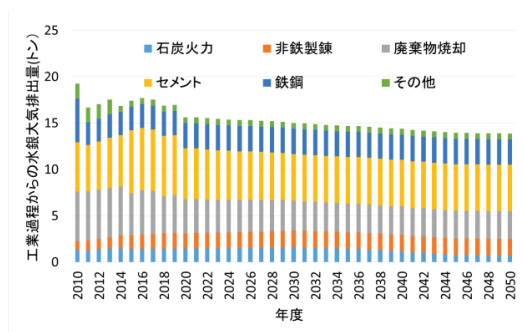


図-1 工業過程からの水銀大気排出予測

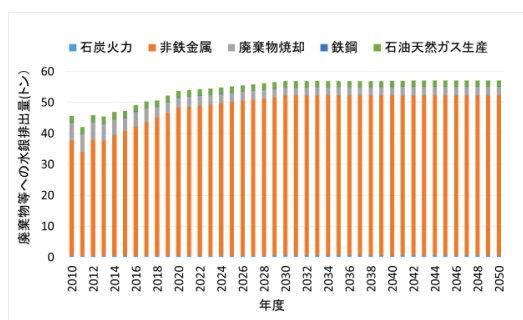


図-2 工業過程から廃棄物等への水銀排出予測

(3) 水銀回収量の将来予測

日本における水銀の排出先は、図-4に示すとおり、2050年には大気及び廃棄物(埋立処分)への排出が減少し、水銀回収が約54トンに増加する見通しになった。

(4) 国際的な水銀需給の動向

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、その他の地域における水銀の需給バランスを図-5に示す。クロロアルカリ製造における水銀セル廃止に伴う水銀の市場への再供給禁止により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。2025年以降は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製錬業からの回収水銀が供給源となることが見込まれる。現在は回収水銀の主な輸出国は日本のみとみられるが、今後、中国など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。

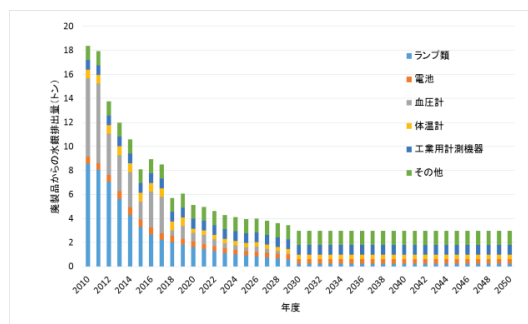


図-3 水銀使用廃製品からの水銀排出量予測

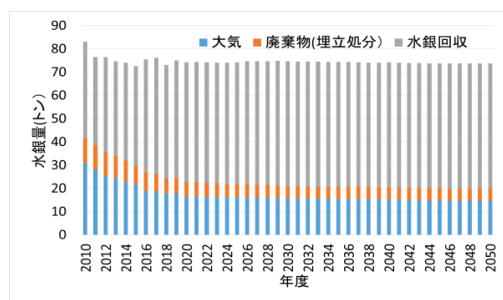


図-4 国内水銀の排出先(大気、埋立、回収)

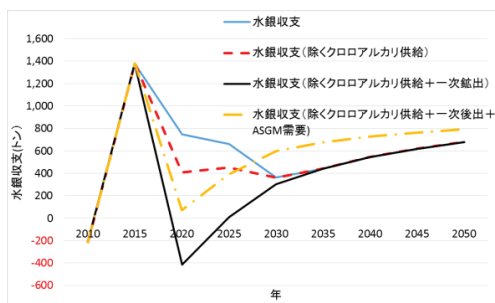


図-5 世界の水銀需給見通し
注) アジア、南米、東欧、ロシアの合計

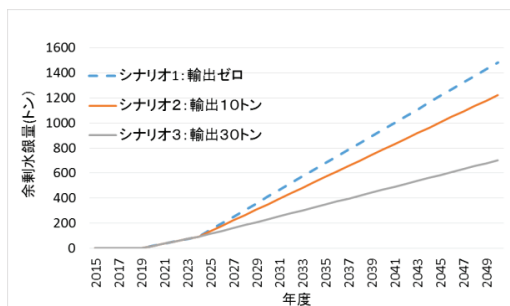


図-6 日本の余剰水銀累積量予測の結果

(5) 日本の余剰水銀量の将来予測

日本は2014年に輸出量70トン（世界の水銀輸出量の3%）で世界第7位の輸出国であった。日本からの水銀輸出は、国内大手水銀回収業者³⁰⁾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。

日本における余剰水銀の発生の見通しについては、2020年に製品用途の輸出（2014年度実績で水銀輸出量の36%³⁰⁾）が減少し、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）と条約上認められた用途への輸出が毎年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つのシナリオにおいて推計を行ったところ、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-6）。また、2050年における余剰水銀の国内ストック量は約700～1,500トンと試算された。

4. おわりに

我が国では、工業過程からの水銀排出は今後も増加傾向で継続する見通しであり、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。一方、水銀使用製品由来の水銀排出は急減するため、今後数年が廃製品の回収に注力すべき時期となる。本稿では、世界的な水銀需要の低下により、水銀の廃棄物化が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長期管理体制の構築を急ぐ必要がある。廃棄物処理法施行令改正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、予想される余剰水銀発生量を踏まえ、水銀の硫化処理施設や最終処分場の早期整備が求められる。

参考文献

- 1) 袖野玲子, 高岡昌輝: 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, 2016(査読中)。
- 2) 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。
- 3) 資源エネルギー庁: 総合エネルギー統計(2010年度～2014年度)。
http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline5 (2016年2月16日閲覧)。
- 4) 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。
- 5) 経済産業省: 長期エネルギー需給見通し(平成27年7月), 2015。
- 6) 気候変動ネットワーク: 全国の石炭火力発電所一覧(2014年6月更新) <http://sekitan.jp/data/> (2015年12月4日閲覧)。
- 7) 気候変動ネットワーク: 石炭火力発電所新設ウォッチ http://sekitan.jp/plant-map/ja/v/table_ja (2016年2月16日閲覧)。
- 8) 日本鉱業協会: 低炭素社会実行計画について(平成25年3月1日), 2013。
- 9) 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, <http://www.env.go.jp/council/06earth/060-111/ref02.pdf> (2016年1月22日閲覧)。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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) http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/2gaiyo_hyo/gaiyo.asp (2016年4月14日閲覧)。
- 13) 一般社団法人セメント協会: 生産高 http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2_0900.pdf (2016年1月20日閲覧)。

- 14) 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）http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1k_01.pdf（2015年12月4日閲覧）。
- 15) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：日本鉄鋼連盟の「低炭素社会実行計画」（2020年目標）（2016年1月26日報告），2016。
- 16) 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LOOK 2015, 2015。
- 17) 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。
- 18) 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。
- 19) 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（平成26年9月12日）
<http://www.env.go.jp/council/05hoken/y0512-02b.html>（2015年12月4日閲覧）。
- 20) 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），
<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/con2h.html>（2015年12月4日閲覧）。
- 21) 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（平成26年9月12日）
<http://www.env.go.jp/council/05hoken/y0512-02b.html>（2015年12月4日閲覧）。
- 22) 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。
- 23) United Nations: UN Comtrade Database, <http://comtrade.un.org/data/>（2016年2月23日閲覧）。
- 24) UNEP: Assessment of Excess Mercury in Asia, 2010-2050, 2009。
- 25) UNEP: Assessment of Excess Mercury in Eastern Europe and Central Asia, 2010-2050, 2010。
- 26) UNEP: Assessment of Excess Mercury in Latin America and the Caribbean, 2010-2050, 2009。
- 27) 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），2014。
- 28) World Chlorine Council (WCC): Annual Report, 2014, <http://www.worldchlorine.org/publications/unep-chlor-alkali-mercury-partnership/>（2016年3月23日閲覧）。
- 29) U.S. Department of the Interior: U.S. Geological Survey (USGS), 2014 Minerals Yearbook, Mercury [Advance Release], February 2016, 2016。
- 30) 国内大手水銀回収業者ヒアリング結果（2016年3月23日）。

(2016. 8. 26 受付)

ESTIMATION ON FUTURE SURPLUS MERCURY IN JAPAN BASED ON THE MINAMATA CONVENTION

Reiko SODENO and Masaki TAKAOKA

The adoption in 2013 of the Minamata Convention on Mercury is expected to result in a decrease in global demand for mercury. Although most mercury in Japan is currently recovered from waste and by-products and then exported, a future decrease in demand may result in an inevitable surplus in recovered mercury, which would have to be dealt with domestically. To consider future scenarios and capacity for final disposal, it is crucial to understand the future outlook for surplus mercury in Japan. This study, therefore, aims to develop an outlook for 2010 to 2050 for mercury emissions in Japan from industrial processes and the disposal of mercury-added products to air and waste (landfill and mercury recovery), and to provide basic information on the potential volume of surplus.

Mercury emissions from industrial processes are calculated using two approaches: emission factors and amounts of mercury contained in raw materials and wastes. For emissions from mercury-added products, estimates factor in a time lag between the production and disposal of electrical products, calculated by Weibull distribution. The study estimates that mercury emissions from industrial processes are expected to increase due to rising emissions from non-ferrous metal refining facilities. Meanwhile, emissions from the disposal of mercury-added products will decline sharply. Total emissions to air and landfill are expected to decrease, while the quantity of recovered mercury will likely increase to more than 50 tons per year in the future. Considering future global trends for the supply-demand balance of mercury, the study predicts that a surplus will develop in Japan starting in 2020, and the cumulative surplus in 2050 will likely amount to 700-1,500 tons. Since the predicted surplus in Japan is likely to appear within just several years, current efforts to establish disposal schemes for mercury should be accelerated.