

第2部 我が国の水銀対策

水俣病による甚大な被害を経験した後、我が国では、行政機関、産業界、市民がそれぞれの役割を担いながら、一体となって水銀対策に取り組んできました。ここでは、我が国における水銀のライフサイクル全体にわたる包括的な水銀対策及びそれらの実施に当たって各主体が果たした役割を紹介し（図参照）ます。

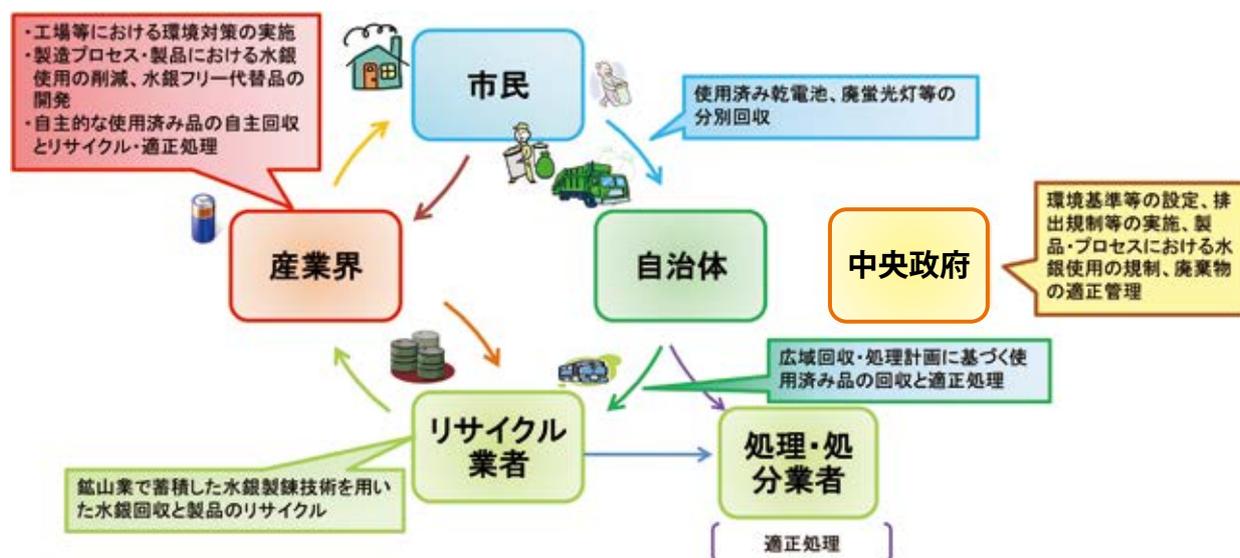


図7 我が国の水銀対策の概要

水銀のマテリアルフロー

生産活動における水銀利用、大気、水、土壌といった環境への排出など、人間社会における水銀の流れを把握するために、我が国では「水銀のマテリアルフロー」を作成しています。図は、平成22(2010)年度の値を用いて作成した我が国の水銀のマテリアルフローです。

それによると、原燃料等に含まれて国内利用等に供される量が85トン（輸入原燃料中に含まれる水銀：73トン、国内で生産される原燃料中に含まれる水銀：6.5トン、海外から輸入される製品等に含まれる水銀：5トン）、輸出等により国外へ移動する量が75トン、環境への排出18～23トン（大気への排出量17～22トン、公共用水域への放出量が0.3トン、土壌への放出量が0.45トン）、最終処分量が11～24トンなどと推計されています。

このように我が国では水銀の国内需要量に比べて回収等による供給量が多く、余剰水銀は現在海外へ輸出されています。水銀の貿易の削減や一時保管、水銀廃棄物の適正管理について「水銀に関する水俣条約」に盛り込まれたことを踏まえ、我が国においても水銀の回収、保管、処分等に関する適切な仕組みについて検討していくこととしています。

水銀の需要削減と一次鉱出の停止

我が国では、国内での水俣病等の公害問題発生を教訓とした水銀の排出等の規制及び使用の削減により、従来自然水銀(無機水銀)等を生産していた鉱山が相次いで閉山し、昭和49(1974)年に総ての企業が鉱山からの水銀生産を停止しました。

図9に示すように、我が国の水銀需要は昭和39(1964)年がピークで約2,500トン/年ありましたが、他の安全な物質への代替や水銀使用量の削減などの技術導入が図られ、その後急速に減少しました。近年の水銀需要は約10トン/年程度となっています。

特に水銀需要が最も多かった昭和30年代後半から40年代にかけて水銀需要の半分以上を占めていたか性ソーダ製造(図9における「塩素アルカリ工業」に相当)において、水銀電解法からの製法転換が、水銀の大幅な需要削減に最も大きな影響を与えたと考えられます。

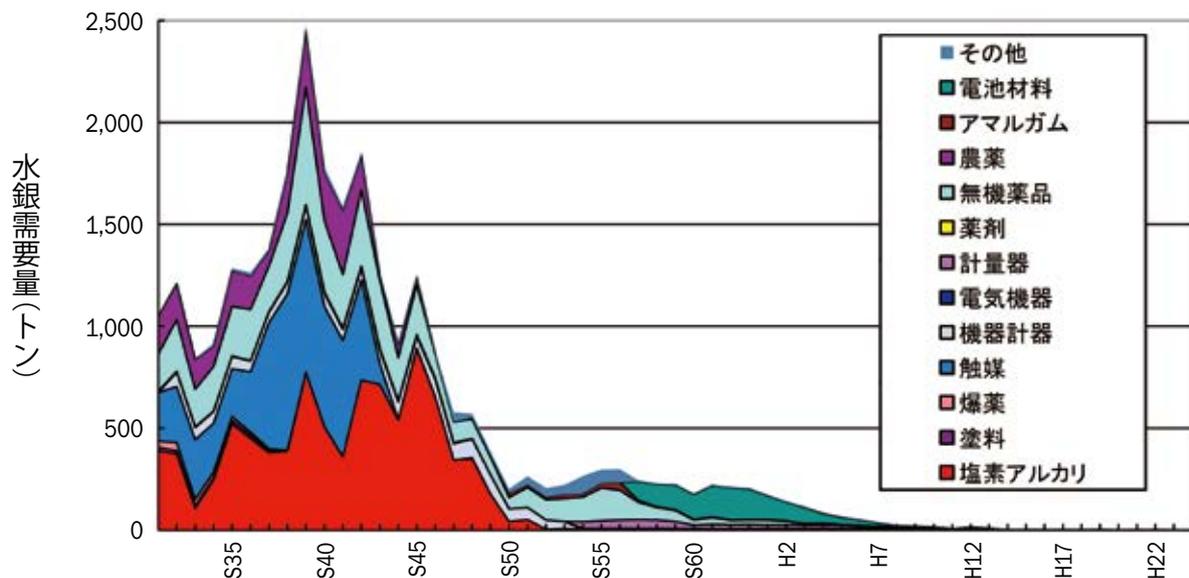


図9 日本における水銀需要の推移

注：蛍光ランプは昭和31年～53年は機器計器、昭和54年以降は電気機器に該当

出典：資源統計年報・非鉄金属等需給動態統計

製造プロセスにおける水銀の使用削減

水銀を利用する生産プロセスとしては、か性ソーダ・塩素の製造(図10における「塩素アルカリ工業」に相当)、塩化ビニルモノマーやアセトアルデヒドの製造(図9における「触媒」に相当)などがありますが、我が国では全て水銀を用いない方法に転換されています。ここでは、我が国の製造プロセスにおける水銀使用削減に係る取組を紹介します。

か性ソーダ製造における水銀使用の削減

か性ソーダ(水酸化ナトリウム(NaOH))は代表的な強アルカリ物質で、金属の溶解、精製、不純物の除去、漂白、中和、軟化等のための基礎素材として使用されているほか、アルミニウムや化学繊維の生産、石けん・洗剤の原料や、パルプの溶解や漂白など、幅広く使用されており、国民生活に欠かせない物質です。

食塩水を電気分解して、か性ソーダ、塩素、水素を製造する方法には、イオン交換膜法、隔膜法、水銀法がありますが、戦後の経済成長期の我が国のか性ソーダ製造は水銀法が主流で、その技術水準は世界でもトップクラスを誇り、昭和40年代頃には日本の水銀使用の半分以上を占めていました(図10参照)。

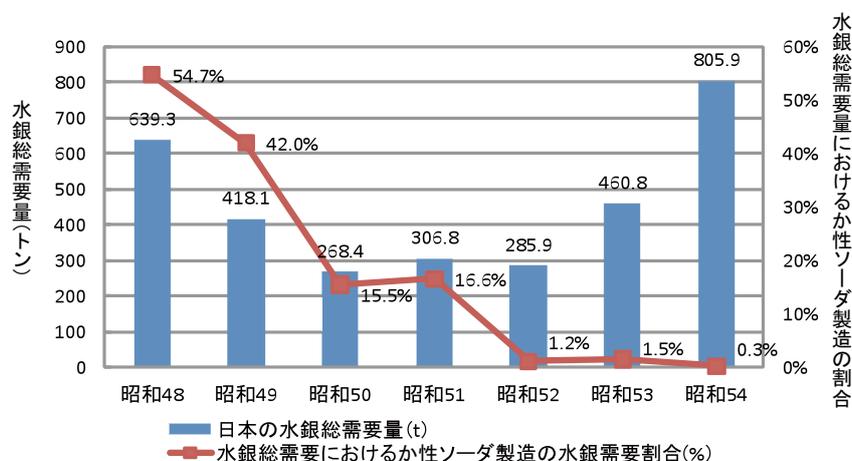


図10 日本の水銀総需要量と水銀総需要量におけるか性ソーダ製造の割合の推移

出典：杉野利之「草創期の電解ソーダ工業」『化学工業』平成5(1993)年

無機水銀しか排出しないソーダ工場の周辺は水俣病発生の可能性はないと考えられていましたが、昭和48(1973)年に有明海でか性ソーダ製造用水銀の流出が原因とされる「第3水俣病」が発生したとの報道を受け(後にこれは否定されました)、同年6月に1,200隻の漁船が水俣から遠く離れた瀬戸内海に位置するか性ソーダ工場に押しかけ、操業停止に追い込むなどの社会問題が起きました¹。これを受けて、政府は水銀法か性ソーダ製造施設におけるクローズドシステムの徹底と隔膜法への転換促進を決定しました²。ソーダ工業会がクローズドシステムを促進した結果、か性ソーダ1トン当たりの水銀需要は昭和48年は113.9gでしたが、昭和54(1979)年には2.3gまで削減されました(図11参照)。また、か性ソーダ製造法は昭和61(1986)年までに全て非水銀法に転換されました³。

非水銀法への転換の過程で、隔膜法はコストが高いという欠点もあり、当時の通商産業省は隔膜法による製品および水銀法による製品の等量交換並びに価格差決裁制度の設立によるコスト差額の上乗せを実施し、97.5万トンのか性ソーダに対し38.7億円を支出し、転換を促進しました⁴。しかし、隔膜法は水銀法にくらべて消費エネルギー及び品質の点でも劣っており、産業の国際競争力維持の観点からも隔膜法への全面的な転換は困難であったことから、当時まだ新しい技術であったイオン交換膜法の技術開発に業界をあげて取り組むことになりました(詳細はコラム⑥参照)。

1 亀山哲也「科学技術と環境問題—水俣病と苛性ソーダ製造技術の転換—」サイエンスネット、第32号、平成20年5月

2 昭和48年6月に関係12省庁による「第1回水銀等汚染対策推進会議」が開かれ、水銀法か性ソーダ製造施設におけるクローズドシステムの徹底、及び昭和50年9月末までに隔膜法へ極力転換することを決定しました。また、第3回会議(同年11月)では、水銀法の1/3を隔膜法に転換し、昭和53年3月末までに全てを隔膜法に転換すると修正されました。

3 日本ソーダ工業会ウェブサイト(<http://www.jsia.gr.jp/index.html>)

4 昭和53年の時点で、隔膜法に転換している企業は239億円の赤字、転換していない企業は22億の黒字の状態であったと推計されています。

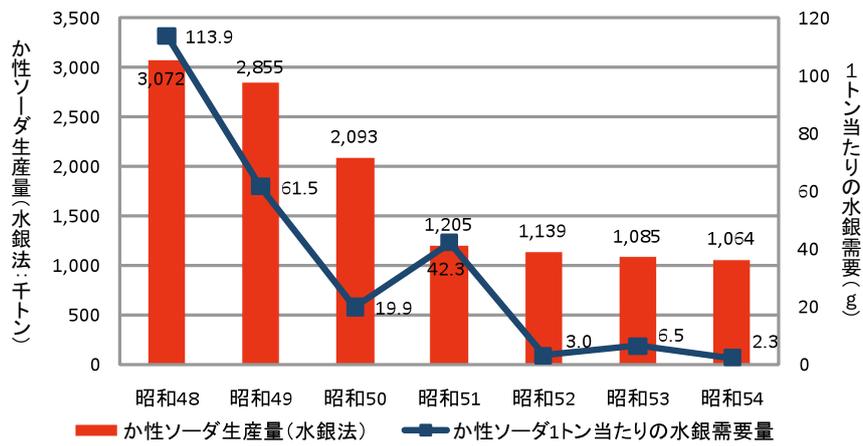


図 11 水銀法によるか性ソーダ製造量と単位あたりの水銀需要量の推移

出典：杉野利之「草創期の電解ソーダ工業」『化学工業』平成5(1993)年

日本のソーダ業界が3,000億円を超える資金を投入した技術開発の結果、イオン交換膜法の技術は、日本を代表する技術に育ち、昭和54(1979)年から商業生産に採用され、平成11(1999)年には日本の製法はすべてイオン交換膜法になりました(図12参照)。高品質、省エネルギー性など多くの特長を誇るこの技術は、現在世界各国に技術輸出されています。

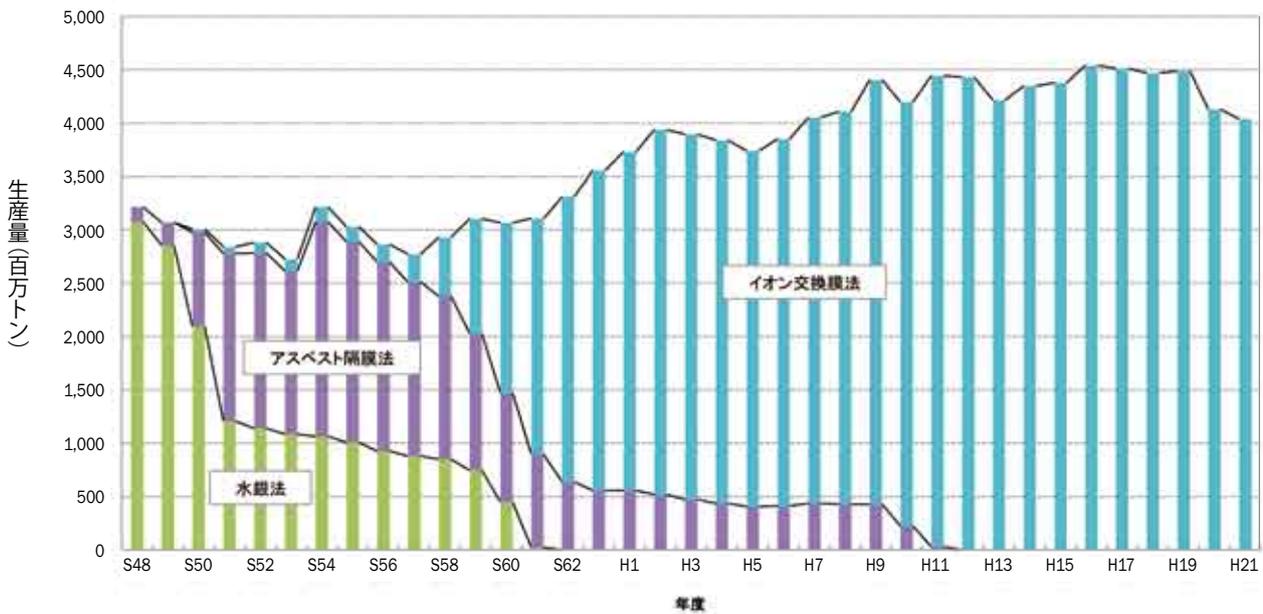


図 12 日本における製法別か性ソーダ生産量の推移

出典：日本ソーダ工業会提供資料

【コラム⑥】 か性ソーダ製造におけるイオン交換膜法開発の経緯

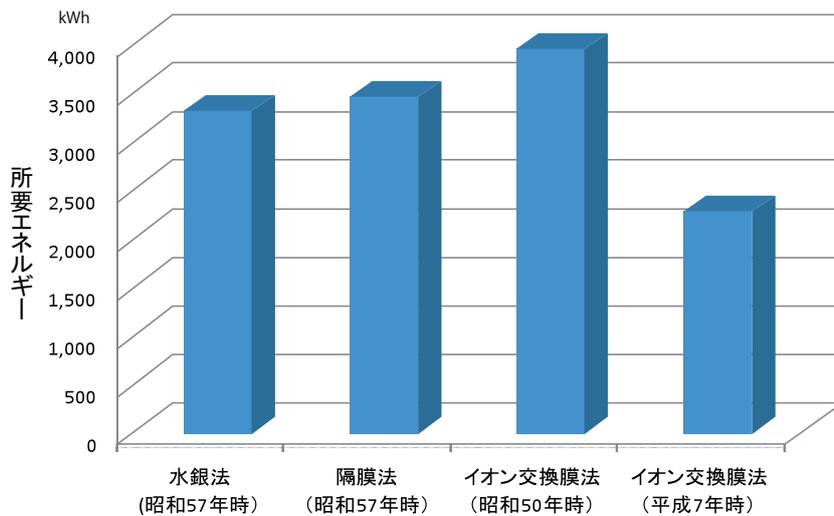
昭和 51 年以降の水銀法からの転換の過程で、隔膜法はコスト高であるだけでなく、製造されたか性ソーダは水銀法よりも品質が悪いことが障害になりました。

隔膜法と水銀法の比較

		隔膜法	水銀法
品質	濃度(wt%)	11~12	48~50
	塩分(ppm)	~10,000	5~10
エネルギー消費量 (kWh/t-NaOH)	電力	2,740	3,300
	蒸気	700	0
	総消費エネルギー量	3,440	3,300

出典：佐藤公彦「旭硝子イオン交換膜法食塩電解技術の開発」『化学史研究』第 24 巻 平成 9 (1997) 年

そこで、当時新しい技術であったイオン交換膜法の技術開発に業界をあげて取り組むことになりました。イオン交換膜法の技術開発においては、電流効率やか性ソーダ濃度等が低いことが問題でしたが、各種構成要素の研究開発により電流効率は 96 %以上に達し、全消費エネルギーも隔膜法、水銀法と比較して、30 %以上の省エネルギーが達成されています。



か性ソーダの製法別の所要エネルギー

出典：大濱博「旭化成イオン交換膜・食塩電解技術 20 年の歩み」『ソーダと塩素』Vol. 48, 平成 9 (1997) 年

塩化ビニルモノマー製造における水銀使用の削減

我が国では、従来、カーバイド・アセチレン法により塩化ビニルモノマーが製造され、アセチレンに塩化水素を添加する際に水銀触媒(HgCl₂)が用いられていましたが、電力コストが上昇したことなどもあり、昭和 30 年代後半から EDC(二塩化エチレン)法、オキシクロリネーション法へと転換され、現在水銀触媒は使用されていません。

製品における水銀使用の削減

政府による水銀の製品への使用規制

水銀の使用による健康被害のリスクの高い化粧品や農薬等の製品については、個別の規制で水銀使用の禁止、あるいは含有量の限度が定められています(表1参照)。

表1 製品等における水銀規制

製品の種類	規制等
化粧品	水銀及びその化合物の配合禁止 (薬事法に基づく化粧品基準)
農薬	水銀及びその化合物を有効成分とする病害虫の防除に用いられる薬剤に該当する農薬の販売及び使用の禁止 (農薬取締法、農薬取締法に基づく農林水産省令)
汚泥肥料	汚泥肥料(下水・し尿・工業汚泥等)に含有を許される有害成分の最大量 <ul style="list-style-type: none"> 水銀又はその化合物: 検液中に0.005mg/L以下 アルキル水銀: 検液中に検出されないこと (肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件)
汚泥の再生利用品	汚泥の再生利用品に必要な基準 <ul style="list-style-type: none"> 総水銀: 検液中に0.0005mg/L以下 アルキル水銀: 検液中に検出されないこと (汚泥に係る再生利用の認定の申請書に添付する書類及び図面並びに再生利用の内容等の基準)
家庭用品	以下の家庭用品に有機水銀化合物が検出されないこと <ul style="list-style-type: none"> 一般家庭用品: 家庭用接着剤、家庭用塗料、家庭用ワックス、くつ墨、くつクリーム 繊維製品: おしめ、おしめカバー、よだれかけ、下着(シャツ、パンツ、ズボン下等)、手袋、靴下、衛生バンド、衛生パンツ (有害物質を含有する家庭用品の規制に関する法律)
医薬品	○経口用剤の場合 水銀化合物の配合は、認められない。 ○外用剤の場合 有効成分としての水銀化合物の配合はマーキュロクロムを除いては原則として認められない。保存剤として水銀化合物を配合する場合は、製剤上及び安全対策上、他の保存剤に替えることができない特別の理由がある場合に限り認められる。 (薬事法における医薬品の承認審査)

また、国等の公的部門において環境負荷の低減に資する物品・役務の調達を推進を図ることを目的とした「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」(以下、「グリーン購入法」という。)に基づく「環境物品等の調達の推進に関する基本方針」で定められる特定調達品目の判断の基準に、水銀に関する内容を設定することで、水銀フリー製品の開発・普及及び製品中の水銀使用量の削減を促進しています(表2参照)。

表2 環境物品等の調達の推進に関する基本方針(抜粋)

製品の種類	製品中の水銀量の上限等
トナーカートリッジ	感光体が処方構成成分として水銀を含まないこと
電子計算機、ディスプレイ	水銀は、日本工業規格(JIS)に定める含有率基準値を超えないこと
蛍光灯(直管形: 大きさの区分40形蛍光灯)	水銀封入量は製品平均10mg以下であること
電球形状のランプ(電球形蛍光灯)	水銀封入量は製品平均5mg以下であること

電池における水銀使用の削減

乾電池の負極に使われている亜鉛は、腐食反応で溶け出すとガスを発生させ、電池の性能を低下させるだけでなく、電池膨れ、液漏れ、破裂等の原因となります。これらを防止するために、腐食反応を抑制する水銀がかつては添加されていました。

しかし、昭和50年代後半に、ごみ焼却炉からの水銀排出による健康への影響について、マスコミ等が積極的に取上げたこともあり、使用済み乾電池による水銀汚染と乾電池回収は大きな社会問題となりました。当時の社団法人日本電池・器具工業会は、水銀を使用する水銀電池の自主回収を始めていましたが、昭和58(1983)年、当時の厚生省及び通商産業省は、同工業会に対して、乾電池に用いられる水銀の総使用量の削減、従来から行われている使用済水銀電池の自主回収の強化を要請する通達を出しました。これを受けて、工業会は、水銀電池の新しい用途の開拓の抑制、使用済水銀電池の回収強化を行うとともに、水銀を使用しない乾電池代替製品の研究、使用済アルカリ・マンガン電池の埋立による土壌への影響の研究等を開始しました。その結果、マンガン乾電池は平成3(1991)年に、アルカリ乾電池は平成4(1992)年に無水銀化が達成されました。また、水銀電池は平成7(1995)年末に製造が中止されています(図13 図参照)。

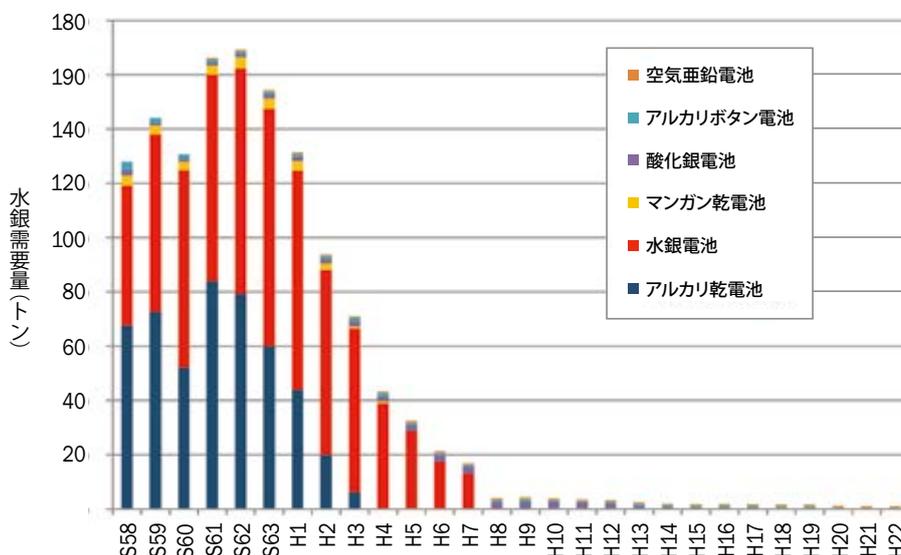


図13 一次電池の国内生産における水銀総需要量の推移

出典：社団法人電池工業会提供資料

これにより、国内で生産される電池における水銀の使用は、ボタン形電池に限られることとなり⁵、メーカー各社はこれらの無水銀化に係る技術開発に取り組んできました。平成17(2005)年には我が国の電池メーカーが世界で初めて、酸化銀電池の無水銀化に成功しました。現在では、酸化銀電池を国内製造する3社が無水銀の商品化技術を確立済みです。アルカリボタン電池については、平成21(2009)年10月に国内の電池メーカーが無水銀化を達成し、商品化技術を確立しています。また、使用済みとなったボタン形電池は、電気店などの回収箱を通してリサイクルされています(「製品等に含まれる水銀の回収・適正処理の推進」参照)。

5 ボタン形電池には、酸化銀電池、空気亜鉛電池、アルカリボタン電池の3種類があり、年間8億個ほど国内生産されています。酸化銀電池は腕時計、空気亜鉛電池は補聴器、アルカリボタン電池はゲームや防犯ブザーなどに利用されています。

近年、資源有効利用の視点から乾電池の使用材料を有効に活用するための処理方法が、主要各国で研究されていますが、環境負荷、資源有効利用、エネルギー消費量、経済性など、総合的な視点で見て合理的な処理方法はまだ確立されていません。このため社団法人電池工業会では新しい処理技術について情報を集めて検討するとともに、世界各国に建設された日本の電池メーカーの海外工場を中心として世界に水銀ゼロ使用の乾電池生産を広めるなどの努力を続けています⁶。

光源製品における水銀使用の削減

蛍光灯では、発光の原理上微量の水銀が不可欠です。必要最低限度の水銀がランプ管内に確保されていないと点灯中に水銀が枯渇して、ランプが本来の寿命を全うできないことがあります。メーカー各社は、ランプ管内の水銀使用量を削減するための技術開発を実施してきました。

その結果、昭和 50 年代においては蛍光灯の平均水銀封入量は 50mg でしたが、平成 19(2007)年には約 7mg まで削減されています(図 14 参照)。平成 13(2001)年から国が施行しているグリーン購入法において、40 形直管蛍光灯はグリーン調達の対象物品となっており、判断基準の一つとして水銀封入量が 10mg 以下であることが掲げられていますが(表 2 参照)、現在ほぼ全ての対象製品でこの基準が達成されています。

さらに、水銀の定量封入方法の採用及び各種アマルガムの使用など、水銀を正確に封入する方法の開発が継続され、さらなる水銀含有量の削減が図られています(コラム⑦参照)⁷。

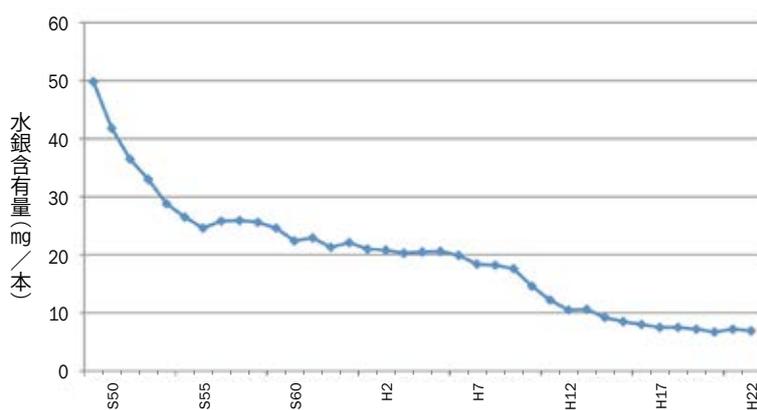


図 14 蛍光灯 1 本あたりの水銀含有量の推移

出典：社団法人日本電球工業会提供資料

わが国では照明機器のうち、特に液晶のバックライトは急速に LED に切り替えられつつあります。また、平成 42(2030)年に向けたエネルギー政策を取りまとめた「エネルギー基本計画」(平成 22(2010)年 6 月閣議決定)では、低炭素型成長を可能とするエネルギー需給構造を実現するための家庭部門における具体的な取組として、高効率照明(LED 等)を平成 32(2020)年までにフローで 100 %、平成 42(2030)年までにストックで 100 %を達成することを掲げています。目標達成のための政策措置を実行することで、一般照明の LED 化も劇的に進み、照明機器における水銀使用量は大幅に減少すると予想されています。

6 社団法人電池工業会ウェブサイト (<http://www.baj.or.jp/>)

7 社団法人日本電球工業会ウェブサイト (<http://www.jelma.or.jp/>)

蛍光灯については、上記の水銀含有量の削減のほかに、長寿命化などによる生産量の減少から、蛍光灯の生産における総水銀使用量は半分以下に削減されました。一方、液晶テレビや液晶モニターのバックライト用の冷陰極蛍光灯については、生産量の増加とともに水銀使用量も増加しましたが、LEDバックライトへの代替によって水銀使用量も減少に転じました。全体的な光源製品への水銀使用量は近年減少傾向にあります(図15参照)。

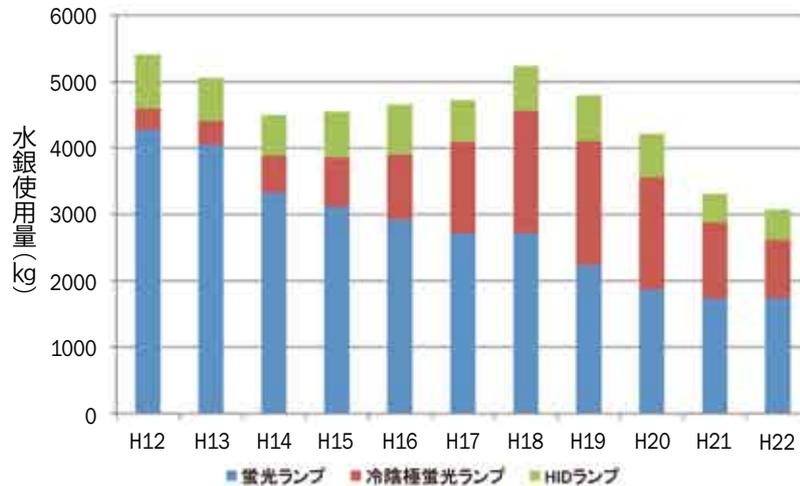


図15 水銀使用光源製品における水銀使用量の推移

出典：社団法人日本電球工業会提供資料

【コラム⑦】 光源製品における水銀含有量の削減に係る取組

メーカー各社は、それぞれの用途におけるランプの特性に見合った形で、必要最小限の水銀をランプ管内に確保するために不可欠な水銀の定量封入技術を開発しています。



水銀量の低減対策の例

出典：社団法人日本電球工業会提供資料

医療機器等における水銀使用の削減

医療の分野では、体温計、血圧計、むし歯治療充填剤などに、これまで水銀が使用されてきました。一部の医療現場において引き続き水銀体温計や水銀血圧計が使用されていますが、全般的に電子式が普及し、水銀を含有した製品の生産量は減少傾向にあります(図 16 参照)。

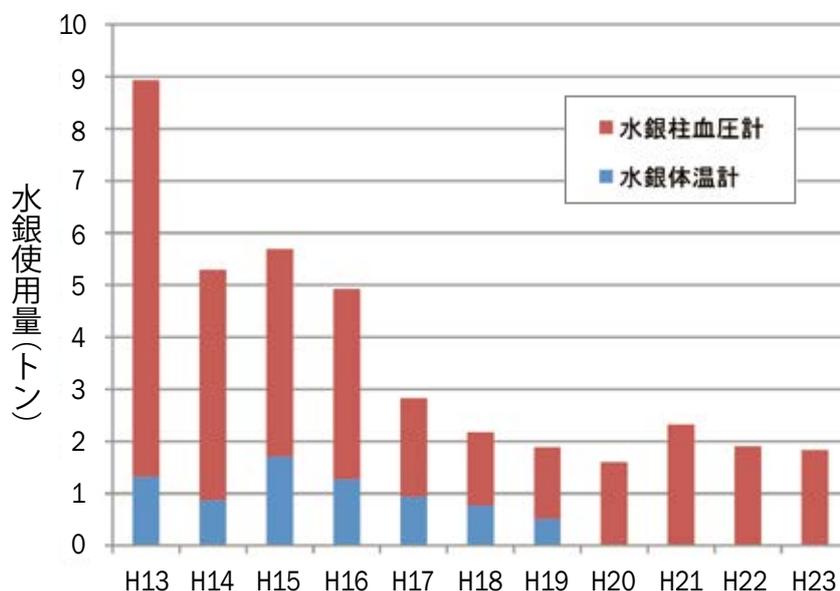


図 16 医療計測機器における推計水銀使用量の推移

出典：環境省推計データを基に作成。(生産量データは、薬事工業生産動態統計年報(厚生労働省)に基づく。
水銀含有量は、体温計は1.2g/本として、血圧計は47.6g/個として計算。)

むし歯治療充填剤としての水銀使用量は、昭和 45(1970)年には国内で年間約 5,200kg⁸でしたが、平成 11(1999)年には年間約 700kg⁹、平成 18(2006)年には約 100kg¹⁰、平成 22(2010)年には約 20kg¹¹まで大幅に削減されました。UNEP によると平成 22(2010)年における世界全体のむし歯治療充填剤としての水銀利用は約 300～400 トンと推計されていますので、我が国の需要が占める割合は 0.005%程度です。我が国の人口が世界に占める割合¹²(1.8%)と比べるとかなり低くなっています。

8 昭和 49 年版環境白書「総説 第 1 章 第 2 節 1 有害物質による蓄積性汚染 表 1-10 各国の水銀の用途別需要量」

9 平成 13 年 11 月 20 日付け内閣参質 153 第 2 号「参議院議員櫻井充君提出歯科用水銀アマルガムに関する質問に対する答弁書」

10 社団法人日本歯科商工協会提供資料

11 社団法人日本歯科医師会提供資料

12 平成 22(2010)年における世界人口 6890 百万人、日本の人口 127 百万人

無機薬品における水銀使用の削減

我々の生活や産業プロセス等において、表3に示す水銀を含有する無機薬品がこれまで使用されてきました。銀朱は朱墨などの赤色顔料として我が国では古来より使われており、現在でも国内で年間約2,000kgが生産されています。昇汞、酸化第二水銀については、近年はほとんど使用されていません。

表3 水銀を含有する無機薬品とその用途

物質名		化学式	用途
銀朱	硫化水銀(Ⅱ)	HgS	漆器の着色、絵具、朱肉朱墨
昇汞	塩化水銀(Ⅱ)	HgCl ₂	塩化ビニル(触媒)*、マンガン電池の陰極用*、医薬品(殺菌)*
酸化第二水銀	酸化水銀(Ⅱ)	HgO	塗料*、試薬、外用剤*
水銀化合物	硫酸水銀(Ⅱ) 他	HgSO ₄ 他	試薬

* 現在、国内では使用されていません。

出典：環境省資料

その他の水銀使用の状況

水質の代表的な指標である化学的酸素要求量(COD: Chemical Oxygen Demand)の測定には、二クロム酸法(COD-Cr)と過マンガン酸法(COD-Mn)があります。

酸化力という面から見れば、COD-Crの方がCOD-Mnよりも値が高く、CODを正しく評価する上では有利な点があり世界の多くの国で使用されていますが、試薬として硫酸水銀や六価クロムという公害の原因となる物質を用いること、化学分析に時間がかかること等の問題があります。

我が国では、昭和39(1964)年に日本工業規格(JIS)の工場排水試験方法において水銀を用いないCOD-Mnを採用し、昭和49(1974)年からは下水試験方法、昭和53(1978)年からは上水試験方法にもCOD-Mnを採用しています。また、COD-Mnは海域や湖沼の環境基準などの水質監視において用いられている測定法にもなっています。

製品等に含まれる水銀の回収・適正処理の推進

我が国は都市人口の増加と急激な経済成長により、大量に発生する廃棄物による処分場の逼迫と有害物質による環境汚染が社会問題として取上げられたため、廃製品の回収システムの構築と水銀含有廃棄物の適正処理処分を積極的に推進してきました。ここでは、水銀含有廃棄物の適正処理の仕組みとともに、使用済み製品に関する業界の自主的取組と、使用済み品からの水銀回収・リサイクルに関する取組を紹介します。

廃棄物の適正管理

化石燃料の燃焼施設、金属製錬施設や廃棄物焼却施設などから発生するばいじん、汚泥など、水銀を含む廃棄物が環境上適正に処理されるよう、廃棄物中の水銀が一定濃度以上のものを特別管理産業廃棄物として必要な処理基準を設け(表4)、運搬・処理等に関して通常の廃棄物よりも厳しい規制を行っています。また、特別管理産業廃棄物の最終処分に当たっては、表4の基準を下回るような処理が行われれば、一般的な管理型最終処分場への埋立が可能です。処理の工程を経てもなお特別管理産業廃棄物と判断される場合は、コンクリート製の仕切りで公共用水域及び地下水と完全に遮断される構造を持つ「遮断型最終処分場」への埋立を義務付けています。

表4 特別管理産業廃棄物の判定基準

廃棄物特性	水銀等の濃度
燃え殻、ばいじん、銻さい、汚泥、これらの処理物(廃酸・廃アルカリ以外)	アルキル水銀: 検出されないこと 水銀: 0.005mg/L (溶出試験)
廃酸・廃アルカリ、廃酸・廃アルカリの処理物(廃酸・廃アルカリ)、燃え殻・ばいじん・銻さい・汚泥の処理物(廃酸・廃アルカリ)	水銀: 0.05mg/L (廃酸・廃アルカリ中濃度)

使用済み乾電池及び廃蛍光管の広域回収・処理システムの構築

焼却炉からの水銀排出が社会問題となったことを受け、昭和60(1985)年に厚生省が自治体に対し乾電池の分別収集と水銀回収に関する通知を出しました。これを受けて(社)全国都市清掃会議は、自治体が一般廃棄物として分別収集している使用済み乾電池(2次電池やボタン形電池などは除く)について、「使用済み乾電池等の広域回収・処理計画」(以下、「本計画」という。)を昭和61年(1986)に策定し、本計画に賛同した市町村を対象に「広域回収処理事業」を開始しました。また、使用済み蛍光管については平成11(1999)年度より本計画に追加されました¹³。

市町村により分別回収された乾電池及び蛍光管は、本計画に基づき、専門の再生処理事業者により処理・処分(水銀回収・再資源化)されています。

乾電池については、昭和61(1986)年に開始以来、毎年増加してきましたが、平成13(2001)年をピークに回収量、水銀の回収量が減少傾向にあります(表5、図17参照)。

13 社団法人全国都市清掃会議ウェブサイト (<http://www.jwma-tokyo.or.jp/>)

表5 広域回収処理事業における一次乾電池からの水銀回収実績

年度	H4	H10	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23
乾電池処理量 (トン)	4,683	7,198	7,866	7,125	6,592	6,188	5,981	5,929	5,034	4,921
水銀回収量 (kg)	702	204	169	107	75	60	58	57	49	49

注：(1) 上記のデータは広域回収処理事業における一次乾電池の処理量及び水銀回収量です。

(2) 上記水銀回収量は筒形乾電池の水銀量であり、回収方法によって混入するボタン形電池や水銀電池及び電池以外の異物（水銀体温計、電子体温計、蛍光管）に含まれる水銀量は含まれていません。

出典：全国都市清掃会議提供資料

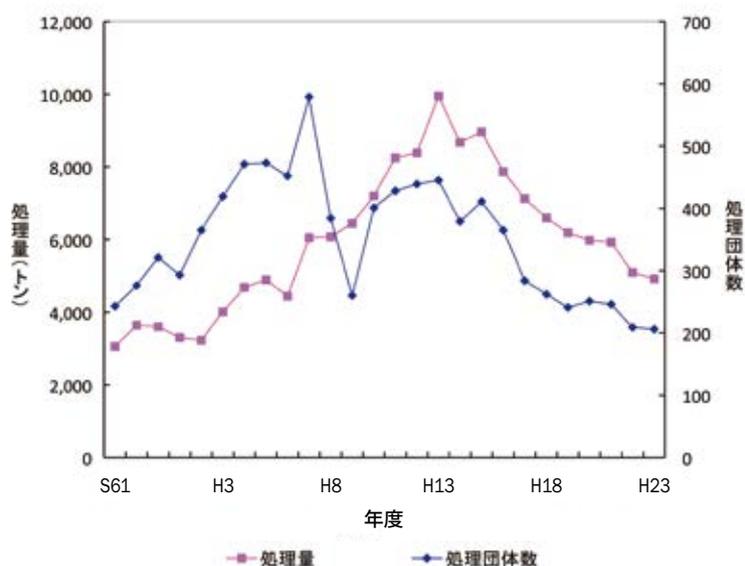


図17 広域回収処理事業における使用済み乾電池の処理量及び処理団体数の推移

注：(1) 図中の処理量は広域回収処理事業における処理量です。

(2) 図中の処理団体数は、広域回収処理事業により処理・処分した市町村及び事務組合の合計数です。

出典：全国都市清掃会議提供資料

廃蛍光管については、平成11(1999)年度の広域回収開始から5年間で処理団体数、水銀回収量ともに大幅に増加しましたが、その後、処理団体数、水銀回収量ともにやや減少傾向にあります(表6、図18参照)。

表6 広域回収処理事業における廃蛍光管等からの水銀回収実績

年度	H11	H13	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23
蛍光管等処理量 (トン)	1,278	2,226	2,470	2,588	2,534	2,463	2,459	2,210	2,096
水銀回収量 (kg)	14	91	99	104	101	99	97	88	84

注：上記のデータは、広域回収処理事業における廃蛍光管等の処理量及び水銀回収量です。

出典：全国都市清掃会議提供資料

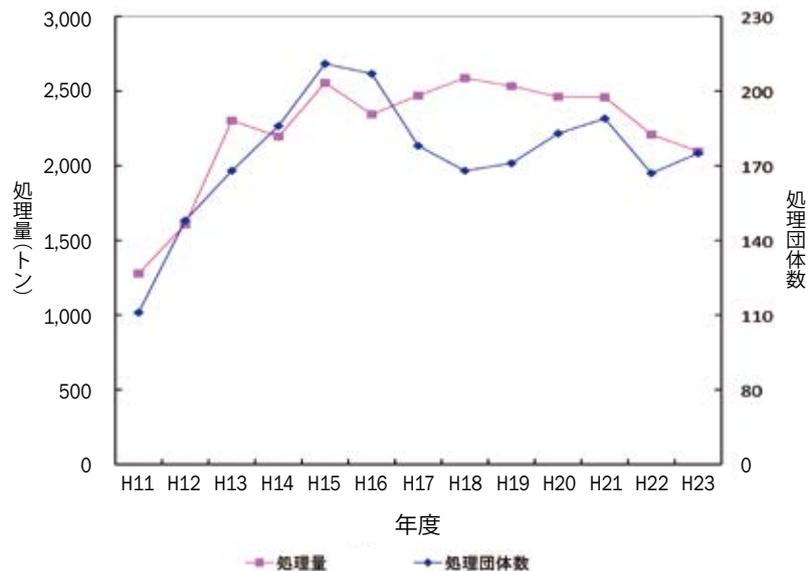


図 18 広域回収処理事業における使用済み蛍光管等の処理量及び処理団体数の推移

注：(1) 図中の処理量は、広域回収処理事業における処理量です。

(2) 図中の処理団体数は、広域回収処理事業により処理・処分した市町村及び事務組合の合計数です。

出典：全国都市清掃会議提供資料

メーカーによる廃蛍光管の回収

事業所等で使用された使用済みの蛍光管は、企業の責任で産業廃棄物としてリサイクルや埋立処分されてきましたが、不法投棄や不適正処理のリスクがありました。そこで、複数の大手蛍光管メーカーは、蛍光管のリースサービスを実施しています。このサービスは、顧客となる企業に蛍光管を「販売」するのではなく、蛍光管メーカーが指定したサービス代理店から貸与する仕組みになっています。使用済みになった蛍光管はサービス代理店により回収され、中間処理業者を介して適正にリサイクルされ、新品の蛍光管が新たに供給されます。事業所以外にも、工場やテーマパーク等でも利用されています。

本サービスの対象となる使用済み蛍光管は、未破碎のまま回収され、蛍光管の蛍光体は覆土材、口金はアルミニウム、水銀は無機薬品へそれぞれリサイクルされています。また、ガラス部分はグラスウールや軽量骨材、タイルなどに再利用されている他、一部の蛍光管メーカーは蛍光管専用ガラス溶融炉に再利用ガラスを利用することで、蛍光管から蛍光管へのリサイクルを実施しています。

本サービスの下では、蛍光管の所有権は顧客ではなくサービス代理店にあるため、顧客は排出者責任に基づくマニフェストの発行等の負担がなくなるというメリットがあります。また、インターネットを介してサービス代理店、中間処理業者、蛍光管メーカー、顧客が処理状況について随時確認できる追跡管理システムが導入されており、環境上適正な処理・リサイクルが担保される仕組みとなっています。

家電リサイクル法に基づく廃蛍光管の回収

前節の通り、液晶テレビのバックライトはLED化が急速に進んでいますが、現時点で廃棄される機器には、蛍光管バックライトを使用したものも多数あります。家庭用液晶テレビについては、家電リ

サイクル法に基づいて製造業者等が回収して再資源化・再商品化されています。再資源化工程において、これらの機器に使用されているバックライト用の冷陰極蛍光ランプは取り外され、処理業者に引き渡されており、蛍光管バックライトに含まれる水銀については、破碎されるとともに、破碎によって生ずる汚泥、ばいじんについて薬剤処理による安定化、あるいはばい焼により発生する水銀ガスの回収が行われるなど、水銀は適正に処理・回収されています。

メーカーによるボタン形電池の自主回収

前節で紹介したように、電池業界ではこれまで乾電池の水銀ゼロ化、水銀電池の生産・販売中止等によって環境負荷の軽減に努めてきました。ただし、ボタン形電池に関しては性能面・品質面の理由から今なおごく微量の水銀が使用されています。そのため、電池メーカー各社は、それぞれ取引先の販売店との間で「下取り行為」の位置付けで自主回収を実施していました。しかし、個別の店舗における回収箱の設置状況等を含めた全体像がつかみにくく、回収量が低迷するという問題点がありました。

この問題に対処すべく、平成 21(2009)年 4 月より、社団法人電池工業会はボタン電池回収推進センターを設立し、業界の自主回収の運営を一元化しています。現在同センターは、ボタン形電池を販売する小売店を回収協力店として登録し、回収缶を配布し、そこで貯まった使用済みボタン形電池を定期的に回収しています。回収電池は中間処理業者の施設に送られ、水銀、鉄、亜鉛化合物等として全てリサイクルされており、廃棄処分、あるいは埋め立ては発生しません(図 19 参照)。

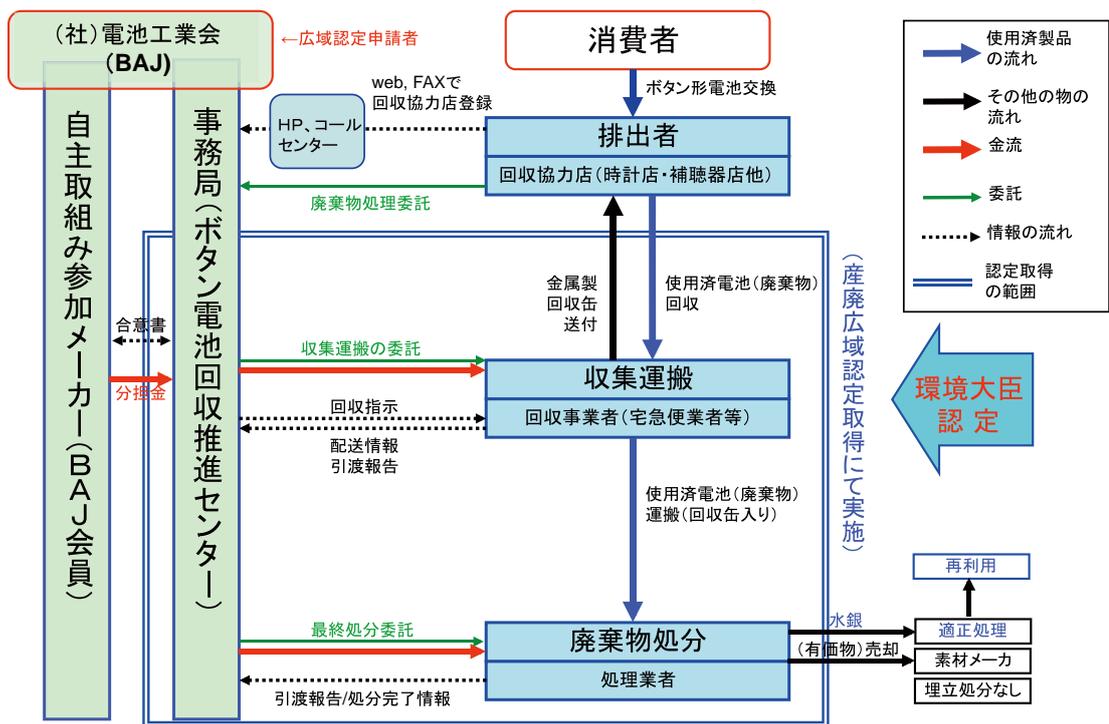


図 19 (社)電池工業会によるボタン形電池の自主回収のスキーム

出典：社団法人電池工業会提供資料

元鉱山における廃製品のリサイクル・水銀回収

我が国では、企業による自主回収や自治体による分別回収で集められた使用済み水銀含有製品が環境上適正な方法でリサイクル、処理・処分されていますが、その多くが、北海道の鉱業所でリサイクルされています。北海道大雪山系にある総面積 1,489,431m² のこの鉱業所は、かつて東洋一の水銀鉱山と呼ばれ、最盛期年間 200 トンの水銀を生産し、鉱山の操業が盛んだった頃には、人口 5,000 人を超え、「鉱山城下町」が形成されていました。

その後、水銀需要が減少し鉱山は閉山しましたが、鉱山業で培われた水銀製錬技術等のノウハウをベースとして、昭和 48(1973)年には含水銀廃棄物の処理を行う環境事業へと転換し、乾電池への水銀使用が問題化した昭和 58(1983)年には、使用済み乾電池を処理できる国内唯一の企業として指定されました。

今日では、この鉱業所は乾電池、蛍光管リサイクルを中心に、様々な廃棄物を処理しています(図 20 参照)。電池類、照明器具類、医療用計測器類等から年間約 3 トン、スラッジ・汚泥から約 3 トン、精錬副産物等から約 36 トンの金属水銀が回収されています。また、ここは日本で唯一、水銀地金を生産している精錬所でもあり、生産された水銀は蛍光管や測定機器他各種用途に再利用されています。



図 20 国内鉱業所における使用済み製品からの水銀の回収の様子

出典：環境省資料

水銀の環境への排出削減

政府による水銀の排出規制

我が国では、水銀による環境汚染を防止し、人の健康の保護及び生活環境の保全を図るため、環境関連法制度に基づく様々な対策を進めています(表7参照)。

まず、水質については、公共用水域や地下水において維持・達成すべき基準として、全国一律の環境基準を設定し、その確保のために工場・事業場に対して排水規制、地下浸透規制等を行っています。排水基準については、全国一律の基準に加え、必要な場合には、地方自治体がより厳しい基準を定めることができます。土壌については、環境基準を定めるとともに、土壌汚染対策法に基づく土壌含有量基準や土壌溶出量基準を定め、調査や対策が進められています。

大気については、環境基準に準ずる、健康リスクの低減を図るための指針値が定められ、事業者による自主的な排出抑制が進められています。

また、水銀及びその化合物を取り扱う一定の事業者については、法に基づく PRTR 制度(Pollutant Release and Transfer Register)により、環境への排出量及び廃棄物に含まれての移動量の届出が義務づけられています。

表7 水銀に関する国レベルの環境基準・排出基準等

対象	基準値の概要	根拠法令名
大気	環境中の有害大気汚染物質による健康リスクの低減を図るための指針となる数値(指針値):水銀(水銀蒸気) 40 ng Hg /m ³ 以下(年平均値)	大気汚染防止法に基づく有害大気汚染物質対策の一環
公共用水域	環境基準:総水銀0.0005 mg/L 以下、アルキル水銀は検出されないこと(年間平均値)	環境基本法
	排水基準:水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物0.005 mg/L 以下、アルキル水銀化合物は検出されないこと	水質汚濁防止法(排水規制)
地下水	環境基準:総水銀0.0005 mg/L 以下、アルキル水銀は検出されないこと(年間平均値)	環境基本法
	地下浸透規制の要件:検出されないこと	水質汚濁防止法(地下浸透規制)
	浄化基準:水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物 0.0005 mg/L 以下、アルキル水銀化合物は検出されないこと	水質汚濁防止法(地下水の浄化に係る措置命令の基準)
土壌	環境基準:検液1リットルにつき総水銀0.0005 mg 以下	環境基本法
	溶出量基準:水銀及びその化合物0.0005 mg/L 以下、かつ、アルキル水銀は検出されないこと	土壌汚染対策法(要措置区域等の指定に係る基準(汚染状態に関する基準))
	含有量基準:水銀及びその化合物15 mg/kg 以下	

環境排出抑制技術(主要大気汚染物質(SO_x, NO_x, ダイオキシン等)対策による水銀削減効果)

我が国では大気汚染防止法、ダイオキシン対策特別措置法により、ばいじん、硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)、塩化水素、ダイオキシン類の大気への排出基準が設定されていますが、水銀については設定されていません。しかし、これら主要大気汚染物質の排出基準の達成、特にダイオキシン類対策が、排出ガス中の水銀濃度の低下に役立っています。例えば、廃棄物焼却施設において、ダイオキシン対策を実施する前とした後で、排ガス中の水銀除去率は22%から96.7%へと改善したという調

査結果¹⁴があります。ダイオキシン対策を実施する前は、電気集じん機と湿式洗浄装置で排ガスを処理していましたが、電気集じん機の代わりに冷却塔を設置して排ガスの温度を下げ、バグフィルタで集じんした後、活性炭を吹き込む方法をとりました。また、一酸化炭素濃度を管理するなど燃焼の改善も行いました、この結果ダイオキシン類の濃度も下がり、当初の排ガス中の水銀濃度 0.047mg/m³ も 0.01mg/m³ 以下まで低下しました。

さらに、一般廃棄物焼却施設における水銀低減効率も大きく改善されており、平成 3(1991)年には 34.5%であった水銀低減効率が、平成 15(2003)年には 74.9%まで上昇しています。平成 11(1999)年に制定されたダイオキシン類対策特別措置法に基づく規制により、一般廃棄物焼却炉では湿式洗浄や電気集じん機から活性炭吹き込み及びバグフィルタへの転換が進んでおり、活性炭による水銀除去機能が高いことから、水銀低減効率も高まっているものと考えられています。また、石炭火力発電所においては、排ガスによる大気汚染防止対策として、主にばいじんの除去のための電気集じん機、あるいはバグフィルタ、SO_x 除去のための湿式又は乾式の脱硫装置、NO_x 除去のための触媒脱硝装置などが導入されており、排ガス中に含まれる水銀についても併せて除去されています。排ガス中の水銀濃度の低減率に関する詳細なデータは限られていますが、触媒脱硝装置、脱硫装置及び塩化アンモニウム投入により 90%以上の低減が図られたとの報告があります¹⁵。

非鉄精錬施設においては、排ガスによる大気汚染防止対策として、主にばいじんの除去のための電気集じん機、あるいはバグフィルタ、SO_x 除去のための湿式脱硫装置などが設置されており、排ガス中に含まれる水銀についても併せて除去されています。また、排ガスから除去された水銀を含むスラッジについては、北海道の鉱業所に輸送され、水銀が回収されています。

水銀の大気排出インベントリー

我が国における人為的及び自然由来の水銀の大気への排出量は、貴田ら(2007)の研究報告書¹⁶、関係業界の提供データ等に基づき、平成 22(2010)年度に日本全体で 19～24 トンと推定されています(表 8 参照)。

水銀に関する水俣条約の規制対象施設では、廃棄物焼却施設、セメント製造施設、石炭火力発電所の寄与が大きく、また、条約対象外の施設では、鉄鋼製造施設の割合が高いと推計されています。

14 Shin-ichi Sakai, Akiko Kida, Shigehiro Shibakawa, Akihiro Matsumoto, Hajime Tejima, Nobuo Takeda. (2006) Co-benefit of Controlling Unintentional Persistent Organic Pollutants (UPOPs) in Municipal Solid Waste Incineration, in 4th i-CEPEC, September 26-29, 2006, Kyoto, Japan.

15 Mitsubishi Heavy Industry, Ltd. (2010) Mercury Removal Technology Demonstration Results, presented at Powergen Asia in Sep. 2011

16 貴田晶子、平井康宏、酒井伸一、守富寛、高岡昌輝、安田憲二：循環廃棄過程を含めた水銀の排出インベントリーと排出削減に関する研究、平成 18 年度廃棄物処理等科学研究費補助金 研究成果報告書

表8 我が国における水銀の大気排出インベントリー(平成 22(2010)年度ベース)

分類	項目	大気排出量 (t/年) ¹	小計 (t/年)		
条約における大気排出の規制対象施設	石炭火力発電所	0.83 - 1.0	11 - 16		
	石炭焼き産業ボイラ	0.21			
	非鉄金属製造施設	0.94			
	廃棄物焼却施設	一般廃棄物焼却施設		1.3 - 1.9	
		産業廃棄物焼却施設		0.73 - 4.1	
		下水汚泥焼却施設 ²		0.17 - 0.85	
セメント製造施設	6.9				
条約における大気排出の規制対象外の施設	鉄鋼製造施設	一次製鉄施設	4.1	4.9	
		二次製鉄施設	0.62		
	石油精製施設	0.1			
	石油・ガス生産施設	<0.001			
	石油等の燃焼	石油火力発電施設	0.01		
		LNG 火力発電所	0.001		
		産業用ボイラ(石油系)	0.003		
		産業ボイラ(ガス系)	0.02		
	生産プロセスに水銀または水銀化合物を使用する施設 ³	塩素アルカリ製造施設	N.O.		
		塩化ビニルモノマー製造施設	N.O.		
		ポリウレタン製造施設	N.O.		
		ナトリウムメチラード製造施設	N.O.		
		アセトアルデヒド製造施設	N.O.		
	水銀添加製品製造施設	ビニルアセテート製造施設	N.O.		
		バッテリー製造施設 ⁴	0		
		水銀スイッチ製造施設	N.E.		
		水銀リレー製造施設	N.E.		
		ランプ類製造施設 ⁵	0.01		
		石鹸及び化粧品製造施設	N.O.		
		殺虫剤及び殺生物剤(農業)製造	N.O.		
		水銀式血圧計製造施設	N.E.		
		水銀式体温計製造施設	N.E.		
		歯科用水銀アマルガム製造施設	0.0004		
	チメロサル製造施設	N.E.			
	その他 ⁸	銀朱製造施設	N.E.		
		石灰製品製造	1.0		1.5
		パルプ・製紙(黒液)	0.23		
		カーボンブラック製造	0.11		
		蛍光灯回収・破砕	0.000005 - 0.000006		
		火葬	0.07		
運輸 ⁶		0.07			
廃棄物の中間処理施設 ⁷		N.E.			
水銀回収施設(蛍光灯を除く)	N.E.				
自然由来	火山	>1.4	>1.4		
合計 (自然由来を除く)			19 - 24 (17 - 22)		

注：1 N.E. は Not Estimated, N.O. は Not Occurring を意味する。

2 国内法においては廃棄物焼却施設に該当しないものがあるが、廃棄物焼却施設として取り扱う。

3 我が国における全ての当該施設では既に水銀は用いられていない。

4 我が国においてボタン型電池のみの製造に水銀が用いられているが、製造プロセス上大気中に水銀を排出しない装置を使用しているため0とした。

5 一般蛍光ランプ、バックライト、HID ランプを含む。

6 対象は燃料由来のガソリン及び軽油。

7 廃棄物焼却処理を除く。

8 過去の政府間交渉で取り上げられていないが、水銀の大気排出に蓋然性がある発生源。

出典：環境省資料

環境中における水銀のモニタリング

一般環境中における水銀に係る環境基準又は指針値の達成状況を確認するため、全国で大気・水等のモニタリングが実施されています。最新のモニタリングの結果では、公共用水域、地下水や土壌において環境基準を超過している箇所があるものの、大気については、全てのモニタリング地点で指針値を達成しています。なお、公共用水域の超過1地点については自然由来の水銀による超過であり、また大気については本格的にモニタリングを開始した平成10(1998)年度以降、指針値を超過した地点はありません(表9参照)。

表9 我が国の水銀モニタリングの結果

対象	基準値	モニタリング結果	測定頻度及び測定年度
大気	指針値：水銀(水銀蒸気) 40 ngHg/m ³ 以下(年平均値)	有害大気汚染物質モニタリング調査結果 ■指針値超過数：0/261 地点、平均濃度：2.1 ngHg/m ³ 、最大濃度：5.3 ngHg/m ³	月1回 平成23年度
公共用水域	環境基準：総水銀 0.0005 mg/L 以下* (年間平均値)	公共用水域水質測定(総水銀として測定) ■環境基準超過数：1/4219 地点	概ね月1回 平成23年度
地下水	環境基準：総水銀 0.0005 mg/L 以下* (年間平均値)	地下水質測定 ■環境基準超過数：概況調査(0/2908本)、汚染井戸周辺地区調査(3/75本)、継続監視調査(24/107本)	概ね年1回 平成23年度
土壌	環境基準：検液1リットルにつき総水銀 0.0005 mg 以下 溶出量基準：水銀及びその化合物 0.0005 mg/L 以下、かつ、アルキル水銀は検出されないこと 含有量基準：水銀及びその化合物 15 mg/kg 以下	土壌汚染調査(法に基づかない調査を含む) ■基準不適合事例数：83 事例**	平成23年度

*環境基準については、アルキル水銀についても「検出されないこと」という基準が定められていますが、超過地点はありません。

**土壌については、常時監視の結果ではなく、土壌汚染調査により環境基準等の超過が明らかとなった事例数です。

出典：環境省資料

大気中の水銀濃度の連続測定

我が国では、沖縄県の辺戸岬の大気・エアロゾル観測ステーションにおいて、形態別水銀連続測定装置を用いて平成19(2007)年2月に大気中の水銀連続測定のパイロットプロジェクトを実施し、同年10月より継続して連続測定を実施しています(図21、図22参照)。

このプロジェクトは以下の分野で貢献することを目的として実施されています。

- ◇ 大気、粒子状物質、降水に含まれる水銀及びその他の重金属の濃度のモニタリングの実施
- ◇ アジア太平洋地域における微量元素の長距離移動に関する有用な情報の獲得
- ◇ モニタリング技術の確立
- ◇ 大気環境モニタリングにおける国際協力

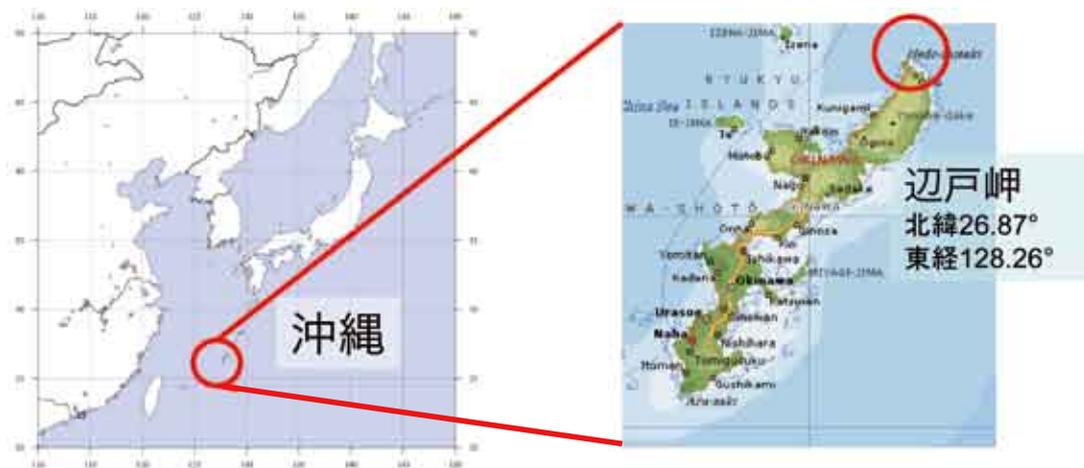


図 21 大気・エアロゾル観測ステーションの位置

出典：環境省資料

これまでの連続測定の結果、大気中の水銀濃度は指針値(40 ngHg/m³)を一桁下回っています。なお、今後データ解析を進めることとしています。

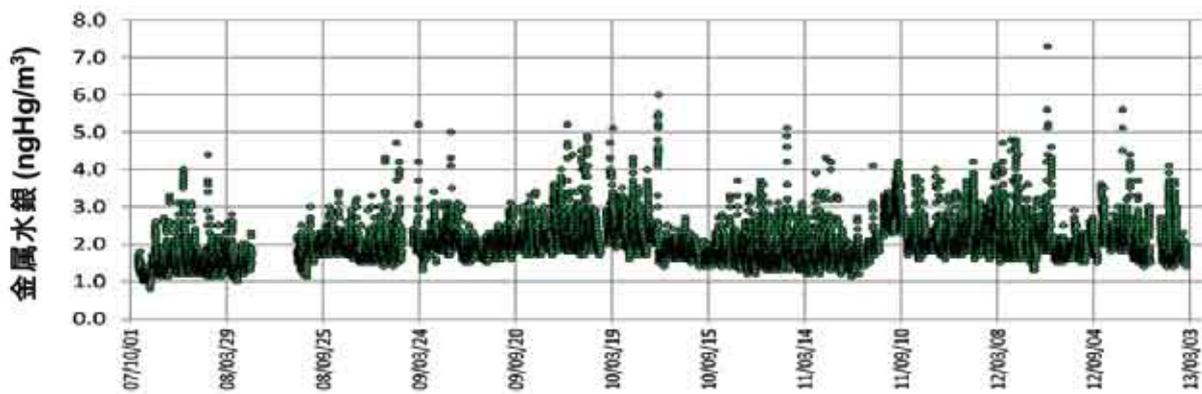


図 22 大気・エアロゾル観測ステーションにおける大気中水銀濃度連続測定の結果

出典：環境省資料

【コラム⑨】国立水俣病総合研究センターにおけるメチル水銀分析

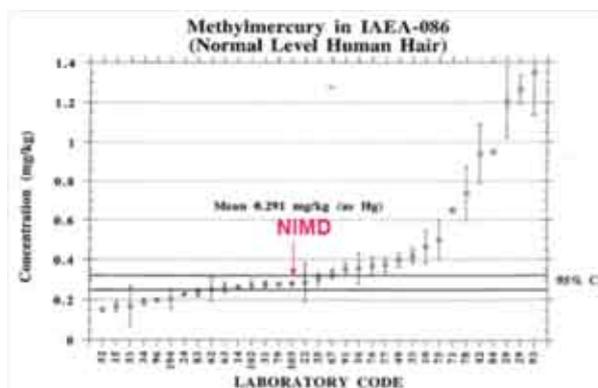
ヒト毛髪や血液、魚肉などを含むほとんどの生体試料中にはメチル水銀と無機水銀が共存しているため、曝露評価やリスク評価のためには、総水銀(メチル水銀+無機水銀)のみならず、メチル水銀の分別定量も必要です。総水銀の定量は原子吸光法により正確な値を得ることができますが、メチル水銀の定量は、有機溶媒(トルエンが主流)に抽出した上で、電子捕獲検出-ガスクロマトグラフィー(ECD-GC)で分析する必要があります。しかしながら当初は、有機溶媒による抽出効率が低いため正確な値を得るのが困難でした。国立水俣病総合研究センター(国水研)では、抽出にジチゾン/トルエンを導入することによって抽出効率を100%近くまで上げる方法を確立しました。現在国水研ではこの方法を用いて生体試料のみならず、海水や土壌試料中のメチル水銀についても、正確な定量を行っています。

なお、本法は、国水研の海外協力の一環として、ブラジル、タンザニア、ニカラグア、インドネシア、韓国など海外の研究者にも技術移転され、現地でのメチル水銀分析に使用されています。本法の詳細は国水研ホームページで見ることができます。

(URL: [http://www.nimd.go.jp/kenkyu/docs/mercury_analysis_manual\(j\).pdf](http://www.nimd.go.jp/kenkyu/docs/mercury_analysis_manual(j).pdf))



電子捕獲検出-ガスクロマトグラフィー装置



相互比較：IAEA-086(ヒト毛髪)中のメチル水銀
国水研(NIMD)の方法を用いるとメチル水銀の正確な分析が可能。グラフ上の点は世界の各分析機関による測定値を、グラフ中の幅は95%信頼区間を示す。