

【特集：水銀条約制定に向けての国際動向】

水銀および水銀含有廃棄物の管理に関する現状

高岡 昌輝*・福田 尚倫*・吉元 直子*

【要旨】 本稿では、最初に日本、EU、アメリカでの水銀廃棄物の発生量、処分・保管等の現状について紹介した。日本においては、水銀の大気排出インベントリーとマテリアルフローから水銀の最終処分・回収量の推定を行った。その結果、最終処分されている水銀量と回収量を比べると回収量の方が大きいことがわかり、EUと比べても回収率が高いことが示唆された。今後、一次鉱出だけでなく回収された水銀についても輸出することが禁じられる可能性があり、余剰水銀や水銀含有廃棄物はその含有率に応じて長期・永久保管あるいは適正処分が求められる。そのため、この閾値を決めるための基礎的な実験的検討を行った。その結果、バーゼル条約やスウェーデンが独自に定めている水銀含有廃棄物の基準：0.1%には一定の合理性があると考えられた。今後は、水銀の安定化機構や長期的な安定性に関するさらなる科学的知見の蓄積が必要である。

キーワード：水銀含有廃棄物、余剰水銀、長期保管、適正処分、安定化

1. はじめに

水銀は有用な物質であるとともに、重大な健康影響をもたらす物質でもある。水銀の地球規模のリスクに関するさまざまな科学的知見が集積されて、国際的に水銀使用低減の潮流ができ、国連環境計画（UNEP）が中心となって管理枠組みを構築しようとしている。この中で優先的に取り組むべきことのひとつに水銀廃棄物の処理・処分・保管があげられている。金属水銀は常温で液体であり、容易に揮発する特性を持つことから、非常に移動性の高い物質であり、製品や生産プロセスにおいて使用されると、気体、液体、固体それぞれに分配される。しかし、最終的に環境中で安定的な形で保管・処分するには移動性の低い固体に集積されてくることから、固体（廃棄物）の管理が重要になってくる。さらに、これまで有価で取り引きされてきた水銀が、生産プロセスの変

換や製品への不使用化が進むことにより、余剰水銀が発生する。これはもはや使用用途がなくなることから有害廃棄物として扱わねばならない。

2011年の1月に千葉で開催された第2回政府間交渉委員会（Intergovernmental Negotiating Committee：INC）で事務局から提出された条約要素案4にて、生産プロセスや廃棄物から回収された金属水銀の処理・処分・保管に関することが述べられている¹⁾。安全な長期・永久保管および最終処分を想定する場合には、その保管化学形態は、より移動性が低く、環境影響の少ない安定なものが望ましく、金属水銀を安定な保管化学形態へ変換することが必要となる。バーゼル条約のテクニカルガイドラインでは、このような金属水銀から成る廃棄物を「Wastes consisting of elemental mercury」と呼んでいる²⁾。

条約要素案12では、廃棄物となった水銀添加製品、石炭火力発電所からの飛灰など保管場所の問題等から長期保管が現実的でない水銀含有廃棄物については適正に処分するという取り扱いを提案している¹⁾。バーゼル条約のテクニカルガイドラインでは、蛍光灯や体温計など水銀添加されている製品が廃棄物となった場合「Wastes containing mercury」と、焼却飛灰などに水銀含有されている場合は、「Waste contaminated with mercury」と呼んでいる²⁾。現段階ではこれら廃棄物を

原稿受付 2010.10.15

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

環境デザイン工学講座

連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂（C1棟）

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

環境デザイン工学講座 高岡 昌輝

E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp

長期・永久保管するのか、環境上適正な方法で処分するのか、どちらの扱いにするかを切り分ける境界となる水銀含有率が決められていない。条約要素案ではバーゼル条約との整合性をとりながらこの水銀含有率を設定することが提案されている。この水銀含有率を設定することは、保管されるべき水銀量を決めることにつながり、重要な意味をもつ。

本稿では、日本、EU、アメリカでの水銀含有廃棄物の発生量、処分・保管等の現状について紹介した後、上記で述べたように第2回INCの条約要素案では、長期・永久保管と適正処分との境界となる水銀廃棄物の含有率を決めると提案されていることから、この閾値に関して基礎的な実験的検討を行った結果を示した。最後に、日本における水銀含有廃棄物の保管・処分の課題を述べた。

2. 日本、アメリカ、EUの水銀および水銀含有廃棄物の現状

2.1 日本

日本における全体的水銀のマテリアルフローについては、環境省が詳細に報告していることから別報を参照していただきたい^{3,4)}。その中で廃棄物関連部分のみをここで取り上げると、国内の水銀回収・再生・リサイクル量については製錬副産物等からは約75 ton/年が回収されていると推定されている。特に国内の非鉄金属製錬業界では、1993年に発足した再資源化部会（野村興産(株)も加盟）によって製錬廃棄物の逆有償処理（有価物の回収）を進めており⁵⁾、非鉄金属製錬における製錬副産物からの水銀回収量は66.8 ton/年と大部分を占めている。電池、照明器具、計測機器、無機薬品、医療機器、汚泥、建設機材、吸着剤などの製品・廃棄物からは約15 ton/年が回収されている。国内の水銀需要量は近年10 ton/年程度であるから、この製品・廃棄物からの回収量はほぼ合致している³⁾。個別の製品への需要量については電池用は1.5 ton/年、電球（蛍光管、HIDランプ）で4 ton/年程度である。蛍光管に関しては、最新の調査により国内の年間流通量約63,000 ton/年（蛍光管重量）に対して約3割が回収され、回収量は356~928 kg/年⁶⁾と報告がある。最終的に回収、再生された水銀は2002~2006年の5年間の平均で約108 ton/年が輸出されている。過年度の在庫などの影響があり、上記の回収総量（75+15 ton/年）とは完全には一致していない。

上記は回収、再生された水銀であるが、これ以外には、都市ごみ焼却施設や石炭火力発電所の飛灰のように微量ながら水銀を含む廃棄物がある。わが国における廃棄物

処理法においては、環境省告示13号溶出試験を行った結果、水銀溶出値が0.005 mg/Lの濃度を上回る場合には、適正に処理した後0.005 mg/L以下であることを確認して、管理型の最終処分場に投入することとしている。水銀溶出値がこの値を超えるような場合は、遮断型埋立処分場での処分、管理となる。つまり、含有率での基準はなく、溶出値のみで判断される。

2005年におけるこのような残渣廃棄物由来の水銀量について、貴田らが求めた日本の水銀の大気排出インベントリーの排出ポテンシャル（各排出源に入っていく水銀量）⁴⁾と大気への排出量の差から概数を見積もった。たとえば、都市ごみ焼却施設からの大気への排出は0.098~0.236 ton/年と推定されており、都市ごみ焼却施設への流入水銀量（排出ポテンシャル）は排出係数や排出低減効率などを用いて、1.31~3.15 ton/年と見積もられる。したがって、この差（1.21~2.91 ton/年）が基本的に廃棄物として存在しうると考えた。つまり、排水へ移行したとしても、キレート樹脂などの処理により最終的に廃棄物として排出されると考えた。表1に各排出源からの固体廃棄物としての水銀量を示す。燃烧残渣などに含まれる水銀量の総計は13.9~18.2 ton/年と推計された。なお、排出係数が示されていない排出源（非鉄金属製錬、セメント製造、カーボンブラック製造、バッテリー製造、電気スイッチ製造、蛍光灯製造、火葬、蛍光灯回収・粉砕、歯科アマルガム、運輸）は、この中に含まれていない。セメント製造、運輸以外は大気への排出量は0.13 ton/年以下であるため、大きな影響は与えないと考えられる。またセメント製造は別途貴田らによると排出ポテンシャルと大気への排出が同じであるとの試算があり⁷⁾、運輸についてはほとんど水銀を除去できていないと想定されることから、両排出源とも廃棄物としての排出はほとんどないと推定される。なお、鉄鋼・製鉄の排出、および下水汚泥の排出については著者らの調査によった^{8,9)}。なお、下水汚泥焼却では多くの水銀がスクラパー排水に移行すると推定されたので、飛灰（固体）への排出は見積もっていない⁹⁾。非鉄金属製錬の排出ポテンシャルは不明であるが、上記の回収・再生量がわかっていることからこの推計値には入っていない。また、都市ごみ焼却残渣の一部や石炭灰がセメント製造に利用されている。貴田らはセメント製造において、6.28 ton/年のポテンシャルのうち、1.96 ton/年が廃棄物由来であることを明らかにしている⁷⁾。これらの部分は循環している部分であり、推計値から引くと、約11.9~16.3 ton/年となる。

上記の回収・再生量のうち、75 ton/年と66.8 ton/年の差が他の製造部門からのリサイクル量であると考えら

表 1 大気排出量から逆算した残渣廃棄物由来の水銀量

		大気への排出量 (ton/年)	排出ポテンシャル (ton/年)	廃棄物中水銀量 (ton/年)
石炭燃焼	火力発電	1.2	4.5	3.3
	産業ボイラー	0.57	1.1	0.51
石油燃焼	火力発電	0.30	1.1	0.80
	産業ボイラー	1.1	2.0	0.97
一般廃棄物燃焼		0.098～0.24	1.3～3.1	1.2～2.9
医療廃棄物燃焼		0.57～1.7	1.1～3.2	0.52～1.5
下水汚泥焼却・溶融		0.258～1.5	0.50～2.8	0
産業廃棄物燃焼	廃プラスチック類	0.017～0.66	0.033～1.3	0.016～0.60
	紙くず	0.0055	0.011	0.0051
	木くず	0.013～0.12	0.025～0.22	0.012～0.11
	繊維くず	0.0033～0.011	0.0063～0.021	0.0030～0.010
	ゴムくず	0.000021～0.0019	4.0E-05～0.0036	1.9E-05～0.0017
	その他汚泥	0.66	1.27	0.61
シュレッターダスト		0.049～0.79	0.094～1.5	0.045～0.73
鉄鋼・製鉄		4.1	8.5	4.4
非鉄金属製錬		0.52～4.61		(66.8)
セメント製造		8.9		
石灰石製造		1.1	1.3	0.27
カーボンブラック製造		0.12		
コークス製造		0.89	1.7	0.81
パルプ・製紙		0.43～0.65	0.82～1.3	0.39～0.60
塩素アルカリ工業		0	0	0
バッテリー製造		0.0018		
電気スイッチ製造		0.0043		
蛍光灯製造		0.018		
火葬		0.056		
蛍光灯回収・粉砕		7.2E-06～9.0E-06		
歯科アマルガム		0.003		
運輸		0.77		

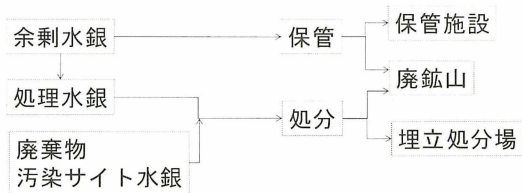
れるが、汚染土壌などからの回収も寄与している可能性があり、ここでは評価しない。また、製品のための水銀需要量（約 10 ton/年程度）と廃製品からの水銀回収量（約 15 ton/年程度）を比べると回収量の方が多いが、前述した電池電球用の需要量約 5.5 ton/年のうち 5 ton/年が回収されずに廃棄物として最終処分されているとして、残渣系廃棄物の推計値と合算すると、年間 16.9～21.3 ton が最終処分されていると推定される。

以上より、現時点では約 90 ton/年が回収・再生され、約 20 ton/年程度が最終処分され、20～30 ton/年が大気放出されていると推定される。EU では非鉄金属製錬以外の廃棄物中の水銀は 400 ton/年程度発生し、平均回収率は 25% であることが報告されている¹⁰⁾。日本においては非鉄金属製錬を除いた場合、回収・再生量が 23 ton/年程度、最終処分量が 20 ton/年程度であることから、日本の回収率は 53% 程度となり、EU に比べて高いといえよう。非鉄金属製錬も含めた全量での回収率

(90/110) は日本では 80% を超える。しかしながら、非鉄金属製錬の回収率によってはこの数値は大きく変化する。上記の推計は非鉄金属製錬業界からの報告値である 95.3% の報告値を用いているが、EU では非鉄金属製錬および天然ガスの精製プロセスから 350～410 ton/年の水銀が回収可能な副産物として存在し、現在、そのうち 65～90 ton/年が回収されていると報告されている¹⁰⁾。

2.2 アメリカの現状

アメリカでは、水銀含有率で 260 mg/kg より高いものは高レベル廃棄物とし、熱処理等により 260 mg/kg 以下にして溶出試験（TCLP）で 0.2 mg/L 以下としなければ処分できない。含有率が 260 mg/kg 以下のものは低レベル廃棄物とし、熱処理（retort）後残渣以外の廃棄物はなんらかの処理によって 0.025 mg/L 以下とし、熱処理後残渣は溶出試験で 0.2 mg/L 以下とする必要がある¹¹⁾。つまり、図 1 に示すように、アメリカでは、保

図1 アメリカにおける水銀保管処分の枠組み¹¹⁾

管と廃棄物が分離提示されており、水銀含有率が260 mg/kg以上とそれ以下で層別の対応が示されている。

製品・廃棄物あるいは汚染サイトなどから回収された金属水銀は保管施設や廃鉱山にて貯蔵する。この回収過程からでてきた廃棄物の処分については、さまざまな処理・安定化処理が施され、埋立処分場あるいは廃鉱山に処分される。アメリカの今後40年間で発生する余剰水銀は約10,000 tonと見積もられている¹²⁾。このうちの約半分が金採掘の副産物である。また、廃棄物の回収などは約2,300 tonで、1,000 ton程度は塩素アルカリ工場の閉鎖に伴う排出が見込まれている。これまでは輸出が可能であったが、2008年10月に2013年までに水銀の輸出を禁止する法案が議会を通過し、大統領の署名を得た。したがって、2013年以降は大量の余剰水銀を保管あるいは処分しなければならない¹³⁾。アメリカは、国防総省(Department of Defense: DOD)の戦略備蓄物質として、4,436 tonの水銀を約50年間保管してきた実績がある¹⁴⁾。今後は、水銀の輸出禁止に伴って将来的に発生す

る余剰水銀の保管・管理はエネルギー省(Department of Energy: DOE)が行う計画となっており、DODのこれまでの実績にならない、金属水銀の状態ですぐ保管する予定となっている。ただし、DODの4,436 tonの備蓄は国防兵站局(Defense Logistics Agency: DLA)によってネバダのホーソン陸軍倉庫に保管される予定となっている。

DOEは40年間で発生するこれら約10,000 tonの余剰水銀を長期保管するため、図2に示す7つの保管候補地を想定し、これらの保管候補地に対する環境影響評価(Environmental Impact Statement: EIS)を行った¹²⁾。それぞれの保管地に対する地震、水源、社会基盤、環境正義の項目に関して評価がなされた。その結果、アイダホとテキサスの候補地の環境影響が小さいことが示され、さらにその他の要素(周辺の人口密度、鉄道の有無など)も考慮した結果、テキサスの候補地が一番望ましい保管地であるとされた。アメリカの余剰水銀の保管の方法は、金属水銀の状態のままの地上保管である。主要な水銀保管容器は2種類あり、76ポンドフラスコ(3L容器で34 kg相当)と1 ton コンテナである¹⁵⁾。フラスコは典型的に鋳鉄かステンレススチールで作られる。DODの水銀備蓄では、水銀を注入した6本の76ポンドフラスコを吸収パッドを敷いたドラム缶の中に入れ、これらのドラム缶を積み上げない形で倉庫に厳重保管している¹⁶⁾(図3)。これに対し、DOEが作成した水銀保管のための暫定ガイドライン¹⁷⁾では、76ポンドフラスコと1 ton コンテナの2種類の容器で保管する計画が立

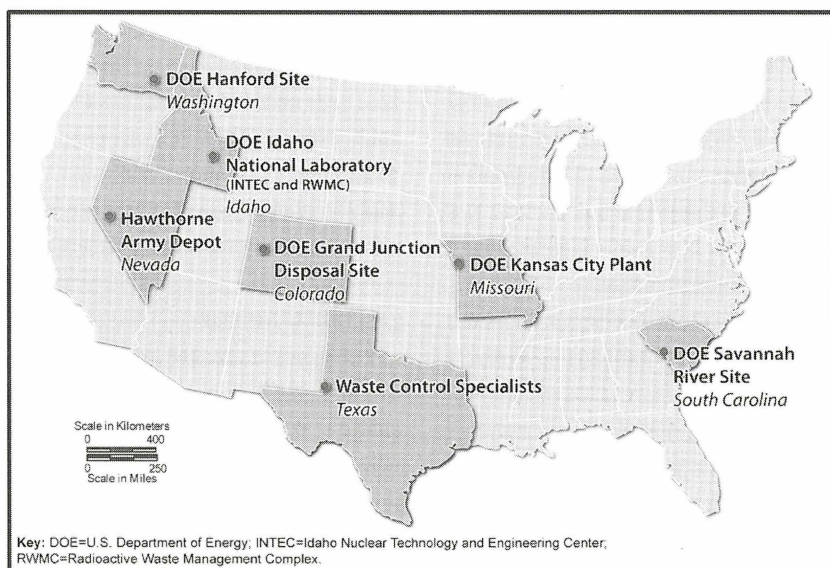
図2 アメリカにおける金属水銀保管候補地¹²⁾

図3 アメリカにおける金属水銀の地上保管¹⁶⁾

てられている。倉庫の床は水銀の重量に耐えられるよう鉄筋コンクリート製とし、表面はエポキシ封止剤加工により強度を増すとともに、漏洩水銀を封じ込めるようにする。その他、照明、換気装置、消火システム、監視システムの導入が必要である。これらは新しい建設が必要な場合の建設計画であり、既存の施設に保管する場合は、水銀保管に適した改装が必要となる。

2.3 EU の現状

EU においては、2005 年に欧州委員会により水銀汚染に取り組むための包括的な戦略が提案された¹⁸⁾。EU および世界全体で水銀の使用・排出を削減するための一連の行動を示すものであり、この戦略では産業界で不要となった余剰水銀の安全な保管にも取り組んでいる。また、2011 年までに EU での水銀輸出を段階的に廃止することも盛り込まれている。この水銀輸出禁止規則案は 2008 年 9 月に最終的な法案が採択され、2011 年 3 月より、塩素アルカリ産業やその他特定の事業活動で水銀を使用することが禁止され、安全な保管が義務付けられることとなった。EU では、塩素アルカリ産業界が最大の単独水銀ユーザーであるが、少なくとも 2020 年までに水銀プラントを閉鎖するか、他のプロセスに転換することをすでに約束しており、2020 年までの閉鎖で約 12,000 ton の余剰水銀が排出されると見積もられている¹⁹⁾。

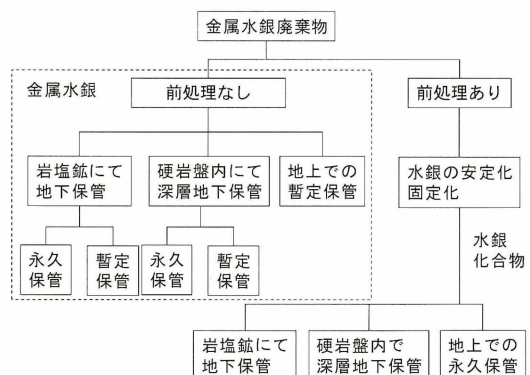
EU では地下の岩塩採掘跡（岩塩坑）および硬岩盤内に有害廃棄物等の処分が行われており、この経験を基に余剰水銀の保管方法が検討されている²⁰⁾。これらの地下処分場は放射性廃棄物の最終処分場としての検討がなされており、余剰水銀の保管・処分にも適用できる²¹⁾。岩塩坑の特徴として、ガスや気体の不浸透性、高い安定性、生物圏との隔離など、廃棄物の保管・処分に適した条件を有しており、金属水銀や水銀化合物の保管にも適していると考えられているが、岩塩であるため水溶性が高い

ことが欠点である。ヨーロッパには地下の有害廃棄物処分場として利用されている岩塩坑はドイツとイギリスに計 5ヶ所あり、ドイツでは水銀含有廃棄物を過去数十年間処分・保管してきた実績があるが、金属水銀や水銀化合物そのものに関しては前例がない。一方、深い地下岩盤は、岩塩坑に比べると高い強度を有しており水溶性も低いが、特に結晶質岩の場合に亀裂が生じる可能性があり、保管形態が金属水銀の場合には環境への放出が懸念される。

スウェーデンでは地下深部の岩盤内に 1,000 年の期間で保管する計画を立てていたが²²⁾、2009 年、ドイツの既存の地下保管施設に移送する方針を決定した²³⁾。この方針変更は、新たな保管施設の建設にはドイツの保管施設に移送する場合の約 15 倍のコストがかかるためである。この決定とともに、スウェーデン政府は水銀の全面的な使用禁止を決定している。また、ノルウェーは、安定化を行えば最大で水銀含有率 10% の水銀含有廃棄物が処分可能な地下施設を 2ヶ所所有している²⁴⁾。

最新の EU の報告書によると、余剰水銀の岩塩坑および硬岩盤内における地下保管および地上保管を想定した各オプション（図 4）のフィージビリティスタディが行われた²⁰⁾。ここでは保管に先立つ安定化処理の有無が考慮されており、安定化を行う場合は永久保管のみを想定し、安定化をせずに金属水銀の状態では保管する場合は暫定保管と永久保管の 2つのパターンが考慮されている。経済的および環境的評価に基づいた分析の結果、最終的に下記のオプションが推奨されている。

- ① 金属水銀の前処理（硫黄安定化）後、岩塩坑で永久保管（最高レベルの環境保護、許容可能なコスト）
- ② 金属水銀の前処理（硫黄安定化）後、深い地下岩盤内で永久保管（高いレベルの環境保護、許容可能なコスト）

図4 EU における水銀保管オプション²⁰⁾

③ 金属水銀を岩塩坑で永久保管（高いレベルの環境保護，コスト削減効果が最も高い）

暫定的保管とは，時間枠として5年間が推奨されている。暫定保管オプションとして可能性があるのは岩塩坑および地上施設での金属水銀の暫定保管とされており，金属水銀を深い地下岩盤内で暫定保管するオプションについては望ましくないとされている。これは，岩盤の性質として亀裂が生じやすいため，金属水銀の流出や揮発が起きた場合に生物圏へ侵入する可能性があるためである。

以上のオプション分析のほか，保管に関する基準と施設が満たすべき要件の検討が行われている。金属水銀の受入基準は純度が99.9%以上，他の金属（鉄，ニッケル，銅等）の含有率<20 mg/kg，ナトリウム含有率<1 mg/kg，保管容器の材質はステンレススチールまたはカーボンスチールとされている。また安定化水銀の受入基準は，水銀蒸気圧<0.003 mg/m³，欧州規格 EN 1247/1-4 に定められる溶出試験（液固比 10 L/kg）の溶出値<2 mg/kg dry mass とされており，保管場所の最小深度は 300 m と提案されている²⁰⁾。

一方で，EU における水銀含有廃棄物に対する基準は，日本と同様の埋立処分に対する溶出基準のみであり，EN 1247/1-4 に定められる溶出試験で表 2 に示すように埋立処分タイプごとに定められている²⁰⁾。液固比 2 L/kg の溶出値<0.5 mg/kg dry mass，液固比 10 L/kg の溶出値<2 mg/kg dry mass，percolate 試験で<0.3 mg/L であれば有害廃棄物処分場に処分できる。EU 内の各国で独自に定められている値もあるが，それらはこの EU 基準よりも厳しい。また，各国では水銀含有率に関する基準が定められているところもある。オーストリアでは 1~20 mg/kg-TS の厳しい基準があり，埋立処分のタイプに依存しているが，硫化水銀であれば 3,000 mg/kg まで可能である。ベルギー（フランドース）では 0.5% であり，硫化水銀はこの値から除外されているが，実際の閾値は 100 mg/kg で運用されている。スウェーデンは唯一，保管に対する含有率基準を決めており，水銀含有率 0.1% を越えるようであれば地下保管することとなっている。

3. 水銀含有率の閾値に関する基礎的検討

上記で述べたように，水銀含有廃棄物は日本や EU では溶出試験により規定されており，含有率に関する基準は見当たらない。一方でバーゼル条約やスウェーデンでは 0.1% と含有率が規定されている。またアメリカについては 260 mg/kg という独自の基準をもっており，別途溶出濃度についても規定を持っている。ここでは，模擬水銀含有廃棄物に対して通常の安定化処理を行った場合の日本の溶出試験値およびアメリカの TCLP 試験値と水銀含有率との関係を求め，通常の安定化処理では処理しきれなくなる水銀含有率がいくらかになるのかについて検討した。

具体的実験方法としては，水銀化合物を添加した都市ごみ焼却飛灰（ストーカー式焼却炉：A 工場のバグフィルタから採取）をキレート剤（高分子重金属捕集剤：アッシュユース L-5000M：日立造船(株)）によって処理し，環境庁告示第 13 号法に従って溶出試験を行った。キレート剤によってどれだけの濃度の水銀を不溶化することができるか検討するため，3 種類の水銀化合物（HgCl, HgO, HgCl₂）をそれぞれ混合した焼却飛灰に対してキレート添加量を変えて実験を行った。これらの化合物種は水銀含有廃棄物中に多く存在すると考えられる形態であり，溶解度の違いから選択した。もともとの飛灰には 17.1 mg/kg の水銀が含まれていた。溶出液中の水銀の測定については，還元気化水銀測定装置（マーキュリー RA-2：日本インスツルメンツ社製）で行った。1 条件につき 2 サンプル作成し，各サンプルを 2 回ずつ測定して得た 4 つの値の平均値を結果とした。

最初に水銀を添加していないもともとの A 工場の飛灰の溶出量を測定すると 0.0005 mg/L より小さく，検出されなかった。したがって，A 工場の飛灰そのものは安定化処理が必要ない結果となった。ところが図 5 に示すように，各水銀化合物を 0.1% 添加した場合は，いずれも埋立判定基準（0.005 mg/L）以上の水銀濃度が検出され，安定化処理が必要であることが確認された。HgCl, HgO, HgCl₂ の水への溶解度は，0.00020（25℃），0.0053（25℃），6.9（20℃）であることから²⁵⁾，水銀溶出

表 2 EU における水銀廃棄物の処分基準²⁰⁾

埋立タイプ	L/S=2 L/kg mg/kg-dry	L/S=10 L/kg mg/kg-dry	C ₀ (percolating 試験) mg/L
安定型処分場基準	0.003	0.01	0.002
非有害廃棄物処分場で有害 廃棄物を処分できる基準	0.05	0.2	0.03
有害廃棄物処分場基準	0.5	2	0.3

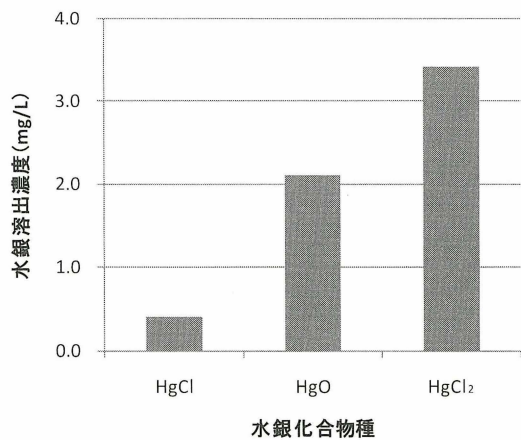


図5 0.1% 水銀含有模擬廃棄物からの水銀溶出特性 (環告13号試験)

表3 添加水銀種ごとの環告13号溶出濃度と水銀含有率の関係 単位: mg/L

水銀含有率 添加水銀種	0.05%	0.1%	1%	3%	5%
HgCl	<0.0005	<0.0005	0.0005	3.2	11
HgO	<0.0005	<0.0005	0.14	1.5	2.9
HgCl ₂	<0.0005	<0.0005	0.019	1.5	3.7

濃度は溶解度の順になっている。溶出試験の pH は 10.8～11.4 程度であり、アルカリ域では HgCl の溶解度は高くなることが、水谷らの調査によりわかっており、その傾向とも合致する⁶⁾。

これに対して、キレート剤を添加した場合の結果を表 3 に示す。キレート剤の添加量は予備的な試験をもとに、HgCl、HgO は 5%、HgCl₂ に対しては 12.5% とした。溶融飛灰等の安定化においてはキレート添加量が 10% を超える事例が散見される。本結果より、環告 13 号試験の結果では、3% 以上の含有率の場合はいずれの形態でも大きく埋立判定基準を超えている。また、1% においては、HgCl については基準以下であるが、HgO、HgCl₂ については基準を満たしていなかった。0.1% まで水銀含有率を下げるとすべての形態で 0.0005 mg/L 以下となった。つまり、環告 13 号試験からは水溶性の水銀であっても 0.1% 以下の水銀含有率であれば、概ね現在の安定化手法で埋立判定基準を満たすことができるといえる。

この中で最も水溶性の高い HgCl₂ を選択し、0.1% 付近での水銀溶出挙動を確認するため、添加量は 0.05%、0.1%、1% と設定し、アメリカの TCLP 試験により安定化物を評価した。その結果を表 4 に示す。TCLP 試験で

表4 HgCl₂添加模擬廃棄物における TCLP 試験溶出濃度と水銀含有率の関係 単位: mg/L

水銀含有率 添加水銀種	0.05%	0.1%	1%
HgCl ₂	0.0016	0.0050	0.052

は予備試験の pH により酢酸溶液を選択し、行った。酢酸を用いての溶出結果であるため、いずれの添加量でも環告 13 号試験の溶出値を上回っている。アメリカでの基準については、含有率 260 mg/kg (0.026%) 以上のものは熱処理等の操作等により 0.2 mg/L 以下という基準を満足しなければならないが、今回のキレートによる安定化では水銀含有率 1% でも 0.052 mg/L と TCLP の基準を満足していた。260 mg/kg 以下の熱処理残渣以外の廃棄物の基準である 0.025 mg/L も、水銀含有率 0.1% 以下では満足していた。

以上の基礎的な検討より、バーゼル条約やスウェーデンが独自に定めている水銀含有廃棄物の基準: 0.1% には一定の合理性があると考えられる。しかしながら、HgCl₂ へのキレートの添加量は相対的に大きく、また他金属の存在やその形態などにも水銀溶出量は影響されることや、廃棄物の種類や性状により異なることも想定される。したがって、安定化の機構や長期的な安定性に関するさらなる科学的知見の蓄積が必要で、それらを考慮した上で水銀含有率は決定される必要があろう。

4. お わ り に

日本では回収・再生・リサイクルされている水銀量が 90 ton/年に対し、最終処分されている量は 20 ton/年程度と見積もられることから、まだまだ蛍光管などのリサイクル率に上昇余地はあるとはいえ、EU と比べると全体として見たときの日本の水銀回収・再生システムは健全であるといえよう。ただ、これは水銀が有価で取り引きされているから回っているシステムであるといえ、今後水銀が廃棄物としてのみの取引になった場合にも健全なシステムが働くようにしていかなければならない。一方、水銀保管の点では、EU やアメリカはそれぞれ独自の方法で水銀を保管する方向を見出している。日本は地震や台風などの自然災害の多発地域であることを考慮すると、アメリカのような金属水銀での保管はリスクが高く、EU のような適した岩塩鉱はない。したがって、新たな日本式の管理の在り方を模索していく必要がある。今後、日本においては水銀の安定化方法や最終保管法に関する技術的要件、水銀回収システム、保管用地の立地や関係法令の整備などの社会・制度的要件、保管・処分費用や

関係主体間の費用分担などの経済的要件など多くの検討事項があり、現在の水銀を取り巻く状況および関係主体の意見などを踏まえながら、よりよい管理システムを考えていかねばならない。

参考文献

- 1) UNEP(DTIE)/Hg/INC. 2/3: Draft Elements of a Comprehensive and Suitable Approach to a Global Legally Binding Instrument on Mercury (2010)
http://www.ciel.org/Publications/INC2_3_Elements_Nov10.pdf (accessed on 6th Jan., 2011)
- 2) Secretariat of the Basel Convention: Draft Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of Elemental Mercury and Wastes Containing or Contaminated with Mercury, 7th Draft
<http://www.basel.int/techmatters/mercury/guidelines/2011-07-31.doc> (accessed on 4th Aug., 2011)
- 3) 環境省: 水俣病の教訓と日本の水銀対策 (2011)
<http://www.env.go.jp/chemi/tmms/pr-m/mat01.html> (閲覧日 2011 年 7 月 28 日)
- 4) 環境省: 平成 21 年度第 2 回有害金属対策基礎調査検討会参考資料 (2010)
<http://www.env.go.jp/chemi/tmms/2102/ref01.pdf> (閲覧日 2011 年 7 月 28 日)
- 5) 日本鉱業協会: 資料 1「再資源化部会」(3)廃棄物の処理
<http://www.kogyo-kyokai.gr.jp/home/data/data01/haiki.pdf> (閲覧日 2011 年 1 月 6 日)
- 6) 高岡昌輝, 小口正弘, 水谷 聡, 浅利美鈴, 高橋史武, 三浦博: 平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費補助金研究成果報告書 循環型社会における回収水銀の長期安全管理に関する研究 (K2147) (2010)
- 7) 貴田晶子, 高橋史武: 日本と諸外国の水銀の大気排出インベントリー, 地球環境, 第 13 巻, pp.167-180 (2008)
- 8) N. Fukuda, M. Takaoka, S. Doumoto, K. Oshita, S. Morisawa and T. Mizuno: Mercury Emission and Behavior in Primary Ferrous Metal Production, Atmospheric Environment, Vol. 45, pp. 3685-3691 (2011)
- 9) M. Takaoka, S. Doumoto, K. Oshita, N. Takeda and S. Morisawa: Mercury Emission from Sewage Sludge Incineration in Japan, J. Material Cycles and Waste Management (Submitted)
- 10) COWI A/S and Concorde East/West Sprl: Options for Reducing Mercury Use in Products and Applications, and the Fate of Mercury Already Circulating in Society (2008)
http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/pdf/study_report2008.pdf (accessed on 3rd Aug., 2011)
- 11) U. S. EPA: Preliminary Analysis of Alternative for the Long Term Management of Excess Mercury, EPA/600/R-03/048 (2002)
<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r03048/600R03048.pdf> (accessed on 3rd Aug., 2011)
- 12) U. S. DOE: Long-Term Management and Storage of Elemental Mercury — Environmental Impact Statement —, Vol. 1 (2011)
<http://mercurystorageeis.com/Volume%201-Final%20Mercury%20Storage%20EIS.pdf> (accessed on 4th May, 2011)
- 13) Environmental NGOs Press Release: U. S. Joins EU in Banning Mercury Exports/Environmentalists Applaud Bi-partisan Effort (2009)
http://www.zeromercury.org/US_developments/2FINAL081015_US_Export_Ban_NGOs_PR.pdf (accessed on 3rd Jul., 2009)
- 14) Quicksilver Caucus: Mercury Stewardship Storage of Mercury, Review Draft October (2003)
http://www.ecos.org/files/721_file_QSC_STOR_Oct_03.pdf (accessed on 3rd Jul., 2009)
- 15) A. J. Carroll: Design of Mercury Storage Containers (2009)
<http://www.mercurynetwork.org.uk/wp-content/uploads/2009/10/Carroll.pdf> (accessed on 3rd Dec., 2010)
- 16) 田中 勝: 水銀廃棄物管理に関する UNEP 水銀パートナーシップ 水銀条約に関する国際セミナー (2010)
<http://www.env.go.jp/chemi/tmms/seminar/jyoyaku/mat05.pdf> (閲覧日 2011 年 1 月 17 日)
- 17) Oak Ridge National Laboratory: U. S. Department of Energy Interim Guidance on Packaging, Transportation, Receipt, Management, and Long-Term Storage of Elemental Mercury (2009)
[http://mercurystorageeis.com/Elementalmercurystorage%20Interim%20Guidance%20\(dated%202009-11-13\).pdf](http://mercurystorageeis.com/Elementalmercurystorage%20Interim%20Guidance%20(dated%202009-11-13).pdf) (accessed on 17th Nov., 2009)
- 18) EU Press Release: Commission Proposes Strategy to Deal with Mercury Pollution Including a Ban on Exports (2005)
http://europa.eu/index_en.htm, 31 Jan, 2005 (accessed on 20th Oct., 2008)
- 19) European Commission: Mercury Flows and Safe Storage of Surplus Mercury (2006)
http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/pdf/hg_flows_safe_storage.pdf (accessed on 3rd Feb., 2009)
- 20) BiPRO: Requirements for Facilities and Acceptance Criteria for the Disposal of Metallic Mercury 07.0307/2009/530302, Final Report, 16 April (2010)
http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/pdf/bipro_study20100416.pdf (accessed on 3rd Jan., 2011)
- 21) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Nuclear Waste Disposal in Germany — Investigation and Evaluation of Regions with Potentially Suitable Host Rock Formations for a Geologic Nuclear Repository, Hannover/Berlin, April (2007)
http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Endlagerung/Downloads/WasteDisposal_HostRockFormations_en.pdf?__

- blob=publicationFile&v=2, (accessed on 3rd Aug., 2011) (accessed on 15th Oct., 2010)
- 22) Naturvardsverket (Sweden/Norway) : A Safe Mercury Repository A Translation of the Official Report SOU 2001 : 58 (2003)
<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8105-5.pdf> (accessed on 15th Oct., 2009)
- 23) Regeringskansliet Government Offices of Sweden Press Releases : Government Bans All Use of Mercury in Sweden, 15 January (2009)
<http://www.sweden.gov.se/sb/d/11459/a/118550>
- 24) Det Norske Veritas AS, Kystverket Norwegian Coastal Administration — Salvage of U-864 — Supplementary Studies — Disposal, Report No. 23916-6, Revision No. 01 (2008)
http://www.kystverket.no/arch/_img/9818145.pdf (accessed on 3rd Dec., 2010)
- 25) D. R. Lide : CRC Hand Book of Chemistry and Physics, 75th Edition CRC Press Inc. (1994)

Current Status for Management of Mercury and Waste Containing Mercury

Masaki Takaoka*, Naomichi Fukuda* and Naoko Yoshimoto*

* Department of Environmental Engineering, Graduate School
 of Engineering, Kyoto University

* Correspondence should be addressed to Masaki Takaoka :
 Department of Environmental Engineering, Graduate School
 of Engineering, Kyoto University
 (Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540 Japan)

Abstract

This paper begins by introducing the current status for discharge, disposal and storage of wastes that contain mercury in the countries of Japan, EU and USA. In Japan, the amounts for both landfilled and recovered mercury are estimated using an air emission inventory and material flow of mercury. Results show the amount of landfilled mercury to be much lower than that of recovered mercury. In the near future, the export of recovered mercury to other countries is likely to become prohibited. In such a case, surplus mercury and wastes that contain mercury will require the implementation of measures for final disposal or permanent, long-term storage, which corresponds to the mercury content in the waste. In this study, basic experiments have been conducted to determine the threshold for long-term storage from the viewpoint of mercury release into underground water. The results suggest that the threshold for wastes containing mercury specified in the Basel Convention and Sweden is reasonable at a rate of 0.1%. It will now become important to look into enhancing the scientific knowledge surrounding the long-term stability necessary for appropriate disposal and storage of mercury and the mercury that is contained in wastes.

Keywords : mercury containing waste, surplus mercury, long-term storage, appropriate disposal, stabilization