

焼却残渣に含有する水銀のモニタリング調査

【水環境室】

盛山 哲郎、森 明寛、奥田 知佳、政井 咲更美*1、成岡 朋弘*2

要旨

鳥取県中部地域では、令和4年4月から水銀汚染防止のため、蛍光管と電池の有害ごみとしての分別回収が開始された。そこで、蛍光管と電池の回収の効果を検証するため、一般廃棄物焼却施設の焼却処理工程から発生した水銀総排出量のモニタリング結果を令和2年度から令和6年度まで解析した。その結果、蛍光管・電池の回収による水銀総排出量中の水銀回収率は6~8%程度であると試算され、蛍光管・電池の回収の効果が示唆された。一方で、年間水銀総排出量に見られる変動は、単に蛍光管・電池の回収による効果のみとは考えられず、その他の要因も考えられたが、現段階ではその変動の要因を特定することはできなかった。今後もモニタリングを継続し、長期的な視点で動向を捉える必要がある。

1 はじめに

地球規模での水銀汚染防止を目指す「水銀に関する水俣条約」が平成25年10月に採択され、日本は平成28年2月に締結した。その後、平成29年8月に同条約が発効し、世界的に水銀対策に取り組むこととなった¹⁾。水俣条約の発効を受けて、日本では大気汚染防止法により水銀の大気への排出規制が始まり、一般廃棄物焼却施設等に排ガス中の水銀濃度の排出基準が設けられ、排出基準の遵守が義務付けられた²⁾。一般廃棄物焼却施設から排出される排ガス中の水銀の主な発生源は、同焼却施設に搬入される可燃ごみ及び水銀使用製品廃棄物であると推定されている³⁾。そのため、一般廃棄物焼却施設の排ガスからの水銀の大気排出を抑制するための有効な対策としては、次の2点が提言されている³⁾。まず入口対策としては、焼却炉に投入される廃棄物中の水銀量の削減があり、水銀使用製品廃棄物の分別の徹底が一つの有効な手段となる。次に出口対策としては、排ガス中水銀の除去技術の活用があり、バグフィルタにおける活性炭噴霧と低温化により水銀除去が期待できると言われている。

日本国内において、現在、身近にある主な水銀使用製品として蛍光管がある⁴⁾。電池も以前は水銀使用製品であったが、乾電池については1990年代前半に完全に無水銀化され、ボタン電池についても2020年(令和2年)をもって完全に無水銀化された⁵⁾。しかし、現在でも依然として、乾電池の処理にあたって水銀が回収されることがあるとの報告がある⁶⁾。

鳥取県中部に位置する倉吉市には、一般廃棄物焼却施設である「ほうきりサイクルセンター」がある。ほうきりサイクルセンターは、鳥取中部ふるさと広域連合が運営及び管理しており、県中部地域5市町の一般廃棄物が焼却されている。当該地域では、蛍光管と電池は令和4年3月まで不燃ごみとして区分されていたが、令和4

年4月からは水銀汚染防止のため有害ごみとして区分されるようになった。蛍光管と電池が不燃ごみとして区分されていた当時、これらは各家庭から分別回収された後、ほうきりサイクルセンターに搬入され、図1に示すフローのとおり破砕機で破砕され、不燃物と鉄・アルミニウム及び粉塵に分けられていた。この粉塵は、蛍光管と電池が破砕機で破砕された際に発生した粉塵を集塵機で集めたものであり、この粉塵が他の可燃残渣と一緒に焼却炉に投入されて焼却されていた。蛍光管と電池が有害ごみとして区分されるようになってからは、これらは各家庭から分別回収された後、ほうきりサイクルセンターに搬入され、破砕機で破砕されることなく一定期間保管され、その後は県外の事業場に搬出され、リサイクル処理されるようになった(図1)。なお、この分別回収が開始された前年の令和3年6月から令和4年3月までは、市役所・町役場に回収ボックスを設置して、蛍光管と電池の試験回収が既に開始されていた。

蛍光管と電池のこれらの回収により、ほうきりサイクルセンターにおいて焼却炉に投入される水銀量の減少に伴い、焼却残渣中の水銀量の減少が期待され、焼却施設の排ガスから排出される水銀の大気への排出抑制にもつながる事が想定された。

そこで、本研究では、県民への意識啓発など水銀の排出抑制対策の一助とするため、焼却残渣中の水銀量の変化をモニタリングし、蛍光管・電池の回収の効果を検証することを目的とした。

2 方法

以下の3つの方法により、蛍光管・電池の回収の効果を令和2年度から令和6年度にかけて検証した。

- ①焼却残渣中の水銀含有量*調査
- ②焼却処理工程から発生する水銀総排出量の算出
- ③蛍光管・電池の回収による水銀回収量の試算

*1 現 鳥取県生活環境部くらしの安心推進課

*2 現 鳥取県生活環境部循環型社会推進課

※水銀含有量：ある試料（又は物質）中に含まれる単位重量当たりの水銀量の割合（濃度）のことを意味する。

2.1 調査方法

2.1.1 焼却残渣中の水銀含有量調査

1) 焼却残渣の採取

ほうきりサイクルセンターにおいて、一般廃棄物を焼却すると、図2に示すとおり、「焼却灰」、「落じん灰」、「空気予熱器灰」、「減温塔灰」、「集じん灰」、「固化灰」の6種類の焼却残渣が発生する。「焼却灰」は焼却炉の灰押出機から排出される灰であり、「落じん灰」はストーカ式焼却炉底面の燃焼火格子の下に落下する灰であり、「空気予熱器灰」は燃焼用空気予熱器において発生する飛灰であり、「減温塔灰」は排ガス減温塔において発生する飛灰であり、「集じん灰」はろ過式集じん器（バグフィルタ）で集められた飛灰であり、「固化灰」は「空気予熱器灰」、「減温塔灰」、「集じん灰」をダスト固化装置に集合させて重金属溶出防止のためキレート剤を用いて固化処理を行った灰である。上記6種類の焼却残渣を四半期毎（6月、9月、12月、3月）に採取した。

2) 採取した焼却残渣のふるい分け

採取した6種類の焼却残渣のうち、固化灰のみを金槌で粉々に粉砕し、粉砕後の固化灰、焼却灰、落じん灰を目開き5mmのステンレス製ふるいでふるい分け、ふるい下の試料を試験に供した。集じん灰、空気予熱器灰、減温塔灰は目視において粒径が5mm以下になっているため、有姿のまま試験に供した。

3) 焼却残渣中の水銀含有量分析の方法

焼却残渣中の水銀含有量分析は、環境省が定める水銀廃棄物ガイドライン⁷⁾では、底質調査方法⁸⁾（以下「公定法」という。）が採用されており、これを用いて、試料の前処理及び分析を行った。試料10gを還元フラスコに入れ、硝酸(1+1)50mLを加えて振り混ぜ、湿式分解装置（ジューエルサイエンス社製：DigiPREP HP）で1時間加熱した。この溶液を室温まで冷却した後、過マンガン酸カリウム溶液(30g/L)20mLを加えて振り混ぜ、湿式分解装置で1時間加熱した。この溶液の液温を約40℃にして、尿素溶液(10g/L)10mLを加えて振り混ぜながら、塩化ヒドロキシルアンモニウム溶液(200g/L)を滴加し、過剰の過マンガン酸カリウムを分解した。この溶液をガラス繊維ろ紙(GF/B)でろ過し、ろ液を250mLの全量フラスコに入れ、このフラスコの標線まで超純水を加えて、これを試験溶液とした。この試験溶液を用いて還元気化分析装置（日本インスツルメンツ社製：マーキュリー/RA-3321A又はRA-7000A）により定量分析を行い、6種類の焼却残渣について、試料中の水銀含有量(mg/kg)を算出した。

2.1.2 焼却処理工程から発生する水銀総排出量の算出

図2に示すとおり、焼却処理工程では中和処理のため排ガスに消石灰が投入された後、ろ過式集じん器で集じん灰が捕集される。消石灰の投入量は毎月一定ではなく変動しており、その影響により、集じん灰中の水銀含有量が変動している可能性が高いと考えられる。そのため、蛍光管・電池の回収の効果の検証にあたり、水銀含有量による評価方法以外に、焼却施設全体の焼却処理工程から発生する水銀総排出量に着目して、水銀総排出量による評価方法も検討することとした。

焼却処理工程から排出される水銀の排出源は、焼却灰、落じん灰、固化灰、排ガスの4つである。そのため、焼却処理工程から発生する水銀総排出量は、前述の4つの排出源に含まれる水銀量を合計して式(1)として取り扱った。

$$\begin{aligned} \text{(水銀総排出量)} = & \{ (\text{焼却灰搬出量}) \times (\text{焼却灰水銀含有量}) \} \\ & + \{ (\text{落じん灰搬出量}) \times (\text{落じん灰水銀含有量}) \} \\ & + \{ (\text{固化灰搬出量}) \times (\text{固化灰水銀含有量}) \} \\ & + \{ (\text{排ガス排出量}) \times (\text{排ガス水銀濃度}) \} \\ & \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

式(1)における焼却灰、落じん灰、固化灰の水銀含有量は当所で分析したデータを用い、焼却灰、落じん灰、固化灰の搬出量及び排ガス排出量と排ガス水銀濃度は、鳥取中部ふるさと広域連合から提供されたデータを用いた。

式(1)では月単位のデータを用いて各月毎の水銀総排出量を算出し、12ヶ月分の水銀総排出量を合計して年間水銀総排出量も算出した。この際、焼却灰、落じん灰、固化灰の水銀含有量の測定データがない月（4月、5月、7月、8月、10月、11月、1月、2月）は、各四半期中最終月の測定データ（6月、9月、12月、3月）を代用した（表1）。排ガス水銀濃度については2ヶ月に1回測定されているため、当該水銀濃度の測定データがない月は、直前の月のデータを代用した（表1）。

落じん灰は定期的な搬出が行われていないため、年間の落じん灰搬出量を年間の焼却灰搬出量で除して搬出比率を求め、それを各月の焼却灰搬出量に乗じて各月の落じん灰搬出量を推計して、その値を式(1)に代入した。

また、水銀総排出量を当該期間中の焼却量で除して、焼却ごみ中の水銀含有量(g/ton)として取り扱った。

2.1.3 蛍光管・電池の回収による水銀回収量の試算

以下に記す式(2)、式(3)を用いて、令和4年度から令和6年度の蛍光管・電池の年間回収量の実績に基づいて、蛍光管・電池の年間水銀回収量を試算し、蛍光管・電池の回収の効果を検証した。

$$\begin{aligned} \text{(蛍光管の年間水銀回収量)} = \\ \text{(蛍光管水銀含有量)} \times \text{(蛍光管の年間回収量)} \\ \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(電池の年間水銀回収量)} = \\ \text{(電池水銀含有量)} \times \text{(電池の年間回収量)} \\ \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

式(2)、式(3)における蛍光管及び電池の水銀含有量は、文献9)に掲載されているデータを用いて表2に示すとおり推計した。この水銀含有量は、令和5年度の一年間に全国で廃棄処分された蛍光管及び乾電池中の年間水銀回収量をそれぞれの年間回収量で除した値である。

次に蛍光管・電池が仮に回収されなかった場合に想定される水銀総排出量を求めて、この量に対する水銀回収量の割合(%)を算出し、この値を「水銀回収率」(式(4))として定義した。

$$\begin{aligned} \text{(水銀回収率)} = A / (A+B) \times 100 \dots\dots\dots (4) \\ A : \text{蛍光管と電池のそれぞれの年間水銀回収量を} \\ \text{合計した「蛍光管・電池の年間水銀回収量」} \\ B : \text{年間水銀総排出量} \end{aligned}$$

3 結果及び考察

3.1 焼却残渣中の水銀含有量調査

図3に四半期毎の焼却残渣中の水銀含有量の変化を示す。集じん灰及び固化灰中の水銀含有量は概ね5~20mg/kgの間で推移しており、それらの水銀含有量の平均(令和2~6年度)は、集じん灰は12.5mg/kg、固化灰は10.1mg/kgであった。残り4つの焼却残渣中の水銀含有量の平均(令和2~6年度)は、減温塔灰は0.302mg/kg、空気予熱器灰は0.117mg/kg、焼却灰は0.003mg/kg、落塵灰は0.027mg/kgであり、残り4つの焼却残渣には水銀はほとんど含まれていない事がわかった。

蛍光管・電池の試験回収開始及び分別回収開始の前後において、集じん灰及び固化灰中の水銀含有量の変化は明瞭ではなく、蛍光管・電池の回収の効果を判断することができなかった。

3.2 焼却処理工程から発生する水銀総排出量の算出

図4に月毎の水銀総排出量及び焼却ごみ中の水銀含有量の変化を示す。水銀総排出量と焼却ごみ中の水銀含有量は同じような挙動を示した。水銀総排出量は約9割程度が固化灰由来の水銀排出量であり、残り1割程度が排ガス由来の水銀排出量であった。焼却灰及び落じん灰由来の水銀排出量は、水銀総排出量に対してどちらも0.1%未満であった。

水銀総排出量は、令和2年度から令和4年度にかけて

減少傾向が見られ、令和4年度から令和5年度にかけて増加傾向が見られ、令和5年度から令和6年度にかけて減少傾向が見られた。

水銀総排出量による評価方法は、焼却処理工程のステップ毎に水銀量を把握することで、焼却施設内での水銀の物質フローを評価することができる。一方で、本法での評価は、水銀総排出量を月単位のデータとして集計しているためデータが離散的であり、日々排出されている水銀総排出量を連続的に捉えていないという点に留意が必要である。

3.3 蛍光管・電池の回収による水銀回収量の試算

表3、図5に蛍光管・電池の年間水銀回収量と年間水銀総排出量及び焼却ごみ中の水銀含有量の変化を示す。年間水銀総排出量と焼却ごみ中の水銀含有量は同じような挙動を示した。令和4年度以降の蛍光管・電池の回収による水銀回収率は6~8%程度であると試算され、蛍光管・電池の回収が水銀の回収に寄与していることが示唆された。年間水銀総排出量は令和2年度から令和4年度にかけて減少傾向が見られ、令和4年度から令和5年度にかけて増加傾向が見られ、令和5年度から令和6年度にかけて減少傾向が見られた。

蛍光管と電池の回収については、令和3年度から試験回収が開始され、令和4年度から分別回収が開始された。令和3年度の試験回収による蛍光管・電池の年間回収量の実績の情報がないため、この年度の蛍光管・電池の年間水銀回収量を試算することができなかったため、令和2年度から令和3年度にかけての年間水銀総排出量の減少傾向と試験回収との関係については現段階では特定することができなかった。令和3年度から令和4年度にかけての年間水銀総排出量の減少量は6,494gであり、令和4年度の蛍光管・電池の年間水銀回収量は674gであるため、この水銀回収量は水銀総排出量の減少量の約1割程度しかなかった。また、令和5年度から令和6年度にかけての年間水銀総排出量の減少量は3,443gであり、令和6年度の蛍光管・電池の年間水銀回収量は751gであるため、この水銀回収量は水銀総排出量の減少量の約2割程度しかなかった。このため、令和3年度から令和4年度までの期間と令和5年度から令和6年度までの期間において、年間水銀総排出量に見られる減少傾向は、単に蛍光管・電池の回収による効果のみとは考えられず、その他の要因も考えられ、蛍光管以外の水銀使用製品廃棄物(例えば水銀体温計など)の回収や可燃ごみのごみ質などの影響の可能性も考えられた。令和4年度から令和5年度にかけての年間水銀総排出量の増加傾向については、可燃ごみのごみ質などの影響の可能性が考えられるが、要因を特定することはできなかった。

4 まとめ

1) 結果の概要

県中部地域における一般廃棄物由来の焼却残渣中水銀含有量と水銀総排出量及び蛍光管・電池の水銀回収量の推移を明らかにすることができた。水銀含有量による評価方法では、蛍光管・電池の回収の効果を判断することができなかった。水銀総排出量による評価方法では、蛍光管・電池の回収による水銀総排出量中の水銀回収率を定義することで蛍光管・電池の回収の効果を可視化することができた。令和4年度以降の水銀回収率は6~8%程度であると試算され、蛍光管・電池の回収の効果が示唆された。一方で、令和2年度から令和6年度にかけての年間水銀総排出量に見られる変動は、単に蛍光管・電池の回収による効果のみとは考えられず、その他の要因も考えられたが、現段階ではその変動の要因を特定することはできなかった。引き続き、水銀総排出量及び蛍光管・電池の水銀回収量をモニタリングすることで長期的な視点で動向を捉える必要がある。また水銀総排出量の変動の要因を特定するためにも今後、焼却ごみのごみ質や市町単位で行われているプラスチックごみ等の分別回収の情報を把握する予定であり、これらを踏まえた上で蛍光管・電池の回収の効果を検証していく予定である。

2) 住民への意識啓発について

蛍光管・電池の回収の効果を可視化した水銀回収率のデータは、住民の分別回収に対する意識の向上につながる啓発の材料とすることができる。今後も引き続き、住民への意識啓発につながるよう、調査データを蓄積して、蛍光管・電池の回収の効果を検証していきたい。

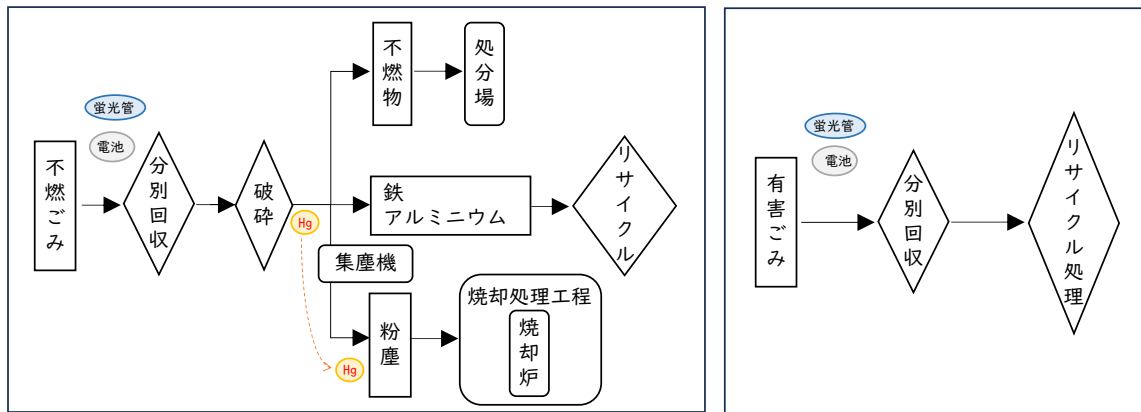
蛍光管・電池の分別回収制度の導入自体は、一定の啓発効果はあったものと考えられ、住民の分別回収に対する意識の向上につながっていると推測される。今後も引き続き、住民の分別回収への協力に期待したい。

5 謝辞

焼却残渣及び関連データの提供に御協力いただいた鳥取中部ふるさと広域連合の皆様に変更して御礼申し上げます。

6 参考文献

- 1) 環境省廃棄物・リサイクル対策部:水銀廃棄物の適正処理について、新たな対応が必要になります, (2017)
- 2) 環境省水・大気環境局:水銀大気排出規制への準備が必要です!, (2016)
- 3) 高岡昌輝:都市ごみ焼却処理施設より発生する水銀の排出抑制対策, JEFMA, No. 63, 16- 18, (2015).
- 4) 環境省廃棄物・リサイクル対策部:家庭から排出される水銀使用廃製品の分別回収ガイドライン, (2015)
- 5) 一般社団法人電池工業会:ボタン電池の適正分別・排出の確保のための表示等情報提供に関するガイドライン (第3版), (2023)
- 6) 野村興産:2025年リサイクル事業報告書, (2025)
- 7) 環境省環境再生・資源循環局:水銀廃棄物ガイドライン第4版, (2025).
- 8) 環境省水・大気環境局:底質調査方法, 226-229, (2012).
- 9) 全国都市清掃会議:令和5年度使用済み乾電池等の広域回収・処理計画実施状況報告, (2024)



令和4年3月以前の処理フロー
(蛍光管と電池が不燃ごみとして区分)

令和4年4月以降の処理フロー
(蛍光管と電池が有害ごみとして区分)

図1 県中部地域における蛍光管と電池の処理フロー

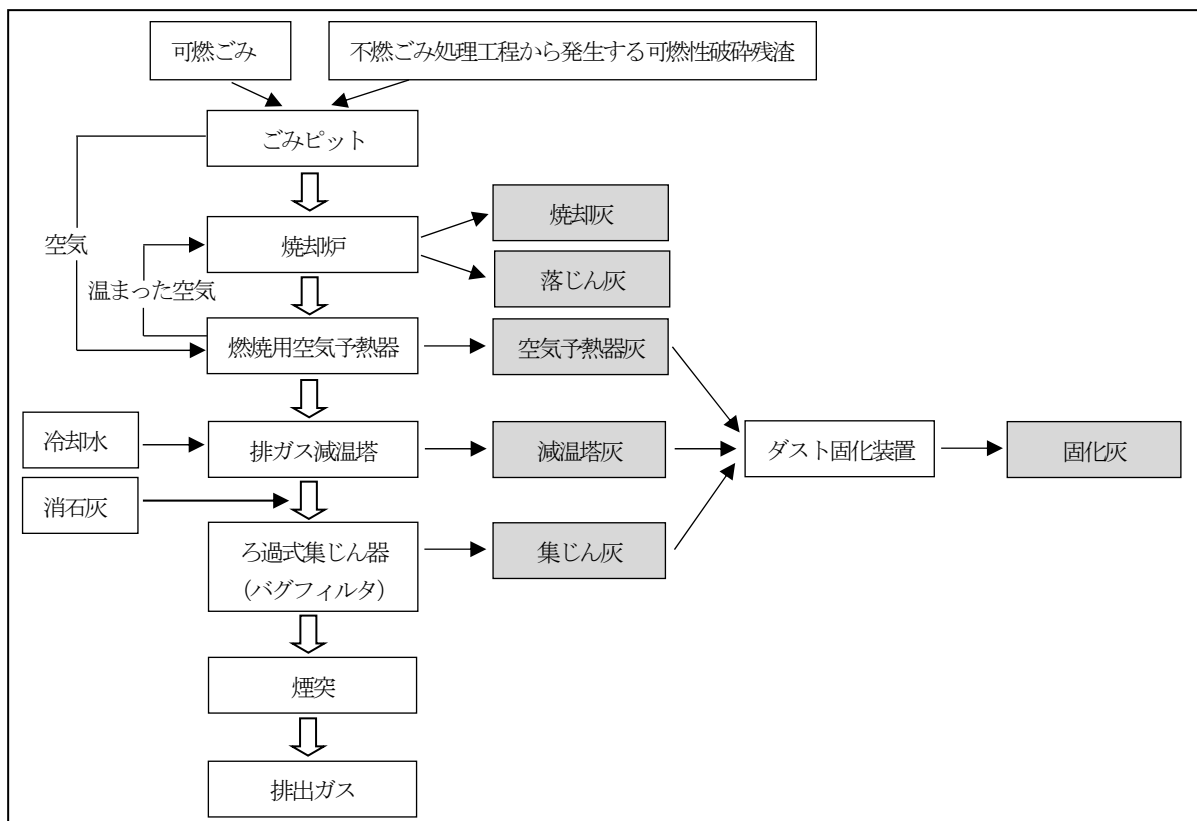


図2 ほうきリサイクルセンターにおける焼却処理工程

表1 焼却処理工程から発生する水銀総排出量の算出において使用したデータの測定月と採用月について^{※1}

使用したデータの月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
焼却残渣中の水銀含有量の測定月	—	—	○	—	—	○	—	—	○	—	—	○
焼却残渣中の水銀含有量の採用月	6	6	6	9	9	9	12	12	12	3	3	3
排ガス水銀濃度の測定月	○	—	○ ^{※2}	— ^{※2}	○	—	○	—	○	—	○	—
排ガス水銀濃度の採用月	4	4	6 ^{※3}	6 ^{※3}	8	8	10	10	12	12	2	2

※1 「○」は測定が実施された月、「—」は測定が未実施の月を表す。

※2 令和2年度の排ガス水銀濃度の測定月に関しては、6月は「—」であり、7月は「○」である。

※3 令和2年度の6月、7月の排ガス水銀濃度の使用データについては、7月の測定データを採用した。

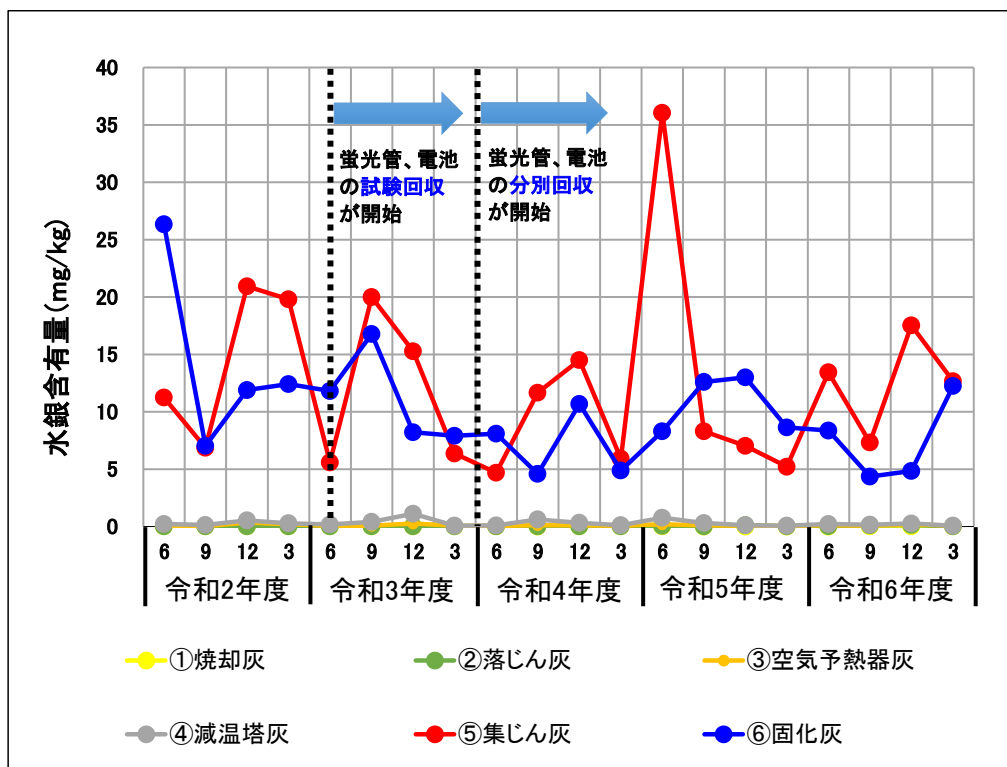


図3 四半期毎の焼却残渣中の水銀含有量の変化

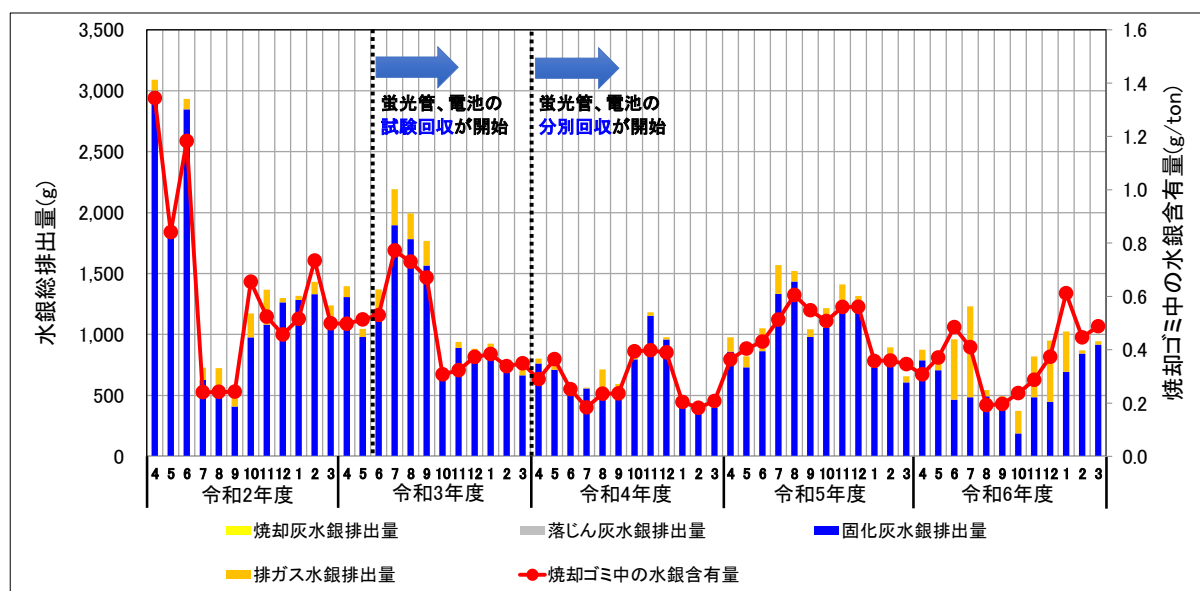


図4 月毎の水銀総排出量及び焼却ゴミ中の水銀含有量の変化

表2 令和5年度の一年間に全国で廃棄処分された蛍光管及び乾電池に関する情報

	蛍光管	乾電池
年間水銀回収量：X (kg)	48	155
年間回収量：Y (kg)	1,544,000	6,113,000
水銀含有量(X/Y) (ppm)	31.1	25.4

※文献9)に掲載されている年間水銀回収量 (X) と年間回収量(Y) のデータを用いて、水銀含有量(X/Y)を推計した。

表3 蛍光管・電池の年間水銀回収量と年間水銀総排出量及び焼却ごみ中の水銀含有量

年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
蛍光管の年間回収量 (kg)	—	—	5,540	6,100	7,310
蛍光管の年間水銀回収量 (g)	—	—	172	190	227
電池の年間回収量 (kg)	—	—	19,800	29,340	20,660
電池の年間水銀回収量 (g)	—	—	502	744	524
蛍光管・電池の年間水銀回収量：A (g)	—	—	674	934	751
年間水銀総排出量：B (g)	17,738	14,712	8,218	13,303	9,860
水銀回収率(A/(A+B) × 100) (%)	—	—	7.6	6.6	7.1
焼却量：C (ton)	29,543	29,974	29,634	28,600	27,819
焼却ごみ中の水銀含有量(B/C)：D (g/ton)	0.60	0.49	0.28	0.47	0.35

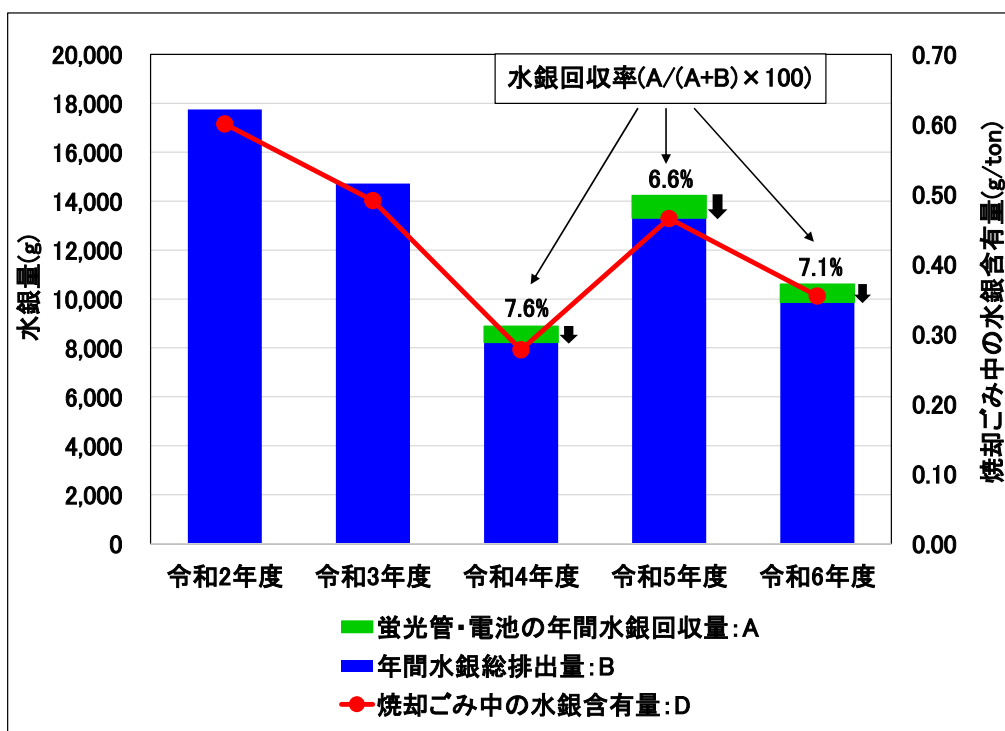


図5 蛍光管・電池の年間水銀回収量と年間水銀総排出量及び焼却ごみ中の水銀含有量の変化

Monitoring of Mercury in Municipal Solid Waste Incineration Residues

Tetsuro SEIYAMA, Akihiro MORI, Chika OKUDA, Sasami MASAI, Tomohiro NARUOKA

Abstract

In April 2022, the separate collection of fluorescent tubes and batteries as hazardous waste was introduced in the central region of Tottori Prefecture to prevent mercury pollution. To evaluate the effectiveness of this collection system, monitoring data on total mercury emissions generated by the municipal solid waste incineration facility were analyzed for the period from fiscal year 2020 to fiscal year 2024. The results indicate that the annual amount of mercury recovered from fluorescent tubes and batteries accounted for approximately 6%–8% of the sum of this recovered mercury and the total annual mercury emissions, suggesting a measurable contribution of the collection system to mercury reduction. However, the year-to-year fluctuations observed in total annual mercury emissions could not be solely explained by collecting fluorescent tubes and batteries. Other factors are likely to be involved, although their specific contributions could not be identified at this stage. Continuous monitoring of total mercury emissions is therefore required to evaluate long-term trends and further clarify the factors influencing variations in total mercury emissions.