

水銀大気排出実態調査の結果

I. 排出実態調査の概要

1. 調査の目的

個別施設についての代表値を把握するのではなく、施設区分ごとの水銀の排出状況を把握することを目的として実施した。

2. 調査の対象

水銀に関する水俣条約附属書Dに掲げる施設又は附属書Dに掲げる工程を行う施設に該当する可能性のある施設について広く調査対象とした。

表 I -2-1 水銀排出実態調査の対象施設

調査対象施設（注1）	備考
石炭火力発電所及び産業用石炭燃焼ボイラー	安定稼働時に石炭を燃料（混焼を含む）とするもの
非鉄金属（鉛、亜鉛、銅及び金）製造に用いられる製錬及びばい焼の工程	鉛、亜鉛、銅及び金の製造の用に供する炉（合金の製造、鑄造等のための施設を除く。）
廃棄物焼却炉（注2）	大気汚染防止法施行令別表第1の13の項に該当する施設、ダイオキシン類対策特別措置法施行令別表第1の第5項に該当する施設、廃棄物の処理及び清掃に関する法律に基づく廃棄物を焼却する施設、下水汚泥の焼却・熔融施設等
セメントクリンカーの製造設備	

（注1）いずれも現在休止している施設又は平成29年4月1日以降休止予定の施設を除く

（注2）水銀に関する水俣条約附属書Dでは、「廃棄物焼却炉」、廃棄物の処理及び清掃に関する法律では、「焼却炉」及び「ばい焼施設」とされているが、この資料では、大気汚染防止法の施設の名称である「廃棄物焼却炉」に名称を統一する。

3. 調査方法

3.1 調査対象期間

平成27年5月～12月（環境省による排出実態調査の実施期間、及び、事業者に対して、水銀大気排出実態把握のための自主測定の実施及び報告への協力を要請した期間）

なお、事業者に対しては、平成 18 年度以降の自主測定結果があれば、上記と併せて提供して頂くよう要請した。

3.2 調査項目

排出実態調査においては、次の項目について調査を行った。

表 I -3-1 調査項目

		調査項目（下線は調査必須項目）
施設情報	事業所概要	<u>製造等の工程・排ガス処理フロー図</u> 等
	調査対象施設の概要	<u>名称・型式、設置年月日、燃焼方式・炉形式、施設規模、稼働状況、原燃料等の種類・使用量 (t/day)、定常運転時の生成物種類・生成量 (kg/day)・処理法、(処理する廃棄物の種類、洗炭の有無、石炭種類・形状・産地)</u>
	調査対象施設の排ガス処理施設の概要	<u>名称・型式・種類、処理能力(排ガス量 (N m³/h)、排ガス温度 (°C))、定常運転時の使用薬剤種類・使用量 (t/day)、定常運転時の生成物種類・生成量 (kg/day)・処理法、当該ばい煙処理施設で排ガスを処理している全ての上流施設</u>
水銀測定結果等	排ガス	<u>全水銀濃度^(注2) [ガス状/粒子状] (μg/N m³)、排ガス温度 (°C)、排ガス量 [乾き/湿り] (N m³/h)、酸素濃度 (%)、水分量 (%)、ばいじん・HCl・NOx 濃度 (Cs/C)、SOx 濃度、CO 濃度、未燃分 (集じん灰) (mg/kg)、試料採取・分析方法</u>
	排出物 ^(注1)	<u>通常及び測定当日の測定施設から排出する排出物の種類、量及び排出場所並びに測定当日の排出物中水銀含有量 (mg/kg、試料採取・分析方法を含む。)</u>
	原料・燃料等 ^(注1)	<u>通常及び測定当日の測定施設で扱っている原燃料の種類及び量並びに測定当日の排出物中水銀含有量 (mg/kg、試料採取・分析方法を含む。)</u>
その他		最新のばい煙濃度の測定結果

(注1) 環境省が実施する調査においては、排出実態をより正確に把握するため、原燃料等及び排出物中の水銀含有量についても補完的に調査した。また、一部事業者からも自主調査結果の提供があった。

(注2) 4.1に記載する「環境省法」による測定

4. 測定方法及び測定回数

4.1 測定方法

今回の実態調査では、排ガス中の水銀濃度（ガス状水銀及び粒子状水銀）並びに原燃料等及び排出物中の水銀含有量を測定対象とし、統一の測定方法（水銀大気排出実態調査のための水銀測定方法（以下、「環境省法」という。）で調査を実施した。水銀濃度の測定結果は、ガス状水銀と粒子状水銀とそれぞれの測定結果を合算したものとなる。

この測定方法は、平成 26 年度に専門家による検討を経て作成されたものであり、ガス状水銀の測定について、JIS K 0222(1)湿式吸収-還元気化原子吸光分析法を基本としつつ、サンプリング量（流速は未変更）を 5 倍に増量させる等の改良をした他、粒子状水銀の測定方法及び原燃料や排出物中の水銀含有量の測定方法も定めたものである。

一方、事業者から提供された自主調査結果については、「環境省法」が用いられていないものも含まれていた。

4.2 測定回数

環境省が実施する調査では、排ガス中の水銀濃度の変動を考慮し、1 施設あたり 5 回サンプリングを基本とし、一部の施設については、連続測定を実施した。

一方、事業者から提供された自主調査結果については、1 施設あたり 1 回サンプリングのものが多かった。

5. データの取り扱い方針

排ガス中水銀濃度の解析にあたっては、「環境省法」で、ガス状水銀と粒子状水銀の両方を測定したデータを、標準酸素補正方式により酸素換算した値を解析の対象とした（一部、酸素吹き込み等を行う施設のデータでは、酸素換算を適用しないものもある。）。また、平成 18 年度～平成 26 年度の測定データであっても、ガス状水銀が、JIS K 0222(1)に準じて流速は未変更のまま約 5 倍のガス量以上サンプリングされており、粒子状水銀も同時に測定されたデータについては、「環境省法」と同等とみなした。

それ以外の測定方法を用いたデータ（ガス状水銀のみのデータや、標準酸素補正方式による酸素換算値でないデータも含まれる。）については、別途統計処理を行った。

II. 排出実態調査の結果

1. 石炭火力発電所及び産業用石炭ボイラー

(1) 調査対象施設の概要

石炭火力発電所及び産業用石炭ボイラーに該当する 150 施設（環境省調査：10 施設、自主調査：140 施設）の調査結果が得られた。

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表Ⅱ-1-1 のとおりであった。

表Ⅱ-1-1 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた施設数	排ガス中水銀濃度のデータ数
環境省法	76 施設	134 データ
上記測定方法以外	87 施設	565 データ

(注) 環境省法と、それ以外の測定方法の両方で行っている施設があるため、全協力施設数と測定方法の分類による合計数は一致しない。

表Ⅱ-1-2 燃焼方式・炉形式

種類	回答施設数
微粉炭焚	106
流動床	38
ストーカ焚	5
無記入	1
合計	150

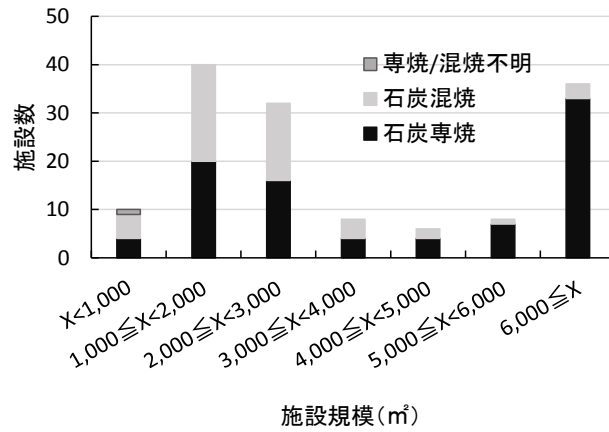


図 II-1-1 伝熱面積による規模分布

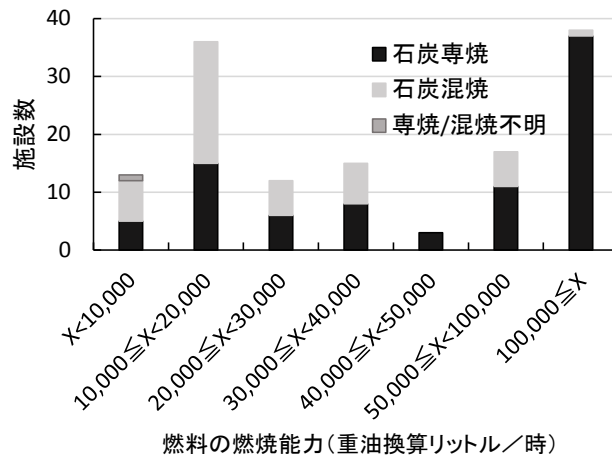


図 II-1-2 燃料の燃焼能力による規模分布

(注) 伝熱面積又は燃料の燃焼能力のいずれか一方しか回答がなかった事業者もあったため、図 II-1-1 と図 II-1-2 の合計は一致しない。

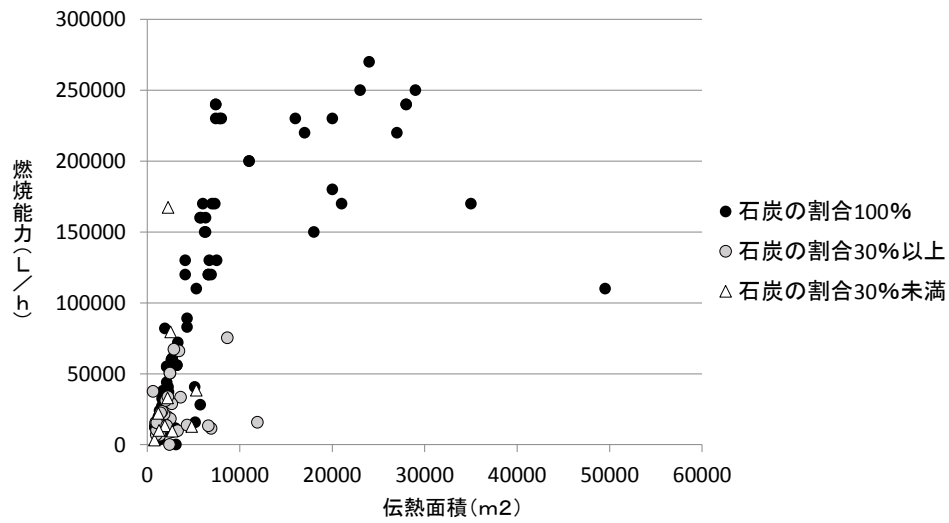


図 II-1-3 燃焼能力と伝熱面積の関係

(2) 原燃料中の水銀含有量

石炭火力発電所及び産業用石炭ボイラーで使用されている石炭の産地、種類・形状、洗炭の実施状況については、次の回答が得られた。

表 II-1-3 石炭の産地

石炭の産地	日本	ロシア
	インドネシア	カナダ
	オーストラリア	

表 II-1-4 石炭の種類

石炭の種類	回答数
無煙炭	7
瀝青炭	108
亜瀝青炭	10
その他 ^(注)	9
無記入	16
合計	150

(注)瀝青炭&亜瀝青炭 4、一般炭 2、褐炭 1、不明 2、

表Ⅱ-1-5 石炭の形状

石炭の形状 <small>(注1)</small>	回答数
微粉炭 (3mm 以下)	23
粉炭 (3-13mm)	8
小塊炭 (13-25mm)	1
中塊炭 (25-37mm)	1
塊炭 (38-50mm)	11
その他 <small>(注2)</small>	13
無記入	93
合計	150

(注1)複数の種類を利用している場合はその中央値で集計した。5mm 以下と記入のあったものは微粉炭として集計した。

(注2)50mm 以下

表Ⅱ-1-6 洗炭の実施状況

洗炭の実施状況	回答数
産地で洗炭	28
産地、炭種により事業所もしくは産地で洗炭	37
洗炭しない	15
不明	2
無記入	68
合計	150

石炭とそれ以外の燃料を混焼している施設もあった。具体的な燃料の種類については、表Ⅱ-1-8 の回答が得られた。

表Ⅱ-1-7 石炭以外の燃料との混焼状況

	施設数
石炭専焼ボイラー	94
混焼ボイラー	55
燃料種類を無記入	1
合計	150

(注) 燃料種類・使用量の回答欄に、石炭についてのみ記入されていたものを「石炭専焼ボイラー」、それ以外を「混焼ボイラー」として集計した。

表Ⅱ-1-8 混焼ボイラーで使用されている燃料の種類

混焼ボイラーで、 石炭以外に使用 されている燃料の種類	ガス（メタンガス、改質ガス、水素ガス、高炉ガス）	
	木質チップ、木くず	RPF
	廃タイヤ	廃プラ
	建築廃材	
	廃油、副生油	重油
	オイルコークス	その他

燃料中の水銀含有量については、表Ⅱ-1-9 のデータが得られた。

表Ⅱ-1-9 燃料中の水銀含有量

燃料の種類	水銀含有量 (mg/kg)			
	算術平均 値	最大値	最小値	データ数(うち定量下限 値未満データ数)
石炭	0.038	0.62	0.001	862(7)
木片チップ・木くず	0.049	0.176	0.004	16(2)
廃タイヤ・ゴム	0.009	0.021	0.004	10(5)
廃プラスチック・RPF	0.1	0.32	0.001	20(1)
製紙スラッジ	0.040	0.1	0.01	10(0)
汚泥	0.103	0.19	0.018	3(0)

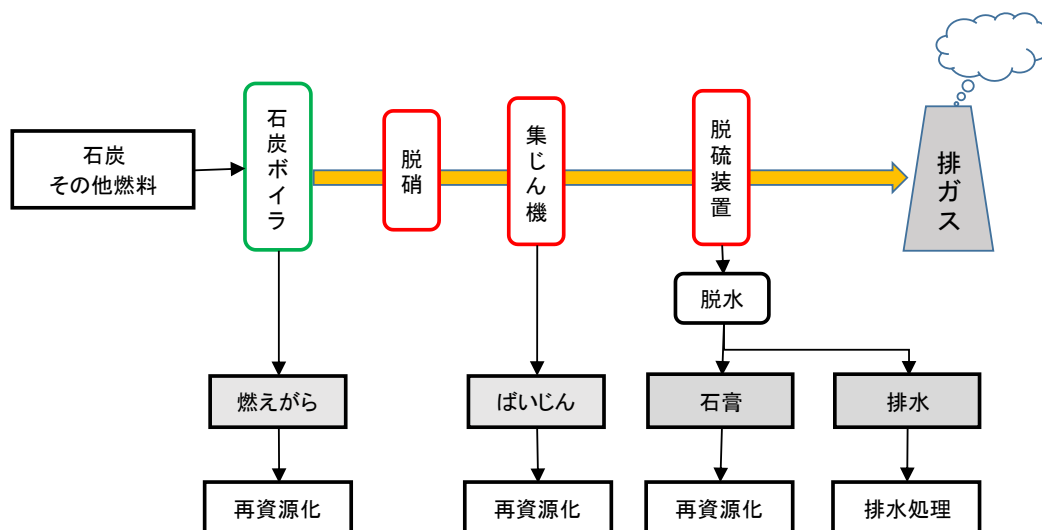
(注) データが定量下限値未満のもので定量下限値が明らかなデータについては、定量下限値の 1/2 の値を代入した。

【参考】電気事業連合会の調査によれば、電力主力炭における石炭中水銀含有量は平均で 0.039 mg/kg (0.0001~0.62 mg/kg (データ数 1224))。

石炭火力発電所及び産業用石炭燃焼ボイラーに関する BAT/BEP ガイダンス (案) によれば、石炭中水銀含有量の各国の算術平均値は、0.03~0.6 mg/kg (中央値は 0.12 mg/kg)。全データの濃度範囲は、<0.01~8.0 mg/kg。

(3) 排ガス中の水銀濃度

石炭火力発電所及び産業用石炭燃焼ボイラーにおける基本的な排ガス処理施設は下図のとおり。



図Ⅱ-1-4 石炭火力発電所及び産業用石炭燃焼ボイラーの排ガス処理設備

水銀大気排出実態調査の協力施設においては、全ての施設に電気集じん機またはバグフィルターが設置されている。また、「集じん機+脱硫+脱硝」の3種を組み合わせている施設が5割以上を占める。

表 II-1-10 排ガス処理設備の概要

排ガス処理設備の組合せ		施設数	(内数) ESP 温度 ^(注)			導入率	
			高温	低温	低低温	(施設数ベース)	
集じん機 のみ	BF	12	-	-	-	8.0%	15.3%
	(CY+)ESP	10	-	-	-	6.7%	
	(CY+)ESP+BF	1	-	-	-	0.7%	
集じん機 +脱硫	(CY+)BF+脱硫	15	-	-	-	10.0%	32.0%
	AC+BF+脱硫	1	-	-	-	0.7%	
	ESP+脱硫	31	2	4	-	20.7%	
	ESP+BF+脱硫	1	-	1	-	0.7%	
集じん機 +脱硝	脱硝+BF	1	-	-	-	0.7%	0.7%
集じん機 +脱硫 +脱硝	(CY+)脱硝+BF+脱硫	12	-	-	-	8.0%	52.0%
	(CY+)脱硝+AC+BF+脱硫	3	-	-	-	2.0%	
	(CY+)脱硝+ESP+脱硫	63	3	27	15	42.0%	
合計		150	5	32	15	-	-

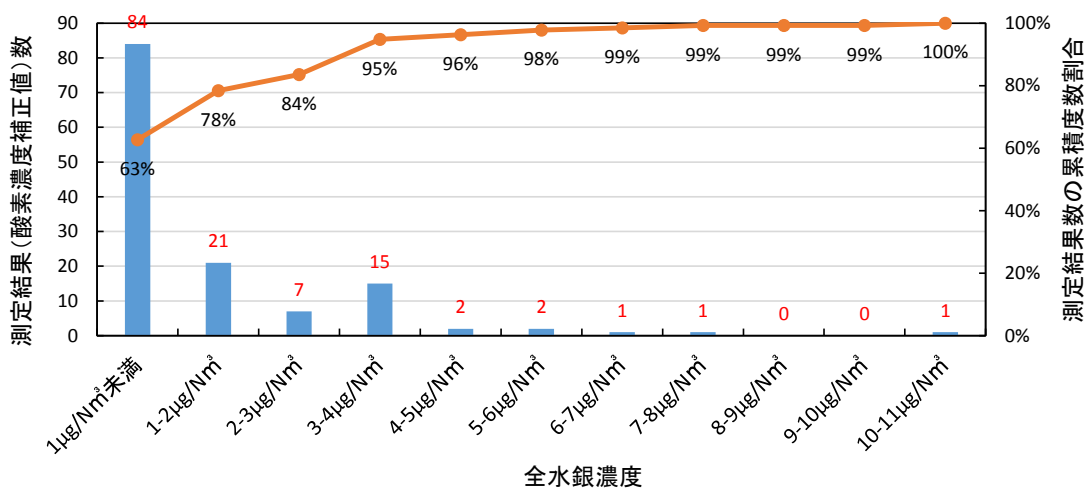
(注 1) ESP 温度は判別できたものののみ。施設数とは一致しない。

BF	: Bag Filter (ろ過式集じん設備)
ESP	: Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)
CY	: Cyclone separator (遠心力集じん設備)
AC	: Activated Carbon (活性炭吹き込み)
脱硫	: 脱硫設備または炉内脱硫
脱硝	: 脱硝設備または炉内脱硝

(注 2) (CY+)ESP は、遠心力集じん設備 (CY) と電気集じん設備 (ESP) の両方を備えた施設と、ESP のみの施設の合計を表す (以下、同じ)。

排ガス中全水銀濃度については、76 施設のガス状水銀及び粒子状水銀 (以下、「全水銀」という。) の 134 データを収集することができた。

全水銀濃度 (標準酸素補正方式 (On : 6%) を用いた酸素換算値) の全体の分布は次図のとおり。1 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約 60% を占めた。また、最高濃度は 10 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。



図Ⅱ-1-5 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム
(石炭火力発電所及び産業用石炭燃焼ボイラー)

① 排ガス処理設備の種類と全水銀濃度の関係

全水銀濃度の算術平均値は $1.1 \sim 1.5 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。また、分布のばらつきの程度を示す標準偏差 (σ) は、 $1.3 \sim 1.7 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であり、排ガス処理設備による顕著な差はなかった。

一方、全水銀濃度の幾何平均値は、 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。また、対数標準偏差 (σ') は、対数値で $0.4 \sim 0.6$ であった。

BAT/BEP ガイダンス (案) では、「集じん機+脱硫設備+脱硝設備」の組み合わせにより排ガス中の水銀が高効率で除去されると記載されているが、我が国の実態としては、「集じん機+脱硫設備」あるいはその他のガス処理方式 (集じん機のみなど) であっても、相当低い濃度に抑えられていることが示唆される。

表 II-1-11 排ガス処理設備の種類ごとの全水銀濃度

排ガス処理設備の種類	施設数		全水銀濃度 (μg/N m ³)						
	データ数		中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)
集じん機+ 脱硫+脱硝	30	54	0.5	10	<0.1	1.1	1.7	0.5	0.5
集じん機+ 脱硫	31	49	0.9	6.3	<0.1	1.4	1.3	0.9	0.4
その他	15	31	1.0	7.5	<0.1	1.5	1.6	0.7	0.6
合計	76	134	0.7	10	<0.1	1.3	1.6	0.7	0.5

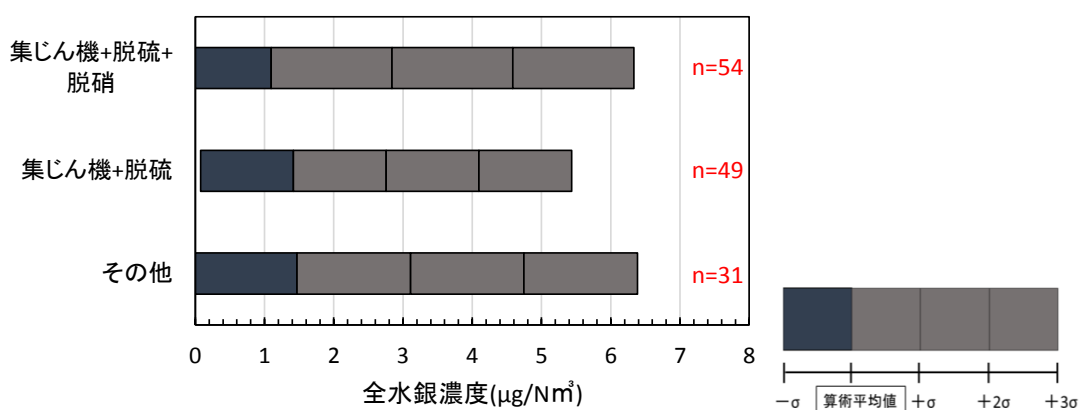


図 II-1-6 排ガス処理設備の種類ごとの全水銀濃度

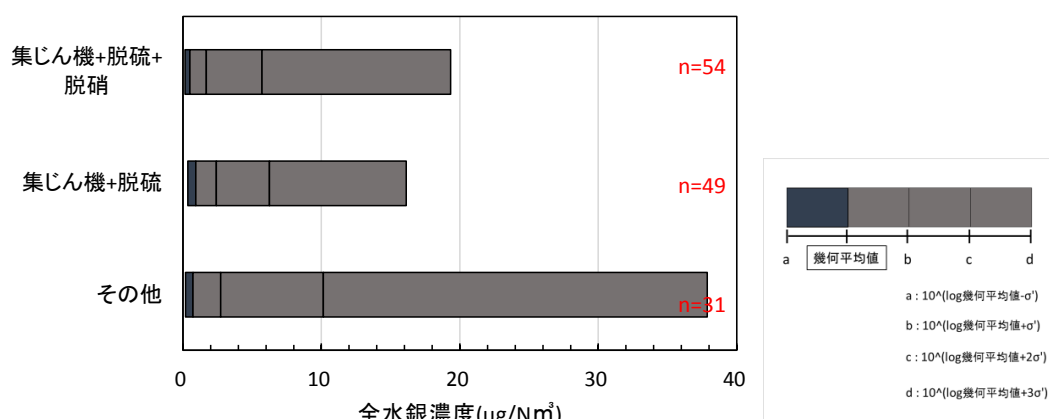


図 II-1-7 排ガス処理設備の種類ごとの全水銀濃度 (対数標準偏差)

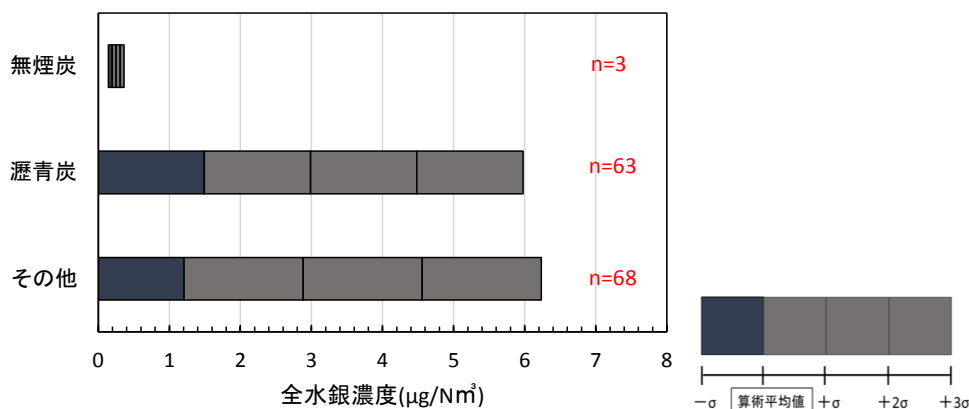
② 使用燃料と全水銀濃度の関係

瀝青炭を使用する施設の排ガス中の全水銀濃度の算術平均値は $1.4\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 、その他炭(主に亜瀝青炭)を使用する施設では $1.2\mu\text{g}/\text{N m}^3$ で、顕著な差はなかった。無煙炭を使用する施設のデータは少なく比較ができなかった。

$5\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上の全水銀濃度が検出された施設は、石炭の使用割合(重量%)が15%以下の施設であった。石炭の使用割合(重量%)が低いほど、全水銀濃度が高くなる傾向が見られた(図Ⅱ-1-10 参照)。燃料中の水銀含有量のデータにおいて、石炭と同程度の水銀を含む木質チップやRPFも確認されたことから、混焼物による影響も少なからずあると考えられた。

表Ⅱ-1-12 使用石炭の種類と全水銀濃度

石炭の種類	回答施設数		全水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$)						
	施設数	データ数	中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均値	対数標準偏差(対数值)
無煙炭	3	3	0.2	0.3	<0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
瀝青炭	40	63	0.9	7.5	<0.1	1.4	1.5	0.9	0.5
その他	33	68	0.5	10	<0.1	1.2	1.7	0.6	0.5



図Ⅱ-1-8 使用石炭の種類と全水銀濃度

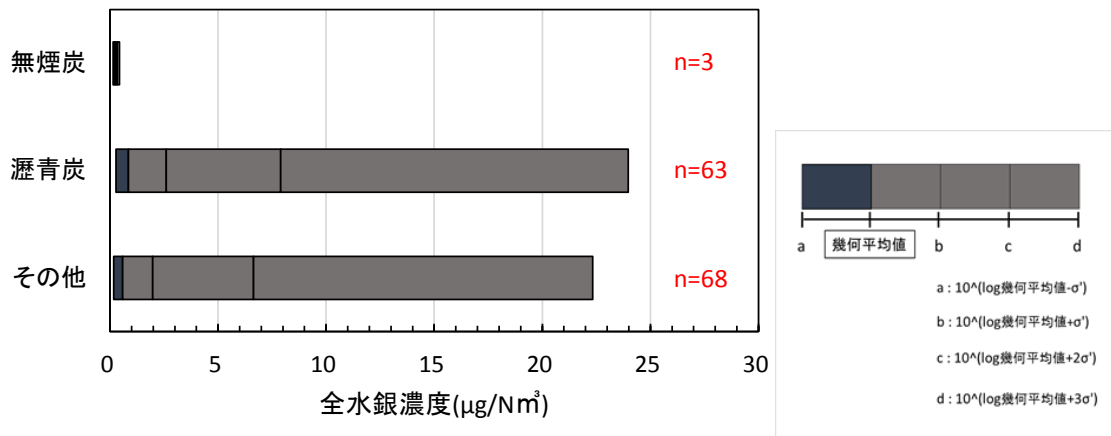


図 II-1-9 使用石炭の種類と全水銀濃度 (対数標準偏差)

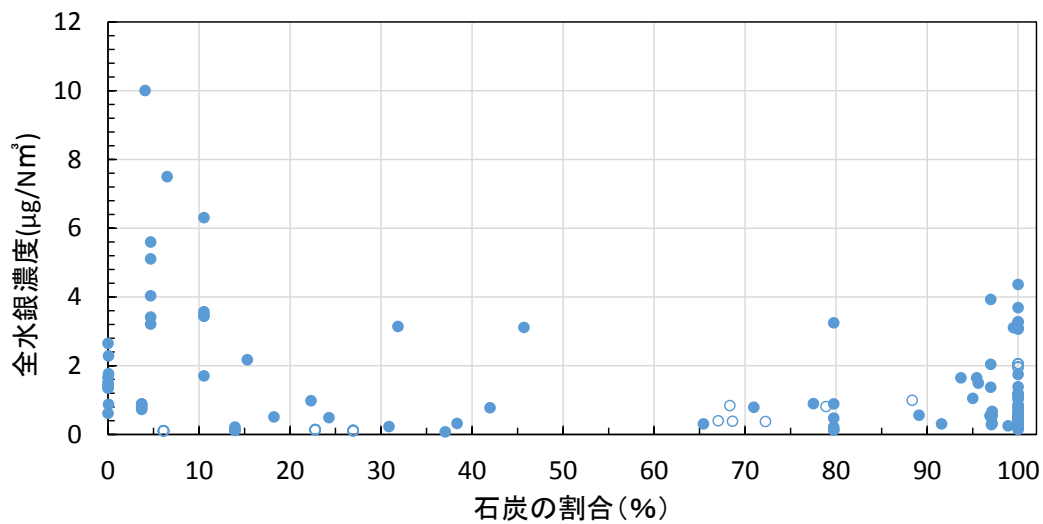
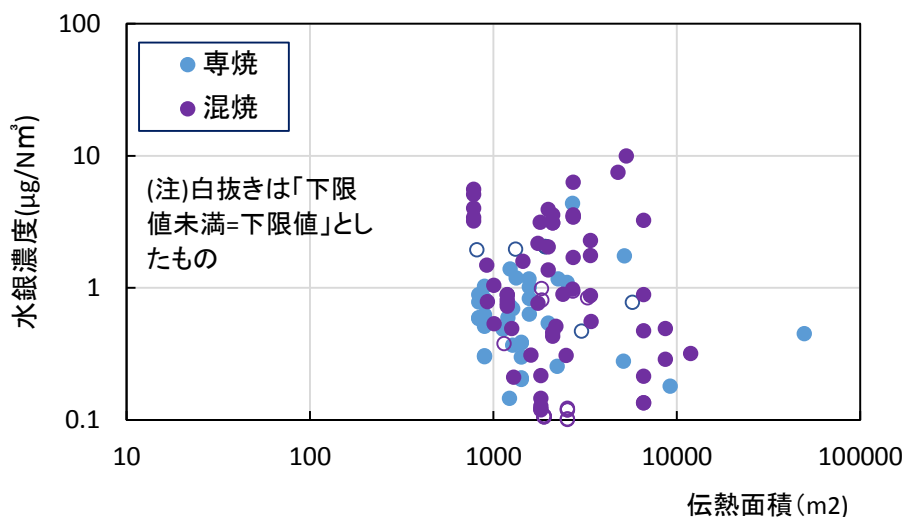


図 II-1-10 燃料に占める石炭の割合 (重量%) と全水銀濃度

(注) 定量下限値未満のデータは定量下限値を代入し、ガス状水銀・粒子状水銀とも定量下限値未満の場合は白抜きでプロットした。以下の図も同様。

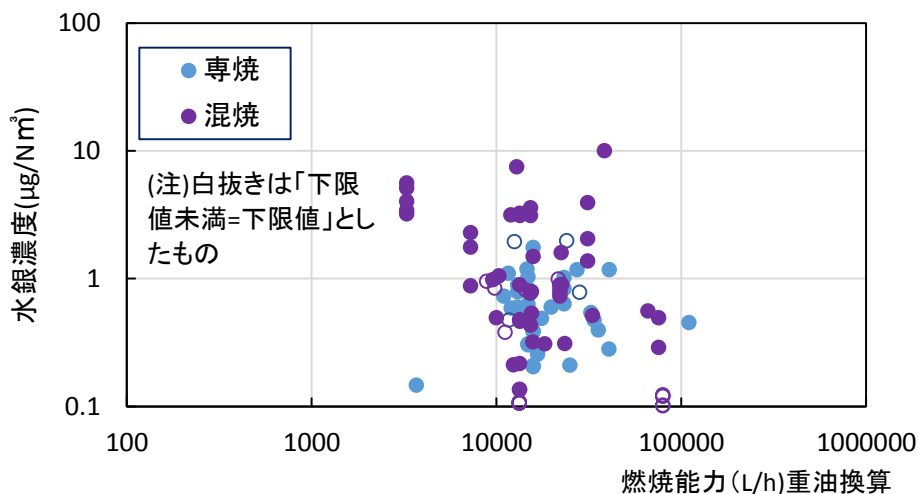
③ 施設規模と全水銀濃度の関係

環境省法のデータと施設規模情報の両方が得られた施設のデータからは、施設規模の大小と全水銀濃度には明確な相関は見られなかった（図Ⅱ-1-11、図Ⅱ-1-12 参照。）。



(注)一般電気事業者の所有する施設のデータは含まれていない

図Ⅱ-1-11 伝熱面積と全水銀濃度



(注)一般電気事業者の所有する施設のデータは含まれていない

図Ⅱ-1-12 燃焼能力と全水銀濃度

④ 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（ガス状水銀のみのデータや、標準酸素補正方式による酸素換算値でないデータも含まれる。）については、次表

のとおりであった。

排ガス処理設備の種類に関わらず、水銀濃度の算術平均値は 1.1~1.5 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。また、分布のばらつきの程度を示す標準偏差 (σ) は、1.3~1.7 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。最大値は 13 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。

表 II-1-13 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
(石炭火力発電所及び産業用石炭燃焼ボイラー)

排ガス処理設備の種類	施設数(うち、全水銀濃度が把握できた施設数)	水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$) (注)							
		中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均値	対数標準偏差(対数値)	データ数
集じん機+脱硫+脱硝	49 (7)	0.7	13	<0.1	1.1	1.3	0.7	0.4	451
集じん機+脱硫	24 (12)	1.1	7.6	0.1	1.5	1.4	1.0	0.4	88
その他	14 (3)	0.6	6.2	<0.2	1.5	1.7	0.8	0.5	26
合計	87 (22)	0.7	13	<0.1	1.2	1.3	0.7	0.4	565

(注) ガス状水銀のみのデータや、酸素換算値でないデータも含まれる。

2. 非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程(一次施設)

非鉄金属の製造に用いられる製錬及びばい焼の工程を行う施設では、単独の炉ごとに排ガスを処理することは少なく、複数の炉の排ガスが合流して処理される又は1つの炉の排ガスが複数に分岐して処理されることが多い。以下では、鉍石及び精鉍の使用状況、並びに溶解炉を出た金属溶融物が精製炉にすぐに投入されるような一連の製造工程とみなせるか、という点に着目し、一次施設/二次施設を次のように定義して解析を行った。

表 II-2-1 本資料における非鉄金属製造の一次施設、二次施設の考え方

一次施設	鉍石及び精鉍を主な原料(原料に占める硫化鉍の重量比が50%以上)とする炉並びにその炉の前後の工程に位置する一連施設と考えられる炉
二次施設	鉍滓等を主な原料(原料に占める硫化鉍の重量比が50%未満)とする炉並びにその炉の前後の工程に位置する一連施設と考えられる炉

また、一次施設の後の工程に位置するものの、原料に鉍滓等を追加する施設のように、一連施設と考えられる炉の中に一次施設及び二次施設が混在してい

る場合は、個別の炉について、原料に占める硫化鉍の重量比により区別した。

(1) 調査対象施設の概要

非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程（一次施設）に該当する 11 事業所 22 箇所（環境省調査 9 箇所、自主調査 13 箇所）の調査結果が得られた。この内、2 箇所は処理前の排ガスを測定したもので、参考値である。（うち、1 施設は硫黄鉍を原料とする乾燥炉の出口のデータであり、水銀濃度は $0.2 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。残り 1 施設は粗銅を原料とする溶解炉の出口のデータであり、水銀濃度は $0.4 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。）

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表 II-2-2 のとおりであった。金属種類別の測定箇所数は表 II-2-3 のとおりであり、鉛や金の製錬を対象とする一次施設のデータは得られなかった。

表 II-2-2 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた 箇所数	排ガス中水銀濃度の データ数
環境省法	18 箇所	58 データ
上記以外の測定方法	2 箇所	6 データ

(注) 上記の事業所以外に、鉛の一次製錬と二次製錬を行う事業所から、一次施設の排ガスに、二次施設の排ガスが合流した地点での測定データの提供があった（1 事業所（1 箇所））。鉍石及び精鉍の使用状況より、この事業所は鉛の一次施設に区分されるが、測定データを一次施設又は二次施設として区分することができないため、今回の集計より除いた。

表 II-2-3 環境省法による一次施設の金属種類別の測定箇所数

	測定箇所数	排ガス中水銀濃度の データ数
銅	14 箇所	38 データ
亜鉛	4 箇所	20 データ

表 II-2-4 一次施設の施設規模

	燃料の燃焼能力 (L/h)	原料の処理能力 (t/h)
銅	約 200～7000	約 40～200
亜鉛	約 20～500	約 10～40

(2) 原燃料中の水銀含有量

非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程（一次施設）で使用されている原料の種類については、次の回答が得られた。

表 II-2-5 原料の種類

	原料の種類
銅	鉍石 精鉍 カラミ（鍍、スラグ） 転炉粗銅・自溶炉粗銅 洗煙スラッジ（特別管理）産業廃棄物 一般廃棄物
亜鉛	亜鉛精鉍（製鋼煙灰） 燃えがら・ばいじん・汚泥（廃棄物焼却由来）

原料・燃料中の水銀含有量については、表Ⅱ-2-6のデータが得られた。

表Ⅱ-2-6 原料・燃料中の水銀含有量 (mg/kg)

原料の種類	算術平均値	最大値	最小値	データ数	(うち定量下限値未満のデータ数)
亜鉛精鉱	20	-	-	1	0
鉛精鉱	19	-	-	1	0
銅精鉱	1.1	1.8	0.67	3	0
金鉱石	<1	-	-	1	1
バルク精鉱	2.7	-	-	1	0
精鉱	47	-	-	1	0
製固鉱	3.4	-	-	1	0
製鋼煙灰	5.4	-	-	1	0
粗酸化亜鉛	3.3	7.3	0.16	3	0
硫酸鉛	0.86	-	-	1	0
鉛澱物	0.3	-	-	1	0
ダスト (集塵灰)	1.4	2	1	3	0
汚泥	8.5	15.51	5	3	0
鉱滓	58	-	-	1	0
燃えがら	0.07	-	-	1	0
石炭灰	0.23	-	-	1	0
製錬二次原料	3	4.3	1.7	2	0
廃棄物混合物	2	2	2	2	0
シュレツダーダスト	0.44	0.6	0.28	2	0
ガラス	<0.005	-	-	1	1
電子基板類	0.135	0.3	0.006	3	0
金属くず	<0.005	-	-	1	1
コークス	0.10	0.35	<0.005	8	4
矽石	0.93	1.8	<1	3	2
石灰石	<0.005	-	-	1	1
石炭	0.19	0.5	<0.1	7	4
重油	<0.005 <1	-	-	5	5
粘結剤	<1	-	-	2	2

(注) この表では、一次施設及び二次施設の両方の調査結果を一覧に整理した

【参考】調査研究¹によれば、銅、鉛、亜鉛の鉱石サンプル中の水銀含有量について、0.797～370mg/kg という測定結果がある。(ただし、実際に原料として用いられている原料鉱石ではなく、それに近いと想定された鉱石サンプルについての測定結果である。)

また、UNEP Toolkit (Version 1.3, January 2015)には、亜鉛の焼結鉱について 2.1 ～25mg/kg、銅の焼結鉱について 0.76～25 mg/kg というデータがある。

(3) 排ガス中の水銀濃度

水銀大気排出実態調査の協力施設においては、約 6 割で「集じん機+硫酸製造施設」が設置されている。

表 II-2-7 排ガス処理設備の概要

排ガス処理設備の組合せ		一次施設	導入率
		測定箇所数	(測定箇所数ベース)
集じん機	(CY+)BF	2	9.1%
	(CY+)ESP	1	4.5%
	(CY+)WS	-	-
	ESP+BF(+脱硝)	-	-
	BF(+脱硝)+WS	-	-
	WS+ESP	-	-
集じん機+脱硫	BF+脱硫	2	9.1%
	BF+脱硫+WS	-	-
	ESP+脱硫	2	9.1%
	ESP+脱硫+WS	-	-
	BF+脱硫+ESP	-	-
	(CY+)脱硫	-	-
集じん機+硫酸製造施設	BF+硫酸(+その他)	-	-
	ESP+硫酸(+その他)	11	50.0%
	ESP+硫酸,BF, (+その他)	2	9.1%
なし (排ガス処理前)		2	9.1%
合計		22	

¹吉本直子 (2010) 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、第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (P2-E2-8)

排ガス中全水銀濃度については、18箇所（施設）、58データの全水銀（ガス状水銀及び粒子状水銀）のデータを収集することができた。

非鉄一次施設全体の全水銀濃度（酸素補正なし）の分布は次図のとおり。非鉄一次施設全体では、 $1\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満の施設が80%を占めた。最大濃度は亜鉛一次施設の $39\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。

$30\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上のデータは、亜鉛一次施設の同じ地点でのデータであり、粒子状水銀濃度がガス状水銀濃度の約10倍程度と特異的なデータであった。当該施設の最新のばい煙測定結果と比較して、今回の測定データは「排ガス量、排ガス温度、ばいじん濃度、酸素濃度」に目立った差異はない。また、測定時のトラブルなど、平常時と異なる運転であった可能性については報告されていない。硫酸製造設備が設置されているが、亜鉛鉱石中の水銀濃度が比較的高い施設であった。

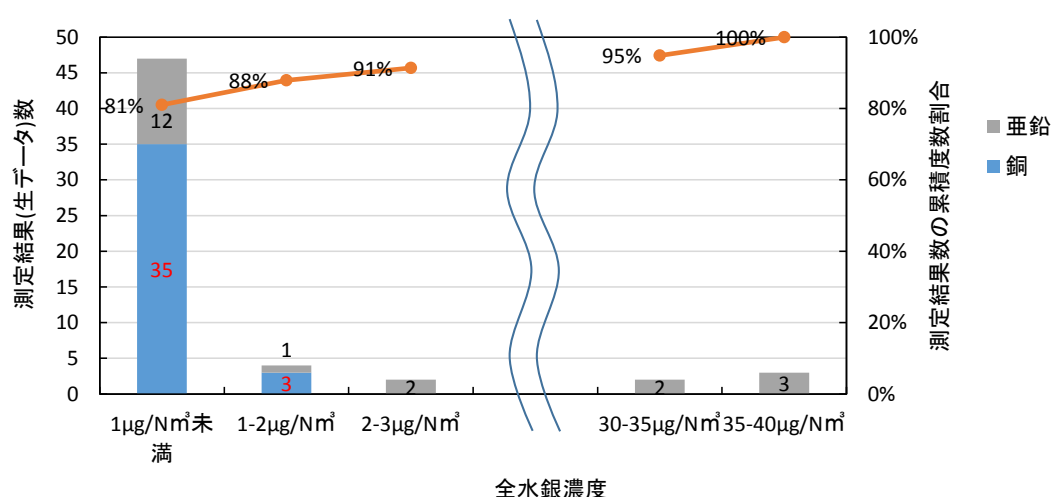


図 II-2-1 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム（一次施設全体）

① 製造金属と全水銀濃度の関係

銅一次施設では、最高濃度でも $1.2\mu\text{g}/\text{N m}^3$ で、相当低い濃度に抑えられていると考えられた。

亜鉛一次施設では、中央値は $0.7\mu\text{g}/\text{N m}^3$ で、全体的には相当低い濃度まで抑えられている施設が多いと考えられた。一方で、集じん機と硫酸製造設備を設置する施設のうち1施設で、連続する2日間の5データが全て $30\mu\text{g}/\text{N m}^3$ を超えた（最高値は $39\mu\text{g}/\text{N m}^3$ ）。

また、金属の精製の用に供する溶解炉（以下、「精製炉」という。）の9データは、算術平均値が $0.2\mu\text{g}/\text{N m}^3$ とかなり低い値となった。

表 II-2-8 一次施設の金属種類と全水銀濃度

金属種類	施設数		全水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$)						
	データ数		中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)
銅	14	38	0.3	1.2	<0.1	0.4	0.3	0.3	0.3
亜鉛	4	20	0.7	39	<0.1	9.4	15	1.4	0.9
全金属	18	58	0.3	39	<0.1	3.5	9.8	0.5	0.7

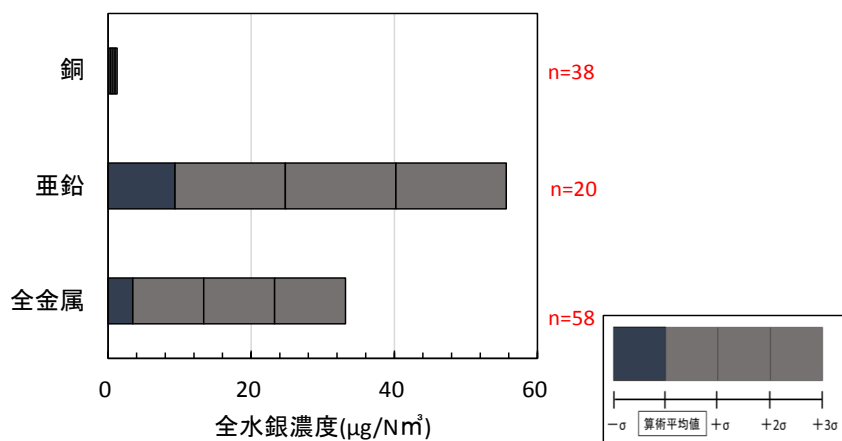


図 II-2-2 一次施設の金属種類と濃度分布

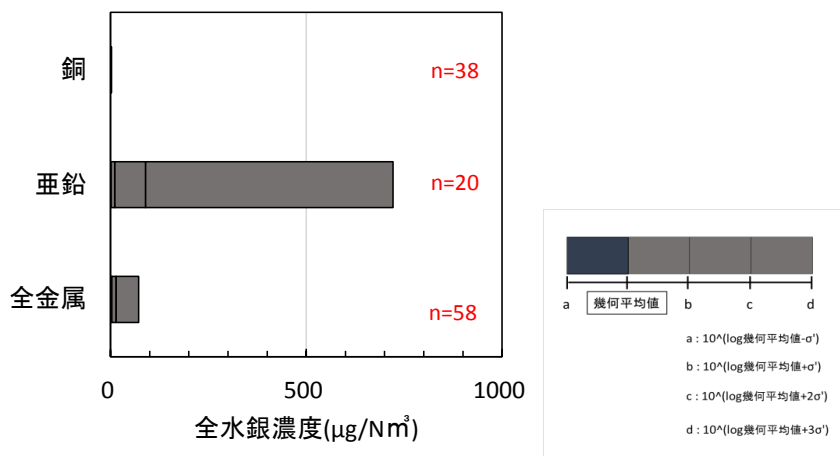


図 II-2-3 一次施設の金属種類と濃度分布(対数標準偏差)

表 II-2-9 炉の種類と全水銀濃度

炉の種類	施設数		全水銀濃度 (μg/N m ³)						
		データ数	中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)
乾燥炉	1	1	0.4	-	-	-	-	-	-
精製炉	3	9	0.1	0.4	<0.1	0.2	0.1	0.2	0.2
上記以外 (注)	14	48	0.4	39	<0.1	4.2	11	0.6	0.7
合計	18	58	0.3	39	<0.1	3.5	9.8	0.5	0.7

注 焙焼炉、焼結炉、溶鉱炉、転炉、溶解炉（精製炉を除く。）及び乾燥炉（精鉱の乾燥炉を除く。）

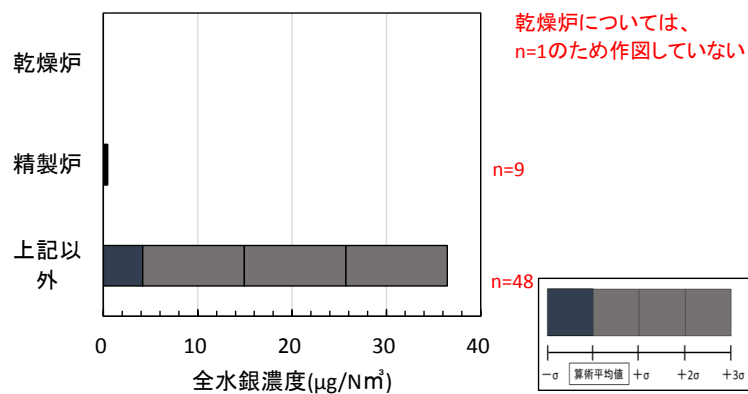


図 II-2-4 一次施設の炉の種類と濃度分布

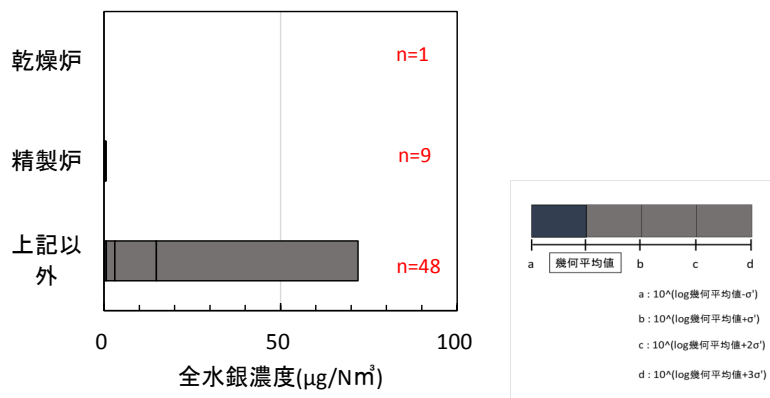


図 II-2-5 一次施設の炉の種類と濃度分布(対数標準偏差)

② 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（ガス状水銀のみのデータも含まれる。）については、次のとおりであった。

表Ⅱ-2-10 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
(非鉄金属製造 一次施設)

金属種類	施設数(うち、全水銀の濃度が把握できた施設数)	水銀濃度 (μg/N m ³) (注)							
		データ数	中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標 準偏差 (対数 値)
銅	0(-)	-	-	-	-	-	-	-	-
亜鉛	2(2)	6	7.0	17	<0.4	7.7	5.8	4.6	0.5
全金属	2(2)	6	7.0	17	<0.4	7.7	5.8	4.6	0.5

(注) ガス状水銀のみのデータも含まれる。

3. 非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程 (二次施設)

二次施設の定義は、2.に記載のとおり。

(1) 調査対象施設の概要

非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程 (二次施設) に該当する 22 事業所 29 箇所 (環境省調査 23 箇所、自主調査 6 箇所) の調査結果が得られた。

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表Ⅱ-3-1 のとおりであった。

表Ⅱ-3-1 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた 箇所数	排ガス中水銀濃度の データ数
環境省法	27 箇所	120 データ
上記以外の測定方法	11 箇所	64 データ

(注) 環境省法と、それ以外の測定方法の両方で行っている施設があるため、全協力施設数と測定方法の分類による合計数は一致しない。

表Ⅱ-3-2 環境省法による二次施設の金属種類別の測定箇所数

	測定箇所数	排ガス中水銀濃度の データ数
銅	4 箇所	19 データ
亜鉛	12 箇所	49 データ
鉛	9 箇所	46 データ
金	2 箇所	6 データ

表 II-3-3 二次施設の施設規模

	燃料の燃焼能力 (L/h)	原料の処理能力 (t/h)
銅	約 40～1300	1 未満～150
亜鉛	約 30～900	1 未満～40
鉛	約 40～700	1 未満～30

(注) 金は 2 施設のため特定される可能性があるため記載しない

(2) 原燃料中の水銀含有量

非鉄金属製造に用いられる製錬及び焙焼の工程（二次施設）で使用されている原料の種類については、次の回答が得られた。

表 II-3-4 原料の種類

	原料の種類
銅	鉱石 精鉱 粗銅 カラミ 鉛銀残渣 金銀滓 古基板 製鋼煙灰 (特別管理) 産業廃棄物 一般廃棄物
亜鉛	酸化亜鉛 粗酸化亜鉛 亜鉛ドロス ダイキャスト 鉛滓 洗煙スラッジ 燃えがら・ばいじん 製鋼煙灰 (特別管理) 産業廃棄物 一般廃棄物
鉛	鉛滓 (ドロス・スライム) 屑鉛 団鉱 鉛・貴金属滓 亜鉛精錬残渣 古基板 半田カス 金属屑

(注) 金は 2 施設のため特定される可能性があるため記載しない

原料・燃料中の水銀含有量については、2. (2) に記載のデータが得られた。

(3) 排ガス中の水銀濃度

水銀大気排出実態調査の協力施設では、バグフィルターのみで排ガス処理している施設が最も多い。なお、一部施設では活性炭吹き込みも行われている。「集じん機+脱硫設備」で排ガス処理している施設は 3 割程度である。

表 II-3-5 排ガス処理設備の概要

排ガス処理設備の組合せ		二次施設	導入率 (測定箇所数ベース)
		測定箇所数	
集じん機	(CY+)BF	11	37.9%
	(CY+)ESP	2	6.9%
	(CY+)WS	3	10.3%
	ESP+BF(+脱硝)	1	3.4%
	BF(+脱硝)+WS	1	3.4%
	WS+ESP	2	6.9%
集じん機+脱 硫	BF+脱硫	4	13.8%
	BF+脱硫+WS	1	3.4%
	ESP+脱硫	2	6.9%
	ESP+脱硫+WS	0	
	BF+脱硫+ESP	1	3.4%
	(CY+)脱硫	1	3.4%
集じん機+硫 酸製造施設	BF+硫酸(+その他)	0	
	ESP+硫酸(+その他)	0	
	ESP+硫酸,BF, (+その他)	0	
なし (排ガス処理前)		0	
合計		29	

排ガス中全水銀濃度については、銅二次施設が 4 箇所（施設）、19 データ、亜鉛二次施設が 12 箇所（施設）、49 データ、鉛二次施設が 9 箇所（施設）46 データ、金二次施設が 2 箇所（施設）6 データを収集することができた。

二次施設全体としては、 $30 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約 65%を占めた。金属別の内訳は以下のとおり。

銅二次施設は、 $30 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約 60%を占めた。最高濃度は $360 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。（図 II-3-1）

亜鉛二次施設は、 $30 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約 60%を占めた。 $100 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上のデータも約 30%あった。最高濃度は約 $1100 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。（図 II-3-2）

鉛二次施設は、 $30 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約 70%を占めた。 $600 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上のデータも約 20%あった。最高濃度は $2300 \mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。（図 II-3-3）

鉛二次施設において、他施設と比べ突出して高い値が検出された 2 施設では、集じん機（バグフィルターや湿式電気集じん機）に湿式処理（湿式脱硫やスク

ラバー) を組み合わせた処理又は活性炭吹込みが行われていたにも関わらず、 $500 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ を超えるデータが検出された。

金二次施設は、2施設のため特定される可能性があるので金属別としては記載しない。

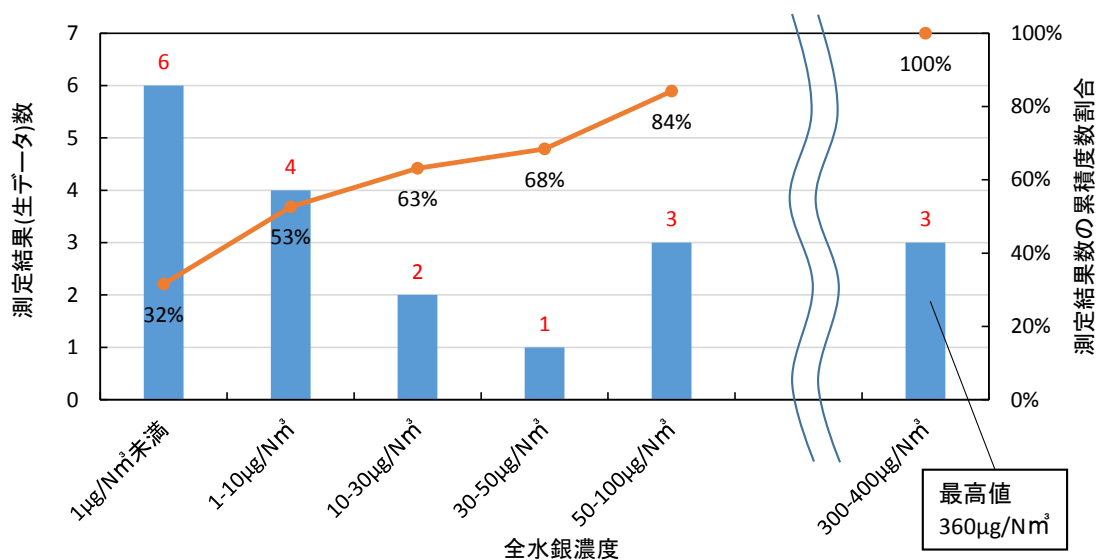


図 II-3-1 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム (非鉄二次施設 銅)

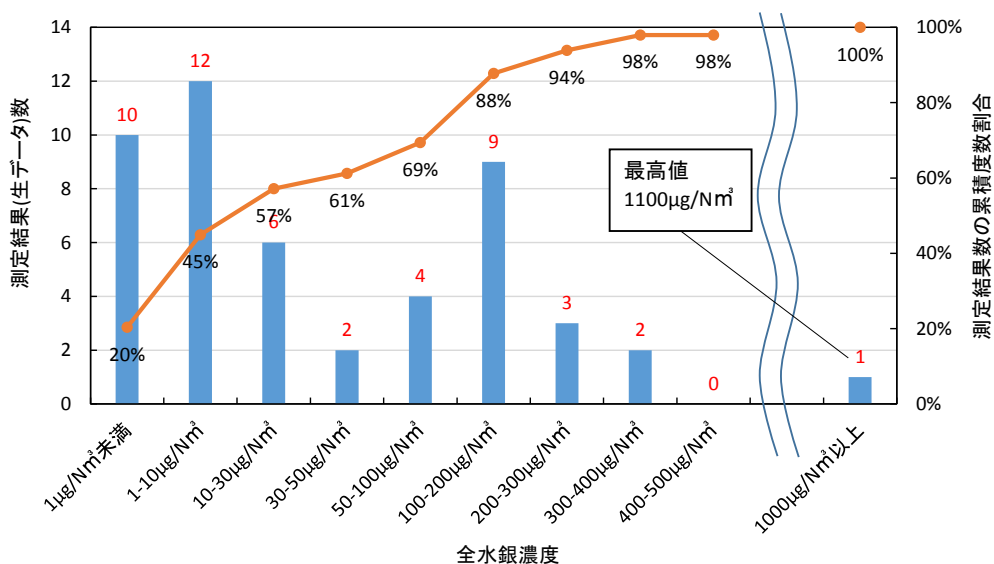


図 II-3-2 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム (非鉄二次施設 亜鉛)

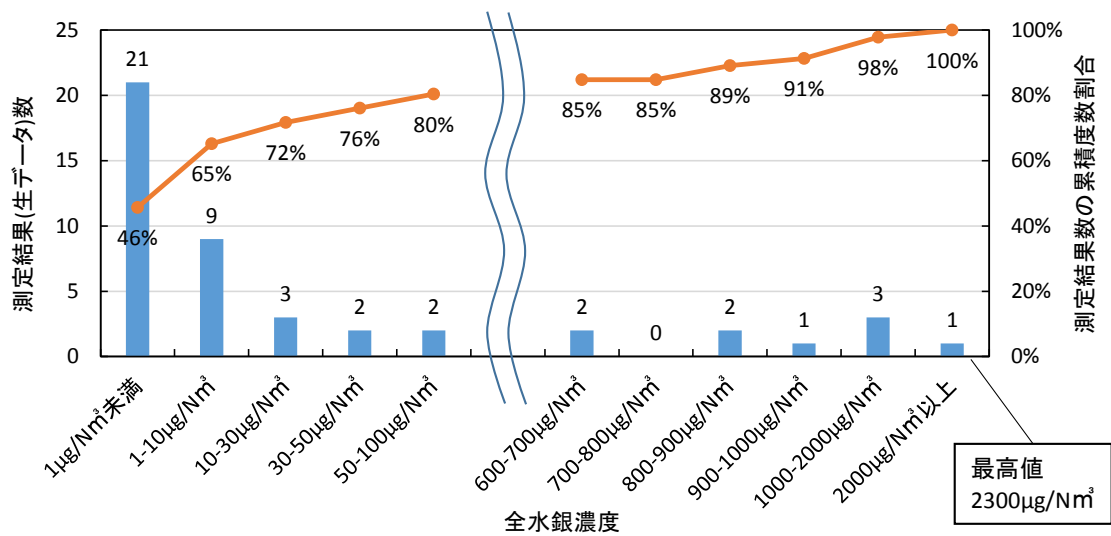


図 II-3-3 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム (非鉄二次施設 鉛)

① 原料の種類と全水銀濃度の関係

鉛二次施設のうち、専ら鉛バッテリー、ハンダくず、ハンダクリームなど特定の均質なものを原料としている施設における 10 データにおいて、全水銀濃度は最大でも $0.3 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ であった。

鉛バッテリー、ハンダくず、ハンダクリームなどには、基本的には水銀が混入しないと考えられる。排ガス中の全水銀濃度が低かったことから、これらの施設では基本的に水銀が混入せず、排ガス中濃度も低いと考えられた。

一方、鋳滓などを原料とする二次施設においては、高濃度の施設もあることが確認された。

表 II-3-6 原料の種類と全水銀濃度（鉛二次施設）

		施設数	水銀濃度 (μg/N m ³)							
			データ数	中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均値	対数標準偏差 (対数値)
全データ		7	37	0.7	98	<0.1	7.7	19	0.9	0.9
原料別	専ら鉛ハンダ類 (※)	2	10	0.1	0.3	<0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
	鉛ハンダ類を除く	5	27	1.6	98	<0.1	10	22	1.7	0.9

(※) 具体的には、鉛ハンダ類：鉛バッテリー、ハンダくず、ハンダクリーム

(注) 図 II-3-3 の全プロットから、他施設と比べ突出して高い値が検出された 2 施設 9 データを除いて解析した。

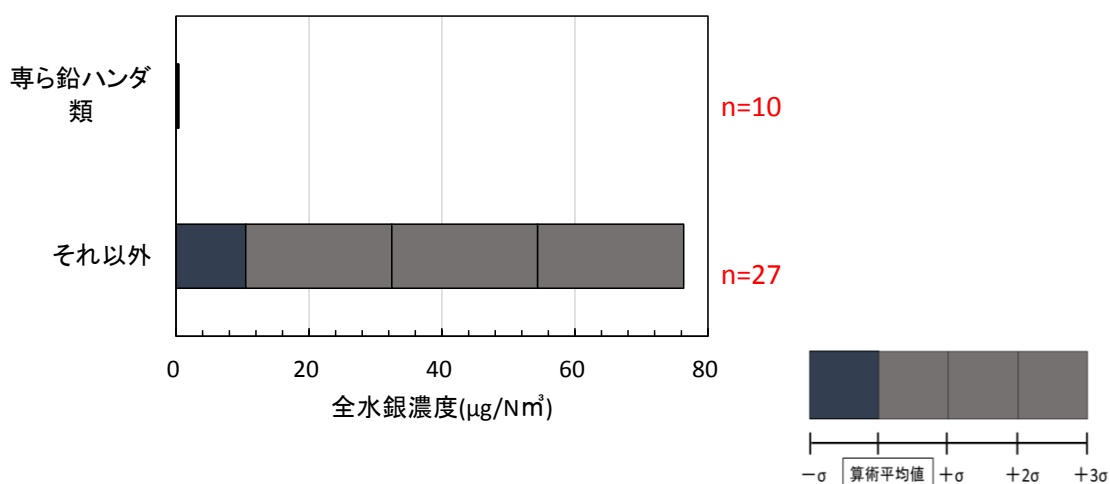
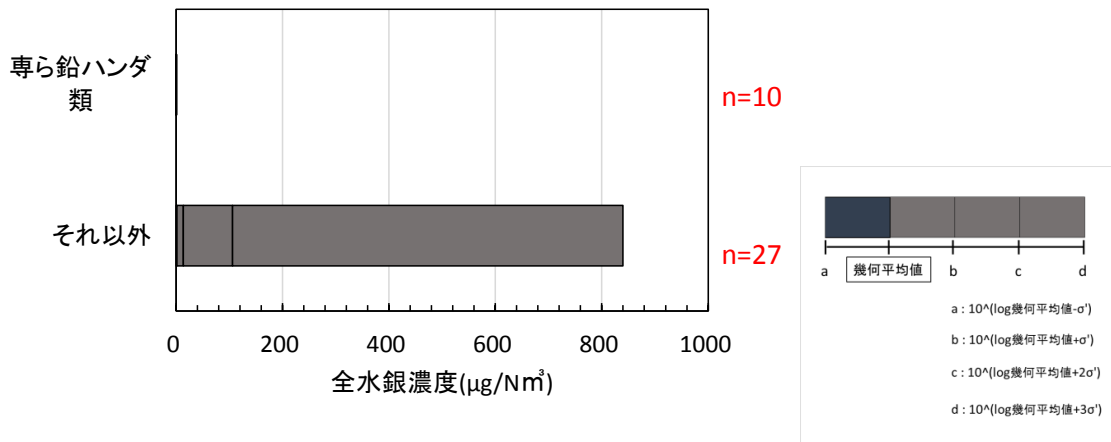


図 II-3-4 鉛二次施設における原料の種類と全水銀濃度

(注) 図 II-3-3 の全プロットから他施設に比べ突出して高い値が検出された 2 施設 9 データを除いて解析した、



図Ⅱ-3-5 鉛二次施設における原料の種類と全水銀濃度（対数標準偏差による）

（注）図Ⅱ-3-3の全プロットから他施設に比べ突出して高い値が検出された2施設9データを除いて解析した。

② 製造金属と全水銀濃度の関係

鉛二次施設、銅二次施設、亜鉛二次施設とも、中央値は数 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ~ 十数 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ のレベルであることから、現在の稼働状況で、多くの施設では低い濃度に抑えられていると考えられた。しかし、鉛二次施設で最大 $2300 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、亜鉛二次施設で最大 $1100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ が検出されるなど、高濃度も少なからず検出された。

表 II-3-7 二次施設施設の金属種類と全水銀濃度

金属種類	施設数		全水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)						
	施設数	データ数	中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均値	対数標準偏差 (対数值)
鉛	9	46	1.6	2300	<0.1	230	510	3.5	1.5
銅	4	19	1.8	360	<0.1	71	120	5.9	1.2
亜鉛	12	49	15	1100	<0.1	90	170	13	1.1
金	2	6	0.1	6.2	<0.1	1.1	2.3	0.2	0.6
全金属	27	120	4.3	2300	<0.1	140	340	5.7	1.3

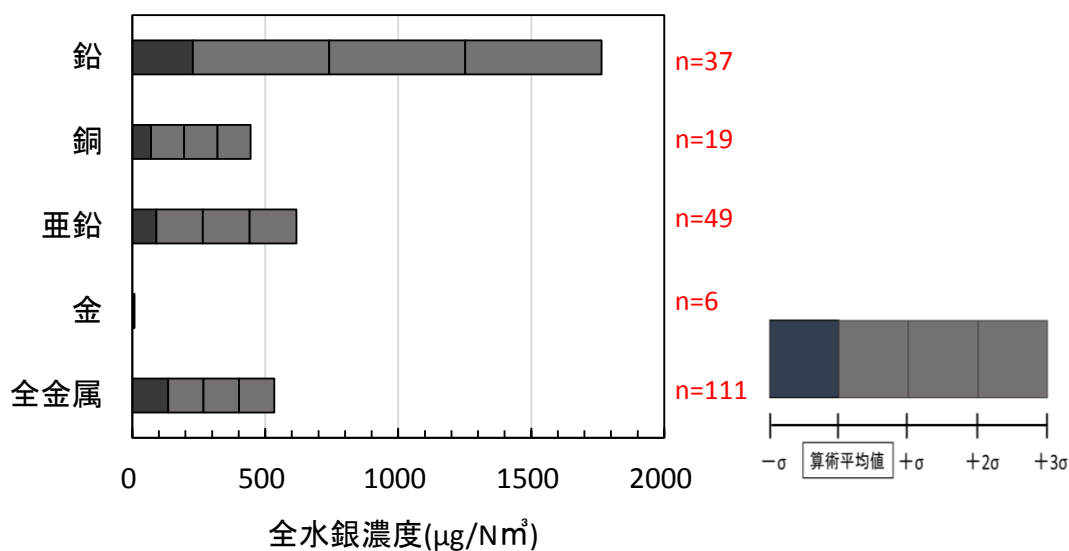
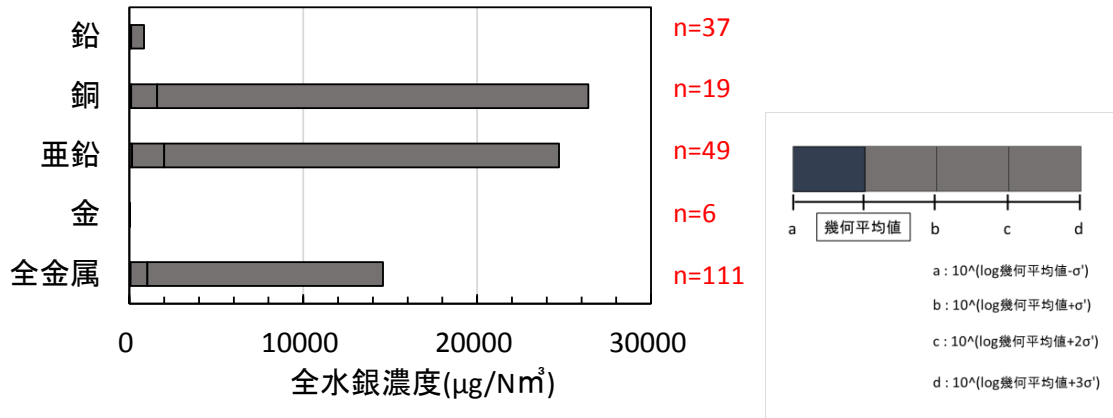


図 II-3-6 非鉄二次施設の金属種類と濃度分布

(注) 表 II-3-7 の全データから、他施設に比べ突出して高い値が検出された 2 施設 9 データを除いて解析した。



図Ⅱ-3-7 非鉄二次施設の金属種類と濃度分布（対数標準偏差による）

（注）表Ⅱ-3-7の全データから、他施設に比べ突出して高い値が検出された2施設9データを除いて解析した。

③ 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（ガス状水銀のみのデータも含まれる。）については、以下のとおりであった。

表Ⅱ-3-8 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
（非鉄金属製造 二次施設）

	施設数(うち、全水銀の濃度が把握できた施設数)	水銀濃度 (μg/N m ³) (注)							
		中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)	デー タ数
鉛	3(1)	520	2000	1.8	560	530	240	0.9	10
銅	2(1)	33	270	14	96	96	55	0.5	5
亜鉛	5(3)	210	1600	0.5	280	290	130	0.7	48
金	1(0)	16	-	-	-	-	-	-	1
全金属	11(5)	220	2000	0.5	310	350	130	0.7	64

（注）ガス状水銀のみのデータも含まれる。

4. 廃棄物焼却炉

4-1 産業廃棄物焼却炉

(1) 調査対象施設の概要

産業廃棄物焼却炉に該当する 178 施設（環境省調査：61 施設、自主調査：117 施設）の調査結果が得られた。

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表Ⅱ-4-1-1 のとおりであった。

表Ⅱ-4-1-1 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた施設数	排ガス中水銀濃度のデータ数
環境省法	101 施設	351 データ
上記測定方法以外	85 施設	161 データ

(注) 環境省法と、それ以外の測定方法の両方で行っている施設があるため、全協力施設数と測定方法の分類による合計数は一致しない。

表Ⅱ-4-1-2 1時間当たり焼却能力

1時間当たり 焼却能力	時間焼却能力				合計
	2t/h 未満	2t/h 以上 ～4t/h 未満	4t/h 以上	未回答 ・無記入	
産業廃棄物 焼却炉	63	26	46	43	178

表Ⅱ-4-1-3 1日当たり焼却能力

1日当たり 焼却能力	日焼却能力				合計
	10t/日 未満	10t/日以上～ 20t/日未満	20t/日以上	未回答・無 記入	
産業廃棄物 焼却炉	20	11	101	46	178

(注) 焼却能力 (t/h) × 日稼働時間で算出

(2) 焼却対象物の水銀含有量

産業廃棄物焼却炉における焼却対象物の水銀含有量については、表Ⅱ-4-1-4

のデータが得られた。

表Ⅱ-4-1-4 焼却対象物の水銀含有量 (mg/kg)

種類	算術平均値	最大値	最小値	データ数	(定量下限値未 満データ数)
汚泥	0.240	1	<0.005	25	6
廃油	0.025	0.1	<0.0005	22	16
廃油スラッジ	0.96	-	-	1	1
廃酸・廃アルカリ	0.007	0.014	<0.0005	3	1
廃プラスチック・RPF	0.204	1.4	<0.001	14	3
金属くず	0.026	0.069	0.001	4	0
紙くず	0.041	0.074	0.018	3	0
木くず	0.059	0.3	<0.01	16	4
動植物性残渣	0.019	-	-	1	0
汚染土壌	0.055	-	-	1	0
産業廃棄物(混合)	12.7	410	<0.001	33	5
副生油	<0.01	-	-	2	2
バイオマス燃料	<0.01	-	-	1	1

(注) データが定量下限値未満のもので、定量下限値が明らかなデータについては、定量下限値の 1/2 の値を代入して算術平均値を算出した。定量下限値が明らかでないデータについては、算術平均値の算出には用いなかった。」

【参考】水銀大気排出インベントリーの推計では、既往の調査研究から、産業廃棄物中の水銀含有量として次のデータを引用している。

廃棄物種類	水銀含有量(mg/kg)
汚泥	0.446
廃プラスチック類	0.115~0.384
廃酸	0.002~0.187
紙くず	0.018
木くず	0.013~0.113
繊維くず	0.161~0.493
医療廃棄物	1.00~2.35

(3) 排ガス中の水銀濃度

水銀大気排出実態調査の協力施設においては、バグフィルターで排ガス処理している施設が多い。バグフィルターを用いない場合、スクラバーによる処理

を行っている施設が多い。

1日あたり焼却能力別では、20t/日未満の小型施設では、バグフィルターを用いるケースは比較的少ない。

表 II-4-1-5 焼却物別の排ガス処理設備の概要

排ガス処理設備の組合せ		焼却物の区分					施設数
		木くず 専焼	廃油 専焼	廃プラ 専焼	混焼	未回答 ・未分類	合計
バグフィル ター系	BF 単独	2	3	0	33	34	72
	ESP,CY+BF	1	0	0	4	3	8
	BF+WS	0	1	0	8	6	15
スクラバー 系	WS(+BF 以外)	0	12	2	19	26	59
その他		2	2	2	7	11	24
合計		5	18	4	71	80	178

表 II-4-1-6 日処理能力別の排ガス処理設備の概要

排ガス処理設備の組合せ		日処理能力の区分 (t/日)				施設数
		X<10	10≤X<20	20≤X	未回答・未分類	合計
バグフィル ター系	BF 単独	8	3	43	18	72
	ESP,CY+BF	1	1	4	2	8
	BF+WS	2	0	11	2	15
スクラバー 系	WS(+BF 以外)	6	6	31	16	59
その他		3	1	12	8	24
合計		20	11	101	46	178

BF	: Bag Filter (ろ過式集じん設備)
ESP	: Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)
CY	: Cyclone separator (遠心力集じん設備)
WS	: Wet Scrubber (湿式集じん設備)

<参考>既存調査による処理方式ごとの設置状況

除じん方式（集じん機）別に見ると、下記のとおり。全体ではバグフィルターで処理している施設が多い。バグフィルターに他の乾式・湿式処理を組み合わせている施設は3割程度。

焼却物別に見ると、木くず専焼炉ではサイクロンによる処理の割合が比較的高い。また、廃油専焼炉ではスクラバーによる処理の割合が高い。

表Ⅱ-4-1-7 集じん機別・焼却物別の炉の内訳（全国）

ばい煙処理方式		施設数（炉数）	焼却物の区分				合計	割合
			木くず 専焼	廃油 専焼	廃プラ 専焼	その他 (注)		
バグフィ ルター系	バグフィルター単独	10	8	29	300	347	28.4%	
	乾式集じん機（ESP,CY）+BF	2	1	13	101	117	9.6%	
	活性炭処理（乾式）+BF	1	-	5	87	93	7.6%	
	BF+湿式処理（スクラバー、湿式ESP）	3	3	5	128	139	11.4%	
	活性炭処理+BF+湿式処理	2	-	1	20	23	1.9%	
	BF+上記以外	-	-	1	12	13	1.1%	
スクラバ ー系	スクラバー（水洗浄）単独	2	22	-	55	79	6.5%	
	スクラバー（アルカリ洗浄）単独	3	3	1	29	36	2.9%	
	サイクロン+スクラバー	6	-	5	105	116	9.5%	
	スクラバー+上記以外	-	24	2	91	117	9.6%	
その他	サイクロン単独	8	5	6	58	77	6.3%	
	電気集じん機（乾式）単独	-	-	1	29	30	2.5%	
	電気集じん機（湿式）単独	-	-	-	1	1	0.1%	
	その他集じん機単独	-	-	3	9	12	1.0%	
	上記以外	2	-	1	20	23	1.9%	
合計		39	66	73	1045	1223	100%	

（注）その他には、混焼炉や汚泥専焼炉が含まれる。

（出典）平成 27 年度産業廃棄物焼却施設におけるダイオキシン類排出状況等調査（平成 26 年度調査結果）（平成 27 年 11 月時点版）をもとに㈱エックス都市研究所が集計

排ガス中全水銀濃度については、101 施設、351 データの全水銀（ガス状水銀及び粒子状水銀）のデータを収集することができた。

全水銀濃度（標準酸素補正方式（ $O_n : 12\%$ ）を用いた酸素換算値。ただし、製鋼用電気炉^注については酸素換算値ではなく実測値を用いた。）の全体の分布は次図のとおり。10 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約 80%を占めた。50 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上のデータは数%であった。最高値は 380 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。

注 鉄鋼用電気炉の中には、廃棄物処理を行う施設があり、今回の水銀大気排出実態調査の対象とした。

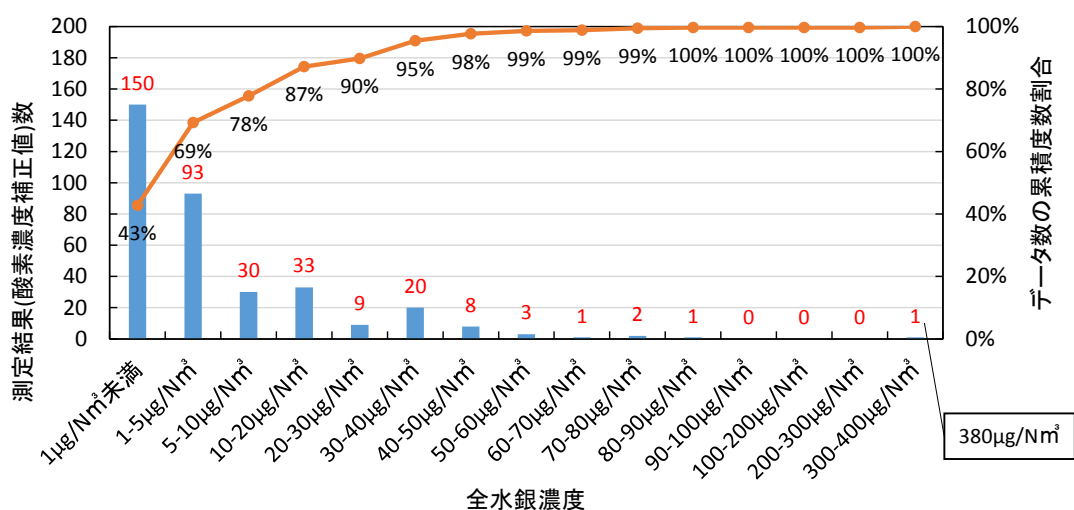


図 II-4-1-1 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム（産業廃棄物焼却炉）

① 排ガス処理施設の種類と全水銀濃度の関係

いずれの排ガス処理方式でも、全水銀濃度の中央値は数 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であることから、現在の稼働状況で、多くの施設では低い濃度に押さえられていると考えられた。

バグフィルターとスクラバーの排ガス処理を導入している施設では、380 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ という高濃度のデータがあり、算術平均値が 18 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であったのに対して、それ以外の排ガス処理を導入している施設の算術平均値は、3.5~10 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ と比較的低かった。また、幾何平均値で比較すると、スクラバーを導入している施設の幾何平均値が 0.8 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 、0.5 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であったのに対して、スクラバーの無い施設の幾何平均値は 2.6 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 、2.5 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ と高かった。

また、焼却物中水銀濃度が同程度である場合、スクラバーを導入している施設は、他の処理方式に比べて排ガス中濃度が低くなる傾向が見られた（図 II-4-1-4）。また、バグフィルターで乾式処理している場合であっても、活性炭吹込み量が比較的多い施設では、低濃度のデータが得られた。

表 II-4-1-8 排ガス処理方式と全水銀濃度（産業廃棄物焼却炉）

排ガス処理 施設の種類	施設数		全水銀濃度 (μg/N m ³)						
	データ数		中央 値	最大 値	最小 値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)
BF+WS	8	23	0.7	380	<0.1	18	77	0.8	0.8
BF(+WS 以 外)	54	211	2.3	87	<0.1	9.4	15	2.6	0.8
WS(+BF 以 外)	27	73	0.2	49	<0.1	3.5	8.4	0.5	0.8
その他	12	44	1.8	50	<0.2	10	14	2.5	0.8
合計	101	351	1.4	380	<0.1	8.7	24	1.7	0.8

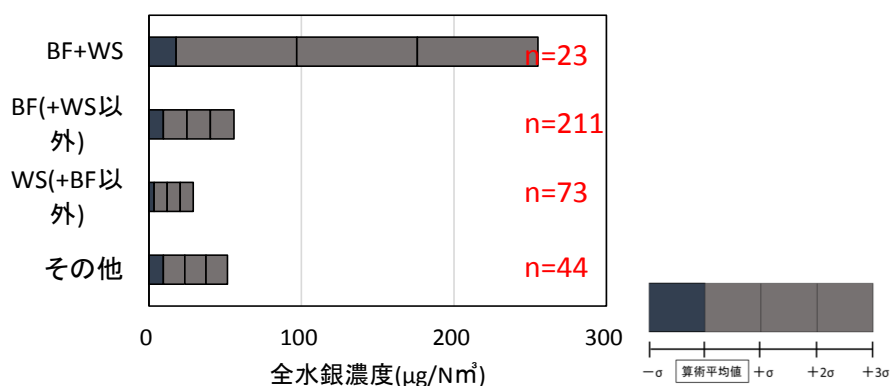


図 II-4-1-2 排ガス処理方式と全水銀濃度（産業廃棄物焼却炉）

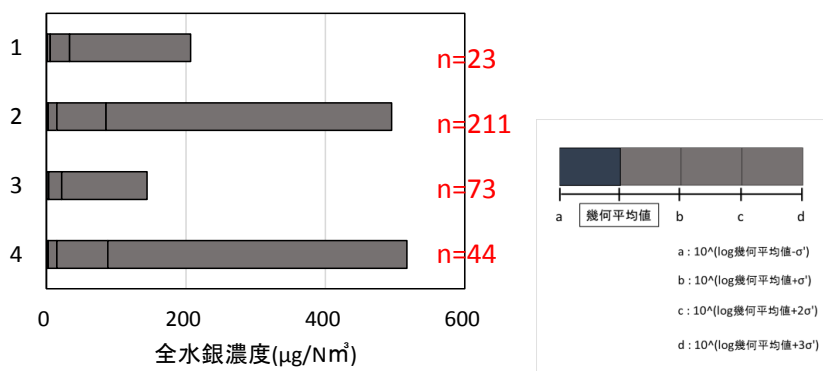


図 II-4-1-3 対数標準偏差による排ガス処理方式と全水銀濃度（産業廃棄物焼却炉）

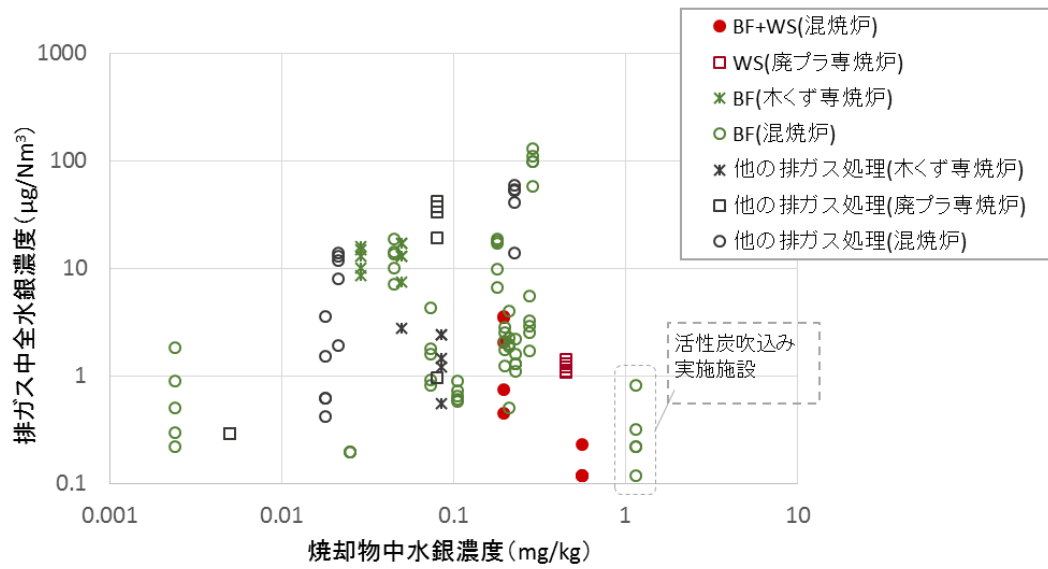


図 II-4-1-4 排ガス処理設備ごとの焼却物中水銀濃度と全水銀濃度 (産業廃棄物焼却炉)

② 焼却対象物の種類と全水銀濃度の関係

医療系廃棄物の投入炉における全水銀濃度データは13データが得られ、算術平均値は $14 \mu\text{g/N m}^3$ 、幾何平均は $4.7 \mu\text{g/N m}^3$ 、分布のばらつきの程度を示す標準偏差 (σ)、対数標準偏差も $16 \mu\text{g/N m}^3$ 、0.7 (対数值) と大きかった。

廃プラスチックの専焼炉及び木くず専焼炉は、いずれも最大で $40 \mu\text{g/N m}^3$ 程度のデータが確認されており、投入物によっては高濃度になるケースもあることが示唆された。

廃油専焼炉は23データが得られ、算術平均値は $0.4 \mu\text{g/N m}^3$ 、幾何平均は $0.3 \mu\text{g/N m}^3$ 、最大値も $1.4 \mu\text{g/N m}^3$ と、濃度が低いことが確認された。廃油専焼炉はスクラバーが導入されている施設が多いが (図 II-4-1-5)、スクラバーの洗浄水にはキレート剤は添加されておらず、他施設区分に比べ特に高度な処理といえないことから、廃油中に水銀がほぼ含有していないことが示唆された。

表 II-4-1-9 焼却対象物の種類と全水銀濃度 (産業廃棄物焼却炉)

焼却対象物の種類	施設数		全水銀濃度 ($\mu\text{g/N m}^3$)						
	施設数	データ数	中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均値	対数標準偏差 (対数值)
医療系廃棄物投入炉	5	13	2.3	43	<0.2	14	16	4.7	0.7
廃プラ専焼炉	4	16	1.1	39	<0.3	8.7	13	1.9	0.8
木くず専焼炉	5	21	3.8	42	<0.5	11	13	4.2	0.7
廃油専焼炉	7	23	0.3	1.4	<0.1	0.4	0.3	0.3	0.3

焼却対象物の種類と全水銀濃度 (産業廃棄物焼却施設)

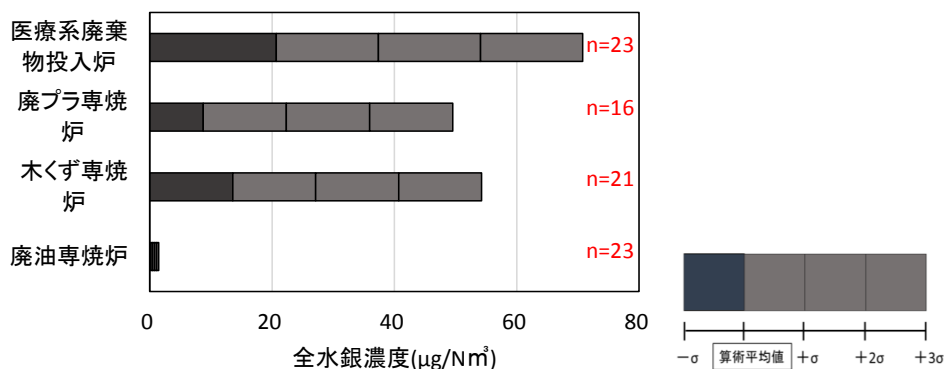


図 II-4-1-5 産業廃棄物焼却炉における焼却対象物の種類と全水銀濃度

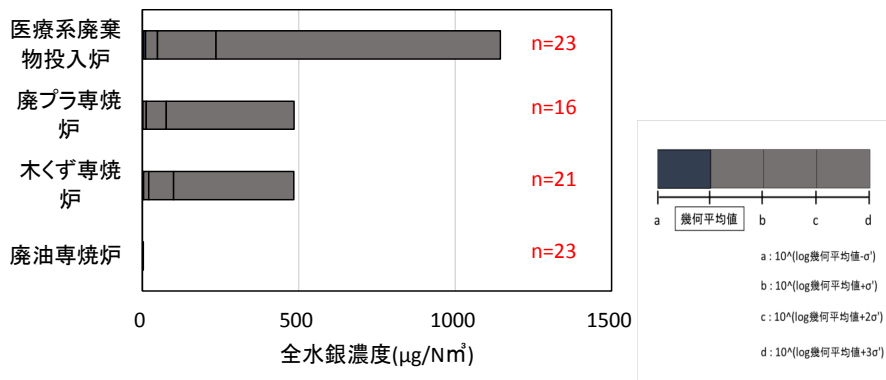


図 II-4-1-6 産業廃棄物焼却炉における焼却対象物の種類と全水銀濃度 (対数標準偏差)

表 II-4-1-10 焼却対象物の種類と全水銀濃度 (産業廃棄物焼却炉)

排ガス処理 施設の種類	施設数		全水銀濃度 (µg/N m³)						
	データ数	中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)	
廃油専焼炉	7	23	0.3	1.4	<0.1	0.4	0.3	0.3	0.3
廃油専焼炉 以外	94	328	1.5	380	<0.1	9.3	25	1.9	0.8
合計	101	351	1.4	380	<0.1	8.7	24	1.7	0.8

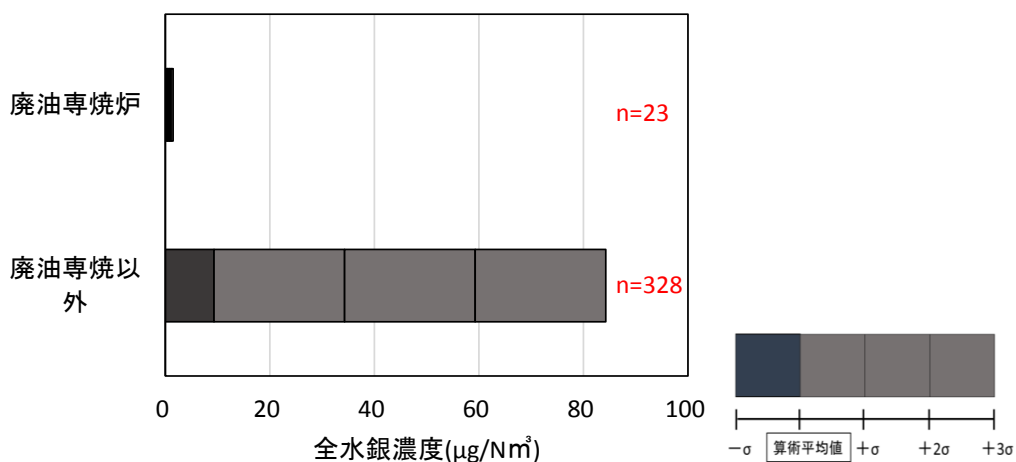


図 II-4-1-7 焼却対象物の種類 (廃油) と全水銀濃度

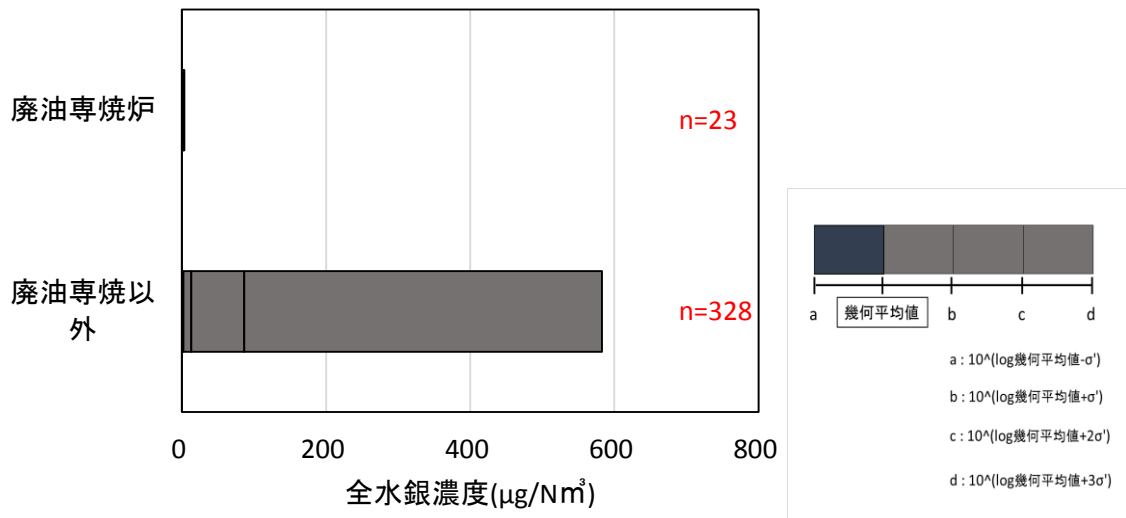


図 II-4-1-8 焼却対象物の種類（廃油）と全水銀濃度（対数標準偏差）

③施設規模と全水銀濃度の関係

本調査において収集できたデータは、大気汚染防止法によるばい煙規制の対象である焼却能力 200kg/h 以上の施設のデータが中心であり、排ガス中の水銀濃度が 50μg/N m³を超える高データも散見された。一方、200kg/h 未満の施設のデータはほとんど得ることができなかったが、これらの施設から排出される水銀量は、全産業廃棄物施焼却炉から排出される水銀量の約 3%^(注)と推計できる。

(注) 「平成 11 年度環境庁請負業務結果報告書 ダイオキシン類小型廃棄物焼却炉実態把握調査」(以下「平成 11 年度調査」という。)において、調査された小型(焼却能力が 50kg/h 以上 200kg/h 未満の)廃棄物焼却炉 93 炉のうち、排ガス処理装置はサイクロンが 66 炉、なしが 18 炉、その他が 9 炉であったため、小型廃棄物焼却炉では「サイクロン」を排ガス処理装置として使用している炉が主流と考えられる。

一方、今回の実態調査の結果から、排ガス処理装置としてサイクロンを使用している小型廃棄物焼却炉の排出係数を求めると、 8.12×10^{-8} (Hg-t/t)と推計された。

また、平成 25 年度ダイオキシン類の排出量の目録(排出インベントリー)に係る調査の調査票情報から、廃掃法の届出対象外となっている小型廃棄物焼却炉の施設毎の焼却能力と年間稼働時間を用い、稼働時間中は常に焼却能力で稼働していると仮定して、小型廃棄物焼却炉の年間焼却量を求めたところ、約 90 万トン/年と推計された。

これらの推計から小型廃棄物焼却炉の年間水銀排出量は約 0.073 Hg-t/year と推計される。廃棄物焼却炉の年間水銀排出量は、平成 22 年度ベースのインベントリーにおいて、2.2-6.85 Hg-t/year であることから、これらの小型廃棄物焼却炉の寄与率は 1.1-3.3%と推計される。

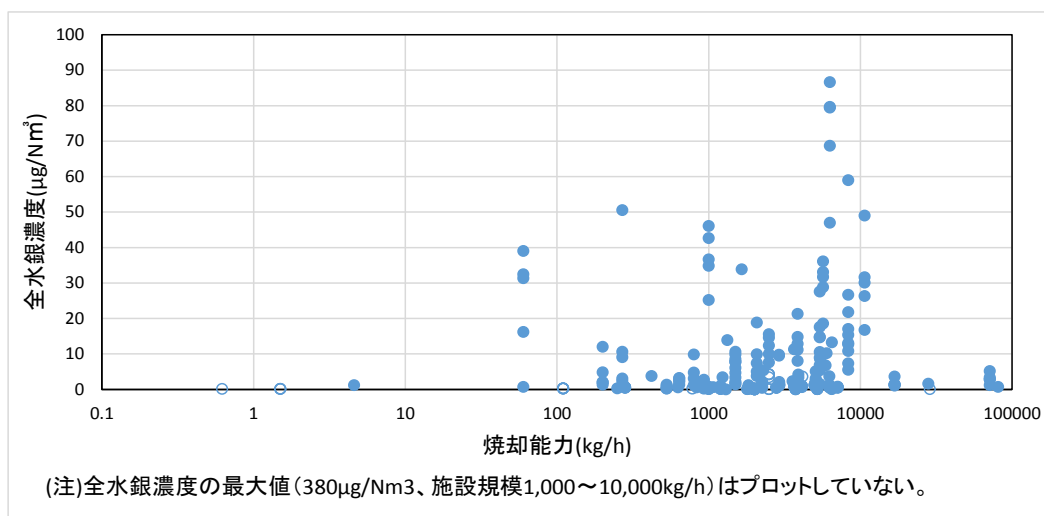


図 II-4-1-9 焼却能力と全水銀濃度（産業廃棄物焼却炉）

④ 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（ガス状水銀のみのデータや、標準酸素補正方式による酸素換算値でないデータも含まれる。）については、以下のとおりであった。

水銀濃度の算術平均値は、5.9~47 µg/N m³で、最大値は 500 µg/N m³（スクラバー系）であった。

表 II-4-1-11 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
（産業廃棄物焼却炉）

排ガス処理 施設の種類	施設数(うち、 全水銀の濃度 が把握できた 施設数)	水銀濃度 (µg/N m ³)							
		中央 値	最大 値	最小 値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏 差(対数值)	デー タ数
BF+WS	7(6)	5.9	76	<0.1	16	22	3.4	1.0	12
BF(+WS 以外)	28(15)	1.5	51	<0.01	5.9	10	1.2	1.0	51
WS(+BF 以外)	36(23)	0.5	500	<0.02	47	91	1.6	1.4	75
その他	14(12)	0.6	48	<0.04	6.9	13	1.1	0.9	23
合計	85(56)	1.1	500	<0.01	26	66	1.5	1.2	161

(注) ガス状水銀のみのデータや、酸素換算値でないデータも含まれる。

4-2 一般廃棄物焼却炉

(1) 調査対象施設の概要

一般焼却炉廃棄物焼却炉に該当する 18 施設（環境省調査：10 施設、委員提供：8 施設）の調査結果が得られた。

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表Ⅱ-4-2-1 のとおりであった。

表Ⅱ-4-2-1 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた施設数	排ガス中水銀濃度のデータ数
環境省法	18 施設	64 データ
上記測定方法以外	-	-

表Ⅱ-4-2-2 1時間当たり焼却能力

1時間当たり 焼却能力	時間焼却能力				合計
	2t/h 未満	2t/h 以上 ～4t/h 未満	4t/h 以上	未回答 ・無記入	
一般廃棄物 焼却炉	2	2	6	8	18

表Ⅱ-4-2-3 1日当たり焼却能力

1日当たり 焼却能力	日焼却能力				合計
	10t/日 未満	10t/日以上～ 20t/日未満	20t/日以上	未回答・無 記入	
一般廃棄物 焼却炉	2	-	8	8	18

(注) 焼却能力 (t/h) × 日稼働時間で算出

(2) 焼却対象物・排出物等の水銀含有量

一般焼却炉廃棄物焼却炉における焼却対象物及び排出物の水銀含有量については、表Ⅱ-4-2-4 のデータが得られた。

表Ⅱ-4-2-4 焼却対象物の水銀含有量 (mg/kg)

原燃料の種類	算術平均値	最大値	最小値	データ数	(うち定量下限値以下のデータ数)
一般廃棄物	0.219	0.56	0.019	10	0

【参考】調査研究²によれば、国内の一般廃棄物中の水銀濃度については、0.1mg/kg (2002年)～2.0mg/kg (1984年) という報告がある。

(3) 排ガス中の水銀濃度

水銀大気排出実態調査の協力施設においては、バグフィルターに、消石灰吹き込みや活性炭吹き込み等を組み合わせている施設が多い。

表Ⅱ-4-2-5 集じん機別・焼却能力別施設数

		焼却処理能力				合計	
		2t/h未満	2t/h以上～4t/h未満	4t/h以上	未回答・無記入		
集じん方式別の施設数	バグフィルター (BF)	1	2	3	5	11	
	電気集じん機 (ESP)	-	-	-	-	-	
	複合	BF+WS	1	-	1	3	5
		ESP+WS	-	-	2	-	2
	合計	2	2	6	8	18	
高度排ガス処理方式別の施設数	消石灰吹き込み	2	1	2		5	
	複合	消石灰吹き込み＋活性炭吹き込み	-	1	1	-	2
		消石灰吹き込み＋活性炭吸着塔	-	-	1	-	1
	なし	-	-	2	-	2	
	未回答・無記入	-	-	-	8	8	
	合計	2	2	6	8	18	

BF	: Bag Filter (ろ過式集じん設備)
ESP	: Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)
WS	: Wet Scrubber (湿式集じん設備)

<参考> 既存調査による処理方式ごとの設置の状況

² 貴田晶子 (2005) 水銀の排出インベントリーと環境排出、廃棄物学会誌、Vol.16, No.4, pp191-203

除じん方式（集じん機）別に見ると、バグフィルター単独が最も多く 1,974 施設(91%)を占め、次いで、電気集じん機単独が 127 施設 (5.9%)となっている。焼却処理能力別にみても、除じん方式の分布は概ね同様である。

ダイオキシン類対策における高度排ガス処理方式は、複合式（活性炭吹き込み+消石灰吹き込み）が 903 施設（41.7%）と最も多い。単独又は複合で活性炭吹き込みしている施設は、全体では 1324 施設（61.1%）に上るが、焼却能力に見ると 4t/h 以上の施設では割合がやや低い（48.3%）。

表Ⅱ-4-2-6 集じん機別・焼却能力別施設数(全国の状況)

		焼却処理能力			合計	
		2t/h 未満	2t/h 以上～4t/h 未満	4t/h 以上		
集じん ^{注1} 方式別の施 設数	バグフィルター (BF)	545	804	625	1974	
	電気集じん機 (ESP)	37	49	41	127	
	サイクロン (CY)	7	2	-	9	
	その他 ^{注2}	5	0	2	7	
	複合	ESP+BF	2	3	18	23
		ESP+CY	2	8	2	12
		その他	3	7	4	14
	なし ^{注3}	-	2	-	2	
施設数合計		601	875	692	2168	
高度排ガス 処理方式別 の施設数	触媒反応塔	6	9	26	41	
	活性炭吹き込み	38	70	54	162	
	消石灰吹き込み	100	129	106	335	
	活性炭吸着塔	4	5	6	15	
	活性コークス吸着	-	-	-	-	
	その他	14	28	20	62	
	複合	活性炭吹き込み+消石灰 吹き込み	311	422	170	903
		触媒反応塔+活性炭吹 込み+消石灰吹き込み	38	111	110	259
		その他	54	86	180	320
	なし ^{注2}	36	15	20	71	
施設数合計		601	875	692	2168	

注1: 出典では「除じん方式別の施設数」と表記されている。注2: スクラバーなど 注3: いずれもガス化改質炉
 (出典) 平成 26 年度一般廃棄物処理に伴うダイオキシン類排出状況等調査報告書 (平成 25 年度調査結果) 平成 27 年
 3 月環境省

排ガス中全水銀濃度については、18施設、64データを収集することができた。全水銀濃度（標準酸素補正方式（On：12%）を用いた酸素換算値）の全体の分布は次図のとおり。10 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが66%を占めた。50 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上のデータも5データあった。

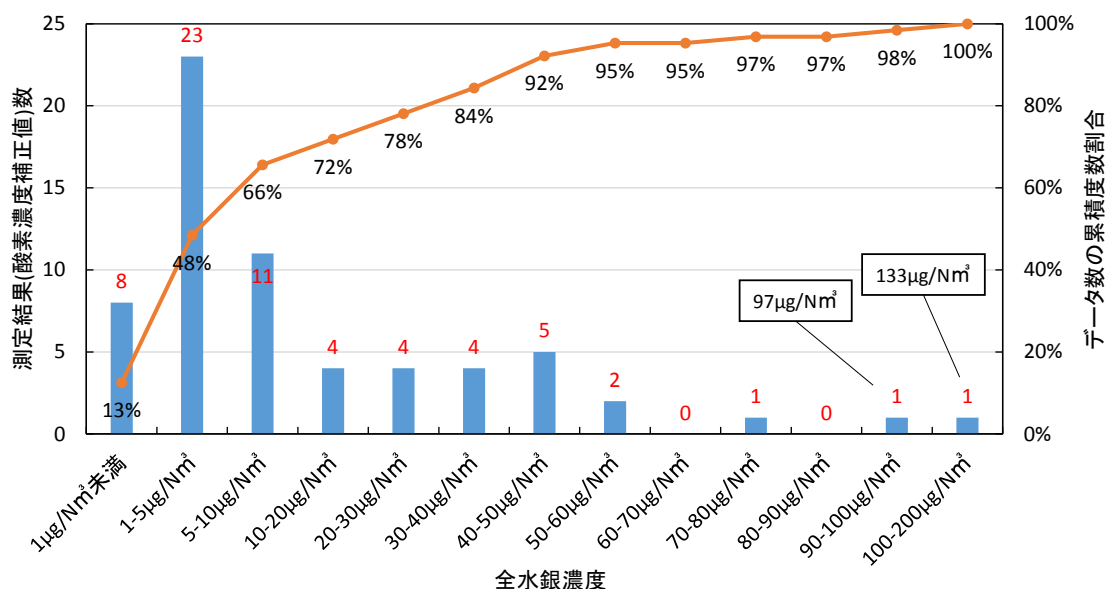


図 II-4-2-1 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム（一般廃棄物焼却炉）

① 排ガス処理施設の種類の全水銀濃度の関係

バグフィルター設備を単独で使用している施設（活性炭吹込みや消石灰吹込みは実施されている）では、全水銀濃度の算術平均値は17 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であったが、中央値は4.8 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ と低かった。特に、活性炭吹込みをしている5施設の15データは、<0.1~9.6 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ と低かった。

最大値（133 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ ）が検出された施設は、コークスベット式高温ガス化溶解炉による処理施設で、消石灰を吹込みバグフィルターと触媒反応塔でガス処理をしている。蛍光管や水銀体温計は分別回収されている。バグフィルターと湿式電気集じん機を組み合わせで使用している施設は、標準偏差（ σ ）が11 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ で、他の排ガス処理方式の標準偏差と比べて小さかった。

バグフィルターを設置していない施設（「WS(+BF)以外」の施設）の中で最大値（97 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ ）が検出された施設は、電気集じん機とスクラバーでガス処理をしている。当該施設では、維持管理の一環で定期的に水銀濃度を測定している。直近3カ年の測定結果は<5 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ ~14 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ （n=10、ただし、ガス状水銀のみ）で、今回の実態調査結果はこれらに比べて高濃度であった。測定当日の一般廃棄物中の水銀含有濃度は0.56mg/kgで「WS(+BF)以外」10施設

中で最も高濃度であったことから、通常時よりも焼却物中の水銀濃度が高かった可能性も考えられる。なお、当該施設が設置されている自治体では、蛍光管や水銀体温計などは分別回収をしていない。

表 II-4-2-7 排ガス処理施設の種類と全水銀濃度（一般廃棄物焼却炉）

排ガス処理施設の 種類	施設数		全水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$)						
	データ数		中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)
BF+WS	5	15	2.4	45	0.6	5.7	11	2.7	0.5
BF(+WS 以外)	11	39	4.8	130	<0.1	17	27	4.4	0.9
WS(+WS 以外)	2	10	30	97	6.0	34	27	23	0.4
合計	18	64	5.0	130	<0.1	17	25	5.1	0.8

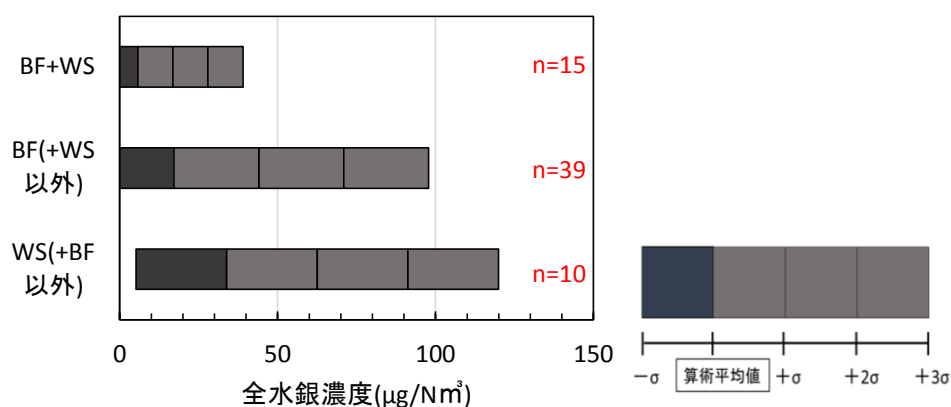


図 II-4-2-2 一般廃棄物焼却炉における排ガス処理施設の種類と全水銀濃度

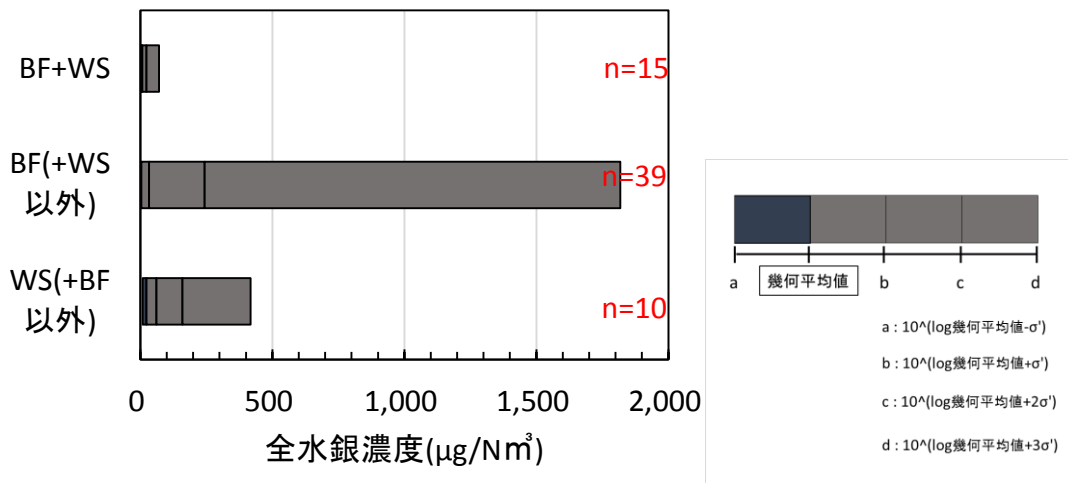


図 II-4-2-3 一般廃棄物焼却炉における排ガス処理施設の種類の全水銀濃度 (対数標準偏差)

② 施設規模及び設置年と全水銀濃度

施設規模 (焼却能力) や施設設置年と、全水銀濃度の間には、相関は見られなかった。

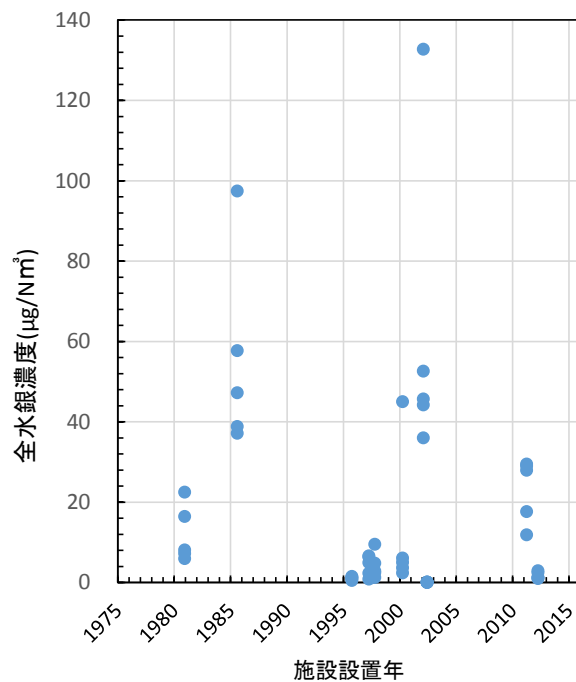


図 II-4-2-4 施設設置年と全水銀濃度との関係

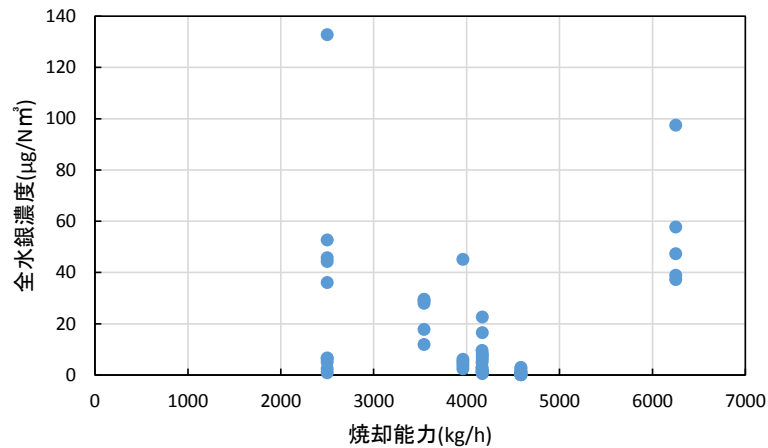


図 II-4-2-5 焼却能力と全水銀濃度との関係

③ 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（全て、ガス状水銀のみのデータ。また、標準酸素補正方式による酸素換算値でないデータも含まれる。）について、文献調査を行った結果、次のとおりであった。

表 II-4-2-8 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
（一般廃棄物焼却炉）

排ガス処理施設の種類	施設数 (データ数)	水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$)				
		中央値	最小値	最大値	算術平均値	標準偏差
BF+WS ^{注1}	6(19)	18	0.063	30	14	12.9
BF+乾式処理 ^{注2}	21(59)	17	0.007	54.0	22	18.3
BF 単独 ^{注3}	10(16)	1.9	0.200	24.2	5.7	8.4
上記以外 ^{注4}	4(9)	1.7	0.50	54	11.1	17

注1：バグフィルターと、湿式集じん機との組合せ

注2：バグフィルターと、消石灰吹込み、活性炭吹込み、触媒反応塔などの組合せ

注3：バグフィルター単独（他の処理と組み合わせているか不明なもの）

注4：電気集じん機、排ガス処理方式が不明なもの

また、平成 25 年度水銀廃棄物の処理実態調査委託業務報告書（平成 26 年 3 月、(株)エックス都市研究所）では、次の結果が得られている。

表 II-4-2-9 処理方式別の排ガス中の水銀濃度

			排ガス中濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$)	データ数	
電気集じん機	湿式処理設備	幾何平均値	5.5	20	
		中央値	5		
	活性炭処理	幾何平均値	9.6	9	
		中央値	9.2		
	その他(電気集じん機のみを含む)	幾何平均値	15	11	
		中央値	20		
バグフィルター	湿式処理設備	幾何平均値	3.4	104	
		中央値	2.5		
	活性炭処理	幾何平均値	3.5	159	
		中央値	3.3		
	バグフィルターのみ	幾何平均値	8.4	99	
		中央値	10		
	※連続測定”有”のデータ(参考)		最大値	180	約 50 施設
			最小値	0.15(ND)	
幾何平均値			3.3		
中央値			2.5		

(文献調査の出典)

- 1) 平成 21 年度水銀灯の残留性物質の長距離移動特性の検討に関する調査・研究業務報告書(国立環境研究所)
- 2) 平成 21 年度廃棄物処理施設からの水銀等排出状況調査業務報告書(東京テクニカルサービス(株))
- 3) 平成 22 年度 PRTR 届出外排出量推計等検討業務報告書 第 2 分冊廃棄物処理施設に係る検討等(株環境計画研究所)
- 4) 平成 23 年度非意図的生成有害大気汚染物質排出実態調査(株島津テクノリサーチ)
- 5) 平成 14 年度有害大気汚染物質排出実態調査((財)日本環境衛生センター)
- 6) 平成 20 年度有害大気汚染物質発生源対策調査(札幌市)
- 7) 平成 22 年度有害大気汚染物質排出実態調査業務結果報告書(株島津テクノリサーチ)
- 8) 平成 26 年度水銀廃棄物の処理に関する排出調査業務報告書(株環境計画研究所)
- 9) 平成 25 年度水銀廃棄物の処理実態調査委託業務報告書(株エックス都市研究所)

4-3 下水汚泥焼却炉

(1) 調査対象施設の概要

下水汚泥焼却炉に該当する 33 施設（環境省調査：5 施設、自主調査：28 施設）の調査結果が得られた。

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表Ⅱ-4-3-1 のとおりであった。

表Ⅱ-4-3-1 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた施設数	排ガス中水銀濃度のデータ数
環境省法	12 施設	33 データ
上記測定方法以外 ^(注)	21 施設	36 データ

(注) ガス状水銀のみのデータや、酸素換算値でないデータも含まれる。

表Ⅱ-4-3-2 1時間当たり焼却能力

1時間当たり 焼却能力	時間焼却能力				合計
	2t/h 未満	2t/h 以上 ～4t/h 未満	4t/h 以上	未回答 ・無記入	
下水汚泥 焼却炉	5	16	19	1	41

表Ⅱ-4-3-3 1日当たり焼却能力

1日当たり 焼却能力	日焼却能力				合計
	10t/日 未満	10t/日以上～ 20t/日未満	20t/日以上	未回答・無 記入	
下水汚泥 焼却炉	-	4	36	1	41

(注) 焼却能力 (t/h) × 日稼働時間で算出

(2) 焼却対象物中の水銀含有量

下水汚泥焼却炉における焼却対象物の水銀含有量については、表Ⅱ-4-3-4のデータが得られた。

表Ⅱ-4-3-4 焼却対象物の水銀含有量(mg/kg)

種類	算術平均値	最大値	最小値	データ数	(うち定量下限値以下のデータ数)
汚泥	0.793	3.6	<0.02	36	0

【参考】水銀大気排出インベントリーの推計では、既往の調査研究から、下水汚泥中の水銀含有量として次のデータを引用している。

廃棄物種類	水銀含有量(mg/kg-dry)
下水汚泥	0.31~1.6

(3) 排ガス中の水銀濃度

水銀大気排出実態調査の協力施設においては、ほぼ全ての施設にスクラバーが設置されている。

バグフィルター＋スクラバーで処理している施設は約半数を占め、最も多い。電気集じん機＋スクラバーで処理している施設も約4割を占める。

表Ⅱ-4-3-5 集じん方式別施設数

排ガス処理設備の組合せ		施設数	導入率 (施設数ベース)
バグフィルター系	BF	1	2.4%
	BF+WS(+CY)	20	49.0%
スクラバー系	WS	3	7.3%
	WS+CY	1	2.4%
	WS+ESP	1	2.4%
	WS+ESP+CY	14	34.1%
その他	CY	1	2.4%
合計		41	100%

BF	: Bag Filter (ろ過式集じん設備)
ESP	: Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)
WS	: Wet Scrubber (湿式集じん設備)
CY	: Cyclone separator (遠心力集じん設備)

<参考>既存調査による処理方式ごとの設置状況

除じん方式（集じん機）別に見ると、湿式集じん設備と電気集じん設備の組合せ、又は湿式集じん設備とバグフィルターの組合せが約 30% ずつと多い。湿式集じん設備のみで処理している施設も約 20% 近くある。乾式処理を行っている施設は、13% 程度と少ない。

表 II-4-3-6 集じん方式別の施設数の内訳（全国の状況）

排ガス処理設備の組合せ		施設数	導入率 (施設数ベース)
バグフィルター系	BF(単独)	6	2%
	BF+乾式処理	8	3%
	BF+WS(+CY)	75	27%
スクラバー系 注1	WS(+CY)	49	18%
	WS+ESP(+その他注2)	87	32%
	WS+その他注3	28	10%
その他	CY+ESP など	22	8%

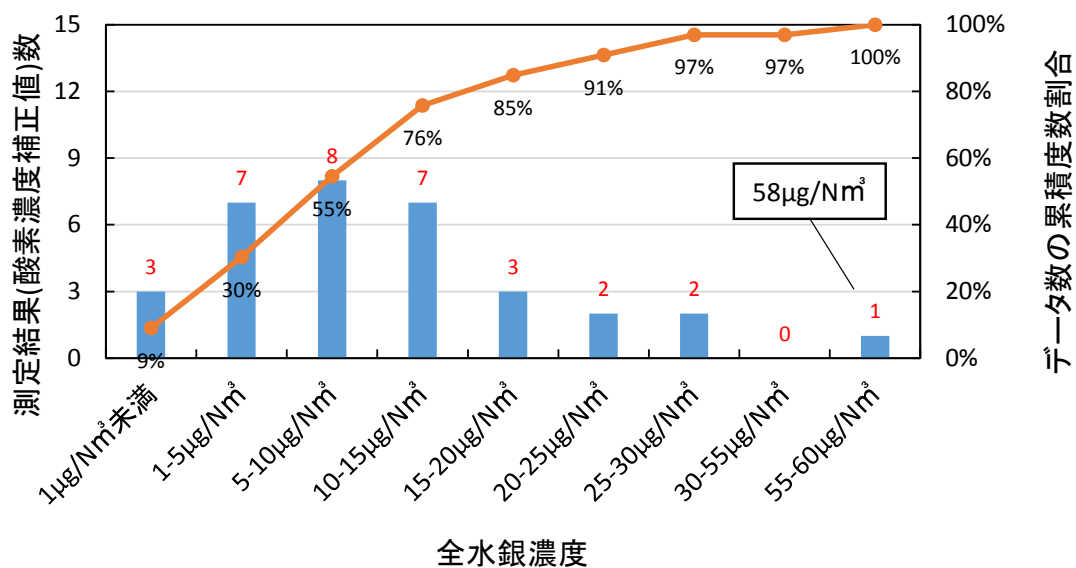
注1：湿式電気集じん機は WS としてカウントした。 注2：触媒反応塔など 注3：セラミックフィルターなど

BF	: Bag Filter (ろ過式集じん設備)
ESP	: Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)
WS	: Wet Scrubber (湿式集じん設備)
CY	: Cyclone separator (遠心力集じん設備)

(出典) 国土交通省提供データを㈱エックス都市研究所が集計

排ガス中全水銀濃度については、12 施設、33 データを収集することができた。全水銀濃度（標準酸素補正方式（On：12%）を用いた酸素換算値）の全体の分布は次図のとおり。

10 μ g/N m³未満のデータは 55% を占めた。最大値は 58 μ g/N m³であった。



図Ⅱ-4-3-1 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム (下水汚泥焼却炉)

① 排ガス処理施設の種類の全水銀濃度

12 施設 33 データを排ガス処理施設の種類の比較したところ、WS (+BF 以外) を導入している施設の全水銀の算術平均値が $17 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ と、他に比べて高い傾向が見られた。下水汚泥中の水銀濃度が測定されていた 11 施設 32 データについて、排ガス処理設備ごとに下水汚泥中水銀濃度と排ガス中水銀濃度の相関を検討したが、有意な相関は見られなかった (図Ⅱ-4-3-4 参照)。

表Ⅱ-4-3-7 排ガス処理設備の種類の全水銀濃度 (下水汚泥焼却炉)

排ガス処理施設の 種類	施設数		水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)						
	施設数	データ数	中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均値	対数標準偏差 (対数值)
BF+WS	5	10	1.9	8.8	<0.02	2.7	2.5	1.4	0.7
BF(+WS 以外)	1	5	8.4	11	5.3	8.3	2.2	8.0	0.1
WS(+BF 以外)	5	13	10	58	1.3	17	15	11	0.5
その他	1	5	14	17	12	15	2.0	14	0.1
合計	12	33	8.4	58	<0.02	11	11	5.9	0.6

BF	: Bag Filter (ろ過式集じん設備)
ESP	: Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)
WS	: Wet Scrubber (湿式集じん設備)

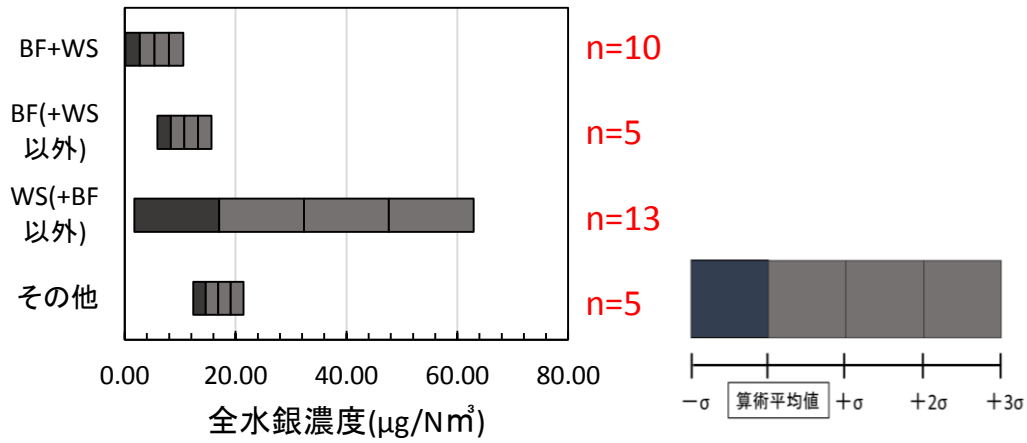


図 II-4-3-2 排ガス処理設備の種類ごとの全水銀濃度（下水汚泥焼却炉）

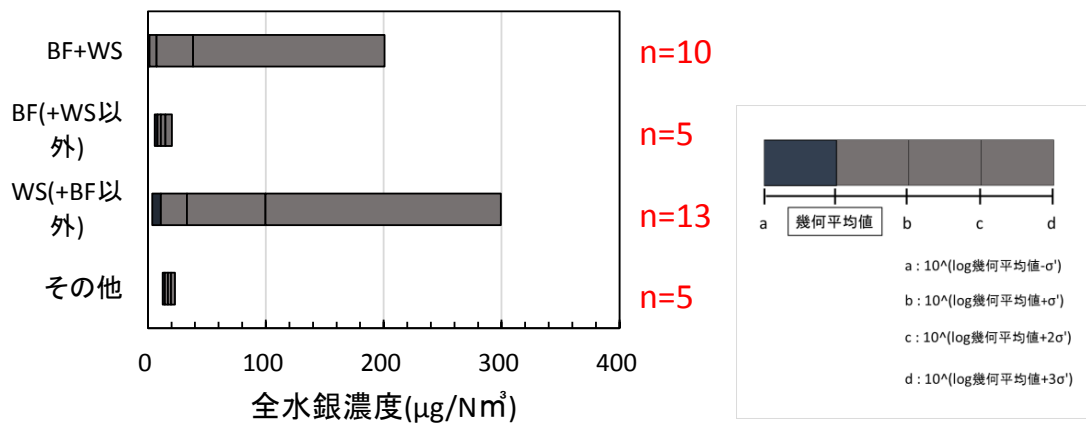


図 II-4-3-3 下水汚泥焼却炉における排ガス処理設備の種類ごとの全水銀濃度

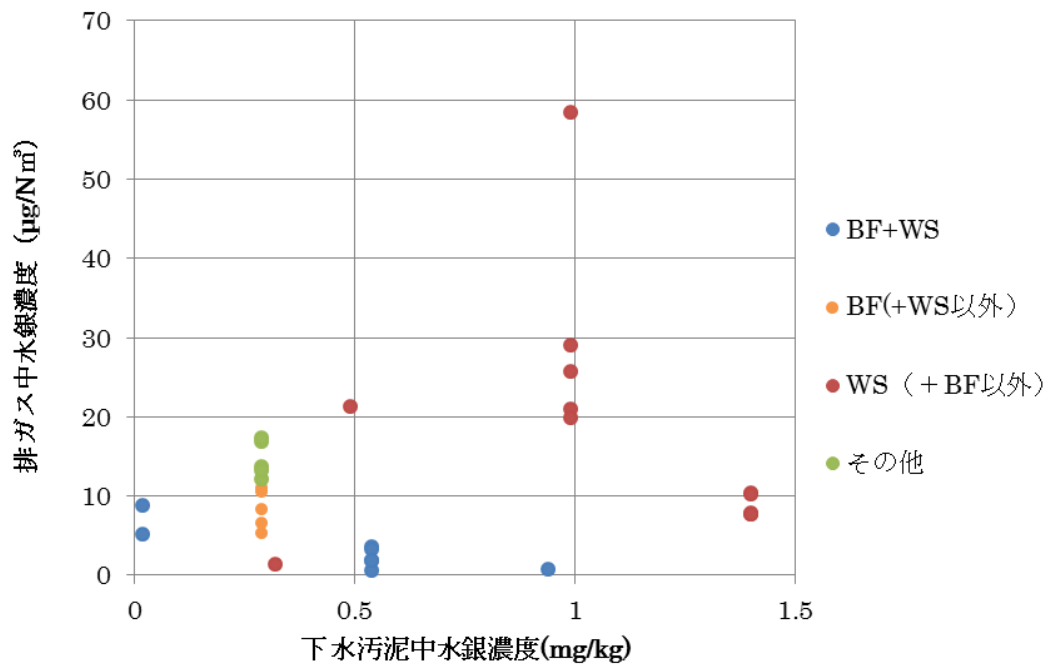


図 II-4-3-4 排ガス処理設備ごとの下水汚泥中水銀濃度と排ガス中水銀濃度

② 施設設置年及び施設規模と全水銀濃度

施設設置年が新しいほど、また焼却能力が大きいほど、全水銀濃度が小さくなる傾向が見られた。

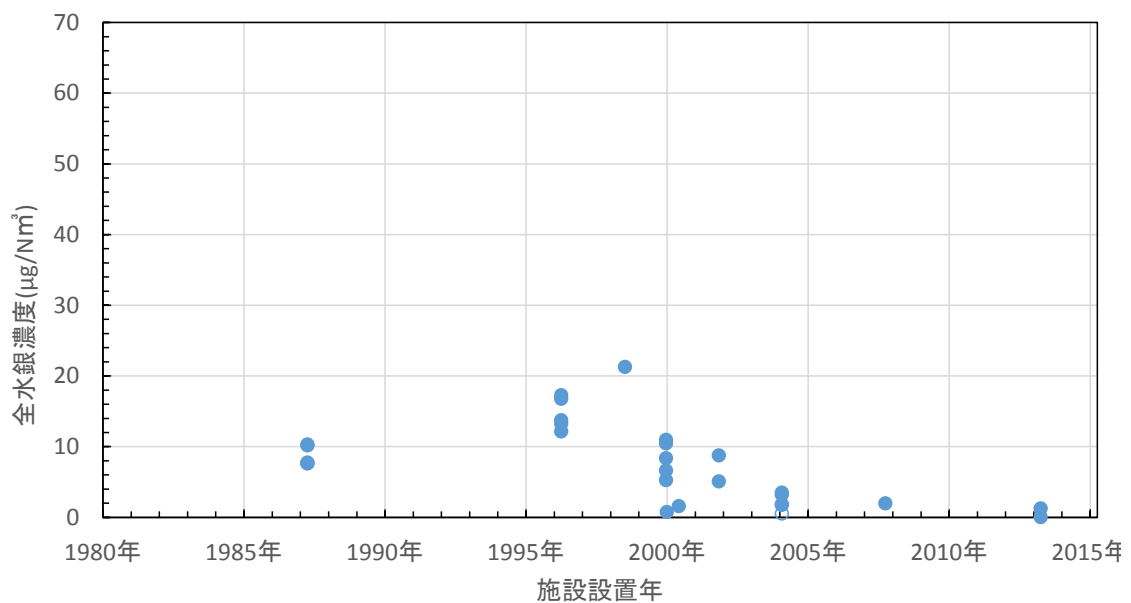


図 II-4-3-5 施設設置年と全水銀濃度との相関図

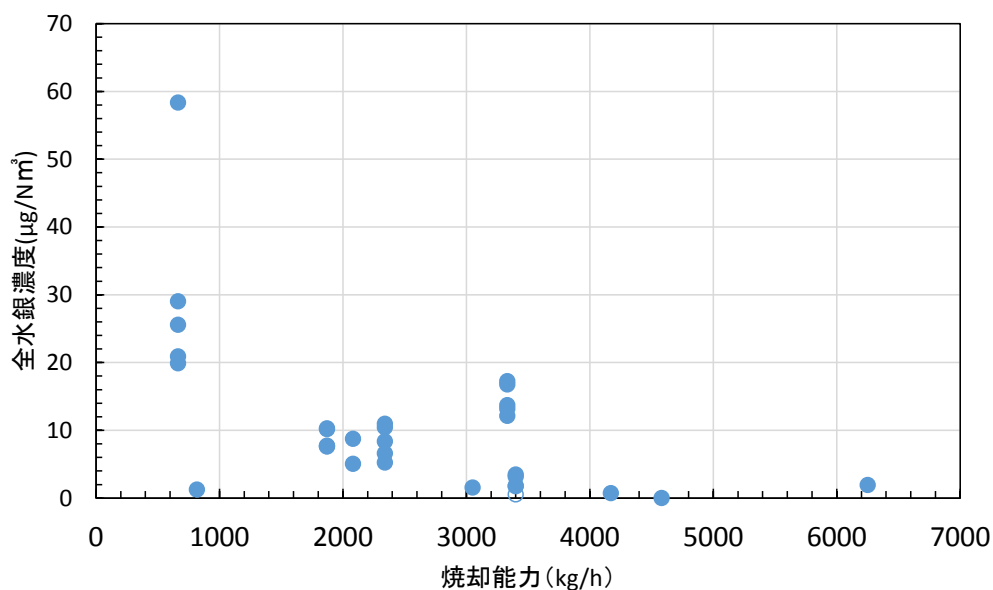


図 II-4-3-6 焼却能力と全水銀濃度との相関図

③ 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（ガス状水銀のみのデータや、標準酸素補正方式による酸素換算値でないデータも含まれる。）については、以下のとおりであった。

水銀濃度の算術平均値は、7.5～11 μg/N m³で、最大値は 31 μg/N m³であった。

表 II-4-3-8 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
(下水汚泥焼却炉)

排ガス処理 施設の種類	施設数	水銀濃度 (μg/N m³)						データ 数	
		中央 値	最大 値	最小 値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値		対数標準偏差 (対数值)
BF+WS	10	6.3	22	<0.01	7.5	6.8	1.8	1.2	18
BF(+WS 以 外)	0	-	-	-	-	-	-	-	-
WS(+BF 以 外)	11	9.9	31	0.8	11	7.8	7.9	0.4	18
その他	0	-	-	-	-	-	-	-	-
合計	21	8.6	31	<0.01	9.4	7.5	3.7	1.0	36

(注) ガス状水銀のみのデータや、酸素換算値でないデータも含まれる。

5. セメントクリンカー製造設備

(1) 調査対象施設の概要

セメントクリンカー製造施設に該当する 51 基 (50 箇所) (環境省調査: 9 基、自主調査: 50 基 (49 箇所)) の調査結果が得られた。

施設数及び測定データ数について、排ガス中水銀濃度の測定方法別の内訳は表 II-5-1 のとおりであった。

表 II-5-1 調査結果が得られた施設数及び測定データ数

排ガス中水銀濃度の測定方法	調査結果が得られた施設数	排ガス中水銀濃度のデータ数
環境省法	49 基 (48 箇所)	98 データ
上記測定方法以外	51 基 (50 箇所)	280 データ

(注) 1 施設では、2 基のキルンの排ガスが合流した点で測定を行っているため、キルン数と測定箇所数が一致していない。8 基のキルンでは、環境省調査と自主調査の両方を実施した。また、自主調査 50 基の内 2 基は、平成 27 年度に測定を行っておらず、平成 19 年度に測定を行ったデータのみ提供を受けた。

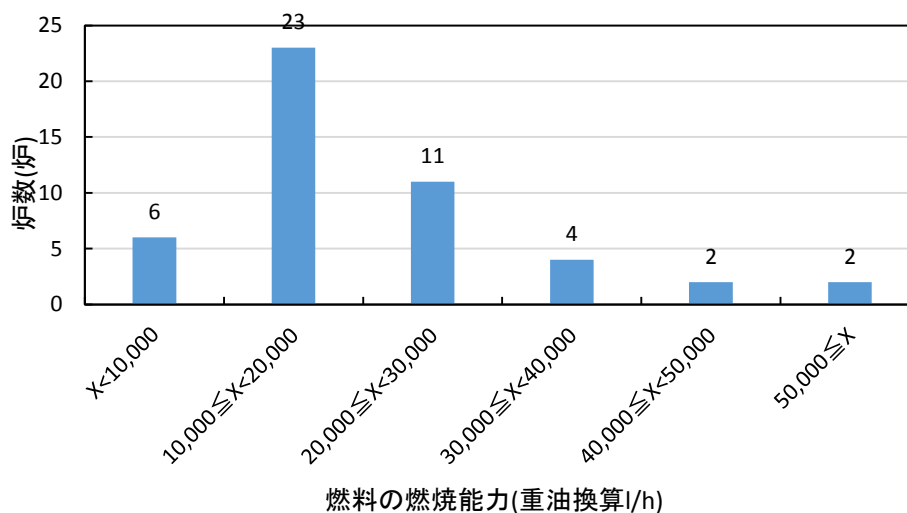


図 II-5-1 燃焼の燃焼能力

(2) 原料・燃料中の水銀含有量

セメント産業では、主要原料である石灰石のほか、様々な廃棄物、他産業の副産物が原料・燃料の代替物として活用されている。

排出実態調査においては、使用原料・燃料の種類について、次の具体的な品目名が挙げられた。

表 II-5-2 原料・燃料の概要

セメントクリンカー 製造設備に投入され る原料・燃料の種類	石灰石類 粘土類 けい石類 鉄原料 高炉スラグ 高炉ダスト 石炭灰 汚泥・スラッジ 副産石こう 建設発生土 燃えがら・ばいじん・ダスト 非鉄鉱さい等 鋳物砂 製鋼スラグ 石炭 石油コークス 重油 ガス 廃プラスチック 廃油 廃白土 再生油 廃タイヤ 肉骨粉 シュレツダーダスト RPF 木くず その他
-------------------------------------	--

原料・燃料中の水銀含有量については、次表のデータが得られた。

表 II-5-3 原料・燃料中の水銀含有量

原料の種類	水銀含有量 (mg/kg)			データ数(うち定量下限値未満のデータ数)
	算術平均値	最大値	最小値	
石灰石	0.022	0.055	0.009	13(2)
珪石	0.077	0.17	0.007	8(0)
鉄原料	0.338	0.475	0.02	4(0)
サイクロン原料	<0.001	-	-	1(1)
石炭灰	0.228	0.4	0.075	12(0)
汚泥・粘土類	0.202	1.3	<0.005	10(1)
廃石膏ボード	0.363	0.363	0.363	2(0)
建設発生土	0.375	0.42	0.32	4(0)
焼却灰	<0.05	-	-	2(2)
集じん灰	0.574	1.4	0.052	3(0)
非鉄鉱さい等	0.004	0.005	0.005	3(2)
製鋼スラグ	4.2	-	-	1(0)
廃プラスチック	0.104	0.13	0.078	2(0)
石炭	0.121	0.91	0.015	14(2)
オイルコークス	0.225	0.36	0.09	2(0)

【参考】セメント協会の調査によれば、セメントクリンカーの主要原料である石灰石について、日本の石灰石中水銀含有量は、0.044mg/kg (0.030～0.185mg/kg (データ数 31))。

セメントクリンカー製造施設に関する BAT/BEP ガイダンス (案) によれば、データの分布は不明であるが、石灰石中水銀含有量の算術平均値は約 0.02～0.04 mg/kg。<0.005～0.4mg/kg というデータもある。

(3) 排ガス中の水銀濃度

セメントクリンカー製造設備における基本的な排ガス処理設備は下図のとおり。セメントクリンカー焼成キルンの排ガスは、複数経路に分かれて異なる原料・燃料と熱交換した後、別々の煙突から大気排出されることもある。また、複数の焼成キルンの排ガスが合流することもある。そのため、焼成キルンの数(上記(1)の施設数)と煙突の数は一致しない。

全ての施設の、全ての排ガス経路に、電気集じん機またはバグフィルターが設置されている。湿式スクラバーや触媒脱硝、活性炭吸着などの技術は使われていない。

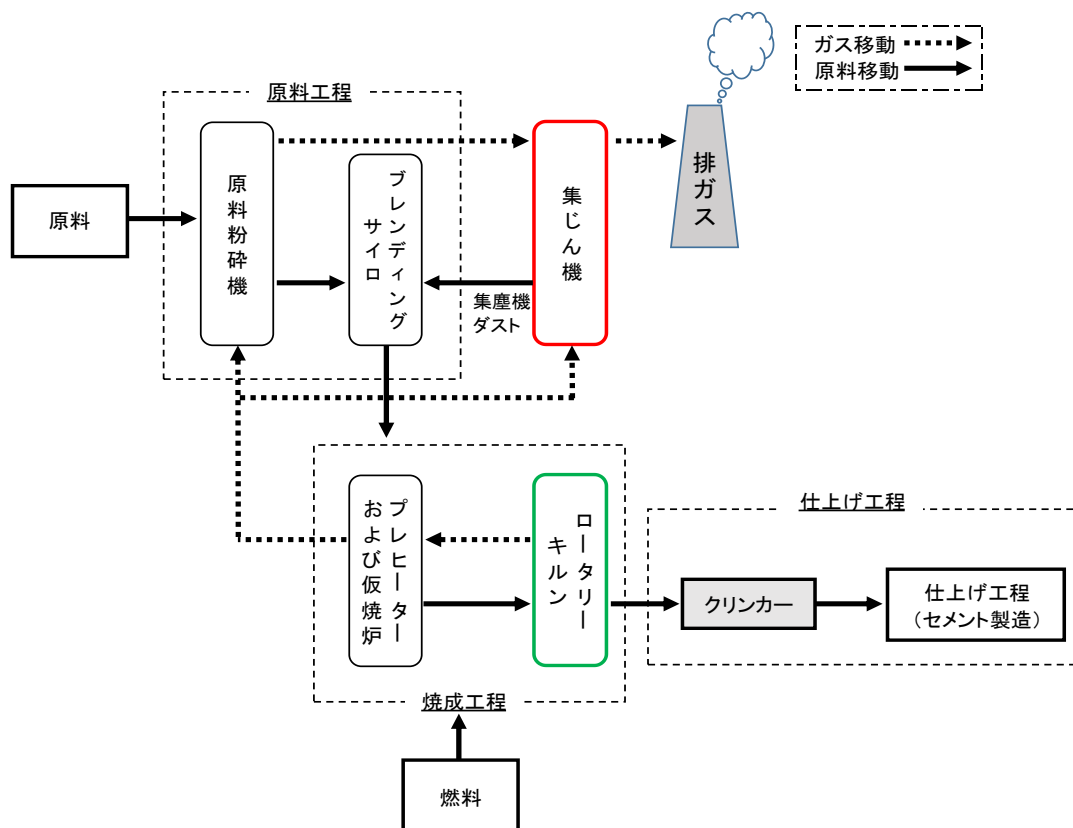


図 II-5-2 セメントクリンカー製造設備の製造プロセス

表 II-5-4 排ガス処理設備の組み合わせ

排ガス処理設備の組合せ	キルン数	割合 (キルン数ベース)
ESP+BF	1	2.0 %
BF	4	7.8 %
ESP (注1)	45	88.2 %
その他 (注2)	1	2.0 %
合計 (注1)	51	—

(注1) 休止中の1キルンを含む。

(注2) BF、ESPが並列に設置されており、合流地点で測定

BF : Bag Filter (ろ過式集じん設備)

ESP : Electrostatic Precipitator (電気集じん設備)

排ガス中全水銀濃度については、49基（48箇所）の全水銀の98データを収集することができた。1箇所は2基の排ガスが合流している。

全水銀濃度（標準酸素補正方式（On:10%）を用いた酸素換算値）の全体の分布は下図のとおり。40 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 未満のデータが約60%を占めたが、100 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ 以上のデータも約10%あった。全体の算術平均値は47 $\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。

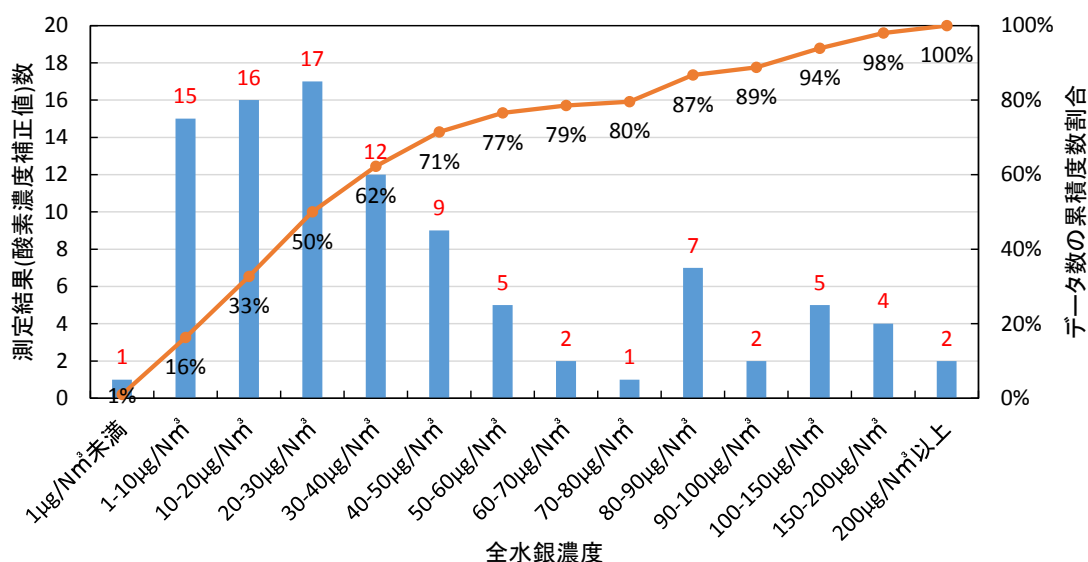


図 II-5-3 排ガス中全水銀濃度 ヒストグラム（セメントクリンカー製造設備）

表 II-5-5 セメントクリンカー製造設備の排ガス中全水銀濃度

全水銀濃度 (μg/N m³)							データ数
中央値	最大値	最小値	算術 平均値	標準 偏差	幾何 平均値	対数標準偏差 (対数值)	
30	260	0.9	47	51	27	0.5	98

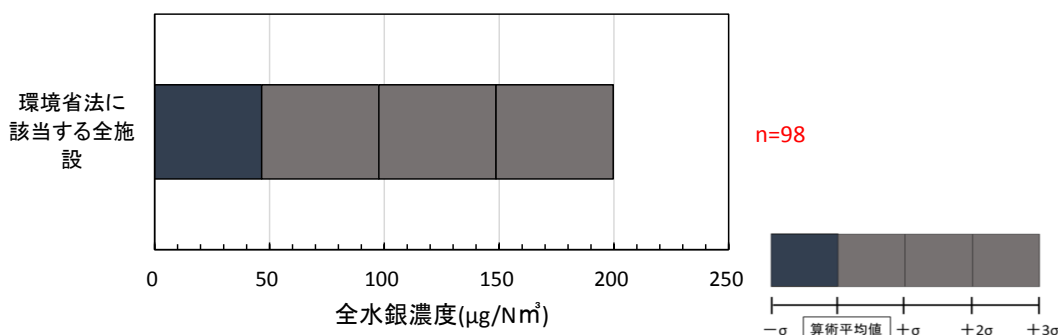
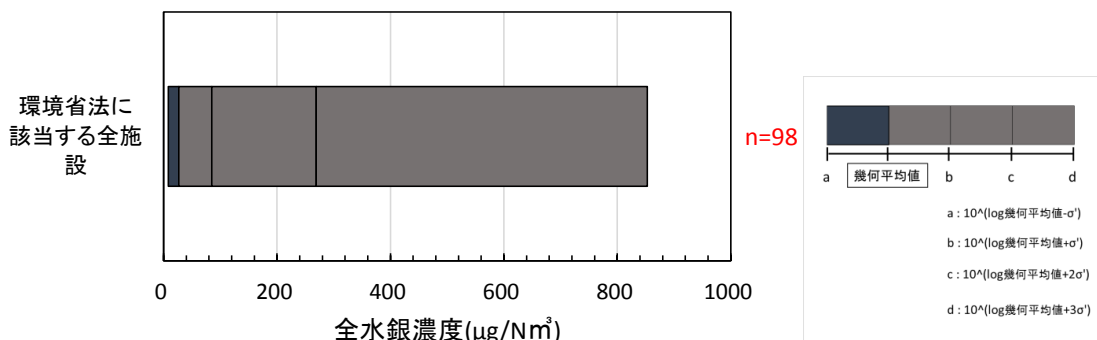


図 II-5-4 セメントクリンカー製造設備の排ガス中全水銀濃度

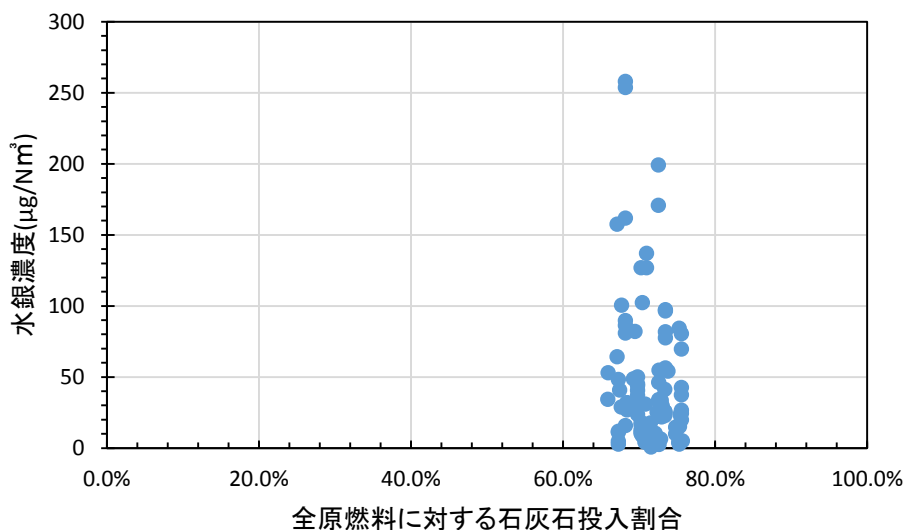


図Ⅱ-5-5 セメントクリンカー製造設備の排ガス中全水銀濃度
(対数標準偏差による)

① 原料・燃料の投入量と全水銀濃度の関係

セメント産業で使われる原料・燃料のうち主要原料である石灰石と、今回の調査で水銀含有量の分析値が得られた廃棄物・副産物のうちセメント産業全体での使用量が最も多い石炭灰について、その投入割合と全水銀濃度との相関図は、図Ⅱ-5-6、図Ⅱ-5-7のとおり。また、水銀含有量が高濃度の試料があった汚泥・粘土類についても、投入割合と全水銀との相関図は図Ⅱ-5-8のとおり。

全水銀濃度と、個々の原料・燃料の投入量には相関は確認できず、多種多様な原料・燃料中の水銀が、相互に影響していると推察された。



図Ⅱ-5-6 石灰石投入割合と全水銀濃度との関係

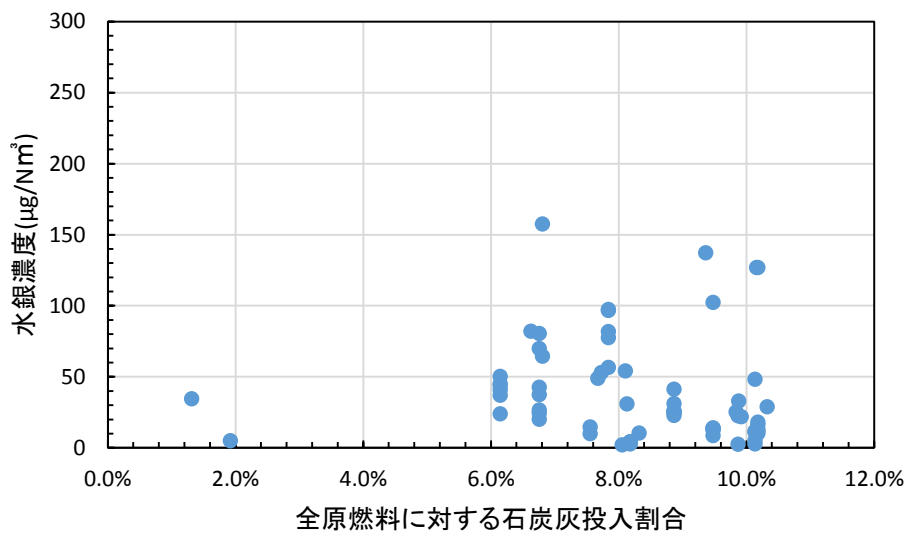


図 II-5-7 石炭灰投入割合と全水銀濃度との関係

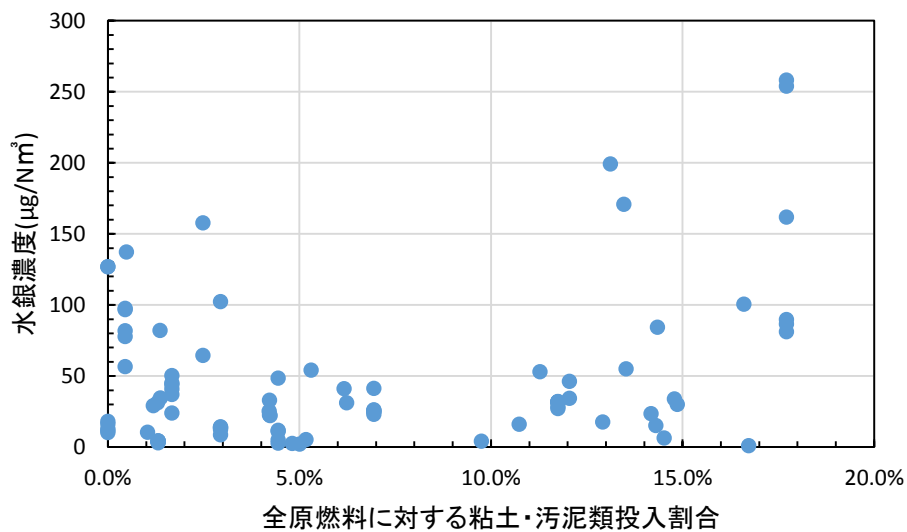
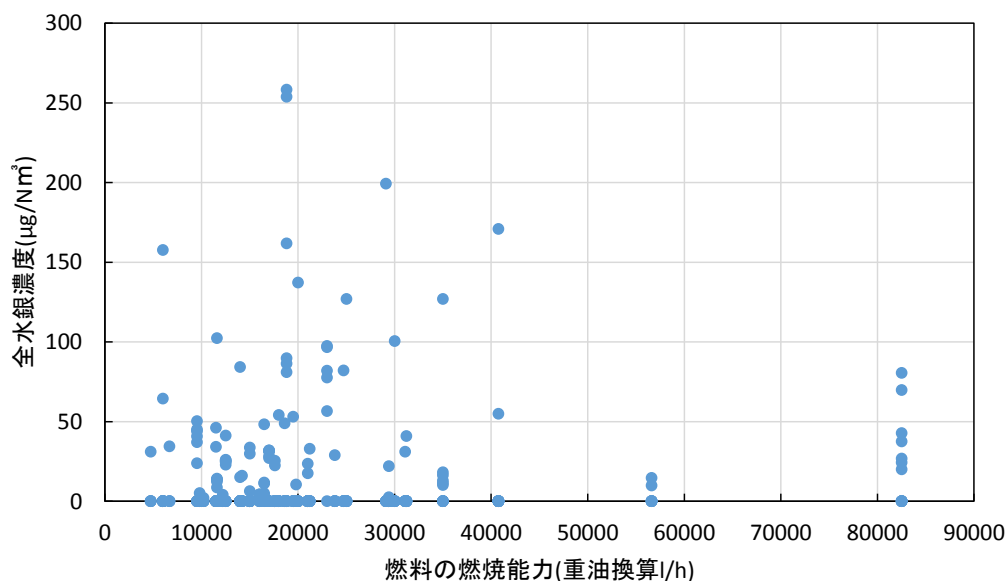


図 II-5-8 粘土・汚泥類投入割合と全水銀濃度との関係

② 施設規模と全水銀濃度の関係

小規模の施設の方が、全水銀濃度のばらつきが比較的大きい傾向が見られた(図 II-5-9)。なお、セメント産業においては、様々な原料・燃料を扱い、必要成分が均一になるようブレンドして用いられている。

規模の大きい施設では、水銀含有量が高い原料・燃料(廃棄物・副産物を含む)が混入しても、より多くの他の原料・燃料とブレンドされることにより、影響が平準化されている可能性が考えられる。



図Ⅱ-5-9 施設規模と全水銀濃度との関係

③ 環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度の分布

環境省法以外の測定方法を用いた水銀濃度（ガス状水銀のみのデータや、標準酸素補正方式による酸素換算値でないデータも含まれる。）については、以下のとおりであった。

水銀濃度の算術平均値は $39\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。また、分布のばらつきの程度を示す標準偏差（ σ ）は、 $37\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。最大値は $220\mu\text{g}/\text{N m}^3$ であった。

表Ⅱ-5-6 環境省法以外の測定方法を用いたデータの分布
(セメントクリンカー製造設備)

水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{N m}^3$)							データ数
中央値	最大値	最小値	算術平均値	標準偏差	幾何平均	対数標準偏差 (対数值)	
30	220	0.2	39	37	21	0.6	280

III. 分野横断的な検討

1. 粒子状水銀の割合

これまで水銀測定に広く用いられてきた JIS K 0222（排ガス中の水銀分析方法）はガス状水銀のみを測定対象とした方法であるが、「実態調査のための水銀測定方法」においては粒子状水銀も測定対象とした。

「実態調査のための水銀測定方法」に基づくデータのうち、ガス状水銀と粒子状水銀のいずれも検出下限値以上であったデータについて、全水銀に占める粒子状水銀の割合は次のとおりであった。

いずれの施設区分も、排ガス中の水銀は、主にガス状水銀として存在していると考えられた。しかし、ガス状水銀の割合が低いデータもあることから、排ガス中の水銀分析においては、粒子状水銀も考慮する必要があると考えられる。

表Ⅲ-1 ガス状水銀の割合

	ガス状水銀の割合			データ数
	中央値	最大値	最小値	
石炭火力発電所及び産業用石炭ボイラー	96.7%	99.9%	58.4%	51 データ
非鉄金属製造（一次施設）	78.5%	98.6%	4.6%	18 データ
非鉄金属製造（二次施設）	98.5%	99.99%	26.3%	68 データ
産業廃棄物焼却炉	94.1%	99.9%	19.4%	66 データ
一般廃棄物焼却炉	99.7%	99.9%	95.2%	11 データ
下水汚泥焼却炉	99.4%	99.5%	92%	6 データ
セメントクリンカー製造設備	97.1%	99.9%	21.2%	84 データ

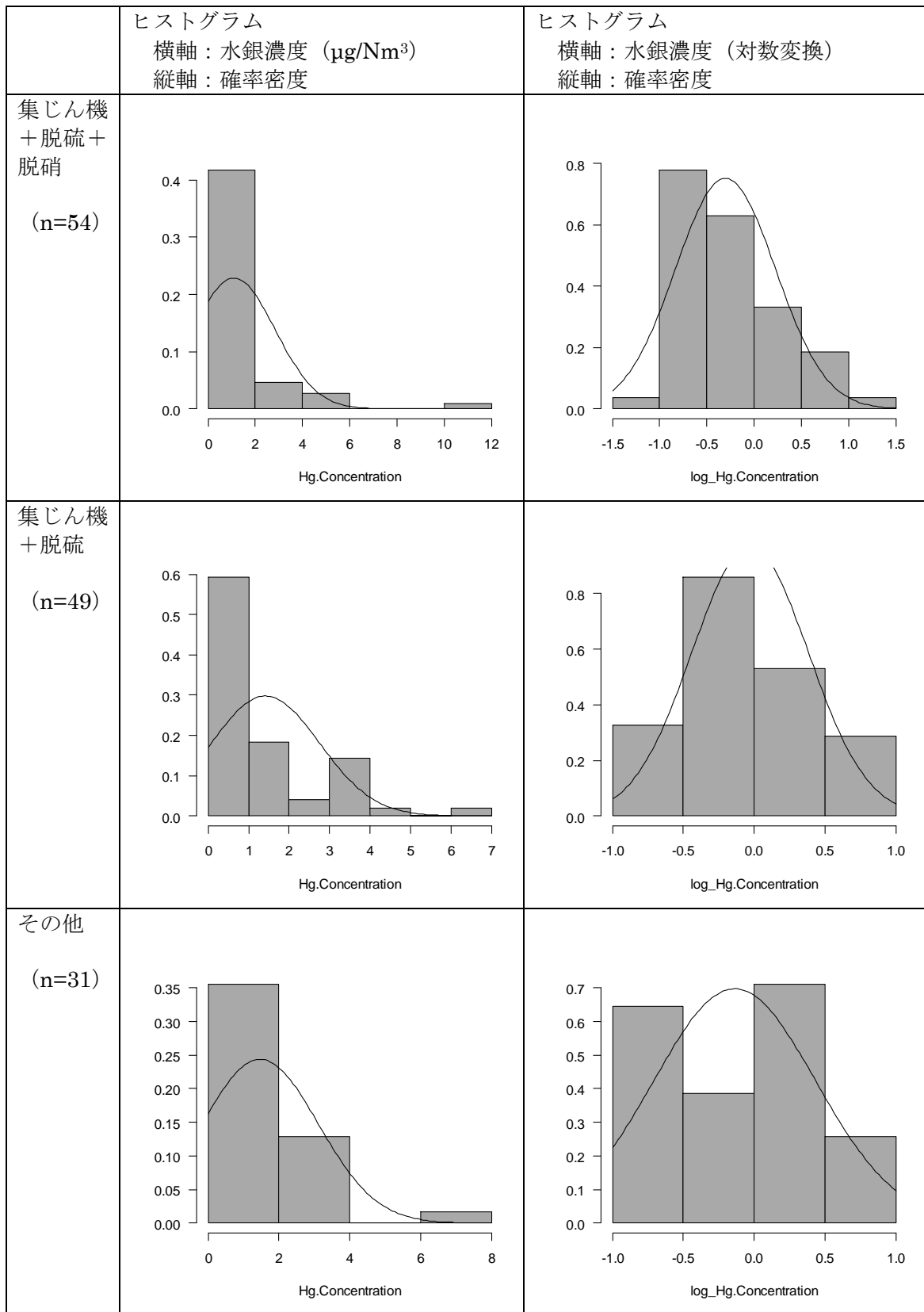
2. データの分布について

発生源の区分ごとの排ガス中の水銀濃度（全水銀）は、多くの発生源区分で対数正規分布にほぼ従うものと考えられる。ただし、非鉄二次製錬の一部の金属種など、一部の区分では正規性は明確ではない（図Ⅲ-2-1～Ⅲ-2-6）。

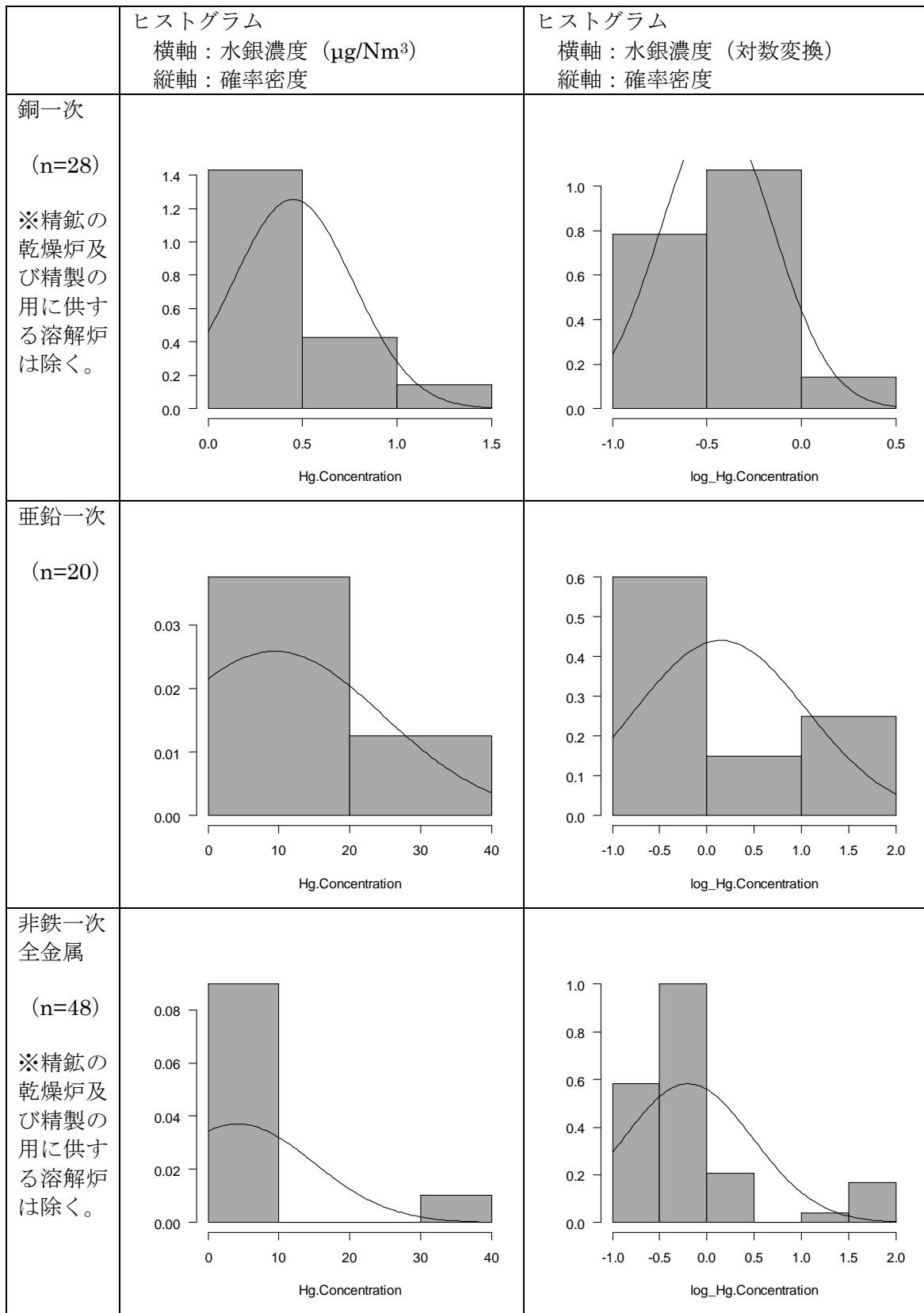
なお、ここで取り扱ったデータは、「I. 排出実態調査の概要」の「5. データの取扱い方針」に基づく。

【次ページ以降のヒストグラムの見方】

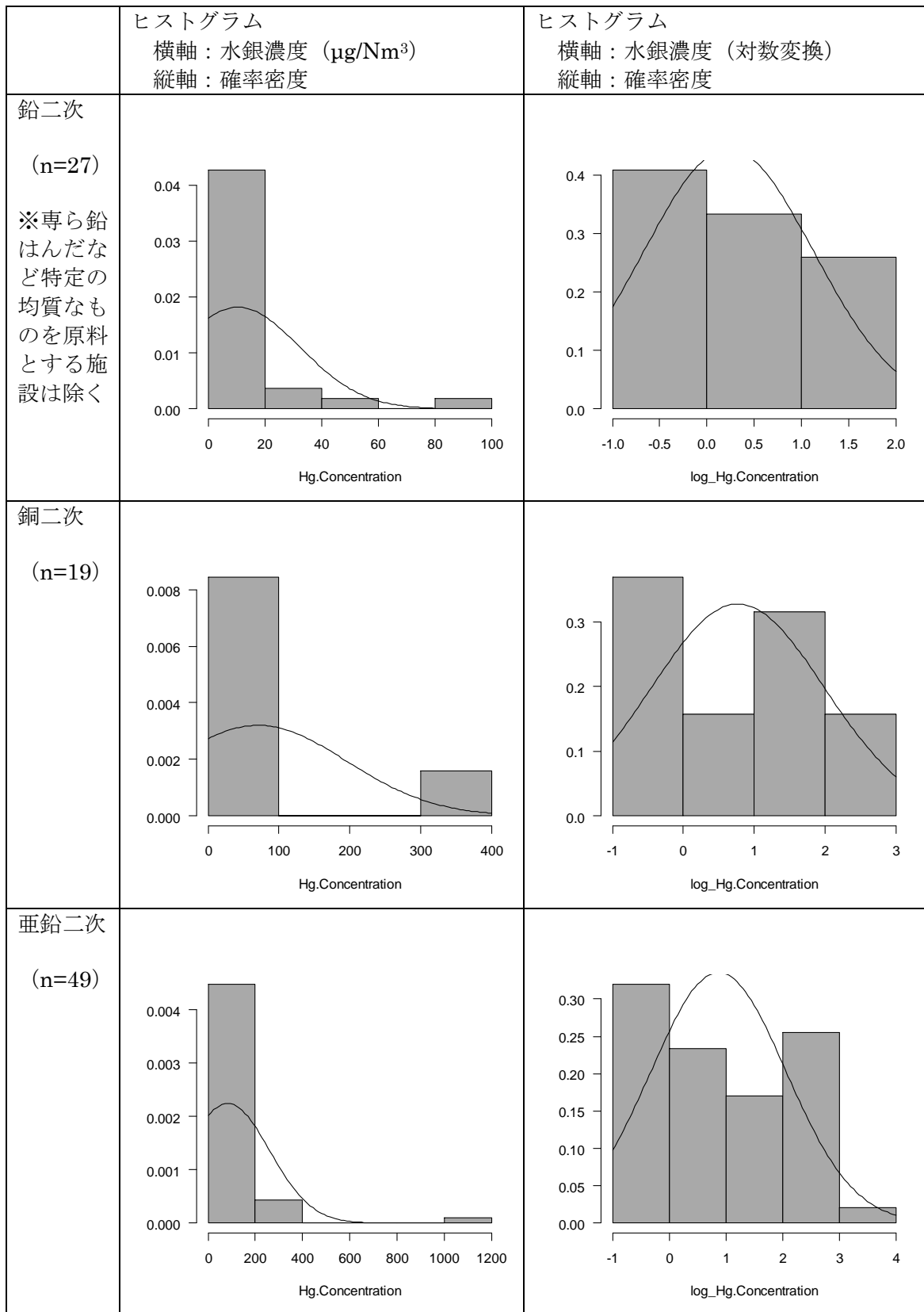
横軸は水銀濃度、縦軸は確率密度。確率密度は、度数分布をもとにグラフの面積（ Σ （水銀濃度の幅×確率密度））が1となるように標準化した数値。



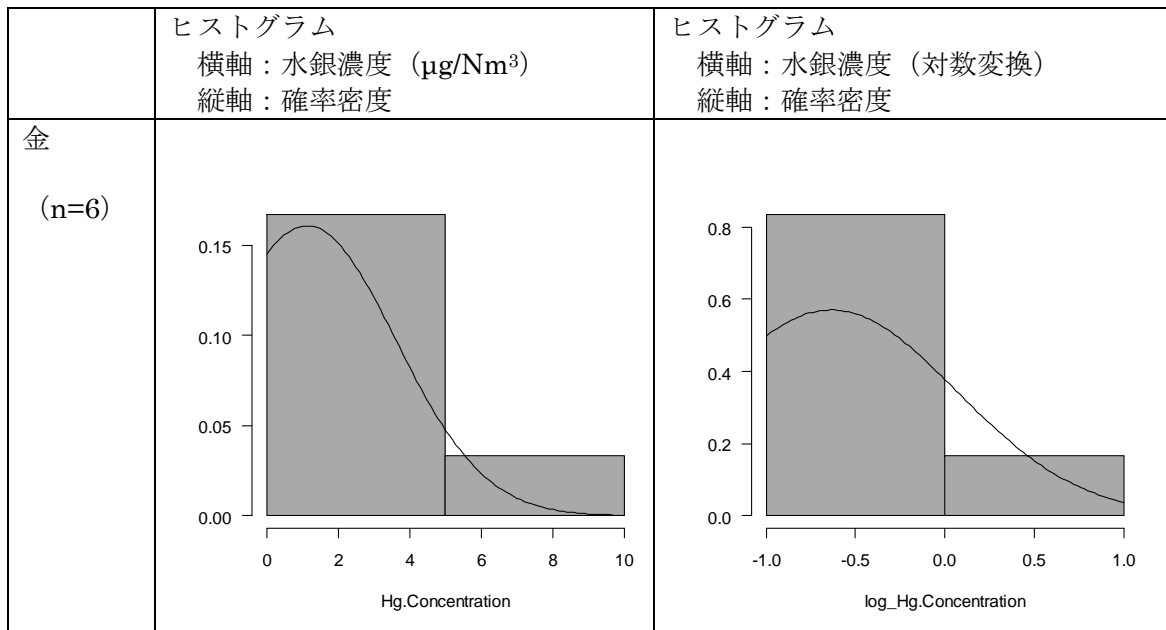
図Ⅲ-2-1 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（石炭ボイラー）



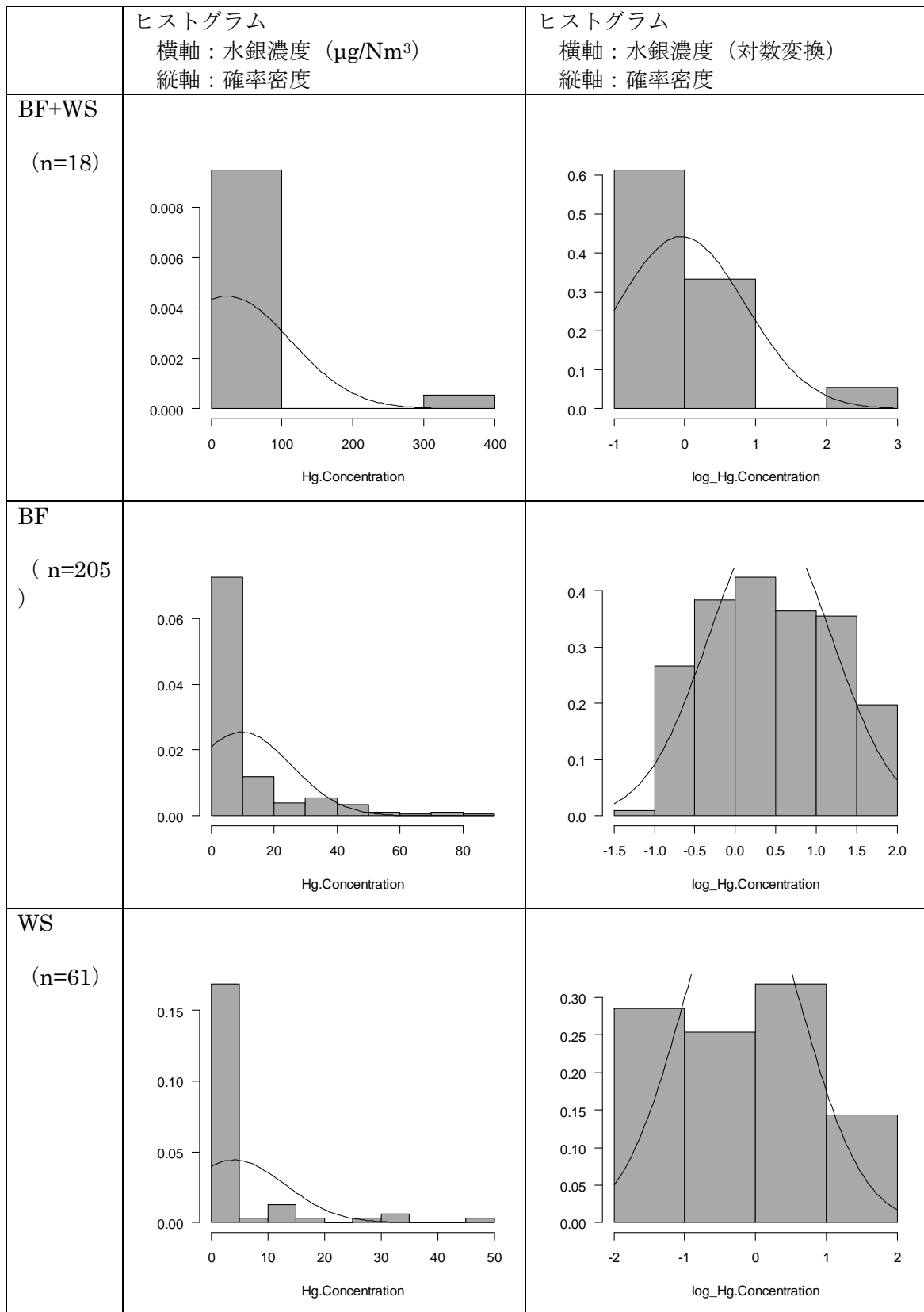
図Ⅲ-2-2 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（非鉄一次施設）



図Ⅲ-2-3 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（非鉄二次施設）（1/2）

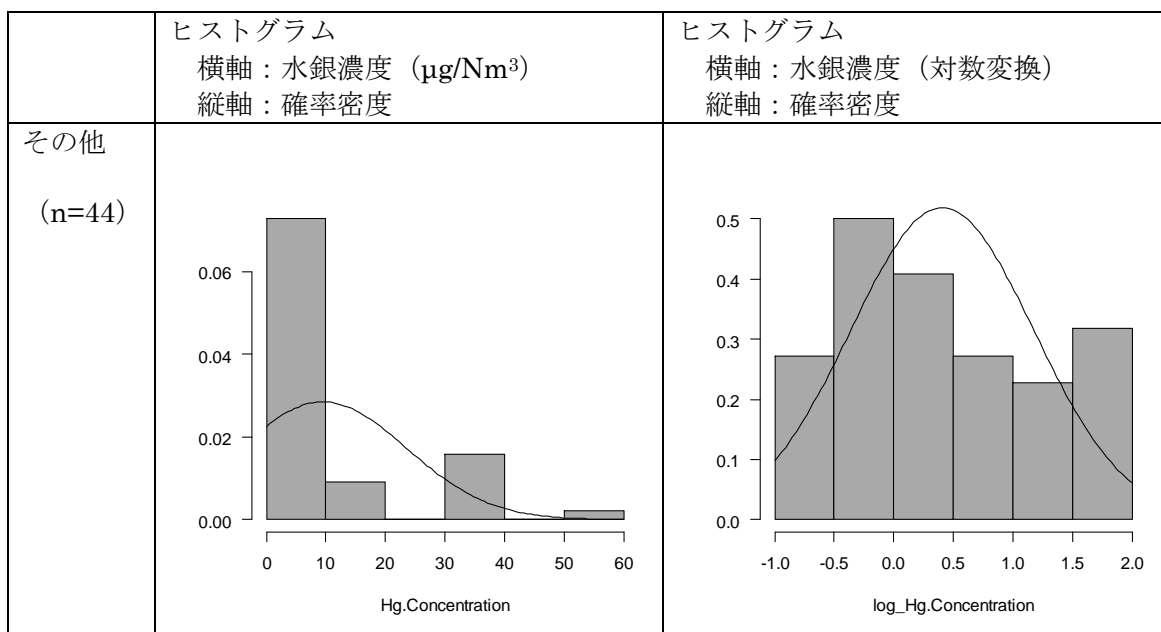


図Ⅲ-2-3 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（非鉄二次施設）(2/2)



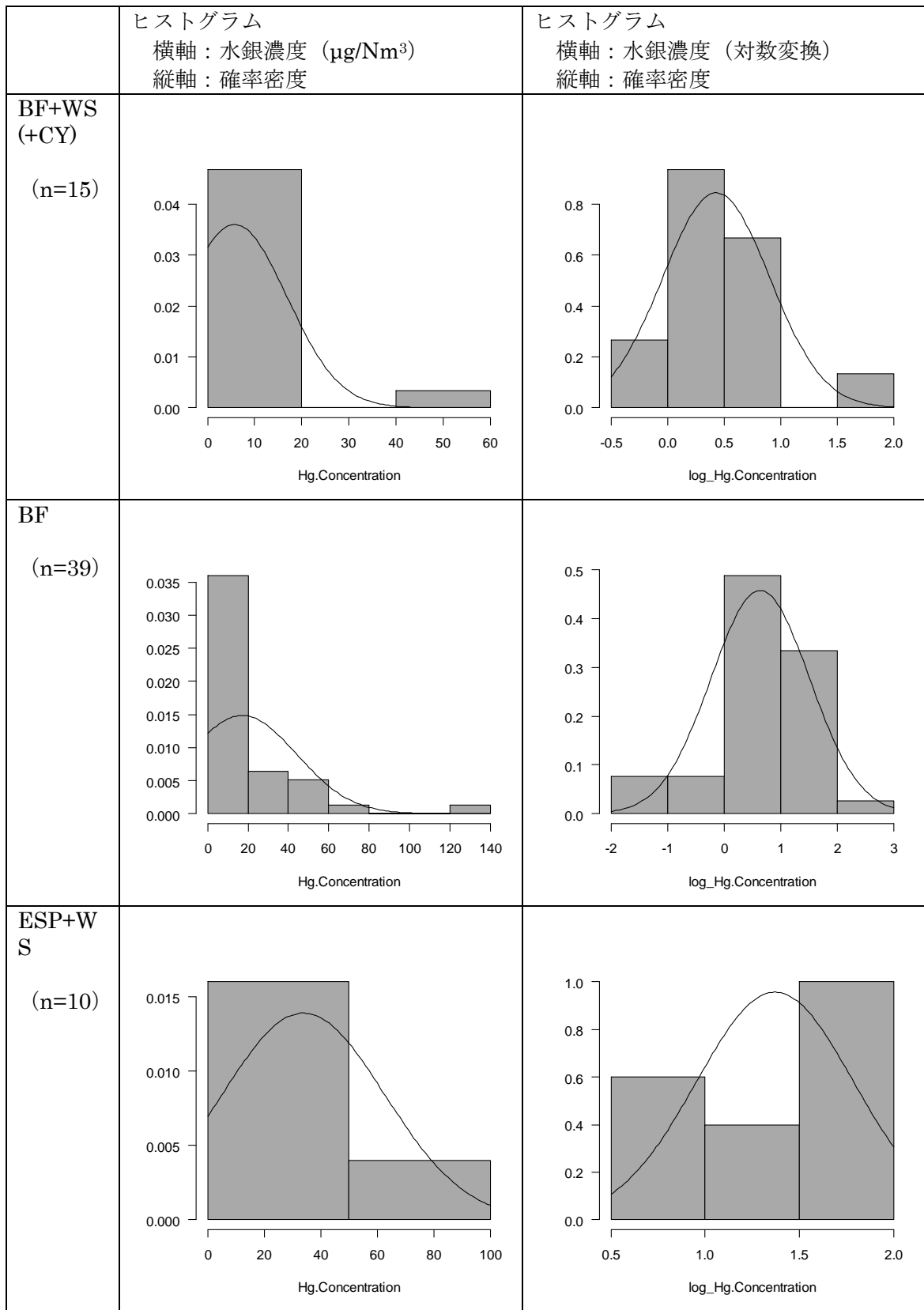
※廃油専焼は除く。

図Ⅲ-2-4 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（産業廃棄物焼却炉）（1/2）

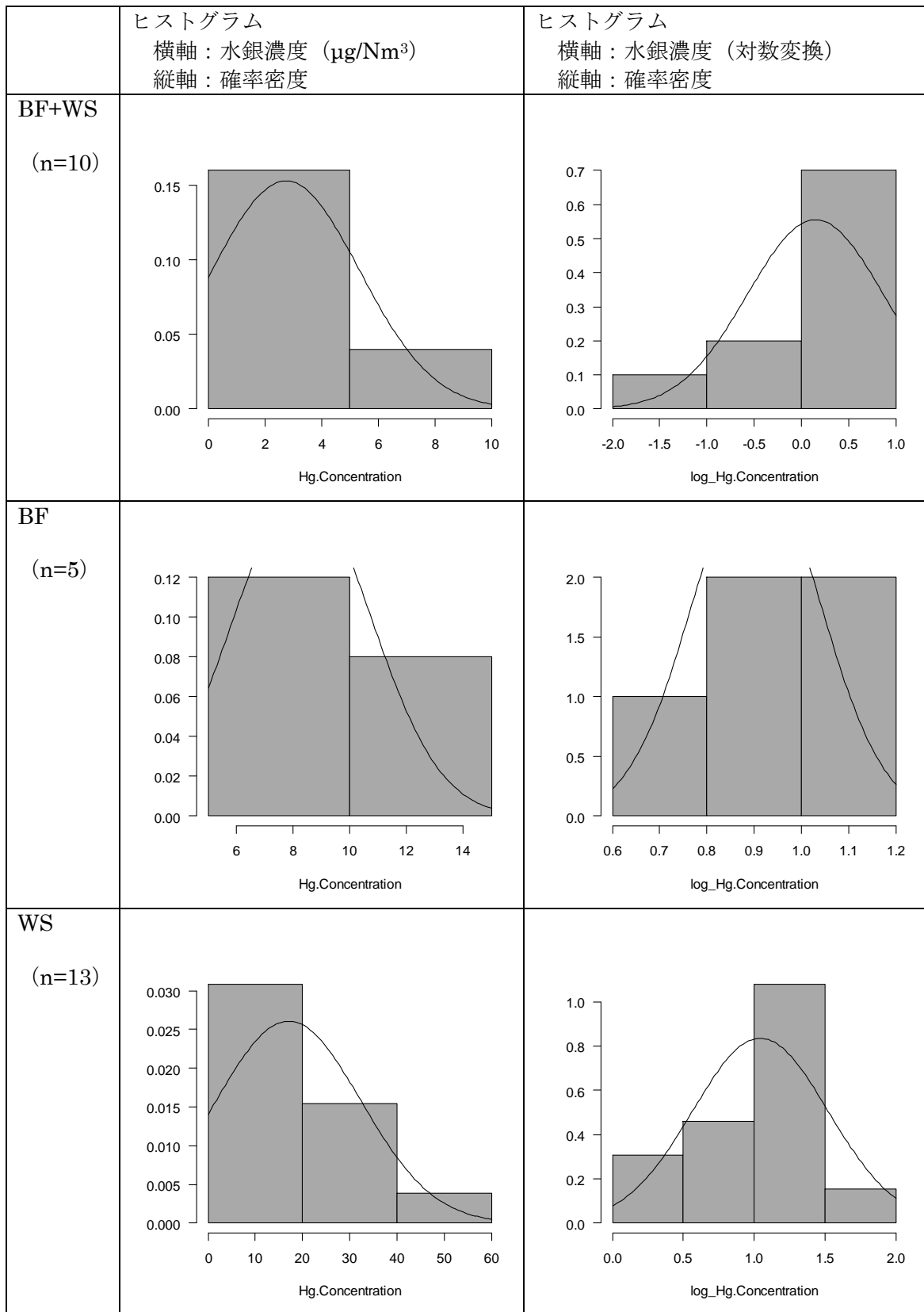


※廃油専焼は除く。

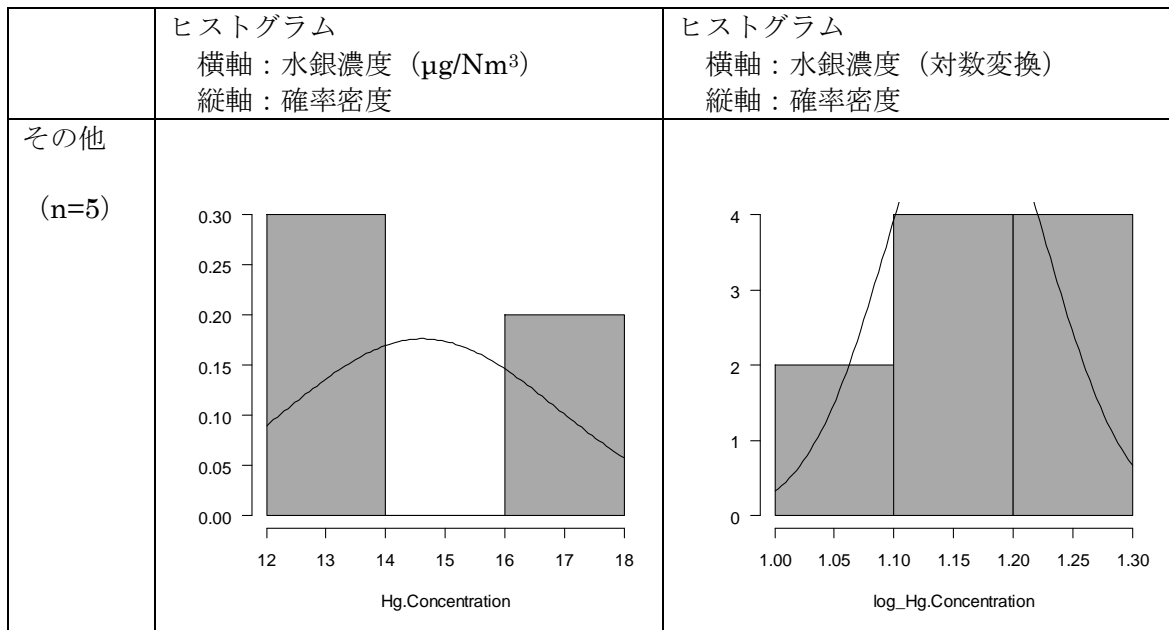
図Ⅲ-2-4 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（産業廃棄物焼却炉）（2/2）



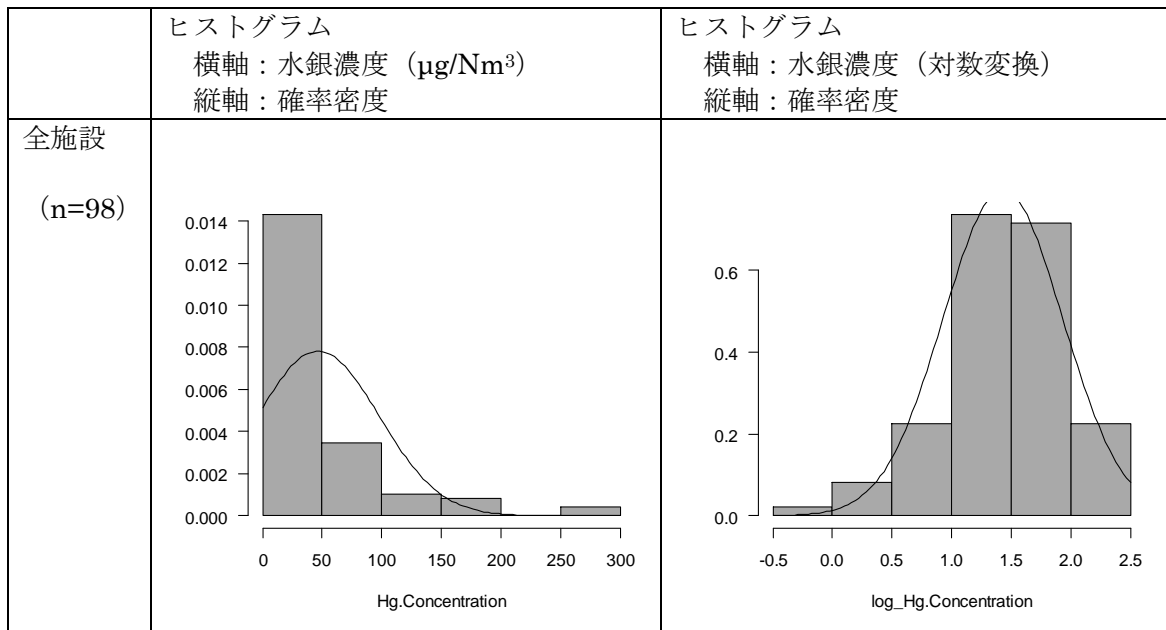
図Ⅲ-2-5 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（一般廃棄物焼却炉）



図Ⅲ-2-6 排ガス中の水銀濃度(全水銀)のヒストグラム(下水汚泥焼却炉)(1/2)



図Ⅲ-2-6 排ガス中の水銀濃度(全水銀)のヒストグラム(下水汚泥焼却炉)(2/2)



図Ⅲ-2-7 排ガス中の水銀濃度（全水銀）のヒストグラム（セメント製造施設）