

水銀の排出インベントリに関する文献調査結果（中間報告）

1. 目的

本調査は、我が国において排出される水銀のうち、製造部門において環境中に排出される水銀に関して、文献調査及び必要に応じて関連業界等へのヒアリング調査を実施し、排出インベントリ作成のための排出原単位（排出係数）及び排出量等に関する基礎情報を把握することを目的とする。

本中間報告では、海外などでの調査データから我が国においても水銀を排出していると考えられる、鉄鋼・製鉄、セメント製造、非鉄金属製錬を対象とし、主に既存文献等から得られた排出係数の設定例を中心に報告する。

なお、排出係数は、原燃料中の水銀含有量、製造・処理工程、排ガス対策等によって大きく変わるため、今後、我が国の実態にあった排出係数に関する情報を継続して収集する必要がある。

2. 文献調査

排出係数の設定例として、以下に挙げる内外の文献について、環境中への水銀の排出係数、排出削減技術等を調査した。

なお、水銀の排出量を推定するための手法をまとめた UNEP ツールキットは、水銀に関する情報をほとんど持っていない途上国などが概略の排出量を推計できるよう作成されたものであるため、排ガス対策が考慮されていないなどの点で我が国とは異なっている。

日本

- [1] 貴田,酒井,平井,守富,高岡,安田(2007),「循環廃棄過程を含めた水銀排出インベントリ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

UNEP

- [2] “Toolkit for identification and quantification of mercury releases, Pilot Draft,”
UNEP Chemicals, November 2005.

欧州 < EMEP >

- [3] “EMEP/ CORINAIR Emission Inventory Guidebook 2005,” UNECE/EMEP Task Force on
Emissions Inventories and Projections.

米国 < TRI >

- [4] “Guidance for Reporting Toxic Chemicals: Mercury and Mercury Compounds Category,”
Emergency Planning and Community Right-to-Know Act – Section 313, USEPA, August 2001.
[5] “AP 42, Fifth Edition, Compilation of Air Pollutant Emission Factors,
Volume 1: Stationary Point and Area Sources,” USEPA, Jan. 1995.

3. 調査結果

3-1 鉄鋼・製鉄

(1) 水銀排出要因と挙動

- 焼結・高炉プロセス
 - ・ 水銀排出の主要要因は、原料の鉄鉱石、石灰石に含まれる微量の水銀である。
 - ・ 焼結と高炉プロセスの排ガスから主に水銀が放出し、排ガス処理工程を経て一部が大気に排出される。
- コークス製造プロセス
 - ・ 水銀排出の主要要因は、原料の石炭に含まれる微量の水銀である。
 - ・ コークスを乾留する排ガスから主に水銀が放出し、排ガス処理工程を経て一部が大気に排出される。

(2) 排出係数の設定例

- 文献調査による水銀の排出係数の設定例を表 1 にまとめる。(詳細は別添資料参照。)

表 1 鉄鋼・製鉄プロセスの水銀排出係数の設定例

プロセス	排出係数	単位	排ガス除去率	出典/ 備考
焼結・高炉・転炉工程				[貴田ら]
－ 排ガス処理なし	0.0533 ^{*1}	g/ t steel produced	47.9%	*1: 原料・燃料中の水銀濃度と使用量からポテンシャルを推算、転炉鋼生産量ベース *2: 石炭とコークス中の水銀含有量の差から推算
－ 排ガス処理による低減	0.0278			
コークス製造工程				
－ 排ガス処理なし	0.0439 ^{*2}	g/ ton coke	47.9%	
－ 排ガス処理による低減	0.0229			
焼結・高炉工程	0.05 ^{*3}	g/t pig iron produced	-	[UNEP] デフォルト値
コークス製造工程	0.01-0.03	g/ ton coke	-	*3: 大気排出率 0.95 (別添資料 6.1 参照)
焼結ペレット工程	0.05	g/ ton sinter	-	[EMEP] 簡易手法の
コークス製造工程	0.01	g/ ton coke	-	デフォルト値
-	-	-	-	[TRI]
コークス製造工程	0.01	g/ ton coke	20%	製鉄工程の排出係数未報告

(3) 国内水銀大気排出量の推定例

- 貴田ら(2007)は、製鉄プロセスへインプットされる原料・燃料である鉄鉱石、石灰石、石炭、石油、コークスの水銀含有量と 2002 年の使用量から、大気への

水銀排出量を推算した(表2)。なお、活動量は2002年の転炉鋼生産量とした。また、コークス製造工程における水銀排出量は、石炭とコークスの水銀含有量の差から推算している。

表2 貴田らの排出係数による鉄鋼・製鉄業の水銀大気排出推算量(2002年)

	排出係数 (g/t)	排ガス除去率	活動量(千 t/y)	水銀排出量 (t)
焼結・高炉・転炉工程	0.0533	0.479	78,553	2.18
コークス製造工程	0.0439	0.479	33,820	0.77
			合計	2.95

(4) その他、有害金属等の排出削減の取組み

- (社)日本鉄鋼連盟へのヒアリング調査により、水銀の排出量に関する調査、また、排出削減に向けた取組みについて記す。
- ・ (社)日本鉄鋼連盟では、2007年度に、鉄鉱石等の原料中、および製鉄プロセスの排ガス処理工程中での水銀の濃度測定調査を行う計画である。
- ・ 我が国の製鉄所はいずれも、排ガス処理としてガス洗浄装置、電気集塵機、排煙脱硫装置等を設置されており、これらが有害金属等の大気中の放出削減に寄与している。
- ・ また、副生成物であるスラグ、脱硫石こう等についても、みだりに環境中に有害金属を放出する恐れがないよう、安全管理を徹底している。

3-2 セメント製造

(1) 水銀排出要因と挙動

- ・ 水銀排出の主要要因は、原料、燃料、添加材中に含まれる微量の水銀である。また、原料代替、エネルギー代替として廃棄物・副産物が利用され、これらにも微量の水銀が含まれる。
- ・ 焼成工程のキルンで水銀は気化し、排ガスに随伴し大気放出する分とダストに吸着・補足される分、そしてクリンカに残るものがある。排ガス処理で捕集されるダストはプロセス内に戻され再循環する。

(2) 排出係数の設定例

- 文献調査による水銀の排出係数の設定例を表 3 にまとめる。(詳細は別添資料参照。)

表 3 セメント製造プロセスの水銀排出係数の設定例

プロセス	排出係数	単位	排ガス除去率	出典/ 備考
セメント製造工程	0.094	g/t clinker	0	[貴田ら] モデル計算
セメント製造工程	0.1 - 0.6	g/t cement produced	-	[UNEP] デフォルト値
セメント製造工程	0.1	g/t cement	-	[EMEP] 簡易手法の デフォルト値
ポルトランドセメントキルン 排ガス処理 - ESP - FF	0.11 0.012	g/t cement produced	考慮	[TRI] 平均値 : 電気集塵機 : バグフィルター

(3) 国内水銀大気排出量の推定例

- 貴田ら(2007)は、セメント生産における原料、燃料、廃棄物等の使用量とそれらの物質中の水銀濃度により、2002年における大気への水銀排出量を推定した(表 4)。

表 4 貴田らの排出係数によるセメント製造の水銀大気排出推算量 (2002年)

	排出係数 (g/t)	排ガス除去率	生産量 (千 t/y)	水銀排出量 (t)
水銀大気排出量	0.094	—	66,630	6.28

- (社)セメント協会では、2007年4月から加盟全社の全工場を対象にして、排ガス処理装置後の排ガスの水銀濃度の調査を行い、2006年について、表5のように水銀排出量の推定値を報告している。

表5 (社)セメント協会によるセメント製造の水銀大気排出推算量(2006年)

	平均水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	平均風量原単位 ($\text{Nm}^3\text{-dry}/\text{t-クリンカ}$)	クリンカ生産量 (千t/2006年)	水銀排出量 (t)	備考
水銀大気 排出量	59.2 ^{*1}	2,432	62,133	8.94	*1 キルン55基加重 平均(排ガス処理後)

(4) その他、有害金属等の排出削減の取組み

- (社)セメント協会へのヒアリング調査によると、各企業において、以下の有害金属等の排出削減に向けた取組みが行われている。
 - ・セメントの天然原料である石灰石、ケイ石等の水銀含有量は、産地やその鉱区内において大きく異なっている。また、セメント製造では廃棄物や副産物が積極的に受け入れ利用され、これらにも微量の水銀が含まれる。
 - ・一方、全てのセメント製造工場では、電気集塵機、バグフィルター等の排ガス処理設備が設置されているが、捕集されるダストはプロセス内に戻され再循環するため、排ガス処理における水銀の除去率は0に近いと考えられている。
 - ・このため、各社では受け入れる原燃料等の検査を行い、水銀等の有害金属の排出量削減のため適切な管理を行っている。

3-3 非鉄金属

我が国において生産規模の大きい亜鉛、鉛、銅の一次製錬を中心にして調査結果をまとめる。

(1) 水銀排出要因と挙動

● 一次製錬

- ・ 水銀排出の主要要因は鉱石に微量に含まれる水銀である。
- ・ 炉を用いた酸化還元反応で粗金属・高純度金属を得る乾式製錬、原料を溶解し電解採取、または乾式製錬で得られた粗金属を電解精製する湿式製錬がある。銅製錬では、精鉱は乾燥工程を経て、自溶炉で銅を濃縮した後、転炉でさらに純度を上げて精製炉を経て電解工程にいたる。
- ・ このうち、焼結・焙焼する酸化工程においてほとんど水銀は気化する。硫酸製造プラント等へ至る前のガス精製工程で、気化したほとんどの水銀は除去され、副産物水銀として回収される。
- ・ 硫酸製造プロセス等から除害施設を経てガスは放出される。

● 二次製錬（再資源化）

- ・ 製品金属スクラップ自体の水銀含有量は少ない。一次製錬工程からの副産物、残渣、汚泥等に水銀が含まれる。また、廃棄物が原料、燃料に利用されている場合は、水銀が含まれると考えられる。
- ・ 再生する金属と用いる原料により異なるが、キルン、熔融炉、電炉等で金属を分離回収する工程で水銀が放出する。排ガスは処理工程を経て排出される。

(2) 排出係数の設定例

- 文献調査による水銀の排出係数の設定例を表 6 にまとめる。(詳細は別添資料参照。)

表 6 非鉄金属製造プロセスの水銀排出係数の設定例

		貴田ら	UNEP	EMEP	TRI
単 位		g/ t metal produced	g/ t of concentrate	g/ t metal produced	g/ t metal produced
亜鉛 Zn	一次製錬	5.26	1 - 20	6 (低減対策) 20 (限られた対策)	-
	二次再生	0.052	-	0.02 ^{*1}	-
鉛 Pb	一次製錬	0.00589 - 5.26	0.2-20	1 (低減対策) 3 (限られた対策)	-
	二次再生	0.0716	-	-	1,000 (高炉) 0.0021 (kettle refiner)
銅 Pb	一次製錬	0.052	0.1-1.5	0.1 (低減対策) 0.1 (限られた対策)	0.035
	二次再生	0.052	-	-	-
ニッケル Ni	一次製錬	0.052	-	-	-
	二次再生	0.052	-	-	-
水銀 Hg	一次製錬	-	-	-	-
	二次再生	-	-	-	-
金 Au (銀 Ag)	水銀アマルガム法	-	1.8 鉱石から 0.6 精鉱から 0.0006 レトルト法 g/t gold produced	-	-
金 Au	一次製錬	-	20 g/t gold produced by 青化製錬	-	-
	二次再生	-	-	-	-
アルミニウム Al	一次製錬	-	30	-	-
	二次再生	-	-	-	0.02 (scrubber) 0.0028 (baghouse) g/t can processed
備 考		英国 UK National Air Emission Inventory による	デフォルト値に大気配分係数を乗じた係数	*1 参考値	

(3) 国内水銀大気排出量の推定例

- 貴田ら(2007)は、国内の製錬工場での水銀排出調査事例や鉱石中の水銀含有量が不明なため、米国と英国で報告されている排出係数を用いて、2002年の国内地金生産量より以下を推定している（表7）。

表7 貴田らの排出係数による非鉄金属製造の水銀大気排出推算量（2002年）

		排出係数 (g/t metal)	生産量 (千 t/y)	水銀排出量 (t)
亜鉛	一次製錬	5.26	564.5	2.97
	二次製錬	0.052	79.9	0.00401
鉛	一次製錬	0.00589 -5.26	94.3	0.00555-0.496
	二次製錬	0.0716	208.1	0.0149
銅	一次製錬	0.052	1,249	0.0627
	二次製錬	0.052	176.6	0.00886
金		-	-	-
ニッケル	一次製錬			
	二次製錬	0.052	70.86	0.00356
		0.052	63.14	0.00317
計		-	-	3.07 - 3.56

(4) その他、有害金属等の排出削減の取組み

- ・ 非鉄金属製錬では、不純物を取り除くプロセスの中で水銀も除去される。具体的には、ガス精製工程のガス洗浄処理によって水銀は除去されると考えられている。
- ・ 水銀が含まれている残渣などは、水銀回収業者へ回収に廻されるが、回収が合理的でないものについては、鉱山保安法、廃掃法などの基準に抵触しないようにした上で、埋立等に廻されていると考えられる。

別添資料 排出係数のデフォルト値

1. 製鉄・鉄鋼

1-1 焼結・高炉プロセスの排出係数

排出係数	単位	根拠	出典																							
0.05	g/ton pig iron produced	<ul style="list-style-type: none"> 水銀の環境媒体中への分配係数 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">工程</th> <th colspan="5">分配係数</th> </tr> <tr> <th>大気</th> <th>水系</th> <th>土壌</th> <th>廃棄物</th> <th>産業固有処理処分</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>焼結・高炉</td> <td>0.95</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>コークス炉</td> <td>1.0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> 水銀排出を決定づける主要要因は、原料である鉄鉱石、石灰石の水銀濃度である。 製鉄・鉄鋼生産工程において、焼結、高炉、転炉プロセスから水銀が排出される可能性がある。しかし、便宜上また詳細データがないことにより、焼結と高炉は一つのプロセスとして扱い、そのアウトプットは銑鉄とする。転炉以降の工程は重大な水銀排出源とは考えず、Toolkit では扱わないこととしている。 ロシアにおける平均水銀濃度を以下として、 鉄鉱石 75% (平均 0.06 mgHg/kg) 別添表 1 参照 石灰石 20% (平均 0.05 mgHg/kg) 他原料 5% (なし) 排出係数は、大気に 99% 放出として銑鉄生産量基準で 0.04 g/ metric ton である。 	工程	分配係数					大気	水系	土壌	廃棄物	産業固有処理処分	焼結・高炉	0.95				0.05	コークス炉	1.0					<p>UNEP Toolkit 2005</p> <p>Lassen <i>et al.</i> (2004)</p> <p>Pacyna and Pacyna (2000)</p>
工程	分配係数																									
	大気	水系	土壌	廃棄物	産業固有処理処分																					
焼結・高炉	0.95				0.05																					
コークス炉	1.0																									
0.05	g/ton sinter	<ul style="list-style-type: none"> UNECE/EMEP のガイドブックでは、デフォルト値として 0.05 g/metric ton sinter を焼結ペレット工程に用いている。 水銀種 ミネソタにおける製鉄所例では、排出される水銀の平均 93.3% が Hg(0) であり残りは Hg(II) との研究報告がある。Hg(II) のうち 70-80% は湿式スクラバーで捕集され、全体の約 5% にあたる。 	<p>EMEP/CORINAIR (2001)</p> <p>Berndt(2003)</p>																							

別添表 1 鉄鉱石の水銀濃度

	鉄鉱石	水銀濃度 (mgHg/kg)
ロシア	Kursk Magnetic Anomaly deposits	0.01 - 0.1
	Korshunovsk deposit in Siberia	0.02 - 0.085
	平均	0.06
米国	Taconite ore in Minnesota 選鉱前	0.0006- 0.032
	選鉱	0.001 - 0.016
	選鉱くず	0.001 - 0.040

1-2 コークス炉の排出係数

排出係数	単位	根拠	出典
0.01-0.03	g/ton coke produced	<ul style="list-style-type: none"> 水銀排出を決定づける主要要因は、原料である石炭の水銀濃度である。 コークス製造工程では、乾留中のみならず、石炭の投入、コークス搬出時にも、水銀が大気放出される。スタックを通さず排出される場合、実測は困難であり、排出係数は不確実が伴う。 また、クウェンチングやスクラバーからの排水放流がある場合、水系への排出が起こり得る。 ドイツにおけるコークス製造施設の水銀排出係数は 0.01-0.03 [mgHg/ ton of coke produced] であるが、洗浄された選炭を使う米国では約 21%大気排出が少なからうとしている。 	<p>UNEP Toolkit 2005</p> <p>USEPA (1997) COWI (2002)</p>
0.01	g/ton coke	<ul style="list-style-type: none"> UNECE/EMEP ガイドブックでは、簡便法で用いる数値としてデフォルト値 0.01 g/ ton coke をあげている。 	<p>EMEP/CORINAIR B146 (2006)</p>

2. セメント

排出係数	単位	根拠	出典	
大気 0.1- 0.6	g/ton cement produced	<ul style="list-style-type: none"> 水銀排出を決定づける要因は、原料（石灰石、粘土、石こう等）の水銀濃度とその使用量、また、キルン等の燃料として使用する量とその水銀濃度である。 セメント製造プロセスでは、ほとんど焼成工程から水銀が排出される。水銀は約 350°Cで蒸発するので、キルンやその予熱過程において放出が起こる。前段の原料・粉砕工程、後段の仕上工程からの大気放出はごくわずかである。 セメントは、カルシウム成分を石灰石や、チョーク、泥灰土、貝殻などにより、またケイ素、アルミ、鉄分を砂、頁岩、粘土、鉄鉱石といった鉱石、鉱物から得る。また、いくつかの国では、フライアッシュ、鉱さい、高炉スラグ等が原料に使われる。 原料中の水銀濃度の例：下記別添表 2.2-2 参照 キルンでは熱源として、石油、石炭、ガス等の化石燃料の他、廃油、溶剤、産廃、場合によって有害廃棄物が使用される。廃タイヤもキルン入口付近に投入される。これらの燃料中の水銀が燃焼中に排出される。 水銀のほとんどは、キルンから煤塵、廃ガスに随伴する。水銀の捕捉は、バグフィルター（FF）、電気集じん機（ESP）等の排ガス処理システムによる。 北米では、キルン排ガス処理に FF と ESP が使用されるが、限られたデータしかない。水銀除去効率は、粒子状物質として ESP で 25%、FF で 50%である。 捕集された煤塵は、原料としてキルンに混入されるので水銀はキルンで再び気化し循環する。よって、最終的には低減されることなく大気に排出される。 水銀排出に関して、セメント製造工程に関連する他のプロセスとして、化石燃料の燃焼、ごみ焼却、石灰製造がある。 	UNEP Toolkit 2005	
製品中 0.02- 0.1	g/ton of cement		<ul style="list-style-type: none"> 原料中の水銀濃度の例：下記別添表 2.2-2 参照 キルンでは熱源として、石油、石炭、ガス等の化石燃料の他、廃油、溶剤、産廃、場合によって有害廃棄物が使用される。廃タイヤもキルン入口付近に投入される。これらの燃料中の水銀が燃焼中に排出される。 水銀のほとんどは、キルンから煤塵、廃ガスに随伴する。水銀の捕捉は、バグフィルター（FF）、電気集じん機（ESP）等の排ガス処理システムによる。 北米では、キルン排ガス処理に FF と ESP が使用されるが、限られたデータしかない。水銀除去効率は、粒子状物質として ESP で 25%、FF で 50%である。 捕集された煤塵は、原料としてキルンに混入されるので水銀はキルンで再び気化し循環する。よって、最終的には低減されることなく大気に排出される。 水銀排出に関して、セメント製造工程に関連する他のプロセスとして、化石燃料の燃焼、ごみ焼却、石灰製造がある。 	Cembureau (1999) Pirrone <i>et al.</i> (2001) VDZ (2001)
0.065	g/ton clinker produced		<ul style="list-style-type: none"> 米国 EPA は、有害廃棄物を含まない場合の平均大気排出係数として 0.065g/metric ton of clinker produced を整備している。TRI 報告書（2001 年）によると、放出のほとんどは大気と現場土壌である。 	USEPA (1997) USEPA (2003)

0.1	g/ton cement produced	<ul style="list-style-type: none"> • UNECE/EMEP のガイドブックでは、限られた情報しかない場合のデフォルト値として 0.1 g/metric ton cement produced を推奨している。 • EU position paper on mercury において、欧州セメント協会から実測に基づく数値として以下が示された。 <table border="1" data-bbox="568 595 1174 860"> <thead> <tr> <th>欧州諸国</th> <th>水銀排出係数 g/ton cement produced</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>オーストリア (1996)</td> <td>0.07</td> </tr> <tr> <td>ドイツ (1998)</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>英国 (1999)</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>スペイン (2000)</td> <td>0.1</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • 焼成後のクリンカに含まれる水銀はわずかである。セメント製品中の水銀は仕上工程で加えられる石こう等の水銀成分に依存する。 • 天然石こう 0.09 mgHg/kg 対 脱硫石こう (石炭火力) 1.3 mgHg/kg • ドイツ：MSW ゴミ焼却炉の排硫石こうの水銀濃度年平均 0.26 – 0.35 mg/kg (2000-2003) • ドイツ：セメント製品中の水銀濃度平均 0.07 mg/Kg (検出限界<0.02 – 0.3 mg/kg) • ドイツにおける 1999 年のセメント生産量 36.7 百万 ton 中の水銀は 2.6 ton であり、欧州セメント協会による大気排出量の推計値 0.72 ton よりはるかに多い。 • デンマーク：セメント製品中の水銀濃度 0.02 – 0.05 mg/kg 	欧州諸国	水銀排出係数 g/ton cement produced	オーストリア (1996)	0.07	ドイツ (1998)	0.2	英国 (1999)	0.05	スペイン (2000)	0.1	<p>EMEP/CORINAIR (2001)</p> <p>Pirrone <i>et al.</i> (2001)</p> <p>Beckert <i>et al.</i>,</p> <p>VDZ (2000)</p> <p>UNEP Toolkit (2005)</p> <p>Skårup <i>et al.</i> (2003)</p>
欧州諸国	水銀排出係数 g/ton cement produced												
オーストリア (1996)	0.07												
ドイツ (1998)	0.2												
英国 (1999)	0.05												
スペイン (2000)	0.1												

別添表 2 セメント原料中の水銀濃度 (UNEP Toolkit 2005, Table 5.77 より)
 -北米、日本、スイス、ドイツ、ロシア、ベラルーシ、デンマークの研究報告

出典	原材料中の水銀濃度 mg/kg dry weight				
	石灰石又は 泥灰土	砂および シルト岩	粘土又は 頁岩	廃棄物	穀粉 Raw meal
Schäfer and Hoenig, 2001 (Germany) *1					0.03-0.13
Sprung, 1982 (Germany) *1	0.03		0.45		
Schneider and Oerter, 2000 (Germany) *1	0.005-0.13		0.02-0.15		0.02-0.5
Adriano, 2001 *1	0.04-0.22		0.005-3.25	0.04 and 0.1 (fly ash)	
Kanare, 1999 (USA) *1	<0.01-0.03				
Klemm, 1993 *1					<0.1 and 0.14
Kirchartz, 1994 (Germany) *1	0.005-0.05		0.02-0.15		>1.0 (代替 原料使用時)
Fukuzaki <i>et al.</i> , 1986 (Japan) *1	0.12		0.013	0.17 (銅スラグ)	
Airey, 1982 *1	0.04 and 0.46				
Bowen, 1979 *1	0.16				
BUWAL, 1997 (Switzerland) *1	0.03 & 0.02		0.45		0.02-0.6
Kitamura <i>et al.</i> , 1976 (Japan)*1	0.01-0.22				
Fujinuki, 1979 (Japan) *1	0.07 & 0.04				
Saupe, 1972 *1	0.033 & 0.048				
Russia, 2003 *2	0.031 (131 サンプルの 平均)	0.039 (45 サンプルの 平均)	0.035 mg/kg (58 サンプルの 平均)		
Denmark, 2002 *3	0.01			0.13-0.39 (fly ash)	
Kakareka <i>et al.</i> , 1998 (CIS countries) *4	<0.01-0.17			0.19-4.0 (pyrite ash) 0.01-0.12 (高炉スラグ)	

Notes: (*1) As cited by Johansen and Hawkins (2003);
 (*2) Lassen et al., 2004;
 (*3) Skårup et al., 2003;
 (*4) Kakareka et al., 1998.

3. 非鉄金属

3-1 亜鉛

排出係数	単位	根拠	出典																				
10 - 200	g/ton of concentrate	<ul style="list-style-type: none"> ・ 亜鉛生産過程における水銀の環境媒体中への分配係数 <table border="1" data-bbox="502 448 1220 638"> <thead> <tr> <th rowspan="2">工程</th> <th colspan="6">分配係数</th> </tr> <tr> <th>大気</th> <th>水系</th> <th>土壌</th> <th>副産物</th> <th>一般廃棄物</th> <th>産業固有処理処分</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>精鉱から生産</td> <td>0.1</td> <td></td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td></td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table> 	工程	分配係数						大気	水系	土壌	副産物	一般廃棄物	産業固有処理処分	精鉱から生産	0.1		0.3	0.3		0.3	<p>UNEP Toolkit 2005</p>
工程	分配係数																						
	大気	水系	土壌	副産物	一般廃棄物	産業固有処理処分																	
精鉱から生産	0.1		0.3	0.3		0.3																	
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 水銀排出を決定付ける主要要因は、原料である鉱石（主に硫化鉱）に含まれる水銀濃度である。（別添表 3） ・ Schwarz(2007)は、アメリカおよびユーラシア大陸の 19 カ国における鉱床における閃亜鉛鉱に含まれる水銀量のデータをとりまとめた。（別添表 4） 	<p>Schwarz (1997)</p>																				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 選鉱された結果残される廃棄岩や選鉱くずは、元々の鉱石よりもろく風化しやすい。風化により含まれる硫黄が酸化されることにより硫酸が生成され、それがさらに廃棄岩や選鉱くずをもろくする。その結果、含まれる水銀が環境中へと浸出しやすくなる。この過程を”acid rain drainage (ARD)”と呼ぶ。 	<p>European Commission (2003)</p>																				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 亜鉛製錬工場において複雑な過程を経て亜鉛が生産される。主に用いられる手法は「湿式製錬法」または「乾式精錬法」である。第一段階では、亜鉛精鋼は高温で焙焼や焼結することにより含有硫黄が取り除かれる。この際、水銀は気化し、硫酸生産工場が併設されている場合には、水銀は亜鉛精鋼より除去されて硫酸へと移動するものと考えられる。 ・ 上記のような焙焼、焼結過程を経ず、直接、亜鉛精鉱を硫酸を用いて浸出させる手法もある。この場合、水銀はスラッジに残るとされる。 																					
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 亜鉛の一次生産プロセスは次のとおりである： 亜鉛鉱石の選鉱 → 亜鉛精鉱の酸化（焙焼、焼結） → 亜鉛生産（電気化学的、熱処理） → 亜鉛精製 																					

	<ul style="list-style-type: none"> 発生した焙焼、焼結プロセスにより発生したガスは、硫酸製造工場に送られる前に電気集塵機（ESP）やスクラバを通される。その結果、水銀はスラッジに濃縮される。 また、Superlig イオン交換（水銀濃度を 5 ppm 以下に抑える）や、ヨウ化カリウムプロセスにより水銀はさらに除去することができる。EU によると、非鉄金属生産過程により製造される硫酸規格では水銀濃度は通常 0.1 ppm 以下とある。 「湿式製錬法」において、リーチング、精製、電気分解を経た後、精製金属中には水銀はほとんど残らない。また、「乾式製錬法」における溶錬では、炉内において高温で加熱される結果、水銀は排ガス中に濃縮され処理される。すなわち、適切な処理が行われない限り、水銀は環境中へと放出されることになる。 非鉄金属の焙焼、焼結プロセスにおける硫酸ガス中に含まれる水銀の除去法は、Boliden/Norzink 法と Outokumpu 法が主流であるが、Bolchem 法、チオシアン酸ナトリウム法、活性炭フィルタ、セレンスクラバー、セレンフィルタ、硫化鉛法がある。除去率は別添表 9 を参照。 水銀は、硫化鉍より亜鉛を抽出する過程で排出される。その過程において、環境中に放出されなかった水銀は、通常、甘汞（かんこう：塩化第一水銀 Hg_2Cl_2）として回収され、金属水銀の原料となる。 European Commission によると、1997 年にヨーロッパにおいて非鉄金属生産の副産物として生産された水銀量は 350 ton と推定されている。通常、これら非鉄金属の生産過程において生産される水銀や甘汞は 0.02 - 0.8 kg/tons 金属生産量とされる。下表に例を示す。 <table border="1" data-bbox="539 1697 1198 1892"> <thead> <tr> <th>生産工程 (EUあるいはヨーロッパ圏)</th> <th>副産物水銀 (kg/t 亜鉛生産量)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>焙焼プロセス/ 硫酸製造過程 (湿式)</td> <td>0.3 - 0.8</td> </tr> <tr> <td>焼結プロセス/ 硫酸製造過程 (ISP 法)</td> <td>0.15</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> 亜鉛生産プロセスからの大気水銀排出の各国事例 (別添表 5 を参照) 	生産工程 (EUあるいはヨーロッパ圏)	副産物水銀 (kg/t 亜鉛生産量)	焙焼プロセス/ 硫酸製造過程 (湿式)	0.3 - 0.8	焼結プロセス/ 硫酸製造過程 (ISP 法)	0.15	<p>Rentz <i>et al.</i> (1996)</p> <p>European Commission (2001)</p> <p>Rentz <i>et al.</i> (1996)</p> <p>European Commission (2001)</p> <p>Pirrone, <i>et al.</i> (2001)</p> <p>European Commission (2001)</p>
生産工程 (EUあるいはヨーロッパ圏)	副産物水銀 (kg/t 亜鉛生産量)							
焙焼プロセス/ 硫酸製造過程 (湿式)	0.3 - 0.8							
焼結プロセス/ 硫酸製造過程 (ISP 法)	0.15							

別添表 3 亜鉛精鉱の水銀濃度 (UNEP Toolkit 2005, Table 5-42 より)

国	場所	種類	平均 Hg 濃度 (g/ton)	濃度範囲 (g/ton)	出典
鉱石					
カナダ	Brunswik		2.1		Klimenko and Kiazimov (1987)
フィンランド	Kokkola		2.8		Maag (2004)
ロシア	Ural		10-25		Kutliakhmetov (2002)
精鋼生成過程からの廃棄原材料					
カナダ	Brunswik	亜鉛、銅、鉛精鉱生成過程	0.69 (鉱石中の Hg 濃度 2.1)		Klimenko and Kiazimov (1987)
ロシア	Ural	亜鉛、銅精鉱生成過程		1 - 9 (鉱石中の Hg 濃度 10- 25)	Kutliakhmetov (2002)
亜鉛精鋼中					
カナダ	Brunswik		13.5		Klimenko and Kiazimov (1987)
ドミニカ	Pueblo Viejo	閃亜鉛鉱		~350	Kesler <i>et al.</i> (2003, in press)
ロシア	Ural (7 施設)	亜鉛精鉱		20- 93	Mustafin <i>et al.</i> (1998)
	Ural	亜鉛精鉱	76- 123		Kutliakhmetov (2002)
	Middle Ural	黄鉄鉱/黄鉄鉱-多金属 鉱床からの亜鉛精鉱		1- 4.5	Ozerova (1986)
	South Ural	黄鉄鉱/黄鉄鉱-多金属 鉱床		10- 75	Ozerova (1986)
	Caucasus	黄鉄鉱/黄鉄鉱-多金属 鉱床		1- 18	Ozerova (1986)
世界市場		一般亜鉛濃度範囲		10- 2000	Fugleberg (1999)

別添表 4 閃亜鉛鉱の水銀濃度 (UNEP Toolkit 2005, Table 5-43, 出典 Schwarz (1997))

鉱床	閃亜鉛鉱中の 平均水銀濃度 (ppm)	推計値に含まれる 鉱床数	80年代半ばにおける Zn 生産への寄与率 (%) ^{*1}
Exhalative (原生代火山タイプを含む)	180	101	61
Exhalative (原生代火山タイプを含まない)	34	75	-
ミシシッピバレータイプ	9	61	25
鉱脈その他	81	86	14
平均生産量 ^{*2}	123 (53)	248 (222)	

注：*1 Tikkanen (1986)より

*2 原生代火山タイプ由来のものは括弧内に示した

別添表 5 亜鉛生産プロセスからの大気水銀排出の各国事例 (UNEP Toolkit 2005, Table 5-46 他)

国	製造量あたりの水銀 排出量	除去技術レベル	備考	出典
カナダ	0.41 g / t of product (Zn, Pb, etc.)	サイクロン、ESP、スクラバ、 Hg 除去、硫酸製造プラント	Zn、Pb の乾式・湿式 並列製錬プロセス	Environment Canada (2002)
	0.002 g / t of product (Zn, etc.)	サイクロン、ESP、スクラバ、 Hg 除去、硫酸製造プラント	Zn 湿式製錬 プロセス	Environment Canada (2002)、(2004)
ロシア	亜鉛生産工程で精鉱の 水銀 93%が焼結工程でガ スに移る。そのうち 24% : ESP ばいじん捕捉 69% : ガスは硫酸製造へ	ESP、Hg 除去 (セレンスクラバ) 硫酸製造プラント	69%のガス中水銀は ・セレンスクラバ汚泥 ・硫酸 ・硫酸精製残渣水 に分配される	Bobrova, <i>et al.</i> (1990)
フィンランド	水系 : 0.02 g / t Zn produced ジャロサイト汚泥中 : 約 40 g / t Zn produced		副産物水銀として 売買	Fugleberg (1999)
中国	硫化鉱 : 155 g / t Zn 生産 酸化鉱 : 78.5g / t Zn 生産		貴州省	Feng, <i>et al.</i> (2004)
	25 g / t Zn 生産		80年代の西洋	Nriagu and Pacyna (1988)

3-2 鉛

排出係数	単位	根拠	出典																																								
2 - 200	g/ton of concentrate	<p>・鉛生産過程における水銀の環境媒体中への分配係数</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">工程</th> <th colspan="6">分配係数</th> </tr> <tr> <th>大気</th> <th>水系</th> <th>土壌</th> <th>副産物</th> <th>一般廃棄物</th> <th>産業固有処理処分</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>精鉱から生産</td> <td>0.1</td> <td></td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td></td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table> <p>・水銀排出を決定付ける主要要因は、原料である鉱石（主に硫化鉛）に含まれる水銀濃度である。</p> <p>・鉛精鉱中に含まれる水銀：</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>国</th> <th>場所</th> <th>タイプ</th> <th>平均 Hg 濃度 (g/ton)</th> <th>Hg 濃度 範囲(g/ton)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>カナダ</td> <td>Brunswick Works</td> <td>鉛精鉱</td> <td>2.7</td> <td></td> </tr> <tr> <td>米国</td> <td>Missouri</td> <td>鉛精鉱</td> <td>0.2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ロシア</td> <td>不明</td> <td>鉛-亜鉛精鉱</td> <td></td> <td>2 - 290</td> </tr> </tbody> </table> <p>・鉛・亜鉛・銅生産過程における廃棄岩中の水銀量は、0.69 g Hg/ ton （鉱石中の水銀が 2.1 g Hg/ ton）</p> <p>・1994年にアメリカの鉛精錬所より排出された水銀は、鉱石中の水銀（0.2 ppm）が全量大気に放出されるとして、生産能力（370,000）より、0.1 ton と推算。</p> <p>・鉛一次製錬における、水銀の挙動、排出については、亜鉛とほぼ同様である。</p>	工程	分配係数						大気	水系	土壌	副産物	一般廃棄物	産業固有処理処分	精鉱から生産	0.1		0.3	0.3		0.3	国	場所	タイプ	平均 Hg 濃度 (g/ton)	Hg 濃度 範囲(g/ton)	カナダ	Brunswick Works	鉛精鉱	2.7		米国	Missouri	鉛精鉱	0.2		ロシア	不明	鉛-亜鉛精鉱		2 - 290	<p>UNEP Toolkit 2005</p> <p>Klimenko and Kiazimov (1987)</p> <p>US EPA (1997)</p> <p>Bobrove <i>et al.</i> (1990)、Ozerove (1986)</p> <p>Klimenko and Kiazimov (1987)</p> <p>US EPA (1997)</p>
工程	分配係数																																										
	大気	水系	土壌	副産物	一般廃棄物	産業固有処理処分																																					
精鉱から生産	0.1		0.3	0.3		0.3																																					
国	場所	タイプ	平均 Hg 濃度 (g/ton)	Hg 濃度 範囲(g/ton)																																							
カナダ	Brunswick Works	鉛精鉱	2.7																																								
米国	Missouri	鉛精鉱	0.2																																								
ロシア	不明	鉛-亜鉛精鉱		2 - 290																																							

3-3 銅

排出係数	単位	根拠	出典																				
1-15	g/ton of concentrate	<p>・銅生産過程における水銀の環境媒体中への分配係数</p> <table border="1" data-bbox="486 353 1222 544"> <thead> <tr> <th rowspan="2">工程</th> <th colspan="6">分配係数</th> </tr> <tr> <th>大気</th> <th>水系</th> <th>土壌</th> <th>副産物</th> <th>一般廃棄物</th> <th>産業固有処理処分</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>精鉱から生産</td> <td>0.1</td> <td>0.02</td> <td>0.24</td> <td>0.4</td> <td></td> <td>0.24</td> </tr> </tbody> </table>	工程	分配係数						大気	水系	土壌	副産物	一般廃棄物	産業固有処理処分	精鉱から生産	0.1	0.02	0.24	0.4		0.24	<p>UNEP Toolkit 2005</p>
		工程		分配係数																			
大気	水系		土壌	副産物	一般廃棄物	産業固有処理処分																	
精鉱から生産	0.1	0.02	0.24	0.4		0.24																	
<p>・水銀排出を決定付ける主要要因は、原料である鉱石（主に硫化鉱）に含まれる水銀濃度である。（別添表 6）</p> <p>・銅の一次生産プロセスは次のとおりである： 鉱石からの銅精鉱の抽出→焙焼→製錬</p> <p>・水銀は、硫化鉱より銅を抽出する焙焼過程あるいは溶鉱炉で排出される。その過程において、環境中に放出されなかった水銀は、通常、甘汞（かんこう：塩化第一水銀）として金属水銀の原料とされる。</p> <p>・文献からは銅生産過程におけるマスバランスを推定するのは困難であるが、一例としてロシアの事例を示す。</p> <p>・Yanins による計算式によると、 精鉱中の水銀濃度：13.8 g Hg/ t 精鉱 精鉱中の銅含有量 15 %のうち 93%抽出して生産するものとして、11.7 g Hg/ton 銅生産量 という排出係数を示している。これは別添表 7 に示したカナダの Hudson Bay の推定値とほぼ同じ量になる。</p> <p>・例えば、US EPA は、1993 年に自己申告した 7 つの精錬所のデータを元に、1994 年の水銀総排出量を生産能力 140 万トンで 57 kg/年と推計した。すなわち、大気への排出分配係数を 0.04 g Hg/ton 銅生産能であると算出した。</p> <p>・別添表 8 にこの事例とカナダの排出係数の例を示す。</p> <p>・また、ヨーロッパにおける 1997 年の非金属生産による水銀の排出量は 350 ton Hg と推計されている。これは、非金属生産過程における水銀の排出量を 0.02-0.8 kg Hg/ton 金属生産量として算出した。</p>	<p>US EPA (1997)</p> <p>Lassen <i>et al.</i> (1990)</p> <p>US EPA (1997)</p> <p>European Commission (2001)</p>																						

別添表 6 銅精鉱の水銀濃度 (UNEP Toolkit 2005, Table 5-53 より)

国	場所	種類	平均 Hg 濃度 (g/ton)	濃度範囲(g/ton)	出典
鉱石					
カナダ	Brunswik		2.1		Klimenko and Kiazimov (1987)
ロシア	Ural		10-25		Kutliakhmetov (2002)
	South Ural	銅、黄鉄鉱 (塊状)	9.8-13		Fursov (1983)
カザフスタン	Kusmurun	銅、黄鉄鉱 (塊状)	9.2	4.3-16.70 (11 サンプル)	Fursov (1983)
	Dzhezgazgan	塩化石灰岩 (塊状) : 黄銅鉱	3.2	2.8-3.68 (15 サンプル)	Fursov (1983)
	Dzhezgazgan	塩化石灰岩 (鉱染) : 斑銅鉱	1.5	1.23-1.87 (11 サンプル)	Fursov (1983)
	Counrad	銅、斑岩 (鉱染) : 一次製鋼	0.9	0.76-1.02 (8 サンプル)	Fursov (1983)
精鋼生成過程からの廃棄原材料					
カナダ	Brunswik	亜鉛、銅、鉛精鋼生成過程	0.69 (鉱石中 Hg 濃度 2.1)		Klimenko and Kiazimov (1987)
ロシア	Ural	亜鉛、銅精鋼生成過程		1-9 (鉱石中 Hg 濃度 10-25)	Kutliakhmetov (2002)
銅精鋼中					
カナダ	Brunswik		2.3		Klimenko and Kiazimov (1987)
ロシア	Ural	黄銅鉱		28-41	Kutliakhmetov (2002)
	不明	黄鉄鉱、多金属鉱		0.22-65	Bobrova <i>et al.</i> , (1990); Ozerova (1986)
	不明	鉛-亜鉛 (層状)		2-290	Bobrova <i>et al.</i> , (1990); Ozerova (1986)
	不明	黄銅鉱		0.3-150	Bobrova <i>et al.</i> , (1990); Ozerova (1986)
	不明	含銅砂岩		4	Bobrova <i>et al.</i> , (1990); Ozerova (1986)
	不明	バナジウム-鉄-銅		70	Bobrova <i>et al.</i> , (1990); Ozerova (1986)
	不明	銅-モリブデン		0.02	Bobrova <i>et al.</i> , (1990); Ozerova (1986)
	不明	銅-ニッケル		0.14-0.4	Ozerova (1986)
一般的	不明		0.5-8		Confidential European data source

別添表 7 銅製錬からの水銀分配推計値（ロシアの事例）（UNEP Toolkit 2005, Table 5-54 より）

経路	大気	排水	廃棄 スラグ	廃棄 スラッジ	ヒ素塊	鉛塊	液体 硫黄*2	酸*2	合計
Hg input *1	0.12	0.02	0.04	0.38	0.06	0.11	0.14	0.14	1.00
g Hg/ton Cu 生産量 (13.8 g Hg/ ton の input を想定)	0.12	0.02	0.04	0.38	0.06	0.11	0.14	0.14	1.00

注：*1 製錬において、フィルタダストが炉にリサイクルされると仮定（定常状態を仮定）

*2 液体硫黄（副生成物）と酸は売却されると仮定（文献に示されていない）

出典：Yanin, in Lassen *et al.*, 2004

別添表 8 銅生産プロセスからの大気水銀排出事例（UNEP Toolkit 2005, Table 5-55）

国	施設	製造量あたりの 水銀排出量	除去技術レベル	備考	出典
米国	全国平均	0.04 g / t 金属生産能力		自己申告	US EPA (1997)
カナダ	Hudson Bay M&S, Manitoba	8.2 g / t 金属 生産量 (Zn, Cu, etc.)	ESP のみ、Hg 除去、/硫酸製 造プラントなし		Environment Canada (2002)
	Noranda Horn	1.8 g / t 金属 生産量 (Cu, etc.)	ESP、スクラバ、Hg 除去、 硫酸製造プラント	リサイクル銅を使用	Environment Canada (2002)
	Inco Copper Cliff	0.01 g / t 金属 生産量 (Cu, Ni, etc.)	湿式 PM フィルタ、硫酸製 造プラント、Hg 除去はなし	Ni と Cu 製錬 他のカナダ製錬と比 較して原料は 低 Hg 濃度	Environment Canada (2002)

別添表 9 非鉄金属製鋼製造過程における水銀除去効率（UNEP Toolkit 2005, Table 5-48 より）

技術	Hg 除去効率	製造工程下流での Hg 濃度(μg/m ³)
セレンフィルタ	>90%	<10
セレンスクラバ	90-95%	200
活性炭フィルタ	90-95%	10
Odda 塩素化法	n.a.	50-100
硫化鉛法	90-99%	10-50