〔報告〕

都市ごみ等に含まれる金属資源の挙動に関する研究（２）

－蛍光X線分析及びＩＣＰ－ＭＳによる希少金属等の分析－

辰市 祐久　茂木 敏*　井上 宏**

（*現・東京都環境局廃棄物対策部　**東京二十三区清掃一部事務組合）

１　はじめに

東京都内で発生する都市ごみ等の可燃物は、清掃工場や産業廃棄物用の焼却炉で焼却処理されている。焼却によって可燃物は無機化され、さらに溶融処理によって灰溶融スラグ、溶融メタル及び溶融飛灰となる。

前報告[1)]では、これらの固形試料中の金属元素を簡易に分析するために、３カ所の清掃工場の焼却灰や溶融物についてエネルギー分散型蛍光 X 線分析（以下「EDX」という。）を用いて測定した。

EDX 分析は ICP-MS 分析と比較した場合、定量性が低いが、試料を溶解せず固体のまま分析することができるため、敏速に資源性を評価する有力な手段と考えられる。一方、ICP-MS による分析は事前に金属類を酸に溶解するため、低濃度まで含有量を正確に測定することができるが、分析装置に導入するまでの溶解処理操作に多くの時間が必要となる。

今後、スラグや焼却飛灰や溶融飛灰、メタルなどの資源循環の可能性を検討していくためには、EDX で各生成物中の比較的微量な金属類濃度を簡易で迅速に測定していく必要があると考えられる。

本調査では固形試料を二つに分け、ベースメタル及び主要元素を主に EDX で、微量な希少金属類を ICP-MS で分析を行った。そして、希少金属等の分析結果から、清掃工場の可燃物焼却処理より溶融処理に至る過程で生成する焼却灰、焼却飛灰、溶融飛灰、スラグ、メタルに希少金属がどのような比率で分配されるかを調査した。

２　調査方法

都市ごみの可燃物に含有される希少金属等の挙動の調査は、焼却炉と溶融炉を併設する施設について行い、可燃物等の焼却によって発生した焼却灰、焼却飛灰及びそれらを溶融したスラグ、メタル、溶融飛灰及び廃水処理汚泥を分析用試料として採取した。試料採取は数回に分けて採取するか、平たく置いた固まりの中からランダムに採取し、採取試料を混合後プラスチック容器に保管した。分析用試料は約 105℃で２時間程度乾燥後、粒子が細かい焼却飛灰や溶融飛灰はその形状のまま、粒子が粗い汚泥、焼却灰、一部のスラグについては高速振動試料粉砕機（シー・エム・ティー社製）で微粉砕し、インゴット状のメタルは小片に切り出して試料とした。

(1) 調査対象の清掃工場

調査は都内の焼却、溶融炉を有する 8 工場と溶融炉 1 工場で、2011 年 12 月から 2012 年 3 月に実施した。調査した工場や施設の概要を表 1 に示す。溶融炉では都内の別の工場の焼却灰も処理している工場がある。

(2) 清掃工場からの焼却灰等の処理量又は発生量

各清掃工場の焼却灰等の処理量は表 2 に示す。

ごみは焼却炉で燃されて焼却灰とバグフィルターで捕集された焼却飛灰が生成する。焼却灰と焼却飛灰は溶融炉で溶融し、冷却されてスラグ又はメタルとして回収され、溶融炉からの飛灰がバグフィルターで捕集され、溶融飛灰が生成する。清掃工場の焼却灰と焼却飛灰を溶融する場合、塩基度（CaO/SiO_2 比）が高いと炉を損傷させる恐れがあるため、ケイ砂を塩基度調整剤として投入しているところがある。都内の清掃工場では焼却灰と焼却飛灰で塩基度が上昇する傾向にあり、特に焼却飛灰は酸性ガスを中和する消石灰が含まれるため、カルシウムが多くなり塩基度が高くなるので、焼却灰のみを溶融する工場が増えてきている。

表１ 調査した各清掃工場の概要

	焼却方式	焼却能力(t/d)	灰溶融方式	溶融能力(t/d)
A清掃工場	火格子炉	600	アーク式	180
B清掃工場	回転ストーカ式	300	回転式表面溶融	30
C清掃工場	火格子炉	300	電気抵抗式	36
D清掃工場	火格子炉	450	アーク式	50
E清掃工場	火格子炉	600	表面溶融式	180
F清掃工場	火格子炉	500	プラズマ式	110
G清掃工場	火格子炉	700	プラズマ式	130
H焼却施設	火格子炉	130	回転式表面溶融	50
I溶融施設			プラズマ式	400

表２　各清掃工場のごみ焼却による焼却灰量、飛灰量と溶融による溶融量、溶融飛灰量、スラグ量、メタル量

	ごみ焼却量(t/y)	焼却灰量(t/y)	焼却飛灰量(t/y)	溶融量 (t/y)	溶融飛灰量(t/y)	スラグ量 (t/y)	メタル量(t/y)
A清掃工場	153,065	9,184	3,061	17,527	1,472	15,633	833
B清掃工場	73,200	4,392	1,464	4,987	419	4,285	0
C清掃工場	63,400	3,804	1,200	3,300	277	3,240	270
D清掃工場	101,737	6,104	2,035	6,104	513	5,292	548
E清掃工場	140,455	8,427	2,809	9,640	810	9,512	136
F清掃工場	129,033	7,742	2,581	8,274	695	7,466	367
G清掃工場	139,237	8,354	2,785	6,842	575	6,807	261
H焼却施設	39,000	2,400	780	3,180	267	2,400	―
I溶融施設	―	―	―	25,830	2,170	20,008	47

表2のごみ焼却量、溶融量、スラグ量、メタル量の値は2010年の処理量を示している。

各工場の焼却灰量及び焼却飛灰量は、焼却ごみ量のそれぞれ6%、2%[3]として推計した。各工場の溶融飛灰量は溶融量の8.4%に設定し、C工場の溶融飛灰量は溶融量の5%に設定[4]して推計した。H焼却施設は年間300日稼働として計算した。H焼却施設のメタルはステンレスやアルミの形で溶融前に取り除かれるためか常時には生成されていない。

(3) 金属類の分析方法

1)EDX による分析

EDX 分析装置は、エス・アイ・アイナノテクノロジー社製 SEA1200VX を用いた。元素の分析法には標準物質（BCR176-664）と新たに 25 種の金属標準物質を使ったファンダメンタルパラメータ法(FP 法)を用いた。焼却灰、焼却飛灰、溶融飛灰、スラグについては金属酸化物として、メタルについては主に金属元素として分析を行い、主要金属元素の含有比率を計算した。試料はポリエチレン容器に概ね 5mm 以上の厚さになるように詰め、真空条件でフィルムを通して下面照射によってスペクトルを測定した。各金属類の定量限界は多くの元素の定量限界のオーダー値である 0.01%に設定した。

2)ICP-MS による分析

ICP-MS 分析用の試料は、(社)廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会の「製品中のレアメタル等の暫定分析方法[2]」に従って調整した。可燃物を焼却した焼却灰や溶融灰では、珪酸塩を多く含むと予想される。このために、固形試料を硫硝酸分解し、王水で溶解を行った後、5B ろ紙でろ過して、ろ液試料とした。ろ紙上のろ過残渣はろ紙ごと白金るつぼに入れ、550℃で加熱灰化し、硫酸、フッ酸を加えて白煙が出なくなるまで加熱後、炭酸ナトリウム、ホウ酸を加えたアルカリ溶融を行い、溶融物を硝酸に溶解して残渣試料とした。金属類の濃度はろ液試料と残渣試料の濃度を合算した。

ICP-MS 分析装置は Agilent Technologies 社製 7500 を使い、内部標準としてロジウム、タリウムを用いた。標準物質は 49 種の元素を使って 0.5～500mg/l の範囲に設定して分析を行った。

３　結果

(1) 各清掃工場の EDX 測定結果

各清掃工場における焼却灰、焼却飛灰等の試料分類ごとの分析結果を、図 1 から図 9 に示した。なお、ここでは EDX で分析が可能なアルミニウム以上の原子量を持つ元素について測定した。

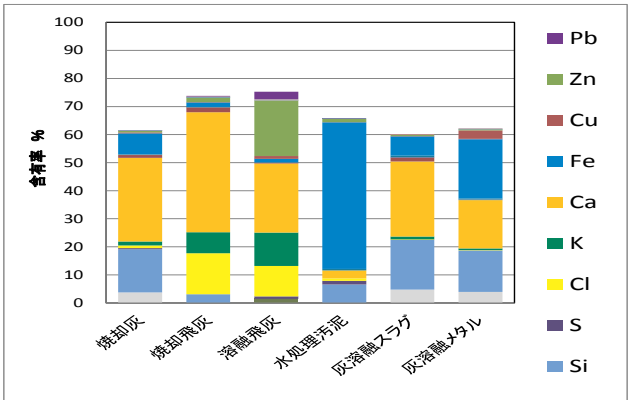

図１　A清掃工場分析結果

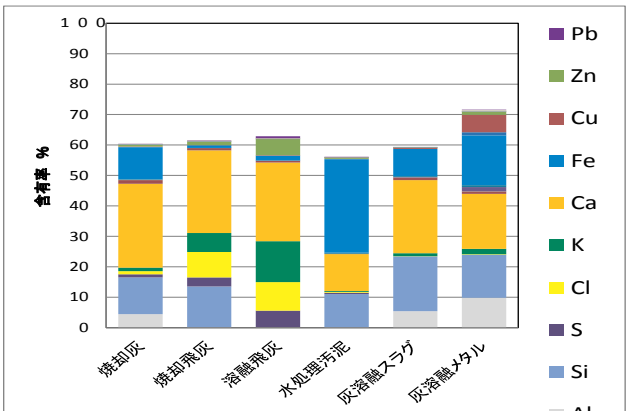

図２　B清掃工場分析結果

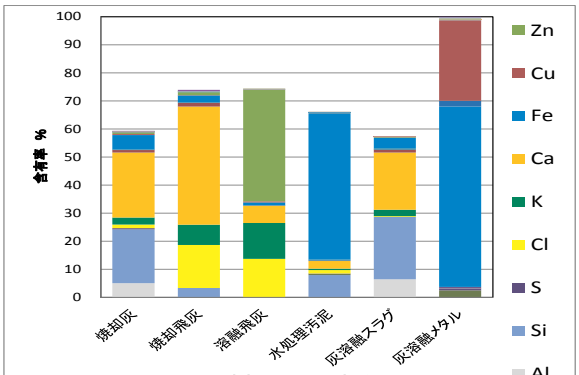

図3　C清掃工場分析結果

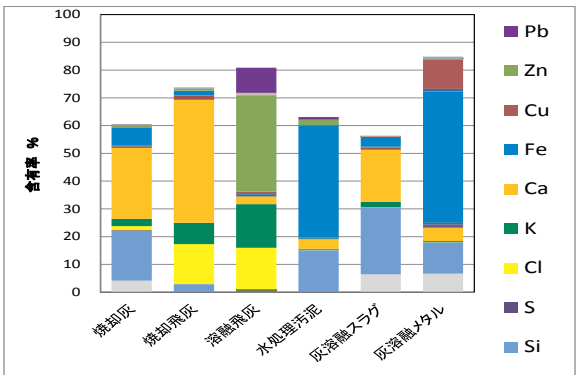

図4　D清掃工場分析結果

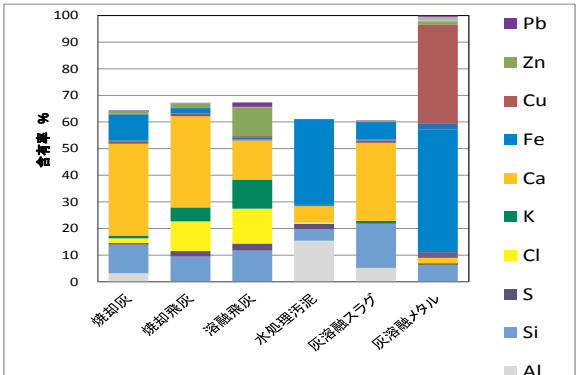

図5　E清掃工場分析結果

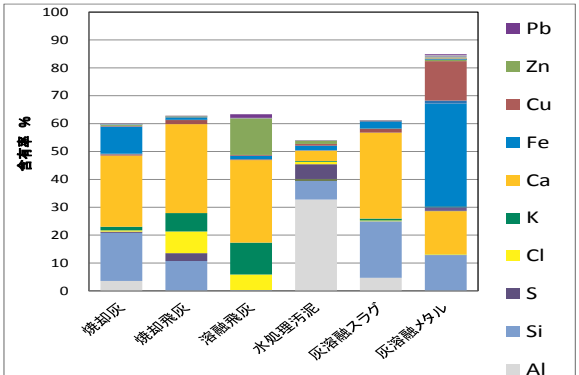

図6　F清掃工場分析結果

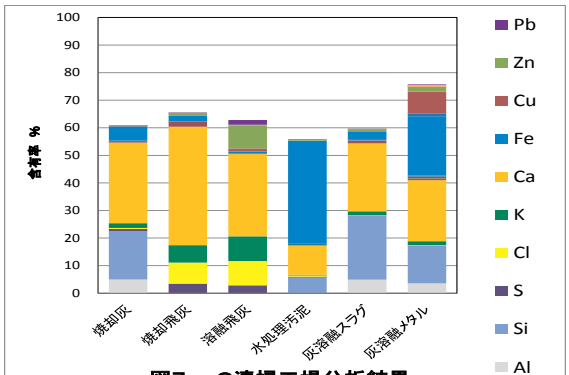

図7　G清掃工場分析結果

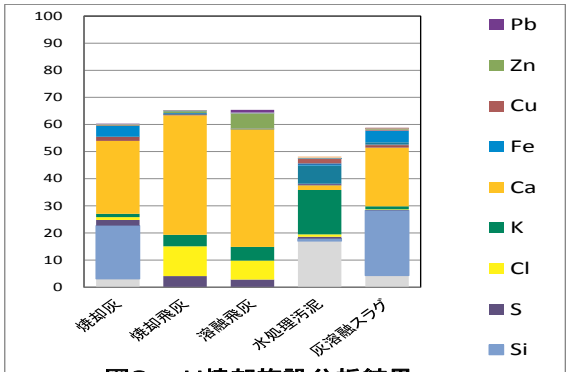

図8　H焼却施設分析結果

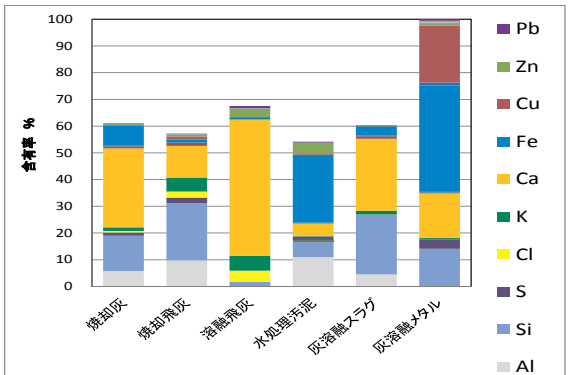

図9　I溶融施設分析結果

焼却灰の元素は、各清掃工場ともカルシウム、ケイ素、アルミ、鉄が多く、主としてこれらの酸化物として存在していると推測される。焼却飛灰の主な元素はカルシウム、塩素、カリウム、ケイ素であり、酸化物または塩化物として存在していると考えられる。さらに G,H 清掃工場ではイオウ元素が比較的多く存在し、硫酸塩として存在していると考えられる。

溶融飛灰に含まれる元素は焼却飛灰と同様な元素と亜鉛を含んでいることが多い。特に C,D 清掃工場で亜鉛の含有率が高くなっていた。また、D 清掃工場で鉛の含有率が高かった。

水処理汚泥に含まれる元素は塩化第二鉄を凝集剤に使用している清掃工場で鉄の含有率が高い。F 清掃工

場では硫酸アルミニウムを凝集剤にしているのでアルミニウム含有率が高く、H清掃工場ではアルミニウムとカリウムの化合物が使われていると考えられる。汚泥は直接工場外に排出されないで、再び焼却用のピットに戻されることが多い。

灰溶融スラグに含まれる元素はカルシウム、ケイ素、アルミニウム、鉄が主で、焼却灰と似た構成比率からなっている。A,G,I などの工場では塩基度調整のため、ケイ砂を溶融原料に加えているが、I 工場でケイ素の比率が焼却灰より多少高くなっている。

灰溶融メタルに含まれる金属は鉄と銅が主要な元素であるが、ケイ素、アルミニウム、カルシウムが含まれる工場がある。C清掃工場では溶融炉からのスラグはスラグ用排出口から出し、メタルはメタル用排出口から出たものを徐冷式で回収しているため大部分が鉄と銅であった。他工場では炉から出た水砕スラグの中から鉄成分が多い部分が磁石によって分離され、メタルと称している。このため、ケイ素、カルシウムを含むものや、メタルにスラグ成分が付着している場合がある。H 焼却施設では、溶融前にステンレスやアルミが除かれ、この重量分がメタルに相当している。分析結果の図で 100%に達していない分は、EDX で測定できなかった酸素などの元素に相当している。

各工場の溶融施設の内、A,C,D,F,G,I は電気溶融式、B,E,H は表面溶融式であるが、元素組成の大きな相違は見られなかった。

(2) 各清掃工場の希少金属類の ICP-MS 測定結果

A～I 工場の焼却灰、焼却飛灰、溶融飛灰、汚泥、スラグ、メタル中の希少金属類をレアメタル等の暫定分析方法に従って ICP-MS で測定し、各工場の測定値を平均した結果を表３に示した。焼却灰中の希少金属類には、チタン、マンガン、クロム、ストロンチウム、バリウム、ニッケル、アンチモン、タングステンが多く含まれていた。焼却飛灰中の希少金属類にはチタン、アンチモン、マンガン、クロム、バリウム、ストロンチウムの順に含まれ、アンチモンの塩化物の沸点が低いことから焼却飛灰中の濃度が高くなっていた。ランタノイド系レアアースはセリウム、ネオジムを除いて各試料とも微量しか存在せず、検出限界以下のものが多かった。溶融飛灰中の希少金属類の中で、ルビジウム、バリウム、インジウム、セシウム、ビスマスが焼却飛灰中の平均濃度より高く、溶融炉が 1300～1400℃の高温条件なので金属類の揮発を促進していると思われる。メタル中の希少金属類は、ニッケル、クロム、マンガンなどステンレスに用いられる成分濃度が高い傾向にある。また、ランタノイド系レアアースを除き最大値と最小値とでは工場間で２桁差がある項目が多くあり、メタル回収方法の相違が影響していると思われた。

メタル中の貴金属としてパラジウム 12mg/kg、白金 15 mg/kg、金 51 mg/kg が含まれていた。白金については、分析の過程でろ過残渣を白金るつぼで溶融しているため、ろ液に含まれていたものについてのみ計算した。

(3) 主な希少金属類の分配収支

８カ所の清掃工場や焼却施設において、表２の焼却灰等の年間重量と希少金属類の含有量から年間の希少金属重量が計算され、希少金属類が焼却工程で焼却灰と焼却飛灰に分配される重量比率を平均して表４に示した。また、９カ所の溶融施設において、希少金属類が溶融工程で溶融飛灰とスラグとメタルに分配される重量比率を図 10～図 18 に示した。

表３　A～I 工場の焼却灰、焼却飛灰、溶融飛灰、汚泥、スラグ、メタル中希少金属類濃度　(mg/kg)

	焼却灰	n=9		焼却飛灰	n=9		溶融飛灰	n=9		汚泥	n=9		スラグ	n=9		メタル	n=8	
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
Ti	9850	17100	6950	7190	12130	2690	1380	2730	72.4	1480	8830	233	8620	10800	6100	4880	9460	0.0
V	39.6	62.5	28.9	19.8	33.8	5.9	8.9	15.1	3.2	18.8	50.1	5.1	43.6	70.7	32.0	75.0	158	6.4
Cr	506	691	345	349	736	75.0	373	832	29.9	354	908	98.0	1150	1580	519	4840	10410	882.0
Mn	903	1910	595	507	1950	215	406	845	64.3	1330	2280	321	2240	5720	1110	1640	3500	50.6
Ni	174	474	81.2	63.8	352	13.2	103	380	24.3	278	1370	25.1	338	1560	0.0	6780	12600	485
Rb	8.6	24.7	<1.0	35.5	50.7	24.8	202	368	82.7	3.0	10.7	<1.0	9.9	26.0	<1.0	2.7	7.0	<1.0
Sr	419	987	257	282	705	212	168	308	28.7	192	771	44.1	526	1640	150	191	562	<1.0
Y	3.7	9.0	2.1	1.9	4.3	1.3	0.9	2.8	<1.0	1.7	7.8	<1.0	3.7	7.0	1.1	1.7	5.3	<1.0
Zr	133	360	74.7	59.5	118	31.6	78.4	592	2.7	19.8	116	3.6	164	303	94.1	67.9	124	<1.0
Mo	15.9	42.4	6.0	22.4	141	2.1	17.8	43.0	5.0	40.4	109	5.9	13.3	37.3	<1.0	265	407	18.0
Pd	1.9	15.4	<1.0	<1.0	4.7	<1.0	3.2	26.9	<1.0	3.1	15.2	<1.0	1.5	8.5	<1.0	11.9	30.7	<1.0
Sb	214	761	66.4	561	1520	407	459	854	106	138	675	11	45.2	127	1	1150	3120	59.2
Ba	280	649	155	315	589	154	1090	8020	12.3	409	1730	152	404	786	196	457	1310	2.9
In	1.4	3.3	<1.0	1.4	4.9	<1.0	21.2	81.3	8.8	2.5	13.8	<1.0	<1.0	1.9	<1.0	9.8	23.3	<1.0
Cs	4.7	38.2	<1.0	1.6	2.9	<1.0	22.1	53.0	10.6	<1.0	2.0	<1.0	<1.0	1.0	<1.0	<1.0	1.0	<1.0
Ce	23.9	98.9	11.1	11.5	41.8	5.8	4.1	13.4	<1.0	4.0	19.1	<1.0	22.0	38.5	7.0	9.4	24.5	<1.0
Pr	2.0	3.9	<1.0	<1.0	2.0	<1.0	<1.0	2.8	<1.0	<1.0	1.5	<1.0	3.6	6.3	1.4	3.9	18.3	<1.0
Nd	15.3	35.4	8.2	6.8	24.7	3.2	5.5	23.5	<1.0	3.3	10.0	<1.0	27.1	51.4	13.1	27.2	120	<1.0
Sm	1.5	3.1	0.5	<1.0	2.0	<1.0	<1.0	2.6	<1.0	<1.0	0.9	<1.0	2.2	4.5	<1.0	1.0	3.9	<1.0
Eu	<1.0	1.2	<1.0	<1.0	1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1.3	<1.0	<1.0	1.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Gd	1.6	4.2	0.6	1.2	2.6	<1.0	<1.0	3.3	<1.0	1.0	4.2	<1.0	4.6	11.8	<1.0	1.9	5.3	<1.0
Tb	<1.0	1.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1.1	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Dy	1.7	3.8	<1.0	<1.0	1.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1.9	<1.0	1.5	2.9	<1.0	1.1	3.0	<1.0
Ho	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1.1	<1.0
Er	1.3	3.6	<1.0	<1.0	1.2	<1.0	<1.0	1.1	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	2.9	6.6	<1.0	1.3	3.0	<1.0
Tm	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Yb	<1.0	1.5	<1.0	<1.0	1.2	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1.7	<1.0	<1.0	2.2	<1.0	<1.0	1.3	<1.0
Lu	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
W	140	552	10.4	10.9	44.8	<1.0	8.3	24.6	<1.0	108	839	6.5	329	978	37.8	372	674	115
Pt	<1.0	2.8	<1.0	<1.0	1.2	<1.0	<1.0	4.0	<1.0	1.9	14	<1.0	<1.0	3.3	<1.0	15.2	35	1.8
Au	5.9	32.8	<1.0	2.3	20.6	<1.0	1.0	8.8	<1.0	<1.0	7.8	<1.0	1.8	16.1	<1.0	51.4	186.7	<1.0
Bi	2.9	7.5	<1.0	11.2	27.9	2.3	81.6	232	30.2	15.8	115	<1.0	1.8	11.9	<1.0	2.1	5.4	<1.0

表４　各清掃工場の焼却による金属類の分配比率

金属の種類		Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
焼却による分配	焼却飛灰%	22.9	15.5	20.5	14.3	4.4	8.4	7.8	35.8
	焼却灰%	77.1	84.5	79.5	85.7	95.6	91.6	92.2	64.2

金属の種類		As	Rb	Sr	Y	Zr	Mo	Pd	Ag
焼却による分配	焼却飛灰%	40.3	68.0	19.8	16.6	14.9	27.7	35.1	39.0
	焼却灰%	59.7	32.0	80.2	83.4	85.1	72.3	64.9	61.0

金属の種類		Cd	Sn	Sb	Ba	Pb	Nd	W	Bi
焼却による分配	焼却飛灰%	88.4	22.6	53.4	31.9	40.2	12.1	7.5	69.9
	焼却灰%	11.6	77.4	46.6	68.1	59.8	87.9	92.5	30.1

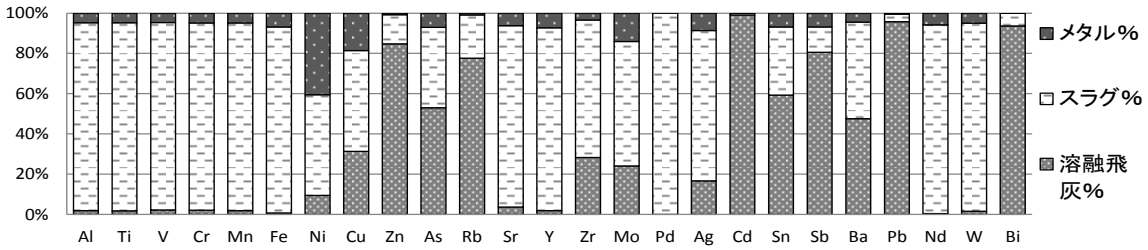

図10　　A清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

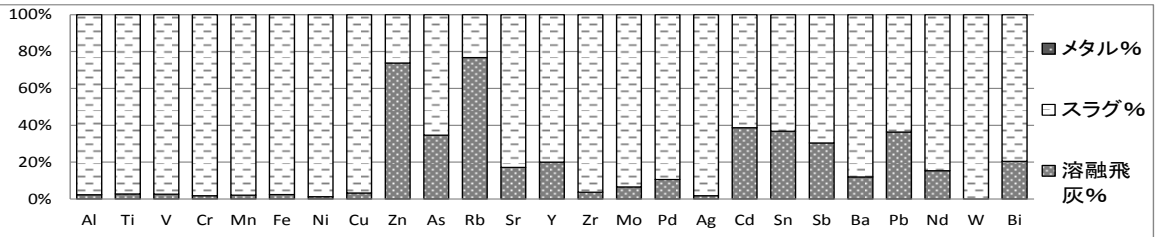

図11　　B清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

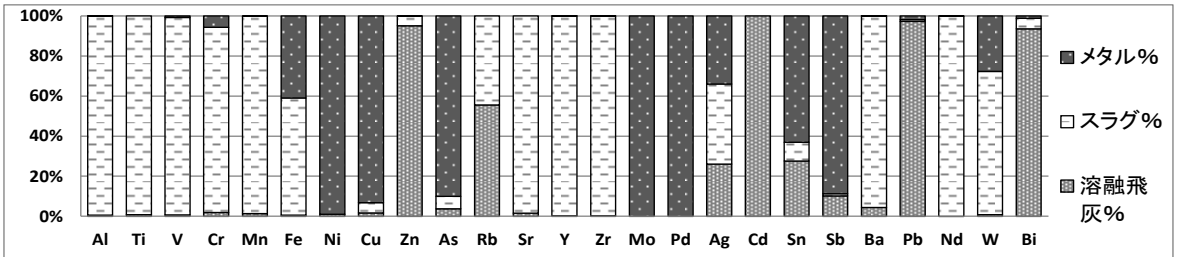

図12　　C清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

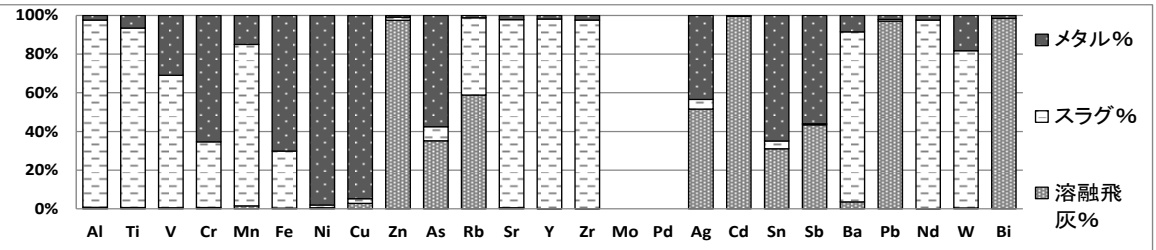

図13　　D清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

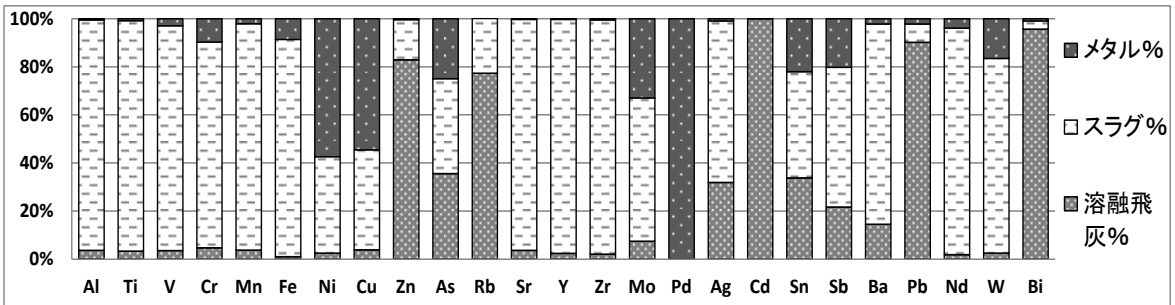

図14　E清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

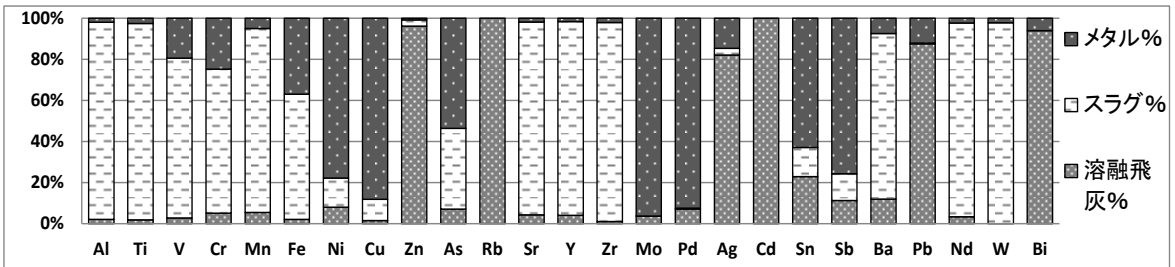

図15　F清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

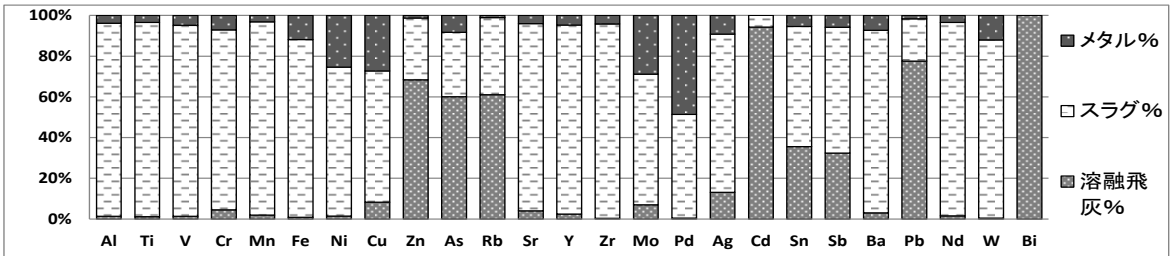

図16　G清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

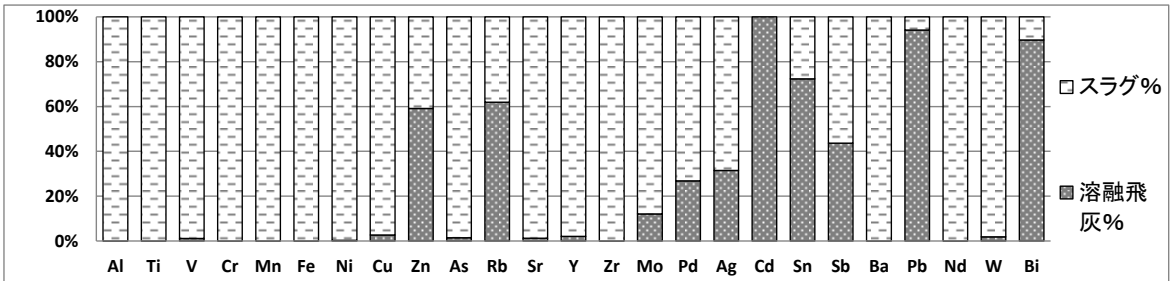

図17　H清掃工場の溶融処理による金属類の分配比率

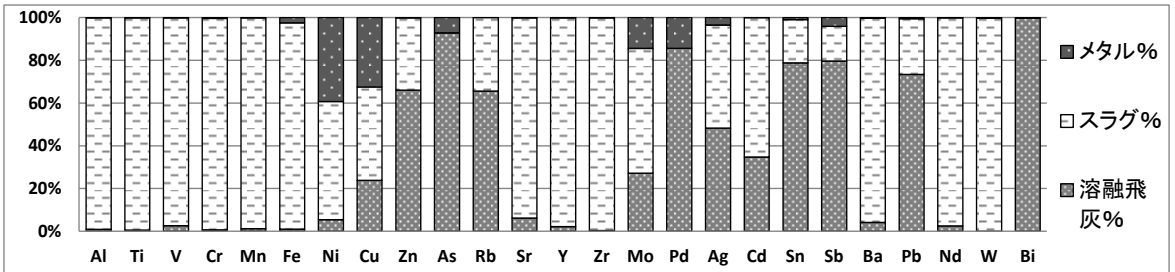

図18　Ⅰ 溶融施設の溶融処理による金属類の分配比率

表４より、多くの金属は焼却灰に分配される比率が高いが、亜鉛、ヒ素、ルビジウム、カドミウム、アンチモン、鉛、ビスマスは、金属の酸化物や塩化物の沸点が低い[5]ために、焼却飛灰に分配した比率が高かった。

図 10～18 より、アルミニウム、チタン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄については、D 清掃工場を除いて、スラグに主に分配していた。D 清掃工場では特にクロム、鉄がメタルに分配していた。ニッケル、銅は B, G,H 清掃工場ではスラグに、C,D,F 清掃工場ではメタルに主に分配していた。亜鉛、ルビジウムでは比較的溶融飛灰に分配している清掃工場が多く、ヒ素は分配が清掃工場により変わっている。ストロンチウム、イットリウム、ジルコニウムでは各工場ともスラグに分配していた。モリブデン、パラジウム、銀では主にスラグに分配している A,B,H 清掃工場と、モリブデン、パラジウムがメタルに分配している C,F 清掃工場とに分けられた。カドミウム、鉛、ビスマスは溶融飛灰に分配している清掃工場が多かった。スズ、アンチモンについて C,D,F 清掃工場で主にメタルに分配し、他の清掃工場ではスラグ又は溶融飛灰に分配していた。バリウム、ネオジム、タングステンは主にスラグに分配しているところが多かった。以上から、アルミニウム、チタン、イットリウム、ストロンチウムバリウムなどの希土類やアルカリ土類金属はスラグに、モリブデン、パラジウム、銀等の貴金属やニッケル、銅等の鋼材に使用される金属類はメタルに、低沸点の亜鉛、ヒ素、ルビジウム、カドミウム、アンチモン、鉛、ビスマス等の金属類では溶融飛灰に分配する傾向を示していた。これらの希少金属等の挙動は、肴倉らにより行われた調査[6]と同様な傾向をするものが多かったが、その分配の比率については工場の溶融炉の形式や溶融温度の差、塩化物量の相違等が理由と考えられるばらつきが見られた。

(4) 焼却灰等の分析値の比較

採取した試料は工場での採取後、２つに分け一方を EDX 用、もう一方を ICP-MS 用とし、両方法で測定できた項目について比較を行った。試料中の含有量の高い金属では、両法の測定でほぼ同一の値が得られ、相関係数も高かった。試料中の含有量が 3%以下の金属では、測定値間の相関係数が比較的高かったが、EDX 測定値に対する ICP-MS 測定値は 1/2 程度であった。この理由として EDX の値は FP 法により求められているが、含有成分の合計値が 100%になるように計算しているため、含有量の低い希少金属ではスペクトルの重なり補正やバックグラウンド除去が FP 法のプログラムで十分に働いていなかった可能性がある。今後比較的含有量の低い元素については、標準物質を固形物中に添加する方法により、測定値の信頼性を向上させ、できるだけ EDX の測定値で希少金属濃度を示していきたい。

４　まとめ

清掃工場からの焼却灰、焼却飛灰、溶融飛灰、スラグ、メタル、汚泥について、ベースメタル及び主要元素を主に EDX で、微量な希少金属類を ICP-MS で分析を行った。

焼却灰中の元素は、各清掃工場ともアルミ、ケイ素、カルシウム、鉄が多く、焼却飛灰にはケイ素、塩素、カルシウム、カリウムが見られた。スラグは焼却灰と似た元素が見られ、メタルには鉄と銅が多く含まれていた。焼却灰中の希少金属類には、チタン、マンガン、クロム、ストロンチウム、バリウム、ニッケル、アンチモン、タングステンが多く含まれ、焼却や溶融によって飛灰中には亜鉛、ルビジウム、カドミウム、アンチモン、鉛、ビスマス等の沸点の低い金属類が捕集されていた。

謝辞

本調査の実施に際して御協力頂いた東京二十三区清掃一部事務組合並びに都内清掃施設の皆様に謝意を表します。

参考文献

1) 茂木敏,辰市祐久ら：都市ごみに含まれる金属資源の挙動に関する研究(1),東京都環境科学研究所年報 2011,pp.78-81（2011）

2) （社）廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会：製品中のレアメタル等の暫定分析方法(v.2)、2010.12.17

3) 東京二十三区清掃一部事務組合,一般廃棄物処理基本計画（平成 22 年 2 月）4 焼却灰処理

4) 東京二十三区清掃一部事務組合,清掃技報 主灰単独溶融について（テスト実施）,No8（2008）

5) 松田仁樹,小島義弘ら：減圧加熱／塩化揮発の組み合わせによる固体残渣類の完全無害化と重金属の効率的分離回収・再資源化,廃棄物処理等科学研究費補助金総合研究報告 2007

6) 肴倉宏史ら：焼却・溶融実処理プロセスにおける希少金属等 54 元素の分配と変動, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 2010,pp.407-408（2010）