

(51) 高温で捕集された溶融飛灰の粒径別性状

高岡 昌輝^{1*}・塩田 憲司¹・増井 芽²・高橋 正光³
宋田 健一⁴・田中 朝都⁵・富田 康弘⁶・石山 卓弘⁷・武田 信生⁸

¹京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²㈱アクトリー 技術開発営業室 (〒924-0053 石川県白山市水澄町375)

³㈱神鋼環境ソリューション 技術開発本部プロセス技術開発部 (〒651-2241 神戸市西区室谷1-1-4)

⁴㈱タクマ 水処理技術部 (〒660-0806 兵庫県尼崎市金楽寺町2-2-33)

⁵日立造船㈱ エンジニアリング本部機械設計部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北1丁目7-89)

⁶三井造船㈱ 環境プラント事業本部環境技術部 (〒134-0088 東京都江戸川区西葛西8-4-6 ST西葛西ビル)

⁷(財) 廃棄物研究財団 東京研究所 (〒130-0026 東京都墨田区両国3-25-5)

⁸立命館大学エコ・テクノロジー研究センター (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

*E-mail:takaoka@environ.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

本研究では、溶融飛灰をあらかじめ粒径別に分離し、重金属の濃縮部を回収することを目的に、高温の灰溶融炉煙道における溶融飛灰の粒径別性状を調査した。具体的にはカスケードインパクトを用いて粒径別に溶融飛灰を捕集し、重金属類含有量測定、走査型電子顕微鏡(SEM)および透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて粒子観察を行った。溶融飛灰の大部分はNa、K、Clを主成分とする10 μ m以下の微粒子からなり、Znは粒径が小さくなるほど濃度が高くなることがわかった。約20 μ m以上の粒子にはSi、Alが主成分である粒子が観察され、この粒径で分離することで重金属を効率的に回収できると考えられた。TEM分析より重金属元素は塩化物、酸化物がそれぞれ別の微粒子として飛散していることが示唆された。

Key Words : fly ash, melting, heavy metals, metal recovery, properties of particles

1. はじめに

現在日本では、一般廃棄物およびそこから排出される処理残渣などを減量化・無害化・スラグ化による資源利用するために多くの溶融施設が移動している¹⁾。それらの施設において、溶融処理により発生した溶融飛灰について、現状ではその多くは無害化処理を経て埋め立てによる最終処分が行われているが、重金属類を高濃度で含んでおり、金属成分のリサイクルのために重金属類を資源として回収することが求められている²⁾。

溶融飛灰から重金属類を回収する方法は湿式法^{7a)}や乾式法¹⁰⁻¹²⁾などが提案され、検討が行われている。単独プロセスで重金属類を回収し、それらを生産プロセスへ戻す方法もあるが、多くの場合は精錬工場における精錬プロセスに戻す山元還元を想定している³⁾。この場合、回収対象となる金属は溶融飛灰中に多い方が望まれる⁹⁾。したがって、溶融飛灰を精錬工場に供用する前に金属成分を分離濃縮する方法が検討されている。

溶融飛灰の組成は、大別すると回収資源として期待される亜鉛、鉛などのような低沸点揮発性金属成分、溶融時に溶融炉から排ガス側へ物理的に飛散するケイ素、カルシウム、アルミニウムなどを多く含む成分(キャリアオーバー成分)、高濃度で含まれる塩素、ナトリウム、カリウムなどの成分に分けられる。山元還元において、溶融飛灰中に高濃度で含まれる塩素は設備の腐食など支障となる可能性がある。また、溶融飛灰を直接山元還元するには、回収対象となる揮発性金属の含有量が粗鉱石以上であることが望まれる。

そのために、溶融飛灰の組成に応じた脱塩素処理、金属濃縮処理が行われているが、そのような処理のなかで、溶融炉から発生する排ガス・ダストを数種の温度域で捕集することにより、溶融飛灰の成分分離・重金属濃縮を行うプロセスの検討も行われている¹⁴⁻¹⁷⁾。これは、高温において揮発性金属成分はガスもしくは微粒子やヒュームになっており、キャリアオーバー成分は揮発せずに比較的粗大な粒子で存在していると考えられることから、溶融炉から発生する排ガス・ダスト

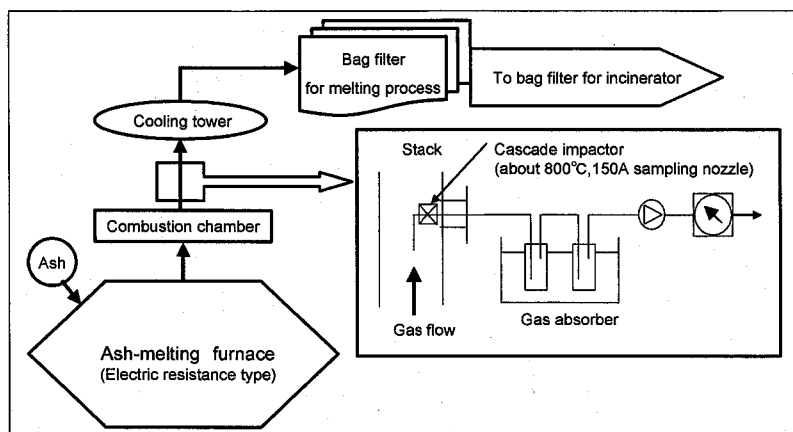


図-1 灰溶融施設概要フローおよびサンプリング位置

を粒径別に捕集することで、粒径の小さなものには揮発性金属成分が濃縮されると期待されることによる¹⁸⁾。この方式だと、溶融施設から溶融飛灰が得られた時点である程度重金属類が分離・濃縮されることが期待され、重金属類を回収する際の前処理を簡素化できる可能性がある。先行研究はラボスケール実験^{15,16)}、パイロットプラント実験^{14,17)}、およびシミュレーション¹⁹⁾が中心で、実稼動中の一般廃棄物の灰溶融施設で高温集塵による成分分離実験が行われた報告はない。

本研究では実施設における高温煙道での溶融飛灰の粒径別分離を想定し、排ガス中のダストの性状についての基礎的調査を行った。具体的にはキャリーオーバー成分の粒子と揮発性金属成分の粒子を粒径別に分離するために、高温の排ガス(約 800°C)をカスケードインパクトを用いて直接捕集し、走査型および透過型電子顕微鏡を用いて粒子形状を確認しながら組成分析を行い、最終的に揮発性金属回収に適した分離粒径を求めた。

2. 試料と分析方法

(1) サンプリング方法および試料

本研究で用いた溶融飛灰は、ごみ処理施設 A 工場(焼却形式: ストーカ炉、灰溶融形式: 電気抵抗式、還元雰囲気、灰供給量: 1500kg/h、燃焼室出口温度: 約 800°C)にて図-1 に示す位置において、同日、異なる時間に 2 回サンプリングされたものを用いた。溶融方式については、溶融炉において燃焼ガスの吹き込みなどがなく他の方式に比べキャリーオーバー成分が煙道内へ飛散しにくいと考えられる電気抵抗式に着目した。

粒子状の溶融飛灰のサンプリング¹⁹⁾は、図-1 に示すサ

表-1 カスケードインパクトの各分級板における最小捕集粒径

Sampling plates	1	2	3	4	5	6	7	8
Particle size(μm)	47	28	19	13	8.7	4.3	2.8	2.0

ンプリングノズルにカスケードインパクト(東京ダイレック社製、アンダーセンスタックサンプラー・モデル AS-500、材質: SUS304および316)を挿入し、約15分間の予熱の後一定時間サンプリングを行った。なお、本カスケードインパクトによるサンプリングを行う前に煙道中排ガス流速の測定を行い、サンプリング時の等速吸引速度を0.0025m³/minとした¹⁹⁾。カスケードインパクトは8層の分級板および捕集板とバックアップフィルターからなり、サンプリング条件により捕集できる粒径が異なる。本実験条件において捕集粒径は表-1となる。カスケードインパクトを通過したガス状成分は水および硝酸を満たした2連のガス吸尿管にて捕捉した。

1回目のサンプリングは2分間捕集を行い、これを粒子観察用とした(以下サンプルAとする)。また、2回目のサンプリングはICPによる元素分析用として、サンプル量を得るために10分間捕集を行った(以下サンプルBとする)。

(2) 分析方法

a) 電子顕微鏡による溶融飛灰粒子の観察およびX線元素分析

捕集された溶融飛灰サンプル A の粒子観察および蛍光 X 線分析については以下の条件で行った。

走査型電子顕微鏡(SEM、日本電子製: JSM-5600T)およびエネルギー分散型 X 線分析装置(EDS、日本電子製: EX-2300BU)では、粒子の付着したカスケードインパクトの捕集板(材質: SUS304)に白金コーティング(日

表-2 粒径別捕集量

Sampling plates	Particle size	Sample A	Sample B	Sample A	Sample B
No.	μm	mg		%	
1	>46.5	3.1	18.8	17.4	15.5
2	27.9-46.5	3.0	14.1	16.9	11.7
3	19.4-27.9	2.7	21.2	15.2	17.5
4	13.3-19.4	1.8	8.5	10.1	7.0
5	8.7-13.3	0.7	18.6	3.9	15.4
6	4.3-8.7	0.6	11.6	3.4	9.6
7	2.8-4.3	1.2	6.5	6.7	5.4
8	2.0-2.8	2.2	5.0	12.4	4.1
BF	<2.0	2.5	16.0	14.0	13.2
Total		17.8	121	100	100

本電子製 JFC-1600、20mA、120 秒)を施し、カーボン系導電性両面テープを用いて捕集板を試料治具に固定して観察を行った。SEM の操作条件は、加速電圧が 15kV、フィラメント電流が 65 μA 、作動距離が 20mm で、EDS の操作条件は、スペクトル測定時間を 30 秒とした。

透過型電子顕微鏡 (TEM、日本電子製：JEM-2100F、EDSつき)では、捕集板上の粒子を超音波洗浄器中でアセトン中に分散させた懸濁液を試料支持膜に滴下し、試料を付着させ乾燥後に観察を行った。TEM の操作条件は、加速電圧200kV、フィラメント電流2.6nAで、EDS の操作条件はスペクトル測定時間を160秒とした。

b) ICP分析法による溶融飛灰の元素分析

カスケードインパクトで捕集された溶融飛灰について、以下のようにして元素分析を行った。

サンプルBについては、1～4段目の捕集板には粒子が分級されて捕集される際に生成される粒子の堆積物は肉眼では認められず、捕集板と固定用ステンレスリングの間に捕集されてしまい線状の塊となったダスト塊が主であった。そのため、1～4段目の捕集板を分けて分析をしても差異が認められにくいと想定されたことから、1～4段目を併せてひとつの試料として分析した。また、捕集板上には分級されて捕集された粒子の山が認められないので、捕集板を削るようにしてサンプルを集めた。5～8段目には分級されて捕集された粒子の山が認められたため、各段ごとに分析を行った。

粒径別に、2.5mL硝酸と7.5mL塩酸の混酸を用い、マイクロウェーブ抽出装置 (CEM社製：MARSS)を用いて 170psi (1.2MPa)、20minの条件下で分解した後、孔径0.2 μm のメンブランフィルターで吸引ろ過した。ろ液と標準試料溶液すべてに内標準元素としてイットリウムがメスアップ後に1mg/Lの濃度となるように添加し、1mol/L硝酸で100mLにメスアップしたものについて、ICP質量分析計 (Agilent Technology社製：HP4500)とICP発光分析装置 (Thermo ELECTRON社製：IRIS Intrepid)を使用し、元素

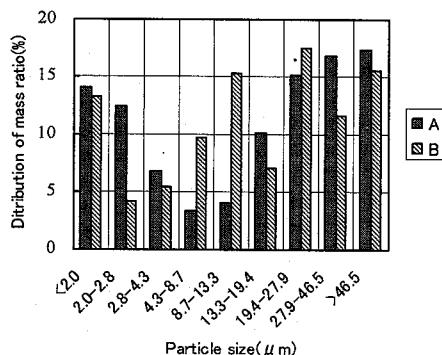


図-2 粒度分布図

濃度を測定した。

3. 実験結果および考察

(1) サンプルの採取および採取量

カスケードインパクトを用いて捕集されたサンプル A および B の溶融飛灰捕集量および各粒径の比率について、表-2 に示す。

サンプル A について、灰の吸湿等の問題はなかったが、カスケードインパクト後段の分級板の孔が詰まり始めていた。各捕集板における捕集量は数 mg であり、合計でも約 18mg であった。粒径は極めて細かく、目視では粒径の大きい粒子が捕捉される前段においてはほとんど捕集されていなかった。

捕集量が多かったサンプル B は、前述のとおり線状の塊となったダスト塊が主であったが、捕集板上に粒子の堆積物として捕集されたものを確認できなかったため、実際には粒径の小さいものがさらに多いと考えられる。

このことから、サンプル B のデータは必ずしも慣性衝突による分級が正常になされていないと考えられることから、粒径分布はサンプル A のデータを用いた。図-2 に捕集した粒子の粒度分布を示す。

結果を見ると、捕集板上段の粒径が大きい範囲 (19.4 μm 以上)と、捕集板後段の粒径が小さい範囲 (2.8 μm 以下)で比率が高く、焼却炉などのダスト分布^{20,24)}と似た傾向であった。

(2) SEM-EDSによる粒子観察および各粒子群の組成分析

サンプル A の捕集板 A1～A8 上の粒子を 1000 倍で観察した画像のうち、A2、A3、A4、A8 を図-3 に示す。これらの画像は、慣性衝突により生成した堆積物のごく近傍を観察したものであり、A1～A3 においては、10

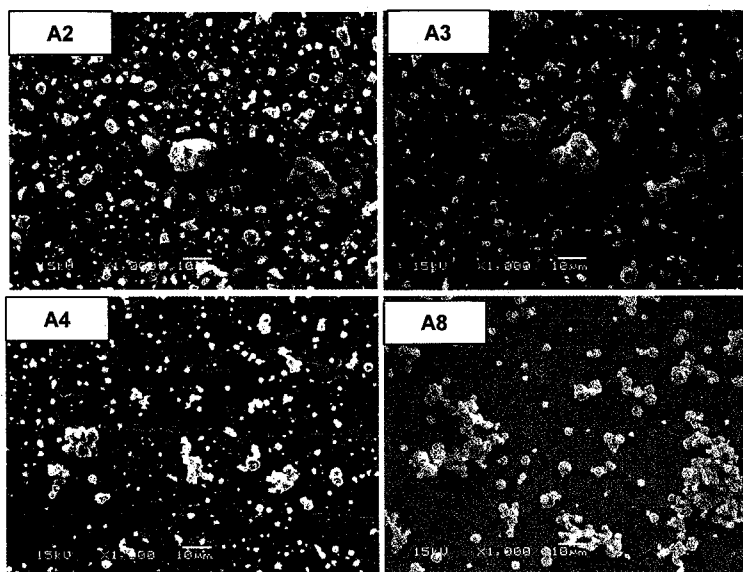


図-3 サンプルAの各捕集板上におけるダストのSEM観察像

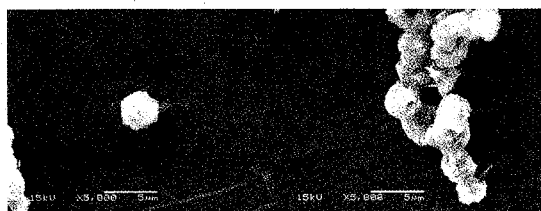


図-4 捕集板A8上の粒子状態

μm 以上の粒子が散見された。それらの $10\mu\text{m}$ 以上の粒子の一部は、図-3 中の A2 像および A3 像中央に確認できるように、捕集板上で小さな粒子が集まって成長し $10\mu\text{m}$ 以上の粒子になったものではなく、すでに排ガス中で $10\mu\text{m}$ 以上の粒子として存在し捕集された粗大粒子であると示唆された。なお、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子も認められるが、捕集板全体にとらえられた粒子（堆積物）からすれば、その影響は小さいと考えられる。

A4～A8 においては、A1～A3 で観察されたような $10\mu\text{m}$ 以上の粗大粒子は存在せず、数 μm の微粒子のみが観察された。ただし、図-4 に示すように、数 μm の微粒子が集まって成長し、 $10\mu\text{m}$ 以上の粒子状になっているものもあった。また、A1～A3 の粒子と A4～A8 の粒子の形状を比較すると、前者には球形でないものも含まれていたが、後者はほとんどすべてが球形であった。

以上より、粒子径および粒子の形状について、ダストは捕集板 3 と 4 の間である粒径が $194\mu\text{m}$ 前後において、構成する粒子が異なると示唆された。

次に、EDS を用いて各捕集板上の粒子を点分析することにより得られた各元素における重量比の平均値の

表-3 捕集板上粒子の SEM-EDS 点分析結果(w%)

Element	Plate	A1	A2	A4	A5	A6	A7	A8
O	3.8	5.8	21.2	14.3	21.4	12.8	16.6	8.3
Na	0.4	21.3	16.6	24.3	16.6	19.0	20.0	14.3
Al	0.0	0.1	1.7	0.2	0.2	0.8	0.3	0.2
Si	0.5	0.2	5.3	1.1	1.3	1.2	0.5	0.5
Cl	0.2	45.7	27.7	30.7	24.1	30.4	26.1	29.9
K	0.1	16.2	15.6	15.3	14.1	16.5	14.8	16.7
Ca	-	0.2	1.8	1.0	0.6	0.3	0.4	0.3
Cr	17.3	0.7	0.5	0.6	1.1	0.7	0.8	1.2
Fe	66.1	1.7	1.5	2.0	3.5	2.1	2.2	4.3
Ni	8.0	0.3	0.1	0.3	0.4	0.2	0.2	0.4
Zn	0.5	0.7	2.8	3.4	6.9	4.7	6.3	13.1
Cd	0.1	1.8	1.1	1.4	1.1	1.5	1.3	1.5
Pb	0.5	2.5	0.9	0.6	0.9	0.5	0.4	0.3

結果を表-3 に示す。

なお、捕集板は SUS304 製であるため、鉄、ニッケル、クロムで構成されていることが EDS 分析よりわかった。この結果から、1 段目から 8 段目の捕集板の点分析で鉄濃度が 5% 以上の分析値を示すものは、粒子だけでなく

捕集板も含めて分析していると判断されるので、各捕集板の粒子 5～15 個に行った点分析のうち鉄濃度が 5% 以下の分析値を示す粒子について各元素の分析値の平均値を算出した。A3 の分析結果においてはいずれの粒子も鉄濃度が 5% 以上という結果であったため示していない。

表-3 より、後段の捕集板ほど、つまり粒径が小さいほど亜鉛の濃度が大きくなる傾向があった。ケイ素、アルミニウム、カルシウムは 2 段目において最も高い濃度を示した。その他の元素については明確な傾向を示さなかった。

次に、捕集板ごとの金属元素濃度の平均値ではなく、ある粒子群における個々の点分析結果を示す。図-5 には A2 の結果を、図-6 には A4 の結果をそれぞれ示した。

2段目の捕集板について、A1～A3で観察されたような10 μ m以上の粒子(001)を点分析した結果、ケイ素濃度が15%を超えており、アルミニウム、カルシウム濃度も高いことから粗大粒子の一部はキャリアオーバー成分であることが示唆される。4段目の捕集板について、A4～A8で観察されたような10 μ m以上の粒子(002)を点分析した結果、ナトリウム、カリウム、塩素が主成分であった。このことから、SEM観察において示唆された構成される粒子の違いが確認された。比較した粒子について、その他の元素濃度はほとんど違いがなかった。比較的静的な条件での溶融と考えられる電気抵抗式溶融においても、ケイ素などを主構成物質とする粗大粒子がガスと共に運ばれてきていることがわかった。

(3) 透過型電子顕微鏡(TEM)による観察結果

捕集板 A8 の粒子を TEM により観察した。図-7 に結果を示す。図中の各元素に対する数値は亜鉛に対する重量濃度の比である。図-6 の SEM 観察により、数 μ m の粒子にもさらに微細な構造を有していることが予察されたが、TEM 観察の結果、数 μ m の粒子は平均 20nm 程度の微粒子結晶体が凝集して数 μ m の粒子を構成していることが認められた。TEM 観察において、同一コントラストで同一方向、同一間隔の格子模様を持つ領域は単一構造の結晶体であるが、図-7 の視野 a を見ると

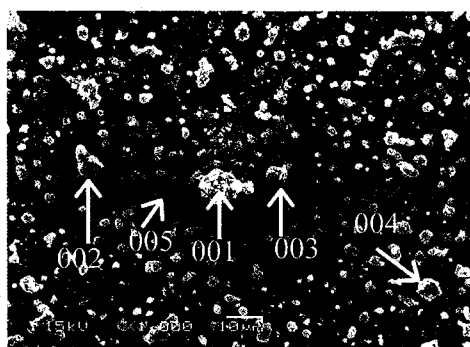
前述のような同一コントラスト等の格子模様を持つ約 20nm 四方の領域が複数集合しているように見え、それらの領域ごとに結晶構造が異なると考えられる。この領域はナトリウム、重金属、および酸素を主成分としており、20nm 四方の領域それぞれについてナトリウムまたは亜鉛を中心とする重金属の酸化物により構成されると考えられる。また、塩素や硫黄を含んでいない。

一方、図-7 の視野 b、および視野 c は視野 a とは異なる粒子の観察結果である。視野 b は亜鉛、鉄、およびカルシウムが主成分であるが、酸素や塩素が含まれていない。視野 c は塩素、亜鉛、および鉄が主成分であり、亜鉛および鉄の塩化物により構成されると考えられる。なお、視野 b、視野 c 共に鉄が高濃度で含まれているが、ニッケルとクロムの濃度が極めて低いので、捕集板由来ではないといえる。

いずれの視野においても A8 の SEM-EDS の結果と同じく亜鉛の量は多いが、より微粒子では複数の化合物形態で存在していると考えられた。

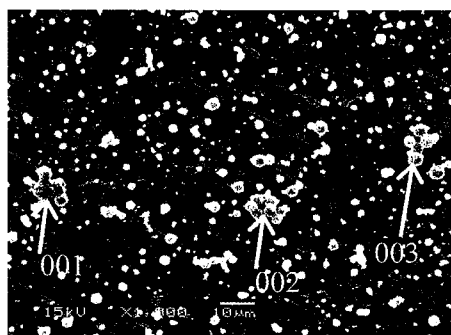
以上のTEM観察の結果から、SEM-EDSでは酸化物や塩化物が共存するような分析値を示しているが、より微粒子では酸化物と塩化物の粒子は分離していることがわかった。これは、酸化物と塩化物が炉内や煙道において温度や雰囲気異なる条件下で形成された後、それぞれ異なるダスト成分として煙道中を移動していると示唆された。

(4) 粒径別元素分布



Element	001	002	003	004	005
O	46.6	21.2	6.7	10.3	11.2
Na	7.3	22.8	20.6	22.0	1.9
Al	4.7	0.1	0.2	0.3	0.0
Si	15.3	0.0	0.3	0.2	0.3
Cl	1.1	33.9	41.8	40.2	0.7
K	4.2	12.9	21.9	20.8	0.5
Ca	5.1		0.2	0.2	0.1
Cr	0.4	0.4	0.3	0.8	15.2
Fe	1.3	5.6	1.3	1.9	58.8
Ni	0.1	0.2		0.1	6.9
Zn	7.4	0.2	0.9	0.0	1.1
Cd	0.3	1.0	1.6	1.6	0.1
Pb	1.0	0.0	1.2	0.6	0.4

図-5 捕集板 A2 上の粒子別点分析結果(wt%, 005は捕集板)



Element	001	002	003
O	19.2	12.5	15.0
Na	22.6	22.7	28.2
Al	0.2	0.2	0.2
Si	1.6	0.1	1.8
Cl	26.6	38.5	23.5
K	15.6	16.8	10.3
Ca	3.0	0.1	0.6
Cr	0.3	0.9	0.6
Fe	1.2	3.1	2.2
Ni	0.2	0.4	0.3
Zn	1.4	0.8	8.4
Cd	1.3	1.9	1.0
Pb	0.9	-	1.0

図-6 捕集板 A4 上の粒子別点分析結果(wt%)

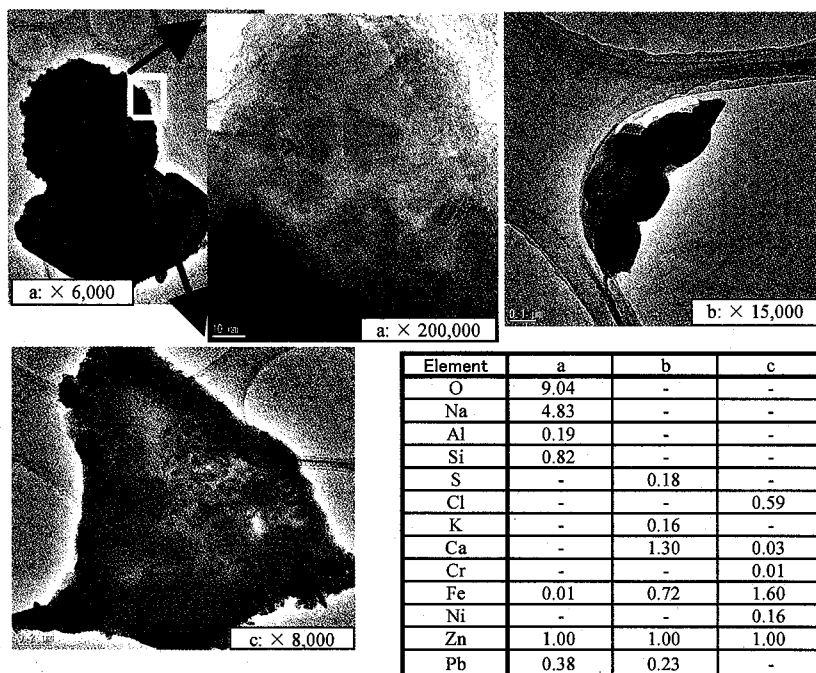


図-7 捕集板 A8 上粒子の TEM 観察・EDS 分析結果

サンプル B の各捕集板のダストについて ICP 発光分析装置と ICP 質量分析装置を用いて粒径別に元素分析を行った。分析結果を表-4 に示す。

サンプル B の捕集板 B1-4 において、クロム、鉄、ニッケルが極端に高い値を示したのは捕集板の材質が SUS304 であり、3.(2)の SEM-EDS による捕集板の分析結果とも一致している。それらの元素が高濃度であるのは ICP 分析用にサンプルを採取した際に削られた捕集板に由来していると考えられた。それ以外の元素では、ケイ素、マンガンが高い濃度となった。これはケイ素やマンガン化合物の沸点、融点が高く²⁾、キャリアオーバー成分として粗大粒子を構成するからだと考えられる。

他の元素については、B1~B4 よりも B5、B8、バックアップろ紙上において高い値を示していた。元素別ではカリウム、ナトリウムといったアルカリ金属元素が非常に高い濃度を示し、ついで亜鉛の濃度が高かった。粒径が小さくなるにつれて、揮発性金属元素の濃度が高くなることが示唆されたが¹⁷⁾、必ずしも明確ではなかった。

以上の結果から、今回粒径別にサンプリングを行った溶融飛灰は重金属元素が特定の粒径に集中しているわけではないことがわかった。しかし、粒径が 13.3 μm 以上の粒子において、キャリアオーバー成分に多く含まれるとされるケイ素の濃度が高いことから、ダスト

表-4 サンプル B の元素分析結果(mg/kg-ash)

Element	B1~4	B5	B6	B7	B8	Filter
Al	3360	2750	7180	2379	14350	3660
Ca	5890	6970	5820	5803	10100	6210
Cd	127	145	110	100	181	124
Cr	19500	406	734	1455	2880	174
Cu	2450	2380	1660	1620	3170	2120
Fe	78400	5030	10600	11900	11900	13400
K	139000	150000	106000	98800	170000	148000
Mg	619	663	636	564	1270	727
Mn	1380	422	128	158	246	384
Na	116000	144000	109000	104000	179000	154000
P	22300	28100	22100	21700	35100	26000
Pb	13200	18100	12600	12600	21400	17300
Sb	424	216	300	209	258	231
Ti	80.8	97.1	120	109	131	152
Zn	56900	81900	58447	54100	90800	74700
Ni	2290	195	310	715	909	73.9
Si	102000	8800	9220	7310	18300	7850
As	14.1	14.1	0	0	87.8	0

をこの粒径で分けることにより後段での湿式(水洗)法による重金属濃縮がより容易になると考えられる。ただし、ダストの重量比率はB1~B4が大きいため、濃縮後は重量的には少なくなることには注意する必要がある。また、ここではICP分析用の試料作成時に捕集板B1~B4をひとつのサンプルとして扱ったために、捕集板4と5の間の13.3 μm において分けていたが、3.(2)におけるSEMの結果からは捕集板3と4の間、19.4 μm で粒子が異なるといった。

なお、本研究ではこの2サンプルのほかには予備実験をさらに2回行い、サンプリングのばらつき、性状のばらつきを確認した。本論文でのデータとしては割愛するが、一定時間内に捕捉されたダスト量およびSEM-EDS

による性状分析結果はこれまで示した実験結果と大きな差はないことを確認している。

4. 結論

本研究から以下の知見が得られた。

- 1) SEM-EDS による分析結果から、溶融飛灰ダストは $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子で主に構成されていることが確認された。 $10\mu\text{m}$ 以上の粒子ではケイ素、アルミニウムを主成分(キャリアオーバー成分)としていた。このような粗大粒子が観察されたのは粒径が $194\mu\text{m}$ 以上の粒子が捕捉される領域であり、それ以降の粒径が細かい領域では観察されなかった。粒径の小さな粒子はナトリウム、カリウム、塩素を主成分とし、捕捉領域により組成が大きく変わることは無かった。また、粒径が小さくなるにつれて亜鉛濃度が大きくなることがわかった。
- 2) TEM による分析結果から重金属元素は塩化物、酸化物がそれぞれ異なる単独微粒子として飛散していることが示唆された。
- 3) ICP による分析結果から、粒径 $13.3\mu\text{m}$ 以上の粒子が捕捉される領域ではケイ素濃度が高かった。他の元素には大きな差はなかった。

以上より、溶融排ガス中のダストを粒径約 $20\mu\text{m}$ で分離すると、 $20\mu\text{m}$ 以下のダストにはほとんどキャリアオーバー成分が含まれないことがわかった。ダストから重金属を乾式で直接濃縮することは難しいが、 $20\mu\text{m}$ 以下の粒子だけを分離し、水洗することにより亜鉛濃度の高い画分が得られると考えられる。

今回、カスケードインパクトを用いて高温下で溶融飛灰を捕集する調査は初めての試みであった。今後、粒径別の重金属分布や温度別の重金属分離についてさらに検討するには、捕集手法の確立、他の温度域での捕集、複数施設、複数の溶融方式での捕集等を行う必要がある。

謝辞：本研究は、(財) 廃棄物研究財団の「廃棄物処理に係る廃棄物含有金属の分離・濃縮・回収技術に関する総合研究」において実施された研究であることを明記し、研究を遂行するに当たり、ご協力を賜りました関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 廃棄物対策課：日本の廃棄物処理 平成 15 年度版, 2005.
- 2) 長崎英範：「溶融飛灰の山元還元」について, 都市清掃, Vol.51, No.227, pp.605-610, 1998.
- 3) 金子栄廣, 鈴木義男, 板谷真積, 島岡隆行, 福永 勲, 吉田義晴, 塚本一夫, 中原啓介, 泉川千秋, 村川忠生：飛灰対策, エヌ・ティー・エス, 1998.
- 4) 全国都市清掃会議, 廃棄物研究財団編：ごみ処理施設整備の計画・設計要領, 1999.
- 5) 渡部 緑, 貴田晶子, 山根早百合：溶融飛灰の精錬原料としての資源化の検討, 広島県保健環境センター報告書, No.10, pp.53-57, 2002.
- 6) 廃棄物研究財団：スリムウェイスト推進研究 平成 5 年度報告書, 1994.
- 7) 浅野闘一, 加賀美忠和, 阿部信二：焼却飛灰、溶融飛灰からの重金属回収技術, 環境管理, Vol.34, No.9, pp.875-879, 1998.
- 8) 長澤松太郎, 井上 卓：資源循環型飛灰処理システム(AER プロセス)の開発, 第 22 回全国都市清掃研究発表会講演論文集, pp.97-99, 2001.
- 9) 高岡昌輝, 河合利幸, 武田信生, 大下和徹：溶媒抽出法による溶融飛灰からの重金属回収に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.39, pp.403-412, 2002.
- 10) 吉田卓司, 中村 崇, 前田正史：溶融還元法による二次飛灰の処理, 資源処理技術, Vol.50, No.2, pp.57-62, 2003.
- 11) 武田信生, 岡島重伸, 長澤松太郎, 峯 勝之：塩化揮発法による飛灰中の重金属の分離に関する基礎的研究, 環境衛生工学研究, Vol.8, No.3, pp.185-190, 1994.
- 12) C. H. ung, T. Matsuto, N. Tanaka: Behavior of metals in ash melting and gasification-melting of municipal solid waste (MWS), *Waste Management*, Vol.25, pp.301-310, 2005.
- 13) T. Okada, Y. Tojo, N. Tanaka, T. Matsuto: Recovery of zinc and lead from fly ash from ash-melting and gasification-melting process of MSW - Comparison and applicability of chemical leaching methods, *Waste Management*, Vol.27, No.1, pp.69-80, 2006.
- 14) 金岡千嘉男, 梁 寛植, 二宮善彦, 増井 芽：高温集塵法による廃棄物燃焼排ガス中の重金属類除去, 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.651-653, 2000.
- 15) 三國徳慶, 坂野健夫, Kanchanapiya Premrudee, 増井 芽, 金岡千嘉男：廃棄物熱処理排ガス中の重金属類の挙動と成分分離の可能性, 第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.887-889, 2004.
- 16) Kanchanapiya Premrudee, Takeo Sakano, Chikao Kanaoka, Tokuyoshi Mikuni, Yoshihiko Ninomiya, Lian Zhang, Megumi Masui: EFFECT OF TEMPERATURE ON SELECTIVE SEPARATION OF METAL IN FLUE GAS FROM THE SEWAGE SLUDGE MELTING PROCESS, *JOURNAL OF SOLID WASTE TECHNOLOGY AND MANAGEMENT*, Vol.31, No.1, pp.30-37, 2005.
- 17) Premrudee Kanchanapiya, Takeo Sakano, Chikao Kanaoka, Tokuyoshi

- Mikuni, Yoshihiko Ninomiya, Lian Zhang, Megumi Masui, Furuuchi Masami: Characteristics of slag, fly ash and deposited particles during melting of dewatered sewage sludge in a pilot plant, *Journal of Environmental Management*, Vol.79, pp.163-172, 2006.
- 18) Robert E. Lee, Jr., Howard L. Crist, Allan E. Riley, and Kathryn E. MacLeod: Concentration and Size of Trace Metal Emissions from a Power Plant, a Steel Plant, and a Cotton Gin, *Environmental Science & Technology*, Vol.9, No.7, pp.643-647, 1975.
- 19) 煙道中粒子物質分級捕集用アンダーセン・スタックサンプラーMODEL AS-500取扱説明書, 東京ダイレック株式会社
- 20) 占部武生: ごみ焼却炉内での元素、特に重金属類の挙動, 衛生工学研究論文集, Vol.22, pp.49-60, 1986.
- 21) 野坂肇, 中原啓介, 仲尾強, 品川拓也: ごみ焼却灰の基礎粒子と構成元素(第2報), 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.425-427, 1997.
- 22) 中塚大輔, 高岡昌輝, 武田信生: 飛灰構成元素の粒度別濃度分布に関する研究, 第19回全国都市清掃研究発表会講演論文集, pp.64-66, 1998.
- 23) 村上健彦, 高岡昌輝, 武田信生: ごみ焼却飛灰中重金属の粒径別濃度と化学形態, 藤原健史, 第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.596-598, 2000.
- 24) 上野俊一郎, 石野森禎, 櫻井健士, 西野順也, 鈴木明朗: 都市ごみ焼却排ガス中の重金属に関する報告, 日本機械学会第10回環境工学総合シンポジウム講演論文集, pp.212-214, 2000.
- 25) 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢 洋, 岩村 秀, 佐藤文隆, 久保亮五編: 理化学辞典第5版, 岩波書店, 1998.

(2007.5.25 受付)

PROPERTIES OF PARTICLES SAMPLED AT HIGH TEMPERATURES IN AN ASH-MELTING FURNACE STACK

Masaki TAKAOKA¹, Kenji SHIOTA¹, Megumi MASUI², Masamitsu TAKAHASHI³, Ken-ichi SHISHIDA⁴, Tomoyuki TANAKA⁵, Yasuhiro TOMITA⁶, Takahiro ISHIYAMA⁷, Nobuo TAKEDA⁸

¹Dept. of Urban & Environmental Engineering, Kyoto University

²Actree Corporation

³Kobelco Eco-Solutions Co. Ltd.

⁴Takuma Co. Ltd.

⁵Hitachi Zosen Corporation

⁶Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.

⁷Japan Waste Research Foundation

⁸Eco-technology Research Center, Ritsumeikan University

Heavy metals need to be concentrated as much as possible in order to recover them from melting furnace fly ash (MFA). Therefore, the particle sizes in MFA were investigated in this study. An in-stack cascade impactor was used to sample the MFA in a high temperature stack of the ash-melting furnace. The chemical composition and morphology of the particles were examined. Most of the MFA contained fine particles that were less than 10 μm in diameter and consisted primarily of Na, K, and Cl. Particles greater than 10 μm in diameter were non-spherical in shape and consisted primarily of carry-over components such as Si and Al. The concentration of Zn increased as the particle size of the MFA became smaller. A TEM analysis of the finer particles indicated that the chloride and the oxide components were dispersed.