

〈論文〉

火葬炉からの酸性ガス、水銀および微小粒子の排出挙動（第2報）

大下和徹¹⁾、高岡昌輝²⁾、江口正司³⁾、塩田憲司⁴⁾¹⁾ 京都大学大学院地球環境学堂

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1 E-mail: oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

²⁾ 京都大学大学院地球環境学堂

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1 E-mail: takaoka@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

³⁾ 太陽築炉工業(株) (〒812-0045 福岡市博多区東公園6-21 E-mail: s-eguchi@taiyochikuro.jp)⁴⁾ 京都大学大学院工学研究科

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1 E-mail: shiota@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

概要

本研究は、バグフィルターを有する新型火葬炉の排ガス中の微小粒子、水銀、酸性ガスの調査を行い、各排出濃度、排出原単位を明らかにした。ばいじんの粒径頻度分布は、従来型火葬炉と共通して、PM2.5に相当する0.2~0.3 μm の微細粒子の割合が高かったが、PM2.5は、バグフィルターにより約99%除去されており、その効果が確認できた。排ガス中HCl、SO₂濃度は、各算術平均(N=106)で33.2 mg/m³_N、11.5 ppmvであり、従来型火葬炉より低減した。この理由としては、副葬品の制限あるいは、バグフィルターにて形成される集じん灰層での除去によるものと推測された。

キーワード：火葬炉、バグフィルター、塩化水素、PM2.5、二酸化硫黄、水銀

原稿受付 2013.6.17 原稿受理 2013.9.5

EICA: 18(2・3) 32-41

1. はじめに

わが国の火葬率は2010年度現在で99.9%以上で¹⁾、かつ死亡人口が年々増加していることから²⁾、火葬数は増大傾向にある。日本における死亡者数の将来推計によると、2013年の死亡者数は125万人で、2040年の死亡者数167万人のピークまで約30年間は、年々死亡人口が増加することが予想されている³⁾。

我が国で、火葬炉から排出される排ガスは、現在のところ大気汚染防止法の対象外であるが、ばいじんはもとより、塩化水素、硫酸化物などの酸性ガスやダイオキシン類、水銀を含んでいることがこれまでの研究から明らかとなっている⁴⁾。国内の火葬炉数は2010年現在で1,447箇所存在し⁵⁾、死亡者数も増加しているが、運転時間が限られていることや、規模も小さいため、我が国における大気中への有害物質の排出インベントリーから見た場合、ダイオキシン類や水銀においては、火葬炉の寄与は低いことが明らかになっており^{4,6,7)}、塩化水素や硫酸化物においても同様に寄与は高くないと予想される。しかし、火葬炉の排ガス処理においては、比較的高い集じん効率が期待できる集じん機が設置されている施設（以下新型火葬炉とする）は全体の15%程度で、加えて消石灰噴霧や湿式洗煙等の酸性ガス処理がなされている炉は皆無であ

る⁵⁾。さらに、火葬炉は煙突高さが低い箇所が多く、拡散による有害物質の希釈効果は見込めず、火葬炉近傍でのローカルな汚染が懸念されている⁵⁾。

以上のような背景から、安全・安心な火葬を行っていくためには、火葬炉から排出される有害物質の実態調査やその抑制対策が必要であり、筆者らは、前報にて、現在稼働中の大半を占める、高度な集じん機や排ガス処理が設置されていない火葬炉（以下従来型火葬炉とする）を対象に、排ガスに含まれるばいじん、SPM、PM2.5、酸性ガス（HCl、SO₂）、および水銀について、それらの濃度、排出挙動、排出原単位を把握し、排出抑制対策を検討した⁸⁾。その結果、まず、従来型火葬炉排ガスにおけるばいじんは、2件の火葬の調査結果から、EUの同形式火葬炉の排出レベルとほぼ同様であったが、粒径の小さい粒子の割合が高く、そのほとんどをPM2.5が占め、比較的高濃度で排出されていることから、バグフィルター（以下BF）の導入が望ましいと考えられた⁸⁾。また、103件の火葬の排ガス連続分析により、水銀は、調査対象の約20%の火葬で、歯科アマルガムに由来する鋭いピークを有する排出があること、HCl、SO₂の排出濃度については、調査対象の約10%の火葬で、国内の都市ごみ焼却炉における実質的な排出規制を超過し、排出原単位もEU報告値よりも高い傾向にあり、副葬品などが影

響している可能性があることが明らかとなり、火葬炉施設の現状を勘案すれば、BFに、消石灰の吹き込み等による乾式法を組み合わせた酸性ガスの除去プロセスの導入が望ましいと結論付けた⁸⁾。

しかし、これらの調査結果は、従来型火葬炉を対象にしたものであり、今後特に都市部で普及が進むと考えられるBFや触媒装置などの高度な排ガス処理装置を有した新型火葬炉については、あまり調査報告がなく、長期的な調査結果は皆無である。ばいじん、SPM、PM2.5の除去については、BFにより高度に除去されることが予想されるが、具体的な程度を明らかにする必要がある。また、水銀、酸性ガスについては、前述したように、現段階の新型火葬炉でも、それらに特化した処理プロセスの導入例がほとんどなく、消石灰吹き込み、湿式洗煙、活性炭吸着などを新たに導入する場合には、その排出濃度、および排出原単位を明らかにしておく必要がある。これらの値は、依然として副葬品や遺体が有する歯科アマルガムなどに左右されることも考えられるが、BFに形成された集じん灰層での除去や、触媒装置への吸着など、新型火葬炉が現時点で有するプロセスの本来の目的からはあまり想定されていない副次的な効果によって、低減されている可能性もある。

そこで本研究では、新型火葬炉を対象として、排ガスに含まれるばいじん、SPM、PM2.5、酸性ガス(HCl, SO₂)、および水銀について、それらの排出濃度、排出原単位を把握し、これらの値を従来型火葬炉と比較して、BF等の導入効果や酸性ガス等の排出濃度を明らかにし、それらの抑制対策を検討するとともにそれに必要な基礎データを提供することを目的とした。

具体的には、1か所の新型火葬炉にて、まず、BFを含む排ガス処理プロセスの前後において、排ガス中ばいじんの粒径別捕集を行って、SPM、およびPM2.5濃度、およびそれらの排出原単位、ならびにばいじん粒径の頻度分布を明らかにし、前報の調査結果とも比較して、BF等の排ガス処理プロセスによるこれらの除去効果を明らかにした。次に、同じ火葬炉にて、106件の火葬について、水銀、HCl、SO₂を中心とした排ガス中成分の連続モニタリングを排ガス処理プロセスの後段で行って、それらの排出濃度、排出原単位を明らかにした。これらについて、前報の調査結果と比較し、その差異について考察した。特に、水銀については、BF前段でも連続モニタリングを行い、その除去効果について言及した。

2. 調査方法

2.1 対象とした火葬炉と火葬

調査は、1か所の火葬炉で行った。火葬炉と調査対

Table 1 Configurations of the Crematory and the Sampling Conditions

再燃焼炉	有						
主燃焼炉：再燃焼炉	1:1						
排ガス冷却方式	空気混合						
集じん機	バグフィルター						
集じん機後段の排ガス処理	触媒装置						
排気方式 (炉:系列)	強制 (1:1)						
燃料	都市ガス 13A						
調査番号	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	B
火葬数	1	1	1	1	1	1	106
火葬時間 (min)	47	61	52	69	65	62	22~86 平均: 55
年齢 (歳)	92	77	105	91	37	84	55~103 平均: 86.3
性別	女性	女性	女性	男性	女性	女性	男性: 35 女性: 71

象とした火葬の概要を **Table 1** に示した。本施設の炉部分は主燃焼室1室に対し、再燃焼室1室を有しており、排気系列は1炉1系列である。排気方式は排風機による強制排気方式であり、排ガス冷却方式は、空気混合方式である。集じん機はBFが設置されており(活性炭、消石灰等の吹き込みなし)、続けてダイオキシン類対策として触媒装置(脱硝のためのアンモニア噴霧なし)が設置されている。また、炉の運転は、従来型火葬炉の場合、そのほとんどが、操作員のマニュアル運転により行われるが、新型火葬炉の場合は、主燃焼炉や再燃焼炉に設置された、温度計、炉内圧計、酸素濃度計の値により、各バーナー出力、燃料空気量、誘引送風機出力、ダンパが自動制御されることにより、燃焼温度を高くでき、火葬時間の短縮が図られている。このような形式の新型火葬炉は、わが国の火葬炉の約15%を占めているにすぎず、多くは運転がマニュアルで行われ、集じん機等が設置されていない従来型火葬炉である。

ばいじん中のSPM、PM2.5については2013年3月27日~3月29日に実施された6件の火葬を対象とし(調査A-1~A-6)、HCl、SO₂、水銀の連続モニタリングについては、2013年1月30日~3月26日までに実施された106件を対象とした。ただしHClに関しては、分析装置の都合により、調査期間後半(2013年2月18日~)の74件のみで測定を実施した(調査B)。

2.2 排ガス中各成分のサンプリングおよび分析方法

排ガス中各成分のサンプリング箇所や方法について、対象とした火葬炉のフロー図とともに **Fig. 1** に示す。

(1) ばいじんの粒径別捕集と分析方法 (調査A-1~A-6)

ばいじんの粒径別捕集については、従来型火葬炉にて実施した前報⁸⁾と比較するため、同様に、アンダーセン型カスケードインパクターを用いて実施した。

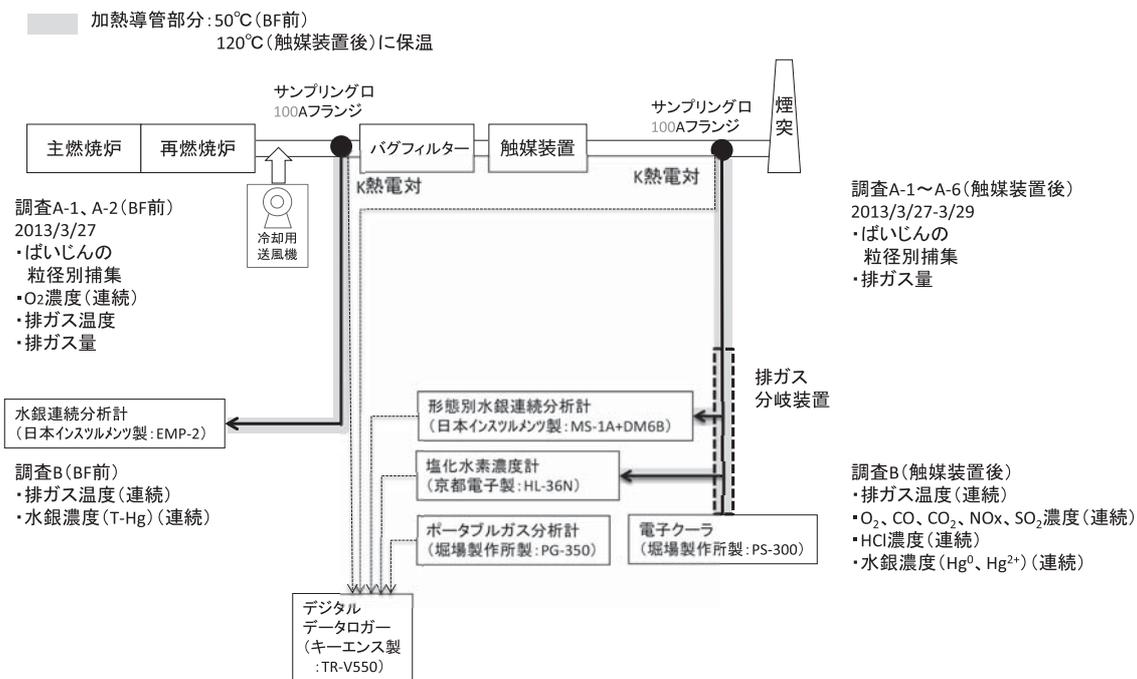


Fig. 1 The Flow Diagram of the Crematory and Gas Sampling and Analysis

具体的には、Fig. 1に示すBF前、かつ触媒装置後の煙道中において、JIS Z8808⁹⁾、JIS K0302¹⁰⁾に準じて行った。ばいじんの粒径別捕集には、多段多孔型カスケードインパクター（東京ダイレック株製：アンダーセンスタックサンプラー AS-500）を直接煙道内に挿入し、ノズルを排ガスの流れに向け等速吸引を行い8段のステージ上の石英捕集紙（東京ダイレック株製：AS513A、AS513B）およびバックアップフィルター（東京ダイレック株製：2500QAT-UP）にばいじんを分級捕集した。カスケードインパクターの後段には水分捕集用のドレンおよびガス吸収用の5%過酸化水素水溶液を設置した。サンプリング時間は、本来カスケードインパクターの各ステージの捕集ばいじん重量が10 mg以下になるように設定するが¹⁰⁾、火葬炉はバッチ燃焼炉であるため、Table 1に示した1火葬、あるいは複数の火葬の火葬時間を通して、サンプリングを行うこととし、BF前では火葬1件ずつ、計2件の火葬について（調査A-1、調査A-2）、触媒装置後ではばいじん濃度が低いと想定されたため6件分の火葬（調査A-1～A-6）を1検体としてサンプリングを実施した。なおカスケードインパクターでの捕集の際には、排ガス温度をK熱電対で、排ガス中O₂濃度をポータブル酸素計（BF前：島津製作所製、CGT-7000、触媒装置後：堀場製作所製：PG-350）にて連続モニタリングした。ばいじん粒径別捕集条件をTable 2に示す。

カスケードインパクターの各段に捕集されたばいじんについては、捕集前後の捕集紙およびバックアップフィルターの質量差を捕集ダスト質量とした。捕集紙

Table 2 Flue Gas Characteristics and Sampling Conditions

項目	調査番号	BF前		触媒装置後					
		A-1	A-2	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
排ガス特性	平均温度 (°C)	165	165	115	111	96	105	105	113
	流速 (m/s)*	12.2	12.2	7.3	5.5	6.7	7.2	6.3	6.2
	平均O ₂ 濃度 (Vol.%)	19.1	19.2	19.0	18.9	19.6	19.9	19.1	19.5
	排ガス中水分量 (wt.%)*	4.0	4.0	1.9	2.3	3.0	3.8	3.1	3.2
	流量 (湿り) (m ³ /h)*	10,500	10,500	14,200	10,700	13,600	14,200	12,300	11,900
	流量 (乾き) (m ³ /h)*	10,100	10,100	13,900	10,500	13,200	13,700	12,000	11,500
サンプリング条件	ノズル径 (mm)	6		10					
	等速吸引流量 (L/min)	20.7	20.7	34.4	25.9	31.6	33.9	29.7	29.2
	サンプリング時間 (min)	60	60	60	63	57	73	68	65
	サンプリング量 (L)	767	761	5,257					

※火葬中、初期、中期、後期の3回×5分間の測定結果の平均値

およびバックアップフィルターは、捕集前は250°C、1時間で加熱乾燥後にデシケーター中で室温まで放冷し秤量した。捕集後は、恒温恒湿室（気温21.5±1.5°C、湿度35±5%）にて、約3日間乾燥させ秤量した。秤量にはJIS Z8808⁹⁾に準じ高感度で測定可能な天秤（sartorius社製：M5P-F、感度1 μg）を使用した。カスケードインパクターに分級捕集されたばいじんの粒径範囲はJISK0302¹⁰⁾、および既報¹¹⁾と同様にして求めた。

(2) 排ガス成分の連続モニタリング方法（調査B）

排ガス中各成分サンプリングは、調査A-1～A-6と同様にBF前と触媒装置後で実施した。

まず、BF前ではT-Hgを連続分析計（日本インスツルメンツ製：EMP-2）にて測定した。サンプリングは、フィルターを有するサンプリングプローブを設置し、連続モニタリング用の排ガスをサンプリングした。採取した排ガスは、約50°Cに保温された加熱導管、および前処理部（日本インスツルメンツ製：

WLE-8, 10%SnCl₂ 溶液-1N KOH) を経て連続分析計に導入した。本分析計で得られたデータは本体にセットされたSDカードにて収集した。

触媒装置後では、酸性ガスとしてHClとSO₂、金属状水銀：Hg⁰と2価の水銀：Hg²⁺、加えて、O₂、CO、CO₂およびNO_xを連続測定した。サンプリングは、フィルターを有するサンプリングプローブ(150℃に保温)を設置し、連続モニタリング用の排ガスをサンプリングした。採取した排ガスは、120℃に保温された加熱導管、および排ガス分岐装置を経て、各分析装置に導入した。排ガス成分のうちO₂、CO、CO₂、NO_x、およびSO₂濃度は、除湿のため電子クーラ(堀場製作所製：PS-300)を通過させた後、ポータブルガス分析計(堀場製作所製：PG-350)にて分析を行った。本分析計については、2週間に1回、2種類の標準ガス(住友精化製：O₂15%/N₂、およびSO₂100 ppm+NO 125 ppm+CO 1,000 ppm+CO₂10%/N₂)にて、ゼロ・スパン校正を行った。またHCl濃度については、イオン電極連続分析法による塩化水素濃度計(京都電子製：HL-36N)にて分析を行った。水銀に関しては、湿式の形態別水銀連続測定装置(日本インスツルメンツ社製：MS-1A+DM-6B)を用いた。これら3種の装置で得られたデータは、デジタルデータロガー(キーエンス製：TR-V550)にて収集した。なお、2か所のサンプリング部分の排ガス温度は、K熱電対にて同データロガーに記録した。

3. 調査結果および考察

3.1 ばいじんおよびSPM, PM2.5 (調査A-1~A-6)

(1) 排出濃度

BF前で2件の火葬に対し2検体(調査A-1, A-2)、触媒装置後で6件(調査A-1~A-6)の火葬に対し、1検体のサンプリングを行ったカスケードインパク

ターの各ステージについて、捕集されたばいじん粒径の計算を行った結果と、各粒径のばいじん濃度、SPMおよびPM2.5の濃度を算出した結果をTable 3に示す。SPM, PM2.5については分級捕集されたばいじんのふるい下積算率を求め、それと粒径からふるい下積算分布を作成し、それぞれ粒径が7μm¹²⁾および2.5μmに相当する積算率をそれぞれ算出し、全体のばいじん濃度に乗じることによって求めた。

粒径と各ステージの対応を見ると、SPMはPM7相当として、ステージ2より後段の粒子に該当し、PM2.5はステージ5よりも後段に該当することがわかった。各条件での合計値としてのばいじん濃度は、BF前がO₂12%換算値で、65.5~91.5 mg/m³_Nであり、従来型火葬炉での調査結果(53.7~91.2 mg/m³_N)⁸⁾と同レベルであった。触媒装置後のばいじん濃度は、O₂12%換算値で、0.674 mg/m³_Nまで低減されており、BFおよび触媒装置によるばいじんの除去率は、99.0~99.3%であり、高度に除去されていることが示された。

SPM, PM2.5については、Table 3より、BF前が、O₂12%換算値でそれぞれ57.0~84.3 mg/m³_N、52.0~80.1 mg/m³_Nであった。触媒装置後は、O₂12%換算値でそれぞれ0.672 mg/m³_N、0.670 mg/m³_Nであり、BFおよび触媒装置によるそれぞれの除去率は、98.8~99.2%、98.7~99.2%であり、ばいじんよりもわずかに低下するが、高度に除去されていることが示された。ばいじんに対するSPM, PM2.5の割合は、BF前で87~92%、79~83%であり、そのほとんどをSPM, PM2.5が占め、ばいじんが粒径の比較的小さい粒子から形成されていることが窺えた。この点は、従来型火葬炉での調査結果と同様の傾向であった⁸⁾。また触媒装置後では、SPM, PM2.5の割合は、それぞれ99.7%、99.5%にまで増えており、BFおよび触媒装置を通過することで、高度に除去されているものの、除去されなかった粒子は、これら粒径の細かい粒子が大半を占めていることが示された。都市ごみ焼

Table 3 The Particle Sizes and Concentrations of the Collected Dusts on the Each Stages of Cascade Impactor

A-1 (BF前)	粒径範囲	排ガス濃度	A-2 (BF前)	粒径範囲	排ガス濃度	A-1~A-6 (触媒装置後)	粒径範囲	排ガス濃度
	μm	mg/m ³ _N (O ₂ 12%換算)		μm	mg/m ³ _N (O ₂ 12%換算)		μm	mg/m ³ _N (O ₂ 12%換算)
ステージ1	12<	4.70	ステージ1	12<	4.45	ステージ1	9.39<	<0.0011
ステージ2	7.76-12	2.05	ステージ2	7.76-12	3.16	ステージ2	6.06-9.39	0.0021
ステージ3	5.17-7.76	1.36	ステージ3	5.17-7.76	2.77	ステージ3	4.03-6.06	<0.0011
ステージ4	3.54-5.17	1.48	ステージ4	3.54-5.17	1.63	ステージ4	2.76-4.03	<0.0011
ステージ5	2.25-3.54	2.42	ステージ5	2.25-3.54	1.52	ステージ5	1.76-2.76	<0.0011
ステージ6	1.12-2.25	2.16	ステージ6	1.12-2.25	1.72	ステージ6	0.868-1.76	0.0134
ステージ7	0.63-1.12	4.10	ステージ7	0.63-1.12	2.61	ステージ7	0.486-0.868	<0.0011
ステージ8	0.46-0.63	5.02	ステージ8	0.46-0.63	2.20	ステージ8	0.354-0.486	0.0482
Backup フィルター	<0.46	68.2	Backup フィルター	<0.46	45.2	Backup フィルター	<0.354	0.607
合計		91.4	合計		65.5	合計		0.674
SPM		84.3	SPM		57.0	SPM		0.672
PM2.5		80.1	PM2.5		52.0	PM2.5		0.670

却炉の煙突手前でのSPM, PM2.5の結果は、BFを有する比較的新しい都市ごみ焼却施設がそれぞれ0.007~0.31 mg/m³_N, 0.005~0.29 mg/m³_Nと報告されており¹¹⁾、本結果と比較すると、新型火葬炉の場合はやや高いが、ほぼ同じオーダーにまで低減されていることが明らかとなった。

(2) ばいじんの頻度分布

次に捕集分率（各ステージでのばいじん捕集量の重量%）を計算し、各捕集ステージに対応する粒径に対するばいじんの頻度分布を作成したものをFig. 2に示す。頻度分布は、前報と同様に、各ステージの分級幅(ΔlogD)の中央値を横軸に、各分級幅に対応する捕集分率(ΔW/W)を分級幅(ΔlogD)で除したものを縦軸にプロットし、粒径の上限値を45 μm, 下限値を0.1 μmとして頻度分布を作成した⁸⁾。Fig. 2には、比較のために、従来型火葬炉の2ケース⁸⁾を示した。

Fig. 2より、従来型火葬炉のケースでは2回の測定とともに、粒径0.2~0.3 μmの部分で最大となる頻度分布を示していたが、本測定結果における新型火葬炉のBF前の2回の測定、および触媒装置後の頻度分布も同様の傾向を示した。この傾向は、前報⁸⁾でも、排ガス中ばいじん頻度分布について、従来型火葬炉と都市ごみ焼却炉（粒径0.5~0.6 μmおよび6~8 μmをピークとする2つ山形状）を比較したが、新型・従来型火葬炉に共通して都市ごみ焼却炉の場合と異なり特徴的

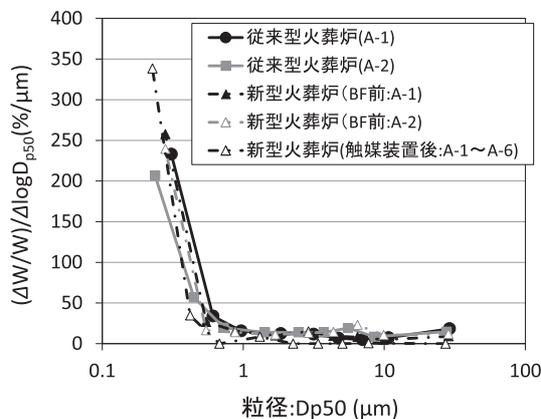


Fig. 2 The Frequent Distributions of Dusts at Each Sampling Point in the New and Conventional Crematory

な点であった。したがって、火葬炉から排出されるばいじんは、粒径が小さい粒子の割合が高いと言え、このことは、前述したばいじん中のPM2.5の割合が高かったことから裏付けられよう。この原因としては、BF前ですでに粒径の小さい粒子の割合が高い頻度分布になっていることから、2つの可能性が考えられる。1つ目は、元々火葬で発生する粒子が細かい可能性であり、もう1つは、BFに至るまでに、粒径の大きな粒子が排ガスダクト内壁等に、慣性力で付着、あるいは落下し、結果的に微小な粒子が残った可能性も考えられる。この点を明らかにするには、捕集された粒径別粒子の元素組成等の分析により発生源を推定するとともに、より排ガスフロー上流側での粒径別の粒子捕集調査などが必要であり、今後の課題である。

(3) 大気への排出原単位

上記のばいじん, SPM, PM2.5の各排出濃度Cij (mg/m³_N), 乾き排ガス流量Qdry, j (m³_N/h), 火葬時間tj (min/体)を用いて、以下の式(1)によって、火葬1体あたりのばいじん, SPM, PM2.5が大気へ排出されるとした場合の排出原単位Mij (g/体)を計算した。

$$M_{ij} = C_{ij} \times Q_{dry, j} \times t_j / 60 / 1000 \quad (1)$$

iは、ばいじん, SPM, PM2.5の種類

jは火葬炉の種類やサンプリングポイント

排出原単位の算出については集じん機の有無や、火葬炉の方式により影響を受けると想定されたため、それぞれのケース(j)に応じて算出した。

結果をまとめたものをTable 4に示す。排出原単位は、触媒装置後は、ばいじん, SPM, PM2.5ともに、算術平均で1.7 g/体(1.3~2.2 g/体)と見積もられた。火葬炉からのばいじんの排出原単位については、EUでは、排ガス処理にBFのみが存在するケースで9.63~19.3 g/体とされており^{13,14)}、それよりも低くまで低減されていると考えられた。この原因として、触媒部分へ微粒子が付着するなどにより、後段のばいじん等の濃度が低くなっている可能性も考えられたが、はっきりとした理由はわからなかった。BF前に関し

Table 4 Concentrations and Emission Factors of the Dusts, SPM and PM 2.5 Emitted from Crematories

サンプリング場所	対象数	火葬時間 (min)	排ガス量 (m ³ _N /h)	濃度 (mg/m ³ _N)			排出原単位 (g/体)		
				ばいじん	SPM	PM2.5	ばいじん	SPM	PM2.5
BF 前	2	64 (62-66)	2,080 (2,020-2,130)	78 (66-91)	71 (57-84)	66 (52-80)	173 (146-201)	156 (127-186)	146 (116-176)
従来型火葬炉集じん機なし煙突手前 ⁸⁾	2	72 (63-80)	1,780 (1,630-1,910)	72 (54-91)	63 (47-79)	59 (44-74)	150 (117-184)	130 (101-159)	122 (95-149)
触媒装置後	6	66 (58-74)	2,290 (1,670-3,090)	0.670	0.670	0.670	1.7 (1.3-2.2)	1.7 (1.3-2.1)	1.7 (1.3-2.1)

※排ガス量および各濃度はO₂12%換算値

※※()内の値は最小値 - 最大値

※※※触媒装置後のばいじん等の濃度は、6火葬分のサンプリング結果から算出

ては、仮にこれらのガスが直接大気に放出された場合に、算術平均値として、ばいじんは179 g/体(146~201 g/体)、SPMは156 g/体(127~186 g/体)、PM2.5は146 g/体(116~176 g/体)と見積もられた。前報の集じん機がない従来型火葬炉における調査結果⁸⁾と比較すると、同等のレベルであり、火葬炉が異なっても、集じん機がない場合の排出原単位としては概ね整合した。ばいじんの排出原単位は、EUでは、排ガス処理がない従来型火葬炉の場合は、224 g/体とされており¹⁵⁾、日本の値の方がやや小さいものの、ほぼ同等であると考えられた。

本結果におけるBF前と触媒装置後の排出原単位を比較すると、ばいじん、SPM、PM2.5の排出原単位は、約99%低減されており、BFを主とする排ガス処理装置を導入することで、これらの排出が大きく低減できることが示された。

3.2 排ガス成分の連続モニタリング(調査B)

排ガス中成分の連続モニタリングを行い、各火葬にて各成分の平均濃度を算出し、106件の火葬について(ただしHClはN=74)、前報の従来型火葬炉での103件の調査⁸⁾と比較して、まとめたものをTable 5に示す。排ガス温度はサンプリング箇所の温度であり、火葬時間を通じての平均温度である。これらの値の算術平均として、BF前で165℃、触媒装置後は114℃であった。前報と比較すると、BF前で10℃程度低くなっているが、新型火葬炉ではBFの保護のため多くの空気をBF前で導入し、急激なガス冷却を行っていることによる。このため、O₂濃度は、算術平均で19.3%であり、従来型火葬炉よりも2%以上高くなっていた。NO_xについては、49.0~159 ppmvの範囲で、算術平均で112 ppmvであり、前報よりも20 ppmv程度高くなった。これは従来型火葬炉よりも新型火葬炉の方が燃焼温度を高くし、火葬時間を短縮していることによると考えられる。COについては、15.3~537 ppmvの範囲で、算術平均は45 ppmvであり、106件

の火葬中、平均濃度で200 ppmvを超えていたのは3件のみであった。従来型火葬炉ではCO平均濃度が200 ppmvを超えていたのは103件中26件であり、新型火葬炉では算術平均値や中央値が従来型火葬炉の半分以下になっていたが、これは燃焼制御を行って、燃焼温度を高くできていることに起因するものと考えられた。水銀、酸性ガス(HCl、SO₂)については、以下に結果を述べ、詳細に考察する。

(1) 水銀

Table 5より、まずBF前のT-Hg濃度に関しては、0.1~206 μg/m³_Nであり、106件の算術平均で10.0 μg/m³_Nであった。前報の煙突手前の結果では、103件の算術平均で、10.3 μg/m³_Nであり⁸⁾、ほぼ同様の値であった。平均濃度として5.0 μg/m³_N以上の比較的高いT-Hg濃度は106件中28件あり、前報では、103件中24件存在した⁸⁾。特に高いT-Hg濃度では、平均で200 μg/m³_Nまで達しているものもあった。この比較的高いT-Hg濃度は、火葬開始後10~30 minに、Hg⁰の鋭いピークを有する時間トレンドを伴うことが前報⁸⁾でも明らかになっており、本研究でも同様の傾向がみられている。このピークは、歯科アマルガム中水銀に由来すると推測されており⁴⁾、今後、アマルガム処置歯を有する遺体の増加にともなって、高濃度水銀が排出される火葬件数の増加が堂本らにより予想されており⁷⁾、定期的に複数火葬の排ガス中水銀のモニタリングを行って、排出レベルを把握しておくことが望ましい。

一方触媒装置後においては、T-Hg濃度は1.35~48.4 μg/m³_Nで、106件の算術平均で4.50 μg/m³_Nであり、これらの値は都市ごみ焼却炉での煙突排ガス中の水銀濃度¹⁶⁾と比較すると同程度かやや低い値であるといえる。なお、国内の都市ごみ焼却炉にて、各自治体が独自に設定している自主目標値、あるいは現実的な要求値としての30~50 μg/m³_N¹⁷⁾を超過しているものは1件のみであった。

ここで、触媒装置後の平均T-Hg濃度は、BF前の

Table 5 Analytical Results of Flue Gas from the Crematory

対象	サンプリング場所	BF前		煙突手前(新型火葬炉は触媒装置後段に相当)										
		項目	排ガス温度	T-Hg	排ガス温度	O ₂	CO	CO ₂	NO _x	Hg ⁰	Hg ²⁺	T-Hg	HCl	SO ₂
		単位	℃	μg/m ³ _N	℃	Vol. %	ppmv	Vol. %	ppmv	μg/m ³ _N	μg/m ³ _N	μg/m ³ _N	mg/m ³ _N	ppmv
新型火葬炉	算術平均値	165	10.0	114	19.3	45.0	5.20	112	1.42	3.08	4.50	34.1	11.5	
	中央値	165	2.20	115	19.3	29.5	5.19	112	0.633	2.70	3.28	31.3	9.97	
	最大値	179	206	136	20.2	537	6.14	159	40.4	12.2	48.4	205	110	
	最小値	134	<0.1	75.1	18.8	15.3	3.84	49.0	<0.1	0.648	1.35	0.2	0.03	
従来型火葬炉 ⁸⁾	算術平均値			179	17.0	172	6.04	91.1	8.19	2.08	10.3	61.3	12.3	
	中央値			178	16.9	127	6.04	90.7	0.0570	1.27	1.63	53.0	9.89	
	最大値			200	18.6	1,090	6.55	125	81.8	24.4	92.2	388	63.6	
	最小値			164	15.8	27.1	4.46	57.6	<0.1	<0.1	<0.2	11.8	0.06	

* O₂以外の成分は、すべてO₂12%換算値

** 新型火葬炉：N=106、ただしHClのみN=74、従来型火葬炉：N=103

結果：10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ よりも低減した。これらのことは、サンプリングポイントとしてのBF前から、触媒装置後までは空気の吸い込みはなく、排ガス流量はほぼ等しいため、BFと触媒装置にて水銀が平均して約55%除去されていることを意味する。また触媒装置後の、 Hg^0 と、 Hg^{2+} との平均的な濃度比率をみると、3:7であり Hg^{2+} が優勢であるが、従来型火葬炉においては、この濃度比率は8:2であり、 Hg^0 が優勢であった。従来型焼却炉における結果からもうかがえるように、火葬炉からの排ガスは一般的に Hg^0 が優勢であり、都市ごみ焼却炉においても、BF中のろ布上に堆積した集じん灰中に未燃炭素分があり、金属酸化物を多く含まない場合は、BFでは排ガス中の Hg^0 の除去は期待できないとされていることから¹⁸⁾、新型火葬炉における排ガス中の水銀の多くは、BFでは除去されず、触媒装置で除去されているものと推測される。

Sandraらは、 V_2O_5 を主体とする脱硝触媒上に、水銀を含むガスを供給する実験を行い、脱硝触媒にて、 Hg^0 は酸化され、 HgO の形態で吸着されるが、その一部は HCl により塩素化され、 HgCl_2 となり脱着する傾向があることを報告している¹⁹⁾。また、東京都の都市ごみ焼却炉への高濃度水銀の流入事故においても、BFで除去されなかった水銀が、脱硝触媒上に付着したことが報告されている²⁰⁾。新型火葬炉の触媒装置における触媒も、 V_2O_5 を主体とする触媒であることから、これと同様のことが生じている可能性が示唆された。すなわち、排ガス中の Hg^0 は酸化され触媒上に吸着されるため、触媒での Hg^0 除去率が高くなっており、その一部が塩素化され、 HgCl_2 の形で脱着しているものと考えられた。今後、集じん灰の組成分析を行って水銀のBFでの除去が限定的であること、触媒上に水銀が蓄積していることを確認する必要がある。

次に、本調査結果から火葬1件あたりの水銀排出量（排出原単位）を、火葬時間と、乾き排ガス量（ O_2 12%換算値）、触媒装置後のT-Hg濃度（ O_2 12%換算値）を乗じることで求めた。乾き排ガス量は、調査Aの結果（Table 2）の平均値を O_2 12%換算して用いた。その結果、106件の火葬について、水銀排出原単位は0~87.3 mg/体、算術平均で9.38 mg/体と見積もられた。前報の結果を含む別の複数の火葬炉での調査を総合した結果では、水銀排出原単位は、31.4~36.9 mg/体と推定され⁴⁾、本結果は、この値よりも1/3以下の値を示した。この理由としては、触媒装置後の排ガス中水銀濃度が低くなっている影響が大きく、詳細は明らかにしなければならないが、前述したように触媒装置で水銀が除去されている可能性が高い。したがって、国内の火葬炉からの水銀排出原単位として

の本値（算術平均：9.38 mg/体）は、現時点では触媒装置を有する火葬炉への適用に限定されるべきである。

(2) HCl

Table 5より、HClについては、平均排出濃度は0.2~205 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり、74件の算術平均で34.1 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。従来型火葬炉の結果（61.3 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ）⁸⁾と比較すると、算術平均に加えて、中央値も1/2~3/5となっていた。都市ごみ焼却炉では、自治体が独自に設定する上乘せ排出基準として、50~100 ppmv（81~162 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ）以下とする場合が多いが、新型火葬炉で100 ppmvを超過していたのは106件中1件のみであった。従来型火葬炉とのこの違いは、2つの可能性が考えられる。1つは、前報において、HClの排出は主に副葬品に由来することが予想されたが⁸⁾、新型火葬炉における副葬品等の制限が、従来型火葬炉における制限よりも厳しい、あるいは遵守され、元々のCl源が少ない可能性である。もう1点は、消石灰の吹込みがなくとも、BFに形成された集じん灰層によりHClがある程度除去されている可能性である。前者については、火葬前での副葬品の確認は現実的に困難であるが、後者においては、武田らが、火葬炉の集じん灰（消石灰吹き込みなし）の元素分析を行った結果⁴⁾、集じん灰にはClが14~20%の高濃度で含まれていること、CaについてもClほどではないが0.5~2.0%含まれていることが示されており、BF上に形成された集じん灰層とHClが反応し、結果として排ガス中HCl濃度が低減され、集じん灰中のCl濃度が高くなっている可能性が高いと考えられた。

ただし、新型火葬炉における平均HCl濃度は従来型火葬炉に比較し低いものの、HClの排出は、火葬開始後高濃度のピークが生じるケースがほとんどであり⁸⁾、煙突高さも低いものが多いことから、何らかのHCl除去の対策が取られることが望ましいと考えられる。

次に、水銀のケースと同様に、火葬1件あたりのHCl排出量（排出原単位）を、火葬時間と、乾き排ガス量（ O_2 12%換算値）、HCl濃度（ O_2 12%換算値）を乗じることで求めた。その結果、74件の火葬について、HCl排出原単位は2.5~468 g/体、算術平均で77.8 g/体と見積もられた。前報のHCl排出原単位の算術平均値は205 g/体であり⁸⁾、この結果を比較すると、新型火葬炉では、1火葬あたりの全乾き排ガス量（乾き排ガス流量×火葬時間）が、従来型火葬炉よりも小さくなるため、HCl濃度の差に加えて、さらに低減されている結果となった。ただしこの点においては、HCl濃度が減少している影響が大きく、Cl源となる副葬品の量や質が異なっていることや、BFの集じん灰層にてHClが低減されていることが主たる要因であると推測される。

(3) SO₂

Table 5 より、SO₂については、平均排出濃度は0.03~110 ppmv であり、106 件の算術平均で11.5 ppmv であった。従来型火葬炉の結果103 件の算術平均値で12.3 ppmv と比較するとほぼ同等の結果であった。SO₂を含む硫黄酸化物は、都市ごみ焼却炉においてはK 値による規制がなされている上、消石灰や湿式洗煙などによる硫黄酸化物除去設計値では、20~50 ppmv 以下とする場合が多いが、これをSO₂として平均濃度で超過するケースは106 件中8 件であった。硫黄酸化物についても、従来型火葬炉と同様に何らかの対策が必要と考えられるが、BF に消石灰吹き込み方式のHCl 除去技術を導入することによって、同時に除去できるものと推測される。

次に、水銀、HCl と同様にSO₂についても、火葬1 件あたりのSO₂ 排出量(排出原単位)を、火葬時間と、乾き排ガス量(O₂12% 換算値)、SO₂ 濃度(O₂12% 換算値)を乗じることで求めた。その結果、106 件の火葬について、SO₂ 排出原単位は0.5~511 g/体、算術平均で68.6 g/体と見積もられた。前報の従来型火葬炉からのSO₂ 排出原単位は算術平均で114 g/体であり⁸⁾、40% 程度低減される結果となった。この原因としては、HCl の場合と一部同様に1 火葬あたりの全乾き排ガス量が異なることが起因していると考えられた。ただし総量としては、従来型火葬炉よりも低い傾向にあることは明らかであり、この点においてははっきりしないが、副葬品の制限や、HCl の場合ほど顕著ではないが、武田らが、火葬炉の集じん灰(消石灰吹き込みなし)の元素分析を行った結果⁴⁾、集じん灰にはS が3~6%と比較的高濃度で含まれていることから、集じん灰層で除去されているなどの影響があると考えられた。

4. おわりに

本研究において、新型火葬炉を対象とした調査で得られた知見、および今後の課題を以下に示す。

- 1) ばいじん濃度は、BF 前でO₂12% 換算値でそれぞれ65.5~91.5 mg/m³_N であった。そのほとんどをPM2.5 が占めており、そのレベルや傾向は、従来型火葬炉とほぼ同様の傾向であった。
- 2) 火葬炉排ガス中ばいじんの粒径頻度分布は、従来型火葬炉と同様に、都市ごみ焼却炉とは異なって粒径が細かく、0.2~0.3 μm の部分が最大となった。
- 3) ばいじん等の排出原単位は、算術平均で1.7 g/体と見積もられ、またBF を含む排ガス処理装置にて、排出量は99% 以上低減された。
- 4) BF 前の排ガス中水銀に関しては、106 件の算

術平均で10.0 μg/m³_N であり、従来型火葬炉のレベルとほぼ同等であった。触媒装置後の水銀濃度は、平均で55% 減少し、触媒装置にHg⁰ が吸着されている可能性が考えられた。この結果、排出原単位は算術平均で9.38 mg/体と見積もられ、従来型火葬炉の排出原単位の1/3 以下となった。

- 5) 排ガス中HCl 濃度は74 件の算術平均で33.2 mg/m³_N であった。また、HCl 排出原単位は算術平均で77.8 g/体と見積もられた。これらの値は、従来型火葬炉の2/5 以下に低減されていた。この原因としては、副葬品等の制限、あるいはBF における集じん灰層での除去に起因するものと推定された。
- 6) 排ガス中のSO₂ 濃度は、106 件の算術平均で11.5 ppmv であった。この値は、従来型火葬炉とほぼ同等であった。また、SO₂ 排出原単位は算術平均で68.6 g/体と見積もられ、従来型火葬炉と比較すると3/5 以下となった。この原因としては、HCl の結果と同様に副葬品等の制限や集じん灰層での除去に起因するものと推定された。
- 7) 本調査の結果から、ばいじん等に関しては、BF 導入により高度除去が期待できるが、粒径特性の要因やその発生源の推定については、粒径別捕集された各粒子の元素分析等が必要である。また、水銀については、排出量が低減されるものの、触媒装置に吸着、蓄積されて徐々に排出されている可能性があり、触媒劣化も含め確認が必要である。またHCl、SO₂ 等の酸性ガスについては、従来型火葬炉より、排出濃度や排出原単位が低減したが、この理由として集じん灰への移行を調査する必要がある。酸性ガスは低減されたとはいえ、火葬炉の煙突高さが低いことやピーク時には高濃度になることから、何らかの対策が必要であると考えられる。具体的には、排水処理が不要な手法として、煙突前のHCl、SO₂ をモニタリングしつつ、BF に時間限定的に消石灰等を吹き込んで、灰の増加を最小限に保ち、酸性ガスを除去する手法が望ましいと考えられる。

謝辞

本研究にて、火葬炉調査にご協力いただいた自治体、火葬場の関係各位、各メーカーの関係各位に感謝する。また、サンプリングや分析の一部は、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士2 回生の辻本悠真君に協力頂いた。またデータ解析は、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士1 回生の谷口雅哉君、

濱口大輔君、藤目基慎君に協力頂いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 厚生労働省：統計一覧，平成22年度衛生行政報告例，第23表 埋葬及び火葬の死体・死胎数並びに改葬数，都道府県—指定都市—中核市（再掲）別
http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001083541/har0230.csv（2012.4.12情報取得）
- 2) 厚生労働省大臣官房統計情報部：平成23年(2011)人口動態統計の年間推計，第一表 人口動態総覧の年次推移
http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suikai11/index.html（2012.4.12情報取得）
- 3) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口（平成24年1月推計）報告書
http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/sh2401.asp（2013.8.20情報取得）
- 4) 武田信生（研究代表者）：火葬場における有害化学物質の排出実態調査および抑制対策に関する研究，厚生労働科学研究費補助金，健康安全・危機管理対策総合研究事業，平成20年度～21年度総合研究報告書（2010）
- 5) 厚生労働省健康局生活衛生課：火葬場から排出される有害化学物質に関するアンケート調査結果（2010）
- 6) 貴田晶子，高橋史武：日本と諸外国の水銀の大気排出インベントリー，地球環境，Vol.13, pp.167-180（2008）
- 7) 堂本真吾，江口正司，高岡昌輝，松本忠生，大下和徹，武田信生：火葬炉における水銀の排出挙動調査，大気環境学会誌，Vol.41, No.6, pp.309-319（2006）
- 8) 大下和徹，高岡昌輝，江口正司，塩田憲司：火葬炉からの酸性ガス，水銀および微小粒子の排出挙動，EICA, Vol.17, Nos.2-3, pp.116-123（2012）
- 9) 日本工業規格：JIS Z8808 排ガス中のダスト濃度測定方法（1995）
- 10) 日本工業規格：JIS K0302 排ガス中のダスト粒径分布の測定方法（1989）
- 11) 塩田憲司，今井玄哉，高岡昌輝，木本成，松井康人，大下和徹，水野忠雄，森澤真輔：都市ごみ焼却施設から排出される微小粒子へのダイオキシン類除去対策強化による効果，大気環境学会誌，Vol.46, No.4, pp.224-232（2012）
- 12) 笠原三紀夫，東野達編：エアロゾルの大気環境影響，京都大学学術出版会（2007）
- 13) A. Santarsiero, G. Trevisan, G. Cappiello, G. Formenton and E. Dell'Andrea: Urban Crematoria Emissions as They Stand with Current Practice, Microchemical Journal, Vol.79, pp.299-306（2005）
- 14) European Environment Agency: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, 6.C.d Cremation（2009）
- 15) European Environment Agency: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2006, Activity 090901, CREMATION, Incineration of Corpses（2006）
- 16) M. Takaoka, N. Takeda, T. Fujiwara, M. Kurata and T. Kimura: Control of Mercury Emission from a Municipal Solid Waste Incinerator in Japan, Journal of Air & Waste Management Association, Vol.52, pp.931-940（2002）
- 17) 高岡昌輝：飛灰堆積層による都市ごみ焼却排ガス中の水銀除去機構の解明，京都大学博士論文，p.19（2001）
- 18) 高岡昌輝，武田信生：流動床式都市ごみ焼却炉排ガス中の水銀除去に与える活性炭噴霧の影響，化学工学論文集，Vol.28, No.5, pp.593-597（2002）
- 19) Sandra Straube, Thomas Hahn and Heinz Koeser: Adsorption and oxidation of mercury in tail-end SCR-DeNOx plants — Bench scale investigations and speciation experiments, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.79, pp.286-295（2008）
- 20) 水銀汚染検証市民委員会：清掃工場の連続水銀事故の検証と課題，pp.9-10, 27（2011）

Behaviour of Acidic Gas, Mercury and Fine Particles Emitted from a Crematorium-Part 2

Kazuyuki Oshita^{1)†}, Masaki Takaoka¹⁾, Shoji Eguchi²⁾ and Kenji Shiota³⁾

¹⁾ Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University

²⁾ Taiyo Chikuro Co. Ltd.

³⁾ Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Kazuyuki Oshita :
(Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University
E-mail : oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

Abstract

This study determined the concentrations of fine particles, mercury and acidic gas in the flue gases from a new crematorium equipped with a bag filter and catalytic device, and examined the factors affecting emissions. The greatest proportion of dust consisted of 0.2-0.3 μm particles corresponding to PM_{2.5}. The flue gas treatment process removed over 99% of the PM_{2.5} from the flue gas, primarily with the bag filter. The arithmetic mean HCl and SO₂ concentrations in flue gas were 33.2 mg/m³_N and 11.5 ppmv, respectively (n=106); the levels were lower than those from a conventional crematorium. This reduction might have resulted from the restriction of burial accessories and the removal of these acidic gases from the layer of fly ash in the bag filter. To eliminate the remaining acidic compounds, the flue gases should be sprayed with lime prior to passage through the bag filter.

Key words : crematorium, bag filter, hydrogen chloride, PM_{2.5}, sulfur dioxide, mercury