

(4) 六価クロム, フッ素, ホウ素

a) 溶出量

表-8 に溶出量試験の結果を示す。まず、六価クロムに関しては、全ての残骨灰、集じん灰で、土壤汚染対策法により規定されている溶出量基準の180～1,200倍の濃度が検出された。フッ素、ホウ素に関しては、残骨灰では、一部ホウ素が1.8mg/Lで溶出量基準を超過していたが、それ以外は全て溶出量基準以下であった。しかし集じん灰では、フッ素で2.6mg/L、6.4mg/L、ホウ素で2.1mg/L、2.6mg/Lであり、溶出量基準を全て超過していた。

したがって、残骨灰、集じん灰にかかわらず、六価クロムに関しては何らかの対策が必要であるといえ、フッ素、ホウ素に関しては集じん灰について対策を講じなければならないことが示唆された。

b) 含有量

表-9 に含有量試験結果を示す。集じん灰中のフッ素、ホウ素含有量は、各350～1,300mg/kg、および69mg/kg以下であった。土壤汚染対策法でのフッ素、ホウ素の含有量基準はともに4,000mg/kgであることから、これらの元素に関しては問題ないと考えられる。しかし、六価クロムに関しては、A残骨灰、D残骨灰、B集じん灰の3サンプルで、含有量基準(250mg/kg)を超過するケースが見られた。したがって、六価クロムに関しては、溶出量と同様に対策が必要であろうと考えられる。

これら六価クロムの由来について、江口は、火葬

炉から排出される残骨灰、集じん灰中六価クロムの調査を行い、クロムの由来は主に、棺桶を乗せるステンレス製(SUS310S)架台であると推測している¹⁰⁾。SUS310Sのようなステンレス鋼では表面にCr₂O₃のような不動態膜が形成され、これにより高温・酸化雰囲気中で内部構成元素の酸化が防がれ強度が保持されているが²⁰⁾、高温・酸化雰囲気下で塩基性のアルカリ土類金属化合物により、Cr₂O₃は容易に酸化され、塩酸可溶の六価クロム化合物を形成するとされる²¹⁾。人骨には主成分であるヒドロキシアパタイト(Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂)に加え、マグネシウム、炭酸イオンなどが含まれており²²⁾、高温・酸化雰囲気下で六価クロム生成能を有すると考えられる。また火葬炉内における耐火物には、Cr₂O₃が含まれる可能性があり、これが六価クロムの由来になっていることも否定できない。

具体的な対策としては、六価クロムを生成させないように燃焼温度、あるいは酸素濃度を下げることが考えられるが、我が国の火葬の習慣上、あるいはダイオキシン類生成の観点から燃焼制御による対策は非現実的である。また、残骨灰とステンレス材、耐火物の直接接触が回避できるような構造的な対策も考えられるが、炉構造の根本的な見直しが必要であり困難であると考えられる。したがって、クロムを含まない代替架台や耐火物の開発などの対策が第一であると考えられる。

表-8 残骨灰、集じん灰における六価クロム、フッ素、ホウ素の溶出量試験結果

単位:mg/L

	A残骨灰	B残骨灰	C残骨灰	D残骨灰	A集じん灰	B集じん灰	土壤環境基準 (溶出量)
六価クロム化合物	30	9	13	9	16	60	0.05
フッ素および その化合物	<0.1	0.17	0.13	0.1	6.4	2.6	0.8
ホウ素および その化合物	0.18	1.8	0.24	<0.01	2.6	2.1	1

※溶出量の基準は、「土壤汚染対策法施行規則」環境省令第29号(平成14年)による。

表-9 残骨灰、集じん灰における六価クロム、フッ素、ホウ素の含有量試験結果

単位:mg/kg

	A残骨灰	B残骨灰	C残骨灰	D残骨灰	A集じん灰	B集じん灰	土壤環境基準 (含有量)
六価クロム化合物	250	58	110	310	140	460	250
フッ素および その化合物	820	430	1300	1000	1200	350	4000
ホウ素および その化合物	12	48	<10	15	69	57	4000

※含有量の基準は、「土壤汚染対策法施行規則」環境省令第29号(平成14年)による。

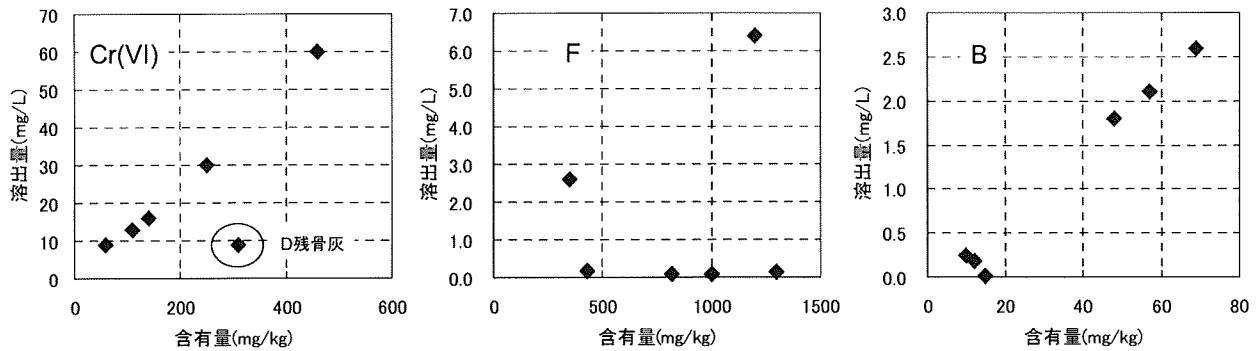


図-4 残骨灰, 集じん灰における六価クロム, フッ素, ホウ素の含有量と溶出量との関係

c) 溶出量と含有量との関係

図-2に, 六価クロム, フッ素, およびホウ素の含有量と溶出量の関係を示した. フッ素に関しては含有量と, 溶出量に明確な関係性は見られなかったが, 六価クロムに関してはD残骨灰を除いて, 含有量が多くなるほど溶出量も多くなる傾向が見られた. このことは, サンプルにかかわらず, 1N塩酸による抽出量と, 蒸留水による溶出量とに関係性があることを意味しており, 含有量に対し一定の割合で溶出性成分が生成されていることが示唆されるうえに, 灰中のクロムの化学形態が類似していることが推察される.

また, ホウ素に関しても, 含有量が低濃度の範囲ではばらつきがあるものの, 含有量が多くなるほど溶出量が多くなる傾向が見られた. 柏倉らは, 石炭フライアッシュ中のホウ素の存在形態の分析を行っており, 石炭フライアッシュ中のホウ素は塩酸により速やかにほぼ全量が抽出されること, 蒸留水により溶出する成分は, $^{11}\text{B-NMR-MAS}$ スペクトルからフライアッシュ表面に偏在する $\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6$ が主たる形態であると推測している²³⁾. 本研究ではホウ素の含有量は 69mg/kg 以下であったが, Caは人骨に由来するなどホウ素に対して十分に存在すると考えられ, $\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6$ が一定割合で生成されている可能性がある.

今後, より効率的な抑制対策を考えていく上で, データを蓄積し, これらの推察を明らかにしていくことが必要である.

4. 結論

本研究では, 4箇所の火葬炉において, ダイオキシン類, 臭素化ダイオキシン類, 水銀, 六価クロム, フッ素, ホウ素に関する調査を行ってこれらの濃度, 総量, 排出形態などについて, その実態を明らかにした. 得られた知見を以下に示す.

- ・火葬炉における排ガス中ダイオキシン類の濃度は, 毒性等量の算術平均では $0.42\text{ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}$ であり, 新設火葬場のガイドライン指針値である ($1.0\text{ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}$) を下回っていた.
- ・残骨灰中のダイオキシン類濃度は非常に低かったが, 集じん灰は, $1.6\sim 15\text{ng-TEQ/g}$ であり, 10年前の調査結果と比較すると, 排ガス中ダイオキシン類が低減されている一方で, あまり変化していないと考えられた. したがって, 濃度の高いものに関しては別途処理を検討するなどの対策が必要であろう.
- ・排ガス中, および残骨灰, 集じん灰中の臭素化ダイオキシン類は, 同施設の塩素化ダイオキシン類と比較して $1/200$ 以下の値であり, その寄与は十分に低いものと考えられた.
- ・本研究の調査結果から, 火葬炉からの排出インベントリーを試算した結果, 現在の報告値: $2.4\sim 5.3\text{g-TEQ/年}$ に比較し, $0.13\sim 1.1\text{g-TEQ/年}$ まで低減されている結果となり, 「火葬炉からのダイオキシン類排出抑制ガイドライン」による効果がうかがえた. 今後, より多くの火葬場での調査を行って, 排出量原単位, 排出インベントリーの検証を行っていく必要がある.
- ・4施設における水銀濃度実態調査では, 排ガスにおいては, 1サンプルのみ $8\mu\text{g/m}^3_{\text{N}}$ を示し, 他の多くは定量下限値 ($< 6.0\mu\text{g/m}^3_{\text{N}}$) となった. 本研究での水銀測定において, JIS法では定量下限値以下のデータが多かったため, サンプリングを含む分析方法の検討も必要であることがわかった.
- ・1か所の施設において水銀連続分析計を用いて経時変化を測定し過去の調査事例と比較した結果, 濃度に関しては $1/3$ 程度であったが, 挙動については同様の傾向であり, 歯科アマルガム由来による Hg^0 の発生が大きな寄与を占めることが確認された.
- ・集じん灰中水銀について, 含有量については土壤汚染対策法の基準以下であったが, 溶出量は基準

値を超えており、取扱いに注意が必要であることがわかった。

- ・溶出量試験, 含有量試験の結果から, 六価クロムに関しては, 含有量基準(250mg/kg)を超過するケースが見られるとともに, 全サンプルで基準の180~1,200倍の溶出量が検出された。したがって, 六価クロムに関しては何らかの対策が必要であろうと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり, 研究主旨を御理解いただき, 実態調査に御協力いただいた4箇所の火葬場, および関係自治体の方々には深く感謝申し上げます。水銀の連続分析に関しては, 株式会社日本インストルメンツの方々には, 現場の下見, 立会, データの解析等に関しては, 太陽築炉工業株式会社・江口正司氏をはじめとする関係各位に御協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。なお, 本研究は平成19年度厚生労働科学研究費補助金(厚生労働科学特別研究事業)により実施された。

参考文献

- 1) 厚生労働省統計表データベースシステム: 衛生行政報告例(旧 厚生省報告例(衛生関係)), 表 埋葬及び火葬の死体・死胎数並びに改葬数, <http://www.dbt.k.mhlw.go.jp/toukei/index.html>, 2008.3.21 情報取得。
- 2) 厚生労働省大臣官房統計情報部: 平成19年人口動態統計の年間推計, 第1表-人口動態総覧の年次推移, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suikai07/index.html>, 2008.3.21 情報取得。
- 3) 武田信生(主任研究者): 火葬場から排出されるダイオキシン類の実態調査, 平成9年度厚生科学研究費補助金(厚生科学特別研究事業)報告書, 1998。
- 4) 武田信生(主任研究者): 火葬場からのダイオキシン類の排出抑制対策の検討, 平成10年度厚生科学研究費補助金(厚生科学特別研究事業)報告書, 1999。
- 5) 火葬場から排出されるダイオキシン削減対策検討会: 火葬場から排出されるダイオキシン削減対策指針, 2000。
- 6) 環境省: ダイオキシン類の排出量の目録(排出インベントリー), p.2, p.8, 2006。
- 7) Department for Environment Food and Rural Affairs, UK.: Mercury emissions from crematoria, Second consultation, 2004。
- 8) Lesley Sloss: 国内外における微量成分の排出状況, *Trace Element Workshop 2000*, pp.47-59, 2000。
- 9) 読売新聞, 東京夕刊22面, 2006.12.8。
- 10) 江口正司: 火葬炉の燃焼制御と環境負荷低減に関する研究, 京都大学博士論文, pp.117-125, 2007。
- 11) 日本財団: 『葬斎・火葬船』構想 調査委員会調査報告書, p.11, 2008。
- 12) 環境省水・大気環境局総務課ダイオキシン対策室: ポリブロモジベンゾパラジオキシン及びポリブロモジベンゾフランの暫定調査方法, 2007。
- 13) Alvin Chua, Koji Tanida, Masaki Takaoka, Naoki Noda: Development of Mercury CEMs for Emission Gases, *18th International Low-Rank Fuels Symposium*, pp.1-9, 2003。
- 14) Koji Tanida, Alvin Chua, Masaki Takaoka, Naoki Noda: The Development and Current Status of the Mercury CEM, *Air Quality IV*, pp.1-12, 2003。
- 15) 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。
- 16) Masaki Takaoka, Nobuo Takeda, Takeshi Fujiwara, Masato Kurata, Tetsuo Kimura: Control of Mercury Emission from a Municipal Solid Waste Incinerator in Japan, *Journal of Air & Waste Management Association*, Vol.52, August 2002, 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) William Hogland: Usefulness of Selenium for the Reduction of Mercury Emissions from Crematoria, *Journal of Environmental Quality*, Vol.23, pp.1364-1366, 1994。
- 19) Allan Mills: Mercury and Crematorium Chimneys, *Nature*, 346, p.16, 1990。
- 20) 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢洋, 岩村秀, 佐藤文隆, 久保亮五: 岩波理化学辞典, 岩波書店, p.701, 1998。
- 21) 西野忠, 桜井正: 含アルカリ土類複酸化物と酸化クロム(III)との反応(その1), 窯業協会誌, Vol.85, No.10, pp.496-500, 1977。
- 22) Rorert K.Murray, Daryl K. Granner, Peter A. Mayes and Victor W. Rodwell(上代淑人監訳): イラストレイテッド ハーパー生化学, 丸善, p.563, 2003。
- 23) 柏倉俊介, 前川英己, 横山一代, 長坂徹也: MAS-NMRによる石炭フライアッシュ中のホウ素の存在形態解析, 第18回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.630-632, 2007。

(2008. 5. 23 受付)

Measures to Prevent Emissions of Hazardous Materials from Crematoriums in Japan

Nobuo TAKEDA¹, Masaki TAKAOKA² and Kazuyuki OSHITA²¹Eco-Technology Research Center, Ritsumeikan University²Department of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering,
Kyoto University

This study measured hazardous materials, including dioxins, mercury, and hexavalent chromium compounds, in the flue gases, fly ash, and bottom ash from four crematoriums in Japan, to evaluate the emissions from crematoriums.

The toxic equivalent concentration (normalized by 12% O₂) of dioxins in the flue gases from crematoriums ranged from 0.00012 to 1.2 ng-TEQ/m³_N. The estimated maximum emission inventory of dioxins from crematoriums was 1.1 g-TEQ/year, which is less than one-fifth of the present emission inventory. Although mercury in flue gases from crematoriums was under the minimum limit of determination using the JIS K0222 method, Hg⁰ from dental amalgam contributed significantly to the total mercury emissions from crematoriums based on a continuous mercury speciation analyzer, as in our past study. The hexavalent chromium compounds leached from all ash samples exceeded the Japanese environmental quality standards for soil by 180 to 1,200 times. Therefore, countermeasures against hexavalent chromium compounds in the ash from crematoriums are required.

PCDDs/DFs and PBDDs/DFs EMISSIONS FROM CREMATORY

Takeda N¹, Takaoka M², Oshita K², Eguchi S³

1 Eco-technology Research Center, Ristumeikan University, 1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577, Japan; 2 Department of Urban & Environmental Engineering, Kyoto University, Kyodaikatsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan; 3 Taiyo Chikuro Industries Co.Ltd., 6-21, Higashikouen, Hakata-ku, Fukuoka, 812-0045, Japan

Abstract

Dioxin emission guidelines for crematories were implemented in Japan in 2000, but the effects of the new law have not yet been fully evaluated. In this study, concentrations of polychlorinated dibenzo-dioxins/dibenzo-furans (PCDDs/DFs), co-planar polychlorinated biphenyls (PCBs), and polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDDs/DFs) in flue gases, fly ashes, and bottom ashes (mainly bone) from several crematories were measured as a follow-up investigation. Total concentrations (O₂12% normalized) of PCDDs/DFs in flue gases ranged from 5.3 to 540 ng/m³_N, and toxic equivalent concentrations ranged from 0.00018 to 11 ng-TEQ/m³_N. Based on these measurements, the average emissions released for each body being cremated was estimated to be 1600 ng-TEQ/body. This value is about two fifths of the value recorded in 1999 which suggests that the guidelines have been effective in reducing dioxin emissions. Conversely, toxic equivalent concentrations in fly ash ranged from 0.014 to 5.0 ng-TEQ/g. Higher dioxin concentrations were observed in facilities that used a heat exchanger as a flue gas cooling device; secondary formation of PCDDs/DFs on the surface of the heat exchanger may explain this difference. In addition, PBDD/DF concentrations were measured in four crematories, but were only detected in one; in this crematory, the PBDD/DF concentration (O₂12% normalized) was 0.031–0.045 ng/m³_N and was almost negligible relative to the measured concentration of PCDDs/DFs.

Introduction

In Japan in 2007, 99.9% of dead bodies were cremated and this percentage is the highest in the world. According to demographic statistics¹, the number of mortalities is increasing so it follows that the number of cremations is also increasing. For religious reasons, emissions from crematories in Japan are not regulated by the Air Pollution Control Act or the Waste Management and Public Cleansing Act. However, it is necessary to examine toxic emissions from crematories to determine their environmental impact and to take measures to reduce or monitor them if necessary.

There have been some investigations into polychlorinated dibenzo-dioxin/dibenzo-furan (PCDD/DF) emissions from crematories²⁻¹¹ but only a limited number of extensive surveys have been carried out. In the detailed survey by Takeda et al.⁶, the authors measured total concentrations of PCDDs/DFs in flue gases from 27 crematories and reported values ranging from 0.074 to 29.2 ng-TEQ(WHO98)/m³_N with an arithmetic mean value of 2.9 ng-TEQ(WHO98)/m³_N. Based on these results, the average emission quantity per dead body cremation was estimated to be 4200 ng-TEQ(WHO98)/dead body and total emissions were estimated to be 1.8–3.8 g-TEQ(WHO98)/year based on the registered number of cremations. The dioxin emission guidelines for crematories were prepared based on the results of this investigation by Takeda et al.⁶ and their data were also used for the national inventory. In Japan, measures to reduce dioxin emissions have been applied to all known dioxin sources, which has resulted in a remarkable decrease in dioxin emissions. For many sources of dioxin emissions, the emission inventory is regularly updated with the newest data. However, the data for crematories are significantly out of date; the inventory has been using emissions data obtained almost 10 years ago. While it can be broadly assumed that dioxin emissions are indeed decreasing because of the countermeasures implemented since the guidelines were enacted (such as good combustion control and installation of advanced air pollution control devices), according to the national inventory, dioxin emissions from crematories are increasing due to the increase in the number of cremations, simply because the emissions data have not been updated.

Emissions of organobromine compounds from thermal processes have been of recent public concern¹². In crematories, emissions of these compounds might be high depending on the contents of burial accessories

that are combusted with bodies. Therefore, it is necessary to investigate the actual emissions of organobromine compounds from crematories.

In this study, PCDD/DF, co-planar polychlorinated biphenyl (PCB), and polybrominated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran (PBDD/DF) concentrations in flue gas, fly ash, and bottom ash (mainly bone) from several crematories were measured as a follow-up survey to evaluate the effect of the emissions guidelines and update the PCDD/DF crematory emissions data in Japan.

Materials and Methods

Table 1 shows the configuration of 11 crematories and the sampling conditions. To evaluate the effects of the guidelines, implemented since 2000, we selected 5 crematories (Facility No.1, 2, 5, 6, and 7) that were constructed after 2000. In these particular facilities, bag filters were used as dust collectors and advanced air pollution control devices (APCDs) had been installed. Conversely, Facilities No.3, 4, 10, and 11 were not equipped with even a dust collector. All crematories had a series of one secondary combustion chamber to one main combustion chamber, and in all cases, except in Facility No.5 flue gases were cooled by air ejectors. Facilities No.1 and 5 used a heat exchanger for flue gas cooling. Natural gas and oil were used as axillary fuel in 6 and 5 of the crematories, respectively.

Table 1 The configuration of 11 crematories and the sampling conditions

Facility No.	1		2		3		4		5		6	
Dust collector	Bag filter		Bag filter		-		-		Bag filter		Bag filter	
Advanced APCD	Catalyst		Activated carbon		-		-		Catalyst		Catalyst	
Flue gas cooling device	Heat exchanger + air ejector		Air ejector		Air ejector		Air ejector		Heat exchanger + air ejector		Air ejector	
Ventilation	Induced		Induced		Induced		Induced		Induced		Induced	
The number of secondary chambers connected to flue gas treatment line	2		2		2		1		2		2	
Fuel	Natural gas		Natural gas		Kerosene		Kerosene		Natural gas		Natural gas	
Experimental No	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Cremation time	42	46	68	61	71	66	90	71	58	57	66	59
Age	81	83	69	87	84	65	74	90	64	75	91	79
Sex	female	male	male	male	female	male	female	female	female	female	female	female
Facility No.	7		8		9		10		11			
Dust collector	Bag filter		Electrostatic Precipitator		-		Screen		-			
Advanced APCD	Activated carbon		-		-		-		-			
Flue gas cooling device	Air ejector		Air ejector		Air ejector		Air ejector		Air ejector			
Ventilation	Induced		Induced		Induced		Induced		Induced			
The number of secondary chambers connected to flue gas treatment line	2		3		1		1		1			
Fuel	Kerosene		Natural gas		Kerosene		Natural gas		Kerosene			
Experimental No	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Cremation time	48	68	64	45	60	63	59	64	85	64		
Age	98	85	66	80	75	88	93	91	60	67		
Sex	female	female	male	female	female	male	male	female	male	male		

Sampling of flue gas was carried out twice for each crematory. Flue gas was sampled throughout a cremation, from ignition of the secondary burner to extinction of the main burner. During the sampling period, concentrations of dust, O₂, CO, CO₂, and NO_x were measured simultaneously. Flue gas temperature

was measured and the age and sex of the cremated bodies were recorded. Bottom ash (mainly bone) was sampled at all crematories except for Facility No.8, and fly ash was sampled at all facilities with the exception of Facilities No.1, 2, 5, 6, 7, and 9.

The concentrations of PCDDs/DFs and co-planar PCBs were measured in all sampled materials, whereas PBDDs/DFs (tetra to octa) were only measured in samples from Facilities No.1, 2, 3, and 4. Sampling and analysis of PCDDs/DFs and co-planar PCBs were based on the Japanese standard method, JIS K0311. Analysis of PBDD/DF concentrations followed the manual of the Ministry of Environment¹³. The notes on the specific matter such as cremation time in each crematory refer to our previous works⁶. This study used the toxicity equivalent factors (TEFs) for PCDDs/DFs and co-planar PCBs proposed by WHO/IPCS in 2006.

Results and Discussion

PCDDs/DFs and co-planar PCBs concentration

The results of the analysis of PCDD/DF and co-planar PCB concentrations in flue gas, bottom ash, and fly ash are shown in Table 2. Total concentrations (O_2 12% normalized) of PCDDs/DFs and co-planar PCBs ranged from 4.7 to 540 ng/m^3_N , and toxic equivalent (TEQ) concentrations range from 0.00005 to 11 $ng-TEQ/m^3_N$. The average TEQ concentration was 0.88 $ng-TEQ/m^3_N$. In Facilities No.1, 2, 5, 6, 7, 8, and 9, the concentrations in both measurements were lower than 0.1 $ng-TEQ/m^3_N$. Facilities No.1, 2, 5, 6, and 7 were constructed since 2000, a catalytic destruction system for dioxin and NO_x had been installed in Facilities No.1, 5, and 6, and an activated carbon adsorption system had been implemented in Facilities No.2 and 7.

Table 2 The results of the analysis of PCDD/DF and co-planar PCB concentrations in flue gas, bottom ash, and fly ash

Crematory	Cremation time (min)	Gas temperature (°C)	Dry gas volume (m^3_N/h)	PCDDs/DFs+co-PCBs						Dust ^a (g/m^3_N)	CO ^a (ppm)	NO _x ^a (ppm)	O ₂ (%)	
				Flue gas ^a		Bottom ash		Fly ash						
				ng/m^3_N	$ng-TEQ/m^3_N$ ^b	ng/g	$ng-TEQ/g$ ^b	ng/g	$ng-TEQ/g$ ^b					
No.1	1	42	150	9,210	16	0.096	0.020	0.0000033	520	13	<0.003	<20	100	17.9
	2	46			4.7	0.000053					<0.009	<30	50	20.0
No.2	1	68	110	14,600	9.0	0.0059	0.012	0.00000035	71	1.4	0.028	120	84	19.7
	2	61			18	0.012					<0.005	35	120	19.2
No.3	1	71	220	6,210	75	1.1	0.18	0.0033			0.17	260	84	18.4
	2	66			41	0.62					0.14	360	130	18.6
No.4	1	90	580	3,250	54	1.0	0.044	0.00000062			0.041	250	91	15.0
	2	71			5.6	0.084					0.064	64	99	15.2
No.5	1	58	140	9,160	12	0.011	2.40	0.042	310	5.0	<0.008	26	86	19.8
	2	57	150	7,780	5.3	0.00018					<0.006	56	110	19.4
No.6	1	66	86	13,900	12	0.0036	0.12	0.00055	9.1	0.10	<0.007	<4	97	19.6
	2	59			17	0.010					<0.006	<3	120	19.5
No.7	1	48	88	14,200	14	0.025	0.029	0	37	0.61	0.005	<20	120	19.1
	2	68			5.5	0.0037					0.005	33	100	19.1
No.8	1	64	170	11,200	25	0.062					0.032	<8	110	19.0
	2	45	140	9,880	14	0.059					0.032	32	100	19.3
No.9	1	60	290	4,560	9.4	0.089	0.12	0.00067			0.13	<30	110	18.1
	2	63	300	3,590	10	0.10					0.16	<10	130	17.9
No.10	1	59	250	3,700	540	11	0.02	0.00000035	1.1	0.014	0.15	180	84	17.4
	2	64	230	4,860	86	1.7					0.10	<40	93	18.1
No.11	1	84	400	4,130	84	1.6	0.31	0.0044			0.19	270	82	15.8
	2	64			85	1.7					0.17	77	110	16.6
Maximum	90	580	14,600	540	11	2.40	0.042	520	13	0.064	360	130	20.0	
Minimum	42	86	3,250	4.7	0.000053	0.012	0	1.10	0.014	<0.003	<3	82	15.0	
Median	64	170	7,780	15	0.073	0.080	0.00028	54	1.0	0.032	34	100	18.8	
Arithmetic mean	62	240	8,020	52	0.88	0.32	0.0051	160	3.4	0.066	88	100	18.3	
Geometric mean	61	220	7,040	21	0.55	0.081	0.000073	40	0.65	0.028	42	99	18.2	

a PCDDs/DFs+co-PCBs, dust, CO and NO_x concentrations were normalized by 12% of O₂.

b The TEQ concentrations were calculated using WHO2006-TEF.

Conversely, at least one measurement in each of Facilities No.3, 4, 10, and 11 was higher than 1 $ng-TEQ/m^3_N$. These facilities were constructed before 2000 and, with the exception of Facility No.10, did not use any dust collectors. Although Facility No.10 was equipped with a simple screen, the dust concentration was not sufficiently low for effective dust removal. Specifically, the first sampling at Facility No.10 recorded a total dioxin concentration of 11 $ng-TEQ/m^3_N$, which exceeds the value set in the guidelines (5 $ng-TEQ/m^3_N$ for existing facility). Based on the concentrations of other gases, the combustion conditions during these sampling periods were not inferior to those during the first measurement at Facility No.11. One possible

explanation for this difference may be that *de novo* synthesis occurred on the surface of the flue gas duct or on the simple screen.

These results emphasize the importance of efficient dust removal, using a bag filter or electrostatic precipitator, in preventing the emission of dioxins. However, dioxin concentrations varied even among new facilities. The structure of Facility No.9 was of the old type and similar to that of Facility No.11, but concentrations of dioxins in emissions were low. In other words, while the effect of including an APCD in the crematory structure is significant, combustion conditions are also important because PCDD/DF concentrations are influenced by many factors such as the dead body and burial accessories.

TEQ levels in bottom ash were very low and ranged from 0.00000035 to 0.042 ng-TEQ/g. Conversely, TEQ levels in fly ash collected from dust collectors ranged from 0.014 to 15 ng-TEQ/g. The concentrations in fly ash in Facilities No.1 and 5 exceeded the regulations on TEQ concentrations in solid waste incineration fly ash (3 ng-TEQ/g). According to Table 2, the CO concentrations in both facilities were relatively low, which suggests that the combustion conditions were sufficient. Because the heat exchanger is used as a gas cooling device in these facilities, secondary formation may have occurred.

In this study, fewer males were cremated than females, but age and sex had no influence on the total concentration of PCDDs/DFs.

PBDDs/DFs concentration

The PBDD/DF concentrations measured in flue gas, bottom ash, and fly ash are shown in Table 3. As indicated, PBDDs/DFs were not detected in three crematories. In Facility No.4, PBDD/DF concentrations (O_2 12% normalized) were 0.031–0.045 ng/m³_N, which is 1/100–1/2000 of the measured concentration of PCDDs/DFs in the same flue gas. The most significant contributing homologues were tetrabromodibenzofurans (TeBDFs).

Table3 The PBDD/DF concentrations measured in flue gas, bottom ash, and fly ash

Crematory	Cremation time (min)	Gas temperature ^e (°C)	Dry gas volume (m ³ _N /h)	PBDDs/DFs			
				Flue gas ^a	Bottom ash	Fly ash	
				ng / m ³ _N	ng / g	ng / g	
No.1	1	42	150	9,210	N.D.	N.D.	0.072
	2	46			N.D.		
No.2	1	68	110	14,600	N.D.	N.D.	0.068
	2	61			N.D.		
No.3	1	71	220	6,210	N.D.	N.D.	
	2	66			N.D.		
No.4	1	90	580	3,250	0.045	0.0038	
	2	71			0.031		
Maximum	90	580	14,600		0.045	0.0038	0.072
Minimum	42	110	3,250		N.D.	N.D.	0.068
Median	67	185	7,710		0.038		0.070
Arithmetic mean	64	270	8,320		0.038		0.070
Geometric mean	63	210	7,220		0.037		0.070

Watanabe and Sakai¹² reviewed the environmental release and behavior of brominated flame retardants where PBDDs/DFs and PCDDs/DFs were introduced into municipal solid waste incinerator (MSWI) flue gas. According to this report¹², the average concentrations of PCDDs/DFs and PBDDs/DFs (tetra to hexa) from 75 incineration plants were 770 ng/m³_N and 4.0 ng/m³_N respectively. Measured PBDDs/DFs concentrations from the crematories in this study were much lower than these values for MSWIs, and the ratio of PBDDs/DFs to PCDDs/DFs was equal to or lower than that in MSWI flue gas. PBDDs/DFs were also detected in bottom ash only in Facility No.4 and were found in concentrations less than one tenth of those of PCDDs/DFs. PBDDs/DFs were detected in fly ash in both Facilities No.1 and 2, but were found in concentrations much lower than those for PCDDs/DFs. Although more data should be gathered to make more robust conclusions, and the detection limit for PBDDs/DFs is not excellent, it is assumed here that crematory emissions of PBDDs/DFs are negligible relative to those for PCDDs/DFs.

Total emission from all crematories in Japan

The total emissions from all active crematories in Japan were estimated using the following equations:

$$\text{Total emissions (ng-TEQ/year)} = \text{Emission quantity (ng-TEQ/body)} \times \text{the number of cremations (bodies/year)} \quad (1)$$

$$\text{Emission quantity (ng-TEQ/body)} = \text{TEQ concentration (ng-TEQ/m}^3\text{N)} \times \text{dry gas volume (m}^3\text{N/h)} \times \text{cremation period (h)} / \text{the number of cremations (bodies)} \quad (2)$$

The emission quantity, shown in Table 4, ranged from 0.041 to 16000 ng-TEQ/body. There was roughly a 0.4 million-fold difference in emission quantity between crematories. The arithmetic and geometric means were 1600 and 110 ng-TEQ/body, respectively. When we converted the emission quantity recorded in 1999⁶ to one based on the TEFs proposed by WHO/IPCS in 2006, the arithmetic and geometric means were 4200 and 1900 ng-TEQ/body, respectively. Thus, the ratios of arithmetic and geometric mean dioxin emissions in 2007 to those in 1999 were roughly 2/5 and 1/20, respectively.

These mean values were multiplied by 1,193,967, the number of bodies cremated in 2007, and the total emissions were estimated to be 0.13–1.9 g-TEQ/year, expressed as the range of the arithmetical mean from a geometric mean. This is equal to 0.04–0.7% of the present PCDD/DF inventory in Japan.

Table4 The Emission quantity of PCDDs/DFs and Co-planar PCBs

Crematory	Sampling time		TEQ concentration	Dry gas volume	Emission quantity
	min		ng-TEQ/m ³ N	m ³ N/h	ng-TEQ/dead body
No.1	1	42	0.10	3200	210
	2	46	0.000053	1000	0.041
No.2	1	68	0.0059	2100	14
	2	61	0.012	2900	35
No.3	1	71	1.1	1800	2300
	2	66	0.62	1700	1100
No.4	1	90	1.0	2200	3400
	2	71	0.084	2100	210
No.5	1	58	0.011	1200	13
	2	57	0.00018	1400	0.24
No.6	1	66	0.0036	2200	8.6
	2	59	0.010	2300	23
No.7	1	48	0.025	3000	60
	2	68	0.0037	3000	13
No.8	1	64	0.062	2500	170
	2	45	0.059	1900	83
No.9	1	60	0.089	1500	130
	2	63	0.10	1200	130
No.10	1	59	11	1500	16000
	2	64	1.7	1600	2800
No.11	1	84	1.6	2400	5300
	2	64	1.7	2000	3700
Max					16000
Minimum					0.041
Median					130
Arithmetic mean					1600
Geometric mean					110

The United States Environmental Protection Agency reported that emissions of dioxins from crematories in Japan were 0.27 g-ITEQ/year in 2000¹⁴. The proportional contribution of dioxins from crematories to total dioxin emissions was 0.02%. Conversely, according to the European Union dioxin inventory, crematories released dioxins at the rate of 9–19 g-TEQ/year and contributed 0.2–0.8% of the total dioxin emissions in

the EU¹⁵. This suggests that crematory-derived dioxin emissions in Japan have been reduced to the same level as that in the US and the EU despite the much higher percentage of cremations in Japan (99.9% compared to 20–40% in the US and EU) and the fact that the absolute number of cremated bodies in Japan is more than 1.5 times that in the US and EU. Thus, we conclude that the dioxin emission guidelines for crematories in Japan have been successful and are justified. Also, the installation of advanced APCDs has been shown to exert a significant influence on the reduction of PCDD/DF emissions.

Acknowledgements

This research was supported by Health Sciences Research Grants in FY 2007 and 2008 from the Japanese Government.

References

1. The Ministry of Health, Labour and Welfare, 2008. Population Survey Report.
2. The Working Group of Subcommittee Air/Technology of the Federal Government Federal States Pollution Control Committee, Germany, 1994. Determination of requirements to limit emissions of dioxins and furan, 127.
3. Hutzinger O. and Fiedler H., *Chemosphere* 1993; 27: 121.
4. Eguchi S., Takeda N. and Sakai S., *Organohalogen Compounds* 1996 ; 27: 127.
5. Takeda N., Takaoka M., Fujiwara T., Takeyama H. and Eguchi S., *Chemosphere* 2000 ; 40: 575.
6. Takeda N., Takaoka M., Fujiwara T., Takeyama H. and Eguchi S., *Chemosphere* 2001 ; 43: 763.
7. Kim DH., Kim YK., Kim SJ. and Ok G., *Organohalogen Compounds* 2003 ; 63: 9.
8. Xu Z., Wedman E., Bucher R., Petzoldt O., Sasamoto T. And Wilken M., *Organohalogen Compounds* 2003; 63: 216.
9. Francois F., Bernaert P. and Baert R., *Organohalogen Compounds* 2003; 63: 252.
10. Livolsi B., Labrousse S., Baron P. and Fiani E., *Organohalogen Compounds* 2006 ; 68: 848.
11. Santarsiero A., Trevisan G., Cappiello G., Formenton G. and Dell'Andrea E., *Microchem. J.* 2005 ;79: 299-306.
12. Watanabe I. and Sakai S., *Environ. International* 2003;29: 665.
13. The Ministry of Environment, Draft manual on analysis method for PBDDs/DFs, 2007.
14. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development: U.S. Environmental Protection Agency An Inventory of Sources and Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the United States for the Years 1987, 1995, and 2000, 2006 ;1-37.
15. North Rhine Westphalia State Environment Agency on behalf of the European Commission, Directorate General for Environment (DG ENV), Ulrich Quass, Michael Fermann, Günter Bröker: The European Dioxin Emission Inventory Stage II, 2000 ; 1 : 41.

S17-12 Mercury emission from crematory in Japan

Masaki Takaoka¹, Kazuyuki Oshita¹, Nobuo Takeda², Shinsuke Morisawa¹

1. Urban & Environmental Eng. Kyoto University, Kyoto, Japan

2. Eco-technology Research Center, Ritsumeikan University, Kusatsu, Japan

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

Anthropogenic sources on mercury emission have significant impact on global pollution. Therefore, it is required to find unknown sources and to assess the emission from the sources. Limited data on mercury emission from crematory is available all over the world. In Japan, 99% of dead bodies are cremated and the percentage is the highest in the world. There are more than 1600 crematories in operation. We focused on the emission from crematory in Japan and its data was examined. The numbers of targeted facilities were twelve. Total mercury concentration in stack gas was a few $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N, which was almost same level as that in stack gas of municipal solid waste incinerator. In two facilities, we used continuous emission monitor to measure the mercury concentration and understand the mercury behavior. Considering the behavior of mercury in cremation, it was confirmed that the mercury in stack gas was originated from the mercury in dental amalgam. The amount of mercury emission was calculated by using the total concentration and flow gas rate. Furthermore, the annual amount of mercury emission from crematory in Japan was estimated by using total number of corpse. The emission amount was considerably lower than that of estimated in UK. In the view point of the statistics on dental care and population movement, the total emission amount from crematory also predicted. There was a large difference between the emission base on the measured data and on the statistics. According to the estimation based on the statistics, the amount of mercury emission from crematory will supposedly increase by 1.3-1.8 times from 2000 to 2025.

Keywords: Mercury; Crematory; Dental amalgam; Emission; Inventory

(45) 火葬場から排出される六価クロムの 実態と由来の調査および排出抑制対策

武田 信生¹・高岡 昌輝^{2*}・大下 和徹²・江口 正司³

¹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)

²京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)

³太陽築炉工業株式会社 (〒812-0045 福岡市博多区東公園6番21号)

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

本研究は、複数の火葬炉を対象に、残骨灰および集じん灰中の六価クロムに着目し、その排出実態を明らかにし、由来とされるステンレス製架台についても調査し、排出抑制対策を検討した。

土壤汚染対策法に基づいた溶出量試験における、灰の六価クロム溶出量は、全サンプル(10検体)で、溶出量基準の10～1,900倍の濃度が検出された。また、火葬炉における全クロムのマスバランスの整合性から、主に、ステンレス製架台の損耗によりクロムが灰中に移行することが推測されたが、ステンレス製架台を用いていない火葬炉由来の灰の六価クロム溶出量は、土壤汚染対策法に基づいた溶出量基準を達成できるほど低減されていなかった。したがって、今後、バグフィルターによる集じんを徹底し、炉外大気への排出を抑制し、灰の別途処理を検討する必要がある。

Key Words : crematorium, hexavalent chromium compounds, stainless steel, ash, leaching amount

1. はじめに

我が国の火葬率は、平成19年度で約99.9%であり、火葬数は110万人を超え、世界一の火葬大国となっている¹⁾、また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。火葬場から排出される排ガスや残骨灰(収骨後に残った灰の一部)、集じん灰(集じん機で捕集された灰)等は、宗教上の観点から大気汚染防止法や廃棄物処理法などの対象外である。それゆえ、これらに含まれる有害物質等の知見が乏しく、その実態はほとんど把握されていない。このことから、筆者らの研究グループでは、2007年に4箇所³⁾の火葬炉から得られた残骨灰、集じん灰中の水銀、六価クロム、フッ素、ホウ素の安全性について、土壤汚染対策法に基づいた溶出量試験、含有量試験により評価した。その結果、特に六価クロムの溶出量が基準値の180～1,200倍の濃度で検出され⁴⁾、さらなる調査、および対策の必要性が示唆された。しかし、これまでの調査は4施設のみにおけるデータであり、日本全国の火葬炉における状況をより正確に把握しようとするならば、できるだけ多くの施設における実測データを得ることが必要であり、その上で対策

を検討しなければならない。また、新聞報道等により、六価クロムの起源としては、火葬炉内のステンレス製架台中のクロムであると推定されているが⁵⁾、詳細は明らかになっていない。

そこで、本研究は、これまでの調査に加え複数の施設の火葬炉を対象に、残骨灰、および集じん灰中の六価クロムに着目し、その排出実態を明らかにするとともに、由来とされるステンレス製架台についても調査し、排出抑制対策について検討することを目的とした。具体的には、まず、基礎調査として、6施設の火葬炉を対象に、残骨灰、および集じん灰中の六価クロムについて土壤汚染対策法に基づいた含有量試験、溶出量試験を行って、2007年の調査結果⁴⁾と比較することにより安全性を評価した。また、灰中の六価クロムの溶出量や、排ガス経由での大気への排出状況等は、火葬の状況に左右される可能性が高いと考えられるため、灰のサンプリング前に、排ガス調査を行って火葬の状況を把握した。この灰の六価クロム含有量(19号含有量)、および火葬排ガスのデータを用いて、集じん機の有無による六価クロム排出量を推定し、集じん機の六価クロム排出抑制効果を検討した。さらに火葬炉からの全クロムの排

出係数を求め、他の燃焼発生源と比較した。

次に、灰中六価クロムの由来とされる炉内のステンレス製架台を主たる由来とした場合の、火葬場1施設における全クロムのマスバランスを評価し、その妥当性を評価した。さらに、ステンレス製架台を用いていない火葬場1施設において、残骨灰、集じん灰中の六価クロムについて、土壌汚染対策法に基づいた溶出量試験を行って、ステンレス製架台の影響について検討した。

なお、土壌汚染対策法に基づいた環境省告示19号にて規定されるI.含有量試験、II.含有量、III.含有量基準は、それぞれアルカリ溶媒による抽出試験、抽出試験による抽出量、抽出量に対する基準として定められているが、特にII.含有量に関しては本来の全含有量とは異なり、混同を避けるため、本論文では“19号含有量”と記載する。

2. 研究方法

本研究では、基礎調査とクロムの由来調査を行った。基礎調査では、残骨灰、および集じん灰中の六価クロムの排出実態を明らかにした。クロムの由来調査は、主たる由来とされるステンレス製架台について調査した。これらの2つの調査により火葬炉からの六価クロムの排出抑制対策について検討した。これらの各調査における対象施設、サンプリング、測定項目、および測定方法について以下に示す。

(1) 対象施設

基礎調査で対象とした火葬場は6施設である。2007年に実施した先行調査では施設A～Dの4施設において実施し⁴⁾、本研究ではそれらとは全て異なる施設で実施した。したがって、以下施設名については、施設E～Jで記述する。火葬場の一覧について表-1

に示した。6施設の全てが、主燃焼室1室に対し、再燃焼室1室を有しており、排気方式も排風機による強制排気方式であるが、施設E～Gは、排気系列が2炉1系列であり、施設H～Jは1炉1系列であった。燃料は灯油と都市ガスが用いられていた。集じん機は、施設E～Gは、平成17年以降に新設された比較的新しい施設であり、バグフィルターが設置され、それぞれの後段に触媒装置、あるいは活性炭吸着設備が設置されていた。施設Iではスクリーンが設置されており、施設H、および施設Jはともに集じん機が設置されていない。これら施設H～Jは、平成3年以前に設置された比較的古い施設である。すなわち、基礎調査における対象施設は、比較的新しい施設と古い施設を3施設ずつ選定し調査を行った。

クロムの由来調査において対象とした施設は2施設であり、その詳細を施設K、Lとして、表-1に併記した。施設K、Lともに、主燃焼室1室に対し、再燃焼室1室を有しており、燃料は都市ガスで、排気方式も排風機による強制排気方式であるが、施設Kは、排気系列が2炉1系列であり、施設Lは1炉1系列であった。集じん機は、施設Kには、バグフィルターが設置され、後段に触媒装置が設置されていた。施設Lでは集じん機としてサイクロンが設置されていた。なお、施設Lでは、通常火葬炉内で用いられているステンレス製の架台は使用されていない。

(2) サンプリング

表-1における6施設の火葬場(施設E～J)において、まず、各施設における火葬の状態を把握するため、1施設の火葬場につき2体の火葬を対象に、排ガスサンプリングを行った。その後、2体分の残骨灰を採取し、さらに、施設E～G、施設Iでは集じん灰を採取した。施設E～Gと、施設H～Jでは炉と排ガス処理設備の比率が異なり、データの条件をそろえるため、また別途、灰中のダイオキシン類を測定す

表-1 調査対象とした火葬炉の概要

火葬炉	施設E	施設F	施設G	施設H	施設I	施設J	施設K	施設L
再燃焼炉	有	有	有	有	有	有	有	有
主燃焼室：再燃焼室	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
集じん機	バグフィルター	バグフィルター	バグフィルター	なし	スクリーン	なし	バグフィルター	サイクロン
集じん機後段の排ガス処理	触媒装置	触媒装置	活性炭吸着設備	なし	なし	なし	なし	なし
排気方式(炉：系列)	強制(2:1)	強制(2:1)	強制(2:1)	強制(1:1)	強制(1:1)	強制(1:1)	強制(2:1)	強制(1:1)
燃料	都市ガス	都市ガス	灯油	灯油	都市ガス	灯油	都市ガス	都市ガス

表-2 基礎調査にて排ガス測定の対象とした火葬の概要

実験番号	E-1	E-2	F-1	F-2	G-1	G-2	H-1	H-2	I-1	I-2	J-1	J-2
火葬時間	58分	57分	66分	59分	48分	68分	60分	63分	59分	64分	85分	64分
年齢	64歳	75歳	91歳	79歳	98歳	85歳	75歳	88歳	93歳	91歳	60歳	67歳
性別	女性	女性	女性	女性	女性	女性	女性	男性	男性	女性	男性	男性

表-3 測定項目、および測定方法

対象	測定項目	測定方法
残骨灰 集じん灰	六価クロム	環境省告示18、19号に規定される溶出量試験、含有量試験
	全クロム	中性子放射化分析法
排ガス	排ガス温度	JIS Z 8808 熱電対による連続測定
	排ガス流速	JIS Z 8808 ピトー管法
	水分	JIS Z 8808 吸収法
	ばいじん濃度	JIS Z 8808 円形ろ紙または円筒ろ紙法
	CO	JIS K 0098 赤外線吸収法(連続分析)
	O ₂	JIS K 0301 ジルコニア方式(連続分析)
	NO _x	JIS K 0104 化学発光方式(連続分析)

る都合上、分析に必要な灰の量を確保するために、2体の火葬に対して灰のサンプリングは1回としている。表-2に各火葬について詳細を示す。排ガスサンプリングは、全ての火葬場で排風機の後段で行った。具体的には、排気塔出口の前段にある測定孔、あるいは測定孔が無い場合は、排気塔出口から煙道に直接サンプリングチューブを挿入し実施した。

クロムの由来調査においては、表-1に併記した2施設の火葬場(施設K, L)において、1体の火葬について残骨灰、および集じん灰を採取した。

(3) 測定項目、および測定方法

測定項目、および測定方法の一覧を表-3に示す。

まず、基礎調査に関して、残骨灰、集じん灰は廃棄物ではなく、最終保管場所が周辺環境への影響を考慮したものになっているかどうかは不明である。したがって、灰中の六価クロムを対象に、土壤汚染対策法に基づいた環境省告示19号：含有量試験、および環境省告示18号：溶出量試験を行い、19号含有量と溶出量を評価した。灰採取前に実施した排ガス測定では、ばいじん、一酸化炭素、酸素、窒素酸化物の濃度を測定した。サンプリング時間は一火葬工程の燃焼時間の内、主燃焼バーナの点火時から、消火時までとし統一した。施設E～Gでは、排気系列が2炉1系列となっているが、この場合、2炉同時に稼働させず、1炉のみの稼働とした。一酸化炭素、酸素、二酸化炭素、窒素酸化物は連続分析計により測定した。また、あらかじめ、サンプリングポイントにおける排ガス中水分、流速を測定し、排ガス流量(湿り、乾き)を求めるとともに、排ガス温度を熱電対により測定した。

クロムの由来調査においては、まず、施設Kにおいて、1体の火葬を対象にステンレス製架台を主たるクロム源とした場合の火葬炉における全クロムのマスバランスを確認した。具体的には、ステンレス製架台について、その中の全クロム含有量、架台交換時期までの損耗量、および交換時期までの火葬遺体数を施設へのヒアリングにより調べ、火葬1体あ

たりステンレス架台から放出される全クロム量をINPUTとして算定した。また、OUTPUTとしては遺体1体の火葬によって生成する残骨灰、集じん灰由来の全クロム量を評価した。具体的には、灰の発生量を施設へのヒアリングにより調べ、施設Kにおいてサンプリングした残骨灰、および集じん灰について、その全クロム量を中性子放射化分析により分析した。

中性子放射化分析は、原子炉からの熱中性子を試料に照射し、励起された原子核の壊変に伴う放射線、特にγ線を半導体検出器で検出し、核種固有のγ線エネルギースペクトルの出現位置および強度から定性定量するものである。これまでに焼却飛灰中の全クロムを対象とし、その測定の妥当性が検証されている⁹⁾。灰はその約100mgをポリエチレン袋で二重に封入し、さらに外袋で封入して測定試料とした。照射は京都大学原子炉実験所圧気輸送管(照射孔:Pn-2)において熱中性子束密度 $2.75 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{sec})$ で行った。照射時間は3,600秒とし、冷却時間は約1ヶ月とした。γ線の計測には4096チャンネル波高分析器付きGe半導体検出器(EG&G社製:ORTEC Hp-Ge Ge COAXIAL DETECTOR)を用いた。計測時間は、7,200秒とした。フラックスモニタ法での校正用試料としては、都市ごみ焼却飛灰の標準試料であり、クロムについても保証値が示されているBCR176を用いた。また、特に集じん灰については、確認のために、土壤汚染対策法に基づいた環境省告示18号：溶出量試験により溶出量を評価した。

次に、ステンレス架台が、残骨灰や、集じん灰の六価クロム溶出量に与える影響について評価するため、ステンレス製架台を用いていない施設Lにて、1体の火葬について残骨灰、集じん灰をサンプリングし、土壤汚染対策法に基づいた環境省告示18号：溶出量試験により溶出量を評価した。なお、この調査は、国内の火葬炉では、ほとんどがステンレス製架台を用いて火葬されているため、海外の火葬炉(施設L)にて実施した。

3. 結果, および考察

(1) 基礎調査

a) 残骨灰, 集じん灰中六価クロムの19号含有量, および溶出量

表-4, および図-1にそれぞれのサンプルについて, 六価クロムの溶出量, 19号含有量の結果を示した. また, 表-5には筆者らの研究グループが, 2007年に4箇所の火葬炉について実施した調査結果⁴⁾も合わせて示した.

これらの図表から, 六価クロムの19号含有量に関しては, 本研究で対象とした10検体において5.7~880mg/kgであり, F残骨灰, F集じん灰, J残骨灰の3サンプルにおいて, 土壤汚染対策法により規定されている含有量基準(250mg/kg)を超過していた. 2007年の調査において, 残骨灰4検体, 集じん灰2検体について調査した結果では, 六価クロムの19号含有量

表-4 残骨灰, 集じん灰中六価クロムの19号含有量, 溶出量試験結果

年	施設	19号含有量(mg/kg)		溶出量(mg/L)	
		残骨灰	集じん灰	残骨灰	集じん灰
2007	A	250	140	30	16
	B	58	460	9.0	60
	C	110	—	13	—
	D	310	—	9.0	—
本研究	E	26	66	3.0	2.7
	F	580	880	60	96
	G	70	210	7.2	19
	H	140	—	7.1	—
	I	5.7	230	0.58	16
	J	670	—	5.9	—

※土壤汚染対策法施行規則 による六価クロムの含有量基準: 250mg/kg, 溶出量基準: 0.05mg/L
 ※2007年の六価クロムの19号含有量, 溶出量は文献⁴⁾

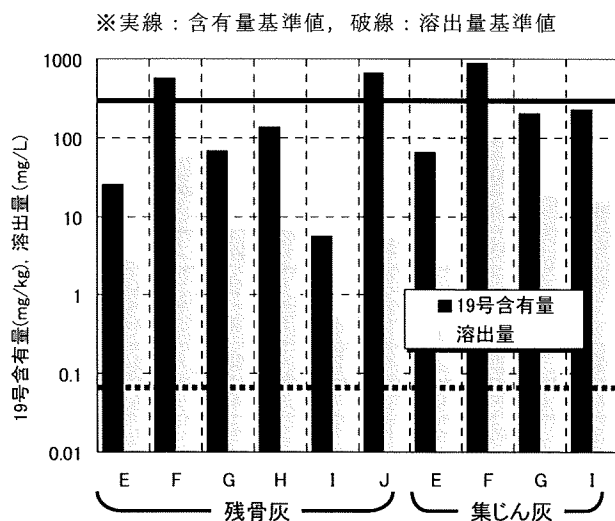


図-1 残骨灰, 集じん灰中六価クロムの19号含有量, 溶出量試験結果

は58~460mg/kgであり, 本研究結果の範囲内にあるとともに, 一部含有量基準を超過するケースもみられ, 同様の傾向であった. また全体として, 施設により大きく濃度は異なるが, 同施設においては集じん灰の方が高くなる傾向が見られた.

六価クロムの溶出量に関しては, 本研究で対象とした全ての残骨灰, 集じん灰において0.58~96mg/Lの範囲にあり, 土壤汚染対策法により規定されている溶出量基準(0.05mg/L)の10~1,900倍の濃度が検出された. この傾向は, 2007年の調査結果では, 六価クロムの溶出量は9.0~60mg/Lであり, 2007年, および本研究を通じて, 全てのサンプルで溶出量基準を大きく超過する結果となった. したがって, 残骨灰, 集じん灰中の六価クロムは, 特に溶出量について注意が必要であることが確認された.

b) 六価クロムの19号含有量と溶出量との関係

図-2に本研究での調査結果, および2007年の調査結果⁴⁾における, 各灰の六価クロムの19号含有量と溶出量との関係を示した. 図より一部の残骨灰について例外があるものの, 六価クロムの19号含有量と溶出量については, 残骨灰, 集じん灰に関わらず, 一定の相関関係が認められた. この関係は, アルカリ緩衝液(5mM炭酸ナトリウム+10mM炭酸水素ナトリウム溶液)による抽出量と, 蒸留水による溶出量との関係を意味している. 土壤汚染対策法に基づく環境省告示18号で規定される溶出量試験では, 溶出条件として溶媒体積: 試料重量が10:1で規定されていることから, 六価クロム溶出量の値を, サンプルの灰重量あたりの値に換算し, 19号含有量と比較したものを表-5に示した. また溶出率は, 19号含有量のうち溶出量換算値として溶出した六価クロムの割合を示す.

※2007年の六価クロムの19号含有量, 溶出量は文献⁴⁾

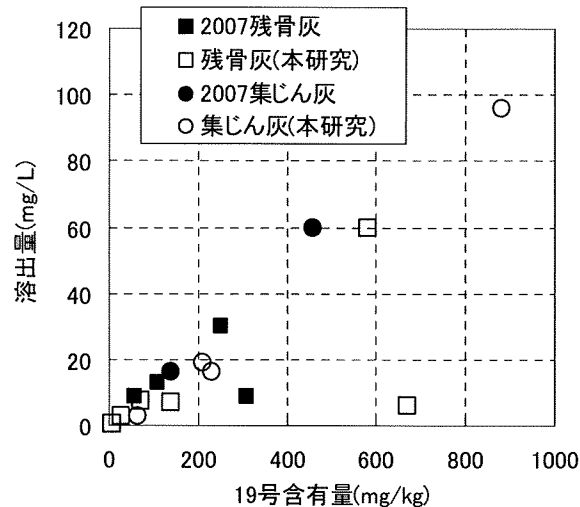


図-2 残骨灰, 集じん灰中六価クロムの19号含有量と溶出量との関係

表より、多くのサンプルについて、溶出率はほぼ100%程度となり、19号含有量として生成された六価クロムはそのほとんどが水溶性成分として存在し、溶出量として定量されていることが示唆された。すなわち、図-2に認められた相関関係は、六価クロム

表-5 残骨灰、集じん灰中六価クロムの19号含有量と溶出量から求めた溶出率

		19号含有量 a (mg/kg)	溶出量 b (mg/L)	溶出量換算値 c=b×10 (mg/kg)	溶出率 c/a×100 (%)
残骨灰	A(2007)	250	30	300	120
	B(2007)	58	9.0	90	155
	C(2007)	110	13	130	118
	D(2007)	310	9.0	90	29
	E	26	3.0	30	115
	F	580	60	600	103
	G	70	7.2	72	103
	H	140	7.1	71	51
	I	5.7	0.58	5.8	102
	J	670	5.9	59	9
集じん灰	A(2007)	140	16	160	114
	B(2007)	460	60	600	130
	E	66	2.7	27	41
	F	880	96	960	109
	G	210	19	190	90
	J	230	16	160	70

※2007年の六価クロムの19号含有量、溶出量は文献4)
 ※溶出量換算値c:b×10は、土壤汚染対策法で規定される溶出量試験において、溶媒(体積):試料(重量)が10:1であることによる。

の19号含有量と溶出量のほぼ1対1の対応によるものと位置づけることができる。この場合は、残骨灰、集じん灰に関わらず、その中の六価クロムの化学形態が類似したものになっていることが推察される。図-2の関係から溶出量を抑制するためには、まず、19号含有量を抑制しなければならないことが示唆され、それでも依然として溶出量が基準を超過する場合には不溶化処理が必要であると考えられる。

J残骨灰については、この関係性から大きく外れており、六価クロムの溶出率は10%以下であった。この灰に関しては、後述する排ガス組成から、この施設Jでの排ガス酸素濃度が15.8~16.6%であり、本研究における他の条件が17.4~20.0%であったこと、かつ、排ガス中のCO濃度が他の火葬炉に比べ高い傾向が見られたことから、炉内が比較的還元雰囲気であったために、生成される六価クロムの化学形態が変化している可能性があるが、原因ははっきりしなかった。ただし、この場合においても、含有量および、溶出量基準を超過しているため、対策として、炉内の雰囲気制御により酸素濃度を低下させ、六価クロムの生成を抑制するような対策には限界があると考えられる。

c) 排ガス組成

排ガス調査結果の一覧を表-6に示した。排ガス組成としてばいじん濃度、CO(平均値)、NOx(平均値)

表-6 基礎調査における排ガス調査結果

項目	火葬時間	燃料使用量	主燃焼室温度	再燃焼室温度	排ガス温度	排ガス流量		ばいじん	CO	NOx	CO ₂	O ₂	
						湿り	乾き						
単位	分	L-灯油, m ³ -都市ガス	°C	°C	°C	m ³ _N /h	m ³ _N /h	g/m ³ _N	ppm	ppm	%	%	
E	E-1	58	50(都市ガス)	912	800	144	9,540	9,160	<0.008	26	86	0.8	19.8
	E-2	57	49(都市ガス)	923	780	147	8,010	7,780	<0.006	56	110	1.2	19.4
F	F-1	66	69(都市ガス)	956	833	86	14,300	13,900	<0.007	<4	97	0.8	19.6
	F-2	59	51(都市ガス)	960	840				<0.006	<3	120	0.9	19.5
G	G-1	48	47(灯油)	N.A.	N.A.	88	14,600	14,200	0.005	<20	120	1.5	19.1
	G-2	68	65(灯油)	N.A.	N.A.				0.005	33	100	1.4	19.1
H	H-1	60	30(灯油)	1035	820	290	4,760	4,560	0.13	<30	110	2.3	18.1
	H-2	63	40(灯油)	980	830	296	3,770	3,590	0.16	<10	130	2.4	17.9
I	I-1	59	N.A.(都市ガス)	N.A.	N.A.	247	3,890	3,700	0.15	180	84	2.5	17.4
	I-2	64	N.A.(都市ガス)	N.A.	N.A.	230	5,150	4,860	0.10	<40	93	2.0	18.1
J	J-1	84	N.A.(灯油)	N.A.	N.A.	400	4,440	4,130	0.19	270	82	3.8	15.8
	J-2	64	N.A.(灯油)	N.A.	N.A.				0.17	77	110	1.9	16.6
最大値	84	—	—	—	400	14,600	14,200	0.19	270	130	3.8	19.8	
最小値	48	—	—	—	86	3,770	3,590	0.005	<3	82	0.8	15.8	
中央値	62	—	—	—	230	5,150	4,860	0.054	32	105	1.7	18.6	
算術平均値	63	—	—	—	214	8,200	7,320	0.078	32	104	1.8	18.4	
幾何平均値	62	—	—	—	189	7,270	6,970	0.030	30	102	1.6	18.3	

※定量下限値以下の値については、定量下限値とみなし、中央値、算術平均値、幾何平均値を算出
 ※ばいじん、CO、NOxについてはO₂12%換算値
 ※N.A.: Not Analyzed

についてはすべて O_2 12% 換算値で示した。

ばいじん濃度は、バグフィルターおよび触媒や活性炭吸着設備等の高度排ガス処理設備が設置されている施設 E-G においては、 0.008 g/m^3_N 以下であり低く保たれていたが、集じん機のない施設 H、および施設 J では、 $0.13 \sim 0.19 \text{ g/m}^3_N$ であり、高い値を示した。施設 I においては集じん機としてスクリーン式が設置されていたが、 $0.10 \sim 0.15 \text{ g/m}^3_N$ であり、集じん機のないケースとほぼ同等の値を示した。したがって、スクリーン式では、高い集じん効率は期待できないといえる。

NO_x に関しては、全ての施設で $82 \sim 130 \text{ ppm}$ であり施設ごとに大きな差は見られなかった。

CO に関しては、施設 J で比較的高い傾向を示し、最大 270 ppm であったが、各実験で大きく変動し、排ガス処理の影響等はあまりみられなかった。CO には、炉構造に加えて、遺体の状況や燃焼状況が大きく影響するものと考えられる。

d) 六価クロムの排ガス経路での排出量の推定

火葬炉に由来する灰中の六価クロムに関しては、2007 年の調査⁴⁾、および本研究にて、全ての残骨灰、および集じん灰について溶出量基準を超過することが明らかとなった。火葬炉の周辺環境への直接的な影響を考えた場合、大気への排出量を把握しておくことが重要である。

ここでは、バグフィルターに加え、触媒や活性炭吸着設備等の高度排ガス処理設備が設置された施設 E-G と、集じん機のない、あるいは集じん効率の低い施設 H-J における排ガスを經由した火葬炉外への六価クロムの排出量を推定し、バグフィルターおよび高度排ガス処理設備の導入が、六価クロムの排出抑制に与える効果を明らかにすることとした。具体的には、以下の方法により、火葬 1 体あたりの六価クロム排出量を推定した。

まず、六価クロムに関しては、表 -6 に示す排ガス温度 $86 \sim 400^\circ\text{C}$ においてはそのほとんどが固体で存在すると考えられるため⁷⁾、集じん機や、触媒装置等の排ガス処理装置で捕集しきれなかったばいじんが、大気へ排出される際に、そのばいじんに含まれる六価クロム量を大気排出量とした。また、ばいじん中六価クロム濃度としては、各施設の集じん灰中六価クロムの 19 号含有量を用いた。したがって灰中の全六価クロムでないことに注意を要する。集じん機がなく、19 号含有量が把握できない場合には、ばいじん中六価クロム濃度は、集じん機を有する施設における 19 号含有量の最大値～最小値の範囲を用いた。

以上の前提により、以下の (1) 式にしたがって、火葬炉排ガス出口付近における排ガス中六価クロム濃

度： $G_{Cr(VI)}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3_N$) を求めた。

$$G_{Cr(VI)} = G_{DUST} \cdot C_{Cr(VI)} \quad (1)$$

G_{DUST} : 排ガスばいじん濃度 (g/m^3_N)
(O_2 12% 換算)

$C_{Cr(VI)}$: 集じん灰の中六価クロムの
19 号含有量 (μg)

次に (2) 式により、求めた $G_{Cr(VI)}$ に各施設での火葬 1 体あたりの乾き排ガス量を乗じ、火葬 1 体あたりの六価クロム排出量： $M_{Cr(VI)}$ ($\text{mg}/\text{体}$) を推定した。

$$M_{Cr(VI)} = G_{Cr(VI)} \cdot 10^3 \cdot V \cdot t / 60 \quad (2)$$

V : 乾き排ガス量 (m^3_N/h) (O_2 12% 換算)

t : 火葬時間 ($\text{min}/\text{体}$)

なお、各施設における、t : 火葬時間、V : 排ガス量 (O_2 12% 換算)、 G_{DUST} : 排ガス中ばいじん濃度は 2 体の火葬の平均値を用いた。

試算結果を表 -7 に示した。まず、排ガス中の六価クロム濃度 (19 号含有量ベース) は、バグフィルター + 触媒装置、あるいは活性炭吸着設備が設置され、2007 年に調査した施設 A ~ B、本研究における施設 E ~ G において、 O_2 12% 換算値で、 $0.23 \sim 3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3_N$ 程度と見積もられた。A. Santarsiero らは、イタリアのバグフィルターを有する火葬炉において、煙突の直前で排ガス中のばいじんに含まれるクロムを、酸分解後 ICP-MS で測定し、排ガス中全クロム濃度を求め、その値が、 $6.0 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3_N$ (O_2 11% 換算値) であったと報告している⁸⁾。この値は O_2 12% 換算値では $5.4 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3_N$ となる。後述するが、施設 K の集じん灰では中性子放射化分析による全クロム濃度は表 -9 に示すように $1,820 \text{ mg}/\text{kg}$ であり、その際の六価クロムの溶出量は $15 \text{ mg}/\text{L}$ であった。この溶出量を灰重量基準に換算すると $150 \text{ mg}/\text{kg}$ となる。表 -5 の溶出率より、灰重量基準の溶出量換算値と、19 号含有量との比は、基礎調査で調査した 4 種の集じん灰で 41% ~ 130% の範囲にあったことから、施設 K の集じん灰中六価クロムの 19 号含有量は、概ね $115 \sim 367 \text{ mg}/\text{kg}$ であると推定できる。この値は、中性子放射化分析により求めた全クロム量： $1,820 \text{ mg}/\text{kg}$ の 6.3% ~ 20.1% に対応する。全クロムの測定値としては、酸分解後 ICP-MS による測定と、中性子放射化分析の値はほぼ対応すると考えられるため、A. Santarsiero らの報告値の O_2 12% 換算値： $5.4 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3_N$ の 6.3% ~ 20.1% が、排ガス中の六価クロム濃度 (19 号含有量ベース) に相当し、この

表-7 火葬炉における排ガス中六価クロム濃度と排出量の推定

項目	火葬時間	排ガス流量 (乾き)	ばいじん	集じん灰中 六価クロム 19号含有量	排ガス中 六価クロム濃度	六価クロム 排出量	備考: 排ガス処理	
単位	分	m ³ _N /h	g/m ³ _N	mg/kg	μg/m ³ _N	mg/体		
2007	A	44	2,100	<0.006	140	0.42	0.65	BF+SCR
	B	65	2,510	<0.017	460	3.8	10	BF+AC
	C	69	1,730	0.155	(66-880)	75	140	集じん機なし
	D	81	2,130	0.0525	(66-880)	25	70	集じん機なし
本研究	E	58	1,320	<0.007	66	0.23	0.15	BF+SCR
	F	63	2,240	<0.007	880	2.9	3.3	BF+SCR
	G	55	3,000	0.005	210	1.1	2.9	BF+AC
	H	62	1,360	0.145	(66-880)	70	97	集じん機なし
	I	62	1,550	0.125	230	29	46	SC
	J	74	2,200	0.180	(66-880)	86	230	集じん機なし

※2007年の火葬データ，集じん灰の六価クロム19号含有量は文献4)

※火葬時間，乾き排ガス流量，ばいじんについては各施設2体分の火葬の平均値

※乾き排ガス流量，ばいじんについてはO₂12%換算値

※集じん灰六価クロム19号含有量()内は，集じん機がなくデータが無いため，集じん機を有する施設の最大～最小値

※排ガス中六価クロム濃度，六価クロム排出量は，六価クロム19号含有量ベースであり，各施設の平均値として算出

※BF：バグフィルター，SCR：触媒装置，AC：活性炭吸着設備，SC：スクリーン式集じん機

値は，0.37～1.2μg/m³_Nと見積もられた。したがって，本研究の施設E～Gの予測値である0.23～3.8μg/m³_Nとほぼ同じオーダーであると推測される。

集じん機が設置されていない，あるいは集じん効率が低い施設である，2007年の施設C～D，および本研究で調査した施設H～Jにおいては，排ガス中の六価クロム濃度(19号含有量ベース)は25～86μg/m³_Nの範囲にあると推定され，少なくともバグフィルターや高度排ガス処理設備が設置された施設よりも高い濃度レベルにあると推測される。

火葬1体あたりの六価クロム排出係数(19号含有量ベース)に関しては，バグフィルター，および高度排ガス処理設備を有する2007年の施設A～B，本研究で調査した施設E～Gにおいて0.15～10mg/体と見積もられた。また，集じん機を有しない，あるいはあっても集じん効率が低い，2007年の施設C～D，および本研究で調査した施設H～Jにおいては，46～230mg/体と見積もられた。双方の比較により，六価クロム排出量(19号含有量ベース)は，集じん効率の高いバグフィルターや高度排ガス処理設備が設置されることにより，集じん機を有しない，あるいは集じん効率が低い場合に比較して，78～99%低減されている。すなわち，排ガスを経由した火葬炉外への六価クロムの排出が，主としてダイオキシン排出抑制を目的に設置されたバグフィルターや高度排ガス処理設備により抑制されていると考えられた。

以上より，排出量に関しては，バグフィルター等の高度排ガス処理設備により，抑制されていることが考えられた。しかし，排出濃度として考えた場合には，我が国では，大気中の六価クロムは大気汚染

防止法により要監視項目としては挙げられているが，排出基準や環境基準が現時点で存在しないため⁹⁾，これらの排出濃度について安全性を評価することができない。また，周辺土壌環境への影響についても，本研究では対象としなかったため，将来的には，より詳細な調査が必要である。

e) 火葬炉における全クロムの排出係数

これまでの結果から，火葬炉から大気への全クロムの排出係数を算出し，他燃焼発生源の排出係数と比較検討した。集じん灰中の全クロムに対する六価クロム(19号含有量ベース)の割合は，前述の検討により，6.3%～20.1%であると推定された。この値により，火葬1体あたりの六価クロム排出係数(19号含有量ベース)を，全クロムの排出係数に換算した。また，日本人の平均寿命¹⁰⁾，年齢別の体重¹¹⁾，死亡者数の男女割合¹²⁾から平均的な遺体の体重は53.5kg/体と推定され，火葬による全クロム排出量を遺体重量あたりの排出係数に換算した。様々な燃焼発生源の全クロムの排出係数は，USEPA，AP42で多く報告されており，ここから代表的な燃焼発生源を選定し^{13)～18)}，火葬との比較を行った。燃焼発生源の選定は，中西，小野が2004年の国内における六価クロムの大気への排出インベントリーを見積もっており¹⁹⁾，それを参考にした。

表-8に，火葬，および他の燃焼発生源から大気への全クロムの排出係数を示した。まず，排ガス処理のある場合を見ると，火葬炉からの全クロムの排出係数は0.014～3.0mg/kgであり，石炭火力発電，廃棄物焼却，下水汚泥焼却とほぼ同オーダーであった。一方，排ガス処理のない場合，火葬の排出係数は，

表-8 火葬, その他燃焼発生源から大気への全クロム排出係数(mg/kg)

項目	排ガス処理なし	排ガス処理あり	備考	文献
石炭火力発電	14	0.13	排ガス処理なし:無煙炭 排ガス処理あり:瀝青炭, 亜瀝青炭, 褐炭	13),14)
廃棄物焼却	4.49	0.015~0.13		15)
下水汚泥焼却	14	0.01~9.8		16)
耐火レンガ製造	130~350	64	Cr-Mgレンガ製造	17)
セメント製造	-	0.0039~0.070		18)
火葬	4.3~69	0.014~3.0	排ガス処理なし:施設A, B, E~G 排ガス処理あり:施設C, D, H~J	本研究

4.3 ~ 69mg/kg であり, 石炭火力発電, 廃棄物焼却, 下水汚泥焼却の 4.5 ~ 14mg/kg と同程度か, それよりも高くなる可能性があることが示唆された。クロムの由来については後段で検討するが, 燃焼対象物としては, 石炭や廃棄物, 下水汚泥に比較して遺体や副葬品, 棺, 燃料に由来するクロムが高くなるとは考えにくく, 従来からクロム源と推測されているステンレス製の架台⁹⁾などの影響があると考えられる。

(2) クロムの由来調査

a) 火葬炉における全クロムのマスバランス

火葬における残骨灰, および集じん灰中六価クロムの由来は主に, 棺を乗せるステンレス製(SUS310S)架台であると推測されている⁹⁾。この根拠としては, 以下のようなことが考えられる。

まず, SUS310S のようなステンレス鋼では表面に Cr_2O_3 のような不動態膜が形成され, これにより高温・酸化雰囲気中で内部構成元素の酸化が防がれ強度が保持されているが²⁰⁾, 高温・酸化雰囲気中で塩基性のアルカリ土類金属化合物により, Cr_2O_3 は容易に酸化され, 水溶性の六価クロム化合物を形成するとされる²¹⁾。人骨には主成分であるヒドロキシアパタイト ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) に加え, マグネシウム, 炭酸イオンなどが含まれているとともに²²⁾, 台車の保護剤として, カルシウムを含むキャストブル粉を用いている施設もあり, これらが高温・酸化雰囲気中で六価クロム生成能を有すると考えられる。ただし, 火葬炉内における耐火物には, Cr_2O_3 が含まれる可能性があり, これが六価クロムの由来になっていることも否定できない。そこで, 火葬における全クロムのマスバランスを明らかにすることで, 残骨灰, および集じん灰中六価クロムの由来を明らかにできると考えた。具体的には, 施設Kにおいて, ステンレス製架台が残骨灰, および集じん灰中六価クロムの由来とした時の火葬炉における全クロムのマスバランスを検討した。この場合, 以下(3)式による全クロ

ムの収支式が概ね成立すると考えられる。

$$M_{Scr} = M_{Bcr} + M_{Fcr} \quad (3)$$

M_{Scr} : 火葬1体あたりのステンレス製架台中全クロムの減少量(mg/体)

M_{Bcr} : 火葬1体あたりの残骨灰に由来する全クロム量(mg/体)

M_{Fcr} : 火葬1体あたりの集じん灰に由来する全クロム量(mg/体)

M_{Scr} : 火葬1体あたりのステンレス製架台中クロムの減少量は, 図-3に示す施設Kのステンレス製架台の交換時期までの損耗量を考え, 以下の(4)式により求めることができる。

$$M_{Scr} = \pi (S_{U1}^2 - S_{U0}^2) \cdot L \cdot \rho \cdot Scr \cdot 10^6 / N \quad (4)$$

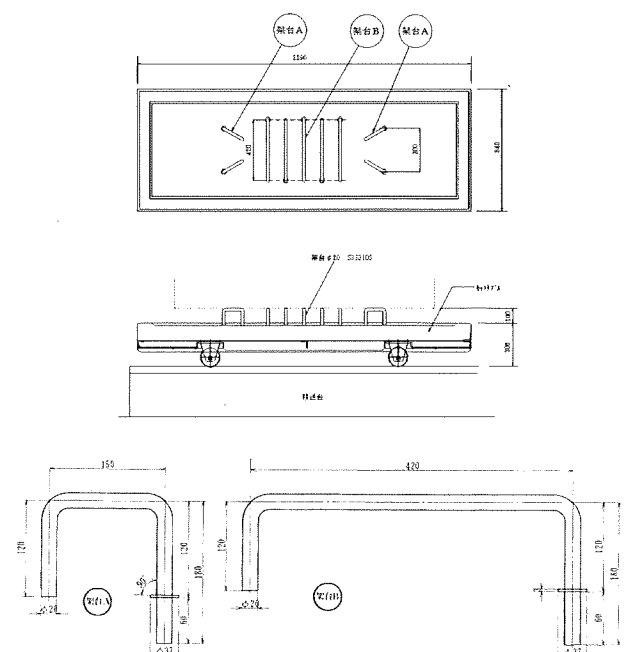


図-3 施設Kにおけるステンレス製架台

表-9 火葬炉における全クロムのマスバランス算出に用いた諸係数

項目	記号	単位	値	備考
ステンレス製架台の初期半径	SUi	m	0.010	図-3より
ステンレス製架台の交換時期における半径	SUo	m	0.005	施設K、ステンレス架台交換基準より
ステンレス製架台の総長さ	L	m	4.86	図-3より算出
ステンレス製架台:SUS310Sの比重	ρ	kg/m ³	7,870	鋼材検査証明書より
ステンレス製架台:全クロム含有割合	Scr	wt%	24	鋼材検査証明書より
ステンレス製架台の交換時期までの火葬遺体数	N	体	180	施設K運転データのヒアリングより
残骨灰中の全クロム濃度	Bcr	mg/kg	4,210	中性子放射化分析結果(平均値:N=3)
火葬1体あたりの残骨灰発生量	MB	kg/体	3	施設K運転データのヒアリングより
集じん灰中の全クロム濃度	Fcr	mg/kg	1,820	中性子放射化分析結果(平均値:N=2)
バグフィルター入口ばいじん濃度	Din	g/m ³ _N	0.05	施設K運転データのヒアリングより
バグフィルター出口ばいじん濃度	Dout	g/m ³ _N	0.01	施設K運転データのヒアリングより
火葬1体あたりの排ガス量	Vb	m ³ _N /体	12,000	施設K運転データのヒアリングより

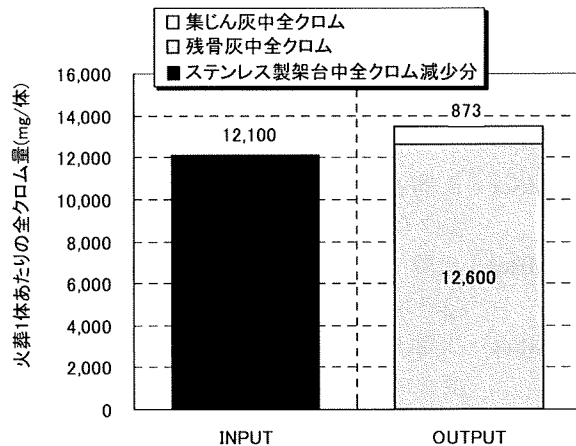


図-4 1体の火葬における全クロムのマスバランス算出結果

SUi : ステンレス製架台の初期半径 (m)

SUo : ステンレス製架台の交換時期における半径 (m)

L : ステンレス製架台の総長さ (m)

ρ : ステンレス製架台 : SUS310S の比重 (kg/m³)

Scr : ステンレス製架台 : SUS310S 中全クロム含有割合 (wt%)

N : ステンレス製架台の交換時期までの火葬遺体数 (体)

MBcr : 火葬1体あたりの残骨灰に由来する全クロム量は、以下の(5)式により求めることができる。

$$MBcr = Bcr \cdot MB \quad (5)$$

Bcr : 残骨灰全クロム濃度 (mg/kg)

MB : 火葬1体あたりの残骨灰発生量 (kg/体)

MFcr : 火葬1体あたりの集じん灰に由来する全クロム量は、以下の(6)式により求めることができる。

$$MFcr = Fcr \cdot (Din - Dout) \cdot 10^3 \cdot Vb \quad (6)$$

Fcr : 集じん灰中の全クロム濃度 (mg/kg)

Din : バグフィルター入口ばいじん濃度 (g/m³_N)

Dout : バグフィルター出口ばいじん濃度 (g/m³_N)

Vb : 火葬1体あたりの排ガス量 (m³_N/体)

これらの値を求めるために用いたデータ、および測定値を表-9にまとめて示した。またこれらの式にしたがって求めた施設Kにおける火葬炉における全クロムのマスバランスを図-4に示す。図-4より、ステンレス架台中全クロムの減少分は、12,100mg/体であるのに対し、残骨灰、および集じん灰の全クロム量は、12,600mg/体、および863mg/体であり、わずかにOUTPUTが高くなったが、その割合は110%程度であり、概ね整合する結果となった。

INPUTとしてステンレス製架台以外には人体由来や、燃料由来、副葬品、炉内耐火物、熱電対が考えられる。人体中全クロムは体重70kgの成人男性で約2mg/体、存在するとされることから²³⁾、12,100mg/体に対して無視できると考えられる。燃料は表-1に示したように灯油、都市ガスが用いられているが、都市ガス中に全クロムはほとんど含まれないと考えられる。また、灯油中の全クロムは、ICP-MSでの測定値として、62.4 μ g/Lとの報告がある²⁴⁾。表-6における火葬での使用量は約50L/体であるので、灯油由来の全クロムは3.1mg/体となる。したがって、これについても無視できると考えられる。副葬品や炉内耐火物、熱電対に関しては、クロム含有量や、火葬における減少量のデータが得られなかったため、はっきりしないが、残骨灰、集じん灰中の全クロムがステンレス架台の減少量でほぼ説明できることから、比較的影響は少ないと考えた。

またOUTPUTとして、残骨灰中の全クロム濃度は集じん灰に比較的高く、残骨灰の発生量はこの結果に大きく影響している。火葬1体あたりの残骨灰発生量は、表-9に示すように、施設へのヒアリングにより3kg/体としている。島崎は、体重60kgの遺体の