

ん除去率は、-233～-80%であり、熱交換器部分に堆積したばいじん、あるいは熱交換器表面の材質が剥離し、熱交換器出口でのばいじん濃度が増加したことに由来すると推測されたが、ダイオキシン類除去率は、このばいじん除去率よりも、大きく下回っていた。これは、熱交換器部分でのダイオキシン類の増加要因が、熱交換器出口のばいじんに含まれるダイオキシン類の寄与以外に存在することを意味する。また、表C.1より、熱交換器部分での温度は、195～825°Cの範囲にあることが考えられることから、熱交換器部分で、ダイオキシン類の再合成が生じていると考えられた。後段のバグフィルターにおいては、ダイオキシン類の除去率は-43%、毒性当量として-50%であり、ほとんど除去されていなかった。このバグフィルターにおけるばいじんの除去率は表C.1.1から98%以上であったことから、バグフィルター入口ではダイオキシン類のほとんどがガス状で存在し、集じんとともに除去されることなく、通過したものと推測される。結果として、バグフィルターで除去されなかったダイオキシン類はその93%が触媒装置で除去されており、触媒装置出口におけるダイオキシン類濃度は、実濃度で $3.26 \text{ ng/m}^3_{\text{N}}$ 、毒性当量で $0.12 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 程度に抑えられた。ただし、この値は、同施設の再燃焼炉出口のダイオキシン類濃度 $3.77 \text{ ng/m}^3_{\text{N}}$ 、 $0.038 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{m}^3_{\text{N}}$ に比較してほとんど除去されておらず、熱交換器での再合成の影響を受けて、バグフィルターがダイオキシン類の除去に効果的に作用していないことが明らかである。火葬炉における熱交換器の使用には、設備をコンパクトにできる利点があるものの、ばいじんの堆積や、その温度管理に注意する必要がある。熱交換器での再合成により増加したダイオキシン類はバグフィルターでも除去できない可能性があり、セーフティネットとしての触媒装置を併用することが望ましいと考えられる。

施設Cにおいては、再燃焼炉出口のダイオキシン類濃度が $39.8 \sim 91.2 \text{ ng/m}^3_{\text{N}}$ であり、施設A、Bよりも高い傾向にあった。CO濃度についても施設Cでは高く、2回目は約300ppmにも達する傾向にあったことから、主燃焼炉、再燃焼炉における燃焼状態が施設A、Bに比較して良くなかったものと考えられる。次に、施設Cでは、排ガス冷却は空気混合により行っており、排ガス冷却器部分で施設Bの熱交換器の場合のようなダイオキシン類の再合成はみられなかった。むしろダイオキシン類は実濃度で60～71%、毒性当量で69～89%除去されていた。また後段のバグフィルターにおいても実濃度で22～54%、毒性当量で58～70%除去されていた。さらに後段の活性炭吸着設備においては、大きく値がばらついたが、実濃度で-20～39%、毒性当量で3.9～48%の除去であった。都市ごみ焼却施設における活性炭吸着設備(充てん塔式)においては、150°Cにおけるダイオキシン類の除去率は毒性当量で80%以上であるとされる²³⁾。また、2007調査にて実施した同火葬場でのダイオキシン類測定結果では、活性炭吸着設備出口のダイオキシン類濃度は $0.009 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下であり¹⁶⁾、高度にダイオキシン類が除去されていたと考えられるが、本研究の結果

とは異なっている可能性が高い。原因としては、活性炭吸着設備において、活性炭が吸着破過状態に近かったため、除去率が低くなった可能性が考えられた。

以上の結果からは、熱交換器を設備として有している場合、ダイオキシン類の再合成に注意することが必要であり、再合成されたダイオキシン類はバグフィルターでの除去が望めないことから、触媒装置等を設置することが重要である。また、熱交換器のない設備ではバグフィルターにてダイオキシン類は毒性当量として、58%以上除去できる。触媒装置においても90%以上のダイオキシン類の除去が期待できるが、触媒入口のダイオキシン類濃度が低い場合濃度が逆転するケースがあるため注意する必要がある。活性炭吸着設備においては、本来高いダイオキシン類除去率が期待できるが、活性炭の吸着破過状況を把握し、適切に交換することが重要であると考えられた。

図 C.1.1 において PCDDs、PCDFs、および co-PCBs の実濃度を比較すると、施設 A ではバグフィルター入口の co-PCBs の占める割合 80% 以上となり、他の施設に比較して高かった。このケースを除き、施設 B、施設 C においては、バグフィルター前後における co-PCBs の割合が、ほとんど同じか、むしろバグフィルター出口で増加する傾向が見られた。これは、バグフィルターや触媒装置等により、ダイオキシン類全体として濃度は減少するが、co-PCBs は PCDDs/DFs に比較して、相対的に除去しにくいことを意味している。あまり問題があるわけではないが、一般的に PCDDs/DFs よりも、co-PCBs の方が蒸気圧が高いとされ²⁴⁾、凝縮、あるいは吸着等による除去効果が働きにくくなっていることによると考えられた。

次に、各サンプルでの PCDDs、PCDFs の同族体分布を施設毎に図 C.3.2(1)、図 C.3.2(2) に示した。同族体分布の傾向としては、PCDFs については施設 A と施設 C で、4 塩素化物 (TeCDFs)、あるいは 5 塩素化物 (PeCDFs) の濃度が最も高く、高塩素化物になるほど濃度が低くなるパターンであり、一般的な燃焼起源のパターンを示した。施設 B においては、再燃焼後の値は、施設 A や施設 C と同様のパターンであったが、熱交換器で濃度が増加した後は、6 塩素化物 (HxCDFs)、あるいは 5 塩素化物 (PeCDFs) の濃度が最も高く、山形の分布に変化した。ダイオキシン類の再合成では、一般に同族体分布は、高塩素化側にシフトするとされていることから^{17)、25)}、ダイオキシン類の再合成の影響を大きく受けているものと推測された。

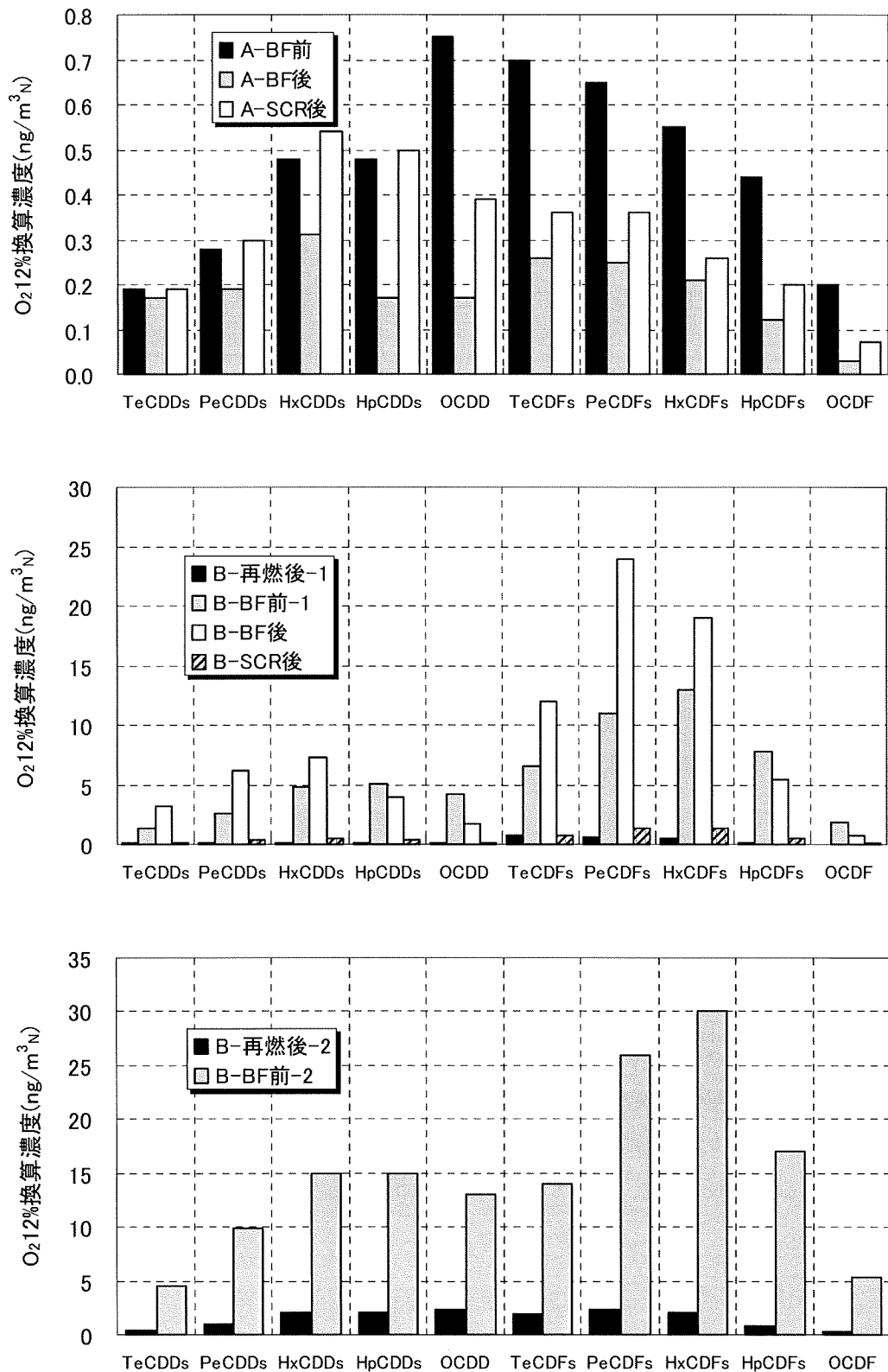
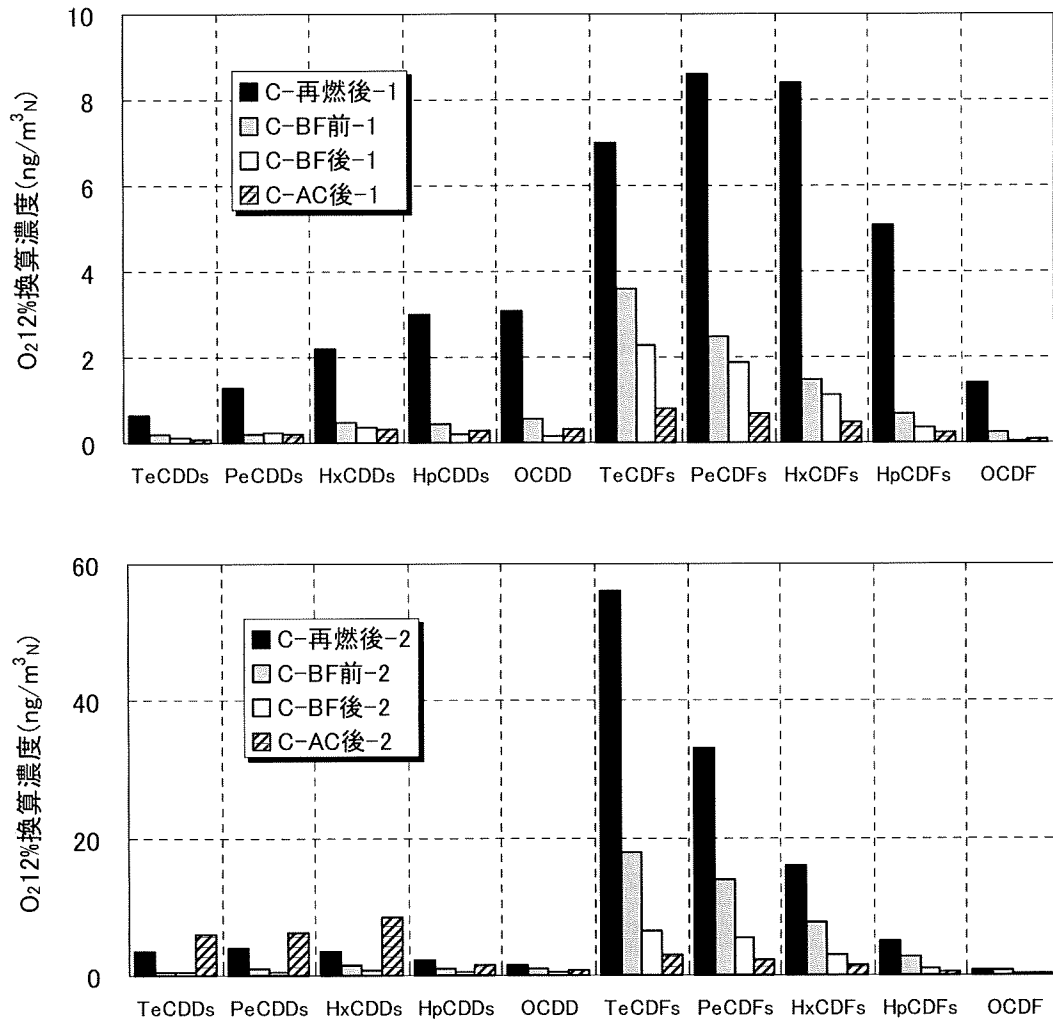


図 C.3.2(1) 排ガス中 PCDDs/DFs 濃度の同族体分布 (施設 A、B)



図C.3.2(2) 排ガス中PCDDs/DFs濃度の同族体分布(施設C)

PCDDsについては、1999 調査結果、2007～2008 調査結果から、以下の大きく3つのパターンに分かれることがわかっている^{3)、4)、16)、17)}。

- ① 8塩素化物(OCDD)が最も多く、4塩素化(TeCDDs)が最も少ないパターン。
：比較的新しい火葬炉で多く見られる。
- ② 6塩素化物(HxCDDs)が最も多く、山型の分布を示すパターン。
：都市ごみ焼却排ガスに多いパターン、火葬炉でも新旧に関わらず見られる。
- ③ 4塩素化物(TeCDDs)が最も多く、8塩素化物(OCDD)が最も少ないパターン。
：比較的古い火葬炉で多く見られる。

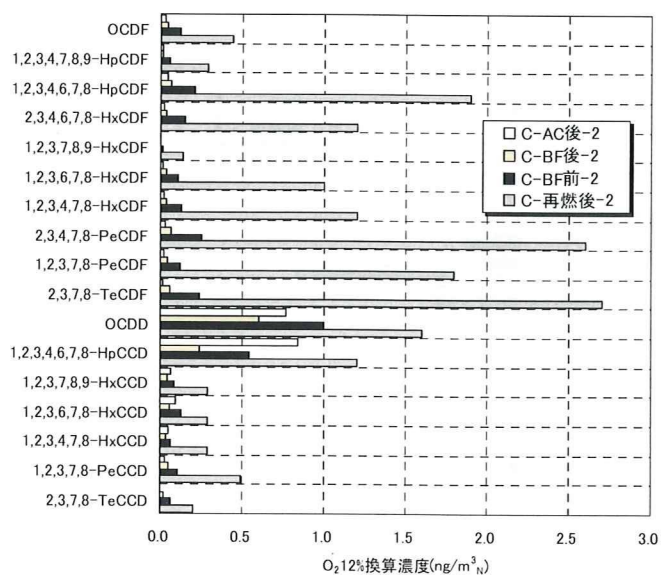
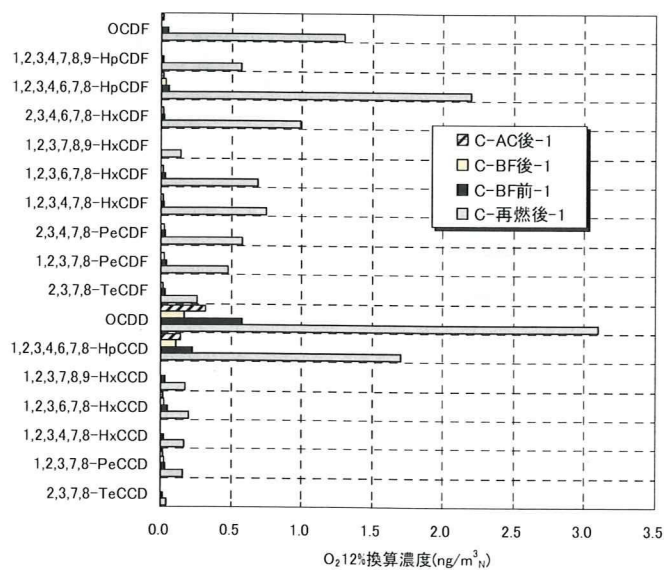
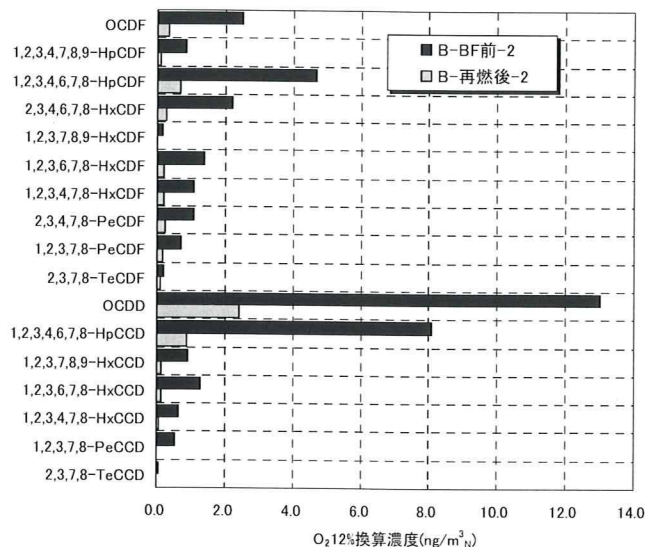
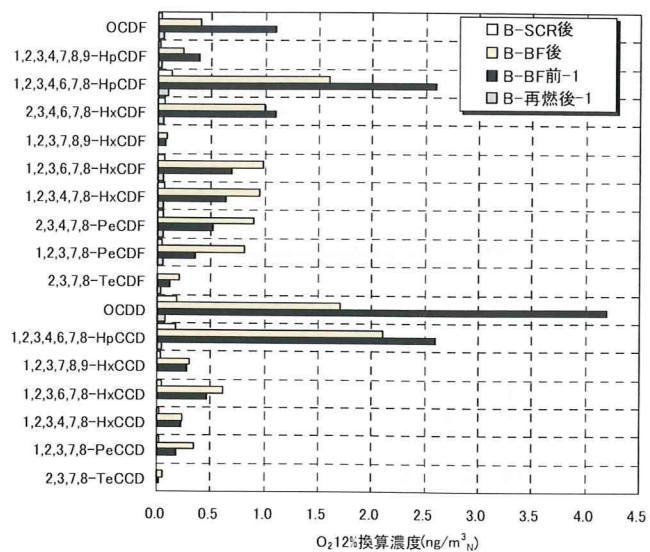
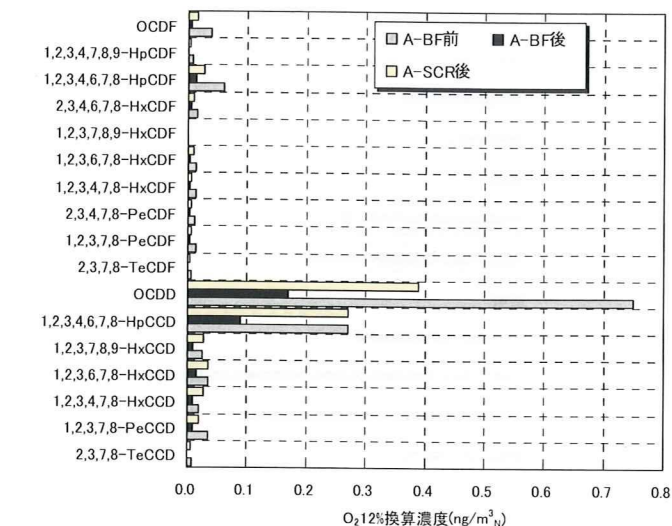
本研究で見られたケースとしては、施設A、Bでは、パターン①、②が見られ、施設Cにおいては、パターン①、②に加えて、2回目の再燃焼炉出口ではパターン③が見られた。

本研究で対象とした3施設は比較的新しい施設であり、概ね上記の傾向と合致したが、施設Cの2回目のみ傾向が異なった。前述したように、施設Cの2回目では排ガス中のCO濃度が高く、炉における燃焼状態があまり良くなかったこと、比較的古い炉ではCO濃度が10～1000ppm程度であり、比較的高い傾向にあること^{3), 4)}、を考えると、パターン③の発現には、炉における燃焼状態が影響しているものと推測された。

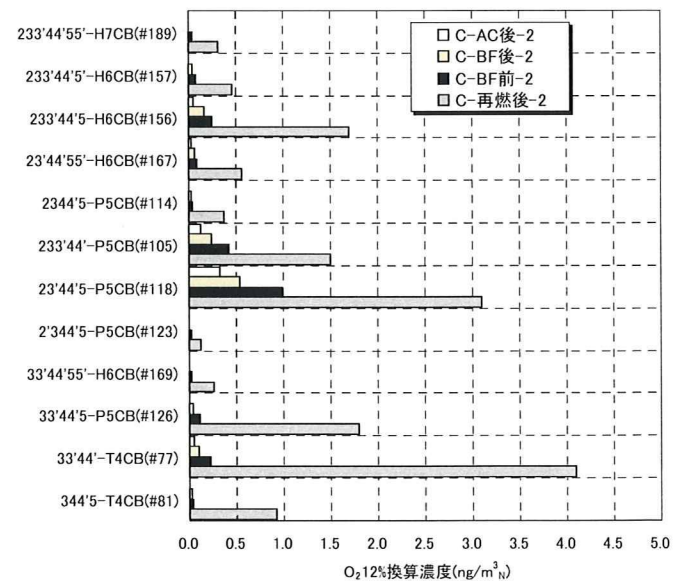
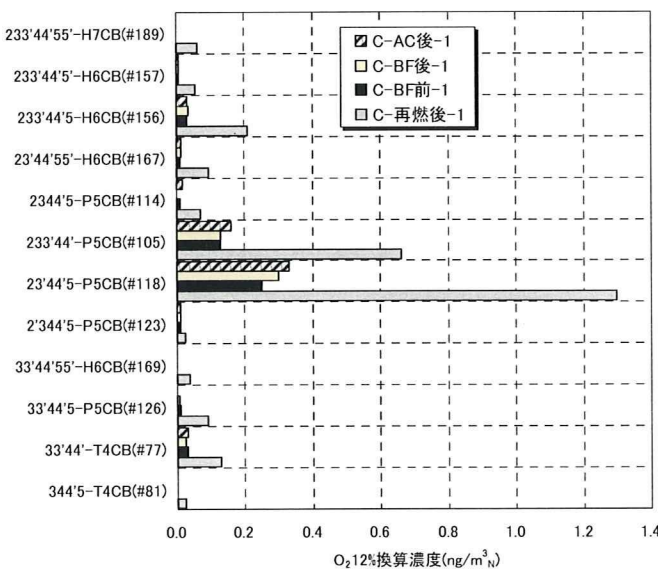
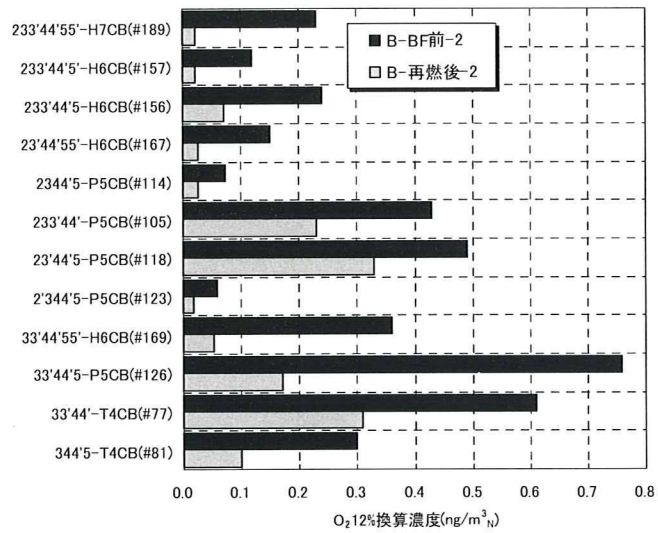
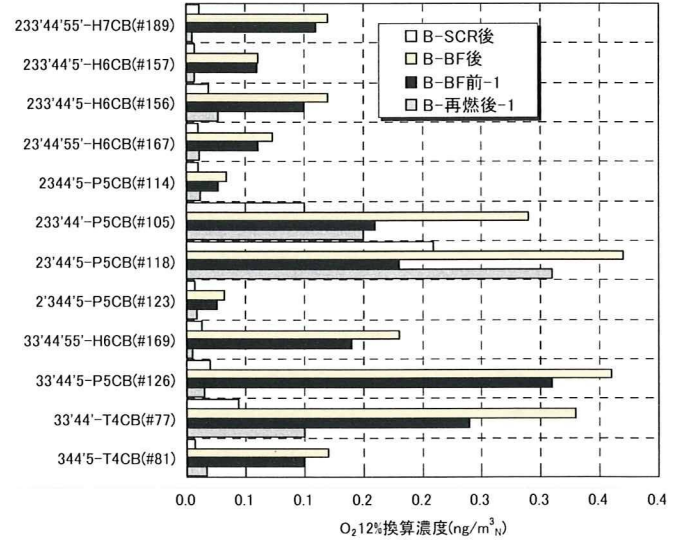
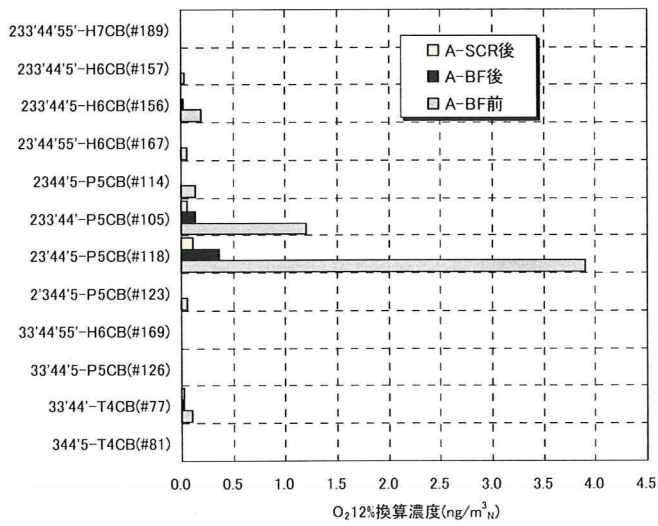
次にPCDDsとPCDFsの17種、およびco-PCBsの12種の異性体分布を、それぞれ図C.3.3、図C.3.4に示した。PCDDsでは多くの場合、低塩素化物よりも、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、OCDDの濃度が高い傾向にあった。これは、1999調査結果^{3), 4)}、および2007～2008調査結果^{16), 17)}の傾向と同様であった。

PCDFsでは、PCDDsほど顕著ではないが、多くの施設で、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF、OCDF等の高塩素化物の濃度が高い傾向が見られた。ただし、施設Cの2回目において、2,3,7,8-TeCDF、1,2,3,7,8-PeCDFs、2,3,4,7,8-PeCDFsについても濃度が高くなる傾向を示した。この傾向は、2007調査結果¹⁶⁾において、比較的古い施設の2施設や、1999調査結果⁴⁾のほとんどの施設についてもその傾向が見られており、PCDDの同族体パターンと同様に、炉における燃焼状態と関連しているものと考えられた。

co-PCBsの異性体分布に関しては、全てのサンプルで、ノンオルト体であるT4CB(#77)、P5CB(#126)、モノオルト体であるP5CB(#118)、P5CB(#105)、が高い傾向が見られ、ついで、H6CB(#156)が比較的高くなる傾向が見られた。特に、ダイオキシン類の再合成が顕著であった施設Bにおいては、P5CB(#126)の増加が顕著であった。都市ごみ焼却飛灰において、ダイオキシン類の*de novo*合成実験では、P5CB(#126)が、P5CB(#118)よりも優先的に生成することが報告されており^{26), 27)}、本研究においても集じん灰中で少なからず、*de novo*合成が生じている可能性が確認された。これらの傾向は、2007～2008調査結果^{16), 17)}と同様の傾向であった。



図C.3.3 排ガス中PCDDs/DFs濃度の異性体分布



図C.3.4 排ガス中co-PCBs濃度の異性体分布

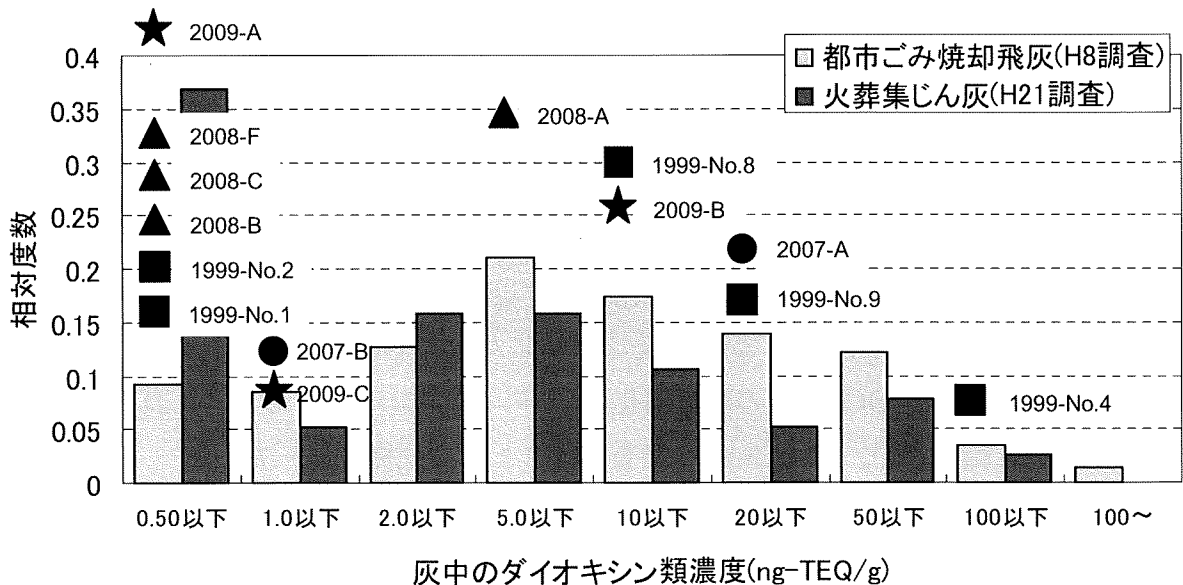
4. 残骨灰、集じん灰中のダイオキシン類濃度

残骨灰、集じん灰は全ての施設において採取し、ダイオキシン類を測定した。

残骨灰中のダイオキシン類の濃度範囲は、実測濃度で0.024～0.64 ng/g、毒性等量で0.00000056～0.0068 ng TEQ-WHO₀₆/gであった。2007～2008 調査結果^{16), 17)}では10施設における残骨灰中のダイオキシン類の濃度範囲は、実測濃度で0.012～2.4 ng/g、毒性当量0～0.042 ng TEQ-WHO₀₆/gであった。また、平成21年10月に、厚生労働省健康局生活衛生課が、火葬実績のある全国1,447施設の火葬場に対し実施したアンケート結果²⁸⁾では、残骨灰中のダイオキシン類測定値として27箇所の火葬場から回答があり、その範囲は、0～0.13 ng TEQ-WHO₀₆/gであった。本研究での調査結果はこれらの範囲に含まれているとともに、全体として非常に低いといえた。主燃焼室では御遺体を完全燃焼せねばならないことから、最終的に残る残骨灰中のダイオキシン類濃度が低くなったものと考えられる。

次に、集じん灰中のダイオキシン類の濃度範囲は、実測濃度で3.1～419 ng/g、毒性等量で0.047～6.3 ng TEQ-WHO₀₆/gであった。

上記の厚生労働省健康局生活衛生課が実施した火葬場のアンケート結果²⁸⁾にて、集じん灰中のダイオキシン類測定値として回答のあった38施設、および平成8年度に厚生省が実施した都市ごみ焼却施設の飛灰中ダイオキシン類毒性等量の相対度数分布²⁹⁾を図C.4.1に示すとともに、対応する濃度範囲に本研究の結果(2009 調査結果)をプロットし、比較を行った。また、2007、2008 調査結果^{16), 17)}、および1999 調査結果^{3), 4)}についても、WHO2006-TEFにより換算し(付録資料1、2)、対応する濃度範囲にプロットした。ただし、都市ごみ



※ ただし、棒グラフ: 都市ごみ焼却飛灰: I-TEQベース
 ■、●、▲、★: 火葬炉集じん灰: TEQ-WHO06ベース

図C.4.1 都市ごみ焼却施設における
 飛灰中ダイオキシン類濃度度数分布と本研究の比較

焼却飛灰については、その毒性等量はPCDDs/DFsのみを対象にしていることや、毒性等価係数として1988年にNATO/CCMSが提唱したI-TEFを用いており、火葬炉集じん灰における毒性等量とは10～20%程度値が低く見積もられていることに注意が必要である。

図C.4.1において、まず、厚生労働省アンケート結果と、都市ごみ焼却飛灰とを比較すると、0.50以下の部分で、火葬集じん灰の相対度数が高いものの、それ以外の部分では、ほぼ同様の分布となった。本研究における集じん灰中ダイオキシン類濃度は、都市ごみ焼却飛灰の濃度範囲にあり、施設A、Cは1.0 ng TEQ-WHO₀₆/g以下の比較的低い範囲、施設Bに関しては5.0～10.0 ng TEQ-WHO₀₆/gで、比較的高い濃度範囲に位置しているといえる。1999調査の場合と、2007～2008調査および本研究の場合とを比較すると、1999-No.4のような50～100 ng TEQ-WHO₀₆/g程度の非常に高い濃度は発現されていないが、依然として、2007-A、2008-A、2009-Bのように5.0 ng TEQ-WHO₀₆/g以上を示す集じん灰が見受けられている。これらの3施設に関しては、2007～2008調査結果^{16), 17)}、および表C.1より、CO濃度は比較的低いレベルで保たれていたことから、火葬中における燃焼状態は良好に保たれていたと考えられる。これら2つの施設は、ともに再燃焼後の排ガスの冷却に、熱交換器を用いた冷却方式が採用されており、2007～2008調査、および本調査で他の火葬炉は全て空気混合による冷却方式であった。また、排ガス中のダイオキシン類濃度の測定結果より、本研究における施設B(2009-B)では、熱交換器部分でダイオキシン類の再合成が生じていることが明らかとなっている。したがって、熱交換器を用いた冷却方式を採用する場合には、ダイオキシン類の再合成により、灰中のダイオキシン類濃度が高くなる傾向にあり、注意する必要があると考えられる。

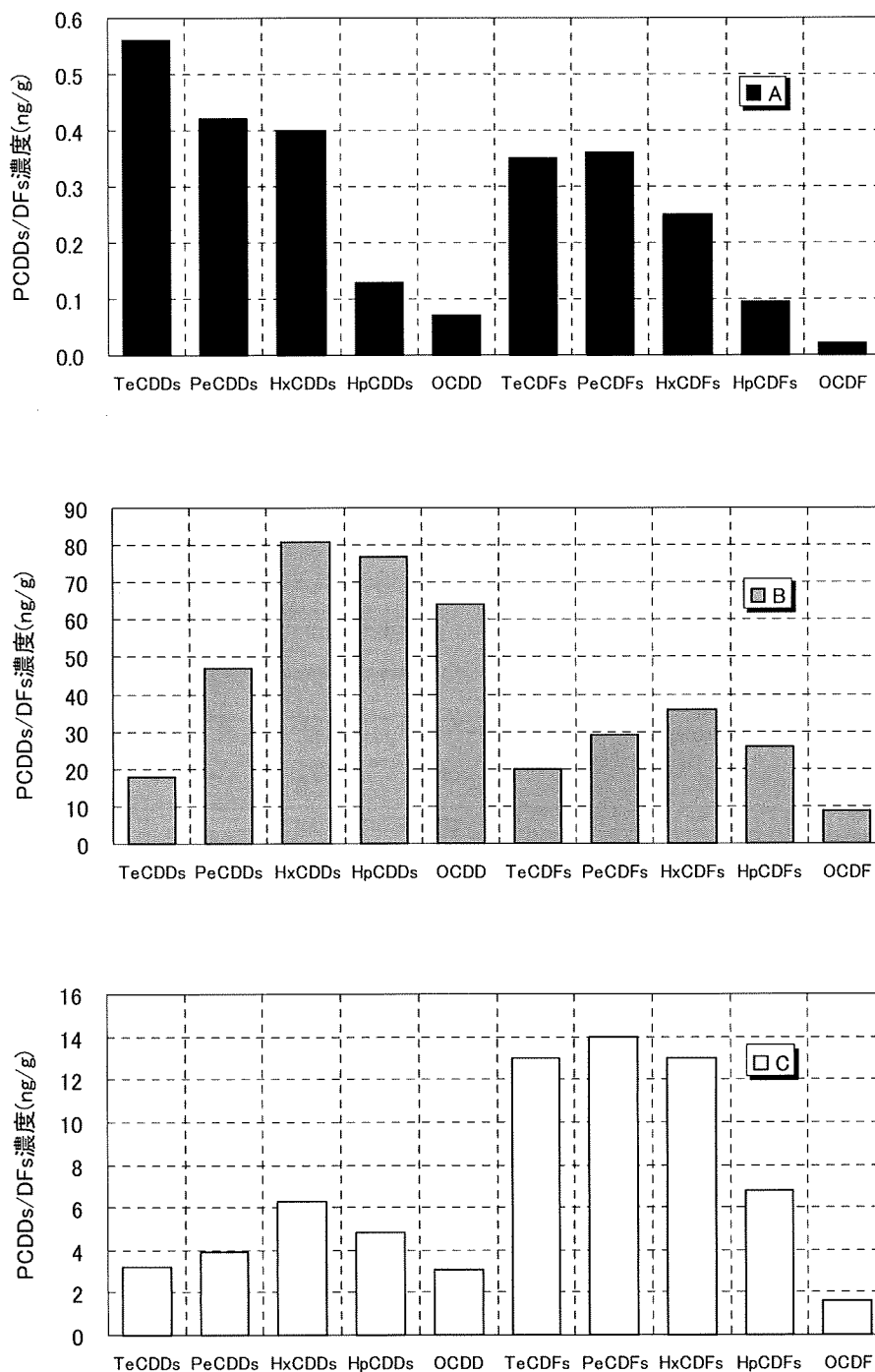
集じん灰中PCDDs/DFsの同族体分布を、図C.4.2に示した。PCDFs総濃度とPCDDs総濃度の大小は、施設により異なった。また全体的な傾向としては、PCDDsは6塩素化物をピークとする山型、PCDFsについては5-6塩素化物をピークとする山型の分布を示していた。この傾向は、2007-2008調査結果^{16), 17)}、および1999調査結果⁴⁾とほぼ同様であった。

集じん灰中のPCDDsとPCDFsの17種、およびco-PCBsの12種の異性体分布を図C.4.3、に示した。PCDDs/DFsについては、全ての集じん灰でOCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCCD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF、OCDF等の高塩素化物が多い傾向を示しており、これらの傾向は、2007-2008調査結果^{16), 17)}、および1999調査結果⁴⁾とほぼ同様であった。

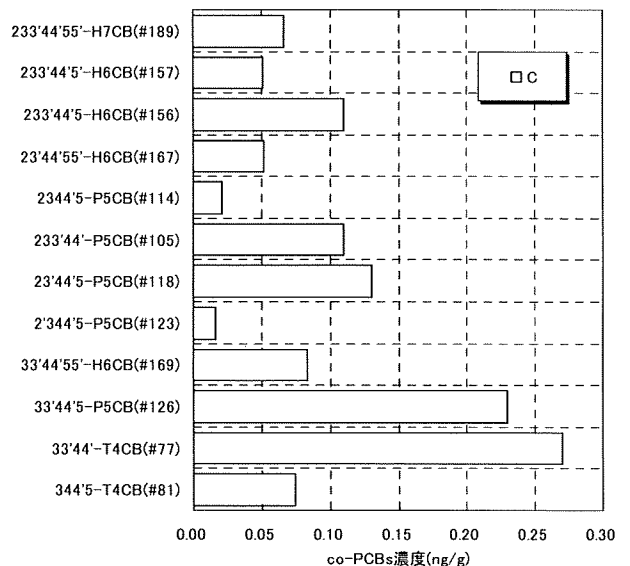
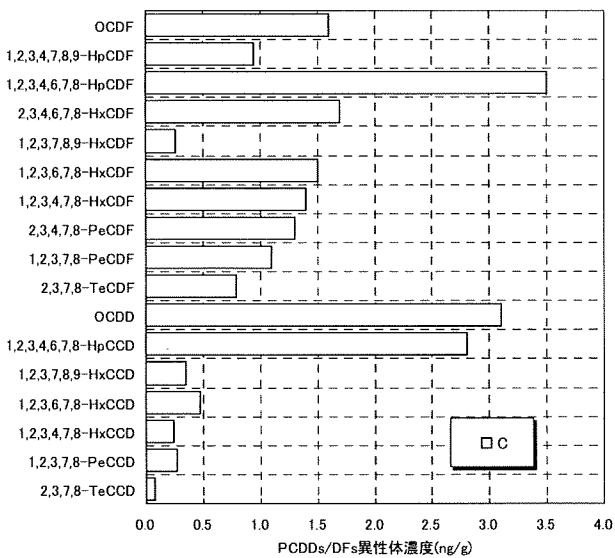
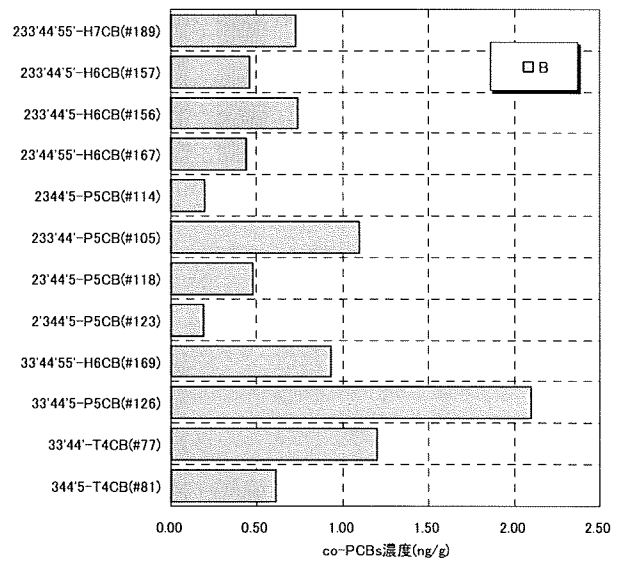
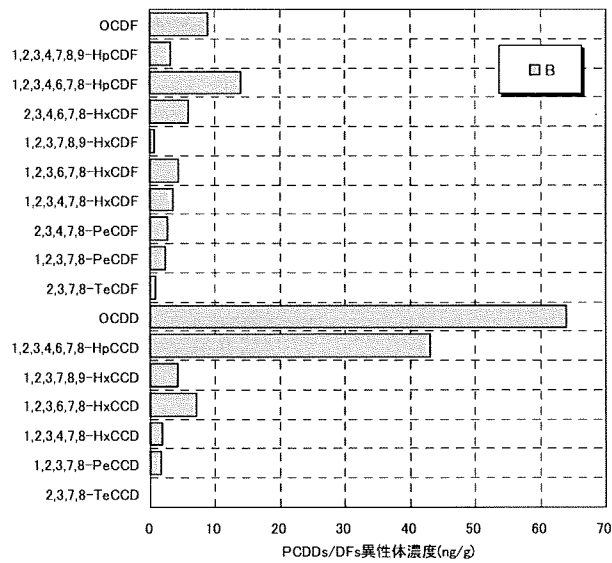
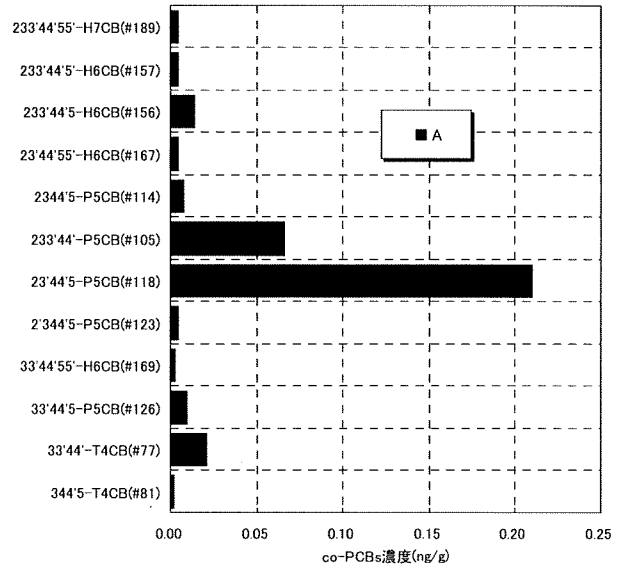
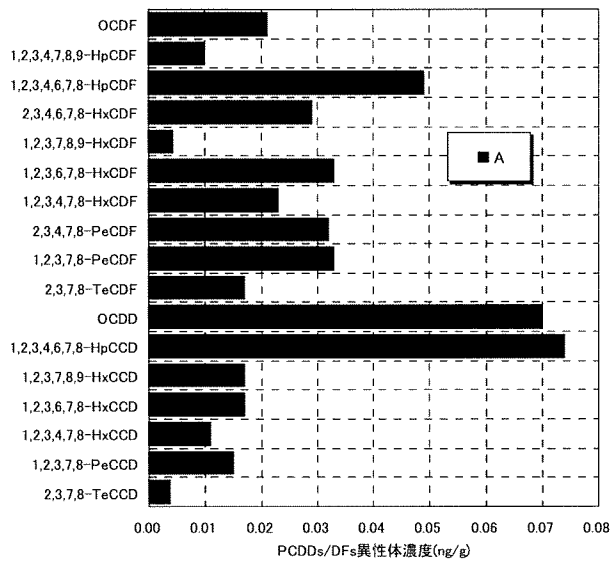
また、co-PCBsに関しては、ノンオルト体であるT4CB(#77)、P5CB(#126)、モノオルト体であるP5CB(#118)、P5CB(#105)が高い値を示しており、図C.3.4における排ガス中の結果と同様の傾向であった。ごみ焼却飛灰において、ダイオキシン類の*de novo*合成実験では、P5CB(#126)が、P5CB(#118)よりも優先的に生成することが報告されており^{26), 27)}、本研究においても施設Bではその傾向が顕著であり、熱交換器部分、あるいは集じん灰中で少なか

らず、*de novo* 合成が生じていると考えられる。施設Bのように、灰中のダイオキシン類濃度が高い場合には、熱交換器の温度管理に注意する必要がある。

以上より、残骨灰のダイオキシン類濃度は低く、環境に与える影響は大きくないといえるが、集じん灰にはごみ焼却飛灰と比較しても依然として同レベルのものも存在するため、排ガスの冷却方式に留意するとともに、低温での集じんを徹底して、再合成を抑制することが重要であると考えられる。また結果として、灰中のダイオキシン類濃度の高いものに関しては別途処理を検討する必要がある。



図C.4.2 集じん灰中PCDDs/DFs濃度の同族体分布



図C.4.3 集じん灰中ダイオキシン類濃度の異性体分布

5. 火葬場からのダイオキシン類の排出量

(1) 大気へのダイオキシン類排出原単位の概算

ここでは、火葬炉から大気へのダイオキシン類排出原単位： A (ng TEQ-WHO₀₆/体) を推定した。推定の方法は、本研究での測定データ (2009)、および 2007～2008 調査結果^{16),17)} (2007-2008) も含め、計 14 施設、26 体分の結果を用いて、以下の (C.5.1) 式により 1 体あたりのダイオキシン類排出量を算出した。なおダイオキシン類毒性等量は WHO2006-TEF を用いた O₂12% 換算値を用い、乾き排ガス量についても O₂12% 換算した値を用いた。

$$\begin{aligned} & \text{大気へのダイオキシン類排出原単位 : } A \text{ (ng TEQ-WHO}_{06}\text{/体)} = \\ & \text{1 体あたりのダイオキシン類排出量 (ng TEQ-WHO}_{06}\text{/体)} = \\ & \text{ダイオキシン類毒性等量 (ng TEQ-WHO}_{06}\text{/m}^3\text{N}) \times \text{乾き排ガス量 (m}^3\text{N/h)} \\ & \times \text{火葬時間 (h/体)} \qquad \qquad \qquad \text{(C.5.1)} \end{aligned}$$

推定の結果を、各施設における火葬炉、排ガス処理の方式とあわせて表 C.5.1 に示した。2007～2008 調査結果、および本研究における調査結果からは 0.041～16,000 ng TEQ-WHO₀₆/体の範囲でダイオキシン類が大気へ排出されていることがわかった。この排出原単位の算術平均値は 1,400 ng TEQ-WHO₀₆/体、幾何平均は 120 ng TEQ-WHO₀₆/体、中央値は 110 ng TEQ-WHO₀₆/体となった。

1999 調査結果から得られている排出原単位⁹⁾を、WHO2006-TEF を用いて換算すると、算術平均値は 4,200 ng TEQ-WHO₀₆/体、幾何平均値は 1,900 ng TEQ-WHO₀₆/体と算出される (付録資料 1、2)。これらの値と、2007～2009 の調査結果からの値を比較すると、現状は、約 10 年前の排出原単位よりも、算術平均値で約 1/3、幾何平均値で約 1/20 まで低減されていた。

(2) 詳細な大気へのダイオキシン類排出原単位の試算

表 C.5.1 において、各施設の集じん機の有無や、高度排ガス処理方式と、ダイオキシン類排出原単位の対応をみると、バグフィルターに触媒装置、あるいは活性炭吸着設備等の高度排ガス処理が組み合わされたケースにおいては、集じん機がない、あるいはスクリーン式等の集じん効率の低い集じん機のみが設置されたケースに比較し、排ガス中のダイオキシン類は高度に除去された結果、大気へのダイオキシン類の排出原単位も全体として低くなる傾向が伺えた。

したがって、(1)にて計 14 施設、26 検体分の結果より算出された大気へのダイオキシン類排出原単位は、火葬場の排ガス処理施設、ひいては選定された火葬場の構成に大きく依存することとなり、厳密には日本全国の火葬の状況を必ずしも表しているとは言い難い。本

表C.5.1 大気へのダイオキシン類の排出原単位試算結果

項目		測定時間	ダイオキシン類 毒性等量	O ₂ を考慮した 乾き排ガス量	ダイオキシン類 排出原単位	備考:集じん +高度排ガス 処理方式
		分	ng TEQ-WHO ₀₆ /m ³ _N	m ³ _N /h	ng TEQ-WHO ₀₆ /体	
2007-A	A-1	42	0.10	3200	210	BF+SCR
	A-2	46	0.00005	1000	0.041	
2007-B	B-1	68	0.0059	2100	14	BF+AC
	B-2	61	0.012	2900	35	
2007-C	C-1	71	1.1	1800	2300	なし
	C-2	66	0.62	1700	1100	
2007-D	D-1	90	1.05	2200	3400	なし
	D-2	71	0.084	2100	210	
2008-A	A-1	58	0.011	1200	13	BF+SCR
	A-2	57	0.00018	1400	0.240	
2008-B	B-1	66	0.0036	2200	8.6	BF+SCR
	B-2	59	0.010	2300	23	
2008-C	C-1	48	0.025	3000	60	BF+AC
	C-2	68	0.0037	3000	13	
2008-D	D-1	64	0.062	2500	170	EP
	D-2	45	0.059	1900	83	
2008-E	E-1	60	0.089	1500	130	なし
	E-2	63	0.10	1200	130	
2008-F	F-1	59	11	1500	16000	SC
	F-2	64	1.7	1600	2800	
2008-G	G-1	84	1.6	2400	5300	なし
	G-2	64	1.7	2000	3700	
2009-A	A-1	62	0.056	1500	85	BF+SCR
2009-B	B-1	45	0.120	1400	120	BF+SCR
2009-C	C-1	85	0.049	3100	210	BF+AC
	C-2	61	0.170	3000	520	
最大値					16000	
最小値					0.041	
中央値					130	
算術平均値					1400	
幾何平均値					120	

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

研究を含む一連の研究にて選定した火葬炉の組み合わせが、全国の火葬炉の統計に概ね合致していれば問題はないが、研究開始当初は、最新の全国の火葬場の統計値が明らかでなかったこと、施設の選定、サンプリング許可には、各自治体の判断に大きく左右されることから、実際はそのようなになっていない。例えば、高度排ガス処理設備を有する火葬炉を、

日本全国の採用状況に比較して、高い割合で対象とした場合、(1)における試算において、大気へのダイオキシン類排出原単位は、当然本来の値よりも低く見積もられることになる。

そこで、まず、厚生労働省健康局生活衛生課が平成21年に実施した火葬場のアンケート結果²⁸⁾を基に、全国の火葬場を、ダイオキシン類排出原単位に大きく依存すると考えられる、排ガス冷却装置の種類、集じん機の種類、高度排ガス処理設備の有無により、火葬数の多い8つの類型に分け、その統計値と、本研究結果を用いて、以下の式により、大気へのダイオキシン類排出原単位の加重平均：A'を求めた。

ダイオキシン類排出原単位 (ng TEQ-WHO₀₆/人) =

$$A' = \sum_{i=1}^8 \alpha_i D_i \quad (C.5.2)$$

ただし、

α_i は、火葬場類型 i における、年間火葬数の合計を年間全火葬数で除したもの
：火葬割合

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_7 + \alpha_8 = 1$$

D_i は火葬場類型 i における、大気へのダイオキシン類排出原単位 (ng TEQ-WHO₀₆/体)
(実験結果より算出)

具体的な計算結果を、表 C.5.2 に示す。それぞれの火葬炉数、火葬件数は、厚生労働省の平成21年度アンケート結果から求めた。各類型のダイオキシン類排出原単位は、これまでの実験データを基に、算術平均値、幾何平均値として示し、これらを用い、C.5.2 式にしたがって、より厳密なダイオキシン類排出原単位：A'を求めた。その結果、算術平均値は2,390 ng TEQ-WHO₀₆/体、幾何平均は1,000 ng TEQ-WHO₀₆/体と算出された。これらの値は、(1)で求めた値よりも大きくなったが、一連の研究にて調査した火葬場の中で、高度排ガス処理設備を有する施設の割合が、全国統計に比較して多かったことによると考えられ

表C.5.2 大気へのダイオキシン類の排出原単位試算結果(加重平均)

類型 i	排ガス冷却装置	集じん機	高度排ガス処理	アンケート結果からの統計値			ダイオキシン類排出原単位				備考(実データの根拠)
				火葬場数 箇所	火葬数 体	火葬割合 α_i —	実データ: Di		計算値: $\alpha_i \times D_i$		
							算術平均	幾何平均	加重原単位 (算術平均)	加重原単位 (幾何平均)	
1	空気冷却	BF	あり	19	43,643	0.04	110	44	4.2	1.7	2007-B、2008-B~C、2009-A、C (N=9)
2	熱交換器	BF	あり	21	27,501	0.02	70	5.1	1.7	0.12	2007-A、2008-A、2009-B (N=5)
3	空気冷却	BF	なし	82	102,799	0.09	370	170	33	16	2009-A、C-BF後 (N=3)
4	熱交換器	BF	なし	37	45,313	0.04	1800	1800	72	72	2009-B-BF後データ (N=1)
5	空気冷却	EP	なし	53	161,898	0.14	120	120	18	17	2008-D (N=2)
6	空気冷却	その他	あり	35	20,423	0.02	110	44	2.0	0.81	2007-B、2008-B~C、2009-A、C (N=9)
7	空気冷却	その他	なし	567	418,190	0.37	3500	1400	1310	520	2007-C、D、2008-E~G (N=10)
8	空気冷却	なし	なし	577	305,991	0.27	3500	1400	960	380	2007-C、D、2008-E~G (N=10)
合計				1,391	1,125,758	1	—	—	2,390	1,000	

※ ただし、BF：バグフィルター、EP：電気集じん機

る。1999 調査結果から得られた排出原単位：算術平均値 4,200 ng TEQ-WHO₀₆/体、幾何平均値 1,900 ng TEQ-WHO₀₆/体⁹⁾では、加重平均を行っていないので厳密には比較できないが、現状は、約 10 年前の排出原単位よりも、算術平均値、幾何平均値ともに、少なくとも約 57% 程度まで低減されていると推測された。

表 C.5.2 より本研究で求めたダイオキシン類排出原単位に寄与する成分として、その内訳を見ると、類型 7 および 8 の寄与が大きかった。すなわち、全体の集じん機のない、あるいは集じん効率の低い、その他の集じん機のみ施設からの寄与が全体の 90% 以上を占めた。これは、類型 7 および 8 では、火葬割合が全体の 64% を占めており、かつ大気へのダイオキシン類の排出量も高いことが主たる原因である。したがって、この部分に如何に集じん機、あるいは高度排ガス処理設備が導入されるかということが、今後、排出原単位を減少させていく上で重要であると考えられた。

(3) 火葬場から大気へのダイオキシン類排出原単位の諸外国との比較

ここで、一体あたりのダイオキシン類排出量原単位に関しては、諸外国においても、I-TEQ 換算値として何例か報告されており^{4)、11)~13)、15)、30)}、本研究で得られた原単位との比較を行った。まず、比較を行うために、本研究で得られた原単位を I-TEQ に換算したところ、(1)における単純計算では 140~1,400 ng I-TEQ/体、(2)における加重平均を考慮した計算では 990~2,330 ng I-TEQ/体であった(付録資料 1、2)。諸外国との報告値との比較を表 C.5.3 に示した。諸外国に関しては、500~80,000 ng I-TEQ/体であり非常に広い範囲にわたっていた。またダイオキシン類削減対策指針前の日本における値は、1,800~4,000 ng I-TEQ/体である⁴⁾。これらの範囲に比較し、アメリカ合衆国は、500 ng I-TEQ/体が報告されているものの 1 施設のみデータであり、本研究で求めた原単位は諸外国、あるいはダイオキシン類削減対策指針前のわが国の原単位に比較し低い範囲にあると考えられる。

表 C.5.3 日本および諸外国のダイオキシン類排出原単位^{4)、11)~13)、15)、30)}

	排出原単位 ng I-TEQ/体	報告年	文献	備考(測定施設数等)
ドイツ	28,000	1992	11)	1施設
オランダ	2,400~4,900	1994	12)	2施設
イギリス	2,400~80,000	1996	13)	不明
日本	1,800~4,000	1999	4)	17施設 幾何平均~算術平均
アメリカ	500	2001	30)	1施設
台湾	6,110~13,600	2003	15)	2施設
日本	140~1,600	2007-2009	本報告書	14施設 概算 幾何平均~算術平均
	990~2,330			加重計算 幾何平均~算術平均

以上より、火葬炉において、本研究におけるダイオキシン類排出原単位と、ダイオキシン類削減対策指針前の国内のダイオキシン類排出原単位、および諸外国のダイオキシン類排出原単位との比較から、ダイオキシン類削減対策指針により、適切に施設が運営されるとともに、燃焼・排ガス設備の高度化がなされてきた効果がうかがえた。

(4) 火葬場から大気へのダイオキシン類排出インベントリー

平成20年度の火葬炉から大気へのダイオキシン類排出インベントリーは2.2～4.9 g TEQ-WHO₀₆/年⁶⁾で報告されているが、本研究結果のデータと平成20年度の火葬件数の実績1,167,729体/年⁷⁾とを掛け合わせ、幾何平均～算術平均の範囲で表すと、ダイオキシン類は、本研究における結果の平均値としての試算で0.13～1.9 g TEQ-WHO₀₆/年まで、加重平均を考慮した場合1.2～2.8 g TEQ-WHO₀₆/年まで低減されている結果となった。平成20年度の日本における大気へのダイオキシン類排出インベントリーは、215～223 g TEQ-WHO₀₆/年まで低減されており、火葬炉からの排出インベントリーの相対的な寄与はその0.99～2.3%まで増加していたが⁸⁾、本研究の結果から求めた相対的な寄与は、加重平均を考慮した場合、概ね0.54～1.3%程度であることが分かった。

USEPAは、2000年の火葬炉からのダイオキシン類排出インベントリーとして、0.27g I-TEQ/年と報告している。同年のアメリカ合衆国における大気へのダイオキシン類排出インベントリーは1243.6 g I-TEQ/年であり、火葬炉の寄与としては、約0.02%と見積もられる³¹⁾。またEUにおいては、火葬炉からのダイオキシン類排出インベントリーは、2000年で、9～19g I-TEQ/年であり、同年のEUにおける大気へのダイオキシン類排出インベントリーは2435～4660 g I-TEQ/年であった³²⁾。ここから、火葬炉の寄与としては、0.37～0.40%と試算された。

本研究で求めた、我が国のダイオキシン類排出インベントリーに対する火葬炉の寄与：0.5～1.3%と、アメリカ合衆国、あるいはEUにおける値とを比較すると、アメリカ合衆国については日本の方が1オーダー以上高く、EUに比較すると日本の方がわずかに高い傾向にあった。特にEUに比較して、排出原単位は低い傾向にあることから、この原因としては、我が国の火葬率が高いことが大きいと考えられる。本研究による結果以前の原単位により求めた相対的な寄与は、0.99～2.3%まで上昇していたことから、我が国は、火葬大国でありながらも、排出削減されてきていると考えられるが、欧米諸国と同レベルまでには至っていないと考えられる。対策としては、火葬数は今後も増加する傾向が予測されることから、排出原単位を下げるのが重要であり、そのためには前述したように、集じん機のない、あるいは集じん効率の低い集じん機のみを有する火葬炉へ、バグフィルター、高度排ガス処理設備の導入が必要であろう。

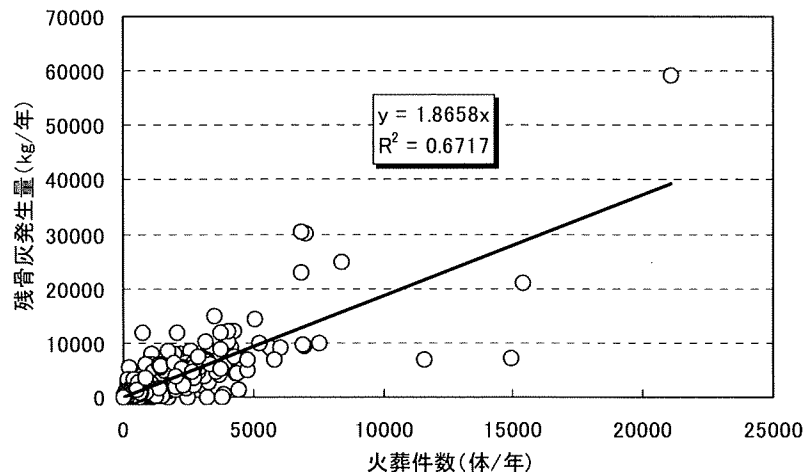
(5) 火葬灰へのダイオキシン類排出インベントリーの概算

ダイオキシン類は、排ガスのみならず火葬灰にも含まれ、火葬場から搬出される。ここでは、火葬灰へのダイオキシン類の排出原単位、および排出インベントリーを算出した。

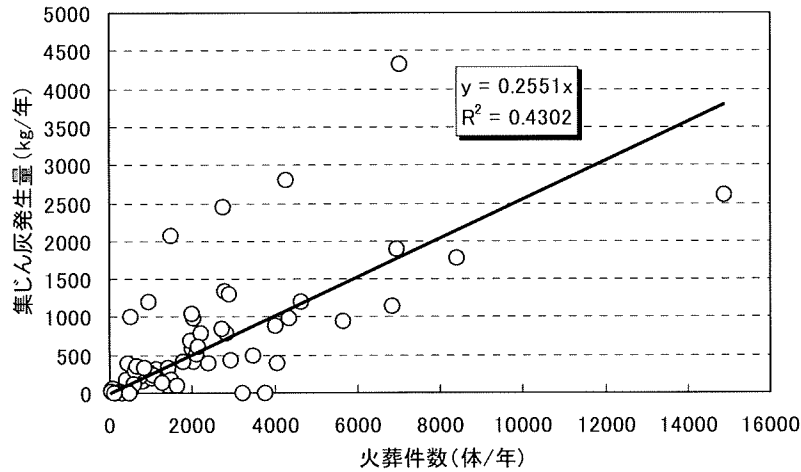
まず排出原単位： $B(\text{ng TEQ-WHO}_{06}/\text{体})$ は、本研究での測定データ(2009)、および2007～2008調査結果^{16),17)}(2007-2008)を用いて、以下の式を基本とし、(2)で実施したように、全国の火葬場を8つの類型に分けて、(C.5.2)式にしたがって加重平均値を求めた。

$$\begin{aligned}
 & \text{灰へのダイオキシン類排出原単位}(\text{ng TEQ-WHO}_{06}/\text{体}) : B = \\
 & \text{一検体あたりのダイオキシン類排出量}(\text{ng TEQ-WHO}_{06}/\text{体}) = \\
 & \text{残骨灰ダイオキシン類毒性等量}(\text{ng TEQ-WHO}_{06}/\text{g}) \times \text{残骨灰の量}(\text{g}/\text{体}) \\
 & + \text{集じん灰ダイオキシン類毒性等量}(\text{ng TEQ-WHO}_{06}/\text{g}) \times \text{集じん灰の量}(\text{g}/\text{体})
 \end{aligned}
 \tag{C.5.3}$$

ここで、残骨灰の量は、厚生労働省健康局生活衛生課が平成21年に実施した火葬場のアンケート結果²⁸⁾を基に、残骨灰の発生量が報告されている火葬場について、火葬数との相関を評価した結果(図C.5.1)、ある程度の相関が見られたため、近似直線の傾きから、1.87kg/体と設定した。集じん灰についても同様に検討しバグフィルター、電気集じん機の場合(図C.5.2)、0.255kg/体と設定した。なお、表C.1において、各施設のバグフィルター前後のばいじん濃度の差、乾き排ガス量(O_2 12%換算)、火葬時間から、集じん灰の発生量を間接的に算出したところ、0.099～0.38kg/体($N=4$)であり、上記の設定値は、概ね妥当な値であると考えられた。また、その他の集じん機における集じん灰量は、同アンケート結果においては、図C.5.1、図C.5.2のような対応が全く見られなかったため、集じん効率が低いこ



図C.5.1 火葬件数と残骨灰発生量との関係



図C.5.2 火葬件数と集じん灰発生量との関係(バグフィルター、電気集じん機)

とを考慮して、バグフィルター、電気集じん機の場合の1/2とし、一意的に0.128 kg/人とした。

火葬灰へのダイオキシン類排出原単位として、具体的な計算結果を、表C.5.4に示す。表より、残骨灰について、算術平均値は8.3 ng TEQ-WHO₀₆/体、幾何平均は0.1 ng TEQ-WHO₀₆/体と算出され、集じん灰については、算術平均値は185 ng TEQ-WHO₀₆/体、幾何平均は148 ng TEQ-WHO₀₆/体と算出された。大気へのダイオキシン類排出原単位に比較すると、残骨灰に関しては無視できるほど小さかった。また、集じん灰に関しては、約10%程度の値であった。集じん灰経由でのダイオキシン類排出原単位のうち大きな寄与を占めているのは、熱交換器での再合成により集じん灰中のダイオキシン類濃度が高くなっていることであり、全体の70～80%の寄与を占めていた。

次に、火葬灰へのダイオキシン類排出インベントリーとして、本結果と平成20年度の火葬件数の実績1,167,729体/年¹⁾とをかけ合わせ、幾何平均～算術平均の範囲で表すと、0.17～0.23 g TEQ-WHO₀₆/年と見積もられ、大気へのダイオキシン類排出インベントリーの10%程度であると試算された。

表C.5.4 火葬灰へのダイオキシン類の排出原単位試算結果

種類:i	排ガス冷却装置	集じん機	高度排ガス処理	アンケート結果からの統計値			残骨灰量	集じん灰量	残骨灰中ダイオキシン類濃度		集じん灰中ダイオキシン類濃度		加重原単位(残骨灰)		加重原単位(集じん灰)		備考(集じん灰:実データの根拠)
				火葬場数	火葬数	火葬割合α _i			算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	
1	空気冷却	BF	あり	19	43,643	0.04	1.87	0.255	0.0044	0.000055	0.73	0.36	0.32	0.0040	7.2	3.6	2007-B, 2008-B, C, 2009-A, C (N=5)
2	熱交換器	BF	あり	21	27,501	0.02	1.87	0.255	0.0044	0.000055	8.1	7.4	0.2	0.0025	50	46	2007-A, 2008-A, 2009-B (N=3)
3	空気冷却	BF	なし	82	102,799	0.09	1.87	0.255	0.0044	0.000055	0.73	0.36	0.8	0.0093	17	8.4	2007-B, 2008-B, C, 2009-A, C (N=5)
4	熱交換器	BF	なし	37	46,313	0.04	1.87	0.255	0.0044	0.000055	8.1	7.4	0.3	0.0041	83	76	2007-A, 2008-A, 2009-B (N=3)
5	空気冷却	EP	なし	53	161,898	0.14	1.87	0.255	0.0044	0.000055	0.73	0.36	1.2	0.015	27	13	2007-B, 2008-B, C, 2009-A, C (N=5)
6	空気冷却	その他	あり	35	20,423	0.02	1.87	0.127	0.0044	0.000055	0.014	0.014	0.2	0.0019	0.032	0.032	2008-F, (N=1)
7	空気冷却	その他	なし	567	418,190	0.37	1.87	0.127	0.0044	0.000055	0.014	0.014	3.1	0.038	0.66	0.66	2008-F, (N=1)
8	空気冷却	なし	なし	577	305,991	0.27	1.87	0	0.0044	0.000055	—	—	2.3	0.028	0	0	
合計				1,391	1,125,758	1	—	—	—	—	—	—	8.3	0.10	185	148	

前述したように、今後火葬数の増加が予想される中で、大気へのダイオキシン類排出インベントリを減少させるには、大気への排出原単位を下げる必要があり、そのためには、現在、主に集じん機を有しない火葬炉へ、バグフィルター、高度排ガス処理設備の導入が有効であると考えられる。しかし、集じん機の導入は集じん灰の発生を意味し、灰へのダイオキシン類排出インベントリの増加につながる。現在のところ、火葬炉においては、大気への排出インベントリに比較し、灰への排出インベントリは低いものの、今後、集じん機の導入にともなって、熱交換器を含めた適切な管理を実施していくとともに、濃度の高い灰については適正な処理が求められる。

(6) 大気、および火葬灰へのダイオキシン類排出原単位の比較

次に、表C.5.2、表C.5.4により、これまで明らかにした火葬場の8類型における、ダイオキシン類の大気、および火葬灰への排出原単位について比較した。

表C.5.5に、火葬場8類型毎の、排ガス、残骨灰、および集じん灰へのダイオキシン類の排出原単位を示す。これらは火葬1体あたりのダイオキシン類量として示され、該当する類型火葬場における火葬1体におけるダイオキシン類のアウトプットとしてとらえることができる。

ダイオキシン類の総括排出原単位としての合計値をみると、比較的古い炉に多い類型7、8においては、1,400～3,500 ng TEQ-WHO₀₆/体であり、排ガスを經由して大気へ排出されるダイオキシン類がそのほとんどを占めた。排ガス冷却に空気混合方式が採用され、集じん機としてバグフィルター、あるいは電気集じん機が設置されているような、類型1、3、5においては、ダイオキシン類の総括排出原単位は136～568 ng TEQ-WHO₀₆/体であり、類型7、8に比較して、20%以下まで低減されており、排ガス經由で大気に排出される、および集じん灰に移行するダイオキシン類は、それぞれ30～60%程度となった。しかし、熱交換器が採用されているような類型2、4においては、総括排出原単位は1,905～3,908 ng TEQ-WHO₀₆/体となり、類型7、8を上回る可能性も示唆された。これは主に、熱交換器部分でのダイオキシン類の再合成に由来し、集じん灰としての排出原単位が高くなったこと、

表C.5.5 大気および火葬灰へのダイオキシン類排出原単位の比較

類型:i	排ガス冷却装置	集じん機	高度排ガス処理	排ガス		残骨灰		集じん灰		合計(総括原単位)			
				ng TEQ-WHO ₀₆ /体									
				算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均		
1	空気冷却	BF	あり	110	44	8.3	0.10	190	92	308	136		
2	熱交換器	BF	あり	70	5.1	8.3	0.10	2100	1900	2178	1905		
3	空気冷却	BF	なし	370	170	8.3	0.10	190	92	568	262		
4	熱交換器	BF	なし	1800	1800	8.3	0.10	2100	1900	3908	3700		
5	空気冷却	EP	なし	120	120	8.3	0.10	190	92	318	212		
6	空気冷却	その他	あり	110	44	8.3	0.10	1.8	1.8	120	46		
7	空気冷却	その他	なし	3500	1400	8.3	0.10	1.8	1.8	3510	1402		
8	空気冷却	なし	なし	3500	1400	8.3	0.10	0	0	3508	1400		

高度排ガス処理を有しない場合には、再合成したダイオキシン類はバグフィルターでの除去効率が低く、大気へ放出されることが主たる要因である。特に類型2においては、集じん灰として排出されるダイオキシン類が、全体の95%を占めていた。酒井らは、1997年に京都市の都市ごみ焼却施設において、PCDDs/DFsのマテリアルフローを検討し、当時のPCDDs/DFsの排出総量は $160 \mu \text{gTEQ/ごみt}$ であり、そのうち90%以上が飛灰に含まれていることを明らかにしており³³⁾、類型2についても、この状態に近いといえる。

類型1、2の国内での実績は、現時点ではあまり高くないため、加重平均によるダイオキシン類排出原単位の影響は軽微ではあるが、今後、火葬炉の高度化にともなって、国内の火葬炉は、類型7、8から、類型1、2へシフトしていくと考えられる。しかし、熱交換器の採用状況や運転管理によっては、ダイオキシン類が再合成し、集じん機により、排ガスから、灰へダイオキシン類を移行させるものの、結果として、総括排出原単位が増加することも懸念される。このため、熱交換器の導入には注意が必要であると考えられる。

(7) ダイオキシン類排出インベントリーの将来予測

火葬場から排出されるダイオキシン類は火葬件数によるため、将来的な死亡者数の増加に伴い増加することを見込むため、大気、灰双方への排出インベントリーの将来推計を行った。将来的な火葬数は、火葬率と将来の死亡者数から求めるが、将来の死亡者数は、厚生労働省、国立社会保障・人口問題研究所の、日本の将来人口推計を用いた³⁴⁾。推計方法は、人口変動要因である出生、死亡、国際人口移動について仮定を設け将来の人口を、コーホート要因法により推計するものである。1999年調査においては、1997年の将来人口中位推計を用い、ダイオキシン類排出インベントリーの将来予測がなされていたが⁴⁾、本研究では、最新の2006年の将来人口推計(出生：中位仮定、死亡：中位仮定)を用いた³⁴⁾。図C.5.3に、2006年の前提に基づき試算された日本の将来人口、図C.5.4に日本の死亡者数の予測を示した。2006年推計に基づけば、日本の将来人口は、2005年に既に1億2777万人でピークに達しており、現在は長期の減少過程に入っている。死亡者数は、2006年の110万人から一貫して増加を続け、2020年の142.9万人を経て、2040年にはピークの166.3万人に達する。

死亡者数の予測データ、火葬率、およびダイオキシン類排出量原単位($\text{ng TEQ-WHO}_{06}/\text{人}$)を掛け合わせ、火葬場から排出される将来排出量を求めた。本研究におけるダイオキシン類排出量原単位は、加重平均により求めた値を用いた。火葬率は、2008年で99.9%であったことから、将来的な火葬率についてこの値を一律で用いた。

図C.5.5に、2007-2008での調査結果および本研究での調査結果から得られた、ダイオキシン類の排出インベントリーの将来排出量(2007-2009予測)を大気、灰ごとに示し、1999