

都市ごみの焼却処理に伴うダイオキシン問題

田 中 勝

(国立公衆衛生院衛生工学部)

Various Issues about Dioxin and Related Compounds Generated from Municipal Solid Waste Incinerators

Masaru TANAKA

(from Department of Sanitary Engineering, the Institute of Public Health, Tokyo.)

M. TANAKA *Various Issues about Dioxin and Related Compounds Generated from Municipal Solid Waste Incinerators*. Bull. Inst. Public Health, 40(2), 141-151, 1991.

Key Words Municipal solid waste, Incineration, Dioxin, emission standard, guideline

(Accepted for publication, June 24, 1991)

1. 都市ごみの焼却処理

1.1 焼却の目的

私たちが、豊かな生活、快適な生活をすればするほど都市ごみが大量に発生する。その都市ごみを適正に処理しなければ、公衆衛生上種々の問題を引き起こす。たとえば、台所ごみは腐敗して悪臭を発生し、またハエやねずみ等、そ属、害虫の発生源になり、ひいては伝染病を媒介する原因となる。したがって、都市ごみの処理は世界的にどの自治体もその責任で公共サービスとして行うのが一般的である。

一般に廃棄物処理の基本は、そもそも廃棄物の発生を抑制し、それでも排出された廃棄物を出来るだけ資源化し、再利用を行った後に安定化、無害化、減容化のために中間処理をして、その残渣物を衛生的に最終処分することである。中間処理の最も代表的なものが焼却処理である。焼却処理は各種の中間処理方法の中で、減容化効果が重量で10分の1、体積で20分の1と大きく、しかも腐敗性有機物を焼却によって無機化し、

[キーワード] 都市ごみ, 焼却処理, ダイオキシン, 排ガス規制, ガイドライン

[平成3年6月24日受理]

病原性生物を高温下で死滅させるなど廃棄物の安定化・無害化の意味でも優れた方法として、日本やヨーロッパの一部で近年急速に発展してきた処理方法である。

焼却処理は減容、安定、無害という廃棄物処理の三目的を燃焼反応という迅速な反応速度で行いうる点が、過密な人口をかかえ処理、処分地の確保が困難な日本の都市で、高く評価されている。

1.2 焼却処理と炉の形式

焼却処理の基本原理は燃焼反応にある。「物が燃える」ということは、そのものが高温で酸化反応する現象であり、都市ごみの場合、紙、野菜、プラスチックなどの有機物が燃焼によって酸化され、炭酸ガスと水のような無機物に変わるわけである。もちろん多くの有機物は、時間をかければ微生物の分解作用で燃焼反応と同じように炭酸ガスと水にまで酸化されるが、焼却処理は燃焼反応という瞬時ともいえる速い酸化反応を利用した点が最大の特徴である。

また燃焼反応では、酸化と同時に焼却熱を発生するので、処理過程が高温雰囲気となり、都市ごみに付着していた病原菌やハエの卵などが死滅され、都市ごみの腐敗に伴う臭気成分も分解することが出来る。そして

不燃分は、当然のことながら灰として、すなわち安定した無機物として、炉から排出される。都市ごみ焼却炉は炉の形式によって、火格子（ストーカ）燃焼方式、流動床方式と回転炉式に大別される。又、運転方式によってバッチ燃焼方式（間けつ投入方式）と連続燃焼方式などにも大別される。

火格子焼却炉では、都市ごみは鑄物の格子の上におかれ、下から格子のすき間を通して空気が供給され、燃焼するしくみである。ごみを乾燥して燃焼させ、次に後燃焼をさせて灰にするための、ごみを移送攪拌する装置で火格子（ロストル）、駆動・伝達機器からなる。

流動床燃焼は、通常縦長の円筒状の炉内に砂などの流動媒体を入れ底部より空気を吹き込み媒体を流動させながら、都市ごみを投入して燃焼をさせる方法である。

回転炉式燃焼装置は、水平よりやや傾斜した円筒型の炉をゆるやかに回転させることにより、上部より供給したごみを下部へ移動しつつ乾燥燃焼させ、下部より灰を排出させる装置である。

焼却施設の数、1988年末で全国で1,899ヶ所、そのうち約半分を機械化バッチ炉（959カ所）が占め、次が連続燃焼式で残りの半数（397カ所）、準連続燃焼式（246カ所）と固定バッチ炉（268カ所）はほぼ同数で、全体の1/4を2分している。焼却能力は連続燃焼方式が全体の70パーセントを占め最も高い。

1.3 都市ごみ焼却と排ガス対策

焼却処理で問題になるのが煙突からの「排ガス」であるが、ごみ焼却炉の排ガス規制は国によってまちまちである。〔表1参照〕

黒煙の原因物質であるばいじんは、乾式ではマルチサイクロンや電気集塵機で除去される。湿式ではベンチュリースクラバーなどが除去用に利用される。亜硫酸ガス（SO₂）はごみ焼却炉の場合都市ごみ中に硫黄分が少ないので、それほど問題にならない。

問題のガスは塩化水素ガス（HCl）である。特に塩化ビニールなどの塩素を含むプラスチックが多いので、燃焼ガス中に高濃度の塩化水素ガスの発生がみられる。その対策も排出基準に合わせて乾式（石灰噴霧方式）や湿式（苛性ソーダや苛性カリ液による洗浄方式）が採用される。排出濃度を20ppm以下にするためには湿式が要求される。

表1 焼却に関する欧州各国の排出基準

Pollutant mg/nm ³	Germany 1989	EEC 1989	(日本) 法規制	自主 規制例
CO	50	100	(50ppm)	
Dust	10	30	200	29
SO ₂	50	300	1,356/85ppm	25
NO _x	100	—	250/85ppm	150
HCl	10	50	430ppm	20
HF	1	2		
C/C _x H _y	10	20		
Unorganic compounds				
Class I (Cd, Hg, etc)	0.1(Cd) 0.1(Hg)	0.2		
Class II (As, Co, Se, Ni, etc)	1.0(Sb, As, Pb, Co, Cr, Cu, Mn, Sn)	1(Ni, As)		
Class III (Pb, Cr, Cu, Zn, etc)		5.0		
Dioxins by Eadon (ng/nm ³)	0.1	—	(0.5)	

窒素酸化物（NO_x）もごみの中の窒素分から発生する分が寄与して、時として排ガス中に200～300ppmに達する。これを100ppm以下にするためには、還元燃焼など燃焼方式に種々の工夫が必要である。

ダイオキシンについてはスウェーデンをはじめ各国で厳しい規制体制に入っているが、一方ではその発生メカニズムや測定方法についての調査研究も各国で本格的に始まったばかりで、その対策については、まだ決め手がない。水銀やカドミウムなどの有害重金属については、排ガスの湿式洗浄や電気集塵機などによって捕集できるが、問題はその洗浄水や集じん灰の処分方法である。一般的には、水銀にはキレート樹脂、その他の重金属類には、洗浄水では凝集沈澱法、スラッジや集じん灰は埋立処分されている。

1.4 焼却施設の評価

ごみ焼却炉の性能は、焼却灰の熱しやく減量（燃え残りの量）によって評価される。すなわち熱しやく減量が小さければ小さいほどその炉は完全にごみを燃やしたことになる。現在、この規制は日本では連続式焼却炉については規制に応じて7～10%以下としている。

最近の大規模の焼却炉では、ごみの焼却熱を利用して蒸気を発生させ、発電したり、地域へ温水を供給し

たり、いわゆる余熱利用計画が盛んである。5000kWの発電能力を持つごみ焼却炉もめずらしくない。このように、焼却処理はその原理である熱による病原菌の殺菌と、熱分解による減容、安定化は公衆衛生面及び環境保全面ですぐれた方法であり、焼却技術も年々改良改善されているので、世界の都市ごみ処理に益々普及されると思われる。しかしながら、微量ではあるが排ガス中に含まれるダイオキシンや重金属等の有害物質に対する充分な対策がなされない場合は、焼却処理についての評価は、住民によってさまざまである。

2. 都市ごみ焼却に伴うダイオキシン問題の発生と行政対応

日本における都市ごみ処理に係わるダイオキシン問題の発生とそれに対する対応について振り返ってみよう。問題の発生からガイドライン公布の対応までのプロセスを、各主体の取ってきたアクション、影響の及ぼす方向とか情報の流れを図示してみると、図1のようになる。

この場合重要な役割をはたす関係者としては、次の主体が考えられる。

(1) 国の廃棄物行政関連主体 (Regulator)

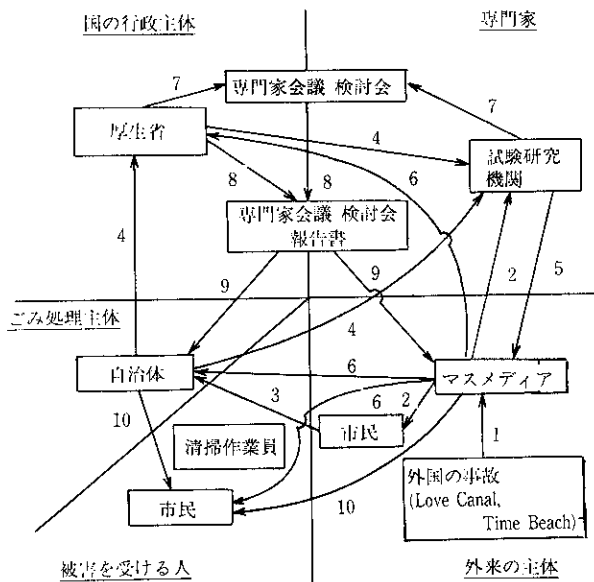


図1 都市ごみ処理に係わるダイオキシン類問題の発生と経緯

- 厚生省生活衛生局水道環境部、環境庁
- (2) 開発事業者 (Developer)
都市ごみ処理を実施する地方自治体
- (3) 専門家 (Experts)
大学、研究機関で、ダイオキシン問題に関して学識があり調査研究に取り組む人
- (4) 影響を受ける可能性のある人 (Impacttee)
一般市民、ごみ処理事業従事者
- (5) 外来の主体 (Exogenous)
直接関与しないが、関心を持つグループ、市民団体、マスメディア

今回の都市ごみ処理に係わるダイオキシン問題が発生した経緯とその行政対応を時間的に追ってみよう。

この図に示すステップ番号で、その内容に少しふれてみよう。1970年代であるがイタリアのセブソの農業工場の爆発事件 (1976年7月10日)、ベトナム戦争時 (1962~) に使用した枯葉剤、ラブ・キャナル事故、タイム・ビーチ洪水等ダイオキシンによる汚染が主として米国で発生し (Step 1)。これらをマスメディアが都市ごみ問題としてとらえ報道し、廃棄物処理に係わるダイオキシン問題が指摘される (Step 2)。これが1980年頃である。研究者等専門家は、この問題の解明に取り組む。市民団体は、廃棄物処理の安全性に疑問をいだく。主として焼却炉建設計画のある自治体に対して情報を求める (Step 3)。より詳しい情報を他の主体に求め、またこれに関する調査研究を促す (Step 4)。その結果試験研究機関で調査研究が開始される。そして日本のごみ焼却炉の焼却灰やフライアッシュ中のダイオキシンについて専門家による調査研究成果が公表される (Step 5)。フライアッシュ等からダイオキシン等が検出されたとの報道により、都市ごみ処理に伴うダイオキシン等の問題が厳しく指摘され (Step 6)。この問題を検討するため、厚生省水道環境部内に「廃棄物処理に係わるダイオキシン等専門家会議」が設置された (Step 7)。専門家会議のメンバーは、毒性学、分析、環境衛生、焼却、廃棄物処理の分野の専門家からなり、各専門家が専門的観点から検討を加えた。1983年12月8日に第一回の会議を開いてスタートを切った会議は、1984年5月21日の最終会議まで5回の会議を開き、その間にもワーキンググループの会合を数回開いて検討が行われ、専門家会議報告書がまとめられた (Step

8). このようにしてまとめられた報告書は提出後、都道府県を通じ各自治体へ、また報道機関にも公表された(Step 9). そして、その内容は、一般市民へ新聞等マスメディアを通して、また自治体等の公表、説明会により、知らされる事となった(Step10). その後、国の行政対応として関連した調査研究が実施されている。

1984年度に厚生省及び環境庁により“微量有害物質環境汚染緊急実態調査”が行われた。それに引き続き1985年度より5カ年計画で国立機関公害防止等試験研究費で、厚生省水道環境部と国立公衆衛生院で研究課題：「廃棄物の処理におけるダイオキシン等の発生メカニズム等に関する研究」が実施された。この研究は、

表2 厚生省から出された「ダイオキシン類発生防止等ガイドライン」の骨子 (1990年12月)

<p>1. 基本的な現状認識</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 当面健康影響が出るといった状況ではない。しかし、長期に残留する化合物であるので、技術的に可能な限りの発生防止を行う。 <p>2. 対策を立てるにあたっての方針</p> <p>[対象範囲]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 新設だけでなく、既設のものもふくめる。 ○ ごみ焼却時の防止だけでなく、埋め立て等の最終処分も含める。 <p>[対策技術]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 施設の型式、規模、新設、既設の別に具体的な対策を示す。 ○ NOx などの他の有害物質の排出対策と整合性のあるものを考える。 <p>[運用]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 統一的なダイオキシン類の測定法を定める。 *廃棄物研究財団 [ダイオキシン類測定技術委員会] <p>3. 対策技術の基本的な方針</p> <p>[目標]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 新設全連続炉の排出ガスのダイオキシン濃度；0.5ng/Nm³(2,3,7,8-TCDD 毒性換算濃度)以下 ○ 日本全体のごみ焼却場からのダイオキシン類の発生量；現状の1/10以下 <p>[発生抑制(運転の要素)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 燃焼；可能な限り完全に燃焼させる。 ○ 温度；集じん器の温度を300℃以下にする。 <p>[除去対策(施設の要素)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 捕集；生成したダイオキシン類の捕集効率を上げる。 ○ 分解；(現時点では実用化されていない) <p>[焼却灰とフライアッシュの最終処分]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 分解；(現時点では実用化されていない) ○ 流出防止；浸出水の管理と処理 ○ 閉じ込め；覆土の徹底
--

昭和60年度より5年間にわたり毎年環境庁総合研究プロジェクト別環境保全研究成果集に公表されている(Step 5~10が繰り返される)。

この他にも、環境庁、農林省、東京都等でもダイオキシン類に関して調査研究がされている。

1990年の夏に、小さい炉の排ガス中のダイオキシン問題が指摘され、ダイオキシン類の発生防止のためのガイドライン作成を目標に1990年9月5日に検討会が厚生省に設置された。この検討会でダイオキシンについてのガイドラインが12月にとりまとめられ、公表された。(表2参照)

なお国立公衆衛生院でダイオキシン問題に国立機関公害防止等試験研究費で取り組んできた研究課題は次の通りである。

- (1) 「廃棄物の処理・処分に伴う微量有害物質の挙動に関する研究」(1982~1984年度)
- (2) 「廃棄物の処理におけるダイオキシン等の発生メカニズム等に関する研究」(1985~1989年度)
- (3) 「ごみ焼却施設における有害物質の低減化に関する研究」(1990~1992年度)

3. ダイオキシンの化学と毒性

3.1 ダイオキシンとは

ダイオキシンとはポリ塩化ジベンゾパラジオキシン(Polychlorinated dibenzo-p-dioxins; PCDDs)のことで、下記の図2のような構造をもち、置換された塩

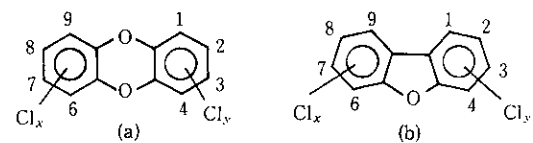


図2 PCDDsの構造(a)およびPCDFsの構造(b)

素の数と位置の違いにより75種の同族体・異性体が存在する。同じような性質と構造をもつ化合物に、ポリ塩化ジベンゾフラン(Polychlorinated dibenzofurans; PCDFs)があり、同じく135種の同族体・異性体が存在する。この両化合物を総称しダイオキシン類と呼ぶ。ダイオキシン類の分子式、異性体数などを表3に示す。

表3 ダイオキシン類の同族体

Cl数	英名	PCDD			PCDF		
		分子式	分子量	異性体数	分子式	分子量	異性体数
1	monochloro(H ₁)	C ₁₂ H ₇ ClO ₂	218	2	C ₁₂ H ₆ ClO	202	4
2	dichloro(D ₂)	C ₁₂ H ₆ Cl ₂ O ₂	252	10	C ₁₂ H ₅ Cl ₂ O	236	16
3	trichloro(T ₃)	C ₁₂ H ₅ Cl ₃ O ₂	286	14	C ₁₂ H ₄ Cl ₃ O	270	28
4	tetrachloro(T ₄)	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂	320	22	C ₁₂ H ₃ Cl ₄ O	304	38
5	pentachloro(P ₅)	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O ₂	354	14	C ₁₂ H ₂ Cl ₅ O	338	28
6	hexachloro(H ₆)	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O ₂	388	10	C ₁₂ H ₁ Cl ₆ O	372	16
7	heptachloro(H ₇)	C ₁₂ H ₁ Cl ₇ O ₂	422	2	C ₁₂ H ₀ Cl ₇ O	406	4
8	octachloro(O ₈)	C ₁₂ Cl ₈ O ₂	456	1	C ₁₂ Cl ₈ O	440	1

3.2 ダイオキシンの物性

ダイオキシンは、熱、酸、アルカリ等に対して極めて安定な物質であり、生物分解性も遅い。ただし、光に対しては比較的不安定で、脱塩素化を起こし易い。水への溶解度は極めて低く、親油性をもつが、有機溶

表4 ダイオキシンの物理化学的性質

	2,3,7,8T ₄ CDD	OCDD
分子量	322	456
融点(°C)	305	130
分解温度(°C)	>700	>700
溶解度(ppm)		
o-ジクロロベンゼン	1400	1830
クロロベンゼン	720	1730
キシレン	—	3580
ベンゼン	570	—
クロロホルム	370	560
n-オクタノール	48	—
メタノール	10	—
アセトン	110	380
水	0.072ppb	—
蒸発速度(水)cm/day	1.7×10 ²	—
化学的安定性		
通常の酸	安定	安定
酸化剤	強酸化剤により分解	安定
アルカリ	安定	条件により分解
光	分解	分解

媒に対する溶解度も比較的低い。2,3,7,8-T₄CDDとOCDDの物理化学的性質を表4に示す。

3.3 ダイオキシンの毒性

ダイオキシン類は、その異性体、同族体間における毒性の相違が大きいことが特徴的であり、また、生物種における感受性にも大きな差が認められる。

ダイオキシン類の急性毒性を表5に示すが、塩素置換のないジベンゾパラダイオキシンとOCDDの毒性は極めて低いのに比較して、2,3,7,8-T₄CDDの場合は非常に強い毒性を示している。

また、2,3,7,8-T₄CDDをいくつかの動物に投与して得られた致死毒性を表6に示す。モルモットでは、体重1kgあたり1μg程度で半数致死が起きるが、マ

表5 ダイオキシン異性体の急性毒性

置換位置	半数致死量(μg/kg)	
	モルモット	マウス
None		>50×10 ³ (ip)*
2,8,	>3×10 ⁵	
2,3,7	29,444	>3×10 ³
2,3,7,8	0.6-2.0	283.7
1,2,3,7,8	3.1	337.5
1,2,4,7,8	1125	>5×10 ³
1,2,3,4,7,8	72.5	825
1,2,3,6,7,8	70-100	1250
1,2,3,7,8,9	60-100	>1440
1,2,3,4,6,7,8	>600	
1,2,3,4,6,7,8,9		>4×10 ⁴

* (McConnel et al. 1978の報告より)

表6 2, 3, 7, 8-四塩化ダイオキシンのいろいろな動物に対する致死毒性

動物種	性	投与のルート	半数致死量(μg/kg)
マウス		経口	283.7
ラット	♂	経口	22
	♀	経口	45
モルモット	♂	経口	0.6
	♀	経口	2.1
ウサギ	♂♀	経口	115
	♂♀	経皮	272
	♂♀	腹腔内	>252
サル		経口	50-70

表7 ダイオキシン類の毒性等価換算係数(TEF)の例

	Eadon'82	U.S.EPA'85	Nordic	International
TCDDs	2,3,7,8-	1	1	1
	others(21)	0	0.01	0
PeCDDs	1,2,3,7,8-	1	0.5	0.5
	others(13)	0	0.005	0
HxCDDs	1,2,3,4,7,8-	0.03	0.04	0.1
	1,2,3,6,7,8-			
	1,2,3,7,8,9-			
	other(7)	0	0.0004	0
HpCDDs	1,2,3,4,6,7,8-	0	0.001	0.01
	other(1)	0	0.00001	0
OCDD(1)		0	0	0.001
TCDFs	2,3,7,8-	0.33	0.1	0.1
	others(37)	0	0.001	0
PeCDFs	1,2,3,7,8-	0.33	0.1	0.01
	2,3,4,7,8-			
	others(26)	0	0.001	0
HxCDFs	1,2,3,4,7,8-	0.01	0.01	0.1
	1,2,3,6,7,8-			
	1,2,3,7,8,9-			
	2,3,4,6,7,8-			
	others(12)	0	0.0001	0
HpCDFs	1,2,3,4,6,7,8-	0	0.001	0.01
	1,2,3,4,7,8,9-	0	0.00001	0
OCDF(1)		0	0	0.001

ウスでは284 μ gであった。両者の間には200倍以上の感受性の差がある。この差が何に起因するのかは、いまだ明らかとなっていない。

さらに、ダイオキシン類は催奇形性と発ガン性を持つ物質と考えられている。

以上のように、ダイオキシン類の毒性は異性体・同族体ごとに大きく異なるため、毒性評価の際は以下の表7に示すような毒性等価換算係数(TEF)を用いて、2,3,7,8-TCDD毒性等価物量(TEQ)を算出し、トータルとしての毒性によって評価を行う。

3.4 ダイオキシンの発生源

ダイオキシン類の主な発生源としては、以下の5つが挙げられる。

- 1) 都市ごみ焼却施設
- 2) 製鋼所・金属精錬などの工業プロセス
- 3) パルプ工場の塩素漂白工程
- 4) 自動車排ガス
- 5) 農業やクロロフェノールなどの化学製品

これらの発生源のうち、わが国での排出量の概算結果例を表8に示す。ただし、この結果はPCDDおよびPCDFの総量として表記してあるため、毒性を考慮に入れてTEQ表示で評価する必要がある。また、全ての発生源をカバーしている訳ではなく、特にデータが豊富な都市ごみ焼却炉からのデータが載っているため、都市ごみ焼却からのダイオキシンがほとんどという印象を与えている。

また、スウェーデンでの推定発生量を表9に示す。この結果を見るとダイオキシン類の主な発生源は、都市ごみ焼却施設と金属精錬関係であり、それぞれ1/3を占め、それ以外の発生源が1/3を占めている。

表9 既知のダイオキシン発生源の年間推定発生量(スウェーデン)

発 生 源	発 生 量 年間推定発生量 (TCDD当量, g/年)
焼却炉(煙道ガス) (1985年、新基準以前は200-300, 1992年からは年間約10g)	50-100
自動車(排気ガス)	5-15
鉄、鉄鋼、非金属工場(煙道ガス)	50-150
パルプ、製紙工場(煙道ガス)	4-6
パルプ、製紙工場(廃水)	15-30
石炭燃焼発電所(煙道ガス)	~1
病院の焼却炉(煙道ガス)	~10
有害廃棄物の燃焼	2-6

サンプリングロス考慮に於いて推定

出典: Rappe, C.: 都市ごみ焼却におけるダイオキシン問題に関する京都会議, 1991

4. ごみ焼却に伴うダイオキシンの発生等に関する研究

ダイオキシン等の芳香族塩素化合物は、焼却炉等から環境中に放出されて、大気、水系を経て土壤の汚染をもたらす可能性がある。そこで、国立公衆衛生院では主としてごみの焼却において、運転条件等がダイオ

表8 ダイオキシン類の排出量概算結果(日本)

燃焼・焼却関係など	ダイオキシン類濃度		廃棄物1トンあたりの排ガス発生量 (Nm ³ /ton)	推定年間焼却処理量		推定年間排出量	
	PCDDs (ng/Nm ³)	PCDFs (ng/Nm ³)		推定廃棄物量 (ton/yr)	焼却処理率等 [-]	PCDDs (kg/yr)	PCDFs (kg/yr)
都市ごみの焼却	290~1700*1	300~1900*1	5,000	58,700,000		85~500*1	88~560*1
有機塩素系廃棄物, 廃油などの焼却	150	340	15,000	3,627,000	1.0	8.2	19
医療系廃棄物の焼却	140	300	8,000	1,326,000 ~ 3,977,000	1.0	1.5~4.5	3.2~9.5
下水汚泥の焼却	5.0	30	2,500	3,116,000	1.0	0.039	0.234
製紙スラッジの焼却	5.0	30	2,500	4,034,000	0.3	0.015	0.091
回収黒液ボイラ	1.0	0.7	6,700	12,281,000	1.0	0.082	0.058
木材, 廃材の焼却	150	100	8,100	8,500,000	0.3 × 0.0015*2	0.005	0.003
金属精錬関連施設	320	940	250	45,283,000	1.0	3.6	10.6
活性炭再生処理	1.0	1.0	3,000	20,000	1.0	0.00006	0.00006
たばこの煙	5,256	—	0.002 (Nm ³ /本)	306 × 10 ⁹ (本)	1.0	3.2	—
紙, 板紙製品	160 (μg/ton)	30 (μg/ton)	—	22,537,000 (流通量)	0.6*3	2.2	0.41
自動車排ガス	2.0(ng-TCDDs/km) × 10(km/L-oil) × 340,000,000(L-oil/yr)					0.007**	—
石油添加剤(潤滑油)	30(ng/g) × 800(g/L-oil) × 648,000,000(L-oil/yr)					16	—
農 薬*5	主 な 用 途	ダイオキシン類含有濃度 (ppm)	生産量(ton/yr)		ダイオキシン類放出量 (kg/yr)		
2, 4 - P A 剤*6	除草剤, 植物成長調整剤	0.001~23.8	160		~3.8		
M C P 剤*6	除 草 剤	0.033~1.564	162		~0.25		
C N P 剤*7	除 草 剤	2,090~3,880	1,912		4,000~7,400		
クロメトキシニル剤*7	除 草 剤	23	591		13.6		

注) *1: 幾何平均値~算術平均値, *2: 木材防腐剤処理率, *3: 塩素漂白率, *4: TCDDsのみ, *5文献14)より, 14)綿貫礼子, 河村宏編集著: 毒物ダイオキシン, 技術と人間 pp.18-35(1986), *6: フェノキシ農薬, *7: ジフェニルエーテル系農薬
 出典: 平岡正勝, 廃棄物学会誌, 1, 20-37, (1990)

キシン等の発生に及ぼす影響について研究を行い, また焼却灰や飛灰等の埋立処分におけるダイオキシン等の挙動を研究し, 廃棄物処理に伴うダイオキシン等の制御手法の開発を図ることを目的とし, 昭和57年度に着手した。最初はダイオキシン類のサンプリングや分析法に重点を置いて研究をしたが, ここでは昭和60年度より厚生省水道環境部と共同研究として, 5カ年間にわたり行った「廃棄物処理におけるダイオキシン等

の発生メカニズム等に関する研究」の成果を示す。

4.1 都市ごみ焼却施設からのダイオキシン発生実態調査

1) ストーカー式焼却炉 (A清掃工場: 焼却能力600t/日, B清掃工場: 焼却能力600t/日)を対象に3日間にわたって調査を実施し, 定常運転時の排出実態を把握するとともに, 可燃破砕ごみを焼却している調査対象施設については, 可燃破砕ごみを焼却しない

目を設け、通常運転時と比較した。また流動床炉(C清掃工場：焼却能力50t/日、D清掃工場：焼却能力450t/日)について、3日間にわたって運転時における排ガス中のPCDDs、PCDFsの濃度を測定した。これらの調査から以下の事項が明かとなった。

①ガス状のPCDDsとPCDFs濃度は、ともに焼却炉から煙道へと流れ、冷却されるにしたがって増加していく傾向にあり、特に、電気集じん機(EP)の前後で増加する傾向がみられ、EP付近における生成の可能性が示唆された。

②PCDDsに関しては O_8 CDDが最も多く、塩素置換数が減るにしたがって、その濃度も減少する。

③飛灰中のPCDDs、PCDFsの同族体は、排ガス試料に比べ低塩素化合物の割合が大きく、高塩素化合物の割合は小さくなっている。

④PCDD同族体における2,3,7,8-置換異性体の比は、ほぼ計算値に近く、2,3,7,8-位に特異的に塩素が導入されるような現象は認められなかった。

2) バグフィルタを備えたストーカー式焼却炉(E清掃工場：焼却能力130t/日)について、3回にわたって運転時における排ガス中のPCDDs、PCDFsの濃度を測定したところ以下の事項が明かとなった。

①PCDDs濃度は焼却炉からバグフィルタへの過程で増加し、バグフィルタから煙道への過程では減少する傾向がみられた。特に、ガス状PCDDsは煙道における濃度がバグフィルタ前の濃度に比べ大幅に低下しているため、バグフィルタによって大部分が除去されていると考えられる。

②捕集灰中のPCDDs、PCDFsの同族体はバグフィルタ前における排ガス試料のばいじん中に比べ低塩素化合物の割合が大きく高塩素化合物の割合は小さくなっている。

3) バグフィルタ及びEPを備えた焼却炉を調査対象とし、両者の除去効果に注目しながら研究を行った。二つの除じん装置を並列に備えたストーカー式焼却炉(F清掃工場：焼却能力300t/日)について測定したところ、以下の事項が明かとなった。

①バグフィルタとEPではバグフィルタにおいて除じん効果が高い。

②各測定点におけるPCDDsの塩素置換数別同族体(T_4 CDD $\sim O_8$ CDD)の相対量を見てみると、 T_4

CDD、 P_5 CDD、 H_6 CDDの濃度が焼却炉から反応塔への過程において増加し、逆に O_8 CDDの割合は減少している。また、PCDFsの塩素置換数別同族体(T_4 CDF $\sim O_8$ CDF)の相対量を見てみると、 T_4 CDF、 P_5 CDFの割合が焼却炉から反応塔への過程で増加傾向を示し、除じん過程で H_7 CDF、 O_8 CDFの割合が減少傾向を示している。

③捕集灰中及び除じん前排ガス試料のばいじん中のPCDDs、PCDFsの同族体比を見てみると、捕集灰間に大きな違いは認められなかった。高温時においては、捕集灰と除じん前排ガス試料のばいじんの構成比は比較的近い値を示しているが、低温時にはまったく異なる状況であった。

④同族体における全異性体中に占める2,3,7,8-置換異性体の割合は理論計算値と比べて低くなっており、2,3,7,8-置換異性体を測定していない場合には、理論計算値を使って2,3,7,8- T_4 CDD毒性等価物濃度を計算すれば高めの値がでる。

4.2 ダイオキシンの生体影響評価に関する研究

ダイオキシンの発ガンプロモーター活性を多形核白血球を用いた活性酸素産生能により検討した。ダイオキシンとして5種の T_4 CDDs(1,2,3,4- T_4 CDD, 1,2,6,7- T_4 CDD, 1,3,6,8- T_4 CDD, 1,3,7,8- T_4 CDD, 2,3,7,8- T_4 CDD)と O_8 CDD及び各種ダイオキシン(1-6塩素化ダイオキシン)の混合物を用いて検討を行った。検討した7種のダイオキシンはいずれも活性を示さなかった。従ってダイオキシンは、C-kinase活性化による発ガンプロモーター活性は持っていないと考えられた。

4.3 PCDDs、PCDFsの前駆体の発生に関する研究

ここでは、前駆体として特に重要なクロロベンゼン類(CBs)とクロロフェノール類(CPs)を中心に研究を行った。まず、それらのGC分析手法について検討した。充填カラムキャピラリーカラムとも1種だけでは、これら30種の化合物を完全に分離するのは困難であるが、極性の異なる2種のカラムを特定の条件で用いることによりほぼすべての成分を分離分析することが出来る手法を開発した。

また、小型の実験用の熱分解炉と燃焼炉を作成し、セルロース(木材、紙)、リグニン(木材)、塩化ビニル、塩化ビニリデンなどの熱分解や燃焼による生成物

を分析した。その結果、塩素系プラスチックの熱分解により9種のCBsと1種のCPsの生成を確認した。また、熱分解温度が500°Cを越えるとCBsの生成が減少する傾向にあることがわかった。また、燃焼実験から塩素系プラスチックだけよりも、セルロースやリグニンが同時に燃焼するときの方が、より多様で多量な前駆体の生成があることも分かった。

ついで、実際の炉におけるCBs, CPsの存在状態を調べるための試料採取・回収・分析法として、「吸着捕集管法—超音波アセトン抽出回収法—窒素吹付濃縮法—GC/MS (GC/ECD) 分析法」を開発した。そして、いくつかの実際の炉において、炉出口から煙突部までのCBs, CPsの変動を追い、それらが数ng/Nm³~数百ng/Nm³の濃度で存在すること、そして、除じん装置の前と後で、多くの場合にCBsでは濃度が増加し、CPsでは濃度が減少した。この現象を確認するため、メタン、エタン等の熱的にも安定で試料採取の問題も少ない低級炭化水素の測定を同時に煙道で行ったところ、炉出口→除じん装置の前→その後——と下流になるにしたがい炭化水素成分が増加する現象が認められた。

これらのことから、高温の燃焼炉の中では、有機物は分解してラジカルが分子を形成したり、固体の一部が分解を受けてより低級な有機化合物を生成し、炭化水素からCBs, CPs, そしてPCDDs, PCDFsと化合物の一部が変化する機構が考えられた。それ故、ダイオキシン類の生成を抑えるには、炉の燃焼と同じくらい煙道の管理が重要であることを示唆していると思われる。なお、除じん装置の後で濃度が減少する化合物があったのは、除じんに用いている集じん用の板やフィルターで取り除かれる量が生成量を上回ったからであると推定された。

4.4 最終処分場におけるダイオキシン存在実態調査

飛灰、焼却灰等に含まれているダイオキシン等の埋立処分における実態を把握し、該当物質の挙動を研究するために埋立地の調査を実施した。

埋立土壌中のPCDDsの検出値は、0.67~49.3ng/gであり、平均21.5ng/gであった。また、PCDFsの検出値は、2.92~70.5ng/gであり、平均36.7ng/gであった。構成比では、新しいほどT₄CDD, P₅CDD, H₆CDDの構成比が減少し、O₈CDDの構成比の増加がみられ

る。PCDFsについては、PCDDsほど明確な傾向は認められなかった。浸出水中のPCDDs, PCDFsはH₇, O₈のみ検出された。

4.5 都市ごみ焼却施設から排出される飛灰から溶出するダイオキシン類に関する研究

清掃工場の飛灰等は最終的には埋め立て処分されることになるが、雨水、海水あるいは共存する廃棄物などにより様々な影響を受け、浸出液とともに飛灰に含まれるダイオキシン類が流出し、環境を汚染することが懸念される。そこで、G清掃工場から採取した飛灰を用いて適切な溶出試験方法を検討し、PCDDs及びPCDFsについて溶出特性などについて調べたところ、飛灰自身や溶出残さからはかなり高濃度のPCDDs, PCDFsが検出されたにもかかわらず、溶出液からは検出限界(0.4ng/l)以下で検出されなかった。そういう点などから、ダイオキシン類の溶出試験方法として、環境庁の告示第13号で規定されている振とうパッチ法の応用は短時間で済むという利点はあるが、埋立地からの溶出実態を十分反映していない可能性があり、また実験操作上の問題もある。一方、カラム法では実態を反映するが数十日にわたる管理と操作が必要になり、いずれもルーチン試験には適していないと判断された。このため、今後、振とう法の改良も含めて、飛灰中のダイオキシン類の溶出試験方法のための公定法の検討を行う必要があると考えられた。

4.6 廃棄物焼却炉におけるダイオキシン類測定方法

排ガス試料の採取条件に関する検討及び飛灰を用いた4分析機関のクロスチェックとダスト抽出条件の検討を行い、PCDDs測定法暫定案を以下のとおりまとめた。

①排ガス試料採取方法

ア. 等速吸引：排ガス流速に対し相対誤差±20%の範囲内

イ. 吸引ノズル：内径4mm以上

ウ. ダスト捕集部：120°C以下

エ. 試料ガス採取量：3Nm³以上

オ. 排ガス温度が500°C以上での採取には冷却ブルーブを使用する

カ. 排ガス処理装置におけるダイオキシン類の除去性能を測定するときには、同時期に測定する。また、これらの周期性があれば、少なくともそれら

の1周期より長い期間にわたり測定を行う。

キ. ガスト採取部以降は原則としてUSEPA法とする

②分析方法

ア. 抽出：固体試料には塩酸処理を行う。

イ. 排ガスサンプルでは粒子状、ガス状を区別する方法がないため、フィルター、ドレン、吸着剤の抽出液は混合してよい。

ウ. 内部標準試料： ^{13}C -2,3,7,8- T_4CDD , ^{13}C - O_8CDD , ^{13}C -2,3,7,8- T_4CDF , ^{13}C - O_8CDF

エ. クリーンアップ：硫酸処理、シリカゲルカラムクロマト、塩基性アルミナカラムクロマトを標準とする。

③結果の表示

ア. 同族体、異性体分析

- ・ 4塩素化物～8塩素化物の各同族体濃度とその総和
- ・ 2,3,7,8位置の塩素置換体の各異性体濃度(17異性体)

イ. 検出下限の明示及び目標

- ・ 排ガス中濃度：0.05ng/Nm³ as 2,3,7,8- T_4CDD
- ・ 灰中濃度：0.01ng/g as 2,3,7,8- T_4CDD

5. 残された課題

ダイオキシン問題に関して次のような質問を良く受ける。

(1) 都市ごみ焼却炉からのダイオキシンの毒性

ダイオキシン、フランとは一体何であるのか。純品としてのダイオキシンの毒性のデータがある。ごみ焼却施設から排出されるダイオキシンは、純品の化学物質とは違う。発灰として、又はガス状として、排ガス中に含まれるダイオキシンは、健康への障害はどういうメカニズムで、どの程度の影響を与えるのか。含有量と健康影響(リスク)との関係は、必ずしも純品のダイオキシンのDose-Response関係では説明がつかない。正確には、排ガスの組成と健康影響との関係が必要な情報である。

ダイオキシン問題が、除草剤→ベトナム戦争での使用→イタリアのセブソ事故→都市ごみ焼却炉という連想で、ダイオキシンに対するリスク認識がされているという問題がある。

都市ごみ焼却炉からの排ガス(ダイオキシン類も含まれている)のHI(Hazard Identification), DRA(Dose-Response Assessment)の情報が無いに等しく、これを、排ガス中の含有ダイオキシンでもって、それを純品のダイオキシンと同等のHazard、及び、同じDRAの関係にあると現在は仮定しているがそれで問題は無いのか。この辺の情報が必要とされている。

(2) ごみ焼却場から排出されるダイオキシン含有有害ガスについて

焼却場から排出されるダイオキシン有害ガスの排出量について、現在のサンプリング、分析法で正しく測定しているのかが問題である。煙道から排出されるガス中のダイオキシンを正確に測定する努力がされている。サンプリング中に、温度によっては、フィルターの所でダイオキシンが生成されることがある。また分析も操作によって、含有量ではなく溶出量の一部を測定していることになる。測定器具の精度により、分解能や分離能の違いから、他の類似物質を含めた値を測定していることになり、実際の含有量以上の値を出していることもある。

実際に人の健康への影響を見るためには、煙突から排出されて拡散され人へ摂取されるダイオキシンの曝露量を見る必要がある。

E.A(Exposure Assessment)において、上記のような問題と、ヒトが曝露された量と体内に摂取された排ガス中のばいじん又はガス状のダイオキシンが純品のダイオキシンとしたらどの程度の量に相当するのかという問題が残る。

(3) 人体におよぼす影響の評価

毒性評価において、現在使われているデータは、純品のダイオキシンを、動物実験で、しかも高濃度でのものである動物のデータをヒトに当てはめた場合はどうなるか、高濃度のデータを、今問題にしているような低濃度領域に当てはめたらどうなるかで評価している。排ガス中に含まれていると考えられるダイオキシンのヒトへの毒性はどうであるかといった定量的情報が求められている。

さて1990年12月にダイオキシン類発生防止等ガイドラインが出されて今残された課題を整理すると、

- 1) 排出基準が、国際的に比較されるようになり、その数字の根拠であるサンプリングや分析法の国際統

一がさらに必要であり、より精度の高い分析を保証するための精度管理についての検討。

- 2) 都市ごみ焼却にともなう、発生するダイオキシン類の環境影響や、人体への影響について、定量的リスクアセスメントの研究。都市ごみ焼却という世界で必要な処理に伴う健康影響については国際的な共同研究が必要と思われる。
- 3) 従って、より精度の高い科学的な分析値、人への影響から、定量的リスクアセスメントを行って、望ましいごみ処理対策（リスクマネジメント）を講じていく必要がある。
- 4) 「未だ分からない事が多い、情報が無い」中で、いつまでもR&Dをして対策を出さないことは許されません。そういう訳で、積極的対策という一つの例がガイドラインのとりまとめがされた。

そこでこのガイドラインをうけて、自治体では

- ①ごみの減量化、資源化の推進は当然であるが、
- ②現存の施設の改善 にとりかかるとに当って
まず、①排出実態の調査

↓

②改善の対策

- (イ)物理的に可能かどうか
- (ロ)経済的に可能かどうか

の検討が必要である

③これからの新設の炉の建設については、ダイオキシンのコントロールも含めた総合的大気汚染対策が求められる。ダイオキシンに目が向かう余り、他の汚染物質のコントロールがおろそかになってはならない。

一方国の行政としては、

①特に中小の焼却工場、機械化バッチ、固定化バッチ炉についての対応が求められる。

1990年から始めた私共厚生省との研究では、中小規模の炉についてのダイオキシンコントロールの知見を得るための研究にとりかかっている。炉の数では機械化バッチが51%、固定バッチが14%である。処理能力では、2つを合わせれば焼却全体の18%と少ないが、廃ガス中のPCDDsの濃度は数十倍あるいは百倍のオーダーということになり、トータルのダイオキシン排出量は無視できない。またPCDDs以外の汚染物質、Hg等重金属の規制について研究

が必要と思われる。

②このようなこともあって、国としてはダイオキシンに関する総合的戦略を早期に建て、対応していく必要があろう。

6. 謝 辞

国立公衆衛生院でダイオキシン問題に取り組むに当たっては、鈴木武夫元院長(廃棄物処理に係わるダイオキシン等専門家会議座長)よりの適切なアドバイスをいただいた。そして国立機関公害防止等試験研究費で行った研究課題には次のように多くの職員が関わった。

- 1) 「廃棄物の処理・処分に伴う微量有害物質の挙動に関する研究」(1982~1984年度)竹下隆三、池口孝
- 2) 「廃棄物の処理におけるダイオキシン等の発生メカニズム等に関する研究」(1985~1989年度)渡辺征夫、森川馨、斎藤眞、宮崎正信
- 3) 「ごみ焼却施設における有害物質の低減化に関する研究」(1990~1992年度)渡辺征夫、宮崎正信

また「廃棄物の処理におけるダイオキシン等の発生メカニズム等に関する研究」の研究は厚生省水道環境部との共同研究であり、厚生省は(財)廃棄物研究財団に委託しその中に「環境微量汚染物質研究委員会」(平岡正勝委員長)を設置して実施した。本院で行う研究についても委員会の先生方から助言をいただきながら、研究を進めてきた。ダイオキシンに関する研究の成果を得ることは、ここに記述した多くの職員や委員会の先生方及び廃棄物処理施設を使わせてくれた自治体や運転や分析に係わった民間企業の多くの人々の協力無しには不可能であったことを記し、謝意を表します。

引用文献

- 1) Tanaka, M., Takatuki, H., Itokawa, Y.: Solid Waste Disposal, Maxcy-Rosenau Public Health and Preventive Medicine, 13th Edition, Appleton & Lange, (to be published)
- 2) Nilsson, K.: Emission Standards for Waste Incineration, Waste Management in Europe 1992, ISWA Annual Conference, Sep. 1990 (Amsterdam)
- 3) Rappe, C.: Sources of and Human Exposure to PCDDs and PCDFs, 都市ごみ焼却におけるダイオキシン問題に関する京都会議, 1991.
- 4) 平岡正勝: 廃棄物処理におけるダイオキシン類の生成と制御, 廃棄物学会誌, Vol. 1, No. 1, 20-37 (1990).