

ダイオキシン類の発生源と生成抑制対策

Sources of Polychlorinated Dioxins and Their Prevention & Control Measures

酒 井 伸 一*

Shinichi Sakai

1. はじめに

ダイオキシン類の制御方策の原則は、①発生抑制、②循環系との協調コントロール、③環境サイクルコントロールにある。発生抑制はいうまでもなく、現在の発生源を絶つという意味での発生源対策を、利用できる制御技術を念頭において最大限行うという意味の対策である。循環系との協調コントロールでは、廃棄前提の社会から循環型社会への移行を念頭におき、現在、ごみの焼却過程で発生しているダイオキシン問題をリサイクル過程にシフトさせないという意味から重要となる。そして、第3の環境サイクルコントロールは大気や水系などの環境媒体に進入したダイオキシン類が、食物連鎖と生物濃縮を繰り返しながら、種々の食品に含まれ、ヒトが摂取する流れをコントロールする概念である。この環境サイクルコントロール概念のなかでは、緊急性の観点からは、①曝露コントロールとして摂取フローの制御、②二次発生源対策として環境蓄積場の制御、が重要となる。こうした視点は、環境政策としての方向性を考えるものと位置づけられようが、環境場によっては、半減期5～10年とも言われるダイオキシン類の場合、いったん環境排出がおこると長く環境媒体に蓄積し、食品媒体をつうじてヒト・生体の摂取は続くこととなる。すなわち、発生源対策として即効性のある環境進入を抑制したとしても、蓄積媒体の影響が長く続くのである。

本論では、ダイオキシン類の現在のフローとしてみた発生源と環境蓄積からみた発生源、生成抑制方策を構想するための物質フロー解析からのアプローチ、各発生源における生成抑制方策について考える。

2. ダイオキシン類の発生源

2.1 現状のフローとしてのダイオキシン類発生源

我が国におけるダイオキシン類の発生源として、都市ごみ焼却が最大のものであることは広く知られるところとなった。日本でダイオキシン類の環境排出フロー量を調べた最新データは1998年11月に公表された通産省のインベントリーであろう(表1)¹⁾。製品生産量あたりのダイオキシン類排出原単位(単位としては、ng TEQ/tonなど)に当該製品等の年間生産量(ton/年)を乗じて年間のダイオキシン類排出量(g TEQ/年)を試算したものである。このインベントリー自身、完全なサーベイによるものではないが、産業界の自主的努力により分析、調査された貴重な成果ともいえる。既知の発生源のうち、都市ごみ焼却が約80%の負荷となっているおり、平岡が1990年に報告した排出インベントリー²⁾における都市ごみ焼却の負荷量とその割合からは大きくは変わらない。この通産省第二次報告においても記述されているが、この都市ごみ焼却からの発生量は近く最新の数値が試算予定とされている。ちなみに1998年9月に厚生省より報告された80 ng TEQ/Nm³を超過したごみ焼却施設の改善状況によれば、1997年1月に1,338g TEQ/年から94g TEQ/年に削減されているとのことである。こうした廃棄物処理工程以外の産業工程が詳細に調査されたわけであるが、そのなかでは製鋼(電気炉)工程からの発生が、190g TEQ/年と全発生量の3.5%を占め、鉄鋼業焼結工程からが119g TEQ/年と2.2%を占める。その他では、亜鉛回収業から34g TEQ/年(0.6%)、アルミ合金製造業から16g TEQ/年(0.3%)となっている。すでにごみ焼却のダイオキシン対策を済ませたドイツやオランダなどでは、鉄鉱石やリサイクル物を用いる製鉄、非鉄プラントなどの産業プロセスからのダイオキシン類発生負荷が多い状況になっている。日本では、すでに製鋼用電気炉は大気汚染防止

* 京都大学環境保全センター助教授
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

表1 我が国におけるダイオキシン類排出量の推計 (g-TEQ/年)-1998年11月の通商省試算による

発生源	1990 ¹⁾ (構成比%)	1997 (構成比%)	1998 ⁵⁾ (構成比%)
都市ごみ焼却	3,100-7,400 (79.5-88.5)	4,300 ²⁾ (82.7-85.3)	4,300 (79.8-82.2)
有害廃棄物焼却	460 (5.5-11.8)	460 (8.8-9.0)	460 (8.5-8.8)
医療廃棄物焼却	80-240 (2.1-2.9)	80-240 (1.6-4.6)	80-240 (1.5-4.5)
下水汚泥焼却	5 (0.0)	5 (0.0)	5 (0.1)
製鉄・鉄鋼	250 (3.0-6.4)	190 ³⁾ (3.7-3.8)	190 (3.5-3.6)
KP回収ボイラ	3 (0.0)	2 ³⁾ (0.0)	2 (0.0)
紙パルプ(スラッジ)	2 (0.0)	3 ³⁾ (0.0)	3 (0.0)
木材燃焼プラント	0.2 (0.0)	0.2 (0.0)	0.2 (0.0)
自動車排ガス	0.07 (0.0)	0.07 (0.0)	0.07 (0.0)
晒工場排水		0.4 ³⁾ (0.0)	0.4 (0.0)
農業製造		0.06 ⁴⁾ (0.0)	0.06 (0.0)
塩化ビニル製造業			0.994 (0.0)
セメント製造業			1.86 (0.0)
焼結工程			118.8 (2.2-2.3)
鋳鍛鋼製造業			1.4 (0.0)
銅一次製錬業			4.0 (0.1)
鉛一次製錬業			0.05 (0.0)
亜鉛一次製錬業			0.3 (0.0)
銅回収業			0.05 (0.0)
鉛回収業			1.0 (0.0)
亜鉛回収業			33.6 (0.6)
貴金属回収業			0.02 (0.0)
伸銅品製造業			5.316 (0.1)
アルミニウム合金製造業			15.7 (0.3)
アルミニウム圧延業			1.90 (0.0)
電線ケーブル製造業			1.89 (0.0)
アルミニウム鋳物ダイカスト			0.21 (0.0)
電気業：火力発電			2.4 (0.0)
合計	3,900-8,360 (100.0)	5,041-5,201 (100.0)	5,230-5,390 (100.0)

1) 平岡正勝京都大学名誉教授による試算値 2) 平成9年1月厚生省試算値 3) 平成9年5月通商産業省試算値
4) 平成9年4月環境庁試算値 5) 塩化ビニルは平成10年11月通商産業省試算値

法上の規制対象施設に指定されているが、それ以外の鉄鋼業焼結工程、亜鉛回収業、アルミニウム合金製造業については当面、自主的な対策としての産業別ガイドラインにより、排出抑制が図られることとなっている。

2.2 蓄積としてみたダイオキシン類

フローとしての発生源インベントリーは、発生抑制ターゲットや抑制対策を考えるうえで重要である。一方、魚類や乳製品といった摂取を考えれば、蓄積の場としての環境媒体の役割を把握することも重要である。都市ごみ焼却以外にもダイオキシン類の発生源は広く、燃焼由来の発生源以外に、塩素系化学物質の生産使用に伴う生成(化学物質由来)があり、二次発生源ともなる環境中のシンクにコンポスト、下水汚泥、汚染土壌などがある。なお、化学物質由来の発生源とは、かつて枯葉剤として問題になった2, 4, 5-Tの生産工程における不純物の例や紙の漂白工程における塩素使用にみられるような化学反応工程における生成である。こうした意味でダイオキシン類の地域内収支の把握は貴重と言える。FiedlerらはHamburgについて³⁾、益永・中西らは霞ヶ浦、東京湾について⁴⁾、脇本らは

松山平野を取り上げ⁵⁾、それぞれ精力的に研究している。益永・中西らの東京湾についての結果によれば、過去35年間でダイオキシン総量として750kg、毒性等価量として2200g TEQが蓄積したとされ、その由来として焼却由来の大気沈着とPCPなど農業由来のものなどがあり、現在の発生源インベントリーとは異なるものであるとしている。脇本らは松山平野を一つの環境系とみなして、そのダイオキシン類の分布と動態を調査した結果、燃焼過程、塩素系漂白剤のほか、農用地のダイオキシン汚染が沿岸域の魚介類に影響をおよぼしている可能性を指摘している。

歴史的にみてダイオキシン類はどの時代から存在し、その発生量はどのように変化してきたか、その蓄積状況はどのようになっているのか、ダイオキシン類による環境汚染の歴史トレンドに関する報告がはじまっている。バルト海、コンスタンツ湖、北米五大湖、そして琵琶湖について、この1～2世紀の蓄積状況がわかってきた⁶⁻⁹⁾。琵琶湖では、1840年代から1910年代まで濃度変化はほとんど認められず、1955年に相当する底質コアからダイオキシン類が増加をはじめる。その後、ダイオキシン類濃度は急増し、1980年頃にピークを示

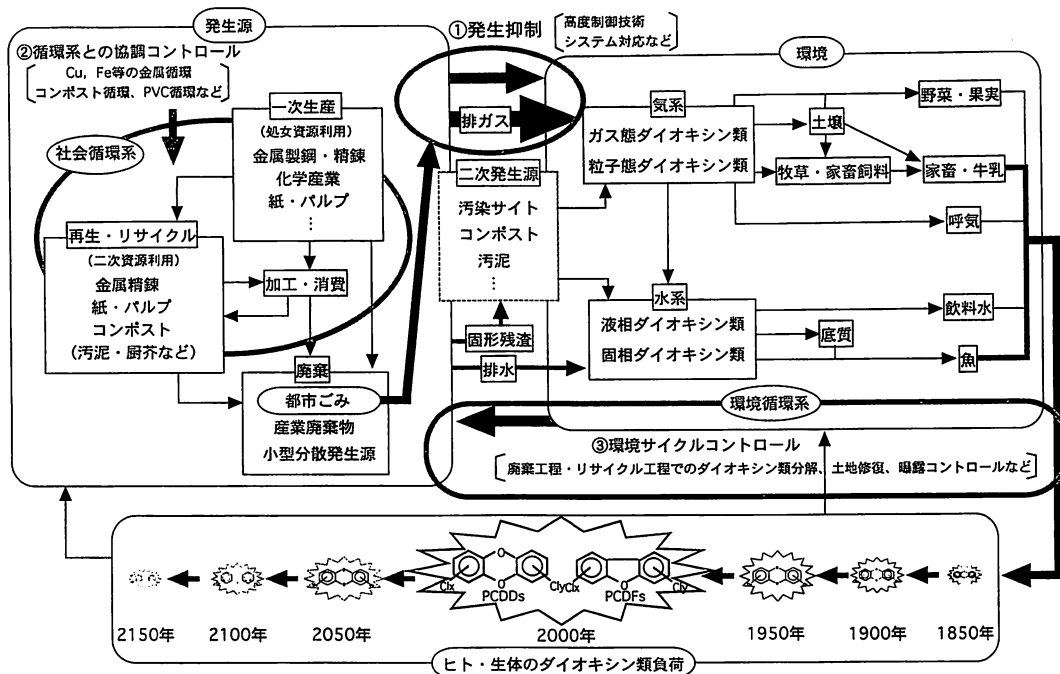


図-1 ダイオキシン類の発生・環境移動・曝露イメージと制御ポイント

し、その後は横ばい状況が続いている。同族体分布、異性体分布の検討から、燃烧由来のダイオキシン類とともに、除草剤PCPやCNPに由来する影響が上乗せされていることを確認している。欧米諸国の調査結果では、1970年代から1980年代にかけてピークを迎えた後、現在は減少傾向にある例が多く示されている。廃棄物対策や農薬製造、化学プラント廃水などの対策による効果と考えられている。一方で、最近の底質コアにおいても、依然として高濃度のダイオキシン類が検出されている例もあり、こうした場合は過去に環境蓄積されたダイオキシン類は直ちに減少しないことに加えて、現段階もダイオキシン類の環境進入が続いていることも示唆される。このように蓄積場を中心に据えた研究によれば、現在の発生フローを抑制することと同時に過去において蓄積されてきたダイオキシン類にも目を配る必要があるといえる。

3. 生成抑制方策を構想するための物質フローアプローチ

3.1 環境サイクルコントロールの重要性

筆者は、ダイオキシン対策の基本は、発生抑制に加えて、リサイクル系との協調コントロールと環境サイクルコントロールであることを強調してきた(図-1参照)¹⁰⁾。まずは、発生源からの発生抑制が重要であり、

この際、廃棄物処理との関連でみれば、循環リサイクル過程との協調が図られねばならない。そして、すでに環境サイクル過程に存在するダイオキシン類の長期的低減化を念頭においたコントロール戦略も頭におかねばならない。この環境サイクルコントロールを展開する上で重要であるのが、ダイオキシン類排出総量の考え方であり、燃烧過程の場合、排ガスに含有されるダイオキシン類のみでなく、処理残渣に含有されるダイオキシン類を含めたダイオキシン類排出総量をごみ1トン当たり5 μ g TEQ以下とすることが将来的な目標とされている。排出物総量、なかでもガス態のダイオキシン負荷を減らすことができるようになれば、社会の分解プロセスとして機能することとなる。

3.2 都市ごみ処理施設におけるダイオキシン類の物質フロー解析

化学物質コントロールを構想するためには、システムを通しての物質収支概念が基本となる。ダイオキシン類のように生成・分解の双方が生ずる有機物質の場合、収支概念よりは物質フロー概念で考えていくこととなる。これを個々の発生源ユニットから種々の環境媒体を通じて解析していくことで、適切な制御ポイントやモニタリングポイントを構想できることとなる。都市ごみ焼却システムの場合、流入物の都市ごみおよび排出物としての排ガスと残渣(飛灰と主灰)などを

表2 都市ごみ焼却施設におけるダイオキシン類の総排出量と流入量

	PCDDs/DFs 濃度	原単位	PCDDs/DFs 排出量	PCDDs/DFs 総排出量	PCDDs/DFs 流入量
排ガス	1.8 (ng-TEQ/Nm ³)	5,000 (Nm ³ /waste-ton)	9.2 μg-TEQ/waste-ton	160 μg-TEQ/waste-ton	NSWベース 1.4-50 μg-TEQ/waste-ton
飛灰	5.0 (ng-TEQ/g)	30 (kg/waste-ton)	150 μg-TEQ/waste-ton		RDFベース 0.45-24 μg-TEQ/waste-ton
主灰	0.021 (ng-TEQ/g)	150 (kg/waste-ton)	3.2 μg-TEQ/waste-ton		

物質フローとして把握することとなる。京都市の一つの焼却施設におけるダイオキシン類の物質フローを解析した結果は表2のとおりとなった¹¹⁾。ここでは、都市ごみ1ton焼却時に発生する排ガス、飛灰、主灰の量を、排ガス：5000(Nm³/ごみton)、飛灰：30(kg/ごみton)、主灰：150(kg/ごみton)として計算している。また、表2には流入量として都市ごみをベースにした値とRDFをベースにした値を併せて示している。この結果から、この都市ごみ焼却施設においてはPCDDs/DFsの排出総量は160μg TEQ/ごみtonとなり、流入量1.4~50μg TEQ/ごみtonを上回っていることが分かる。かりに排ガス濃度を0.1ng/g/Nm³まで低減できたとすれば、ガス態での排出量は0.5μg TEQ/ごみtonとなり、環境移動性の高いガス態としての環境進入はごみに含まれる負荷を下回ることとなる。また、排出されるPCDDs/DFsの90%以上が飛灰中に含まれている。

飛灰に含まれるPCDDs/DFs対策としては、まず燃焼・廃ガス処理段階でPCDDs/DFsの発生量を低減させることであり、次いで、飛灰の適正な処理を行うことが挙げられる。飛灰の処理方法としては熔融固化処理や加熱脱塩素化処理が有効とされている。ここで、熔融固化処理または加熱脱塩素化処理を付加した場合の削減効果について検討してみた¹¹⁾。焼却排ガスで0.1ng TEQ/Nm³が達成されるシステムにおいて、主灰と飛灰を対象として熔融固化処理を付加した場合、PCDDs/DFs濃度をスラグ中で0.0008ng TEQ/g、熔融飛灰中で0.01ng TEQ/g、熔融排ガス中で0.1ng TEQ/Nm³まで削減できるとした。そのときの排出総量を試算した結果は0.85μg TEQ/ごみtonとなり、都市ごみによるPCDDs/DFs流入量を下回ることとなった。また、既設炉で排ガス濃度0.5ng TEQ/Nm³、飛灰1ng TEQ/g、主灰0.01ng TEQ/gの排出を行っている施設に加熱脱塩素化処理を付加した場合、PCDDs/DFs濃度を処理灰中で0.02ng

TEQ/g、脱塩素化排ガス中で0.1ng TEQ/Nm³まで削減できるとし、削減効果を試算した結果、4.6μg TEQ/ごみtonとなった。これらの試算結果から、熔融固化処理及び加熱脱塩素化処理は排出総量に対して、ともに高い削減効果を示していることが分かる。

3.3 都市ごみ処理施設におけるコプラナーPCBの物質フロー解析

コプラナーPCB(以下Co-PCBsと略記することあり)とはPCBの一部の異性体を総称するもので、PCB構造のオルト位に置換塩素を持たないもの(ノンオルトCo-PCB)、オルト位に一つ置換塩素を持つもの(モノオルトCo-PCB)があり、平面構造あるいはそれに近い構造をとり、構造上PCDDs/DFsに類似している。物性としては水に不溶、難分解性、ある程度の揮発性を持ち、脂溶性、生物濃縮性が高いなど、残留性有機汚染物質としその典型的な性質を持っている。毒性の面では発ガン性、生殖毒性、免疫毒性などPCDDs/DFsと似た毒性を持っていることから、PCDDs/DFsとあわせて毒性を評価できるように毒性等価換算係数(TEF)が定められている。Co-PCBsの毒性等価換算係数については、WHO欧州事務局は1993年と1997年に提案を行っている^{12, 13)}。ここでは1997年のWHOの報告値を用いて毒性等価換算濃度を算出した。ただし、3,4,4',5-T₄CB(#81)はこれまで継続的に測定していないことから、毒性等価換算濃度に含めていない例もあるが、特に断らない場合、毒性等価換算係数が0でないノンオルト、モノオルトの12の異性体をCo-PCBsとする。この中で最も毒性の強い3,3',4,4',5-P₅CB(#126)は2,3,7,8-T₄CDDの1/10の強さの毒性を有している。

このような特徴を有するCo-PCBsであるが、その生成過程により大きく二つに分けられると考えられる。一つは過去に製造された製品PCBs中に存在するCo-PCBsであり、これは意図的生成物と位置づけることができる。PCBsは絶縁性が高い、粘着性、伸展性に

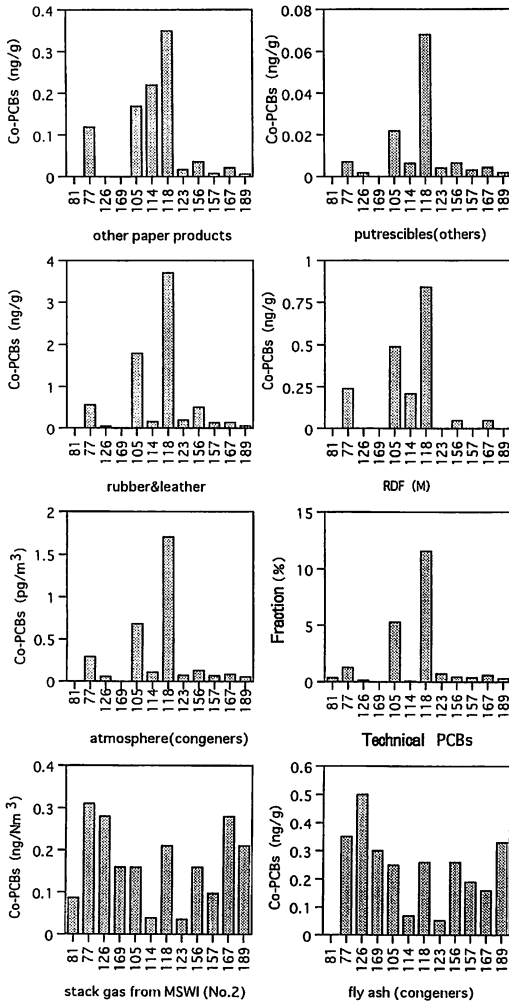


図-2 都市ゴミ、RDF、大気、製品PCBs、焼却排ガス、飛灰のCo-PCBs異性体分布

富むなどの特徴を持つことから、トランス、コンデンサー、感圧紙などに用いられた。日本では1972年に生産が中止されるまでに約6万トンが生産された。その後、製造されたPCBsはメーカーによって一部回収、分解処理された。残り5万トン強が未回収のままトランス、コンデンサー等に含まれた形で各種施設に散在していると推定されており、保管容器の破損や漏出により環境中へ拡散することが懸念されている。

もう一つは都市ゴミ焼却をはじめとする燃焼工程において副生成するCo-PCBsであり、これらは非意図的生成物と位置づけることができる。Co-PCBsの燃焼工程における生成を確認するため、筆者らは1990年代初頭に、都市ゴミ焼却炉における排ガスと飛灰中のCo-PCBs（ノンオルトの3種：#77、#126、#169）

の濃度を測定した結果、排ガス、飛灰から検出された全PCBsに対するCo-PCBsの割合は5～10%であった¹⁴⁾。PCB製品中のCo-PCBsの割合が1%程度である¹⁵⁾ことと比較すれば、燃焼工程において生成する全PCBs中のCo-PCBsの割合は、PCB製品中の割合よりも高くなっていると言える。また、ダイオキシン類の毒性等価換算濃度に対するCo-PCBsの寄与は2～4%であった。ただし、ここで測定したCo-PCBsとは3種類のノンオルトCo-PCBs（#77、#126、#169）であり、Co-PCBs12種類全てを測定した場合と結果は若干異なる可能性がある。

そこで、ダイオキシン類に対する物質フロー解析と同じ手法で、都市ゴミ焼却過程におけるコプラナーPCBsの流入フローの把握を行った¹⁶⁾。まず、都市ゴミを構成する組成別にCo-PCBs濃度を測定することで都市ゴミ焼却施設へ流入するCo-PCBs量を把握し、一方で排ガス、飛灰、主灰中の濃度を測定することで都市ゴミ焼却施設からの排出総量（ゴミ1トンを焼却した際に排ガス、飛灰、主灰を通じて排出される量）を把握した。そして、これらと比較することで、都市ゴミ焼却がCo-PCBsの分解工程であるのか生成工程であるのかといった考察や毒性等価換算レベルでPCDDs/DFsとCo-PCBsのどちらの寄与が大きいかなどの考察を行った。

図-2に都市ゴミ中の紙類、厨芥、ゴム・皮革類とRDF、ならびに製品PCB、大気、ゴミ焼却排ガス、飛灰のコプラナーPCBの異性体分布を示す。都市ゴミ中の各組成に含まれるコプラナーPCBとしての特徴に、#118（2, 3', 4, 4', 5-P_sCB）の濃度が高いことが挙げられる。その他に#105（2, 3, 3', 4, 4'-P_sCB）、#77（3, 3', 4, 4'-T_sCB）等の濃度が比較的高いと言える。また、紙類では#114（2, 3, 4, 4', 5-P_sCB）の濃度が他の分類に比べて高くなっている。これらは比較的似たパターンを示していることから全ての分類に対して同一の由来があるものと考えられる。筆者らが測定した京都市における環境大気中のコプラナーPCBの異性体分布を図-2に併記しているが、ここでも#118、#105、#77が主成分であることがわかる。都市ゴミの異性体分布と比較すると、これらの分布は類似しており、都市ゴミと大気では由来が同じである可能性が高い。PCBの発生源としては製品PCBと廃棄物焼却を始めとする燃焼プロセスがあるが、図-1に併記した都市ゴミ焼却施設の排ガスおよび飛灰中のコプラナーPCB異性体分布は大気、都市ゴミのものとは

表3 都市ごみ焼却施設におけるコプラナーPCBの総排出量と流入量

		濃度	原単位	排出量	総排出量	流入量
PCBs(Total)	排ガス	48 (ng/Nm ³)	5000 (Nm ³ /waste-ton)	240 (μg/waste-ton)	1000 (μg/waste-ton)	13,000-33,000 (μg/waste-ton)
	飛灰	26 (ng/g)	30 (kg/waste-ton)	790 (μg/waste-ton)		
	主灰	0.12 (ng/g)	150 (kg/waste-ton)	18 (μg/waste-ton)		
Co-PCBs (Total)	排ガス	11 (ng/Nm ³)	5000 (Nm ³ /waste-ton)	55 (μg/waste-ton)	140 (μg/waste-ton)	450-550 (μg/waste-ton)
	飛灰	2.7 (ng/g)	30 (kg/waste-ton)	81 (μg/waste-ton)		
	主灰	0.012 (ng/g)	150 (kg/waste-ton)	1.9 (μg/waste-ton)		
Co-PCBs (TEQ)	排ガス	0.23 (ng TEQ/Nm ³)	5000 (Nm ³ /waste-ton)	1.2 (μg TEQ/waste-ton)	2.8 (μg TEQ/waste-ton)	0.13-0.29 (μg TEQ/waste-ton)
	飛灰	0.053 (ng TEQ/g)	30 (kg/waste-ton)	1.6 (μg TEQ/waste-ton)		
	主灰	0.0023 (ng TEQ/g)	150 (kg/waste-ton)	0.035 (μg TEQ/waste-ton)		
PCDDs/DFs+ Co-PCBs(TEQ)	排ガス	1.8-14 (ng TEQ/Nm ³)	5000 (Nm ³ /waste-ton)	9-70 (μg TEQ/waste-ton)	160-220 (μg TEQ/waste-ton)	1.5 (μg TEQ/waste-ton)
	飛灰	5.0 (ng TEQ/g)	30 (kg/waste-ton)	150 (μg TEQ/waste-ton)		
	主灰	0.021 (ng TEQ/g)	150 (kg/waste-ton)	3.2 (μg TEQ/waste-ton)		

大きく異なっており、燃焼由来のコプラナーPCBが支配的であるとは考えにくい。

次に、各ごみ組成ごとの測定値に都市ごみの組成比を乗じて加算し、都市ごみ1トン(湿ベース)あたりの流入量を求め、表3に示した。その結果、PCBsでは13000~33000 μg/ごみトン、Co-PCBsでは450~550 μg/ごみトン、毒性等価換算値は0.13~0.29 μg TEQ/ごみトンであった。PCDDs/DFsが1.2 μg TEQ/ごみトンであることから、PCDDs/DFsとCo-PCBsを合わせた流入量は1.5 μg TEQ/ごみトンでCo-PCBsの寄与は19%となる。都市ごみの代替試料として位置づけていたRDF中のPCBs、Co-PCBs濃度は、全PCBs濃度が40~59 ng/g (40000~59000 μg/ごみトン)、Co-PCBs濃度が0.88~1.9 ng/g (880~1900 μg/ごみトン)で、都市ごみ全体と比べるとやや高い値であったが、毒性等価換算濃度は0.17~0.29 pg TEQ/g (0.17~0.29 μg TEQ/ごみトン)で都市ごみと同じレベルであった。

また、表3には焼却施設から排出されるPCBs(Total)、Co-PCBs(Total)、Co-PCBsのTEQと全ダイオキシン類(PCDDs/DFs+Co-PCBs)のTEQの各項目についての結果も併記した。結果を見ると、Co-PCBs(TEQ)としての排出総量は2.8 μg TEQ/ごみトンとなり、流入量0.13~0.29 μg TEQ/ごみトンを上回っていることが分かった。全排出総量に対する寄与は飛灰58%、排ガス41%程度であった。

一方、Co-PCBs(Total)では排出総量が流入量を下回っている結果となった。PCBs(Total)では、流入量が13000~33000 μg/ごみトンであるのに対し、排出総量が1000 μg/ごみトンであることから焼却過程でPCBsが90%以上分解されていることが分かる。したがって、焼却過程において毒性等価換算量としてのCo-PCBsは生成されているが、PCBs全体としては分解されていると考えられる。

また、全ダイオキシン類(PCDDs/DFs+Co-PCBs)(TEQ)では、流入量は1.5 μg TEQ/ごみトン、排出総量は160~220 μg TEQ/ごみトンとなり、排出総量が流入量を大幅に上回ることが分かった。流入量に占めるCo-PCBsの割合は19%であるのに対し、排出総量に占めるCo-PCBsの割合は2.2~3.1%と流入量に比べてかなり低くなっている。都市ごみ焼却施設からの排出ではCo-PCBsよりPCDDs/DFsのTEQ負荷が多いにも関わらず、食品をはじめとする生体試料や環境試料ではCo-PCBsの割合が高くなるのはCo-PCBsの濃縮性が高いことと、PCBsの主たる発生源が燃焼施設ではなく、環境中に散在している製品PCBsであることが原因ではないかと考えられる。このようにごみ焼却におけるPCBの物質フロー解析を行うことにより、コプラナーPCB対策を考えていくためには、焼却副生成のコプラナーPCBをPCDDs/DFsとともに低減することと同時に、製品PCBに由来する環境負荷を低減していく必要のあること

がわかった。こうした残留性有機汚染物質に対する物質フロー解析は、地域レベルで生成抑制方策を構想するうえで、有効な解析手法となる。

4. 各発生源における生成抑制方策

1997年12月には大気汚染防止法改正による排ガス基準値の策定と廃棄物処理法改正による構造・維持管理基準改正がおこなわれた。厚生省令で示された構造・維持管理基準は施設として最低限有するべき機能が示されており、これに燃焼過程、熱回収・ガス冷却過程、廃ガス処理過程の対策メニューとして示した技術を各々の創意工夫により組み合わせて行くこととなる。なお、大気汚染防止法のなかで定められた排ガス基準は、4 ton/hr以上の新設炉については0.1ng TEQ/Nm³であるが、これより小規模の施設については1～5 ng TEQ/Nm³、既設炉については1～10ng TEQ/Nm³である。一般廃棄物に係る施設のみならず、産業廃棄物に関連する施設を念頭においたための措置と考えられるが、将来的には技術基準として国際的に共通の基準となりつつある0.1ng TEQ/Nm³をめざした対処が求められる。こうした技術の適用はこれまでの施設に比べて高コストとならざるを得ないが、抑

制のための高度技術は用意されてきており、その基準適用の原則は、最善の実証済技術BDAT (Best Demonstrated Available Technology) の適用を図るという考え方である。その対策技術の要点は、完全燃焼技術とともに、廃ガス冷却過程の低温化、粒子状物質対策としてのバグフィルター、吸着対策としての活性炭等の利用、脱硝効果も併せた触媒分解技術、酸性ガス対策も含めた廃ガスクラバーなどの廃ガス処理に対する最新技術を利用するものである。このごみ焼却過程におけるダイオキシン類対策を含めて、燃焼発生源別にみた生成抑制対策を表4にまとめた。1998年11月に公表された各産業工程の自主ガイドラインの内容も整理して示している。いずれの工程とも、原料に含まれる塩素系有機化合物を可能な限り、排除することが述べられている。さらに、鉄鋼焼結やアルミニウム合金製造工程は、集塵効率を向上させる方策が、それぞれ示されている。また、亜鉛回収工程では活性炭吸着や触媒分解などの考え方も提示されている。一方、ダイオキシン類を含む電炉ダストを原料とする亜鉛回収工程では、電炉ダストを中間処理することにより、ダイオキシン類を削減したうえで、亜鉛回収を行う構想が模索されている。こうした取り組みの前提

表4 燃焼発生源別にみたダイオキシン類対策

	鉄鋼電炉工程	鉄鋼焼結工程	亜鉛回収工程	アルミニウム合金製造工程	都市ごみ焼却
ダイオキシン類 排出量 [g TEQ/年]	187	118.8	34.0	15.7	4,300
排ガス濃度 [ng TEQ/ Nm ³]	分流式直引ガス 5.3(0.03～76)(n=41) 分流式建屋ガス 0.10(0.00～0.2)(n=3) 合流式 0.40(0.08～1.33)(n=19)	0.69(0.012～1.7) (n=16)	12.7(0.55～72) (n=8)	0.05～5.9 (前処理、溶解、精錬 の工程ごとに異なるため 平均値示さず、n=17)	約10(0.01～1,000) (n数はおよそ1,600)
生産量等	約3000万トン/年生産 総粗鋼生産量の約30%	1,146ng TEQ/ton 103,675千ton/年	47,241Nm ³ /h 55,952h/年 亜鉛回収量6万トン/年 亜鉛生産量の約10%	二次地金119万トン/年 全アルミ需要の1/3	約5000万トン/年 焼却率72%
排出抑制 対策技術	<ul style="list-style-type: none"> 原料・資材等の選別 スクラップに付着、混入するPVC、切削油、塗料等の排除 廃ガスの急冷 水スプレー、建屋集塵ガス混合により急冷 集塵効率の向上 バグフィルター、集塵温度低下 	<ul style="list-style-type: none"> 焼結配合原料中の塩素分、有機分の除去 高揮発分・有機分の多い無煙炭の使用量削減 油分が付着したミルスケールの使用量削減 集塵効率の向上 既設集塵機の改善、管理強化 更新時の高効率化 	<ul style="list-style-type: none"> 電炉ダストの中間処理によるダイオキシン類の削減 活性炭の吹き込み、充填塔による吸着除去 酸化触媒装置、二次燃焼装置による分解 	<ul style="list-style-type: none"> 塩素系有機化合物の選択的除去 再生重油中の塩素分の低減 塩素ガス及び塩化物を含むフラックスの最小化 バグフィルター設置の推進 消石灰塗布等による吸着効率の向上 既設集塵機の管理強化 	<ul style="list-style-type: none"> 完全燃焼対策 廃棄物定量供給、連続運転、800℃以上、2秒以上、CO100ppm以下、灰の熱灼減量10%以下 廃ガス対策 800℃以下に急冷、高度のばいじん除去機能、急冷反応塔、バグフィルター、活性炭吸着、触媒分解など
排出濃度 目標	新設：0.5ng TEQ/Nm ³ (H9. 12. 1以降) 既設：5ng TEQ/Nm ³ (H14. 12. 1以降)	新設：0.1ng TEQ/Nm ³ (H10. 12. 1以降の 工事着手分) 既設：1ng TEQ/Nm ³ (H14. 12. 1までに 達成)	新設：1ng TEQ/Nm ³ (H10. 12. 1以降の 工事着手分) 既設：10ng TEQ/Nm ³ (H14. 12. 1までに 達成)	新設：1ng TEQ/Nm ³ (H11. 12. 1以降の 設置分) 既設：5ng TEQ/Nm ³ (H13. 10. 1までに 達成)	新設：0.1～5ng TEQ/Nm ³ (H9. 12. 1以降) 既設：1～10ng TEQ/Nm ³ (H14. 12. 1以降)

として、亜鉛回収工程では、そもそも電炉ダストに含まれるダイオキシン類を分解するという機能を果たしていることは重要な視点である。電炉ダストを中間処理してダイオキシン分解した後、精錬工程にかけるという方法は、これをより積極的に行う試みであり、産業連関、資源の循環利用の意義からも注目される。

5. おわりに

以上、フローとしてみた現状のダイオキシン類の発生源から蓄積としてみた発生源について、都市ごみ処理プロセスを例とした物質フロー解析からのアプローチについて、そして各燃焼系の発生源における生成抑制対策について述べてきた。今後はこうした政策を確固たる意志をもって実行に移すとともに、その効果を確認し、場合によっては軌道修正できるよう、判断すべき媒体の長期的モニタリング態勢を早急に整えることも重要である。日本では、こうした環境モニタリング態勢がようやく整いつつあるが、大気や土壌といった一般の環境媒体に偏りすぎの感がしないでもなく、より摂取に近い場と発生源の削減効果を確認できる懐の深い情報獲得が重要である。最近、ドイツで牛乳汚染の原因として飼料汚染が発見された経緯が報告¹⁷⁾されたが、こうした体系的なモニタリング態勢を有することが望まれる。もちろんのこと、ダイオキシン類といえども多くある化学物質の一部であり、ダイオキシン類の情報獲得にシフトしすぎないことにも注意しなければならない。産業活動、社会活動、環境移動、生体蓄積といった化学物質の大循環系の中で、生体影響や環境蓄積を評価するための長期モニタリング態勢をダイオキシン類のみならず幅広い化学物質に対して、バランスよく、ヒト、生態系を含めて早急に構想、確立する必要がある。

参考文献

- 1) 通商産業省環境立地局環境問題連絡会ダイオキシン対策検討会：第2次中間報告書，1998年11月
- 2) 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*，1 [1]，20-37 (1990)
- 3) Lau, C., Fiedler, H., Hutzing, O., Rippen, G., Wesp, H. F., Sievers, S., Friesel, P., Schacht, U., Gras, B., Reich, T., Vahrenholt, F.: Dioxin mass balance for the city of Hamburg, Germany, *Organohalogen Compounds*, 28, 83-88 (1996)
- 4) 益永茂樹，中西準子，桜井健郎，小倉勇：東京湾と霞ヶ浦流域におけるダイオキシン類の収支，第7回環境化学討論会，20-21 (1998)
- 5) 脇本忠明：農用地土壌におけるダイオキシン類の分布と動態，環境庁・土壌中のダイオキシン類に関する検討会資料，1998年7月10日 (1998)
- 6) Kjeller, L. O., Rappe, C.: Time trends in levels, patterns, and profiles for polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and biphenyls in a sediment core from the Baltic Proper, *Environ. Sci. & Tech.*, 29 [2], 346-355 (1995)
- 7) Hagenmaier, H., Walczok, M.: Time trends in levels, patterns and profiles for PCDD/PCDF in sediment cores of lake, *Organohalogen Compounds*, 28, 101-104 (1996)
- 8) Cleverly, D., Monetti, M., Phillips, L., Cramer, P., Heit, M., McCarthy, S., O'Rourke, K., Stanley, J., Winters, D.: A Time-Trends Study of the Occurrences and Levels of CDDs, CDFs and Dioxin-like PCBs in Sediment Cores From 11 Geographically Distributed Lakes in the United States, *Organohalogen Compounds*, 28, 77-82 (1996)
- 9) 酒井伸一，出口晋吾，浦野真弥，高月紘，恵和子，佐藤哲志：大阪湾，琵琶湖底質のダイオキシン類に関する歴史トレンド解析，第7回環境化学討論会，22-23 (1998)
- 10) 酒井伸一：ダイオキシン類のはなし，日刊工業新聞社 (1998)
- 11) 酒井伸一，鶴岡隆広，浦野真弥，高月紘，中村一夫，木下小百合：都市ごみ焼却におけるPCDDs/DFsのマテリアルフローに関する研究，*廃棄物学会論文誌*，9 [4]，123-132 (1998)
- 12) Ahlborg, U. G., Becking, G. C., Birnbaum, L. S., Brouwer, A., Derks, HGJM, Feeley, M., Golor, G., Hanberg, A., Larsen, J. C., Liem, AKD., Safe, S. H., Schlatter, C., Warn, F., Younes, M., Yrjanheikki, E.: Toxic Equivalency Factors for Dioxin-like PCBs, Report on a WHO-ECEH and IPCS consultation, December 1993, *Chemosphere*, 28, 1049-1067 (1994)
- 13) WHO European Centre for Environment and Health: WHO Toxic Equivalency Factors (TEFs) for dioxin-like compounds for humans and wildlife, *Dioxin'97* (1997)
- 14) Sakai, S., Hiraoka, M., Takeda, N., Shiozaki, K.: Coplanar PCBs and PCDDs/PCDFs in Municipal Waste Incineration, *Chemosphere*, 27, 233-240 (1993)
- 15) Kannan, N., Tanabe, S., Tatsukawa, R.: Toxic potential of non-ortho and mono-ortho coplanar PCBs in commercial PCB preparations: "2, 3, 7, 8-T, CDD Toxicity Equivalence Factors Approach", *Bull Environ Contam Toxicol*, 41, 267-276 (1988)
- 16) Sakai, S., Ukai, T., Takatsuki, H., Nakamura, K., Kinoshita, S., Takasuga, T.: Material flow analysis of coplanar PCBs released from waste treatment processes, *J. Material Cycles & Waste Management*, 1 [1], (1999) (in press)
- 17) Malisch, R.: Increase of PCDD/F-contamination of milk and butter in Germany by use of contaminated citrus pulps as component in feed, *Organohalogen Compounds*, 38, 65-70 (1998)