

## 焼却施設での適正な処理 - ダイオキシンを中心に -

岡山大学大学院教授 川本 克也

### 1. はじめに

ダイオキシン類の主な発生源には、廃棄物焼却などの燃焼起源と塩素系化合物の製造など塩素の関わる化学プロセス起源とがある。廃棄物焼却施設での適正な処理について述べる場合いくつかの課題設定があるが、本稿では、ダイオキシン類の生成と排ガス処理に焦点を絞ることとする。

広く社会を揺るがす問題は、いつの時代にもあるが、今から四半世紀ほど前、1990年代はまさに化学物質汚染問題に揺れた時代であった<sup>1)</sup>。その兆候は、地下水汚染の問題などで1980年代からみられていた。しかし、廃棄物の焼却施設から排ガスとともに排出されるダイオキシン類の問題は何よりも大きな反響を引き起こし、また時を同じくして起こった内分泌かく乱化学物質(環境ホルモン)問題と相まって社会問題化し、多様なマスコミ報道などを通じて拡大した。この結果として、ダイオキシン類の主たる排出源とされた焼却施設、さらには廃棄物の処理という大きな体系そのものも変革を遂げ、現在に至っている。

ここでは、かつて起こったダイオキシン類問題を振り返りながら、焼却施設がたどった変化と現在を概観することとしたい。それは、微かなものが巨大なプロセスを変えた、と形容できる。

### 2. ダイオキシン類問題とは何だったのか

ダイオキシン類とは法律上の用語で、化学的名称からは、ポリ塩化ジベンゾ-*p*-ダイオキシン(PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン(PCDFs)およびダイオキシン様ポリ塩化ビフェニル(DL-PCBs)の大きく3グループの化学物質からなる。それらの一般的化学構造を図1に示す。PCDDsのうち、2,3,7,8位に対称的に塩素が置換した2,3,7,8-TCDD(Tetrachlorinated dibenzo-*p*-dioxine)がダイオキシン類の中で最も毒性の強い化合物といわれる。

焼却処理とは原理的に、燃える有機化合物を十分な空気のもとに燃焼させ、重量、体積をそれぞれおよそ1/10、1/20以下まで減らし、化学的に安定な

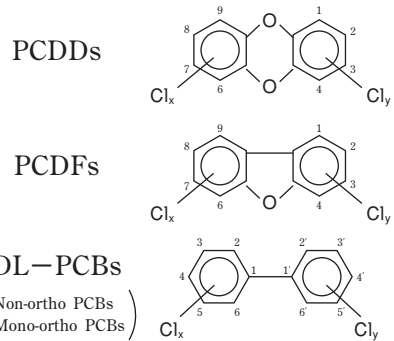


図1 ダイオキシン類の化学構造

状態にする処理である。このとき、無機化合物も酸化される。しかし、均一な工業生産の過程と異なり、廃棄物では水分の多い厨芥ごみ、紙やプラスチックなどがあるため組成の変化が生じることが避けられず、量や形状の変化、変動もあって燃焼のコントロールが難しい。ダイオキシン類の生成が専門的な研究者の間で指摘された1980年代から90年代前半までにおいて、焼却炉内の温度が必ずしも十分な高温に保たれていなかったこと、排ガス処理のための集じん方法がダイオキシン類生成の至適温度で操作される電気集じん主体であったことなど、いくつかの悪条件も重なっていた。このため、焼却炉内の不完全燃焼生成物の一つとして、ダイオキシン類が高濃度で生成していた。

焼却炉での燃焼にともなうダイオキシン類の生成は、燃焼域で生成するラジカル的な化学種の反応によって引き起こされる。これとは別に、燃焼後の排ガスは冷却されていくが、この温度の低下する過程で生じるデノボ(*De novo*)合成が、焼却施設での主要な生成機構となってきた。図2がその一連の過程である。この合成反応では、銅化合物などの触媒が存在し、概ね200℃以上、とくに300~400℃の温度域で粒子状炭素(飛灰中の未燃炭素や「すす」などを含む幅広い炭素質物質)と塩素源からダイオキシン類が生成する。塩素源にはポリ塩化ビニルなどの有機塩素化合物とともに無機塩化物も関与し、これらから生成する塩素や塩化水素によって塩素化反応

が生じる。触媒としては、廃棄物であるがゆえに、銅以外にも様々な金属を含む飛灰の寄与が大きい。

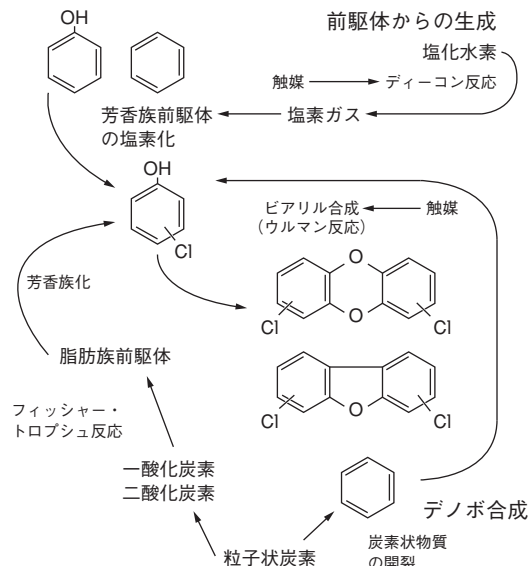


図2 廃棄物の焼却におけるダイオキシン類の生成

### 3. ダイオキシン類問題 20 余年の変遷

ダイオキシン類の環境排出量は詳細に見積もられ、インベントリー<sup>2)</sup>として整備されている。その推移は、平成 29 年度までのデータで図 3 のようになる。

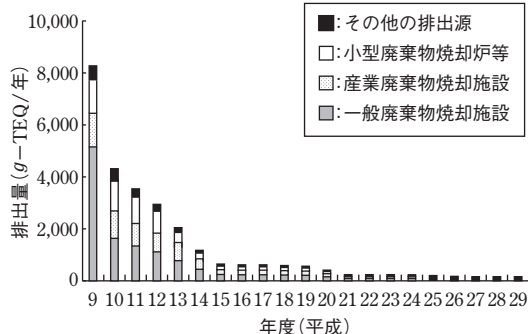


図3 全国でのダイオキシン類排出量の変遷

ポイントは次の通りである。平成 9 年(1999 年)度に 8,000g-TEQ/ 年を超えていた総排出量は、5 年程度で大きく減少した。ここで TEQ (Toxic Equivalent) とは毒性等量であり、多数の化合物について 2,3,7,8-TCDD についての毒性係数を 1 とした相対的な毒性の強さで重みづけした値の総和である。最新のデータは 106 ~ 107g-TEQ/ 年(平成 29 年度)であり、国の定めた削減目標量はかなり下回った。中でも「一般廃棄物(ごみ)焼却施設」からの排出量は、5,000g-TEQ/ 年から、平成 29 年度で

22g-TEQ/ 年(減少率 99.6%)となり、大幅に減少している。廃棄物処理分野が全体に占める割合は次第に低下しており、替わって「その他の排出源」に含まれる産業分野の排出量の比率が上昇し、平成 29 年度では約 43%となっている。最も多いのは製鋼用電気炉である。

### 4. ダイオキシン類削減の要因

これまでに述べたように、ごみ焼却施設からのダイオキシン類の排出量を大きく削減できたことは、多様な対策の成果といってよい。政策的には、平成 9 年、ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン<sup>3)</sup>が提示され、「技術的に実施可能な目標としてダイオキシン類の排出濃度を 0.1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下とすること」とされたことが排出量の大幅な減少に寄与した。具体的内容としては、炉出口温度 850℃ 以上での燃焼、先に触れた電気集じん器からバグフィルターへの転換を主とする排ガス処理技術の導入とその後の技術的向上が進んだことにあり、また小規模で間欠的な運転の施設が減り、より大型の連続運転施設の導入が進んだことにあると考えられる<sup>4)</sup>。なお、この間に、従来から主要な焼却炉形式であるストーカ式焼却炉に加え、ガス化溶融炉の導入が進んだ。その主な特徴は、① 1,200℃ 以上での高温燃焼により、ダイオキシン類の排出を大きく低減できること、② ガス化工程が酸素のほとんどない還元雰囲気であることにより金属分が酸化されることなく回収できること、③ 排ガス量の低減に役立つ低空気比運転が可能となること、などであった<sup>5)</sup>。この後、ガス化溶融炉の占める割合は次第に増加し、平成 29 年度末では全 1,103 施設のうち 106 施設(9.6%)がガス化溶融炉(若干の改質施設を含む)となっている<sup>6)</sup>。しかし、他方での大きな流れとして、ストーカ炉において、炉内の燃焼を高温で安定して行う技術や排ガスを炉内へ返送することなどによる低空気比運転などの技術的改良が各種進んだ。

### 5. 排ガス処理について

一般に、有害物質の環境排出を抑制する基本は、生成抑制と排出段階での処理技術適用である。焼却の場合、燃焼発生源に関しては、生成抑制は十分な温度条件(Temperature)のもとに燃焼反応が行われ、

二次燃焼領域で一次燃焼ガスが十分な時間保たれ (Time), かつ十分混合すること (Turbulence: 乱流) である。これは 3T の原則と呼ばれる。

焼却炉を出た後、排ガスはすみやかに冷却される。これは、ダイオキシン類がデノボ合成機構で生成する機会を減らすことに有効であり、実際にダイオキシン類問題以降、全体システムの設計において中心的に考慮されてきた。ボイラー部とエコマイザーと呼ばれる熱交換設備がこの役割を果たす。そして、排ガス集じん設備の入口で、200℃以下、概ね150℃までの範囲に制御される。バグフィルターを用いた集じん技術によって、焼却炉でのダイオキシン類の排出抑制は効果的に達成される。その要素技術は、操作温度の低温化、飛灰と煙道注入される消石灰、活性炭などで形成されるフィルター (ろ布) 堆積層における吸着であり、後段に触媒充填塔があればそれによる分解も含まれる。

これらは、最も一般的に用いられる乾式排ガス処理方法の要素となる。図4にその典型的なシステム構成を示す。

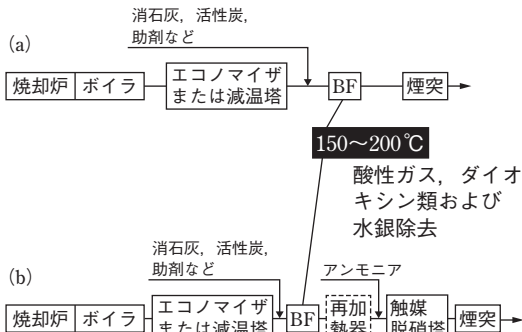


図4 代表的な焼却施設乾式排ガス処理プロセス

この中で、(a)は薬剤煙道噴霧による最も単純なプロセス、(b)は(a)に加え、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )除去を触媒充填塔で行おうとするプロセスである。(b)の触媒充填塔では通常同時にダイオキシン類の分解も生じる。酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )を担体とする酸化バナジウム( $\text{V}_2\text{O}_5$ )系触媒がよく用いられる。触媒表面の活性点にダイオキシン類および酸素分子が吸着し、脱塩素・酸化分解などの機構が生じるのである。充填塔方式としてはハニカム構造が適用される。温度条件として、従来200℃以上が適当とされ、このためバグフィルター (BF) 後段で排ガスの加熱が行われるが、最近では再加熱による熱回収分の損失を避けるために低温で活性のある触媒が用い

られる傾向にある。なお、バグフィルターのろ布に、触媒成分を織り込む方式の触媒フィルターも例は少ないが用いられる。

## 6. 実施設でのダイオキシン類生成と排出抑制

ダイオキシン類の低減が全国的に進行した2000年代前半に、筆者が行った実施設での半試験的ダイオキシン類の生成および除去測定について述べたい。施設は、流動床方式のガス化溶融炉で、排ガス処理に先述の触媒フィルターを適用している。図5に設備フローと測定のためのサンプリング箇所を示す。

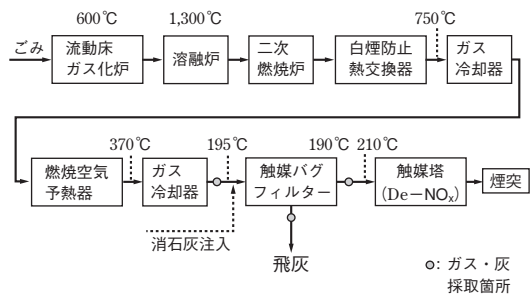


図5 調査施設のフローとガス・灰の測定箇所

流動床方式は、砂などの蓄熱媒体を炉下部からの流入空気によって流動させ、投入される汚泥やごみを熱の伝導によって燃焼させる方式で、迅速な装置立上げなどの特長がある反面、燃焼が不安定になり易い面もある。試験的取り組みでは、燃焼の条件を人為的にかなり変動させたときに、ダイオキシン類の発生と除去特性がどのような影響を受けるかについて排ガスおよび飛灰の測定により検討した<sup>7)</sup>。なお、触媒バグフィルターでは、ガス状で存在するダイオキシン類を分解する効果が期待され、このため煙道には酸性ガス除去のための消石灰だけが注入されている。

表1 排ガスおよび飛灰中のダイオキシン類濃度

Run No.	BF 入口ガス (ng/Nm <sup>3</sup> )	飛 灰 (ng/g)	BF 出口ガス (ng/Nm <sup>3</sup> )
1	140 (2.3)	12 (0.17)	7.0 (0.071)
2	120 (1.7)	9.3 (0.11)	7.3 (0.078)
3	140 (2.0)	11 (0.13)	8.9 (0.098)
4	130 (2.0)	20 (0.24)	8.5 (0.076)
5	760 (11)	390 (3.0)	7.7 (0.085)

ガス濃度はすべて酸素濃度12%換算値。

各欄( )内は、毒性等量値:ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>または飛灰ではng-TEQ/gを示す。

測定結果は表1の通りである。バグフィルター (BF) 前後での排ガスと飛灰の測定値から、通常条件の

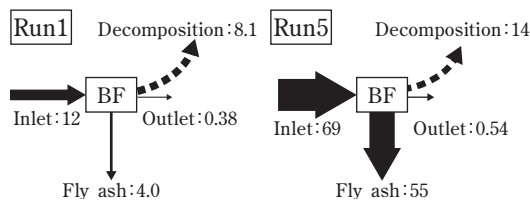


図 6 バグフィルター(BF)前後での物質収支  
(単位は  $\mu\text{g}\cdot\text{TEQ}/\text{h}$ )

Run1 と、プラスチックを多く含む粗大ごみ破砕物を通常時より多く投入した Run5 とで典型的な相違をみるることができる。すなわち、図 6 に 1 時間当たりのダイオキシン類流量として示したように、バグフィルター入口でのダイオキシン類は、Run1 より Run5 の方が 5 倍以上もの量となった。しかし、バグフィルター出口では他の Run と同水準にとどまった。排ガス濃度は  $0.085\text{ng}\cdot\text{TEQ}/\text{Nm}^3$  で、 $0.1\text{ng}\cdot\text{TEQ}/\text{Nm}^3$  を下回った。飛灰中に吸着して生成ばいじん側へ移行することには注意を要する(最終処分の際に処理物含有量は  $3\text{ng}\cdot\text{TEQ}/\text{g}$  の規制を受ける)が、排ガスとしては規制値を超えることはない。なお、通常時の Run1 において、バグフィルターでのダイオキシン類の分解は、流入量の 67.5% と推定された。

## 7. おわりに - 最近の焼却施設の状況

ダイオキシン類の排ガス規制が恒常化してから、新設される焼却施設の排ガス中濃度に関しては、地域住民の安心を求める意向に配慮し、ダイオキシン類対策特別措置法で定められる  $0.1\text{ng}\cdot\text{TEQ}/\text{Nm}^3$  は当然のこと、より低い数値が維持管理上設定される場合も多い。環境安全の観点から科学的に考慮したときの解釈はさておき、最近の焼却施設における排ガス中のダイオキシン類の濃度の実態は、十分に低い値となっているようである。例えば、東京 23 区清掃一部事務組合が運営する東京都 23 区内の焼却施設約 20 施設の排ガス実態<sup>8)</sup>をみると、平成 30 年度の実績データからは、排ガス中ダイオキシン類濃度は  $0.0000001 \sim 0.01\text{ng}\cdot\text{TEQ}/\text{Nm}^3$  といったきわめて低濃度の水準にある。そのほか筆者の施設見学を通じた経験からも、処理量 100 トン / 日台の比較的規模の小さい新規施設においても、かなり低濃度の実績データとなっている例を多くみている。このように、ダイオキシン類への対策が総合的に進み、焼却技術そのものの進歩もあり、排ガス中のダイオ

キシン類濃度は著しく低減されてきた。

最近の動きとしては、水俣条約の発効にともない、水銀(Hg)の削減が重要な課題となって新設焼却施設の規制値として  $30\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  なる値が設けられた<sup>9)</sup>ことから、焼却排ガス中有害物質に関し考慮すべき項目が増した。ただし、水銀に関しては、活性炭などの吸着剤の適用によって除去が可能であることから、近年の焼却排ガス中濃度は総じて低下していることから、ダイオキシン類対策を講じることで適正な処理が達成されると考えてよい。

排ガスは一般に大量である。1 時間当たり数万  $\text{m}^3$  もの水蒸気含有ガスが排出される。このような大量処理の場で、ダイオキシン類に象徴される極微量の成分がプロセスひいては社会を動かすというのは、何とも興味深いできごとといえるのではないか。

### 参考文献

- 1) 立川涼: 化学物質で囲まれた時代 - 新しい環境破壊が人間を蝕んでいる -, 世界 第 472 号, pp.31-41, 岩波書店(1985)
- 2) 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)について(2019)  
<https://www.env.go.jp/press/106594.html>
- 3) 環境省: ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン(1998)  
[https://www.env.go.jp/recycle/kosei\\_press/h970123a/h970123a-1.html](https://www.env.go.jp/recycle/kosei_press/h970123a/h970123a-1.html)
- 4) 川本克也: ダイオキシン類の生成・排出およびその抑制対策 - この 20 年を振り返る, 生活と環境, Vol.62, No.3(通巻 731 号), 16-23 (2017)
- 5) 川本克也: 循環型社会の視点からみたガス化溶融方式ごみ処理施設の実態と評価, 都市清掃, Vol.61, 462-471(2008)
- 6) 環境省: 一般廃棄物の排出及び処理状況等(平成 29 年度)について(2019)  
<https://www.env.go.jp/press/106564.html>
- 7) K. Kawamoto, H. Miyata: Dioxin formation and control in a gasification - melting plant, Environmental Science and Pollution Research, Vol.22, 14621-14628 (2015)
- 8) 東京 23 区清掃一部事務組合  
[https://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/gijutsu/kankyo/toke/chosa/dioxin/documents/30\\_haigasuu.pdf](https://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/gijutsu/kankyo/toke/chosa/dioxin/documents/30_haigasuu.pdf)
- 9) 環境省: 水銀大気排出対策  
[https://www.env.go.jp/air/suigin/post\\_11.html](https://www.env.go.jp/air/suigin/post_11.html)