海外文献

有害廃棄物の焼却：現在までの推移の批判的レビュー（第2回）

Incineration of Hazardous Waste : A Critical Review Update

J. AIR and WASTE, Vol.43, pp.25-73 (1993)

著者：C. R. Dmpsey, T. Oppelt,

訳：石川 義紀*・西田 耕之助**・樋口 能士**

2. 現在の焼却手法

2. 1 焼却の実際

焼却は、廃棄物中の有機物を分解して体積を減少するために、高温（通常は900℃、またはそれ以上）での熱酸化を経て、熱的分解手法を採る工学的プロセスである。一般に、可燃廃棄物や多量の有機物を含む廃棄物は、焼却に最も適すると考えられているが、有害有機成分を含む廃棄物はどんなに少量であっても、焼却は問題の対象となる。例えば、1980年代始めのアメリカでは、大量の被汚染水が焼却され、汚染土壌の焼却も多い。EPAは、自動車焼却炉をミズーリ州の土40トンの汚染除去に使用したが、この土は塩化ダイオキシン4ポンドで汚染されていた³³⁻³⁶⁾。以来、多くの自動車焼却炉や移動用焼却炉が建設され、スーパーファンド処分地の恒久的安定化に積極的に使用している。また、この例のスケールダウンとして、トレーラー車版のロータリーキルン、流動床焼却炉（10～20×10⁶ Btu/hr）が造られ、120×10⁶ Btu/hrの移動設備もでき、これらの移動式の性能は固定式施設と同程度とみられる^{34, 35)}。移動式施設の利点の一つは、浄化すべき残留物の除去や民間施設への輸送よりも社会的、政治的に一般に受け入れやすいことである。しかし、このことは処分地付近の住人にとっては良くないことかもしれない。土壌の汚染除去の例では、現地焼却は大量の汚染土壌を他の焼却施設へ輸送するよりも、費用的にはるかに有利である。

移動式施設の正確な数は1990年の数値³⁷⁾が、この種

の焼却炉の特徴をよく示している。すなわち、15社の30施設が稼働しており、その内訳はロータリーキルン22基、赤外線コンベア4基、循環床4基となっている。さらに最近の調査³⁸⁾では、表4のように56カ所の処分場で汚染土壌2,139,700トンの安定化に利用されている。表の処分場には、スーパーファンド対象、資源回復保護法（RCRA）の是正措置対象や閉鎖対象、流出物浄化対象地等を含むが、地下貯蔵タンクは含まれていない。国のスーパーファンド処分地の恒久的安定化から決定記録（ROD：恒久的浄化措置の決定記録）が熱的処理技術に基づく場合が多いので、移動型焼却炉の利用が増え続けると思われる。

資源保護回復法で、1980年に暫定許可状態（暫定的に操業が許可されている状態）の焼却炉基準が公布されて以来、多くの調査や研究から、全米で発生する有害廃棄物の種類や量、さらに種々の処理、貯蔵、処分のための施設で取り扱われる廃棄物の種類と量が評価されてきた。これらの調査の多くは、1980年代の初期から中期の³⁸⁻⁴⁶⁾もので、得られた情報の更新と精度向上努力が続けられている⁴⁷⁾。

有害廃棄物の発生と管理に関するデータで、最も新しくかつ包括的なものは、州処分地容量確保計画（CAPs）に含まれるものであろう。スーパーファン

表4 スーパーファンド対象およびその他の汚染土壌の恒久的安定化を行っている移動式焼却炉の概要（1992年3月現在³⁸⁾、ただし地下貯蔵タンク（UST）の浄化を含まない）

内 容	処分地数	汚染土壌量（トン）
処理済	32	452,200
処理中	12	845,500
契約済	12	842,000
計	56	2,139,700

* 関西空港調査会 Yoshinori ISHIKAWA

** 京都大学工学部附属環境微量汚染制御実験施設
Konosuke NISHIDA, Takashi HIGUCHI

ド法修正および再授權法（SARA）で、各州は1989年10月17日までにEPAに州処分地容量確保計画（CAP）を提示し、州内に十分な容量があるか、または有害廃棄物管理のために他の州に十分な容量が確保されていることを示すとされている。また、各州は1987、1989、1995、2009年における州内の有害廃棄物発生と管理に関する情報の提供が求められている。この計画の1987年値のみが実際の廃棄物管理量で、他の年次の値はすべて予測値である。

これらの多くの研究レビューから有意な差が明らかになっており、その中には比較的直截な統計値が見られる。廃棄物管理案や経済的影響を評価する政府や産業界にも不満があり、それらは非常に多くの要因から起こる結果である。例えば、有害廃棄物用語の法令上の定義の変遷や不確かさ、種々の調査での手法や仮定のちがひ、施設所有者や使用者の不完全で不正確な反応などである。廃棄物発生量の変化、規制の変化で起こる施設の数や許可状況、経済的要素の変化もまた、廃棄物管理のトレンド予測を困難にしている。

しかし、これらの推定値の差に寄与する最も重要な要因は「規制外廃棄物」の取り扱い方の違いである。廃棄物が水質汚濁防止法（Clean Water Act）で規制される排水処理プラントで処理される場合（そうでなければ有害と定義されるはずだが）には資源保護回復法（RCRA）の規制から除外される。全米で発生する有害物の約97%（対象外も含めて）は排水で⁴⁸⁾、その多くが規制外施設で処理されている。州処分地容量確保計画（CAP）の一つの解析⁴⁹⁾がこの影響を示している。18の州では1987年には発生有害廃棄物推定値の中に規制外廃棄物を含めている。この規制外廃棄物を含めないと、全米についての値は40%以上も少なくなる。

このような差異や限界にもかかわらず、研究成果を集めると、有害廃棄物発生と焼却の実施について十分根拠のある予測ができる。全米の有害廃棄物発生量の年間合計値はEPAの推計が最初であるが、いわゆるWestat 郵送調査⁴³⁾によれば1981年がほぼ 265×10^6 メートルトン（265MMT）となっている。これは後に、議会予算局（CBO）の調査⁴⁴⁾と議会テクノロジーアセスメント局（OTA）の調査⁴⁵⁾から別々に確認されている。EPAは1987年の発生量を216MMTと推定しており、州処分地容量確保計画（CAP）は同じ時期に249.3MMTが発生したと報告している⁴⁹⁾。しかしながら、規制対象有害廃棄物の147.9MMTを収支か

ら除くと、この内の101.4MMTが規制外廃棄物となり、この廃棄物量の1%以下が焼却されていると考えられている。EPAは、1981年には1.7MMTの廃棄物が焼却処理されたと推定し⁴³⁾、議会予算局はこの量が1983年には2.7MMTと推定した⁴⁴⁾。EPAは、1987年には1.0MMTの廃棄物が227カ所の焼却施設（焼却炉数は310と推定）で処理されたと推定した²¹⁾。またHolloway⁵⁰⁾は、1980年代後半には年間1.0MMTの廃棄物が産業用ボイラーで燃やされたと推定したが、EPAは1.0MMTと推定した²⁷⁾。これらの値は州処分地容量確保計画（CAP）の推定値とよく一致している。この州処分地容量確保計画の推定値を1987年の規制対象有害廃棄物についてスーパーファンド法修正および再授權法（SARA）の管理区分に従って表5に要約して示した。州処分地容量確保計画では、1987年には1.3MMTの有害廃棄物が焼却され、1.2MMTがボイラーおよび産業用燃焼炉で焼却されたと推定している。

産業用のボイラーや燃焼炉での有害廃棄物燃焼は、先に述べた資源保護回復法（RCRA）の焼却基準からの除外、燃料と廃棄物の輸送費用の節約が予想され、有害廃棄物は売却できる（つまり経済的には燃料の価値を持つ）燃料として扱われ、廃棄物処分費用の節約が期待される。

表5 全米の非適用外有害廃棄物の発生量、1987年⁴⁹⁾

スーパーファンド改正法の 管理区分		量 (百万トン)	全体の比率 (%)
回 収	金 属	0.4	0.2
	溶 剤	0.9	0.6
	そ の 他	0.1	0.1
	全 回 収 量	1.4	0.9
熱プロセス	焼 却 / 液 体	1.1	0.8
	焼 却 / 個 体	0.2	0.1
	エ ネ ル ギ ー 回 収	1.2	0.8
	全 熱 プロセス	2.5	1.7
処 理	液 体 無 機 物	16.8	11.4
	液 体 有 機 物	36.7	24.8
	そ の 他 処 理	58.8	39.7
	汚 泥 処 理	0.4	0.3
	安 定 化	0.6	0.4
	全 処 理 量	113.3	76.6
処 分	陸 上 処 理	0.4	0.3
	埋 立	3.3	2.3
	深 井 戸 注 入	27.8	18.1
	そ の 他 処 理	0.2	0.1
	全 処 理 量	30.7	20.8
非適用外有害廃棄物量		147.9	100

産業の廃棄物燃料の使用に関する情報をEPAが1984年にまとめている。この調査は1983年の廃棄物燃料と廃油使用に関する全国アンケートの結果の概要である。この調査から、有害廃棄物を原料とする燃料(HWDF: hazardous waste-derived fuels)を使用している施設は1,300以上で、その量は年間230×10⁶ ガロン(0.9MMT)にのぼることが明らかになった。標準産業分類(SIC: Standard Industrial Classification) 28の化学工業がこのうちの67%にのぼるが、12.4%の施設のみが有害廃棄物を原料とする燃料(HWDF)を使用している。その他に、大量の有害廃棄物を燃料とする産業には、標準産業分類(SIC) 26(製紙), 29(石油), 32(窯業土石), 33(一次金属)がある。1,300施設のほんの一部(1.6%)を占めるにすぎず、少数の施設で廃棄物の大部分(69%)が燃やされている。これらの施設には中大規模の産業用ボイラー、セメントキルンや集合キルン(aggregate kiln)、製鉄用焼却炉が含まれる。

有害廃棄物を原料とする燃料(HWDF)に関する廃棄物コードに準拠したデータはまだ利用可能ではないが、1983年データによれば燃やされたHWDFのうち30%が有機溶剤、45%が他の有害有機物であった⁵¹⁾。この廃棄物の大部分は現地で発生したもので、それ以外のものの74%は他の場所から仲介者を通さずに直接に送られてきたものである。

実際に焼却施設に来る廃棄物の正確な種類に関する情報はまだ得られていない。多くの施設が間欠的な運転をしており、EPAの標準廃棄物コードでは書きにくい混合廃棄物を取り扱っている。1983年のEPA調査では全米204カ所の焼却施設に入る413の廃棄物経路のデータを採っている³²⁾。焼却される廃棄物の主要な経路は非ハロゲン溶剤(EPA廃棄物コード: F003)と有機物を含む腐食性と反応性を持つ廃棄物(EPA廃棄物コード: D002およびD003)で、これらを合わせると焼却廃棄物の44%になる。その他の顕著な廃棄物としては、シアン化水素酸(HCN、青酸、廃棄物コード: P063)、アクリルニトリル(廃棄物コード: K011) およびリストに載せていない引火性廃棄物(廃棄物コード: D001)がある。別のEPA解析⁴¹⁾では1981年の情報⁴³⁾から焼却炉で処理された廃棄物の分類を行っている。その結果によれば、廃棄物はほぼ60の廃棄物コードから成ることがわかった。2つの廃棄物コード、D001: 引火性廃棄物、X182: U008-アクリル酸、U112-エチルアセテート、U113-エチル

アクリレート、P003-アクロレインの混合物の2種類が廃棄物の71%にのぼる。また、この廃棄物の約44%が有毒金属を含んでおり、約37%が塩素を含む。Behamanesh ら⁵²⁾は1986年中に焼却された資源回復保護法(RCRA)の有害廃棄物量と組成を調べ、焼却廃棄物の金属対ハロゲンの比を標準産業分類(SIC)に従って決定した。彼らは、金属を含む廃棄物の発生時の姿は焼却時とは全く異なっていることを見だしている。ある場合には、2、3の廃棄物経路で焼却炉に投入される全金属量のかかなりの部分を占めている。

現在では、発生有機廃棄物のほんのわずかが焼却管理されているが、焼却法の利用は増加傾向になる。有害固形廃棄物法(HSWA)による陸上処分制限の実施で有害廃棄物焼却量が増えると期待される。この規制によって、以前は陸上処分された有害廃棄物のうち年間700万トンを、陸上処分に先立って最良の実証された利用可能技術(BDAT: Best demonstrated available technology: 資源保護回復法で指定される処理基準)により達成可能なレベルにまで処理しなければならなくなる¹⁾。制限予定の有害廃棄物の多くに対して、BDATによる処理レベルは焼却が基本となっている。さらに、発生原因者は長期間にわたる責任が大きくなることに関心を持っているから、焼却がさらに魅力的であることは間違いない。EPAの1981年推定によれば、実際よりもさらに850万トンの有害廃棄物は焼却炉や産業用燃焼炉で熱的分解が可能である⁴³⁾。他の多くの調査によれば、有害廃棄物管理のための焼却技術の利用と需要が大きく増加している^{2, 44, 53~55)}。また、焼却に適する廃棄物の種類をより広げる方向にある。スーパーファンド法処分地の恒久的安定化の実証により、比較的低濃度(数百ppm以下のある種のダイオキシン汚染の処分地)の有機物汚染廃棄物やあるレベルでの金属汚染廃棄物に限っては焼却処理が行われている。それゆえ、将来は発生有害廃棄物の非常に多くの部分が焼却管理になる可能性がある。燃焼法の拡大には大きな可能性があるが、このことは、資源保護回復法(RCRA)あるいは有毒物質規制法(TSCA)の許可を受けた移動用施設的能力が十分であることが前提になる。もちろんこれは重要で、数多くの研究^{2, 39~42)}においても注意が払われている。Gruber⁵⁶⁾やHighum⁵⁷⁾は焼却能力の現在量調査から、1987年には17の有害廃棄物焼却の商業施設と154の現地焼却施設が運転され、表6に示すように、合わせて430万トンの能力があったと述べた。この建設によって利用

表6 稼働中の全米の有害廃棄物焼却施設の能力
(1987年)⁵⁷⁾

内 容	数	能力(百万トン) ^{a)}
有害廃棄物焼却の商業施設	17 ^{b)}	0.9
現地 (on-site) 焼却炉	154	3.4
計	171	4.3

a : 示されている能力は最大能力値らしい。実際の能力は30%から50%少ないと推定される。

b : 有機廃棄物焼却炉として許可された産業用燃焼炉4施設を含む。

可能な焼却能力の増大が計られている^{56, 58)}。

現在の焼却有害廃棄物量から考えて、将来の処理能力の確保が必要になるが、能力の数値はその大部分が最大能力の推定値で、実際には達成できそうもない。Highum⁵⁷⁾は、実際能力は表6よりは30ないし50%少なく、220万トン～300万トンと推定している。将来、はるかに大量の廃棄物が焼却されることは間違いないが、未使用や計画中の設備のすべてが稼働するとは考えられない。廃棄物処理能力は全国のトンベースでは利用可能に見えるが、これは廃棄物の種類や場所による必要能力の違いを考慮していない。例えば、処理能力の大部分を液体廃棄物とすると汚泥や固形物に対する処理能力は十分ではないことになる。また、爆発物や混合廃棄物のような特殊な廃棄物の焼却能力は十分とはならない。1987年には商業用焼却炉施設の稼働は13の州のみであった⁵⁷⁾。

焼却能力の増大に対するもう一つの大きな障害は、新施設の許可と立地に対する公衆の反対である。適切な処分が求められる汚泥や固形物の処理の多い off-site (発生地から離れた場所) の商業用施設には特に反対が強い。最近では、新しい商業用の熱分解施設の稼働許可に対しての公衆の反対が非常に強くなっている。グリーンピースは44焼却炉の建設と許可の停止を主張している⁴⁾。新しく商業用の焼却施設の許可に要する時間は、普通、最低3年であるが、それ以上になることが多い。公衆の反対がある場所では、この時間の要素と許可を得るための出費は非常に大きくなる。既存施設の場所に新しい産業用焼却炉の設置許可に要する時間は普通は1ないし2年である。

この公衆の反対は、廃棄物の発生当事者、設備製造者および廃棄物処分業者に不安を呼んでいる。この不安とより厳しい規制のために、有害廃棄物焼却分野の会社や施設の数に変化が現れるようになった。例えば、1981年～1987年には、ほぼ100焼却炉が資源回復保護法(RCRA)のシステムから撤退した。これらは運

転中止や有害廃棄物は扱わないとしている⁴¹⁾。1981年に、有害廃棄物焼却炉のメーカー57社のうち、23社がその事業から撤退したり、1984年までに活動を大きく縮小している⁴¹⁾。1989年11月8日までに(議会命令によるすべての有害廃棄物焼却炉許可の法期限)、さらに55カ所の焼却炉施設が閉鎖を申し立て、120焼却炉施設が許可され、55カ所の焼却施設が欠陥の申し立てにもかかわらず運転の継続(許可申請の受領を延期する)が認められ⁵⁹⁾、1991年12月までにほぼ150の焼却施設が稼働している⁶⁰⁾。さらに、1991年には推定で925カ所のボイラーが有害廃棄物を燃やしている。「ボイラーおよび産業用燃焼炉における有害廃棄物の燃焼：最終規定」²⁷⁾によれば、1991年2月21日には、このうち200カ所が有害廃棄物の燃焼を停止し、600カ所が小規模の現地設置のバーナー(対象外であり許可は不要)での稼働を継続することとなり、125カ所が暫定状態の稼働で基準の許可を得ると思われる。また、ほぼ75カ所の産業用燃焼炉が有害廃棄物の燃焼を継続するとみられる。これらの規制を受ける燃焼炉の分野は、セメントキルン40、軽量集合キルン18、ハロゲン酸燃焼炉15と推定される²⁷⁾。しかし、セメントキルンはもう少し多くの施設が有害廃棄物の燃焼を望んでいる。1992年の2月と同様に、53セメント施設はB I F 規定(ボイラーおよび産業用燃焼炉の規定)のもとで暫定状態が適用されている⁶¹⁾。

燃焼炉施設の許可に対する公衆の反対の程度は、設置場所と廃棄物の種類によって異なる。単一の廃棄物発生施設から発生する廃棄物を直接に現地処理する施設は、大きな市場の複数発生施設からの廃棄物を受け入れる現地外(off-site)施設よりも受け入れられやすい。現地外の施設は、他の地域からの廃棄物の移入に伴う危険性と差し引きすると、十分な経済的利益を地域社会に与えるとは認め難いことが多い。現地施設は地域経済に重要な事業としてはっきりと認識され、一般的には有害廃棄物の移入者とはみなされていない。反対は、まず第一に、新たな現地外商業処理施設の設置や、批判者が特別に有害とみているPCBの燃焼に焦点を当てる傾向がある。

受ける便益と公衆の反対を調整する努力の中で、EPAは、熱分解を規制する方向を変更する必要があるかどうかを決めるためのアセスメントを1985年に行った³⁾。市民から報告された主な問題には、イ)貯蔵、処理、取り扱いにおける有害物質の流出、ロ)環境と健康への影響、ハ)設置場所選定の手順の

貧弱さ、ニ) 焼却炉所有者と使用者への不信任感、ホ) 行政機関の遵守執行能力のなさ。

この調査は、連邦の規制戦略、地域社会への影響、施設立地の公平さ、公的な意志決定の手順、特に執行計画と焼却能力に関する市民の関心を行政側が十分に把握すれば、焼却に対する公衆の反対がいくらかは弱まる可能性があるとして結論している。また、この調査は、健康と環境に対する関心とその優先度が規制と基準にどのように反映されているかについて、よりコミュニケーションを図る必要があると結論している。公衆とのこれまで以上の対話は規制機関と執行機関の信頼度を高めることができるから、個々の焼却施設や焼却装置の許可の決定に関して、規制の対策、戦略および他の活動についてもっとコミュニケーションを図ることが望ましいことである。

2. 2 焼却技術

有害廃棄物の種類や物理的形状に対応する種々の焼却技術が開発されている。最も一般的な4種の焼却炉は、液体噴霧（時にはフューム燃焼と組み合わせる）、ロータリーキルン、固定炉床、流動床の各燃焼炉である。

有害廃棄物燃焼システムの選定と設計のプロセスは非常に複雑であるが、産業上の十分な経験があり、多くの設計ガイドが出版されている^{11, 62-65)}。設計原理の詳細な検討は本論文の範囲を越えるが、焼却システムの最も顕著な姿と重要な設計要素を一般化してレビューすることは熱分解操作と排出物に関する性能を理解する上で有用であろう。

有害廃棄物燃焼システムに組み込まれる4種の主要

なサブシステムは：(1)廃棄物の前処理と投入、(2)燃焼室、(3)大気汚染防止、(4)残滓／灰の扱いである。これらのサブシステムの通常の位置づけを典型的なプロセス要素とともに図-1に示す。この要素の適切な組み合わせが、基本的には、廃棄物の流れあるいは焼却廃棄物の流れの物理的・化学的な特性となる。

(1) 廃棄物の前処理と投入

廃棄物の物理的な形により適切な投入方法が決まる⁶²⁾。混合液体であれば、ポンプで汲み上げて、ノズルまたは噴霧バーナーで燃焼室に送入する。浮遊粒子を含む廃棄物は、ノズルや噴霧器の目詰まりを防ぐためにスクリーニングが必要になる。浮遊燃焼では4,000 Btu/1 b程度の廃棄物熱量 (heat content) で可能で、液体廃棄物では8,000 Btu/1 bの正味熱量に混合するのが典型的なやり方である。発熱量の低い廃棄物の燃焼には、通常、補助燃料が必要となる。混合は燃焼室投入前か、あるいは廃棄物の種類に応じて別のノズルにより燃焼室内で混合する。混合は、また、焼却炉に投入する廃棄物の塩素量制御にも使用され、塩素含有量70%以上の廃棄物は特別に設計した焼却炉でしか燃焼出来ない⁶⁶⁾。混合によって良好な燃焼管理が保たれるとともに、燃焼ガス中で高濃度の遊離塩素ガスの周期的な形成を抑えることができる。

汚泥は、progressive cavity ポンプか、水冷 lance による投入が一般的である。塊になった固形廃棄物は粒径制御のために粉砕が必要になる。これらは燃焼室へ、押し込み、重力投入、気密投入、振動、あるいはねじ込み投入、ベルト式投入などにより投入される。容器に入った廃棄物は重力式かまたは押し込み投入に

図-1 焼却のサブシステムとプロセス要素の種類

よるのが典型的である。

(2) 燃焼室

廃棄物の物理的形態とその灰の成分で燃焼室の形が決まる。表 7 には、主要な 4 種類の焼却炉の設計における一般的な選定要件を廃棄物形態ごとに示した⁶²⁾。なお、焼却のシステムの名前は採用している燃焼室の形に由来する。

液体噴射の焼却炉または燃焼室はほとんどの液体廃棄物に適用でき、これらの装置（図－2）は通常単純なものは、耐火レンガで内張りした筒状の装置（水平または垂直）で、1 個あるいはそれ以上のバーナーを持つ。液状廃棄物はバーナーから噴霧されて微細な液滴になり、浮遊状態で燃焼する。バーナーは廃棄物噴霧ノズルと別のこともあるが、軸に平行、あるいは火炎に放射状や接線方向に取り付けられる。しかし、接線方向噴霧を含む渦流バーナーの実用化で、高い熱効率が得られている。

表 7 廃棄物の物理的な形状と焼却炉の適合性⁶²⁾

		液体 注入	ロータリー キルン	固定 炉床	流動床
固 体	粉体、均一		×	×	×
	不均一、塊状（ペレット）		×	×	
	低融点（タール）	×	×	×	×
	融解性灰分を持つ有機化合物		×	×	×
	予備処理なし、大塊状		×	×	
気 体	有機性蒸気	×	×	×	×
液 体	高有機結合の液状廃棄物	×	×	×	×
	液体有機物	×	×	×	×
固 ／ 液 体	ハロゲン化芳香族を含む廃棄物（2200Fが最低）	×	×	×	
	液状有機性汚泥		×		×

液体燃焼で高い分解効率を得るには良好な噴霧が必須で、ノズルはミストの平均粒径が 1 ミクロン以下になるよう開発されてきた⁶⁸⁾。これに比べて、典型的な油バーナーでは粒径が 10～50 ミクロンである⁶⁹⁾。噴霧は低圧の空気または水蒸気〔1～10psig〕、高圧の空気または水蒸気〔25～100psig〕、あるいは高水圧〔25～450psig〕で行われる。

廃棄物が無機塩類や融解性の灰分を多量に含む場合には、鉛直下向き噴霧の焼却炉が用いられ、水平方式の装置は灰分の少ない廃棄物に用いられる。これまでの液体噴霧焼却炉は $30 \times 10^6 \text{ Btu/h}$ の発熱量が典型的であったが、現在では $210 \times 10^6 \text{ Btu/h}$ のものも稼働している。

ロータリーキルン型焼却炉（図－3）は、固形廃棄物、流動性のスラリーや液性の廃棄物分解など広い用途がある。このために、この型の装置は、廃棄物の発生地から離れた場所に設置される商業ベースの焼却施設によく採用され、スーパーファンドの恒久的安定化に用いられている。このロータリーキルンは、耐火レンガで内張りした筒状の装置で、キルンの回転によって固形廃棄物の混合と移動が行われ、廃棄物をガス流と反対または順方向に動かす。一般に、固形廃棄物はキルン内で 0.5～1.5 時間滞留し、キルンの回転速度（0.5～1.0rpm）と廃棄物の投入速度で制御される。また、キルン内の移動速度を遅らせるために、内部隔壁を付けることもある。投入速度は、キルン内で処理される廃棄物量をキルン容量の最大 20% とするのが一般的である。

キルンの基本的機能は、固形廃棄物のガス化で、蒸発、分解、部分的燃焼反応が一連の現象として起こる。しかし、ガス相の完全な燃焼反応のためには再燃焼装

図－2 典型的な液体注入方式の焼却室

図-3 典型的なロータリーキルン/再燃焼装置の燃焼室

置（afterburner）が必要で、キルンの排出口に直接に取り付けられる。最近のシステムではキルンと再燃焼装置の間に“ホットサイクロン”を取り付けて固形粒子を除去している。これは再燃焼装置内でのスラグ生成を防ぐためである。アフターバーナーは水平または垂直に取り付けられるが、基本的機能は液体噴霧燃焼炉と同じである。多くの施設では、液体有害廃棄物を再燃焼装置に別のバーナーを取り付けて燃やしている。通常は再燃焼装置とキルンに補助燃料による燃焼系を取り付けて、必要な運転温度に保つようにしている。一方では、液体廃棄物を再燃焼装置に噴霧し、その燃焼により温度制御をしているものもある。アメリカではロータリーキルンの発熱容量 $150 \times 10^6 \text{ Btu/h}$ で設計されてきたが、平均 $60 \times 10^6 \text{ Btu/h}$ 付近が典型的である。

固定炉床の焼却炉では、いわゆる空気制御方式、低酸素空気方式および熱熔融方式が有害廃棄物の焼却に用いられる。これらの装置は二段燃焼方式で、ロータリーキルンによく似ている（図-4）。廃棄物は第一段目の燃焼室、あるいは初期燃焼室に押し込み方式で投入され、ほぼ50～80%の理論空気で燃焼させる。この低酸素空気の条件で廃棄物中の揮発成分の大部分が固定炭素成分の酸化で得られる吸収熱によってガス化し、基本的にメタン、エタンその他の炭化水素類から成るが、COおよび燃焼生成物とともに第二段目の燃

焼室へ移動する。ここで、燃焼を完結するために空気を追加する。この燃焼は自燃または補助燃料の追加により燃焼させる。粒子の巻き上げと移動を最小限にするために、第一段燃焼室での燃焼反応と乱気流の速度を低酸素空気で低いレベルに保つことができる。二次空気を追加するために、固定炉床では、全体としての過剰空気率は100%～200%となる。

固定炉床の装置は、液体注入の焼却炉やロータリーキルン方式の焼却炉よりも容量が小さくなる傾向があり、資本費用が比較的低くなること、および粒子状物質の低減できることから、廃棄物発生現場での設備としてロータリーキルンよりも有利である。

流動床方式は都市廃棄物処理プラントで発生する汚泥の燃焼に用いられるが、有害廃棄物の焼却に利用されるようになったのはごく最近のことである。流動床焼却炉には循環炉床、あるいは流動層がある⁷⁰⁾。両者とも耐火レンガで内張りした単一の容器で、その中に砂、アルミナ、炭化カルシウムなどを入れている。燃焼空気は燃焼室の底部にある拡散板を通して供給され（図-5）、この空気は流動層を形成するか、または流動材と混ざるように量を調節する。循環炉床方式は空気流量が大きく、固形物は上方へ吹き上げられるがサイクロンで分離されて燃焼室へ再び戻る。稼働温度1,400～1,600 Fが普通で、過剰空気は25～150%が必要である。

図-4 典型的な固定炉床方式の燃焼室

図-5 典型的な流動床方式の燃焼室

流動床焼却炉は基本的には液体、汚泥、粉碎した固形物（土壌を含む）に用いられ、廃棄物を流動層内でうまく分布させるためと、流動層から固形の残留物を取り除くために、固形物はスクリーニング、または直径2インチ以下に破碎することが必要である。流動床焼却炉では高いガス固形物比、高い熱転換効率、気相と固相の両方における大きな乱れ、層全体に均一な温度、生石灰・石灰石・炭酸塩の添加による酸性ガスの中の中和が可能となる。また、特に塩類が投入廃棄物の中に含まれている場合には、層内での塊状凝集物が出る。

焼却炉の型とは関係なく、廃棄物の化学的および熱的特性によって燃焼室の大きさや運転条件（温度、過剰空気率、流量）が決まり、大気汚染防止の特性や灰分／残留物の取扱システムが決まる。化学量論的に燃焼空気量を求めたり、燃焼ガスの流量や組成の予測には、基本的な組成と水分含有量のデータが必要である。これらのパラメータは、燃焼温度や滞留時間、廃棄物／燃料／空気の混合比、大気汚染防止機器の種類や大きさの決定に重要である。主要な4種の型の焼却炉について、典型的な運転温度、ガス（および固形物）の滞留時間、過剰空気率を図-2～5に示す。しかしながら、これらの値は実際現場では大きくばらついているが廃棄物の分解と除去の効率に有害な影響を及ぼすことはない⁷¹⁾。

(3) 大気汚染防止

有害廃棄物の焼却に続いて燃焼ガスの大気汚染防止の処理が必要になる。廃棄物中の塩素や他のハロゲンが存在するから、HClやその他のハロゲン酸除去のために、燃焼ガスの洗浄や吸収が必要になるが、廃棄物中の灰分は燃焼過程では分解されないが、その組成によっては、灰分はキルンが炉床の取り出し口から底灰（bottom ash）として、あるいは燃焼ガス流中に浮遊する粒子状物質（フライアッシュ）として出てくる。有害廃棄物燃焼システムのほとんどから排出される粒子状物質は一般に1μ以下の粒子径であり、RC

R Aの排出基準や州の排出基準に適合するには高効率の集塵装置を必要とする。

有害廃棄物施設の最も一般的な大気汚染防止装置は quench (ガスの冷却と温度調節) で、さらに高エネルギーのベンチュリスクラバー (粒子の除去)、充填塔 (酸性ガスの除去)、ミスト除去装置 (水蒸気白煙の除去) からなる。しかし、灰分やハロゲン含有量の低い液体廃棄物はこのような防止措置なしでも運転は可能である。

ベンチュリスクラバーでは、収縮断面またはスロートを高速でガスが通過する際に洗浄液 (通常は水または苛性ソーダ水溶液) を排出ガス中に注入する。液は噴霧されて微細な水滴となり、これがガス流中で微細な粒子やガス中の溶解成分を取り込んでいく。ベンチュリスクラバーの主要な利点は、その信頼性が高いことと操作が簡単なことである。一方、有機廃棄物焼却炉における粒子状物質の有効な除去のためには、ベンチュリスロット断面での圧力降下をかなりの程度 (60~120インチ水柱) に保たねばならないことから、溶液洗浄方式を採用している焼却施設では、全運転費用のかなりの部分をこれが占めることになる。また、ベンチュリスクラバーは、金属エアロゾルのような微細な粒子の排出を防止するにはあまり有効ではない。

酸性ガスの除去は、一般に充填塔スクラバー、あるいは段塔スクラバーで行われる。充填塔スクラバーは、ポリエチレン製の鞍型充填物やリング型充填物をランダムに満たした塔である。洗浄液は塔の上端から供給され、ガス流に対して順方向、逆方向、横断方向のいずれの方式も可能で、充填物はガス相の効果的な物質移動のための接触面積を確保する。

段塔スクラバーもまた汚染物質の吸収除去について信頼度が高い。基本的な形は垂直の円筒形の塔で、内部には多くの段 (plate または tray) がある。洗浄液は最上段から供給し、液の流れは各段を次々と横切って、塔の底部にある液出口へと移動していく。ガスは塔の底部から入って、各段の開孔部を通して上端から出る。ガスの吸収は、ガス相が各段で液を通過する際に小さな気泡を生じることによって促進される。

充填塔あるいは段塔スクラバーは、溶解性ガス状汚染物 [HCl および SO_x] の吸収が最も重要で、粒子状物質がそれほどでもない場合に、液注入の焼却施設でよく用いられる。ロータリーキルンや固定炉床の施設、あるいは液注入の施設で灰分の多い廃棄物を焼却する場合には、ベンチュリスクラバーを充填塔や段塔

と直列につないで用いる。

多くの方式では、ガス冷却やエネルギー回収手段として廃熱ボイラーが組み込まれる。また、湿式電気集塵装置 (ESP)、湿式イオン化スクラバー (IWS)、衝突式スクラバー、噴霧乾燥吸収装置 (SDA, spray-dryer-absorber)、布濾過装置 (FF, fabric filter) 等も組み込まれている⁷⁴⁾。これらは微細粒子の除去効率がよく、圧力損失が低いことがその大きな理由である。

(4) 残留物や灰の取り扱い

有害廃棄物中の無機成分は焼却によっても分解されることはない。これらの物質は、底灰として燃焼室から洗浄水中の汚濁物質として、また、他の大気汚染防止装置の残留物として、煙突からの大気汚染物質として焼却システムから出てくる。有害廃棄物の焼却から発生するこれらの残留物は注意深く取り扱わねばならない。

灰は、燃焼室から出た後に空気冷却されるか、水冷却されるのが普通である。この点から、有害廃棄物の陸上処分施設で処分する前に、灰を焼却施設内の貯留池や容器に集めることが多い。陸上処分禁止 (LDR; Land Disposal Restriction) の規制措置に適合するように、処分に先立って脱水や化学的な固定/安定化がなされることもある。

大気汚染防止装置での残留物は、燃焼ガスの冷却、粒子除去、酸性ガス吸収といった燃焼システムの各段階で発生する。これらの残留物は液状で、捕集された粒子状物質、吸収された酸性ガス (普通は HCl として吸収される)、塩類、微量の有機成分が含まれる。この液の流れは汚水溜や再循環槽に進められ、酸は苛性ソーダで中和されてプロセス内に戻される。時には、これらの廃液の一部または全部が処理と処分のためにとり出される。多くの施設では、貯留池に入れるか、液内に浮遊している物質を凝集させて化学的に沈澱させる操作をして最後には陸上処分へと送っている。処理後の液内に溶解している汚濁物質の性状と濃度によっては、プロセス内に戻すか、または下水への放流をすることもある。液状残留を取り扱うその他の方法としては、乾燥スクラバー装置を用いて排水を出さないようにすることである。

参考文献

- 32) G. Vogel, et al., "Composition of Hazardous Waste Streams Currently Incinerated," Mitre Corp., U. S. EPA, April 1983.

- 33) S. Tejada, "The blue goose flies!", "EPA journal, October 1985.
- 34) J. J. Yezzi et al., "Results of the Initial Trial Burn of the EPA-ORD Mobile Incineration System," In Proceedings of the ASME 1984 National Waste Processing Conference, Orlando, FL, June 1984.
- 35) H. Mortensen, et al., "Destruction of Dioxin Contaminated Solids and Liquids by Mobile Incineration," EPA Final Report, EPA/600/R 2-87/033, NTIS PB 87-188512/AS, June 1987.
- 36) F. Freestone, et al., "Evaluation of On-Site Incineration for Cleanup of Dioxin-Contaminated Materials," Nuclear Chemical Waste Management, Vol. 7, pp 3-20, 1987.
- 37) D. A. Oberacker, J. J. Cudahy, M. R. Richards, "Remediation (Clean-Up) of Contaminated Uncontrolled Superfund Dumpsites by Incineration and Other Popular Technologies," presented at the 1990 Pacific Basin Conference on Hazardous Waste, Honolulu, Hawaii, November 12-16, 1990.
- 38) J. J. Cudahy, W. L. Troxler, "1991 Thermal Treatment Remediation Industry Contractor Survey" presented at the AWMA 85th Annual Meeting & Exhibition, Kansas City, Missouri, June 21-26, 1992.
- 39) U. S. EPA, "Hazardous Waste Generation and Commercial Hazardous Waste Management Capacity," SW-894, December 1980.
- 40) G. Vogel, et al., "Incineration and cement kiln capacity for hazardous waste treatment," in Proceedings of the 12th Annual Research Symposium, Incineration and Treatment of Hazardous Wastes, NTIS PB 87-110896, Cincinnati, Ohio, April 1986.
- 41) U. S. EPA, "A Profile of Existing Hazardous Waste Incineration Facilities and Manufacturers in the United States," NTIS PB 84-157072, February 1984.
- 42) U. S. EPA, "Assessment of Incineration as a Treatment Method for Liquid Organic Hazardous Wastes-Background Report III : Assessment of the Commercial Hazardous Waste Incineration Market," U. S. Government Printing Office, 1985-526-778/30376, March 1985.
- 43) U. S. EPA, "National Survey of Hazardous Waste Generator and Treatment, Storage and Disposal Facilities Regulates Under RCRA in 1981," U. S. Government Printing Office, 055000-00239-8, 1984.
- 44) U. S. Congress, Congressional Budget Office, "Hazardous Waste Management : Recent Changes and Policy Alternatives," U. S. Government Printing Office, 1985.
- 45) U. S. Congress, Office of Technology Assessment, "Technologies and Management Strategies for Hazardous Waste Control," U. S. Government Printing Office, Washington, DC, OTA-196, March 1983.
- 46) U. S. EPA, "1986 National Screening Survey of Hazardous Waste Treatment, Storage, Disposal and Recycling Facilities," December 1986.
- 47) U. S. EPA, "1987 National Biennial RCRA Hazardous Waste Report," EPA/530-SW-91-061, July 1991.
- 48) U. S. EPA, "Fact Sheet on Waste Treatment Capacity," Office of Solid Waste and Emergency Response, November 1989.
- 49) Environmental Information, Ltd., "Interchange of Hazardous Wastes Management Services Among States," National Solid Wastes Management Association, December 31, 1990.
- 50) R. Holloway, "An Overview of Waste Combustion in Boilers and Industrial Furnaces : History, Current Practices and Future Prospects," presented at Waste Combustion in Boilers and Industrial Furnaces Conference of the Air and Waste Management Association, Kansas City, MO, April 1990.
- 51) Westat, Inc., "Used or Waste-Oil and Waste-Derived Fuel Material Burner Questionnaire for 1983," U. S. EPA, 1984.
- 52) N. Behmanesh, D. T. Allen, J. L. Warren, "Flow Rates and Compositions of Incinerated Waste Streams in the United States," Journal of the Air & Waste Management Association 42(4) : 437-442, April 1992.
- 53) Environmental Resources Management, Inc., "New Jersey Hazardous Waste Facilities Plan," New Jersey Waste Facilities Siting Commission, Trenton, NJ, March 1985, p.170.
- 54) ICF, Inc., "Survey of Selected Firms in the Commercial Hazardous Waste Management Industry : 1984 Update," U. S. EPA, September 1985.
- 55) Office of Appropriate Technology, "Alternatives to the Land Disposal of Hazardous Wastes, An Assessment for California," Toxic Waste Assessment Group, Governor's Office of Appropriate Technology, Sacramento, CA, 1981.
- 56) W. Gruber, "Hazardous Waste Incineration : 1990," E I Digest, pp. 7-15, April 1990.
- 57) K. Highum, "The Incineration Picture Based on the Capacity Assurance Plans," E I Digest, pp.16-35, April 1990.
- 58) U. S. EPA, Region IX, "Commercial RCRA Hazardous Waste Incinerators and Boilers & Industrial Furnaces in the USA," draft, May 30, 1991.
- 59) Sonya Sasseville, U. S. EPA, Office of Solid Waste, Wash., DC personal communication, September 1990.
- 60) Nahid Zoveshtiahi, U. S. EPA, Office of Solid Waste, Wash., DC personal communication, December 4, 1991.
- 61) S. Garg, U. S. EPA, Office of Solid Waste, Washington DC, personal communication, February 12, 1992.
- 62) U. S. EPA, "Engineering Handbook on Hazardous Waste Incineration," SW-889, NTIS PB 81-248163, September 1981.
- 63) W. R. Niessen, Combustion and Incineration Processes, Marcel and Dekker, 1978.
- 64) C. A. Brunner, Incineration Systems and Selection and Design, Van Nostrand Reinhold Co., 1984.
- 65) C. A. Brunner, Handbook of Incineration Systems, McGraw-Hill Inc., 1991.
- 66) D. C. Ackerman, J. F. McGaughey, D. E. Wagoner, "At-Sea Incineration of PCB-Containing Waste On Board the M/T Vulcanus," U. S. EPA, 600/783-024, NTIS PB 83-207647, April 1983.
- 67) Y. H. Kiang, "Total hazardous waste disposal through combustion" Industrial Heating 14 : 9, 1977.
- 68) Y. H. Kiang, A. A. Metry, Hazardous Waste Processing Technology, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, 1982.
- 69) R. D. Reed, Furnace Operations, Third Edition, Gulf Publishing, Houston Texas, 1981.

- 70) W. S. Rickman, N. D. Holder, D. T. Young, "Circulating bed incineration of hazardous waste," Chemical Engineering Progress 81 : 3 : 34 (March 1985).
- 71) A. Trenholm, "Summary of Testing Program at Hazardous Waste Incinerators," in Proceedings of the 11th Annual Research Symposium, Incineration and Treatment of Hazardous Waste, EPA/600/9-85/028, NTIS PB 86-199403, September 1985.
- 72) J. J. Santoleri, "Energy Recovery A By Product of Hazardous Waste Incineration Systems," in Proceedings of the 15th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference on Toxic and Hazardous Waste, 1983.
- 73) R. G. Novak, W. L. Troxler, T. H. Dehnke, "Recovering energy from hazardous waste incineration," Chemical Engineering 91 : 6 : 146 (1984).
- 74) J. J. Moller, O. B. Christiansen, "Dry Scrubbing of Hazardous Waste Incinerator Flue Gas by Spray Dryer Absorption," in Proceedings of the 77th Annual APCA Meeting, 1984.

第11回大学等廃棄物処理施設協議会研修会

開催日時 平成5年11月11日(木), 12日(金)
場 所 東京大学山上会館
 TEL 03(3818)3008
 〒113 東京都文京区本郷7-3-1

プログラム

11月11日(木)

あいさつ (14:45~15:00)

大学等廃棄物処理施設協議会会長 篠田 純 男

あいさつ

文部省文教施設部指導課課長 依頼中

特別講演 (15:00~16:00)

新しい水質基準について(仮題)

国立環境研究所 中 杉 修 身

特別講演 (16:00~17:00)

大学のキャンパス内での雨水貯留のすすめ(仮題)

東京大学工学部 市 川 新

11月12日(金)

部会報告 (9:00~10:25)

(1)環境教育部会, (2)国際交流部会,

(3)分析計測部会, (4)安全衛生部会,
 (5)処理プロセス部会

フリーディスカッション (10:25~11:55)

(1)大学における処理施設の環境教育

(2)特別管理廃棄物の取扱い

(3)処理施設の管理・運営

閉会のあいさつ (11:55~12:00)

大学等廃棄物処理施設協議会副会長 正 藤 英 司

〔会 費〕

会 員 : 無料

非会員 : 大学等研究機関関係者 ￥3,000

地方自治体関係者 ￥3,000

一般, 民間企業関係者 ￥10,000

〔講演要旨〕当日受付で配布します。

〔問合わせ, 申込先〕

京都大学環境保全センター

大学等廃棄物処理施設協議会事務局

TEL 075(753)7703 担当 高 月 紘