

## 処理技術の原理と効果を「形式知」に

松 藤 敏 彦\*  
Toshihiko MATSUTO

### 1. はじめに

廃棄物処理には収集から始まり、破碎、選別、焼却、堆肥化、メタン発酵、埋立など、多様な技術が用いられている。さらに付随する処理として水処理、排ガス処理、固型残渣処理などがあり、排ガスならば酸性ガス、ばいじんなど、目的別の処理がある。各々について技術開発が進められているのだが、十分な知識を持たない者にとっては「何が違うのか」を理解できないことが多い。その理由は「〇〇式」と名のつくものが大変に多く、その名称づけが体系的でないことによっていると以前から感じていた。つまり「〇式」と「△式」はどこがどう違うのか、である。

本特集で予定された内容は大部分が焼却技術である。本原稿では「ごみ処理施設整備の計画・設計要領（以下設計要領<sup>1)</sup>」の内容について、焼却以外の例も含めて、筆者がなぜ理解が難しいと感じるのかについて述べることにする。提案したいのは、処理や技術を「原理」によって分類することである。なお、引用する箇所を示すため、以下では図2.1-2などのようにⅡ編設計要領中の図表番号を示している。

\*北海道大学

### 2. 施設・設備の分類

#### (1) 破碎、堆肥化

筆者が最初に「〇式」の多さを感じたのは、破碎である。表1(a)は設計要領の図7.2.3-4のツリー図を書き換えたものだが、縦/横は機器の形状、スイングハンマなどはハンマの種類にすぎない。縦/横の意味は、高速回転式は回転軸の方向、切断式は切断刃の移動方向(堅型は下方へ移動するギロチン)と、意味が異なる。低速回転式は軸の数によって一軸、二軸、三軸などがあり、回転刃の形状からスクリー、ディスクなどにも分けられる。堅型高速回転式にはリンググライダーというのもあり、いくらでも組み合わせが増加してしまう。

表1(a)の切断、高速回転、低速回転は、それぞれ破碎のメカニズム(原理)が異なっている。この点、文献2)は方式とメカニズムを対応付けた整理をしており、切断式→せん断、高速回転→衝撃、低速回転→引き裂きとなり、各々の対象となる物質の特性が繊維質、ぜい弱などであるとしている。設計要領には、可燃性粗大、不燃性粗大、不燃物、プラスチック類に対する適合性(表7.2.3-1)が示されているが、プラスチックでも硬質、軟質があり、不燃物もセラミック、ガラス、

表1 破碎施設の分類

(a)設計要領の分類

切断式	横型	
	堅型(ギロチン)	
高速回転式	横型	スイングハンマ
		リングハンマ
	堅型	スイングハンマ
		リングハンマ
低速回転式	単軸	
	多軸	

(b)メカニズムによる分類

方式	メカニズム	対象物	
切断式	せん断	強じん、繊維質	切断方向 上下/水平
高速回転式	衝撃が主	ぜい弱 摩耗性、繊維質	回転軸 たて/横 ハンマー/リング
低速回転式	引き裂き	強じん、繊維質	軸：1, 2, …
圧縮型	圧縮	ぜい弱	
粉碎機	摩擦		

表2 堆肥化施設の種類

(a)設計要領の種類

形状		移送・攪拌
立型	多段式	レーキ/パドル/ゲート
	サイロ式	オーガ/無攪拌
横型	平面式	スクープ/パドル
	野積み式	クレーン/ショベルカー
回転型	円筒式	ロータリーキルン

(b)欧米の種類

施設形態		繰り返し, エアレーション
ウインドロー	静置	エアレーションなし エアレーションあり
	繰り返しあり	エアレーションなし エアレーションあり
バイオリアクター	鉛直型 (Vertical) 水平型 (Horizontal) バイオセル	さまざまな方法がある

金属があるため、物性で示す方がよいと思われる。

表2(a)は堆肥化(表10.3.3-2)である。立／横／回転の施設形状が第一段階で、平面／野積みなどはそのさらに細分化、そしてレーキ／パドルは攪拌装置の種類である。つまりこれらは、「形」であり、いくらでも多くの「式」が生まれる。

堆肥化の原理は好氣的微生物処理であり分類は不要なので、欧米ではまず施設の形態で分けている。Chiumentiら<sup>3)</sup>による第一の分類は、ウインドローとバイオリアクターである。前者は屋外に野積みするのに対し、後者は生物反応器として施設内に格納するためIn vessel typeと称されることもある。ウインドローは好気性化の方法によって、ただ積むだけの静置と繰り返しありに分けられ、両者ともさらにエアレーションの有無で分かれる。静置型のエアレーションはパイプなどを挿入して空気を送る(あるいは吸引する)。バイオリアクター型には、記載を省略したが機械的繰り返しとエアレーションに様々な方法がある。このほか「バイオセル」とは、密閉空間に空気を送り、排気をスクラバー、バイオフィルター(堆肥層などにより脱臭)して処理する。わが国では表2(b)のウインドローはごみ処理施設には含まれておらず、バイオリアクター型の施設を「高速堆肥化」と呼んでいる。(高速だけで低速がないのは奇妙であり、こうした一部のみを取り出す例は後述の排ガス処理でも見られる。)

(2) 焼却施設

焼却施設は図1.1-1で表3のように分類されている。焼却とガス化溶融、ガス化改質に区別し、それぞれが炉形式によりさらに分類されている。

表3について技術の原理に注目すると、ガス化溶融とガス化改質とは最終的な目的が溶融かガス回収かの違いであって、ガス化を行う点で同じである。また一体か分離かという形状で分類したのち、キルン式、流

表3 焼却施設の種類(設計要領)

焼却施設	ガス化溶融施設	一体方式	ストーカー式 流動床式 回転炉式
		分離方式	キルン式 流動層式
	ガス化改質施設	一体方式	シャフト炉式
		分離方式	キルン式 流動層式

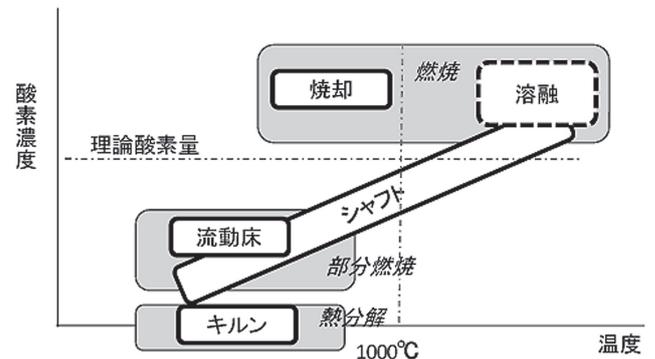


図1 焼却施設の種類(筆者)

動床式、シャフト式が並べられているが、酸素濃度と温度を軸にとると運転条件は図1のように表すことができる。3種類のガス化溶融のうちキルン式が熱分解、流動床式は部分燃焼によって生じた可燃ガスやチャーを、高温で燃焼して溶融している。一方、シャフト式は上部から供給された廃棄物が下降するにつれて、低温での熱分解から燃焼を経て、最下部で溶融に至る連続的な技術である。焼却は十分な酸素濃度下の、これらとは異なる処理である。

図は省略するが、灰溶融については熱源の種類、加熱方法、炉形式などによりさまざまな「方式」が示されている(図6.2.3-1)。しかしいずれも「高温で溶融しスラグ化する」装置であって、形状は本質的ではない。

(3) 炭化施設

炭化処理は熱分解処理の一種であり、表4のように分類されている(表11.1.1-1)。低温か高温かが最初の分類であるが、加熱方法、装置形状はほぼ同じで、一部が異なっているにすぎない。原理としてはどちらも「熱分解」であることは同じなので、温度(操作条件)と加熱方法によって図示すると、図2となる。低温-直接加熱の組み合わせを除いてキルンが使用され、スクリーなどその他の方法は特定の場合の使用であることがすぐわかる。表のみでなく、こうした視覚的な整理も必要と思われる。

(4) ストーカー炉の構造

ストーカーの種類には、表5のようなものが示されている(図3.3.3-7~15, 移床式は省略した)。設備の図は火格子の形状や動きが読みとれず、文章との対照が難しい。表5の文章は本文からの抜粋であるが、並行揺動式と階段式は文章での説明がほとんど同じであり、違いが分からない。「揺動」と「前後する」の違い、「並列」と「並行」の差もわかりにくい。(並列はストーカーが炉を横断して設置され、並行はごみ送り方向に長い。)設計要領には、「代表的な火格子の作動例」として図3.3.3-6で説明しているが、並行揺動式しか名称の記載がない。さらには、ストーカーが上下に往復する図があるが、表5のどれと対応するかわからない。

著者が理解した階段式と逆動式の動作を、表5右に

表4 炭化施設の分類(設計要領)

低温炭化(400~500℃)	間接加熱式	キルン式 縦軸攪拌式
	間接加熱式および直接加熱併用式	キルン式
高温炭化(500~1,000℃)	間接加熱式	キルン式 スクリー式
	直接加熱式	キルン式 揺動式 流動床式

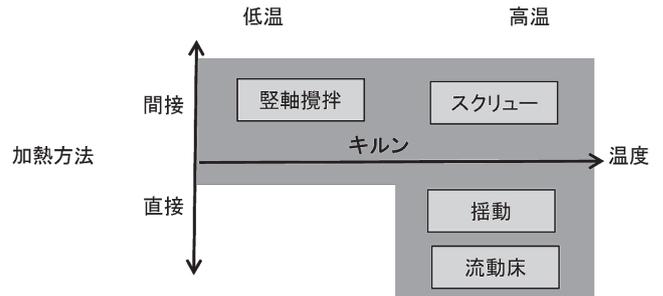


図2 運転条件による分類(筆者)

示した。つまり両者を比較すると

- ・共通：火格子が横方向に配列され、可動火格子が前後(ごみ送り方向)に動く。
- ・火格子の重ね方：可動式は上から見ると下へ順にかさね、逆動式は上から下へ潜り込むように重ねる。
- ・ごみの動き：火格子が動くとき可動式はごみを下方向に、逆動式は上へ持ち上げる。

表5中、逆動式の説明において、「緩い傾斜で」は

表5 ストーカーの種類(設計要領, 図は筆者)

並行揺動式	ごみ送り方向に可動・固定の火格子を交互に階段状に配列し、可動火格子の往復動でごみを攪拌、移送する。	
階段式	ごみ送り方向に可動・固定の火格子を交互に階段状に配列し、可動火格子の往復動でごみを攪拌、移送する。	
逆動式	可動・固定火格子がごみの送り方向に緩い傾斜で配列され、可動火格子をごみの上流側に向かって逆方向に往復動させる。	
並列揺動式	ごみの送り方向に傾斜し、階段状の起伏を持たせた長い火格子を炉幅の方向に可動・固定と交互に配列し、可動火格子を前後に往復動させる。	
回転火格子式	ごみ送り方向へ傾斜した回転炉であり、ゆるやかな回転によりごみの攪拌、移送を行う。火格子下部の風箱より一次燃焼空気を送る。	
回転ローラー式	多くの火格子を組み合わせた円筒状のローラーを、ごみ送り方向に階段状に配置し、ローラーの回転によって移送する。	
扇型反転式	扇型の火格子を階段状に配置し、各火格子を90度反転往復運動させ、ごみを攪拌移送する。	

階段式が各ストーカーが水平に近いのにくらべてごみ送り方向に傾斜していることを、「逆方向に」はごみを上へ持ち上げることが表現している。自治体の施設パンフレットでも表5の名称は使われているが、ユーザーが理解できるとは思えない。表5右のような可動部分の模式図を示し、その特徴（攪拌の強度、耐摩耗性、空気供給スリットの間隔、交換頻度など）を説明すべきである。

(5) 炉本体の型式

炉本体の型式は、図3のように分類されている（図3.3.3-18）。まず第一に混乱するのは、ストーカーの分類と同様に名称である。対流は英語ではConvectionで、流体の流動メカニズムのひとつであり、交流は電流で直流に対する用語である。意図されているのはごみとガスの流れ方向だから、(a)(b)は対向流、並行流と呼ぶべきである。しかしこれらは熱交換器や反応装置における伝熱面を隔てた流体の流れに使用する用語であり、ごみの速度はガスと比べて無視できる（つまりほぼ静止している）のだから、適当とは言えない。(a)~(c)はガスの出口位置が乾燥段、燃焼段、後燃焼段のいずれに近いかで分類するのが良いと思われる。(d)は(c)+邪魔板設置と表現するのがわかりやすい。

また、各方式の特徴は、図3右のように書かれている(a)の放射熱とは、一般に固体表面温度が高い時の放射radiationであり、ガスによる放射というのは理屈に合わない(対流熱伝達であろう)。筆者は、(a)は「水分が多い場合(厨芥が多ければそうなる)、その乾燥のために燃焼ガスの保有熱を利用する」という意味と理解した。では(b)はなぜ「着火性のよい」なのか。水分が低ければ着火性がよく、揮発分の燃焼が早い。プラスチック割合が高いと、より燃焼は早い。したがって、前段で燃焼が進むので、未燃ガスを後段で完全燃焼させるために出口を後に置くと推測した。(c)はごみ質変動が大きいときとしているが、むしろこれが標準で、低質、高質に偏る場合に(a)(b)とするとした方が、自然と思われる。

いずれにしても、定性的な説明ではなく、酸素濃度、未燃ガス濃度、燃焼温度などの量的情報を加え、なぜこれらの形式が有効となるかの説明がほしい。

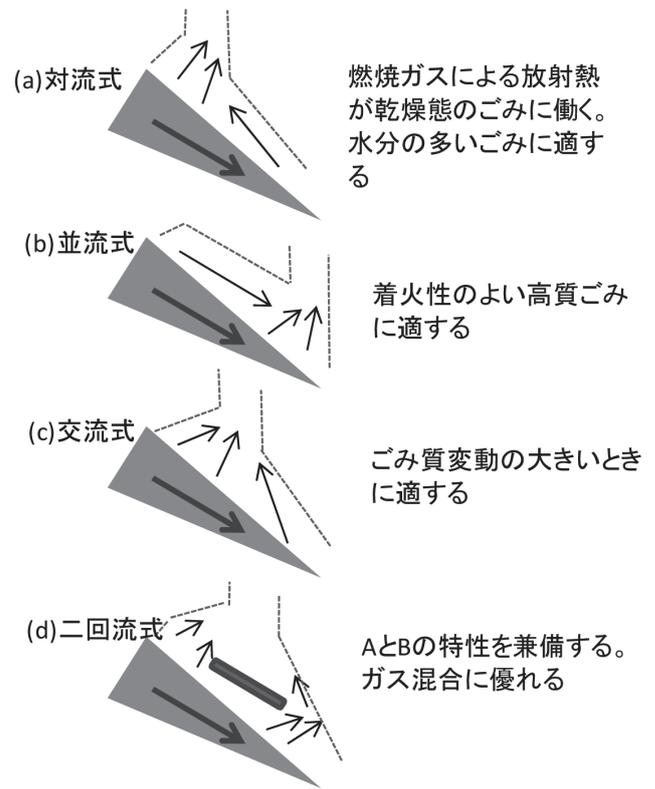


図3 炉本体の型式(設計要領)

3. 運転技術の分類

最後に、筆者が以前からよく理解できていない、窒素酸化物除去について述べたい。設計要領表3.3.5-4は、脱硝「装置」として表6を示している。表には除去率、排出濃度、設備費などが示されているが省略し、最右欄には技術の特徴を設計要領の本文からまとめた。一見して、「燃焼制御」と「乾式」が同じレベルに併記されていることに違和感を覚える。燃焼制御は「装置」ではないだろう。

表7は、「公害防止の技術と法規<sup>4)</sup>」に示されているもので、排出ガス中のNOx濃度を下げるには、発生量を減らす(NOx抑制)方法と、生成したNOxを窒素に分解する方法(排煙脱硝)があることを示している。表6の分類ではこの最初の部分(発生抑制か脱硝か)が抜けていることがわかる。脱硝方法については無触媒脱硝、触媒脱硝などの区別は容易なので、以下は抑制技術について述べる。

NOx抑制技術については、図4のように説明されている。良く知られているように、NOxは燃料中の窒素分に由来するフューエルNOxと、空気中の窒素が高温で酸化されて生じるサーマルNOxがある。こ

表6 脱硝装置の分類(設計要領)

区分	方式	技術の特徴-本文より
燃焼制御法	低酸素法	低酸素で自己脱硝
	水噴射法	温度を下げて発生抑制
	排ガス再循環法	炉温低下+酸素濃度低下
乾式法	無触媒脱硝法	炉内高温域にアンモニア、尿素を噴霧し還元
	触媒脱硝法	原理は無触媒脱硝と同じ。触媒を用いて低温領域で使用
	脱硝ろ過式集じん法	ろ布に触媒機能を持たせる
	活性コークス法	活性コークスを触媒として利用
	電子ビーム法	
	天然ガス再燃法	

表7 NOx排出防止技術の種類(公害防止の技術と法規)

NOx抑制技術	燃料改善	燃料転換, 燃料脱窒
	燃焼改善	運転方法, 燃焼装置
排煙脱硝	乾式法	
	湿式法	

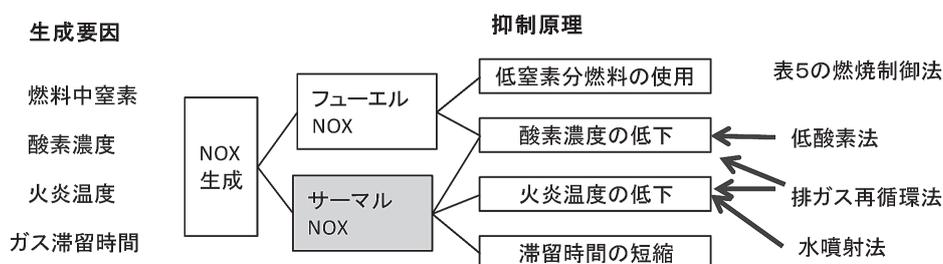


図4 NOx抑制技術(公害防止の技術と法規)

表8 NOx排出防止技術の種類(公害防止の技術と法規)

		サーマルNOx				フューエルNOx	
		抑制理由			効果の程度	抑制理由 酸素濃度低下	効果の程度
		火炎温度低下	酸素濃度低下	滞留時間短縮			
運転条件の変更	低空気比燃焼	○	○		△	○	◎
	燃焼室熱負荷低減	○		○	○		○
	空気余熱温度低下	○		○	○		○
燃焼装置の改造	二段燃焼	○	○		◎	○	◎
	濃淡燃焼	○	○		○	○	○
	排ガス再循環	○		○	◎		○
	水蒸気または水吹き込み	○		○			○
	炉内脱硝	○	○		◎	○	◎

これらの生成要因は図左のとおりで、フューエルNOx抑制には低窒素燃料の使用、燃料の脱窒、酸素濃度低下の方法がある。一方、サーマルNOx抑制には酸素濃度の低下、火炎濃度の低下、滞留時間短縮があり、表4の燃焼制御法に示された3つの方法は、設計要領本文の説明によるとそれぞれ図右のように対応している。

表8は各々のNOx抑制技術の、NOx抑制の原理と効果をわかりやすく示している。(ただしごみ焼却では対応不可能な燃料改善、気体燃料に用いるバーナー形式は、省略した。)表6中の3つの燃焼制御法を網掛けで示したが、表8においては運転条件、燃焼装置改造に区別されている。表中「?」は図4と一致しな

い点であるが、こうした関連を明確にすることが「なぜ個々の技術が有効か」を示すことになる。

#### 4. おわりに

粗大ごみの破碎施設では、破碎後に粒度選別を行い、ふるい上を焼却、ふるい下を埋立処分する場合が多い。可燃物は破碎されにくく粒度が大きく、不燃物は粒度が小さくなると考えられるからである。ところが、10年以上も前になるが、札幌市の粗大ごみ処理施設で破碎残渣を分析したところどちらも木が50~60%、プラスチックが10~15%とほぼ同じであった<sup>5)</sup>。

この調査以前に、筆者は高速回転破碎機の破碎粒度分布データを見たことがあった。粒度はおおよそ軟質プラスチック、家電品等の金属類>紙類、木竹類>硬質プラスチック、ガラスの順で、木、紙、金属類、軟質プラは粒度の幅が大きい、というものである。つまり、木やプラスチックは破碎によって均質な粒度にはならず、大きいものも小さいものもあるということである。この知識のため、上記の結果は容易に理解することができた。資源循環がごみ処理の重要な役割となったため、破碎は単に処理のための減容化から、素材別に分離するための前処理へと役目に変化している。破碎機には表1に示したようにさまざまな種類があるが、どの方式を選択するかは、後続の選別、処理の効率に大きな影響を与える。対象物の種類と破碎・選別特性に関して、例えば対象物ごとの破碎粒度分布といった技術的な情報の整備が必要である。

設計要領には多くの技術が紹介されているが、「なぜ」「どうして」が書かれていないため、筆者には製品リストのように見えてしまう。このことは、新たな

技術開発についても言える。例えば排ガス再循環(EGR)は定着した技術になっており、多くの報告がなされている。これを、図4の原理から説明してほしいと思う。例えば以下のようなになるだろう。

- 1) ガス再循環は酸素濃度、燃焼温度を低下させることでNO<sub>x</sub>生成を抑制する[原理]
- 2) 排ガス循環量は一次空気の△%とし、装置、運転方法を○するよう工夫した[方法]
- 3) その結果炉内の酸素濃度、燃焼温度が○となり、NO<sub>x</sub>濃度は△に減少した[結果]
- 4) 操作条件を○に変化させると、NO<sub>x</sub>濃度は△となり抑制効果が向上した[改善]

ごみ焼却においてはフューエルNO<sub>x</sub>が主であると言われている。しかし図4、表8において、排ガス再循環はサーマルNO<sub>x</sub>対象の技術となっているのはどうしてだろうか。この図はごみ焼却に対しては違っているのか、フューエルNO<sub>x</sub>抑制にも効果があるのだろうか。そもそもフューエルNO<sub>x</sub>はサーマルNO<sub>x</sub>よりどのくらい多いのだろうか。1)の原理の前に、ごみ中の窒素含有量とフューエルNO<sub>x</sub>転換率、サーマルNO<sub>x</sub>発生量(図5)にさかのぼった説明が必要と考える。

以上述べてきたことは、「焼却の世界では当たり前である、皆知っている」と言われるかもしれない。しかし筆者のような半素人から見れば、それは関係者のみを知る「暗黙知」である。これから学ぶ人たちは、まねているうちに慣れていくのだろうか。筆者らが研究を行うときには、図6のような手順を進める。実験を行うときには、まず原理を考え、仮説をたてて方法を決定し、実験結果を分析して仮説と照らし合わせ、

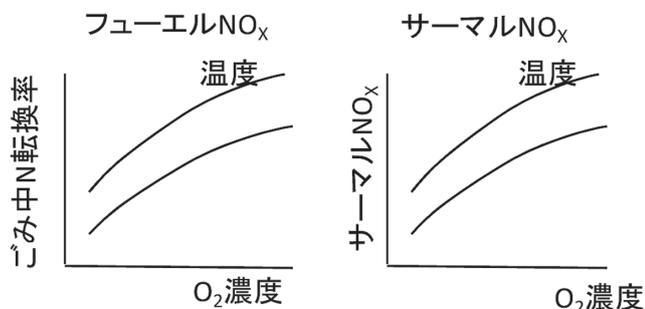


図5 NO<sub>x</sub>生成の温度、酸素濃度依存性

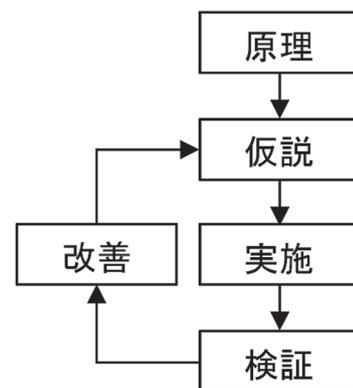


図6 研究の手順

修正・改善をはかる。これらのプロセスが明確になると、情報が「形式知」となる。

筆者は、既存の施設の調査を行って物質収支、エネルギー収支などを分析することを、焼却施設<sup>6)</sup>、堆肥化施設・メタン発酵施設<sup>7)</sup>などについて行っている(研究室ホームページにPDFを掲載)。これは、ごみ処理施設が「一体どのようになっているのか」を把握するためだが、それだけ情報が不足しているということである。まずは個々の技術、施設について入力-出力関係、パフォーマンス、物質収支などの科学的情報を「形式知」とし、ごみ処理全体が体系化されることを望んでいる。

(なお、設計要領は2006年版を引用したが、2017年版では堆肥化の章がなくなり、炭化は表の形式が変わ

り表10.1.2-1となっている。)

## 参 考 文 献

- 1) 全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領(2006改訂版)
- 2) 建設産業調査会，廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック，1993
- 3) Alessandro Chiumentilほか：Modern Composting Technologies, Th JP Press, Inc., 2005
- 4) 新・公害防止の技術と法規2016大気編・技術編，産業環境管理協会，2016
- 5) 松藤敏彦，鄭昌煥，筑紫康男，田中信壽：粗大ごみ破碎処理施設における物質収支・金属収支の推定，土木学会論文集，755(VII-30)，pp.85-94，2004
- 6) 一般廃棄物全連続式焼却施設の物質収支・エネルギー収支・コスト分析(2012年3月)
- 7) さまざまな有機性廃棄物を対象とする堆肥化施設・メタン発酵施設に関する調査分析(2011年3月)

# 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 〈2010改訂版〉

編集・発行／公益社団法人全国都市清掃会議

## 目 次

### I 編 計画要領編

- 1章 一般廃棄物処理基本計画の策定
- 2章 最終処分場整備に関する基本的計画事項
- 3章 最終処分場の整備計画
- 4章 最終処分場建設工事の発注手続き
- 5章 最終処分場施設建設のための財源
- 6章 新しい施設整備事業方式

### II 編 設計要領編

- 1章 最終処分場の構造と形態
- 2章 最終処分場内施設配置と造成
- 3章 貯留構造物
- 4章 地下水集排水施設
- 5章 遮水工
- 6章 雨水集排水施設
- 7章 浸出水集排水施設
- 8章 浸出水処理施設
- 9章 埋立ガス処理施設
- 10章 被覆施設
- 11章 管理施設

### 12章 関連施設

### III 編 管理要領

- 1章 最終処分場における管理
- 2章 廃棄物の搬入管理
- 3章 施設管理
- 4章 埋立作業管理
- 5章 環境管理
- 6章 埋立終了後または跡地の管理
- 7章 再生工法

発 行 平成22年5月

体 裁 A4判，約690頁

定 価 会員：23,760円(税込価格，送料込)  
一般：32,400円(税込価格，送料込)

申込先 全国都市清掃会議ホームページ

URL <http://www.jwma-tokyo.or.jp>

〒113-0033 東京都文京区本郷3-3-11

(IPBお茶の水7F)

公益社団法人全国都市清掃会議調査普及部

FAX 03-3812-4731