

環境対策、環境負荷の無害化処理、集中処理

4.2.2 一般廃棄物処理：(清掃工場)

ごみの収集車は分別されたごみを集め、缶・ビン・PET ボトルなどの資源ごみを選資源化施設に、燃えるごみを清掃工場に搬入します。清掃工場は、家庭とオフィスなどの業務施設から排出される廃棄物を焼却処理する施設です。本稿では身近な存在なのに見る機会が少ない清掃工場について、種類と焼却方法、焼却炉、処理工程、排熱を利用する発電の方法、排ガス処理について概説します。

2017 年度に全国の市町村が収集した一般廃棄物は約 4100 万トンで、このうちの約 3400 万トンが全国の清掃工場で焼却処理されています。焼却されなかった一般廃棄物は主に資源ごみで、資源化施設に搬入されて再生原料に変換されています。主に容器包装廃棄物ですが、古紙や使用済みの金属製品も再生原料に変換されています。本稿の対象は資源化ではなく無害化処理なので、清掃工場の焼却処理状況について解説します。なお、焼却処理対象の一般廃棄物は約 7 割が生活系の廃棄物で、約 3 割が業務系の廃棄物です。業務系の廃棄物は、オフィス、商業施設、交通施設、宿泊施設、教育施設などから排出される廃棄物で、成分構成が生活系の廃棄物と大きく変わらないので一般廃棄物とされています。

1. 清掃工場の整備状況

1.1 清掃工場の種類と処理能力

環境省が公開している「日本の廃棄物処理（平成 29 年度版）」によると、表 1 に示すように全国には 1103 ヲ所に清掃工場があります。全連続式（24 時間稼働）が工場数の 62% ですが、処理能力では 91% を占めています。准連続式（16 時間稼働）は工場数で 15% ですが処理能力では 7% です。バッチ式（1 日 8 時間以下の稼働）は工場数

で 22% ですが、処理能力は 3% 以下に過ぎません。このように、清掃工場には処理能力に大きな差異があります。小規模工場が多いのは、公共事業として市町村単位で建設されてきたことと、臨海地域の市町村には人口の少ない島が多いからです。しかし、小規模工場は環境対策も含めて効率が悪いので、廃炉と統合化の傾向が続いています。

清掃工場の処理能力は、全連続式が平均で 1 日約 240 トンです。日本で最大規模の清掃工場は江東区の新江東清掃工場で、1 日に 1800 トンの焼却能力があります。准連続式の処理能力は平均が 1 日約 70 トンで、全連続式の三分の一以下です。バッチ式はさらに少なく、処理能力の平均は 1 日約 20 トンで 10 トン以下の工場も少なくありません。

表 1. 清掃工場の種類と処理能力（2017 年度）

焼却方式	工場数	処理能力（トン／日）		
		平均	全体	比率（%）
全連続式	686（62%）	239	163,760	90.7
准連続式	170（15%）	70	11,822	6.6
バッチ式	247（22%）	20	4889	2.7
計	1,103（100%）	110	180,471	100.0

注：民間の工場を除く

1.2 清掃工場の焼却炉数

規模が大きい清掃工場は 2 炉以上の焼却炉を設置することが多く、最多では 4 炉まであります。2 炉以上にするのは、1 炉が定期点検や補修で停止しても残る炉で焼却を続けられるからで、工場の機能を完全に停止させずに済む利点があります。もちろん焼却量は減りますが、通常は稼働率に 3 割程度の余裕があるので、かなりの程度までは補うことができます。それでも不足する焼却能力は、近隣の清掃工場が補います。一方、処理量が少な

い清掃工場は、経済性の観点から1炉しか設置しません。このため、稼働を停止している間は他の清掃工場が焼却処理を代行します。ちなみに、焼却炉の点検や補修に必要な期間は1年に1か月程度です。補修工事では、損傷した炉壁の耐火材や路床の火格子（ストーカ）の補修と交換が行われます。表2に焼却炉の炉数別平均処理能力を示します。対象は全連続式の664工場、発電設備の保有工場を左側、非保有工場を右側に記載しました。2011年度のデータなので、工場数が2017年度の表1のデータと異なりますが、全体の傾

でいます。可動火格子は機械駆動で、ごみを連続的に下方に移動させます。ストーカは850℃～1000℃の炉内温度に耐えられる耐熱性と、耐摩耗性を備えた铸铁製です。燃焼用の空気はストーカの下からストーカの間を通して供給されます。乾燥ゾーンはごみの水分を蒸発させて燃えやすくするのが目的で、供給空気の量は全量の15%程度です。続く燃焼ゾーンが本格的に火炎を発生させて燃やす場所で、燃焼用空気の約75%が吹き込まれます。後燃焼ゾーンは燃焼ゾーンの燃え残りを完全燃焼させる場所で、空気量の約10%が供給され

表2. 炉数別の平均焼却処理能力（トン/日） 全連続式664工場（2011年度）

発電設備保有工場		発電設備非保有工場	
清掃工場の区分	平均処理能力	清掃工場の区分	平均処理能力
4炉清掃工場（2）	638	4炉清掃工場（2）	420
3炉清掃工場（124）	458	3炉清掃工場（38）	279
2炉清掃工場（175）	291	2炉清掃工場（243）	138
1炉清掃工場（24）	206	1炉清掃工場（56）	82
合計（325工場）	350	合計（339工場）	145

注）環境省HP（平成25年度公表）焼却施設備状況（平成23年度版）より作成

向は変わりません。全体的に処理能力の大きい工場ほど焼却炉数が多いことと、発電設備の保有工場の方が非保有工場より処理能力の大きいことが分かります。

1.3 清掃工場の焼却炉形式

清掃工場の焼却炉には、主にストーカ方式、流動床方式、ガス化熔融方式、バッチ式があります。ストーカ炉の構造は図1に示すように上部にごみの投入ホッパーがあり、下部の炉床にストーカと称する火格子が階段状に設置されています（出典：中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会 廃棄物処理基準等専門委員会（第6回）議事次第・資料）。ストーカは通常は上部から乾燥ゾーン、燃焼ゾーン、後燃焼ゾーンの3段階で構成されています。ストーカは多数の短冊形火格子で、可動火格子と固定火格子が交互に並ん

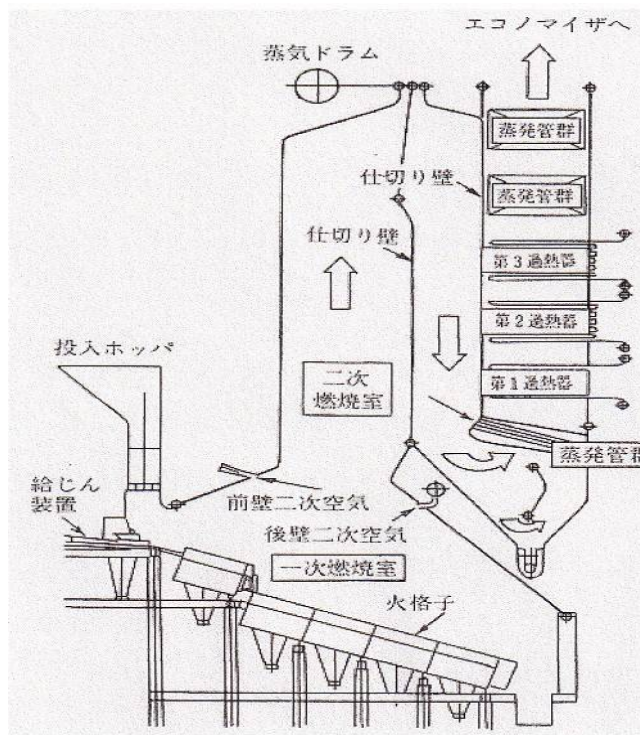


図1. ストーカ炉の構造

ます。ストーカ炉は長年月の開発の歴史と実績で信頼性が高く、未燃分が少ないことが実証されています。2017年度に稼働している1103工場では、約7割の786工場がストーカ方式です。

流動炉は図2に示すように円筒形の縦型で、ごみは下部の給じん口から炉内に送られます。炉底からは散気管を通して燃焼用の空気を送入し、一次燃焼室ではごみを浮かせて流動化した状態で燃焼させます。炉内の熱量を一定に保つとともに、物理的に安定した燃焼状態を維持する目的で砂と一緒に流動化させます。砂は炉底から未燃分と一緒に抜き出しますが、砂は分離して炉内に戻し循環使用します。一次燃焼室で燃焼できなかった軽量のごみや未燃のガスは、上部の広い二次燃焼室（フリーボード）で完全燃焼させます。流動炉はごみが空気と激しく混合するので燃焼効率がよいのと、炉内にストーカのような機械駆動部分がないので運転のトラブルが少ないのが長所です。熱容量の大きい砂を熱媒体に使用しているため、運転の停止と再稼働がストーカ炉より容易で迅速です。一方、円筒形なので大型化には制約があります。円筒形にするのは均一な流動状態を得るためですが、同じ理由でごみの寸法が大きく異なるのも好ましくありません。このため、炉に投入する前に概ね20cm以下のサイズに破碎します。なお、図2の出典は図1と同じです。2017年度に稼働している1103工場では、2割弱の191工場が流動床方式です。この他にガス化熔融方式とバッチ式がありますが、全工場の1割弱なので省略します。

1.4 清掃工場のエネルギー利用

清掃工場で発生する燃焼ガスのエネルギーは、全国1103ヶ所の清掃工場のうち754工場が表3に示す複数の用途に利用しています。（環境省・平成31年度資料）。発電しているのは371工場で、電気事業者に売電

しているのは323工場です。したがって、48工場は自家消費専用発電と推察されます。他方、349工場は燃焼ガスのエネルギーを利用していません。発電効率は表4に示すように5%から15%程度が多く、単純平均では約13%です。

一方、ヨーロッパでは表5のように、発電効率が30%を超える清掃工場もあります。アメリカの清掃工場も概して発電効率が高く、25%を超える工場が少なくありません。欧米の清掃工場は発電タービンに入る蒸気の圧力が4MPから5MPで、温度は400℃から450℃が

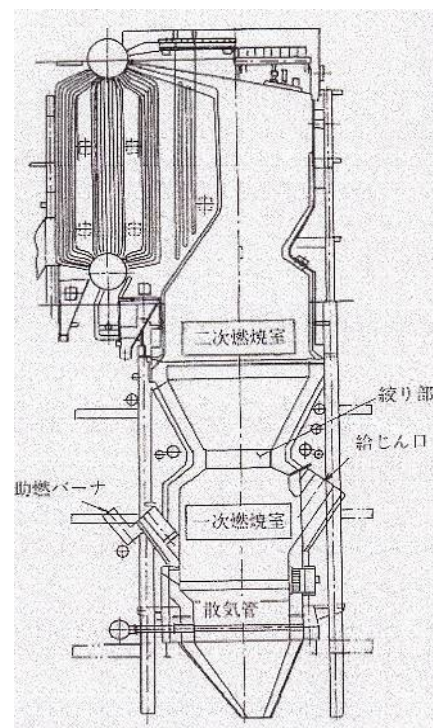


図2. 流動炉の構造

表3. 清掃工場のエネルギー利用状況（2017年度）

全清掃工場		1103	
エネルギー利用なし		349 (33%)	
エネルギー利用あり		754 (67%)	(用途)
工場内利用 (重複あり)	温水	(650)	給湯・暖房
	蒸気	(245)	給湯・冷暖房
	電力	(371)	動力・照明
工場外利用 (重複あり)	温水	(212)	給湯・暖房
	蒸気	(96)	給湯・冷暖房
	電力	(323)	動力・照明

出典：「日本の廃棄物処理（平成29年度版）」環境省

表 4. ゴミ焼却発電効率

発電効率	清掃工場数
20%以上	37
15%~20%	100
10%~15%	132
5%~10%	65
5%以下	29
12.98%	(平均)

363 工場：調査の有効回答数

表 5. 欧州のごみ焼却発電例

発電効率	清掃工場
25%	アムステルダム旧炉 700 トン/日×4 炉
33%	アムステルダム新炉 800 トン/日×2 炉
21%	ブルツブルグ (独) 3 炉
計	300 トン/日×1 炉

注 1) タービン入り口蒸気温度：
410℃~420℃

注 2) タービン入り口蒸気圧力：
約 4.2 MP

があります。公共衛生施設としての役割を果たすと同時に、エネルギー施設としての効率を重視しているのです。ドイツは独立採算の第 3 セクター（処理料金は全額を排出者が負担）が運営しており、売電収入が清掃工場の大きな財源になっています。日本も 1990 年以降に建設された清掃工場は、エネルギー効率を重視するようになり、発電効率が高くなっています。既設の清掃工場も、設備更新のたびに発電効率が向上しています。したがって日本も遠くない将来の時点で、平均で 25% 程度の発電効率が達成できるものと期待しています。

一般的です。一方、日本の清掃工場は蒸気の圧力が 2MP から 3 MP で、温度は 250℃ から 300℃ と欧米より低いのが低発電効率の原因です。日本では清掃工場を公共衛生施設として建設してきたので、発電よりも安定運転を重視してきたからです。なお、アメリカの清掃工場は民営なので、なるべく多く発電して売電する強い動機

2. 清掃工場の処理工程

2.1 ごみの投入工程

図 3 に全連続式清掃工場の焼却処理工程（ストーカー炉）を示します。ごみの収集車は工場の搬入ゲートで車両のまま計量され、次にプラットホームでごみをごみピットに投入します。ピットの容量は、約 4 日分の焼却量を前提に設計しています。清掃工場は、ごみを収集しない暮れから正月も運転を続けるからです。ピットの深さは 10m を超えることが多く、幅は投入口の数に応じて決められません。ピットの底部は緩く傾斜していて先には汚水タンクがあり、ごみから染み出す汚水が貯まるようになっています。この汚水は、沈殿する土砂を除いて焼却炉に吹き込み蒸発させてしまいます。ピット内の空気は吸引してごみの燃焼に使い、ピット全体を負圧にして臭気が外部に漏れないようにしています。ピットの上部には放水銃があり、火災発生時の消火に備えています。

ごみ投入ステージでは、収集車のごみ投入する時だけ扉を開け、投入後は直ちに閉めます。投入ステージにはピットの直前にストッパーがあり、収集車が勢い余って転落するのを防いでいます。過去には転落事故も報告されています。ピットの上部には天井走行クレーンが設置されていて、ごみを焼却炉の投入口（ホッパ）に運んで投入します。クレーンの操作は、天井走行クレーンの少し下の操作室で行います。ごみを掴むクレーンのグラブは、爪を横に大きく広げて一度に多くのごみを掴めるようにしたポリップ式が多用されています。ごみの投入口（ホッパ）には、焼却炉の燃焼ガスを逆流させない封入（シール）機能が必要なので、焼却炉に入るまでに一定の容量が必要です。また、ごみが相互に支え合って落下を妨げるブリッジの発生を防ぐ必要があります。このため、ホッパの途中で横から油圧でごみを押し出すプッシ

ヤーを設置しています。流動炉の場合は、破砕機でサイズの大きいごみを裁断しているのですが、ホッパ（図 2 の給じん口）にスクリーフィーダーを設置して強制的に押し込めるようにしています。

クレーンの操作は、ごみを焼却炉に運んで投入するのに約 20 分、ピットのごみの攪拌、混合、積み替えに約 20 分、監視と休止時間に約 20 分の概ね 1 時間周期です。ゴミの攪拌と混合は、燃えやすい紙類やプラスチックと、水分が多い食品ごみが偏らないようにして、ごみを安定的に燃焼させるためです。積み替えは投入口の下部に堆積するごみをホッパの近くに移動させ、休止中の炉の前のごみは稼働中の炉の前に移動させて、焼却炉への投入操作を容易にするためです。クレーンの操作は、1970 年代まで全面的に作業員に依存していました。その後は自動化が徐々に進んで半自動運転が増え、現在は全自動運転の工場が増加しています。自動化にはピットのごみの高さの検知、グラブで掴む位置の選定、攪拌・混合・積み替え、グラブの巻き上げや走行中の加速や減速の自動化が必要です。このため、高度なセンサーと制御技術が採用されています。

ストーカ炉の場合、焼却炉の炉壁は内側から耐火レンガ、耐熱レンガ、保温断熱材で、外側が鉄骨の炉体です。ボイラーは、縦置きの水冷管が炉壁に沿って設置されています。流動炉の場合は、図 2 に示すように炉壁から離れた上部に設置します。ボイラーの形式は「水管ボイラー」と称する自然循環式で、上部と下部のドラムを多数の水管でつないだ構造です。水管が燃焼ガスで加熱されると発生した水蒸気が上部のドラムに移行し、新たな水が上部のドラムから落下してきます。ボイラーの役割は、燃焼ガスを冷却すると同時に廃熱を回収し、発電や場内の熱源に利用するためです。

2.2 ごみの燃焼工程

ごみはストーカ炉や流動炉で燃焼して 850℃～900℃の燃焼ガスになり、ボイラーと水の噴霧で冷却されて反応蒸発塔に送られます。反応蒸発塔では消石灰スラリーが噴霧され、燃焼ガスに含まれる塩化水素を塩化カルシウムに、硫酸化物を石膏に変換します。スラリーの水分が蒸発して粉末になった反応生成物と未燃の灰分は、次工程のろ過式集塵機か電気集塵機で分離・除去されます。図 3 に示すのはろ過式集塵機です。電気集塵機より耐熱温度が低く、送風機の動力が大きいのですが、電気集塵機より安価です。また電気集塵機は装置サイズが大きいので、ろ過式集塵機よりかなり広いスペースが必要です。

集塵機を出た燃焼ガスは、加温されてから脱硝反応塔に送られます。脱硝反応塔は、触媒を使って燃焼ガス中の窒素酸化物を窒素と酸素に分解する装置です。この反応は 300℃～400℃なら窒素酸化物をほぼ完全に分解できますが、250℃で約 90%、200℃だと 60%以下の分解率です。触媒を使うので、事前の煤塵除去は必須要件です。一方、ろ過式集塵器は「ろ布」を使いますが、化学繊維なので耐熱温度は約 150℃です。このように前工程に必要な集塵より後工程の脱硝の温度が高いため、加温が必要になるのです。エネルギー効率の点では望ましくないため、低温でも分解率の高い触媒の開発が期待されています。脱硝された燃焼ガスは、通常は 100m～150m の煙突を通して大気中に排出されます。

2.3 燃焼ガスの排熱による発電の工程

ごみ発電を採用する場合は、ボイラーで発生させた飽和蒸気を炉内に設置する過熱管に送って再加熱し、湿度の低い乾いた蒸気にします。下流の発電タービンで温度が下がっても水滴が生じないようにするために、水滴が発生するとタービンの回転羽根（ブレード）に損傷を与えるからです。タ

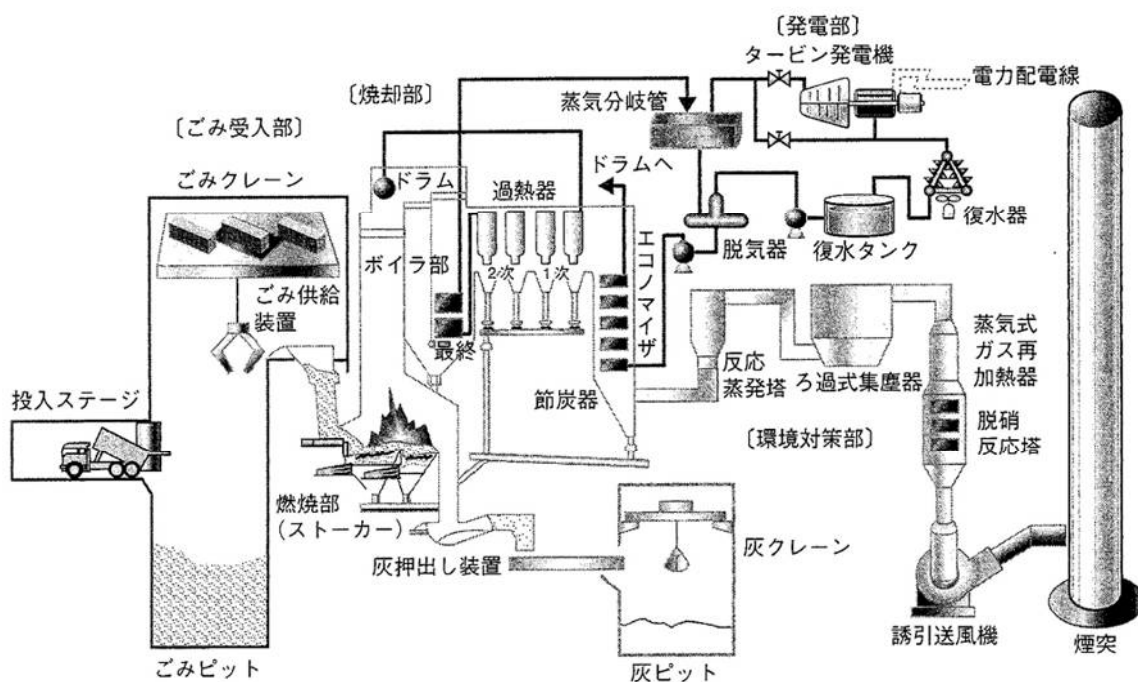


図 3. 一般的な連続式の清掃工場 (ストーカー式)

出典：“NEDO 技術開発機構 HP 掲載資料 (2004 年)

ービンは直結する発電機を回転させて発電し、膨張した蒸気は圧力と温度が下がって復水器に入ります。復水器では蒸気を冷却して凝縮させ、温水に戻してボイラー給水として循環させます。発電効率を高くするには、タービンに入る蒸気の圧力と温度をなるべく高くする一方、復水器でなるべく低い温度にまで冷却し、圧力落差を大きくする必要があります。

復水器には空冷式と水冷式がありますが、空冷式は蒸気を自動車のラジエーターのようなフィン（ひれ）のついた伝熱管に通し、外側から空気で冷やす方式です。フィンをつけるのは伝熱面積を大きくするためで、図 3 では空冷式になっています。水冷式は多管式の熱交換器を使って、工業用水や海水で冷却する方式です。水冷式の方が空冷式より低温まで冷却できるので、発電効率を高くできますが、海水か工業用水が必要です。工業用水を使う場合は、循環利用するために温度が高くなった冷却水を再び冷やす冷水塔が必要になりま

す。冷水塔はオフィスビルの冷房に使われる冷水塔と同じ原理ですが、容量が大きいと大型装置になり設備費が高くなります。また、設置スペースが大きいので、市街地に建設されることの多い清掃工場には好まれない傾向があります。

2.4 清掃工場の排水と廃棄物

清掃工場の排水は、ごみピット汚水の他にプラットホーム洗浄廃水、洗車排水、生活排水、排ガス処理排水があります。ピット汚水以外の排水は砂などの固形物を分離し、必要なら微生物処理を経て公共用水域または下水道に放流されます。清掃工場の廃棄物は灰ピットの焼却残渣と、集塵機から排出されるダストです。通常は埋め立て処分されますが、焼却残渣から焼却灰を分離してセメントの原料に利用している工場もあります。

(おわり)

参考：基礎からわかるごみ焼却技術 (オーム社)
廃棄物の焼却技術 (オーム社)