2007. 9.5

SCE・Net 研究レポート

ごみ焼却発電の拡大と発電効率の向上

松村　眞

１．ごみ焼却施設の種類と規模

日本では一般廃棄物が１年間に約 5,300 万トン発生します。環境省が発表しているデータによると､平成 17 年度にはこの 87%にあたる 4,579 万トンが全国 1,396 ヶ所の清掃工場（ごみ焼却工場）で焼却されました。したがって、清掃工場の 1 日平均焼却量は約 90 トンになります。しかし清掃工場の規模は地域によって大きな隔たりがあり、大都市には 24 時間連続稼動の全連続式と呼ばれる清掃工場が多く、平均処理能力は 1 日約 270 トンです。一方､人口が中規模の市町村には､1 日 16 時間稼動の准連続式と言われる清掃工場が多く、平均処理能力は 1 日約 80 トンです。さらに人口規模の小さな市町村にはバッチ式と呼ばれる 1 日の運転が 8 時間に達しない小規模工場が多く、平均処理能力は 1 日約 20 トンです。

表１．日本のごみ焼却施設（清掃工場）

焼却方式	施設数	処理能力（ﾄﾝ／日）		
		平均	全体	比率（%）
全連続式	612	267	163,615	83.5
准連続式	286	77	22,123	11.2
バッチ式	476	21	10,214	5.2
計	1,374	143	195,952	100.0

都道府県別ごみ焼却施設整備：平成 16 年度版（環境省）

表１．は平成 16 年度のデータですが、全清掃工場の 44%にあたる全連続式の清掃工場が総処理能力の約 84%を占めています。一方、全工場の約 34%を占めるバッチ式工場は、総処理能力の 5%を占めるに過ぎません。小規模工場は効率が低いだけでなくダイオキシンなどの環境対策が困難なことから、近年は集約化と廃炉が進んでいます。小規模工場が多いのは、清掃工場が市町村単位で整備され、基本的に管轄行政区域内処理を原則としてきたからです。ごみ焼却発電は全連続式 612 工場のうち、規模が大きい 286 工場で実施されています。

２．ごみ焼却発電の方法

ごみ焼却発電の最初の工程は、廃熱ボイラーによる燃焼ガスの冷却と熱回収です。焼却炉は 850℃から 900℃でごみを焼却しますが、燃焼ガスには煤塵や塩素ガスなどの有害物質が含まれています。このため集塵機で煤塵を除去し、さらに塩素ガスなどの有害物質を除去するのですが、そのためには燃焼ガスの温度を 200℃以下にまで下げなければなりません。廃熱ボイラーの役割は、燃焼ガスを冷却すると同時に廃熱を回収し、蒸気を発生させることにあります。発電する場合は第 2 工程の蒸気過熱器で、廃熱ボイラーで発生した飽和蒸気をさらに加熱し、温度を上げることで相対湿度を下げます。湿度の低い乾いた蒸気にするのは、下流の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です。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。乾燥した蒸気は第 3 工程の蒸気タービンに送られ、連結する発電機を駆動させて発電します。タービンで膨張した蒸気は圧力と温度が下がり、第 4 工程の復水器に送られます。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用水として循環させます。

発電量を多くするには、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冷却し、圧力落差を大きくするのが効果的です。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ェーターのようなフィンのついた伝熱管に通し、外側から空気で冷やす方式です。伝熱管にフィンをつけるのは伝熱面積をなるべく大きくするためです。一方、水冷式は蒸気を多管式熱交換器に通し、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出力を大きくできますが、海水か工業用水が必要になります。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冷やす冷水塔が必要になります。冷水塔はビルの冷房に使われる冷水塔と同じ原理ですが、容量が大きいので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負担になります。

３．日本のごみ焼却発電

日本のごみ焼却発電の１号基は、1965 年に稼動を開始した大阪市の西淀清掃工場です。このときは蒸気の発電タービン入口条件に 350℃、2.35MPa を採用し、23%の発電効率を達成しました。復水器には水冷式を採用し、現在多くの清掃工場が採用している空冷式より低い温度まで冷却して、圧力落差を大きく取ったのも高い発電効率に寄与しました。しかし蒸気の過熱器で伝熱管の腐食損傷が多発したので、以降の建設から蒸気温度を 300℃以下に抑えるようになりました。清掃工場はごみの焼却処理のための衛生施設として建設されたのであり、発電は副次的な機能に過ぎなかったので、発電効率よりも安定運転を重視してきたと言えるでしょう。また、ごみ焼却発電は出力が不安定なために電力会社の購入

価格が低かったことと、公共施設なので余剰電力を売却して収入を得る必要性がなかったことも背景にあります。

このような状況から、これまでに建設された清掃工場は、規模の大きい全連続式でも発電をしないか、発電しても自家消費電力を賄う程度に止まっています。発電効率は表２．に示すように 5%から 15%程度が多く、処理量を考慮しない単純平均では約 11.3%に過ぎません。

表２．発電効率別ごみ焼却発電施設数

発電効率	施設数
20%以上	17
15%～20%	54
10%～15%	92
5%～10%	85
5%以下	38

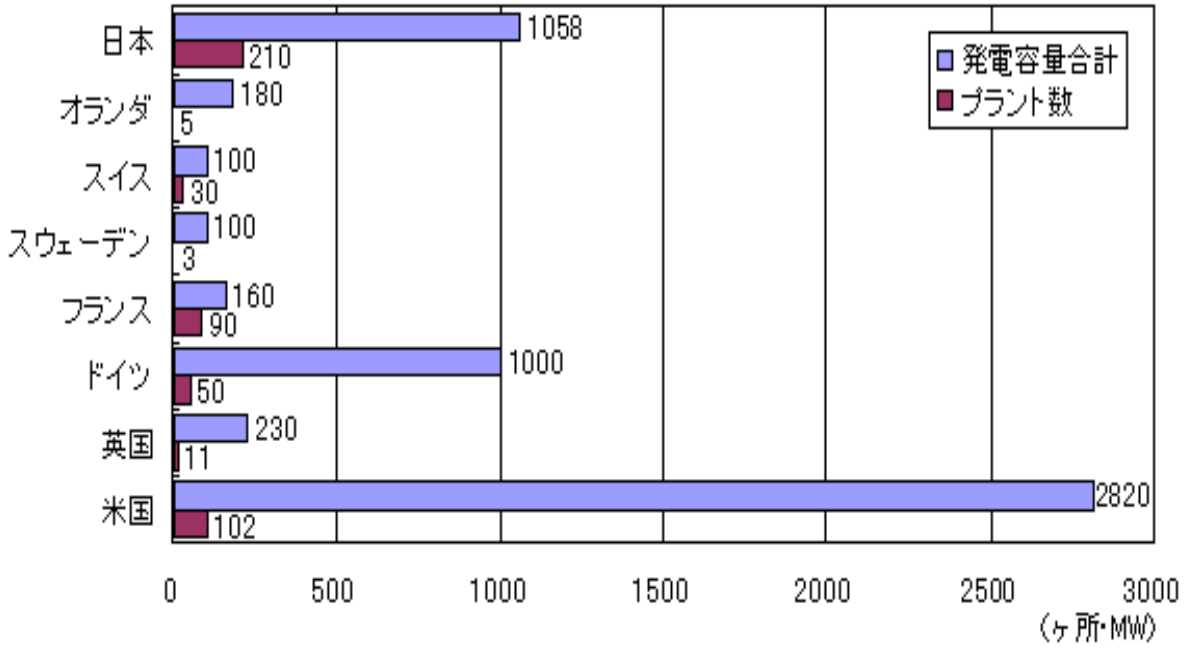
４．主要国のごみ焼却発電と発電効率

ごみ焼却発電の状況を海外と比較すると、少し古いデータですが図１．に示すようにアメリカは 102 施設で 282 万 kW、ドイツは 50 施設で 100 万 kW の出力です。一方、日本は 210 施設で 105.8 万 kW ですから、1 施設あたりの発電出力はドイツの 1/4、アメリカの 1/5 程度に過ぎません。１施設あたりの出力に大きな影響を与えるのは、ごみの焼却量、ごみのカロリー、発電効率です。そこで発電している 1 施設あたりのごみ焼却量を比較すると、アメリカが 1 日平均で 1100 トン強、ドイツは 600 トン弱、日本は 400 トン弱です。ですからアメリカの１施設あたりの発電出力が日本の 3 倍ぐらいあっても当然ですが、実際は 5 倍もあります。ドイツはアメリカより処理規模が小さく日本の 1.5 倍程度ですが、それでも発電出力は日本の 4 倍もあります。

ごみのカロリーによる違いも考えられます。日本のごみは食べ物の特性から欧米諸国より水分が多いように思われますし、所得水準の高い国の方がごみのカロリーも高い傾向にあります。日本も経済成長とともに紙やプラスチックの割合が増え、カロリーが高くなってきた歴史があります。しかし現在ではごみ 1 キログラム当たりの高位発熱量が約 2,300 キロカロリーに達しており、生活水準や生活感覚からも生活系廃棄物のカロリーに欧米諸国とそれほど大幅な違いがあるとは思えません。

残る要因は発電効率の違いです。発電効率に影響を与える主な要因は、蒸気の発電タービン入口温度と圧力、そして復水器出口の温度と圧力です。この落差が大きいほど蒸気の体積膨張が大きく発電効率が高くなるからです。アメリカとドイツは蒸気の発電タービン入口温度を 400℃から 500℃とし、圧力は 5MPa 以上を採用しています。また復水器は多くが水冷式なので、発電効率は 25%以上が珍しくありません。一方、日本では蒸気の発電

タービン入口温度が 300℃以下で、圧力は 2MPa 以下でした。復水器は臨海立地でもほとんどが空冷式です。なお、日本も新設工場では発電タービン入口の蒸気温度に 400℃を採用し始めており、既設の清掃工場もボイラーや復水器など発電関連設備を新/増設すれば、発電効率を改善し出力を増大できるでしょう。



注:日本は2001年度(経産省調べ)、米国は2000年調べ、他国は1990~93年度ベース
:廃棄物は全て一般廃棄物

出典：財団法人エネルギー総合工学研究所作成データを元に、
新エネルギー･産業技術総合開発機構が作成

図 1. 主要国のごみ焼却発電施設数と出力規模

５． ごみ焼却発電の拡大方法

前に述べたように全連続式 682 施設のうち 286 工場が発電していますが、アメリカやドイツと同等の 25%まで高められれば、石油に換算して年間約 80 万キロリットル分のエネルギーに相当する電力が得られます。また現在は発電していない全連続式清掃工場のすべてに発電効率 25%の発電設備を導入すれば、石油に換算して約 250 万キロリットル分と、全石油消費量の約 1%に相当する電力が得られます。この省エネルギー効果は、筆者がごみ処理量とカロリー、および現在の発電効率から推算したもので、ごみのカロリーは現在の数

値を前提としています。ごみ焼却発電を拡大する具体的な方策を表３．に提案しますが、技術的な対策だけでなく政策や仕組みなど多面的な対策が有益です。

表３．ごみ焼却発電の拡大方法

分野	課題	内容
ごみ成分改善	水分の低下	清掃工場で焼却しているごみ（一般廃棄物）には、水分が 35%～40%含まれている。厨芥ごみをディスポーザーで処理し水分を減らす。
	産業廃棄物の混合焼却	清掃工場はオフィスやレストランなどの事業所から排出するごみも焼却しているが、一部の工場廃棄物（木くず、紙くずなど）も混合焼却する。
焼却設備改善	蒸気の高温化と高圧化	耐腐食性の強い過熱器伝熱管を採用する。最近の伝熱管は 4MPa、400℃までは耐えられるが、さらに高温高圧を目指す。試験的には 500℃まで可。
	復水器の低温化と低圧化	既存の清掃工場は空冷復水器による常圧復水が多いが、水冷式を利用して凝縮温度を下げ真空復水にする。圧力と温度の落差を大きくする。
	排ガスからの熱回収増大	廃熱ボイラーを出た排ガスの下流に空気予熱器とボイラー給水予熱器を設置して熱回収率を高める。低温腐食対策が必要。
	白煙対策の抑制	清掃工場は煙突から出る水蒸気を見えなくするために、排ガスを灯油や水蒸気を使って再加熱している。視覚的な対策に過ぎないので止める。
	ガスタービン併用	ガスタービン発電を併設し、腐食性の低いガスタービン排熱で蒸気を過熱することにより蒸気の高温化を図る。スーパーごみ発電とも言われる。
優遇施策	焼却発電の義務化	24 時間連続稼動の清掃工場には、一定の発電効率以上の焼却発電を義務化する。ドイツを含めて数ヶ国がエネルギー回収の最低基準を設定。
	電力の購入義務化	電力会社によるごみ発電の購入義務と、購入価格の基準設定。ヨーロパでは数ヶ国が購入を義務化。また数ヶ国が購入価格の最低基準を設定。
運営体制	ESCO 事業の導入	設備建設事業者が既存清掃工場の発電設備新設や性能向上の工事費を負担し、得られる売電収益で工事費を回収する。オフィスビルに事例多い。
	PFI（民営）の導入	清掃工場の運営が民間に移管されれば収益インセンティブが強化され、廃棄物発電の拡大が促進される。アメリカは民営。ドイツは独立採算制。

注１．ESCO：**E**nergy **S**ervice **C**ompanyの略。

注２．PFI：**P**rivate **F**inance **I**nitiativeの略

６．今後の課題

表３．に示した対策のうち、電力会社によるごみ焼却発電の購入はすでに法整備が進んでいます。発電タービン入口蒸気の高温高圧化は、20%以上の発電効率に必要な 4MPa 、

400℃まではすでに実用化されており、他の設備改善も既存技術の範囲でほとんどカバーできます。したがって既設の清掃工場の設備改善を阻害する主な要因は、発電関連設備の新/増設に必要なスペース、費用対効果、設備資金、そして発電量増大の動機（インセンティブ）です。清掃工場は市街地に設置することが多いので、設備の新/増設に必要なスペースが乏しい場合もあります。しかし設備の配置など工夫次第で、必要なスペースを確保できる清掃工場も少なくありません。敷地面積に対する設備の面積は概して低いし、立体化の余地もあるでしょう。

費用対効果は既存工場の残存耐用年数、立地環境、現有設備の配置状況によって大きく異なるので、清掃工場ごとに慎重に推算する必要があります。設備資金の調達については、財政支出に代わる方法として最近多くなっているESCO事業の導入が可能でしょう。この場合、設備の新/増設請負事業者が金融機関と協力して設備資金を調達し、清掃工場の売電増収益から数年にわたって回収します。この方法だと設備の新/増設請負事業者が既存の設備状況を調査し、必要な費用と売電増収益を見積ります。民間の事業者が自己責任で設備費を売電増収益から回収するので、清掃工場を保有する自治体には設備資金需要も投資リスクも発生しません。このESCO方式を清掃工場のごみ発電に適用した事例はまだありませんが、現実的な方法として積極的に具体化を検討する価値があると考えています。発電量増大の動機（インセンティブ）については民営化が有効な方法です。すでにアメリカは民営、ドイツは多くが第 3 セクターによる独立採算で運営しています。アジア諸国でも民営が増えているし、中国にも大規模な民営清掃工場があります。

一方、日本ではこれまで地方自治体が清掃工場を建設し運営しているので、民間にノウハウが充分に蓄積されていません。このため民営化の第 1 段階は自治体が設備を保有し、運営だけを民間に委託する官設民営が好ましいでしょう。しかし最終的には産業廃棄物の場合と同様に、設備も民間が建設して保有し、運営する方式が好ましいと思います。なお、地域の環境保全は住民を代表する地方自治体の責務です。このため全体的な計画の立案と必要なら用地の確保、請負処理事業者の選定と契約、継続的な運営の健全性確認は地方自治体の仕事です。ワシントンでは、ごみ焼却発電の事業者と近隣50の市町村が処理量と処理単価について契約しています。興味深いのはアメリカで採用されている「Put or Pay」という契約です。この方式では地方自治体が委託処理するごみの量を保証し、不足する場合は処理事業者の収益低下を補償します。ごみ処理事業者は示された処理量を前提に設備を建設し運営するので、処理量が低下すれば設備の稼働率が低下し損失が発生します。ですから、その損失を委託側の自治体が補償するのは当然という考えです。アメリカの合理主義と契約社会の興味深い一例ではないでしょうか。

（以上）