

Lecture Note

バイオマス (9)

都市ゴミからのエネルギー回収

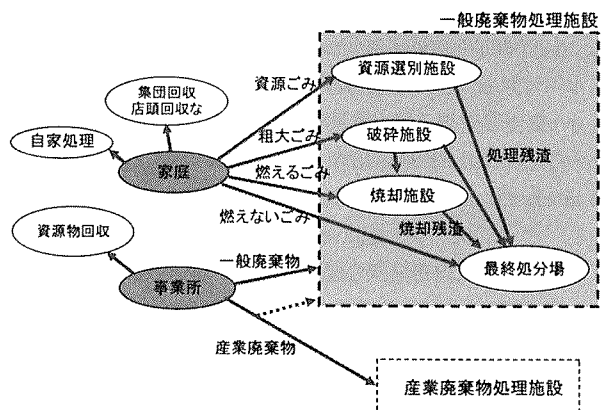
松藤 敏彦

1. 都市ごみの組成と処理方法

1.1 ごみの分別

廃棄物の発生源は、大きく家庭と事業所に分けられる。事業所から発生する廃棄物のうち、汚泥、燃え殻、がれきなど20種類が産業廃棄物に指定され、残りを家庭系と合わせて一般廃棄物と呼んでいる。産業系（農業系、木質系、畜産系、汚泥など）についてはすでに紹介されているので、本稿では一般廃棄物について述べる。

わが国は20世紀の初めから、伝染病を防ぐための衛生的処理として焼却を推進してきた。埋立地は大きな面積を必要とするが、土地の確保が難しいことも焼却を選択した大きな理由である。焼却によってごみの容積は10分の1程度となるため、埋立空間の削減効果は大きい。収集時点でごみを種類別に分けることを分別(ぶんべつ)といい、諸外国では資源化可能物を分けて収集することを指す。しかし日本は、効率的な焼却を行うために不燃ごみを可燃ごみと分けることを1970年代から行ってきた。さらに大型ごみ(粗大ごみ)が分別され、一般廃棄物は図1のような流れで処理されている。粗大ごみは破碎され、不燃ごみは埋立地(最終処分場)へ、そして可燃ごみは焼却されたのちに埋立てられる。近年資源ごみの分別収集が進められており、複数の種類を混合して収集す



(参考文献1, p.17より引用)

図1 ごみの発生から処理・処分までのフロー

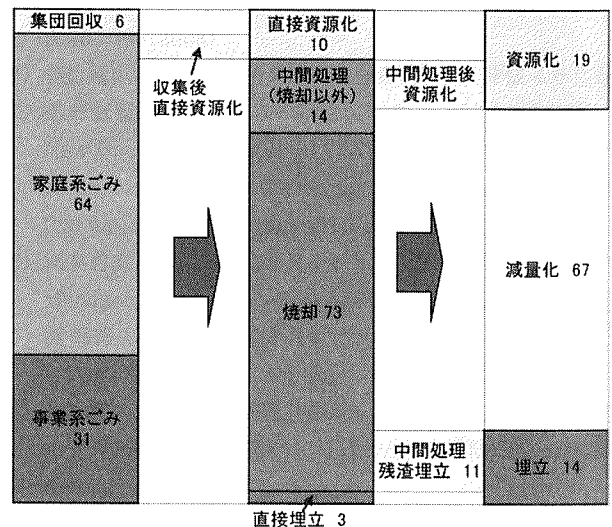
北海道大学大学院工学研究科

〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

る場合には選別施設で分けられる。家庭で発生した不要物の一部は集団回収、店頭回収によって回収され、自家処理とは生ごみを庭に埋めるなどの処理をいう。

1.2 一般廃棄物の処理方法

一般廃棄物は、廃棄物処理法によって自治体が処理を行うこととなっている。したがって産業廃棄物以外の事業系ごみ(事業系一般廃棄物)は、家庭系ごみと一緒に自治体の処理施設で処理されている。図2は、2005年度における一般廃棄物の収集から処理までの割合を示している。ここでは集団回収量を含めた量を100としており、家庭系と事業系の比はおおよそ2:1である。73%が焼却されて、最終的に埋め立てられるのは重量比で14%である。一般廃棄物の主な組成は、紙、生ごみ、プラスチックであり、おおよそ30~40%、30~40%、15%の割合である。上述のように分別は可燃ごみと不燃ごみに分け、生ごみは可燃ごみとしてほとんどが焼却されている。紙のうち新聞紙、雑誌、ダンボールなどは古紙として回収され、プラスチックは1997年に施行された容器包装リサイクル法によってペットボトル、それ以外の容器包装材



一般廃棄物量 4974 千トン、集団回収量 299 千トンの合計を 100 とした (参考文献 1, p.19 より引用)

図2 一般廃棄物の収集量と処理の内訳 (2005年度)

が回収されているが、それ以外はやはり可燃ごみとして焼却されている。埋立地において処分されるのは不燃物と焼却残渣が中心である。したがって現時点でのエネルギー回収は焼却のみといってよいが、以下ではごみ中の主たるバイオマスである生ごみと紙に注目し、諸外国の状況も含めてエネルギー回収方法について述べる。

2. 埋立地からのメタンガス回収

2.1 メタンガス回収技術

生ごみなどの有機物は、空気があると好気性微生物によって最終的に水と二酸化炭素となる。有機物を含むごみが埋め立てられると酸素は埋立地表面近くで消費されてしまい、埋立地内部は酸素のない状態(嫌氣的雰囲気)となる。嫌気性微生物の活動によって二酸化炭素とメタンガスが発生し、埋立地に隣接する建物の爆発や植物の生育阻害などの問題が起こるため、ガス抜き、燃焼などの埋立ガスの制御が1960年代から始められた。その後、欧米における規模の大きい埋立地ではエネルギー利用を目的としてガスの抽出が行われるようになった。最も一般的な方法は鉛直井戸を設置し、ポンプ吸引するもので、隣り合った井戸の影響領域が重ならないよう井戸間隔を50~60m程度とする。埋立地表面から空気が侵入すると、埋立地内部でのメタン生成が妨げられ、さらには火災発生の原因となるため、埋立地表面をしゃ水シートや粘土などでカバーすることが必要である。ガス抜き管を水平に設置することもある。鉛直井戸は埋立終了後に設置するのに対し、水平井戸は埋立途中に順次設置する。

回収されたガスは燃料として外部へ供給するか、埋立地での発電に利用される。都市ごみ乾燥重量1トンあたり120~150m³の埋立ガス(メタン濃度は55±5%)が回収され²⁾、発熱量にすると約2500MJ/tに相当する。規模の小さい埋立地ではガス回収は不経済なので、ガス発生による内部圧力の上昇を利用してガス抜きし、大気に放出する。ガス濃度が高い場合はバーナーで燃焼することができる。

2.2 バイオリアクター埋立地

“埋立地は、微生物活動によって有機物を安定化する生物反応器(バイオリアクター)である”との考え方は古くからあった。しかしpH、廃棄物の粒径、栄養、温度、水分などを制御し、微生物植種をするなどして、“装置”としての効率を最大化しようとする考えがある。これをバイオリアクター埋立地という。最も重要な因子は水分であり、嫌氣的分解を最大化するために廃棄物層全体を一定の水分に保つことを目標として、北米を中心に研究が進められている。分解を活発化し、短期間でメタンガスを最大限回収することが、バイオリアクターの主目的である。しかし埋立地は、廃棄物が分解して安定化する

までに数十年の時間を要する。この間、ごみ中を通過して汚濁物等が溶け出した浸出水、埋立ガスの管理を継続しなければならず、経済的な負担が大きい。そのため日本、欧米ともに早期安定化が重要な課題となっている。当初のバイオリアクターは上記のようなメタンガス回収促進を目的としていたが、安定化を優先し、空気を強制的に導入する好氣的バイオリアクターが優位となっており、このときには逆にエネルギーを消費することになる。

2.3 日本の特徴

日本では、浸出水集水管からの酸素供給によって好氣的ゾーンを広げようとする準好気性埋立構造が主流であること、紙や厨芥は焼却され、埋立物が焼却灰と不燃物が中心で有機物量が少ないことのため、埋立ガス回収は行われぬ。東京都海面処分場が唯一の例で、1982年から埋立ガスを回収し発電を行っているが、年平均約3000MWh(850世帯分の家庭消費量)に過ぎない³⁾。

3. バイオガス化

生ごみの主なりサイクル方法としては、堆肥化とメタン発酵がある。これは、埋立の項で述べた好気性分解、嫌気性分解を装置内で行うものと考えてよい。ここでは、エネルギーを得ることのできる後者について述べる。

3.1 メタン発酵のプロセス

嫌気性発酵(あるいはメタン発酵)は、し尿、下水汚泥など、高濃度有機性廃水に対する技術として歴史が古い。最近ではメタンガスを取り出すことを強調して、バイオガス化と呼ばれるようになってきている。生ごみを対象としたバイオガス化は、欧米では1980年代から研究が始められ、1997年の時点で世界に90施設(総処理量350万トン/年)が稼働しているとの調査結果がある⁴⁾。日本では下水汚泥、し尿処理施設でそれぞれ342施設、118施設があるが、生ごみを受け入れる施設は12施設、うち生ごみのみは3施設に過ぎない⁵⁾。メタン発酵槽は固形物濃度によって湿式(6~10%)、乾式(25~40%)に分けられ、混合方式(完全混合/押出し)、操作温度(高温/中温)によっても分類される。

メタン発酵にはさまざまな微生物が関与し、大きく①加水分解(炭水化物、脂肪などの不溶性高分子有機物を単糖類、アミノ酸などの単純な化合物に加水分解、可溶化する)、②酸生成(可溶性有機物から酢酸、プロピオン酸などの揮発性脂肪酸を生成する)、③水素・酢酸生成(揮発性脂肪酸を水素、酢酸に分解する)、④メタン生成(酢酸あるいは水素からメタンを生成する)の4段階に分けられる。メタン生成菌のpH至適範囲は6.8~7.5であるが増殖速度が遅く、酸生成速度が上回るとpHが低下してプロセスが停止する。また、固形物を原料とする場合には

可溶化の促進が必要となる。種々の菌類、微生物などが関与し、エアレーションや切り返しなどの簡単な操作で済む好気性分解に較べて、高度な技術と制御が必要となる。メタン発酵には、さまざまな中間生成物を經由する分解経路があるが、いずれも同じ最終産物を生産する。したがって有機物の種類ごとにガス発生量、組成を求めることができ、例えば炭水化物のガス発生量は790L/kg、メタンガスとCO₂の容積比は1：1となる。

3.2 生ごみバイオガス化

生ごみを原料とするメタン発酵の基本的な処理フローは図3のようである。破碎・選別、プラスチック、金属などの異物除去を前処理としたのち、発生したガスを回収する。嫌気性状態を保つために発酵槽は密閉容器であり、外部へガスが漏れることはなく、臭気は堆肥化に較べてはるかに少ない。回収されたガスにはごみ中の硫黄分に由来する硫化水素が含まれるため、脱硫したのちタンクに貯蔵され、ガスエンジンや燃料電池により発電

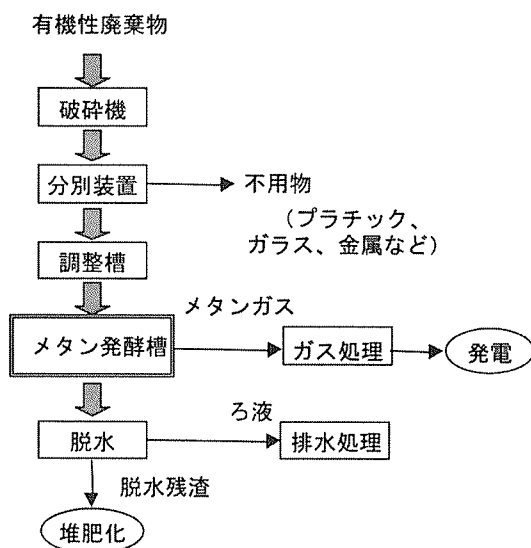


図3 生ごみメタン発酵（バイオガス化）の処理フロー

行われる。すなわち天然ガス、電力の回収が可能であるが、実際には、発生したガスは施設の運転に使用され、外部へほとんど取り出すことができない。しかも固形残渣は有機物量が少ないため堆肥としては利用できず埋め立てられ、ろ液の排水処理コストは小さくない。正味のエネルギー回収施設となるには、改善すべき余地が多く残されている。

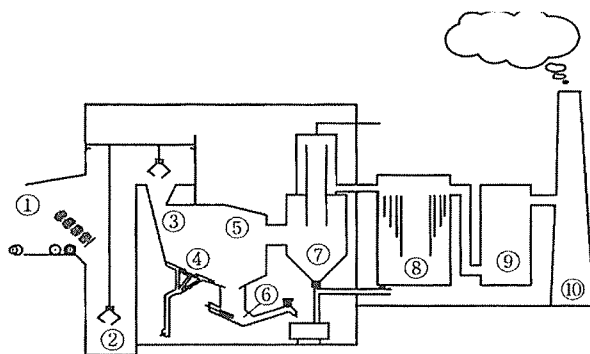
4. ごみ発電

4.1 ごみ焼却施設の構成

図2に示したように、わが国では焼却が一般廃棄物の中心的処理方法となっている。焼却炉の一般的な構成は、図4のようである。まずごみを貯留槽(②ピット)に受け入れ、クレーンで炉の投入口(③ホッパ)に投入する。火格子上(④)でごみは燃焼し、燃え残りの残渣(焼却灰)は水タンク内(⑥)で冷却される。ごみの燃焼温度は800～1000℃と高いので、ガスを冷却しなければ排ガス処理ができない。そのため、熱回収ボイラ(⑦)を置き、高温蒸気を回収する。冷却ガス中の粒子状物質(ばいじん)は、集じん装置(⑧)で除去し(捕集されたばいじんを飛灰と呼ぶ)、塩化水素、硫酸ガスなどの酸性ガスをアルカリ剤を吹き込んで(⑨)除去する。⑦で回収された高温蒸気を暖房、給湯などに利用し、蒸気によって発電を行う。小規模の焼却施設ではボイラ設置が不経済なので、水を噴霧してガスを冷却する。

4.2 低いエネルギー回収率

表1に、一般廃棄物焼却施設におけるボイラ回収熱の利用状況を示す。全連続式と准連続式は運転時間が24時間か16時間かによる分類であり、前者がより大型であるが構造的に大きな差はない。バッチ式とは、一日8時間運転する小規模施設であり、2001年から2005年の間に減少した。これは、ダイオキシン類排出基準の既設施設に



①受け入れホール、②ごみピット、③ごみ投入ホッパ、④燃焼火格子、⑤二次燃焼室、⑥焼却灰冷却タンク、⑦熱回収ボイラ、⑧集じん装置、⑨酸性ガス除去装置、⑩煙突

(参考文献1, p.66より引用)

図4 ごみ焼却施設の一般的構成

表1 一般廃棄物焼却施設の熱回収状況

年度	1998	2001	2005
施設数	1,769	1,680	1,319
全連続式	474	549	618
准連続式	378	359	269
バッチ式	917	772	432
余熱利用あり [%]	63	65	69
温水利用	59	61	67*
蒸気利用	12	14	18*
発電	11	14	22
その他	6	5	6*
総発電能力 [MW]	960	1,246	1,515
総発電電力量 [GWh]		5,538	7,036
発電効率 [%]		10.4	11.3

(参考文献1, p.68より引用)

*2004の数値

対する適用の猶予期限(2002年11月)内に多くの施設が閉鎖したためである。全体として大型化していることもあって、表1の余熱利用の回答によると、5分の1の施設で発電が行われている。しかし発電効率(生産電力量の熱換算値と燃料がもつ熱量の比)は、石炭火力発電が40%を超えるのに対して、ごみ発電は平均で10%程度に過ぎない。この理由として、以下のことがあげられる。

発電は蒸気を高温とするほど効率が高くなるが、廃棄物焼却の場合、排ガス中の塩素によって320~330℃以上とすると腐食が起こってしまう。そのため発電効率を上げることが難しい。これが第一の理由である。また余剰電力は電力会社へ“売電”し、需要者へ供給される。しかしごみは量と質が一定しないため、電力会社は“質の悪い電力”として購入に積極的ではなく、売電価格は、購入する場合の買電価格に比べて大幅に安かった。そのため積極的に発電が行われず、場内利用分のみを発電する施設が多かった。すなわち売っても利益が少なく、発電施設は高価なので最初から発電量を低く計画している、これが第二の理由である。第一の問題に対しては、ガスタービン併用による発電効率向上、耐腐食性材料の利用など、技術的対応は可能であるが、第二の理由のため高

価な発電設備を持つことのメリットが小さい。表1に示されている2005年度の総発電量は、194万世帯分の年間電力使用量に相当するとされるが⁶⁾、どれだけ売電されたかは不明であり、場内使用が大部分を占めていると思われる。

もうひとつの方法である余熱利用は、表1によると3分の2の施設で実施されている。温水、蒸気の利用としては、施設内暖房・給湯、施設外の温水プール、熱供給、地域暖房供給などがある。このうち大きな熱量を利用できるのは地域暖房である。600トン/日の施設の場合、集合住宅1000~1500世帯の集中暖房ができるが、一般に焼却施設は“迷惑施設”と考えられ、住宅地から遠くに建設されている。外部供給先までの距離が長くなると損失熱量が大きくなるので、結局周辺での小規模利用しかできない。温水プール、動植物用温室は集中暖房と較べると、それぞれ50世帯、15世帯分の熱量で足りてしまう。組成にもよるが、ごみの発熱量は石炭の3分の1程度である。欧州のように、十分な環境対策を前提としてエネルギー供給施設としてごみ焼却施設を位置づけるならば、エネルギー利用の状況は大きく変化する。

5. RDF 発電

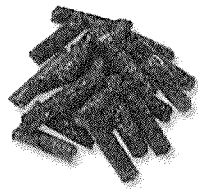
5.1 RDF (ごみ燃料) の分類と特性

RDFはRefuse Derived Fuelの略であり、ごみから製造した燃料の意味である。粗大物を除いて単に細かくしたものから、処理を施して液体あるいは気体燃料としたものまで幅広い(表2)が、わが国では圧縮して固形化したもの(RDF5)をさす(図5)。わらや木くずなどを圧縮・成型して燃料にすることは100年以上前から北欧で行われており、固形化RDFの歴史は古い。わが国ではまず、均質な事業系ごみのRDF化が行われた。家庭系ごみを対象とした施設の運転は1980年代後半から始まり、生ごみを含むため乾燥が必要なので、通常は破碎→乾燥→選別→成型のプロセス構成となっている。廃プラスチックと紙を主原料とするものを特に区別してRPF(Refuse

表2 ごみ燃料(RDF)の分類

クラス	形態	
RDF1	そのまま (Raw)	粗大物を除いただけの都市ごみ
RDF2	(Coarse)	6インチ角(約15cm)通過分が95%以上の粗い粒度とした都市ごみ。金属分離は必須でない
RDF3	フラフ (Fluff)	金属、ガラス、不燃物を除去するために破碎した都市ごみ。2インチ角(約5cm)通過分が95%以上
RDF4	粉状 (Powder)	10メッシュスクリーン(2mm)通過分が95%以上となるよう粉碎されたパウダー状の可燃性ごみ (combustible waste fraction)
RDF5	固形化 (Densified)	ペレット、キューブ、ブリケット状に成形(圧縮)された可燃性ごみ
RDF6	(Liquid)	液体燃料化されたもの
RDF7	(Gas)	ガス燃料化されたもの

ASTM E-38委員会による定義



(旧川崎製鉄 HP より)

図5 RDF の例

Paper & Plastic Fuel) と呼ぶことがある。

RDFは乾燥し、不燃分を除くので発熱量が高く、燃料としては石炭並みとなる。また均質化されているので、ごみと較べて安定燃焼が容易であり、輸送・貯蔵ができるので学校、プールなどの自治体関連施設で燃料として使うことが期待された。1993年には国庫補助対象となって施設が増加し、大部分が50t/日以下の規模であった。(2005年度の焼却施設の平均規模は、全連続式260t/日、準連続式74t/日、バッチ式23t/日であるので、バッチ式炉の規模に相当する。)

5.2 RDF 広域発電計画

しかし、1990年後半にごみ焼却施設からのダイオキシン排出が問題となると、通風などの十分な設備をもち、24時間連続運転可能な施設以外でのごみ焼却が禁止された。小規模のごみ焼却炉は運転継続が難しくなったが、同時にRDFも高度な設備での燃焼が必要となり、事実上小規模施設での利用が不可能となった。代わって“小規模の焼却炉を使用しているところは個別にRDF化施設を設置し、それを集約して大規模な炉で処理する”という広域RDF発電が考えられた。これは小規模自治体にとっては焼却施設よりもRDF製造が安価であり、RDFを一箇所集めることで、個別のごみ焼却発電よりも発電効率を高くすることができるとの考えによっている。2002年時点で三重県、福岡県など県が事業主体となり、5つの広域RDF発電計画が導入あるいは計画された。これらの事業では参加市町村が製造したRDFを輸送し、200t/日規模での発電を計画し、20～30%の発電効率を見込んでいた。

ところが2003年に三重県のRDF貯蔵サイロが爆発し、消火作業中の消防士2名が死亡するという事故が発生した。事故後、各地の施設が調査され、類似の事故が高い割合で発生し、約4割の施設で製造されたRDFが必ずしも有効に使われずに廃棄物として処分されていること、RDFを販売して利益を得ている自治体は2割で、それ以外は利益なし、処理費を払っていることが明らかとなった⁷⁾。RDF化施設は2003年時点で全国の43箇所稼働あるいは建設中であった⁸⁾が、こうした問題のためにRDF発電には疑問符が付けられ、国内での展望は開けていない。

5.3 米国のRDF製造利用

なお、米国では148の焼却プラントのうち121施設で発電を行っており、うち15施設がRDF焼却炉で平均1370トン/日の処理能力を持っている⁹⁾。しかし米国でいうRDFは破碎、不燃物除去により性状を均一化するだけのもの表2中のRDF3にあたり、固形化RDF (densified RDF, dRDF) に対し、フラフRDF (coarse RDF, cRDF) と呼ばれている。cRDFの製造は破碎、選別のみで簡単であるが、乾燥しないので保管できず、すぐに燃やして発電を行う。cRDF製造における選別の目的は不燃物の除去にあるが、日本では不燃物を発生源での分別によって除いている。すなわち日本では発生源での分別によって米国のcRDF相当のごみを得ており、一般廃棄物焼却は米国のRDF焼却と同等と考えられる。

6. 熱分解による炭化・ガス化

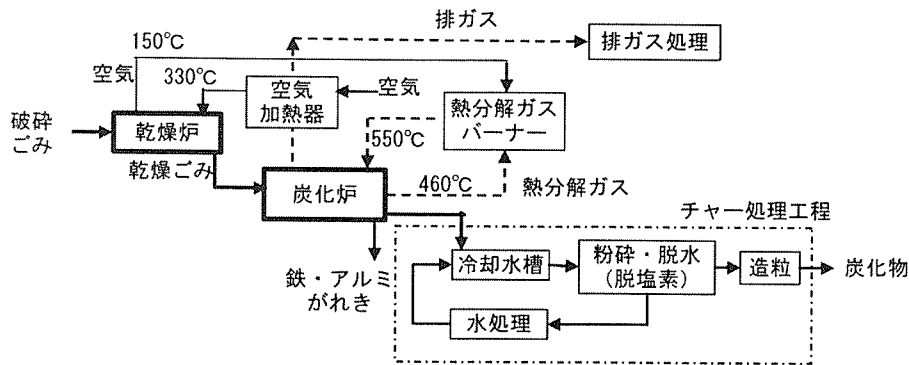
有機物を低酸素あるいは無酸素状態で加熱すると熱分解 (pyrolysis) が起こり、生成物として①炭化水素、一酸化炭素などの可燃性ガス、②有機化合物を含むタールまたは油、③チャー (炭素) が得られる。その割合は加熱温度と対象物によって異なり、①②③のうちどれを主な目的物とするかで、それぞれガス化、油化、炭化と呼ばれる。いずれもエネルギー回収の方法となるが、油化はプラスチックに対する技術であり、バイオマスに対してはガス化、炭化がある。

6.1 ガス化溶融

ガス化技術には、無酸素状態での熱分解による方法と、低酸素状態で部分燃焼する方法がある。欧州ではいずれかの方法により“ガス化”し、発電等の利用が行われているが、日本では1990年代後半にダイオキシンが問題となってから、ガスあるいは未燃分を燃焼してスラグ化するガス化溶融が主流となった。キルン式あるいは流動床式の炉において500℃前後の比較的低温でごみを部分燃焼あるいはガス化し、発生した可燃ガスおよび熱分解残渣を溶融炉において燃焼させ、固形分を溶融・スラグ化するもので、製鉄所の高炉技術を利用した一体型 (シャフト炉と呼ばれる) もある。新規施設の建設は急速に進み、2005年時点で全国に77箇所の施設がある。1200～1500℃で溶融するためダイオキシンが分解され、発電効率が高く、スラグがリサイクルできることが長所とされた。しかし助燃料、電気使用量が多く、スラグのリサイクル率が低いなどの問題が明らかとなってきた¹⁰⁾。

6.2 炭化技術

ガス化溶融は環境影響の低減を主な目的としており、エネルギー回収技術ではない。これに対して、前段部分のみを独立させた炭化技術が注目されている。図6に、都



(参考文献 11 より作成)

図6 廃棄物炭化システムのプロセス構成例

市ごみを対象とした炭化施設のフローを示す¹¹⁾。収集されたごみは100～150mm程度に破砕し、乾燥後、無酸素状態400～500°Cで熱分解される。乾燥は炭化炉を小型化するためである。熱分解残渣は可燃性ガスと分離し、鉄・アルミなどは分離・回収される。

炭化物は、多様な特性を利用して以下のように多くの用途がある。

- ・吸着性 (有害物質吸着剤, 脱臭剤, 調湿剤, 水質浄化剤),
- ・還元性 (高炉還元剤), 土壌活性 (土壌改良剤, 緑化資材),
- ・断熱性 (建材, 保温材), 熱吸収性 (融雪剤), 炭素分 (燃料)

有機物炭化の目的として最も多いのは活性炭製造であり、土壌改良剤として使用すると、土壌の通気性、透水性を改良し、保水能力、養分保持力を増大させることができ、肥料の増量剤としての利用も考えられている。しかし、大量の利用が見込めるのは燃料としての利用であり、火力発電所、セメントキルン、製鉄所などが考えられる。使用時に塩素による腐食をさけるために、図6では水洗(温水)によって塩素を除去している。また炭化処理には原料の乾燥と、炭化炉加熱のための熱源が必要であり、図6では発生した熱分解ガス全量を燃焼し、高温燃焼ガスによって炭化炉を間接加熱し、乾燥は熱分解ガスの一部との熱交換によって加温された空気を直接吹きこんでいる。これらの必要熱量が過大であればエネルギー生産技術とはならないが、廃棄物の発熱量が5000～6300kJ/kg (1200～1500kcal/kg) 以上であれば外部燃料は必要ないとされており、一般廃棄物はそれ以上の発熱量を持つた

め外部に取り出せる正味エネルギーは正となる。ただし、燃料としての品質を高めるために、不燃分、塩素分の分離が課題である。

文献: References

- 1) 松藤敏彦, ごみ問題の総合的理解のために, (技報堂), 2007
- 2) R. Stegmann: Landfill gas utilization: An overview, in Landfilling of waste: Biogas (ed. T. H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann), (E&FN SPON), p. 10(1996)
- 3) 東京都廃棄物埋立管理事務所公式ウェブサイト <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/tyubou/>
- 4) 四蔵茂雄, 原田秀樹, 都市廃棄物の嫌気性消化, 廃棄物学会誌, 10(3), 241-250(1999)
- 5) 古市徹, 西則雄編著, バイオサイクル, (環境新聞社), 2006
- 6) 環境省, 一般廃棄物の排出及び処理状況等 (平成16年度実績)
- 7) 朝日新聞, 2003年9月13日, 11月16日, 日経新聞, 10月15日など
- 8) 鍵谷司, RDF 保管時の発熱と今後の対応, 環境施設, (94), 48-55(2003)
- 9) 阿部正, 米国におけるRDFごみ発電の発展, 廃棄物学会誌, 7(4), 305-315(1996)
- 10) 藤吉秀昭, ガス化溶融炉の運転管理と改善事例, 環境技術会誌, (129), 86-99(2007)
- 11) 中平敏雄, 炭化処理技術の実際とリサイクル施設としての稼働実績, 資源環境対策, 38(3), 304-310(2002)