【総 説】

エネルギー・資源と廃棄物

武 田 信 生*

【要 旨】 地球環境時代を迎えた今、廃棄物処理はエネルギー・資源の保全と一体となって考えていかなければならない課題となってきた。すなわち、廃棄物の流れがエネルギー・資源の流れのサイクルに組み込まなければならない。本稿では、わが国のエネルギー・資源をとりまく状況を概観した上で廃棄物の熱操作処理におけるエネルギーと金属資源の回収について今後の方向性を論じた。

キーワード：固体廃棄物，エネルギー，資源，回収

はじめに

エネルギー・資源が有限であること、そしてそれらの開発・利用が必然的に環境汚染に繋がることが強く認識されるようになってきた今、つまり地球環境時代を迎えた今、廃棄物処理をどのように考えていくかは重要な課題となってきた。廃棄物はエネルギー・資源が利用された結果として排出されるものであり、循環型社会の形成とは、とりもなおさず廃棄物の流れがエネルギー・資源の流れのサイクルに組み込まれることにはかならない。戦後長く続いた大量生産—大量消費—大量廃棄の流れを循環型流れに戻すことは至難の技ではあるが、次の世紀に向かって着実にその方向を見出していくことが重要である。

本稿では、廃棄物の熱操作処理におけるエネルギーと金属資源の回収について今後の方向性を論じてみることにする。

廃棄物の発生抑制 (Reduce), 再利用 (Reuse), 物質回収 (Recycle) が最大限進められねばならないことはいうまでもないが、物質の混在, 付着, 散乱など, 要するにエントロピーが増大し切った廃棄物については直接的な再利用や物質回収はかえってエネルギーや処女資源の乱用に繋がる危険性すらある。このような廃棄物について残されているのはエネルギーや廃棄物処理残渣か

らの資源の回収 (Recovery) である。

1. エネルギー

1.1 エネルギー消費の概観

世界のエネルギー消費が増え始めたのは19世紀末の蒸気タービンの発明による動力革命を契機としているといわれているが、図1に示されるように過去100年間で25倍、第二次世界大戦後の50年間で約5倍に達している。現在、世界のエネルギー総消費量は石油換算で年間約82億tonに達しており、そのほとんどは化石燃料の消費によっている¹⁾。

表1は世界の一次エネルギー消費と人口の統計を抜粋したものである²⁾。一次エネルギー消費量は石油に換算してある。世界のエネルギー消費の4分の1以上にあた

出典：国連エネルギー統計，BP 統計等による

図1 世界のエネルギー消費の推移¹⁾

原稿受付 1999. 6. 17

* 京都大学大学院工学研究科環境工学専攻 教授

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町

表1 世界の一次エネルギー消費と人口 (1995)

	一次エネルギー消費量石油換算		人 口		1人当たり一次エネルギー消費量石油換算
	万 ton	(%)	千人	(%)	kg
世界	820,414	(100)	5,660,778	(100)	1,449
アジア	255,016	(31.1)	3,421,451	(60.4)	745
日本	44,692	(5.4)	125,570	(2.2)	3,559
韓国	13,020	(1.6)	45,090	(0.80)	2,888
中国	81,949	(10.0)	1,221,462	(21.6)	671
バングラデシュ	832	(0.1)	118,230	(2.1)	70
ヨーロッパ	252,013	(30.7)	729,394	(12.9)	3,455
イギリス	21,691	(2.6)	58,610	(1.0)	3,700
イタリア	16,495	(2.0)	57,300	(1.0)	2,879
ドイツ	32,271	(3.9)	81,660	(1.4)	3,952
フランス	21,604	(2.6)	58,143	(1.1)	3,716
北中アメリカ	251,797	(30.7)	446,988	(7.9)	5,633
アメリカ合衆国	211,510	(25.8)	263,034	(4.6)	8,041
カナダ	22,460	(2.7)	29,620	(0.52)	7,583
南アメリカ	28,474	(3.5)	313,200	(5.5)	909
ブラジル	10,148	(1.2)	155,822	(2.8)	651
ペルー	904	(0.1)	23,532	(0.42)	384
アフリカ	21,439	(2.6)	722,179	(12.8)	297
オセアニア	11,675	(1.4)	27,566	(0.49)	4,235

(文献2より作成)

表2 アジア地域における発電量 (1995)

	発電量 (億 kWh)	人 口 (千人)	1人当たり 電力 (W)
アジア	37,783	3,421,451	126
日本	9,900	125,570	900
韓国	2,051	45,090	519
マレーシア	466	20,110	265
タイ	837	59,400	161
中国	10,077	1,221,462	94
パキスタン	602	130,250	53
フィリピン	334	70,267	52
インド	4,146	915,970	52
インドネシア	688	195,280	40
バングラデシュ	117	118,230	12

(文献2より作成)

る2,115MTOE (Million Tons Oil Equivalent) をアメリカ合衆国が消費しており、1人あたりのエネルギー消費はアメリカ合衆国とカナダが群を抜いて、約8TOE程度となっていることがわかる。欧州主要国の1人あたりのエネルギー消費は約3～4TOEで高水準にある。わが国は世界全体の消費量の5.4%、約447MTOEを消費し、1人あたりのエネルギー消費は約3.6TOEと、欧州各国とほぼ同じ水準にある。開発途上国における1人あたりのエネルギー消費は少なく、先進諸国に比べ1～2桁低い値となっていることがわかる。開発途上国は一般に人口が多いため、1人あたりのエネルギー消費原単位が大きくなると消費量の伸びにおよぼす影響は大きい。たとえば、表2はアジア各国における発電量を示したものであるが、近年、中国は発電量を著しく増大させており、1995年には1980年の3.35倍、10,077億kWhを発電し、ついにわが国を追い抜き、ア

メリカ合衆国の33,453億kWhに継ぐ世界第二位の電力生産国となっている。中国の電力生産量の約80%は火力によるものであり、大気汚染の元凶ともなっている。それでも、1人あたりの電力で見ると中国は94W/人と小さく、今後の増大圧力は強いものと考えられる。開発途上国の経済成長や生活水準の向上が続けば、エネルギー消費の増勢はますます強まり、エネルギー源の争奪が起こる可能性は高く、エネルギー供給の逼迫化は十分にあり得ると考えられる。

そのような中において、わが国は人口では世界の2.2%を占めているに過ぎないが、エネルギー消費は世界の5.4%を占めており、経済活動や消費活動が活発であることを反映している。わが国のエネルギー供給源の特徴は、輸入依存度、石油依存度、ホルムズ依存度のいずれもが他の諸国と比較して格段に高く、エネルギー供給構造が脆弱であることである。

1.2 わが国のエネルギー消費構造の特徴と改善方策

そのようなわが国の脆弱なエネルギー供給構造の中で、消費段階ではどのようなエネルギーの流れとなっているのかを示しているのが図2である³⁾。1995年度のわが国におけるエネルギー供給のフローチャートもある⁴⁾が、損失の流れを明示しているこの図の方が問題点を掴みやすいので、あえて少し古いデータで見てみる。この図では、左から一次エネルギーの投入があり、右は総廃棄熱量を示している。上段の図は1975年度を、下段の図は1992年度を示している。エネルギー不滅の法則により、一次エネルギーとして供給された熱量は結局はすべて廃棄熱量となるのであるから、その間に有用エネルギーとしてどれだけ使われたかが最も重要である。

一次エネルギーの供給量は1975年度が 3.6×10^{15} kcal (1.5×10^{16} kJ)、1992年度が 4.9×10^{15} kcal (2.0×10^{16} kJ)であり、約20年間に30%近く増加している。この間に有効に使われたエネルギーは37%から34%に低下している。このような熱利用効率の低下の大きな原因は、電力化率が1975年度の27.5%から1992年度の40%に上がることによって損失が大きくなったことである。言葉を替えれば、発電による温排水による熱損失や大気中への熱放散がそれだけ増えているということもできる。両年度の間に産業用、運輸用、民生用の比率の変化における特徴は、産業用が減少し、運輸用ならびに民生用が増加したことである。これは重厚長大産業から軽薄短小産業へのシフト、産業の空洞化、工業における省エネルギーの促進の一方で三次産業化やライフスタイルの変化などが起こったことを反映しているものである。

図2 わが国のエネルギーフロー³⁾ 図3 エネルギーのカスケード利用の概念⁵⁾

熱利用の効率が低いのは高温に始まって常温におわる熱を有効に利用していないことにある。わが国のエネルギー供給は発電用と非発電用が並列に流れる構造であり、46℃の湯や25℃の室温を得るために燃料を燃焼し、千数百℃にもなる熱を使い、廃熱として出される数百℃の熱を利用していないことにあるという批判がなされている³⁾。すなわち、燃料を燃やしたときには、先ず熱機関で動力に変換し、発電機、ポンプ、圧縮機などの駆動に用い、そののちに廃熱を暖房や給湯に用いるべきであるということである。図3に示すエネルギーのカスケード利用である⁵⁾。

上述のようなエネルギーの流れについていくつかの改善策が提案されている⁶⁾。それらは①高効率廃棄物発電、②大規模コジェネレーションシステム、③未利用エネルギー活用型地域熱供給、④発電所・工場等の余剰エネルギーの供給などである。このうち、廃棄物からの熱利用について述べると以下のようなものである。

1.3 廃棄物からのエネルギー回収

1.3.1 廃棄物の位置付け

未利用エネルギーの利用促進が叫ばれる中、最も有望なものは廃棄物からのエネルギーの利用であると見られている。廃棄物からの物質回収(マテリアルリサイクル)も資源回収・再利用にとって重要であるが、汚染されエントロピーが増大してしまった廃棄物からの熱回収(サーマルリサイクル)は重要なリサイクル技術である。もともと焼却処理されている廃棄物の焼却熱をエネルギー利用することは二酸化炭素の新たな増加を招くことではなく、地球環境保全上も好ましいことであると考えられている。

1994年9月13日閣議決定の「石油代替エネルギーの供給目標」を達成するため、同年12月16日の総合エネルギー対策推進閣僚会議において、新エネルギーの導入

表3 新エネルギー利用等の種類別導入目標

新エネルギー利用等の種類	2010 年度
太陽光発電	約 500 万 kW
風力発電	約 30 万 kW
クリーンエネルギー自動車	約 3.4 百万台
廃棄物燃料製造	※約 189 万 kℓ
廃棄物発電	約 500 万 kW
廃棄物熱利用	※約 14 万 kℓ
温度差エネルギー	※約 58 万 kℓ
天然ガスコージェネレーション	約 455 万 kW
燃料電池	約 220 万 kW
太陽熱利用	※約 450 万 kℓ

※当該新エネルギー利用等の導入量を原油の数値に換算したものである。

を図る国全体の指針として「新エネルギー導入大綱」が決定され廃棄物発電は 2000 年度で 200 万 kW、2010 年度で 400 万 kW を目標とされた。その後、1997 年 6 月 23 日「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」が施行され、1998 年 9 月 18 日の閣議決定で「石油代替エネルギーの供給目標」が改定され「新エネルギー利用等の種類別導入目標」が表 3 のように示された。この表によれば廃棄物発電は 2010 年度で 500 万 kW の導入目標値が掲げられている。

一方、脆弱なエネルギー供給構造の改善や環境問題解決への貢献を目指して新エネルギー導入施策が政府によって積極的に進められている。とくに小規模かつ地域分散型のエネルギー開発として、太陽熱・光、風力、中小水力などとならんでごみ焼却の廃熱利用、厨芥・し尿・下水・畜産廃棄物・工場廃液のメタン発酵ガスやプラスチック類の乾留ガスの利用、木質系廃棄物の燃料利用などがあげられている⁷⁾。

1.3.2 廃棄物発電

図 4 に廃棄物発電の設備数、発電出力の変遷を示した⁸⁾。1992 年度末に一般廃棄物焼却発電設備数は 117 か所、発電出力は 35.9 万 kW であったが、1997 年度末には 171 か所、発電出力は 70.89 万 kW へと、発電出力はほぼ倍増している。また、産業廃棄物の発電設備数も 1992 年度末の 44 か所から 1997 年度末には 50 か所に増加し、発電出力も 8.6 万 kW から 20.4 万 kW へと、ほぼ 2.4 倍に増大している。結局、1997 年度末では一般廃棄物発電と産業廃棄物発電を合わせると 91.2 万 kW であるが、2010 年度の廃棄物発電導入目標 500 万 kW に比較すると 18% に過ぎない現状である。したがって、2010 年度の目標を達成するためには、ごみ処理の広域化、大型設備化などの社会的システムの構築のほか、廃棄物発電自身の高効率化など、相当の努力が必要である。

(a) 廃棄物発電施設数と出力合計の変遷

(b) 廃棄物発電出力の変遷
(資源エネルギー庁公益事業部電力技術課調べ)図4 廃棄物発電の変遷⁸⁾

ごみ焼却によって生成される高温燃焼排ガスはばいじんや酸性ガスを含む高温ガスであり、排ガスの浄化処理を施すためには排ガスの冷却過程は必須のものとなる。従来小型炉では水噴射等によってガス温度を下げる例が多く、せいぜいガス-ガス熱交換によって予熱空気を得る程度の廃熱回収であった。これには、燃焼の不安定性、熱供給先の不足など小型炉特有の条件も作用していた。ダイオキシン問題に基づくごみ処理の広域化、焼却炉の大型化・連続操業化はごみからのエネルギー回収にとっては有利な条件である。小型炉でもダイオキシン抑制は可能であるとの議論はあるが、地球環境問題とエネルギーの有効活用の視点に立てば大型化は好ましい方向である。

わが国におけるごみ焼却発電実用機の第1号であった大阪市西淀清掃工場は 1965 年に竣工、1995 年までに累計 665 GWh の発電を行い 452 GWh の電力を施設外に送ったが、その蒸気条件は 350℃、24 ata (2.35 MPa) で、当時としては高温高压であった。しかしながら、高温域では蒸気過熱器の腐食が進むため、その後のごみ焼却発電ではおおむね 300℃ 以下の温度と飽和蒸気圧の蒸気条件で設計されることが多くなった。その後、長年にわたり発電効率の低いごみ焼却発電が続いてきたのには次のような理由が考えられる。

① ごみ処理に重点がある一無害化、安定化、減容化

が廃棄物処理の目的であって、熱回収が主目的ではないこと。

- ② 低い蒸気温度で設計される—燃焼ガス中に塩化水素や低融点アルカリ金属類が含まれ、蒸気温度 300℃、メタル温度 330℃ 以上では過熱器の高温腐食速度が大きくなることからこの温度以下で設計されることが多かったこと。
- ③ タービン形式が高効率化を目指したものではない—一般に事業用タービンではタービン出口の蒸気を水冷式復水器で海水によって冷却するのが普通であり、たとえば 33℃ まで冷却すれば蒸気はこの温度での飽和圧力である 0.05 ata まで膨張するように設計される。しかし、廃棄物発電は一般に小規模であり、水冷式に必要な取水・排水設備の設置が大掛かりとなりすぎること、内陸部に建設されることも多いことから、空気との熱交換による空冷式復水器が採用される。タービン出口蒸気は空冷により約 60℃ までしか冷却されず、蒸気はその温度に相当する飽和圧力 0.2 ata 程度までしか膨張しないこと。
- ④ 売電の魅力がうすい—余剰電力が発生しても電力会社の買電単価が安かったために設備費の償却が困難であったこと。

1.3.3 廃棄物発電の高効率化^{8,9)}

新エネルギー、未利用エネルギーとして廃棄物が重視されてくるに伴って、廃棄物による発電にとって有利な条件が整えられるようになり、廃棄物発電の高効率化が進められるようになってきた。高効率化の方法としては、蒸気の高温高圧化を図るものと蒸気サイクルの工夫によるものに大別できる。前者には

- ① 外部燃料による蒸気の高温高圧化；ガスタービン等あるいは独立過熱器を設置し、廃棄物焼却炉より発生する蒸気を高温高圧化して高効率化する。
- ② 耐食性材料を用いた蒸気の高温高圧化；焼却炉ボイラーの蒸気条件を高温化しても腐食しない材料を用いて高効率化する。

後者には、

- ③ 再熱再生サイクルを用いた高効率化；原子力発電で用いられている高圧の飽和蒸気を湿分分離し、再熱再生サイクルを構成し高効率化する。

などがある。

1) スーパーごみ発電

図 5 に示すように、廃棄物発電設備にガスタービン発電設備を併設して、ガスタービンの排ガスによって焼却炉ボイラーで発生した蒸気を過熱し、発電出力と発電効率を上げる方式である⁹⁾。スーパーごみ発電のシステム構成はごみ焼却炉による汽力発電とガスタービン発電の複合サイクル発電であり、その間の蒸気系、排ガス系の組み合わせにより各種方式が提案されている。なお、ガスタービンの代わりに独立過熱器を設けごみ焼却炉よりの蒸気を過熱する方式も提案されている。ガスタービンとの組み合わせにおいては、さらに「単複合サイクル方式」、「排気再燃方式」、「脱硝装置共用方式」、「蒸気結合方式」などが採用されている。国内ですでに 3 か所（群馬県高浜クリーンセンター、北九州市新皇后崎工場、堺市東第二工場）の実績がある。これらの一覧を表 4 に示した⁸⁾。

2) 焼却炉ボイラー蒸気の高温高圧化

焼却炉ボイラー蒸気の高温高圧化の例を表 5 に示す。埼玉県東部清掃組合第一工場、帯広市他 13 町村十勝複合事務組合「くりりん発電所」では高温高圧条件での実機操業が始まっている。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では 1991 年度から高効率廃棄物発電技術開発プロジェクトを推進し、500℃、100 ata の蒸気を安定的に発生させる焼却炉ボイラーの実用を目標に津久井高効率実証設備によって 1998 年から運転が行われている。

図 5 スーパーごみ発電⁹⁾

表 4 スーパーごみ発電の実績⁸⁾

市町村・組合	施設名	ごみ処理方式	定格処理規模 t/d	炉数	発電出力 kW	蒸気タービン出力 kW	ガスタービン出力 kW	発電端効率 %
高崎市他 4 町村衛生施設組合	高浜クリーンセンター	ストーカー炉	450	3	25,000	9,630	15,370	34.30
堺市	クリーンセンター 東第二工場	ストーカー炉	460	2	16,500	12,400	4,100	21.10
北九州市	新皇后崎工場	ストーカー炉	810	3	36,300	28,300	8,000	26.60

表5 高温・高圧発電施設の実績⁸⁾

市町村・組合	施設名	定格処理規模 t/d	炉数	蒸気温度 ℃	蒸気圧力 ata	ごみの低位発熱量 kcal/kg	発電出力 kW	発電端効率 %
津久井市	NEDO 高効率廃棄物発電実証設備	50	1	500	101	2,800	800	12.00
十勝環境複合事務組合	くりりん	330	3	400	40	3,000	7,000	14.59
埼玉県東部清掃組合	第一工場ごみ処理施設	800	4	380	37	3,000	24,000	20.64
一宮市	清掃工場	450	3	340	30.5	3,000	7,000	10.70

(蒸気温度 300℃ 越えの設備)

図6 RDFによる熱回収の概念⁹⁾

1.3.4 RDF 発電

RDFはRefuse Derived Fuelのことであり、米国ではASTMによってごみから得られる燃料として7種類のRDFが定義されている。わが国でRDFと呼ばれているものは、腐敗等を防止するために生石灰や消石灰を添加し固形化したごみ燃料であり、貯蔵性ならびに輸送性に優れるため、小規模なごみ処理工場ではごみをRDFに加工し、広域的に1か所に集め熱源として使用し、あるいは高効率の発電に使用するものである。この方法によれば、従来は小規模であるために間欠運転を余儀なくされたり、積極的な熱回収ができなかったごみの持つ発熱量を有効に利用できるようになる。このような構想を示したのが図6である。

以上のようないくつかのシステムによって大気中に放散されていた廃棄物エネルギーを積極的に回収し化石燃料の消費を抑えようとするのが廃棄物エネルギー利用の

提案である。ここでは発電を中心に述べたが、熱の需要が近くにあり熱利用が可能な場合には熱供給発電が熱利用率を最も高くできるものであることに留意する必要がある¹⁰⁾。

3. わが国の資源消費の特徴

3.1 わが国のマテリアルバランス

わが国における資源の産出、輸入、消費などの総体を見ることは極めて困難であるので、まず全体のマテリアルバランスを見たのち、2,3の汎用金属資源についての状況を見る。

わが国にどれ程の物質が持ち込まれ（輸入され）、どれほどの物質が持ち出され（輸出され）るのか、また、国内に蓄積されたり燃焼等によって大気中に放散されているのかという点はわが国全体の廃棄物問題を考えるために重要な事柄であるが、1980年以前にはそのよ

うな試みがなされたことはなかった。輸出入の統計は金額ベースで捉えられるのが普通であり、物量として把握するのは困難であった。現在もこの困難性には変わりがないが、平岡らの先見的な試み¹¹⁾に端を発して、物量に着目した国全体のマテリアルバランスを試算することはもはや不思議なことではなくなった。図7は平岡らが試算した結果である。これによると1975年度(昭和50年度)にわが国に輸入された総量は約5億5千万tonであり、総量約5千5百万tonの製品が輸出されたことになっている。この差約4億9千万tonのうち約2億9千万tonはエネルギー消費として大気中に放散され、残り約2億tonは何らかの形で国内に滞留した。一方、廃棄物の方は産業廃棄物の発生量が約1億6千万ton、一般廃棄物の発生量が約3千2百万tonで合計約1億9千万tonであった。この結果はさきのわが国における滞留量とほぼ一致していて興味深いものである。この試算では国内産物として農林水産品だけが計上されている。

さて、このような考え方は環境庁のリサイクル研究会の研究にも引き継がれ、わが国における産出も含めてのマテリアルバランスが示された¹²⁾。1995年におけるわが国のマテリアルバランスはクリーンジャパンセンター

によれば¹³⁾図8のようにになっている。この結果によると国内資源は12億2千2百万ton、輸入資源が6億2千3百万ton、輸入製品が1億2千3百万ton国内に入り、製品輸出が9千8百万ton、国内蓄積が11億3千9百万ton、エネルギーとしての散逸が3億3千2百万ton、食料消費が6千6百万ton、廃棄物としての処分量が8千3百万tonとなっている。資源としてのリサイクル量は1億9千8百万tonとなっており、わが国全体で使用されているエネルギー・資源の約9.7%となっている。

3.2 主要非鉄金属の国内需要の推移

図9は主要非鉄金属(銅、鉛、亜鉛)の国内需要の推移を示している。1973年までは経済の発展とともに国内需要は増大を続けたが、同年の石油危機によって大きな影響を受け、1974年には急激に減少した。1980年ころには石油危機までの水準に戻ったが、その後横ばいを続けた。1987年以降需要は再び増大し、1990年には最高水準となったが、その後は景気の低迷によって減少している。1997年の国内需要は銅が約149万ton、鉛が約27万ton、亜鉛が約62万tonであった。図によってわかるように非鉄金属の需要は横這い傾向であり、典型

図7 わが国のマテリアルフロー¹¹⁾

単位: 百万 t/年

注: () 内は資源投入量に対する割合%

図8 わが国のマテリアルバランス (1995)¹³⁾ 図9 主要非鉄金属（銅、鉛、亜鉛）の国内需要の推移
的な先進国型の推移となっている。

3.3 主要非鉄金属の供給構造の変化

図10は主要非鉄金属の供給源の様子を示したものである。1970年代はじめ以降スクラップその他の量の変化は少なく、特徴的な変化は次のようである。すなわち、国内鉱による地金生産量は一貫して減少を続け、海外鉱による地金生産が増加、また、輸入地金も大きなウェイトを占めるようになってきていることである。銅について見ると、1960年頃までは国内鉱による地金生産量は銅地金供給量の30%以上であったということであるが、1997年度にはわずかに0.04%にまで低下している。こ

れに対して輸入鉱出の地金は71.7%を占めるまでになってきている。また、地金輸入量は約34万tonで、地金供給に占める割合は20.8%になっている。このように、円高や人件費の高騰など種々の要因から国内鉱による出鉱・精錬は極度に困難になり、海外鉱の精錬ないしは海外地金の輸入に供給の重点が移ってきたことから鉱山の閉鎖が相次ぎ、現在まで維持されてきた鉱業インフラや技術の衰退が憂慮されるようになってきた。

3.4 廃棄物処理と金属リサイクルシステム

各種の金属は加工されて様々な用途に使用され、やがて廃棄される。製品の製造過程で生じるいわゆるスクラップや廃棄物から簡単な分別によって回収される金属の他にも、廃棄物の処理過程において残渣の中に含まれてくる金属がある。たとえば、廃自動車や廃家電製品を破砕した際のシュレッダダストには金属が多く含まれる。また、ごみや下水として廃棄されたものの中にある金属は焼却や溶融の過程で生成する飛灰の中に濃縮されてくる。例としてごみ焼却工場での金属の流れを見ると、高温においても蒸気圧が低いクロムのような金属は主灰に移行するが、カドミウムや銅、鉛、亜鉛など蒸気圧が高い金属は飛灰に移行する割合が高い。現在、飛灰に含まれる有害金属の溶出を防止するためにセメント固化や

図10 主要非鉄金属(銅, 鉛, 亜鉛)の供給源の推移

薬剤添加の方法がとられることが多いが、これらの方法は溶出を遅らせる効果程度しか期待できない。根本的な解決策としては、飛灰に含まれるダイオキシン類等の分解も視野に入れて、飛灰の溶融や酸抽出などが考えられている。溶融処理を行う場合には、再び金属類が飛灰(溶融飛灰)に濃縮されるので解決にならないとの見方もあるが、溶融飛灰が金属資源であるとの観点に立って、このものから金属を回収すれば、サイクルが成り立つ。

表6に示したものはごみ焼却炉からの飛灰、溶融スラグ、溶融飛灰の分析結果の例である。銅、鉛、亜鉛の濃度でみると、飛灰が0.039%、0.1%、0.29%であり、溶融スラグは0.036%、0.005%、0.09%であり、溶融飛灰が0.58%、1.26%、1.65%である¹⁴⁾。一方、どれくらいの濃度があれば鉱物資源として扱うことができるかは、

表6 ごみ焼却飛灰、溶融スラグ、溶融飛灰の分析例¹⁴⁾

成分	単位	供試飛灰	スラグ	溶融飛灰
SiO ₂	%	27.78	31.56	0.51
Al ₂ O ₃	%	9.11	11.09	1.44
Fe ₂ O ₃	%	1.30	1.81	1.56
Ca	%	19.56	24.19	1.02
Mg	%	2.15	2.76	0.23
Na	%	0.96	1.59	18.1
K	%	0.62	0.54	22.8
Mn	%	0.036	0.05	0.01
Cu	%	0.039	0.036	0.58
Ni	%	0.007	0.004	0.008
Zn	%	0.29	0.09	1.65
Cr	%	0.044	0.11	0.016
Pb	%	0.1	0.005	1.26
Cd	mg/kg	23.5	0.54	431
As	mg/kg	3.0	1.3	40
T-Hg	mg/kg	1.9	< 0.01	0.35
Cl	%	3.45	< 0.1	48.10
SO ₄	%	1.73	0.68	6.44
PO ₄	%	1.90	2.79	0.37
C	%	7.12	—	0.46
水分	%	0.97	5.34	0.46
水分	%	89.96	99.66	98.46
可燃分	%	10.04	0.34	1.54 (600℃)

注) 水分以外は全て乾物基準

目的成分以外の成分の質と濃度にも左右されると考えられるが、最低採掘品位と比較することが一応の目安となるであろう。たとえば銅については新しい溶媒抽出法を採用した鉱山では最低採掘品位は0.3%くらいまで下がっており、この品位を地殻存在度55 ppmで割ると55倍になるといわれている。このようにして最低品位と地殻存在度の関係を示したのが図11である¹⁵⁾。この図では()内に百分率が示されている。主要非鉄金属について見ると、銅が0.3%、鉛が2.0%、亜鉛が2.5%となっている。したがって、現状でも溶融飛灰のうちには最低採掘品位以上のものが存在する。また、たとえ濃度が下まわるものがあったとしても、溶融プロセスの中で飛灰を循環させ濃縮度をあげれば最低採掘品位以上にすることは可能であろう。

図12は溶融飛灰中の銅、鉛、亜鉛を回収する試みのプロセスを示している。このプロセスの実験結果の例が表7である。鉛が鉛産物の中に、また銅と亜鉛が亜鉛産物の中に高濃度で回収されており、金属資源として十分に回収可能であることが示されている。このようなプロセスを社会の中に構築していくことによって金属資源の保護と環境保全が同時に果たされていくものと考えられる。

鉱山におけるインフラや処理技術の有効活用の観点からも廃棄物からの金属資源の回収は重要な課題であり、

図 11 鉱石が含んでいなければならない金属含有量の下限値¹⁵⁾

通産省のプロジェクトでも RMP (リサイクルマインパーク) 構想が唱えられている。この構想のイメージを図 13 に示した。

図 12 溶融飛灰からの金属回収プロセスの例

表 7 金属回収プロセスの実験結果例

	濃度 (品位) % Hg は ppm							
	Pb	Zn	Cu	Fe	Si	Al	Cd	As
溶融飛灰	2.70	6.72	0.74	1.18	0.07	0.04	0.106	0.017
鉛産物	35.60	0.72	0.07	7.17	0.70	0.11	0.008	0.098
亜鉛産物	0.97	38.35	4.23	3.83	0.06	0.11	0.609	0.057
排水 mg/L	0.11	0.07	0.00	0.06	2.76	3.36	0.015	0.001

	溶融飛灰を 100 とした分配率 %							
	Pb	Zn	Cu	Fe	Si	Al	Cd	As
溶融飛灰	100	100	100	100	100	100	100	100
鉛産物	93.7	0.8	0.7	43.3	72.6	21.2	0.5	41.1
亜鉛産物	6.3	99.2	99.3	56.7	15.9	51.5	99.5	58.8
排水 mg/L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(環境新聞 96/ 10/ 23 より作成)

図 13 リサイクルマインパーク (RMP) 構想のイメージ

廃棄物処理操作の主流は熱操作である。これは、とくに一般廃棄物（都市ごみ）の衛生的処理を念頭においた場合には妥当な選択であったと考えられる。腐敗し易い厨芥が多く排出され、一方で高温多湿のわが国風土においては衛生的処理が何にもまして重要であったことによる。この点は、ごみ質も違い、低温で乾燥した風土の欧州において、都市ごみがむしろ燃料としての扱いを受けてきたのとは対照的である。

これからの廃棄物処理に求められるのは①環境排出物の一層の抑制、②資源・エネルギーの回収と保全、③脱埋立て処分、④施設のコンパクト化、であると考えられる。これらの要求はともすればお互いに矛盾し合う要素を含んでいるために、技術の開発とともに循環型社会を形成するための社会システムの整備も重要となつてこよう。

本稿は平成7年度特定研究「21世紀の環境研究・政策の展開に関する研究」（研究代表者＝宗宮 功教授）において筆者がまとめた成果をもとに、データを刷新し、改めて加筆したものである。

参 考 文 献

- 1) エネルギー教育研究会編著：講座現代エネルギー・環境論, p. 13, 電力新報社 (1997)
- 2) 矢野恒太記念会編：'98/99 世界国勢図会 第9版, 国勢社 (1998)
- 3) 平田 賢：省エネルギーの本質, エネルギー・資源, Vol. 16, No. 1, pp. 16-19 (1995)
- 4) 通商産業省編：エネルギー '97, p. 15 電力新報社 (1997)
- 5) 環境庁編：平成6年度環境白書, 大蔵省印刷局, (1994)
- 6) 柏木孝夫：産業公害, Vol. 29, pp. 708-716 (1993)
- 7) 1999・2000 資源エネルギー年鑑, p. 119-129, 通産資料調査会
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：廃棄物発電導入マニュアル (印刷中)
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：廃棄物発電導入基本マニュアル (1996)
- 10) 平岡正勝, 武田信生, 太田達雄, 橋詰正三：ごみ焼却発電の実現性に関する一考察, 環境技術, Vol. 10, No. 5, pp. 374-385 (1981)
- 11) 平岡正勝：新体系土木工学 91 廃棄物処理, 技報堂出版, p. 8-9 (1979)
- 12) 資源リサイクル研究会：リサイクル新時代, 中央法規 (1991)
- 13) クリーンジャパンセンター：リサイクルジャパン, p. 5 (1999)。
- 14) 平岡正勝, 酒井伸一：ごみ焼却飛灰の性状と処理技術の展望, 廃棄物学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 3-17 (1994)
- 15) 西山 孝：資源経済学のすすめ, 中公新書 (1993)

Energy, Resources and Solid Waste

Nobuo Takeda

Professor, Kyoto University
(Yoshida-honnmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501 Japan)

Abstract

Solid waste management should be considered in close relation to the conservation of both energy and resources. Solid waste has to be built into the cycle of mining, production, consumption and waste discharge. In this paper, the energy and resources situation in Japan is firstly outlined, and after that the importance of the recovery of energy and metal resources within the solid waste thermal treatment system is discussed.

Key words: solid waste, energy, resources, recovery