

廃棄物学会研究委員会焼却部会

報 告 書

(No. 1)

1996年7月

部会委員名簿

網本 博 孝	(ユニチカ(株))
河端 博 昭	(株)神戸製鋼所)
木村 哲 雄	(株)クボタ)
高市 克 己	(株)タクマ)
高木 泰	(応用地質(株))
◎ 武田 信 生	(京都大学)
○ 手島 肇	(株)タクマ)
中村 一 夫	(京都市)
三野 祐 男	(日立造船(株))
福永 勳	(大阪市)
守岡 修 一	(川崎重工業(株))
安田 憲 二	(神奈川県)
山内 淳 行	(中日本建設コンサルタント(株))

◎ 代表、○ 幹事

目 次

1.はじめに	1
2.ごみ焼却が公衆衛生に果たしてきた役割	2
2.1.ごみ処理・廃棄物処理の歴史と公衆衛生	2
2.1.1 廃品回収からごみ処理の時代へ	2
2.1.2 ごみ処理が焼却の時代へ	4
2.2 埋立処分の問題点と焼却処理の長所	4
2.2.1 埋立処分の問題点	4
2.2.2 焼却処理の長所	6
3.ごみ焼却処理による減量化の効果	8
3.1 問題意識と視点	8
3.2 ごみ発生量・処理量の推移	8
3.2.1 ごみ収集実績	8
3.2.2 ごみ処理実績	10
3.3 収集量、焼却処理量、残渣量、減容量	11
4.ごみ焼却における余熱利用	14
4.1 余熱利用の形態	14
4.2 ごみの潜在的エネルギー	14
4.3 焚却施設におけるエネルギー回収	16
5.大気規制の変遷とそれに対応するために開発されてきた技術	18
5.1 廃棄物処理と大気汚染に関する法令規制の歴史	18
5.2 大気汚染規制の経緯と現状	20
5.2.1 ばい煙規制法	20
5.2.2 大気汚染防止法の変遷	20
5.2.3 大気汚染防止法による現行の排ガス規制	23
5.2.4 ダイオキシンガイドライン	24
5.3 開発された排ガス処理技術	24
5.3.1 大気規制と対応処理技術	24
5.3.2 現在の排ガス処理技術	25
6.容器包装リサイクル法の導入による焼却の物質収支、熱収支の変化予想	27
6.1 計算の条件	27
6.1.1 現状および施行後2ケースのごみ質・ごみ量の設定	27
6.1.2 モデルごみ焼却プラントの要目	28
6.2 物質収支計算結果	29
6.3 熱収支計算結果	29
6.4 ランニングコストの試算	29
6.4.1 試算条件	30

6.4.2 ランニングコスト計算結果	31
6.5 まとめ	32
7. ストーカ炉・流動床炉の今後の課題	41
7.1 熱回収の高効率化	41
7.1.1 ごみ焼却プラントにおける熱の流れ	41
7.1.2 ポイラでの熱回収率の向上	42
7.1.3 プロセス消費熱の低減	42
7.1.4 発電効率の向上	42
7.1.5 低レベル熱の回収と有効利用	47
7.2 燃焼技術の改善による有害物質の発生抑制	47
8. ごみ焼却における新技術のありよう	49
8.1 環境負荷とリサイクルの視点	49
8.1.1 環境負荷低減	49
8.1.2 リサイクル	50
8.2 ごみ焼却に求められる取り組み	50
8.2.1 環境負荷低減の焼却技術	50
8.2.2 リサイクル推進の焼却技術	52
8.3 新しい取り組みの動向	52
9. 飛灰、主灰に対する新処理技術	54
9.1 飛灰、焼却灰の発生量と性状	54
9.1.1 発生量	54
9.1.2 主な構成元素	54
9.1.3 重金属ほかの溶出挙動	54
9.2 中間処理－4種の指定方法	54
9.2.1 溶融固化法	54
9.2.2 セメント固化法	57
9.2.3 薬剤混練法	57
9.2.4 酸抽出法	58
9.3 中間処理－4種の指定方法の比較	58
9.3.1 溶出規制	58
9.3.2 資源リサイクル性	59
9.3.3 減量率	60
9.3.4 施設保守性と運転上の課題、ランニングコスト	60
9.3.5 実績	60
10. 都市における資源・エネルギーの循環構造と焼却	62
10.1 資源・エネルギー消費の現況	62
10.1.1 わが国エネルギー消費の特徴	62
10.1.2 わが国資源消費の特徴	64
10.2 資源・エネルギーの循環構造の提案	65
10.2.1 エネルギーリサイクルの提案	65
10.2.2 金属リサイクルシステムの提案	65
11. あとがき	68

1. はじめに

平成2年（1990年）に発足した廃棄物学会では、研究委員会を設けて廃棄物に関する諸問題の研究の発展を促している。委員会の中にはテーマごとにいくつかの部会が設けられ関心の深い人々がグループを組んで研究を進めている。廃棄物処理技術として歴史的に最も重要な役割を果たしてきた「焼却」についての部会が結成されたのは他の部会の発足から少し遅れて平成7年1月であった。焼却にまつわる種々の課題について研究を進めるのがこの部会の役割である。

ところで、「焼却」については世界的にも賛否両論が激しく闘わされている分野である。衛生的な処理が可能であり大きな減量効果が期待できること、熱利用が可能であることなどが積極的に評価される点であるが、一方において排ガスとしてばいじん、塩化水素、窒素酸化物、ダイオキシン類等の汚染物質が排出され、あるいは排水や残渣埋立地における浸出水が問題とされる。このように、他のプロセス同様、プラス面とマイナス面をもった焼却プロセスについて、冷静な議論と判断が可能なように情報を整理しておくことも重要な役割の一つであると考えられる。そこで、部会がまず最初に手掛けるべきこととして、焼却が歴史的に果たしてきた役割を評価するとともに、焼却とそれを取り巻く技術の歴史と現状、排ガス処理システムの歴史的変遷、今後開発が期待される技術等についてまとめることにした。本報告書は部会委員が例会において議論を重ね、最終的に分担執筆してまとめたものである。この報告は今後のこの部会の研究のスタート点とするべくまとめたものであると同時に、各方面からの批判や意見を得て、より充実した研究を行なう基とするべきものであると考えている。

2. ごみ焼却が公衆衛生に果たしてきた役割

わが国の廃棄物事情は、廃棄物量の増加、多様化、処分場確保の困難性、資源確保の関連から益々社会的に大きな問題となっている。一般廃棄物、産業廃棄物のいずれについても廃棄物問題を解決していくには、結局のところ再利用を伴う根本的な減量化対策が必要であるということに結論づけられるようである。すなわち、資源一生产一流通一消費一廃棄を一体的に捉えた、一貫した産業構造にすることといえる。そのため、国をはじめとした行政と企業の責任は大きい。

一方、再利用、埋立、海洋投入などの最終処分のための中間処理法には、破碎、圧縮、分別、焼却、堆肥化、固化などがある。その中で、焼却の役割・目的について、「毎日排出するごみを焼却によって減量化し、衛生的に安定化、無害化して埋立処分するための施設であり、私達が健康で文化的な市民生活を営む上で欠かすことの出来ない都市施設である。¹⁾」といわれており、衛生的で安定的な最も効果的な減量化施設である。

しかし、他方では焼却処理のもたらす環境・公衆衛生への悪影響として、

- a 特定の毒性物質、重金属、ダイオキシン、多環芳香族化合物、ガス類、放射能、
- b 環境上の問題—焼却炉消火水、焼却灰溶出水中の金属、有機物、その毒性、
- c 大気放出物と捕集飛灰—土壤や生物への影響、

が、指摘されている²⁾。

以上の背景の中で、本章では焼却処理法が今日までに果たしてきた公衆衛生上の役割を見直し、整理する。

2.1 ごみ処理・廃棄物処理の歴史と公衆衛生

2.1.1 廃品回収からごみ処理の時代へ

わが国の古代の廃棄物処分場として最も有名なのが貝塚であり、世界的にもローマの遺跡が有名である。少し時代を下って江戸時代になれば、1655年には幕府から江戸の街では永代橋脇がごみ投棄場所として指定されるなど、都市部にあっては時の政府の管理下におかれようになる。この様子は、杉本苑子の小説「大江戸ごみ戦争」でごみ収集を個々人足から大手商人に一括させる騒動を描いており、早くも利権の対象となるなど、廃棄物処理が近代化されていくようになる。しかし、この頃は公衆衛生上の立場からごみ処理を行うというよりも、基本的には生産性が低く、物不足の中で廃棄物の発生量は現在と比較にならないほど少なく、その上排出された廃棄物のかなりの部分が自然にリサイクルされていた。

生産性が上昇して、組織的な焼却処理、埋立などのごみ処理事業が開始されたのは世界的にみて発達した近代国家といえども、アメリカ、イギリス、フランスなどで約110年前である。日本では、約90年余り前の1900年（明治33年）に汚物掃除法が成立したのが最初である。当初は、有価物の回収が処理方法の中心になっており、清掃事業はこのときから市町村の義務となって今日まで続いている。

したがって、自治体の廃棄物行政の始まりは、同様に汚物処理法の成立の頃であるが、その中心はごみ、し尿収集であり、堆肥、燃料、金属類などをリサイクル可能な形でかなりの部分を回収し、残りを処分していた。しかし、ごみ処理を行政的に組織的に大きく進歩させた力は、何といっても公衆衛生上の理由からである。

そこで、公衆衛生の最も大きい分野である水系経口感染症患者数、上下水道普及率およびごみ焼却率の年次推移と簡単なごみ焼却の歴史年表を整理すれば、図2-1のとおりとなる^{3,4)}。

江戸時代にはごみとして捨てられる物資の再利用、あるいは物資輸送に大きな役割を果たしていた運河としての河川の通行確保のためにごみの一括処理が開始された。しかし、明治時代以降はごみ処理あるいはごみ焼却の動機

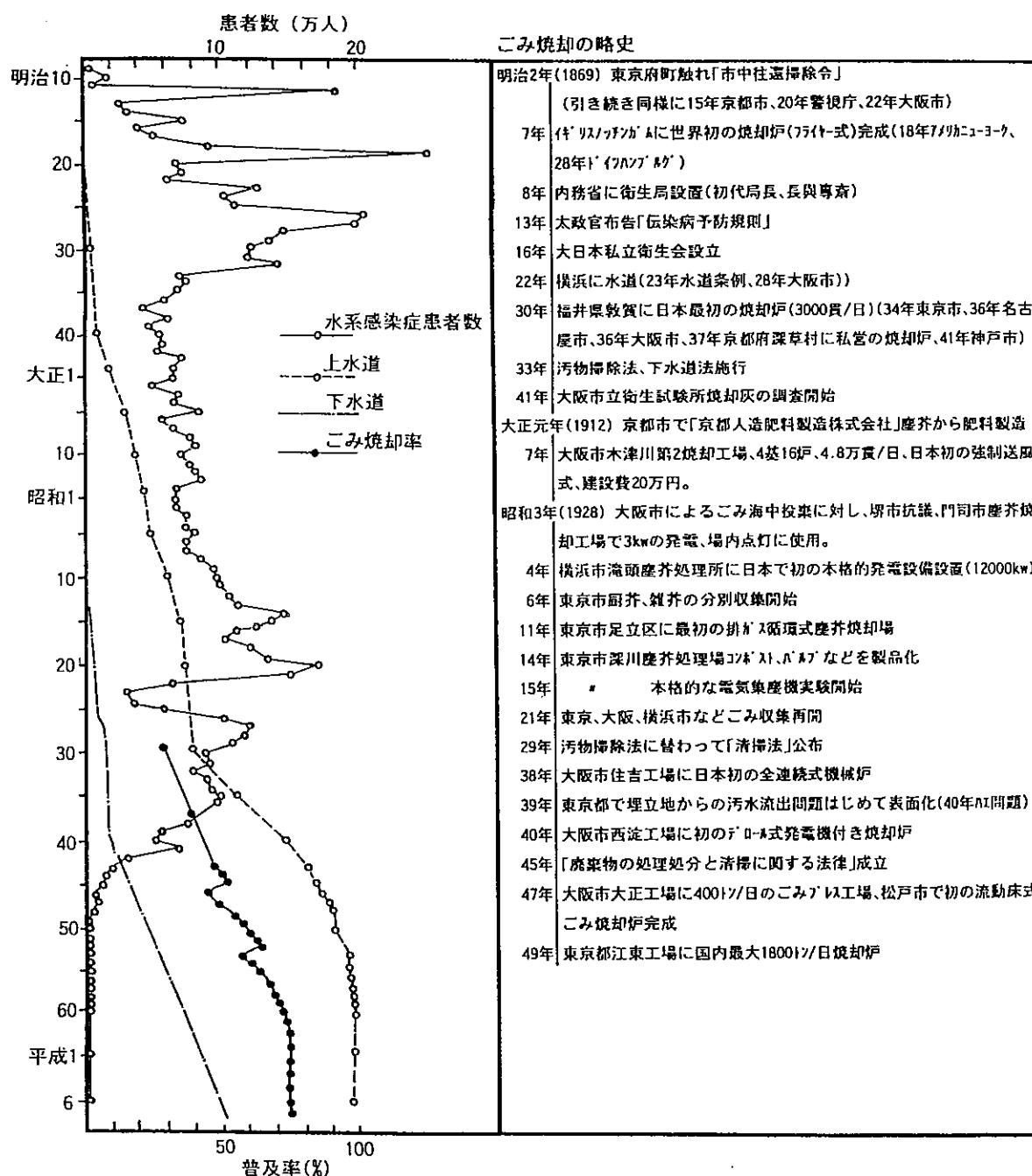


図 2-1 水系経口感染症患者数、上下水道普及率およびごみ焼却率の年次推移とごみ焼却の歴史

は、ひとえに衛生問題と関係がある。水道の敷設、それにつづく下水道の完備は、伝染病、なかでもコレラの蔓延が契機となっている。とくに、明治 12 年 (1879 年) および 19 年 (1886 年) にはそれぞれ 10 万人を超える死者が発生し、日露戦争の戦死者の数を超えるという大事件であった。このために、政府内務省は、明治 11 年 (1878 年)、東京府および警視庁に対し予防措置、その中で「塵芥掃除方法」を講ずるように命じた。さらに、明治 12 年 (1879 年) コレラ病仮規則の中で、コレラ流行時には病毒の媒介となりうる物件、場所に対し、掃除、清潔を心がけるように求めている。さらに、明治 15 年 (1882 年) には、伝染病予防心得書の中で、「芥溜は雨水の浸入を防ぐものにして、塵芥を堆積しないように」指示し、明治 23 年 (1890 年) には「消毒芥溜で、コレラ発生時には塵芥はなるべく焼却するように」述べて初めて焼却処理を衛生上の処理法として位置づけている。あわせて、この頃上下水道の整備も始まっている。明治 16 年 (1885 年) に設立された大日本私立衛生会がごみについての知識の普及

に一定の役割を果たしていくことになるが、その副会頭であり、内務省初代衛生局長であった長與専斎は、コレラ予防のために汚水疎通方の事、屎尿排除方の事、塵芥掃除方の事が大切であると述べている。コレラなどの水系経口感染症の克服には上水道、下水道の普及が大きい役割を果たしたことはいうまでもない。

そして、汚物掃除法が明治 33 年（1900 年）に成立し、ごみ処理が独立した体系となって、清掃事業はこの時以来市町村業務となり、「市は掃除義務者の蒐集したる汚物を一定の場所に運搬し、塵芥はなるべく焼却すべし」とされて、日本も焼却の時代に入った。

2.1.2 ごみ処理が焼却の時代へ

こうして、日本もごみ処理、廃棄物処理は焼却の時代に入ったが、そのごみ焼却施設が第一級の迷惑施設になったことは今も昔も変わらず、裁判ざたになることも珍しくなかった。今風にいう「技術上の基準」である警視庁令第 18 号「清潔保持に関する取締規則」は次のようになっている。

塵芥焼却場の位置及構造は、次の制限に従うべし。
① 市街地外又は市外地内村落に接近し人家稀疎の地にして人家及道路を距たること 30 間以上飲料井戸を距たること 5 間以上、
② 周囲に高さ 9 尺以上の墻垣を設くること、
③ 焚却竈は高さ 50 尺以上の煙突を設け消烟の装置をなすこと、さらに昭和 6 年には④ 適当なる防臭装置をなすこと、がつけ加えられた。

しかし、実際は露天焼却が幅を利かせ、東京都では昭和 37 年まで続いた。

最初の焼却炉の建設は、図 2-1 に見るように、「汚物掃除法」より古く、当時の活気のある貿易港であった敦賀に出来たもので、一日 3000 貫（11.5 ton）で、70 貫（260 kg）の灰を得て、肥料とした。自然通風式で、煙突の高さは、6 尺（1.8 m）であった。

その後、大正 7 年（1918 年）には日本ではじめての強制送風式の焼却炉（大阪市）、昭和 4 年（1929 年）には日本ではじめての発電設備を持った焼却炉（横浜市）、昭和 15 年（1940 年）には電気集塵機（東京市）、昭和 38 年全連続式機械炉（大阪市）などの技術的革新段階を経ながら今日に至っている。そこで、焼却処理とあわせて戦後のごみ処理における各種データを厚生白書より整理をすれば表 2-1 のとおりとなる。

まず昭和 33 年頃には人口約 9,000 万人に対して計画処理人口は不明であるが、収集されているごみは 1 日 1 万 4,700 トンであった。その後昭和 43 年には人口 1 億 100 万人に対して、計画収集人口は 7,600 万人、ごみ 5 万 4,300 トンで人口比約 76% であった。昭和 46 年頃になるとごみ総排出量は飛躍的に増大し、計画収集人口比は 94%，昭和 49 年頃には日本はほぼ 100% の計画収集人口比となった。その中で、焼却比率は、昭和 33 年頃 31%，昭和 43 年 48%，と順調に進歩し、ごみ計画処理量が急激に増大したときは、比率としては若干減少し、石油ショックの起きた昭和 49 年のようにごみ量が減少したときは焼却比率としては飛躍的に増大するなどの変動を持ちながら進歩し、平成 2 年には 74% に達して現状に至っている。

当初、ごみ組成は厨芥類、水分が多く、機械式連続炉を安定して操業するには熱量不足であった。表 2-2⁵⁾に大阪市の事例を示すように、昭和 30 年頃には大阪市のごみは厨芥類が多く低位発熱量は 700 kcal/kg 程度であったが、発電式ごみ焼却炉の第一号機である西淀工場デ・ロール式焼却炉の設計段階では 800 kcal/kg を最低エネルギーとしていたので重油、廃油を補助燃料とすることすら検討されていた。経済状態の高度化によってごみの発熱量も上昇し、実際には補助燃料を用いられなかつたが、厨芥類、水分が多いごみを焼却処理することの衛生的な役割は大きかったといえよう。

こうして焼却によって減量化した後、最終的には残渣を埋立処分しなければならないが、焼却による減量化を図らなければ容量で 10 ~ 20 倍の埋立処分量とならざるを得ない。そこで、わが国全体の焼却処理による歴史的な減量効果は次章で論ずるが、埋立処理の問題点と焼却処理の長所を次に論ずる。

2.2 埋立処分の問題点と焼却処理の長所

2.2.1 埋立処分の問題点

まず、埋立処分の影響として、浸出水の環境影響、地下水汚染などが考えられ、浸出液の制御・監視と実行、用地の確保、ごみ投棄場所としてガスの影響回避が必要となってくる。問題点を整理すれば、以下のとおりとなろう。

表 2-1 ごみ処理推移一覧

項目	年度	S 33	S 43	S 44	S 45	S 46	S 47	S 48	S 49	S 50
国内人口(百万人)		89.35	101.41	102.65	104.67	105.01	107.33	108.71	110.00	112.38
計画処理区域内人口(百万人)			76.1	80.6	84.7	99.1	101.0	106.6	110.0	111.6
計画収集日量(100トン/日)		147	543	623	699	671	755	790	727	763
ごみ総排出量(100トン/日)			690	807	858	1,061	1,167	1,223	1,099	1,152
焼却(100トン/日) (%)		46.7 (31.4)	230 (48.3)	358 (51.0)	426 (55.3)	377 (45.3)	426 (46.5)	452 (47.5)	460 (54.6)	504 (57.8)
埋立(100トン/日) (%)		83.8 (57.1)	225 (36.2)	247 (35.3)	257 (33.5)	275 (33.1)	306 (33.3)	320 (33.7)	254 (30.2)	245 (28.1)
高速堆肥化(100トン/日) 堆肥化・飼料(%)		12.4 (8.4)	8.8 (1.5)	7.8 (1.1)	5.8 (0.7)	7.4 (0.8)	4.6 (0.5)	2.7 (0.3)	2.1 (0.2)	1.7 (0.2)
その他(100トン/日) (%)		4.6 (1.5)	9.6 (1.7)	10.9 (1.6)	10.8 (1.3)	13.6 (1.6)	19.5 (2.1)	16.3 (1.7)	10.6 (1.3)	12.8 (1.4)
計(100トン/日) (%)**		147 (100)	543 (87.5)	623 (88.9)	699 (90.8)	671 (80.6)	755 (82.3)	790 (83.2)	727 (86.3)	763 (87.5)
一人当たりのごみ総排出量*			907	1,001	1,013	1,071	1,155	1,147	999	1,033
その内日常生活によるもの*			815	870	909	841	908	891	765	781

項目	年度	S 51	S 52	S 53	S 54	S 55	S 56	S 57	S 58	S 59
国内人口(百万人)					116.13					
計画処理区域内人口(百万人)		112.6	113.9	115.1	116.2	116.7	117.7	118.6	119.7	120.4
計画収集日量(100トン/日)		777	824	858	890	877	908	932	925	947
ごみ総排出量(100トン/日)		1,113	1,138	1,183	1,219	1,204	1,168	1,219	1,169	1,179
焼却(100トン/日) (%)		529 (60.6)	571 (63.3)	598 (64.2)	679 (59.0)	687 (60.4)	711 (64.5)	753 (65.3)	750 (67.6)	778 (69.1)
埋立(100トン/日) (%)		235 (26.9)	237 (26.3)	243 (26.1)	445 (38.7)	421 (37.1)	357 (32.3)	373 (32.3)	328 (29.6)	315 (28.0)
高速堆肥化(100トン/日) 堆肥化・飼料(%)		2.1 (0.9)	2.3 (0.9)	2.0 (0.2)	2.8 (0.2)	2.8 (0.2)	1.4 (0.1)	1.7 (0.1)	2.1 (0.2)	2.1 (0.2)
その他(100トン/日) (%)		10.6 (1.1)	13.1 (1.4)	15.8 (1.7)	24.8 (2.1)	25.6 (2.3)	33.2 (3.0)	25.7 (2.2)	29.0 (2.6)	30.1 (2.7)
計(100トン/日) (%)**		777 (88.9)	824 (91.3)	858 (92.2)	1,152 (100)	1,137 (100)	1,102 (100)	1,153 (100)	1,110 (100)	1,126 (100)
一人当たりのごみ総排出量*		988	999	1,028	1,049	1,032	993	1,028	980	981
その内日常生活によるもの*		776	793	809	824	809	828	842	826	833

項目	年度	S 60	S 61	S 62	S 63	H 1	H 2	H 3	H 4	H 5
国内人口(百万人)		121.27	122.00	122.19	122.65	123.14	123.54	124.15	124.59	
計画処理区域内人口(百万人)		120.8	121.8	122.0	122.5	123.0	123.4	124.1	124.6	
計画収集日量(100トン/日)		969	994	1,043	1,088	1,140	1,164	1,150	1,154	
ごみ総排出量(100トン/日)		1,190	1,226	1,270	1,326	1,369	1,382	1,387	1,375	
焼却(100トン/日) (%)		804 (70.6)	845 (71.9)	891 (72.6)	936 (72.8)	984 (73.9)	1,005 (74.4)	988 (72.8)	1,000 (74.3)	
埋立(100トン/日) (%)		300 (26.4)	290 (24.6)	288 (24.6)	296 (23.0)	288 (21.6)	275 (20.4)	231 (17.0)	201 (14.9)	
高速堆肥化(100トン/日) 堆肥化・飼料(%)		1.8 (0.2)	1.6 (0.1)	1.4 (0.1)	1.7 (0.1)	1.7 (0.1)	2.5 (0.2)	1.6 (0.1)	1.6 (0.1)	
その他(100トン/日) (%)		32.2 (2.8)	39.7 (3.4)	47.3 (3.9)	52.9 (4.1)	57.8 (4.3)	67.7 (5.0)	137 (10.1)	143 (10.6)	
計(100トン/日) (%)**		1,138 (100)	1,177 (100)	1,228 (100)	1,286 (100)	1,331 (100)	1,350 (100)	1,358 (100)	1,346 (100)	
一人当たりのごみ総排出量*		986	1,007	1,040	1,082	1,114	1,120	1,118	1,104	
その内日常生活によるもの*		846	857	889	921	956	969	950	948	

* 単位: g/人・日、ごみ総排出量=計画収集日量+直接搬入量+自家処分量を示し、それを計画処理区域内人口で割ったものが一人当たりのごみ総排出量で、その内直接搬入分を除いたものが日常生活によるものを示す。

** 処分方法比%について、S 53以前は計画収集日量+自家処分量に対するそれぞれの処分量の割合%を示し、S 54以後は計画処分量=計画収集日量+直接搬入日量に対する各々処理方法の割合%を示す。

表2-2 大阪市におけるごみ組成の変化

区分	年度	'60	'65	'70	'75	'80	'85	区分	'88	'89	'90	'91	'92	'93
可燃物	厨芥類	8.2	14.5	11.8	12.1	13.2	11.5	台所ごみ	5.7	6.5	4.9	5.3	4.9	4.0
	紙類	30.1	39.6	28.6	36.8	37.1	28.8	紙類	33.4	35.7	41.0	43.0	40.5	38.2
	繊維類	4.7	2.9	3.9	5.1	4.0	5.3	繊維類	5.0	5.9	5.4	4.0	7.6	5.6
	木竹類	7.2	4.2	3.4	4.2	2.5	5.6	木竹類	8.4	5.2	6.1	7.7	5.5	9.3
	プラスチック類	1.9	3.3	12.2	11.0	15.2	14.3	プラスチック類	21.4	20.3	19.6	18.6	19.0	17.1
不燃物	その他	6.7	4.9	3.4	2.6	2.8	1.9	雑物	14.0	11.3	7.2	9.4	8.7	9.5
	小計	58.8	69.4	63.3	71.8	74.8	67.4	小計	87.9	84.9	84.2	88.0	86.2	83.7
	貝殻卵殻類	1.9	2.9	4.0	1.5	1.4	0.9	ガラス	3.6	7.1	5.5	4.7	4.0	5.7
	土砂・雜物	19.4	9.1	6.2	8.6	6.0	10.1	石陶器	2.7	2.7	4.1	2.6	2.5	4.6
	ガラス・陶器・石	17.6	15.5	19.3	12.0	12.3	14.8	鉄	4.6	3.7	4.4	3.4	5.3	4.5
燃焼物	金属	2.3	3.1	7.2	6.1	5.5	6.8	非鉄金属	1.2	1.6	1.8	1.3	2.0	1.5
	小計	41.2	30.6	36.7	28.2	25.2	32.6	小計	12.1	15.1	15.8	12.0	13.8	16.3
	水分	48.2	50.4	50.7	51.5	49.7	40.4	—	38.5	37.1	37.9	37.9	35.5	35.0
	灰分	22.7	18.7	20.8	15.6	15.5	21.5	—	14.8	17.0	16.1	14.8	17.1	18.0
	可燃分	29.1	30.9	28.5	32.9	34.8	38.1	—	46.7	46.0	46.0	47.3	47.4	47.0
低位発熱量								—	2,211	2,225	2,251	2,308	2,379	2,221

注：数字は、低位発熱量（生ごみの kcal/kg）以外は重量%で示す。'88年度から組成分析の区分が変更された。

最終処分としての埋立の問題については、美観上の悪さからくるイメージダウン、交通量の増大、水質汚濁などが主な問題点といえる。Nimby (not in my back yard) 症候群という言葉すら生まれている。その他、埋立に伴い発生する炭酸ガス、メタン、亜酸化窒素などのガスによる地球環境破壊への寄与の問題がある。あるいは、有害廃棄物の埋立後の長期的安全性の問題がある（たとえば、セメント固化されたものでも、長期的には溶出する可能性がある。）また、安定型処分場でも長期的に安心できるかなどの問題がある。とくに、焼却処理を施していない生ごみを埋め立てることによる浸出余水の汚濁は甚大のものであり、その水処理には非常な困難を伴うことは歴史的にも明らかであり⁶⁾、環境問題であるとともに、公衆衛生問題でもある。

埋立地確保の困難性から海面埋立は魅力ある方法となっているが、上に述べたすべての埋立処分に係わる問題点はもちろん海面埋立にも関係している。大阪市も大規模な海面埋立処分場を持っているが、それに劣らぬ規模の東京都では、海面埋立処分場の問題点として①浸出水の長期的処理、②異常降雨対策、③遮水性の確保、を挙げ、今後の課題として①処分場施設、②埋立計画、③埋立廃棄物の内容、④広域処分、⑤複合施設、とまとめている⁷⁾。その対策として、埋立地の集排水設備と遮水工、処分場のクローズド化を検討し、中深度閉鎖型（仮設覆蓋構造）・跡地利用先行型なども提案され、イメージダウンなどの付近住民の最終処分場に対するデメリットを住民サービス施設を併設することで補おうとしている⁸⁾。

水質の点からいえば、現行規制の水質基準項目だけではなく、発生源としての最終処分場はまさに無限な種類の化学物質が持ち込まれる可能性がある。産業廃棄物の新規判定基準も告示されており、それらの行政対応が迫られるが、それ以外の項目も含めて有害廃棄物問題が、国際条約の動きとも関連して大きい問題となりつつある。この点について、今後の課題として、中央公害対策審議会答申では①生態影響を考慮した基準、②クロスマディアからの暴露も考慮し、未規制物質も含めた総合的な管理が求められるといっている。

さらに、海面埋立独自の特徴として2・3層目埋立部分は山間埋立と同様な挙動をとるであろうが、海面下の部分は常時水中にあり、山間埋立と違った機構を持つと考えられ、海面埋立における溶出機構の解明が必要である。この点、ガス発生問題、埋立地跡地の再生利用を目指した早期安定化などの点でも同様である。処分場の確保について、山間埋立より大規模な場所を確保し易いとはいえるが、海面埋立は自然海浜を破壊するし、既存の処分場の沖合にいければ、さらに水深が深くなり、工事技術的に難しくなり、いっそう工費も高くなる危険性がある。この自然海浜の破壊によるデメリットも計り知れないものがあり、自浄作用の点からの論議もされている。この点について、出来上がった後の護岸を自然に近づけ、自然の景観と自浄作用をもつ人工海岸を目指す課題も重要となっている。

2.2.2 焼却処理の長所

前項に述べたように、埋立処分には多くの問題点が含まれるのに対して、焼却処理には多くのメリットがある。これを整理をすれば、以下のとおりであろう。

- ① 減量化、すなわち埋立地の延命である。焼却処理によっても廃棄物はゼロになるわけではないが、1/10～1/20と大きく減量化され、先にあげた埋立処分の問題点をも少しでも軽減できる。
- ② 腐敗などの現象に対しても微生物学的、衛生学的に回避することができる。本章はこれについて歴史的な事象も含めて検証してきたのであるが、焼却によって腐敗性の有機物は無機化されて安定化する。
- ③ 有害物質の無害化にも寄与する。すなわち最近飲料水の基準改正からはじまって環境基準、排水基準、廃棄物基準と基準項目に取り入れられた多数の基準項目のみならず、すでに述べた未規制物質も含めて焼却によって分解消滅できる可能性を持っている。
- ④ 発電などのエネルギー回収、コミュニティーへの寄与（温水プール、リクリエーションなど）によって資源の有効利用が図れる。これについても別章で詳しく検討される。

以上、ごみの減量化方法としての焼却処理方法の位置づけと役割を検討するにあたって、まず焼却処理の今日まで果たしてきた公衆衛生上の役割を歴史的に整理した。その結果、焼却処理から発生する各種の毒性物質の悪影響が心配されるが、国土の小さいわが国において現状のまま埋め立てられることによる問題点と比較すれば、上水道や下水道が果たしてきたと同様に明治時代以来公衆衛生上果たしてきた役割には大きいものがあるといえることがわかった。

参考文献

- 1) 全国都市清掃会議：ごみ焼却施設環境アセスメントマニュアル, p. 1 (1986)
- 2) Lisk, D. J.: Environmental Implications of Incineration of Municipal Solid Waste and Ash Disposal, Sci. Total Environ., 74, 39–66 (1988).
- 3) 溝入 茂：「ごみの百年史、処理技術の移り変わり」、学芸書林 (1987)
- 4) 田口勝久、田口 真：公衆衛生における下水道の重要性、下水道協会誌, 32 (387) 4–7 (1995)
- 5) 大阪市環境事業局パンフレット (1994)
- 6) 福永 黙：大阪市廃棄物埋立処分場浸出余水対策の今日までと今後の展望、生活衛生, 40 (2) 69–76 (1996)
- 7) 根本康雄：廃棄物学会誌, Vol. 4 (1) 23–28 (1993)
- 8) 花嶋正孝：廃棄物学会誌, Vol. 4 (1) 3–9 (1993)

3. ごみ焼却処理による減量化の効果

3.1 問題意識と視点

大量消費・大量廃棄型の生活様式が見直しを求められ、「地球環境にやさしい」ライフスタイルが強く提唱されるようになった。厚生省においても、「燃やして、埋める廃棄物処理から、廃棄物循環型の廃棄物処理へ」と廃棄物処理の理念の変更を打ち出している。第8次廃棄物処理施設整備5箇年計画においては、従来の焼却処理率に加えて、資源化率を政策達成指標に加えており、ごみ処理行政の主要な課題に資源化機能を明確に位置付け始めている。

このような時代のトレンドの中で、「ごみ焼却処理の推進は、都市の物質代謝の速度を加速することを通して、大量消費・大量廃棄型の生活様式の社会基盤を形成し、この生活様式が「蔓延」する条件を整備した」との、一定の価値判断を含む評価が存在する。

ごみ焼却処理技術は、都市ごみを迅速に処理し、都市の公衆衛生を向上・確保する切り札としての役割を与えられ、多くの技術革新を成し遂げて、これに応えてきた。今や、わが国のごみ焼却処理技術が非常に高いレベルに達している事は世界的に承認されるところである。そして、結果的に、消費の多様化の進行、金額表示での生活水準の著しい向上に、ごみ焼却処理は都市ごみの減量化を実現することを通して、一定の貢献をしたことは指摘出来よう。このように、ごみ焼却処理に関しては、毀譽褒貶が絶えない状態にある。

ごみ焼却処理が果たしてきた役割は、一面的な理解が可能なほど単純ではないことは明らかである。ここでは、ごみ焼却処理に最も期待された役割であるごみの減量化機能において、どのような役割を果たしてきたのかを見ていく。

3.2 ごみ発生量・処理量の推移

3.2.1 ごみ収集実績

「日本の廃棄物」および「一般廃棄物処理実態調査」に基づいて、わが国のごみ収集の実績を整理すると表3-1、図3-1のとおりである。

1971年までは、直接搬入ごみ量は統計上、計上されておらず、収集ごみ量だけが、計画収集量として整理されている。

計画収集量が家庭系ごみ発生量に対応するものとして、家庭系ごみ原単位を求めた。

家庭系ごみ原単位は、1960年代を通じて上昇傾向を示し、1970年に825g/人・日に達する。この間、計画収集率も増加して、1970年には80%を超える。

1970年代に入ると、計画収集率は急激に上昇して、1974年にはほぼ100%に達し、その後若干の変動を経て、1980年以降はほぼ安定する。

家庭系ごみ原単位は、1970年代の初頭には大きな変動を繰り返し、1975年に第1次オイルショックによると見られる原単位の底を示して以降、若干の停滞を示しながらも、安定的な増加基調を示し、1990年には、943g/人・日のピークを示している。

計画収集率が急上昇している1960年代後半から1970年代前半は高度成長後期に属している。この期間に、生活様式を含めた社会システムが急速に変化し、生活過程で発生する不要物の処理が、大都市圏域のみならず、町村を含めて、清掃行政に依存すること無しには円滑に進まない段階に入ったことが読み取れる。

計画収集率が急上昇する中で、原単位が上昇を継続した1960年代後半の状況は、注目に値するごみ排出量の増

表 3-1 ごみ収集の実績

年度	国内人口	計画人口	計画収集率	計画収集量	家庭系ごみ原単位	直接搬入量	自家処理量	ごみ排出総量
	千人	千人	%	t/日	g/人・日	t/日	t/日	
	1	2	[2]/[1]	3	[3]/[2]	4	5	6=[3]+[4]+[5]
1963	95,580	58,533	61.24%	29,871	510	—	6,029	—
1964	96,597	60,552	62.69%	33,253	549	—	6,792	—
1965	97,681	64,230	65.75%	37,098	578	—	7,424	—
1966	98,443	67,855	68.93%	40,930	603	—	7,410	—
1967	99,603	71,292	71.58%	47,486	666	—	6,339	—
1968	100,737	76,080	75.52%	54,271	713	—	7,734	—
1969	101,938	80,592	79.06%	62,319	773	—	7,796	—
1970	103,119	84,690	82.13%	69,899	825	—	7,099	—
1971	104,539	99,127	94.82%	67,128	677	—	16,200	106,095
1972	106,971	101,039	94.45%	75,544	748	24,926	16,213	116,683
1973	108,478	106,645	98.31%	79,047	741	27,186	16,005	122,238
1974	110,573	110,084	99.51%	77,664	706	23,912	9,742	111,318
1975	112,376	111,554	99.27%	76,273	684	28,089	10,894	115,206
1976	113,792	112,589	98.94%	77,663	690	23,910	9,742	111,315
1977	114,275	113,904	99.68%	82,403	723	23,490	7,882	113,775
1978	115,287	115,073	99.81%	85,814	746	25,225	7,296	118,335
1979	116,637	116,173	99.60%	89,000	766	26,158	6,746	121,904
1980	117,429	116,678	99.36%	87,711	752	26,017	6,643	120,371
1981	118,143	117,660	99.59%	90,809	772	19,400	6,609	116,818
1982	118,960	118,581	99.68%	93,230	786	22,026	6,601	121,857
1983	119,733	119,210	99.56%	92,529	776	18,447	5,888	116,864
1984	120,444	120,166	99.77%	94,740	788	17,850	5,326	117,916
1985	121,267	120,774	99.59%	96,940	803	16,842	5,259	119,041
1986	122,000	121,801	99.84%	99,419	816	18,274	4,905	122,599
1987	122,185	122,025	99.87%	104,273	855	18,489	4,194	126,956
1988	122,648	122,515	99.89%	108,830	888	19,784	3,967	132,582
1989	123,137	122,954	99.85%	113,977	927	19,327	3,608	136,912
1990	123,529	123,432	99.92%	116,424	943	18,563	3,209	138,196
1991	124,150	124,055	99.92%	114,954	927	20,891	2,861	138,708

厚生省：日本の廃棄物 '94 他

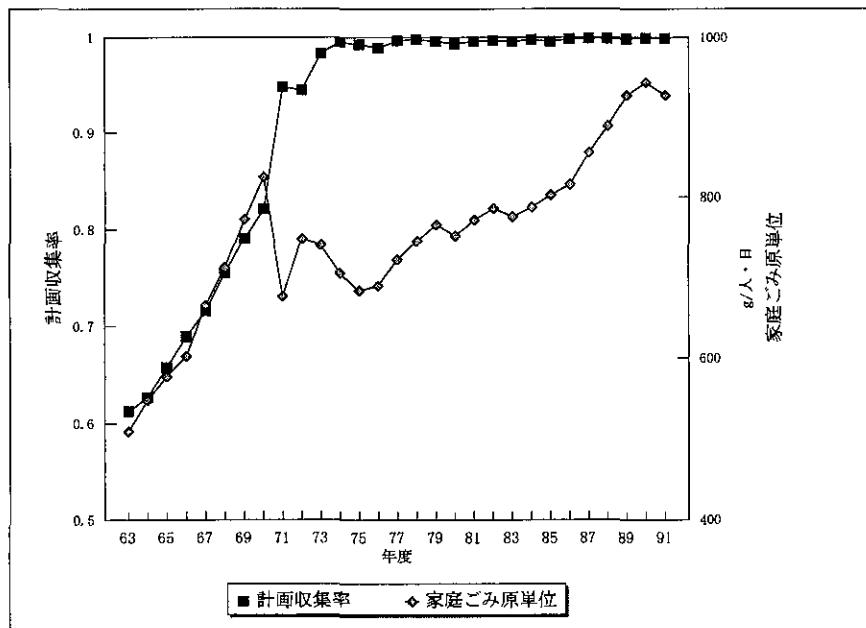


図 3-1 ごみ収集の実績

加であったといわなければならない。すなわち、計画収集区域の拡大は、従来の収集区域に比して自家処理等が容易な大都市圏市街地周辺部、あるいは地方都市への収集区域の拡大を意味し、本来ならば、収集区域の拡大とともに、原単位の停滞、あるいは減少が生じても不思議ではないにもかかわらず、実際には急激な増加を記録していたのである。

このような結果を生じるのは、

- ・新規に計画区域に編入された地域の原単位が従来の区域よりも高い地域であるという状況が数年に渡り継続した。
- ・従来の収集区域の原単位の増加率が著しく大きく、新規に編入された区域を含めた平均を取っても増加傾向を示した。

の2つの要因が考えられるが、前者は考えにくいので、後者が主要因と考えられる。

原単位と計画収集率が同時に急増する現象は、計画収集率が高まって、清掃行政の対象区域が拡大しただけではなく、対象品目も拡大していったと想定すると納得出来るものである。

すなわち、高度成長期前半に始まった生産過程の石炭から石油へのエネルギー転換が消費過程にまで波及する事により、薪炭燃料の補助材料として自家処理されていた木竹・紙ごみなどの可燃性廃棄物が排出されるようになり、生活の都市化に伴い、生ごみが処理手段を失い、ごみとして排出されるようになったことなどが考えられるのである。この期間を通して、清掃行政は、都市から発生する不要物のほとんど全部を処理する役割を受け持つ体制を確立したのである。

この期に匹敵する原単位の増加は、1986-90年のいわゆる「バブル経済期」に発生している。この期は、計画収集率がほぼ100%に達した時点での原単位の上昇であった。

この要因は、生活様式の変化に伴う家庭ごみの増加により説明されるのが一般的であるが、事業活動の活性化がこの期に大きく進行した事と事業系ごみに相当する直接搬入ごみが18,000t/日前後で安定している事を合せて考えると、計画収集量に混入していた事業系ごみの増加により説明される部分も存在するものと考えられる。

3.2.2 ごみ処理実績

ごみ処理の実績を整理すると、表3-2、図3-2のとおりである。

表3-2 ごみ処理の実績

年 度	中間処理量			計画処理量 t/日	埋立量 t/日	残渣発生率 %	焼却減量化率 %	焼却処理率 %
	焼却量 t/日	残渣量 t/日	その他 t/日					
	7	8	9					
1963	12,668		2,063	29,871	15,140	35.62%	42.41%	
1964	15,254		1,823	33,253	16,176	38.53%	45.87%	
1965	16,896		2,507	37,098	17,695	38.26%	45.54%	
1966	21,899		2,437	40,930	16,594	44.94%	53.50%	
1967	25,459		1,735	47,486	20,292	45.04%	53.61%	
1968	29,959		1,842	54,271	22,470	46.37%	55.20%	
1969	35,758		1,873	62,319	24,688	48.20%	57.38%	
1970	42,559		1,625	69,899	25,715	51.14%	60.89%	
1971	37,717		1,868	67,128	27,543	47.20%	56.19%	
1972	42,604		2,353	75,544	30,587	47.37%	56.40%	
1973	49,660		1,874	106,233	54,699	39.27%	46.75%	
1974	52,069	内挿補完		105,273	内挿補完	—	49.46%	
1975	54,477		1,540	104,312	48,295	43.87%	52.23%	
1976	57,644		1,310	101,573	42,619	47.67%	56.75%	
1977	62,014		1,663	105,893	42,216	49.19%	58.56%	
1978	65,394		2,003	111,039	43,642	49.47%	58.89%	
1979	67,887		2,762	115,158	44,509	49.52%	58.95%	
1980	68,739		10,988	2,850	113,728	42,139	15.99%	50.77%
1981	71,102		10,303	3,456	110,209	35,651	14.49%	54.19%
1982	75,264		11,988	2,731	115,256	37,261	15.93%	54.85%
1983	75,022		12,092	3,112	110,975	32,841	16.12%	56.79%
1984	77,841		12,363	3,214	112,590	31,535	15.88%	58.07%
1985	80,370		12,765	3,405	113,782	30,007	15.88%	59.33%
1986	84,548		13,803	4,137	117,693	29,008	16.33%	60.34%
1987	89,116		14,500	4,873	122,762	28,773	16.27%	60.98%
1988	93,552		15,168	5,450	128,615	29,613	16.21%	61.10%
1989	98,424		16,028	5,949	133,145	28,772	16.28%	62.09%
1990	100,482		16,415	7,015	135,016	27,519	16.34%	62.51%
1991	98,822			13,908	135,839	23,109	61.11%	72.75%
63-91 計	1,703,200			2,716,890			52.66%	
80-90 計	914,460	146,413				16.01%		

厚生省：日本の廃棄物'94他

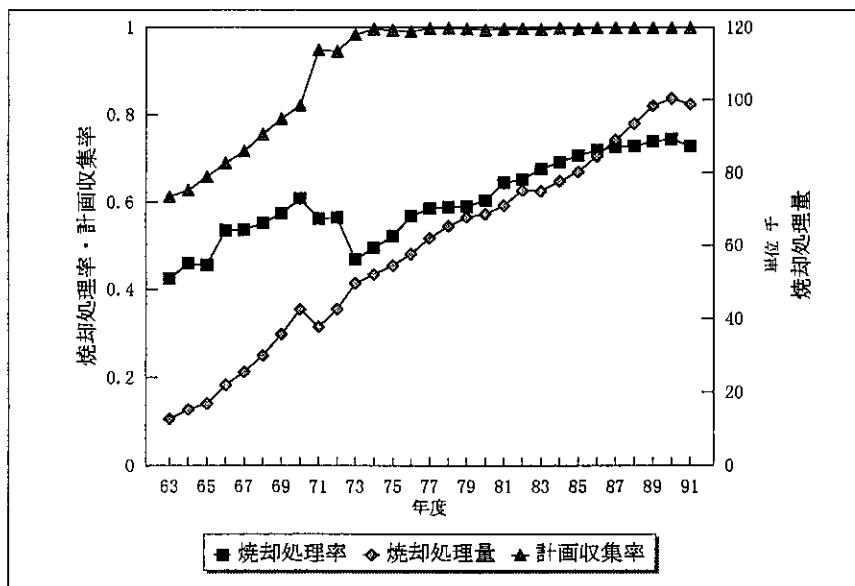


図 3-2 ごみ処理の実績

焼却処理量は一貫して上昇基調を示しており、1963年から90年にかけて、約8倍に増加している。

これに対し、直接埋立量は計画収集率の上昇段階である1973年以前は増加傾向を示し、計画収集率がほぼ100%に達した75年以降は逆に減少傾向を示している。

このプロセスは、次のように理解することが出来る。

計画収集率の上昇段階では、ごみの公共処理を求める圧力是非常に強く、焼却処理施設の整備の速度を超えて計画収集量が増加したので、直接埋立を併用して計画収集量の増加に対応せざるを得なかった。このため、焼却量、直接埋立量はどちらも増加した。増加のパターンは、両者で異なったので、焼却処理率は1970年に一旦ピークに達し、その後低下した。

計画収集率がほぼ100%に達しても、焼却処理施設整備は強力に推進されたので、直接埋立量は量としても低下し、計画処理量に占めるシェアも減少した。

計画収集率が100%に達した後は、徐々に、粗大ごみ処理などの「その他」の中間処理が増加傾向を示し、1991年には前年比倍増した。これに伴い、焼却処理量が前年比で減少を示した。

3.3 収集量、焼却処理量、残渣量、減容量

1965～90年の資料（表3-3）を基に、5年毎に整理したものを表3-4、図3-3に示す。

計画処理量は、1965～79年にかけて、著増しており、この間は、直接埋立と焼却残渣を合計した埋立総量も増加している。

これに対し、1980年代は、計画処理量は増加基調を継続するが、焼却処理量のシェアが増加し、焼却減量が大きくなるとともに、直接埋立量も減じたので、総埋立量は減少傾向となっている。

次に、25年間の総量の処理・処分状況を、図3-4に示す。

過去25年間の計画処理量の62%が焼却処理され、10%が残渣として埋立てられ、差し引き52%が減量された。焼却減量は25年間で4.5億トンに達した。

表3-3 全国のごみ処理実績の推移

年 度	中間処理量			計画処理量 t/日	埋立量 t/日		
	焼却量 t/日	残渣量 t/日	その他 t/日				
1965	16,896	2,703	2,507	37,098	17,695		
1966	21,899	3,504	2,437	40,930	16,594		
1967	25,459	4,073	1,735	47,486	20,292		
1968	29,959	4,793	1,842	54,271	22,470		
1969	35,758	5,721	1,873	62,319	24,688		
1970	42,559	6,809	1,625	69,899	25,715		
1971	37,717	6,035	1,868	67,128	27,543		
1972	42,604	6,817	2,353	75,544	30,587		
1973	49,660	7,946	1,874	106,233	54,699		
1974*	52,069	8,331	1,707	101,576	51,497		
1975	54,477	8,716	1,540	104,312	48,295		
1976	57,644	9,223	1,810	101,573	42,619		
1977	62,014	9,922	1,663	105,893	42,216		
1978	65,394	10,463	2,003	111,039	43,642		
1979	67,887	10,862	2,762	115,158	44,509		
1980**	68,739	10,988	2,850	113,728	42,139		
1981	71,102	10,303	3,456	110,209	35,651		
1982	75,264	11,988	2,731	115,256	37,261		
1983	75,022	12,092	3,112	110,975	32,841		
1984	77,841	12,363	3,214	112,590	31,535		
1985	80,370	12,765	3,405	113,782	30,007		
1986	84,548	13,803	4,137	117,693	29,008		
1987	89,116	14,500	4,873	122,762	28,773		
1988	93,552	15,168	5,450	128,615	29,613		
1989	98,424	16,028	5,949	133,145	28,772		
1990	100,482	16,415	7,015	135,016	27,519		

出典：日本の廃棄物

*：内挿補完

**：これ以後残渣量実績あり

表 3-4 焼却処理の実績と減容効果

年度	焼却量	残渣量	計画処理量	焼却率	その他処理	直接埋立量	焼却減量	減容量
	千t/5年	千t/5年	千t/5年	%	千t/5年	千t/5年	千t/5年	千m³/5年
	1	2	3	4=1/3	5	6	7=1-2	8=7/0.8
65-69	47,439	7,590	88,368	53.68%	3,794	37,135	39,850	59,299
70-74	81,982	13,117	153,439	53.43%	3,441	69,365	68,865	102,478
75-79	112,207	17,953	196,361	57.14%	3,386	80,768	94,254	140,259
80-84	134,308	21,073	205,407	65.39%	5,607	65,491	113,235	167,885
85-89	162,794	26,376	224,839	72.40%	8,692	58,353	136,417	208,492
計	538,730	86,109	868,413	62.04%	24,921	306,111	452,621	673,413

埋立面積削減量 [累計] (0.80 t/m³一生ごみ, 1.00 t/m³残渣)

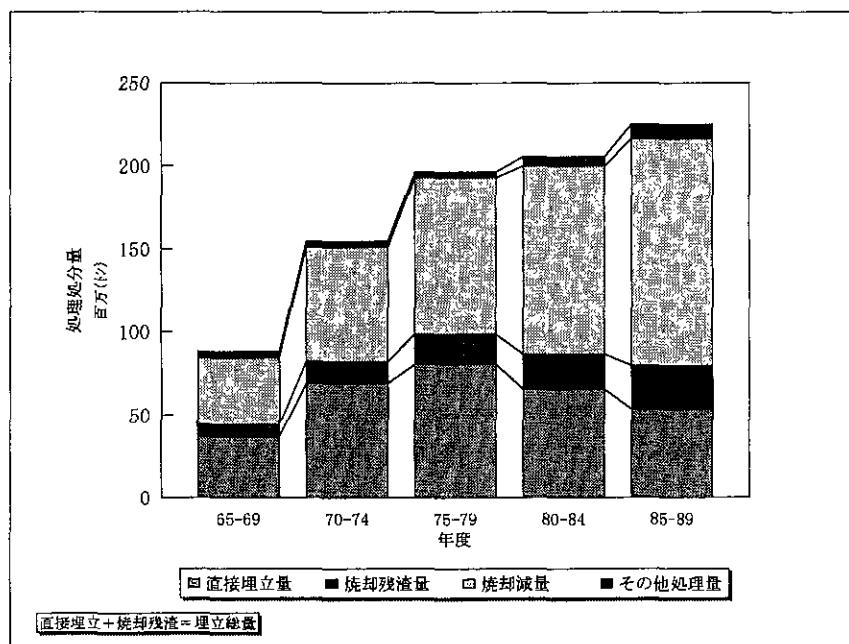


図 3-3 処理・処分の推移

この間の総埋立量は、3.9億トンであったので、焼却による廃棄物の減量化は、総埋立量の115%に達する。

焼却減量を容積換算して、埋立容量の減少への寄与を検討する。生ごみの埋立時の単位体積重量は、測定事例は少ないが、大阪市の総括的な埋立地搬入量と、埋立地容量との関係から推定された単位体積重量を参考に、0.8t/m³を採用した。焼却残渣は1.0t/m³とした。

平均埋立深さについては、近年の最終処分場の平均的な埋立深度は8m内外であることから、10mと設定して、面積を求めるものとした。

ごみ焼却による最終処分場容量の節減量は、約6.7億m³となり、総埋立量3.9億トンを焼却残渣に相当するものとして、容積換算した、3.9億m³に対して177%に相当する。ごみ焼却による最終処分場の節減量は上記のとおりであり、焼却処理が実施されていなければ、最終処分場の必要整備量は、従来の225%～277%に達していたことになる。

埋立地面積の節減量は、約67km²となる。

一方、近年の最終処分場の整備状況は表3-5に示すとおり、

65-89年の処理・処分状況(単位:千t)

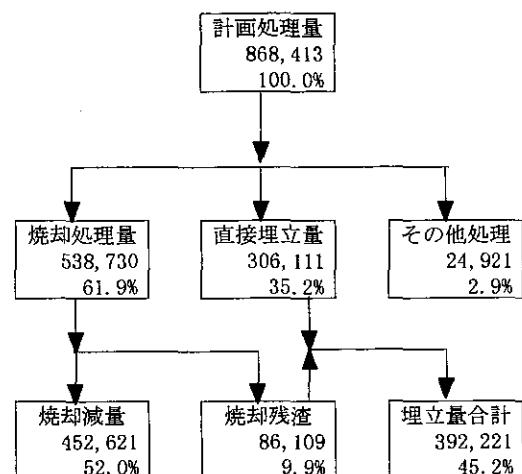


図 3-4 処理・処分状況

表3-5 ごみ埋立処分地の状況（全国）

年度	埋立処分地数					面積 (ha)	全体容量 (千m³)	残余容量 (千m³)	平均埋立深度 m
	山間	海面	水面	平地	計				
1986	1,629	36	39	707	2,411	5,569.8	429,895	197,048	7.7
1987	1,637	31	35	692	2,395	5,310.9	423,858	195,108	8.0
1988	1,628	35	34	676	2,373	4,944.1	414,278	170,887	8.4
1989	1,601	34	31	668	2,334	5,073.2	424,535	167,027	8.4
1990	1,617	33	33	653	2,336	4,872.3	415,622	156,695	8.5
1991	1,567	31	29	623	2,250	4,994.7	420,219	156,830	8.4

最終処分場計画全体面積：約 50 km²

最終処分場残余容量：約 1.6 億 m³

最終処分場計画全体容量：約 4.2 億 m³

平均埋立深度：約 8.5 m

である。

節減された規模を近年の最終処分場の整備状況と対比すると、現在供用中の最終処分場計画面積の 135% に相当する。

わが国の廃棄物処理は高度経済成長期を経る中で、埋立処分から焼却処理へと重点を移し、1975 年に焼却処理率が 50% を超えて以降安定的にこの割合は上昇した。1991 年に、焼却処理率は若干低下したが、これは、資源化・減容化のための粗大ごみ処理のウェイトが徐々に高まって来ていることによるもので、新しい傾向が生じているともみられる。

わが国のごみ処理は焼却処理を中心に進められて来た。この功罪については、様々な観点から、異なった判定が下されるであろうが、1965～89 年の間に、焼却処理が皆無であれば、2 倍以上の最終処分場が必要であったのであり、最終処分場の立地速度を考慮すると、焼却処理中心のごみ処理に代わる別の方式が存在したことには無理があるようである。しかしながら、これを理由に、今後も焼却処理中心でごみ処理を進めることがよいと短絡する事にはならない。本項での検討は、過去の事実の分析に過ぎないのであって、今後のシステムは新しい社会規範を踏まえて構想されるべきものであるからである。

1960 年代以降 80 年に至るプロセスで、ごみ処理行政は、消費生活から発生する不要物の処理を一手に引き受けた体制を確立していった。しかるに、95 年に成立した「容器包装リサイクル法」は、ある意味で、「ごみ処理行政が処理しない廃棄物の種類を定め始める第 1 歩」であるともいえる。

ごみ処理行政は、かつてない転換期を迎えており、焼却処理に関しても、そのあり方が再検討されることにより、より適切な役割を見いだしていくものと考える。

4. ごみ焼却における余熱利用

ごみの発生量は、前章でも述べたように増加傾向を示しており、1991年度末の計画処理量は図4-1に示すように約50,000千tであり、そのうち焼却処理量は約36,000千t(約73%)となっている。

このようなごみの増加に対して近年では、これまでの「燃やす」、「埋める」という後始末的な処理から、ごみの減量化およびリサイクルに努め、その後なお排出される可能性のあるものは焼却処理等を行うとともに積極的に熱エネルギーの活用を行う「廃棄物循環型処理」への転換が求められている。

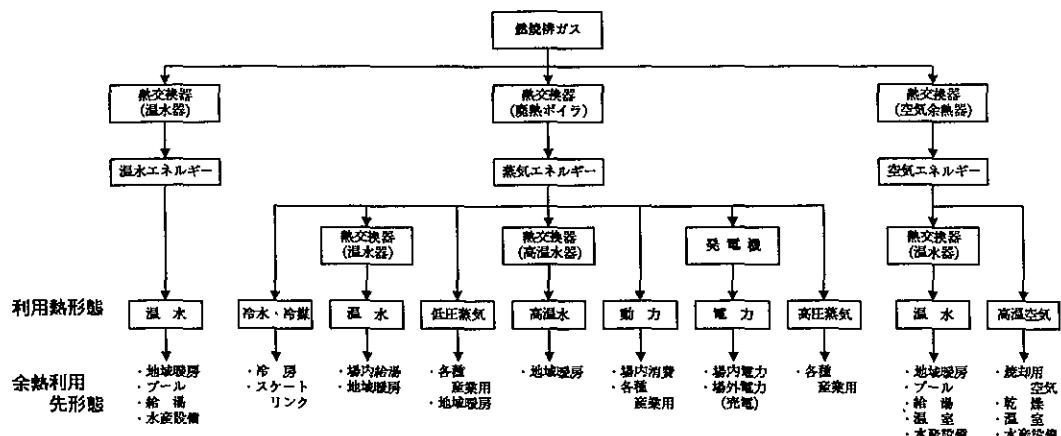
そこで、本章においてはごみの焼却によってどれほどのエネルギーが回収されてきたのかを検討する。

4.1 余熱利用の形態

焼却施設においては、ごみの燃焼に伴って発生する熱を様々な形態で利用することが可能であるが、施設の規模により発生するエネルギー量に差が生じるのでその利用形態は異なっている。余熱利用の形態としては、図4-2に示すように発電、冷暖房、温水プールなどがあり、施設規模別に見ると小規模施設では施設内部や外部への給湯などが主で、大規模施設では温水としての利用以外に発電、動力等その利用形態は様々である¹⁾(表4-1参照)。

4.2 ごみの潜在的エネルギー

昭和40年代前半頃まではごみの発熱量も低く、補助燃料を用いていかに完全燃焼させるか、焼却炉の設計上の工夫が重ねられたが、昭和40年代後半頃から、プラスチック容器の普及やOA機器の普及による紙類の増加に伴いごみの発熱量が上昇している¹⁾。



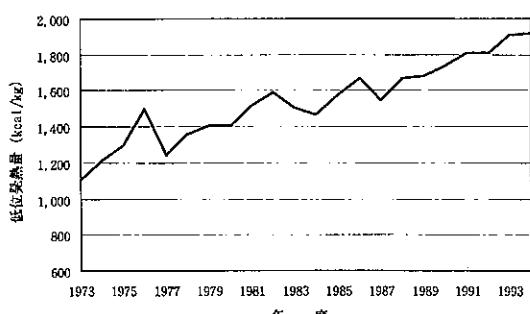
出典：ごみ処理施設における余熱の有効利用に関する検討会報告書「厚生省」

図4-2 ごみ処理施設における余熱利用の形態

表4-1 施設規模と余熱利用の例

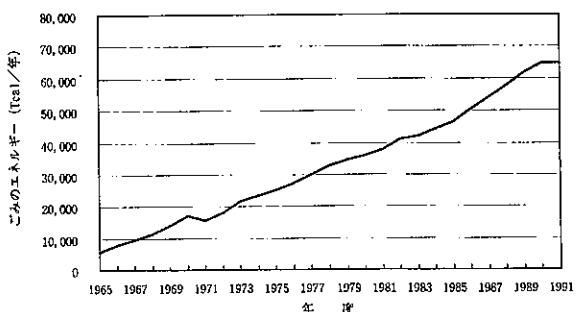
	小 規 模	中 規 模	大 規 模	特 大 規 模
年間処理量	3万t未満	3~9万人	9~26万t	29万t以上
日処理量	100t未満	100~300t	300~1,000t	1,000t以上
対象人口	10万人未満	10~30万人	30~100万人	100万人以上
稼働時間	間欠	16~24時間	24時間(安定)	24時間(安定)
余熱利用	施設内冷暖房給湯 近隣プール集会場 地域暖房等 発電 コミュニティエネルギーセンター	○ ○昼間のみ △ ○ —	○ ○ ○ ○ —	○ ○ ○ ○ ○
そ の 他		今後は余熱利用の可能性がある。		

出典：ごみ処理施設構造指針解説



出典：(財)日本環境衛生センターの分析結果

図4-3 ごみ発熱量の推移（低位発熱量）



(財)日本環境衛生センターの分析結果（ごみ処理施設精密機能検査の年度別全国平均値）によると、1994年度の都市ごみの発熱量は、1,920 kcal/kg であり、1973年度 (1,108 kcal/kg) と比較すると約2倍となっている（図4-3参照）。

このようなごみの高カロリー化およびごみ量の増加に伴って、焼却処理されるごみの持つ潜在的エネルギーについても増加していると思われる。

そこで、先に示した(財)日本環境衛生センターの分析結果を基に一次回帰を行い、各年毎のごみの発熱量を想定し、ごみの持つ潜在的エネルギーを算出すると表4-2に示すとおりである。

1991年度における潜在的エネルギーは約65,000 Tcal/年であり、1965年度（約6,000 Tcal/年）と比較すると約11倍に増加している。これを石油に換算すると約700万kl（石油1リットルのエネルギーを9,200 kcalとした。）であり、これは日本における約9日分の石油消費量に相当する²⁾。

表4-2 焼却処理されるごみの潜在的エネルギーの推移

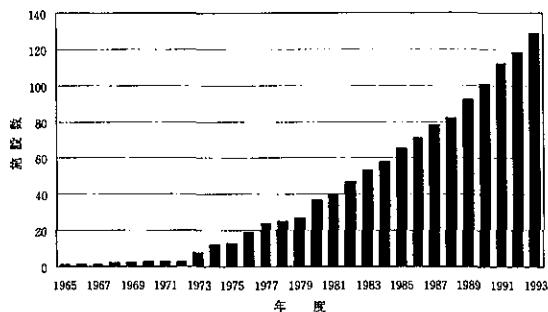
年度	低位発熱量 ① (kcal/kg)	焼却処理量 ② (千t/年)	潜在的エネルギー ③=①×② (Tcal/年)
1965	940	6,167	5,797
1966	980	7,993	7,833
1967	1,010	9,318	9,411
1968	1,040	10,935	11,372
1969	1,070	13,052	13,966
1970	1,110	15,534	17,243
1971	1,140	13,804	15,737
1972	1,170	15,550	18,194
1973	1,200	18,126	21,751
1974	1,240	—	—
1975	1,270	19,939	25,323
1976	1,300	21,040	27,352
1977	1,330	22,635	30,105
1978	1,370	23,869	32,701
1979	1,400	24,847	34,786
1980	1,430	25,090	35,879
1981	1,460	25,952	37,890
1982	1,500	27,471	41,207
1983	1,530	27,458	42,011
1984	1,560	28,412	44,323
1985	1,590	29,335	46,643
1986	1,630	30,860	50,302
1987	1,660	32,617	54,144
1988	1,690	34,146	57,707
1989	1,720	35,925	61,791
1990	1,760	36,676	64,550
1991	1,790	36,169	64,743

4.3 焼却施設におけるエネルギー回収

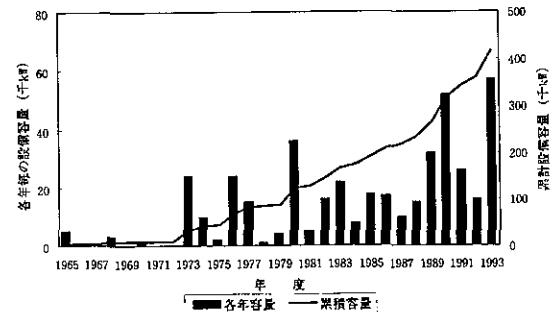
焼却施設におけるエネルギー回収について検討を行うに当たっては、データとしての取りまとめが可能なごみ発電に限定して検討を行う。

1993年においてごみ発電を行っている焼却施設は、図4-5に示すように118施設であり、焼却施設全体の約6%となっているが、大規模な施設ほどごみ発電を行っている割合が高いため、処理能力ベースでは約30%となっている²⁾。

そして、これらの施設が有する発電設備容量は、1993年度末において約42万kW（「日本の廃棄物'94」作成時点の集計結果）であり、約140万世帯の消費電力に相当する²⁾。



出典：日本の廃棄物'94



出典：都市と廃棄物 Vol. 25 No. 10 1995

図4-5 発電設備を有する焼却施設数の推移

図4-6 焼却施設における発電設備容量の推移

表4-3 建設可能発電施設および発電設備容量の推移

年 度	ごみの潜在的エネルギー量		建設可能発電施設規模		エネルギー回収量 ⑤ (kW)	
	潜在的エネルギー		発電効率 12%	発電効率 20%		
	① (Tca 1 / 年)	②=①×1,000 ÷ 860 (GWh / 年)				
1965	5,797	6,741	92,342	153,904	5,400	
1966	7,833	9,108	124,767	207,945	5,400	
1967	9,411	10,943	149,904	249,840	5,400	
1968	11,372	13,223	181,137	301,895	7,900	
1969	13,966	16,240	222,466	370,776	7,900	
1970	17,243	20,050	274,658	457,763	9,200	
1971	15,737	18,299	250,671	417,785	9,200	
1972	18,194	21,156	289,808	483,014	9,200	
1973	21,751	25,292	346,466	577,443	32,700	
1974	—	—	—	—	42,300	
1975	25,323	29,445	403,356	672,260	44,300	
1976	27,352	31,805	435,685	726,142	67,850	
1977	30,105	35,006	479,534	799,224	83,250	
1978	32,701	38,024	520,877	868,128	84,650	
1979	34,786	40,449	554,096	923,493	88,150	
1980	35,879	41,720	571,507	952,511	123,850	
1981	37,890	44,058	603,534	1,005,890	129,150	
1982	41,207	47,915	656,370	1,093,950	145,300	
1983	42,011	48,850	669,178	1,115,297	167,700	
1984	44,323	51,538	706,000	1,176,667	175,900	
1985	46,643	54,236	742,959	1,238,265	193,440	
1986	50,302	58,491	801,247	1,335,411	209,940	
1987	54,144	62,958	862,438	1,437,397	219,440	
1988	57,707	67,101	919,192	1,531,986	233,940	
1989	61,791	71,850	984,247	1,640,411	265,690	
1990	64,550	75,058	1,028,192	1,713,653	317,274	
1991	64,743	75,283	1,031,274	1,718,790	343,574	

しかし、現状のごみ発電設備を有する焼却施設における蒸気条件（蒸気圧力 20～30 kg/cm²、蒸気温度 240～290°C）においては、発電効率は約 10～14% に過ぎない³⁾。

そこで、前節において算出したごみの潜在的エネルギーを基に発電効率を 12% として、建設可能発電施設規模を算出すると表 4-3 に示すとおりとなる。

1991 年度における建設可能発電施設規模は約 100 万 kW であるのに対して、整備されている発電設備は約 35 万 kW である。このように、焼却によるエネルギー回収をごみ発電に限ってみると、33% しか利用されていないことになる。

参考文献

- 1) 愛知県環境部：愛知県ごみ減量化等推進指針
- 2) 全国都市清掃会議：日本の廃棄物（'84, '90, '94）
- 3) 県省エネルギーセンター東海北陸支部：廃棄物発電ガイドブック

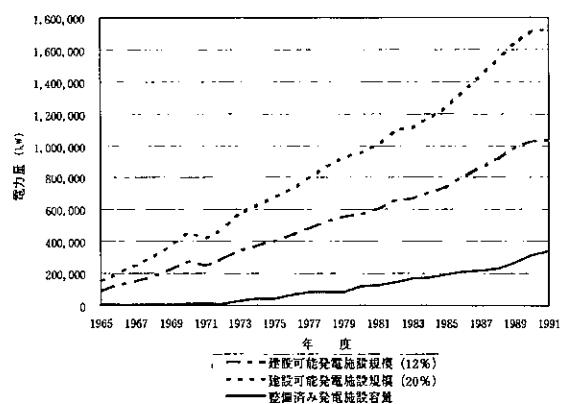


図 4-7 発電可能量および発電電力量の推移

5. 大気規制の変遷とそれに対応するために開発された技術

わが国の廃棄物処理は、衛生的な中間処理として、また最終処分場での減容化を目指して焼却処理に重点をおいて施策が図られてきた。今日までの廃棄物処理に焼却処理は十分その役割を果たしてきたが、近年の廃棄物量の増大、多様化に伴って焼却処理重点指向から再利用・資源化による廃棄物排出量の減量を目指して施策が転換されつつある。その流れの中で焼却処理はその排出物による土壤汚染、大気汚染等により環境への悪影響について取り沙汰されてきている。焼却処理はその建設された時代に即応した環境対策を第一として技術開発されてきた経緯もあり、現在では高度な技術として確立されているといつても良いといえる。ここでは大気規制の変遷とそれに対応して開発された技術について述べる。

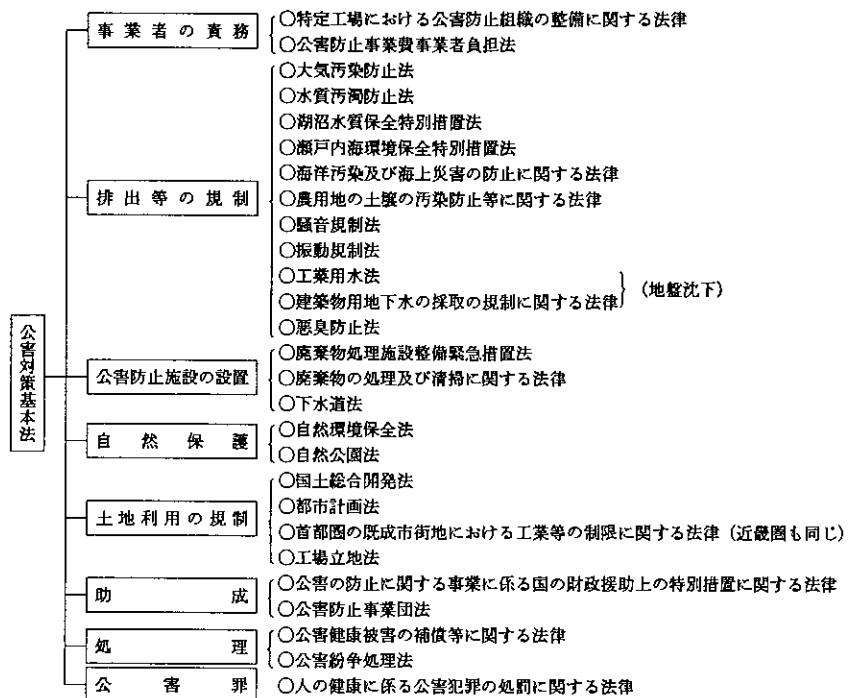
5.1 廃棄物処理と大気汚染に関する法令規制の歴史

わが国の廃棄物処理に関する法律は、明治33年4月急性伝染病の予防対策として発令された「汚物掃除法」であり、このとき既に汚物掃除は市町村の事務となった。さらに衛生上の対策として、昭和5年5月に汚物掃除法が改正され、ごみ焼却が義務化されている。しかし、昭和8年5月深川塵芥処理工場で戦前最大の煤煙問題が発生したを契機としてごみ焼却が疑問視され、厨芥通気発酵、炭化炉、アルコール製造など焼却以外の方法が試みられるようになり、昭和16年7月汚物掃除法施行規則を一部改正して、ごみは可燃、不燃、厨芥の3分類で収集するようにし、焼却義務をなくしている。

一方、大気関係では大阪府で明治17年煤煙防止条例が制定されており、日本の急速な工業化政策が窺える。明治時代はこの工業化政策により鉱山煙害が深刻な問題となり、大正5年9月には「工場法」が施行され、その対策のため電気集じん器特許実施のためコットレル組合が設立されている。そして、大正6年12月には神尾鉱山に電気集じん器が設置された。昭和初期の7~11年にかけて大阪、京都、兵庫に煤煙防止施行規則が制定されているが、ごみ焼却では深川塵芥処理工場での煤煙問題から、昭和15年1月に日立製作所によって、同工場において電気集じん器適用実験が開始されている。

戦後の日本工業の復興はすさまじく、人口増加、産業の発達などにより都市集中化が生じ社会環境の変化に対応して、廃棄物処理も約50年間実施してきた汚物掃除法が廃止され、汚物を衛生的に処理し、生活環境を清潔にすることによって公衆衛生の向上を図ることを目的として、清掃事業の環境衛生基本理念を示した「清掃法」が昭和29年4月に公布された。

公害関係の法規制としては、昭和24年8月に国および地方自治体を通して公害防止を目的にした最初の条例である東京都工場公害防止条例が制定された。このあと昭和25年大阪府、26年神奈川県、30年福岡県と同様の趣旨の条例があい次いで制定され大気汚染が問題になりはじめた。ばい煙に対しては昭和30年10月東京都においてばい煙防止条例が制定され、昭和33年10月工場公害防止条例の対象とされていた公害のなかからばい煙のみを対象として体系化された。昭和35年四日市公害が深刻な状況となり、昭和37年6月になって初めて国による「ばい煙の排出の規制等に関する法律」ばい煙規制法が公布された。この法律の条項には「生活環境の保全」と「産業の健全な発展との調和」を目的に掲げており、公害対策基本法の目的の原形となり、昭和42年8月公害対策基本法が公布された。この公害対策基本法は29条からなる国の施策の基本方向を示すものとして制定された。この基本法10条で各種公害に対する必要な規制措置が具体化され、昭和43年6月ばい煙規制法が廃止され「大気汚染防止法」と「騒音規制法」が公布された。また、基本法9条環境基準の設定にしたがって、昭和44年2月いおう酸化物、昭和45年2月一酸化炭素、昭和46年12月浮遊粉じん、昭和48年5月二酸化窒素、オキシダントの環境基準がそれぞれ決定されていった。この環境基準は国および地方自治体の行政目標となるもので、排出基準は環境基準



公害対策基本法は平成5年11月に環境基本法と改められた。

図5-1 公害関係法律の体系¹⁾

をもとにして設定されている。

廃棄物処理については、昭和30年代から40年代にかけての経済成長、国民生活の向上等による廃棄物の増加や質的変化により環境汚染が問題視され、特に産業廃棄物処理対策を講ずる必要があり清掃法を全面的に改正して、公害対策基本法の枠組みのなかで、昭和45年12月公害国会で「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」いわゆる廃棄物処理法（廃掃法）が可決公布された。この廃掃法を含めて昭和45年12月公害対策基本法改正等14法案が可決され、さらに昭和45年末から46年5月末にかけて開催された第65通常国会で公害関係6法案が成立し、半年の間に20の法案が成立して公害対策基本法の体系ができあがった。

このとき公害対策基本法の「産業の健全な発展との調和」の条項が削除され産業経済より生活環境保護を重視した法改正がなされた。

廃棄物処理法は昭和51年6月産業廃棄物に対する規制強化、昭和58年4月廃木材を産業廃棄物として指定などの一部改正がなされてきたが、廃棄物の多様化・增大化に伴い、平成3年4月「再生資源の利用の促進に関する法律」が公布された後、平成3年10月大幅に改正された。廃棄物処理に係る法律はその後、平成4年5月「産業廃棄物の処理に係る特定施設の整備の促進に関する法律」、平成4年12月「特定有害廃棄物などの規制に関する法律」が公布され、平成7年6月には「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律」が公布され現在に至っている。

また、今まで日本の環境施策を支えてきたのは公害対策基本法と昭和47年に制定された自然環境保全法であるが、これから環境問題は地球環境という空間的な広がりと世代にわたる時間的な広がりを持つので総合的に推進する必要があり、この2法のような問題対処型の法規制では不十分となり、環境保全に関する計画的な施策を推進するため、公害対策基本法に代わる新たな法制度として平成5年11月に「環境基本法」が公布施行された。

廃棄物処理における大気規制は大気汚染防止法で漸次規制してきた。大気汚染防止法も幾つかの規制強化が行われた。昭和49年6月大気汚染防止法を一部追加し、いおう酸化物とその他政令で定めるばい煙の総量規制を導入、昭和52年6月には第3次規制によりHCl規制を廃棄物焼却炉に適用と同時に、窒素酸化物に総量規制制度を導入した。昭和57年5月にはばいじん排出基準が強化されている。

昭和58年11月には日本においてはじめて、ごみ焼却炉の飛灰、残灰中のダイオキシン含有データが公表された。

ダイオキシンについては昭和48年5月にアメリカではじめて国際会議が開かれており、廃棄物焼却に関する海外では昭和52年Hutzingerらが焼却飛灰等からダイオキシンの存在を報じて以来、世界的に注目を集め研究されてきたが、この新聞報道により日本での廃棄物焼却処理に大きなインパクトを与えた。直ちに、廃棄物処理に係るダイオキシン等専門家会議が開催され、昭和59年5月には現状のレベルでは人間の健康に影響を与えることはないと報告された。しかし、ダイオキシン問題は廃棄物処理行政に指針を与える重要なことであり、厚生省を主体に産官学共同で研究が進められた。その成果として、ダイオキシンの生成機構もほぼ解明され、その抑制や除去技術について知見が得られ、平成2年12月に厚生省より「ダイオキシン類発生防止等ガイドライン」が通知され、本格的に排出低減に取り組まれてきた。このガイドラインでは焼却炉構造や運転方法の指針を与えたもので、ダイオキシン数値としては目標値（指針にしたがえば新設の連続炉で 0.5 ng/Nm^3 以下が期待できる）を示すことにとどまっている。欧州等の諸外国ではさらに低レベルな規制が制定されており、日本でも対応が迫られている状況にある。

また、昭和50年代後半には電子機器および持ち歩き小型電気機器などの発達により、使用済み水銀乾電池からの水銀排出が問題となり、昭和59年1月には厚生省より「使用済み水銀乾電池の回収強化対策」が発表され、昭和60年7月生活環境審議会廃棄物処理部会適正処理専門委員会から処理が困難な廃棄物対策とともに使用済み乾電池対策について報告がなされた。この対策は生産側への対応も求めており、平成2年4月よりマンガン乾電池の水銀使用量はゼロとなり、アルカリ乾電池も平成3年1月より水銀が全廃された。乾電池メーカーの努力により水銀代替乾電池に切り替えられ水銀使用量は減っており、廃棄物焼却炉からの排出量も昭和50年代後半当時の約半分になってきている状況にある。

5.2 大気汚染規制の経緯と現状

5.2.1 ばい煙規制法

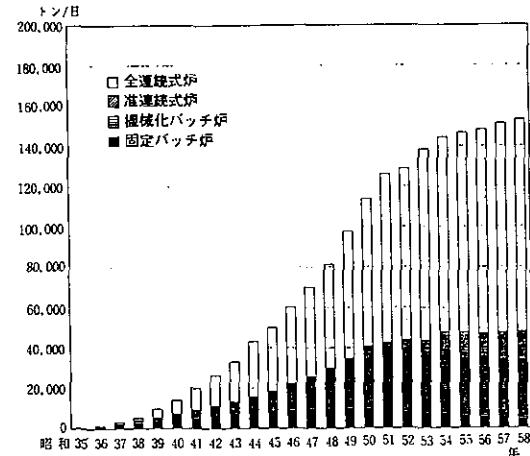
明治30年日本で最初の規模等の分かっているごみ焼却炉（三千貫/日）が福井県敦賀に完成しており、その後バッチ式焼却炉が建設されたが、昭和35年3月岡山県玉島市（現倉敷市）に日本で最初の連続式機械炉が建設された。昭和38年12月生活環境施設整備緊急措置法が公布され、ごみ処理施設への国庫補助が決まるとき焼却量は増加していく。

昭和37年ばい煙規制法が公布されているが、規模の大きな工場に限られ、ごみ焼却炉でのばい煙は自主規制であった。昭和41年8月公害審議会よりごみ焼却に関する施設基準ならびに維持管理基準が発表さればい煙対策が施されるようになった。

5.2.2 大気汚染防止法の変遷

国の基準として廃棄物処理に対して規制されたのは昭和43年6月に公布された大気汚染防止法である。発令当時、ばい煙とは「いおう酸化物」と「すすその他の粉じん」をいう。排出基準は指定地域ごとに排出基準が定められ、いおう酸化物（ばい煙量）については排出口の高さ（省令で定める補正を加えたもの）に応じて定める許容濃度とし、すすその他の粉じん量（ばい煙濃度）についてはばい煙発生施設の種類ごとに定める許容限度としている。ばい煙発生施設は政令で規定され、別表第一の13項にその施設として「汚物焼却炉」、その規模は火格子面積 2 m^2 以上と規定された。

施行規則で排出口の高さの補正方法を定め、告示で「いおう酸化物」の排出基準と「すすその他の粉じん」の排出基準が規定され、「いおう酸化物」はK値による政令で定める指定地域ごとの排出基準、「すすその他の粉じん」の排出基準は汚物焼却炉では 0.7 g/Nm^3 と規定された。なお、この「いおう酸化物」排出基準算出式は現法律でも採用されており、指定地域ごとのK値改定がなされて現在に至る。



全国廃棄物処理施設総覧（工業出版社）、都市清掃各号より作成

図5-2 焼却処理能力合計年次推移²⁾

大気汚染防止法に規定するばい煙発生施設（昭和43年～46年）

「汚物焼却炉」の規模	火格子面積2m ² 以上
------------	-------------------------

「いおう酸化物」排出基準算出式（昭和43年～現在）

「いおう酸化物」排出基準
$q = K \times 10^{-3} H e^2$
q : 硫黄酸化物排出基準量 (Nm ³ /h)
K : 政令で地域ごとに定める数値
He (有効煙突高) : 施行規則により補正された排出口高さ (m)
排出口の高さの補正の方法
$He = H_0 + 0.65 (H_m + H_t)$
$H_m = (0.795 \sqrt{Q \cdot V}) / (1 + 2.58/V)$
$H_t = 2.01 \times 10^{-3} \cdot Q \cdot (T - 288) \cdot (2.30 \log J + 1/J - 1)$
$J = (1/\sqrt{Q \cdot V}) \{1460 - 266 \times V / (T - 288)\} + 1$
He : 補正された排出口の高さ (m)
H_0 : 排出口の実高さ (m)
H_m, H_t : 慣性および熱的上昇分 (m)
Q : 温度 15°C における排出ガス量 (m ³ /秒)
V : 温度 T (K) における排出ガスの排出速度 (m/秒)
T : 排出ガスの温度 (K)

「いおう酸化物」排出基準：政令で定める数値（昭和43年公布当時）

政令で定める地域	排出基準 K 値
	告示（排出基準）第一条
政令別表第二 3種の地域を指定	20.4, 26.3, 29.2

「すすその他の粉じん」の排出基準値（昭和43年～46年）

施設の種類	排出基準 (g/Nm ³)
汚物焼却炉	0.7

大気汚染防止法は昭和45年から49年にかけて改正され、ばい煙とは「いおう酸化物」「ばいじん」（すすその他の粉じんを改める）、物の燃焼、合成、分解その他の処理に伴い発生する「有害物質」となり、「有害物質」は政令で定めるものとして、カドミウム及びその化合物、塩素及び塩化水素、弗素・弗化水素及び弗化珪素、鉛及びその化合物、窒素酸化物と指定された。政令別表第一の13項でばい煙発生施設として廃棄物焼却炉（汚物焼却炉を改める）と改正し、その規模は火格子面積2m²以上又は焼却能力が1時間当たり200kg以上と改定された。昭和46年には工場が集中している特別地域を指定した特別排出基準が「いおう酸化物」と「ばいじん」に導入され、また、昭和49年には大気環境基準の確保が困難な地域の対策として総量規制が導入され、「いおう酸化物」は総量規制となつた。

昭和52年6月には施行規則が改正され、有害物質の排出基準として「塩化水素」が別表3、3項廃棄物焼却炉に

大気汚染防止法に規定するばい煙発生施設（昭和46年～現在）

廃棄物焼却炉の規模	火格子面積2m ² 以上又は 焼却能力が1時間当たり200kg以上
-----------	---

いおう酸化物の排出規制（昭和46年～現在）

地域の区分	排出基準 K 値 ¹⁾	
	一般	特別
施行規則別表第1で16項の基準を規定	施行規則第7条で3項の基準を規定	
令別表第3 100項の地域を指定	3.0～17.5	—
施行規則別表第4 28項の地域を指定	—	1.17, 1.75, 2.34

1) K 値は昭和46年以降一部改正されてきた。この表は現在の数値を示す。

ばいじんの排出基準値（昭和 46 年～57 年）

施設の種類	施設の規模	排出基準 (g/Nm³)	
		一般	特別
連続炉	排ガス量 40,000 Nm³以上	0.2	0.1
	排ガス量 40,000 Nm³未満	0.7	0.2
連続炉以外のもの	—	0.7	0.4

いおう酸化物の総量規制：施行令 7 条 2（昭和 49 年～現在）

「指定ばい煙」	「指定地域」
いおう酸化物	表 5-1 参照

表 5-1 いおう酸化物に係わる総量規制指定地域

第1次指定 (49.11)	第2次指定 (50.12)	第3次指定 (51.9)
千葉、市川など 特別区など 横浜・川崎など 富士宮・富士など 名古屋など 半田・碧南など 四日市など 大阪など 神戸・尼崎など 倉敷（水島） 北九州など	岸和田、池田など 姫路、明石など 和歌山・海南など 倉敷（水島以外） 宇部・小野田 徳山・下松など 岩国など 大牟田	川口・草加など 京都など 備前 福山 大竹

適用され、その排出基準は 700 mg/Nm³（酸素濃度換算 12%）と規定された。また同時に「窒素酸化物」が別表 3 の 2, 27 項廃棄物焼却炉に適用され、排ガス量 40,000 Nm³以上の焼却炉では 250 ppm（酸素濃度換算 12%）と規定された。

昭和 54 年「窒素酸化物」の排出基準値は全部改正され、その後一部改正があって現在に至る。昭和 56 年 6 月には政令が改正され、政令で総量規制基準は「いおう酸化物」と「窒素酸化物」になり、「窒素酸化物」に総量規制が導入された。昭和 57 年 5 月には施行規則が改正され「ばいじん」排出基準が強化され現在に至る。

「塩化水素」の排出基準値（昭和 52 年～現在）

施設の種類	排出基準 (mg/Nm³)
廃棄物焼却炉	700 (O₂= 12% 換算値)

「窒素酸化物」の排出基準値（昭和 52 年～54 年）

施設の種類	施設の規模	排出基準 (ppm)
廃棄物焼却炉	排ガス量 40,000 Nm³以上	250 (O₂= 12% 換算)

窒素酸化物の排出規制³⁾（昭和 54 年～現在）

施設の種類 ¹⁾	施設の規模	排出基準 (ppm) ²⁾
連続炉	—	250
連続炉以外のもの	排ガス量 40,000 Nm³以上 排ガス量 40,000 Nm³未満	250 —

1) 浮遊回転燃焼方式を除く。

2) 酸素濃度換算 12% である。

3) 昭和 54 年 8 月 10 日以降に設置された施設に適用。

窒素酸化物の総量規制：施行令 7 条 2（昭和 56 年～現在）

「指定ばい煙」	「指定地域」
窒素酸化物	特別区など 横浜・川崎など 大阪など

ばいじんの排出規制（昭和 57 年～現在）

施設の種類	施設の規模	排出基準 (g/Nm ³)	
		一般	特別
連続炉	排ガス量 40,000 Nm ³ 以上	0.15	0.08
	排ガス量 40,000 Nm ³ 未満	0.50	0.15
連続炉以外のもの	—	0.50	0.25

この基準は本則では酸素濃度換算 12% であるが、付則で昭和 59 年 7 月 1 日から当分の間適用を猶予するとしている。

5.2.3 大気汚染防止法による現行の排ガス規制

大気汚染防止法で規定している「ばい煙」排出基準には次の 4 種類がある。

- 1) 一般排出基準：国が一元的定めるものであり、いおう酸化物については地域区分毎に、また、ばいじんおよび有害物質については全国一律に定められている。
- 2) 特別排出基準：ばい煙発生施設が集合し、汚染が複合するような物質について政令で定められている地域において、新設されるばい煙発生施設に一般排出基準より厳しい基準を適用する。現在は、いおう酸化物とばいじんに設定されている。（窒素酸化物には適用されていない）
- 3) 上乗せ基準：1), 2) の排出基準によっては不十分と認められたとき、条例により国の基準より厳しい基準を定めることができる。都道府県が上乗せ基準を設定できる物質はばいじんおよび有害物質であり、いおう酸化物は除外されている。
- 4) 総量規制基準：排出基準のみによっては公害対策基本法（現行環境基本法）の規定による大気環境基準の達成が困難であると認められる地域として指定ばい煙（昭和 49 年にいおう酸化物、昭和 56 年に窒素酸化物）ごとに政令で定める指定地域にあっては、施行規則で定める基準に従い都道府県知事が定める規模以上の施設（特定工場）において指定ばい煙総量削減計画を作成し、施行規則 7 の 3, 7 の 4 に規定する総量規制基準を定めることとなっている。

現行の大気汚染防止法では施行令第 2 条ばい煙発生施設として別表第 1, 13 項に「廃棄物焼却炉」を定め、その規模は火格子面積 2 m² 以上または焼却能力 200 kg/h 以上と規定されている。

大気汚染防止法第 2 条で定義される「ばい煙」とは次の物質である。

- ・いおう酸化物……燃焼に伴って発生するもの
- ・ばいじん…………燃焼または熱源としての電気の使用に伴って発生するもの
- ・有害物質…………燃焼、合成、分解その他の処理（機械的処理を除く）に伴い発生する物質のうち、人の健康または生活環境に被害を生ずる恐れのある物質で、政令で定められる次のもの

政令第 1 条に定める物質

- (1) カドミウム及びその化合物
- (2) 塩素及び塩化水素
- (3) ふっ素、ふっ化水素及びふっ化けい素
- (4) 鉛及びその化合物
- (5) 窒素酸化物

なお、法第 3 条排出基準に特定有害物質を規定しているが現在未制定である。

有害物質のうち、施行規則第 5 条で「廃棄物焼却炉」に対しては規制基準が定められているのは塩化水素と窒素酸化物の 2 種である。

したがって、ごみ焼却施設で大気汚染防止法上「ばい煙」として規制基準が定められているのは物質は、いおう酸化物、ばいじん、塩化水素、窒素酸化物である。これらのばい煙の排出基準は前項で示した最後に改正されたものが現行の規制である。これらの各種排ガス排出規制に対して、各地方自治体ではその地域の環境保全上、さらに個別に厳しい排出規制（上乗せ規制）を設定しているところが多いのが実状である。

5.2.4 ダイオキシンガイドライン

生活環境保全を目的として技術的に実施可能な限りダイオキシン類を低減する対応策として、1990年12月厚生省から「ダイオキシン類発生防止等ガイドライン」が通知された。ガイドラインは基本的な考え方としてダイオキシン類を除去することよりも、発生そのものを防止・抑制する観点から定められており、ごみ焼却炉からのダイオキシン発生抑制として、燃焼設備と排ガス処理設備に具体的な方策が示されている。ダイオキシン類排出濃度として規制値は定められていないが、新設の全連続炉では完全燃焼化と集じん設備の高効率化・低温化等が設計に反映される結果、 0.5 ng/Nm^3 ($2, 3, 7, 8\text{-TCDD}$ 毒性等価換算濃度 TEQ: Toxicity Equivalent Quantity) 程度以下になることが期待されるとしている。

5.3 開発された排ガス処理技術

5.3.1 大気規制と対応処理技術

大気汚染防止法による廃棄物焼却炉への大気規制の変遷でわかるように、排ガス規制項目の追加や強化にしたがってその単一規制項目毎に除去設備を加えてシステムとして対応してきた経緯がある。最近では厳しい上乗せ規制に対しても高度処理システムとして対応できるまでに確立されている。

大気汚染防止法ではばい煙としていおう酸化物がK値規制となっているが、この規制はいおう酸化物排出量が多い場合、煙突を高くすれば良いことになる。廃棄物焼却炉も規制されているが、公布当初のK値規制値から計算される排出基準値は高く、ごみ焼却で発生するいおう酸化物は100 ppm程度でこの基準値よりはるかに低い排出量であることから、ばいじん対応技術に注力された。このK値規制値が強化された現在でもK値=1.17、煙突59 m (Heとして計算)の場合でも排出基準量 $4.07 \text{ Nm}^3/\text{h}$ であり、排ガス量 $40,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ としてもその濃度は102 ppmとなり、一般排出基準からは規制を受けないことになる。

ばいじん対応技術として電気集じん器が、水分の多いごみ焼却排ガスに適用され、ばいじん特性からもその高性能化を維持できることが実証されて、ごみ焼却の主要公害防止機器としての役割を果たしてきた。

ごみ焼却排ガス処理技術が盛んに開発されたのは、昭和52年大気汚染防止法で塩化水素が規定されたときであ

表5-2 大気規制と排ガス処理

大気規制の変遷	排ガス規制項目	対応排ガス処理システム
昭和37年以前	未規制	MC
昭和37年ばい煙規制法	ばいじん	EP+MC
昭和43年大気汚染防止法公布	ばいじん, SO _x	EP(高性能EP)
昭和52年大気汚染防止法改定 塩化水素追加	ばいじん, SO _x HCl	DS+EP EP+WS
昭和56年大気汚染防止法改定 窒素酸化物総量規制対応 その後、上乗せ規制対応	ばいじん, SO _x HCl, NO _x	NSCR+EP+WS EP+WS+SCR
平成2年ダイオキシンガイドライン 集じん温度低下、高効率集じん	ばいじん, SO _x HCl, ダイオキシン	DS+BF DS+高性能EP
最近の高度処理要求に対応	ばいじん, SO _x HCl, ダイオキシン NO _x	DS+BF+SCR DS+BF+WS+SCR

表5-3 排ガス除去設備と除去対象物質

除 去 設 備	除 去 対 象 物 質
MC : マルチサイクロン	ばいじん
EP : 電気集じん器	ばいじん
DS : 乾式有害ガス除去設備	HCl, SO _x
WS : 湿式有害ガス除去設備	HCl, SO _x , Hg
NSCR : 無触媒脱硝	NO _x
SCR : 触媒脱硝装置	NO _x
BF : バグフィルタ	ばいじん, HCl, SO _x , Hg

る。湿式処理の技術は確立していたが、排水処理が必要なこと、装置費が嵩むなどの理由で、大都市を中心とした上乗せ規制が厳しい施設に適用が限定されていた。塩化水素が国の一般基準として 700 mg/Nm^3 と規定されると、この基準を満足すること、全国のごみ焼却炉に適用するため排水の出ないこと、および装置費が安価であることを目的として簡易な乾式除去設備が開発された。そして、乾式除去設備は乾式・半乾式法など湿式処理に近づける高効率除去のため種々の工夫が試みられ様々な装置が開発された。塩化水素の高効率除去技術は同じ酸性ガスであるいおう酸化物も同時に低減できる技術ともなった。

昭和 52 年に窒素酸化物が規制され、ごみ焼却での対応技術が迫られた。国の一般基準は 250 ppm であり、ごみ焼却では燃焼改善、焼却炉冷却法など燃焼技術で 100 ~ 150 ppm 程度まで対応できたが、昭和 56 年に総量規制が適用され規制が厳しくなるとさらに対応技術が必要となり、無触媒脱硝技術が開発された。その後、大都市周辺では窒素酸化物環境基準が達成されていないことから上乗せ規制が課せられ、触媒脱硝技術が必要となった。触媒脱硝技術は以前から火力発電所など化石燃料の排ガスに適用されその分野では完成された技術であった。HCl、重金属、塩化物主体のばいじんを含むごみ焼却排ガスへの適用に際してはこれらの技術がベースとなり、適用技術が開発された。

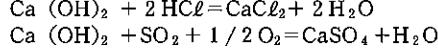
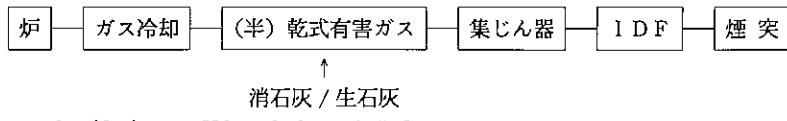
昭和 59 年にはダイオキシンが国内で問題になり、平成 2 年 12 月ダイオキシンガイドラインが通知されてその対応が必要となった。ダイオキシンは未燃物の一種であるので燃焼技術での対応が基本であるが、排ガス冷却過程、集じん過程での再合成があることから排ガス処理での技術も要求された。集じん温度の低温化、高効率な集じんが要求されるが、海外ではダイオキシン対応にバグフィルタの効果が実証されており、わが国でもバグフィルタが多く採用されるようになった。ガイドラインでは高効率電気集じん器でもよいとしているが、バグフィルタは乾式有害ガス除去装置と組み合わせて高効率に HCl、SOx を除去できるので、コンパクトかつ高効率な排ガス処理システムとなる。さらに、バグフィルタは低温で操作されるため粉末活性炭を併用することによって水銀除去にも効果がある。

5.3.2 現在の排ガス処理技術

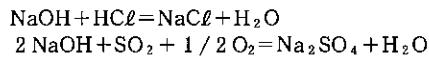
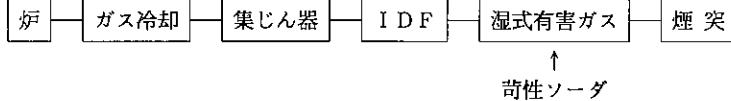
ごみ焼却施設での排ガス処理はばいじん、HCl、SOx 除去システムが基本であり、その基本システムに NOx、ダイオキシン除去が付加される。

(1) ばいじん、HCl、SOx 除去システム（基本システム）

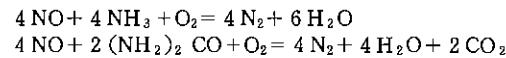
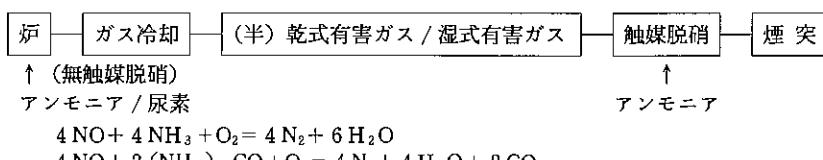
1) 乾式・半乾式システム



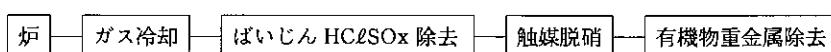
2) 湿式システム



(2) NOx 除去付加システム

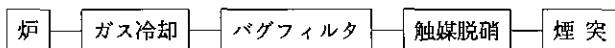


(3) 有機物、重金属除去付加システム



本システムはヨーロッパで採用されている有機物、重金属除去付加システムである。HCl, SO_x 除去は半乾式または乾式有害ガス除去システムを適用し、有機物、重金属除去には活性コークス法を用いている。

バグフィルタによる有害ガス除去システムはダイオキシン等有機塩素化合物、Hg 吸着除去および微粒ばいじんの除去が可能であることからばいじんに含まれる重金属除去に効果があるので、このバグフィルタは有機物、重金属除去付加システムと考えられる。一方、触媒脱硝で使用されるチタン・バナジウム系触媒にはダイオキシン等有機塩素化合物を分解する能力がある。ただ、触媒との接触分解であるためガス状のダイオキシンの分解に効果があるので、微細ばいじんの除去が可能なバグフィルタにより粒子状のダイオキシンを除去した後に適用するとさらなる低減化が望める。したがって、ごみ焼却排ガス汚染物質を対象として、実績を基にした高効率かつコンパクトな排ガス処理システムとして次のシステムがわが国では採用されている例が多い。



ごみ焼却における大気規制の変遷と排ガス処理対応技術について述べたが、その技術は、制定された大気規制項目毎に除去設備が付加され、処理システムとして対応してきた経緯がある。最近ではバグフィルタシステムによる、ある程度高効率かつコンパクトな排ガス処理システムが開発されているが、厳しい排出基準には汚染物質毎に対応できる除去設備を付加したシステムが選定される。ごみ焼却ではこのようにシステムは複雑化するものの大気規制に適応できる高度な処理技術は確立されている状況にある。

クリーンな化石燃料を燃やしても完全にきれいな排ガスは出ないのであり、ましてやごみである。ごみ焼却による環境汚染問題に対しては、少なくとも排ガス処理をしっかりとすることによって、ごみ焼却による衛生処理と環境負荷低減は両立すると思われる。ずさんな排ガス処理ではごみ焼却の存在はあり得ない。

しかし、高度な処理技術といっても既知の汚染物質に対応したものであり、ごみ焼却においては特に微量汚染物質に対する調査研究は避けなければならない。既知の微量汚染物質に対しては人類への影響リスクアセスメントを基礎とした規制基準も必要である。今後、未規制汚染物質が徐々に規制化されていくだろうが、ごみ焼却が生活環境の中で共存していくには、少なくともこれら微量汚染物質に対して適正な規制基準に対応する排ガス処理技術の開発が必要となる。

参考文献

- 1) 公害防止の技術と法規「大気編」(社)産業公害防止協会(1991)
- 2) 溝入茂：ごみの百年史、処理技術の移り変わり(1991)
- 3) 大気汚染ハンドブック(2)除塵装置編、コロナ社(1972)
- 4) 武藤、菱田、吉持：廃棄物処理技術、工業調査会(1972)
- 5) 都市ごみ処理ガイドブック、環境技術研究所(1979)
- 6) 新しいごみ処理施設、日本廃棄物処理技術管理者協議会(1991)
- 7) 石川禎昭：これからの廃棄物処理と地球環境、中央法規出版(1994)
- 8) 石川禎昭：ごみ処理技術の歴史的変遷と技術開発の展望、環境施設No.54(1993)
- 9) 廃棄物ハンドブック：第6章排ガス処理技術、廃棄物学会、オーム社(1996)

6. 容器包装リサイクル法の導入による 焼却の物質収支、熱収支の変化予想

平成7年6月「容器包装リサイクル法」が公布された。以後5年間で段階的に施行される。施行されるとプラスチック製・紙製の容器包装類およびビン類、缶類の容器は回収再生利用されることになりその分ごみ量の低減が期待される。同時にごみ質も低くなることが予想される。京都市では数年に渡り家庭ごみの細組成調査¹⁾を行っている。そしてこの細組成調査にもとづき容器包装リサイクル法施行後のごみ量・ごみ質予想を行っている。内容は容器包装廃棄物の分別再資源化による効果試算として回収効果によるごみ量・ごみ質試算である。

ここでは京都市の効果試算結果を使用し、現状焼却と容器包装リサイクル法施行後のごみを焼却処理した場合の2ケースについて比較検討した。現状ケース600T/日ごみ焼却プラントをベースに設定した。分別回収によるごみ量ごみ質の変化に応じて施行後2ケースとあわせ3ケースについて物質収支・熱収支の計算を行った。容器包装リサイクル法施行後のごみ焼却のメリット、デメリットを検討した。

そして3ケースについてごみ焼却プラントの運転費用および分別回収費用をそれぞれ算出し、合計をごみ処理費用として算出した。経済的に分別回収が成立するかどうかを検討した。

6.1 計算の条件

6.1.1 現状および施行後2ケースのごみ質・ごみ量の設定

京都市は家庭ごみ細組成調査を基に、容器包装リサイクル法施行後の分別・再資源化による効果試算としてごみ質、発熱量、飛灰発生量を計算している。その数値を表6-1に示す。試算においては3つのケースに分け、容器包装リサイクル法を現状ケースとし、施行後を分別再資源化の導入程度に分けケース1(完全分別)、ケース2(部分分別)としている。表6-2には各ケースの分別再資源化条件と表6-1からのごみ減量効果とごみ発熱量を示す。

今回の目的は各ケースのごみを焼却したときの物質収支、熱収支の算出であるため、燃焼計算に必要なデータを準備した。下記に示すような仮定を行って、各ケースのごみについてごみ3成分(水分、可燃分、灰分)およびごみ可燃分中の元素分析値の設定を行った。

- (1) ごみの減量分は表6-1中のデータ毎の水分、灰分を加重平均して算出する。
- (2) 元素分析値の設定を行うためにごみ処理施設構造指針解説より引用する(表6-3)。表6-1と照合させるために、紙・セロファン=紙類、木片類=木・竹類、合成樹脂=プラスチック類、繊維=繊維類、ゴム・皮革=

表6-1 家庭ごみ質調査からみた容器包装廃棄物の分別・再資源化による効果試算

	ごみ質						発熱量			残灰発生量(ごみ100kg)				
	現状重量(%)	ケース1重量(%)	ケース2重量(%)	水分%	灰分%	高位発熱量kcal/kg	低位発熱量kcal/kg	現状発熱量kcal/kg	ケース1kcal/kg	ケース2kcal/kg	現状残灰量kg/100kg	ケース1kg/100kg	ケース2kg/100kg	
紙・セロファン	25.8	△7.3	△0.8	25.5	6.7	3,290	2,800	722	682	745	1.729	1.633	1.784	
木片類	1.1	△0.3		20.0	0.5	4,370	3,300	36	35	39	0.006	0.005	0.006	
合成樹脂	12.8	△10.1	△0.4	25.0	2.5	9,300	6,800	870	242	898	0.320	0.089	0.330	
繊維	4.1			19.5	2.1	4,870	3,700	152	200	162	0.086	0.113	0.092	
ゴム・皮革	0.8			4.8	12.3	9,300	6,900	55	73	59	0.098	0.130	0.105	
小計	44.6	△17.7	△1.2					1,836	1,232	1,902	2.239	1.970	2.316	
厨芥類	40.7			74.7	3.3	4,080	880	358	472	381	1.343	1.770	1.430	
草木類等	4.0			67.0	4.3	4,170	970	39	51	41	0.172	0.227	0.183	
小計	44.7							397	523	423	1.515	1.996	1.614	
金属類	3.0	△1.5	△0.7	6.8	93.1	0	-40	-1	-1	-1	2.793	1.840	2.280	
不燃物	2.4			4.0	95	0	-24	-1	-1	-1	2.280	3.004	2.248	
ガラス	5.3	△4.9	△4.2	0.4	99.5	0	-2	0	0	0	5.273	0.524	1.166	
小計	10.7	△6.4	△4.9					-2	-2	-2	10.346	5.368	5.874	
総計	100.0	△24.1	△6.1					0	2,231	1,753	2,324	14.100	9.335	9.804

表 6-2 各ケースの分別再資源化条件

ケース名	分別再資源化条件	ごみ発生量 (%)	ごみ低位発熱量 (kcal/kg)
現状	容器包装リサイクル法施工前の平成5年3月の京都市家庭ごみの調査結果。ケース1, 2のベース条件とする。	100.0	2,231
ケース1	容器包装リサイクル法施工後分別再資源化可能なすべての容器包装廃棄物を分別・再資源化した場合。	75.9	1,753
ケース2	容器包装リサイクル法施工後、紙パック、PETボトル、飲料缶、飲料びんを分別・再資源化した場合。	93.9	2,324

表 6-4 焼却ごみの三成分

項目	単位	現状	ケース1	ケース2
水分	%	44.24	52.27	46.72
可燃分	%	41.66	38.39	43.47
灰分	%	14.10	9.34	9.81
低位発熱量	kcal/kg	2,231	1,753	2,324

表 6-6 焼却処理ごみ種別ごみ量

ごみ種	現状		分別収集ケース1		分別収集ケース2	
	組成 (%)	含有量 (t/日)	組成 (%)	含有量 (t/日)	組成 (%)	含有量 (t/日)
紙、セロファン	25.8	154.80	18.5	111.00	25.0	150.00
木片類	1.1	6.60	0.8	4.80	1.1	6.60
合成樹脂	12.8	76.80	2.7	16.20	12.4	74.40
繊維	4.1	24.60	4.1	24.60	4.1	24.60
ゴム・皮革	0.8	4.80	0.8	4.80	0.8	4.80
厨芥類	40.7	244.20	40.7	244.20	40.7	244.20
草木類等	4.0	24.00	4.0	24.00	4.0	24.00
金属	3.0	18.00	1.5	9.00	2.3	13.80
陶磁器等	2.4	14.40	2.4	14.40	2.4	14.40
ガラス	5.3	31.80	0.4	2.40	1.1	6.60
合計	100	600	75.9	455.4	98.9	563.4

その他、厨芥=厨芥類、草木類等=その他とした。

- (3) 不燃物(金属、陶磁器等、ガラス)は表6-1のとおり、灰分と水分(付着)とした。
- (4) 元素分析値の妥当性を確認するために Scheurer-Kestner の式で可燃分高位発熱量を算出し、表6-1の実データとのかい離がないかどうかをチェックした。

上記条件で計算したごみの3成分と可燃分中の元素分析値を表6-4、表6-5に示す。

ごみ量については現状を600T/日全量焼却処理しているものとして設定した。容器包装リサイクル法施行後は分別・再資源化以外のごみを焼却するものとした。表6-6に焼却処理するごみ量・ごみ種、表6-7に回収するごみ量・ごみ種を示す。

6.1.2 モデルごみ焼却プラントの要目

各ケースのモデルとなるプラントの要目は次のとおりである。

(1) プラントの概要

- ① 名称: 都市ごみ焼却プラント
- ② 炉形式: 全連続焼却式ストーカ炉
- ③ 炉数: 3基
- ④ 炉運転時間: 1日 24 時間連続運転
- ⑤ 炉運転方式
 - (a) ガス冷却方式: 廃熱ボイラ SH 出口 300°C × 30 ata

表 6-3 ごみ種類組成ごとの元素量及び発熱量²⁾

元素等	項目	紙類	プラスチック類	厨芥類	繊維類	木・竹類	その他
可燃分 (%)	92.58	94.43	84.96	96.84	97.21	78.87	
炭素	43.27	72.88	49.72	49.13	48.18	40.85	
水素	6.23	12.64	5.78	6.49	6.29	5.30	
窒素	0.33	0.65	2.49	2.03	2.03	2.59	
硫黄	0.04	0.09	0.10	0.10	0.18	0.07	
塩素	0.46	3.50	0.30	0.46	0.44	0.52	
酸素	42.25	4.67	33.57	38.63	40.09	29.54	
灰分 (%)	7.42	5.57	15.04	3.16	2.79	21.13	
乾物高位発熱量 (kcal/kg)	4,261	8,791	4,243	4,768	4,760	4,020	

(注) ※雜物、土砂のほかゴム、皮、革、落葉を含む。

昭和54年度～60年度横浜市ごみ分析結果より

表 6-5 焼却ごみ可燃分中の元素分析値

元素名	単位	現状	ケース1	ケース2
Cl	%	0.9	0.6	0.9
S	%	0.1	0.1	0.1
C	%	59.3	50.6	53.3
N	%	1.8	2.1	1.8
O	%	36.1	39.5	36.2
H	%	7.8	7.1	7.7

表 6-7 分別回収ごみ種別ごみ量

ごみ種	現状		分別収集ケース1		分別収集ケース2	
	組成 (%)	含有量 (t/日)	組成 (%)	含有量 (t/日)	組成 (%)	含有量 (t/日)
紙、セロファン	0	0.00	7.3	43.80	0.8	4.80
木片類	0	0.00	0.3	1.80	0	0.00
合成樹脂	0	0.00	10.1	60.60	0.4	2.40
金属	0	0.00	1.5	9.00	0.7	4.20
ガラス	0	0.00	4.9	29.40	4.2	25.20
合計	0	0	24.1	144.6	6.1	36.6

- (b) 受入供給方式：ピットアンドクレーン方式
- (c) 灰出し方式：ピットアンドクレーン方式
- (d) 通風方式：平衡通風方式
- (e) 集じん方式：ろ過集じん器方式
- (f) 有害ガス処理方式：乾式有害ガス除去方式+洗煙装置
- (g) 窒素酸化物除去方式：触媒脱硝方式
- (h) 排水処理方式
 - ごみピット排水：炉内噴霧処理
 - 工場排水：接触酸化→凝集沈殿→ろ過→活性炭吸着→再利用
 - 洗煙排水：凝集沈殿→ろ過→活性炭吸着→キレート吸着→下水道放流
- (i) 余熱利用設備方式：蒸気タービン発電
 - 抽気復水タービン 入口 298°C × 29 ata 出口 0.25 ata (タービン内部効率 0.8, タービン機械効率 0.97, 発電機効率 0.97)

(2) 設計基準

① ごみの性状 表 6-4, 表 6-5 および表 6-6 による。

② 焼却条件

- (a) 燃焼室出口温度 800°C 以上 950°C 以下
- (b) 燃焼室出口排ガス酸素濃度 6 %以上
- (c) 燃焼室内設定温度滞留時間 2 秒以上
- (d) 焼却残渣の熱灼減量 5 %以下 (600°C 3 時間)

(3) 排ガス排出基準

- | | |
|----------------------------|---|
| ① ばいじん | 0.02 g/Nm ³ (O ₂ = 12%) 以下 |
| ② 硫黄酸化物 (SO _x) | 20 ppm (O ₂ = 12%) 以下 |
| ③ 塩化水素 (HCl) | 15 ppm (O ₂ = 12%) 以下 |
| ④ 窒素酸化物 (NO _x) | 60 ppm (O ₂ = 12%) 以下 |
| ⑤ 水銀 | 0.05 mg/Nm ³ (O ₂ = 12%) 以下 |
| ⑥ ダイオキシン類濃度 | 0.5 ng/Nm ³ 以下
毒性等価換算濃度 (国際法) |

6.2 物質収支計算結果

各ケースについて 6.1 の計算条件を用い計算を行った。

計算結果は次のとおりである。

図 6-1 排ガス、空気、水、薬品、焼却灰等物質収支結果（3 炉分）

図 6-2 蒸気復水系統物質収支結果（3 炉分）

図 6-3 給排水系統物質収支結果（3 炉分）

6.3 熱収支計算結果

図 6-4 に熱収支図と各ケースの入熱出熱の内訳を示す。

6.4 ランニングコストの試算

各ケースについて、焼却炉および分別回収にかかるランニングコストの比較検討を行った。

6.4.1 試算条件

ごみの発生量は600 T/日とし焼却に要する単価および分別回収に要する単価を表6-8, 表6-9, 表6-10, 表6-11のように設定した。

表6-8 焼却条件

a	炉運転条件	3炉
b	運転時間	24 h/日, 330日/年
c	ごみ量, ごみ質条件	現状: 600 T/日 2,231 kcal/kg CASE 1: 455.4 T/日 1,753 kcal/kg CASE 2: 563.4 T/日 2,324 kcal/kg
d	炉立ち上げ回数	3回/年/炉
e	都市ガス代金	100円/Nm ³
f	電力料金	関西電力 特別高圧電力売電単価 7.59円/kwh, 基本料金1,700円/kw・月, 買電単価9.68円/kwh
g	水道料金	300円/m ³
h	下水道料金	400円/m ³
i	薬品代	表6-10による
j	油脂類代	表6-10による
k	人件費(焼却炉運転員)	30人 600万円/ごみT
l	工場建設費	5,000万円/ごみT
m	焼却ごみ収集コスト ³⁾	表6-11による
n	埋立てコスト	7,400円/輸送T, 6,120円/埋立てT

注) • m. 焚却ごみ収集コストは文献3)の収集運搬コストを参照した。
• n. 埋立てコストは京都市からフェニックスまでの概略費用を参考とした。

表6-9 分別回収条件

a	分別回収日数	330日/年
b	分別収集コスト ⁴⁾ に設定(表6-9)	焼却ごみ収集コスト + 20,000円/T
c	再商品化コスト ⁴⁾	紙・セロファン 10,000円/T 合成樹脂 87,000円/T ガラス 4,700円/T
d	再商品売却利益 ⁵⁾	合成樹脂(燃料油再成) 20,000円/T アルミ 40,000円/T 鉄(引取は含む) 0円/T

注) • b. 分別収集収集コストは焼却ごみ収集コストに文献4)の分別収集総コストを使用して分別収集アップ分を想定した。
• c. 再商品化コストは文献4)の再商品化単価より想定した。
• d. 売却利益は実勢の価格(1996年)を参考とした。

表6-10 薬品及び油脂類単価

設備名	薬品名	濃度%	単価円/unit	unit
排ガス処理設備	消石灰	100	32	kg
	反応助剤	100	70	kg
	アンモニア水	25	51	kg
	苛性ソーダ	24	25	kg
燃焼ガス冷却設備	脱酸剤	100	1,000	kg
	復水処理剤	100	1,000	kg
	清缶剤	100	450	kg
	塩酸	35	20	kg
	苛性ソーダ	24	25	kg
	カチオン樹脂	100	600	kg
	アニオノン樹脂	100	1,600	kg
灰出し設備	重金属安定化剤	100	600	kg
排水処理設備	塩酸	35	20	kg
	苛性ソーダ	24	25	kg
	塩化第二鉄	38	20	kg
	硫酸バンド	8	50	kg
	キレート	100	2,000	kg
	高分子助剤	100	1,300	kg
油脂	水銀キレート樹脂	100	3,000	kg
	非常用発電機燃料	—	57	kg
	潤滑油	—	400	kg
	一般用グリース	—	400	kg
	耐熱用グリース	—	1,950	kg
	油圧作動油	—	200	kg
	絶縁油	—	150	kg
タービン発電機潤滑油	—	400	kg	

表6-11 ごみ種別収集コスト

ごみ種	焼却ごみ収集コスト(円/T)	分別回収ごみ収集コスト(円/T)
紙・セロファン	20,000	40,000
木片類	52,000	72,500
合成樹脂	76,400	96,400
繊維	25,500	45,500
ゴム・皮革	25,500	45,500
厨芥類	14,000	34,000
草木類等	14,000	34,000
金属	71,000	91,000
陶磁器等	24,600	44,600
ガラス	24,600	44,600

6. 容器包装リサイクル法の導入による焼却の物質収支、熱収支の変化予想

6.4.2 ランニングコスト計算結果

各ケースにおける年間維持管理費用と処理トン当たりの費用を表6-12、表6-13に示す。

表6-12 年間維持管理費

項目	現状 費用(円/年)	分別収集ケース1 費用(円/年)	分別収集ケース2 費用(円/年)
都市ガス料金	3,600,000	3,600,000	3,600,000
電力料金	-374,902,000	-135,483,000	-370,093,000
水道代金	15,058,000	14,157,000	15,028,000
下水道料金	16,909,000	19,998,000	17,886,000
薬品代	210,097,000	126,233,000	205,841,000
油脂類代金	4,917,000	3,860,000	4,660,000
人件費(焼却炉運転員)	180,000,000	180,000,000	180,000,000
工場建設償却費	3,000,000,000	2,280,000,000	2,820,000,000
焼却ごみ収集コスト	5,355,583,000	3,057,932,000	4,960,415,000
埋立てコスト	518,795,000	262,431,000	352,422,000
焼却費用合計	8,930,057,000	5,812,728,000	8,189,759,000
分別回収コスト	0	3,252,011,000	636,728,000
再商品化コスト	0	1,929,965,000	123,829,000
再商品売却費	0	-432,432,000	-30,888,000
分別費用合計	0	4,749,544,000	729,669,000
処理費用合計	8,930,057,000	10,562,272,000	8,919,428,000
ごみton当たり焼却費用	45,101	29,357	41,362
ごみton当たり分別費用	0	23,988	3,685
ごみton当たり処理費用	45,101	53,345	45,048

表6-13 処理トンあたり維持管理費一覧表

項目	現状 費用(円/処理t)	分別収集ケース1 費用(円/処理t)	分別収集ケース2 費用(円/処理t)
都市ガス料金	18	24	19
電力料金	-1,893	-902	-1,991
水道代金	76	94	81
下水道料金	85	133	96
薬品代	1,061	840	1,107
油脂類代金	25	26	25
人件費(焼却炉運転員)	909	1,196	967
工場建設償却費	15,152	15,152	15,152
焼却ごみ収集コスト	27,048	20,348	26,680
埋立てコスト	2,620	1,746	1,896
焼却ごみton当たり焼却費用	45,101	38,657	44,032
分別回収コスト	0	68,151	52,718
再商品化コスト	0	40,445	10,252
再商品売却費	0	-9,062	-2,557
分別ごみton当たり費用	0	99,534	60,413

注) 費用の欄の- (マイナス) は収入を示します。

6.5 まとめ

物質収支計算結果より 600 T/日ごみ処理したときのごみ焼却処理施設から系外に排出される物質のごみ原単位の比較を表 6-14 に示す。

表 6-14 ごみ焼却処理施設から排出される物質の原単位

物 質 名	単 位	現 状	ケー ス 1	ケー ス 2
塩化水素	Nm ³ /T	0.0772	0.0496	0.0760
硫化水素	Nm ³ /T	0.1032	0.0664	0.1016
窒素酸化物	Nm ³ /T	0.3092	0.1988	0.3048
二酸化炭素	Nm ³ /T	404.6	270.5	399.4
煙突出口排ガス量	Nm ³ /T	5,168	3,516	5,068
全ボトムアッシュ量	T/T	0.1629	0.0794	0.1014
飛灰処理物	T/T	0.0309	0.0186	0.0303
放流水量	T/T	0.2135	0.2525	0.2260

放流水量を除きケース 1, ケース 2, 現状の順で各種排出量は少なくなっている。放流水量については湿式洗煙装置でガス中の水分が除去されるのでごみ中の水分が大きい順（ケース 1, ケース 2, 現状）に放流水量が多くなっている。物質収支および熱収支計算結果より蒸気発生量, 発電量, 発電効率およびごみ発電による CO₂ 負荷軽減量をごみ原単位を使用して算出したものを表 6-15 に示す。

表 6-15 発生蒸気量, 発電量, 発電効率及び CO₂ 負荷

	単 位	現 状	ケー ス 1	ケー ス 2
発 生 蒸 気 量	kg/T	3,282	1,970	3,442
発 電 量	kwh/T	397	218	419
発 電 効 率	%	15.29	8.40	15.51
炭素排出原単位	g-C/kwh	546	665	544
LNG 複合発電 炭素排出原単位 ⁵⁾	g-C/kwh		128	
差引炭素排出原単位	g-C/kwh	418	537	416
差引ごみ Ton 当り 炭素排出原単位	g-C/T	1.66 × 10 ⁵	1.17 × 10 ⁵	1.74 × 10 ⁵
差引二酸化炭素排出量	Nm ³ /T	310	219	306

当然のことながら現状, ケース 2, ケース 1 の順に発生蒸気量, 発電量, 発電効率は高くなっているが二酸化炭素も同様の順となっている。環境への負荷を LNG 複合発電の炭素排出原単位を使用して差引二酸化炭素増加排出量をみた場合, 順位は変わらないが発電による効果でその差は縮まっている。

経済性を比較するために仮定を使用してランニングコストを試算した。

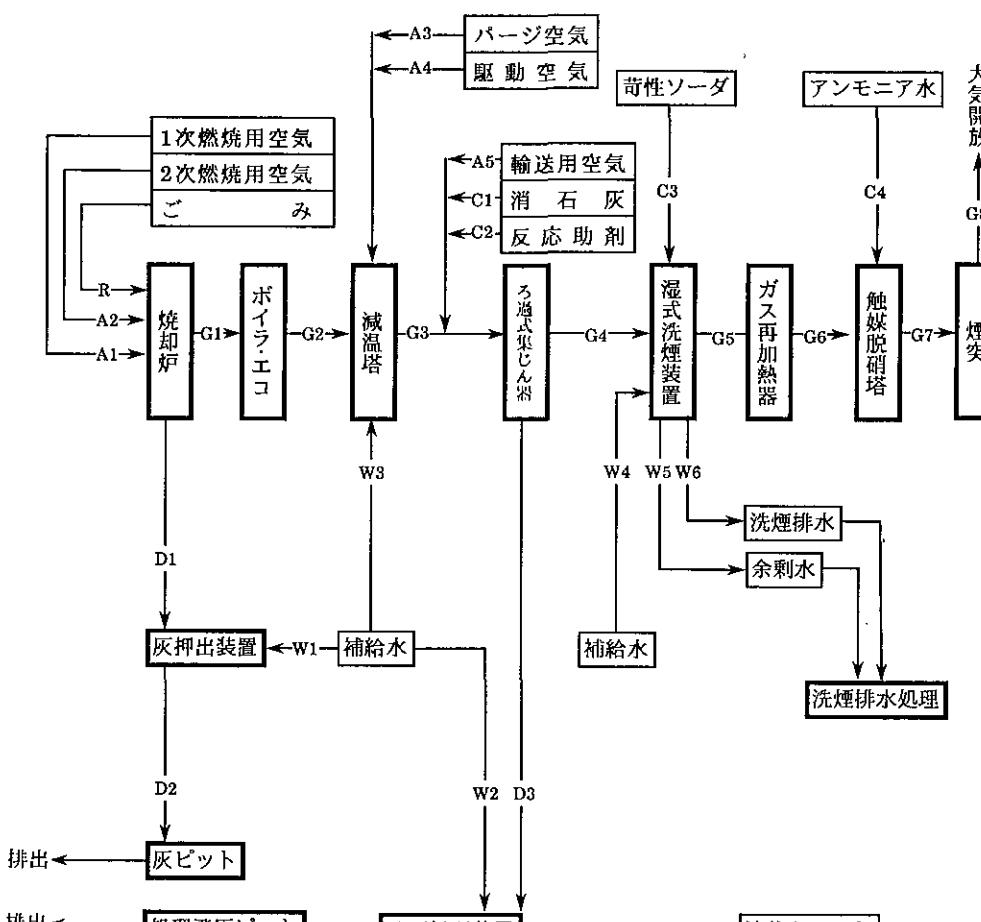
人件費, 建設量, 収集コスト等概算設定しているので, ランニングコストの目安を示す程度となるが結果としてごみトン当たりの処理費用は現状が最も安く, 次に僅差でケース 2 となり, ケース 1 が最も高い。

原因としては, 発電による利益の大小, 分別回収コストが再商品売却よりも大幅に高いことが上げられる。

コスト的にみると回収をすればするほど費用は高くつく。再商品の売却が高くならない限りそして分別収集コストを安くしない限り経済的視点のみからはリサイクルは成立しないことを示唆している。

参考文献

- 1) 京都市: 家庭ごみ細組成調査, 1993 他
- 2) 社団法人全国都市清掃会議: 1987 ごみ処理施設構造指針解説, p. 82
- 3) 中村, 勝見, 高月, 田中: 处理コストに着目した処理困難性の評価, 1994, 都市清掃第 202 号
- 4) 由田秀人: 容器包装廃棄物法の概要と今後の動向 1995 環境計画センター調査研究部会
- 5) 和久秀樹: 「CO₂ 回収型発電システム」におけるエネルギー収支および CO₂ 排出量のライフサイクル分析: 1995. 7 エネルギー総合工学, Vol. 18, No. 2



ガス量

位置	名称	現 状		ケース1		ケース2	
		流量 Nm ³ /h	温度 °C	流量 Nm ³ /h	温度 °C	流量 Nm ³ /h	温度 °C
G1	焼却炉出口ガス	128,420	950	88,300	950	125,970	950
G2	ボイラ出口ガス	128,420	220	88,300	220	125,970	220
G3	減温塔出口ガス	136,630	150	94,700	150	134,070	150
G4	ろ過式集じん器出口ガス	139,180	145	97,250	143	136,620	145
G5	ガス洗浄塔出口ガス	129,210	53	87,910	53	126,690	53
G6	ガス再加熱器出口ガス	129,210	210	87,910	210	126,690	210
G7	触媒脱硝塔出口ガス	129,210	205	87,910	205	126,690	205
G8	煙突出口ガス	129,210	195	87,910	195	126,690	195

空気量

位置	名称	現 状		ケース1		ケース2	
		流量 Nm ³ /h	温度 °C	流量 Nm ³ /h	温度 °C	流量 Nm ³ /h	温度 °C
A1	一次燃焼用空気	79,770	65	55,760	125	77,370	55
A2	二次燃焼用空気	27,640	150	15,210	150	27,830	150
A3	バージ空気	1,800	20	1,800	20	1,800	20
A4	駆動空気	900	20	900	20	900	20
A5	輸送用空気	2,550	20	2,550	20	2,550	20

水量(単位=kg/h)

位置	名称	現 状	ケース1	ケース2
W1	灰押出し機補給水	679	331	422
W2	飛灰安定化装置補給水	173	104	169
W3	減温塔補給水	4,431	2,976	4,344
W4	ガス洗浄塔補給水	0	0	0
W5	ガス洗浄塔余剰水	7,886	7,430	7,860
W6	洗煙排水	184	118	182

薬品量(単位=kg/h)

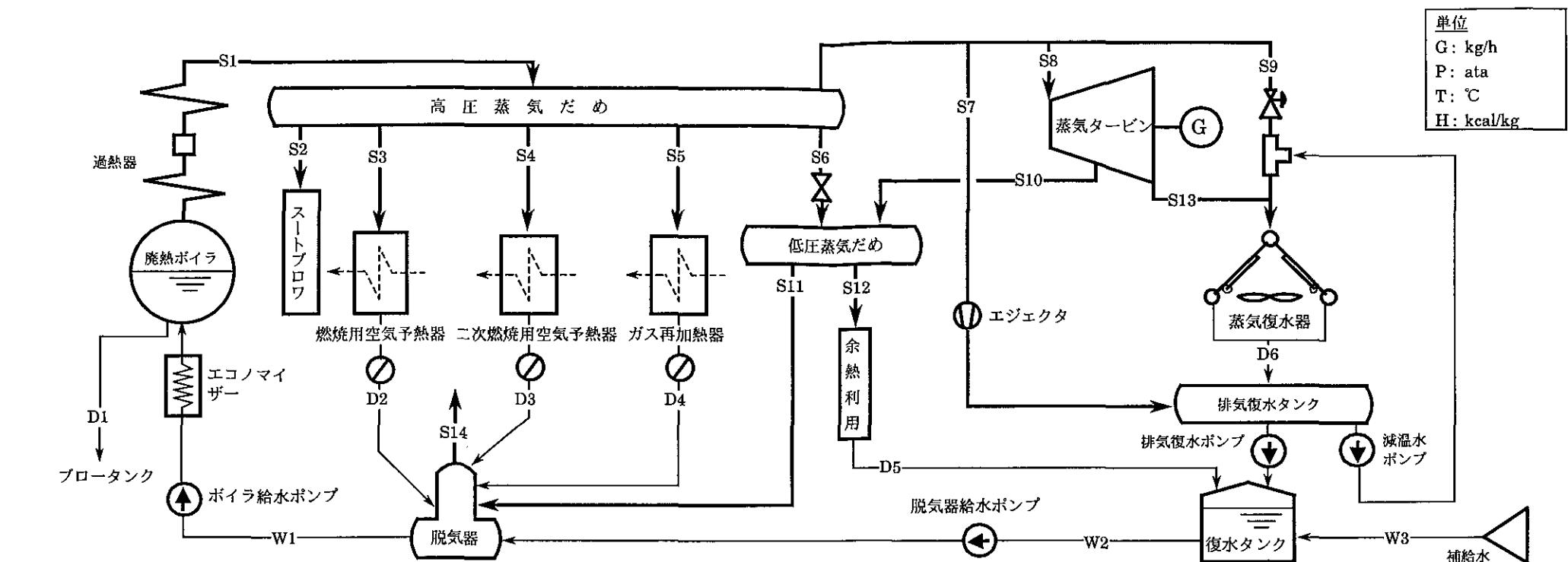
位置	名称	現 状	ケース1	ケース2
C1	バグフィルタ用消石灰	158.30	77.79	154.64
C2	反応助剤	53.31	37.07	52.32
C3	苛性ソーダ(24%)	50.29	32.33	49.58
C4	アンモニア水(25%)	37.19	23.91	36.66
C5	液体キレート	23.08	13.90	22.58

ごみ焼却量、灰量等(単位=kg/h)

位置	名称	現 状	ケース1	ケース2
R	ごみ焼却量	25,000	18,975	23,475
D1	ストーカ乾灰量	3,393	1,654	2,112
D2	灰押出し湿灰量	4,072	1,985	2,535
D3	集じん装置捕集灰	577	348	565
D4	飛灰処理物	773	466	757

有害物質排出量

名 称	単位	現 状		ケース1		ケース2	
		発生量	処理後	発生量	処理後	発生量	処理後
塩化水素	Nm ³ /h	59.71	1.93	25.91	1.24	58.17	1.90
硫化水素	Nm ³ /h	6.98	2.58	5.14	1.66	6.90	2.54
窒素酸化物	Nm ³ /h	19.32	7.73	12.42	4.97	19.05	7.62
二酸化炭素	Nm ³ /h	10,116.06	10,116.06	6,763.35	6,763.35	9,985.26	9,985.26
全排出灰量	kg/h	-	4,072	-	1,985	-	2,535
飛灰処理物	kg/h	-	773	-	466	-	757



現状															
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14		
G 82050	G 0	G 2400	G 2415	G 14415	G 0	G 300	G 62520	G 0	G 5830	G 5830	G 0	G 56690	G 200		
P 31	P 29	P 28	P 10	P 5	P 5	P 0.25	P 4								
T 300	T 298	T 295	T 195	T 181	T 181	T 65	T 143								
H 715.1	H 672.3	H 672.3	H 672.3	H 559.5	H 653.7										

運転炉数	3 炉
焼却量	600 t/日
ごみ質	2,231 kcal/kg
消費電力	2,706 kW
契約電力	3,200 kW

分別収集ケース1															
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14		
G 49260	G 0	G 3930	G 1335	G 9810	G 0	G 300	G 33890	G 0	G 2580	G 2580	G 0	G 31300	G 200		
P 31	P 29	P 28	P 10	P 5	P 5	P 0.25	P 4								
T 300	T 298	T 295	T 195	T 181	T 181	T 65	T 143								
H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 672.3	H 672.3	H 672.3	H 559.5	H 653.7		

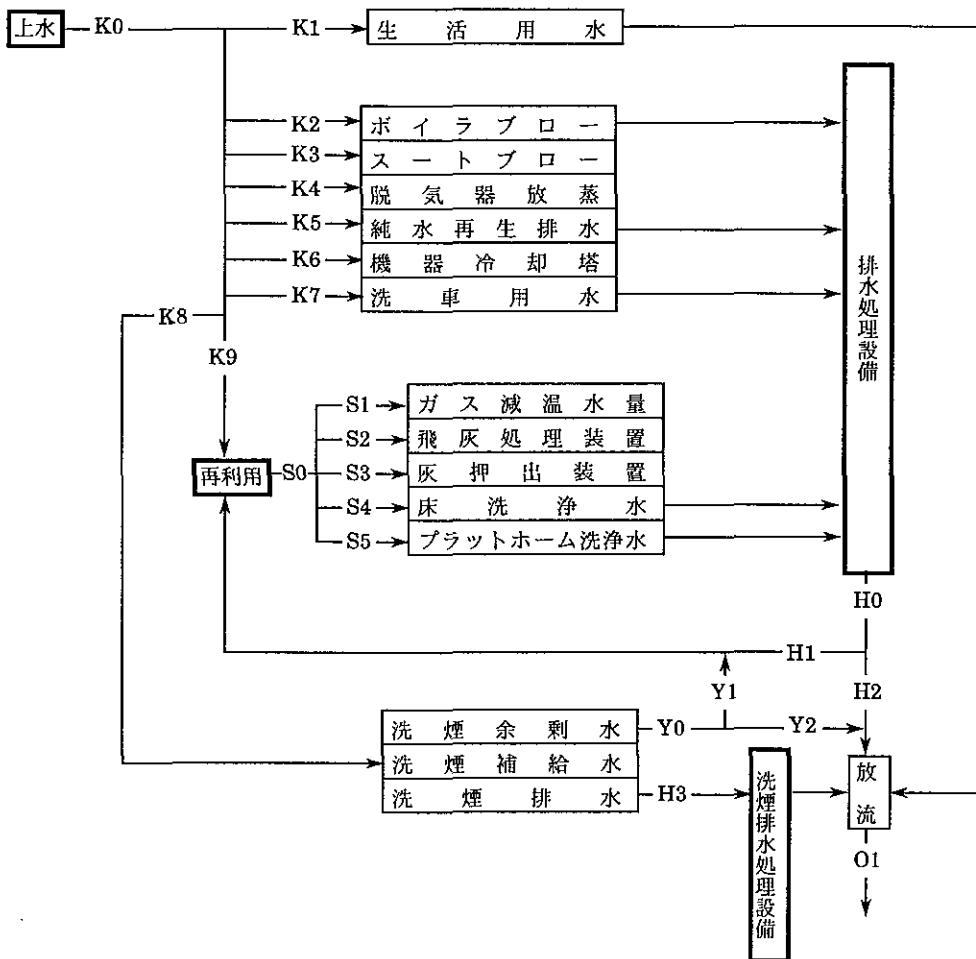
運転炉数	3 炉
焼却量	455.4 t/日
ごみ質	1,753 kcal/kg
消費電力	2,341 kW
契約電力	2,800 kW

分別収集ケース2															
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14		
G 80790	G 0	G 1815	G 2430	G 14145	G 0	G 300	G 62100	G 0	G 5900	G 5900	G 0	G 56200	G 200		
P 31	P 29	P 28	P 10	P 5	P 5	P 0.25	P 4								
T 300	T 298	T 295	T 195	T 181	T 181	T 65	T 143								
H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 715.1	H 672.3	H 672.3	H 672.3	H 559.5	H 653.7		

運転炉数	3 炉
焼却量	563.4 t/日
ごみ質	2,324 kcal/kg
消費電力	2,706 kW
契約電力	3,200 kW

図 6-2 蒸気復水系統物質収支結果（3炉分）

運転炉数 3 炉



上水給水量(T/日)

位置	名称	現状	ケース1	ケース2
K1	生活用水	24.0	24.0	24.0
K2	ポイラブロー	19.7	11.8	19.4
K3	ストブロー	6.0	6.0	6.0
K4	脱気器放蒸	4.8	4.8	4.8
K5	純水再生排水	4.6	3.4	4.6
K6	機器冷却塔	80.0	80.0	80.0
K7	洗車用水	13.0	13.0	13.0
K8	洗煙補給水	0.0	0.0	0.0
K9	再利用補給水	0.0	0.0	0.0
K0	上水給水量	152.1	143.0	151.8

再利用水量(T/日)

位置	名称	現状	ケース1	ケース2
S1	ガス減温水量	106.4	71.4	104.3
S2	飛灰処理装置	4.2	2.5	4.1
S3	灰押出装置	16.3	7.9	10.1
S4	床洗浄水	2.0	2.0	2.0
S5	プラットホーム洗浄水	3.0	3.0	3.0
S0	再利用水量	131.9	86.8	123.5
H1	排水設備再利用水量	42.3	33.2	42.0
Y1	洗煙余剰水再利用水量	89.6	53.6	81.5
K9	再利用補給水	0.0	0.0	0.0

洗煙余剰水量(T/日)

位置	名称	現状	ケース1	ケース2
Y1	洗煙余剰水再利用水量	89.6	53.6	81.5
Y2	洗煙余剰水放流水量	99.7	124.7	107.1
Y0	洗煙余剰水量	189.3	178.3	188.6

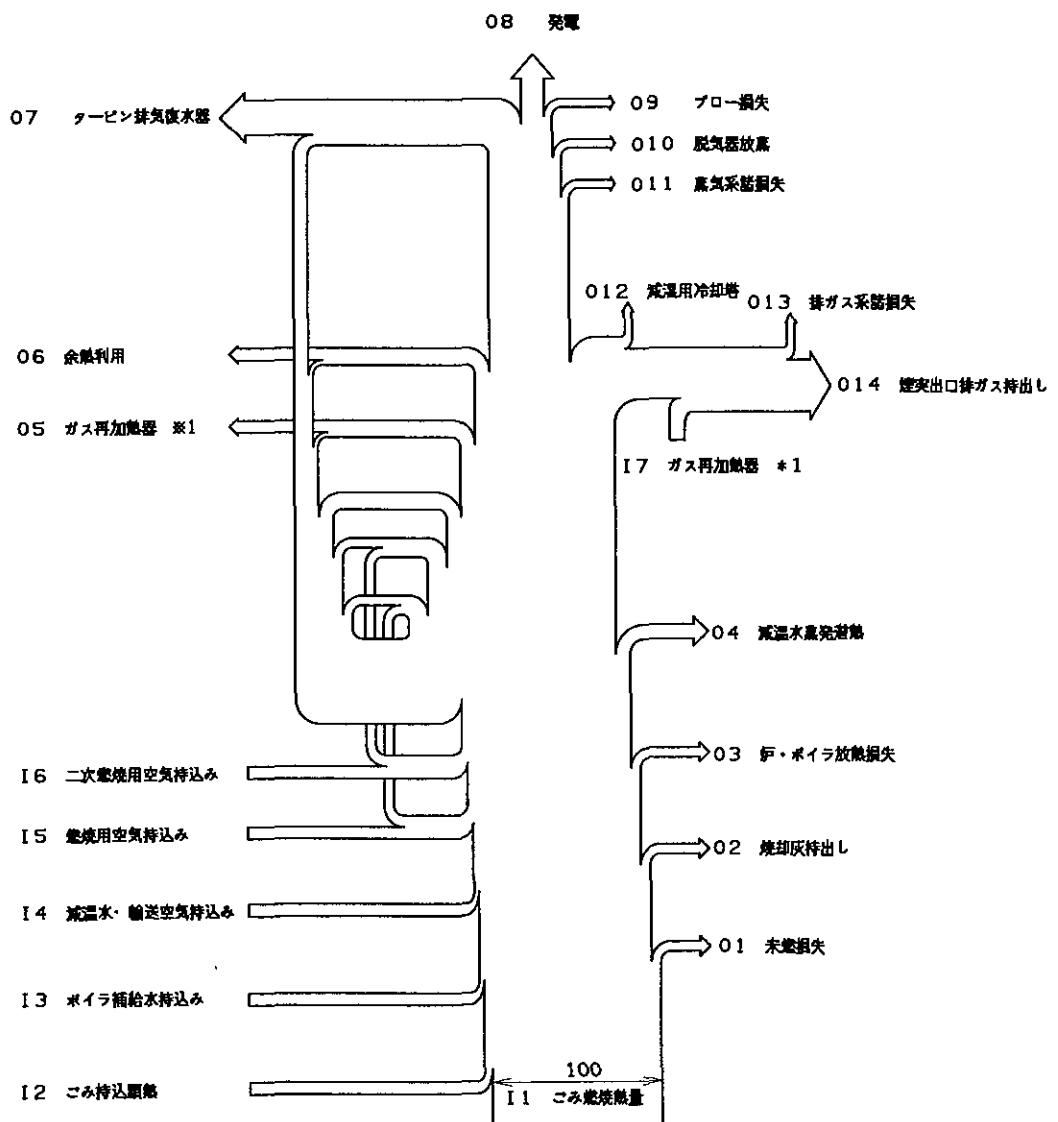
排水量(T/日)

位置	名称	現状	ケース1	ケース2
K2	ポイラブロー	19.7	11.8	19.4
K5	純水再生排水	4.6	3.4	4.6
K7	洗車用水	13.0	13.0	13.0
S4	床洗浄水	2.0	2.0	2.0
S5	プラットホーム洗浄水	3.0	3.0	3.0
H0	排水量	42.3	33.2	42.0

放流水量(T/日)

位置	名称	現状	ケース1	ケース2
K1	生活用水	24.0	24.0	24.0
H2	プラント排水系余剰水量	0.0	0.0	0.0
Y2	洗煙余剰水放流水量	99.7	124.7	107.1
H3	洗煙排水	4.4	2.8	4.4
O1	放流水量	128.1	151.5	135.5

熱収支図



焼却量及びごみ質

ケース	現状	分別収集ケース1	分別収集ケース2
焼却量	600 t/日	455.4 t/日	563.4 t/日
焼却ごみ質	2,231 kcal/kg	1,753 kcal/kg	2,324 kcal/kg

入熱

記号	名称	ごみ燃焼発生熱量に対する比率(%)			入出熱量(Mcal/h)			備考
		現状	分別収集 ケース1	分別収集 ケース2	現状	分別収集 ケース1	分別収集 ケース2	
I1	ごみ燃焼発生熱量	100.00	100.00	100.00	55,775.0	33,263.2	54,555.9	
I2	ごみ持込顯熱	0.27	0.34	0.26	150.0	113.9	140.9	
I3	ボイラ補給水持込み	0.04	0.04	0.04	20.5	13.9	20.3	
I4	減温水・輸送空気持込み	0.22	0.28	0.22	122.4	92.9	120.6	
I5	燃焼用空気持込み	0.89	1.04	0.88	496.0	346.7	481.0	
I6	二次燃焼用空気持込み	0.31	0.28	0.32	171.8	94.6	173.0	
I7	ガス再加熱器	12.03	13.72	12.06	6,711.1	4,564.0	6,581.3	
	入熱合計	113.76	115.70	113.78	63,446.8	38,489.2	62,073.0	

出熱

記号	名称	ごみ燃焼発生熱量に対する比率(%)			入出熱量(Mcal/h)			備考
		現状	分別収集 ケース1	分別収集 ケース2	現状	分別収集 ケース1	分別収集 ケース2	
O1	未燃損失	2.27	1.81	1.52	1,267.9	603.2	827.8	
O2	焼却灰持出し	0.82	0.67	0.52	458.1	223.3	285.2	
O3	炉・ボイラ放熱損失	1.40	2.34	1.43	780.0	780.0	780.0	
O4	減温水蒸発潜熱	5.12	5.76	5.13	2,855.1	1,917.6	2,798.5	
O5	ガス再加熱器	12.03	13.72	12.06	6,711.1	4,564.0	6,581.3	
O6	余熱利用	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	
O7	タービン排気復水器放熱	50.85	47.35	51.54	28,362.4	15,749.0	28,120.4	
O8	発電	15.29	14.09	15.51	8,529.7	4,686.2	8,460.9	
O9	プロ一損失	0.37	0.37	0.37	204.7	122.9	201.5	
O10	脱気器放蒸	0.23	0.39	0.24	130.7	130.7	130.7	
O11	蒸気系諸損失	1.44	1.51	1.45	805.9	503.9	790.1	
O12	減温用冷却塔	7.96	9.29	7.99	4,440.3	3,088.6	4,358.6	
O13	排ガス系諸損失	1.11	1.47	1.13	620.8	488.7	618.2	
O14	煙突出口排ガス持出し	14.85	16.93	14.88	8,280.1	5,631.1	8,119.8	
	出熱合計	113.74	115.70	113.77	63,446.8	38,489.2	62,073.0	

図 6-4 熱収支図と各ケースの入熱出熱の内訳

7. ストーカ炉・流動床炉の今後の課題

現在、ごみ焼却プラントにおける課題として、図7-1にまとめるとおり、熱回収の高効率化、低公害型焼却炉、ランニングコストの低減等があげられている。さらに、熱回収の高効率化のための課題には、燃焼技術に係わるもの、熱回収技術に係わるもの、熱の有効な利用先の拡大等があり、低公害型焼却炉のための課題としては、燃焼技術（有害物質の発生抑制）、排ガス処理技術、灰処理技術等の開発がある。排ガス処理技術および灰処理技術に関しては、他章においてそれぞれ単独に取上げられ詳述されるので、本章では、熱回収の高効率化および燃焼技術の改善による有害物質の発生抑制について述べる。

7.1 热回収の高効率化

7.1.1 ごみ焼却プラントにおける熱の流れ

ごみの保有する熱量は、次のように変化しプラント外へ出ていく。

ごみの燃焼により発生した熱は、炉内で約1,000°Cの温度を持っているが、ボイラで冷却されて200～300°Cとなって、排ガスにより持ち出されていく。この温度差700～800°C分の熱がボイラで吸収され、蒸気の保有する熱に変換される。したがって、ボイラの効率（熱回収率）は通常70～80%であり、20～30%の熱は排ガスにより持ち出されている。

発生した蒸気は、一部排ガスの再加熱や白煙防止等のプロセス用に消費される他、放熱、ストーブなどで極わずかに消費されるが、消費される熱量は排ガス処理の方式により決定されるといつても過言ではない。

消費された残りの蒸気は、冷暖房、給湯などへの直接利用およびタービン発電機により電気エネルギーに変換され利用される。

熱エネルギーの電気への100%の変換はあり得ず、廃熱が復水器より放出される。

以上のとおり、ごみの持つ熱は、大きく以下の5種のエネルギー形態としてプラントからでていくと捉えることができる。

- ① 排ガスにより持ち出される熱
- ② プロセスにより消費される熱
- ③ 冷暖房・給湯などに利用される熱
- ④ 電気エネルギーに変換され利用される熱
- ⑤ 復水器により放出される熱

したがって、熱回収の効率を向上させるためには、ボイラーでの熱回収率の向上、プロセスで消費される熱の低減、電気への変換効率の向上および復水器で放出される低レベルの熱を回収し利用すること、が必要である。以下に各々の方策について述べる。

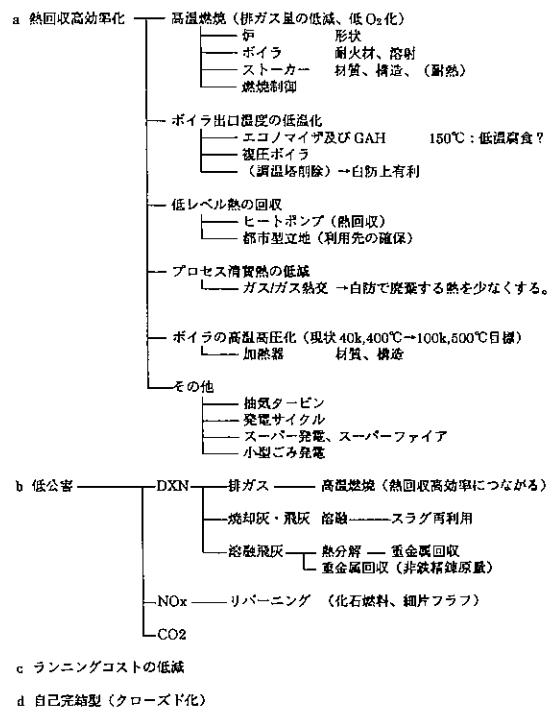


図7-1 焼却炉の今後の課題

7.1.2 ボイラでの熱回収率の向上

ボイラ自体からの放熱やボイラブロー等による損失は入熱のせいぜい 1 ~ 2 %であり、そのボイラでの熱損失は、ほとんどが排ガスが持ち出す熱損失である。したがって、排ガス量を少なくし、かつ、ボイラ出口排ガス温度を下げれば、排ガスの持ち出す熱損失が減少し、ボイラでの熱回収率が向上する。

(1) 排ガス量の低減（高温燃焼）

ごみは化石燃料に比べ成分が不均質であり、多量の水を含んでいるため燃焼速度が遅く空気の利用効率が悪い。したがって、化石燃料に比較して高い空気比で焼却されている。また、ごみの燃焼において発生する飛灰は融点が低く、低空気比での高温燃焼を行うと、炉壁等にクリンカを生成し、焼却炉の安定操業に支障をきたすため、炉温冷却用として過剰空気が必要となっている。

以上の問題を解決し、排ガス量の低減を図るための課題は、下記のとおりである。

- ① ごみの均質化・含水率低減を図る前処理システムの検討
- ② 前処理後のごみに適した燃焼システムの検討
- ③ 低空気比燃焼による排ガス量の低減
- ④ 酸素富化空気による燃焼システムの検討
- ⑤ 水冷壁・排ガス再循環など炉温冷却方式の検討
- ⑥ 高温燃焼に対応した炉形状、ボイラおよびストーカの材質、並びに、燃焼制御方式の検討

(2) ボイラ出口温度の低温化

ごみ焼却プラントにおけるボイラは、ガス冷却設備として位置づけられており、従来、高温の燃焼排ガスを冷却し、後流の排ガス処理設備、通風設備の各機器に悪影響を与えないようにするのが第1の目的であった。そのため、ボイラ出口排ガス温度は 300°C 程度が一般的な値であったが、熱回収率向上の要望の高まり、排ガス処理設備でのバグフィルタの採用などにより、ボイラ出口排ガス温度は低下の傾向にあり、エコノマイザを装備したボイラが普及してきた。最近では、ボイラ出口排ガス温度を 190 ~ 220°C で計画するものが増えており、一部ではさらに低温化を指向しているものもある。

しかし、多少排ガス温度を下げても、熱回収率の大幅な向上にはつながらないこと、排ガス温度を下げることで発生するエコノマイザの低温腐食、伝熱面積の増加等の問題を総合的に検討し、実用的な技術開発を進める必要がある。

現在、ボイラ出口排ガス温度の低減のために、下記の課題が検討されている。

- ① エコノマイザーおよびガスエアヒータによる排ガス温度の低減
- ② 排ガス温度低下に伴う低温腐食対策
- ③ 複圧ボイラの採用

7.1.3 プロセス消費熱の低減

先にも述べたとおり、ごみ焼却プラントにおいて、プロセス上消費される熱（蒸気）の大部分は、触媒脱硝、白煙防止のための排ガス加熱用として使用される。これらの消費熱を低減するために、下記の課題が検討されている。

- ① ガス / ガス熱交換器の採用
- ② 排ガス中水分率の低減（ボイラ出口の排ガス温度低減とリンク）
- ③ 排ガス量の低減（高温燃焼とリンク）
- ④ 低温活性触媒の開発

7.1.4 発電効率の向上

ごみ発電状況の変遷は表 7-1 に示すとおりである。

最近では、ごみ焼却熱を高度に有効利用するための一つの方策として、各種の高効率ごみ発電システムが検討されている。本節では、各種ごみ発電システムの代表例についてシステム構成、特長、発電効率等の概要と今後の動向について述べる。

現在考えられている多くの高効率ごみ発電システムは表 7-2¹⁾のように分類でき、大きく『ごみ焼却熱単独利

表 7-1 ごみ発電状況の変遷

年 代	計画ごみ 発 热 量	発 電 方 式	蒸 気 壓 力 × 温 度	ボイラ出口 排ガス温度	タービン形式	タービン 排 気 圧	ボイラ効率	発電効率
昭和 60 年 以 前	1500 ~ 2000 kcal/kg	所内消費分を 発電	15 ~ 20 atg × 鮎和 または 200°C 前後	約 300°C	背压タービン	0.3 ~ 0.5 atg	70 ~ 75%	5 ~ 10%
昭和 60 年 以 降	2000 ~ 2500 kcal/kg	積極発電	20 ~ 24 atg × 250 ~ 290°C	約 250°C	復水または 抽気復水タービン	0.3 ~ 0.5 ata	75 ~ 80%	10 ~ 15%
最 近 (平成 7 年)	2500 ~ 3000 kcal/kg	高効率発電	24 ~ 40 atg × 300 ~ 400°C	190 ~ 220°C	抽気復水タービン	0.2 ~ 0.3 ata	80 ~ 85%	15 ~ 20%

表 7-2 高効率ごみ発電の分類と適用例

発 電 方 式	ボイラ出口蒸気		高圧タービン入口		再熱タービン入口		発電効率 (%)	備 考
	温 度 (°C)	压 力 (ata)	温 度 (°C)	压 力 (ata)	温 度 (°C)	压 力 (ata)		
A ごみ焼却熱単独利用方式								
1 高温・高圧ボイラ方式								
	a 空冷復水器	380 ~ 500	37 ~ 100	375 ~ 495	35 ~ 99	—	20 ~ 25	* 1
2 湿分分離・蒸気再熱方式	b 水冷復水器	380 ~ 500	37 ~ 100	375 ~ 495	35 ~ 99	—	25 ~ 30	* 2
	約 300	50 ~ 80	約 295	49 ~ 79	240 ~ 200	10 ~ 11	20 ~ 23	* 1
3 ボイラ内再熱器設置方式								
	a タービン出口湿分非分離	約 300	50 ~ 55	約 295	49 ~ 54	約 295	約 8	19 ~ 20
4 2段再生サイクル	b タービン出口湿分分離	約 300	70 ~ 80	約 295	69 ~ 79	約 190	約 9	21 ~ 22
	約 400	約 80	約 395	約 79	—	—	23 ~ 25	* 1
5 蒸気タービン排熱回収方式	5 段再生サイクル	400 ~ 440	50 ~ 80	395 ~ 435	49 ~ 79	—	25 ~ 28	* 2
	蒸気タービン排熱回収方式	400 ~ 440	50 ~ 80	395 ~ 435	49 ~ 79	—	—	—
B 異種燃料併用方式								
	1 ガスターイン組込み方式	約 300	50 ~ 80	395 ~ 445	46 ~ 76	—	20 ~ 30	* 2
2 異種燃料焚蒸気昇温方式	2 異種燃料焚蒸気昇温方式	約 300	50 ~ 80	395 ~ 545	46 ~ 76	—	20 ~ 30	* 2

注：1 ごみ焼却能力 600 ~ 800 t/d (ごみ低位発热量：3,000 kcal/kg) を対象として試算。

2 A-2, A-3, B-1, B-2 の方式のボイラ出口温度は、炭素鋼钢管の高温腐食防止のため約 300°C とした。

3 A-4 方式は、『脱気器 + 低圧給水加熱器』を対象とした。

4 A-5 方式は、『水冷復水器 + 第 1 種ヒートポンプ』を対象とした。

5 B 方式では、異種燃料の持込熱量を総入熱の 10 ~ 40% 程度とし、発電効率は、総持込熱量ベースで計算した。

6 備考欄 * 1 は空冷復水器を使用しタービン背圧を 0.22 ata とした場合を、* 2 は水冷復水器を使用しタービン背圧を 0.05 ata とした場合の試算を示す。

用』と『異種燃料併用』とに集約できる。これらの各システムは、プラントの立地条件、計画条件（都市計画との関係を含む。）によって、その得失が大きく変わるため、計画に当たっては各方式の組み合わせも考慮に入れねばならない。

(1) 各方式の主な特長¹⁾

各方式の代表的な構成例を、図 7-2 ~ 図 7-8 に示す。

a 高温高圧ボイラ方式 (図 7-2)

ごみ焼却ボイラの蒸気温度を極力高くし、蒸気タービンでの有効熱落差を増大する方式である。（現在国内では、380°C × 37 ata が最高であるが、これを 400 ~ 500°C × 40 ~ 100 ata とする。）

ただし、蒸気温度および圧力を上げ過ぎると、加熱器およびボイラ耐圧部の鋼材重量の増加に伴う建設費の増加、給水ポンプの所用電力の増加、加熱器管および蒸発管に対する高温腐食の発生、等の問題が出てくるため、効果的な範囲で必要最低限の上昇に留めるのが基本計画上の重要なポイントである。

具体的には、蒸気圧力を極力高くし、蒸気温度はタービン効率およびタービン背圧を考慮して、タービン出口蒸気乾き度がドレンアタック防止のための許容下限（86 ~ 87% 程度）に近くなるよう選定するのが効果的である。

本方式実用化のためには、加熱器管の高温腐食防止対策が必要であるが、現在、各ごみ焼却炉メーカーにおいて、炉・ボイラの構造面および燃焼技術面での対策ならびに高温耐食材料の開発が行われている。

本方式は、異種燃料を用いず、また、湿分分離器、再熱器、再熱タービン等を設置せずに発電効率を 23 ~ 30% 程度に向上させることが可能であり、今後最も有望な方式の一つと考えられる。さらに、後に述べるタービン排熱回収方式との組合せにより廃熱の活用を図ることで、さらにメリットが拡大する。

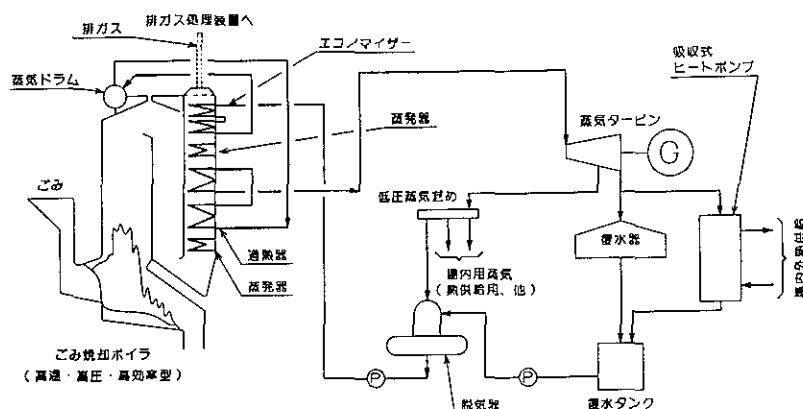


図 7-2 高温高圧ボイラ方式

b 湿分分離・蒸気再熱方式 (図 7-3)

ボイラの加熱器管の高温腐食を防止するため、蒸気温度を低く (300°C 程度) 抑えた上で、蒸気圧力を高くし、さらにタービン出口蒸気の乾き度をドレンアタック防止の許容下限とするため、高圧タービン出口の湿り蒸気から湿分を分離した後、高圧蒸気の一部を用いて再加熱の上、再熱タービンを駆動する方式である。この類似方式は、原子力発電において既に採用されているが、高圧・高温ボイラ方式に比べ、湿分分離器、再熱器および再熱タービン等の機器が必要となる。

本方式では、ボイラ出口蒸気圧力が高い程、また、蒸気温度が飽和温度に近い程、発電効率が向上する傾向があるが、ボイラ出口蒸気圧力の高圧化に伴いボイラ水管鋼材の温度が上昇するので、高温腐食対策が必要となる。また、蒸気加熱式再加熱器の過大化を防止するために高圧蒸気の温度は極力飽和蒸気温度に近づける必要があり、高圧タービン入口でのドレン切り対策が必要となる場合がある。

c ボイラ内再加熱器設置方式 (図 7-4)

先述の『湿分分離・蒸気再熱方式』と同様の目的で、高圧タービン出口蒸気をごみ焼却ボイラ内に設置した再熱器まで戻し、ごみ燃焼排ガスで再加熱の上、再熱タービンを駆動する方式である。なお、蒸気圧力が高い (70 ~ 80 ata 以上) 場合には、高圧タービン出口の湿り蒸気からの湿分分離を追加する方式が有効である。

本方式を採用する場合、再熱蒸気の温度制御の観点からボイラ、高圧タービンおよび再熱タービンを 1 系列とする事が望ましいため、施設計画上の制約条件となる。また、再熱蒸気配管での圧力損失が発電効率向上の阻害要因となるため、施設計画時に十分配慮する必要がある。

d 再生サイクル方式 (図 7-5)

ボイラ水管の腐食を避けるため、ボイラの給水温度は排ガスの酸露点 (130 ~ 140°C) 以上とすることが望ましいため、復水を加熱 (再生) する必要がある。従来、脱気器のみを用いた 1 段再生が多く採用されてきたが、抽気点を低圧側にするほど発電効率が良くなるので、低圧給水加熱器を追加設置した 2 段再生方式や各種の多段再生方式

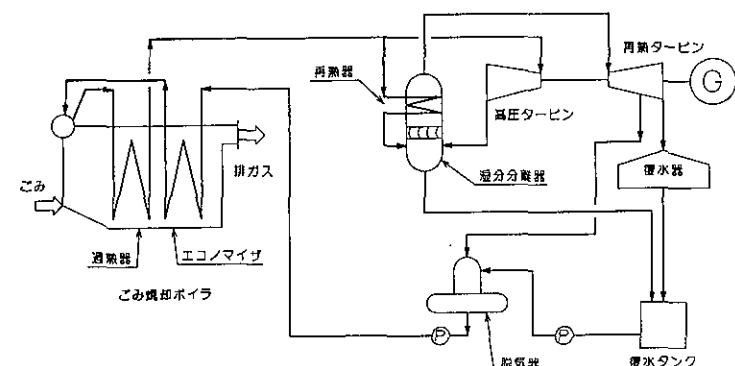


図 7-3 湿分分離・蒸気再熱方式

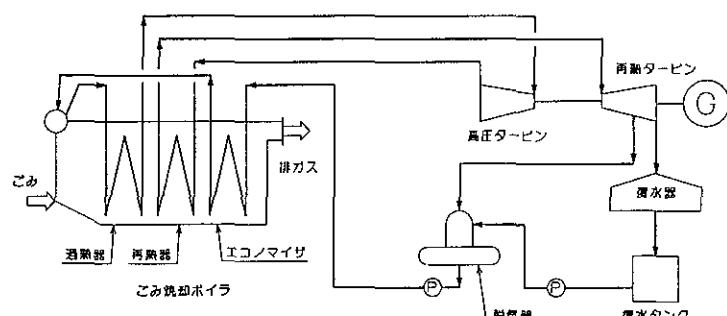


図 7-4 ボイラ内再熱器設置方式

が、発電効率向上のための再生サイクルとして検討・採用されている。

ただし、2段以上の再生方式は、水冷復水器を用いてタービン背圧を0.05 ata程度まで下げる場合は効果が大きくなるが、空冷復水器の場合（タービン背圧が0.22 ata以上）では、効果が十分ではなく、設備費を含めて導入効果を検討する必要がある。また、ごみ焼却ボイラでは、多段再生サイクルにより給水温度を上げると、排ガス温度低減の手段が実質的にエコノマイザーしかないため、ボイラ出口排ガス温度が上昇し、かえって発電効率が低下する傾向がある。

以上のとおり、本方式では、水冷復水器の採用、および、再生式空気予熱器等のボイラ出口排ガス温度低減手段の開発が課題となる。

e タービン排熱回収方式（図7-6）

水冷復水器を用いてタービン背圧を0.05 atmまで下げ、最大限タービンで仕事をさせた後、吸収式ヒートポンプを用いてタービン排熱を回収し復水予熱に活用する方式である。場内・外での熱利用のニーズが少なく、発電を最大限とすることが求められる場合に有効な方式である。

現状の吸収式ヒートポンプ（第1種）では、駆動蒸気からの入熱量の0.6～0.7倍の熱量を低温廃熱（30～60℃）から回収して合計1.6～1.7倍の出熱を得ることができるが、その専有面積がかなり大きいので、極力コンパクト化して設備費の低減を図り、導入効果を高めることが課題となる。

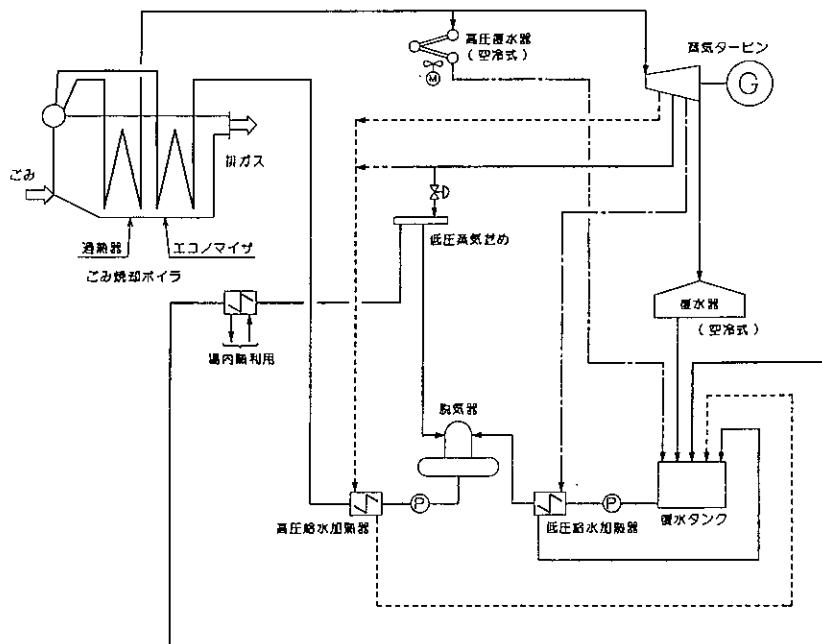


図 7-5 再生サイクル方式

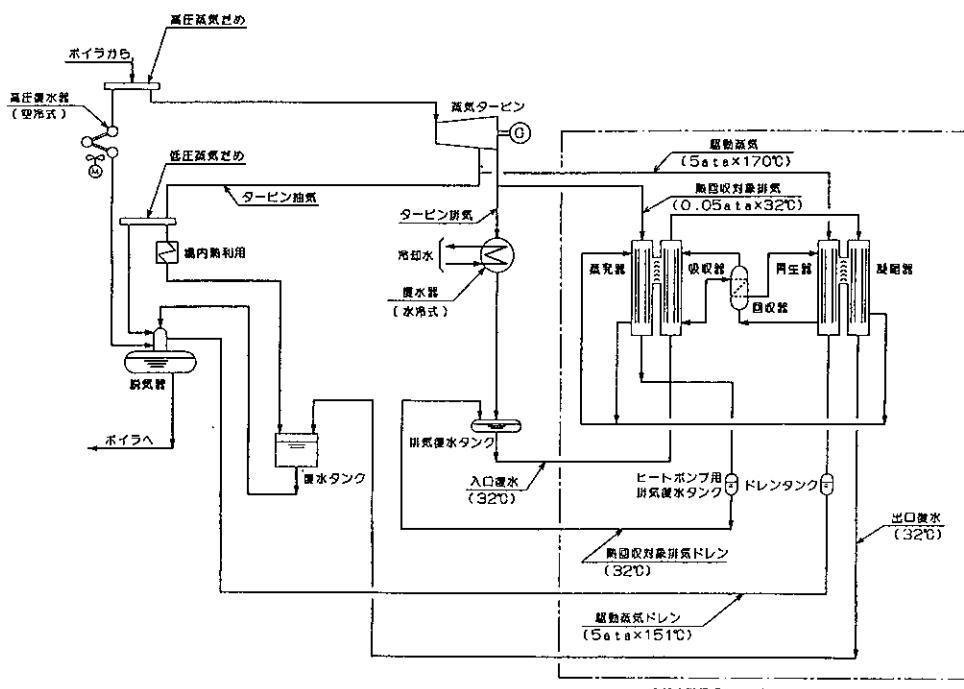


図 7-6 タービン排熱回収方式

f ガスタービン組込み方式 (図 7-7)

ガスタービンによる発電出力の向上、ガスタービン廃熱ボイラによる発電用蒸気の発生、ガスタービン排気加熱器での蒸気昇温およびこれに対応したごみ焼却ボイラの高圧化やタービン背圧の低減による蒸気タービンの発電出力増大により、総合発電効率の向上を図る方式である。

本方式では、ガスタービンの単体発電効率を維持して、蒸気タービンの発電効率を大幅に高められるため総合熱効率の向上が図れる。また、大出力のガスタービンを組み込めば総発電出力を必要なだけ高められるため、広域的な電力需要のピーク対策および分散型発電の拠点とできる。

しかし、現状の一般的な売電料金の体系ではガスタービンでの使用燃料費との比較において、大出力化すると採算に乗らない場合がある。時

間帯により売電価格が異なる場合においては、DAIRY STOP AND START 方式の採用等収益の改善を図る運用方法の構築が課題となる。

g 異種燃料焚蒸気昇温方式 (図 7-8)

異種燃料（廃プラスチック油、天然ガス、石油等）焚蒸気昇温炉での蒸気過熱（400～550°C 程度）およびこれに対応したごみ焼却ボイラの高圧化やタービン背圧の低減により総合発電効率を向上させる方式である。

異種燃料の入熱を蒸気発生に用いると発生蒸気の低圧復水器での熱損失が大きくなるため、本方式での発電効率向上の効果を高めるためには、異種燃料の入熱を極力タービン駆動蒸気の昇温に利用し、蒸気発生用に使用しないように計画するのが望ましい。

なお、既に実用化段階にある廃プラスチック油化の安定性および経済性が向上すれば、廃プラスチック回収油利用の異種燃料焚蒸気昇温方式が有望となる可能性がある。

- ケース 1 : GT 排気過熱 + 2段蒸気発生 + 給水加熱
- ケース 2 : GT 排気過熱 + 1段蒸気発生 + 給水加熱
- ケース 3 : GT 排気過熱 + 給水加熱

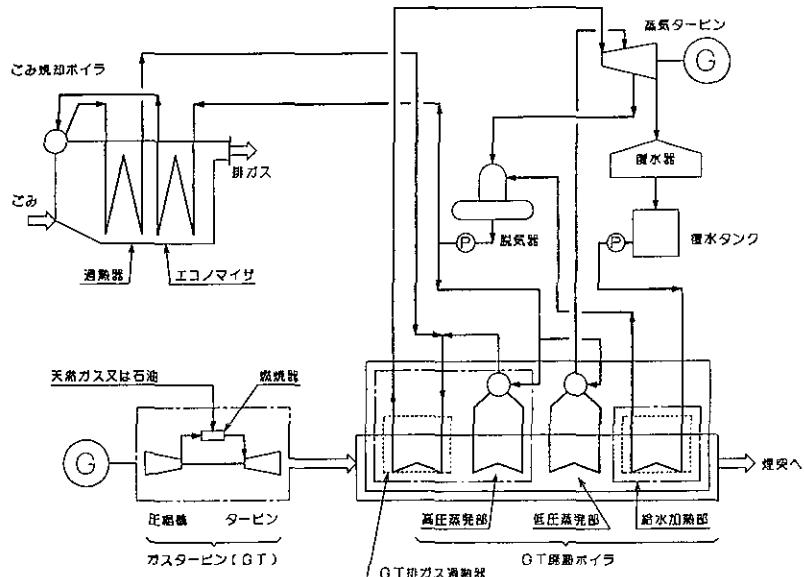


図 7-7 ガスタービン組込方式

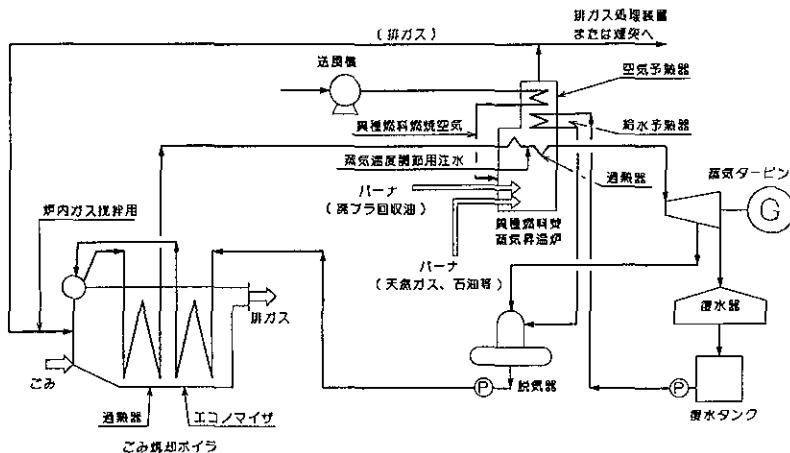


図 7-8 異種燃料焚蒸気昇温方式

(2) まとめ（各方式の比較）

『高温高圧ボイラ方式』は、高価な化石燃料を使用せず、かつ、特別な付属設備なしで発電効率を高められ、また、現状の技術の延長線で対応が可能な方式である。加熱器伝熱管の高温腐食対策の向上に伴い、経済的な観点も含めて、上述の各種高効率ごみ発電方式の内で、今後最も有望になる可能性がある。なお、タービン排熱をヒートポンプで回収し、場内・外の熱利用や復水予熱等に活用する方式を併せて採用すれば総括的な熱利用率の向上が図れる。

現段階においては、ボイラ構造、加熱器配置、燃焼システムの最適化等に関する一連の研究開発の成果および伝熱管材料としてSUS 310 J1, SUS 309 J2の採用により、ボイラ出口蒸気温度400～450°Cクラスへの対応が可能となってきた。

現在、次のステップとして、伝熱管への高Ni基合金等の適用を含め、ボイラ出口蒸気温度500°Cを目指した研究開発が推進されている。

『異種燃料焚蒸気昇温方式』では、廃プラスチック回収油が安定して経済的に供給できれば、廃プラスチックの処理の観点からも非常に有望となる。

『ガスタービン組込方式』は、大都市近傍のごみ焼却発電の出力を増大して、広域的な電力需要のピーク対策や分散型発電の拠点とするために有効な方式であり、今後、行政による技術的及び財政的な支援を得て推進されると考えられる。

7.1.5 低レベル熱の回収と有効利用

今まで述べたとおり、ごみ焼却プラントにおいては、排ガスとともに20～30%の熱が廃棄され、70～80%が蒸気として回収されているが、蒸気で回収した熱のうち、有効に利用されているのは、せいぜい25～30%であり、45～50%の熱が廃熱として復水器から放出されている。

煙突から排出される排ガスや復水器から排出される熱は、カロリーベースでは非常に大きいが、温度が低く比較的低品位の熱であるため、その有効利用は困難である。しかし、これらの低品位の熱を回収し利用できれば、その意義は非常に大きく、ごみの持つ熱の利用率は飛躍的に向上する。

これらの低品位熱を回収し利用するための課題は以下のとおりである。

- ① ガス / ガス熱交換器の使用による煙突排ガスからの熱回収
(白煙防止フローとリンク。低温腐食対策必要。)
- ② 吸収式ヒートポンプの利用による熱回収および回収熱の利用先の検討
(都市型立地により、地域冷暖房・給湯等に利用。公共施設との併設により、施設の冷暖房・給湯に利用。プラント内で復水余熱等に利用、ほか)

7.2 燃焼技術の改善による有害物質の発生抑制

ごみの燃焼排ガスには、塩化水素、いおう酸化物、窒素酸化物等の酸性ガス、水銀、カドミウム等の重金属類、ダイオキシン、PCB等の有機塩素化合物など、様々な有害物質が含まれている。これらの有害物質は、ボイラの後流に設置される各種の排ガス処理設備により処理されるが、有機塩素化合物等は燃焼技術の改善により、その発生を抑制することができる。

ごみの燃焼過程および不完全燃焼生成物から生成する有機塩素化合物等を抑制するための重要な要素として、完全燃焼を目指した燃焼改善があげられる。燃焼改善のためには、高い燃焼温度(TEMPERATURE)、高温域での十分な滞留時間(TIME)、燃焼ガス中の未燃物と空気の良好な混合(TURBULENCE)、いわゆる「3T」が必要条件である。これらの条件が達成されれば、不完全燃焼物を低減でき、有機塩素化合物等の発生を抑制することができると思われる。しかし、ごみの場合は単一組成燃料の燃焼と異なり、その性状の不均質性のために安定した高度な完全燃焼が困難な面がある。

高度な完全燃焼を達成するための燃焼技術に関する課題は以下のとおりである。

- ① 燃焼ガス温度の高温維持(炉形状、耐火物材質、他)

- ② 排ガス中未燃物と空気の良好な混合（炉形状、空気の供給方法、混合方式、他）
- ③ 燃焼制御方式の確立（エキスパートシステム、ファジー制御、他）

参考文献

- 1) 神山榮六、寺島正春：各種込み発電方式の現状と今後の取り組みごみ発電の技術開発動向と実用化に関するフォーラム
94, p付録-45～付録-61

8. ごみ焼却における新技術のありよう

前章までに述べられたとおり、わが国ではごみ処理において焼却処理が果たしてきた役割は、批判的な指摘があるものの技術的な変遷も含め、評価できる点は大きい。

一方、廃棄物問題が環境問題の重要課題と認識されてきた今日、「環境負荷の低減」と持続的社会の実現に向か「資源循環型社会システム構築」への取組は不可欠となってきた。

こうした情況のなか、廃棄物処理の枠組も大きく変化することが求められており、「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律（容器包装リサイクル法）」の制定に代表される法体系の整備・再構築も緒に着いたばかりといえる。

こうした枠組の変化の中にあって、ごみ焼却が今後果たしていくべき役割と、その役割達成のための技術的取り組みにおいて、新しい視点が求められているといえる。

本章では、「環境負荷低減」と「リサイクル」をキーワードとして、ごみ焼却技術に求められる新しい取組について整理してみる。

8.1 環境負荷とリサイクルの視点

8.1.1 環境負荷低減

「環境負荷」として何を低減すべきかの認識は、第5章の大気汚染防止の例にも見られるように、環境問題の視点の変遷により、対象およびその重要度において差異が生じてきている。

また、同時代にあっても、地域性、廃棄物との係り方等によって異なる価値観が生まれ、それに左右されているし、さらに各国間では、社会システム、経済システムのあり方、状況によっても大きく影響されているといえる。

ごみ焼却における「環境負荷」としては、わが国において一般的に次の正と負の効果が示せる。

正の効果	負の効果
①腐敗性有機物の無機化	①焼却排ガスの発生
②埋立処分量の減量化	②焼却残渣、排水の発生
③埋立地ガスの発生削減	③振動、騒音、悪臭の発生
④熱エネルギー回収（省資源）	④資源、エネルギーの消費（処理コスト）

しかし、これら効果の中には、相反する事項も多く、正の効果を上げれば、負の効果も増大するものがある。このため、焼却の効果を評価するうえで「環境負荷」の重要項目とその優先度に関しては、行政、住民および研究機関を含めた共通認識に立った施策としての設定が必要といえる。

わが国は、狭い国土、狭い平野部の都市に人口が集中し、さらには戦後50年の工業生産、経済活動の高度な発展により、多量の資源輸入、多くの社会資本の蓄積など、今後において、いま以上の多量な廃棄物の発生とその環境への影響が顕在化する要因を内在している。

この状況を考えると、今後の「環境負荷」の重要度としては、①最終処理量および埋立処分量の削減、②有害物・汚染物質の拡散・蓄積防止、③省エネルギー・省資源が主要な課題として挙げられ、ごみ焼却においてもこの課題解決にいかに寄与するかが重要といえる。

8.1.2 リサイクル

資源循環型社会システムの構築にあっては、「廃棄物の発生回避」が最優先課題として取り組まれる必要があり、廃棄物の処理、処分はそれが回避できない場合の2次的手段として位置づけできる。また、処理にあっても資源としての価値を考えた場合、①素材（マテリアル）としての利用を促す処理、②エネルギーとして利用をうながす処理の順序で取組むべきといえる。

リサイクルの現状を見ると、マテリアルリサイクルは、必ずしも成立しているとはいえない、製品の設計思想の変更を伴う取り組みおよび、分別・選別技術等処理技術の革新が必要である。また、全ての廃棄物がマテリアルリサイクルによるリサイクルが可能とはいえない、高汚染物質・選別不可物等は焼却によるサーマルリサイクルに最終処理を委ねるところも現状では否定できない。

一方、サーマルリサイクルにおいても、RDF化、プラスチック油化等多様な処理技術が提案、実用化されるなか、LCA的手法による単純焼却との比較・評価が試みられている段階であるが、地域性、施設規模等の要因により、評価が変わるものと予想される。

さらに、収集システム、分別・選別システムの機能を的確に把握し、リサイクル可能物の割合・量、リサイクル物の品質と用途を整合させ、総合評価を行うことは現状データでは不十分といわざるを得ない。

このため、リサイクルの社会的システムが軌道に乗るまでは焼却処理システムによる補完的システムの保有・整備が重要である。

また、処理・処分においては、新たなエネルギー資源の多量消費や、リサイクルに携わる人々の衛生面のリスクを回避することは考慮していくべき重要な問題といえる。特に、選別の手による作業は、衛生面で評価できない状況も認められる。

こうした視点から、ごみ焼却が、リサイクルの視点で寄与できる課題は、①サーマルリサイクルとしてのエネルギー回収、②リサイクル不適物、汚染物の安定処理および、③安定的焼却残渣の資源化が挙げられる。

8.2 ごみ焼却に求められる取り組み

「環境負荷」および「リサイクル」の視点で、ごみ焼却に求められる取組について見直すと次の課題に整理できる。

8.2.1 環境負荷低減の焼却技術

ごみ焼却の主要な批判は、焼却に伴って発生する排ガス、残渣および排水による汚染に向けられている。これらの低減は焼却が今後とも処理技術として認知されるうえで不可欠の課題といえる。

(1) 焼却排ガス負荷の低減

① 排ガス量の最少化

(a) 低空気比燃焼、酸素富化等による排ガス量の削減を図り、量的な抑制を実現する。

② 排ガス中の汚染・環境負荷物質の低減

(a) 焼却温度の高温化、安定化を図り、ダイオキシン等の未燃有機物の完全燃焼を達成する。

(b) RDF化等の前処理により均質化、金属類・不適物の除去を行い、供給の安定化、燃焼の安定化を図る。

(c) 排ガス処理設備の高度化により、残留性有機汚染物質等未規制物質を含む汚染物質の排出量の抑制を実現する。

(d) 地球温暖化物質としてのN₂O低減とともにCO₂除去・固定化への対応も視野に入れていく。

(2) 焼却残渣負荷の低減

① ポトムアッシュの安定化・無害化

(a) 完全燃焼、有害重金属類等環境汚染物質の回収および安定化・除去により達成する。

(b) 溶融処理により重金属類等の溶出を抑制し、安定化・無害化を達成する。

② 飛灰の安定化・無害化

(a) 有害重金属類の薬品添加による安定化または酸抽出での分離・回収、除去により達成する。

- (b) 溶融処理等によりダイオキシン等の有機汚染物質の分解・除去および重金属類の安定化を達成する。
- ③ 残渣中の塩類の低減
 - (a) 乾式排ガス処理システムの高機能化を図り、飛灰中の薬剤（カルシウム）類の低減を達成する。
 - (b) 残渣中のCl分の分離・低減を図り、埋立処分場の排水の改質を実現する。
- (3) 水環境負荷の低減
 - ① 水の循環使用
排水の高度処理により再生・再利用を図り、排水の低減、水の消費量低減を達成する。
 - ② 排水の無害化
排水の高度処理により、重金属類、化学物質等汚染物質を除去を達成する。
- (4) 省エネルギー、省資源化
 - ① 消費エネルギーの最小化
 - (a) 排ガス処理の高度化による装置のコンパクト化、複合機能化
(例：バグフィルタのろ過機能+吸着機能、触媒でのNOxとダイオキシン類分解等)によるプロセスの簡素化により動力の低減を図る。
 - ② 省資源化
 - (a) 熱ロスの削減等による燃料消費の低減を達成する。
 - (b) ごみ保有エネルギーの最大限の活用による燃焼の高温化、灰直接溶融の実現を図る。
 - (c) 汚泥等低発熱量廃棄物のごみとの混焼による燃料消費の削減を図る。
 - (d) 排ガス処理、排水処理の高度化による薬剤消費の削減を図る。
 - (e) 耐火物、ボイラチューブ、消耗品の延命化、施設寿命の延命化による補修資材の最小化を図る。
 - (f) 施設のコンパクト化による建設資材・工事資材の削減を図る。
 - (g) 施設寿命の延命化、建屋再利用による建設資材の最小化を図る。
- (5) 操業の高度化・安定化
 - ① 運転・監視システムの改善
画像表示、音声入出力などマンマシン・インタフェイスの改善により、安定運転の維持とオペレータ負担の軽減を図る。
 - ② コントロールシステムの改善
人工知能（AI）技術、高速処理計算機の最新技術の活用により高度情報処理制御の実現を図る。
 - ③ 運転サポートシステムの改善
シミュレーション技術、バーチャルリアリティ技術の活用により直感的運転状況把握、訓練システムの実用化を図る。また、マルチメディア技術の活用による遠隔地からのエキスパートによる運転支援など管理技術の高度化、安定化を実現する。
- (6) 有機性有害廃棄物の無害化処理
 - ① 高温焼却による無害化、有機溶剤、PCB等有機性有害廃棄物の分解安定処理として高温となる焼却処理の果たしていく役割は大きい。
- (7) ごみ、残渣の輸送の効率化
収集、運搬、交通量削減、安全性、省エネルギー等を考えると焼却の前後システムとして、この効率化は重要課題といえる。
 - ① 多量輸送、省エネ輸送、長距離輸送の実現
貨物列車、船舶輸送等による効率的輸送の実現を図る。
- (8) 震災等の災害における機能確保
 - ① 構造物、設備の構造的安定性を高める。
 - ② 水、電力等ユーティリティの安定的確保を図る。
 - ③ ごみ収集、灰輸送の安定的確保を図る。

8.2.2 リサイクル推進の焼却技術

焼却は、サーマルリサイクル以外にもリサイクルシステムを構成するうえで重要な補完システムおよび最終処理システムとして位置づけされる。

(1) エネルギー回収によるリサイクル¹⁾

① 高効率熱利用

- (a) 高温・高圧蒸気回収による高効率発電の達成を図る。
- (b) 低温排熱の高効率吸収式ヒートポンプ等による回収・利用を図る。

② 熱の高度利用

- (a) 熱による高効率利用を図るため、長距離熱移送技術を実現する。
- (b) 热電素子による熱エネルギーの直接的な電気エネルギー変換の開発推進を図る。

(2) 補完システムとしての焼却

① リサイクル不適物の安定処理

- (a) マテリアルリサイクル不適物の最終処理と熱回収によるサーマルリサイクルを実現する。
- (b) 汚染の著しい廃棄物、分別・選別不適廃棄物の衛生的、低コスト処理と焼却残渣からの混入有価物の回収・資源化を実現する。

(3) 焼却処理残渣等の資源化

① 焼却残渣の資源化

- (a) 安定化無機化したボトムアッシュの資材化を実現する。
- (b) ボトムアッシュ、飛灰の溶融スラグの資材化を実現する。

② 重金属類・塩類の回収・資源化

- (a) 溶融飛灰に濃縮された重金属類を回収し、資源化を図る。
- (b) 洗煙排水、灰処理排水中の重金属類、塩類を回収し、山元還元等の資源化を図る。

8.3 新しい取り組みの動向

「環境負荷」と「リサイクル」をキーワードとして、新しいごみ焼却技術をイメージすると、次のシステムを構成することが求められている。

表 8-1 新しい取組動向²⁾

プロセス	システム	技術区分	視点
焼却	R D F 化 ごみ焼却	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固形燃料化ごみ焼却 ・ 外部循環型流動床炉 ・ 内部循環型流動床炉 ・ ロータリーキルン炉 ・ ストーカ炉 	広域化、エネルギー回収、低環境負荷
		<ul style="list-style-type: none"> ・ フラフ化ごみ焼却 ・ 浮遊燃焼炉 	広域化、エネルギー回収、コンパクト化
		<ul style="list-style-type: none"> ・ プラスチック粉体燃焼 ・ 粉体燃焼炉 	エネルギー回収
熱分解	溶融	<ul style="list-style-type: none"> ・ 直接溶融 ・ シャフト炉方式 	灰スラグ化 エネルギー回収
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 热分解・溶融 ・ キルン炉方式 ・ 流動床炉方式 	金属回収、灰スラグ化 低環境負荷 エネルギー回収
	油化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 热分解 ・ 接触分解 ・ (水素化分解) ・ (ガス化分解) 	市場性、 低環境負荷、エネルギー回収、 ケミカルリサイクルへの展開
	ガス化	・ メタノール転換燃焼	市場性、 低環境負荷、エネルギー回収、 ケミカルリサイクルへの展開
嫌気性消化	メタン発酵	・ メタン回収燃焼	低環境負荷、エネルギー回収

- ① 汚染物質（未規制物質、地球温暖化物質を含む）の低減
- ② 廃棄物保有エネルギーの高度活用
- ③ 有価物の回収
- ④ 含有金属類、無機物の資源化
- ⑤ ごみの資源変換と安定処理

これらは、既に各種システムが提案され、一部は実用化、実証段階にある。燃焼と熱回収を中心とした新しいプロセスの代表的なシステムの一例を表8-1²⁾に示す。

焼却技術は、新しいカスケード的にマテリアルリサイクルする中でも最終処理として許容度の大きい処理システムの役割を果たしていくと考えられる。ごみを RDF、油化等、様々に加工する中であっても、その特性は十分發揮され、新しい取組を効果的に生かす焼却システムが今後の時代の変化、要請に応じて提案されていくと考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人廃棄物研究財団、ウェイストイノベーション21Cプロジェクト、焼却処理施設におけるエネルギー転換推進研究、平成5年度報告書
- 2) 廃棄物学会編 廃棄物ハンドブック、p.537、9章、再資源化技術、9.4各種変換回収プロセス

9. 飛灰、主灰に対する新処理技術

廃棄物処理法の改正で飛灰に対しては厚生大臣の指定する4種の方法で中間処理を行い、決められた溶出基準をクリアして最終処分する必要がある。主灰ではこのような規制は現在までのところない状況であるが、飛灰に準じた中間処理を検討している自治体も多い。この稿では、4種の方法の処理技術比較を考えたい。

9.1 飛灰、焼却灰の発生量と性状

9.1.1 発生量

表9-1 都市ごみ焼却量と主灰、飛灰発生量¹⁾ 単位：百万トン／年

	都市ごみ焼却量	主 灰	飛 灰	焼却残渣合計 (主灰+飛灰)
ストーカ炉	34.20	4.62	1.03	5.65
流動床炉	2.90	0.38	0.13	0.51
合 計	37.10	5.00	1.16	6.16

9.1.2 主な構成元素

表9-2 都市ごみ焼却残渣の元素組成 (IAWG 報告より)^{1,2)}

単位：mg/kg

元素	主 灰	フライアッシュ	乾式 / 半乾式 APC 残渣	湿式 APC 残渣
Al	22,000 ~ 73,300	49,000 ~ 90,000	12,000 ~ 83,000	21,000 ~ 39,000
Ca	3,900 ~ 120,000	74,000 ~ 130,000	110,000 ~ 350,000	87,000 ~ 200,000
Cd	0.3 ~ 61	50 ~ 450	140 ~ 300	150 ~ 1,400
Cl	800 ~ 4,200	29,000 ~ 210,000	62,000 ~ 380,000	17,000 ~ 51,000
K	750 ~ 16,000	22,000 ~ 62,000	5,900 ~ 40,000	810 ~ 8,600
Mg	400 ~ 26,000	11,000 ~ 19,000	5,100 ~ 14,000	19,000 ~ 17,000
Na	2,900 ~ 42,000	15,000 ~ 57,000	7,600 ~ 29,000	720 ~ 3,400
Pb	98 ~ 6,500	5,300 ~ 26,000	2,500 ~ 10,000	20 ~ 310
S	1,000 ~ 5,000	11,000 ~ 45,000	1,400 ~ 25,000	2,700 ~ 6,000
Si	91,000 ~ 310,000	95,000 ~ 210,000	36,000 ~ 120,000	78,000

9.1.3 重金属ほかの溶出挙動

重金属の溶出は主として問題になる鉛、カドミウムの検討が中心となるが、評価方法によって異なるが、日本では特定条件下での溶出量を評価する環告13号法によって評価する。この方法の是非はさておき、PbとCdの溶出はpHへの依存性が強く、飛灰の場合にPbは0~260 mg/Lと分布^{3,5)}、Cdは0~30 mg/Lと分布^{4,5)}している。主灰の場合にPbは0~3 mg/L程度に分布しているが、Cdの溶出はほとんど報告されていない。

9.2 中間処理—4種の指定方法

9.2.1 溶融固化法^{6,7)}

(1) 溶融固化の概要

溶融固化は燃料の燃焼熱や電気から得られた熱エネルギーまたはその他のエネルギーにより飛灰や焼却灰などを加熱し、1,200~1,400°Cの高温条件下で有機物を燃焼、ガス化させ、無機物を溶融してガラス質のスラグとして回収するものである。飛灰などに含まれていた低沸点の重金属類は排ガス中に揮散したのち、排ガス処理装置で捕

集される溶融飛灰の中に濃縮される。一方、スラグ中へ移行した重金属は、Si-O₂の網目構造の中に包みこまれた形となり、外部への溶出防止が可能となる。また、焼却灰や飛灰中のダイオキシン類の多くは高温条件下で分解される。

(2) 溶融技術の開発動向

① 開発の歴史

溶融炉の方式ごとの納入実績を表9-3に示す。都市ごみ灰溶融、都市ごみ直接溶融を対象としたもので、数字は納入プラント数を表しており、実験炉や実証炉は含まれていない。

② 最近の開発動向

溶融炉の導入期の目的は、埋立地不足から焼却灰の減量、減容化にあった。現在、焼却炉から排出される残渣を溶融処理する場合に求められている機能として、以下の項目が挙げられる。

- ・特別管理一般廃棄物である飛灰が処理できること。
- ・溶融処理によってダイオキシン類などの有機塩素化合物を分解できること。
- ・溶融飛灰は資源回収しやすい形で排出し、かつ資源回収できること。
- ・排出されるスラグは安全であり、外部で有効利用できること。鉄缶類、溶融メタル等も有効利用可能な形とし、埋立地に埋立すべきものをなくすること。また、ごみ処理全体の減量、減容、安定無害化を考えた場合の溶融処理に求められる機能としては以下の項目が挙げられ、これらの新しい課題に対して開発が進められている。
- ・焼却炉に投入しないごみ（粗大、不燃、燃焼不適、分別ごみ）の溶融化。
- ・焼却、溶融処理全体での環境への負荷の最小化。

最近、乾留ガス化溶融技術が注目されつつある。ロータリーキルンや流動床で熱分解を行い、ここで発生した乾留ガスと熱分解残渣中のチャーの燃焼により溶融処理するもので、方式により違いがあるが一般に以下の長所が見込まれている。

- ・低空気比での高温燃焼となるため、排ガス量が少くなりかつダイオキシン類も制御しやすい。
- ・乾留後に分離された金属は酸化していないため、回収価値が高い。
- ・補助燃料が不要。

ジーメンス、サーモセレクト、PKA、ノエルなど欧州を中心として開発が進められており、わが国でも実証プラントが稼働している。今後、運転性能、経済性、公害防止面などからの評価が待たれるところである。

(3) 溶融技術の課題と対策

① 溶融コストの低減

焼却コストと溶融コストの計算例を表9-4に示す。焼却の場合はごみトン当たり、溶融の場合は灰トン当たりでの表示となっている。

実際のプラントでの溶融コストは、稼働時間が少なく年間の処理量が計画値に達しないなどの影響もあり、項目によっては、2~3倍にもなる場合がある。溶融炉は焼却炉に比べて耐火物の損耗が大きいことから、修繕費の割合が高くなる。実際にはこれらの項目に加え、最終生成物の処分または売却費を考慮する必要がある。

表9-3 溶融炉の納入実績の推移

年次	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	計
	試験導入期										埋立地不足の顕在化、溶融処理の評価										
表面溶融炉	固定式			1				2	2			1	1			2	1	10			
	回転式									1			1			1	1		4		
電気溶融炉	アーカ式												1	1	1	1		3			
	抵抗式																	0			
	プラズマ式															1		1			
	高低周波式																	0			
旋回溶融炉														1	1			1	1	3	
直接溶融炉(熱分解炉)		1	1															1	1	4	
コクスペッド(灰)																		1		1	
内部溶融炉																	1			1	
合計	0	1	1	1	0	0	0	2	2	1	0	0	2	4	0	1	4	5	2	1	27

表 9-4 焼却コストと溶融コスト

	焼却	溶融
総コスト	14,000 円 / ごみ t	60,000 円 / 灰 t
・償却費	62.9%	24.2%
・人件費	16.8%	13.5%
・ユーティリティ費	14.0%	39.6%
・修繕費	6.3%	22.7%

注：収集と埋立費用は除外。

溶融プラントのコスト低減には以下の対策が有効である。

- 修繕費はユーティリティ費用と同種のものとみなし、設備とくに耐火物の耐久性をあげること。
- プラントの稼働率をあげること。
- 溶融効率をあげ、ユーティリティ費の相対的な削減を図ること。
- 焼却炉施設との併設の場合は全体としてのコスト最小化を図ること。

② 溶融飛灰対策

溶融飛灰は焼却飛灰に比べ、重金属類の含有割合が高い。これは、焼却灰や焼却飛灰中の低沸点重金属が選択的に揮散した後、ダストとして集じん装置で捕集されるためである。溶融飛灰の成分上の特徴を示す。

- Na, K, S, Clなどの塩類が全体の70%以上を占める。
- SiO₂, Al₂O₃, CaO, Feなどの高沸点物質の含有率は低い。
- Pb, Znなどの低沸点重金属類の含有率は高く、全体の3~5%を占める。

溶融飛灰から、非鉄金属類を分離回収し、非鉄金属精錬業界へ戻すためのテストが行われている。その処理フロー例を図9-1に示す。

今後、実証実験を含めた、さらなる調査研究が必要である。

③ 溶融スラグの有効利用

・安全性の評価

溶融スラグの安全性の評価指標として、土壤環境基準の適用が検討されている。重金属類の溶出試験方法やその基準値の見直しに加え、スラグの安全性を増すという意味でスラグ中のこれらの含有量そのものを下げるような溶融炉の運転方法も合わせて検討すべきであろう。

・有効利用

溶融スラグの有効利用は、溶融飛灰対策とともに、資源循環型の社会システムを構築する上で不可欠のものである。現在のところ、路盤材やコンクリート二次製品用の土木・建築用資材として、あるいは窯業やロックファイバーの原料としてなど、種々の用途開発が進められている。

スラグを原料として使用する場合には、要求品質に応じた選別あるいは加工が必要となり、その分、1原料化のための費用が加算されることになる。スラグを代替原料として使用した場合の価値を評価するために、原料および製品の市場価格を調べたものが表9-5である。たとえばスラグが細骨材と同等であるとするとき2,000円/tとなり、

表 9-5 各種原料および製品の市場価格（1トン当たり）

項目		価格
原 料	細骨材(砂)	1,700~2,400円
	粗骨材(砂利)	1,700~2,400円
	窯業用原料	2~3万円
製 品	インターロッキングブロック	約3万円
	空洞ブロック	約2万円
	化粧ブロック	約6万円
	歩道用タイル	5~60万円
	内装タイル	25~130万円
	暖気節の工業製品	100~200万円

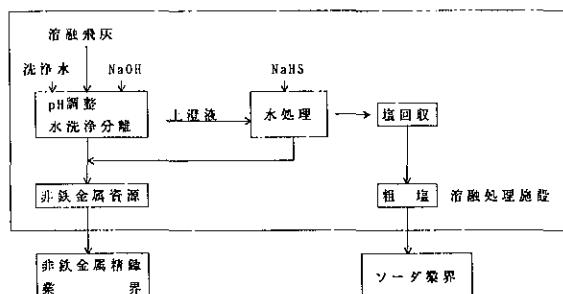


図 9-1 非鉄金属回収方法の例

窯業用の原料となると約 20,000 円 /t の潜在的な価値を持つということになる。

9.2.2 セメント固化法

(1) セメント固化法による安定化機構⁸⁻¹¹⁾

セメント系材料は生石灰 (CaO)、シリカ分 (SiO_2)、アルミナ分 (Al_2O_3) を主体として製造されており、なかでも高アルカリ性の生石灰分が主成分である。このような組成は排ガス処理で中和剤に消石灰を使用した場合の飛灰組成と含有率は異なり、しかもセメントの添加量は一般的に安定化すべき灰重量の 15 ~ 25% であるために、飛灰に水硬性を付与したのみに近い形になり、通常のセメントの固型化とは基本的に大きくは変わらないことになる。

したがってセメント固化による重金属の固定形式は

- ① 消石灰性のアルカリによる不溶性の水酸化物の生成
- ② セメント鉱物生成時の Ca や Al との置換、固溶体の生成 (アルミニン酸三硫酸カルシウム水和物、 $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ が作用)
- ③ 生成水和物の層間に吸着される
- ④ 物理的な封じ込め

などがあげられているが、効果がもっとも大きいものは①の水酸化物の生成であり、 Pb のような両性金属では溶出抑制の効果は少ない場合があり、予め硫化物を作用させる方法、セメントを改良したセメント系固化剤を用いる方法、pH 調整剤の添加などが提案されている。

(2) セメント系固化法の特徴

セメント固化法は飛灰が特別管理一般廃棄物に指定される平成 3 年以前より、実施されているところがあり、平成 4 年度までに 117 か所と実績数値も多いため、機械設備的にはほとんど完成されている。ただし、長期的な試験からはセメントの中性化による崩壊、重金属成分等の溶出が危惧される。

9.2.3 薬剤混練法

(1) 薬剤混練法の種類と機構^{12, 13)}

薬剤混練法はセメント固化の設備と同様の設備が使用でき、少量の添加混練で効果的に重金属を固定する。従来薬剤が高価であったために予め灰のアルカリ度を調整するために pH 調整剤を添加し、効果的に薬剤を使用する方法が提案されていた。無機系は現在でも同様な方法で行っている場合が多いが、キレート系では薬剤メーカーが多く、性能の改良とともにコストも低下してきたために灰の事前処理は減少しつつあり、pH 調整剤を用いない薬剤少量添加の方法が主流になりつつある。

無機系の薬剤の中で、リン酸を主成分とする薬剤の Pb をはじめとする重金属の安定化機構は、

- ① 難溶性の含リン酸の塩を生成すること
- ② pH の緩衝作用を持つリン酸成分が灰の pH 変動などにある程度まで対応可能であること

キレート系ではジチオカルバミン酸基を代表とする官能基が次のような結合を起こすためである。キレート系はこのように窒素成分と硫黄成分が働き Pb 等を安定化するものである。

(2) 灰の変動と薬剤添加量³⁾

薬剤混練法で最も注意を要するのが灰変動と薬剤添加量の関係であり、灰変動に対する対応性のある薬剤か、または薬剤添加量に直結するリアルタイムに判定可能な灰変動の指標の決定が求められている。

灰変動は飛灰の場合、同一の炉でも重金属含有量や溶出量の変動は大きく、 Pb 含有量では数十倍の変動、 Pb 溶出量では数百倍の変動がある。 Pb 溶出量をリアルタイムに把握することは分析方法の内容から考えて無理であるが、全般的には Pb 含有量と溶出量は相関があるために Pb 含有量を用いて短時間で把握し、これを薬剤添加量に反映させる方法など改良がなされると予想される。

(3) 薬剤混練時の安全性^{14, 15)}

薬剤混練では無機系、キレート系を問わず、飛灰あるいは主灰に材料を水を介在させて混ぜる方法であり、活性の高い灰に効果のある薬剤を混合する、いわば化学反応であり、注意が必要である。たとえば、金属アルミニウムを含むようなアルカリ性の灰に水を添加することで水素ガスによる爆発の例²⁵⁾があり、またキレート系の薬剤では

熱による分解などの可能性があり、設備上の留意を必要とする。これはセメント固化においても類似の状況が存在する。

(4) 薬剤混練物の長期安定性^{4, 12)}

セメント固化では長期的な安定性は中性化による崩壊、重金属成分の溶解が懸念されるが薬剤による安定化ではセメント固化ほど長期的な追跡調査は行われていない。

無機系のうちリン酸を主成分とする薬剤では中和剤を用いて最適 pH 条件で混練した場合、長期安定性は高く、たとえばアベイラビリティ試験のような他の溶出試験でも溶出は少なく、長期的な観点からも安定といわれている。

キレート系の場合は薬剤を過剰に用いた場合はたとえば EP 試験方法のような他の溶出試験でも溶出は抑制でき、紫外線照射時の経時変化もないといわれている。

9.2.4 酸抽出法

(1) プロセスの簡素化¹⁵⁻¹⁷⁾

この処理技術は主として飛灰や主灰に鉛酸を作用させ、有害物を溶出させ灰から除去する方法であり、溶解した有害物を水酸化物、硫化物あるいはキレート薬剤で排液処理を行う設備も必要となる。したがってこの方法は有害物の溶出に関しては全く問題がなく、採用実績も数有るが、塩化ナトリウムとしての資源回収を併設したものは設備が複雑になることと、維持管理がやや複雑になるために実績が少ない。酸抽出法による塩化ナトリウム回収の実プラント運転結果による成果と問題点を表 9-6 に示すが、プロセスの簡素化に向け、今後さらに研究する必要があると考えられる。

(2) 有価金属の回収^{8, 16)}

現在の主流である消石灰吹き込みによる排ガス処理では塩化ナトリウム回収を行うことは出来ず、また重金属の回収においても濃度が希薄なため実施されていないが、重金属等の枯渇を考慮すると意義深い方法である。灰溶融した後の溶融飛灰においては重金属が濃縮されることなどから、Pb を主とする重金属類と Zn を主とする重金属類に分別する研究が行われて、回収有価金属の品位、分離性を考えても有力な方法として考えられる。ただし、現状では灰溶融の補完的な位置づけであり、さらに通常の飛灰に普遍化するための新技術が必要であると考えられる。

表 9-6 酸抽出法による O 清掃工場プラント運転結果の成果と問題点

項目	内 容
1. 飛灰と洗煙廃水の一括処理	飛灰と洗煙廃水を一括処理して、無放流を可能にした。
2. 飞灰からの重金属溶出防止性能	フルスケールプラントにスケールアップしても、埋立基準以下に重金属溶出防止ができた。
3. 飞灰からの有価物再資源化	溶解性塩類を回収し、ソーダ工場の原料塩として再利用できた。
4. 各機器の材質耐久性	運転開始より 11 年間、すべての機器は現在も使用している。特に飛灰スラリー攪拌の FRP 樹脂槽が摩耗せずに、また遠心脱水機が年 1 回の定期補修で現在も使用している。
5. H ₂ S ガス発生の有無	NaHS を pH 6 ~ pH 8 まで注入しても、排気ダクト中に H ₂ S ガスは検出せずに、安全に運転している。
6. ランニングコスト	飛灰当たり 3,840 円 / t は比較的安い。
1. 晶析缶加熱コイルの腐食	運転当初、塩回収処理設備の晶析缶内蒸気過熱コイル (SUS 316 L 製) が腐食しているのを発見した。原因は晶析缶内の処理水中 NH ₄ ⁺ が減圧加熱によって、NH ₃ ガスとして蒸発して pH 4 に低下したためである。その後処理水槽の NaOH を pH 9 まで加えて解決した。
2. 集塩器の閉塞	運転当初、晶析缶とスラリータンクの間に集塩器を設置して、塩スラリーを沈降・濃縮していたが、流动性が不足して集塩器出口に塩スラリーが閉塞した。その後、集塩器を撤去して解決した。

9.3 中間処理—4 種の指定方法の比較

4 種の指定方法について、いくつかの観点から比較する。4 種の方法の内、代表的な方法として、溶融固化では実績の多い表面溶融法とアーク溶融法、セメント固化ではポルトランドセメントによる単独固化法、薬剤混練ではリン酸系薬剤による方法とキレート系薬剤による方法、酸抽出では酸抽出・硫化物処理法を選び比較した。

9.3.1 溶出規制^{4, 5, 8, 18-25)}

中間処理で溶出規制を行うものは、重金属類の他にシアン、砒素、有機リン、PCB であるが、飛灰ならびに主灰で溶出が懸念されるのは Pb、次いで Cd である。これらの金属の溶出試験方法で日本での公定法は環境庁告示

表 9-7 溶融飛灰から重金属を分離したときの事例

	品 位 % (Hg, Cr: ppm)			分 布 率 %			
	溶融飛灰	Pb 產物	Zn 產物	溶融飛灰	Pb 產物	Zn 產物	廃 水
合 計	—	—	—	100	6.2	10.7	—
Pb	2.18	33.47	0.90	100	95.6	4.4	0.0
Zn	4.09	0.72	37.79	100	1.1	98.9	0.0
Cu	0.34	0.03	3.18	100	0.5	99.5	0.0
Fe	0.93	7.20	4.50	100	48.2	51.7	0.0
Sn	0.82	12.97	0.12	100	98.4	1.6	0.0
Sb	0.11	1.45	0.22	100	79.3	20.7	0.0
Si	0.16	2.25	0.18	100	88.1	11.9	0.0
Al	0.03	0.16	0.22	100	30.6	69.4	0.0
Cd	0.006	0.005	0.617	100	0.5	99.5	0.0
As	0.012	0.126	0.035	100	67.7	32.3	0.0
Hg	26.62	55.21	216.6	100	12.9	87.1	0.0
Cr	0.05	0.29	0.29	100	36.8	63.1	0.2

表 9-8 4種の指定方法で中間処理したときの浸出液の性状（事例）

	溶融 固化法		セメント固化法	薬剤混練法		酸抽出法
	表面溶融	アーケ溶融		リン酸系	キレート系	
pH	6～7	6～7	約13	6～10	11～13	6～8
T-Hg	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005
Pb	< 0.02	< 0.02	< 0.02～0.6	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Cd	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01～0.02
Cr ⁶⁺	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
As	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01～0.02

13号法で、外国ではカラム試験、アヴェイラビリティ試験、アメリカ TCLP などが実施されており、一般的には外国での試験方法が厳しく、特にアヴェイラビリティ試験が溶出重金属の評価では最も厳しい試験方法といわれているが、飛灰の種類によっては重金属の溶出が逆転する場合も報告されており、飛灰の由来や指定方法の詳細条件により、断言はできないといえる。

表 9-8 は種々の報告よりデータを集積したもので、種々の飛灰を用いた4種の方法で処理した焼却飛灰を環境庁告示13号法で浸出したときの溶液の比較である。セメント固化法は飛灰の種類によって、薬剤混練法や酸抽出法では飛灰の Pb 含有量の変動によって、それぞれ Pb の溶出量が変動するようで、これに比較して溶融固化法に関しては比較的安定な方法ということができる。

また、セメント固化法では長期間放置時の中性化等から固化物の崩壊等が懸念されるが、重金属等の溶出規制は1年間のデータでは問題がないと報告されている。他の方法はセメント固化のように実際のデータはないが、リン酸系薬剤混練では米国で8年以上の実績があるといわれている。キレート系の薬剤混練ではこのような長期放置の実際例はないが、紫外線下での加速試験60日では溶出規制に大きな変化がないことも知られている。

9.3.2 資源リサイクル性^{26,27)}

指定された4種の方法で資源のリサイクル性を比較するとセメント固化法や薬剤混練法は資源リサイクル性は全くないといえる。溶融固化法はスラグ、鉄粒とともに資源化は溶融飛灰に比べ容易であり、溶融飛灰においても可能性はあるといえる。酸抽出においても重金属汚泥は重金属が濃縮されており、溶融固化法の溶融飛灰と同じ扱いができる。

表 9-9 は様々な文献から枯渇性金属の現行のリサイクル率について原田がまとめたもので、表中の耐用年数は資源枯渇までの年数と考えられる。飛灰ならびに主灰で枯渇性の有害金属で記載されていないものは Hg, Cd である(As は枯渇性の資源かどうかは疑問がある)。

飛灰中に多く含有されている金属としては、Zn, Ti, Pb, Mn, Cu, Cd, Cr 等で Zn, Ti, Pb, Cu は枯渇が心配されており、特に資源回収の意義が深い。少々古い別の資料では Hg は枯渇までに約5年、Cd は約12年程度の残余期間しかなく、Zn 等と同じく資源回収は意義深い方法である。

表 9-9 各種金属元素のリサイクル率²⁷⁾

元素	生産量 (t/Y)	耐用年数 (Y)	リサイクル率 (%)	主要リサイクル源	主 要 用 途
Fe	982 M	67	37.6	建築老廃物, 自動車加工屑	建築, 自動車
Mn	22.1 M	37	6.5	鉄鋼スラグ	鉄合金, 乾電池
Al	13.0 M	192	55.2	加工屑	圧延品
Cr	11.7 M	116	27	特殊鋼	特殊鋼, 耐火物
Cu	9.0 M	39	46.5	電線屑, 伸銅屑, 鋳物屑	電線, 伸銅品
Zn	7.3 M	20	13.1	加工屑, ドロス	めっき, 伸銅
Ti	6.5 M	27	50	Ti 合金屑	酸化チタン, Ti 合金
Ba	5.4 M	80	S	苛性ソーダ脱硫材	プラウン管, 塗料
Pb	3.3 M	21	31.8	蓄電池	蓄電池, 無機薬品
B	2.9 M	110	S	ガラス屑	FRP, 断熱材
Zr	993 K	36	33	使用済み耐火レンガ	耐火レンガ, 耐火物
Ni	972 K	56	81	ステンレス加工	ステンレス, めっき
Sr	235 K	29	0		プラウン管, 磁性体
Sn	211 K	20	8.3	はんだ	はんだ, ブリキ, 塩ビ安定剤
Mo	110 K	50	25	特殊鋼自家発生, 触媒	特殊鋼, 触媒
Sb	52.6 K	80	25	Sb 合金, 蓄電池	樹脂難燃剤
Co	43.4 K	76	23	磁石, 触媒	磁石, 工具, 磁気テープ
W	43.3 K	59	19	使用済み工具, 触媒	工具, 触媒
V	33.2 K	129	24	スラグ, Ti 合金加工屑	特殊鋼
Nb	13.7 K	258	0.6	スラグ	特殊鋼, 光学レンズ
Li	4.9 K	490	S	使用済み触媒, 電池箔屑	陶磁器, フラックス
Bi	2.8 K	32	S	触媒	低融点合金
Se	1.8 K	44	38	感光体スクラップ	複写機, 着色剤
Ta	376	58	32	ヒータ, 電子部品不良品工具	コンデンサ
Pt	270	208	12.1	使用済み触媒, 電子部品加工屑	触媒, 電子部品
Ge	85		29	使用済み触媒, 半導体屑	触媒, 医療用有機 Ge, 光ファイバ
In	65	25	5.3	ITO ターゲット残, はんだ, ウェハー屑	ITO 透明電極, ブラウン管
Te	59.8	244	5.6	使用済み感光体	快削鋼
Ga	46	2,391	79	半導体加工屑	半導体
Hf	368		S	超合金自家発生屑	原子炉制御体
Re	33.6	82	49	使用済み触媒	触媒, フィラメント
Tl	13		0		ガラス添加
Be	7.1	54	26	ベリリウム銅屑	ベリリウム銅
Bi	2.8	32	S		
Cs	N. A.		0	—	触媒
Pd			9.9	使用済み触媒, 電子部品加工屑	電子部品, 歯科材料
Rb			0		光学ガラス

9.3.3 減量率

減量に関しては中間処理物を廃棄物のままか、あるいは有価物に変化したのかで取り扱い方が異なる。特に溶融固化で生成したスラグは埋立を行う場合は廃棄物として、路盤下層材として用いる場合は有価物として取り扱いが異なり、類例は数多くあるが、今後の開発により大きく変化する。

9.3.4 施設保守性と運転上の課題、ランニングコスト

施設保守性については溶融固化法に特に課題があり、炉内部の耐久性が溶融温度が高くなればなるほど低下する。そのため耐火材の長寿命化が図られている。

運転上の課題とランニングコストは相一致するものであるが、定量的な比較を行うには未だ資料不足である。

9.3.5 実績

中間処理の実績の集約は4種の指定方法が義務付けられる前のデータを基にまとめた。溶融固化法については9.2.1に詳細にまとめてあり、酸抽出法は全国9か所であり、そのほかはセメント固化法か薬剤混練法が用いられていると考えられる。

以上で主灰ならびに飛灰の処理に関する比較を行ったが、このほかに未規制の重金属、ダイオキシン、さらに最終処分時の浸出水等に関して考えておく必要があるが、データそのものが少なく、今後の調査研究が待たれる。

<未規制金属>

規制のない Sb については飛灰中の含有量は Pb の 1 / 10 程度で Cd と同程度であり、4 種の指定の中間処理法での溶出防止機能。

<ダイオキシン>

燃焼溶融あるいは電気溶融のいずれも溶融固化法は、従来から知られているようにダイオキシン類のほとんどを分解することが知られているが、他の 3 種の方法については全く調査研究がなされていない。溶融固化法でのダイオキシンの分解は熱分解が主であるが、他の 3 種の方法での分解（化学的、光化学、生物的）の程度。

<浸出水>

最終処分として管理型埋め立てを行った場合、浸出水に及ぼす長期的影響。

参考文献

- 1) 酒井伸一：一般廃棄物焼却残渣の性状と溶出特性、都市清掃、Vol. 48, pp. 438 - 444 (1995)
- 2) International Ash Working Group : An international perspective on characterization and management of residues from municipal solid waste incineration (1994)
- 3) 手島肇：焼却飛灰の循環処理技術に関するセミナー予稿集、財 廃棄物研究財団 (1995)
- 4) 勝浦英雄、網本博孝、堀田義照：環境技術会誌、Vol. 83, pp. 95 - 104 (1996)
- 5) 石田拓郎：焼却飛灰の循環処理技術に関するセミナー予稿集、財 廃棄物研究財団 (1995)
- 6) 財団法人 廃棄物研究財団編：特別管理一般廃棄物ばいじん処理マニュアル、pp. 101 (1993)
- 7) 講習会テキスト TIC : 廃棄物の溶融処理技術とスラグの有効利用、pp. 88 - 97 (1996)
- 8) 日本化学会編：化学便覧、応用化学編 K 材料編、pp. 930 (1986)
- 9) 阿部雄二：セメント固化法による飛灰処理技術と実際例、PPM, 1994, 1, pp. 18 - 25
- 10) 小野田セメント、セメント固化システムカタログ
- 11) 古角雅行：東京都の飛灰対策の現状、廃棄物学会誌、Vol. 5, pp. 46 - 59
- 12) T. T. Eighmy : 焼却飛灰の循環処理技術に関するセミナー予稿集、財 廃棄物研究財団 (1995)
- 13) ユニチカ、薬剤混練法技術資料
- 14) 高月紘：集じん灰パンカー爆発事故の教訓、廃棄物学会誌、Vol. 5, pp. 441 - 448 (1994)
- 15) 勝浦英雄、井上卓：酸抽出処理法による飛灰安定化処理技術実際例、PPM, 1994, 1, pp. 49 - 55
- 16) 澤地実、福永勲：PPM, 1995, 4, pp. 17 - 23
- 17) 勝浦英雄、井上卓、平岡正勝、酒井伸一：酸抽出処理法による飛灰処理の運転結果、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 114 - 124 (1996)
- 18) 酒井伸一、水谷聰、高月紘、岸田拓郎：廃棄物の溶出試験に関する研究—アベイラビリティ試験と pH 依存性試験—、廃棄物学会論文誌、Vol. 6, pp. 225 - 234 (1995)
- 19) 阿部清一、上林史朗、岡田正治：回転式表面溶融炉による灰溶融処理、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 34 - 46 (1996)
- 20) 伊藤正：旋回流炉による飛灰の溶融固化、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 56 - 64 (1996)
- 21) 山岸一雄：電気抵抗式ごみ焼却灰溶融炉の開発とスラグの有効利用、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 65 - 76 (1996)
- 22) 泉川千秋：都市ごみ溶融飛灰の金属リサイクリング、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 125 - 136 (1996)
- 23) 貫上佳則、山田優：廃棄物の再利用時における判定法としての溶出試験方法、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 195 - 202 (1996)
- 24) 内田敏仁、伊藤一郎、原田高至：アッシュナイト R による焼却飛灰中の重金属固定処理—高比表面積消石灰による飛灰処理および処分コストの低減、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 98 - 104 (1996)
- 25) 嘉門雅史：一般廃棄物焼却飛灰の固化処理と有効利用について、PPM, 1994, 1, pp. 62 - 66
西垣正秀：反射式表面溶融炉とスラグ利用、廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関するセミナー、pp. 47 - 55 (1996)
- 26) アメリカ鉱山局：MINERAL FACTS & PROBLEMS (1980)
- 27) 原田幸明：金属材料のリサイクル、エネルギー・資源、Vol. 5, pp. 33 - 40 (1996)

10. 都市における資源・エネルギーの循環構造と焼却

10.1 資源・エネルギー消費の現況

10.1.1 わが国エネルギー消費の特徴

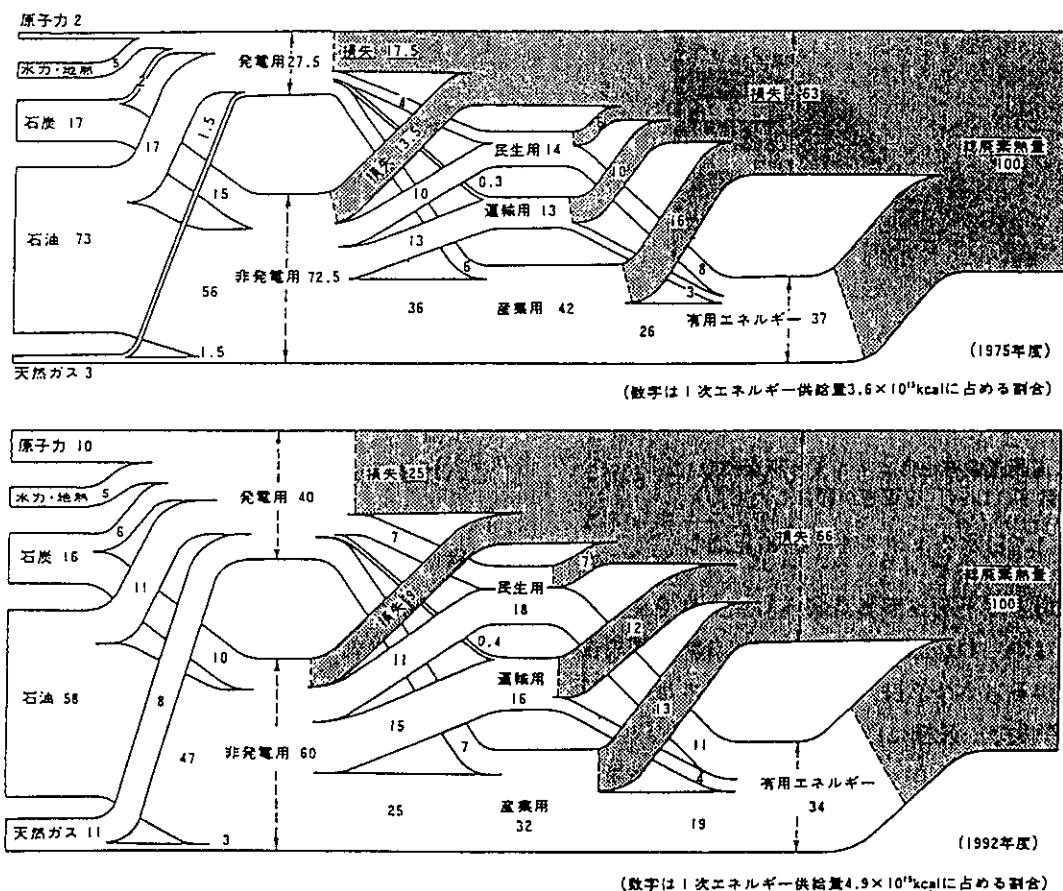
1992年における世界のエネルギー消費量は一次エネルギーの石油換算で約7,663 MTOE (Million Tons Oil Equivalent) であり、この4分の1に当たる1,917 MTOEをアメリカ合衆国が消費しており、1人当たりのエネルギー消費はアメリカ合衆国とカナダが群を抜いており、7.5 TOE以上を消費している¹⁾。欧州主要国の1人当たりのエネルギー消費は約2.8～約4.1 TOEで高水準にある。わが国は世界全体の消費量の5.4%，約412 MTOEを消費し、1人当たりのエネルギー消費は約3.3 TOEと欧州とほぼ同じである。発展途上国は一般に人口が多いため、1人当たりのエネルギー消費原単位が大きくなると消費量の伸びに及ぼす影響は大きい。たとえば、アジア開発銀行の1993年調査²⁾によると、中国の電力生産量は8,159億kWhに及び、アメリカ合衆国、ロシア、日本に次ぐ第4位の電力生産国になった。中国は発電能力、電力生産量を著しく増大させており、1981年から1993年の12年間に年平均約8.1%の割合で増やしている。中国の電力生産量の83%は火力であり、うち約90%は石炭火力であり大気汚染の元凶ともなっている。アジア開発銀行調査結果による国民一人当たりの電力ワット数をみると、開発の著しい台湾、韓国はわが国の水準に近づいていること、APEC諸国の経済成長や生活水準の向上がければエネルギー供給の逼迫化、エネルギー源の争奪戦が起こる可能性は十分にあることが分かる。そのような中にあって、わが国の人団は世界の2.3%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。

主要先進国のエネルギー供給構造の比較をすると³⁾。わが国の特徴は輸入依存度、石油依存度、ホルムズ依存度、中東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。

こ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すのが図10-1である⁴⁾。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年の間に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低下の大きな原因は電力化率が27.5%から40%にあがることによって損失が大きくなつたことである。言葉をかえれば、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。両年度の間における産業用、運輸用、民生用の比率の変化の特徴は、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。これは重厚長大型産業から軽薄短小型産業へのシフト、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つたことを反映しているものである。

熱利用の効率が低いのは高温に始まって常温に終わる熱を有効に利用していないことがある。日本のエネルギー供給構造は発電用と非発電用が並列に流れる構造であり、46°Cの湯や25°Cの室温を得るために燃料を燃焼し、千数百°Cにもなる熱を用い、廃熱として出される数百°Cの熱を利用してないことがあるという批判がなされている⁵⁾。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、その後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。すなわち、エネルギーのカスケード利用

図 10-1 わが国のエネルギーフロー⁴⁾

である⁵⁾。

図 10-1 に示された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⁾。代表的なものを以下に述べる。

- ① 高効率廃棄物発電； 原子力 (10%), 水力・地熱 (5%), 石炭 (6%), 石油 (11%), 天然ガス (8%) が発電用の一次エネルギーを構成しているが、この一次エネルギー源として廃棄物を加え、石炭、石油、天然ガス等の使用量を減じる。もともと廃棄物は焼却されることが多いにもかかわらず焼却廃熱が有効に利用されることは少なく、多くの部分が大気中へ放散されてしまっている。このエネルギーを有効に活用することにより化石燃料の燃焼量を減じるとともに温室効果ガスである二酸化炭素の排出抑制にも役立てようとするものである。後述するように、現在の廃棄物発電の効率は低いものにとどまっているので、高効率化を図ることが課題である。
- ② 大規模コジェネレーション地域熱供給システム； 非発電用と発電用にエネルギーが並列で流れることを少なくし、先ず動力源として燃料を利用し、そのうちに熱を地域熱供給に使うようにするために、需要地近くにコジェネレーション地域熱供給システムを構築する。このようにすることによりエネルギーの有効利用率が上がる。
- ③ 未利用エネルギー活用型地域熱供給； 河川水、下水、海水などの温度差エネルギー、地下鉄、送電線等の廃熱など未利用エネルギーを回収し熱供給に利用する。
- ④ カスケード利用型工業団地； とくに産業用エネルギー利用において各エネルギーレベルに応じて熱をカスケード利用することにより、エネルギーの有効利用率を高くする。
- ⑤ 発電所、工場等余剰エネルギー供給； 発電や工場から出る廃熱で、民生用であれば使えるエネルギーを積極的に利用し、新たなエネルギー投入量を削減する。

10.1.2 わが国資源消費の特徴

環境庁のリサイクル研究会によって示された、わが国のマテリアル・バランスよれば⁷⁾、1987年度には国内から約12億3千万トン、国外から約6億トンの処女資源が投入され、国内での蓄積が建設関係等の約8億9千万トン、製品等の1億8千万トン、海外への輸出が約8千万トン、

食料としての消費が約8千万トン、これらを支えるエネルギーとして約3億3千万トンが消費され、産業廃棄物として（再生利用を除き）約2億3千万トン、一般廃棄物が約4千万トン排出されていることになっている。そして、わが国のマテリアル・バランスの上で再生利用原料が占める割合は、わが国全体で使用されているエネルギー・資源の約8%であり、わが国の経済活動は大きな処女資源によって支えられているということができる。

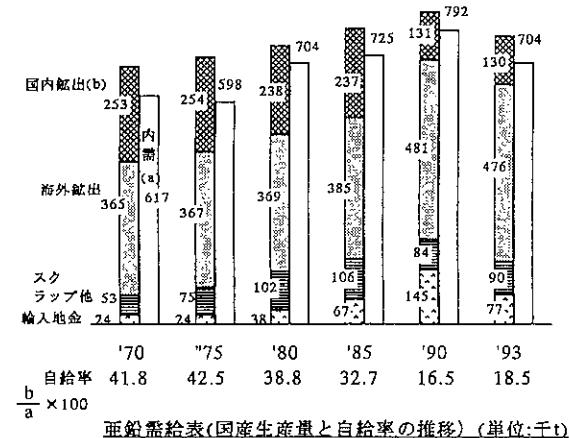
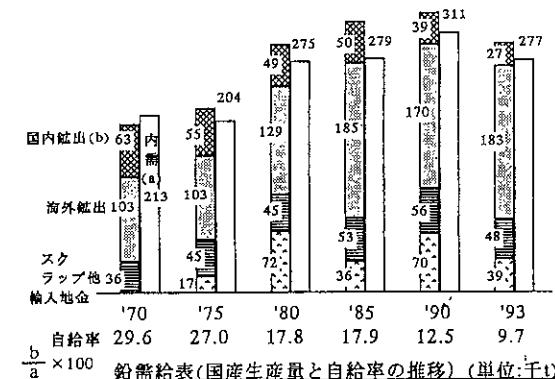
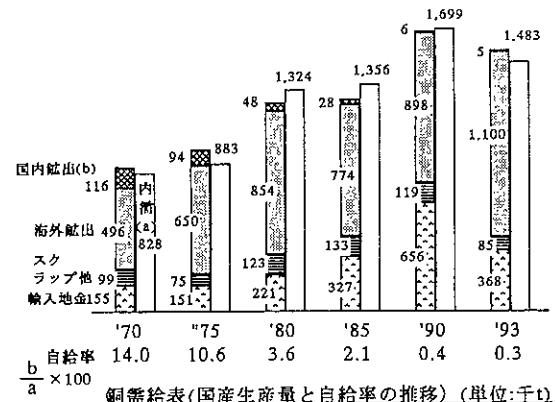
表10-1は主要非鉄金属（銅、鉛、亜鉛）の国内需要の推移を示している⁸⁾。1973年までは経済の発展とともに国内需要は増大を続けたが、同年の石油危機によって大きな影響を受け、1974年には急激に減少した。1981年には石油危機までの水準にもどったが、その後横ばいを続けた。1987年以降需要は再び増加し、1994年には最高水準となったが、その後は景気の低迷によって減少している。1993年度の国内需要は銅が148万トン、鉛が28万トン、亜鉛が70万トンであった。

図10-2は主要非鉄金属の需給の様子を示したものである⁸⁾。1970年度以降、スクラップその他による量の変化は少なく、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エイトを占めるようになってきていることである。銅についてみると、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%以上あったということであるが、1993年度にはわずかに0.3%にまで低下している。これに対して輸入鉱出の地金は74.7%を占めるまでになってきている。また、地金輸入量は約37万トンで、地金供給に占める割合は25%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からの出鉱・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、今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ているのが現状である。

表10-1 主要非鉄金属の国内需要の推移⁸⁾

単位：千t

年度 鉱種	48	49	50	55	60	61	62	63	元	2	3	4	5
銅	1,213	781	883	1,324	1,356	1,353	1,467	1,500	1,590	1,699	1,633	1,509	1,483
鉛	271	195	204	275	279	263	282	295	298	311	319	300	277
亜鉛	752	619	598	704	725	713	747	766	778	792	813	770	704

図10-2 主要非鉄金属の需給⁸⁾

10.2 資源・エネルギーの循環構造の提案

10.2.1 エネルギーリサイクルの提案⁹⁾

未利用エネルギーの利用促進がいわれる中、最も有望なものは廃棄物からのエネルギー利用であるとみられている。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年に決定された新エネルギー導入大綱では、廃棄物発電がリサイクル型エネルギーの一つとして2000年で200万kW、2010年で400万kWの電源として位置づけられている。1993年度末における都市ごみ焼却発電の規模は約39万kWであり、産業廃棄物処理施設における発電規模は約18万kWである。1991年度の一般廃棄物焼却量3,100万トンと産業廃棄物のうちの可燃性廃棄物が保有する総熱量は原油換算で約2,300万kLであり、一次エネルギー供給量の4.4%に相当する。図10-3に示すように、このエネルギーをすべて発電に振り向けると、発電効率10%程度の廃棄物発電技術レベルでは年間250億kWh、電源規模としては約300万kWに、さらに高効率廃棄物発電技術が導入され発電効率が20%になったとすると年間500億kWh、電源規模としては約600万kWに相当すると試算される。このようにみていくと、新エネルギー導入大綱に示されている程度まで廃棄物発電を行うためには、廃棄物発電の一層の普及と高効率化が重要であることが分かる。

発電効率をあげるための試みとして大きく3つの方法が考えられる¹⁰⁾。それらは①高効率発電システム、②複合ごみ発電（スーパーごみ発電）、③ 固形燃料化（RDF）発電である。

10.2.2 金属リサイクルシステムの提案

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。1992年における主要非鉄金属三種の内需の内訳によると、銅では内需のうち69%が電線に、鉛では同65%が蓄電池に、亜鉛では52%が亜鉛メッキ鋼板に使用されている。また、銅は約1,118千トン、鉛は約75千トン、亜鉛は約109千トンが国内でスクラップとして回収されている。これらの量と同年に生産された量との比率を“単純リサイクル率”と考えると銅は95.5%，鉛は28.1%，亜鉛は15.1%となっている¹¹⁾。このように三種の金属の間に大きな差が出るのは、回収の容易さ（製品の態様など）のほかに金属の単価も影響しているものと考えられる。単純リサイクル率の低い金属については、一層、工程内回収および市中回収を図る必要があるが、多くのものは廃棄物セクターへ流れていることが容易に想像される。このような廃棄物セクターの中で大きなものは一般廃棄物処理場および下水処理場である。廃家電製品に代表される粗大ごみは破碎されて不燃物は埋立へ、可燃物は焼却炉へ投入される流れが標準的である。また、廃家電製品や廃自動車を破碎し有価物を回収した残りのいわゆるシュレッダーダストには金属が多く含まれていることが知られている。このようなシュレッダーダストに含まれている金属を回収・再利用することが第一の課題である。

第二の課題はごみや下水として廃棄されたものの中にある金属を回収・再利用することである。多くの金属はごみ焼却や下水汚泥の焼却によって生成する飛灰の中に濃縮されている。例として、ごみ焼却工場での金属の流れをみると、高温における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防止のためにセメント固化や薬

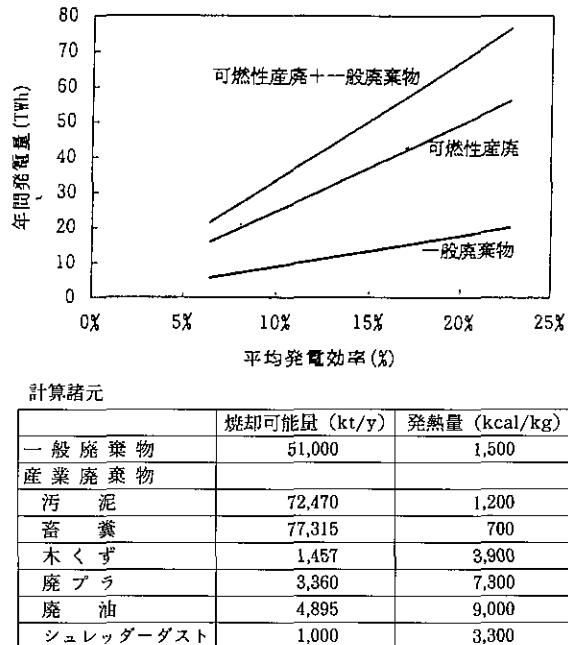


図10-3 廃棄物発電による発電可能量⁹⁾

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いれて、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。このようなサイクル成立の可能性があるかどうか考えてみる。

表 10-2 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¹²⁾。銅、鉛、亜鉛の濃度についてみると、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。

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、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% 位まで下がっており、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 10-4 である¹³⁾。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みると、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。このようなシステムを社会システム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せていけるものと考えられる。

都市に集中する廃棄物などは、見方を変えれば貴重な資源が集積されていると考えることができる。このような資源を、生産—流通—消費—廃棄—生産のサイクルに乗せていくと、資源・エネルギーの保全と環境保全にとって重要な作業であり持続可能な発展を遂げていくための必要条件であろう。今後の環境政策はこれらのサイクルを軸としたものでなければならないと考えられる。

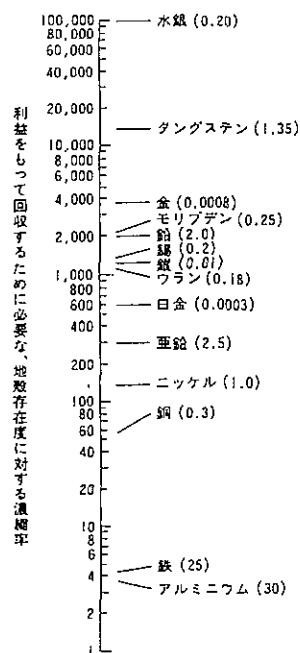
参考文献

- 1) 総務庁統計局編：世界の統計 1995，大蔵省印刷局，1995.4.10
- 2) 日本経済新聞，1994.10
- 3) 資源エネルギー庁編：平成 7 年度版新エネルギー便覧，通商産業調査会，1995.3.31
- 4) 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)
- 5) 環境庁編：平成 6 年版環境白書，大蔵省印刷局，1994.6.6
- 6) 柏木孝夫：産業公害，Vol. 29, pp. 708 (1993)
- 7) 資源リサイクル研究会：リサイクル新時代，中央法規 (1991)
- 8) 資源エネルギー庁監修：資源エネルギー年鑑，通商産業調査会，1995.2.28
- 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

表 10-2 飛灰、スラグ、溶融飛灰の分析例¹²⁾

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
灰 分	%	89.96	99.66	98.46
可燃分	%	10.04	0.34	1.54 (600°C)

注) 水分以外は全て乾物基準

図 10-4 鉱石が含んでいなければならぬ金属含有量の下限値¹³⁾

- 10) 武田信生：一般廃棄物とエネルギー利用，廃棄物学会誌，Vol. 6, No. 3, pp. 193–194 (1995)
- 11) 中村 治：非鉄金属素材の需給とリサイクル，エネルギー・資源学会ミーティング資料 (1994)
- 12) 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)
- 13) 西山 孝：資源経済学のすすめ，中公新書 (1993)

11. あとがき

この報告書は廃棄物学会研究委員会焼却部会において勉強し、議論を進めてきたところをまとめたものである。この部会では、演者をお願いして講演して頂いたり、各自の得意分野を発表するなど、あるいはテーマを決めての自由討論など、すでに11回にわたって会合をもってきた。部会員はそれぞれの職場で忙しい日々を送りながら、時間を割いて会合に参加してきた。このことは、各職場での色々な意味での支えがあってはじめて可能であったことである。そのような支えに応えるためにも、一定の時期にはその成果を世に問う必要があると常々考えている。今回まとめた報告はその第1弾というべきものであって、ごみ焼却にまつわる周辺状況の整理を試みたものである。このあと、研究を進めるべき方向性は必ずしも定まっているわけではないが、諸兄姉のご批判やご提言を仰ぎながら今後の活動につなげていけたらと考えている。

最後にこのような活動の機会を与えていただいた廃棄物学会ならびに関係各位に紙面をかりて感謝の意を表します。

平成8年7月

焼却部会代表 武田信生