

## B-14 地球温暖化防止対策技術の総合評価に関する研究

### (1) 技術評価のためのライフサイクル温室効果ガス排出量の分析に関する研究

#### ② 技術評価のためのライフサイクル微量温室効果ガス排出量の分析に関する研究

研究代表者 国立公衆衛生院 渡辺征夫

厚生省	国立公衆衛生院		
	地域環境衛生学部	環境評価室	渡辺征夫
		環境健康影響室	後藤純雄
	廃棄物工学部		田中 勝
		最終処分工学室	池口 孝
		主任研究官	大迫政浩
	水道環境部		松澤 裕

平成6～8年度合計予算額 23,162千円  
(平成8年度予算額 7,127千円)

#### [要約]

CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、フロン類などの微量温室効果ガスのライフサイクルアセスメントを行う際に不可欠な発生関連データ、およびそれらの発生関連施設の運転管理に要するエネルギーや資材のデータを収集し解析した。まず、特に発生データが不足していたアジピン酸関連の工業プロセスからのN<sub>2</sub>Oの排出係数[1.3(N<sub>2</sub>O/アジピン酸)]および放出量[15 Gg/年]を実験および文献から予測した。また、メタンや亜酸化窒素の潜在的な発生源として重要な都市ごみ、し尿、下水の処理を考え、それらの1981-1990年度のデータベースを作成し、1990年度で、ごみ処理施設(約1800カ所)では、総処理量;3650万tonに対し、消費エネルギーとして、電力量;1780 GWh(自家発電補正;約2100)、都市ガス;2.4 Mm<sup>3</sup>、LPG;1.6 kton、重油・灯油;78 ML、エネルギー合計;2.4 Pcalであり、1 tonの処理に30～90kWh(電力)、1～13L(石油)が消費されていること、また、し尿処理施設(約1200カ所)では、総処理量;27 GLに対し、それぞれの年間使用概量は、電力量;1400 GWh、都市ガス;0.9 Mm<sup>3</sup>、LPG;0.2 kton、重油・灯油;167 ML、エネルギー合計;2.9 Pcalであり、し尿の処理量当たり10～150kWh/kL(電力)、1～20L/kL(石油)が消費されていること、などが判明した。また、小集落用の下水処理施設と都市下水道との比較から、両者の運営に要するエネルギー消費量はほぼ同程度であること、粗大ごみ処理では、1990年度で350tonの処理に電力120GWhを消費していることなどが分かった。これらのデータを基に、都市ごみ処理での焼却と埋立、し尿処理での下水処理場とし尿処理場などの比較検討をして、微量温室効果ガスの低減対策のライフサイクル解析をした。

[キーワード;ライフサイクル分析、ごみ処理、し尿処理、アジピン酸、メタン、亜酸化窒素]

#### 1. 序

地球温暖化に関連して、大気中のCO<sub>2</sub>などの温室効果ガスが問題とされているが、本研究で主な対象成分としているCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、フロン類などの微量温室効果ガスは、それらを合わせた温室効果が80年代以降ではCO<sub>2</sub>のその60%を越え、今後一層増大しているとの予測<sup>1) - 3)</sup>もなさ

れている。しかし、これらの化合物の発生状態は、CO<sub>2</sub>に較べると著しく複雑で不明な点が多く、これらの発生要因の解明も不十分であり、対策については緒の付いたばかりである。特に、ライフサイクルアセスメント(LCA)に立脚した対策、すなわち、単に微量温室効果ガスの排出抑制だけではなく、その対策技術・施設の導入段階での初期投入や最終処分のためのエネルギー、あるいは運営における温室効果ガスの総発生量の推定も含めた全体としての評価はほとんど成されていない。

そこで、本研究では、まずこれまでの微量温室効果ガスの放出、発生についての最近のデータを整理し、不明な発生源からの放出量をおおよそ評価することにした。ついで、生産や廃棄処理などの幾つかの代表的な発生源での対策技術について考察し、LCAのためのデータベースを作成し、CO<sub>2</sub>排出抑制も含めた温暖化防止対策の事例について検討した。

## 2. 研究方法

本研究では、従来の微量温室効果ガスの発生源や発生量についての知見を整理し要約する作業、従来は未整理であった数値を吟味しデータベースにまとめてLCAのための基礎データを整備して、それを解析する作業、従来は知見が不足して全体の排出状態を見ることを困難にしていた発生源の排出状態を実験的に推定する作業――などから構成されている。

特に、メタン、亜酸化窒素、フロン類の発生・排出と密接の関連がある都市ごみやし尿・下水の処理をおもな検討対象とした。LCAの評価精度を高めるもっとも重要な点は、全体のプロセスの解明と各プロセスにおけるエネルギー消費量の正確な把握であると考え、処理に関連する数値をデータベース化して、定量化することに重点を置いた。廃棄物関連の処理は、生産活動と異なり、先進諸国においても正確な統計数値が得にくい分野である。日本でも、状況は同じであるが比較的数値が整備されている国であるが、これまでにそれを整理・研究した報告は少ない。これらの数値が整理され、知見がまとまれば、国際的な目安にも成るし、発展途上国で今後の廃棄物処理の政策立案に際して、貴重な資料となると期待される。

本研究での作業内容は、おおよそ以下の項目に整理できる。

- 1 微量温室効果ガスの放出・発生についてのデータの集約。
- 2 アジピン酸製造、硝酸製造などの工業プロセスからの亜酸化窒素排出係数と排出量の推定。
- 3 フロン類の排出低減対策。
- 4 廃棄物関連物質(都市ごみ、し尿、地域下水、粗大ごみ)の処理についてのデータベースの作成と処理に要するエネルギー量および経費の解析。

## 3. 研究内容と結果・考察

### 3. 1 微量温室効果ガスの放出・発生についてのデータの集約

国内における微量温室効果ガスの放出・発生について、環境庁地球環境部が取りまとめた平成4年度および平成5年度の地球環境総合推進費研究成果報告書あるいは地球環境産業機構の報告書<sup>9)</sup>を参考にしながら、関連データを整理した結果、幾つかのことが判明しているものの、まだ不明な部分が多く、特に、推定値は前提となる条件の取り方で大きく異なることが分かった。これまでの推定結果で見ると、主な国内の発生源は、メタンでは、水田、家畜、廃棄物埋立、石炭採掘など、またN<sub>2</sub>Oでは、工業プロセス、自動車排ガス、廃棄物処理、施肥などであった。

### 3. 2 アジピン酸製造、硝酸製造などの工業プロセスからの亜酸化窒素放出

窒素を含む化合物の酸化、あるいは還元によりN<sub>2</sub>Oは発生し、工業的プロセスで見ると、前者ではアンモニアの酸化、後者では硝酸を酸化剤としたときの有機化合物の酸化が特に重要であ

る。このうち、アジピン酸製造、硝酸製造施設は、N<sub>2</sub>Oの人為的な主要な発生源の1つとして世界的に問題となっている。しかし、本研究を始めた当時は、国内の放出データは報告されていなかった。そこで、アジピン酸製造、硝酸製造などを含む硝酸が関連する工業プロセスからのN<sub>2</sub>O放出の可能性、放出量、その削減対策などを考察した。

### 3. 2. 1 硝酸が関連する工業プロセスからの亜酸化窒素放出の可能性

アンモニア酸化法による硝酸製造は、アンモニアから一酸化窒素を得る行程、一酸化窒素から二酸化窒素を得る行程、および二酸化窒素を水に吸収させて硝酸を得る行程の3つの基本行程からなっている。これらの各段階で副反応としてN<sub>2</sub>Oが生成する可能性はあるが、無視できない量が生成しているとするならば、必然的に硝酸の収量低下をもたらすことになり、工業プロセスとしての重大な欠点となる。それ故、完成された領域にある本法では、これまで計測されたことはないが、大量のN<sub>2</sub>Oの排出は一応無いと判断した。

硝酸による工業的有機酸化プロセスとしてはシクロヘキサノール/シクロヘキサノンからのアジピン酸の製造がある。アジピン酸の主要な用途はナイロン66の原料であり、国内の主要なメーカーは旭化成、東レ、宇部興産で合計生産能力は53,000トン/年(94年3月)である<sup>4)</sup>。

硝酸の有機化学工業における用途としてはアジピン酸製造以外に合成繊維、トルエンジイソシアト、ニトロペンゼン、ニトログリセリン、火薬、染料などの原料がある。これらの硝酸を用いるニトロ化やエステル化、また亜硝酸によるジアゾ化において各種窒素酸化物が発生することが知られている。しかし、生産規模や製品自身が含窒素化合物であるときに、硝酸使用量に比べ窒素酸化物の副生量は少ないものと見込まれ、N<sub>2</sub>Oの発生も無視し得る程度と考えられる。

### 3. 2. 2 アジピン酸製造プロセスからの亜酸化窒素排出係数の推定

小型の実験装置を作成して工業プロセスと同様な反応をさせて、アジピン酸の製造に伴うN<sub>2</sub>Oの排出係数を推定した。実験装置は容量10mlの密閉反応容器(80℃に保温)と、容器の上部に試薬滴下用のシリンジおよび発生ガス採取用のヘリウムガスの入口管と出口管を取り付け、それに、ヘリウムの流出口に付けたN<sub>2</sub>O回収用バックから成る。実験では、反応容器に濃度50%の硝酸水溶液の約2mlを入れて、そこに、シクロヘキサノールあるいはシクロヘキサノンを滴下してアジピン酸を生成させた。その時に生成するN<sub>2</sub>Oはヘリウムの気流に乗せて取り出し、その濃度はGC/ECDで分析した。

表1 アジピン酸製造におけるN<sub>2</sub>O発生量

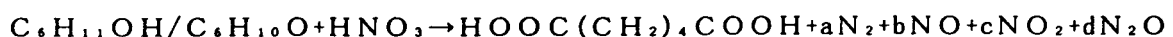
反応基質	AA*生成量 mmol	収率 %	N <sub>2</sub> O量 mmol	N <sub>2</sub> O/AA (モル比)
シクロヘキサノール (I)	2.80	52.5	3.71	1.33
	2.72	54.3	3.19	1.17
	2.63	51.9	3.50	1.32 (1.27)**
シクロヘキサノン (II)	2.81	54.8	3.91	1.39
	2.64	50.9	3.18	1.21
	2.60	50.8	3.74	1.43 (1.34)
(I)+(II) 混合(1:1)	2.74	54.6	3.52	1.28
	2.64	50.7	3.46	1.31
	3.00	58.8	3.90	1.30 (1.30)

注、\*；アジピン酸、\*\*；3回の平均値。

その結果を表1に示すが、1.3 [mol・N<sub>2</sub>O/mol・アジピン酸]と、従来、予測されていた値<sup>5)</sup>よりも高比率でN<sub>2</sub>Oが生成していた。この原因は現在不明であるが、より様々の条件で実験を行い、この差の要因や排出係数に影響する因子について解析を進めたいと考えている。

### 3. 2. 3 N<sub>2</sub>O放出量の推定

前節で述べたように当面无視し得ないN<sub>2</sub>Oの放出が予想されるのは、硝酸を酸化剤とするアジピン酸の製造過程であるが、その過程は以下の反応式で示されている。



実際の製造装置での発生ガスの組成比率(上式中のa, b, c, d)や発生量について、具体的な数値は求められていないが、ここでは、既報<sup>5)</sup>の値、

$1 \text{ mol N}_2\text{O 発生量} / 1 \text{ mol アジピン酸生産量} = 0.3 \text{ g N}_2\text{O} / 1 \text{ g アジピン酸}$   
なる値を用いることにする。

アジピン酸の輸入量は34,000トン(93年)<sup>6)</sup>であるが、国内の生産実績は自家消費量が多いこともあり明確ではない。ある調査では50,000トン/年(90年)<sup>7)</sup>程度と推定されている。この数値は、硝酸(98%換算)の1992年の生産量667,000トンのうちアジピン酸用は69,000トンであり<sup>6)</sup>通常この種の反応では酸化基準に対して硝酸を3倍モル以上使用すると考えられることなどから、概ね妥当なものと判断される。以上の前提にたつてアジピン酸製造に伴う $\text{N}_2\text{O}$ の発生量を見積もると、 $15 \cdot \text{N}_2\text{O G g} / \text{年}$ となった。

### 3. 2. 4 削減のために考えられる対策

現行のアジピン酸製造プロセスに換わる方法としては、シロヘキソンのホウ酸添加空気酸化法、およびシロヘキソノ/シロヘキサーノの空気酸化法が1960年代に開発された。しかし、これらの方法は、前者では製造行程が複雑になる、後者では製品(アジピン酸)の純度が悪いなどの問題がある。1970年代に硝酸でなく触媒で一段空気酸化によるアジピン酸合成法が<sup>8)</sup>が開発された。この方法であれば、 $\text{N}_2\text{O}$ の発生を皆無にすることはできるが、LCAによる $\text{N}_2\text{O}$ の低減化の効果と、現在のプロセスを変えるための新たな投資、それに伴うエネルギー投入などとの関係の解析が必要である。

発生する $\text{N}_2\text{O}$ の分解処理による低減法も考えられる。当面、実用化可能な方法は、①高温条件下(1200-1500℃)での熱分解、および②触媒を用いた分解、がある。このいずれも利用が可能であるが、①では、分解生成物の利用、②では効率的な触媒の選択などが、今後、実用化する上での重要な過程と考えられ、メーカーを中心に検討が続けられている<sup>9)</sup>。

### 3. 3 フロン類の排出低減対策

フロン等のハロカーボン類による温暖化は、微量温室効果ガスの中でメタンについて影響が大きいとされている<sup>3)</sup>。モントリオール議定書以降、製造や使用の停止・制限で大気中濃度も減少に向かうなど改善が見られている<sup>3)</sup>が、一層の低減策が求められている。そこで、ここでは、都市ごみ焼却に伴う低減化の可能性と、回収フロン類の分解技術について検討した。

#### 3. 3. 1 都市ごみ焼却に伴うフロンの低減化の可能性

都市ごみの中には、フロンを含むスプレー缶や発泡ウレタンフォームなどが有り、フロンの一部はごみピットで貯留中、あるいは燃焼時にほぼ全量、気相中あるいは排ガス中に放出される。日本機械器具工業連合会の推定に依れば国内のこれまでの発砲断熱材に蓄積しているフロン11の量は約15万トンで、全フロン・ハロン蓄積量の68%になると推定されている<sup>10)</sup>。これらのフロン類は燃焼炉の温度が高いと分解するので、結果的にごみ焼却炉がフロン類の低減に寄与することになるが、一方、フッ素系のプラスチックなどの熱分解や炉内の反応で合成される可能性もある。それらがどの程度になるか推定した例はない。そこで、排ガス中のフロン類の実測値から概観してみた。

ある機械化バッチ方式の焼却炉での測定事例を表2に示す。定常的に燃焼している時と埋火(蒸し焼き)状態とを比較すると、埋火状態下では顕著に排ガス中のハロカーボン類の濃度が上昇しているのが分かる。濃度が上昇した原因をごみ中のプラスチックなどの熱分解で生成したと見るか、ごみ中に最初から有ったものであるのかの見極めは、これだけのデータでは困難である。しかし、炉への給気ガスはごみピットから取っているため、ピット内のガス濃度(表3)との比較から、少なくとも50%以上が分解していると思わせる。しかし、埋火状態では生成し得る可能性も示唆している。これらのことから、都市ごみ焼却炉は、不完全燃焼下であると発生源に成り得るが、効率良く燃焼していれば、ごみ中あるいは大気中のフロン類の分解を促進し、効率が良ければ50%以上の低減化が可能なが分かった。

表2. ある清掃工場（機械化バッチ方式）の排ガス中のハロカーボン濃度

運転状態	採取時刻	濃度 (ppb)					
		F-12	F-11	F-113	CHCl <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
立上げ	9:30～9:43	0.61	0.39	0.09	2.90	1.06	6.27
立上げ	9:45～9:56	0.21	0.31	0.02	9.21	0.15	4.20
立上げ	9:57～10:08	0.29	0.33	0.41	9.80	1.38	6.59
定常	10:38～10:50	0.42	0.35	0.07	5.09	1.87	7.42
定常	11:31～11:45	3.05	0.56	0.35	2.46	0.90	3.98
定常	12:30～12:40	0.42	0.34	0.04	4.36	3.72	8.09
定常	13:29～13:40	1.55	0.49	0.21	1.87	0.88	3.37
定常	14:30～14:40	5.86	7.86	31.20	3.22	0.98	6.78
定常	15:30～15:40	6.24	6.02	11.72	4.49	1.63	3.42
埋火	16:12～16:21	4.16	1.28	1.82	1.55	0.97	2.33
埋火	16:22～16:32	5.17	2.16	4.34	2.21	1.38	2.78
埋火	16:59～17:10	3.17	8.51	7.29	6.12	4.52	10.02
埋火	17:25～17:33	2.75	9.34	9.62	24.73	16.17	36.50
埋火	17:34～17:44	2.88	10.94	10.85	26.78	16.88	36.57
埋火	17:45～17:55	2.83	10.75	10.20	25.20	16.02	35.28
埋火	18:01～18:11	2.26	8.27	7.84	26.79	13.08	23.80
埋火	18:12～18:25	2.30	7.18	7.92	20.45	13.48	29.54
埋火	18:40～18:50	2.14	4.50	5.80	13.42	10.10	16.35

注； F-12 : CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, F-11 : CFCl<sub>3</sub>, F-113 : C<sub>2</sub>FCl<sub>5</sub>

表3. 調査期のごみピット、清掃工場周辺大気中のハロカーボン濃度

採取場所	濃度 (ppb)					
	F-12	F-11	F-113	CHCl <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
ごみピット						
	1.41	0.48	0.35	ND	0.08	9.42
	1.99	3.16	1.76	ND	0.06	1.61
	0.86	0.64	0.28	ND	0.01	1.31
清掃工場周辺大気						
	0.30	0.33	0.14	ND	ND	0.81
	0.32	0.34	0.07	ND	ND	0.87
	0.37	0.35	0.31	ND	0.08	0.93

### 3. 3. 2 フロンの分解技術の比較

国連環境計画 (UNEP) は、フロン分解技術として可能性の高い方法を10分類している。それらは、燃焼炉での熱分解、触媒分解、回転炉での熱分解、化学的破壊、超臨界水分解法、湿り空気酸化法、プラズマ分解法、UV光分解法、生物的分解法、高エネルギー放射法—などである。これらの利害得失の詳細は、最近の報告書にまとめられている<sup>11)</sup>。それらを、単にダイオキシンなどの有害物質排出の視点だけでなく、温室効果ガス全体と関連させて考えてみると、

1) 施設建設に要する資材・経費、2) 運転に係わる資材・経費、3) 他の目的との相性—などを考慮する必要がある。このような観点と比較的容易に満たすのは、上記の中で熱分解方式である。

熱分解方式では、1) 熱を他の目的、発電や合成などに利用することにより、実質的に熱の投入を無視できることがある、2) 固形物などの不純物が混入しても効率が大きく変動することが少ない、3) フロン以外の有機溶媒などの産業廃棄物への利用も可能である—など、他の方式に比較し有利といえる。特に、セメントキルンを用いた熱分解法は、従来の施設をほぼそのまま利用でき、かつフロン中の塩素やフッ素がカルシウム化合物としてセメント生成プロセスの中で吸収され、生成物の処理が不要な点も評価される<sup>12)</sup>。

しかし、セメントキルンの有る施設まで輸送する経費やエネルギーを考えると、発生 (回収) した場所で分解もできる他の方法も必要になる。その場合にどのような方法が適切かは、処理の必要が発生した環境により異なり、様々な方式の利用が考えられている<sup>11)</sup>。

### 3. 4 都市ごみやし尿などの廃棄物の処理のライフサイクルアセスメントのための基礎検討

都市ごみ処理やし尿処理から、処理法によっては、大量のメタンや $N_2O$ が発生する可能性があることは、これまで、IPCCの報告書<sup>3) 13)</sup>や我々の研究結果<sup>16)</sup>で指摘されている。特に、埋立処分では、嫌気的な条件に成りやすいのでメタンの発生は膨大なものとなる。そのため、焼却処理や高度処理が有効と考えられるが、それらはまた、建設や運転に大量のエネルギーを消費して、結果的に二酸化炭素排出を促進することにもなり、それらを含めた全体をLCA手法で、解析をしない限り、正確な温室効果抑制を評価できないことになる。それで、以下のようなプロセスで具体的な作業を進めることにした。

- ① 都市ごみ、し尿、下水などの処理のプロセス全体を概観し、メタン、 $N_2O$ などの微量温室効果ガスの発生に係わる部分を見極める。
- ② 1981-90年の4種の施設、合計で約5000箇所の余りの施設における数値をデータブック<sup>14)</sup>からコンピュータへ入力する。
- ③ 入力データを基の数値まで遡って吟味し、数値として明らかに誤りと判断されるものをデータベースから除く。
- ④ そのデータを基に、これらの施設で、これまでにどの程度のエネルギー消費がされてきたかを推定する。
- ⑤ 主なものについては、使用された経費も計算する。
- ⑥ 微量温室効果ガスのLCAの事例を考える。

#### 3. 4. 1 処理のプロセス

LCAを行うためには、全体の処理プロセスについての理解が不可欠である。そこで、都市ごみ・粗大ごみ・産業廃棄物およびし尿・下水の処理工程の概要、それに都市ごみの埋立地内での温室効果ガスの発生部分を整理した (図1~3)。

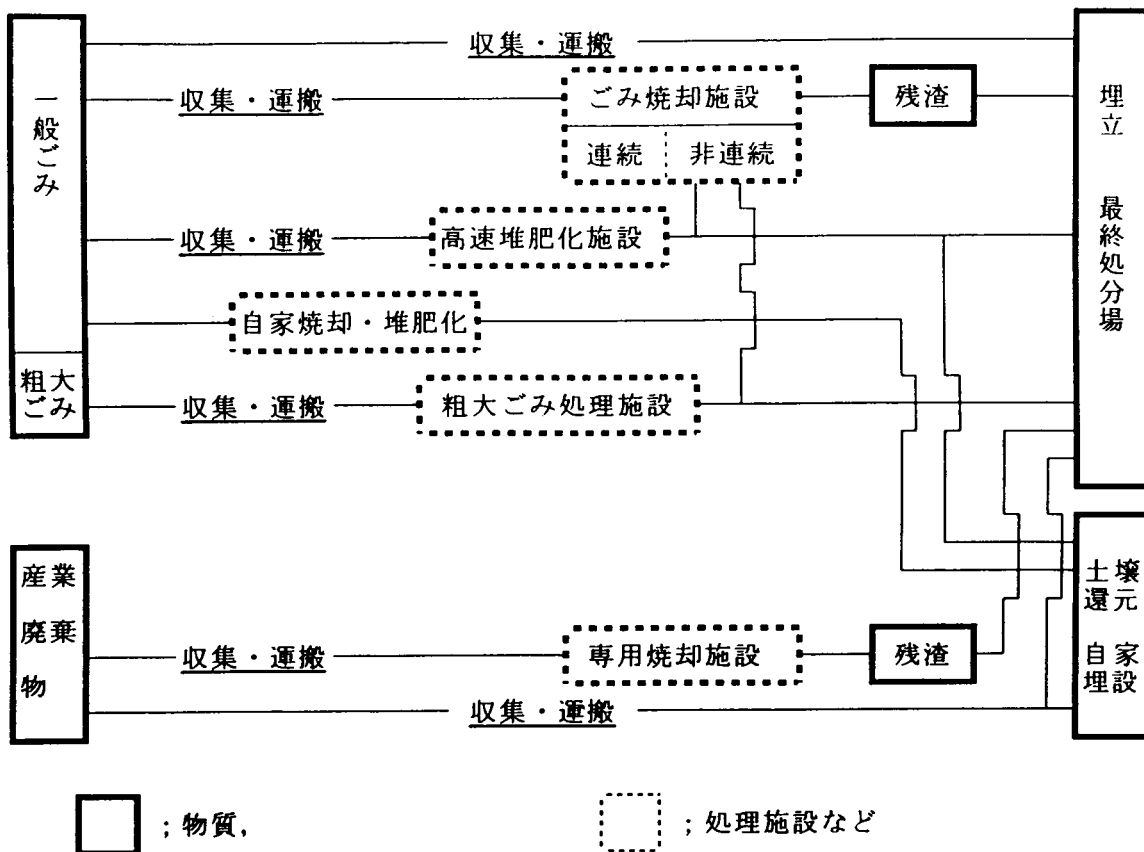


図1 都市ごみ、産業廃棄物の処理フロー

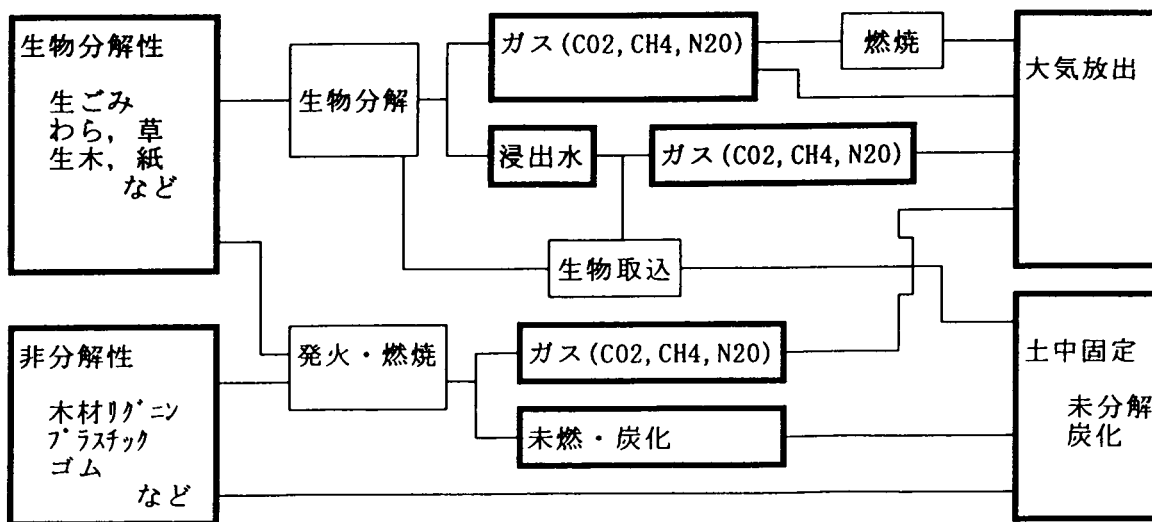
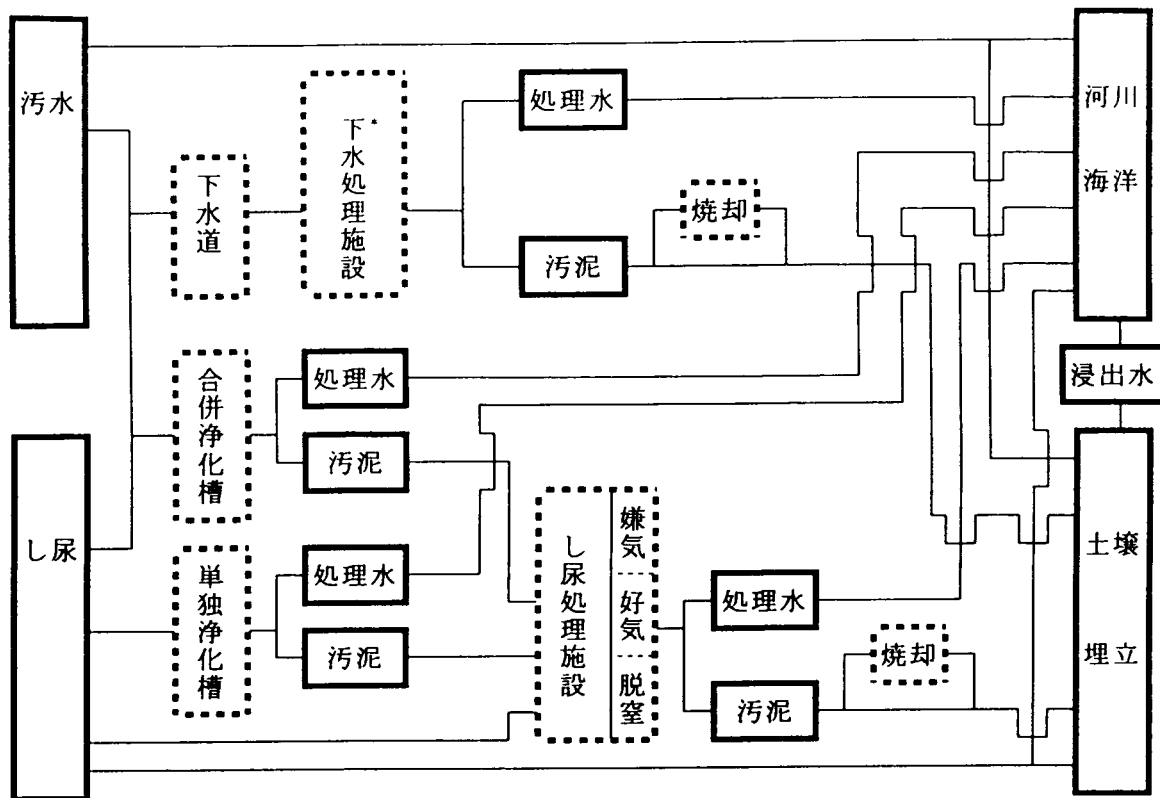


図2 都市ごみ埋立地内での有機性炭素、窒素のフロー



\* ; 小規模・地域・排水処理施設を含む。

□ ; 物質,

□ ; 処理施設など

図3 下水・し尿の処理フロー

### 3. 4. 2 生データの吟味とデータの再編成

今回、対象とした施設は、極めて多数であり集計データは膨大である。このような数値群には、記載ミス等が一定程度あると見ておく必要がある。それを見過ぐすと、重大な誤りを招くことになる。特に、エネルギーに関しては、数値の持つ意味について直感的な判断はしにくいし、利用過程で検証される機会も少ないことから、誤って記載しても気づかない場合が多い。ここでは、幸い、電力や燃料の使用量と共に購入経費の数値があるので、両者の比較から以下の手順で、記載の数値を吟味した。

使用量とそれに支払った金額との関係を両対数グラフで見ると、4分類のすべての数値群でし、図4（し尿処理の例）と同様な大きな不一致が有った。特に、1000倍ほど離れた2本の直線に属するデータ群が認められ、電力量（90年度）では主群が図4のように上方にあるが、重油・灯油

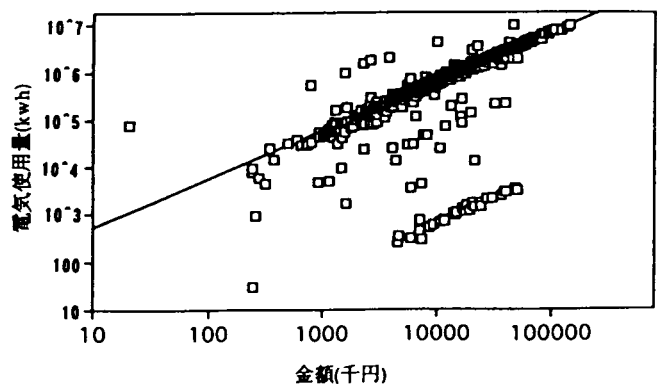


図4 電気使用量と支払い金額との関係（1990年度）



では逆になることも分かった。同様なことは、他の年度でも見られ、何らかの系統的なミスに基づくと推定された。

電力や燃料の購入単価は、地域、仕入れルート、使用量によって異なるとは言え、10倍以上の差は異常であり、いずれか、あるいは両方に誤りがあると見なせる。しかし、金額については、生活実感で把握し易く注意も集中するので桁を間違ふ可能性が少ないと考え、使用量に誤りが多いと考え、購入経費(料金)を基にして逆に電力や石油類の使用量を推定することにした。まず、離れた点を除いた主群から使用量と料金との関係を年度毎に求めて、ついで、支払い金額を基準にして使用量を算出した。各年度の使用量(Y)と支払い金額(X, 千円)との関係は、以下のようになった。

[1981年度] 電力;  $(Y, \text{kwh}) = 36.5 \cdot X^{1.026}$ , 重油・灯油;  $(Y, \text{L}) = 12 \cdot X^{1.009}$

[1990年度] 電力;  $(Y, \text{kwh}) = 49.4 \cdot X^{1.028}$ , 重油・灯油;  $(Y, \text{L}) = 20 \cdot X^{1.018}$

なお、施設の規模や処理量に比較し、支払金額が異常に大きいものは、単位(千円)を円と取違えたとみなし、使用量を用いた。なお、LPGと都市ガスでは、使用量をそのまま用いた。

なお、記入のないものは記入漏れとみて、記入の無い部分は集計対象から外した。また、「データブック」でプロパンと記載されているものはLPGと見なした。

### 3.4.3 都市ごみの処理に要するエネルギー量

都市ごみ焼却施設で処理に使用されている電力量と燃料量の実態を全国の約1800ヶ所施設での1981年度と1990年度のデータから推算した。その結果を表4に整理した。81年度と90年度の値で見ると、それぞれは;

施設数; 1842 & 1780, 年間処理量; 25.9 & 36.5 Mton, 電力消費; 1061 & 1779 GWh, 重油・灯油; 80 & 78 ML, 都市ガス; 3.3 & 2.4 Mm<sup>3</sup>, LPG; 0.17 & 0.16 kton, エネルギー総量; 1.8 & 2.4 Pcalであり、主要エネルギーは電力と重油・灯油であり、1 tonの処理に30~90kWhの電力量と1~13Lの油類が消費されていることが分かった。

この電力量は都市ごみの潜在熱量<sup>1)</sup>の4%程度に相当し、家庭用の電灯需要の約1%に当たる。購入した電力量は、81年度よりも62%増加し、ごみ量の増大を勘案しても、処理により多くのエネルギーが消費されるようになってきたことが分かる。この中で全連続方式だけ取ると、処理量当たりの購入電力量が81年度よりも、15%程度減少していたが、図5に示すように特に発電設備を有する大型施設で著しい。それ故、この減少の原因は焼却熱利用発電の結果と反映と推察された。

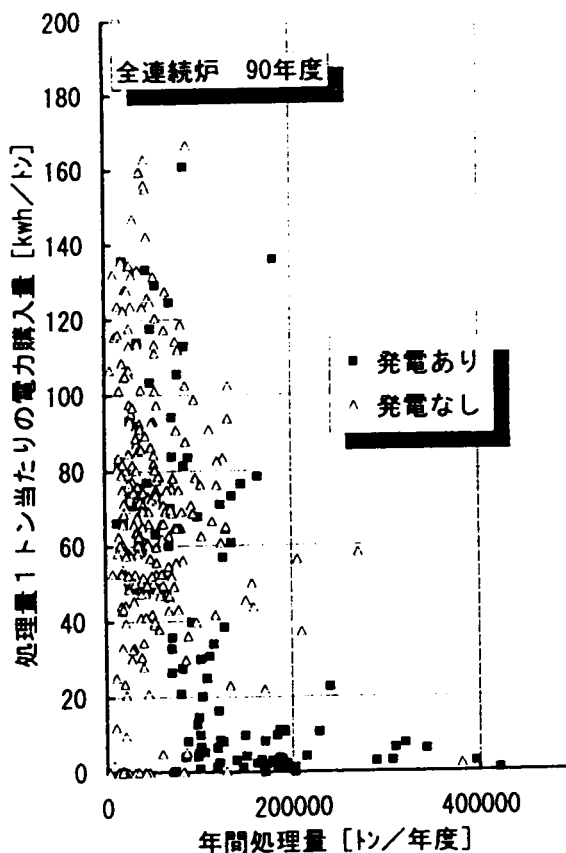


図5 年間処理量と単位処理量当たりの電力量

表4 都市ごみ焼却施設での処理方式別のエネルギー消費の実態 (1981-1990)

処理方式	施設数	処理量		電力使用量		油類使用量	
		処理総量 kton	施設当り kton/pt	総量 GWh	処理量当り kWh/ton	総量 ML	処理量当り L/ton
[1981年度]							
全連続	304	17,531	57.7	799	70.4	24.0	2.68
准連続	119	1,306	11.0	72	69.0	6.2	6.31
機バッチ	979	5,629	5.8	137	21.5	41.8	9.99
固定バッチ	348	994	2.9	9.2	13.8	6.3	13.4
コンポスト	11	56	5.1	2.7	72.2	0.02	0.35
その他	81	374	4.6	41	35.8	2.3	4.85
合計	1,842	25,891		1,061		80.4	
[1990年度]							
全連続	379	27,173	71.7	1,286	47.3	18.1	0.67
准連続	249	3,799	15.3	296	78.0	7.4	1.96
機バッチ	861	5,110	5.9	186	36.4	45.8	8.97
固定バッチ	214	266	1.2	2.3	8.7	3.2	12.1
コンポスト	23	58	2.5	4.0	69.5	0.8	13.0
その他	54	116	2.1	3.9	33.2	2.9	24.8
合計	1,780	36,523		1,779		78.2	

### 3.4.4 し尿・浄化槽汚泥の処理に要するエネルギー量

表5に、し尿処理に伴うエネルギーの消費の概要と処理方式別の1981年度と1990年度の解析結果を要約している。81年度と90年度の変化を施設数で見ると1487から1166と20%以上減少したが、処理量では20GLから27GLと35%増加し、下水道の整備が進んでも尿尿処理施設の重要性は高く、また施設の大型化が進んでいることが分かる。エネルギー使用量では、10年間で10%近く減少していて、内訳では、電力と油類がほとんどを占め、LNGや都市ガスは無視できるほどの量であることが分かる。また、油類の使用は10%以上減少したが、電力の減少量はわずかであった。

処理方式別の処理用当りの電力使用量は、表5のように全体として、嫌気く高負荷く好気く標準脱窒素、といった傾向にあった。また、年間処理量との関係では、多くなるほど使用量が少なくなる傾向が、標脱型や高負荷型では比較的明瞭であるが、嫌気型では不明確であった。高負荷型は、年間処理量が50MLを越える施設は少なく、他の方式に較べると小型であることが分かったが、表5の施設当りの処理量でも約19ML/施設と少なくなっている。

油類(重油・灯油)の処理方式別の処理量当りの使用量は、電力ほど明確ではないが、全体として、嫌気く高負荷く標準脱窒素く好気の傾向が見られる。また、①嫌気型は10L/kL以下の下方に集中している、②標脱型は3-15L/kLの範囲にほとんどが入り、③好気型と高負荷型は分布が広い、—といった特徴が見られた。ここで、嫌気型で使用量が少ないのは処理過程で発生するメタンを燃料として利用することにもよるのであろう。

前章の都市ごみ焼却施設でのエネルギー使用実態の結果と比較すると、①同じ90年度で見ると、電力および油類の使用量は、電力では約80%と幾分少ないが、油類は2倍以上と、し尿処理施設では油類の使用が多いという特徴があること、②また、それぞれ同程度のエネルギー消費施設であること、③81年度からの10年間の変化を見ると、焼却施設では、使用量が電力で1.7倍、油類は

ほぼ同じであるのに対して、し尿処理施設での使用量では、電力は同程度で、油類は約15%減少したこと—などの特徴が見られた。

表5 し尿処理施設での処理方式別のエネルギー消費の実態 (1981/1990)

処理方式	施設数	処理量		電力使用量 <sup>*</sup>		油類使用量 <sup>*</sup>	
		処理総量 ML	施設当り ML/pt	総量 GWh	処理量当り <sup>♯</sup> kWh/kL	総量 ML	処理量当り <sup>♯</sup> L/kL
[1981年度]							
嫌気	579	10,201	17.6	480	54.7	72.6	5.56
好気	394	3,038	7.7	508	48.1	55.0	8.66
その他-1 <sup>°</sup>	252	6,877	33.5	422	62.5	66.7	6.64
その他-2 <sup>°</sup>	262			30		0.3	
合計	1,487	20,116		1,440		194.3	
[1990年度]							
嫌気	391	8,823	22.6	279	32.2	41.1	5.43
好気	345	7,094	20.6	396	70.3	40.0	9.10
標準脱窒素	227	7,267	34.6	510	99.3	48.6	7.95
高負荷	116	2,169	18.7	134	67.8	12.6	6.72
その他-1 <sup>°</sup>	87	1,594	18.3	83	39.4	24.6	26.3
合計	1,166	26,947		1,402		166.9	
比率(1990/1981)							
	0.78	1.34		0.97		0.86	

注、<sup>\*</sup>；支払い金額を基準に補正して求めた推定値。<sup>♯</sup>；施設ごとに算出した平均値。  
<sup>°</sup>；その他-1：記載の処理方式に該当しないもの、その他-2；処理量不明。

### 3. 4. 5 コミュニティープラントでの下水の処理に要するエネルギー量

コミュニティプラント(CP)は、都市下水道が整備されていない地域の団地や小集落の下水を処理するための施設であるが、メタンや亜酸化窒素の発生源の1つでもある。しかし、そこでの運転に消費されるエネルギー量がまとめられたことは無かった。現在、流域下水道などの大型の都市下水道の整備が進められつつあるが、全体の完成に時間が掛かりすぎるとか、長距離の下水管の建設費用が割高に付くとか、河川自身が消滅してしまうとか、地形が複雑な地域では建設も運営も高負担になるとか—といった欠陥が顕在化しており、小規模の下水処理が注目されつつある。しかし、建設や運営に要するエネルギーや費用といった点からの定量的な比較は不十分であり、そのための基礎データの蓄積は、メタンや亜酸化窒素などの微量温室効果ガスの発生が無視できないとの指摘もあり、下水処理関連施設からの温室効果ガス全般の排出量推定やその抑制に不可欠な要件である。

CPでの下水の処理に伴うエネルギーの消費の概要と処理方式別の1985年度と1990年度の解析結果を表6に要約した。85年度と90年度の5年間の変化を関連市町村数で見ると、約691から419と40%近く減少したが、有効なデータの記載のあった施設数や処理対象人口は464施設と99万人から385施設と82万人と17%程度の減少であった。これは、都市下水道の整備が進みCPは必然的に閉鎖されることになるが、従来有った運転を停止したにもかかわらず閉鎖されなかったCPの

整理がこの5年間で進んだことの現れと推察される。

CPで使用されるエネルギーは、他の施設と同様にほとんど電力と重油・灯油類であった。これらの使用量の推定に当たっては、使用量をそのまま用いるよりも、料金として支払った費用から推定する方が正確であると判断されたので、ここでもその手法で総使用量を求めた。算出値は、報告値よりも、電力では約20%小さく、石油類では%大きくなった。

電力使用量では、この5年間の減少は12%で、対象人口などの減少よりも少ない。処理方式別で見ると、長時間曝気方式の減少度合いは、標準活性汚泥方式よりも少ない。長時間曝気方式では、処理排水中の汚染物をより多く除くために、標準活性汚泥方式の倍程度の曝気を行うので、当然、それだけ多くの電力使用量となるが、ここでもその傾向は認められ、それが5年間の変化に反映したと考えられる。しかし、CPでの処理量を正確に評価するのは、現在のデータ収集法で困難で、不明確な計画対象人口や計画最大汚水量に依らざるを得ないため、厳密な比較は困難である。

使用量の総量で見ると、都市ごみやし尿の処理の5%以下で、国内の消費では無視できる程度であることが分かった。CPでの値を都市下水処理施設と比較して見た。都市下水の例としては、最新の流域下水施設の代表的な相模川・酒匂川流域下水道での値を採用した(表7)。そこでの電力使用量は合計すると、64.3 Gwhとなり、全国のCPの総量の1.5にもなる。これを、対象人口や流入水当たりの電力量と比較すると、CPでの値が幾分大きいという結果となった。しかし、汚水輸送のためのポンプ場での消費量などを加えるとおよそ同程度と見て良いであろう。

表6 コミュニティプラントにおける使用エネルギーなど消費の概要

	合計	処理方法別			
		長時間曝気	標準活性汚泥	接触曝気	その他
[1985年度] 関連市町村数	691				
対象施設数	464	344	71		49
計画対象人口, 万人	98.5	48.8	46.8		2.
計画最大汚水量, km <sup>3</sup> /日	334.7	155	163.3		16.
電気使用量 Gwh	40.9	23	15.6		2.4
電気使用量 (算出値)	51.3	26.6	21.1		3.5
重油・灯油使用量, ML	13.7	12.8	0.3		0.5
水道使用量 km <sup>3</sup>	187.3	49.3	124.2		14
[1990年度] 関連市町村数	419				
対象施設数	385	272	50	15	48
計画対象人口, 万人	81.6	41.4	34.3	4.3	1
計画最大汚水量, km <sup>3</sup> /日	291.1	142.7	121.5	11.1	15
電気使用量 Gwh	35.8	21.2	12.4	0.83	1.37
電気使用量 (算出値)	45.4	25.5	15.4	1.4	3.1
重油・灯油使用量, ML	2.09	0.82	0.73	0	0.54
水道使用量 km <sup>3</sup>	151.2	48.1	45.6	25.3	32.2

[総電気使用量 (算出値) / 計画最大汚水量・年]

=0.42 kwh/m<sup>3</sup> (1985年度), =0.43 kwh/m<sup>3</sup> (1990年度)

表 5 流域下水道における電力使用量の事例 (相模川・酒匂川流域下水道, 平成6年度実績)

年間総電力 使用量合計 Gwh/年	流入水当 消費電力量 kwh/m3	工程別の電力消費量の内訳,%					自家発電量 Mwh	
		汚水ポンプ ブローア	水処理施設 汚泥処理施設	16.8	9.9	15.5		
四の宮管理センター 23.1	0.31	20.7	34.2	16.8	9.9	15.5	2.9	3.44
柳島管理センター 34.3	0.34	22.2	41.3	11	5.6	18.6	1.3	5.39
酒匂管理センター 6.9	0.4	15.8	28.5	16.8	13.5	18.1	7.3	9.44
[合計; 64.3]								

\* 計画人口; 201万人

### 3. 4. 6 粗大ごみの処理に要するエネルギー量

1990年度における全国の粗大ごみ処理施設は、約720ほどである。しかし、粗大ごみ施設は、ごみ処理施設などと並設されていることが多く、電気使用量などを独自に集計していないこともあり、集計の対象となった施設は、680ほどであった。年間の総処理量は349万トンで、処理能力の30%程度であった。使用されたエネルギーの90%以上は電力であり、その合計量は、電気料金からの計算で121 Gwhで、焼却施設やし尿処理施設の1/10程度であった。今後、リサイクル運動の発展により粗大ごみ処理施設は、質、量ともに大きく変わっていくものと思われるが、現時点での処理量単位のエネルギー消費は、都市ごみ処理と比較すると幾分低いことが分かった。

### 3. 4. 7. 都市ごみ処理施設における経費の解析

施設の運営には、エネルギーと共に資材や労力も不可欠であり、これらの必要量もLCA解析には重要である。すなわち、資材や労力を生むためには当然エネルギーの投入が必要であり、それに伴い、二酸化炭素などの温室効果ガスが発生するからである。経費の合計のここ10年の変遷を図6に示すが、着実に増加している傾向が分かる。特に「その他の料金」の項目は、経費の中で最大で50%以上を占め5年間で2倍ほどの増加を示している。この項目には、施設の委託管理料や定期点検などの経費が入っているので、施設の管理・運営形態によっても大きく異なる。消耗品と薬品の経費を加えると電気料金の50%を越える額となり、全国合計で200億円程度(90年度)に達している。

図7には、処理や運転方式による処理量当たりの経費の内訳を示す。コンポスト処理は、工程が複雑なこともあり、他の処理の2倍以上の経費が掛かっていた。焼却処理の内では、准連続方式が最も多く、固定バッチ方式はもっとも低い、顕著に差のあるのが電気料金である。准連続方式の場合、設備は連続方式とほぼ同程度であるが、連続方式ほど多量のごみの処理をせず、さらに発電もしないことから、処理単位であると相対的に多量の電気料金を要することになるが、固定バッチ方式では施設が単純で除塵や排ガス処理も単純か、ほとんどなされていないことが、少ない原因となっていると判断される。連続方式で薬品料金が他の2倍以上となっているのは、排煙処理に用いる消石灰(生石灰)やアンモニア、触媒などが関係していると思われ、今後、一層の排煙処理をすることになると、薬品や消耗品などの経費が急速に増加するものと推察される。

自治体の予算の中でごみ処理に要する費用は年々増加し、全国では2.7兆円(1993年度)であり、維持費と処理費だけでも1.6兆円に達している。特に、近年、消耗品や薬品に要する費用は、

ごみ処理の高度化に伴い増加率が著しく、この経費の節約は重要な課題となっている。

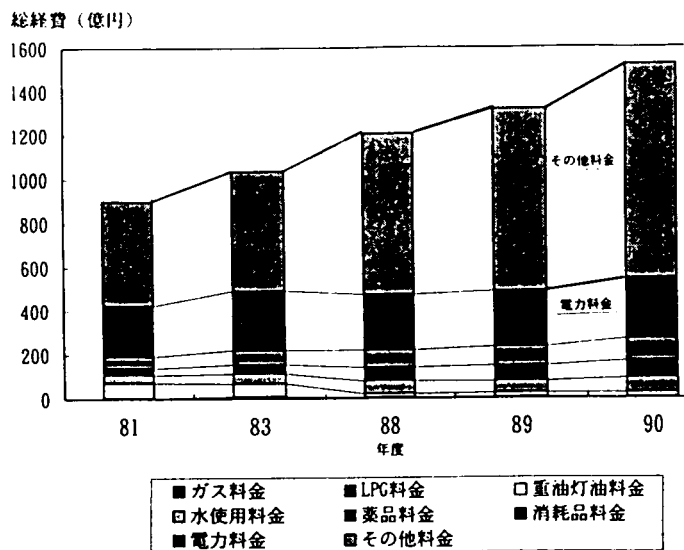


図6、ごみ処理に要する経費の推移

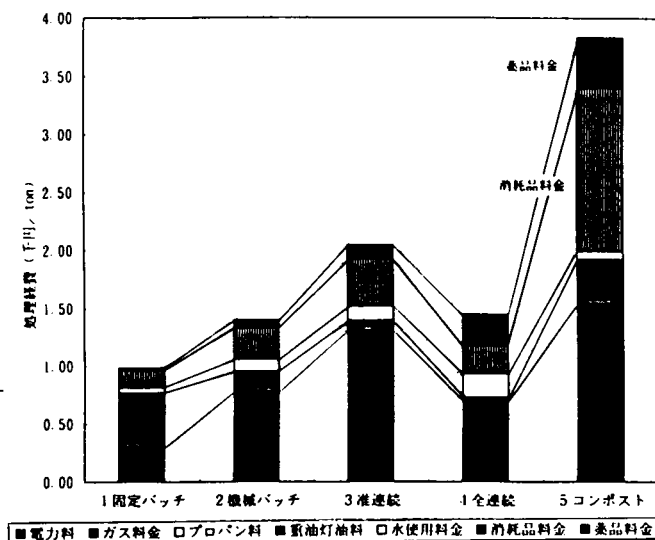


図7、処理方式別の処理経費（1990年度）

### 3. 4. 8 都市ごみ処理における焼却処理と埋立処分の経費の比較

国内の主要な処分方法は焼却と埋立であるが、近年、焼却が増加してきて1993年度では、74.3%で、埋立は14.4%となっている。これらの処理に対して、施設建設費を含めてどの程度の費用が掛かるかを推定することは、LCA解析にも有用な知見をもたらすものであり、重要である。しかし、精密な費用の見積もりは、ごみの性状、施設の立地環境などの状況により大きく異なるので困難であり、これまでに整理された統計データが発表された事例も少ない。それ故、概要にとどまらざるを得ないがおよその目安を立てるための比較を試みた。

以下の推定過程で、関係者の経験を基にしているものもあり、細かい根拠を示すことは困難である場合もあることを了解いただきたい。なお、ここで、用地費用、運営・人件費、ごみの収集・運搬費用などの事項については、ほぼ共通しているを見なし除外している。

#### [焼却処理]

##### 1. 建設費

厚生省の補助金の算定基礎が、およそ5000-7000万円/(ton・日・施設能力)

施設の利用期間；20年、稼働日数；250日/年

→ 5000-7000万円/(5000ton処理総量)

→ 1.0 - 1.4 万円/(ton・ごみ)

##### 2. 運営・処理コスト

処理運営費、既述のデータベースから算出、1990年度、処理量；3600万ton

処理経費合計；1500億円

→ 0.42 万円/(ton・ごみ)

焼却処理総経費； 1.4 - 1.8 万円/(ton・ごみ)

#### [埋立処理]

##### 1. 建設費 (300,000 m<sup>3</sup>以上)

実績として、2500-5000 円/m<sup>3</sup>・埋立容積

ごみの比重；0.5-1.0 (埋立後ごみの分解・圧縮を考慮)

覆土などで使用できない容積；50%

→ 0.25 - 0.5 (ton・ごみ)/(m<sup>3</sup>・埋立容積)

→ 0.5 - 2.0 万円/(ton・ごみ)

浸出水処理施設、5 億円/500,000 m<sup>3</sup>・埋立地総容積

- 0.2 - 0.4 万円/(ton・ごみ)
2. 運営費 (ほとんどが、浸出水の処理経費と考える)
- 浸出水の発生量; 1 tonのごみ (埋立層; 10m) → 0.2-0.4m<sup>2</sup>・埋立面積/ton・ごみ  
 降雨量; 1500mm/年, 30年間処理し続ける必要があるとして  
 → 9 - 18 m<sup>3</sup>(浸出水)/ton
- 浸出水処理費単価 (コンクリートプラントの事例から) → 51円/(m<sup>3</sup>水・年)
- 0.05 - 0.09万円/(ton・ごみ)
- 埋立処理総経費; 0.8 - 2.5 万円/(ton・ごみ)

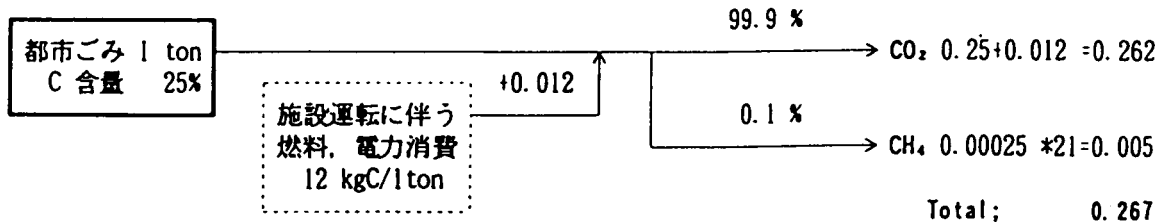
以上のことから、焼却処理と埋立処理の経費は、推定誤差を考慮すると、全体とするとほぼ同程度であると見なすことができる。しかし、焼却炉におけるダイオキシン対策、埋立地における厳重な漏水対策や浸出水対策などが加わるとこの推定の範囲を大幅に越える可能性もある。また、埋立地では、海面埋立のように広い地域で数十メートルまで積み重ね、跡地も緑地などで利用するなどのことを考慮すると、大幅な経費削減を実現できる場合もあるなど、事情によって10倍程度の差は生じ得る。

また、厚生省資料の1993年度の事業歳出の内訳で見ると;

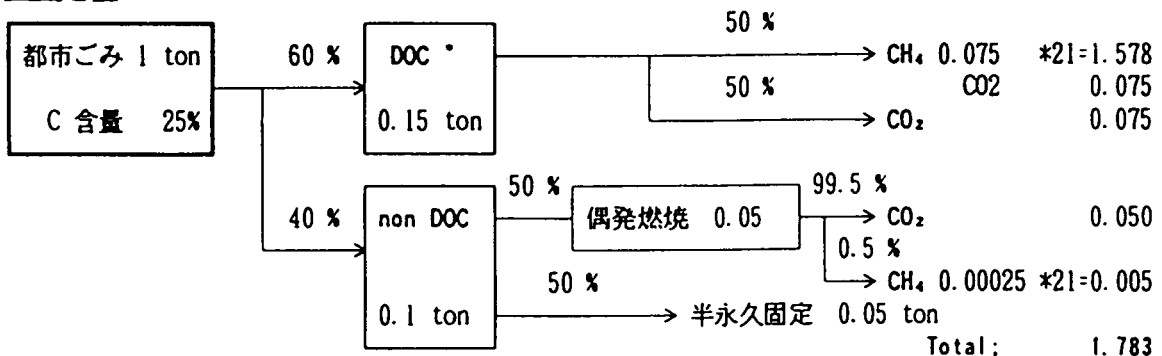
焼却炉などの中間処理施設費; 8287億円  
 焼却炉の運転などの中間処理費; 1904 | 合計; 10,191億円 (処理量; 3664万ton)  
 埋立地などの最終処分地費; 1083  
 埋立地の運営などの最終処分費; 395 | 合計; 1,478 億円 (処理量; 712万ton)

となっている。ここでは、焼却処理の結果生じた灰を埋立処分するなど両者が混在している部分があるなど上記の結果と厳密な対比は困難であるが、ほぼ上記の推定が妥当であることを示している。

### 焼却処理



### 埋立処理



\* DOC: 生物分解性炭素

[処理法による温室効果ガスの放出量(CO<sub>2</sub>換算)の差: 埋立処理/焼却処理 = 1.783/0.262 = 6.8倍]

図 8 都市ごみの処理方法による温室効果ガスの放出量の比較 (試算)

3. 4. 9 都市ごみ処理における焼却処理と埋立処分の温室効果ガス全体の発生量の比較試験  
廃棄物処理における微量温室効果ガスでもっとも問題となっているのは、都市ごみ処理における埋立方式と焼却処理の比較である。両者の比較を正確に行うとこと、現時点では、不明な部分が多くあるので困難であるが、本研究や最近の研究から、おおよその概要を計算することは可能となった。図8にその概要を示すが、焼却処理をすることで温室効果ガス全体の発生は、約1/7以下に低下できることが分かった。なお、ここでは、埋立により発生するガスをガス抜き管の出口で焼却したり、燃料として利用するを無視しているため、実際はこれよりも差は小さくなるが、完全に燃焼させることは困難なので、焼却処理の方が温室効果ガスの発生抑制につながると、結論づけられる。

#### 4. 謝辞

本研究を行うに当たり、工業プロセスからの $N_2O$ 放出量を推定するに際して、埼玉工業大学工学部の手塚暹教授に協力頂いた。また、廃棄物関連のデータベースの入力、解析では、日本環境衛生センターの秋月祐司氏、国立公衆衛生院に在職していた中野正博氏（現、沖縄開発庁）、千葉県環境研究所の松浦章良氏、国立公衆衛生院研修生の望月宏明氏、平田昌生氏、の諸兄にご助力頂いた。皆様に深く感謝いたします。

#### 5. 引用文献

- 1) L. Donner, V. Ramanathan: Methane and nitrous oxide; Their effects on terrestrial climate, *J. Atmos. Sci.*, 37, 119-124 (1980).
- 2) R. E. Dickinson, R. J. Cicerone: Future global warming from atmospheric trace gases, *Nature*, 319, 109-115 (1986)
- 3) J. T. Houghton, et al (ed.), *Climate Change 1995, -The Science of Climate change-*, Cambridge Univ. Press, 1996.
- 4) 石油化学製品データブック, 重化学工業通信社(1994)
- 5) M. H. Thiemens and W. C. Trogler, Nylon production: An unknown source of atmospheric nitrous oxide, *Science*, 251, 932-934 (1994).
- 6) 化学工業年鑑1994年版, 化学工業日報社 (1994)
- 7) 新化学インデックス, 化学工業日報社 (1994)
- 8) 田中久吾, 触媒, 17, 197 (1975)
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 地球環境産業技術研究機構編, 亜酸化窒素 ( $N_2O$ ) の低減対策に関する調査, (1996).
- 10) 日本機械器具工業連合会オゾン層保護対策協議会編, オゾン層破壊物質の燃焼法による破壊に関する調査報告書, (1995)
- 11) 地球環境産業技術研究機構編; エネルギー使用合理化フロン分解技術調査研究報告書, (1996)
- 12) 東京都環境保全局他編, フロン破壊手法の確立に関する「セメントキルン法」によるフロン破壊実証実験結果報告書, (1996).
- 13) J. T. Houghton, et al (ed.), *Climate Change 1992, -The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment-*, Cambridge Univ. Press, (1992).
- 14) 厚生省水道環境部環境整備課編: 廃棄物処理施設データブック, 環境産業新聞社.
- 15) 厚生省水道環境部環境整備課監修: 日本の廃棄物'96, 全国都市清掃会議, (1996).
- 16) 渡辺, 手塚, 松澤, 井上, 大迫, 田中; 高負荷型し尿処理施設から排出される亜酸化窒素, 大気汚染学会誌, 29, 225-233, (1994).



- 16) 渡辺, 手塚, 松澤, 井上, 大迫, 田中; 高負荷型し尿処理施設から排出される亜酸化窒素, 大気汚染学会誌, 29, 225-233, (1994).
- 17) 渡辺征夫, 宮崎正信, 田中勝, 奥山隆一; 廃棄物から回収可能なエネルギーの一次推定, 第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, p. 191-194 (1993)

#### 本研究での研究発表の状況

##### [論文]

- 1) 渡辺征夫, 手塚和人, 松澤裕, 井上雄三, 大迫政浩, 田中勝; 高負荷し尿処理施設から排出される亜酸化窒素, 大気汚染学会誌, 29, 225-233 (1994)
- 2) M. Tanaka, M. Miyazaki and I. Watanabe; CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from waste disposal facilities in Japan, in "CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O" (ed. K. Minami, A. Mosier and R. Sass), NIAES Series 2, p. 181-186 (1994)
- 3) 渡辺征夫, 松澤裕, 田中勝, 平田昌生, 小野昌徳; 一般廃棄物の処理に要する電力量および燃料量の実態分析: エネルギー・資源学会第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, p. 103-108 (1995).
- 4) 渡辺征夫, 望月宏明, 中野正博, 田中勝, 後藤純雄; し尿処理施設で消費されている電力量および燃料量の実態分析, エネルギー・資源学会第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, p. 471-476 (1996)
- 5) I. Watanabe, Y. Matsuzawa, M. Osako, M. Yamada, and M. Tanaka; Emission of Nitrous Oxide from Processes of Night Soil Treatment, Proceedings of 7th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions, Cologne, Germany, (1997).

##### [学会]

- 1) 渡辺征夫, 孫恵欣, 小林征嗣, 赤石修; 練炭, 木炭などの家庭用固形燃料からのCOなどの大気汚染物質の排出, 第35回大気汚染学会講演要旨集, p. 580 (1994)
- 2) 渡辺征夫, 相内更子, 高瀬享子, 富田潤一. 高性能ポータブル型測定機による発生源および環境調査でのガス状化合物の分析, 日本分析化学会第44年会講演要旨集, p. 217 (1995).
- 3) I. Watanabe, M. Hirata, A. Matsuzawa, H. Mochizuki, Y. Matsuzawa, M. Nakano, M. Tanaka; Estimates and analysis of consumption of electricity and fuels in MSW incineration plants and night soil treatment plants in Japan. 7th ISWA International Congress, Proceedings II, 325-326, (1996)
- 4) 渡辺征夫, 庭野知子, 高瀬享子, 泉克幸. 光音響吸収型ガス分析計による温室効果ガスおよびSO<sub>2</sub>の分析-II, 第37回大気環境学会講演要旨集, 445 (1996)