

マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878

土木研究所資料 第3731号

土木研究所資料

下水汚泥焼却施設の温室効果ガス削減コストに 関する調査報告

平成12年5月

建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全文又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文章による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

下水汚泥焼却施設の温室効果ガス削減コストに関する調査報告

汚泥研究室	主任研究員	原田	一郎
	室長	森田	弘昭
新下水処理研究官		酒井	憲司
前新下水処理研究官		中村	栄一*
前汚泥研究室	室長	尾崎	正明**

要 旨

下水汚泥焼却施設の排ガス中には、温室効果ガスである二酸化炭素に加え、温暖化効果の大きい一酸化二窒素が含まれている。なかでも、現在主流の高分子系流動焼却炉において単位汚泥量あたりの一酸化二窒素排出量が最も大きい。しかし、燃焼温度を引き上げることによりその削減が可能である。しかし、高温化は焼却施設に悪影響を及ぼすおそれがあり、焼却コストの上昇が予想される。また、補助燃料使用量の引き上げに伴い二酸化炭素排出量が増加するため、温暖化に及ぼす効果を総合的に評価する必要がある。

そこで、本調査では、高分子系流動焼却炉の燃焼温度を引き上げた場合を想定し、ライフサイクルコスト分析手法を用いて経済的な影響の検討を行った。さらに、全国の汚泥焼却施設から排出される温室効果ガス排出量を予測し、その削減可能量および所要コストを試算した。本報告書はこれらの調査結果をとりまとめたものである。

キーワード：下水汚泥、流動焼却炉、温室効果、一酸化二窒素、ライフサイクルコスト

* 現、日本下水道事業団 技術開発部長

** 現、都市基盤整備公団 関連施設交通部調査役

目 次

1 はじめに	1
2 燃焼温度と温室効果ガス排出量との関係	2
3 高温燃焼に伴う経済的な影響調査	3
3.1 調査概要	3
3.2 高温燃焼が及ぼす影響	4
3.2.1 焼却プロセスが受ける影響	4
3.2.2 焼却施設のコスト増加要素	5
3.3 LCC分析を用いた高温燃焼のコスト評価	7
3.3.1 評価手法	7
3.3.2 評価条件	9
3.3.3 調査対象施設の概要	12
3.3.4 経済的耐用年数の変化	14
3.3.5 トータルコストの増加	16
3.4 温室効果ガス削減単価の試算	19
4 全国の焼却施設から排出される温室効果ガスの推計	21
4.1 調査概要	21
4.2 焼却施設の現況	22
4.2.1 整備状況	22
4.2.2 焼却状況	24
4.2.3 費用関数	27
4.3 温室効果ガス排出量の現状	29
4.4 高温燃焼による温室効果ガス削減効果の試算	32
4.5 温室効果ガス排出量の将来予測	35

4.6 モデル炉における温室効果ガス削減単価の試算	38
5 まとめ	40
6 謝辞	41
7 参考文献	42

1 はじめに

わが国の下水道普及率は既に5割を超え、1997(平成9)年度に下水処理場から発生した下水汚泥は乾燥重量で186 DS万tにのぼっている。このうち65%に相当する121 DS万tが焼却され、汚泥の効率的な減容化・安定化が図られているが、今後は下水道整備の進捗に伴って汚泥発生量が増加するとともに、最終処分地の逼迫から、焼却される汚泥量はますます増大するものと見込まれる。ところが、下水汚泥焼却施設の排ガス中には、温室効果ガス(GHG)である二酸化炭素(CO₂)に加え、温暖化効果の大きい一酸化二窒素(N₂O)が含まれており、下水道施設から直接排出されるGHGsの大半を占めていると推定されている¹⁾。

このような状況を受け、汚泥研究室では、これまで下水汚泥焼却施設から排出されるGHGsの挙動に関する研究を行ってきた。その結果、現在主流である流動焼却炉で、かつ、高分子系の脱水助剤を用いた場合に、単位汚泥量あたりのN₂O排出量が最も大きいことが明らかにされた²⁾。また、その削減対策としては、燃焼温度の引き上げが効果的であることがわかった³⁾。しかし、燃焼温度の引き上げは、焼却施設の早期劣化など焼却施設に悪影響を及ぼすおそれがあり、しかも、補修費などのコストが上昇するものと推測される。また、高温化には補助燃料使用量の引き上げが必要であると考えられるが、それに伴ってCO₂排出量が増加するため、温暖化に及ぼす効果を総合的に評価しなければならない。したがって、GHGsの削減対策を検討するにあたっては、経済的な影響を事前に把握するとともに、GHGs排出量をより正確に推計することが求められる。

そこで、本調査においては、流動焼却炉の燃焼温度を引き上げた場合を想定し、焼却施設が受ける影響を把握することとした。とくに、経済的な影響の検討にあたっては、ライフサイクルコスト分析手法(LCC)を用い、高温化によるGHGsの削減効果についても推計を行った。さらに、これらの検討結果に基づき、全国の汚泥焼却施設から排出されるGHGsの排出量を予測し、その削減可能量および所要コストを試算した。

2 燃焼温度と温室効果ガス排出量との関係

従来の調査結果においては、高分子系流動焼却炉からの N_2O の排出を抑制するため、フリーボード部(流動焼却炉の気相燃焼部)で高温燃焼を行うとともに、同時に炉内温度差を保つことにより窒素酸化物(NO_x)の増加も抑えられることが示されている³⁾。また、実際の流動焼却炉を対象とした実験から、下水汚泥中の窒素分が N_2O に転換する割合は、高分子系汚泥の場合、

$$x = (-0.1403 \times t + 123) / 100 \quad \dots (2.1)$$

で表され、燃焼温度に比例して N_2O への転換率が減少することが明らかにされている⁴⁾。したがって、汚泥中の窒素含有率が与えられた場合、高分子系流動炉から排出される N_2O 量は以下の式で算出できる。

$$g = x \times w \times r \times 1.5711 \quad \dots (2.2)$$

ここで、

- x : N_2O 転換率 (N of N_2O -g/N of Sludge-g)
- t : フリーボード燃焼温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- r : 窒素含有率 (N-g/DS-g)
- w : 投入汚泥量 (DS-g)
- g : N_2O 排出量 (N_2O -g)

そこで、本調査においては、上式を用いて高分子系流動炉の N_2O 排出量を計算することとした。

3 高温燃焼に伴う経済的な影響調査

3.1 調査概要

N₂O 排出量の削減を目的に高分子系流動炉の燃焼温度を上げた場合、汚泥焼却に関連するコストの上昇が予想される。そのため、GHGs の抑制対策を進めるにあたっては、焼却施設における経済的な影響を事前に把握しておくことが不可欠である。そこで、本調査においては、高分子系流動焼却炉が受ける高温化の影響について、とくに経済的な観点から検討することとした。

検討の手順としては、まず、焼却プロセスが受ける影響を把握し、コストの増加要因を抽出したうえで、高温化に伴う経済的耐用年数およびコストの変化を推計した。分析手法には、経時的に発生するコストを現在価値で評価可能な LCC を用い、また、実態をできるだけ反映させるため実用基を調査対象とした。さらに、GHGs の排出量を見積もり、LCC の計算結果を適用して GHGs の削減に必要な単価を試算した。

なお、検討に必要な基礎データは、焼却施設メーカーおよび事業主体である地方公共団体からヒアリングを行い入手した。ヒアリングの概要は以下に示すとおりである。

- | | | |
|--------|---|--|
| メーカー | : | 高温化に伴い焼却プロセスが受ける影響
高温化に対応した技術的な対策
建設費および補修費の経年的な実績
高温化がもたらす補修費の増分 |
| 地方公共団体 | : | 運転・維持費の経年的な実績
投入汚泥量、補助燃料使用量、電力量など焼却状況の経年的な実績 |

3.2 高温燃焼が及ぼす影響

3.2.1 焼却プロセスが受ける影響

メーカーヒアリングの結果、流動焼却炉の燃焼温度は補助燃料の使用量を増大させることで設計値より数十度程度引き上げることが可能であるが、炉の排ガスが最初に送り込まれる空気予熱器(熱交換器)の伝熱チューブ等の損傷が進む可能性が高いことが明らかになった。図3-1に標準的な下水汚泥の流動焼却システムを示す。ただし、その影響の大きさは熱交換器の構造に左右され、とくに高温化による損傷を受けないものから、燃焼温度によっては炉の排ガス温度を確実に低下させるために冷却器等の増設が必要となるケースも生ずる。また、設置場所や施工条件によっては改造が不可能な施設もあり得ることが指摘された。しかし、多くは補修頻度および補修費を増加させることで対応可能であるとのことであった。一方、炉内の耐火物については、補修頻度が若干増加するおそれがあるものの、大幅な耐久性の低下は生じないとの回答であった。一方、炉本体、排ガス処理設備およびブロワ等の能力には制約があり、補助燃料使用量の増加に伴って汚泥処理量の低下が予想される。しかし、メーカーの計算によると、燃焼温度を50度引き上げた場合でも汚泥焼却能力は数%程度の減少にとどまるため、施設の稼働状況が逼迫していない限り、施設能力の観点からは高温化が十分に可能であると考えられる。

以上の検討は、現在稼働中の焼却施設において設計値以上の高温化を想定したものであるが、メーカーヒアリングによると、当初から燃焼温度を引き上げた焼却施設の設計・建設についても、とくに焼却システム全体の変更を伴わずに支障なく対応可能であることがわかった。ただし、補助燃料の使用量は上述と同様に増加し、また、施設の構造や能力等も燃焼温度に見合ったものとする必要がある。

3.2.2 焼却施設のコスト増加要素

下水汚泥焼却炉のコストは大きく建設費、運転・維持費および補修費から構成され、燃焼温度を上げた場合これらの増加が予想される。図3-2に焼却炉のコスト構造および高温化に伴うその増加要因を示す。なお、運転・維持費は、人件費、消耗品費、薬品費、補助燃料費および電力費に分類した。

投入汚泥の発熱量および含水率が一定の場合、3.2.1で指摘されたように、高温化には補助燃料使用量の引き上げが必要となり、それに伴い空気量および排ガス量も増大する。このため、運転・維持費のうち補助燃料費、ブロワが消費する電力費および排ガス処理プロセスにおける薬品費が増加すると考えられる。さらに、現在稼働中の施設で燃焼温度を設計値以上に引き上げた場合、空気予熱器等の損傷が進行することにより補修費が増大し、一方、高温化を前提に設計した新しい施設においては、初期投資である建設費の増額およびそれに伴う補修費の増加が見込まれる。

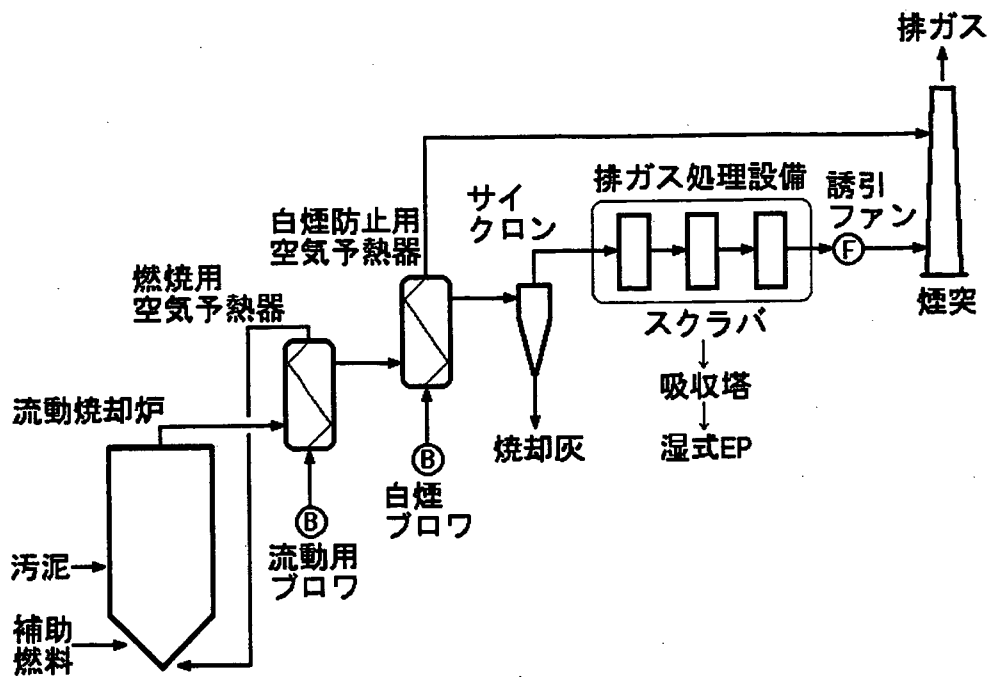


図3-1 流動焼却炉のシステム

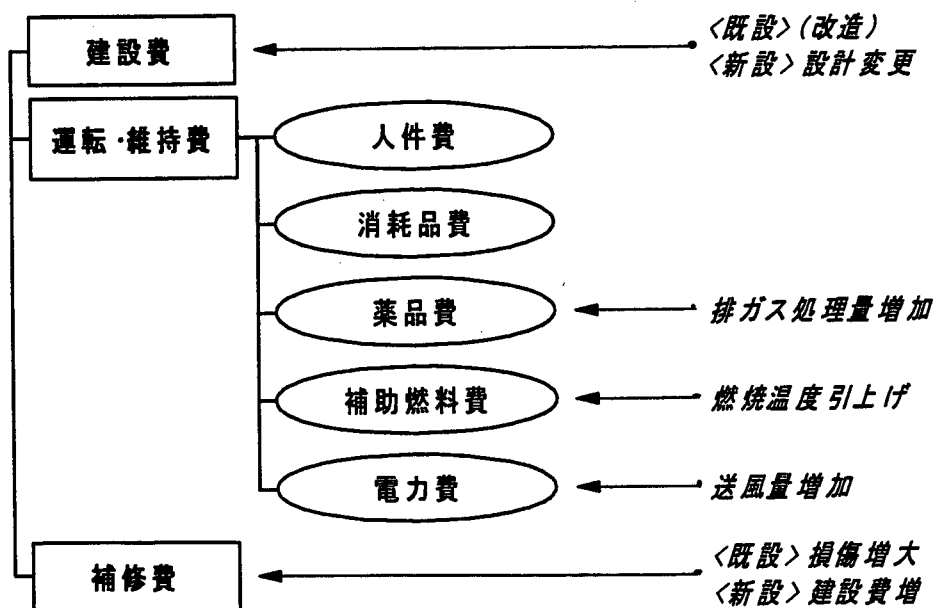


図3-2 流動焼却炉のコスト構造およびその増加要因

3.3 LCC分析を用いた高温燃焼のコスト評価

3.3.1 評価手法

LCC 分析手法には大きく年価法と現価法が存在する⁵⁾⁶⁾。本調査では双方の方法を用いてコスト分析を行った。以下にその概要を解説する。

(1) 年価法

発生コストを毎年の平均コスト(年間均等価格; 年価)に変換する方法。年価は以下の式で求められる。

$$\sum_{k=0}^n \{C_k / (1+r)^k\} = A \times \sum_{k=0}^n \{1 / (1+r)^k\} \quad \cdots (3.1)$$

$$1+r = (1+d) / (1+i) \quad \cdots (3.2)$$

ここで

- k : 年次(建設年において k=0)
- C_k : k 年に発生するコスト
- d : 名目上の金利
- i : 名目上のインフレ率
- r : 実質割引率
- A : 年価

経過年の進行に伴って増加する補修費の年価と減少する減価償却費の和の極小点が経済的耐用年数を表す。

$$Ar + D \rightarrow \min \quad \text{at } n \quad \cdots (3.3)$$

ここで、

- Ar : 補修費の年価
- D : 減価償却費
- n : 経済的耐用年数

減価償却費は、初期投資である建設費の価値減少を表すものであり、その主な算出方法としては次の2種類がある。

a) 定額法：年間の償却額を一定とするもの。すなわち、

$$\text{年間の償却額} = (\text{初期投資額} - \text{残存価値}) / \text{耐用年数}$$

で計算される。日本では、残存価値を初期投資額の 10% に設定することが一般的である。

b) 定率法：年間の償却率を一定とするもの。すなわち、

$$\text{年間の償却率} = \text{年間の償却額} / \text{年間の未償却額}$$

を一定とする。この値を定額法における初期償却率の 2 倍とした倍率定率法がよく用いられる。

本調査では、定額法および倍率定率法それぞれを用いて減価償却費を求めることとした。

(2) 現価法

将来のコストを現在の価格(現在価値；現価)に換算し、その累積値であるトータルコストを求め経済性を比較する方法。トータルコストは以下の式で求められる。

$$P_k = C_k / (1 + r)^k \quad \dots (3.4)$$

$$TC = \sum_k P_k \quad \dots (3.5)$$

ここで、

P_k : コスト C_k の現価

TC : トータルコスト

本調査では、初期投資額である建設費、毎年発生する運転・維持費および補修費すべてを対象として、建設年度における現価に換算しトータルコストを計算することとした。

3.3.2 評価条件

流動焼却炉の燃焼温度を上げた場合、3.2.2で述べたように、各種コストが上昇する。本調査では、実態に即したコスト変化を把握するため、既存の実用基を対象に LCC 分析を行うこととした。高温化に伴う補助燃料増加量等の技術的な対応方法およびコスト増加額の一部については焼却施設メーカーに、コストの実績については地方公共団体にそれぞれヒアリングを行い、得られた基礎データに基づいて経済的な評価を試みた。ところが、現在稼働中の焼却施設において設計値以上に燃焼温度を上げた場合と、当初から高温化対応とした焼却施設では、コストに及ぼす影響の大きさが異なると予想される。そこで、

- a) 既設の炉を供用当初から設計値より 50 度高く運転してきたと仮定した場合(以下「既設炉」という)
- b) 50 度高い燃焼温度を前提に設計・建設し運転してきたと仮定した場合(以下「新設炉」という)

の 2 ケースを想定し、経済的耐用年数の変化を検討する LCC 年価法は「既設炉」のみににおいて、トータルコストを算出する LCC 現価法では「既設炉」「新設炉」双方を対象として、それぞれ実績との比較を行った。評価方法の概要を表3-1に示す。3.3.1で説明したとおり、経済的耐用年数に関する分析を LCC 年価法で行う場合は建設費と補修費を用い、LCC 現価法によるトータルコストの計算では運転・維持費も含めたすべてのコストが対象となる。また、LCC 分析に必要な名目割引率およびデフレータはそれぞれ長期プライムレート、卸売物価指数⁷⁾を用いた。

3.2.2で想定した増加要因に基づき設定した各コストの増加条件を表3-2に示す。なお、本調査における建設費は、焼却施設の大半を占め高温化の影響を受ける機械設備のみを対象とした。

まず、建設費のうち、「既設炉」における初期投資額は実績そのものであり、増加分の計上はない。3.2.1で述べたように、高温化に伴う処理能力の低下は軽微であり、設計上の余裕または稼働率の引き上げで「既設炉」での対応が可能であるとした。ただし、排ガス温度の上昇によって運転が不可能になると回答したメーカー 1 社の施設については、空気予熱器の改造費を上乗せした。一方、「新設炉」を想定した場合、建設当時にさかのぼった建設費の算出が困難であった。そこで、燃焼温度を 800℃および 850℃に設定した 1997 年度時点での建設費をヒアリングし、能力を変数とした関数で高温化した場合の増加率を算出した。なお、この建設費の増加率はメーカー間で差がほとんど生じなかったため、平均値を用いて 1 つの関数形で表すこととした。それによると、例えば処理能力が 100 湿 t/日の場合、機械設備建設費の増加率は 1.6%程度となる。

次に、運転・維持費に関しては、「既設炉」「新設炉」とともに増加が見込まれる。そのうち、補助燃料費は補助燃料使用量に、電力および薬品費は排ガス量に概ね比例すると考えられる。そこで、実績コストに対する増加率として、ヒアリングで得られた補助燃料使用量の増加率、および、それに伴う排ガス量の増加率を

それぞれ用いることとした。なお、人件費は変化しないと仮定し、消耗品費についても微増が予想されるものの、3.3.5にて後述するが全体に占めるシェアが1%程度と軽微であったためその変化を無視した。

さらに、補修費についても、「既設炉」では確実に増えることが予想される。しかし、その増加額を理論的に計算する方法がなく、メーカーの経験に基づく推計値をそのまま適用することとした。ただし、燃焼温度を引き上げても補修費が変わらないとするメーカーもあった。また、「新設炉」においては、通常の補修が想定されるが、一般に補修費は建設費に比例するとされているため⁸⁾、補修費の実績値に建設費の増加率を乗じた値とした。

表3-1 評価方法の概要

調査内容	LCC手法	高温化の想定条件		分析対象とするコスト		
		既設炉	新設炉	建設費	運転・維持費	補修費
経済的耐用年数	年価法	○	△	○ ¹⁾	△	○
トータルコスト	現価法	○	○	○	○	○

1) 実績コストを減価償却費として表現

表3-2 コストの増加条件

コスト内訳		既設炉	新設炉
建設費(機械設備)		一部の施設で改造費を計上 (ヒアリング結果による)	現在の建設費における増加率で計算 (ヒアリング結果による) * 増加率: $1.013 \times T^{0.00068}$ T: 炉規模(湿t/日)
運転・維持費	補助燃料費	補助燃料使用量に比例(ヒアリング結果による) * 実績値に対する増加率: 1.332~1.458倍	
	電力・薬品費	補助燃料使用量の増加に伴う排ガス量に比例 * 実績値に対する増加率: 1.018~1.036倍	
補修費		(ヒアリング結果による) * メーカーにより計上方法が異なる (定額増、定率増、増加せず)	建設費の増加率で計算

3.3.3 調査対象施設の概要

本調査では、十分なコストの実績データを得るため、稼働年数が7～20年と比較的長い実際の高分子系流動炉10基を対象とした。表3-3に調査対象施設の概要を示す。炉名のアルファベットはメーカー名を表す。このうち、「既設炉」で改造が必要なA社、および、「既設炉」における補修費の増加が生じないとしたD社はLCC年価法を行わず、また、運転・維持費データの欠損が大きい一部の炉についてはLCC現価法分析から除外した。

表3-3 調査対象施設の概要

炉名	建設 年度	経過 年	能力 (湿t/日)	燃烧温度 (°C)	補助燃料	LCC分析		備考 注) 凝集剤はすべて高分子系
						年価法	現価法	
A1	88	7	45	800	A重油		○	既設炉高温化は改造必要
B1	78	18	50	830	A重油	○	○	消耗品費のみ不明
B2	83	13	100	830	A重油	○	○	消耗品費のみ不明
C1	76	20	30	800	灯油	○		運転・維持費すべて不明
C2	81	15	45	800	灯油	○	○	
C3	81	15	60	820	都市ガス13A	○	○	
C4	80	16	40	820	A重油	○		運転・維持費すべて不明
C5	77	19	30	800	A重油	○		運転・維持費すべて不明
D1	73	18	20	850	A重油		○	既設炉高温化は補修費増なし／消耗品・薬品費不明
D2	77	15	20	850	A重油		○	既設炉高温化は補修費増なし／消耗品・薬品費不明

3.3.4 経済的耐用年数の変化

LCC 年価法を適用して、調査対象施設の高温化で増加が見込まれる補修費の年価を試算するとともに、経済的耐用年数の変化の有無を検討した。

まず、調査対象施設の補修費について、設計値以上の高温燃焼を想定した「既設炉」での増加額をヒアリング結果から推計し、実績値に対する年価の増加率を年価で求めた。補修費年価の推定増加率を図3-3に示す。すべての施設で初期の増加率が高く、経過年数の進行とともに低くなる傾向が見られた。これは、初期においては、本来低額で済む補修費に高温化による追加分が加算されるため増加率が高くなるが、年数の経過につれ本来必要な補修費が増加し高温化の影響が相対的に小さくなるためであると考えられる。

次に、経済的耐用年数の変化を検討するため、推計された補修費年価と減価償却費の和を算出し、その経年変化を調べた。高温化による増加率および極小点の変化を表3-4に、経年変化の例を図3-4にそれぞれ示す。高温燃焼を想定した場合、10年後における補修費年価と減価償却費の和の増加率は、定額法、定率法でそれぞれ1.13～1.31倍、1.20～1.54倍となり、定率法の方が大きく見積もられた。補修費年価と減価償却費の和については、極小点が不明瞭なものが多く見られたが⁹⁾、高温化に伴う曲線の形状変化はほとんどなく、コストが増加する方向にほぼ平行移動するものであった。また、極小点が確認された施設では、償却率の算出方法による相違はあるものの、高温化に伴う経済的耐用年数の変化は見られなかった。したがって、設計値以上の高温燃焼を導入した場合でも、LCCの観点からは耐用年数の変化がほとんど生じないと考えられる。

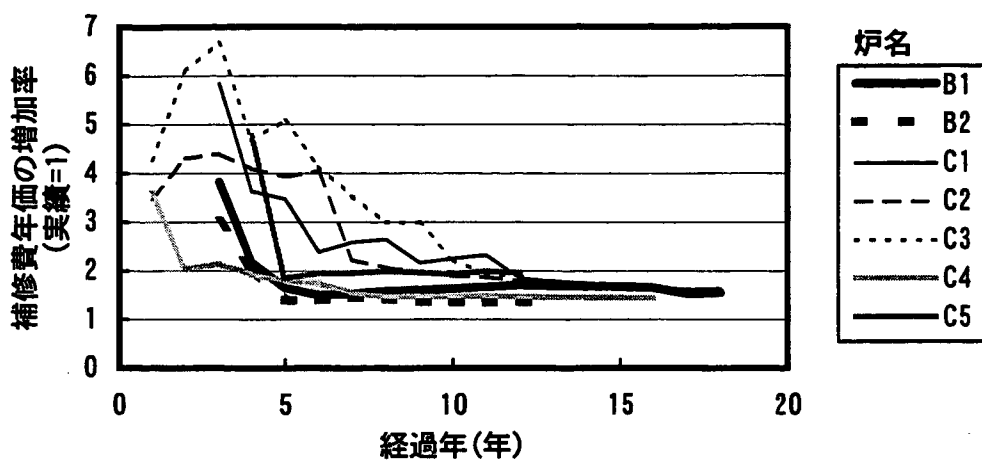


図3-3 補修費年価の増加率

表3-4 高温化に伴う年価の増加率および極小点の変化

炉名	(補修費年価+減価償却費) の供用10年後における増加率		(補修費年価+減価償却費) が極小となる経過年 ¹⁾			
	定額法	定率法	定額法		定率法	
			実績	高温化	実績	高温化
B1	1.22	1.36	16	16	16	16
B2	1.13	1.20	-	-	-	-
C1	1.31	1.54	11	11	11	11
C2	1.25	1.42	-	-	-	-
C3	1.26	1.47	12	12	9	9
C4	1.21	1.30	-	-	-	-
C5	1.28	1.47	-	-	-	-

1) -印は極小点が不明瞭なもの

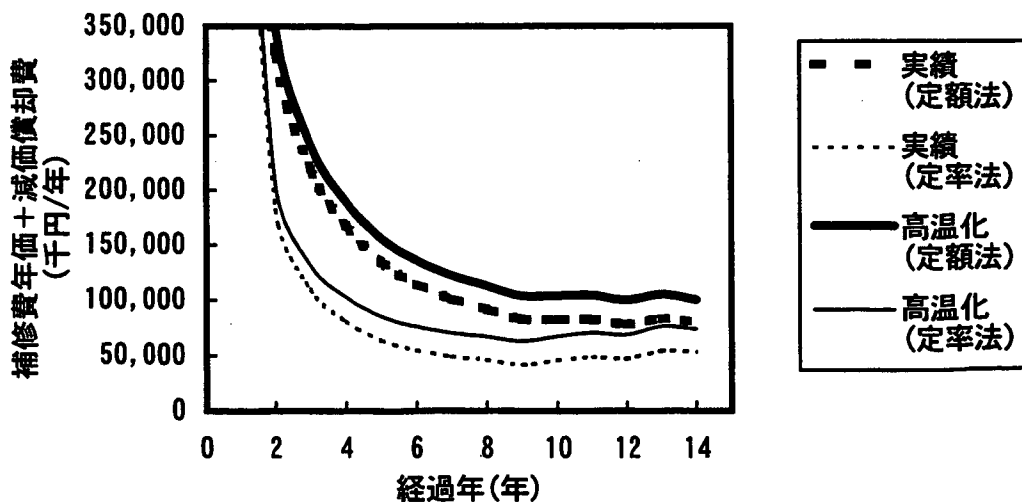


図3-4 経済的耐用年数の変化(C3炉)

3.3.5 トータルコストの増加

LCC 現価法を用いて、すべてのコストを建設年度の現価に換算し累計したトータルコストを求め、高温化がもたらすコスト変化を検討した。

まず、トータルコストの実績を図3-5に示す。一般に、経過年の進行に伴いトータルコストに占める運転・維持費および補修費の割合は増加するが、調査対象施設においても同様な傾向が見られ、両者の合計シェアは建設後7年のA1炉が44%であったのに対し18年経過のB1炉は70%を越えた。一方、人件費については規模の大きな炉ほどシェアが低くスケールメリットが確認された。これらの関係を図3-6および図3-7に示す。

次に、高温化した場合の「既設炉」を対象に試算したトータルコスト増加率の例を図3-8に示す。コスト全体の増加率に比べ補修費と補助燃料費の増加が大きく、逆に電力・薬品費の伸びは小さいものとなった。増加を見込んでいないD社の補修費を除き他の施設でも同様な傾向を示し、「既設炉」におけるトータルコスト増加率の最大値は、補修費、補助燃料費がそれぞれ81.5%、45.8%であったのに対し、電力・薬品費は3.6%と見積もられた。

さらに、「既設炉」「新設炉」それぞれを想定した各調査対象施設におけるトータルコスト増加率の計算結果を図3-9に示す。この図では、コスト全体の実績を1として、それに対する増加率を縦軸に表している。また、一部の施設では消耗品費または薬品費が不明であったため正確な比較はできないが、コスト全体に占める両者の割合は数%以下と小さく、薬品費の増加率も他のコストに比べ極めて小さいためその影響は軽微であると考えられる。このうち、A社は「既設炉」で空気予熱器の改造費を計上したが、経過年数が7年間と短いため運転・維持費および補修費のトータルコスト増加率は「新設炉」も含め他社に比べて大きく抑えられた。また、D社では「既設炉」において補修費上昇を見込んでおらずトータルコストの増加は運転・維持費の増分のみの計上となり、「新設炉」の増加率の方が大きく見積もられた。これら2社を除いた経過年数13年以上の施設におけるコスト全体の増加率は、「既設炉」の場合10.0～15.0%でそのうち補修費分が半分以上を占めたのに対し、「新設炉」では「既設炉」の1/2以下の4.1～7.3%となり、しかも建設費による部分は1%にも満たず大半は運転・維持費によるものとなった。燃焼温度を引き上げた場合、高温燃焼を当初設計に組み入れた「新設炉」では建設費は若干増加するものの、「既設炉」の高温化に比べ補修費の増加を大きく抑えられると考えられる。

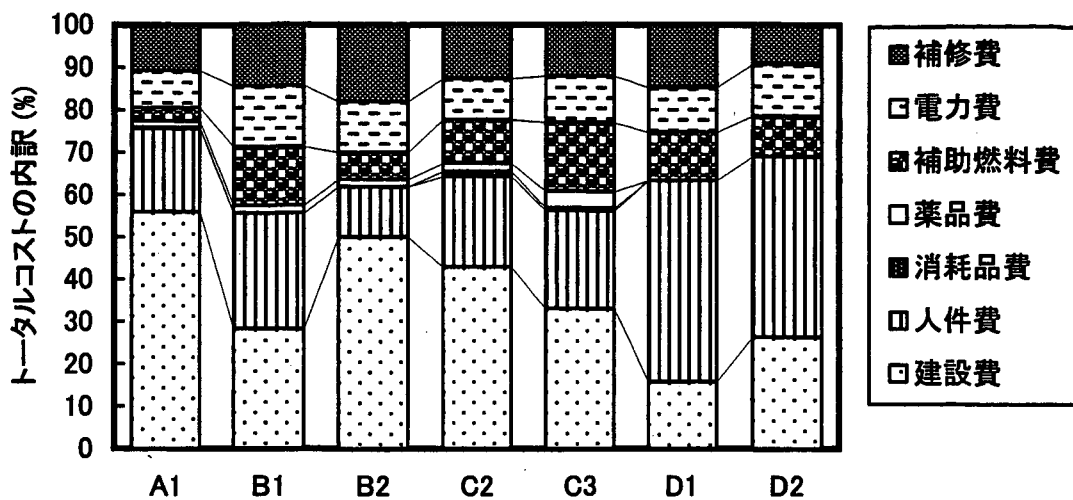


図3-5 トータルコストの実績内訳

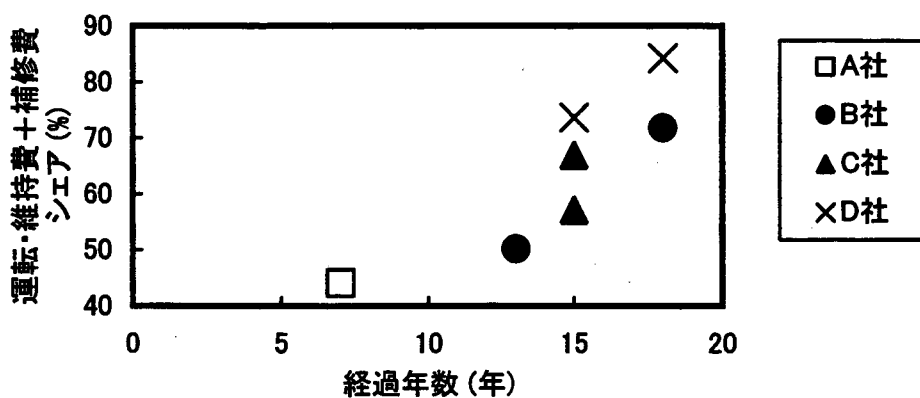


図3-6 経過年数と運転・維持費および補修費との関係

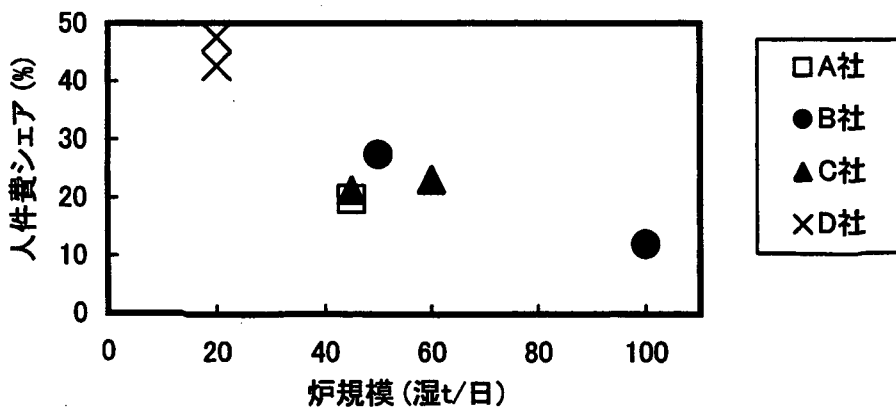


図3-7 施設規模と人件費との関係

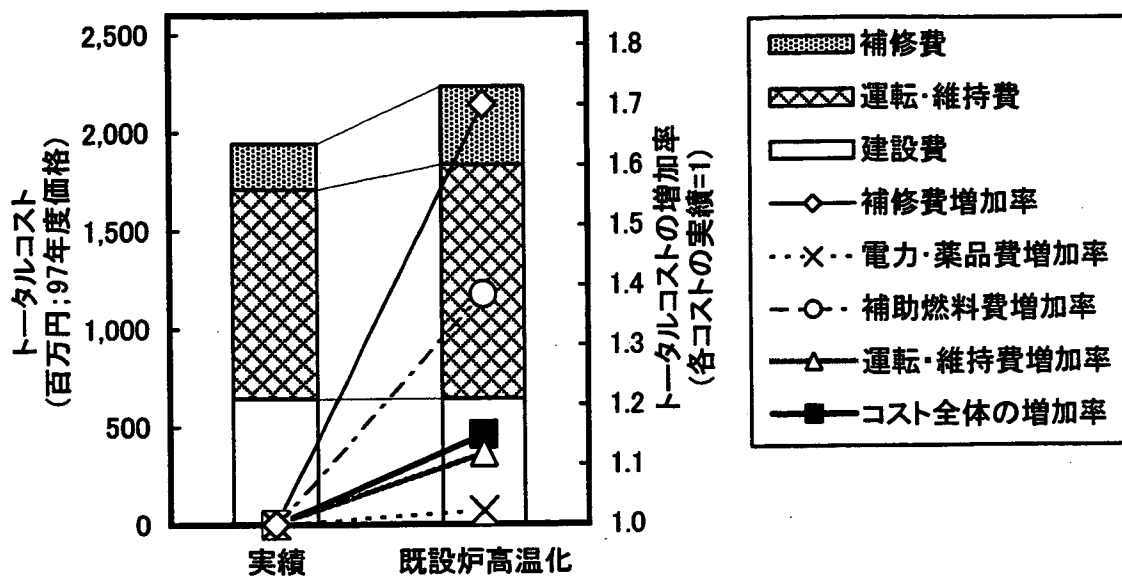


図3-8 トータルコストの変化(C3炉)

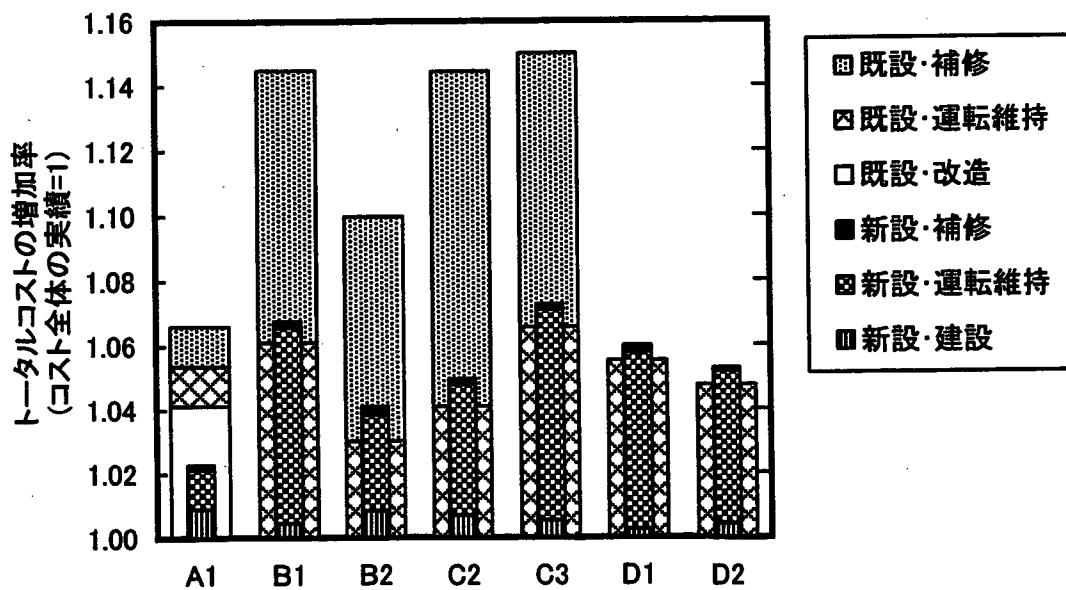


図3-9 トータルコストの増加率

3.4 温室効果ガス削減単価の試算

2で述べたように、高分子系流動炉における燃焼温度の引き上げは N_2O の排出量を減少させるが、補助燃料の使用量が増えるため CO_2 の排出量は増加する。ところが、単位質量の CO_2 の温室効果を 1 とした N_2O の地球温暖化ポテンシャル(GWP)は 310 であり¹⁰⁾、これを考慮すると流動焼却炉の排ガスがもたらす温室効果は減少すると推計されている⁴⁾。そこで、3.3.5で調査対象とした7施設について、建設・運転された時期の実績データを基に、高温化の前後における CO_2 および N_2O の排出量を見積もり GHGs の削減量を推計した。さらに、3.3.5で計算された高温化に伴うトータルコストの増加額を用いて GHGs の削減に必要な単価を試算した。なお、 N_2O 排出量の算出にあたっては、燃焼温度の関数として表現された(2・1)および(2・2)式を適用することとした。ただし、調査対象施設のうち D1 と D2 については、燃焼温度を 50 度引き上げて 900 °C とした場合、(2・1)式によると N_2O 転換率が負の値となるため、900 °C 付近の燃焼温度で調査された結果¹¹⁾に基づき、 N_2O 転換率を 0.082% (N of N_2O -g/N of Sludge-g) と設定した。また、3.3.5では各調査対象施設のコストをそれぞれの建設年度換算で計算したが、ここでは、単価の比較検討のため、卸売物価指数を用いてすべてのトータルコストを 1997 年度価格にそろえた。

GHGs の削減量およびその必要コストの試算結果を表3-5に示す。燃焼温度を 50 度上昇させた場合、排ガスによる GHGs は下水汚泥 1 DS_t あたり炭素換算で 0.17 ~ 0.42 C-t/DS_t の削減が可能となり、その削減率は 24 ~ 45% と推計された。このとき炭素換算で 1 C-t の削減に必要なコストは「既設炉」の場合 6,700 ~ 23,400 円/C-t、「新設炉」では 2,800 ~ 25,300 円/C-t と見積もられた。また、「既設炉」で補修費の増加を見込まない D 社を除くと、削減単価は「既設炉」に比べ「新設炉」では半額以下に抑えられ、平均値はそれぞれ 11,800 円/C-t、4,900 円/C-t となった。これらの価格はあくまで調査炉の建設時点での設備内容を対象とし、しかも運転された時期の実績に基づいて計算されたものであるため、最近建設された炉を対象として試算すれば多少異なった値になる可能性がある。しかし、いずれにしても当初設計時から GHGs の抑制対策を考慮することにより経済的になると考えられる。

ところで、米国では既に二酸化硫黄(SO_2)の排出権取引が大規模発電施設間で実施されており、1998 年の取引価格は SO_2 1 t あたり US\$ 100 ~ 200 (約 11,000 ~ 22,000 円; 1 US\$ = 110 円)程度となっている¹²⁾。また、マクロスケールの市場モデルに基づき GHGs の排出権取引を想定した価格もいくつか試算されており¹³⁾、炭素 1 C-t あたり US\$ 14 ~ 145、日本円では 1,500 ~ 16,000 円/C-t 程度の値が提示されている。今回の試算は個別施設の過去の実績値に LCC 手法を適用したものであり単純な比較はできないが、算出された削減単価はこれらの値に近く、燃焼温度の引き上げはコストの観点からも現実的な対策であると推測される。

表3-5 調査対象施設における温室効果ガスの削減量およびその必要コスト

炉名	投入 汚泥量 の累計 (DSt)	LCOTータルコスト (百万円:97年度価格)			温室効果ガス排出量の累計 ¹⁾							温室効果ガス削減単価 (C換算・97年度価格; 円/C-t)		
		実績	高温燃焼化		実績	高温化	実績	高温化	計 (C換算:C-t)		削減量 (C換算; C-t/DSt)	削減率 (%)	既設	新設
			既設	新設					実績	高温化				
A1	17,535	1,499	1,598	1,533	24,962	26,263	140	49	18,637	11,280	0.420	39.5	13,453	4,644
B1	30,706	1,222	1,399	1,304	50,201	55,498	149	11	26,303	16,068	0.333	38.9	17,295	8,081
B2	73,794	1,776	1,954	1,849	103,988	110,111	358	27	58,670	32,271	0.358	45.0	6,712	2,767
C2	39,877	1,247	1,427	1,309	59,909	64,347	318	111	43,240	26,912	0.409	37.8	11,037	3,793
C3	68,778	1,943	2,234	2,084	103,041	110,924	406	48	62,401	34,301	0.409	45.0	10,375	5,029
D1	15,269	1,094	1,154	1,159	25,673	29,042	42	1	10,587	7,999	0.169	24.4	23,367	25,314
D2	18,513	699	733	736	26,925	29,083	51	1	11,690	8,027	0.198	31.3	9,078	10,106

- 1) 計算条件
- ・汚泥中の元素含有率: 0.327kgC/kgDS, 0.0472kgN/kgDS
 - ・補助燃料の炭素排出係数: 0.7357kgC/L(A重油), 0.6896kgC/L(灯油), 0.5655kgC/Nm³(都市ガス13A)
 - ・N₂OのGWP: 310 (CO₂のGWP=1)

なお、これらの価格はあくまで建設当時の設備内容及び過去の実績に基づいて計算された値であり、将来の推計値ではない

4 全国の焼却施設から排出される温室効果ガスの推計

4.1 調査概要

地球温暖化対策を進めるうえで、国内における現在ならびに将来の GHGs 排出量をできるだけ高い精度で計算することが不可欠である。同時に、その抑制に向けた施策の検討にあたっては、全国的な所要コストを推計しておく必要がある。そこで、全国の下水汚泥焼却施設の実態を詳細に把握し、燃焼ガスとして排出される GHGs 排出量を計算するとともに、将来値を予測することとした。さらに、GHGs 排出の抑制対策として、高分子系流動炉で燃焼温度を引き上げた場合を想定し、その効果とコストの見積りを試みた。

本調査においては、精度の向上を図り実態をより正確に反映した計算を行うため、下水汚泥焼却を実施している地方公共団体に調書を送付し必要な基礎データを入手することとした。調査対象は、1998(平成 10)年度に稼働しているすべての汚泥焼却施設とし、それぞれの施設ごとに以下の項目を質問した。建設費を除くコスト、焼却汚泥、補助燃料および運転状況については、1998 年度時点での値としている。なお、調書の回収率は 100%であったが、調査項目によっては不明なものも多くみられた。

- 仕様 : 能力, 形式, 供用年度
- コスト : 建設費(機械, 電気, 土木建築; 建設時価格)
運転・維持費(人件費, 消耗品費, 薬品費, 補助燃料費, 電力費)
補修費
- 焼却汚泥: 投入量, 含水率, 窒素含有率, 凝集剤の種類
- 補助燃料: 種類, 使用量
- 運転状況: 稼働時間

4.2 焼却施設の現況

4.2.1 整備状況

表4-1に焼却施設の整備状況の概要を示す。1998 年度末現在、稼働中の焼却施設は 225 基、焼却能力は 20,423 湿 t/日 に達している。そのうち、流動炉が基数で 73%、焼却能力で 70%を占め、主流の形式となっている。次に多段炉が 2 割前後のシェアを有しているが、基数の割合に比べ焼却能力の割合がやや高い。これは、1 基あたりの焼却能力が流動炉の場合 87 湿 t/日/基 であるの対し、多段炉は 108 湿 t/日/基 と規模がやや大きいためである。

次に、整備された焼却施設の基数および焼却能力の経年変化をそれぞれ図4-1、図4-2に示す。流動炉は 80 年代から新設炉の主流を占めるようになり、90 年代に整備された炉はほぼ全て流動炉となっている。図4-2 中には流動炉 1 基あたりの平均焼却能力の経年変化も示している。データのばらつきはあるものの、80 年代までは炉の規模は増加し、90 年代に入ると 100 湿 t/日/基 前後で推移している。したがって、現在整備される焼却施設は、焼却能力 100 湿 t/日/基 の流動炉が標準的であると考えられる。

一方、多段炉は 70 年代から 80 年代前半にかけて整備されたものが多く、平均使用年数は 20 年に達している。このため、今後は多段炉の改築時期を迎えることとなり、現場の条件にもよるが、多くが流動炉へ置換されていくものと予想される。

表4-1 焼却施設の整備状況概要

(1998(平成10)年度末現在)

炉形式	流動	多段	ストーカ	その他	全体
基数(基)	164	42	15	4	225
(シェア;%)	(72.9)	(18.7)	(6.7)	(1.8)	(100.0)
整備焼却能力(湿t/日)	14,261	4,519	1,121	522	20,423
(シェア;%)	(69.8)	(22.1)	(5.5)	(2.6)	(100.0)
1基あたり平均能力(湿t/日/基)	87	108	75	131	91
平均使用年数(年)	8.5	20.0	13.5	19.5	11.2

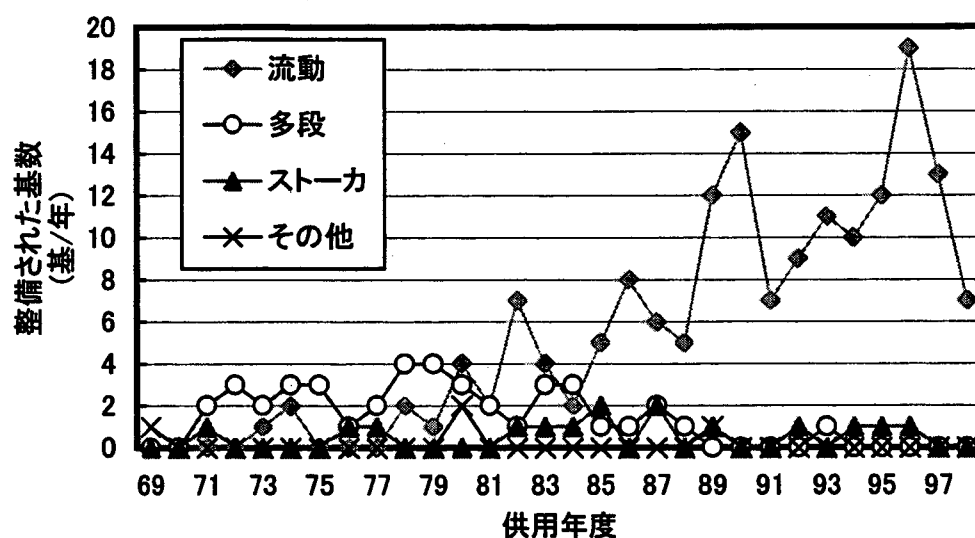


図4-1 整備基数の経年変化

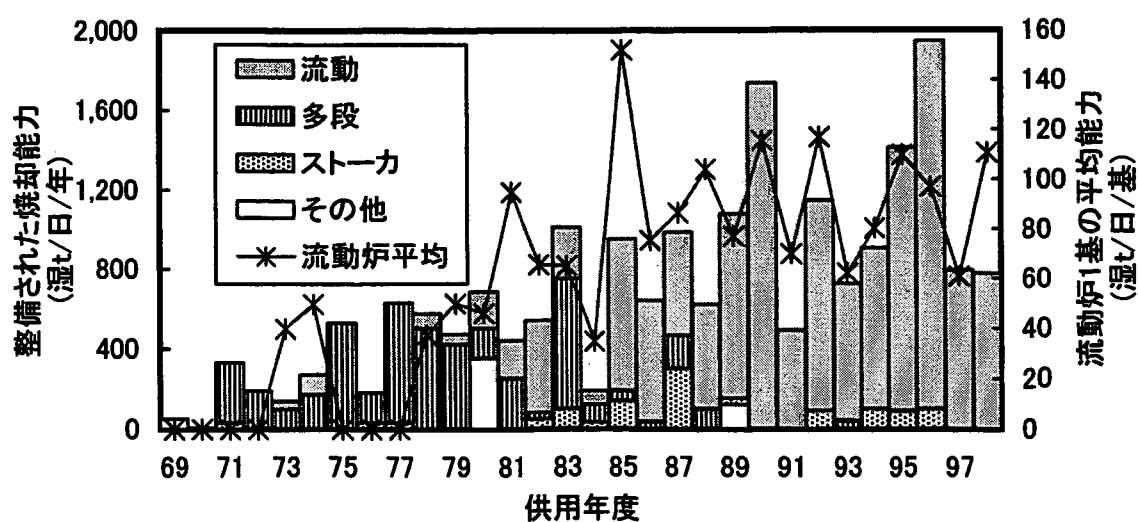


図4-2 整備焼却能力および流動炉規模の経年変化

4.2.2 焼却状況

焼却炉の形式および凝集剤の種類ごとの焼却量の内訳を表4-2および図4-3に示す。1998 年度における投入汚泥量は4,216 湿千 t/年 であり、うち 73%が流動炉、20%が多段炉で焼却されている。使用される凝集剤は、高分子系が石灰系との併用も含めると 87%に達し、とくに流動炉では 9 割以上が高分子系の凝集剤のみを用いた汚泥で占められている。一方、多段炉およびストーカ炉においては、石灰系のみの汚泥のシェアがそれぞれ 20%、46%となっており、流動炉に比べ石灰系の適用割合が高い。また、補助燃料に関しては、A 重油が大半を占めている。

次に、流動炉における燃焼温度の値および分布をそれぞれ表4-3、図4-4に示す。流動炉の平均燃焼温度は、高分子系および石灰系でそれぞれ 827℃、801℃、全体では 825℃であり、最高温度は 875℃であった。燃焼温度は 800℃から 870℃に多く分布しているが、800℃未満の流動炉も存在する。一方、整備年度と燃焼温度との関係を調べたところ、図4-5に示すように、両者に相関は見られず、新しい炉ほど高い燃焼温度で運転されているという傾向は見られなかった。

表4-2 全国の焼却汚泥量および使用補助燃料の内訳

(1998(平成10)年度現在)

炉形式	凝集剤	基数 (基)	能力 (湿t/日)	投入量		DS (DSt/年)	補助燃料 (kL, 千Nm ³ , kg)					
				(湿t/年)	(シェア (%) ¹⁾)		A重油	消化ガス	LNG	灯油	都市ガス	微粉炭
流動	高分子	145	13,148	2,839,722	(92.2)	638,902	32,559	13,051	5,525	5,415	8,277	2,172
	石灰	8	530	130,783	(4.2)	40,594	911	922	0	1,477	0	0
	併用	8	410	78,907	(2.6)	19,466	1,306	2,107	0	482	0	0
	その他	3	173	31,626	(1.0)	6,859	1,303	0	0	0	0	0
	小計	164	14,261	3,081,038	(100.0)	705,821	36,078	16,079	5,525	7,374	8,277	2,172
多段	高分子	22	3,142	613,217	(72.7)	139,129	9,806	5,435	542	6,697	5,989	0
	石灰	13	1,056	166,215	(19.7)	48,614	2,589	0	0	546	0	0
	併用	3	106	26,198	(3.1)	5,109	2,276	846	0	0	0	0
	その他	4	215	37,810	(4.5)	7,701	2,852	0	0	0	0	0
	小計	42	4,519	843,440	(100.0)	200,553	17,523	6,281	542	7,243	5,989	0
ストーカ	高分子	6	550	104,916	(43.4)	25,583	386	0	0	0	0	0
	石灰	4	400	111,023	(45.9)	37,813	41	0	0	0	0	0
	併用	0	0	0	(0.0)	0	0	0	0	0	0	0
	その他	5	171	25,689	(10.6)	12,926	1,613	0	0	0	0	0
	小計	15	1,121	241,628	(100.0)	76,322	2,040	0	0	0	0	0
その他	高分子	1	52	11,604	(23.2)	2,750	562	0	0	0	0	0
	石灰	1	120	31,182	(62.4)	12,161	428	0	0	0	0	0
	併用	0	0	0	(0.0)	0	0	0	0	0	0	0
	その他	2	350	7,153	(14.3)	2,117	0	0	0	0	2	0
	小計	4	522	49,939	(100.0)	17,028	990	0	0	0	2	0
合計		225	20,423	4,216,045		999,723	56,631	22,360	6,066	14,617	14,268	2,172

1) 各炉形式の小計を100%とした場合

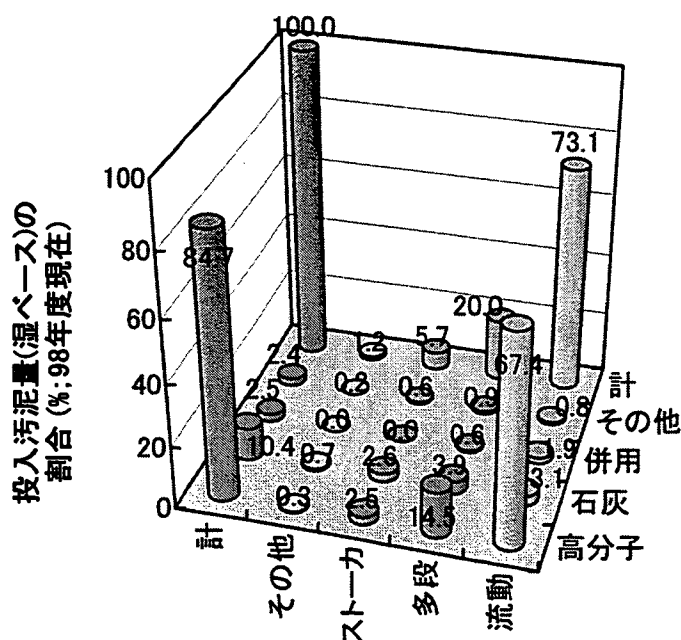


図4-3 全国の焼却汚泥量の内訳

表4-3 流動炉の燃焼温度

(1998(平成10)年度現在)

	高分子系 ¹⁾	石灰他	計
基数(基)	153	11	164
平均燃焼温度(°C)	827.0	800.6	825.3
中央値(°C)	825.0	800.0	825.0
最大値(°C)	875.0	860.0	875.0
最小値(°C)	700.0	750.0	700.0

1) 石灰併用含む

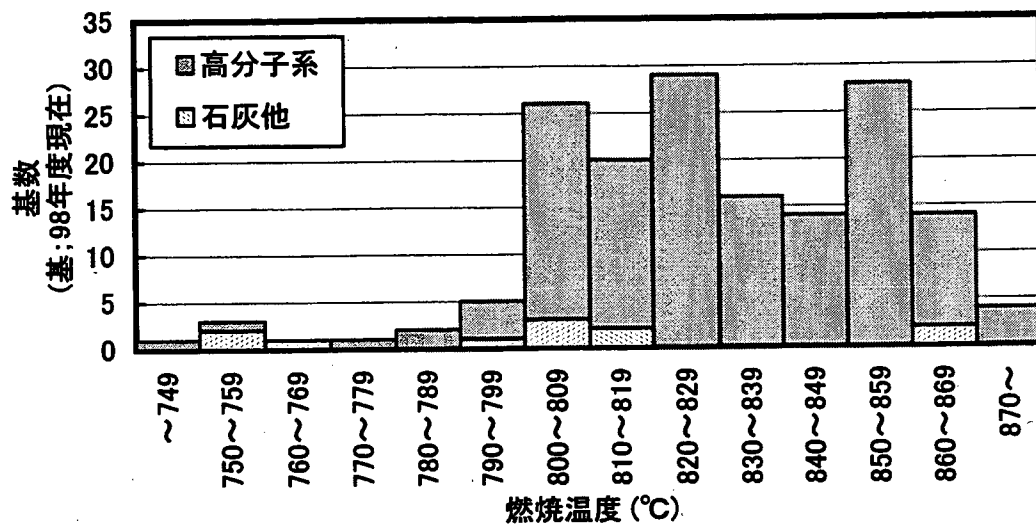


図4-4 流動炉の燃焼温度の分布

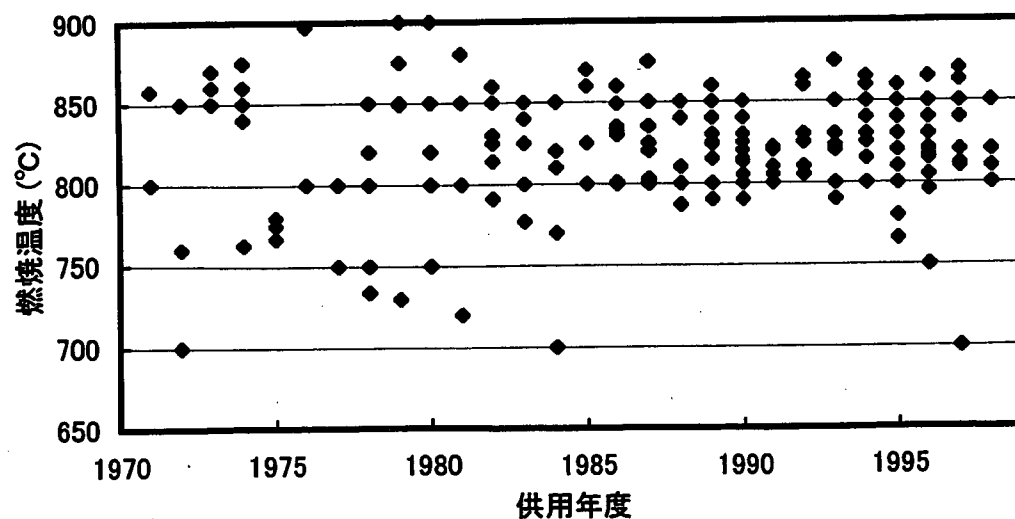


図4-5 流動炉の整備年度と燃焼温度の関係

4.2.3 費用関数

本調査においては、全国の焼却施設における建設費および 1998 年度の運転維持費が得られたため、これらのデータに基づき、流動炉の費用関数を算出した。計算にあたっては、実態を反映させるとともに今後新設される施設設計の検討に適用できるよう、1994 年度から 1998 年度までの 5 年間に整備された新しい施設のデータを抽出した。なお、建設費は、卸売物価指数をデフレーターに用いて 1998 年度価格に換算した。補修費に関しては、一般に各焼却施設で年度間のばらつきが大きいものとなるが、今回は 1998 年度値のみを調査対象としたため、費用関数の検討から除外した。また、関数形は、現在用いられている費用関数⁸⁾と同様、焼却能力の指数関数形で表すこととし、さらに、投入汚泥量を変数にした場合も計算した。

計算結果を表4-4に示す。抽出された有効なデータは全国の稼働中の流動炉のうち 3 割前後である。建設費は焼却能力との相関が高いが、運転・維持費はすべての項目で投入汚泥量との相関係数の方が大きい結果となった。焼却施設の計画段階で実際の汚泥焼却量が予測可能であれば、投入汚泥量を用いて運転維持費を見積もる方が望ましいと考えられる。焼却能力と機械建設費、投入汚泥量と電力費との関係をそれぞれ図4-6、図4-7に示す。この両者は他のコストに比べ良好な相関を示した。

表4-4 算出された焼却施設の費用関数

コスト内訳			建設			運転維持			
			機械	電気	土木建築	人件	消耗品	薬品	補助燃料
データ数			55	55	55	45	45	50	52
抽出率 (%)			33.5	33.5	33.5	27.4	27.4	30.5	31.7
抽出データによる平均単価 (千円/湿t) ¹⁾			30,886	9,935	6,575	4.472	0.265	0.581	1.701
費用関数	$Y=A_1 \times (X_1)^{B_1}$	A_1	215.2	91.08	75.45	10.95	0.06259	0.05913	2.097
	X_1 : 能力 (湿t/日)	B_1	0.5719	0.4991	0.3711	0.3792	0.8199	0.9823	0.3447
	Y : コスト ²⁾	R^2 (相関係数)	0.6880	0.4001	0.0771	0.1019	0.1965	0.2983	0.1010
	$Y=A_2 \times (X_2)^{B_2}$	A_2	79.58	54.15	69.16	1.348	0.001497	0.0009623	0.2445
	X_2 : 投入量 (湿t/年)	B_2	0.3631	0.2796	0.1762	0.3920	0.7572	0.8803	0.3832
	Y : コスト ²⁾	R^2 (相関係数)	0.4855	0.2198	0.0319	0.1819	0.2485	0.4435	0.2272

1) 建設は単位能力あたり、運転維持は単位投入量あたり;ともに98年度価格換算

2) 建設は百万円/基、運転維持は百万円/年/基;ともに98年度価格換算

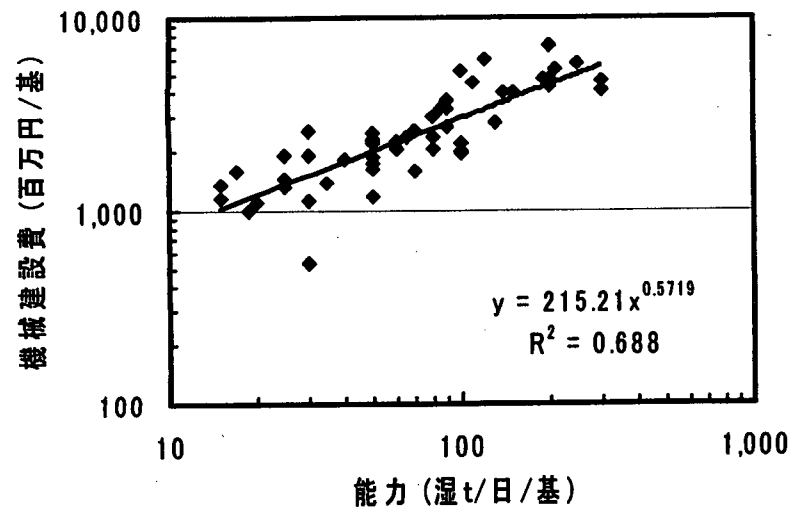


図4-6 焼却能力と建設機械費の関係

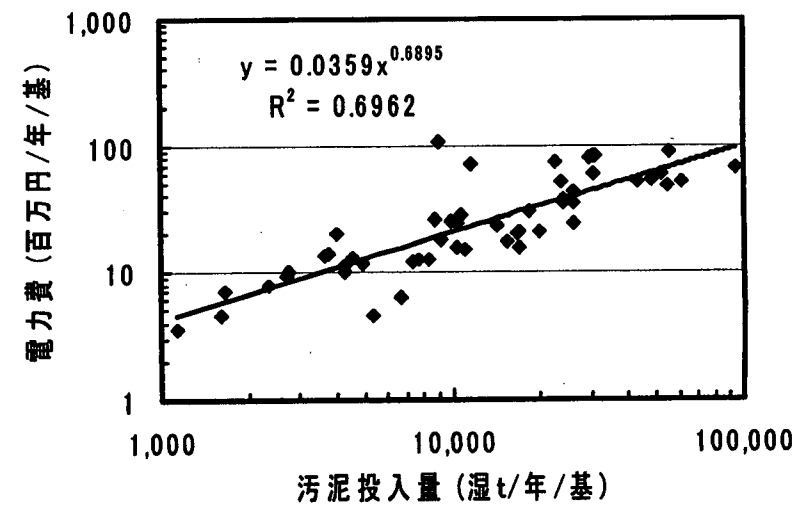


図4-7 投入汚泥量と電力費の関係

4.3 温室効果ガス排出量の現状

既報¹⁴⁾においては、下水汚泥焼却施設から排出される N_2O 量を 1992 年度時点で 2,830 $\text{N}_2\text{O-t/年}$ 、炭素換算で 239 C-Gg/年 と試算している。しかし、この試算では、寄与が最も大きいと考えられる高分子系流動炉の N_2O 排出係数と燃焼温度との関係を考慮しておらず、補助燃料に起因する CO_2 も計上していない。そこで、4.2.2で得られた焼却炉の形式および凝集剤の種類ごとの焼却量に基づき、全国の焼却施設から燃焼ガスとして排出される GHGs を算出した。とくに、高分子系流動炉の N_2O に関しては、(2・1)および(2・2)式に基づき各炉における実際の燃焼温度および窒素含有率から排出係数を求めた。ただし、窒素含有率が不明な箇所については全国平均値 4.72% $\text{N-g/DS-g}^{15)}$ を採用した。また、高分子系と石灰系を併用している炉はすべて高分子系に含め、高分子系流動炉以外の N_2O 排出係数については既報告²⁾の値を、補助燃料の排出係数は文献¹⁶⁾を参照した。なお、 N_2O 排出量との比較検討を行うため、焼却施設の排ガス中に含まれる全ての GHGs を対象とし、バイオマスに由来する炭素分も計上した。そのうち、汚泥中の炭素分は 327 $\text{C-kg/DS-t}^{15)}$ (1,200 $\text{CO}_2\text{-kg/DS-t}$)、補助燃料として用いた消化ガスはメタン(CH_4)および CO_2 のみから構成されるものと仮定し、その炭素分をすべて計上した。

計算結果を表4-5および図4-8に示す。1998 年度現在、全国の汚泥焼却施設から燃焼に伴って排出される GHGs は炭素換算で 776 C-Gg/年 と見積もられ、そのうち、 N_2O 、汚泥由来の CO_2 および補助燃料由来の CO_2 がそれぞれ 374 (48%)、327 (42%)、75 (10%) C-Gg/年 となった。とくに、 N_2O について焼却炉の形式別にみると、排出係数の高い高分子系流動炉が 307 C-Gg/年 、全 N_2O 排出量の 82%を占め、投入汚泥量の割合である 69%を大きく上回った。これは、バイオマス由来の CO_2 を除いた GHGs の 7 割を占めるものである。したがって、高分子系流動炉から排出される N_2O の抑制対策を進めることは、焼却施設全体の GHGs 排出量の削減を図る上で最も効果的であると考えられる。また、既調査²⁾においては、高分子系流動炉の湿ベース投入汚泥量あたりの N_2O 排出係数が 1,200 $\text{N}_2\text{O-g/湿 t}$ と報告されているが、燃焼温度と窒素含有率から N_2O 排出量を計算した本調査で同じ排出係数を求めたところ 1,245 $\text{N}_2\text{O-g/湿 t}$ と大変近い値を示した。高分子系流動炉の N_2O 排出量を概算で見積もる場合、現在の燃焼温度を前提にすれば、1,200 $\text{N}_2\text{O-g/湿 t}$ 程度の排出係数を用いてよいと推測される。

表4-5 全国の污泥焼却施設から排出される温室効果ガスの計算

(1998(平成10)年度現在)

焼却炉 形式	凝集剤 種類	投入量 (湿t/年)	DS (DSt/年)	GHGs										計	(うち 汚泥由来 C-Gg/年) 分CO ₂ を 除いた分)	
				汚泥由来分			補助燃料由来分									
				CO ₂	N ₂ O ¹⁾		CO ₂									
				(C換算: C-Gg/年)	(N ₂ O-Gg /年)	(C換算: C-Gg/年)	(C換算:C-Gg/年)	A重油	消化ガス	LNG	灯油	都市ガス	微粉炭			小計
排出係数 (N ₂ O-g /湿t) ²⁾	1200 (CO ₂ -kg /DSt)				0.7357 (C-kg /L)	0.5359 (C-kg /m ³)	0.5526 (C-kg /m ³)	0.6896 (C-kg /L)	0.5655 (C-kg /m ³)	0.7524 (C-kg /kg)						
流動	高分子	1,245	2,918,629	658,367	215.4657	3.6347	307.2983	24.9140	8.1229	3.0529	4.0663	4.6804	0.0016	44.8381	567.6021	(352.1364)
	石灰	330	130,783	40,594	13.2853	0.0432	3.6488	0.6699	0.4940	0.0000	1.0185	0.0000	0.0000	2.1824	19.1166	(5.8313)
	その他	750	31,626	6,859	2.2448	0.0237	2.0054	0.9586	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9586	5.2088	(2.9640)
多段	高分子	750	639,415	144,238	47.2051	0.4796	40.5447	8.8886	3.3659	0.2992	4.6186	3.3868	0.0000	20.5591	108.3090	(61.1038)
	石灰	330	166,215	48,614	15.9100	0.0549	4.6374	1.9046	0.0000	0.0000	0.3765	0.0000	0.0000	2.2811	22.8285	(6.9185)
	その他	750	37,810	7,701	2.5203	0.0284	2.3975	2.0985	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0985	7.0163	(4.4960)
ストーカ	高分子	750	104,916	25,583	8.3727	0.0787	6.6526	0.2840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2840	15.3093	(6.9366)
	石灰	330	111,023	37,813	12.3751	0.0366	3.0975	0.0299	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0299	15.5026	(3.1274)
	その他	750	25,689	12,926	4.2302	0.0193	1.6289	1.1870	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.1870	7.0461	(2.8159)
その他	高分子	750	11,604	2,750	0.9000	0.0087	0.7358	0.4135	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4135	2.0493	(1.1493)
	石灰	330	31,182	12,161	3.9800	0.0103	0.8700	0.3152	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3152	5.1652	(1.1852)
	その他	750	7,153	2,117	0.6929	0.0054	0.4536	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0013	0.0000	0.0013	1.1478	(0.4549)
計			4,216,045	999,723	327.1822	4.4233	373.9706	41.6637	11.9828	3.3521	10.0799	8.0685	0.0016	75.1488	776.3016	(449.1194)

1) 高分子系流動炉のN₂O排出量は、各焼却施設における燃焼温度および汚泥の窒素含有率から算出2) 高分子系流動炉のN₂O排出係数(湿tベース)は、各焼却施設から排出されるN₂Oの全国合計値を投入汚泥量(湿tベース)で割り戻したもの

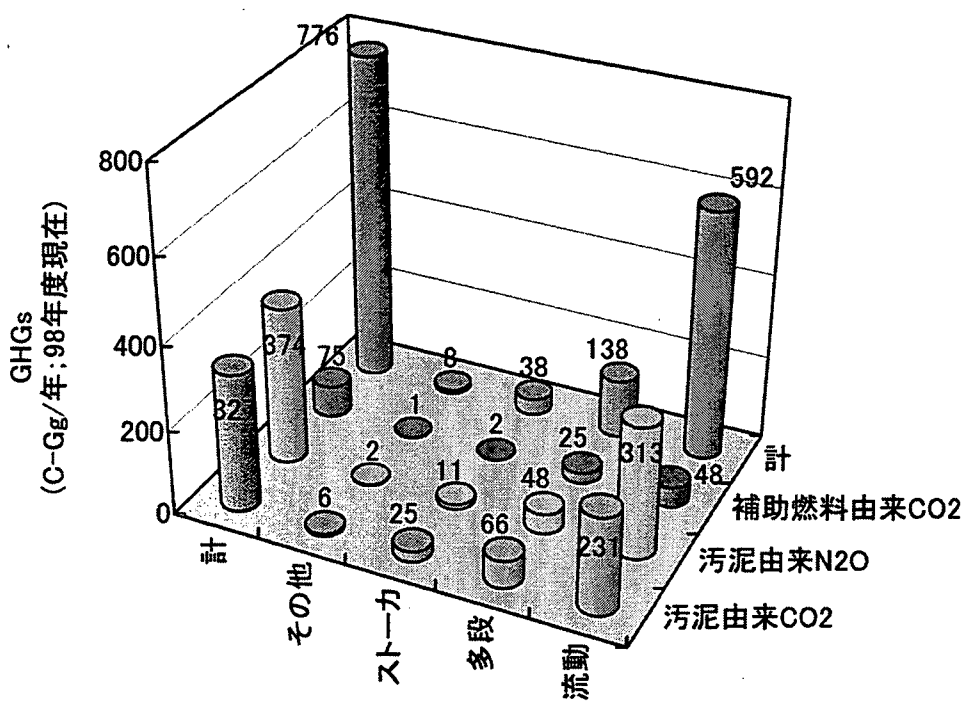


図4-8 全国の汚泥焼却施設から排出される温室効果ガスの内訳

4.4 高温燃焼による温室効果ガス削減効果の試算

汚泥焼却施設から排出される GHGs の削減対策として、全国の高分子系流動炉を対象に燃焼温度を上昇させた場合を想定し、4.3で算出した GHGs の現状に対する削減効果ならびにそれに要するコストを試算した。燃焼温度の引き上げは、3.3で想定した「既設炉」の考え方と同じく、現在稼働中の高分子系流動炉において補助燃料量を増加させることにより対応し、とくに高温燃焼に対応した施設の改築は行わないものとした。なお、高分子系流動炉以外の焼却施設については現状のままを想定している。

試算にあつたては以下の条件を設定した。まず、燃焼温度に関しては、最高温度の現状が 875℃であることに鑑み、現在 825℃以下の炉は 50 度、826 から 850℃までの炉は 25 度それぞれ上昇させるものと仮定した。引き上げ前後の燃焼温度分布を図4-9に示す。この条件下においては、平均燃焼温度は 827℃から 35 度上昇し 862℃となった。次に、コストについては、3.3.5における「既設炉」のトータルコスト計算と同様、高温化に伴って、運転維持費のうち補助燃料費と電力・薬品費、ならびに補修費が上昇するものと想定した。各高分子系流動炉における現在のコストはヒアリング結果をそのまま用いることとしたが、有効なデータが得られなかった箇所については、4.2.3で算出した費用関数のうち相関係数が高い方を用いて推計した。また、各コストの増加率に関しては、3.3ではメーカー別にヒアリング結果を調査対象炉に適用したが、ここではその平均値を採用した。設定したコスト増加条件を表4-6に示す。

これらの試算条件に基づき、GHGs の削減効果を計算した結果を表4-7、表4-8および図4-10に示す。高分子系流動炉のうち補助燃料に由来する CO₂ は 30%増加するものの、N₂O 排出量は 74%減少し、その排出係数は全国平均で 1,245 から 326 N₂O-g/湿 t となる。その結果、GHGs 全体では 776 から 28%減の 563 C-Gg/年となり、さらに、バイオマス由来の CO₂ を除くと、GHGs は 449 から 236 C-Gg/年 に削減され半分程度に抑えられる。一方、高分子系流動炉の高温化に必要とされるコストは、運転維持費と補修費の合計で 7,500 円/湿 t から約 800 円上昇し、単位炭素量あたりの GHGs 削減単価は 10,600 円/C-t と試算された。この値は、3.4で算出した「既設炉」の単価と概ね同じであり、既存の施設で高温化を図る場合、全国的に見ても炭素削減量 1C-t あたり 1 万円/C-t が目安になると考えられる。

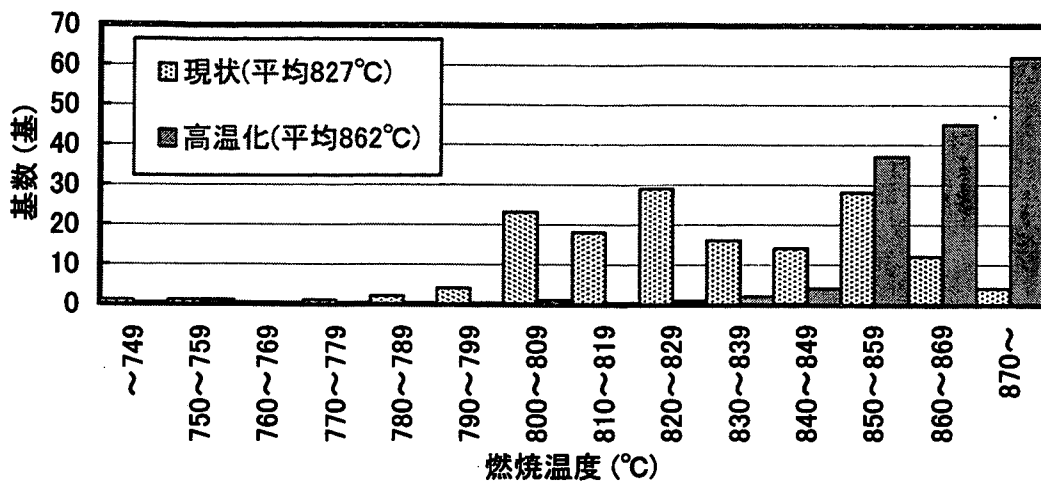


図4-9 想定した高分子系流動炉の燃焼温度分布

表4-6 想定したコスト増加条件

コスト内訳	高温燃焼に伴うコスト増加条件										
補助燃料費	補助燃料使用量に比例して増加 補助燃料使用量(100t炉)の増加率ヒアリング結果(%)										
		+25度	+50度								
	A社	24.5	33.2								
	B社	-	39.4								
	C社	22.0	44.6								
	D社	20.8	41.7								
	平均	22.4	39.7								
電力・薬品費	排ガス量に比例して増加 排ガス量(100t炉)の増加率ヒアリング結果										
		A重油使用量				排ガス量(Nm ³ /h) ^{注1)}			排ガス量増加率(%)		
		設計値	+25度	+50度	(単位)	設計値	+25度(増分)	+50度(増分)	+25度	+50度	
	A社	24.1	30.0	32.1	(L/t)	10,407	305.6	414.3	2.94	3.98	
	B社	63.4	-	88.4	(kg/h)	10,435	-	369.9	-	3.55	
	C社	61.9	75.5	89.5	(L/h)	10,487	169.0	343.1	1.61	3.27	
	D社	72.0	87.0	102.0	(L/h)	10,640	186.5	372.9	1.75	3.50	
	平均								2.10	3.58	
	注1) A重油の単位排ガス量, 比重 : 12.43Nm ³ /L, 0.84kg/L										
	補修費	機械補修費が増加 毎年の機械補修費の増加率ヒアリング結果									
			機械補修費の増分					推定費用関数(円/年) ^{注2)}			
		B社	機械建設費の0.6%					(0.024+0.006) × 機械建設費			
		C社	機械建設費の0.3%+機械補修費の5%					(0.003+0.024 × 1.05) × 機械建設費			
		平均	0.005 × 機械建設費					0.029 × 機械建設費			
		注2) 本来の補修費は費用関数(0.024 × 建設費(円/年,下水汚泥処理総合計画策定マニュアル))を想定									

表4-7 高温化に伴う温室効果ガス排出量の変化

(1998(平成10)年度現在:C-Gg/年)

	全国				うち高分子系流動炉			
	汚泥由来 CO ₂	汚泥由来 N ₂ O	補助燃料 由来CO ₂	計	汚泥由来 CO ₂	汚泥由来 N ₂ O (排出係数) ¹⁾	補助燃料 由来CO ₂	計
現状	327	374	75	776	215	307 (1,245)	45	568
高温化	327	147	89	563	215	80 (326)	58	354
削減率 (%)	0.0	60.7	-17.8	27.5	0.0	73.8	-29.8	37.6

1) 単位 : g-N₂O/湿t

表4-8 高温化に伴う高分子系流動炉のコスト変化

(1998(平成10)年度価格)

	全国(百万円/年)			投入汚泥量あたり(円/湿t)			削減GHGsあたり(円/C-t)		
	運転維持	補修	計	運転維持	補修	計	運転維持	補修	計
現状	16,684	5,175	21,859	5,716	1,773	7,490			
高温化	17,407	6,707	24,114	5,964	2,298	8,262			
増分	723	1,532	2,255	248	525	772	3,387	7,175	10,563

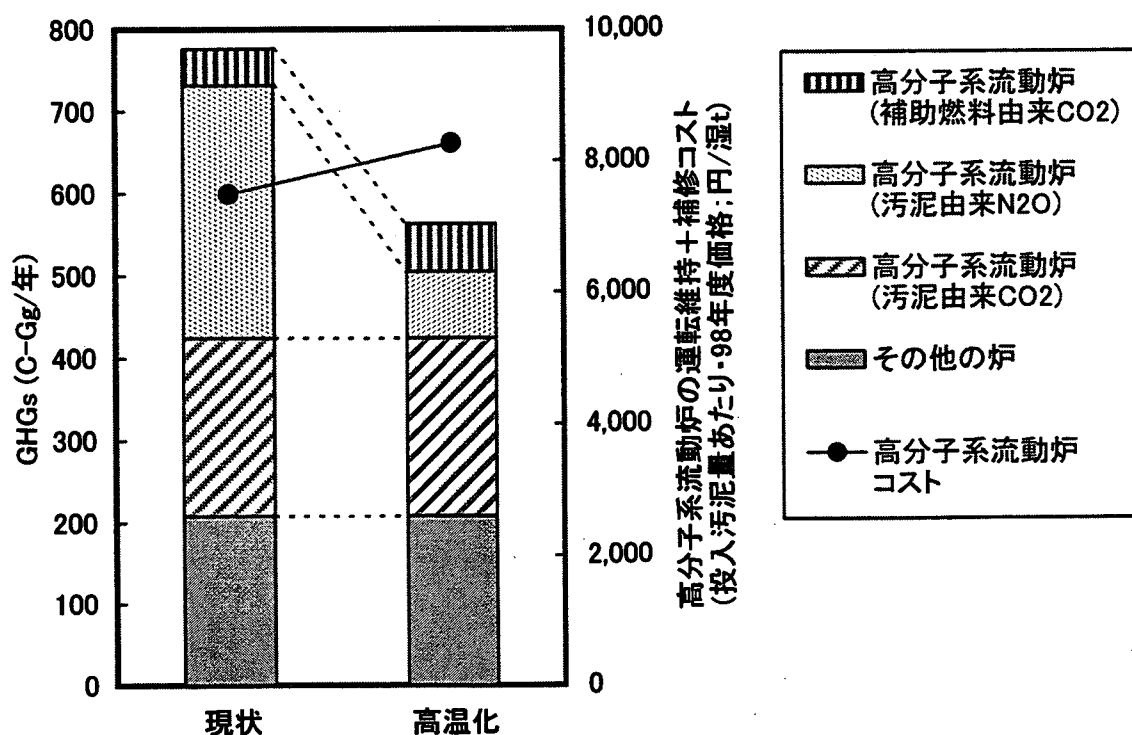


図4-10 高温化による全国の温室効果ガス排出量の変化とコスト

4.5 温室効果ガス排出量の将来予測

地球温暖化防止京都会議(COP3)においては、2010 年が GHGs の削減目標年とされている。そこで、2010 年における GHGs 排出量を推計することとした。

まず、焼却される汚泥量を予測するため、1988 年度から 1997 年度までの過去 10 年間の統計資料¹⁷⁾および4.2.2で調べた 1998 年度のデータに基づき、全国の脱水汚泥量と焼却汚泥量のトレンドを調べた。ただし、統計資料の値のうち、入力データに明らかな誤りがみられた年度は除外した。汚泥量の経年変化ならびに予測値を図4-11に示す。最近の実績をみると、脱水汚泥量、焼却汚泥量とも年度が進むにつれ直線的に伸びてきており、脱水汚泥量に対する焼却汚泥量の割合を示す焼却率は 62 ～ 65%程度で推移している。そこで、両者を線形外挿したところ、2010 年度における脱水汚泥量、焼却汚泥量はそれぞれ 8,542、5,563 湿千 t/年と推計された。この場合、焼却汚泥量は 1998 年度の 1.32 倍となるが、焼却率は現状とほとんど変わらない 65%となる。そこで、2010 年度に焼却率がさらに 10%増え 75%となる場合、すなわち、焼却汚泥量が 1998 年度比で 1.52 倍の 6,406 湿千 t/年 となる場合も想定することとした。

次に、2010 年度における焼却炉の形式および凝集剤の種類に関しては、以下の想定を行った。焼却汚泥量の増加分については、4.2.1および4.2.2で述べたように、近年新設されている焼却施設がほぼすべて高分子系流動炉であるため、全量がそのタイプで焼却されると仮定した。そのうえで、現在稼働中の焼却炉形式および凝集剤種類が変わらない場合と、1999 年度から 2010 年度までの今後 12 年間に、最も古い 1969 年度から 1980 年度までの 12 年の間に設置された焼却施設がすべて高分子系流動炉に置換される場合の 2 ケースを想定した。これらの条件に基づき予測した 2010 年度における焼却汚泥量の内訳を図4-12に示す。高分子系流動炉で焼却される汚泥量の割合は、1998 年度の 69%に対し、焼却率 65%・稼働中の炉形式を置換しない場合で 77%、焼却率 75%・高分子系流動炉に置換するケースでは 90%と推計された。

以上の焼却予測量を用いて、焼却施設の排ガスがもたらす 2010 年度の GHGs 排出量を試算した。焼却炉形式および凝集剤種類ごとの GHGs 排出係数は4.3と同じ値を適用し、とくに、高分子系流動炉の N₂O 排出係数については、現状の 1,245 N₂O-g/湿 t と、4.4と同条件で燃焼温度を上昇させ 326 N₂O-g/湿 t とした場合の 2 ケースを設定した。2010 年度における GHGs 排出量の予測結果を表4-9および図4-13に示す。N₂O 排出係数が現状のままの場合、GHGs は 1998 年度に対し最大 1.60 倍の 1,240 C-Gg/年 と見積もられたが、高温化を想定した場合、GHGs は最大でも 837 C-Gg/年 となり現在とほぼ同程度の値となった。したがって、焼却汚泥量の増加を見込んで、高分子系流動炉の燃焼温度を4.4で設定した条件で平均 35 度程度引き上げることで、2010 年度の GHGs 排出量を 1998 年度現在の水準に抑制できると考えられる。また、高分子系流動炉への置換を想定した場合、GHGs 排出量の計算値は 2%程度上昇したものの、高温化を前提とすれば逆に 2%程度減少した。これは、焼却汚泥量のうち高分子系流動炉の占める割合が増加するほど、高温化に伴う GHGs の抑制効果が高くなることを示すものである。

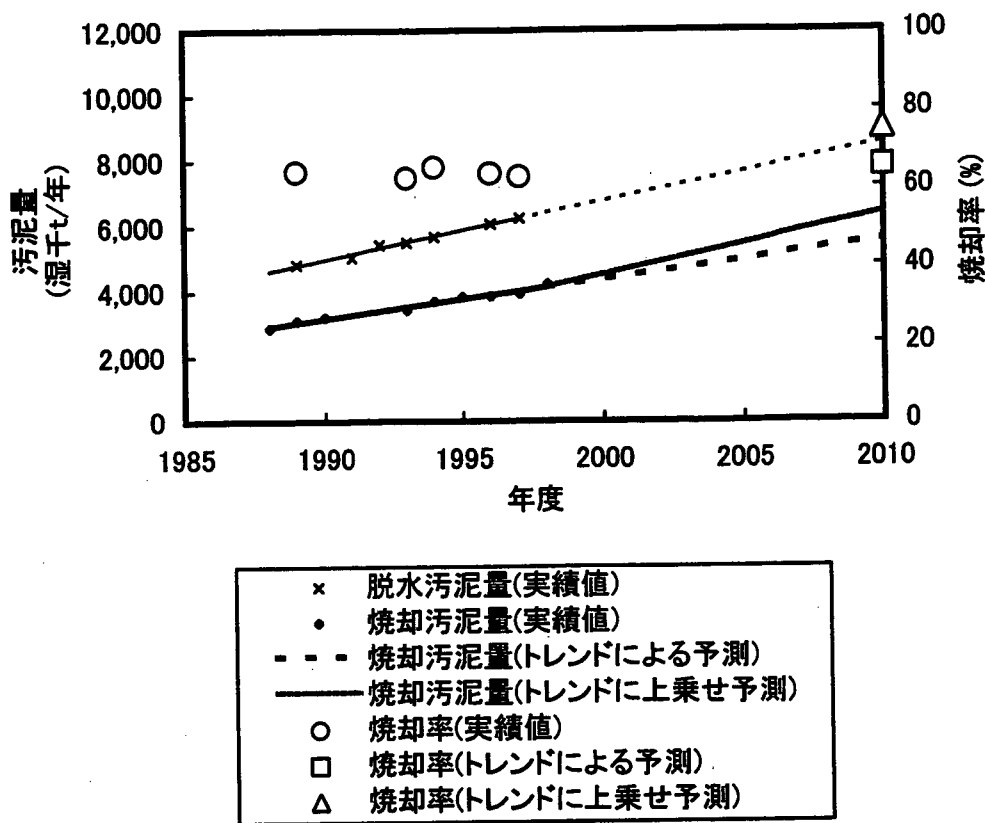


図4-11 汚泥量の実績と予測

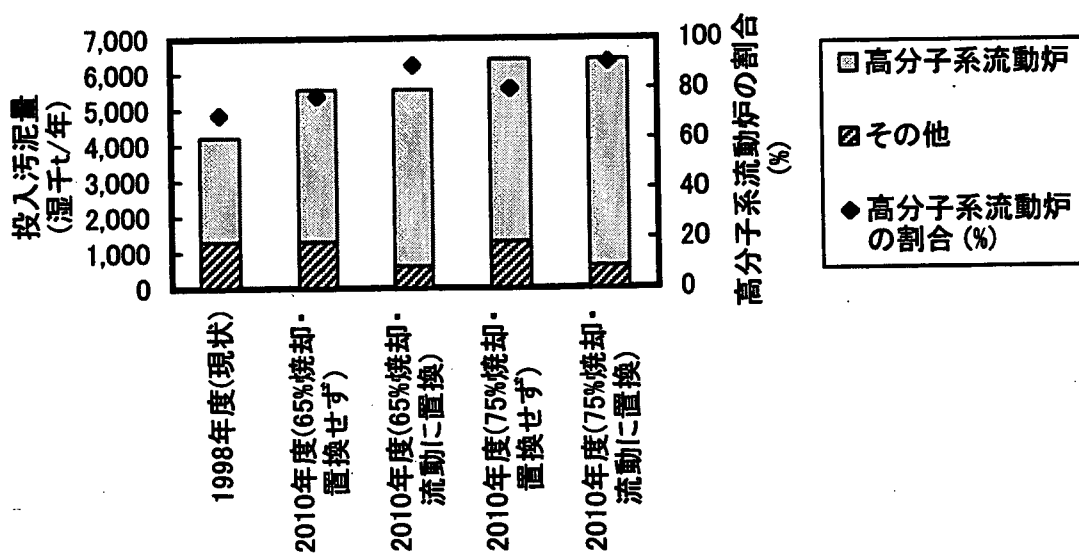


図4-12 焼却汚泥量の予測

表4-9 全国の污泥焼却施設から排出される温室効果ガスの予測

			(C-Gg/年)				
年度			1998年度 (現状)	2010年度 (65%焼却・ 置換せず)	2010年度 (65%焼却・ 流動に置換)	2010年度 (75%焼却・ 置換せず)	2010年度 (75%焼却・ 流動に置換)
現状	汚泥由来	CO ₂	327	432	432	497	497
		N ₂ O	374	516	553	605	642
	補助燃料由来	CO ₂	75	96	88	109	101
	計		776	1,043	1,073	1,211	1,240
高温化	汚泥由来	CO ₂	327	432	432	497	497
		N ₂ O	147	184	168	208	192
	補助燃料由来	CO ₂	89	115	110	132	127
	計		563	731	710	837	816
削減率 (%)			27.5	29.9	33.8	30.9	34.2

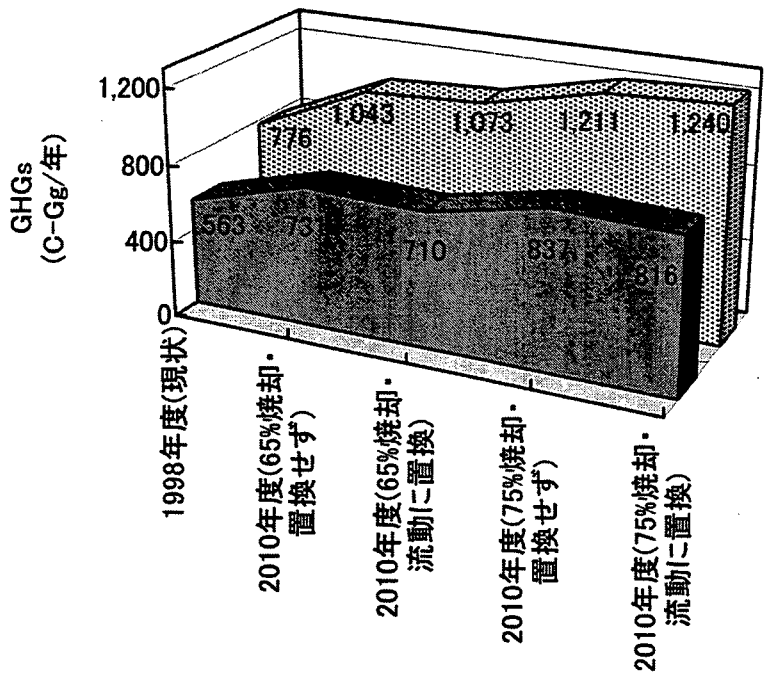


図4-13 全国の污泥焼却施設から排出される温室効果ガスの予測

4.6 モデル炉における温室効果ガス削減単価の試算

3.3においては、稼働年数が比較的長い数箇所の施設を対象として、高温化に伴うコスト変化を計算したが、これは、あくまで過去の実績に基づく推計値である。一方、4.4では、全国の施設を対象に、高温化によるGHGs削減単価を試算したものの、既存の施設で高温化を図る「既設炉」のみを想定しており、また、全国の平均的な傾向を示すものである。そこで、今後新設される高分子系流動炉においてGHGsの削減に必要なコストを推計するため、モデル炉を設定し、高温化に伴うトータルコストの変化およびGHGsの削減単価を見積もることとした。

モデル炉の能力は50、100および200湿t/日とし、稼働率および投入汚泥は標準的な条件を設定した。まず、現時点におけるコストのうち、建設費および運転・維持費については4.2.3で求めた費用関数を用いて、また、補修費については文献⁸⁾に基づき推計した。なお、建設費は能力ベース、運転・維持費は投入量ベースの費用関数を用いている。トータルコストの計算にはLCC現価法を用い、稼働期間は10年間、実質割引率は2%を設定した。次に、3.3.2と同様、50度高温化した「既設炉」および「新設炉」を想定して、トータルコストの増加額およびGHGsの削減単価を試算した。コストおよびGHGsの増加条件は基本的に4.4と同じとしたが、「新設炉」の建設費および補修費については3.3.5に準拠した。

モデル炉におけるコスト変化の試算結果を表4-10に示す。GHGsの削減単価は、3.4の結果と同様、「新設炉」においては「既設炉」の1/2程度となり、当初設計時から高温化を考慮した方が経済的であると考えられる。また、200湿t/日の炉では50湿t/日炉の半分程度と試算された。したがって、GHGsの削減に関して焼却施設能力のスケールメリットが考慮できると推定される。さらに、費用関数の代わりに単位能力または単位投入量あたりの平均的な単価を用いて現時点のコストを計算したところ、表4-10に示すように、GHGs削減単価は「既設炉」「新設炉」でそれぞれ9,500円/C-t、6,300円/C-tとなった。これらの値は、費用関数による50湿t/日炉と100湿t/日炉の間にあり、流動炉の平均能力が87湿t/日(4.2.1参照)であることを考慮すれば、概ね全国平均値を表していると推測される。また、「既設炉」の削減単価9,500円/C-tは、全国の施設を対象に4.4で試算された値10,600円/C-tに近いものの、やや小さいものとなっている。その原因のひとつとしてはLCCによる割引が考えられるが、4.4でも述べたように、高分子系流動炉で設計値以上の高温化を図る場合、平均的なGHGs削減単価は1万円/C-t程度であると推定される。

表4-10 モデル炉におけるトータルコストおよび温室効果ガス削減単価

(1998(平成10)年度価格)

	炉能力 (湿t/日)	現状				高温化			
		建設 (百万円)	運転・維持 (百万円/年)	補修 (百万円/年)	トータル コスト (百万円)	トータルコスト増加額 (百万円)		GHGs削減単価 (円/C-t)	
						既設	新設	既設	新設
費用関数	50	2,980	101	64	4,457	135	83	11,191	6,881
を用いた	100	4,320	143	94	6,448	196	120	8,123	4,993
計算	200	6,275	206	138	9,365	286	176	5,924	3,651
平均単価	50	2,370	112	49	3,817	114	75	9,494	6,267
を用いた	100	4,740	224	98	7,634	229	151		
計算	200	9,479	448	196	15,268	458	306		

注) 計算条件

- ・稼働率 : 80%
- ・含水率 : 80%
- ・窒素含有率 : 4.72%N-g/DS-g
- ・燃焼温度 : 高温化により50度増
- ・N₂O削減量 : (2・1)および(2・2)式による
- ・CO₂増加量(補助燃料由来分) : 5.3276C-kg/湿t(A重油; メーカーヒアリング結果より設定)
- ・費用関数および平均単価 : 表4-4による(建設費は能力ベース, 運転維持費は投入量ベースで計算)
なお、毎年の補修費は機械・電気建設費の2.4%を想定
- ・高温化に伴うコスト増加条件 : 新設炉の建設費および補修費は表3-2, 他は表4-6による
- ・トータルコストの計算 : (3・4)および(3・5)式による
- ・稼働期間 : 10年間
- ・実質割引率 : 2%

5 まとめ

本調査では、 N_2O の削減を目的に流動焼却炉の燃焼温度を引き上げた場合、焼却施設が受ける経済的な影響について検討した。また、全国の汚泥焼却施設から排出される GHGs の排出量を見積もり、その削減に必要なコストを推計した。以下に、本調査で得られた知見をまとめる。

(1) 高分子系流動炉の実基を対象としたLCC分析

- ①設計値を超える燃焼温度の引き上げは補助燃料の使用量を増加させることで可能であるが、空気予熱器の損傷を進行させるおそれがあり、補修コストが上昇する。
- ②設計値以上に燃焼温度を引き上げた場合、とくに初期において補修費の増加率が高くなるものの、経済的耐用年数の変化は生じない。
- ③設計値より 50 度高い燃焼温度を想定した場合、トータルコストは 1 割以上増加し、そのうち補修費分が半分以上を占める。一方、当初から高温化に対応した設計とすると、トータルコストの増加率は半分以上に抑えられ、その大半が運転・維持費によるものとなる。
- ④ GHGs の削減単価は、既存の炉で燃焼温度を引き上げた場合、単位炭素換算量あたり 1 万円/C-t 程度となるが、設計当初から高温化を考慮すると半額程度に抑えられる。

(2) 全国の下水汚泥焼却施設から排出されるGHGsおよびその削減コストの推計

- ① 1998 年度現在、焼却汚泥の 7 割以上が流動炉に投入され、そのうち 9 割以上が高分子系汚泥となっている。また、流動炉 1 基あたりの平均能力は 87 湿 t/日/基、平均燃焼温度は 825℃である。
- ② 1998 年度現在、全国の下水汚泥焼却施設から排出される GHGs は炭素換算で 776 C-Gg/年 であり、なかでも、高分子系流動炉が排出する N_2O は 307 C-Gg/年 で、汚泥由来の CO_2 を除く GHGs の 7 割を占めている。
- ③高分子系流動炉の平均的な N_2O 排出係数は投入汚泥量あたり 1,245 N_2O -g/湿 t であるが、現在の施設のままだと全国平均で 35 度燃焼温度を引き上げると 326 N_2O -g/湿 t となる。その場合、運転・維持費と補修費の合計コストは全国平均で 7,500 円/湿 t から 800 円上昇し、GHGs 削減単価は 10,600 円/C-t となる。
- ④高分子系流動炉で高温化を図った場合、2010 年度においても、全国の下水汚泥焼却施設から排出される GHGs を 1998 年度の水準に抑制することが可能である。

今後は、本格的な GHGs の削減対策に向け、引き続き下水道分野全体としての所要コストを把握していく必要がある。

6 謝辞

本調査にあたり、貴重なデータの提供を頂いた焼却施設メーカーならびに地方公共団体の関係各位に謹んで謝意を表します。

7 参考文献

- 1) 建設省都市局下水道部監修,「下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き」, 日本下水道協会, 1991
- 2) 竹石和夫, 鈴木穰, 松原誠,「下水処理場からのメタン・亜酸化窒素の放出量の解明に関する研究」, 平成5年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第3294号, pp.105-110, 1994
- 3) 竹石和夫, 渡部春樹, 松原誠, 佐藤和明, 前橋隆介, 田中忠美, 三羽宏明, 若杉泰宏, 山下研二,「流動炉における排ガス成分の挙動解明及び削減に関する共同研究報告書」, 土木研究所共同研究報告書第109号, 1994
- 4) 竹石和夫, 渡部春樹, 松原誠, 平山孝浩, 前橋隆介, 高麗昭憲, 若杉泰宏, 吉川開二,「流動炉における排ガス成分の挙動解明及び削減に関する共同研究報告書」, 土木研究所共同研究報告書第147号, 1996
- 5) A.J.デリソッラ, S.J.キルク,「建物のライフサイクル・コスト分析」, 鹿島出版会, 1987
- 6) ロジャー・フラナガン, ジョージ・ノーマン,「建物のライフサイクル計画」, 技術書院, 1988
- 7) 日本銀行調査統計局,「金融経済統計資料」, 1999
- 8) 建設省都市局下水道部監修,「下水汚泥処理総合計画策定マニュアル」, 日本下水道協会, pp.100-106, 1991
- 9) 尾崎正明, 落修一, 北村友一,「汚泥性状の変化に対応した汚泥処理に関する調査」, 平成8年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第3528号, pp.223-228, 1997
- 10) IPCC, "Climate Change 1995 - The Science of Climate Change - Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", pp.22, 1996
- 11) 中村栄一, 鈴木穰, 重村浩之, 落修一, 原田一郎,「温室効果ガス排出抑制のための下水処理システム対策技術」, 平成9年度下水道関係調査研究年次報告集, 土木研究所資料第3606号, pp.119-133, 1998
- 12) EPA, "Monthly Average Price of Sulfur Dioxide Allowances under the Acid Rain Program", 1998
- 13) 例えば, "The Kyoto Protocol and the President's Policies to Address Climate Change: Administration Economic Analysis", 1998
- 14) 竹石和夫, 鈴木穰, 松原誠,「メタン・亜酸化窒素の放出源及びその放出量の解明に関する研究」, 平成6年度下水道関係調査研究年次報告集, 土木研究所資料第3374号, pp.115-121, 1995
- 15) 渡部春樹, 岡澤邦明, 平山孝浩,「中小規模用汚泥乾燥システムの開発に関する調査」, 平成5年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第3294号, pp.223-228, 1994
- 16) 環境庁国立環境研究所地球環境研究センター,「産業連関表による二酸化炭素排出原単位」, 1997
- 17) 日本下水道協会,「下水道統計行政編」, 1988-1997