

B-16 地球温暖化防止のための CH_4 、 N_2O の対策技術開発と評価に関する研究

(5) 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

研究代表者

建設省土木研究所

酒井憲司

建設省 土木研究所

下水道部

新下水処理研究官

酒井憲司

三次処理研究室

鈴木穰 ・ 重村浩之 ・ 平出亮輔

汚泥研究室

森田弘昭 ・ 落修一 ・ 原田一郎

平成10～11年度合計予算額 15,818千円

(平成11年度予算額 7,340千円)

[要旨]

下水処理場から排出されるメタン (CH_4) および一酸化二窒素 (N_2O) について、水処理プロセスと汚泥処理プロセスに分けて抑制技術の評価を行った。

水処理プロセスについては、パイロットプラントを用い、全て好気槽からなる標準活性汚泥法 (以下、標準法)、嫌気―好気活性汚泥法 (以下 AO 法)、及び嫌気―無酸素―好気法 (以下 A_2O 法) における CH_4 、 N_2O の排出特性を調査した。 CH_4 に関しては、AO 法および A_2O 法が標準法に比べて排出抑制に効果があることが明らかになった。 N_2O に関しては、 NO_3^-/N 濃度が低い場合は、排出量は少ないが、 NO_3^-/N 濃度が高い場合には、排出量が増加する傾向にあった。

汚泥処理プロセスについては、下水汚泥焼却施設からの N_2O 排出量のかなりの部分を占めている「高分子凝集剤で脱水された汚泥を流動焼却炉で焼却する」タイプの焼却における排出抑制対策の効果と費用について、実施設のデータに基づいて算定を行い、その結果及びこれまでの研究成果を用いて日本全国の下水汚泥焼却施設を対象とした試算を行った。排出抑制対策として想定したのは燃焼温度の引き上げであり、この対策は焼却施設の補修と補助燃料の使用量の増加を必要とする。燃焼温度を引き上げるにより、汚泥焼却から排出される温室効果ガスはほぼ半減できること、また、要する費用は既存施設を補修する場合では削減される温室効果ガスの炭素換算重量 1 トンあたり 1 万円程度となることが分かった。また最初から高温での燃焼を前提とした焼却炉を建設する場合には、削減のための費用は低くできる可能性があることが分かった。

[キーワード] 温室効果ガス、下水道、高度処理、汚泥焼却、ライフサイクルコスト

1. 序

下水道は生活環境の向上と公共用水域の水質保全のための重要な社会資本であり、その普及拡大に向けて積極的な取り組みがなされている。下水道の運転管理により水域への汚濁物の排出は削減されているが、運転に伴い温室効果ガスが排出されていることも事実である。下水道から排出される温室効果ガスとしては、バイオマス由来の二酸化炭素 (CO_2) を除くと、汚泥焼却に伴う N_2O 、下水処理に伴う CH_4 、及び電力や燃料、薬品等の使用に伴う CO_2 が主なものである。

今後予想される下水道の普及の拡大や下水汚泥の焼却の増加は、下水道からの温室効果ガスの排出の増加をもたらす可能性が高い。このため、下水処理場における温室効果ガスの排出を抑制する対策技術の確立が急務となっている。

2. 研究目的

下水処理場における温室効果ガスの主な排出源は、電力や燃料に由来する CO_2 と、汚泥焼却に由来する N_2O 、下水処理に由来する CH_4 である。電力等に由来する CO_2 については別のテーマで行うこととしており、本研究は、下水処理場における処理過程で生成する CH_4 及び N_2O の排出を抑制する対策技術の確立とその評価を目的としている。

水処理プロセスと汚泥処理プロセスに分けて研究を行い、研究の目的は、水処理プロセスについては、嫌気性槽の導入が CH_4 の排出抑制に及ぼす効果の把握と、硝化の進行が N_2O の排出に与える影響の把握、汚泥処理プロセスについては、高分子凝集剤で脱水した汚泥を流動焼却炉で焼却するタイプの焼却において燃焼温度を高めることが温室効果ガスの削減に及ぼす効果とこのために要する追加の費用について評価することである。

3. 研究方法

3. 1 水処理プロセスからの温室効果ガスの抑制

(1) 実験方法

実験では、図・1,2,3 のそれぞれのプラントを使用し、標準法・AO 法・ A_2O 法の運転を行った。全プラントの反応槽の容量は 10 m^3 である。

標準法・AO 法は、反応槽が 5 槽に分かれており、それぞれの容量は等しい。流入水と返送汚泥はプラント内に入る前に混合し、その混合液を第 1 槽に供給した。

A_2O 法は、嫌気—無酸素—好気 1 槽—好気 2 槽の 4 槽構成とし、好気槽中には担体を添加した。担体を各好気槽内に保持するため、スクリーンを各好気槽に設置してい

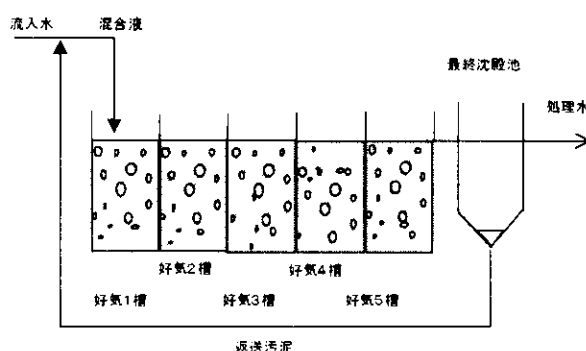


図-1 標準法運転プラント

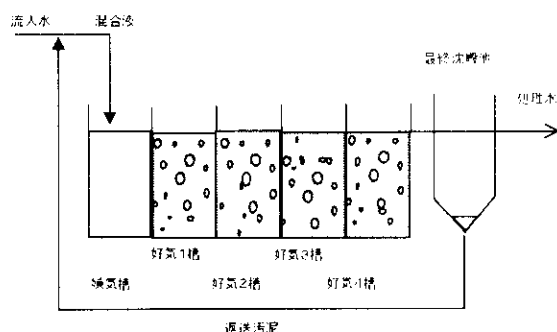


図-2 AO 法運転プラント

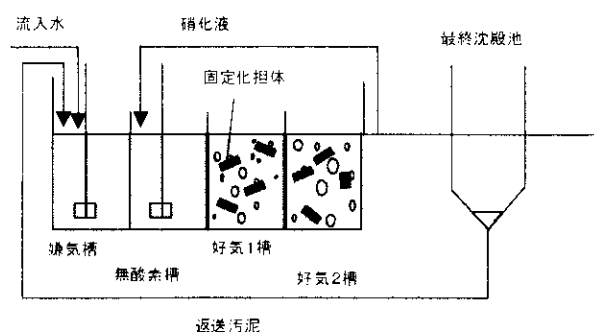


図-3 A_2O 法運転プラント

る。流入水と返送汚泥はそれぞれ直接嫌気槽に供給した。

実験では、AO 法および A₂O 法の CH₄ 排出抑制効果、N₂O 排出の影響因子に関する検討を行った。

① AO 法および A₂O 法における CH₄ 排出抑制効果

AO 法および A₂O 法において標準法との対照実験を行い、CH₄ 排出の抑制効果について検討を行った。

AO 法と標準法の実験条件を表-1 に示す。両処理法について測定を行った。測定当日の水温は標準法 12.9℃、AO 法 13.7℃であり、MLSS 濃度は標準法 2100 mg/l、AO 法 2210 mg/lであった。液体サンプルは、流入水、返送汚泥、各反応槽、処理水より採取し、ガスサンプルは各反応槽より採取した。

次に、A₂O 法と標準法で長期間平行して運転を行い、平均的な CH₄ 排出量を把握した。実験条件は、表-1 に設定した。液体サンプルは、A₂O 法で流入水、返送汚泥、各反応槽より採取し、標準法は混合液、各反応槽より採取した。ガスサンプルは各反応槽より採取した。

② N₂O 排出の影響因子

標準法について長期間運転を行い、N₂O 排出の検討を行った。実験条件とサンプル採取場所は上記 A₂O 法の検討と同様である。

表-1 各プラントの実験条件

処理プロセス	流入水量 (m ³ /h)	HRT (h)	返送汚泥比	SRT (d)	A-SRT (d)
AO法との比較					
AO法	<u>1.45</u>	<u>6.9</u>	<u>0.4</u>	<u>8</u>	<u>6.4</u>
標準法	<u>1.45</u>	<u>6.9</u>	<u>0.4</u>	<u>8</u>	<u>8</u>
A2O法との比較					
A ₂ O法	<u>1.25</u>	<u>8</u>	<u>0.5</u>	<u>15</u>	<u>7.5</u>
標準法 1	<u>1.25-1.45</u>	<u>6.9-8</u>	<u>0.5-0.6</u>	<u>10</u>	<u>10</u>

(2) サンプルの採取方法および測定方法

液体サンプルに関しては、各槽からバイアル瓶に液体サンプルを採取し、殺菌剤として 20 % グルコン酸クロロヘキシジン溶液を添加し、蓋を閉め密閉した後、ヘッドスペース法により測定を行った。

ガスサンプルに関しては、曝気槽では水面にチャンバーを置き、各槽下から曝気されるガスサンプルをテトラバッグに採取し、別に採取したブランクとの差からガス濃度を測定した。嫌気槽および無酸素槽に関しては、水面にチャンバーを置き、0 分後と 3 分後のガスサンプルをテトラバッグに採取し、両サンプルの濃度差から排出ガス量を計算した。CH₄ 濃度測定には GC/FID を使用し、N₂O に関しては GC/ECD を用いた。

3. 1 汚泥処理プロセスからの温室効果ガスの抑制

下水汚泥焼却炉の排ガスには温室効果ガス(GHG)のひとつである一酸化二窒素(N₂O)が含まれており、単位汚泥量あたりの N₂O 排出率は現在主流の高分子系汚泥流動焼却炉において最も大きい¹⁾。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り²⁾、現実的な方法として技術的には対応が可能である³⁾ことが報告されている。その一方で、高温化に伴い汚泥焼却に関連するコストの上昇が予想されるが、温室効果ガスの削減対策を推進する観点から経済的な影響を事前に把握しておく必要がある。また、高温化による補助燃料使用量の増加に伴って CO₂ 排出量が増えるため、温暖化に及ぼす効果を総合的に評価する。

N₂O 排出抑制のために行う高分子系流動焼却炉の燃焼温度の引き上げに関して、焼却炉メーカーおよび事業主体である地方公共団体へのヒアリングを行い維持管理データを収集して、ライフサイクルコスト分析手法(LCC)により燃焼温度を上げた場合のコスト変化を検討した。また、全国の下水汚泥焼却施設から排出される GHG を推計し、その削減可能量および所要コストを試算した。

(1) ライフサイクルコスト分析による高温燃焼のコスト評価

下水汚泥の焼却に関連する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コストが増加することとなる。図-4 に汚泥焼却炉のコスト構造および高温化に伴うコストの増加要因を示す。投入下水汚泥の発熱量および含水率が一定の場合、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。また、高温燃焼を前提に設計した新設炉では初期投資である建設費が増加する。さらに、補修費に関しても既設炉では空気予熱器等の劣化の進行による増額³⁾、新設炉では初期投資額に比例した増加⁴⁾が見込まれる。

① トータルコストの計算

ア 実基における実績

4 社(A,B,C,D)製の 7 基の流動焼却炉を対象に、実績コストについて LCC 分析を行った。LCC 現価法では、毎年発生する運転・維持費および補修費を建設年度の現在価値に換算して累計した値を求め、それに初期投資額である建設費を加えるトータルコストが[1]式により算出される⁵⁾。

$$TC = \sum_{k=0}^{\infty} C_k / \{(1+d)/(1+i)\}^k$$

[1]

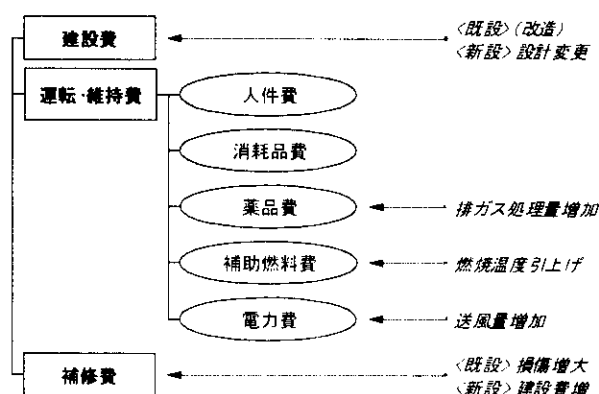


図-4 汚泥焼却炉のコスト構造及びその増加要因

ここで、TC：トータルコスト、k：年次(建設年 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

イ 高温燃焼を導入した場合

流動焼却炉の燃焼温度を引き上げた場合、建設費、運転・維持費および補修費の上昇に伴ってその累計値であるトータルコストも増加する。そこで、前項のアで LCC 分析を実施した 7 炉を対象に、次の 2 つのケースを想定してトータルコストを試算し実績値との比較検討を行った。

a) 設計値より 50 度高い運転を当初から行っ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建設し運転してきたと仮定した場合(以下「新設炉」という)

② 温室効果ガスの削減効果とそのコスト

実際の高分子系流動焼却炉における調査結果によると、下水汚泥中の窒素分が N_2O に転換する割合は、[2]式で表され、燃焼温度に比例して N_2O の排出量が減少することが明らかにされている²⁾。ここでは、[2]式を用いて前項の①で対象とした流動焼却炉における N_2O 排出量を求めた。ただし、D1 と D2 炉については、燃焼温度を 50 度引き上げ 900℃とした場合、[2]式では x が負の値となるため、900℃付近の高温域で行われた実基での調査結果³⁾に基づき、 x を 0.082(%) と設定した。

$$x = -0.1403 \times T + 123 \quad [2]$$

ここで、 x : 下水汚泥中窒素の転換率(%; $\text{N of N}_2\text{O} \cdot \text{g/N of sludge} \cdot \text{g}$)、 T : 燃焼温度(℃)

一方、高温化による補助燃料使用量の増加に伴い CO_2 の排出量は増加するが、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⁶⁾、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²⁾。そこで、同様の炉 7 基について、建設、運転された時期の実績データを基に、高温燃焼の導入前後における CO_2 および N_2O の排出量を見積もり GHG の削減量を推計するとともに、高温化に伴うトータルコストの増加額を求めて温室効果の削減に要するコストを試算した。

(2) 全国の下水汚泥焼却施設から排出される温室効果ガスの推計

全国の下水汚泥焼却施設から排出される GHG およびその削減コストを推計するため、全ての稼働焼却炉を対象に、地方公共団体に調書を送付して下水汚泥焼却の現況を調査した。

① 温室効果ガス排出量の現状

全国調査から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 GHG を算出した。高分子系流動炉の N_2O に関しては、(1)の②項と同様、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 $4.72\% \text{N} \cdot \text{g/DS} \cdot \text{g}^{9)}$ 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¹⁾の値を、補助燃料の排出係数は文献¹⁰⁾を参照した。

② 温室効果ガス削減効果の試算

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、前項の①で算出した GHG 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、現在稼働中の高分子系流動炉で補助燃料量の増加により対応するものとし、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。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℃となる。コストについては、(1)の①のイ項における既設炉のトータルコストの計算と同様、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の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費用関数を用いて推計した。また、各コストの増加率に関しては、メーカーヒアリング結果の平均値を採用した。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維持されたとした。

③ 温室効果ガス排出量の将来予測

下水汚泥の焼却量を予測し、GHG の削減目標年とされている 2010 年の GHG 排出量を推計した。統計資料¹¹⁾および全国調査の結果に基づき、全国の脱水汚泥量と焼却汚泥量のトレンドを調べた結果、脱水汚泥量、焼却汚泥量ともに年度の経過とともに直線的に推移していた。そこで、両者を線形外挿し、2010 年度における脱水汚泥量、焼却汚泥量をそれぞれ 8,542、5,563 湿千 t/年と予測した。しかし、この場合、焼却率は現状とほとんど変わらない 65%となるため、さらに 10%増え 75%となる場合、すなわち、焼却汚泥量が 6,406 湿千 t/年 となる場合も想定した。また、焼却汚泥量の増加分はすべて高分子系流動炉で焼却されると仮定し、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、古い焼却施設が高分子系流動炉に置換される場合の 2 つのケースを想定した。

4. 結果

4. 1 水処理プロセスからの温室効果ガスの抑制

(1) 実験結果

① AO 法および A₂O 法による CH₄ 抑制効果の検討

図-5,6,7 に、標準法、AO 法、A₂O 法における CH₄ 収支を示す。標準法では、流入水中の溶存 CH₄ に対し約 1.7 倍の CH₄ が大気中に排出されていた。しかし、AO 法の場合は流入水中の溶存 CH₄ と総 CH₄ 排出量が同程度であった。AO 法は、標準法に比べ CH₄ 排出抑制効果のあることが確認できた。

CH₄ 排出に関する標準法と AO 法の特徴として、以下の点が上げられる。標準法では、反応槽前半において CH₄ が生成されており、特に、好気 1 槽目での生成量が多い。また、生成された CH₄ は流入 CH₄ とともに好気 1 槽で大気中に排出されている。これに対し AO 法では、流入 CH₄ は嫌気槽でほとんど変化なく素通りし、その後の好気槽でも溶存 CH₄ の生成が見られていない。好気槽において、流入 CH₄ が大気中に排出されるが、標準法で見られた CH₄ 生成が見られなかったため、全体での排出量が増加しなかった。実験の結果より、嫌気槽が設置されることで、その後の好気槽での CH₄ 生成がなくなり、CH₄ 排出量が抑制される結果となった。

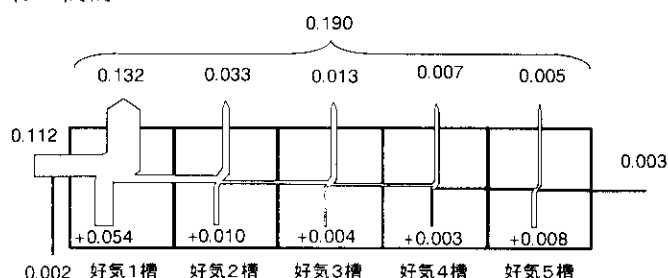


図-5 標準法における CH₄ 収支 (gCH₄/m³ 処理水)

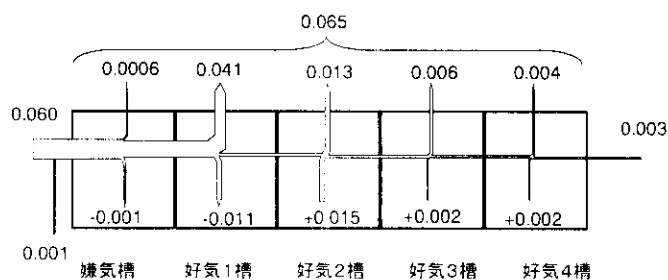


図-6 AO 法における CH₄ 収支 (gCH₄/m³ 処理水)

図-7は、7ヶ月間にわたり測定したA₂O法の平均のCH₄収支である。A₂O法では、流入CH₄量の約0.9倍が大気中に排出されていた。好気2槽で少量のCH₄の生成がおこっているが、その他の槽ではCH₄が減少している。実験期間中に無酸素槽の脱窒や嫌気槽でのりんの放出が良好に行われていない時期があり、必ずしもA₂O法に期待されている処理性能が常時確保されていたとは言えないが、年間を通してみれば、A₂O法はCH₄排出抑制効果がある結果となった。今後、安定した運転によるA₂O法の調査が必要である。

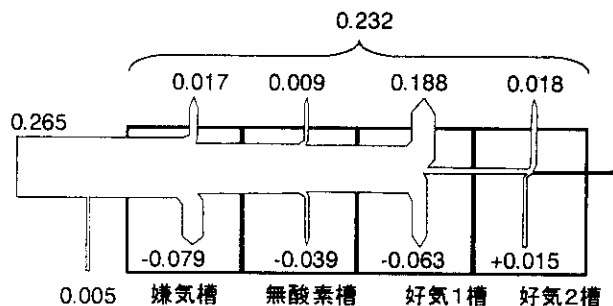
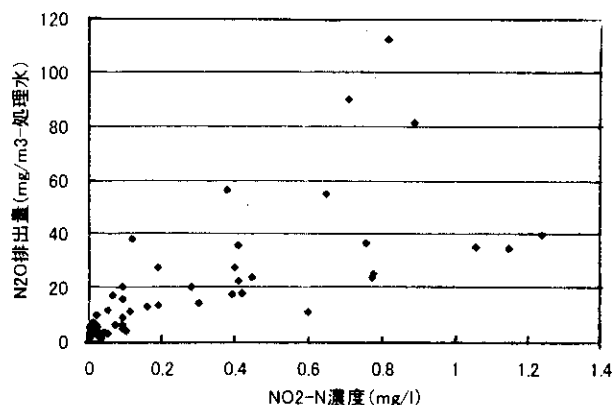


図-7 NO₂-N濃度とN₂O排出量の関係

② N₂O排出抑制に関する調査

図-8に、標準法における全期間を通しての各槽のNO₂-N濃度とN₂O排出量の関係を示す。NO₂-N濃度が低いときは、N₂O排出量も低い状態に維持される。しかしNO₂-N濃度が高くなるにつれ、N₂O排出量が増加の傾向にある。これはNO₂-N濃度が上昇することで、液中でのN₂O生成量が増加するが、曝気風量の多少で、大気中に排出される量にばらつきが出ているためと考えられる。



今回の測定は、8月から10月の夏期と1月から2月の冬期に行っており、夏期のNO₂-N濃度は平均0.09 mg/lで、冬期は0.34 mg/lであった。硝化活性の低下する冬期にNO₂-N濃度が増加していたことから、今後、冬期におけるNO₂-N濃度の低減対策を検討することが重要である。

図-8 A₂O法におけるCH₄収支 (gCH₄/m³-処理水)

4. 2 汚泥処理プロセスからの温室効果ガスの抑制

(1) ライフサイクルコスト分析による高温燃焼のコスト評価

① トータルコストの計算

ア 実基における実績

対象とした炉の概要を表-2に、トータルコストの実績内訳を図-9に示す。なお、ここでは、名目上の金利は長期プライムレートを、名目上のインフレ率には卸売物価指数を用いた。一般に経過年の進行に伴いTC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

表-2 ライフサイクルコスト分析の調査対象炉

炉名	建設年	経過年	能力 (t/d)	燃焼温度 (°C)	補助燃料	備考
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	消費品費不明
B2	83	13	100	830	A重油	
C2	81	15	45	800	灯油	
C3	81	15	60	820	都市ガス13A	
D1	73	18	20	850	A重油	消費品・薬品費不明
D2	77	15	20	850	A重油	

注) 全て高分子凝集剤。能力は湿ベース

炉においても同様な傾向が見られ、トータルコストに対するこれらの合計のシェアは建設後 7 年の炉で 44%であったのに対し 18 年経過の炉では 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。

イ 高温燃焼を導入した場合

各コストの増加条件を表-3 に示す。ここで、運転・維持費のうち人件費の増加は生じないと仮定し、消耗品費については微増が予想されるがトータルコストに占めるシェアが 1%程度と小さいためその変化を無視した。また、既設炉における燃焼ガス量の増加に対しては、ヒアリングの結果、ブロワおよび排ガス処理設備の能力に制約があるものの設計上の余裕または稼働率の引き上げで対応が可能であるとし改造を見込まなかった。ただし、A 社に関しては排ガス温度の上昇に伴う空気予熱器の改造費を計上した。

既設炉の高温化を想定して試算した各コストごとのトータルコスト増加率の例を図-10 に示す。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。増加を見込まない D 社の補修費を除き他の炉でも同様な傾向を示した。既設炉における各コストの増加率は、補修費、補助燃料費がそれぞれ最大 81.5%、45.8%であったのに対し電力・薬品費は最大でも 3.6%と見積もられた。

各調査対象炉におけるトータルコスト増加率の計算結果を図-11 に示す。一部の炉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、トータルコスト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。A 社は既設炉で空気予熱器の改造が必要となるものの、経過年数が 7 年間と

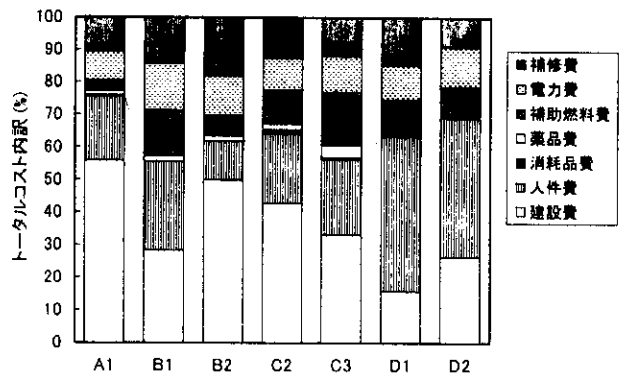


図-9 トータルコストの実績内訳

表-3 各コストの増加条件

コスト内訳	既設炉	新設炉
建設費	(改造費)	ヒアリング結果より求めた増加率の関数 $1.013 \times T^{0.00088}$ T: 炉規模(t/d)
運転・維持費	補助燃料費	ヒアリング結果に基づく補助燃料使用量の増加率に比例
	電力・薬品費	補助燃料の増加に伴う排ガス量の増加率に比例
補修費	ヒアリング結果	建設費の増加率に比例

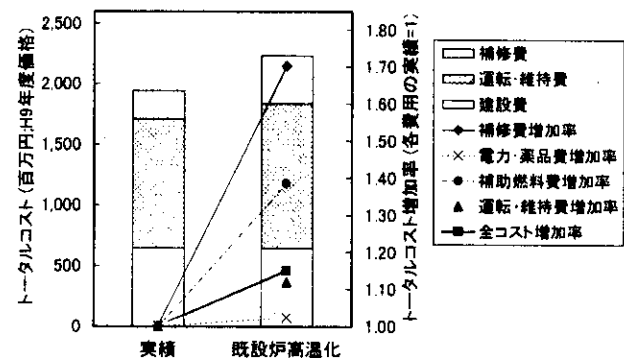


図-10 トータルコスト変化の内訳(C3 炉・既設)

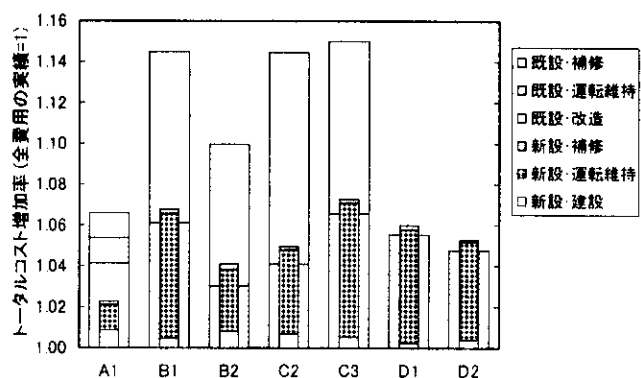


図-11 各炉におけるトータルコスト増加率

表-4 GHGs 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)	LCCT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		CO ₂ (CO ₂ -t)		N ₂ O (N ₂ O-t)		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	実績	高温化	実績	高温化								
A1	17,535	1,499	1,598	1,533	3,920	5,221	140	49	12,898	5,541	0.420	57.0	13,453	4,644			
B1	30,706	1,222	1,399	1,304	13,354	18,651	149	11	16,254	6,019	0.333	63.0	17,295	8,081			
B2	73,794	1,776	1,954	1,849	15,435	21,557	358	27	34,519	8,120	0.358	76.5	6,712	2,767			
C2	39,877	1,247	1,427	1,309	12,056	16,495	318	111	30,190	13,862	0.409	54.1	11,037	3,793			
C3	68,778	1,943	2,234	2,084	20,507	28,390	406	48	39,892	11,792	0.409	70.4	10,375	5,029			
D1	15,269	1,094	1,154	1,159	7,351	10,720	42	1	5,590	3,002	0.169	46.3	23,367	25,314			
D2	18,513	699	733	736	4,709	6,868	51	1	5,631	1,968	0.198	65.0	9,078	10,106			

1) 計算条件 汚泥中の窒素含有率: 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

短いため運転・維持費および補修費のトータルコストの増加率は新設炉も含め他社に比べて大きく抑えられている。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。これらを除いた経過年数13年以上の炉における全体のトータルコストの増加率は、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。

② 温室効果ガスの削減効果とそのコスト

GHG削減量とそれに必要とするコストを求めた結果を表-4に示す。燃焼温度を50度上昇させた場合、下水汚泥1DStあたり炭素換算で0.17～0.42C-t/DS-tのGHGs削減が可能となり、その削減率は24～45%となる。このとき、1C-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と予想される。しかし、いずれにしても当初設計時から温室効果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。

ここで、米国では既に二酸化硫黄(SO₂)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SO₂1tあたりUS\$100～200(約11,000～22,000円; 1US\$=110円)程度となっている⁷⁾。また、マクロスケールの市場モデルに基づき温室効果ガス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⁸⁾、炭素1tあたりUS\$14～145(1,500～16,000円/C-t)程度の値が提示されている。本研究で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察される。

(2) 全国の下水汚泥焼却施設から排出される温室効果ガスの推計

全国の下水汚泥焼却炉の現況を調査した結果、1998年度末現在、稼働中の焼却施設は225基で、そのうち流動炉は基数で73%、焼却能力で70%を占め、1基あたりの平均焼却能力は87湿

t/日/基となっていた。1980 年代後半以降に整備された炉はほぼ全て流動炉であった。一方、多段炉の平均使用年数は 20 年に達しており、今後はその多くが流動炉へ置換されていくものと予想される。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図-12 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%が流動炉で焼却され、その 9 割以上が高分子系凝集剤のみを用いた汚泥で占められている。また、流動炉の平均燃焼温度は 825 ℃、最高温度は 875 ℃となっている。

① 温室効果ガス排出量の現状

計算結果を図-13 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 GHG は炭素換算で 437 C-Gg/年と見積もられ、その内訳は、N₂O が 374C-Gg/年(86%)、補助燃料由来の CO₂ が 63C-Gg/(14%)年となった。そのうち、高分子系流動炉による N₂O は 307 C-Gg/年で、GHG の 7 割を占めた。したがって、高分子系流動炉から排出される N₂O の抑制対策を進めることは、焼却施設全体の GHG 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。

既調査¹⁾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 N₂O 排出係数が 1,200 N₂O-g/湿 t と報告されているが、燃焼温度と窒素含有率から N₂O 排出量を計算した本調査で同じ排出係数を求めた結果、1,245 N₂O-g/湿 t と非常に近い値を示した。高分子系流動炉の N₂O 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 N₂O-g/湿 t 程度の排出係数を用いてよいと推測される。

② 温室効果ガス削減効果の試算

GHG の削減効果を計算した結果を図-14 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

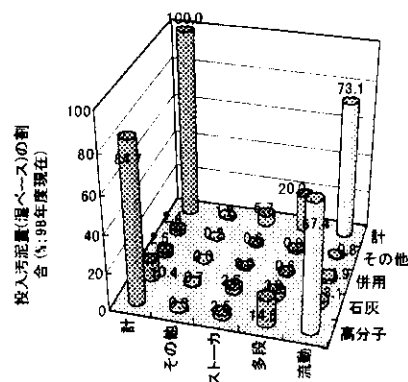


図-12 全国の汚泥焼却量の内訳

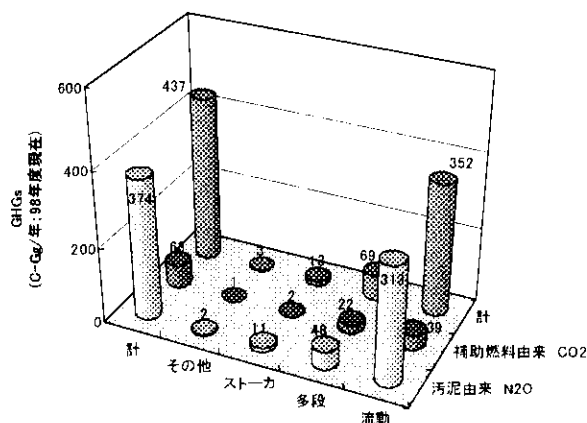


図-13 全国の GHGs 排出量の内訳

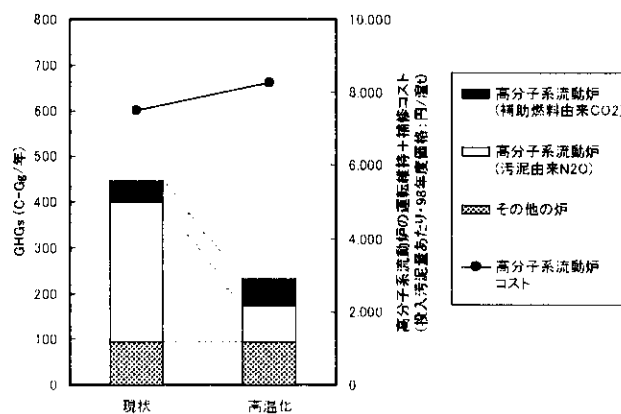


図-14 高温化による全国の GHG 排出量変化とコスト

326 N_2O -g/湿 t となる。その結果、GHG 全体では 437 から 49%減の 221 C-Gg/年となり、高温化により約半分程度に抑えられることになる。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、GHG 削減単価は 10,600 円/C-t と試算された。この値は、(1) の②項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 GHG 削減単価は 1 万円/C-t が目安になると考えられる。

③ 温室効果ガス排出量の将来予測

2010 年度の GHG 排出量を試算した結果を図-15 に示す。燃焼温度が現状のままの場合、GHG は 1998 年度に対し最大 1.66 倍の 725 C-Gg/年と見積もられたが、高温化した場合、GHG は最大でも 317 C-Gg/年となり現在の水準よりも 27 %ほどの削減が可能と示された。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全国平均で 35 度程度引き上げることにより、2010 年度の GHG 排出量を 1998 年度以前の水準までに抑制できると考えられる。

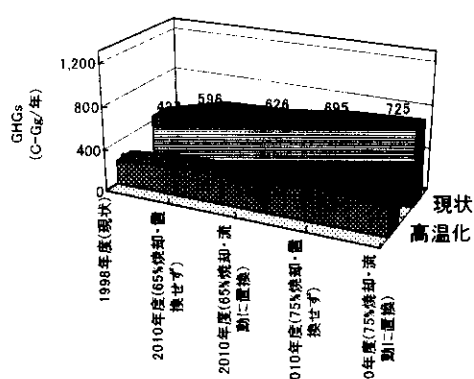


図-15 全国の GHG 排出量の予測

5. まとめ

水処理プロセスにおける嫌気性槽の導入が CH_4 の排出抑制に及ぼす効果と硝化の進行が N_2O の排出に与える影響についてパイロットプラント実験により調べた結果、以下を得た。

- ・ AO 法および A_2O 法においては、標準活性汚泥法に比べて CH_4 排出の抑制効果があることが確認された。
- ・ 槽内の $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が低い場合には N_2O の排出量は少ない。しかし、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が高い場合の排出量は増加する傾向にあり、変動も大きいものであった。

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を検討するとともに、全国の汚泥焼却施設から排出される GHG の排出量およびその削減コストを推計し、以下の結論を得た。

- ・ 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下に抑えられ、その大半が運転・維持費によるものとなる。
- ・ GHG 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。
- ・ 1998 年度現在、全国の下汚泥焼却施設から排出される GHG は炭素換算で 437 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 と GHG の 7 割を占めている。
- ・ 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

在の施設のまま全国平均で 35 度燃焼温度を引き上げると 326 $\text{N}_2\text{O}\cdot\text{g}/\text{湿 t}$ となる。

- ・ 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 GHG を 1998 年度以前の水準までに抑制することが可能である。

6. 参考文献

- 1) 竹石ら、「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集,土木研究所資料第 3294 号, pp.105-110, 1994
- 2) 竹石ら、「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
- 3) 中村ら、「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
- 4) 日本下水道協会,「下水汚泥処理総合計画策定マニュアル」, pp.100-106, 1991
- 5) 例えば、ロジャー・フラナガンら,「建物のライフサイクル計画」,技術書院, 1988
- 6) 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
- 7) EPA, Monthly Average Price of Sulfur Dioxide Allowances under the Acid Rain Program, 1998
- 8) 例えば、The Kyoto Protocol and the President's Policies to Address Climate Change: Administration Economic Analysis, 1998
- 9) 渡部ら,「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
- 10) 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
- 11) 日本下水道協会,「下水道統計行政編」, 1988-1997