

B-16 地球温暖化抑制のためのCH₄、N₂O等微量ガスの対策技術開発と評価に関する研究
(8) 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 中村 栄一

建設省 土木研究所 下水道部
新下水処理研究官 中村 栄一
三次処理研究室 鈴木 穰・重村 浩之
汚泥研究室 落 修一・原田 一郎

平成7-9年度合計予算額 28,575 千円
(平成9年度予算額 9,331 千円)

[要旨] 本研究は地球温暖化防止のため、下水処理システムからのメタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)の排出抑制技術の開発および消化ガスの有効利用方策の検討を目的としている。下水処理システムは、水処理システム、汚泥処理システムから成るが、ここでは過年度の研究¹⁾により温室効果ガス放出量の大きいことが明らかとなった水処理システムと汚泥の流動焼却プロセスを対象に排出抑制技術の開発を行った。さらに、汚泥消化ガス(CH₄)の炭素は元来大気中の炭酸ガスであることから、温暖化防止対策の一環として消化ガスの有効利用方策を検討した。

水処理システムにおける研究では、反応槽に担体を投入した嫌気、無酸素、好気の組み合わせプロセスから成るパイロットプラント実験を行い、N₂Oの生成因子等について検討した。その結果、流入下水中の有機物濃度の低下時や低水温期の脱窒活性の低下時にN₂O生成が高かった。また、全国処理場の水処理システムからのCH₄、N₂Oの年間放出量を推定するため、実下水処理場でCH₄、N₂Oの放出量の補足調査を実施した。その結果、CH₄については年間約8,000tと推定されたが、N₂Oについては処理場間の相異が大きく推定は困難であった。

高分子凝集剤汚泥の流動焼却プロセスを対象としたN₂O排出抑制技術の開発においては、実験炉及び実炉を用いて、フリーボードの燃焼温度と汚泥中の窒素のN₂O転換率との関係を調査した。その結果、現在の燃焼温度(750~800℃)を約50℃上昇させることにより、N₂O排出係数を平均1,200g・N₂O/汚泥tから800g・N₂O/汚泥tに削減できることが判明した。また、温度上昇による炉の建設費や耐用年数等への影響も小さいことが判明した。

消化ガスは消化槽の加温に使用され、残余は余剰ガスとなるが、実務的には消化ガスの有効利用は余剰ガスの有効利用と同義である。中小の処理場まで視野に入れた消化ガスの有効利用のためには、余剰ガスの貯留・運搬が不可欠である。そこで各種変数を組み入れた余剰ガス生成モデルを作成し、規模別、地域別、月別の余剰ガス生成量の予測を可能とした。また、消化ガスの貯留方法として吸着剤に吸収させる貯留技術が有効であることが判明した。

[キーワード] 温室効果ガス、メタン、亜酸化窒素、下水処理、汚泥処理、消化ガス

1. はじめに

地球の温度は、日射エネルギーと地表面から宇宙に放散される放射エネルギーとのバランスによって決定されており、大気中に赤外線を吸収する成分が増加すれば地球が温暖化する。この赤外線吸収成分としては、二酸化炭素（ CO_2 ）が代表的であるが、メタン（ CH_4 ）や亜酸化窒素（ N_2O ）などのガスも大気中の濃度は低いものの、単位重量当たりの赤外線吸収能が大きく、また近年の増加割合も大きいことから、温室効果ガスとして注目を集めている。

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基盤施設であるが、近年の調査によると¹⁾、下水処理、汚泥処理の過程で CH_4 、 N_2O の放出が報告されている。今後下水道の普及拡大を考えると、下水処理システムからの CH_4 、 N_2O の放出量は益々増加することが予想される。下水道が地域単位の環境と同時に地球規模の環境の保全にも貢献するためには、これら温室効果ガスの下水道システムからの排出を抑制する対策技術の確立が急務と言える。

2. 研究目的

本研究は、過年度に実施した「下水処理場からの（メタン・亜酸化窒素）放出量の解明に関する研究¹⁾」および「汚泥からのメタンガス回収・有効利用に関する調査²⁾」を受けて、下水処理システムからの CH_4 、 N_2O の排出を抑制する対策技術の確立を目的として実施するものであり、水処理プロセスおよび汚泥焼却炉からの CH_4 、 N_2O の排出抑制技術の開発と、消化ガスの有効利用の促進方策の検討を行った。

3. 研究結果

3.1 水処理プロセスからの温室効果ガスの抑制

平成8年度末現在、全国の下水道処理人口普及率は55%に達し³⁾、今後も処理人口の増加が見込まれるものと考えられる。これまでの調査結果によると、水処理系においてはエアレーションタンク（以下、エアタン）からの CH_4 、 N_2O ガス排出量の多いことが明らかになっており⁴⁾、処理人口の増加により CH_4 、 N_2O 排出量もさらに増大するものと考えられる。さらに、今後栄養塩除去のために高度処理の導入が進められるものと考えられる。本研究所の過去の報告によると、水処理プロセスからの N_2O 排出量は汚泥焼却炉からの排出量と比較してごくわずかであったが⁵⁾、窒素除去のための硝化・脱窒プロセスにおいて N_2O 発生が促進されるという報告があるので⁶⁾、高度処理プロセスにおける N_2O 排出抑制について検討する必要がある。

本研究においては、水処理プロセスからの CH_4 、 N_2O 排出量の推定、及び CH_4 、 N_2O 排出の原因因子の把握を目的とする。

3.1.1 実プラントにおける CH_4 排出量の測定

既存の研究から、 CH_4 の多くはエアタンから放出されることが明らかになっている。流入水中あるいは返流水中に含まれていた溶存 CH_4 が曝気を受けてエアタンで揮散していると考えられるため、嫌気性消化プロセスからの返流水や合流式下水管中の堆積物が影響を与えている可能性がある。このため、表1-1に示すように、汚泥の嫌気性消化槽の有無、及び合流式と分流式の違いが把握できるように処理場を選定し、 CH_4 排出量を測定して処理場内での CH_4 の主な発生源について検討した。

表1-1 測定対象の処理場の概要（数値は平成9年度夏期及び冬期の平均）

処理場名	A 処理場	B 処理場	C 処理場
流入水量(m ³ /d)	2697	10065	6365
合流・分流の別	分流	合流	分流
嫌気性消化の有無	無	無	有
流入水のCODcr	365mg/L	393mg/L	308mg/L
エアタン末のDO	1.1mg/L	3.2mg/L	2.3mg/L
エアタンのHRT	9.3hr	5.3hr	10.5hr
SRT	19.3d	6.7d	13.0d

※A及びB処理場は標準活性汚泥法、C処理場のエアタンの前方1/3は嫌気槽になっている。

(1)実験方法

各プロセスから気相へのCH₄のフラックスを求めるために、浮遊式のチャンバーを水面に浮かべてガスのサンプリングを行った。最初沈殿池等、曝気をしていない槽では、チャンバーを水面に浮かべてから0分後と3分後のチャンバー内のガスを、エアーポンプを使ってテドラーバッグに採取し、両者のCH₄濃度の差から発生フラックスを求めた。エアタンでは、エアタン水面からチャンバーに吹き上がってくるエアレーション空気を、エアタンの前・中・後の計3カ所でテドラーバッグに捕集した。また、各プロセスから液体試料を採取し、CODcr濃度及び各態窒素濃度を測定した。ガス試料中のCH₄はGC/FIDで測定した。

さらに、本研究では、下水処理場からのCH₄発生源を特定するために、各プロセスの液体試料のCH₄生成実験を行った。70mLのバイアル瓶に、CH₄生成用基質の酢酸（添加後のCOD≒1000mg/L）を添加した液体試料を封入し、約10日間ほど恒温振とう培養槽内で培養した。各試料につき同じものを5個作成し、経時的に1個ずつバイアル瓶を開け、液中のCH₄濃度を測定した。液中のCH₄濃度はGC/FIDを使って、ヘッドスペース法で測定した。

(2)実験結果

表1-2に、各処理場の水処理系の各プロセスにおけるCH₄排出量を示す。いずれの処理場でも、他のプロセスと比べて、エアタンからの大気中へのCH₄排出量が多かった。処理場間でのCH₄排出量の比較としては、エアタンからの排出量では、夏冬ともに、B処理場が圧倒的に大きく、続いてA処理場、C処理場の順であった。B処理場のエアタンにおいて排出量が多くなる理由としては、合流式であること、あるいは他の処理場よりもエアタンのHRT及びSRTが短くなっていること（表1-1）が考えられる。

今回の調査において、各処理場の水処理プロセスにおいて、平均703mg/m³-流入下水の排出量データを得た（表1-2参照）。この値を用いて、日本の下水処理場の水処理プロセスからのCH₄排出量を試算してみた。平成7年度現在の下水処理水量が107億m³/年³⁾であることより、日本の下水処理場の水処理プロセスからのCH₄排出量は7522t/年と試算された。

表1-2 各処理場の水処理系の各プロセスにおけるCH₄排出量(単位: mg/m³-流入下水)

処理場	沈砂池	最初沈殿池	エアタン	最終沈殿池	計
A処理場H9.8	5.0	21.7	430.0	2.0	458.7
B処理場H9.8	22.5	4.8	1002.6	0.0	1029.9
C処理場H9.8	0.3	127.0	252.5	1.4	380.9
A処理場H10.2	2.6	1.8	298.8	0.2	303.4
B処理場H10.2	1.5	68.1	1877.3	3.2	1950.1
C処理場H10.1	0.3	2.4	89.9	0.5	93.1

エアタンで排出されるCH₄の発生源を調べるために、各プロセスの液体試料のCH₄生成実験を行った。B処理場およびC処理場における結果を図1-1に示す。エアタンの活性汚泥混合液では、B及びC処理場ともに、CH₄が生成されていることがわかる。一方、どちらの処理場においても、流入水中ではCH₄がほとんど生成されず、合流式のB処理場においても流入水が排出量増加に寄与しないことがわかった。これらの結果より、流入水のCH₄生成能が処理場のCH₄放出に与える影響は小さく、活性汚泥のCH₄生成能が大きく影響することが明らかとなった。

処理場間で、実験開始後0~6、7日の活性汚泥混合液のCH₄生成能を比較すると、A処理場は0.08mg/g-SS・d、B及びC処理場は0.28mg/g-SS・dであり、A処理場のみ値が低かった。活性汚泥混合液の生成能が同程度であるB、C処理場を比較すると、生物反応槽に嫌気槽の存在するC処理場の方がエアタンからのCH₄排出量が少なかった。今後、嫌気槽の効果について検討する必要がある。なお、C処理場では、汚泥消化槽の分離液から相当量のCH₄が生成された。このことより、汚泥処理プロセスからの返流水には、高いCH₄生成能があることがわかった。

3.1.2 実プラントにおけるN₂O排出量の測定

下水処理プラントの水処理系において、N₂Oガスはほとんどエアタンで排出されており⁴⁾、その排出量については、窒素の処理状況に大きく影響されると考えられている⁷⁾。ここでは、前章の処理場において、エアタンでのN₂O排出量を測定し、処理場間及び季節間での比較を行った。

(1)実験方法

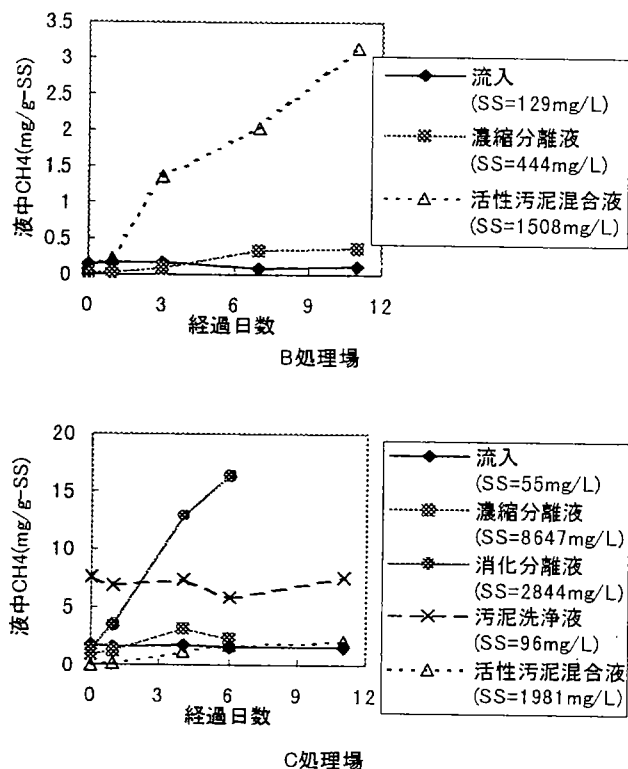


図1-1 CH₄生成実験の結果

前項のA、B、C各処理場でエアレーションガスのN₂O濃度を測定した。ガスサンプル採取法は、前項と同様である。ガスサンプル中のN₂O濃度の測定はGC/ECDで行った。なお、C処理場においては、約2ヶ月に1回N₂O排出量を測定し、その季節変動を調べた。

(2)実験結果

図1-2に、C処理場のエアタンにおけるN₂O排出量及びN₂O放出率を示す。ここで、N₂O放出率は、エアタンに流入する窒素量(g-N/d)に対する、エアタンから放出されるN₂O量(g-N/d)の割合(%)で表される。グラフより、8月で排出量、放出率ともに最大値を示している。その後減少していき、12月、1月の冬場ではほとんどが生成していなかった。その後、暖かくなり始めた3月に、排出量、放出率ともに上昇していた。なお、本実験期間中、C処理場のエアタン中の混合液はほぼ完全硝化していた。

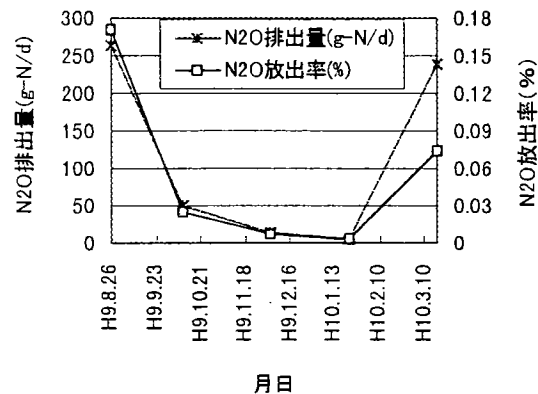


図1-2 C処理場のエアタンでのN₂O排出量とN₂O放出率

表1-3に、A、B、C各処理場のエアタンからのN₂O排出量、N₂O放出率、エアタン末端のNH₄-N濃度、NO_x-N濃度及びNO₂-N濃度を示す。B処理場が、他の2処理場と比べてN₂O排出量、N₂O放出率ともに相当高かった。この原因として考えられるのが、エアタン末端でのNO₂-N濃度の高さである。N₂OはNO₂-Nとともに硝化反応の際に副産物として生成される⁷⁾。そのため、硝化不十分の場合、N₂OとNO₂-Nがともに蓄積すると考えられる。山根らの報告でも、エアタン混合液中のNO₂-N濃度が大きくなると、N₂O発生量原単位が大きくなるという相関が得られている⁷⁾。

表1-3 各処理場のエアタンでのN₂O排出量、N₂O放出率、及びエアタン末端の各態窒素濃度

処理場名	A処理場	B処理場	C処理場
N ₂ O排出量(mg-N/m ³ -流入下水)	9.0	316.5	19.3
N ₂ O放出率(%)	0.016	0.64	0.056
エアタン末端のNH ₄ -N濃度(mg/L)	14.9	9.1	0.80
エアタン末端のNO _x -N濃度(mg/L)	3.7	0.49	8.8
エアタン末端のNO ₂ -N濃度(mg/L)	0.19	0.47	0.030

3.1.3 担体添加型A₂O法パイロットプラントからのN₂Oガスの抑制

これまでの調査結果によると、生物学的窒素除去プロセスからのN₂O排出量は、脱窒が良好に行われず、NO₃-Nが無酸素槽に蓄積するときに増加する傾向が見られた⁶⁾。本研究では、高度処理法におけるN₂Oの排出状況を調査し、その対策手法を検討した。

(1)実験方法

好気槽の一部に固定化担体を添加したA₂O法パイロットプラント(図1-3)を実験に用いた。定期的に好気槽排ガス中のN₂O濃度を及び各層の水質を測定すると共に、随時、液相中の溶存N₂O濃度を測定した。N₂Oの測定はGC/ECDにより行った。

(2)実験結果

図1-3に示すパイロットプラントにおいて、好気槽からの N_2O 排出量の季節変動を測定した結果、長雨により流入下水中の有機物が希釈されていたとき、及び水温低下時に N_2O 排出量が増加していた。

高水温期及び低水温期における亜酸化窒素のプロセス内フロー図を図1-4及び図1-5に示す。脱窒が良好に行われていた高水温期には、無酸素槽での N_2O の生成は少なかったが、 NO_3-N が2mg/Lほど無酸素槽に残存していた低水温期には、無酸素槽で N_2O が大量に生成され、その N_2O が大気中に放出されることなく好気槽に移流し、好気槽の曝気により大気中に放出されていた。これより、無酸素槽での N_2O 生成量が放出量に大きな影響を与えること、生成された N_2O が曝気により大気中に放出されることが明らかになった。

無酸素槽での N_2O 生成には、 NO_3-N 濃度が影響を与えるものと考えられる。定期測定により得られた無酸素槽の NO_3-N 濃度と流入窒素の N_2O への交換率の関係を図1-6に示す。 NO_3-N 濃度の低濃度域においてデータのばらつきが見られるものの、 NO_3-N 濃度が高いほど N_2O への交換率が大きいという傾向が得られた。

無酸素槽における脱窒促進のため、有機物源として可溶化した生汚泥の濾液を無酸素槽に投入する方法が考えられた。今後、この方法について、 N_2O 排出の抑制効果を検討する。

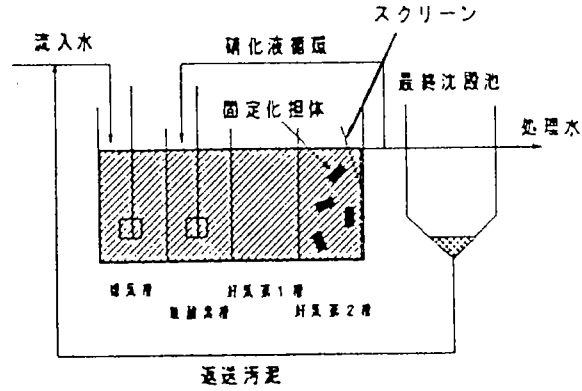


図1-3 パイロットプラント概要

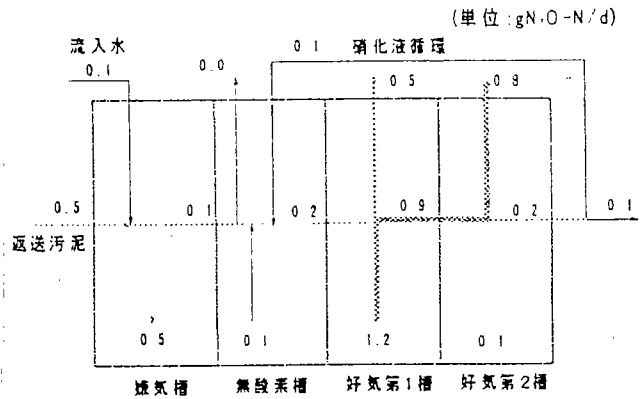


図1-4 高水温期(24°C)の N_2O フロー

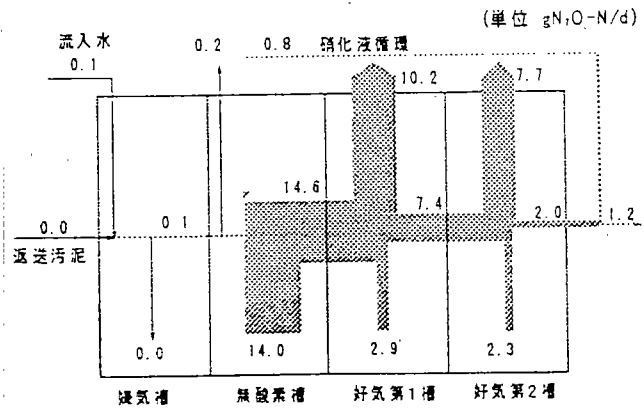


図1-5 低水温期(14°C)の N_2O フロー

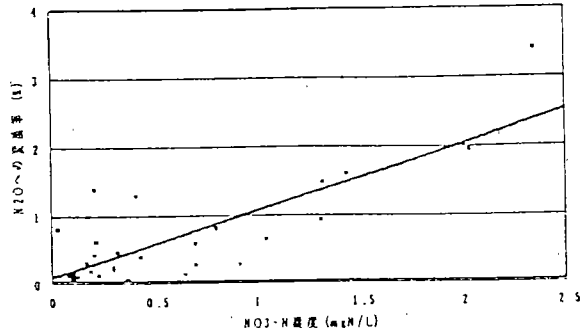


図1-6 NO_3-N 濃度と流入窒素の N_2O への交換率の関係

3.2 汚泥焼却炉からの温室効果ガスの抑制

平成7年度におけるわが国の下水道からの汚泥発生量は乾重量で169万tに達し、このうち61%に相当する103万tが焼却されている。今後、下水道整備の進展に加え、汚泥の最終処分地の制約から、下水汚泥の焼却は増加する傾向にあると推測される。とくに、近年採用が増加している高分子凝集剤汚泥の流動焼却炉においては、他の焼却方法と比較して汚泥中窒素の亜酸化窒素への転換率が高く、その排出抑制策の確立が急務となっている。

従来の調査結果においては、高分子系流動焼却炉からの亜酸化窒素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の増加も抑えられることが示されている⁸⁾。引き続き、亜酸化窒素の排出状態と運転条件との関係を詳細に把握するため、データの蓄積を図る必要がある。

一方、燃焼温度を上昇させた場合、補助燃料使用量の増加及び二酸化炭素放出量の増大につながるため、温暖化に及ぼす影響を総合的に評価する必要がある。さらに、現在の焼却施設の早期劣化や建設費、補修費等のコスト上昇が予測されるため、これらの影響を事前に把握し必要に応じて改築等対応策の検討が求められる。

3.2.1 研究方法

(1)実炉における燃焼実験

温暖化ガスの排出を抑制する流動焼却炉の運転方法を検討するため、高分子系汚泥の実稼働流動焼却炉を対象に、燃焼条件を変化させ亜酸化窒素等の生成量を測定した。とくに、従来の調査結果に基づき、重要な操作因子であると考えられる燃焼温度に着目した。また、亜酸化窒素及び二酸化炭素の排出量と補助燃料である重油使用量との関係を調査し、温暖化ガスの排出抑制に求められる運転条件を抽出した。

(2)温暖化削減効果の試算

GWP(地球温暖化ポテンシャル)を用いて、実用流動焼却炉において温暖化ガス排出の抑制を目的に高温燃焼を実施した場合の温暖化効果を試算し、その影響を検討した。

(3)焼却施設に対する影響調査

フリーボード部800℃で設計されている現在の流動焼却炉の燃焼温度を最大50℃上昇させた場合に予測される施設への影響及び対応策を調査した。また、実用炉8ケースを対象に高温燃焼を想定した場合のライフサイクルコスト(LCC)分析を実施し⁹⁾、経済的耐用年数及びコストの変化を推計した。さらに、新設炉における高温燃焼対応策についても検討した。なお、これらの調査は焼却炉メーカーの協力を得て実施した。

3.2.2 研究結果

(1)実炉における燃焼実験

亜酸化窒素への窒素転換率は、フリーボード部における燃焼温度との相関が高く、両者の関係が再確認された。下水汚泥焼却時のフリーボード部温度と、亜酸化窒素及び窒素酸化物への窒素転換率との関係を図2-1に示す。フリーボード部の燃焼温度の上昇に伴い亜酸化窒素への窒素転換率は減少し、排出抑制対策としては850℃以上の高温運転が望ましいと考えられる。一方、燃焼温度の上昇は窒素酸化物の排出増加を招くおそれがあるが、その抑制対策として、フリーボ

一部での高温燃焼と同時に砂層との温度差を50℃以上に保つ運転が有効であることが確認された。

次に、実稼働流動炉において運転条件を変化させ温暖化ガスの排出量を調査したところ、投入汚泥量及び補助燃料使用量と亜酸化窒素排出量との間に明らかな関係がみられた。単位投入汚泥量あたりの補助燃料使用量と亜酸化窒素排出量との関係を図2-2に示す。本調査では処理能力が160t/日及び150t/日の焼却炉を対象としたが、検討した運転条件の中では、設計値に見合った定格運転において重油/汚泥比が最も小さくなり、かつ亜酸化窒素排出量が最も少なくなった。また、単位投入汚泥量に対する二酸化炭素排出量も定格運転の場合に最小となった。したがって、温暖化ガスの排出抑制には設計能力相当の運転が望ましいことが明らかになった。

(2)温暖化削減効果の試算

ここでは、実稼働流動焼却炉を対象に、高温燃焼させた場合の年間の温暖化効果を実験結果から試算した。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)では、温暖化ガス発生量にGWPを乗じて相対的温室効果を算出することとしている。いま、二酸化炭素及び亜酸化窒素における20年後のGWPをそれぞれ1,290とし、二酸化炭素1ktによる効果を1としたとき、試算対象焼却炉における温暖化ガスの相対的温室効果は表2-1に示すとおりとなった。高温燃焼の場合、定格運転に比べ重油使用量が13%増加するが、相対的温室効果は20%減少し、高温運転の有効性が示唆された。今後は、補助燃料使用量の削減を目的とした効率的なエネルギー回収施設の導入等の検討も含め、システム全体としての対応が必要であると考えられる。

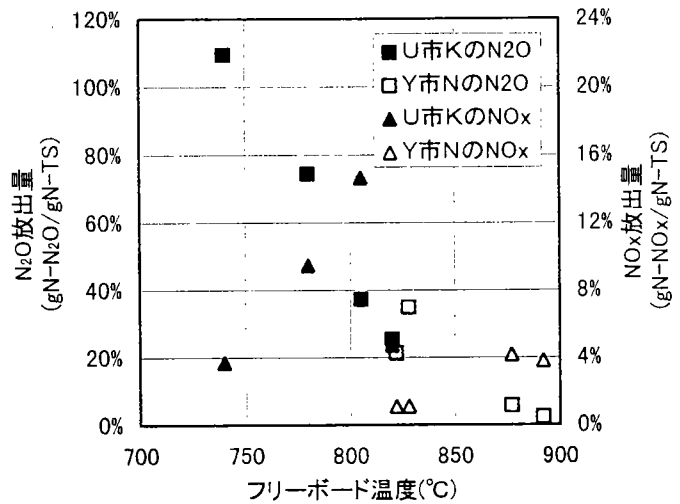


図2-1 燃焼温度と窒素転換率の関係

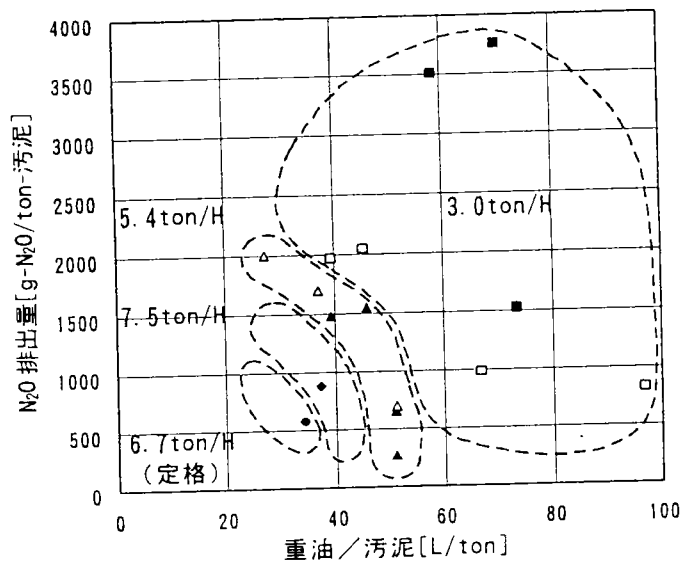


図2-2 重油/汚泥比と亜酸化窒素排出量の関係

表2-1 温暖化ガス排出量及び相対的温室効果

	投入汚泥量 (t/h)	使用重油量 (L/h)	燃焼温度 (°C)	温暖化ガス年間発生量(kt/年)		年間相対的温室効果 (CO2 1ktの効果=1)		
				N2O	CO2	N2O	CO2	計
定格運転	6.7	230	846	0.041	27.4	11.9	27.4	39.3
高温燃焼	6.7	260	870	0.011	28.2	3.2	28.2	31.4

注) 年間汚泥焼却量 = 70.070t として計算

(3) 焼却施設に対する影響調査

① 既設炉における高温燃焼の影響

設計値以上の高温燃焼は補助燃料の使用量を増大させることで可能となるが、炉の排出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2-3に標準的な下水道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、炉の排出ガス温度を確実に低下させるため冷却器等の増設が必要となるケースも生ずる。しかし、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。一方、炉内の耐火物については、補修頻度が増加する可能性はあるものの、大幅な耐久性の低下は生じないと推測された。

しかし、排ガス処理設備等の能力には制約があり、補助燃料の使用量の増大に伴って汚泥処理量が低下することが見込まれるため、その定量的把握が必要である。

② LCC分析を用いた実用炉の高温運転の評価

実用炉において設計値以上の高温燃焼を想定した場合の補修費を推計し、実績値に対する上昇率を年間均等価格換算で求めた結果を図2-4に示す。初期には本来低額で済む補修費に高温運転に起因する追加補修分が加算されるため上昇率は高いが、経過年数とともに低下し高温運転の影響は小さくなる。設計値以上の高温燃焼の導入を仮定した実用炉の初期投資と補修費の年価合計の推計例を図2-5に示す。償却率を定額法で算出した場合の年価合計は10年後には1.2~1.3倍上昇するが、極小点で示される焼却システム全体の経済的耐用年数の変化はほとんど見られなかった。

③ 高温燃焼に対応した新設炉の検討

フリーボード部設計燃焼温度を800℃か

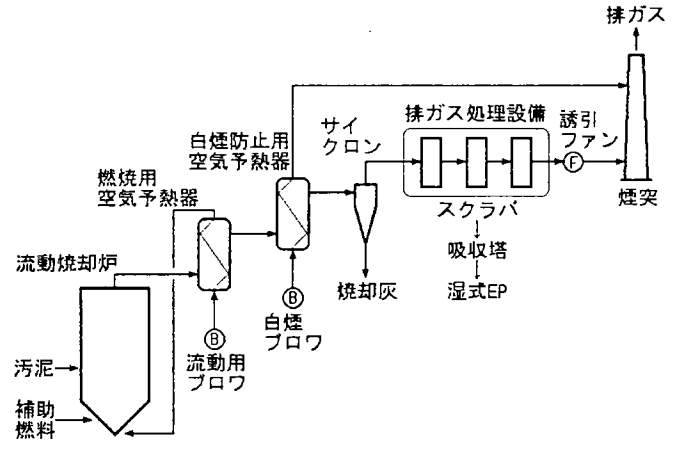


図2-3 標準的な流動焼却施設のシステム

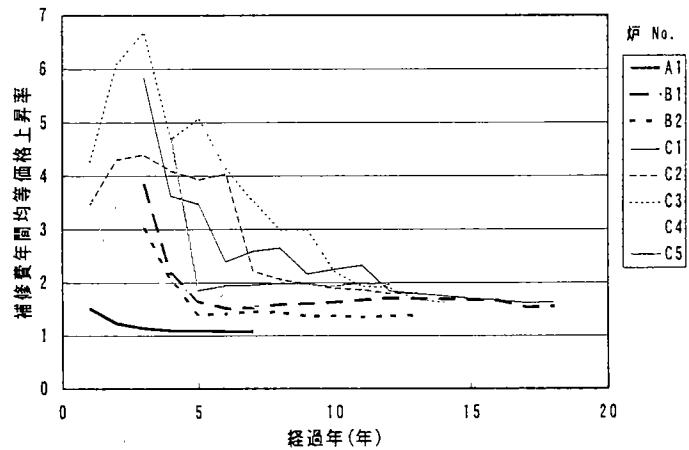


図2-4 高温運転に伴う補修費上昇率の経年変化

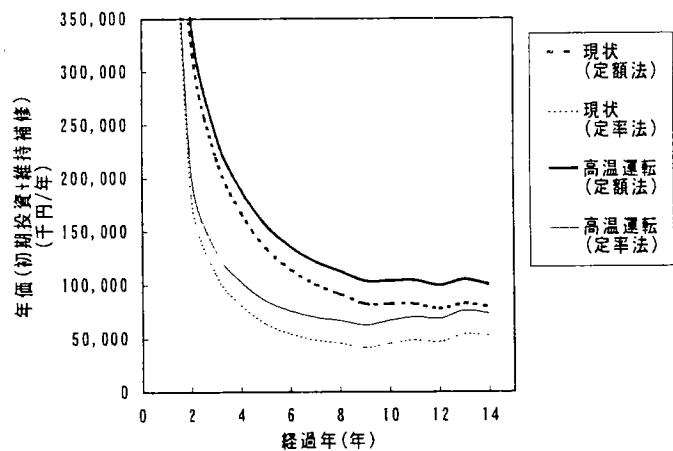


図2-5 高温運転を導入した場合のLCC年価例

ら850℃に上げて流動焼却炉を新設する場合、焼却システム全体の変更はとくに必要なく、処理能力100t/日の機械設備建設費の上昇率は1.6%程度であると見積もられた。

3.3 消化ガスの有効利用

消化ガスは、下水汚泥の嫌気性消化プロセスから発酵ガスとして発生し、その65～70%をメタンガスが占めるエネルギー価の高いバイオガスである。発生した消化ガスは、まず消化槽の加温のために用いられ、そこで余剰となった分が他の用途となる。この量的な関係は施設規模や立地条件によって異なり、規模の小さな施設では季節的に加温用ガスに過不足を生じるケースもある。また、比較的規模の大きな施設では余剰のガスが安定的に多量に発生することから他の処理プロセスの熱源やガス発電、都市ガス等への利用が図られている。平成7年度末時点においては全国の下水处理場775カ所の内、289カ所において嫌気性消化法を採用し、その約8割が処理人口規模が10万人以下の中小規模であり、1万人に満たない処理人口規模でも30カ所ほど稼働している。

本研究においては、消化ガスの完全利用を目指す立場から対象を主に中小規模の施設に置き、そこでの加温用ガスの不足の解消と、少ない余剰ガスの利用価値の向上を図る技術的な方策を見出すことを目的とする。

3.3.1 方法

消化ガスの完全利用を検討するためには、全国レベルにおける消化ガスの発生量を一般化し、加温用消化ガスの過不足を施設規模と地域的な立地条件から季節的な定量化を図る必要がある。このために、消化施設の運転実績データ¹⁰⁾や気象データ¹¹⁾、地中データ^{12)、13)}等に基づき、全国の消化施設の平均的、一般的な運転成績を求めるとともに消化槽の加温に係わる気温、地温、水温の年間変化の関連化を図り、これらの結果から消化施設の規模や立地条件から余剰消化ガスの季節的な発生率を求めるモデル化を行った。

消化ガスを高度に利用するためには安定的な量の確保と利用先への円滑な移送方法を確率する必要がある。これは既存の都市ガス等におけるガスの貯留と輸送の範疇であり、技術的にも運用上も現在の法体系に基づく規制や基準が適用されることから、関連する法規上の条件等^{15)～20)}を調査した。また、現在の消化ガスホルダーは消化槽の加温を主目的とする容量設計、施工がなされており、安定的な有効利用を図るためには更に高度な貯留方法を見出す必要があり、そのための技術を検索するとともに実用性について検討、評価した。

3.3.2 結果

(1)余剰ガス発生率のモデル化

消化ガスの過不足は、消化槽の運転法に基づくガス発生量と消化槽立地の気象条件により決定付けられる。

全国の消化槽の平均的な運転成績は表3-1の通りであった。そして、投入汚泥量とガスの発生量には図3-1の良好な比例関係が認められ、解析上は消化槽の運転法に関係なく、投入汚泥量に対するガス発生率は一定として差し支えないものであった。

表 3 - 1 加温式消化施設の全国集計値（し尿投入カ所は除く）

	消化日数 (日)	消化温度 (°C)	投入TS (w/w-%)	投入VS/TS (-)	CH ₄ 濃度 (v/v-%)
有効件数	164	166	166	166	27
平均値	35.8	41.2	2.7	0.782	61.4
最大値	55	190	5.4	0.866	83.6
最小値	24	6	0.6	0.563	51.3
標準偏差	4.7	24.2	0.01	0.050	7.1

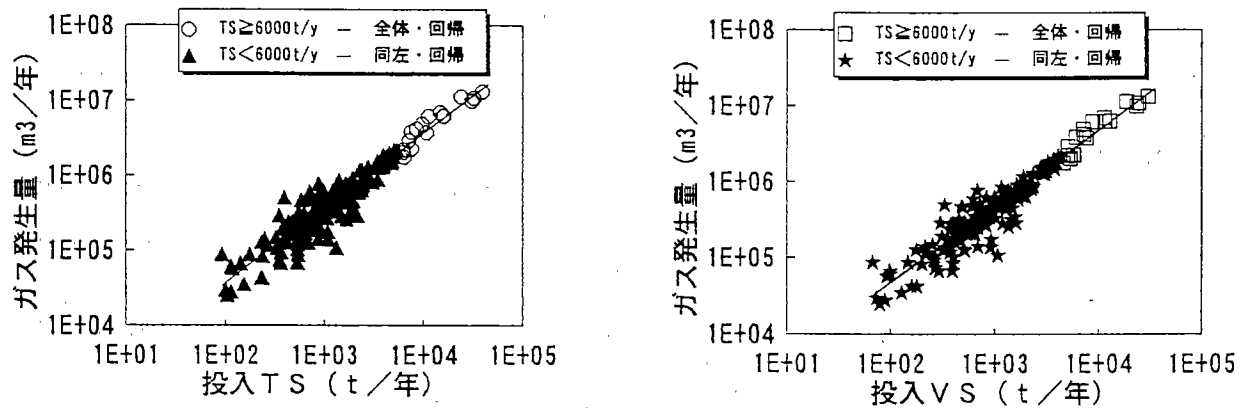


図 3 - 1 投入汚泥 (TS、VS) 量と消化ガス発生量の関係

一方、外気温度に関しては、図 3 - 2 の通り年間の平均値や変化幅は年間の最低値と良好な相関関係にあり、月別平年気温の年間変化は [1] 式の sin カーブで良好に近似できた。投入汚泥の温度はデータが無いために流入下水の温度を代用することとし、これも外気温度と関連付けることができた。これらの統計解析結果を表 3 - 2 にまとめた。表中の地中温度に関しては文献 13) も適用できる。

$$T = \frac{T_w}{2} \sin \left\{ (M-5) \frac{180}{6} \right\} + T_A \quad [1]$$

ここで、 T : 月別平年気温 (°C), T_w : 月別平年気温の年間変化幅 (°C), M : 任意の月, T_A : 月別平年気温の年間平均値 (°C)

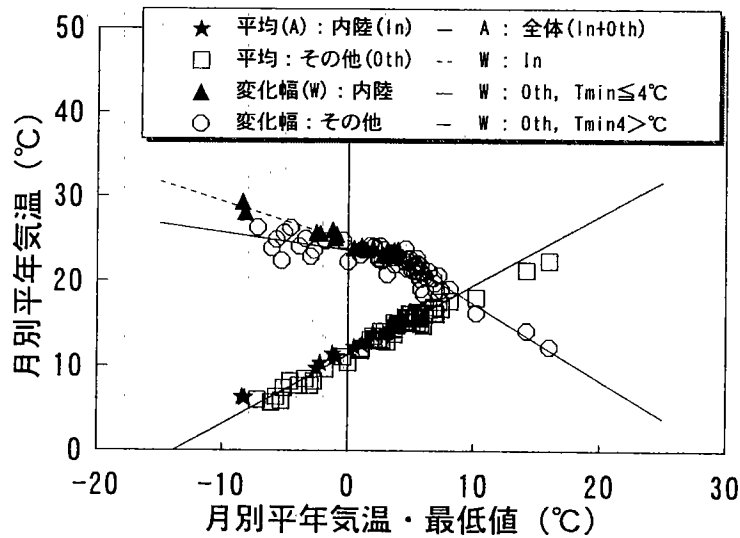


図3-2 気象データの解析結果

表3-2 統計回帰 ($Y=aX+b$) 分析結果

Y	X	a	b	Yの標準誤差	aの標準誤差	適用範囲
消化ガス発生量 (m ³ /Y)	投入TS量 (t/Y)	368	0	$400 \cdot 10^3$	5.12	全体
々	々	364	0	$169 \cdot 10^3$	7.18	投入TS量 < 6,000 t/Y
々	投入VS量 (t/Y)	479	0	$386 \cdot 10^3$	6.43	全体
々	々	466	0	$158.5 \cdot 10^3$	8.59	投入TS量 < 6,000 t/Y
月別平均気温平均値 (°C)	月別平均気温最低値 (°C)	0.819	11.4	0.569	0.0187	
月別平均気温変化幅 (°C)	々	-0.461	24.8	0.451	0.0298	内陸部, $X \leq 4^\circ\text{C}$
々	々	-0.210	23.6	1.013	0.0515	沿岸部, $X \leq 4^\circ\text{C}$
々	々	-0.900	26.3	0.868	0.0607	沿岸部, $X > 4^\circ\text{C}$
流入下水水温平均値 (°C)	月別平均気温平均値 (°C)	0.668	9.0	1.012	0.0550	
流入下水水温変化幅 (°C)	々	0.171	6.2	1.959	0.1065	
地中不易層温度 (°C)	々	0.80	3.7	-	-	文献 3) に基づく

図3-3は、開発モデルの出力結果の一例である。モデルでは、消化槽形状を円柱形とし、槽高さの2/3が地上部にあると仮定した。また、消化槽が触れる地中部温度の月別平均値には外気温度と不易層温度の相加平均値を当てた。熱効率に係わる係数や定数には、メタンガス熱量：8,550 kcal/m³、ボイラー効率：85%、消化槽壁の総括伝熱係数：1.1 kcal/m²/hr/°Cを用いた。開発したモデルは、主に熱移動に基づいていること

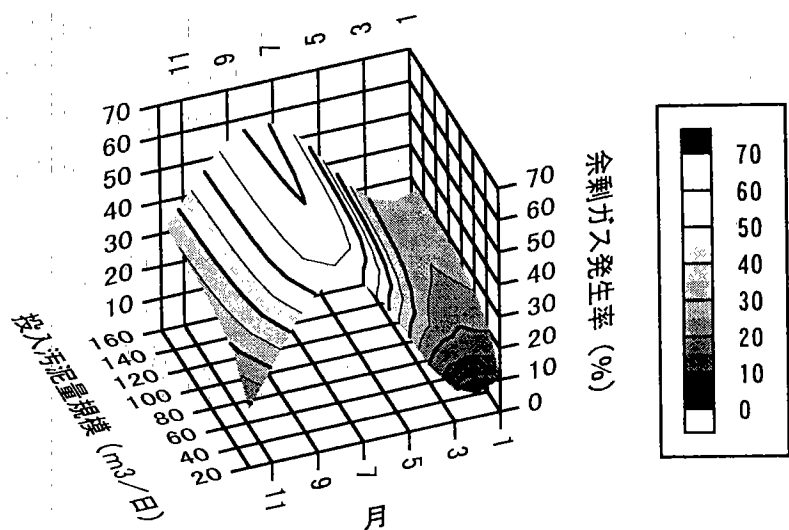


図3-3 開発モデルによる出力結果の一例

から、消化槽の熱効率を高めるための槽形状や地上部／地下部の比、槽壁材質等に係わる設計の最適化にも適用できる。

(2)ガス貯留、輸送に係わる法規上の条件

ガスの貯留や輸送を行う場合には各種の法規が適用されるが、その基本はガス事業法と消防法、高圧ガス取締法、労働安全衛生法の4法に基づくものである。関係する設備については、ガス事業法の中で「ガス工作物の技術上の基準を定める省令」により技術上の詳細が指定されている。また、タンクローリー輸送する場合には上記の法以外に道路運送車両法や車両制限法、道路交通法、貨物自動車運送事業法等も適用される。

(3)消化ガス貯留技術の検討、評価

ガス事業法では、ガス設備の種類が大気圧との差圧に基づくガス圧力により低圧：1 kgf/cm²未満、中圧：1 kgf/cm²以上10kgf/cm²未満、高圧：10 kgf/cm²以上と大きく分類されている。現在、消化ガスの貯留方法は低圧の有水式や無水式のガスホルダーが主流をなし、僅かではあるが規模の大きな消化施設で中圧の球形ホルダーを適用している事例もある。

ここでは、余剰ガス発生量の少ない中小規模施設における効果的な貯留方法を見出す観点から、消化ガスへの適用事例のない高圧貯留法、メタノール化法、液化法、吸着貯留法について技術上の適用性を検討した結果、吸着貯留法の有効性が示唆された。吸着貯留技術は、活性炭やゼオライト等の吸着材を用いた吸着除去技術を貯蔵、貯留に適用したもの(例えば21)、22)、23)であり、化学処理プロセスでは生成水素ガスや天然ガスの精製技術として既に確立されているものである。

吸着貯留法では、その性能が含まれるCO₂ガスやH₂Sガス、水分等の影響を受けることから、必要に応じた純度のCH₄ガスまで精製する必要がある。図3-4は、既往の報告²²⁾に基づき、吸着担体に活性炭(空隙率：40%、充填密度：0.4 g/cm³)を適用した場合のCH₄純ガスの貯留能力を試算した結果であり、メタンガスの吸着貯留法の優位性を示している。図3-5は、発生した消化ガスを空容器に貯留した場合と、消化ガスを精製し、C

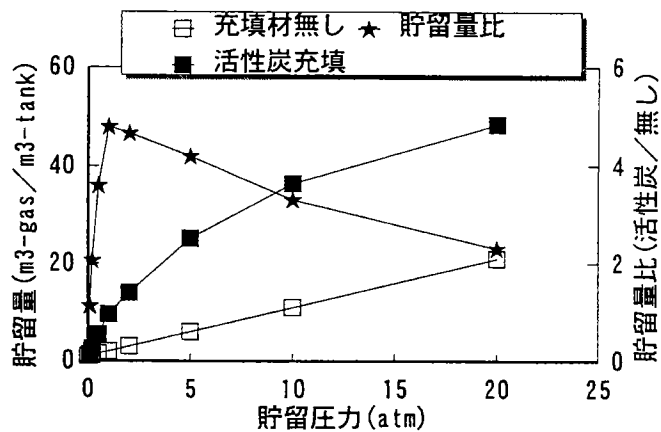


図3-4 メタンガスの貯留能力の比較

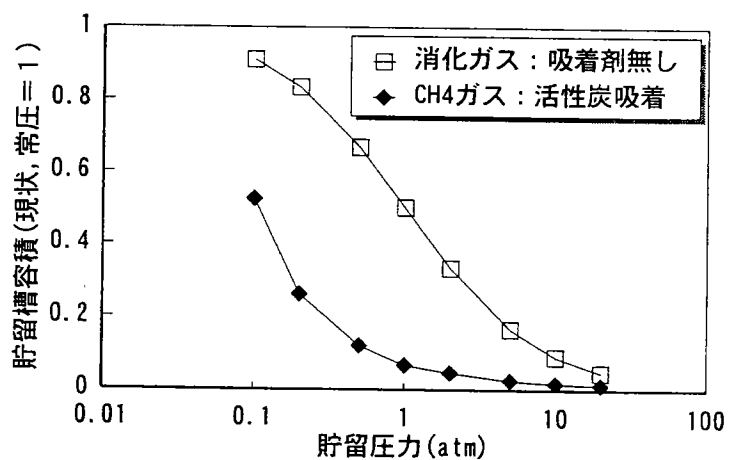


図3-5 吸着貯留法による必要貯留容積の比較

H₄純ガスで活性炭吸着貯留した場合に必要なガスホルダー容量を現状の常圧貯留法 (= 1) と相対比較した結果である。消化ガスの加圧貯留を法的な規制, 基準からみた場合, 10kgf/cm²未満の中圧貯留が技術的にも運用的にも実現性が高い。この中圧貯留の範囲で吸着貯留法を適用するとするならば, 従来の6.8~1.3%のガスホルダー容積で対応可能となることを示している。これは, 従来ホルダーの貯留量: 12 hr相当分容積にて7~38日間相当の貯留が可能となることであり, 利用上の量的な安定性が高まるとともに, 質的にも高純度のCH₄ガスの利用が可能となり, エネルギー効率の向上と合わせて用途の拡大が図れる可能性が高い方法と言える。

消化ガスの吸着貯留では含まれるCO₂ガスやH₂Sガス, 水分等の影響を受け, その度合いは適用する担体の種類や性状により異なるものと思われる。このために貯留に際しては実用的なCH₄ガス純度まで消化ガスを精製する必要がある。また, 貯留圧力と吸着貯留量の関係は, 傾向としては適用する吸着担体の種類やその性状に左右されず類似の現象を示すものの, 量的には大きく異なる可能性が高い。従って, 実用化に際しては消化ガスの精製も含め, 担体の種類や性状と吸着貯留能力, 入手性, 再生性, 経済性等の関係を明らかとし, 貯留, 利用目的に応じた性状, 品質の担体を選定する必要がある。

[参考文献]

- 1) 竹石和夫、鈴木穰、松原誠:「下水処理場からの放出量の解明に関する研究」、地球環境研究総合推進費平成6年度終了研究成果報告集、環境庁企画調整局地球環境部、平成7年9月
- 2) 竹石和夫、落修一:「汚泥からのメタンガス回収・有効利用に関する研究」、地球環境研究総合推進費平成6年度終了研究成果報告集、環境庁企画調整局地球環境部、平成7年9月
- 3) 建設省都市局下水道部:平成9年日本の下水道、(社)日本下水道協会、平成9年
- 4) 建設省土木研究所:「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4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3215号、pp. 105-118、平成5年
- 5) 建設省土木研究所:「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書集、土木研究所資料第3374号、pp. 115-121、平成7年
- 6) 糸川浩紀、花木啓祐、松尾友矩:「高負荷間欠曝気式硝化・脱窒法における有機物制限条件下でのN₂O生成機構」
- 7) (財)下水道新技術推進機構:「下水道の長期的技術開発に関する基礎調査」、1996年度下水道新技術研究所年報、1/2巻、pp. 45-52、1997年
- 8) 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年
- 9) 尾崎ら、「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年
- 10) 「下水道統計—行政編—平成5年度版」、(社)日本下水道協会、第50号の1
- 11) 「理科年表—国立天文台編」、丸善(株)、第66冊、pp. 気8-9 (198-199)、1993年
- 12) 村下敏夫著:「改著—地下水学要論」、(株)昭晃堂、pp. 162-164
- 13) 湯原浩三、瀬野錦蔵共著:「温泉学」、地人書館、pp. 93-95

- 14) 「ガス事業便覧－平成7年度版」, (社)日本ガス協会
- 15) 「都市ガス工業概要－Ⅰ, Ⅱ」, (社)日本ガス協会, 平成4年6月, 平成6年1月
- 16) 「ガス工作物技術基準の解説－第5次改訂版」, (株)ぎょうせい
- 17) 「供給管, 内管指針－中圧編」, (社)日本ガス協会, 平成2年6月
- 18) 「機械設備技術資料－Ⅰ, Ⅱ編」, (社)日本ガス協会, 平成7年4月
- 19) 「高圧ガス保安技術」, 高圧ガス保安協会, 平成7年4月
- 20) 「ガス事業法令集－平成8年度版」, (社)日本ガス協会
- 21) 尾谷賢, 本田重司, 荒木邦夫, 山口正巳, 石原誼: 「道産ゼオライトによる坑内ガスのメタン濃縮(第2報, 第3報)」, 北海道立工業試験場報告, pp.203-217, 1982年
- 22) 宮田知幸: 「メタンの吸着, 吸収と水和物」, RETROTECH, pp.46-49, Vol.12, No.7, 1989年
- 23) J. Alcaniz-Monge, M. A. dela Casa-Lillo, D. Cazorla-Amoros and A. Linares-Solano, [METHANE STORAGE INACTIVATED CARBON FIBRES], Carbon, Vol.35, No.2, pp.291-297, 1997年