

5. 下水道における一酸化二窒素発生抑制型処理方法に関する検討

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 道中 敦子

1. はじめに

生物反応を利用した下水処理プロセスでは、二酸化炭素 (CO_2) のほかに、メタン (CH_4)、一酸化二窒素 (N_2O) が発生することが特徴である。この中でも N_2O は、 CO_2 の約 300 倍の温室効果を有し、下水道事業全体の地球温暖化ガス排出量において水処理から排出される N_2O の占める割合は無視できない¹⁾。このことから、地球温暖化防止対策の一環として排出量の削減が取り組まれている。そのため、本研究では、水処理プロセスにおける N_2O 排出量について実態調査および抑制型処理方法について取り組んでいる。

下水汚泥には有機物が多く含まれていることから、有効活用が推進されている²⁾。汚泥処理の1つである嫌気性消化は、余剰汚泥中の有機物 40~60%をエネルギーとして回収することが可能であることから、地球温暖化防止へ貢献できる反面、消化槽で汚泥の可溶化が進むことにより、窒素、りん濃度が高い脱水分離液が発生する。このような脱水脱離液を含む返流水は、直接放流できないため、個別返流水処理もしくは水処理プロセスに戻すなどにより生物学的に処理されている。そのため、返流水に含まれる高濃度の窒素が N_2O 排出量に影響を与える可能性が考えられる。しかしながら、その実態は把握されていない。そこで、今年度は、汚泥処理から発生する返流水の窒素負荷が、水処理プロセスで排出される N_2O 量に与える影響を評価することを目的に調査を行った。

2. 汚泥処理から発生する返流水の処理方法に関する実態調査

本調査では、嫌気性消化を導入している下水処理場における返流水処理の状況等を把握することを目的として国内下水処理場を対象に、アンケート調査を実施した。

(1) アンケート調査方法

嫌気性消化を導入している国内の下水処理場を対象とする。嫌気性消化施設が稼働していない場合は、返流水処理の影響による窒素負荷が小さいと考えられるため、今回の調査の対象外とした。下水道統計³⁾より休止中等を除く 289 施設を対象にアンケートを実施したところ、そのうち 12 施設は休止もしくは廃止あるいは好気性消化を導入しているとの回答だったため調査対象として除外した。アンケート調査対象施設 (277 施設) のうち、回答があった 207 施設 (回答率は 75%) について調査結果をまとめた。

(2) アンケート調査結果

アンケート調査の結果、嫌気性消化を導入している施設は水処理と汚泥処理を有しており、汚泥を集約処理している施設は約 10%、汚泥集約処理のみの施設は 1%だった。また、回答が得られた処理場のうち、個別に返流水処理を行っている施設を有しているのは 5%と少なかった。個別に返流水処理を行っている施設のうち、活性汚泥法により処理 (生物処理) を行っているのは 3%であり、その他はアンモニアストリッピングや凝集沈殿などの物理化学的処理を行っていた (図 1)。ほとんどの処理施設 (95%) では、処理場において発生した返流水は個別に処理せず、水処理系に返流しているとの回答が得られた。

そこで、水処理系に返流水を返送し処理していると回答があった施設について水処理系の処理方式を調べた結果、標準活性汚泥法（標準法）が 81.1%、嫌気好気活性汚泥法が 2.6%、窒素除去法（ステップ流入式多段硝化脱窒法、嫌気無酸素好気法、循環式硝化脱窒法を含む）が 12.8%、その他（回転生物接触法、オキシデーションディッチ法等）が 3.6%であり、ほとんどの処理施設が標準法を採用していた。また、アンケート項目の「返流箇所」について回答があったのは 61 施設であり、最初沈殿池が 52%、沈砂池が 33%、ポンプ井が 15%だった。

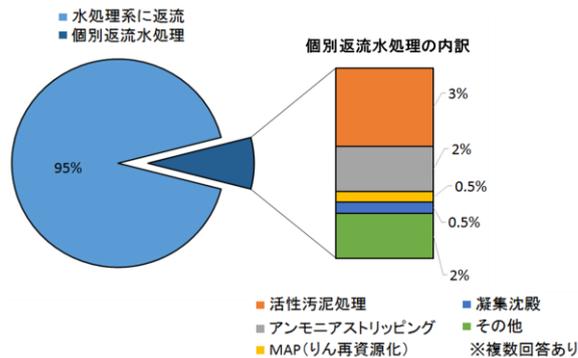


図 1 返流水処理方法

3. 嫌気性消化導入による温室効果ガス排出量の試算

嫌気性消化導入が温室効果ガス排出量に与える影響を調べるため、嫌気性消化を導入していないケース（ケース 1）、嫌気性消化を導入しているケース（ケース 2）について物質収支に基づき排出される N₂O 量を試算し比較を行った。また、物質収支を計算することで、嫌気性消化の導入に伴い発生する返流水による窒素流入負荷が、水処理プロセスから排出される N₂O 量にどのくらい影響するか試算した。

(1) モデルケースの設定

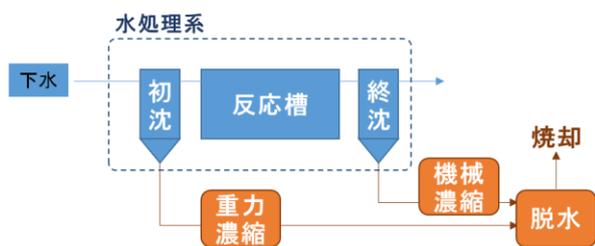
物質収支を計算するにあたり、アンケート調査および下水道統計³⁾よりモデルケースを設定した。ここでは、導入数の大半を占めている水処理系に返流しているケースについてモデルケースを設定した。また、物質収支を計算するにあたり、今回のモデルケースではアンケート調査の結果をもとに、総合返流水を最初沈殿池の前段に送水することとした。

汚泥処理にかかる設定条件については、設計指針⁴⁾および下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン⁵⁾に基づき設定した。今回のケースでは、最終的に発生した汚泥の処理について、下水道統計³⁾より最も導入施設が多かった高分子凝集剤を併用している流動炉「高分子流動炉（高温）」を汚泥処分方法として採用し、N₂O 排出量を試算することとした（表 1）。設定したモデルケースのフロー図を（図 2）に示す。

表 1 汚泥処分方法

区分	処理方式	N ₂ O排出係数 kg-N ₂ O/m ³ -t	施設割合	備考
焼却	下水汚泥	1.11	該当なし	
焼却	高分子流動炉（通常）	1.51	35%	845℃未満
焼却	高分子流動炉（高温）	0.645	53%	845℃以上
焼却	高分子多段炉	0.882	2%	
焼却	石灰系	0.294	該当なし	
焼却	ストーカ炉	0.263	5%	多段吹込燃焼式流動焼却炉 二段燃焼式循環流動焼却炉
焼却	過給式流動炉	0.214	該当なし	
焼却	そのた下水汚泥	0.882	2%	
ガス化炉	ガス化炉	0.0403	該当なし	
固形燃料化	汚泥炭化	0.0312	2%	
固形燃料化	汚泥乾燥（油温乾燥）	0.0184	該当なし	
固形燃料化	汚泥乾燥（混合焼却）	0.0095	該当なし	

ケース1：嫌気性消化なし



ケース2：嫌気性消化あり

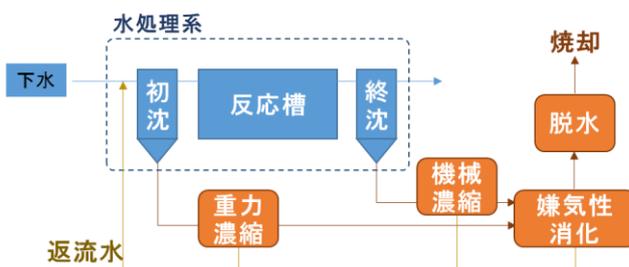


図 2 モデルケースフロー図

嫌気性消化を導入している処理場は 1 万～5 万 m³/日の施設が多かったため施設規模の設定条件は 5 万 m³/日（計画処理水量）とし、日処理水量はその 8 割とした（処理水量：4 万 m³/日）。流入下水の水質（濃度）および反応槽の除去率は、下水道統計³⁾より該当施設の平均値とした。ケース 2 については、採用数が多かった標準法と窒素除去法について試算することとした。水処理施設における N₂O 排出量は、物質収支より計算された損失窒素量に N₂O 転換率⁶⁾を乗ずることにより試算した。今回用いた転換率は、窒素損失分あたりの系外に排出されたガス態および溶存態 N₂O 量の総和から計算した値（N 質量比）であるが、物質収支では反応槽で転換された N₂O はすべてガス態として発生するという仮定にて計算している。

モデルケースの条件設定について表 2 に整理する。

表 2 試算時設定値

流入水 ^{a)}		汚泥回収率・含水率 ^{b,c)}					
水量	40,000 m ³ /日	汚泥含水率	生汚泥含水率		97 %	余剰汚泥含水率	99.3 %
SS	180 mg/L	濃縮・脱水機		回収率	含水率	棄注率	備考
BOD	200 mg/L	濃縮	機械濃縮装置	90 %	96 %	-	遠心濃縮機
T-N	40 mg/L		重力濃縮装置	85 %	97 %	-	
最初沈殿池の除去率 ^{b)}		脱水	混合汚泥	95 %	78 %	1.2 %/TS	遠心脱水機
SS	50 %		消化汚泥	95 %	81 %	1.5 %/TS	遠心脱水機
BOD	40 %	嫌気性消化 ^{c)}					
T-N	15 %	汚泥有機物濃度			80 %	発電効率	32 %
生物反応槽の除去率 ^{a)}		消化ガス中のメタン割合			60 %	発熱効率	35.8 MJ/Nm ³
SS	90 %	汚泥有機物量当たりのガス発生量			0.55 m ³ /kg	VS分解率	50 %
BOD	95 %	N ₂ O転換率					
T-N	標準法 48 %	水処理	標準法	0.88 % w/w (N)	汚泥処理	高分子流動炉(高温) ^{c)}	
	窒素除去法 70 %		窒素除去法	0.092 % w/w (N)		0.645 kg-N ₂ O/wet-t	

a) H24下水道統計より

b) 設計指針・標準仕様(JS,H24)より

c) 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン(改訂版)より

(2) 温室効果ガス排出量試算結果

図 2 のとおり、嫌気性消化を導入していないケース（ケース 1）、嫌気性消化を導入しているケース（ケース 2）について設定し、ケース 1 では、国内で導入数の最も多い標準法を、ケース 2 では水処理系として標準法を採用しているケース（ケース 2-1）、窒素除去法を採用しているケース（ケース 2-2）について、各ケースそれぞれ物質収支フローを作成した。一例として、ケース 1（嫌気性消化設備はなく水処理系が標準法のモデルケース）、ケース 2-1（嫌気性消化設備があり水処理系が標準法のモデルケース）について物質収支のフローをそれぞれ図 3、図 4 に示す。ケース 2-2 についても同様に行っている。

物質収支に基づき算出された N₂O 排出量及び汚泥発生量を用いて温室効果ガス排出量を試算した。物質収支の結果より得られた汚泥発生量をもとに、下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン⁵⁾に基づき、汚泥処理エネルギー使用量および汚泥処理における温室効果ガス排出量を試算した。また、水処理にかかる消費電力量として、標準活性汚泥法は 7,365 kWh/日、窒素除去法は循環法、A2O 法、多段法（2 段階ステップ）の平均値である 14,272 kWh/日を用いた⁷⁾。試算結果を表 3 に示す。

同じ標準法を水処理系に持つケース 1 とケース 2-1 について比較すると、嫌気性消化を導入することにより、水処理から排出される温室効果ガス排出量のうち、排出されるガス態 N₂O 由来の排出量が約 10%増加した。これは、返流水から持ち込まれる窒素により、反応槽へ流入する窒素量が約 10%増加していることが起因している。一方、汚泥処理における温室効果ガス排出量は削減されており、結果的に全体として、嫌気性消化を導入したケース 2-1 の方が約 35%削減（CO₂ 換算）されることが示された。また、嫌気性消化を導入したケースのうち、水処理系が異なるケース 2-1（標準法）とケース 2-2（窒素除去法）を比較すると、水処理方

Mass balance ①

Main stream: Conventional Activated Sludge
Sludge treatment without Anaerobic digestion

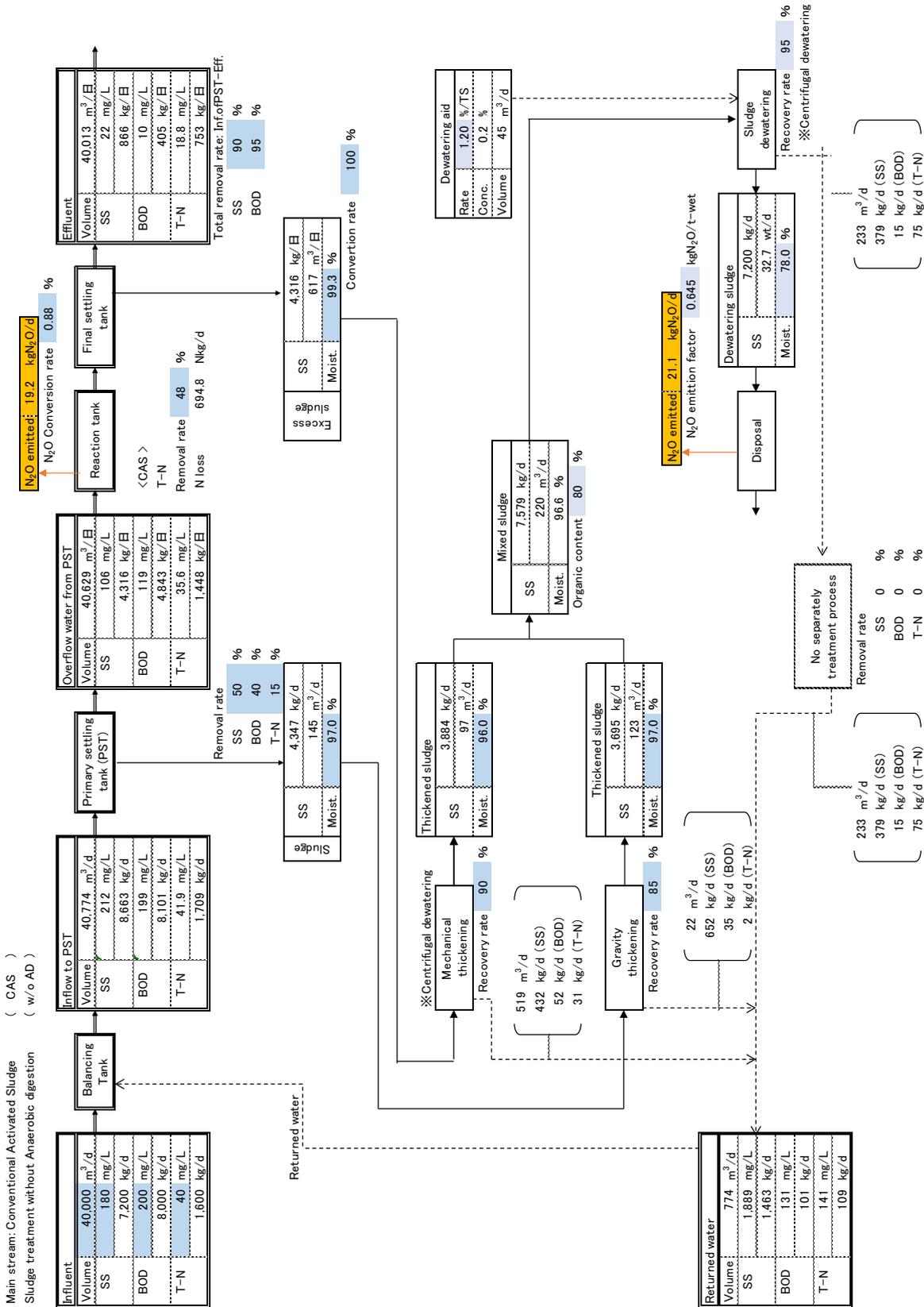


図3 物質収支【ケース1】（水処理系：標準法、嫌気性消化なし）

Mass balance ②-1

Main stream: Conventional Activated Sludge
 Sludge treatment: with Anaerobic digestion

(CAS)
 (w AD)

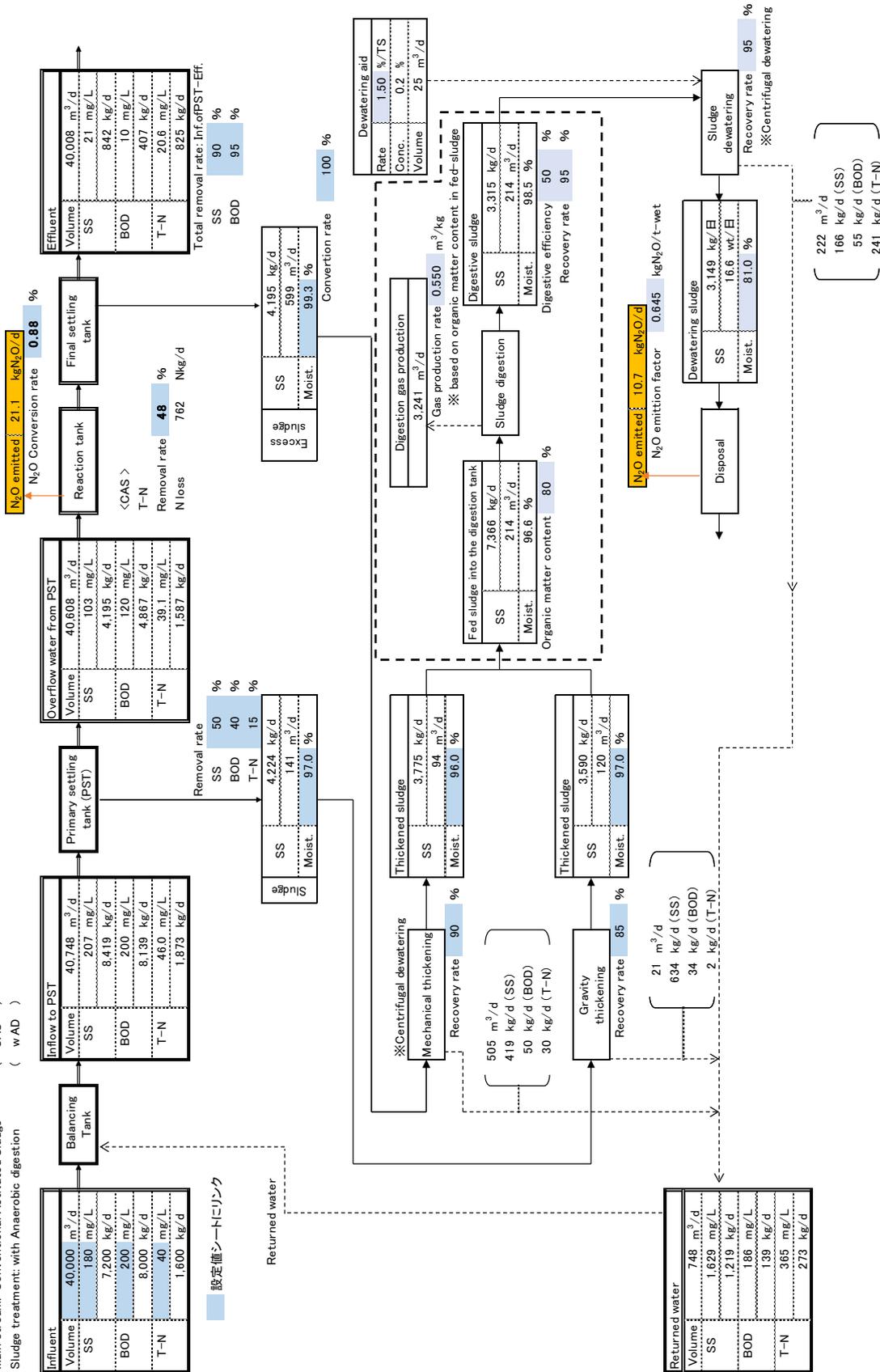


図 4 物質収支【ケース 2-1】(水処理系：標準法、嫌気性消化有)

式を窒素除去法に変更することにより（ケース 2-2）、水処理にかかる消費電力が増加し、それに伴う消費エネルギー由来の CO₂ は増加する。しかしながら、排出されるガス態 N₂O 由来の排出量が大幅に少なくなることから、結果的に、水処理から排出される温室効果ガスの総和は、ケース 2-1 が 4,780 t-CO₂/年、ケース 2-2 が 4,298 t-CO₂/年となり、ケース 2-2 の方が低い結果となった。このことから、嫌気性消化および高度処理（窒素除去法）による水処理方式の導入により、温室効果ガスが削減される試算結果となった。

以上のことから、返流水の窒素負荷の影響による水処理施設から排出される N₂O 量の増加を加味しても、嫌気性消化や窒素除去法の導入により、温室効果ガスが削減されることが示された。

4. まとめ

汚泥処理から発生する返流水の窒素負荷が排出される N₂O 量に与える影響を調べたところ、汚泥の嫌気性消化を実施している処理場の場合、返流水から持ち込まれる窒素により、反応槽へ流入する窒素量が増加することにより、水処理系で約 10%N₂O 排出量が増加することが示されたが、汚泥処理における温室効果ガス排出量は削減され、結果的に全体として、嫌気性消化を導入したほうが約 35%削減（CO₂ 換算）されることが示された。このことから、返流水の窒素負荷の影響による水処理施設から排出される N₂O 量の増加を加味しても、嫌気性消化の導入により、温室効果ガスが削減されることが期待される。今後は、将来的にも増加が見込まれる汚泥集約処理について今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き、平成 21 年 3 月
- 2) 国土交通省：資源のみちの実現に向けて報告書（平成 19 年 3 月）
- 3) （公社）日本下水道協会：下水道統計（平成 24 年度版）
- 4) （一財）下水道事業支援センター：機械設備標準仕様書 日本下水道事業団編集（平成 24 年度版）
- 5) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—改訂版—（平成 27 年 3 月）
- 6) 国土技術政策総合研究所：平成 24 年度下水道関係調査研究年次報告書 p.45-52
- 7) 国土技術政策総合研究所：平成 25 年度下水道関係調査研究年次報告書 p.45-56

表 3 温室効果ガス排出量の試算結果

条件	ケース1	ケース2-1	ケース2-2
処理方式	標準法	標準法	窒素除去法
水処理系	嫌気性消化なし	嫌気性消化あり	嫌気性消化あり
汚泥処理	脱水高温焼却	バイオガス発電	バイオガス発電
●物質収支			
N ₂ O排出量 (kgN ₂ O/日)	40.3	31.8	13.9
水処理	19.2	21.1	3.2
汚泥焼却	21.1	10.7	10.7
汚泥発生量	単位		
脱水汚泥発生量	wet-t/日	32.7	16.6
バイオガス発生量	Nm ³ /日	0.0	3240.9
発生濃縮汚泥量	m ³ /日	220	214
●エネルギー使用量			
水処理消費電力量(千kwh/年)	2,688	2,688	5,209
水処理	2,688	2,688	5,209
汚泥処理消費電力量(千kwh/年)	1,168.3	1,152.7	1,152.7
消化槽		414.1	414.1
高温焼却	1,099.0	556.5	556.5
ガス精製設備		61.1	61.1
脱水機	69.3	121.0	121.0
燃料(A重油)(kL/年)	298.6	151.2	151.2
高温焼却	298.6	151.2	151.2
排ガス(kgN ₂ O/年)	7,704.8	3,901.7	3,901.7
高温焼却	7,704.8	3,901.7	3,901.7
再生エネルギー量 (千kwh/年)		2,258.6	2,258.6
バイオガス発電		2,258.6	2,258.6
●温室効果ガス排出量 (t-CO ₂ /年)			
水処理 (t-CO ₂ /年)			
消費エネルギー量由来	係数	標準法	標準法
電気	0.579 (kgCO ₂ /kwh)	1,556.5	1,556.5
排出ガス態N ₂ O由来	係数		高度処理(N)
N ₂ O	298 (kgCO ₂ /kgN ₂ O)	2,090.2	2,291.5
349.4			
汚泥処理 (t-CO ₂ /年)			
消費エネルギー量由来	係数		
電気	0.579 (kgCO ₂ /kwh)	676.4	667.4
A重油	2.71 (kgCO ₂ /L)	809.3	409.8
焼却排ガス由来	係数		
排ガスN ₂ O	298 (kgCO ₂ /kgN ₂ O)	2,296.0	1,162.7
1,162.7			
再生エネルギー量由来(削減分)	係数		
バイオガス発電(kgCO ₂ /kwh)	0.579 (kgCO ₂ /kwh)	0.0	-1,307.7
-1,307.7			
合計 GHG (t-CO ₂ /年)		7,428.5	4,780.2
4,297.7			