

〈論文〉

下水処理場の環境負荷削減に関する総合評価

福嶋 俊 貴¹⁾, 宗 宮 功²⁾

¹⁾メタウォーター(株) R&D センター R&D 企画部

(〒105-6029 東京都港区虎ノ門4丁目3番1号 城山トラストタワー E-mail: fukushima-toshiki@metawater.co.jp)

²⁾京都大学名誉教授・龍谷大学名誉教授

概 要

水処理と汚泥処理を連携し下水処理場プロセス全体を対象とし処理水質と使用エネルギーを総合的に評価する下水処理場機能評価システムを開発している。下水処理場からの温室効果ガス(電力・燃料・N₂O・CH₄)排出量を各種高度処理方式や汚泥処理工程(脱水・消化・焼却)について計算し、下水処理場の機能を除去環境負荷(有機物・窒素・リン)と温室効果ガス排出量とから下水処理場環境効率という指標で評価した。処理量48,000 m³/日のモデル処理場を対象として、各種高度処理方式について環境効率で評価したところリン除去を対象とした高度処理方式が高いことが判った。

キーワード：下水処理場, 機能評価, 水質, 温室効果ガス排出量

原稿受付 2010.8.5

EICA: 15(2・3) 89-97

1. は じ め に

2020年までに温室効果ガス(GreenHouse Gas; 以下はGHGと略記)の1990年比25%削減を目標とする『地球温暖化対策基本法案』が平成22年3月に閣議決定され、地球温暖化対策は喫緊の課題となっている。わが国全体のGHG排出量の約0.5%(2004年度)を占める¹⁾といわれる下水道分野もその例外ではない。

下水道からのGHG排出量は普及率の上昇とともに増加しているが、その増加率は処理水量の増加を上回っている。下水道からのGHG排出量の内訳(2004年度)をFig.1に示すが、処理場の電力消費CO₂が最も多く約50%を占めており、ついで下水道特有の排出である汚泥焼却N₂Oが約24%を占めている。

(しかも汚泥焼却N₂Oの1990年からの伸びは、GHG全体よりも2倍程度大きい。)

平成21年3月にまとめられた「下水道における地球温暖化防止対策推進計画策定の手引き」²⁾(以下は手引き)では計画策定の目的として『下水道事業は多くのエネルギーを使用し、水処理及び汚泥処理、最終処分(有効利用)の過程から多くの温室効果ガスを排出しており、下水道からのGHG排出量を抑制することにより、地域のGHGの実質的な抑制に寄与できる。』とされている。ただし、高度処理の実施や合流改善対策による公共用水域の水質保全や浸水対策、普及の促進といった下水道の本質的な役割のうえに成り立つと指摘されている。手引きには2006年度の排出割合が計算されており、2004年度集計には無かった汚泥埋立CH₄も考慮した数値として、電力消費CO₂約48%、汚泥焼却N₂O約19%となっており、次いで汚泥埋立CH₄の約17%の順となっている。

下水道からのGHG排出量削減の評価に関する研究としては下水道統計データを利用したGHG排出量の詳細把握に関する研究^{3,4)}やシミュレーションを活用した各種処理方式の評価に関する研究^{5,6)}がある。しかし、GHG排出量を下水処理場の機能である窒素やリン除去といった環境負荷削減と組み合わせて総合評価した研究は無かった。そこで、エコプロダクツの分野で活用されている環境効率を参考に、下水処理場のサービスとして水質浄化による環境負荷除去量を取り上げ、式(1)で算出する下水処理場環境効率を考案した。

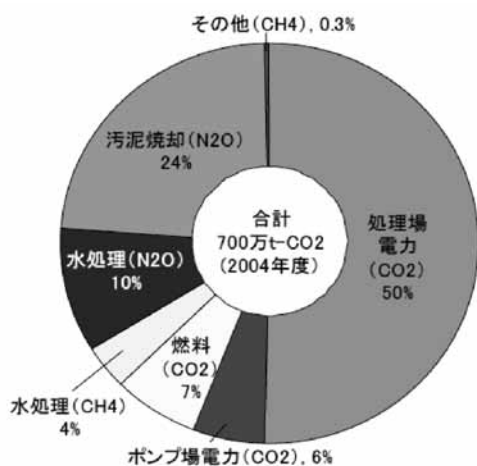


Fig.1 GHG emission from Sewage Works¹⁾

下水処理場環境効率＝
除去環境負荷量 (kg)/GHG 排出量 (kg) (1)

水処理方式の高度処理化や汚泥処理工程における処分汚泥量削減のための消化・焼却の導入について、下水処理場環境効率により比較したので報告する。

2. 下水処理場機能評価システムのモデル

下水処理場機能評価システム (PES: Performance Evaluation System) で採用している水処理・汚泥処理のモデルを Table 1 に、具体的なパラメーター一覧を Table 2 にまとめた⁷⁻⁹⁾。PES は処理場全体の物質の流れを把握することに重点をおき、水処理における微生物反応は一次反応式で表現し、溶解性 BOD と固形性 BOD で分解速度に違いを持たせている。窒素に関しては硝化率・脱窒率で設定し、今回はほぼ完全硝化・脱窒としている。リンに関しては生物脱リンとして、MLSS 中のリン含有率で設定している。汚泥処理における固

液分離は固形物回収率で機器回収分を計算し、残りを脱離液流出分としている (BOD・窒素・リンも同様に計算)。嫌気性消化は投入汚泥中 VSS のガス化率で設定し、遠心濃縮機と遠心脱水機の出口汚泥濃度はサンプルデータを使って回帰モデルを作成し、適用した。焼却炉に関しては投入汚泥中の可燃分が減少するものとし、燃料使用量は含水率を入力とし、燃料使用量を出力する回帰モデルを作成し、適用した。

PES の機能拡張として、前述の手引き²⁾に準拠して GHG 排出量を計算する機能を追加した。Table 3 に示すように主要排出源として電力・燃料といったエネルギー由来の CO₂、水処理工程からの CH₄・N₂O、汚泥焼却からの N₂O、汚泥埋立からの CH₄ を対象として計算した (高度処理法の検討には凝集剤も対象とし、汚泥処理工程の検討には機械濃縮や脱水の高分子凝集剤も薬品使用 CO₂ として計算した。)。なお、下水処理からの N₂O については処理法によって排出係数が異なるとの指摘や排出係数が実際よりも過大評価である可能性も指摘されている¹⁰⁾がここでは他の項目

Table1 The Model Equation of Water Treatment and Sludge Treatment

No	設備	モデル化	計算式	数値	文献
1	最初沈殿池	一次反応で表現	固形物除去率=1-exp(-k*t) t; 滞留時間(hr)	k=0.28(1/hr)	7)
2	反応タンク				
	①BOD	一次反応で表現	溶解性BOD除去率=1-exp(-k*MLSS*t) t; 滞留時間(hr)	k=0.00035(1/hr*mg/L)	7)
			固形性BOD除去率=1-exp(-k*MLSS*t) t; 滞留時間(hr)	k=0.00015(1/hr*mg/L)	7)
	②SS	自己分解	SS分解率=1-exp(-k*t) t; 滞留時間(hr)	k=0.001(1/hr)	7)
		MLSS計算	流入水+返送汚泥+増殖量(除去BOD*収率)-自己分解		7)
	③窒素	硝化率で表現	NO3-N=NH4-N*硝化率	硝化率;99.9%	8)
		脱窒率で表現	N2ガス=NO3-N*脱窒率	脱窒率;97%	8)
	④リン	リン含有率で表現	汚泥中リン=MLSS*含有率	含有率;5%(リン除去時)	8)
3	最終沈殿池	一次反応で表現	固形物除去率=1-exp(-k*t) t; 滞留時間(hr)	k=2.75(1/hr)	7)
4	重力濃縮槽	濃縮汚泥濃度		濃度;3%	7)
5	遠心濃縮機	濃縮汚泥濃度	濃度(%)=α*余剰汚泥濃度+β*凝集剤注入率	α・βは定数(回帰式より設定)	
6	遠心脱水機	脱水ケーキ含水率	含水率(%)=100-(α*濃縮汚泥濃度+β*凝集剤注入率)	α・βは定数(回帰式より設定)	
7	嫌気性消化	ガス化率で表現	投入汚泥中のVSSの60%がガス化	ガス化率;60%	7)
8	焼却炉	可燃分が減少	灰分=1-可燃分(VSS)		7)
		燃料使用量	使用量(L)=α*含水率-β	α・βは定数(回帰式より設定)	

Table2 The Lists of Parameters

No	設備	項目	値	文献
1	反応タンク	収率係数	Y=0.55	7)
		増殖汚泥組成	汚泥重量の窒素;16%、リン;0.5%を固定	7)
		脱窒炭素源	BODをNO3-Nの3.1倍使用	7)
2	固形物回収率	重力濃縮	90%	9)
		遠心濃縮	90%	9)
		遠心脱水	95%	9)
3	嫌気性消化	消化ガス中のメタン濃	60%	9)
4	消毒槽	次亜注入率 ^{注1)}	3mg/L	9)
5	遠心濃縮機	凝集剤注入率	0.2%	9)
6	遠心脱水機	凝集剤注入率	0.7%	9)

次亜:次亜塩素酸ナトリウム(有効塩素を考慮し注入量を計算)

Table3 The Lists of Parameters for GHG emission

No	設備	項目	値	文献
1	GHG排出係数	電力	0.555kg-CO2/kWh	2)
		都市ガス	0.0138kg-C/MJ	2)
	下水処理	CH4排出量	0.00088t-CH4/千m3	2)
		N2O排出量	0.00016t-N2O/千m3	2)
	汚泥焼却	通常焼却	0.00151t-N2O/wet-t	2)
		高温焼却	0.000645t-N2O/wet-t	2)
	汚泥埋立	準好気埋立	0.0667t-CH4/ds-t	2)
2	温暖化係数	CH4	21	2)
		N2O	310	2)

と合わせて手引きの係数を採用した。

GHG 排出量の計算手順としては流入水質から処理水質を計算したうえで、その処理に必要な電力量・燃料から CO₂ を算出した。下水処理からの排出については返流量も考慮して温暖化係数を使用して CO₂ 換算で算出し、汚泥焼却・埋立は計算された汚泥量と含水率から同様に CO₂ 換算で算出した。

3. 下水処理場からの GHG 排出量

計算方法の妥当性を確認するために平成 18 年度下水道統計¹¹⁾を利用し、全国の下水処理場からの GHG 排出量を計算した。計算結果を手引きの数値とともに Fig. 2 に示すが、電力約 48% や汚泥焼却 N₂O 約 20%、汚泥埋立 CH₄ 約 16% と今回の計算結果は手引きの割合とほぼ一致していた。全国約 2,000 箇所の下水処理場からの総 GHG 排出量は約 800 万 t と計算され、総下水処理量(約 1700 万 m³)から以下の式(2)で計算した GHG 原単位は 0.57 kg/m³であった。

$$\text{GHG 原単位 (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{GHG 排出量 (kg)}}{\text{下水処理量 (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

下水処理場からの GHG 排出量削減を検討するにあたり、現状把握として処理量 1 万 m³/日以上の中大規模処理場を対象に GHG 原単位の分布を調べた。結果を Fig. 3 に示すが、0.3~0.5 に分布し、中央値は 0.45 kg/m³であった。1 万 m³/日以上中大規模処理場からの GHG 総排出量は約 650 万 t であり、全体の 8 割以上(処理場数は約 500 箇所と 25% にすぎないが、下水処理量は 1300 万 m³ と 9 割以上)を占めており、中大規模にターゲットを絞った対策が有効であり、その際の目標値として 0.45 kg/m³ が利用できると思

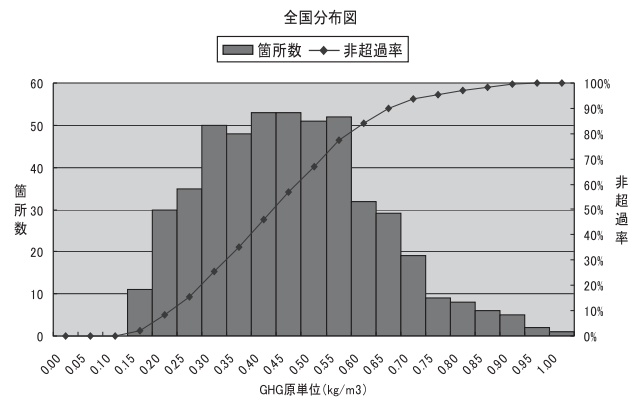


Fig.3: The Distribution of GHG Marginal value

られた。

なお、中央値が 0.45 kg/m³ と全国の下水処理場の平均値より小さいのは残りの小規模処理場の GHG 原単位が大きい(ただし GHG 排出量に対する寄与率は 2 割以下にすぎない)ためと考えられる。

日本全国の下水処理場からの GHG 排出量総量を削減するには中大規模処理場を対象に、中央値が小さくなるように対策すればよいが(例えば 25% 削減のためには GHG 原単位を 0.34 kg/m³ とする)、個別の処理場では水処理方式(高度処理導入の有無)や汚泥処理方式(消化や焼却の有無)により事情が異なることが想定される。そこでモデル処理場に近い規模の下水処理量 5 万 m³/日クラスの処理場を抽出し、GHG 原単位を計算し、結果を Table 4 に示す。

水処理方式が標準法の場合でも嫌気性消化を導入することにより脱水ケーキ埋立量が減少するために GHG 原単位は減少する傾向にあった。汚泥焼却を導入することにより、通常焼却(800℃)では焼却 N₂O により GHG 原単位は増加するが、高温焼却(850℃)とすることにより GHG 原単位は大幅に減少し、全国

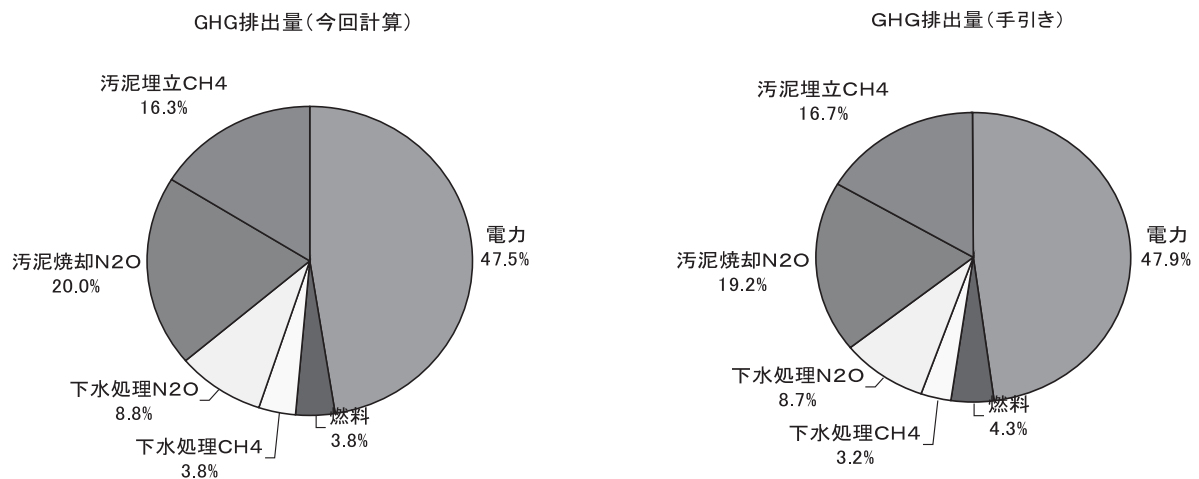


Fig.2: The Result of GHG emission

Table4 GHG Marginal value

処理場名	A	B	C	D	E	F	G	H	
下水処理量	m ³ /日	48000	47000	51000	42000	41000	52000	48000	51000
水処理方式		標準法	標準法	標準法	標準法	標準法	標準法	多段法	A ₂ O法
汚泥処理方式	消化		0				0	0	
	焼却			0	0	0	0	0	0
電力	水処理 kWh/日	20951	11211	14079	13671	12112	21351	36167	23841
	汚泥処理 kWh/日	2197	3847	11411	5605	7030	2041	7164	9652
燃料	A重油 L/日	46	68	1071	423	258	1955	941	556
焼却	焼却タイプ	-	-	通常	高温	高温	通常	通常	通常
	汚泥量 t/日	-	-	41	22	32	37	19	40
脱水ケーキ	埋立量 t/日	33	18	-	-	-	-	-	-
	含水率 %	70.7	79.7	-	-	-	-	-	-
GHG原単位	kg/m ³	0.62	0.37	0.79	0.45	0.49	0.75	0.79	0.82

の中央値に近い値となっていた。一方、水処理を高度処理化（多段法やA₂O法）することによりGHG原単位は大幅に増加する傾向にあった。ただし、汚泥焼却の通常焼却の影響も考えられ、限定はできないと思われた。

3.1 下水処理場からのGHG排出量モデル計算

標準法のプラントを高度処理法に改築する際のGHG排出量の違いを汚泥処理工程の組合せで計算した。モデル処理場の仕様をTable 5に示すが、48,000 m³/日という中規模処理場を対象として水処理方式は標準活性汚泥法（標準法）を基本とし、各種高度処理方式に変更した場合の処理水質とGHG排出量を計算した。初沈汚泥は下水処理量の一定値（2%）を引き抜くものとし、余剰汚泥はMLSSが1500 mg/Lで一定となるように引き抜くこととした。

流入水質としては平成16年度下水道統計データから、全国分布の中央値として

BOD180 mg/L, SS160 mg/L, T-N35 mg/L, T-P4.0 mg/L

と設定し、PESの内部計算で使用している内訳（溶解性BODの割合やVSSの割合）は従来の値⁷⁾を使用した。

汚泥処理は分離濃縮—脱水を基本としてGHG排出量を計算したうえで、嫌気性消化による減容化の効果や高温焼却の効果を評価した。各方式としては採用実績の多い、遠心濃縮・中温消化・遠心脱水・流動焼却を対象とした。

なお、高度処理方式としては①循環式硝化脱窒法（循環法）②多段硝化脱窒法（多段法）③嫌気無酸素好気法（A₂O法）④嫌気好気法（AO法）⑤循環法+同時凝集法（凝集法）を検討し、標準法の反応タンクを改造し、嫌気・無酸素・好気の各タンクとして利用するものとした。

3.1.1 脱水ケーキ埋立のケース

日本の下水処理場で最も多く採用されている脱水ケーキ埋立（分離濃縮—脱水）について水処理5方式毎に処理水質とGHG排出量を計算した。

処理水質（BOD・T-N・T-P）の計算結果をFig. 4に示す（SSはMLSSが1500 mg/Lで一定となるように設定したので処理方式にかかわらず15 mg/Lでほぼ一定であった。）。BODは循環法と同時凝集法で好気タンクの滞留時間が短くなるため5 mg/Lと若干高かったが、すべて10 mg/L以下の良好な処理となっていた。循環法・多段法・A₂O法・同時凝集法といった窒素除去法ではT-N12 mg/L以下を達成し、A₂O法・AO法・同時凝集法といったリン除去法ではT-P0.4 mg/L以下を達成していた。

Table5 The Condition of Model Plant

運転条件	下水処理量	48,000m ³ /日
	処理方式	標準活性汚泥法
	水温	20°C
	返送汚泥率	20%固定
	初沈汚泥	下水処理量の2%引抜
	余剰汚泥	MLSSを1500mg/L一定に引抜
滞留時間	初沈	1.5時間
	反応タンク	8.0時間
	終沈	2.0時間
流入水質	BOD	180mg/L(溶解性;35%)
	SS	160mg/L(VSS;60%)
	窒素	35mg/L(NH ₄ -N;25mg/L)
	リン	4.0mg/L(PO ₄ -P;2.0mg/L)
汚泥処理	濃縮	分離濃縮(重力+遠心)
	消化	嫌気性消化
	脱水	遠心脱水機
	焼却	流動焼却炉

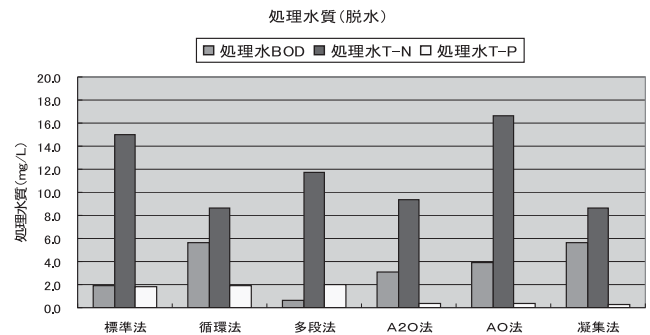


Fig.4 Water Quality in effluent (Dehydrator)

このときのGHG排出量をFig. 5に示す。標準法では半分以上を占める汚泥埋立CH₄による影響で26330 kg (GHG原単位; 0.55 kg/m³-以下同じ)と最大であった。窒素除去法では脱窒の炭素源としてBODが無酸素タンクで消費されるため余剰汚泥発生量が減少し、多段法では汚泥埋立CH₄が4割程度ま

で減少し、好気タンクでの硝化に伴う曝気量の増加による電力消費 CO₂ の増加にもかかわらず、GHG 排出量は 23990 kg (0.50) と標準法よりも 1 割近く少なくなっていた。生物学的脱リン法である AO 法では嫌気タンクで有機物が消費されるため好気タンクでの曝気量が減少し、GHG 排出量が 25210 kg (0.53) と若干減少していた。

以上のように高度処理化することにより GHG 排出量はむしろ減少することがわかった。

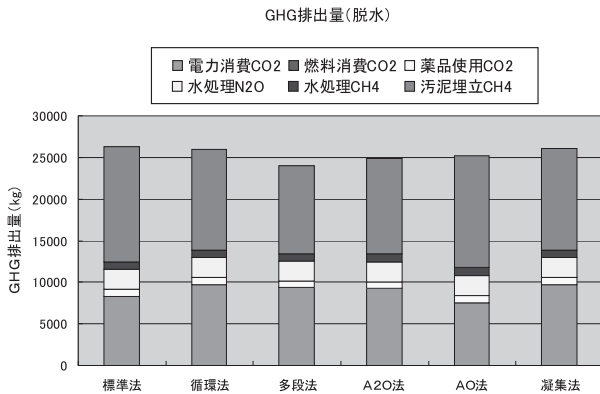


Fig.5 GHG emission (Dehydration sludge)

3.1.2 嫌気性消化追加のケース

汚泥埋立からの CH₄ による GHG 排出量が多いことがわかったので、埋立処分量を削減するために嫌気性消化を導入するケース（分離濃縮—消化—脱水）を検討した。

嫌気性消化の導入により、脱離液による水処理への戻り負荷の影響を検討するために処理水質（BOD・T-N・T-P）の計算結果を Fig. 6 に示す。戻り負荷の影響で T-N・T-P には 1 割程度の悪化がみられ、T-N では循環法のみ 9.5 mg/L（消化無では 8.6 mg/L）とかわろじて 10 mg/L 以下を維持できていた。

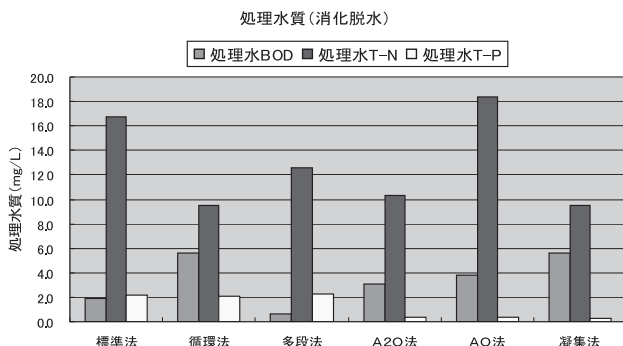


Fig.6 Water Quality in effluent (Digestion)

このときの GHG 排出量を Fig. 7 に示す。嫌気性消化工程の導入により、標準法では嫌気性消化設備の追加に伴い電力消費 CO₂ は 7% 増加するものの、処分する汚泥量が減少するため汚泥埋立 CH₄ が 19% 減少

し、GHG 排出量は 24230 kg (0.50) と結果的には 8% の削減となっていた。窒素除去法では戻り負荷中の NH₄ の硝化のため電力消費量の増加の影響があるため、GHG 排出量の削減は 7% に留まっていた。

いずれの処理法でも嫌気性消化工程を導入することにより処分汚泥量が減少し、GHG 排出量が 1 割近く削減されていた。

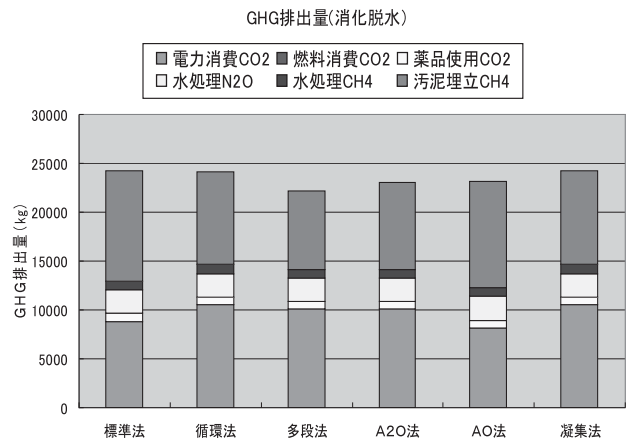


Fig.7 GHG emission (Digestion sludge)

3.1.3 汚泥焼却追加のケース

汚泥埋立からの CH₄ による GHG 排出量をさらに削減するために、汚泥焼却を導入するケース（分離濃縮—脱水—焼却）を検討した。Fig. 8 に示すように通常燃焼（800℃）では汚泥焼却 N₂O により GHG 排出量はむしろ 2 割以上増加したため、燃料消費は増えるものの汚泥焼却 N₂O を大幅に抑制できる高温焼却（850℃）を対象とした。

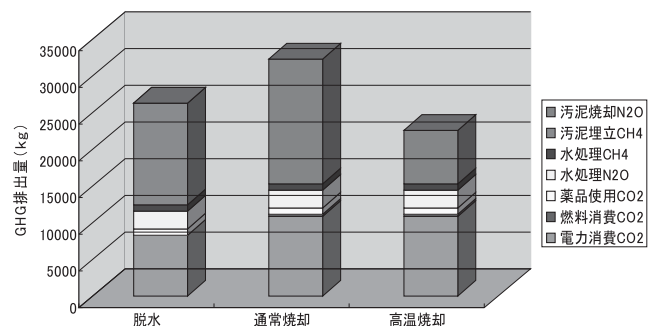


Fig.8 GHG emission (Incinerator)

汚泥焼却による水処理への戻り負荷は無いので、処理水質は脱水ケーキ埋立と同じレベルであった。このときの GHG 排出量の計算結果を Fig. 9 に示す。汚泥焼却工程の導入により、標準法では汚泥焼却設備の追加により電力消費 CO₂ は 3 割程度増加し、燃料消費による CO₂ も追加となるものの、汚泥埋立 CH₄ (13880 kg) が汚泥焼却 N₂O (7240 kg) へと削減される効果が大きく、GHG 排出量は 22570 kg (0.47) と

結果的には14%の大幅な削減となっていた。循環法のように汚泥埋立CH₄の寄与が5割以下と小さかった場合は削減効果が少なく、12%に留まっていた。

いずれの処理法でも汚泥焼却工程（高温焼却）を導入することにより1割強のGHG排出量が削減されていた。

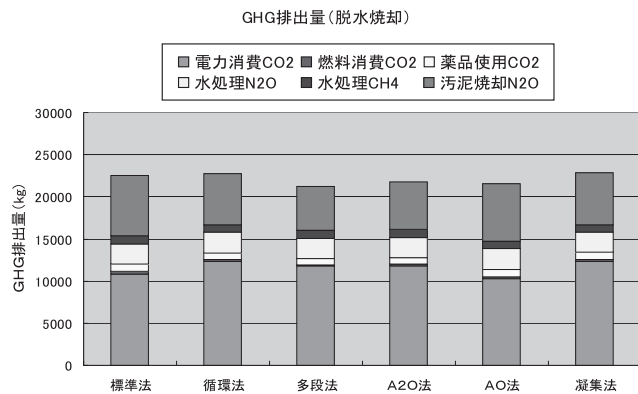


Fig.9 GHG emission (Incineration ash)

3.1.4 消化と焼却を同時追加のケース

最大のGHG削減効果を期待して消化と焼却を同時に追加したケース（分離濃縮-消化-脱水-焼却）を検討した。

GHG排出量の計算結果をGHG原単位とともに、ケース1~4をまとめてTable 6に示す。このときの処理水質は嫌気性消化を導入した場合と同様にT-N・T-Pが若干悪化していた。消化と焼却を同時に追加した場合には、ケース3（脱水-焼却）に比べて嫌気性消化により焼却する汚泥量が減少して汚泥焼却N₂Oが減少するものの嫌気性消化設備分の電力消費CO₂の増加と相殺してしまい、ほとんど削減にはつながらなかった。

Table6 The Results of GHG emission and GHG marginal value

汚泥処理工程		標準法	循環法	多段法	A2O法	AO法	凝集法
脱水	排出量(kg)	26330	25980	23990	24920	25210	26070
	原単位(kg/m ³)	0.55	0.54	0.50	0.52	0.53	0.54
消化-脱水	排出量(kg)	24230	24130	22130	23060	23110	24210
	原単位(kg/m ³)	0.50	0.50	0.46	0.48	0.48	0.50
脱水-焼却	排出量(kg)	22570	22790	21180	21780	21590	22810
	原単位(kg/m ³)	0.47	0.47	0.44	0.45	0.45	0.48
消化-脱水-焼却	排出量(kg)	22460	22730	21100	21680	21290	22740
	原単位(kg/m ³)	0.47	0.47	0.44	0.45	0.44	0.47

ただし、嫌気性消化設備を導入した場合には消化ガスによる発電も可能となるので、発電によるGHG削減も含めた効果を検討した。

標準法の結果をFig. 10に示す（発電によるGHG

削減効果はグラフ下部にマイナス表示)。消化と焼却を同時に追加した場合には発電による削減が900kg期待でき、実質的なGHG排出量は21560kg(0.45)と計算され、ケース3（脱水-焼却）よりも5%削減となっており、ケース1に対しては18%の削減であった。

いずれの処理法でも嫌気性消化-脱水-高温焼却と消化ガス発電を導入することにより2割近くのGHG排出量削減が期待された。

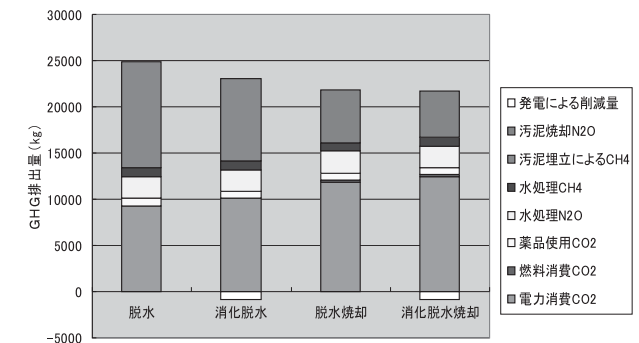


Fig10 GHG emission (CAS)

3.2 下水処理場環境効率による評価

3.2.1 環境効率の導入と計算結果

下水処理場の機能を水質浄化とGHG排出量（エネルギー消費）から総合的に評価する手法として、下水処理場環境効率を考案した。環境効率は「製品・サービスについて、最小の環境負荷で、どれだけ最大の価値をあげられるかを測る指標」としてエコプロダクツの分野で活用されている。環境効率を下水処理場の機能評価に取り入れるにあたり、最小の負荷としては『GHG排出量』を採用し、最大の価値としては『環境負荷除去量』を採用し、前述の式(1)で算出した。

なお、除去環境負荷量としてはBOD・T-N・T-Pを対象として、富栄養化係数¹²⁾を使用して統一的に計算した（BOD：0.00148, T-N：0.26, T-P：3.06）。一方、GHG排出量としては発電による使用電力削減量も考慮した実質的なGHG排出量を使用した。

下水処理場環境効率の計算結果をFig. 11に示す。標準法を高度処理化することにより環境効率が向上することがわかり、窒素除去法に比べてリン除去法のほうが環境効率は高い結果となっていた（当然ながら窒素・リンの同時除去法であるA₂O法・同時凝集法は環境効率が高い結果となっていた）。また、リン除去法のほうが消化や焼却を導入し、GHG排出量を削減した場合の環境効率の向上がより大きい傾向にあった。

環境効率の向上は基準値からの改善率という観点で『ファクターX』として評価されている。ここでは、基準値として最も環境効率の低い「標準法で脱水ケー

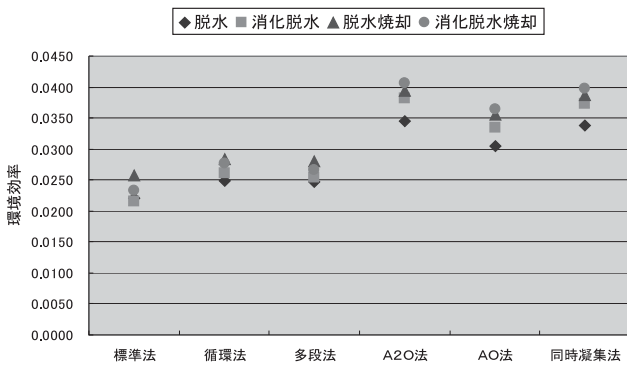


Fig11 The results of eco efficiency

キ埋立」を1とした場合の環境効率の向上としてファクター値を計算した。結果を **Table 7** に示すが A₂O 法での消化脱水焼却が 1.84 で最大であった。

Table7 The results of Factor-X

	脱水	消化脱水	脱水焼却	消化脱水焼却
標準法	1.00	0.97	1.17	1.05
循環法	1.13	1.18	1.28	1.26
多段法	1.12	1.15	1.27	1.20
A2O法	1.56	1.73	1.78	1.84
AO法	1.38	1.52	1.61	1.65
凝集法	1.53	1.69	1.75	1.80

このときの環境効率の変化を GHG 排出量と除去環境負荷量の関係として標準法と A₂O 法との比較で **Fig. 12** に示す。標準法を A₂O 法へと高度処理化することにより T-N・T-P の処理水質が向上するために除去環境負荷量が 582 kg から 852 kg へと増加するので環境効率はファクターとして 1.56 へと向上する (高度処理化により汚泥発生量が減少するので GHG 排出量も減少)。一方、標準法で汚泥処理工程へ消化・焼却 (高温) を導入することにより GHG 排出量が 26330 kg から 21560 kg へと減少するので環境効率はファクターとして 1.05 へと若干改善する (ただし、消化設備からの戻り負荷の影響で T-N・T-P の処理水

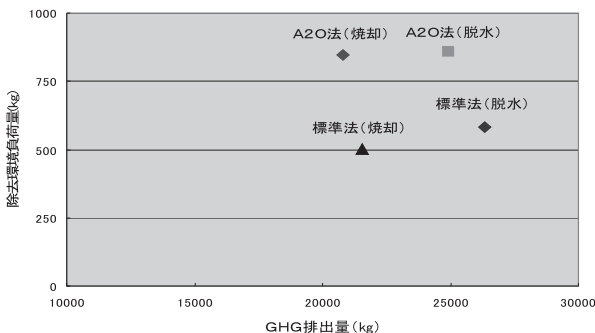


Fig12 The influence of GHG emission and removed environmental loads for changing eco efficiency

質は悪化するため除去環境負荷量は減少)。高度処理化と消化・焼却 (高温) を同時に実行すると除去環境負荷量は 582 kg から 846 kg へと増加し、GHG 排出量は 26330 kg から 20800 kg へと減少するため、環境効率はファクターとして 1.84 への向上となっていた。

3.2.2 環境効率のさらなる向上施策

環境効率のさらなる向上を目指して、今後導入可能性のある施策についてファクターで評価した。

環境効率の向上のためには「除去環境負荷量の増加」と「GHG 排出量の削減」の2つの方法があるが、今回は GHG 排出量の削減策について3つ取り上げ検討した。対象としてはファクターが 1.84 と最も大きい A₂O 法の消化・脱水・焼却というケースのさらなる向上を検討した。

① 高効率散気装置の導入²⁾

GHG 排出量のうち 58% と最も多い電力消費 CO₂ の削減としてプロワ電力量を削減するために高効率散気装置を導入する。従来タイプよりも酸素移動効率が 50% アップすると設定する。

② 第二世代型焼却炉の導入¹³⁾

GHG 排出量のうち 23% と二番目に多い汚泥焼却 N₂O の削減として高温焼却よりもさらに N₂O 削減策が可能な第二世代型焼却炉を導入する。N₂O が高温焼却よりも 5 割削減されると設定する。

③ 有機物回収機能の導入¹⁴⁾

電力消費の削減として発電量を増加させる目的で有機物を積極的に回収する機能として初沈において前凝集機能を導入する。固形性有機物の回収率が 5 割アップすると設定する。

各施策を導入した場合の GHG 排出量の計算結果を **Fig. 13** に示す。高効率散気装置を導入した場合には電力消費 CO₂ が 11130 kg と 1 割以上削減され、処理水質は変わらないのでファクターは 1.98 と計算された。第二世代型焼却炉を導入した場合は汚泥焼却 N₂O が 2500 kg と半減するとともに燃料消費 CO₂ も若干減るのでファクターは 2.11 と計算された (処理水

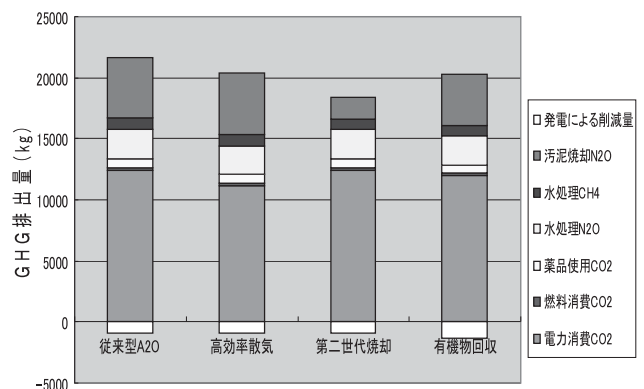


Fig13 The change of GHG emission

質は変化しない。)。有機物回収機能を導入した場合は消化ガス発生量の増加により発電量が2420 kWhと5割アップしていた(GHGで1340 kg削減)。また、前処理で有機物を回収した結果、反応タンクでの分解の減少や余剰汚泥発生量の減少にもつながりGHG排出量も6%の削減効果があった(ただし、窒素・リンの処理水質は若干悪化していた。)。両者の結果としてのファクターは1.99と計算された。

以上の3つの施策を同時に実施した場合にはGHG排出量が15950 kg (0.33)となり、環境効率はファクターとして2.36が期待された。このときのGHG排出量の内訳をFig. 14に示す。7割近くを占める電力消費CO₂の削減はもちろん、水処理N₂O等の対策も重要になってくると考えられた。

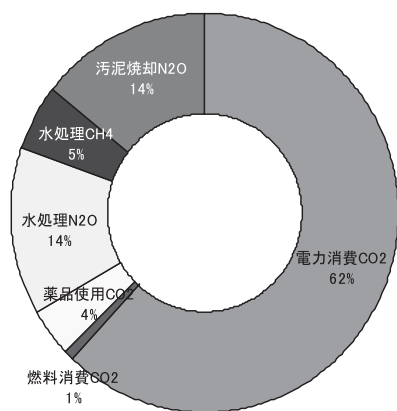


Fig14 The breakdown of GHG emission

4. おわりに

下水処理場の処理水質と温室効果ガス(GHG)排出量を総合的に評価する下水処理場機能評価システム(PES)を開発し、水処理の高度処理化と汚泥処分量削減のための消化・焼却の導入についてGHG排出量をGHG原単位や下水処理場環境効率という指標で評価した。結果をまとめると以下ようになった。

- ① 高度処理方式として循環法・多段法・A₂O法・AO法・同時凝集法のGHG排出量を計算したところ、多段法が最も少なく22990 kgと標準法よりも1割近く少なくなっており、高度処理化することによりGHG排出量はむしろ減少することがわかった。
- ② 嫌気性消化工程の導入により、設備の追加による電力消費CO₂は増加するものの、埋立汚泥量が減少するためGHG排出量は削減となり、いずれの処理法でも1割近くGHG排出量が削減された。
- ③ 汚泥焼却工程(高温焼却)の導入により、設備

の追加による電力消費CO₂は増加し、燃料消費によるCO₂も追加となるものの、汚泥埋立CH₄が汚泥焼却N₂Oへと削減される効果が大きく、いずれの処理法でも1割強のGHG排出量が削減された。

- ④ 下水処理場の機能を水質浄化とGHG排出量から総合的に評価する手法として、下水処理場環境効率を考案し、高度処理化の環境効率を検討したところ窒素除去法に比べてリン除去法のほうが環境効率は高いことが判った。
- ⑤ 環境効率の向上をファクターとして評価した(標準法の脱水ケーキ埋立を1とした場合の環境効率)ところA₂O法での消化脱水焼却が1.84と最大であった。さらなる環境効率の向上を目指して高効率散気装置・第二世代型焼却炉・有機物回収機能を導入するとファクター2.36が期待された。

今後は評価指標として維持管理費といった観点からも検討を加え、実処理場での適用も検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：資源のみの実現に向けて報告書(案)(平成19年3月)
- 2) 国土交通省：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)
- 3) 米本, 李：下水処理におけるエネルギー消費に及ぼす処理方式および処理規模の影響に関する統計分析, 下水道協会誌, Vol. 45, No. 544, pp. 96-105 (2008)
- 4) 須田, 宗宮, 脇坂, 山田：下水処理施設におけるエネルギー消費原単位の傾向分析, 下水道協会誌, Vol. 45, No. 552, pp. 107-113 (2008)
- 5) 惣田, 岩井, 清, 下田, 池：処理規模を考慮したエネルギー解析モデルのさまざまな下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価, 用水と廃水, Vol. 51, No. 3, pp. 50-60 (2009)
- 6) 庄村, 大下, 高岡：エネルギー消費からみた下水処理システムの比較評価に関する研究, 第45回下水道研究発表会講演集, pp. 55-57 (2008)
- 7) 宗宮：下水処理システムの機能評価表に関する研究, 下水道協会誌, Vol. 41, No. 502, pp. 131-141 (2004)
- 8) 宗宮：都市下水の各種高度処理プロセスにおける栄養塩除去機能の評価, 下水道協会誌, Vol. 42, No. 509, pp. 81-90 (2005)
- 9) 社日本下水道協会：下水道設計計画・設計指針と解説2009年版
- 10) 増田, 西村：水処理工程におけるN₂Oの発生特性, 用水と廃水, Vol. 52, No. 3, pp. 41-54 (2010)
- 11) 日本下水道協会：平成18年度下水道統計(2006)
- 12) 新井, 惣田, 池：環境影響を指標とした下水の生物処理システムの評価, 第46回下水道研究発表会講演集 pp. 173-175 (2009)
- 13) 東京都下水道局：下水道事業における地球温暖化防止計画「アースプラン2010」, (平成22年2月)
- 14) 下水道新技術推進機構年報：前凝集と担体を用いた下水高度処理システムの実用化に関する調査研究(2002)

The general evaluation on the reduction of environmental load in a sewage treatment plant

Toshiki Fukushima¹⁾ and Isao Somiya²⁾

¹⁾ Metawater Co., Ltd.

²⁾ Emeritus Professor of Kyoto University

Abstract

We had developed a performance evaluation system for sewage treatment plant which we cooperated with water treatment by sludge treatment, and evaluated the water quality of effluent and energy consumption for the whole sewage treatment plant generally. We evaluated both water quality and greenhouse gas emission by eco efficiency (reduction of environmental load/GHG emission) in some advanced treatment process. We found that the phosphorus removal process was higher than others.

Key Words : Sewage treatment plant, Advanced treatment, Performance evaluation Water quality, Greenhouse Gas Emission