

# 下水汚泥処理における温室効果ガス排出削減技術の検討

環境システムコース 環境経済システム学 佐藤 哲 (#26645)

## 1. はじめに

下水処理の現状について消費エネルギーの観点から見ると、そこでの電力使用量は全国の電力使用量の約0.6%を占めている。また汚泥焼却等において重油等の化石燃料が使用されていることなどと併せ、処理システム自体が大きな温室効果ガスの排出源のひとつとなっているといえる。他方、年々増加する下水汚泥発生量は平成12年度には198万DS-t(乾燥重量)に達し、内37%は埋立処理されており、廃棄物問題としての課題も大きい。さらには費用の面でも、汚泥埋立にかかる費用は活性汚泥法における曝気槽処理費用(浄水部分)と薬品費を考慮した全体の処理費の60%を越え、自治体財政に大きな負担を与えている。

本研究では下水処理の過程で発生する汚泥をエネルギー源として再利用することで、廃棄物発生量および消費エネルギーの削減を図る。また、回収エネルギーの利用方法や、システム全体の稼働運用方法について、時間帯を考慮した商用電力利用の最適化を図る。

## 2. 評価システムの設計

### 2.1 嫌気性消化発電システム(従来法)

N浄化センター(処理人口12万人、処理能力96,800m<sup>3</sup>/日)内に設置した嫌気性消化試験装置を用いて様々な条件下で連続試験をおこない、施設の運転条件を変えた場合の消化率を予測できる嫌気性消化のプロセスモデルを作成した。それを利用し、オゾン処理設備付設による消化率向上や、熱分解処理付設による発電量の増加、稼働施設の運用時間帯を最適化することによる効果等を検証する。

モデル作成にあたり、水処理部分については除外し、下水汚泥処理部分を対象とした。以下、下水汚泥処理モデルのフローについて解説する。水処理プロセスより排出された最初沈殿汚泥、余剰汚泥はそれぞれ、重力濃縮槽、遠心濃縮処理を経由して嫌気性消化槽に導入されると、ガス攪拌によって混合される。汚泥は槽内で52日間滞留した後に排出され、脱水機によって脱水される。搬出される脱水ケーキの内2/3は処分業者に受け渡され、他の下水処理設備から搬出された脱水ケーキとともに焼却される。残りの1/3は、隣接するゴミ焼却施設において混合焼却されることとした。

また嫌気性消化槽から発生する消化ガスはガスエン

ジン(以降、GE:400kW規模)に投入してメタン発電した場合を考えると、エンジン排熱も回収して消化槽加温に利用することとした(従来法: System1)。さらに固液分離設備とオゾン処理を加えた場合を System2(図1)、乾燥機と熱分解炉を付加したものを System3とし(図2)、3つのシステムを設定した。

表1 システム設定

System	従来法	嫌気性消化発電	焼却あり
System1	従来法	嫌気性消化発電	焼却あり
System2	オゾン処理法	System1 + オゾン処理	焼却あり
System3	熱分解法	System1 + 熱分解処理	焼却なし

### 2.2 オゾン処理システムについて

下水汚泥からのエネルギー回収と汚泥減量化の促進が期待されるオゾン処理技術に注目する。オゾン処理では、消化汚泥の一部を生物酸化して生物分解性を高め、再び消化槽に返送することで、槽内の汚泥濃度が高く、汚泥滞留時間が長くなるため、VSS(揮発性浮遊物質)の消化率が向上し、消化ガス回収量が増加する<sup>1)</sup>。さらに消化汚泥のVSS/SS比(浮遊物質中に占める揮発性=有機性物質の割合)の低下に伴い、脱水ケーキの含水率が低下し、量の減少も見られる。その影響で、脱水ケーキの焼却時に必要となる重油の使用量も減少する。一方で、オゾン処理法の問題点として、電力多消費型プロセスであり、1kgのオゾン製造するのに、14.9kWh(オゾン9kg製造時)消費する。トータルなエネルギーの収支を見る上で、これらのトレードオフの関係に注目して分析を進めた。

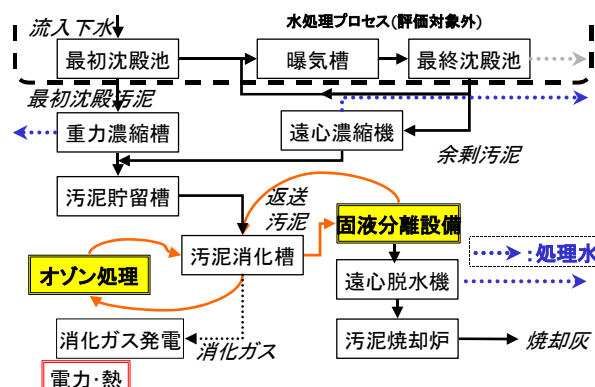


図1 オゾン処理システム(System2)

### 2.3 熱分解システムについて

従来の嫌気性消化では回収しきれない残留有機分を取り出す方法として、排出される消化汚泥に熱処理を加えて可燃性ガスの回収を図る熱分解処理がある。得られたガスは消化ガスと混合してガス発電に利用する。

オゾン処理法と比較すると電力消費は少なく済むが、水分を多く含む汚泥を乾燥させ、ガス化するまで温度を上げていく必要があるため、必要熱量が大きくなる。ただし一方で、従来法、およびオゾン法においては消化槽加温にしか利用されておらず余剰分として捨てている GE 排熱を汚泥の乾燥に有効利用できるとした。乾燥機および熱分解炉の設計については文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

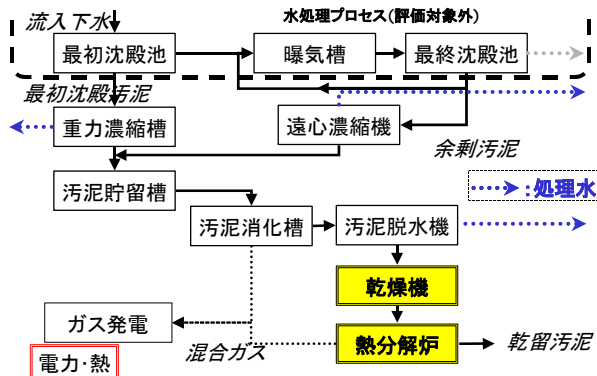


図2 熱分解システム(System3)

## 2.4 排熱利用について

各システムにおける排熱利用について図3に、熱交換器等の効率を表2にまとめて示す。図中破線は燃料ガスの流れを、実線は熱の流れを表す。GEの発電効率は34%としている。

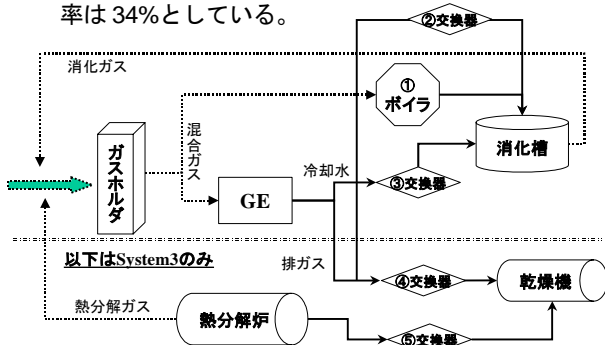


図3 ガスおよび排熱利用のフロー

表2 熱交換器等の効率

各種機器	熱源	機器効率	採用システム
①消化槽加温ボイラ	消化ガス直接焚き	81%	System3
②蒸気加温システム	冷却水+排ガス	34%	System1、2
③温水熱交換器	エンジン冷却水	85%	System3
④排ガス熱交換器	エンジン排ガス	85%	System3
⑤排ガス熱交換器	熱分解炉排ガス	85%	System3

System1 および System2 においては、熱の需要が消化槽加温のみであり、得られた消化ガスは全量 GE に投入し、冷却水と排ガスから34%の熱量(対投入ガス熱量)を回収し、加温に利用することとした(図表中②)。

必要熱量は、最大となる3月の実設備運用データより、1日6618Mcalとなり、これはGE排熱で十分賅うことができるため、利用しきれなかった余剰分は損失分として考える。

System3は多熱量消費型システムであり、GEからの排熱を最大限利用することを目的にして排熱利用のフローを設定した。GEからの排熱を排ガスとジャケット冷却水からの回収とに分離し、それぞれ投入熱量の20%、30%が回収可能であるとした。ここで排熱温度の問題から、冷却水由来の熱量は消化槽加温のみにしか使用できないという制約を設けた。また消化槽加温を冷却水由来の回収熱量のみで賅うことはできないため、一部をボイラによる加温(図表中①)としている。GEからの排ガスは、重油で稼動する熱分解炉からの排ガスと共に、汚泥乾燥プロセスの補助熱量に利用する(図表中④⑤)。

また、GEの日中運転における排熱利用について、乾燥機、消化槽加温への利用の双方ともその影響を受けないものとした。

## 3. 下水処理システムの総合評価

### 3.1 エネルギーの収支、CO<sub>2</sub>排出量に関する評価

汚泥処理設備の運転記録から抽出した各設備の動力原単位をもとに、投入・排出される下水汚泥量、生産・消費・回収されるエネルギー(電力、消化ガス、重油、排熱、軽油)、凝集剤投入量を算出した。また、オゾン処理システムでオゾンの副産物として発生する酸素ガスを、下水処理の曝気に利用可能な資源と位置付けた(未反応酸素の利用：図7、8参照)。

CO<sub>2</sub>排出量の算出には、環境省発表資料や電力会社へのヒアリングにより得られた原単位を用いた。凝集剤の原単位には、産業連関表を用いて波及効果を考慮して算出したCO<sub>2</sub>負荷原単位を用いている<sup>3)</sup>。

#### 3.1.1 オゾン発生量変化の影響と熱分解法

表1に示すSystem1(従来法)、System2(オゾン処理法)、System3(熱分解)について比較する。まずオゾン処理については、オゾンの製造量を、毎時2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 [kg-O<sub>3</sub>/hr]と変化させたときの影響を見た。オゾン処理法、熱分解法ともに、導入のメリットとして想定していた発生汚泥の削減と、発生ガス量の増加について図4で確認することができる。オゾン発生量の増加に比例して消化汚泥の生分解性も

向上し、汚泥中の有機分がガス化され、ガス量増加と汚泥量の減少に影響している。熱分解の場合は最終発生汚泥の含水率がゼロまで落ちるため、ガス回収から得られる発生熱量についてはオゾン 12kg-O<sub>3</sub>/hrの場合と同程度であっても、最終発生汚泥の重量は激減している。

エネルギーの収支として、電力と重油の消費量を図5、6に示す。多電力消費型のオゾン処理法では、オゾン発生量が増加するに従って発電量が増加する一方で、オゾン製造に消費する電力の増加が上回り、全体としても増加傾向にあることがわかる。重油消費量を見ると、オゾン処理法について、脱水汚泥が減少するに従って焼却場での重油投入量削減の効果が大きく見られる。熱分解については、乾燥機と熱分解に投入す

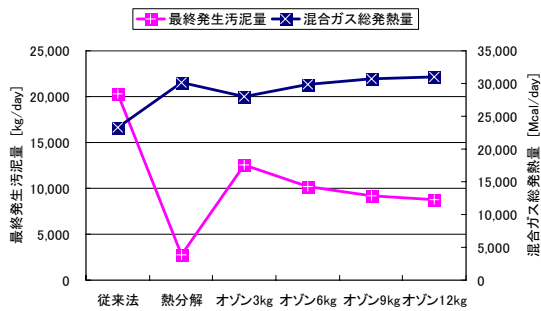


図4 発生汚泥量と発生ガス発熱量の比較

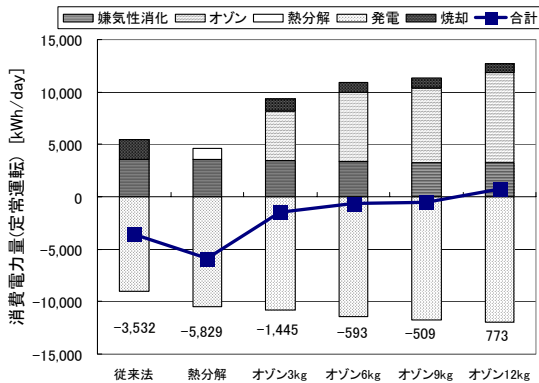


図5 消費電力量の比較

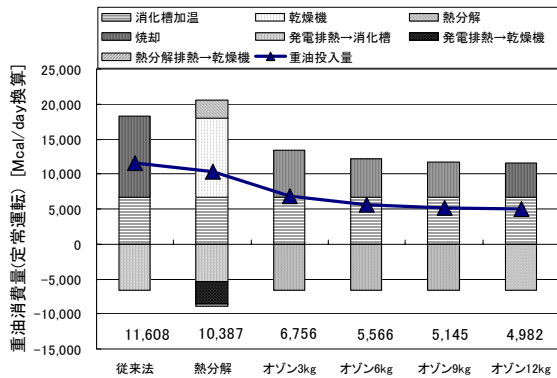


図6 消費重油量の比較

る重油量の方が、従来法において焼却プロセスで必要とする重油量より多くなっており、含水量の多い脱水汚泥の乾燥に大量のエネルギーを必要とすることがわかる。ただし、GE 排ガスから回収した排熱を有効利用することで、従来法よりも実質重油投入量が少なく抑えられている。

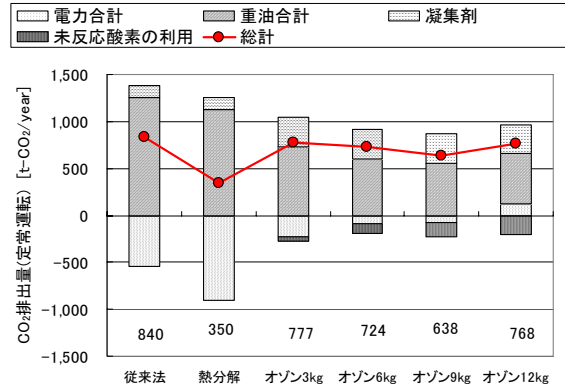


図7. CO<sub>2</sub>排出量の比較

さらに凝集剤の投入量と未反応酸素の有効利用を評価してCO<sub>2</sub>排出量を総合してみると、従来法で840t-CO<sub>2</sub>/yearとなり、熱分解の350t-CO<sub>2</sub>/yearの場合が最も少なく、オゾン処理法の中では発生量が毎時9kgの場合が最も少なく、638t-CO<sub>2</sub>/yearとなった(図7)。オゾン処理法についてのトレードオフが存在する中で、オゾン発生量増加に伴う効果を最大限に発揮するのが毎時9kgの時であること、また凝集剤の投入量の、オゾン処理におけるCO<sub>2</sub>排出量に与える影響も大きいことが分かった。

### 3.1.2 時間帯を考慮した最適運転の評価

次に、時間帯によってCO<sub>2</sub>排出原単位、および買電単価が変化する商用電力の特徴に注目する。電力を大量に消費するオゾン処理プロセスをCO<sub>2</sub>排出原単位および買電単価がともに低下する夜間に運転することとした。またGEによる発電に関しては、商用電力購入の代替として捉え、その分は買電費用およびCO<sub>2</sub>排出量の削減とみなすため、逆に24時間発生する燃料ガスをガスホルダに貯留しておき、日中に集中して発電する日中運転した。一方で、汚泥を運ぶポンプや消化槽の攪拌など基本的なシステムについては24時間定常運転するとした。電力多消費型のシステムであるオゾン処理システムへの効果が期待できる。ここではオゾン処理法で最も結果の優れていたオゾン9kg製造時の結果と熱分解処理とを比較する。(図8)

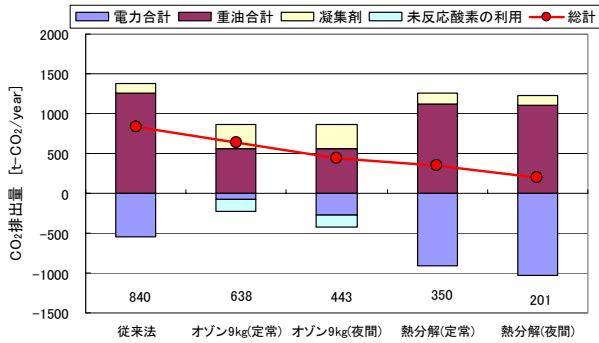


図8. 運転方法の違いによるCO<sub>2</sub>排出量の比較

オゾン法 9kg は夜間運転をすることにより約 200t-CO<sub>2</sub>削減され、443t-CO<sub>2</sub>となった。

これは夜間電力のCO<sub>2</sub>排出原単位(0.395kg-CO<sub>2</sub>)が昼間のそれ(0.441kg-CO<sub>2</sub>)より10%程小さいことが影響している。さらに単位時間あたりの稼働量が24/10倍となり、設備が大規模化することにより、オゾン発生器の動力効率も向上するとした。

一方熱分解法の場合も、電力消費量の占める割合の大きいオゾン処理ほどではないが、夜間運転によって削減量は増加している。また排熱回収の効果によって既に定常運転時より削減量が大きかったため、夜間運転を行なった場合のオゾン処理法を上回り、最も削減効果が大きい結果(201t-CO<sub>2</sub>/年)となった。

### 3.2 コストに関する評価

今回比較したシステムの経済性について、建設費を考慮に入れたコスト評価を行なった。事業初年度に必要な建設費を、各設備の償却期間をもとに利子を含めて年間費用として換算(平均化)して比較する「年価法」を用いた。年価化した建設費に補修費、運転費用等を足し合わせることで、毎年発生する費用を明示する。ここで利率は公営企業債の平均値1.4%を用いた。

なお各プロセスの建設費及び運転経費は(社)日本下水道協会において作成された費用回帰式と、メーカーへのヒアリングデータを元に算出した。

建設費を見ると(図9)、熱分解の方がオゾン処理よりも高額となっているが、オゾン(夜間)の場合だと設備規模の増大に伴い熱分解(定常)よりも高くなる。

一方、毎年発生する費用として、電力、重油、凝集剤等の消費量より算出される運転費用と、費用関数から算出した補修費、運転経費等がある。これらを年価化した建設費に足し合わせた総年間費用を見ると、オゾン9kg時の夜間運転が最も経済的であることが分か

った(図10)。

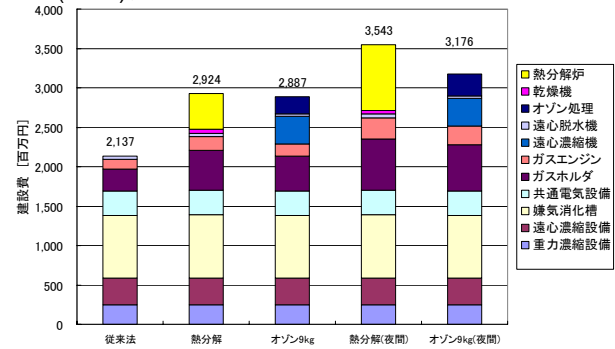


図9 建設費比較

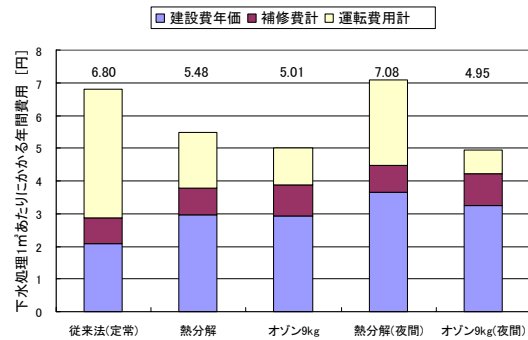


図10. 下水処理1m<sup>3</sup>あたりの年間費用(年価化)

## 4. まとめ

汚泥エネルギーの有効利用促進技術として、オゾン処理と熱分解の導入を比較検討した。双方ともにエネルギーの回収量は増加し、電力多消費型、熱量多消費型といった各特徴が結果に顕著に表れている。オゾン処理法では夜間電力の有効活用によるメリットが大きく表れ、熱分解法では排熱利用を行なうことで重油投入量を抑制し、最も高い排出削減効果を示した。

コスト面をみると、建設費では熱分解(定常)よりも高額となるが、建設費を年価化して年間費用として比較した時、運転費用等の差によりオゾン(夜間)が最も小さく、下水処理1m<sup>3</sup>あたり4.95円となった。

オゾン(夜間)と熱分解(定常)のCO<sub>2</sub>排出量の差は93t-CO<sub>2</sub>/年で前者が大きく、年間コストの差は約17百万円/年で前者の方が小さいという結果となった。

## 参考文献

- Goel.R. et al.; Closed loop anaerobic digestion using pre/post sludge ozonation and effect of low temperature on process performance, (2002), Proceedings of 3<sup>rd</sup> international conference on Anaerobic digestion of solid wastes 2002
- 今田努; 熱分解プロセス導入による下水処理システムの設計および総合評価, 東京大学大学院修士論文, (2002), 54-60
- 南齋規介, 森口祐一, 東野達; 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID), (2002), 国立環境研究所