

オゾン／過酸化水素処理による下水汚泥の可溶化

－実証試験による消化ガス増量効果の確認

Sludge Treatment by Hydrogen Peroxide/Ozone - Evaluation of Pilot-Scale Results

○永森泰彦*、茂庭忍*、仕入英武*、木内智明*

*：東芝インフラシステムズ株式会社

論文要旨

消化ガスの増量を目的に、オゾン／過酸化水素処理により下水汚泥を可溶化する汚泥可溶化装置を開発した。実証機を製作し下水処理場で約3年間、実証試験を行った。汚泥可溶化装置を接続した消化槽では消化ガスが1.28倍に増加する消化ガス増量効果が得られ、装置の消費電力の2.2倍の電気エネルギー増産効果が得られると算定された。加えて、消化槽から排出される浮遊物質(SS)が14%減少する汚泥減容効果も得られた。

キーワード：汚泥、促進酸化処理、実証試験

1. はじめに

下水処理で生じる汚泥は、濃縮・消化・脱水・焼却等のプロセスを組み合わせた汚泥処理によって減容化・安定化されて処分されている。汚泥消化は、汚泥中の有機物を嫌気性微生物の働きで低分子化・ガス化するプロセスであり、生成した消化ガスを燃料として利用できることから、下水汚泥からのエネルギー回収手段として注目されている。また、エネルギー回収量を増加させる方法として汚泥可溶化技術が研究されている。オゾン処理による可溶化は、汚泥消化の前処理として実施され、汚泥中の浮遊性有機物を低分子化することで、汚泥消化における有機物のガス化を促進する。

報告者らは、高効率な溶解反応タンク方式のオゾン処理と、オゾン／過酸化水素による促進酸化処理とを用いた汚泥可溶化技術の開発を行ってきた。ラボ実験の結果¹⁾²⁾から、溶解反応タンク方式でのオゾン／過酸化水素処理は、オゾン処理と比較して低コストでガス化を促進でき、導入効果が高いことが分かった。次の開発段階として、下水処理場の消化槽1系列分の規模の実証機を製作し、2018年9月から3年間の実証試験を行った。本報告では、その実証試験結果について示す。

2. 実証試験の概要

実証試験は、江別浄化センター(北海道江別市)で実施した。汚泥処理フローと汚泥可溶化装置の設置場所を図-1に示す。浄化センターには汚泥処理が2系列(既設系、新設系)あり、既設系一次消化槽に汚泥可溶化装置を接続して可溶化処理を行い、既設系を試験系、新設系を対照系とする対照実験で汚泥可溶化効果を実証した。

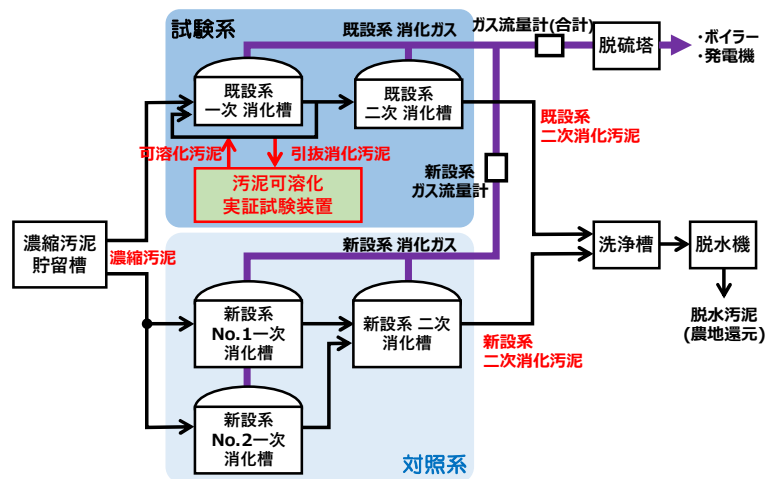


図-1 下水処理場の汚泥処理フローと汚泥可溶化装置

汚泥可溶化装置の外観と処理フローを図-2に示す。汚泥可溶化装置は、汚泥を貯留する循環調整槽、汚泥にオゾンと過酸化水素を注入して汚泥を可溶化するオゾン溶解装置、オゾン生成装置、過酸化水素注入装置、で構成されている。循環調整槽では、既設系一次消化槽の消化汚泥循環ラインを介して、消化汚泥の引拔と、可溶化汚泥の返送を行っている。

オゾン溶解装置は、循環調整槽に引き抜かれた消化汚泥を加圧ポンプによって循環し、オゾンガスと過酸化水素水溶液を注入して混合液にする。混合液を溶解反応タンク内上部のノズルから噴射し、タンク内に設置された内筒で高速乱流状態を生じさせて、オゾン／過酸化水素による促進酸化反応により汚泥を可溶化する。

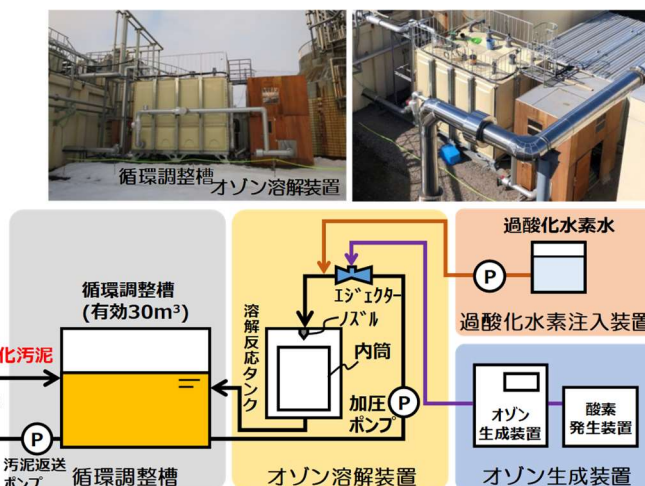


図-2 汚泥可溶化装置の外観と処理フロー

3. 実証試験方法

3. 1 汚泥可溶化装置の運転

汚泥可溶化装置の運転は、(1)消化汚泥引拔工程、(2)汚泥可溶化工程、(3)可溶化汚泥返送工程、の3つの工程を、タイマ制御を基本としたバッチ処理で行った。1バッチの運転条件を表-1、主要な試験履歴を表-2に示す。試験は、まず最初に、オゾン注入率と過酸化水素水添加率をパラメータとした、パラメータ試験(a)を行った。

次に、1バッチ/日の平日運転(b)からスタートし、段階的にバッチ数を増やして処理量を増加(c)させた。その後、3バッチ/日の連続運転(12日)とメンテナンス(2日)を組み合わせた2週間のサイクル運転(d)を延べ約11か月行った。次いで、再度、パラメータ試験(e)を行い、(a)の結果と同等であることを確認した後、90バッチ、273バッチを無停止で運転する1か月連続運転(f)、3か月連続運転(g)を問題なく完了した。その後も連続試験(h)を実施した。

表-1 1バッチの運転条件*1

項目	設定値
汚泥処理量 [m³/バッチ]	22.6
消化汚泥引拔工程時間 [min]	60*2
汚泥可溶化工程時間 [min]	180*2
可溶化汚泥返送工程時間 [min]	240*2
オゾン注入率 [mg/L]	45
過酸化水素水添加率 [ppm]	20

*1 状況により調整する *2 待機時間を含む

表-2 主要な試験履歴

試験名称	試験期間	運転バッチ数 [バッチ]
a) 運転パラメータ試験(1回目)	2019/5/7~17	4
b) 平日運転(1バッチ/日)	2019/5/20~24	3
c) 平日運転(処理量増加)	2019/6/3~8/9	57
d) サイクル連続試験 (12日連続運転+2日メンテナンス)	2019/8/21~2020/4/8	535
(試験中断)	2020/4/9~5/31	0
d) サイクル連続試験 (12日連続運転+2日メンテナンス)	2020/6/10~8/23	149
e) 運転パラメータ試験(2回目)	2020/9/7~25	13
f) 1か月連続試験	2020/10/5~11/3	90
g) 3か月連続試験	2020/11/16~2021/2/14	273
h) 連続試験	2021/2/16~3/27	120

3. 2 分析と評価

図-1に示した汚泥(濃縮、引抜消化、可溶化、各系二次消化の計5か所)を週1回の頻度でサンプリングしてTS(蒸発残留物)、VS(TSの強熱減量)、SS(浮遊物質)、VSS(SSの強熱減量)を分析した。

消化ガス増量効果は、(式1)と(式2)を用いて求めた消化ガス倍率比が1より大きい場合、汚泥可溶化によって消化ガスが増加したものとし、(式3)と(式4)を用いて求めた増産消化ガス量をその増加量とした。また、(式5)を用いて試験系と対照系の消化率をそれぞれ求めた。

$$\text{消化ガス倍率[倍]} = \text{消化ガス量}[\text{m}^3/\text{日}] \div \text{濃縮汚泥量}[\text{m}^3/\text{日}] \quad \dots (式1)$$

$$\text{消化ガス倍率比[-]} = \text{試験系消化ガス倍率[倍]} \div \text{対照系消化ガス倍率[倍]} \quad \dots (式2)$$

$$\begin{aligned} &\text{濃縮汚泥VS当たりの消化ガス量}[\text{m}^3/\text{kg-VS}] \\ &= \text{消化ガス量}[\text{m}^3/\text{日}] \div (\text{濃縮汚泥量}[\text{m}^3/\text{日}] \times 10^3 \times \text{濃縮汚泥VS}[\%] \times 10^{-2}) \quad \dots (式3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{増産消化ガス量}[\text{L/kg-VS}] \\ &= (\text{試験系濃縮汚泥VS当たりの消化ガス量}[\text{m}^3/\text{kg-VS}] - \text{対照系濃縮汚泥VS当たりの消化ガス量}[\text{m}^3/\text{kg-VS}]) \times 10^3 \quad (式4) \end{aligned}$$

$$\text{消化率}[\%] = (\text{濃縮汚泥VS}[\%] - \text{二次消化汚泥VS}[\%]) \div \text{濃縮汚泥VS}[\%] \times 10^2 \quad \dots (式5)$$

さらに消化ガス増量に伴う汚泥減容効果について評価した。汚泥減容効果は、試験系と対照系の二次消化汚泥のSSの差分を(式6)で求めて、SS差分がマイナスであれば汚泥可溶化により消化汚泥のSSが減少したものとした。

$$\text{SS差分}[\text{pt}] = \text{試験系二次消化汚泥SS}[\%] - \text{対照系二次消化汚泥SS}[\%] \quad \dots (式6)$$

3. 3 エネルギー収支

装置導入効果を評価する目的で、装置のエネルギー収支を試算した。可溶化期間の消化ガス量の平均値から(式7)と(式8)を用いて消化ガス増加量を求めた。この消化ガス増加量を全て消化ガス発電で使用したものとして電気エネルギーに換算した。消化ガス発電の条件を表-3、換算式を(式9)に示す。さらに(式10)を用いて増産エネルギー倍率を求め、増産エネルギー倍率が1倍を超えた場合、エネルギー収支はプラスとなり創エネ効果が見込まれるものとした。

表-3 消化ガス発電算定条件

項目	値
メタンガス低位発熱量 [MJ/Nm ³]	35.79
消化ガスメタン濃度 [%]	55
消化ガス発電装置 型式	ガスエンジン
消化ガス発電装置 発電効率 [%]	33

$$\begin{aligned} &\text{可溶化前試験系消化ガス量}[\text{m}^3/\text{日}] \\ &= \text{可溶化期間試験系消化ガス量}[\text{m}^3/\text{日}] \div \text{消化ガス倍率比[-]} \quad \dots (式7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{消化ガス増加量}[\text{m}^3/\text{日}] \\ &= \text{可溶化期間試験系消化ガス量}[\text{m}^3/\text{日}] - \text{可溶化前試験系消化ガス量}[\text{m}^3/\text{日}] \quad \dots (式8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{消化ガス増加量の電気エネルギー換算量}[\text{kWh}/\text{日}] \\ &= \text{消化ガス増加量平均}[\text{m}^3/\text{日}] \times 35.79 \times 55\% \times 33\% \div 3.6 \quad \dots (式9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{増産エネルギー倍率[倍]} \\ &= \text{消化ガス増加量の電気エネルギー換算量}[\text{kWh}/\text{日}] \div \text{装置の消費電力量}[\text{kWh}/\text{日}] \quad \dots (式10) \end{aligned}$$

4. 実証試験結果

4. 1 消化ガス増量効果

消化ガス倍率比、増産消化ガス量、可溶化汚泥量、消化率を図-3に示す。消化ガス倍率比(3a)と増産消化ガス量(3b)は、2019年4月から2020年9月の間、データ欠損がたびたび発生し、2019年11月～2020年2月は増産消化ガス量がマイナスになるなど変動が大きかった。消化ガスに含まれる硫化水素から生成した硫黄が、対照系消化ガス流量計のセンサー部に付着したことが原因と考えられた。消化率(3c)は試験系が対照系を上回っていることからこの期間の消化ガス流量計測値には異常があったことが示唆された。

2020年9月に対照系消化ガス流量計を交換したことから、消化ガス量については、2020年10月以降((f)～(g))のデータを本装置の実力値として評価した。2020年10月以降の平均では消化ガス倍率比は1.28、増産消化ガス量は192L/kg-VSであった。汚泥可溶化によって、消化ガスが増加することが示唆された。

4. 2 汚泥減容効果

試験系と対照系の二次消化汚泥のSSとSS差分を図-4に示す。サイクル連続試験を開始した2019年8月以降、SS差分(4b)はマイナスとなっており、その平均値は-0.17ptであった。同期間の対照系二次消化汚泥SSの平均は1.22%であったことから、可溶化によって二次消化汚泥SSが14%削減されることが示唆された。

4. 3 創エネ効果

装置のエネルギー収支の試算結果を表-4に示す。増産エネルギー倍率は2.2倍であり、汚泥可溶化装置は、装置の消費電力に対して2.2倍の電気エネルギー増産効果があると算定された。

5. まとめ

汚泥可溶化装置の実証試験を下水処理場で実施した。その結果、以下の効果が確認できた。

- 1) 消化ガスが1.28倍に増加する消化ガス増量効果が得られた。
- 2) 消化槽から排出される浮遊物質(SS)が14%減少する汚泥減容効果が得られた。
- 3) 装置の消費電力量に対して2.2倍の電気エネルギーを増産する創エネ効果が得られた。

参考文献

- 1) 永森、茂庭、小原、木内、金平、加治木、中野：オゾン／過酸化水素処理での汚泥可溶化による消化ガス増量と汚泥減容，第54回下水道研究発表会 講演集，pp. 1057-1059 (2017)
- 2) 永森、茂庭、小原、木内、加治木、中野：消化ガス増量を目的とした下水汚泥の可溶化に対するオゾン／過酸化水素による促進酸化処理の適用，第27回 日本オゾン協会年次研究講演会 講演集，pp. 109-112 (2018)

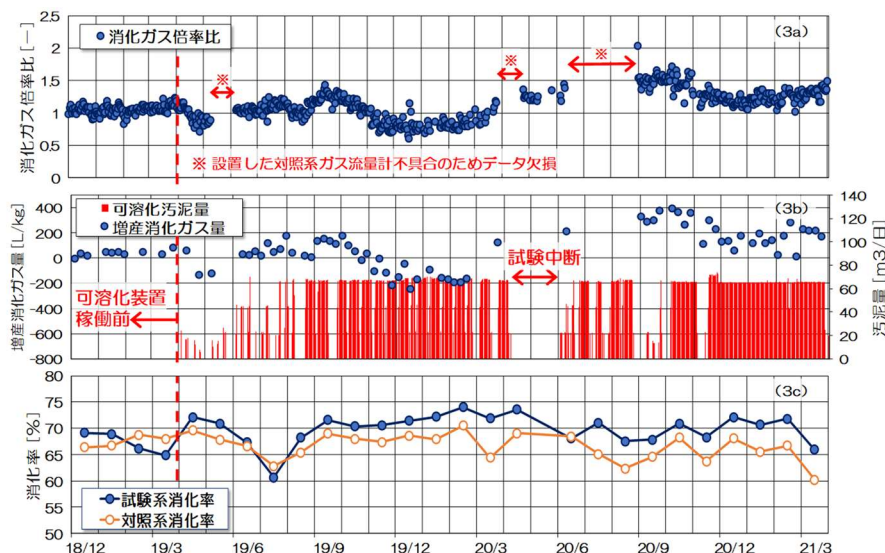


図- 3 可溶化が消化ガス量と消化率に与える影響

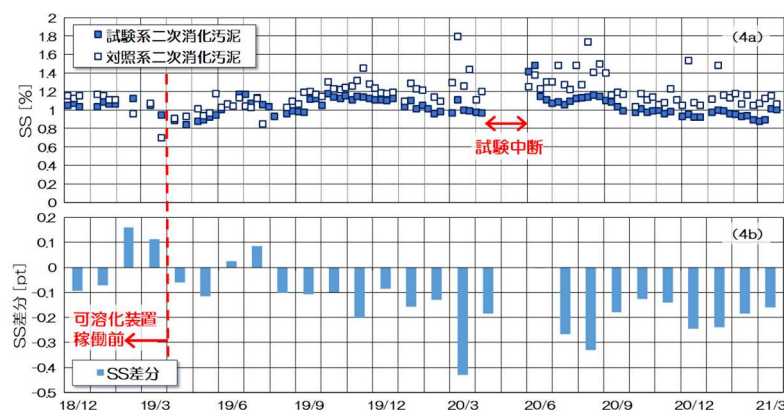


図- 4 可溶化が二次消化汚泥SSに与える影響

表- 4 装置のエネルギー収支

項目	値
試験系消化ガス量 [m³/日] (2020年10月～2021年3月平均)	1530
消化ガス増加量 [m³/日]	335
電気エネルギー換算量 [kWh/日]	604
装置の消費電力 [kWh/日]	273
増産エネルギー倍率 [倍]	2.2