

# 持続可能な社会実現に向けた 下水処理場でのバイオガス増産技術

黒木洋志\*  
Hiroshi Kuroki  
勝又典亮†  
Noriaki Katsumata  
小川和彦‡  
Kazuhiko Ogawa

有馬芳明§  
Yoshiaki Arima  
和田昇\*  
Noboru Wada  
大泉雅伸||  
Masanobu Oozumi

Realization of Sustainable Society Through Technology for Increasing  
Biogas Production in Sewage Treatment Plants

\*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所  
†同社 同研究所(博士(農学))  
‡同社 社会環境事業部  
§同社 神戸製作所  
||日鉄エンジニアリング㈱

## 要 旨

下水道分野のカーボンニュートラル実現に向けて省エネルギー・創エネルギー技術が検討される中、下水処理場で発生する下水汚泥を活用した創エネルギー技術としてバイオガスの増産技術が期待されている。バイオガス増産にはオゾンを利用した汚泥可溶化が効果的であるが、これまでのオゾン処理法では反応効率が低いことが課題であった。そこで、特殊攪拌(かくはん)翼によって高濃度オゾンガス気泡を微細化することで効率良く汚泥を可溶化するオゾン可溶化反応装置を開発した。国内の下水処理場で一年間を通じた実証試験の結果、バイオガスが約22%増産することを確認した。

## 1. ま え が き

経済産業省が2020年に取りまとめた“カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”で、資源循環関連産業の成長戦略としてエネルギー回収の高度化・効率化やエネルギー利用の促進が掲げられ、バイオマス資源の利用拡大に向けた技術が注目されている。国土交通省は下水道分野で脱炭素社会を牽引(けんいん)するグリーンイノベーション下水道を目指す方針を示している<sup>(1)</sup>。

下水処理場での脱炭素の取組みとして、三菱電機㈱と日鉄エンジニアリング㈱はバイオマス資源として活用が期待されている下水汚泥に着目した。下水処理場では、下水中に含まれる浮遊物質が沈殿した初沈汚泥と、溶解性有機物の分解によって増殖した微生物から成る余剰汚泥がある。これら汚泥は廃棄物として処理されるが、消化槽を導入することで、嫌気性微生物を作用させ汚泥を分解し汚泥量を減らす取組みもなされている。このとき、消化槽では汚泥の分解に伴いメタンを主に含むバイオガスが発生する。バイオガス中のメタンをボイラーや発電機の燃料として利用することで、下水処理場の脱炭素化に貢献している。

余剰汚泥は微生物を主体とし難分解性であるが、オゾンで酸化処理をすれば分解性が向上しバイオガスが増産することが知られている<sup>(2)</sup>。余剰汚泥のオゾン処理は消化槽投入前に行うが、従来の散気によるオゾン処理ではオゾン消費率が30%以下と低いことが課題であった。開発したオゾン可溶化反応装置のオゾン消費率は、実証試験の結果80%以上であることが確認できた。国内の下水処理場で一年間行った実証試験で得られたバイオガス増産効果について述べる。

## 2. 下水処理場での脱炭素の取組み

下水道技術開発会議エネルギー分科会で下水道分野で導入すべき脱炭素技術が検討されており、“カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発等に関するエネルギー分科会報告書<sup>(3)</sup>(以下“エネルギー分科会報告書”という。)”にその結果がまとめられている。この中で、地球温暖化対策計画(2021年10月22日閣議決定)では下水道分野の削減目標として、2030年度での温室効果ガス排出量を2013年度の約50%(二酸化炭素換算)に相当する208万tのCO<sub>2</sub>を削減するとの目標が示されている。削減目標達成のための導入すべき技術及び技術開発項目として“省エネルギーの促進”“焼却の高度化”“下水汚泥のエネルギー化”“再生可能エネルギー利用の拡大”があり、下水汚泥のエネルギー化を現在の24%から37%まで向上させることで約70万tのCO<sub>2</sub>が削減できると試算されている。

エネルギー分科会報告書には2050年カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発ロードマップが示されており、創エネルギー・再生可能エネルギーに関する事項として“高濃度濃縮技術、汚泥可溶化、マイクロ波の活用によって消化性能を向上させる等による既存消化槽の高効率エネルギー生産・回収型への転換技術”は2030年までにパイロットスケールと実規模実証を行い、順次導入拡大・コスト低減・改善を行うことが示されている。今回開発したオゾン可溶化反応装置は先に述べた汚泥可溶化に該当するものであり、下水処理場の脱炭素化に貢献する技術である。

### 3. オゾン可溶化反応装置

図1に下水処理場の処理工程とオゾン可溶化反応装置の配置を示す。集めた下水は、下水処理場の最初沈殿池で、固形物を沈殿させ初沈汚泥と上澄みに分離する。初沈汚泥は消化槽に投入し処理する。一方、最初沈殿池の上澄みは曝気(ばっき)槽で微生物の作用で浄化されるが、この工程で微生物は水中の有機物を消費し増殖する。増殖した微生物は凝集し、最終沈殿池で余剰汚泥として分離される。

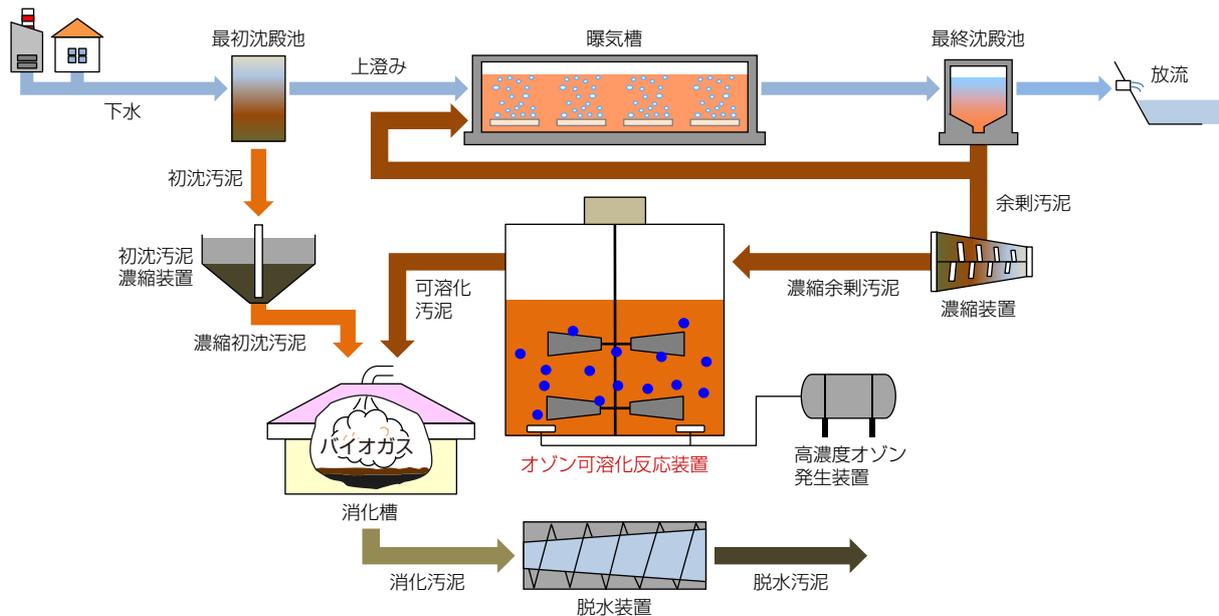


図1. 下水処理場の処理工程とオゾン可溶化反応装置の配置

このように下水処理場では多量の初沈汚泥や余剰汚泥が発生する。処分する汚泥量を削減するために、初沈汚泥や余剰汚泥を分解する消化槽が設置されている。これらの下水処理場では、消化槽を小さくし、また効率的に消化するために、初沈汚泥と余剰汚泥は脱水によって濃縮して消化槽に投入する。一例として、初沈汚泥を濃縮した濃縮初沈汚泥と余剰汚泥を濃縮した濃縮余剰汚泥を混合して消化を行っている。

今回開発したオゾン可溶化反応装置は余剰汚泥の濃縮装置と消化槽の間に設置する。オゾン可溶化反応装置で濃縮余剰汚泥を可溶化することで、消化槽での濃縮余剰汚泥の分解効率とバイオガス発生量を高められる。

消化槽で分解されなかった消化汚泥は脱水装置で脱水し、焼却するか固形燃料として利用する。

図2にオゾン可溶化反応装置を示す。装置は円筒形のタンクに濃縮余剰汚泥を貯留し、装置下部に設けられた散気部からオゾンを注入する。タンク容積は1m<sup>3</sup>であり、せん断性を高めた特殊攪拌翼が回転して汚泥を攪拌し気泡を微細化する。図3に可溶化反応装置の概要を示す。特殊攪拌翼は散気部から浮上するオゾン気泡を微細化するとともに、汚泥中に微細気泡を均一に分散する。注入するオゾンの濃度は200~230g-O<sub>3</sub>/Nm<sup>3</sup>であり、一般的な水処理で用いられるオゾン濃度の約2倍である。このように高濃度オゾンガスを利用することによってオゾンと汚泥の反応効率が向上し、より少ないオゾン濃度での処理と比較して短時間での可溶化を実現した。

次にオゾンによる濃縮余剰汚泥の酸化処理がバイオガス増産に果たす役割を述べる。濃縮余剰汚泥中の微生物にオゾン及びオゾンと水が反応して生成したヒドロキシラジカルが接触し、細胞壁を構成するペプチドグリカンの結合を酸化分解することで汚泥が可溶化する。有機物の発酵経路は加水分解工程(第一段階)、酸生成工程(第二段階)、メタン生成(第三段階)から成り、最終生成物としてバイオガス(メタン及び二酸化炭素)になる。オゾンは余剰汚泥中の微生物を酸化分解することによって、先に述べた第一段階及び第二段階の反応を一部代替し、発酵を促進されて、その結果バイオガス化率(メタンの増産)が向上する<sup>(4)</sup>。



図2. オゾン可溶化反応装置

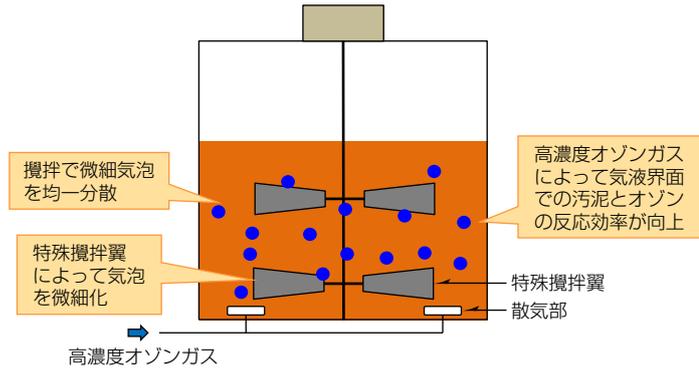


図3. オゾン可溶化反応装置の概要

## 4. 実証試験

### 4.1 実証試験方法

開発したオゾン可溶化反応装置(図2)を国内のA下水処理場に設置し、濃縮余剰汚泥可溶化の実証試験を行った。流入する下水の水質や気温などの影響によって下水処理場で発生する汚泥の量・濃度が変化する。そこで春夏秋冬の各季節を含む2020~2021年の一年間にわたって実証試験を行った。

下水処理場で採取した濃縮余剰汚泥(SS(Suspended Solids, 浮遊物質)濃度2.5~4.0%)を可溶化反応装置に1回当たり約790L入れて、汚泥を攪拌しながらオゾンガス(濃度200~230g-O<sub>3</sub>/Nm<sup>3</sup>)を注入した。濃縮余剰汚泥のオゾン吸収量が60~80mg-O<sub>3</sub>/g-SSになるまでオゾンを注入した。処理時間は約80分であった。

実証試験でオゾン消費率と可溶化率を評価した。オゾン消費率は濃縮余剰汚泥によって吸収されたオゾンガスの割合を示しており、可溶化反応装置注入前と装置から排出されるオゾンガス中のオゾン濃度を測定することで算出した。可溶化率はバイオガス増産の指標であり、可溶化前後でのVSS(Volatile Suspended Solids, SSの強熱減量)濃度を測定することで算出した。

可溶化した汚泥を用いた消化試験は実験室で行いバイオガス増産の効果を評価した。消化試験のフローを図4に示す。可溶化処理系は実証試験でオゾンで可溶化した濃縮余剰汚泥、対照系はオゾンで可溶化していない濃縮余剰汚泥を用いた試験系である。消化試験は濃縮初沈汚泥75mLと濃縮余剰汚泥75mLを67日間にわたって毎日投入した。消化槽内の汚泥量を一定(4.5L)に保つため、投入した汚泥分(150mL)を毎日引き抜いた。温度36~38℃、滞留日数30日の条件(A下水処理場の消化条件に準じた)で消化試験を実施した。消化槽から発生したバイオガスをアルミガスパックで採取し、毎日ガス発生量を測定した。投入した汚泥のVTS(Volatile Total Solids, 強熱減量)当たりのバイオガス発生量を比較して、オゾンによる可溶化のバイオガス増産効果を評価した。

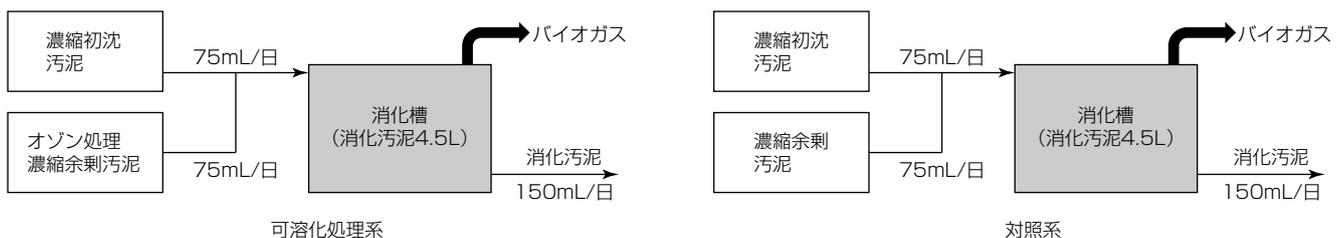


図4. 消化試験のフロー

## 4.2 実証試験結果

各季節でのオゾン消費率の結果を示す(図5)。汚泥に従来の散気方式でオゾンを注入した場合オゾン消費率は約30%であるが、今回開発したオゾン可溶化反応装置では全ての季節でオゾン消費率が80%であった。せん断性を高めた特殊攪拌翼がオゾンガス気泡の微細化して均一にオゾンガス気泡を分散できたためである。これらの結果によって開発したこの装置は気温や汚泥濃度によるオゾン消費率の変動が小さく、年間を通じて安定的にオゾンによる可溶化処理を行えることが確認できた。図6に各季節でのVSS可溶化率(有機物の分解程度を表す)の結果を示す。VSS可溶化率は最も低い1月が25.2%、最も高い3月が35.6%であり季節による差が見られた。これは、汚泥性状の季節変動や、外気温の影響によって粘度が変化したためと考えられる。一年を通じて20%以上の高いVSS可溶化率であり、可溶化処理が安定して行えることが確認できた。消化試験の結果、発生したバイオガス量は可溶化処理系で0.45L/g-VTS、対照系で0.37L/g-VTSであり、汚泥オゾン可溶化によってバイオガスが22%増産された。

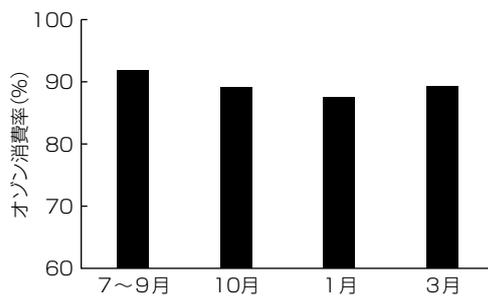


図5. オゾン消費率

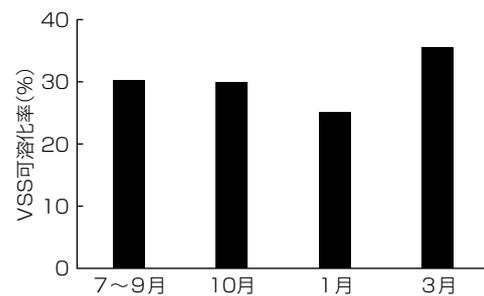


図6. 揮発性浮遊物(VSS)可溶化率

## 5. む す び

特殊攪拌翼によって微細化された高濃度オゾンガス気泡で濃縮余剰汚泥を可溶化するオゾン可溶化反応装置を開発し、国内の下水処理場で実証試験を一年間行った。年間を通じてオゾン消費率平均80%以上、VSS可溶化率平均20%以上を達成し、安定した可溶化処理が行えることを確認した。可溶化した汚泥を用いた消化試験で、バイオガス量は22%増えることを確認した。

今後は下水道分野で脱炭素社会実現に資する重要な技術として、国内下水処理場への展開を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 国土交通省：下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書 脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道 (2022)  
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001474979.pdf>
- (2) 小松俊哉, ほか：オゾン前処理が濃縮余剰汚泥のバイオガス化および消化汚泥の脱水性に及ぼす影響, 用水と廃水, **63**, No.8, 49~56 (2021)
- (3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道技術開発会議エネルギー分科会：カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発等に関するエネルギー分科会報告書 (2022)  
[https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/202203\\_energybunkakaihokokusyo.pdf](https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/202203_energybunkakaihokokusyo.pdf)
- (4) 大泉雅伸, ほか：オゾンによる余剰汚泥の高効率可溶化技術とその応用, 第27回廃棄物資源循環学会研究発表会要旨集, 223~224 (2021)