

濃縮余剰汚泥を対象とした オゾン可溶化技術

～高濃度オゾンと特殊攪拌翼による

オゾン可溶化反応装置の開発～

Ozone Solubilization Technology for Concentrated Excess Sludge
～Development of Ozone Solubilization Reactor
Using Highly Concentrated Ozone and Special Stirring Blades～

大泉 雅伸 Masanobu OOIZUMI

環境・エネルギーセクター
エンジニアリング本部 プロジェクト部
環境・水プロジェクト室 マネジャー

抄 録

世界的に地球温暖化防止の取り組みが広がる中、下水処理場においても省エネ・創エネ技術の導入が進められている。下水処理場で発生する下水汚泥は、嫌気性消化処理を行うことで下水汚泥量を削減している。また、嫌気性消化で発生するバイオガスは、これまで主に嫌気性消化槽の加温に用いられていたが、現在は発電機にて電力エネルギーに変換し下水処理場の動力や売電収入を得る取り組みが広がっている。

当社では嫌気性消化における下水汚泥の分解率向上によるバイオガス発生量の増大と、下水汚泥発生量の削減を目的として、可溶化技術を開発してきた。本論文では、濃縮余剰汚泥を対象としたオゾン可溶化反応装置の開発について、技術課題とその取り組みについて述べる。

Abstract

As efforts to prevent global warming spread worldwide, energy – saving and creative technologies are being introduced in sewage treatment plants. Sewage sludge generated at sewage treatment plants is treated by anaerobic digestion to reduce the amount. And biogas generated from anaerobic digestion has been mainly used to heat anaerobic digestion tanks. However, there is now a growing trend to convert the biogas into electric energy using generators and supply it to sewage treatment plants or to generate income from the sale of electricity has been spreading. We have developed solubilization technology to increase biogas generation by improving the decomposition rate of sewage sludge in anaerobic digestion and to reduce sewage sludge generation. This paper describes the development of an ozone solubilization reactor for concentrated excess sludge.

1 緒言

現在、我が国では下水汚泥220万t/年(乾燥重量)¹⁾、食品廃棄物1728万t/年(乾燥重量として345万t/年と推定)²⁾、し尿処理汚泥1210万t/日(乾燥重量として240万t/年と推定)³⁾など大量の有機性廃棄物が発生している。これら有機性廃棄物からバイオガスを発生させ発電する場合の発電量は年間300億kWhと試算されており¹⁾⁻⁵⁾、エネルギー回収の重要性は高い。しかしながら、有機性廃棄物からエネルギー回収を実施している割合は、下水汚泥が約13.7%¹⁾、食品残渣においては2.8%²⁾、し尿処理においては僅か0.05%³⁾と低い状況に留まっている。これは、食品残渣やし尿汚泥単独での消化発酵では設備の規模が小さくなる傾向にあり、設備投資に対してのエネルギー回収効果が小さいことに起因していると考えられる。

このような状況下、食品残渣やし尿汚泥、下水汚泥等の有機性廃棄物を集約し、消化発酵させバイオガス回収を行うケースが見受けられるようになった。そこで、当社は三菱電機株式会社と共同で、原料集約によるスケールアップ効果に加えて、更なるプロセスの経済性向上を目指し、有機性廃棄物に可溶化処理を施すことで、汚泥発生量の削減割合(以下、減容化率という)と同時に有機性廃棄物からバイオガスが発生する割合(以下、バイオガス化率という)の向上を図ることを目的としたオゾン可溶化反応装置の開発を進めてきた。

具体的には、有機性廃棄物の中でも、発酵におけるバイオガス化率、減容化率が共に低い余剰汚泥を対象として、オゾン化した酸素ガス(以下、オゾン化ガスという)による可溶化処理を施すものである。オゾン化ガスによる余剰汚泥や消化汚泥の可溶化技術は、以前より研究が行われてきたが、減容効果のみを実現する技術や高度にシステム化された機器により構成させるものであった。そこで我々は、下水処理場への適用性を考慮し、濃縮余剰汚泥を対象とした反応装置の開発を目指した(図1参照)。これにより濃縮機と消化発酵槽の間に可溶化反応装置を設けるのみの簡便なシステム構成となる。一方、課題として、濃縮余剰汚泥は、粘性が高く、気体との反応性が低いため、可溶化反応装置内に投入するオゾ

ン量(以下、投入オゾン量という)と排出するオゾン量(以下、出口オゾン量という)との差(以下、オゾン消費率という)が30%以下と低いことが課題であった。本論文では、上記した課題解決に向けた取り組みと、開発したオゾン可溶化反応装置について述べる。

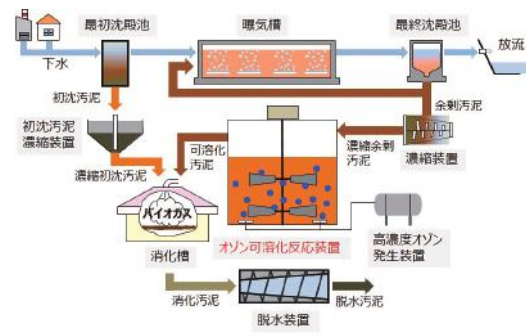


図1 開発趣旨の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of development purpose

2 オゾンによる余剰汚泥可溶化技術の概要

オゾンによる汚泥可溶化の原理を図2に示す。余剰汚泥はオゾンおよびオゾンとH₂Oが反応することにより生じるOHラジカルにより、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。これにより、汚泥が低分子化し可溶化する。

また、有機物の発酵の経路は図3に示す通り、加水分解工程(第一段階)、酸生成工程(第二段階)、メタン生成工程(第三段階)からなり、最終生成物としてバイオガス(メタンおよびCO₂)となる。ここで、オゾンと余剰汚泥が反応し酸化分解することにより、前述の第一段階および第二段階の反応を一部代替し、発酵が促進されることで、バイオガス化率向上および汚泥発生量の低減を図ることが可能となる。

3 高濃度オゾンと特殊攪拌翼によるオゾン可溶化反応装置の特徴

濃縮余剰汚泥の可溶化反応装置は、有機物のバイオガス化率が低い余剰汚泥を対象とした装置である。濃縮余剰汚泥を対象とすることで、濃縮機と消化発酵槽の間に可溶化反応装置を設置するのみで、

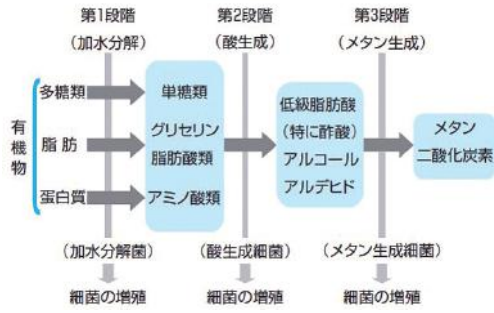


図3 有機物の発酵経路
Fig. 3 Anaerobic digestion pathways

可溶化処理を行うことが出来る。濃縮余剰汚泥とオゾンとの反応は、図4に示すとおり、ガス状のオゾンが液中に溶解・拡散し、汚泥中の有機物と反応する経路をたどる。ここで、液中への溶解が反応の律速となることから(式1参照)、液中への溶解速度を高める工夫を施した。

具体的には、オゾン化ガスを微細化する特殊な攪拌翼(式1の a を増加)と高濃度オゾンをもちいることで(式1の $\Delta[O_3]$ を増加)、オゾン消費率向上を意図した工夫を施した。

本装置の特殊攪拌翼は、オゾン化ガスの微細化を目的として、翼のせん断力を高めるため複数の穴をあけている。この穴をオゾン化ガスが通過する際に、オゾン化ガスを微細化し、濃縮余剰汚泥との接触面積を増加させることで、液中への溶解率を高めることが出来る。また、高濃度オゾンをもちいることで、単位接触面積当たりのオゾンの溶解速度を高め、効率的にオゾン化ガスと濃縮余剰汚泥を反応させることができる。開発したオゾン可溶化反応装置(実規模試験装置)の概略図および写真を図5および図6に示す。



図4 オゾンと有機物の反応経路模式図
Fig. 4 Schematic diagram of reaction

溶解速度式 : $Q = kl \times a \times \Delta[O_3]$ 式1

Kl : 気液間物質移動係数

a : 比表面積

$\Delta[O_3]$: オゾン濃度差

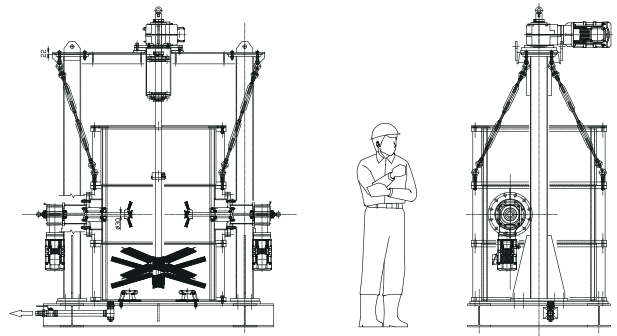


図5 オゾン可溶化反応装置
Fig. 5 Ozone solubilization reactor (demonstration test)



図6 オゾン可溶化反応装置(写真)
Fig. 6 Ozone solubilization reactor (photo)

4 下水処理場における実証試験

4.1 試験方法

可溶化処理には、下水処理場で採取した水中に懸濁している不溶性物質(SS)濃度が2.5~4.0%の濃縮余剰汚泥を使用した。可溶化反応装置に1回あたり約790Lの濃縮余剰汚泥を貯留してバッチ方式の処理を行った。濃縮余剰汚泥を攪拌しながら濃度200~230g/Nm³のオゾンガスを注入し、濃縮余剰汚

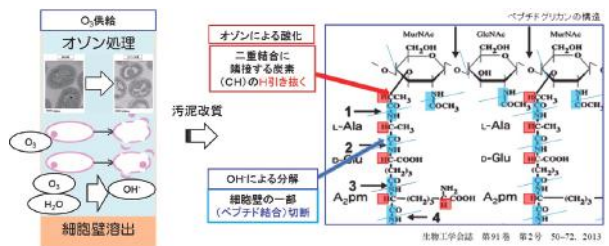


図2 余剰汚泥可溶化の原理(概念図)
Fig. 2 Mechanism of excess sludge solubilization

泥のオゾン吸収量が60～80mg-03/g-SSになるまで処理を行った。下水処理場では、この可溶化処理を春、夏、秋、冬の各季節において各々約1か月間試験的に行った。可溶化反応装置の性能を評価するため、オゾン消費率と浮遊物(VSS)可溶化率を算出し、開発目標値(オゾン消費率：平均80%以上、浮遊物可溶化率：平均20%以上)に対する達成度を評価した。ここで、開発目標値は、下水処理量43,000 m³/日の下水処理場を対象とした経済性評価により決定した。オゾン消費率を算出するため、可溶化反応装置の入口オゾン濃度と出口オゾン濃度を測定し、その差から濃縮余剰汚泥によって消費されたオゾン量を求めた。浮遊物(VSS)可溶化率を算出するため、可溶化処理前後の濃縮余剰汚泥のVSS濃度を測定した。

バイオガス化率の効果確認を行うため、実験室にて嫌気性消化発酵試験を行った。下水処理場で行われている消化発酵の条件をもとに、初沈汚泥と濃縮余剰汚泥を容積比1:1で混合させて消化試験を行った。消化試験のフローを図7に示す。可溶化処理系では、オゾン処理で可溶化した濃縮余剰汚泥(オゾン処理濃縮余剰汚泥)と濃縮初沈汚泥75mLずつ混合して消化発酵槽に投入した。対照系では、未処理の濃縮余剰汚泥と濃縮初沈汚泥を75mLずつ混合して消化発酵槽に投入した。消化発酵槽に貯留した消化汚泥が4.5Lになるように、消化発酵槽から投入した混合汚泥量と同量の消化汚泥(150mL)を引き抜いた。また、消化発酵槽から発生したバイオガスは、アルミガスパックで採取して、1日当たりのガス発生量を測定した。消化汚泥は36～38℃に加熱し、消化発酵槽内で温度が一定になるように攪拌を行った。この消化発酵試験におけるHRT(水理学的滞留時間)は30日である。消化試験に用いた汚泥の有機物総量(VTS)濃度は、濃縮初沈汚泥が2.2%、濃縮余剰汚泥が2.8%である。消化試験は67日間行った。

消化発酵試験後の消化汚泥を用い、可溶化処理による水処理への影響を検討した。具体的には前述した嫌気性消化発酵試験にて得られた消化汚泥を脱水処理し脱離液を得る。脱離液の性状を比較することで、返流水質への影響と流入水質に与える影響を比較し評価を行った。ここで、流入水質については、

実証試験を実施した下水処理場の監理年表の値をもちいて試算を行った。

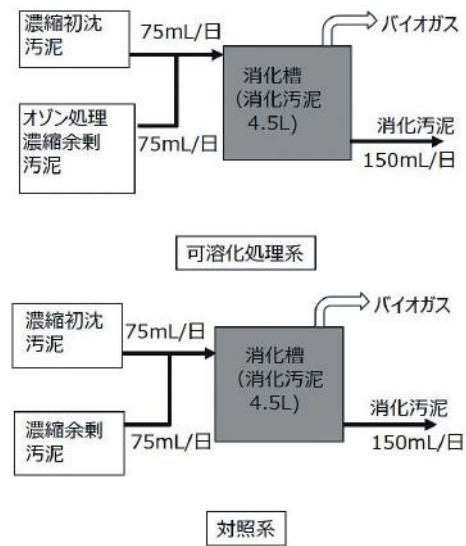


図7 消化試験のフロー図
Fig. 7 Flow chart of digestion test

4.2 試験結果

(1)可溶化反応装置のオゾン消費率

図8に四季ごとのオゾン消費率の平均と通年での全体平均を示す。最も高い消費率は夏季の91.8%、最も低い消費率は冬季の87.5%、全体平均は89.4%であった。オゾン消費率は、いずれの季節においても開発目標の平均80%以上であった。この結果から、高濃度オゾンガスを注入し、特殊攪拌翼でオゾンガス気泡を微細化する方法は、濃縮余剰汚泥の可溶化に効果的であることが示された。ここで、四季の試験結果から、オゾン消費率は、夏場に最も高い値を、冬場に最も低い値となった。また、春および秋は同程度の値であった。外気温により汚泥の粘性

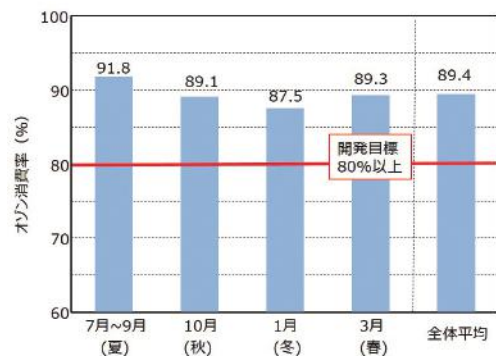


図8 四季ごとのオゾン消費率
Fig. 8 Ozone consumption rates by season

や密度が影響を受けることになるが、気温が高い夏には、汚泥の粘度と密度が小さくなり、オゾン気泡が微細化しやすくなったことで、オゾン消費率が高くなったと考えられる、また、四季ごとのオゾン消費率は試験期間通年平均の89.4%±3%の範囲内にあり、オゾン消費率の四季の変動は小さいとの結果が得られた。

(2) 浮遊物(VSS)可溶化率

図9に四季ごとの浮遊物(VSS)可溶化率の平均と全体平均を示す。最も高い可溶化率は春季の35.6%、最も低い可溶化率は冬季の25.2%、全体平均は30.2%であった。この結果から、60~80mg-O₃/g-SSのオゾン吸収量で処理した濃縮余剰汚泥は、浮遊物(VSS)可溶化率が、いずれの季節においても開発目標の平均20%以上となることが示された。浮遊物(VSS)可溶化率が、季節によって10%程度異なる要因としては、余剰汚泥の性状が季節によって異なること等が考えられるが、より詳細な確認・検証の余地が残されていると考えている。

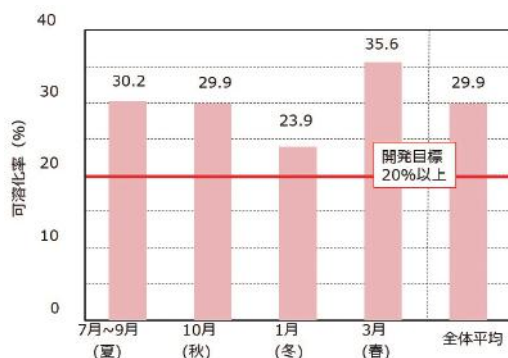


図9 四季ごとの浮遊物(VSS)可溶化率
Fig. 9 Suspended solids (VSS) solubilization rate by season

(3) バイオガス増産効果

67日間の消化試験で発生したバイオガスの総量と消化槽に投入した混合汚泥の有機物総量(VTS)1gあたりから発生したバイオガス量を算出した結果を図10に示す。初沈汚泥と濃縮余剰汚泥を投入した対照系から発生したバイオガス量は0.37L/g-VTSであった。初沈汚泥とオゾン処理を行った濃縮余剰汚泥を投入した可溶化処理系から発生したバイオガス量は0.45L/g-VTSに増加した。濃縮余剰汚泥をオゾン処理によって可溶化することで、バイオガス発

生量は22%増加することを確認した。この結果から、オゾン処理による濃縮余剰汚泥の可溶化処理により、バイオガス化率が向上することが示された。

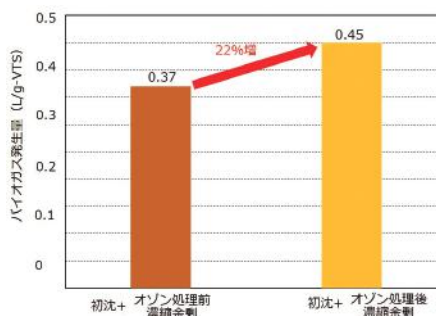


図10 VTSあたりのバイオガス発生量
Fig. 10 Biogas generation per VTS

(4) 水質への影響に対する検討結果

67日間の消化試験で得られた消化汚泥を基に、脱水脱離液を抽出し、性状確認を行った結果を表1に示す。

表1 脱水脱離液性状
Table1 Dehydration desorption liquid Properties

試料名	BOD	CODMn	全リン T-P	全窒素 T-N
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
対照系	36	150	400	1,000
可溶化系	120	510	420	1,300

表1の脱水脱離液性状を基に、下水処理場の令和元年度 維持管理年報の流入水性状から影響を試算した結果を表2に示す。現状を模擬した対照系の返流水水質から試算した①流入水+返流水と、可溶化を実施した際を模擬した可溶化系の返流水水質から試算した②流入水+返流水を比較した結果、負荷増加率が最も大きいT-Nにおいても5%以下の増加率となることが確認できた。このことから、可溶化による水処理への影響は軽微であるものと想定される。

表2 脱水脱離液による流入水への影響評価
Table2 Assessment of impact of dehydration desorption liquid on influent

試料名	BOD	CODMn	全リン T-P	全窒素 T-N
	ton/日	ton/日	ton/日	ton/日
対照系①	17.59	9.90	0.58	3.73
可溶化系②	17.63	10.08	0.59	3.89
負荷増加率 ②/①×100	100.3	101.9	101.8	104.2

5 結言

本論文では、下水処理場への適用性を考慮した濃縮余剰汚泥を対象としたオゾン可溶化反応装置の開発について述べた。濃縮余剰汚泥は粘性が高く、オゾン消費率が30%以下と低いことが課題であったが、高濃度オゾンとオゾン化ガスを効率的に微細化する特殊攪拌翼により、四季を通して80%以上のオゾン消費率を安定して実現可能なオゾン可溶化反応装置を開発するに至った。

今回開発したオゾン可溶化反応装置を用いて作成したオゾン処理濃縮余剰汚泥を用いた消化発酵試験では、消化醗酵槽に投入した全有機分(VTS)あたりのバイオガス発生量が22%増加する結果が得られた。また、可溶化による水処理への影響を試算した結果、負荷増加率が最も大きいT-Nにおいても5%以下の増加率にとどまることが確認できた。

今後は、可溶化反応装置、消化醗酵槽、脱水機を合わせたシステムとして、実規模での確認を実施し、オゾン可溶化技術による効果検証を進める所存である。下水汚泥のバイオマスとしての有効利用に貢献し、下水処理場での省エネ・創エネ技術の開発と実装を通して、地球温暖化防止等の諸課題解決に貢献をしていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省 下水道部 (2011)下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン(案)
- 2) 農林水産省 統計部 (2011)平成24年食品循環資源の再生利用等実態調査報告
- 3) 環境省 廃棄物対策課 (2011)日本の廃棄物処理 P36-P46
- 4) デイリージャパン, 高畑英彦 (2000)家畜糞尿のメタン発酵処理 メタン発酵の基礎(1)
- 5) (社)日本下水道協会 (2002)平成12年度版 下水道統計 - 要覧 -

