

好熱性微生物を利用した余剰汚泥が発生 しない活性汚泥処理プロセス S-TE PROCESSの実証

Systematization of S-TE PROCESS
Zero-Discharge Activated Sludge Process Using
Thermophilic Bacteria



(技)研究開発部
長谷川 進
Susumu Hasegawa
福井 孝博
Takahiro Fukui
赤司 昭
Akira Akashi
(技)開発企画室
桂 健治
Kenji Katsura

著者らは、これまで、汚泥を可溶化する好熱性微生物を用いた余剰汚泥の発生しない活性汚泥処理プロセスを提案し、人工廃液及び実工場廃液を用いた室内実験により実証した。本稿では、パイロットテストの運転結果を報告する。処理水 SS, TOC が若干上昇するものの、余剰汚泥の引き抜きをしない運転が可能であること、所定の条件で運転することにより、汚泥可溶化好熱菌の培養が可能であること等、室内実験で実証された結果を再現することができた。

We have previously demonstrated that the zero-discharge activated process can be achieved by using thermophilic bacteria which solubilize excess sludge.

In this paper we show the results of pilot test. In our process, SS and TOC concentrations of the treated water increased slightly compared with those of conventional activated sludge system. But we could run the process without disposing excess sludge.

Key Words :

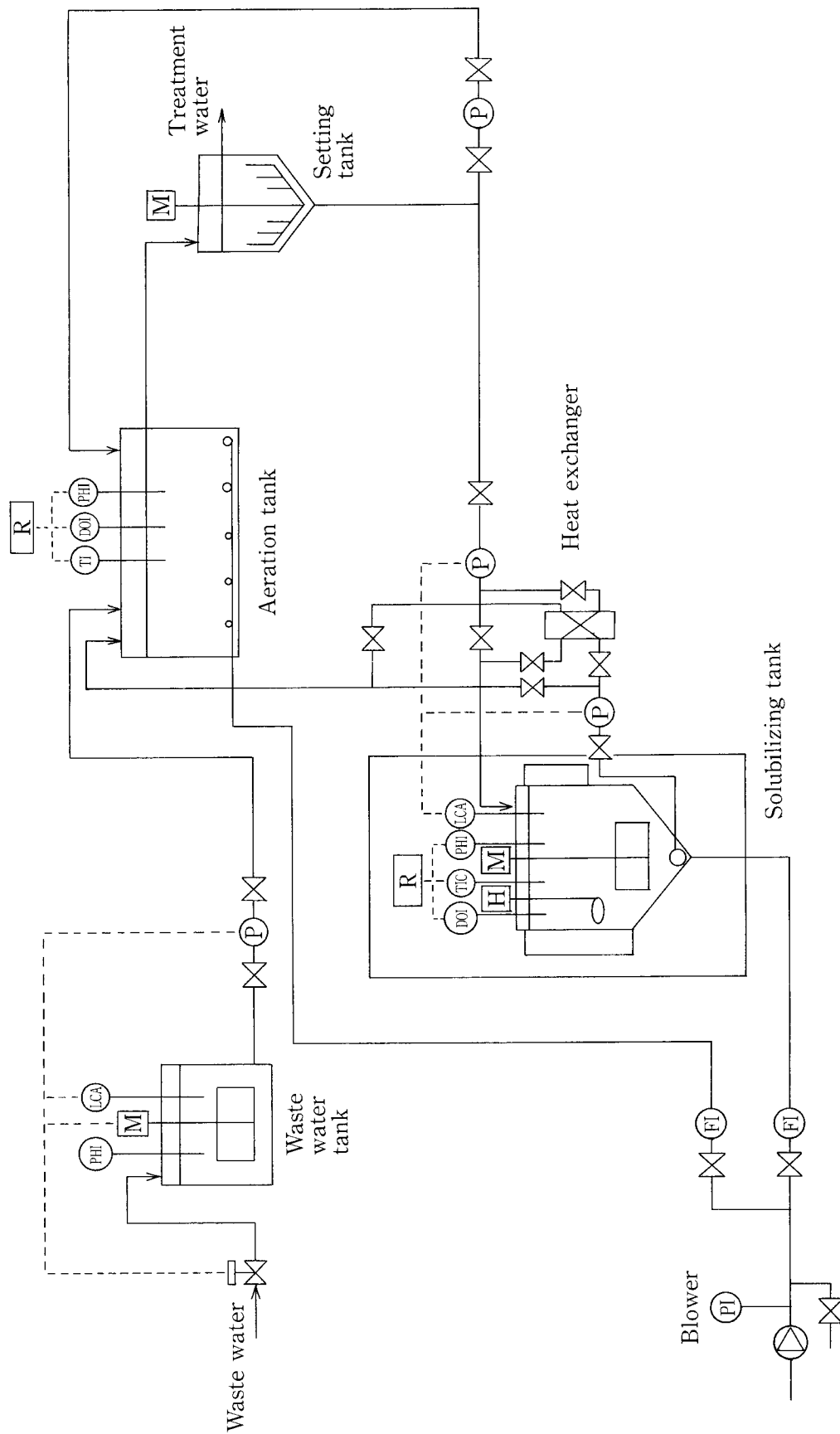
好熱性細菌
余剰汚泥
可溶化
活性汚泥法

Thermophilic bacteria
Excess sludge
Solubilization
Activated sludge system

まえがき

わが国における1993年度の産業廃棄物排出量は、約4億トンとされており、ここ数年、ほぼ横這いの傾向にあるが、その量は、家庭から排出される一般廃棄物の約8倍の量に相当する。この内約20%が最終処分として埋め立て処理されており、最終処分場の残余容量はここ数年をピークに減少の傾向にあ

る。このままでは、約10年後には、残余容量がゼロになるとの推算もあり、産業廃棄物の再利用、減量化が緊急の課題となっている¹⁾。産業廃棄物の内、生物学的排水処理設備より排出される余剰汚泥は、有機物含有量が多いことから、大規模工場あるいは都市圏の大規模下水処理場などでは、脱水の後、焼却、溶融による減容化が主流となっている。しかし、



第1図 S-TE PROCESS 7ロ-図
Fig. 1 Flow diagram of S-TE PROCESS

小規模工場あるいは今後普及が予想される中小市町村の小規模下水道においては、専門技術者の不足や経済面での制約があり、大規模向けに開発された技術がそのまま適用できるとは限らず、むしろ小規模設備に適した新たな技術開発が望まれている²⁾。

廃棄物減容の基本は廃棄物を出さないことであり、その様な観点から、1995年、公共下水道に関しては「発生汚泥等の処理に当たっては、脱水、焼却、再生利用等によりその減量に努めなければならない」との責務条項を盛り込んだ下水道法の一部改正がなされた。また、近年、多くの企業が「ゴミゼロ工場」「ゼロエミッション」等を目指し、工場、事業所からの廃棄物の削減に取り組んでいる³⁾。

有機性廃水の生物学的処理法は、増殖する生物により廃水中の有機物を吸着あるいは分解させるため、増殖汚泥の発生は宿命的なものである。そのため、永年、汚泥生成の少ないプロセスの検討がなされ生物膜法、長時間曝気法等余剰汚泥の発生が少ない活性汚泥法の開発がなされてきたが、それでも余剰汚泥の全く発生しないプロセスは存在しなかった。しかし、近年、山本ら⁴⁾による膜分離活性汚泥法、安井ら⁵⁾によるオゾン活性汚泥法により、見かけ上余剰汚泥の発生しないプロセスが提案され、注目を集めている。前者は、曝気槽中に膜を浸漬して固液分離することにより槽内 MLSS 濃度を高め、生物の自己酸化を促進し汚泥を減容化する方法であり、後者は、曝気槽内の汚泥を一部引き抜き、オゾンに接触させて可溶化し、再び曝気槽へ循環返送して生物分解することにより汚泥を減容化する方法である。しかし、一般に膜処理やオゾン等の物理化学的処理は装置自体はコンパクトになるが、建設費が高くなる、維持管理が煩雑等の問題あり、特に、小規模の事業所では経済的負担が大きくなる傾向にある。そこで、著者らは経済性に優れた微生物による汚泥減容化処理を検討し、これまで、ある種の好熱性微生物が汚泥可溶化酵素を体外に分泌し、有機性汚泥を可溶化することを明らかにした⁶⁾。さらに、汚泥可溶化好熱菌を用いて可溶化した可溶化液を従来の活性汚泥処理槽に返送してガス化することにより、見かけ上余剰汚泥の発生をゼロにすることが可能な活性汚泥システムを提案し、ベンチスケールテストで実証した⁷⁾。そこで、本稿では、実廃液を用いたパイロットテストの結果を報告する。

1. パイロットテストの概要

実装置化にあたって、ベンチスケールテストで得られた処理性能の実証と、運転立ち上げ方法及び維

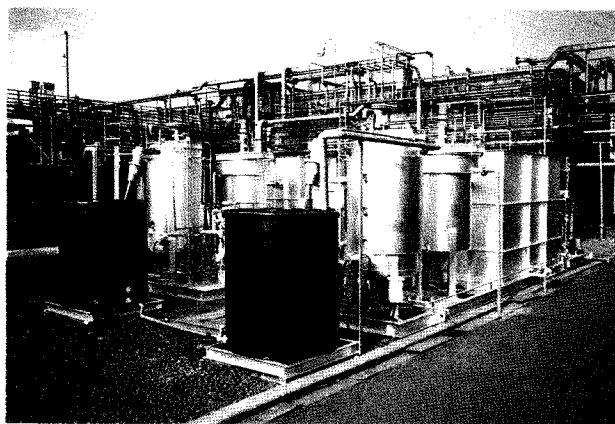


写真 1 パイロットテスト装置
Photo.1 Pilot plant of S-TE PROCESS

持管理性の確認等を行うため、実廃液を用いたパイロットテストを実施した。テストは、石油化学工場活性汚泥廃水処理設備の流入廃液を対象とし、現地に、パイロットテスト機を設置して行った。

1. 1 テスト装置

パイロットテスト機のフローシートを第1図に、装置の概略仕様を第1表に、また、装置外観を写真1に示す。S-TE PROCESSの主要部は、汚泥可溶化槽であるが、汚泥の出ないプロセスが活性汚泥曝気槽との組み合わせによりはじめて達成されることから、パイロットテスト機も、汚泥可溶化好熱菌を培養する汚泥可溶化槽と、固液分離槽を含む活性汚泥処理設備から構成されている。写真1に示すよう、装置は2系列で運転し、1つの系は汚泥可溶化槽を運転しない通常の活性汚泥法とし、S-TE PROCESSの効果を評価するための対照系とした。

1. 2 運転方法

1) 装置の制御法

実設備の原水ポンプ吐出側より分岐をとり、原水を一旦本テスト機の原水槽に受水した。原水槽よりは、原水ポンプで分配槽を通してそれぞれの系に注水した。曝気槽で処理された排水は沈殿槽で固液分離され、S-TE PROCESSでは、沈殿汚泥を一部汚泥可溶化槽に移送し、残りは返送汚泥として曝気槽に返送した。また、必要がある場合は、一部を余剰汚泥として系外に引き抜いた。汚泥可溶化槽は電気ヒーターにより加温され、好熱菌培養温度を 65 ± 2 ℃に保った。汚泥可溶化槽への汚泥移送量を変化させ可溶化処理汚泥量を変化させる場合は、汚泥可溶化槽での反応時間が1日となるよう、槽内液位を調整することにより反応槽容積を変化させ、処理汚泥量の変化に対応した。汚泥可溶化槽で可溶化され

た汚泥は全量曝気槽に返送した。一方、対照系では、曝気槽内で増殖する汚泥分を余剰汚泥として連続的に系外に排出した。

運転条件を第2表に示す。できるだけ実設備の運転条件に合わせるよう運転したが、沈殿槽における汚泥の濃縮度が実設備より低かったため、返送汚泥濃度が低くなり曝気槽内 MLSS 濃度を高く維持することができなかった。そのため、BOD/SS 負荷を基準として実装置の負荷に合わせて運転した。運転立ち上げ時、曝気槽内 MLSS 濃度の上昇に合わせて BOD/SS 負荷が所定の値になるよう廃水処理量を上昇した。

第2～4図に運転立ち上げ時の、曝気槽内 MLSS 濃度、BOD 容積負荷及び BOD/SS 負荷の経日変化を示す。曝気槽内 MLSS 濃度の上昇に合わせて廃水処理量を増大し、容積負荷を上昇することにより、BOD/SS 負荷をほぼ所定の 0.3 kg-BOD/kg-SS/d に調整できた。

2) 好熱菌の添加

運転立ち上げ時、本テストで用いたと同じ実廃液で約4ヶ月運転を継続した室内実験装置の汚泥可溶化槽より採取し、冷蔵庫に貯蔵しておいた好熱菌培養液を種汚泥として用いた。沈殿槽より引き抜いた汚泥9に対し1の割合で好熱菌培養液を添加し、65℃で2日間空曝気し、運転を立ち上げた。

3) 余剰汚泥の引き抜き及び汚泥可溶化処理量

対照系の余剰汚泥の引き抜きは、曝気槽内 MLSS 濃度が約 3000 mg/L となるよう引き抜き量を調整した。一方、S-TE PROCESS では、沈殿汚泥の一部を可溶化処理し、曝気槽 MLSS 濃度が上昇傾向にある場合は、沈殿槽より汚泥を引き抜いて、対照系同様、曝気槽内 MLSS 濃度を約 3000 mg/L に維持した。

運転立ち上げ時、対照系の余剰汚泥量 (Q_w) と同量の汚泥を汚泥可溶化槽に投入したが、この場合、曝気槽内 MLSS が上昇の傾向にあったため一部汚泥を引き抜いた。曝気槽内 MLSS が所定の値になったところで、約2週間毎に汚泥可溶化槽に投入する汚泥量 (Q_s) を増加し、最終的に対照系の余剰汚泥量の3倍 ($Q_s/Q_w=3$) に相当する汚泥を投入した時、汚泥を引き抜かない系が達成された。

1. 3 分析方法

処理水質の分析は、下水試験方法⁹⁾に準じた。なお、全有機態炭素 (TOC) は、島津製作所製 TOC-500 により測定した。

2. テスト結果

2. 1 余剰汚泥の発生量

運転立ち上げ時は、対照系では、曝気槽内平均汚泥滞留時間 (SRT) が20日になるよう引き抜き汚泥量を少なくした。約20日運転後、曝気槽 MLSS

第1表 装置仕様

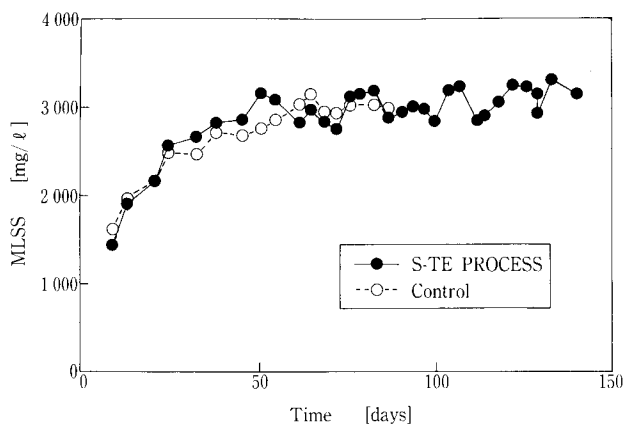
Table 1 Specifications of pilot plant

	S-TE PROCESS	Control
Aeration tank	1 m ^w ×3 m ^L ×2 m ^H (4.5 m ³)	1 m ^w ×3 m ^L ×2 m ^H (4.5 m ³)
Settling tank	0.8 m ^f ×1.3 m ^H (0.64 m ³)	0.8 m ^f ×1.3 m ^H (0.64 m ³)
Solubilizing tank	0.8 m ^f ×1.5 m ^H (0.54 m ³)	—

第2表 運転条件

Table 2 Operational Conditions of pilot plant

	S-TE PROCESS	Control
Volumetric loading rate (kg-BOD/m ³ /d)	0.8	0.8
Sludge loading rate (kg-BOD/kg-SS/d)	0.3	0.3
MLSS of aeration tank (mg/L)	3000	3000
HRT (d)	2	2
Aeration rate (m ³ /m ³ /min.)	0.1	0.1
〈Solubilizing tank〉		
HRT (d)	1	—
Temperature (°C)	65	—
Aeration rate (m ³ /m ³ /min.)	0.1	—



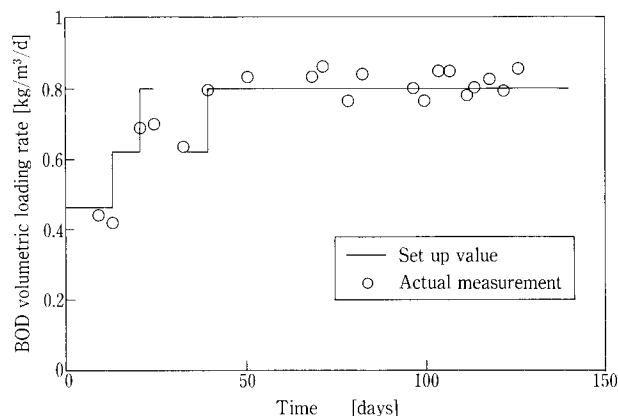
第2図 曝気槽内 MLSS の経日変化
Fig. 2 Time course of MLSS

濃度の上昇にともない、引き抜き汚泥量も増加し、最終的には、SRTを10日程度に調整した。一方、S-TE PROCESS においては処理水質への影響も考慮し、運転立ち上げ時は対照系の余剰汚泥量に相当する量の汚泥を汚泥可溶化槽に移送し、対照系の MLSS 濃度と同じになるよう余剰汚泥の引き抜きを行った。MLSS 濃度が 3000 mg/L に達してからは、2週間毎に汚泥可溶化槽への移送量を2倍3倍と増加し、結果的に3倍処理した時、汚泥の引き抜きを必要としない系が成立した。

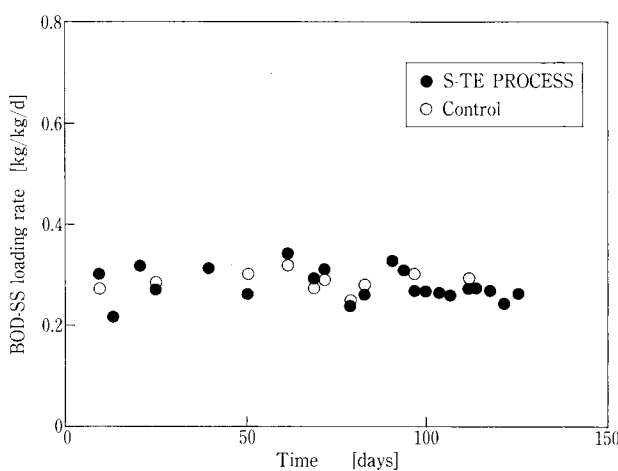
第5図に除去 BOD と発生した余剰汚泥量の関係を示す。グラフの傾きは、除去 BOD 当たりの生成汚泥量、即ち、見かけの汚泥転換率を示す。生成汚泥量としては、人為的に余剰汚泥として系外に引き抜いた汚泥と、処理水中に流出した SS 及び無視小ではあるが分析用採取分の合計とした。対照系では、実験期間を通じて、見かけの汚泥転換率は約0.25であった。一方、S-TE PROCESS では、可溶化処理する汚泥量を増加することにより、見かけの汚泥転換率が減少し、対照系で排出される余剰汚泥量の約3倍量の汚泥を可溶化処理することにより、見かけの汚泥転換率はほぼゼロになった。この条件では、人為的な汚泥の引き抜きは行っておらず、系より排出される汚泥は、処理水中の SS 及び分析用採取分のみである。

2.2 処理水質

第3表に汚泥の引き抜きを行わない運転条件での定常時における処理水水質の平均値を示す。処理水 BOD はいずれの系でも良好で実験期間を通じ常に 5 ppm 以下であった。一方、S-TOC 及び SS は対照系と比べ S-TE PROCESS では、それぞれ 37%、33% 上昇した。これは、汚泥を可溶化して曝気槽



第3図 BOD 容積負荷の経日変化
Fig. 3 Time course of BOD volumetric loading rate



第4図 汚泥負荷の経日変化
Fig. 4 Time course of BOD-SS loading rate

に返送することにより、曝気槽の汚泥負荷が上昇したためと考えられる。また、本廃水を用いて室内実験を実施した時の測定結果も併記してあるが、室内実験においては SS の値がパイロットテスト結果より高めにでているものの、両者は、ほぼ同様の傾向を示しており、室内実験結果をよく再現することができた。このことは、逆に、室内実験により、実設備の処理水質を予測することができることを示唆する。室内実験で処理水 SS が高くなったのは、沈殿槽が小さいため壁面効果が現われたこと、及び曝気槽温度を 28℃ にコントロールしたため、外気温にさらされ水温の低下した沈殿槽滞留水中に曝気槽流出液が流入した際、密度流を生じ、固液分離性能が低下したためと推察される。第6図に対照系の余剰汚泥引き抜き量 (Q_w) に対する S-TE PROCESS の可溶化処理汚泥量 (Q_s) の割合を可溶化処理率 (Q_s/Q_w) と定義したときの可溶化処理率と処理水

第3表 処理水質
Table 3 Performance of S-TE PROCESS

	Influent	Effluent			
		Pilot scale test		Bench scale test	
		S-TE PROCESS	Control	S-TE PROCESS	Control
BOD ₅ (mg/L)	1550	< 5	< 5	< 5	< 5
SS (mg/L)	45	29.2	21.9	39.8	30.1
S-TOC (mg/L)	990	52.9	38.4	55.8	41.2

水質の関係を示す。可溶化処理率を増加することにより汚泥可溶化液の返流に起因する曝気槽への負荷が上昇するため、処理水 TOC が増加していることが分かる。また、図中には、ポリペプトン、グルコースを主成分とする人工廃水を用いた室内実験の結果も併記したが、TOC の上昇率は処理する廃水の組成によっても影響され、比較的生物分解の容易な人工廃水を処理した場合は、上昇率は小さい値となった。

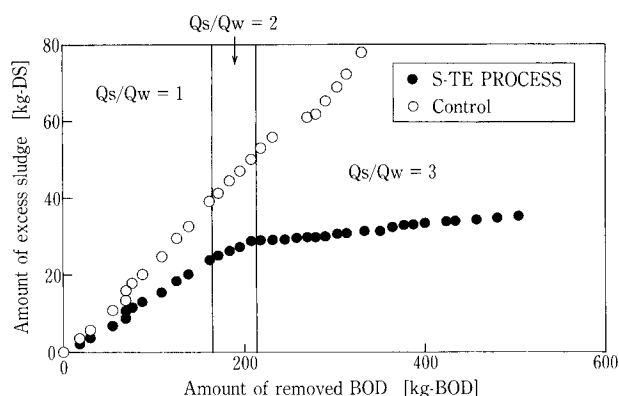
2.3 好熱菌の挙動

第4表は汚泥可溶化槽中の好熱菌計数結果を示す。好熱菌の計数は、既報の方法により行った⁶⁾。汚泥可溶化槽中の好熱菌数は 10⁴ オーダーで曝気槽より2桁多かった。また、曝気槽中の好熱菌がほとんど全て休眠孢子で存在するのに対し、汚泥可溶化槽中では、ほぼ100%は生菌として存在しており、汚泥の可溶化に寄与していることが分かった。

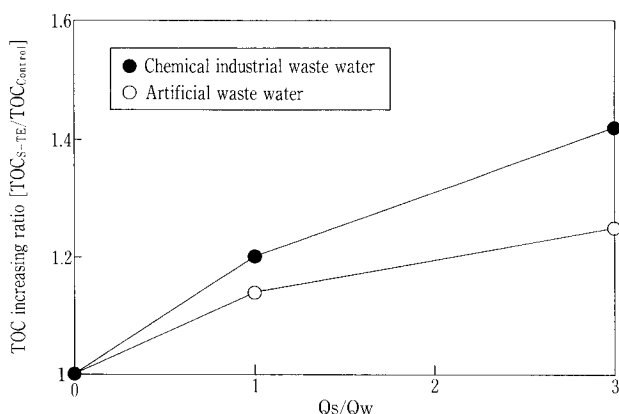
写真2は、好熱菌計数中に得た代表的な好熱菌のコロニーを継代培養し、汚泥を懸濁させた寒天培地に塗抹し、65℃恒温槽中にて24時間培養した結果である。コロニー周辺にハローが認められ、好熱菌が分泌した汚泥可溶化酵素により汚泥が可溶化され透明部ができたことが確認された。

S-TE PROCESSでは、余剰汚泥を65℃の高温で処理するため、曝気槽内の中温菌がダメージを受ける事が懸念される。そこで、S-TE PROCESSと対照系の曝気槽内の中温菌数を比較した。第5表に示すように、両系の曝気槽内の中温菌数(CFU/ml)は共に10⁷オーダーで大きな差はなかった。従って、BOD除去成績と併せて考えると、S-TE PROCESSによる中温菌へのダメージは少ないものと考えられる。

前述の結果より、汚泥可溶化槽で生育した好熱菌は曝気槽に返送されても死滅するのではなく孢子の形で生存し、好熱槽に戻された際、再び発芽し、活動するものと考えられる。また、汚泥可溶化槽に流入した中温菌も全て可溶化されるわけではなく、一



第5図 BOD除去量と持出汚泥量の関係
Fig. 5 Relationship between excess sludge and removed BOD



第6図 可溶化処理率(Q_s/Q_w)と処理水 TOC の関係
Fig. 6 Relationship between Q_s/ Q_w and TOC increasing ratio

部、孢子の形で生存し、曝気槽に返送された際、再び活性を取り戻すものもいると考えられる。この様に、S-TE PROCESSにおいては、それぞれ環境に適した生物が優占するようになると考えられるため、従来の活性汚泥法における生物相とは異なる生物相になっているものと推察される。

2.4 系内への無機物 (ash) の蓄積

S-TE PROCESSでは発生する余剰汚泥を系外へ引き抜かないため、系内への無機物の蓄積が懸念される。そこで、VSS/SS比を測定することにより、

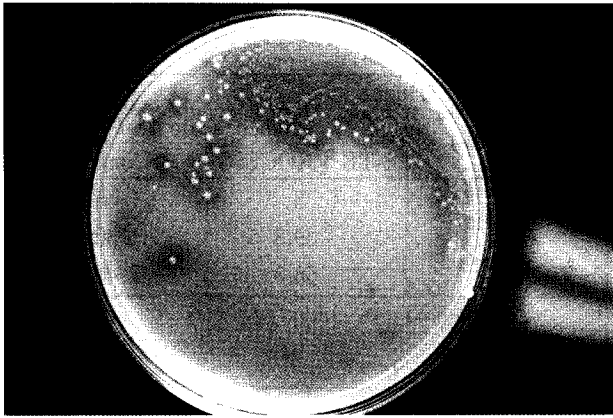
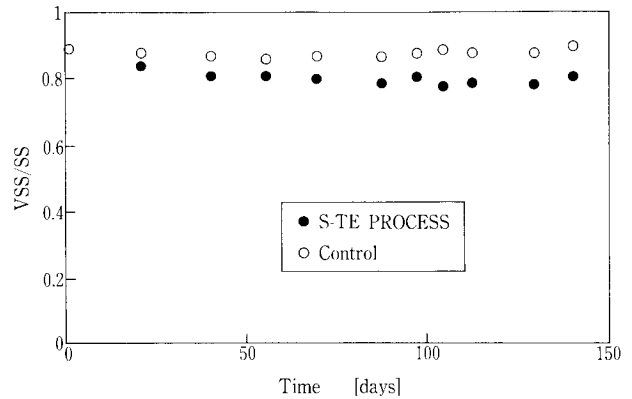


写真 2 好熱菌による汚泥の分解・可溶化
Photo. 2 Solubilization of sludge by thermophilic bacteria



第7図 VSS/SSの経日変化
Fig. 7 Time course of VSS/SS

第4表 汚泥可溶化槽内好熱菌数
Table 4 Number of thermophilic bacteria in the solubilizing tank

	Number of colony forming units(CFU/ml)	Ratio
Viable cells	2.36×10^4	1
Spores	2.8×10^2	0.01

第5表 曝気槽内中温菌数
Table 5 Number of methophilic bacteria in the aeration tank

	Number of colony forming units(CFU/ml)	Ratio
S-TE PROCESS	1.80×10^7	0.7
Control	2.54×10^7	1

曝気槽内の無機物の蓄積を考察した。第7図に示すように、S-TE PROCESSで運転初期において曝気槽内のVSS/SS比が低下する傾向が認められた。しかし、その傾向は、次第に減少し、最終的には、VSS/SS比0.8前後で安定するようになった。個々の無機塩類の挙動については未確認であるが、無機物の汚泥内への蓄積には上限があるものと推察される。これは、微生物が取り込める無機塩類には限界があるため、不要な無機物は菌体外に放出され、溶解性成分として処理水中に流出していくためと考える。

S-TE PROCESSの無機物含有量が対照系に比べて10ポイント程度高いことは、曝気槽内MLSS濃度を等しくした場合、微生物に代表される有機固形物が対照系に比べ少ないことを意味する。S-TE PROCESSでの処理水質の悪化は、対照系に比べ生物量が少なかったことも原因の1つと考えられる。

むすび

好熱性微生物を利用した余剰汚泥の発生しない活性汚泥法のパイロットテストを実施した結果、次の知見が得られた。

- 1) 石油化学工場廃水を対象としたパイロットテストにより、汚泥のでないプロセスを実証した。
- 2) 処理水BODは5 mg/L以下であったが、S-TOCは標準活性汚泥法に比べ35~40%程度上昇した。
- 3) S-TE PROCESSの曝気槽中の好熱菌数は 10^2 オーダーで全てが休眠孢子であるのに対し、汚泥可溶化槽中の好熱菌は 10^4 オーダーで、ほとんど全てが生菌であった。これら好熱菌は、汚泥を懸濁させた寒天上で、汚泥可溶化斑(ハロー)を示すことから、汚泥可溶化槽で好熱菌が良好に培養されていることを確認した。
- 4) S-TE PROCESSの曝気槽中の汚泥の無機物

含有率は、対照系に比べ10ポイント程度上昇したが、無機物が蓄積し続けることはなく、一定の値で安定した。

[参考文献]

- 1) 仁井正夫：環境技術，Vol.26，No.1，61-66，1997.
- 2) 渡部春樹：下水道協会誌，Vol.33，No.405，13-17，1996.
- 3) 例えば；PPM，Vol.27，No.9，17-85，1996.
- 4) 淵上善弘，山本和夫，浅見恵一，松尾友矩；衛生工学研究論文集，Vol.23，239-248.
- 5) Yasui, H., Shibata, M.; Wat. Sci. Tech., Vol.30, 11-20, 1994.
- 6) 長谷川進，三浦雅彦，桂健治；下水道協会誌，Vol.34，No.408，76-82，1997.
- 7) 桂健治，三浦雅彦，長谷川進；水環境学会誌（投稿中）
- 8) （社）日本下水道協会；下水試験方法（1984年度版）

連絡先

長谷川 進 技術開発本部
(工学博士) 研究開発部
主任研究員
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail s.hasegawa@pantec. co.jp

福井 孝博 技術開発本部
研究開発部
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail t.fukui@pantec. co.jp

赤司 昭 技術開発本部
(医学博士) 研究開発部
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail a.akashi@pantec. co.jp

桂 健治 技術開発本部
開発企画室
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail k.katsura@pantec. co.jp