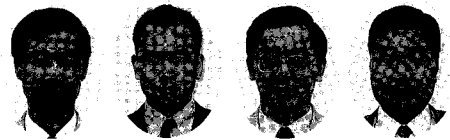


余剰汚泥の発生しない新しい活性汚泥法 —エステプロセス—の紹介



Zero-discharge activated sludge process, S-TE PROCESS

(技)研究開発部第1研究室
赤 司 昭
Akira Akashi
塩 田 憲 明
Noriaki Shiota
長 谷 川 進
Susumu Hasegawa
那 須 潔
Kiyoshi Nasu

近年、余剰汚泥の減量化、消滅化に関する要望が一段と高まっている。我々は今までにない余剰汚泥発生がゼロの廃水処理・汚泥処理一体型のプロセス、エステプロセスを開発し、販売を開始した。本法は好気性好熱細菌を用いて汚泥を可溶化後、曝気槽に返送して無機化することにより余剰汚泥の発生をゼロにするものである。本法は、運転費が安価で維持管理が容易であるという特長を有する。

We have developed the zero-discharge activated sludge process, S-TE PROCESS. This process is consist of the conventional activated sludge process and thermophilic aerobic digester (S-TE reactor) in which excess sludge are solubilized by thermophilic bacteria. Complete decomposition of the excess sludge is carried out when the sludge is solubilized by thermophilic aerobic bacteria and mineralized by activated sludge. This process is economical and easy maintenance. Operating cost of S-TE PROCESS is one-third to one-fourth of that of conventional sludge treatment method (dewatering + dumping).

Key Words :

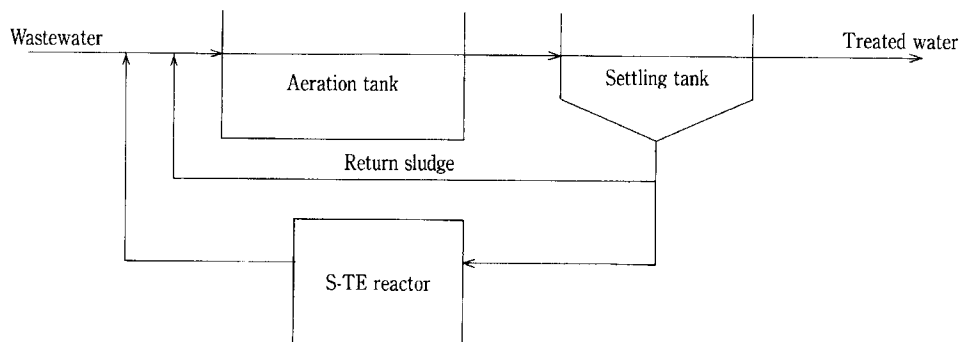
活 性 汚 泥
余 剰 汚 泥
好気性好熱細菌

Activated sludge process
Excess sludge
Aerobic thermophilic bacteria

まえがき

有機性廃水の生物処理で生じる余剰汚泥の発生量は、下水汚泥だけで約171万 DS-t/年に達しており(平成8年度)、今後も下水道の普及により更に増加すると予想される。¹⁾ また、工場廃水における余剰汚泥の発生量も下水の普及による増加同様、生産活動の増加に伴い今後も増加するものと予想される。余剰汚泥の多くは脱水、あるいは、脱水・焼却によ

り減容後埋め立て最終処分されているが、埋め立て地の確保は年々困難になっている。このような現状をふまえ、余剰汚泥の農地還元、建設資材化、あるいは熱利用などのリサイクルに関する取り組みも積極的に行われているが、経済性の問題等解決すべき課題もあり、有効利用されている余剰汚泥は30%程度である。このように、汚泥の処分は埋め立てに依存しているのが現状であり、何らかの対策が求め



第1図 エステプロセス概略フロー
Fig. 1 S-TE PROCESS Flow

られている。

本稿では、余剰汚泥発生ゼロをめざして開発した廃水処理-汚泥処理一体型の新しい活性汚泥法、エステプロセスについて紹介する。

1. 既存の余剰汚泥減量化技術

活性汚泥法そのものから余剰汚泥の発生量を削減する試みは数多くなされている。活性汚泥は、有機物の酸化、合成、自己酸化が同時並行的に進むので、汚泥の正味の生物学的増殖は次式で表すことができる。すなわち、

$$\Delta X = aSr - bX$$

ΔX : 余剰汚泥発生量 (kg/日)

Sr : 除去 BOD 量 (kg/日)

X : 曝気槽中の活性汚泥量 (kg)

a : 除去 BOD の汚泥転換率

b : 体内呼吸による自己酸化率 (日⁻¹)

従って、余剰汚泥発生量を削減するためには、汚泥転換率 (a) を下げるか、自己酸化率 (b) を上げる、若しくは、曝気槽の MLSS 濃度を上昇させ活性汚泥量を増やすことが考えられる。

自己酸化を上げる方法として長時間曝気法、MLSS 濃度を上昇させる方法として膜分離活性汚泥法やサポニンを曝気槽に添加する方法、さらに、汚泥転換率を下げる方法として腐植土やスギナを曝気槽に添加する方法等が挙げられるが、²⁾ いずれも汚泥発生量を減少させることはできるが、ゼロにすることは不可能である。

2. エステプロセス

2.1 エステプロセスの概要

エステプロセスは上記の処理方法とは概念が全く異なるものである。すなわち、第1図に示すように、

余剰汚泥を汚泥可溶化槽 (エステ槽) で処理後、曝気槽に返送し、無機化する水処理・汚泥処理一体型のプロセスである。

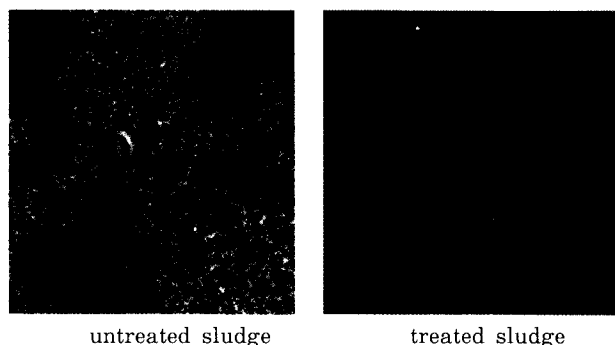
エステ槽は沈殿槽を持たないため、活性汚泥法のような汚泥管理 (返送汚泥管理, 汚泥界面の管理) を必要とせず、運転管理はエステ槽温度と通気量だけで良く、運転は極めて容易である。

2.2 エステプロセスの原理

2.2.1 汚泥を可溶化する好気性好熱細菌

エステプロセスで使用する細菌は *Bacillus stearothermophilus* に分類される病原性のない安全な細菌で、自然界から分離されたものである。この細菌は好気性条件の下で 60~70℃ で活発に増殖し、強力な汚泥可溶化酵素を分泌し、汚泥を溶解する (第2図)。また、本菌は 50℃ 以下では増殖せず、かつ、汚泥可溶化酵素も 50℃ 以下では不活性であるため、曝気槽の活性汚泥に悪影響を及ぼすことはない。

本菌は、芽胞 (孢子) 形成細菌の一種であり、芽胞は種々のストレス (温度変化, 毒性物質の混入, 乾燥等) に晒されても死滅することなく生残する。



第2図 好熱性細菌による汚泥の可溶化
Fig. 2 Sludge solubilization of thermophilic bacteria

曝気槽内では一部芽胞の状態が存在するため、死滅することなく、沈殿槽を経てエステ槽に送られ、再度活性化（発芽）し、汚泥の可溶性に寄与する。従って、種菌の追加接種は不要である。

2.2.2 汚泥消滅化の原理

本法は、エステ槽で可溶化した汚泥の曝気槽における無機化量と、活性汚泥単独運転時の余剰汚泥の発生量とが等しくなるように、エステ槽で処理する汚泥量を決定することにより、汚泥の発生量がゼロになる。

3. 実施例

3.1 室内実験

3.1.1 人工廃水処理テスト

まず、基礎的データの入手を目的として、人工廃水を処理した場合に発生する余剰汚泥の消滅化実験を実施した。

1) 実験条件

(1) 実験装置

標準活性汚泥法：曝気槽；40 L
 (Run 1) 沈殿槽；8 L
 エステプロセス：曝気槽；40 L
 (Run 2～5) 沈殿槽；8 L
 エステ槽；2 L

(2) 廃水

ペプトン、グルコース、乾燥酵母を主成分とする BOD 濃度約 1 500 mg/L の人工廃水。

(3) 実験フロー

第 3 図に示すように、対照系として標準活性汚泥法、汚泥減量化系（エステ系）として標準活性汚泥法にエステ槽を付加した 2 系列を運転した。

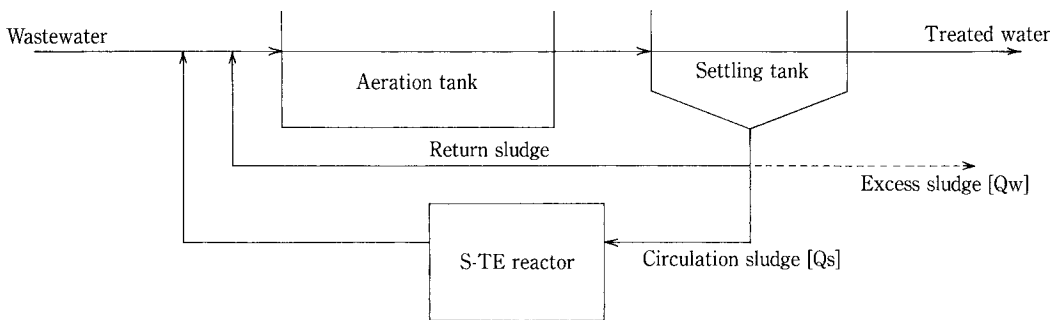
(4) 汚泥可溶性菌の接種

エステ槽運転立上げ時に、凍結乾燥した汚泥可溶性菌を接種した。種菌接種翌日からエステ槽の連続運転に入った。なお、種菌の接種は運転立上げ時に行っただけで追加接種は行わなかった。

(5) 運転条件

第 1 表に運転条件を示す。

Run 1 はエステ槽を付加しない標準活性汚泥法である。Run 2 から 5 は汚泥減量化を目的としてエステ槽を付加して運転した。Run 2 は標準活性汚泥法で発生した余剰汚泥と等量 ($Q_s/Q_w = 1$) の汚泥をエステ槽で処理した。Run 3 は余剰汚泥の 2 倍量 ($Q_s/Q_w = 2$)、Run 4 と 5 はそれぞれ 3 倍量 ($Q_s/Q_w = 3$) をエステ槽で処理した。Run 5 は Run 4 に比べ、曝気槽の MLSS 濃度を高め、SS 負荷を低減させることによる処理水質の改善効果を調べた。



第 3 図 実験フロー
 Fig. 3 Experimental flow

第 1 表 運転条件
 Table 1 Operating conditions

Run	1	2	3	4	5
Aeration Tank					
TOC-VSS load (kg/kg vss/d)	0.15	0.17	0.19	0.21	0.15
MLVSS (mg/L)	2 000	1 800	1 800	1 800	2 400
S-TE Tank					
Temp. (°C)	—	65			
HRT (d)	—	1			
Q_s/Q_w	0	1	2	3	3

2) 結果

(1) 汚泥発生量に対するエステ処理汚泥量（汚泥循環率： Q_s/Q_w ）の効果

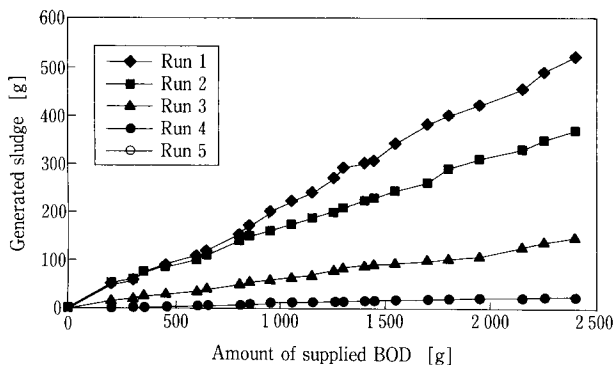
第4図にエステ槽で処理する汚泥量を変えて運転したときの発生汚泥量を示す。

標準活性汚泥法では2000gのBODを処理することにより約400gの余剰汚泥が発生した（BODの汚泥転換率=0.2）。一方、エステ槽で処理する汚泥量を1倍（Run 2）、2倍（Run 3）、3倍（Run 4、5）と増やすことにより、発生汚泥量は減少し、最終的に、余剰汚泥の3倍量をエステ槽で処理後曝気槽に返流することにより、汚泥を引抜くことなく曝気槽のMLSSを一定に保持することができた。

(2) 処理水質

第2表に各運転条件時の処理水質を示す。

BODは対照運転，エステプロセス運転時，共に5mg/L未満となり，良好な処理水質が得られた。一方，TOC濃度は，エステ槽での汚泥処理量を増やすに従い上昇し，汚泥完全消滅時（Run 4）のTOC濃度は活性汚泥単独運転時（Run 1）に比べ，約30%上昇した。しかし，曝気槽のMLSS濃度を高め，負荷を適正にすることにより（Run 5），TOCの上昇は12%の上昇に抑制することができた。汚泥完全消滅運転時の処理水SS濃度も活性汚泥単独運転に比べ約10%上昇した。



第4図 汚泥発生量に対するエステ処理汚泥量（汚泥循環率： Q_s/Q_w ）の効果

Fig. 4 Effect of sludge circulation ratio (Q_s/Q_w) on the sludge generation

第2表 各運転条件による処理水質の比較

Table 2 Comparison of treated water quality

Run		1	2	3	4	5
S-BOD 5	(mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
S-TOC	(mg/L)	26	29	31	35	29
SS	(mg/L)	21	21	23	23	22

前述のように，人工廃水を用いた室内実験により，余剰汚泥の3倍量をエステ処理することにより余剰汚泥の発生をゼロにできること，汚泥消滅運転時の処理水TOCやSSは活性汚泥単独運転時に比べ若干上昇するものの，曝気槽のMLSS濃度を高め，負荷を適正にすることにより大幅に抑制できることが確認された。

3.1.2 石油化学工場廃水処理テスト

人工下水を用いた実験において汚泥消滅化が確認できた為，次に実際に石油化学工場から排出される廃水を用い，汚泥消滅化と処理水質について調べた。更に，エステ槽の後に後曝気槽を付加し，エステ処理汚泥に起因するBODやCOD成分を除去することにより本流の活性汚泥の負荷を低減し，処理水質の改善を狙った実験も同時に行った。

1) 実験条件

(1) 実験装置

標準活性汚泥法：曝気槽；40L
 (Run 1) 沈殿槽；8L
 エステプロセス：曝気槽；40L
 (Run 2, 3) 沈殿槽；8L
 エステ槽；2L
 (後曝気槽；2L)

(2) 実験フロー

第5図に示すように，標準活性汚泥法（Run 1），エステプロセス（Run 2），及び，処理水質の向上を目的としてエステ槽の後に後曝気槽を付加したRun 3の3系列を運転した。

(3) 汚泥可溶化菌の接種

3.1.1と同様に，エステ槽立上げ時に凍結乾燥した汚泥可溶化菌を接種した。

(4) 運転条件

第3表に運転条件を示す。

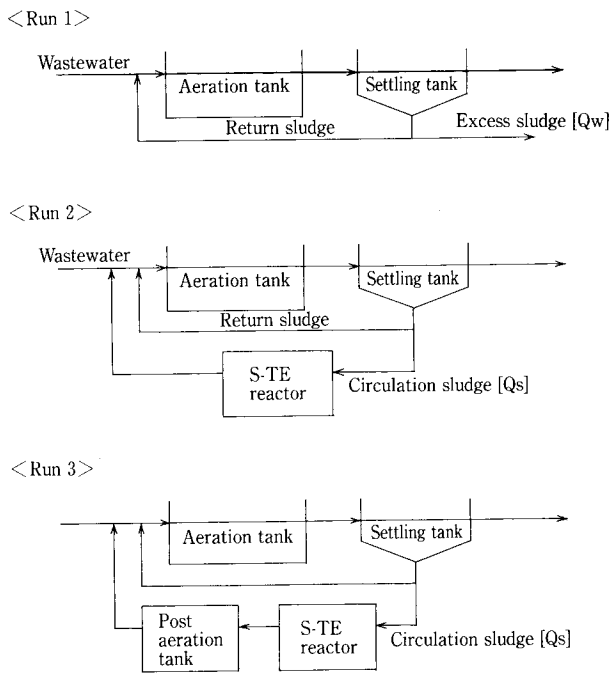
各Run共に，曝気槽は廃水を採取した石油化学工場の実機と同一条件で運転した。

2) 結果

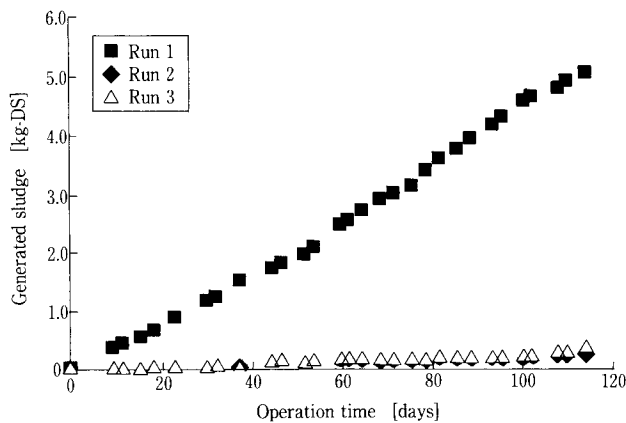
(1) 余剰汚泥発生量

第6図に発生汚泥量の積算量を示す。

標準活性汚泥法（Run 1）では120日間の運転で



第5図 実験フロー
Fig. 5 Experimental flow



第6図 余剰汚泥発生量
Fig. 6 Excess sludge generation

約 5 kg の余剰汚泥が発生したが、エステ槽を付加した Run 2, 3 では、余剰汚泥を引抜くことなく曝気槽の MLSS を標準活性汚泥法と同じ濃度で一定に保持できた。

(2) 処理水質

第4表に各 Run の処理水質を示す。

BOD は全て 5 mg/L 未満となり良好な水質が得られた。一方、TOC は汚泥消滅運転時 (Run 2) 対照系に比べ約 30 % 上昇したが、後曝気槽を設置 (Run 3) することにより改善された (10 % 上昇)。SS も汚泥消滅化運転時に 10~20 % 上昇した。

前述のように、人工廃水や石油化学工場廃水を用

第3表 運転条件

Table 3 Operating condition

Run	1	2	3
Aeration Tank			
BOD-SS load (kg/kg/d)		0.3	
MLSS (mg/L)		3 000	
Post Aeration Tank			
MLSS (mg/L)	—	3 000	—
HRT (d)	—	1	—
S-TE Tank			
Temp. (°C)	—	65	—
HRT (d)	—	1	—
Qs/Qw	—	3	—

第4表 処理水質

Table 4 Comparison of treated water quality

Run	1	2	3
S-BOD (mg/L)	<5	<5	<5
S-TOC (mg/L)	42	55	46
SS (mg/L)	31	37	35

いた室内実験により余剰汚泥ゼロを確認した。今回紹介した廃水以外にもさらに数種の廃水を用いて処理試験を実施したが、全てにおいて余剰汚泥発生ゼロを確認した。

3.2 パイロットテスト

前述のように、室内実験で余剰汚泥の消滅化を確認できた。そこで、次にパイロットテスト装置を現地に持ち込み、実際の負荷変動の下で汚泥消滅が可能か否か、及び、処理水質について検討した。

3.2.1 石油化学工場廃水処理テスト

1) テスト条件

(1) テスト装置

第7図にテスト装置の外観を示す。

テスト装置は、曝気槽 4.5 m³、沈殿槽 0.5 m³、および、エステ槽 0.5 m³ (0.18, 0.36, 0.5 m³ の 3 段階で切替え可) より構成される。装置は 2 系列用意し、一方はエステ槽を運転せず対照系 (標準活性汚泥法) として運転した。

(2) 運転条件

第5表に運転条件を示す。

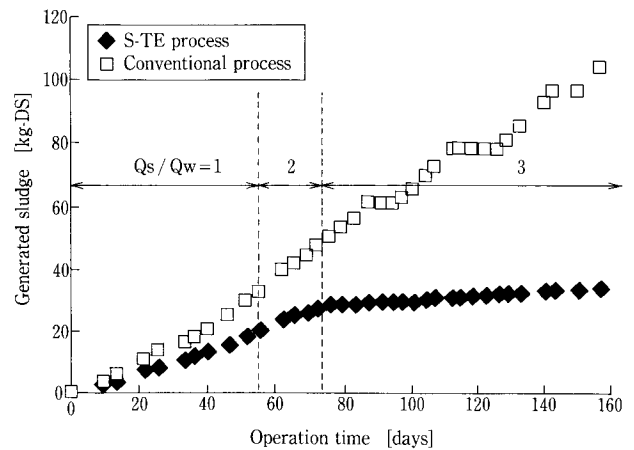
活性汚泥は実機と同一条件になるように運転した。エステ槽は水温 60~70 °C に設定し、滞留時間は 1 日とした。エステ槽で処理する汚泥量は、運転開始後 56 日目まで 1 倍量、56~75 日目まで 2 倍量、75~160 日目まで 3 倍量を処理し余剰汚泥発生量を調べた。

第 5 表 パイロットテスト機運転条件
Table 5 Operating conditions of pilot plant

		Conventional	S-TE PROCESS
Aeration Tank			
BOD-volmetric load	(kg/m ³ /d)	0.8	0.82
BOD-SS load	(kg/kg/d)	0.3	0.32
MLSS	(mg/L)	3 000	
HRT	(d)	2	
S-TE Tank			
Temp.	(°C)	—	60~70
HRT	(d)	—	1
Qs/Qw			0~ 56 days : 1 56~ 75 days : 2 75~160 days : 3



第 7 図 パイロットテスト装置
Fig. 7 Pilot test plant



第 8 図 余剰汚泥発生量
Fig. 8 Excess sludge generation

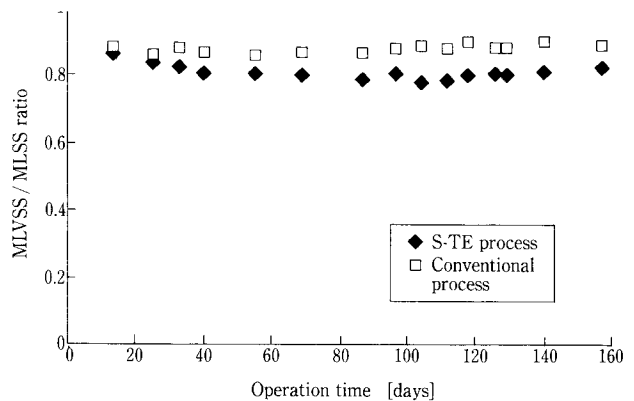
2) 結果

(1) 発生汚泥量

第 8 図に対照系とエステプロセスの余剰汚泥発生量を示す。対照系では160日間に渡る運転で約100 kg-DSの余剰汚泥が発生した。一方、エステプロセスではエステ槽で処理する汚泥量を増加するに従い汚泥発生量も減少し、最終的に3倍量を処理することにより余剰汚泥の発生量はゼロになった。

(2) 曝気槽活性汚泥の MLVSS/MLSS 比の経日変化

エステプロセスでは余剰汚泥を系外に引抜かないため、系内への無機物の蓄積が懸念される。そこで、対照系とエステプロセスの曝気槽活性汚泥の SS に占める VSS (有機性の SS) の比率を経日的に観察した。第 9 図に示すように、エステプロセスにおいて MLVSS/MLSS 比は徐々に低下したが、約0.8で平衡に達した。従って、余剰汚泥を引抜かないエステプロセスにおいて若干の無機物の蓄積は見られるものの、無制限な蓄積は起こらないと結論した。



第 9 図 MLVSS/MLSS 比の経日変化
Fig. 9 Time course for MLVSS/MLSS ratio of activated sludge in aeration tank

(3) 処理水質

第 6 表に対照系とエステプロセスの処理水質の比較を示す。BOD は両系とも 5 mg/L 未満の良好な水質が得られた。TOC と SS はエステプロセスにおいて若干 (それぞれ対照系の 15 %, 20 % アップ) 上昇した。

3.2.2 化学工場廃水処理テスト

1) テスト条件

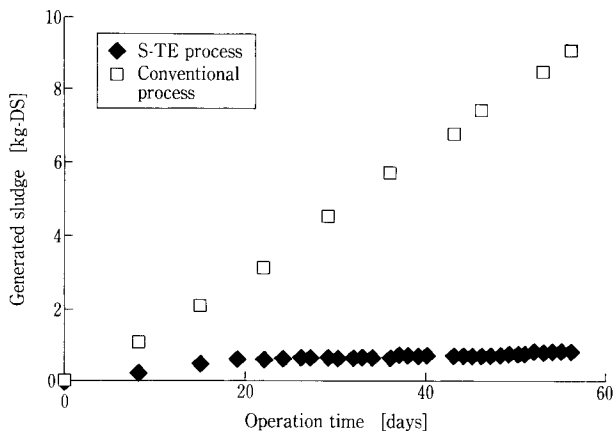
(1) テスト装置

3.2.1で使用した装置と同一のテスト機を使用した。

(2) 運転条件

第7表に運転条件を示す。

曝気槽はテスト装置を設置した工場の実機と同一条件で運転した。エステ槽は温度60~70℃, 好気条件で汚泥滞留時間が1日になるよう運転した。



第10図 余剰汚泥発生量

Fig.10 Excess sludge generation

2) 結果

(1) 発生汚泥量

第10図に積算発生汚泥量を示す。

対照系は50日の運転で約9 kg-DSの余剰汚泥が発生したが、エステプロセスでは余剰汚泥を引抜くことなく曝気槽のMLSSを一定に保持できた。

(2) 処理水質

BODは対照系, エステプロセス共に, 良好な処理水質が得られた。TOCはエステプロセスで若干上昇(15%上昇)した。SSはエステプロセスの方が低かった。

前述のように, 民間工場廃水を対象とした現地でのパイロットテストにおいても余剰汚泥消滅化を実証できた。今回紹介したテスト以外に更に5件の現地パイロットテストを実施したが, 全てにおいて汚泥消滅化を実証できた。

4. 経済性

4.1 算出基準

(1) 設計諸元

- ・余剰汚泥発生量 : 1.2 t-DS/d
- ・エステ処理汚泥量 : 3.6 DS/d
- ・エステ槽投入汚泥濃度 : 1.8 %
- ・エステ槽容量 : 200 m³

(2) ユーティリティー

- ・電気 : 10 円/kW
- ・蒸気 : 2.2 円/kg

第6表 処理水質

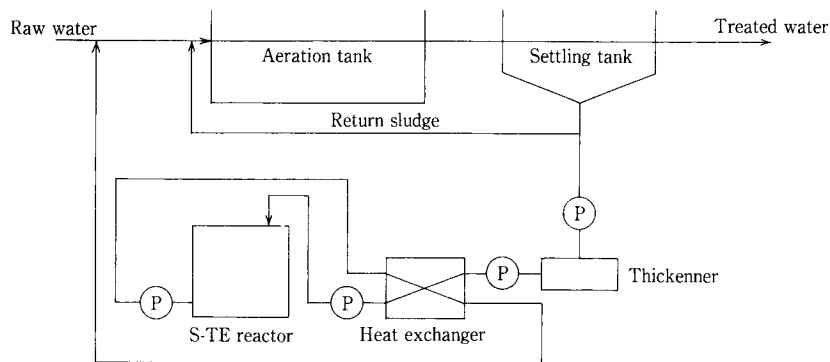
Table 6 Comparison of treated water quality

	Conventional	S-TE PROCESS
S-BOD (mg/L)	<5	<5
S-TOC (mg/L)	38.4	44.2
SS (mg/L)	21.9	26.3

第7表 運転条件

Table 7 Operating conditions

	Conventional	S-TE PROCESS
Aeration Tank		
BOD-volumetric load (kg/m ³ /d)	0.20	0.21
BOD-SS load (kg/kg/d)	0.035	0.037
MLSS (mg/L)	5 500	5 500
S-TE Tank		
Temp. (°C)	—	60~70
HRT (d)	—	1
Qs/Qw	—	3



第11図 エステプロセス概要フロー
Fig.11 Outline of S-TE PROCESS

第 8 表 エステプロセス用役費
Table 8 Operating cost of S-TE PROCESS

Item	Unit cost	Consumption	Total
Electricity	¥ 10/kwh	1 007 kwh/d	¥ 10 070/d
Steam	¥ 2.2/kg	7 680 kg/d	¥ 16 896/d
Total			¥ 26 966/d
Unit operating cost			¥22.5/kg-DS

4.2 装置概略フロー

第11図に装置概略フローを示す。

4.3 運 転 費

第 8 表に余剰汚泥の発生量が1.2 t-DS/d の廃水処理設備にエステプロセスを導入した場合の用役費を示す。1.2 t-DS/d の余剰汚泥を消滅するために、ポンプ等の電気代として約10 000 円/d, エステ槽の加温蒸気代として約17 000 円/d の計27 000 円/d が必要となる。

一方、従来通り余剰汚泥を脱水して85 %含水ケーキとして搬出する場合、搬出量は 8 m³/d となる。搬出費を12 000 円/m³ とし、これに脱水に要する凝集剤代と電力費を加算すると、120 000 円/d となる。

従って、エステプロセスを導入することにより汚泥処理費用を従来の1/4に削減できる。

む す び

数種類の工場廃水を用いた室内実験, 並びに, 6カ所の工場での現地パイロットテストにおいて汚泥消滅化を実証した。

エステプロセスは以下の特長を有する。

(1) ゼロディスチャージ

余剰汚泥の発生がゼロになる。

(2) 短時間での立上げが可能

汚泥可溶性菌の増殖と汚泥可溶性酵素生産に最適な装置設計により1日で装置立上げが可能である。

(3) 安価な運転費

汚泥の可溶性に細菌を用いるため、運転費が安価である。従来の脱水・

搬出する処理方法に比べ処理費用が1/4から1/3に削減できる。

(4) 簡単な維持管理

エステ槽内の温度を60~70℃に保持し, 好気条件に保つ以外, 面倒な維持・管理は不要である(汚泥管理は不要)。

(5) 環境と調和したプロセス

エステプロセスは化学薬品を使用せず, 自然界に生存する安全な微生物を使用するため, 環境に優しいプロセスである。

[参考文献]

- 1) 再生と利用, Vol.22, No.83 (1999), p.33
- 2) 環境技術, Vol.28, No.8 (1999)

連絡先

赤 司 昭 技術開発本部
(医学博士) 研究開発部
第1研究室
主任研究員
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail a.akashi@pantec.co.jp

塩 田 憲 明 技術開発本部
(農学博士) 研究開発部
第1研究室
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail n.shiota@pantec.co.jp

長谷川 進 技術開発本部
(工学博士, 技術士・水道部門) 研究開発部
第1研究室
主任研究員
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail s.hasegawa@pantec.co.jp

那 須 潔 技術開発本部
研究開発部
第1研究室
次席研究員
T E L 078 - 992 - 6525
F A X 078 - 992 - 6504
E-mail k.nasu@pantec.co.jp