

日本下水道事業団共同研究テーマ

好気性好熱細菌による下水汚泥の減量化

—エステプロセス®の下水への適用—

Decomposition of sewage sludge by
thermophilic aerobic bacteria



(技)第2研究開発部第5研究室
長 谷川 進

Susumu Hasegawa

(水)技術部第2グループ
塩田 憲明

Noriaki Shiota

当社は日本下水道事業団と共同で、エステプロセスの下水汚泥に対する適用について、実規模級のテストプラントを用いて実証した。中之条町沢渡水質管理センターの400 m³のオキシレーションディッチから発生する余剰汚泥を減量化する目的で、5 m³のS-TE槽を設置した。最適な運転条件を検討した結果、余剰汚泥の発生量は従来の約1/5に減量できた。また、汚泥処理・処分に要する経費も2/3に削減できた。一方、処理水質は若干上昇したものの、T-BOD、SSともに20 mg/Lを越えることはなかった。なお、本プラントは、現在、実用機としてそのまま同センターで稼働中である。

An application of S-TE PROCESS to municipal sewage sludge treatment has been studied in a full-scale facility in cooperation with Japan Sewage Works Agency. S-TE reactor (5 m³) was installed to an oxidation ditch (OD) system with the capacity of 400 m³ in Sawatari Sewage Treatment Center of Nakanojo Town. In an optimum operating condition, the amount of excess sludge from OD tank was reduced by 80 %, and the total utility cost by 30 %. The effluent quality was slightly deteriorated especially in winter, but both T-BOD and SS concentrations were less than 20 mg/L. The test plant is now operated as an actual plant in the Center.

Key Words :

好熱性細菌	Thermophilic bacteria
酵 素	Enzyme
下水汚泥	Sewage sludge
可 溶 化	Solubilization
汚 泥 減 量	Sludge decomposition

まえがき

活性汚泥法は、有機物を含む廃水を自然界に生存する微生物に接触させることにより、廃水を浄化する方法で、経済的かつ最良の有機性廃水浄化技術として古くから用いられている。しかしながら、この方法によると、廃水中の有機物を分解する際、微生物の増殖を伴うため、増殖した微生物を余剰の汚泥として系外に抜き取る必要がある。従来、余剰汚泥の処分法としては脱水して減容化した後埋め立てる方法が主流であったが、近年、埋め立て処分地の確

保が困難になってきており、汚泥処分の問題は深刻な社会問題になりつつある。

このような背景のもと、当社は、好気性好熱細菌（以下、好熱菌と略す）を用いて余剰汚泥を大幅に減量する技術「エステプロセス」を開発し¹⁾、これまで民間工場におけるパイロットテストにより、原水中に固形物（Suspended Solids：SS）を含まない場合は汚泥の引抜きをしない活性汚泥処理運転が可能であることを実証した²⁾。しかしながら、原水中に200 mg/L程度のSSを含む下水処理場に適用する

場合は、流入SSの分解性によっては汚泥の減量化率が低下する恐れがある。そこで、エステプロセスの下水処理場への適用を目的として、日本下水道事業団と共同で1998年度よりオキシレーションディッチ法（以下OD法と称する）施設における実証試験を開始し、約3年間にわたる調査の結果、その有効性を確認したので報告する。

1. エステプロセスの原理と特長

エステプロセス（S-TE PROCESS）は、“(Sludge) Solubilization by Thermophilic Enzyme”の語源からも分かるように、好熱菌の分泌する汚泥可溶化酵素により汚泥を減量化する技術である³⁾。フローは第1図に示すように、従来余剰汚泥として引抜いていた汚泥を汚泥可溶化槽（以下S-TE槽と称する）に投入し、そこで好熱菌の分泌する酵素により汚泥を可溶化し、可溶化した汚泥を従来の水処理系に循環して通常の活性汚泥微生物群により分解無機化するという極めてシンプルなものである。本法は、生物反応であるため、物理化学的手法に比べて反応槽は幾分大きくなるが、補機類が汎用機器であるため維持管理が容易で、運転経費も安価である。また、薬品を使用しないため、水処理設備や運転管理員に悪影響を及ぼすことが無いなどの特長がある。

2. 調査の概要

エステプロセスでは、従来余剰汚泥として系外に引抜いていた汚泥を可溶化して再び水処理系に返流するため、水処理系への負荷が増大することになる。

そこで、まず、比較的低負荷で運転されるOD法への適用の検討を実施した。

2.1 実証プラント概要

本技術の実施設における実証試験を群馬県中之条町沢渡水質管理センターで行った。

実証プラントのフローを第2図に、設備概要を第1表に、また、設備の全景を写真1に示す。

本試験では反応タンクからの引抜汚泥を直接濃縮し、この濃縮汚泥を可溶化処理して反応タンクへ戻すフローを採用した。S-TE槽は蒸気を直接吹き込むことによって65℃に加温した。また、アスピレータ式曝気機により槽内を均一に攪拌すると同時に好気条件を維持した。

S-TE槽の排気ガスは、吸着材併用型生物脱臭装置（当社のB-DOシステム）で前処理後、OD反応タンクに吹き込み生物学的に脱臭処理した。

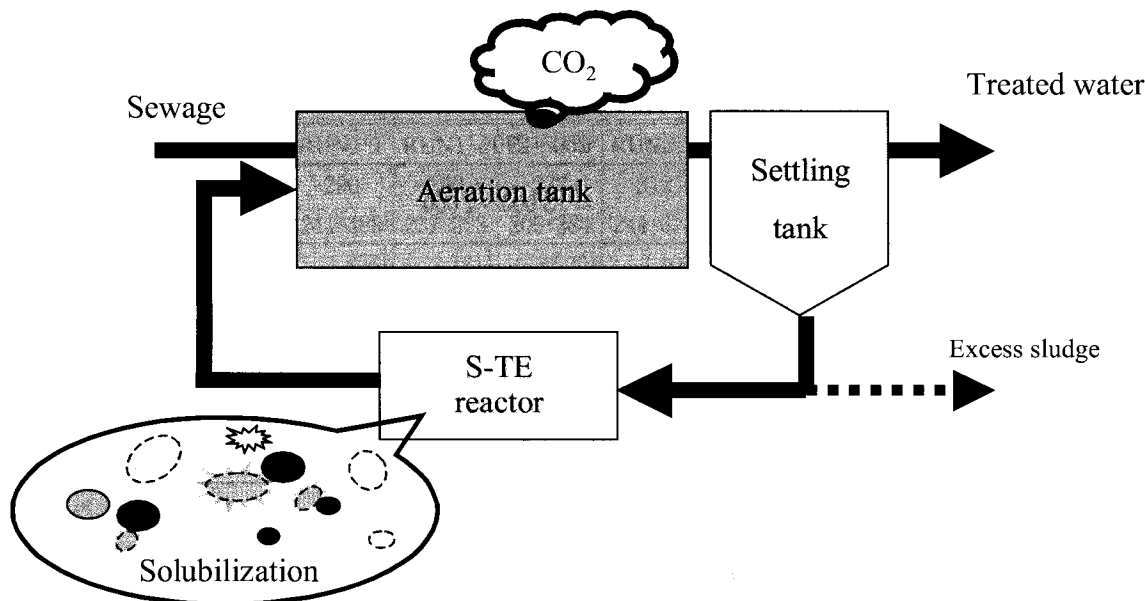
2.2 調査項目

実証プラントにおける調査項目は次のとおりである。

- (1) 余剰汚泥減量効果の実証
- (2) 濃縮汚泥投入による設備のコンパクト化の検討
- (3) 水処理系への影響調査
- (4) 活性汚泥への影響の調査
- (5) 経済性評価

2.3 運転条件

実証プラントの運転は、1998年6月より開始した。ODの運転は、基本的にそれまでの当センターの運



第1図 エステプロセスの基本フロー
Fig. 1 Standard flow of S-TE PROCESS

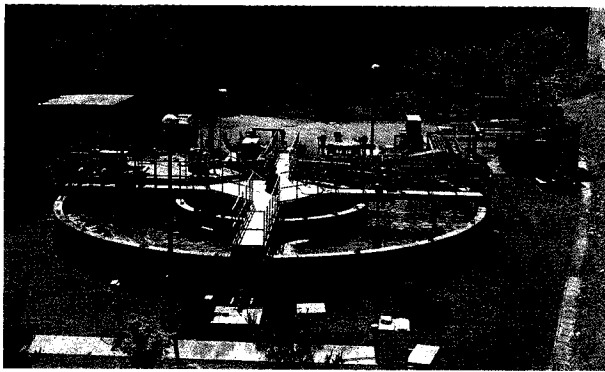
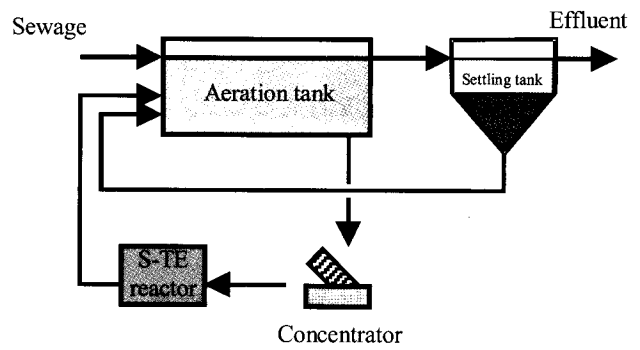


写真 1 実証プラント全景
Photo 1 Outside view of pilot test plant



第 2 図 実証プラントフロー
Fig. 2 Flow diagram of pilot test plant

第 1 表 実証プラント設備仕様
Table 1 Specification of the components in the full-scale plant

Item	Specification
Aeration tank	Oxidation ditch, 4 200 mm ^w × 3 000 mm ^d , 400 m ³
Aerator	Mechanical surface aerator with a horizontal-axis rotor
Settling tank	6 600 mm ^φ × 3 000 mm ^d
Concentrator	Screw press type with stainless steel screen, 1-3 m ³ /h
S-TE reactor	1 500 mm ^φ × 3 500 mm ^h
Aerator of S-TE reactor	Turborator (aspirating aerator)
Boiler	Oil boiler, 100 kg/h, 53 000 kcal/h

第 2 表 実証プラント運転条件 (設定値)
Table 2 Operating conditions

RUN No.	RUN1			RUN2			RUN3	RUN4	
	RUN1-1	RUN1-2	RUN1-3	RUN2-1	RUN2-2	RUN2-3			RUN4-1
Operating period	'98.6/25 -10/5	'98.10/6 -11/16	'98.11/17 -'99.6/23	'99.6/24 -9/19	'99.9/20 -12/15	'99/12/16 -'00.2/14	'00.2/15 -3/30	'00.3/31 -'01.3/31	'00.9/5 -'01.3/31
Operating days	102	41	218	87	86	59	44	365	207
Influent flow rate (m ³ /d)	250~270								
MLSS concentration (mg/L)	2 000~ 3 000	3 000~4 000							
Concentration of the sludge To be treated (%)	1.5	1.5	1.5	3	6	4	—	4	4
Circulating ratio* (—)	1	2	3	4	4	4	—	3	3
HRT of S-TE reactor (d)	4.5	3	1.5	1.5	1.5	1.5	—	3	3
Sludge decomposition (%)	33	66	100	100			0	80	80
Object	Effect of circulating ratio on sludge decomposition			Effect of injected sludge concentration on energy saving			Control	Optimum operation	

* (Injected SS to S-TE reactor)/(influent SS)

転を踏襲する形を取ったが、S-TE槽に汚泥を循環することによりOD反応タンクのSRTが短くなり硝化が進行しなくなる可能性が考えられるため、反応タンクMLSS濃度を高く維持する運転とした。

運転条件を第2表に示す。

RUN1ではS-TE槽への汚泥循環率（S-TE投入汚泥量／流入SS量）と汚泥減量化率との関係を調査した。RUN1-1で循環率を1として運転を開始した後、順次循環率を増加し、RUN1-3では汚泥の完全消滅を目指して循環率を3とした。RUN1でのS-TE槽投入汚泥濃度は、重力濃縮を想定して1.5%前後に調整した。

RUN2では投入汚泥濃度を上昇させて投入汚泥液量を減じ、投入汚泥の加温に要する熱源の省力化を検討した。投入汚泥濃度を6%まで上昇したが、汚泥濃度上昇に起因する粘性の上昇により酸素溶解効率が極端に低下したため、RUN2-3以降は4%濃度とした。なお、RUN2での汚泥循環率は、RUN1の結果から、循環率3では汚泥の完全消滅が達成されなかったため、循環率を4として運転した。

RUN3では、特に低温期に汚泥減量化を行わない場合の処理水水质および発生汚泥量を確認するため、S-TE槽の運転を停止し、対照としてのデータを収集した。

RUN4では、RUN1, 2のデータより、当センターの余剰汚泥の減量化の限界が80%であると判断し、流入SSに対して20%分の汚泥を引抜き、反応タンクMLSS濃度を一定に維持する運転の実証を1年

間を通しておこなった。なお、RUN4において、初夏から秋にかけて、装置の一部改造、落雷による運転停止などにより延べ10日程度S-TE槽の運転が停止した時期があったため、その時期を除いた2000年9月5日以降のデータをRUN4-1として解析に供した。

2.4 分析試料

原水、処理水のサンプルは、1日の流入水量変動を考慮したコンポジットサンプルとし、その他の反応タンク、S-TE槽などのサンプルはスポットサンプルとした。

3. 調査結果

3.1 余剰汚泥減量化効果

対照運転期間中（RUN3）の汚泥発生量（放流水中のSSも加味）は、平均流入SS 26.1 kg-DS/dに対し26.8 kg-DS/dで、流入SS当たりの汚泥発生量はほぼ1であった。これより、当センターの汚泥発生量は流入SS量にほぼ等しいと見なし、汚泥減量化率等の算出をおこなった。

第3表に各RUN毎の運転経過実績をまとめる。

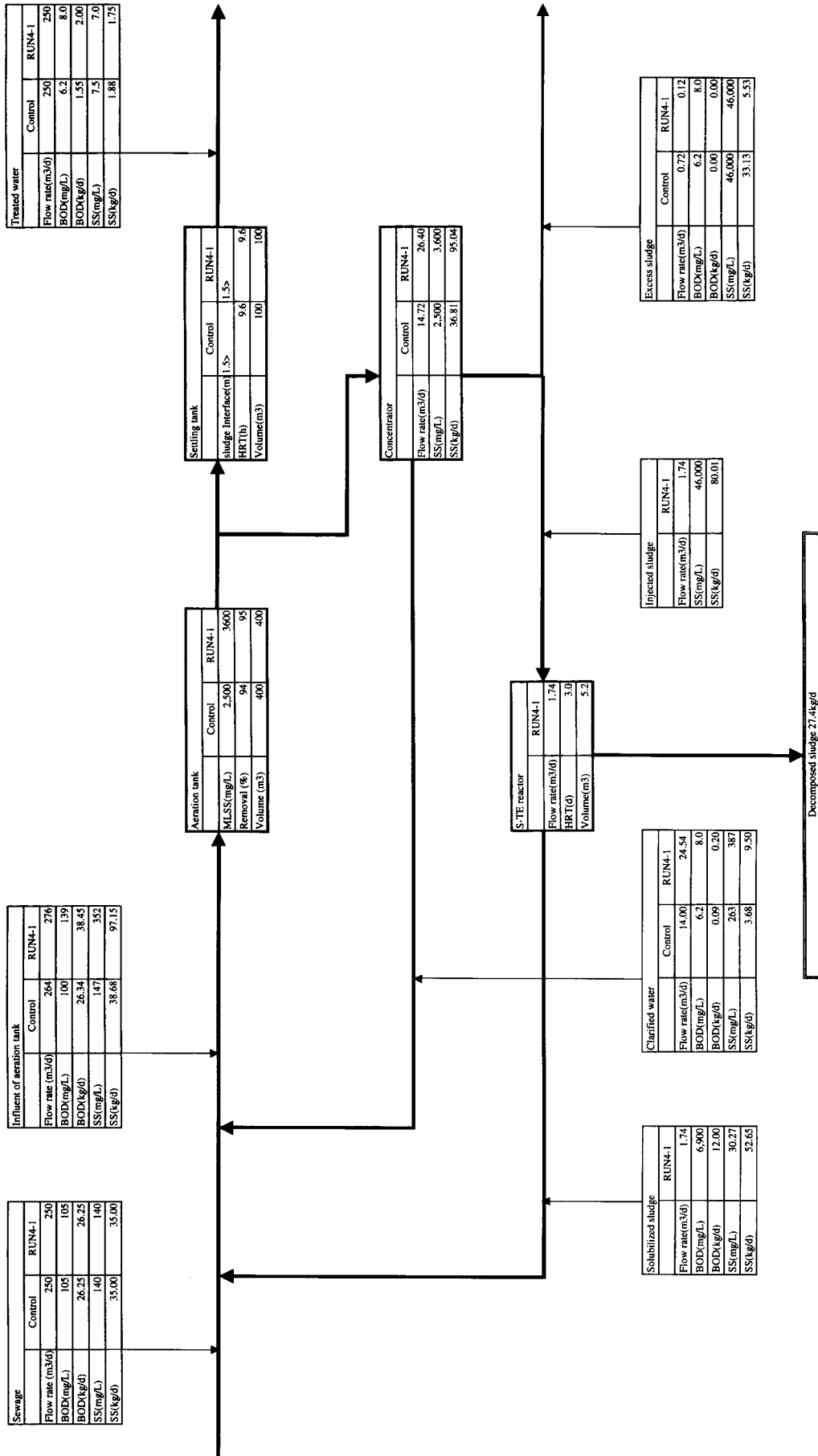
RUN1-1では、流入SS量相当分（汚泥循環率1）を可溶化処理して汚泥減量化運転を実施した。この場合、反応タンクMLSS濃度を一定に保つため一部汚泥を系外に引き抜く必要があった。結果的に約45%の汚泥が減量された。

RUN1-2では、反応タンクMLSS濃度を上昇するため、汚泥の系外引き抜きを中止した。その結果、汚泥循環率は1.4（流入SS量の約1.4倍量の汚泥を

第3表 運転実績
Table 3 Performance of S-TE operation

RUN No.	RUN1			RUN2			RUN3	RUN4	
	RUN1-1	RUN1-2	RUN1-3	RUN2-1	RUN2-2	RUN2-3			RUN4-1
Influent flow rate (m ³ /d)	290	260	237	312	260	250	247	262	249
	241-488	237-328	205-284	244-624	231-450	213-281	201-309	189-607	195-607
MLSS concentration (mg/L)	1 826	2 231	3 520	3 406	3 811	4 743	3 921	3 563	3 561
	1 220	1 550	2 480	2 560	3 300	4 130	3 430	3 050	3 561
	-2 125	-2 810	-4 680	-4 050	-4 540	-5 167	-4 890	-4 070	-3 920
Concentration of the sludge To be treated (%)	2.0	1.3	1.7	3.2	5.9	4.1	—	4.5	4.6
	0.71-4.6	0.9-1.5	0.4-3.0	1.4-4.8	3.3-8.8	3.1-5.6	—	2.5-6.5	2.8-6.5
Circulating ratio*	1.0	1.4	2.9	3.6	5.5	4.9	—	2.4	2.3
HRT of S-TE reactor (d)	4.8	1.9	1.5	1.7	1.4	1.2	—	2.6	2.8
Sludge decomposition (%)	43	62	72	70	77	77	0	74	79
Object	Effect of circulating ratio on sludge decomposition			Effect of injected sludge concentration on energy saving			Control	Optimum Operation	

Upper : average Lower : range



第3図 汚泥減量化プロセス物質収支 (RUN4-1)
Fig. 3 Mass balance of S-TE operation

可溶化処理)になった。この条件では約60%の汚泥が減量された。

RUN1-3では、反応タンクからの引き抜き汚泥量を増加して、汚泥循環率を3まで上昇した。これにより、汚泥の減量化率は約70%になった。

RUN2(-1~-3)では汚泥循環率を4とし、投入汚泥濃度を変化させた。投入汚泥濃度の汚泥減量化率が与える影響はほとんど認められず、RUN2全期間を通しての汚泥減量化率は約75%であった。

下水処理場においては、流入原水SS中に繊維質など有機性の難溶解性物質が含まれるため、長期の汚泥減量化運転中にそれらが反応タンク内活性汚泥中に蓄積されることが予想される。このような難溶解性物質の流入が汚泥減量化率低下の一因と考えられる。

RUN4は上記の結果を基に、汚泥を一部系外に引き抜きながら汚泥減量化運転をすることにより、難溶解性物質の蓄積を防ぎ、反応タンク内MLSS濃度を一定に維持する運転を実施した。結果的に、余剰汚泥発生量の約20%に相当する汚泥を系外に引き抜くことによりMLSS濃度を一定に保つ運転が可能であった。第3図にRUN4の運転条件で安定運転を維持できた期間の汚泥収支をまとめる。

参考までに、当センターの原水SS中の有機性難溶解性物質を酸・アルカリ不溶性有機物として定量したところ、流入SSの約30%と高い割合を占めていた。比較として測定した四万水質管理センターの値は約15%で、当センターの流入SSは比較的減量化し難い汚泥であることが示唆された。また、当センターの対流入SS当たりの余剰汚泥発生割合が1と通常より高い⁴⁾ことも、この難溶解性物質の含有割合が影響していると推察する。

3.2 濃縮汚泥投入による省エネルギー効果の検討

投入汚泥を濃縮すると投入汚泥液量が減少するため、昇温に要する熱量を低減できる。また、同時に

S-TE槽を小さくできるため、放散熱量や攪拌に要する動力も小さくできる。そこで、RUN2-1~RUN2-3においては、投入汚泥濃度を1.5~6%の範囲で変化させて、ユーティリティー使用量との関係を調べた。第4図に投入汚泥濃度とユーティリティー使用量の関係を示す。汚泥濃度を上昇することにより、投入汚泥液量が少なくなり昇温に要する熱量が削減できるため灯油使用量が減少する。しかし、一方で、汚泥濃度を上げるに従い汚泥の粘度が上昇するため、攪拌動力が大きくなり、消費電力が上昇する傾向になる。また、粘度の上昇は酸素移動効率を低下させるため、通気量が大きくなり、その結果、通気ガスが持ち出す熱量を補充するため灯油使用量が上昇する傾向となる。

以上の観察結果より、経済性、取扱性を考慮して、投入汚泥濃度は4%程度が最適と判断する。

3.3 処理水質への影響

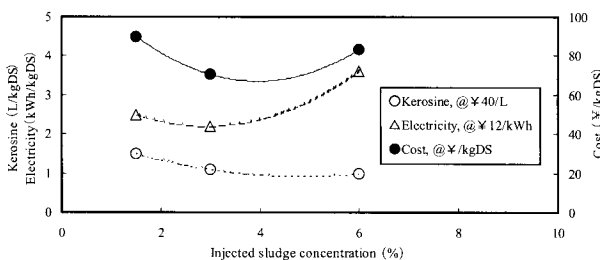
3.1および3.2の結果を基に、長期安定化運転(RUN4)は次の条件で実施した。

余剰汚泥引抜き率 流入SSに対し20%程度
(処理水SSも含む)

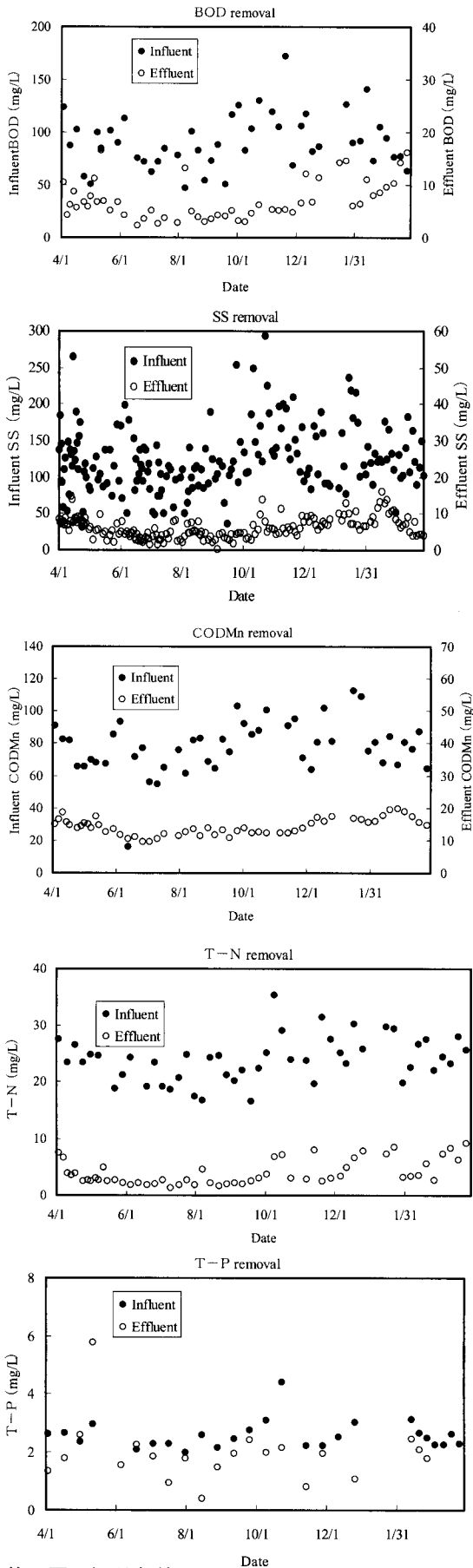
投入汚泥濃度 4%

処理水質については1年間を通して安定運転を行ったRUN4のデータを表示する。

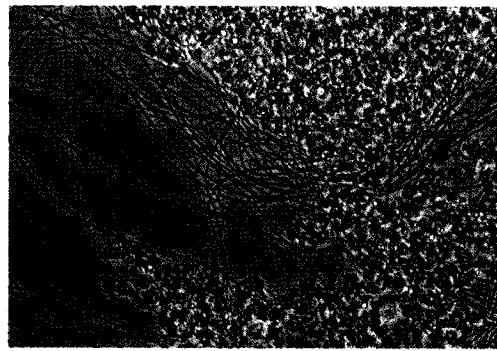
放流水質の経日変化を第5図に示す。処理水SSは、大略10mg/L以下で運転できた。冬期の処理水SSの上昇は、水温低下による活性汚泥の活性低下、あるいは、可溶化による汚泥フロックの一部解体による影響と推察される。処理水T-BODは、処理水SSの影響を受け、処理水SSが高くなる冬期にやや高い値を示したが、ほぼ15mg/L以下を維持できた。S-BODはほぼ検出下限値2mg/L以下の水質を得ている。処理水T-COD_{Mn}は水温の低下する冬期に上昇する傾向にあったが、20mg/L以下を維持できた。また、BODとは異なり、処理水のT-COD_{Mn}とS-COD_{Mn}はほぼ同じ値を示し、ほとんどのCOD成分が溶解性であった。処理水透視度は処理水SSの影響を受け、処理水SSが上昇する冬期にやや悪化し50cmを下回ることがあった。T-N除去については、汚泥減量化運転では、想定汚泥発生量の3倍量程度の汚泥を循環させるため、反応タンクのA-SRTが短くなるが、ローター運転時間を12時間に延長してA-SRTを十分確保することにより汚泥減量化運転前とほぼ同程度の80%以上の窒素除去率を維持できた。りん除去は、りんを含有した余剰汚泥の引き抜き量に見合う除去にとどまった。



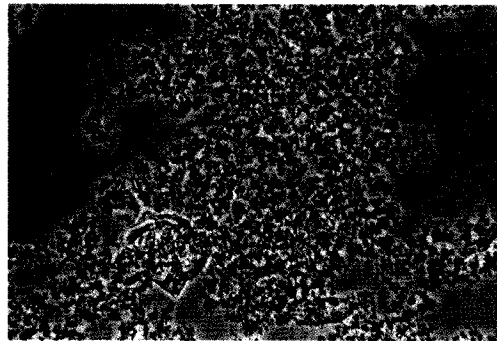
第4図 高濃度汚泥投入による省エネルギー効果
Fig. 4 Effect of injected sludge concentration on energy saving



第5図 処理水質
Fig. 5 Qualities of Effluent

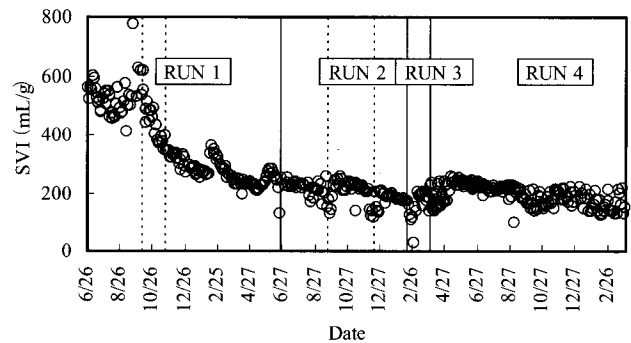


Before S-TE treatment



After S-TE treatment

写真2 反応槽内活性汚泥
Photo 2 Activated sludge in aeration tank



第6図 反応タンク SVI
Fig. 6 Time course of sludge SVI in aeration tank

3.4 活性汚泥への影響

好熱性細菌による汚泥減量の対象が有機性汚泥であるため、無機物の反応タンク内への蓄積が懸念されたが、反応タンク活性汚泥の VSS/SS 比は最終的に0.7程度で安定化した。これは、原水からの無機物の流入と、処理水あるいは引き抜き汚泥中に流出する無機物の量がバランスした結果と考える。

第6図に汚泥の沈降性の指標として測定した SVI の経日変化を示す。汚泥減量化運転を開始することにより活性汚泥中の糸状性細菌が減少し、沈降性が大きく改善された。可溶化処理により糸状体が解体

されたものと推察される。(写真2)

汚泥減量化運転中に引き抜いた汚泥の脱水性も調べたが、減量化運転開始以前と同様の条件で脱水したところ、含水率78~80%と従来と同程度の脱水ケーキが得られた。

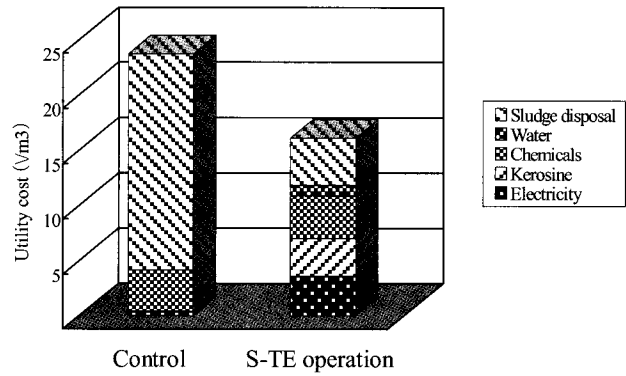
3.5 経済性の検討

汚泥減量化運転の実施により、散気動力、加熱に要する費用、および反応タンクにおける酸素消費増加に伴う電力費等が増加要因となるが、余剰汚泥の発生量が大幅に減少するため、脱水薬剤および汚泥処分に関わる費用が削減要因となる。第7図に流入水量当たりの用役費を示す。今回の実験では、当センターの余剰汚泥発生量が小さかったため、熱交換器やボイラー、曝気機が過大となっており、エネルギー効率が最適化された条件であったわけではないが、従来法より30%程度用役費が削減された。さらに、余剰汚泥の搬送、処分にかかる手間、人件費なども削減できることから、当センターには有効な技術と評価できる。

むすび

好気性好熱細菌による汚泥減量化技術のOD法への適用について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 本技術の導入により、余剰汚泥発生量を約80%削減できた。
- (2) 処理水質は、概ね、T-BOD<15 mg/L, SS<15 mg/L, COD_{Mn}<20 mg/L, 窒素除去率>80%と良好であった。



第7図 経済性評価

Fig. 7 Economic estimate

(3) 汚泥の沈降性、脱水性は良好であった。

(4) 処理費用も約30%低減された。

なお、本調査に用いた汚泥減量化設備は、現在、当センターにおいて実設備として使用されている。

最後に、中之条町下水道課および同町沢渡水質管理センター、日本下水道事業団技術開発部の関係者の皆様より多大なるご指導ご支援を賜りましたことに深く感謝致します。

[参考文献]

- 1) 桂健治ほか：水環境学会誌, Vol.21, No.6, (1998), p.360
- 2) 塩田憲明ほか：環境技術, Vol.28, No.8, (1999), p.1
- 3) 長谷川進ほか：下水道協会誌, Vol.34, No.408, (1997), p.76
- 4) 堺好雄：月刊下水道, Vol.21, No.2, (1998), p.12

連絡先

長谷川 進 技術開発本部
(工学博士, 技術士・水道部門) 第2研究開発部
第5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