

S—TE プロセスによる汚泥の減容化技術

Sludge Solubilization by Thermophilic Enzyme



技術開発本部 研究開発部
長谷川 進
Susumu Hasegawa
三浦 雅彦
Masahiko Miura
桂 健治
Kenji Katsura

好熱菌の中から、汚泥可溶化酵素を分泌する SPT 2—1 株を分離した。SPT 2—1 株は、下水処理場余剰汚泥を熱処理した上澄み液を培養液として汚泥可溶化酵素を生成した。汚泥可溶化好熱菌を用いた S—TE プロセスを提案し、約 2 日の HRT で有機性汚泥の 40 % 以上を可溶化できた。従来の活性汚泥法と S—TE プロセスを組み合わせることにより汚泥の出ないプロセスが可能であることを示唆した。

A thermophilic bacteria named SPT2—1 which actively produces a sludge solubilizing enzyme was isolated from our laboscale thermophilic reactor. It secreted the enzyme by using a supernatant of heated sludge taken from sewage treatment plant.

In the new process named S—TE which consists of enzyme producing reactor where a thermophilic bacter secretes special enzyme, and a sludge solubilizing reactor. About 40 % of VSS was solubilized even in a short period such as 2 days. Zero discharge process applied S—TE process to a conventional activated sludge process was proporsed.

Key Words :

好 熱 菌
酵 素
汚 泥 処 理
可 溶 化

Thermophilic bacteria
Enzyme
Sludge treatment
Solubilization

まえがき

昨年、第 7 次下水道整備五箇年計画が下水道人口普及率 54 % を達成して終わった。現在では、人口 100 万人以上の大都市では、ほぼ全ての家庭が下水道の恩恵に与っている。また、1996 年度、新たにスタートした第 8 次下水道整備五箇年計画では、普及率の低い、中小市町村の下水道整備が精力的に進められると予想される。下水処理のほとんどが生物学的に行われている現状から、今後、下水道の普及に比例して下水処理場から排出される汚泥量が増加すると推察される。

現在、汚泥の処理法としては、脱水あるいは焼却後、埋め立て処分する方法が広く採用されているが、埋め立て処分地の確保が困難になるにつれ、汚泥処分費は高騰していくものと考えられる。そのような背景のもと、公共下水道

に関して、「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。今後、汚泥の減容化の問題は、益々、クローズアップされていくものと考えられる。

汚泥減容化の基本は、汚泥を出さないことである。従来の生物処理法で汚泥の全く出ないプロセスは存在しないが、汚泥の発生量の少ない生物処理プロセスとしては、第 1 表に示す方法が提案されている。

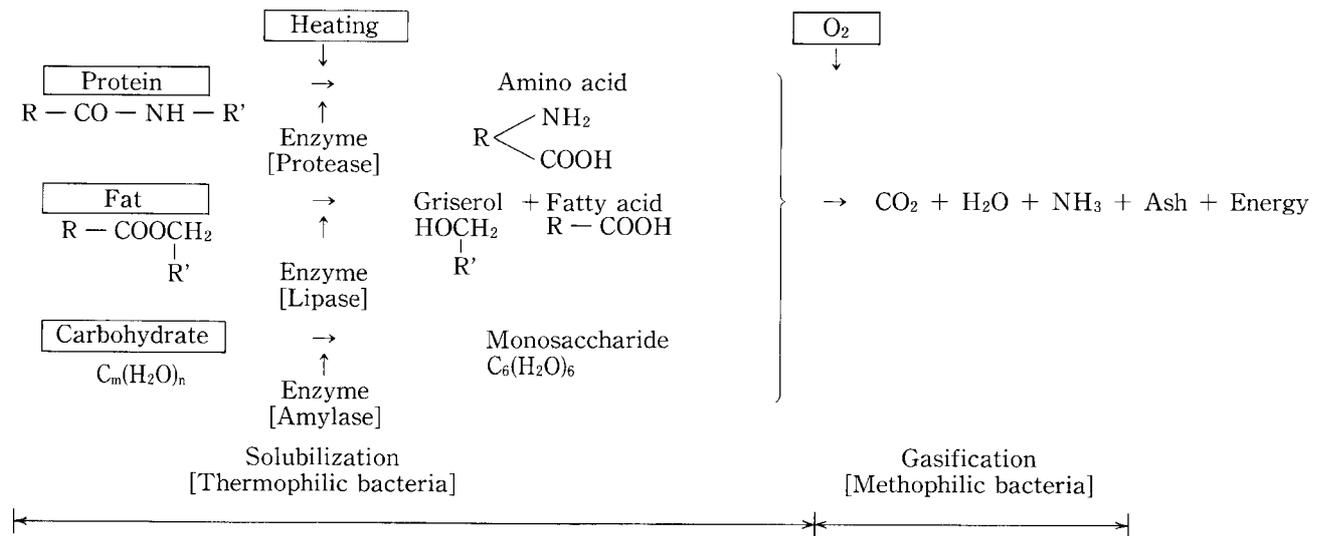
長時間曝気法は、低負荷条件で運転することにより、生物を飢餓状態、あるいは、内性呼吸期の状態にし、生物の細胞内外の貯蔵物質を自己酸化させることにより、汚泥の発生量を減少させるものである。

生物膜ろ過法は、充填担体に微生物を大量に保持すると

第 1 表 汚泥発生量の少ない生物処理プロセス

Table 1 Biological waste water treatment process minimizing sludge yield

	Conventional activated sludge process	Total oxidation process	Fixed bed biofilm	Anaerobic digestion
BOD volumetric loading (kg-BOD/m ³ /d)	0.3 ~ 0.8	0.09 ~ 0.2	5	10
Sludge yield coefficient (kg-SS/kg-BOD)	0.4 ~ 0.6	0.3 ~ 0.4	0.25 ~ 0.3	0.05



第 1 図 汚泥の生物学的分解

Fig. 1 Biological digestion of organic sludge

同時に、増殖速度の遅い生物、あるいは汚泥転換率の低い大型の微生物など多種の生物を系内に維持することにより、その相乗効果で汚泥の発生量が小さくなるものである。当社の BCF がこれにあたる。

嫌気処理は、代謝がエネルギー貯留型でないため、もともと汚泥転換率は小さい。当社の PANBIC がこれにあたる。

これらは、標準活性汚泥法に比べると、汚泥の発生量は比較的少ないが、それでもなお、汚泥が発生することは免れない事実で、余剰の汚泥は、系外に引き抜き、処理しなければならない。

著者らは、前報¹⁾で、有機性汚泥の処理技術の 1 つとして、高温好気法による有機性汚泥の可溶化法について紹介し、その効果が好熱菌の生成する汚泥可溶化酵素に起因することを明らかにした。本稿では、汚泥可溶化菌の特性を調べると共に、特定好熱菌を用いたより効率的な汚泥可溶化システムについて述べる。

1. 好熱性微生物による汚泥酸化法の原理

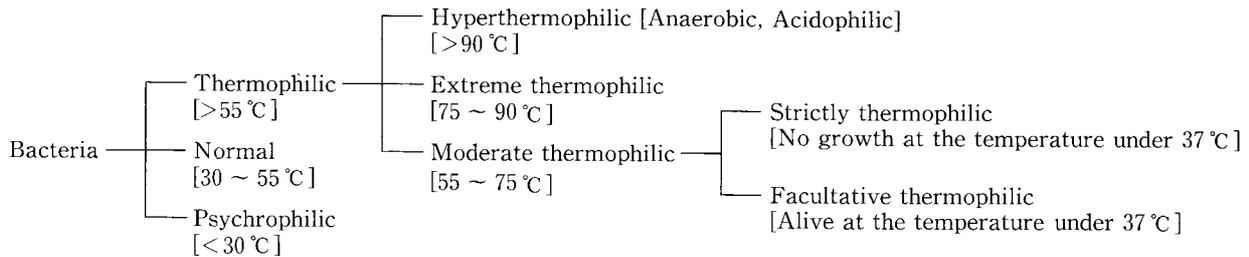
1.1 有機性固形物の分解

第 1 図に示すように、有機性固形物は、多種の酵素により低分子化され、最終的に微生物に取り込まれ、無機化される。例えば、たんぱく質を資化する場合は、まず、プロテアーゼにより各種アミノ酸に分解され、さらに分解する

必要がある場合は、脱アミノ作用、脱炭酸作用を触媒する酵素により分解代謝されていく。同様に、脂肪は、リパーゼにより脂肪酸とグリセロールに分解され、脂肪酸は、さらに、 α -酸化や β -酸化により低分子化されていく。また、炭水化物は、例えば、アミラーゼにより分解され、グルコースは解糖系に入り、好気条件においては、二酸化炭素と水にまで酸化される。高等動物の場合、体内にそれら酵素の生産機能を有するため、有機性固形物は体内で順次可溶化、無機化されていく。しかし、微生物の場合は、生産する酵素に限られているため、ある種の微生物は有機性固形物を可溶化できない。これら、微生物は有機性固形物を可溶化できる微生物により固形物を可溶化してもらってはじめて食物を得ることができる。即ち、有機性固形物を無機化するには、固形物を可溶化する段階が律速でありかつ重要といえる。

1.2 好熱性細菌

通常、われわれが目にする生物は、地球の平均的な温度環境にその生育温度をもっている。特にこの傾向は複雑な高等生物になるほど顕著で、高等動植物では、通常 50℃ を越えては生育できない。しかし、細菌や藻類のなかには 50℃ を越えて生育できる微生物が存在する。このような高温条件下においても生育できる好熱性細菌に関する研究の歴史は古く、細菌学が体系化されて間もない 1880 年頃といわれている。研究の中心は好熱菌の生産する耐熱性酵素



第 2 図 好熱菌の分類

Fig. 2 Classified figure of thermophilic bacteria

第 2 表 *Bacillus* 属による体外酵素の生産

Table 2 In-vitro enzyme produced by *Bacillus* sp

Strain	In-vitro enzyme
<i>B. subtilis</i>	Amylase, Protease, Unclease, Lysozyme, Hemicellulase
<i>B. cereus</i>	Penicillinase, Protease
<i>B. pumilus</i>	Protease, Amylase
<i>B. megaterium</i>	Protease
<i>B. licheniformis</i>	Protease, Amylase

で、現在、わが国はこの分野では先行しており、好熱菌の生成する耐熱酵素が既に商品化されている。また、好熱菌は、原始生物の研究対象としても注目されている。第 2 図は生育温度による好熱菌の分類例である。

著者らが汚泥可溶化菌として、好熱菌に注目した理由は、

- ①高温条件下では、有機性固形物は熱により変成し、可溶化あるいは可溶化酵素の影響を受けやすくなる。
- ②通常、化学反応は高温条件下の方が活性が高い。
- ③好熱菌の酵素は高温でも安定である。

という点にある。

1. 3 細胞外酵素

細菌のような原核細胞、特に、グラム陽性菌は、細胞外に種々の細胞外酵素を分泌する。これらの酵素は、微生物を破壊することなく取り出せるため、微生物を培養しながら得ることが出来る。また、体外酵素が分泌されると、培養液そのものが酵素液となるため、酵素反応が速やかに、また、効率よく進行する。第 2 表に体外酵素の一例を示す。

既報の通り、当研究グループで分離した汚泥可溶化好熱菌 SPT 2—1 株は体外酵素を分泌する。

1. 4 汚泥可溶化好熱菌

汚泥可溶化能の確認は、希釈滅菌洗浄汚泥を含む寒天平板上に、菌体コロニーを形成させ、コロニー周辺に汚泥可溶化部（ハロー）が認められたものを汚泥可溶化能+と判定した。可溶化部は、寒天中の懸濁汚泥が透明になるため容易に認知できる。また、寒天中の懸濁汚泥が透明化することは、汚泥の可溶化が、単に汚泥を死滅させるだけではなく文字通り可溶化していることを示している。寒天平板上に形成されたコロニーより特徴的なコロニーを継代培養し、その性状を調べた。結果を第 3 表にまとめる。供試 40 検体中汚泥可溶化能を示したものは約 1 割の 4 検体で、それらは、プロテアーゼを活発に分泌し、また、同時にアミ

ラーゼ分泌能も有した。本研究では、70°C でプロテアーゼを安定して分泌する SPT 2—1 株を分離した。分離菌の性状の一例を第 4 表に示す。

37°C の中温条件で培養した活性汚泥培養液についても同様の試験を行った。培養液中には、 $10^8 \sim 10^9$ CFU/ml の中温菌が存在したが、いずれのコロニー周辺にも汚泥の可溶化部は認められなかった。

第 3 図に代表的な汚泥可溶化菌の汚泥プレート上での生育の状況を示す。汚泥可溶化菌は直径約 10 mm と、好熱菌の中では比較的大きなコロニーを形成し、その周辺には大きな可溶化部が観察された。一方、中温菌のコロニー径は汚泥可溶化菌の倍近くあったが可溶化部は認められなかった。

2. 好熱菌を利用した汚泥可溶化プロセス (S—TE プロセス)

S—TE (エステ: Sludge solubilization by thermophilic enzyme) プロセスの概念図を第 4 図に示す。プロセスは、酵素生成槽及び可溶化槽の 2 槽より構成される。酵素生成槽では、汚泥可溶化酵素生成好熱菌を種として、必要な栄養素を含む培養液を供給して酵素を生成させる。生成された酵素液は、可溶化槽にて対象の有機性汚泥と混合され、可溶化される。

本プロセスの要件は、如何に効率的に汚泥可溶化酵素を生成させるかにあり、本研究の目的も酵素生成条件の検討ということでスタートした。

3. SPT 2—1 株の汚泥可溶化酵素生成条件

3. 1 培養液組成

第 5 図に SPT 2—1 株を標準液体培地で培養した場合の典型的な培地環境の経時変化を示す。30~60 分のラグの後、急速な菌体増殖 (A_{600}) が認められ、同時に溶解性有機体炭素濃度 (DOC) が減少した。このことから、

第 3 表 好熱菌のコロニー性状

Table 3 Characteristic of thermophilic bacteria forming typical colonies on agar plates

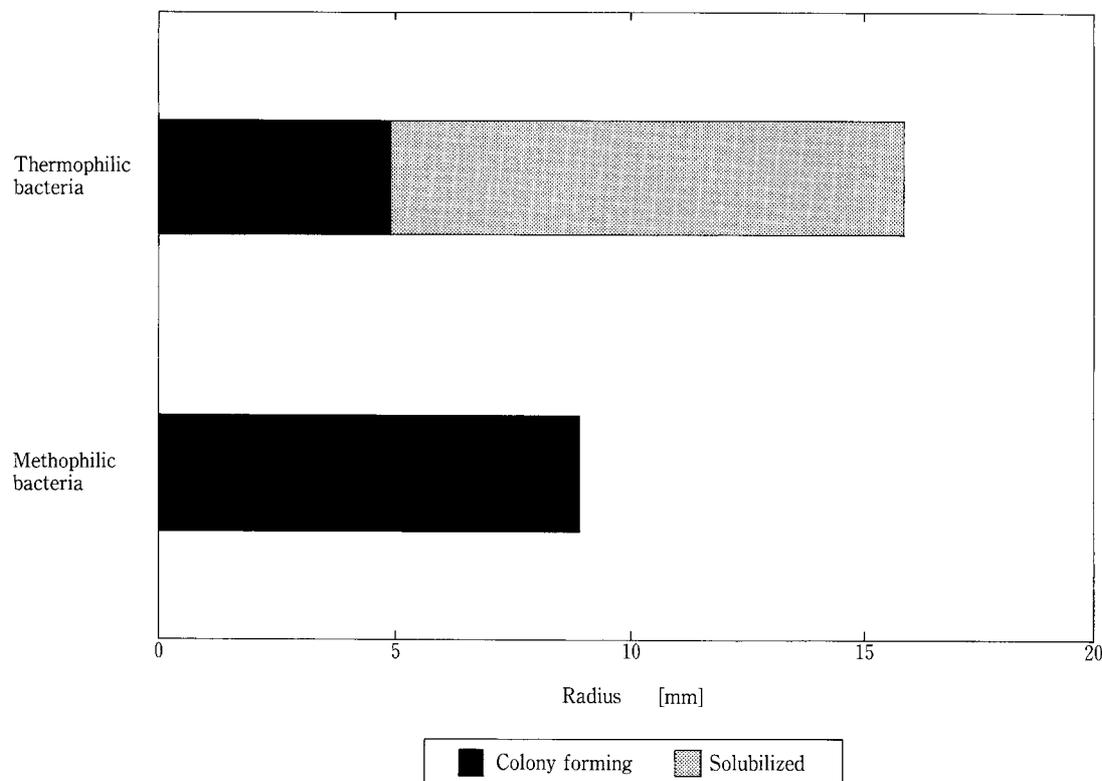
Appearances		Enzyme		Sludge solubilizing ability	Number of colony forming units
Color	Size	Protease activity	Amylase activity		
White (light)	Large	+++	+	++	2
White (light)		+++	+	++	2
White	Large	+	++		2
White	Small	+			1
White	Large		+		1
White	Large				9
White (light)					9
White (bluish)	Small				5
Very light	Small				9
Number of Colony forming units		7	7	4	40

+++ : Large activity, ++ : Moderate activity, + : Small activity, No symbol : No activity
 Temperature : 70 °C, Cultivating period : 24 hours.

第 4 表 SPT 2—1 株の菌学的性質

Table 4 Morphology and physiology of SPT2-1

Morphology		Physiology	
Shape	Rod-shaped	Utilization of inorganic nitrogen	+
Movement	+	Oxidase	+
Spore	+	Catalase	+
Gram stain	+	Behavior for oxygen	Aerobic or facultative anaerobic
		Growth temperature	55 ~ 75 °C
		Growth pH	5.5 ~ 8.5



第 3 図 好熱菌による汚泥プレート上の可溶化

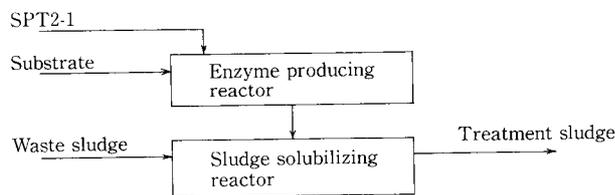
Fig. 3 Solubilization of sludge agar plate by thermophilic bacteria

SPT 2—1 株は有機性固形分を可溶化してそれを基質として摂取するというより、むしろ、既に存在する溶解性有機物を摂取して増殖すると推察される。第6図はDOCを種々変化させた場合の、SPT 2—1 株の酵素生成量を Bomio の方法²⁾によるプロテアーゼ基準値 (A_{520}) で示す。DOCが500 mg/L以下になると生成量が低下したため、安定して酵素を生成させるには、DOCが500 mg/L以上の条件にする必要があることが分かった。従って、原廃水 DOCが500 mg/L以上である場合は、原廃水を SPT 2—1 株による酵素生成のための基質培地として用いることができるが、都市下水のように DOCが低い場合は、原廃水を酵素生成用培地として用いることはできず、別に酵素生成用の培地を用意する必要がある。しかし、酵素生成用の培地を購入することは運転経費の増大につながるため、処理過程の廃水から培地を得ることを検討した。前報で確認されたように、有機性汚泥は、熱のみの影響で20~30%可溶化されるため、処理対象の有機性汚泥を短時間熱処理して酵素生成用培地とできるかを検討した。

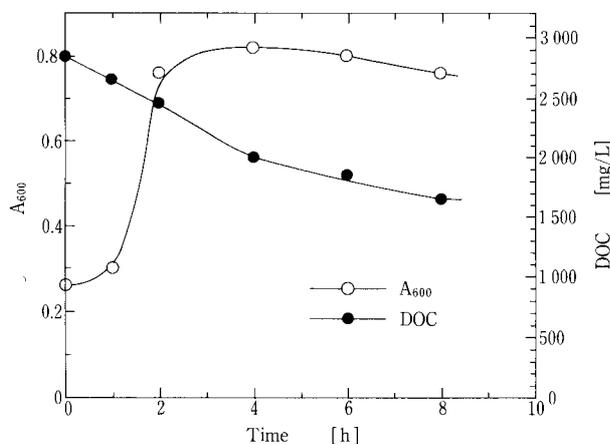
余剰汚泥を70℃で約6時間熱処理した場合のDOC濃度を第7図に示す。汚泥濃度が5000 mg/L以上であれば、約6時間の熱処理で、DOCが500 mg/L以上となり、酵素生成用の培地として適用できる可能性を得た。

3. 2 S—TE プロセスによる汚泥の可溶化

熱処理汚泥を酵素生成用培地として用い、好熱菌の生成する汚泥可溶化酵素により汚泥を可溶化するS—TEプロセスのベンチスケールでの確認テストを実施した。

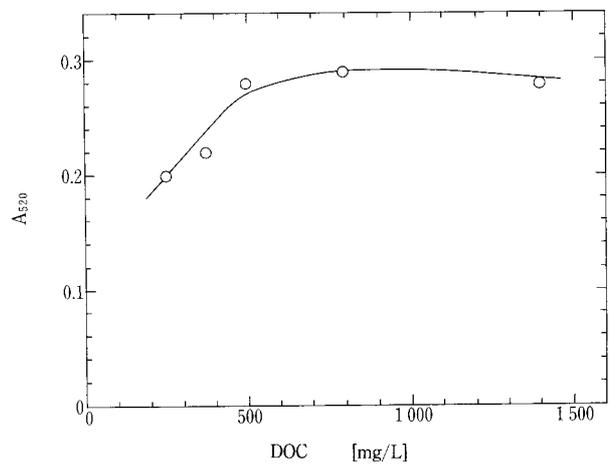


第4図 S—TEプロセス
Fig. 4 Schematic drawing of S—TE process

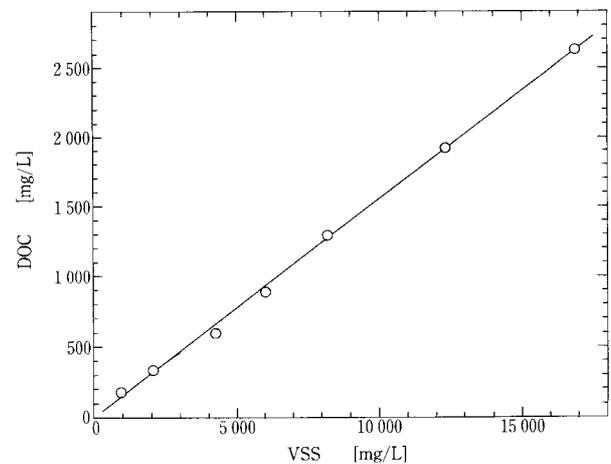


第5図 SPT 2—1 株の増殖特性
Fig. 5 Growth of SPT2—1

反応槽としては5Lのジャーファメンターを用いた。(写真1) 2%濃度の余剰汚泥を70℃で6時間熱処理し、30分静置後の上澄み液1Lを酵素生成用培地とした。この上澄み液のDOCは約1200 mg/Lであった。これに、約12時間、前培養したSPT 2—1株培養液を2%容量接種し、通気量0.4 vvm、攪拌速度300 rpmで6時間培養した。その後、先の沈殿汚泥と混合し、通気を止めて、攪拌のみで40時間反応させた。この時の、反応前後の汚泥を遠心分離した状況を写真2に示す。固形物が可溶化されて減容し、上澄み液が可溶化成分により褐色を呈していることが分かる。この操作により、余剰汚泥は約2日という短時間で有機性固形物の約40%が可溶化された。前報の方法では、20日の反応時間で約80%の有機性固形物の分解可能である。本法によると、除去率は半減するが、反応時間は大幅に短縮される。



第6図 酵素生成におよぼすDOC濃度の影響
Fig. 6 Effect of DOC on producing enzyme



第7図 熱処理汚泥のDOC
Fig. 7 DOC of heated sludge

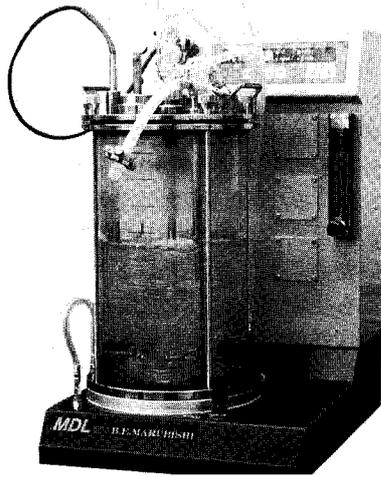
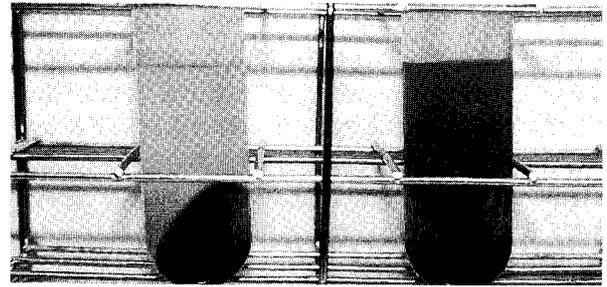
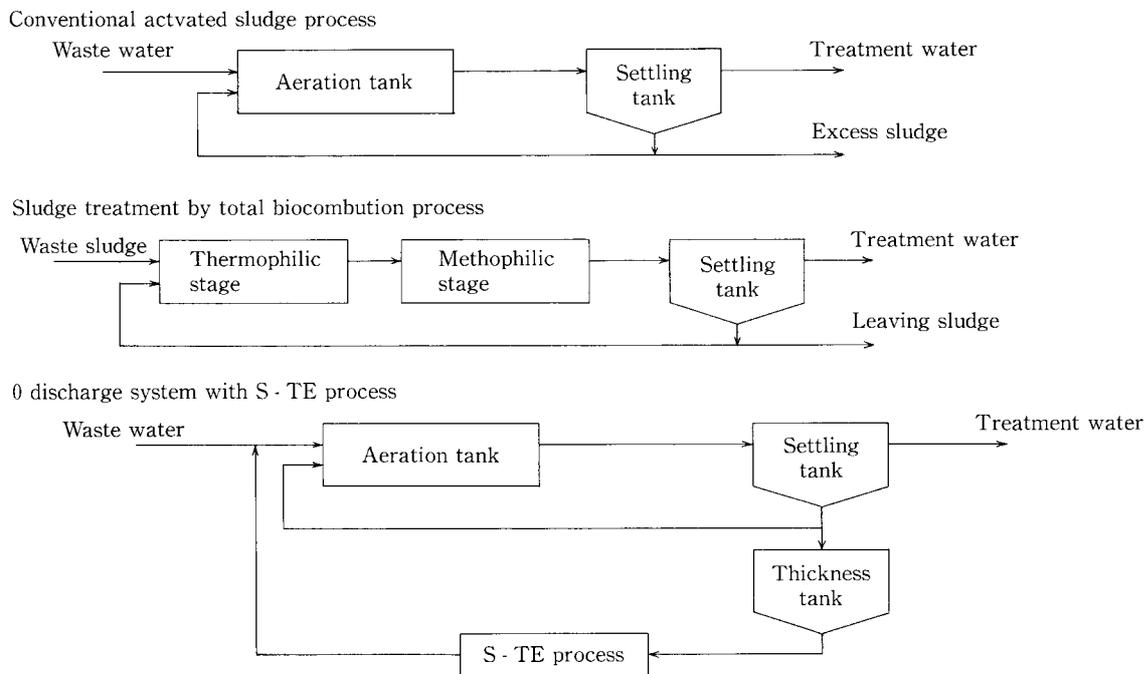


写真 1 5 L ジャーフェルメンター
Photo.1 5 ℓ Jar-fermenter



酸素処理前 酸素処理後
Before S-TE treatment After S-TE treatment

写真 2 S-TEプロセスによる汚泥の可溶化
Photo.2 Sludge treatment by S-TE process



第 8 図 汚泥・水処理一体型システム
Fig. 8 Zero discharge system with S-TE process

4. S-TEプロセスを利用した汚泥・水処理一体型システム

有機性汚泥を好熱菌で処理する場合、VSSは約80%程度まで可溶化できる。このことは、逆をかえせば、約20%のVSSが処理液中に残存することを意味する。例えば、2%濃度の有機性固形物を含有する廃液を処理する場合、4000~5000 mg/LのSSが処理水中に流出することになる。もし、この処理液を、水処理系の処理水で希釈可能であるとするならば、例えば、50倍希釈すれば、処理水SSは80~100 mg/Lになる。このような発想から提案されたのが、汚泥・水処理一体型システムである。実際には、単に、S-

TE処理液を活性汚泥処理水で希釈するのではなく、S-TE処理液を活性汚泥流入側に返送することにより、活性汚泥による有機物のさらなる低分子化を図り、効率向上を期待することができる。

4.1 適正廃水

現在、分離している好熱菌がプロテアーゼ及びアミラーゼを活発に分泌することから、それらが触媒出来る、たんぱく質、デンプンなどを含む廃液に適用可能である。但し、高温処理するため、高温において熱変質し、不溶化してしまうものには適用し難い。また、固形物濃度は、曝気動力との兼ね合いもあるが、高濃度の方が効率が良い。

4.2 従来システムへの組み込み方

好熱菌による汚泥処理プロセスでは、汚泥の可溶化液のガス化を中温処理槽において行うが、この中温槽の代わりに活性汚泥処理プロセスを用いると、一体型プロセスができあがる。(第8図) 本法によると、汚泥増殖分を全量好熱菌で処理するため、汚泥を系外に出すことはない。但し、生物難分解性物質及び無機物は処理水とともに流出することになる。従って、BOD 処理効率はほとんど低下しないが、処理水 COD 及び無機物濃度は多少高くなる。また、可溶性 BOD が返流負荷として上乘せられるため、送気量を増加する必要がある。

4.3 維持管理及び経済性

本法においては、反応槽温度を高温に保つ必要があるため、維持管理に熟練を要するようと思われるが、温度さえ維持できれば通常の活性汚泥法と変わりはなく、維持管理は比較的容易である。

汚泥・水処理一体型システムは、汚泥の可溶化液が水処理系に返流水負荷としてかかるため、多少の処理水質悪化は覚悟しなければならない。従って、高度処理設備の導入が検討されるような大規模下水処理場に対しては、高度処理設備への負荷が増加することを考慮する必要がある。しかし、放流先の放流水負荷が小さい小規模処理場、あるいは、下水道放流可能な事業所においては、汚泥・水処理一体型システムの導入が可能である。小規模の場合、建設費は割高になるが、運転費は、従来の活性汚泥法の半分以下になる。

むすび

自然界で生成されたあらゆる有機物は微生物によって分解されるといってもよい。そうでなければ、その物質がどんどん蓄積され地球がその物質で埋め尽くされることになる。下水処理場で生成される余剰汚泥についても同じで、効率的に行えば完全分解も可能と考えられる。現在、汚泥減容化は、脱水、焼却といった物理化学的方法が主流となっているが、これらは、経済面、維持管理面で問題があるため最善の方法とはいえない。水処理技術あるいは脱臭技術が物理化学的方法から生物学的方法に発展してきているように、今後、汚泥処理技術においても現在の物理化学的方法から生物学的方法に発展していくことが期待される。

[参考文献]

- 1) 長谷川進ほか：神鋼パテック技報, Vol. 39, No. 2 (1996), P. 23
- 2) M. Bomio et al.: Appl. Microbiol. Biotechnol. Vol. 32, (1989), P. 356

<記号説明>

- $A_{520, 600}$: Absorbance, 波長520nm (プロテアーゼ活性測定時) および600nm (菌体懸濁液測定時) に対する吸光度
B O C : Biochemical oxygen demand, 生物的酸素要求量
C F U : Colony forming units, 寒天平板上に形成された菌体コロニー数
D O C : Dissolved organic carbon, 溶解性有機体炭素濃度
V S S : Volatile suspended solid, 懸濁性強熱減量≡有機性固形物濃度
v m : Vol./vol./min., 単位時間当たり, 単位反応槽容積当たりの通気量

連絡先

長谷川 進 (工学博士)	技術開発本部 研究開発部 主任研究員	三浦 雅彦	技術開発本部 研究開発部	桂 健治	技術開発本部 研究開発部
	TEL 078-992-6525		TEL 078-992-6525		TEL 078-992-6525
	FAX 078-992-6504		FAX 078-992-6504		FAX 078-992-6504
	E-mail s.hasegawa@pantec.co.jp		E-mail m.miura@pantec.co.jp		E-mail k.katsura@pantec.co.jp