

総説 エステプロセス®

General Introduction of S-TE PROCESS®



技術開発本部
水・汚泥技術開発部水処理室
長谷川 進
Susumu Hasegawa
(工学博士・技術士)

エステプロセス®は、生物処理法の最大の課題である余剰汚泥の減量化技術として、自然界に生存する好熱性細菌（以下「好熱菌」と略す）を利用するという世界で初めての当社独自のプロセスで、すでに、10件以上の実績を有している。また、世界最大手の水処理メーカーであるオンデオ・デグレモン社がエステプロセス®の有効性を認めて技術導入するなど、世界的にも評価された技術である。

エステプロセス®は、汚泥を好熱菌の分泌する酵素により可溶化し、それを通常の生物で無機化（消滅）するという、自然界の生物の特性をうまく生かした効率的な技術で、条件によってはゼロディスチャージも可能で、運転経費を従来の半分以下にできる。近年では、食品廃棄物、畜産廃棄物のバイオマス再資源化設備に本技術を適用することにより、固形物残渣の排出が少ない資源化設備として貢献している。

We have developed a novel activated sludge (AS) process, in which no excess sludge is generated. It comprises the conventional AS process with thermophilic aerobic sludge digester in which excess sludge are solubilized by thermophilic enzyme, so we call hereafter the digester S-TE reactor. The sludge generated from the AS step is solubilized by thermophilic bacteria (e.g. *Bacillus* sp.) in S-TE reactor, and returned to an aeration tank, in which complete mineralization is carried out by mesophilic bacteria. The S-TE reactor is operated at 60-65 °C with hydraulic retention time of 1-2 days. Special isolated bacteria is initially inoculated to the S-TE reactor, but no additional inoculation seem to be needed since these bacteria can form spores and survive even under mesophilic condition. No excess sludge was generated when 3-fold amounts of the excess sludge is subjected to the S-TE reactor. According to our estimates, total operation costs for the S-TE PROCESS® is reduced to 30-50 % of those of conventional dewatering process. Recently a food waste methane fermentation plant combined with S-TE process has been operating, and producing valiant methane gas without excess sludge.

Key Words :

好熱性細菌

Thermophilic bacteria

汚泥減量

Sludge reduction

可溶化

Solubilization

バチルス ステアロ

Bacillus stearothermophilus

サーモフィラス

まえがき

都市下水、有機性工場廃水に対して生物処理法が広くもちいられているが、増殖した生物が余剰汚泥（産業廃棄物）として排出されることが昨今の重大な問題とされている。

余剰汚泥の発生量は年間約1億トンともいわれ、わが国の廃棄物総量の約20%を占めており、昨今のロンドン条約による海洋投棄の禁止¹⁾や埋立地を確保することが困難になってきているなかで、その処理・処分が大きな社会問題となっている。2001年循環型社会形成推進基本法が施行され、3R (Reuse, Reduce, Recycle) の原則にしたがい、余剰汚泥の農地還元など再利用の取組みも積極的におこなわれているが、重金属の問題、利用先確保、安定供給の問題が残されており、現実的には、脱水処理後、焼却あるいは溶融して有効利用する方法が主流となっている。しかしながら、今後、焼却などをしない地球環境にやさしい、経済的かつ簡易な汚泥減量化技術 (Reduce) が望まれている。

一方で、近年、「汚泥減量化の基本は汚泥を極力出さないようにすることである」とのコンセプトから、汚泥の発生量を大幅に低減するプロセスの提案がなされている。水処理系から発生する汚泥を可溶化して通常の微生物が容易に分解できる形にし、可溶化液を水処理系の反応槽に戻して分解することにより発生汚泥量を削減する方法で、汚泥を可溶化する方法として、オゾン法²⁾、機械的破碎法³⁾、水熱

法⁴⁾（当社のレセルシステム[®]等）、超音波法⁵⁾、生物法⁶⁾などが提案されている。

本稿では、当社が開発した好熱性細菌（以下、好熱菌と略する）を利用した汚泥減量化技術について、その技術の中核となる好熱菌の特性を中心に、原理から実設備例までを総説する。

1. エステプロセス[®]の概要

開発当初、「好熱菌で汚泥を可溶化して消滅する」と説明すると、「眉唾物」との印象をもたれることがあり苦労した。確かに、世の中には「特殊微生物」を謳い文句とする技術がごまんとあるが、実際に信頼されている技術は数少ない。全てが「眉唾」というわけではないが、多くの場合、「特殊微生物」の特性をよく理解しないでもちいているため、謳い文句の効果がえられていないようである。たとえば、当社の好熱菌も温度を間違えると効果が激減する。そこで、まず、汚泥可溶化好熱菌について、その特性をよく理解できるように以下に詳述する。

1.1 汚泥可溶化の原理

人が食物を食べると、食道、胃、腸を移動する過程で、いろいろな酵素が分泌され、可溶化、低分子化され、体に吸収されていく。微生物は、人間のような複雑な消化器官は持ち合わせていないため、それらを分業することになる。すなわち、ある種の微生物は、図1に示すような、有機性固形物を可溶化する酵素を分泌して、固形物を可溶化する。さらに別の微生物がそれらをより低分子化する酵素を分泌

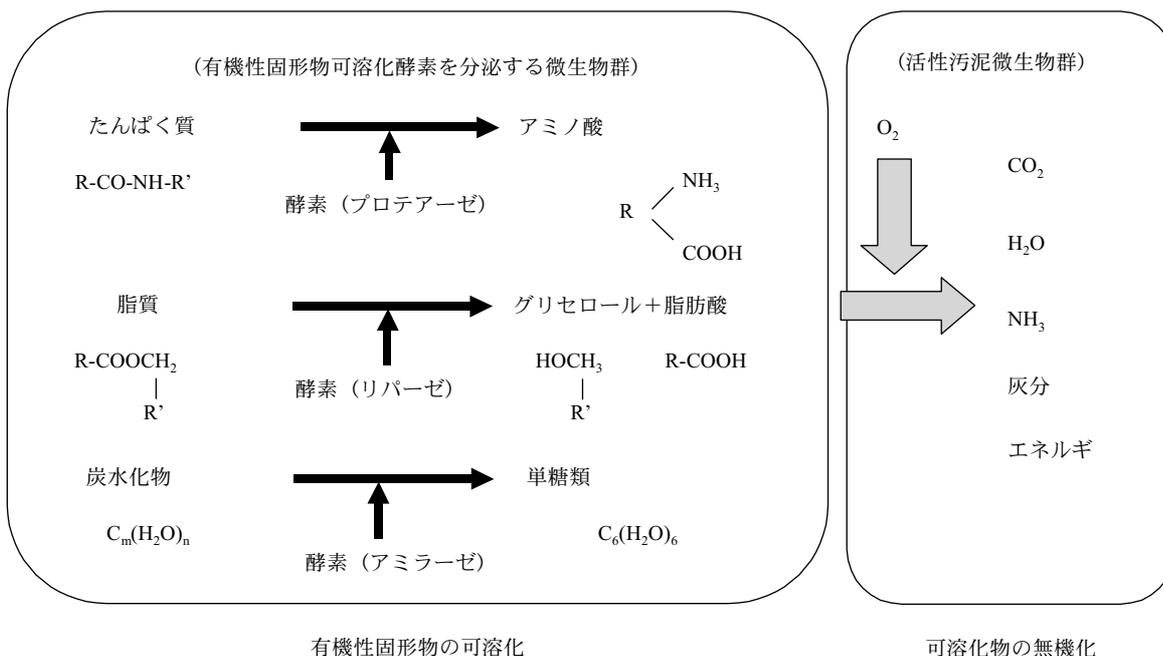


図1 有機性固形物の生分解

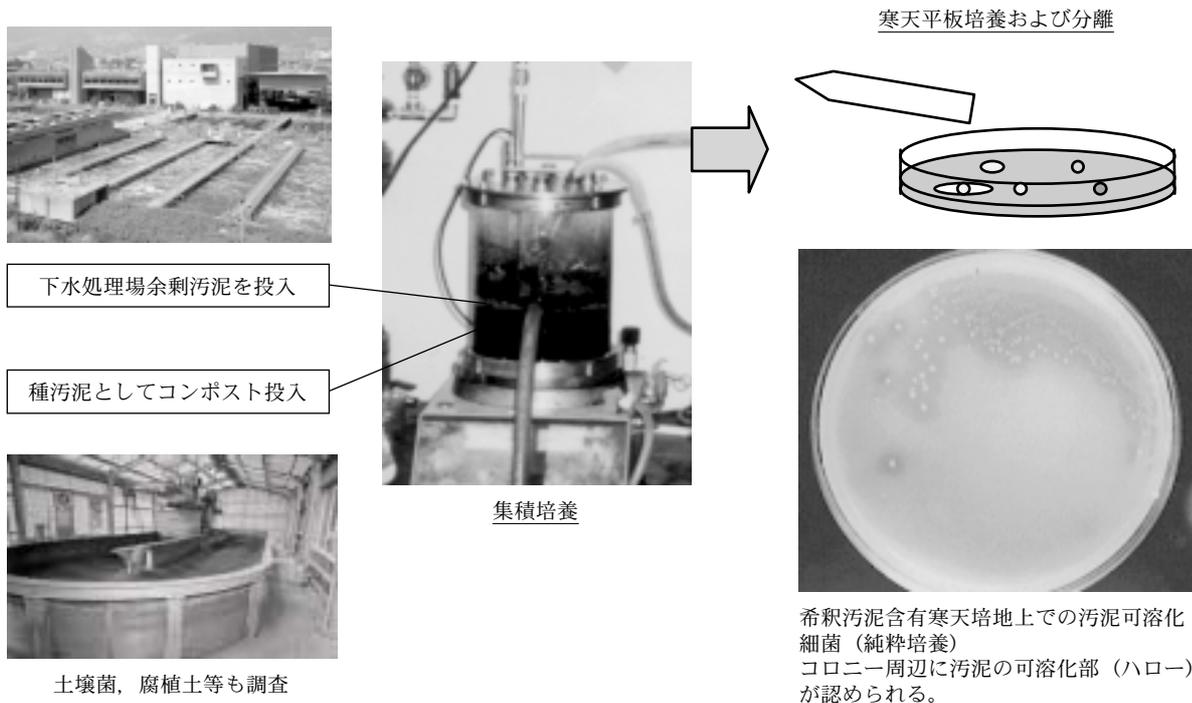


図2 汚泥可溶化細菌の分離

し、最終的に微生物に取込まれ、無機化される。たとえば、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、たとえば、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。

1.2 汚泥可溶化細菌の分離

コンポスト、腐植土、土壌などを分離源とし、下水汚泥を基質として馴養した培養液から汚泥を可溶化する細菌の分離を試みた。図2に分離法の概要を示す。培養液の一部を希釈汚泥を含む寒天平板上に塗抹し、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細菌として分離した。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なく文字通り溶かしていることを示している。

当社は、65℃を最適生育温度とし、プロテアーゼおよびアミラーゼを安定して活発に分泌するSPT2-1株を汚泥可溶化好熱菌（汚泥可溶化酵素を活発に分

表1 SPT2-1株の菌学的性質

形態的性質		生理学的性質	
細胞の形	桿菌	無機窒素の利用	+
運動性	+	オキシダーゼ	+
孢子	+	カタラーゼ	+
グラム染色	+	酸素に対する態度	好気～通性嫌気
		生育温度の範囲	55～75℃
		生育pHの範囲	5.5～8.5

増殖制限因子がない場合の倍化時間は20～30分

泌する好熱性細菌を総称して以後 S-TE (Sludge solubilization by thermophilic enzyme) 菌と称す) として分離した。37℃の中温条件で培養した培養液からも分離を試みたが、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。

1.3 S-TE 菌の効用

SPT2-1株は *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。SPT2-1株の細菌学的性質を表1にまとめる。この細菌は好気性条件下（通性嫌気性細菌であるため、嫌気条件下でも生残できる）の60～70℃で活発に増殖し、強力な汚泥可溶化酵素を分泌して汚泥を溶解する。また、孢子（芽胞）形成能を有しており、孢子になると、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ことができる。

図3は、温度による細菌の分類例⁷⁾であるが、本菌は中等度偏性好熱菌に分類され、50℃以下では増殖せず、かつ、汚泥可溶化酵素も50℃以下では不活性となる。

エステプロセス[®]は、水処理系から引抜かれた余剰汚泥を高温条件に保ったS-TE槽で可溶化し、可溶化汚泥を再び水処理系へ循環返送するというきわめて簡単なフローである(図4)。このようにプロセスが簡略化されるのは、これら特性を有するSPT2-1株ならではの効用である。

(1) 高熱の効用

S-TE菌を生育させるためには、温度を60～65℃に維持する必要がある。通常、生物処理系から排出

される余剰汚泥は、多糖類等からなる粘性物質でフロックを形成しているが、この粘性物質は50℃程度で容易に溶解する。また、大型の原生動物や後生動物も熱により細胞膜が破れ細胞質が溶出する。結果的に、温度を上昇するだけで、多い場合は、20～30%程度のSSが可溶化される⁸⁾ことになる。しかし、熱による可溶化は、ここまでで、頑強な細胞壁を有する細菌類は高温に晒すことにより死滅はできても可溶化することは容易ではない。

一方で、細菌類を包む粘性物質が可溶化されると、細菌類が酵素にアタックされやすい状態になり、好熱菌による可溶化の効率を向上させる効果を生み出す。

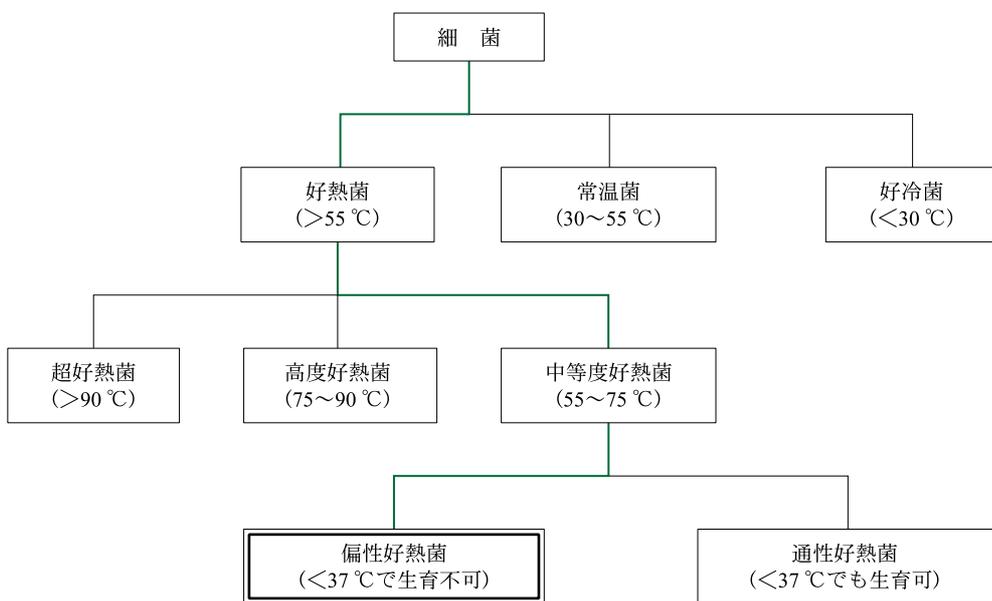


図3 温度による細菌の分類

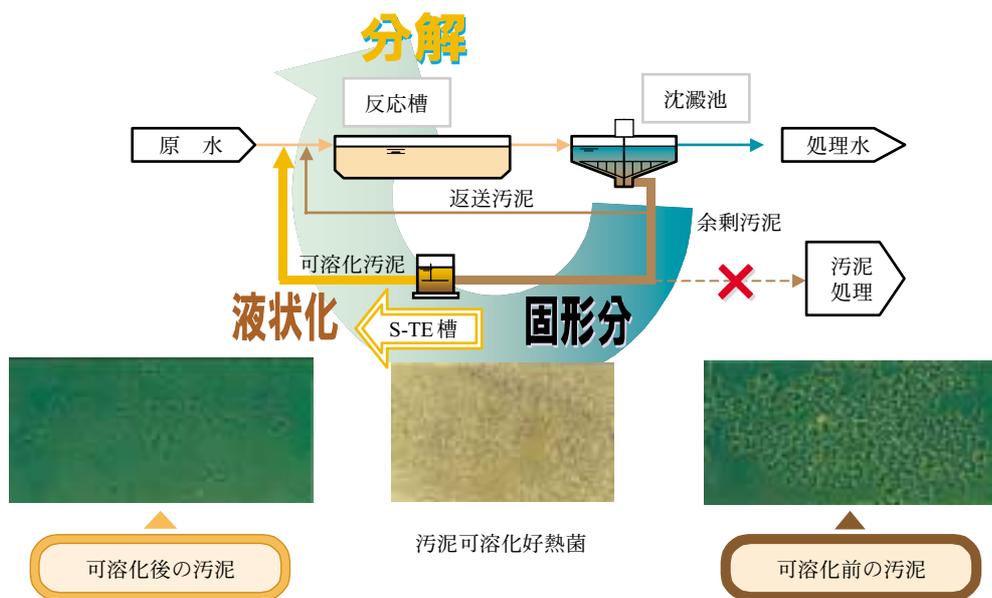


図4 エステプロセス[®]とは？

(2) 体外酵素分泌の効用

人間のように酵素を生成する能力を有していても体外に分泌できなければ、周囲の固形物を可溶化することはできない。SPT2-1株はグラム陽性菌で体外に酵素を分泌するため、菌を培養しながら酵素をえることができる。すなわち、培養液そのものが酵素液となり、効率よく汚泥を可溶化できる。

写真1は、SPT2-1株の純粋培養液の上澄みを希釈汚泥を含む寒天培地上に塗抹したものである。好熱菌が存在しないにもかかわらず、見事なハローが形成されたことから、SPT2-1株が汚泥可溶化酵素を体外に分泌していたことがわかる。

図5に、SPT2-1株による汚泥の可溶化を示す。ここで試験に供した汚泥は、前述の熱による可溶化の影響を除外するため滅菌洗浄（121℃で10分間オー

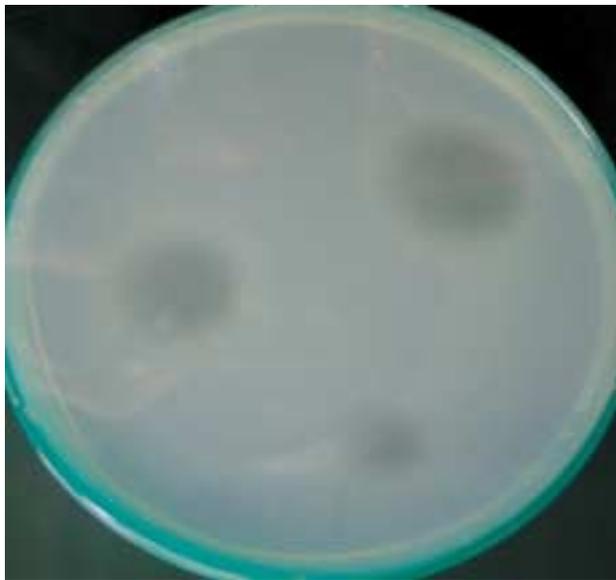
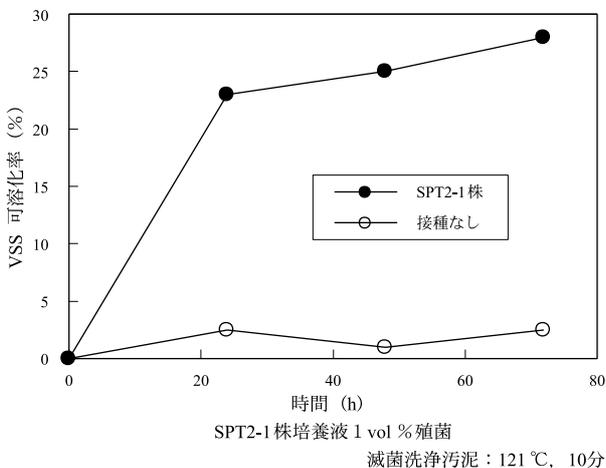


写真1 SPT2-1株培養液の高速遠心上澄みを希釈汚泥含有寒天培地に滴下。汚泥が溶解した透明部が観察される。

写真1 SPT2-1株上澄み液による汚泥の可溶化



トクレーブ処理して、高速遠心後3回洗浄）した汚泥をもちいた。SPT2-1株を接種した場合は、滅菌洗浄汚泥を25～30%可溶化した。一方、接種しない場合はほとんど可溶化されなかった。また、SPT2-1株の培養液を高速遠心した上澄み液についても同様に滅菌洗浄汚泥の可溶化能を調べたところ、好熱菌を除外したにもかかわらず、15～20%の可溶化率がえられた。この結果より、SPT2-1株が培養液中に酵素を分泌していることが確認された。

(3) 大腸菌なみの増殖速度

SPT2-1株を標準培地で培養した場合の増殖速度は大腸菌なみで、その倍化時間は20～30分程度である。したがって、通常の活性汚泥法のように、反応槽に生物を維持するために汚泥を返送する必要はなく、一過式での培養が可能である。

(4) 耐熱性酵素の効用

通常、化学反応は温度が高いほど速くなる。酵素触媒反応においても同様で、これが、近年、精力的に好熱菌が研究されている理由でもある。SPT2-1株が分泌する酵素も耐熱性で、SPT2-1株の最適生育温度（65℃）付近で最高活性を示す。しかし、逆に、温度が低下すると活性も低下し、50℃以下では失活する。したがって、この酵素が通常温度条件（15～35℃）で運転される水処理系に戻されても、失活するため、活性汚泥に悪影響を及ぼすことはない。

(5) 胞子形成能の効用

前述のように、SPT2-1株は *Bacillus* 属に分類され、胞子形成能を有する。本菌が S-TE 槽から流出して水処理系に返送された場合、大部分は死滅するが、一部は胞子を形成して生残する。胞子は、沈殿池で固液分離され、余剰汚泥とともに再び S-TE 槽に投入される。S-TE 槽で高温条件に晒された胞子

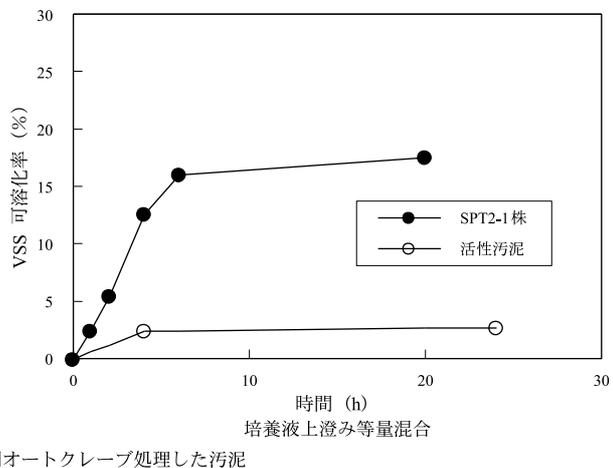


図5 SPT 2-1株による滅菌洗浄汚泥の可溶化

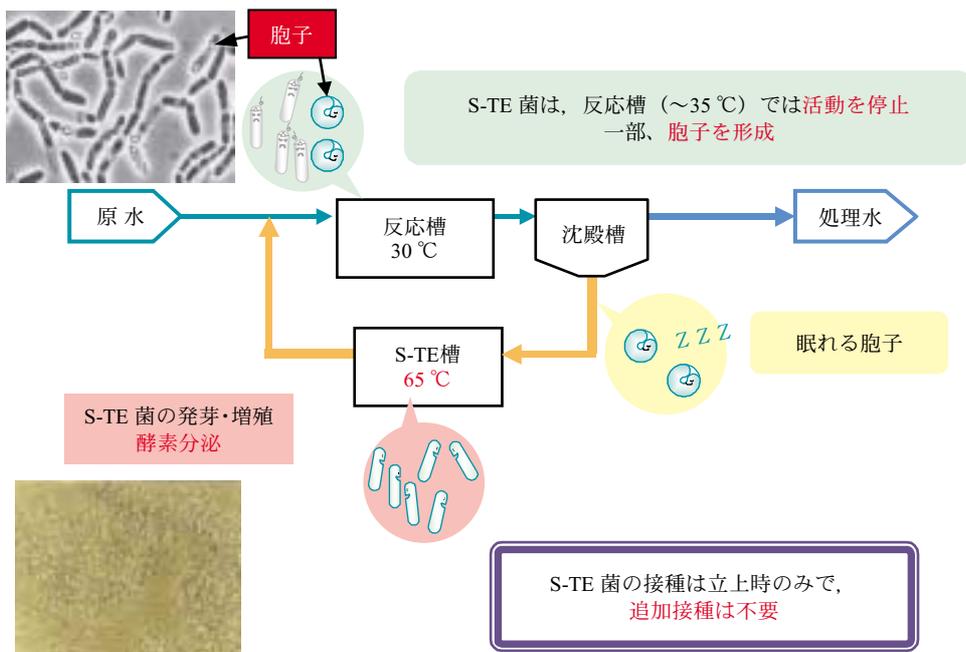


図6 SPT2-1株の有効性

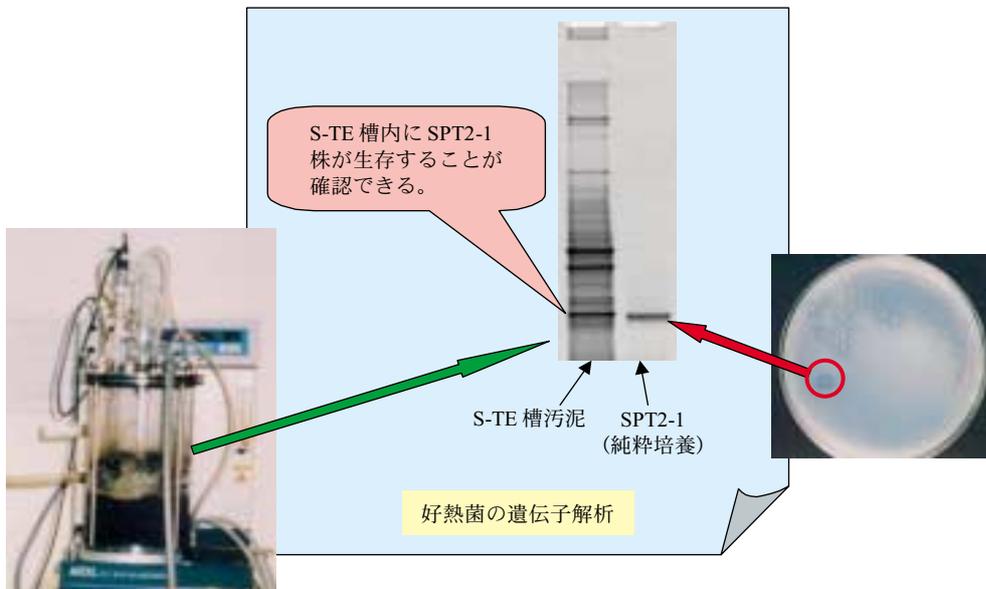


図7 遺伝子解析による S-TE 槽診断

は、再び発芽して増殖し、5時間程度で十分な数となる。したがって、一度 S-TE 菌を接種すれば、系内の汚泥を入替えない限り、追加接種の必要はない。(図6参照)

図7は、運転立上げ時 SPT2-1 株を接種した後、3年間運転後の S-TE 槽内汚泥の遺伝子解析 (DGGE 解析) 結果を示す。S-TE 槽には種々雑多 (死滅菌も含む) の微生物種を示すバンドが認められるが、確実に SPT2-1 株のバンドが確認されている。

(6) 生物学的異化代謝 (呼吸) の効用

SPT2-1 株は、有機炭素を酸化してエネルギーを与える従属栄養細菌で、有機炭素を呼吸により二酸化炭

素にまで無機化する。S-TE 槽において、呼吸に要する十分な酸素を供給すると、S-TE 菌は可溶化した有機物の30~50%を無機化することができる。したがって、他の物理化学的可溶化法に比べ、水処理系に返流される可溶化有機物の負荷量が30~50%軽減されることになる。すなわち、水処理系への返流負荷の影響が他方にくらべ少ないといえる。

2. エステプロセス®の理論⁹⁾

2.1 ゼロディスチャージの理論

プロセス全体の汚泥収支から定常状態を仮定して、汚泥減量化率を求めると次式のように表される。(詳細は文献9) 参照)

$$\text{汚泥減量化率} = \frac{Q_s}{Q_w} \times (\beta - Y_r \cdot \gamma) \quad (1)$$

ここで、

- Q_s : S-TE 槽投入汚泥量 (L/d)
- Q_w : 余剰汚泥量 (L/d)
- Y_r : 反応槽内汚泥収率 (kgSS/kgBOD)
- β : S-TE 槽を一過した場合の可溶化率 (-)
- γ : S-TE 槽を一過した場合の BOD 溶出率 (-)

BOD 溶出率が可溶化率に比例すると仮定すると、 Y_r は定数と考えられることから

$$\text{汚泥減量化率} = k \cdot \beta \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_w} \right) \quad (2)$$

ここで k 値は可溶化された物質が無機化される割合を示す。

式(2)より、汚泥減量化率は S-TE 槽での可溶化率 (β) と汚泥循環率 (Q_s/Q_w) の積に比例することが分かる。

人工廃水をもちいた室内実験および実廃液をもちいた現地テストでえられた結果を基に、式(2)の $\beta \times (Q_s/Q_w)$ と汚泥減量化率の関係を図 8 に点綴した。両者はほぼ直線関係にあり、式(2)の k 値がほぼ 1 であることがわかる。このことは、可溶化された物質が水処理系でほぼ完全に無機化されていることを示唆している。

通常、S-TE 槽での処理時間を 1 日程度で運転すると、 β 値は 0.3~0.35 であるため、ゼロディスチャージを達成するには、汚泥循環率 (Q_s/Q_w) を 3 以上で運転すればよいことがわかる。

2.2 難可溶化物質の挙動

難可溶化物質が全て原水固形物由来であると仮定すると、原水固形物由来の難可溶化固形物の流入と処理水および汚泥引抜きによる難可溶化固形物の系外持出しがバランスして反応槽内難可溶化固形物割合が一定になる条件では、次式が成り立つ。(詳細は文献 9) 参照)

$$W = \frac{\zeta_{ni}}{Y \cdot \zeta_n} \quad (3)$$

ここで、

- W : 処理水中の固形物も加味した汚泥引抜率 (-)
 - Y : 流入固形物に対する汚泥転換率 (-)
 - ζ_{ni} : 原水固形物中の難可溶化物の割合 (-)
 - ζ_n : 反応槽内固形物中の難可溶化物の割合 (-)
- 難可溶化固形物の定量は困難であるが、式(3)によ

り、汚泥を一部系外に引抜くことにより反応槽内難可溶化固形物の割合を一定に維持することができる。

無機物の蓄積についても同様に考えることができるが、一般的に汚泥が可溶化されて溶出した無機物は、ある程度活性汚泥微生物中に蓄積されるが、微生物の蓄積能にも限界があるため、蓄積能を超えた無機物は微生物には取込まれず、処理水中に排出される。

2.3 エステプロセス®の特長と適用上の留意事項

(1) エステプロセス®の特長

① 余剰汚泥の大幅減量化

余剰汚泥の発生が大幅に減量化され、条件によってはゼロディスチャージも可能である。

② 短時間での立上げが可能

S-TE 菌の増殖と汚泥可溶化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

汚泥の可溶化に細菌をもちいるため、運転費が安価である。従来の脱水・搬出する処分方法にくらべ処理費用が 1/2~1/3 に削減できる。(図 9 参照)

④ 簡単な維持管理

S-TE 槽内の温度を 60~65 °C 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

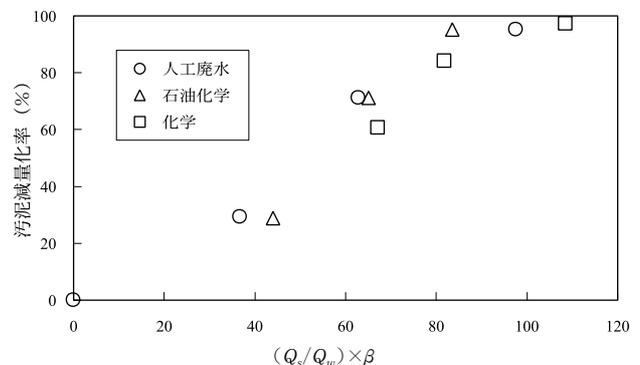


図 8 可溶化処理汚泥量と汚泥減量化率の関係

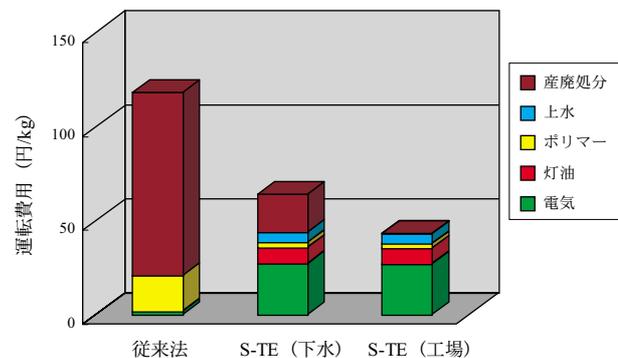


図 9 エステプロセス®の経済性

泥管理は不要)。また、特殊な知識や技術を必要としない。

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。

(2) 適用上の留意事項

① 高温処理するため高温において熱変質したり、不溶化してしまうものには、前処理で除去するなど適用に工夫を要する。

② 水処理系の負荷上昇

本来増殖菌体分として系外に引抜く汚泥を可溶化して水処理系に返送するため、本流水処理系の負荷が上昇する。ただし、S-TE 槽においても無機化が進行するため、他の物理化学的可溶化法にくらべると、返流負荷は1/2程度ですむ。

③ 負荷上昇にともなう曝気動力の上昇

負荷上昇に見合う曝気の増加が必要になる。通常、S-TE 槽排気ガスを脱臭と曝気量補充の目的

で水処理系活性汚泥反応槽に通気する。

④ リンは除去できないため、リン除去が必要な場合は、別途検討を要する。このことは、逆に、水処理系にリンを栄養塩として添加している場合は、添加量を少なくできることを意味する。

3. 実設備例

エステプロセス®は、下水への適用を目的に、1998年から2001年にかけて日本下水道事業団（JS）と共同研究を実施している（写真2）。実証機はそのまま実用機として稼動しており、稼動実績を基にJSより技術評価を受けている。また、農業集落排水への適用についても（社）地域資源循環技術センター（JARUS：旧（社）日本農業集落排水協会）より汚泥量調整機構として技術評価を受けている。

本技術は、世界最大手の水処理メーカーであるデグレモン社をはじめ、国内大手水処理メーカー2社にも技術供与しており、すでに、フランスにおいて、50 000人規模の下水処理場に欧州1号機が稼動している（写真3）。



写真2 下水処理場実証機

共同研究実証設備

水処理設備

処理方式 OD法
 反応タンク容積 400 m³
 発生汚泥量 25~30 kg/d

S-TE 槽

容積 4.4 m³
 滞留時間 2日（1~3日）



写真3 世界に羽ばたくエステプロセス®

設備概要

水処理設備

処理方式 オキシデーションディッチ
 処理人口 50 000人
 発生汚泥量 2 900 kg/d

S-TE 槽

容積 500 m³
 滞留時間 2日
 温度 65℃

欧州 S-TE 1号機（Vannes WWTP）

2005年6月稼動

Degremont 社施工

表2にエステプロセス®の実績をまとめる。下水や原水中に難分解物質が含まれる事例において、一部汚泥を引抜く運転をおこなっているが、それ以外ではゼロディスチャージの運転をおこなっている。

エステプロセス®は、それ単独でも「汚泥を発生しない排水処理プロセス」として有用な技術であるが、当社の高負荷処理あるいはメタン発酵技術と組み合わせることにより、他社技術を凌ぐ当社独自のメニューとしてランクアップされる。

3.1 PABIO MOVER との組合せ

PABIO MOVER は排水と酸素と微生物の「高い接触効率」および「高い酸素供給効率」がえられる高負荷型の好気性生物処理装置である。

化学製品および電子工業用高純度薬品などを製造する工場において、増産にともなう既設排水処理設備（活性汚泥法）の負荷増強を計画するにあたり、当社のPABIO MOVERを紹介するとともに、排水

の処理過程で発生する余剰汚泥の減量化に有効なエステプロセス®を付加することを提案し、「汚泥消滅型高負荷排水処理装置」としてセットで採用いただいた。設備フローを図10に示す。

約700 kgBOD/d から2 400 kgBOD/d の負荷増強に対し、600 m³ のPABIO 槽を設け、負荷増強後の推定余剰汚泥発生量715 kgDS/d を完全消滅させるため、155 m³ のS-TE 槽を設置した。PABIO 槽でのBOD除去率は、90 %以上、設備全体としては、98.4 %と良好な処理性能がえられており、汚泥引抜きゼロ運転が達成されている。

3.2 メタン発酵との組合せ

食品廃棄物処理分野において「食品リサイクル法」が施行され、事業所系食品廃棄物については、リサイクル率の20 %向上が求められている。リサイクルの一法として、メタン発酵は容易にエネルギー回収が可能であることから注目を集めているが、発酵後の消化液の処理が問題になっている。欧米のように直接液肥として利用できる場合は問題ないが、国内では、そのような地域はごく限られており、後段に水処理設備を設置するのが一般的である。そこで、メタン発酵残渣を極力少なくするため、メタン発酵消化液の処理にエステプロセス®を適用したシステムを提案し、採用いただいている。システムの概略フローおよび写真を図11に示す。

5 t/d（含水率60 %）の生ゴミを180 m³ の消化槽でメタン発酵し、回収したメタンガスを利用して60 kW の発電機およびボイラでエネルギーを創出している。メタン発酵後の消化液は、排水処理設備に投入され、排水処理設備から排出される1 t/d の余剰汚泥は、80 m³ のS-TE 槽で可溶化処理して水処理系に返流することにより減量化している。本設備においても汚泥引抜きゼロを達成している。

表2 エステプロセス®の実績

納入先	処理汚泥量 (kg-DS/d)	汚泥減量化率	納入年度	業種
N町	22	70~80	2001	下水
H社	330	80	2002	食品
M(株)	5 000	70~80		化学
S(株)	100	90		電気
(株)N	72	100	2003	化学
N(株)	715	100		食品
KK	450	100		食品
A(株)	10	100		食品
AM(株)	140	100	2004	食品
LP	400	100		電気
(株)M	1 100	稼動中	2005	食品
H市	540	目標80~90		畜産他

技術供与先の実績：民間工場2件（2003, 2004年度）
下水処理場1件（2005年度：フランス）

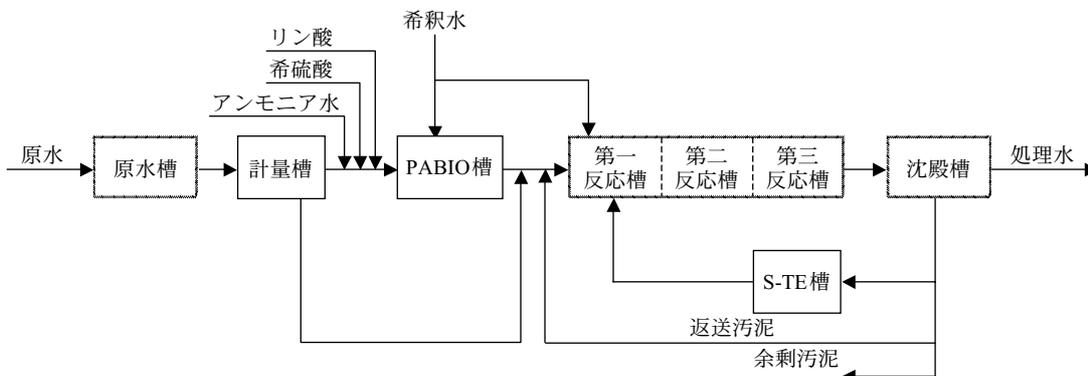


図10 汚泥消滅型高負荷排水処理装置

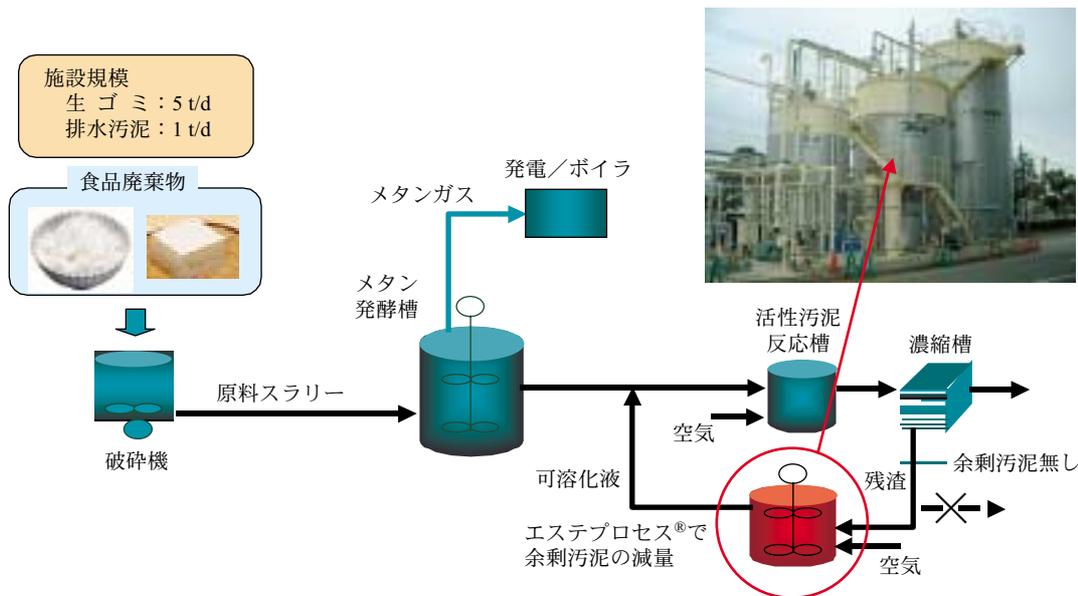


図11 食品廃棄物処理への適用

むすび

自然界で生成される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過言ではない。そうでなければ、その物質がどんどん蓄積されて地球がその物質で埋め尽くされることになる。生物学的排水処理設備から排出される余剰汚泥についても同じで、効率的におこなえば完全分解が可能である。水処理技術、脱臭技術に生物学的方法が適用されてきたように、汚泥処理技術においても生物学的方法が採用されていくことを期待する。

[参考文献]

- 1) 河崎哲久：ロンドン条約附属書 I の改正に伴う産業廃棄物の海洋投入処分の規制強化について、いんだすと、Vol.10, No.9 (1995), p.38-42
- 2) H. Yasui, M. Shibata: An Innovative Approach to Reduce Excess Sludge Production in the Activated Sludge Process, Wat. Sci. Tech., Vol.30, No.9 (1994), p11-20
- 3) 名和慶東：ミル破碎工程を含む汚泥減容化の研究，環境技術，Vol.28, No.8 (1999)，p.562-565
- 4) 奥田友章，村上定瞭，笠原伸介，石川宗孝：水熱反応を利用した余剰汚泥削減型活性汚泥法に関する研究，環境工学研究論文集，Vol.39 (2002)，p.43-54
- 5) 見手倉幸雄，古崎康哲，榊原隆司，安藤卓也，笠原伸介，石川宗孝：超音波を利用した余剰汚泥削減システムに関する研究，環境工学研究論文集，Vol.39 (2002)，p.31-41
- 6) 桂健治，三浦雅彦，長谷川進：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プロセス，水環境学会誌，Vol.21, No.6 (1998)，p.360-366
- 7) 大島泰郎監修：極限環境微生物ハンドブック第1版 (1991)，p.36-51
- 8) 李玉友，野池達也：余剰汚泥の嫌気消化に及ぼす前熱処理および滞留時間の影響，水質汚濁研究，Vol.12, No.2 (1989)，p.40-49
- 9) 日本下水道事業団，神鋼パンテック株式会社：好気性好熱細菌による下水汚泥の減量化に関する共同研究報告書（第1報）平成13年12月