特集Ⅱ 汚泥の濃縮・消化

嫌気性消化プロセスの効率化に向けて

Aiming at the Effective Anaerobic Digestion Process

平岡 正勝*・武田 信生**

はじめに

汚泥の処理・処分における省エネルギーが強調されるにしたがい、汚泥の嫌気性消化によるメタンの回収・利用が強い関心を集めるようになってきた。とくに、下水処理場内での電力使用量は大きく、電力単価の高騰に伴って、消化ガス発電はコスト的にも魅力のあるものとなってきている。ガスエンジン発電機は、蒸気タービン発電機にくらべ手軽であることも一つの魅力である。

しかしながら、従来、わが国の下水処理場では消化ガスの利用は、消化プロセスを維持する加熱用エネルギーとしての利用に限定されている例がほとんどであった。もちろんこれには、一次エネルギー単価が相対的に安かったことも理由としてあげられるが、消化ガスの発生量が少なかったことも1つの大きな理由であろう。

嫌気性消化プロセスを省エネルギー策として確立するためには、安定した高いガス化率を確保するとともに、効率的な消化プロセスの設計・運転が必要であろう。たとえば、石川¹⁾は、①単位有機物あたりのガス量の増大化、②消化槽の運転の改善、③投入汚泥濃度の改善、④消化槽の放熱量の減少を図る、ことが必要であると述べている。

筆者らは、嫌気性消化プロセスについて、①嫌気性消化プロセスの機構解析およびメタン発酵促進対策の検討、②消化タンクの形状、攪拌方法、構造を中心とした反応装置工学的検討、③システム解析による省エネルギー性・経済性の検討、が必要であると考えて研究を行ってきたが²⁻⁴⁾、本報では、今後の嫌気性プロセスの方向として考えられるいくつかの点について述べてみたい。

1. 消化槽投入汚泥濃度の改善——高濃度消化

消化槽へ投入する汚泥の濃度を高くすることによって消化プロセスを効率化しようという研究は多く、また、実用化されつつある。投入汚泥濃度を高くすることは、嫌気性消化を維持するのに必要な加熱エネルギーを減少させるとともに、消化槽における汚泥の滞留時間すなわち、消化日数を確保する上でも有効である。消化日数についていえば、設計時の汚泥濃度にくらべ、実際の投入汚泥濃度が低いことが多く、十分な消費日数が確保されていない場合が多いと考えられる⁵⁾。

消化槽の容量 V (m³)は、

$$V = (Q_1 + Q_2) / 2 \times T$$

Q_1 : 投入汚泥量 (m³/日), Q_2 : 消化汚泥量 (m³/日), T : 消化日数 (日), によって計算されており、一旦消化槽の容量が決まってしまうと、投入汚泥濃度の低下や消化率の悪化は Q_1 や Q_2 の値を大きくし、実際の消化日数を低下させることになる。

栗林らが調査した処理場では、消化率は消化開始後10日間で40%に達し、消化日数が10~40日の範囲では、消化日数が10日長くなるごとに消化率は2~3%増加していたという⁶⁾。

嫌気性消化を維持するのに必要な加熱エネルギーについてみると次のようになる。

いま、下水の処理人口10万人規模について、適当な仮定を設けて⁷⁾(表1)計算を行うと、混合汚泥の固形物量は約8,600kg/日となる。この場合に、投入汚泥濃度を2%, 3%, 4%とそれぞれ仮定したときの諸量の計算結果を表2に示した。なお、消化汚泥の濃度は、投入汚泥濃度に対応して、それぞれ、1.5%, 2.3%, 3%と仮定し、消化槽滞留日数は20日とした。仮定する条件によって異なってくるのは当然であるが、消化

* 京都大学工学部衛生工学教室教授、工博 Masakatsu HIRAOKA

** 同 上 助手、工博 Nobuo TAKEDA

表 1 消化槽収支計算の仮定 (例)

下 水 量	450 ℓ/人・日
SS	250mg/ℓ
初沈汚泥有機物	70%
余剰活性汚泥有機物	75%
初沈SS除去率	40%
終沈SS除去率	80%
初沈濃縮槽固形物回収率	95%
余剰活性汚泥濃縮機固形物回収率	80%
初沈汚泥分解率	50%
余剰活性汚泥分解率	30%
初沈汚泥ガス収率	1 Nm ³ /kg-VS
余剰活性汚泥ガス収率	0.75Nm ³ /kg-VS
濃縮汚泥温度	7℃
地下水温度	6℃
土壌温度	5℃
外気温度	0.5℃
消化ガス組成	CH ₄ : 65%, CO ₂ : 30%, H ₂ : 1%, N ₂ : 4%

槽からの放熱を補充するために必要な熱量は約20%程度となっている。先に表1で仮定した条件にもとづけば、消化ガスの生成量は約93Nm³/hrであり、その低位発熱量は5,590kcal/Nm³程度となる。ボイラおよび熱交換器における効率を考え、低位発熱量の76%が加熱のために有効に利用できると仮定すると、プロセスの維持に必要な消化ガス量は、投入汚泥濃度、2%、3%、4%に対応して、それぞれ、132Nm³/hr、110Nm³/hr、85Nm³/hrとなる。すなわち、2～3%の投入汚泥濃度では、消化ガスの発熱量だけでは消化プロセスの維持が出来ないということになる。

下水の流入水量、汚泥有機分率、環境温度などの季節的変動を考慮したガスエンジンシステムのシミュレーションについては佐藤が展開している⁸⁾。

汚泥の高濃度消化は、消化プロセスの熱収支の改善、充分な消化日数の確保にとって有効であるが、高濃度汚泥の消化反応や消化槽内の攪拌に及ぼす影響、消化

汚泥の性質が後続のプロセスに与える影響、高濃度汚泥を得るための前処理(濃縮操作)の安定性とエネルギー消費量などが検討されなければならない。

佐藤ら^{9,5)}は、濃度4%および6%の下水汚泥について消化日数(有機物負荷)を変えて連続実験を行い、投入汚泥濃度が投入有機物あたりガス発生量に及ぼす影響はほとんどなく、6%程度の濃度までは20日消化でとくに問題はなさそうであると述べている。

神奈川県大和市における高濃度消化の実証プラントの運転結果および実プラントの概要については多くの報告が発せられている¹⁰⁻¹⁹⁾。これらの報告によれば、汚泥濃度4%、有機物負荷2.2～2.5kg-VS/m²・日で支障なく運転でき、一次消化槽(滞留日数約17日)で消化がほぼ完全であり、二次消化槽では固液分離の機能を期待できないことから二次消化槽は不要であり、直接脱水処理とすること、消化汚泥の脱水は従来の消化法の場合と同様であることが示されている。なお、消化槽の攪拌には、ドラフトチューブ方式によるガス攪拌とジェット噴流によるポンプ攪拌が併用されている。

福智ら²⁰⁾は、濃度3%、4.5%、6%の汚泥について消化実験を行い、汚泥濃度を6%程度まで上げて消化阻害の徴候は認められず、通常の消化条件で消化されるとしている。また、消化汚泥の濃縮に関しては、4.5、6%の汚泥は洗浄工程では濃縮されず、消化汚泥は初期濃度にあまり関係なく、3～3.5%に濃縮されて安定される。脱水に関しては、固形物あたりの脱水助剤添加率は高濃度消化汚泥と低濃度消化汚泥はほぼ同じである。汚過速度は無機凝集剤の場合に高濃度汚泥では高くなっている。

高柳ら²¹⁾は、遠心濃縮機を使用した濃度5%の高濃度消化の実施設消化実験を行い、有機物負荷2.2kg/m²・日程度までの高濃度消化は既存の消化槽で運転可能であるとしている。また、濃度が3%以上の高濃度消化では、ほとんど濃縮効果は期待できないので、固液分離槽(二次消化槽)を想定せずに設計し、消化汚泥は直接脱水することが望ましいとしている。遠心脱水機、ベルトプレスを用いた脱水では、高濃度消化汚泥は従

表 2

汚 泥 濃 度 (%)	投入汚泥量 (m ³ /日)	消化汚泥量 (m ³ /日)	消化槽容積 (m ³)	プロセス維持に必要な熱量 (kcal/hr)
2	430	408	8,400	564 × 10 ³
3	286	266	5,600	466 × 10 ³
4	215	204	4,200	361 × 10 ³

来消化汚泥と同等かそれ以上の脱水性を示している。

大山²²⁾によれば、機械濃縮による高濃度消化により、加熱用エネルギーの減少などの利点があった反面、投入有機物あたりのガス発生量の低下、消化槽脱離液濃度の上昇などが起こったとしている。投入有機物あたりガス発生量の低下は、消化脱離液濃度が上昇し、水処理プロセスへの循環汚泥量が増加するために難分解性有機物質の循環量が増えるためであろうと考えられている。また、濃縮に要した動力は、遠心濃縮で1.588 kWh/m³、0.059 kWh/DS-kg(約30 m³/hr規模)、浮上濃縮で0.819 kWh/m³、0.248 kWh/DS-kg(約90 m³/hr規模)であった。

以上の結果を総合すると、4—5%程度の高濃度消化は、消化日数20日程度を確保すれば従来の中温消化槽技術で十分に対応できるといえそうである。その際には、消化汚泥の濃縮は期待できず、直接脱水によることとなる。また、返流水負荷が低濃度消化にくらべてどのように変化するのか、濃縮に要する動力は全体のシステムの中でどれくらいの位置を占めるのかに注意を払うべきであるといえよう。

2. 基質の改善

嫌気性消化プロセスは、酸発酵段階とメタン発酵段階とからなる。第1の段階では炭水化物、脂肪、蛋白質などが酸生成菌の作用によって、低級脂肪酸、アルデヒド、アルコールなどの低分子有機物にまで分解される。そして第2段階では、低級脂肪酸がメタン菌の作用によってメタンと二酸化炭素に分解される。低級脂肪酸のうち、酢酸はメタン菌に直接利用されるが、プロピオン酸、酪酸はアセトジェニック菌によって酢酸と水素に分解されてはじめてメタン菌の対象基質になるといわれている。従来、嫌気性消化における総括の律連段階はメタン発酵期であることから、この段階に関する研究が多くなされてきた。ところが、最近では、汚泥のように固形性有機物が大量に含まれる有機物の嫌気性消化では、固形性有機物の可溶化、低分子化が重要な一段階であると指摘されるようになってきている²³⁾。

通常、嫌気性消化プロセスによって分解・ガス化される有機物は、初沈汚泥で50%、余剰活性汚泥で35%といわれており、残留する有機物質は嫌気性消化に対する難分解性有機物質であると受けとめられている。この難分解性有機物質の割合を減少させ、消化ガス発生量を増大させ、しかも分解速度を向上させることが

できるならば、嫌気性消化プロセスの効率を高めることができる。

このように難分解性有機物質を分解性有機物質に変える、いわゆる基質の改善について最も有望であると考えられるのは汚泥の熱処理である。Haugら²⁴⁾は、177°Cで熱処理した汚泥の分解液を嫌気性フィルターにて処理する方法を提案しているが、同時に、固形物中の有機物が利用できない点、臭気の問題などから、熱処理汚泥そのものを従来の嫌気性消化プロセスにかける方法を提案している²⁵⁾。この方法であれば、従来の消化槽運転技術が生かせることも利点の1つである。Haugの計算によれば、熱収支として最もすぐれているシステムの構成は、余剰活性汚泥に熱処理をほどこし、これと初沈汚泥を混合して消化槽に投入する方式である。

さらに、Haugら²⁶⁾は、100—250°Cで熱処理した汚泥の中温槽気性消化実験を行い、余剰汚泥からのメタン生成量は100°Cの熱処理で14%、170°Cの熱処理で60—70%増加するという結果を報告している。

Haugら²⁷⁾はさらに約45 m³の規模の消化槽によって、熱処理・高温消化のフィールド実験を行い、余剰活性汚泥に対しV/S分解率は従来法中温嫌気性消化にくらべ約40%、従来法高温嫌気性消化にくらべ約15%向上するなどの結果を得ている。

筆者らも、比較的高温の熱処理プロセスを嫌気性消化の前段におく実験を試みたが²⁾、従来の手軽さをそのまま維持しながら嫌気性消化プロセスの効率を向上させるには比較的低温での熱処理(水の沸点以下)プロセスを前段プロセスとすることも魅力的であるので、その方向での室内実験を行い、昭和57—58年度には20 m³の卵型消化槽を使つてのパイロット実験を実施した。

図-1は、室内実験の結果の一例であり⁴⁾、比較的低温の熱処理によってもガス生成量の増加がはかれることが示されている。データを整理した結果によれば、

図-1 ガス生成量の推移

有機物負荷 $3 \text{ kg-VS/m}^2 \cdot \text{日}$ 以下では、ガス発生量は増大し、 60°C における熱処理で、その増加率は30%に達する。

パイロットプラント実験に関する中間的な結果は次のとおりである⁸⁾。

表3は、発生ガス量などが安定した約1か月間の実験データを総括し、第Ⅰ～Ⅲ期の結果として示したものである。同表中には、第Ⅰ期に並行して実施した従来法嫌気性消化実験（容量30ℓ）の結果も示してある。ガス発生量に関していえば、投入有機物あたりのガス発生量は、熱処理の場合、 $0.35 \sim 0.45 \text{ m}^3/\text{kg-VS}$ に対して、無処理 $0.23 \text{ m}^3/\text{kg-VS}$ と、その差は極めて大きい。第Ⅰ～Ⅲ期の投入有機物あたりガス発生量をみれば、投入汚泥の有機分率がガス発生量に関係しており、投入汚泥有機分率が高いほどガス発生量は多いようである。第Ⅱ、Ⅲ期にくらべて第Ⅰ期では有機分率は10%程度高いが、この時の有機物あたりガス発生量も25%程度多くなっている。汚泥の分解率は、無処理21%に対し、熱処理23～30%という結果になっている。いずれも、一般に報告されている分解率にくらべて多少低い値であるが、これは、消化特性が良好であるとされている初沈汚泥の有機分率が低い（50～65%）ためであると考えられる。

余剰汚泥を熱処理することにより後続の嫌気性消化プロセスにおけるガス発生量が増大することを述べて

表3 熱変性メタン発酵実証実験の総括

			60℃熱処理メタン発酵			無処理 830221 ～311	
			第Ⅰ期間 830221 ～325	第Ⅱ期間 830510 ～609	第Ⅲ期間 830704 ～804		
投入汚泥	初沈	pH	〔－〕	6.26	4.82	5.84	6.40
		TS	〔％〕	3.37	4.79	4.34	2.78
		VTS/TS	〔％〕	67.3	56.0	51.2	65.2
	余剰熱処理	pH	〔－〕	6.51	6.40	6.58	6.20
		TS	〔％〕	4.34	4.95	4.74	5.33
		VTS/TS	〔％〕	71.0	62.2	61.5	75.3
	混合	TS	〔％〕	3.85	4.86	4.52	4.05
		VTS/TS	〔％〕	69.3	58.7	56.2	71.8
		消化汚泥	pH	〔－〕	7.59	7.40	7.39
	TS		〔％〕	3.20	3.49	3.81	3.38
VTS/TS	〔％〕		62.2	50.0	49.7	66.8	
投入条件	消化日数	〔日〕	24	18.5	20	20	
	有機物負荷	〔kg/㎡・日〕	1.11	1.54	1.29	1.46	
	初沈/余剰有機物比	〔－〕	0.76	1.14	0.90	0.45	
	消化温度	〔℃〕	35.5	36.4	36.8	35.0	
実験結果	ガス発生倍率	〔㎡/㎡〕	12.2	11.6	9.1	6.6	
	ガスメタン濃度	〔％〕	69.6	—	67.3	61.1	
	投入有機物当たりガス量	〔㎡/kg〕	0.458	0.408	0.357	0.227	
	分解 “ ”	〔㎡/kg〕	1.690	1.378	1.552	1.081	
	汚泥分解率	〔％〕	27.1	29.6	23.0	21.0	

表4 消化タンクの形状と攪拌装置の組合わせによる混合特性

	ポンプ循環攪拌		ガス攪拌		ポンプ循環+ガス攪拌	
	デッドスペース	流動状態	デッドスペース	流動状態	デッドスペース	流動状態
型式-1 ソロバン玉形		旋回流は胴長の1/2程度で消える。 無攪拌状態の範囲が全体の1/2程度ある。		外周部に垂直方向の速い循環流ができるが、中央部に無攪拌状態のデッドスペースが生じる。	無	全ての型式において、均一な旋回流が生じ垂直流は消え槽内の混合状態は良く、完全に混合する。
型式-2 亀甲形		旋回流はソロバン玉形より広い範囲に生じる。無攪拌状態の範囲は上部吸込み口と下部吐出部に生じる。		ソロバン玉形と同じように循環流が生じるが、中央部のデッドスペースはソロバン玉形より少ない。		
型式-3 クラシック形		ほぼ100%の旋回流が胴体に生じ、亀甲形より攪拌状態は良い。		垂直循環流の範囲は亀甲形より大きくなりデッドスペースも10%前後に減少する。		
型式-4 卵形		スムーズな旋回流が胴全体に起こり攪拌は十分行われる。旋回流は最も速い。		槽全体が垂直循環流により激しく攪拌される。		

注. 無攪拌（デッドスペース）域は斜線で示す。

変化するかを粒子追跡法によって調べた。表4にはその結果を示した。この結果、①完全混合状態にしやすい、死水域の発生が少ない形状は卵形で、次いで、クラシック型、亀甲型、ソロバン玉型である。②底部の攪拌が充分で、砂の堆積が少なくなるであろうと考えられる形状は卵型であり、次いでクラシック型である、ということがわかった。

次に、卵型消化タンクで使用されている攪拌装置としては、機械攪拌とポンプ循環攪拌の組合せが多い。機械攪拌装置ではスカムの破碎が容易であり、攪拌に要する動力も小さいといわれている。ちなみに、文献によれば³⁰⁾、卵型消化タンクの場合に攪拌に要する動力は表5のように報告されている。

汚泥の投入、引き抜き位置については、500ℓ容量の卵型消化タンクモデルを用いてポンプ循環攪拌およびガス攪拌の組み合わせのもとで図-3に示すようなR, S, Tの3方式について攪拌ゾーン存在率およびバイパス流存在率を求めた結果が表6である。この結果では、

R方式、すなわち、上部投入、下部引き抜きの方式が攪拌性にすぐれ、バイパス流が少なく最もすぐれていた。

上記のような実験は現実の消化槽容量とくらべれば小規模なものであり、流体として清水を用いているなど不十分な点も多く残されているが、初期検討材料としては十分な参考資料となろう。

おわりに

汚泥の嫌気性消化の効率化という観点から2, 3の項目について述べてきた。嫌気性消化は古くて新しいシステムである。歴史的に長いという意味では古いシ

図-3 各方式の汚泥投入、引き抜き管位置と攪拌方式

表5 卵形消化タンクにおける各種攪拌方式と消化タンク容積 m^3 当たりの消費動力比較³⁰⁾
(消化タンク容積 $6,000 \text{ m}^3$)

	機 械 攪 拌	ガ ス 攪 拌			ポンプ循環攪拌
		周辺吹き込み式	底部吹き込み式	ガスリフター式	
タンク 1 m^3 当たりの消費動力	$25 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{日}$	$100 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{日}$	$130 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{日}$	$40 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{日}$	$170 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{日}$

表6 R, S, T各方式の攪拌効果

方 式	滞留時間 分	攪 拌 効 果	
		攪拌ゾーン 存 在 率 Va/V	バイパス流 存 在 率 Va/V
T-方式	747	0.894	0.089
R-方式	829	1.000	0.064
S-方式	678	0.919	0.088

攪拌条件: ポンプ 0.36 ℓ/分 (1回/1日)

ガ ス 2.0 ℓ/分 (22回/1日)

システムであるが、今後のニーズといった点からは種々の改良が必要であるという意味で、新しいシステムであるといえる。何日という時間オーダーで記述されるように、反応そのものは緩慢であり、それだけに研究にも時間と根気が要求されるが、各方面での研究が嫌気性消化プロセスの高率化として結実することを期待してやまない。

参 考 文 献

- 石川忠男:「下水汚泥消化ガスによる発電」, 空気調和・衛生工学, **58** (5) 423—429 (1984)
- 平岡正勝, 武田信生, 大隅欣一, 奥兼美:「下水汚泥嫌気性消化システムに関する研究 (第1～3報)」, 環境技術, **10** (9) 671—701, (11) 869—882, (12) 945—954 (1981)
- 平岡正勝, 武田信生, 酒井伸一, 安田顕弘, 藤原護朗:「下水汚泥の消化ガス発電システムとメタン発酵プロセスのガス発生量増大対策に就て」, 燃料及燃焼, **50** (11) 801—825 (1983)
- Hiraoka M., N. Takeda, S. Sakai, A. Yasuda: "Highly Efficient Anaerobic Digestion with Thermal Pretreatment", IAWPRC's 12th Biennial International Conference on Water Pollution Control (Amsterdam 1984/9) (in Press)
- 小越真佐司:「下水汚泥のガス発生率とその影響要因」, 公害と対策, **17** (7) 601—607 (1981)
- 栗林宗人, 村上忠弘:「下水汚泥の嫌気性消化に関する現状分析」, 下水道協会誌 **21** (240) 14—22 (1984)
- 平岡正勝, 吉野善彌:「汚泥処理工学——プロセスの計画と設計」p.206, 講談社 (1983)
- 佐藤和明:「下水汚泥の嫌気性消化と消化ガスの有効利用」, 環境技術, **10** (3) 254—258 (1981)
- 佐藤和明, 館山祐清:「嫌気性消化法によるエネルギー回収 (第3報) ——高濃度汚泥の消化について」, 第16回下水道研究発表会, 81—83 (1979)
- 玉井孝生:「わが国の下水汚泥消化ガス発電システム」, PPM, 39—48 (1981/2)
- 同上:「汚泥消化ガス発電システムと適用例」, 公害と対策, **17** (7) 629—630 (1981)
- 小林浩志:「下水汚泥エネルギー化システム」, 化学装置, 12—19 (1981/10)
- 渋谷守弘, 大山善久:「高濃度汚泥消化法による消化ガス発電システムの実証試験」第19回下水道研究発表会, 694—696 (1982)
- 渋谷守弘:「高濃度下水汚泥消化ガス発電システムと実証プラントの運転結果」, 公害と対策, **18** (12) 1143—1152 (1982)
- 古木啓介, 渋谷守弘, 鈴木正:「高濃度汚泥消化法による消化ガス発電システムの実証試験 (第2報)」, 第20回下水道研究発表会, 693—695 (1983)
- 玉井孝生:「高濃度スラッジによるガス発電システム」, 工業用水, (301) 58—65 (1983)
- 山田盛一, 木村三郎, 鈴木正, 大森重明:「高濃度汚泥消化法における消化日数の影響について」, 第21回下水道研究発表会, 523—525 (1984)
- 外山誠一, 木村三郎, 浅野悦夫, 見上博, 叫喜二郎, 高橋友幸:「高濃度汚泥消化ガス発電システムに於ける消化槽の初期運転について」, 第21回下水道研究発表会, 526—528 (1984)
- 川崎雷司:「生活系廃棄物の有効利用施設例——大和市における下水汚泥のガス発電」, 空気調和・衛生工学, **58** (5) 443—448 (1984)
- 福智真知, 嶋岡忠敬, 加藤哲二:「高濃度汚泥の嫌気性消化について」第19回下水道研究発表会, 532—534 (1982)
- 高柳枝直, 上村敏夫:「実施設を用いた高濃度消化実験」, 第20回下水道研究発表会, 586—588 (1983)
- 大山孝利:「汚泥濃縮法と消化槽管理」, 第20回下水道研究発表会, 571—573 (1983)
- Eastman, J. A., J. F. Ferguson: "Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion", J. WPCF **53** (3) 352—366 (1981)
- Haug, R. T., S. K. Raksit, G. G. Wong: "The Anaerobic Filter Treats Waste Activated Sludge.", Water and Sewage Works, **124** (2) 40—43 (1977/2)
- Haug, R. T. "Sludge Processing to Optimize Digestibility and Energy Production", J. WPCF **49** (7) 1713—1721 (1977)
- Haug, R. T., D. C. Stuckey, J. M. Gossett, P. L. McCarty: "Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dewaterability of Organic Sludges", J. WPCF **50** (1) 73—85 (1978)
- Haug, R. T., T. J. LeBrun, L. D. Tortorici: "Thermal Pretreatment of Sludges—A Field Demonstration", J. WPCF **55** (1) 23—34 (1983)
- 平岡正勝, 武田信生, 西田猛:「下水汚泥の低温熱変性消化プロセスに関する研究——パイロットプラントによる実証実験」, 第21回下水道研究発表会, 520—522 (1984)
- 平岡正勝, 武田信生, 川崎信彦, 長安賢二, 三谷哲夫:「汚泥の消化と消化ガス発電」, 環境技術, **9** (12) 978—984 (1980)
- Wiedemann, F.: "Einrichtungen zur Umwälzung des Schlammes in Faulräumen", Wasser / Abwasser, **118** (6) 278—284 (1977)