

# でんぷん製造廃水のメタン発酵処理について

— アクアルネッサンス '90計画より —

## Methane Fermentation of Wastewater from a Wheat Starch Producing Plant

— On the Results of Aqua Renaissance '90 project —



技術開発本部 製品化技術室  
堀 口 真  
Makoto Horiguchi

Using the newest biotechnology and membrane filtration technology, energy recovery from wastewater and municipal sewage, efficient treatment of them, low excess sludge from treatment system and others were studied at the national project, Aqua Renaissance '90 project conducted by Agency of Industrial Science and Technology.

Kobe Steel Ltd. and others developed Two-phase Methane Fermentation System using Membrane, which can recover methane from wastewater stably at high loading rate of organic matter and purify wastewater highly.

### ま え が き

1985年度から1990年度までの6年間実施された通商産業省工業技術院大型プロジェクト「水総合再生利用システムの研究開発」(アクアルネッサンス '90計画)に、工業技術院の公害資源研究所、微生物工業研究所、化学技術研究所、大阪工業技術試験所の4研究所と、(財)造水促進センターと(財)バイオインダストリー協会の2団体および企業20社とが参加し、最先端のバイオテクノロジーや膜分離技術を組合わせて、工場廃水や生活廃水からのエネルギーの効率的な回収、廃水処理設備のコンパクト化、処理費用の低減、汚泥発生量の低減、設備の容易な維持管理等を可能とする技術開発が行われた<sup>1)</sup>。

このプロジェクトに参加し、2相中高濃度廃水用バイオリアクターの研究開発を担当した神戸製鋼所のグループ企業の一員として、本稿ではプロジェクトの研究開発成果の中ででんぷん製造廃水のメタン発酵処理に関する部分の概要を紹介する。

### 1. 開発目標

#### 1.1 研究開発の目標

メタン発酵はメタンというエネルギーを回収でき、また好気性の活性汚泥処理のように酸素供給のための大きな曝気動力が不要であり、さらに余剰汚泥の発生量が少ない等の特長をもち、古くから下水汚泥やし尿の嫌気性消化処理等に利用されてきたが、メタン細菌の高濃度培養が困難なために高有機物負荷処理ができず、また環境変化に鋭敏であるために運転が容易でなく、さらには有機物の除去率が低い等の理由でその利用が制限されてきた。

本プロジェクトではメタン発酵法の長所を生かし、エネルギーとして利用可能なメタンを安定に回収し、さらに廃水を高度に浄化するメタン発酵システムを構築するために、嫌気性細菌を高濃度に保つための菌体が付着しやすい担体の開発や、菌体自身の造粒作用を利用したスラッジブランケット(以下UASBと略す)式リアクターの開発<sup>2)</sup>、さらには懸濁物質を高濃度に含んだ液を低圧で効率よ

く透過させ、洗浄性に優れかつ耐久性のある膜モジュールの開発<sup>3)</sup>が行われた。

#### 1.2 基本計画目標値

バイオリアクター及び膜モジュールの各々の使用条件における基本計画目標値が第1表に示したように設定されたが、高濃度廃水であるでんぷん製造廃水を中温発酵でメタン発酵処理する場合には15 kgBOD/m<sup>3</sup>・d以上の負荷で処理し、そのときの流入有機物のガス化率を80%以上にするという目標値が設定された。ここでガス化率とは流入有機炭素がメタン及び二酸化炭素に転換する比率である。

また分離膜の開発では、膜の使用条件として廃水中の微生物あるいは懸濁物質(SS)濃度が10 000 mg/ℓ程度の場合の膜透過所要動力を1.5 kWh/m<sup>3</sup> 透過水以下にするという目標値が設定された。

#### 1.3 パイロットプラントの建設

基礎的な要素技術の研究<sup>4)</sup>、さらには7グループに分かれて実施された小型実液試験装置による実廃水試験<sup>4)</sup>等の結果に基づき、高濃度廃水研究グループはでんぷん製造廃水を、低濃度廃水研究グループは下水を研究対象とするパイロットプラントが建設された。でんぷん廃水研究グループには神戸製鋼所の他に、膜モジュールの研究開発を担当する三菱レイヨン・エンジニアリング㈱、計測制御システムの開発を担当する三菱電機㈱の2社も参加した。

第1表 基本計画目標値  
Table 1 The objectives of Aqua Renaissance '90 project

		Objective	
Wastewater		BOD loading rate	Gasification rate
Reactor	High conc. wastewater 2000 mgBOD/L over	Thermophilic 15 kgBOD/m <sup>3</sup> (Reactor)・d over Mesophilic 5 kgBOD/m <sup>3</sup> (Reactor)・d over	80% over
	Low conc. wastewater 200~1 000 mgBOD/L	Mesophilic 2 kgBOD/m <sup>3</sup> (Reactor)・d over	60% over
	Operating cond. of membrane	Power consumption	
Membr.	Microorganisms conc. 10 000 mg/ℓ	1.5 kWh/m <sup>3</sup> Permeate under	
	Microorganisms conc. 100 mg/ℓ	0.3 kWh/m <sup>3</sup> Permeate under	

## 2. 膜複合メタン発酵リアクターによる小麦でんぷん製造廃水処理

### 2.1 小麦でんぷん製造廃水の水质

パイロットプラントが設置された長田産業㈱（兵庫県栗郡山崎町）では小麦粉から小麦でんぷんと小麦蛋白（グルテン）が生産されている。小麦でんぷんは、原料小麦粉に約10数倍の清水を加え、混練、水洗分離し回収したでんぷん乳を精製、乾燥させて製造される。小麦粉中のグルテンも水洗分離後に別工程で回収、乾燥されて製造される。このような工程から排出されるでんぷん製造廃水は第2表に示したように小麦粉中の不溶性懸濁物質、及び溶解性の有機物をともに高濃度に含む<sup>4)</sup>。また窒素を約500 mg/l、リンを約120 mg/l を含んでいるために嫌気性処理する場合には栄養塩の添加は不要である等の特長を有している。

### 2.2 膜複合メタン発酵処理システム

固定床式酸発酵リアクターとUASB式メタン発酵リアクターの間に分離膜を設ける膜複合2相式メタン発酵シ

第3表 膜複合2相式メタン発酵システム  
パイロットプラントの主要機器仕様

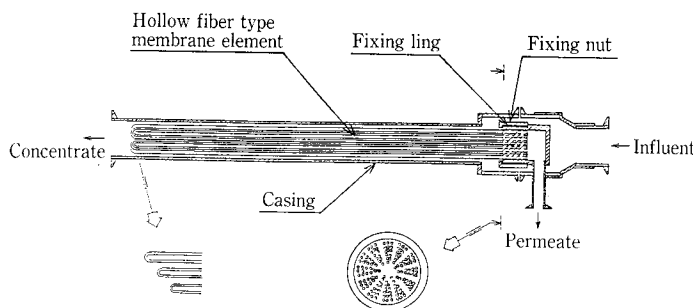
Table 3 Specifications of pilot-scale plant of two-phase methane fermentation system using membrane

Equipment name	Specifications	
Acidogenic reactor	Type	Fixed
	Shape	Cylindrical
	Dimension	3 000 φ × 4 320 SH
	Volume	30 m <sup>3</sup>
	Media	PVC
	Media volume	24 m <sup>3</sup>
Membrane module	Type	Hollow fiber
	Dimension	65A × 935L
	Material	Polyethylene
	Pore size	0.2 μm
	Membrane area	324 m <sup>2</sup>
Methanogenic reactor	Type	Sludge blanket
	Shape	Cylindrical
	Dimension	2 400 φ × 2 500 SH
	Volume	15 m <sup>3</sup>
Gas holder	Type	Water seal
	Dimension	3 200 φ × 4 000 H
	Volume	30 m <sup>3</sup>

テム<sup>4)</sup> (以下アクアシステムと略す) のパイロットプラントの主要機器仕様を第3表に、処理フローを第1図に示した。酸発酵リアクターで処理された液は精密ろ過型分離膜で分離され、主に揮発性有機酸を含有した透過水はメタン発酵リアクターに供給される。一方高分子の未分解物、S S、酸生成細菌などを含んだ膜濃縮水は酸発酵リアクターに返送されるシステムである。本システムで使用されたポリエチレン製の外圧型中空糸膜モジュールの構造図<sup>6)</sup>を第2図に示した。発生したガスは乾式脱硫装置で脱硫処理後一時ガスホルダーに貯流された後、ボイラーなどのエネルギー源に使用される。

本システムの特長は次の通りである。

- (1) 酸発酵相とメタン発酵相を分離した2相式であるため、各リアクターを各相の嫌気性細菌に適した生育条件下で運転でき、高有機物負荷処理運転が可能となる。
- (2) 分離膜によって酸生成細菌を高濃度に保持できるため、高有機物負荷処理が行える。
- (3) 同じく分離膜によって未分解の高分子物質や懸濁物質を長時間酸発酵リアクター内に滞留させることによって、分解を促進することができる。
- (4) メタン発酵リアクターには、メタン細菌が自己造粒し高濃度菌体保持が可能となるUASB型リアクターを採用している。
- (5) メタン発酵リアクターへは主にメタン細菌の基質で

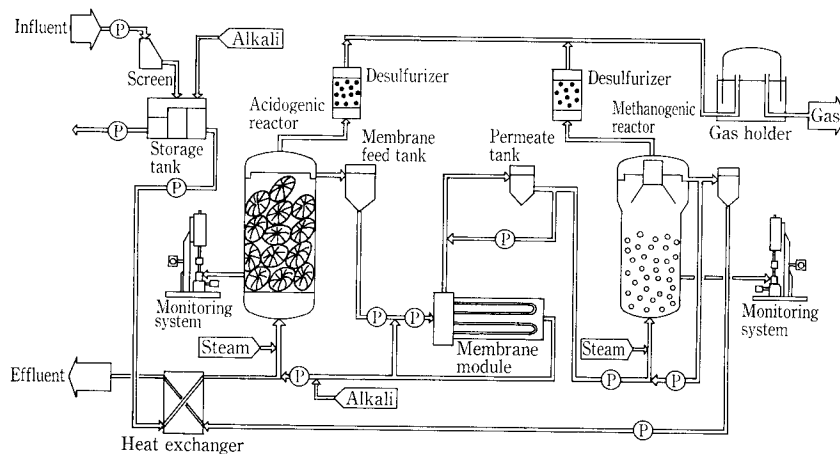


第2図 中空糸膜モジュール構造図

Fig. 2 Schematic representation of hollow fiber type membrane module

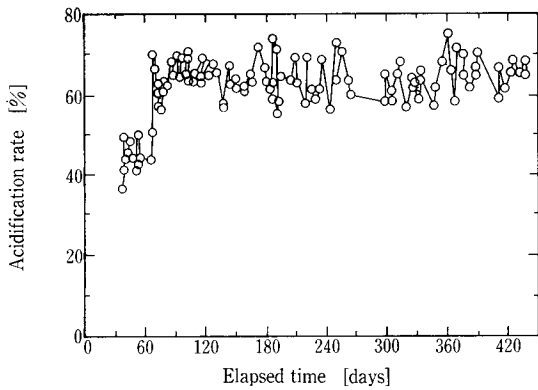
第2表 小麦でんぷん製造廃水水质  
Table 2 Water quality of wastewater from a wheat starch producing plant

Water analysis	conc. [mg/l]
BOD	13 000
COD	19 000
TOC	6 400
SS	4 000
Hydrocarbon	3 500
Protein	3 000
Lipid	400
K-N	500
T-S	50
T-P	120



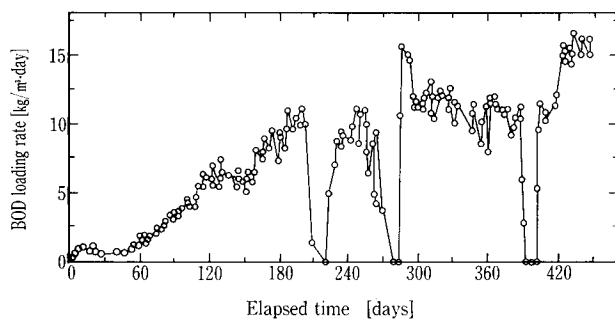
第1図 膜複合2相式メタン発酵システムのフローシート

Fig. 1 Flow diagram of two-phase methane fermentation system using membrane



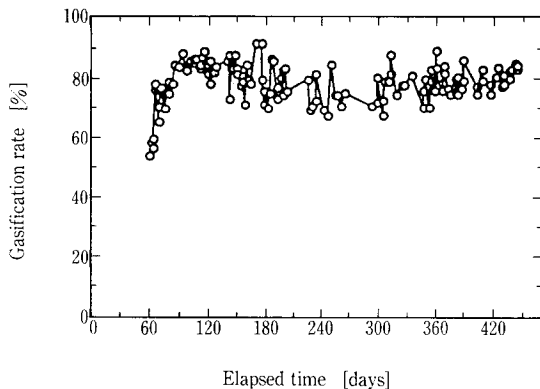
第3図 酸発酵リアクターにおける有機酸転換率の経日変化

Fig. 3 Time course of acidification rate



第4図 BOD負荷の経日変化

Fig. 4 Time course of BOD loading rate



第5図 ガス化率の経日変化

Fig. 5 Time course of gasification rate

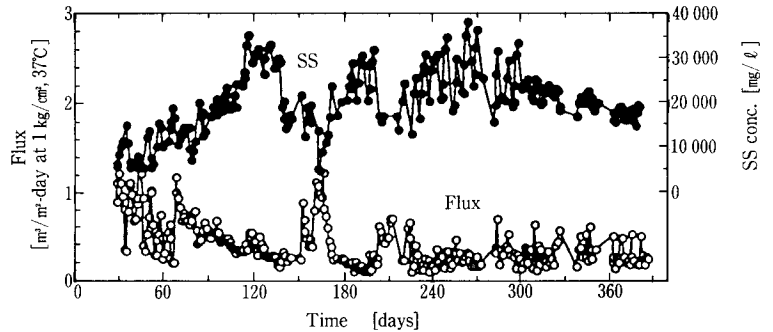
ある酢酸や低分子有機酸が供給されるため、高負荷処理が可能となりかつ高有機物除去率が達成できる。

- (6) コンパクトである。
- (7) 余剰汚泥発生量が少ない。

### 2.3 運転結果

#### 1) 有機酸転換率

第3図に酸発酵リアクターにおける有機酸転換率の経日変化を示した。この有機酸転換率とは流入した廃水中の有機炭素が揮発性有機酸に転換した比率であるが、発生したメタンと二酸化炭素も有機酸を経由して生産されたものとして計算値に含まれている。運転開始当初約40%前後であったこの有機酸転換率が、投入した種菌が馴養されたと推



第6図 膜循環液SS濃度と膜透過流束の経日変化  
Fig. 6 Time courses of SS concentration and flux

第4表 各工程の水質

Table 4 Water quality at each process

Analysis	Wastewater	Acidogen. eff.	Permeate	Methanogen. eff.
SS [mg/l]	3 650	18 000	0	90
BOD [ / ]	12 700	24 000	7 500	50
COD [ / ]	19 000	51 000	9 600	320
TOC [ / ]	6 350	15 000	3 100	60
S-TOC [ / ]	4 900	3 400	3 100	30
VFA-C [ / ]	80	2 900	2 900	5
pH [ - ]	4.5	5.3	5.3	7.0

定される約60日以後から60~75%に達し、これ以降安定した酸発酵処理が進行した。

#### 2) BOD負荷とガス化率

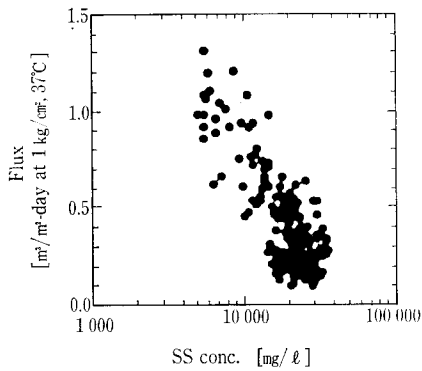
第4図にBOD負荷値の経日変化を示したが、運転終了前の40日間に設計負荷運転を実施し開発目標値の15 kg BOD/m<sup>2</sup>・dの運転が可能であることを実証した。また第5図にガス化率の経日変化を示したが、工場の操業条件の変更及び原料小麦粉の変動等により原水水質が大幅に変動したにも関わらず、分離膜を組み込んだ効果によりガス化率の開発目標値である80%をほぼ安定して達成していることが認められる。なお、酸発酵リアクターのpHはアルカリを添加して5.3±0.2に調整された。メタン発酵リアクターのpH調整は行われなかったが、7.0~7.3で推移した。また両リアクターの液温は約37°Cに保持された。

#### 3) 処理水水質とガス発生量

第4表に各工程の処理水水質を示したが、小麦でんぷん製造廃水は河川に直接放流できるまでに高度に浄化処理されていることが分かる。このときのBOD除去率は99.6%と非常に大きな数値である。酸発酵処理水と膜透過水の水質の比較により、酸発酵リアクターの後段に組み込んだ分離膜の有効性が確認できる。両リアクターからのガスは7~8 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 廃水発生した。このときのガス組成はCH<sub>4</sub> 62%, CO<sub>2</sub> 38%であった。このガスのエネルギー量は本システム内で加温などに消費するエネルギー量の約5倍量となり、本システムが創エネルギーシステムであることが実証された。

#### 4) 分離膜の透過流束

膜面SS濃度と透過流束の経日変化を第6図に示した。SS濃度が20 000~30 000 mg/lの高濃度であっても、嫌気性細菌に悪影響を及ぼす塩素系洗浄薬品を使用することなしに、透過水による逆圧洗浄を行うことによって長期間



第7図 SS濃度と透過流束の関係  
Fig. 7 Correlation of flux and SS concentration

にわたり安定した運転が可能であることを実証した。また第7図に膜透過流束と膜面SS濃度との相関を示したが、透過流束が膜面SSに依存していることが認められる。運転所要動力は膜面SS濃度が20,000 mg/lのときで1.35 kWh/m<sup>3</sup> 透過水であり、目標値を満足していた。

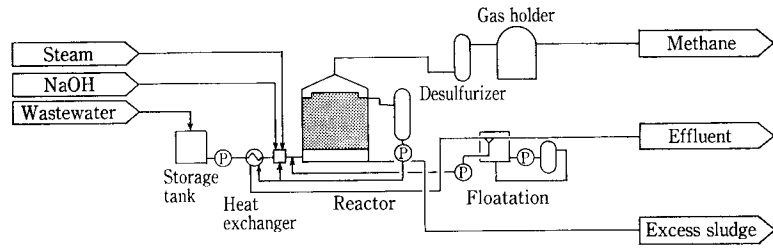
#### 2.4 アクアシステムによるでんぷん製造廃水処理結果のまとめ

佛神戸製鋼所等が開発した膜複合2相式メタン発酵システムは、パイロットプラントによるでんぷん製造廃水処理テストにおいて、有機物負荷、ガス化率、分離膜の運転所要動力の各基本計画目標値を満足し、さらには直接放流できるまでに高度に浄化された処理水が得られるという高効率なシステムであることが実証された。

#### 3. 固定床式メタン発酵リアクターによるでんぷん製造廃水のメタン発酵処理

大型の実装置では日本国内で最初に建設された実績を持つ当社の固定床式メタン発酵リアクター (PANBIC-F) とアクアシステムとの技術的な比較を次に行う。

PANBIC-F の処理フロー例を第8図に示したが、このシステムの特長は、維持管理はリアクターのpH、温度、空隙容量を制御するだけで済み、プラスチック製の担体を使用することによって嫌気性細菌を高濃度に保持し高効率なメタン発酵処理が行えるというものであるが、これまでに主に食品工場廃水処理向けに約30基の実績を有している。このPANBIC-Fの実装置による小麦でんぷん製造廃水のメタン発酵処理結果<sup>7)</sup>を第5表に示した。COD cr 負荷8 kg/m<sup>3</sup>・d でメタン発酵処理し、TOC除去率が80%に達するという単相式メタン発酵システムとしては高効率な処理結果を得ている。



第8図 PANBIC-Fの処理フロー  
Fig. 8 Flow diagram of PANBIC-F

Feeding rate of wastewater	435 m <sup>3</sup> /d
Reactor volume	1 200 m <sup>3</sup>
Reactor liquid temp.	37 °C
Reactor liquid pH	7.2
BOD loading rate	5 kg/m <sup>3</sup> ・d
COD removal	78 %
TOC removal	80 %
Gas production	2 840 Nm <sup>3</sup> /d
Methane conc.	68 %

第5表 固定床式メタン発酵リアクターによるでんぷん製造廃水処理結果  
Table 5 Anaerobic treatment of wastewater from a wheat starch producing plant by PANBIC-F  
(長田産業(株) '88. 3. 20の運転実績)

このPANBIC-Fとアクアシステムを比較すると、PANBIC-Fは下水道放流の場合以外には活性汚泥法などの後処理が必要であるが、構造及びシステムがシンプルで維持管理が容易である。一方、アクアシステムは維持管理がやや複雑ではあるが、河川などに直接放流できるまでに高度に浄化された処理水が得られるといえる。

#### むすび

以上述べてきたようにアクアルネッサンス'90計画において佛神戸製鋼所等は、でんぷん製造廃水を研究対象廃水として、工場廃水から安定してメタンを回収するとともに、高度に浄化された処理水が得られる高効率な膜複合2相式メタン発酵システムを開発した。今後は(財)造水促進センターが中心となって、このシステムを含めたプロジェクト全体の研究開発成果の実用化と普及活動が推進されることになっている。

#### 〔参考文献〕

- 1) 河野承雄：環境技術，20，81-84 (1991)
- 2) 小林浩志：環境技術，20，85-91 (1991)
- 3) 谷口良雄：環境技術，20，92-99 (1991)
- 4) 柳長太ほか：造水技術，17，11-21 (1992)
- 5) アクアルネッサンス技術研究組合：分離膜を複合した嫌気性廃水処理技術，p. 79-104, 307-320 (1991)
- 6) (財)造水促進センター：造水先端技術講習会講演要旨，p. 43-46, 83-87 (1992)
- 7) 宝月章彦ほか：環境技術，17，672-678 (1988)