

# “FMモジュール”の膜分離活性汚泥法への適用

## Application of "FM module" to membrane bioreactor



(技)第2研究開発部第4研究室  
松 田 勉  
Tsutomu Matsuda  
(技)第2研究開発部第5研究室  
野 中 信 一  
Shinichi Nonaka

有機性廃水処理の分野では活性汚泥法と膜分離を組合わせた膜分離活性汚泥法の適用が注目されている。この方式は従来の活性汚泥法（曝気槽＋沈殿槽）の沈殿槽の代替として膜分離装置をもちいるものであり、従来法にくらべて設備がコンパクトになることや処理水質が著しく改善できるなどの長所をもっている。本報告では、膜分離活性汚泥法についての概説をおこない、現状の問題点を指摘する。更に、食品工場の廃水を対象として“FMモジュール”を装着した膜分離活性汚泥処理システムの実証実験を実施し、同廃水に安定した適用が可能であることを確認した。その結果、FMモジュールをもちいることにより従来方式の問題点を解決するユニークな膜分離活性汚泥法となることがわかった。

A membrane bioreactor system is focused to apply for organic waste water treatment in various industrial fields. In this system, a membrane separation equipment is alternatively adopted instead of using settling tank which is conventionally used in an activated sludge treatment system. The membrane bioreactor system has great advantages such as compact design and improvement of treated water, compared with those of conventional activated sludge treatment systems. In this report, membrane bioreactor system and its present problems are described. Furthermore, demonstration testing has been conducted in a food manufacturing factory by using pilot plant installed FM module. The results of demonstration testing shows that the waste water from the factory could be stably treated by this system, and the system used FM module is proved as unique membrane bioreactor which can solve the problems of conventional treatment system.

### **Key Words :**

膜 分 離	Membrane separation
膜分離活性汚泥法	Membrane bioreactor
廃 水 処 理	Waste water treatment
平 膜	Flat sheet membrane
逆 圧 洗 浄	Back pressure cleaning

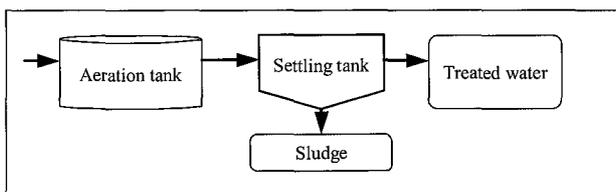
## まえがき

有機性廃水処理のもっとも一般的な手法として活性汚泥法が普及している。この方式は好気性微生物に有機物を摂取・分解させ、重力沈降を利用して汚泥微生物と処理水を固液分離している。

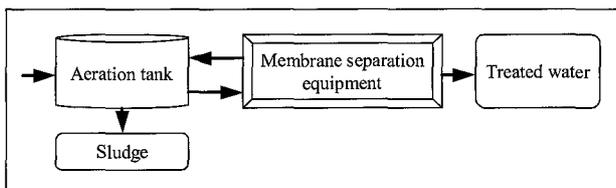
従来の活性汚泥法では、汚泥膨化現象等に起因する汚泥沈降不良によって処理水質悪化や汚泥の流出等を生じるリスクがあり、運転管理上、留意すべき点が多いという処理技術上の問題点があった。またさらに、曝気槽が大きくなったり、沈殿槽が必要であるなど設置面積の増大や、メンテナンスの手間が大きいという問題もあった。このような従来法の欠点を克服するシステムとして、生物処理後の固液分離に膜分離装置をもちいる膜分離活性汚泥法が提案されている。この方式をもちいることにより設置面積の大幅な削減、処理水質の向上が期待できる。

当社では、ROCHEM-UF Systeme 社（ドイツ）が開発したクロスフロー型の膜分離装置“FM モジュール”の独占販売契約を締結し、販売を開始している<sup>1)</sup>。FM モジュールは流路間隔を比較的大きくとれる平膜構造であり、かつ逆圧洗浄が可能であることから、高いSS分の原水に対しても閉塞のおそれが少ないため前処理を簡略化できる利点を有する。

本稿では、膜分離活性汚泥法について概説し、従来の技術上の問題点について指摘する。また食品工場廃水を対象としてFM モジュールをもちいた膜分離活性汚泥法の実証実験を実施した結果について報告し、FM モジュールの膜活性汚泥法への適用性について述べる。



(a) Conventional activated sludge process



(b) Membrane bioreactor process

図 1 標準活性汚泥法と膜分離活性汚泥法の処理フロー  
Fig.1 Flow sheet of standard activated sludge process and membrane bioreactor process

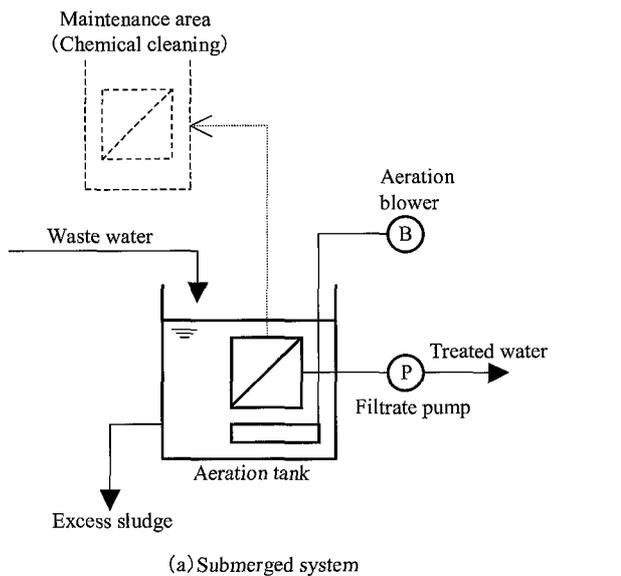
## 1. 膜分離活性汚泥法の概要

### 1.1 特長

従来の活性汚泥法と膜分離活性汚泥法の標準的な処理フローを図1に示す。膜分離活性汚泥法は、活性汚泥法の沈殿槽の代わりに膜分離装置をもちいるため、設備がコンパクトになり維持管理も容易となる。また、MF膜、UF膜による精密な固液分離でありバクテリアを完全にトラップできるため曝気槽のMLSS濃度を高濃度に維持可能となり、曝気槽の小型化も可能である。さらに、えられる処理水は大腸菌等の病原性微生物の完全な除去が可能であるなどの特長をもつ。

### 1.2 膜モジュールの設置方式

膜分離活性汚泥法は膜モジュールの設置方式から大別すると膜モジュールを曝気槽内に設置する浸漬方式と膜モジュールを曝気槽外に設置するクロスフロー方式の2方式に大別されている。図2に浸漬方式とクロスフロー方式の基本フローの比較を示す。



(b) Cross flow system

図 2 浸漬方式とクロスフロー方式のフロー比較  
Fig.2 Flow diagrams of submerged system and Cross flow system

### 1. 2. 1 浸漬方式<sup>2)</sup>

曝気槽内に浸漬された膜モジュールは散気管の上部に設置され散気管の曝気空気による気液混合上昇流により、汚泥の蓄積などのファウリングが抑制されている。

ろ過方法は膜の処理水側からポンプで負圧としてろ過をおこなう吸引ろ過方式が多くもちいられている。

膜分離装置は長期間運転をおこなうと、膜細孔への有機物や無機物質沈着のため透過流束低下は避けられない。このような場合、定期的に薬品洗浄を実施して処理性能を回復させる必要がある。

浸漬方式の場合洗浄方法は、曝気槽内に膜を浸漬したまま薬液を注入して洗浄をおこなう槽内洗浄と、槽外に膜を取出して別途薬品洗浄槽に浸漬して洗浄する槽外洗浄があるが、強力な洗浄力の点から、通常は長期運転では槽外洗浄が実施されている。

槽外で実施する薬品洗浄は手動操作にて実施されているのがほとんどである。薬品洗浄頻度は条件によって異なるが、非定常な廃水の流入や負荷変動の大きい産業排水の処理では1～2ヶ月程度、もしくはそれよりも短いインターバルで薬品洗浄が必要な場合もある。このように浸漬方式の場合は、膜を曝気槽から取出すなどの作業とメンテナンスエリアが必要であり、作業にかかる労力が大きいことが問題であった。

### 1. 2. 2 クロスフロー方式

膜モジュールは加圧容器の中に納められ、曝気槽外に設置される。循環ポンプによって活性汚泥を含んだ廃水を曝気槽から膜モジュールに加圧供給し、クロスフロー方式でろ過される。クロスフロー方式では、比較的高粘度、難ろ過性の液についても処理が可能であるという利点をもつ。

また、クロスフロー方式では、薬品洗浄時に膜モ

ジュールに薬液をポンプで循環する方式が一般的に採用されており、膜モジュールを取出すことなく、迅速かつ効果の高い薬品洗浄がワンボタンもしくは異常の自動検知によって自動で実施が可能である。

表1に浸漬方式とクロスフロー方式の性能についてまとめたものを示す。

クロスフロー方式は、比較的難ろ過性の処理が可能であることや薬品洗浄に人手を要しない等、処理性能は浸漬方式よりも優れている。設置面積についても浸漬方式は薬品洗浄槽の必要性から必ずしも有利とはいえない。

本報告では、浸漬方式の技術的な問題点を克服することが可能と考えられるクロスフロー方式についてFMモジュールを適用した実証運転をおこなった。

## 2. FMモジュールをもちいた膜分離活性汚泥法

### 2. 1 FMモジュールの構造

FMモジュールの構造図を図3に、封筒状平膜エレメントの構造図を図4にそれぞれ示す。FMモジュールは封筒状平膜を多層に積層したユニークな構造となっている。処理目的に応じて限外ろ過(UF)膜から逆浸透(RO)膜に至る膜種を選択可能であると同時に、原水性状にあわせて膜間流路幅の変更も可能である。封筒状平膜は、支持板の両面に、処理水スパーサー、平膜を各1枚ずつ重ね合わせて外周部をシールしている構造であり、平膜でありながら逆圧洗浄が可能な構造となっている。

### 2. 2 膜分離活性汚泥法への適用

FMモジュールをもちいた膜分離活性汚泥法の標準的なフローシートを図5に示す。FMモジュールは膜モジュールを曝気槽外に設置するクロスフロー方式である。曝気槽と膜分離装置間をポンプによって被処理液を循環させ、クロスフローでろ過する。従来の加圧方式ではファウリングを防止するために

表 1 浸漬方式とクロスフロー方式の性能比較

Table1 Comparison of performance between submerged system and Cross flow system

	submerged system	Cross flow system
Installed location of module	Inside of aeration tank	Outer side of aeration tank
Space for chemical cleaning	Necessary (tank)	Not necessary (Including the system)
Interruption time for chemical cleaning	long	short (Automatic)
Treatability of hardly-filterable liquid	Bad	Good

クロスフローによる2～3 m/sの膜面流速を必要としていたが、FM モジュールでは逆圧洗浄を組入れた運転方法を採用し、ファウリングを間欠的に除去するという考えによって1 m/s以下の膜面流速でも安定した処理が可能となり従来の加圧方式よりも低動力で安定した処理が可能である。

### 3. 実証実験

#### 3.1 実証装置

実験に使用した装置仕様を表2に、装置フローを図6に示す。FM モジュールは膜間流路幅の広いタイプで膜材質は親水性のポリアクリロニトリル製UF膜（分画分子量50 000）を使用した。使用した実験装置を写真1に示す。

#### 3.2 実証条件

##### 3.2.1 実験原水

実験原水として食品工場の廃水を使用した。

実験期間の原水水質の平均値および最小、最大値

表 2 実験装置仕様

Table2 Specification of test equipment

1) Aeration Tank	
Capacity	2 m <sup>3</sup>
2) Membrane specification	
Membrane type	UF
Material	Polyacrylonitrile
MWCO	50 000
3) Module Specification	
Clearance between membranes	3.0 mm
Membrane area per a module	3.48 m <sup>2</sup> /module
Quantity of module	1 module
Total membrane area	3.48 m <sup>2</sup>

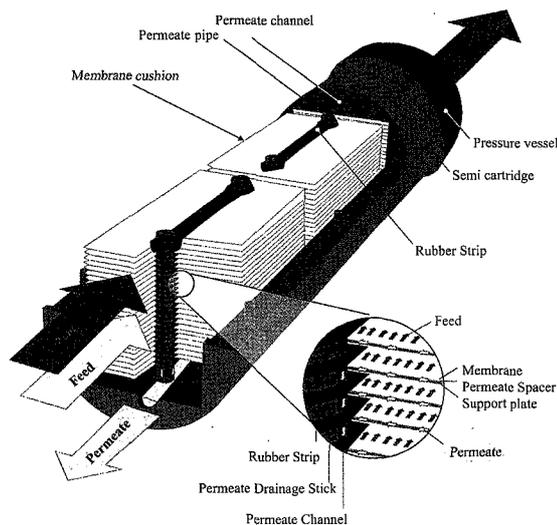


図 3 FM モジュール構造図

Fig.3 Schematic diagrams of FM module

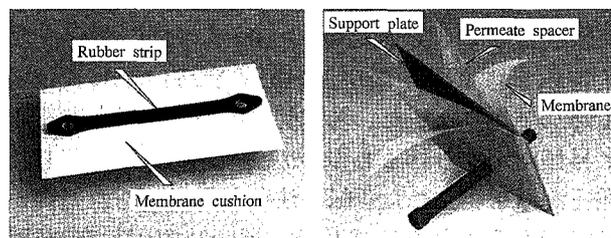


図 4 メンブレンクッション

Fig.4 Membrane cushion

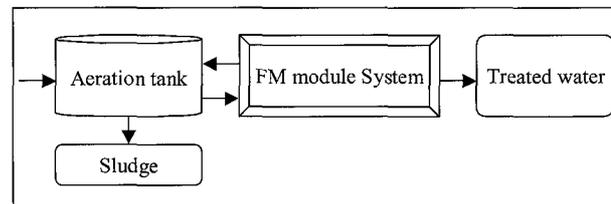


図 5 FM モジュールをもちいた膜分離活性汚泥法の標準フロー

Fig.5 Block flow diagram of membrane bioreactor process with a FM module

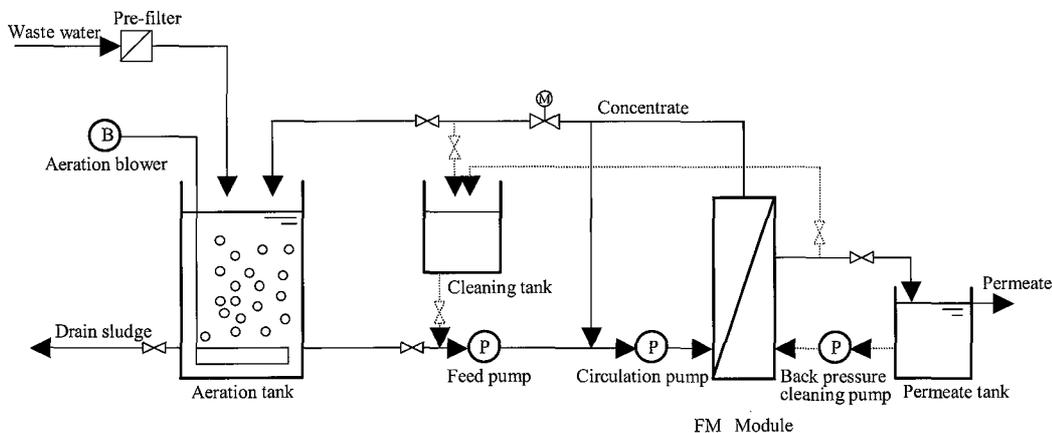


図 6 実験装置フロー

Fig.6 Flow diagrams of test equipment

を表3に示す。期間平均値はBODが5 330 mg/L, SSが1 070 mg/Lであった。

### 3. 2. 2 運転条件

ろ過方法として、FLUXを25 L/m<sup>2</sup>/hに設定する定流量ろ過方式を採用した。運転時間の経過と共にファウリングに起因する膜間差圧が上昇するが、定期的な逆圧洗浄（2～3時間毎に透過水を利用しておこなう）を組み込むことにより、膜間差圧を減少させてファウリングを防止する運転とした。

前処理として、自動洗浄機能付きのストレーナー（200 μm）をもちいて、膜処理に詰まりなどの悪影響をおよぼす粒子の大きい固形物や繊維状の異物を除去した。

## 4. 実証結果および考察

### 4. 1 処理性能

#### 4. 1. 1 膜間差圧とMLSSの推移

膜間差圧および混合水のMLSSの経時変化を図7に示す。実験期間中、FLUXを25 L/m<sup>2</sup>/hに設定し通水をおこなった。基本的に膜間差圧は、若干の上昇傾向がみられるものの0.1～0.2 MPaで推移し、逆圧洗浄を組み入れた運転方法により安定した処理が可能であることを確認した。運転時間が約250時間を経過したところで急激に膜間差圧が上昇したが、その原因は低MLSS濃度での通水に起因するものであった。なお後述するが、逆洗をおこなわない場合には短時間で膜面に汚泥が堆積して膜間差圧が急上昇し、処理が困難であった。

実験期間中のMLSS測定結果は、最大値：17 720 mg/L, 最小値：5 560 mg/Lであった。

MLSSが6 000 mg/L以下で、膜間差圧が上昇する

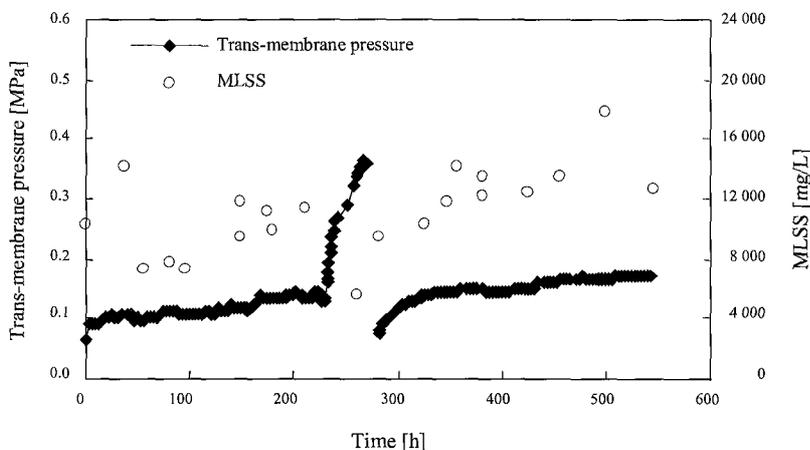


図7 膜間差圧とMLSSの経時変化  
Fig.7 Dependence of trans-membrane pressure and MLSS on operating time

傾向が確認された。理由は次のように考えられる。膜分離活性汚泥法のろ過原理は、膜表面に形成されたケーキ層がある程度ろ過層として働き、そのケーキ層で高～低分子の有機物が減少し膜細孔のファウリングを防止すると考えられているが、逆洗後、膜表面のケーキ層が除去された状態で低MLSS濃度の混合水をろ過したことにより、浮遊している微細フロック、溶解している有機成分等が直接膜細孔に作用しファウリングが起り、膜間差圧が上昇したものと考えられる。対策としては、高MLSS濃度（巨大フロック）を保持した状態で運転することが必要である。

### 4. 1. 2 処理水質

原水のBODおよびSSの推移を図8, 9に示す。期間平均値はBODが5 330 mg/L, SSが1 070 mg/Lであった。

表3 原水水質  
Table3 Waste water quality

		Average	Minimum	Maximum
pH	[-]	4.3	4.0	4.9
SS	[mg/L]	1 070	480	2 360
BOD	[mg/L]	5 330	3 800	6 860
S-BOD	[mg/L]	4 690	3 200	6 350
S-TOC	[mg/L]	2 420	1 570	3 320

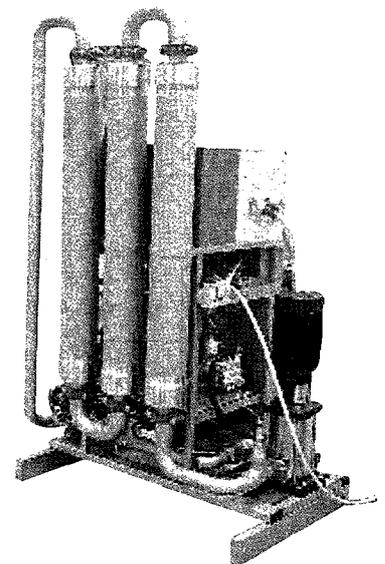


写真1 実験装置の外観  
Photo 1 Outside view of test equipment

処理水 BOD 濃度の推移を図10に、BOD 除去率の推移を図11に示す。処理水 BOD は10~200 mg/Lで、BOD 除去率はおおむね98%以上であった。なお、98%以上の BOD 除去率が得られた時の BOD 負荷は、容積負荷が  $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ 、SS 負荷が  $0.2 \text{ kg/kg}^{\text{SS}} \cdot \text{d}$  以下であった。膜処理で曝気槽処理水に含まれる微細な懸濁物質を分離除去することにより、BOD が  $15000 \text{ mg/L}$  の廃水を  $10 \text{ mg/L}$  以下にできたと考えられる。

## 2 物理洗浄の効果

物理洗浄を実施しない運転では、膜間の流路に汚泥が閉塞を起し、処理不能状態となる。膜間に汚泥が閉塞している状態を写真2に示す。このような

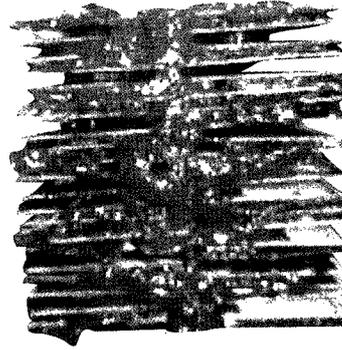


写真 2 膜間に汚泥が閉塞した状態  
Photo 2 Plugged membranes with sludge

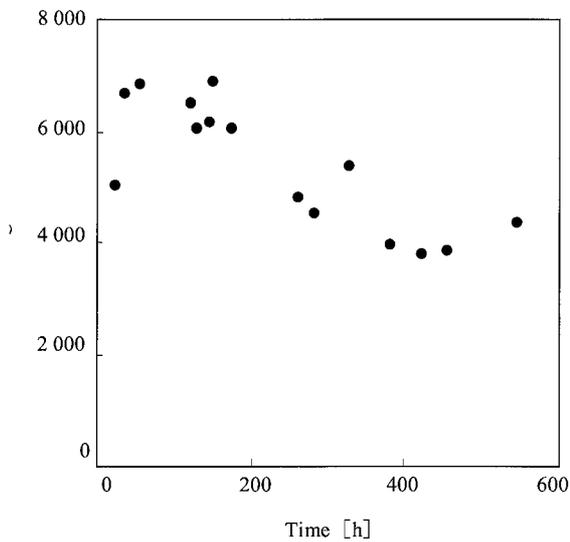


図 8 原水 BOD の推移  
Fig. 8 Change of BOD of waste water

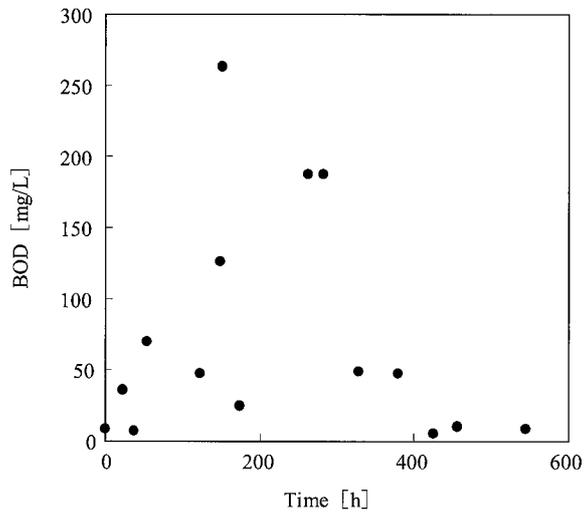


図 10 処理水 BOD の推移  
Fig. 10 Change of BOD of treated water

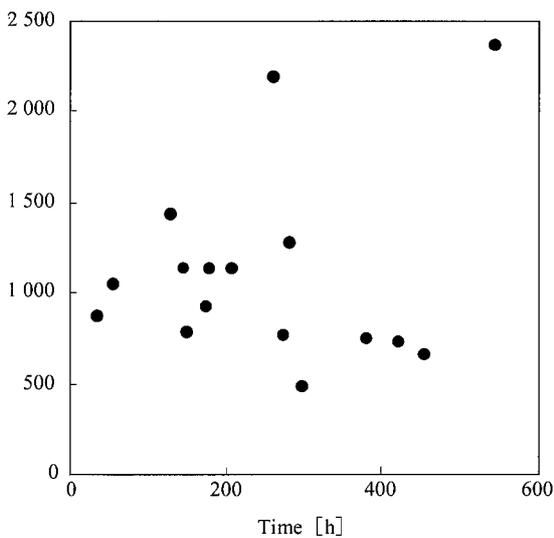


図 9 原水 SS の推移  
Fig. 9 Change of SS of waste water

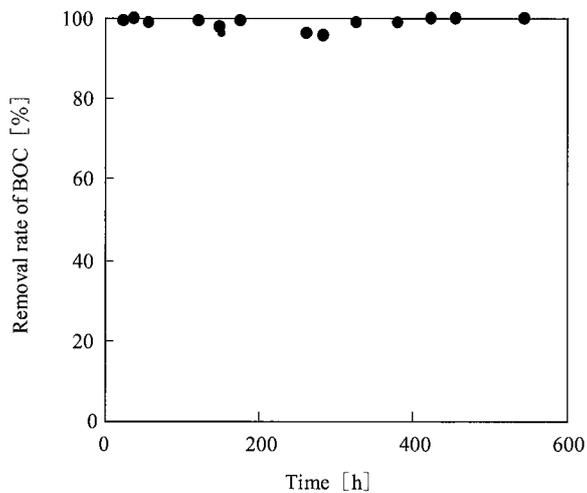
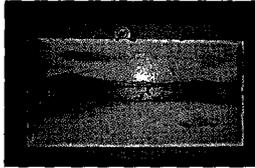
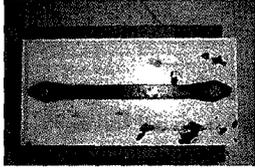
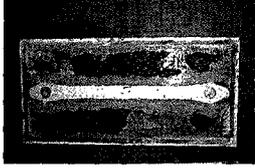


図 11 BOD 除去率の推移  
Fig. 11 Change of removal rate of BOD

表 4 物理洗浄効果  
Table4 Effect of physical cleaning

	Before cleaning	After cleaning
① Air scrubbing cleaning		
② Back pressure cleaning (Washing by water)		
③ Back pressure cleaning (Washing by air)		

状態になると、薬液洗浄を実施しても閉塞した汚泥を完全に除去することは困難である。そこで、膜面に堆積した物質を除去・抑制する有効な手段である物理洗浄効果について調査した。物理洗浄条件は

- ①エアスクラビング
- ②水による逆圧洗浄
- ③空気による逆圧洗浄

について、モジュール内を強制的に汚泥で閉塞させ、各条件で物理洗浄を実施し、物理洗浄前後のモジュール内の状態より洗浄効果について評価した。エアスクラビング洗浄とは、原水中に空気を送り込み、気水による物理的せん断力により膜面の付着物を除去する方法であり、逆圧洗浄は膜の処理水側から水および空気を送り、ファウリング物質、付着物を除去する方法である。

洗浄前後のモジュール内部の状態を表4に示す。その結果、水による逆圧洗浄がもっとも高いことがわかった。

図12に逆洗実施による膜間差圧の推移を示す。ろ過時間にともない、膜表面に汚泥の付着、体積が生じ、膜間差圧が上昇するが、一定の間隔で逆洗を実施することによって回復し、安定した処理が可能となった。

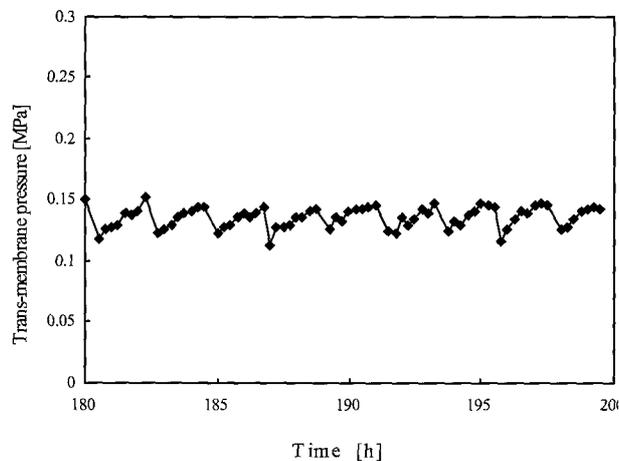


図 12 逆圧洗浄の効果  
Fig.12 Effect of back pressure cleaning

### 4.3 薬品洗浄の効果

実験期間中に膜間差圧が上昇した際と、実験終了時に NaClO による薬品洗浄を実施した。薬品洗浄前後の膜表面の状態を写真3に示す。逆圧洗浄を継入れた運転方法により、薬品洗浄前における膜表面の汚染度は抑制されている。さらに、薬品洗浄の実施により、膜の清水透過性能は新膜時の約85%程度まで回復し、良好な薬品洗浄効果がえられた。

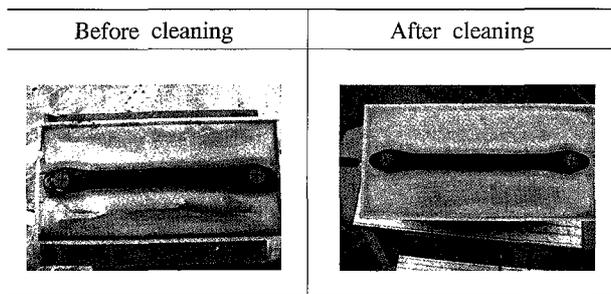


写真 3 薬品洗浄効果 (膜面の状態)  
Photo 3 Effect of chemical cleaning  
(Condition of membrane surface)

#### 4. 汚泥性状の処理性におよぼす影響

図13に実験期間中の曝気槽混合水 MLSS 濃度とろ紙ろ過性および汚泥粘度の関係を示す。

ろ紙ろ過性とはろ過の難易度を調べる方法であり、50 mL の汚泥を 5 枚ろ紙で濾過した場合の 5 分間のろ過量で示される。

藤井らは、廃水用浸漬膜処理の最適汚泥性状として①ろ紙ろ過性：20 mL/5 min 以上②粘度：150 mPa·s 以下であることを紹介している<sup>2)</sup>。今回の実験ではろ紙ろ過性は2.0~2.5 mL/5 min、粘度は最高直400 mPa·s、に達しており、浸漬膜では安定した運転が困難と考えられるような汚泥性状であったが、FM モジュールでは安定した運転が可能であることが判明した。

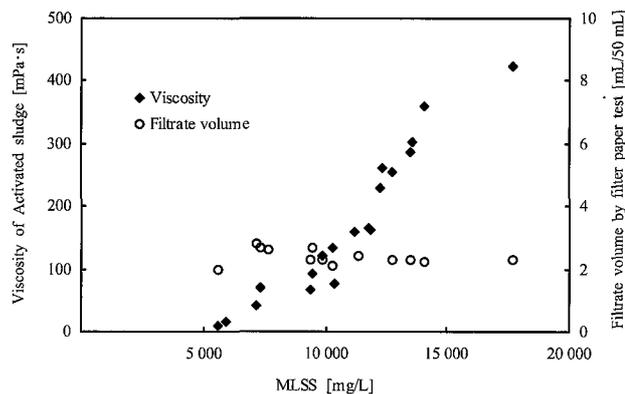


図 13 MLSS 濃度とろ紙ろ過性および汚泥粘度の関係  
Fig.13 Relationship among MLSS, viscosity and filterability

#### むすび

食品工場の廃水を対象として FM モジュールをもちいた膜分離活性汚泥処理システムの性能実証実験を実施した。その結果、逆圧洗浄を組入れた運転方法により、従来の加圧方式よりも低動力で安定した処理が可能であることが確認された。また、薬品洗浄性も良好な結果がえられ、同廃水への適用が十分に可能であることが実証された。

#### [参考文献]

- 1) 島田光重ほか：神鋼パンテック技報，Vol.45 No.2 (2001)，p.46
- 2) 藤井 匡ほか：神鋼パンテック技報，Vol.44 No.1 (2000)，p.17

#### 連絡先

松田 勉 技術開発本部  
第2研究開発部  
第4研究室

TEL 078 - 992 - 6525  
FAX 078 - 992 - 6504  
E-mail t.matsuda@pantec.co.jp