

中空糸膜をもちいた膜分離活性汚泥処理システム

Hollow Fiber Membrane Bio-Reactor System



技術開発本部
水・汚泥技術開発部水処理室
石山 明
Akira Ishiyama
中島 優一
Yuichi Nakashima

排水規制の強化に対応すべく、高度処理技術の開発に取り組んでいる。そのひとつが、PVDF製の中空糸膜をもちいた浸漬型膜分離活性汚泥処理システムである。当社は、実用化に向け、実下水をもちいたパイロットプラント実証実験で1年半にわたる運転データを取得してきた。その結果、四季を通じ、膜透過フラックス $0.6\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ で安定した膜差圧を維持するとともに、6時間程度の短い滞留時間で高度処理（SS $< 1\text{mg/L}$ 、全窒素 $< 10\text{mg/L}$ ）を達成し、さらに汚泥転換率を60%にまで低減することができた。

A PVDF hollow fiber membrane bio-reactor (MBR) system has been developed to comply with the stringent regulation of treated water from the wastewater treatment plant. A pilot test plant was operated using actual sewage water for about one and a half year for practical use. The test proved gradual increase of transmembrane pressures at membrane flux of $0.6\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. For all seasons, the high effluent quality was maintained; SS less than 1mg/L and nitrogen less than 10mg/L , for example, in a short HRT of about 6 hours with the minimized bio-reactor. In addition, the sludge reduction rate was maintained at 60%.

Key Words :

膜分離活性汚泥法
中空糸膜
高度処理
汚泥減量化
省スペース化

Membrane bio-reactor
Hollow fiber membrane
Advanced wastewater treatment
Sludge reduction
Area minimization

まえがき

水処理分野における膜分離技術の発展は近年著しいものがあり、浄水処理をはじめとして、各種産業排水処理、大規模建物個別排水循環利用、し尿処理等で膜分離技術をもちいた水処理が導入されており、また、最近では浄化槽、農業集落排水処理施設等の汚水処理施設にくわえ、下水処理施設においても導入されてきている。海外においても水処理分野における膜分離技術の導入が活発であり、年々、施設の大規模化が進んでいる。

処理水量の少ない産業排水処理施設、浄化槽、農業集落排水処理施設等と比較して、処理水量が多い

下水処理分野では、必要膜面積が大きくなるためコスト的に不利であるとの考えから、これまで膜分離技術は一部の再利用用途以外では導入が進んでいなかった。しかしながら、前述した諸分野における膜分離技術の普及にともない膜コストが低下してきたことにより、下水処理のように処理水量の多い施設においても膜分離技術の導入が現実的な選択肢となってきた。膜分離技術の水処理への導入により、最終沈殿池や砂ろ過施設等が不要になるなどの施設の削減とそれにとまなう必要敷地面積の削減によるコスト削減効果の他、高度な処理水質がえられるなどの多くのメリットが期待できる。

このような背景から、当社では、1999年度より神戸市との共同研究にて、下水を対象とした浸漬型膜分離活性汚泥処理システムの開発を実施している。1999年度～2002年度の期間は、浸漬膜として平膜をもちいた評価^{1), 2)}をおこない、本システムの実用性を実証した。2003年度からは、さらに耐薬品性が高く機械的強度に優れたPVDF（ポリフッ化ビニリデン）製の中空糸膜を適用し、実証試験をおこなっている。³⁾

本稿では、PVDF製中空糸膜をもちいた浸漬型膜分離活性汚泥処理システムについて、長期にわたる連続運転データを取得し適用技術の有効性を確認したので、その内容について報告する。

1. 浸漬型中空糸膜分離活性汚泥処理システムの概要

1.1 システムの概要

本システムの概要と特長を図1に示す。

現在、下水分野では、BOD（生物学的酸素要求量：有機物量の指標）、SS（固形物）、窒素の除去を対象とした主なプロセスとして、循環式硝化脱窒法が挙げられる。またさらなる高度処理として、SS除去のため、後段に砂ろ過をつけたプロセスがある。

□従来法（沈殿池による固液分離）



□膜分離活性汚泥法



- 省スペース
- 活性汚泥の高濃度化
- 高度な処理水質
- 余剰汚泥減量化

図1 浸漬型中空糸膜分離活性汚泥処理システムの概要と特長

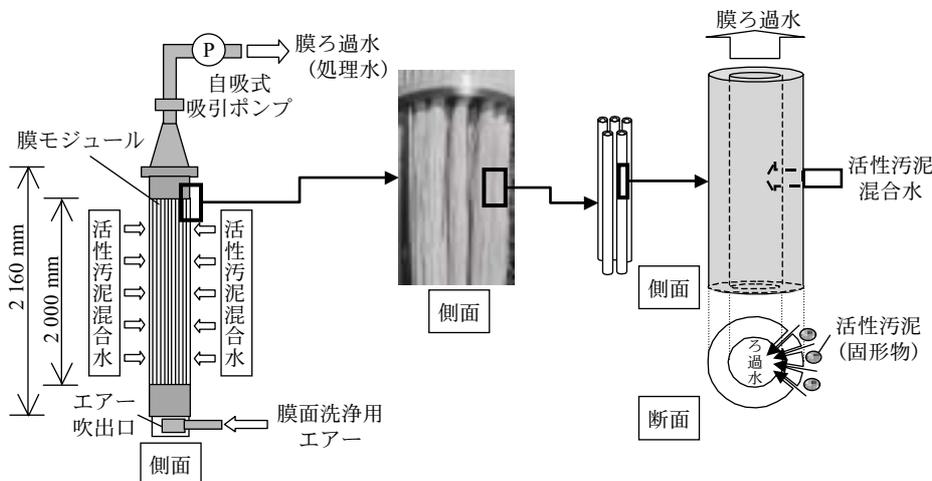


図2 中空糸膜モジュールの概要

浸漬型膜分離活性汚泥処理システムは、SS除去のための最初沈殿池、最終沈殿池、砂ろ過設備が不要となり、その代替として、反応タンク内に公称孔径0.1～0.4 μm程度の精密ろ過膜（以下、MF膜）を浸漬設置し、物理的な固液分離を実現する排水処理システムである。以下に本システムの特長を示す。

- ① 最初沈殿池、最終沈殿池、砂ろ過設備が不要となり、プロセスが簡略化され、省スペース化が可能となる。
- ② 反応タンク内のMLSS（活性汚泥濃度）を10 000 mg/L程度と高濃度に維持でき、標準活性汚泥法と同等以下の水理的滞留時間（以下、HRT）で有機成分のみならず窒素除去をも実現できる。
- ③ 孔径0.1～0.4 μmのMF膜にて固液分離するため、SSを99%以上除去できる。
- ④ SRT（汚泥滞留時間）を長くとることができるため、汚泥の自己酸化作用による汚泥減量化が見込める。
- ⑤ 膜による物理的な固液分離のため、沈殿池における固液分離障害の原因となる汚泥膨化（バルキング）が発生しても、処理水への影響がない。

1.2 中空糸膜モジュールの概要と特長

本システムに適用している中空糸膜モジュールの概要を図2に、主な仕様を表1に示す。

表1 中空糸膜モジュールの主仕様

形状	中空糸型 MF 膜
サイズ	φ 150 mm × H2 160 mm (有効膜長 2 000 mm)
有効膜表面積	25 m ²
平均膜孔径	0.1 μm
膜材質	PVDF（ポリフッ化ビニリデン）

本システムの中空糸膜は外径 1 mm 強の細長い糸状の膜であり、中心部が空洞となっている。膜の材質は耐薬品性が高く機械的強度に優れたPVDF製であり、膜表面には平均0.1 μm の微細な孔のあいた構造となっている。

膜モジュールは、この中空糸膜を多数束ね、その束の両端を樹脂により接着し、片側の中空糸膜の端面を開口させた構造となっている。その開口側から吸引ポンプにより吸引することで、中空糸膜表面の微細孔によりろ過がおこなわれるしくみとなっている。モジュールは省スペースな円筒型であり、1基の大きさは、外径150 mm、長さ2 160 mm（有効膜長2 000 mm）、有効膜表面積は25 m²である。

浸漬型膜分離活性汚泥処理システムでは、活性汚泥混合水を吸引していくと膜面に汚泥が堆積し、ろ過抵抗となる。これを防止するため、モジュール下部からエアを吹出して膜面を洗浄しながら吸引ろ過をおこなう。モジュール形状が円筒型なので膜の集積度が高く、そのため1基当たりの必要なエア量が0.08 m³/min と非常に少なく済む。

また、中空糸膜は断面が円形のため、内外からの

圧力に強い構造となっている。その利点を生かし、通常の運転サイクルにおいて数十分に1回程度、膜内部から逆圧をかけ、ろ過水を逆に押し出し、膜面に付着した閉塞物質を除去する。これを「逆洗」という。

さらに、膜の材質が耐薬品性に優れた PVDF 製であるため、次亜塩素酸ソーダをもちいた「インライン逆洗」（膜モジュールを反応タンクに浸漬したままでの逆洗）を月に1回程度実施することで、逆洗では排除できずに膜面にしつこく付着した閉塞物質をも洗浄することが可能である。

2. 実証実験概要

2.1 実験場所および実験期間

実験期間：2003年4月～2005年3月（予定）

実験場所：神戸市建設局西水環境センター西神施設（通称 玉津処理場）内 実験プラント

実験内容：下水処理場への適用を想定した浸漬型膜分離活性汚泥処理システムの評価

2.2 実験プラントの仕様および運転条件

パイロットプラント（処理水量30 m³/d）の全景を写真1に、主な仕様を表2に、実験フローシートを図3に示す。



写真1 実証実験プラント

表2 実証実験プラントの主仕様

反応タンク形状 （1区画当たり）	W1.0 m×L1.0 m×H5.8 m 有効水深 4.0 m
反応タンク区画数	2区画 （無酸素タンクおよび好気タンク）
中空糸膜モジュール	2基を好気タンクに浸漬
前処理スクリーン	裏搔式自動微細目スクリーン （目幅 1 mm）
散気装置 （酸素供給用）	高効率型超微細気泡式散気装置

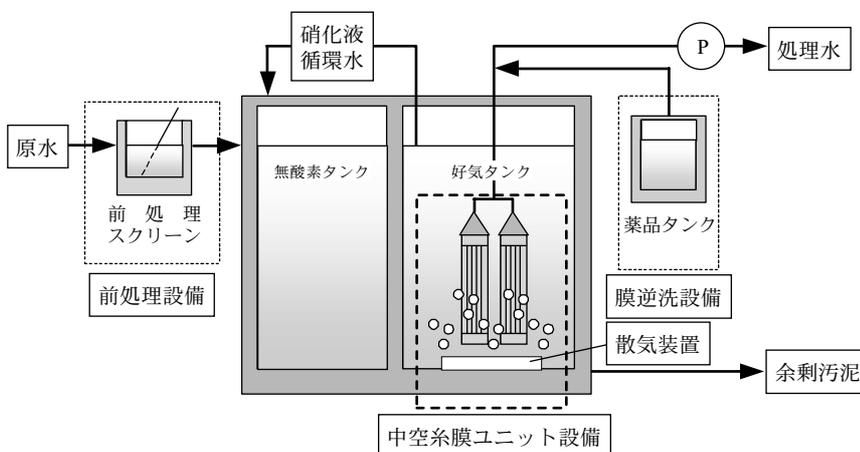


図3 実証実験フローシート

実験原水には分流式（雨水が混入していない）の下水処理場である玉津処理場の流入下水（最初沈殿池に流入する直前の下水）をもちい、目幅1mmの前処理スクリーンで毛髪等の夾雑物を荒取りした後、反応タンクに流入させた。本実証実験ではBOD、SSの他に窒素の除去をおこなうため、反応タンクを無酸素タンクと好気タンクとで構成し、循環比（処理水量に対する硝化液循環水量の比）を2とした循環式硝化脱窒法で運転した。処理水は自吸式吸引ポンプにより吸引ろ過する方式とし、一定流量制御をおこなった。なお、PAC等の凝集剤は添加していない。

処理水をもちいた逆洗は、通常の運転サイクルにおいて10分で1回の逆洗工程（吸引9分、停止5秒、逆洗50秒、停止5秒）で実施した。また、次亜塩素酸ソーダによるインライン逆洗は1ヶ月に1回程度、有効塩素濃度0.5%で実施した。膜透過流束（膜フラックス）は、逆洗による処理水量のロスを含めて

表3 平膜の運転管理指標

MLSS	8 000~12 000 mg/L
好気タンク DO (溶存酸素濃度)	1.5~4.0 mg/L
BOD-MLSS 負荷	0.05~0.10 kgBOD/kgMLSS/d

表4 主な実証実験条件

	高水温期	低水温期
水温	25.7~33.5 °C	13.3~20.6 °C
処理水量	15 m ³ /d	30 m ³ /d
HRT	12.8 h	6.4 h
膜モジュール数	1 基	2 基
膜フラックス	0.6 m ³ /m ² /d	
通気倍率 (膜面洗浄用+酸素供給用)	20倍	
硝化液循環比	2	

表5 処理水質 (平均値)

		高水温期 (水温: 25.7~33.5 °C)		低水温期 (水温: 13.3~20.6 °C)	
		原水	処理水	原水	処理水
BOD	(mg/L)	185	1.6	254	< 1.0
SS	(mg/L)	219	< 1.0	320	< 1.0
COD	(mg/L)	107	5.6	161	6.5
全窒素	(mg/L)	37.4	7.2	53.1	6.7
NH ₄ -N	(mg/L)	—	—	34.0	0.28
全りん	(mg/L)	7.6	1.7	10.2	0.7
大腸菌群数	(個/100 mL)	—	検出されず	—	検出されず

0.6 m³/m²/dとした。通気倍率は、膜面洗浄用曝気と酸素供給用曝気とのトータルで、処理水量に対し15~20倍とした。

2.3 活性汚泥性状の管理

ところで、膜分離活性汚泥処理システムでは、膜モジュール自体の運転管理とともに、ろ過されやすい活性汚泥性状の維持が重要となる。そのため、反応タンク内の活性汚泥のろ過性指標として、ろ紙ろ過量（5分間に5Cろ紙を自然透過する液量）をもちいた。また、膜閉塞物質については固形物の他にゲル状の物質の影響が大きく、その指標としてSMP (Soluble Microbial Products) をもちいた。SMPとは、膜に堆積・付着する溶解性の有機物量を表したもので、既往の文献^{4), 5)}において膜閉塞の原因であると報告されているものである。

本パイロット実証実験の運転は、基本的に、平膜をもちいた実験で把握した運転管理指標²⁾ (表3)に基づいている。一般的に、原水水質とMLSS濃度が一定とすれば、活性汚泥の性状は、水温およびHRTに大きく左右される。これらが適切な範囲であれば必要十分な排水処理がなされ、ろ過しやすい活性汚泥となる。しかし、水温が低い時期にHRTが短い場合は処理が不十分となる可能性があり、一方、水温が高い時期にHRTが長い場合は過剰処理となり活性汚泥の「解体」という現象が起こりやすくなる。いずれの場合も、活性汚泥性状が悪化し、ろ過性が悪くなる。

本パイロット実証実験では、1年半以上にわたって運転を継続しており、膨大なデータを取得している。本報告では、表4に示すように、とくに高水温期と低水温期の場合の性能評価を中心に報告する。

3. 実証実験結果および考察

3.1 処理水質

高水温期、低水温期それぞれの原水および処理水の水質平均値を表5に示す。いずれの季節においても良好な処理がなされていた。有機物量の指標であ

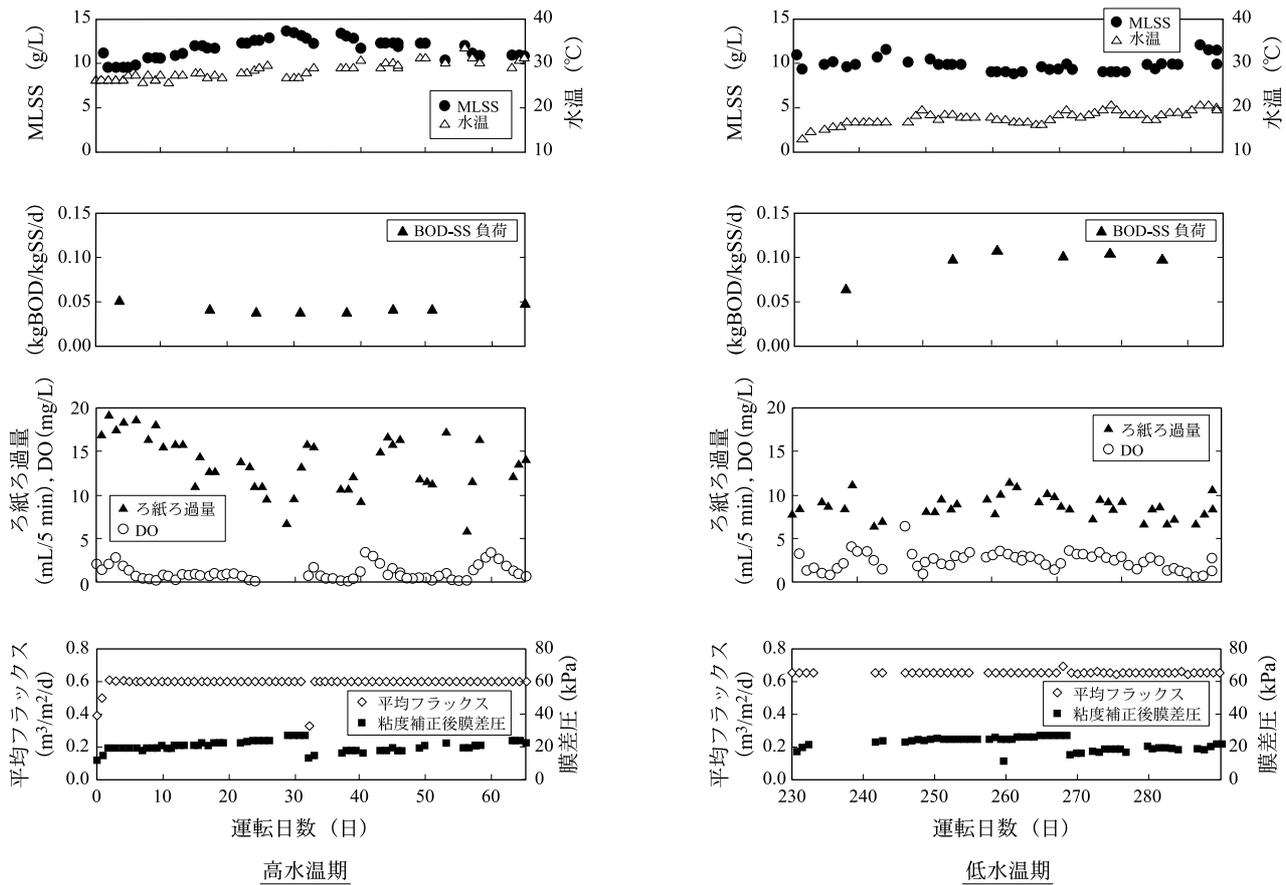


図4 高水温期と低水温期における汚泥性状と膜ろ過性の状況

る BOD, COD (化学的酸素要求量) や固形物 (SS) の除去が確実にこなわれているとともに、大腸菌に関しても、菌体サイズが膜孔よりも大きく、膜面で完全に阻止されるため、処理水の大腸菌群数は未検出であった。すなわち、膜分離法の特長を端的に反映するデータをえることができた。

さらに、窒素についても、高度処理の目安である 10 mg/L 以下に処理されていた。なお、本実験期間においては、嫌気タンクを設けておらず、また、PAC 等の凝集剤の添加もおこなっていない。今後、りん高度処理のためには、PAC 添加で対応していく予定である。

なお、高水温期と比較すると、低水温期のりん除去性能が高かった。これは、生物学的りん除去に必要な原水の BOD が高かったためと推測される。

3.2 膜ろ過の安定性

図4に高水温期と低水温期の汚泥性状と膜ろ過性を示す。

(1) 高水温期

通常、高水温期では有機物等の汚濁物質が十分に分解され、ろ過性の良好な汚泥フロックが形成され

ると考えられる。そこで逆に、汚泥が若干解体気味になるよう、滞留時間を長時間 (12.8h) に設定し、表3の運転管理指標の範囲において最小となる BOD-SS 負荷 (0.05 kgBOD/kgSS/d) に近い条件で運転をおこなった。しかしながら、膜差圧の急な増大はなく、安定した運転ができた。ろ紙ろ過量に関しても、好気タンクの DO が 1.5 mg/L 未満となる期間が多かったにもかかわらず、おおむね 10 mL/5 min 以上の良好なる過性を示した。

(2) 低水温期

低水温期では有機物等の汚濁物質が十分に分解されず、ろ過性の悪い汚泥になると考えられる。そこでさらに、滞留時間を 6.4h に短縮し、表3の運転管理指標の範囲において最大となる BOD-SS 負荷 (0.10 kgBOD/kgSS/d) に近い大きな負荷をかけた。その結果、ろ紙ろ過量がおおむね 10 mL 以下に悪化したものの、高水温期と比較してもほぼ同様の膜差圧を示し、安定した運転が可能であった。

3.3 SMP とろ過性の相関

曝気槽に蓄積する生物代謝産物である SMP は、(反応タンク内の溶解性 TOC) - (膜透過水の溶解性

表6 汚泥の脱水性評価

想定脱水機種	凝集剤添加率	予測含水率
ベルトプレス	高分子凝集剤 0.75 (%/TS)	84 (%)
	ポリ鉄 14 (%/TS) + 高分子凝集剤 0.75 (%/TS)	82 (%)
スクリーンプレス	高分子凝集剤 0.75 (%/TS)	85 (%)
	ポリ鉄 14 (%/TS) + 高分子凝集剤 0.75 (%/TS)	84 (%)

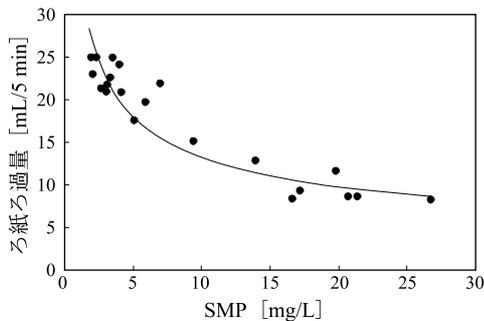


図5 SMP とろ紙ろ過量との相関

TOC) で表すことができる。図5にSMPとろ紙ろ過量の関係を示す。

この結果より、SMPの上昇が活性汚泥のろ過性を低下させていることが示唆された。SMPを低く制御することにより、低水温期など、活性汚泥のろ過性が悪化する期間において、膜差圧が低く安定した運転を維持することが可能になると考えられる。

3.4 余剰汚泥の発生量

図6に連続運転時に反応タンクに流入した累積SS量と、反応タンクから引抜いた余剰汚泥量の相関を示す。この結果から、流入SSの汚泥転換率は約60%であり、標準活性汚泥法(100%程度)、循環式硝化脱窒法(80%程度)、オキシデーションディッチ法(75%程度)と比較して余剰汚泥発生量が少なく、環境負荷が少ない地球にやさしい処理システムであることが実証された。

3.5 余剰汚泥の脱水性

本システムでは、反応タンク内のMLSS濃度を10000mg/L程度と高濃度に保持できるため、通常の水処理プロセスで必要な汚泥濃縮設備を省略できる可能性がある。そこで余剰汚泥の直接脱水が実現可能かの目処をえるため、ピーカー試験にて汚泥の直接脱水性を評価した。なお、脱水ケーキの目標含水率は、既存の水処理プロセスの脱水ケーキ含水率を参考に82%とした。

評価の結果を表6に示す。その結果、高分子凝集剤添加率0.75%もしくは、ポリ鉄14%+高分子凝集剤0.75%の条件にて含水率82~85%の脱水ケーキがえられることを確認した。すなわち、汚泥濃縮

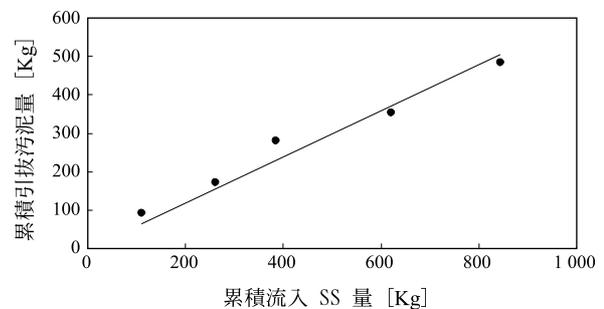


図6 流入SSと発生汚泥量との相関

設備が不要で余剰汚泥の直接脱水が可能であることがわかった。

むすび

PVDF製中空糸膜をもちいた浸漬型膜分離活性汚泥処理システムの実用化に向け、実下水をもちいたパイロットプラント実証実験において、これまで1年半にわたって評価してきた。その結果、高濃度の活性汚泥に浸漬された状態でも安定した膜分離運転を維持するとともに、省スペース化された反応タンクにおいて四季を通じて高度な処理水質をえることができ、汚泥の減量化にも成功した。

現在、さらなる大幅なコストダウンを目的として、膜分離運転および膜洗浄方法を最適化し、技術のブラッシュアップを図っている。

本実験に関し、神戸市建設局の皆様方には、実験場所および貴重なご意見をご提供頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 内田浩ほか：第38回下水道研究発表会講演集, p.619-621 (2001)
- 2) 中田誠亮ほか：第40回下水道研究発表会講演集, p.706-708 (2003)
- 3) 石山明ほか：第41回下水道研究発表会講演集, p.756-758 (2004)
- 4) Namkung, E., Rittmann, B.E.: Soluble microbial products (SMP) formation kinetics by biofilm, Water Science and Technology, 20, 795~806 (1986).
- 5) Rittmann, B.E., Bae, W., Namkung, E., Lu, C-j.: Acritical evaluation of microbial product formation in biological processes, Water Science and Technology, 19 517~528 (1987).