

バイオテクノロジーによる水処理技術

Development of a Waste-water Treatment System Using Biotechnology

医薬・食品分野で、微生物の高濃度化技術として工業化されつつある固定化技術や、膜による菌体分離を組み入れた膜形リアクタなどの新しいバイオテクノロジー技術を排水処理の分野に応用し、生物処理の高速・高度化を図るための研究が官学民で進められている。日立プラント建設株式会社では、生物的窒素除去にかかわる増殖速度の遅い硝化細菌を高分子含水ゲル中に高濃度に包括固定化することにより、生物反応速度を従来の方法に比べ大幅に向上させることができ、コンパクトな窒素除去プロセスを実用化した。また、膜形リアクタについては、低動力形の回転平膜モジュールを考案し、これと生物処理を組み合わせた省エネルギー・省スペースな中水製造装置を開発した。

森 直道* Naomichi Mori
大熊直紀* Naoki Ookuma
篠田 猛* Takeshi Shinoda
水口 保** Tamotsu Mizuguchi

1 はじめに

生命の源である水は、地球全体で約14億km³あると言われており、このうち、河川と湖沼の合計は50万km³とわずかである。日々利用しているこのわずかな貴重な資源が汚染されつつあり、大きな社会問題になっている。

現状の水処理に広く用いられている生物処理技術は、オールドバイオテクノロジーに属し、省資源・省エネルギーで地球に優しい方法であるが、反応時間が長い、分解能に限界があるなどの問題がある。このため、新しい水処理技術の開発が上水・下水などさまざまな分野で進められている。

一方、医薬・食品分野でのバイオテクノロジーの発展は近年目覚ましいものがあり、高活性・多機能な微生物の育種や²⁾、これらの有用な微生物を大量に培養し、反応速度を高めるための技術が開発され、一部実用化されている³⁾。

この論文では、水処理の分野にこれらの新しいバイオテクノロジーを活用し、従来の生物学的方法に比べ高速かつ高度な処理が可能な、(1)固定化微生物を用いた窒素除去技術、(2)低動力な回転平膜モジュールを用いたビル中水製造装置を開発したので以下に述べる。

2 生物学的水処理技術の課題とニューバイオテクノロジーの活用

水処理では古くから活性汚泥と呼ばれる微生物の集合体(フロック)の働きにより、廃水中に含まれる有機物を分解・浄化する活性汚泥法が主として用いられてきた。この方法は、図1に示すように好氣的な生物反応を行うためのエアレーションタンクと、フロックを重力沈降分離するための沈殿池から成

る。この方法の欠点は、分離したフロックの濃度が薄く、返送汚泥量を増やしても反応槽内の微生物濃度を高くできないという点にある。このため、石やプラスチックの表面に生物膜を自然に付着させ微生物濃度を高めることにより、反応速度を向上させた生物処理方法(結合形固定化微生物法：表1参照)が一部実用化されている⁴⁾。しかし、生物膜の維持管理が難しく安定した処理性能が得られないなどの問題がある。

一方、医薬・食品分野で、表1に示すように寒天のような高分子含水ゲルに微生物を包括固定する方法(包括形固定化微生物法)が、1973年に初めて工業化され、その後アミノ酸やアクリルアミドなどの生産に適用されている^{3),5)}。

包括形固定化微生物法の大きなメリットは、微生物の種類・量を人為的に固定できることである。このため、目的に合った微生物(例えば硝化細菌)を選択的に、かつ高濃度に保持することができる。さらに、ゲル内部に固定化しているため、周囲に存在する他の微生物により淘汰(とうた)されにくいと

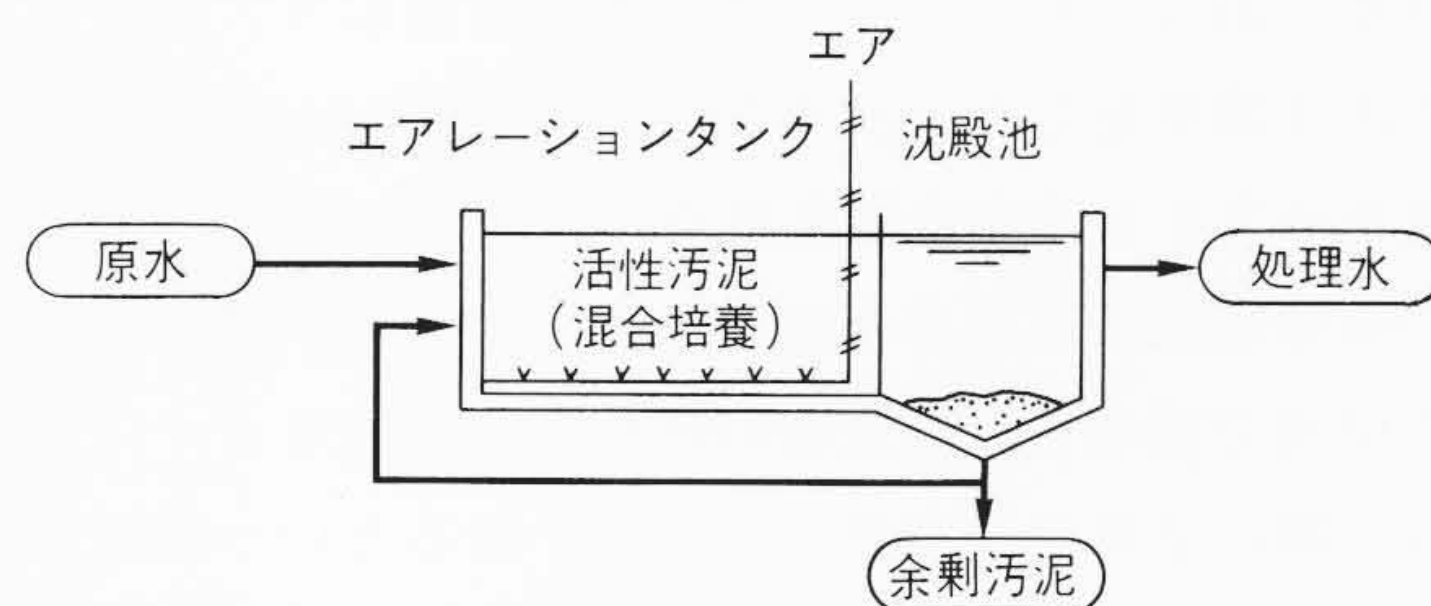


図1 活性汚泥処理法 浮遊している数十ミクロンの微生物の塊により、好気条件下で有機物を一部CO₂に分解し、一部を菌体増殖に利用して除去する方法である。

* 日立プラント建設株式会社 ** 日立プラント建設株式会社 技術士(水道部門)

表1 固定化方法 従来の廃水処理に用いられていた結合固定に比べ、包括固定は特殊な有用微生物を選択的に固定することができる。

項目	固定法	結合固定（固着）	包括固定
モデル			
微生物の固定		自然発生的	種類・量を任意に固定
増殖場所		担体表面	担体内部
長所		固定化操作が容易	目的に応じた微生物を高濃度に保持
短所		微生物のはく離・脱落があり処理が不安定	流入水に含まれるSSの処理が困難

注：略語説明 SS（浮遊物質）

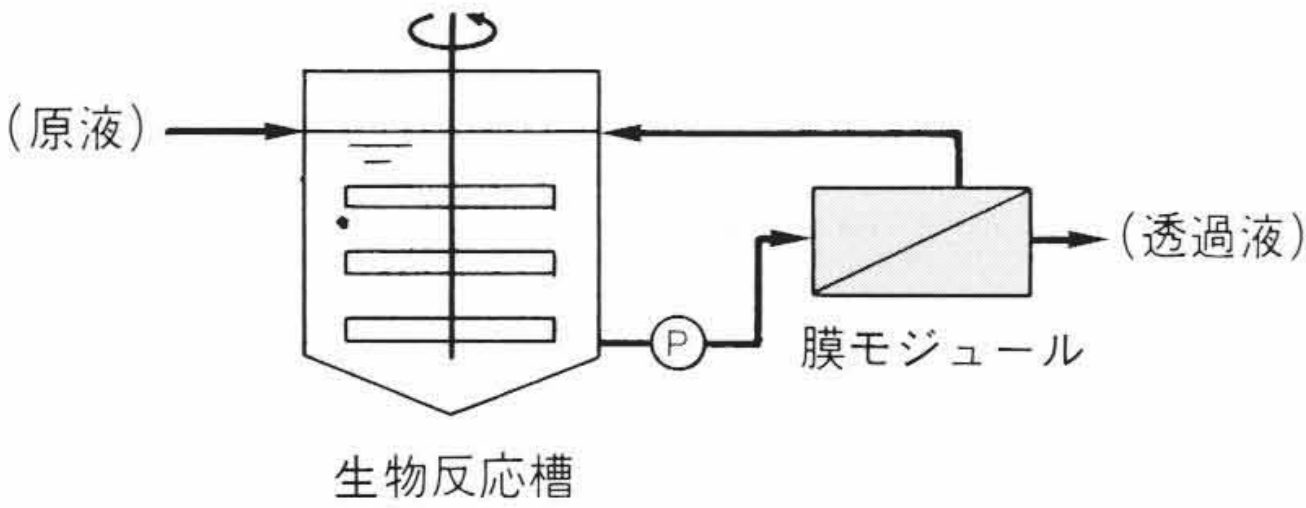
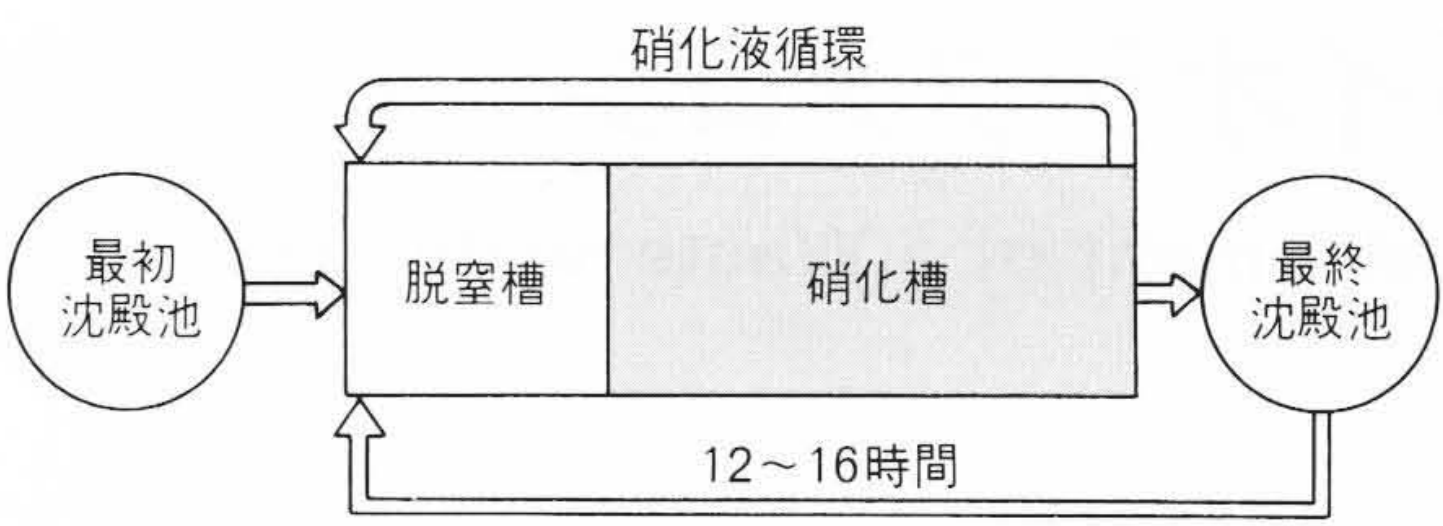


図2 膜形リアクタの概要 反応液と微生物との分離を膜で行うことにより、微生物を生物反応槽内に高濃度に保持することができ、反応時間と分離時間の短縮が可能になった。

いった特長がある。そこで、日立プラント建設株式会社では1982年から包括形固定化微生物法について適用研究を開始した。

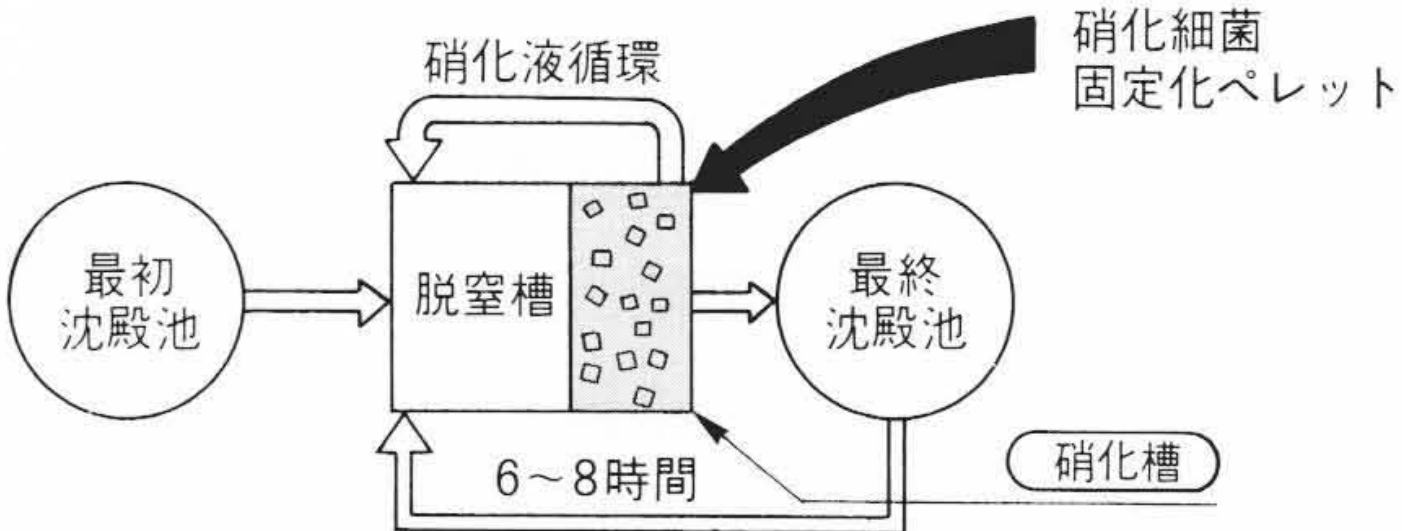
微生物濃度を高めるもう一つの方法として、図2に示すように膜分離装置を用いて反応槽系内に微生物を滞留させたまま高濃度に保持する膜形リアクタの開発が進められている⁶⁾。この方法は、(1) 連続操作が可能でありプロセスの簡素化が図れる、(2) 微生物の漏れがなく、また清澄な汙液が得られるなどの特長がある。最近では、水処理でも膜形リアクタを用いて活性汚泥濃度を1万mg/l(従来法：2,000 mg/l)に高め、反応速度を大きくした中水製造装置が販売されている。しかし、従来の膜分離装置は膜の目詰まりを防ぐため、微生物との混合液を高速で循環させ膜表面の汚れをはぎ取るようにしたため、膜分離に必要な電気動力が大きくなるという問題があった。そこで、1983年からは、高濃度微生物の分離に有効な低動力形のモジュールとして膜を回転させた回転平膜モジュールを通商産業省化学技術研究所と共同で考案し、開発に着手した。

1985年からは、バイオテクノロジーを活用した排水処理技術の国家プロジェクト研究が建設省、通商産業省でスタート



(a) 活性汚泥循環変法

処理能力 (BOD 200 mg/l → 20 mg/l以下)
(T-N 30 mg/l → 10 mg/l以下)



(b) 硝化促進形循環変法：開発プロセス

注：略語説明 BOD（生物化学的酸素要求量）

図3 生物的窒素除去方法 硝化細菌固定化ペレットを硝化槽に添加することにより、従来法の約1/2の処理時間でBOD、窒素の同時処理が達成された。

した。日立プラント建設株式会社はこれらプロジェクトに参加し、建設省の総合プロジェクト「バイオフィーラスWT」では、下水の高度処理を目的に「包括形固定化微生物を用いた窒素除去技術」を日本下水道事業団と共同開発した。また、通商産業省の大型プロジェクト「アクアルネッサンス'90」では、下水・ビル排水の再利用を目的に、コンパクトで低動力な膜を用いた高濃度微生物による下・廃水処理技術を開発し、この要素技術をもとに日立プラント建設株式会社で「膜利用ビル中水製造技術」を開発した。

そこで、これら開発技術について順にその概要を述べる。

3 包括形固定化微生物を用いた窒素除去技術

3.1 窒素除去技術の現状と開発技術

下水中に含まれる窒素成分は、約2/3がアンモニア性窒素であり、下水処理法として広く普及している活性汚泥法では、特に冬季の低水温時に窒素除去にかかわる硝化細菌の活性が低下し、アンモニア性窒素の大部分がそのまま自然界に排出される。このため、放流の際の塩素消毒によるクロラミンの発生や閉鎖性水域での富栄養化の要因のひとつになっている。

下水の生物学的窒素除去技術としては、Ludzack, Etingerら⁷⁾の開発した活性汚泥循環変法が知られている。この方法は、図3に示すように好氣的条件のもとで細菌(アンモニア酸化細菌)が、下水中に含まれる窒素の主成分であるアンモニア性窒素を硝酸まで酸化する反応(硝化反応)と、嫌氣的条件で細菌(脱窒細菌)が、硝酸を下水に含まれる有機炭素源(BOD(生物化学的酸素要求量)成分)を水素供与体として窒素ガスま

ペレットの硝化速度と水温との関係を図5に示す。ペレットの硝化速度は、従来法に比べて速く、水温の低下による影響も少ないことが確認できた。

(3) 実証プラント

1990年には標準活性汚泥法の実施設の改造を行い、実証施設(標準処理量：2,250 m³/d)による水理学的な検討、および実下水を用いた連続実験を継続している。

装置の外観を図6に示す。反応槽は全体容積750 m³で、このうち脱窒槽450 m³、硝化槽300 m³である。

1990年11月末から立上げを行い、1991年1月から本実験を開始した。連続実験条件および実験結果の一部を、標準活性汚泥法の結果とともに表3に示す。冬季の低水温でも良好な処理を行うことができ、処理目標を達成している。

標準活性汚泥法の処理水には窒素が残存しており、開発プロセスによれば、既設の生物反応槽容積を増やさずに改造だ

けでBOD・窒素の同時除去が行えることを確認した。

(4) 実用化プラントによる高濃度窒素処理

1991年1月には固定化ペレットを用いた実用化第1号として、汚泥処理系から排出される高濃度アンモニア含有廃水(250 mg/l)の処理装置(図7)が稼動し、順調な運転がなされている。今回納入した装置は、従来の浮遊菌による方法に比べ反応時間を約 $\frac{1}{7}$ に低減したもので、同様な廃水への適用が期待される。

4 回転平膜モジュールを用いたビル中水製造装置

4.1 膜利用ビル中水製造装置の現状

都市の再開発が進み慢性的な水不足に拍車をかけている。東京都や福岡市では、新設の大規模なビルに対して、ビル排水を浄化し、トイレなどの雑用水として再利用する設備の導入を義務づけている。ビル排水の再利用設備は、生物処理と固液分離処理とで構成されている例が多いが、省スペースを図るため、固液分離処理に膜分離装置を使用した装置が、昭和58年以後実績が増加し、ビル中水製造装置の主流となりつつある⁹⁾。

膜利用ビル中水製造装置の特長は次のとおりである。

表3 実証プラントの処理性能と活性汚泥法との比較 BODだけを処理している従来の活性汚泥と同じ滞留時間でBOD、SS、窒素を同時に処理できている。

項 目	数 値
滞留時間	6.2 h
水 温	16 °C

単位 mg/l			
水 質	原 水*	処理水 1	処理水 2
BOD	70.3	3.8	5.3
SS	53.7	5.7	5.0
T-N	23.9	6.8	15.6

注：＊ 最初沈殿池流出水
処理水 1：開発プロセス
処理水 2：活性汚泥法

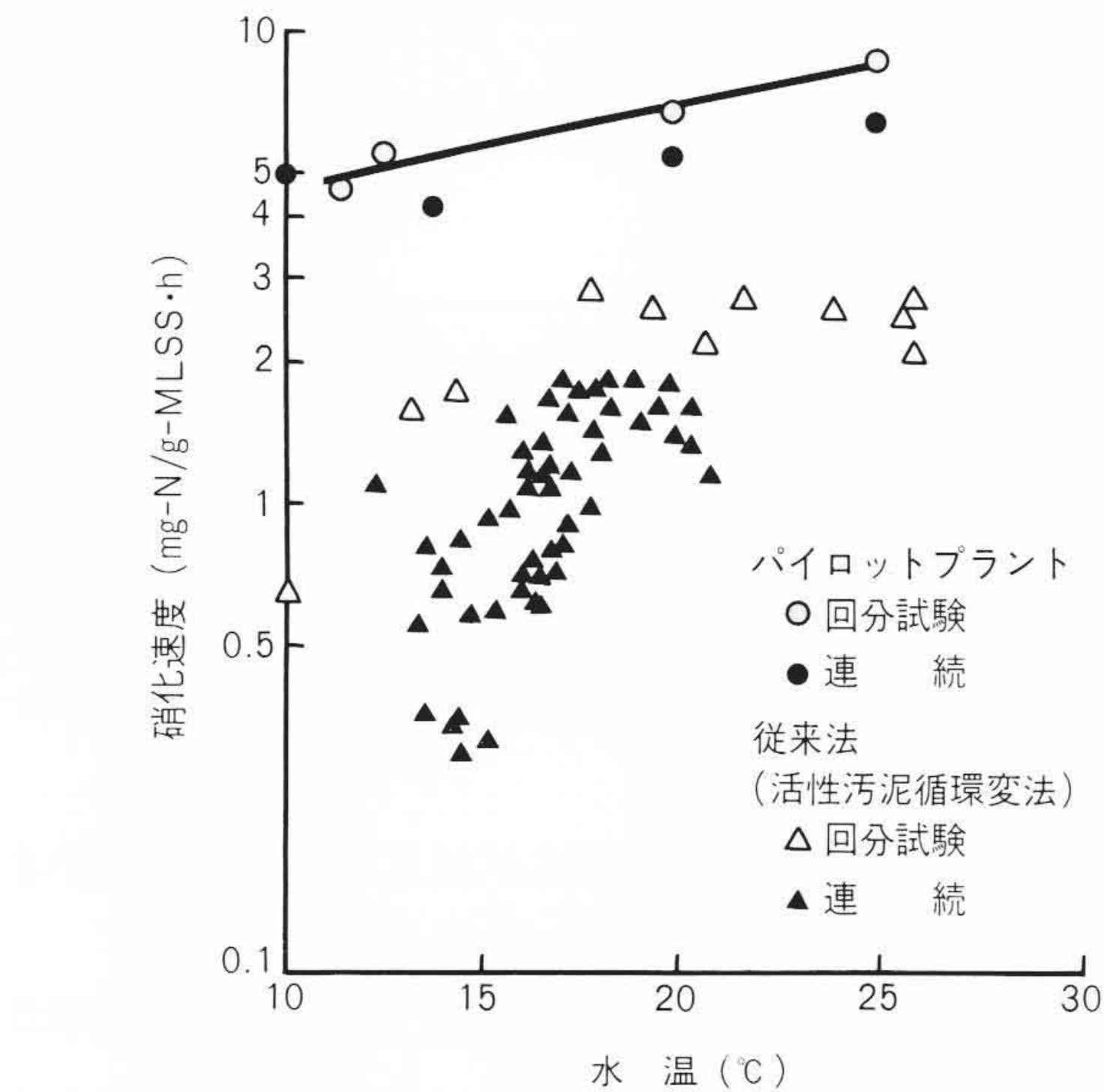


図5 水温と硝化速度の関係 パイロットプラント実験の結果、開発プロセスは、従来法に比べ、硝化速度を大幅に向上できることを確認した。

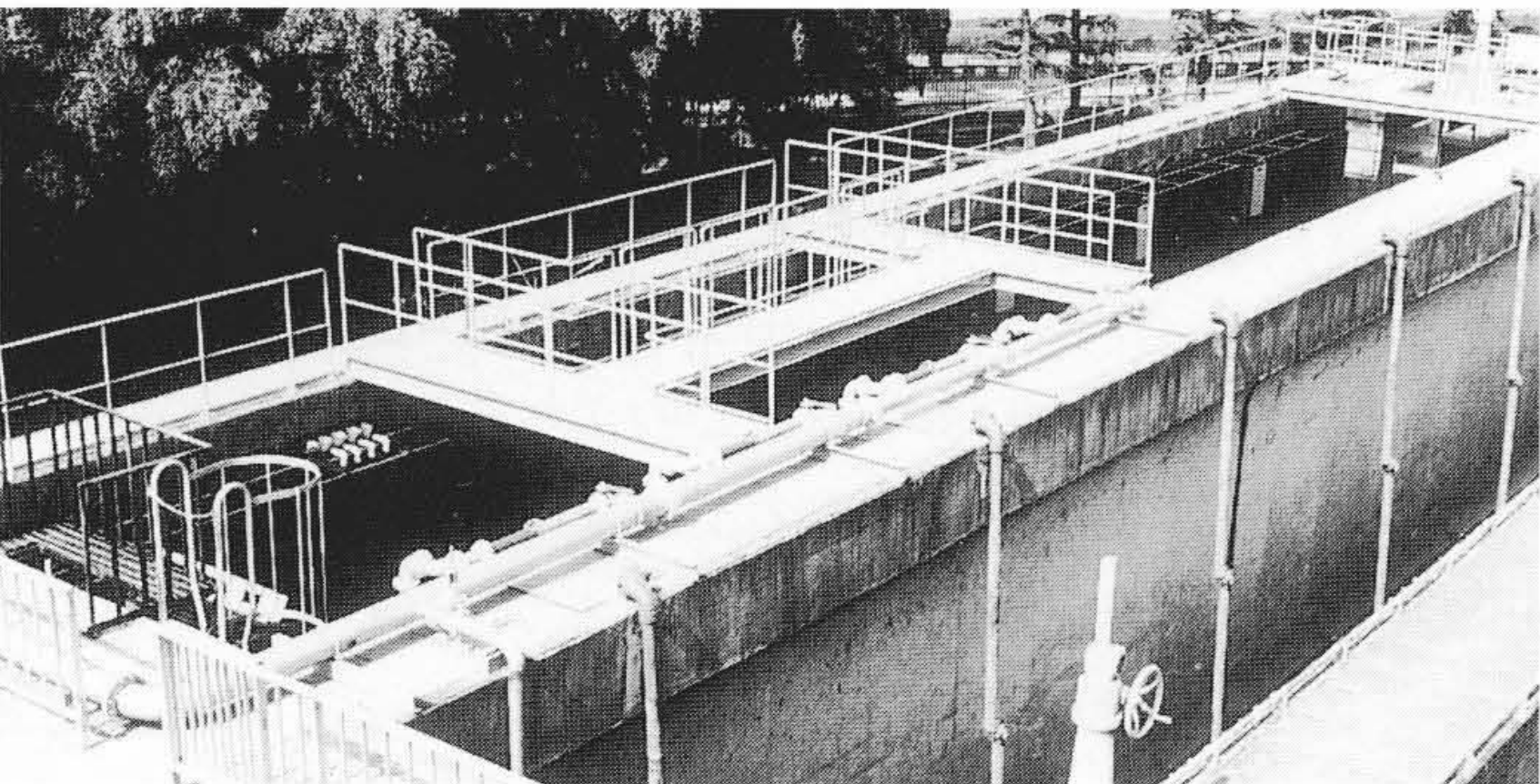


図6 実証プラントの概観(処理量2,250 m³/d) 実用化のための設計諸元を明らかにするため、実施設を改造した実証プラントを用い、水理学的な検討を行うとともに運転条件を確立した。

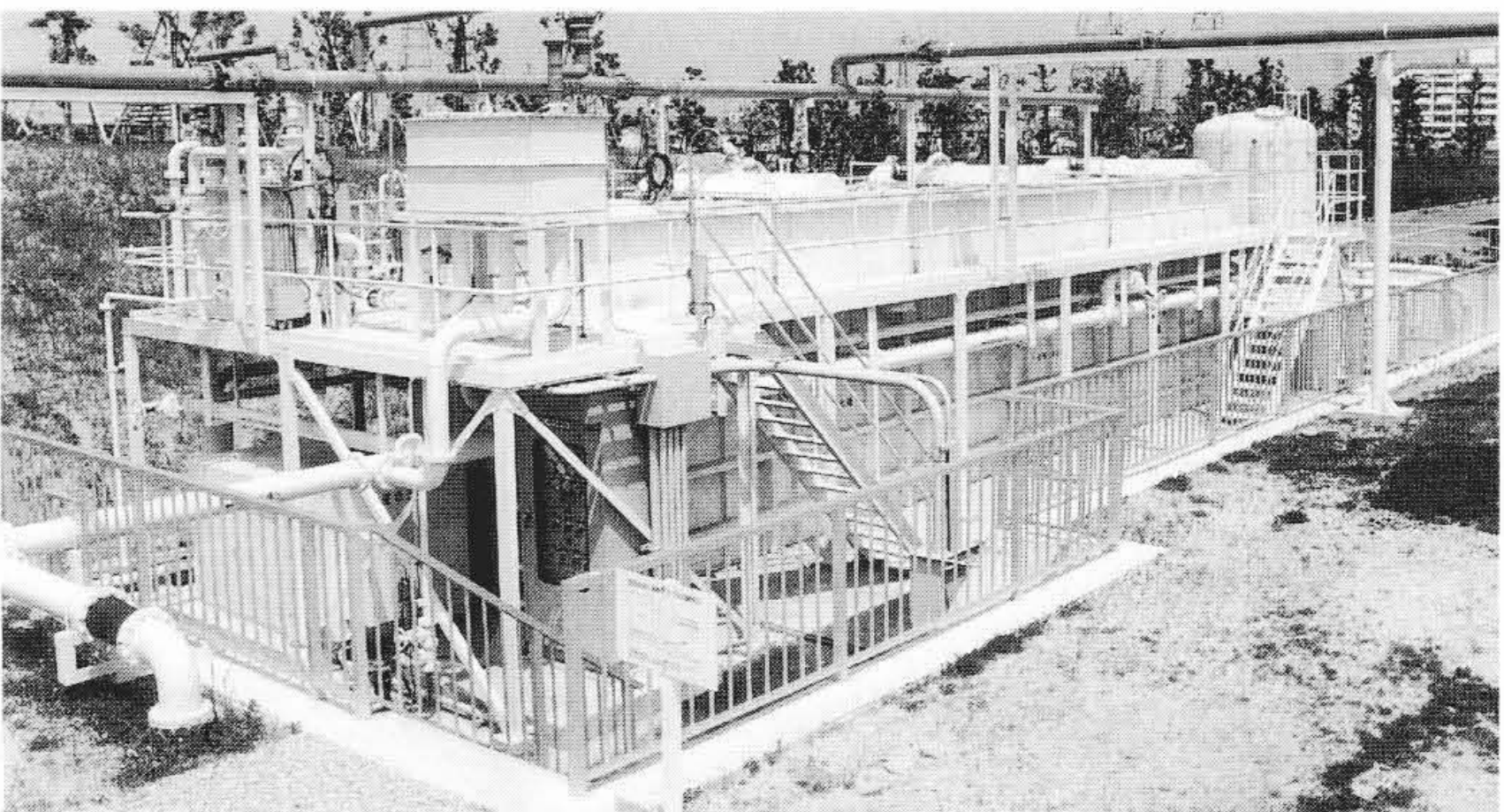


図7 実用化プラントの外観(処理量480 m³/d) 固定化微生物を用いた水処理装置の実用化第1号として、日本下水道事業団の北東エースプランから排出されるスクラッパー廃水処理装置に採用され、順調に稼動している。

- (1) 設置スペースが少なく済むこと。
- (2) 維持管理が容易であること。
- (3) 水質・水量変動に強いこと。
- (4) 処理水質が安定し、かつ良質であること。
- (5) 余剰汚泥の発生が少ないこと。
- (6) 間欠運転が可能で、オフィスビルに最適であること。

このような利点は、ビル排水の浄化に寄与する微生物を膜で反応槽全体を固定したことにより、生物処理槽内の微生物濃度を高く保持できたためである。しかし、高濃度微生物混合液を膜で分離することは、当然膜モジュールにとって大きな負担となる。経済性を考えれば、膜の透過水量を高く維持することが必要である。このため、膜表面の汚れ物質の付着や目詰まりを防止する必要がある。高濃度微生物を高流速で膜表面に流すため、膜モジュール内で大きな圧力損失を生じ、この結果運転動力が大きくなるという問題があった。

これに対して、膜モジュールを高濃度微生物混合液中で回転させることで膜表面と液との相対流速を得て、膜性能の維持を低動力で行える回転平膜モジュールを大形プロジェクトで開発するとともに、これを中水製造装置に適用し、コンパ

クトで省エネルギーな装置を開発した。

4.2 回転平膜モジュールの構造

モジュール構造を図8に示す。円盤状の支持材の両面に膜を張り合わせ膜ディスクとし、中空の回転軸に固定してある。膜面で分離した再生水は回転軸内に集水され系外に抜き出される。

モジュール構成は、二軸で一つのモジュール単位とし、膜ディスクと膜ディスクの間に他軸の膜ディスクをかみ合わせている。このような構成では、膜ディスクと膜ディスクの間の液の共回りを防止し、膜性能を高く維持することができ、さらに被処理液が高濃度・高懸濁液でも低動力運転が可能になる。チューブラ形膜モジュールとのランニングコストを比較すると、所要電気動力は約 $\frac{1}{2}$ となり、このほか膜交換費および膜洗浄のための薬品費を含め、ランニングコストを約60%に低減できる。

4.3 回転平膜モジュールを用いた中水製造装置

(1) 食堂排水からの中水製造装置

日立プラント建設株式会社 松戸工場内の食堂排水を原水とし、処理水量3m³/dの装置を用いて約1年間実証実験を行った。実験装置のフローを図9に示す。原水はスクリーンで粗ごみを除去した後、油水分離を行い、生物処理槽に供給した。生物処理槽内の高濃度微生物混合液は回転平膜モジュールで固液分離され、再生水を得る。回転平膜モジュールの装着状態を図10に示す。実験には、ディスク径500mmのポリスルホン系の限外濾過膜を用いた。微生物濃度を9,000~12,000mg/lの範囲で運転を行い、表4に示す水質の再生水を得ることができた。再利用水の水質基準と比較して満足できる値であり、大腸菌が検出されないことから親水空間での利用が可能であり、再生水の適用拡大が期待できる。

(2) ビル中水製造装置

ビルの敷地を有効に活用するため、いかに省スペース化を図るかが重要な課題である。中水製造装置でも同様であり、日立プラント建設株式会社では設置面積を大幅に低減できる

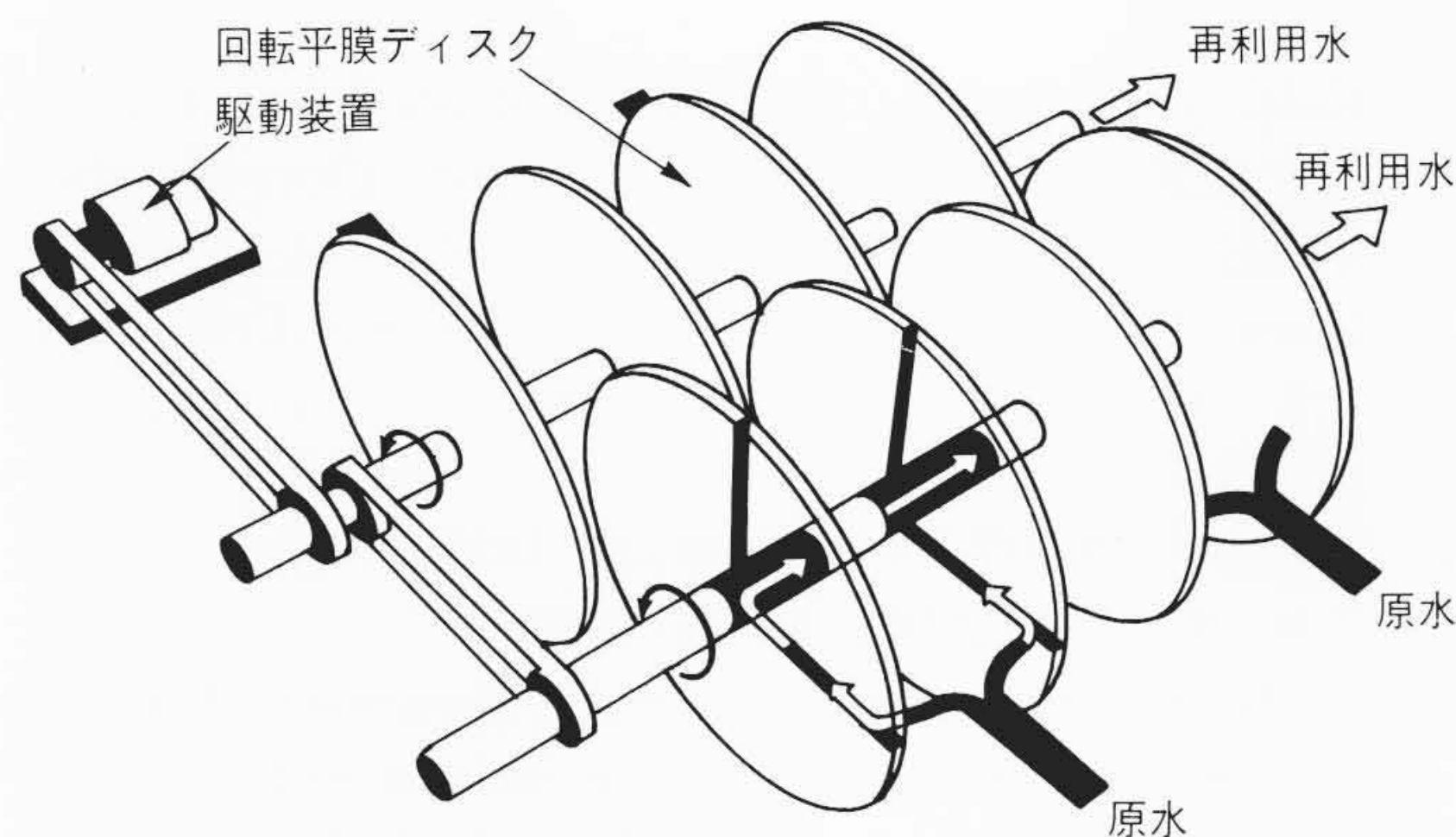


図8 回転平膜モジュールの概要 膜面の汚れを少なくし、透過水量を高く維持するため、膜を回転させることにより、汚れをはぎ取るための水との相対流速を低動力で得ることのできるモジュールである。

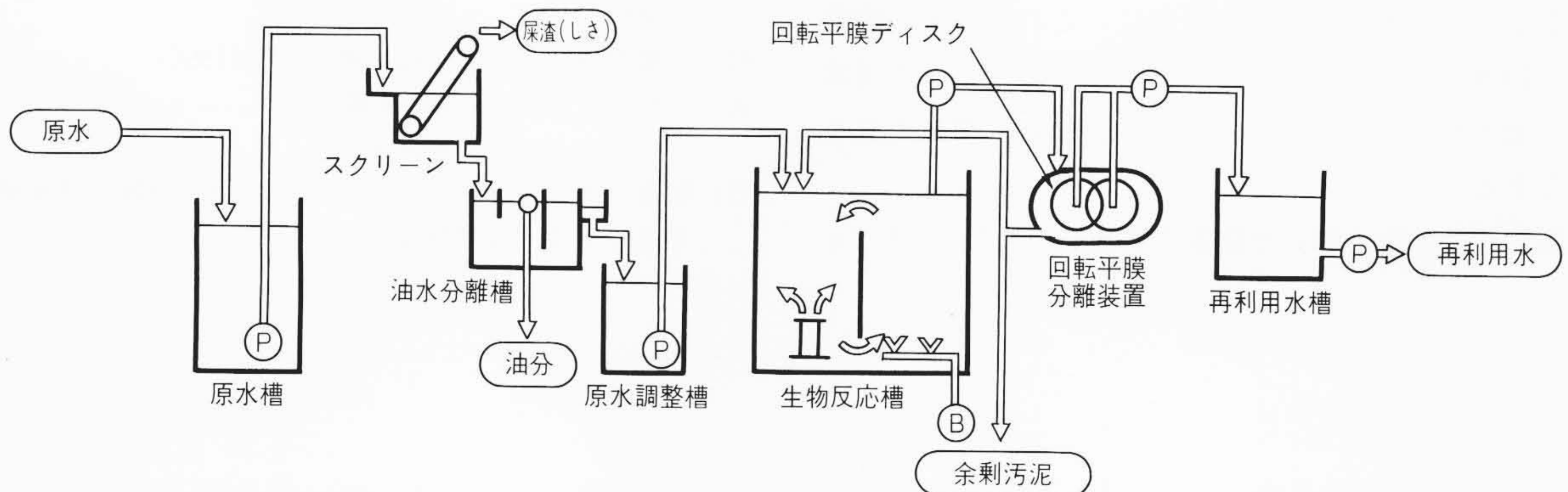


図9 食堂排水再利用実験装置フロー 回転平膜分離装置と生物反応槽を組み合わせ、食堂排水の再利用水製造装置の性能を確認するための実験を行った。

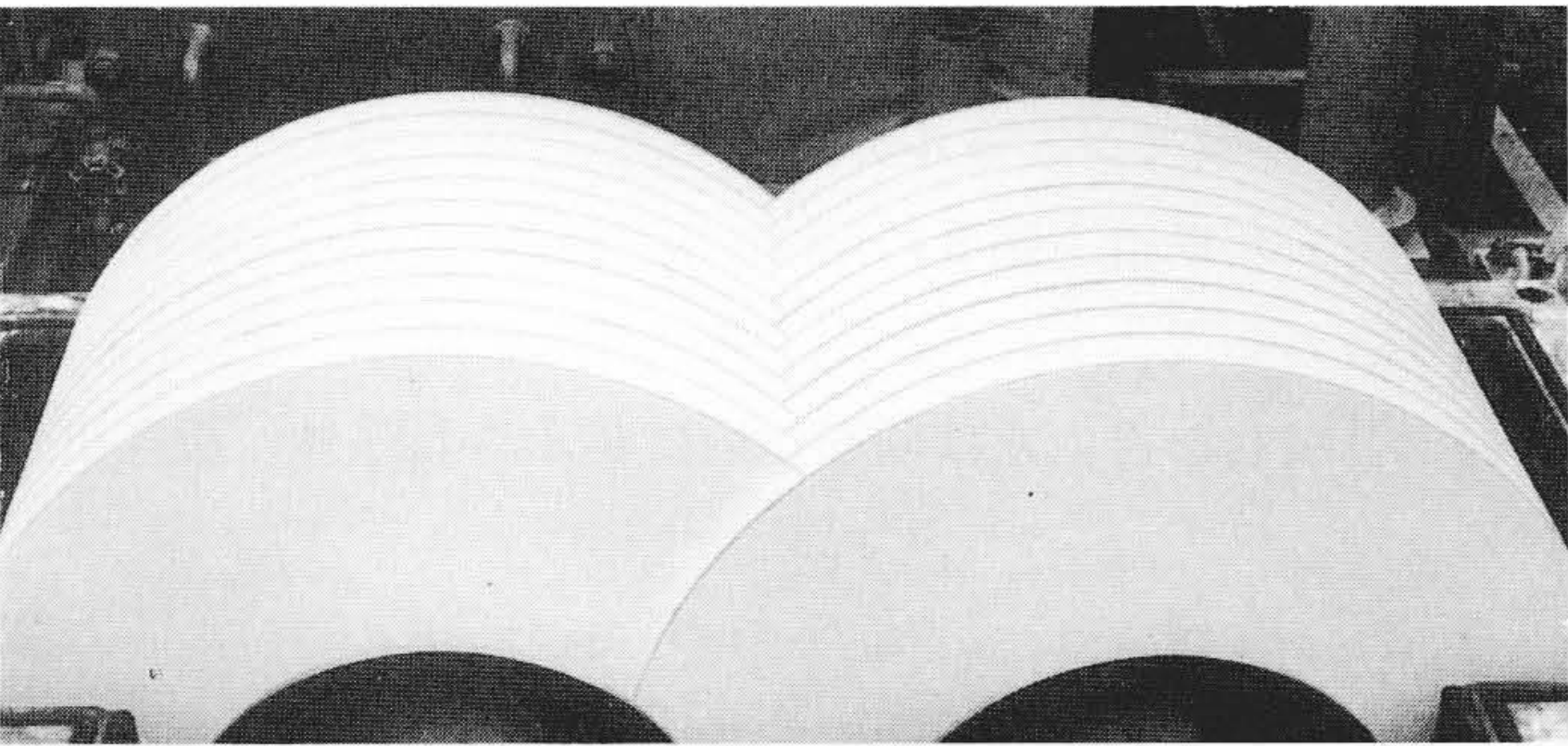


図10 回転平膜モジュール装着状況 回転軸に膜を積層したときの膜間での混合液の共回りを防止するため、膜を交互にかみ合わせる方式を採用し、混合液の膜面での乱流効果を高めるとともに装置のコンパクト化を図った。

ディープシャフトプロセスを納入している。このプロセスの沈殿池と砂汙過装置に代えて回転平膜モジュールを用いることで、標準活性汚泥に従来の膜モジュールを組み合わせた方法に比べ25%の省スペース化が図れ、処理水質を高めることができる。

4.4 回転平膜モジュールの応用

回転平膜モジュールは、先に述べたように高濃度微生物の分離に適していることから、ビル排水の中水製造装置や尿(し)尿処理設備だけでなく、生産工程での分離・濃縮装置への適用が期待される。また、無機膜の使用による食品¹⁰⁾や医薬品などのバイオテクノロジー関連装置への応用も検討している。特に、回転平膜モジュールは、従来の膜分離の際に生じるせん断力による微生物の解体を少なく抑えることができ¹¹⁾、安定した微生物反応を行いながら連続的に汙過を継続できるという特長がある。

5 おわりに

微生物の有用な機能・能力を最大限に発揮させることを目的に、包括固定化技術や膜分離技術を開発し、微生物濃度を高め反応速度を速めることにより、装置のコンパクト化・処理水質の向上を図ることができた。今後高活性・高機能な新しい微生物の探索・育種が進むにつれて、開発技術がますます有用になるものと考えられる。最後に、これら技術の開発に際し、ご指導・ご協力をいただいた建設省、日本下水道事業団および通商産業省をはじめ、関係各位に対し深謝の意を表す次第である。

なお、固定化微生物を用いた窒素除去技術は、「バイオフォ

表4 食堂排水再利用実験の水質分析結果 生物反応槽と回転平膜分離装置を組み合わせた装置により、きわめて良質な再利用水を得ることができることを確認した。

	原 水	処 理 水	雑用水基準値
BOD(mg/l)	390	1.9	<20
COD(mg/l)	127	7.4	—
SS(mg/l)	109	<1	—
pH(—)	6.1	7.1	5.8~8.6
n-Hex(mg/l)	32.8	<2	—
大腸菌群数(個/ml)	—	ND	<10

注：略語説明 COD(化学的酸素要求量), ND(検出せず)

ーカスWT」の一環として、日本下水道事業団が土木研究所からの委託を受け日立プラント建設株式会社と共同研究を行ったものである。

また、回転平膜モジュールの研究は、水総合再生利用システムの研究開発の一環として、アクアルネサンス技術研究組合がNEDO(新エネルギー産業技術開発機構)から委託を受けて、実施したものである。

参考文献

1) 大矢：水不足対策としての膜法による水処理, JETI, 36, 3, 24(1988)

2) Kars, J. S., et al. : Microbial Biodegradation of 2, 4, 5- Trichlorophenoxyacetic Acid and Clorophenols, Genetic Control of Environmental Pollutants, Edited by Omen, G. S. and A. Hollaender, P. Lenum Press(1894)

3) 土佐：バイオリアクターの応用技術, シーエムシー, 70~75(1986)

4) 井出, 外：水処理工学, 技報堂出版(1976)

5) 千畑, 外：固定化酵素, 講談社(1980)

6) R. Wichmann, et al. : Continuous Enzymatic Transformation in an Enzyme Membrane Reactor with Simultaneous NAD(H) Regeneration, Biotechnol. Bioeng., 23, 2789(1981)

7) Ludzack F. J., et al. : Controlling Operation to Minimize Activated Sludge Effluent Nitrogen, J. WPCF., 34, p.920(1962)

8) 日本下水道事業団技術開発部：活性汚泥循環変法の技術資料(1986)

9) 工業新報社：工業新報, 第1482号(1990)

10) 山野：食品工業における膜の応用, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム'91(1991)

11) 福島, 外：セラミック平膜による菌体の分離, 日本発酵工学会平成2年度大会要旨集(1990)