

逆浸透膜による下水の高度処理法の開発

Development of Advanced Waste Water Treatment by Reverse Osmosis Membrane

柴田 敏 幸^{*(1)}

Toshiyuki

SHIBATA

近 藤 三 雄^{*(5)}

Mitsuo KONDO

當 間 久 夫^{*(2)}

Hisao TOMA

坂 田 守 生^{*(5)}

Morio SAKATA

末 広 章 一^{*(3)}

Shoichi SUEHIRO

松 本 英 行^{*(4)}

Hideyuki

MATSUMOTO

抄 録

下水処理水は新たな水資源の一つとして再利用が進みつつあるが、砂ろ過等の従来の高度処理法では、水質上の問題によりその用途は限定されている。親水(せせらぎや池等)等の高品位な用途に再利用を拡大するためには水質の向上が課題である。新日本製鐵は、下水を高品位な水質に処理する方法として、逆浸透膜処理法に着眼しその実用化を目指し研究開発を推進してきた。本研究開発では、基礎実験及び実設備規模での長期実証実験により、逆浸透膜処理による水質の衛生性、処理性能の安定性、及び維持管理の簡易さ等を明らかにすると共に、運転費、設備費の検討を行い本処理法が下水の高度処理法として十分実用性があることを確認した。

Abstract

Reuse of waste water has been carried forward to secure one of new water resources. However, those conventional advanced waste water treating methods such as sand filtration are limited in their application from a resultant water quality standpoint. To expand the reuse of waste water to such water resources of a high grade as parent water, i.e., shallows and ponds, the improvement of the water quality should be the first subject to be solved. Paying attention to a waste water treatment using reverse osmosis membrane as the treating method for the waste water to be converted to the water resources of a high grade, Nippon Steel has promoted research and development on it aiming to put it to practical use. From the results of basic tests together with long term proof tests in a field test scale carried out in this R & D, it has been clarified that the resultant water obtained by the reverse osmosis membrane method has a good sanitary property, treating performance of the method is stable and its operation and maintenance are simple. Further, from the results of examination on its operation cost and equipment cost, it has been also confirmed that this treating method has sufficient operational suitability as the advanced waste water treatment.

1. 緒 言

水環境を構成する要素は、水質、水量、水辺の三つに大別されるが、近年、都市化・工業化による水質の悪化、及び水量減少、水辺の人工化等による水環境の悪化が進んでいる。ここで、水量に着眼すると大都市圏では人口の集中に伴い、将来的に水量の確保が困難になると予想されている。1994年12月に策定された環境基本計画では、環境政策の長期的目標の一つとして“環境への負荷が少ない、循環を基調とする社会システムの実現”¹⁾を挙げている。

下水処理水の年間水量は約110億m³であり、身近で安定した新たな水資源の一つとして注目され再利用、つまり循環利用も進みつつある。しかし、水質的な問題からその用途は便所用水、雑用水等の

低級用途に限定され再利用率は1%程度に留まっているのが現状である。今後、下水処理水の再利用用途をせせらぎや噴水等の親水用水のような高級用途へ拡大するためには処理水質の向上が必要であり、その処理法として、あらゆる水質成分について高い除去性能が得られる逆浸透膜分離法が有望視されている。本分離法は、ち密な細孔を有する高分子製膜を用い、圧力によって物質を分離する一種のろ過法である。その特徴は、

- 1) 水中の多種成分の同時一括除去が可能
- 2) 良質な処理水質が安定して得られる
- 3) 設備がコンパクトであり、設備配置の自由度が高い
- 4) 維持管理が簡単で、全自動が容易等

が挙げられ、下水の高度処理法として大きな可能性がある。

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 技術開発部

*⁽²⁾ 九州支店 掛長

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 技術開発部 部長代理

*⁽⁴⁾ 鉄構海洋事業部 水道・土木エンジニアリング部 掛長

*⁽⁵⁾ 鉄構海洋事業部 水道・土木エンジニアリング部 部長代理

このような背景のもと、新日本製鐵は、日本下水道事業団と膜分離による下水超高度処理法の実用化を目指し、1990年3月から1995年までの4年3か月にわたって共同研究を実施した。

基礎実験結果により行った膜の選定、基本特性把握、膜面積負荷の決定等は、新日鉄技報350号²⁾で報告しているため、本論文では、膜種類によるトリハロメタン等の有害物質除去性能の比較結果、実証実験結果及び設備、運転コストの比較検討結果について報告する。

2. 各種膜の分離性能

処理水再利用用途を“親水公園、せせらぎ等の水環境とのふれあい”を目的とする親水”と定義すると、処理水質には、

- 1) 安全性(衛生性)：人体に直接接触しても問題の無い水質
- 2) 感覚的快適性：臭気、にごり、不自然な泡等が無く、藻類の発生も考慮した水質

が求められる。このような要求水質まで処理可能な膜を選定するためには、あらかじめ各種膜の分離性能を把握する必要がある。ここでは、小型の卓上試験器を用いて各種膜による下水二次処理水中の溶解物質除去性能及びトリハロメタンやカドミウム等の有害物質除去性能を比較し下水の高度処理に適した膜の選定を行った。

2.1 実験装置

実験装置フローを図1に示す。実験装置は、まず原水を高圧ポンプにて加圧し、流量調整バルブ、圧力調整バルブによりアクリル製平膜テストセルに掛かる圧力と濃縮水量を調整する。濃縮水は原水槽へ戻される。テストセルは、約60cm²の平膜を装着でき、クロスフロー過が可能な構造である。

2.2 実験使用膜の仕様と運転条件

分離膜は大別すると細孔のサイズにより、精密ろ過膜(MF)、限外ろ過膜(UF)、逆浸透膜(RO)に大別される。ここでは、精密ろ過膜を2種、限外ろ過膜を1種、逆浸透膜を阻止率別に4種、計7種の膜を選定し実験を行った。表1に選定した膜の仕様と実験条件を

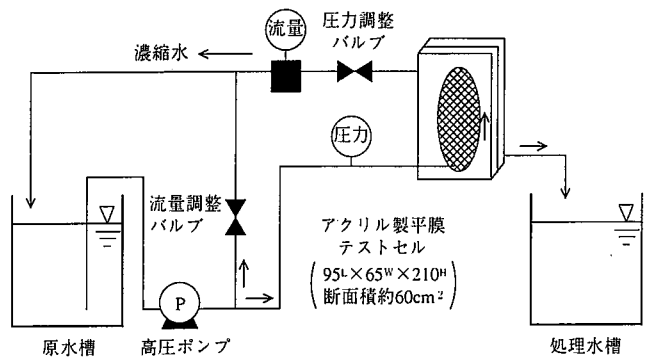


図1 平膜実験装置のフロー

示す。運転圧力は、実験装置の能力により最大10kg/cm²とした。

2.3 分離性能の比較

2.3.1 下水二次処理水溶解物質の分離性能比較

原水は、荒川左岸下水処理場の下水二次処理水を砂ろ過処理したものを用いた。各成分の除去率計算結果を図2、3に示す。ここでの除去率は、原水と濃縮水の平均濃度に対する膜透過水濃度とした。計算式を以下に示す。

$$\text{除去率}(\%) = \left[\frac{C_p}{(C_o + C_b)/2} \right] \times 100$$

ここで、 C_o =原水初期濃度、 C_b =濃縮水濃度、 C_p =透過水濃度

全溶解性物質(TDS)除去率は、膜の分離性能に従って向上している。BOD、CODはある一定水準までどの膜でも除去可能であるが、COD除去率が高いのは逆浸透膜であった。無機物質の除去率に関してもTDSと同様の傾向が見られた。栄養塩類に関しては、りんは逆浸透膜で高い除去率が得られるが、窒素は除去し難い傾向にあった。

表1 各種膜の仕様

膜の種類			MF膜		UF膜	RO膜*2)				
膜No.			1	2	3	4	5	6	7	
膜の型番			N5201	金属膜	N3150	N7410	N7450	N729HF	N769SR	
性能	阻止率		%	—	—	—	10	50	93	97
	評価条件	評価液	—	0.5%*1)	—	純水	0.15%NaCl		0.2NaCl	0.05NaCl
		圧力	kg/cm ²	0.5	—	2	5	10	10	15
		温度	℃	25	—	25	25			
		pH	—	—	—	—	6.5			
		回収率	%	—	—	—	50		15～25	10～20
	分画分子量		—	—	50 000	—				
	孔径		μm	0.2	0.4	—				
膜素材			ふっ素樹脂	SUS316	ポリスルホン	合成高分子系複合膜				
実験圧力		kg/cm ²	2	2	2	5	10	10	10	
濃縮水量		l/min	0.513							

*1) ポリエチレングリコール水溶液

*2) 本実験で採用したRO膜は、性能的にUF膜と海水淡水化用に使用されている高阻止率RO膜との中間に位置すること、また比較的低圧力で使用されることから、最近の分類では、ナノフィルトレーション膜もしくは、ルーズRO膜とされている。

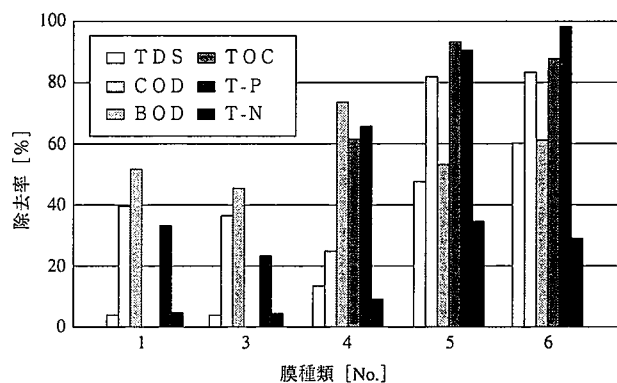


図 2 各種膜の分離性能比較 その1

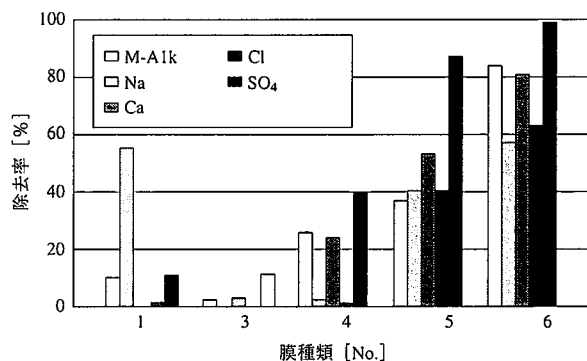


図 3 各種膜の分離性能比較 その2

2.3.2 有害物質に関する分離性能の比較

原水は、純水を用い表2に示す1～3, 4, 5～8の物質を3回に分けて添加し分離実験を行った。添加濃度は基本的に排水基準の100倍としたが、1,1,1-トリクロロエタンについては排水基準濃度が高いため10倍とした。図4に各種膜の除去率計算結果を示す。

鉛、カドミウムは、No.4の阻止率10%の逆浸透膜までほとんど除去できなかった。また、ひ素も阻止率50%の逆浸透膜を用いても除去率は20%以下と低いものとなった。シアンについては、高阻止率の膜を用いても除去率が低く、除去するためには更に高い除去率の逆浸透膜を適応する必要があると考えられる。エチレン類は、U

F膜でも約50%以上の除去率を得ることができた。全体の傾向としては、やはり高阻止率の膜を用いるほど各種成分の除去率も高く、より高品位な水質が得られた。

実験結果より、前述の条件を満たし親水等の高度な再利用用途に適する水質が得られる処理には、各種成分を分離可能な逆浸透膜の採用が最も適切であると考えられる。

表 2 有害物質名称と添加濃度

No	名 称	濃度 (mg/L)
1	カドミウム	1
2	鉛	10
3	ひ素	5
4	シアン	10
5	テトラクロロエチレン	1
6	トリクロロエチレン	3
7	総トリハロメタン	10
8	1, 1, 1-トリクロロエタン	3

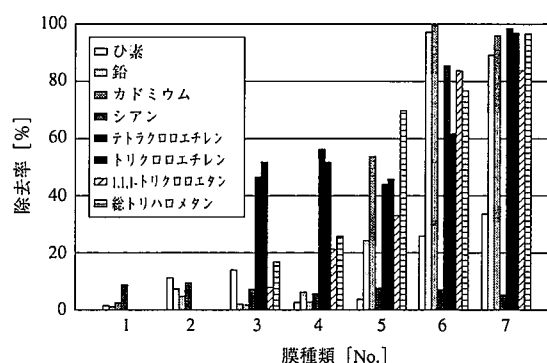


図 4 各種膜の分離性能比較 その3

3. 基礎実験結果の概要

基礎実験は、埼玉県戸田市に所在する日本下水道事業団技術開発部総合実験棟内で実施し、原水は荒川左岸処理場の下水二次処理水を用いた。実証実験設備の設計根拠としたFI<4を保つ前処理条件、逆浸透膜の基本特性等の基礎実験結果概要を表3に示す。詳細については、新日鉄技報350号を参照されたい²⁾。

表 3 基礎実験結果の概要

基 礎 実 験 フ ロ ー		前処理(凝集沈殿と二層式砂ろ過)→ 逆浸透膜
前 処 理	凝集沈殿 選定凝集剤	ジャーテストにより、PAC(ポリ塩化アルミニウム)を選定
	最適凝集剤添加量	実機テストにより、20 (mg/L as Al ₂ O ₃) に決定
	攪拌時間	ジャーテストにより、5分 に決定
	水面積負荷	実機テストにより、13 (m ³ /m ² ・d)に決定
砂 ろ 過	ろ材構成	ろ過水がFI<4を保てる時間とろ材の層厚／調和平均径の値、すなわちL/D値の関係を求めた。その結果、例えばLV=150m／dであれば、24時間ろ過水のFI<4を保つためには、L/D値=1 550程必要である。
	ろ過水廃棄時間	FI<4を保つためには、水質が悪化する逆洗後のろ過水のある程度廃棄する必要がある。実験の結果その時間を30分と定めた。
逆 浸 透 膜	逆浸透膜の選定	各メーカーの逆浸透膜カタログ性能を調査し、水質、透過水量、汚れ難い膜構造を考慮し、下水処理に適した膜として、N社製スパイラル型逆浸透膜NTR-729HPを選定した。
	逆浸透膜基本特性の把握	下水処理に逆浸透膜処理を適用した場合の圧力と透過水量、水温と透過係数、圧力と除去率の関係を明確にし数式化した。
	最適透過水量負荷の決定	1か月の連続処理にて膜性能が20%低下する透水量負荷を最適とし、その透過水量負荷を実験により、0.6[m ³ /m ² ・d]と定めた。
	薬品洗浄方法	薬品洗浄間隔を1か月とし、膜の性能回復に効果的な洗浄薬品と方法を策定した。
	逆浸透膜配列計算プログラムの開発	実験結果を基に、逆浸透膜の運転圧力、透過水量、透過水質等を予測する逆浸透膜配列計算プログラムを開発した。

この他、基礎実験では新前処理法として、UF膜適用実験、前処理簡略化等の実験を実施し成果を得ている。

4. 実証実験

実証実験は、基礎実験結果の実設備規模での確認とともに、実設備としての長期安定性、コストや保守性等の実用化に際して重要となる次の事項についての調査・検討を目的として実施した。

- 1) 前処理設備長期安定性の確認
- 2) 逆浸透膜性能長期安定性の確認
- 3) 処理水質の確認
- 4) 運転コストの算出

4.1 実証実験設備の概要

実験フローを図5に示す。原水は塩素滅菌前の下水二次処理水と

し、処理場の最終沈殿池より自動ストレーナー(精度 $250\mu\text{m}$)に送られSS分等を荒除去する。次に、凝集沈殿と同等の処理性能があり設備面積が約1/10に省スペース化できるクロフタ式加圧浮上装置により濁質の凝集分離を行い、更に砂ろ過し前処理を終了する。この前処理水を高圧ポンプにより逆浸透膜に通水する。逆浸透膜では、前処理水を溶解成分が除去された透過水と成分が濃縮された濃縮水とに分離する。得られた透過水は、藻類の発生状況を調査するための処理水評価設備、及び下水処理場内の噴水に送られる。濃縮水は、初沈に返送される。設備の回収率は、対前処理水において80%であり、処理水量は $210\text{m}^3/\text{d}$ である。また、設備の運転データには、電話回線でアクセスができ、遠隔地にて設備の運転状況を監視することができる。設備主要機器仕様を表4に示す。高圧ポンプは、インバータ制御を採用し省エネルギー化を目指した。逆浸透膜

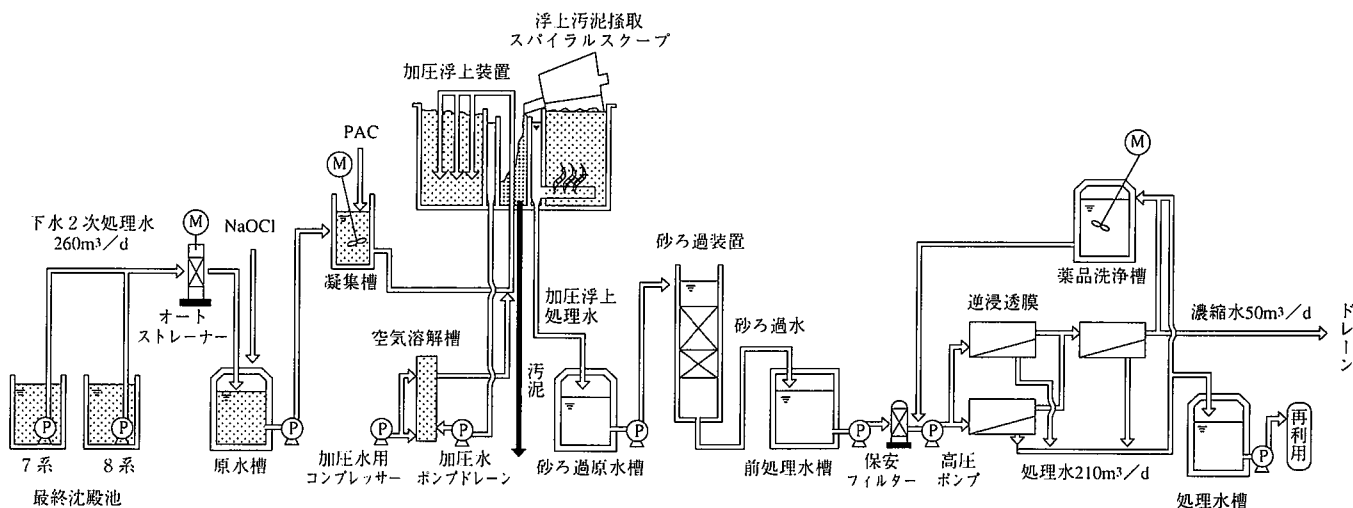


図5 実証実験フロー

表4 実証実験設備主要機器仕様

原水種類	下水二次処理水(塩素滅菌前)		
計画処理水量	前処理水 : $260\text{m}^3/\text{d}$ 逆浸透膜処理水 : $210\text{m}^3/\text{d}$ (回収率80%)		
水温	$10\sim 30^\circ\text{C}$ (設計水温 15°C)		
設備設置面積	$6\text{m}\times 13\text{m}$		
実験場所	千葉県印旛沼流域下水道花見川終末処理場内		
実験期間	1993年3月～1995年3月		
機器名称	数量	計画処理水量	
加圧浮上装置 (クロフタ式)	一式	$260\text{m}^3/\text{d}$	形状 : 堅型、円筒式 浮上槽寸法 : $1800\text{mm}\phi\times 400\text{L}$ 材質 : ステンレス鋼
砂ろ過装置	一式	$260\text{m}^3/\text{d}$	形式 : 重力式 形状 : 円筒型 ろ材 : 砂 $0.6\text{mm}\phi\times 1200\text{mmH}$ アンスライト $0.4\text{mm}\phi\times 1200\text{mmH}$
高圧ポンプ	基	$260\text{m}^3/\text{d}$	形式 : 多段渦巻 材質 : ステンレス鋼 電源 : $200\text{V}\times 11\text{kW}\times 3\phi\times 50\text{Hz}$
逆浸透膜 (NTR-729HF-S8)	15本	$210\text{m}^3/\text{d}$	膜素材 : ポリビニルアルコール系複合膜 寸法 : $200\text{mm}\phi\times 1016\text{mmL}\times 15\text{本}$ 脱塩率 ^{*1)} : 92% 透過水量 ^{*2)} : $36\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{本}$

*1), *2)の測定条件: 水温 25°C , 圧力 $10\text{kg}/\text{cm}^2$, 原水濃度 1500ppm (NaCl), pH=7

は基礎実験にて選定した膜と同じ材質のものであり、8インチタイプを15本使用している。

4.2 前処理に関する実験結果

逆浸透膜エレメントは、膜面積を増やすと同時にコンパクト化を図るため膜と膜の間隔が狭く、膜供給水に濁質が含まれると膜の閉塞や膜表面への汚れの付着等により、著しく透過性能が低下する。このため、逆浸透膜設備には原水の濁質を除去するための前処理工程が通常必要とされる。

前処理実験は、低濁度指標であるF I (Fouling Index) < 4 を安定して得られる運転条件の策定と長期安定性の確認を目的に実施した。その結果、通常の下水二次処理水を原水とした場合、安定してF I < 4 の処理水が得られる条件として表5に示す運転条件が得られた。また、突発的な原水水質の悪化を考慮し、原水水質が悪化した場合の前処理性能を確認した。

図6に加圧浮上装置による実験結果を示す。原水は汚泥を添加することによりSSと濁度を調整した。原水濁度濃度10(NTU)以下では、処理水濁度は、ほぼ一定であるが、それ以上になると原水濁度の上昇に伴い処理水濁度も悪化する。これは、凝集剤であるPAC添加量の不足が考えられた。PACは、 Al^{3+} 等の多価カチオンがコロイド粒子の電荷を中和し、同時に $Al_2(OH)_3$ 等の水酸化物が粒子を吸着しフロック化させる。よって、PACの添加量が不足すると、フロック化しきれないコロイド粒子が処理水中に残留すると考えられる。

図7に原水のSS約20(mg/L)、原水濁度10(NTU)の場合のPAC添加量と処理水質の変化を示す。処理水濁度はPAC添加量増に伴い低下するが、SSは逆に増加する傾向を示す。これは、PAC増量によりコロイド粒子のフロック化が進み、処理水は澄んだ状態になるが、増加したフロックが浮上しきれない状態となり、これがSSとして検出されたためと考えられる。

図8にこの加圧浮上処理水を砂ろ過処理した後のF I の変化を示す。PAC添加量は、20, 40(mg/L as Al_2O_3)の2ケースとした。砂ろ過逆洗後のF I は、PAC添加量が40(mg/L as Al_2O_3)の方が速く低下し、逆洗後の処理水廃棄時間30分以内にF I が4以下に低下することが確認できた。この結果、原水水質が悪化した場合でもその水質の濁質をフロック化できる量のPACを注入すれば、前処理性能を維持できることが明らかになった。

以上により、本前処理設備は突発的な原水水質の悪化にも対応可能であり、安定してF I が4以下の処理水が得られることが確認できた。

表 5 前処理運転条件

項目		条件
凝集槽	塩素注入量	5 (mg/L as 12%Cl)
	凝集剤	PAC=20 (mg/L as Al_2O_3)
	攪拌時間	5 (min)
	攪拌機回転数	80 (rpm)
加圧浮上装置	滞留時間	5 (min)
	水面積負荷	140 ($m^3/m^2 \cdot d$)
	エア供給量	24 (%) (1 air/1 wt)
	加圧水比	30 (%)
	加圧水圧	590 (kPa) (6 (kg/cm^2))
砂ろ過装置	ろ過速度	150 ($m^3/m^2 \cdot d$)
	逆洗頻度	1 (回/日)
	逆洗後ろ過水廃棄時間	30 (min)

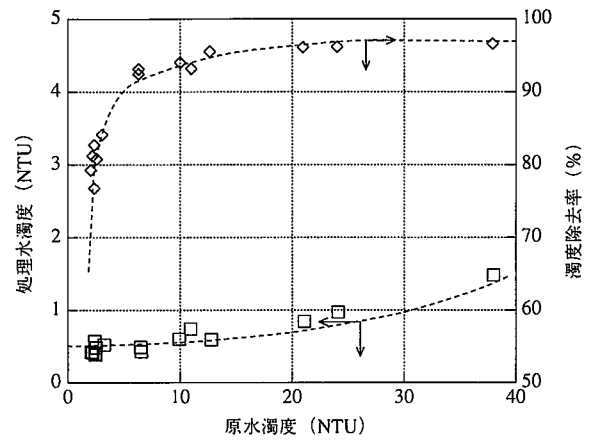


図 6 加圧浮上装置による濁度除去性能

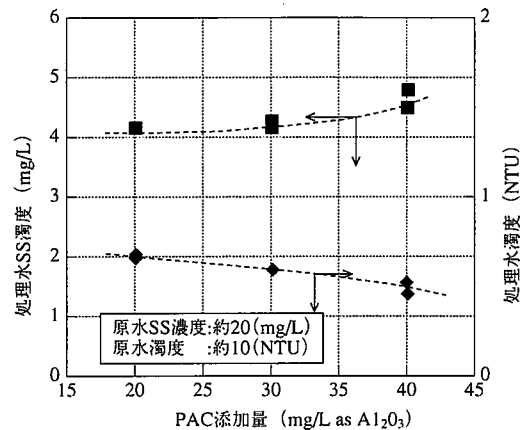


図 7 加圧浮上装置におけるPAC添加量と処理性能の関係

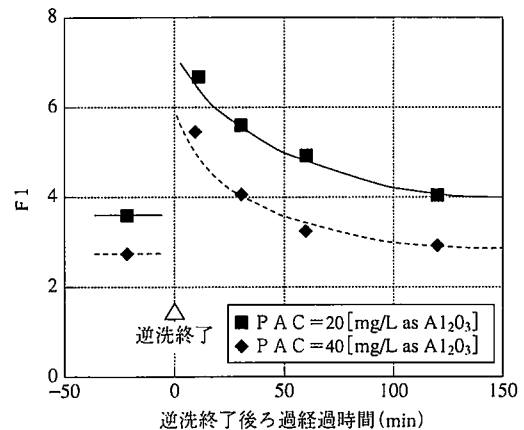


図 8 砂ろ過逆洗後のF I 変化

4.3 逆浸透膜処理に関する実験結果

運転開始から約8 000時間の運転圧力、処理水量、濃縮水循環量の変化を図9に、運転条件を表6に示す。また、図10に水温変化、回収率変化、図11に逆浸透膜除去率の変化を示す。

4.3.1 制御方式の適正確認

RUN 1では、基礎実験結果より、新日本製鐵で開発した膜配列計算プログラムによる計算結果に基づき運転条件を設定し連続実験を行った。処理水量は、ポンプのインバータ制御と逆浸透膜モ

ジュールの濃縮水側に設けた圧力調整バルブにより、 $210(\text{m}^3/\text{d})$ に制御を行った。膜の汚れによる運転圧力の上昇や水温変化による必要圧力の変動が起こるが、設定処理水量の $210(\text{m}^3/\text{d})$ と回収率80(%)は一定に保たれた。また、実験期間中に砂ろ過タイマー設定ミスにより、水質が悪化した場合でも運転圧力は上昇したが、処理水量、回収率はほぼ一定に保たれており、本制御方式が適正であることが確認できた。

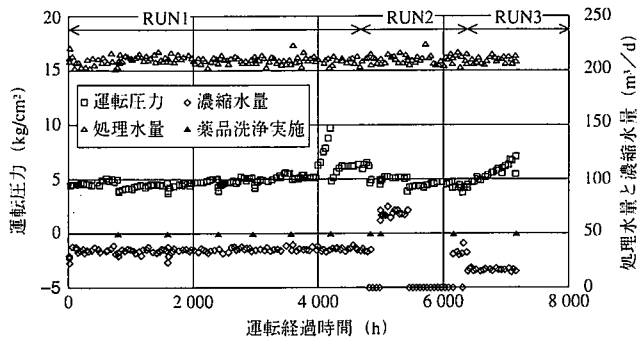


図9 運転圧力、処理水量と濃縮水量の変化

表6 実証実験運転条件

項目	条件	前処理水量 (m^3/d)	処理水量 (m^3/d)	濃縮水循環量 (m^3/d)	回収率 (%)
RUN1 連続負荷実験		260	210	40	80
RUN2 濃縮水循環効果 確認実験		260	210	0,36,70	80
RUN3 膜面積負荷変更実験		260	210,170,2CASE	20	80

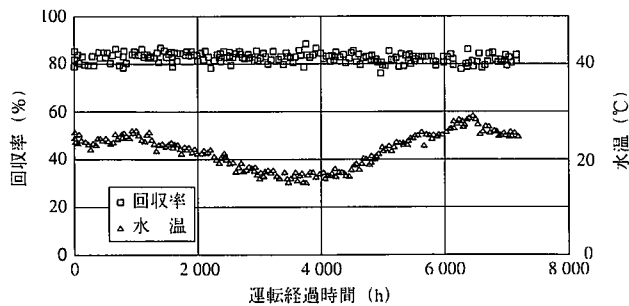


図10 回収率と水温の変化

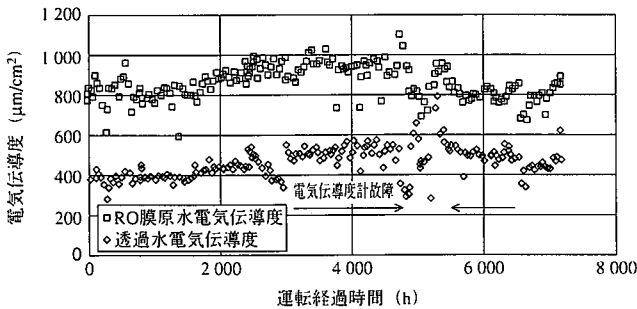


図11 電気伝導度の変化

4.3.2 運転圧力の変化

膜面積負荷は、基礎実験により決定した1か月運転で膜の性能低下が20%になる負荷、約 $0.6(\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d})$ を採用した。運転圧力は、RUN1の期間で4~6(kg/cm^2)で安定しており、設計値である1か月の連続運転で20(%)程度の性能低下をほぼ満足した。

4.3.3 除去率の変化

図11に電気伝導度の変化を示す。除去率は、運転条件によって若干の変動があるが運転期間中は、約50%に保たれた。この結果、下水を長時間処理した後も逆浸透膜の基本的な分離性能は初期値と同等に保たれることが確認できた。除去率が低い部分は、電気伝導度計の不備のため異常検知されたデータである。

4.3.4 薬品洗浄効果

薬品洗浄は、1か月ごとに基礎実験で選定したpH2の硝酸水溶液とpH10のEDTA水溶液により行った。図9の▲が薬品洗浄を実施した箇所である。RUN1の運転条件では、基礎実験で求めた薬品洗浄サイクル、循環20分→浸漬20分→循環20分→フラッシングにて膜の運転圧力は、ほぼ初期値に戻り膜性能を回復できた。また、原水水質の悪化等の原因により設定以上の汚れが膜に付着した場合でも、薬品洗浄時間の延長や2回洗浄により膜性能は回復することが確認できた。

4.3.5 濃縮水循環効果の確認

本実験設備に採用した膜エレメントはスパイラル型であり、クロスフロー過方式を採用している。このろ過法は、原水の全量をろ過せず一部を膜面垂直方向に流し、原水側膜面の乱流効果により汚れの蓄積を防ぐ方法である。よって、膜性能を安定して維持するためには、膜面を流れる水量、つまり濃縮水量を確保する必要がある。膜メーカーでは、この濃縮水量の最低値を8インチエレメントで、45(L/min)と定めている。RUN2では、この濃縮水循環量を変え、透過実験を行い濃縮水循環量(膜面の乱流)が膜性能に与える影響を確認した。実験は、濃縮水の循環量3ケースで実施した。実験条件を表7に示す。ここで、ケース2がRUN1の条件である。このケース2を基準と考え、濃縮水循環量を増やせば、圧力損失により若干運転圧力は上昇するが膜の性能低下速度が遅くなり、逆に循環量を減らせば、運転圧力は若干低下するが膜性能低下が進む傾向にあった。この結果、運転コストを考慮しできるだけ少ない循環水量で膜性能を設計値に保つためには、ケース2の条件が適正であると考えられる。

表7 濃縮水循環量

CASE	濃縮水返送量 m^3/d	最低濃縮水量 m^3/d (L/min)
1	70	86.4 (60)
2	36	68.6 (47)
3	0	49.9 (34)

4.3.6 高負荷運転

RUN3は、使用膜本数を8インチ×15本から12本に変更し、膜面積負荷を上げ同水量を処理した結果である。1か月運転で膜の性能は初期値より約30%程度低下するが、安定した処理が可能であることが確認できた。この運転を適用する場合は、膜の汚れが設計運転条件よりも増加するため、膜の性能を回復するために、薬品洗浄時間を延長する必要があると考えられる。

4.3.7 膜配列計算プログラムの適正確認

基礎実験結果に基づき開発した膜配列計算プログラムにより、実証実験の運転状況を解析した結果を図12に示す。運転圧力、除去率等の計算結果と実証実験運転結果はほぼ一致しており、下水処理における膜の配列計算用として、本プログラムが有効であることを確認できた。

```

HIFON STEEL CORPORATION RO SYSTEM ANALYSIS (OCT 93 VERSION)
(50 MEMBERS TYPE:WTR-TDSF SERIES)
DATE: 94/01/22
ANALYZED BY: T. KUBOTA
PREPARED FOR: 95-G1300
FEED WATER: SEWAGE
PURPOSE: DESIGN

***** INITIAL CONDITIONS *****
FEED WATER= 160 [m3/day], FEED WATER TDS= 100 [mg/L]
RO PERMEATE= 210 [m3/day], RO PERMEATE TDS= 150 [mg/L]
RECOVERY= 80.76% [%], REJECTION= 39 [%]
TDS= 15 [mg/L]
MIX BRINE FLOW= 14.8 [m3/day]

***** RO SYSTEM *****
RO ELEMENT SIZE: 8 INCH DIAMETER
RO SYSTEM CONFIGURATION: 1 VESSEL (5) (5 ELEMENTS) -> 1 VESSEL (5) (5 ELEMENTS)
RO ELEMENT TOTAL NUMBER= 11

***** COMPUTED RESULTS *****
NECESSARY RAW WATER QUANTITY= 260 [m3/day]
RAW WATER QUANTITY DIFFERENCE= 0 [m3/day]
RO PERMEATE= 210.014 [m3/day]
RECOVERY= 80.77% [%]
RO PERMEATE TDS= 216.771 [mg/L]
RO PERMEATE REJECTION= 66.64% [%]
FEED PRESSURE= 8.7400 [kg/cm2]
BRINE RETURN= 34 [m3/day]
BRINE TDS= 1894.23 [kg/cm2]
MINIMUM BRINE FLOW= 87.8481 [m3/day]
TOTAL RO ELEMENT PERMEATE LOAD= .50616 [m3/day]

STAGE EL. NO. FEED PERMEATE REC
[m3/day] [kg/cm2] [mg/L] [%]
1 1 141.80 8.74 238.18 16.57 155.25 13.3
1 2 132.43 8.35 203.52 16.97 142.55 13.9
1 3 113.46 8.01 187.44 16.54 145.25 14.1
1 4 97.42 7.68 163.87 15.19 150.24 15.8
1 5 82.23 7.39 151.93 14.59 158.16 17.5
TOTAL 78.15 169.65 59.5

<1st STAGE> PERMEATE TOTAL QUANTITY= 156.304 [m3/day]
BRINE QUANTITY/VESSEL= 97.8481 [m3/day]
BRINE TDS= 1185.06 [mg/L]

STAGE EL. NO. FEED PERMEATE REC
[m3/day] [kg/cm2] [mg/L] [%] DO
2 1 133.50 8.57 184.04 12.25 216.78 9.0
2 2 125.50 8.20 171.51 11.21 221.82 9.1
2 3 112.19 7.85 156.59 10.28 230.10 9.2
2 4 102.91 7.53 1476.15 9.42 404.85 9.2
2 5 92.59 7.25 1576.53 8.61 411.91 9.3
TOTAL 51.72 181.91 10.1

<2nd STAGE> PERMEATE TOTAL QUANTITY= 51.7205 [m3/day]
BRINE QUANTITY/VESSEL= 13.9757 [m3/day]
BRINE TDS= 1534.31 [mg/L]

```

図12 膜配列計算プログラムの計算結果

4.4 処理水質の検討

実験期間中の水質分析結果の平均値を表8に示す。逆浸透膜処理によれば、SSはほぼ0となり、有機物指標のCOD、BOD等も高い除去率が得られた。富栄養化指標では、リンの除去率は高く藻類の発生限界値である0.01(mg/L)以下まで除去できた。しかし、窒素除去率は低い傾向にあった。これは、処理コストの低減を目指し、本実験には低圧で多量の処理水が得られるルーズ逆浸透膜(ナノフィルトレーション膜)を適用したためである。

処理水の池やせせらぎ等の親水用途への適用を考える場合、藻類の発生は重要な検討要素となる。図13に藻類増殖能力(AGP)の試験結果を示す。試験はクロレラを用いて実施し、20℃、4000ルクスで14日間培養した後のSS乾燥重量を測定した。二次処理水のAGP値は100以上であったが、逆浸透膜処理水はほぼ0まで低下した。写真1に、実際に実証実験設備内に設置した処理水評価設備による藻類の発生状況を、図14に藻類付着量測定結果を示す。この結果、逆浸透膜処理水には、ほとんど藻類が発生しないことが確認できた。

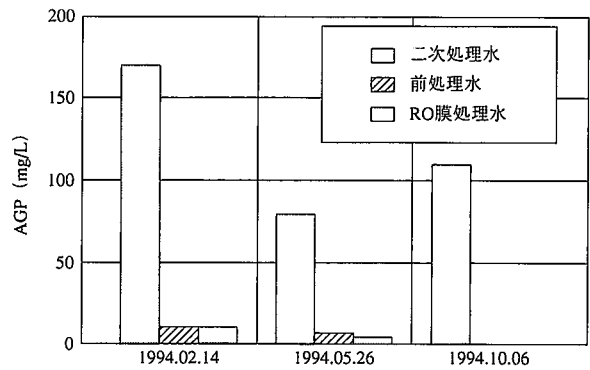


図13 各処理水のAGP

表8 実証実験における平均処理水質

指標	項目	単位	下水二次処理水	前処理水	RO膜処理水	RO膜除去率 [%]	水道水質基準*2	工業用水標準水質	親水用水目標値*6
固形物指標	SS	(mg/L)	5.2	3.6	<0.4	—	—	—	—
	TDS	(mg/L)	350	390	230	41	<500*3	<250	—
有機物指標	COD - Mn	(mg/L)	12	9	2.9	68	<10*4	—	—
	BOD*1	(mg/L)	3.3	1.6	0.73	53	—	—	<3
	TOC	(mg/L)	12	7.3	0.36	95	—	—	—
富栄養化指標	T - P	(mg/L)	0.7	0.03	<0.01	—	—	—	—
	T - N	(mg/L)	22	25	17	34	—	—	—
	NH ₃ - N	(mg/L)	20	20	13	36	—	—	—
	NO ₂ - N	(mg/L)	0.7	2	2	—	<10	—	—
	NO ₃ - N	(mg/L)	1.1	1.3	1.4	—	<10	—	—
	pH	(—)	7.3	7	6.8	—	5.8~8.6	6.5~8.0	5.8~8.6
無機物指標	M-アルカリ度	(mg/L)	150	120	66	44	—	<75	—
	電気伝導度	(μ S/cm)	722	809	490	39	—	—	—
	Na	(mg/L)	67	75	50	33	<200	—	—
	Ca	(mg/L)	26	28	11	61	<300*5	<120	—
	Cl	(mg/L)	85	120	93	22	<200	<80	—
	SO ₄	(mg/L)	46	59	4.5	92	—	—	—
	Si	(mg/L)	12	10	8.9	13	—	—	—
	Fe	(mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	—	<0.3	<0.3	—
	Mn	(mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	—	<0.05	—	—
	Al	(mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	—	—	—	—
一般細菌			—	100	0	100	100mL以下	—	—
大腸菌			—	0	0	100	検出されないこと	—	<50個/100mL

*1ATU - BOD, *21983.8.31 厚生省令第5号, *3蒸発残留物, *4過マンガン酸カリウム消費量, *5総硬度, *6建設省高度処理会議「下水処理水の背景・親水利用水質検討マニュアル(案)」, 1990

以上により、逆浸透膜処理水は、親水、工業用水等の高品位な用途に再利用可能であり、水質的には、飲料用水への適用も可能である。

4.5 運転費実績

実験中の1か月を抜き出し、運転費を算出した結果を表9に示す。運転コストは、膜交換費(交換頻度は推定)を含めて64.5(円/㎥)であった。ここで、電気費には、実験用ハウスの光熱費も含んだ。また、人件費は、日常点検、薬品洗浄、機器整備等の保守・点検に必要な工数として、52.4(人日/年)を算定したが、今回はコスト対象外とした。

流速：5～10 [cm/s]
残留塩素：0.1～0.3 [ppm]

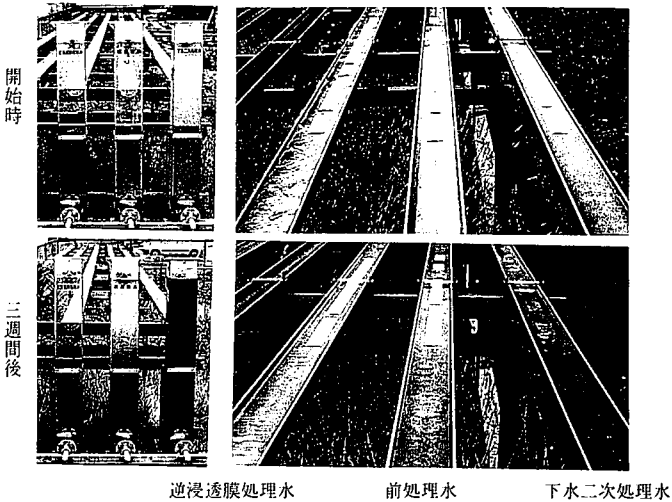


写真1 処理水評価設備による藻類の発生状況

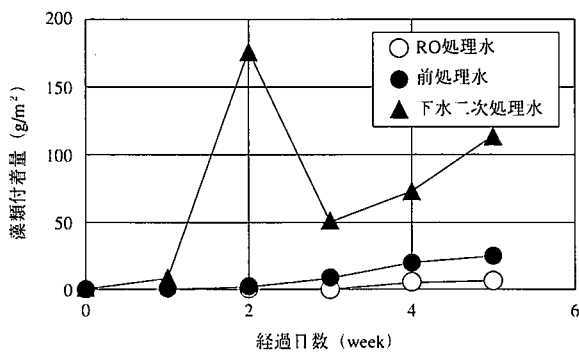


図14 藻類付着量変化

表9 実証実験運転費実績

項目	実証実験運転費 (稼働率93.5%)	備考
電気	26.9 (円/㎥)	制御盤, 光熱費含む
使用薬品	PAC	11.1 (円/㎥)
	NaOCl 10%	5.0 (円/㎥)
	酸	0.4 (円/㎥)
	EDTA	0.2 (円/㎥)
消耗品	4.1 (円/㎥)	保安フィルタ, 駆動部潤滑油等
逆浸透膜交換費	16.7 (円/㎥)	推定値, 寿命5年
合計	64.5 (円/㎥)	

5. 試設計による経済性の検討

設備費、運転費等の経済性比較検討のために以下の条件で試設計を実施した。

- (1) 原水 : 標準的な下水二次処理水
- (2) 処理水量 : (i) 100m³/d
(ii) 200m³/d
(iii) 500m³/d
(iv) 1 000m³/d
- (3) 前処理方式 : (i) 凝集沈殿と砂ろ過
(ii) 凝集加圧浮上と砂ろ過
(iii) 凝集ろ過と砂ろ過
(iv) MF膜
- (4) 逆浸透膜部回収率 : 80%

試設計は、逆浸透膜部を水量別の同仕様とし、前処理設備はそれぞれの方法により設計を行った。また、処理水質的には劣るが下水処理用に限らず各方面で適用されている凝集沈殿+急速ろ過+活性炭吸着法を従来法として本検討の比較対象とした。

5.1 設備費

従来法の設備費は、以下の計算式により算出した。

$$(599.1 \times Q^{0.649} - 299.2 \times Q^{0.622}) \times (114.8/100.9)^{0.71}$$

$$= (\text{標準活性汚泥法} + \text{従来法} - \text{標準活性汚泥法}) \times \text{デフレクタ}$$

ここで、単位：百万円，Q：千m³/d(日最大)

図15に、試設計に基づく設備費試算結果を示す。逆浸透膜処理法は、従来法と比較すると約2倍の設備費となる。これは、逆浸透膜処理設備構成が従来法と同程度の前処理設備に加え逆浸透膜処理設備を必要とするためである。今後、膜メーカーの技術開発や設備普及による膜需要の拡大により膜単価が低減すれば、設備費低下が可能である。

5.2 運転費

従来法の運転費は、以下の計算式により算出した。

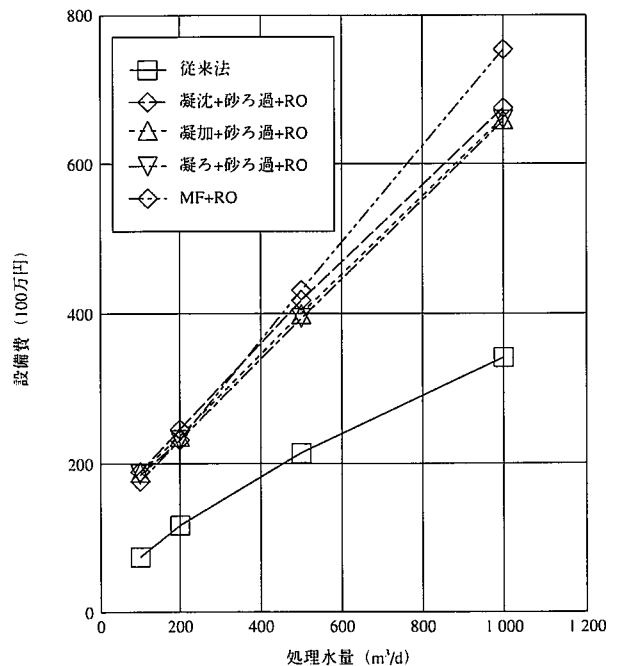


図15 設備費検討結果

$$(15.35 \times Q^{0.942} - 4.23 \times Q^{0.848}) \times (114.8/100.9)^{6.7}$$

= (標準活性汚泥法+従来法-標準活性汚泥法) × デフレータ

ここで、単位：百万円，Q：千m³/d(日最大)，人件費除く

図16に結果を示す。逆浸透膜処理設備の運転費は、処理水量の増加に伴い低下する傾向がある。しかし、従来法の運転費と比較すれば処理水量1000(m³/d)の場合でも約1.4倍程度となる。しかし、逆浸透膜処理水を飲料水以外の水道水の代替として使用するとすれば、設備償却費等を含む運転費を考慮しても十分に安価であると考えられる。

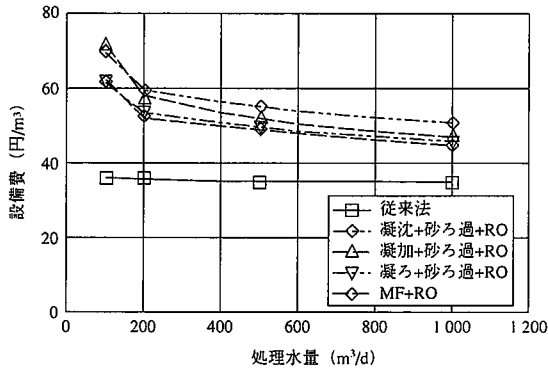


図 16 運転費検討結果

6. 結 言

下水処理水の再利用を目的とした逆浸透膜処理設備の開発成果について述べた。逆浸透膜処理は水道水に匹敵する水質が得られ、せ

せらぎ、噴水用水といった親水等の高品位な用途へ再利用可能である。また、実設備規模の実験により、運転・制御の安定性、処理水質の安定性を実証できた。運転費も水道水と比較すれば十分安価であることが確認できた。

今後は、本処理方式による下水高度処理の実用化の推進に取り組んでいく所存である。本設備の普及が下水処理場やその周辺地域の水環境保全や新たなうおいある水環境造業につながることを期待する。

謝 辞

共同研究者としてご指導いただいた、日本下水道事業団 技術開発部 総括主任研究員 高橋正策氏、東京都下水道局 東部第二管理事務所 葛西処理場長 竹島正氏(元 日本下水道事業団 技術開発部 総括主任研究員)、埼玉県下水道公社 荒川左岸北部支社 水質管理課長 石山栄一氏(元 日本下水道事業団 技術開発部 主任研究員)の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局水質管理課：下水道協会誌. 32(392), 1995/12
- 2) 當間久夫 ほか：新日鉄技報. (350), 94 (1993)
- 3) 日本下水道事業団 技術開発部報告書 94-007 膜分離技術の下水処理への適用性に関する調査
- 4) 建設省高度処理会議：下水処理水の修景・親水利用マニュアル(案)
- 5) N社：逆浸透膜カタログ
- 6) 建設省土木研究下水道三次処理研究所 1988：下水道高度処理計画及び高度処理導入プログラムに関する報告書 二次処理水質の評価、高度処理費用、高度処理導入の考え方。
- 7) (社)日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説. 1993