

逆浸透膜による下水の超高度処理

Advanced Waste Water Treatment by Reverse Osmosis Membrane

當 間 久 夫^{*(1)} 柴 田 敏 幸^{*(2)} 近 藤 三 雄^{*(3)} 澤 谷 幸 一^{*(3)}
Hisao TOMA Toshiyuki SHIBATA Mitsuo KONDO Koichi SAWA YA
 末 広 章 一^{*(4)} 松 本 英 行^{*(4)}
Shoichi SUEHIRO Hideyuki MATSUMOTO

抄 録

下水処理水の多様かつ高度な再利用の更なる促進のためには水質の向上が必須である。そこであらゆる水質成分の除去性能が優れている逆浸透膜法の下水超高度処理への実用化を目指し、基礎実験を行った。前処理部に凝集沈澱砂ろ過法を採用し、逆浸透膜の基本特性の調査、透過水量負荷の決定等を行い、安定した長期運転を実現するための運転条件を把握した。膜処理水は親水をはじめ広範囲に再利用できる良好な水質であることを確認した。引き続き、実証実験により実用可能性調査を実施する。本システムは、処理水の再利用用途が広いことから下水の超高度処理法として適当であり、将来の水需要の逼迫への対策としても非常に有効であると考えられる。

Abstract

For further promotion of diverse, advanced reuse of treated waste water, the improvement of water quality is indispensable. Fundamental experiment has been conducted on the practical application of the reverse osmosis membrane system that can eliminate waste altogether, using the coagulating sedimentation and sand filtering method in the pretreatment section. The operating conditions necessary for realizing stable operation over a long time have been elucidated by investigating the fundamental characteristics of the reverse osmosis membrane and determining the amount of water treated per unit area, thus confirming that the water treated by this method is high in quality to permit its reuse for a variety of purposes, including the creation of a cleaner riverside environment. Following this experiment, feasibility studies will be made. As the water treated by the reverse osmosis membrane system is usable for various purposes, this system is suitable for advanced treatment of waste water and very effective as a means to cope with the future demand for water which is expected to become increasingly tight.

1. はじめに

生活水準の向上や産業の発展に伴い、日本の水需要は大きく増大しており、特に人口の集中した大都市圏においては、将来の水の逼迫が懸念されている。このような情勢の下、下水処理水は都市の身近な水資源として注目され、近年、環境(修景)用水、便所用水、雑用水等への再利用が進みつつある。

しかしながら、砂ろ過法等を中心とした従来レベルの高度処理水には、スライムや藻、泡の発生、機器配管類の腐食などの問題が生じ、用途によっては適当でない場合があることも報告¹⁾されている。そのため、再利用先は表 1²⁾ に示すよう比較的低級な用途に留まっており、下水再利用率も 1% に満たないのが現状となっている。従って今後、更なる下水処理水の多様かつ高度な再利用の促進のためには水質の向上が必須であり、従来の高度処理を超える“超”高度処理法の開発が求められているといえよう。

そのような超高度処理法として、あらゆる水質成分の除去性能が優れている逆浸透膜法が有望である。そこで、下水の逆浸透膜による超高度処理の実用化を目指し、調査、研究を行った。本稿は、逆浸透膜に求められる前処理法の検討、逆浸透膜の処理特性の把握及びその最適運転負荷の設定について報告した後、システム設計例として実証実験設備について紹介する。

なお本研究は、日本下水道事業団との共同研究として推進しているものである。共同研究期間は1990年12月から1994年3月までの3年3か月である。

2. 膜分離法の概要と膜の選定

2.1 膜分離法の概要

2.1.1 膜分離法の特徴

膜分離法とは、緻密な細孔を有する高分子製の膜を用い、圧力によって物質を分離する一種のろ過ともいえる方法である。この内、

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 技術開発部 掛長

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 技術開発部

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 水道・水処理施設部 部長代理

*⁽⁴⁾ 鉄構海洋事業部 水道・水処理施設部 掛長

表 1 下水処理水の処理場外再利用の事例 (1990年度)

再利用用途	処理場数	再利用量 (10 ³ m ³ /y)	代 表 事 例		
			処 理 場 名	再利用量 (m ³ /d)	利 用 先
水洗便所用水	12	1,294	東京都落合処理場	2,429	新宿副都心ビル
洗浄用水	18	5,881	東京都芝浦処理場	402	J R新幹線
工業用水	3	17,537	名古屋市千年処理場	19,109	名古屋市水道局
冷却用水	16	7,506	北九州市皇后崎処理場	723	ごみ焼却工場
希釈用水	17	18,674	船橋市西浦処理場	4,715	し尿処理場
農業用水	6	8,430	熊本市蓮台寺処理場	17,117	上地改良区水利組合
環境用水	19	28,796	東京都多摩川流域 多摩川上流処理場	34,310	野火止用水, 玉川上水, 千川上水
植樹帯散水	10	273	芦屋市芦屋処理場	450	都市公園
融雪用水	10	3,157	青森市八重田処理場	19,800	街路
計	(111)* 96	約0.92億 m ³	*同一処理場で複数の用途に利用しているため		

逆浸透膜は元来、海水淡水化を主目的として開発、実用化されてきたが、近年では超純水製造への応用が著しい。

膜分離法の特徴は、

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

これらの特徴から、膜分離法は従来法に替わって、今後の都市型の高度処理法として大きな可能性を持っていると考えられる。

2.1.2 膜の種類

膜はその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)の3種に大別される。下水の高度処理に適用する場合、運転圧力は精密ろ過膜、限外ろ過膜では1~5kgf/cm²、逆浸透膜では5~15kgf/cm²程度である。図1³⁾に膜種類による除去対象物質について示す。

2.1.3 膜の形式

各種の方法で製造された膜を実用できる構造にしたものをモジュールという。このモジュールの形式には大きく4通りあり、それぞれ目的、用途に合わせて使い分けられている。膜モジュール形式の特徴比較について表2にまとめて示す。

2.2 膜の選定

下水の超高度処理に使用する膜の選定においては、

- (1)再利用上、問題の少ない透過水質
- (2)コンパクトで膜汚染に強い構造

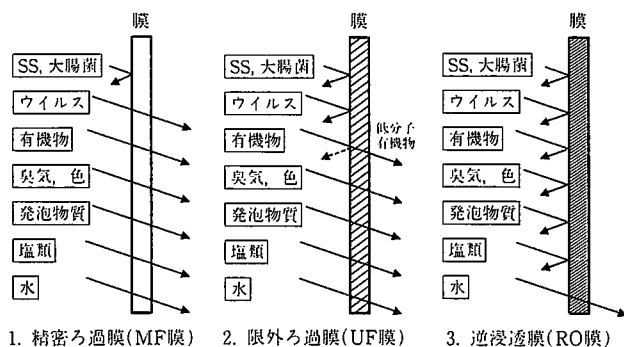


図 1 膜種類による除去対象物質概念図

表 2 膜モジュール形式の特徴比較

膜型式	平 型	チューブ型	中空糸型	スパイラル型
膜コスト (¥/m ²)	× (高い)	× (高い)	△ (やや安い)	○ (安い)
汚れ耐性	△ (ややあり)	○ (あり)	× (なし)	△ (ややあり)
洗浄の効果	△	○ (容易)	× (悪い)	△
前処理	△ (必要)	○ (不要)	× (厳密に必要)	△ (必要)
スペースリット	△	× (最低)	◎ (最高)	○ (高)
モジュール当たり透過水量	△	× (最低)	◎ (最高)	○ (高)
互換性	× (無)	× (無)	× (無)	○ (有)
エレメント交換難易度	△	△	△	○ (簡単)
実績 (ROでの)	× (稀少)	△ (少)	○ (多)	○ (最多)
総合評価	×	×	△	○
コメント	平膜型 RO はメーカーも少なく、一般性がない	汚れに強いが大量の水を処理しなければならない下水高度処理には不適當である	スペースリットは良いが、膜が汚れやすいのが難点	最も多く使用されており、種類も多い。互換性があり入替えできる長所あり

○(安い, 良い, 効果大など長所大) → ×(長所小)

- (3)低圧力で多量の透過水量等を考慮した。

ここで、再利用用途を人間が中に入ったり触れたりして遊ぶことのできる池、せせらぎ等に使用する“親水”と想定すると、(1)の条件は、処理水質が水道水レベルになること、細菌やウイルスが除去されること、藻が生じないこと、臭気がないこと等となる。特に発藻に関わる窒素とリンのうち、より除去し易いリンの濃度が藻の発生限界以下(≤0.01mg/l)となることを考慮すると、膜種類としては除去率70%程度以上の逆浸透膜を選択する必要があると判断された。将来的な再利用用途の広がり可能性からも逆浸透膜の適用がふさわしい。

又、(2)より膜形式はスパイラル型が適當であると考えられた。図

2) にスパイラル型膜モジュールの構造を示す。

更に(3)に関するスパイラル型逆浸透膜のカタログ調査を実施し、本研究に用いる膜を選定することとした。その調査結果を図3に示す。これより逆浸透膜の除去率と透過水量は反比例する一般特性があることがわかる。本研究に適切な逆浸透膜は数種が候補としてあげられるが、今回は、まずN社製NTR-729HF-S4逆浸透膜を採用

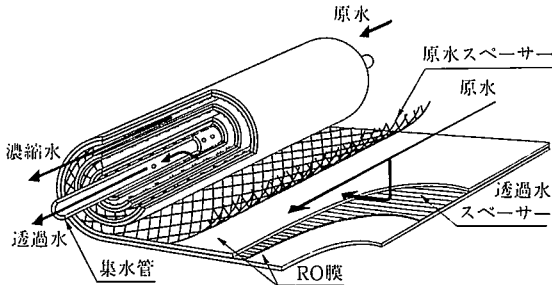


図2 スパイラル型膜モジュールの構造

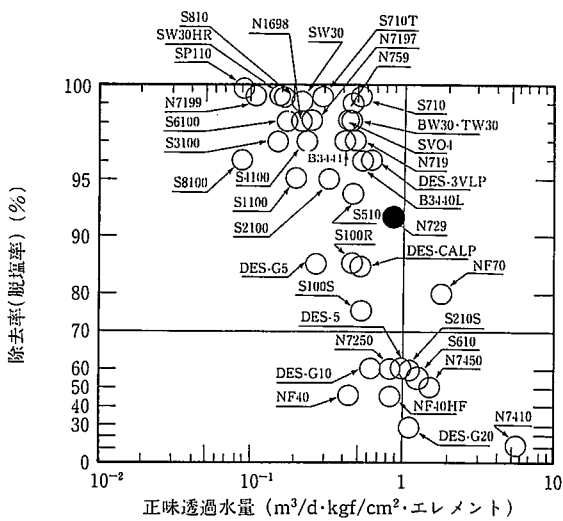


図3 各種スパイラル型逆浸透膜の性能 (4in径逆浸透膜、型番は略して記入)

した。この膜の仕様を表3に示す。

3. 基礎実験

逆浸透膜へ通水するには、膜の汚染による性能劣化を防ぐため前処理によって原水中の汚濁成分をある程度除去する必要がある。そこで、逆浸透膜の前処理法として現在適当かつ標準的^{5,6)}と評価される凝集沈殿砂ろ過法を採用し、基礎実験を行うことにした。

3.1 基礎実験設備の概要

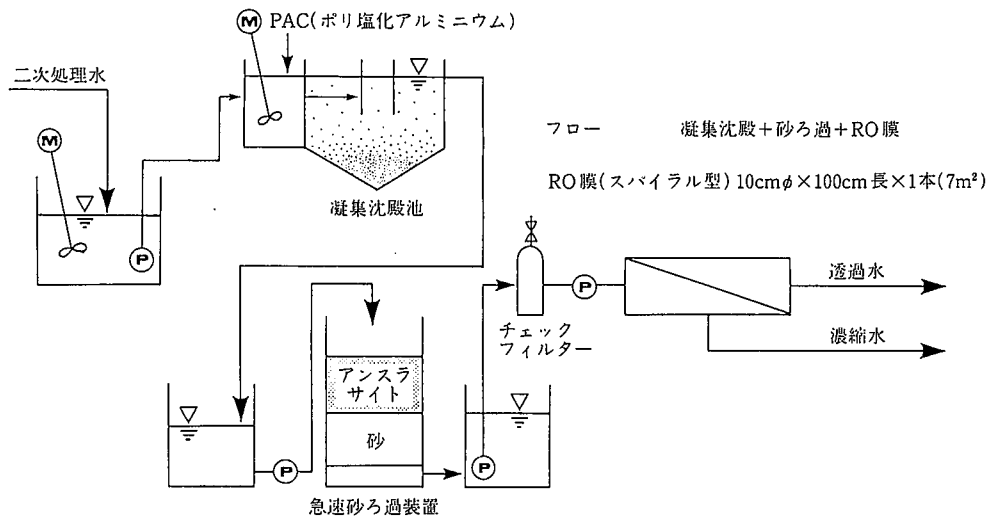
基礎実験装置のフローを図4に示す。フローは基本的に前処理部の凝集沈殿、砂ろ過と逆浸透膜部とに大別できる。

まず、凝集槽において下水処理水に凝集剤を添加後、攪拌して汚濁分をフロック化し、沈殿池でそれを沈降分離させる。凝集槽の滞留時間は10min、攪拌回転数は80rpm、沈殿池の水面積負荷は13m³/m²・dである。ついで沈殿池上澄水の砂ろ過を行い、残留する微小フロックを除去して前処理を完了する。砂ろ過のろ過速度(LV)は210m/dで、形式は重力式である。

次に、この前処理水を保安用のチェックフィルター(5μm)を通し

表3 逆浸透膜の仕様

型番	NTR-729HF-S4	
形式	スパイラル	
寸法, 膜面積	100mmφ×1000mm長さ, 7m² (推定)	
膜材質	ポリビニールアルコール系複合	
除去率*	92%	
透過水量*	8.0m³/d (平均値)	
*の測定条件	圧力	10kgf/cm²
	水温	25°C
	原水濃度	1500ppm as NaCl
	回収率	15~25%
	pH	6~7
使用条件	圧力	<30kgf/cm²
	水温	<40°C (洗浄時<60°C)
	残留塩素	<1.0ppm (洗浄時<10ppm)
	Fouling index	<4
	pH	2~8 (洗浄時1~10)



M: モーター, P: ポンプ

図4 基礎実験設備概略フロー

た後、高圧ポンプにより昇圧し、逆浸透膜へ供給する。ここで前処理水の一部が逆浸透膜を透過し、処理水(透過水)となって得られ、残りは濃縮水となり、放流される。使用逆浸透膜本数は1本である。

処理規模は前処理で約40m³/d、逆浸透膜処理で約5m³/dである。

3.2 調査実験項目

3.2.1 前処理

(1)凝集沈殿の最適運転条件の策定

(2)砂ろ過の最適運転条件の策定

3.2.2 逆浸透膜

(1)基本特性確認

(2)最適な透過水量負荷の設定

(3)薬品洗浄法の選定

(4)処理水(透過水)水質確認

4. 基礎実験結果

4.1 前処理

一般に、逆浸透膜への給水水質条件は Fouling Index (FI) *1 < 4 であるといわれている。本実験では、まず凝集沈殿砂ろ過の前処理で安定して FI < 4 の処理水が得られる前処理運転条件について調査した。

4.1.1 凝集沈殿の最適運転条件の策定

ジャーテストにより下水の凝集に最適な凝集剤の選定を行い、PAC とアニオン系高分子凝集剤を選定した。その凝集剤を用いて、基礎実験装置を運転し、実際の処理状況を確認した。

その結果、高分子凝集剤は確かにフロックの大きさ、沈降速度に効果が認められるが、上澄水に残留する高分子凝集剤が FI に悪影響を与えるため、フロック沈殿促進を損なわない限りその添加量を制限する必要があることが判明した。本実験装置では沈殿池の水面積負荷も比較的高くないことから、高分子凝集剤は未注入で良好な凝集と沈降分離が達成できた。

4.1.2 砂ろ過の最適運転条件の策定

砂ろ過の処理性能には、ろ材の層厚(L)/調和平均径(D)値(多層ろ過の場合は各ろ材のL/Dの総和値)とLV(ろ過速度)が重要なファクターであるといわれている⁷⁾。そこで前記の凝集沈殿処理水(平均SS=5mg/l)を用い、安定してろ過水のFI < 4を保つL/DとLVの関係を調査した。

その結果、例えばLV=210m/dの場合、24時間(逆洗1回/d)でろ過水のFI < 4を保つにはL/D ≧ 約1700が必要であった。即ち、砂ろ過装置の設計基準として従来参照されてきた水道施設設計指針・解説や急速ろ過設計マニュアル等に示されている標準的ろ材構成より、L/Dを大きくする必要があることが判明した。なお、本実験では砂ろ過装置の構造制約からL/D=1400とせざるを得ないため、逆洗を2回/dと設定し、FI < 4のろ過水を安定して得ることとした。一方、逆洗方法については、水道施設設計指針・解説に示されている空気

*1 FI (Fouling Index)とは、SDI (Silt Density Index)とも呼ばれる低濁度領域の濁質指標で、0(最良)~6.7(最悪)の値をとる。試験水を2.1kgf/cm²の圧力でミリポア社製FI測定用フィルター(HAWP)、孔径0.45μm、47mmφによってろ過を行い、1)ろ過開始から500mlろ過する時間t₀、2)ろ過開始から15分経過後、500mlろ過する時間t₁₅を測定し、

$$FI = 100 \times (1 - t_0/t_{15})/15$$

により計算する。膜メーカーでは逆浸透膜供給水規準としてFI < 4を求めている。ちなみに、水道水のFIは5.5程度であった。

と水を用いた標準的な方法で良好な洗浄効果が得られた。

以上、設定した逆浸透膜の前処理運転条件を表4に示す。

4.2 逆浸透膜基本特性確認

前述の条件でFI < 4に良好に処理された前処理水を用い、水温-透過水量、運転圧力-透過水量、運転圧力-透過水質の関係を実験により求め、膜メーカー測定値(25°C、0.15% NaCl 純水水溶液による)と比較し、膜の基本的性能の確認を行った。

4.2.1 圧力と透過水量の関係 (図5参照)

透過水量は運転圧力に比例している。又、同一圧力でも、水温が上昇すると透過水量は増加する。膜メーカー測定値と比べると同一圧力でもより多量な透過水量が得られることになるが、この主たる原因は膜メーカー試験水の濃度(TDS=1500mg/l)が本実験での前処理水の濃度(平均TDS=447mg/l)に比べ3倍程度濃いため、両者間の浸透圧差を考慮すれば、膜メーカー測定値と今回の実験値はほぼ同等と考えられる。

4.2.2 水温と透過係数の関係 (図6参照)

図5を水温別に整理し直し、透過係数(m³/m²・d・kgf/cm²)の変化を見た。その結果、この実験の水温範囲では透過係数は水温に比例することがわかった。

4.2.3 圧力と除去率の関係 (図7参照)

前処理水と透過水の電導度から逆浸透膜の除去率を求めた。その結果図7に示すように、除去率は運転圧力が上がるにつれて向上するが、水温が上昇する場合には、除去率は若干低下することが判明

表4 前処理運転条件

凝集沈殿	処理量	40.8m ³ /d
	凝集薬品	PAC=20mg/l as Al ₂ O ₃
	水面積負荷	13m ³ /m ² ・d
	備考	NaOCl注入(5mg/l) 遊離塩素0.2~0.5ppmに調整
砂ろ過	処理量	40.8m ³ /d
	ろ過速度	210m ³ /m ² ・d
	逆洗頻度	2回/d
チフエックス	精度	5μm(公称)
	材質	ポリプロピレン
クタ	備考	全量ろ過、糸巻タイプ 65mmφ×750mmφ×3本

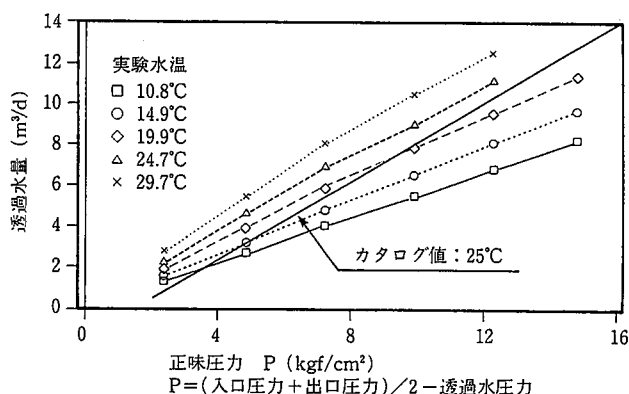


図5 圧力と透過水量の関係

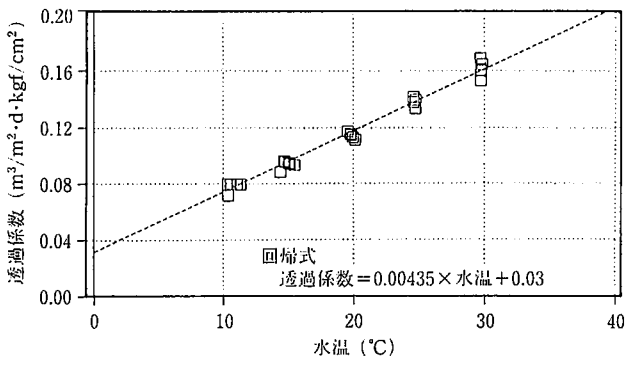


図 6 水温と透過係数の関係

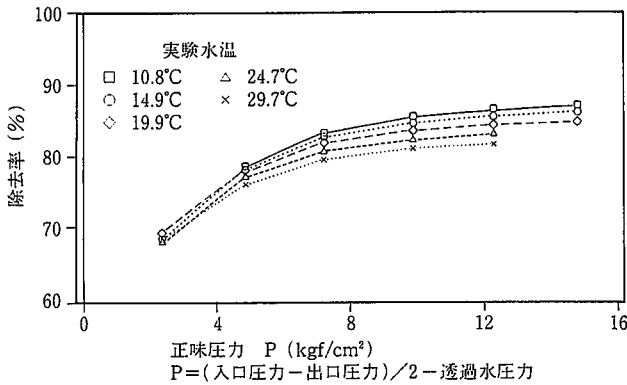


図 7 圧力と除去率の関係

した。

以上4.2.1~4.2.3の逆浸透膜の基本特性は、次に示す溶解-拡散方程式^{8,9)}により説明することができる。

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P - \sigma \cdot \Delta \pi) \quad \dots(1)$$

$$J_s = C_s \cdot (1 - \sigma) \cdot J_v + \omega \cdot \Delta \pi \quad \dots(2)$$

ここで、 J_v : 透過水量 ($m^3/m^2 \cdot d$)、 L_p : 透過係数 ($m^3/m^2 \cdot d \cdot kgf/cm^2$)、 ΔP : 膜に掛かる圧力差 (kgf/cm^2)、 σ : 反射係数 (1: 完全逆浸透膜 \sim 0: 逆浸透性無し)、 $\Delta \pi$: 浸透圧差 (kgf/cm^2)、 J_s : 溶質流束 ($mol/m^2 \cdot d$)、 C_s : 原水と透過水の濃度対数平均値、 ω : 溶質の膜透過性 ($mol/m^2 \cdot d \cdot kgf/cm^2$)

まず、逆浸透膜では σ がほぼ1であるため、溶解-拡散方程式(1)は以下のように書き換えられる。

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad \dots(3)$$

ここで、 L_p は図6より

$$L_p = 0.004351 \cdot t + 0.0300 \quad \dots(4)$$

t : 水温 ($^{\circ}C$)

の関係がある。(3)、(4)式より、透過水量が正味の運転圧力(運転圧力から浸透圧を差し引いた値)及び水温に比例する現象が説明できる。一方、より適切に膜性能変化を評価するためには異なる水温の膜実験データを、ある一定水温(通例 $25^{\circ}C$)に温度標準化が必要があるが、(4)式により可能となる。

次に、除去率は溶質が膜を透過していく量: 溶質流速と透過水量との関係から決まる。この溶質流速についての現象論方程式(2)も、 σ がほぼ1であることから、

$$J_s = \omega \cdot \Delta \pi \quad \dots(5)$$

と書き換えられる。これは透過水側に抜けていく溶質量が運転圧力に無関係な一定値になることを表している。これより、運転圧力を

上げて透過水量(溶質を含まない)を増加させると、膜を透過した一定量の溶質は希薄されていくことになり、見掛け上の除去率が上昇する。これが、運転圧力が上昇すると除去率が向上する理由である。

又、水の浸透圧は水温に比例する(van't Hoffの定理)。これより、水温が上昇すると本式における浸透圧差 $\Delta \pi$ も拡大し、透過側に抜けていく溶質量が大きくなる。このことから水温が上昇すると除去率が低下すると説明できよう。但し、水温上昇によって透過水量も増加するため、水温による除去率の変化は余り大きくはない。

4.3 逆浸透膜の最適透過水量負荷の設定

単位膜面積当たりの透過水量負荷が高ければ膜本数は少なく済むが、膜汚染による透過係数の低下が速く、薬品洗浄頻度が増えると考えられる。又、逆に負荷が低いと洗浄頻度は低下するが、膜本数が膨大になろう。従って設備設計上、この負荷をどの値に設定するかは非常に重要なファクターであるといえる。

そこで、透過水量負荷を変えて連続運転し、運転可能時間(透過係数が初期値から20%低下するまでの時間と仮設定)との関係を求めた。図8に運転可能時間と透過水量負荷の関係を示す。運転可能時間が1か月になる負荷を最適とすれば、凝集沈殿砂ろ過を前処理(前処理水FI<4)とした場合の最適透過水量負荷は $0.6 (m^3/m^2 \cdot d)$ 前後であると考えられた。

4.4 長期連続運転

以上の結果に基づき、透過水量負荷 $0.6 (m^3/m^2 \cdot d)$ で長期連続運転を実施した。図9に示すように、この負荷において透過係数の低下は1か月で20%程度となる運転が可能であることが実証できた。

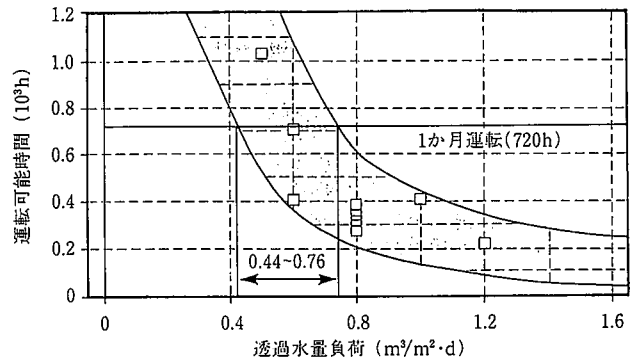


図 8 透過水量負荷と運転可能時間の関係

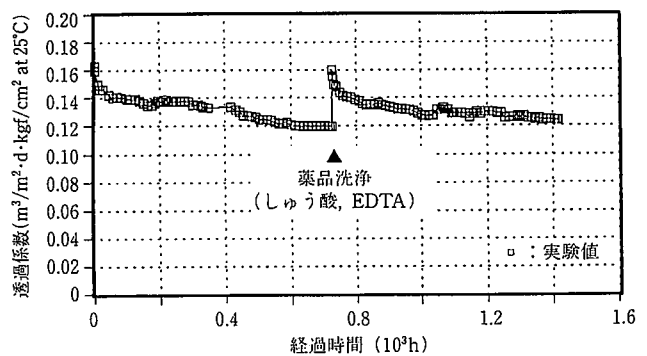


図 9 長期連続運転結果

4.5 処理水質結果

連続実験期間中の水質分析結果を表5に示す。透過水は水道水に匹敵する良水質であり、親水用途のみならず、広範囲の用途に再利用可能であることが確認できた。栄養塩類の内、逆浸透膜の窒素除去率は低かったが、りんが良く除去されているため、発藻はほぼ生じないと考えられる。実際、透過水の放置発藻実験を数か月行ったが、藻はほとんど見られなかった。

4.6 洗浄薬品の選定

適宜、薬品洗浄を実施し、その効果を確認した。洗浄方法は、循環(20分)→浸漬(20分)→循環(20分)を基本サイクルとしたが、くえん酸とアンモニア混合(pH=3水溶液)、しゅう酸(pH=2水溶液)、EDTA(エチレンジアミン4酢酸)(pH=10水溶液)、塩酸(pH=2水溶液)、かせいソーダ(pH=10水溶液)の内、単一で最も洗浄復帰度が高い薬品はEDTAであった。実用的にはしゅう酸洗浄→EDTA洗浄の組み合わせが効果的であり、ほぼ100%の回復が見られた。なお、洗浄効果は運転開始時と洗浄後との透過係数の比で判断した。

5. 逆浸透膜による下水超高度処理設備設計例

～実証実験設備

5.1 逆浸透膜システム計算

以上の実験結果により、凝集沈澱砂ろ過法による前処理についての設計指針は得られたが、逆浸透膜については、1本だけの基本特性や運転条件が判明したにすぎない。実際のシステムでは、原水からの透過水の回収率を上げるために、多数の逆浸透膜をいわゆるクリスマスツリー状に配列^{*)}するため、その逆浸透膜集合体としての特性を明らかにする必要がある。そこで、膜の基本特性を数式化し、前段の膜から一本一本、順に計算することによって、全体シ

テムでの状態を推定するプログラムを開発した。

このプログラムは、与えられた原水量、原水濃度、回収率(透過水量)、水温等の条件の下、策定した膜配列における必要運転圧力、透過水濃度、圧損等を計算により求めるものである。計算結果が設計条件を満足するまで、膜配列を策定し直しては繰り返し当プログラムを走らせるトライアンドエラーにより、最適な配列を決定することができる。但し、計算結果はあくまで推定値であるため、その検証は次に紹介する実証実験により行う必要がある。図10に逆浸透膜システムの設計手順を示す。

5.2 設計例：実証実験設備

実際の設計例として、1993年4月より実施中の実証実験設備を紹介する。その目的は、長期に亘る逆浸透膜性能や薬品洗浄法の確認等の基礎実験結果の立証と同時に、実用規模としてのコストや保守等のフイジビリティの調査を行うことにある。又、この設備にはインバーターやタービン等の省エネルギー機器や計算機による遠隔データ自動管理装置を導入している。場所は千葉県印旛沼流域下水道花見川終末処理場内で、本設備の処理水は場内の池や水路に送水し、発藻や発泡などの親水としての実用上の評価も行う予定である。

この実証実験設備の仕様を表6に、フローを図11に、又、全景を写真1に示す。設置面積は6m×13mで、水槽類を地下に構築し、その上部に機器類を設置することにより設置投影面積は更に半減できる。

*1 クリスマスツリー配列とは、ある段の膜の濃縮水を次段の膜の供給水とするもので、後段になるに従い膜の本数が少なく配列される場合をいう。フローシート上、この配列がクリスマスツリーの形に似ているため、こう呼ばれるようになった。

表5 水質分析結果

(分析回数 N=18)

指標	項目	単位	二次下水 処理水	前処理水	透過水	除去率(%) 対前処理水	水道水質 基準*1	工業用水 標準水質	親水用水 目標値*5
感覚的 指標	外観	—	黄濁色	若干黄透明	無色透明	—	無色透明	—	—
	臭気	—	下水臭	弱下水臭	無臭	—	異常でない	—	不快でない
	色度	度	>20	5.6	<1	>95.0	<5	<20	<10
固形物 指標	濁度	度	4.54	0.13	0.02	84.6	<2	—	<5
	SS	mg/l	6.5	0.9	<0.1	>88.9	—	—	—
有機物 指標	TDS	mg/l	382	447	246	45.0	<500*2	<250	—
	CODMn	mg/l	9.2	4.5	<0.2	>95.6	<10*3	—	—
	BOD	mg/l	5.7	<1	<1	—	—	—	<3
富 栄養化 指標	TOC	mg/l	7.2	3.4	0.2	94.1	—	—	—
	T-P	mg/l	0.78	0.03	<0.01	>66.7	—	—	—
	T-N	mg/l	12.1	12.1	11.1	8.3	—	—	—
	NH ₃ -N	mg/l	0.5	0.57	0.3	47.4	—	—	—
無 機 物 指 標	NO ₂ -N	mg/l	0.11	<0.1	<0.1	—	<10	—	—
	NO ₃ -N	mg/l	10.2	10.6	10.4	1.9	<10	—	—
	pH	—	7.0	6.7	6.3	—	5.8~8.6	6.5~8.0	5.8~8.6
指 標	M-Alk	mg/l	53.1	24.2	14.9	38.4	—	<75	—
	Na	mg/l	55.0	65.3	39.2	40.0	—	—	—
	Ca	mg/l	64.8	65.4	24.4	62.7	<300*4	<120	—
	Cl	mg/l	65.1	102.5	58.3	43.1	<200	<80	—
	SO ₄	mg/l	55.5	59.8	<1.0	>98.3	—	—	—
	Si	mg/l	8.5	6.7	4.9	26.9	—	—	—
	Fe	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	—	<0.3	<0.3	—

*1 1983.8.31 厚生省令第56号, *2 蒸発残留物, *3 過マンガン酸カリウム消費量, *4 総硬度, *5 建設省高度処理会議「下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル(案)」, 1990

5.2.1 前処理

まず前処理は、基礎実験で採用した沈澱法に替えて、処理性能が同等以上でありながら設置面積が10分の1程度に省スペース化できる加圧浮上法(クロフタ式)を採用することとした。このクロフタ式加圧浮上装置は、浮上槽内の水の流れが生じない独自のゼロペロシティ機構を有し、汚濁質フロックを効率的に浮上させることができる。一方、砂ろ過については基礎実験で定めたる材構成、ろ過速度として設計した。

5.2.2 逆浸透膜システム

逆浸透膜の本数、配列は、前述のプログラムにより計算を行って運転圧力、透過水の濃度、透過水量負荷が適当であることを確認の

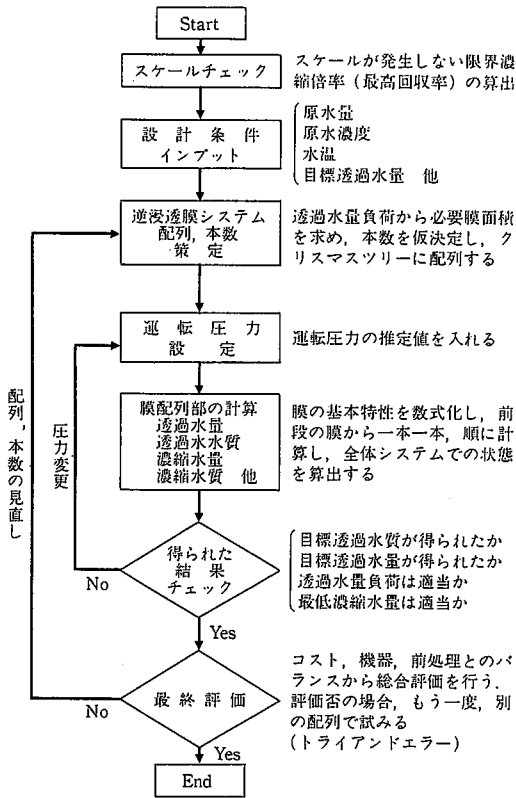


図 10 逆浸透膜システム設計手順

上、最適値として定めたものである。計算アウトプット例を図12に示す。本ケースの場合、濃縮水の一部をもどすことにより膜への供給水量を増加させ、膜モジュール内の流速をある一定の値以上に保つ(膜面で生じる濃度分極を最低限度に抑える)ことが必要である。なお逆浸透膜は、材質、構造は同一ではあるが、基礎実験で使用した直径4インチのものから大型タイプの直径8インチのものへと変更している。

5.2.3 運転コスト

前処理と逆浸透膜を含めた全体の運転コストを本実証実験設備で

表 6 実証実験設備主仕様

原水種類	下水二次処理水(塩素滅菌前)			
処理水質目標値	上水(飲料水)相当			
計画処理水址	前処理水量 : 260m ³ /d 逆浸透処理水量 : 210m ³ /d (回収率80%)			
水温	10~30°C (設計水温 : 15°C)			
設備設置面積	6m×13m			
実験場所	千葉県千葉市美浜区磯辺8丁目24番1号 千葉県印旛沼流域下水道花見川終末処理場内			
実験スケジュール	1993年3月~1994年3月			
主要機器仕様	機器名称	数量	計画処理水量	主仕様
	加圧浮上装置(クロフタ式)	一式	260m ³ /d	形状 : 壁型, 円筒形 浮上槽寸法 : 1800mmφ×400mm高 水面積負荷 : 7.5m ³ /m ² ・d 要部材質 : ステンレス鋼
	砂ろ過装置	一式	260m ³ /d	型式 : 重力式 形状 : 円筒形 標準 LV : 150m ³ /m ² ・d 逆洗頻度 : 1回/d ろ材 : 砂 0.6mmφ×1200mm アンスラサイト 1.2mmφ×800mm
	高圧ポンプ	一基	(能力) 260m ³ /d ×10kgf/mm ²	型式 : 多段渦巻 要部材質 : ステンレス鋼 電源 : 200V×11kW×3φ ×50Hz
	逆浸透膜(NTR-729HF-S8)	15本	210m ³ /d	膜素材 : ポリビニールアルコール系複合高分子 寸法 : 200mmφ×1016mm長 ①脱塩率 : 92% ②透過水量 : 36m ³ /d・本 ①と②の測定条件 : 水温25°C, 圧力10kgf/cm ² , 原水濃度 1500(NaCl)ppm, pH=7.0
	(基礎実験使用膜の大型タイプ)	5本入り圧力容器が3本の計15本での処理水量		

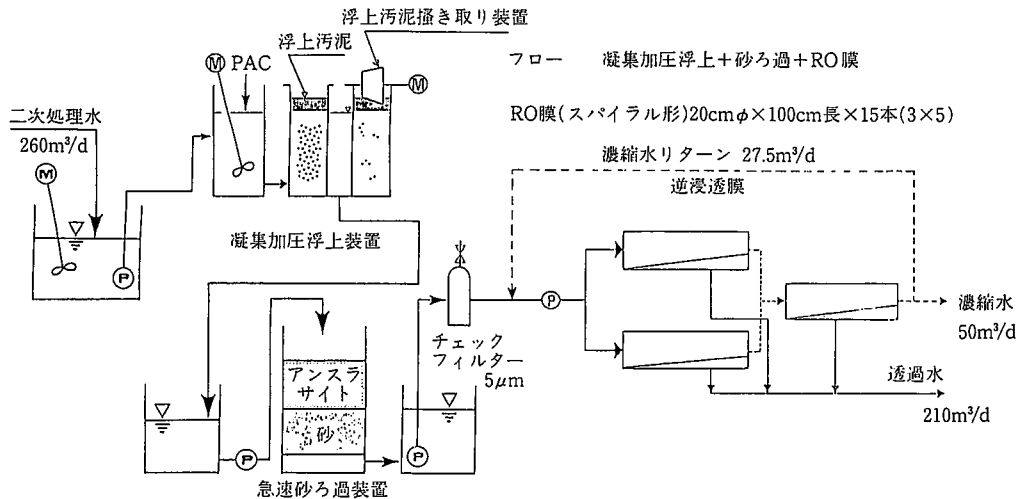


図 11 実証実験設備概略フロー

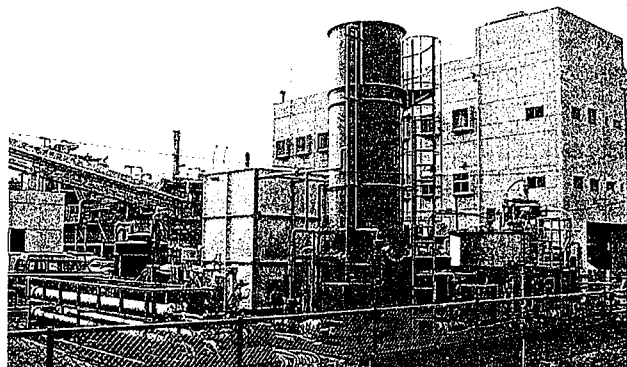


写真 1 実証実験設備の全景

試算すると、表 7 に示すように 54.4 円/m³ となる。これには設備償却費、人件費等は含んでいない。ちなみに、大都市での上水道料金(使用量 100m³/d 以上、下水道料金含む)について図 13 に示す。

6. まとめ

逆浸透膜による下水の超高度処理実用化に関する研究を開始した。膜調査、及び基礎実験を実施し、前処理法、膜性能、薬品洗浄法等

表 7 推定運転コスト

項目	運転コスト(円/m ³)	備考
電気	23.82	15 円/kWH
薬品	10.40	PAC (10%) : 0.20kg/m ³ NaOCl (10%) : 0.05kg/m ³ H ₂ SO ₄ (75%) : 0.04kg/m ³
浸透透膜	16.48	400,000 円/本, 5 年寿命
チェックフィルター	3.71	18本/2 か月で全交換, 2500 円/本
合計	54.41	稼働率 95% 設備償却費, 人件費等固定費は含まず

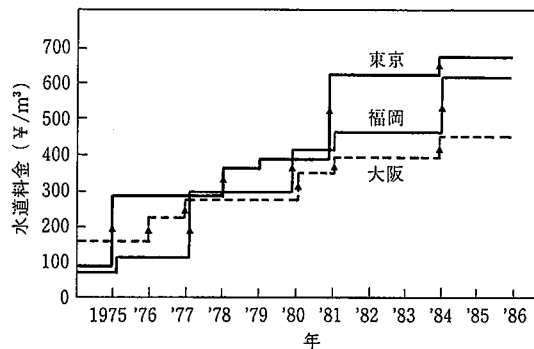


図 13 主要都市の上下水道料金の変化

NIPPON STEEL CORPORATION RO SYSTEM ANALYSIS (DEC 92 VERSION)
(RO MEMBRANE TYPE:NTR-729F SERIES)
DATE:93/06/11
ANALYZED BY:H.TOMA
PREPARED FOR:ADVANCED WASTEWATER TREATMENT BY RO MEMBRANE IN HAHAMIGAWA
FEED WATER:SEWAGE SECONDARY EFFLUENT
PURPOSE:REUSE FOR AMENITY

***** INITIAL CONDITIONS *****
FEED WATER= 260 [m3/day], FEED WATER TDS= 500 [mg/l]
RO PERMEATE= 210 [m3/day], RO PERMEATE TDS= 250 [mg/l]
RECOVERY= 80.7692 [%], REJECTION= 50 [%]
TEMP= 15 [DEG C]
MIN BRINE FLOW= 57.6 [m3/day]

***** RO SYSTEM *****
RO ELEMENT SIZE: 8 INCH DIAMETER
RO SYSTEM CONFIGURATION: 2 VESSEL(S) (5 ELEMENTS)----> 1 VESSEL(S) (5 ELEMENTS)
RO ELEMENT TOTAL NUMBER= 15

***** COMPUTED RESULTS *****
RO PERMEATE= 210.055 [m3/day]
RECOVERY= 80.7904 [%]
RO PERMEATE TDS= 208.308 [mg/l]
RO PERMEATE REJECTION= 58.3383 [%]
FEED PRESSURE= 8.0892 [kg/cm2]
BRINE RETURN= 27.5 [m3/day]
BRINE TDS= 1731.47 [kg/cm2]
MINIMUM BRINE FLOW= 57.8183 [m3/day]
TOTAL RO ELEMENT PERMEATE LOAD= .500131 [m3/m2day]

STAGE	EL. NO.	FEED			PERMEATE			REC
		[m3/day]	[kg/cm2]	[mg/l]	[m3/day]	[mg/l]	[%]	
	1	143.75	8.09	618.61	20.22	110.51	14.1	
	1	123.53	7.12	701.76	18.98	125.37	15.4	
	1	104.55	6.37	806.41	17.00	157.48	16.3	
	1	87.56	5.80	932.38	15.47	195.45	17.7	
	1	72.08	5.35	1090.56	14.26	241.90	19.8	
		TOTAL			85.93	160.19	59.8	

<1st STAGE> PERMEATE TOTAL QUANTITY= 171.863 [m3/day]
BRINE QUANTITY/VESSEL= 57.8183 [m3/day]
BRINE TDS= 1299.93 [mg/l]

STAGE	EL. NO.	FEED			PERMEATE			REC
		[m3/day]	[kg/cm2]	[mg/l]	[m3/day]	[mg/l]	[%]	
	2	115.64	4.06	1299.93	10.83	348.48	9.4	
	2	104.80	3.37	1998.29	8.98	374.85	8.6	
	2	95.83	2.78	1494.17	7.41	437.01	7.7	
	2	88.42	2.27	1582.73	6.07	502.40	6.9	
	2	82.35	1.84	1662.31	4.91	570.75	6.0	
		TOTAL			38.19	424.85	33.0	

<2nd STAGE> PERMEATE TOTAL QUANTITY= 38.1916 [m3/day]
BRINE QUANTITY/VESSEL= 77.445 [m3/day]
BRINE TDS= 1731.47 [mg/l]

図 12 逆浸透膜システム計算アウトプット例

について以下のような知見が得られた。

- (1)膜分離法は種々の長所を有し、将来の都市型の超高度処理法としての可能性を持っている。
- (2)膜は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)の3種に大別されるが、高度な再利用用途へ対応するには、逆浸透膜の適用がふさわしい。特に親水用途への再利用を考慮した場合、逆浸透膜の除去性能としてはNaCl除去率(カタログ値)70%程度以上が必要であると考えられた。逆浸透膜の形式としては、汚染に比較的強く、スペースメリットも大きく、実績の多いスパイラルタイプが適当である。これらの条件を満たす膜を2~3種選び、そのうちの1種を基礎実験に供した。
- (3)逆浸透膜には、その性能を維持するために予め原水の汚濁物質を除去する前処理が必要であるが、基礎実験ではその前処理に凝集沈殿砂ろ過法を採用し、FI<4の前処理水を安定して得ることができる運転条件を見い出した。
- (4)逆浸透膜の透過水量は運転圧力と水温に比例し、除去率は運転圧力に比例し、水温に反比例する基本特性を持つことが判明した。又、これらの特性より逆浸透膜システムの設計計算が可能となった。
- (5)逆浸透膜の最適透過水量負荷を、1か月連続運転して透過係数が初期値から20%低下するような負荷であると定め、最適透過水量負荷を算出した。その結果、凝集沈殿、砂ろ過を前処理とした場合(前処理水FI<4)、約0.6m³/m²・dが適当な透過水量負荷となると考えられた。
- (6)逆浸透膜の洗浄法は薬液の循環→浸漬→循環(それぞれ20分程度)法を採用し、洗浄薬品としてはEDTAが効果が最も高かった。
- (7)逆浸透膜処理水質は水道水レベルで、色度、濁度とも充分低く、大腸菌も完全に除去されており、親水として適当であるばかりでなく、その他広く再利用可能と考えられた。

(8) 運転コストは54.4円/m³と推定され、上水の代替え(当面は飲用以外の用途に限られよう)として使用できることや、使用者側で更に処理する必要がないこと等を考慮すれば充分安価であると考えられる。

(9) 本システムは、再利用用途も広く、下水の超高度処理法として適当であるばかりでなく、将来の水需要のひっ迫への対応策としても非常に有効であると考えられる。

今後は、実証実験の実施を通して、実用規模としてのコストや保守等、フィービリティの調査を行っていく予定である。と同時に、より一層のコストダウンを目指し、前処理の合理化や汚染に強い膜モジュールの開発等にも取り組む所存である。

今後とも、本設備の実用化促進に力を注ぎ、本技術の発展、普及に貢献できれば幸甚である。

謝 辞

尊敬すべき共同研究者として、常に本研究をリードして下さって

いる 日本下水道事業団技術開発部総括主任研究員 竹島正氏、同副参事 長尾英明氏、並びに東京都流域下水道本部技術部北多摩二号処理場長 青木正信氏(元、日本下水道事業団技術開発部総括主任研究員)の皆様に深く感謝致します。

参 照 文 献

- 1) 例えば、柳瀬晃：造水技術. 1 (1), 45 (1975)
- 2) 建設省都市局下水道部：日本の下水道(平成3年). 東京, (社)日本下水道協会, 1992, p.272
- 3) 長尾英明：季刊水すまし. (66), 48 (1990)
- 4) N社：逆浸透膜カタログ
- 5) 御園生善彦 ほか：公害と対策. 24 (10), 47 (1988)
- 6) 河杉忠昭 ほか：造水技術. 9 (2), 38 (1983)
- 7) 藤田賢二：水道協会雑誌. (485), 2 (1975)
- 8) 大矢晴彦：逆浸透法・限外ろ過法 I 理論. 初版. 東京, 幸書房, 1976, p.9-24
- 9) 井出哲夫：水処理工学—理論と応用—. 初版. 東京, 技報堂, 1976, p.560-564
- 10) 井出哲夫：水処理工学—理論と応用—. 初版. 東京, 技報堂, 1976, p.606
- 11) 日本下水道事業団技術開発部：1992年技術開発部報. 1992, p.56-63