

逆浸透法による下水処理水の高度浄化

東大・工 都市工学科 綾 日出教
東大・工 化学工学科 木村 尚史
○ 三井建設(株) 技術部 井木 満夫
造水促進センター 井上 源之助

1. 概要

1960年にLoeb型膜が発表されて以来、逆浸透法は実用化の段階となり、我国でもかなりの使用実績がみとめられるようになった。現況の主な用途は、ボイラー用水の前処理、超純水の製造であり、海水の脱塩などの淡水化にはまだ用いられてはいない。下水や産業廃水の処理法としてはいくつかの報告があるが、長期にわたる大規模の実験の報告はきわめて少ない。昭和45年度より、4ヶ年にわたり実施された「産業排水等再生利用調査」(日本工業用水協会)において、かなりの長期にわたり、実用の施設を用いて下水処理水の処理実験が行なわれた。本実験は、逆浸透法の代表的な型式であるSpial Wound方式とHollow Fiber方式の両者を並列に設置し、同時に比較実験が行なわれたきわめて特異なものであるといえる。

延150日にわたる運転結果より、用途によっては直ちに実用化し得るものと考えられ、下水の再利用の応用面を広げる効果が期待できる。さらに、高汚濁水の浄水、産業廃水の回収、水質汚濁防止技術などの面にも資する所は大きいと思われるので、その実験成果の概要を発表する次第である。

2. 実験の意図と計画

下水処理水を工業用水に転用することは東京都の江東工業用水をはじめとし、各地で用いられている。下水処理水は工業用水としていくつか欠点がある。最大の欠点は塩分濃度が大きいことによる腐食性にあるとされる。また、不純物が多いためボイラー用水などの純水を製造するにはかなり高価につくことになる。効果的に不純物を除く方法があれば、工業用水としての下水処理水の用途を大に広げることが可能となる。逆浸透法は、無機物と有機物を同時に排除できる点より注目されることとなった。分子レベルの透過であるため、巨大分子であるウイルスは当然排除され、無菌水が製造できる面からも応用が考えられた。

現在、実用的な逆浸透装置として開発されているものには、前述の二形式とチューブ形式のものがある。後者は、前二者が使用できるならば容積の点からは不利であり、大規模の使用および中取品の入りが容易であることから、前二者の研究に重点を置くことになった。

逆浸透法の実用上の問題は主として膜の寿命にある。膜の圧密による性能の劣化、表面にスライム等が生成することによる劣化、膜の分解などが考えられる。膜の圧密は水質と使用圧力とに關係するので改善は困難であるが、被膜の生成は防止しなければならぬ。また、濁質は目詰りの原因となる可能性がある。下水処理水中の懸濁物質、鉄分、スケール原因の硬度およびシリカは何らかの前処理を要し、膜面でのスライム発生も制御する必要がある。逆浸透法は前処理を十分に行うことによりこれらの障害原因を取り除かねば十分に機能しないことが予想され、前処理法の信頼性も一つの課題と考えられた。膜本体の寿命は、短時間で劣化するようなものでは実用にならず、実用になるものは長期間のテストを要することになり、実施設備連続運転をしないと判定困難であると予想された。このため、連続運転できる最小限のモジュールを使用することになった。

実験施設は、東京都水道局南砂町浄水場にその他の高度浄化実験施設と一諸に設置した。このため、原水の種類は、実際に供給されている江東工業用水、前処理を受けている砂町処理場処理水が導入でき、さらに1000バレルの能力のある粒状活性炭処理施設があるので、両方の原水を処理したものの4種となる。粒状活性炭処理を前処理として必要とするかどうかはかなり興味のある点であった。

3. 施設の概要

前処理設備

凝集ろ過法	上向流急速ろ過設備	至 720 mm 高 3,000 mm 砂層厚 2,200 mm	1基
凝集剤注入設備	電解アルミ、または液体パント使用		
塩素注入設備	次亜塩素酸ソーダ使用		
pH 調節設備	硫酸 使用		

渦巻型逆浸透膜処理方式設備 (Spiral R.O.)

処理水量	7.6 m ³ /日 (2,000 GPD)
逆浸透膜	ROGA-4000 モジュール2本入 2基 (膜面積 4.8m ²)
操作圧力	28 ~ 42 kg/cm ²
容器	φ100 mm, l = 2,000 mm
高圧ポンプ	多段渦巻ポンプ (3.7 kW)
保安フィルター	カートリッジフィルター (PSP ポーラスステレススカーール22μ) 2本

中空糸型逆浸透膜処理方式設備 (Hollow Fine Fiber R.O.)

処理水量	8.5 m ³ /日 (2,250 GPD)
逆浸透膜	パーマセップ B-9 パーミエーター 1基 外径 90μ, 内径 50μ, 長 1.4m, 中空糸 100万本
容器	φ134 mm, l = 1192 mm
高圧ポンプ	プランジヤー型 (2.2 kW)
保安フィルター	カートリッジフィルター (ホリプロピレン 10μ) 2本
活性炭ろ過設備	φ400 mm, l = 1500 mm 1基

図-1 フローシート

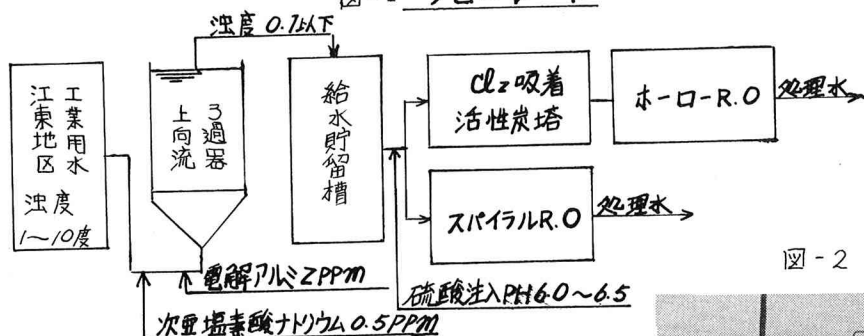
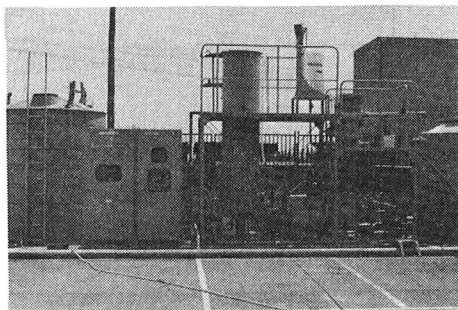


図-2 前処理設備



(注) 前処理における塩素注入はスライム防止の目的であり、硫酸注入は、R.O内にスケールが発生するのを防止するためのpH 制御用である。

ホロー-R.Oで活性炭吸着を行う理由は、膜が有効塩素によって劣化することを防止するためである。Loeb膜はこの必要はない。

図-3 スパイラル R.O設備

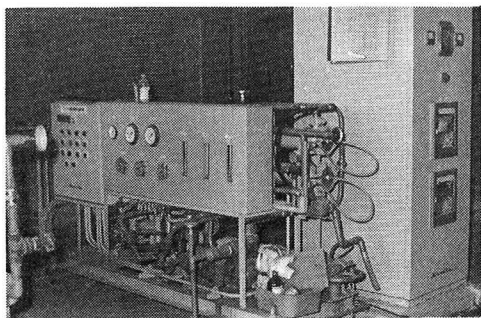
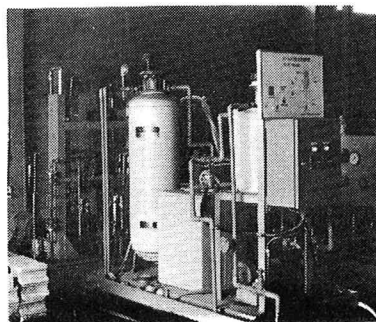


図-4 ホーロー・ファイバー R.O設備



4. 実験操作 と 結果

4-1 前処理

原水に塩素およびバンドを注入し、フロック形成を行わずに直接砂ろ過を行う。実験の大半は原水として江東工業用水を用いたが、すでに凝集沈殿砂ろ過を行なったものである。従ってかなり濁度は低くなっているが、常時濁度を0.1度以下という基準で前処理を行うこととした。濁度の表現では逆浸透の障害になる懸濁物質量を十分に示すことはできないので、ミリポアフィルター(0.45μ)を47mmを用い、一定水量をろ過し終る時間で懸濁物質量を表わすことにした。たとえば、夏期の高水温時には、500mlの校水を55mmHgでろ過する時間を2分30秒以下と定めている。後期には、江東工業用水を単に再度砂ろ過しただけで供給することも試みている。鉄の蓄積を防ぐため、砂ろ過前にエアレーションを試みている。

4-2 逆浸透

操作圧力は28kg/cm²とし、スパイラルR.Oは通常低回収率、ホーローR.Oは高回収率で運転している。1回の連続運転時間を500時間を目標とし、終了時に洗浄などの操作を行なって能力の回復をはかった。運転操作の諸元および除去率を表-1に示す。

表-1 運転諸元 スパイラル R.O.

RUN	運転時間	操作圧力	生産水量	回収率	循環	除去率	前処理濁度	給水
1	0~552 ^{hr}	28 kg/cm ²	359~383 g/hr	26 %	なし	95 %	0.1度以下	江東工業用水
2	~1200	"	349~385	26	"	95	"	"
3	~1728	"	369~424	25	"	94	"	"
4	~2304	"	359~422	24	"	92	"	砂町下水処理水を粒状活性炭処理
5	~2832	"	291~422	75	あり	95	0.3度以下	江東工業用水
6	~3336	"	280~380	22	なし	93	0.3~0.5	江東工業用水を濁度0.5度以下処理
7	~3840	"	232~348	20	"	94	0.5~1.2	江東工業用水を単純砂ろ過

ホーロー・ファイバー R.O.

1	0~552	28	470~557	50	なし	96	スパイラルと同じ	スパイラルと同じ
2	~1224	21	295~390	75	あり20%	94	"	"
3	~1752	28	294~362	75	なし	96	"	"
4	~2352	"	358~428	50	"	96	"	"
5	~2880	"	317~427	75	"	95	"	"
6	~3432	"	252~426	50	"	85	"	"
7	~3744	"	232~349	50	"	78	"	"

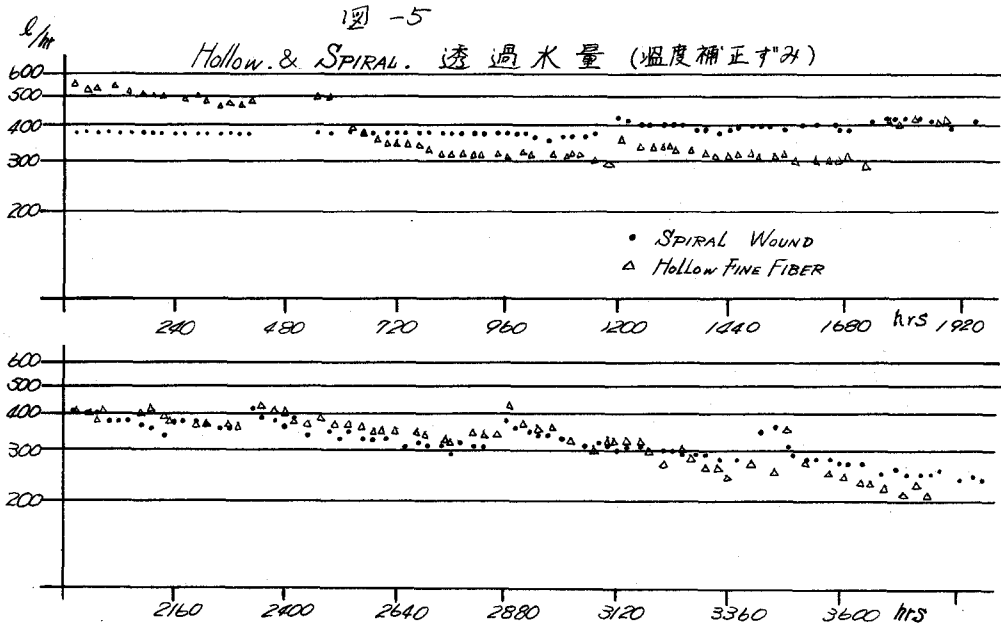
除去率は導電率につき、次式で定義される値である。

$$\text{除去率 (\%)} = \left\{ 1 - \frac{\text{生産水導電率} \times 2}{\text{給水導電率} + \text{濃縮水導電率}} \right\} \times 100$$

回収率は、給水量の何%が生産水となったかを示す。

循環は、濃縮水を給水側に循環し、モジュール内の流速を高く保ちながら回収率を高くすることである。

透過水量(生産水量)は、水の粘性の変化のため、水温によって大々に変化してくる。水温25°Cに補正した値を延時間で行ったのが図-5である。生産水量が回復している所が新しい運転サイクルである。



給水がモジュールを通過し、濃縮水となる間にかなり高流速で流れるので圧力損失がある。操作圧力の損失となり、効率が悪くなることになるから圧力損失は小さいことが望ましい。スライムなどの目詰まりの指標であるので、図-6~9に例示する。ホーローROは構造上圧力損失はかなり大きい。

図-6、スパイラルRO 圧力損失 (RUN-1)

図-7 ホーロー RO 圧力損失 (RUN-1)

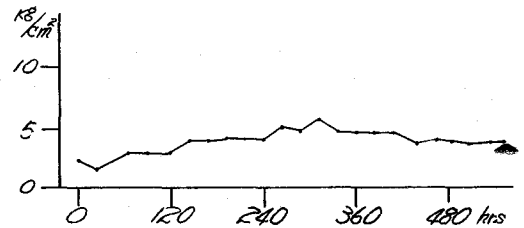
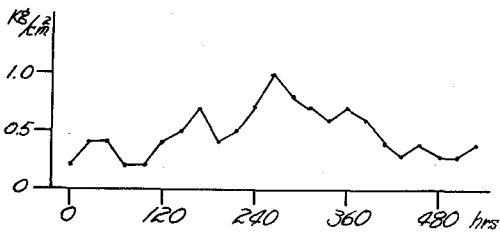
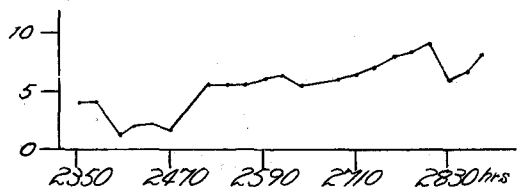
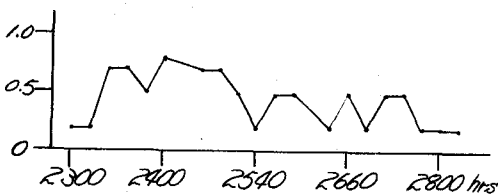


図-8 スパイラルRO 圧力損失 (RUN-5)

図-9 ホーロー RO 圧力損失 (RUN-5)



4-3 水質

処理水質の例を表-2～に示す。

表-2 RUU-1

項目	原水	給水	Spiral RO		Hollow Fiber RO	
			product	reject	product	reject
PH	6.9	6.8	6.5	7.0	6.4	6.9
導電率 (μS/cm)	552	588	25	888	35	1120
SiO ₂ (ppm)	25	25	4.5	31	4.1	46
Cl ⁻ (ppm)	137	144	15	199	14	267
Mリカリ度 (ppm)	68	63	7.5	88	13	95
全硬度 (ppm)	124	128	2.0	174	2.0	248
COD (Mn) (ppm)	4.4	3.6	0.	4.6	0.	5.0
NH ₄ -N (ppm)	0.6	0.7	0.2	0.7	0.2	0.8
PO ₄ (ppm)	2.7	1.1	0.	1.6	0.	2.1
SO ₄ ²⁻ (ppm)						

表-3 Run-4

原水	給水	Spiral RO		Hollow Fiber RO	
		product	reject	product	reject
5.9	5.7	5.4	6.0	6.0	6.5
2005	2020	183	2780	129	3990
20.0	20.0	3.5	26.0	0.4	45.0
409	405	36	518	18	735
29.0	27.5	2.5	33.5	15.0	110.5
255	252	4.0	342	3.6	572
5.1	4.3	1.4	5.7	1.0	7.2
～	25.0	1.5	17.5	2.0	40.0
～	254.0	240	314.0	16.3	438.0

表-4 Run-7

項目	給水	Spiral RO		Hollow Fiber RO	
		product	reject	product	reject
PH	6.1	5.8	6.2	6.0	6.2
導電率 (μS/cm)	618	42	790	158	1050
SiO ₂ (ppm)	30.4	6.3	36.5	7.0	45.0
Cl ⁻ (ppm)	75.0	7.2	95.6	20.3	145.0
Mリカリ度 (ppm)	32.0	7.0	37.5		
全硬度 (ppm)	114.	0.0	151	9.0	220
COD (Mn) (ppm)	7.0	0.0	8.0	0.0	10.8
COD (Cr) (ppm)	24.0	3.2	26.4	4.0	32.0
NH ₄ -N (ppm)	11.4	0.7	14.1	2.7	19.4
有機炭素 (ppm)	370	13	570	89	660
強熱減量 (ppm)	93	2	133	11	171
Na ⁺ (ppm)	38.0	3.8	48.0	10.0	66.0
SO ₄ ²⁻ (ppm)	570	47	675	59	700

Run-7において、ホローファイバーROの水質が悪いのは一部機器に漏水がみとめられたためであるが、それでもきれいな水となっており、それがわかる。代表的なイオンである塩素イオンは約90%の除去率を示しており、シリカはやや悪くなっている。CODはほとんど0を示すことが多い。

スパイラルROとホローファイバーROでは各成分の除去率が異なり、膜特性差はかなり認められる。

導電率で示される除去率は、生産水量が時間とともに低下しても変化はほとんどみとめられる。また、原水水質変動に対しても除去率には変化はない。

4-4 洗浄

約500時間の運転後、停止して洗浄を行い、能力の回復を行っている。洗浄は水道水で逆方向に洗浄後、酸

で洗浄する。洗浄廃水中には鉄が多く、膜上に酸化鉄被膜を形成しているものと思われる。

ホローファイバーROでは構造上目詰りが多いため、後期には給水方向を逆にして短時間の逆流を行なうようにした。スパイラルは、図-6～9でわかるように目詰りは少ないが、膜面の濃度分極を防止するための間欠的なフラッシングを行うように改造された。

5 考察

前処理法の検討に時間がかかり、実運転時間はかなり少なくなっている。しかし、機械的な故障がほとんどないのは、運転そのものは容易であるといえる。洗浄あるいはフラッシングの方法にかなりの検討事項があり、今後も検討を要するものと考えられる。

全般的には次のような結論が得られた。

- (1) 前処理が適当であれば比較的安定した処理を行うことができる。
- (2) 前処理には活性炭処理を特に必要としな。

(3) 膜特性の劣化はあまりみとめられず、十分実用可能である。

(4) 高濁水を給水しても、洗淨によって能力を回復できる。

(5) 操作圧力は低圧 (30 分以下) で十分である。

スパイラルROについては、下水処理水水温が高いので仕様の上限温度 30℃以上になりやすいことが欠点である。水温が高くなると Lc も膜が圧密され、能力が落ちてしまう。

ホローファイバーROは、特異な構造であるための利点と欠点とが明確に現われる。容器の大きさはスパイラルROに比較して半分以上であるが、圧力損失はきわめて大きい。図-5における生産水量の低下はこれに起因する所が大きいものと思われる。膜特性としてもゆっくりと水量が低下していくことが知られており、かなりはつきり読みとれる。

除去率に大きな差はないが、両者の水分毎の排除率には差がある。しかし、下水処理水で特に問題になることもないと思われるので、回収率低下の特性さえ十分に考慮してあげれば両者とも実用可能といえよう。

逆浸透法によれば、きわめて良質の水が得られることは判明したが、直ちに下水処理場に応用し、汚濁をなくすることができずわけではない。回収率を大きくすると、平均的な給水濃度が上がったことと同じで、全体としての圧力増加と生産水濃度が上昇することになる。理論的には多段にして濃厚廃水を濃縮していくことも可能であり、蒸発法などを併用すれば固形物の残量を残すだけにするともできる。しかも、このためには大量のエネルギーが必要であり、除去した物質の大部分は非汚染物質である。逆浸透法は比較的は何でも排除する(溶存ガスは透過)ため余分な作業をしてしまうことになる。逆浸透法は低回収率で運転する方が動力は少なくて済み、水質も良好である。水温上昇を防ぐ点からも夏期は低回収率が好ましい。従って、下水処理に用いるよりも、大量の下水処理水より少量の良質の水を得ること、プロセス用水あるいはボイラー用水を得る方法として用いられるべきである。濃縮廃水の処理は粒状活性炭吸着が可能ではあるが、できれば他用途に混入して行なわなければならない方が有利であることは当然であろう。薬品洗淨廃水の処理問題もあるので全量処理は困難と考える。

逆浸透法により、下水処理水より上水道への利用が可能であるとの説がよく散見する。水質項目的には表-2などのように十分達成し得る。前述のごとく、ウイルス除去はできずは必ずであるが、上水道用には故障しては困るのであり、安全率が高く、稼働率も安定していなければならない。現時点では上水道には採用されるべきではないと思う。雑用水道として洗濯、風呂用途まで考える場合もあるが、誤飲、クロスコンタクションが問題であり、水洗便所用であればこれほどの水質は必要としない。

やはり当分は本法は工業用途またはかん水の脱塩に用いられるべきであろう。

6. 結語

逆浸透法は、下水処理水より良質の工業用水を得るのに有効な手段であることが確認された。本法の普及により上水道を用いているプロセス用水も代替できる場合が多くなるものと思われる。工業廃水からの用水回収も有望であり、クローズドシステム化への有効な手段の一つとなるだろう。

前処理法、洗淨法、膜の耐久性についてさらに今後とも研究が必要である。

本研究は、大勢の人々の協力により行なわれた。本調査委員会委員長 石坂誠一氏(東工試)、谷口良雄氏(栗田工業)、伊藤益三氏(神鋼ファブロー)、馬場澄男氏(三井建設)、渡辺憲二氏(西原化学)の諸氏に謝意を表す次第である。

なお、本実験は昭和48年7月で終了し、施設は解体・移転された。

(参考文献)

* 水処理実験法 日本工業用水協会 コロナ社 昭和46年

産業排水等再生利用調査 中間報告 日本工業用水協会 昭和48年3月