

(2) 物理化学プロセスの水処理への展開

東京大学工学部 教授 藤 田 賢 二

緒 言

これまで我々が主として研究対象としてきた水処理技術の多くはすでに1世紀にわたって使い続けられてきたものである。これを古典的処理法としよう。化学処理として、凝集、pH調節、酸化、還元などが、物理処理法として、スクリーニング、沈殿、浮上、粒状濾過などが古典的水処理法として挙げられる。化学処理の多くは、後の物理的分離を可能にするための前処理である。

これに対して、吸着やイオン交換あるいは膜処理のように、除去対象物質を粗大化するための前処理を必要としないものをここでは仮に近代的水処理としておこう。この中でもとくに、次世代に主流になると思われる現代的処理法として、精密濾過、限外濾過および逆浸透に代表される膜処理を擬し、これを以下に考えたい。

膜分離技術

現在我々が保有している情報を総合すると、次世代の主要水処理技術は結局膜に落ち着くものと考えている。清澄化過程の固-液分離技術は次の世代にはおそらくほとんど膜分離になるであろう。少なくとも、凝集・沈澱・濾過の工程は膜処理という1つの操作で代替されていくと思われる。

これまで、我々は膜の研究を避けてきたきらいがある。それは主たる部分—膜素材、膜製造—に関与できないということが大きな理由になっていたのではないだろうか。研究の自由度や奥深さに限界を予見したためかもしれない。その一方で、我々と関りの薄い分野では膜利用が盛んになっている。たとえば、超純水や医薬品製造水の製造、し尿、ビル中水道、パルプ廃水等の処理あるいは食品工業等々である。

しかし、上下水道分野でもはや膜分離技術を等閑に付すことはできなくなっている。これまで膜を避けてきた表向きの理由である、膜処理の経済性、信頼性、価格、実績が大幅に向上したからである。

膜を扱ってみると、衛生工学を専門とする者が関与すべきことが沢山あることに気づく。集積度（単位体積あたりの処理量）、モジュールの形、寸法、膜加圧力、処理対象物、洗浄法など、製造者が模索している項目が多々あるのである。とくに、大量処理への対応がまだできていない。

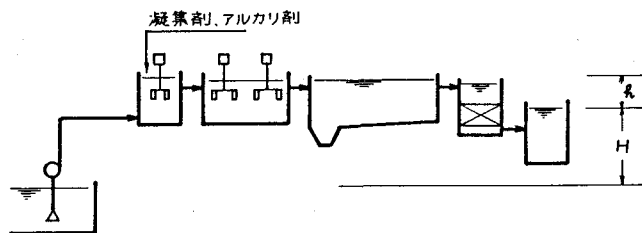
膜分離技術によれば、古典的手法ではむずかしかった高濃度のイオンや微粒子を除去できることは周知のとおりである。しかし、通常の水処理、代表的には上水処理に適用したらどのような形になるかはあまり示されていない。そこで、次に上水処理に膜を適用して実際に設計してみよう。そうすることによって、膜処理の有利な点もこれから確認すべき事柄、研究すべき事柄も見えて来る。

膜処理浄水場の試設計

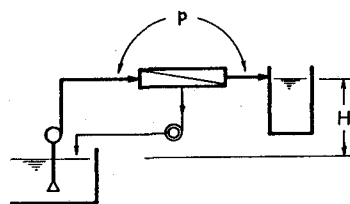
膜処理の難点として動力費が大きいということが挙げられている。そこで、まず一般的に運転コストについて考えよう。図-1は在来形浄水場法と膜処理浄水場との水位と圧力関係について描いたものである。電力と薬品（凝集剤とアルカリ剤）のコストは表-1のようになる。両者を次のような条件で計算して合計し、単位処理量あたりのコストで表したものが図-2である。

計算条件：

$a = 2.72 \times 10^{-3}$ ($= 9.8 \cdot 1 \cdot 24 / 86400$) kWh/m/(m³/d)である。取水ポンプ効率 $\eta_p = 80\%$ 、電力回収効率 $\eta_r = 60\%$ 、薬注率 $r = 0.04 \text{ kg/m}^3$ (40mg/l)、浄水用電力量 $w = 0.024 \text{ kWh/(m}^3/\text{d)}$ 、 $m = 2 \times 10^{-4} \text{ kWh/(m}^3/\text{d)}$ 、電力単価 $\alpha = 11 \text{ 円/kWh}$ 、凝集剤単価 $\beta = 55 \text{ 円/kg}$ （アルカリ剤を当量注入するとして凝集剤に価格換算）在来式浄水場の着水井—浄水池間水位差 $h = 3 \text{ m}$ とし、膜加圧水頭 p として5mおよび10mの2つを考えた。



左来形



膜処理

図-1 浄水場水位関係

表-1

	在来形	膜処理
取水量 [m ³ /d]	Q	nQ
取水ポンプ揚程[m]	h+H	p+H
薬品量 [kg/d]	Qr	—
浄水用電力[kWh/d]	Qw	Qm
取水ポンプ電力費	$a\alpha Q(h+H)/\eta_p$	$a\alpha nQ(p+H)/\eta_p$
回収電力費	—	$-a\alpha(n-1)Q(p+H)\eta_r$
薬品費	Qrβ	—
浄水用電力費	Qwα	Qmα

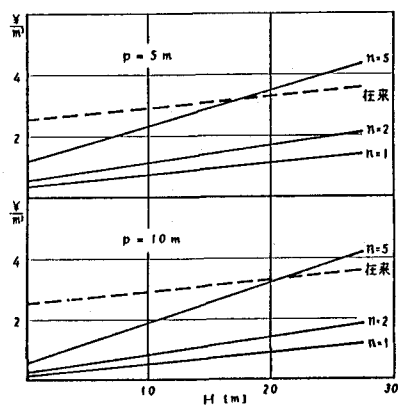


図-2 ランニングコスト比較

この図から分かるように、膜加圧水頭が5～10mであれば、膜処理浄水場は、原水量／濾過水量比nや水位差Hをかなり大きくしても在来形浄水場よりランニングコストが小さくなる。

次にもっと具体的に実際に浄水場を設計してみる。図-3は50,000m³/dの浄水場を在来の処理法と膜処理法とについて設計して比較したものである。大量処理に適するようにモジュールの形を工夫した。設計条件は次のとおりである。

- 1) 凝集・沈殿・濾過の工程をMF膜処理で代替する
- 2) 原水量／濾過水量 比 $n = 2$ とする
- 3) 膜流速を2.1m/d (膜加圧水頭10m) および1.04m/d (膜加圧水頭5m) の2つについて考察した
- 4) 逆洗浄は1時間に1回15秒間とする
- 5) 取水ポンプ場－浄水場間の距離を300m、水位差を3mとする

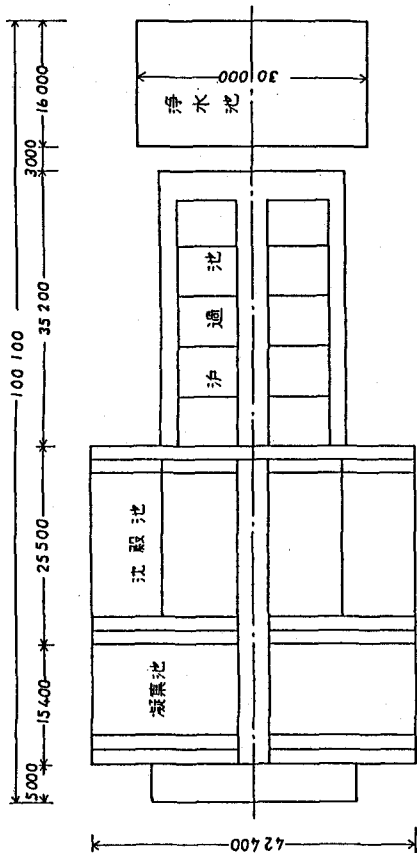
この図に見るように、膜処理によれば、浄水場面積と槽体積を在来式より遙かに小さくできる。ランニングコストも表-2に比較したように、膜処理では在来形の1／3あるいはそれ以下にできる。この計算には、膜処理では僅少になるだろう人件費は入っていない。

まとめて膜処理浄水場のメリットを挙げると次のようになる。

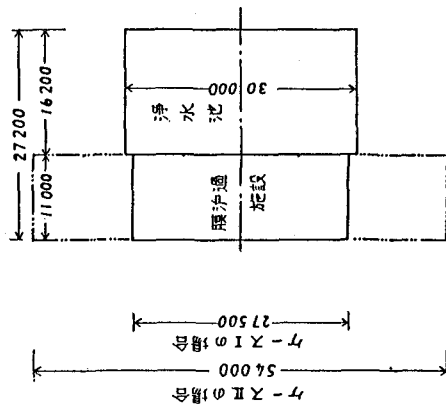
- 1) 所要面積を小さくできる、2) 槽容積を小さくできる、3) ランニングコストを小さくできる
- 4) 無人運転が容易である、5) 污泥処理が不要になるか容易になる可能性がある

これに対し、膜分離を上水処理に適用するためには次のような研究すべき課題も残っている。

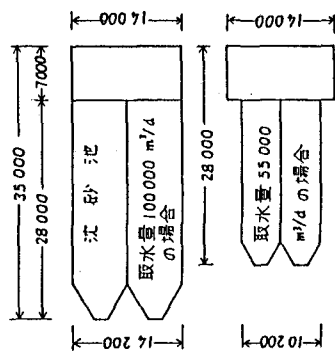
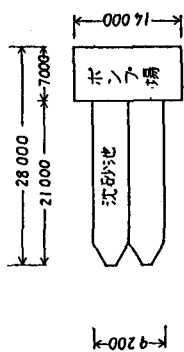
- 1) 安全性、2) 安定性、3) 濃縮液の処理、4) 膜洗浄法、5) 原水量／濾過水量 比 の選定、6) 膜寿命の推定



在 来 形 浄 水 場



膜 処 理 浄 水 場



原水ポンプ場

図-3 膜処理浄水場と在来形浄水場との面積比較

表－２ 在来式浄水場と膜処理浄水場との比較

	在来式浄水場	膜処理－Ⅰ	膜処理－Ⅱ	条 件
膜圧力（水位差）[m]	2.9	10	5	
濾過流速 [m/d]		2.1	1.04	
取水量 [m ³ /d]	50000	100000	100000	硫酸アルミニウム注入率30mg/l ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)
槽面積 [m ²]	3580 (2800)	1300(350)	1580 (630)	苛性ソーダ 注入率 15mg/l
槽容積 [m ³]	18250(14200)	5770(870)	6400(1500)	硫酸アルミニウム単価 25円/kg (8% as Al_2O_3)
電力設備容量 [kW]	190	275	185	苛性ソーダ 単価 35円/kg (25% NaOH)
電力消費量 [kWh/d]	2640	5280	3552	従量電力単価 11円/kWh
電気料 [円/d]	37000	69000	46300	電力基本料1175円/kW/月
薬品費 [円/d]	162000	0	0	
合計費用 [円/d]	199000	69000	46300	() 内は浄水場のみの値

古典的浄水法の将来

以上のように膜処理には多くの利点があり、将来古典的物理化学処理は多くの部分で膜処理に代わって行くものと思われる。しかし、古典的な物理化学処理法が一切なくなるわけではない。

まず、膜はあくまで分離技術であるから、分解や無害化を要するような反応部分には化学処理が今後とも必要になる。とくに廃水処理においては、膜分離した濃縮液を処分できる形に処理する必要があるが、現在の膜技術では濃縮液の処理には限界がある。

また、上述の浄水場の例のように、複数の単位操作を1つの膜処理で代替できるときには有利になるが、もともと単一の処理で済んでいる場合には膜に代えても経済的にあまり有利にならない。

以下、古典的処理法の将来を占っておこう。

凝集：清澄化過程での凝集処理は必要なくなる。しかし、凝集の研究はこれまでとは違った意味で必要になるだろう。

析出：pH調整や酸化・還元によって金属を析出して分離するか、直接逆浸透膜を使って分離するかは、経済的な比較で手法が選定されよう。膜分離濃縮液が再利用可能な場合には不純物を添加する化学処理は敬遠される。しかし、逆浸透膜処理では膜面に金属が析出しないようなpH調節が必要になる。

殺菌：膜で細菌は容易に除くことができる。しかし、薬品や紫外線による殺菌処理は省くことができない。

沈殿：清澄化過程の沈降分離は必要性が低くなるが、凝集を伴わない単純沈降や沈降濃縮過程は膜処理が導入されても使われ続けよう。

濾過：粒状濾過池は分離操作に関する限り、技術的、経済的に精密濾過膜で代替できる。濾過池が将来とも残るとすれば、分離装置としてではなく、反応槽としてであろう。

吸着：臭味や色は膜で除去しにくいものに属する。したがって、この用途に吸着処理は広く使われていく。しかし、これらを比較的低圧で除去できる膜が開発されれば、再生を要する吸着処理は膜分離に対して不利になる。