

VII-35

膜ろ過におけるファウリングが膜破断時の原水流出に与える影響

東北大学 学生員○大野 崇
東北大学 正会員 後藤光亀
東北大学 正会員 大村達夫

1. はじめに

近年、塩素消毒耐性を有する病原微生物による水域汚染が顕著化し、水源として利用する際の対応策確立が急務である。一方、膜ろ過処理はクリプトスポリジウム等を除去できる浄水技術として注目されているが、膜破断後に病原微生物が流出する事によって生じる感染リスクについては十分議論がなされていない。

そこで本研究では、膜ろ過処理の連続運転に伴う膜抵抗の増加や中空糸内径の減少が、膜破断後の原水流出に及ぼす影響をシミュレーションにより解析した。また、膜破断時の原水及び透過水の許容病原微生物濃度について考察を加えた。

2. 膜ろ過基礎式¹⁾

内圧型クロスフロー式中空糸膜ろ過において、膜長さ dx の間に減少する中空糸内流量は膜外部へ流出する透過水量であるので連続の式より次式を得る。

$$\frac{dv}{dx} = \frac{4D_0u}{D^2} \quad (1)$$

ここに、 x ：膜始端からの距離(m)、 v ：距離 x における循環流速(m/s)、 u ：距離 x において膜を透過する流速($m^3/m^2/s$)、 D ：中空糸内径(m)である。

中空糸内の水の流れについて次式が成立する。

$$\frac{dp}{\rho g} = - \left(f \frac{dx}{D} \frac{v^2}{2g} + dz \right) \quad (2)$$

ここに、 P ：距離 x における圧力(Pa)、 z ：鉛直方向の位置水頭(m)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 ρ ：水の密度(kg/m^3)、 μ ：水の粘性係数($Pa \cdot s$)、 f ：摩擦損失係数(-)である。水の流れが層流の場合、 $f=64/Re$ である。ただし、 Re ：レイノルズ数 (-)。

膜を透過する流速は、ケークロ過理論から次式で表される。

$$u = \frac{\Delta p}{\mu R} \quad (3)$$

ここに、 R ：膜抵抗($1/m$)、 Δp ：膜間差圧(Pa)である。

以上の式を破断した膜モジュールに適用し、モジュールから得られる全流量に占める破断面からの原水流出量の割合を次式の原水流出率 α によって評価した。

$$\alpha = \frac{Q_{broken}}{Q_{f,total}} \times 100 \quad (4)$$

ここに、 α ：原水流出率(%)、 $Q_{f,total}$ ：全ろ過流量(m^3/s)、 Q_{broken} ：破断面からの流出流量(m^3/s)である。

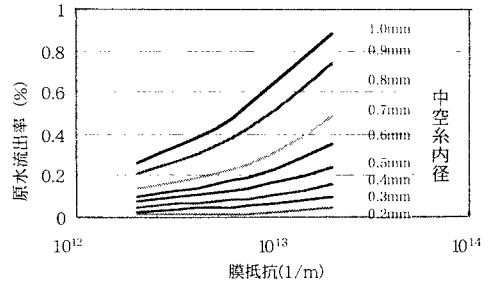


図-1 膜抵抗・中空糸内径と原水流出率の関係

3. 膜ろ過因子が原水流出率に与える影響

膜破断モデルを用いて、中空糸内径、膜抵抗が変化した場合の原水流出率への影響についてシミュレーションを行った。その結果を図-1に示す。計算条件はモジュール長さ1m、設定透過流速は1m/d、中空糸本数が2万本のU膜モジュールにおいて、中空糸1本が入口付近で完全に破断したものとした。

(1) 膜抵抗の影響

膜抵抗が増加するに従い必要な膜間差圧が増加し、入口圧力の増加に伴って破断部からの流出量が増加するため、原水流出率が上昇する結果となった。

式(3)に示されるように、膜抵抗の上昇後も定流量ろ過を維持する場合は必要な膜間差圧は膜抵抗に比例して増加する。このため、膜を透過する速度に比べ破断部からの流出速度が相対的に大きくなり、原水流出率は増加することになる。

(2) 中空糸内径の影響

破断した中空糸から流出する原水流出速度は中空糸入口から破断面までの総圧力損失に左右される。中空糸内径の減少は、ろ液側に到達するまでの各形状損失(入口出口損失・摩擦損失)を増加させるものであり、破断部からの膜透過量と比較し原水が相対的に流出しにくくなるため、原水流出率は低下することとなる。

4. ファウリングの進行と原水流出率

膜ろ過処理の経過とともにファウリングが進行し、膜抵抗や中空糸内径が変化することで破断後の原水流出率にも影響を及ぼす。そこで、現場における運転データを参考に実規模処理場を想定した数値計算を行い、膜破断による原水流出率の定量的な評価を行った。

ファウリングの進行を測定するため、仙台市H下水処理場においてラボスケールの膜ろ過実験を行った。

原水は下水処理場の最終沈殿池水を使用し、20分に1回の逆流洗浄をしながら約6ヶ月間連続運転させた。その結果、中空糸がろ過とともに閉塞していき、膜抵抗が増加していくにつれて膜に加わる圧力は上昇し、図-2のような圧力変化が見られた。この実験における膜抵抗は、膜ろ過開始直後、運転1ヶ月、6ヶ月運転が経過した時点でそれぞれ 1.2×10^{12} 、 1.0×10^{13} 、 2.4×10^{13} l/m であった。実験終了後、モジュール内から中空糸を取り出しその切断面を観察したところ中空糸内部には膜表面への堆積物が確認され、中空糸の内径が約0.1mm減少していることが確認された。

これらのデータを元に、下水処理水を修景用水及び親水用水使用のため膜ろ過によって処理する場合を想定し、以下の条件で数値計算を行った。

- ・膜は分画分子量 13,000Da の UF 膜で、内径 1mm、長さ 1m の中空糸が 2 万本充填されているモジュール（膜ろ過面積は約 60 m²）を使用する
- ・透過流束は 1 m/d の定量ろ過を行う

この様な処理場における膜破断時期と原水流出率の関係は次のように推定される。運転当初に全中空糸本数 2 万本のうち 1 本が破断した場合の原水流出率は 0.2% である。1 ヶ月が経過し膜抵抗が約 8 倍に増加した時点で破断すると、原水流出率は 0.6% と運転初期と比較して約 3 倍も増加する結果になる。さらに 6 ヶ月が経過し膜抵抗が初期の約 20 倍に上昇した場合、原水流出率は 0.9% になると計算された。ただし、内径が 0.1mm 減少し 0.9mm であった場合、内径減少による圧力損失が破断面からの流出に影響し、原水流出率は 0.7% と 8 割の値に減少する。

5. 膜破断が水道水質へ及ぼす影響

膜破断による病原微生物流出が処理水質にもたらす影響について、クリプトスポリジウムをモデルとして計算を行った。内径 1mm、長さ 1m の中空糸 UF 膜により透過流束 1 m/d で定量ろ過を行った場合の中空糸膜破断割合と原水流出率の関係を表-1 に結果を示す。

水道水中のクリプトスポリジウム許容濃度は、感染リスクを 10^{-4} 人/年、水摂取量を 1 日 2 l としたときに 3.3×10^{-3} 個/100 l であると試算される²⁾。一方、イギ

リスにおける水道基準では水道水中の検出濃度を 10 l 中 1 個以下としている³⁾。現在のクリプトスポリジウム検出技術は 100 l 中 1 個の精度まで上がっており、1 個/100 l を達成目標としても妥当であると考える。

そのような基準を元に考察すると、水道原水が 1,000 個/100 l²⁾、回収率が 90% で膜ろ過装置への供給水中のクリプトスポリジウムが 10,000 個/100 l を超えるような場合には、中空糸 10 万本に 1 本の破断検出可能な管理が望まれる。この破断割合は処理水量が約 300 m³/d の膜ろ過装置における中空糸 1 本の破断に相当し、原水流出率は 0.052% である。供給原水濁度を 10 度と仮定すると膜破断時の濁度は 0.0052 度となり、常時の膜ろ過水濁度がおよそ 0.001 度である事を考慮すると 1000 分の 1 度精度の濁度計でなければ感知できない。

今回例に挙げた濁度だけではなく、今後はその他粒子数などによる水質モニタリングに対してもこの破断モデルを適用することで定量的な議論が可能である。

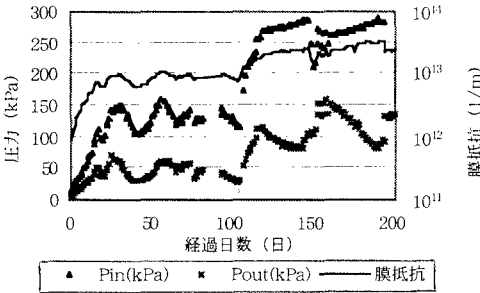


図-2 下水処理水を原水とした膜ろ過の圧力推移

6. おわりに

膜破断時の原水流出モデルにより、ファウリングの進行に伴う原水流出濃度の変化が定量的に示され、クリプトスポリジウムのような少量の摂取で感染を引き起こす病原微生物に対する膜破断時のリスク評価につながる議論も可能となった。

(参考文献)

- 1) 大野他：平成9年度東北支部講演概要、pp728-729、(1998)
- 2) 橋本他：水環境学会誌、vol.21、No.2、pp119-122、(1998)
- 3) UK DETR：The Water Supply (Water Quality) Regulations (1999)

表-1 ろ液へのクリプトスポリジウム流出濃度(個/100 l)

供給原水濃度	膜ろ過		破断膜				砂ろ過
	除去率6log ₁₀	100万本に1本	10万本に1本	1万本に1本	1000本に1本	除去率3log ₁₀	
1	1×10^{-6}	5.3×10^{-5}	5.2×10^{-4}	5.2×10^{-3}	5.2×10^{-2}	1×10^{-3}	
10	1×10^{-5}	5.2×10^{-4}	5.2×10^{-3}	5.2×10^{-2}	5.2×10^{-1}	1×10^{-2}	
100	1×10^{-4}	5.2×10^{-3}	5.2×10^{-2}	5.2×10^{-1}	5.2×10^0	1×10^{-1}	
1000	1×10^{-3}	5.2×10^{-2}	5.2×10^{-1}	5.2×10^0	5.2×10^1	1×10^0	
10000	1×10^{-2}	5.2×10^{-1}	5.2×10^0	5.2×10^1	5.2×10^2	1×10^1	

□ … 10^{-4} 人/年の感染を許容するレベル²⁾を超過する範囲 ■ … イギリス水道基準³⁾を超過する範囲