

膜破損が膜ろ過水質に与える影響の予測

岐阜大学工学部

都築佑太

岐阜大学流域圏科学研究センター

正会員

湯浅晶

岐阜大学工学部

正会員

李富生

同上

正会員

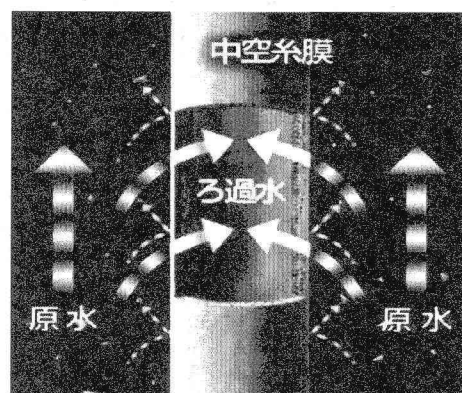
松下拓

1. はじめに

近年、クリプトスポリジウムやジアルジアなどの耐塩素性原虫類への対策を目的として、膜ろ過浄水施設を導入する例が増加している。膜ろ過方式の利点は省スペース性と、ろ過膜の孔径以上の微粒子をほぼ完全に除去できることである。一方、膜の使用に伴って膜素材の寿命や事故等による膜の破損が発生し、それに関連した対策を講じることが重要な課題である。日本では、膜破損検知に関する基準が未だなく、現状では膜メーカーなどが個別に対応している。管理の効率化や安全性の向上を図るためには、信頼性の高い検知手法による適切な運転管理が求められる。本研究では破損部を流れる流量が最大になる場合を想定し実際の膜処理施設の条件に基づき、膜破損の処理水質に与える影響のシミュレーションを行い、その結果により膜破損の検知システムについて検討した。

2. 中空糸膜と破損の概略

膜が正常の場合は右図のように中空糸の外側を通る原水が、強い圧力がかかることにより膜の内側にしみこみ、その過程で膜孔径以上の微粒子を除去する。しかし、事故等により膜の破損が生じた場合、原水は処理されないまま中空糸の内側を通過するため処理水の水質が悪化する。



3. 結果と考察

(1) 評価指標

膜処理の場合、懸濁物質の除去性は膜処理前後の濁度や微粒子数の変化から評価されている。したがって膜の破損を連続的に監視するためには、これらに基づいて求められる漏洩率を評価指標とすることが有効と考えられる。漏洩率は処理後と処理前の水質の比として式(1)のように定義される。微粒子が膜によって完全に除去されると考えると膜ろ過後の濃度は0となる、($C_T=0$)。さらに、破損した膜からの流出水の濃度は流入水と等しい($C_T=C_0$)と考えると、漏洩率は破損した膜内の流量と全体の流量の比によって表される。破損した膜内流量を求めることにより、膜破損の処理水質に与える影響は式(1)により予測される。

漏洩率と流入濃度および検出器の検出下限値(以下は検出レベル)の関係を図1に示す。検出レベルに対応した直線の上部に漏洩率と流入濃度の関係が位置していれば検出器により膜の破損を検知することが可能となる。

$$\text{漏洩率} = \frac{C_I Q_I + C_T Q_0}{C_0 (Q_I + Q_0)} = \frac{Q_I}{Q} \quad (1)$$

(Q_I : 破損膜内流量、 Q_0 : 正常膜内流量、 Q : モジュール全体の流量、 C_0 : 原水濃度、 C_T : 膜ろ過後濃度、 C_I : 破損部を流れる水の濃度)

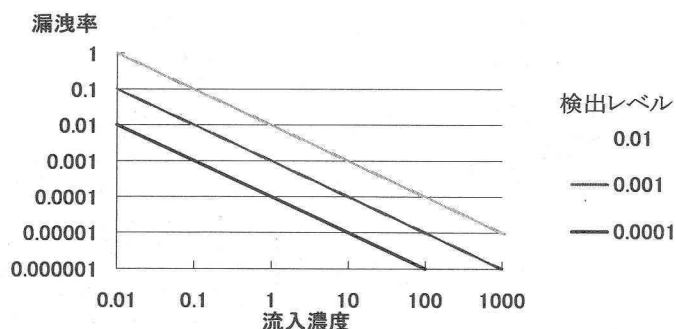


図1. 漏洩率と流入濃度および検出レベル

(2) 破損部流量が最大になる場合の影響

モジュール内の中空糸は、ばらばらにならないように両側を接着し束ねられており、破損部の流量が最大になるのはその接着部分の直前で完全に破損した場合と考えられる。そこで、破損した中空糸の接着部分を通る流量をポアズイユの法則により求め、さらに流れ出るときに急拡大による損失があると考え、以下の三つの式を導いた。

$$\frac{\rho(A_2 - A_1)^2}{2} Q_l^2 + \frac{128\mu \Delta x}{\pi D^4} Q_l = \Delta P \tag{2}$$

$$Q_0 = \kappa \Delta P A \tag{3}$$

$$Q = (\alpha - \beta) Q_0 = \alpha Q_l \tag{4}$$

(Δx : 中空糸の長さ(接着部分)、 D : 中空糸の内径、 A : 有効ろ過面積、 A_1 : 中空糸の断面積、 A_2 : 急拡大後の面積、 μ : 粘性係数、 κ : 透過係数、 Q_l : 破損膜内流量、 Q_0 : 正常膜内流量、 ΔP : 膜差圧、 Q : モジュール全体の流量、 α : モジュールの膜総本数、 β : 破断本数)

Q_l を上記の三つの連立方程式から求めその値を Q と共に式(1)に代入することで漏洩率を求める。

今回は、オーストラリアのサンドハースト浄水場の場合を例にしてシミュレーションを行った。サンドハースト浄水場は一つのセルに 18 のラックがあり、一つのラックに 8 のクローバーがあつて、そのクローバーあたり 4 本のモジュールがある系統になっている。1 本のモジュールあたりの中空糸は 14500 本である。そこで、表 1 に示す条件下で、セルごと、ラックごとおよびクローバーごとに管理を行った場合における中空糸一本が破損した時の計算結果を表 2 に示す。

表 1. 計算条件

中空糸の長さ(接着部分)(m)	0.1
中空糸の内径(m)	0.001
有効ろ過面積(m ² /モジュール)	31
フラックス(m/日)	1.18
差圧(Pa)	50000

表 2. 系統ごとの計算結果

	クローバー	ラック	セル
破断膜内流量[m ³ /日/本]	0.1094	0.1094	0.1095
正常膜内流量[m ³ /日/本]	0.0025	0.0025	0.0025
モジュール流量[m ³ /日]	146.32	1170.56	21070.08
漏洩率	0.000748	0.000094	0.000005

表 2 から、中空糸一本あたりの破損部を通る流量が正常な膜を通る流量に比べて著しく増大していることがわかる。さらに、表 2 の漏洩率の結果を図 1 に対応させ検出レベルと流入濃度の関係を図 2 に示した。検出レベルが 0.001 度において、クローバーごとの管理ならば、原水濁度 1~2 程度でも中空糸一本の破損を検知できるのに対して、ラックごとやセルごとの管理では 10 度以上の原水濁度がないと中空糸一本の破損が検知できないことがわかる。しかし原水濁度 0.1 度程度のきれいな水に対する膜破損の検知には検出レベルの値降下させるような分析機器の精度の向上が必要となる。

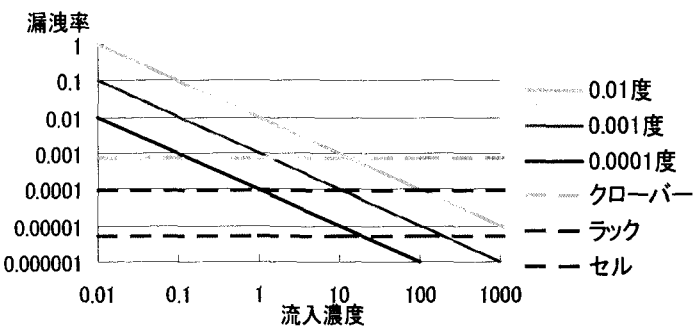


図 2. 漏洩率の図1への対応結果

4. まとめ

今回、検出レベルが 0.001 度程度の濁度計を用いた監視を行う場合、原水濁度 1 度以上の場合について、管理する対象の範囲を小さくすることで濁度計による破損の検知が可能となる。しかし原水濁度 0.1 度よりきれいな水に対する膜破損の検知には 0.0001 度程度の検出レベルが必要である。さらに、このシミュレーションの信頼性を評価するために、室内実験等が必要である。