

岐阜県庁

正会員 小林恭次郎

岐阜大学流域環境研究センター

正会員 湯浅晶

### 1.はじめに

膜ろ過処理法が、急速ろ過システムによる浄水処理に替わる方法として近年注目されている。本研究では中空糸UF(限外ろ過)膜ろ過のパイロットプラントを用いて、琵琶湖水の直接ろ過実験を行い、UF膜ろ過パイロットプラントの膜透過性能を長期間監視して膜透過性能に影響を及ぼす種々の因子について検討した。

### 2. UF膜ろ過実験の概要

#### (1) UF膜モジュールと運転条件

長浜市の下坂浜浄水場内に中空糸UF膜ろ過プラントを設置し、湖岸から700m沖合いの水深約4mの地点から取水している琵琶湖水を原水に用いて、凝集・フロック形成などの前処理を行わない直接膜ろ過実験を行った。使用した中空糸UF膜モジュールの特性を表1に、パイロットプラントのフローを図1に示す。

原水供給ポンプ(RFP)により一定流量で送られた原水はUF膜モジュールに入流し、中空糸の内側から外側へろ過される。ただし、原水側流路では循環ポンプ(RCP)により原水側ループ内を循環している。ろ過工程中の透過流量 $Q_F$ は、一定流量に制御している原水供給ポンプ流量 $Q_0$ に等しい。また、循環ポンプ流量 $Q_c$ は一定に制御した。逆洗工程時には、貯留した透過水を逆洗ポンプ(BWP)を用いて透過水側から原水循環水側へ圧送し、逆洗排水弁(BWDV)から系外へ排出した。逆洗効果を高めるために、洗浄用の透過水に次亜塩素酸ナトリウム(NaClO)を注入した。

表1 中空糸UF膜モジュールの特性

UF膜の材質	セルロース誘導体
UF膜の孔径	10 nm
排除限界分子量	100,000 Dalton
中空糸内径/外径	0.93 mm/1.67 mm
中空糸有効長/全長	1.20 m/1.30 m
中空糸の本数	2060 本/module
全ろ過表面積	7.2 m <sup>2</sup> /module
純水の初期透過係数 (20°C換算)	0.22~0.32 m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup>

#### (2)ろ過フラックスと膜透過係数

中空糸内側のクロスフロー流路の圧力損失 $\Delta P_{CF}$ と膜透過による圧力損失(膜間差圧) $\Delta P_{TM}$ 、および、ろ過フラックス $J_F$ と膜透過係数 $K_F$ は次式で計算した。

$$\Delta P_{CF} = P_1 - P_2 + \rho g L_{12} \quad (1)$$

$$J_F = Q_F / A_F \quad (3)$$

$$\Delta P_{TM} = (P_1 + P_2) / 2 - P_3 \quad (2)$$

$$K_F = J_F / \Delta P_{TM} = Q_F / A_F / \Delta P_{TM} \quad (4)$$

さらに、水温変化による水の粘性の変化の影響を補正するために、水温が20°Cの場合に換算したろ過フラックス $J_{F,20}$ と膜透過係数 $K_{F,20}$ を次式で計算した。

$$J_{F,20} = J_F \mu / \mu_{20} = J_F \exp\{0.0239(20-T)\} \quad (5) \quad K_{F,20} = K_F \mu / \mu_{20} = K_F \exp\{0.0239(20-T)\} \quad (6)$$

また、膜表面上に付着したケーキ層の厚みの増加を把握するために、式(7)のハーゲンボアズイユの法則を用いて中空糸のクロスフロー流路有効内径を計算した。なお、中空糸内平均流量 $Q$ は式(8)で計算した。

$$d = \left[ \frac{128 \mu L Q}{\pi \Delta P_{CF}} \right]^{1/4} \quad (7)$$

$$Q = (Q_1 + Q_2) / 2 \quad (8)$$

ただし、 $P_1$ :膜モジュールの原水流入口圧力、 $P_2$ :原水流出口圧力、 $P_3$ :透過水出口圧力、 $\rho$ :水の密度、 $g$ :重力加速度、 $L_{12}$ : $P_1$ と $P_2$ の測定点間垂直距離(2.0m)、 $A_F$ :全ろ過表面積、 $\mu$ :水の粘性係数、 $\mu_{20}$ :20°Cの水の粘性係数、T:水温、d:中空糸有効内径、L:中空糸全長、 $Q_1$ :中空糸入口流量、 $Q_2$ :中空糸出口流量

### 3. UF膜ろ過実験の結果と考察

#### (1) Run 1(93年2月3日~93年3月29日)

図2にRun 1の期間中の膜透過係数 $K_{F,20}$ の経日変化を示す。ただし、開始直前に薬品洗浄を行った。2月3日から2月8日の間は $J_{F,20}$ を0.066~0.069m/hという低い水準に設定したものの原水水温が8~9°Cと非常に低いために、 $K_{F,20}$ は急激に低下した。ヒーターを用いて水温を12°Cに上げても(2月8日~17日)、 $K_{F,20}$ は急激に下がり続け、0.193m/h/bar(2月3日)から0.095m/h/bar(2月13日)まで低下した。1日間の運転停止(2月14日)の後には一時的に膜透過性が回復するものの、またすぐに減少し始める。水温を23°Cに急激に上げ、かつ $J_{F,20}$ を0.045m/hと低く設定する(2月18日)ことにより膜透過性はようやく回復し始め、 $J_{F,20}$ を0.07m/hに引き上げて(2月22日)からも膜透過性は回復し続け、 $K_{F,20}$ は0.172m/h/barまで上昇した。しかし、水温が20°C以上であっても、 $J_{F,20}$ を0.086m/h(2月26日)、0.099m/h(3月5日)および0.082m/h(3月9日)と上げた場合には、膜透過性は再び悪化し、 $K_{F,20}$ は0.047m/h/bar(3月16日)にまで減少した。 $J_{F,20}$ を0.047m/hと低く設定(3月17日)することにより膜透過性は再び回復し始め、3月下旬に至って $K_{F,20}$ は0.154m/h/barまで上昇した。

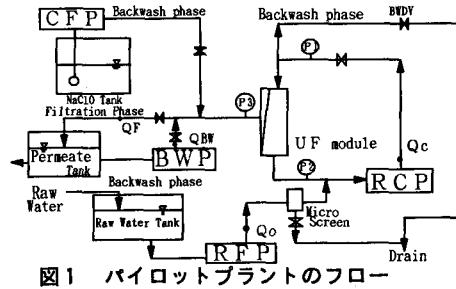


図1 パイロットプラントのフロー

図3にRun 1における中空糸のクロスフロー流路有効内径dと $K_{F,20}$ の関係を示す。中空糸有効内径dの減少は、膜表面上に付着するケーキ層の厚みの増大を意味する。Run 1では中空糸有効内径dが0.821mmまで減少(3月14日)しており、Run 2と比較して(図5)中空糸有効内径dの減少が著しい。また図3にみられるように、中空糸有効内径dが減少するに伴って $K_{F,20}$ が減少するといった相関を示していることから、Run 1の期間の膜透過性の悪化の原因は膜表面上に付着するケーキ層の厚みの増大に起因することが明らかである。

冬期間の琵琶湖では、湖水上に吹く強い風による底泥の巻き上げが常時生じており、底泥由来の有機物が取水された原水に流入している。つまり、UF膜に付着しやすく粒径の小さな有機物が冬期間の琵琶湖原水中に含まれておらず、このような物質が膜を閉塞させやすくなっている可能性が大きい。そのため、中空糸有効内径dの減少が直ちに膜透過性能の低下をもたらしてしまうと考えられる。

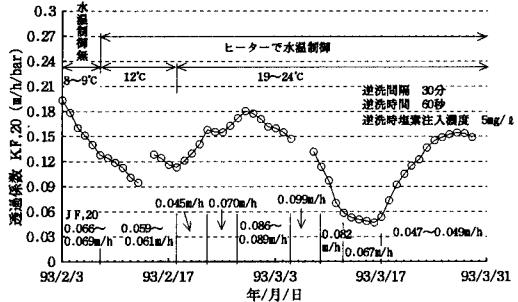


図2 透過係数の経日変化(Run 1)

(2) Run 2 (1993年3月30日～1993年5月25日)

Run 2は実験開始に先立つて膜の薬品洗浄をせず、Run 1に引き続いて行われた。図4にRun 2の透過係数 $K_{F,20}$ の経日変化を示す。水温は22°C前後(3月30日～4月6日)と16°C前後(4月7日～19日)に制御した。またその間、 $J_{F,20}$ は0.068～0.077m/hに設定したが、 $K_{F,20}$ は0.174m/h/barから0.113m/h/barへと徐々に低下した。4月20日以降は水温制御を止め(自然水温11°C～15°C)、 $J_{F,20}$ を0.063～0.071m/hと低めに設定した結果、 $K_{F,20}$ は0.11m/h/bar前後のほぼ一定値のまま推移した。しかし5月下旬に至って $K_{F,20}$ は急激に減少した。

図5にRun 2における中空糸有効内径dと $K_{F,20}$ の関係を示す。Run 1の場合とは異なり、Run 2の期間中はdが0.86～0.88mmとほぼ一定の高い水準に保たれており、 $K_{F,20}$ の減少とdには相関が認められない。このことは、ケーキ層の厚みの増加が膜透過性の低下を引き起こしているのではなく、膜内部での閉塞が膜透過性の低下の原因であると考えられる。Run 2の終了時に膜モジュールの中空糸膜を観察したところ、中空糸の外側(透過水側)が赤褐色に変色していたことから、鉄やマンガンの付着による膜内部の閉塞が生じたものと考えられる。このようなタイプの膜の閉塞は長期の運転期間中に徐々に進行していく可能性もあるが、図4に示されるように薬品洗浄から3か月半経過した5月下旬に至って膜内部での閉塞が一段と進んだと考えられる。

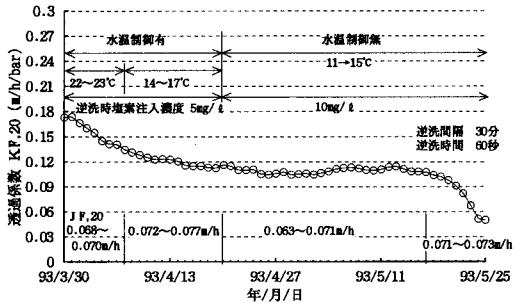


図4 透過係数の経日変化(Run 2)

## 4. おわりに

本研究では中空糸UF膜ろ過のパイロットプラントを用いて琵琶湖水の直接ろ過実験を行って膜透過性能に影響を及ぼす因子を検討した結果、次のことが明らかとなった。

- ① 原水水温の低下は透過性能を急激に低下させる。低水温条件でUF膜中空糸に付着してケーキ層を形成することにより閉塞を生じさせやすい有機物が冬期間の琵琶湖水中に含まれていると考えられる。
- ② ろ過フランクスを高く設定した場合には、膜間差圧は上昇して膜透過係数は低下する。逆に、ろ過フランクスを低く設定すれば、膜間差圧は下降して膜透過係数が増加するといった傾向が認められる。

今後の課題として、冬期の低水温時の膜透過性能の急激な低下への対応策の検討が必要である。冬期の膜の閉塞はケーキ層の付着・肥厚化が主たる原因があるので、ケーキ層のはく離・除去のために1日1回の短時間の温水洗浄等の簡単な操作を導入するなどの検討が望まれる。

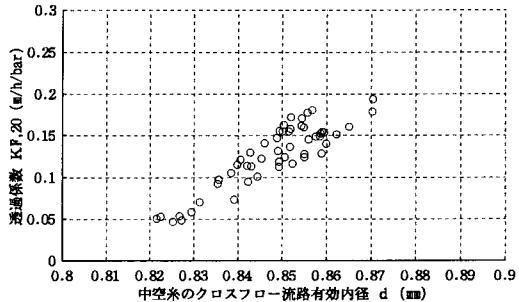


図3 中空糸有効内径と透過係数の関係(Run 1)

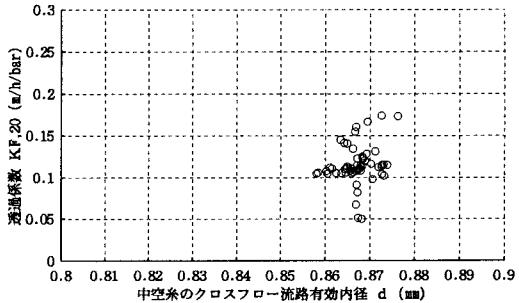


図5 中空糸有効内径と透過係数の関係(Run 2)