



Title	琵琶湖水のUF膜ろ過による浄水処理
Author(s)	湯浅, 晶; 野中, 規正; Denis, Snidaro
Description	第1回衛生工学シンポジウム (平成5年11月17日 (水) -18日 (木) 北海道大学学術交流会館) . 6 水処理 . 6-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 1, 192-197
Issue Date	1993-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7448">https://hdl.handle.net/2115/7448</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	1-6-1_p192-197.pdf



## 6 - 1

# 琵琶湖水のUF膜ろ過による浄水処理

湯浅 晶 (岐阜大学), 野中 規正, Denis Snidaro (ディックデグレン(株))

### 1. はじめに

急速ろ過システム(凝集・フロック形成・沈殿・砂ろ過)による浄水処理に替わる方法として最近注目されている膜ろ過プロセスは、膜の分離孔径よりも寸法の大きな懸濁質や高分子物質を除去するプロセスであり、様々な種類の素材や形状のMF膜(分離孔径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ )やUF膜(排除限界分子量数千~数十万)を用いた膜ろ過浄水処理法の検討が各地で行われつつある。膜ろ過法の利点の一つは、凝集・フロック形成といった成長プロセスや負荷削減のための沈殿プロセスなどの前処理を行わなくても固液分離が原理的には可能であり、浄水工程の運転・管理の簡単化と浄水施設の縮小が可能となることである。

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、透過水の水質と透過性能を長期間監視して中空糸UF膜による直接ろ過プロセスの実用性について検討した。

### 2. UF膜ろ過実験の概要

#### 2-1. UF膜モジュールと運転条件

滋賀県長浜市の下坂浜浄水場(長浜水道企業団)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平成4年9月に開始した。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プレフィルター(目開き $125\mu\text{m}$ )を通過してUF膜モジュールに流入し、中空糸の内側から外側へとろ過される。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 $Q_C$ は所定のクロスフロー流速 $V_C$ を与えるように一定流量に制御した。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、膜内部に付着した不純物および中空糸の内側(クロスフロー側)表面に蓄積したケーキを剥離させて、逆洗排水弁(BWDV)から系外へ排出した。逆洗時の洗浄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( $\text{NaClO}$ )を注入した。また、原水側圧力(膜モジュールの原水流入口の圧力 $P_1$ 、流出口圧力 $P_2$ )と透過水出口圧力 $P_3$ を測定した。ろ過工程と逆洗工程の操作条件の例を表2に示す。

#### 2-2. 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。

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

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

$$J_F = Q_F/A_F \quad \text{-----(3)}$$

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

ただし、 $L_{12}$ : $P_1$ と $P_2$ の測点間垂直距離(2.0m)、 $\rho$ :水の密度、 $g$ :重力加速度、 $A_F$ :全ろ過表面積。

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 $20^\circ\text{C}$ 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。

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

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

ただし、 $T$ :水温、 $\mu$ :水の粘性係数、 $\mu_{20}$ :20°Cの水の粘性係数。

また、膜表面上に付着したケーキ層の厚みの増加による中空系クロスフロー流路の有効内径の減少を、次のHagen-Poiseuille式を用いて計算した。

$$\Delta P = (32\mu VL)/d^3 = 128\mu LQ/(\pi d^4) \quad \text{-----(7)}$$

ただし、 $\Delta P$ :圧力損失、 $V$ :流速、 $Q$ :流量、 $\mu$ :粘性係数、 $d$ :円管内径、 $L$ :管長。

表1 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
中空系内径/外径	0.93 mm/1.67 mm
中空系有効長/全長	1.20 m/1.30 m
中空系の本数	2060 本/module
全ろ過面積	7.2 m <sup>2</sup> /module
純水の初期透過性能 (20°C換算)	0.22~0.32 m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup>

表2 ろ過条件と逆洗条件の例

原水供給流量 $Q_0$ (20°C)	0.72 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
ろ過流量 $Q_F$ (20°C)	0.72 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
ろ過ラックス $J_F$ (20°C)	0.10 m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
循環流量 $Q_C$	4.5 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
クロスフロー流速 $V_C$	0.90 m s <sup>-1</sup>
原水圧力:モジュール入口 $P_1$	0.7~2.0 bar
原水圧力:モジュール出口 $P_2$	0.5~0.6 bar
ろ過水圧力 $P_3$	0.2 bar
ろ過工程時間	45 min
逆洗工程時間	45 s
逆洗時の塩素注入濃度	5 mg-Cl <sub>2</sub> /L

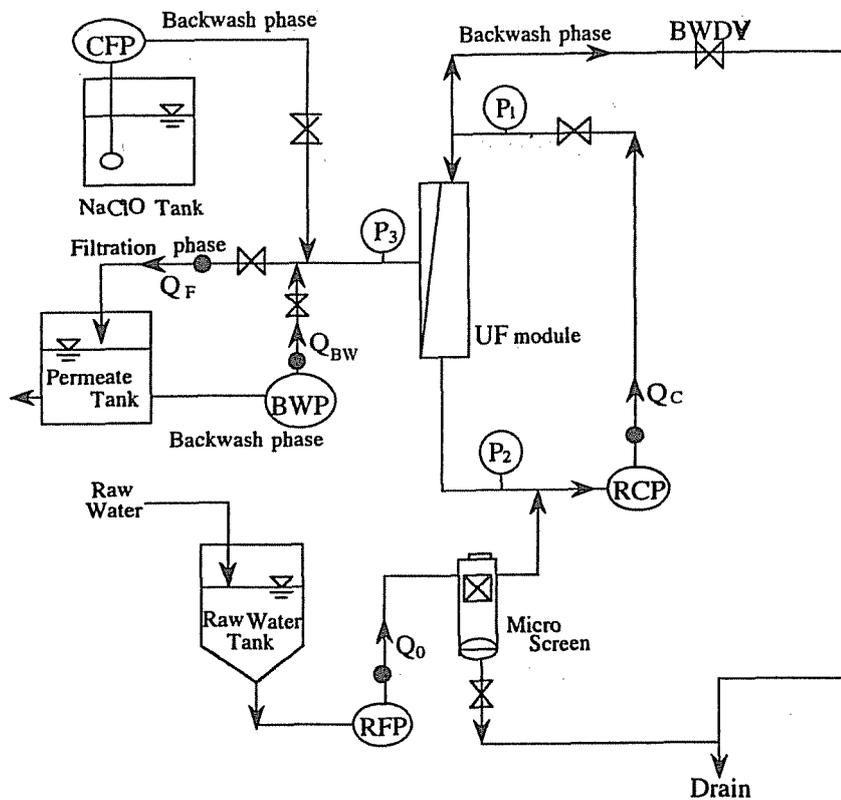


図1 UFパイロットプラントのフロー図

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 水質

UF膜ろ過プラントの運転開始(平成4年9月4日)から翌年1月24日までの原水と膜透過水の水質データを図2~13に示す。原水の水温は28°Cから8°Cまで徐々に低下した(図2)。9月上旬にはpH8.4程度であったが、藻類の活動低下につれて9月中旬からpH7.8~7.0の範囲で徐々に低下していった(図3)。アルカリ度と塩素イオン濃度は実験期間中ほぼ一定であり、それぞれ32mg/L (as CaCO<sub>3</sub>)および11mg/Lであった。原水中のプランクトンは100~800個/mL、一般細菌数は10~800個/mLであった(図4と図5)。透過水中にはこれらの微生物は検出されず、また大腸菌群の定性試験結果は実験期間中常に陰性であった。原水の濁度は1~20度の範囲であったが、ろ過水ではほとんど0であり、最悪時でも0.1度以下であった(図6)。このように、懸濁物質はUF膜ろ過プロセスにより完全に除去された。

原水の色度は2~24度の範囲であったが、透過水では通常は1度以下であり、最悪時でも3度以下であった(図7)。原水の過マンガン酸カリウム消費量は3~5mg/Lの範囲であり、UF膜ろ過により20~40%が除去された(図8,9)。原水のTOCは2~3mg/Lであり、10~20%が除去された。原水の全窒素および有機窒素の濃度はそれぞれ0.4~0.5mg/Lおよび0.2~0.4mg/Lの範囲であり、除去率はそれぞれ15~20%および20~40%であった。原水の全リン濃度は0.2~0.7mg/Lであったが、UF膜ろ過により0.002mg/L以下に減少した。

原水(ただし分離サイズ1μmのガラス繊維ろ紙でろ過後)の紫外外部吸光度E<sub>260</sub>(1cmセル)は0.005~0.022の範囲であり、運転期間が増すにつれて膜ろ過による除去率は10~70%の範囲で徐々に増加する傾向を示した(図10,11)。溶存性有機物の除去性が徐々に向上したことは、膜表面のケーキ層の厚みの増加や膜内部の閉塞により膜の分離サイズが実質的に徐々に減少していく可能性を示していると考えられる。

原水中の総鉄と総マンガンはそれぞれ0.01~0.08mg/Lおよび0.004~0.014mg/Lであり、いずれも透過水中では0.002mg/L以下に減少した。他の重金属(Cu,Pb,Zn,Cr,Cr<sup>6+</sup>,Cd,Hg,As)は原水と透過水中で不検出あるいは水道水の水質基準以下の濃度であった。

以上のことから、凝集処理を行わないUF膜を用いた直接ろ過プロセスにより、飲料水として十分な水質の水道水を供給することができることが示された。

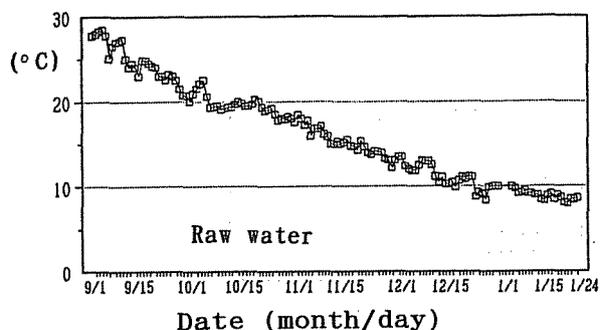


図2 水温

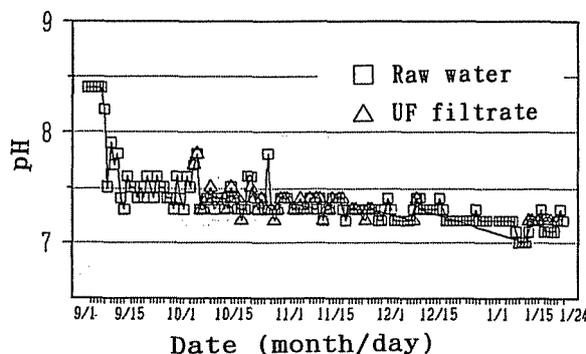


図3 pH

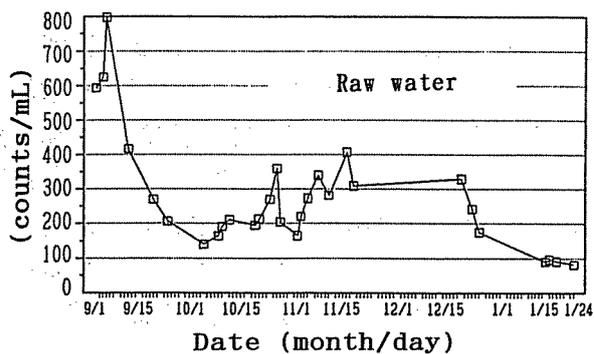


図4 総プランクトン

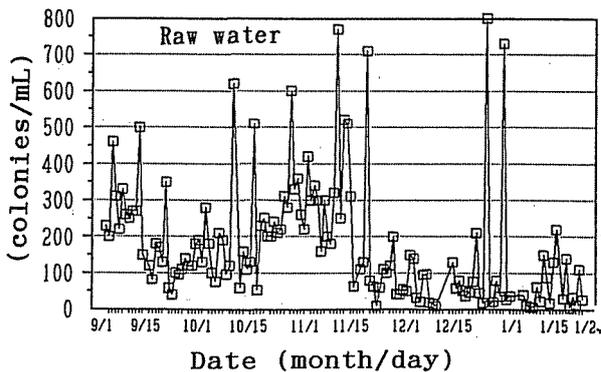


図5 一般細菌

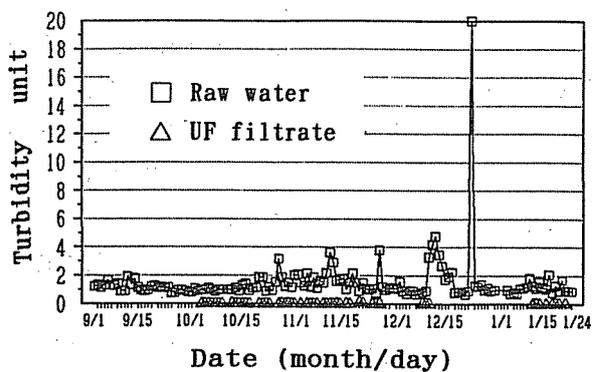


図6 濁度

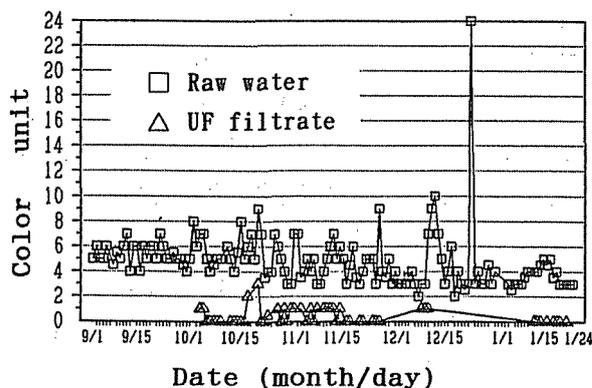


図7 色度

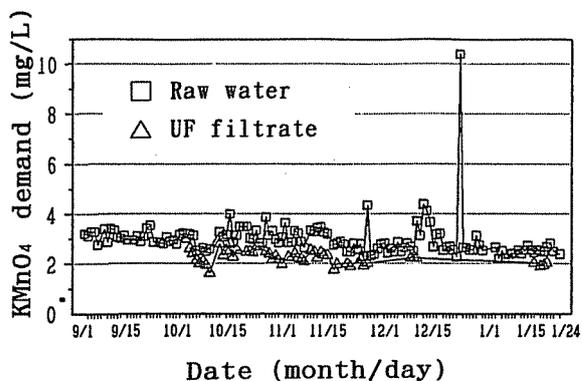


図8  $\text{KMnO}_4$ 消費量

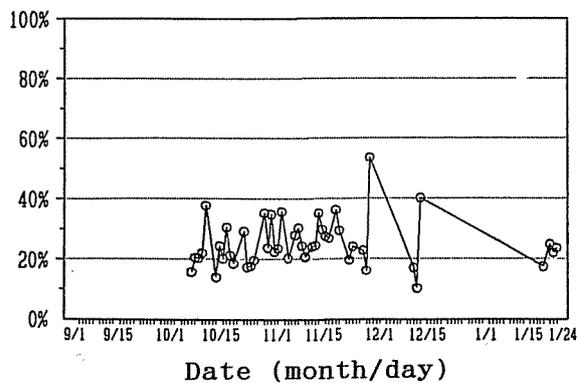


図9  $\text{KMnO}_4$ 消費量の除去率

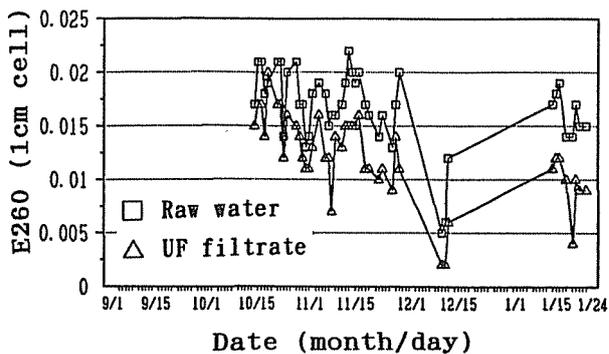


図10  $E_{260}(1\text{cm}\text{cell})$

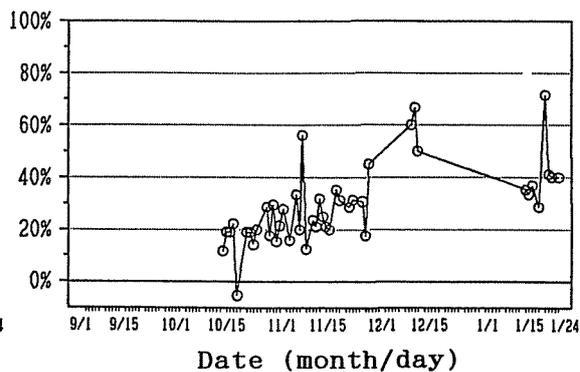


図11  $E_{260}(1\text{cm}\text{cell})$ の除去率

### 3-2. 透過性能

運転開始から約2ヵ月間の中空系内部クロスフロー流路の圧力損失 $\Delta P_{CF}$ 、膜間差圧 $\Delta P_{TM}$ 、膜透過係数 $K_{F, 20}$ (20°C換算値)、および原水水温を図12, 13に示す。水温はこの期間中に25°Cから16°Cへとほぼ直線的に減少し(図13), したがって水の粘性係数 $\mu$ はこの期間中に約24%増加した。クロスフロー圧力損失 $\Delta P_{CF}$ もこの期間中に0.42barから0.62barへとほぼ直線的に増加したが(図12),  $\Delta P_{CF}$ の増加率は48%であり, 粘性係数 $\mu$ の増加率の約2倍に達する。この実験期間のクロスフロー流量 $Q_c$ はほぼ一定値に制御されており, Hagen-Poiseuille式を用いて解析すると, クロスフロー流路(中空系)の有効径がこの期間中に16%減少し, したがってクロスフロー流速 $V_c$ が41%増加したことを意味する。クロスフロー流路の有効径の減少は膜表面上に付着したケーキ層の厚みの増加によるものと考えられる。

このプラントではろ過フラックス $J_F$ をほぼ一定値に制御して運転しており, 膜表面あるいは膜内部での閉塞の度合いに応じて操作圧力( $P_1, P_2$ )が上昇する。運転開始から2ヵ月間は, ろ過工程中のろ過フラックス $J_F$ を0.90~0.95 $m^3/m^2/h$ に制御したが, この期間中に膜間差圧 $\Delta P_{TM}$ は0.34barから0.58barへと徐々に増加し(増加率71%), したがって膜透過係数 $K_F$ (温度補正なし)は41%減少した。ただし, 期間中の水温低下による粘性係数の上昇の影響を補正した膜透過係数 $K_{F, 20}$ (20°C換算値)の減少率は25%であった(0.24→0.18 $m^3/h/bar$ ; 図13)。この期間中の1日の総ろ過流量は16 $m^3/day$ であったが, その内の5~10%が逆洗工程で消費された。

10月17日から26日にかけて急激に $\Delta P_{TM}$ が増加( $K_{F, 20}$ が減少)したが, この時には逆洗工程中の塩素注入量が所定の量となっておらず, 塩素濃度が不十分であったことが原因であると考えられた。塩素注入量を再調整することにより膜透過性能が回復したことから, 逆洗時の塩素注入は膜に付着した有機物を酸化・分解により除去して透過性能を回復させる上で重要な役割を果たすと考えられる。

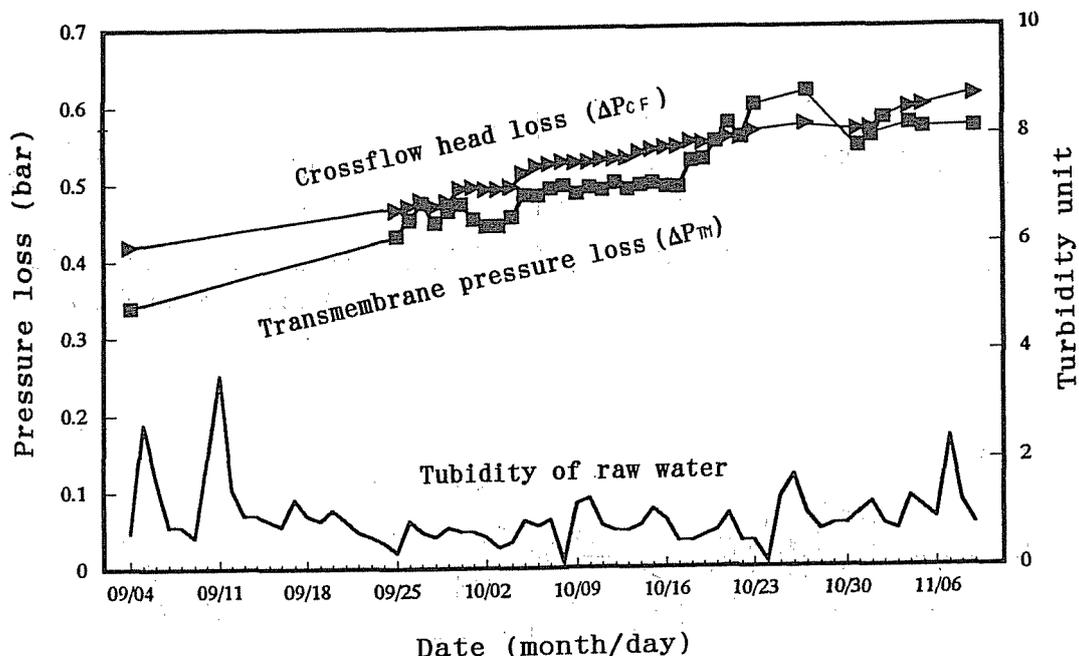


図12 クロスフロー圧力損失 $\Delta P_{CF}$ と膜間差圧 $\Delta P_{TM}$

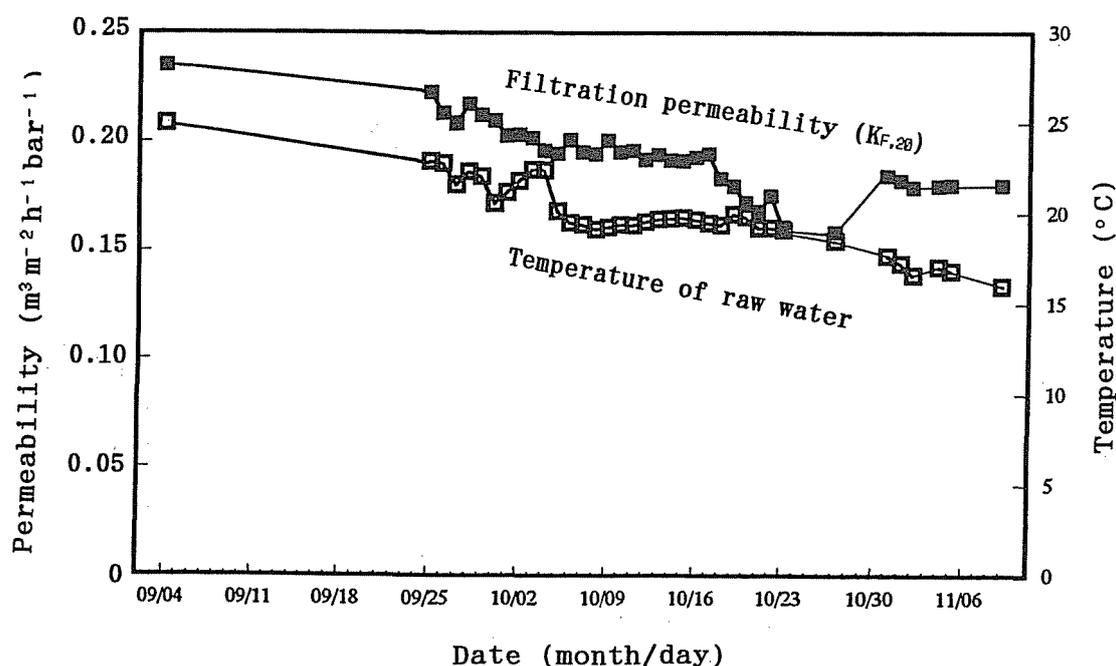


図13 膜透過係数 $K_{F,20}$ と水温

水温が $15^{\circ}\text{C}$ 以下に低下した11月中旬以降には、膜透過係数 $K_{F,20}$ が急激に減少したために、薬品（次亜塩素酸ナトリウム溶液，界面活性剤，キレート剤）による温水洗浄を行った。薬品洗浄後の膜透過係数 $K_{F,20}$ は新品の性能にまで回復した。しかしながら，原水の水温が $10^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$ まで低下した12月～1月の冬期間は，再び膜透過係数 $K_{F,20}$ は著しく速く減少した。12月～1月の冬期間に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，取水された原水に流入している。薬品洗浄排水中の無機物(Fe, Mn, Al, Ca, Mg, Si)の濃度はさほど高くないことから，これらの無機物が閉塞の主たる原因とは考えにくい。また，薬品洗浄にあたっては，有機物の酸化・分解に効果が大きい次亜塩素酸ナトリウムのみによる温水洗浄のみでも，洗浄直後の膜透過係数 $K_{F,20}$ が新品の性能にまで回復することが認められた。ヒーターを用いて原水の水温を $20^{\circ}\text{C}$ に制御した場合には膜透過係数の減少が大幅に抑制できることが確認された。これらの観察から，低水温条件下でUF膜内部に付着しやすく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可能性が考えられる。

#### 4. おわりに

琵琶湖水を原水として中空糸UF膜ろ過プロセスによる浄水処理を行った結果，全実験期間を通じて透過水は飲料水として十分な水質を示した。膜透過係数 $K_{F,20}$ は $0.2 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$ 前後と良好であったが，原水の水温が $8^{\circ}\text{C}$ にまで低下する冬期間には $K_{F,20}$ が著しく減少した。低水温時における膜透過性能を良好に維持するためには，ろ過フラックスや逆洗頻度・逆洗方法等についての検討が必要であると考えられる。

謝辞：UF膜ろ過実験の実施と水質の分析にあたって，長浜水道企業団浄水課の方々から多大なる協力を頂戴した。ここに記して感謝の意を表す次第である。