

〈研究発表〉

前処理と温水洗浄の組み合わせによる低ファウリング型膜ろ過システム

村山 清一¹⁾, 松代 武士¹⁾, 横川 勝也¹⁾, 納田 和彦²⁾, 竹内 賢治³⁾

¹⁾ ㈱東芝 電力・社会システム技術開発センター (〒183-8511 府中市東芝町 1, E-mail: seiichi.murayama@toshiba.co.jp)

²⁾ ㈱東芝 社会インフラシステムソリューション部 (〒183-8511 府中市東芝町 1, E-mail: kazuhiko.nouda@toshiba.co.jp)

³⁾ ㈱東芝 水・環境システム事業部 (〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1, E-mail: kenji2.takeuchi@toshiba.co.jp)

概要

AQUA10 持込研究を通じ、低ファウリング型膜ろ過システムの浄水処理への適用性評価を行った。河川・湖沼系原水における膜ろ過システムにおいて、温水洗浄と凝集剤添加前処理を組み合わせることで、膜透過流束 1.46m/d で薬品洗浄周期に換算すると約 500 日となる緩やかな差圧上昇 (0.26kPa/d 、温水洗浄無しの場合の約 1/4) で推移する運転を実現できた。粉末活性炭添加前処理では、凝集剤のみの前処理よりも膜間差圧の上昇を低減できた。前処理と温水洗浄の組み合わせにより、膜間差圧上昇の低減効果を発揮する膜ろ過システムを確立できた。

キーワード: 膜ろ過, ファウリング, 前処理, 温水洗浄, 凝集剤

1. はじめに

上水膜ろ過では、河川水等表流水を膜ろ過処理する場合、物理洗浄では回復し難い不可逆的なファウリングを生じ、運転継続に伴い膜ろ過抵抗が上昇しやすい傾向にある。このため、あらかじめ膜透過流束を低く設定した設計が必要となり、コストの増大につながるなどの課題があった。こうした課題を解決するため、凝集剤の添加と温水洗浄との組み合わせにより、不可逆的なファウリングによる長期的な過抵抗の上昇を低減する技術の開発を進めてきた。

(財)水道技術研究センターの「持続可能な水道サービスのための浄水技術に関する研究 (Aqua10 共同研究)」の持込研究として、川崎市上下水道局との共同研究により実証試験を行ない^{1),2)}、前処理と温水洗浄を組み合わせた低ファウリング型膜ろ過システムの浄水処理への適用性を評価した。

2. 試験概要

2009 年 6 月～2011 年 3 月の期間、川崎市上下水道局長沢浄水場にて実証試験を行なった。Fig.1 に膜ろ過試験設備の概略図を示す。膜ろ過試験設備は、原水槽、前処理水槽 (2 系統)、膜モジュール、処理水槽、ヒートポンプ、コンプレッサ、計装機器で構成され、膜モジュールは PVDF 製 MF 膜 (公称孔径 $0.05\ \mu\text{m}$) を使用した。前処理水槽では、凝集剤、pH 調整剤 (硫酸) を添加し、急速攪拌後に加圧全量ろ過を行なった。膜モジュールの逆洗は、膜の二次側から処理水を供給する逆圧水方式と、加温した温水を供給する逆圧温水方式 (以下、温水洗浄と記す) を併用した。

温水洗浄は、1 日に 1 回程度の頻度で実施した。洗浄用の温水は、ヒートポンプ式給湯装置より供給した。

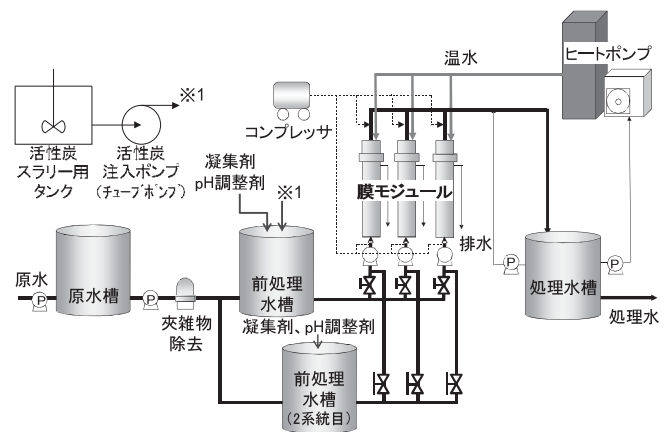


Fig.1: Process flow diagram of membrane test plant

3. 試験方法

3.1 凝集剤添加と温水洗浄による差圧上昇評価試験

凝集剤添加前処理と温水洗浄を適用した場合の膜間差圧上昇の低減効果を確認するため、凝集剤添加有無、温水洗浄有無の条件で膜ろ過連続試験を行い、膜間差圧の変化を比較評価した。

凝集剤は、ポリ塩化アルミニウム (以下、PAC と記す) を使用した。ジャーテストにより求めた凝集沈澱処理の上澄み濁度が 0.1 度以下となる注入率 15mg/L を本試験の注入条件とした。

温水洗浄は 1 日に 1 回の頻度で 1 回 5 分実施した。

膜間差圧上昇率の目標値は、薬品洗浄周期が 1 年となる上昇率として 0.36kPa/d とした (膜透過流束

2.0m/d の時の初期差圧 20kPa、薬品洗浄時の差圧 150kPa から算出)。

Table.1 に運転条件とその範囲を示す。膜透過流束は、1.0～2.5m/d の範囲で変更した。運転方針として 1, 3 系は温水洗浄有り、2 系は温水洗浄無しとし、各々の膜透過流束と差圧上昇率を比較した。

Table.1: experiment condition

運転条件	変更範囲
ろ過継続時間(=逆洗間隔)	22分、または45分
逆洗時間	40s
膜透過流束(Flux)	1.0～2.5 m/d
温水洗浄	有り、無し
前処理としてのPAC注入	有り(注入率15mg/L)、無し

3.2 粉末活性炭添加による差圧上昇評価試験

(1) 膜間差圧上昇の低減効果の評価試験

粉末活性炭を前処理として添加することで膜ファウリング要因の一つである溶解性有機物の除去率を高くできることから、膜ファウリングの低減効果が期待できる。但し、粉末活性炭そのものによる目詰まりの影響度が不明であることから、膜ろ過連続試験により評価した。

数%の活性炭スラリー(水道用粉末活性炭(JWWA K113(粉末)))をポンプにて前処理水槽へ添加した。前処理として PAC のみを添加する系統を比較対象系とし、粉末活性炭のみ、或いは粉末活性炭+PAC を添加する系統を同時に膜ろ過連続試験し、膜間差圧上昇率を評価した。試験設備の制約上、試験時間は約 5 時間とした。3.1 項の結果より、薬品洗浄周期が 1 年となるような膜間差圧の推移での運転条件として、膜透過流束 2.0m/d、ろ過継続時間 22 分を設定した。Table.2 に前処理の試験条件を示す。粉末活性炭の注入率は、5、15、30mg/L を設定した。PAC の注入率については、3.1 項の試験の後、低い注入率の場合でも差圧上昇の低減効果が同等以上であることを確認したことから、本項の試験では 5mg/L に設定した。

Table.2: experiment condition

試験No. 条件	No.1 ^{*1}		No.2 ^{*2} , 3 ^{*2} , 4 ^{*3} , 5 ^{*4} , 6 ^{*4}		No.7		No.8	
PAC注入	5mg/L	なし	5mg/L		5mg/L		5mg/L	
活性炭注入	なし	15mg/L	なし	5 ^{*2} , 15 ^{*3} , 30 ^{*4} mg/L	なし	接触時間 2倍 30mg/L	なし	微細化 活性炭 30mg/L

*1: 粉末活性炭そのものによる目詰まりの影響を評価

*2: No.2と3は同条件(活性炭注入率: 5mg/L)で別の日に実施

*3: No.4の活性炭注入率は15mg/L

*4: No.5と6は同条件(活性炭注入率: 30mg/L)で別の日に実施

(2) 有機物(E260)の吸着除去性による影響評価試験

原水、前処理水の溶解性成分の紫外線吸光度(波長 260nm、セル長 5cm、における吸光度。以下、E260 と記す。)を測定し、前処理における溶解性有機物の

吸着除去性が膜間差圧上昇の低減効果へ与える影響を評価した。溶解性成分は、0.45 μ m フィルタでろ過したる液中に含まれる成分とした。

4. 結果と考察

4.1 凝集剤添加と温水洗浄による差圧上昇評価試験

Fig.2 に全期間における膜間差圧の変化を示す。期間④では、PAC 添加無しの条件としており、膜間差圧が急上昇する結果となった。期間⑤と⑥では期間④で差圧が急上昇した後、膜間差圧が回復する現象(傾きが負)が見られた。膜間差圧の変化が安定しておらず、十分長い時間運転することで安定すると思われることから、今回は膜間差圧の上昇率が負となる期間のデータは評価には用いなかった。期間⑧は、期間⑦までの結果から、膜間差圧上昇率が 0.36kPa/d 以下となる膜透過流束として 2.0m/d を設定し、差圧上昇率を確認した。その結果、薬品洗浄周期が 1 年となるような膜間差圧上昇率 0.36kPa/d より小さい上昇率 0.15kPa/d (⑧-3系)で推移した。

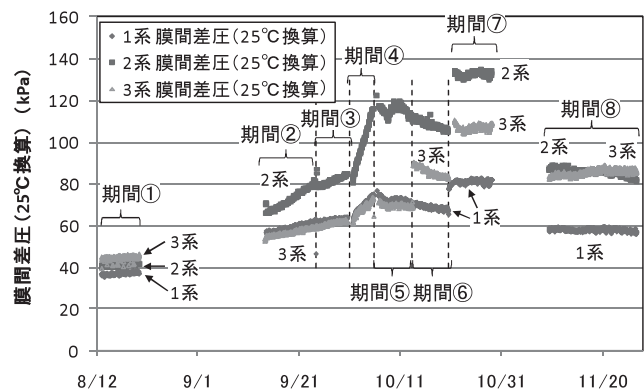


Fig.2 Transmembrane pressure (TMP)

まず、温水洗浄、PAC 添加前処理の膜間差圧上昇の低減効果について検討した。Table.3 に温水洗浄、PAC 注入の条件を変更した時の膜間差圧上昇率を示す。期間は③と④、運転条件を膜透過流速 1.46m/d、ろ過継続時間 22 分とした時の結果である。膜間差圧上昇率は、“温水洗浄有るかPAC 添加有り”の条件(③-1系)が最も小さく 0.53kPa/d、次いで“温水洗浄無しかPAC 添加有り”の条件(③-2系)で 0.95kPa/d、そして“温水洗浄無しかPAC 添加無し”の条件(④-1系)で 2.60kPa/d となった。“温水洗浄有るかPAC 添加有り”の条件(③-1系)が最も小さく 0.53kPa/d、次いで“温水洗浄無しかPAC 添加有り”の条件(③-2系)で 0.95kPa/d、そして“温水洗浄無しかPAC 添加無し”の条件(④-1系)で 2.60kPa/d となった。

Table.3: Daily increase of TMP(1.46m/d, 22min)

温水洗浄	PAC注入	膜間差圧上昇率 (kPa/d)	試験期間	系列
有	有	0.53	③	1系
無	有	0.95	③	2系
無	無	2.60	④	1系

PAC 添加有り”の条件が最も膜間差圧上昇の低減に効果があり、次いで、“温水洗浄無しかつ PAC 添加有り”、“温水洗浄、PAC 添加共に無し”の順となることを確認できた。

次に、薬品洗浄周期が1年となる運転条件（膜透過流束）について検討した。目標差圧上昇率 0.36kPa/d より少し上回っているが、期間⑦では温水洗浄有無の条件下で異なる膜透過流束の時にほぼ同じ差圧上昇率約 0.4kPa/d で変化した。Table.4 に期間⑦における膜透過流束と膜間差圧上昇率を示す。膜透過流束は、“温水洗浄有しかつ PAC 添加有り”の条件（⑦-3系）で 2.5m/d (0.41kPa/d)、“温水洗浄無しかつ PAC 添加有り”の条件（⑦-2系）で 1.75m/d (0.42kPa/d) であった。このことから、薬品洗浄周期が約1年となるような運転条件として、“温水洗浄有しかつ PAC 添加有り”の条件の方が、“温水洗浄無しかつ PAC 添加有り”の条件よりも膜透過流束を高く設定でき、今回の条件では約 1.4 倍高められた。必要な膜本数に換算すると、約 0.71 倍の本数で良いことになる。

Table.4: Permeation flux at period ⑦

温水洗浄	PAC注入	膜透過流束 (m/d)	膜間差圧上昇率 (kPa/d)	試験期間	系列
有	有	2.50	0.41	⑦	3系
無	有	1.75	0.42	⑦	2系

第三に、“温水洗浄有しかつ PAC 添加有り”の条件とした時、目標の膜間差圧上昇率 0.36kPa/d に近い変化をした膜透過流束について、試験期間全体を通じて検討した。Table.5 に膜間差圧上昇率 0.36kPa/d に近い推移をした時の膜透過流束を示す。期間②では、膜透過流束を 1.46m/d と設定した時、0.46kPa/d (②-1系、ろ過継続時間 45 分)、0.47kPa/d (②-3系、ろ過継続時間 45 分) となった。別の期間の期間⑦では、2.5m/d まで膜透過流束を上げた条件の時膜間差圧上昇率が 0.41kPa/d (ろ過継続時間 22 分)、期間⑧では 2.0m/d の条件の時膜間差圧上昇率が 0.15kPa/d (ろ過継続時間 22 分) であった。期間により水質が異なるため得られた結果も異なるが、膜透過流束が 1.46～2.5m/d の範囲で差圧上昇率 0.47kPa/d 以下となる運転を実現できた。

Table.5: Permeation flux at 0.47kPa/d or less

膜透過流束 (m/d)	膜間差圧上昇率 (kPa/d)	ろ過継続時間(分)	試験期間	系列
1.46	0.46	45	②	1系
1.46	0.47	45	②	3系
2.00	0.15	22	⑧	3系
2.50	0.41	22	⑦	3系

更に、今回の試験結果を長期的に評価するため、休止期間の影響を排除した期間②～⑦の膜間差圧の変化

から温水洗浄有無による膜間差圧の変化を評価した。期間②～⑦では、1系と2系は温水洗浄の有無し以外には同じ条件で運転した（1系は期間④以外温水洗浄有り、2系は期間中温水洗浄無し）。膜透過流束は、期間②～⑥まで 1.46m/d とし、期間⑦では 1.75m/d に上げた運転をした。運転日数は 44.6 日であった。期間②では膜透過流束 1.46m/d、期間⑦では膜透過流束 1.75m/d と異なることから、膜透過流束 1.46m/d の時の差圧に換算して差圧変化を評価した。期間②～⑦の運転期間で変化した膜間差圧を差圧上昇率として表すと、1系（温水洗浄有り）で 0.26kPa/d、2系（温水洗浄無し）で 1.01kPa/d であった。基本となる条件は、膜透過流束 1.46m/d、ろ過継続時間 22 分、前処理として PAC 添加有り（注入率：15mg/L）であり、1系は温水洗浄有り、2系は無しであった。これに対し、期間②ではろ過継続時間 45 分、期間④では PAC 添加無し、期間⑦では膜透過流束を 1.75m/d に高めた条件とし、更に1系については期間④で温水洗浄無し、という基本となる運転条件と比べて過酷な条件の場合があったが、温水洗浄有りでは 0.26kPa/d（薬品洗浄周期に換算すると、500 日に相当）、温水洗浄無しでは 1.01kPa/d（薬品洗浄周期に換算すると、129 日に相当）となる膜間差圧の変化で運転できた。

4.2 粉末活性炭添加による差圧上昇評価試験

(1) 膜間差圧上昇の低減効果の評価試験

Fig.3 に膜間差圧上昇率の差（試験対象系（活性炭のみ、或いは活性炭+PAC を添加した系列）の差圧上昇率から比較対象系（PAC のみ添加の系列）の差圧上昇率を引いた値）を示す。膜間差圧上昇率は、試験時間 5 時間では負となることもあったが、長期的に運転した場合差圧が減り続けることはないと考えられることから、同じ原水を並列で膜ろ過試験した時の差圧上

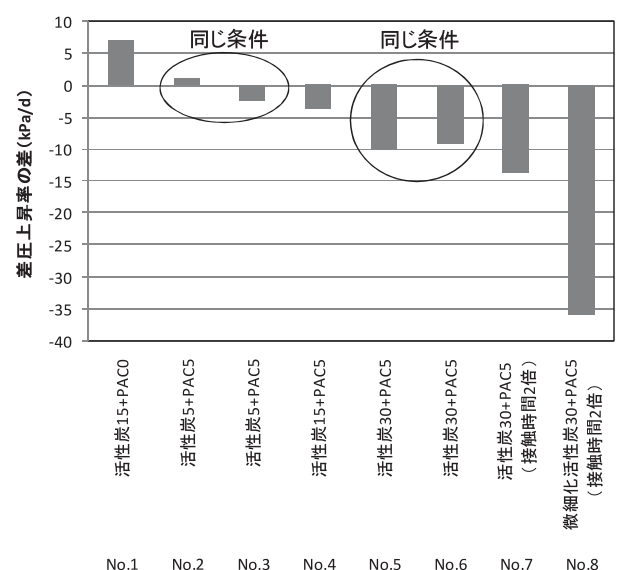


Fig.3 Comparison of daily increase in TMP

昇率を“差圧上昇率の差”により評価した。“差圧上昇率の差”が負の場合、PACのみ添加の前処理よりも差圧上昇の低減効果があり、その絶対値が大きいほど、その低減効果が大きいことを示す。

試験 No.1 では、粉末活性炭のみを添加する前処理を行っており、PACのみ添加の前処理よりも膜間差圧上昇率が大きくなった（差が正）。このことから、差圧上昇の低減に対しては、PAC 単独添加の方が効果があることがわかった。

次に、PAC (5mg/L) と活性炭を添加した条件では、No.2～8 より、差圧上昇率の差が負となることから（同条件の No.2、3 は平均値が負）、PAC のみ添加の前処理よりも差圧上昇低減効果があることがわかった。

No.2～6 を比較すると、活性炭注入率を増加させるほど差圧上昇率の差は負の値で絶対値が大きくなる結果となった。

No.5、6 と 7 を比較すると接触時間を約 2 倍とした試験 No.7 の方が差圧上昇率の差が大きくなった。

No.8 の試験では、粉末活性炭の代わりにそれを粉碎処理し、微細化させたものを使用しており、同条件で活性炭を利用した No.7 と比較して、差圧上昇率の差は、負でその絶対値は大きくなった。

以上より、粉末活性炭＋凝集剤（PAC）を添加する前処理は、凝集剤（PAC）のみを添加する前処理の場合よりも膜間差圧上昇の低減に効果があり、活性炭注入率、及び接触時間を大きくすることで、また活性炭を微細化することで、低減効果を高められることを確認した。

(2) 有機物(E260)の吸着除去性による影響評価試験

Fig.4 に前処理による E260 の除去率を示した。全ての条件について測定できなかったが、活性炭＋PAC を添加する条件で活性炭注入率が増えるほど前処理における E260 除去率が大きくなり、微細化した粉末活性炭を用い、接触時間を 2 倍にした条件が最も除去率が大きかった。

これらの結果から、粉末活性炭＋凝集剤（PAC）を添加する前処理による膜間差圧の低減効果は、E260 除去率と相関があると判断できる。

5. まとめ

5.1 凝集剤添加と温水洗浄による差圧上昇評価試験

- ・PAC 添加前処理＋温水洗浄の組合せにより各々単独の場合よりも差圧上昇を低減できた。薬品洗浄周期延長、或いは、膜モジュールの本数を減らした設計への展開が期待できる。
- ・長期評価（運転日数 44.6 日）の結果、膜透過流束 1.46m/d、ろ過継続時間 22 分、PAC 添加有り、温

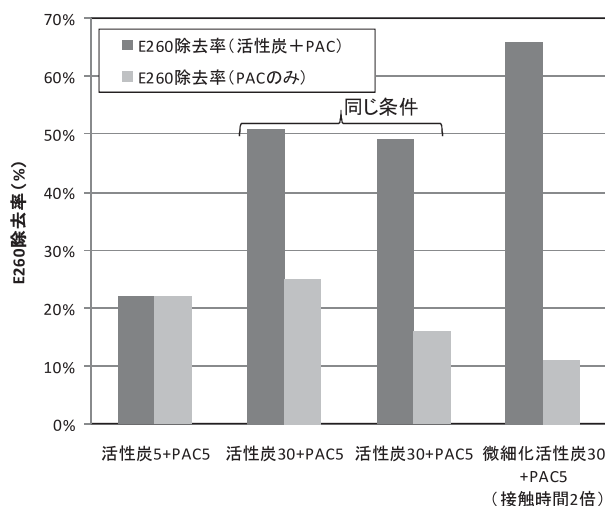


Fig.4 Removal of E260 by pretreatment

水洗浄を採用すると膜間差圧の変化率は 0.26kPa/d（薬品洗浄周期に換算すると、500 日に相当）、逆圧温水洗浄を採用しない場合は 1.01kPa/d（薬品洗浄周期に換算すると、129 日に相当）で運転が可能だった。

5.2 粉末活性炭添加による差圧上昇評価試験

- ・粉末活性炭のみを添加する前処理は、PAC のみ添加の前処理よりも膜間差圧上昇率が大きく、差圧上昇の低減を目的とした前処理として望ましくなかった。
- ・粉末活性炭＋凝集剤（PAC）を添加する前処理は、凝集剤（PAC）のみを添加する前処理の場合よりもさらに膜間差圧上昇の低減に効果があり、活性炭注入率、及び接触時間を大きくして E260 除去率を高くするほど効果を高めることができた。
- ・原水中の溶溶性有機物（農薬、トリハロメタン生成能、臭気、など）除去を目的とした粉末活性炭による吸着除去プロセスと膜ろ過の組合せが適用される場合、活性炭と凝集剤（PAC）を同時に添加する前処理により膜透過流束を高めた運転も可能となる。

謝辞

本研究の実施にあたり、原水および試験場所の提供、試験結果についての助言など多大なご協力をいただいた川崎市上下水道局の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松代武士：表流水の膜処理における凝集剤添加と温水洗浄の効果，第 61 回全国水道研究発表会予稿集，pp.250-251 (2010)
- 2) 村山清一：表流水を対象とした膜ろ過処理への凝集剤注入制御システムの適用，第 62 回全国水道研究発表会予稿集，pp.348-349 (2011)