

# 水リサイクル技術の下水への適用

## Application of Water Recycling Technology to Sewage Treatment Water

### —膜処理による下水高度処理水リサイクルの実証—



山地洋樹\*  
Hiroki Yamaji



池田進吾\*\*  
Shingo Ikeda



長谷川進\*\*\*  
Susumu Hasegawa  
工学博士・技術士（水道部門）

膜処理（MF膜＋RO膜）による排水リサイクルシステムの下水処理水への適用を実証した。堺市三宝下水処理場に100 m<sup>3</sup>/dのパイロットテスト機を設置し、高度処理水を原水として運転した。下水処理水には有機物が含まれるため、バイオフィウリングが確認されたが、当社の微生物抑制剤CX-3500を連続注入することにより安定運転が可能となった。原水の変動に対しても四季を通じて冷却塔補給水水質基準を十分満足する処理水質が得られた。

The application of the water recycling system to the sewage treatment water by the membrane process (Micro-filtration + Reverse osmosis) was studied. The pilot test equipment of 100 m<sup>3</sup>/d was set up in Sanpo sewage treatment plant in Sakai City, and advanced treated water was supplied as raw water. Without chemical doses, bio-fouling was caused because of the organism contained in the sewage treatment water. To control it, it is effective to dose continuously microorganism inhibitor CX-3500. The treated water quality with RO membrane is satisfied the water quality standard of make-up water for cooling tower.

#### Key Words :

水リサイクル	Water recycling system
精密ろ過	Micro-filtration
逆浸透	Reverse osmosis
ファウリング	Fouling
高度処理水	Advanced treated water

#### 【セールスポイント】

下水処理水の有効利用（これまでの修景、親水、場内用水にくらべより広範囲な用途に利用）  
逆浸透膜を用いた膜処理により工水レベルの水を得ることができる。

公共用水域に放流していた水を再利用することにより節水になる。また、渇水期に対応できる。

#### まえがき

地球全体に存在する水は14億 km<sup>3</sup>といわれるが、そのほとんどは海水で、淡水は2.5%程度にすぎない。また、水源が地域により偏在していることもあり、世界的には、慢性的な水不足に悩まされている

地域も少なくない。とくに、途上国においては、工場の大規模化、人口の集中など、水のユースポイントが集中するにつれ、地域的水不足が顕在化してきている。

このような水不足に対応するため、排水リサイク

ルの検討が各所で進められている。シンガポールにおいては、国家プロジェクトとして「NEWater」を立ち上げ、世界最先端の膜処理技術を用いた下水処理水の再生利用に取り組んでおり、2011年には国内の水需要の30%を賄う計画である。また、乾燥大陸オーストラリアにおいても、2007年の大渇水をきっかけに約2000億円の予算をつけ、海水淡水化および下水処理水の再利用が進められている。

今後、海外水ビジネスを展開するにあたり、排水のリサイクルは重要なキーワードになると予想される。ここでは、膜処理による排水リサイクル技術を下水に適用する場合の課題と対策を検討するため、堺市三宝下水処理場において実施した膜パイロット実証実験の結果について報告する。

## 1. 実験方法

実験は、堺市との共同研究として三宝下水処理場において実施した。三宝下水処理場<sup>1)</sup>は、堺市北西端の大和川河口に位置し、平成3年から毎年5月下旬にアジサイの一般公開を行っていることでも知られている(写真1)。排除方式は合流式(一部分流式)で、し尿も下水に直接投入して処理しており、現有処理能力は約12万 $\text{m}^3/\text{d}$ である。処理方式は、標準活性汚泥法から、高度処理(凝集剤添加ステップ流入式多段硝化脱窒法+繊維ろ過)に改造中であり、2009年度末現在4万 $\text{m}^3/\text{d}$ が高度処理化さ



写真1 三宝下水処理場のアジサイ一般公開

れている。供試原水としては、高度処理水を用いた。

パイロットテスト装置のフローと写真を図1および写真2に示す。除濁装置としてのMF(Microfiltration: 精密ろ過)膜としては、6inchの実モジュールを用いており、RO(Reverse osmosis: 逆浸透)膜も実設備を想定して、上流側2系列、下流側1系列のツリー状配列としている。

下水処理場の高度処理水を原水槽で受け、MF膜およびRO膜を通して処理水を得た。MF膜の逆圧洗浄用水としては、MF膜処理水を、また、薬液洗浄の薬品希釈用水としてはRO膜処理水を用いた。目標水質としては、表1に示す冷却塔補給水水質基準を目指した。

## 2. 実験結果

### 2.1 原水水質

表1に水質分析結果を示す。各組成において、最小値と最大値で2から4倍の変動が認められた。図2に降雨量と電気伝導率(EC)減少量の関係を示すが、降雨量が増加するにしたがいEC減少率が增大していることから、降雨による希釈効果が原水水



写真2 実験装置全景

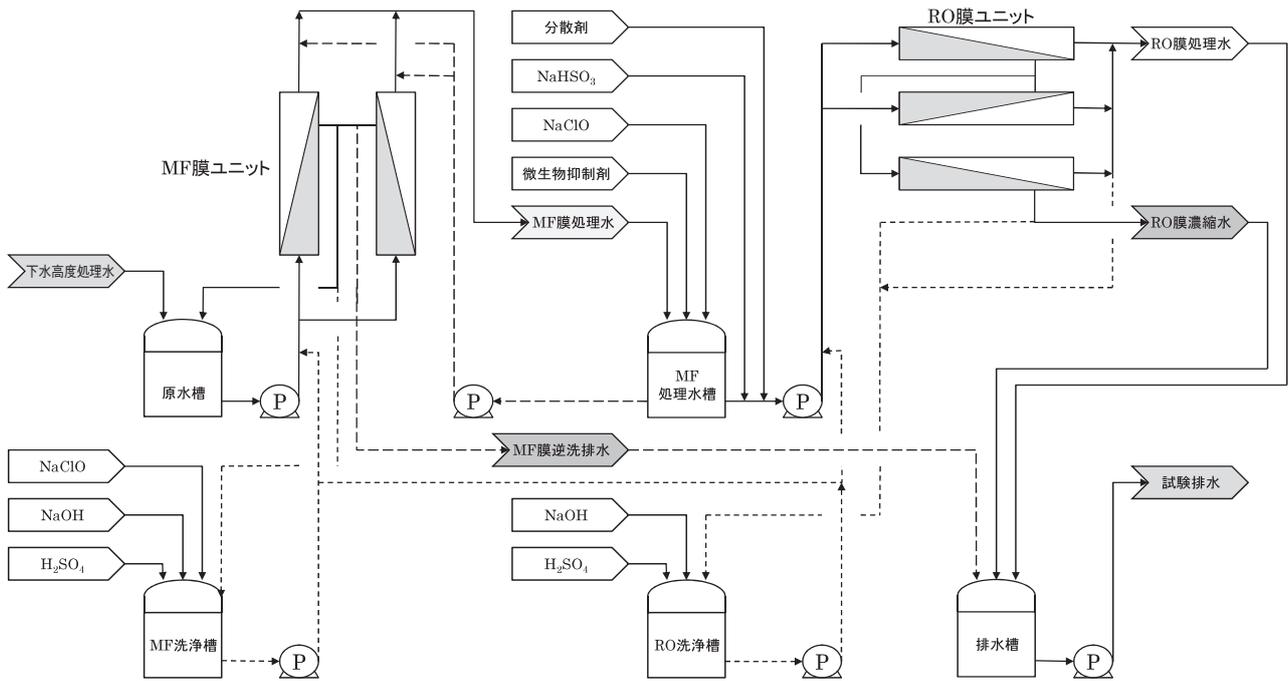


図1 実験装置フロー

表1 高度処理水水質および膜処理性能

分析項目	試料名	原水 (高度処理水)			MF膜処理水			RO膜処理水			工業用水水質基準	親水用水水質基準	冷却塔補給水水質基準
		最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値			
水素イオン濃度 (pH)	-	7.0	8.0	7.3	7.2	8.1	7.5	6.0	7.0	6.4		5.8 ~ 8.6	6.0 ~ 8.0
化学的酸素要求量 (CODMn)	mg/L	4.6	11.4	8.4	3.2	19.2	6.7	< 1.0	< 1.0	< 1.0			
色度	度	8	18	12	8	20	11	< 1	2	< 1		≤ 10	
濁度	度	0.1	1.8	0.9	0.1	0.2	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1		< 2	
蒸発残留物 (TS)	mg/L	480	1 400	932	450	1 300	943	< 10	40	< 21	< 250		
全硬度	mgCaCO <sub>3</sub> /L	100	317	204	100	442	234	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 120		< 70
カルシウム硬度	mgCaCO <sub>3</sub> /L	61.0	138	101	61.4	194	116	< 2.0	< 2.0	< 2.0			< 50
アルカリ度 (pH4.8)	mgCaCO <sub>3</sub> /L	70.1	107	93.4	68.6	108	93.8	2.8	5.5	4.1	< 75		< 50
電気伝導率	mS/m25℃	66.2	248	153	68.7	344	169	1.3	15.1	5.5			< 30
銅含有量	mg/L	0.1	0.9	0.3	0.1	0.1	0.1	< 0.10	< 0.10	< 0.10			< 0.1
鉄 (Fe)	mg/L	0.1	0.4	0.13	0.01	0.0	0.022	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.30		< 0.3
塩化物イオン	mg/L	171	608	385	170	608	384	2.78	28.40	12.80	< 80		< 50
硫酸イオン	mg/L	52.5	211	104	52.9	210	101	< 0.10	0.64	< 0.29			< 50
イオン状シリカ	mg/L	10.0	17.0	14.2	10.4	18.6	14.9	0.14	1.36	0.59			< 30
アンモニウムイオン	mg/L	0.06	1.30	0.36	0.01	1.54	0.36	0.01	0.06	0.04			< 0.1
硫化物イオン	mg/L	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05			検出されないこと

最小値および最大値の“<”は定量下限未満（検出されないこと）を示す。

質変動の一因と推察される。図2より、降雨量が20mmを超えるとECが約1/2に減少することが分かる。また、降雨により水温が低下したり、処理系内での滞留時間が短くなることから、濁度が上昇することが懸念されたが、高度処理として繊維ろ過が導入されることにより濁度は2を超えることはな

く、MF膜への負荷は小さいと予想された。

図3にRO膜のスケーリングに影響すると考えられる蒸発残留物 (TS: Total solids) および全硬度とECの関係を示す。ECとTS、全硬度に高い相関が認められることから、ECをモニタリングすることにより、RO膜のスケーリングを予測することがで

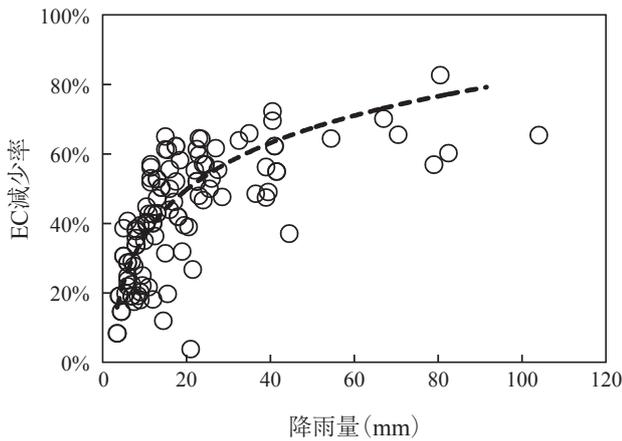


図2 高度処理水 EC におよぼす降雨量の影響

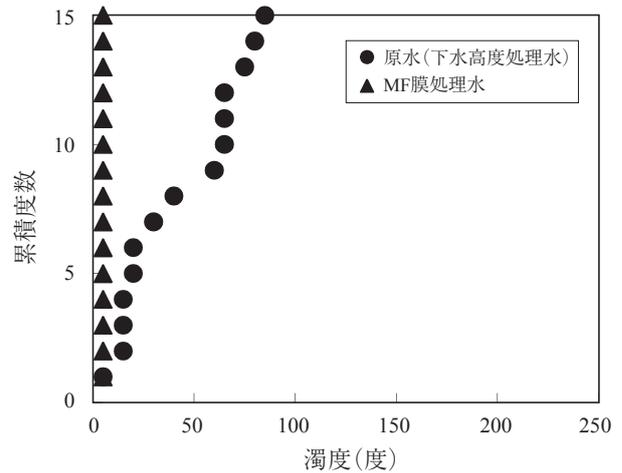


図4 高度処理水濁度と膜処理性能

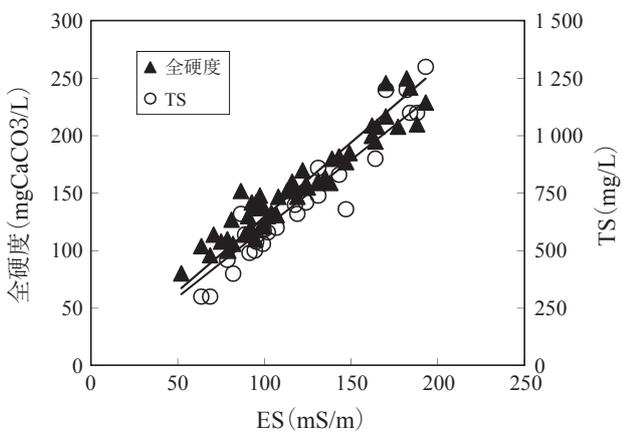


図3 高度処理水 EC と全硬度および TS の関係

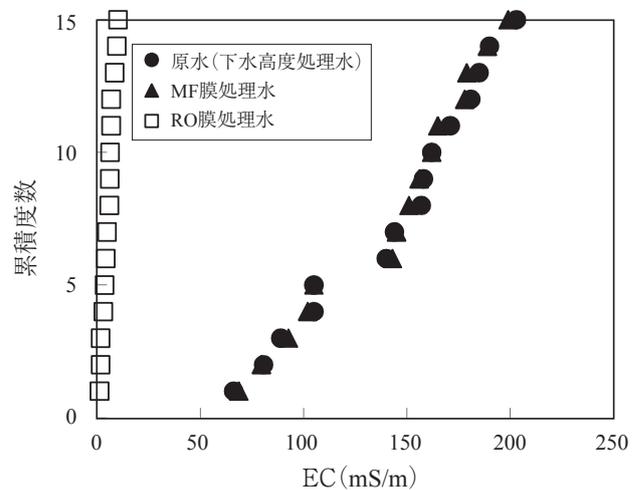


図5 高度処理水 EC と膜処理性能

き、薬液洗浄の目安とすることができると考える。

## 2.2 処理水質

図4にMF膜ファウリングに影響すると考えられる濁度の累積度数を示す。前述のとおり、原水濁度は2以下にまで処理されており、さらに、MF膜処理することでほぼ検出下限値にまで除去された。一方、図5に示すようにRO膜スケールに影響すると考えられるECについては、MF膜ではほとんど除去されることなく、ほぼ全量がRO膜に負荷されていた。原水ECの上昇によりRO膜処理水ECも若干上昇する傾向が認められ、原水ECが150 mS/m以上になると、5 mS/mを超える傾向にあったが、目標値の30 mS/mを十分下回る値であった。

## 2.3 膜ファウリング

### 2.3.1 有機物ファウリング

原水中の有機物の沈着、蓄積あるいは微生物の増殖により、MF、ROの両膜において有機物によるファウリングが起こる。MF膜については、酸、ア

ルカリ等の洗浄剤で洗浄可能であるが、RO膜はMF膜に比べ耐薬品性に劣るため、強力な薬品洗浄ができないことから、微生物抑制剤を注入することとした。微生物抑制剤は、ファウリングが高度に進行してから（微生物が増殖してしまってから）では効き目が期待できない（したがって処理場のように高濃度の活性汚泥の障害にはならない）ため、ファウリングが進行しないよう、低濃度で連続的に注入して微生物の増殖を抑制した。微生物抑制剤としては当社のSPスーパークリーンCX-3500を用いた。図6に微生物抑制剤添加前後のRO膜ユニット操作圧の変化を示す。微生物抑制剤を添加しない場合は、操作圧（膜透過抵抗）、差圧（モジュール通過抵抗）が、運転経過にともない増加したが、微生物

抑制剤を注入することにより、操作圧、差圧とも上昇が抑制された。微生物抑制剤は、RO濃縮液側に濃縮されるため、濃縮水の水質を上昇されることになる。CX-3500添加による濃縮水のCOD<sub>Mn</sub>、T-N、T-Pの増加量はそれぞれ、2.1、0、0.5 mg/L程度と推算された。

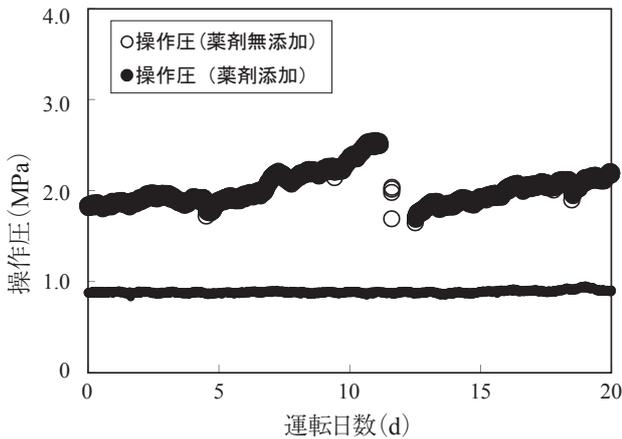


図6 微生物抑制剤添加効果

### 2.3.2 無機物ファウリング

高度処理で使用されるPAC由来のAlが流入すると、水酸化アルミニウムがMF膜に沈着したり、RO膜で濃縮されて、膜のファウリングを生じる恐れがある。表2にMF膜およびRO膜の洗浄排水の水質分析結果を示す。MF膜逆洗排水は、MF膜処理水を逆洗用水に使用しているため、MF膜処理水水質(表1参照)がベースとなるが、MF膜逆洗排水の濁度、銅、鉄などがMF膜処理水のそれより高い値になっていることから、それらがMF膜面に蓄積していたものと推察される。これらファウリング物質の蓄積により、操作圧が上昇したが、薬液洗浄により洗浄が可能であることを確認している。

また、降雨等で汚泥の凝集状態が低下した場合に、濁度物質や凝集剤として添加されるAlが繊維ろ過を通り抜けて、MF膜でファウリングを生じる傾向が認められた。

### 2.3.2 RO濃縮水CODの生分解性

膜処理による水リサイクルシステムを下水処理場に適用する場合、RO濃縮水は下水処理場上流側に返流するフローが合理的である。この場合、水リサイクルシステムにおいて外部より何も添加しなけれ

表2 洗浄排水水質

試料名	原水 (高度処理水)	RO濃縮水	MF逆洗排水	MF洗浄排水 (酸+アルカリ)	RO洗浄排水 (アルカリ)	RO洗浄排水 (酸)
分析項目						
水素イオン濃度 (pH)	7.3	7.8	7.6	中性	11.7	2.0
化学的酸素要求量 (COD <sub>Mn</sub> )	8.4	16.8	15.0	2460	2978	10.2
色度	12	24	15	-	-	-
濁度	0.9	0.3	8.0	-	-	-
蒸発残留物 (TS)	932	3525	700	-	59.0	-
全硬度	204	753	134	279	52.5	33.4
カルシウム硬度	101	376	75.5	130	37.3	19.1
アルカリ度 (pH4.8)	93.4	377	93.8	-	-	-
電気伝導率	153	485	105	-	-	-
銅含有量	0.3	<0.2	0.2	-	-	-
鉄 (Fe)	0.13	<0.1	<0.10	21.0	-	<0.1
アルミニウム (Al)		0.6	2.4	43.4	2.57	8.2
塩化物イオン	385	1330	223	-	-	-
硫酸イオン	104	347	85.8	-	35.4	7.4
イオン状シリカ	14.2	48.4	11.6	24.1	22.3	3.6
アンモニウムイオン	0.36	0.20	0.09	-	-	-
硫化物イオン	<0.05	<0.05	<0.05	-	-	-

\* MF膜洗浄排水(酸+アルカリ)およびRO洗浄排水(アルカリ)のCOD<sub>Mn</sub>には洗浄薬品のCOD<sub>Mn</sub>も含まれる。

ば、単に、濃縮された下水処理水が返流されるだけであるため、下水処理場から放流される汚濁物質の総量は変わらないことになるが、実際には、微生物抑制剤などの薬剤を添加するため、汚濁物総量が5～10%増加されて返流されることになる。そこで、RO濃縮水のCOD<sub>Mn</sub>の生分解性を下水試験法<sup>2)</sup>にしたがって測定した。RO濃縮水は、膜パイロット実験装置より24時間のコンジットサンプルとして採水した。下水試験方法による24時間培養後の生分解度は約25%であり、活性汚泥の馴致も考慮すると、水リサイクルシステムでの薬剤添加による負荷上昇分は十分吸収できると推察された。

## む す び

周囲を海で囲まれ、大小多数の河川を有する我が国は、水不足とは無縁との印象も有り、これまで、多量の水を浪費してきたといえる。しかし、工場の大規模化、人口の集中など、水のユースポイントが集中するにつれ、地域的水不足が顕在化してきており、また、資源リサイクルの社会的ニーズから水リ

サイクルを検討する企業も増加しつつある。世界的には、水不足に対しては海水淡水化が主流であるが、造水コストが高いことに加えて、内陸地への輸送にも経費がかさむため、今後、下水処理水の再利用が注目されるものと考えられる。当社は、下水の再利用に加え、下水と海水を混合して処理するコンバインド型低動力海水淡水化システムも開発しており、今後、とくに海外の水不足ニーズに対して下水処理水の再利用技術を提案し、水不足解消の一助としたい。

本稿は、堺市との共同研究で得られたデータを基にまとめたものである。共同研究実施にあたり、情報提供および多大なご協力をいただきました、堺市上下水道局ならびに三宝下水処理場の関係者の皆様にご協力いただき感謝申し上げます。

## [参考文献]

- 1) 堺市ホームページ：[http://water.city.sakai.lg.jp/arekore/gg\\_sanpou.html](http://water.city.sakai.lg.jp/arekore/gg_sanpou.html)
- 2) (社)日本下水道協会：下水試験方法上巻(1997年版)，p.280

\*水環境・冷却塔事業部 技術部 計画室 \*\*水環境・冷却塔事業部 水リサイクル部 テクノサービス室 堺事業所  
\*\*\*商品市場・技術開発センター 水・汚泥技術開発部