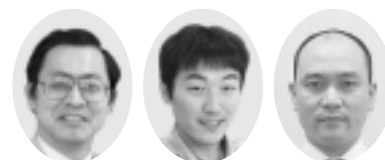


# 水リサイクル技術への取組み

Activities on Water Recycle

## ——膜をもちいた水リサイクル技術とB値モデルによる 膜閉塞解析例の紹介——



技術開発本部  
水・汚泥技術開発部  
長谷川 進  
Susumu Hasegawa  
(工学博士・技術士)  
水・汚泥技術開発部 水処理室  
島田 光重  
Mitushige Shimada  
水環境事業部 技術部  
プロジェクト室  
塩田 憲明  
Noriaki Shiota  
(農学博士)

21世紀は水の時代といわれている。これまでのように単に汚水を処理するだけでなく、処理水を再生し、付加価値の高い水として再使用することが求められてきている。当社は、これまで、海水淡水化、車載式浄水セット、工場排水リサイクルなど、逆浸透膜をもちいた水リサイクル技術の実績を有している。とくに、工場排水は水質の変動が大きいことから、逆浸透膜を保護する保安膜の運転制御法が重要である。著者らは、膜目詰まりモデル（B値モデル）により膜間差圧を上昇させない運転条件を求めた。B値モデルは、CODに起因する膜目詰まりの状況をよく再現することができ、 $B=0$ となる透過流束で運転することにより、膜間差圧を上昇させない運転が可能であった。

The 21st century is called the age of water. It has been requested wastewater not only is processed up to now but also to reproduce the processing water, and to use it again as water with a high additional value. Up to now, our company has had results of the water recycling technology that uses reverse osmotic membranes of the desalting of seawater, the in-vehicle clean water set, and the plant effluent recycling, etc. In this text, the operating condition in which the trans membrane differential pressure (TMDP) was not raised, was requested by the fouling model (B value model) about the driving control method of the security membrane that protected the reverse osmotic membrane. B value model was able to reproduce the situation of the fouling well caused by COD, and driving that did not raise the TMDP was possible with the flux that became  $B=0$ .

### Key Words :

水リサイクル	Water recycle
再生	Reclaim
膜処理	Membrane filtration
逆浸透膜	Reverse osmosis membrane
目詰まり	Fouling
膜間差圧	Trans membrane differential pressure

### 【セールスポイント】

逆浸透膜をもちいた膜処理により工水レベルの水をえることができる。  
これまで捨てていた水を再利用することにより節水になる。また、湯水期に対応できる。  
下水放流している場合は、下水道料金を削減できる。  
水リサイクルで企業イメージを向上できる。

## はじめに

水はわたしたちにとってあまりにも身近な物質であるため、その特異性に気付く人は少ないが、水は液体としては特異な性質を有している。たとえば、水の定圧比熱容量は25℃で4.18 kJ/kg/K、熱伝導率は0℃の水で0.56 W/m/K、蒸発潜熱は100℃で2.25 kJ/kgと通常液体のうち最大で、<sup>1)</sup> 分子量等から外挿される予想値を大きく上回っており、この特異性により、水は、冷却水や熱媒体として広くもちいられている。また、双極子モーメントも $6.17 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ と同族分子のうち最大で、多種・多様の溶質を溶解できることから、様々な分野で洗浄水として利用されている。このように、水は日常生活の中でもっとも多く利用されている液体である。

一方で、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あり、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。

本稿では、世界の水リサイクルの現状を紹介するとともに、そこから発生するニーズに応える当社の水リサイクル技術について紹介する。(水リサイクルシステムの一般的フローを図1に示す。)

## 1. 水リサイクルの海外動向

### 1.1 シンガポール/NEWater

「NEWater」とはシンガポールで進められている下水を膜処理して飲料水源に供する国家プロジェクトのことで、中国語では「新生水」という。シンガ

ポールはマレー半島の先端にある小豆島ほどの面積の国で、大きな川がないため水道源を隣国のマレーシアに依存している。しかし、近年、マレーシアから水源料の大幅な値上げを通告されたことをきっかけに、世界最先端の膜処理技術をもちいた下水処理水の再生利用に取り組んでおり、現在、すでに、表1に示す4箇所の下水処理場で稼動中であり、2011年には国内の水需要の30%を賄う計画である。

水再生の方法としては、下水処理水を精密ろ過膜(MF膜)で前処理し、逆浸透膜(RO膜)をもちいで脱塩後、紫外線(UV)殺菌して水道水源に戻している。

### 1.2 オーストラリア/人が住むもっとも乾燥した大陸

農業大国オーストラリアの干ばつは世界の食糧事情にも影響を与え、近年の世界的食糧の高騰は、バイオ燃料問題以外にもオーストラリアの干ばつによる影響もあるといわれている。

一昨年、この100年間で最悪といわれる大渇水があり、シャワーの長さに至るまで制限され、長時間シャワーにも罰金が科せられた。乾燥大陸オースト

表1 下水処理水再利用施設 (Singapore NEWater)

プラント名	造水量 (m <sup>3</sup> /d)	稼動開始年
Bedok	1期	2002
	2期	2008
Kranji	1期	2002
	2期	2006
Seletar	24 000	2003
Ulu Pandan	148 000	2006
Changi	189 000	2009

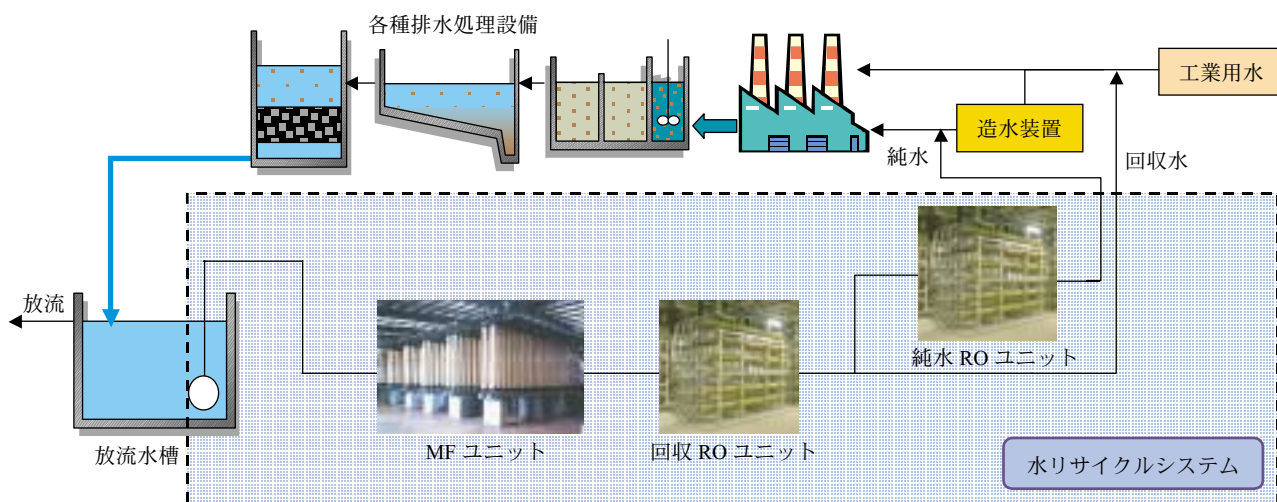


図1 水リサイクルシステムの概略フロー

ラリアでは水資源確保は常に重要課題となっている。

現在、渇水対策の切り札として約2000億円の予算をつけた海水淡水化のプロジェクトが進められているが、海水淡水化は生産コストが高いため、並行して、下水処理水の再利用が検討されており、シンガポールより「NEWater」の技術が導入されることになっている。

### 1.3 我が国の水事情

我が国の年平均降水量は約1700mmで世界平均の約2倍であるが、人口密度が高いことから、1人当たりの水資源量としては約3300m<sup>3</sup>/年と世界平均の1/2以下となっており、<sup>2)</sup> 一級河川が無いなど地理的に恵まれない福岡市や沖縄、離島などでは渇水対策を余儀なくされている。

当社は、早くからRO膜をもちいた水リサイクル技術の開発に取り組んでおり、すでに、離島の水不足を補うための海水淡水化設備、節水を目的とした工場排水の排水回収設備、下水処理水の親水利用など多くの実績を有している。以下にその一例を紹介する。

## 2. 当社の水リサイクル技術

### 2.1 海水淡水化技術<sup>3)</sup>

海水の淡水化法としては、中近東などの大規模設備では蒸発法の採用も見られるが、我が国の離島向けのような小規模設備では、省エネルギー、コンパクトかつ維持管理が比較的容易なRO膜の採用が一般的である。RO膜法の基本フローは、前処理設備(砂ろ過+MF膜または限外ろ過膜(UF膜))+RO膜であるが、海水の場合は、原海水貯槽に貝、藻類が付着するのを抑制するため、電解により発生させた次亜塩素酸ナトリウムを原海水に注入する。また、海水中に5mg/L程度含まれるほう素は、ほかの無機物に比べRO膜での除去率が低いため、改正水質基準の1mg/L未満に除去するため、当社では低

圧RO膜を後段に設置した二段RO膜処理システムを採用している。これにより、処理水ほう素平均濃度0.5mg/Lを安定的にえている。表2<sup>3)</sup>に水質例を示す。

### 2.2 TFT工場排水回収技術<sup>4)</sup>

近年台湾では、大量に水を使用するIT関連工場があいついで建設されたため、渇水期には深刻な水不足に陥っている。そのため、自治体は工場に対して排水再利用の指導をおこなっており、当社も大型TFT(Thin Film Transistor: 薄膜トランジスター)液晶工場に排水回収設備を納入している。TFT製造工場から排出される排水は、無機系排水、高濃度有機系排水、低濃度有機系排水に大別される。

無機系排水は、イオン交換樹脂により電気伝導率数 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下にまで除去可能である。また、高濃度有機系排水は、希釈して生物処理をおこなうことも可能であるが、設備規模が極端に大きくなることから、ここでは、蒸発法を採用している。発生する凝縮水を回収して再利用するもので、台湾では前例のない方法であるが、大型工場では有効な方法として評価されている。一方、低濃度有機性排水は、水量も多いことから蒸発法は不経済なため、当社では、前処理として生物処理を採用している。まず、固定床式好気性生物処理装置(BCF: Bio Contact Filter)で、TOC(Total Organic Carbon: 全有機炭素)成分を生物で分解した後、MF膜+RO膜処理することにより再利用可能な水質にしている。

## 3. 膜運転制御技術

水リサイクル技術は膜のファウリング(汚れ)抑制技術といっても過言ではない。とくに、工場排水では、水質が大きく変動することから、RO膜の前処理として設置するMF膜の操作が重要となる。ここでは、溶解性有機物含有排水をリサイクルする場合の、MF膜の運転解析例について紹介する。

### 3.1 理 論

篩い分けを基本とする分離膜の目詰まりは、膜表面のケーキ形成による目詰まりと、細孔へのゲル状物質の吸着に大別される。固形物質(SS)を多く含む場合は、前者が主要因となるが、SSが少ない見た目にきれいな排水の場合は後者がメインとなる。ケーキに対する解析は多くなされているが、細孔の目詰まりについての報告はほとんどなされていない。これは、従来、篩い分けを基本とする分離膜の用途がSSの分離に限られていたため、上水分野のような見た目に清澄な原水への適用では、長期間目詰りを生じることがないため、あまり注目されなかつ

表2 水質例

水質項目	度	原水(海水)	処理水(生産水)
濁度	度	0.4	< 0.1
色度	—	< 1	< 1
pH	mg/L	8.2	7.5
蒸発残留物	mg/L	37 700	161
ナトリウム	mg/L	10 300	1.4
全硬度	mg/L	6 460	85
塩素イオン	mg/L	19 500	34
ほう素	mg/L	4.9	0.4
有機物等 (過マンガン酸カリウム消費量)	mg/L	3.9	0.7

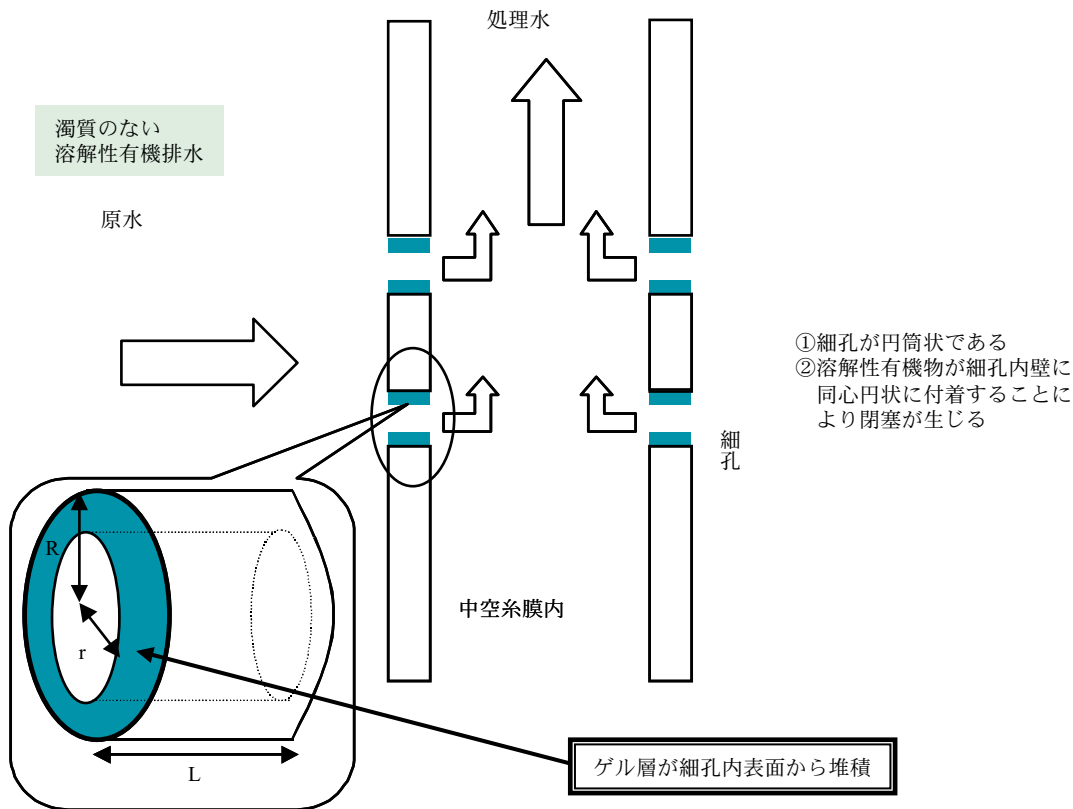


図2 膜目詰まりモデルの概念図

たものと推察される。しかしながら、工場排水の場合は、砂ろ過などで見た目に清澄な排水に処理できても、多くの溶解性有機物や無機イオンを含んでおり、予想以上に早く目詰まりを生じる例が多く見られる。そこで、細孔へのゲル状物質の蓄積による目詰まりの理論解析を試みた。

図2に細孔へのゲル状物質の蓄積による目詰まりのモデルを示す。ここで、

- ① 細孔は円筒状である。
- ② ゲル状物質は細孔内表面から同心円状に細孔内部に向かって蓄積する。

- ③ 細孔内の流れは層流である。

と仮定すると、細孔内部における堆積物の物質収支および Hagen-Poiseuille の式より次式が成り立つ。<sup>6)</sup>

$$d\Delta P_g/dt = B \cdot \Delta P_g^{3/2} \quad (1)$$

ここで、

$$B = (QC_g - Z\rho) / (\pi n L \rho) \times (\pi \mu Q L)^{-1/2} \times (1/2)^{-3/2} \quad (2)$$

$P$  : 圧力 [Pa]

$Q$  : 流量 [ $\text{m}^3/\text{min}$ ]

$C_g$  : ゲル濃度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$t$  : 時間 [d]

$L$  : 細孔長さ [m]

$n$  : 細孔数 [—]

$\rho$  : ゲル密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$Z$  : 逆圧洗浄によるゲル除去量 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]

$B$  は、目詰り物質の蓄積 ( $QC_g$ ) と排除 ( $Z\rho$ ) のバランスを表す係数で、ここでは  $B$  値 (Balance coefficient) と称する。 $B$  値がゼロの条件では膜間差圧の上昇がない運転が可能となる。

### 3.2 $B$ 値モデル解析

表3の外圧式円筒型中空糸膜モジュールに、膜透過流束 (Flux)  $1.44 \text{ m}^3/\text{d}$  で通水した場合の膜間差圧の経日変化および  $B$  値のパラメータフィッティングを図3に示す。パラメータフィッティングによる相関は良好で、 $B$  値モデルにより膜目詰り現象をよく再現できることがわかった。

表3 外圧式円筒型中空糸膜モジュール仕様

型式	外圧式円筒型
材質	PVDF (ポリフッ化ビニリデン樹脂)
公称細孔径	$0.1 \mu\text{m}$
膜面積	約 $7 \text{ m}^2$
モジュール仕様	3 inch × 1 m

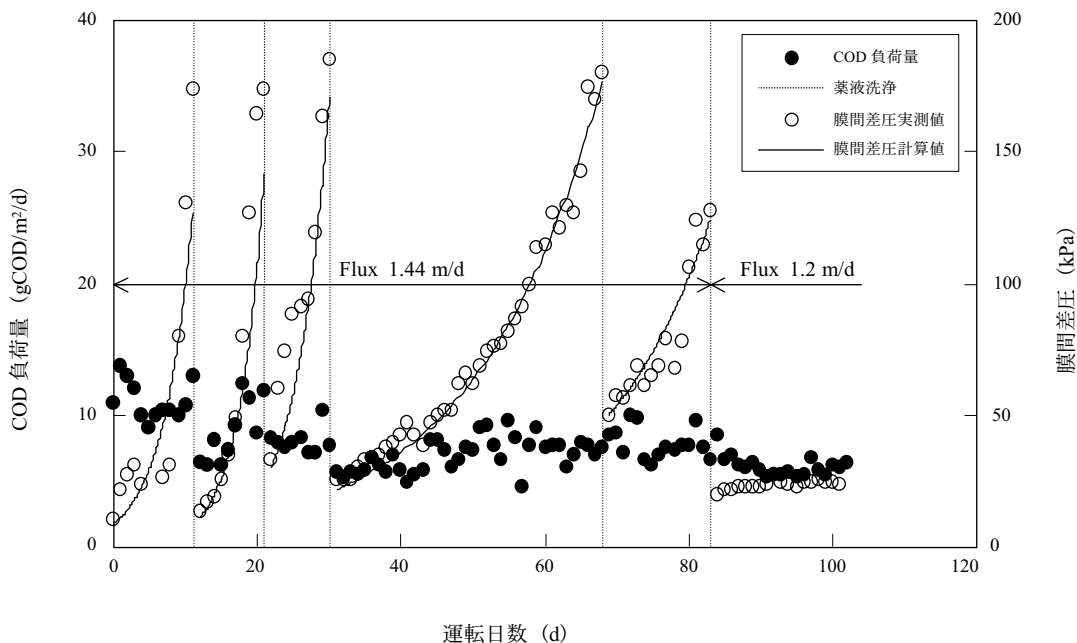


図3 膜目詰まりのシミュレーション

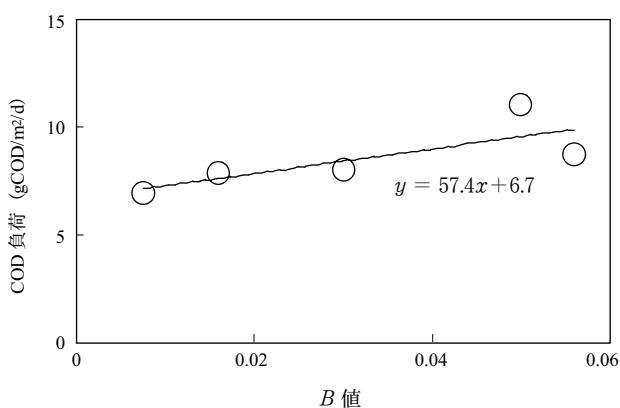


図4 B値とCOD負荷量の関係

上述式(2)より、 $B$ 値は目詰り物質の負荷に相関があると考えられることから、目詰り物質の指標としてCODを測定し、 $B$ 値との相関を調べた。図4に $B$ 値とCOD負荷量の相関を示す。図4より $B=0$ (膜間差圧が上昇しない運転条件)となるCOD負荷量( $y$ 切片)を求めると、 $6.7\text{g COD/m}^2/\text{d}$ で、流入COD値(平均 $5.7\text{mg/L}$ )よりこのときのFluxを計算すると $1.2\text{ m/d}$ となった。そこで、運転83日目よりFluxを $1.2\text{ m/d}$ に下げたところ、ほぼ一定の膜間差圧で運転することができた(図3)。

このように、排水の水質にあった目詰りモデルを適用することにより、MF膜の適正な運転を実現することができる。

### おわりに

20世紀後半、排水処理技術は大きな進展をとげ、

ほとんどの場合、排水を満足いく水質まで処理することが可能になった。しかし、世界的な水不足が叫ばれる中、21世紀は単に水を処理するだけでなく、回収して再利用することが求められる時代といえる。幸い我が国では、慢性的な水不足はないが、それでも、地域的には問題となっているところもあり、また企業によっては、放流量規制あるいは節水の観点から、水リサイクルを検討する事業所も増えつつある。

水リサイクル技術においては、その要素となる膜の性能も重要であるが、膜のファウリング抑制が十分でなければ、その性能も発揮されない。当社は、これまで積み上げてきた実績と経験に加え、本稿で紹介したような理論的解析に基づくファウリング抑制技術により、ユーザーニーズに応えていきたい。

### 【参考文献】

- 1) 三浦靖：水の機能化，工業調査会(2004)，p.16
- 2) 国土交通省土地・水資源局水資源部：平成19年版日本の水資源(2007)，p.50-54
- 3) 佐藤良太，竹坂憲治，野下昌伸：神鋼環境ソリューション技報，Vol.2，No.2(2006)，p.12-18
- 4) 西澤昭彦，秋吉栄宏：神鋼パテック技報，Vol.46，No.2(2003)，p.18-22
- 5) 真鍋恵：神鋼環境ソリューション技報，Vol.3，No.1(2006)，p.8-11
- 6) 尾崎敏之，中島優一，石山明，長谷川進：第39回日本水環境学会年会講演集(2005)，p.43