

# 水循環への膜処理技術の応用

小越眞佐司\* 宮本綾子\* 西村峻介\*

## 1. はじめに

21世紀は水が人間社会の活動を支配する「水の世紀」といわれている。人間社会の持続可能な成長を達成するため、水資源の効率的な利用に関わる多様な技術展開が世界中で繰り広げられている。なかでも、一度使用した排水を循環利用する技術は、限られた水資源を何倍にも活用できる技術として注目されている。この人為的な循環利用において中心的な役割を果たすのが膜処理技術である。

本報告では、水循環の要である下水処理のために実用化された膜処理技術の現状と課題を整理し、膜を利用する近未来の水循環システム実現に向けた技術の方向性について述べる。

## 2. 水の循環に伴う諸課題

地球規模の水循環では、太陽光を熱源とする蒸留によって再生循環が行われており、浮遊成分は海底に溶解成分は海水中に濃縮されている。一方、人為的な水の循環では、排水中の汚濁の種類や程度に対応した様々な技術によって排水を再生し、利用する。また、除去された汚濁は、廃棄物として埋立、もしくは資源として利用する。この様な循環利用における基本的な課題は、①利用用途に

適した水質を得ること、②分離した汚濁の適切な処分を行うこと、そして③循環利用に要する費用および④温室効果ガス（以下GHGという）排出量の点で他の水源利用より優位であることの4点である。

### 2.1 再生水の用途と水質

排水を循環利用するシステムには二つの方式がある。一つは従来の用水と同じ水道から一元的に配水する方式、一つは再生水専用の配水システムを設けて供給する二元配水方式である。

一元的な配水方式では従来の用水と同じ再生水質が求められる。工業用水や農業用水に利用する場合に多い方式で、海外では膜処理技術の適用を前提として、飲用に利用することも検討されている。

二元配水方式は都市で利用する場合に採用され、飲用水以外の様々な用途に応じて水質が設定される。二元配水方式は、供給システムが二重になり建設費・管理費が増加する他、誤接続や誤使用防止のための措置も必要になる。

再生水の用途と水質および処理技術の例を表-1に示した。

### 2.2 分離した汚濁の処理・処分

循環利用に伴って除去された汚濁は、下水汚泥の場合と同様に、エネルギー資源や原材料として

表-1 再生水の用途と水質の例

国又は機関	日本			US EPA		WHO (2006)	シンガポール	WHO	
	水洗/散水用水	修景用水	親水用水	農業(27°以下海源)用	飲用地下水涵養	レタス等栽培用	工業用・都市用・間接飲用	飲用水	
水質基準	大腸菌	100mL中に不検出	大腸菌群数≦1000個/100mL	100mL中に不検出	100mL中に糞便性大腸菌群不検出	100mL中に大腸菌群不検出	病原生物の除去率≧6log 寄生虫卵1個/L以下	100mL中に大腸菌群不検出	同左
	濁度	2度以下	2度以下	2度以下	≦2NTU以下	同左	-	5NTU未満	5以下
	pH	5.8-8.6			6.0-9.0	6.5-8.5	-	7.0-8.5	6.5-8.5
	外観	不快でないこと			-	-	-	-	-
	色度	必要に応じる	40度以下	10度以下	-	-	-	5HU未満	15HU以下
臭気	不快でないこと			-	-	-	-	-	
残留塩素	遊離0.1mg/L又は結合0.4mg/L以上	-	遊離0.1mg/L又は結合0.4mg/L以上	1mg/L以上	同左	-	2mg/L未満	5mg/L以下	
その他	-	-	-	80D10mg/L以下	TOC3mg/L以下 TOM0.2mg/L以下 飲用水基準を満たす	-	TOC0.5mg/L未満 硝酸15mg/L以下 飲用水基準を満たす	硝酸11mg/L以下 他	
再生処理技術の例	二次処理+砂ろ過	同左	二次処理+凝集沈殿+砂ろ過	二次処理+ろ過+消毒	二次処理+ろ過+消毒+高度処理	-	二次処理+MF/UF膜ろ過+逆浸透膜処理+消毒	-	

利用するか廃棄物として処分される。表-1に示した処理技術のうち、逆浸透膜（以下RO膜という）処理の場合は溶解性物質が濃縮された液体となるが、その処分方法は確立されていない。RO膜による海水淡水化施設では濃縮液は環境に影響を与えないような配慮をした上で海に戻されている。

### 2.3 循環利用のコストとGHG排出量

水利用にかかるコストとGHG排出量は、水資源開発、水供給、排水処理、および再生循環の各段階におけるコストおよびGHG発生量の各々の合計である。

ある地域で循環利用を検討する場合、再生循環を組み入れた場合とそうでない場合について、コストとGHG排出量を推定し比較することになる。水需要増加もしくは水資源の枯渇に対応する場合は、循環利用導入とその他の新規水源開発との比較に、水需要や水資源に変化がない場合は、既存の水利用システムを継続する場合との比較になる。

水利用のコストおよびGHG発生量を施設のライフサイクルで見た場合、その大部分は水供給施設の運用に伴うものである（図-1）。したがって、運用に関するコストあるいはGHG排出量が少ないシステムは総合的に優位になる可能性が高い。

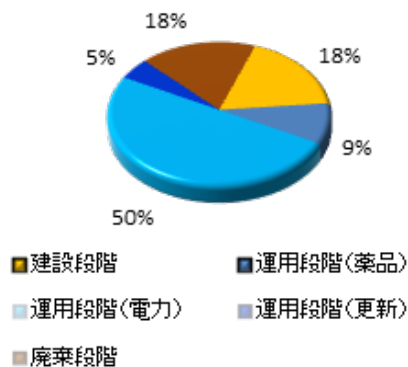


図-1 再利用施設のライフサイクルCO<sub>2</sub>推定例

### 3. 下水処理における膜処理技術の現状と課題

下水処理のための膜処理技術として実用化された膜分離活性汚泥法（以下、MBRという）は国内では2005年以降17カ所以上に導入されている。MBRの導入により下水処理施設は必要面積が減少し、用地費、建設費が低下する。また、日常の運転管理は自動化が容易で無人化を進めることができる。処理水質は生物処理＋ろ過＋消毒と同等

以上で衛生学的な安全性が高く、用途によっては、そのまま再利用可能である。一方、膜表面の目詰まりを防止するために常時ばっ気を行うなど、相当の電力を必要とする。また、ばっ気洗浄では防除できない膜面付着物や膜内部の汚れによって膜の透過性能が低下すると、付着物等の除去作業を行わなければならない。この工程の頻度は低いだが相応の労力と薬品を消費する。

#### 3.1 MBRの電力消費率

MBRにおいてコストやGHG排出量に及ぼす影響が最も大きいと考えられる電力消費量を、現在稼働中のMBR施設について調査した。その結果は表-2に示す通りであった。

これらの値を同等の水質を得ることができる他の処理方式施設のエネルギー消費率と比較すると、図-2の通り、施設規模が小さい場合に、ほぼ同じ範囲にあることがわかった。

MBRの電力消費率は、図-3に示す様に、1) 膜ろ過に必要な圧力をポンプ吸引によって得る方式から位置水頭の差を利用する方式に変更することや、2) 好気槽と無酸素槽との間で行う混合液の

表-2 MBR施設の電力消費率

処理場	処理能力 (m <sup>3</sup> /日)	稼働率 (%)	単位処理水量当たりの電力消費量 (kWh/m <sup>3</sup> )
A	4200	73.2	1.11
B	1000	25.5	2.48
C	125	70.1	2.16
D	1067	30.3	1.94
E	290	55.6	2.91
F	230	60.3	2.16
G	720	60.6	1.86
H	1515	57.8	2.59
I	2150	2.9	9.78
J	240	14.2	4.65
K	1375	12.9	3.42

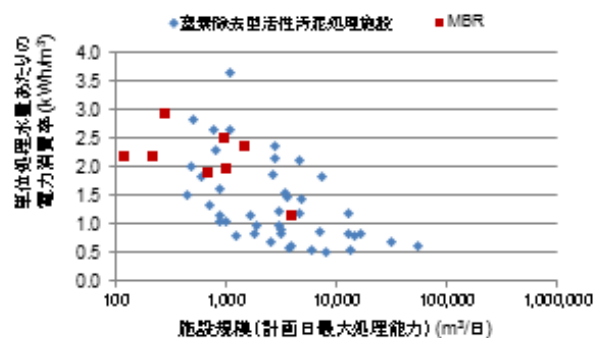


図-2 MBR施設と従来型施設の電力消費率

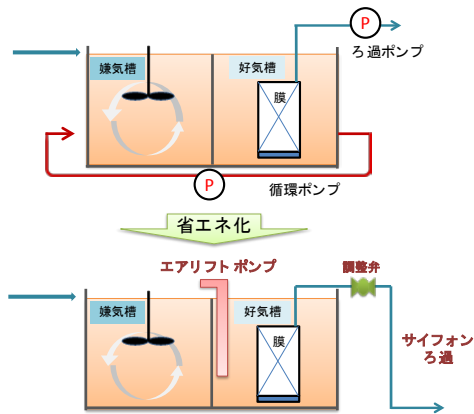


図-3 MBRの省エネルギー化の例

循環をポンプによって行う方式からばっ気によるエアリフト効果を利用する方式に変更すること、等によって更に減少する。

このような工夫を行った実証実験施設（名古屋市守山浄化センター）では、フル稼働時の電力消費率（汚泥処理分を除く）は、約0.4kWh/m<sup>3</sup>まで低下している。

### 3.2 薬品洗浄の処理機能への影響

膜の透過性能が低下したときに行われる膜の洗浄では、有機物を分解除去するための塩素系の酸化剤や無機物を溶解して除去するための酸が用いられる。これらの洗浄廃液には活性汚泥に有害な成分が含まれており、処分先となる生物反応槽の処理機能に影響を及ぼす場合がある。図-4は反応槽内にある膜に直接洗浄液を注入して薬品洗浄を行う方式を採用しているMBR施設の洗浄前後の処理水質の変化を表している。この施設では、洗

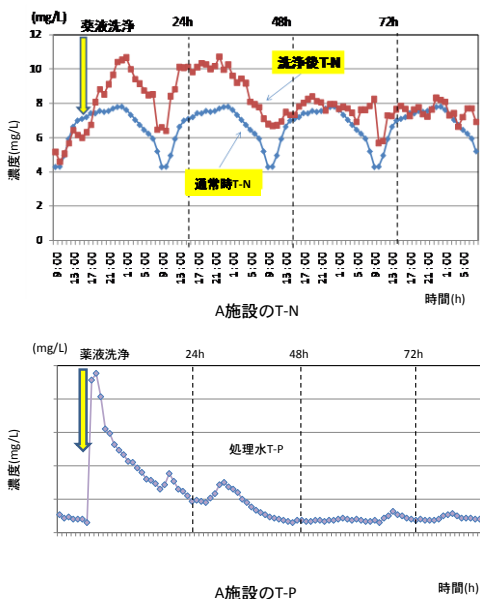


図-4 薬品洗浄の影響例

浄後に一時的に窒素の除去性能が低下するほか数日にわたりリンの除去性能も低下していることがわかる。洗浄方法や洗浄廃液の処理には様々な方式があるが、各々の方式において、活性汚泥への影響が少なく処理水質が低下しない、洗浄廃液の水処理への戻し方などに改善の余地があると考えられる。

### 3.3 膜付着物

ばっ気洗浄では防除できない膜面への付着物は人力で除去しているのが現状である（写真-1,2）。どの程度まで除去するかによるが、1ユニット200枚程度の平膜モジュールの場合でも1人・時、程度を要しており、重要な管理コスト増加要因になっていると考えられる。

付着物の原因の一つは下水中に含まれる繊維分で、現在用いられている間隙1mmのバースクリーンでは除去できない成分である。

また、膜面への活性汚泥付着は避けられない現象であるが、その堆積は、膜モジュールまたはユニットの構造上ばっ気による膜面洗浄が不十分になる部分で、生じ易いと考えられる。



写真-1 膜の付着物（平膜タイプ）  
左：膜上面 右：膜下面



写真-2 膜間付着物の清掃作業（平膜）



#### 4. 膜処理技術を応用した水循環システム

MBR施設の処理水は濁質をほとんど含まないため、直接RO膜処理を行うことができ、これによってMBR処理水中に残留する溶解性物質の大部分とウイルスが除去されるため、飲用可能な再生水を得ることができる。

米国では下水処理水をRO膜処理した後に地下注入し、地下水を汲み上げて上水に利用する間接的飲用水利用が行われている。また、シンガポール、オーストラリアでは、MBR-RO膜処理システムで下水を再生し、飲用水源（貯水池）に供給して再利用することが提案され、実施に向けた検討が行われている。

我が国でも、下水処理水を活性炭ろ過で処理した後、地表面から地下に浸透させ、下流側の伏流水を汲み上げてRO膜による浄水処理を行い、上水道に利用した事例がある。

現在、MBR処理とRO膜処理を組み合わせ、下水と海水から低動力で高水質の工業用水を得るシステムが実証実験中である。さらに、持続可能な水利用をテーマとする戦略的創造研究推進事業（CREST）では、膜を利用した低消費エネルギーの排水再利用システム（図-5）や目詰まりが起こりにくい膜の開発及びこれを利用した分散型の水循環システムなどが研究されている。

このような膜処理技術を利用した水循環システムの実用性は、システム全体としての消費エネルギーの少なさ、安全性、安定性、経済性、等によって評価される。これらは使用する膜の透過性能の高さ、目詰まり難さ、洗い易さ、物理的強さ、薬品耐性の高さ、取り扱い易さ、等に依存する部分が多い。しかし、3. に述べた様に、膜の特

性以外のエンジニアリングの部分で解決すべき課題も多いと考えられる。

したがって、膜処理技術を核とする水循環システムの実現には、膜単体性能の向上に加えて、水処理用の膜施設に関するエンジニアリング技術の向上を欠くことができない。さらに、多用途の一元配水システムによる循環を可能にするためには、RO膜処理に伴う濃縮液処理処分法の確立が不可欠である。

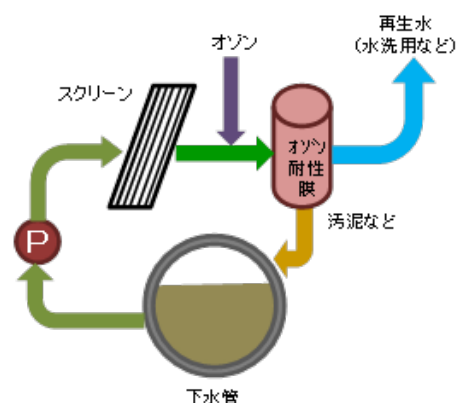


図-5 低エネルギー分散型再利用施設の例

#### 5. おわりに

水資源問題を解決できる有力な技術と考えられる下・排水の循環再利用の諸課題と鍵となる膜処理技術の現状について述べた。下・排水の循環には相当のエネルギーを消費するが、海水より1桁以上塩分濃度が低いため、海水を淡水化するよりは遙かに少ないエネルギーで循環が可能である。その実現に向けて解決しなければならない技術課題は既に述べた通りである。一度排出した水を再び摂取することに対する心理的な抵抗感等を解消して行くことを含めて課題を解決していきたい。

小越眞佐司\*



国土交通省国土技術政策総合  
研究所下水道研究部下水処理  
研究室長、工博  
Dr.Masashi OGOSHI

宮本綾子\*



国土交通省国土技術政策総合  
研究所下水道研究部下水処理  
研究室 研究官  
Ayako MIYAMOTO

西村峻介\*



国土交通省国土技術政策総合  
研究所下水道研究部下水処理  
研究室 研究官  
Shunsuke NISHIMURA