
下水道への膜処理技術導入のための
ガイドライン[第1版]

平成21年5月

下水道膜処理技術会議

発刊にあたって

わが国の下水道人口普及率は平成 19 年度末で 71.7%に達し、依然として都市規模による格差は残っているものの一定の進捗が図られてきました。しかしながら、閉鎖性水域における水質改善や健全な水循環系の構築、老朽化施設の計画的な改築等、下水道事業が直面する課題は数多く残されています。

例えば閉鎖性水域における水質改善のための高度処理の実施状況については、平成 19 年度末の高度処理人口普及率は 15.7%程度と低水準にとどまっており、健全な水循環系の構築のための下水処理水再利用についても、処理水量全体の 1.4%（平成 18 年度末）が再利用されているに過ぎません。また、病原微生物や微量有害化学物質による水系リスクを低減していくためにも、今後、より一層の処理機能の高度化が求められます。

また、都市部においては、処理施設の老朽化に伴い処理機能の高度化を含めた改築を行うにあたり、用地の拡張が困難な中で現施設を運転しながら計画的に改築を進めつつ、処理機能の高度化を図っていかなくてはなりません。

膜処理技術は、これらの課題を解決していく上で、今後、その中心となる処理技術として期待されています。

わが国の下水道では、膜処理技術はこれまで主として処理水の一部を再利用するための処理に適用されてきましたが、近年の膜技術の進展に伴う膜価格の低下等により、下水処理そのものへの適用が現実的なものとなってきています。

特に、膜分離活性汚泥法は、平成 20 年度末において 10 箇所程度の比較的小規模な下水処理場で導入されており、今後、改築需要の増大等を受けて中・大規模施設への導入も進んでいくものと考えています。

海外では EU、北米、中東、中国等で下水道への膜処理技術の導入が積極的に進められており、一部では標準化に向けた動きもあります。

わが国においても、こうした海外での動きもにらみつつ下水道への膜処理技術導入を進めていくべき時期に来ているものと考えます。

今回、「下水道膜処理技術会議」で審議された結果をもとに、地方公共団体が下水処理への膜処理技術の導入を検討する際の技術資料として「下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン [第 1 版]」をとりまとめました。

本ガイドラインは、下水道を中心とした膜処理技術に関する基礎的な情報や最新の知見、膜処理技術を下水処理場へ導入するための検討方法について示しており、広く下水道関係者に活用して頂きたいと考えています。

平成 21 年 5 月

下水道膜処理技術会議
委員長 大垣 眞一郎

委員の構成.

(順不同・敬称略)
(平成 21 年 3 月現在)

下水道膜処理技術会議

委員長	大垣 眞一郎	東京大学大学院教授
委員	中尾 眞一	東京大学教授
〃	長岡 裕	武蔵工業大学教授
〃	山本 和夫	東京大学環境安全研究センター教授
〃	小川 健一	東京都下水道局計画調整部長
〃	鈴木 祥一	神奈川県県土整備部下水道課長
〃	吉澤 正宏	滋賀県琵琶湖環境部下水道課長
〃	石川 美直	名古屋市上下水道局計画部長
〃	大木 常正	堺市上下水道局下水道部長
〃	山下 秀樹	浜松市上下水道部長
〃	村上 孝雄	地方共同法人 日本下水道事業団技術開発部長
〃	清水 俊昭	財団法人 下水道新技術推進機構研究第一部長
特別出席	岡久 宏史	国土交通省都市・地域整備局下水道部下水道事業課長
〃	藤木 修	国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部長
特別参加	松尾 英介	社団法人 日本下水道施設業協会技術部長
〃	阿瀬 智暢	有限責任中間法人 膜分離技術振興協会事務局長

目次

第1章 本ガイドラインの位置付け	1
第2章 総論	4
2.1 膜処理技術の概要	4
2.1.1 膜処理技術の概要と適用範囲	4
2.1.2 膜の種類	4
2.1.3 膜分離設備の概要	6
2.2 下水道への導入意義	11
2.2.1 膜処理技術の下水道への導入意義	11
2.2.2 下水道への膜処理技術の導入形態	14
2.3 下水道における膜処理の現状	15
2.3.1 国内の下水道用膜処理施設の導入状況	15
2.3.2 海外の下水道用膜処理施設の導入状況	15
第3章 新設処理場への MBR 導入	18
3.1 MBR の特徴	18
3.2 施設導入の検討事項	22
3.2.1 検討条件	22
3.2.2 水量変動対策	24
3.2.3 最初沈殿池	24
3.2.4 反応タンク	25
3.2.5 膜モジュール	27
3.2.6 消毒設備	30
3.2.7 汚泥処理設備	30
3.2.8 その他の留意事項	30
3.3 導入コスト	32
第4章 既設処理場への MBR 導入	35
4.1 MBR と従来法との並列処理の特徴	35
4.2 MBR と従来法との並列処理の場合の検討事項	36
4.2.1 新規系列増設, 既設改造に共通の検討事項	37
4.2.2 新規系列増設の場合の検討事項	39
4.2.3 既設改造の場合の検討事項	40
4.3 導入コスト	42
第5章 再生水利用のための膜処理技術導入	44
5.1 再生水利用のための膜処理技術導入の効果	44
5.2 再生水利用のための膜処理技術導入にあたっての検討事項	46

5.2.1 再生水の用途及び水質.....	47
5.2.2 供給量の設定.....	49
5.2.3 膜の種類の設定.....	49
5.2.4 処理フロー.....	51
5.2.5 膜処理に伴って発生する濃縮水の処理.....	52
5.3 導入コスト.....	53
【参考資料】	54
1. 膜処理技術の導入検討にあたっての技術情報.....	55
1.1 膜を利用した処理技術.....	55
1.2 MBR 設計諸元例(JS 技術評価).....	56
1.3 膜コストに関する資料	62
1.4 再生処理施設の費用関数の例.....	63
1.5 MBR の膜モジュールの例	64
1.6 MBR 適用事例における配置例.....	65
2. 膜処理技術を用いた展開.....	68
2.1 コスト縮減に向けた膜処理技術の開発研究	68
2.2 膜処理技術の研究開発の事例.....	69
2.3 普及拡大に向けた今後の課題.....	72
2.4 他機関における膜処理技術の研究開発の動向について	72
2.5 EU における標準化の動向	73
3. その他	76
【参考文献】	80

第1章 本ガイドラインの位置付け

本ガイドラインは、現時点における、下水道を中心とした膜処理技術に関する基礎的な情報や最新の知見について整理するとともに、地方公共団体が下水道への膜処理技術の導入にあたって検討すべき事項や留意事項を示したものである。具体的には、以下の事項について記載している。

膜処理技術の概要や下水道への膜処理技術導入の意義等（第2章）

膜分離活性汚泥法を主として新設の下水処理場に導入する場合の検討事項（第3章）

膜分離活性汚泥法を既設の下水処理場で導入する場合の検討事項（第4章）

膜処理技術を再生水利用のために導入する場合の検討事項（第5章）

ただし、膜処理技術は技術開発途上の段階にあり、今後とも大幅な低コスト化、省エネルギー化等が期待される技術である。このため、本ガイドラインで記載しているコストや検討諸元等の数値については、あくまで現段階での参考値であることに留意する必要がある。

また、膜処理技術は、閉鎖性水域の水質改善のための高度処理、病原微生物等の水系リスク低減、下水処理施設の改築等、今後の下水道事業における様々な展開の核となるコア技術であることから、巻末に参考資料として下水道における膜処理技術を用いた今後の展開について記載した。

なお、本ガイドラインは今後の技術開発の動向やわが国における膜処理技術の導入事例の増加等をふまえて適宜改訂を予定している。

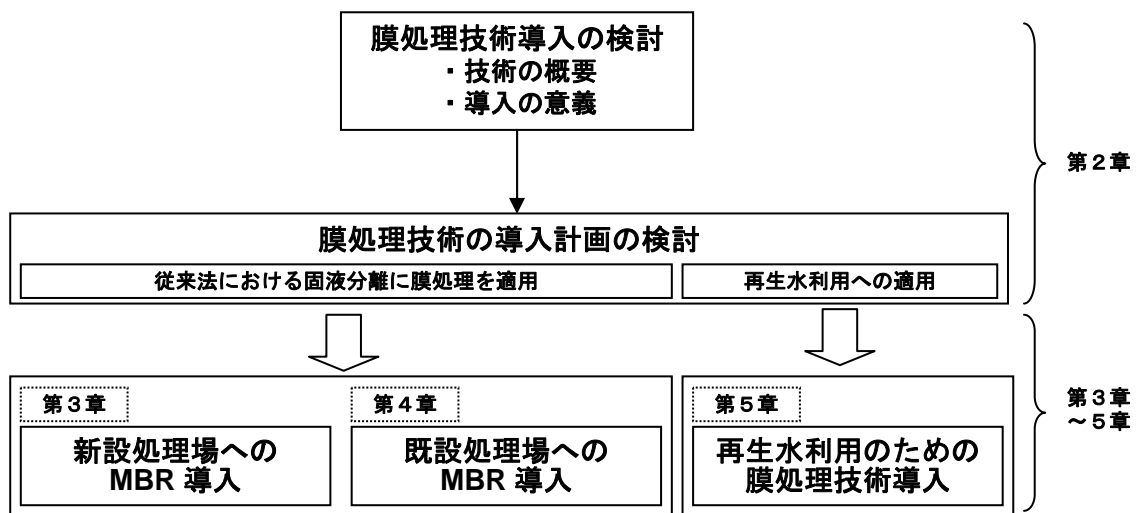


図 1-1 ガイドラインの内容

【用語解説】

膜処理： 分離機能を持つ固体の膜を利用し、対象物質と溶液をその大きさを分ける（サイズ分離）ことや溶解-拡散現象等を利用して分けること。膜の分離機能のみを利用して処理することや、これ以外の処理法と組み合わせて処理することを区別する場合もあるが、本ガイドラインでは、いずれも「膜処理」と称す。

膜エレメント： 膜とその支持体及び流路部等の部材を一体化した機器をいう。

膜モジュール： 膜エレメントを水処理設備・装置等に組み込んで加工した機器をいう。シート状の膜では平膜モジュールとスパイラル型モジュールが代表的であり、管状の膜では数本を束ねて一つのケースに収めたものが代表的である。中空糸型では大量の中空糸膜を束ねて両端を樹脂に包理したものを単独または複数本で、ケース等に固定したものが代表的なモジュールである。

膜ユニット： 膜モジュールに加え、散気部（生物処理や攪拌・膜洗浄に必要な空気の供給を行う部分）や、集水部（ろ過水を引き抜き集水する部分）等を含む装置をいう。

MBR： 膜分離活性汚泥法（Membrane Bioreactor）。下水処理等において処理水と活性汚泥の固液分離に膜分離技術を適用した処理方法。通常、MF膜が用いられる。膜モジュールの設置方式により、便宜的に、浸漬型（一体型）、浸漬型（槽別置型）、槽外型の3種の型式に分類される（表 3-1(p19)参照）。

ファウリング： 膜処理において時間経過とともに、付着物質が膜の表面へ累積したり、透過流路を閉塞する状況で、定期的に、洗浄（付着物質をはがす工程）が必要。

透過流束： 膜の表面積あたりに得られる処理水の量（ $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日} \Rightarrow \text{m}/\text{日}$ ）。

膜差圧： ろ過水を得るために必要な圧力。膜間差圧、ろ過差圧、TMP（Trans Membrane Pressure）と表現される場合もある。

従来法： 本ガイドラインにおいては、下水道法施行令及び通知（平成 16.3.29 国都下事第 530 号 国土交通省都市・地域整備局長通知「下水道法施行令の改正に伴う事業計画の認可の運用について」）に示される処理方式（標準活性汚泥法、循環式硝化脱窒法、嫌気無酸素好気法、等）を指す。

MBR と従来法との並列処理： 本ガイドラインにおいては、同一処理場内で、MBR と従来法の処理方式とが並列されることを指す。ハイブリッド MBR と呼ばれることもある。

施設、設備、装置、機器： 「下水道施設計画・設計指針と解説²⁷⁾」に準じ、原則として次のように使い分ける。

施設： 構造物を含めた大きい範囲のもの（下水道施設、処理施設、等）

設備： 方式化されて機能するもの（前処理設備、膜処理設備、消毒設備、等）

装置： 機器が集まり単体として作動するもの（散気装置、膜ユニット、等）

機器： 機械、器械等（装置、設備を構成するもの、膜モジュール、等）

表 1-1 膜エレメント, 膜モジュール, 膜ユニットの例

<p>【膜の例】</p> 	<p>【膜エレメントの例】</p> 	<p>【膜モジュールの例】 (中空糸膜)</p>  <p>(平膜)</p>  <p>(“膜モジュールエレメント”, “膜カートリッジ” と呼ばれることもある)</p>	
<p>膜(中空糸)</p>	<p>多数の膜(中空糸)が両端の集水管によって固定されたもの</p>	<p>複数の膜エレメントを組み合わせ一体化させたもの</p>	<p>シート状の膜(平膜)を支持体に取り付けたもの</p>
<p>【膜ユニットの例】(浸漬型) (中空糸膜)</p>  <p>(平膜)</p>  <p>膜エレメント, 集合管, 膜ケース, 散気ケース, 散気装置からなるもの</p>			

※「膜エレメント」「膜モジュール」「膜ユニット」は、厳密に区別して呼称されているものではなく、種類や形状、開発したメーカーによっても異なる呼称が使われており、本ガイドラインでは、これらを「膜モジュール」として総称する。

第2章 総論

膜処理技術の概要、膜分離方式等の膜処理に関する基礎的な事項を述べるとともに、下水道への導入意義や下水道における膜処理の現状を整理する。

2.1 膜処理技術の概要

2.1.1 膜処理技術の概要と適用範囲

(1) 膜処理技術の概要

膜処理技術は、膜を介して圧力差や濃度差、電位差等の推進力により物質を分離する技術である。除去対象物質を直接膜でろ過する場合、生物処理と組み合わせてろ過する場合及び凝集等と組み合わせてろ過する場合がある⁶⁾。

(2) 膜処理技術の適用範囲

膜処理技術は幅広い分野において応用され、物質の分離・精製技術として不可欠な技術となっている。膜処理技術の応用範囲としては、

- ・ 各種製造業（精製，濃縮，分離，回収，脱水）
- ・ 医療用（血液透析，人工肺）
- ・ 水処理（海水淡水化，浄水処理，下排水処理，下排水再利用）
- ・ 燃料電池

等がある。

2.1.2 膜の種類

(1) 膜の孔径

浄水・排水処理分野において用いられる分離膜^{*1)}には、分離対象が大きい順に、精密ろ過（microfiltration：以下「MF」という。）膜，限外ろ過（ultrafiltration：以下「UF」という。）膜，ナノろ過（nanofiltration：以下「NF」という。）膜，逆浸透（reverse osmosis：以下「RO」という）膜がある（表 2-1，図 2-1参照）。

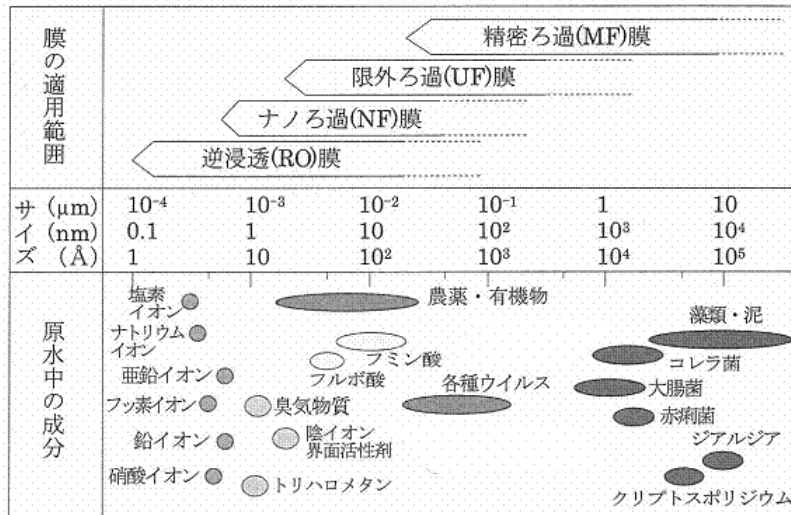
表 2-1 各種の膜ろ過法の分離対象と操作圧力

膜の種類	分離対象(分離性能)	操作圧
精密ろ過 (MF)	0.01~10 μ m 粒子	減圧~数 100kPa
限外ろ過 (UF)	分子量 1,000~200,000	数 10kPa~数 100kPa
ナノろ過 (NF)	分子量 200~1,000	数 100kPa~数 MPa
逆浸透 (RO)	分子量 ~350	数 MPa~10MPa

注：操作圧は原水や目標水質によっても異なる。

UF膜，NF膜の分離対象については参考文献¹⁸⁾より引用

¹ 膜の分類：分野や製造メーカー等により区分が異なり、孔径や操作圧の範囲が重なっている（図 2-1 参照）。IUPAC（International Union of Pure and Applied Chemistry）による定義（1996）では、 $>0.1 \mu$ m を MF 膜， $2\text{nm} \sim 0.1 \mu$ m を UF 膜， $<2\text{nm}$ を NF 膜とされている。



※文献 18)より作成

図 2-1 膜の種類と分離対象物質

①MF (精密ろ過 : microfiltration) 膜

MF 膜は、0.01~10 μm 程度の孔径を持っており、微細な粒子や細菌を分離・除去するものである。MBR で用いられる場合は、0.1~0.4 μm 程度の孔径が多く、SS 測定用のろ紙 (孔径 1 μm) や大腸菌等の細菌の大きさ (概ね 1 μm 程度) よりも小さいことから、膜処理水から SS が検出されないまでに除去することができる。医療用の除菌フィルタ等としても利用されている。

②UF (限外ろ過 : ultrafiltration) 膜

UF 膜は、MF 膜より小さい孔径を持つもので、主にタンパク質等、分子量数千以上の高分子物質の濃縮やろ過等の用途に用いられる。粒子状物質以外に、ウイルスや溶解性有機物の一部も除去できることが特長である。

③NF (ナノろ過 : nanofiltration) 膜 / RO (逆浸透 : reverse osmosis) 膜^{※2}

NF 膜は、ルーズ RO 膜とも呼ばれ、RO 膜とともに、広義の逆浸透膜といえる。NF 膜 / RO 膜による分離は、膜の素材と除去対象物質 (分子やイオン) との親和性の違いを利用したものである。水分子は容易に膜素材中に溶け込むことはできるが、除去対象物質は溶け込めないためである。また、除去機構に膜の電荷が大きな影響を及ぼす。

(2) 膜の材質

膜を材質によって大別すると有機膜と無機膜に区分できる。

有機膜としては、MF 膜、UF 膜では、PSF (ポリスルホン)、PE (ポリエチレン)、CA (酢酸セルロース)、PAN (ポリアクリロニトリル)、PP (ポリプロピレン)、PVDF (ポリフッ化ビニリデン)、PTFE (ポリテトラフルオロエチレン) 等が用いられている。NF 膜/RO 膜では、ポリアミド系の有機膜が多く用いられている。

無機膜としては、セラミックを用いた膜 (MF 膜、UF 膜、NF 膜) があり、また金属膜が開発されている。

² NF/RO 膜 : RO 膜と NF 膜の処理性能の差は小さくなりつつある。また、RO 膜には SWRO (海水淡水化用 RO) と BWRO (低圧 RO 膜) とに区別される場合がある。水道用膜モジュール規格に基づく分類では、NaCl 除去率により、海水淡水化用 RO 膜 : 99.0%以上、RO 膜 : 93%以上、NF 膜 5~93%と区分されている。

膜の材質及び特徴について主なものをまとめると表 2-2となる。

表 2-2 主な膜の材質及び特徴

	主たる材質	特徴
有機系	PVDF, PE (塩素化, 親水化処理) PP, PTFE, 等	材質により, 耐熱性, 耐薬品性等が異なり, 膜の保管や薬品洗浄において, その材質特性 に留意する。
無機系	セラミック (酸化アルミニウム, 酸化チタン, 酸化ジルコニウム, 等)	有機膜に比較して, 耐熱性, 耐薬品性に優れ るが, 耐衝撃性の点で取り扱いに留意する必 要がある。
	金属	耐用年数が長い。(開発段階)

2.1.3 膜分離設備の概要

膜分離設備は, ろ過方式, 駆動圧方式, 膜モジュールの形式等により, 表 2-3のように分類される。表中の各項目について, 以下に概要を説明する。

表 2-3 膜分離設備の主な分類項目

項目	主な分類		
(1)ろ過方式	a)全量ろ過	b)クロスフローろ過	
	a)内圧式	b)外圧式	
(2)駆動圧方式	a)ポンプ加圧方式	b)ポンプ吸引方式	c)水位差利用方式
(3)膜モジュールの形式	a)中空糸型	b)平膜型	c)スパイラル型
	d)管型	e)モノリス型	
(4)膜の洗浄方式	a)物理洗浄	b)薬品洗浄	

※文献 32)より作成

(1) ろ過方式

1) 全量ろ過とクロスフローろ過

膜処理におけるろ過方式は, 図 2-2に示すように, 全量ろ過 (デッドエンドろ過 : dead-end-filtration) とクロスフローろ過 (cross-flow filtration) とがある。

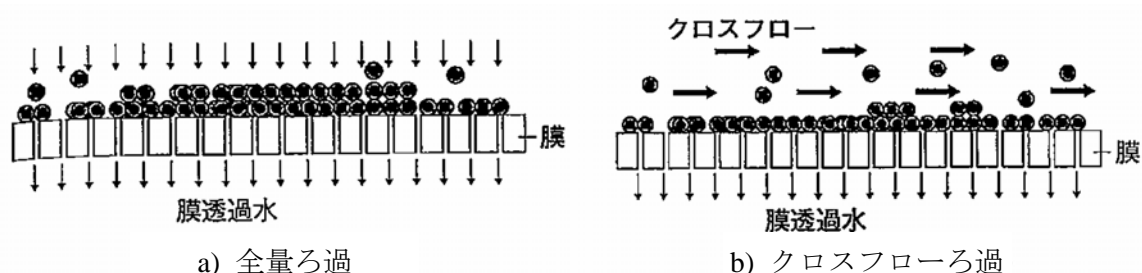


図 2-2 ろ過方式 (全量ろ過とクロスフローろ過) 6)より一部改変

全量ろ過では, 膜で阻止されたものが膜に付着し, ろ過とともに付着物が蓄積するため, 一定時間ごとに必ずろ過を中止して, 累積した付着物の層を除去しなければならない。

一方, クロスフローろ過では, 膜表面に平行な流れで常に膜表面を洗浄させながらろ過する。ろ過と付着物の除去を並行して連続運転ができ, かつ, ろ過速度を高く維持できる反面,

十分な平行流を作るためろ過流量に対して供給水側の流量が大きくなり、ろ過流量当りのエネルギー消費が大きくなる。

2) 内圧式と外圧式

膜の内側（中空糸や管の内側）に原水を供給し、外側（中空糸や管の外側）に処理水を流出する方式を内圧式ろ過方式と言い、逆に膜の外側に原水を流し、内側に向けて処理水が流れる方式を外圧ろ過方式という。浸漬型 MBR（後述 3.1 参照）は、膜の外側に原水を供給するものであり、全て外圧式となる。

外圧式は、内圧式と比べると透過流束が低くなるが、実施可能な膜洗浄の方式（(4) 参照）が多く、原水中に懸濁粒子が多い場合にも使用できるため、排水処理分野では外圧式が採用されることが多い。

(2) 駆動圧方式

膜ろ過を行うには、供給水（原水）側と膜透過水側の圧力差、すなわち膜差圧が必要である。膜差圧を与える方式として、ポンプ加圧方式、ポンプ吸引方式、水位差利用方式等がある。

- a) ポンプ加圧方式：ポンプを用いて、膜の供給水側に圧力を加える方式
- b) ポンプ吸引方式：吸引ポンプを用いて、膜の膜透過水側より吸引する方式
- c) 水位差利用方式：膜浸漬槽とろ過水槽、あるいは供給水槽と膜透過水槽の水位差を用いて、膜の供給水側に圧力を加える方式もしくは膜の膜透過水側より吸引する方式

(3) 膜モジュールの形式

浄水・排水処理分野において主に用いられている膜モジュールには、中空糸型、平膜型、スパイラル型、管型、モノリス型等がある。

浄水・排水処理分野で使用される主な膜モジュールの形式を図 2-3に示す。

<p>中空系膜</p>	<p>中空系型 外径 0.5~3mm 程度の中 中空系状の膜を集積したも の。膜の中心部であるマ カロニ状の中中空部分より 処理水を得る。 膜の充填密度を大きくで き、一般的には他の型の モジュールと比べ装置が コンパクトになる。</p>	
<p>平膜</p>	<p>平膜型 シート状の膜を5~10mm 程度の間隔で連結したも の。 2枚の膜の間あるいは膜 とスペーサの間より処理 水を得る。</p>	
	<p>スパイラル型 袋状の平膜を原水水路と なる網目状のスペーサと ともに海苔巻き状に一体 化したもので、圧力容器 に装填した構造。NF/RO 膜に多く用いられる。</p>	
<p>管状膜</p>	<p>管型/チューブラー型 外形 3~15mm の円筒状 の膜を束ねたもの。</p>	
<p>モノリス型</p>	<p>内圧式のセラミック膜で、1 本のエレメントに多数の流路 が設けられている。流路の表 面には膜が焼結（生成）され ている。</p>	

図 2-3 膜モジュールの主な形式³²⁾及びメーカー資料より

(4) 膜の洗浄方式

1) 膜の性能変化

膜の性能変化には、劣化とファウリングがある。劣化は、膜そのものの変化で生じる不可逆的な膜の性能の変化をいい、ファウリングは、膜の表面や流路に付着物質が堆積することによる膜の見かけ上の性能変化をいい、膜モジュールの流路閉塞も含まれる。ファウリングによる性能変化は、膜の洗浄操作により回復する場合が多い。

膜の性能変化の主な要因を表 2-4 に整理した。

表 2-4 膜の性能変化の主な要因

区分	要因		摘要
劣化	物理的劣化	圧密	圧力（高圧）による膜構造の恒久的な変形
		損傷	固形物等による擦過や衝突による膜構造の破損，振動等の繰返し応力による膜構造の疲労破壊
		乾燥	収縮等による膜構造の恒久的な変化，膜材質に依存
	化学的劣化	加水分解	膜材質の化学反応による材質の変化，温度・pHに大きく依存
		酸化	塩素等の酸化剤による物性の変化，膜材質に依存
生物的劣化		生物による分解，代謝産物等による化学的変質，膜材質に大きく依存	
ファウリング	原因物質		無機塩類，無機性・有機性コロイド，溶解性有機物質，付着微生物，懸濁物質
	膜面の汚染状態	ケーキ	懸濁粒子の膜面への堆積
		ゲル	溶解性高分子物質の膜面でのゲル化（濃度分極現象による），粘着性（ゲル状）物質の付着
		スケール	濃縮により溶解度を越えた物質の析出
		吸着	膜面への吸着による層形成
	膜内部の汚染状態（目詰まり）		膜細孔内部での吸着，析出，閉塞，気泡による細孔のブロッキング
流路閉塞		ユニット内原液側流路における固形物等による閉塞	

膜のファウリング原因物質としては，炭酸カルシウム，硫酸カルシウム等の無機塩類，シリカ，水酸化鉄等の無機性コロイド，蛋白質等の有機性コロイド，溶解性有機物質，付着性微生物，懸濁物質等が挙げられるが，実際には原因物質が多種多様にわたり支配的なものを同定することが困難な場合も多い。

様々な物質が高濃度に存在する排水処理の分野では，原因物質を特定することはきわめて困難で，あらゆる要因が複合的に存在しているとみることができる。さらに，膜面にケーキ層やゲル層が形成されることによる透水性能の低下が顕著である。特にゲルの原因物質は通常の水質分析では固形物として計量されないコロイド性・溶解性の物質のため発生の予測が困難である。

また，膜の性能とは別に，水温（液粘性）によっても膜差圧や透過流束が変化する現象が生じ，低水温期は，圧力一定制御運転下では透過流束が小さくなる傾向が，流量一定制御下では，膜差圧が上昇する傾向が認められる点にも留意する必要がある。

2) 膜洗浄（ファウリング対策）

膜処理においては，経過時間とともに，膜の表面や流路に付着物質が蓄積していくため，定期的に洗浄（付着物質を取り除く工程）が必要となる。膜の洗浄方法には物理洗浄と薬品洗浄がある。

a) 物理洗浄

物理洗浄には，逆圧洗浄，空気洗浄，フラッシング洗浄等があり，これらを単独または併用して洗浄を行う。排水処理分野で用いられる主な膜の物理洗浄の種類を図 2-4に示す。

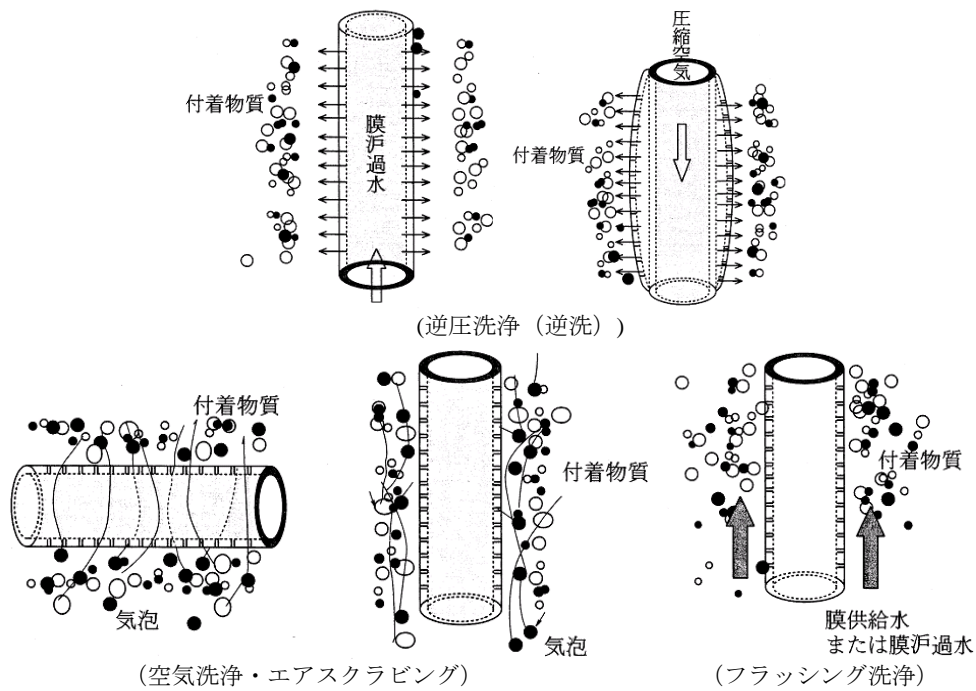


図 2-4 膜の物理洗浄の種類¹⁴⁾より一部改変

- ・ 逆圧洗浄（逆洗）

逆圧洗浄（逆洗）とは、ろ過方向とは逆方向に処理水・空気を流して、膜面の付着物質を除去する方法である。例えば逆圧洗浄は、逆圧洗浄用ポンプや、圧縮空気により加圧された水を用いて行われる。膜の材質や形状により、逆圧洗浄の可否や、洗浄時圧力の上限が決まる。

- ・ 空気洗浄・エアスクラビング

空気を吹き込んで膜を水中で振動させることにより、膜面の付着物質を除去する方法である。逆圧洗浄と併用される場合もある。

- ・ フラッシング洗浄

膜供給水または膜ろ過水を高速で膜面に沿って流すことにより、膜面の付着物質を除去する方法である。

b) 薬品洗浄（化学洗浄）

膜ろ過を継続していると、洗浄しきれない目詰まり物質が膜表面ないし膜内部に蓄積してくる。これらを除去し、膜性能を回復させるため薬品洗浄（化学洗浄）が実施される。薬品として、無機物を除去する薬品（酸等）や有機物や微生物を除去する薬品（次亜塩素酸ナトリウム等）が使用される。

膜の洗浄は、逆圧洗浄と薬品洗浄とを組み合わせることが多い。また、オゾンの使用によるファウリング軽減対策についても検討されており、耐オゾン性の高い膜材質の開発も進められている。

2.2 下水道への導入意義

2.2.1 膜処理技術の下水道への導入意義

平成17年9月にまとめられた「下水道ビジョン2100」では、100年後を見据えた下水道のあり方として、地域の持続的な発展のための「活用・再生」を中心とした『循環のみち』を基本コンセプトとした下水道が提案されている。

『循環のみち』実現のための基本方針として、水循環の健全化に向けた水再生・利活用ネットワークを創出する「水のみち」、将来の資源枯渇への対応や地球温暖化防止等に向け資源回収・供給ネットワークを創出する「資源のみち」、新たな社会ニーズに応えるサステナブル（sustainable, 持続可能な）下水道の実現を掲げている。

『循環のみち』実現に向けた施策には、新技術を積極的に導入し下水道の機能を高度化することが不可欠なものが多い。

膜処理技術は、下水中のSS成分はもとより、大腸菌等の細菌を確実に除去し、ウイルスや微小な物質についても低減効果が期待できる技術であり、下水道に導入する場合、次のような効果が期待できる。

- ・ 汚濁物質の除去性能の向上
- ・ 病原微生物の除去
- ・ 施設のコンパクト化
- ・ 運転管理が容易（自動制御運転の範囲の拡大）、等

『循環のみち』を実現するための施策体系と、膜処理による実現可能性のある取り組みの例を図2-5に示す。

「循環のみち」			膜処理の導入により実現可能な取り組み
基本方針	視点	施策項目	
水のみち	活かす水のみち	<ul style="list-style-type: none"> ・ 近自然水流の復活、再生 ・ 水質の保全 ・ 水利用の自立性向上 	<ul style="list-style-type: none"> (1)未普及地域の早期解消 (施設のコンパクト化が可能なMBRの活用) (2)高度処理 (3)再生水利用の拡大
	優しい水のみち	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人に優しい水環境の創出 ・ 潤いのある水縁空間の創出 ・ 水縁コミュニティの創出 	<ul style="list-style-type: none"> (2)高度処理 (3)再生水利用の拡大 (サテライト処理等)
	衛る水のみち	<ul style="list-style-type: none"> ・ 公衆衛生の向上 ・ 新たな浸水対策の展開 ・ 雨水、再生水、湧水等の防災への活用 ・ 地域保全生態系の保全、再生 	<ul style="list-style-type: none"> (3)再生水利用の拡大 (4)水系リスクの低減 (病原微生物の除去)
資源のみち	優しい資源のみち	バイオマスの利用	<ul style="list-style-type: none"> ・ 膜分離によるメタン発酵促進 (研究開発段階)
施設再生	機能向上	機能維持・改築の効率化	<ul style="list-style-type: none"> (5)改築：処理場の改築において、現有の敷地や土木構造物の範囲内で機能向上(処理水質の高度化、監視・制御の自動化、省力化等)

図 2-5 「循環のみち」実現における膜処理技術の可能性

このように、「循環のみち」実現のために必要となる取り組みのうち、膜処理技術の導入により実現可能なものも多く、下水道における膜処理技術への期待も大きい。

特に MBR は中・大規模処理場への導入やサテライト処理への適用等、今後、下水道事業への本格的な展開が期待できる処理方法である。

以下に各取り組みについて具体的に記載する。

(1) 未普及地域の早期解消

人口減少、高齢化、厳しい財政状況の中で、未普及地域における下水道整備を速やかに進めるために、施設のコンパクト化が可能な MBR の導入が進んでいる。またコスト縮減、工期短縮を目的としたユニット型の極小規模 MBR の開発が進められている。

(2) 高度処理

膜処理水は、従来法と比較して SS が含まれない。膜処理による SS 除去に際して、窒素、りん等のうち SS に含まれる部分の除去も期待できる。

特に MBR は、従来法に比べ高い MLSS 濃度（10,000～15,000mg/L）で運転することができることから、短時間で有機物分解、硝化脱窒反応を生じさせることが可能である。また、循環法、ステップ法、凝集剤添加法等との組み合わせも可能であり、最適な運転条件や適用範囲の拡大について検討が進められている。

(3) 再生水の利用拡大

処理水再利用を行う場合においても、高度処理が必要となることが多く、膜処理技術の活用により効果的に対応できる場合がある。

再生水利用の基準値と従来法及び膜処理による処理水質の例を表 2-5 に示す。MBR の処理水は、用途によってはそのまま再利用できる。再利用にあたって色度が問題となる場合等必要に応じて、活性炭投入やオゾン処理の追加で対応が可能である。

表 2-5 再生水の水質目標値と膜処理水の水質事例

項目	再生水利用の基準値 ^{注1)}		従来法による処理水質 ^{注2)}		膜処理水の例	
	修景用水利用	親水用水利用	標準活性汚泥法	循環法+砂ろ過	MBR 処理水 ^{注3)}	NF/RO 膜処理水 ^{注4)}
BOD	—	—	10～15 mg/L	～10 mg/L	<2 mg/L	<1mg/L
T-N	—	—	—	10～20 mg/L	<10 mg/L	1～17 mg/L
T-P	—	—	—	(～1 mg/L)	(<0.5 mg/L)	<0.03 mg/L
大腸菌	1,000CFU /100mL 以下	不検出	3,000 個/cm ³ 以下 (大腸菌群数)	3,000 個/cm ³ 以下 (大腸菌群数)	不検出	不検出
濁度	2 度以下	2 度以下	—	—	<2 度	<1 度
pH	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6
外観	不快でないこと	不快でないこと	—	—	不快でない	無色透明
色度	40 度以下	10 度以下	—	—	5～20	<1
臭気	不快でないこと	不快でないこと	—	—	不快でない	無臭

()は凝集剤添加による

注 1)：再生水利用の基準値²⁵⁾

2)：下水道法上求められる放流水質のレベル

3)：運転条件によっても大きく異なるが引用文献による例として記載^{11), 15)}

4)：二次処理水を NF/RO 膜でろ過した場合の水質例^{6), 12)}

また MBR については、下水のサテライト処理の具体化が期待されている。サテライト処理は、下水処理場に至る前の下水管から下水を取り込む中間浄化施設を設置し、処理水を活用するもの（図 2-6参照）である。

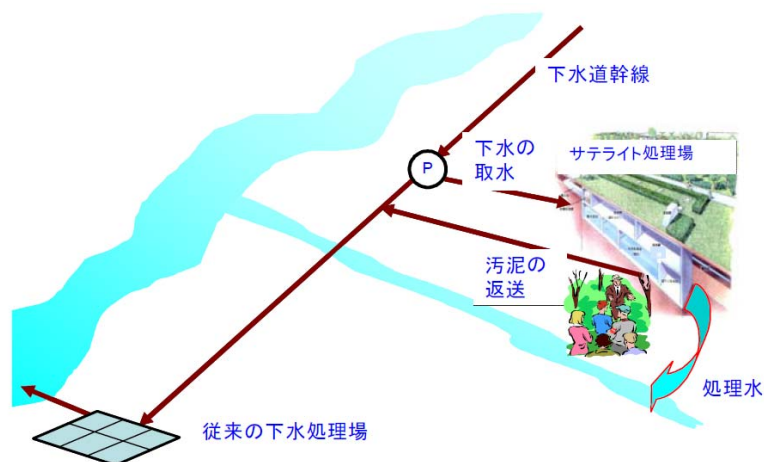


図 2-6 サテライト処理による再利用の例⁴³⁾

サテライト処理では、下水管から取水・処理し、処理に伴って発生する汚泥はもとの下水管に戻すという方法が取られるため、通常の下水処理場より施設のコンパクト化が期待できる。

再生水利用を行う場合、現状では、利用先が下水処理場の周辺に立地していないと経済性が成立しない。しかし、サテライト処理が低コストで実現できれば、雑用水やせせらぎ用水等の水需要が多い地域であれば、下水処理場の周辺という立地に該当しなくても、経済的なメリットが生まれる可能性がある。

(4) 水系リスクの低減

下水道を取り巻く課題の一つとして、水系リスクの低減が挙げられる。

膜処理では、微量化学物質や細菌やウイルスについても低減することができる。例えば、下痢や嘔吐等の集団感染を引き起こす原因となるクリプトスポリジウム^{※3}のオーシストは塩素に対して強い抵抗性を持つが、表 2-6に示されるように、砂ろ過法と比較しても、膜処理では高い除去性能を有している。

表 2-6 クリプトスポリジウムのオーシスト除去性能の事例¹⁹⁾

急速砂ろ過法	2.5 log
緩速砂ろ過法	3 log
膜ろ過法・大孔径膜	6 log
精密ろ過膜	>6 log
限外ろ過膜	>7 log

なお、ウイルスよりも孔径の大きい MF 膜であっても、MBR がウイルス除去率向上に有効との報告事例¹⁵⁾、二次処理水を対象とした MF 膜処理によるウイルス除去の報告例⁴⁵⁾がある

³ クリプトスポリジウムに対しては、原水の汚染状況、最小感染量、及び感染リスクから、4~5log (99.99~99.999%) 程度の除去性能が必要であると考えられている。膜ろ過法では 6log (99.9999%) 以上の除去性能（表 2-6 参照）が得られている。

ことから、細菌や原虫の除去だけではなく、リスク低減に寄与できる可能性が示されている。

(5) 処理場の改築

下水道整備の進捗にともない、老朽化した処理施設が増加してきた。日常生活や社会活動に重大な影響を及ぼす事故の発生や機能停止を未然に防止するため計画的な改築更新の推進、あわせて高度処理や再生水利用等を目的とした改築も必要となってきた。このような下水処理場の改築を行う際に、スペース不足や処理能力の不足が課題となる。

既存下水処理場の改築に際して、既存下水処理施設の全部又は一部を MBR に改造することにより、限られた敷地や既存の土木構造物等の範囲で、処理の高度化や処理能力の増強が可能となる（第 4 章参照）。



また、膜処理技術は固液分離が確実な物理的な処理方式であり、監視・制御運転の自動化が行いやすいという利点もある。

2.2.2 下水道への膜処理技術の導入形態

下水道における膜処理技術は、近年、低コスト型膜モジュールの開発や膜の長寿命化が図られており、現在も、コスト、エネルギー使用量の削減等、様々な観点からの研究や技術開発が進められており、今後も、健全な水循環の構築等、多方面での適用が可能な技術として、下水道事業への積極的な展開が期待されている。

下水道への膜処理技術の導入目的に応じた導入形態を、表 2-7 に示す。

表 2-7 膜処理技術の導入形態

膜処理技術の導入目的	導入形態	代表的な例
未普及地域の早期解消や処理場の改築にあわせた処理の高度化等	従来法において最終沈殿池での重力沈降により行われている固液分離操作を、膜処理により行うもの。	<p>生物反応タンクの活性汚泥を膜により分離して処理水を得る膜処理</p> <p><例></p>  <p>①新設処理場への MBR 導入 ②既設処理場への MBR 導入</p>
再生水の利用	再生水の利用を目的として従来法や MBR の処理水を対象に、膜処理を行うもの。	<p>下水処理水を対象とした膜処理</p> <p><例></p> 

2.3 下水道における膜処理の現状

2.3.1 国内の下水道用膜処理施設の導入状況

(1) MBR 導入状況

国内の下水道における MBR は、平成 17 年に兵庫県福崎町において初めて供用開始された。以降、順次他の処理場においても供用開始され、平成 21 年 3 月時点での供用実績は 10 箇所である。(表 2-8 参照)。

MBR は中・大規模処理場への導入やサテライト処理への適用等、今後、下水道事業への本格的な展開が期待できる処理方法であり、その普及拡大に向けた課題について巻末に参考資料として記載した。

表 2-8 下水道における MBR 適用事例

(平成20年12月現在)

自治体名	施設名	現有処理能力 (m ³ /日)	供用開始	膜タイプ
福崎町	福崎浄化センター	4,200	H17. 3	平膜
禰原町	禰原浄化センター	720	H17.12	平膜
鹿沼市	古峰原水処理センター	90	H17. 4	平膜
鏡野町	奥津浄化センター	580	H18. 3	中空糸状膜
雲南市	大東浄化センター	1,000	H18.10	平膜
標茶町	塘路終末処理場	125	H19. 5	平膜
浜松市	城西浄化センター	1,375	H20. 3	中空糸状膜
沼津市	戸田浄化センター	2,140	H20. 3	平膜
若狭町	海越浄化センター	230	H20. 4	中空糸状膜
大田市	大田浄化センター	2,150	H21. 3 ^(※1)	平膜
新宮町	中央浄化センター	6,060 ^(※2)	H22. 3 予定	未定

※1:平成21.3.31供用開始

※2:現在建設中の処理能力

(2) 膜処理を利用した再生水利用の導入状況

国内における膜処理を利用した再生水利用の事例を表 2-9 に示す。

表 2-9 膜処理を利用した再生水利用の事例

自治体名	施設名	利用目的(膜の種類)	稼働年度	出典
東京都	落合水再生センター	親水用水(MF 膜, RO 膜)	H5	文献 6)
東京都	芝浦水再生センター	トイレ用水(MF 膜)	H16	文献 1)
大阪市	海老江下水処理場	修景用水(MF 膜, RO 膜)	H7	大阪市下水道科学館資料
神戸市	垂水下水処理場	修景, 洗車用水(RO 膜)	H5	文献 45)

2.3.2 海外の下水道用膜処理施設の導入状況

(1) MBR 導入状況

海外の下水処理施設における MBR は、1997 年にイギリス Porlock 処理場において初めて供用開始され、近年施設数が増加している。また、大規模施設への導入も進み、数万 m³/日規模の処理場も増えてきている。(表 2-10 及び図 2-7 参照)

表 2-10 海外の下水処理施設における MBR の導入事例

国	施設名	処理能力 (m^3 /日)	供用開始年
イギリス	Porlock	1,900	1997年
ドイツ	Roedigen	3,240	1998年
イギリス	Swanage	12,700	1998年
フランス	Lle d'Yeu	4,300	1999年
イタリア	Brescia	42,400	2002年
ドイツ	Nordkanal	45,000	2004年
オランダ	Varsseveld	18,000	2003年
アメリカ	Tulalip	4,540	2003年
アメリカ	Traverse City	38,600	2004年
オマーン	Al-Ansab	78,000	2006年
アメリカ	Gainesville	38,200	2006年
アメリカ	Tempe Kyrene	44,300	2006年
アメリカ	Johns Creek	93,500	2007年
中国	Beixiaohe	80,000	2007年
アメリカ	Peoria	75,700	2007年
カタール	Lusail	60,200	2007年
中国	Qinghe	60,000	2007年
イタリア	Syndial	47,300	2007年
アメリカ	Delphos	45,400	2007年
アメリカ	Broad Run	35,600	2007年
中国	Miyun	30,000	2007年
アメリカ	Brightwater	144,000	2010年 予定

※ 文献 10), 21), 22)より作成

※ 新設・既設改築の区分の傾向としては、新設あるいは既存施設に隣接した敷地への増設が多い

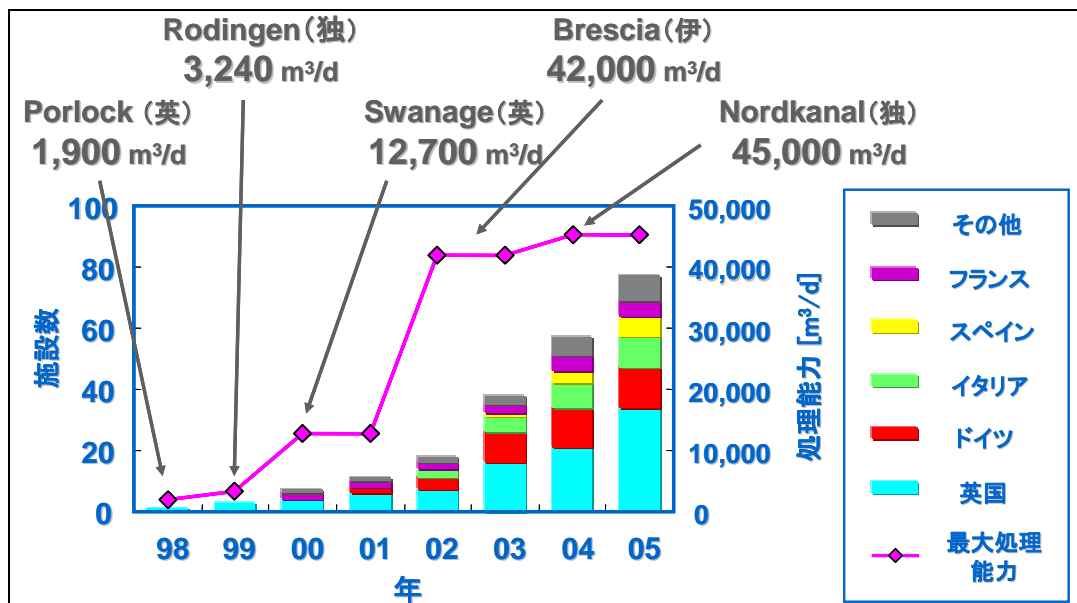


図 2-7 欧州の下水処理施設における MBR の採用数と処理能力の推移¹³⁾

EU においては、MBR 導入促進のため標準化の検討が進められており、2008 年 11 月には関係者団体が構成されるワークショップで審議された CEN 合意文書(CWA)が公表された(参考 2.5 参照)。これは標準化のための基準ではなく拘束力は無いが、標準化へ向けた議論のた

たき台となるものである。その有効期間が公表後 3 年となっており、3 年経過の後、廃止、有効期間の延長、あるいは上位の基準等への移行に向けた検討が行われることとなる。

(2) 膜処理を利用した再生水利用の導入状況

海外における膜処理を利用した再生水利用の事例を表 2-11に示す。

表 2-11 膜処理を利用した再生水利用の事例文献 18)より作成

国名	場所	水量	稼働年	膜の種類
クエート	Sulaibiya	320,000	2005	RO 膜
アメリカ	Orange County Water Destrict, CA	264,980	2006	RO 膜
シンガポール	Ulu Pandan	167,700	2006	RO 膜
シンガポール	Kranji	40,000	2002	RO 膜
シンガポール	Juron	35,000	2000	RO 膜
アメリカ	Gwenett City	34,000	1999	NF 膜
シンガポール	Bedok	32,000	2002	RO 膜

第3章 新設処理場への MBR 導入

MBR の基本的事項を述べるとともに、新規の下水処理場に MBR を導入する場合の検討事項、経済性等について整理する。

3.1 MBR の特徴

ろ過膜で活性汚泥を分離する MBR については、次の特徴が挙げられる。

- ・ 汚泥沈降性状の変化による処理機能への影響を受けず、安定した活性汚泥処理が可能である。
- ・ 反応タンクの MLSS 濃度を高く保持できるため、BOD/MLSS 負荷の設定によっては施設をコンパクトにできる。
- ・ 処理水は清澄であり、そのまま再利用に適用することも可能である。

(1) MBR の概要

MBR は、従来法において、最終沈殿池での重力沈降により行われている固液分離を、膜処理により行うもので、処理の高度化、安定化が期待できる。膜による固液分離の概念を図 3-1 に示す。

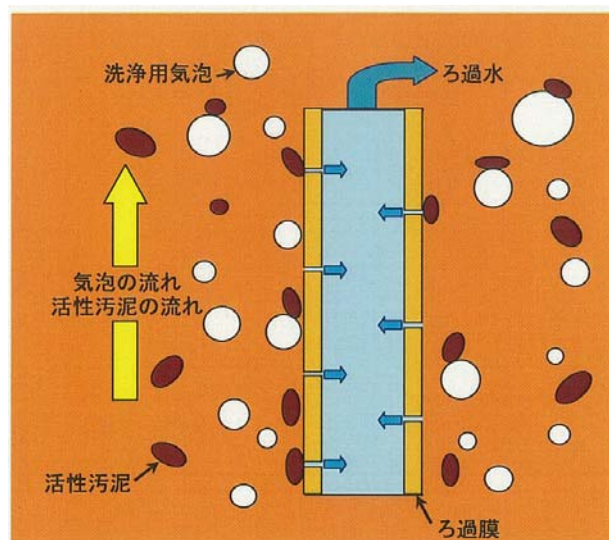


図 3-1 膜による固液分離の概念図（浸漬型 MBR）¹⁰⁾

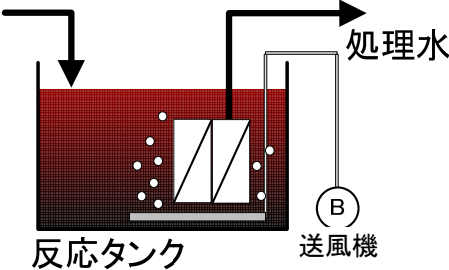
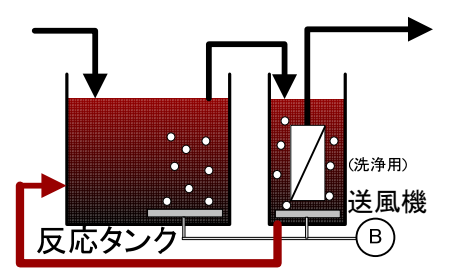
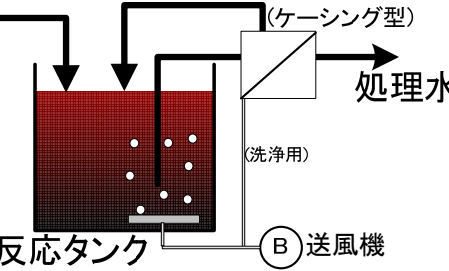
MBR では、膜モジュールを設置する場所により、便宜的に、浸漬型（一体型）、浸漬型（槽別置型）、槽外型の 3 種に分類できる（表 3-1 参照）。

浸漬型は、膜モジュールを槽に浸漬し、水位差や吸引ポンプを用いてろ過を行う方式である。槽外型は、膜エレメントをケーシングという収納容器に収めて使用するもので、水位差またはポンプによりケーシング内部に供給水（原水）を圧入する、もしくはケーシング内部から膜ろ過水を吸引することで膜ろ過を行う方式である。

一般に処理水の吸引には、ポンプ吸引が多く用いられているが、浸漬型においては水位差

を利用して、ポンプ吸引と併用することにより省エネ化を図ることの検討が行われている⁴²⁾。

表 3-1 MBR における膜モジュールの設置方式の特徴

<p>浸漬型 (一体型)</p>		<ul style="list-style-type: none"> 最も採用例が多い。 プロセス構成がシンプル。 反応タンク内の散気装置を、膜モジュールの洗浄と共有できる。 膜ユニットの複数設置等で膜モジュールの点検・補修・交換時に、他系との連携により、反応タンクを休止しない運転が容易にできる。
<p>浸漬型 (槽別設置型)</p>		<ul style="list-style-type: none"> 生物処理及び逆洗に必要な散気装置を、それぞれに適した方法を取りやすい（微細散気と粗大気泡の使い分け）。 反応タンク MLSS 濃度を膜分離槽 MLSS 濃度よりも低くして運転できる。 膜モジュールの点検・補修・交換時に、他系との連携により、反応タンクを休止しない運転が容易にできる。 最終沈殿池が利用できない場合は一体型に比べ建設コストが大きくなる。 浸漬洗浄が容易（膜分離槽を薬液洗浄タンクとして使用することが可能）。
<p>槽外型</p>		<ul style="list-style-type: none"> 透過流束が最も大きくできる（膜モジュール数を削減することができる）。 時間変動への対応幅が最も大きい。 汚泥循環等のコントロールが容易。 膜ユニットの複数設置等で膜モジュールの点検・補修・交換時に、他系との連携により、反応タンクを休止しない運転が容易にできる。 汚泥循環用のポンプが必要となるため、必要エネルギーが大きくなる。 薬品洗浄が容易。

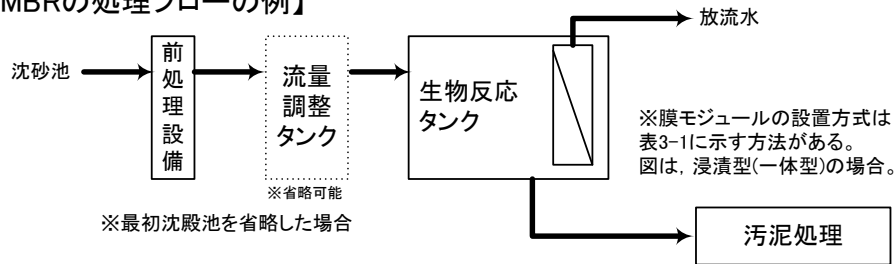
注：膜モジュールの改善・開発や、運転管理の工夫等により、表中の特徴（長短）は絶対的なものではない。

(2) MBR の主な設備構成

MBR の基本的な処理フローを標準活性汚泥法の場合と比較した例を図 3-2 に示す。ここでは、新規処理場に MBR あるいは標準活性汚泥法を適用する場合の主要な施設構成例を示す。

MBR は、前処理設備（微細目スクリーン等）、生物反応タンク、膜モジュールを設け、必要に応じて流量調整タンクを設ける。標準活性汚泥法等の従来法に比べ、最終沈殿池は必要なく、消毒設備も緊急時に固形塩素投入等が可能となるように措置していれば不要である。また最初沈殿池の省略あるいは規模の縮小が可能となる場合もあり、基本的にシンプルな施設構成となる。

【MBRの処理フローの例】



【標準活性汚泥法の一般的な処理フロー】

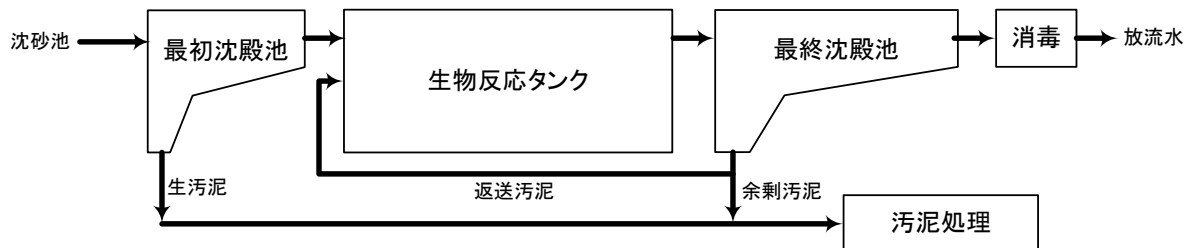


図 3-2 MBR と標準活性汚泥法における施設構成の比較

(3) MBR の特徴

1) 構成上の特徴

MBR の構成上の特徴として、以下に列記する事項が挙げられる。

- ① 最終沈殿池は必要ない。また、最初沈殿池や常時の消毒設備について、処理条件の検討を行った上で、省略あるいは規模縮小が可能となる場合がある。
- ② 生物反応タンク内の MLSS 濃度を高く保持できるため、余剰汚泥は生物反応タンクから直接引抜いて脱水することが可能であり、この場合、汚泥濃縮設備は省略することができる。
- ③ 流入水量変動に対応するために、流量調整タンクが必要となる場合がある。
- ④ 膜処理設備の必要敷地面積は小さく、一般的に標準活性汚泥法の 1/3 程度である。
- ⑤ ろ過膜保護のため、生物反応タンク流入水は 1mm 目程度の微細目スクリーンによる前処理が必要である。
- ⑥ 監視・制御の自動化が容易である。

2) 処理機能上の特徴

MBR の処理機能上の特徴として、以下に列記する事項が挙げられる。

- ① 返送汚泥の管理が容易である。
- ② 重力沈殿による固液分離の制約がないため、生物反応タンク内 MLSS 濃度を高く保持でき、従来法に比べ短い時間で処理を行うことができる。
- ③ 処理水中に SS はほとんど検出されず、透視度が高く清澄な処理水が得られる。また、有機物の除去は、従来法に比較して処理水に SS が含まれない分、より良好である。
- ④ 孔径 $0.4 \mu\text{m}$ 以下の MF 膜が通常用いられることから、大腸菌（染色標本で、短径

0.4~0.7 μm , 長径 1.0~3.0 μm の大きさ) ⁴⁴⁾を阻止できる。

- ⑤ MBR 処理水は、そのまま修景用水としての利用が可能である。また、残留塩素を保持させることより、散水用水、水洗用水としての利用も可能である。
- ⑥ 固形物滞留時間 (SRT) が長いため、処理過程で硝化反応が起こりやすく、生物反応タンク中に無酸素ゾーンを組み込むこと等により、生物学的硝化・脱窒反応による窒素除去が期待できる。
- ⑦ 凝集剤添加により高度なりん除去が可能である。また、従来法に比較して処理水中に SS が含まれない分、処理水りん濃度が低下する。
- ⑧ 汚泥転換率は、SRT が 20 日前後の運転では、OD 法について一般的に用いられている数値に比較して 10%程度小さい。また、より SRT の長い運転を行うことにより、さらに発生汚泥量を減少することができる。
- ⑨ MBR の余剰汚泥の脱水性は、OD 法の余剰汚泥と同程度である。

3.2 施設導入の検討事項

流入水の水質，処理水質，用地等の諸条件に基づき，施設，設備容量等の検討を行い，経済性，維持管理性，エネルギー効率等，多面的な観点から導入目的に照らして最適な膜及びその設置方式を選定する。

MBR システムの検討・計画にあたっては，MBR の主要な設備構成や特徴を十分にふまえて行うものとする。検討フローを，図 3-3に示す。

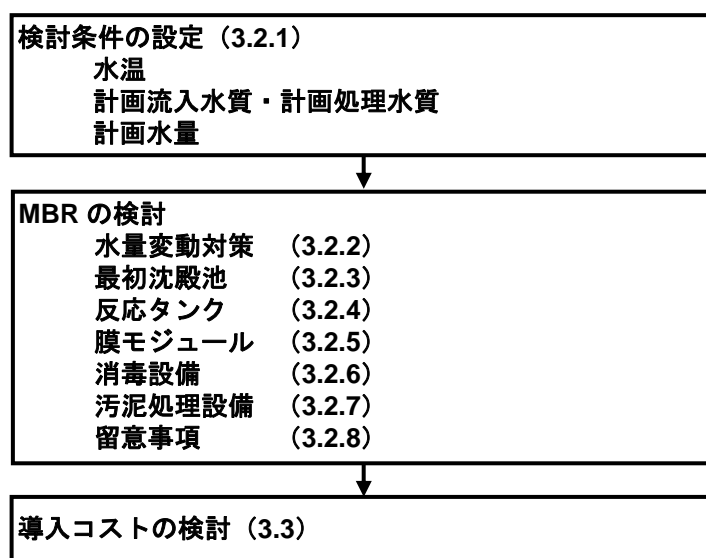


図 3-3 MBR システムの検討フロー

3.2.1 検討条件

MBR の計画にあたっては，安定した処理性能を確保するため，①水温，②計画流入水質・計画処理水質，③計画水量の設定を行う。

(1) 水温

低水温期には水の粘性等によりろ過性が低下し，通常水温 1℃低下により約 2%の透過流束の低下を招くことが知られている¹⁰⁾。このため，膜モジュールの必要面積は月間平均値の年間最低値を基準にして決定する。

水温の高い時期に流入水量の増加が見込まれる場合，膜モジュールの必要面積は当該時期の水温も勘案する必要がある。

(2) 計画流入水質・計画処理水質

MBR の MLSS 濃度を比較的高いレベルで運転すると，硝化が進行しやすいため，計画流入水質については硝化反応等の確認に必要な溶解性 BOD，アルカリ度，T-N 等についても設定しておく必要がある。MBR の処理水質は，一般的な標準活性汚泥法に比べ良好である場合が多い。

図 3-4は、既設の下水処理場に設置された実証プラント 5 種（いずれも窒素除去対応の中空糸膜 2 種，平膜 2 種，セラミック膜 1 種）における処理水 BOD 及び処理水 T-N の累積度数分布を示したものである。MBR 処理水の BOD，T-N は，それぞれ 2mg/L 以下，10mg/L 以下と，標準活性汚泥法の処理水に比べ良好な水質が得られている。

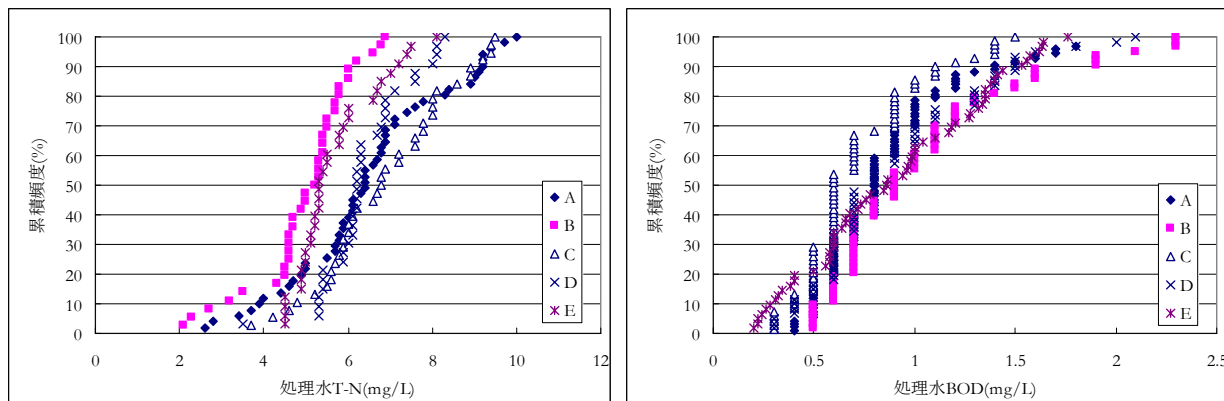


図 3-4 実証プラントの処理水 BOD，T-N の累積度数分布¹⁰⁾

なお，日本下水道事業団（以下「JS」という。）による MBR の施設容量設計における計画流入水質と計画処理水質の設定例を表 3-2 に示す。

表 3-2 流入水質と処理水質の設定例¹⁰⁾

項目	計画水質例		備考
	流入下水	処理水	
BOD	200mg/L	3.0mg/L 以下	処理水は C-BOD
SS	200mg/L	1.0mg/L 以下	
(T-N)	35mg/L	10mg/L 以下	窒素除去を行う場合の参考値
(T-P)	4.0mg/L	0.5mg/L 以下	同時凝集を行う場合の参考値

(3) 計画水量

施設計画を行う場合，原則として計画日最大下水量を用いる。ただし，膜の透過流束には上限があり，それを超える水量はろ過できないことから，時間変動が大きく膜のろ過能力のみでの対応が困難と考えられる場合は，別途対策が必要となるため，計画水量の設定には十分注意する。(3.2.2 参照)

3.2.2 水量変動対策

MBR の処理能力を超える水量変動に対応するため、流量変動を適切な範囲に調整する仕組みを検討する。

MBR は、安定した処理水質が得られるものの、膜のろ過能力を超えた流量には対応できないので、膜のろ過能力以上の流入がある場合には、反応タンクの水位が上昇し上流側設備への逆流や反応タンクからの溢水が懸念される。従って、必要に応じて流入水量変動を制御するための流量調整タンクを設ける。

JS の小規模施設を対象とした流量調整タンクの容量計算では、日最大水量と日間流入変動パターンを考慮して、調整後の変動比（時間最大／日最大）が 1.0 となることを原則としている¹⁰。日間流入変動パターンが未知の場合は、類似処理施設のデータより推定を行う。

中・大規模施設の場合は、一般的に、小規模施設に比べて流量変動比が小さいものの、変動比を 1.0 とするには必要な流量調整タンクの容量が膨大なものとなり、建設コストが増加する。従って、流量調整タンクによる方法以外の水量変動への対応策を、処理場全体の運転管理方法も含めて検討し、流量調整タンク設置の有無・規模を設定する。また、雨天時増水が懸念される場合についても、あわせて考慮しておく。

流量調整タンク以外の対応方法としては、反応タンクに余裕高を持たせて水位上昇によって変動を吸収する、あるいは流入ポンプ井の運転レベルを調整することにより対応させること等が考えられる。

反応タンクの水位で変動を吸収する方法は反応タンクの躯体が大きくなること、また反応タンク容積が変化することに伴い MLSS 濃度が時間的に変化するため、膜のろ過抵抗に変動が生じることとなり、膜に好ましくない影響を及ぼす可能性があることに留意する。

また、膜の必要面積が大きくなるという欠点はあるが、膜コストのさらなる低下を前提とすれば時間最大流量に対応可能な面積の膜を設置しておき、流入量の変化に対応して、膜の吸引ポンプの運転時間や回転数を調整する方式も考えられる。今後、中・大規模施設への導入検討が進むことで、日間流入変動への対応策についての技術開発も期待される。

なお、MBR と従来法との並列処理の場合は、従来法系列との流量配分によっても対応が可能となる（詳細は第 4 章）。

3.2.3 最初沈殿池

最初沈殿池については、3.1 の MBR の特徴に十分配慮し、施設の省略や適切な施設規模の設定について検討する。

MBR では、反応タンクにおける MLSS 濃度を高くすることができるため、通常は、最初沈殿池で汚濁負荷を削減することなく、必要な処理機能を発揮できると考えられており、最初沈殿池は必須ではない。

ただし、反応タンクにおける MLSS 濃度を高くしすぎると送気動力の増加や膜の透過性の低下等によって所定の性能が発揮できない場合がある。このような場合には、最初沈殿池を設けて反応タンクにかかる負荷を削減することを検討する。

現状では国内における実績がなく実証実験の段階ではあるが、最初沈殿池の設置により想定される効果を以下に示す。

- ・ 流量調整効果
- ・ 微細目スクリーンの固形物負荷軽減
- ・ 反応タンクの SRT 長期化に伴う硝化の安定化
- ・ 反応タンクでの必要酸素量の低減

ただし、最初沈殿池を設置した場合、反応タンクの有機物負荷低減による脱窒や生物脱りんへの影響や総汚泥発生量(生汚泥を含む)の増加等が考えられる。

3.2.4 反応タンク

反応タンクの計画にあたっては、3.1 の MBR の特徴に十分配慮し、①MLSS 濃度、②滞留時間、③必要空気量の設定を行う。

MBR の処理施設における容量算出フローの例を示す (図 3-5参照)。

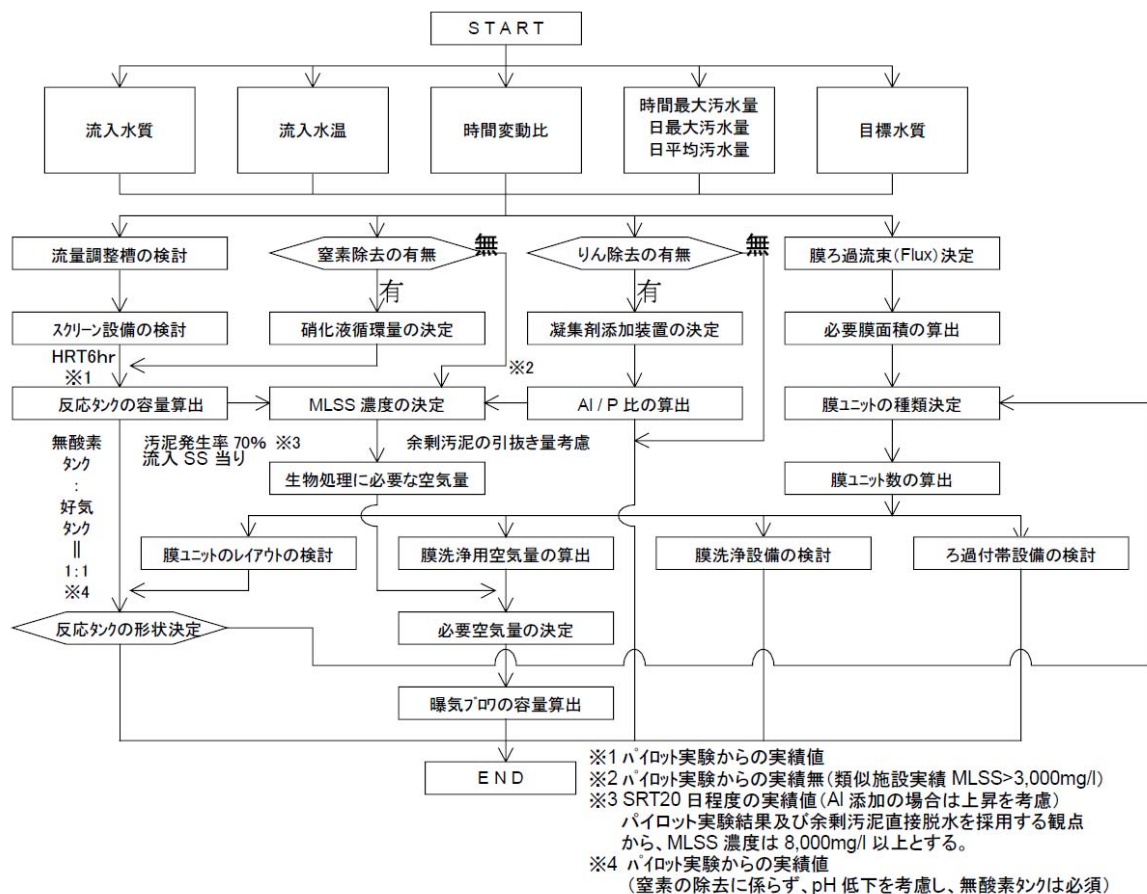


図 3-5 容量算出フローの例¹⁰⁾

(1) MLSS 濃度

MBR における反応タンクの MLSS 濃度は、標準活性汚泥法に比べ高く、これまでの実績では 8,000~15,000mg/L 程度に設定されている。MLSS 濃度を高くするほど、反応タンク容量は縮小できるが、必要空気量とのバランスを十分考慮する必要がある。

MLSS 濃度をできるだけ高め、反応タンク容量を縮小することは、特に中・大規模施設へ MBR を適用する場合にコスト縮減効果が大きい。

ただし、維持管理を考慮して、安定して管理できる MLSS 濃度の範囲を十分に確認する必要がある。例えば、浸漬型（一体型）においては、膜モジュールを設置した区画の MLSS 濃度が、処理水引抜により他の区画よりも高くなる傾向にあり、反応タンクの平均 MLSS 濃度と、膜モジュール設置区画の MLSS 濃度が等しくならぬこと等に注意する。

また、高 MLSS 濃度では、汚泥の粘性や流動性が変化することから、反応タンク内での流動（攪拌）性や膜へのファウリング、酸素移動効率の低下についても留意する。

(2) 滞留時間

反応タンクの滞留時間^{※4}については、浸漬型（一体型／槽別置型）の場合、膜モジュール設置タンクの容量は、反応タンク滞留時間に見込むものとする。

なお、窒素除去を行う場合は、流入水質、水温、流入水量及び MLSS 濃度に応じて、好気タンク及び無酸素タンクの滞留時間を設定する。

また、MBR では MLSS が高濃度となり、SRT も長期化するため、従来の活性汚泥法（MLSS 濃度として 1,000~3,000mg/L 程度）の場合とは、生物反応特性も異なる。従来の検討方法（BOD・SS 負荷、硝化に必要な A-SRT、脱窒速度、等）で滞留時間を設定すると、HRT が極端に短縮化されることから、今後の調査が必要な分野である。なお、国内における実績としては滞留時間 6.0hr が多く、また、EU では 3.0~8.5hr と報告¹³⁾されている。

(3) 必要空気量

必要空気量は、生物処理に必要な酸素量から換算した空気量、及び空気洗浄に必要な空気量から検討を行う。

浸漬型の場合、反応タンク内に膜モジュールを浸漬し、膜下部からエアレーションを行って気液混合流により膜面を洗浄するため、生物処理に必要な空気と洗浄用の空気を併用することができる。

現状では、生物処理に必要な空気量よりも、空気洗浄に必要な空気量が多いことが多く、JS による技術評価¹⁰⁾では、浸漬型（一体型）の標準設計値としては日最大汚水量の 23 倍とされている。今後、膜モジュールの技術開発が進み、空気洗浄に必要な空気量の低減が期待されている。このとき、空気洗浄に必要な空気量の低減により生物処理に必要な空気量が不足する場合は、膜モジュールに付帯する散気装置だけではなく、補助散気装置の設置を検討することが必要となる。

⁴ 滞留時間の検討において、JS 技術評価では膜モジュールそのものの体積も反応タンク容量に含まれたものとして取り扱われており、モジュール体積分を加算することはない。ただし、滞留時間を非常に小さく設定する場合、膜モジュール及び付帯設備等が反応タンクの実容量に大きく影響する場合等には、別途検討を行う。

空気量低減に関しては、様々な調査研究が行われている。例えば、洗浄用の空気を効率的に利用するために膜モジュールを水深方向に長く設置する方法のほか、浸漬型（槽別置型）において好気タンクの MLSS 濃度を小さく設定することで、浸漬型（一体型）に対して必要空気量が 6～15%程度削減できるという研究報告例³⁶⁾や、微細気泡散気装置を活用することで 20%程度削減効果が期待できるという研究報告例³⁷⁾、洗浄用空気を間欠運転することで従来に比べ 1/2～1/3 の低減効果があるという研究報告例³⁸⁾ 等がある。

3.2.5 膜モジュール

膜モジュールの選定は、MBR の安定した運転及び容易な維持管理を保障する重要な事項であり、①膜モジュールの形式、②膜モジュールの設置方式、③膜の耐用年数、④膜の洗浄方式について、十分検討する。

(1) 膜モジュールの形式

MBR において使用される膜は様々な種類があるが、通常、MF 膜（孔径 0.1～0.4 μm）が使用される。

現状の膜モジュールの主要な諸元の例を表 3-3に示す。膜の透過流束は、設置面積あたりの処理能力を示すものではなく、膜の表面積あたりの処理水量である。したがって膜モジュール選定時には、膜透過流束に加えて、必要となる設置面積についても検討・設定を行う。なお、巻末の「膜処理技術の導入検討にあたっての技術情報」に膜モジュールの諸元の例、及び国内における MBR 適用事例における配置例を記載している。

表 3-3 各膜モジュールの主要な諸元の例

	平膜 (A 社)	中空糸膜 (B 社)	セラミック膜 (C 社)	管状膜 (D 社)
透過流束 (m/日)	0.7	0.6～0.7	～2.6	1.2～1.44
膜差圧 (kPa)	～20	10～50	20～80	10～50

※日本下水道施設業協会へのヒアリングより（2008.9）

MBR で用いられる膜モジュールは、中空糸型、平膜型が多く、設置方式としては浸漬型が多いが、その他の形式の膜モジュールについても開発が進められていることから、今後の開発動向をふまえて選定する。

(2) 膜モジュールの設置方式

膜モジュールの設置方式（浸漬型（一体型）／浸漬型（槽別置型）／槽外型）は、必要空気量、膜モジュールの形式、洗浄の効率性及び管理性、コスト等を比較評価し設定する。

浸漬型（一体型）は、浸漬型（槽別置型）や槽外型に比較して、採用事例が多く、日本の下水道における実績（H20 年現在）は、全て浸漬型（一体型）である。

浸漬型（槽別置型）や槽外型の場合、膜洗浄や点検作業時に、他系との連携で反応タンクを休止しない運転が容易であること、反応タンクへの超微細気泡散気装置の導入と膜モジュールの洗浄に特化した散気方式の使い分けによる必要空気量の削減が期待できること等が考

えられる。

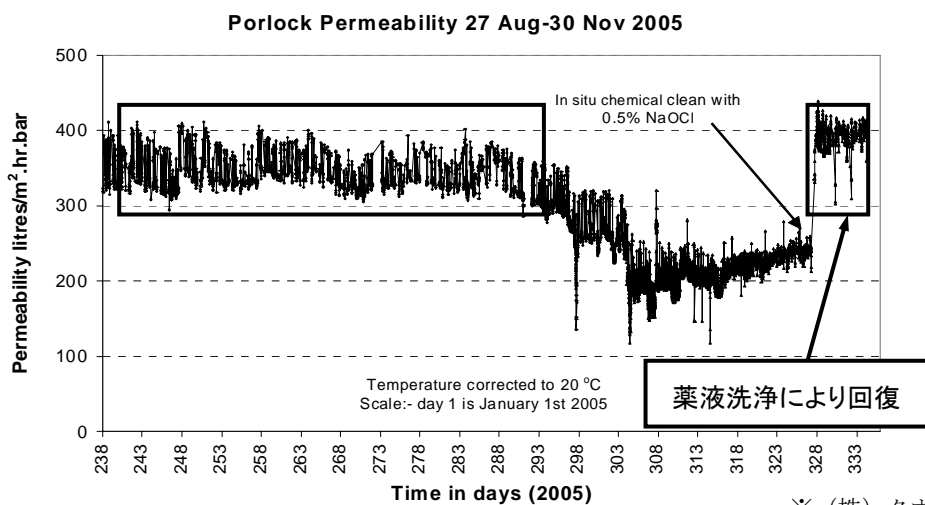
EU においては、今後の中・大規模施設では槽別置型の採用が増えると考えられている¹⁾。現状における調査例³³⁾によると、調査対象 MBR 処理場 15 箇所 (1,600~45,000m³/日の規模)のうち、8 箇所で槽別置型が採用されている。

膜モジュールの設置方式の選定にあたっては、現状での技術開発や採用実績とこれらの今後の動向、運転管理の状況、膜モジュール更新時における膜モジュールの形式や設置方式を変更する可能性 (互換性への配慮) 等についても十分に考慮する。

(3) 膜の耐用年数

耐用年数は、膜モジュールの形式・設置方式のみならず、原水性状 (夾雑物等) や洗浄の方法・頻度によっても異なる点に留意する。

ろ過膜は、物理洗浄や薬品洗浄を行うことにより、必要な透過流束を確保しながら運転するが (図 3-6)、長期間の間には洗浄を行ってもなお閉塞が残り、ろ過性能が低下してくる。このような状況ではろ過膜の交換が必要となる。膜の交換が必要となるまでの期間は、膜の種類、原水の種類、運転状況等によっても大きく異なり、正確な予測は困難であるが、例えば英国における下水道施設 (MBR) での実績 (表 3-4) では 7 年間使用時点でも膜交換比率は約 3%に留まっているとの報告がある。



※ (株) クボタ提供資料

図 3-6 イギリス Porlock 処理場における膜透過量の経年変化

表 3-4 膜使用年数と膜交換状況 (英国での実績)¹⁰⁾

膜使用年数	膜枚数	交換枚数	交換の比率(%)
1	85,000	162	0.2
2	73,936	227	0.3
3	36,036	514	1.5
4	15,386	29	0.2
5	15,386	16	0.1
6	4,286	20	0.5
7	686	~15	2.9

過去の浄化槽、産業排水処理施設について施設毎の膜交換比率を調査し、施設数ベースで集計した報告 (図 3-7) によると、7 年経過した 1998 年度納入施設において 50%近くが膜を

全く交換しておらず、9年以上経過した1996年度以前に納入した施設においても45%程度が膜を全く交換していなかった。

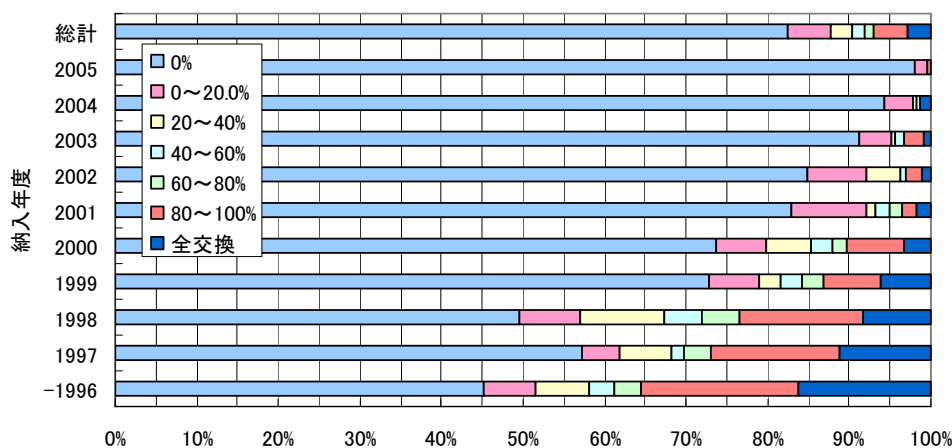


図 3-7 膜交換比率 (産業排水処理施設と浄化槽) 11)

(4) 膜の洗浄方式

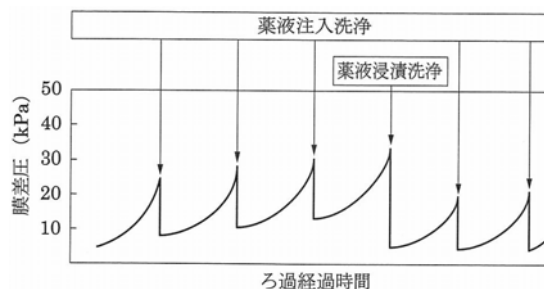
膜洗浄方式については、第2章で述べたとおり、物理洗浄と薬品洗浄があり、薬品費、設備費、洗浄の効率性、管理性を十分勘案し、組み合わせによる洗浄方式を検討する。

浸漬型における洗浄では一般的に、強いばっ気を定常的に行う(空気洗浄)ことでケーキ層の蓄積を抑えるとともに、定期的に薬品洗浄を行う。薬品洗浄には、インライン洗浄と浸漬洗浄がある。インライン洗浄は、膜ユニットを反応タンクに浸漬したまま、ろ過水側から薬液を注入して静置し、膜を洗浄する。浸漬洗浄は、運転を停止して膜モジュールをタンク外に吊り上げ、水洗浄した後、薬液洗浄タンクに浸漬させて洗浄するのが一般的である。薬品洗浄の頻度は、都市下水処理の場合、年数回程度である。なお、低濃度の薬液を用いて週1回程度、定期的に洗浄(メンテナンス洗浄)を行う方式もある。

槽外型では膜はケーシングに収納されているため、ポンプを用いてケーシングと膜の間に循環流を形成することにより、膜面を洗浄しながらろ過を行う方式が取られる。また、膜面洗浄効果を高めるため、循環流に空気を混入する方法が採用される場合もある。

薬液浸漬洗浄は、膜モジュールを取り出し、薬液を満たした洗浄タンク内に浸漬し一定期間静置することより行うため、この期間はMBRの処理能力が低下あるいは当該系列の休止となる。今後のMBR施設の中・大規模化にあたって特に注意すべき事項として、膜モジュールを一定期間使用できない場合の対応についての配慮が必要である。

図 3-8に膜洗浄による膜差圧回復のイメージを示す。



※図中の「薬液注入洗浄」はインライン方式の薬品洗浄を指す。

図 3-8 膜洗浄による膜差圧回復のイメージ 32)

3.2.6 消毒設備

消毒設備は MBR の設備機能不全時における緊急対策設備として計画する。

MBR では、膜ろ過により大腸菌が除去される。JS 技術評価¹⁰⁾では、MBR 処理水について常時の消毒設備は必要ないとしている。ただし膜破損等緊急時の対応として、塩素投入等の措置が可能なよう配慮することとされている。

3.2.7 汚泥処理設備

汚泥処理設備の計画にあたっては、3.1 の MBR の特徴に十分配慮し、汚泥処理方式の設定、物質収支計算を行う。

(1) 汚泥処理方式

MBR は最終沈殿池を必要としないことから、余剰汚泥は、膜モジュール設置場所（反応タンク末端、膜モジュール設置槽、ケーシング）から、直接引抜くことになる。

MBR では、MLSS が高濃度（概ね 10,000mg/L）であり、引抜いた余剰汚泥は直接脱水処理が可能である。ただし、濃縮工程を省略し、余剰汚泥（汚泥濃度約 10,000mg/L）を直接脱水する場合と、濃縮工程を経た濃縮汚泥（汚泥濃度 30,000mg/L～50,000mg/L 程度）を脱水する場合とで、脱水機の設置台数が大きく異なることから、経済性（イニシャルコスト、ランニングコスト）や管理性を十分に勘案し、濃縮工程の有無による長短をふまえた比較検討を行ったうえで、汚泥処理方式を設定する。

(2) 物質収支

汚泥処理系を含めた施設設計にあたっては、原則として汚泥の物質収支計算を行うものとする。

MBR における流入 SS に対する余剰汚泥発生量は、凝集剤を添加しない場合で標準活性汚泥法や循環法の 6～7 割程度との報告¹⁰⁾もあり、MBR 導入により汚泥量削減に寄与できる可能性がある。なお、りん除去のため凝集剤を添加する場合は、添加に伴う汚泥発生量の増加分を見込む必要がある。

3.2.8 その他の留意事項

MBR の計画検討においては、①微細目スクリーン、②水位計画、③施設配置についても留意する。

(1) 微細目スクリーンの設置

膜モジュールの保護を図るために、反応タンク流入以前に微細目スクリーンを設置する。流量調整タンクを設ける場合には流量調整タンク前段が一般的である。

微細目スクリーンには、バースクリーン、ドラムスクリーン、メッシュスクリーン等があ

り、国内の小規模施設の実績は目幅 1mm 程度のものが使用されているが、当該下水処理場の流入水の性状をふまえて適切な形式⁵を選定する必要がある。

MBR 運転における重大なトラブルは膜の破損や閉塞である。英国における膜交換の原因分析からは、異物の反応タンクへの流入による膜の破損や、不適切なスクリーン設置による異物流入による膜の破損が多いと見られる¹⁰⁾。このことから、夾雑物等による膜の破損や目詰まりを防止するためには、微細目スクリーンの適切な設置及び管理が重要である。

(2) 水位計画

処理施設の水位計画は、放流先の外水位、処理場流入下水管水位及び処理場計画地盤高さを基準に、円滑な水の流れになるよう検討を行う。

比較的小規模な MBR 施設で、下水を流量調整タンクから反応タンクへポンプ圧送し、処理水も膜モジュールからポンプ吸引する場合等では、各タンクの水位は比較的自由に設定できる。ただし、中・大規模施設の場合は、ポンプ設備が大容量となることから、前後の水位関係を検討し、自然流下とすることが省エネルギーの観点からは望ましい。

(3) 施設配置

前処理設備、流量調整タンク、反応タンク及び管理棟・汚泥棟等、敷地条件に応じた配置計画を行う。この時、膜モジュールや浸漬洗浄タンク等の設備を効率的に利用できるよう留意する。

(4) その他

MBR の計画検討にあたり、次のような事項にも十分留意する。

- ・ 膜破損時における診断方法や緊急対応について十分に検討しておく必要がある。
- ・ ウイルス除去はウイルス粒子より小さい孔径の UF 膜等を使用することにより達成できる。MF 膜によってウイルスが除去されているとの報告^{10),15)}もあり、ウイルスが SS に付着している、あるいはケーキ層にウイルスが吸着されるためと考えられているが、機構解明について今後の調査研究が待たれる。
- ・ 周辺環境対策に留意する。特に、流量調整タンクの臭気対策を検討しなければならない。
- ・ 流入水量について初期は少なくその後の伸びが予想される場合等は、反応タンク内への膜ユニットの設置数を、流入水量の伸びにあわせて順次増やす等の段階的な整備を含めた検討をしておく必要がある。

⁵ 膜のモジュール形式、処理フロー、運転方法（スクリーンの清掃、膜の洗浄や点検）、流入下水の性状等によっても最適な目幅は異ってくる。最近では、目幅 0.5mm 程度についても検討されている。

3.3 導入コスト

MBR の導入検討において、建設費及び維持管理費におけるコスト低減要因、増加要因を勘案し、従来法と比較検討を行う。

MBR におけるコスト低減及び増加要因として、表 3-5の項目が挙げられる。

建設費については、最終沈殿池が不要であり、反応タンクも縮小できること等から、用地費や土木工事費の大幅な削減が期待できる。膜モジュールは、スケールメリットが生じにくい傾向を持っているが、膜コストについては、経年的に低下傾向が認められ、低コスト膜モジュール開発も進められている。

膜コストに関する資料を参考資料(p62)に例示するが、EUにおける膜コストは10年間(1994年から2004年)で約1/5に低下している。⁴⁶⁾

今後、下水道での普及や技術開発により、更なる膜コストの低下が期待される。

表 3-5 新設における MBR の主なコスト低減・増加要因 ^{49)より作成}

	コスト低減要因	コスト増加要因
建設費	<ul style="list-style-type: none"> ○省施設・省設備 ・最終沈殿池が不要 ・常時の消毒設備を不要とすることができる ・汚泥濃縮を不要とすることができる ・砂ろ過設備が不要 ○生物反応タンク容量を縮小できる ○省敷地面積 	<ul style="list-style-type: none"> ●従来法に付加させる施設・設備 ・膜モジュール ・膜洗浄設備 ・微細目スクリーン ・流量調整タンク ●送風機必要能力増大
維持管理費	<ul style="list-style-type: none"> ○汚泥の管理が容易 ○消毒用薬品の使用量削減可能 ○汚泥発生量を減らすことができる ○施設構成がシンプルとなり維持管理手間が減少 	<ul style="list-style-type: none"> ●膜モジュール管理費・交換費 ●膜洗浄用薬品費 ●送風機動力増大

新規の下水処理場への MBR の導入におけるコストの検討においては、建設費、維持管理費及び用地費を算定するとともに、従来法を用いてそれと同等の性能を有する処理施設を新設する場合の建設費、維持管理費及び用地費と比較を行う。

コストの検討にあたっては、処理能力、計画水質、設計諸元等の施設条件を想定し、建設費、維持管理費及び用地費を算出する。

参考として、以下に新たに下水処理場へ MBR を導入する際のコストの試算例を示す。

(1) 施設条件

MBR 導入に伴う新たな施設の設置の概要を以下に示す。

試算では、新規下水処理場へ高度処理（窒素・りん除去）が可能な MBR を導入する場合を対象とした。具体的には、処理能力 21,600～26,900m³/日 (2,700～3,360m³/日×8 池) 及び 54,000～67,500m³/日 (5,400～6,750m³/日×10 池) の 2 ケースについて、前処理設備（微細目スクリ

ーン), 最初沈殿池, 生物反応タンク, 膜モジュールを設置する場合のコストを算定する。

本試算の基本的な方針及び条件は以下の通り。

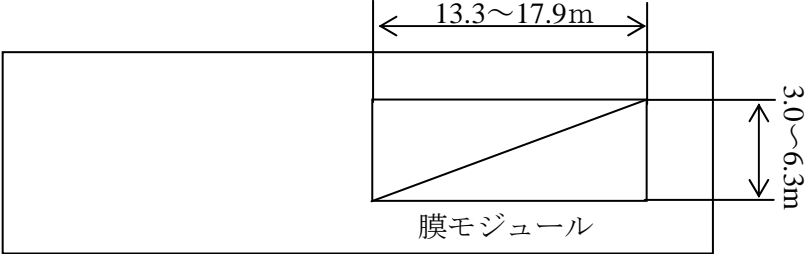
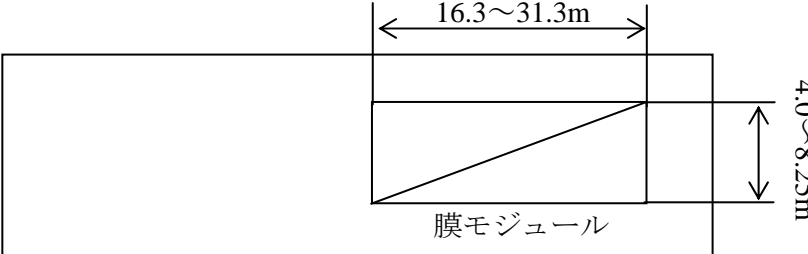
- ・ 流量調整タンク : 流入水量の変動は流量調整タンク以外による方法を採用するものとし, 設置しない。
- ・ 機械設備 : 膜モジュールを新たに設置するほか, 処理に必要となる微細目スクリーン等の前処理設備及び最初沈殿池, 送風機設備やポンプ設備等の設置を対象とする。
- ・ 土木構造物 : 前処理設備, 最初沈殿池, 生物反応タンク等の土木構造物の設置を検討対象とする。
- ・ 検討範囲 : 水処理設備以外の施設・設備 (前処理設備より上流の流入設備, 汚泥処理設備, 脱臭設備等) は検討対象としない。また, 電気設備は検討対象としない。

(2) コスト試算結果

今回試算を行った結果は表 3-6 のとおりである。今回は, 浸漬型 (中空糸膜 1 システム及び平膜 2 システム) と槽外型 (モノリス型 1 システム) による試算を実施した。

なお, 表に示す値は一定の仮定条件による試算結果であり, 施設設計条件や今後の技術開発等により必要コストは大きく変動する可能性があることに留意する。

表 3-6 コスト試算例

処理能力	21,600~26,900m ³ /日(2,700~3,360m ³ /日×8池) ※適用する膜処理方式の違いにより1池あたりの処理能力に差が生じている				
膜モジュール平面配置例 (1池あたり) (浸漬型の例)					
コスト試算結果			土木	機械	計
建設費	処理水量 あたり	千円/(m ³ /日)	44~64	110~131	155~192
			ユーティリティ	保守費	計
年間 維持管理費	処理水量 あたり	円/m ³	8.5~15.5	3.3~18.0	16.0~30.7
処理能力	54,000~67,500m ³ /日(5,400~6,750m ³ /日×10池) ※適用する膜処理方式の違いにより1池あたりの処理能力に差が生じている				
膜モジュール平面配置例 (1池あたり) (浸漬型の例)					
コスト試算結果			土木	機械	計
建設費	処理水量 あたり	千円/(m ³ /日)	38~53	97~119	135~171
			ユーティリティ	保守費	計
年間 維持管理費	処理水量 あたり	円/m ³	7.3~15.1	3.1~17.0	14.0~28.3

※平成20年度新技術を用いた処理施設の改築・機能高度化に関する調査報告書、国土交通省都市地域・整備局下水道部
 ※コスト試算は、現状の技術レベルに基づくものであって今後の技術開発の動向により更なる低減が見込まれる。

第4章 既設処理場への MBR 導入

既設処理場へ MBR を導入する場合、MBR と従来法を並列するケースが多いと考えられるため、MBR と従来法との並列処理の検討事項、経済性等について整理する。

4.1 MBR と従来法との並列処理の特徴

既設処理場へ MBR を導入し、MBR と従来法との並列処理を行う場合、次の特徴が挙げられる。

- ・ 反応タンクのコンパクト化や、最終沈殿池の省略等により限られた敷地や既存の土木構造物等の範囲で、処理の高度化や処理能力の増強が可能となる。
- ・ 従来法系列との水量配分により処理場全体として様々なレベルの処理水質を得ることができる。

MBR の既設処理場への導入は、その特徴から、流量調整や前処理等の一部設備等の追加を必要とするものの、反応タンクのコンパクト化、最終沈殿池の省略等により、限られた敷地や既存の土木構造物等の範囲で、処理の高度化や処理能力の増強が可能となり、既存の下水処理場の能力増強や高度処理化に有効である。

既設処理場への MBR 導入目的の例を以下に示す。

- ・ 放流先の環境基準や水利用条件から、速やかに処理水質を向上させるため
- ・ 再利用先や放流先の水系リスク低減のため
- ・ 所定の量の再利用を行うため
- ・ 敷地条件が厳しく、増設用地が無い場合

4.2 MBR と従来法との並列処理の場合の検討事項

MBR と従来法との並列処理となる場合に留意する事項として、水量配分の設定、流量変動への対応、最終沈殿池の活用等が挙げられる（図 4-1 参照）。

MBR と従来法との並列処理において、MBR を新規の増設系列に導入する場合（新規系列増設）と、既設系列を改造して導入する場合（既設改造）がある。新規系列増設時の検討については、基本的に第 3 章に従うものとする。

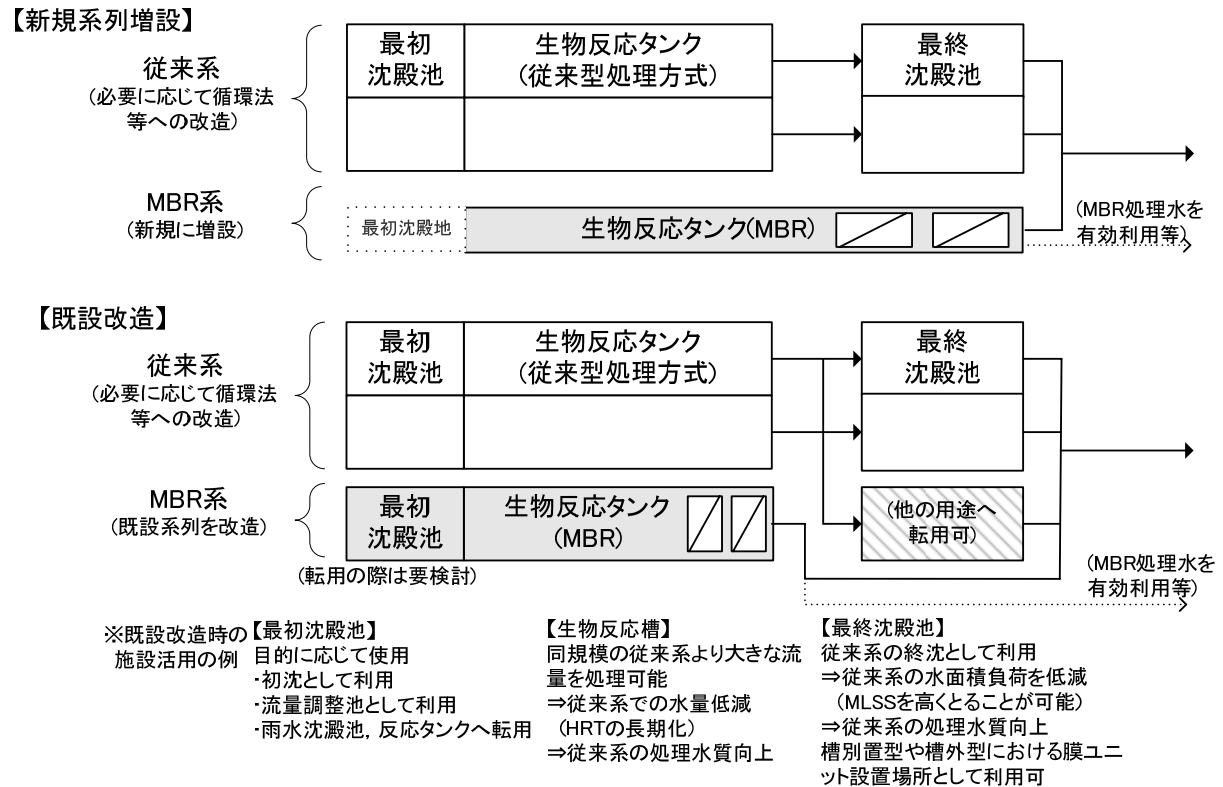


図 4-1 MBR と従来法との並列処理の概略イメージ

MBR と従来法との並列処理における検討フローを図 4-2に示し、個々の検討事項について以下に述べる。

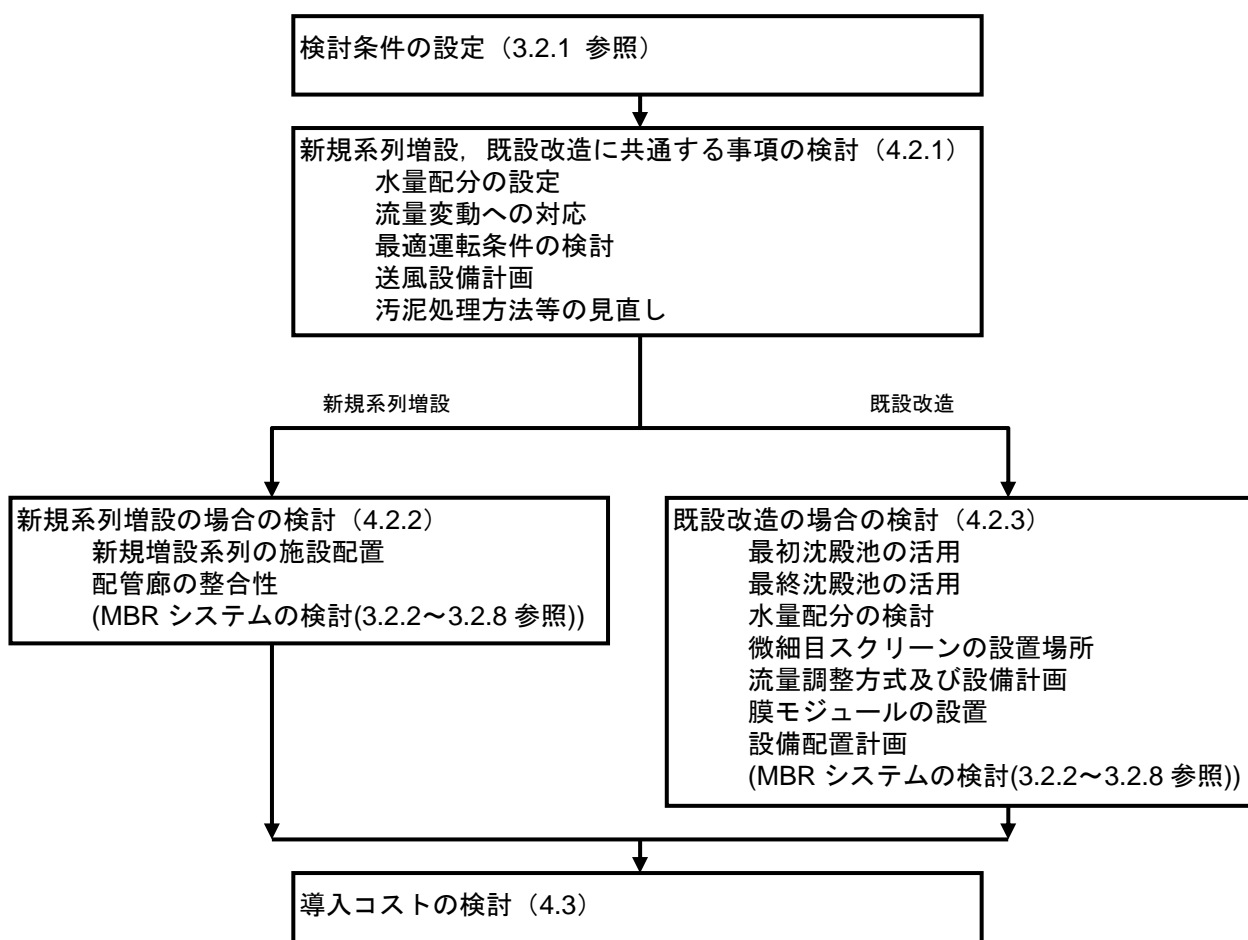


図 4-2 MBR と従来法の並列処理の検討フロー

4.2.1 新規系列増設, 既設改造に共通の検討事項

MBR と従来法との並列処理においては、MBR 系列と従来法処理系列との適正な水量配分、流量変動への対応、最適運転条件等に十分配慮する。

(1) 水量配分の設定

MBR は、標準活性汚泥法等の従来法と比べ、反応タンクの必要滞留時間が短いため、反応タンクの容量が同じであれば、より多くの水量を MBR 系列で処理することができる。

これにより、従来法処理系列に流入させる水量を減らすことが可能となり、必然的に滞留時間が長くなり、処理の高度化に繋がる。

こうした特長を活かして処理の高度化を行う場合、一部系列で MBR を導入することにより、処理場全体の処理水質（系列ごとの処理水質を加重平均したもの）を向上させることができる。

そこで、MBR と従来法との並列処理を導入するにあたっては、達成すべき計画処理水質に対し、経済性、維持管理性、設備配置等、総合的に検討し、各処理方式で負担させる最適

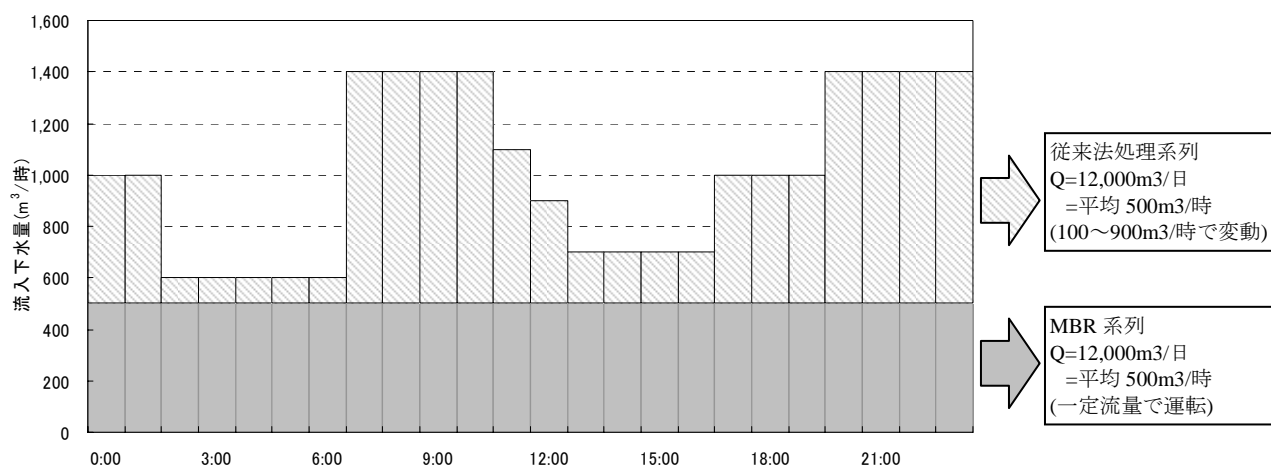
な水量配分を決定する必要がある。

(2) 流量変動への対応

MBR は、膜の透過流束の上限が最大処理水量となり、この量を超えて MBR 系列へ流入させることができないため、流量管理が適切に行われることを確認する必要がある。

通常は、水量の季節変動、時間変動により、流入下水量が増減するが、MBR 系列は、処理能力（計画日最大水量を基本）に対して流入水量を大きく増減させることは望ましくない。

MBR と従来法との並列処理を実施する下水処理場において、MBR 系列に通日で処理能力分の水量を一定流入させると、従来法処理系列への流入水量は、処理場全体の流入水量（時間変動あり）から、MBR 系列分の水量を差し引いた水量となる（図 4-3参照）。すなわち、MBR 系列と従来法処理系列の規模のバランスによっては、従来法処理系列に流入する水量は、時間帯により極端に少なくなることや多くなることがある。このため、時間変動による処理水への影響の確認や、特に、従来法処理系列への流入水量が多くなる時間帯における最終沈殿池の能力（水面積負荷等）を確認し、必要に応じて、流量調整等の措置を講じる。



想定条件

- ・ 計画日最大（全体） $Q=24,000\text{m}^3/\text{日}=\text{平均 } 1,000\text{m}^3/\text{時}$ （600~1,400 $\text{m}^3/\text{時}$ で変動）
- ・ 計画下水量は、一般的な大規模下水処理場での変動パターンを模した
- ・ 系列は 2 系列（MBR 系列、従来法処理系列）とし、処理能力は 1:1 とする
- ・ MBR 系列へ、処理能力（1 系分の計画日最大）の一定流量とし、残量を従来法処理系列へ流下させるとした

図 4-3 MBR と従来法との並列処理における流入パターンの例

(3) MBR と従来法との並列処理の最適運転条件の検討

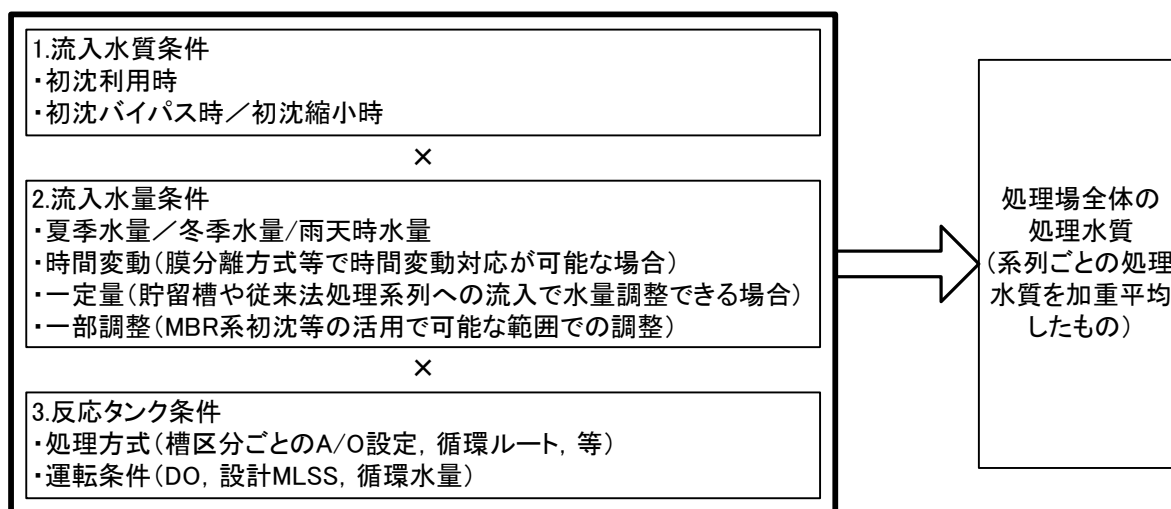
MBR と従来法との並列処理においては、同一処理場内で異なる処理方式の系列が混在することとなり、その計画において、多方面から検討する必要がある。

基本的には、それぞれの処理方式に応じた計画を行うが、処理方式の組み合わせにより、処理性能、コスト、維持管理等の面で、最適な組み合わせや設備検討を行うものとする。

MBR と従来法との並列処理では、MBR 系列数や流入条件により、従来法処理系列の運転条件が変化することとなり、それに応じた設備計画を検討しなければならない。

特に、既設改造による MBR 導入の場合は、既存の設備を有効に活用する観点から、運転条件を検討する必要がある。

なお、処理場全体の処理水質の検証にあたり考慮する項目の例を図 4-4に示す。



※MBR 系列への流入条件に応じ、従来法処理系列への流入条件も変化することに留意

図 4-4 処理場全体の処理水質の検証にあたり考慮する項目の例

(4) 送風設備計画

MBR は、生物処理に必要な酸素量以外に膜を洗浄するための空気が必要となる。散気装置の型式、配置や膜モジュール空気洗浄方式等について検討^{※6}し、既設送風設備の有効利用を図り、送風設備の建設費、送風のための電力使用量の削減を目的とした検討を行う。

(5) 汚泥処理方法等の見直し

MBR 系列では、最初沈殿池を不要とする場合、最初沈殿池汚泥が発生しなくなり、余剰汚泥濃度も高くなることが多い。このため、従来法処理系列からの汚泥も考え合わせ、汚泥処理方式の見直しが必要となる。また、MBR から発生する余剰汚泥を既設の汚泥処理施設で処理する場合は、従来法系列と MBR 系列の余剰汚泥性状の違いを踏まえ、投入する施設・設備の処理効率を勘案して検討する。

4.2.2 新規系列増設の場合の検討事項

新規の増設系列に MBR を導入し、MBR と従来法との並列処理にする場合、それぞれの処理フローが異なることに留意し、適切な施設配置となるよう検討する。

MBR は、従来法に比較してコンパクトな施設となるため、MBR 系の施設配置にあたっては既設処理施設との整合を図り、水や空気の流れの効率性及び維持管理の作業性に留意し、以下の事項を検討する。

(1) 新規増設系列の施設配置

新規増設系列 (MBR 系) では、最終沈殿池がなく、反応タンクの形状寸法も既設系列とは異なることが考えられるため、増設系列の施設配置については処理場の敷地を効率的に利用

できるよう検討する。

(2) 配管廊の整合性

新規増設系列の配管廊は、既設水処理施設の配管廊、送風機室、電気室及び汚泥処理施設の配置を考慮し、その設置位置及び構造を検討する。

4.2.3 既設改造の場合の検討事項

既設水処理施設の一部を改造して MBR を導入し、MBR と従来法との並列処理にする場合、既設の最初沈殿池や最終沈殿池の活用、新たに追加する施設等について検討する。

(1) 最初沈殿池の活用

MBR 系列においては、反応タンクにおける MLSS 濃度を高くすることができるため、通常は、最初沈殿池で汚濁負荷を削減することなく、必要な処理機能を発揮できると考えられており、最初沈殿池は必須ではない。(第3章 3.2.3 最初沈殿池 参照)。また、合流式下水道の場合、最初沈殿池は、雨天時の簡易処理施設として運用していることが多いため、最初沈殿池の廃止にあたっては、特に留意する必要がある。

なお、既設最初沈殿池を使用しない場合には、他の用途（流量調整池、雨水貯留槽、生物反応タンク等）への転用を考慮する。

(2) 最終沈殿池の活用

MBR 系列では最終沈殿池が不要となるため、従来法処理系列の最終沈殿池として利用することができる。

これにより、従来法系列の最終沈殿池の水面積負荷を小さくすることができ、水量が同じであっても MLSS 濃度を高くとることが可能となる。

槽外型及び槽別置型の処理方式の場合、膜モジュールの設置場所として最終沈殿池を活用することができる。

(3) 水量配分の検討

MBR 系列への流入水量は、膜による固液分離という特性から、水量変動を抑えた水量配分を行う必要がある。そこで、既存の分配槽や既設の最初沈殿池等を活用するほか、必要に応じて新たな分配施設の検討を行う。

(4) 微細目スクリーンの設置場所

既存の下水処理場においては、ポンプ揚水後、反応タンクまでの間に微細目スクリーンを設置している処理場はほとんどないため、MBR 系列に改造する際に新たに微細目スクリーンを設置する必要がある。微細目スクリーンの設置については、既存処理場の敷地・設備配置状況を勘案し検討する。

⁶ MBR においては、膜モジュールの形式により、洗浄散気方式が決まるため、選択の余地は少ない。

(5) 流量調整方式及び設備計画

最初沈殿池がある既存の水処理施設の一部に MBR を導入する場合は、流量調整タンクとして最初沈殿池を活用することも検討する。流量調整タンクの容量を算定するにあたっては、晴天時の時間変動等、実績データから設定するが、流量調整タンクの容量が過大とならないよう、ろ過差圧を変動させることによる流量制御での流量変動対応等も併せて検討する。

(6) 膜モジュールの設置

浸漬型（一体型）の場合、膜モジュールは、既設の反応タンク内に設置することになり、水深、隔壁の位置に留意するとともに、構造的な検討を行う必要がある。

浸漬型（槽別置型）の場合、膜モジュールは、反応タンク内や既設の最終沈殿池に設置することになるため、別置用の反応タンク仕切り壁の設置位置や構造的な検討が必要になる。

槽外型の場合、膜モジュールを、反応タンク上部や配管廊内、最終沈殿池内部スペース等へ設置することが考えられるが、空間的な設置可能性や構造的検討が必要とされる。

(7) 設備の配置計画

MBR 処理系列においては、膜モジュールの吊り上げ装置、薬液洗浄用設備、浸漬洗浄タンク、ろ過水タンク、各種配管及び計装制御設備等の設置が必要であり、既存施設との取り合いを検討する必要がある。また、既設最終沈殿池等、既存施設の活用を検討する。

4.3 導入コスト

既存施設の活用方法について十分に検討し、新たに設置する施設、既存施設の改造及び維持管理等の費用を算定する。

既設処理場への MBR の導入におけるコストの検討においては、改造が必要となる既存施設及び追加で設置が必要となる施設について、建設費及び維持管理費を算定するとともに、MBR を用いないでそれと同等の性能となるように改造（もしくは新設）する場合の建設費及び維持管理費と比較を行う。ただし、新たな用地の取得が必要な場合は、用地費を含めるものとする。

コストの検討にあたっては、処理能力、計画水質、設計諸元等といった施設条件を想定し、建設費及び維持管理費を算出する。

参考として、以下に標準活性汚泥法を採用している既設下水処理場へ MBR を導入する際のコストの試算例を示す。

(1) 施設条件

MBR 系列導入に伴う新たな施設の設置、施設改造の概要を以下に示す。

試算では、標準活性汚泥法を採用している既設下水処理場へ高度処理（窒素・りん除去）可能な MBR を導入する場合を対象とした。ここで、処理場の全体処理能力 20,000m³/日（2,500m³/日×8 池）及び 50,000m³/日（5,000m³/日×10 池）の 2 ケースについて、系列 1 組（2 池）の反応タンク及び最終沈殿池を MBR へ改造する場合のコストを算定する。なお、改造後の 1 池当たりの処理能力は、2,700～3,360m³/日、及び 5,400～6,750m³/日である。

なお、改造系列数が増える場合には、基本的に 2 池（または 1 池）を一組として検討すればよいが、送風機等の共通設備が含まれるため、改造コスト等が単純な倍数とまらない点に注意が必要である。

本試算の基本的な方針及び条件は以下の通り。

- ・ 最初沈殿池 : 改造しない（最初沈殿池として使用する）。
- ・ 流入水量調整 : 従来法との並列処理により MBR 系列へ定量流入させることを前提とし、流量調整タンクは設けない。
- ・ 機械設備 : 膜処理設備を新たに設置するほか、既存設備の活用を前提とするが容量が不足する送風機の増設や新たに必要となる微細目スクリーンの設置を行う。
- ・ 土木構造物 : 反応タンク内隔壁等、既存の土木構造物をなるべく活かすこととしたが、一部隔壁の撤去をおこなった。
- ・ 検討範囲 : 水処理設備以外の施設・設備（最初沈殿池より上流の流入設備、汚泥処理設備、脱臭設備等）は検討対象としない。また、電気設備は検討対象としない。

(2) コスト試算結果

今回試算を行った結果は表 4-1のとおりである。今回は、浸漬型（中空糸膜 1 システム及び平膜 2 システム）と槽外型（モノリス型 1 システム）による試算を実施した。

なお、表に示す値は一定の仮定条件による試算結果であり、施設設計条件や今後の技術開発等により必要コストは大きく変動する可能性があることに留意する。

表 4-1 コスト試算例

処理能力		2,700~3,360m ³ /日×2 池 ※適用する膜処理方式の違いにより改造後の 1 池あたりの処理能力に差が生じている			
膜モジュール平面配置例 (1 池あたり) (浸漬型の例)					
コスト試算結果			土木	機械	計
改造費	処理水量 あたり	千円/(m ³ /日)	1.1~5.2	97~119	99~121
			ユーティリティ	保守費	計
年間 維持管理費	処理水量 あたり	円/m ³	9.0~17.6	3.9~18.1	16.6~31.4
処理能力		5,400~6,750m ³ /日×2 池 ※適用する膜処理方式の違いにより改造後の 1 池あたりの処理能力に差が生じている			
膜モジュール平面配置例 (1 池あたり) (浸漬型の例)					
コスト試算結果			土木	機械	計
改造費	処理水量 あたり	千円/(m ³ /日)	0.6~3.1	87~109	89~110
			ユーティリティ	保守費	計
年間 維持管理費	処理水量 あたり	円/m ³	8.2~15.6	3.3~17.1	15.1~28.5

※平成 20 年度新技術を用いた処理施設の改築・機能高度化に関する調査報告書、国土交通省都市地域・整備局下水道部
※コスト試算は、現状の技術レベルに基づくものであって今後の技術開発の動向により更なる低減が見込まれる。

第5章 再生水利用のための膜処理技術導入

再生水利用を目的として、膜処理技術を導入する場合に期待される効果、膜の選定手順、導入に際しての検討事項、経済性等について整理する。

5.1 再生水利用のための膜処理技術導入の効果

再生水利用のための膜処理技術導入により期待される効果としては、次の事項が挙げられる。

- ・再生水の水質が安定かつ良好である。
- ・広範な用途に使用可能な再生水が得られる。

なお、MBRの処理水は用途によっては、直接再利用することが可能である。

下水処理水の再利用に対して膜処理を利用する場合、再利用用途に求められる水質から、使用する膜の種類や処理フローを選定する必要がある。

(1) 処理水質の安定性

膜処理により捕捉できる濁質の粒子径は、従来の砂ろ過設備に比べはるかに小さく、濁質がほぼ完全に捕捉できるため、放流水路での付着物やユスリカの発生は抑制される。また、RO膜等を用いると、色や臭気の原因物質の分子レベルでの除去が可能であり、良好な水質を安定して得ることができる。

(2) 広範囲な用途に使用可能な再生水

膜処理の効果は、衛生項目である大腸菌群数、美観維持項目である濁度等、広範囲にわたっている。濁度、色度については、活性炭吸着法やオゾン酸化法と同程度の水質を、大腸菌群数については、塩素消毒、オゾン消毒、紫外線消毒と同等以上に高い除去率を得ることが期待できる。

また、MBR処理水はそのまま再利用することも可能である。MBRによる処理水質の例を表5-1に示す。この事例では、水洗用水、散水用水、修景用水の基準を満たしており広範な用途に利用可能である。さらに大腸菌群数、濁度については、親水用水の基準を満足している。色度については従来法の二次処理水と同等であるが、オゾン処理等を施すことにより、親水用水としての使用も可能であると考えられる。

なお、供給先の要求により塩素消毒を行うことが求められる場合もある。

表 5-1 MBR (MF 膜) による処理水質の事例

項目 (単位)	MBR 処理水	参考		
		水洗用水 散水用水	修景用水	親水用水
大腸菌群数 (CFU/100mL)	0	不検出 (大腸菌)	1,000	不検出 (大腸菌)
BOD (mg/L)	<0.5	—	—	—
pH (—)	7.0	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6
濁度 (度)	<1	2 以下 (管理目標値)	2 以下 (管理目標値)	2 以下
臭気 (—)	土臭	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
色度 (度)	20	—	40 以下	10 以下

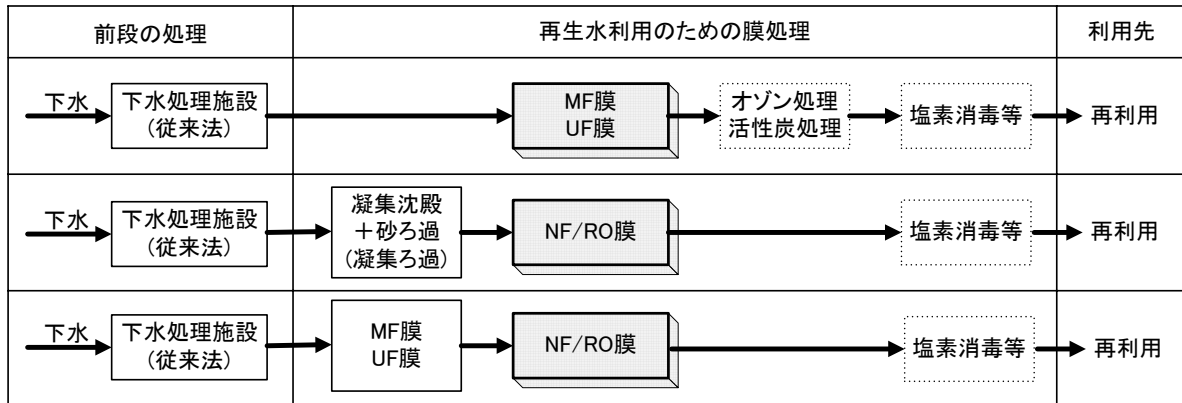
参考文献 10) より作成

5.2 再生水利用のための膜処理技術導入にあたっての検討事項

再生水利用を目的とした膜処理技術の導入においては、その原水となる前段の下水処理工程（二次処理，高度処理，MBR 処理等）の処理水質，用途別目標水質によって膜の種類や処理工程の内容が異なる。

再生水利用のための膜処理技術導入例を図 5-1に示す。

【(1)従来法による処理工程の後段に膜処理を付加】




【(2)MBRによる処理工程の後段に膜処理を付加】



【(3)MBR処理水を直接再利用】



 主体となる膜処理工程

※オゾン処理及び活性炭処理は、色度あるいは臭気が利用先の要求水準を満足しない場合に必要となる

図 5-1 再生水利用のための膜処理技術導入例

再生水利用を目的として膜を導入するにあたっては、以下の事項を検討する。

- ・ 再生水の用途及び水質
- ・ 必要な供給量
- ・ 膜の種類を選定
- ・ 処理フロー
- ・ 膜処理に伴って発生する濃縮水の処理

以下に、再生水利用を目的とした膜処理技術の導入のための検討内容について示す。

5.2.1 再生水の用途及び水質

再生水の水質の検討にあたっては、利用用途ごとの水質基準に基づいて設定する。

(1) 利用用途

下水処理水を再利用する際の利用用途は、以下のようなものが想定される。

- a) 水洗便所用水
- b) 公園、植樹・道路等の散水用水
- c) 公園、せせらぎ等の修景・親水用水
- d) 防火用水
- e) 事業場の冷却用水・設備用水等（工業用水）

(2) 利用用途ごとの水質基準

① 下水処理水の再利用に関する基準等

「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」²⁵⁾では、下水処理水の再利用する際に問題となる衛生学的安全性、配管の腐食・閉塞等の設備障害防止及び快適性確保の観点から、下水処理水再利用に関する技術上の諸基準について検討し、用途別の水質基準等を設定(表 5-2)している。

表 5-2 再生水利用に関する技術上の基準(水質基準等及び施設基準)*

基準適用箇所	基準項目	水洗用水	散水用水	修景用水	親水用水	
再生処理施設出口	大腸菌	不検出 (検水量100mL；特定酵素基質培地法)		大腸菌群数1000CFU/100mL (暫定基準)	不検出 (検水量100mL；特定酵素基質培地法)	
	濁度	2度以下 (管理目標値) 注)		2度以下 (管理目標値)	2度以下	
	pH	5.8～8.6				
	外観	不快でないこと				
	色度	－ (規定せず) (利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて基準値を設定)		40度以下 (利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて上乗せ基準値を設定)	10度以下	
	臭気	不快でないこと (利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定)				
責任分界点	残留塩素	遊離残留塩素0.1mg/L又は 結合残留塩素0.4mg/L以上 (管理目標値)		－ (規定せず)	遊離残留塩素0.1mg/L又は 結合残留塩素0.4mg/L以上 (管理目標値)	
		・供給先で追加塩素注入を行う場合には個別の協定等に基づくこととしても良い	・消毒の残留効果が特に必要ない場合には適用しない ・供給先で追加塩素注入を行う場合には個別の協定等に基づくこととしても良い	・生態系保全の観点から塩素消毒以外の処理を行う場合があること及び人間が触れることを前提としない利用であるため規定しない	・消毒の残留効果が特に必要ない場合には適用しない ・供給先で追加塩素注入を行う場合には個別の協定等に基づくこととしても良い	
施設基準		砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること			凝集沈殿＋砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	

注) 管理目標値；常に遵守しなければならない基準値とは異なり、再生処理施設の運転管理において極力満足すべき目標値

* 参考文献25)より作成。

② 建築物における雑用水利用に関する基準

「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」では、施行規則により雑用水に関する衛生上の基準を定めている（表 5-3参照）。

表 5-3 雑用水水質基準*

基準項目	基準値	適用箇所
大腸菌	不検出	再生処理貯水槽
濁度	2度以下	
pH	5.8~8.6	
外観	ほとんど無色透明であること	
(色度)	規定なし(上記に含まれる)	
臭気	異常でないこと	
残留塩素	遊離残留塩素0.1mg/L又は結合残留塩素0.4mg/L以上	給水栓
備考	雑用水の用途は、①散水、②修景、③清掃、④水洗便所。 ただし、「特定建築物」※においては、し尿を含む原水を水洗便所用水以外の用途に使用してはならない ※多数の人が使用又は利用する床面積3,000m ² 以上の興行場・集会所・図書館・博物館・美術館・遊技場、店舗・事務所、学校、旅館	

* 「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」施行規則(雑用水に関する衛生上の基準)

③工業用水に関する基準

工業用水の水質に係る基準としては、日本工業用水協会により提示されている標準水質、経済産業省の調査により提示された需要者の90%が満足する水質、及び需要者が好ましいと考える水質(ボイラー用水・冷却用水)等がある(表5-4)。

表 5-4 工業用水水質基準

項目	単位	工業用水供給水質			
		標準水質*1	経産省(90%値)*2	ボイラー用水*3	冷却用水*3
水温	(°C)		15~25		
塩化物イオン	(mg/L)	<80	<40	10	15
電気伝導率	(mS/m)				150
pH	(-)	6.5~8.0	6.7~7.9	7	7.5
M-アルカリ度	(mg/L)	<75	<70		50
全蒸発残留物	(mg/L)	<250	<220	100	
全硬度	(mg/L)	<120	<90	50	50
濁度	(度)	<20	<10	5	10
鉄	(mg/L)	<0.4			0.5
マンガン	(mg/L)	<0.2			
COD	(mg/L)			2.0	2.0
BOD	(mg/L)				1.0

出典：平成16年度「工業用水の水質把握等調査報告書」(経済産業省)

*1：工業用水道供給水質標準値(日本工業用水協会制定)

*2：90%程度の事業所が満足すると考えられる水質範囲

*3：工業用水用途別に見た場合の要望水質

5.2.2 供給量の設定

用途別需要量及び供給可能水量の調査・検討結果を勘案し、再生水の供給先での使用水量の変動等を考慮した上で、日最大及び時間最大再生水供給量を設定する。

(1) 用途別需要量

用途別の需要量を的確に把握するためには、供給先の需要者を対象として再生水の利用施設概要、利用用途、使用水量等について、アンケート調査、ヒアリング調査等を行う。

(2) 供給可能水量

再生水の供給可能水量は、当該処理場の処理能力及び流入下水量の実績値等に基づくものとし、流入下水量の季節的、経時的変動等を考慮して検討する。なお、再生水利用に膜処理を採用する場合には、その利用率（再生水供給量／流入下水量）によっては、濃縮水の返流により、下水処理機能及び放流水質に影響を及ぼす可能性があることに留意する。

5.2.3 膜の種類の設定

原水の水質と再生水の目標水質を勘案し、これに適した膜を選定する。

原水は従来法生物処理水または MBR 処理水である。MBR 処理水では再生水として必要な水質のうち、色度を除く大部分の水質項目を達成していることが多く、付加的な処理プロセスは不要である場合が多い。従来法生物処理水では SS、濁度、大腸菌（群）等を除去しなければならない場合が多い。従来法生物処理水を原水とし、かつ再生水供給量が従来法生物処理水量に比較して少ない場合、MBR と同様の方式で反応タンクに膜を浸漬して再生水を抽出することができる。色度の除去が必要な場合は、RO 膜の利用、もしくはオゾン処理や活性炭処理を組み合わせることによって対応できる。MBR とオゾン処理を組み合わせる場合は、膜処理の後段でオゾン処理を行うことになる。MBR 以外の膜処理の場合は、膜処理の前段でオゾン処理を行う場合と後段で行う場合がある。膜処理の前段でオゾン処理を行う場合は、残留オゾンによる膜の劣化について配慮する必要があり、オゾン耐性のある膜の利用等を検討する必要がある。

工業用水利用等でより高度な水質が要求される場合、NF 膜や RO 膜による処理が必要となる。従来法の下水処理水を膜処理する場合、凝集沈殿ろ過等の前処理が必要であるが、MBR 処理水は直接 NF/RO 膜処理にかけることが可能である。

実際に下水処理水の再生水利用への膜処理の適用例として、表 5-5、表 5-6 に原水となる下水処理水（二次処理水）と膜処理水の水質事例について示す。この事例では、MF 膜/UF 膜による処理水は、大腸菌群数、濁度、COD、BOD が除去されており、その他の水質項目では二次処理水とほぼ同等程度である。これに対して、NF 膜/RO 膜による処理水は、濁度、大腸菌群数、BOD のほか、色度、硬度、塩化物イオン、りん、無機塩類等の溶解性の物質も除去されていることが分かる。

表 5-5 二次処理水と膜処理水の水質事例¹²⁾

項目	単位	二次処理水の例	膜処理水の例	
			MF/UF膜	NF/RO膜
pH	(-)	6.5~7.5	6.5~8.0	5.8~8.6
大腸菌群数	(個/mL)	3,000以下	不検出	不検出
M-アルカリ度	(mg/L)	50~100	二次処理水と同程度	50
全蒸発残留物	(mg/L)	300前後	二次処理水と同程度	20~150
塩化物イオン	(mg/L)	100前後	二次処理水と同程度	10~40
全硬度	(mg/L)	50~100	二次処理水と同程度	1~20
濁度	(度)	5~10	1以下	1以下
色度	(度)	20~40	15以下(凝集剤添加)	1以下
COD	(mg/L)	10~15	10以下	1以下
BOD	(mg/L)	5~15	3以下	1以下
T-N	(mg/L)	15~25	二次処理水と同程度	1~8
T-P	(mg/L)	1~3	2以下(凝集剤添加)	0.03以下

表 5-6 オゾン処理と膜処理(MF 膜)を併用した処理水の水質事例¹⁶⁾

対象サンプル	原水(二次処理水)	生物膜ろ過処理水	オゾン耐性膜処理水
分析項目			
外観	黄色いフロックが浮遊	黄色い微細なフロックが浮遊	無色透明
臭気	微カビ臭	微カビ臭	ややオゾン臭
COD (mg/L)	15.0	13.4	8.1
SS (mg/L)	10.3	3.2	0.0
濁度 (度)	9.4	5.2	<0.1
色度 (度)	(40)	(36)	3
アンモニア性窒素 (mg/L)	12.2	3.7	-
亜硝酸性窒素 (mg/L)	1.43	-	ND
大腸菌群 (個/mL)	4.8×10 ²	-	0

(注) 色度の()の数値は、ろ紙5種Cろ過液の測定値

また、下水処理水の親水用水利用を目的とした膜処理による下水再利用設備の例を、表 5-7 に示す。

表 5-7 落合水再生センター下水再利用設備の仕様⁶⁾

区分	MF膜	RO膜	処理フロー
膜材質	ポリプロピレン	ヒペラジンホリアミド	
阻止性能	0.2 μm	塩阻止率97%	
エレメント形状	外圧中空糸	4インチ・スパイラル	
膜本数	2m ² /本、15本	12本	
膜ろ過流速	2.2m/d	0.6m/d	
逆洗	20分間隔	-	
水回収率	92%	77%	
通水pH	6.5	6.5	
殺菌剤	残留塩素を含まないこと	残留塩素1mg/L以下	
スケール防止剤	なし	なし	

5.2.4 処理フロー

主体となる膜処理工程に、必要に応じて以下の処理工程の付加を検討する。

- ・膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理工程
- ・膜処理水の水質を用途別目標水質に適合させるための処理工程

膜処理技術による再生水利用のための処理工程は、主体となる膜処理工程、膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理工程、及び膜処理水の水質を用途別目標水質に適合するための処理工程に大別される。

膜処理技術を利用した再生水利用のための処理フローの例を巻末資料(p78)に記載する。

(1) 主体となる膜処理工程

再生水を得るための主体となる膜処理工程は、従来法や MBR の後段で行うものと、MBR そのものが主体となるものとに大別される（図 5-1参照）。

従来法の後段で膜処理を行う工程においては選定した膜の特性、膜の目詰まりの発生頻度等を十分考慮して、膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理工程の適用を検討する必要がある（(2)に詳述）。

(2) 膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理

アンモニア性窒素等の栄養塩を含む下水処理水を対象とした膜処理設備では、バイオフィアウリング（バクテリア等の微生物によるファウリング）が容易に発生するため、これを抑制することは非常に重要となる。

検討にあたっては、選定した膜の特性、膜の目詰まりの発生頻度等を十分考慮する。

1) 主体となる膜処理工程に MF 膜/UF 膜を用いる場合

主体となる膜処理工程に MF 膜/UF 膜を用いる場合、バイオフィアウリングを抑制するために次亜塩素酸ナトリウムが用いられることがある。ただし、膜素材によっては、塩素により膜の劣化を早めることになりかねないので注意する必要がある。なお、膜の劣化に対しては、塩素耐性膜の使用や、オゾンまたは UV(紫外線)処理によるバイオフィアウリングの抑制等が提案されている。

2) 主体となる膜処理工程に NF/RO 膜を用いる場合

主体となる膜処理工程に NF/RO 膜を用いる場合には、NF/RO 膜保護のための夾雑物除去を目的とした前段の処理として、砂ろ過等の物理化学的方法のほか、設備のコスト低減やコンパクト化を図るため、MF 膜/UF 膜を用いる方法が検討されるようになっている。また、ファウリングしにくい膜素材や、洗浄後のろ過性の回復が大きい膜素材等の研究開発が、盛んに行われており、設備の簡素化とろ過継続期間の延長化の技術が進んできている。

3) 前段の下水処理プロセスが MBR による場合

下水処理プロセスとしての MBR の後段に NF/RO 膜を用いる場合は、MBR における膜分

離が夾雑物除去のための前段の処理を兼ねることができることから、設備省略化も可能である。

(3) 膜処理水の水質を用途別目標水質に適合させるための処理工程

再利用用途により、溶解性物質に起因する色度の改善や再生水中の細菌等による利用者への感染リスク低減等、水質の高度化を図る必要がある場合は、必要に応じて膜処理設備の後段に膜処理水の水質を用途別目標水質に適合するための処理を付加する。

MBR 処理水や、従来法の後段に MF 膜/UF 膜を用いた再生水を修景用水利用する場合には、大腸菌群数 (MPN) がほとんど検出されないことから、塩素消毒を省いて直接利用することができる。ただし、水洗用水利用する場合等では残留塩素の規定(表 5-2, 表 5-3 参照)があることに留意する。

5.2.5 膜処理に伴って発生する濃縮水の処理

膜処理に伴って発生する濃縮水について、処理場施設の運転状況に応じて濃縮水の逆流対策の検討を行う。

大量の下水処理水を NF 膜/RO 膜で処理する場合においては、高濃度の塩分や難生物分解性有機物を含む濃縮水が大量に下水処理施設に逆流され、下水処理機能に支障をもたらすこと、放流水の水質基準を遵守できないことが懸念されるため、対策を講じる必要がある。

対策例としては、供給水量の見直しや、再生水の原水供給系列と濃縮水の逆流系列を別系統とすること、濃縮水の単独処理(活性炭、促進酸化等)等が考えられる。

5.3 導入コスト

コスト検討においては、既存施設をどのように活用するかを十分に整理し、必要な改造や膜分離装置の設置にかかるコストを検討する。

イニシャルコスト及びランニングコストといった膜処理施設導入コストの算出は、下水処理水再利用にあたって、膜処理技術の導入可能性の有無を判断するために、きわめて重要である。

膜処理施設導入コストについては、イニシャルコストは処理フローの内容によって大きく異なり、また、ランニングコストは、膜の耐用年数の設定で大きく異なる点に留意する必要がある。

なお、下水処理水の再生利用に関する費用関数をモデル計算により算出した例²⁶⁾を巻末資料に示す。

【参考資料】

ここでは、現段階における膜処理技術に関する実績や検討事例及び評価事例といった、膜処理技術の導入検討にあたっての参考となる技術情報と下水道分野における膜処理技術の今後の展開について掲載する。

1. 膜処理技術の導入検討にあたっての技術情報
 - 1.1 膜を利用した処理技術
 - 1.2 MBR 設計諸元例 (JS 技術評価)
 - 1.3 膜コストに関する資料
 - 1.4 再生処理施設の費用関数の例
 - 1.5 MBR の膜モジュールの例
 - 1.6 MBR 適用事例における配置例

2. 膜処理技術を用いた展開
 - 2.1 コスト縮減に向けた膜処理技術の開発研究
 - 2.2 膜処理技術の研究開発の事例
 - 2.3 普及拡大に向けた今後の課題
 - 2.4 他機関における膜処理技術の研究開発の動向について
 - 2.5 EU における標準化の動向

3. その他

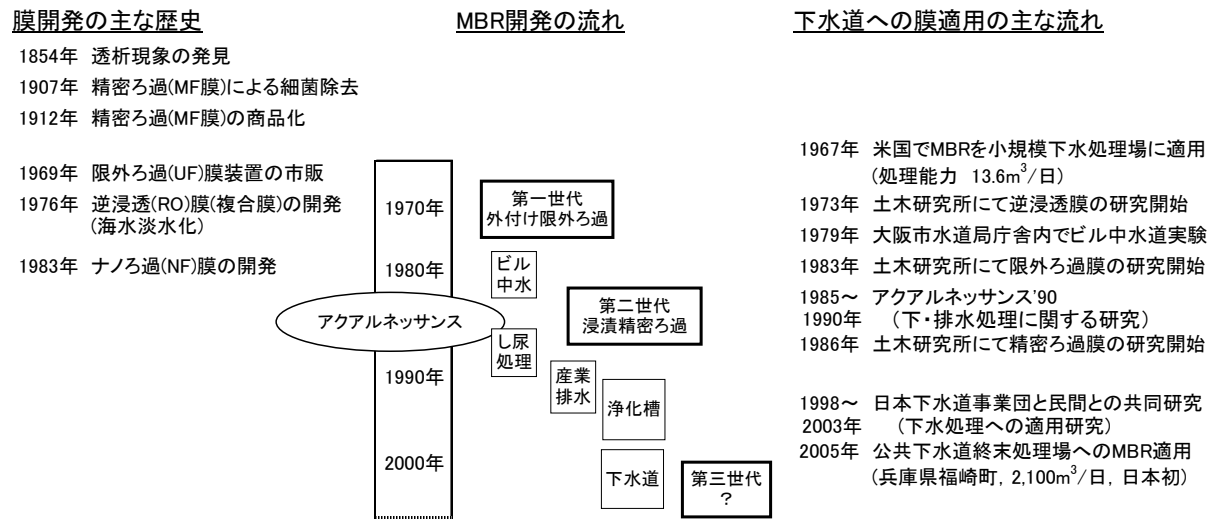
1. 膜処理技術の導入検討にあたっての技術情報

1.1 膜を利用した処理技術

水中の固形物の分離は水処理の基本であり、古くから沈殿分離と機械的阻止（スクリーン及びろ過）法が使われてきているが、より微小の物質を効率よく除去する技術として、化学的凝集処理の併用が行われさらに 19 世紀中頃には、精密ろ過膜の均一な微細孔構造が発見され、限外ろ過現象や透析現象の発見も報告されている。

膜処理技術は、分離機能を持つ固体の膜を利用し、対象物質と溶液をその大きさを分ける（サイズ分離）という技術であり、MF、UF、NF/RO、透析と各種の方法があり、目的に適應した性質の膜を利用することにより、多様な物質の分離に適用できることが特徴である。

排水処理の分野における膜処理技術の開発に関する主な流れは、参考図 1-1 のとおりである。



参考図 1-1 膜処理技術の開発の流れ 文献 1)~5)より作成

18 世紀に細胞膜の透析現象が発見され、1900 年代以降、主に細菌等の除去目的に、MF 膜の開発が進んだ。1950 年代に海水淡水化のため RO 膜の開発が始まり、1960 年代に UF 膜の産業界における適用が進められた。

日本における排水処理の分野では、1960 年代以降に膜の導入と適用が始められた。1970 年代に、下水処理水の再利用に関する膜処理技術の開発が開始され、1979 年に大阪市水道局庁舎内で中水道実験が行われたが、広く普及するまでには至らなかった。その後、1985 年に始まるアクアルネッサンス'90 計画による下水、排水への適用研究が進み、また、し尿処理施設においても、同時期より高負荷膜分離法の採用例が増えてきている。

1986 年頃から建設省土木研究所において MF 膜による活性汚泥分離の研究を開始し、1996 ~1997 年には官民共同研究により浸漬型 MF 膜で活性汚泥を分離する移設可能で簡易な下水処理施設の開発を行って、簡素な処理施設で高度な処理水が得られることを実証した。

1998 年以降、日本下水道事業団（以下「JS」という。）により最終沈殿池の代替え及び機能向上を目的とした膜分離活性汚泥法（Membrane Bioreactor：以下「MBR」という。）の下水処理への適用に関する共同研究が開始され、2005 年、MBR を導入した公共下水道終末処理場の

供用開始がなされた。また、2006年から大規模処理場の改築・高機能化等の多様な目的に適した膜分離活性汚泥法の開発（共同研究）が行われている。

1.2 MBR 設計諸元例(JS 技術評価)

JS による MBR 設計要領（200～3,000m³/日規模）での反応タンク標準設計値を参考表 1-1 に示す。

参考表 1-1 JS による標準設計値の例

項目	標準設計値 (小規模・浸漬型 MBR)	適用
無酸素タンク滞留時間	3 時間※	流入条件, 目標水質, MLSS 等によっても異なる。
好気タンク滞留時間	3 時間※	
MLSS 濃度	10,000mg/L	8,000～15,000mg/L 程度
硝化液循環比	200%	目標水質等によって設定
必要空気量	日最大汚水量の 23 倍	膜モジュールの形式等によっても異なる

※共同研究値から設定。

ただし、計画水質が設計条件と大きく相違する場合には、別途検討するものとする。

あわせて、JS による膜分離活性汚泥法の技術評価に関する報告書の抜粋を次紙に示す。

膜分離活性汚泥法の 技術評価に関する報告書

平成 15 年 11 月

日本下水道事業団 技術開発部

目 次

(技術評価の経緯)	1
(技術評価の目的)	2
(評価対象技術)	2
(評価の範囲)	2
(膜分離活性汚泥法の特徴)	2
(設計上の留意事項)	5
(維持管理上の留意事項)	6
(適用上の注意)	7
(その他の留意事項)	8

(技術評価の経緯)

水処理分野における膜分離技術の発展は、近年著しいものがあり、浄水処理をはじめとして、各種産業排水処理、大規模建物個別排水循環利用施設、し尿処理等で膜分離技術を用いた水処理が導入されている。既に水道用浄水施設では約 280 箇所、し尿処理施設では約 130 箇所が膜分離技術を導入しているが、最近では浄化槽や農業集落排水処理施設等の下水道以外の汚水処理施設においても導入が進んでいる。また、海外においても水処理分野における膜分離技術の導入が活発であり、膜分離活性汚泥法施設の大規模化が進んでいる。

わが国では、下水道分野では浄化槽や農業集落排水処理施設等に比較すると処理水量が多いため必要膜面積が大きく、コスト的に不利であるとの考えから、これまで膜分離技術は一部の再利用用途以外では導入が進んでいなかったが、前述した諸分野における膜分離技術の普及に伴う膜コスト低下により、下水処理における膜分離技術導入は現実的な選択肢となってきた。膜分離技術の水処理への導入により、最終沈殿池や砂ろ過施設等が不要になるなどによる施設の削減とそれに伴う必要敷地面積の削減によるコスト削減効果の他、高度な処理水質が得られるなどの多くのメリットが期待できる。

このような背景から、平成 14 年 10 月、日本下水道事業団理事長より技術評価委員会へ諮問があり、膜分離活性汚泥法について技術評価を行うこととなった。

[1]

(技術評価の目的)

前述の経緯から、これまでの膜分離活性汚泥法に関する各種排水処理施設における処理実績及び主として実験プラントによる調査結果を体系的に整理することにより、膜分離活性汚泥法の特徴の明確化を行い、下水処理への適用性を評価し、あわせて設計や管理の留意事項を提示することを本技術評価の目的とする。

(評価対象技術)

本評価の対象とする膜分離活性汚泥法(以下、「本法」)は、家庭下水を主体とする都市下水を処理する活性汚泥法の一つであり、無酸素タンク及び好気タンクから構成される生物反応タンクにおいて活性汚泥処理を行い、好気タンク内へ曝漬したろ過膜によって固液分離を行なう技術である。

(評価の範囲)

評価の範囲は、水処理に関しては、前処理施設以降とする。また、汚泥処理に関しては、余剰汚泥の引き抜きから脱水までとする。

(膜分離活性汚泥法の特徴)

1. 処理原理とプロセス構成

本法は、従来の活性汚泥法では最終沈殿池において重力沈殿によって行われる固液分離を微細な孔径を有するろ過膜で行なうものであり、有機物の分解は活性汚泥によって行なわれる。ろ過膜としては、大腸菌群を阻止できることから、通常、孔径 0.1~0.4 μm 程度の精密ろ過膜(MF 膜)が用いられる。

本法の主な施設構成は、前処理施設、流量調整タンク、生物反応タンク

[2]

である。生物反応タンクは、無酸素タンクと好気タンクから構成され、流入下水は、前処理施設で夾雑物を除去した後、無酸素タンクに供給され、その後好気タンクに流入する。好気タンクと無酸素タンク間では混合液の循環を行なう。

好気タンク内をろ過膜を浸漬し、膜下部からエアレーションを行なって気液混合液により膜面を洗浄し、膜の閉塞（ファウリング）を防止しながらポンプ吸引あるいは重力により、ろ過を行なう。

2. 施設構成上の特徴

- ① 最初沈殿池、最終沈殿池、消毒施設は必要ない。
- ② 生物反応タンクMLSS濃度が高いので、余剰汚泥は生物反応タンクから直接引抜いて脱水することが可能であり、この場合、汚泥濃縮タンクは省略することができる。
- ③ 流入水量変動に対応するために、流量調整タンクが必要である。
- ④ 処理施設の必要敷地面積は小さく、OD法の約三分の一程度である。
- ⑤ 生物反応タンクには無酸素タンクを設け、脱窒反応により硝化で消費されたアルカリ度の半分を回収し、混合液pHの低下を防止する。
- ⑥ ろ過膜保護のため、生物反応タンク流入水は1mm目程度の微細目スクリーンによる前処理が必要である。

3. 処理機能上の特徴

- ① 重力沈殿による固液分離の制約がないため、生物反応タンク内MLSS濃度を高く保持でき、短時間で処理を行なうことができる。
- ② 処理水中にSSは輸出されず、透視度が高く清澄な処理水が得られる。また、有機物の除去は標準活性汚泥法やOD法と比較して、処理水に

[3]

SSが含まれない分、より良好である。

- ③ 処理水中に大腸菌群はほとんど検出されない。
- ④ 本法の処理水は、そのまま散水用水、修景用水としての利用が可能である。また残留塩素を保持させることによりトイレ洗浄用水としての利用も可能である。
- ⑤ 固形物滞留時間（SRT）が長いいため、処理過程で硝化反応が起こりやすい。
- ⑥ 生物学的硝化・脱窒反応により窒素除去が可能であり、窒素除去率は好気タンクから無酸素タンクへの循環量により制御できる。
- ⑦ 凝集剤添加により高度なりん除去が可能である。また、処理水中にSが含まれない分、処理水なりん濃度が低下する。なお、反応タンク中に嫌気ゾーンを組み込むこと等により、生物学的りん除去が期待できる。
- ⑧ 汚泥転換率は、SRTが20日前後の運転では、OD法について一般的に用いられている数値と比較して10%程度小さい。また、よりSRTの長い運転を行うことにより、更に発生汚泥量を減少することができる。
- ⑨ 本法の余剰汚泥の脱水性は、OD法の余剰汚泥と同程度である。

4. 建設費及び維持管理費

建設費に関しては、構成施設が少なく、必要敷地面積が小さいことが削減要因となる。一方、微細目スクリーン、流量調整タンク、膜ユニットおよびその関連設備、送風機の能力増加等が建設費の増加要因となる。維持管理費については、消毒用薬品費、沈殿池関連費用や汚泥処理処分費等が削減要因であるが、送風用動力をはじめとする動力費や膜交換費、膜洗浄関連費用等が増加要因となる。

[4]

他処理法と年間費用（建設費及び維持管理費の合計）を比較すると、新規施設を対象とした一般的な試算条件下では、比較的規模の小さい施設において本法の有効性が高い。

（設計上の留意事項）

① 前処理施設
前処理施設としては、生物反応タンク流入前に、更に1mm 目程度の微細目スクリーンを設置する。

② 流量調整タンク
本法では原則として定流量を行なうので、流入水量変動を均等化するため、流量調整タンクを設置する。

③ ろ過膜
本法で用いる MF 膜には大別して、平膜と中空糸膜があり、透過流束、洗浄方法、必要空気倍率が膜により異なるが、処理機能上の特徴については、膜形状による差は見られない。また、透過流束は水温が低下すると小さくなるため、冬季に流入水温が相当低下することが予想される場合には、設計透過流束に余裕を見込む必要がある。

④ 生物反応タンク
無酸素タンクと好気タンク各1槽で構成される生物反応タンクの水力的滞留時間は6時間程度とする。無酸素タンク及び好気タンク間の隔壁については好気タンクから無酸素タンクへの酸素持込を防止するため、開口部の大きさは必要最小限とする。また、スカム対策として生物反応タンクには消泡装置を設置する。生物反応タンクには外部からの異物風入を防止するため、原則として覆蓋をする。

⑤ 本法における必要空気量は、送気洗浄に必要な空気量と活性汚泥への酸素供給に必要な空気量からなる。

⑥ 消毒施設は不要であるが、ろ過膜破損等緊急時の対応として、固形塩素投入等の措置が可能なよう配慮する。

⑦ その他
必要に応じて浸漬洗浄タンクを設置する。また、生物反応タンクには、膜ユニット吊り上げ装置を設置する。

（維持管理上の留意事項）

① 運転管理項目としては、膜差圧及び生物反応タンク MLSS 濃度が重要である。また、活性汚泥のろ過性を「ろ紙ろ過量」等の測定により定期的に把握することが望ましい。

② 膜差圧が上昇してきた場合、次亜塩素酸ナトリウム等の薬液を処理水側から注入する方法（薬液注入洗浄）あるいは膜ユニットを生物反応タンクから引き上げて薬液タンクに浸漬する方法（浸漬洗浄）によりろ過膜を洗浄する必要がある。

③ ろ過膜は使用の継続に伴ない、洗浄を行なっても閉塞物が除去しきれず、膜差圧が十分に低下しなくなってくる。このような状態になった場合、膜エレメントの交換が必要となる。

④ ろ過膜の閉塞を防止するため、ろ過を行なっている間はエアレーションによる膜面洗浄を行なう必要がある。このため、運転停止時や運転開始時など曝気洗浄なしでろ過を行なうことがないように注意する。

⑤ 流入水量が少ない場合には、適宜、ろ過及び曝気洗浄を停止する間欠運転を行なう。この際、運転休止時間を適正に設定し、活性汚泥を嫌気化させることがないように注意する。

⑥ 点検時や浸漬洗浄時に膜ユニットを生物反応タンクから引き上げて作業を行なう場合には、ろ過膜に損傷を与えないよう取り扱いに十分注意する。

⑦ 維持管理作業においては、コンクリートから等の建設残さや採水器具など異物を生物反応タンク内に落下させることがないように注意する。

(適用上の注意)

(1) 処理対象とする下水

本法の処理対象は、家庭排水を主体とする都市下水とする。

(2) 下水収集システム

本法は、流量調整タンクを備えることにより、ある程度の流量変動には対応可能であるが、雨天時の浸入水に起因する設計処理能力を大幅に越える流入水量への対応には限界がある。このため、下水収集システムにおいて雨天時の浸入水量を低減するため、適切な施工管理及び不明水対策が重要である。

(3) 適用施設

本法の適用先としては、下記の条件を有する施設が考えられる。

- ① 敷地面積が狭小で、コンバクトな施設配置が求められる場合
- ② 高度処理が要求される場合
- ③ 処理水の再利用を行なう場合
- ④ 放流先の水利用状況から消毒方法に配慮が必要な場合
- ⑤ 既設施設の高度化や改築・更新において、既設土木構造物を生かして施設の処理能力を増大する場合や処理水質の高度化を図る場合
- ⑥ 活性汚泥の沈降性が悪く、処理の改善が必要な場合

(その他の留意事項)

ろ過膜に関しては技術開発が活発であり、高透過流束の膜やオゾン耐性素材あるいはセラミック、金属等の新素材を用いた耐用年数の長い膜が出現して来ている。また、膜の価格は、膜分離技術の普及に伴なって全体的に低下傾向にある。このため、本法の採用においては、最新の技術動向に十分に留意することが望まれる。

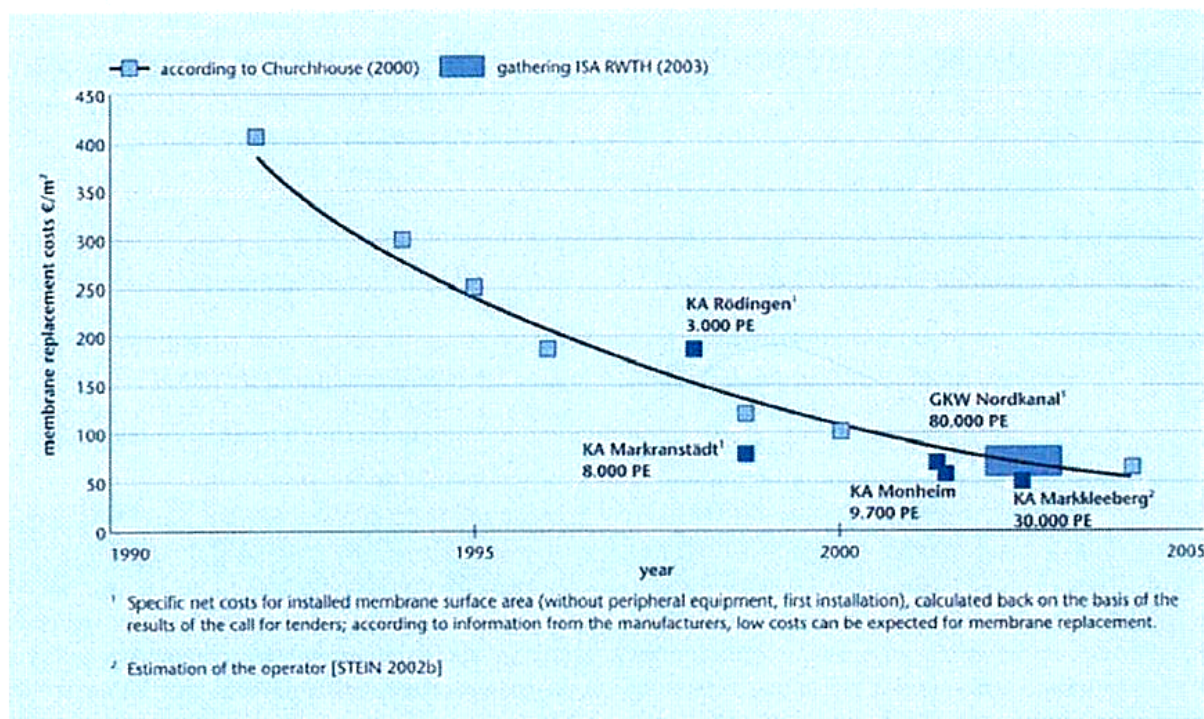
1.3 膜コストに関する資料

EU における膜コストについて、膜の交換費用を単位面積当たりの費用として、1990 年代からの変化について整理したものを参考図 1-2 に示す。

図に示すように、EU における膜コストは、1994 年ごろに約 300 ユーロ/m²であったものが、10 年後の 2004 年には約 60 ユーロ/m²となり、約 1/5 に低下している。

Figure 2-27

Development of membrane replacement costs [ISA 2002; CHURCHHOUSE, WILDGOOSE 2000]



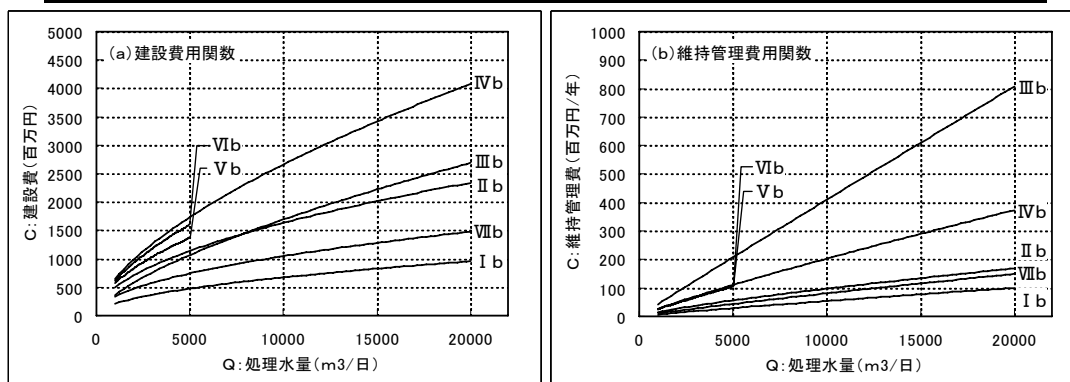
参考図 1-2 EU における膜コストの変化⁴⁶⁾

1.4 再生処理施設の費用関数の例

再生処理について、費用関数の例²⁶⁾を以下に示す。なお、再生処理施設とは再生水として利用可能な水質の下水処理水を得るため、下水処理施設に付加する処理施設をいう²⁵⁾。

再生処理費用関数

区分	再生処理方法	建設費 (百万円)	維持管理費 (百万円/年)	適用範囲 (m ³ /日)	
I	a 砂ろ過	$3.9335 \cdot Q^{0.5492}$	$0.0109 \cdot Q^{0.8542}$	$Q \leq 20,000$	
	b 凝集剤添加+砂ろ過	$6.4927 \cdot Q^{0.5042}$	$0.0158 \cdot Q^{0.8846}$		
II	a 砂ろ過+オゾン	$11.139 \cdot Q^{0.5379}$	$0.0737 \cdot Q^{0.7471}$		
	b 凝集剤添加+砂ろ過+オゾン	$13.815 \cdot Q^{0.5182}$	$0.0690 \cdot Q^{0.7879}$		
III	a 砂ろ過+活性炭	$2.6684 \cdot Q^{0.6969}$	$0.0450 \cdot Q^{0.9828}$		
	b 凝集剤添加+砂ろ過+活性炭	$3.6453 \cdot Q^{0.6668}$	$0.0500 \cdot Q^{0.9785}$		
IV	a 砂ろ過+オゾン+活性炭	$7.6477 \cdot Q^{0.6331}$	$0.0576 \cdot Q^{0.8722}$		
	b 凝集剤添加+砂ろ過+オゾン+活性炭	$9.0958 \cdot Q^{0.6166}$	$0.0625 \cdot Q^{0.8780}$		
V	b 凝集剤添加+砂ろ過+RO膜ろ過	$13.101 \cdot Q^{0.5460}$	$0.0659 \cdot Q^{0.8653}$		$Q \leq 5,000$
VI	b 凝集剤添加+MF膜ろ過+RO膜ろ過	$9.8560 \cdot Q^{0.5979}$	$0.0489 \cdot Q^{0.9056}$		$Q \leq 5,000$
VII	a 砂ろ過+紫外線消毒	$7.9673 \cdot Q^{0.5239}$	$0.0203 \cdot Q^{0.8591}$	$Q \leq 20,000$	
	b 凝集剤添加+砂ろ過+紫外線消毒	$10.962 \cdot Q^{0.4952}$	$0.0250 \cdot Q^{0.8781}$		
VIII	塩素消毒	$17.688 \cdot Q^{0.0632}$	$0.0044 \cdot Q^{0.8903}$		



再生処理費用関数

再生処理費用（建設費及び維持管理費）の算出条件

- ①モデル計算は、処理水量（Q）1,000、5,000、10,000及び20,000m³/dについて行う。ただし、V及びVIは、1,000及び5,000m³/dについて行う。
- ②機械・電気設備の据付費、経費等は、機器費の80%とする。
- ③土木費は機器配置概略図より躯体空容量を求め、30千円/空・m³として算出する。
- ④建築費は機器配置概略図より床面積を求め、250千円/m²として算出する。
- ⑤機械・電気設備の補修費は、機器費の3%とする。
- ⑥活性炭の交換周期は前段が砂ろ過の場合に2回/年、砂ろ過+オゾンの場合に1回/2年とする。
- ⑦MF膜の交換周期は1回/3年、RO膜の交換周期は1回/5年とする。
- ⑧紫外線ランプの交換周期は、低圧ランプで1回/1.5年、中圧ランプで1回/年とする。
- ⑨電力単価は15円/kWhとし、基本電力を含めない。
- ⑩維持管理費に人件費は含めない。

【単位プロセス】とその主要な[設計諸元]

【前処理】 [オートストレーナ]

【凝集剤添加】 [注入率 5mg/L]

【砂ろ過】 [ろ過速度 300m/d]

【オゾン処理】 [注入率 10mg/L]

【活性炭処理】 [ろ過速度 120m/d]

【MF膜ろ過】 [外圧中空糸型]





【RO膜】 [スパイラル型]

【紫外線消毒】 [処理水量 10,000m³/d 以下は低圧ランプ、10,000m³/d 超は中圧ランプ]

【塩素消毒】 [注入率 4mg/L]

1.5 MBR の膜モジュールの例

MBR の膜モジュールの諸元の一例*を以下の表に示す。

種類	A	B	C	D
膜モジュールの形式	中空糸型	モノリス型	平膜型	平膜型
膜モジュールの設置方式	浸漬型（一体型，槽別置型），槽外型	槽外型	浸漬型（一体型，槽別置型），槽外型	浸漬型（一体型，槽別置型），槽外型
膜の材質	ポリフッ化ビニリデン（PVDF）	セラミック（アルミナ質）	塩素化ポリエチレン	ポリフッ化ビニリデン（PVDF）
1 モジュールの外形概略寸法	L 1.4 m × W 0.5 m × H 2.9 m	L 4.0 m × W 2.0 m × H 3.5 m	L 0.7 m × W 3.1 m × H 4.4 m	L 2m × W 1.7m × H 3.3m(2 段積み) または 4.3m(3 段積み) ※水深により 2 段積みと 3 段積みを選択
1 モジュール当り処理水量	180～210 m ³ /日	768 m ³ /日	350 m ³ /日	280～420 m ³ /日
膜モジュール外観				 ※写真は 2 段積みの例

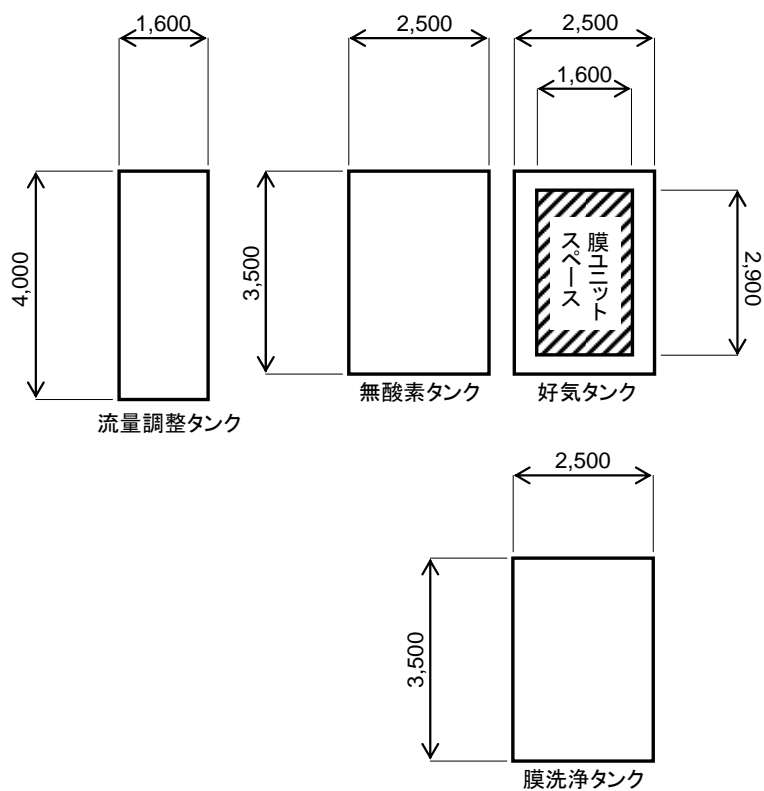
* 「平成 20 年度新技術を用いた処理施設の改築・機能高度化に関する調査報告書，国土交通省都市地域・整備局下水道部」及びメーカーヒアリングに基づき作成

1.6 MBR 適用事例における配置例

国内における MBR 適用事例における配置例（平面図）を以下に示す。

①処理能力 日最大 約200m³/dの配置例

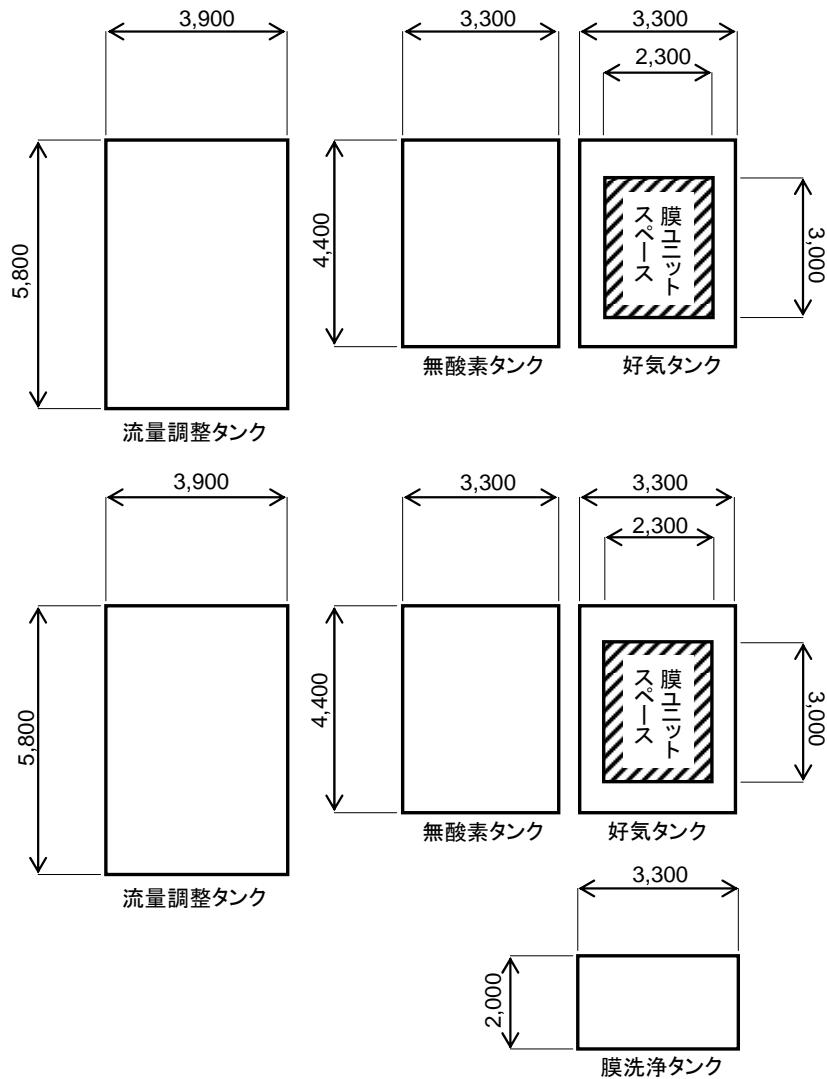
好気タンク	31.5m ³
無酸素タンク	31.5m ³



※ 流入下水の変動量、採用する膜モジュールの形式等、処理場毎の条件により各施設容量は異なり、標準的な値ではなく、一例として示したものである。

②処理能力 日最大 約700m³/dの配置例

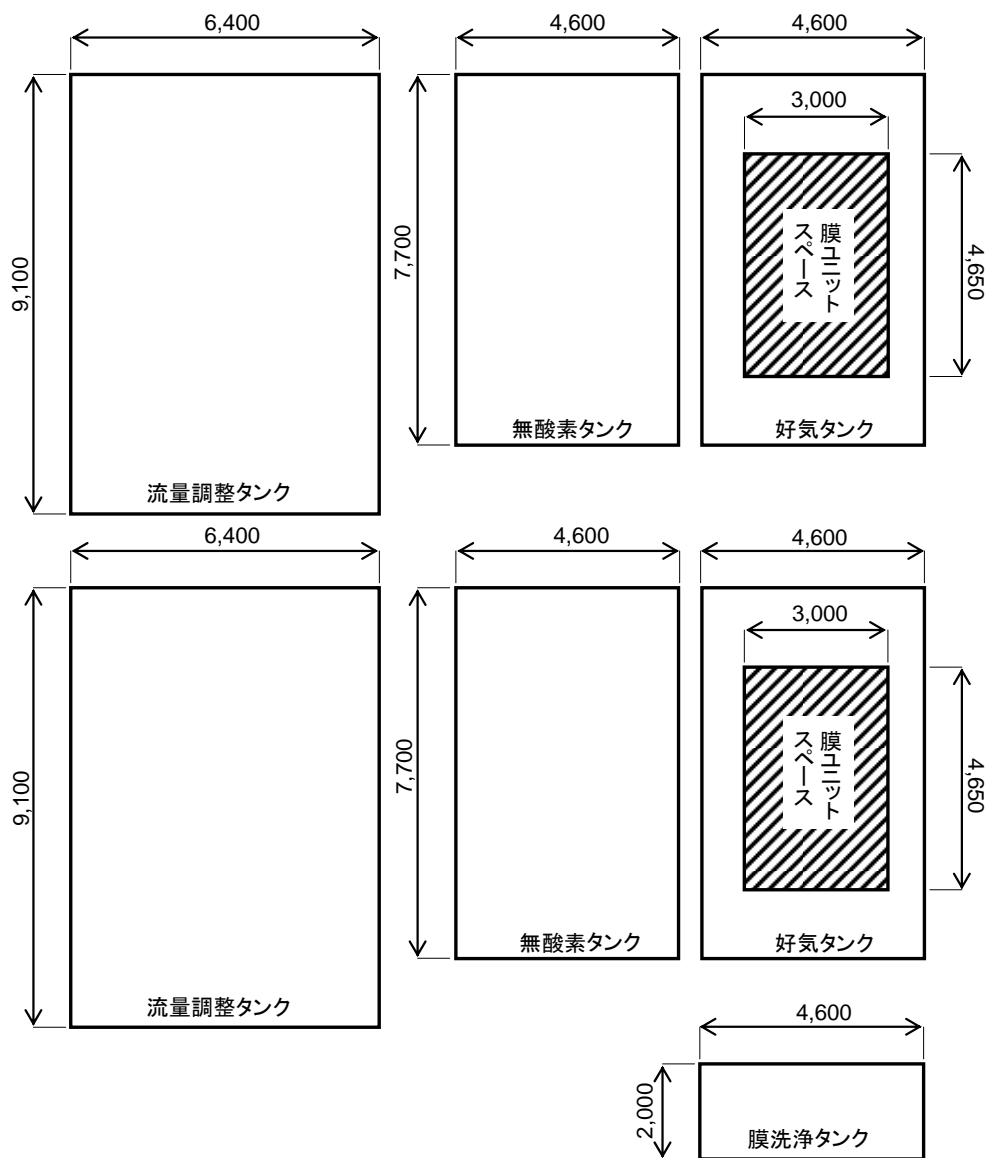
好気タンク	58m ³ ×2
無酸素タンク	58m ³ ×2



※ 流入下水の変動量、採用する膜モジュールの形式等、処理場毎の条件により各施設容量は異なり、標準的な値ではなく、一例として示したものである。

③処理能力 日最大 約2000m³/dの配置例

好気タンク	142m ³ ×2
無酸素タンク	142m ³ ×2



※ 流入下水の変動量、採用する膜モジュールの形式等、処理場毎の条件により各施設容量は異なり、標準的な値ではなく、一例として示したものである。

2. 膜処理技術を用いた展開

膜処理技術については、コスト、エネルギー使用量の削減はもとより、健全な水循環の構築、エネルギーの効率的な回収等、多方面での適用が期待されており、その研究・開発が積極的に進められている。

ここでは、下水道における膜処理技術を用いた今後の展開について、国内外の先進的な事例、技術開発の動向を整理する。

2.1 コスト縮減に向けた膜処理技術の開発研究

(1) MBR に関する技術開発

MBR の技術開発は、JS が中心となり実施され、3,000m³/日以下の小規模下水処理場に対する技術評価が出された。

今後の技術開発の焦点は、MBR の中・大規模施設への適用に関するものになっている。この場合、処理規模の拡大によるイニシャルコスト及びランニングコストの縮減化に繋がる技術開発が主体である。

1) イニシャルコストの縮減

イニシャルコストの縮減策としては、以下のものがある。

a) 高フラックス対応型膜モジュールの開発

従来の小規模向け膜モジュールをそのまま中・大規模施設へ適用した場合、スケールメリットが生じにくいため、より大きな透過流束が得られる膜モジュールの開発・導入が進められている。

b) 必要供給空気量低減による送風機設備能力削減

高効率散気方式の導入や膜面洗浄空気量削減を図り、必要供給空気量低減による送風機設備能力削減を行い、送風機設備コスト縮減を行う。

2) ランニングコストの縮減

ランニングコストの縮減策としては、以下のものがある

a) ファウリングの抑制

下水等の排水を対象とした場合、高分子有機物やバイオフィアリングによるトラブルが、全体の 70～80%を占めるといわれており、膜差圧の増加や透過流束・水回収率及び分離性能の低下を伴うため、最近では次に示す抑制技術についての研究開発が盛んに行われている。

- ・膜素材、膜構造の研究開発（素材の改質、新素材の採用、膜の表面加工等）
- ・洗浄方法の研究開発（洗浄装置の形式・設置場所、薬品の選定等）

b) 膜交換頻度の低減

膜交換頻度の低減を目的として、膜の長寿命化を図れる膜モジュールの開発及び薬品洗浄による膜の劣化防止策の検討が進められている。

c) 電力使用量の低減

必要供給空気量の削減等により、電力使用量の低減を図る（前項の 1) b)に関連）。

(2) 下水二次処理水を対象とした膜処理技術に関する技術開発

下水二次処理水を対象とした膜処理技術に関する技術開発については、産業排水処理等の分野で、特に膜モジュール自体の開発が中心に進められている。

1) イニシャルコストの縮減

イニシャルコストの縮減策としては、PVDF 等、高透水性と高強度性を持つ膜モジュールの開発が進み、MF/UF 膜モジュールの設置数の削減によるコスト縮減が図られている。

2) ランニングコストの縮減

ランニングコストの縮減策としては、以下のものがある

a) ファウリングの抑制

RO 膜においては、耐汚染性 RO 膜や低ファウリング性 RO 膜の開発、洗浄方式の改善等によって、ランニングコストの縮減を図っている。

b) 膜の劣化対策に関する技術開発

膜は、物理的な劣化のほかに、洗浄用薬品による影響を受け、塩分阻止率等の性能が低下する。特にポリアミド系膜は塩素剤の影響を大きく受ける。膜の劣化対策に関して、次に示す研究開発が行われている。

①膜洗浄用薬品に対する耐久性の向上

(膜素材の開発；塩素耐性膜，オゾン耐性膜等)

②膜洗浄用薬品等の選定（クロラミン，クエン酸，UV 等）

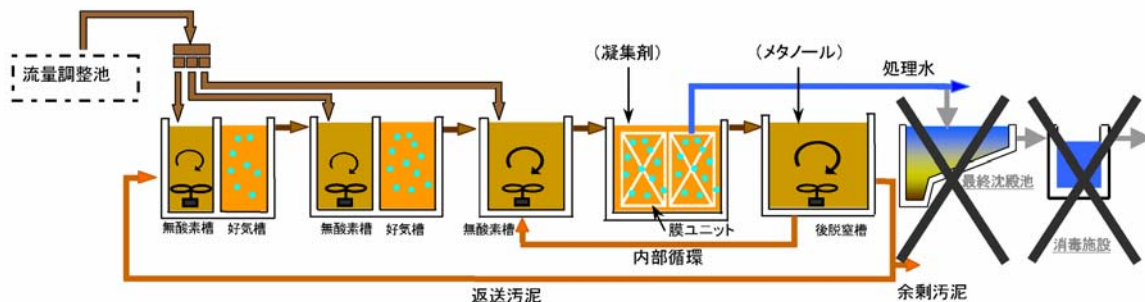
③劣化膜の補修技術（薬品による補修等）

2.2 膜処理技術の研究開発の事例

(1) 処理の高度化

JS で、大規模下水処理場へ適用する MBR として、膜ステップ流入式多段硝化脱窒法（膜ステップ多段法）の開発を行っている（参考図 2-1 参照）。

従来法のステップ法に比較して、①初沈，終沈，常時の消毒設備，砂ろ過設備等の省略による必要敷地面積の削減，②反応タンク容積の削減（膜による高濃度の汚泥を反応タンク内に保持），③高度な処理水質（ステップによる高い窒素除去率と凝集剤併用の同時凝集による高いりん除去率），④処理水の再利用（砂ろ過以上の除去率）といったメリットが考えられる。

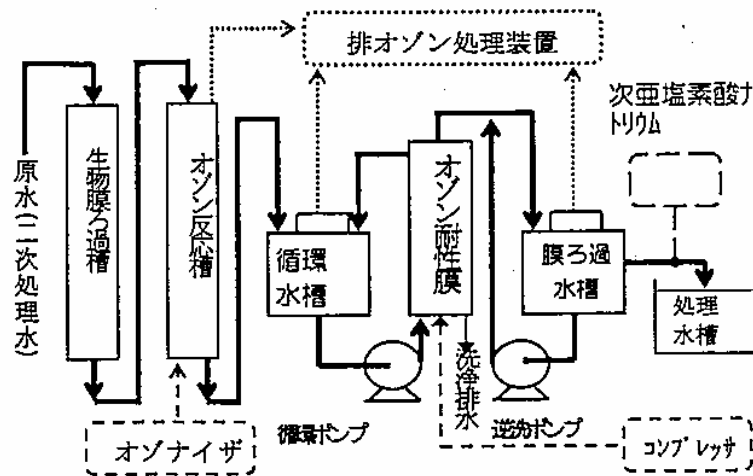


※JS WEB Page より

参考図 2-1 膜ステップ流入式多段硝化脱窒法の開発の例

(2) 色度除去による再利用の拡大

色度除去も考慮してオゾン処理と膜処理（MF）を併用した事例を、参考として参考図 2-2 に示す。

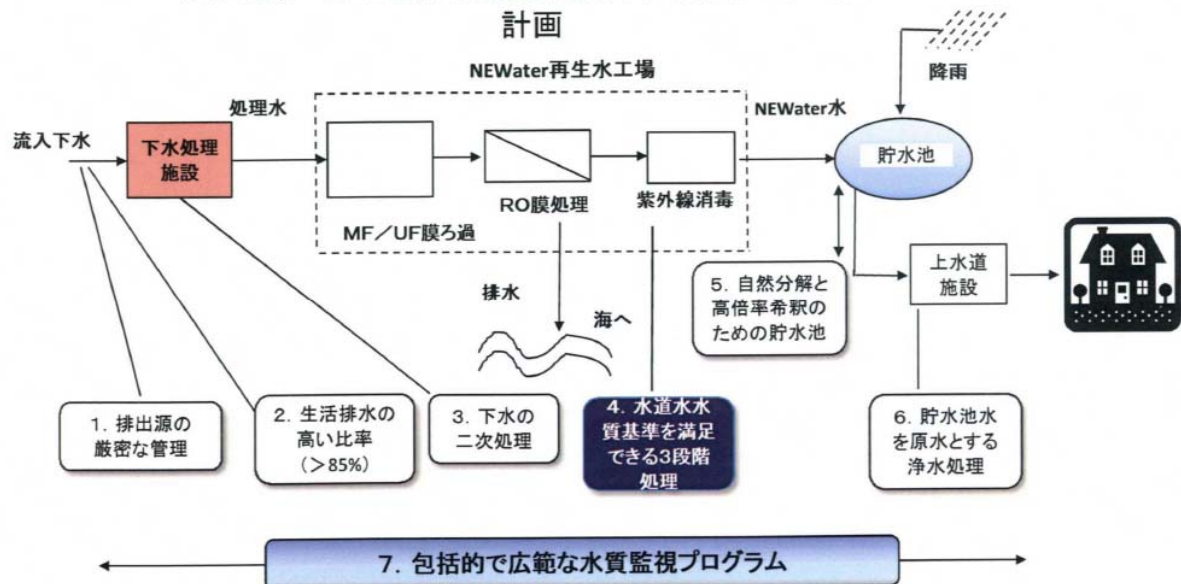


参考図 2-2 オゾン処理と膜処理を併用した処理フローの事例¹⁶⁾

(3) 水利用の安定化

国内の水資源が不足しているため国外からの水の供給に依存するシンガポールにおける、将来の水資源不足に対して講じられている下水二次処理水の再利用計画「NEWater プロジェクト」の全体像と処理フローを、処理水再利用の事例として参考図 2-3 に示す。この事例では、産業用としての非飲料水 (Non Portable Water) への利用と間接的飲料水 (Indirect Portable Water) への利用とが実施されている。

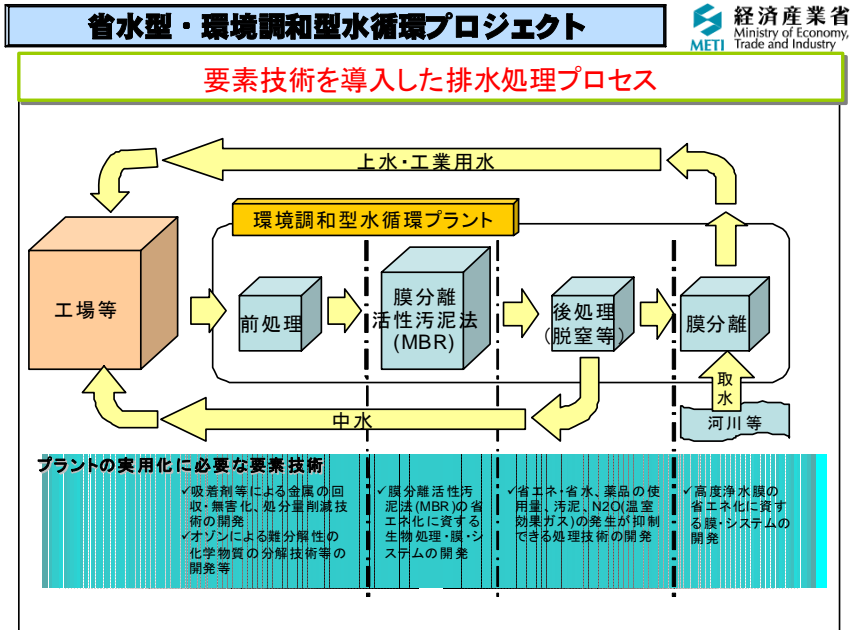
シンガポールにおける間接的飲料水利用プロジェクト



参考図 2-3 シンガポール NEWater プロジェクトの全体像と処理フロー¹⁷⁾の日本語訳

(4) エネルギー低減

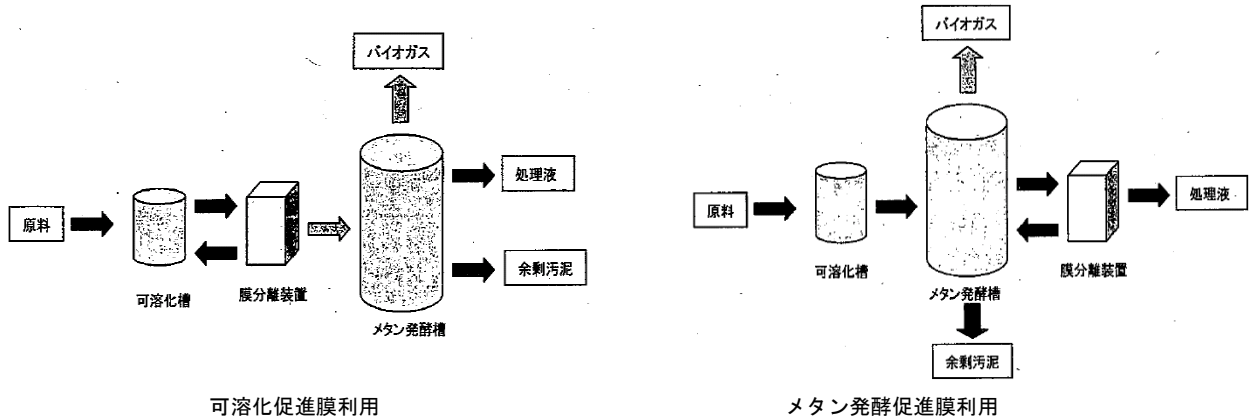
経済産業省では、省水型・環境調和型水循環プロジェクトの一環として革新的膜分離技術や省エネ型 MBR 等の開発を平成 21 年度から平成 25 年度までの 5 年間の予定で進めることとしている（参考図 2-4 参照）。



参考図 2-4 膜処理技術を導入した排水処理プロセスの開発イメージ（経済産業省資料による）

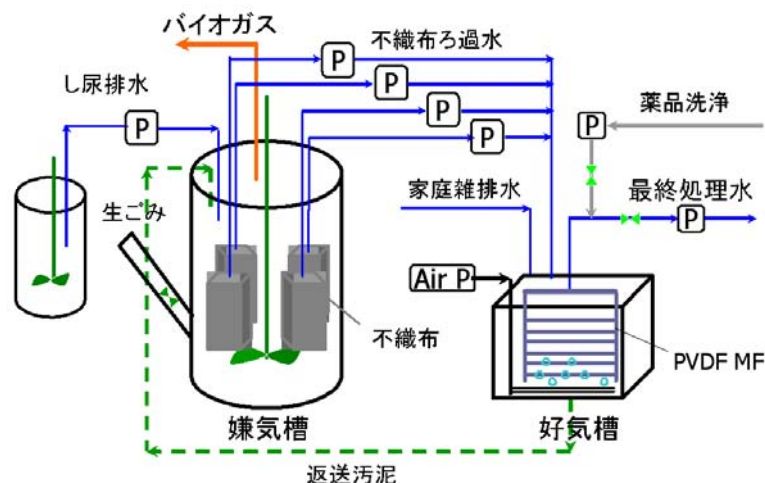
(5) 膜分離によるメタン発酵促進

膜とメタン発酵を組み合わせた技術も研究開発されており、可溶化汚泥を膜分離した後の透過液を用いてガス化を促進するフローや、膜により分離した発酵汚泥（メタン菌）を循環させてガス化を促進するフローが検討されている（参考図 2-5 参照）。



参考図 2-5 膜分離型嫌気性処理のフロー²⁴⁾

また、オンサイトでメタン回収等を目的として研究が進められているシステムの例を参考図 2-6 に示す。この例では、都市で発生するし尿や生ごみからメタンを回収するとともに、その処理水と雑排水から膜処理水を回収している。



参考図 2-6 嫌気不織布・好気 MBR⁴⁸⁾

2.3 普及拡大に向けた今後の課題

下水道における膜処理技術の導入をとりまく状況としては以下の点が挙げられる。

- ① MBR においては、従来法に比較し多くの空気量を必要とし、これがランニングコスト増に繋がり、MBR 採用の阻害要因となっている。
- ② MBR の中・大規模施設への導入は、これまで国内の実績がない。
- ③ 膜処理技術を用いたエネルギー回収の試みも端緒についたところである。

こうした状況を考慮して、下水道における膜処理技術の普及拡大を図るためには、次のような課題に対応していく必要がある。

(1) コスト縮減に向けた対応技術の開発

- ① 下水処理におけるファウリング機構の解明と抑制技術の性能向上
- ② 膜処理に掛かる省エネルギー化
- ③ 自動計測・遠隔制御方法の確立による運転管理の省力化

(2) 膜処理技術の利用拡大

- ① 大規模処理施設での実績と知見の集積
- ② 改築の導入実績と知見の集積
- ③ 汚泥処理工程への適用等、応用範囲の拡大

(3) 付加価値を付けた多機能利用

- ① メタン発酵技術との併用によるエネルギー回収型システムへの応用

2.4 他機関における膜処理技術の研究開発の動向について

最近 5 ヶ年程度の下水道関係機関以外の機関における膜処理技術の実用化に向けた研究開発テーマを参考表 2-1 に示す。

これらの研究開発の方向性は、膜処理技術を利用した省エネ・省資源、処理水質の高度化、他の技術と併用した総合環境対策システム等が中心となっている。

参考表 2-1 排水処理に関する膜処理技術の研究開発動向

研究機関	研究開発テーマ
(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	革新的膜分離技術の開発
	省エネ型膜分離活性汚泥法(MBR)の開発
(財)造水促進センター	PTFE 膜 MBR による下水の再生処理技術開発
(財)水道技術研究センター	MBR-RO による(工場)排水再利用
	膜を用いた浄水場排水処理
(独)国立環境研究所	膜ろ過膜モジュール等標準化に関する研究
	有用微生物・膜分離排水再利用システムの浄化機構と因子解明に関する基礎的研究
(財)日本環境整備教育センター	浸出水処理への逆浸透膜法の適用
	膜処理法を導入した小型生活排水処理装置の実用化に関する研究
	膜分離技術による汚泥の減量化・処理方法の確立に関する研究
	膜分離法における効率的な窒素除去に関する研究

2.5 EU における標準化の動向 (文献 39),40)参照

EU においては、1990 年ごろから下水道への MBR 導入が始まり、特に 21 世紀に入ってから急激に増加している。この背景として、EU 指令により下水の高度処理（特に窒素除去）が求められるようになり施設拡張が困難である場合に MBR が有利であること、欧州では伝統的に塩素消毒を敬遠する傾向があり、MBR により大腸菌等の細菌除去を目的としていることが考えられる。

EU 諸国では、MBR の研究開発・普及に関する連携を図るため、MBR ネットワークを設立し、EU の研究費助成の基、研究機関、大学、自治体、企業等で構成される 4 つのプロジェクト (AMEDEUS, EUROMBRA, MBR-TRAIN, PURATREAT) が研究開発に取り組んできた (参考表 2-2)。

参考表 2-2 MBR 関連プロジェクト一覧 ⁴⁷⁾

プロジェクト名	AMEDEUS	EUROMBRA	MBR-TRAIN	PURATREAT
期間(年)	2005-2008	2005-2008	2006-2009	2006-2008
予算	約 9 億円	約 6.3 億円	約 3 億円	約 1.4 億円
参加組織	12 組織 豪州も含む	13 組織 豪州・南ア含む	10 組織	9 組織
幹事	ドイツ	ノルウェー	ドイツ	ドイツ
研究テーマ	MBR 設計・運転管理の最適化・MBR 標準化	コスト競争力・汚染防止対策・ライフサイクルアセスメント	MBR リサーチ・若手の教育・汚染防止・MBR 情報交換の促進	地中海諸国向け MBR リサーチ・開発

さらに、AMEDEUS, EUROMBRA のメンバーを中心としたワークショップで、MBR 標準化に関する検討が進められ、2008 年 11 月に CEN (European Committee for Standardization) 合意文書 (文書 No. CWA15897) が公表された (参考表 2-3)。

参考表 2-3 CWA15897 (MBR 標準化) の目次

序文	8. 評価試験
はじめに	9. 提出データ
1. 範囲	10. 互換性
2. 参考図書類	10.1 原則
3. 用語の定義	10.2 総論
4. 全体システムと要件	10.3 プロセスフロー図(PFD)
4.1 基本的考え方	10.4 膜システム設備の範囲
4.2 前処理と中間スクリーン	10.5 互換性の考え方
4.3 MBR 生物処理システムの特徴	10.5.1 総論
4.3.1 総論	10.5.2 膜種類
4.3.2 活性汚泥混合液(MLSS)	10.5.3 配置
4.3.3 水理的滞留時間(HRT)	10.5.4 槽
4.3.4 汚泥日令(汚泥滞留時間,SRT)	10.5.5 排水と洗浄
4.3.5 化学的リン除去	10.5.6 損傷のチェック
4.3.6 ばっ気	10.5.7 点検と管理のし易さ
4.4 膜ろ過システム	10.5.8 薬品洗浄
4.5 活性汚泥混合液循環	10.5.9 プロセス制御システム(PLC)
4.6 ろ過水注水システム	資料 A(基準) 情報と書類
4.7 期待される処理水質	資料 B(参考) 清水ろ過テストの例
5. 材質特性	資料 C(参考) 真空リークテストの例
5.1 総論	資料 D(参考) ろ過孔径測定の例
5.2 有孔膜	資料 E(参考) ろ紙ろ過量測定
6. 形状	資料 F(参考) ろ過孔径分布のファウリングへの影響
6.1 平膜	参考資料リスト
6.2 中空糸膜	
7. 設計及び運転管理因子	
7.1 総論	
7.2 流入水質	
7.3 ファウリング	
7.4 膜差圧	
7.5 ろ過性	
7.6 損傷	

※JS 提供資料

<CEN (European Committee for Standardization)合意文書の位置づけ>

CEN 発行文書には参考表 2-4 に示す種類があり、上位文書については、直接的な法的拘束力をもつものではないが、通常は、各国の法体系や基準に組み込まれる。

CEN 合意文書とは、関係者団体により構成されるワークショップで審議されたもので、ガイドライン、基準等作成において議論のためのたたき台となる合意文書をいう。

合意文書の有効期間は、公表後 3 年 (2011 年 11 月まで) となっており、その後は、①廃止、②有効期間の延長、③上位の基準等への移行に向けた検討、のいずれかとなる。

なお、CEN 合意文書の審議と並行し、DWA（ドイツ水管理・排水・ゴミ協会）において、下水処理用 MBR 設計・建設ガイドラインのとりまとめが進められている。

参考表 2-4 CEN 発行文書の種類

各国の代表からなる技術委員会で審議したもの	EN（ヨーロッパ基準） CEN/TS（技術仕様） CEN-TR（テクニカルレポート） ガイドライン欧州技術	
関係者団体により構成されるワークショップで審議されたもの	CEN 合意文書	今回の MBR 標準化

3. その他

(1) 廃棄膜モジュールの有効利用

下水道での膜モジュールの膜透過流束を 0.6~0.8m³/日程度とすると、10 万 m³/日の下水処理場では膜モジュールの総面積は、120,000~170,000m² に達する。これらを一度に全量交換することはないものの、交換時には大量の廃棄膜が出ることが予想される。

水道用の膜の場合、現在使用済みの膜モジュールの大半は、種類や用途に関係なく、産業廃棄物として処分されている。下水道で膜の廃棄は今後の課題であるが、廃棄膜の有効利用方法については事前に検討を行っておく必要がある。

廃棄膜の有効利用の例及びプラスチック材料の一般的な有効利用方法を示す（参考表 3-1 及び 3-2 参照）。

参考表 3-1 廃棄膜の有効利用の例

反応タンク浸漬型		反応タンク槽外型	
平膜 (A 社)	中空糸膜 (B 社)	セラミック膜 (C 社)	管状膜 (D 社)
支持材等樹脂部分については再資源化可能		良質な無機材料からできており、使用済みの膜は、粉碎・分級後他の無機材料として再利用可能。	サーマルリサイクルによる有効利用。

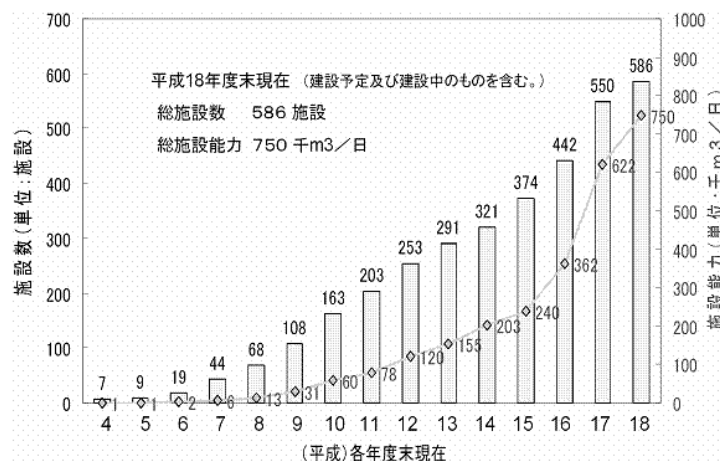
※日本下水道施設業協会へのヒアリングより作成（2008.9）

参考表 3-2 プラスチック材料の一般的な有効利用方法¹⁴⁾

有効利用方法	特徴と問題点
材料リサイクル (マテリアルリサイクル)	化学変化を伴わず、破碎粉碎等によりペレットを作成し、原料として再利用する。しかし、バージン原料と比較すると、品質劣化は避けられない。
化学材料リサイクル (ケミカルリサイクル)	樹脂を熱分解等で化学原料に戻して、原料として再利用する。原料としての回収率向上と分解副産物の処理が過大である。
エネルギー回収 (サーマルリサイクル)	ごみ発電等の燃料として再利用する。燃料として排出される廃棄物の状態が一定でないので、エネルギーとしての回収率を高めることができない。

(2) 水道用膜の導入状況

水道分野においては、膜処理の導入が増えており、平成18年度末では、総施設数586施設、総施設能力75万m³/日まで伸びている（参考図3-1参照）。施設規模分布を見ると、施設能力1,000m³/日未満が施設数の8割を占めており、小規模が中心であるものの、10,000m³/日以上規模も12件（施設能力としては全体の約5割）と、大規模への導入も進んでいる（参考表3-3参照）。



参考図 3-1 水道用膜ろ過浄水施設 (MF・UF) 導入状況³¹⁾

参考表 3-3 水道用膜ろ過浄水施設の規模別導入状況³¹⁾

施設能力(m ³ /日)	18年度末		17年度末	
	件数	施設能力 (m ³ /日)	件数	施設能力 (m ³ /日)
10,000 以上	12	360,552	10	270,552
5,000 ~ 10,000 未満	13	83,541	11	67,241
2,500 ~ 5,000 未満	27	90,387	25	84,377
1,000 ~ 2,500 未満	63	93,339	59	86,239
500 ~ 1,000 未満	97	64,523	88	59,503
250 ~ 500 未満	101	35,199	94	32,737
100 ~ 250 未満	99	15,102	92	14,053
50 ~ 100 未満	79	5,459	78	5,380
0 ~ 50 未満	95	2,606	93	2,568
	586	750,708	550	622,650

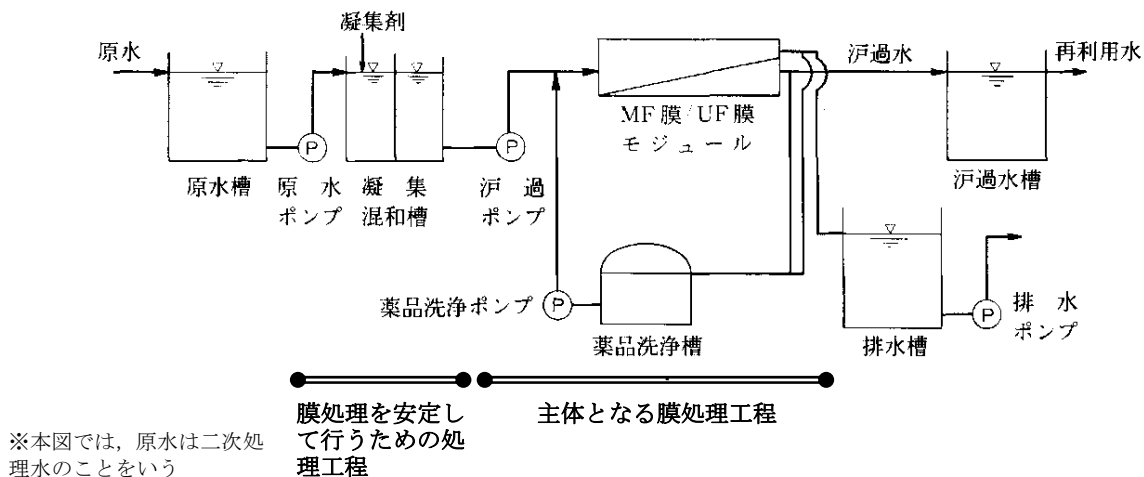
(3) 膜処理技術を利用した再生水利用のための処理フローの例

これまでに開発された膜処理技術を利用した再生水利用のための処理フローの例を参考図 3-2～3-4 に示す。

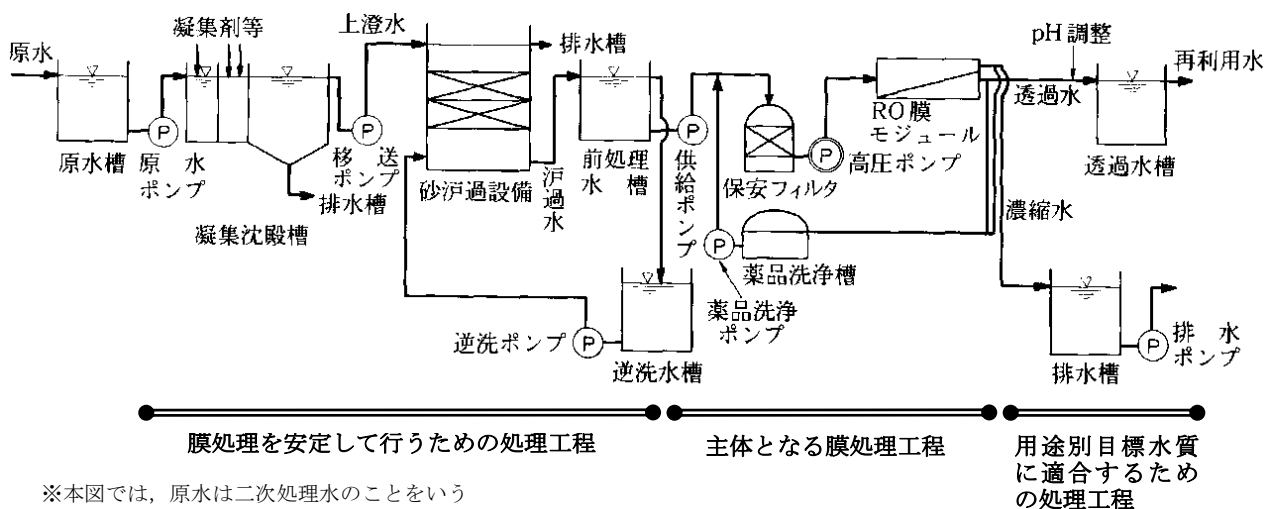
参考図 3-2 は、トイレ用水のための再生処理として MF/UF 膜を利用したものであるが、膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理工程は、凝集混和のみとなっている。

参考図 3-3 は、親水用水のための再生処理として RO 膜を利用したものであり、膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理工程は、凝集沈殿+砂ろ過となっており、膜の特性に合わせてファウリング抑制を図ったものとなっている。

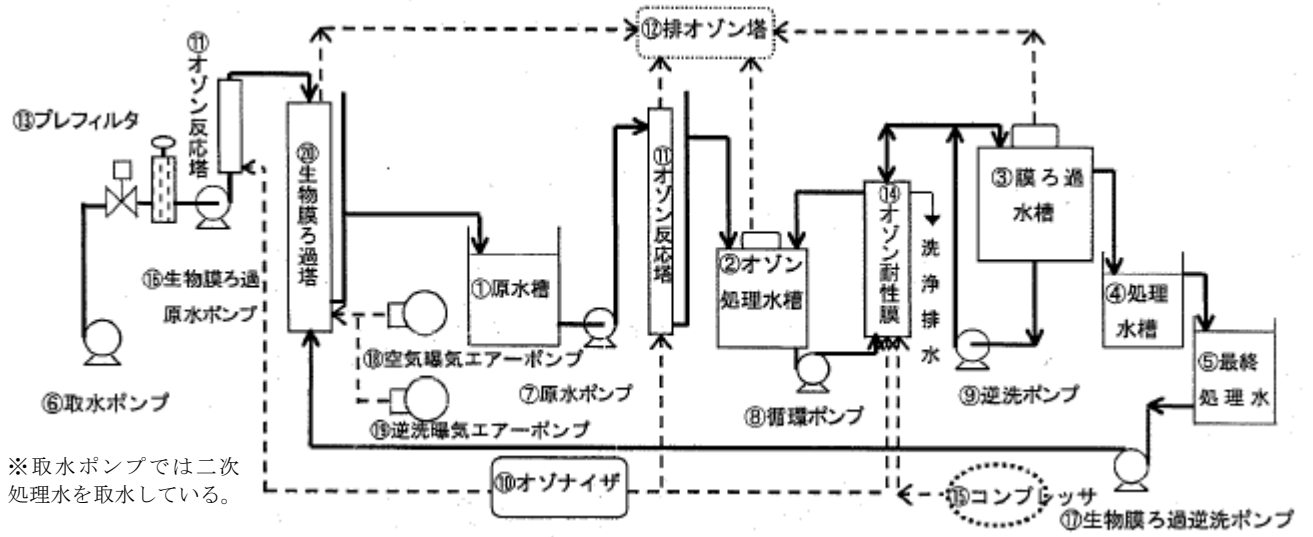
また、参考図 3-4 は、トイレ用水のための再生処理として MF 膜を利用したものであるが、膜処理を安定して行うために膜の閉塞や劣化を抑制するための処理工程は、前オゾン+ろ過+後オゾンによるもので、かつ、オゾン耐性の膜を使用し、ファウリング抑制と膜の劣化防止に配慮したものとなっている。



参考図 3-2 MF 膜/UF 膜処理の設備構成例¹²⁾ [トイレ用水]



参考図 3-3 NF 膜/RO 膜処理の設備構成例¹²⁾ [親水用水]



参考図 3-4 芝浦水再生センターの膜(MF)処理の設備構成例¹⁾[トイレ用水]

【参考文献】

- 1) (社)日本水環境学会・膜を利用した水処理技術研究委員会編,「水循環の時代 膜を利用した水再生」, 技報堂出版, (2008.2)
- 2) 有限責任中間法人膜分離技術振興協会, 浄水膜セミナー資料, (2006)
- 3) 山本和夫,「ナノろ過膜分離バイオリアクター (NFMBR) を用いた分散型解放水循環技術」, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2004, 日本膜学会・(社)日本能率協会, SESSION5, pp5-3-1~15, (2004)
- 4) 綾日出教,「膜分離技術の変遷—膜分離活性汚泥法を中心として」, 水環境学会誌, Vol.22, No.4, pp242-247, (1999)
- 5) 野池達也・他「下水の超高度処理に関する研究」, 土木研究所下水道関係調査研究年次報告書集(S58), pp9-14, (1983)
- 6) 稲盛悠平ら,「排水・汚水 処理技術集成」, NTS, (2007.5)
- 7) 藤田賢二ら,「急速濾過・生物濾過・膜ろ過」, 技報堂出版
- 8) 長岡裕,「健全な水環境と水循環の創造のための膜技術の展開」, 水環境学会誌, Vol.29, No.7, pp360-364, (2006)
- 9) 濱野利夫,「福岡の逆浸透膜海水淡水化施設」, 膜による造水技術シンポジウム 2005, pp35-46, (2005)
- 10) 日本下水道事業団技術開発部,「膜分離活性汚泥法の技術評価に関する報告書」, (2003.11)
- 11) 古山麻由子,「既納入施設の膜交換状況 (前編)」, (株)クボタ技術資料 “Membrane Now!”, Vol.2, p5, (2006)
- 12) (財)下水道新技術推進機構,「下水道膜処理システム技術マニュアル—1994 年度版—」, (1995.6)
- 13) 糸川浩紀,「ヨーロッパの MBR と日本の下水処理における MBR」, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2007, 日本膜学会・(社)日本能率協会, SESSION7, pp7-1-1~20, (2007)
- 14) (財)水道技術研究センター,「浄水技術ガイドライン」, (2000)
- 15) 村上孝雄,「膜分離活性汚泥法の下水処理への応用」, 水環境学会誌, Vol.29, No.7, pp7-11, (2006)
- 16) 石田恵一,「生物膜ろ過, オゾン, オゾン耐性膜からなる再生水製造システムの開発・導入」, 下水道協会誌, Vol.41, No.499, pp31-36, (2004)
- 17) Public Utility Board (Singapore) 提供資料, (2008.6)
- 18) 有限責任中間法人膜分離技術振興協会・膜浄水委員会監修, 浄水膜 (第 2 版) 編集委員会編集,「浄水膜 (第 2 版)」, 技報堂出版, (2008.2)
- 19) 平田強,「クリプトスポリジウム汚染と浄水処理」, 粉体と工業, Vol.34, No.3, pp75~83, (2002)
- 20) 山本和夫,「下水・排水処理における膜技術の新展開」, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2007, SESSION7, pp7-3-1~17, (2007)
- 21) 糸川浩紀,「特集膜分離技術 Q&A 膜分離活性汚泥法は小規模施設向けの技術なの?」, 月刊下水道 Vol.29, No.12, pp30-32, (2006)
- 22) 鬼塚卓也,「欧米における膜処理技術の動向」, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2003, SESSION7, pp7-2-1~9, (2003)
- 23) 関根康記ら,「膜分離活性汚泥法の空気量削減システムに関する検討」, 第 45 回下水道研究発表会, p 280, (2008)
- 24) 中尾真一・渡辺義公ら監修「膜による水処理技術の新展開」, シーエムシー出版, (2004.9)
- 25) 国土交通省,「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」, (2005.4)
- 26) 南山瑞彦ら,「再利用の促進に関する調査」, 平成 18 年度下水道関係調査研究年次報告書集, pp25-30, (2007)
- 27) (社)日本下水道協会,「下水道施設計画・設計指針と解説, 2001 年版」, (2001)
- 28) 斉藤孝一ら,「オゾン耐性膜再生水製造システムの運転状況報告—オゾン耐性膜の延命化対策と効果について—」, 第 45 回下水道研究発表会講演集, pp491-493, (2008)
- 29) 村田恒雄,「下水の高度処理技術」, 理工図書株式会社, (1992.5)
- 30) 鈴木義明ら,「親水用水を目指した水処理プロセスの技術開発—膜分離法による高度処理と処理水

- 再利用（第四報）－」，平成元年東京都下水道局技術開発年報，pp375-417，（1989）
- 31) (財)水道技術研究センターWebPage (<http://www.jwrc-net.or.jp/>)
 - 32) (財)水道技術研究センター，「膜ろ過浄水施設維持管理マニュアル」，(2005.3)
 - 33) 糸川浩紀，「ヨーロッパの下水処理施設における膜分離活性汚泥法の実態調査」，下水道協会誌，Vol.43，No.528，pp87-97，(2006.10)
 - 34) 山本欽也，「膜分離活性汚泥法を採用した福崎浄化センター」，ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2008，日本膜学会・(社)日本能率協会，SESSION8，pp8-1-1～19，(2008)
 - 35) 安中祐子ら，「奥津浄化センター（下水）への MBR 導入経緯と運転状況」，第 11 回日本水環境学会シンポジウム講演集，pp103-104，(2008.9)
 - 36) 関根康記ら，「膜分離活性汚泥法の空気量削減に関する一考察」，第 44 回下水道研究発表会講演集，pp142～145，(2007)
 - 37) 平山稚子ら，「微細気泡を導入した PVDF 平膜 MBR モジュール」，第 11 回日本水環境学会シンポジウム講演集，pp96-97，(2008)
 - 38) 安中祐子ら，「膜分離活性汚泥法における維持管理コスト縮減技術の開発」，第 41 回下水道研究発表会講演集，pp768-770，(2004)
 - 39) 村上孝雄，「EU における MBR の開発動向と標準化」，ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2008，日本膜学会・(社)日本能率協会，SESSION7，pp7-3-1～13，(2008)
 - 40) (社)日本水環境学会（膜を利用した水処理技術委員会），「EU における MBR 標準化の現状」，特別シンポジウム配布資料，(2008.11)
 - 41) (社)日本下水道協会，「下水試験方法」，(1997)
 - 42) 和泉清司ら，「膜分離活性汚泥法における重力濾過法の運転事例」，第 31 回日本水環境学会年会研究発表会講演集，p41，(1997.3)
 - 43) 国土交通省都市・地域整備局下水道部，(社)日本下水道協会，「下水道ビジョン 2100，下水道から「循環のみち」へ 100 年の計 —地域の持続的な発展を支える 21 世紀型下水道の実現—」，(2005.9)
 - 44) 吉田眞一，柳雄介編，戸田新細菌学 改訂 32 版，南山堂，p547，(2004.1)
 - 45) 堀部晃，「都市空間に水と緑のオアシスを垂水処理場で「低圧逆浸透膜処理」」，下水道協会誌，Vol.44，No.534，pp23-26，(2007)
 - 46) Johannes Pinnekamp et al., *Membrane Technology for Waste Water Treatment*, FiW Verlag, 2006
 - 47) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，「水ストレス地域における水資源ビジネスの可能性と技術開発課題に関する調査事業」，P136，(2008.3)
 - 48) JSPS 科学研究費補助金 基盤研究(S)H17 年度採択（山本和夫教授研究概要）
http://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/12_kiban/c_gaiyo19/sum41_yamamoto.pdf
 - 49) 村上孝雄，「特集膜分離技術 Q&A なぜ、いま膜分離活性汚泥法が必要なの？」，月刊下水道，Vol.29，No.12，pp23-25，(2006)