

「膜ろ過浄水システム高度化の研究」

研究報告書

平成 26 年 9 月

公益財団法人 水道技術研究センター

— 目 次 —

| | |
|-------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 1-1. 研究の背景 | 1 |
| 1-2. 研究の目的 | 1 |
| 2. 研究経過 | 2 |
| 3. 研究方法 | 3 |
| 3-1. 研究対象 | 3 |
| 3-2. 調査・検討方法 | 3 |
| 4. 研究結果 | 5 |
| 4-1. NF膜の技術開発の動向 | 5 |
| 4-2. NF膜の技術的な到達点 | 17 |
| 4-3. NF膜の除去性確認 | 22 |
| 4-4. NF膜による処理コスト | 29 |
| 4-5. 水道の課題、高度処理導入状況等の調査 | 35 |
| 5. 浄水処理におけるNF膜の新たな適用 | 37 |
| 6. おわりに | 39 |
| 参考文献 | 41 |
| 別添資料 研究発表・論文リスト | |

1. はじめに

1-1. 研究の背景

我が国のナノろ過（NF：Nanofiltration）に関する本格的な研究開発は、JWRCによる「高度処理 MAC21」プロジェクト（平成6年度～8年度）が嚆矢である。以来、数々の研究や開発が行われ、色度等の一般有機成分や農薬等の化学物質の除去性に優れていることが判明している。しかし、我が国では、NFが高度浄水処理として本格的に採用された例はほとんど無い。その原因として、造水コストが高くエネルギー消費も多いこと、これを全量高度処理に採用して高品質の浄水をすべての用途に一元給水することの是非、水回収率や濃縮排水に関する課題、適用可能な原水に関するデータ不足等があげられてきた。

一方、大都市圏を中心に高度処理（オゾン＋活性炭吸着等）が普及し、異臭味の除去等に威力を発揮している。しかし、施設の複雑さ、維持管理の手間、活性炭の価格高騰や供給不足の懸念、オゾン酸化による副生成物の発生等、課題は多い。

これに対して、膜ろ過法は除去可能な不純物サイズが明確、前処理が軽減される、施設構成が簡潔でコンパクト、設計の自由度が高い、自動運転が可能、維持管理が比較的容易等、多くの利点があり、精密ろ過（MF：Microfiltration）又は限外ろ過（UF：Ultrafiltration）を採用する浄水場が増えつつある。さらに、高度浄水処理法のひとつとして、MF/UFと活性炭吸着等を組み合わせたハイブリッド処理も普及しつつある。しかし、現実には、ハイブリッド処理によりかえってシステムが複雑化しており、前述の膜ろ過本来の利点を活かした適用について再考する時期にあるものと考ええる。

NFについては、前述のように研究開発がほとんど停止した状況が続いている。しかし、近年、極超低压タイプ膜の開発や大規模浄水場の更新を想定した実証実験等が実施され始めており、現在の技術と今後の展望を踏まえ、NFの浄水処理への適用について改めて検討が必要な時期が来ていると考える。

1-2. 研究の目的

前述のように、水道全体及び浄水技術の転換点を迎えている今、膜ろ過浄水システムの高度化という視点に立って、NFが持つ高度浄水処理機能を改めて見直す必要がある。そこで、本研究ではMF/UF＋NFによる浄水処理システムを前提に、NFの高度浄水処理機能に焦点を絞り、適用の可能性、課題、考えうるシステム等について改めて検討することとした。具体的な研究の目的は次のとおりである。

- ・高度浄水処理法としてのNFの技術的な到達点と動向について資料調査を行い、特に処理性能と造水コスト・エネルギー消費について再評価を行う。
- ・その結果を現行の高度処理（オゾン＋活性炭吸着）と比較しつつ、NFの技術的な課題を検討する。
- ・以上をまとめ、NFの高度浄水処理への適用可能性、システム形態及び技術的な展望等について検討し、NF膜及びNF処理の新展開に関して考察する。

2. 研究経過

本研究は、公益財団法人水道技術研究センター（以下「JWRC」という。）の特別研究等推進事業「水道における膜利用型新技術等に関する研究」において平成23年度～24年度に実施し、以下に示す研究委員会を設置して推進した。

| | | |
|-----|-------|-----------------------|
| 委員長 | 福士 憲一 | （八戸工業大学大学院 工学研究科 教授） |
| 委員 | 鈴木 拓也 | （八戸工業大学大学院 工学研究科 准教授） |
| | 熊野 淳夫 | （一般社団法人膜分離技術振興協会） |
| | 新谷 卓司 | （一般社団法人膜分離技術振興協会） |
| 事務局 | 高嶋 渉 | （JWRC 浄水技術部長） ※平成23年度 |
| | 富井 正雄 | （JWRC 浄水技術部長） ※平成24年度 |
| | 安積 良晃 | （JWRC 浄水技術部 主任研究員） |

研究委員会は、JWRC が選任した学識者と膜分離技術振興協会会員の構成とし、委員長は研究委員会の推進、委員は調査・検討、事務局（JWRC）は研究委員会及びヒアリング調査等の開催を主に担当した。

研究委員会の開催状況及び活動内容を表2-1に示す。

表2-1 研究委員会の開催状況及び活動内容

| 開催日 | 名称 | 活動内容 |
|-------------|--|---|
| 平成23年8月30日 | 第1回研究委員会 （於：日本消防会館） | ・研究計画案の協議及び決定 ・研究分担の確認 |
| 平成23年10月11日 | 第2回研究委員会 （於：JWRC） | ・研究の中間報告及び意見交換 ・次回研究委員会までの研究内容確認 |
| 平成23年10月12日 | 東京都水道局実証実験設備視察 （於：東京都水道局 研修・開発センター） | ・NFによる河川表流水の浄水処理実証実験設備見学及び質疑応答 ・その他の実証実験設備見学 ・研修施設の見学 |
| 平成23年12月19日 | 第3回研究委員会 （於：JWRC） | ・研究の結果報告及び意見交換 ・研究成果取りまとめの方針決定 ・今後の予定確認 |
| 平成24年3月14日 | 第4回研究委員会 （於：JWRC） | ・研究報告書案の内容確認 ・平成24年度研究の方針協議 |
| 平成24年8月21日 | 第1回研究委員会 （於：八戸工業大学） | ・研究計画案の協議及び決定 ・研究分担の確認 ・八戸工業大学実験施設見学 |
| 平成25年3月27日 | 第2回研究委員会 （於：JWRC） | ・研究の結果報告及び意見交換 ・研究報告書の内容確認 |

3. 研究方法

3-1. 研究対象

NF^{注1)}の水道への適用に関し、その可能性、考え得るシステム及び課題等について、主として文献、技術資料やヒアリングに基づいた調査・検討を行う。本研究では、一般的な水源原水に対応する浄水システムのうち、臭気物質、THMFP（トリハロメタン生成能）等の有機性成分や、農薬、硝酸態窒素を除去する高度処理プロセスを主な検討範囲とする^{注2)}。また、将来的な利用や災害・緊急時を含めた水道全般におけるNFの用途についても言及する。

注1) 低圧RO膜や必要に応じて一部のRO膜も検討対象とし、表記はNF（膜）に統一する。

注2) 本研究では、凝集+沈殿+急速ろ過、MF/UFによる浄水プロセスには直接言及しない。

3-2. 調査・検討方法

1) 調査の方法と主な視点

学会・研究発表会資料、研究プロジェクト成果報告、導入事例・技術動向に関する文献・公開資料の探索及び実証実験プロジェクトへのヒアリングによる情報収集を基本とし、用いる情報は、原則として高度処理MAC21から現在に至るものとする。なお、不足する情報については実験的研究による調査も行う。

調査・検討の主な視点は次のとおりである。

(1) NF膜の開発状況、到達点及び今後の動向

- ・現状の技術によるNF膜の透水性、除去性能、回収率、エネルギー消費量、コスト
- ・それらの今後の動向
- ・NF導入事例での原水水質と処理水質
- ・NF膜処理の造水コスト調査及び高度浄水処理との比較（文献等の調査）

(2) NF膜の除去性

- ・既存の文献や公開資料では明確な評価がなされていないNF膜の異臭味成分、硝酸態窒素の除去性確認（実験的研究による調査）
- ・NF膜処理と高度浄水処理の除去性比較（高度処理実証実験報告書等の分析）

(3) NFの浄水システムへの適用可能性及び今後の展開

- ・浄水場での全量高度処理あるいは部分的処理、ローカルユース、二元給水、災害時の緊急造水等への適用可能性
- ・NFの適用条件（施設規模、立地条件等）
- ・浄水処理に適したNF膜の基本的性能仕様及び開発の可能性
- ・高度浄水処理の導入状況、今後の課題とニーズ（文献、公開情報等の調査）
- ・一般有機成分、化学物質、異臭味成分、硝酸態窒素の除去性能と硬度成分の保持
- ・エネルギー消費等

2) 調査対象とする情報

本研究における主な情報、調査・検討方法を表 3-1 に示す。

表 3-1 主な情報、調査・検討方法

| | |
|--------------------|---|
| 研究発表会論文集・講演集 | 全国水道研究発表会、東京都水道局研究発表会、IWA-ASPIRE、ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム |
| 研究プロジェクト報告書 | JWRC プロジェクト：高度処理 MAC21、ACT21、 <i>e-Water</i> 、 <i>e-WaterII</i> NEDO プロジェクト：省水型・環境調和型水循環プロジェクト |
| 研究機関発刊図書・発刊誌・技術資料等 | 一般社団法人膜分離技術振興協会、社団法人日本水道協会 一般財団法人造水促進センター、JWRC |
| 実証実験サイト視察 | 東京都水道局実証実験設備の視察及び当該研究に係る資料 |
| 高度処理実証実験報告書の分析 | 埼玉県企業局「浄水方法最適化実験調査」（平成 21 年度～23 年度） |
| 実験的研究による調査 | 八戸工業大学による分担研究「NF 膜の除去性調査」（平成 24 年 10 月～平成 25 年 1 月） |
| ホームページ掲載情報の調査 | 東京都水道局、沖縄県企業局、京都市上下水道局、千葉県水道局 |

4. 研究結果

4-1. NF 膜の技術開発の動向

1) 技術開発と利用実績

(1) NF 膜の概要

NF 膜は古くから知られており、1970 年代から逆浸透 (RO : Reverse Osmosis) 膜の研究開発とともに発展してきた。開発当初は高塩分阻止性能を有する RO 膜に対し、塩化ナトリウムの阻止性能が低いためルーズ RO 膜と呼ばれていた。その後、1985 年ごろから Dow Chemical (FilmTec) 社が 1 nm 程度の分子を阻止する性能を有するろ過膜を NF 膜と呼称し、実用化された膜である。現在ではこれが定着している。図 4-1 に示すとおり、MF 膜、UF 膜、RO 膜と比べ、最も実用化が遅い膜である。^{1),2)}

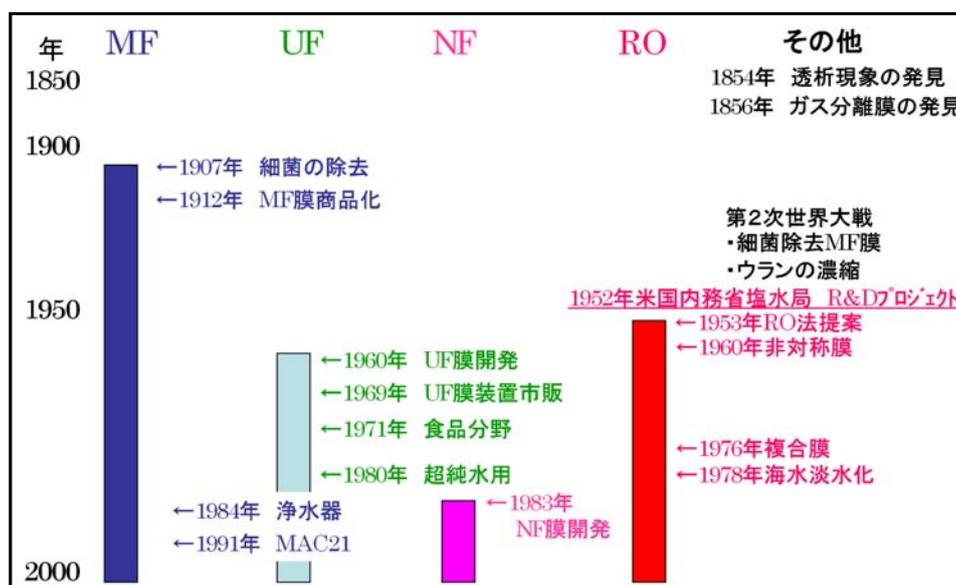


図 4-1 膜開発の歴史¹⁾

注 3) 上図は 1)の参考文献を基に作成。

NF 膜は UF 膜と RO 膜の中間に位置付けられ、NF 膜の定義は明確ではないが、「操作圧力が 1.5 MPa 以下で、分画分子量が 200~1,000 であり、塩化ナトリウムの阻止率が 90 %以下の膜」³⁾、「1 nm 前後のサイズの分子の除去が可能で、操作圧力は 0.2~1.5 MPa で、除去対象物は分子量が最大数百程度の低分子量有機物質（トリハロメタンとその前駆物質、農薬、臭気物質、合成洗剤等）、カルシウム、マグネシウムなど硬度成分及び蒸発残留物」⁴⁾ 等がある。RO 膜と UF 膜の中間的位置づけで、1~2 nm の細孔径を有する膜である。一方、我が国の浄水用 NF 膜の定義では、「操作圧力 1.5 MPa 以下で使用され、除去率 90 %以上を示す分離対象物質の分子量の範囲が 200~1,000 を示し、試験液の塩化ナトリウム濃度が 500~2,000 mg/L で操作圧力が 0.3~1.5 MPa の評価条件で塩化ナトリウム除去率 5 %以上 93 %未満の膜」⁵⁾ とされている。

NF 膜の特徴としては、表 4-1 に示すとおり塩化ナトリウムのような 1 価イオンの阻止性能は RO 膜ほど高くないが、硫酸マグネシウムのような 2 価イオンや低分子量の有機物（医薬品、農薬、界面活性剤、トリハロメタン前駆物質等）の阻止性能は高い水準を示すという特徴を持つ。したがって、1 価イオンと 2 価イオン、塩と有機物等の形態で分離・精製・濃縮プロセスに適用することができる。また、各成分を阻止性能の相違を活かして選択的にウイルスや蛋白質レベルにおいても阻止することができるため、微量汚染物質の除去等、浄水場での適用検討が期待でき

る。また、NF 膜はろ過清澄だけでなく、濃縮方法の一つとして食品や医薬分野で用いられる。NF を含む膜ろ過法は蒸発法等の他の方法と比較して分離濃縮を相 (phase) 変化することなく行うことができる。食品や医薬の多くは熱変性や分解する物質が多く存在することから、これらの領域の分離濃縮において非常に有効な手段であるといえる。このように、NF 膜の適用範囲は非常に広く、分子量の異なった水溶性の有機物や塩との混合物から選択的に分離除去することができる。浄水用 NF 膜の開発はあまり見られないが、NF 膜はその特性から RO 膜の低圧化、高流束化/低除去率化の位置付けである。製膜技術も低圧 RO に類似しており²⁾、低圧 RO 膜の開発の延長線上においてポテンシャルが上向いていると考えられる。NF 膜は脱塩率が低い一方で、低分子量有機物の除去率が高い特性から高度浄水処理に応用することが検討され、国内でも JWRC が中心となって、NF 膜の高度浄水処理への適用性研究が実施された。

表 4-1 NF 膜の各種溶質阻止性能の例 (%)⁶⁾

| メーカー | 日東電工 | | | | Dow Chemical (FilmTec) | | | 東レ | | GE-W&PT DESAL | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|------|------|------|------------------------|-----|------|-----|------|---------------|------|------|
| | NTR | | | | NF | | | SU | | DK | HL | HWS |
| 溶質 (分子量) | 729HF | 7250 | 7450 | 7410 | 70 | 50 | 40HF | 600 | 200S | 3/3 | 3/3 | 3/3 |
| NaCl (58) | 92 | 60 | 51 | 15 | 70 | 50 | 40 | 80 | 65 | - | - | - |
| Na ₂ SO ₄ (142) | 99 | 99 | 92 | 55 | - | - | - | - | 99.7 | - | - | - |
| MgCl ₂ (94) | 90 | 90 | 13 | 4 | - | - | 20 | - | 99.4 | - | - | - |
| MgSO ₄ (120) | 99 | 99 | 32 | 9 | 98 | 90 | 95 | 99 | 99.7 | 98 | 98 | 98.6 |
| エチルアルコール (46) | 25 | 26 | - | - | - | - | - | 10 | - | - | - | - |
| イソプロピルアルコール (60) | 70 | 43 | - | - | - | - | - | 35 | 17 | - | - | - |
| グルコース (180) | 97 | 94 | - | - | 98 | 90 | 90 | - | - | - | - | - |
| ショ糖 (342) | 99 | 98 | 36 | 6 | 99 | 98 | 98 | 99 | 99 | - | - | - |
| 評価条件 | 評価液濃度 (%) | 0.15 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| | 圧力 (MPa) (kgf/cm ²) | 1 | 2 | 1 | 1 | 0.6 | 0.4 | 0.9 | 0.75 | 0.75 | 0.69 | 0.69 |
| | | 10 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 9 | 7.5 | 7.5 | 6.9 | 6.9 |
| | 温度 (°C) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

(2) NF の開発経緯

図 4-2 に JWRC が実施してきた膜ろ過の水道分野への適用化研究を示す。¹⁾

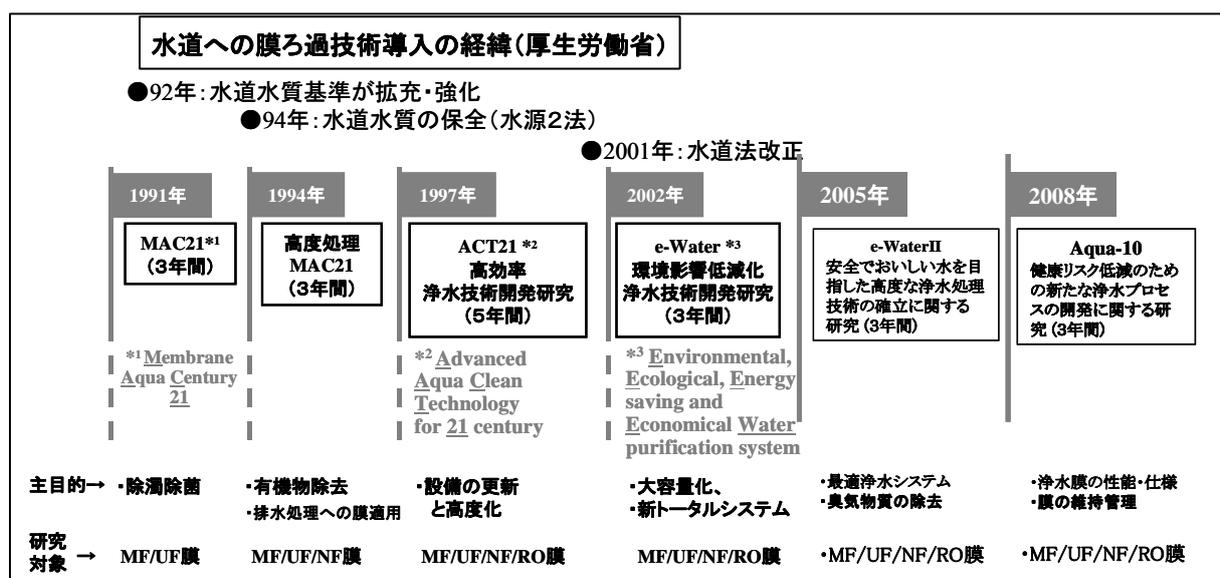


図 4-2 JWRC の膜ろ過研究経緯¹⁾

注 4) 上図は 1)の参考文献を基に作成。

図4-2に示した開発研究の概要は次のとおりである。

①「膜利用型新浄水システム開発研究」(高度処理 MAC21、1994 年度～1996 年度)

NF の水道分野への適用を検討した国内初の開発研究である。JWRC が中心となり、国立公衆衛生院^{注3)}、大学、水道事業体、JWRC 会員企業、膜分離技術振興協会等が参加し、3 年間にわたって行われた大型総合研究プロジェクトである。研究課題は以下の 4 課題である。

- ・消毒副生成物の低減化技術の開発に関する研究
- ・農薬・臭気物質等の除去技術の開発に関する研究
- ・ウイルス等の除去技術の開発に関する研究
- ・排水処理技術の開発に関する研究

ここでは、膜分離法として、溶解性有機物の NF 膜による処理を研究対象とし、MF 膜、UF 膜とオゾン+活性炭による処理も検討された。研究は実証プラント実験を主とする合同研究、参加企業独自あるいは水道事業体等の共同で行う独自研究、大学が主体となっていく基礎研究の 3 つに分けて実施された。NF 膜の処理性が調査・検討され、開発研究の成果を踏まえて「膜ろ過高度浄水施設導入ガイドライン(案)」が作成された。高度浄水処理の除去対象物質として、色度、消毒副生成物の前駆物質、臭気物質、農薬、陰イオン界面活性剤及びアンモニア態窒素が挙げられた。このガイドライン案では、NF 膜によって色度や消毒副生成物前駆物質はよく除去されること、トリハロメタン等の塩素処理によりすでに消毒副生成物となったものはあまり除去されないこと、臭気物質、農薬、陰イオン界面活性剤等は種類によってはよく除去されることが示されている。その他、ファウリングを抑制するための膜モジュール当たりの流量分配のための膜モジュール配置や、回収率設定の注意事項等が示されており、導入前に実証試験の実施を推奨している。なお、先の MAC21 では「小規模水道における膜ろ過浄水施設導入ガイドライン」が小規模施設に限定しているのに対して、この高度浄水処理のガイドラインでは小規模施設を主たる適用対象とはしていない。また、その後、このガイドライン(案)をベースに「膜ろ過高度浄水施設導入の手引き」が発刊されている。^{7~11)}

注 5) 現在の国立保健医療科学院を指す。

②「高効率浄水技術開発研究」(ACT21、1997 年度～2001 年度)

より良質な水道水を確保するためには、原水水質の保全と同時に原水水質に見合った適切で確実な浄水技術が不可欠である。我が国では、全国的に施設更新の時期を迎えることもあり、浄水施設の処理機能の診断・評価手法の確立とともに、より効率的な浄水技術の開発が求められ本開発研究が実施された。ここでは、学識者、民間企業、水道事業体及び他関連団体等の積極的な参加で実証試験等が実施された。NF 膜に関する研究も実施され、NF 膜高度浄水処理プロセスの安定運転性の研究では、水温の比較的高い時期において流束 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$ 、回収率 90 % という高回収率の条件で 3 か月間の安定運転が行われ、水温の低い時期には pH を 4~5 に下げることで安定運転が可能とされた。また、前処理に UF 膜を用いることで水温の低い時期でも前処理水質(SDI)の維持が可能となり、砂ろ過に比べて NF 膜の安定運転に有効であることが報告されている。^{12)、13)}

③「環境影響低減化浄水技術開発研究」(*e-Water*、2002 年度～2004 年度)

環境に配慮した、省エネルギー型浄水処理システム、発生汚泥の削減、水資源の有効利用により地球温暖化を防止し、健全な水循環の形成を促進することが求められている。このような背景のもと、本開発研究のプロジェクトが推進され、大容量膜ろ過技術の開発、浄水処理トータルシ

システム開発、水道水監視に関する研究が行われた。NF 膜に関しては、NF 浄水システムにおける水質予測や性能予測に関する検討が行われた。^{14)~17)}

④「安全でおいしい水を目指した高度な浄水処理技術の確立に関する研究」(e-WaterⅡ、2005年度～2007年度)

各地域の施設が更新時期を迎え、最適な浄水処理技術を選択するガイドラインが求められており、安全でおいしい水を求めるニーズも高まっている。このような背景を受け、原水条件に応じた最適な浄水プロセスを示すことにより、水質基準への適合、省エネルギーを図るとともに、効率的な施設更新を図り、安全でおいしい水を安定して供給する必要がある。そのため、本プロジェクトでは、各種原水条件に応じた最適浄水システムに関する研究、おいしい水を目指した臭気原因物質等に関する研究が実施された。NF 膜に関しては、NF を用いた高度浄水システムに関する研究がなされた。^{18)~21)}

(3) NF 膜の利用実績

本研究の参考となる国内外の代表的な利用実績の概要を以下に示す。

① 熊本県宇土市／花園水源 NF 脱塩設備

本施設は地下水を水源とし、塩素+砂ろ過で主にマンガン除去を目的としたものであったが、蒸発残留物 (TDS) 濃度が上昇し、水道水の味が塩辛いとの苦情が出始めたことから、その対策として NF が導入された。原水の特徴は、蒸発残留物が高く、特に硫酸イオン、カルシウムイオン等の 2 価イオンの割合が高く、シリカ濃度も高い一方で、濁質性を示す SDI 値が良好という点である。そのため、塩分を除去できる RO、NF の適用が検討された。図 4-3 に示すとおり、当時市販されていた数種類の NF 膜について除去性能比較や透水性能等を検討した結果、2 価イオンの除去率が高い一方でシリカの除去率が低く、膜モジュール内での析出が抑えられる NF 膜(膜 B)が採用されることとなった。²²⁾ この NF 膜はポリアミド複合膜からなり NaCl 除去率は 55 % である。1989 年に導入され、浄水能力は 3,000 m³/日であり、当時の膜ろ過浄水施設としては施設規模が大きい。施設の仕様を表 4-2、処理フローを図 4-4、設備配置図を図 4-5 に示す。

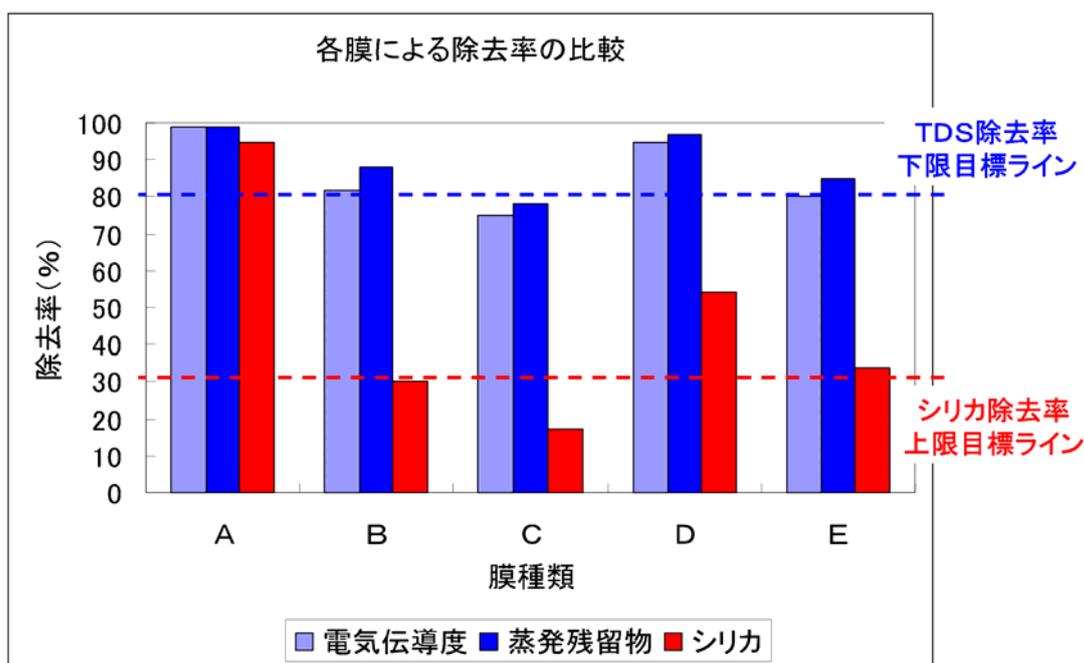


図 4-3 NF 膜の除去性能の比較²²⁾

② 香川県多度津町／平瀬浄水場高度処理施設

本施設は、浅井戸水源の硝酸・亜硝酸態窒素除去や病原性微生物、農薬等による水質汚染の進行に対処するため2003年5月に完成、8月より運用を開始している。計画最大取水量は9,900 m³/日、計画最大給水量8,400 m³/日、低圧RO膜とNF膜を組み合わせた膜ろ過方式を採用し、NF膜を用いた高度処理施設としては国内最大規模である。膜ろ過部分の処理フローは図4-6に示すとおりであり、低圧RO膜で処理（回収率40%）した濃縮水をNF膜で処理し、生産水として回収するシステムである。使用されているRO膜、NF膜は、ともにポリアミド製複合膜であり、NaCl除去率はそれぞれ99.5%、95%である。

施設の仕様を表4-3、モジュールラック写真を図4-7、代表的性能を表4-4に示す。

表4-3 施設の仕様¹⁾

| 項目 | | 仕様 | |
|------------------|-------|-------------------------|----------------|
| 処理目的 | | 硝酸性窒素等の除去による飲料水の製造 | |
| 主要プロセス | | RO・NF膜処理 脱炭酸塔 電気透析装置 | |
| | 最大配水量 | 8,415 m ³ /日 | |
| | 最大回収率 | 85% | |
| RO・NF膜処理 基本仕様 | システム | RO膜設備 | NF膜設備 |
| | 膜型式 | スパイラル型逆浸透膜 | スパイラル型逆浸透膜 |
| | | 架橋全芳香族ポリアミド複合膜 | 架橋全芳香族ポリアミド複合膜 |
| | | 膜エレメント:220本 | 膜エレメント:300本 |
| 運転状況 | | 2003年 運転開始 | |

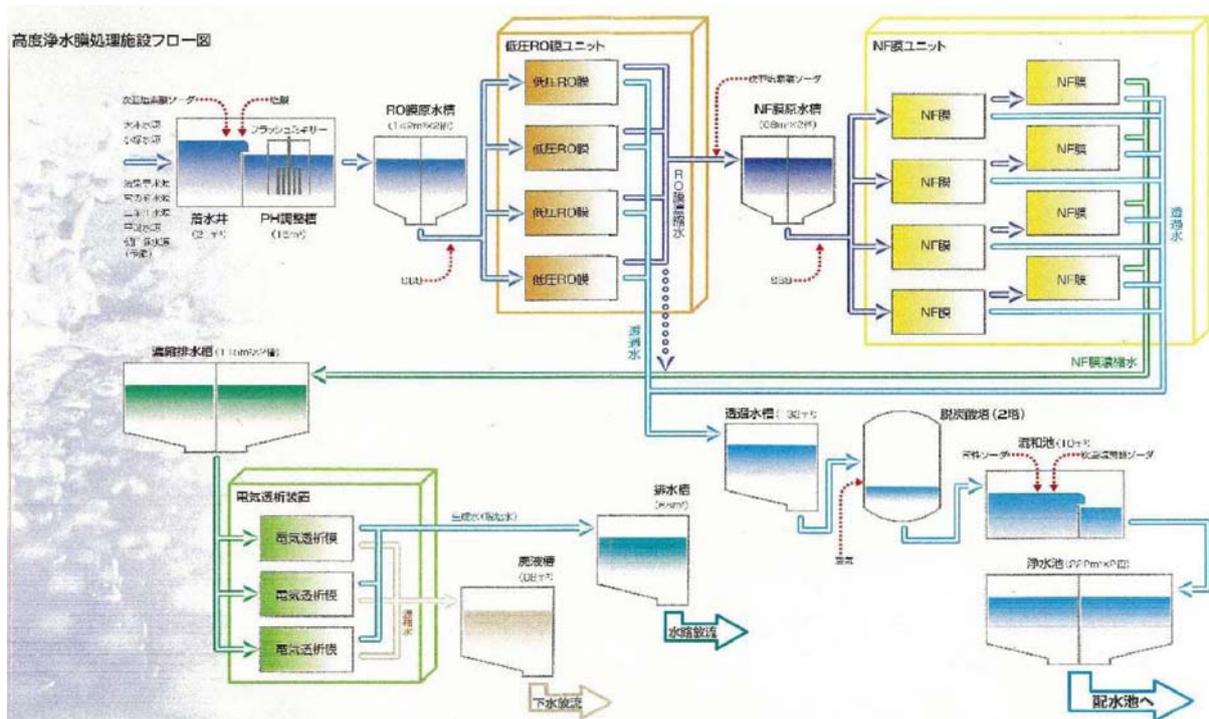


図4-6 処理フロー¹⁾



低圧RO膜ユニット

NF膜ユニット

図4-7 モジュールラック写真¹⁾

表4-4 代表的性能^{1)、23)、24)}

| | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 運転開始 | 2003年8月 | | | |
| 生産水量 | 8,415 (m ³ /日) | | | |
| 回収率 | 85 (%) (RO40 % + NF部45 %) | | | |
| 運転圧力 | (0.5-1.0) (MPa) | | | |
| 水温 | 20-28 (°C) | | | |
| 膜モジュール | スパイラル型 | | | |
| | RO 220エレメント | | | |
| | NF 300エレメント | | | |
| 水質例 | 原水 | RO透過水 | NF透過水 | 浄水 |
| 硝酸態窒素 | 6.89 mg/L | 1.09 mg/L | 4.52 mg/L | 2.76 mg/L |
| 亜硝酸態窒素 | 0.01 mg/L未満 | 0.01 mg/L未満 | 0.01 mg/L未満 | 0.01 mg/L未満 |
| 塩素イオン | 23 mg/L | 1.1 mg/L | 11 mg/L | 5.5 mg/L |
| KMnO ₄ 消費量 | 1.5 mg/L | 0.4 mg/L | 0.3 mg/L | 0.3 mg/L |
| 総硬度 | 131 mg/L | 2.8 mg/L | 18.5 mg/L | 9.6 mg/L |
| 蒸発残留物 | 260 mg/L | 10 mg/L | 77 mg/L | 41 mg/L |
| 溶性ケイ酸 | 22 mg/L | 2 mg/L未満 | 5 mg/L | 2 mg/L |
| カルシウム | 40.5 mg/L | 2.6 mg/L | 5.9 mg/L | 3.2 mg/L |

③ フランス／メリーショアーズ浄水場への導入

海外では、脱塩・軟水化目的の大型プラントが多く稼働しているが、^{25)、26)} 国内での NF 浄水処理を検討する上で参考となるものは、フランスのメリーショアーズ (Mery-sur Oise) 浄水場である。この浄水場は、パリ近郊の 144 の自治体に水道水を供給している浄水場の一つであり、給水能力を 20 万 m³/日から 34 万 m³/日へ増加させるのに伴い、当時の EC による新しい水質基準を満足させるために NF 浄水プラントを建設した。目的は、消毒副生成物の除去並びにおいしさの向上であり、生分解性溶存有機炭素 (BDOC)、病原体、農薬類を中心とした溶存有機炭素 (DOC) を除去対象としている。使用されている NF 膜は、ポリアミド系の複合膜であり、農薬類の除去率を高いレベルで維持しつつ、硬度成分の除去性能を低減させた新しい NF 膜である。

このメリーショアーズ浄水場の NF 膜設備の仕様を表 4-5、処理フローを図 4-8 に示す。

表 4-5 施設の仕様^{1)・27)}

| 項目 | 仕様 | |
|---------------|--|--|
| 処理目的 | 溶存有機炭素(DOC)、特に生分解性溶存有機炭素(AOC)を除去することにより、消毒副生成物ならびに異臭味を低減した飲料水を製造する | |
| 主要プロセス | 高速凝集沈殿・オゾン処理・二層ろ過・NF膜ろ過 | |
| RO膜処理 基本仕様 | 生産水量 | 140,000 m ³ /日 |
| | 回収率 | 85 % |
| | システム | トレイン数 8 トレインのモジュール構成 108-54-28 モジュール当たり膜エレメント数 6 |
| | 膜型式 | スパイラル型(8 インチ径) ポリアミド系複合膜 膜エレメント:9,120 本 |
| 運転状況 | 1999 年 運転開始 | |

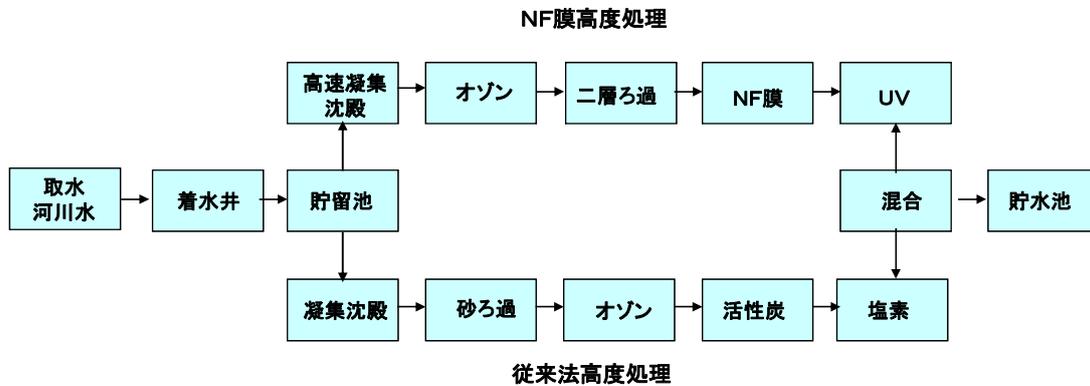


図 4-8 処理フロー^{1)・27)}

メリーショアーズ浄水場は 1999 年末から浄水量 14 万 m³/日で稼働している。この浄水場で実施した 2,800 m³/日のパイロットプラントにおける阻止率の結果を表 4-6 に示す。それぞれの物質に対し高い阻止性能を示している。特に、ヨーロッパで規制の厳しい農薬類に対しては、代表的な物質であるアトラジンやシマジンに対しても高い阻止性能を示している。

表 4-6 NF 膜ろ過法による高度浄水処理の例 (Mery-sur Oise 浄水場)²⁾

| 水質項目 | 供給水 | ナノろ過水 | 阻止率 |
|---|-------|--------|-------|
| TOC (mg/l) | 4.0 | 0.4 | 90% |
| DOC (mg/l) | 3.6 | 0.4 | 89% |
| BDOC (mg/l) | 1.1 | < 0.1 | > 91% |
| UV吸光度 [270nm] (1/cm) | 0.1 | 0.003 | 94% |
| 塩素消費量* (mg-Cl ₂ /l) | 3.0 | 0.18 | 94% |
| CHCl ₃ 生成能* (μg/l) | 72.8 | 3.0 | 96% |
| THM前駆物質* (μg/l) | 98.0 | 8.3 | 92% |
| TOX生成能* (μg-Cl/l) | 319.0 | 41 | 87% |
| COD [KMnO ₄] (mg-O ₂ /l) | 2.30 | 0.15 | 94% |
| アトラジン (μg/l) | 0.7 | 0.07 | 90% |
| シマジン (μg/l) | 0.4 | < 0.05 | > 85% |
| 濁度 | 0.5 | < 0.1 | > 80% |
| pH | 7.5 | 6.5 | |

* 試験条件: Cl₂添加量4mg/l, pH7.5, 20°C, 72hr

供給水: 河川水の凝集・沈殿・砂ろ過水

BDOC: 生物分解性溶存有機炭素

④ 海上油田石油採掘井戸への適用

海上油田では、石油生産を継続するために大量の水が採掘油井へ注入されている。海水をそのまま使用すると、海水中の硫酸イオンと油田に存在するバリウムやストロンチウムイオンとのスケール発生の恐れがある。また、硫酸塩スケールの形成がある場合、硫酸還元菌により副次的硫化水素が発生するが、これらを低減するために海水の軟水化処理による硫酸イオン除去が必要となる。最大数万 m³/日規模の NF 処理プラントが海上油田等で稼働しており、Dow Chemical (FilmTec) 社が Marathon Oil 社との共同研究により NF40 膜の改良品として開発した SR90-400 が独占的に使用されている。この海水の NF 処理では硫酸イオンを選択的に 98 %以上除去するが、NaCl は 95 %程度透過するので、RO 海水淡水化に比べて小さな浸透圧差となり、実際の運転は比較的低压となる。

⑤ 染料の脱塩精製への適用

スルホン基やカルボキシル基を含有する合成染料や光沢剤調合物の製造において、副生成物として系内に混在する残存 NaCl 等の無機塩を選択的に除去して有効成分の純度を上げるために、UF 膜や分画分子量 1,000 程度のスルホン化ポリエーテルスルホン系 NF 膜 (NTR-7400 シリーズ) 等による分離精製が行われる。一般的に、NF 膜を用いて染料等の製造工程で発生する塩分や微量不純物を含む染料溶液に加水・希釈と再濃縮を繰り返す圧透析を行い、染料等が工業製品として精製される。塩の阻止率は低いが染料分子は透過しない NF 膜を用い、染料と塩の混合水溶液を所定の加圧下で分離・濃縮する。透過側は塩含有水溶液が、濃縮側は染料分子が濃縮され濃度が低下した塩が混合している。この濃縮液を原液タンクに戻し、透過した水溶液量と同量の純水を原液に加える。この一連の操作を繰り返すことで、原液タンク内は染料分子のみが溶解した水溶液となり脱塩することができる。

(4) NF 膜の浄水システムへの適用に関する課題

このように、非常にユニークな性能を有する NF 膜であるが、浄水システムへ適用された実績は非常に少ない。この原因として以下のことが考えられる。

- ・ 除去対象物質が明確でない。
- ・ 地域によって水質が異なるため、汎用化が困難。
- ・ 現行方法のメリット・デメリットが明確でなく、NF 膜へ期待されることが不明。
- ・ 膜性能が広範囲であるがゆえに、多様な水源にマッチする NF 膜が存在しない。
- ・ NF 膜でないと除去が困難な原水中の物質が明確でない。

しかし、言い換えれば、以上のような項目について再検討を行い、必要に応じて膜開発を行うことにより展開の可能性は充分あると考えられる。

そこで、NF 膜の適用実績が極めて少ない理由についてさらに検討し、併せて改善の方向性を述べると以下のようなになる。

① 適用原水・浄水目的が不確定

NF の主目的は、MF、UF では除去できない溶解性物質を除去する高度浄水処理にある。その除去対象物には、代表的なものだけでも色度、消毒副生成物前駆物質、臭気物質、農薬、陰イオン界面活性剤及びアンモニア態窒素が挙げられており、また、NF 膜によって異なるが、中性分子からイオン性物質までが対象となる。また、原水性状にも幅があることから、必要とされる除去性も異なり、適用対象とする原水が不明確であることも挙げられる。したがって、実情として膜メーカーでは浄水用 NF 膜の開発目標を絞りきれず、開発が進んでいない。多くの NF 膜や低

圧 RO 膜が実用化されているが、これらは浄水用として開発されたものとは限らない。ここで、高度処理 MAC21 当時の各社 NF 膜（一部、低圧 RO 膜を含む）における各溶質の阻止性能及び仕様の一覧表を表 4-7 に示す。

表 4-7 高度処理 MAC21 当時の各社 NF 膜（一部、低圧 RO 膜を含む）における各溶質の阻止性能及び仕様の一覧表⁵⁾

各種低圧RO複合膜の溶質阻止率一覧(スパイラル膜モジュール:国内)

| 分子量 | 日東電工 | | | | | | | | | | | | 東レ | | | | |
|----------|-------------|-------|-------|-------|------|--------|-------|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
| | ES- | | | 759HR | | | 729HF | | | NTR- | | | SUL- | | SU- | | |
| | 20 | 15 | 10 | LP | NF | NF | NF | NF | NF | NF | ULP | LP | NF | NF | NF | | |
| 膜材質 | APA | | | APA | PVA | PVA | PVA | SPS | SPS | SPS | APA | APA | PA | PA | PA | | |
| 溶質阻止率[%] | NaCl | 58 | 99.7 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 98 | 92 | 60 | 40 | 51 | 15 | 99.4 | 99.5 | 63 | 97 | 65 |
| | MgCl2 | 94 | 99.7 | 99.4 | 99.4 | 99.7 | 97 | 90 | 57 | 35 | 13 | 4 | - | 99.8 | 46 | 95 | 99.4 |
| | MgSO4 | 120 | 99.8 | 99.6 | 99.6 | 99.9 | 99 | 99 | 99 | 90 | 32 | 9 | - | 99.9 | 99.2 | 99 | 99.7 |
| | Na2NO3 | 142 | >99.9 | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99 | 99 | 99 | 95 | 92 | 55 | - | 99.9 | 99.6 | 99 | 99.7 |
| | NH4NO3 | 80 | 99 | 98 | 98 | 98 | 91 | 83 | 39 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | SiO2 | 60 | 99 | 99 | 99 | 99 | 94 | 70 | 40 | 13 | - | - | - | 99 | 30 | 85 | - |
| | エチルアルコール | 46 | 50 | 44 | 44 | 53 | 40 | 25 | 26 | 7 | - | - | - | 54 | 10 | - | 8 |
| | イソプロピルアルコール | 60 | 96 | 94 | 94 | 96 | 85 | 70 | 43 | 22 | - | - | - | 96 | 35 | - | 17 |
| | グルコース | 180 | 99.8 | 99.7 | 99.7 | 99.8 | 99 | 97 | 94 | 89 | - | - | - | - | 95.4 | 99 | 85 |
| | ショ糖 | 342 | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99 | 99 | 98 | 94 | 36 | 5 | - | 99.8 | 99 | 99 | 99 |
| 透過水量 | 8"エレメント | m3/d | 30 | 37 | 30 | 30 | 20 | 36 | 60 | 75 | 52 | 100 | 30 | 28 | 18 | 20 | 40 |
| 評価条件 | 評価液濃度 | [%] | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.05 | 0.15 | 0.1 | 0.05 | 0.1 |
| | 圧力 | [Mpa] | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 2.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.75 | 1.5 | 0.4 | 1.5 |
| | pH | [-] | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| | 温度 | [°C] | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 使用範囲 | 最高使用圧力 | [Mpa] | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| | 最高温度 | [°C] | 40 | 40 | 40 | 40(90) | 40 | 40(90) | 40(90) | 40 | 40(90) | 40(90) | 45(90) | 45(90) | 45 | 45 | 45 |
| | 常用可能pH | [-] | 2~10 | 2~10 | 2~10 | 2~10 | 2~8 | 2~8 | 2~8 | 2~8 | 2~11 | 2~11 | 2~10 | 2~10 | 2~9 | 2~9 | 2~11 |

各種低圧RO複合膜の溶質阻止率一覧(スパイラル膜モジュール:海外)

| 分子量 | Film Tech(Dow) | | | | | | | | | | | | TRISEP | | | | | Fluid System(Koch) | | |
|----------|----------------|-------|------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------------------|--|--|
| | BW- | | | NF | | | Desal- | | | ACM- | | | TS- | | A- | | TFC- | | | |
| | 30LE | LP | NF | NF | NF | 3B | 3VLP | 3K | NF | 11 | 4 | LP | LP | 80 | 15 | ULP | HR | S | | |
| 膜材質 | APA | | | APA | PA | PA | PA | PA | PA | PA | PA | PA | PA | PA | PA | APA | APA | PA | | |
| 溶質阻止率[%] | NaCl | 58 | 98 | 90 | 75 | 50 | 98.5 | 96 | 50 | 15 | 99.3 | 98.7 | 99 | 99 | 85 | 98 | 99 | 99.5 | | |
| | MgCl2 | 94 | - | - | 70 | 83 | - | - | - | - | - | - | 99 | 99 | 93 | 98.5 | - | 95 | | |
| | MgSO4 | 120 | - | - | 97.5 | 97.5 | - | 99 | 98 | 96 | 99.8 | - | 99.5 | 99.5 | 98 | 98.5 | - | - | | |
| | Na2NO3 | 142 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | NH4NO3 | 80 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 98 | 98 | 75 | 92 | - | - | | |
| | SiO2 | 60 | - | - | - | - | >99 | 87 | - | - | - | - | 99 | 99 | 96 | 96 | - | - | | |
| | エチルアルコール | 46 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | イソプロピルアルコール | 60 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | グルコース | 180 | - | 90 | - | 98 | - | - | 98 | 98 | - | - | 99.9 | 99.9 | 98 | 99.8 | - | - | | |
| | ショ糖 | 342 | - | 98 | - | 99 | - | - | - | - | - | - | 99.9 | 99.9 | 99 | 99.9 | - | - | | |
| 透過水量 | 8"エレメント | m3/d | 34 | 28 | 39 | 45 | 28 | 29 | 29 | 30 | 39 | 34 | 32.2 | 34 | 28 | 30 | 36 | 49 | | |
| 評価条件 | 評価液濃度 | [%] | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.05 | 0.2 | 0.05 | | |
| | 圧力 | [Mpa] | 1.1 | 1.6 | 0.5 | 0.5 | 0.9 | 2.8 | 1 | 0.7 | 1.4 | 1.1 | 1.6 | 1.6 | 0.7 | 1.6 | 1.1 | 1.6 | | |
| | pH | [-] | 8.0 | - | - | - | - | - | - | - | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7.5 | 7.5 | | |
| | 温度 | [°C] | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | | |
| 使用範囲 | 最高使用圧力 | [Mpa] | 2.1 | 4.2 | 1.7 | 1.7 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 1.4 | 4.2 | 2.5 | 4.2 | | |
| | 最高温度 | [°C] | 45 | 45 | 35 | 35 | 45 | 50(90) | 50(90) | 50(90) | 50(90) | 50(90) | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | | |
| | 常用可能pH | [-] | 2~11 | 2~11 | 3~9 | 3~9 | 3~10 | 4~11 | 4~11 | 4~11 | 2~11 | 4~11 | 4~11 | 4~11 | 4~11 | 4~11 | 4~11 | 4~11 | | |

*1) 使用範囲の最高温度()内は、取扱書可能使用エレメントの場合
 *2) 膜材質: APA 架橋全芳香族ポリアミド; PA ポリアミド; PVA ポリビニルアルコール; SPS スルホン化ポリアミド

中空糸型中低圧RO膜モジュールの溶質除去性能例

| 代表銘柄 | DuPont | | 東洋紡 | | | | |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| | B-9 | HF Cartridge | HA | HS | HKC | HS | CM |
| モジュール外形寸法 | 102 Φx640L | 216 Φx1032L | 150 Φx1240L | 150 Φx1240L | 103 Φx880L | 150 Φx840L | 100 Φx440L |
| 膜材質 *1 | RO | RO | RO | RO | RO | NF | NF |
| 膜材質 *1 | PA | PA | CTA | PA | CTA | PA | PA |
| 溶質除去率[%] *2 | 分子量 | | | | | | |
| | NaCl | 94 | 97.3 | 94 | 94 | 94 | 25 |
| | MgCl2 | 94 | | 99 | | | 67 |
| | MgSO4 | 120 | | | 97 | 97 | 90 |
| | Na2SO4 | 142 | | | | | |
| | NH4NO3 | 80 | | | | | |
| | SiO2 | 60 | | 94 | 94 | 90 | |
| | エチルアルコール | 46 | | 20 | 20 | | |
| | イソプロピルアルコール | 60 | | | 60 | | |
| | グルコース | 180 | | | | | 90 |
| ショ糖 | 342 | | | 99 | 99 | >96 | 93 |
| 透過水量 | [m3/d] | 9.1 | 41.6 | 24 | 20 | 1.3 | 3 |
| 評価条件 | 評価液濃度 | [%] | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.05 | 0.05 |
| | 圧力 | [MPa] | 2.8 | 1.55 | 2.9 | 2.9 | 0.5 |
| | pH | [-] | | | | | 6 |
| | 温度 | [°C] | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | 回収率 | [%] | 75 | 75 | 75 | 75 | 30 |
| 使用範囲 | 最高使用圧力 | [MPa] | 2.8 | 2.8 | 3.9 | 3.9 | 0.7 |
| | 最高温度 | [°C] | 40 | 40 | 35 | 35 | 35 |
| | 常用可能pH | [-] | 4-11 | 4-9 | 3-8 | 4-10 | 3-8 |
| | 常用可能塩素濃度 | [mg/L] | | 0.0 | ≤1.0 | ≤0.5 | ≤0.5 |

*1) 膜材質 CTA: 三酢酸セルロース; PA: ポリアミド系
 *2) 除去率の算出は入口濃度基準値 除去率=[1-(透過水濃度/供給水濃度)] x100 (%)

高度処理 MAC21 等の知見によると、一般的に国内の浄水用 NF 膜としては、低分子量有機物の高い除去性が必要とされるが、硬度成分の除去性はランゲリア指数の関係等から低い方が望ましいとされている。その観点から、前述の表 4-7 のデータの整理を試みた。低分子量有機物の除去性能としては、農薬、臭気物質の分子量が 200 前後であることから、グルコース (分子量 180) の除去性能 (Rj 1) を指標とし、硬度成分の除去性能は $MgCl_2$ の除去性能 (Rj 2) を指標として、その対応関係をまとめたものが図 4-9 である。RO 膜は Rj 1 は高いものの、Rj 2 も高いことから浄水用には適していない。一方、NF 膜では、Rj 1 と Rj 2 はある程度の正の相関関係が認められるが、Rj1 が高く、Rj 2 が低い領域、すなわち高度浄水処理で要求される領域を適切にカバーする NF 膜が存在していないことがわかる。このような領域にある NF 膜が浄水用 NF 膜の開発方向の一つと考えられる。

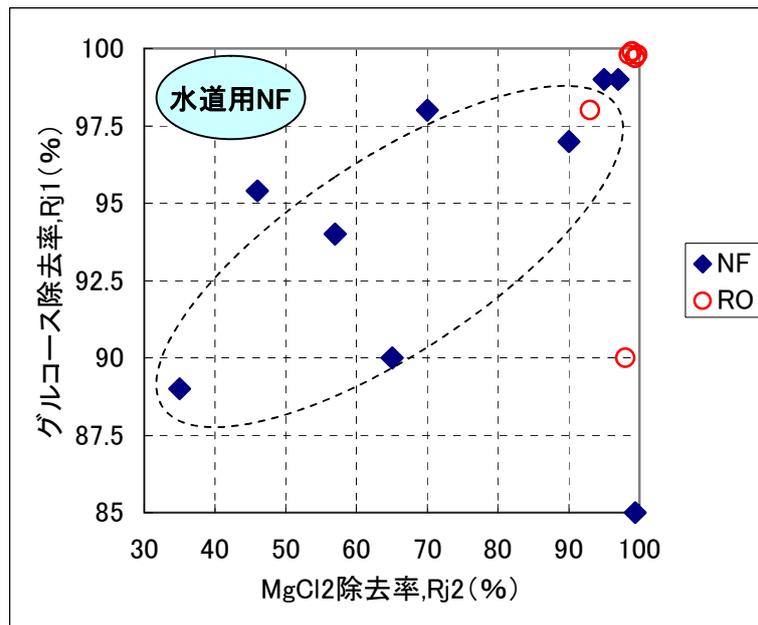


図 4-9 $MgCl_2$ 除去率 Rj2 とグルコース除去率 Rj1 との関係

② 中程度の除去特性

NF 膜の性能は除去対象物質によって異なるため、システム設計が困難となる場合があり、その結果、普及の妨げになることが考えられる。一方、RO 膜は除去率がほぼ 90 % 以上であることからシステム設計が容易である。

③ RO 膜の需要が大きい

RO 膜は NF 膜に比べ、要求特性や用途が実績に基づいて明確となっているため、水需要の増加に伴い需要が大きくなった。その結果、膜メーカーでは要求特性が明確な RO 膜の開発には開発資源を投入しやすい一方、不明確な NF 膜及び NF システムの開発は停滞傾向になったものと推察される。

2) 最近の技術開発の動向

(1) 東京都水道局による実証実験

東京都水道局研修・開発センターでは、NF を用いた浄水処理の研究を継続的に実施している。そのうちの 2 つの研究について、概略を以下に示す。

① MF膜-NF/RO膜プロセスに及ぼす前処理凝集剤の影響（平成17年度～18年度）

NF/RO膜をオゾン+生物活性炭処理の代替として用いる場合には、前処理方法の検討が課題となる。NF/RO膜の前処理方法をMF膜ろ過処理とし、その前段にインライン凝集処理を行う場合、膜のファウリング対策としてポリ塩化アルミニウムと塩化第二鉄のどちらの凝集剤が優れているかについて検討を行った。また、NF/RO膜ろ過水とオゾン+生物活性炭処理との水質を比較し、MF膜-NF/RO膜プロセスがオゾン+生物活性炭処理の代替として適用であるかを検討した。検討では、調布取水堰地点の多摩川河川水を原水とした実験を行い、以下の知見が得られた。

- ・インライン凝集処理に用いる凝集剤の比較

MF膜及びNF/RO膜のファウリング対策として、ポリ塩化アルミニウムよりも塩化第二鉄の方が優れていた。塩化第二鉄を用いた場合、1年間に1～2回の薬品洗浄頻度で安定した運転ができた。

- ・処理水質の比較

MF膜-NF/RO膜プロセスによるDOC等の有機物指標の処理性はオゾン+生物活性炭処理よりも優れており、オゾン+生物活性炭処理の代替として適用可能であることが示唆された。²⁸⁾

② NF膜処理システム構築のための調査・実験（平成22年度～23年度）

玉川浄水場の運用再開に向けた浄水技術の確立を目的として、MF膜+NF膜による浄水処理フローの長期運転における安定性と、回収率向上のためのNF膜濃縮排水の処理方法に関する調査・検討が行われている。^{注5)}

注7) 平成23年10月12日 東京都水道局 研修・開発センターへのヒアリングによる。

(2) NEDOプロジェクトの概要

「省水型・環境調和型水循環プロジェクト」水循環要素技術開発として、平成20年度から5年間のプロジェクトとしてスタートした。近年、水質に係る安全安心への要請が高まっており、今後さらに悪化する原水水質や新たな水資源の確保に対応するためには、膜利用水処理技術がすでに必須の技術となっている。しかしながら、RO膜やNF膜を用いた水処理システムは以下の課題を抱えている。

- ・原水を加圧し、分離膜を通過させる過程で、多量のエネルギーを消費すること。
- ・従来の膜素材が、殺菌や洗浄に用いる薬品への耐久性が低いこと。
- ・前処理工程にも多くのエネルギーを消費すること。

このため、従来のシステムではRO膜やNF膜を用いた水処理システムの導入に伴い、必要なエネルギーが増大することになる。この課題を解決するためには、既存の膜素材や分離システムでは限界がある。そこで、本プロジェクトでは、エネルギー消費量を50%以上削減するプロセスを確立すれば、全浄水施設に膜分離装置が普及する2030年頃において、現在と同等のエネルギー消費量で処理が可能になるとの予想から開発研究を進めている。

事業の目的は、海水淡水化、表流水・地下水の利用及び生活排水・工場排水の再利用に適用できる新素材によるRO膜及びNF膜技術、膜モジュール技術及び膜システム技術の統合による省エネルギー型の水処理分離膜技術を開発することにある。本プロジェクトの期間は5年間であり、平成24年度の最終目標は以下のとおりである。

<平成24年度のプロジェクト最終目標>

RO膜及びNF膜の開発においては、従来法に比べ、処理性能を維持・向上しつつ、膜透過加

圧エネルギー等をプロセス全体^{注6)}として50%以上削減する。さらに分離膜の細孔計測技術の開発及び標準化に向けた性能評価手法を開発する。²⁹⁾

注8)「プロセス全体」とは、当該技術を適用する反応系への流入から流出を示す。

4-2. NF膜の技術的な到達点

1) 調査目的と方法

NF膜の技術的な到達点を確認するため、まずNF膜の処理性の再評価を行うこととした。そのため、国内で行われた主要なNF浄水処理実験のデータを収集し、各水質項目の平均的な除去率をまとめた。また、その結果を高度処理(オゾン+活性炭吸着)の場合と比較し、NFの今後の応用・展開を検討する際の参考とすることとした。

調査の対象としたデータは以下のとおりである。

・JWRCプロジェクトによる長期連続実験結果

高度処理MAC21、ACT21、*e-Water*、*e-Water*Ⅱの合同実験、独自研究、持ち込み研究等^{30)~33)}

・八戸工業大学による長期連続実験結果³⁴⁾、ベンチスケール実験結果³⁵⁾

・東京都による長期連続実験結果、ベンチスケール実験結果^{36)~40)}

・JWRCプロジェクトに係るベンチスケール実験結果：高度処理MAC21のほか、基礎研究長期連続実験の補足実験等^{41)~51)}

この他に水道協会雑誌や水道研究発表会等のデータもあるが、ほとんどは前述のデータに関する発表であることから直接の調査は実施しなかった。また、諸外国の実績や実験データもあるが、国内の結果で十分と判断した。なお、高度処理(オゾン+活性炭吸着)の実績データは、東京都による実験結果⁴⁰⁾および*e-Water*Ⅱの成果を基にしたJWRC報告書⁵²⁾を参照した。

2) 調査結果と考察

表4-8は、国内におけるNF長期運転実験で得られた各水質項目の除去率実績をまとめた結果であり、除去率の高いものほど濃い緑色、低いものほど赤色に塗り分けている。また、資料の左側には、これらの結果を基に予想した高度浄水処理法として「望ましいNFの除去性能」を併記している。さらに、資料の左端には、高度処理(オゾン+活性炭吸着)の除去率実績を併記している。

表4-9は、表4-8の結果を補足するために、NF長期連続実験以外のベンチスケール実験等の結果をまとめたものである。これらの結果から、以下のことがいえる。

(1) 脱塩率55%程度のNF膜について

以下に示すとおり、有機成分がかなり良好に除去できる。

① 色度、KMnO₄消費量、TOC、E260、総THMFP、AOC、界面活性剤は良好に除去できる。

② 農薬等の化学物質も比較的良好に除去できる。ただし、分子量や荷電特性によっては除去困難な物質がある。なお、1,4-ジオキサンの除去はかなり困難である。

③ 2-MIB、ジェオスミンも比較的良好に除去されている。ただし、異臭味を完全に除去可能かどうか判断するにはデータがやや不足している。

ただし、下記のようなイオン成分等はほとんど除去できない。

④ NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、Na、Cl、K、B、Br、溶性ケイ酸等。

その他、以下のようなことがいえる。

⑤ 硬度、蒸発残留物の除去率は約 30～40 %である。

⑥ Ca、Mg の除去率は約 50 %である。

⑦ Fe、Mn、Al の除去率は約 60～80 %である。

⑧ SO₄、PO₄ の除去率は 70 %以上と高い。

(2) 脱塩率 99 %程度以上の NF 膜について

当然ながら、脱塩率 55 %程度の膜より全般的に除去率がかなり高いことが明らかである。特に、前述の③～⑥で示した各水質項目については除去率が大幅に改善され、高脱塩率の NF 膜（低圧 RO 膜）を用いれば異臭味や NO₃-N をかなり良好に除去できることが推定される。ただし、当然ながら④の Na、K など、⑤、⑥の硬度発現物質については、浄水にしては除去され過ぎとなっている。

(3) 高度処理実績との比較

以上の結果を総合的に判断し、表 4－8 の左端に示した高度処理の実績と比較すれば以下のようことが推定される。

- ・高度処理の主な目的は異臭味、化学物質、NH₄-N のほぼ完全な除去、及び色度等に代表される一般有機成分とこれに伴う THMFP の低減にある。
- ・この高度処理の能力を NF 膜で置き換えることを考えた場合、表 4－8 左側の「望ましい NF の除去性能」に示したように、脱塩率 60 %程度の膜では異臭味が除去率 50～70 %程度、NH₄-N や NO₃-N は除去率 10 %程度にとどまる。
- ・一方、脱塩率 90 %程度以上の膜では、異臭味の除去率が 70～90 %程度に、NO₃-N の除去率が 50～70 %程度に向上する可能性がある。
- ・いずれにしても、適切な造水コストとエネルギー消費の範囲内で、これらの物質を除去し得る NF 膜の選択もしくは新膜の開発が望まれる。

図 4－10 は、以上の推定結果を丹保⁵³⁾、渡辺⁵⁴⁾による水質変換マトリックスに当てはめ、浄水処理（特に高度浄水処理）における各物質と適用可能な処理プロセスとの関係を図化したものである。これより、以下のことが推定される。

- ・図の緑色が濃い領域ほど脱塩率 60 %程度の NF でも処理性が高い物質の領域を示している。
- ・逆に、赤色が濃いほど脱塩率 60 %程度の膜では除去困難な物質であるが、脱塩率 90 %程度の膜を用いれば除去率が向上する可能性のある物質である。
- ・図には、高度処理（オゾン＋活性炭吸着(BAC)）で対応除去している物質の範囲も破線で示している。これに対して、やや高脱塩率の膜もしくは何らかの機能性を付加した膜を選択あるいは開発すれば、NF が現行の高度処理の守備範囲もしくはそれ以上をカバーし得る可能性を持っていることが推定される。

表4-9 NF膜ベンチスケール等の実験によるNF膜の除去率の実績
(JWRCプロジェクト、東京都ほかのデータより)

| 1 | 高度MAC21合同実験で臭気物質添加; 前処理UF、ジェオスミンと2-MIB混合添加、低濃度:各50ng/L、高濃度:各500ng/Lで除去率検討 1995.11.15~11.22 東レNF(55%) | <ul style="list-style-type: none"> 低濃度実験:水回収率98%: 2-MIB 85%、ジェオスミン 66%、臭気強度 87% 高濃度実験:水回収率96%: 2-MIB 94%、ジェオスミン 87%、臭気強度 88% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---|---|------|--------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------|---|----|----|----|-----|-----|--------|----|----|----|----|-----|-----|-------|---|----|----|----|-----|-----|-------|---|----|----|----|-----|-----|------|----|----|-----|----|-----|-----|-------|----|----|----|----|-----|-----|------|----|----|----|----|-----|-----|-----------|----|----|----|----|-----|-----|-----------|----|----|----|----|-----|-----|------|----|----|-----|----|-----|-----|
| | 1996.1.29~2.2 日東電工NF(92%) | <ul style="list-style-type: none"> 水質基準の準達成は困難、運転条件の変更必要 低濃度実験:水回収率92%: 2-MIB 99%、ジェオスミン 99%、*臭気強度 86% 高濃度実験:水回収率94%: 2-MIB 100%、ジェオスミン 99%、*臭気強度 82% 水質基準満足 (*処理水/供試水、他は処理水/膜入口) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 高度MAC21合同実験で農薬4種類添加; 前処理UF、水回収率90%で除去率検討 1995.11.27~12.1 東レNF(55%) | <ul style="list-style-type: none"> シマジン69%、チオベンカルブ49~61% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1996.2.5~2.9 日東電工NF(92%) | <ul style="list-style-type: none"> シマジン99%、チオベンカルブ99%、1,3-ジクロロプロペン51~25%、チウラム77%~ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 高度MAC21合同実験でフミン、消毒副生成物9種類添加; 前処理UF、水回収率90%で除去率検討 1995.12.4~12.8 東レNF(55%) | <ul style="list-style-type: none"> 消毒副生成物添加(質基準の100%、400%濃度) フミン添加(TOCで5mg/L) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1996.2.13~2.16 日東電工NF(92%) | <ul style="list-style-type: none"> フミン添加(TOCで5mg/L) 消毒副生成物添加(質基準の100%、400%濃度) トリハロメタン生成能: NFによりほぼ除去可能。日東電工>東レ ホルムアルデヒド、ジクロロアセトニトリル: 除去困難。7%、17% ホルムアルデヒド生成能: 東レ76%、日東100 → 69% ジクロロ酢酸生成能、抱水クロラール生成能: 東レ・日東100% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 高度MAC21 パッチ試験による有機物質処理性評価(公衆衛生院); 平膜11種類、中空糸3種類 1996.3報告 操作圧、分子量分画特性、フミン酸除去性、農薬・臭気物質除去性を実験 | <ul style="list-style-type: none"> フミン系有機物: 80~90%以上。低分子の除去性は分子量依存の傾向 農薬: 物質による違いが大 2-MIB: 膜により異なり 65~95% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 高度MAC21独自実験(ユニチカ); 淀川表流水、前処理UF0.01 μm、水回収率85%。水質総括表がないが除去率は下記 1995.6~1996.12 SU-610 | <ul style="list-style-type: none"> 色度成分 100% E260、THMFP 80~90% TOC、KMnO₄消費量 60%前後 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | ACT21 第3研究グループ 給水管末端ルーゾRO膜処理(前澤工業); 原水は水道水、ホリエーテルスルホン系3種(脱塩率10、30、50%) 1997~5年間 | <ul style="list-style-type: none"> TOC除去率: 脱塩率10%膜で15%、30%膜で35%、50%膜で50% Al除去: 脱塩率50%膜で定量下限値以下 トリハロメタン除去性: 脱塩率50%膜でも低い | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | ACT21 第3研究グループ 安定運転性研究(東レ); 埼玉県庄和浄水場凝集沈殿水、前処理UF0.01 μm or 砂ろ過、回収率60~90% 2001.3~2002.3 | <ul style="list-style-type: none"> トリハロメタン生成能: 水質基準の1/10以下に低減 AOC除去率: 85% HPC(従属栄養細菌数): 凝集沈殿水や砂ろ過水の1/100以下 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | e-Water 基礎研究 定容量回分試験による農薬・フェノール・フタル酸エステル類の除去率(八戸工大); 純水に添加、膜4種、27物質 2002~2004 | <ul style="list-style-type: none"> 結果は略: e-Water基礎研究報告書H17.3、JWRC 物質分子量と膜孔径について考察。ただし物質性質により除去率に差異ありそう | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | e-Water II 基礎研究 定容量回分式・クロスフロー式試験による農薬の除去率(八戸工大); 純水に添加、膜2種、7物質。色度成分共存も 2005~2007 | <ul style="list-style-type: none"> 結果は略: e-Water II基礎研究報告書H20.3、JWRC 色度成分共存下で農薬除去率がやや増加 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | e-Water II 持ち込み研究 ユースポイントNF処理(日立プラント、前澤工業、東洋紡); 日立森山浄水場浄水+臭気物質 2006.11~2008.3 3酢酸セルロース膜 | <ul style="list-style-type: none"> 2-MIB、ジェオスミン: 原水20ng/L以下 → ろ過水1ng/L以下(基準の1/10以下) 原水20~120 → 2-MIB 75%以上、ジェオスミン85%以上の除去 THM 0% THMP: 20~80% TOC: 常時0.3mg/L以下 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 東京都 平膜テストセル実験 膜10種類に対して阻止率を検討; 多摩川河川水、1 μmろ過+NH ₄ Cl溶解。阻止率%は下記 2007年度 | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NO₃-N</th> <th>UV260</th> <th>Ca硬度</th> <th>Cl⁻</th> <th>圧力MPa</th> <th>流速m/d</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>UTC-60</td> <td>0</td> <td>49</td> <td>68</td> <td>29</td> <td>0.5</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>UTC-20</td> <td>38</td> <td>90</td> <td>88</td> <td>47</td> <td>0.5</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>NF200</td> <td>0</td> <td>95</td> <td>71</td> <td>37</td> <td>0.5</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>NF産業用</td> <td>0</td> <td>96</td> <td>75</td> <td>43</td> <td>0.5</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>NF90</td> <td>78</td> <td>96</td> <td>100</td> <td>94</td> <td>0.5</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>LES90</td> <td>80</td> <td>95</td> <td>99</td> <td>92</td> <td>0.5</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>ES20</td> <td>96</td> <td>95</td> <td>71</td> <td>98</td> <td>0.5</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>NTR-729HF</td> <td>38</td> <td>88</td> <td>81</td> <td>67</td> <td>0.9</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>NTR-759HR</td> <td>97</td> <td>90</td> <td>99</td> <td>97</td> <td>0.9</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>LF10</td> <td>96</td> <td>95</td> <td>100</td> <td>99</td> <td>0.9</td> <td>0.9</td> </tr> </tbody> </table> | | NO ₃ -N | UV260 | Ca硬度 | Cl ⁻ | 圧力MPa | 流速m/d | UTC-60 | 0 | 49 | 68 | 29 | 0.5 | 1.4 | UTC-20 | 38 | 90 | 88 | 47 | 0.5 | 1.4 | NF200 | 0 | 95 | 71 | 37 | 0.5 | 0.7 | NF産業用 | 0 | 96 | 75 | 43 | 0.5 | 0.9 | NF90 | 78 | 96 | 100 | 94 | 0.5 | 1.3 | LES90 | 80 | 95 | 99 | 92 | 0.5 | 1.4 | ES20 | 96 | 95 | 71 | 98 | 0.5 | 0.7 | NTR-729HF | 38 | 88 | 81 | 67 | 0.9 | 1.1 | NTR-759HR | 97 | 90 | 99 | 97 | 0.9 | 1.1 | LF10 | 96 | 95 | 100 | 99 | 0.9 | 0.9 |
| | NO ₃ -N | UV260 | Ca硬度 | Cl ⁻ | 圧力MPa | 流速m/d | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| UTC-60 | 0 | 49 | 68 | 29 | 0.5 | 1.4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| UTC-20 | 38 | 90 | 88 | 47 | 0.5 | 1.4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NF200 | 0 | 95 | 71 | 37 | 0.5 | 0.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NF産業用 | 0 | 96 | 75 | 43 | 0.5 | 0.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NF90 | 78 | 96 | 100 | 94 | 0.5 | 1.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LES90 | 80 | 95 | 99 | 92 | 0.5 | 1.4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ES20 | 96 | 95 | 71 | 98 | 0.5 | 0.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NTR-729HF | 38 | 88 | 81 | 67 | 0.9 | 1.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NTR-759HR | 97 | 90 | 99 | 97 | 0.9 | 1.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LF10 | 96 | 95 | 100 | 99 | 0.9 | 0.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 八戸工大受託研究 クロスフロー式実験によるNO ₃ -N除去; 純水に添加、膜10種類、除去率と流速の関係検討、圧力0.35MPa 2010~継続中 | <ul style="list-style-type: none"> ES10・20・40: 除去率90~100%、流速約0.6m/d UTC-60: 除去率60~80%、流速約0.7m/d LES90: 除去率80~95%、流速約1.5m/d、今のところベスト | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

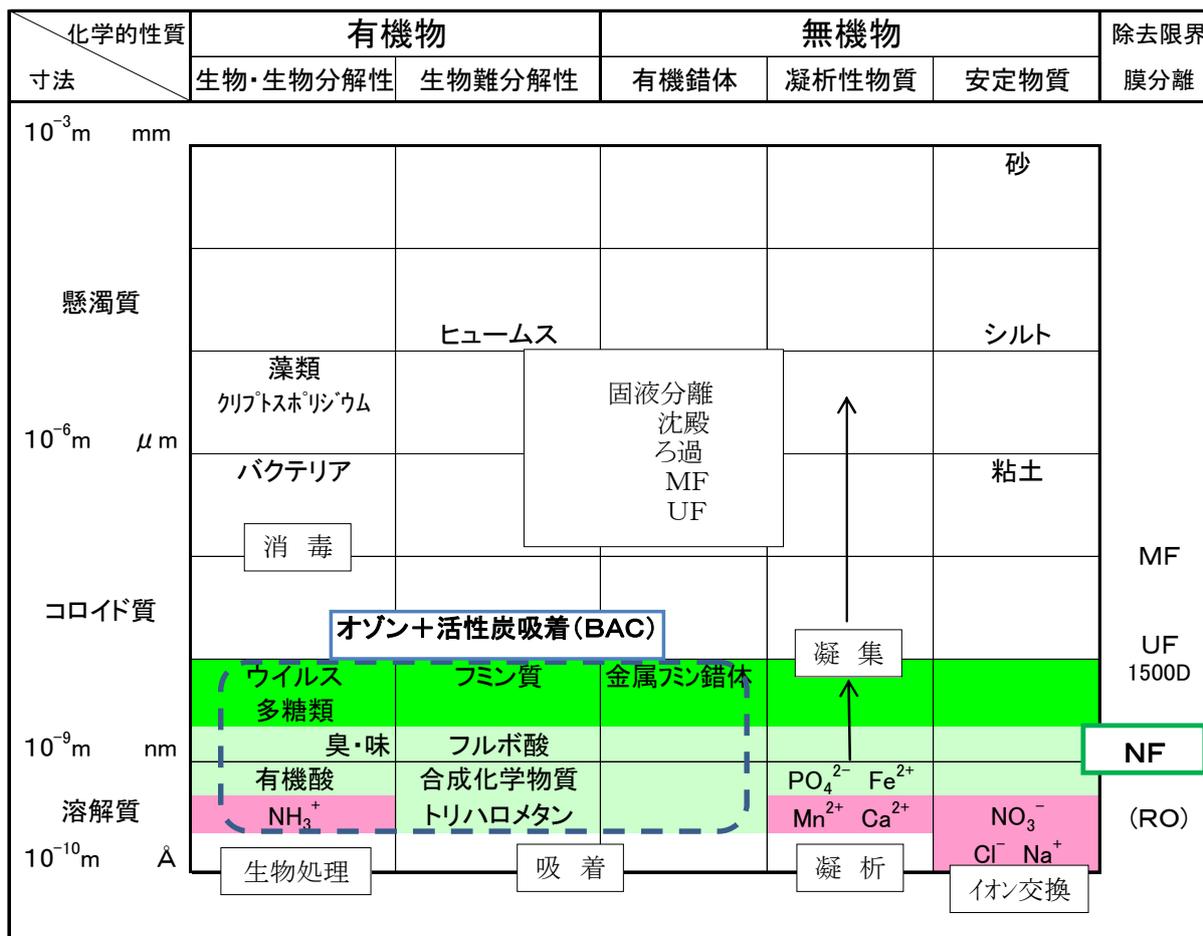


図4-10 水質変換マトリックス（浄水処理）

注 11) ・原図は丹保・渡辺による

- ・物質名は代表的なものとし、最小寸法と思われる位置に記入
- ・MFまたはUF膜+活性炭吸着などのハイブリッド処理は省略
- ・図中の色付け部分は、タイプ I（脱塩率60%程度）のNF膜による除去率
凡例およびタイプ II（脱塩率90%程度）の膜を用いた場合の予想除去率は次のとおり

| 脱塩率約60% | 脱塩率約90%の膜を用いた場合 |
|---------|---|
| 90~100% | ほぼ100%にアップ |
| 70~90% | 90~100%にアップ |
| 50~70% | 70~90%程度にアップ。ただし要実証 |
| 30~50% | 50~70%程度にアップ |
| 10~30% | 30~50%程度にアップ |
| 0~10% | NO ₃ ⁻ は50~70%程度にアップ。ただし要実証 Cl ⁻ 、Na ⁺ は10~30%程度にアップ |

4-3. NF 膜の除去性確認

4-2 項において、国内で行われた主要な NF 膜による浄水処理実験のデータを収集し、各水質項目の平均的な除去率をまとめた。また、最近の情報として、東京都による長期連続実験の結果もあわせて検討した。得られた結果と課題をまとめると次のようになる。

- ① 脱塩率 60 %程度の NF 膜でも色度、TOC（全有機炭素）等の一般有機成分及び各種化学物質は十分に除去可能である。ただし、異臭味成分についてはデータ不足のために現段階では評価が難しい。また、アンモニア態窒素や硝酸態窒素については除去が困難である。
- ② NF 膜処理によって異臭味成分と硝酸態窒素までを除去しようとする場合は、脱塩率 90 %程度以上の膜もしくは何らかの機能性を追加した膜が必要であると推察される。その際、硬度成分は適宜保持できる適切な NF 膜の選択もしくは新規の膜開発が課題となる。
- ③ 当面の課題として、NF 膜による除去性評価の重点検討項目として異臭味成分及び硝酸態窒素があげられる。ベンチスケール実験及び資料調査を追加し、両成分の除去性を明らかにする必要がある。

そこで、上記③の課題を検討するため、NF 膜による異臭味成分及び硝酸態窒素の除去性、ならびに硬度成分の残存性について以下の調査を実施し、評価を行うこととした。

1) ベンチスケール実験による除去性の調査

(1) 対象 NF 膜及び実験方法

表 4-10 に、実験で用いた NF 膜の諸元を示す。

表 4-10 NF 膜の諸元

| メーカー | 製品名 | 脱塩率 (%) | 材質 |
|------|----------|-------------------|------------|
| T 社 | UTC-60 | 55 | ポリアミド系 |
| | TMN10R | 98 ^{注1)} | |
| N 社 | LES90 | 95 | |
| | KMD22 | 98 ^{注2)} | |
| | NTR729HF | 92 | ポリビニルアルコール |

注 12) 未公表のため脱塩性能を独自に評価した。(原水条件：塩化物イオン 10mg/L、0.35MPa)

注 13) 未公表ではあるがメーカーからの情報による。

図 4-11 に定容量回分式膜ろ過装置の構成を示す。本装置は、回分式セル (UHP-62 K、Advantec、セル材質：ポリサルホン樹脂、容量 220 mL、直径 5.9 cm、膜面積 27.3 cm²) 3 個及び 10L リザーバタンク (DV-10、Advantec) で構成されている。窒素ガスでタンクを加圧することにより、回分式セルに連続的に原水を供給できる定容量回分式膜ろ過装置である。

実験は、操作圧力を 0.35 MPa に設定しろ過を行い、ろ過水が 220 mL 採取された時点でろ過実験を終了し、原水、濃縮水及びろ過水を採取し分析に供した。

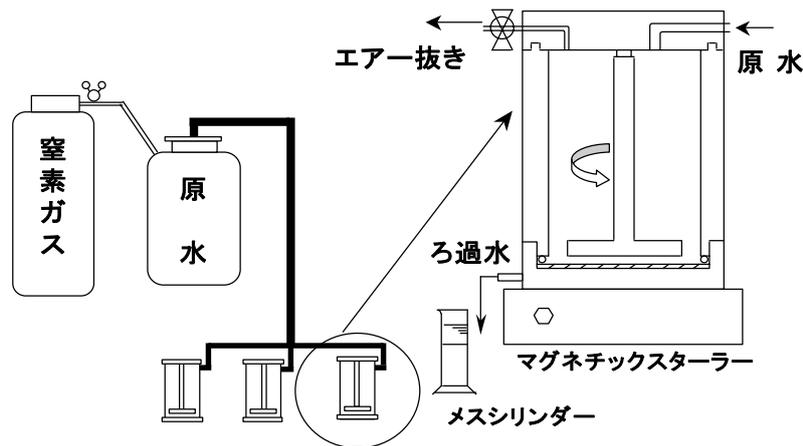


図4-1-1 定容量回分式膜ろ過実験装置

(2) 除去対象物質、原水条件及び分析方法

除去対象成分は、異臭味成分である2-MIB (分子量 168 g/mol)、ジェオスミン (分子量 182 g/mol) 及び硝酸態窒素 (硝酸イオンとして 62 g/mol) とした。原水には、共存物質の影響を検討するために純水 (対照系)、河川水及び地下水を用いた。表4-1-1に、原水水質 (調整前) を示す。原水濃度は、2-MIB 及びジェオスミン各 50 ng/L、硝酸態窒素 5~6 mg/L、及び pH を 0.1M HCl を用いて 7.0 に調整し実験に供した。異臭味成分の分析は、八戸圏域水道企業団に委託し、上水試験法に準拠したパージアンドトラップ-GCMS 法により行った。なお、河川水、地下水については、硝酸態窒素の除去実験の際に硬度成分 (総硬度) の残存性も測定した。

表4-1-1 原水水質 (調整前)

| 項目 | 単位 | 河川水 (白山浄水場 新井田川系原水) | 地下水 (三島浄水場原水) |
|--------------|---------|---------------------------|------------------|
| pH | - | 7.6 | 7.8 |
| EC | μS/cm | 190 | 337 |
| DOC | mg/l | 1.0 | 0.3 |
| E260 (1cmセル) | 1/cm | 0.024 | 0.001 |
| DOC/E260 | mg/l・cm | 40 | 300 |
| 総硬度 | mg/l | 53 | 150 |
| 硝酸態窒素 | mg/l | 1.2 | 4.5 |
| 硫酸イオン | mg/l | 10.0 | 10.8 |

異臭味成分は、比較的高濃度 (概ね 20 ng/L 以上) になるとメモリー効果により正確な測定できないため、原水及び濃縮水については濃度が 10 ng/L 程度になるように、それぞれ 5 倍及び 10 倍に希釈して測定した。希釈水には、ミネラルウォーター (Volvic) を用いた。硝酸態窒素の分析は、イオンクロマトグラフ法により行った。イオンクロマトグラフは、陰イオンカラム (Shim-pakAC-3、島津製作所)、検出器には電気伝導検出器を用いた。分析条件は、カラム恒温相 40 °C、流速 1.0 mL/min 及びサンプル注入量 50 μL で行った。移動相 (溶離液) の組成は、8 mmol/L p-ヒドロキシ安息香酸、3.2 mmol/L Bis Tris 及び 50 mmol/L ホウ酸である。総硬度は上水試験法に準拠した滴定法 (EDTA 法) により測定を行った。

(3) 除去率、物質収支の算出法

実験の評価は、除去率 [式(1)] 及び物質収支 [式(2)] で行った。物質収支は、膜に供給した除去対象成分の溶質量に対する濃縮水とろ過水中の溶質量の合計の割合と定義した。物質収支を検討することで、実験の妥当性や膜面への吸着などを判断することができる。

$$\text{除去率} = \left\{ 1 - \frac{2C_p}{C_o + C} \right\} \times 100 \dots\dots \text{[式(1)]} \quad \text{物質収支} = \frac{CV + C_p V_p}{C_o(V + V_p)} \times 100 \dots\dots \text{[式(2)]}$$

ここで、 C_p : ろ過水平均濃度 (μg/L)、 C_o : 原水平均濃度 (μg/L)、 C : 濃縮水平均 (μg/L)、 V : セル容積 (L)、 V_p : ろ過水量 (L) である。

(4) 実験結果

図4-12～図4-15に、異臭味成分(2-MIB、ジェオスミン)の除去率及び物質収支を示す。2-MIBの除去率は、すべての膜において95%以上の除去率となった。河川水及び地下水系原水を用いた実験では、除去率が若干低い傾向も見受けられるがほぼ同程度と考えられる。2-MIBの物質収支は概ね90%以上であった。実験及びサンプリング時に異臭味成分が若干揮発することも考えられるため、膜や実験装置への吸着はほとんどないと考えられる。しかし、KMD22及びNTR729HFの河川水系原水の実験では、物質収支が80～87%とやや低い。共存物質と膜材質との相互作用による吸着が考えられる。

ジェオスミンについては、2-MIBよりも除去率がやや低いが、すべての膜において90%以上の除去率となった。分子量では、ジェオスミンの方が2-MIBよりも大きいため、物理的な篩効果作用が増すと考えられたが反対の結果になった。おそらく分子量だけでは判断できない分子形状・サイズ(空間的な大きさ)や膜材質との相互作用などが影響していると考えられる。また、ジェオスミンの物質収支は、80～90%程度であり、膜や実験装置への吸着が考えられ、上記の相互作用によるものと思われる。

以上の結果から、脱塩率60%程度のNF膜でも異臭味成分の除去は充分可能であることがわかった。

図4-16～図4-17に、硝酸態窒素及び総硬度の除去率を示す。硝酸態窒素については、低脱塩NF膜(脱塩率60～92%、UTC-60、NTR729HF)では、除去率が10～40%程度であった。一方、高脱塩NF膜(脱塩率95%以上、TMN10R、KMD22、LES90)では、除去率80%以上であった。

総硬度成分(主にカルシウム及びマグネシウムイオン)については、低脱塩NF膜(UTC-60、NTR729HF)で20～30%程度残存させることが可能である。一方、高脱塩NF膜では、TMN10Rでは若干残存しているものの、ほとんどが除去されている。

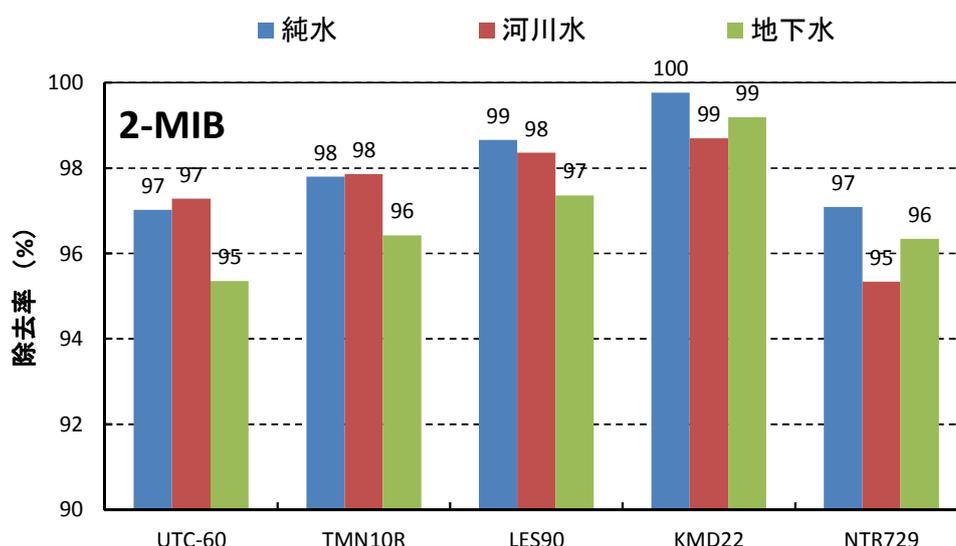


図4-12 2-MIBの除去率

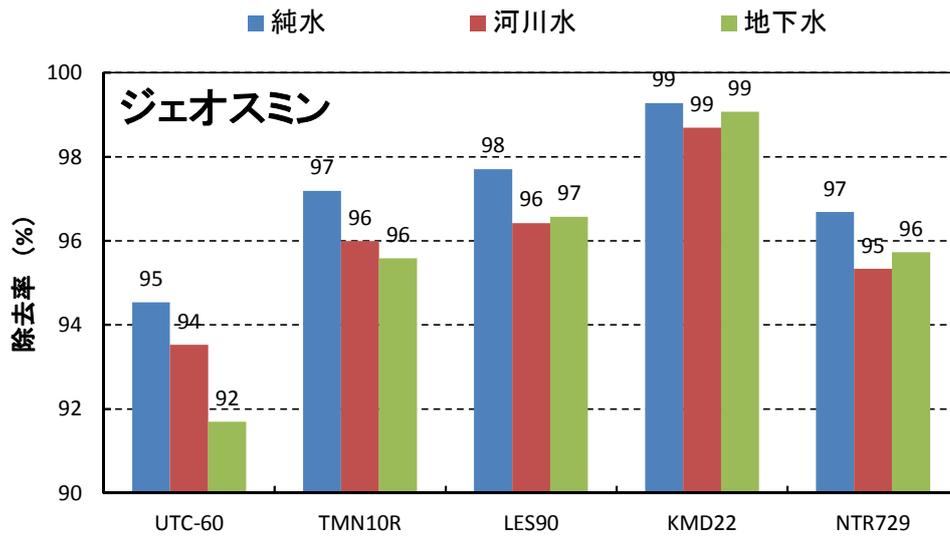


図 4-13 ジェオスミンの除去率

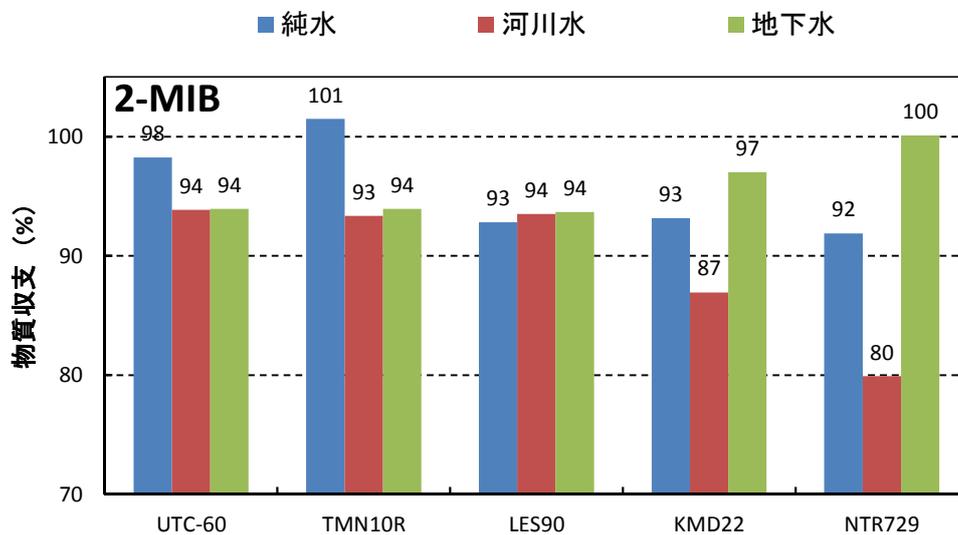


図 4-14 2-MIB の物質収支

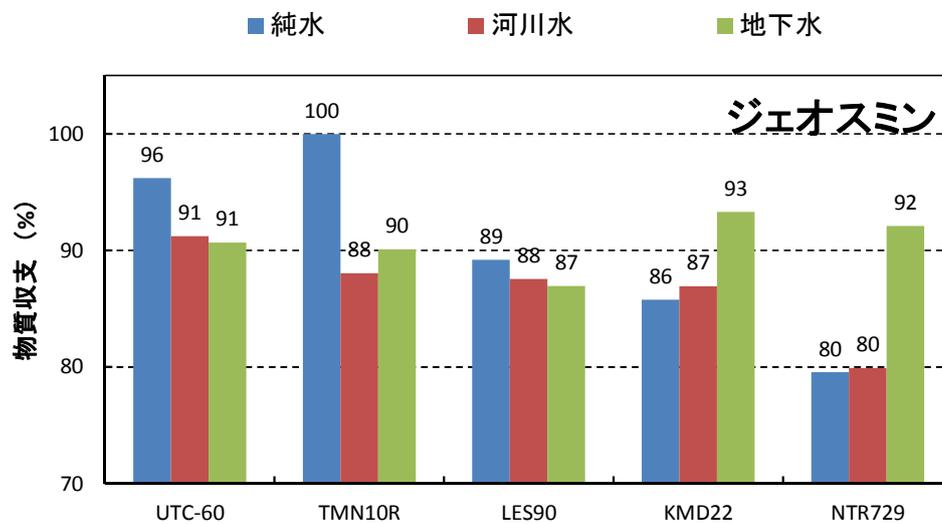


図 4-15 ジェオスミンの物質収支

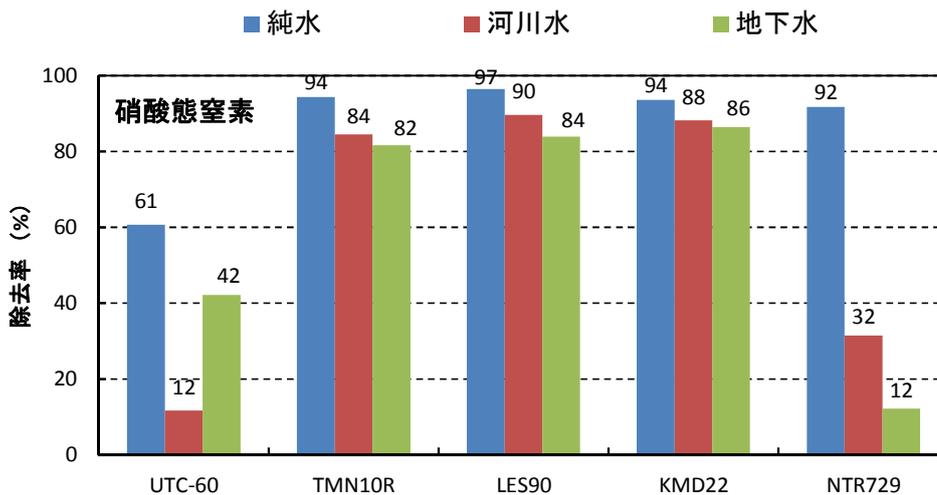


図 4-16 硝酸態窒素の除去率

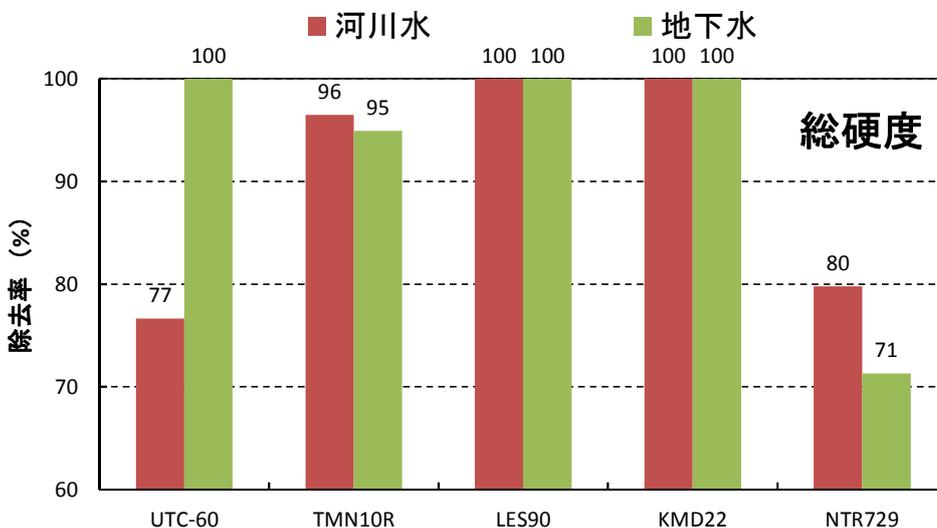


図 4-17 総硬度の除去率

2) 高度処理実証実験の調査

4-3項のベンチスケール実験に加え、埼玉県企業局による高度処理実証実験「浄水方法最適化実験調査」⁵⁵⁻⁵⁸⁾について資料調査を行い、特にNF膜処理に関する実験結果に着目することとした。

(1) 「浄水方法最適化実験調査」の概要

① 調査の目的

「調査」は、埼玉県営水道が将来にわたって安全な水を供給し続ける責務を果たすために、既に高度浄水処理が稼働している新三郷浄水場以外の4つの浄水場（以下「O、S、G、Y浄水場」という。）について、原水水質に応じた最適な浄水方法を検討し、選定することを目的とした。

本研究と直接関係する点を中心に「調査」の要点をあげると次のとおりである。

- ・調査期間は、平成21年5月～平成23年12月
- ・「主調査」として、粉末活性炭注入、オゾン+生物活性炭処理、NF膜ろ過の3方式の実証実験を行い、THM（トリハロメタン）と異臭味成分を主対象に、水質の改善効果、運転上の課題、コストを比較検討し、4つの浄水場ごとに最適な高度浄水処理方式を選定

- ・「個別調査」として、農薬類や界面活性剤、生物等の各種水質項目についても水質改善効果を総合的に判断

② 実証実験の概要

実証実験設備は O 浄水場（取水河川：荒川）に設置され、以下に示す 3 系列からなる。各系列の処理フローと特徴等は次のとおりである。

A 系（pAC）： 原水 → 粉末活性炭（連続注入）＋凝集沈殿 → 砂ろ過 → MF 膜ろ過

- ・処理水量 約 100 m³/日
- ・THM 前駆物質の除去効果が高いとされる鉄系凝集剤を使用
- ・粉末活性炭の連続注入により水質改善
- ・ろ過池からの活性炭漏出を MF 膜ろ過で除去

B 系（O₃+BAC）： 原水 → 凝集沈殿 → 砂ろ過 → （促進酸化）＋オゾン＋
生物活性炭処理（2 系統） → 砂ろ過

- ・処理水量 約 50 m³/日
- ・促進酸化処理によるオゾン注入率の低減化
- ・臭素酸の抑制の検討
- ・前段砂ろ過の検討
- ・石炭系破碎炭、ヤシ殻球状炭の 2 種類を比較

C 系（NF）： 原水 → 凝集沈殿 → 砂ろ過 → NF 膜ろ過（2 系統）

- ・処理水量 約 25 m³/日×2
- ・NF により THM 前駆物質と異臭味成分を直接除去
- ・ファウリング、濃縮水処理の検討、NF 膜ろ過の前段に MF 膜ろ過を置く必要性の検討
- ・NF 膜はポリアミド製 SU-610（PA、脱塩率 55 %、操作圧力 0.35 MPa）、ポリビニルアルコール製 NTR-729HF（PVA、脱塩率 92 %、操作圧力 0.98 MPa）の 2 種類を比較
- ・モジュール構成は 4 インチエレメント×2、バンク構成は 3 バンク（2-1-2）、各モジュールの回収率 50 %、システム回収率 87.5 %

(2) 調査結果のまとめ

表 4-1 2 は、調査報告書⁵⁶⁾に記載されている THM と異臭味成分に対する各系列の水質改善効果をまとめたものである。これより、THM-FP（トリハロメタン生成能）に対して C 系（NF）では約 80～90 %の除去を期待でき、他の方式よりも優位である。また、異臭味成分 2-MIB に対して C 系（NF）は B 系（O₃+BAC）より若干劣るものの、90 %以上の除去を期待できる。なお、NF 膜の種類による差異はほとんどないが、2-MIB についてはポリビニルアルコール製膜（脱塩率 92 %）の除去率が若干高い。

また、この他の水質項目の除去率についても調査報告書中にグラフ化されており⁵⁵⁾、概略の数値を読み取ると表 4-1 3 に示すとおりとなる。総じて、各水質項目とも、C 系（NF）の除去率は B 系（O₃+BAC）のそれに勝るとも劣らない結果が得られている。

なお、C 系（NF）についてはファウリングしやすいことが指摘され、前段の砂ろ過を MF 膜ろ過に変更することによりある程度抑制できている。

表 4-12 高度処理実証実験による水質改善効果

| | | A系(pAC) | B系(O ₃ +BAC) | C系(NF) | 備考 |
|---------|----------------------------------|---|-------------------------------------|-----------|----------------------------------|
| トリハロメタン | 生成能除去率 | 粉末活性炭 10g/m ³ 63% (44%) 粉末活性炭 20 g/m ³ 77% (62%) | 滞留槽溶存オゾン 濃度 0.1mg/L 76% (60%) | 88% (77%) | 6月～9月 平均除去率 ()内は 最小除去率 |
| | 除去の安定性 | 不安定 | 安定 | 安定 | |
| | 急激な変動 | 対応困難 | 対応可能 | 対応可能 | |
| 異臭味成分 | 除去率 (2-MIB 100ng/L 添加時) | 粉末活性炭 10g/m ³ 38% (30%) 粉末活性炭 20g/m ³ 82% (63%) | 100% | 95% (92%) | 平均除去率 ()内は 最小除去率 |
| | 除去の安定性 | 不安定 | 安定 | 安定 | |
| | 急激な変動 | 対応困難 | 対応可能 | 対応可能 | |

表 4-13 高度処理実証実験で得られた除去率（平成 21 年度～22 年度の平均概略値）

| | A系(pAC) | B系(O ₃ +BAC) | C系(NF-PA) | C系(NF-PVA) |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|------------|------------|
| DOC | 50% (活性炭 10mg/L) | 50% | 95% | 95% |
| E260 | 70% (活性炭 10mg/L) | 80% | 95% | 95% |
| THM-FP | 70% (活性炭 10mg/L) | 80% | 95% | 95% |
| ジエオキシ(高水温時) (低水温時) | 95% 80% (活性炭 20mg/L) | 100% 95% | 95% 97% | 97% 97% |
| 2-MIB (高水温時) (低水温時) | 90% 65% (活性炭 20mg/L) | 100% 85% | 95% 97% | 97% 97% |
| モリネート | 99% (活性炭 10mg/L) | 100% | 99% | 99% |
| ブロモブチド | 80% (活性炭 10mg/L) | 100% | 98% | 99% |
| メフェナセット | 90% (活性炭 10mg/L) | 100% | 95% | 90% |
| 1,4-ジオキサン | — | 75% 90% (促進酸化) | 30% | 30% |
| 陰性界面活性剤 | 75% (活性炭 10mg/L) | 90% | 90% | 95% |

注 14) THM-FP については表 4-12 の除去率と若干異なるが、調査対象の期間が異なるためと思われる。

4-4. NF膜による処理コスト

1) ケーススタディによる高度処理とのコスト比較

NFを適用した浄水場の動力原単位及びランニングコストのケーススタディを以下のとおり行った。ケーススタディでは、凝集沈殿+急速ろ過+オゾン+活性炭(BAC)を処理フローとした2つの浄水場をモデルとし、おのおのの浄水場について、オゾン+活性炭(BAC)処理をNFに置き換えた場合と、それに加え、さらに凝集沈殿+急速ろ過をMFに置き換えた場合について、試算を行なった。

(1) コスト原単位

調査によって得られた実績値を参考とし、コスト原単位を表4-14～表4-15のとおり設定した。なお、活性炭の価格は、過去5年で約1.3倍に上昇している。これは、木質系活性炭では、東南アジアでの伐採規制、バイオマス資源としての使用量増加や中国、東南アジア及び欧州での需要増加による原料価格の高騰が影響している。同様に石炭系活性炭でも、中国による旺盛な需要や良質な石炭の確保が困難になっていることから原料価格が高騰している。

表4-14 A 浄水場コスト原単位

| 項目 | コスト原単位 | 備考 |
|--------------|----------------------------|-----------|
| 消毒剤 | 0.58 円/m ³ | 製造次亜+購入次亜 |
| 凝集剤 | 0.33~0.4 円/m ³ | |
| アルカリ剤 | 0.16~0.28 円/m ³ | |
| 酸剤 | 0.03~0.07 円/m ³ | |
| 粒状活性炭 | 0.57~0.62 円/m ³ | |
| 電力費 | | |
| 導水 | 0.62 円/m ³ | |
| 凝集沈殿+急速ろ過 | 0.77 円/m ³ | |
| オゾン+活性炭(BAC) | 1.01 円/m ³ | |
| 送配水 | 1.07 円/m ³ | |
| 電力費 計 | 3.47 円/m ³ | |

表4-15 B 浄水場コスト原単位

| 項目 | コスト原単位 | 備考 |
|--------------|----------------------------|------|
| 消毒剤 | 0.16 円/m ³ | 液体塩素 |
| 凝集剤 | 0.33~0.4 円/m ³ | |
| アルカリ剤 | 0.16~0.28 円/m ³ | |
| 酸剤 | 0.03~0.07 円/m ³ | |
| 粒状活性炭 | 0.57~0.62 円/m ³ | |
| 電力費 | | |
| 凝集沈殿+急速ろ過 | 0.9 円/m ³ | |
| オゾン+活性炭(BAC) | 0.56 円/m ³ | |
| 送配水 | 1.40 円/m ³ | |
| 電力費 計 | 2.86 円/m ³ | |

(2) 試算方法

オゾン+活性炭（BAC）処理をNFに置き換えた場合をケース1、それに加え、さらに凝集沈殿+急速ろ過をMFに置き換えた場合をケース2とし、A及びB浄水場をモデルとした動力原単位及びランニングコストの試算を行なった。凝集沈殿+急速ろ過のMFへの置き換えについては、調査から得られた膜ろ過施設 40,000 m³/日の動力原単位及び神保による試算⁵⁹⁾（膜ろ過施設 10,000 m³/日、膜ろ過、薬品注入及び濃縮・機械脱水設備）を基に 0.3 kWh/m³とした。これらの結果を用いてA及びB浄水場の浄水処理量に応じた電力費等を算出した。

図4-18に、IMSDesignを用いて試算したシステム回収率と動力原単位の関係を示す。当然ながら、回収率が高いほど動力原単位は低下し、NF膜モジュールのバンク数が多いと動力原単位が高くなる傾向にある。しかし、回収率90%で2バンクと4バンクの動力原単位の差は0.02 kWh/m³程度でありほとんど変わらないという結果になった。また、オゾン+活性炭（BAC）処理による動力原単位は0.086（A浄水場）～0.095（B浄水場）kWh/m³であり、NFに置き換えた場合でもその差は0.05 kWh/m³であった。

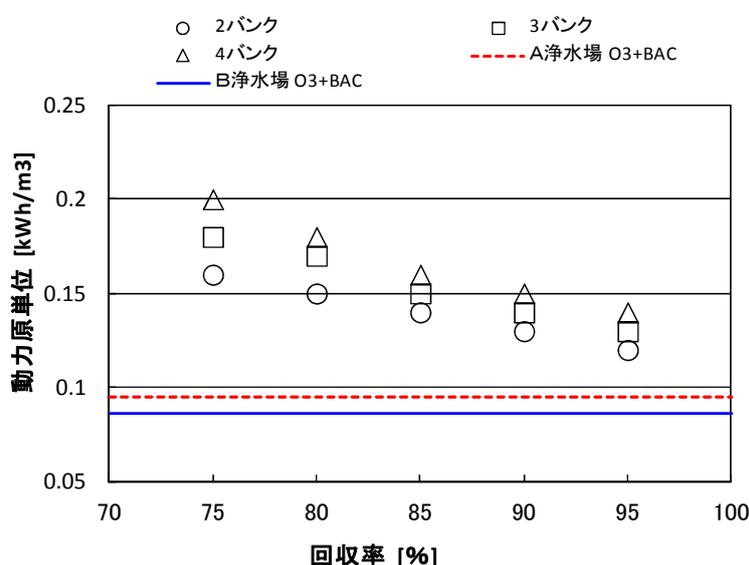


図4-18 NF膜処理システムの動力原単位の試算

(3) 試算結果

図4-19～4-22に、動力原単位及びランニングコストの試算結果を示す。試算では、システム回収率90%、NF膜モジュール3バンクにおける動力原単位0.14 kWh/m³を用いた。

動力原単位の試算では、A、B浄水場で、ケース1の場合、それぞれ凝集沈殿+急速ろ過+オゾン+活性炭（BAC）処理の1.1倍、1.3倍となった。さらにケース2ではそれぞれ1.9倍、2.5倍となった。また、ランニングコストの試算では、A、B浄水場で、ケース1の場合、それぞれ1.2倍、1.7倍となり、さらにケース2では、それぞれ1.4倍、2.0倍となった。これらの試算結果から、凝集沈殿+急速ろ過からMFへの置き換えにより、動力原単位及びランニングコストが全体的に増加することがわかる。このように、オゾン+活性炭（BAC）処理のNFへの置き換えは、技術開発によるさらなる省力化の実現によって十分な可能性があると考えられる。

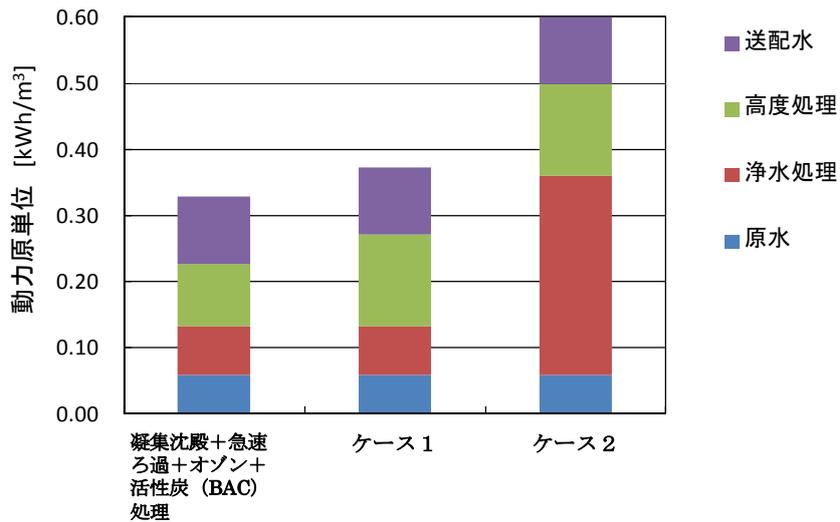


図 4-19 A 浄水場の動力原単位試算結果

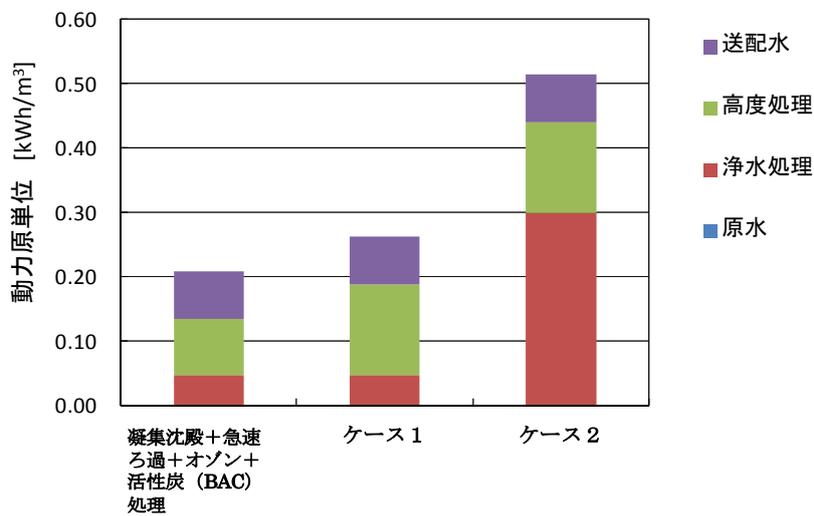


図 4-20 B 浄水場の動力原単位試算結果

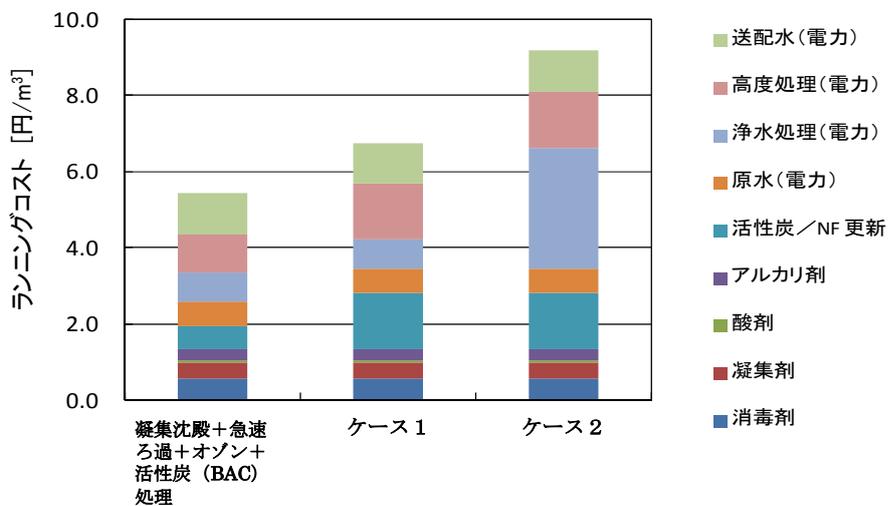


図 4-21 A 浄水場のランニングコスト試算結果

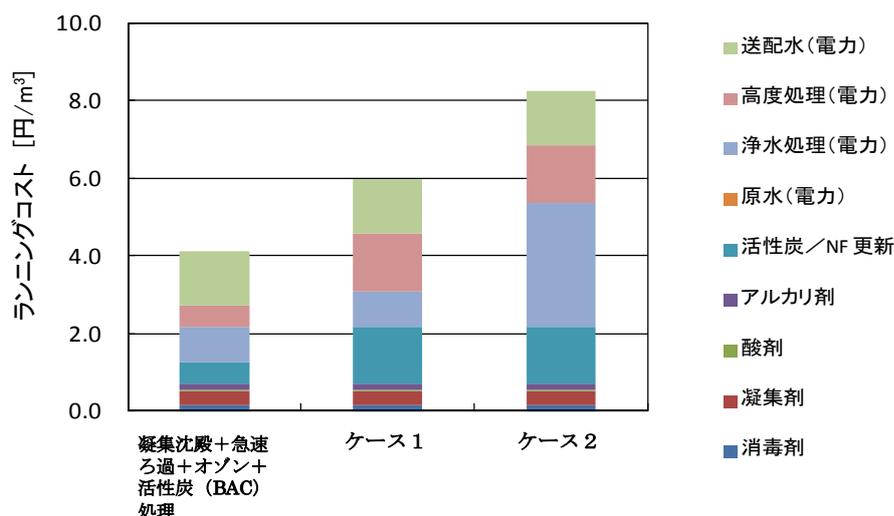


図4-22 B浄水場のランニングコスト試算結果

2) 事例等の調査によるコストの考察

NF膜処理を本格的に導入した浄水場の事例はほとんどなく、コストを具体的に求めることは困難である。そこで、既存の実証実験報告書や研究論文等から、高度浄水処理、逆浸透ろ過膜（以下「RO膜」という。）による海水淡水化、精密ろ過膜又は限外ろ過膜（以下「MF/UF膜」という。）による浄水処理のコストを調査し、これらを参考にNF膜処理のコストを考察した。

(1) 高度浄水処理のコスト

4-3項で述べた埼玉県企業局による高度処理実証実験「浄水方法最適化実験調査」⁵⁵⁻⁵⁸⁾について、コストに関する資料調査を行った。表4-15は、O、S、G、Yの4つの浄水場をモデルとし、A~C系の処理フローを適用した場合のコスト試算結果をまとめたものである。調査報告の結論としてまとめられた「提言書」⁵⁸⁾では、このコスト試算及び4-3項で述べた水質の改善効果、運転上の課題について総合的な比較を行い、4つの浄水場すべてについて、オゾン+生物活性炭処理または粉末活性炭（常時注入）が最適な浄水方法として選定されている。なお、C系（NF）については、コストが高いとして選定されていないが、表4-15に注記したとおり、試算の基となるデータが不足しているため、本試算結果はあらためて精査する必要がある。

表4-15 各浄水場をモデルとしたコスト試算結果⁵⁵⁾⁻⁵⁷⁾

| 試算モデルとした施設 | 試算項目 | 単位 | A系 (pAC) | B系 (O ₃ +BAC) | C系 (NF) | 有収水量 (m ³ /日) |
|------------|-------|------|----------|--------------------------|---------|--------------------------|
| O浄水場 | 建設費 | 億円 | 22.7 | 395 | 3,036 | 818,277 |
| | 維持管理費 | 億円/年 | 33.3 | 9.9 | 39 | |
| S浄水場 | 建設費 | 億円 | 4.3 | 106 | 818 | 196,606 |
| | 維持管理費 | 億円/年 | 10 | 2.2 | 9.8 | |
| G浄水場 | 建設費 | 億円 | 3.5 | 152 | 1,168 | 344,332 |
| | 維持管理費 | 億円/年 | 5.4 | 3.8 | 15.9 | |
| Y浄水場 | 建設費 | 億円 | — | 46 | 350 | 121,168 |
| | 維持管理費 | 億円/年 | — | 1.3 | 5.3 | |

注15) A系はO浄水場のドライ炭設備を基に試算。

B系は新三郷浄水場高度浄水施設の実績を基に試算。

C系は実績データがないため小型実験での想定システムからの外挿値。

表4-15をもとに、B系の処理フロー（オゾン+生物活性炭処理）について、建設費を有収水量で除した造水量1 m³当りの建設費及び年間の維持管理費を有収水量で除した造水量1 m³当りの維持管理費を表4-16に示す。試算の結果、4つのモデルにおけるおおよそのコストは、建設費4万～5万円/m³、維持管理費3円/m³となる。

表4-16 オゾン+生物活性炭処理のコスト試算結果

| 試算モデル とした施設 | 試算項目 | 単位 | B系 (O ₃ +BAC) |
|----------------|-------|------------------|-----------------------------|
| O浄水場 | 建設費 | 円/m ³ | 48,272 |
| | 維持管理費 | | 3 |
| S浄水場 | 建設費 | | 53,915 |
| | 維持管理費 | | 3 |
| G浄水場 | 建設費 | | 44,143 |
| | 維持管理費 | | 3 |
| Y浄水場 | 建設費 | | 37,964 |
| | 維持管理費 | | 3 |

(2) RO膜による海水淡水化のコスト

RO膜による海水淡水化施設については、世界的な普及や技術革新による膜の価格低下、透水性能の向上等により、当初に比較して造水コストが低下している。建設費は立地条件や設備規模等によって大きく異なるが、海外の事例では8.5万～17万円/m³（1US\$=110円とした場合）程度と推定されている⁶⁰。また、運転費については、近年の回収率向上（50～60%）やエネルギー回収システムの適用により、国内では170円/m³以下と予想され、海外では施設の立地条件や設備の仕様にもよるが、すでに65～130円/m³までに到達している。50,000 m³/日規模の海水淡水化施設における造水コスト試算例を表4-17に示す。この例では、建設費が20万円/m³、運転費が約90円/m³となっている。

表4-17 RO膜による海水淡水化施設（50,000 m³/日規模）の造水コスト試算例⁶¹

| 試算条件 | | 試算結果 | | | |
|------|--------------------------|-------------|----------------------------|-----------|------|
| 項目 | 使用数値 | 項目 | コスト (円/m ³) | 割合 (%) | |
| 生産水量 | 50,000 m ³ /日 | 運 転 費 | 電気代 | 60.0 | 41.5 |
| 回収率 | 50% | | 膜代 | 4.6 | 3.2 |
| 稼働率 | 95% | | 薬品代 | 8.8 | 6.1 |
| 原単位 | 5 kWh/m ³ | | 補修費 | 5.8 | 4.0 |
| 電気代 | 12円/kWh | | 労務費 | 9.8 | 6.8 |
| 膜交換率 | 年10% | | 小計 | 89.0 | 61.6 |
| 建設単価 | 20万円/(m ³ /日) | 設備償却費 | 55.6 | 38.4 | |
| 耐用年数 | 15年 | 合計 | 144.6 | 100 | |
| 利子率 | 5% | | | | |

(3) MF/UF膜による浄水処理のコスト

JWRCによる研究開発プロジェクト「環境影響低減化浄水技術開発研究（e-Water）」において取りまとめられた「大規模膜ろ過施設導入技術資料」⁶²では、MF/UF膜による膜ろ過浄水場に

ついて、規模として 50,000 m³/日、100,000 m³/日、200,000 m³/日のモデルケースを想定し、コストを試算している。そのうち、原水水質条件を「濁度が常時 5 度程度、有機物等が 5 mg/L 程度、降雨時には濁度が 50 度程度まで上昇、高濁度の継続時間は 24 時間程度、出現率は年 3 回程度」、薬品洗浄条件を「年 1 回と年 3～4 回」と想定したケース（「供給水②」）では、表 4-18、表 4-19 に示すとおり、給水量 1 m³ 日当りの総建設費（設備費＋建屋建設費）はおおよそ 5～10 万円/m³、維持管理費はおおよそ 2～10 円/m³と試算されている。

表 4-18 MF/UF 膜による膜ろ過浄水場の建設費（設備費＋建屋建設費）⁶²⁾

| | 薬洗回数 | 50,000 m ³ /日 | 100,000 m ³ /日 | 200,000 m ³ /日 |
|------|--------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 供給水① | 1回/年 | 5.1～7.5 | 4.7～6.2 | 4.5～6.1 |
| | 3～4回/年 | 4.6～5.5 | 3.8～4.5 | 3.2～4.4 |
| 供給水② | 1回/年 | 7.0～11.4 | 6.1～10.7 | 5.4～10.7 |
| | 3～4回/年 | 5.4～9.2 | 4.9～8.4 | 4.8～8.4 |

注 16) 上記単価は、すべて万円/m³である。

表 4-19 MF/UF 膜による膜ろ過浄水場の維持管理費（供給水②）⁶²⁾

| 給水量規模 | 50,000 m ³ /日 | | 100,000 m ³ /日 | | 200,000 m ³ /日 | |
|-------|--------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| 薬洗回数 | 1回/年 | 3～4回/年 | 1回/年 | 3～4回/年 | 1回/年 | 3～4回/年 |
| 動力費 | 0.66～1.50 | 0.61～1.50 | 0.66～1.50 | 0.61～1.50 | 0.66～1.50 | 0.61～1.50 |
| 薬品費 | 0.02～1.10 | 0.02～1.10 | 0.02～1.10 | 0.02～1.10 | 0.02～1.10 | 0.02～1.10 |
| 薬品洗浄費 | 0.06～0.23 | 0.11～0.44 | 0.03～0.23 | 0.09～0.44 | 0.03～0.23 | 0.09～0.46 |
| 膜交換費 | 0.96～9.10 | 0.73～6.07 | 0.95～9.10 | 0.72～6.07 | 0.95～9.10 | 0.72～6.07 |
| 合計 | 2.67～10.12 | 2.13～7.17 | 2.68～10.12 | 2.19～7.17 | 2.68～10.12 | 2.30～7.17 |

注 17) 上記金額は、すべて円/m³である。

(4) NF 膜処理の維持管理費

海外における NF 膜処理の維持管理費試算例として、Liikanen R. et al. (2006) によれば、10～13 円/m³ (1€=130 円とした場合) 程度と報告されている⁶³⁾。また、4-4 項では、NF 膜処理の動力原単位は約 0.14 kWh/m³ (条件: システム回収率 90 %、NF 膜モジュール 3 バンク) であるとの試算結果が得られたことから、動力費は 1.5 円/m³ (1 kWh=12 円とした場合) 程度と考えられる。

(5) まとめ

表 4-20 に上記(1)～(4)の調査結果をまとめて示し、NF 膜処理のコストを考察すると以下のようになる。

① 建設費

NF 膜処理の建設費に関する情報は得られなかったものの、膜面積当たりの処理水量の差から、同じ施設規模における膜面積は NF 膜のほうが RO 膜よりも小さくなる。また、海水淡水化では設備の腐食対策等が必要になるが、NF 膜処理ではこれがないため建設費は海水淡水化よりも低い。したがって、NF 膜処理の建設費は、MF/UF 膜処理と海水淡水化の間に位置する。

② 維持管理費

海外では NF 膜処理の維持管理費として 10～13 円/m³ の事例がある。一方、国内の海水淡水化では、表 4-17 に示す運転費 90 円/m³ の事例があるが、仮に電気代 60 円/m³ を NF 膜処理の試算結果である表 4-20 の動力費 1.5 円/m³ に置き換えてみると、運転費としては 30 円/m³ 程

度となる。以上のことから、NF 膜処理の維持管理費は、MF/UF 膜処理よりもやや高く、海水淡水化の少なくとも半分以下となる。

③ 高度浄水処理との比較

NF 膜処理の建設費、維持管理を推算した結果、いずれも高度浄水処理のそれらを上回る結果となった。しかし、当初に比較してコスト低下が進んでいる MF、UF、RO 膜は、今後も導入が拡大するものと考えられ、これらのさらなる普及と技術革新によって、NF 膜処理のコストについても低下が見込まれるものと考えられる。

表 4-20 コスト調査のまとめ

| 処理方式 | 建設費 (円/m ³) | 維持管理費 (円/m ³) | 備考 |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|
| 高度浄水処理(O ₃ +BAC) | 4万~5万 | 3 | 国内の高度処理実証実験 |
| RO膜による海水淡水化 | 8.5万~20万 | 65~130 | 国内外の事例 |
| MF/UF膜による浄水処理 | 5万~10万 | 2~10 | 国内の研究プロジェクト |
| NF膜による浄水処理 | — | 10~13 | 海外の事例 |
| | — | 1.5(動力費のみ) | 本研究(平成13年度)の検討結果 |

4-5. 水道の課題、高度処理導入状況等の調査

1) 気候変動の水道への影響

近年、地球温暖化による気候変動の水道に与える影響が懸念されている。降雨量の増加や豪雨、洪水の頻発による原水濁度の上昇に加え、気温上昇による影響として、藻類の異常発生によって生じる貯水池等の水質悪化、THM の生成速度増加が予想されている⁶⁴⁾。

このまま地球温暖化が進行するとすれば、特に地表水を水源とする浄水処理においては、濁度を中心とする原水水質の大きな変動のほか、藻類の影響による異臭味成分や THM-FP 等、微量有機成分の除去が課題となり、高度浄水処理の必要性が高まる可能性も考えられる。

2) 水道水質規制の動向

平成 25 年 2 月 28 日に厚生労働省が開催した平成 24 年度第 2 回水質基準逐次改正検討会において、現行では水質管理目標設定項目としている亜硝酸態窒素を水質基準項目に位置付け、評価値も現行の暫定値である 0.05 mg/L から 0.04 mg/L へ強化する方向で検討する方針を固めた。これは、内閣府食品安全委員会が行った亜硝酸態窒素の発がん性に関する評価結果が示されたことを受けたものである⁶⁵⁾。

このような、水道水質の規制強化や新たな健康被害要因物質の同定が進むことにより、高度浄水処理による対応の必要性がさらに増加する可能性も考えられる。

3) 水道用活性炭の価格動向

「平成 24 年度東京都水道局物品契約監視委員会報告書」⁶⁶⁾によると、図 4-23 に示すとおり、粒状活性炭の単価は平成 20 年度から 22 年度まではおおむね安定的に推移したが、平成 23 年度は大幅に上昇し、要因として原材料(石炭系原料)や燃料価格の上昇に影響を受けているものと考えられている。また、同様に、粉末活性炭の単価も平成 23 年度は大幅に上昇し、要因としては、福島第一原子力発電所事故を受けた放射性物質対策として東北及び関東地方において大量の活性炭が使用されたことなどにより、需給バランスが崩れたものと考えられている。

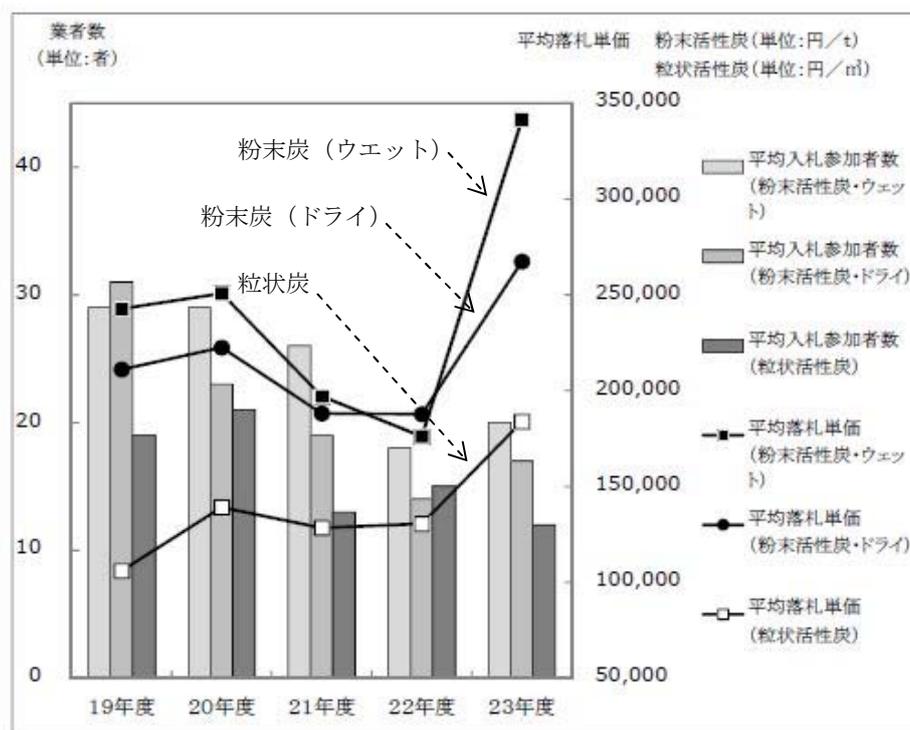


図 4-23 水道用活性炭の価格変動⁶⁶⁾
 (出典：平成 24 年度東京都水道局物品契約監視委員会報告書)

このように、水道用活性炭は、原材料の需要によって価格が大きく変動することから、今後、人口増加が予想される新興国での需要が伸びるとすれば、継続的な価格の上昇や入手の困難、それに伴う顕著な品質低下が生じ、活性炭を用いる高度浄水処理では、将来的な課題となる可能性がある。

4) 高度浄水処理の導入状況

最近の主要な浄水場整備計画について情報収集を行った。表 4-2 1 に示すとおり、調査対象としたいずれの施設においても高度浄水処理の導入が計画されており、NF 膜処理はプロセスの比較対象として挙げられることはあっても導入実績がない等の理由により採用には至っていない。

表 4-2 1 最近の主要な高度浄水処理導入計画^{67~69)}

| 事業体名 | 施設名及び施設能力 | 事業年度 | 処理フロー | 水源及び水質の課題 |
|----------|--|--------------------------|--|----------------------|
| 沖縄県企業局 | 新石川浄水場 1,929,000m ³ /日 | 平成 25 年度供用開始(平成 21 年度着工) | 既設凝集沈殿+急速ろ過の間にオゾン+粒状活性炭を追加 | ダム水 THM、TOC |
| 京都市上下水道局 | 蹴上浄水場 159,000 m ³ /日 | 平成 26 年度供用開始 | 既設凝集沈殿+急速ろ過に粉末活性炭及び粒状活性炭を追加(将来的にはオゾン+粒状活性炭を追加) | 琵琶湖疏水 異臭味成分 |
| 千葉県水道局 | 柏井浄水場 360,000 m ³ /日 (給水量ベース) | 平成 26 年度~29 年度建設工事 | 既設凝集沈殿+急速ろ過の間にオゾン+粒状活性炭+再凝集を追加 | 利根川、印旛沼 THM、異臭味成分 |

5. 浄水処理における NF 膜の新たな適用

本研究の推進に当たり、当初、水道事業体においては処理に適応した NF 膜が無いという意見があった。一方、膜の開発においては、浄水処理における課題や膜に望むものが不明確であり、方向性が定まらない状況にあった。このような背景から、浄水処理に NF 膜を本格的に導入することに関して、互いに「敬遠」あるいは「誤解」しあってきたことは否めない。このことを打破するためにも、本研究では一部実験も含めて各種の調査研究を行い、浄水処理における NF 膜の新たな適用について考察を行った。この結果を総合してまとめると以下のようになる。

1) NF 膜の除去性

4 - 3 項のベンチスケール実験の結果から、異臭味成分、硝酸態窒素に対する一定の除去性が確認された。また、高度処理実証実験の調査結果から、高度浄水処理への適用に対して充分対応できることが確認された。

2) NF 膜処理のコスト

NF 膜処理の建設費、維持管理費は、おおむね MF/UF 膜処理と RO 膜による海水淡水化の間に位置し、高度浄水処理を上回るものの、導入が拡大している MF、UF、RO 膜は、初期に比較してコスト低下が進んでいる。したがって、これらのさらなる普及と技術革新によって、NF 膜処理の造水コストについても今後の低下が見込まれるものと考えられる。

3) 膜処理（特に NF 膜）のメリット

(1) 気候変動の影響による水質変動に対して

気候変動に伴う原水水質の大きな変動や、異臭味成分、THM-FP 等、微量有機成分の増加が予想されているが、膜処理で対応する場合には、水質や水量変動への対応のしやすさや、運転管理が簡便というメリットがある。また、これまでの安全な水から安心な水の確保に一躍を担うと期待される。

(2) 水道水質規制強化等に対して

今後の水道水質の規制強化や新たな健康被害要因物質の同定が進むことにより、浄水処理での除去対象物質の増加あるいは除去レベルの厳格化が考えられる。このような場合、膜処理では、細孔による分離という原理から、物質の除去についての適用範囲が広いというメリットがある。また、高度浄水処理では今後、活性炭供給の不安定による影響が予想されるが、NF 膜処理ではそれがないこともメリットである。高度浄水処理では、各種の酸化副生成物生成の問題が伴う。これに対して、NF 膜処理では化学変化を伴わずに除去対象物質を除去するため副生成物の発生もなく、処理水に対して複雑な追加処理が不要である。また、オゾン処理では AOC（同化性有機炭素）の増加によって給排水系で従属栄養細菌の増殖ポテンシャルが高くなる可能性がある。これに対して、NF 膜処理では有機物もある程度除去するため AOC の低下につながり、細菌の増殖ポテンシャルを低下させるメリットもある。

(3) 導入・適用性の幅広さ

NF 膜処理は原理・方式がシンプルなため、小規模な処理にも適用可能であり、ローカルユースにも用いることができる。また、装置の設置も簡便・迅速なため、災害時や緊急時での使用にも適している。実例として、NF 膜処理はペットボトルの生産工程にも利用されているほか、中国の一部では NF 膜処理した直飲水道水と常用水道水を供給する二元水道でも利用されている⁷⁰⁾。

さらに、集合住宅やオフィスの施設内に設置され、浄水場から水道本管にて送水された水道水を取り込み、水道水を NF 膜によってろ過水と濃縮水に分離し、ろ過水を飲用に、濃縮水を生活用水に用いる方法も提案されている⁷¹⁾。このように、NF 膜処理方式はシンプルであるため、導入がしやすく、かつその適用範囲が広いというメリットがある。

NF 膜処理では、「全量的な処理」だけでなく「部分的な処理」も可能であり、いわゆるハイブリッド的な適用ができることもメリットである。例えば、浄水処理では NF 膜処理によっても硬度成分を適切に保持することが求められるが、4 - 3 項の結果によれば硬度成分はほとんど除去されてしまう。これを解決する一法として、真に除去対象とする成分の除去率と硬度成分の残存率とを調整しつつ、原水の一部を NF 膜処理し、別途処理したものと混合する方法もありうる。また、硝酸態窒素については NF 膜処理によっても完全に除去することは困難である。しかし、NF 膜処理を用いて 50%程度除去すれば十分に水質基準を満たすといたった原水（特に地下水）の例は多い。このように、量的にも質的にも NF 膜処理の「部分的な処理」を期待して適用しうる水道原水は少なからずあるものと考えられる。

4) NF 処理と高度処理の比較

現行の高度処理（オゾン+活性炭吸着）は十分に機能を発揮しており、特に異臭味やアンモニア態窒素の除去能が高く、浄水場への導入実績も多い。これに対して、NF も多くの利点を有しており、両者を比較すると以下ようになる。

- ・膜ろ過は分離・排除という単純な機構によるものであり、高度処理に比べて設備が比較的簡潔で運転・管理が容易であり、結果の解析や評価も容易である。
- ・高度処理では活性炭の供給不足や価格高騰が大きな懸念材料となりつつある。⁷²⁾ NF 膜は高価であるといわれてきたが、技術革新と普及により価格が大幅に下がる可能性は高い。
- ・NF は一般有機成分の除去に優れ、THM 生成の抑制に効果的である。高度処理においても同様ではあるが、活性炭吸着では吸着速度が遅く破過しやすい成分があるため対応が困難な場合がある。また、AOC 等の親水性有機成分は難吸着性であるが、NF では除去可能である。
- ・高度処理ではオゾン酸化分解による臭素酸等の副生成物の発生が懸念されるが、NF ではこれが無い。
- ・異臭味、アンモニア態窒素、一部の化学物質の除去については高度処理の方が優位と考えられるが、NF 膜の適切な選択あるいは新規開発によってある程度克服できる可能性を持っている。

5) NF 膜の課題と新展開

前述の諸点と本研究で実施した調査の結果を総合すれば、高度浄水用 NF 膜として望ましい性能は以下ようになる。

タイプ I：脱塩率 60%程度の NF 膜

一般有機成分と化学物質をほぼ除去するが、異臭味や硝酸態窒素の除去を必要としない原水に適用。ただし、透水性能、造水コスト、エネルギー消費については改良が望まれる。

タイプ II：脱塩率 90%程度又は何らかの機能性を付加した NF 膜

タイプ I の適用原水に加えて、異臭味をほぼ完全に除去し、硝酸態窒素もかなり除去する必要がある場合に適用。ただし、カルシウム、マグネシウム、硬度成分等は可能な限り温存し、透水性能、造水コスト、エネルギー消費についても適切な仕様であること。

このような性能を有する高度浄水処理に適した NF 膜仕様を新たに検討することによって、これまで利用実績が少なかった NF 膜を浄水処理へ適用できる展望が開ける可能性が出てくる。

具体的には、適用可能原水、処理水質、造水コスト、エネルギー消費等の視点から、MF/UF + NF 膜の使い方を高度処理（オゾン+活性炭吸着）と比較した上で考え、以下のような適用例への展開を図ることができるものと考えられる。

- ・全量高度処理（一元給水）：現行の高度処理に置き換わる NF 処理
- ・ローカルユース（二元給水）：給水管末端等での少量・省エネ型の NF 処理等
- ・小規模特殊利用：硝酸態窒素が高濃度な地下水の NF 処理等
- ・災害・緊急時利用ほか

6. おわりに

NF 膜による高度浄水処理の新展開の可能性を探るため、JWRC 特別研究「水道における膜利用型新技術等に関する研究」のうち「膜ろ過浄水システム高度化の研究」として、平成 23 年度から 24 年度までの 2 年間に亘って調査研究を行った。

平成 23 年度においては、現行の高度浄水処理の機能・実績と比較しつつ、NF 処理の技術開発の経過、最近の技術的な動向と到達点及び諸課題について資料調査を行った。

平成 24 年度においては、前年度の研究成果を踏まえ、NF 膜処理の除去性に関する実証実験の追加調査、異臭味成分・硝酸態窒素の除去性能に関する追加実験、造水コストに関する追加調査及び高度浄水処理に関連する社会動向等の調査を実施した上で、本研究の目標である高度浄水処理としての NF 膜処理の新たな適用について検討した。

得られた成果と課題をまとめると以下ようになる。

① NF 膜処理に関して、高度処理 MAC21 から現在までを対象に資料調査等を行い、その技術的な動向や到達点を評価するとともに、除去性能、造水コスト、社会動向との関連及び高度浄水処理へ向けた新たな適用など、NF 膜処理の研究・開発に資するための各種情報を集積することができた。

② 国内における NF 膜の長期連続実験及びベンチスケール実験のデータを再評価した結果、脱塩率 60%程度の NF 膜でも色度、TOC 等の一般有機成分及び各種化学物質は十分に除去可能である。ただし、脱塩率 60%程度の NF 膜ではアンモニア態窒素の除去は困難であり、異臭味成分と硝酸態窒素についてはデータ不足のために評価が困難であった。

硝酸態窒素をほとんど除去しようとする場合は、脱塩率 90%程度以上の膜もしくは何らかの機能性を追加した膜が必要であると推察された。その際、硬度成分は適宜残存させることができる適切な NF 膜の選択もしくは新規の膜開発が課題となるが、いずれにしても異臭味成分・硝酸態窒素の除去性と硬度成分の残存性との関係を明らかにすることが課題として残った。

③ そこで、異臭味成分と硝酸態窒素の除去性、ならびに硬度成分の残存性について、本研究独自にベンチスケール実験を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ・2-MIB については、脱塩率 60%程度の膜で 95%程度以上の除去率を期待でき、脱塩率 90%程度以上の膜でもほぼ同様の結果である。

- ・ジェオスミンについては、脱塩率 60%程度の膜では 90%程度以上、脱塩率 90%程度以上の膜では 95%程度以上の除去率を期待できる。
- ・硝酸態窒素については、脱塩率 60 %程度の膜では数 10%程度しか期待できず、脱塩率 90%程度以上の膜で 90%程度の除去率となる。
- ・硬度成分については、脱塩率 60%程度の膜では数 10%程度残存するが、脱塩率 90%程度以上の膜ではほとんど除去されてしまう。

④ 埼玉県企業局による最新の実証実験資料を追加調査した結果、NF 膜処理の除去性能について以下の点が明らかとなった。

- ・THM-FP については、NF 膜処理により約 80~90%の除去を期待でき、高度浄水処理よりも優位である。
- ・2-MIB 及びジェオスミンについては、高度浄水処理より若干劣るものの、NF 膜処理により 90%程度以上の除去を期待できる。この結果は上記 3) の実験結果とよく一致している。

⑤ NF 膜処理については、本格的な適用実績がほとんどないため、その造水コストを正確に求めることは困難である。そこで、RO 膜による海水淡水化施設及び MF/UF 膜による浄水処理施設の実績値、ならびに動力費の独自試算結果を基に考察を行った。その結果、NF 膜処理の建設費・維持管理費ともに高度浄水処理を上回る結果となった。ただし、少なくとも、高度浄水処理に比して桁違いに高いという定説はある程度覆すことができた。また、コストの低下が進んでいる MF、UF、RO 膜は、今後も導入が拡大するものと考えられ、これらのさらなる普及と技術革新によって、NF 膜処理の造水コストについても低下が見込まれるものと考えられる。

⑥ 以上の結果及び高度浄水処理をめぐる社会情勢を総合して、本研究の目標である浄水処理における NF 膜の新たな適用・展開について考察を行った。その結果、NF 膜処理は気候変動の影響による水質変動に対する安定性、水道水質規制強化等に対する適応性、導入・適用性の幅広さなど、高度浄水処理に比較して多くのメリットがあることを指摘できた。

特に、NF 膜処理は原理・方式がシンプルなため、小規模から大規模まで、全量処理・一元給水からローカルユース・二元給水まで、あるいは災害・緊急時での活用など、その適用範囲は極めて広い。また、硝酸態窒素の除去と硬度成分の保持の両立など、質・量的に部分的な処理を行って他の処理法とハイブリッド的な利用も可能である。

以上、本研究の結果によっても NF 膜処理の造水コスト・エネルギー消費・LCA に関する具体的な分析など課題は残る。しかし、NF 膜処理は原理・方式のシンプルさゆえに水道の水質・水量に関する諸課題に対して広範な対応能力を有し、水道をとりまく様々なシーンで活用できる大きな可能性を秘めている。

現時点では、造水コストは高度浄水処理を若干上回る状況にある。したがって、浄水処理への適用については、当面、凝集+沈澱+急速ろ過処理水、あるいは MF/UF 膜処理水に対し、ハイブリッド化も考慮したある一定量の処理を考えることが望ましいと思われる。いずれにせよ、本研究により、導入に対する「垣根」は低くなったと考えられ、安全で安心な水を提供する上で NF 膜を用いた新たな提案が期待される。本研究で明らかにした NF 膜処理の特性を十分に活かして、具体的な導入実績が増えてゆくことを願うものである。

【参考文献】

- 1) 膜分離技術振興協会, 浄水膜(第2版), 2008年
- 2) 新谷卓司, NF膜 水処理膜の製膜技術と材料評価, サイエンス&テクノロジー発行, 2012年
- 3) 大谷敏郎, NF膜の基礎と現状の応用例, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 1995, p.4-1
- 4) 水道技術研究センター発行, 水道膜ろ過法用語集(改訂版), 2005年2月
- 5) 水道技術研究センター監修, 膜分離技術振興協会発行, 水道用膜モジュール性能調査規定集, 1998年
- 6) 池田健一, 浄水用途での膜分離技術, 日東技報, 34, No.2, p.65, 1996年
- 7) 伊藤雅喜, 半回分式試験によるナノろ過膜の基礎的性能評価, 水道協会雑誌, 第68巻, 第12号, p.29, 1999年
- 8) 国包章一, 高度処理 MAC21 の概要と進捗状況, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 1996, p.3-1
- 9) 綾日出教, 高度処理 MAC21 の進捗状況, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 1997, p.7-1
- 10) 伊藤雅喜, 高度処理 MAC21 の成果, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 1998, p.3-1
- 11) 水道技術研究センター発行, 膜ろ過高度浄水施設導入ガイドライン(案), 1997年3月
- 12) 谷口元, 高効率浄水技術開発(ACT21)の成果と今後の展望, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2002, p.1-1
- 13) 水道技術研究センター, 高効率浄水技術開発研究 ACT21 成果報告書, 2002年7月
- 14) 水道技術研究センター, 環境影響低減化浄水技術開発研究 *e-Water* 成果報告書, 2005年
- 15) 西村和恵, ナノろ過膜浄水処理システムにおける水質予測のための実証実験手法の確立, 第55回全国水道研究発表会講演集, p.210, 2004年5月
- 16) 仲宗根盛利, 循環型ナノろ過試験装置を用いた実規模装置の性能予測に関する研究(I) —運転性能予測の検討—, 第56回全国水道研究発表会講演集, p.286, 2005年5月
- 17) 大谷務, 循環型ナノろ過試験装置を用いた実規模装置の性能予測に関する研究(II) —水質予測及び除去性能予測の検討—, 第56回全国水道研究発表会講演集, p.288, 2005年5月
- 18) 清家雅彦, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2002-1-1, *e-Water* プロジェクトの成果と膜技術の最新の情報について
- 19) 水道技術研究センター, 安全でおいしい水を目指した高度な浄水処理技術の確立に関する研究 *e-Water*II 成果報告書, 2008年
- 20) 山田雄司, NF膜を用いた高度浄水処理システムの開発, 第58回全国水道研究発表会講演集, p.208, 2007年5月
- 21) 坂元陽介, NF膜を用いた高度浄水処理システムの開発, 第59回全国水道研究発表会講演集, p.200, 2008年5月
- 22) ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 1995, s-4-3, 竹島弘昌, NF膜システムによる飲料水処理の実施例
- 23) 川崎睦男, 造水技術, Vol.30(3), p.21, 2005年, 香川県多度津町平斑浄水場高度処理施設
- 24) 久保谷隆, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2009, 3-4, 低圧 RO・NF膜による硝

酸性窒素除去設備の運転状況

- 25) 前田恭志, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2000, 6-2, NF 膜の巨大プラント
- 26) 前田恭志, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 1997, 8-3, 欧米における NF 膜の実施例
- 27) 膜分離技術振興協会, 第 8 回浄水膜セミナーテキスト, 2007 年 11 月
- 28) 森田, 佐藤, 内藤, 尾崎, 吉田; MF-NF/RO 膜プロセスに及ぼす前処理凝集剤の影響, 水道協会雑誌, 第 78 巻, 第 7 号, pp.2-12, 2009 年 7 月
- 29) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「省水型・環境調和型水循環プロジェクト研究開発項目/水循環要素技術開発/革新的膜分離技術の開発 うち NF 膜の開発」平成 21 年度～平成 24 年度のうちの平成 22 年度分中間年報
- 30) 水道技術研究センター; 第 1 回浄水技術セミナーテキスト, pp.133-149, 1997 年 9 月
- 31) 水道技術研究センター; 膜ろ過高度浄水施設導入の手引き, p.26, 2001 年 9 月
- 32) (株)西原環境衛生研究所; 高度処理 MAC21 平成 7 年度膜実証プラント独自研究実験結果報告書, pp.87-90, 1996 年 3 月
- 33) (株)荏原製作所; 高度処理 MAC21 計画平成 7 年度膜実証プラント独自実験報告書, p.8, 1996 年 3 月
- 34) 王, 福士, 佐藤; ナノろ過膜の浄水処理への適用に関する基礎的研究, 水道協会雑誌, 第 69 巻, 第 5 号, pp.35-45, 2000 年 5 月
- 35) 福士, 鈴木; NF・低圧 RO による硝酸態窒素の除去特性, 安全・安心な水道水確保のための浄水処理技術に関する調査報告書(平成 22 年度東京都水道局受託研究), pp.45-55, 2011 年 3 月
- 36) 辻, 中里; 浄水及び排水処理における膜ろ過の適応、平成 15 年度東京都水道局研究発表会論文集, pp.199-202, 2003 年
- 37) 辻, 及川, 大瀬; NF 膜における 1,4-ジオキサン等の処理性とファウリング要因等の安定運転に関する調査, 平成 16 年度東京都水道局研究発表会論文集, pp.209-214, 2004 年
- 38) 森田, 佐藤, 内藤, 尾崎, 吉田; MF 膜-NF/RO 膜プロセスに及ぼす前処理凝集剤の影響, 水道協会雑誌, 第 78 巻, 第 7 号, pp.323-333, 2009 年 7 月
- 39) Ehara K.; Comparison between Pre-Treatment Methods in Water Purification Process Using NF-Membrane, The 4th IWA-ASPIRE (2011)
- 40) 吉沢, 田中, 森田; ナノ(NF)膜による浄水処理についての研究, 平成 19 年度東京都水道局研究発表会論文集, 2007 年
- 41) 日立プラント建設(株)ほか; 高度処理 MAC21 パイロットプラント実験臭気物質添加実験報告書, p.15, 1996 年 5 月
- 42) (株)荏原製作所ほか; 高度処理 MAC21 パイロットプラント実験農薬添加実験報告書, pp.5,15, 1996 年 5 月
- 43) 神鋼パンテック(株)ほか; 高度処理 MAC21 パイロットプラント実験消毒副生成物添加実験報告書, p.17, 1996 年 6 月
- 44) 国立公衆衛生院水道工学部; バッチ試験による NF 膜の有機物質処理性評価, 高度処理 MAC21 平成 7 年度研究報告書, pp.9, 27-29, 1996 年 3 月
- 45) ユニチカ(株); 高度処理 MAC21 平成 7 年度膜実証プラント独自研究実験結果報告書, p.26,

1996年3月

- 46) 水道技術研究センター；高効率浄水技術開発研究 ACT21 成果報告書(ハイブリッド膜処理法および給水管末端でのルーズ RO 膜処理の研究, 前澤工業(株)), p.177, 2002年7月
- 47) 水道技術研究センター；高効率浄水技術開発研究 ACT21 成果報告書(NF 膜高度浄水処理プロセスの安定運転性の研究, 東レ(株)), p.272, 2002年7月
- 48) 富士；浄水処理におけるナノろ過の合理的な利用に関する研究, 環境影響低減化浄水技術開発研究(*e-Water*)基礎研究報告書, pp.135-146, 2005年3月
- 49) 富士；ナノろ過の浄水処理への適用に関する研究, 安全でおいしい水を目指した高度な浄水処理技術の確立に関する研究(*e-Water*II)基礎研究報告書, pp.93-99, 2008年3月
- 50) 水道技術研究センター；健全な水循環の形成に資する浄水・管路技術に関する研究成果報告会テキスト(NF 膜を用いた高度浄水処理システムの開発, (株)日立プラントテクノロジーほか), p.持-20, 2007年12月
- 51) 安野, 藤間, 森田；NF 膜実用化に向けた調査, 平成 20 年度東京都水道局研究発表会論文集, pp.117-122, 2008年
- 52) 水道技術研究センター；厚生労働省委託費による水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討等に関する技術資料, pp.129-146, 2009年3月
- 53) 丹保, 竹村；「人と水」今日から明日へ, p.44, (財)北海道地域総合振興機構, 2010年2月
- 54) 渡辺；最終講義資料「水処理技術の Innovation と Integration」, 2008年2月
- 55) 埼玉県企業局, 平成 21 年度浄水方法最適化実験調査報告書(概要版), 2010年9月
- 56) 埼玉県企業局, 平成 22 年度浄水方法最適化実験調査報告書(概要版), 特に pp.12-16, 2011年8月
- 57) 埼玉県企業局, 平成 23 年度浄水方法最適化実験調査報告書(概要版), 2012年3月
- 58) 浄水方法最適化実験調査検討委員会, 浄水方法最適化実験調査について [提言書], 2012年3月30日
- 59) 神保吉次, 東北大学学位論文, 限外ろ過膜による鉄マンガ含有水の浄水処理に関する研究, 1999年
- 60) 中尾真一, 渡辺義公, 膜を用いた水処理技術, シーエムシー出版, p.132, 2010年3月
- 61) 永井正彦, 岩橋英夫, 田中賢次, 特集 技術論文「逆浸透 (RO) 法海水淡水化技術の上水道分野への適用」, 三菱重工技報, 2002年 第39巻 第5号, 2002年9月
- 62) (財)水道技術研究センター, 環境影響低減化浄水技術開発研究 (*e-Water*) 大規模膜ろ過施設導入技術資料 pp.293-295, pp.299-300, 2005年8月
- 63) Liikanen R., Yli-Kuivila J., Tenhunen J. and Laukkanen R., Cost and environmental impact of nanofiltration in treating chemically pre-treated surface water, *Desalination*, 201, pp.58-70, 2006
- 64) 東京都水道局総務部調査課編集・発行, 気候変動が水道事業に与える影響, 2008年9月
- 65) 水道産業新聞社, 水道産業新聞, 第4808号, 2013年3月4日
- 66) 東京都水道局物品契約監視委員会, 平成 24 年度東京都水道局物品契約監視委員会報告書, 2012年11月
- 67) 沖縄県企業局, 平成 21 年度沖縄県水道用水供給事業(水道用水供給施設整備事業)再評価書, 2009年度
- 68) 京都市上下水道局, 京都市上下水道局公共事業庁内評価委員会, 蹴上浄水場における高度浄

水処理施設整備事業事前評価調書【概要版】，2009年11月10日

- 69) 千葉県水道局，千葉県水道局大規模施設整備事業等事前評価自己評価調書，柏井浄水場西側施設高度浄水処理施設整備事業
- 70) 眞柄泰基，松井佳彦，大野浩一，新しい水道技術と水道事業の多様な展開，第7回水道技術国際シンポジウム基調講演論文，2006年11月22日
- 71) 特開 2009-74279
- 72) 水道技術研究センター特別研究事業「水道における膜利用型新技術等に関する研究」のうち、「膜ろ過浄水システム高度化の研究」第2回研究委員会配布資料，2011年10月

以上のほか、研究委員会では本研究に関するこれまでの研究発表・論文を検索してリストを作成した（別添「研究発表・論文リスト」）。

研究発表・論文リスト

| タイトル | 発表先 | 発表年 | 著者 | 掲載ページ | 著者所属団体 | 備考 |
|---|------------------|-----------|---|---------------|--|-------------------|
| ＜日本水道協会 全国水道研究発表会＞ | | | | | | |
| NF膜の浄水処理への適用の検討 －パッチ試験によるNF膜の有機物質処理性評価－ | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 栗田 政一、伊藤 雅喜、眞柄 泰基、 菱 美娥、加藤 裕子、増家 由季 | pp. 242 - 243 | 国立公衆衛生院、大邱廣域市、荏原製作所、日本大学 | 高度処理MAC21による研究 |
| ナノろ過法による河川水の高度処理 | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 竹田 静雄、松原 秀吉、伊藤 義一、 鬼塚 卓也、国包 章一、伊藤 雅喜、 赤澤 寛 | pp. 244 - 245 | 水道浄水プロセス協会、石垣機工、荏原製作所、水道機工、国立公衆衛生院 | 高度処理MAC21による研究 |
| 膜を用いた高度浄水処理－有機物の除去性について－ | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 池田 啓一、鈴木 辰彦、山田 寛之、 渡辺 義公、瀬川 典一、小澤 源三、 丹保 憲仁 | pp. 246 - 247 | 北海道大学工学部、前澤工業、北海道大学大学院、北海道大学 | |
| NF膜処理性能に及ぼす水温の影響 | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 品田 司、島袋 公男、工藤 禎恵、 太田 直輝 | pp. 248 - 249 | 西原県境衛生研究所 | 高度処理MAC21による研究 |
| ろ過膜とNF膜、活性炭処理を組み合わせたことを特徴とする高度膜処理実験 | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 太田 光伸、黒木 省三、山本 規雄、 松下 知広 | pp. 250 - 251 | ユニチカ（共同研究者：大阪市水道部他） | 高度処理MAC21による研究 |
| ナノフィルトレーション（NF）膜による農薬除去の基礎検討 | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 植村 忠廣、大音 勝文、南口 尚士、 房岡 良成 | pp. 252 - 253 | 東レ | |
| 逆浸透膜によるカビ臭物質の除去 | 第47回全国水道研究発表会講演集 | 平成 8年 5月 | 赤石 祐美、山下 幸宏、木村 憲司 | pp. 474 - 475 | 前澤工業 | |
| ナノろ過法による河川水の高度浄水処理（A） －高度処理MAC21合同実験－ | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 松原 秀吉、安楽 幸一、国包 章一、 伊藤 雅喜 | pp. 230 - 231 | 石垣、前澤工業、国立公衆衛生院（共同研究者：アタカ、オルガノ、クロリンエンジニアズ、月島機械、東レエンジニアリング、日本ガイシ、東レ） | 高度処理MAC21による研究 |
| ナノろ過法による河川水の高度浄水処理（B） －高度処理MAC21合同実験B系列－ | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 伊藤 義一、西尾 弘信、国包 章一、 伊藤 雅喜 | pp. 232 - 233 | 荏原製作所、神鋼パンテック、国立公衆衛生院（共同研究者：三機工業、ディックデグレモン、日本鋼管、ユニチカ、磯村豊水機工、扶桑建設工業、東洋紡績） | 高度処理MAC21による研究 |
| ナノろ過法による河川水の高度浄水処理（C） －高度処理MAC21合同実験－ | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 鬼塚 卓也、品田 司、国包 章一、 伊藤 雅喜 | pp. 234 - 235 | 水道機工、西原県境衛生研究所、国立公衆衛生院（共同研究者：栗田工業、クボタ、日立プラント建設、住友重機械工業、新日本製鐵、理水化学、日東電工） | 高度処理MAC21による研究 |
| NF膜の除去性評価の基礎的研究（Ⅰ） －溶質濃度と阻止率、透過流束－ | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 森山 茂樹、伊藤 雅喜、眞柄 泰基、 沖本 祐二 | pp. 236 - 237 | 国立公衆衛生院、東海大学 | 高度処理MAC21による研究 |
| NF膜の除去性評価の基礎的研究（Ⅱ） －フミン質と農薬の除去性－ | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 田中 芳寛、伊藤 雅喜、眞柄 泰基、 小川 幹治 | pp. 238 - 239 | 協和コンサルタンツ、国立公衆衛生院、東洋大学 | 高度処理MAC21による研究 |
| 膜による溶解性有機化合物の処理特性（Ⅲ） －ナノろ過による農薬の除去特性－ | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 井上 剛、松本 尚久、原田 準一、 青木 政史、小林 幸夫、松本 公寿、 笠井 基豊 | pp. 240 - 241 | 福岡県南広域水道企業団、前澤工業、ディックデグレモン | |
| NF膜を用いた高度浄水処理 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 及川 健治郎、廣瀬 道郎、 八尾 正敏、波田 達也、寺内 信夫 | pp. 242 - 243 | 東レエンジニアリング、大津市企業局 | 高度処理MAC21による研究 |
| 超低圧逆浸透膜による浄水処理の基礎検討 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 南口 尚士、小嶋 定雄、立石 康、 房岡 良成 | pp. 244 - 245 | 東レ | |
| 河川水を対象とした限外ろ過とナノろ過による膜処理現場実験 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 織田 真人、福士 憲一、佐藤 敦久、 下館 勝美、山本 由忠、竹内 弘 | pp. 246 - 247 | 前澤工業、八戸工業大学、八戸圏域水道企業団、理水化学、東レ | |
| 膜処理プラントにおける高濃度ウイルス・ファージの除去特性に関する研究 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 大瀬 雅寛、矢野 一好、大垣 眞一郎、 唐澤 祥嗣 | pp. 248 - 249 | 東京大学、東京都立衛生研究所 | 高度処理MAC21による研究 |
| ナノろ過法の前処理への適用を目的とした凝集沈殿・砂ろ過実験 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 末広 章一、中谷 健治、国包 章一、 伊藤 雅喜 | pp. 250 - 251 | 新日本製鐵、磯村豊水機工、国立公衆衛生院（共同研究者：アタカ工業、クボタ、東レエンジニアリング、ディックデグレモン、ユニチカ、理水化学） | 高度処理MAC21による研究 |
| 長期連続運転によるNF膜のファウリング物質 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 太田 直輝、工藤 禎恵、島袋 公男、 品田 司 | pp. 252 - 253 | 西原県境衛生研究所 | 高度処理MAC21による研究 |
| 超低圧ROによる飲料水水质改良システムの実証実験 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 岩堀 博、木下 利昭、平田 茂英、 荒井 民雄、渡辺 義公、小澤 源三 | pp. 254 - 255 | 日東電工、川崎重工業、北海道大学 | |
| ルーズ逆浸透膜による浄水処理 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 笠 正二、山口 岳夫 | pp. 256 - 257 | 日本上下水道設計 | |
| ナノろ過（NF）膜を用いた”おいしい水”の研究 | 第48回全国水道研究発表会講演集 | 平成 9年 6月 | 永富 孝則、杉嶋 伸祿、伊豆 智啓、 篠原 亮太、入江 隆司 | pp. 516 - 517 | 北九州市環境科学研究所 | |
| 河川水を対象とした限外ろ過とナノろ過による膜ろ過実験 | 第49回全国水道研究発表会講演集 | 平成 10年 5月 | 王 磊、福士 憲一、佐藤 敦久、 山本 由忠、竹内 弘 | pp. 188 - 189 | 八戸工業大学、理水化学、東レ | |
| NF膜における塩阻止率と有機物阻止率との考察 | 第49回全国水道研究発表会講演集 | 平成 10年 5月 | 澤田 繁樹、住田 一郎、有賀 久道 | pp. 190 - 191 | 栗田工業 | |
| NF膜ろ過法を用いたヒ素除去処理 | 第49回全国水道研究発表会講演集 | 平成 10年 5月 | 野嶋 義教、澤田 恵枝、浅見 真理、 相澤 貴子 | pp. 226 - 227 | 国立公衆衛生院 | |
| NF膜による水質改善 | 第50回全国水道研究発表会講演集 | 平成 11年 5月 | 阿部 泰洋、澤田 繁樹、吉岡 道雄、 住田 一郎、浜岡 英雄、岩崎 誠 | pp. 218 - 219 | 豊浦町水道課、栗田工業 | |
| 既設急速ろ過水を対象としたNF膜ろ過による高度浄水処理実験 | 第50回全国水道研究発表会講演集 | 平成 11年 5月 | 久保谷 隆、松浦 寛、広瀬 洋一 | pp. 222 - 223 | 扶桑建設工業 | |
| 有機色度成分によるナノろ過膜の閉塞特性 | 第50回全国水道研究発表会講演集 | 平成 11年 5月 | 佐藤 芳史、井齋 拓也、福士 憲一、 佐藤 敦久 | pp. 224 - 225 | 八戸工業大学 | 家庭用NF浄水器の実現可能性に言及 |
| 振動型膜分離装置のNF膜による河川水処理 －振動による膜ファウリングの低減に関する検討－ | 第50回全国水道研究発表会講演集 | 平成 11年 5月 | 下 如林、山本 和良、渡辺 義公、 小澤 源三 | pp. 226 - 227 | 神鋼パンテック、北海道大学 | ACT21による研究 |

| タイトル | 発表先 | 発表年 | 著者 | 掲載ページ | 著者所属団体 | 備考 |
|---|------------------|-------------|---|---------------|---|------------------------------|
| 活性アルミナ吸着法及びNF膜ろ過法を用いたヒ素除去技術 ー原水の水質因子による影響の評価ー | 第50回全国水道研究発表会講演集 | 平成 11 年 5 月 | 野嶋 義教、澤田 恵枝、浅見 真理、 相澤 貴子 | pp. 256 - 257 | 国立公衆衛生院 | |
| ナノろ過による農薬・ビスフィノールAの除去特性 | 第51回全国水道研究発表会講演集 | 平成 12 年 5 月 | 鈴木 拓也、佐藤 芳史、桂山 清美、 福士 憲一 | pp. 208 - 209 | 八戸工業大学 | |
| 分子量分画によるナノろ過膜閉塞の評価 | 第51回全国水道研究発表会講演集 | 平成 12 年 5 月 | 王 磊、桂山 清美、福士 憲一 | pp. 210 - 211 | 八戸工業大学 | |
| 急速ろ過に付加するNF膜を用いた長期実験 | 第51回全国水道研究発表会講演集 | 平成 12 年 5 月 | 山岡 亜弓、八尾 正敏、針井 豊和、 原 孝之、寺内 信夫 | pp. 212 - 213 | 東レエンジニアリング、大津市企業局 | |
| 膜ろ過によるフミン質とヒ素除去における膜振動の効果 | 第51回全国水道研究発表会講演集 | 平成 12 年 5 月 | 下 如林、山本 和良、渡辺 義公、 小澤 源三 | pp. 234 - 235 | 神鋼パンテック、北海道大学 | ACT21による研究 |
| ナノろ過による微量化学物質の除去性に関する基礎的研究 | 第52回全国水道研究発表会講演集 | 平成 13 年 5 月 | 山崎 義人、鈴木 拓也、桂山 清美、 佐藤 久、福士 憲一 | pp. 254 - 255 | 八戸工業大学 | |
| 湖沼水を原水とするNF膜処理試験 | 第52回全国水道研究発表会講演集 | 平成 13 年 5 月 | 香取 晶衛、風間 道夫、出口 達也、 小島 康成、須田 康司 | pp. 256 - 257 | 潮来市水道課、荏原製作所 | |
| 既設設備に付加したNF膜ろ過設備の運転状況 | 第52回全国水道研究発表会講演集 | 平成 13 年 5 月 | 針井 豊和、八尾 正敏、山岡 亜弓、 原 孝之 | pp. 258 - 259 | 東レエンジニアリング | |
| 湖沼水を原水とするNF膜処理試験 | 第53回全国水道研究発表会講演集 | 平成 14 年 5 月 | 風間 道夫、森 康輔、須田 康司 | pp. 242 - 243 | 潮来市水道課、荏原製作所 | |
| ナノろ過膜の材質が微量化学物質の除去性に与える影響 | 第53回全国水道研究発表会講演集 | 平成 14 年 5 月 | 鈴木 拓也、桂山 清美、福士 憲一 | pp. 244 - 245 | 八戸工業大学 | |
| NF膜高度浄水処理プロセスの運転と処理水質の微生物学的評価 | 第53回全国水道研究発表会講演集 | 平成 14 年 5 月 | 池田 啓一、木原 正浩、池田 敏裕、 山村 弘之 | pp. 246 - 247 | 東レ | ACT21による研究 |
| 新規NF膜の除去特性評価 | 第53回全国水道研究発表会講演集 | 平成 14 年 5 月 | 花川 正行、井上 岳治、村上 睦夫、 房岡 良成 | pp. 248 - 249 | 東レ | |
| ナノろ過における微量化学物質の吸着・溶出過程の解析 | 第54回全国水道研究発表会講演集 | 平成 15 年 5 月 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 190 - 191 | 八戸工業大学 | |
| ナノろ過によるアンチモン処理に及ぼす共存物質の影響 | 第54回全国水道研究発表会講演集 | 平成 15 年 5 月 | 黒木 隆、伊藤 雅喜、国包 章一 | pp. 192 - 193 | 国立保健医療科学院 | |
| 平膜ナノろ過装置によるファウリング加速試験と洗浄に関する検討 | 第55回全国水道研究発表会講演集 | 平成 16 年 5 月 | 門脇 正夫、伊藤 雅喜、国包 章一 | pp. 208 - 209 | 国立保健医療科学院 | |
| ナノろ過膜浄水処理システムにおける水質予測のための実証実験手法の確立 | 第55回全国水道研究発表会講演集 | 平成 16 年 5 月 | 西村 和恵、大谷 務、亀井 翼、 大野 浩一、眞柄 泰基、伊藤 雅喜、 仲宗根 盛利、赤嶺 永正、崎山 里志 | pp. 210 - 211 | 北海道大学大学院、北海道大学、国立保健医療科学院、沖縄県企業局（共同研究者：荏原製作所、クボタ、水道機工、東レ、西原環境テクノロジー、日本水コン） | e-Waterによる研究 |
| 循環型ナノろ過試験装置を用いた実規模装置の性能予測に関する研究（Ⅰ） ー運転性能予測の検討ー | 第56回全国水道研究発表会講演集 | 平成 17 年 5 月 | 仲宗根 盛利、赤嶺 永正、 崎山 里志、大谷 務、眞柄 泰基、 伊藤 雅喜、松本 直秀、杉本 隆仁、 古屋 弘幸、高木 亮太、太田 直輝、 町田 幹彦 | pp. 286 - 287 | 沖縄県企業局、北海道大学、国立保健医療科学院、荏原製作所、クボタ、水道機工、東レ、西原環境テクノロジー、日本水コン | e-Waterによる研究 |
| 循環型ナノろ過試験装置を用いた実規模装置の性能予測に関する研究（Ⅱ） ー水質予測及び除去性能の検討ー | 第56回全国水道研究発表会講演集 | 平成 17 年 5 月 | 大谷 務、眞柄 泰基、伊藤 雅喜、 仲宗根 盛利、赤嶺 永正、 崎山 里志、松本 直秀、杉本 隆仁、 古屋 弘幸、高木 亮太、太田 直輝、 町田 幹彦 | pp. 288 - 289 | 北海道大学大学院、北海道大学、国立保健医療科学院、沖縄県企業局、荏原製作所、クボタ、水道機工、東レ、西原環境テクノロジー、日本水コン | e-Waterによる研究 |
| ナノろ過法を用いた急速ろ過池洗浄排水からの浄水直接回収法の検討 | 第56回全国水道研究発表会講演集 | 平成 17 年 5 月 | 太田 直輝、大谷 務、眞柄 泰基、 伊藤 雅喜、仲宗根 盛利、 赤嶺 永正、崎山 里志、松本 直秀、 杉本 隆仁、古屋 弘幸、高木 亮太、 町田 幹彦 | pp. 290 - 291 | 西原環境テクノロジー、北海道大学、国立保健医療科学院、沖縄県企業局、荏原製作所、クボタ、水道機工、東レ、日本水コン | e-Waterによる研究 |
| ナノろ過におけるファウリングの原因物質に関する研究 ーカルシウムの影響評価ー | 第56回全国水道研究発表会講演集 | 平成 17 年 5 月 | 森 真由子、伊藤 雅喜 | pp. 292 - 293 | 国立保健医療科学院 | |
| 有機色度成分共存下におけるナノろ過の微量化学物質の除去性に関する基礎的検討 | 第57回全国水道研究発表会講演集 | 平成 18 年 5 月 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 236 - 237 | 八戸工業大学 | |
| 異なった前処理におけるナノろ過の汚染物質に関する研究 | 第57回全国水道研究発表会講演集 | 平成 18 年 5 月 | 金 賢児、森田 健史、滝沢 智、 辻 正仁、大垣 眞一郎、佐藤 三郎 | pp. 238 - 239 | 東京大学大学院、東京都水道局 | 東京都水道局ヒアリングに関連 |
| 超低圧逆浸透膜の膜表面電荷密度と陰イオン除去性 | 第57回全国水道研究発表会講演集 | 平成 18 年 5 月 | 松井 康弘、滝沢 智 | pp. 240 - 241 | 東京大学大学院 | |
| 有機色度成分共存下におけるナノろ過の微量化学物質の除去特性 | 第58回全国水道研究発表会講演集 | 平成 19 年 5 月 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 204 - 205 | 八戸工業大学 | |
| ナノろ過膜ファウリングと前処理(凝集沈殿・膜処理)及び原水濃度との関係についての研究 | 第58回全国水道研究発表会講演集 | 平成 19 年 5 月 | 松田 康孝、伊藤 雅喜 | pp. 206 - 207 | 国立保健医療科学院 | |
| NF膜を用いた高度浄水処理システムの開発 | 第58回全国水道研究発表会講演集 | 平成 19 年 5 月 | 山田 雄司、坂元 陽介、小林 幸夫、 梅森 文寿 | pp. 208 - 209 | 日立プラントテクノロジー、前澤工業、東洋紡績 | e-Water IIによる研究、ユースポイント処理に言及 |
| ナノろ過膜による浄水処理についての研究（Ⅰ） | 第58回全国水道研究発表会講演集 | 平成 19 年 5 月 | 鹿島田 浩二、松井 佳彦、 大野 浩一、伊藤 雅喜、高田 武、 吉沢 健一、三木 一弥、 青井 健太郎、房岡 良成、 太田 直輝 | pp. 210 - 211 | 荏原環境エンジニアリング、北海道大学、国立保健医療科学院、東京都水道局、クボタ、水道機工、東レ、西原環境テクノロジー | |

| タイトル | 発表先 | 発表年 | 著者 | 掲載ページ | 著者所属団体 | 備考 |
|--|------------------|--------------|---|---------------|---|------------------------------|
| NF濃縮水の凝集・活性炭による処理性 | 第58回全国水道研究発表会講演集 | 平成 19 年 5 月 | 日根野谷 充、木村 哲朗、大野 浩一、松下 拓、松井 佳彦、伊藤 雅喜 | pp. 212 - 213 | 北海道大学、国立保健医療科学院 | |
| NF膜処理の実用化に向けた調査 | 第59回全国水道研究発表会講演集 | 平成 20 年 5 月 | 重枝 孝明、佐藤 三郎、森田 健史、植木 誠 | pp. 198 - 199 | 東京都水道局 | 東京都水道局ヒアリングに関連 |
| NF膜を用いた高度浄水処理システムの開発 (II) | 第59回全国水道研究発表会講演集 | 平成 20 年 5 月 | 坂元 陽介、小林 幸夫、梅森 文寿 | pp. 200 - 201 | 日立プラントテクノロジー、前澤工業、東洋紡績 | e-Water IIによる研究、ユースポイント処理に言及 |
| 有機成分がナノろ過の微量化学物質の除去特性に与える影響 | 第59回全国水道研究発表会講演集 | 平成 20 年 5 月 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 202 - 203 | 八戸工業大学 | |
| ナノろ過膜ファウリングの進行過程における膜面付着物の推移 | 第59回全国水道研究発表会講演集 | 平成 20 年 5 月 | 長峯 知徳、伊藤 雅喜、三輪 信一、小松 良光 | pp. 204 - 205 | 国立保健医療科学院、愛知県企業局、大阪市水道局 | |
| ナノろ過膜による浄水処理についての研究 (II) -多段型NF装置の連続運転経過- | 第59回全国水道研究発表会講演集 | 平成 20 年 5 月 | 小林 琢也、松井 佳彦、大野 浩一、伊藤 雅喜、植木 誠、吉沢 健一、三木 一弥、青井 健太郎、岡崎 素弘、森川 則三 | pp. 206 - 207 | 荏原環境エンジニアリング、北海道大学、国立保健医療科学院、東京都水道局、クボタ、水道機工、東レ、西原環境テクノロジー | 東京都水道局ヒアリングに関連 |
| ナノろ過膜による浄水処理についての研究 (III) -高度処理/通常処理との水質比較- | 第59回全国水道研究発表会講演集 | 平成 20 年 5 月 | 田中 宏樹、松井 佳彦、大野 浩一、伊藤 雅喜、植木 誠、吉沢 健一、小林 琢也、三木 一弥、青井 健太郎、岡崎 素弘 | pp. 208 - 209 | 西原環境テクノロジー、北海道大学、国立保健医療科学院、東京都水道局、荏原環境エンジニアリング、クボタ、水道機工、東レ、 | 東京都水道局ヒアリングに関連 |
| 有機成分の分子量構成がナノろ過の微量汚染物質の除去性に与える影響 | 第60回全国水道研究発表会講演集 | 平成 21 年 5 月 | 伊藤 翼、神山 浩志、小野 要介、鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 146 - 147 | 八戸工業大学 | |
| ナノろ過膜処理における原水pH制御の効果と薬品洗浄に関する検討 | 第60回全国水道研究発表会講演集 | 平成 21 年 5 月 | 長峯 知徳、伊藤 雅喜、岡村 朗夫、吉井 昭寿、杉本 聡平 | pp. 148 - 149 | 国立保健医療科学院、神奈川県内広域水道企業団、神奈川県企業庁、広島市水道局 | |
| 有機成分共存下におけるナノろ過による微量化学物質の除去特性 | 第61回全国水道研究発表会講演集 | 平成 22 年 5 月 | 鈴木 拓也、伊藤 翼、福士 憲一 | pp. 256 - 257 | 八戸工業大学、八戸工業大学大学院 | |
| ナノろ過処理を適用した浄水の微生物学的安定性に関する研究 | 第62回全国水道研究発表会講演集 | 平成 23 年 5 月 | 大河内 由美子、矢田 裕次郎、伊藤 禎彦 | pp. 662 - 663 | 京都大学大学院 | |
| <土木学会> | | | | | | |
| ナノろ過膜による高濃度廃水の処理時に置ける有機物と窒素の阻止特性 | 土木学会第51回年次学術講演会 | 平成 8 年 9 月 | 江川 健、浦瀬 太郎、山本 和夫 | pp. 180 - 181 | 東京大学、東京大学環境安全研究センター | |
| 低圧ナノろ過法による地下水溶存物質の除去性能評価 | 土木学会第51回年次学術講演会 | 平成 8 年 9 月 | 浦瀬 太郎、山本 和夫、森本 直子 | pp. 182 - 183 | 東京大学、東京大学環境安全研究センター、東京都 | |
| 膜を用いた高度浄水処理 -溶解性成分の対応 | 土木学会第51回年次学術講演会 | 平成 8 年 9 月 | 瀬川 典一、渡辺 義公、丹保 憲仁、鈴木 辰彦、小澤 源三 | pp. 200 - 201 | 北海道大学大学院、前澤工業、北海道大学 | |
| ナノろ過膜による農薬の除去性 | 土木学会第52回年次学術講演会 | 平成 9 年 9 月 | 田中 芳寛、伊藤 雅喜、眞柄 泰基 | pp. 350 - 351 | 協和コンサルタンツ、国立公衆衛生院 | |
| ナノろ過膜の有機溶質阻止性能の決定因子 | 土木学会第53回年次学術講演会 | 平成 10 年 10 月 | 浦瀬 太郎、江川 健、山本 和夫 | pp. 198 - 199 | 東京大学環境安全研究センター、住友重機械工業 | |
| イオン性溶質に対するナノろ過膜の阻止特性のモデルによる解析 | 土木学会第55回年次学術講演会 | 平成 12 年 9 月 | 浦瀬 太郎 | | 東京工業大学 | |
| 超低圧逆浸透膜による有機化合物の分離特性 | 土木学会第55回年次学術講演会 | 平成 12 年 9 月 | 尾崎 博明、Li Huafang | | 京都大学、アジア工科大学大学院 | |
| 低圧逆浸透膜の ζ -電位に及ぼす共存物質の影響 | 土木学会第60回年次学術講演会 | 平成 17 年 9 月 | 池嶋 則人、松井 三郎、尾崎 博明、児戸 睦尚、深見 晃司 | pp. 29 - 30 | 京都大学大学院、大阪産業大学 | |
| ナノろ過膜の塩素劣化に伴う微量物質の阻止特性の変化 | 土木学会第60回年次学術講演会 | 平成 17 年 9 月 | 浦瀬 太郎、佐藤 孝太 | pp. 37 - 38 | 東京工業大学、ドーコン | |
| ナノろ過浄水プラントの長期実験結果 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 8 年度 | 福士 憲一、織田 真人、中川 洋一 | pp. 734 - 735 | 八戸工業大学 | |
| フミン質によるNF膜の閉塞 -人口実験による検討 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 10 年度 | 井斎 拓也、佐藤 芳史、福士 憲一 | pp. 752 - 753 | 八戸工業大学 | |
| 有機色度成分によるNF膜の閉塞特性 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 11 年度 | 王 磊、福士 憲一、佐藤 芳史 | pp. 848 - 849 | 八戸工業大学 | |
| NF膜による微量有害成分の除去特性 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 11 年度 | 山崎 義人、鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 850 - 851 | 八戸工業大学 | |
| 有機成分の分子量分布によるNF膜ファウリング特性の検討 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 12 年度 | 王 磊、山崎 義人、福士 憲一 | pp. 734 - 735 | 八戸工業大学 | |
| ナノろ過による微量化学物質の除去性に関する基礎的検討 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 12 年度 | 小山田 浩之、鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 736 - 737 | 八戸工業大学 | |
| 膜ろ過浄水プラントの長期運転結果-ナノろ過 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 13 年度 | 佐藤 芳史、久保田 和康、斉藤 良隆、福士 憲一 | pp. 722 - 723 | 八戸工業大学 | |
| ナノろ過膜の素材が微量化学物質の除去性に与える影響 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 13 年度 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 756 - 757 | 八戸工業大学 | |
| 有機色度成分共存下におけるナノろ過の微量化学物質の除去特性 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 17 年度 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 896 - 897 | 八戸工業大学 | |

| タイトル | 発表先 | 発表年 | 著者 | 掲載ページ | 著者所属団体 | 備考 |
|---|--------------------------|-------------|-----------------------------------|---------------|----------------------|--------------------|
| 有機色度成分がナノろ過の微量化学物質の除去性に与える影響 | 土木学会東北支部技術研究発表会 | 平成 18 年 度 | 中野 祐介、倉本 功、鈴木 拓也、福士 憲一 | | 八戸工業大学 | |
| 吸引型浸漬ナノろ過法の地下水処理への適用可能性 | 第34回環境工学研究フォーラム講演集 | 1997 年 | 浦瀬 太郎、山本 和夫 | pp. 141 - 143 | 東京大学環境安全研究センター | |
| ナノろ過プロセスでの種類および化学形態の異なる金属の阻止特性 | 環境工学研究論文集第35巻 | 1998 年 | 呉 政益、浦瀬 太郎、山本 和夫 | pp. 255 - 263 | 東京大学、東京大学環境安全研究センター | |
| 超低圧ナノろ過によるトリハロメタン前駆物質と無機塩の阻止性の違い (英文) | 第36回環境工学研究フォーラム講演集 | 1999 年 | 浦瀬 太郎、山本 和夫 | pp. 61 - 63 | 東京大学環境安全研究センター | |
| 膜細孔径分布を加味したナノろ過膜の阻止性能の予測 | 第38回環境工学研究フォーラム講演集 | 2001 年 | 宮下 健一朗、浦瀬 太郎 | pp. 76 - 78 | 東京工業大学 | |
| 有機色度成分によるナノろ過膜のファウリング特性 -分子量分布に基づいた評価 | 環境工学研究論文集第38巻 | 2001 年 | 王 磊、福士 憲一 | pp. 345 - 352 | 八戸工業大学大学院 | |
| ナノろ過膜による微量化学物質の除去性に関する研究 | 環境工学研究論文集第40巻 | 2003 年 | 鈴木 拓也、福士 憲一 | pp. 247 - 255 | 八戸工業大学大学院 | |
| ナノろ過膜による医薬品の阻止性能のpH依存性 | 第41回環境工学研究フォーラム講演集 | 2004 年 | 佐藤 孝太、浦瀬 太郎 | pp. 110 - 112 | 東京工業大学大学院 | |
| 小型ナノろ過実験によるナノろ過実験装置設計手法の開発 | 第42回環境工学研究フォーラム講演集 | 2005 年 | 伊藤 雅喜、太田 直輝 | pp. 147 - 149 | 国立保健医療科学院、西原環境テクノロジー | |
| <水環境学会> | | | | | | |
| ナノフィルトレーション膜による農薬の分離 | 水環境学会誌第19巻第8号 | 1996 年 | 木曾 祥秋、季 揮東、北尾 高嶺 | pp. 648 - 656 | 豊橋技術科学大学 | |
| <北海道大学 衛生工学シンポジウム> | | | | | | |
| 膜ろ過法による水中のヒ素除去 | 衛生工学シンポジウム論文集, 4 | 1996 年 11 月 | 江原 康浩、鬼塚 卓也 | pp. 155 - 160 | 水道機工 | NF膜処理のランニングコストを試算 |
| ナノろ過法による高度浄水処理について | 衛生工学シンポジウム論文集, 4 | 1996 年 11 月 | 工藤 禎恵、太田 直輝、島袋 公男、品田 司 | pp. 161 - 166 | 西原環境衛生研究所 | |
| ナノろ過法の膜選定についての一考察 | 衛生工学シンポジウム論文集, 5 | 1997 年 11 月 | 太田 直輝、貫名 崇雄、島袋 公男、品田 司 | pp. 161 - 165 | 西原環境衛生研究所 | |
| パッチ実験によるナノろ過高度浄水処理の検討 | 衛生工学シンポジウム論文集, 5 | 1997 年 11 月 | 伊藤 雅喜、眞柄 泰基、国包 章一 | pp. 246 - 251 | 国立公衆衛生院 | |
| 河川水を対象とした限外ろ過・ナノろ過実験結果の評価 | 衛生工学シンポジウム論文集, 6 | 1998 年 11 月 | 王 磊、福士 憲一、佐藤 敦久 | pp. 131 - 136 | 八戸工業大学 | |
| 有機色度成分によるナノろ過膜の閉塞特性 | 衛生工学シンポジウム論文集, 7 | 1999 年 11 月 | 井斎 拓也、福士 憲一、佐藤 敦久 | pp. 237 - 241 | 八戸工業大学 | 家庭用NF浄水器の実現可能性に言及 |
| 水質汚濁物質としてのN-ニトロソジメチルアミンの活性炭・ナノろ過膜による処理性について | 衛生工学シンポジウム論文集, 12 | 2004 年 10 月 | 南 岳宏、大野 浩一、亀井 翼、眞柄 泰基 | pp. 113 - 116 | 北海道大学 | 家庭用NF浄水器の実現可能性に言及 |
| ナノろ過膜のファウリングにおけるカルシウムとそのイオンの影響 | 衛生工学シンポジウム論文集, 12 | 2004 年 10 月 | 小口 祥史、大野 浩一、亀井 翼、眞柄 泰基 | pp. 121 - 124 | 北海道大学 | |
| 凝集剤由来のアルミニウムがナノろ過膜のファウリングに与える影響 | 衛生工学シンポジウム論文集, 13 | 2005 年 11 月 | 澤岡 大輔、小口 祥史、大野 浩一、亀井 翼、眞柄 泰基、大谷 務 | pp. 219 - 222 | 北海道大学、水道機工 | |
| カルシウム-天然有機物共存系におけるナノろ過膜に与える影響 | 衛生工学シンポジウム論文集, 13 | 2005 年 11 月 | 近藤 拓也、小口 祥史、大野 浩一、亀井 翼、眞柄 泰基、大谷 務 | pp. 223 - 226 | 北海道大学、水道機工 | |
| <日本膜学会> | | | | | | |
| 環境問題と膜利用の可能性 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 20 No. 1 | 1995 年 | 中尾 真一 | pp. 2 - 9 | 東京大学 | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| 最近の膜による水処理技術 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 23 No. 5 | 1998 年 | 木村 尚史 | pp. 226 - 228 | 工学院大学 | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| 高機能選択性ナノフィルトレーション膜ならびにハイブリッドプロセス | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 23 No. 5 | 1998 年 | 前田 恭志 | pp. 235 - 244 | ダウ・ケミカル日本 | |
| NF膜スパイラルエレメント“LES90” | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 24 No. 1 | 1999 年 | 廣瀬 雅彦 | pp. 72 - 75 | 日東電工 | |
| 水道への膜ろ過プロセスの応用 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 24 No. 6 | 1999 年 | 渡辺 義公、下 如林 | pp. 310 - 318 | 北海道大学大学院、神鋼パンテック | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| 中空糸型ナノろ過膜 -CMシリーズ- | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 24 No. 6 | 1999 年 | 丸井 一成、松井 洋一、熊野 淳夫 | pp. 350 - 353 | 東洋紡績 | |
| 持続可能社会の構築と膜技術 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 25 No. 4 | 2000 年 | 中尾 真一 | pp. 150 - 155 | 東京大学大学院 | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| 健全な水循環の維持と膜分離の役割 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 25 No. 5 | 2000 年 | 前田 恭志 | pp. 246 - 249 | ダウ・ケミカル日本 | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| 新規超極低圧ナノフィルトレーション (NF) 膜 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 26 No. 5 | 2001 年 | 井上 岳治、村上 睦夫、房岡 良成 | pp. 231 - 233 | 東レ | |
| 膜技術を基盤とした水資源有効利用システムの構築 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 28 No. 5 | 2003 年 | 中尾 真一 | pp. 215 - 220 | 東京大学大学院 | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |

| タイトル | 発表先 | 発表年 | 著者 | 掲載ページ | 著者所属団体 | 備考 |
|--|----------------------------|-------------|---|---------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 水資源有効利用技術としての膜の応用 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 28 No. 5 | 2003 年 | 大熊 那夫紀 | pp. 221 - 230 | 日立プラント建設 | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| 水資源有効利用システム用膜の現状と今後の課題 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 28 No. 5 | 2003 年 | 山村 弘之 | pp. 231 - 238 | 東レ | 膜利用の総論の一部でNF膜処理に言及 |
| <日本水道協会 その他> | | | | | | |
| NF膜ろ過によるジクロロアニリンの除去 (原題 "Dichloroaniline Retention by Nano-filtration Membranes, "Water Research, Vol. 39, No. 8, pp. 1594-1600 (2005)) | 水道協会雑誌第76巻第3号 (第870号) 文献抄録 | 平成 19 年 3 月 | C. Causserand, P. Aimar and J. P. Cravedi, B. Singlande | pp. 41 - 43 | | |
| UF膜およびNF膜におけるファウリング分析 (原題 "Fouling Analysis of Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes, " Membrane filtration) | 水道協会雑誌第76巻第6号 (第873号) 文献抄録 | 平成 19 年 6 月 | D. B. Mosqueda-Jimenez, P. M. Huck | pp. 90 - 91 | | |
| NF膜、逆浸透膜処理水の生物学的安定性比較 (原題 "Nanofiltration and Reverse Osmosis Biostability Relative to Alternative Methods of Water Treatment, "Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, Vol. 56, No. 1, pp. 25-40 (2007)) | 水道協会雑誌第77巻第8号 (第887号) 文献抄録 | 平成 20 年 8 月 | S. Liu, M. LePuil, J. S. Taylor, and A. A. Randall | pp. 23 - 25 | | |
| 酸化剤とNF膜を組み合わせたヒ素除去 (原題 "Arsenic Removal Using Oxidative Media and Nanofiltration, "Reprinted from Journal AWWA, Vol. 100, No. 12 (December 2008), by permission. Copyright© 2008, American Water Works Association.) | 水道協会雑誌第78巻第6号 (第897号) 文献抄録 | 平成 21 年 6 月 | K. W. Moore, P. M. Huck and S. Siverns | pp. 55 - 56 | | |
| MF-NF/RO膜プロセスに及ぼす前処理凝集剤の影響 | 水道協会雑誌第78巻第7号 (第898号) 報文 | 平成 21 年 7 月 | 森田 健史、佐藤 三郎、内藤 利夫、尾崎 勝、吉田 永 | pp. 2 - 12 | 東京都水道局 | 東京都水道局ヒアリングに関連 |
| 有機フッ素化合物の淀川水系における動向と浄水処理過程における挙動 | 第54回日本水道協会関西支部水道研究発表会 | 2010 年 11 月 | 稲田 康志、林 広宣、服部 晋也、森口 泰男、宮田 雅典 | | 大阪市水道局 | PFOA、PFOSの処理性について、オゾン+活性炭とNF膜を比較 |
| <その他・参考> | | | | | | |
| 高度浄水処理施設における活性炭の寿命に関する研究 | 第49回全国水道研究発表会講演集 | 平成 10 年 5 月 | 福井 輝男、小林 隆、柳 寿一、吉留 剛 | pp. 152 - 153 | 武田薬品工業 | |
| MF膜を使用した可搬式浄水器の性能テスト | 第49回全国水道研究発表会講演集 | 平成 10 年 5 月 | 一色 正道、柿内 尚、尾崎 耕三、保野 健治郎 | pp. 522 - 523 | 松山市公営企業局、近畿大学 | 緊急時小規模給水への膜利用に関する研究 |
| UF膜を使用した可搬式簡易浄水器の実証テスト | 第49回全国水道研究発表会講演集 | 平成 10 年 5 月 | 一色 正道、柿内 尚、尾崎 耕三、保野 健治郎 | pp. 524 - 525 | 松山市公営企業局、近畿大学 | 緊急時小規模給水への膜利用に関する研究 |
| 急速ろ過代替技術としての膜ろ過技術導入に向けてのケーススタディ | 土木学会第60回年次学術講演会 | 平成 17 年 9 月 | 花元 隆司、古林 祐正、大谷 真巳 | pp. 43 - 44 | 阪神水道企業団 | 猪名川浄水場の更新を踏まえた高速ろ過と膜処理のケーススタディによる比較 |
| 水資源繰り返し利用地域での高度浄水処理への評価 | 水環境学会誌第23巻第8号 | 2000 年 | 三浦 浩之、竹村 仁志、村岡 浩、和田 安彦 | pp. 503 - 509 | 関西大学、関西大学大学院、極東技工コンサルタント | 高度処理水需要者による給水水質・システムの評価 |
| ナノろ過法による内分泌かく乱物質の阻止性能 | 水環境学会誌Vol. 25, No. 6 | 2002 年 | 金 時浚、鈴木 謙 | pp. 340 - 354 | 独立行政法人土木研究所 | 下水処理水中の内分秘かく乱物質除去についての検討 |
| ナノろ過膜による医薬品の阻止特性 | 水環境学会誌Vol. 28, No. 11 | 2005 年 | 浦瀬 太郎、佐藤 考太 | pp. 657 - 662 | 東京工業大学大学院 | 下水処理水中の医薬品除去についての検討 |
| 最先端の超低圧RO膜とモジュールの現状 | 日本膜学会誌「膜」, Vol. 22 No. 5 | 1997 年 | 川崎 睦男、佐々木 武、廣瀬 雅彦 | pp. 257 - 263 | 日東電工 | 食品用途の低圧RO膜に関する研究 |
| 平成22年度浄水方法最適化実験調査報告書 (概要版) | ホームページにて公開 | 平成 23 年 8 月 | | | 埼玉県企業局 | |
| 平成23年 (2011年) 東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書 | ホームページにて公開 | 平成 23 年 9 月 | | | 厚生労働省健康局水道課、社団法人日本水道協会 | |
| 東日本大震災「浄水技術等支援チーム」現地調査 報告書 | ホームページにて公開 | 平成 23 年 7 月 | | | 財団法人水道技術研究センター | |