

ACT21から e-Water へ

— 浄水技術開発の新しい流れ —

New Trend of Water Purification Technology
— From sand to membrane —



(環)環境本部計画部第2計画室
西尾 弘 伸
Hironobu Nishio

日本の近代水道は、1887年の横浜市をはじめとして緩速ろ過、急速ろ過と技術的に発展進歩してきた。しかし、1991年のMAC21（膜利用型新浄水システム開発研究）を契機に、浄水方法は「砂でろ過する」から「膜でろ過する」技術へと代わりつつある。

当社は、MAC21プロジェクトで浄水用膜ろ過装置の実用化をおこない、その後のACT21（高効率浄水技術開発研究）では、膜ろ過、高速ろ過などの技術開発をおこなった。このACT21では、大規模膜ろ過施設に対応可能な浸漬膜、ろ過速度を従来の2倍とした高速ろ過の実用化を目指した実証実験をおこなった。さらに、2002年から始まるe-Water（環境影響低減化浄水技術開発研究）にも、当社は、大規模膜ろ過施設の開発に実証実験で参画する。

Modern water purification system has developed from slow filtration to rapid filtration in terms of technology since the one in Yokohama City in 1887. The filtration media began to shift from sand to membrane at the start of MAC 21 in 1991, a national project for development of membrane technologies. Shinko Pantec participated in the commercialization of the membrane purification system as a part of the project. In the subsequent ACT 21, achievements were made in submerged membrane systems for large-scale plants, and rapid membrane filtration at doubled filtration velocity. In the new project, e-WATER just started in 2002, a demonstration test is scheduled for development of large-scale purification plants.

Key Words :

浄 水 処 理
膜 ろ 過

Water Purification
Membrane

ま え が き

水道における浄水技術の革新と高効率化の実現を最終目標とした「高効率浄水技術開発研究」(ACT21)が1997年度から2001年度の5カ年実施された。このACT21では、従来浄水技術の高効率化、新技術の開発（膜ろ過の新分野への適用）、および代替消毒法の実用化などの成果を挙げた。しかし、膜ろ過の大容量化（数十万 m³/d）に対する技術的

課題、「高効率な浄水単位プロセス」と「排水処理の高効率化」を組み合わせたトータルシステムの最適化技術の開発（上下排水一体化処理）、さらに、省エネルギーも含めた環境負荷低減など残された課題も多い。

これらの課題に対処するために2002年度から「環境影響低減化浄水技術開発研究」(e-Water)が（財）水道技術研究センター、国立保健医療科学院、大学、

水道事業体、および企業の協力のもとに、2002年度から2004年度の3カ年実施されることになった。本報では、ACT21での当社の成果概要、ならびにe-Waterの概要、当社の取り組みについて報告する。

1. ACT21での当社の成果概要

より安全で信頼性のある水道システムの構築を目指し、従来の浄水技術と比較して高効率な浄水技術の開発をおこなうことを目的としたACT21の具体的な研究テーマは、

- ①湖沼・貯水池系原水を対象にした高効率な浄水技術開発
- ②河川系原水を対象にした高効率な浄水技術開発
- ③膜ろ過法の適用分野の拡大方策の検討
- ④代替消毒法の実用技術の開発研究
- ⑤浄水場から発生する排水処理技術の効率化の研究
- ⑥老朽化した浄水施設の機能診断、機能改善手法の研究

⑦浄水場における計測・制御技術の高度化の研究である。当社は、このACT21に膜ろ過で2件、高効率浄水技術開発で2件、排水処理で2件の計6件に実験参画した。以下に、これらの成果概要について述べる。¹⁾

1.1 河川系原水を対象とした高度浄水処理システムにおける効率的ろ過プロセスの研究

淀川表流水を水道原水とする阪神水道企業団は、凝集沈澱／オゾン／流動層活性炭／再凝集／急速ろ過の高度浄水処理を導入している。この高度処理プロセス（オゾン／活性炭）の運用結果から、最終の急速ろ過のろ過抵抗が従来より低くなることが認められた。この原因を調査した結果、凝集沈澱のみを前処理とする従来の急速ろ過は砂層表面で濁質を捕捉するが、高度処理をおこなうことで濁質が砂層内部まで進行していることが判明した。このことは、砂層全体を有効に利用できる、すなわち、ろ過池の高速化が可能であることを示唆しており、この実用化に向けての実証実験をおこなうこととした。

1.1.1 実験プラント、研究成果

写真1に実験プラントを示す。実験には、より高速化とするために砂ではなく、有効径0.81 mmのアンサライトを使用し、これを1.5 m充填し、ろ過速度を従来型の急速ろ過の2倍の300 m/d、洗浄間隔を48 hとし実験をおこなった。下部集水装置は、支持砂利不要のIMS レオポルドブロックを使用した。洗浄工程は空気洗浄→気水洗浄→水洗浄→ろ過とし、逆洗後のろ過開始時には捨水工程を設けた。

処理水の評価指標としては、濁度より高感度の微粒子数計をもちい、目標値をろ過初期100個/mL以下、通常時10個/mL以下とした。

処理水微粒子数の一例を図1に示す。処理水の微粒子数は目標値を満足したが、水温15℃以下の低水温期において、ろ過初期の微粒子数が増加する傾向が認められたため、この結果から逆洗後の処理水の捨水時間を30 minとした。また、処理水の微粒子数の低減を目的にろ材仕様の検討をおこなった。粒度分布の比較を図2に、処理水微粒子数の比較を図3に示す。有効径、均等係数が同じろ材でも、粒

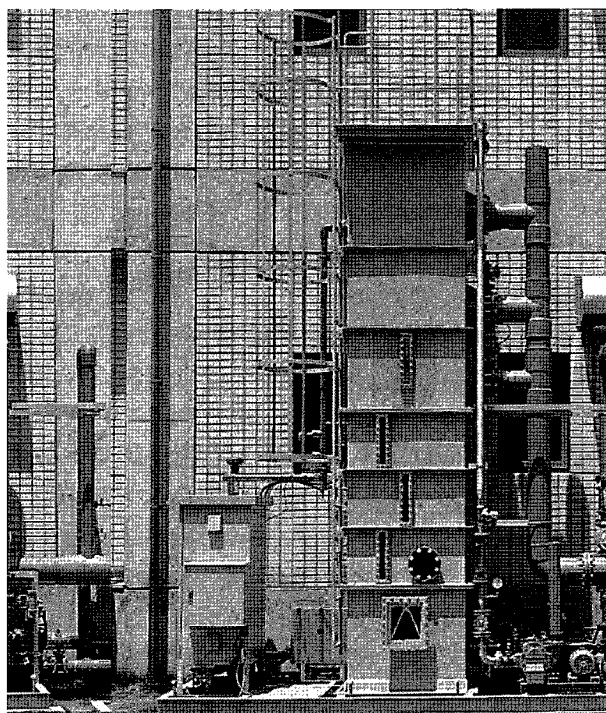


写真1 高速ろ過実験プラント

Photo 1 Experimental plant for rapid filtration

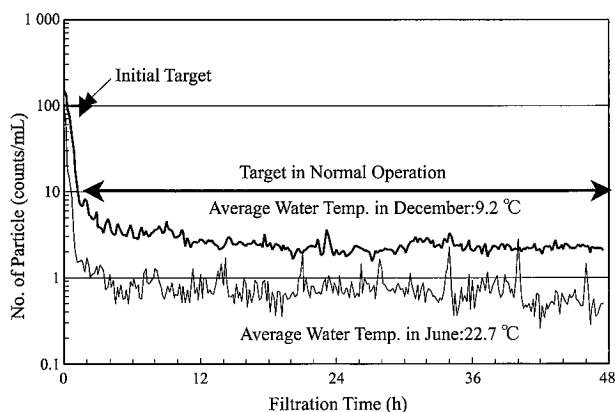


図1 処理水微粒子数

Fig.1 Particle counts in treated water

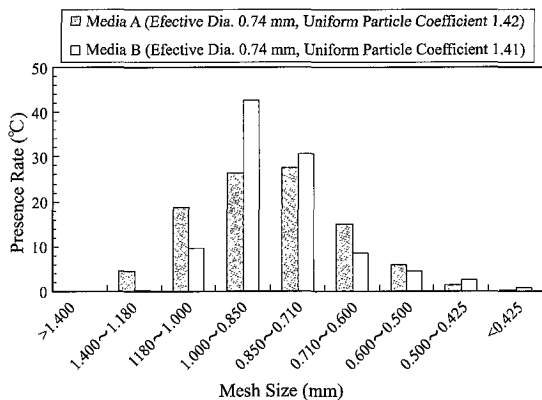


図 2 ろ材の粒度分布
Fig.2 Particle distribution of filter media

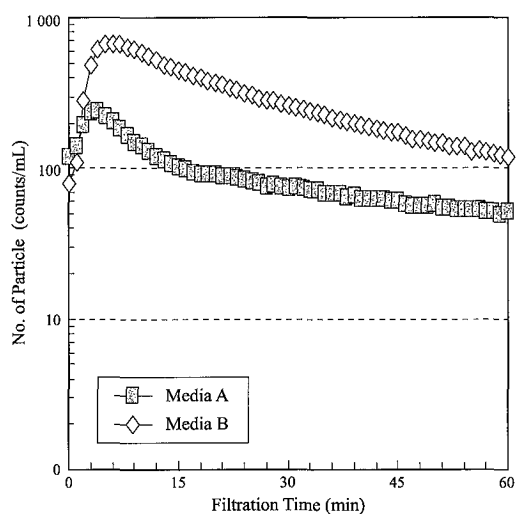


図 3 処理水微粒子数比較
Fig.3 Comparison of particle counts in treated water

度分布の分布状態のピーク値が低いろ材の方が処理水微粒子数を低減でき、損失水頭も減少した。さらに、この微粒子数を低減するためにろ過開始方法の検討をおこなった。ろ過速度300 m/d一定にてろ過開始する方法と150から300 m/dへ上昇させるスロースタート方法を比較した結果、図4に示すようにスロースタート方法によりろ過初期の処理水微粒子数漏出を抑制できることが確認できた。

阪神水道企業団では、新尼崎浄水場 (373 000 m³/d) を建設し、2001年4月に稼働を開始した。施設更新にともない能力増強と高度浄水処理の導入をおこなったが、本研究成果でえられた高速ろ過方式を採用することで省スペース化が図られた。

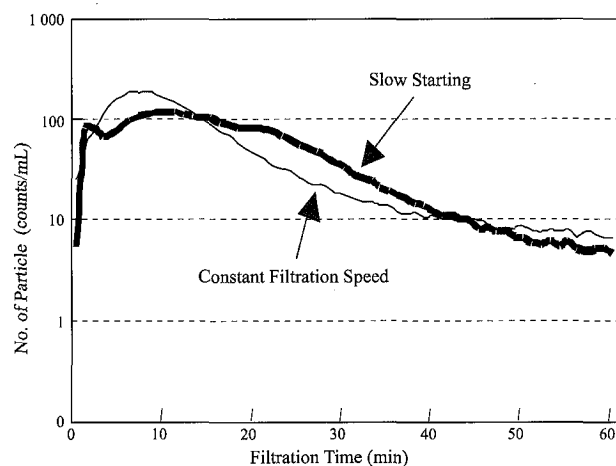


図 4 ろ過開始方法の比較
Fig.4 Comparison of particle counts with starting filtration methods

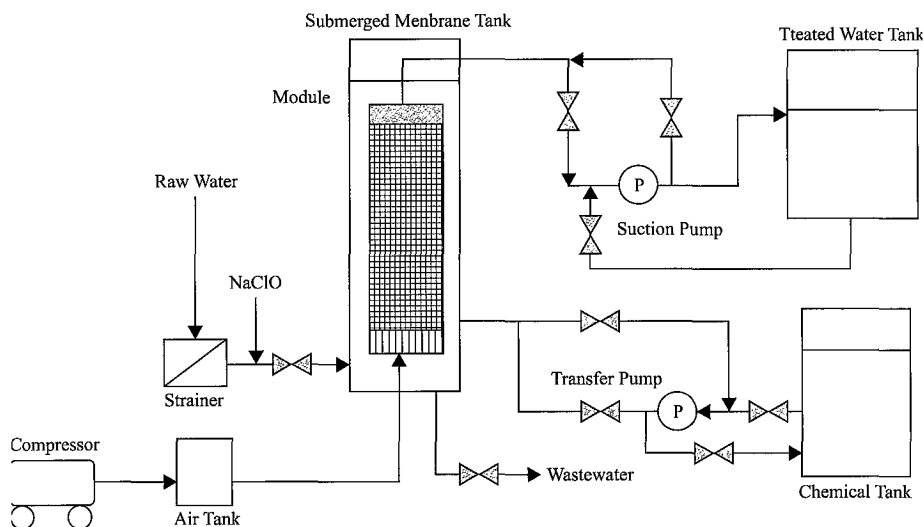


図 5 浸漬型膜ろ過実験フロー
Fig.5 Test flow for submerged membrane filtration

1.2 中・大規模向浸漬型膜ろ過技術の研究

中・大規模浄水場に膜ろ過を適用する場合、膜モジュールの高流束化、大型化が必要となる。浸漬膜の場合、高い流束の設定は、吸引ろ過であるため難しく、槽内に高い充填率で膜モジュールを充填することにより中・大規模への対応が可能となる。この浸漬型膜ろ過の実用化を目指した実証実験を、北千葉広域水道企業団北千葉取水場にておこなった。

1.2.1 実験プラント、研究成果

実験に使用した膜モジュールは、材質がポリフッ化ビニリデン (PVDF、公称孔径 $0.1\mu\text{m}$) の中空糸膜であり、膜面積は $32.6\text{ m}^2/\text{本}$ である。図5に実験フローを示す。

原水 (江戸川表流水) は、目開き 0.2 mm のストレーナにて夾雑物を除去した後、浸漬槽に移送し、膜ろ過をおこなった。実験期間中の原水の平均濁度は20度程度であった。浸漬槽内部には、膜モジュールを4本設置し、吸引ポンプにより定流量全量ろ過方式で実験をおこなった。

設定流束 $0.4\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ での補正膜差圧、原水濁度の経日変化を図6に示す。運転時間が600 hを越えたところで原水に殺藻程度 (1.0 mg/L 程度) の次亜塩酸ナトリウムを注入した。運転期間中の補正膜差圧、原水濁度の推移から、原水に次亜塩素酸ナトリウムを注入していない期間は膜差圧の上昇が認められたが、殺藻程度の次亜塩素酸ナトリウムを注入することで、長期にわたり膜差圧が上昇することなく安定した運転ができた。また、原水に次亜塩素酸ナトリウムを注入していた期間中に原水濁度が約50度まで上昇したが膜差圧は上昇することなく安定に運転で

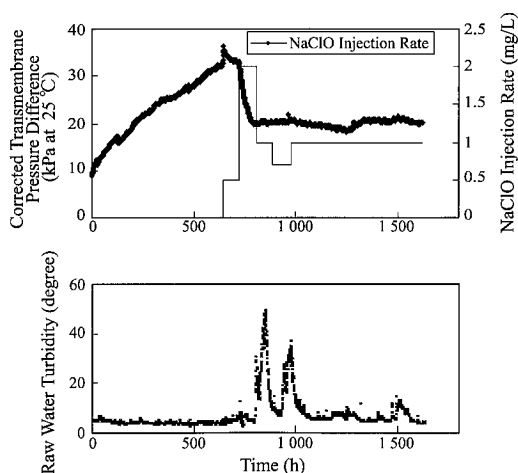


図 6 浸漬型膜ろ過運転結果

Fig.6 Operating data of submerged membrane filtration

きることが実証できた。

1.3 振動型膜ろ過装置による膜ファウリングの低減

浄水の膜ろ過において、膜ファウリングの低減、溶解性成分の除去など解決すべき課題は多い。本研究では精密ろ過 (MF) 膜、限外ろ過 (UF) 膜と比較して溶解性成分の除去能力が高いナノろ過 (NF) 膜による河川水直接ろ過システムの開発、実証実験をおこなった。

1.3.1 実験プラント、研究成果

比較的高い色度、高い濁度である千歳川表流水を原水として、定圧下で NF 膜の直接ろ過実験をおこなった。実験装置には、50 Hz の周波数で膜を水平円周方向に振動させる振動型膜ろ過装置 (写真2 参考) をもちいた。本装置は、膜を振動させることにより膜表面の流体に剪断力と遠心力が作用し、膜表面でのファウリングと濃度分極が低減される特長を有している。実験にもちいた原水の色度は、9 ~ 200 度 (平均25度)、E260は $0.06\sim0.21\text{ cm}^{-1}$ (平均 0.13 cm^{-1}) であった。

図7に、千歳川表流水の NF 膜直接ろ過における補正膜ろ過流束の推移を示す。膜差圧900 kPa、回収率95 %、振動幅3/4 inch にて連続運転をおこなった結果、補正膜ろ過流束を $1.4\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ 以上で約800 h 維持でき、高色度、高濁度の原水を NF 膜直接ろ過できることがわかった。さらに、千歳川表流水の場合、フミン質の膜面への堆積が膜ファウリングの主な原因となることが報告されている。本装置の特長である膜の振動を0 ~ 1 inch の各振動幅における濃縮水中のフミン質の濃縮倍率を測定した結果、1/2 inch 以上の振動幅の膜振動では、フミン質が膜面に堆積せず、濃縮水中に逆輸送されることがわかった。(図8)

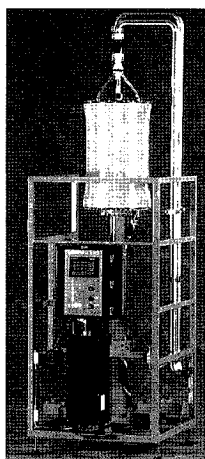


写真 2 振動型膜ろ過装置 (参考)

Photo 2 Vibratory membrane filtration unit (for reference)

1. 4 凝集沈澱代替プロセスとしての生物高速ろ過の研究

浄水場における凝集沈澱処理は、原水水質悪化によってアルミニウム系凝集剤注入率が増加する傾向にある。従来は高度浄水処理として導入される生物ろ過処理の持つ除濁機能を向上させることによって、少ない凝集剤注入率で生物処理機能と固液分離機能を併せ持つ凝集沈澱代替プロセスとしての生物高速ろ過（BRF）を開発、実証実験をおこなった。

1. 4. 1 実験プラント、研究成果

実験プラントは、阪神水道企業団猪名川浄水場の高度浄水処理実証プラント内に設置した。実験対象となる原水は淀川表流水である。

BRFの基本システムは、下層を球状セラミックろ材（有効径0.83 mm×層高0.5 m）、上層を中空ポ

リプロピレンろ材（ $\phi 4\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times$ 層高2.0 m）としたろ層構成のBRF塔と、その前段に凝集混和槽を設けたものである。実験プラントには、前段に原水濁度50度以上の高濁度時にBRFの負荷軽減を目的した前処理装置（傾斜管式簡易除濁装置）を、後段にはシステム全体の評価をおこなうための砂ろ過塔を設置した。BRF塔のろ過速度は240 m/dとし、システム全体で凝集沈澱より省スペースであるものとした。図9に実験プラント概略フローを示す。

濁度除去性能に関して、通常の原水濁度（15～25度）に対して、BRF処理水濁度は1度以下であり、80 h以上のろ過継続時間がえられた。原水濁度が50度を超える高濁度時においても前処理装置を稼働さ

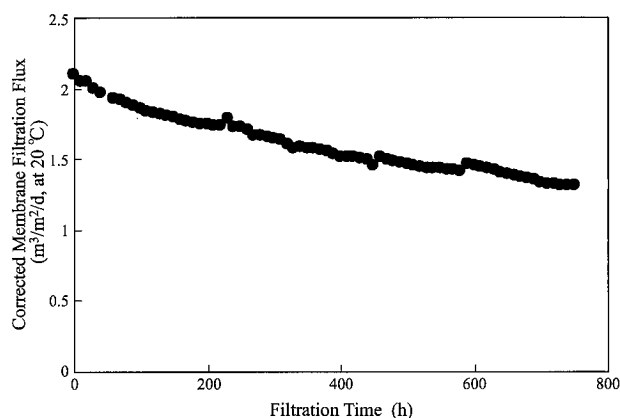


図 7 NF膜直接ろ過での補正膜ろ過流速
Fig.7 Corrected membrane filtration flux

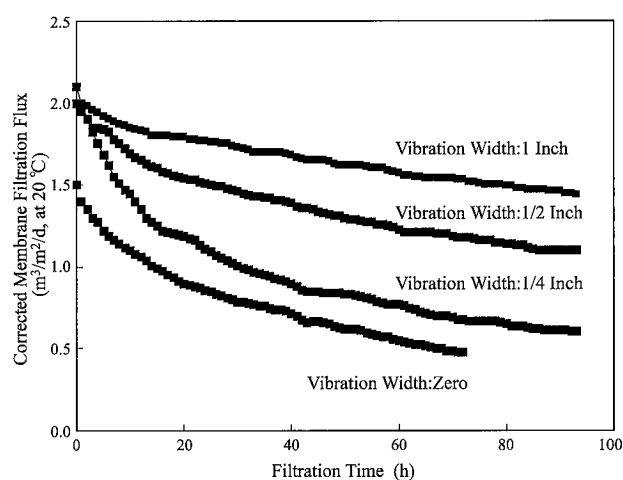


図 8 補正膜ろ過流速と振動幅
Fig.8 Corrected membrane filtration flux and vibration width

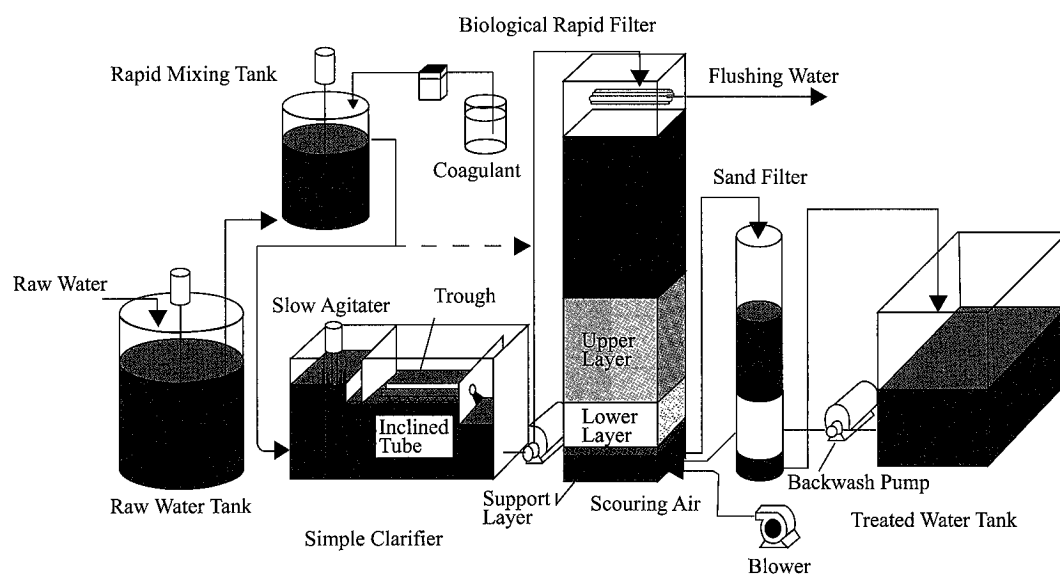


図 9 生物高速ろ過実験フロー
Fig.9 Test flow for biological rapid filtration

せることでBRF処理水濁度は1度未満をえることができた。さらに砂ろ過の前段で再凝集操作（硫酸バンド注入率5 mg/L）をおこなうことで、最終の平均砂ろ過水濁度は0.07度がえられ、この場合の全凝集剤使用量は、凝集沈澱／砂ろ過システムの約半分となった。

BRFと凝集沈澱（高度浄水処理実証プラント）の水質項目を図10に示す。アンモニア性窒素、鉄、マンガンについては凝集沈澱よりBRFの方が高い除去率がえられており、生物処理効果であると思われる。

1.5 浄水場排水のクリプトスポリジウム対策技術の探索

水道原水中に病原性原虫クリプトスポリジウム（クリプト）が混入した場合、通常、凝集沈澱などの固液分離により2 log以上の除去率がえられるが、沈澱汚泥には存在し浄水場内でクリプトが循環することが懸念されるため、クリプトの浄水場内での挙

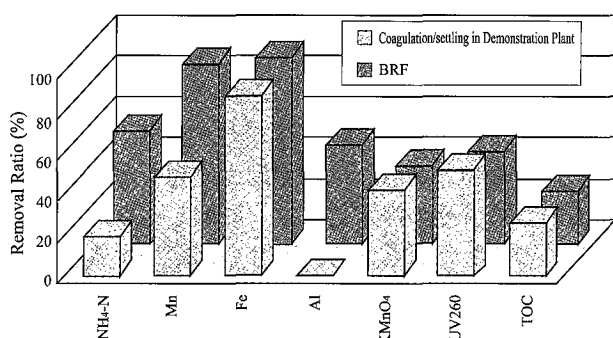


図 10 水質の平均除去率
Fig.10 Average removal ratio

動の確認をおこない、クリプトを排水処理から排出しないプロセスの検討をおこなった。

1.5.1 研究成果

浄水場内のクリプトの存在状況をシュミレーションした結果を図11に示す。大部分のクリプトは濃縮スラッジに存在し、クローズドシステムを採用している浄水場では、約18%のクリプトが着水井に返送されると推定できる。

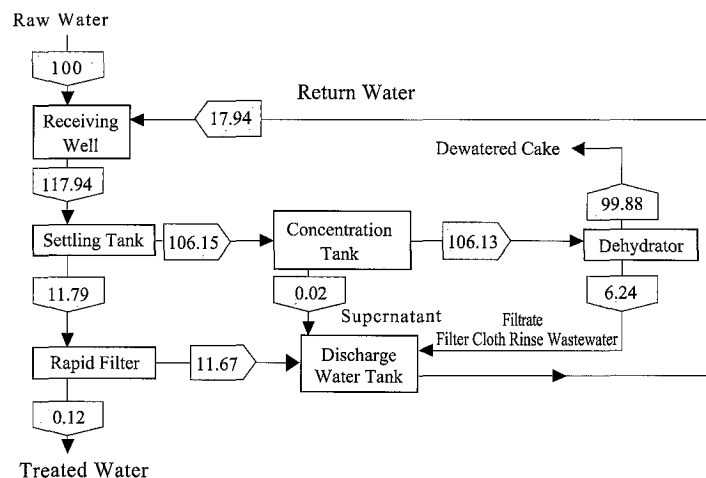
さらに、この研究成果をもとに、100 000 m³/d 規模のクローズドシステムの浄水場のケーススタディをおこなった。排水処理設備よりクリプトを排出しないシステムフローを図12に示す。クローズドシステムの場合、浄水場内に流入したクリプトの大部分は脱水ケーキ中に捕捉されて場外に搬出され、一部は着水井に返送される。ここに、濃縮スラッジ中のクリプトは加温処理、脱水ケーキのクリプトは造粒乾燥処理、返送水中のクリプトは濁度が20度以下であれば紫外線照射処理が有効であると推定された。

また、この加温処理、造粒乾燥処理にコージェネレーションシステムを導入することで環境への負荷低減や省エネルギーに寄与するものと考えられる。

2. 環境影響低減化浄水技術開発研究 (e-Water)²⁾

2.1 実施の背景・目的

水道として生活に関わる「水」は、流域圏の大きな水循環系を構成する重要な要素となっている。大都市地域の水道では、上流の下水処理水や家庭排水をやむなく取水し浄水処理をおこなっている。さらに、近年の病原性原虫クリプトスポリジウムや化学物質の水道原水への混入など、水道の安全性を確保



Figures in show the counts of oocysts when the incoming oocysts are assumed 100.

図 11 浄水場内のクリプトの挙動
Fig.11 Behavior of cryptosporidium oocysts in purification system

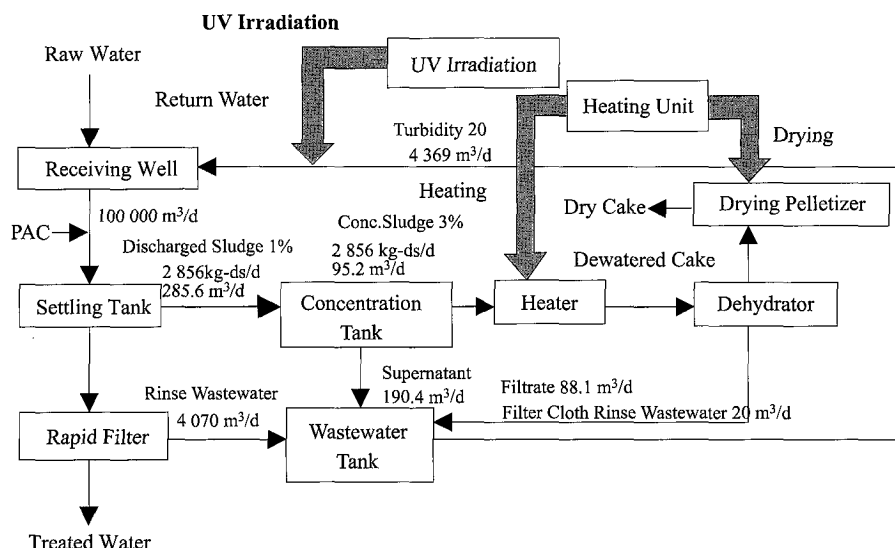


図 12 クリプト対応型排水処理システム
Fig. 12 Cryptosporidium-proof wastewater treatment system

するための課題も多い。これらの課題には、水道個別では解決できず、利用者個別の水利用形態から流域圏までも含めた対応が必要となる。また、現状の浄水処理システムにおいて、取水、送水などかなりの電力を使用しており、地球環境の立場からも負荷を低減する必要がある。

このような水循環系において、今後の水道に求められるのは安全な水の供給のみでなく、浄水処理システム全体で水の有効利用を図り、河川への負荷の低減、さらには省エネルギーや発生汚泥量の削減など環境影響の低減化に繋がるシステムを構築していくことである。2000年度に「水道施設の技術的基準を定める省令（施設基準）」が施行され、浄水処理技術の自由化、多様化などその地域独自の原水水質に応じた多様なシステム構築の気運が高まっている。このような背景のもと、e-Waterは、環境配慮型の社会実現に向けて必要となる施設の整備、既存施設の改良に貢献できる技術開発を目指して2002年度から2004年度の3カ年実施される。

2.2 研究課題、研究概要

e-Waterでは以下に示す研究が実施される。

(1) 大容量膜ろ過技術の開発に関する研究

小規模浄水場では、すでにクリプト対策として膜ろ過技術が有効であることが実証され、実施への普及が順調に進行しており、現在、日本全国で280カ所の膜ろ過施設が稼働中、もしくは建設中である。しかし、高度浄水処理を導入するまでもない比較的清浄な水道原水を有する中・大規模浄水場においては、クリプト対策として、急速ろ過処理水の濁度

0.1度（クリプト暫定指針値）管理には、凝集剤の過剰注入、ろ過継続時間の短縮、これらにともなう汚泥の難脱水性など問題が多い。とくに、低水温、低濁度時には顕著であり、中・大規模浄水場でも膜ろ過の導入を検討し始めている。また、汚染が進行している水道水源では、クリプト、臭気、藻類、難分解性有機物、さらには消毒副生成物などの対策・対応のため、その浄水処理は一層難しくなっている。こうしたことから、既存の高度浄水処理と膜ろ過を組み合わせた多様な応用技術の開発も求められている。

本研究では、膜の大容量化（50,000～200,000 m³/d）における技術的課題を解決し、より高い安全性の確保と浄水技術の信頼性を向上させるために「大容量膜技術の開発研究」をおこなう。具体的には省エネルギー化が重点課題であり、オンラインでの効率的な薬品洗浄方法の確立、薬品洗浄廃液処理も含む排水処理、あるいは上下排水一体化処理の検討、使用済み膜モジュールの再利用、処分方法の最適化を目指す。さらには、コスト、スペースなどにおけるスケールメリット化、システム全体の自動運転、制御化による容易な運転維持管理システムの開発の確立を目指す。

(2) 浄水処理トータルシステムの開発に関する研究

日本の浄水システムは圧倒的に急速ろ過法が大勢を占めているのが現状である。臭気、藻類対策、消毒副生成物対策、クリプト対策が相互に関連して急速ろ過処理水の濁度0.1度管理に苦慮している浄水場も多い。これらの浄水場では既存技術である急速

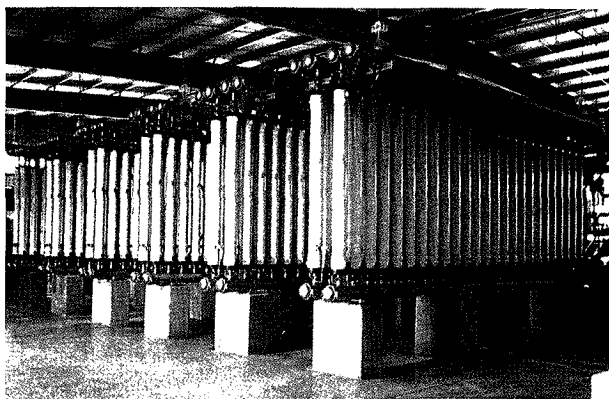


写真 3 高流束型 (MF 膜)
Photo 3 High-flux type MF membrane

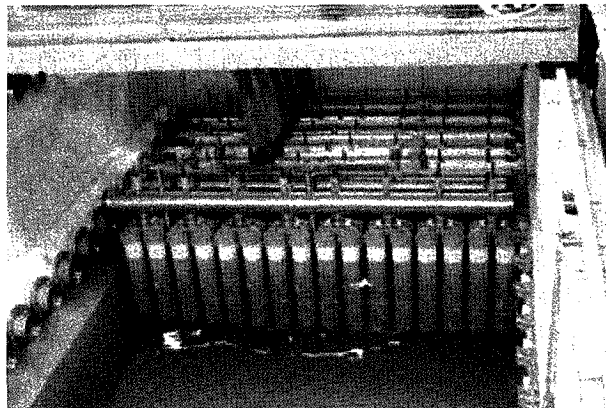


写真 5 高充填浸漬型 (MF 膜)
Photo 5 High density submerged MF membrane

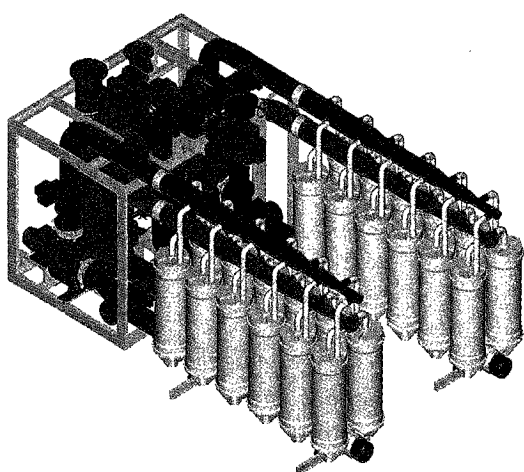


写真 4 大型膜モジュール (UF 膜)
Photo 4 Large UF module

ろ過法の最適化活用域あるいは従来の急速ろ過法に代わる代替技術と排水処理の高効率化が望まれている。本研究では、ACT21の成果である「高効率な浄水単位プロセス」および「排水処理の高効率化」を組み合わせたトータルシステムとしての最適化技術の開発を目指す。このシステムの中では、計測技術、薬品注入制御システムなどITを駆使した効率的な制御システムの導入も考慮し総合的な最適化システムの技術開発を目指す。

(3) 水道水源における監視技術の向上に関する研究

水道水源の水質事故による汚染、近年の化学物質やクリプトなどの病原性微生物による水源汚染に対応し安全性を確保するうえで、水源の監視能力の向上が望まれている。また、科学技術の進歩とともに、通信、制御、OA機器、省エネルギー技術などの高度化、高機能化が図られきている現状を鑑みて、該当技術を浄水処理システムに積極的に導入することを目的とし、迅速な危機管理、多様な情報公開、多

次元的な情報交換を達成しようとするものである。

2.3 e-Water に対する当社の取り組み

当社では、この e-Water に(1)の大容量膜と(2)の浄水処理トータルシステムに参画する。特に、「大容量膜技術の開発研究」には、実証実験を含めて積極的に取り組んでいる。これは、今後5～10年後の浄水処理は、膜を核としたシステムになり、さらに中・大規模の膜ろ過施設が増加するものと予想されるためである。

以下に、当社の大型膜ろ過施設の概要を紹介する。大規模浄水場に膜ろ過を適用する場合、まずその設置スペース、エネルギー消費が問題となる。現状、これらの問題には、当社として膜の高流束化 ($5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ 以上)、大型膜モジュール ($125 \text{ m}^2/\text{モジュール}$)、設置膜モジュールの高充填率化での対応を考えている。

(1) 高流束化

膜材質に耐薬品性 (耐塩素性) に優れたポリフッ化ビニリデン (PVDF) を使用し、原水にわずかの塩素を注入することで高流束化を可能にしたものである。運転方式も消費電力が少ない全量ろ過方式を採用している。(写真3)

(2) 大型膜モジュール

膜材質は地球環境に配慮した酢酸セルロースである。膜モジュール1本あたりの膜面積は 125 m^2 と従来のセルロースモジュールの約2.5倍の膜面積を有している。この膜モジュールも運転方式は全量ろ過方式である。(写真4)

(3) 高充填率化 (浸漬膜)

膜材質は PVDF であり、浸漬槽内に高充填率で膜モジュール ($32.6 \text{ m}^2/\text{モジュール}$) を充填する。運転方式は吸引式全量ろ過方式である。(写真5)

む す び

当社では、日本で最初の膜を利用した浄水技術を開発するための官学民共同プロジェクト MAC21 (1991年度から3カ年) に実証実験に参画して以来、高度処理 MAC (1994年度から3カ年)、ACT21、e-Water と十年以上にわたり浄水膜ろ過技術の開発に取り組んできている。当社の浄水膜ろ過施設の納入実績も1998年に第1号機を納入してから、その数も27件 (総処理水量: 約15 000 m³/d, 2002年11月現在) と着実に増えている。膜ろ過は、その処理の確

実性、安全性に優れた技術であり、浄水処理において、今後主流となるものと思われる。当社は、今後も浄水膜ろ過の研究開発に積極的に関わり込んでいく所存である。

[参考文献]

- 1) (財) 水道技術研究センター: 高効率浄水技術開発研究 (ACT21) 成果概要集, (2002)
- 2) (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の実施に関する基本方針, (2000)

連 絡 先

西 尾 弘 伸 環境装置事業部
 環境本部
 計画部
 第2計画室
 課長
 T E L 078 - 232 - 8102
 F A X 078 - 232 - 8057
 E-mail h.nishio@pantec.co.jp