

## 【委員会報告】

## 用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会

## RESEARCH COMMITTEE ON ADVANCED TREATMENT FOR WATER AND WASTEWATER

尾崎 博明

Hiroaki OZAKI

正会員 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科

(〒 574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

**Key Words :** *advanced treatment, water reuse, water, wastewater, membrane filtration*

## 1. はじめに

新世紀が始まり、エネルギーの時代から水の時代へと移ろうとしている。言うまでもなく“水”は全ての源であり、古来から何よりも重要であったが、おもに狭い地域の関心事であった水問題が、すでに国家レベルをも越えて、国際間の戦略物資としてさえ位置づけられようとしている。世界人口は年間 8,000 万人ずつ増加しているとされ、現在の 62 億人余の人口は 2030 年には 90 億人にまで増加すると予測されている。また、水資源白書（平成 12 年版）によると、2025 年における水需要量は 1995 年の約 1.4 倍になり、国連は、1995 年に全体の約 1/3 であった水不足の人口割合が、2025 年には約 2/3 になると報告している」と記している。すでに WHO は水質と関連して、全発展途上国の人口の内、1994 年に 32 億人の人が安全な水を得られておらず、これが 2000 年には 40 億人に増大する」と 1997 年に警告しており、今後世界は量的にも質的にも深刻な水問題に直面していくことは明らかである。日本の食料の自給率は年々減少し、カロリーベースで 42%、飼料を含む穀物自給率は 29%（農業白書平成 8 年版）にすぎない。食料の生産には多量の水が必要である。したがって、食料の輸入は別の角度から見ると水を輸入していることにも相当しよう。工業や他の産業でも多量の水が必要であることは同様であり、人口増の中で今後いかに必要物資を世界から調達していけるかは、限りある水をいかに有効に利用できるかにかかっていることを強く認識しておかなければならない。

振り返って国内では、まさに“湯水のように”水が使用されてきた結果として、一人一日平均の水使用量は 324 リットル（平成 9 年度）に達した。農業用水は耕地面積減と生産調整のため、また、工業用水は水回収率の向上のため、この 20 年間ほぼ横ばい状態が続いているが、生活用水については以前ほどの急激な増

加は無いものの増加傾向にある。わが国の人口が 2010 年頃まで微増した後、減少に推移すると予測されていること、また、前述したように一人一日平均の水使用量は世界的に見てもすでにハイレベルにあることから、日本全体における今後の生活用水使用量が急増する状況にはないが、とくに都市部においては、昨今におけるダム建設計画数の急減と中止、水質悪化等による水源の問題および地域的な人口増のために、今後さらに水需給が逼迫することが予想されている。大局的な水の適性配分の見地からの工業、農業用水の水利権の見直しを視野に入れながらも、より安定した水源確保のために、渡辺<sup>2)</sup>が指摘するように、水環境を保全・改善して再利用可能な新たな水資源を創出することがこれからの都市に求められている。一方では、農業やトリハロメタンなどの有機塩素化合物、内分泌攪乱物質のような有害化学物質、クリプトスポリディウムなどの病原性微生物などによる水質汚染が深刻となっており、これらへの対応も緊要な課題となっている。

このような水の再利用を基本とした新たな都市域水循環代謝システムの構成をめざすには、それを可能にするための基本的な考え方の整備と実施可能な技術の確立が不可欠である。後述するように、土木学会環境工学委員会“用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会”では、高度な水処理技術の開発とシステム化について研究を進め、健全な水循環システムについて議論を進めてきた。本稿では、同小委員会活動に携わってきた者の一人として、現在までの活動状況について報告するとともに、用水廃水の高度処理に関わる若干の私見を述べたい。

## 2. 用水廃水の高度処理技術

用水廃水処理法は、表-1 に示すように物理化学的

表-1 用水廃水処理法の分類

物理化学的方法	沈降分離	自然沈降, 凝集沈殿
	浮上分離	加圧浮上, 油水分離
	ろ過	急速ろ過, 緩速ろ過, プレコートろ過
	遠心分離	遠心沈降, 遠心ろ過
	中和・pH調整	
	酸化, 還元	オゾン, 促進酸化, 紫外線, 光分解, 湿式酸化, フェントン法
	吸着	活性炭処理, 特殊吸着剤
	イオン交換	イオン交換樹脂, キレート樹脂
	膜分離	逆浸透法, ナノフィルトレーション, 限外ろ過, 精密ろ過
	電気透析抽出	
生物学的方法	活性汚泥法	標準法, 各種変法
	生物膜法	浸漬ろ床法, 回転円板法, 流動床法, 散水ろ床法, 生物活性炭
	嫌気性消化	高速消化槽, 嫌気性ろ床, UASB
	特殊微生物処理	
	酸化池法	酸化池, ラグーン
	固定化法	包括固定化法, 架橋法, 担体結合法

処理法と生物学的処理法に大別される。おもな物理化学的処理法には、微小粒子や重金属のような溶解性物質を直接あるいは凝集後に固液分離する方法（中和、凝集、沈殿、ろ過、遠心分離、膜分離等）、溶解性物質を吸着あるいは交換する方法（活性炭吸着、イオン交換法等）、溶解性有機物を薬剤等により酸化（還元）する方法（オゾン処理法、促進酸化法、光分解、フェントン法等）などがある。また生物学的処理は、嫌気・好気あるいは浮遊・付着といった装置構成、運転条件の観点から、活性汚泥法や生物膜法などのいくつかの処理法に分類される。ここで特殊微生物処理とは、長期馴養や単離などにより得られた特殊機能を有する微生物を用いる処理を指している。

従来にない新しい方法で水を高度に処理しようと言う意味での高度処理の研究は、日本でもすでに1960年代から開始されている。例えば、オゾン処理は1967年頃から合田らにより、また逆浸透法は1970年頃から岩井らにより行われていたことが記されている<sup>3)</sup>。高度処理の概念はさらに以前にもあったと考えられ、このような試みの後、1970年代後半からは“高度処理”をタイトルにもついくつかの本が出版されている。

“高度処理”は、従来法では処理できない物質を処理する場合、あるいは従来法で処理できる濃度よりさらに低濃度にまで処理するときに適用するが、高度処理の概念自体は現在、被処理対象水によって若干異なっている。例えば、浄水処理における高度処理の対象には、異臭味、トリハロメタン類をあげることができ

る。異臭味については活性炭による除去が従来からの主な方法であり、トリハロメタン類については浄水プロセスの塩素消毒により生成することから、原因となるフミン酸などの有機物の低減や、塩素添加量を増加させるアンモニア性窒素の除去を中心に高度処理が行われる。また、下水処理においては、いわゆる活性汚泥法による二次処理後の、水系の富栄養化防止のための窒素やリンの除去プロセス（三次処理）が高度処理を意味していた。最近では、有機物や窒素、リンなどのような旧来からの汚染物質のみならず、前述したように有機塩素化合物や内分泌攪乱物質のような有害化学物質や病原性微生物が新たに出現するにおよび、オゾン処理法などの酸化法や膜分離法などが高度処理法として検討され、一部実用化されている。とくに浄水処理においては膜分離法が実用化あるいは実証実験中であり、下水処理分野でも浸漬型膜分離活性汚泥法による実プラントが稼働し、バクテリアのみでなくウイルスも除去されていることが報告<sup>4)</sup>されている。

廃水は通常の汚染物質のみでなく時として多彩な有害物質を含有するため、また、排水の再利用のためにすでに高度処理が適用されている場合が多々見受けられる。さらに、し尿は汚濁レベルが著しいため、膜分離法を含む各種生物学的あるいは物理化学的処理法が適用されて高度な処理が行われ、水質的には飲用に供することができる程度にまで処理されている場合もある。したがって、高度処理のための各種単位処理操作法はすでに利用されているものも多いが、水処理では多成分系を取り扱うがゆえに共存物質の影響を考慮する必要があることや、コスト、他法との組み合わせ処理や効果など、検討すべき課題が多く残されている。

### 3. 用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会

#### (1) 前身となった用水・廃水の物理化学的処理に関する研究分科会

本稿で話題にする“用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会”について記述するためには、その前身であった土木学会衛生工学委員会“用水・廃水の物理化学的処理に関する研究分科会”（主査：丹保憲仁（現、北海道大学総長））にふれなければならない。

同分科会では、平成元年4月から約5年間、大学、研究所、企業の研究者が集まり、物理化学的処理のユニットプロセスとシステム化について活発な研究活動を行った。設立当初の丹保先生の思いは、従来技術の基礎理論を論理立てて見直す作業を進めて足元を固めた上で、都市・環境水システムの再構築をめざして新

しい技術の展開をはかることであったと理解している。事実、当初の3年間は、従来法や従来システムの見直しがおもにははられたが、その中で新しい手法についても模索し始めた。例えば、“用廃水処理にもつと膜が使えないか？”という発想の元で、各種ユニットプロセスと膜分離法との組み合わせ処理を考える『膜を主分離プロセスとする用廃水処理システムの構成法』（科学研究費総合研究（A）、研究代表者：丹保憲仁、平成4～6年）が並行して推進された。このような活動は、異臭味や微量成分除去などをめざし、膜分離処理法が新たな浄水施設基準にみあう方法として大々的に検討され始める契機となった。また、同分科会を開始するにあたっては、若手研究者に自由な勉強の場を与えることが標榜された。結果的にはそれほど若くない方も含め多くの研究者が参加する手弁当の会となったが、これもこの会がきわめて興味深い、時代のニーズに即したものであったことを示している。分科会でのワークショップでは、活発かつ自由な雰囲気が尊ばれ、講演途中での質問も自由で、講演を一時中断して議論が沸騰することも珍しくなかった。この雰囲気は、研究小委員会となった今でも受け継がれている。

同分科会の当初の研究課題は分科会名が示すように物理化学処理が主であったが、次第に生物処理の領域も対象となっていく。これは、新たな汚染物質の出現もあり、水の高度処理や汚染土壌浄化において微生物機能が見直されるとともに、単離微生物や酵素の利用、遺伝子工学的アプローチの分野で斬新な研究方向が示されるようになった状況とも呼応している。分科会の後半の活動は、“用水・廃水の物理、化学、生物学的処理に関する研究分科会”として機能していたと記憶している。

## （2）用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会

上記のような背景をもとに、高度処理法を確立していくには物理、化学、生物の各処理技術を連携させた総合水処理法を確立していくことが重要であると認識され、前述の分科会をもとに、1996年4月に土木学会環境工学委員会『用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会』（小委員長：住友恒京都大学教授、以下小委員会と記述）が設置された。小委員会はI期（平成8年、9年）とII期（平成10～12年）にわかれ、平成11年からは渡辺義公北海道大学教授を小委員長として活動が続けられている。設立時の設置計画書には、上述のような高度処理技術の必要性に関する背景についてふれた後、次のように記述されている。

「…（中略）…、水処理技術の高度化をめざした研

究が進められているが、個々の技術を確立するための課題が山積しているとともに、物理・化学的処理と生物処理とを組み合わせた機能的なハイブリッドシステムの構成も重要な課題となっている。（中略）当該研究小委員会では、凝集や活性炭処理などの既存技術のみならず、光分解酸化や膜分離法などの期待される物理化学的処理のほか、生物凝集、生物活性炭、有用微生物・酵素の利用、遺伝子組換え法などの新しい生物関連技術とを合わせて、高度な水処理技術の開発とシステム化について研究を進めることとする。」

このような構想の下で、ワークショップなどの具体的な活動および目的とする高度処理技術・システムの内容、流域水循環の再構築について、幹事会およびワークショップの中で徹底的に議論された。その中で、小委員会ではワークショップ等の開催のほか、日常活動としていくつかのワーキンググループを結成し、①ユニットプロセスの処理性能の整理、②処理法組み合わせの際の考え方、③組み合わせの事例、などの情報整理を目的とした文献抄録のとりまとめなどの日常活動を行った。

当初私も幹事長として参画させていただいたが、長期外国出張が重なり、幹事長職は途中で後藤光亀先生（東北大学助教授）に交代いただいた。小委員会の活動は後藤元幹事長の報告<sup>5)</sup>に詳しいのでそれを引用させていただき、最近の活動を付け加えると、開催されたワークショップ等は表-2のとおりである。話題は多岐にわたっているが、膜分離、生物活性炭、吸着、オゾン処理、UASB、光触媒、紫外線照射、フミン質、病原微生物、変異原性、微生物リスク、環境ホルモン、有機塩素化合物の微生物分解、高度処理、都市水代謝、流域水管理、流域水循環のようなキーワードが目につく。分科会、小委員会の活動途上においても新しく問題となる数々の汚染物質が出現した。例えばクリプトスポリディウムには塩素消毒が有効でなく、このことは従来からの塩素消毒プロセスに警鐘を鳴らすとともに、万能のように考えられてきた既存技術も対応できない場合があることを知らしめた。また、微量汚染物質としての内分泌攪乱物質（一部の農薬もその中に含まれる）については、オゾン酸化、促進酸化などのような化学酸化処理や膜分離法などによる処理が検討されているが、確立されるにはいたっておらず解決が緊要な課題となっている。このような新たな汚染物質に対応できる水処理技術やシステムの開発とその機能評価など、小委員会の検討課題は多い。

## （3）流域の健全な水環境の構築

とくに小委員会活動の後半（第II期）においては、用水廃水の高度処理と再利用技術を基本技術とし、流

表-2 「用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会」活動経過

第1回ワークショップ 1996. 7.22 於 京都大学 (参加: 25名)		
一高度処理と水の安全性確保一		
水道水の消毒と変異原性の生成	京都大学	伊藤 禎彦
膜分離による廃水処理技術	武蔵工業大学	長岡 裕
水道における膜処理と水道水の安全	(株)ユニチカ	山本 規雄
有機塩素化合物汚染と微生物分解	京都大学	尾崎 博明・越川 博元
第2回ワークショップ 1997. 1.11 於 岐阜大学 (参加: 28名)		
光触媒反応の水処理への応用	明星大学	田中 修三
フミン質と農薬の活性炭吸着特性	岐阜大学	松井 佳彦
水処理における最近のトピックス	国立公衆衛生院	園包 章一
第3回ワークショップ 1997. 6.20・21 於 神戸 (参加: 54名 (内若手16名))		
オゾン処理における副生成物質について	水道機工(株)	橋本 暢之(若)
ゴミ浸出液の処理	日本ガイシ(株)	鈴木 重浩(若)
海藻を指標生物とした排水の環境影響評価	宮崎大学	鈴木 祥広(若)
生物膜の構造とその機構	北海道大学	岡部 聡
質の使用を中心とした新しい都市水代謝システム	北海道大学	渡辺 義公
Changing Characteristics of Pollutants in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Treating Landfill Leachate	北海道大学	Hang-Sik Shin
第4回ワークショップ 1997.10.17・18 於 仙台		
浄水処理における硝酸性窒素の除去技術	クボタ(株)	松本 隆仁(若)
機械攪拌式ドラフトチューブによるMAP法による基礎的研究	前澤工業(株)	吉野 正章(若)
沖縄県企業局の水需要計画と海水淡水化施設について	(株)日水コン	篠龍 一郎
生物活性炭の機能解析	長岡技術科学大学	亀屋 隆志(若)
新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物のエネルギー化、再資源化	東北大学	野池 達也
第4回ワーキング 1997.11. 4 於 東京		
水源対策と浄化高度処理について	東京都水道局	本山 智啓
第5回ワーキング 1997.12.12 於 東京		
下水道におけるクリプトスポリディウムへの取り組みについて	建設省土木研究所	小越真佐司
下水道におけるクリプトスポリディウムオーシストの検出技術について	建設省土木研究所	諏訪 守
水道における病原微生物及び微量汚染物質への対応について	国立公衆衛生院	園包 章一
第5回ワークショップ 1998. 1.23・24 於 沖縄 (参加: 42名)		
沖縄県における水資源と浄水技術に関する課題と展望	沖縄県企業局	川満 尚
回分生物反応と凝集加圧浮上の組み合わせによる高度汚水処理(アクアフローラ)について	扶桑建設(株)	久保谷 隆(若)
排水からの水回収技術	栗田工業(株)	山田 亮一(若)
RO膜とNF膜の開発と技術の動向(I)	日東電工	河田 一郎
RO膜とNF膜の開発と技術の動向(II)	東レ	竹内 弘
第6回ワーキング 1998. 2.25 於 東京		
非特定汚染源対策を含めた流域管理計画の策定 その現状と課題	京都大学	市川 新
第6回ワークショップ 1998. 8.21・22 於 京都		
紫外線照射による水処理における副次的効果	東京大学	大瀧 雅寛
用水・排水の高度処理技術の役割と展望	東北大学	後藤 光亀
環境ホルモン問題とその取組みについて	京都大学	伊藤 禎彦
第7回ワークショップ 1998.10.24 於 岐阜大学		
水環境における高度処理の現状と課題	岐阜大学	湯浅 晶
水中有機物群の固定層吸着破過曲線の推定	岐阜大学	李 宇生(若)
小規模下水道における高度処理	住友重機械工業(株)	多田 雅之(若)
第35回環境工学研究フォーラム企画セッション 1998.11.24		
一流域の水管理における用水・廃水の高度処理技術の役割と展望一		
コーディネータ	北海道大学	渡辺 義公
小委員会の活動報告	東北大学	後藤 光亀
浄水技術と水道事業をめぐる最近の話題	大阪府水道部	藤好紘一郎
環境ホルモンを含む微量化学物質への対応	環境庁	
流域水管理と微生物リスク制御	建設省土木研究所	田中 宏明
流域の水循環と水処理技術の役割	岐阜大学	湯浅 晶
ワークショップ 1999. 7. 5 於 札幌		
リンのリサイクルのための機能性酵素の利用	北海道大学	但野 利秋
水処理用新材料の開発	北海道大学	岩本 正和
水質マトリックスについて	北海道大学	丹保 忍仁
Research on Characterizing Humic Substances and the Relationship to Pollutants and Reaction By-Products	イリノイ大学	Roger Minear
ワークショップ 2000. 7.24 於 東京		
逆浸透、電気透析、正浸透の水処理への応用	東京工業大学	浦瀬 太郎
浄水処理における膜ファウリング機構	北海道大学	渡辺 義公
水処理用膜モジュールの開発	東レ	山村 弘之
玉川浄水場におけるパイロット実験、他	東京大学	滝沢 智
吸着/膜ハイブリッドプロセス	岐阜大学	松井 佳彦

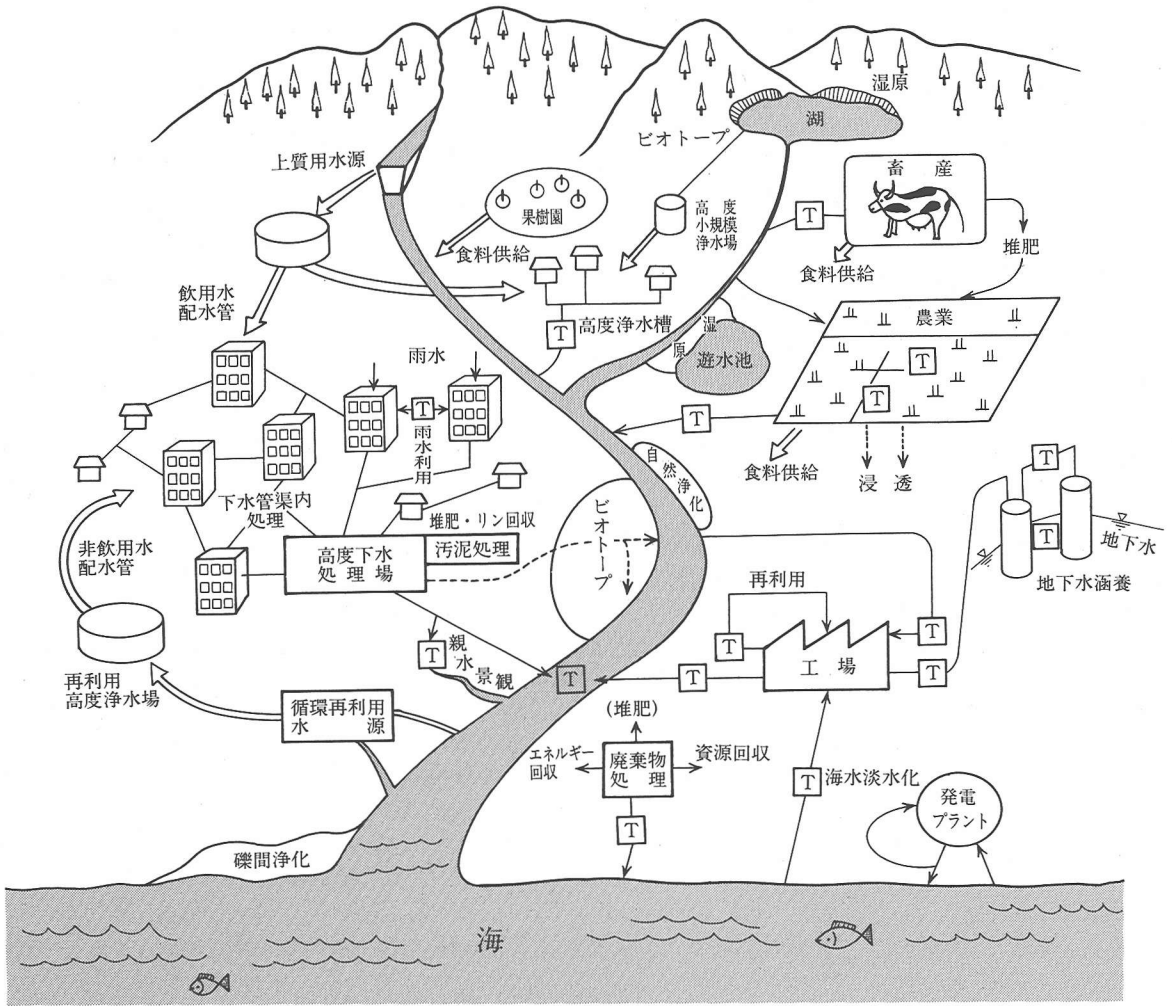


図-1 流域での水管理システム

域水環境の改善・保全と円滑な水運用とを実現する“流域水循環代謝システム”に関する議論が高まった。本稿でもたびたび記述しているように、水資源の比較的豊富な我が国においても、効率的な水資源の活用や、すではじまっている国際的な水問題への対応が不可避であるとの認識によっている。その根底には、前世紀からの継続課題であるエネルギー・資源問題があり、水資源の再利用、循環システムは、循環型社会システムの構築の一環として確立される必要があることも視野に入れられている。すでに、行政レベルにおいても同様な認識があり、「健全な水循環系構築に関する連絡会議」（環境省、国土交通省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省）等を通じて総合的な水資源政策等が推進されている。小委員会では、官学民の委員による多面的な意見の交換により、学術的のみでなく実際の解決方法を模索している。

小委員会では、“流域での水管理システム”の例についても多くの議論をした。図-1は後藤<sup>5)</sup>、渡辺<sup>2)</sup>らの提案に筆者が若干の改良を加えたもので、小委員会による結論ではなく、筆者らの個人的主張も含まれている。図では、水循環のための要素として、水貯留（涵養）、水の適正分配、雨水利用、下水高度処理・再利用、下水管渠内処理、工場排水処理・再利用、地下水保全・利用、農業排水処理・再利用、堆肥生産、肥料成分回収、資源・エネルギー回収、生物資源保護、親水・景観などが取り上げられている。

渡辺<sup>2)</sup>は、図中にも見られるように、「人為的な汚染を受けない清澄な水源から取水した原水を一人一日20リットル程度取水して、膜を主体とする浄水システムで処理して供給する飲用水専用水道を敷設し、再利用水源系の非飲用水水道と二元化するのが理想」と主張している。このような水道二元化には異論もある

う。しかしながら、世界的に見るときわめて上質な水道水（時には高度処理浄水）が飲用とともに、トイレ用水、洗車用水、散水などに使われる現状は、エネルギー的にも感覚的にさえも看過できず、深刻な水問題に直面していく今後において受け入れられるとは思えない。このような二元化水道を敷設するには長期間を要することから非現実的とする意見に対しては、新しく建築されるニュータウンやビル、小規模地域からまず敷設することが考えられる。膜分離法による浄水施設は小規模化が可能であり、水源水質が悪い場合にも適用できる。困難はあるが、市民も含めて真摯に二元水道を議論しても良いのではないだろうか。

また、ボトルウォーターの活用についてもあえてふれたい。1998年における国土庁の統計によると、国民の48%がすでに水道水を直接に飲用に供することはないと言う。筆者による京都大学での講義における学生への最近のアンケート（約200名を対象）では、料理をすることが少ない学生が対象であることを割り引く必要があるが、70%以上がボトルウォーターなどを飲用し、水道水を直接に飲用することは少ない。主な理由としては、異臭味、安全性、配管の老朽化による赤水などがあげられた。このことは、水道の信頼性に対して次々と問題点が出現する状況において、従来水道とは別の飲用水（料理用を含む）の供給方式があり得る事を示している。ちなみにバンコク（タイ）の一般家庭では再利用容器につめられた10リットルの飲用水（日本円で10Lが約30円）が飲用として用いられ、水道水は漏水による安全性の問題から立派に雑用水（料理用を含む）として利用されている。状況が異なる話であることからこの事例をそのまま日本に推奨しようとするわけではない。運搬などの問題もあり、日本ではボトルウォーターにのみ依存することは考えにくい。とくに日本の都市部の一般家庭ではすでにボトルウォーターを利用することに抵抗があるとは思えない。わが国の現状のボトルウォーターはばかばかしいほどの高値であるが、もっと安価なボトルウォーターをいかに供給できるかがむしろ問題であろう。従来の無駄遣い水道システムを当分の間あえて使い続けるとするならば、今の水道システムと水質を維持しながら、さらなる高度浄水を希求せず、個別浄水器の設置や、安全、美味で安価なボトルウォーターの活用を考えることもできる。

ボトルウォーターを使う社会システムを是が非でも作ることを主張しようとしているのではない。悪い水源からどうしてもおいしい水を作ろうとして高度処理し、庭に撒く愚について異論を唱えている。水道、下水道を含む水利用システムについて従来の概念にとらわれず議論していくことは、水循環システムの再構築

にとって不可避であると考えられる。

#### 4. 水循環システムへの膜分離法導入の可能性と期待

健全な水循環システム再構築のためには、次々と出現する汚染物質に迅速に対応できる高度処理法の導入が不可欠である。生物学的処理法では特殊微生物を用いるバイオテクノロジーや遺伝子工学を駆使する有害物質バイオアッセイ法が新技術としてとりあげられ、物理化学的処理法では、オゾンなどによる酸化法、各種膜分離法、活性炭や他の特殊吸着剤を用いる吸着処理法が注目を集めている。いずれも今後の重要な技術であるが、分科会、小委員会では、これらの技術の中でも“膜分離法の利用可能性”を常に念頭に置いてきた。本章では、いささか手前味噌になることを恐れながらも、膜分離法の動向、水循環システム再構築における膜分離法の可能性と期待について述べてみたい。

##### (1) 注目される膜分離法

膜分離法が最近注目を集めてきた理由としては、次々と性能がよい水処理用の膜が開発され、有機、無機を問わず、ほとんどの汚染物質を高効率に分離可能であることが挙げられる。また、スケールメリットが無いかわりに小規模施設であっても設置が可能であり、新たに優れた膜モジュールが開発されても既存のものを取り替えるだけでほぼ対応できるユニット性を有している。さらに、たとえ新たに即応することが求められる新しい有害汚染物質が出現したとしても、膜分離法を設置しておけば、多くの物質はすでに除去されていることが期待できる。例えば、浄水分野でクリプトスポリディウムが問題になっているが、膜分離法が浄水処理過程の一部を構成しておれば問題にもならない。後述するように、内分泌攪乱物質の多くも膜により除去が可能と考えられ、膜分離法は汚染物質の分離システムとしてきわめて優れていると言える。

##### (2) 膜分離法利用の経緯

膜は、それが有する孔径が大きいものから順に、精密ろ過膜、限外ろ過膜、逆浸透膜などに分類され、被処理物質の性状に応じて使い分けられる。逆浸透膜はもっとも物質阻止能が高い膜で、有機、無機の溶質が高効率に分離できる。逆浸透法はアメリカで開発され、実用に供しうる膜は、1960年代初頭に Sourirajan により開発されたアセチルセルロース膜である。アセチルセルロース膜は、筆者も1974年頃に実験室で製造し水処理目的の逆浸透法実験を行ったが、高い

塩類阻止性能を有し大変使いやすい膜であった。しかし、当時の同膜は、フェノールについては負の阻止性能を示すなど、有機物阻止能にいくつかの問題点があった。また、水透過フラックスが小さく、数十気圧の印加圧力を要することも多量の水を扱う水処理には難点であった。その後、複合ポリアミド膜のように従来のアセチルセルロース膜よりも優れた溶質阻止性能を示す高分子膜が開発されたが、同様に高压を要することから1970年代から80年代前半にかけては、一部の海水脱塩や超純水製造など限られた用途にのみ用いられた。1980年代後半に入ると欧米で限外ろ過膜、精密膜ろ過膜を用いる浄水処理が試みられるようになり、“用水・廃水の物理化学的処理に関する研究分科会”でも検討を開始した。1991年からは限外ろ過膜、精密膜ろ過膜を用いる「膜利用型高度浄水システム開発研究（MAC 21計画）」が国レベルで進められた。このころになると、逆浸透膜と比較して塩阻止能は劣るが10気圧以下の印加圧力で操作でき、かつ水透過フラックスも高い膜など、従来とは性能が異なる膜（ナノろ過膜）が注目を集め始める。MAC 21計画に引き続いて推進された「膜利用型新高度浄水技術開発研究（高度処理 MAC 21）」では、ナノろ過膜を用いて塩素消毒副産物や農薬、臭気物質などを除去する浄水処理が検討され、浄水処理への膜分離導入の契機となった。最近では、そのころ使われたナノろ過膜よりさらに脱塩率が高く、2~3気圧でさえ運転可能な膜（ここでは超低圧逆浸透膜と称す）が開発されている。これは、操作がポンプ加圧で十分であるとともに、ビルの屋上から通水することでもろ過が可能であることを示しており、膜分離法の水処理への適用範囲を大きく拡大するものである。

### (3) 超低圧逆浸透法

筆者は超低圧逆浸透膜に注目している。従来のナノろ過膜は共存イオンの影響を受けやすく、とくに一価塩類の除去率が低下するとともに、有機物除去率も必ずしも高いものではなかったが、超低圧逆浸透膜（日東電工製 ES 20）は、共存イオンの影響をあまり受けず、NaCl 除去率として99%程度が得られた。ただし、超低圧逆浸透膜による溶質阻止に関する確たるデータはまだ少ない。図-2は、上記膜を用いて種々の有機化合物（表-3）を異なるpH下、印加圧力0.3MPaで分離した結果を示したものである。（詳細については既報<sup>9)</sup>を参照されたい。）図中には2,4-ジクロロフェノールやペンタクロロフェノールのような内分泌攪乱物質も含まれるが、総じて分子量150程度以上ではほぼ90%以上の除去率が得られ、それ以下の除去率を示しているいくつかの化合物についても解離状

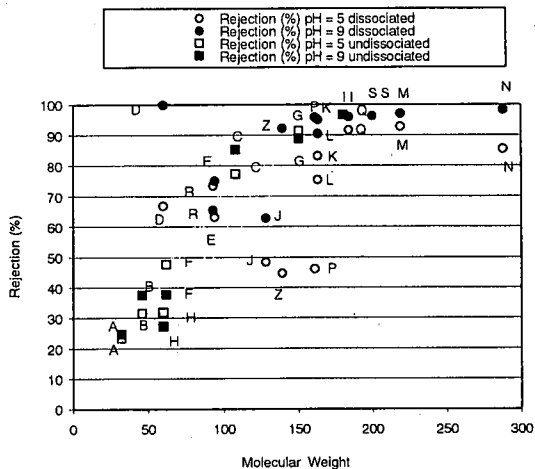


図-2 有機化合物除去率の分子量依存性

表-3 実験に用いた有機化合物

compound	M.W.	pKa	symbol
Methyl alcohol	32	—	A
Ethyl alcohol	46	—	B
Benzyl alcohol	108	—	C
Acetic acid	60	4.7	D
Phenol	94	9.9	E
Ethylene glycol	62	—	F
Tri (ethylene glycol)	150	—	G
Urea	60	—	H
Glucose	180	—	I
4-Chlorophenol	128	9.4	J
2,3-Dichlorophenol	163	7.7	K
2,4-Dichlorophenol	163	7.9	L
2,4,5-Trichlorophenol*	219	6.7	M
Pentachlorophenol*	288	4.7	N
O-Nitrophenol	139	7.2	Z
P-Nitrophenol*	161	7.1	P
2,4-Dinitrophenol	184	4.1	Q
Aniline	93	4.7	R
MCPA	200	3.1	S

態では90%以上の除去率が得られている。筆者は、上記のような実験結果と膜の電位測定などの界面化学的検討とから、膜の溶質分離がおもに溶質の分子量と解離状態および膜電位に依存することを見出している。図-2において低分子量化合物の除去率が分子量の減少とともに低下しているが、低分子量の有機物は易分解性のものが多い。内分泌攪乱物質や農薬（一

部内分泌攪乱物質を含む)のような高分子量化合物の除去率が高いことがむしろ重要と言える。図-2の結果からもある程度予測し得るが、他の内分泌攪乱物質について同様の膜分離実験を行ったところ、ビスフェノール A (分子量 228.3) と 17-β エストラジオール (分子量 272.4) についてそれぞれ 98%以上、99.5%以上の除去率が得られた。このように超低压逆浸透膜は低压下で内分泌攪乱物質のような有害有機物をも除去しようと期待できる。ただし、ここで用いた膜よりも塩阻止能が低い低压逆浸透膜については、内分泌攪乱物質の除去率が経時的に低下する傾向が見られ、上記の結果が低压逆浸透膜全般の傾向を示しているわけではない。

上記のように超低压逆浸透膜は優れた性能を有する膜であるが、非イオン状態でも存在する砒素やホウ素のような無機物質、非解離状態の有機物については除去率が悪いものがある。また、濃縮技術である以上、効率的な濃縮水の処理技術の確立が同時に必要である。最近では非常に汚れにくい膜も開発されている<sup>7)</sup>が、膜のファウリングに関する検討も重要である。より完全な高度処理法としての膜処理法の基礎を固めるためには、このような課題に関するさらに詳細な検討が望まれる。

#### (4) 膜分離法への期待

上述のように、膜分離法の環境水への適用は最近になって急激に進められようとしている。全国水道研究発表会では、このような状況を反映して、10年前にはほとんどみられなかった浄水処理セッションでの膜分離法の発表が、昨年度には 95 件中 23 件を占めるほどになっている。これも膜分離法に対する大きな期待の表われと言える。膜分離法は汚染物質除去技術であるとともに造水技術であることから、これをいかに水循環システムへ組み込んでいくかが、生活系、産業系全体における水の有効利用のための鍵といえよう。総合的には、被処理対象水の特性に合わせ、既存あるいは新開発の他の生物学的処理あるいは物理化学処理との組み合わせによる水処理システムの構成がさらに威力を発揮するものと期待される。

## 5. おわりに

「用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会」という与えられた課題を越えて、同委員会の目標である高度処理技術の開発・確立、健全な水循環の構築、基礎技術の一つとして期待される膜分離法についても記述させていただいた。

本稿を叙する機会を与えてくださった元小委員長、住友恒先生(京都大学教授)、当初より分科会や科学研究費(総合研究(A))への参画をお許し下さった丹保憲仁先生(北海道大学総長)、日頃から数々のご教示をいただいた前小委員長、渡辺義公先生(北海道大学教授)に深謝いたします。また、小委員会の幹事長職を引き継いでいただいた後藤光胤先生(東北大学助教授)、種々の重要な用務をこなしていただいた伊藤禎彦先生(京都大学助教授)をはじめとする小委員会の方々には大変お世話になりました。改めて感謝の意を表します。

本稿が掲載される頃には新しい体制で同小委員会が再発足しているものと思われます。従来の活動を基礎に、さらに大きな目標に向かって小委員会活動が継続し、筆者も微力を尽くせることを願います。

## 参考文献

- 1) WHO: Strategy on Sanitation for High-risk Communities, Report by the Director-General, 1997.
- 2) 渡辺義公: 新しい都市代謝システムを支える水処理技術, 第 35 回環境工学研究フォーラム講演集, pp. 177-179, 1998.
- 3) 京都大学工学部土木系教室京大土木 90 周年記念事業会: 京大土木 90 周年記念誌, 1987.
- 4) 酒井英彦: 英国での膜分離下水処理の実例, 用水と廃水, Vol. 41, No. 5, pp. 58-59, 1999.
- 5) 後藤光胤: 「用水・廃水の高度処理技術に関する研究小委員会」活動報告, 第 35 回環境工学研究フォーラム講演集, pp. 180-182, 1998.
- 6) 尾崎博明, Li Huafang: 超低压逆浸透膜による有機化合物の分離特性, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 7-39, 2000.
- 7) 蜂須賀久男: 汚れにくい低压逆浸透膜 "LF 10", 造水技術, Vol. 24, No. 1, pp. 36-40, 1998.

(2001.3.7 受付)