●特集 水資源の有効利用システムと膜技術

膜技術を基盤とした水資源有効利用システムの構築

中尾真一

東京大学大学院 工学系研究科 化学システム工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

Development of System Making Efficient Use of Water Resources Base on Membrane Technologies

Shin-ichi Nakao

Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

21st century is called "Water Century", because water shortage will be big problem at many places in the world. Amount of river water will be much less than water requirement for agriculture, industry and living. Therefore water will be important resource and its efficient use will be necessary.

Water recycle system will be one of potential solutions, and for constructing this system membrane technology will be essential technology.

In this paper conventional system to use water and its problems are reviewed, and then new system to be developed by using various membrane technologies will be proposed. Finally subjects to be developed for construct proposed system will be explained.

Key words : water resources / water recycle system / water reuse / membrane technology

1. はじめに

21世紀は「水の世紀」と言われている。我が国は水が豊富で、大きな水不足は十数年に一度あるかないかであり、「水の世紀」の意味がピンと来ないが、中国では黄河はかなりの部分が完全に涸れており、河口に位置する天津ではすでに下水処理水の再利用が大規模に始まっている。また、シンガポールでは下水処理水を水道水として給水する計画が進行中である。

現在でも水不足の国や地域は多いが、2025年に

は中東地域、地中海側アフリカ諸国、韓国、パキスタン、インド、南アフリカなどは水不足が深刻となり、またメキシコ、中国、アメリカ合衆国、イギリスを除くヨーロッパ諸国なども水不足地域、国となる。

人間の水使用量は生活水準の向上に伴い増加し、農業、産業用水量も増加する。このため、先進国はもとより、多くの発展途上国や降水量の少ない地域の国々では、水量を確保することが今後の国家発展、繁栄に不可欠であり、水を貴重な資源として考えるようになってきている。これが、

「21世紀は水の時代」と言われるゆえんである。

例として河川水を取り込み、利用し、廃水は処理して河川下流に放流するという、一過式の従来の水利用システムを考える。この場合、河川水を有限量の資源と考え、必要量が取り込み可能量（最大値は河川流量）を超えた場合、再利用し地域内で循環使用しない限り、必要量を満たすことができないことは明白である。従って再利用を基礎とする水資源の有効利用システムの構築が必須となるわけである。そしてこのシステムの基盤となる技術が膜技術なのである。

ここでは、要所要所に膜技術を配した水資源の有効利用システムがどのようなものかを考えてみたい。

2. 従来型の水利用とその問題点

現在の一般的な水利用法をFig. 1に示す。水源として河川を例にとると、河川から取り込まれた水は農業用水、産業用水、生活用水として利用され、それぞれの目的で利用後、まったく処理をせずに、あるいはしかるべき処理をおこなった後、それぞれ使用した地域の下流に放流され、下流地域で再び取水され利用されている。このため、処理が完全でない場合（多くの場合は排水基準クリアが目標で、完全に清澄な水にはなっていない）や、処理はしたものの河川の自然浄化能力を超えた負荷が放流されている場合には、下流域に行くほど水質が悪化していく。これが従来型の水使用法の第一の問題点である。

また、河川からの取り込み量が全量排水として再び河川に戻るわけではない。とくに取り込み量の大きな農業用水は地表から蒸散して空気中に放出される量が多く、この水蒸気は大きな地域規模で見れば確かに雨となって地上に戻ってくるが、同一地域に雨として降ることはまれである。このため、地域の取り込み量は排出量よりも多くなり、下流へ向かうほど河川流量は減少し、ついには河川が断流することになる。中国の黄河の断流はそのよい例で、これが従来型の第二の問題点である。

更に、生活用水、すなわち水道水のシステムに

Fig.1 Conventional system for using water resources

もいくつかの問題点がある。ペットボトル入りの水が飲用として大量に流通していることから、それに負けないような水質の水道水を供給しようと、我が国に限らず世界の先進諸国では、水道浄水プロセスに活性炭吸着やオゾン処理、膜処理などの高度処理を導入し、まさに水に磨きをかけている。確かに近年、高度処理を導入した浄水場の水は水質が格段によくなっており、おいしくなっている。しかし、Fig. 2に示すように、一般家庭で250 l/man・day、オフィスで150 l/man・dayの平均使用量のうち、一般家庭では24%、オフィスにいたっては実に45%がトイレに流されている。人間一人当たりの飲用水量は一日約2 lから3 lで、家庭の水使用量から見ればわずか1%前後に過ぎず、それすらもボトル水に取って代わられつつある。つまり飲んでおいしいようにと高いコストをかけて磨きかけた水は、ほとんどその目的である飲用には使われず、1/4はトイレに流されているのである。洗濯や風呂にもこれほどまでに磨きかけた水が必要であろうか。この点が水道システムの第一の問題点である。

Fig. 2 Amount and purposes of personal water usage

第二の問題点は水道水の送配水システムについてである。我が国の浄水処理、下水処理の消費エネルギーは全エネルギー消費の数%程度であり、そのうち水道事業における電力使用量内訳の63%は送配水電力である。なぜこのように大量のエネルギーが必要なのであろうか。近年の水道システムは大規模な浄水場を中心に置いた広域水道システムとなってきた。このため浄水場からはるか遠く離れた場所にまで送水しなければならず(場合によっては家庭の蛇口に届くのは浄水場を出てから2日後となるケースもある)、大きなポンプ動力を必要とすることになる。確かに浄水場は大型化してスケールメリットの恩恵を受けているが、エネルギー消費増加とのバランスが取れているかは疑問が残る。特に大きな問題は、送配水管内での水質劣化である。たしかに浄水場を出る時点では水質は非常によくなっているが、送配水管の内部はそれほど清浄ではない。このため、送配水管内に長時間とどまるうちに水質が悪化していき、家庭の蛇口を出るときにはおいしい水ではなくなってしまう。これでは何のために高いコストをかけて水を磨き、多量のエネルギーを使って送配水しているのか大きな疑問が生じる。

従来型の廃水処理技術にも問題が生じてきている。既に述べたように、従来型の水使用では、ある地域で廃水処理した放流水をその下流の地域で

再び取り込み、浄水処理して水道水とする。しかしながら、活性汚泥法に代表される従来の廃水処理技術では、近年大きな問題となってきた病原性微生物、原虫であるクリプトスポリジウムやジアルジア、ウイルスである小型球形ウイルス(SRSV)、細菌であるレジオネラなどの除去は完全ではない。下流域でこれらの微生物を取り込むと、やはり従来型の浄水処理法である凝集沈殿、砂濾過といったプロセスでは取り除くことは難しく、塩素殺菌に頼ることになるが、今度はトリハロメタン類の発生が問題となってくる。中にはクリプトスポリジウムのように、塩素殺菌が有効ではない微生物も存在する。

3. 新しい水資源有効利用システム

既に述べたように河川水量は地域ごとの取り込みにより減少し、しかも使用可能な水資源量が需要量を下回ると、当然の結果として河川は涸れてしまい、それより下流域では水の取り込みができなくなってしまう。このような事態が、2025年には世界の多くの地域で実際に生じることが懸念され、これゆえ「21世紀は水の世紀」と呼ばれるわけである。

このような状況を回避するにはどうしたらよいのであろうか。農業用水においては蒸散量を如何

に少なくするかが課題であるが、生活用水、産業用水においては、廃水を再使用すれば新たな河川水の取り込みは不要となる。すなわちある地域ごとに水を再利用し、地域にホールドアップ量として必要な水量を保持すればよいわけである。このように考えると、水が資源と見做せ、しかも如何に重要な資源であるかを容易に理解できるであろう。

Fig. 3には地域ごとに水資源を循環再利用するシステムを示す。循環再利用とはいえ水質維持の観点からは完全な閉鎖系を組むことはコスト等の面から難しく、ホールドアップのメイクアップ分の取り込み、それに見合う量のパーズは必要であろう。この場合河川流量は減らず、最下流まで水量を維持することができる。

地域内の水循環の一例をFig. 4に示す。ここでは水再生センタを中心に再利用水が生活用水や、農業用水、産業用水として使われる。産業用水はひとつ、あるいは複数の工場での循環再利用も考えられる。生活用水（水道水）は飲用や厨房で使用される高水質なものトイレに流すような雑用水とに分けられ、最低でも2元給水システムが必要になる。前述した送配水管内の水質劣化を避けるためには、送配水距離を短くする（小さな浄水場を分散設置する）方法や、浄水場での水浄化はあるレベルにしておき、家庭等で実際に使用する直前で高水質な水に浄化する方法などが考えられる。

このようなシステムに現状の水処理技術、例えば浄水では凝集沈殿、砂濾過、廃水処理では活性汚泥、沈降分離といった技術を使うと、水の再使用に十分な水質を得ることは難しい。したがって高品質な処理水が容易に得られる各種の膜技術が基盤となると予想される。

さらに人間の心理として、廃水を処理した水を直接再利用水として飲んだり、風呂や洗濯に使ったりすることには抵抗があろう。この点は水循環再利用を考える上で、実際には非常に重要な点である。シンガポールで計画されている下水処理水を再利用して水道原水にする計画も、この点が障害となり、国民に受け入れられていないと聞いて

Fig.3 Newly developed system for use of water resources

いる。実際の河川では上流、下流間でまったく同じことが起こっているが、先進諸国においても何ら問題は発生していない。これは廃水処理水が再び水道原水として取り込まれるまでの間に、一度河川の自然浄化を経ており、これが人々に感情的な安心感を与えているものと考えられる。したがって、水循環再利用システムの中に自然浄化をうまく組み込むことが大切である。

この意味では、Fig. 4に示すように、農業用水を循環系の中にうまく組み込むことが大切であろう。例えば田圃は見方を変えるならば水の自然浄化池と見ることもできる。田圃から流れ出た水が集まってきた小規模河川（用水）となれば、水道原水としての抵抗はかなり低減されるのではないだろうか。問題は肥料成分や農薬などの混入を如何に防止するかであるが、ここでも膜技術の活躍が期待される。

4. 新しいシステム構築の課題

Table 1には、水資源有効利用システム構築のた

Fig.4 An example of regional recycle for water resources usage

Table 1 Technologies to be developed for constructing system of water resources usage

1 リスク管理指標

病原性微生物、ウィルス、農薬、環境ホルモン、N、P、塩分 他

2 要素技術の適合化

要素技術の性能評価(膜・吸着・オゾン)
低コスト化(NF膜の洗浄、MBRの運転費)

3 システム設計

地域社会システムへの適合化
システム規模の適正化
用途別水使用管理システム

をどのように管理するかなどが第一の技術開発課題である。リスクとしては病原性微生物、ウィルス、農薬、環境ホルモン、富栄養化にかかわるN、P、そして各種の塩分などが予想される。これらは膜技術で除くことができるが、原水性状と膜透過水水質との関係は必ずしも明らかになっていない。

第二の課題は、水処理の各種の要素技術をいかにしてこの新しい水資源有効利用システムの中に適合させるかである。そのためには膜、吸着、オゾンなどの水処理要素技術の定量的な性能評価法の確立が不可欠である。また、システムの実用化のためには低コスト化も大きな課題である。例えば比較的難しいNF膜やRO膜の洗浄経費、MBRの運転費などの低減が必要である。

第三の課題はシステムの設計である。システムを導入する地域は、場所によって社会システムが大きく異なっている。したがってそれぞれの地域のそれぞれ異なる社会システムに適合させる技術

めの技術開発要素をまとめた。水を循環再利用する際の最大の問題点は、再利用水の安全性である。再利用水からどのようなリスクが予想されるか、リスクの指標として何を用いるか、そしてリスク

の開発は不可欠である。また、システム規模の適正化も重要課題である。水処理技術のスケールメリット、送配水過程の水質劣化、農業、産業、生活の各種用途での水需要量など、システム設計に当たって考慮すべき点が多い。

システム内で使用される膜技術についても、もちろん開発課題はたくさんある。なぜなら、現在実用化されている膜、あるいは膜プロセスは、このような水資源有効活用システム内での使用を前提に開発されたものではないからである。なお、膜技術そのものについては、本特集の他の項で紹介、解説されるので、ここでは述べないことにする。

5. おわりに

水を有限量の資源として捉えると、その有効利

用のためには複雑に絡み合った広範囲なシステムの構築が必要となる。そしてシステム内のいろいろなポイントでは、各種の膜技術が不可欠であり、システムの基盤は膜技術になる。もちろん、システムの実現のためには、関連技術、周辺技術の開発も必要であるし、インフラの整備も必要である。また、導入される膜技術についても、個々の使用場所に適した膜の開発、プロセスの開発、運転法の開発などが必要となる。コストやLCAも組み込んだ、今後のシステム構築技術の開発に期待したい。21世紀は水の時代である。水なしには人間は一日も生きられない。その意味で、膜技術を基盤とした水資源有効利用システムが実現するか否かは、21世紀の人類の存続を握っているといっても過言ではない。膜技術研究者の責任は大きい。

(受付 2003年8月12日 掲載決定 8月14日)