

深刻化する世界の水不足

水不足が深刻化する中、世界では水資源を確保することが重視され、水の奪い合いによる紛争さえ起きている。

地球は水の惑星といわれるが、その水のほとんどは海水が占め、人が利用できる淡水の量は全体のわずか0.01%に過ぎない。そこへもってきて、水不足の最大の要因である人口増加は止まらず、水の利用が増加することが見込まれている。その上、地球温暖化がリスクとして加わり、水資源の危機は高まるばかりだ。世界中から食糧を輸入し、食糧生産に必要な水を海外に頼っている日本にとっても、世界の水不足は他人事ではない。

水不足というと、従来は水だけが着目されていた。しかし人口の増加に伴い、水の確保だけでなく食糧増産やエネルギーの確保が急務となっており、「水の問題は、食糧やエネルギーの問題と一体化して解決すべき」というパラダイムシフトが起きている。この概念から、廃水プラントをエネルギーや栄養分の製造プラントとしてとらえ

直す流れがあり、水の再利用などに総合的な技術革新が求められている。しかし、比較的水資源の豊富な日本はこれまで、公衆衛生や環境の面から水の研究が進められてきており、水の再利用はあまり考えられてこなかった。また、水を管理する省庁も上水道は厚生労働省、下水は国土交通省、工業用水は経済産業省というように別々で、水の施策も異なっている。

「どのような用途でも水であることに変わりはなく、使った水も処理すれば同じ水です。これからは水を One Water ととらえ、有効活用していくことが必要です」と産業技術総合研究所四国センター長の田尾博明氏は語る。田尾氏は2015年にドイツで開催されたCS3会議^{*1}に出席。「Chemistry and Water」を主題に、世界が水不足に直面する中で化学者として何をすべきかを議論してきた。^{*2}「欧米や中国は、水の問題を食糧やエネルギーの問題と一体化して取り組むという理念を示し、技術開発を進めています。このままでは、日本だけが大きく取り残されるかもしれません」と田尾氏は不安の色を隠さない。

*1 Chemical Sciences and Society Summit 日米英独中5カ国の化学者が参加して、人類が直面する重要な課題を主題に議論する。会議で集約された意見は、白書として公開される。日本からは日本化学会やJSTが参画。

*2 本誌2016年2月号「化学会発」に田尾氏からの報告を掲載。また、下記URLで白書を見ることができる。URL: http://www.acs.org/content/dam/acsorg/global/international/regional/eventsglobal/final_cs3_white_paper_2015

OVERVIEW

新しい水循環システムへ 持続可能な水利用を目指す



世界的に水不足が深刻化し、水資源の確保が重視されている。これまで川などに流していた下水や廃水を循環させて有効利用しようという技術開発が始まっている。

写真1：沖縄県糸満市の再生水処理施設。施設内のUV装置とUF膜（左）と農家に再生水を運ぶタンクローリー。2016年3月1日に行われた「糸満市ビストロ下水道 通水記念式」にて撮影（提供：田中宏明教授）

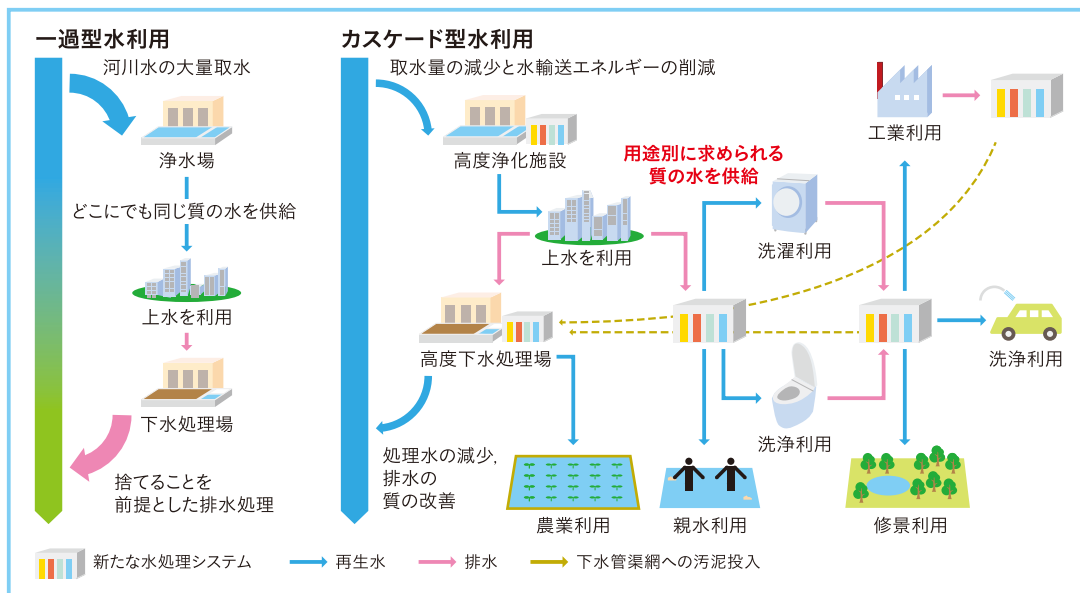


図1：一過型水利用とカスケード型水利用。都市内で水を再利用すれば、自然の水への依存を減らすことができ、環境負荷やエネルギー消費を抑えることができる場合があると考えられている（田中宏明教授提供の図を元に作成）

下水を再利用するために

私たちの暮らしでは、水道の蛇口をひねれば安全で清潔な水が出て、トイレが水洗であることは当たり前だ。日本では、ダムや川から水を取り、その水を使ったあと、下水として処理し、川などに放出する一過型の水利用が行われている。下水処理には下水道法に基づく全国一律な放流水質基準が設けられているが、流域別下水道整備総合計画ではより高い水質基準が定められている。そのため、都市部の下水処理場では、従来から行われている活性汚泥法に加え、嫌気-無酸素-好気法や循環式硝化脱窒法などの高度処理の導入が進んでいる。

「これまでたくさんのコストやエネルギーをかけ、上下水道を整備してきました。また水を利用するためには、水質基準の値を定めるのは大切なことですが、たくさんのエネルギーを使って、どこでも同じ水質基準を満たすための浄水処理をしたあと、一度だけ使って下水として捨てることは考え直したほうがよいのではないのでしょうか」と京都大学流域圏総合環境質研究センターの田中宏明教授は話す。田中教授は、限られた水資源を有効活用するため、再生水利用のシステムを研究し、CRESTプロジェクト「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」の研究代表者を務める。

田中教授が目指しているのは、農業用や工業用、あるいは洗濯用や公園の噴水用といった用途に応じて異なる再生処理をした下水を利用する、カスケード型水利用システムの構築だ（図1）。現在は、先に述べたように一過型で水が利用されているが、下水をきれいにして都市に循環させれば川やダムなどの水源からの取水量を削減できるだけでなく、水を運ぶためのエネルギーも小さくなる。また、用途が変われば必要な水質は異なるため、必ずしも下水の高度処理が必要というわけではない。用途に応じた再生水処理をすればエネルギーやコストも抑えることができる。

再生水の安全性も大きな課題だ。「これまで、下水処理をしても、排出基準に定められていない医薬品由来の微量化学物質やウイルスなどの病原微生物が残っていることがありました。新たな水利用システムをつくるには、再利用水のリスクを制御することが大切です」と田中教授。病原微生物や有害な微量化学物質などのリスク物質を制御する方法や水質の安全性を評価する方法も検討している。

これらの対策が実現できれば、エネルギーやコストの抑制に加えて、水環境に排出される汚染物質も削減できる。さらに取水量を減らすことができるので、河川などの希釈水量が増え、環境負荷も下げられる可能性がある。

カスタマイズで水を再利用

この再生水の利用は、その地域に適したカスタマイズなシステムで行う。あまり広域なシステムでは、輸送エネルギーなどが大きくなり、再生水を有効活用できないので、地域の特徴に応じた適切な循環規模で適切な再生方法であることが必須だ。「水を遠くから運ぶのではなく、使うところで水をくみ、使う目的の基準に合った水処理をして再利用します。適材適所のシステムをつくることを提案しています」。地域にあるこれまでの水利用システムと比較し、より環境負荷が少なく、安全な方法を組み合わせてシステムをつくらせようと研究を進め、いくつかの実証実験が始まっている。

2016年3月1日、沖縄県糸満市で、糸満市浄化センターの下水処理水を再利用する実証プラントが本格稼働した（写真1）。沖縄県本島南部では、農業用水が慢性的に不足しており、かんがい施設を整備するための水源を確保することが課題だ。このプラントでは、浄化センターからの下水処理水を限界ろ過膜（UF膜^{*2}）に通したのち、紫外線照射する。1日1000 m³処理でき、処理した水は希望する農家に当面無料で提供する。

「このシステムでウイルスも処理できます。農業で利用しても、水道水で育てたときと同等に安全な野菜やフルーツ、花きが得られます。下水を再利用すれば、海へ流す排水量が減り、沖縄県のサンゴ礁を守ることもつながります。下水を使うことに抵抗があるかもしれませんが、この実証実験によって理解を深めていきたいです」と田中教授。水源の不安定な沖縄県では、以前那覇市にある下水処理場で再生水利用の計画が立てられたが、コスト高などにより中断された。「このプロジェクトでは軌道にのせたい」と田中教授らは意気込む。

一石二鳥の水処理システム

「水は重要な資源」と話すのは大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻の池道彦教授だ。水はなんでも溶かす一

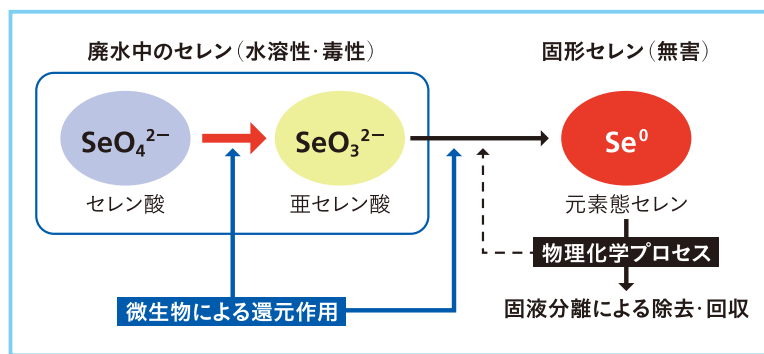


図2：下水からセレンを回収するための反応（池道彦教授提供の図を元に作成）

番よい溶媒といわれ、様々な物質の媒体となる。さらに熱やエネルギーを運び、蓄積する。水は有機物や金属などあらゆる物質を運ば、エネルギーも運び、すべての資源の源になり得るといふことだ。「水を物質やエネルギーと考え、有効活用すべきなのです」と池教授は強調する。

池教授も田中教授と同じように、適材適所の水利用を進め、エネルギーやコストを削減すべきと考えている。「水処理も一律の基準で処理するのではなく、合理的に行うべきです。ただ、誰も捨てる水の処理にコストをかけたくないので、新しい技術が広がりません。そこで、水を資源として多面的にとらえ、水処理を儲かる技術にしようとしています」と話す。

池教授は微生物を使って、工場廃水に含まれる有害なセレンを除去するとともに、資源として回収する技術を開発した。レアメタルのセレンは太陽電池の材料やガラスの着色などに使われるが、廃水中では、有害なセレン酸 (SeO₄²⁻) や亜セレン酸 (SeO₃²⁻) となって溶解している。セレンは水質汚濁や土壌汚染に関わる環境基準項目になっているため、通常は電気化学的な還元や凝集沈殿によって除去されている。

排出基準を満たすために高いコストをかけてセレンを取り除いても、セレン含量が低いために捨てられている状況に着目した池教授は、金属工場の廃水から好気性細菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-1 株を見つけた。この菌は廃液中の毒性の高いセレン酸や亜セレン酸を還元する。セレン酸もアセレン酸も単体のセレン (Se) となって不溶化するので、簡単に回収できる。微生物の体内に

*2 Ultrafiltration 孔径は 0.01 μm 程度、分子レベルのふるい分けが可能。

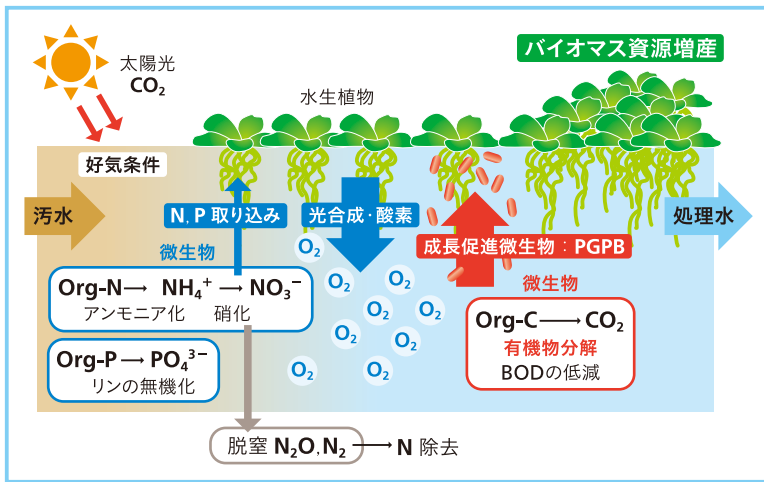


図3:ウキクサと根圏微生物を利用した水浄化・資源生産システム(池道彦教授提供の図を元に作成)

取り込まれたセレンは灰化によっても回収できる。さらにこの菌はセレンをメチル化して揮発性セレン化合物であるジメチルジセレンドを生成することがわかった。気体であれば、二相分離によってより容易にセレンを回収できる。微生物を使うことによってエネルギーやコストをあまりかけずに有害物質を除去でき、しかも資源を回収できる一石二鳥のシステムだ(図2)。この技術はレアメタルのテルルやバナジウムの回収にも応用されている。

さらに、「セレン化カドミウムという半導体を合成する微生物がいることもわかりました。将来はマイクロファクトリーとして半導体生産のグリーン化ができるかもしれません」と池教授は期待している。

廃水をバイオマス資源に

ウキクサと微生物の共生作用を利用して、廃水を浄化させるだけでなく、バイオ

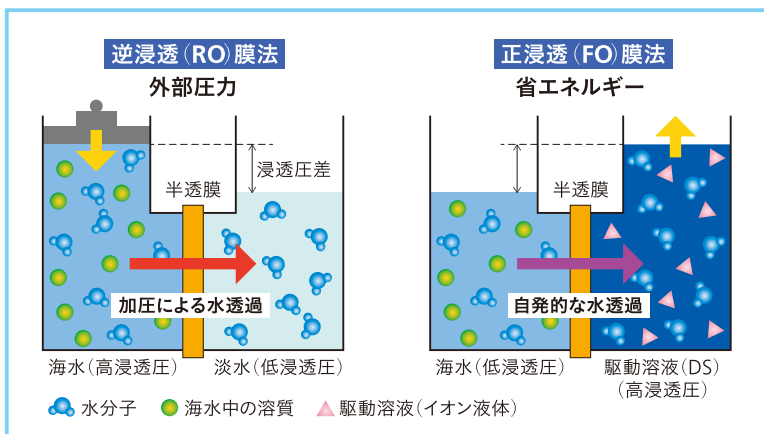


図4:RO膜法とFO膜法の比較(松山秀人教授提供の図を元に作成)

マスエネルギーをつくるという低環境負荷型の水処理技術を開発している(図3)。ウキクサは、体内にたくさんのでんぷんやタンパク質を蓄え、バイオマスとして有望視されている。水生植物であるウキクサは栄養分として水中の窒素やリンを取り込むので、水を浄化する。さらにPGPB(Plant Growth-Promoting Bacteria)と呼ばれる微生物を共生させるとウキクサの成長が2倍に加速することがわかった。成長速度が増せば、水の浄化作用が加速され、バイオマスの生産性も高くなる。また、ウキクサ根部に生息する微生物は、植物が生産した酸素を取り込んで、有機物を分解するのでBODも低減できる。

ウキクサにはいろいろな種類があるが、ミジンコウキクサは体内に7割ものでんぷんを蓄える。また、PGPBも様々なものが見つかっている。場所によって環境条件が違うので、その場所に適したウキクサやPGPBを組み合わせる。そのためのデータベースの構築に取り掛かっており、誰でもどこでも使える技術を目指している。

「下水処理技術は、様々な技術の組み合わせです。新しい技術を組み合わせることで、下水処理系をリ・デザインし、下水の価値観を変えたいです」と池教授は話す。

省エネルギーを実現するFO膜

水処理に膜技術は欠かせない。中でも次世代の水処理技術として注目されているのは正浸透膜(FO膜^{*3})を使った技術だ。海水の淡水化などに使われる逆浸透膜(RO膜^{*4})は、海水側に浸透圧より高い圧力をかけて、海水側の水を膜に浸透させる。高い圧力をかけるのでエネルギーが必要だ。一方、FO膜は、半透膜を挟んで、濃度の薄い溶液から濃い溶液へ水だけを移動させ、溶質を除く。濃度の濃い溶液と薄い溶液の浸透圧の差を利用したもので、RO膜とは違い圧力をかけなくても水は自発的に移動するので、エネルギーを節減できる(図4)。この原理は以前から知られていたが、実用的な膜が開発されていなかったため、実用化は遅れていた。日本で

は東洋紡株式会社からようやく FO 膜が市販されたばかりだ。

神戸大学先端膜工学センターのセンター長 松山秀人教授は、FO 技術の実用化を目指している。先端膜工学センターは、日本で唯一の総合的な膜工学研究拠点で、国内の 72 もの企業や海外の膜センター 10 機関と連携して、水問題の解決に貢献する膜技術を開発している (写真 2)。

FO 膜による海水淡水化技術の決め手になるのは駆動溶液 (DS^{*5}) だ。DS とは高浸透圧の溶液のことで、FO 膜を介して海水と、それよりも浸透圧の高い DS を置くと、海水中的の水だけが DS 側に引っ張られる。その後、DS から水を分離すれば、真水を得ることができる。また、DS は循環させて繰り返し利用する。

松山教授らの開発しているシステムでは、DS にイオン液体を使っている。イオン液体とはイオンのみからなる熔融塩のことで、「100℃以下でも液体で、ほとんど蒸発しない」、「電気をよく通す」、「液体として利用できる温度域が広い」などの特徴をもつ。また、イオン液体自体が塩なので、高い浸透圧を示す。今回開発したイオン液体は、室温では水と均一に混ざり合うが、60℃ではイオン液体相と水相とに分離する性質をもつ。すなわち、室温では均一液体なので DS として作用させ、その後 60℃に温度を上げると、イオン液体と水は分離するので、簡単に水を回収できる。

「温度を 60℃に上げるのにエネルギーが必要ですが、これは廃熱を有効利用します」と同センターの熊谷和夫特命准教授。この FO 膜を使った技術は、廃水処理や有用資源の回収などに応用できる。

広がる膜の可能性

さらに FO 膜を使った、浸透圧発電 (PRO^{*6}) 技術も開発している。海水と淡水の塩分濃度の差を利用し、浸透圧によって海水側で生じる水流でタービンを回し発電するというものだ。河川が注ぎ込む海岸など海水と淡水を豊富に得られる場所が発電に適しており、実現すれば、海水の淡水



写真 2: 先端膜工学センターが入る神戸大学先端膜工学研究拠点 (左) と膜をつくる大型製膜装置 (右上)、中空糸 (右下)、いずれも筆者撮影

化と発電を同時に行うことができる。

下水や工場排水を浄化する活性汚泥法では、処理水と活性汚泥を分離する沈殿池の代わりに、精密ろ過膜 (MF 膜^{*7}) や UF 膜を使う膜分離活性汚泥法 (MBR 法) が使われるようになった。この MBR 法に PRO を組み合わせたり、また FO 膜と RO 膜を組み合わせる水を循環させたりするハイブリッドシステムも開発している。既存の技術と FO 膜を組み合わせることで、効率よく水を処理でき、エネルギーを削減できるという。実用化には課題はたくさんあるが、水問題の解決に向けて、FO 膜は大きな可能性を秘めている。

高まる水の再生利用への期待

2015 年の 6 月に ISO で水の再利用に関する専門委員会が立ち上がり、日本が幹事国に選ばれた。これは世界が水の再利用の重要性を認識していることや日本の水処理技術が期待されているからだろう。また、2014 年に成立した水循環基本法が、省庁間の垣根を越えた水の有効利用を後押ししている。会議に参加した田尾氏は、下水の再生利用や下水からエネルギーと有価物を回収する技術開発への投資が少ない状況が続けば、日本は世界に大きく遅れをとることを懸念し、語気を強める。「今、水の問題の解決に向けて、世界中が立ち上がっています。日本の化学者も傍観している暇はないのです」。

(サイテック・コミュニケーションズ 佐藤成美)

*3 Forward Osmosis

*4 Reverse Osmosis

*5 Draw Solution

*6 Pressure Retarded Osmosis

*7 Microfiltration 孔径は 10 μm 程度で、限外ろ過膜よりも大きい。

OVERVIEWは化工誌編集幹事会の企画・監修により制作されています。