

特集2

海水を安全な飲み水に 世界の水不足を解消へ

「水の惑星」と呼ばれる地球。表面積の約70パーセントを水で覆われているが、その大半は海水と氷河で、生活や工業に使用できる淡水は全体の0.01パーセントに過ぎない。センター・オブ・イノベーション(COI)プログラムの信州大学アクア・イノベーション拠点は、ナノカーボン材料や物質分離技術を生かして、水に含まれる不純物を除去できる水処理膜を産学官連携で開発している。海水から淡水をつくり、また、汚れた水をきれいに再生し、世界中の誰もが豊かな水を手に入れられる未来を目指す。

えんどう もりのぶ
遠藤 守信
信州大学 特別特任教授
2013年よりCOI研究リーダー

つづき こういち
都築 浩一
日立製作所 水・環境ビジネスユニット
技術アドバイザー
2018年よりCOIプロジェクトリーダー

深刻化する水不足 ナノカーボンが鍵

人類が生きていくために欠かせない水。人口増加や気候変動、経済発展に伴って水の需要は高まるばかりで、そのため限られた水資源の有効活用は喫緊の課題だ。現在、アフリカやアジアを中心に11億人以上が安全な飲み水を確保できていない。特に農業用水が不足し、およそ9億人が食糧を十分に得られていない状況だ。産業廃水や資源産出現場での水の汚染問題に対してもより高度な対応が求められている。

「さまざまな水源から、きれいな淡水を低コストでつくる技術を開発して、安全で健康的な生活を支える水循環社会を構築するのが目標です」と、信州大学COI拠点のプロジェクトリーダーを務める日立製作所の都築浩一技術アドバイザーは語る。海水や地下水の不純物を効率良く除去すれば、使える水の量が増える。不衛生な水で命を落とす人々も多く、きれいで豊かな水を確保できれば、人類の平均寿命は約2年も延びると推定される。

キーテクノロジーの1つとして、信州大拠点はナノカーボンを使用した

水処理膜を開発している。ナノカーボンは非常に強靱で、優れた導電性や熱伝導性、化学的特性を持つ最先端の炭素材料である。研究リーダーとして拠点を率いるのは、信州大学の遠藤守信特別特任教授。ナノカーボンの1つである筒状炭素物質「カーボンナノチューブ(CNT)」の量産技術を開拓した第一人者だ。「ナノカーボン膜研究で大きな技術革新を興せるという強い直感がありました」と遠藤さん。

信州大拠点には、ナノカーボン材料や水処理膜、海水淡水化プラントを扱う企業や、計算機化学を得意とする研究機



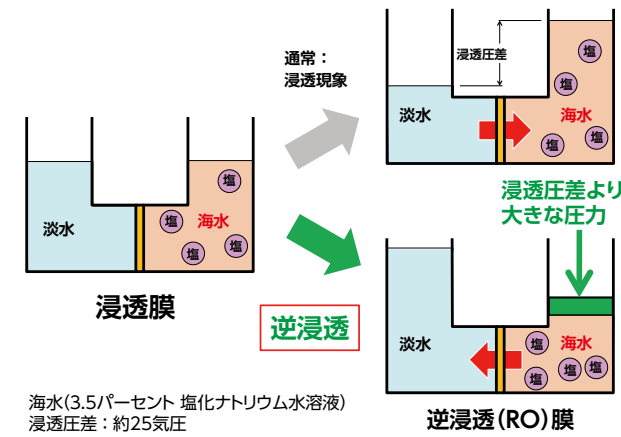
■図1 信州大拠点の中核施設である信州大学国際科学イノベーションセンター内では、拠点の概要や研究成果を映像とパネル展示で紹介している。手前にはアクア・イノベーションが達成された未来を描いたジオラマが広がる。砂漠だった場所に、海水淡水化、随伴水処理、かん水処理、水処理再生設備などが設置され、高層ビルなどの商業地域、リゾート地域、住宅地域、農業地域が新たに出現し、持続可能都市が構成される。

関などが参画している。それぞれの世界屈指の技術を融合させて、革新的な機能・性能を持つ水処理膜やその応用システムを開発し、「アクア・イノベーション」を興そうとしている(図1)。

不純物の目詰まりが難点 汚れに強い膜に期待

豊富な水源として注目したのが、地球の水の97パーセント強を占める海水だ。海水淡水化技術の1つに、「逆浸透膜(RO膜)法」と呼ばれる、浸透圧の原理を利用したものがある。無数の微細な孔がある膜は水分子だけを通し、海水から塩分などの不純物は濾し取って、海水から淡水を分離する(図2)。

エネルギー効率が良く、操作が簡単なRO膜法は、海水淡水化技術の主流となっている。とりわけ水不足が深刻な中近東各国を中心に、RO膜を利用



した海水淡水化プラントが稼働している。難点は、海水中のミネラルや微生物など塩分以外の不純物が膜表面に堆積すると、目詰まり(ファウリング)を起こして造水性能が低下することだ。そのため定期的な洗浄が必要だが、洗浄剤の塩素が膜を傷つけてしまう。

また、海水を濾すための圧力をかけるのに大量の電力が必要で、開発途上国・地域への導入が必ずしも十分に進んでいない。汚れに強い丈夫(ロバスト)な膜や、低コストで淡水化できる水処理システムの開発が期待されている。

実験と計算機化学の両輪 材料設計の指針に

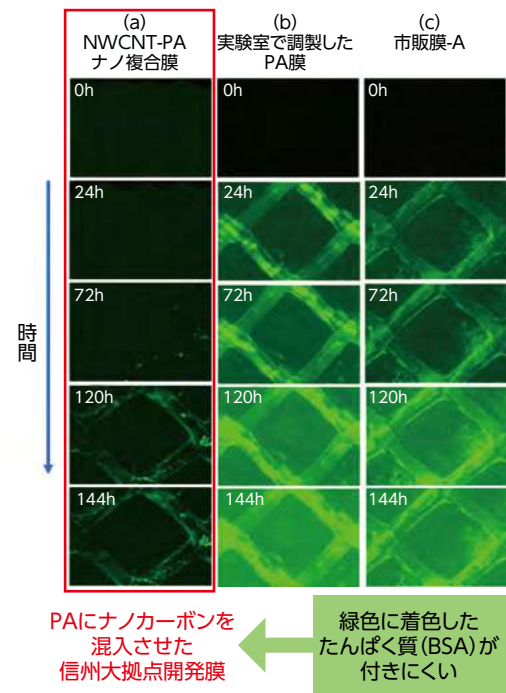
ファウリング抑制の切り札として期待されるのがCNTだ。通常、RO膜にはポリアミド(PA)という高分子膜素材が使われている。CNTを混ぜるとPAの細孔構造や電子状態が変化して塩分の侵入を防ぎ、より多くの水が通りやすくなる機能が付与される。

しかし、従来の研究では0.1パーセント程度のCNTしか混ぜることができなかった。CNTをうまく分散させ、PAの中に均一に混ぜ込むのは至難の業だったのだ。

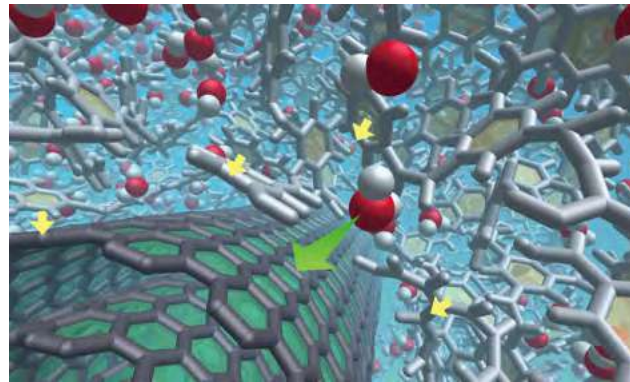
「ごく少量のCNTを混ぜるだけでは、CNTの優れた特性が存分に発揮できません」と遠藤さん。「もっとたくさんの量を混ぜれば、従来の膜に比べて汚れに強く、多くの水を通す丈夫な膜を作れるのではないかと考えました」。CNTの繊維を高度に解きほぐす技術と

■図2 直径約0.5ナノメートル(ナノは10億分の1)の孔が無数に開いた膜は、水分子だけを通して不純物を通さない。この膜を隔てた左右にそれぞれ淡水と海水を入ると、同じ濃度になるように淡水側の水分子が海水側に流入する。この時、膜には濃度に応じた浸透圧が発生するが、それよりも大きい圧力を海水側にかけることで、海水中の水分子だけが膜を通して淡水側に移動する現象が「逆浸透」である。

従来の薄膜形成技術とを融合することで、独自のナノ複合膜形成技術を編み出し、2015年、PAに従来の100倍以上のCNTを均一に分散させた「ナノカーボン複合RO膜」の開発に見事成功し、特許も取得した。遠藤さんの予想通り、高い耐ファウリング性と水の透過性能を得られただけでなく、耐塩素性も備わって洗浄に強いことがわかった(図3)。製品寿命が長くなるので、維持費用を少なくできる。信州大拠点は2013年の発足以降、このような優れた性能を持つ複合膜について数多くの論文を発表してきた。



■図3 ナノカーボン複合RO膜、実験室で調製したPA膜、市販膜それぞれで耐ファウリング性試験を行い、汚染物質の付着を評価した。緑色部分はファウリングが生じている部分を示す。ナノカーボン複合RO膜へのファウリングは他の2つに比べて著しく少なく、優れた耐ファウリング性を示す。



■図4 ナノカーボン複合RO膜における水分子移動現象。CNTを混ぜるとPA分子がCNTに沿って配列(黄色の矢印)し、水分子はCNTに沿って移動(緑色の矢印)するため透水性が向上する。また、PAからCNTに電子が移動して帯電するため、不純物が膜内部に侵入することを防いで塩分除去率が向上する。



■図5 ナノカーボン複合RO膜の生産ライン。信州大学国際科学イノベーションセンター内に設置されている。

より高性能な膜にするためには、CNTを混ぜると耐ファウリング性や耐塩素性がもたらされるメカニズムの他、水分子やイオンが原子レベルでどのように膜と相互作用しているかを知る必要がある、と遠藤さんは考えた。そこで、複合膜での水分子の精密な挙動を明らかにすべく、スーパーコンピュータでシミュレーションを行った(図4)。

結果、水分子が界面水と呼ばれるナノメートルレベルの薄い層を膜表面に作って覆いとして働き、さまざまな不純物が付着するのを防いでいることがわ

かった。また、CNT周辺のPA分子配列の様子や、膜の孔サイズが小さくなることで不純物の侵入を防げるなど、材料開発の実験と良く整合する結果が得られた。

「初めて計算機化学を導入し、従来は困難だったナノカーボン膜の複雑な解析や現象の解明に加え、材料設計の指針を速やかに決定できるようになりました。現在は、膜の設計指針を目指して実験と計算機化学の両輪で研究開発を進めています」と遠藤さんは語る。より緻密な材料設計が可能にな

り、今後は多くの水質で安定して性能を発揮できるように膜機能を向上させて、広範な応用を視野に次世代の革新的な水処理膜を完成させる狙いだ。

実用化を目指してパイロット試験を開始

「ナノカーボン複合RO膜はロバスト性が高いので、十分に市場に入り込む余地があります」と都築さんは確信している。実用化に向け、拠点内に設置した製造設備で製品に近い試作を

進めているところだ(図5)。

今年4月には、福岡県北九州市にあるウォータープラザ北九州で、ナノカーボン複合RO膜を使った海水淡水化システムのパイロット試験も開始した(図6)。複合膜をモジュール化してテストプラントに組み込み、システム上の問題点を解決する狙いだ。「海の状態は季節によって大きく変化するため、1年間かけて、パイロット試験を実施していく計画です。実際の海水を使うことで、複合膜の性能の評価と、実用化に向けた課題を明らかにしていきます」と都築さんは意気込みを見せる。

遠藤さんもこのパイロット実験には大きな意味があると期待を寄せている。「実用化できればいいといった中途半端な気持ちでは、企業と『協創』して技術革新を興すことは到底できません。性能やコストなど、企業の厳しい目で価値あるものを作ることが大切です」。試算では、複合膜を用いることで、従来の造水システムより、海水淡水化で37パーセント、再生水で25パーセントの費用削減が期待できる。

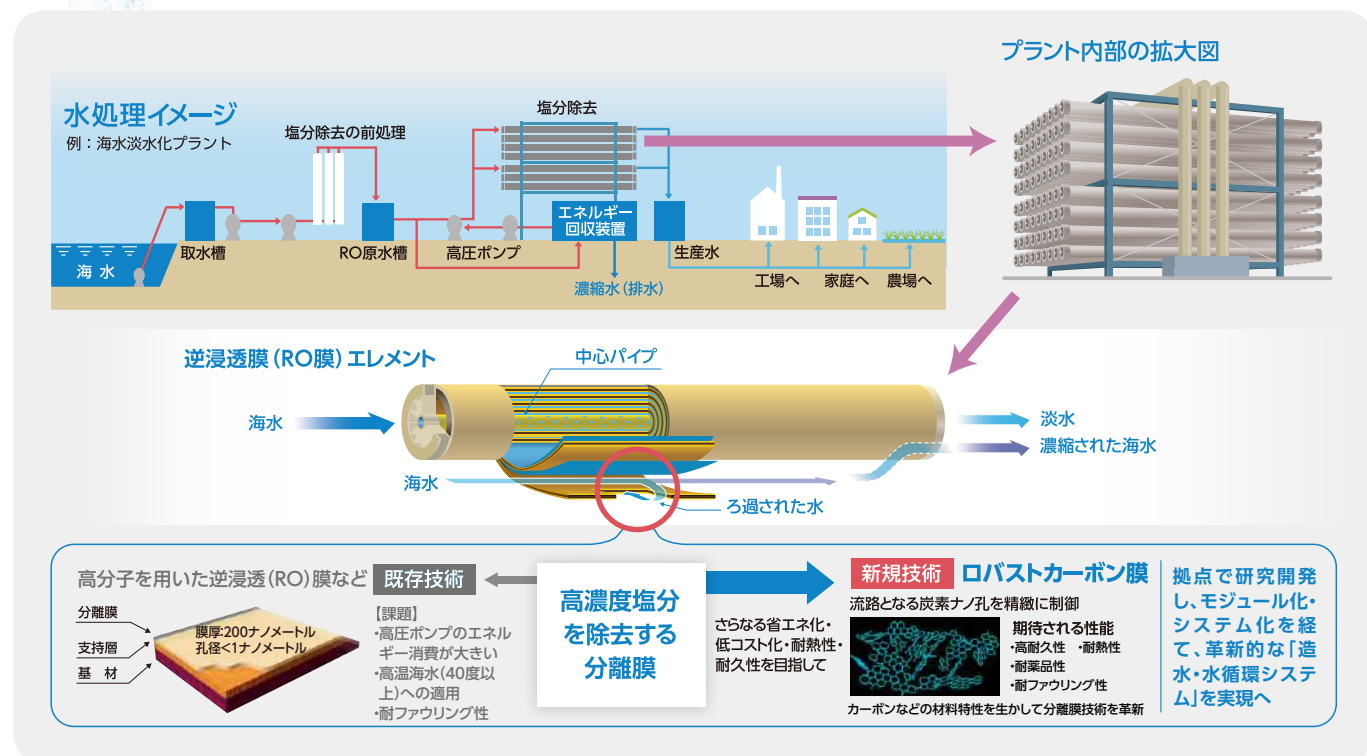
多様な水源を活用 日本発の産業に

今後は海水だけでなく、石油や天然ガスの資源採掘に伴って産出される油分や有機物を含んだ随伴水、湖沼や地下にある塩分を含んだかん水、生活・工場排水、下水などの水処理にも対応すべく、ナノカーボン複合RO膜やナノ材料を使った水処理システムの開発を進めていく計画だ。

一例が、地下水から重金属などの有害物質を除去する溶融塩法によるナノ材料を使った吸着剤だ。2018年からタンザニアで水質調査を行っている(図7)。「タンザニアでは、地層の影響で、一部の地域の地下水にフッ

素が混入し、それを飲んでいた住民に健康被害が生じていました」と都築さんは話す。フッ素はカルシウムと結合するので、骨の成長に影響を及ぼす。同様の問題はインドやバングラデシュなどさまざまな国・地域でも発生している。「信州大拠点の技術を使い、地下水中のフッ素を除去して安全な飲料水を作るプロジェクトを、タンザニアの大学などと共同で始めています。加えて、現地の若者を対象に、安全な水を確保するための科学者や技術者を育成する共同プロジェクトも進めているところだ」。

今後の夢を遠藤さんは熱く語る。「今はとにかくこの水処理システムを早く実用化し、日本発の新産業として確立することを目指しています」。8つもの一級水系の源流域であり、数多くの名水で有名な長野県。「そんな水資源に恵まれた地域に生まれ育ち、水のおいしさを知っているわれわれだからこそ、世界中の人々にきれいで安全な水を届けたいのです」。この強い思いこそが、研究開発の原動力だ。



■図6 海水淡水化のパイロットプラント。長さ約12メートルのコンテナ内に、ナノカーボン複合RO膜モジュールを搭載した海水淡水化装置、膜の耐久性などを評価するための薬品ユニット、水槽などを設置している。最初に汚れを取り除いた後、海水に高い圧力をかけ、膜モジュールに通して塩分を取り除く。

ナノカーボン複合RO膜を搭載したモジュール。断面で黒く見えるのがナノカーボン。



■図7 タンザニアにて、地下水や井戸水の水質調査、現地の学生による浄水実験を実施した。