



特集

1

持続可能な水利用を実現する！

# 「水システム」最適化へ

水は、ほかのものでは代替できない、私たちの生存に欠くことのできない資源だ。今社会が抱えている、あるいは将来予測される国内外の水問題を見だし、現在と未来の生活を支える、多面的な技術とシステムの研究開発がJST CRESTで進められている。



大垣 眞一郎

おおがき・しんいちろう

国立環境研究所 理事長

1969年、東京大学工学部都市工学科卒業、74年、同大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。東京大学大学院工学系研究科教授、同大学工学部長・大学院工学系研究科長などを経て、09年から現職。同年からCREST研究総括

Part.1

## 17の研究チームで持続可能な水利用を提案する

### 水は代替できない 必須の消耗品

水と大気は、生物が生きるためになくてはならないものだ。しかし、大気はそれを供給するシステムを必要としないが、水には安全な供給システムが必要だ。

「水は代替物質がなく、生活と生産にとって必須な循環資源です。人の健康と衛生のためにも必需品であり、量と質をいかに確保するかは重要な問題です」と話すのは、CREST研究総括の国立環境研究所 大垣眞

一郎理事長だ。水は農水産物や工業製品とは全く異なる消耗品であり、経済財の側面を持つ公共財なのだ。

日本では都市基盤整備の一環として優れた水利用システムが作られてきた。しかし、果たしてそれで十分だといえるだろうか。

「大都市圏の水は、お天気頼みなのが現状です。今年の夏のように雨が降らないとすぐに渇水になってしまいます。それを解決するには、下水を再利用する、海水を淡水化するなど、安定した安全な水資源を確保する必要があるのです」と、大垣さんは発展、

変化する環境に合わせた水システムの重要性を語る。

更に、世界に目を向けると、水の足りない地域や、人口が急増しているのに水道が整備されていない都市が多くある。安全な飲み水が提供されない人は、世界に9億人いるといわれる。今、水に関する国内外の課題や今後起きてくるさまざまな水問題に適応する、革新的な技術や水システムを作り出すことが求められているのだ。

CRESTの「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域では、

水の供給、排出、再利用を最適化し、エネルギー、コスト、環境負荷、健康・環境への安全性などの観点から検討した研究を17のチームによって推進している。

## 解決すべき水の課題はフィールドにある

科学的発見・発明が新技術を生み出し、新しい製品やサービスを作り出すというのは、イノベーションへの一般的な流れだ。コンピュータや自動車などの工業製品は、下図①のように直線的な過程を経て生み出されることが多い。ところが、この領域の場合、それとは性格が異なり②のような道筋をたどることになるだろうと大垣さんは見通している。まず、持続的な水利用という社会的課題があって、そのためにどういうサービスやシステムが必要かという視点から研究が進められ、科学的発見・発明があって、社会におけるイノベーションが導かれるというわけだ。

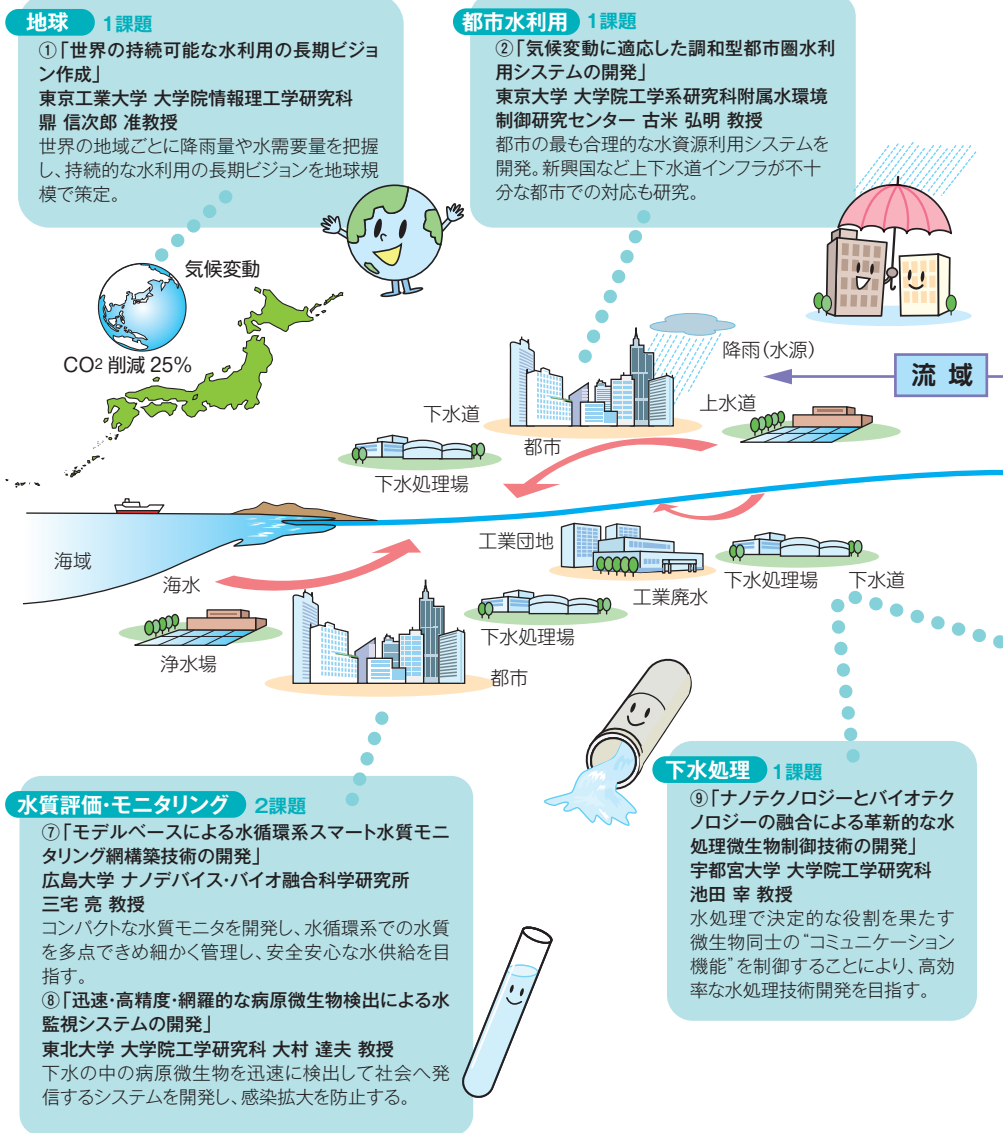
「この分野で新しい技術やシステムを作るには、頭の中で考えるより、現実の水問題を見つめ、解決しようとするのがスタートになります。問題点を克服するために、初めてどんな革新的サービスや新技術が必要かという話になるのです。だから、研究チームは都市や農地、山などのフィールドと密接にかかわっています。“現場”での研究が重要になるのです」(大垣さん)

## 17のチームが連携して持続可能なパッケージを

「水」とひと言でいっても、その研究分野は多岐にわたる。そのため、この領域では水問題のより具体的な解決策を得ることを目標に、総合的なアプローチを行うことにした。

### ■17研究課題の分野別配置

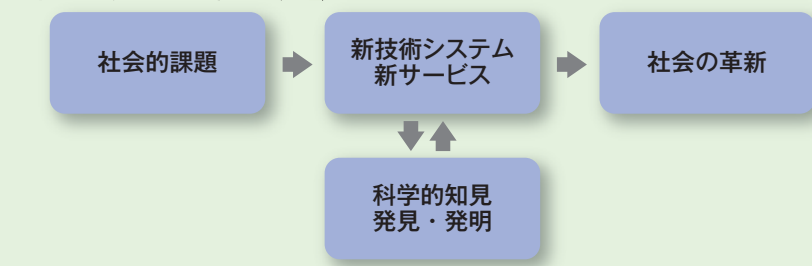
CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」領域では、17の研究チームが互いに連携を図りながら、以下の研究代表者のもと、下のようなささまざまなジャンルの研究課題に取り組んでいる。



### ①科学的知見がイノベーションを生み出す一般的な例



### ②この領域では、社会的課題を解決するためのアイデアが新技術を生み、イノベーションにつながっていく



実社会への適用を念頭に置いた革新的な水処理技術や水資源管理システムの研究に取り組むのは、17のチーム、全体で約600名の研究者だ。広い視野での取り組みが必要な分野だけに多様な研究が展開されるが、大切なことは一つひとつのチームが抱えている課題を、他のチームと一緒に解決して、いこうというチーム横断的な連携体制だと大垣さんはいう。

「例えば、農業や地下水の研究をしているチームはそれぞれ共同で勉強会やシンポジウムを開いています。また、水処理膜を研究しているチームは、膜を詰まらせる“ファウリング物質”を共同で分析しています。領域アドバイザーたちも、各チームの





## 農業 2課題

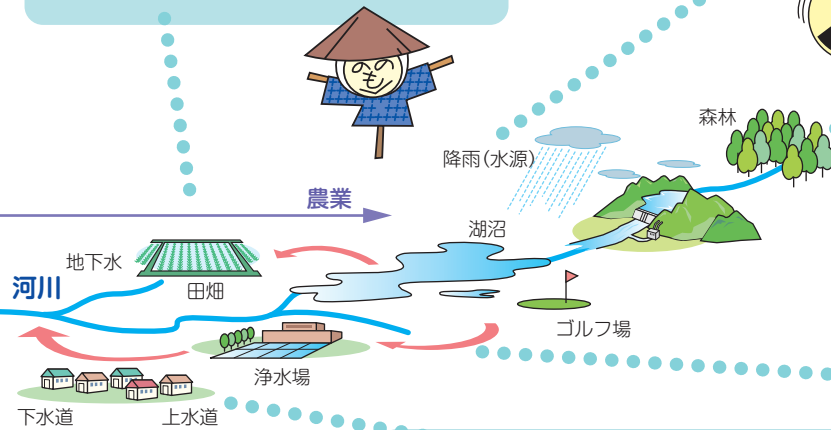
- ③「気候変動を考慮した農業地域の面的水管理・カスケード型資源循環システムの構築」  
高知大学 教育研究部自然科学系農学部 藤原 拓 教授  
農業地域の地下水汚染や温室効果ガス排出抑制技術、適切な水・資源循環システムの中で構築。
- ④「超節水精密農業技術の開発」  
東京農工大学 大学院農学研究院 澁澤 栄 教授  
乾燥地帯や植物工場などで応用可能な、非常に少量の水で作物を育てる超節水型農業技術を開発。

## 放射性物質 1課題

- ⑤「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移行拡散シミュレータの開発」  
東京大学 生産技術研究所 沖 大幹 教授  
水文学(すいもんがく:水の循環の研究)の視点から、拡散した放射性物質の動きを把握、水の安全性を確保する。

## 森林 1課題

- ⑥「荒廃人工林の管理による流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」  
筑波大学 生命環境系 恩田 裕一 教授  
人工林の5割を切り出す強度の間伐により、地表に届く雨水の量を増やして河川の流量や水質を管理する技術を開発。



## 膜技術 4課題

- ⑪「水循環の基盤となる革新的な水処理システムの創出」  
北海道大学 大学院工学研究院 環境創生工学部門 岡部 聡 教授  
膜分離技術を核とした革新的な上下水処理システム、有害化学物質と病原微生物を対象とした安全性評価・管理手法を開発。
- ⑫「21世紀型都市水循環システムの構築のための水再生技術の開発と評価」  
京都大学 大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター 田中 宏明 教授  
都市の水循環利用システム構築のための新しい水処理技術を開発し、地域ごとに最適なシステムを提案。(→P6~7参照)
- ⑬「地域水資源利用システムを構築するためのIISS※の適用」  
工学院大学 工学部環境エネルギー化学科 中尾 真一 教授  
複数の膜技術を統合した新しい水処理システムと情報管理技術を融合して、独創的な地域水資源利用システムを構築。  
※Integrated Intelligent Satellite Systemの略
- ⑭「多様な水源に対応できるロバストRO/NF膜の開発」  
広島大学 大学院工学研究院 都留 稔 教授  
過酷な条件でも多様な原水に対して使用可能な逆浸透/ナノろ過 (RO/NF) 膜を開発。

## 水管理システム 1課題

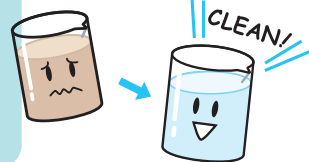
- ⑩「都市地下帯水層を利用した高度リスク管理型水再利用システムの構築」  
京都大学 大学院地球環境学 伊藤 禎彦 教授  
地下での水質交換過程によって地下水を水道原水として利用する、都市内水循環利用システムを開発。



安全です

## 地下水 3課題

- ⑮「地熱熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発」  
埼玉大学 大学院理工学研究科 小松 登志子 教授  
ヒートポンプの利用などによる地下熱環境への影響を考慮し、持続的な地下水管理手法を開発。
- ⑯「地域水循環機構を踏まえた地下水持続利用システムの構築」  
熊本大学 大学院自然科学研究科 嶋田 純 教授  
地下水利用の先進地域である熊本をフィールドとして、詳細な地下水データをもとに持続的な地下水利用システムを開発。
- ⑰「良質で安全な水の持続的な供給を実現するための山体地下水資源開発技術の構築」  
京都大学 大学院農学研究科 小杉 賢一朗 准教授  
山地の基盤内の地下水帯を効率よく探査し、水資源開発を可能とする革新的な利用技術を開発。



フィールドへ足を運んで研究者と議論し、連携を促進する働きかけを行っています」

水分野の研究は、すべてが繋がったまとまりとして見渡していくことが重要で、研究が個別の理論で終わってしまったら、社会への貢献につなげることができないと、大垣さんは付け加える。

このことは今後、研究成果を国内外で応用する際にも重要だ。日本の水システム技術は世界トップレベルにあり、世界の水問題の解決に役立てられていくことが期待されている。その時に求められるのが、「ホリスティック(包括的・全体的)な水システムの構築」にあるからだ。膜技術や浄水場技術といった個別の技術で満足することなく、

それらを連携させ、コストや運用の実行性も考慮した持続可能なパッケージを作り上げていくことが重要なのだ。

都市への人口集中や気候変動などにより、今後も国内外の水問題は深刻化していくことが見込まれる。Part2では、本領域の取り組みの一つである「都市水循環システム」構築を目指す事例を紹介する。

17のチームが連携しながら、実社会への適用を念頭に置いた革新的な研究を進めています。



# Part.2 21世紀型の都市水循環システム

20世紀型の水利用は、川や湖の水を浄化し、利用者へ送り、不要になった下水を処理して環境に放流するという、いわば一方通行のシステムである。このシステムの問題は、水の運搬と処理に多くのエネルギーが必要とされる点だ。21世紀型の“都市水循環システム”には、取水排水を減らし、環境負荷を軽減、エネルギー消費を抑制しながら適正な質と量を供給する仕組みが求められている。



**田中 宏明** たなか・ひろあき  
京都大学 大学院工学研究科附属  
流域圏総合環境質研究センター 教授

1978年、京都大学工学部衛生工学科卒業、80年、京都大学大学院工学研究科衛生工学研究科衛生工学専攻修士課程修了、94年、カリフォルニア大学デービス校土木環境工学科修士課程修了。博士(工学)。建設省などを経て2001年、土木研究所水環境研究グループ上席研究員。03年から現職。

水処理実験、評価のための設備に囲まれて

## 日本の水は本当に安全なのか

日本の高度成長時代、川や湖の水質汚染が「公害」として問題になっていた。その反省を受けて行われた下水道の整備により、環境中の水の質は改善されてきた。しかし、1990年代後半になると、淡水魚が雌雄同体化する原因となる内分泌攪乱物質、いわゆる環境ホルモンが河川や海などから検出され問題となった。また96年、埼玉県越生町では、約1万4千人の人口の内、約9千人が水道水による耐塩素性原虫に感染するという事件が起き、日本の“安全な水道神話”は崩れていった。浄水場や下水処理場で処理しきれない微量の化学物質や病原微生物などが大きな問題を引き起こしたのだ。

では、水処理レベルを上げればいいのかという、また新たな問題が起こる。日本では微生物による下水処理が行われているが、未規制物質には十分対応できない。高度な処理のためにはオゾンや紫外線を利用したり、膜を使って不純物を分離したりするなど物理化学的な処理をすることになり、より多くのエネルギーが必要とされるのだ。

「上下水道システムもエネルギー問題を考

えなくてはならない時代に入っています。上水道のエネルギーのうち90%が、遠くから水を運ぶために費されます。ですから、一度使われた水を近いところで処理して再利用すれば、エネルギー消費を抑制できます」と語るのは、京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センターの田中宏明教授だ。

田中さんたちのチームは、琵琶湖に面した津市下水処理場に隣接する研究センターで、新たな都市水循環系を構築するために、水の適切な再生技術の開発と評価を行っている。

## 用途に応じた最適な水を作る

都市の水循環は水資源を有効活用し、コストやエネルギーを抑える方法として有効だ。しかし、下水の再利用は、地域住民に必ずしも歓迎されるとは限らない。化学物質や病原微生物を真に除去するわけではないからだ。しかし考えてみれば、すべての水に医療や飲み水と同じレベルの純度が必要だとは限らない。トイレや農業用に使う水なら、そこまでのレベルは不要だ。そこで田中さん

は、現状の上下水道システムを見直し、再利用を前提とした新しい水処理技術と都市水循環システムを作ると共に、処理した水が何に使えるか、どのくらいエネルギー負荷が減らせるかを明らかにする研究を進めている。

例えば、田中さんは水処理のための膜技術の研究も行っている。有機質系の膜には、穴の大きさが0.1 $\mu\text{m}$  (1 $\mu\text{m}$ は1000分の1mm) から0.001 $\mu\text{m}$ までのさまざまな種類がある。更に無機質系のセラミック膜もあり、除去する物質に合わせて使用する。これらの膜は大きなシート状で、巻いてコンパクトなケースに入れたり、中空糸やモノリス状に集積形成されるので、設置面積は圧倒的に小さくて済む。膜処理はこし取る技術なので、沈殿処理のように温度の変化に左右されず安定しているというメリットもある。

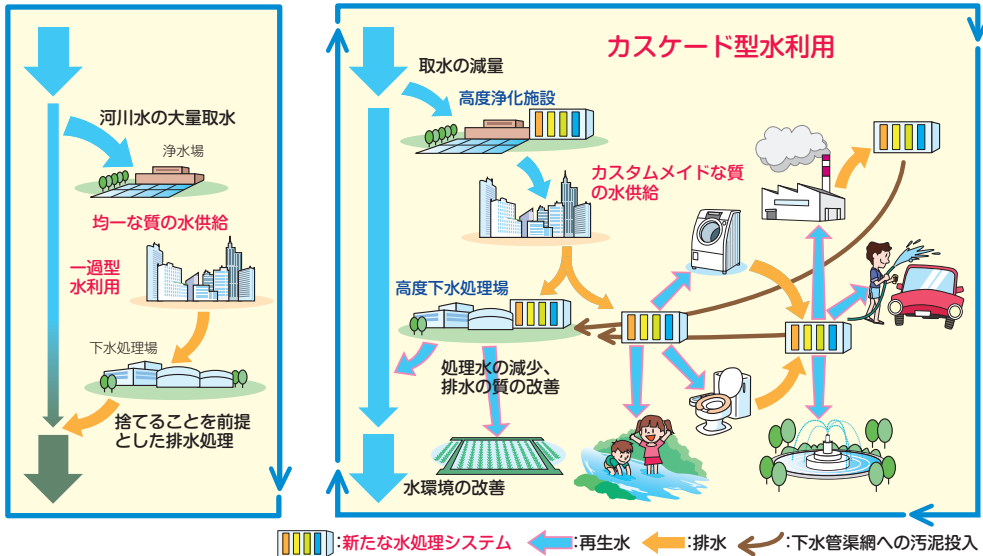
「私たちのターゲットは微量化学物質や病原微生物なので、どういう膜を使うと何を除去できるかを調査します。更に、凝集剤を使ったり、酸化させるためにオゾンを組み合わせたらどうなるか、また、膜の種類によって下水処理水がどの程度不純物を除いた水になるかを評価しています。それによって、飲み水や農業用など、用





# ムを作る

## ■求められる21世紀型の都市水循環システム



途ごとに適した水処理方法を提案できるのです」と田中さん。

膜、凝集剤、オゾン、紫外線などの組み合わせにより、何がどのくらい除去できるか、エネルギーがどの程度必要か、科学的根拠にもとづいた水利用用途の判断ができれば、安全性を保ちコストや環境に配慮した21世紀型のシステムの実現に近づくことができる。

### 再生水利用の実証実験を沖縄で推進

田中さんのプロジェクトでは、既に実用化に向けた実証実験が2か所で進められている。一つは沖縄で再生水を利用する試みだ。沖縄本島は人口が南部に偏っており、水はダムのある本島北部から約70kmを経て送られる。水供給にかかるエネルギー量は全国平均の約3倍、慢性的な水不足だ。南部農業地域では、フルーツなどを栽培したくても灌漑用水が不足し、雨水で育つサトウキビを作っているのが実情だ。また、沖縄県の人口は年々増加しており、今後、都市部でも水の供給を更に増やす必要に迫られている。

そこで田中チームでは、膜処理の分野で優れた技術を持つ企業と共に、那覇浄化センターの下水処理水を有機膜を使って処理するパイロット施設を稼働させた。今後水の供給を増やしたい地元の自治体と連携し、膜処理を活用した再生水利用の事業化を考えていく予定だ。

### 中国・深圳で清華大学と進めている共同実験

もう一つの研究フィールドは中国だ。広東省東南部にある深圳という都市は、もともと人口3万人程の漁村であったが、経済特別区が設置された1980年から人口が急増しており、今や1,200万人を擁する大都市に成長した。それに伴い、市民1人当たりが利用できる水資源量が非常に少なくなっている。もともと深圳で使われる水の大半は、約100km離れた東江から運ばれており、水質もあまり良くない。12年7月には中国の水道水質基準項目が従来の30種から106種へと厳しくなり、その対応も必要になっているが、水源改善もできない。そこで、京都大学は中国・清華大学と深圳研究生院に設置した、環境技術共同研究・教育センターにおいて、水の安定供給を図っていくための膜技術を用いた水処理を導入し、新たな基準を満たそうという試みを始めた。

ここでは、セラミック膜とオゾンを組み合わせた処理技術で基準を満たす条件を検討している。そのため日本から輸出した無機膜・オゾン処理システムを浄水場内に設置し、適用性評価の実証実験が進められている。

### 成果を世界の標準規格に

田中さんは、この研究成果を国際標準規格にしたいと考えている。どんな原水を、どう処理すれば、何に再利用できるか、そのマ

ネジメント方法を計画するというものだ。今年9月に開催されたシンポジウムでは、日本、韓国、中国でおおむね合意ができたという。これについては来年以降、世界の標準規格として提案するための活動を予定しており、認められれば将来的に、田中チームが行っている研究成果が使われるようになるだろう。

また、災害時にも田中さんが構築を目指すシステムは活用できると考えられている。東日本大震災では多くの下水処理場が被災し、いまだに稼働していない処理場もある。従来から行われている下水の生物処理は処理槽の復旧に数年単位の時間がかかる場合もあるため、現在も沈殿と塩素処理だけで処理水を海に放流している処理場もあるという。十分な処理ができなければ、沿岸の病原微生物濃度が高くなる可能性がある」と田中さんは指摘する。

今後、ほかの地域でも同様のことが起きる可能性も否定できない。もし、京都のような内陸部で下水処理場が機能しなくなったら、下流地域では水道が使えなくなってしまうかもしれないのだ。

「私たちは膜処理技術で病原微生物濃度を下げる研究を行ってきたので、生物処理と同程度の病原微生物除去を短時間で再開できます」と田中さんは語る。

田中チームは、下水処理場の隣という立地条件を最大限に活用し、行政や企業とうまく連携して実地の取り組みを展開している。机上の理論ではなく、現場で研究された成果が国内外で活用される日はもうすぐだ。