

# 未来社会に向けた水処理技術

安永 望\* 谷村泰宏\*\*\*  
 稲永康隆\*\*  
 生沼 学\*\*

## Water Treatment Technology for Future Society

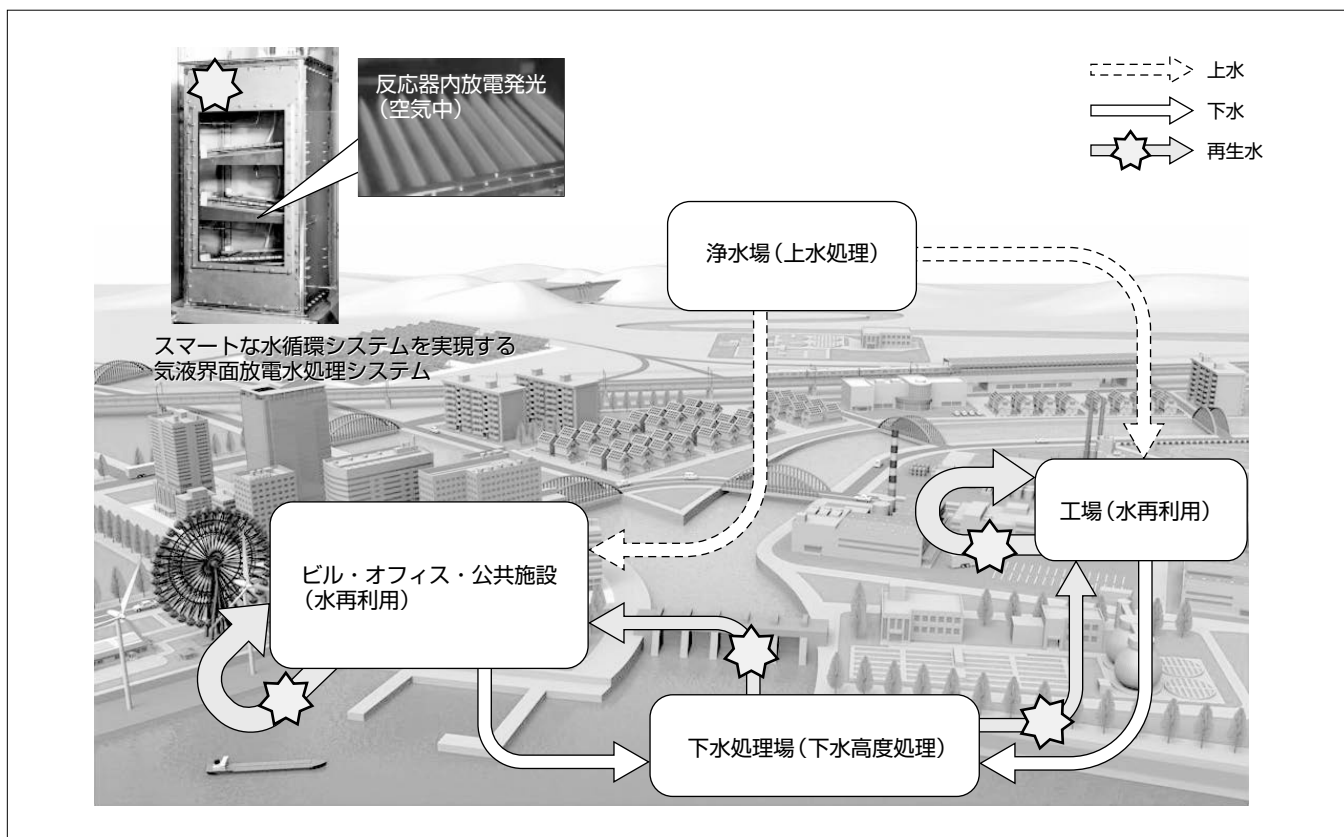
Nozomu Yasunaga, Yasutaka Inanaga, Gaku Oinuma, Yasuhiro Tanimura

### 要旨

異常気象による水需給のアンバランス、不適切な廃水処理に由来する水質汚染とそれによる安全な飲料水不足等、水環境の悪化は深刻な問題であるが、社会の成長には水資源が必須である。一方、現在の上下水処理システムは、上水処理で大量に取水し、上下水処理の前後で長距離輸送し、下水処理した水を河川や海に放流する。このような一過型水循環システムはエネルギー消費量が大きく、国内総電力消費量に対して上水処理で約0.9%<sup>(1)</sup>、下水処理で約0.7%<sup>(2)</sup>を占める。さらに、水の位置エネルギーを無駄に消費するだけでなく、膨大な数や長さの管路の老朽化による維持管理費の増大も予想される。このような課題を解決するための手段として水の再生がある。オンサイトで水を処理、再利用することで、水質に見合った高効率な水処理プロセス

を適用するとともに水の輸送に必要とするエネルギーを大幅に削減し、低炭素社会におけるスマートな水循環システムを実現できる。

本稿では、未来社会の水循環システムのあるべき姿と、それを実現するために必要な水処理技術について述べる。三菱電機は、気液界面でパルスコロナ放電を誘起させて非常に酸化力の強いOH(ヒドロキシル)ラジカルを生成し、これによる水中の難分解性有機物質を分解する水処理技術を開発中である。湿潤酸素ガス雰囲気中で安定して放電場を形成することによって酸素を有効に活用し、実験室レベルで従来比2倍以上の分解効率が得られた。当社はこの技術で未来社会に向けたスマートな水循環システムの構築に貢献していく。



### 2050年のスマートな水循環システム

上下水処理場での水の集中処理、分配、供給システムはエネルギー消費量が大きく、限りある水資源を有効に活用できていない。当社が開発中の気液界面放電水処理システムによる難分解性有機物質の分解技術を適用し、ビル、工場、下水処理場等におけるオンサイトで水の再生を省エネルギーで実現してスマートな水循環システムを構築する。

\*先端技術総合研究所(工博) \*\*同研究所 \*\*\*同研究所(農博)

## 1. ま え が き

図1に地球上の水の所在<sup>(3)</sup>をグラフにして示す。地球上に存在する水量はおよそ14億km<sup>3</sup>であり、そのうちの約97.5%が海水で淡水は約2.5%である。淡水の大部分は氷河として存在し、地下水や河川、湖沼の水等として存在する淡水の量は地球上の水の約0.8%である。この水のほとんどが地下水として存在するため、河川や湖沼等として存在する淡水量は、地球上に存在する水量の僅か約0.01%、約0.0014億km<sup>3</sup>に過ぎず、棒グラフでは示すことができないほど少ない。これらの水は地球上に偏在するため、我々が使用可能な水量はさらに限定される。

世界的な人口増加や地球温暖化の進行によって、異常気象による利用可能な水の不足、水質汚染による生態系への影響が懸念されている。また、水の安全性への要求度は今後ますます高くなり、水の量と質についての総合的な管理が必要になると考えられる。一方で、国内の上下水処理のエネルギー消費は大きく、一過型の水循環システムに起因する水の長距離輸送がその主要因である。低炭素社会を実現するためにはこれらの課題を解決する必要がある、その手段として水の再生がある。

本稿では、これらの課題を解決するスマートな水循環システムと、それを実現するために必要な水処理技術について述べる。

## 2. 未来社会の水循環システム

### 2.1 水循環システムの課題

現在の水循環システムは、大量に取水、処理、長距離輸送し、使用後は処理して大量に排水する一過型である<sup>(4)</sup>。上水道ではその95%のエネルギーが取水、導水、給水、配水のために消費されているが、水処理プロセスの占めるエネルギーは僅か5%に過ぎない。また下水道では、水・汚泥処理で約2/3のエネルギーが消費され、残り約1/3が水の輸送分である<sup>(3)</sup>。さらに、これらの水循環システムは膨大な

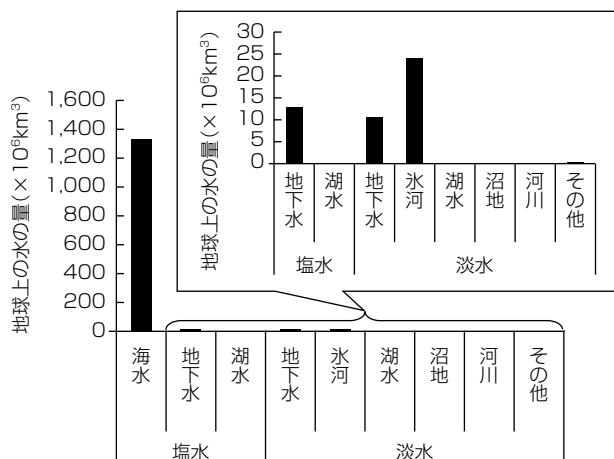


図1. 地球上の水の所在<sup>(3)</sup>

数、長さの管路を持ち、老朽化による維持メンテナンスコストも莫大(ばくだい)になる。これに加えて、大量取水による河川水量の低下、水域生態系の変化等、様々な課題を抱えている。

### 2.2 スマートな水循環システムの提案

2.1節で述べた課題を解決するための手段として、水の再生がある。これによって、水質の改善と省エネルギーを同時に実現できる可能性がある。すなわち、オンサイトで処理をして再利用することで、輸送に関するエネルギー消費を大幅に削減できるとともに、廃水水質に見合った高効率な水処理プロセスを適用することで水量及び水質の安定性が期待でき、スマートな水循環システムの構築が可能となる。

## 3. 水の再生の最新動向及び水処理技術

### 3.1 各国の水の再生動向

日本は、一部の地域や季節において渇水となる場合があるが、世界的にみて降水量に恵まれた国である。年間の下処理水139.3億m<sup>3</sup>のうち、再利用水量は約2.0億m<sup>3</sup>、再利用率にして1.5%と僅かである。図2に下水処理水の再利用状況<sup>(5)</sup>を示す。この図に示すように、そのほとんどが河川維持用水、修景用水、融雪用水として利用されているだけであり、積極的な再利用は一部の地域を除いて進んでいない。

一方、海外の下水処理水の再利用率はイスラエル83%、スペイン12%、米国6%であり(2007年)、イスラエルが圧倒的に高い。再生水の量としては米国が約365,000万m<sup>3</sup>/年とイスラエルの約28,000m<sup>3</sup>/年を大きく引き離している<sup>(6)</sup>。

慢性的な水不足の状態であるイスラエルは国家的な水政策の一環として、下水処理水を主に農業用水として使用している。プラスチック製のパイプを使用して農地に必要な量の水を適切に、無駄なく供給できる点滴灌漑(かんがい)

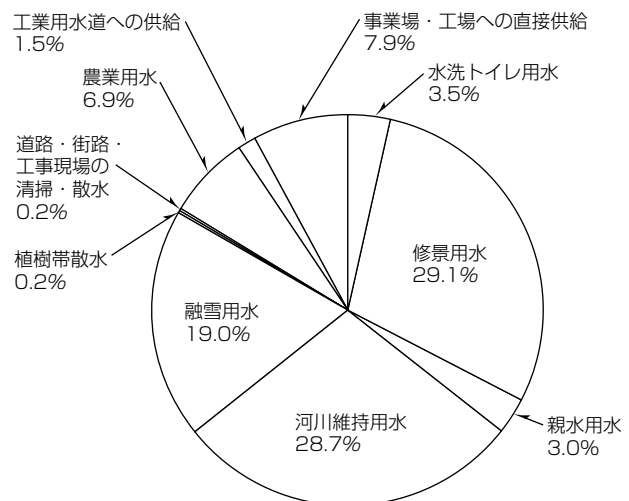


図2. 日本の下水処理水の再利用状況(平成19年度)<sup>(5)</sup>

法によって生産効率を高め、農作物の輸出額は日本と同程度にまで達する。さらに、水の再利用の専門委員会ISO/TC 281の議長国として水の再利用に関する国際標準化を進めている。

更に進んだ下水処理水の再利用として、間接的飲用化がシンガポールや米国カリフォルニア州で進められている。すなわち、高度に処理した下水処理水を貯水池で表流水と混合したり、地下水涵養(かんよう)したりすることによって上水原水として使用している。将来的には下水処理水の直接的飲用化も視野に入っているが、そのハードルは高い。特に長期にわたる健康リスクの評価、さらには心理的な問題を解決する必要があるが、安全な水を確保する選択肢の1つとして今後も考慮されると考えられる。

### 3.2 再生水市場の見通し

人口の増加や経済発展に伴い、水処理に対する需要が急速に高まると考えられるが、使用可能な水資源には限りがある。図3に水の分野別世界市場規模予測<sup>(7)</sup>をグラフにして示す。上下水が占める割合は2025年でも依然として高い。しかし再生水市場の現状はその市場規模は小さいものの、今後の成長分野として注目されており、2025年には2007年の約3倍の2.1兆円になると見込まれている。

### 3.3 水の再生に必要な水処理技術

下水処理の主要なプロセスは生物処理であるが、微生物に水中の有機物を分解させる方法のため、処理可能な有機物の量、種類には限界がある。さらに、有害な化学物質やウイルス等の除去も期待できない。したがって、人が再生水に直接触れて使用する点を考慮すると、膜分離、酸化分解等の物理・化学的な処理が必須であり、またそれらの処理水を使用することに対する化学物質や微生物に対するリスク管理も重要である。また膜分離では必ず分離された濃縮水が発生し、難分解性有機物質は分解されずにこれに濃縮されるため、これらを高効率に分解する技術の開発が必須である。

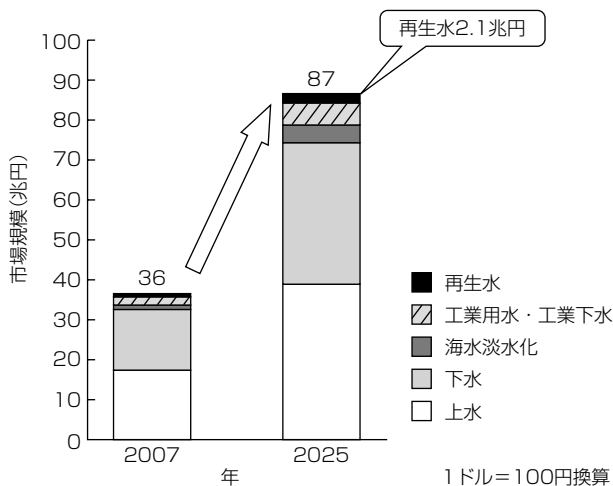


図3. 水の分野別世界市場規模予測<sup>(7)</sup>

現代社会では膨大な化学物質を日常的に使用していることから、パーソナルケア製品や医薬品等に由来する難分解性有機物質が下水に混入する。さらに、微生物を用いた廃水処理技術では、先に述べたようにこれらの物質の十分な除去が期待できないため、下水放流水を介して海や河川等の環境水中にこれらの物質が拡散し、水道水源がこれらの物質によって汚染される可能性がある。当社はこのような状況に鑑み、難分解性有機物質を高効率分解可能な廃水処理技術の開発に着手した。

## 4. スマートな水循環システムのための水処理技術

### 4.1 難分解性有機物の分解技術

図4に示すように、難分解性有機物を分解する方法の1つとして、オゾン(O<sub>3</sub>:酸化還元電位2.07eV)、及びこれよりもさらに酸化力の大きいOHラジカル(・OH:酸化還元電位2.85eV)を使用する促進酸化処理がある。OHラジカルによって、原理的には有機物質を水と二酸化炭素に完全に分解可能である。オゾンと過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)や紫外線(UV)を併用してOHラジカルを生成させる方法が主流であるが、オゾン在水中に溶解させる必要があるため、有機物質分解効率は決して高いとは言えない。

### 4.2 気液界面放電による水処理技術

当社は山形大学理工学研究科南谷研究室の技術協力<sup>(8)</sup>の基に、気液界面での放電によって水中に直接OHラジカルを生成する新たな水処理技術を開発中である。図5に気

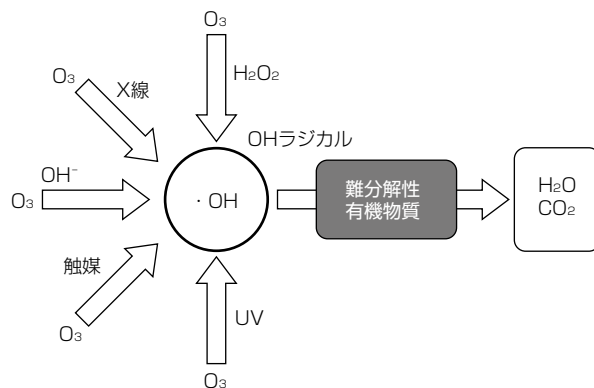


図4. オゾンによるOHラジカルの生成方法

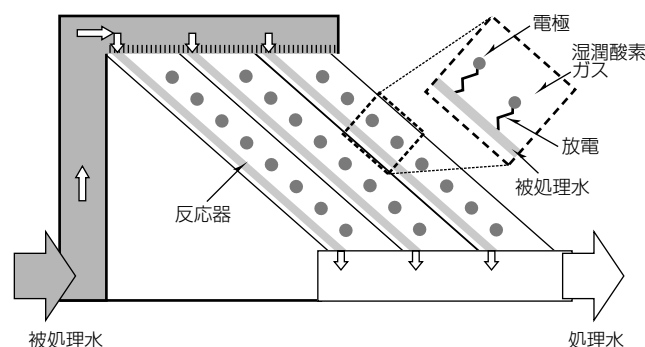


図5. 気液界面放電水処理システム

液界面放電水処理システムを示す。この図に示すように、被処理水表面で効率的に放電できるよう、被処理水の水深を浅く保つことが可能な流下方式を採用した。被処理水が流下する傾斜面に複数の電極を配置し、湿潤酸素ガス中で被処理水の気液界面に放電時間約100nsのパルスコロナ放電を誘起させて気液界面放電水処理を実施する。この処理では湿潤酸素ガス中で安定して放電できるため、湿潤酸素ガス中の水分を除去せずに酸素を循環使用できる。その結果、酸素使用量を大幅に削減できる。

図6に気液界面放電水処理の原理を示す。湿潤酸素ガス中の放電によってOHラジカル( $\cdot\text{OH}$ )を発生させ、これが水中に取り込まれる。その際にOHラジカルが持つ強い酸化力で、塩素やオゾンでは分解が難しい界面活性剤やジオキサン等の難分解性有機物質を分解、低分子化し、最終的には二酸化炭素や水に分解する。

オゾン処理では分解できない酢酸ナトリウムを被処理物質として10mgC/L添加した場合の分解効率(消費電力量当たりの分解量)について、従来の促進酸化処理であるオゾン+UV法と比較した結果を図7に示す。この図に示すよ

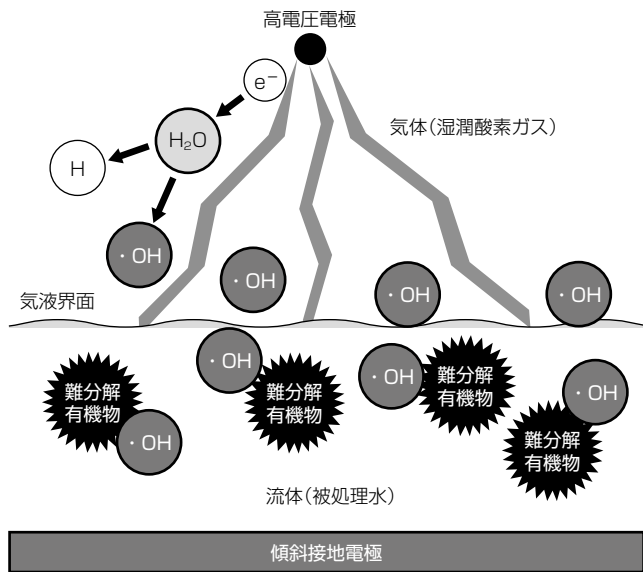


図6. 気液界面放電水処理の原理

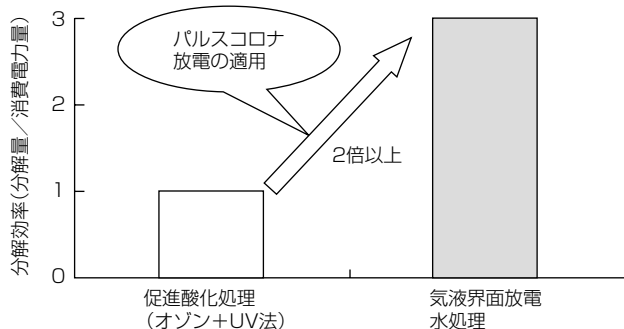


図7. 有機物の分解効率の比較

うに実験室レベルでオゾン+UV法と比較して、気液界面放電水処理では従来比2倍以上の分解効率を得られた。これは先に述べたように、OHラジカルを水中で直接発生させることができるためと考えられる。

### 5. むすび

気液界面放電水処理システムの実用化に向けた今後の課題として、反応器のモジュール化と装置構成の簡素化による装置コストの低減、スケールアップ等が挙げられる。今後も、より効率的な水処理技術の開発を進め、未来社会が目指すべきスマートな水環境システムによる循環型社会の構築に貢献していく。

### 参考文献

- 厚生労働省 健康局 水道課：水道事業における環境対策の手引書(改訂版) (2009)  
<http://www.mhlw.go.jp/za/0723/CO2/CO2-O2.html>
- 国土交通省 資源のみち委員会：資源のみちの実現に向けて報告書(案) (2007)  
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/sigen7th/02.pdf>
- 国土交通省 水管理・国土保全局水資源部：平成26年版日本の水資源について～幅を持った水システムの構築<次世代水政策の方向性>～ (2014)  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo\\_mizsei\\_fr2\\_000012.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr2_000012.html)
- 田中宏明：21世紀型都市水循環系の構築の鍵となる水生成技術の開発と評価, 科学と工業, 88, No. 6, 214~220 (2014)
- 国土交通省 下水道部：我が国における下水処理水の再利用状況 (2009)  
<http://gcus.jp/report/groupReport/pdf/ballast03.pdf>
- 国土交通省 下水道部：下水処理水の再利用のあり方に関する懇談会中間とりまとめ (2008)  
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/shorisui/chukan/01.pdf>
- 経済産業省 水ビジネス国際展開研究会：水ビジネスの国際展開に向けた課題と具体的方策 (2010)  
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/004625/pdf/g100426b01j/pdf>
- Minamitani Y, et al.: Decomposition of dye in water solution by pulsed power discharge in a water droplet spray IEEE Trans. on Plasma Sci. 36, 2586~2591 (2008)