

# よみがえれ水

## 電気電子工学専攻 安岡・竹内 研究室



安岡 康一 教授 1955年静岡県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程修了。2007年より、同理工学研究科電気電子工学専攻教授。



竹内 希 講師 1983年茨城県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程修了。2012年より、同理工学研究科電気電子工学専攻講師。

安岡・竹内研究室では、水中プラズマを用いて水を再利用する研究が行われている。本稿ではまず、水中プラズマとはどのようなものなのか説明する。そして、水を取り巻くさまざまな問題を通して、なぜ水の再利用が必要なのか、また、なぜ水中プラズマが有用なのかを述べる。最後に先生は水の再利用をどのようにして果たそうとしているのかを紹介していく。

### 水中プラズマとは

皆さんはプラズマというものを知っているだろうか。おそらく、聞いたことはあるがどのようなものかはわからない、という人が多くを占めるだろう。実は私たちが知らないだけで、身の回りにもプラズマは存在している。私たちの身近にあるプラズマの例として雷やオーロラなどがあるが、それらがプラズマだと言われてもイメージが湧かないだろう。そこで、まずはプラズマについての説明から入る。

プラズマとは原子が電離し、イオンと電子が独立して存在している状態を指す(図1)。本来、電子は原子核に束縛されているが、電圧をかけてエ

ネルギーを加えることで、原子がイオンと電子に電離する。つまり、物質にエネルギーを加えることで固体から液体、液体から気体になり、最後にプラズマになるのである。このとき電子のもつ運動エネルギーが、クーロン力のポテンシャルエネルギーを上回っていなければ、元の状態に戻ってしまう。これはロケットを打ち上げる際に、重力を振り切るだけの運動エネルギーが必要になることと同様である。

では、プラズマにはどのような性質があるのだろうか。まず、プラズマは気体などの三態と違い、粒子のごく一部がプラズマとなるだけで全体がプラズマとしての特徴を示す。また、電離する前の状態は気体であり、全体は電氣的に中性である。

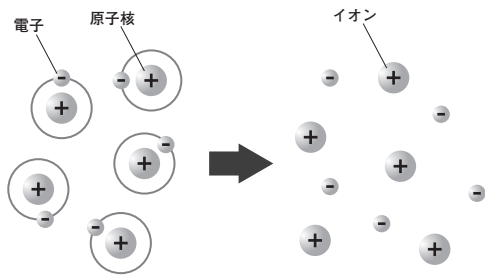


図1 プラズマとは

気体状態の粒子が部分的に、もしくは完全に電離している状態をプラズマという。

したがって電離しても正電荷と負電荷の量は等しいので、プラズマも全体としては電気的に中性を示す。しかし、個々の粒子は電荷を帯びているので、中性粒子と異なり粒子間にクーロン力が発生している。そのためプラズマ中の他の粒子に影響されて、複数の粒子が一つの集団としてふるまうのである。これに加えて、粒子は電磁場からローレンツ力を受けるため、電磁場を用いて粒子の動きを制御することができる。このように他の三態とは大きく異なる性質を有するので、プラズマは第四の状態とも呼ばれている。

安岡・竹内研究室では、プラズマの中でも主に水中プラズマの研究を行なっている。水中プラズマと聞くと、水中に存在しているプラズマのことを想像するかもしれない。しかし、実際は気体と水との界面に接して、水や水中の物質に作用する気体中のプラズマのことなのである。先ほども述べたように、粒子がプラズマを維持するためには大きなエネルギーを必要とする。また、一般的に物質は気体よりも液体の方が分子密度は遥かに高い。したがって、**プラズマが液体に接すると、気**

体中と比べて頻繁に分子と衝突するので、すぐにエネルギーを失ってしまい、プラズマを保つことができなくなる。つまり、プラズマは液体中には存在できないのである。

さまざまな実験によって水中プラズマならではの利点が見つかっている。これまでに判明していることとして、水中プラズマは単に水中の有機物を分解するだけでなく、その反応を局所的に行えることが挙げられる。たとえば、低温では分解できない水溶性物質がある場合に、従来は水全体を加熱することで分解していた。しかし、水中プラズマを用いれば、水の一部分を加熱して、加熱した箇所だけで分解反応を進めることができるため、全体を加熱するよりも効率的に分解を行えるのだ。

さて、安岡・竹内研究室では水中プラズマをどのようにして発生させているのだろうか。水中プラズマの発生には主に三つの方法がある。一つめは水中に電極を浸して電圧をかけ、電極間に気泡を作り、その気泡内にプラズマを作る方法である。二つめは水上と水中に電極をおき、電極間の空気中にプラズマを作る方法である。三つめは溶液の入った容器の下部からガスを出して事前に気泡を作っておき、その気泡内に電圧をかけてプラズマを作る方法である(図2)。

まず、これらの三つの方法のうち、一つめの方法とそれ以外の方法には、プラズマを作る際のエネルギー効率において大きな違いがある。プラズマになるためには電子が原子核の束縛から抜け出すだけのエネルギーが必要となる。粒子は電場によって加速されることでそのエネルギーを得ている。そのため加速される時間が長いほど、つまり、他の粒子と衝突するまでの時間が長いほど、低い

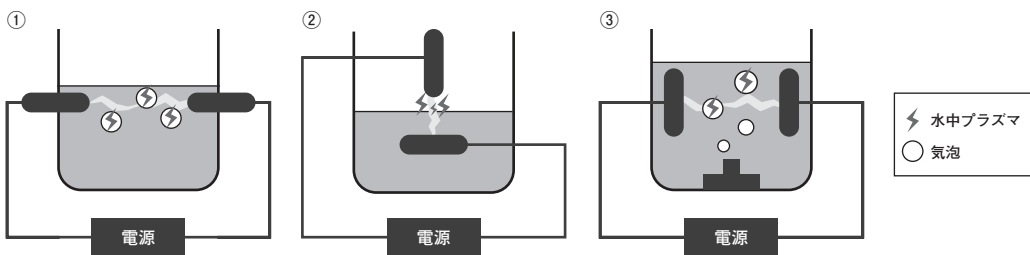


図2 水中プラズマの生成

電極間に電圧をかけて、気体中にプラズマを作る。安岡・竹内研究室では効率の良さから③の方法を用いている。

電圧でもプラズマが生成できるのでエネルギー効率が良いのである。一つめの方法では、気体に比べて分子密度の遥かに高い液体からプラズマを発生させる。したがって、他の方法よりも頻繁に粒子が衝突するため、プラズマになるために十分なエネルギーを与えるには他の方法よりも高い電圧が必要となり、非常に効率が悪いのだ。

次に、二つめと三つめの方法はどちらも気体中で行なっているが、この両者にも違いがある。二つめの方法では、空気中にプラズマができていますので、水中プラズマとして作用するのは水面に対してのみである。一方で、三つめの方法では、水中の気泡内にプラズマができていますので、水中プラズマとして作用するのは気泡と水との界面に対してである。そのため、二つめの方法では水中プラズマの作用する場所を変えられないが、三つめの方法では気泡を動かすことで、作用する場所を自在に変えられる。このように水中プラズマを作用させることができる範囲に違いがある。

また、分解する際の効率面でもう一つ大きな違いがある。水中プラズマは大きなエネルギーをもつので、水や水中の物質だけでなく、気体とも反応するのである。たとえば、酸素とプラズマが反応すればオゾンができる。オゾンは強い酸化力をもつため、殺菌や分解に使われており、水の再利用にも役立つ物質である。二つめの方法ではオゾンは空気中で発生しているが、三つめの方法ではオゾンは気泡内で発生している。したがって、二つめの方法で発生したオゾンは四方八方に拡散してしまうのに対して、三つめの方法で発生したオゾンはそのまま水中に溶け込むので、水中での反応に利用することができるのだ。このように、三つめの方法は作用する範囲が広く、気体との反応も利用できて効率が良いため、安岡・竹内研究室では三つめの方法を採用している。

## 世界と水

安岡・竹内研究室では、水中プラズマを用いた水の再利用を目指している。ここで水中プラズマを用いて、どのようにして水を再利用するのか説明する前に、水について少し考えてみよう。日本

に住んでいる私たちにとって、水は当たり前のものであり、蛇口をひねればいつでも水を得ることができる。しかし、世界全体に目を向けたときに、水は簡単に手に入るものとは必ずしも言えない。現に世界では水に関するさまざまな問題が起きている。この問題を解決するために、水の再利用は世界的な重要課題となっているのだ。

地球は水の惑星と言われるように多くの水が存在するが、そのうち淡水はわずか3%ほどである。その中でも私たちが利用できるのは、さらにその一部で、水全体のうち河川や地下水として存在するわずか0.8%だけである。そのため世界では、中央アジアやアフリカをはじめとした地域で、10億人を超える人々が水不足で苦しんでおり、少ない水源を取り合って、世界各地で争いが起きている。その例としてナイル川やメコン川などの国際河川を巡った紛争がある。

あちこちで水が不足していることからわかるように、不足していなかった昔よりも水の価値は高くなっている。人口が増え続ける近年ではその価値は年々上昇している。そのため水は21世紀現在、石油や天然ガスなどのように戦略物質として扱われるようになってきている。その最たる例がシンガポールである。シンガポールはマレー半島の南部にある63の島で構成されている国だが、島はいずれも小さく高低差もないので大きな水源が少なく、貯水力に乏しい。一方で、シンガポールの人口密度は世界第2位であり、自国だけでは必要な水を賄うことができない。そのため、隣国のマレーシアから水の多くを輸入してきたが、そのマレーシアにこれまでの100倍の価格で水を輸入するように迫られている。このようにシンガポールは、水に関してマレーシアの外交戦略に左右されやすく、水不足が外交面でのアキレス腱となっている。

これらの問題を解決するには、足りない分の水をどこかから持ってこなければならない。それならば、海水を真水に変えれば良いと思うかもしれないが、海水から塩分を取り除くには、現在のところ多大なエネルギーを必要とするのでコスト面に大きな課題がある。また、飲料水として使用する場合は、精製した真水を殺菌する必要もあるもので、さらにコストがかかる。水を必要としている

地域には途上国が多いので、低いコストで使える水を増やす方法が求められているのだ。そのため使った水を再利用する方法が模索されている。

水の再利用を行うには廃水中の有機物の処理が必要である。有機物を処理するには抽出や分解など多数の方法が存在しており、世界各地でさまざまな研究が行われている。その中で安岡・竹内研究室では、水中プラズマを用いて分解する研究を行なっている。では、なぜ先生方は水中プラズマに着目したのだろうか。これから水中プラズマの特徴を踏まえて見ていく。

### 水中プラズマの力

水の再利用を行うとき必要となるのは、先にも述べたように有害な有機物の除去である。その際、対象となる有機物は水中に存在しており、有機物によっては一箇所に集めることも可能である。そこで、水全体に作用する方法よりも、水中の有機物のみに作用する方法がより効率的である。したがって、水中で局所的に反応を起こせる水中プラズマは有効なのである。しかし、水中プラズマを用いるメリットはそれだけではない。仮に元の有機物を分解しても、有害な二次生成物を出してしまえば再利用することができない。だが、水中プラズマではそういったことが起きない。水中プラズマを用いる一番のメリットは、有機物を分解して無害化できることである。それは水中プラズマの分解の仕組みに由来している。

水中プラズマによって有機物を分解する仕組みは二つ存在する。一つめはプラズマが有機物を直接分解するものである。水中プラズマではプラズマ中の粒子が激しく運動していて、水との界面上の水分子と衝突する。このとき通常の粒子と違い、プラズマ中の粒子はとて大きな運動エネルギーを有しているため、衝突する際に水や有機物の結合を切断し、分解することができるのだ。この運動エネルギーはほとんどの結合エネルギーを上回っているため、有機物を分解して無害化できるのである。二つめはプラズマと水分子が反応することで生成されるHラジカル、OHラジカルを利用して分解するものである。ラジカルとは不対

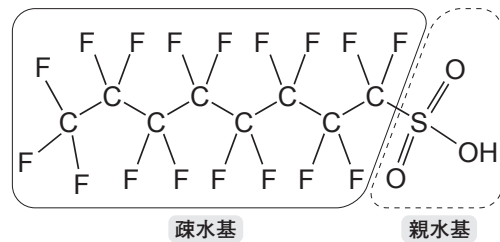


図3 PFOS

有機フッ素化合物の一種であるPFOSは親水基と疎水基を持つ界面活性剤である。

電子をもつ原子や分子、イオンのことであり、不対電子をもっていることからわかるように反応性がとても高い。したがって、生成されてからすぐに他の原子や分子と酸化還元反応を行い、有機物を分解する。水中プラズマ以外にも生成方法が多数存在し汎用性は高く強力な分解能力をもつが、全ての結合を切れるわけではない。

水中プラズマ以外にも有機物を処理する技術はもちろん存在しており、現に水中プラズマはこの分野において他の技術と競合している。特に日本は逆浸透膜などの膜分離技術が世界でも進んでおり、一般的に水処理で利用されているのは膜分離方式である。しかし、膜分離技術には分離した有機物の一部を脱水して埋め立てるなど、二次廃棄物が発生する問題がある。それに対して、水中プラズマ方式はまだ研究が始まったばかりであるが、水中の有機物を分解して無害化できる。そのため、高効率化、低コスト化、装置の大規模化などの課題を解決していく必要があるものの、水中プラズマ方式の実用化に対する期待は大きい。

水中プラズマが特に優れている事例として、ペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) (図3)、ペルフルオロオクタン酸 (PFOA) の分解が挙げられる。PFOSやPFOAなどに代表される有機フッ素化合物は安定した物質であり、PFOSやPFOAは界面活性剤として表面処理剤や消火剤などの用途で、工業的に広く使用されてきた。しかし、2000年頃に環境残留性と生態蓄積性が指摘されて以降、製造禁止となっている。それでも今までに使われてきた量は多い。中でもPFOSはホッキョクグマの体内からも検出されており、PFOSやPFOAによる汚染が深刻な問題となっている。



PFOSやPFOAは難分解性の物質なので、効率的な分解方法が求められてきた。光化学や光触媒などで分解する方法がすでに見つかっているが、反応効率が悪くあまり実用的ではない。その上、分解過程で有害な二次生成物も出てしまう。PFOSやPFOAを完全に無害化する方法ではない。このように、有効な手立てがない中で見つかったのが水中プラズマによる分解である。

一般的に分解で利用されるのはラジカルであるが、PFOSやPFOAは結合が強くOHラジカルやHラジカルでは結合を切ることができない。そのため、ラジカルを利用する水中プラズマで分解することは、これまで考えられていなかった。しかし、安岡・竹内研究室は、水中プラズマで直接分解することを考えて実験を行なったところ、予想外のデータが得られた。今までに考案された方法よりも遥かに効率よく分解できたのだ。

なぜこのようなデータが得られたかを調べていたところ、ある事実が明らかになった。なんとPFOSやPFOAが水中プラズマに集まってきていたのである。PFOSやPFOAは界面活性剤なので、親水基と疎水基をもっているが、この疎水基が水中プラズマと水との界面に、引き寄せられ集まっていたのである(図4)。

一連の流れでどのような反応が起きているのか、いまだに不明な点が多いが、得られた実験データから安岡・竹内研究室では次のように考えている。はじめに、生成された水中プラズマの周りにPFOSやPFOAが集まってくる。引き寄せられた

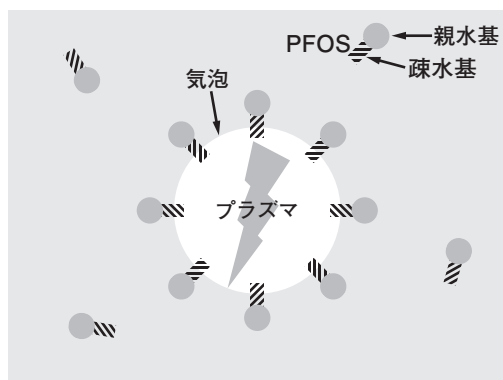


図4 水中プラズマとPFOS

水中プラズマと水の界面にPFOSの疎水基が引き寄せられる。このことによりPFOSの分解効率が飛躍的に高くなる。

PFOSやPFOAが界面と接触すると、プラズマ中の粒子が衝突して炭素間の結合が切られていく。その際、一度に切れる結合の数はその時々により異なるが、繰り返すことで最終的には $CF_4$ や $CF_3$ ラジカルが大部分になっていく。次に、これらの生成物が分解されてフッ化水素や二酸化炭素になる(図5)。ここでできたフッ化水素は毒性の高い物質であるが、水中でフッ素イオンになり、無害な蛍石( $CaF_2$ )にして回収されるので問題ない。後半の炭素とフッ素の結合を切る過程は、さまざまな経路の反応が考えられる。たとえば、先ほどと同じようにプラズマが直接分解する反応である。他にもHラジカルで還元される反応や、OHラジカルで酸化される反応も十分に考えられる。つまり、ただ分解するだけでなく、同時にラジカルなどの物質を生成していることが、効率の良さの一因なのかもしれない。どのような反応が起きているのか、他の界面活性剤でも同様の事が起きるのかなど、これからの研究で徐々に明らかになっていくだろう。

## 水不足を越えて

ここまでで、水中プラズマと世界を取り巻く水問題について紹介してきた。水が不足している現在では、単に再利用するだけで増え続ける需要を恒久的に満たせるとは限らない。水中プラズマを使った水の再利用技術の使い道は無数に存在していて、水不足が解決するかは再利用技術の活用方法にかかっている。それでは、先生は最終的にどのような場面で水中プラズマを活用して、水不足を解決するつもりなのだろうか。先生の出した答えは、水耕栽培において、水中プラズマを制御して用いることである。

水耕栽培とは、通常の栽培方法と違い、ビニールハウスなどの施設を用いて、土を使わずに根を水に浸して栽培する方法である。そのため水耕栽培では、土地を立体的に利用でき、栽培室を重ねることで作付可能な面積が何倍にもなる。このように水耕栽培は、従来の方法よりも生産性が高いので、近年では植物工場などに広く普及している。また、土を必要としないことから場所を選ばない

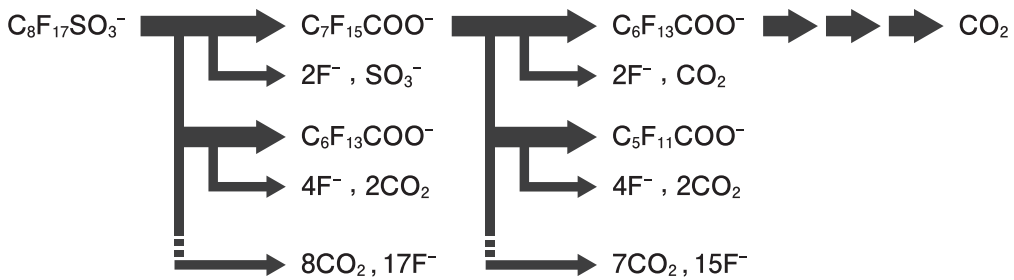


図5 水中プラズマによるPFOSの分解過程

水中プラズマによるPFOSの分解経路はさまざまであるが、最終的には無害な物質に分解される。

ため、家庭菜園としても人気になっている。

実は、世界で使われている水の7割以上は農業で使用されている。現代の農業の主流は灌漑農業であり多くの水を必要とするが、使われている水の大部分は蒸発して失われている。もちろん、失われた水は循環して最終的には海に戻ってくるが、海水を真水として使用するのは困難である。つまり、栽培の過程で余分に失われている水を抑えることができれば、水不足は解決できる問題なのだ。そこで必要となるのが、先に述べた水耕栽培であり、水中プラズマなのである。

水問題において水耕栽培の長所は二つある。一つめは、必要な水だけを供給すれば良いので、畑一面に水を散布しなければならぬ灌漑農業に比べて、要求される水量が大幅に少ないことである。二つめは、余分に失われる水がほとんどないことである。というのも水耕栽培でも水の蒸発は当然あるが、水耕栽培は主に施設の中で行われるため、回収して再利用することが可能であるからだ。また、水を循環させているので、蒸発せずに残った水も全て回収している。そのため、一度栽培が始まれば新たな水をほとんど必要としない。

では、水中プラズマは水耕栽培にどう関わってくるのだろうか。水耕栽培では水を介して植物に栄養を与えるので、その過程で水が汚れて有機物が生成してしまうことは避けられない。また、植物の活動から硝酸などの物質も生成される。これらの物質は植物に悪影響を与えるので、栽培に適した水を安定して供給するには、循環の中でこれらの物質を分解して無害化しなければならない。回収した水をきれいにするシステムが必要になる

のである。そこで、水中プラズマが役に立つのだ。

ただし、水耕栽培においては水中プラズマをそのまま用いると問題が生じてしまう。なぜなら水耕栽培では、植物の肥料になるカリウムやナトリウムを有機物と結合させて与えているからである。水中プラズマを制御せずに用いると、肥料を含む有機物がすべて分解され、肥料としての役割をもたなくなってしまう。つまり、熱分解や酸化還元反応の強弱も制御して、肥料以外の有機物のみを分解しなければ意味が無いのである。制御ができれば、植物の育成に適したきれいな水を送り、汚れて戻ってきた水を再びきれいにする理想的な循環ができあがるのだ。

これが実現されたなら、将来的には植物工場だけでなく家庭や施設ごとに独立した水の循環が行われるだろう。自分たちで使った水を、自分たちできれいにしてもう一度使う。このサイクルが一度確立されれば、水不足以外だけでなく水質汚染などといった水に関するさまざまな問題を、一挙に解決することができるだろう。誰もが悩むことなくきれいな水を使える世界となるために、先生の研究がより一層進展することを期待したい。

#### 執筆者より

取材では水中プラズマだけでなく、さまざまな事柄について先生方にお話を伺うことができました。今回の取材で得た経験を今後活かしていきたいと思います。最後になりますが、度重なる取材を快くお引き受けくださった安岡先生と竹内先生に心からお礼申し上げます。(石松 慎)