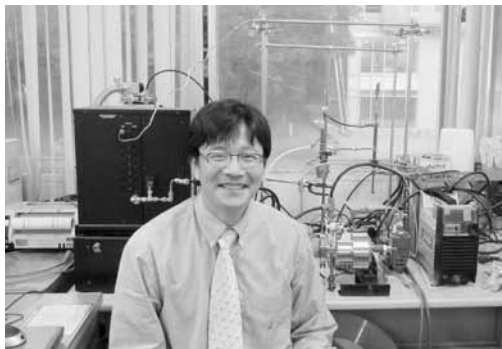




プラズマで循環型社会を拓く

渡辺 隆行 研究室～化学環境学専攻



渡辺 隆行 准教授



プラズマとは

プラズマとは、正のイオンと電子がほぼ同じ密度で、電気的中性を保って分布している、ある粒子集団のことである。この粒子集団は、高いエネルギー状態にある。身近なプラズマの例としては、太陽やオーロラが挙げられる。また、プラズマは蛍光灯や空気清浄機にも利用されている。

プラズマの生成方法にはさまざまな種類があるが、一般的には気体を電離させて生成させる。たとえば、直流アーク放電の中に気体を送り込むという方法がある。アーク放電とは、電流間の気体が電離し、そこを電流が通ることで起こる、強い光と高熱を伴う放電現象である。アーク放電が起こったとき、電極間に飛び出した電子が気体分子に衝突する。すると、分子が原子に解離し、さらにイオンと電子に電離して、プラズマができる。アーク放電は大気圧下で安定な放電状態であるため、この生成方法は汎用性が高い。

また、プラズマの別の生成方法として、電磁誘導によるものがある。磁場をすばやく変化させると、気体の電子が振動する。その結果、気体が電離してプラズマができる。この生成法では電極を使わないので、電極物質が不純物としてプラズマ

循環型社会への移行が急がれる現在、廃棄物処理やリサイクル、材料製造プロセスの革新が求められている。廃棄物処理は、ただ廃棄物を分解すればよいというわけではなく、有害な副生成物を抑制しながら効率的に行わなければならない。リサイクルや材料製造の効率化も徹底していく必要がある。これらを実現する新しい方法として、渡辺先生はプラズマのさまざまな性質を活かしたものを考案している。先生の研究成果は近年大きな注目を集めており、本稿ではそのいくつかを紹介する。

に混入しない。そのため、材料合成に適している。

ここで紹介したどちらの生成方法でも、気体は装置内にあるプラズマの生成場所に送られ、放電や磁場によりプラズマ化される。そして加熱や反応に利用されたのち、気体に戻りながらプラズマの生成場所から出て行く仕組みになっている。

大気圧下で作られるプラズマは、熱プラズマと低温プラズマに大別される。熱プラズマとは、中心部分が1万℃以上のプラズマのことである。熱プラズマ中の全ての粒子は高温であるため、これを用いると熱処理速度や化学反応速度が上がる。これが熱プラズマを用いる利点だ。一方、低温プラズマは、電子の温度が高く、その他のイオンや原子、分子の温度は低い。たとえば、酸素の低温プラズマの場合、電子は1万℃にも達するが、 O 、 O^+ 、 O_2 は数百℃にとどまる。低温プラズマでは、高温の熱プラズマではできない選択的な熱処理が可能になる。

渡辺先生は、プラズマの生成方法の違いや、熱、低温プラズマのそれぞれの特長を活かした新しい廃棄物処理やリサイクル、材料製造の方法を研究している。



プラズマの熱を活かす

インジウムの回収

携帯電話やパソコン、テレビの画面を構成する液晶パネルは、私たちの生活において欠かせないものとなっており、需要が世界的に拡大している。液晶パネルに用いられる電極は光を通すために透明でなくてはならないので、電極の材料にできる物質は限られている。ITO (Indium Tin Oxide 酸化インジウムスズ) と呼ばれる物質は、透明な上に、電気抵抗も少ないため、液晶パネルの電極として最適であり、広く用いられている。

しかし、ITOの原料となるインジウムの産出量は少なく、今のところITOの代用物質もない。そのため、廃棄される液晶パネル内のインジウムを回収することが望まれる。企業では、液晶を塩酸で洗いインジウムを溶かして回収したのち再利用している。この方法では、廃液による環境汚染の問題が生じる上、廃液処理のコストが膨らんでしまう。そこで、渡辺先生は、廃液を出すことのない、プラズマによるインジウムの回収方法を提案した。

液晶パネルは、図1のような層状の構造を持つ。先生の提案した方法では、まず液晶部分を境に液晶パネルを2枚に分割する。このとき、液晶は流れ落ちるので、その結果配向膜が露出する。そこに低温プラズマを照射すると、プラズマにより配向膜は分解され、ITOが露出する。ここにさらにプラズマが照射されると、伝導性のあるITOにのみ、ストリーマ放電と呼ばれる放電現象が生

じる(図2)。この放電の熱によってITOが蒸発し、その一部はインジウムになる。インジウムや蒸発したITOを回収することで、再利用が可能になる。この方法では、液晶パネルに残されたITOだけを蒸発させ続けるので、効率よく、しかも廃液を出さずに回収が行えるのだ。

実際には、液晶パネルを2枚に分けたとき、液晶の一部が流れ落ちずに残ってしまう。液晶に隠れたITOの回収は難しいので、ITOの全てを回収できるわけではない。それでも、10センチメートル四方の液晶パネルに、30秒間のプラズマ照射を行った結果、パネル上のインジウムのうち8割ほどが回収できた。この方法で、広範囲に広がるプラズマを用いれば、30秒間で50インチ四方の液晶パネルを処理できるようになると渡辺先生は考えている。

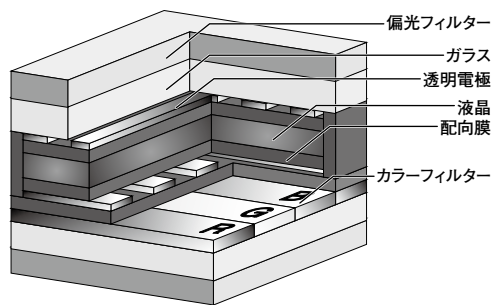


図1 液晶パネルの構造

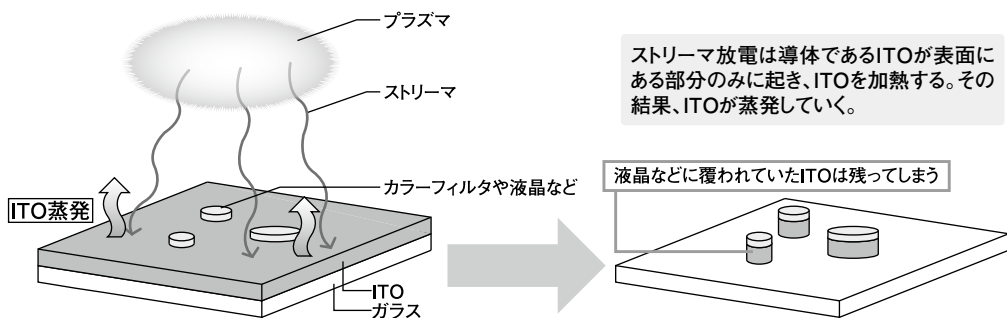


図2 ストリーマ放電によるITOの回収

革新的ガラス溶解

ガラスは、窓や鏡、食器などとして私たちの身近に多く使われており、ガラスの製造量は現在もなお増え続けている。ガラス製造業に消費されているエネルギー量は、原油換算で毎年約二百万キロリットルにも及んでおり、ガラス製造に必要なエネルギーコストの削減の必要がある。

現在のガラス製造には、ドイツのシーメンスが1850年ごろに発明したものと原理的に変わらない方法が用いられている。シーメンスの方法では、はじめに、巨大な炉の中で原料となる二酸化ケイ素などを加熱し、溶解することで水あめ状のガラスを得る。この水あめ状のガラスには気泡や組成の偏りがあり、急冷して固化すると質の悪いガラスができてしまう。それを防ぐために、水あめ状のガラスを長時間高温に保つことで、気泡や組成の偏りを取り除き、均質化する。その後、冷却して高品質の固形ガラスを得る。しかし、この方法では均質化に時間がかかるためにエネルギーを大量に消費してしまう。シーメンスの方法には度重なる技術改良がすでに加えられており、熱エネルギー効率を上げることでエネルギー消費量を減らすことは、これ以上できないと考えられている。そのため、ガラス製造業全体のエネルギー消費量を削減するためにはシーメンスの方法にとって代わる新しいガラス製造法の開発が必要である。

そこで渡辺先生らは、気中溶解という方法を用いた革新的ガラス溶解技術を開発している。先生が開発している方法では、まずガラス原料を100マイクロメートルほどの微小粒子にする。そして、これをプラズマと燃焼炎の複合熱源に投入し、溶解する(図3)。

この方法は、熱源中に微小粒子原料を投入するという点で従来あった方法とは根本的に異なっており、いくつか重要な利点を持つ。一つ目は、原料を複合熱源に投入することで熱源から原料への熱伝達効率が向上することだ。

二つ目は、微小粒子原料を気中で溶解することになるので、熱源に投下して落下しきるまでの数百ミリ秒程度という非常に短時間でガラス化が全て完了するという点である。

三つ目は、熱源に投入する粒子原料が溶解した時に、溶解してできたガラスがそのまま最終的な

ガラス組成となることである。従来の方法では、混合原料が溶解するときに融点の違いにより、成分の分離を起こしてしまうため、組成に偏りが生まれていた。革新的ガラス溶解技術では、粒子は内部まで反応して溶解するので、成分の分離を起こすことなく、目的の組成で、均質なガラスを得ることができる。その結果、落下後にガラスを均質化するために長時間高温に保つ必要がなくなり、その分のエネルギーが大幅に削減できる。

しかし、高品質の固形ガラスを得るためには、水あめ状のガラスの均一化が進んでいるだけでなく、ガラス中に気泡が残っていない必要もある。これを確認するため、革新的ガラス溶解技術で、実際に溶解を行ったところ、複合熱源でガラス化した直後、ガラス中に気泡が残っていないことが確認できた。これは、外表面だけが先に溶解し、内部に二酸化炭素が閉じ込められてしまうような急激な温度差が生じにくくなっているためだと考えられる。

革新的ガラス溶解技術を用いれば、長時間高温に保つという過程をなくして、泡や組成の偏りのないガラスを得られる。つまり、ガラス製造におけるエネルギー消費量を大幅に削減することが可能になる。

しかし、革新的ガラス溶解技術には、実用化に向けまだ課題も残されている。たとえば、装置内への原料の供給量が多いほど、ガラス化がたくさんの粒子で起こる。そのため、プラズマの中心部分で強烈な冷却が起こる。その結果、各粒子への熱の伝達量が減り、粒子の処理の質が下がってし

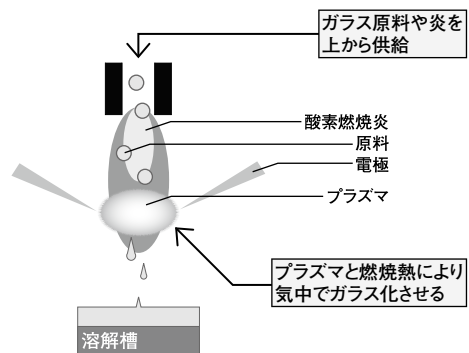


図3 革新的ガラス溶解技術

まう。また、プラズマ全体を有効的に使うためには、原料供給を行うノズルの挿入位置はできるだけプラズマの上部がよい。しかし、プラズマの流れは複雑なので、原料粒子をプラズマに効率よく入れるためにはノズルをプラズマに近づけなければならぬことがわかっている。そのため、ノズ

ルの最適な位置を見つける必要がある。

革新的ガラス溶解技術を用いればエネルギー消費量が大幅に削減できるだけでなく、ガラス製造プロセスの単純化と製造装置の小型化も可能になる。この技術を実用化するため、課題を解決しようと、渡辺先生は研究を続けている。



水プラズマによる廃棄物処理

水を用いたプラズマの利点

フロンは、オゾン層破壊や地球温暖化などの環境問題を引き起こす物質として有名である。また、代替フロンはオゾン層への影響は少ないが、地球温暖化に大きな影響を与える物質である。フロン等が原因となる環境問題を解決するために、フロン等の分解、回収を進めることが重要な課題となっている。しかし、フロンを単純に熱で分解すると、分解後に温度が下がった時に、別の新たなフロンやダイオキシンなどの副生成物が生成してしまう。そのため、環境問題の原因となる副生成物を生成することのない、適切な分解方法を用いる必要がある。

フロンや代替フロンを適切に分解する方法の一つとして、水のプラズマを用いる方法が考えられている。水のプラズマ中には、電子や酸素ラジカル、水素ラジカルなどが豊富に存在するため反応性が高い。酸素と水素を直接プラズマにしようとすると、急激に反応が起こるため非常に危険である。そのため、水素ラジカルと酸素ラジカルは共

存させることが困難である。しかし、水をプラズマにする際には安全に電離するため、酸素ラジカルと水素ラジカルという、共存しにくいものを共存させることができる。

水のプラズマを用いてフロンの分解を行った場合、Cは酸素ラジカルと反応しCOもしくはCO₂となる。ハロゲンは水素ラジカルと反応し、HFやHClになる。これにより、フロンやダイオキシンという副生成物の発生を防げるのである。

また、水のプラズマはPCB（ポリ塩化ビフェニル）という有毒性の物質の分解にも用いることができる。PCBはコンデンサーやトランスの絶縁体としてかつて広く用いられていたが、後に毒性が明らかになり製造が中止されている。しかし、未処理のPCBが大量に残されているため、適切な処理が求められている。PCBの場合も、熱による分解ではダイオキシンが発生するおそれがあるが、水のプラズマを用いて分解すればダイオキシンの発生を抑制しながら処理できる。

水プラズマの課題

PCBなど、有害物質の一部は運搬が制限されており、処理するためには有害物質がある場所に処理装置を用意しなければならない。しかし、その都度新しく装置を作るにはコストがかかりすぎてしまうので、移動可能な小型の処理装置の開発が求められている。

前述のように、PCBなどの有害物質を処理するうえで水のプラズマは有用である。しかし、水のプラズマを生成するための装置はどうしても巨大になってしまうという問題があり、実用化には至っていない。

水のプラズマを生成する際、液体の水を直接プ

ラズマ化するのは困難なので、水蒸気の水蒸気発生装置によりつくり、それをプラズマ発生装置に送ることで水のプラズマを得る。しかし、装置内には100℃を下回る場所が生じてしまうので、そこでは水蒸気が凝縮し始める。その結果、プラズマが消えてしまう。この問題があるため、従来の装置で安定した水のプラズマを得るためには、装置全体を100℃以上に保たねばならず、同時に水蒸気発生装置も必要なので、どうしても設備全体が巨大になってしまうのである。

また、従来の方法では熱効率が悪いという欠点もあった。一般にプラズマは10,000～20,000℃と

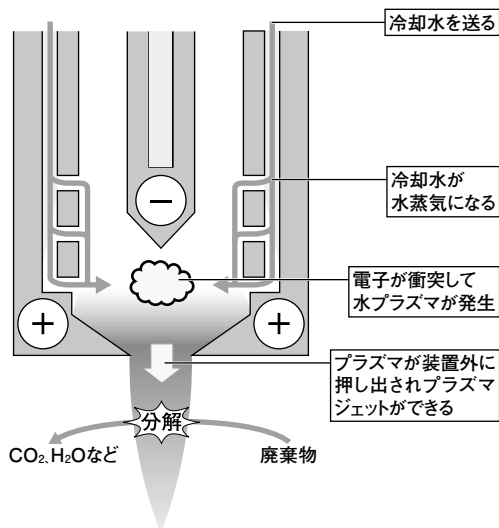


図4 水プラズマによる廃棄物分解

高温なので、電極が解けないように装置の電極部分を水冷する。このとき、冷却水を排出する従来の方法では、プラズマの熱の一部も排出されてしまうため、エネルギーを有効に使えない。

そこで渡辺先生は、水プラズマの生成装置を小型化し、熱効率をよくするために、冷却水を直接プラズマにするという、シンプルにして画期的な方法を考案した。渡辺先生は、この方法で生成するプラズマを特に、「水プラズマ」と呼んでいる。

渡辺先生が考案した方法では、まずはじめにプラズマ発生装置の陰極と陽極を接触させ、ショートさせる。このとき、電極中を流れる冷却水に大量のエネルギーが与えられ、冷却水はプラズマ化する。その後、電極を離すと、プラズマ化して電離した水蒸気を媒介として直流アーク放電が発生する。そこに冷却水が送りこまれていくと電極の熱で水蒸気となり、水蒸気はアーク放電により直ちにプラズマ化する。冷却水は次々と送り込まれるので、結果として発生したプラズマは高速で押し出され、プラズマジェットを形成する。このプラズマジェットに廃棄物を投入することで、廃棄物を分解することができる(図4)。

この方法では、冷却水として使われることで温まった水をプラズマ化するから、水蒸気発生装置

を用意する必要がないうえ、装置全体を100℃以上に保つ必要もない。そのため装置の小型化が可能となる。また、冷却水によって熱を有効に使えるので、熱効率も約9割程度まで上がった。

この方法を考案した当初は安定なプラズマを得ることができていなかったが、試行錯誤しながら装置の改良を重ねることで、装置内へ最適な方法で水を供給することが可能になり、安定なプラズマが得られるようになった。すでに渡辺先生は、この研究成果を活かし、企業との共同研究で移動式廃棄物処理装置を開発している。この装置は10トントラックに水プラズマの発生や廃棄物処理に必要な装置を搭載したものだ。必要な電力は、トラックの走行に使われるディーゼルエンジンで直流発電機を回すことで得られる。

現在、渡辺先生は、自身が開発した水プラズマを用いる廃棄物処理装置に残された課題に取り組んでいる。課題の一つは、プラズマを生成するためのコストが依然として高いことである。一般に使用されるようになるためには、さらにコストを下げる工夫が必要だ。また、電極にも課題がある。陽極に関しては、使用する金属は何を用いてもさほど問題にならない。陽極には陰極から飛び出した電子が自然に入っていくためである。一方、一定以上のエネルギーを与え、電子を飛び出させなければならない陰極には、電子を出しやすい金属を使う必要がある。たとえば、アルゴンプラズマを生成する場合、陰極にはタングステンを使うことが多い。しかし、空気中においてプラズマを用いるときや、酸化雰囲気である水プラズマを用いるときは、酸化され蒸発してしまうためタングステンは使えない。渡辺先生は、装置の陰極として現在はハフニウムを用いているが、イリジウム合金などいろいろな材料を試しているところである。高温でも酸化されにくく電子を出しやすい材料を用いて、より良い陰極を作ることを目指して研究を進めている。

これからも渡辺先生は、プラズマの特長を活かした廃棄物処理やリサイクル、材料合成の研究によって、循環型社会の実現に貢献し続けるだろう。

この度は、ご多忙の中度重なる取材や質問に快く応じていただきありがとうございました。今後

の研究の発展をお祈り申し上げます。

(弥永 恵)