

放電プラズマによる円筒型水処理リアクタの新たな設計と処理特性

A New Design and Treatment Characteristics of Cylindrical Water Treatment Reactor using Discharge Plasma

○金丸真子、城戸真紘、古木貴志、立花孝介、市來龍大、金澤誠司
大分大学 理工学部

論文要旨

本論文は、放電プラズマによる水処理において、新たな円筒型リアクタの開発についてその設計を説明し、水処理実験として着色水の脱色時間やエネルギー効率 G_{50} を評価した結果について述べる。従来の同軸円筒型リアクタでは、金属製のパイプを外部接地電極として使用するのが通常であり、処理水を膜状にその内壁面を流下するよう供給する場合、内壁に工夫を施すことは不可能であった。今回、金属製の円筒パイプを半割加工して、開閉できる構造をとることで内壁面に活性炭を装荷するなど可能とした。

キーワード：放電プラズマ、円筒型リアクタ、水処理

1. はじめに

現在、SDGs の 6 番目の目標に掲げられている安全な水の確保は重要な課題である。生活排水の処理や有機染料で汚染された水を高度に浄化するためには、これまで以上に優れた水処理技術の開発が望まれる。しかし、既存の水処理方法ではコストがかかることや、難分解性有機化合物が処理できないなどの問題点があり、次世代水処理技術の開発が必須である。これらの問題を解決するためには、環境負荷が少なく、処理能力の高い放電プラズマによる次世代の水処理用リアクタの開発に期待が寄せられている。これまでのところ放電プラズマを用いた処理装置では、放電の形式やそれを実現するリアクタの構造に効率は大きく依存することが知られている[1]。われわれの研究室では、処理効率の高い方式の一つである処理水を膜状にして放電プラズマを照射する手法の開発を行ってきた[2]。特に流体制御する手法であるコアンダ効果[3]を処理水に施すことや既存の水処理でよく用いられる活性炭とプラズマを重畳することが有効であることを実証してきた[4]。一方、水処理において放電プラズマリアクタを実用化する上で一番の課題は、大容量の水を処理できることへの対応である。われわれはこれまでのところ円筒型と平板型のリアクタに着目してきたが、リアクタ内部構造の自由度が高く、大容量化が比較的容易である平板型リアクタの開発に注力してきた。しかし、平板型リアクタでは流下する膜状の処理水が占める面積を拡大させると放電プラズマが当たらない領域が形成されるといった問題があった。

そこで本研究では、円筒の内壁を流下する膜状処理水に対して放電プラズマが均一に当たる円筒型リアクタにおいて、円筒を半割加工して開閉できる新型の同軸円筒型のリアクタを開発した。これにより円筒内壁への活性炭の装荷や流体制御を行うための内壁面の加工が可能となった。ここでは新たなリアクタの設計とその水処理特性について紹介する。

2. 実験装置および実験方法

今回開発した水処理用リアクタの概略図を図1に示す。装置は円筒型リアクタと貯水槽（アクリル容器）から構成される。リアクタは円筒パイプの中心に線電極を配置する同軸円筒型である。円筒パイプはステンレス製のパイプ（材質 SUS304、内径 21 mm、外径 25 mm、長さ 300 mm）を半割にして蝶番を付けることで開閉できる構造とした。処理液は送液ポンプで貯水槽からリアクタ上部の容器（3D プリンタで作製、材質 ABS 樹脂）へ送られ、容器内に徐々に蓄積される。そして、溶液が容器内の貯水槽いっぱいまで溜まると、溶液は溢れ出し、ステンレスパイプの内壁に沿って水膜状に流下し、下部のアクリル容器に流れ落ちる。高電圧電極としては、線電極（タングステン製、直径 0.2 mm）を使用し、ステンレスパイプの中心に配置した。線電極に高電圧パルス電源（末松電子、MPC 3010S-50SP）からパルス高電圧を印加し、線電極とステンレス管内壁面を流れる水膜との間に放電を発生させた。放電条件はピーク電圧 21 kV、パルス幅 100 ns、繰り返し周波数 100 pps とした。処理溶液にはインジゴカルミン水溶液を使用し、処理溶液量は 500 mL とした。また、送液ポンプによる処理溶液の循環流量は 1,400 mL/min とした。さらに粒状のヤシ殻活性炭（粒度 8×30 メッシュ）をステンレスパイプの内壁に付着させて（図2、約 8.5 g）、活性炭とプラズマの相乗効果を調べる実験も行った。この場合、放電ギャップ長が短くなる（ギャップ長約 7 mm）ので、パルス高電圧のピーク電圧は 12 kV にして、他の実験条件は同一のもで行った。

脱色実験では、水処理を 4 回行い、処理毎のインジゴカルミン水溶液の脱色率を測定し、エネルギー効率 G_{50} を評価した。 G_{50} の評価は次式により行った。

$$G_{50}[\text{g/kWh}] = \frac{\text{液量[L]} \times \text{濃度[g/L]}}{\frac{1 \text{ パルスの放電エネルギー[J]} \times \text{周波数[pps]} \times \frac{\text{処理時間[s]}}{3600}}{1000}} \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

ここで、 G_{50} は脱色率 50% に達したときのエネルギー効率である。よって、式(1)での処理時間は、処理が半分（50%）に達したときの時間であり、1 パルスの放電エネルギーは電圧電流波形から求めた。また、放電プラズマにより生成したオゾン濃度は、放電停止後すぐにガス検知管をリアクタ内の下部に挿入して測定した。

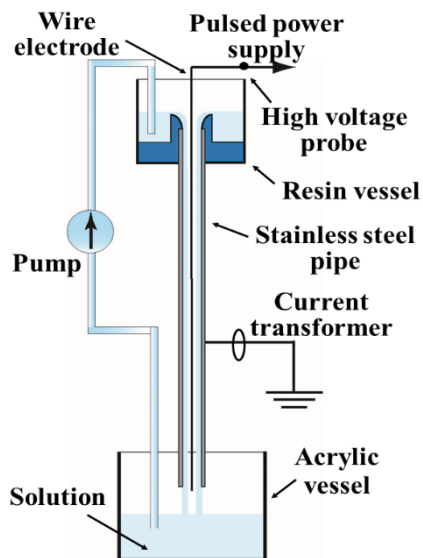


図1 円筒型リアクタ



図2 半割加工した円筒リアクタ
(活性炭を壁面に付着させた場合)

3. 実験結果と考察

図3に放電の様子を示す。放電観測のために矩形開口部(10 mm×20 mm)を設けたリアクタを準備した。開口部は外側よりITO膜付きフィルム(材質PET)を貼り付け外部に水が漏れないようにした。図3(b)のようにステンレスパイプの中心に置かれた線電極からパイプの内側に流れる水膜に向かって放電が伸びている様子が確認できた。よって、流れる処理水に対し、全体的に放電が照射されることがわかる。

図4に放電条件は変えず、処理溶液の濃度を10 mg/Lと30 mg/Lと変えた場合の脱色率を示す。濃度10 mg/L、30 mg/Lのときのそれぞれの脱色完了時間は4分、7分であり、濃度を高くしてもそれほど脱色が完了するまでに時間がかからないことがわかった。

また図5では各濃度におけるエネルギー効率 G_{50} を示す。印加電圧21 kVでの1発の放電エネルギーの測定値は56.4 mJであった。この値をもとにエネルギー効率を計算すると、濃度10 mg/Lでは19.2 g/kWh、濃度30 mg/Lでは38.4 g/kWhとなり、2倍の向上が確認できた。

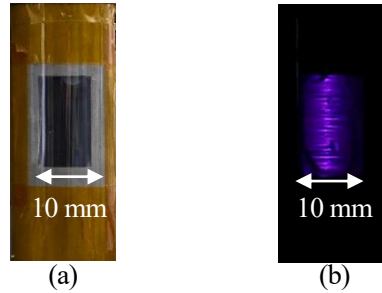


図3 (a) リアクタ中央に設けた放電観測部
(b) 放電の様子 (21 kV, 10 発分のストリーマ)

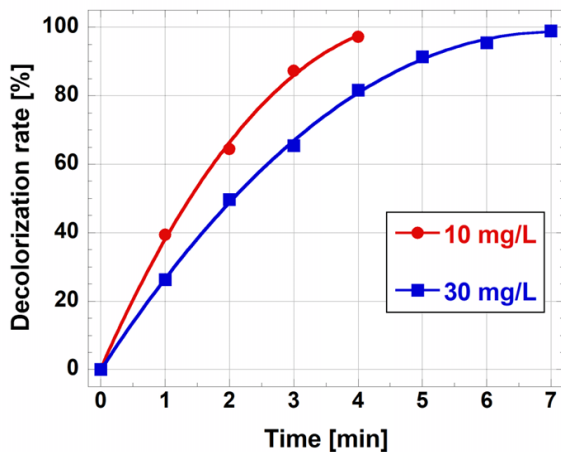


図4 各濃度における脱色率

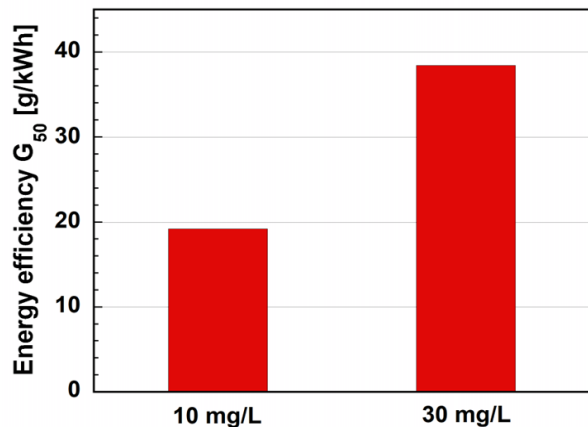


図5 各濃度におけるエネルギー効率 G_{50}

次に、ステンレスパイプの内壁に活性炭を貼り付け、活性炭とプラズマの相乗効果を調べた。実験条件はピーク電圧12 kV、処理溶液の濃度は30 mg/Lである。図6にその時の脱色率を示す。脱色完了時間は8分であり、図4の同濃度である30 mg/Lと比べると1分しか脱色完了時間が変わらないことがわかる。しかし、印加電圧は12 kVであり、1パルスの放電エネルギーの測定値は8.2 mJと省エネルギー化される。そのため活性炭を用いた際のエネルギー効率 G_{50} は223.4 g/kWhであり、著しい向上が確認できた。

また、放電プラズマにより発生するオゾンの濃度を測った。ピーク電圧21 kV、処理溶液の濃度30 mg/Lの条件下でのオゾン濃度を測定すると1.95 ppm、ピーク電圧12 kV、処理溶液の濃度30 mg/L、活性炭を用いた条件下でのオゾン濃度を測定すると1.80 ppmであった。ここで用

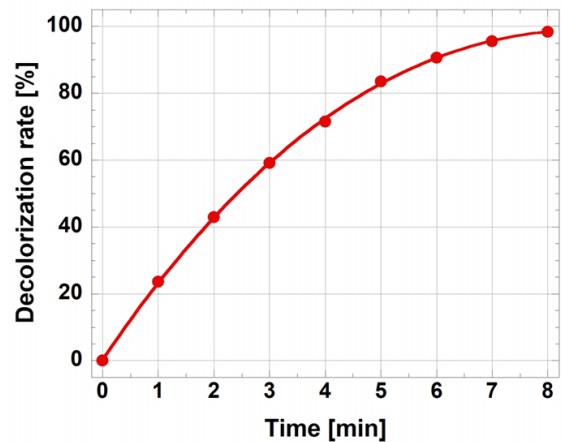


図6 プラズマと活性炭の併用による脱色率

いている放電プラズマはパルスストリーマであり、しかも水膜から蒸発する水分も放電空間に存在するため、オゾン発生器におけるバリア放電で生成されるオゾンのように高濃度化しない特徴がある。

4. まとめ

放電プラズマによる水処理において、円筒パイプを半割加工し、内壁に活性炭を貼り付けることで新たな円筒型リアクタを開発することができた。活性炭と放電プラズマを組み合わせることで、エネルギー効率 G_{50} は放電プラズマのみの処理よりも 5.8 倍の値を達成することができた。また、放電プラズマにより発生するオゾンの濃度は変わらないが、活性炭を用いた際には活性炭の脱臭効果により、オゾン臭をほとんど感じる事が無く、処理水の脱色に活用することが可能である。今後も円筒パイプの内壁を工夫し、更なる効率化を目指していきたい。

謝辞

本研究の一部は、国立大学法人大分大学男女共同参画推進事業の助成を受けて行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] M. A. Marik, *Plasma Chem. Plasma Process*, 30 (2010) 21.
- [2] K. Tachibana, *et al.*, *Energies*, 15 (2022) 4028.
- [3] H. Coanda, *Propulseur*. France Patent 416541 (1910).
- [4] 松藤誉 他, 第 31 回日本オゾン協会年次研究講演会 講演集 (2022) 79.