

水中気泡内放電による有機染料の 脱色におけるパルス幅の影響についての検討

川野 修太^{*1}, 高橋 克幸^{**}, 高木 浩一^{*}, 颯田 尚哉^{***}

(2011年9月12日受付; 2011年12月28日受理)

Influence of Pulse Width on Decolorization Efficiency of Organic Dye by Discharge inside Bubble in Water

Shuta KAWANO,^{*1} Katsuyuki TAKAHASHI,^{**} Koichi TAKAKI^{*} and Naoya SATTA^{***}

(Received September 12, 2011; Accepted December 28, 2011)

Water purification by discharge inside bubble in water containing organic dye has been investigated. The discharge reactor consists of a glass tube and a tungsten wire inserted into the glass tube, which is immersed in the water. Room air is injected into the glass tube to generate bubbles in the water. The high voltage pulses are generated by a magnetic pulse compression circuit and a pulsed power generator with inductive-energy storage using semiconductor opening switch. The pulse width is adjusted in the range from 61 to 570 ns. The high voltage is applied to the tungsten wire to generate streamer discharges, which propagate into the bubble from the tip of wire. Indigo carmine is employed as a specimen to evaluate decolorization efficiency. Potassium nitrate is used to adjust the solution conductivity. Decolorization rate increases with increasing conductivity of the solution and the applied voltage. The solution of 1,830 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in conductivity is successfully decolorized. Energy efficiency for decolorization increases with decreasing ohmic loss by decreasing the applied voltage and the pulse width.

1. はじめに

水質汚濁は、人の健康だけではなく、生態系全てにおいて悪影響をもたらす深刻な問題である。水質汚染を引き起こす主な原因は、産業廃水、生活排水、投棄廃棄物である。これらによる水質汚染は、近年の法規制や水処理技術により、改善されてきている¹⁾。その一方で、一部の地域では、水質基準を満たしていない過去の排水による底質汚染や、産業廃棄物の不法投棄などによる、地下水への汚染物質の染みだしが問題になっている^{1,2)}。汚染物質の処理方法には、酸化剤を用いる薬品処理や、生物的処理などがある³⁾。しかし、環境への配慮やコスト面から、新しい技術が求め

られている。パルスパワーを用いて水中でプラズマを作り、そこで生成される様々な活性種を利用した処理法^{4,5)}は、比較的短い処理時間で、選択性がなく汚染物質の分解除去が可能であることから、実用化が強く望まれている⁶⁾。

水中プラズマによる汚染物質の分解除去の要因としては、放電により生成される様々な活性種、衝撃波、紫外線などがあげられる。特に、水中放電にて生成される酸素ラジカル、ヒドロキシラジカル、オゾンなどの化学的活性種は、強い酸化力を持ち、選択性がなく、難分解性の物質の分解除去を可能にする⁵⁻⁸⁾。

水中プラズマは、水中に設置した電極間に急峻で高い電圧パルスを印加することにより生成できるが、水の絶縁破壊電界が高いことから大容量化が困難である。また、対象となる水が高導電性を有する場合、化学的活性種の生成に寄与しない水に流れる導電電流が増加することによって、エネルギー損失が増加する⁹⁾。そのため、様々なリアクタ構造が検討されており¹⁰⁾、気泡を電極付近で生成し水中プラズマの生成を助長する方式¹¹⁾や、電極を気中に設置し気相放電を気泡内に進展させ、溶液の処理を行う気相放電水中進展型リアクタなどが提案されている¹²⁾。また、気相放電によるオゾンガスの生成において、印加電圧の短パルス化により、放電の熱損失が抑制され、高いエネルギー効率を得られることが報告されている¹³⁾。このことから、水中

キーワード: 汚水浄化, 気泡内放電, オゾン, パルス幅

*岩手大学工学部 (020-8551 盛岡市上田 4-3-5)

Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5, Ueda, Morioka 020-8551, Japan

** シシド静電気株式会社研究開発センター (224-0033 神奈川県横浜市都筑区茅ヶ崎東 4-7-21)

Research and Development Center, SHISHIDO ELECTROSTATIC LTD., 4-7-21 Chigasaki-higashi, Tazuki-ku, Yokohama 224-0033, Japan

*** 岩手大学農学部 (020-8550 盛岡市上田 3 丁目 18-8)

Faculty of Agriculture, Iwate University, 18-8, Ueda 3 chome, Morioka 020-8550, Japan

¹ t2311015@iwate-u.ac.jp

気泡内放電においても短パルス化により高いエネルギー効率で、オゾンなどの化学的活性種の生成が期待できる。

本研究では、水中気泡内放電方式による汚水浄化の高効率化を目的とし、オゾンが効果的な汚染物質に対する特性として、有機染料の脱色における印加電圧のパルス幅および、溶液の導電率によるエネルギー効率への影響を調べた。パルス発生装置には、磁気パルス圧縮(MPC: Magnetic pulse compression)型パルス電源(MPC型電源)と半導体開放スイッチ(SOS: Semiconductor opening switch)を用いた誘導性エネルギー蓄積(IES: Inductive energy storage)型パルス電源(SOS-IES型電源)を使用し、リアクタへの印加電圧のパルス幅を変化させた。リアクタは構造の簡易化および小型化を目的とし、気体を注入したガラス管内に、タングステン線を挿入したものを溶液中に設置することによって構成した¹¹⁾。有機染料には、オゾンによる分解が可能、測定および評価が容易、そして検討例が多く比較が可能であることからインジゴカルミンを使用した。

2. 実験方法

図1に、MPC型電源(末松電子製作所, MPC3000S-SP)の回路図を示す。コンデンサ C_0 が、直流電圧 V_S より充電された後、サイリスタがONになると、過飽和トランスPTを介して、 C_1 にエネルギーが転送される。 C_1 に充電されたエネルギーが、 SI_1 , C_2 , SI_2 , C_3 , SI_4 による共振にて圧縮され、高電圧の出力電圧 v_0 となり、負荷へと出力される。また、可飽和インダクタ SI_3 は、パルス幅をより圧縮するために設けており、接続の有無によりパルス幅を調整した。パルス幅は半値幅とし、リアクタを接続しないとき、 SI_3 を接続および未接続とした場合で、それぞれ130, 570 nsとなる。また、出力端にダイオードを接続することによって、共振による負電圧の発生を抑制した。

図2に、SOS-IES電源の回路図を示す。開放スイッチには、SOSダイオード(Voltage Multipliers Inc., K100UF)を4直列4並列に接続し使用している。1次側のキャパシタ C_1 が直流電圧 V_S より充電され、ギャップスイッチが導通すると、 C_1 によりパルスが生成される。過飽和トランスPTを介して、2次側に電圧が誘起され、SOSダイオードに順方向電流が流れる。その後、2次側のキャパシタ C_2 およびインダクタ L によるLC振動によって、電流の方向が反転する。SOSダイオードは、順方向時に蓄積されたキャリア分のみ逆方向電流が流れ、その後、急激な電流遮断が生じる。この電流遮断により、誘導起電力が生じ、出力電圧 v_0 が出力される。また、 C_2 への電荷残留を抑制するために、出力端に20 k Ω の抵抗 R_C を接続した。パルス幅は半値幅とし、リアクタを接続しない場合において56 nsとなる。

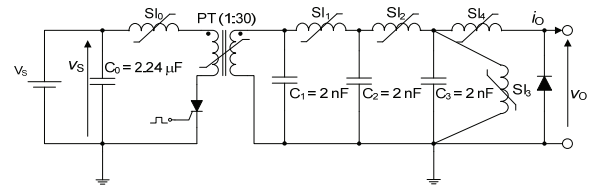


図1 磁気パルス圧縮型パルス電源回路図

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic pulse compression circuit.

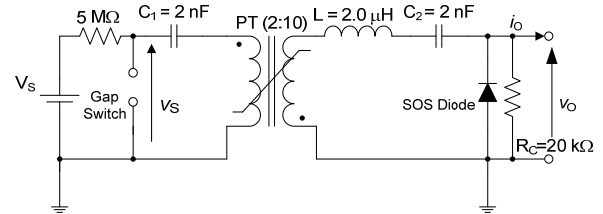


図2 半導体開放スイッチを用いた誘導性エネルギー蓄積型パルス電源回路図

Fig. 2 Schematic diagram of the pulsed power generator with IES using SOS.

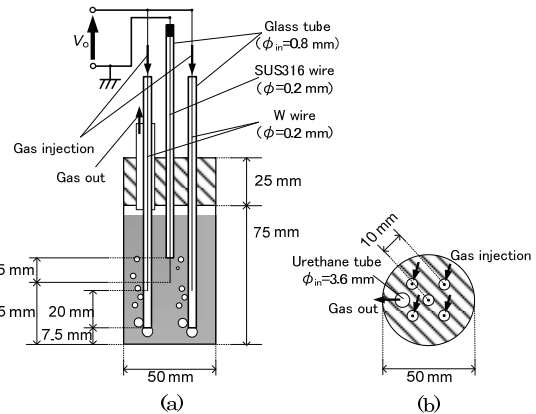


図3 リアクタ概略図: (a) 正面図, (b) 上面図

Fig. 3 Schematic diagram of the reactor: (a) side view, (b) top view

図3に、リアクタの概略図を示す。容器には100 mLのメジューム瓶を使用した。蓋に、内径0.8 mmのガラス管を5本、図3(b)のように設置した。中央以外の4本のガラス管には、直径0.2 mmのタングステン線を、先端がガラス管先端から20 mm内部に配置されるように挿入し、高圧電極として用いた。これらのガラス管には、室内空気を2 L/minの流量(F_G)でリアクタ内に注入し、ガラス管先端に気泡を生成した。中央のガラス管には、直径0.2 mmのSUS316線をガラス管先端から15 mm突出するように挿入し、接地電極として用いた。また、最大印加電圧は18もしくは30 kVとなるように調整し、放電繰り返し周波数は80 ppsとした。また、注入された気体は、リアクタ上部に設置されたウレタンチューブを通し排出した。このとき、

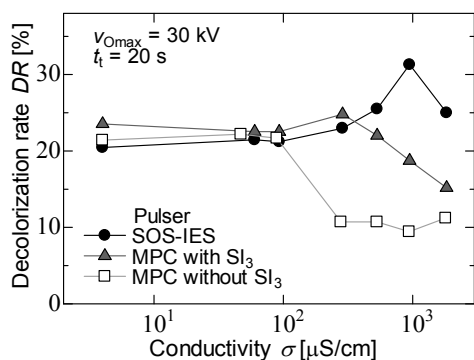


図 4 各電源を使用した場合の導電率による脱色率の変化 (最大出力電圧: 30 kV)

Fig. 4 Decolorization rate as a function of conductivity for various pulsed generators at v_{Omax} of 30 kV.

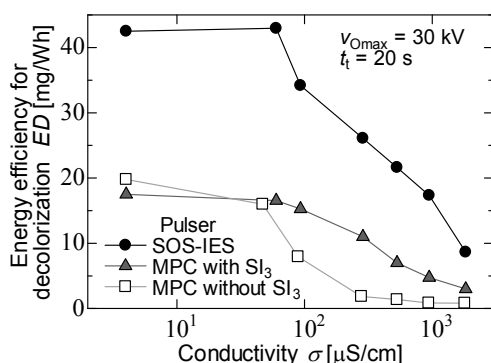


図 5 各電源を使用した場合の脱色におけるエネルギー効率の変化 (最大出力電圧: 30 kV)

Fig. 5 Energy efficiency as a function of conductivity for various pulsed generators at v_{Omax} of 30 kV.

排出された気体のオゾン濃度をオゾン計(荏原実業株式会社, PG-320L)を用いて測定した。

有機染料として、青色を示すインジゴカルミン(CAS No.860-22-0)を 100 mL の精製水に溶解し、濃度を 10 mg/L に調整した。また、硝酸カリウムを溶液に 0-1.6 g/L となるように溶解させ、導電率(σ)を 4-1,830 μ S/cm に調整した。溶液の処理前の pH は 5.5 であり、水温を 25 $^{\circ}$ C に調整した。

脱色率(DR)および、脱色におけるエネルギー効率(ED)は、吸光計(Milton Roy Ltd., Spectronic 301)によって溶液の吸光スペクトルを測定し、610 nm の吸光波長について、それぞれ式(1)および式(2)より求めた。

$$DR = \frac{(\text{初期吸光度} - \text{処理後吸光度})}{\text{初期吸光度}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

$$ED = \frac{DR \times 36}{J_T} [\text{mg} / \text{Wh}] \quad (2)$$

ここで、 J_T はリアクタへの総投与エネルギーであり、印加電圧(v_0)とリアクタに流れる電流(i_0)の積を時間積分して求めた。

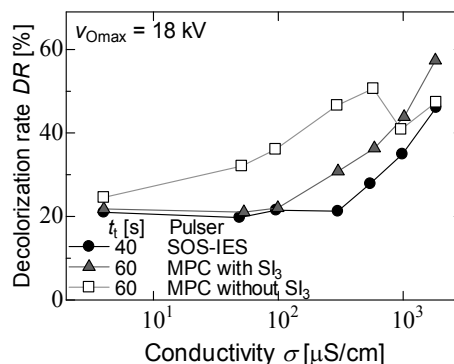


図 6 各電源を使用した場合の導電率による脱色率の変化 (最大出力電圧: 18 kV)

Fig. 6 Decolorization rate as a function of conductivity for various pulsed generators at v_{Omax} of 18 kV.

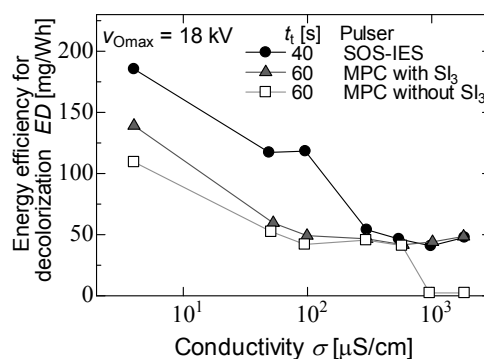


図 7 各電源を使用した場合の脱色におけるエネルギー効率の変化 (最大出力電圧: 18 kV)

Fig. 7 Energy efficiency as a function of conductivity for various pulsed generators at v_{Omax} of 18 kV.

3. 実験結果

3.1 脱色率とエネルギー効率

図 4 に、各電源を使用した場合の、導電率による脱色率の変化を示す。このとき、リアクタへの最大印加電圧(v_{Omax})を 30 kV とし、放電処理時間(t_t)を 20 秒とした。図より、SOS-IES 型電源、 Si_3 接続時の MPC 型電源の場合、導電率の増加に伴い DR が増加し、SOS-IES 型電源、 Si_3 接続時の MPC 型電源、 Si_3 未接続時の MPC 型電源を用いた場合それぞれ、947, 287, 47 μ S/cm のときに最大となることからわかる。DR の増加は、投与エネルギーの増加とともに、脱色に寄与する化学的活性種の濃度が増加したことが要因として考えられる¹⁴⁾。また、いずれの電源方式の場合においても、1,830 μ S/cm の高導電性の溶液の脱色が進展しており、脱色が可能であることがわかる。図 5 に、このときの脱色におけるエネルギー効率の変化を示す。図より、いずれの電源を用いた場合においても、導電率の増加に伴い ED が減少していることがわかる。また、SOS-IES 型電源を用いたとき、導電率を 1,800 μ S/cm とした場合の ED が、導電率を 4 μ S/cm とした場合と比較して 79.7%

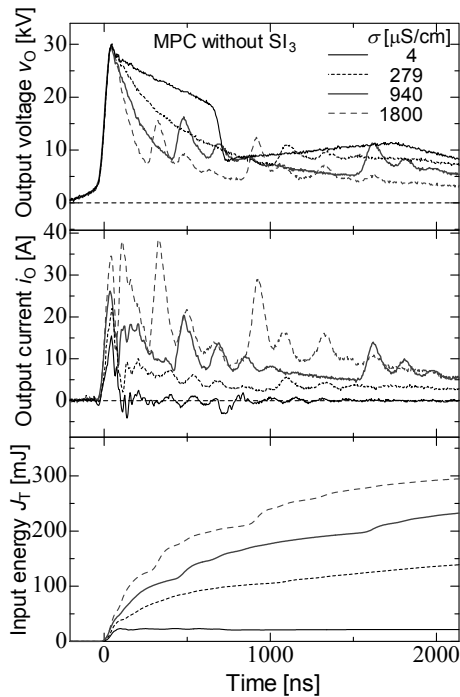


図8 SI_3 未接続時のMPC型電源を用いた場合の出力電圧, 出力電流, 投与エネルギーの波形

Fig. 8 Waveforms of output voltage, output current and input energy for various solution conductivity using MPC circuit without SI_3 .

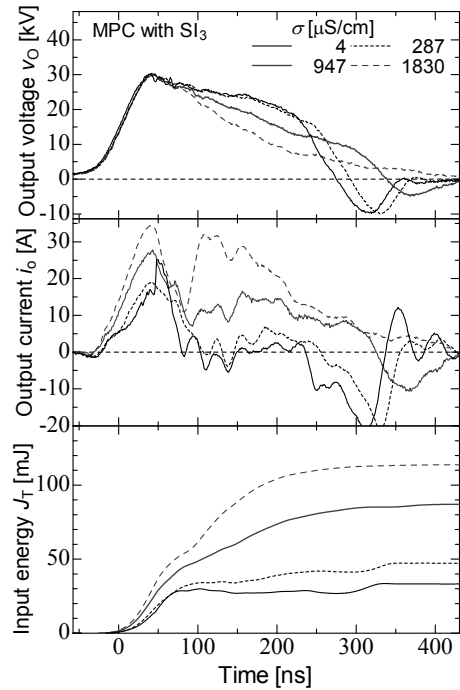


図9 SI_3 接続時のMPC型電源を用いた場合の出力電圧, 出力電流, 投与エネルギーの波形

Fig. 9 Waveforms of output voltage, output current and input energy for various solution conductivity using MPC circuit with SI_3 .

減少している。MPC型電源の場合は、 SI_3 接続時および未接続時のとき、EDがそれぞれ82.9、95.9%減少している。このことから、パルス幅が大きいほうが、溶液の導電率によるEDへの影響が大きいことがわかる。

図6に、各電源を使用した場合の、導電率による脱色率の変化を示す。このとき、リアクタへの最大印加電圧を18 kVとした。また、脱色率によって、脱色のエネルギー効率が変化する。そこで、4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 時の脱色率を前述した結果(図4)とおおよそ等しくするために、放電処理時間(t_d)を、SOS-IES型電源を用いた場合は40秒、MPC型電源の場合は60秒とした。図より、いずれの電源方式においても、導電率の増加に伴い、DRが増加していることがわかる。また、 SI_3 未接続時のMPC型電源の場合、導電率が576 $\mu\text{S}/\text{cm}$ のときにDRが最大値となり、その後減少傾向にある。また、SOS-IES型電源、 SI_3 接続時のMPC型電源の場合には、急激な減少は見られなかった。図7に、このときの脱色におけるエネルギー効率の変化を示す。図より、いずれの電源方式においても、導電率の増加とともに、EDが減少していることがわかる。 SI_3 未接続時のMPC型電源の場合、導電率が963 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上のときに、EDが急激に減少している。また、いずれの導電率においても、30 kVとした場合(図5)と比較し、EDが高いことがわかる。

3.2 放電電圧電流波形

図8に、 SI_3 未接続時のMPC型電源を用い、導電率(σ)を変化した場合の出力電圧(v_0)、出力電流(i_0)およびリアクタへの投与エネルギー(J_T)の波形の変化を示す。ここで、最大出力電圧は30 kVとしている。図より、導電率の増加とともに、電圧のパルス幅が減少し、出力電流とリアクタへの投与エネルギーが増加していることがわかる。また、導電率の増加とともに電流のパルス幅が増加し、放電がより長く持続されている。

図9に、 SI_3 接続時のMPC型電源を用い、導電率を変化した場合の v_0 、 i_0 および J_T の波形の変化を示す。図より、導電率を947 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上としたとき、導電率の増加とともに、出力電流の値とパルス幅が増加していることがわかる。また、投与エネルギーは、導電率が947 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の場合、電圧の立ち上がり後であっても、なだらかに増加していることがわかる。

図10に、SOS-IES型電源を用い、導電率を変化した場合の v_0 、 i_0 および J_T の波形の変化を示す。図より、複数回のパルスが連続的に発生している。これは回路中のL、 C_2 、 R_C による共振によるものである。いずれの導電率においても、電圧のパルス幅は61 nsである。また、電流が負の値となる期間において、リアクタへの投与エネルギーが

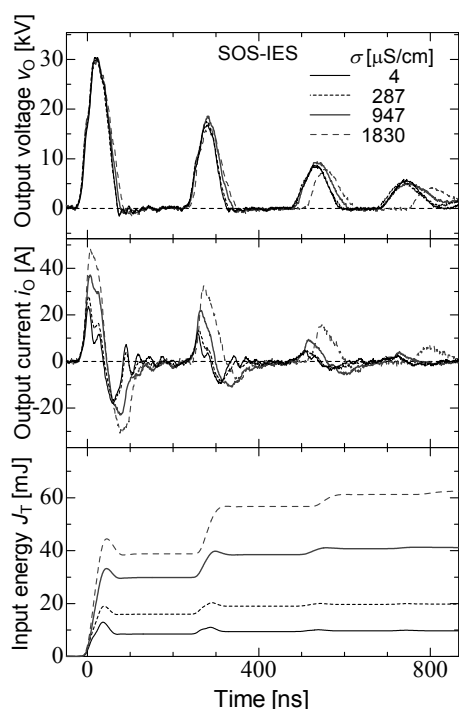


図 10 SOS-IES 型電源を用いた場合の出力電圧, 出力電流, 投与エネルギーの波形

Fig. 10 Waveforms of output voltage, output current and input energy for various solution conductivity using the pulsed power generator with IES using SOS.

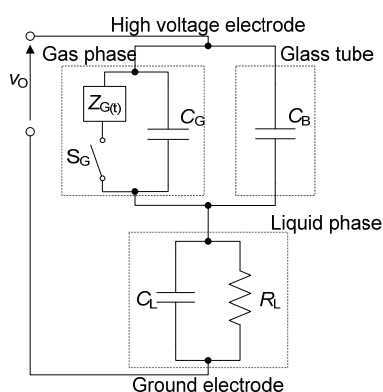


図 11 リアクタの等価回路

Fig. 11 Equivalent circuit of the reactor.

減少していることがわかる。

これらの結果より, いずれの電源においても, 導電率の増加に伴い, 電流のパルス幅が増加し, リアクタへの投与エネルギーが増加していることがわかる。

4. 検討

4.1 リアクタの等価回路

図 11 に, リアクタの等価回路¹²⁾を示す。ここで, $Z_{G(t)}$ は, 気泡内放電のインピーダンスを示し, R_L は, 溶液の抵抗成分であり, 導電率に依存する。4, 47, 93, 287, 530,

947, 1,830 $\mu\text{S}/\text{cm}$ のとき, それぞれの R_L の値はおおよそ 20, 15, 12, 2.8, 1.8, 1.0, 0.5 $\text{k}\Omega$ 程度になる。これらは, 電極を溶液と接触させ, SI_3 接続時の MPC 型電源を用いて, 放電させないように最大出力電圧を 500 V としリアクタに印加したときの電圧電流波形より算出した。 C_B , C_G , C_L は, それぞれガラス管, 気相中の高圧電極と気泡の気液界面間, 液相中の気泡の気液界面と接地電極間の静電容量を示し, それぞれの値は 360, 16, 12 pF 程度になる。

リアクタへ電圧が印加されると S_G がオンになり, 気泡内にストリーマ放電が進展していく。ストリーマ放電が気泡内の液面に到達すると, 放電チャンネルが熱化し, $Z_{G(t)}$ が急激に低下する¹⁵⁾。また, 溶液の導電率が高く, R_L が小さい場合, リアクタ内に大電流が流れ, プラズマが加熱される。このとき, リアクタに投与されたエネルギーのほとんどが, 導電電流として放電路および溶液の加熱により消費されると考えられる。また, 図 10 より, SOS-IES 型電源を用い, パルス幅を短くした場合, いずれの導電率においても, 電圧の立ち下がり時に, 電流が負の値となっていることがわかる。これは, 水の誘電率が高いため, 気泡表面に電荷が蓄積される。ここで, 電圧のパルス幅が水の緩和時間より短くなることにより, 溶液の容量成分による影響が大きくなる。そのため, 溶液表面に蓄積された電荷が電圧の立ち下がりとともに, 電源側に戻ったことが要因として考えられる¹⁶⁾。

4.2 実験結果の考察

インジゴカルミンは, オゾンに対して非常に反応性が高いことがよく知られている¹⁷⁾。そのため, 室内空気を注入した場合, 脱色に寄与する化学的活性種は, 主に式(3)および式(4)の反応により, 気泡内放電において生成されるオゾンとなる^{11,14,18)}。

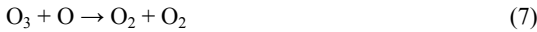


ここで M は三体衝突の第三体を表しており, 反応はしないがエネルギー吸収に寄与する。式(3)の反応は, 投与エネルギーの増加に伴い増加する¹⁴⁾。式(4)の反応速度を式(5)に示す。

$$k_4 = 2.5 \times 10^{-35} \exp(970/T) \quad (5)$$

ここで, T は気体の温度を表している。そのため, 気泡内の気体および放電の温度が増加するとともに, オゾンの生成反応速度が減少する。図 4, 6 より, DR が最大値となるまで, 導電率の増加とともに, DR が増加していることがわかる。これは, リアクタへの投与エネルギーが増加するとともに, 式(3)の反応が増加したため, オゾン濃度が増加したことが要因として考えられる。そして, DR は最大値となったあと減少傾向にある。これは, 放電及び気体温度

の増加により、式(4)の反応が減少し、また、オゾンの分解反応が促進されたことが要因として考えられる。式(6)、(7)、(8)に、オゾンの分解反応を示す。ここで、式(8)は水含有時の放電により生成されたヒドロキシラジカルによる反応である。また、式(7)、(8)の反応速度を式(9)、(10)に示す^{14,19}。式(7)、(8)が特に、温度に依存している。



$$k_7 = 8.0 \times 10^{-12} \exp(-2060/T) \quad (9)$$

$$k_8 = 3.76 \times 10^{-10} (T/298)^{1.98} \exp(-9718/T) \quad (10)$$

図 8, 9, 10 に示す電圧電流波形より、放電のインピーダンスが 14 kΩ から 70 Ω 程度に減少している。これより、全路破壊が生じ、気体温度が増加した¹³と考えられる。このとき、気体温度は 450 から 1,550 K 程度^{13,20}に増加する。そのため、ガス温度の増加とともに式(7)、(8)の反応が促進され、オゾンの生成量が減少することが考えられる。

図 12 に、リアクタより排出されるガスのオゾン濃度の導電率による変化を示す。このとき、リアクタへの最大印加電圧(v_{Omax})を 30 kV とし、放電処理時間(t_f)を 20 秒とした。図より、SOS-IES 型電源、 SI_3 接続時の MPC 型電源、 SI_3 未接続時の MPC 型電源を用いた場合、それぞれ導電率が 1,765, 534, 94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ のときに急激に減少していることがわかる。図 4 と比較し、DR の減少する導電率と一致している。

オゾン濃度と脱色率との関係を調べるため、同軸円筒型オゾン発生器²¹)を用い、オゾンガスを発生し、リアクタへ注入することによって脱色を試みた。オゾン発生器の電源には SI_3 接続時の MPC 型電源を使用し、放電繰り返し周波数は 40 pps とした。また、出力電圧を 10-12 kV で変化させている。原料ガスは室内空気とし、オゾン濃度を 0-52 ppm となるように調整した。リアクタへの気体流量は 2 L/min とした。処理前の溶液の導電率は 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に調整し、pH は 5.5 であり、水温は 25 °C に調整した。また、処理時間は 20 秒とした。図 13 に、脱色率および流入するガスのオゾン濃度の排出されるガスのオゾン濃度による変化を示す。図より、オゾン濃度の増加とともに、脱色率が増加しているが、溶解されずに排出されるオゾン量が増加していることから脱色におけるエネルギー効率が低下していることがわかる。これは、水中気泡内放電方式においても同様の傾向が得られている。また、排出ガスのオゾン濃度が低濃度の場合、水中気泡内放電の脱色率の方が高くなっている。これは、水中気泡内放電方式の場合、放電により生成されるヒドロキシラジカルなどの化学的活性種や過酸化水素により脱色が促進されたことが要因として考えら

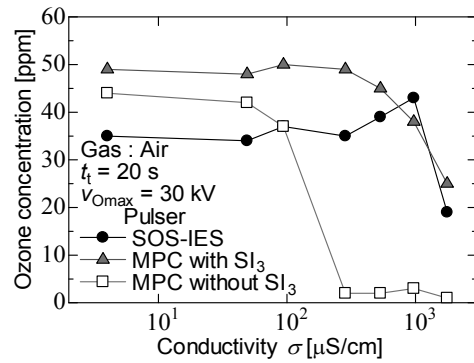


図 12 排出されるガスのオゾン濃度の導電率による変化

Fig.12 Ozone concentration of exhaust gas as a function of conductivity for various pulsed generators at v_{Omax} of 30 kV.

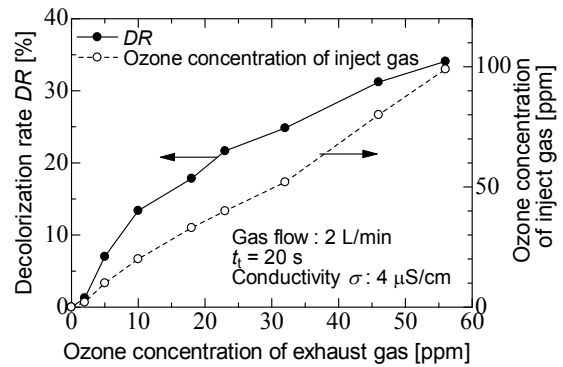


図 13 排出されるガスのオゾン濃度による脱色率および流入するガスのオゾン濃度の変化

Fig.13 Decolorization rate and ozone concentration of inject gas as a function of ozone concentration of exhaust gas.

れる。これより、図 4 の DR の減少はオゾンの生成量の減少が要因として考えられる。また、流入するガスと排出されるガスのオゾン濃度を比較すると、38-50%程度のオゾンが溶液に溶解込み、脱色に寄与していると考えられる。

水中気泡内放電方式において、生成されたオゾンの 50% が溶解しているとした場合のオゾン生成効率の最大値は、SOS-IES 型電源、 SI_3 接続時の MPC 型電源、 SI_3 未接続時の MPC 型電源のとき、それぞれ 37, 50, 25 g/kWh である。バリア放電方式を用いた場合、空気原料での最大値は 80 g/kWh であることから、水中気泡内放電方式のオゾン生成効率は低いことがわかる。また、脱色におけるエネルギー効率はオゾン発生器を用いた場合、76-285 mg/Wh となり、水中気泡内放電方式の方が低い。しかし、水中気泡内放電方式では、オゾンのみではなくヒドロキシラジカルなどの化学的活性種を生成することが可能であることから、リアクタの最適化が必要である。

導電率がある閾値よりも高い場合では、全路破壊による気体温度の増加によりオゾンの生成量が減少し、DR および ED が減少したと考えられる。また、導電電流による放

電の加熱に消費されるエネルギーは、導電率および印加電圧のパルス幅の増加に伴い増加する。さらに、同じ導電率において、印加電圧が増加するとともに、ストリーマ放電の進展速度が増加し^{14,22)}、加熱に消費されるエネルギーが増加する。そのため、印加電圧を低くし、パルス幅を短くすることによって加熱によるオゾンの分解を抑制でき、脱色におけるエネルギー効率が向上したと考えられる。

5. まとめ

気泡内で発生した放電を用いた場合の、リアクタへの印加電圧のパルス幅および、溶液の導電率による、有機染料の脱色におけるエネルギー効率への影響について検討した。また、リアクタの等価回路を、電源の出力電圧電流波形より求めることにより、放電時のエネルギー損失について検討した。その結果、印加電圧を低くし、パルス幅を短くすることによって、脱色におけるエネルギー効率が向上されることがわかった。

本論文の脱色率の測定および、電源の製作において、大変なご協力をいただきました、岩手大学の小出章二先生、東京大学の八木一平様に感謝申し上げます。また、有益なご助言をいただきました、岩手大学工学部の藤原民也先生、向川政治先生、高橋和貴先生、志田寛様に感謝いたします。

なお、本研究は科学研究費補助金(課題番号:20380130)の助成を受けていることを付記する。

参考文献

- 1) 田中俊逸, 沖野龍文, 藏崎正章, 高橋洋介, 東條卓人, 新岡正, 山崎健一, 安住薫, 石塚真由美: 環境修復の科学と技術, p.1, 北海道大学出版会 (2007)
- 2) 橋本良二, 中澤廣: 地域のための環境再生読本-県境廃棄物投棄サイト-, p.41, 地域環境再生委員会 (2006)
- 3) P.C. Vandevivere, R. Bianchi and W. Vestraete: J. Chem. Technol. Biotechnol., **72** (1998) 289
- 4) H. Akiyama: IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, **7** (5) (2000) 646
- 5) P. Lukes: IPPS AS CR Ph.D. Thesis (2001)
- 6) 浦島邦子:平成 21 年電気学会全国大会, 1-S4-8, p.27, 電気学会 (2009)
- 7) T. Oda, T. Takahashi and K. Tada: IEEE Trans. Industry Applications, **35**(2) (1999) 373
- 8) 飯島崇文, 牧瀬竜太郎, 村田隆昭: 東芝レビュー, **61**(8) (2006) 40
- 9) T.H. Dang, A. Denat, O. Lesaint and G. Teissere: Plasma Sources Sci. Technol., **17**, 024013 (2008) 1
- 10) M.A. Malik: Plasma Chem Plasma Process, **30** (2010) 21
- 11) 高橋克幸, 高木浩一, 颯田尚哉, 秋山雅裕: 電気学会パルスパワー放電合同研究会資料, PPT-10-35 ED-10-33, p.57, 電気学会 (2010)
- 12) K. Takahashi, Y. Sasaki, S. Mukaigawa, K. Takaki, T. Fujiwara and N. Satta: IEEE Trans. Plasma Sci., **38** (2010) 2694
- 13) 波平隆男, 王斗艶, 松本宇生, 岡田翔, 秋山秀典: IEEJ Trans. FM, **129**(1) (2009) 7
- 14) J.S. Chang, P.A. Lawless and T. Yamamoto: IEEE Trans. Plasma Sci., **19** (1991) 1152
- 15) T. Namihira, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam and H. Akiyama: IEEE Trans. Plasma Sci., **31** (2003) 1091
- 16) K. Takahashi, I. Yagi, K. Takaki and N. Satta: IEEE Trans. Plasma Sci., **39**(11) (2011) 2654
- 17) R. Criegee: Mechanism of Ozonolysis. Angew. Chem. Internat. Edit., **14** (1975) 745
- 18) K. Takahashi, K. Takaki and N. Satta: Water remediation using pulsed power discharge under water with advanced oxidation process. J. Adv. Oxidat. (2011) 印刷中
- 19) B.R. Locke and S.M. Thagard: IEEE Trans. Plas. Sci., **37** (2009) 494
- 20) 水野彰, 朽久保文嘉, 内田諭, 小田昭紀, 高木浩一, 林伸哉: J. Plasma Fusion Res. **83**(11) (2007) 913
- 21) 高橋克幸, 高木浩一, 颯田尚哉, 秋山雅裕: 環境工学研究論文集, **47** (2010) 507
- 22) M. Farzaneh and I. Fofana: J. Phys. D: Appl. Phys., **37** (2004) 721