

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-92, 1993
UDC 628.52,537.523,66.07.074.38

放電プラズマ化学反応を用いた有害物質の無害化
—沿面放電による芳香族有機溶剤蒸気の分解—

山隈繁蔵*, 大沢 敦*, 児玉 勉*, 田島泰幸*

Detoxification of Hazardous Gaseous Substances by Discharge Plasma
—Decomposition of Aromatic Organic Solvents
by Surface Discharge Plasma—

by Shigezo YAMAGUMA*, Atsushi OHSAWA*, Tsutomu KODAMA*
and Yasuyuki TABATA*

Abstract; There are a lot of industrial processes in which generation of hazardous gaseous substances such as solvent vapor, NO_x and SO_x, etc. are unavoidable. These substances are also known to cause environmental pollution and have been thought to be difficult to be sufficiently managed by conventional technologies based on heat burning, adsorption by active carbon, etc.

Recently, as a high performance and low energy consumption environment protection technology, an application of discharge plasma is gaining worldwide attention. This is because that copious high energy electrons generated in discharge plasma directly collide with target molecules and dissociate them, which are then easily changed into other substances by chemical combinations with species in the plasma region, while ion and neutral molecule temperatures are kept comparatively low.

In this study, in attempt to develop a new application technique of discharge plasma, we employed a kind of discharging method called SPCP (short for Surface discharge induced Plasma Chemical Process). Applications of SPCP have been widely used for years. Compact ozonizers to deodorize household equipments like refrigerators are a part of such applications. We took advantages of the compactness and durability of the SPCP electrode to set up an experimental apparatus for decomposing vapor of aromatic hydrocarbons such as toluene, benzene and xylene, which are major substances given off in painting or washing processes and aggravate working conditions.

Results obtained with the apparatus are summarized as follows.

(1) Aromatic hydrocarbon vapor of up to 2,000 ppm is almost thoroughly decomposed at the flow rate of 4ℓ/min or lower under the discharge with electric power of several hundred Watts.

(2) In dry air, as the decomposition progresses, tar-like substance deposits on the discharging areas, which deteriorates the decomposition rate in the end. This substance, however, is almost thoroughly removed by keeping discharge in dry air containing no solvent vapor. It has also been proved that using oxygen as carrier gas drastically reduces the generation of liquid and solid substances.

(3) Adding a discharge enhancing gas like argon is effective to reduce power consumption.

For example, about 20% of electric power can be saved by adding 10% of argon to air.

Keywords; Discharge Plasma, Volatile Organic Compound, Aromatic Hydrocarbon, Ozone, Decomposition, Air pollution

1. 緒 言

塗装工程、洗浄工程、各種薬品類製造工程等においては様々な有機溶剤が使用されている。これらの有機溶剤は、使用后適当な装置を用いて回収・再利用されたり、無害化処理されている場合もあるが、大部分は回収されることなくそのまま周囲の労働環境または大気中に排出され、労働安全衛生上および地球環境保全上の問題となっている。また、従来より、有機溶剤蒸気の無害化処理方法としては、直火式または触媒式の燃焼、活性炭による吸着、スクラバによる捕集および薬液洗浄等が一般的であるが、これらは経済面・運用面で種々問題点を有しているため、必ずしも最適な方法とはいえず、広汎に使用されるには至っていない。

一方、近年、世界的な環境問題への関心の高まりに呼応して、種々の新しい公害防止技術が開発されつつあり、そのうちのひとつである常温常圧下での放電プラズマによる放電化学反応を応用したNO_xやSO_xの処理技術は、その高い処理能力および経済性が期待されることから注目を集めている^{1,2)}。本研究においても、

放電の一つの形態である沿面放電に注目し、産業分野での使用量が多い芳香族炭化水素系溶剤（ベンゼン、トルエンおよびキシレン）を対象に、放電化学反応を利用した無害化処理を試みた。沿面放電は一種のオゾナイザー放電であり³⁾、通常の大気中で安定して放電を持続することが可能であるので、既に、冷蔵庫やトイレの脱臭用、上水道の殺菌用等に広く利用されており、また、オゾン層破壊の元凶と目されている特定フロン^{4,5)}の分解に応用したという研究報告もある^{4,5)}。沿面放電を利用した放電化学反応を増田らはSPCP (Surface discharge induced Plasma Chemical Process) と命名している。このように、電極自体は、既に実績があるものが使えるので、SPCPの利用は、実用化に向けての開発研究をスピーディーに行うことができるという利点がある。

今回、SPCP 放電電極を核として試作した実験装置は、シンプルな構成でありながら、芳香族炭化水素系有機溶剤に対して極めて優れた処理能力を有し、耐久性にも問題がないことが確認された。また、実用化に向けて考慮すべき点の洗い出しとその対策についても検討を行った。以下、その詳細を報告する。

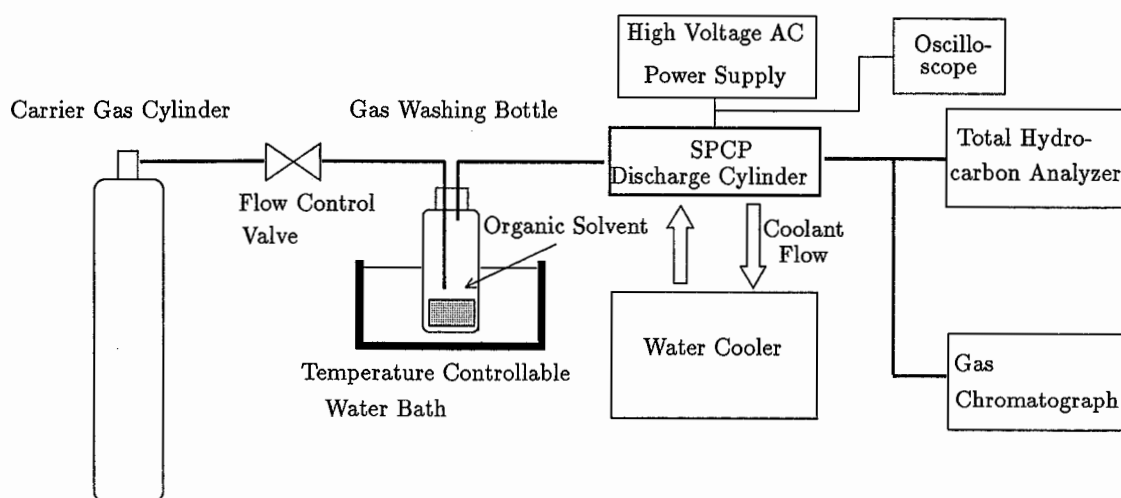


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus
実験装置の構成

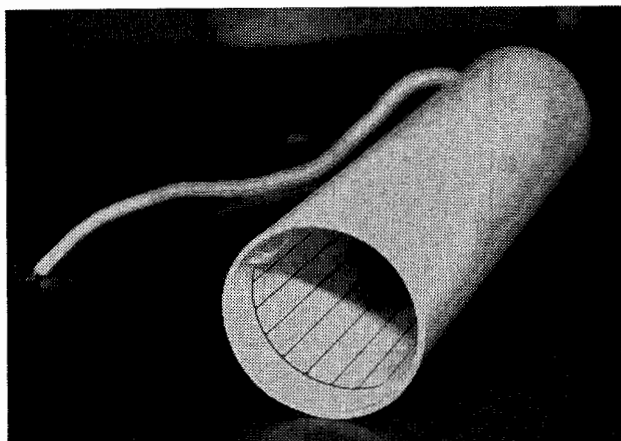


Photo 1 SPCP discharge electrode
SPCP 放電電極の外観

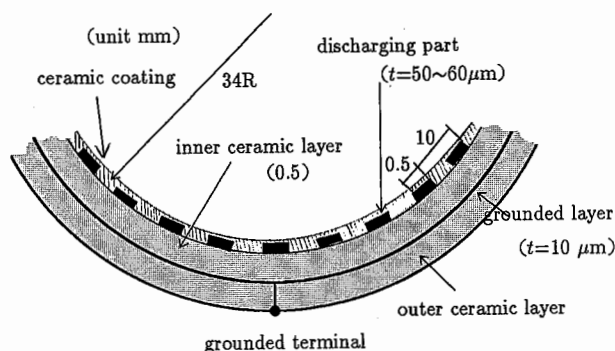


Fig. 2 Cross-sectional view of SPCP electrode
SPCP 放電電極の断面図

2. 実験装置および実験方法

実験装置の構成図を Fig. 1 に示す。放電プラズマを発生し、様々なプラズマ化学反応を生じる領域を作り出す SPCP 放電電極の外観およびその内部構造を Photo 1 および Fig. 2 に示す。SPCP 電極は、ベース材としてセラミック（高純度アルミナ）を、また放電用材質としてタングステン薄膜を使用しているので、化学的・熱的な刺激に対して極めて安定であること、熱伝導性が高いことが特長である。実験中、SPCP 放電電極は、放電に伴って発生した熱を十分放熱させるため、Fig. 3 に示すようにウォータージャケット中にセットし冷却水を流した。被処理物質を含んだガスは、同図中の矢印の方向に沿って流れ、途中の放電プラズマ領域で放電化学作用を受ける。放電に必要な電力の供給には、高周波高電圧電

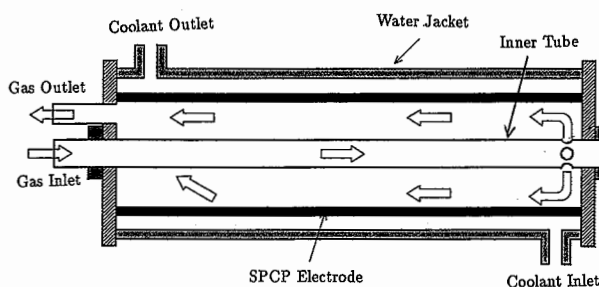


Fig. 3 Flow of carrier gas in SPCP electrode
SPCP 電極内の被処理ガスの流路

源（周波数 10 kHz, 電圧 0 ~ 12 KV_{pp}）を用いた。

被処理物質である有機溶剤（トルエン、ベンゼンおよびキシレン）の蒸気を適当な濃度で発生させるために、ガス洗浄瓶に有機溶剤（常温で液体）を適当量入れ、これにキャリアガス（有機溶剤を蒸気として分散させる気相）を導入し、蒸気を含んだガスを発生させた。有機溶剤蒸気濃度は、有機溶剤の量およびガス洗浄瓶を浸した水槽の温度を変化して調整した。

キャリアガスとしては、主としてポンベ入りの乾燥空気をを用いた。本実験では、一般の空気は、放電に影響を与える水分を含有する⁶⁾ため、安定した放電状態の維持が困難となることが懸念されたので使用しなかった。また、乾燥空気以外にも、酸素、窒素、アルゴン等を単独または混合して実験に用いた。キャリアガスの流量調整は、流路に挿入したフローコントロールバルブにより行った。主な測定機器としては、放電電圧・電流波形観測用のデジタルオシロスコープ、被処理物質の濃度測定用の全炭化水素濃度計およびガスクロマトグラフを用いた。ここで、ガスクロマトグラフに加えて、全炭化水素濃度計を用いたのは、同機器が炭化水素系有機溶剤に対して良好な感度を有する FID（水素炎イオン検出器）を内蔵しており、かつ、侵入した試料の濃度をほぼリアルタイムで測定できるため、放電プラズマ領域以外で起こった化学反応の影響を極力排除できると考えられたためである。

実験の基本的な手順は次の通りである。

- (1) 有機溶剤蒸気を所定のキャリアガス流量および濃度で発生させ、SPCP 放電電極に導入する。
- (2) 高周波高電圧電源の電圧または電流を所定の値にセットし、その時の濃度を測定する。

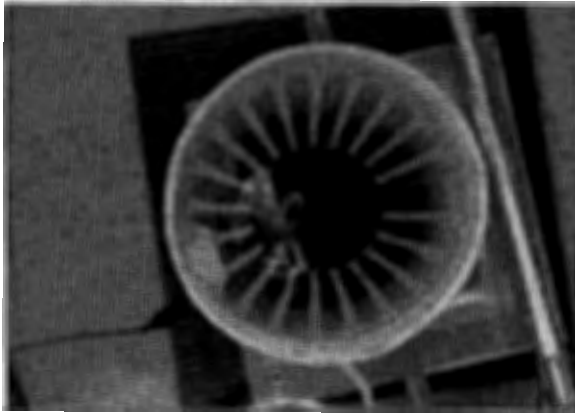


Photo 2 View of electrode discharging in air
空気中での放電の様子

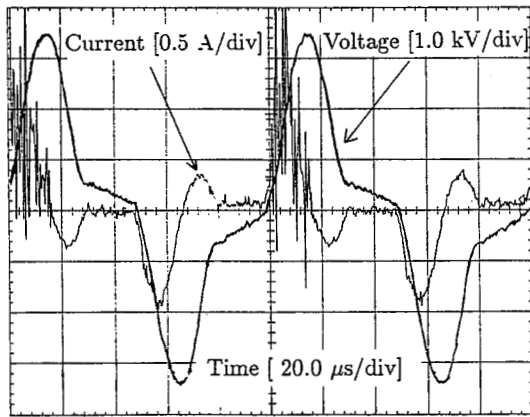


Fig. 4 Wave form of discharge
放電時の電圧・電流波形

また、本稿において使用する若干の用語については、次のように定義する。

(1) 分解率 (decomposition rate)

分解性能を表す指標として用いるが、これは以下の計算式に従って求めた値である。

$$\text{分解率} = 1 - \text{放電後の濃度} / \text{放電前の濃度}$$

ただし、濃度は、全炭化水素濃度計により測定した溶剤蒸気の濃度である。

(2) ppmC

全炭化水素濃度計で直読される濃度の単位であり、メタンに換算したときの百万分率濃度を示す。メタン以外の炭化水素の場合には、この値を換算係数（トルエンの場合は4.34）で除する必要がある。本稿中で、ppmとあるのは、すべてこの換算係数を用いて計算した値である。

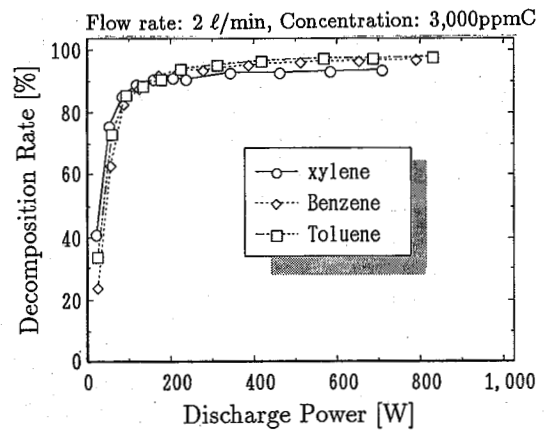


Fig. 5 Typical decomposition property of SPCP
有機溶剤蒸気に対する分解特性

(3) 放電電力 (discharge power)

高周波電圧電源内部の直流部の電圧と電流の積である。SPCP 放電電極に汚れ等放電障害要因がない場合は、実際の放電電流と放電電圧の積にはほぼ等しいことを確認済みである。

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥空気中の有機溶剤蒸気の分解特性

3.1.1 溶剤蒸気の種別と分解率

放電発生時の電圧・電流波形の一例を Fig. 4 に示す。これは放電形式の分類上、pulsive type⁷⁾と呼ばれるものに相当すると考えられる。開放空間中で放電中の電極の様子を、Photo 2 に示す。放電プラズマ領域がストライプ状の放電素子の近傍に発生していることが目視でも確認できる。

キャリアガスに乾燥空気を用い、ベンゼン、トルエンおよびキシレン（*o*-, *m*-および *p*-キシレンならびにメチルベンゼンの混合試薬）の芳香族炭化水素系溶剤の蒸気を SPCP 放電電極に導入した時の分解率の一例を Fig. 5 に示す。これは、全炭化水素濃度計の指示がほぼ等しくなるような蒸気濃度において、前述の三種類の炭化水素に対する分解率を比較したものである。本実験装置では、(1) 実験中、蒸気濃度に若干の変動があったこと、(2) 電極や配管等への蒸気の結露・再気化等の影響が考えられること、(3) Fig. 6 のガスクロマトグラフチャートに示すように、放電プラズマにより分解後、他の含炭化可燃性物質がいくつか生成されるので、これが全炭化水素濃度計に検

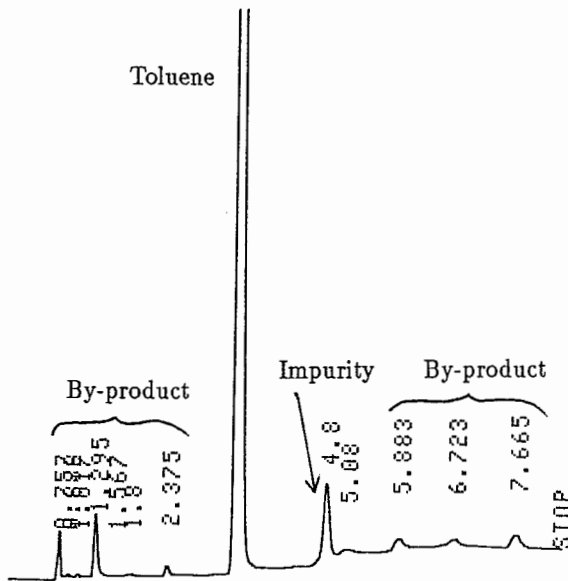


Fig. 6 Typical pattern of byproducts generated by plasma chemical process
放電プラズマ化学反応による生成物の検出例

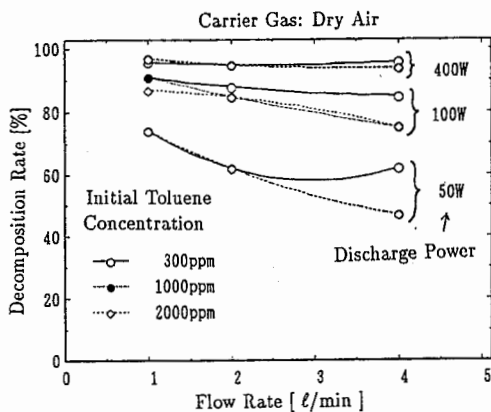


Fig. 7 Decomposition rate of toluene vapor with regard to flow rate and discharge power
トルエン蒸気の分解率に対する流量および放電電力の影響

出されてしまうこと、等の誤差要因が存在すること等を考慮すると、本実験結果をもとに三種の溶剤間での分解率の差を定量的に論ずることは不可能である*1。したがって、Fig. 5は、それぞれの溶剤蒸気

*1結合解離エネルギーを比較すると、トルエン (C₆H₅-CH₃) の C-C 結合、およびベンゼン (C₆H₆) の C-H 結合のエネルギーは、それぞれ約 360 および約 410 kJ/mol であるから、トルエンの方が分解しやすいと考えられるが、本実験においては、その差を明らかにすることはできなかった。

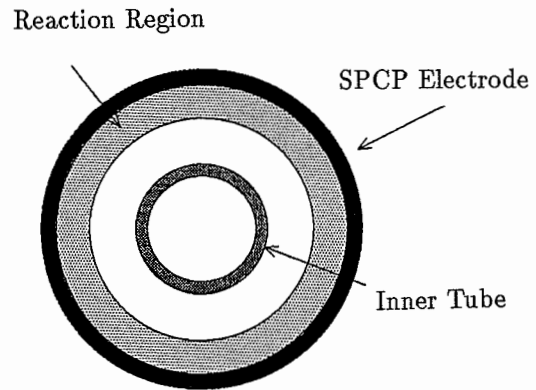


Fig. 8 Simplified view of plasma region inside SPCP electrode
モデル化した SPCP 電極内の放電プラズマ領域

が放電電力に対してほぼ同様の傾向で分解されていくことを示すものと理解すべきであろう。

以上のように、本実験においては、ベンゼン、トルエンおよびキシレンについて、これらの間の分子構造の違いを考慮した考察はあまり意味がないと思われるので、以後、主としてトルエンを対象に実験結果の提示および考察を行うこととする。

3.1.2 放電電力と分解率

トルエン蒸気の濃度、流量および放電電力の関係を示したものが Fig. 7 である。同図から次の 2 点が指摘される。

- (1) 初期 (放電電極へ導入時) の濃度または流量が等しい場合、放電電力が大きくなるほど分解率は高くなる。
- (2) 放電電力が大きくなるほど、分解率は流量によらず一定になる傾向がある。

(1) については、放電電力が大きくなるほど放電プラズマ領域の電子および各種化学種の密度が高くなるので、単位時間内に化学的変化を受ける被処理分子の数が增加するためであることは容易に理解できる。ところが、(2) については、放電プラズマ領域の体積的な広がりに関係があるとしないと説明が困難である。すなわち、Fig. 8 に模式的に示すように、放電時の放電プラズマによる化学反応領域は、放電電極付近に局在し、円筒の中心部には無反応領域が生じると考える。放電電力が十分大きければ、反応領域を通過する溶剤蒸気は流量に関係なく 100% 分解されるが、無反応領域ではまったく分解されない。結局、分解率は反応領域と無反応領域の断面積比に

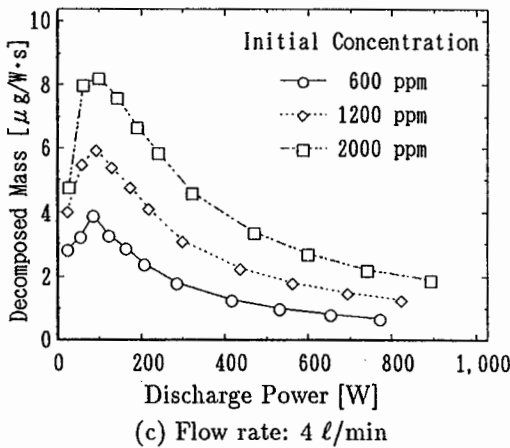
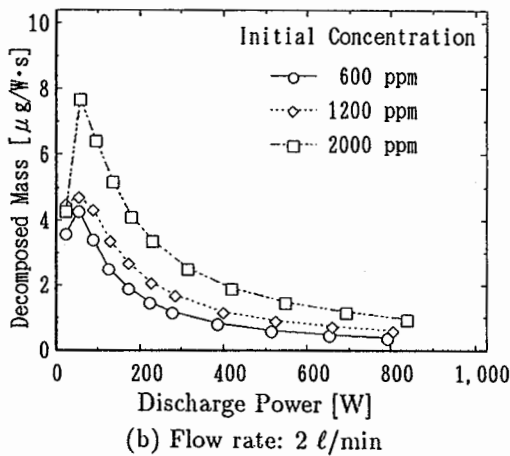
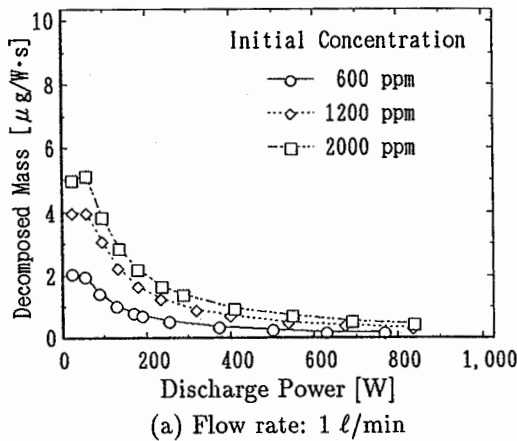


Fig. 9 Decomposed mass of toluene vapor per second and discharge power
放電電力 1 ワット当たりの毎秒のトルエン蒸気の分解量

よって決定され、流量には関係しないことになるのである。もちろん、この説明は電極内のガスの流れが層流状態であるという前提に基づくものであるが、

Table 1 Reynolds number in SPCP electrode
SPCP 放電電極内のレイノルズ数

Flow rate ℓ/min	Velocity m/s	Re
1	5.0×10^{-3}	24.3
2	1.0×10^{-2}	48.6
4	2.0×10^{-2}	97.2

Table 2 Discharge onset voltage
主要キャリアガスの放電開始電圧

Carrier Gas	Onset Voltage [kVpp]
Dry Air	6.0
Nitrogen	6.0
Argon	2.8

These values were measured at the flow rate of 2ℓ/min.

単純にジオメトリだけでレイノルズ数を計算する*2と Table 1 のようになるので、実際の流れは層流に近いと考えられる。

さらに、電力効率を評価するために、単位時間 (1 sec) ・単位電力 (1W) 当たりのトルエン分解量をプロットしたものが Fig. 9 である。この図から次の二点が指摘できる。

- (1) 放電電力が 0 から増加していくと、単位時間・単位電力あたりの分解量は最初増加していくが、やがてピークに達し、以後小さくなっていく。
- (2) 上記のピークに達する電力は濃度が小さいほど低く、かつ、流量が小さいほど低い。例えば、1, 2 および 4ℓ/min の順に約 30 ~ 70W, 約 60 ~ 70W および約 90 ~ 100W となる。

電力効率は、Fig. 9 中のピークに達した時点で最高になることはもちろんであるが、これは必ずしも Fig. 5 に示すように分解率が飽和する電力を意味する訳ではない。ピーク前の領域は、分解に必要なエネルギーを有する電子を十分に生成することができない領域、ピーク後の領域は、放電電力が過剰であり、無駄に消費されている電力が多い領域とみなすことができよう。

*2円筒内の流れと仮定すると $Re = \rho v d / \eta$ となる。ここで、 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ は空気の密度、 $\eta = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ は空気の粘性抵抗、 $d = 6.75 \times 10^{-2} \text{ m}$ は SPCP 電極の直径、 $v[\text{m/s}]$ は流速である。

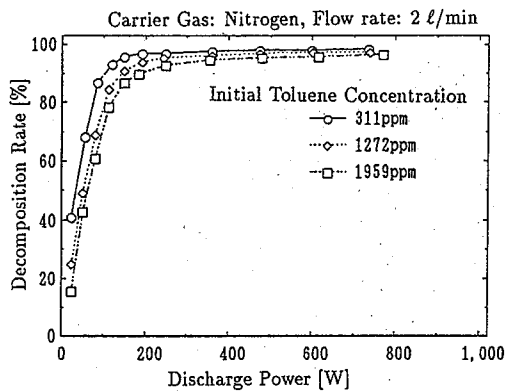


Fig. 10 Decomposition rate for nitrogen as carrier gas
窒素ガスをキャリアガスとした時の分解率

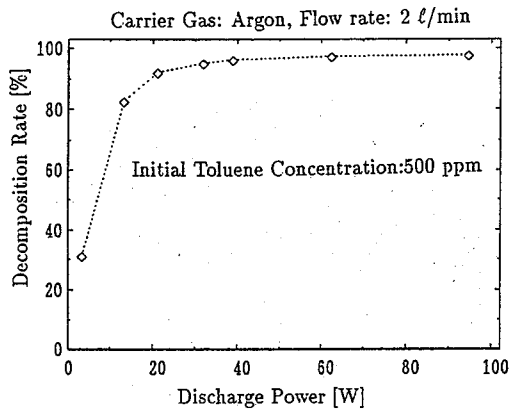


Fig. 11 Decomposition rate for argon as carrier gas
アルゴンをキャリアガスとした時の分解率

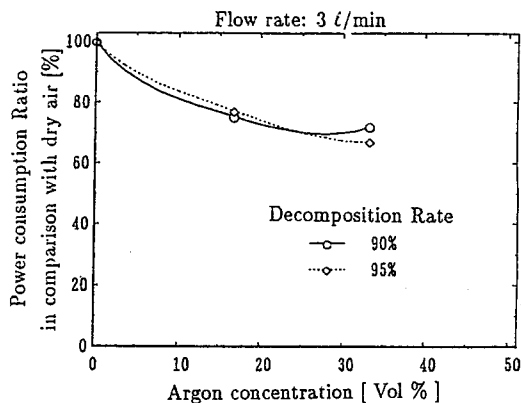


Fig. 12 Improvement of power consumption ratio when argon is added
アルゴンの混合率が電力効率に与える影響

3.2 キャリアガスの種類の分解特性への影響

キャリアガスの成分は一般に放電特性に影響を与える。本実験では空気に対し放電開始電圧が低いアルゴンおよびほぼ同程度の窒素を用いて分解率の測定を行った。Table 2は、各キャリアガス中での放電開始電圧を実測したものである。

Fig. 10 および Fig. 11 は窒素中およびアルゴン中の分解率を示すものである。いずれの場合も空気と同様に、放電電力が増加するほどより高い分解率が得られた。ただし、電力効率に関しては、放電開始電圧の低いアルゴンの方が空気の場合よりも高く、窒素の場合は空気とほぼ同様であった。

アルゴン中での放電開始電圧が低い理由は、第1電離電圧 (15.6 eV) の付近に準安定レベル (11.6 eV) を有するので、累積電離の効果が大きいためである⁸⁾。アルゴンのこの性質を利用して、空気に対するその含有率を変化させ、電力効率の向上を図ったところ Fig. 12 のような結果が得られた。これによれば、アルゴンの含有率が高くなるほど一定の分解率に達する電力は少なくて済むことが分かり、電力効率が向上することが明らかとなった。

3.3 長時間運用に際しての問題点および解決方法

芳香族有機溶剤蒸気を空気とともに放電プラズマで分解処理すると、放電生成物としてタール状の物質が放電部分近傍に付着し、時間とともに徐々に堆積していくことが判明した。この物質の成分分析をNMR (核磁気共鳴分析) により実施したところ、ベンゼン核と数種の酸化物の存在が確認された。ベンゼン核は比較的安定な結合を有することが知られており、放電条件によってはこれを完全には破壊しきれないことが示唆される。酸化物は、活性酸素、酸素ラジカル、オゾン等と溶剤蒸気分子のフラグメントが化合して生じたものであろう。

この放電生成物の堆積量の時間的変化の様子を Photo 3 にしめす。この時の運用条件は、トルエン濃度が約 300 ppm、流量 2 l/min、放電電力約 400 W であり、約 2 時間毎に放電電極を取り出し撮影を行った。本実験中、分解率はほぼ 95% 以上が保たれたので、この程度の堆積量では分解性能に影響を与えることはないと考えられる。

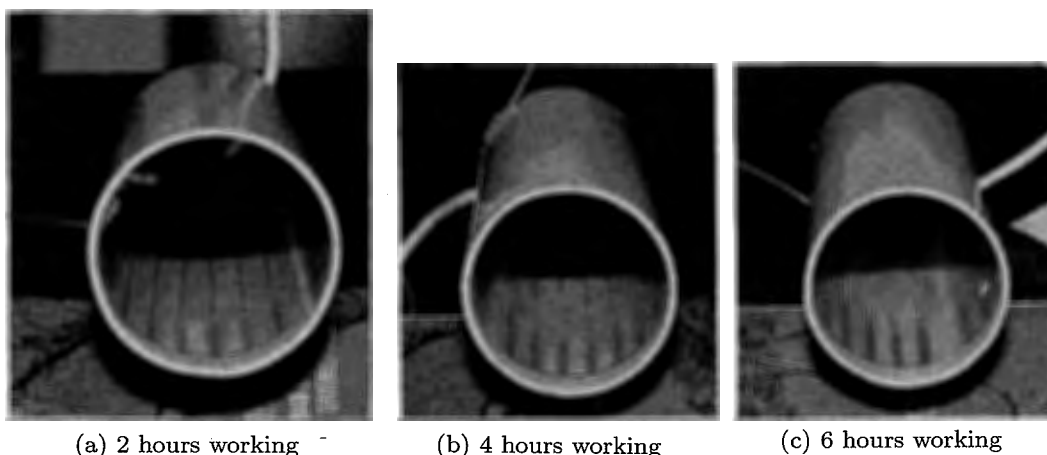


Photo 3 Progression of by-product deposition
放電生成物の堆積の進行 (2 時間毎)

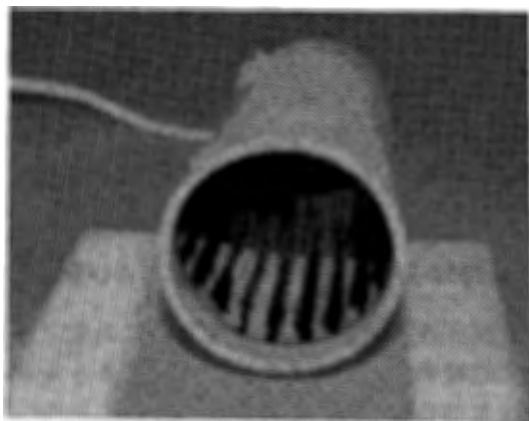


Photo 4 Two hours working with rich vapor
高濃度な溶剤蒸気分解時 (2 時間後)

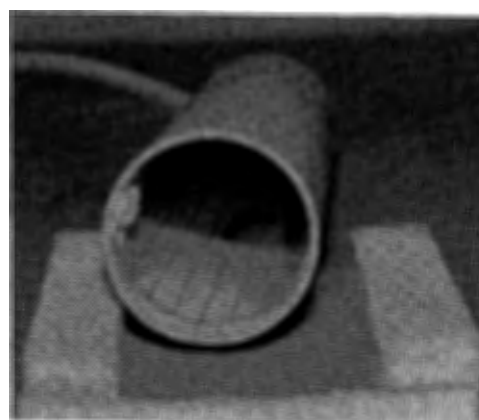


Photo 6 Six hours working with pure oxygen as
carrier gas
酸素キャリア中で稼働時 (6 時間後)

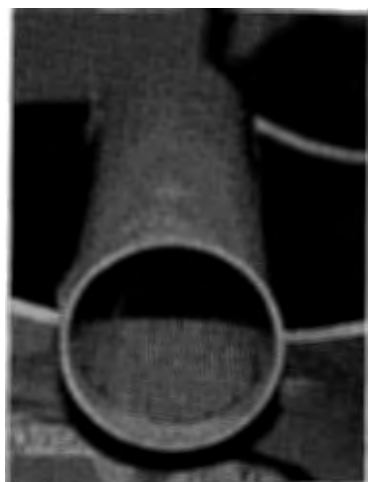


Photo 5 Self-cleaning effect by clean air
清浄空気による自浄作用

ところが、別途非常に高濃度 (2000 ppm 以上。全炭化水素濃度計で測定不能) の蒸気を用いて同様に実験を行ったところ、約 2 時間後に Photo 4 のように生成物が放電部分を完全に覆うような形状で堆積し、放電の維持が不可能となった。この時、SPCP 放電電極全体の静電容量を測定してみると、堆積前に 1.06 nF であったものが、1.46 nF まで増加していた。この静電容量の増加のため無効電流が増加し、電源にとって過負荷状態になったと考えられる。

上述のような放電生成物の堆積に起因する問題を解決するために、次の二つの試みを実施した。

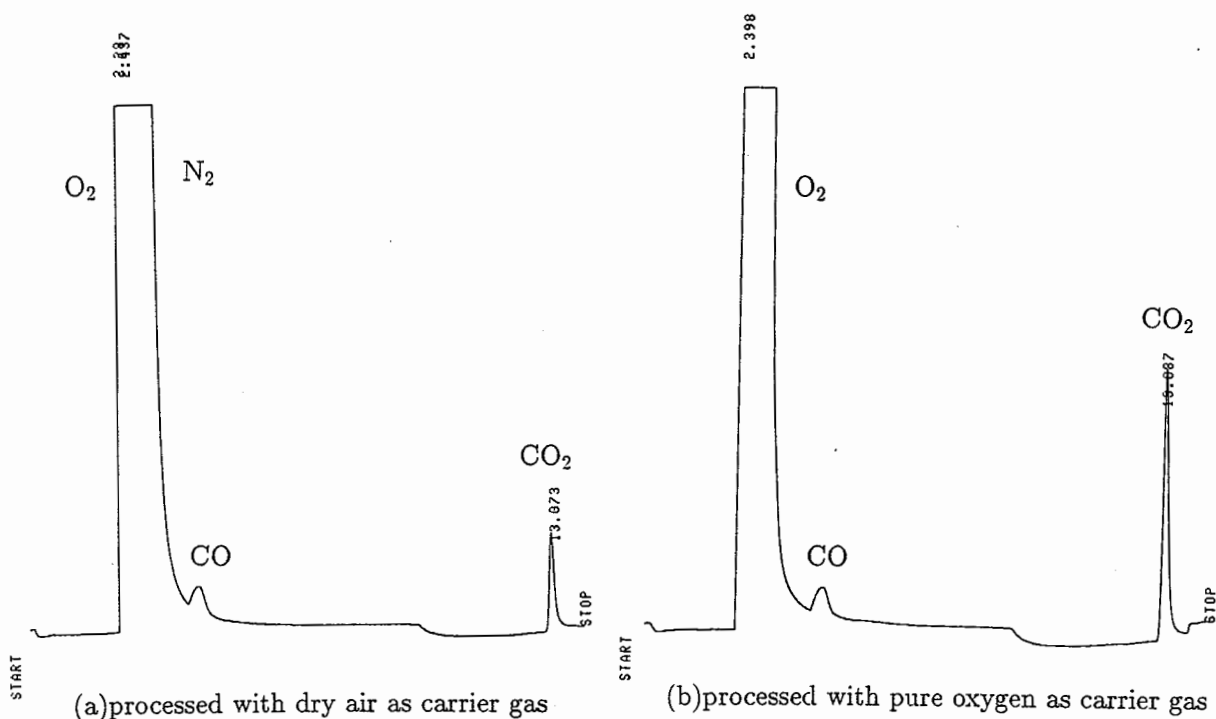


Fig. 13 Gas chromatographs of gases processed by discharge plasma
 プラズマ処理されたガスのガスクロマトグラフ分析

(1) 放電生成物が堆積した電極に乾燥空気のみを導入し放電を行う

これは、Photo 3(c) の状態となった電極に対し、乾燥空気のみを 2l/min の流量で流しながら約 400W の放電を持続したものである。6 時間経過後の結果を Photo 5 に示す。時間の経過とともに放電生成物が除去される状況が確認された。このように単なる放電の持続によって堆積物が除去されるのは、タール状の堆積物の中に高沸点物質が多く含まれ、これらが放電の際の熱で気化し、更にプラズマ中で再分解されるためと考えられる。

(2) 乾燥空気の代わりに純酸素をキャリアガスとして用いる

これは、芳香族炭化水素が完全に酸素と化合し、水素と二酸化炭素に変化する場合には、多量の酸素を必要とすることにヒントを得たものである^{*3}。

キャリアガスとして酸素を用い、約 300 ppm, 2l/min, 約 400W で 6 時間経過後の放電電極の状況を Photo 6 に示す。同写真から明らかなように、空気の場合 (Photo 3) に比べ、堆積量は極端に少なく

なり、実用上は電極の汚れによる性能劣化の懸念はないと思われる。また、乾燥空気を使用して放電生成物が堆積した場合に、酸素を用いて前述の放電を行うと、堆積物は乾燥空気の場合よりもずっと早く除去されることも確認された。

乾燥空気の場合と純酸素の場合の放電生成物の堆積量の違いの理由を調べるため放電プラズマ処理後の CO および CO₂ の濃度に注目してガスクロマトグラフを描いた結果が Fig. 13 である。この時のトルエン蒸気の濃度は約 1000 ppm であり、放電電力は 400W であった (分解率は 95% 以上)。同図から CO₂ の濃度を求めてみると、乾燥空気の場合が約 2300 ppm, 純酸素の場合では約 6800 ppm であった。CO 濃度は微量過ぎて定量不能であったが、図上のピーク面積で比較する限り乾燥空気・純酸素間に差はほとんどみられなかった。トルエン濃度は 1000 ppm であったが、トルエン分子は 7 個の炭素原子を有するから、これがすべて CO₂ に変化すると仮定すれば、CO₂ 濃度は 7000 ppm となる。本実験では、酸素の場合は 6800 ppm であるからトルエンは大部分が CO₂ に変化したとみなすことができる。一方、乾燥空気の場合には、約 1/3 が CO₂ に、残りの約 2/3 は他の放電生

*3 トルエンと酸素の化学反応式: $C_7H_8 + 9O_2 \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O$

成物に変化したと考えることができる。

以上のことから、より完全な無害化処理のためには、酸素濃度ができるだけ高い雰囲気中で放電処理を行う必要があることが示唆される。

なお、炭化水素には水素が含まれるので、燃焼の場合と同様に放電化学反応によって H_2O が生成されると考えられるが、測定技術上の理由で今回はその確認はできなかった。

4. 結 言

沿面放電による放電化学反応を利用するプラズマ処理装置を試作し、芳香族炭化水素溶剤蒸気の分解を試みたところ、以下のような結果が得られた。

- (1) 乾燥空气中で濃度約 300 ~ 2,000 ppm の有機溶剤蒸気を、流量 1 ~ 4l/min で放電電極に導入したところ、最高 90 ~ 98% の分解率が得られた。
- (2) 放電電力が大きくなると、流量および濃度に関係なく分解率が一定の値に漸近する傾向がある。これは、流れの状態（層流）と放電電極内部における化学反応領域の局在が原因と考えられる。
- (3) 単位時間・単位電力当たり処理量（電力効率）は、濃度および流量毎にほぼ決まった放電電力でピークをとる。ピーク前の領域は電子のエネルギーが不足している領域、ピーク後の領域は分解に寄与しない電力が増加する領域とみなすことができる。
- (4) キャリアガスにアルゴン等の放電開始電圧の低い物質を用いると、より小さな電力で所定の分解率を得ることが可能である。これらのガスを空気に混合してもある程度の電力効率改善効果が期待できる。
- (5) 分解量が増加すると、放電電極にタール状の放電生成物が堆積する。この堆積量が増加すると放電電極の静電容量が増加し、放電の維持が困難となる。
- (6) 放電生成物は、純粋な空気のみを通過させ、放電を行うことによりほぼ完全に除去可能である。また、キャリアガスに酸素を用いると、放電生成物の付着を抑制することができ、同時に、有機溶剤蒸気の二酸化炭素への転換が促進され、より無害な処理が可能である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、株式会社増田研究所・屠祥令氏には実験に関連して多大の指導を仰いだ。東京工業大学化学工学科・顧錦華氏および当所化学研究部安藤研究官には放電生成物の分析について協力いただいた。また、東京電機大学学生小林秀之氏（現株式会社トキメック社員）には、実験のアシスタントをしていただいた。さらに、石川島播磨重工業株式会社技術研究所荻原正明氏には、研究全般にわたり貴重な討論およびアドバイスをいただいた。以上の方々にはこの場を借りて謝意を表す。なお、本研究の一部は、環境庁国立機関公害防止等試験研究費による『工場等において発生するミストの環境への飛散防止システムの開発に関する研究』の下で実施されたものである。

（平成 5 年 6 月 4 日受理）

参 考 文 献

- 1) 増田閃一・呉彦, 極短パルスコロナ放電による燃焼排ガスの脱硝同時処理の検討, 静電気学会誌, 12-4, (1988), pp. 277-283.
- 2) 大塚馨象・雪竹次太・下田誠, 湿式電気集塵機による脱硫脱硝同時処理の検討, 静電気学会誌, 9-5, (1985), pp. 352-358.
- 3) S. Masuda, K. Akutsu, M. Kuroda, Y. Awatsu and Y. Shibuya, A Ceramic-Based Ozonizer Using High-Frequency Discharge, IEEE Trans. on Industry Applications, (1988), pp. 223-231.
- 4) T. Oda, T. Takahashi, H. Nakano and S. Masuda, Decomposition of Fluorocarbon Contaminants by Surface Discharge Induced Plasma Chemical Processing, paper for IEEE/IAS Annual Meeting, (1991).
- 5) 小田哲治・高橋正・増田閃一, SPCP (高周波沿面放電) によるフロンの分解, 静電気学会講演論文集, (1992), pp. 95-98.
- 6) 電気学会編, 放電ハンドブック, (1975), 270, 電気学会.
- 7) 同上, 264.
- 8) 電気学会編, 電離気体論, (1981), 32, 電気学会.