Osaka University Knowledge Archive

Title	高効率・高濃度オゾン発生技術
Author(s)	和田, 昇
Citation	電気材料技術雑誌. 2013, 22, p. 26-34
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76900
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

電気材料技術雑誌　第22巻第１号
J. Soc. Elect. Mat. Eng.　Vol.22,　No.1　２０１３

高効率･高濃度オゾン発生技術

和田　昇
三菱電機株式会社　先端技術総合研究所　〒661-8661 尼崎市塚口本町８－１－１

High Efficiency and High Concentration Ozone Generation

Noboru Wada
Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R&D Center
8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661 Japan

Abstract:
In this paper, the principle of a narrow gap discharge for high concentration ozone generation is described and shown the advantage of the application of high concentration ozone. Non-equilibrium plasmas move into the limelight with the preservation of the global environment. Ozone generation by dielectric barrier discharge is the most practical environmental technology in the application of the plasmas. Recently, ozone gas is developed in not only environmental fields but also the advanced technologies such as the semiconductor manufacturing. And, the development of ultra-high density ozone generation of 400g/m^3(N) is achieved by the narrow gap discharge with less than 0.1mm. For the future of the global environment, it is extremely important to examine a detailed mechanism of narrow gap discharge for development of the high efficiency and high density ozone generators.

キーワード：オゾン，誘電体バリア放電，短ギャップ放電

1. はじめに

21 世紀を迎え、世界各国において、環境調和・循環型社会形成への取り組みが実施されている。地球温暖化のようにグローバルな連携と対策が必要とされる問題から、大気・水環境浄化および室内空気質（IAQ：Indoor Air Quality）の改善など我々の住環境に対して身近な問題もクローズアップされている。近年、特に大気・水環境浄化の面では、大気圧非平衡プラズマを用いた環境浄化技術が脚光を浴びている。その最たる成功例として水環境浄化への適用に代表される誘電体バリア放電によるオゾンガス発生装置（オゾナイザ）が挙げられる。オゾンはその強力な酸化力に基づく殺菌・消毒・脱臭・漂白作用により、水環境浄化を中心に適用されてきたが、近年では、高濃度オゾン発生技術の革新を契機に、半導体・液晶製造プロセスにおける成膜やウェハ洗浄などにも適用され、急速に発展する IT 化社会構築の一翼を担っている。

最近の誘電体バリア放電によるオゾナイザの技術動向は「短ギャップ化・高濃度化」に集約される。短ギャップ化とは、オゾンを生成する放電空間(ギャップ)長を短く設定することにより、高濃度オゾンの高効率発生を実現するものである [1)]。短ギャップ化以前、すなわち、放電ギャップ長が 1.0mm 程度であったオゾナイザにおいては、生成できるオゾン濃度は高々100g/m^3(N)程度であった。しかしながら、現在、放電ギャップ長が 0.1mm 以下のオゾナイザにおいては、400g/m^3(N)となる超高濃度オゾン発生が実現されている [2)]。

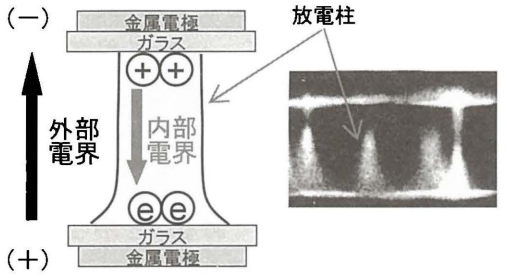
各種酸化プロセスにおいて要求されるオゾン濃度は様々であるが、総じてオゾンの適用領域の拡大および生産性向上の観点から高濃度化の一途を辿っている。高濃度オゾンの利用は、高品質化に加え、必要ガス量の低減や処理プロセスのスループット向上に大きく貢献し、オゾン処理プロ

セス全体の大幅なランニングコストの低減をもたらす。

本報においては、誘電体バリア放電による高濃度オゾン発生技術について示し、オゾン利用による環境浄化の推進、ならびに高効率オゾン処理プロセス構築のために高濃度オゾンの利用を提案する。

2. 誘電体バリア放電の基礎

オゾン発生に適用される大気圧非平衡プラズマは、誘電体バリア放電とも称されており、プラズマ中のガス温度は低いものの電子温度が高く、常温常圧下において極めて活性な反応場を形成することができる。この利点を活かし、様々な分野への適用が検討されている。



(a)電極基本構造　(b) 放電状態

図 1. オゾナイザ電極基本構造と放電状態

Fig. 1 Structure of the electrodes of the ozone generator and the phenomenon of the discharge

誘電体バリア放電によるオゾナイザの電極の基本構造を図 1 に示す。金属電極間に誘電体を挿入し、交流高電圧を印加することにより放電が発生する。図 1(a)のように外部電界が印加された場合、放電中で発生した荷電粒子は瞬時電界により電子(e)は瞬時陽極に、正イオン(+)は瞬時陰極に向かって誘電体表面までドリフトする。これら荷電粒子は誘電体でブロックされるため、その表面に蓄積される。この誘電体表面への電荷蓄積により、電極間には外部電界をキャンセルする方向に内部電界が発生する。外部電界の極性が変化すると、それに応じて、内部電界の向きも変化するため、放電は消滅と発生を繰り返し、局所的な電流の集中を抑制しつつ、高ガス圧力下においても安定な放電を維持することができる。この放電形態は、一般に、streamer 状の放電と称され、図 1(b)に示すような無数の微細な放電柱の生成、消滅により維持される。

3. 短ギャップオゾン発生技術

3.1. オゾナイザの構造

誘電体バリア放電を用いた円筒管式オゾナイザは、図 2 に示すように、ある一定のクリアランスを維持して配置された長さ 1m 程度に渡る同軸円筒状の接地電極管とガラス管により電極部が形成される。ガラス管の内面には高電圧電極が設けられている。この電極部が並列に多数集積され、大容量化が実現される。上記クリアランスにおいては、原料ガス(酸素または空気)が導入され、ガラスを介在した前記両電極間に印加された交流高電圧(HV)により、原料ガス中の酸素分子が解離され、オゾンを生成することになる。すなわち、このクリアランスが放電空間となり、クリアランス長が放電ギャップ長となる。放電ギャップ長は、ガスの流れを妨げないように放電部に局所的に配置されたスペーサにより維持されており、従来のオゾナイザの放電ギャップ長は 1.0mm 程度であった。また、接地電極管外壁には冷却水が導入されており、放電空間のガス温度上昇を抑制する。

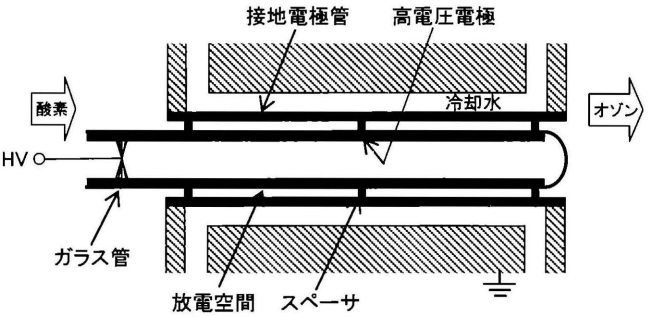


図 2. 円筒管式オゾナイザの電極構造

Fig. 2 Structure of the electrodes of the tubed type ozone generator

3.2 オゾン発生プロセスの基礎

3.2.1. オゾン発生プロセス

誘電体バリア放電によるオゾン発生プロセスは (1)～(3)式に示すような電子衝突による酸素

原子発生プロセスを first step とする。微細放電柱内をドリフトする電子 e が、酸素分子 0_2 に衝突し、酸素原子($0(^1D)$および$0(^3P)$)を発生する。ここで、k1、k2 および k3 は各々の反応速度定数を示す。

$$O_2 + e \xrightarrow{k1} O(^3P) + O(^1D) + e \quad (1)$$

$$O_2 + e \xrightarrow{k2} O(^3P) + O(^3P) + e \quad (2)$$

$$O_2 + e \xrightarrow{k3} O(^3P) + O^- \quad (3)$$

$$O(^3P) + O_2 + M \longrightarrow O_3 + e \quad (4)$$

電子衝突により発生した酸素原子 $0(^3P)$は、second step として(4)式に示すような三体衝突によるオゾンへの変換プロセスを経由する(ここで M は第三体を表す)。以上のように、オゾンの発生効率は、酸素分子の解離プロセスより得られる酸素原子の発生効率と酸素原子と酸素分子の結合プロセスより得られるオゾンへの変換効率に支配される。

3.2.2. オゾン発生効率

放電空間中の酸素原子密度が小さい場合、生成された酸素原子はすべてオゾンに変換される。すなわち、低濃度オゾン領域における酸素原子発生効率はオゾン発生効率と等価であり、オゾン発生効率の向上には、酸素原子発生効率の向上が重要な因子となる。一般に、この酸素原子発生効率は最大オゾン発生効率とも称される。一方、高濃度オゾン領域においては、微細放電を繰り返し、放電空間にオゾンを蓄積しながらオゾン濃度を高めていくため、 例えば、(5)式のような電子衝突によるオゾンの分解作用を考慮する必要が生じる。すなわち、実効的な酸素原子のオゾンへの変換効率が重要な因子となる。

$$O_3 + e \longrightarrow O(^3P) + O_2 + e \quad (5)$$

単位エネルギーΔE あたりに生成する酸素原子の粒子数密度 n は(1)～(3)式を用いて(6)式のように表すことができる。(6)式は電子衝突による酸素原子発生効率、すなわち最大オゾン発生効率を示す。ここで、q は素電荷、v_dは電子のドリフト速度、E/N は換算電界強度およびκは放電エネルギー中で電子が消費するエネルギーの割合を示す。すなわち、κ=1 は、放電によるエネルギーの全てが電子に注入される場合に相当し、放電による酸素原子発生効率の理論上限値に相当する。

$$\frac{n}{\Delta E} = \kappa \frac{2k_1 + 2k_2 + k_3}{q v_d (E/N)} \quad (6)$$

図3は酸素ガス中における酸素原子発生効率n/ΔE と E/N の関係を記述したものであり、(6)式に基づく計算結果と各放電ギャップ長 d による実験結果を併せて示している。図より、酸素原子発生効率は E/N が 80Td 程度において最大値を有し、概ね、E/N の増加とともに低下する傾向があることがわかる。また、各放電ギャップ長における実験結果は、(6)式において、κ=0.55 程度と推測され、酸素原子発生効率の最大値は 230g/kWh となり、κ=1 とした場合の理論上限値は、約 410g/kWh となることがわかる [1]。また、熱化学的なオゾン発生効率は、1200g/kWh であることから、放電励起式による酸素原子発生効率は、高々、その 30% 程度に留まる。さらに、現状の放電励起式オゾナイザにおいては、放電励起式の理論上限値の 50% 程度の効率でしか動作していないことになる。

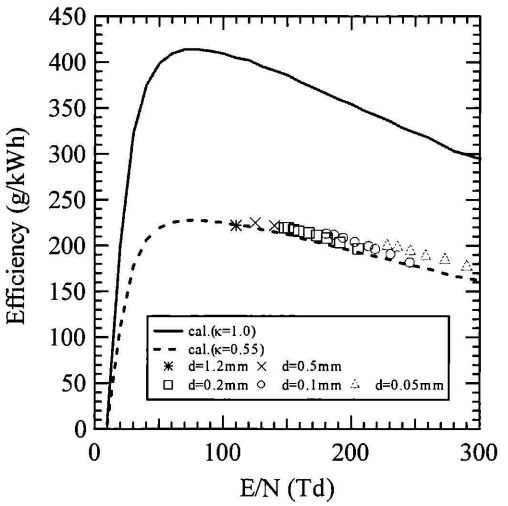


図 3. 酸素原子発生効率

Fig.3 Efficiency of the generation of the oxygen atoms

酸素を原料ガスとしたオゾナイザにおいては、従来から使用されていた放電ギャップ長1.0mm程度(E/N=100Td程度)は、オゾン発生のfirst stepである酸素原子の生成からすれば極めて最適な動作領域であることがわかる。すなわち、放電ギャップ長の短ギャップ化はE/Nの増大を招き、酸素原子発生効率が低下するため、オゾン発生の高効率化に関しては好ましくないと考えられてきた。

3.3. 短ギャップ放電の特長[1)]

3.3.1 ガス温度上昇の抑制

オゾンの生成および分解に関わる反応はガス温度に大きく影響され、オゾナイザにおいては、ガス温度を低く維持することは極めて重要な設計指針とされている。図2に示したようなオゾナイザにおいては、接地電極管外壁部に導入される冷却水により、放電空間のガス温度の上昇が抑制される。放電空間のガス温度は、投入電力密度(単位放電面積あたりに投入する電力)と放電ギャップ長との積に比例することが知られており、放電ギャップ長の短ギャップ化は、ガス温度の観点から極めて有利なオゾン生成条件を形成することになる。また、ガス冷却性能が飛躍的に向上することから、投入電力密度を増大させることが可能となる。後述するが、投入電力密度はオゾナイザのサイズを決定する値の1つであり、すなわち、短ギャップ化は、オゾナイザのコンパクト化に大きく寄与する。例えば、放電ギャップ長を1/10に設定すれば、投入電力密度は10倍まで上昇させることができる。

3.3.2 電子衝突によるオゾン分解

誘電体バリア放電によるオゾナイザにおいては、投入エネルギーの増加に伴い、発生するオゾン濃度(発生量)が上昇する。しかし、放電ギャップ長1.0mm程度であった従来のオゾナイザにおいては、発生オゾン濃度は、100g/m^3(N)程度で飽和していた。長年の間、このオゾン濃度の上限が決定されるメカニズムが明確にされていなかった。

図4は、放電空間における電子の解離衝突断面積を示している。図中、①および②は、比較的高いエネルギー領域に拡がり、オゾン発生のfirst stepとなる酸素分子の解離に寄与する電子の衝突断面積を示す。一方、③は①および②から生成したオゾンに衝突して酸素への再分解に寄与する電子の衝突断面積を示している。図より、オゾン生成に寄与する電子には6eV以上のエネルギーが必要であるが、6eV未満、例えば2eV程度の比較的低エネルギーの電子は、オゾン生成には寄与せず、もっぱら③で示されたオゾンの分解にしか寄与しないことがわかる。これは、一般的に良く知られている200nm(6eV程度)以下の短波長の光照射によるオゾン生成およびそれ以上の長波長の光照射によるオゾン分解と対応する。

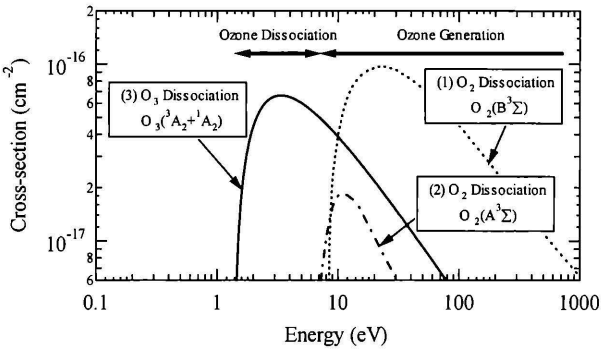


図4 衝突断面積

Fig.4 Cross-section of the electron

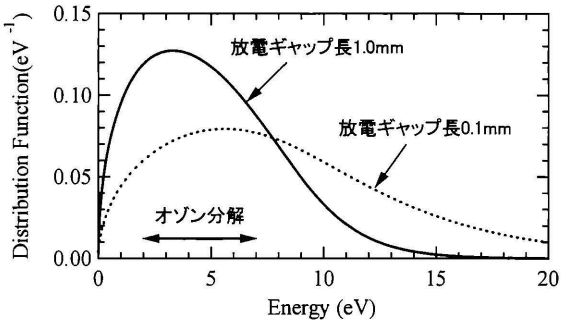


図5 酸素放電における電子エネルギー分布関数

Fig.5 Electron energy distribution function

図5は、従来のオゾナイザ(放電ギャップ長1.0mm)の電子のエネルギー分布関数を示したものである。図より、上述したオゾンの再分解に寄与するエネルギーを有する電子が極めて多いことがわかる。すなわち、従来のオゾナイザでは、

低い濃度域で、生成オゾンと再分解してしまうオゾンの量が平衡状態となるため、高濃度オゾンの発生が実現できない。同図に放電ギャップ長を0.1mm に短ギャップ化した場合の電子エネルギー分布関数を併記する。短ギャップ化に伴う高電界放電場の実現により、オゾンの分解に作用していた低エネルギー電子が電界からエネルギーを受け加速されることより、その比率が大幅に低減されていることがわかる。したがって、短ギャップ化は、投入電力の大きい領域で顕著に発生するオゾンの電子衝突による分解現象を大幅に緩和し、飛躍的な高濃度オゾン発生を実現することができる。

3.3.3 高ガス圧力・短ギャップ動作

短ギャップ化はガス温度の冷却性能の向上に伴う大幅な装置のコンパクト化、ならびに高電界放電場形成による生成オゾンの分解抑制による高濃度オゾン発生の実現という利点を有する。一方、酸素原子の発生効率は短ギャップ化に伴い低下する。しかしながら、E/N はガス密度 N と放電ギャップ長 d の積 Nd により決定される値であるため、短ギャップ化と同時に高ガス圧力(高ガス密度)下で動作させることにより、従来オゾナイザのような最適値には及ばないものの、大幅な低下を招くことなく、動作させることが可能となる。以上の知見より、酸素を原料ガスとしたオゾナイザにおいては、放電ギャップ長 d が 0.6mm 以下、放電ギャップ長 d とガス圧力 P の積である Pd 値が 70.52Torr・cm 以下となる短ギャップ・高ガス圧力動作条件による高効率高濃度オゾン発生を提案している[3]。

4. 短ギャップオゾン発生の効果

4.1 短ギャップオゾン発生特性

図6は酸素を原料ガスとした場合の当社従来機種と現行機種との消費電力の比較を示す。縦軸は、1kg のオゾンを生成するのに必要な消費電力の相対値を示し、横軸は発生するオゾン濃度を表す。現行機種においては、例えば、オゾン濃度 180g/m^3(N)において、その消費電力は従来機種の70%に抑制され、30%もの大幅な省エネルギー化を達成している。また、従来機種では、発生そのものが困難であった 200g/m^3(N)以上の高濃度オゾンも極めて小さな消費電力で発生することができることが確認できる[4]。

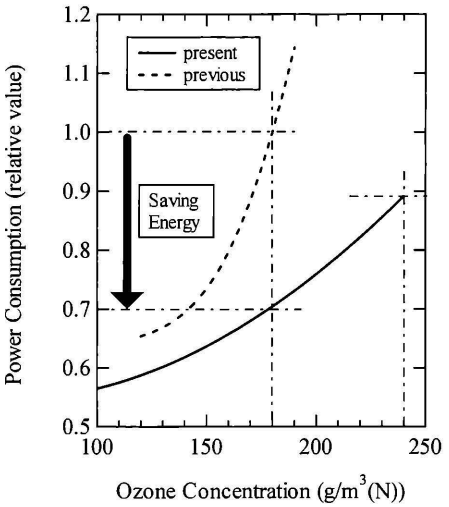


図6 オゾン発生特性の飛躍的改善

Fig.6 Improvement of the characteristics of the ozone generation

図7 オゾンブルー

Fig.7 Ozone blue

現行機種においては、当社従来機種に比して、短ギャップ化を高精度に実現している。短ギャップ化に伴い、要求される放電ギャップ長の精度、均一性は著しく厳しくなり、コスト上昇が課題であった。現行機種は、電極構造および製造面からのアプローチにより、コスト上昇を招くことなく、均一な放電ギャップ長の形成を実現しており、従来機種に比して飛躍的な省エネルギー化を達成している。

また、現行機種では、円筒管式オゾナイザにおいて、世界最高レベルとなるオゾン濃度

350g/m^3(N)を達成した。これは、図7に示すように、オゾンガスが青く色づく、いわゆる“オゾンブルー”が観測されることからも確認されている。オゾンガスは400nm付近(青色)の波長を除いて広範囲な波長領域で大きな光吸収特性を有する。オゾン濃度が高くなると可視光は吸収されて、青色の光だけが透過し、青色を呈する。これは、高濃度オゾン特有の現象であり、その発生を視覚的に証明している。

4.2 ランニングコストの低減

各国の上水処理システムにおいては、注入オゾン濃度 120g/m^3(N)程度もしくはそれ以下が一般的に使用されており、海外では酸素原料、国内では空気原料によるオゾン発生装置が主流である。当社は、オゾン濃度200g/m^3(N)以上となる高濃度プロセスを提案する。図8に液体酸素を原料ガスとした場合の発生オゾン濃度とランニングコストの関係を示す。ここで、ランニングコストは放電電力による電力コスト(9 円/kWh)と液体酸素コスト(21 円/m^3-gas)の合算であり、当社従来機種と現行機種を相対値にて比較している。

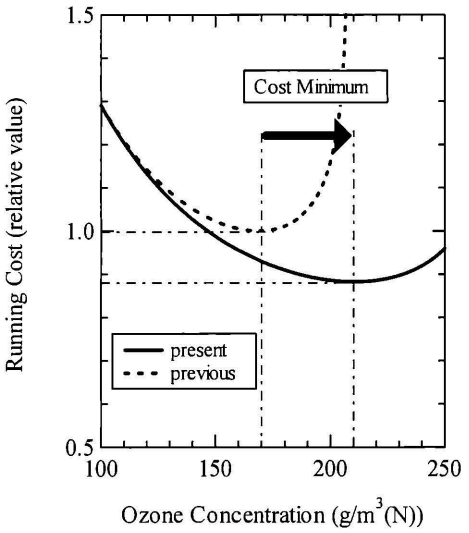


図8 ランニングコストの比較

Fig.8 Running cost of the ozone generator

図より、従来機種においては、オゾン濃度170g/m^3(N)程度の動作条件がランニングコストの最小値を示すが、現行機種においては、オゾン濃度 210g/m^3(N)程度が最小値となることがわかる。

従来の常識では、高濃度オゾンの発生には、投入電力の増加に伴うランニングコストの増大は不可避と考えられていた。しかしながら、短ギャップオゾン発生が実現されることにより、オゾン発生量はオゾン濃度とガス流量との積で表され、同一のオゾン発生量において、原料ガスのコスト低減が可能となる。特に高濃度オゾン領域の高効率化の実現により、電力コストも従来機種のような急激なコスト上昇を招かない。したがって、ランニングコストの最小値は高濃度側にシフトすることになる。つまり、現行機種においては、200g/m^3(N)以上の高濃度オゾン処理プロセスの適用がユーザ側に大きなメリットをもたらすことがわかる。また、オゾナイザのコストだけではなく、処理プロセスにおいても高速化・高品質化が期待される。加えて、反応塔やポンプ等の水処理システム機器においても、原料ガス流量の低減に伴うイニシャルおよびランニングコストの低減も期待できる。例えば、20 万 m^3/day の浄水場に本器を適用した場合、年間2千万円のランニングコスト低減が見込める[4)]。

4.3. コンパクト化

オゾナイザの大きさは単位放電面積あたりに投入する放電電力（投入電力密度)に大きく依存する。すなわち、投入電力密度を増大させることは発生器の小型化につながるのであるが、放電空間の温度上昇も招く。現行機種では、短ギャップ化の実現および放電空間の冷却構造の最適化を実施したことにより、放電空間の温度上昇を抑制できる。したがって、従来機種よりも放電電力密度の増大、オゾンの熱分解の抑制を実現している。

図8は、従来機種の 40%となる大幅な小型化を実現し、世界最小レベルのフットプリントを誇る三菱電機(株)製オゾナイザの外観である。本オゾナイザは、36.5kg/h（オゾン濃度 150g/m^3(N)時)、48.3kg/h(オゾン濃度 87.5g/m^3(N)時)のオゾン発生能力を有し、現在、浄水場にて稼働中である。オゾナイザの小型化は、イニシャルコストの低減に極めて有効であり、また、プラント設計を行ううえで、レイアウトの自由度があがり、オゾン導入を後押しする。

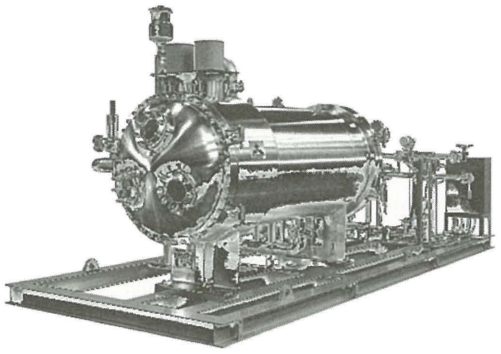


図８ 三菱電機(株)製オゾナイザ
Fig.8 Ozone generator by Mitsubishi Electric corporation

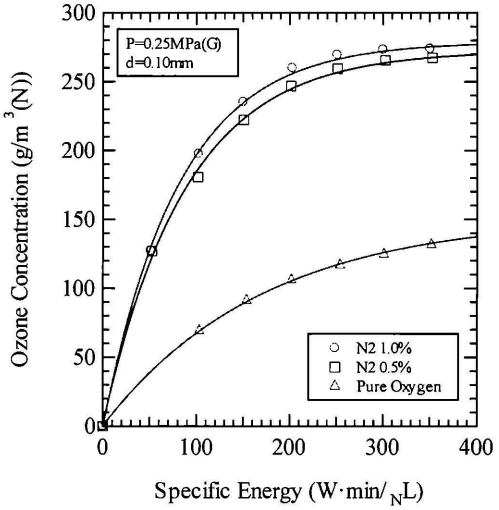


図９ 高純度酸素下におけるオゾン発生特性
Fig.9 Characteristics of the ozone generation by pure oxygen

5. オゾン発生効率改善への取り組み

上下水道など水環境浄化分野においては、オゾンの適用は浸透している。しかしながら、他分野においては、オゾンの環境への貢献は認知されているものの、未だ、オゾン生成は高コストであるとの認識が強く、オゾン普及への障害となっている。したがって、オゾナイザにおけるオゾン発生効率の改善および低コスト化は最大の命題である。

5.1. オゾンゼロ現象

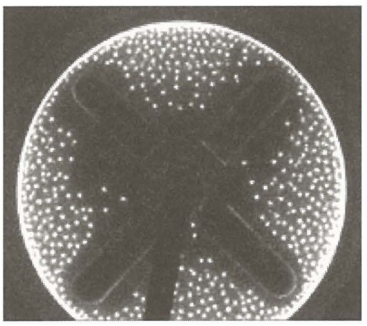
オゾナイザの高効率・高濃度化に関し、近年のオゾン発生技術開発の最大の焦点として、オゾンゼロ現象[5]の解明が挙げられる。オゾンゼロ現象とは、清浄な電極を有するオゾナイザにおいて、極めて純度が高い酸素を原料ガスとした場合に発生する特異な現象をである。そのような構成においては、電力を多大に投入しても、オゾナイザから出力されるオゾン濃度は経時的にゼロに漸近する。酸素濃度が高いほうがオゾン発生効率が高いことは周知であるが、高純度領域においては、純度が高すぎることによる弊害が生じる。この現象は、現在までに体系化されてきたオゾン発生メカニズムでは議論できないとして、特に、クリーンなオゾンガスを使用する半導体製造プロセス向けのオゾナイザの開発において注目されている。

図９に極めて純度が高い酸素を原料ガスとした場合(酸素純度 99.9999%以上)のオゾン発生特性を示す[6]。図において、縦軸がオゾン濃度、横軸が投入エネルギーを示し、放電ギャップ長 d が 0.1mm における特性を示している。極めて純度が高い酸素のみを原料ガスとした場合、オゾン発生効率は極めて低く、短ギャップ化が実現されているにもかかわらず、高濃度オゾンの発生すら不可能となっていることがわかる。さらに、この特性は、運転時間とともに継続的な性能低下を生じ、最終的に出力されるオゾン濃度がゼロに近づく先述のオゾンゼロ現象である。ところが、極めて純度が高い酸素に窒素を微量添加(～1.0%程度)した場合、オゾン発生特性が飛躍的に回復し、安定な高濃度オゾン発生が実現できる。工業的には、純度が高い酸素を原料ガスとして使用する場合は、経験則として、窒素の微量添加により効率低下を保証するのが業界標準ともなっている。この微量窒素の添加に関わるオゾン発生メカニズムについては、様々な議論がなされているが、未だ明確とされていない。このような特異な現象に関して、オゾナイザ電極表面、つまり放電界面におけるオゾン発生に作用する現象・反応が特異な現象を引き起こすとの報告もある。古くから体系化されてきた放電空間における現象論だけでなく、今日まで議論されてこなかった放電界面における現象へのアプローチが、オゾン発生メカニズム

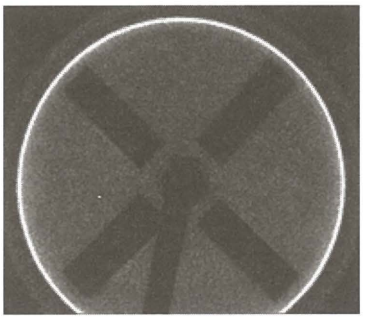
の全解明に貢献することが期待される。

5.2. 短ギャップ放電現象

前章で示したように、短ギャップ化によるオゾン発生特性は数多くの研究開発がなされてきているが、その放電現象については全く議論されていない。筆者は、放電ギャップ長 1.0mm～0.1mm に至る短ギャップ放電現象の観察を実施した。図 10 に、同一の投入電力において、放電ギャップ長 1.0mm および 0.1mm の場合における放電空間に対して垂直方向より微細放電柱を観測した結果を示す。



(a) d=1.0mm



(b) d=0.1mm

図 10 短ギャップ放電による放電維持形態の変化
Fig.10 Discharge structure of the narrow gap discharge

放電ギャップ長 1.0mm から 0.3mm 程度に至るまでは、streamer 状の微細放電柱が明確に観測されているが(図 10(a))、微細放電柱は放電ギャップ長の短ギャップ化に伴い、その直径が急激に縮小し、その数密度が急増する。放電ギャップ長が 0.1mm 程度になると、放電柱直径の極小化ならびに数密度の急増により、もはや個々の微細放電柱は一切観測されず、見かけ glow 状の放電形態を示す(図 10(b))[2]。すなわち、短ギャップオゾナイザは、従来の長ギャップ放電での streamer 状の放電とは、見かけ上、全く異なった放電形態を有すると考えられる。放電制御の観点からは、従来の streamer 状放電の維持に対する定説とは異なった視点で、短ギャップ放電の最適化が必要であると予想される。例えば、電極材料については、ガラスやセラミクスといった streamer 状放電の維持に適切な極めて高抵抗な絶縁材料が適用されている。しかし、短ギャップ化により、その選択基準が従来のオゾナイザと大きく変化し、電極材料の選択次第では、電子電流比 κ の増大による放電励起式の理論限界へ向かう高効率・高濃度化の可能性も考えられる。

6. まとめ

高ガス圧力・短ギャップ放電技術により、オゾナイザの高効率・高濃度化は革新的に進展した。最新のオゾナイザにおいては、従来機種に比して、大幅な省エネルギー化、高濃度化および小型化が達成されている。コストパフォーマンスに優れたオゾナイザにより、水環境浄化やその他の酸化プロセスへの高濃度オゾン導入が現実のものとなり、さらに広範な分野へのオゾン処理プロセスの広がりが期待できる。

一方、オゾン発生メカニズム自身は古くから体系化されており、放電空間における放電物理、化学反応はほぼ解明されていたと考えられていた。しかしながら、放電空間における諸現象の理論だけでは、議論できない特異な現象が発見されている。これまで、議論されてこなかった電極表面、すなわち放電界面で発現する現象のモデル化と短ギャップ放電メカニズムの解明により、更なる高効率・高濃度化が期待でき、オゾン利用の普及、省エネルギー・環境調和型社会の形成が促進されるものと考えられる。

文献

1) J. Kitayama and M. Kuzumoto : J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 2453
2) N. Wada, et al : 10th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Contributed papers) (Saga, 2006) 156
3) 特許 3545257 号
4) 和田 昇他：三菱電機技報 81, 6 (2007) 429
5) 高野 哲美他：電学論 A 125, 6 (2005) 508
6) N. Wada, et al : Photocatalytic and Advanced Oxidation Processes for Treatment of Air, Water, Soil and Surfaces (2005) 421

(2013 年 8 月 20 日受理)

著者略歴

和田　昇

1970 年 7 月大阪府生まれ。1994 年 3 月名古屋大学工学部電子工学科卒、1996 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻前期課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。以来、主として放電を用いたオゾン発生技術の研究に従事。電気学会、応用物理学会、触媒学会会員。

(本論文は平成 24 年度電気材料技術優秀論文の受賞内容をまとめたものである)