

大容量新形オゾン発生装置

*1北出 弘(きたいで ひろむ)

*1星野 収一(ほしの しゅういち)

*1西川 孝也(にしかわ たかや)

*2虎口 信(とらぐち まこと)

*3関口 一夫(せきぐち かずお)

*3酒井 英治(さかい えいじ)

1 まえがき

我が国の水道の普及率は既に92%を超え、いわゆる「高普及時代」を迎えた。しかし昨今、水源の汚染に伴う異臭味の問題が発生し、国民の水道水質への関心は著しく高まっている。

昭和59年に生活環境審議会が「高普及時代を迎えた水道行政の今後の方針」について答申したが、その中でも「安心して飲める水の供給」と「おいしい水の供給」が重要テーマの一つとして取り上げられている。

また、ヨーロッパでは、長大な河川を水源とするため水源の汚濁が進み、これに対応するための各種浄水プロセスが導入されている。特に、オゾン処理による水質改善は約100年の歴史を持ち、ヨーロッパ全体で1,000か所以上の浄水場に浄水の高度処理として導入されている。

我が国においても浄水の高度処理として、生物酸化、オゾン処理、活性炭処理などの処理プロセスが検討されているが、その中でオゾンと活性炭の併用処理が最も効果のある方法として有望視されている。既に一部の浄水場において、オゾンと活性炭の併用処理がパイロットプラントによって研究されつつある。

オゾンは強力な酸化力を持ち、他の酸化剤では分解できないような成分をも酸化分解できるが、反応後は分解しても元の酸素に戻り、二次汚染の心配がないので各種の分野で利用されてきた。従来から産業廃水の脱色・脱臭、し尿処理水の脱色、食品の殺菌などに利用されてきたオゾンが、上水の高度処理分野などに利用されるときは、従来と違って大量に使用されるので、大量使用に向くオゾン発生装置の開発が必要になる。

富士電機では、上水の高度処理用など、大量のオゾンを必要とする分野向けに高性能オゾン発生装置を開発したので、その概要を紹介する。

2 新形オゾン発生装置

例えば、1日当たり10万 m^3 の給水能力をもつ中規模浄水場では、10~15kg/hのオゾンが必要になり、1日当たり100万 m^3 クラスの大規模浄水場にもなると、100~150kg/hのオゾンが必要になる。

これに対し、従来のし尿処理水脱色用などのオゾン発生装置の容量は5kg O_3 /hもあれば十分で、装置としては大きい方であった。

このような状況から、上水処理に適用される大容量オゾ

ン発生装置には、省エネルギーをねらいとした消費電力の低減と、設置面積の縮小を目的とした小形化が強く望まれる。

2.1 オゾンの発生原理と発生特性

2.1.1 オゾン発生原理

オゾンは光化学反応で生成するほか種々の化学反応でも発生するが、工業的規模で効率よく発生させるためには、無声放電を用いる方法が一般的である。

図1 無声放電によるオゾンの発生原理と新形冷却方式

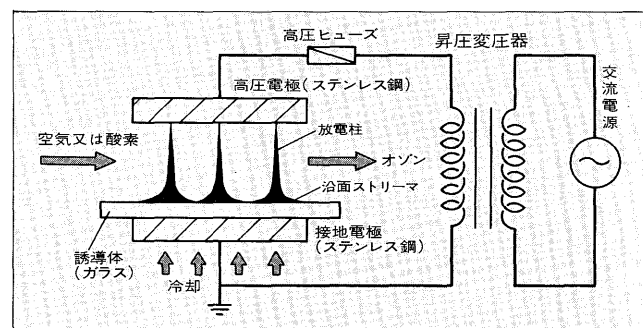
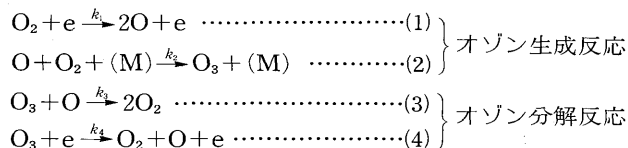


図1に無声放電によるオゾン発生の原理を示す。放電部の基本構造は、対向した電極の間に誘電体を装着したものである。この対向電極間に交流高電圧を印加すると空隙が絶縁破壊を起こして放電するが、誘電体の存在のためにアーク放電には至らず、極めて短時間に放電が消滅する。このようなパルス状放電が電極面の全域で発生する。この放電空間に空気又は酸素を通過させると、放電による加速電子が O_2 分子と衝突し、主として次のような反応が起こる。



e : 電子, k_1, k_2, k_3, k_4 : 反応速度定数

式(1), (2)はオゾンが生成する反応であり、(M)は第3物体で O_2 , N_2 , 器壁などがこれに相当する。一方、式(3), (4)はオゾンの分解反応で、生成反応と分解反応が同時に起こっており、両者のバランスで取り出されるオゾンの量が決定される。ここで、式(1), (4)の反応速度定数 k_1, k_4 は放電による電子のエネルギーとその分布の状態、すなわち放電状態に依存するのに対し、式(2), (3)の反応速度定数 k_2, k_3 は反応空間の気体温度に依存する。すなわち、式(2)は発熱反応であるため温度が低いほど k_2 は大きくなり、オゾンの生成が進む。これに対し、式(3)は吸熱反応のため温度が高い

*1 鈴鹿工場 工業電熱部

*2 (株)富士電機総合研究所 応用装置研究所

*3 総合技術第二部 水処理技術部

ほど k_3 は大きくなり、分解が促進される。したがって、反応空間の気体温度を下げることによって生成反応が促進し、分解反応が抑制され、オゾンの発生効率は向上することになる。

2.1.2 オゾンの発生特性

オゾンの発生特性に影響を与える主要な因子としては次のものがある。

- (1) 放電電力 (W)、原料ガス流量当たりの放電電力 (W/Q) 及び放電面積当たりの放電電力 (W/S)
- (2) 放電空隙長 (d)、空隙のガス圧力 (p)、誘電体材質及び誘電体厚さ
- (3) ガス温度、誘電体温度、冷却水温度
- (4) 原料ガス性状と含有水分量

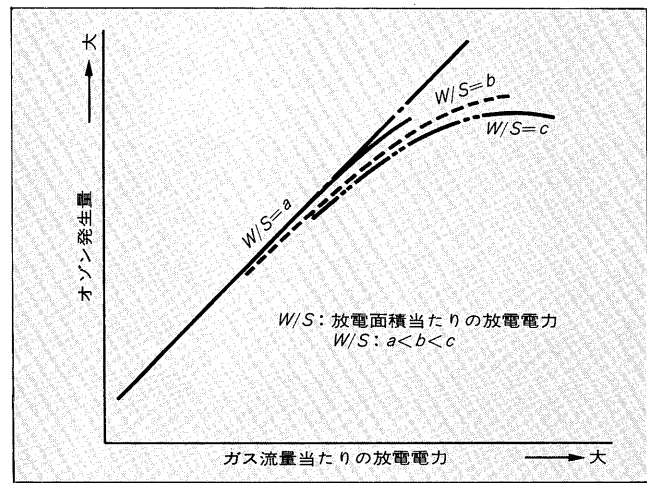
これらの因子のうち、原料ガス性状に関しては酸素分圧が高いほどオゾン発生量は増加し、概略酸素分圧の1/2乗に比例する。したがって、空気原料の場合に比べて酸素原料では約2倍のオゾンが発生する。

また、含有水分量については少ないほど効率は高く、特に空気原料の場合は、この水分量が増加するとオゾン発生効率が低下するばかりでなく、窒素酸化物の生成量が増加して電極面を汚し、誘電体の劣化などを引き起こす原因となる。したがって、少なくとも露点温度 -50°C 以下の水分量まで原料空気を乾燥させる必要がある。

ガス流量当たりの放電電力 (W/Q) 及び放電面積当たりの放電電力 (W/S) とオゾン発生量との一般的関係は、図2 になる。電力/流量 (W/Q) が小さい範囲では、オゾン発生量は電力/流量 (W/Q) に比例する。ところが、放電面積当たりの放電電力 (W/S) が一定でも電力/流量 (W/Q) が増加するに従ってオゾン発生量は、比例関係からはずれてオゾン発生効率が悪化してくる。これは、電力/流量 (W/Q) が増加するのに応じてオゾン濃度が高くなり、濃度分解が進むためと、熱による分解が進むためである。更に放電面積当たりの放電電力 (W/S) が大きくなると、熱による分解の影響は顕著に現れてくる。

しかし、発熱量が増加しても冷却が十分行われていて、

図2 ガス流量当たりの放電電力(W/Q)、放電面積当たりの放電電力(W/S)とオゾン発生量の関係



発生熱量を容易に取り去ることができれば放電部分の温度は上昇せず、オゾン生成量の低下も起こらない。したがって、冷却方式や冷却温度の改善によって、電極部分の温度を低く保つことができれば、電力密度を高めてもオゾンの発生効率を高く維持することができる。

放電空隙長 (d) と空隙のガス圧力 (p) は、放電開始電圧を決定する重要な因子であるとともにオゾン発生効率にも影響を及ぼす。特に空気原料の場合、この効率を極大にする $p \times d$ の値が存在する。また、電極を片側からのみ冷却する場合には、空隙は一種の断熱層の働きをし、直接冷却されない側の冷却を妨げる。したがって、この点からは空隙長 (d) は小さいほど望ましいことになる。

誘電体については電力のロスとなる誘電損失が少なく、絶縁耐圧が高く、しかも温度上昇でこれらの特性変化の小さいことが必要である。

2.2 新形オゾン発生装置

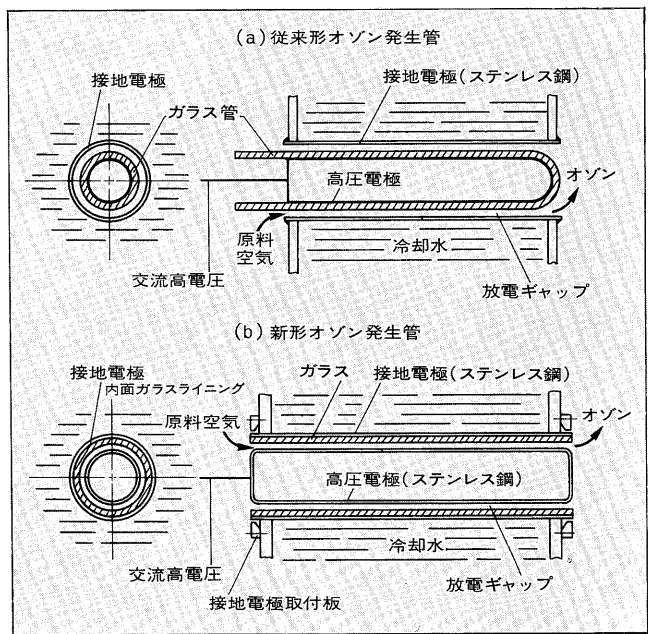
2.2.1 新形オゾン発生管の構造

具体的なオゾン発生電極の構造を図3 に示す。オゾン発生機を小形化するためには、オゾン発生管の1本当たりの発生量を増加させ本数を少なくするとともに、オゾン発生管の占積率と冷却効率の面から最適の直径を選択する必要がある。そのためには、放電面積当たりの放電電力 (W/S) を大きくし、かつ電力/面積 (W/S) を大きくしたことによる効率の低下を招かぬよう、投入電力の増加に伴う発熱量をより効果的に冷却して除去する対策が必要である。

放電空間における発熱について考えてみると、図1 のように放電が発生すると誘電体表面には沿面ストリーマが形成されるが、金属表面には生じないので、空間における発熱のほかに誘電体表面においてもかなりの発熱が考えられる。

新形オゾン発生管は、誘電体を直接冷却して放電空間の

図3 オゾン発生管の構造



冷却効果を著しく向上させたもので、次のような特長がある。

(1) 冷却効果の向上

従来形オゾン発生管は、誘電体であるガラス管の内面に高圧電極膜を塗布し、それを外側の接地電極管（ステンレス鋼管）の内部に挿入し、周囲に一定の空隙を構成するように同心円状に固定した構造となっていた。このためガラス誘電体は接地電極の外側の冷却水によって、断熱層ともいえる空隙を介して冷却されていた。

これに対し、新形オゾン発生管は従来とは逆に、ガラス誘電体を外側接地電極であるステンレス鋼管の内面にライニングし、高圧電極としてステンレス鋼管を内部に同心円状に配置してある。このため、ガラス誘電体は外側の冷却水で直接冷却され、冷却効果は著しく向上した。

(2) 発生管寸法精度の向上

オゾン発生効率向上のためには、最適な放電空隙長とこの空隙長の均一性が重要である。従来形では、誘電体としてガラス管を直接接地電極管内に挿入していたため、ガラス管の寸法加工精度に規制され、放電空隙長を2mm以下にすることができなかった。これに対し新形発生管の寸法精度は、ステンレス鋼管の精度だけで決まるので、曲がり精度及び真円度は極めて向上した。この結果、空隙長を最適な1mmとし、更に空隙長の均一性も向上し、これらが効率の向上に寄与している。

(3) 接地電極の取外し

従来形の接地電極は本体と溶接一体構造となっており、冷却水側の点検、清掃が困難で、冷却水質によっては接地電極の腐食を引き起こすことがあった。新形発生管は1本ずつ取り外しが可能で、メンテナンス性を考慮した構造とした。

(4) ガラス誘電体の強度向上

新形発生管のガラス誘電体は、接地電極である外側ステンレス鋼管との熱膨張率の差のため、使用温度範囲では常に圧縮応力を受けている。このため、強化ガラスのように機械的強度が増し、破損しにくい構造となっている。

2.2.2 新形オゾン発生管の特性

前述のような構造の効果によって、新形オゾン発生管のオゾン収率（1kW 当たりのオゾン発生量）及び電力/面積（ W/S ）は図4のように向上した。電力/面積（ W/S ）を従来の2倍にしてもなお収率は十数%向上しており、逆に従来並みの効率なら電力/面積（ W/S ）は3～4倍にできることがわかった。

図5はオゾン濃度とオゾン発生量1kg 当たりの放電電力の関係を示すものである。新形オゾン発生管は濃度が高くなっても放電電力/オゾン発生量の増加は少なく、原料空気を減らして濃度を上げることが可能であり、原料空気の製造コストも含めた総消費電力を最低にする濃度は従来の16mg/Nl 付近から20mg/Nl 付近へ移動した。

図6は冷却水温度とオゾン収率の関係で、冷却水温の上昇に伴う収率の低下も25℃付近以下ではごくわずかであることがわかる。

図4 放電面積当たりの放電電力（ W/S ）とオゾン収率の関係

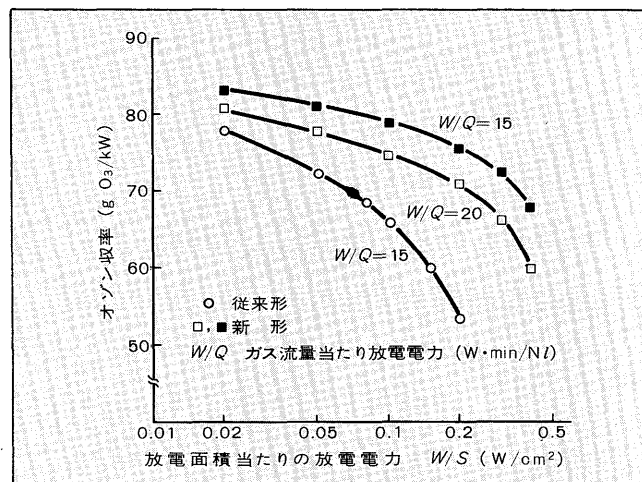


図5 オゾン濃度とオゾン発生量当たりの放電電力の関係

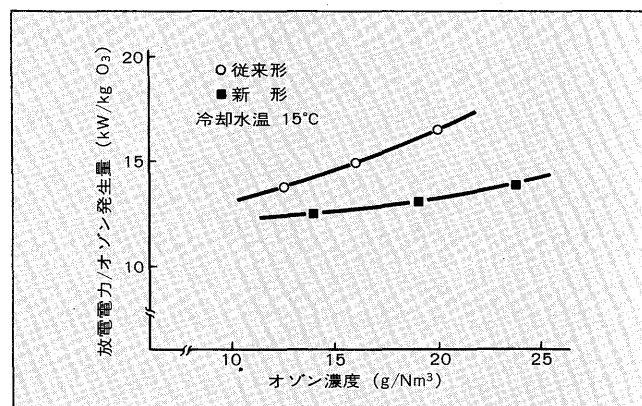
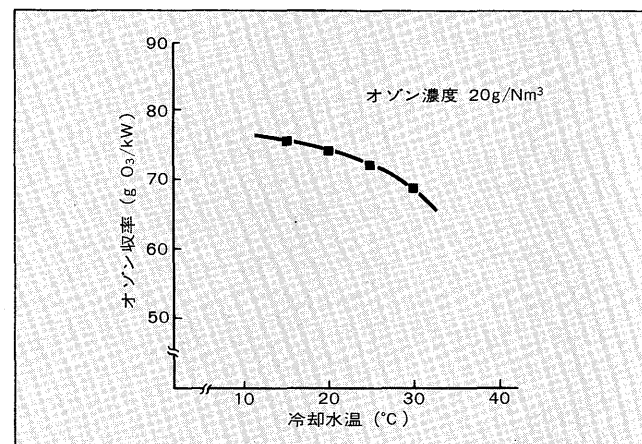


図6 冷却水温度とオゾン収率の関係



2.2.3 新形オゾン発生装置の概要

前述の新形オゾン発生管を使用した新形オゾナイザ（FON形）をシリーズ化した。新形オゾナイザの特長は次のとおりである。

(1) 大容量化

新形発生管の径の最適化と性能の向上によって、1本当たりのオゾン発生量を従来の約4倍とし、単機容量最大30 kg O₃/h までシリーズ化した。

また、上述の定格発生量では発生管に熱的余裕がまだあ

図 7 オゾン発生装置のフローシート

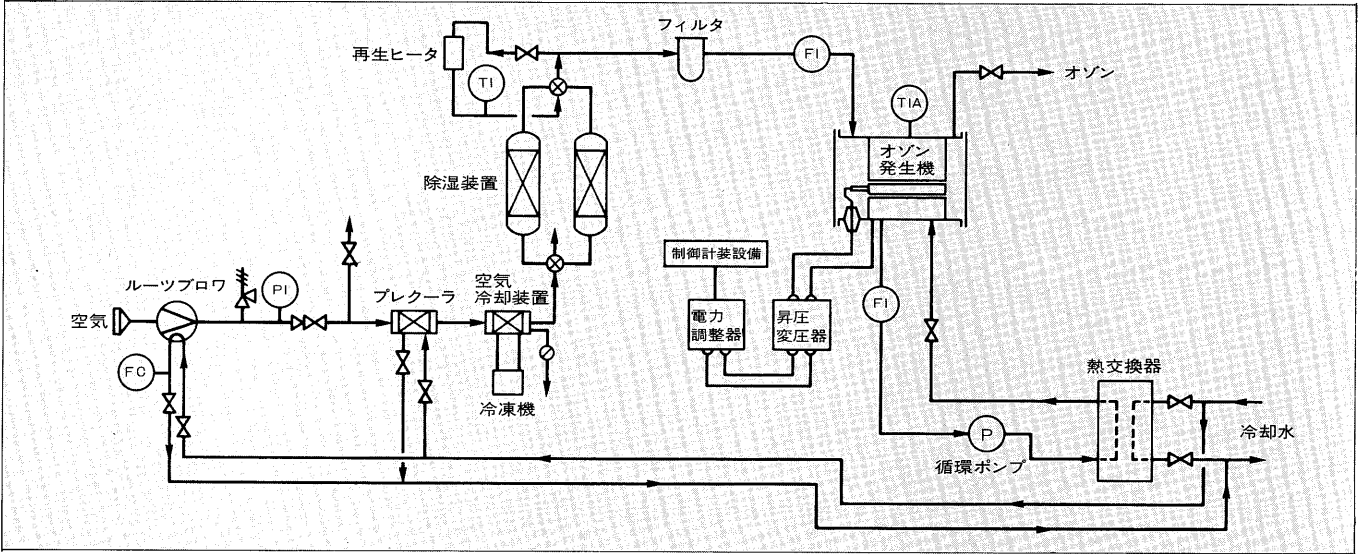


表 1 新形オゾン発生装置の概略仕様

オゾナイザ形式	オゾン発生量 (kg O ₃ /h)	原料空気量 (Nm ³ /h)	オゾナイザ 冷却水量 (m ³ /h)	補機 冷却水量 (m ³ /h)	オゾナイザ 放電電力 (kW)	消費電力 (kW)
FON-100	1.0	50	3.5	0.86	13.2	21.2
FON-150	1.5	75	5.3	1.21	19.8	29.9
FON-200	2.0	100	7.0	1.45	26.4	40.3
FON-250	2.5	125	8.8	1.68	33.0	48.7
FON-300	3.0	150	10.5	2.07	39.6	57.9
FON-400	4.0	200	14.5	2.53	52.8	76.9
FON-500	5.0	250	17.5	3.00	66.0	94.4
FON-750	7.5	350	24.5	4.32	99.0	139
FON-1000	10	500	35.0	14.0	132	183
FON-1500	15	750	52.5	20.6	198	269
FON-2000	20	1,000	70.0	27.8	264	359
FON-2500	25	1,250	87.5	35.2	330	446
FON-3000	30	1,500	105	40.9	396	539

り、定格の160%まで発生量をあげることができ、ピーク負荷に対して、空気源・電源を対処しておくことによって経済的な機種選定ができる。

(2) 省エネルギー

オゾン発生管の収率が17%向上し、また最適なオゾン濃度が高くなったことにより、ブロック、除湿装置などの補機の消費電力も節減された。その結果、設備全体で従来に比べ約14%も消費電力は小さくなり、18kW/kg O₃ (30kg O₃/h の場合) となった。

(3) 省スペース

オゾン発生管 1 本当たりの発生量が増加したことのほか、従来丸形であった発生機本体を角形にして、設置スペースを面積比で平均20%縮小した。

更に、5kg O₃/h 以下の機種についてはブロウ以外の必要機器を共通床台上に一体化し、従来の個別配置に対して約30%省スペース化した。

(4) オゾナイザ専用のインバータ

1 本の発生管に大きな電力を投入するためには、電源の周波数を大きくする必要がある。新形発生管の性能を十分に引き出すために、専用のインバータを開発した。このインバータは定格周波数2,000Hz、三相入力・単相出力で電源の相バランスを図り、また 5 ～100%の範囲でオゾンの発生量を調整できる。

図 7 に新形オゾン発生装置のフローシート、表 1 に概略仕様を示す。

③ あとがき

大容量新形オゾン発生装置について特性、構造などを中心に紹介した。昨今、オゾンの利用が各方面から非常に注目されている。今後、多くの分野にオゾンの利用が拡大していくものと思われる。そのためには更に性能向上を図るとともに、オゾンの利用技術というソフトウェア面での研究にも並行して挑戦する所存である。

参考文献

(1) 衛生常設調査委員会：オゾン処理調査報告書，水道協会雑誌，**53**，11，pp.42～131 (1984)

(2) 電気学会オゾナイザ専門委員会編：オゾナイザハンドブック，コロナ社 (1959)

(3) 井関昇ほか：水処理用大形オゾン発生装置（富士オゾナイザ），富士時報，**44**，12，pp.1142～1149 (1971)

(4) 石川強ほか：大容量オゾン発生装置とオゾン利用技術，富士時報，**50**，6，pp.308～316 (1977)



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。