

上水原水の汚染が進行し、安全で良質な水の供給が、また、水資源の枯渇により、下水処理水の再利用が大きくクローズアップされている。

当社は、これらに対応して、強力な酸化力を持つオゾンの特性を利用したオゾン処理設備を納入している。オゾンの特性を応用して、浄水分野では水道の異臭の除去など、安全で良質な水の供給に、下水処理分野では処理水を脱色・脱臭し、安定した良質の処理水の供給に役立っており、ここではこれらの事例について述べる。

With the progressive contamination of raw water sources, the supply of safe and good-quality water and the reuse of treated sewage water because of the depletion of water resources are being greatly highlighted.

In response to this situation, Toshiba has been supplying ozone processing facilities employing the characteristics of ozone, which has powerful oxidation capability. These characteristics of ozone are being used in the field of water purification for tasks such as odor elimination in service water so as to supply safe and good-quality water, and in the field of sewage treatment to decolorize and remove the odor of treated water so as to ensure stable and good-quality treated water supplies.

This paper introduces examples of these ozone processing technologies for water purification and sewage treatment.

1 まえがき

環境問題が地球規模で議論されており、水処理の分野においても、より高度な処理システムが要求されている。

水環境は、上水、下水で個別に論じられるものでなく、それぞれが深く関与している。河川水質の悪化の原因は、畜産排水、化学肥料、工場排水などの混入もあるが、一般家庭からの生活排水の流入による影響も大きい。下流の都市では、上流で放流・流入された水を浄水処理し、飲み水として繰り返し使用していることになる。

従来の浄水処理は、汚濁・汚染された原水を、除濁・殺菌することが主な目的で、溶存している有機物を完全に除去するのは難しい。下水処理では、主としてBOD(生物化学的酸素要求量)負荷の低減、SS(浮遊物質)除去が行われており、環境基準の達成、湖沼のリン・窒素の低減には十分とは言えない。また、水の有効利用として、下水処理水を中水や修景用水^(注1)として再利用している。

これらを背景として、水道水では“より安全で良質な水”が、下水処理では水循環システムへの影響を考慮した“より高度に処理された水”が求められている。各々、多くの処理方法の組合せが考えられるが、酸化処理プロセスとしてオゾンの応用が考えられる。ここでは、オゾンを用いた高度水処理システムについて述べる。

(注1) 住宅団地などにおいて人工的に作られた池、壁泉、小川などに利用する水を言う。

2 オゾンとは

2.1 オゾンの性質

オゾン(O₃)は、常温で特有のにおいを持つ微青色気体で、大気中に含まれたオゾンは不安定で分解されやすく、時間とともに分解し、酸素(O₂)に戻る。オゾンは非常に強い酸化力、及び水に溶けやすい性質を持っている。この特性を利用し、オゾン水中に散気することによって、水中の種々の物質を酸化し、脱色、脱臭、殺菌などをすることができる。

2.2 オゾン発生方法

オゾンは酸素から生成され、まずO₂を原子状のOに分解し、分解されたOは直ちにO₂と結合してO₃が生成される。このような反応を起す手段として、電子線、放射線、光などを酸素に照射する方法や、化学的方法、電解法などがあるが、工業的には無声放電法が多く用いられている。

無声放電法は図1に示すように、並行に相対した二つの電極間に誘電体を介して交流の高電圧を印加すると、電極間にアーク放電と異なった静かな放電(無声放電)が持続的に発生する。O₂がこの放電空間中を通過することにより、O₃が発生する。

実用的な無声放電式のオゾン発生装置は、図2に示す機器構成となる。

オゾン発生器に要求されるオゾン濃度により、原料ガスは乾燥空気と乾燥酸素の2種類が使い分けられる。

電源装置は、オゾン発生器の電極に電力を供給する装置

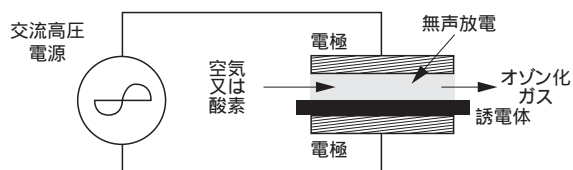


図1．オゾン発生原理 酸素が無声放電空間内を通過すると、オゾンに変化する。
Basic principle of ozone generation

ガラス管の内側には、高圧電極としてステンレス被膜がスパッタリングされている。この被膜は、最適な厚みのアモルファス構造となっているため、放電管は信頼性が高く、長寿命である。

また、電源装置は高周波・高電圧の電力変換装置を用いる。アクティブフィルタやPWM(Pulse Width Modulation)コンバータを使用した、高調波低減タイプもある。

この電源装置でオゾン発生器に供給する電力を調整し、オゾン発生量を制御する。

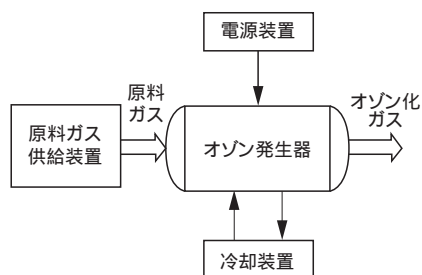


図2．オゾン発生装置の機器構成 原料ガス供給装置から、原料ガスをオゾン発生器に注入し、オゾンガスを発生させる。
Configuration of ozone generator

3 上下水道における応用

オゾンの特徴を前章で述べたが、水処理への利用方法を分類すると下記ようになる。

- (1) 殺菌 / 殺藻
- (2) 脱色
- (3) 脱臭
- (4) 有機物の酸化分解
- (5) 無機物の酸化
- (6) 凝集性の改善

3.1 浄水処理におけるオゾンの応用

一般的な浄水処理工程は、図4に示すように、着水井、薬品混和池、凝集沈殿池、砂ろ過池、配水池の構成となっている。

で、過去には商用周波が用いられてきた。近年は、発生効率向上のため、1 kHz 程度の高周波が用いられることが多く、インバータ及び変圧器を用いて供給電圧を約3～7 kVまで昇圧し、印加している。

オゾン発生器の電極に印加する電力とオゾン発生量はほぼ直線的であり、電力を変えることによって、オゾン発生量を制御することができる。

2.3 当社のオゾン発生装置

当社のオゾン発生器は、円筒形のステンレス管の内側に同心円状のガラス管を挿入した構造になっている(図3)。

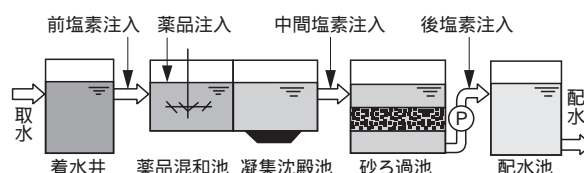


図4．一般的な浄水処理工程 日本の浄水場のほとんどは、この方式で浄水処理をしている。
Standard water purification process in Japan



図3．オゾン発生器 発生機内に多くの円筒形電極が取り付けられており、本数により最大発生量が決定する。
Ozone generator (open)

近年、上水原水の水質悪化により、水質管理のため、前塩素・中間塩素を大量に注入する必要がある。そのため、異臭が発生したり、発ガン性物質として注目されているトリハロメタンが生成されるという問題が起きている。

これらの問題を解決するため、水処理工程の前塩素・中間塩素をやめ、オゾン処理と活性炭吸着池を組み合わせた高度浄水処理が多く採用されている。オゾン処理により、異臭物質やトリハロメタン前駆物質を酸化・分解するとともに、前塩素・中間塩素をやめることによって除去できなくなったマンガンなどの重金属を酸化しており、後段の砂ろ過池や活性炭吸着池で除去している。

オゾン処理の目的によって、図5に示すように、オゾン注入ポイントが異なる。

注入ポイントごとの事例を以下に述べる。

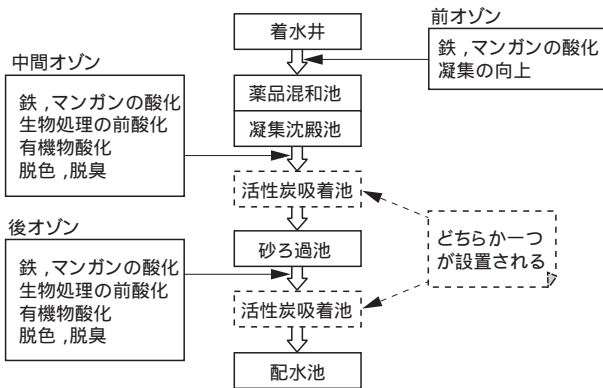


図5. オゾン注入ポイント オゾンの注入ポイントは三つあり、目的によって使い分ける必要がある。
Ozone injection points for purification

(1) 中間オゾン処理 東京都三郷浄水場で実施したフローを図6に示す。

この処理方式は、従来の凝集沈殿工程と砂ろ過工程の間にオゾンを注入する方法であり、その後段に活性炭吸着池が設置されている。三郷浄水場では、生物活性炭吸着池(BAC池)を採用しているが、粒状活性炭吸着池(GAC池)を設置している浄水場もある。従来の中間塩素注入の代わりに用いられているシステムで、オゾンで鉄・マンガン、有機物を酸化している。

後オゾンと比較し、オゾンが多く必要となるが、最終処理が従来法と同様の砂ろ過となる特徴がある。

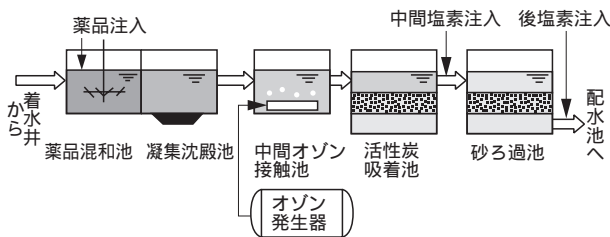


図6. 中間オゾン処理 凝集沈殿工程と砂ろ過工程の間に、オゾン散気工程を挿入した処理方法である。
Intermediate ozonation process in Misato purification plant

(2) 後オゾン処理 大阪府村野浄水場で実施したフローを図7に示す。

この処理方式は、従来の処理の後にオゾン接触池と

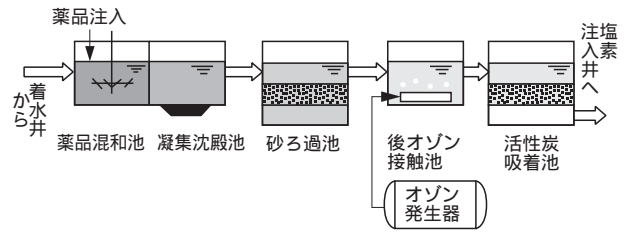


図7. 後オゾン処理 砂ろ過工程の後に、オゾン散気工程を挿入した処理方法である。
Post ozonation process in Murano purification plant

活性炭吸着池を配置する方式である。

この方法は、中間オゾン処理と比較して、懸濁物質がほとんどないので、オゾン消費量が少なくなる。

(3) 中間オゾン・後オゾン併用処理 大阪市庭窪浄水場で実施したフローを図8に示す。

この処理方式は、システムとして複雑になるが、砂ろ過池の保護に優れるなどの利点がある。

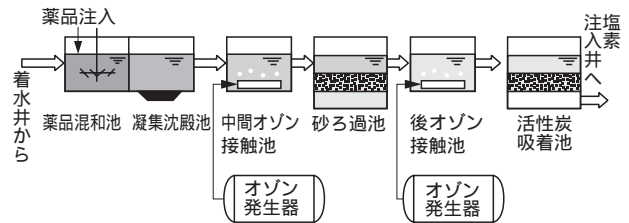


図8. 中間オゾン・後オゾン併用処理 中間オゾンと後オゾンと併用した、より高度な処理方法である。
Intermediate/post ozonation combination process in Niwakubo purification plant

3.2 下水処理におけるオゾンの応用

都市における水資源の不足を解消するために、下水処理水が中水、修景用水、又は親水用水として再利用されており、その処理にオゾンを利用するケースが多い。

中水(水洗用水など)、修景用水、親水用水に要求される水質は、表1、表2に示すとおりである。

表1. 再利用水水質基準⁽¹⁾
Water quality standards for reused water (L)

項目	修景用水利用	親水用水利用
大腸菌群数	1,000個 / 100 mL以下	50個 / 100 mL以下
BOD (mg/L)	10以下	30以下
pH	5.8 ~ 8.6	5.8 ~ 8.6
濁度 (度)	10以下	5以下
臭気	不快でないこと	不快でないこと
色度	40度以下	10度以下

表 2 . 再利用水水質基準² (2)

Water quality standards for reused water (2)

基準水質	項目	水洗用水	修景用水
基準水質	大腸菌群生 (個/L)	検出できないこと	検出できないこと
	残留塩素 (mg/L)	保持されていること*	-
目標水質	外観	不快でないこと	不快でないこと
	濁度 (度)	-	10 以下
	BOD (mg/L)	-	10 以下
	臭気	不快でないこと	不快でないこと
	pH	5.8 ~ 8.6	5.8 ~ 8.6

* : 衛生上必要な措置として塩素消毒をするが、その場合、使用場所にもっとも近い場所で、もっとも近い入水槽付近における再利用水が残留塩素を保持していること。

ある処理場の高度処理の実例を図 9 に示す。

この処理場はろ過池に生物膜ろ過を用いているが、砂ろ過を用いている下水処理場もある。

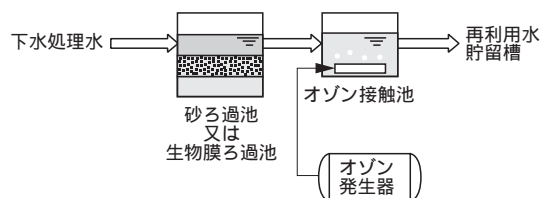


図 9 . 下水再利用水のオゾン処理 ろ過してからオゾン処理をする例が多い。

Ozonation of sewage water for reuse

オゾン処理の主な目的は、脱水・脱臭・殺菌であり、以下に述べる。

- (1) 脱色 下水処理水に含まれる着色成分は、比較的分子量が大きく、反応性の高い構造をしている。この分子は、オゾンの強い酸化力で低分子化され、短時間で脱色される。
- (2) 脱臭 下水臭は水中の揮発性含硫有機物であり、オゾンで容易に分解できる。
- (3) 殺菌 オゾンは微生物の細胞壁の直接破壊や酵素の変質、核酸の損傷などを起し、また微生物を不活性化し殺菌する。オゾンの殺菌は、脱色・脱臭反応後の水中の溶存オゾンが出た後に起こる、遅い反応である。

水中のオゾンは速やかに、環境に無害な酸素に戻るため、殺菌効果の継続は望めず、中水利用の際は一般的に塩素滅菌される。

3.3 オゾン注入量制御

オゾンの注入量は、水質と水量によって変動する。

一般的に実施されている制御フローを、図 10 に示す。

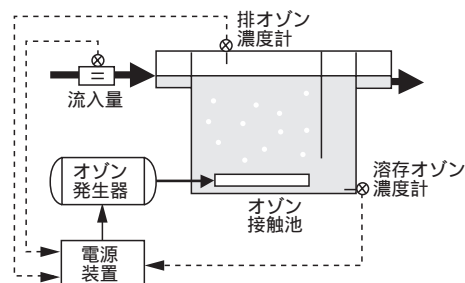


図 10 . オゾン注入量制御方法 一般的なオゾン注入量制御には3通りあり、その組合せで構成されている。

Ozone injection rate control strategy

- (1) 注入率一定制御 オゾン注入量は、設定した注入率に流入量を掛けて算出し、変動する流量に対し注入量を制御するフィードフォワード制御である。

- (2) 溶存オゾン濃度一定制御 散気されたオゾンは水中に溶解し、有機物などと反応して、有機物などは酸化され、オゾンはなくなる。

水中に有機物などが残っている間は、オゾンは反応し、溶解しているオゾンはなくなる。また、有機物が酸化されてなくなると、溶解したオゾンは反応せず、残ることになる。

この残った溶存オゾン濃度を一定(フィードバック制御)にすることにより、オゾンの過不足を防止し、最適なオゾン注入をすることができる。ただし、溶存オゾン濃度を、長期にわたって安定して測定することが難しいという問題がある。

- (3) 排オゾン濃度一定制御 散気されたオゾンは水中に溶解し、溶存オゾンが水中の有機物などに反応し、溶存オゾンはなくなる。溶存オゾンが減少すると、気体のオゾンは溶解しようとするので、排オゾン濃度が減少する。水中の有機物などが減少すると、溶存オゾンは反応・分解できなくなり、溶存オゾン濃度は上昇し、結果的に排オゾン濃度が増加する。

この排オゾン濃度を一定(フィードバック制御)にすることにより、オゾンの過不足を防止し、最適なオゾンの注入をすることができる。排オゾン濃度は、長期間安定して測定できるメリットはあるが、制御の応答が遅い欠点がある。

また、以上の複数の制御を組み合わせた併用制御をしている浄水場もある。

4 今後の上下水道におけるオゾン応用と課題

4.1 浄水場の場合

湖沼での藻類の発生や富栄養化などの水道水源における水質の悪化は、浄水場沈殿池での凝集性の悪化の原因とな

る。その結果、沈殿池での沈降性が悪くなり、砂ろ過への負荷が増加するため、砂ろ過で濁質が処理しきれずに漏洩が起きたり、砂ろ過の洗浄周期が短くなるなどの問題が発生している。

これらを解決するために、オゾン処理による凝集性改善が研究されている。海外では、既に実プラントに利用されている実績があるが、国内においては現在検討を進めている段階である。

4.2 下水処理場の場合

(1) 下水汚泥の減容化 下水処理場で発生している汚泥の量は膨大で、現在この汚泥は脱水(減容)し、一部は加工され肥料やブロックとしてリサイクルされている。しかし、大部分は、埋め立て処分されているが、処分費も安くなく、また、処分地もなくなり環境問題として認識され始めてきた。

下水処理場では、好気性微生物を用い、水中の有機物を除去しており、除去された有機物の一部は二酸化炭素(CO₂)となるが、ほとんどは微生物(汚泥)となる。反応槽で増殖した微生物の一部を反応槽に返送し、残りを汚泥処理設備に輸送している。この返送汚泥にオゾンを散気し、反応槽に戻すと、汚泥が減容化できることが確認されている。

オゾンは強い酸化力により、汚泥の元である微生物の細胞膜を破壊(死滅)でき、破壊された微生物は反応槽の微生物によって消化され、水とCO₂にまで分解されるためである。

(2) 河川放流水のオゾンによる殺菌 近年、都市人口の増加により、河川上流に大規模下水処理場が建設され、河川に放流される下水処理水の割合が大きくなってきており、その河川水が再度上水の原水として使用される例が多くなってきている。従来、下水処理では塩素殺菌をしてきたが、下水処理水中にはトリハロメタン前駆物質が含まれており、塩素殺菌をすることで、トリハロメタンが上水の原水に含まれる問題がある。

下水処理水の塩素による殺菌をオゾンによる殺菌に代えることで、トリハロメタンの発生を低減することができる。

(3) 放流水のCOD削減 現状の下水処理は、微生物を用いた方法で処理されており、微生物で分解できない難分解性有機物は処理されずに流出する。これはBODとして測定されないが、COD(化学的酸素要求量)として測定される。これらを分解し、有機物を除去する

一つの方法として、オゾンの持つ強力な酸化力を利用する方法が採用され始めている。

4.3 オゾン発生器の技術的課題

オゾン発生器の今後の課題は、下記のとおりである。

- (1) 高効率化,高濃度化
- (2) 放電空隙の最適化,高精度化
- (3) 新しい無声放電方式の確立,工業化

5 あとがき

ここでは、上下水道のオゾンを応用した高度水処理について、当社がエンジニアリングした浄水場と下水処理場のフローから述べた。浄水分野では、水道水の異臭などの除去に効果を発揮し、安全で良質な水の供給に役だっている。下水処理場では、下水処理水を脱色・脱臭し、安定した良質な処理水の供給に役だっている。

今後オゾンの種々の特徴を生かしていくためには、オゾン生成コストの低下、中間生成物の解明、オゾンを効率よく利用するための発生オゾン濃度、オゾン溶解システム、紫外線などを併用した促進酸化法など、最適システムの研究が必要となる。

当社では、最適な処理工程の研究、高濃度で効率よくオゾンを発生できる装置の開発をより積極的に推進していく所存である。

文献

- (1) 建設省高度処理会議,下水処理水の修景,親水用水利用用水質検討マニュアル(案).1990.
- (2) 建設省都市局下水道部,下水処理水循環利用基準(案).1981.



野口 基 NOGUCHI Motoi

情報・社会システム社 社会インフラシステム事業部 公共システム技術第一部。水処理システムのエンジニアリングに従事。

Public Use Systems Div.



牧瀬 竜太郎 MAKISE Ryutaro

情報・社会システム社 社会インフラシステム事業部 公共システム技術第一部。水処理システムのエンジニアリングに従事。

Public Use Systems Div.



高瀬 格 TAKASE Itaru

情報・社会システム社 社会インフラシステム事業部 公共システム技術第一部主査。水処理システムのエンジニアリングに従事。

Public Use Systems Div.