UDC 628.162.8 : 697.947 : 628.1/.3

上下水道における高度処理技術

田中　健(たなか　けん)　　酒井　英治(さかい　えいじ)　　森岡　崇行(もりおか　たかゆき)

1　まえがき

最近，オゾン層の破壊や二酸化炭素などによる地球の温暖化など地球規模での環境問題に目が向けられるようになってきた。大気と水は人間にとって最も重要な環境であり，これらの汚染についても改めて注目されている。とりわけ水環境は日常生活に密着しており，水環境の汚染は特に大きく取り上げられている。水は自然の中で大きく循環しており，河川，湖などはその循環の一部である。さらにそれらから取水して上水道とし，人間の活動に使用された後，下水道として再度河川などに放流される経路も循環の一部であり，この人間が関与する循環のなかで人間自身および自然環境のために，より高度な処理が求められている。

富士電機ではオゾン処理を長く手掛けており，本稿では高度処理のプロセスの一つとして注目されているオゾン処理を中心に上下水道の高度処理について述べる。

2　上水道における高度処理

2.1　ふれっしゅ水道と高度処理

厚生省は平成3年に「21世紀に向けた水道整備の長期目標」(通称「ふれっしゅ水道計画」)を発表した。これは，いつでもどこでも安全でおいしい水を供給できる「安全な水道」など三つの側面から施策の具体化を図り，21世紀に向けた「高水準の水道」を構築するもので，具体的に七つの目標が設定されている。その目標の一つに「高度浄水施設の整備」が挙げられており，水質汚濁が進行している水源の利用を余儀なくされている浄水場に，高度浄水施設の整備を図り，安全で異臭味のないおいしい水の供給を実現するとしている。高度浄水施設はすでに幾つかが稼働あるいは建設中であるが，今後さらに増加してゆくものと考えられる。

2.2　高度処理の効果

産業の発展や人口の増加に伴い，河川や湖沼などの水源の汚濁が進行し，アンモニア性窒素の増加や異臭味の発生などの問題を生じており，特に異臭味については平成2年度にはついに2,000万人以上の人が被害を受けたと言われている。さらにトリハロメタンに代表される微量有機塩素化合物の健康への影響についても議論されるようになり，これらの問題に対処するために高度浄水処理が導入されることになった。

高度浄水処理は，活性炭処理，オゾン処理，生物処理などの単位処理の単独または組合せである。処理の主目的が異臭味除去やトリハロメタンの低減の場合，オゾン＋活性炭処理が主として用いられる。また，特に原水のアンモニア性窒素が高い場合は生物処理が用いられる。オゾンは特に異臭味除去に効果があるほか，活性炭処理が生物学的活性炭処理の場合，その前にオゾン処理を行うことにより生物分解性を高めたり，活性炭寿命の延長などの効果がある。

3　下水道における高度処理

3.1　水環境と高度処理

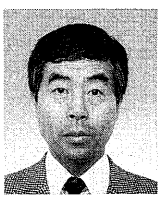
下水道は人間の生産活動や生活活動で汚染された水を処理し，放流すなわち自然環境へリサイクルしたり，人間社会で再利用するために直接リサイクルするためのものであり，水環境の保全を行うものである。最近は下水道においても高度な浄化が求められているが，下水道における高度処理とは，①水質環境基準の維持達成，②富栄養化の防止，③再利用などのため高度に浄化された処理水を得るための処理方法全体を意味し，種々の処理方法が含まれる。ここではオゾン処理が有効な高度処理について述べる。

(1)　再利用

水源の開発が困難になりつつあり，下水処理水は貴重な水資源として，積極的に使用されるようになってきた。すでに下水処理場内で水洗用水などの場内水としては多数使用されているが，最近は場外へ水洗用水，雑用水として配水されたり，親水公園などの修景，親水用水に用いられるなどの実施例が増加している。これらの用途については建設省より「下水処理水循環利用技術指針」および建設省高度処理会議で「下水処理水の修景・親水利用マニュアル

田中　健

昭和33年入社。オゾン高度処理システムの企画，設計に従事。現在，制御システム事業本部公共システム事業部主席。



酒井　英治

昭和47年入社。オゾン処理設備のシステム設計に従事。現在，制御システム事業本部公共システム事業部水処理技術第一部課長。

森岡　崇行

昭和55年入社。オゾンを応用した上水の高度処理技術の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所水処理・バイオ研究所主任研究員。

(案)」が提示されており，目標水質などが示されている。

これら下水処理水の再利用では再利用水の色や臭気が利用者に不快感を与えないように処理する必要がある。このための脱色，脱臭にオゾン処理が効果的であり，すでに千葉県の幕張地区などに給水されている再利用水をはじめ幾つかのプラントでオゾン処理設備が稼働している。

(2) 殺　菌

放流水の殺菌につていは，従来，塩素が一般に使用されている。塩素殺菌では残留塩素が殺菌力を持続させるが，これが場合によっては放流先の河川などの生態系に悪影響を与える場合がある。これに対してオゾンは殺菌力では塩素より強力であるが，分解が速いため放流先に二次的影響をほとんど与えない。このことから放流先の微生物やこれをえさとする魚類などの生態系の保護のためにはオゾン殺菌が有効である。

また，塩素殺菌においては処理水中の残留有機物と塩素が反応してトリハロメタンなどの微量有機塩素化合物を生成する可能性があるが，この問題に対してもオゾン殺菌は有効である。したがって，今後「地球にやさしい」殺菌処理としてオゾン処理が採用されてゆくものと考えられる。

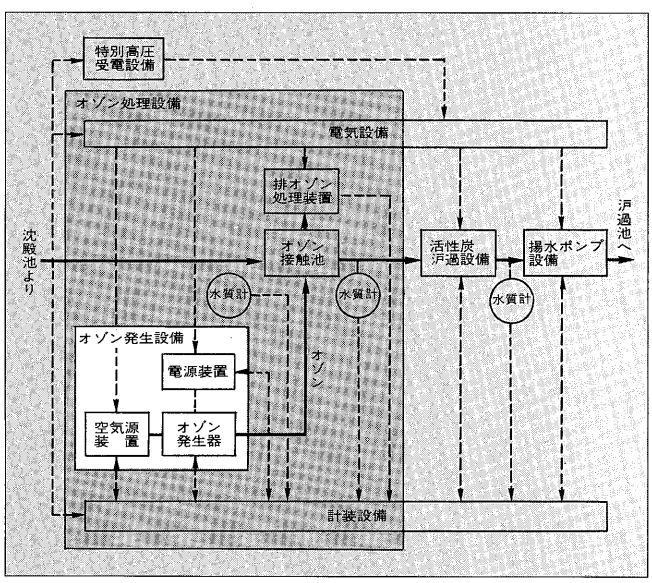
4　高度処理システムの構成要素と課題

4.1　高度処理システムの構成

高度処理システムはそれぞれ適用分野，目的，規模などによってその構成は異なるが，ここではオゾン処理を中心に構成要素とその技術的課題について述べる。

高度処理は幾つかの単位処理プロセス（オゾン処理，活性炭処理など）を組み合わせたものであり，これらがさらに従来の処理プロセスに組み込まれる。各単位処理プロセスはさらにいろいろな機器で構成されており，オゾン処理の場合，オゾンを発生させるオゾン発生装置，それを反応させる反応槽，反応槽から未反応のまま排出される排オゾンを分解する排オゾン処理装置などで構成されている。

図1　上水高度処理設備の構成例



電気設備は高度処理設備を構成する機器に電源を供給するものであり，監視制御設備は各機器レベルの制御から単位処理プロセスの制御，高度処理設備全体の制御，さらに従来プロセスとの協調をとるための情報処理などを行う（**図1**参照）。

4.2　オゾン処理設備の計画と課題

高度処理におけるオゾン処理設備を計画するにあたっての留意事項として次の項目が挙げられる。

(1) オゾン反応設備
- 除去率，吸収効果の向上
- 最適設計による省スペース

(2) オゾン発生装置
- 省電力，高信頼性
- 高調波の低減

(3) 排オゾン処理装置
- ランニングコストの低減

(4) 監視制御設備
- 効果的な階層化と水平分散

4.3　オゾン反応設備

オゾン反応設備はオゾンを①溶解，②反応させることを目的とするもので，高い溶解効率と十分な反応によって処理目的物質の除去率が高くなるように設計しなければならない。また，大規模な高度処理では反応槽の容量も大きくなり，大きなスペースを占めるので必要以上に大きくならないよう留意する必要がある。

オゾン反応槽内の状態にかかわる要因は多数あり，その評価が困難であったため，従来反応槽の設計は経験的に行われていた。シミュレーションによる検討も行われているが，多くは水の流れを押出し流れと仮定したもので，大規模な横流式の反応槽には適用できないものであった。富士電機では比較的規模の大きい反応槽の総合的なシミュレーションモデルを開発し，反応槽のオゾン溶解効率や除去効率などを評価できるようにした。このシミュレーションにより反応槽の特性を評価しながら効率のよい反応槽の設計を行うことができる。このシミュレーションモデルは反応

図2　オゾン反応槽シミュレーションモデルの入出力

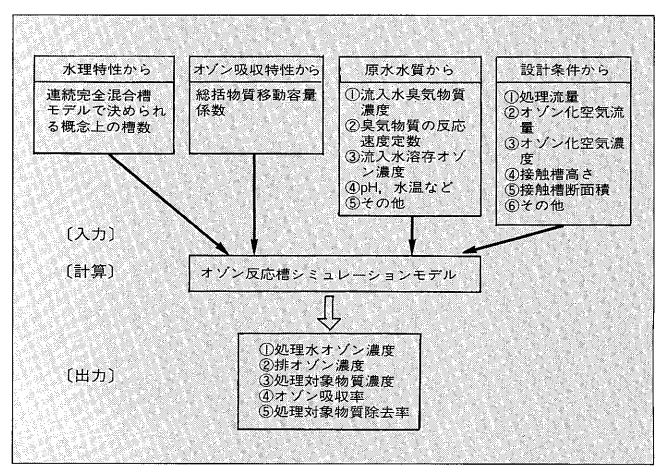
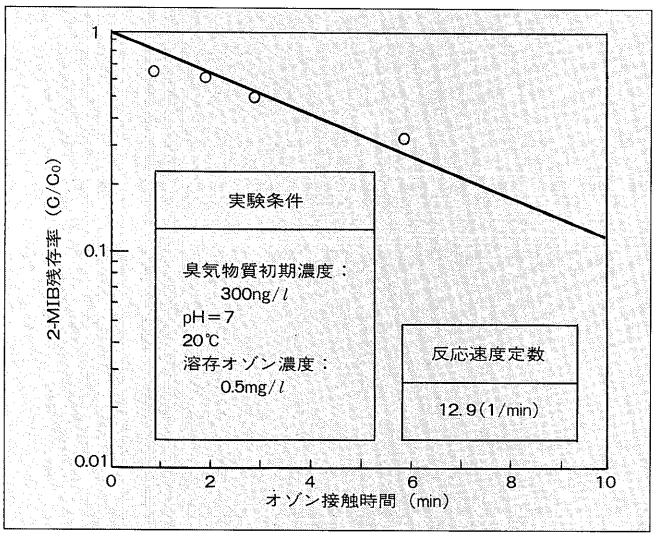


図3　2-MIB（ジメチルイソボルネオール）の反応速度



槽の水理特性やオゾン吸収特性のパラメータ，原水水質および設計条件などを入力すると，反応槽内の除去対象物質やオゾンの濃度を計算し，除去率やオゾン吸収効率を求めることができる（**図2**参照）。

次に実験やこのシミュレーションによるデータを用いて反応槽の設計上重要な要因を紹介する。

(1)　処理対象物質とオゾンの反応速度

オゾンと他の物質が反応して変化してゆく速さが反応速度である。したがって，オゾンの供給が追いつかないほど反応速度が速い場合は別にして，十分オゾンが供給されている範囲では，オゾンの処理対象物質がある濃度から目標値まで変化するのに要する時間は反応速度に応じて決まる。例えば，**図3**は水道水のかび臭原因物質であるジメチルイソボルネオール（2-MIB）がオゾンと反応して分解してゆく状況を示すものであり，縦軸は2-MIBの残存率，横軸は反応時間である。このデータから，例えば残存率を0.1（除去率0.9）にするためには約10分オゾンと接触させる必要があることが分かる。

(2)　水理学的滞留時間と滞留時間分布

滞留時間は反応槽の最も基本的な仕様である。滞留時間と処理水量から反応槽の容量がほぼ決定される。滞留時間は処理対象物質がオゾンと反応して目標値になるまでに必要な反応時間から決定される。ところで，反応槽の形状が管状で流れが押出し流れでない限りショートパスや循環流が発生し，流入した被処理水は反応槽の容量を処理水量で割った値である水理学的滞留時間より早く流出したり，遅く流出したりして，滞留時間の分布ができる。この滞留時間分布は反応槽内の流れの状況で決まり，槽の形状が大きく影響する。

反応槽の設計にあたっては，槽の形状による滞留時間分布を考慮して，滞留時間の短い部分に対しても必要な反応時間が確保されるように水理学的滞留時間を決める必要がある。特に実験時に径の小さい反応塔で必要な接触時間を求めて，それをスケールアップする場合は注意が必要である。

図4　オゾン反応槽の分割例

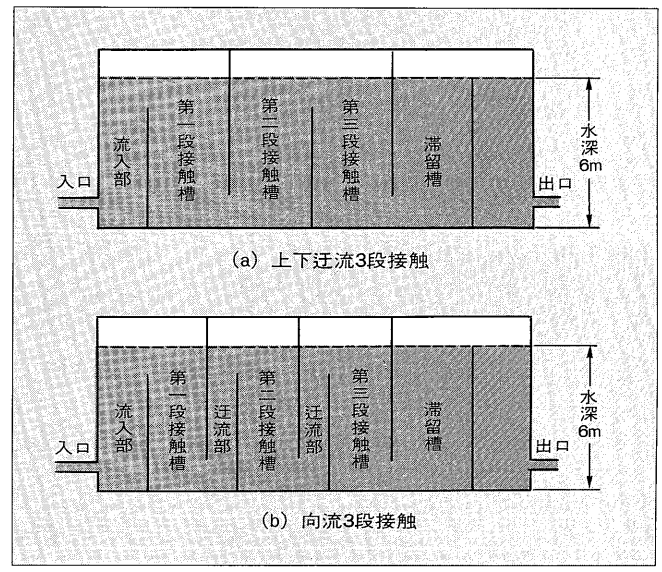
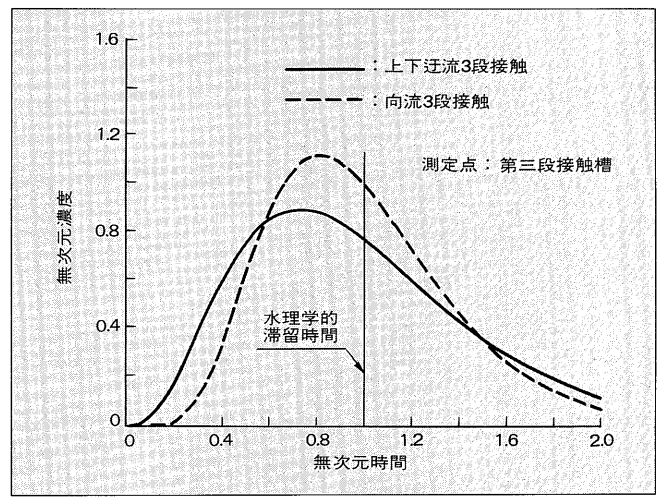


図5　上下迂流3段と向流3段式反応槽の滞留時間分布



(3)　反応槽の形状と滞留時間分布

図4に示すように反応槽を幾つかに分割するとショートパスが防止され，滞留時間分布をシャープにして水理学的滞留時間に近づける効果がある。当然分割数が多いほどその効果は高くなるが，構造的には複雑になり建設費が高くなるので総合的に判断する必要がある。また分割する場合，各区画で処理水とオゾンガスが対向流になるように分割する方法と処理水が上下に迂（う）流するように分割する方法があるが，各区画で対向流になるように分割した方が滞留時間分布の改善には効果がある（**図5**参照）。

(4)　オゾン吸収効率

注入したオゾンを有効に利用するためにはオゾン吸収効率を高くする必要がある。オゾン吸収効率に関係する要因としては，反応槽の水深，気泡径，液ガス比（L/G），オゾン濃度，被処理水中のオゾン消費物質濃度と反応速度など数多くあり，複雑に関係している。反応槽の設計で重要な水深について，**図6**にシミュレーションで求めた吸収効率との関係を示す。**図6**では被処理水中のオゾン消費物質の反応速度条件は上水処理の場合を想定したものであるが，

図6　オゾン反応槽の水深とオゾン吸収率

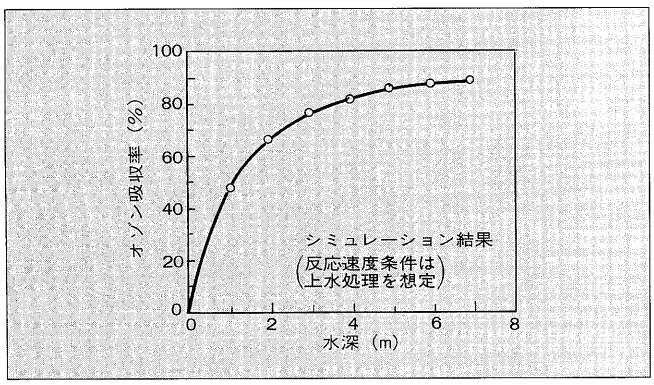


表1　シミュレーションの基本条件

処理水流量（m^3/h）	5,000
オゾンガス流量（m^3/h）	250
オゾンガス濃度（g/Nm^3）	20
流入水の溶存オゾン濃度（mg/l）	0
反応槽高さ（m）	6
水温（℃）	20
pH	7

表2　シミュレーションの結果

項目＼段数		1段	2段	3段	4段	5段
上下迂流	平均オゾン吸収率（%）	80.78	81.32	82.78	82.53	83.18
	溶存オゾン濃度（mg/l）	1.29	1.37	1.43	1.43	1.46
	臭気物質除去率（%）	76.44	81.93	84.15	85.29	86.06
向流	平均オゾン吸収率（%）	80.78	83.01	83.73	84.07	84.24
	溶存オゾン濃度（mg/l）	1.29	1.40	1.44	1.46	1.48
	臭気物質除去率（%）	76.44	82.96	85.48	86.82	87.65

〈注〉平均吸収率は各段のオゾン吸収率の平均値

水深6m程度で吸収効率は飽和する傾向にあり，一般に言われている最適値4～6mと一致する。なお，吸収効率はオゾン消費物質の反応速度などの影響を受けるので水質が大きく異なる下水二次処理水などの場合には吸収効率はさらに良くなる傾向にある。

(5)　シミュレーションによる総合評価

反応槽に要求される機能は処理目標とする水質項目について目標値まで処理することであるが，その結果を得るためには上記のような要因を含めてその他さまざまな条件が複雑に関係している。反応槽の設計にあたって，最適な条件を求めようとしたとき，反応槽の形状にかかわる条件のように規模の小さい実験では評価できないものやパイロットプラントのデータではその他の条件が一致していないために評価できないような項目がでてくる。そのような場合にシミュレーションが有効である。一例として5,000m^3/hの向流と上下迂流式多段接触オゾン反応槽について**表1**の条件の場合，反応槽の段数に応じて，オゾン吸収率や臭気物質の除去率がどう変化するかをシミュレーションした結果を**表2**に示す。これから段数が増えるほど除去率は向上すること，同じ段数なら向流式の方が優れていることが分かる。

図7　ガラスライニング式オゾン発生管の構造

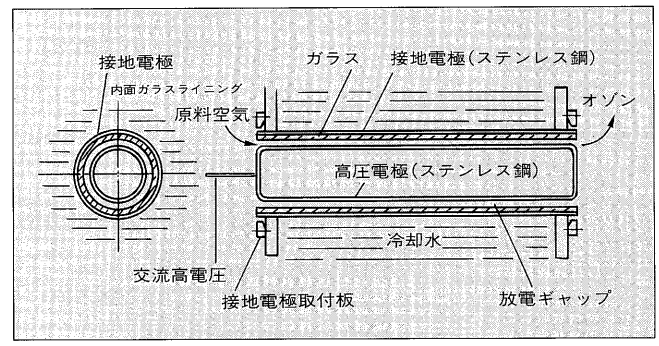
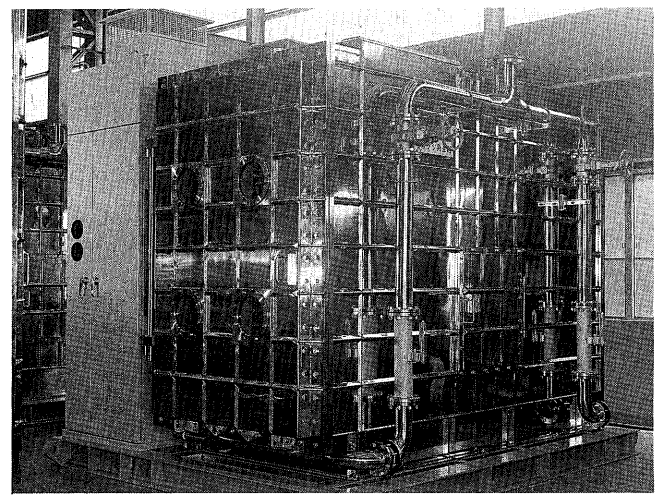


図8　大形オゾン発生器の外観（18kg O_3/h）



N89-6106-16

4.4　オゾン発生装置

(1)　省エネルギー，高信頼性

高度処理に適用されるオゾン発生装置は省電力，高信頼性が要求される。これらの課題に対してはオゾン発生装置単体での対応と設備全体としての対応が考えられる。

オゾン発生装置単体としては富士電機独自のガラスライニング式オゾン発生管の採用によりこの課題に対処している。ガラスライニング式オゾン発生管は外側接地電極であるステンレス鋼管の内面にガラスをライニングした構造のもので，次の特長がある（**図7**参照）。

(a)　ガラスが外部の冷却水で直接冷却され，きわめて冷却効果が高い。

(b)　冷却効果が高いのでオゾン発生効率が高い（オゾン吸収率76g/kW）。

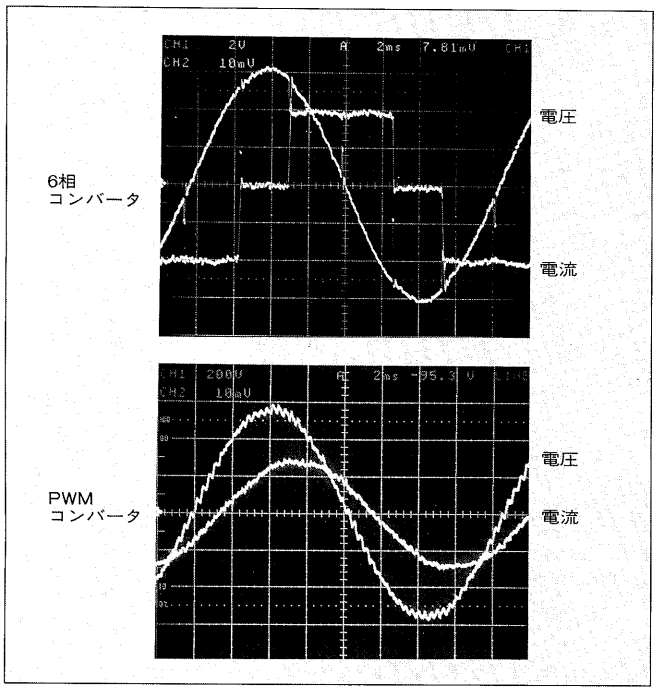
(c)　ガラスはステンレス鋼管の内面にライニングされており破損率がきわめて小さく，信頼性が高い。

(d)　接地電極も本体から取り外すことができる構造になっており，冷却水側の保守点検が可能である。

図8に上水高度処理に適用された大形オゾン発生器の外観を示す。

オゾン発生設備全体としての省エネルギー・高信頼性対

図9　6相コンバータとPWMコンバータの電流・電圧波形



策として構成台数を検討する必要がある。上下水道においては処理水量の変動が大きく，必要なオゾン発生量も大きく変動する。オゾン発生量は連続的に5%程度まで調整可能で，放電電力もほぼこれに比例して減少させられるが，空気源ブロワや除湿装置などの補機は通常定格で連続運転するのでオゾン発生量にかかわらず補機の消費電力は一定である。したがって，オゾン発生設備を複数台のオゾン発生装置で構成し，発生量に応じて運転台数を制御して補機も含めて運転停止させた方が全体として省電力になる。また，複数台構成にすることによって設備全体としての信頼性も向上させることができる。

(2)　電源の高調波対策

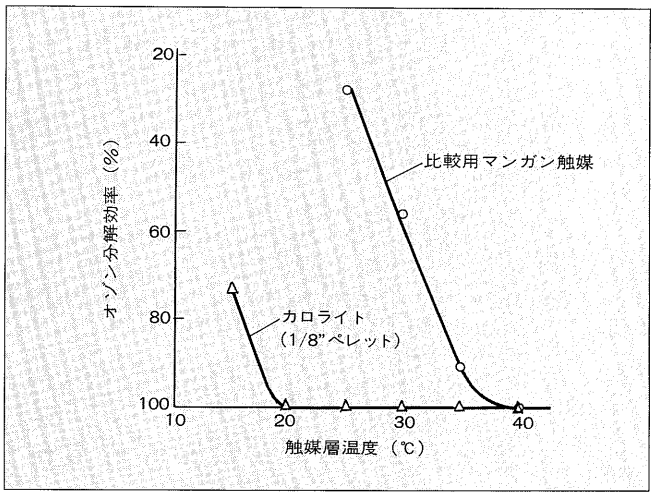
オゾン発生器は1,000Hzの電源で駆動される。したがって電源装置として周波数変換器を備えているが，この直流変換器（コンバータ）は電源に対して通常大きな高調波を発生する。設備容量に対してオゾン発生装置の容量があまり大きくなければこの高調波は問題にならないが，容量が大きくなると他の設備に対してコンデンサの過熱などの影響を与える。この問題に対して最近はアクティブフィルタなどで対応するが，富士電機ではさらに一歩進んで，高調波を出さないコンバータを必要に応じてオゾン発生器の電源装置に組み込むことができる。これはPWM制御（パルス幅制御）でコンバータの入力電流を正弦波に近くなるように制御するものである（**図9**参照）。このPWMコンバータの特長として次の点があげられる。

(a)　高調波の抑制効果が高い。

(b)　高調波抑制と同時に力率もほぼ1に制御することが可能で，電源トランスの容量を低減することができる。

(c)　通常のコンバータとアクティブフィルタの機能を一つにまとめたことにより省スペース化が図れる。

図10　オゾン分解触媒「カロライト」の温度と分解効率



4.5　排オゾン処理装置

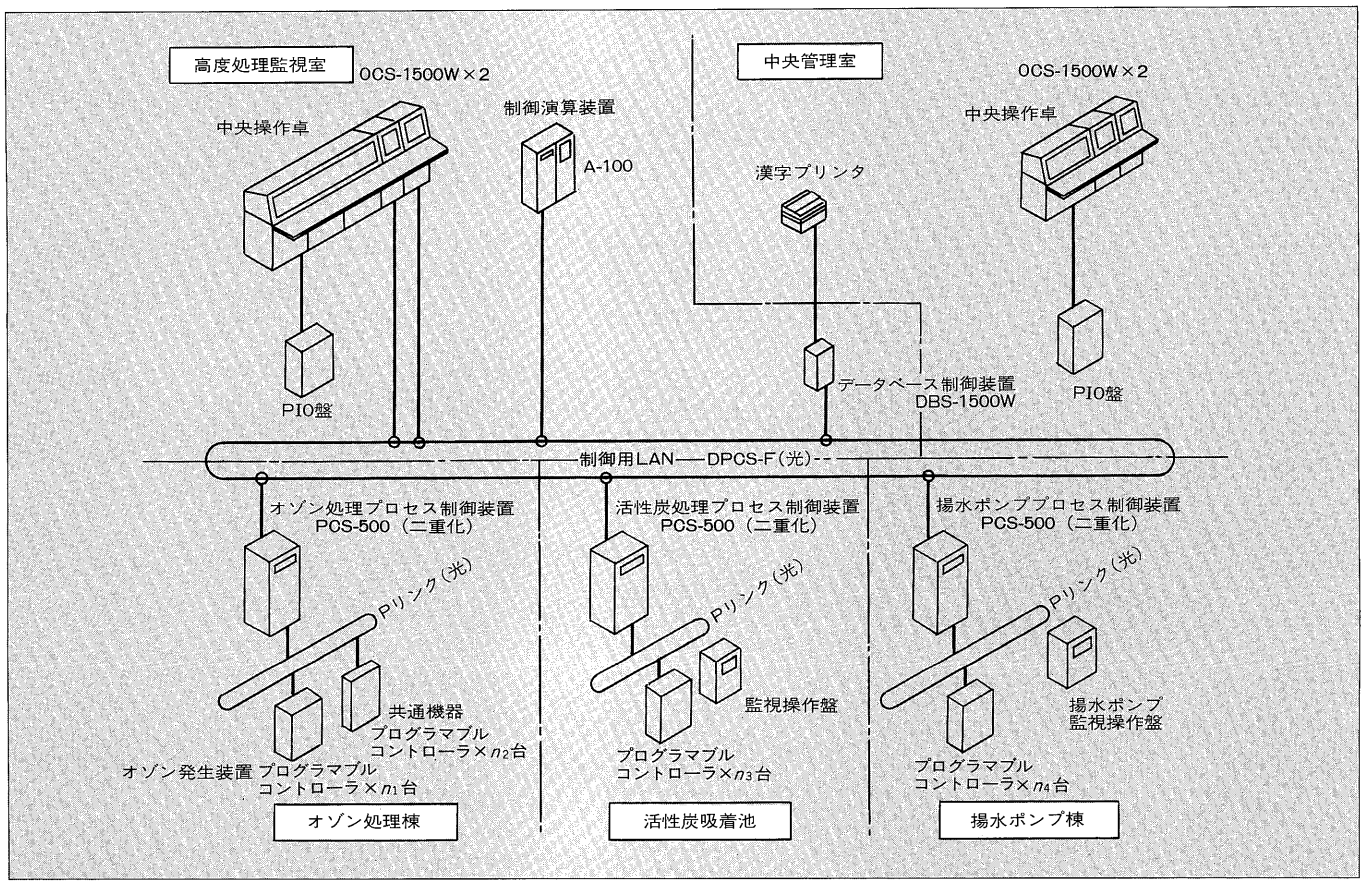
オゾン反応槽から排出される未反応のオゾンガスはまだ濃度が高く，排オゾン処理装置で分解してから大気に放出する必要がある。排オゾン処理の方法は幾つかあるが，従来は活性炭方式が多く用いられていた。活性炭方式は，ランニングコストは高いが設備コストは安く，容量が小さい場合に比較的有利である。しかし，規模が大きくなるに従って消費する活性炭量も多くなり，ランニングコストがかかる以外に充てん塔スペースの増大，交換作業の労力など不利な点が多くなる。これに対し触媒法は小さな容積で高濃度のオゾンを分解することができ，基本的に触媒は消費しないのでランニングコストが安く，触媒の寿命も長いという特長がある。したがって，加温のためのヒータが必要という点を考慮しても規模が大きくなれば触媒法が有利である。

富士電機が使用している二酸化マンガン系のオゾン分解触媒“カロライト”は比較的低温でもオゾンの分解が可能であり，加温のためのエネルギーが少なく，同じ触媒の中でもさらに省エネルギータイプの触媒である（**図10**参照）。

4.6　高度処理システムの監視制御

高度処理システムは構成機器単体レベルから全体システムへと機能的に階層化していると同時に，例えばオゾン処理，活性炭処理，ポンプ設備など機能的に水平分散して全体のシステムが構成されている。したがって，監視制御システムもこれらの機能に合わせて階層化と水平分散化し，機能的に結合を図る必要がある。**図11**にEIC統合化システムによる大規模な上水高度処理設備の監視制御システムの構成例を示す。この中で特にオゾン処理設備では，オゾン発生器1台とそれに直接関係する補機一式を1台のオゾン発生装置として扱い，この1台のオゾン発生装置に1台のプログラマブルコントローラを割り当ててその制御を行わせている。さらにオゾン反応槽回りの機器（排オゾン処理装置も含む）などについてはオゾン処理設備の共通機器として別のプログラマブルコントローラで制御させ，これ

図11　上水高度処理の監視制御システム構成例



らのプログラマブルコントローラをオゾン処理設備全体を制御するプロセス制御装置で制御するというように階層化している。ここでプロセス制御装置は次の制御を行う。

(a)　複数のオゾン発生装置の台数制御

(b)　予備機の自動立上げ

(c)　オゾン発生装置と排オゾン処理装置の連動制御

(d)　オゾン注入量制御（条件に応じた総オゾン発生量の決定と各オゾン発生装置へのオゾン発生量の割付け）

このように複数のオゾン発生装置を群単位で台数制御したりする場合は，単に機側制御盤付きのオゾン発生装置を並置するだけではだめで，階層化した上位のプロセス制御装置が必要である。

また，水平に分散した各処理プロセス単位のプロセス制御装置間ではそれぞれの水位データをやりとりして水位・水量制御を行ったり，各処理プロセスの水質データなどを集めて高度処理プロセスの運転管理を行う。

5　あとがき

上下水道の高度処理技術について主としてオゾン処理を中心に紹介した。上水の高度処理については10年以上も前から検討や実験が行われていたものがようやく実施の段階に入り，今後は相次いで高度処理の建設が続くものと思われる。一方，下水の高度処理については緒についたところであり今後普及してゆくものと考えられる。いずれにしても実設備の建設は始まったばかりで，今後は実設備での運転の実績をもとにさらに技術の進歩を図ってゆく所存である。

参考文献

(1)　厚生省：21世紀に向けた水道整備の長期目標，水道協会雑誌，No.681，p.57-58（1990）

(2)　佐藤和明：高度処理，'91下水道年鑑，p.296-305（1991）

(3)　森岡崇行ほか：横流式オゾン接触池の滞留時間分布特性，水道協会雑誌，No.677，p.11-21（1990）

(4)　森岡崇行ほか：横流式接触池のオゾン吸収モデル，水道協会雑誌，No.682，p.7-17（1990）

(5)　北出弘ほか：大容量新形オゾン発生装置，富士時報，Vol.59，No.4，p.321-324（1986）

(6)　酒井英治ほか：上水道の高度処理とオゾン処理技術，富士時報，Vol.62，No.6，p.419-422（1989）

e-Front runners

＊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。