

<特集>

下水道における高度処理技術の動向

村上 孝雄

日本下水道事業団(戸田市下笹目 5141 E-mail: murakamit@jswa.go.jp)

概要

公共用水域の水質保全や再利用等の目的で、全処理施設の 14%、277 箇所の下水処理施設で高度処理が行なわれている。高度処理プロセスとしては、砂ろ過や生物学的窒素りん除去法が多い。新しい高度処理法としては、膜法やオゾン処理、アナモックス等がある。活性汚泥モデルの活用も有効である。今後は、水域のリスク管理の観点から、微量化学物質を対象とするケースも増えてくると考えられる。

キーワード: 下水の高度処理, 生物学的窒素りん除去法, 膜分離活性汚泥法, オゾン, アナモックス, 活性汚泥モデル

1. はじめに

水質環境基準の達成をはじめとする様々な理由により、下水道における高度処理の必要性は、今後ますます増大してゆくものと考えられる。また、下水道は健全な水循環の要の役割を担っていることから、高度処理の除去対象物質も、有機物や窒素・りん栄養塩類に加えて、今後は難分解性物質や微量化学物質あるいは病原性微生物等が処理対象となってくる可能性が高い。

このように下水道における高度処理の必要性が高まって行く一方で、処理におけるコスト削減や省エネルギーが強く求められており、これに的確に対応することが重要である。今後は、このような厳しい要求を満たす高度処理技術が求められて行くことになる。本稿では、下水道における高度処理の現状と新しい高度処理技術について紹介する。

2. 高度処理の現状

2.1 高度処理の目的と実施状況

下水処理における高度処理とは、活性汚泥法に代表される通常の二次処理により達成可能なレベル以上の処理を行なうことを意味する。高度処理の対象物質としてはBOD、COD、SS等で表現される有機物と窒素・りん栄養塩類がある。高度処理を行なう目的としては、①湖沼、三大湾等(東京湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海)閉鎖性水域の富栄養化防止、②水道水源水域の水質保全、③水質環境基準の達成維持、④下水処理水の再利用がある。平成 16 年度末現在で、高度処理を実施している処理施設は 277 箇所であり、全下水処理施設の 14%にあたる。Table 1に目的別の高度処理実施施設数を示す。但し、目的は重複しているものもある。⁽¹⁾なお、277 箇所の内 39 箇所は、処理水の再利用のみを目的としている。高度処理人口は 1,677 万人であるが、高度処理の普及状況を示す「環境基準達成のための高度処

Table 1 Purposes of advanced treatment and the numbers of facilities

公共用水域の水質保全	
・三大湾(東京湾、伊勢湾、瀬戸内海)及び有明海	175 箇所
・指定湖沼	24 箇所
・水道水源	73 箇所
・その他	55 箇所
処理水の再利用	
	77 箇所

理人口普及率」は全国平均 13%にとどまっているため、「社会資本整備重点計画」では、高度処理人口普及率を平成 19 年に 17%とすることとしている。⁽²⁾

2.2 高度処理プロセス

Table 2に平成 15 年度版下水道統計を基に集計した生物学的高度処理プロセスの箇所数を示す。⁽³⁾箇所数としては、嫌気好気活性汚泥法が最も多くなっているが、同法はバルキング抑制対策として導入されているケースも多いため、必ずしもりん除去を目的として採用しているものとは限らない。嫌気好気活性汚泥法の他には、各種の生物学的窒素除去法が多数採用されている。なお、下水道統計のデータからは明らかではないが、通常、窒素のみを高度処理の対象とすることは考えにくいので、りん除去のために凝集剤を生物反応タンクに添加する同時凝集法が併用されているケースが多いと考えられる。

高度処理としては、この他に有機物除去を目的として二次処理水を対象とする砂ろ過や凝集沈殿があり、特に砂ろ過は実施箇所数が多いが、Table 2 にはこれらは含まれていない。

Table 2 Biological nutrients removal processes and the numbers of facilities

プロセス名	箇所数
嫌気好気活性汚泥法	88
嫌気無酸素好気法	51
循環式硝化脱窒法	36
ステップ流入式多段硝化脱窒法	16
硝化内生脱窒法	7
その他	2

また、生物学的窒素・りん除去プロセスのほかに、オキシデーションディッチにおいても、通常、一池当たり2基設置してある曝気用ローターの高速回転と低速回転の組み合わせにより、好気条件で硝化を行う時間帯と無酸素条件で脱窒を行う時間帯を設定することにより高度な窒素除去が可能である。

2.3 高度処理プロセスの処理目標

窒素・りんの栄養塩類を対象とする場合、その処理目標水質は、窒素については、 $T-N \leq 10\text{mg/L}$ という目標水質の設定が多い。 $T-N$ の内訳までは、設定されていないケースがほとんどであるが、通常は処理水中にアンモニア性窒素がほとんど残存しないことを目標として処理が行われている。一方、りんについては $T-P \leq 0.5\text{mg/L}$ というケースが多い。

3. 新しい高度処理技術

前述のように、現在は、高度処理プロセスとしては、有機物除去のための砂ろ過、栄養塩類除去のためには各種生物学的窒素・りん除去プロセスが中心となっているが、その一方で、最近、新しい高度処理技術が現れてきている。ここでは、日本下水道事業団が現在、研究対象としている高度処理プロセスについて紹介したい。

3.1 膜分離活性汚泥法

膜分離活性汚泥法(MBR)は、活性汚泥法において、従来は最終沈殿池で重力沈降により行っていた固液分離をろ過膜により行なうものである。膜分離活性汚泥法は、産業排水処理、し尿処理、大規模ビル内個別循環等の分野では比較的早くから導入が進んでいたが、下水道では導入が遅れていた。しかしながら、2005年3月末に下水道における膜分離活性汚泥法の第一号施設である福崎浄化センター(兵庫県福崎町)が稼動開始したのを始め、現在、3箇所の施設が

稼動中であり、この数年で小規模施設を中心として10箇所程度の膜分離活性汚泥法施設が稼動するものと予想されている。

Fig.1 に膜分離活性汚泥法の基本フローを示す。生物反応タンクは、無酸素槽と好気槽から構成されており、活性汚泥混合液は、好気槽から無酸素槽へ循環される。これは、好気槽において硝化が進行し、アルカリ度が消費されpHが低下するため、無酸素槽で脱窒を行いアルカリ度の回収を行なうことが目的である。これは、循環式硝化脱窒法と同様なフローであり窒素の除去ができる。窒素除去率は、混合液循環比の関数となる。また、嫌気槽を設置あるいは無酸素槽内に嫌気条件を形成することにより、生物学的りん除去も可能である。

膜分離活性汚泥法は、固液分離を重力沈降によらないため、MLSS濃度の制限を受けず、 $10,000\text{mg/L}$ 程度の高いMLSS濃度での運転が可能である。このことは高度処理という点から見ると、以下のような利点が生じる。

- (1) 硝化に必要なSRTの確保が容易である。
- (2) 硝化・脱窒が速やかに進行する。
- (3) 混合液循環により無酸素槽へ持ち込まれる溶存酸素や硝酸性窒素が速やかに消費されるため、無酸素条件や嫌気条件の保持に有利である。

膜分離活性汚泥法における窒素除去率(η_N)は、循環混合液量と流入水量の比である循環比(R)の関数となり、理論的に以下の式で表される。

$$\eta_N = R / (R+1) \cdots \cdots (1)$$

このため、窒素除去率を高めたい場合には、循環比Rを大きくすれば良い。しかしながら、80%程度の窒素除去率を得たい場合には、これに必要な循環比Rは4となり、流入水量の4倍の循環が必要となる。このため、大規模な施設においては、循環に必要なポンプとその動力が大きくなるという課

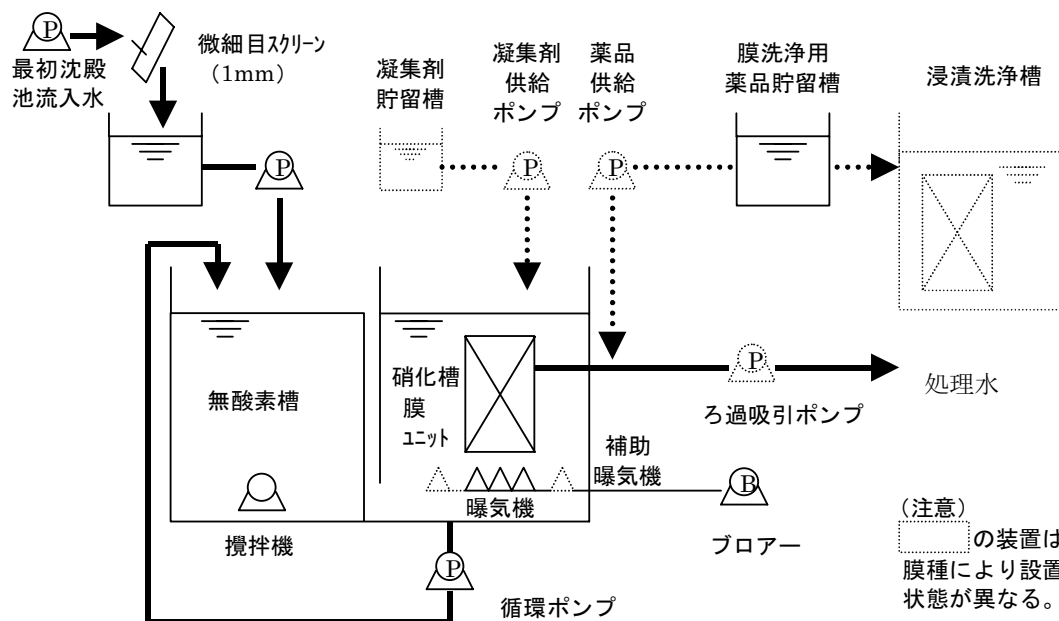


Fig.1 The flow of membrane bioreactor

題があった。この対策として、無酸素槽－好気槽の多段化を行なうことにより、小循環比で高い窒素除去率を得ることができる。この考え方に基づいて、日本下水道事業団では、多段硝化－脱窒プロセスに膜分離を組み込んだ大規模向け高度処理プロセスを開発した。このプロセスのフローを Fig. 2 に示す。

本プロセスでは、三段目の好気槽が膜分離槽であり、硝化槽を兼用する。その後に後脱窒槽を設置し、返送汚泥は後脱窒槽から返送される。また、後脱窒槽から前段の脱窒槽にも循環返送を行なうラインを有する点が特徴である。本プロセスでは、単段MBRと比較して小さい循環比(R=2程度)で約 80%の窒素除去率が得られる。また、従来の高度処理法(ステップ流入多段硝化－脱窒プロセス)と比較して、以下のような利点がある。⁽⁴⁾

- ①最初沈殿池、最終沈殿池、消毒施設、砂ろ過施設が不要となるため、必要敷地面積が約1/2となる。
- ②最初沈殿池無しで、低水温期でも安定した窒素除去ができる。
- ③後脱窒槽へのメタノール添加－脱窒により、返送汚泥中に硝酸性窒素が含まれず、第一段無酸素槽が嫌気槽として機能するため、生物学的りん除去が可能である。
- ④後脱窒槽に添加したメタノールは、前段脱窒槽への循環により脱窒に有効に利用される。
- ⑤汚泥発生量が低減される。

本法は、今後、高度処理導入が必要であるが従来法では必要敷地面積が不十分であるようなケースでの活用が期待される。

3.2 オゾン酸化・促進酸化

生物学的処理による有機物の分解には限界があり、生物学的に難分解性の有機物は下水処理水中に残存する。このような難分解性有機物は、処理水のCODとして測定され、また、外観上は処理水の着色となる。COD規制がある場合や処理水の再利用を行なう場合には、このような残存CODや色度の原因となる残存難分解性有機物の除去を行なう必要がある。この目的に対して効果的な処理技術の一つとしてオゾン処理がある。また、オゾン処理と過酸化水素や紫外線照射等を併用する促進酸化法(AOP)により、オゾンの分解に

伴うHOラジカルの生成を促進し、より効率的に残存難分解性有機物の分解を行なうことができる。⁽⁵⁾さらに、オゾン処理後に生物活性炭(BAC)を通すことにより、一層の除去効果が得られる。

一方、水環境中に残存する微量化学物質が問題になってきている。その一つに内分泌攪乱物質があるが、特に、天然および合成のエストロゲン(女性ホルモン)は、ノニルフェノールなどの内分泌攪乱作用が疑われる合成化学物質と比較して、その内分泌攪乱作用が強く、また、下水処理過程において比較的除去され難いため下水処理水中に残留しやすい傾向がある。このため下水処理水中のエストロゲン様活性は、天然エストロゲンの寄与が高く、放流先の魚類の雌性化等、水環境における影響が懸念されている。したがって、下水道において水環境に対する内分泌攪乱物質のリスクをより一層低減するためには、下水処理場における効率的かつ効果的なエストロゲンの除去が求められる。

オゾン処理は、下水処理水中に残存するエストロゲンの除去に有効であり、3mg/L 程度のオゾン消費量で効果的に分解できることがわかってきた。⁽⁶⁾また、最近では内分泌攪乱物質に加え、PPCPs(医薬品及び身体ケア用品)の環境水中への残存が問題視されてきている。

オゾン処理は、現在、下水道では約 40 箇所採用されており、その目的は処理水の場外再利用のための処理や脱色が主である。⁽⁶⁾しかしながら、今後は、水環境中でリスクとなる微量化学物質の分解除去にもオゾン処理の必要性が高まってゆくものと思われる。

3.3 嫌気性アンモニア酸化(アナモックス)

生物学的高度処理法は、活性汚泥法の運転条件を若干変えることにより、窒素・りん除去が可能となる優れた方法であるが、以下のような課題がある。

- (1)硝化に必要な空気量が大きい。
- (2)排水中に脱窒に必要な有機物が十分に無い場合には、メタノール等の外部基質が必要となる。

比較的最近になって発見された生物学的反応であるアナモックス反応は、亜硝酸性窒素とアンモニア性窒素により以下の式により脱窒が行なわれる。このため、通常硝化－脱窒プロセスと比べて次のような利点がある。⁽⁷⁾

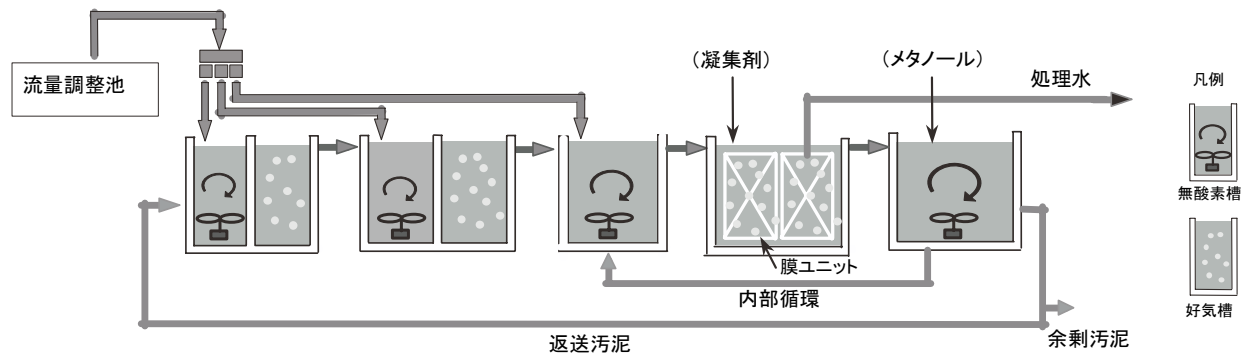
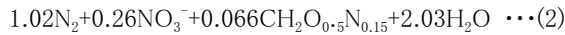
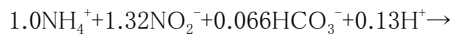


Fig.2 The flow of multi-stage biological nutrient removal process with membrane separation



- (1)アンモニア性窒素の半分を亜硝酸性窒素まで酸化すればよいため、必要酸素量が低減される。
- (2)脱窒に有機物は必要ないため、外部基質の添加は不要である。
- (3)独立栄養細菌による反応であるため、汚泥発生量が少ない。

一方で、この反応には排水中のアンモニア性窒素濃度が高く、有機物は比較的少ないことが必要であり、また水温が低いと反応が進まないといった制約がある。現在のところ、アナモックスプロセスは、このような制約条件から嫌気性消化槽脱離液や乾燥排ガススクラバ排水等への適用が想定されているが、省エネルギー・省コストの窒素除去法として、今後の実用化や適用範囲の拡大が期待される生物反応である。(Fig. 3)

3.4 高度処理の制御と活性汚泥モデルの活用

生物学的窒素除去法では、まず、排水中のアンモニア性窒素を硝酸性窒素にまで酸化する必要があることから、硝化を確実に進行させるために空気量を多めにし、高めのDO濃度で運転されていた面があった。このため、供給空気量の適正な制御により過大な曝気が避けられ、送風動力の削減・コスト低減が可能であるばかりか、循環液や返送汚泥中に含まれる溶存酸素量が低減されることによって、脱窒に必要な無酸素条件の確保や生物学的りん除去に必要な嫌気条件の確保に有利となり、処理の安定化が期待できる。

高度処理プロセスの制御としてはDO制御があるが、最近では、新しい高度処理プロセス制御手法が開発されてきている。日本下水道事業団では、高度処理の運転管理コストと所要エネルギーの削減を目指して、平成15年度から民間企業3者(1社+2グループ)と共同研究を実施してきたが、その成果として、ORP制御、プロセス協調制御、硝化活性検出器を用いる制御方式が開発されてきている。これらの新しい制御により、送風量のきめ細かい制御と、それによる運転管理コスト及びエネルギーの削減が期待されるところである。

一方、これらの新たな制御方式においては、活性汚泥モデル(ASM)の制御への活用も検討されている。活性汚泥モデルは、活性汚泥プロセスの挙動をコンピュータ上でシミュレーションするもので、活性汚泥微生物反応に関する知見の蓄積とコンピュータの性能向上が相俟って、良好な精度での処理水質の予測が可能となってきている。活性汚泥モデルは、特に高度処理プロセスにおける窒素やりんの挙動のシミュレーションに有効であり、高度処理プロセスの最適運転条件決定や省エネルギー等、様々な用途に活用することができる。

また、活性汚泥モデルは設計支援にも利用できる。今後、既設施設の再構築に伴う高度処理化のケースが増加してくると予想されるが、このような場合での基本設計のチェックに活性汚泥モデルは有効であり、活性汚泥モデルの活用は、

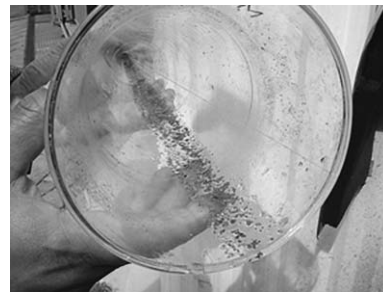


Fig. 3 Granule of anammox bacteria

今後の高度処理の効率的な実施に不可欠なものとなる。

日本下水道事業団では、活性汚泥モデルの実務における適正な利用を促進することを目的として、「活性汚泥モデルの実務利用に関する技術評価」を実施し、平成18年2月に活性汚泥モデルの運転管理支援及び設計支援における利用に関する基本的な考え方、手順、留意事項をまとめている。(8)

4. おわりに

高度処理の除去対象物質は、これまでの公共用水域の水環境保全のための有機物や栄養塩類に加えて、今後は、水環境のリスク管理の観点から内分泌攪乱物質を始めとする微量化学物質やウイルス等にも拡大して行きそうである。これらの物質は、極めて微量でも水生生物や人間の健康に影響を及ぼすことから、下水の高度処理は、これから ppm から ppb の領域に踏み込んで行くことになる。

有機物や栄養塩類に加えて、さらに微量化学物質等の除去を行うことは、高いレベルの技術が要求されるとともにコストもかかるが、健全な水循環のためには、その要である下水道が汚濁物質の除去において果たすべき役割への期待は極めて大きい。一方で、自治体の財政状況には厳しいものがあり、また地球環境保全への取り組みには猶予が許されないことから、高度処理のコスト削減、省エネルギー化に対して、一層の技術開発努力が期待されている。

[参考文献]

- (1) (社)日本下水道協会「日本の下水道」平成17年度版
- (2) 榊井正将「わが国の下水道の現状と最近の動向について」、*環境技術*, Vol.35, No.1, p.29-34, 2006
- (3) (社)日本下水道協会「下水道統計」平成15年度版
- (4) 太田秀司、村上孝雄、瓜生昌弘「膜分離を適用したステップ流入多段硝化脱窒法の開発」*水環境学会誌*, Vol.28, No.11, pp.689-696, 2005
- (5) 宍田健一「オゾン/過酸化水素処理法による廃水処理システムの開発に関する研究」*京都大学学位論文*, 2002
- (6) 村上孝雄、橋本敏一「安全性確保のための下水処理技術開発に関する調査」*日本下水道事業団技術開発部報*(CD-ROM)2004
- (7) 徳富孝明、「anammox プロセス実用化の展望」*水環境学会誌*, Vol.27, No.4, pp.453-457, 2004
- (8) 日本下水道事業団技術評価委員会「活性汚泥モデルの実務利用の技術評価報告書」平成18年2月