

総説

し尿高度処理技術の発展と技術的展望

桜井 敏郎, 田所正晴, 野池達也*
(環境工学部, *東北大学工学部)

Review

Development and Technical View of Advanced Nightsoil Treatment Systems

Toshiro SAKURAI, Masaharu TADOKORO, Tatsuya NOIKE*
(Environmental Engineering Division, *Department of Civil Engineering, Tohoku University)

キーワード：し尿処理, 高度処理技術, 高負荷脱窒素処理方式, 限外ろ過, 無希釈処理

1. はじめに

わが国におけるし尿処理は、1954年に清掃法で市町村による汲み取りし尿の収集、処理が義務づけられたことにより本格的に始まったが、下水道が整備されるまでの補完的なシステムとして位置づけられていた¹⁾。

初期の処理技術は嫌気性消化方式、化学処理方式、酸化処理方式を中心に発展し、さらに1968年頃に湿式酸化処理方式が加わり、放流水質は清掃法により20倍希釈でBOD30mg/l以下、SS70mg/l以下、大腸菌群数3,000個/ml以下と定められていた。しかし、公害が社会問題化するにつれて、迷惑施設であるし尿処理施設を建設する際に厳しい放流水質が要求されるようになった。これらの要求に応えられる無公害型の処理技術を開発するため、プラントメーカーを中心に積極的な研究開発が行われてきた。

し尿高度処理(以下、本文では三次処理を含む広義の高度化処理を指すものとする)の研究開発が始まってから約35年余りが経過した。研究開発にあたっては、要求される処理水質を満足させるために多くの用排水処理法がし尿処理に導入され、適用化試験を繰り返し行いながら処理技術は飛躍的に発展してきた。この結果、今ではし尿や浄化槽汚泥を無希釈・高負荷で処理できる膜分離高負荷脱窒素処理方式が確立され、放流水はBOD、SS、COD、T-Nがそれぞれ10mg/l以下、T-P1mg/l以下

下、色度30度以下という非常に良好な水質が得られるようになった。このような処理技術発展の背景には、社会的な要求に応えられる処理システムを開発しようとするプラントメーカーの開発競争と、開発した処理システムを新技術として認める厚生省の国庫補助制度に負うところが大きい。現在のし尿処理技術は、わが国独特の高度処理システムとして世界に誇れるものである。

し尿高度処理技術の発展段階を大別すると、次の3段階に分けることができる。

- ① 第1段階：環境保全型し尿三次処理技術の開発
- ② 第2段階：低希釈型生物学的脱窒素技術の開発
- ③ 第3段階：膜分離型高負荷脱窒素技術の開発

本文では、これらの発展段階に沿ってし尿の高度処理技術を解析し、その結果をもとに今後の技術的な課題を展望する。

2. 環境保全を目指したし尿三次処理技術の開発

2.1 三次処理技術開発の背景

し尿処理施設の放流水に対して環境保全上から水質改善を要求する動きが強くなったのは、1970年に水質汚濁防止法が制定された後で、その当時嫌気性消化方式および好気性消化方式の放流水質(約200施設)を調査した結果²⁾³⁾⁴⁾では、平均BOD31mg/l、COD59mg/l、SS47mg/l、色度214度で、一部の処理施設を除けばBODはほぼ基準値を満足している状況であった。

しかし、法律以前の問題として、処理施設の建設には放流先の利水団体や住民との合意を得る必要があり、BODのほかにCOD、SS、色度等の高度処理が求められる計画事例が次第に多くなった⁵⁾。なかでもCODはBODより除去率が低く、規制の強化につれて除去が求められ、色度も感覚的に放流水の色相がし尿を連想させるため、高度処理が強く要望された。

いずれの水質項目も従来の一、二次処理では十分に除去できなかったため、三次処理の研究開発が各地で行われた。当時下水道でも三次処理の研究に着手していたが、し尿処理はいち早く実施の建設に向けた動きが始まった。実用化の段階で研究されたのは、凝集分離、砂ろ過、活性炭吸着、オゾン酸化、接触酸化等の処理法であった。

2.2 凝集分離法

凝集分離法は、し尿処理ではし尿に直接凝集剤を添加して固液分離する化学処理方式が既に多くの実績があり、これを三次処理に適用することによりBOD、SS、COD、リン等の除去に効果があることが知られていた。当初は嫌気性消化方式や好気性処理方式の三次処理法の一つとして実用化されたが、1973年の瀬戸内海臨時措置法の制定によるCOD規制を満足するために普及した。1975年以降は10倍希釈でBODとともにT-Nが除去可能な低希釈二段活性汚泥処理方式が開発されたのに伴い、凝集分離法は1979年にし尿処理施設構造指針の三次処理の一プロセスとして正式に国庫補助の対象技術となった。

凝集分離法のうち当初研究されたのは凝集沈殿法である。嫌気性消化方式や好気性処理方式の二次処理水の性状に適する凝集剤の種類、添加量、固液分離性、処理効率等について多くの基礎実験が行われた⁶⁾。凝集剤は石灰、硫酸バンド、PAC、塩化第二鉄等の凝集効果が検討され⁷⁾⁸⁾⁹⁾、放流水のBOD、SSは10mg/ℓ以下が期待できるが、COD、色度については二次処理水の性状、希釈倍率、凝集時のpH等の条件によって除去率に限界があることが報告された⁸⁾¹⁰⁾。リンの除去には凝集分離法は最も有効な方法で、三次処理でリンを90%以上除去することが可能で、放流水のT-Pは1mg/ℓ以下が得られた¹¹⁾¹²⁾。

その後リン除去を目的に生物学的脱リン法が検討された例はあるが、凝集分離法はリン、CODを含む多くの水質項目に対して除去効果があるため、リン除去に関してそれ以外の処理技術はあまり研究されず、ほぼ完成した技術として現在でも評価されている。

凝集沈殿の適用化試験は、嫌気性消化方式の二次処理水に対して凝集沈殿・砂ろ過・活性炭吸着を組み合わせた処理システム(処理能力：120m³/日)で長期間行われ

た報告¹³⁾があり、凝集加圧浮上については、好気性消化方式の二次処理を凝集加圧浮上と砂ろ過を組み合わせた実施の報告¹⁴⁾がある。

その後各種の生物学的脱窒素処理方式に凝集分離法を適用した成果をもとに、1988年に全面改定されたし尿処理施設構造指針において、混和槽+凝集槽+凝集沈殿槽(浮上分離槽または濃縮スクリーン)の処理システムが採用された¹⁵⁾。さらに高負荷脱窒素処理方式が指針化された時は、凝集分離法は脱窒素処理水の二次処理法に採用されており、現在においてもし尿処理では重要な処理法である。

2.3 活性炭吸着法

活性炭吸着法は、活性炭の吸着能が低下すると処理水質が次第に悪化し再生が必要であること、維持管理コストが高いことなど、主に管理上の理由から一時期はオゾン酸化法より施設数が少なかった。しかし、COD除去に有効であるため、COD規制が厳しい地域には不可欠の処理法であり、また1980年以降は低希釈・高負荷処理システムが次第に多くなるにつれて、凝集分離法と組み合わせ導入する施設が多くなった。

活性炭吸着法を適用する場合、使用する最適な活性炭の選択とその必要量は、吸着等温線による吸着能試験で評価¹⁶⁾¹⁷⁾し、カラム実験等で破過曲線を作成して吸着速度を比較する方法により検討する¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾。

活性炭を用いた高度処理システムには、二次処理のばっ気槽に粉末炭を添加し、活性汚泥による生物化学的な酸化作用と物理化学的な吸着作用を併用した方法を実用化した例²¹⁾が一部あるが、多くの施設では凝集分離と砂ろ過の設備を前置し、その後粒状炭を充填した吸着塔を直列または並列に配置した固定床方式による三次処理システムが用いられた。

凝集沈殿・砂ろ過・活性炭吸着を組み合わせた実証試験によれば、4塔メリーゴーランド式の活性炭吸着塔を用いて、S V 3.6m³/m³・時の条件で3カ月処理した結果は表1のようで、前処理の凝集沈殿による除去率が非常に高く50%に達していた。砂ろ過までの処理水質は二次処理水の水質変動の影響を受けやすいが、活性炭吸着による処理水質は変動が少なく良好であった¹³⁾²²⁾。

2.4 オゾン酸化法

オゾン酸化法は、一部の処理施設においてオゾンの強い酸化作用施設の脱臭に利用していた実績があるが、二次処理水の脱色に適用した事例はなかった。オゾンで脱色に適用する試みがなされたのは、①新たな汚泥の生成がない、②運転操作が容易、③活性炭吸着法より脱色効

表1 凝集沈殿+砂ろ過+活性炭吸着の処理機能¹³⁾

項 目		二 次 処理水	凝 沈 処理水	砂ろ過 処理水	活性炭吸着処理水			
					第 1 塔	第 2 塔	第 3 塔	第 4 塔
COD(mg/ℓ)	平 均	59	44	40	30	28	26	19
	標準偏差	14	13	13	13	14	13	9
BOD(mg/ℓ)	平 均	35	19	12	12	12	10	9
	標準偏差	13	12	5	5	4	4	4
色 度(度)	平 均	285	184	155	95	84	65	39
	標準偏差	54	58	64	54	46	33	21

率が安定している、④凝集分離法のように処理後に塩類が増えない、等の特徴によるものであった²³⁾。

二次処理水の着色成分はフミン酸等の高分子物質や胆汁色素によっているが、その色度は処理方式や希釈倍率によって異なり、20倍希釈では平均204度、10倍希釈では500度²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾で、これを色度30度以下(無色)にするために必要なオゾンの注入量や処理条件について多くの研究が行われた²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾。これらの研究結果によると、オゾン注入量50~100mg/ℓ、接触時間20~30分で色度30度以下の放流水質が得られるが、オゾンは二次処理水中のNO₂-Nの酸化に優先的に消費されるため、脱色に必要なオゾン注入量はNO₂-N濃度が高い場合は増加する³⁰⁾。

オゾン酸化法による脱色の高度処理設備が初めて登場したのは1974年で²⁵⁾、凝集分離+オゾン酸化+砂ろ過を組み合わせた方式が多く建設された。標準脱窒素処理方式では、凝集分離を併用した場合の必要オゾン量は20~50mg/ℓ程度で、オゾン反応槽の滞留時間は20~40分が標準である¹⁵⁾。

3. 低希釈型生物学的脱窒素技術の開発と発展

3.1 窒素除去の必要性

公共用水域における富栄養化の原因物質である窒素、リンのうち、リンについては凝集分離法で除去できる目途がついたため、窒素除去が次の課題であった。窒素は、上水道では藻類によるろ過池の閉塞、浄水用の薬剤量の増加、異臭味物質の発生等の原因となり、農業では灌漑用水への流入に伴う窒素過多、水産業ではNH₄-Nによる漁業被害が生じるため、その除去が要望された。し尿はもとも窒素の含有量が多く、このためばっ気槽における不完全な硝化等で沈殿槽において汚泥浮上の原因となったり、処理水のNO₂-NでCODが異常に高くなる現象が生じる。また凝集分離で弱酸性にpHコントロールする際に、NH₄-Nにより凝集剤の使用量が増加し、オゾン酸化ではNO₂-Nが色度の除去効果に悪影響を与える³¹⁾など、これらの障害を排除するため窒素除去技術の開発が不可欠な状況であった。

環境庁が二次処理水質について行った調査³²⁾によれば、T-Nは平均118.6mg/ℓ(最低0.46~最高406mg/ℓ)、T-Pは平均10.88mg/ℓ(0.07~30.1mg/ℓ)で、工場排水と比べて著しく高い状況であった。窒素成分では一般にNH₄-N濃度が高く、塩素イオンやBODの濃度と比較的よく相関しており、NH₄-N濃度はBODの約3倍であった³³⁾。窒素除去は三次処理として要望され、開発の目標水質はT-N10mg/ℓ以下であった。

3.2 古典的な生物学的脱窒素方式

最初にし尿の窒素除去施設が稼動したのは1962年のことで、嫌気性消化方式の脱離液を対象に硝化・脱窒が行われた³⁴⁾。その後、生物学的脱窒素法以外ではスチームによるアンモニアストリッピング法³⁵⁾やゼオライトを用いた選択的イオン交換法³⁶⁾が一部の施設に適用された例があるが、いずれの方法もNH₄-Nの除去が主体で他の窒素成分は除去されないため、これ以降の技術開発は生物学的脱窒素法に限定されて行われた。

生物学的脱窒素法のシステムが最初にまとめられたのは、脱窒に必要な有機炭素源を活性汚泥の細胞内物質に求め、細菌の内生呼吸により脱窒を行う Wuhrmann 法³⁷⁾³⁸⁾と、有機炭素源を流入基質または有機性排水に求めて脱窒活性を高め、高い反応速度が得られる Bringmann法³⁹⁾であった。これらの処理法をもとに、BOD酸化菌、硝化菌、脱窒菌を培養する設備形式により基本的には三つの処理システムに分類された。すなわち、①硝化槽・脱窒槽・沈殿槽の同一汚泥内で三つの細菌群を培養する単相汚泥方式、②硝化槽・沈殿槽と脱窒槽・沈殿槽に区分し、三つのうち一つの細菌群を別の汚泥で培養する2相汚泥方式、③ばっ気槽・沈殿槽、硝化槽・沈殿槽、脱窒槽・沈殿槽に3区分し、それぞれ別の汚泥を培養する3相汚泥方式で、それぞれの方式についてその特質と適用性が検討された。

1973年に処理能力60kℓ/日の3相汚泥方式の施設が初めて建設され⁴⁰⁾、嫌気性消化脱離液を低希釈で活性汚泥処理したのち硝化・脱窒を行った結果、処理水の

$\text{NH}_4\text{-N}$ は $5 \text{ mg}/\ell$ 以下が得られた。3相汚泥方式は個々の反応プロセスを独立して管理できるという利点があるが、設備の必要容積が大きく使用薬剤量も多くなるため、設備の合理化と薬剤量の節減を目的に2相汚泥方式の施設(処理能力 $90 \text{ k}\ell/\text{日}$)が建設された⁴¹⁾。[ばっ気槽・沈殿槽]+[硝化槽・脱窒槽・沈殿槽]という設備構成で、脱窒工程で生成したアルカリを硝化工程に返送して使用するため、pH調整用の薬剤消費量は3相汚泥方式の $1/4$ 以下であった³⁴⁾。

遠矢⁴²⁾は、生物学的脱窒素法についての詳細な基礎研究を行い、その成果はそれ以降の関連研究に大いに貢献した。また村田⁴³⁾は実用規模での生物学的脱窒素処理法の研究結果を報告している。

3.3 経済的な生物学的脱窒素処理方式の開発

1) 開発の考え方

古典的な生物学的脱窒素処理方式では、硝化槽におけるpHコントロールと脱窒槽における水素供与体の添加が重要で、高濃度排水の場合には処理を制御するためのアルカリ剤と水素供与体のメタノールを多量に必要とするため、一般に薬剤費が高くなる。さらに、硝化槽では多量の酸素を必要とするので、供給用の動力費が通常より割高となる等の課題があった。このためプラントメーカーを中心に、省エネルギーでBODやSSの除去と同時に窒素を除去できる新しい処理技術の開発が精力的に行われた。それまで構造指針にはBOD除去を主体とした技術が取り入れられており、BODと窒素除去を一体化した技術は認可されていなかった。指針外技術の認可を受けるには、処理性能を実証するために十分な実験を行う必要があり、現在は原則として $10 \text{ k}\ell/\text{日}$ 規模の施設で1年間の実証試験が義務づけられている。

経済的処理システムの基本的技術は、Bringmann法を進展させ排水中のBODを炭素源として利用するLudzack⁴⁴⁾が開発した循環法があるが、その後Barnard⁴⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾は硝化液循環方式やその他の改良法について実験的に検討している。

竹田⁴⁸⁾⁴⁹⁾は、し尿を用いてLudzack法について長期の実験を行い、最適な処理条件を検討した。Ludzack法でもかなりの脱窒効果が期待できるが、循環比やし尿のBOD/Nによって一部の $\text{NO}_x\text{-N}$ が処理水中に流出する。

経済的な処理システムの考え方は、脱窒工程で生成するアルカリを硝化工程の中和剤として利用することと、脱窒工程における水素供与体にメタノールの代わりにし尿中のBODを利用する点にある。硝化・脱窒におけるアルカリの収支は、硝化工程で消費されるアルカリと、脱窒工程で生成するアルカリは等量で、pHが高い脱窒液

を硝化槽に流入させて中和することが可能となる。脱窒には $\text{NO}_x\text{-N}$ 1 kg に対してメタノール $2.5 \sim 3 \text{ kg}$ を用いる。これをし尿のBODで代用すると必要BOD量は窒素の約 2.1 倍である。

2) 各種の改良型生物学的脱窒素処理法

指針外技術として多くの処理法が開発されたが、その代表的な処理方式は循環式脱窒素法、循環ばっ気式脱窒素法、ステップ脱窒素法、二段脱窒素法である。(図1)

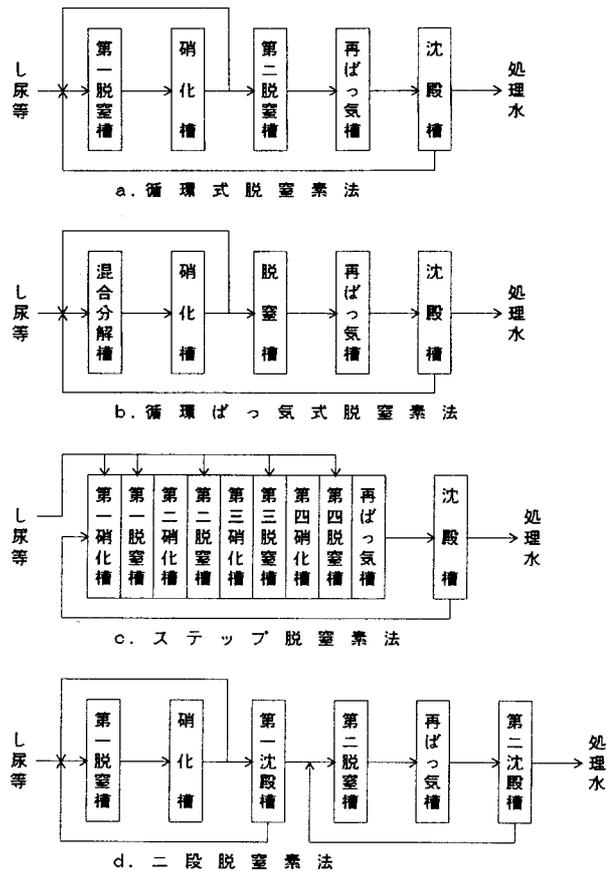


図1 代表的な改良型生物学的脱窒素法

循環式脱窒素法は硝化液循環タイプで、従来一段であった脱窒工程を二段とし、硝化槽の前後に第一脱窒槽と第二脱窒槽を設ける。本方式の特徴は、硝化槽で生成される $\text{NO}_x\text{-N}$ を大量に第一脱窒槽に循環し、流入するし尿のBODを水素供与体として脱窒する。残留した $\text{NO}_x\text{-N}$ が処理水中に流出するLudzack法の欠点を補うため、第二脱窒槽でメタノールを用いて脱窒される。

これらの特徴により、メタノールの使用量が従来の処理法と比べて大幅に節減出来ること、硝化槽に供給される酸素は $\text{NH}_4\text{-N}$ の酸化にのみ消費されるのでばっ気動力が節減されること、第一脱窒槽で生成したアルカリが硝化槽に流入するため、中和用のアルカリが不用になること、等の利点がある。循環式脱窒素法は遠矢⁴⁶⁾により研究され、最初の施設が1976年に建設された。

循環ばっ気式脱窒素法は、好気性消化槽においてBOD酸化のほか硝化と脱窒反応が同時に起こりうる事が確認され⁴³⁾、T-Nが効率よく除去される現象をもとに開発された方式である。本方式は循環式脱窒法の第一脱窒槽の代わりに混合分解槽を設け、空気攪拌によりBOD除去のほか硝化・脱窒を同時に行うが、好気・嫌気ゾーンを明確に分けないのが特徴である。さらに、硝化・脱窒のあと三次処理として凝集分離を行う場合、その凝集汚泥を混合分解槽に返送し、余剰汚泥は沈殿槽からの引き抜き汚泥として一本化している。この方式は空気吹き込み条件下での脱窒であることから、好気性脱窒素法とも呼ばれた。松田ら⁵⁰⁾は好気性脱窒素の機構について研究した。

ステップ式脱窒素法は、処理槽を8分割して脱窒と硝化を交互に4回ずつ行い、し尿を四つの脱窒槽に分割注入するとともに循環法の循環液の代わりに硝化・脱窒を繰り返すことにより、アルカリの回収と水素供与体の節減を図っている。

二段脱窒素法は、プロセス全体を脱窒反応に用いる有機炭素源の種類によって二分割し、第一脱窒工程は第一脱窒槽・硝化槽・第一沈殿槽から成り、し尿中のBODを有機炭素源として70~80%のT-Nを除去する。ついで第二脱窒槽・再ばっ気槽・沈殿槽から成る第二脱窒工程でメタノールを用いて脱窒する。このように二段で脱窒素することにより、し尿およびメタノールを資化するそれぞれの生物反応を最適条件に設定することが出来るのが特徴である。

これらの指針外技術の開発によりBODと窒素の同時除去が可能になった結果、施設の運転管理が著しく容易になった。それまでは低負荷や高水温時に硝化が起り、沈殿槽の汚泥浮上、ばっ気槽のpH低下、亜硝酸の蓄積によるCODの増加等、運転状態が不安定になりやすかったが、このようなトラブルは非常に少なくなり処理水質も良好になった³⁴⁾。

1979年に改正された構造指針において、循環式脱窒素法を基本にした10倍希釈の低希釈二段活性汚泥処理方式(以下、「低二方式」とする)という名称で指針化技術となり、嫌気性消化処理方式等の旧世代の処理法に対して、新世代の処理法が確立した。

4. 膜分離型高負荷脱窒素技術の開発と発展

4.1 高負荷処理に対する開発の期待

1978年に高性能のばっ気装置を有する最初の低希釈高負荷処理による指針外施設が認められた⁵¹⁾のを契機に、高負荷処理に向けた技術開発がさかんに行われるようになった。

低二方式の施設においても、実際には5倍希釈以下で良好な放流水質が得られている事例⁵²⁾⁵³⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾⁵⁶⁾が報告され、生物反応槽のコンパクト化(高容積負荷化)と、3倍以下の超低希釈処理への開発指向が出てきた。究極の開発目標は無希釈処理技術にあったが、これは希釈水が確保出来ない立地条件への対応と、放流量を最小限にとどめたいという要望によるものであった。一方、高負荷処理は機能が高いが十分な管理と高塩類による腐食に留意する必要性が指摘された⁵⁷⁾。

無希釈によるコンパクト化は、低二方式の運転実績から可能なことが示されていたが、解決すべき課題としては、①高MLSSを保持し、酸素供給性能が高いばっ気装置の開発、②超低希釈化による異常な昇温と発泡に対する対策、③COD、色度等除去しにくい項目の対応、④汚泥生成量の減少と運転管理コストの節減、等があげられた⁵⁸⁾⁵⁹⁾。

高MLSS濃度の保持は槽容量の縮小に不可欠の条件であるが、容積負荷を高く設定しても、BOD-MLSS負荷を極端に高くすることは不可能で、一般に負荷を経験上0.4kg/kg・日以下に設定する必要がある。それにはMLSS濃度を低二方式の6,000mg/lから、固液分離装置の機能を高めて12,000~20,000mg/lに高めることが開発目標となった。

ばっ気装置の高性能化については、従来から使用しているばっ気装置の性能は一般に酸素移動速度が0.05kg-O₂/m³・時前後⁵¹⁾であったため、高濃度なし尿を処理するには希釈して濃度を下げるか、槽容積を大きくし反応時間を長くする方法が採用されてきた。このため高性能なばっ気装置の開発が必要であった。

生物反応槽における水温の異常な上昇は、気温の上昇と低希釈による生物反応時に起り、反応槽の発生熱と流入熱の和が流出や放熱よりも大きいことに原因している。し尿のBOD酸化と硝化に伴う発生熱は50~60Mkcal/kl⁵⁾で、無希釈で処理した場合は42~45℃に達する。生物活性に対する高温の影響については、40℃以上になるとアンモニア毒性が強まり、硝化菌の活性が低下する⁴²⁾ため、冷却装置を設置して夏季は水温を35℃程度に下げる必要がある。また高性能なばっ気装置による強いばっ気や生物活性の変化により、粘度が高く細かい泡が発生しやすいため消泡対策も必要となる。

4.2 高負荷脱窒素処理方式

発展段階における高負荷処理技術は、一次処理に低二方式またはそれに準じた生物脱窒素法を採用するメーカーが多く、低二方式以外では単一槽で硝化と脱窒を行う回分式や前ばっ気槽を用いる方式等であった。二次処

凝集分離法が一般に用いられていた⁶⁰⁾。

生物反応槽はばっ気装置との組合せで形状が異なるが、一部のメーカーを除くとほとんどが酸素溶解効率が高い水深7~10mの深槽タイプが採用された。ばっ気装置はポンプ循環式、空気注入式、回転空気分散式、加圧式、酸素注入式など、酸素供給能力が従来型より10数倍高い独特のものが使用された結果、生物反応槽の容量は処理し尿量Qに対して5~10Qで、BOD容積負荷は3~10kg/m³・日の範囲が多かった⁶⁰⁾⁶¹⁾。発泡対策には反応槽の余裕高を十分とり、さらに羽根などの回転による強いせん断力で泡を破碎する各種の消泡装置や混合液をポンプで加圧して液面に噴射して消泡する方法のほか、消泡剤が用いられている。

以上の諸技術に加えて、高負荷処理では高MLSS濃度を保持するため混合液の固液分離装置を開発することが重要であった。開発当初は重力分離型や浮上分離型等の固液分離装置が使われた⁶²⁾が、次第に分離機能が高い遠心濃縮機による機械分離型に移行した。遠心濃縮機を用いることによりMLSS15,000~20,000mg/l、返送汚泥濃度30,000~50,000mg/lを保持することが可能となった⁵⁹⁾。

このように高負荷処理法は指針外技術として積極的に開発が行われ、技術的に固まったため1988年に希釈倍率3倍以下で処理する高負荷脱窒素処理方式(以下、「高負荷方式」とする)として指針化された。同時に低二方式は標準脱窒素処理方式(以下、「標準方式」とする)という名

称に変わった。

4.3 無希釈・膜分離型高負荷脱窒素処理方式の開発

1) 限外ろ過膜を導入した高負荷処理技術

遠心濃縮機等の代わりに分離膜を用いて高濃度の活性汚泥を直接固液分離し、高度なる過性能によって安定した処理水質を得る新技术が開発された。技術開発の対象になった分離膜は限外ろ過膜(以下、「UF膜」とする)で、その他の膜では一部の施設で逆浸透膜を用いて処理水を再利用している例がある。

UF膜による活性汚泥の分離は1970年に米国で最初に報告⁶³⁾されたが、わが国では1979年頃からビル排水の再生利用に適用してきた実績がある⁶⁴⁾。処理規模10kl/日の施設で最初にUF膜による高負荷処理の実証試験が行われたのは1979年のことで、その成果をもとに1986年初の膜分離型高負荷方式の処理施設(40kl/日)が建設された⁶⁵⁾。

膜分離型高負荷方式は現在のところ指針外技術になっているが、固液分離にUF膜を採用したこと以外は構造指針の高負荷方式と基本的に同じである。本方式は大別すると図2に示す3種類で、一般にはUF膜を二段に設置する例が多く、一段目は高負荷で硝化・脱窒反応を終了した生物汚泥の固液分離用として、二段目はCOD、色度、リン酸等を除去する凝集汚泥の固液分離用である。凝集汚泥を固液分離した処理水は、活性炭吸着によりCOD、色度等を高度処理する⁶⁶⁾。

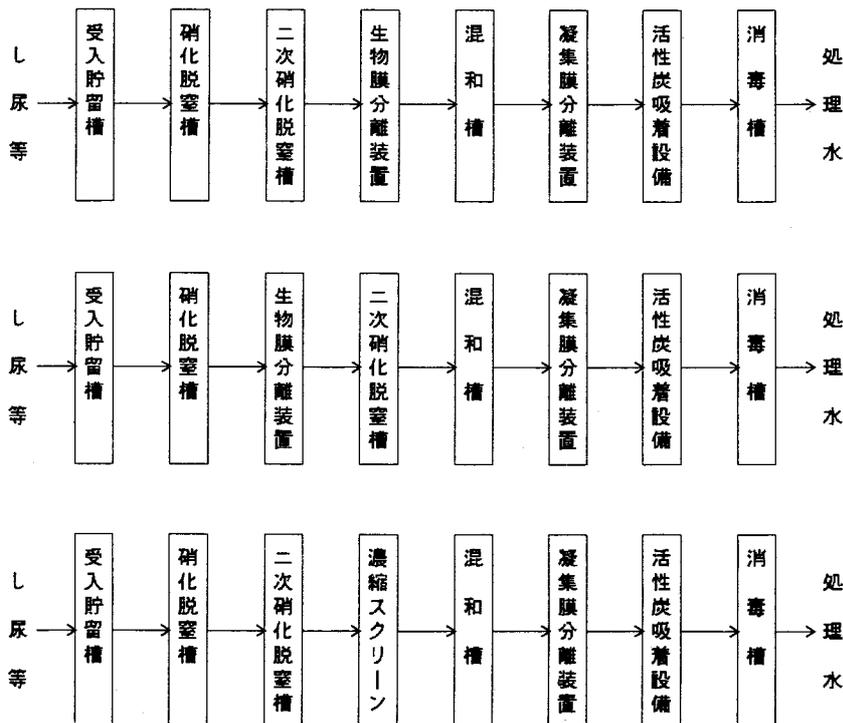


図2 膜分離型高負荷脱窒素処理方式⁶⁶⁾

2) 硝化・脱窒槽設備

それぞれの処理方式により反応槽の構造、酸素供給方法、硝化・脱窒方法等が異なるが、大別すると、①単一槽で硝化・脱窒反応をサイクルで繰り返し、し尿は回分投入する、②反応槽内を嫌気部と好気部に分けて硝化と脱窒を行う、③その他の方式(反応槽を複数に分割し、硝化・脱窒を各々の槽で行う方式、反応槽の中に担体を入れ処理効率を高める方式等)、である。

反応槽には冷却装置、消泡装置等を設け、槽容量は構造指針に沿ったものになっている。実施設の運転条件をみると、BOD容積負荷は1.1~1.2kg/m³・日の範囲で処理しているものがほとんどで、BOD-SS負荷0.06~0.1kg/kg・日、T-N・SS負荷0.03~0.05kg/kg・日、MLSS14,000~18,000mg/l、水温35~38℃である(58)59)。

3) 膜分離装置

生物汚泥用膜分離装置は、管状型または平膜型のモジュールを加圧してろ過する方式が一般的であるが、その他膜モジュールを直接反応槽内に浸けて真空ポンプで透過液を吸引する浸漬型⁶⁷⁾や、同様に引き出した混合液中に円板状の平膜を浸漬し、回転しながら吸引する回転平膜型⁶⁸⁾が開発されている。加圧式のUF膜の材質は、ポリアクリロニトリル、ポリスルホン、ポリオレフィンが一般的で、分画分子量は2万~10万のものが使われている。フラックスは1.0~1.5m³/m²・日、膜面流速2~3m/秒である。一次処理水は全項目とも他の固液分離装置より良好な水質が得られている(表2)⁵⁸⁾。

凝集汚泥用膜分離装置は混和槽、凝集原水槽、UF装置および膜洗浄装置から構成されており、凝集はCOD、

表2 固液分離装置の平均処理水質⁵⁸⁾

項目	方式*	除さし尿	一次処理水	二次処理水
BOD(mg/l)	A	8,620	93	11
	B	8,656	41	14
	C	5,823	7	—
COD(mg/l)	A	4,537	502	141
	B	5,248	473	137
	C	3,957	273	—
S S(mg/l)	A	7,438	192	17
	B	9,473	331	20
	C	5,000	ND	—
T-N(mg/l)	A	3,118	63	23
	B	2,913	70	34
	C	2,797	29	—
T-P(mg/l)	A	265	93	1.4
	B	309	146	1.5
	C	255	69	—
色度(度)	A	—	2,347	317
	B	—	2,742	437
	C	—	2,015	—
塩素イオン(mg/l)	A	2,747	2,064	2,191
	B	2,641	2,335	3,133
	C	2,557	2,460	—

* A:沈殿槽、B:遠心濃縮機、C:UF膜

色度の除去が良好な酸性凝集の実施例が多い(58)69)70)71)72)。膜モジュールおよび材質は生物汚泥用分離膜と同じであるが、分画分子量は4万と10万のものが使われている。透過水量は2.0~2.5m³/m²・日程度で、流速は1~1.3m/秒である⁵⁹⁾。

5. 高負荷処理技術に対する評価と技術的課題

5.1 浄化槽汚泥への対応

1970年以降のし尿高度処理技術の開発と発展の経緯を表3に示す。近年、し尿処理施設における処理上の課題

表3 し尿高度処理技術の開発と発展

西 暦	1975	1980	1985	1990	1995
処理技術の開発					
	20倍希釈		10倍希釈		3倍以下・無希釈
新処理施設の建設 構造指針の改正	<ul style="list-style-type: none"> 生物脱窒素施設 オゾン酸化施設 	<ul style="list-style-type: none"> 循環脱窒素施設 高負荷処理施設 	<ul style="list-style-type: none"> 低二方式構造指針 浄化槽汚泥専用方式構造指針 	<ul style="list-style-type: none"> 膜分離高負荷施設 	<ul style="list-style-type: none"> 高負荷脱窒素方式標準脱窒素方式

は、浄化槽汚泥対策である。非水洗化人口の減少に伴ってし尿の搬入量が減少し代わりに浄化槽汚泥量が増加したため、汚泥の混入率は全国平均で約36% (1992年現在) に達しており、年々混入率が高まる傾向にある。浄化槽汚泥の性状は、①し尿と比べて濃度が低く、BODはSS成分に由来する割合が高い、②建築用途により油分の濃度が高く、前処理設備等に悪影響を及ぼす、③窒素濃度が低いため、BOD/N比が高い、等の特徴があるため、汚泥の混入率が高い施設では処理負荷が低下して運転管理に支障をきたしている⁷³⁾。このため建設数が最も多い膜分離型高負荷方式を中心に、高い混入率に対応できる省エネルギーの新処理技術および標準方式等の改善技術について検討する必要がある。

標準方式の施設では浄化槽汚泥の混入率が高くても支障ない例⁷⁴⁾⁷⁵⁾や、反対にT-N対策が必要な例⁷⁶⁾等が報告されている。また構造指針ではし尿と浄化槽汚泥の混合処理方式および専用処理方式が規定されている¹⁵⁾。

現時点で浄化槽汚泥の混入率が高い(60%以上)施設に適用可能な膜分離型高負荷方式で、(財)廃棄物研究財団によって評価された処理技術⁷⁷⁾は、①前処理脱水による脱リン法を適用した方式、②生物学的脱リン法を適用した方式⁷⁸⁾、③前処理分離膜と固定生物膜法による硝化・脱窒を適用した方式⁷⁹⁾、である。

①の方式は、除さ後のし尿と浄化槽汚泥に余剰汚泥を混合して脱水したのち生物学的脱窒素を行う方式で、凝集分離設備を省略する。②の方式は、浄化槽汚泥に余剰汚泥を混合して脱水後、除さし尿と混合して生物学的な脱窒素と脱リンを行い、凝集分離設備を省略する。③の方式は、前処理で凝集・遠心分離した後膜分離を行い、分離液をプラスチック固定床型の生物膜法で脱窒素し、凝集分離装置を省略する。

5.2 適正処理の推進

膜分離型高負荷方式の開発によってし尿処理技術は完成したように見えるが、さらに生物反応等の運転制御を進めるとともに、汚泥処理の高率化と省エネルギーを追求し適正処理に努める必要がある。

し尿処理は標準方式によってBODと窒素の同時除去が可能となり、これが高負荷方式に発展した。両方式を比較すると、施設全体の槽容量は標準方式がし尿量Qに対して40Q以上であるのに対して、高負荷方式は20Q以下で、特に指針外で開発された硝化・脱窒槽等の主要設備は、5~12Q程度で非常に槽容量が小さい⁵⁹⁾⁸⁰⁾。し尿1klに対する施設面積は、標準方式15~20m²、高負荷方式10~15m²という報告⁸¹⁾がある。

また電力消費量について比較すると、電力量は標準方式が90.5KW時/klであり、高負荷もほぼ同様な結果であったが、燃料は前者が8.8l/kl、後者が6.3l/klであった⁸²⁾。維持管理費は、高負荷方式は標準方式の約1/2に削減されている⁸⁰⁾が、近年は標準方式においても契約電力の削減や省エネルギー運転等により使用電力削減の工夫が図られている⁸²⁾⁸³⁾。

近年開発された高負荷方式は、硝化・脱窒槽が単一槽形式または単一槽に二次脱窒素槽を付加した形式が主流で、小容量の槽内で時間的または空間的にDOを変化させて処理している。このため反応槽内のDO、ORPによる自動制御⁸⁴⁾のほか、NH₄-Nを検知して制御する方法⁶⁸⁾⁸⁵⁾、ファジー推論を用いて直接NH₄-Nを制御する方法⁸⁶⁾、施設の運転データを解析し、特性を把握してばっ気制御する方法⁸⁷⁾が報告されている。(表4)

このように生物反応槽を中心とした省エネルギーや制御技術は進歩してきたが、膜分離装置等の設備についてはまだ不十分な状態であるので、適正処理をめざしたこれらの技術開発が必要である。

表4 生物反応槽の制御方法⁵⁸⁾⁸⁴⁾

メーカー	1	2	3	4	5	6	7
投入方法	回分投入 (8回/日)	連続投入	連続投入	回分投入 (48回/日)	回分投入 (20~25回/日)	回分投入 (6~8回/日)	連続投入
制御用計測項目	DO	DO	DO、ORP	DOまたはORP	DO、ORP	DO	ORPまたはNH ₄ -N
測定制御	<ul style="list-style-type: none"> 投入量 サイクル数 吸入空気量 ばっ気-攪拌時間比 	<ul style="list-style-type: none"> 回転数制御による循環量 	<ul style="list-style-type: none"> 空気量 	<ul style="list-style-type: none"> 循環ポンプの吐出量 循環量 	<ul style="list-style-type: none"> 空気量 循環ポンプ 	<ul style="list-style-type: none"> 空気量 	<ul style="list-style-type: none"> 空気量
ばっ気装置	エジェクター式循環ポンプ	エジェクター式循環ポンプ	回転ばっ気	エジェクター式循環ポンプ	ばっ気プロワー式循環ポンプ	エジェクター式循環ポンプ	ばっ気プロワー水中ミキサー

6. おわりに

膜分離型高負荷方式を中心とした現在のし尿処理技術の発展は、各種の排水処理分野をみても最高の技術レベルにある。ここに至るこれまでの長い間に開発されてきた諸技術のうち、高い評価を受けているものとして、①高濃度活性汚泥法と低希釈し尿処理技術、②循環法や低DOレベルの生物脱窒素技術、③膜分離活性汚泥法の開発とし尿処理への導入、④高度三次処理技術の導入、⑤前処理等の周辺技術の進歩、⑥臭気対策の進歩、等がある。これらの成果は現在多くの排水処理分野に適用されている。

下水道の普及が進むなかで、し尿処理施設を取りまく環境は厳しいものがあるが、生活排水処理施設の整備とともに、これらの施設から排出される汚泥の処理施設として位置づけられ、今後とも環境保全に果たす役割は大きい。なお一層の技術発展を望みたい。

参 考 文 献

- 1) 佐藤昌之：し尿処理の現状とこれからの方向，全国市長会(1970)。
- 2) 大野 茂：用水と廃水，**21**, 473～485(1979)。
- 3) 小川雄比古：水，**20**(269), 89～94(1978)。
- 4) 森田 昭ほか：生活と環境，**22**(6), 24～27(1977)。
- 5) 松尾吉高：水質汚濁研究，**12**(3), 155～160(1989)。
- 6) 田所正晴：水，**20**(273), 27～32(1978)。
- 7) 松元寛郎ほか：第12回下水道研究発表会講演集(1975)。
- 8) 高橋哲郎：未発表資料
- 9) 村田清美ほか：水処理技術，**19**, 1(1978)。
- 10) 八木下一壬：第13回下水道研究発表会講演集(1976)。
- 11) 本田修己：環境創造，**5**(7), (1975)。
- 12) 永並 明：環境創造，**5**(7), (1975)。
- 13) 桜井敏郎：生活と環境，**21**(5), 4～16(1976)。
- 14) 小川雄比古：環境技術会誌，**13**, (1978)。
- 15) 全国都市清掃会議編：し尿処理施設構造指針解説・1988年版，全国都市清掃会議(1988)。
- 16) 松元寛郎ほか：用水と廃水，**17**(2), (1975)。
- 17) 浦野紘平：日本工業経済連盟講習テキスト(1974)。
- 18) 北川睦夫：水処理技術，**11**(10), (1970)。
- 19) 立本英機ほか：下水道協会誌，**12**(130), (1975)。
- 20) 洞沢 勇：排水の物理化学処理，産業用水調査会(1976)。
- 21) 新潟鉄工所編：活性炭活性汚泥及び湿式酸化による連続再生運転報告書(1977)。
- 22) 桜井敏郎：用水と廃水，**17**(8), (1975)。
- 23) 桜井敏郎：水，**21**(279)～(282), (1979)。
- 24) 森田 昭ほか：第19回全国環境衛生大会講演集(1975)。
- 25) 小林健司ほか：水処理技術，**16**(11), (1975)。
- 26) 中村寿男ほか：P P M, **9**(11), (1978)。
- 27) 桜井敏郎：浄化そう・コミプラ，**27**, (1978)。
- 28) 竹田 茂ほか：第12回下水道研究発表会講演集(1975)。
- 29) 松並 壮ほか：第14回下水道研究発表会講演集(1977)。
- 30) 村田清美ほか：水処理技術，**19**(2), (1978)。
- 31) 松尾吉高ほか：荏原インフィルコ時報，(74) 1～7(1978)。
- 32) 山中芳夫：化学と工業，**30**(6), (1977)。
- 33) 桜井敏郎：公害と対策，**14**(9), 46～53(1978)。
- 34) 関川泰弘：国際水環境技術シンポジウム資料集，韓国水道研究所314～321(1992)。
- 35) 関川泰弘：窒素除去技術研究会資料(1978)。
- 36) 相馬国基：生活と環境，**21**(5), 17～32(1976)。
- 37) K. Wuhmann：Ergebnisse an hochbelasteten Belebtschlammanlagen, Basel, Schweiz Birkhaus(1953)。
- 38) K. Wuhmann：Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie Birkhäuser Verlag Basel, **XIV**, (1) 409-427(1957)。
- 39) G. Bringmann：Gesundheits-Ingenieur, **82**(23), 3-235(1961)。
- 40) 宮地有正ほか：下水道協会誌，**11**(120), (1974)。
- 41) 山田国光：用水と廃水，**20**(1), 40～45(1976)。
- 42) 遠矢泰典：下水道協会誌，**7**(74)～(78), (1970)。
- 43) 村田清美ほか：水処理技術，**18**(7)～(9), (1977)。
- 44) F. J. Ludzack et. al.：Jour. W. P. C. F., **34**(9), 920～931(1962)。
- 45) J. L. Barnard：Wat. Pollut. Control, 705-720(1973)。
- 46) 遠矢泰典ほか：第10回衛生工学研究討論会講演文集(1974)。
- 47) 久保田 宏ほか：水処理技術，**18**(2), (1977)。
- 48) 竹田 茂ほか：第14回下水道研究発表会講演集(1977)。
- 49) 桜井敏郎：用水と廃水，**20**(1), 32～39(1978)。
- 50) 松田 智ほか：発酵工学，**60**(2), 93～99(1982)。
- 51) 下元常光：環境技術，**13**(4), 331～333(1984)。
- 52) 日本環境衛生センター：日環セ所報，(9), 44～53(1982)。
- 53) 千種 薫ほか：用水と廃水，**20**(9), 1070～1079(1978)。
- 54) 石田宏司ほか：環境技術，**10**(8), 620～627(1981)。
- 55) 菊池 栄ほか：生活と環境，**27**(9), 51～57(1982)。

- 56) 松井謙介：環境創造, **80**(2), 34~40(1980).
57) 竹内 敏ほか：日環七所報, (17), 70~76(1990).
58) 桜井敏郎：水質汚濁研究, **14**(11), 772~776(1991).
59) 桜井敏郎：生活と環境, **33**(9), 22~28(1988).
60) 桜井敏郎：環境技術, **13**(4), 301~302(1984).
61) 武藤暢夫：環境技術, **13**(4), 295~300(1984).
62) 岩田政詞：環境技術会誌, (71), 14~19(1991).
63) F. W. Hardt et. al. : Jour. W. P. C. F., **42**(12), (1970).
64) 井上源之助ほか：造水技術, **6**(4), 11~23(1980).
65) 金山彦喜ほか：環境技術, **16**(12), 803~807(1987).
66) 日本環境衛生工業会：日環工, (31), (1994).
67) 石田宏司：用水と排水, **37**(10), (1995).
68) 岡庭良安ほか：用水と廃水, **36**(9), 780~787(1994).
69) 石田宏司ほか：水処理技術, **28**(9), 579~590(1987).
70) 石井保彦ほか：工業用水, (389), 27~36(1991).
71) 藤瀬和彦：生活と環境, **35**(7), 39~48(1990).
72) 辻 文夫ほか：生活と環境, **35**(6), 64~72(1990).
73) 森田 昭：環境技術会誌, **81**, 44~52(1995).
74) 五木田一雄：都市清掃, **34**(123), 147~152(1981).
75) 豊永哲夫ほか：生活と環境, **28**(1), 53~59(1983).
76) 山田 豊ほか：用水と廃水, **24**(12), 1363~1375(1982).
77) 廃棄物研究財団：処理技術評価書(1995).
78) 吉田伸二ほか：エバラ時報, (168), 52~55(1995).
79) 佐藤 淳ほか：三菱重工技報, **32**(5), 322~325(1995).
80) 石川宗孝：環境技術, **18**(11), 678~685(1989).
81) 松村治夫ほか：都市清掃, **41**(162), 66~77(1988).
82) 桜井敏郎：用水と廃水, **33**(4), 308~315(1991).
83) 山田 豊：環境技術, **20**(9), 563~566(1991).
84) 桜井敏郎：用水と排水, **33**(10), (1991).
85) 元村勝公ほか：生活と環境, **35**(6), 73~80(1990).
86) 青井 透ほか：京都大学衛生工学研究会第13回シンポジウム講演論文集(1991).
87) 円馬卓三ほか：環境衛生工学研究, **9**(3), (1995).