

浮上ろ材式硝化脱窒法 に関する研究

1. 背景と目的

近年、小規模下水処理場に適した処理方式として、省スペースで維持管理が容易な好気性ろ床法などのろ床タイプの処理方式が注目され、普及しつつある。一方、水質汚濁防止の観点から、窒素、リンなどの除去といった高度処理も、今後必要な状況となってきたが、好気性ろ床では窒素の除去に単独のプロセスでは対応できない等の課題を有している。

本研究で対象としている浮上ろ材式硝化脱窒法（以下、本技術という）は、浮上性の特殊ろ材を用いた上向流式の生物膜ろ過法であり、従来の好気性ろ床法と同等の省スペース性と維持管理性を有する上に、窒素除去機能を付加した処理方式（凝集剤添加により、リン除去も可能）であり、今後の下水処理に適した水処理システムの1つとして期待できる。

本技術では、海外で下水処理の実績を多数有しており、国内では産業廃水処理に適用された事例もある。

本研究は、平成11、12年度の2ヶ年において実証実験を行い、本技術の処理性能評価を行うとともに、大規模下水処理場への適用（改築、増設）についても検討を行う。さらに、実用化に向けた設計諸元、維持管理などについて整理し、技術資料としてとりまとめ、本技術の普及に資することを目的として実施した。

2. 研究体制

本研究は、(財)下水道新技術推進機構、(株)荏原製作所、(株)クボタ、栗田工業(株)、日本ガイシ(株)、日立金属(株)の6者の共同研究により実施したものである。

3. 目標値

研究の目標値を表-1に示す。目標処理水質は、次のように設定した。

処理水質1は、本技術の標準的な処理により期待できる数値であり、高度処理の計画放流水質等を参考として定めた。

処理水質2は、水域の水環境保全に関する将来的ニーズ（例えば処理水の上流還元等）をふまえて、処理水質1で設定した水質をさらにレベルアップさせた数値である。処理水質2に対しては、標準的な処理設備に脱窒促進槽を付加した2段脱窒方式にて対応することとした。

なお、処理水量に関係する反応槽のろ過速度については、従来の好気性ろ床法と同等以上の25～35m/日を目標とした。また、2段脱窒方式のろ過速度については、一般的な水処理（標準法等）の後段処理として普及している砂ろ過法と同程度の200～300m/日を目標とした。

表-1 研究目標値

項目	処理水質1 ^{注1}	処理水質2 ^{注1}
BOD (mg/l)	10	5
S S (mg/l)	10	5
T-N (mg/l)	10	5
T-P (mg/l)	0.5 ^{注2}	

注1 処理水質1：1段処理での処理水質
 処理水質2：2段処理での処理水質

注2 T-Pは凝集剤添加の場合

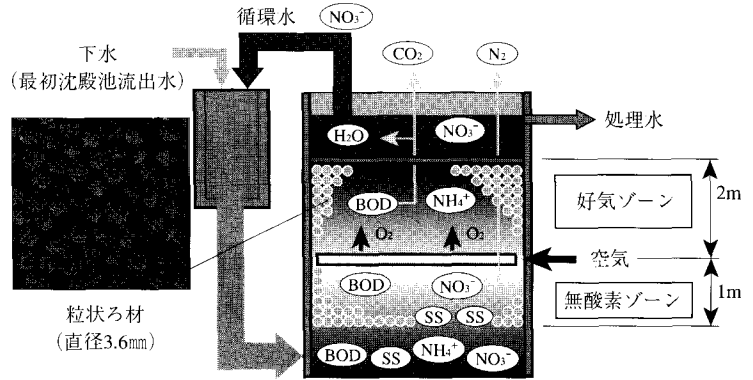


図-1 処理機構

4. 研究内容

4.1 小規模下水処理場への実用化

(1) 実証実験による検証

長期連続的な負荷変動条件下における処理性能評価を行い、設計諸元の基礎となるデータを把握した。

(2) 設計に関する検討

実証実験の結果をもとに実施設計の計画・設計に関する事項をとりまとめた。

4.2 適用範囲の拡大の検討

本技術の大規模下水処理場への適用（増設・再構築）について、従来法と対比・検討し、設置スペース等についてのケーススタディを行い、検討すべき留意事項を抽出した。

4.3 技術資料の作成

上記4.1, 4.2をまとめ、本技術の実用化を目指した技術資料を作成した。

5. 研究成果の概要

5.1 浮上ろ材式硝化脱窒法の概要

5.1.1 構造

反応槽は、図-1に示す浮上性特殊ろ材（直径3.6mmの粒状）を用いた上向流式生物膜ろ過であり、ろ床中間部に散気装置を配置し、散気装置の上部を好気ゾーン、下部を無酸素ゾーンに区分した反応槽で、処理水循環により、BOD、SSに加え、窒素の同時除去（凝集剤添加でリン除去も可）を可能としている。

反応槽は、処理時間の経過に伴って補足されたSSや増殖した汚泥によりろ床が閉塞するため、その回復のために逆洗操作（1回/1~2日）により機能を維持させる。

5.1.2 特長

本方式は、以下の特長を有している。

① 窒素・リン除去が可能

窒素除去に加え、凝集剤を添加することによりリン除去も可能。

② 最終沈殿池が不要

SS成分はろ材に捕捉されるため最終沈殿池は不要となる。さらに反応槽上部において処理水を保持できるため、複数の反応槽で構成される場合、十分な逆洗水量の確保が可能であり、逆洗用水槽が不要である。

③ 滞留時間が短く省スペース

一つの槽で硝化・脱窒を行うとともに、最終沈殿池が不要のため、他の処理方式と比較して設置スペースが少ない。ただし、H=7~8mの高さを確保する必要がある。

④ 維持管理が容易

自動化が可能であり、管理項目が少ないため、維持管理が容易である。

5.2 実験概要

実験は、元荒川処理センター（埼玉県）内に設置し、処理規模70m³/日（ろ過速度35m/日の場合）で、平成11年10月より実験を行った。

図-2に本実験装置のフローを、表-2に装置仕様を示す。

流入下水は、同センター5系最初沈殿池流入渠よりポンプで取水され、最初沈殿槽（以下、初沈）へ送られる。初沈流出水は、原水槽、調圧槽を経て反

応槽の下部より反応槽上部の処理水と混合され、上向流で通水することにより、下部の無酸素ゾーンで脱窒、上部の好気ゾーンで硝化を行う。同時にBOD、SS成分が除去される。

槽上部の処理水槽に貯められた処理水の一部は、反応槽の洗浄水に利用され、一部は高度処理に対応した後段の脱窒促進槽へ送られ更に処理を行う。(2段方式)。

脱窒促進槽では、流入水に含まれるBODが少ないため、脱窒反応に必要な水素供与体を添加する。

反応槽の洗浄により発生する洗浄排水は、洗浄排水槽に一時貯留後初沈に返送される。洗浄排水中の汚泥は初沈で沈降分離され、余剰汚泥として系外へ排出する。

実験結果は、2時間ごとのコンポジットサンプルを日間平均として評価した。

変動に対して十分な処理性能を有していることが挙げられる。このため、一般に処理が困難とされている低水温期(処理水温15~20℃)において、**図-3**に示す流入負荷変動(日平均流入水量比:0.3~2.0倍)を与え、処理の安定性について検討を行った。日間平均ろ過速度は、「下水道施設計画・設計指針と解説」等に示されている好気性ろ床法の平均ろ過速度である25~35m/日を中心とし、循環比は日平均流量比2.0として運転を行った。

実証実験における水質結果を**表-3**、BOD、SS、T-N、NH₄-Nの容積負荷と除去速度の関係を**図-4**から**図-7**に示す。

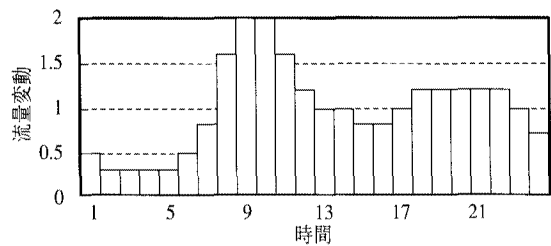


図-3 流量変動パターン

6. 成果の概要

6.1 反応槽における処理性能評価

実施に適用する条件の一つとして、日間の流量

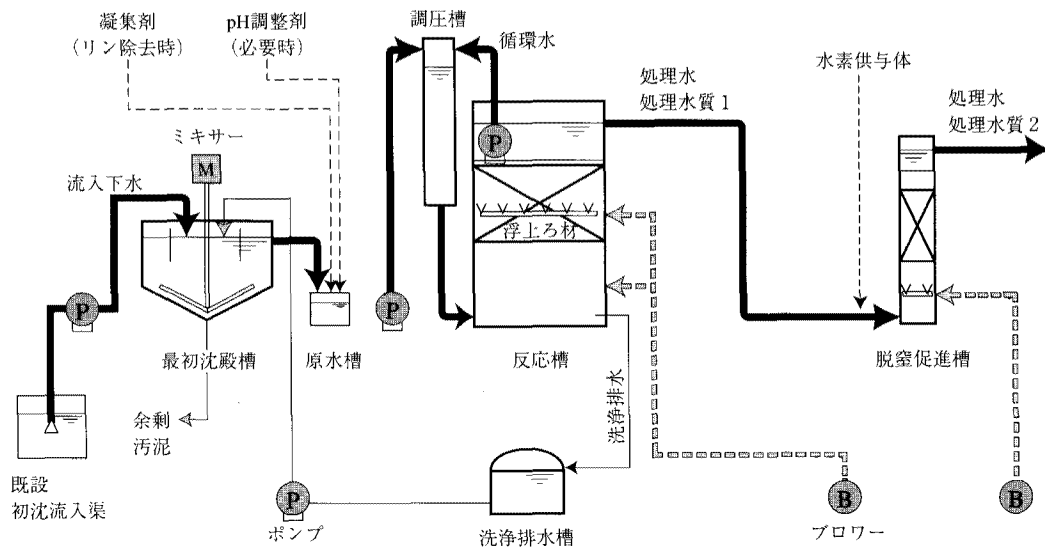


図-2 実験フロー

表-2 装置仕様

	最初沈殿槽	反応槽	脱窒促進槽
寸法	φ1.6m×3.8mH	φ1.6m×6.3mH	φ0.35m×4.7mH
仕様	水面積 2m ² 有効水深 3m	ろ過面積 2m ² ろ層高さ 3m 硝化部 2m 脱窒部 1m	ろ過面積 0.1m ² ろ層高さ 2.2m (脱窒部 2.2m)

(1) BOD

BOD容積負荷 $2\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ (日平均ろ過速度 $40\text{m}/\text{日}$)以下では、高い負荷変動にも関わらず、処理水質1を満足することができ、約97%と高い除去率が得られ、好気性ろ床と同等の処理性能であった。

(2) SS

SS容積負荷 $2.3\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ (日平均ろ過速度 $40\text{m}/\text{日}$)以下では、反応槽流入水SSが最大で $140\text{mg}/\ell$ 以上あったにも関わらず、処理水質1を満足することができ、除去率97%と高いろ過機能を有していた。

(3) T-N

T-N容積負荷 $0.48\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ (日平均ろ過速度 $40\text{m}/\text{日}$)以下では、BOD、SS同様、処理水質を満足することができ、実験条件から設定 (循環比2.0倍)される理論除去率 (67%)を上回る除去率が得られており、高い脱窒機能を有していることが把握できた。

(4) $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ 除去では、 20°C を下回る低水温期においても高い硝化機能を有していることが確認されたが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷 $0.3\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ より大きくなると除去率が低下する傾向にあった。

また、ろ過速度を低くし、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 負荷を高めた場合でも除去率が低下した。

このことから、本技術の律速因子は $\text{NH}_4\text{-N}$ 負荷であることを確認した。

(5) 反応槽におけるまとめ

T-Nにおける理論除去率が上回ったのは、SSに起因する窒素が、ろ過により除去されていたものと推測される。

水温が $15\sim 20^\circ\text{C}$ における実証実験では、**図-8**、**図-9**に示すように、ろ過速度を増加させると処理性能が低下する傾向にある。特に、T-N濃度としては、ろ過速度 $30\text{m}/\text{日}$ より大きくなる場合、処理水質1に対する十分な余裕が見込めないことから、本技術の設計諸元を $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷 $0.3\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ 以下、ろ過速度を冬期における1日最大汚水量に対して $30\text{m}/\text{日}$ と設定した。

6.2 脱窒促進槽における処理性能評価

将来的な高度処理への対応として、処理水をさらに高度に処理するために、反応槽の後段に脱窒促進槽を設置した2段方式による処理について一定条件下で実証実験を行った。

脱窒促進槽は、脱窒を行う有用なBODが少ないことからメタノール等の水素供与体を添加する必要がある。

実証実験では、脱窒に必要な水素供与体としてメタノールを添加した。

表-3 処理水質

(単位: mg/ℓ)

	流入水	最初沈殿槽流出水		反応槽流出水		脱窒促進槽流出水	
		濃度	平均除去率(%)	濃度	平均除去率(%)	濃度	平均除去率(%)
BOD	158 (313~70)	74 (128~32)	53	5.0 (9.5~0.5)	97	2.6 (4.8~1.0)	98
SS	243 (394~100)	92 (147~47)	62	7.0 (10~3)	97	3.4 (6~1)	99
T-N	30.5 (44.3~19.0)	22.7 (31.8~14.7)	27	6.9 (10.0~3.2)	77	3.2 (5.0~0.9)	89
$\text{NH}_4\text{-N}$	14.1 (21.2~7.6)	12.6 (19.5~6.9)	10	1.1 (2.6~0.2)	92	0.5 (1.3~0.1)	96
T-P	6.8 (13.0~3.3)	4.2 (7.3~2.1)	38	0.37 (0.49~0.21)	94	0.24 (0.40~0.10)	97

注: 水質は日間平均値、異常値を除く、()内は範囲を示す、T-Pは凝集剤添加時

反応層処理条件: ろ過速度 $25\sim 40\text{m}/\text{日}$ (冬期 $\sim 30\text{m}/\text{日}$)、日間流量変動比 $0.3\sim 2.0$ 倍、循環比2

脱窒促進槽処理条件: ろ過速度 $100\sim 300/\text{日}$ 、日間流量変動なし

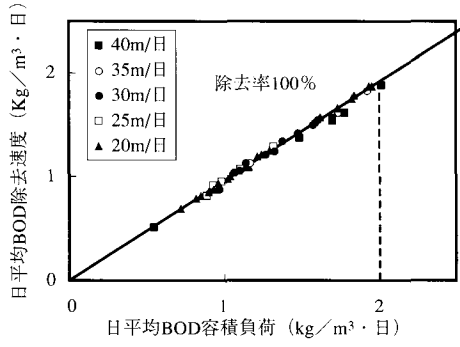


図-4 容積負荷とろ過速度 (BOD)

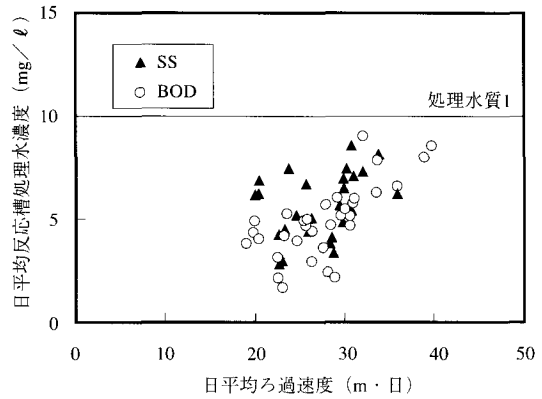


図-8 ろ過速度と処理水 (BOD, SS)

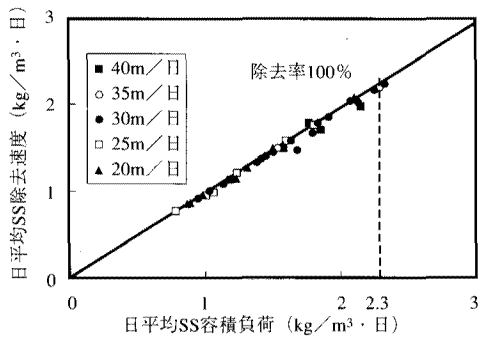


図-5 容積負荷とろ過速度 (SS)

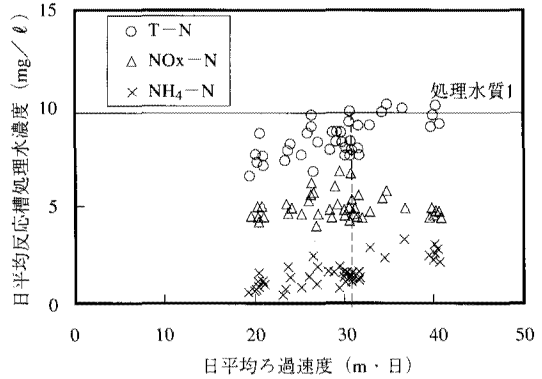


図-9 ろ過速度と処理水 (窒素)

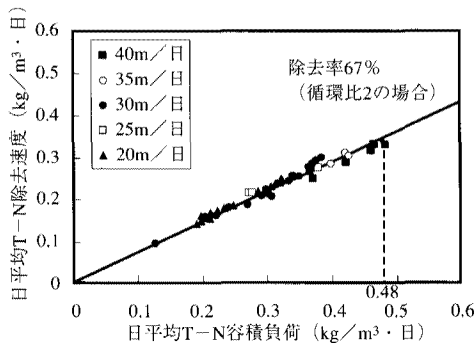


図-6 容積負荷とろ過速度 (T-N)

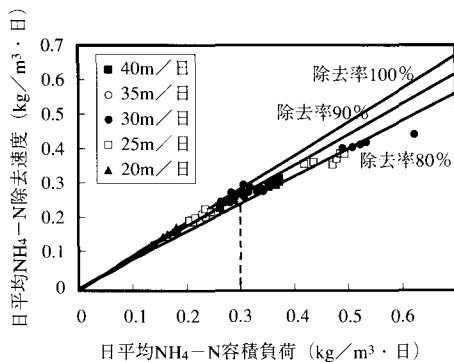


図-7 容積負荷とろ過速度 (NH₄-N)

(1) 脱窒性能

脱窒速度とNO_x-N負荷の関係を図-10に示す。NO_x-N容積負荷2.8kg-N/m³・日以下では、十分な脱窒性能を有していることを確認した。

(2) メタノールの最適制御

脱窒促進槽にメタノールを過剰添加した場合、余剰有機物がろ層内でSSに転換され、処理水BOD、SSが処理水質を満足できない。このため、メタノール量を適正に注入する制御が必要である。

1) メタノール添加量

適正なメタノール添加量を把握するために、メタノール濃度を変えて実験を行った(図-11)。補正メタノール濃度/NO_x-N濃度の比が約3以上になるとメタノールの過剰添加により、より処理水BODが流入BODより高くなった。

2) メタノール添加量の制御

流入水質の変化により、メタノール一定注入では、添加量が過剰あるいは不足になる可能性があるため、実証実験では、添加量の制御についてORP制御

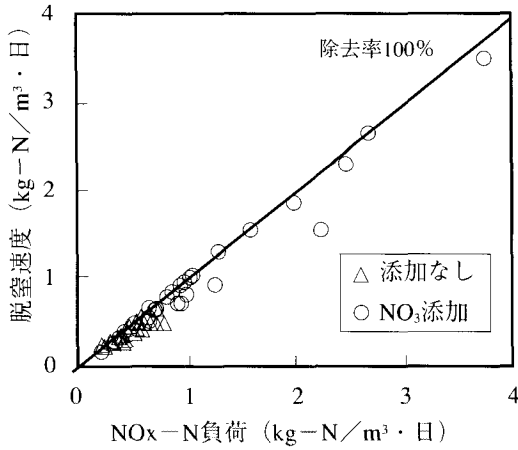
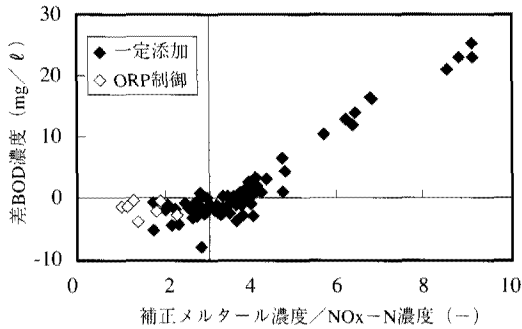


図-10 NOx-N負荷における脱窒速度



$$\Delta \text{BOD} = (\text{脱窒促進槽処理水BOD} - \text{脱窒促進槽流入水溶解性BOD})$$

図-11 メタノール添加量の推移

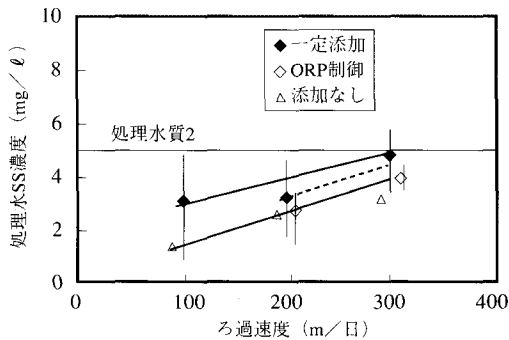


図-12 メタノール添加有無および調整とろ過速度

による添加量の調節を行った(図-12)。一定流入の場合、ろ過速度300m/日において平均で処理水質2を満足できたものの、処理水SSは処理水質2を達成することができなかった。一方ORP制御を行った場合、ろ過速度300m/日では、実証期間は短かったものの、最大処理水SSにおいても処理水質2を満足することができた。

(3) 脱窒促進槽におけるまとめ

実証実験では、脱窒を行うために水素供与体としてメタノールを添加した。メタノールを過剰に添加した場合、有機物が発生し、処理水質が達成できず、メタノールが不足すると脱窒不足になることから、メタノールの制御が今後必要となる。

本実験では、メタノールの注入率は、補正メタノール濃度/NOx-N濃度比3程度が適正であった。

ORP制御を行った場合、ろ過速度300m/日においても最大処理水SSは処理水質2を満足することができた。なお、実験期間が短かったことから、今後、実施への適用にあたっては、さらに検討を行う必要がある。

6.3 適用範囲の拡大(既設水処理設備の改築)

本技術に関して、海外では、大規模処理場においても実績があり、標準法で得られる処理水質以上の高度な水質が必要な地域では、処理施設の更新、あるいは増設時において本技術の適用が効果的な場合が想定される。なお、本技術では、約7~8mの高さを必要とするため、深槽式を採用しているある処理場についてケーススタディを行い、設置スペースや改築に伴う留意点について検討を行った。

(1) 改築概要

ケーススタディとして対象とした処理場の計画は、処理方式：標準法(深槽式)、処理水量：約20,000m³/日・池である。現有施設および改造後のフローを図-13に示す。なお、土木躯体の変更箇所として、現有の反応タンクを本技術反応槽に改造するために仕切り壁を設け、2池を6槽(反応槽5槽、洗浄排水槽1槽)に分けた。また、隣接する反応槽の間には管廊スペースを設けた。

(2) 検討結果

現有施設(深槽式標準法)、本技術、循環式硝化脱窒法における水量比を表-4に示す。

本技術は、現有施設と比較して容量は63%程度に減るものの、循環式と比較して13%容量を確保して窒素除去が行える。さらに最終沈殿池が不要なので、既存施設の有効利用を図ることができる。

表-4 水量の比較

項目	現状	改 築 後	
方式	標準法 (深槽式)	浮上ろ材式 硝化脱窒法	循環式硝化脱窒法 (深槽式)
槽形状 (m)	L72×W9×H10	L9×W9×5槽 (最終沈殿池部分 未利用)	L72×W9×H10
水量 (m ³ /日)	19,320 (100)	12,150 (63)	9,660 (50)

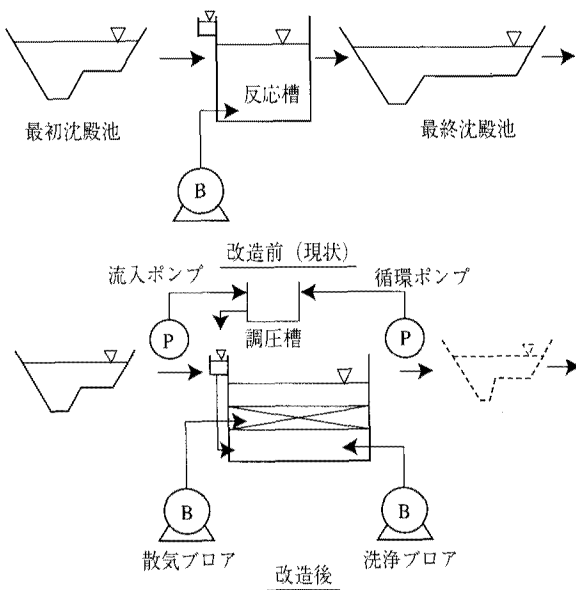


図-13 反応槽改造前後のフロー

(3) 改築にあたっての留意点

- ① 本技術の反応槽は水深約7mとなるため、それ以下のエアレーションタンクを有する標準法の施設を有する場合には、荷重に耐えうる底盤が必要。
- ② 本技術は、反応槽流入前に調圧槽があるため、処理場全体の水位関係の再確認が必要。
- ③ 最終沈殿池が不要となるが、既存施設の改築に際して、現状よりも水量が減少するため、施設全体の容量とのバランスについて検討が必要
- ④ 既存のエアレーションタンクに新たな仕切り壁を設けることから、水密性の確保に留意が必要。

(4) 適用範囲の拡大に関するまとめ

(大規模処理場への改築)

深槽式を用いた標準法について、既存の土木

体・機器を利用して、本技術に適用、改築ができ、最終沈殿池部分が不要となることから、高度処理の導入で水処理施設の敷地が逼迫しながらも、窒素除去が必要となるケースでは、有効な手段である。

7. 技術資料の構成

本技術資料は、「本編」、「資料編」の2編から構成する。

「本編」では、浮上ろ材式硝化脱窒法の概要、原理、設計因子、適用範囲を明確にしている。

「資料編」では、連続運転結果、本技術を設計する際の容量計算例、大規模処理場における改築時への適用について記載した。

本技術の構成は、以下のとおりとした。

「本編」

第1章

第1節 総則

第2節 概要

第3節 用語の定義

第2章

第1節 対応する処理レベル

第2節 浮上ろ材式硝化脱窒法の原理

第3節 浮上ろ材式硝化脱窒法の特徴

第4章 設計上の基本事項

第1節 処理プロセス

第2節 最初沈殿池

第3節 反応槽

第4節 逆洗排水槽

第5節 脱窒促進槽

第6節 付帯設備

第7節 発生汚泥量

第5章 維持管理に関する留意点

第1節 運転管理

第2節 水質管理

第3節 保守点検

「資料編」

1. 運転データ

2. モデル設計

3. 適用範囲の拡大

4. 経済性の比較条件

8. まとめ

平成11, 12年度の2ヶ年に渡って実証実験を踏まえ、本技術の設計因子, 適用範囲が明確にでき, 高度処理が求められる小規模下水道に適用可能なシステムであることが検証された。また, 適用範囲の拡大として, 大規模処理場における施設更新時への適用にあたっては, 窒素除去が必要となるケースでは, 有効な手段であると言える。

本技術資料は, 一処理場での実証実験の結果であることから, 今後は実施設でのデータを蓄積し, 処理性能の再評価を行う必要がある。

また, 脱窒促進槽では, さらに処理水質の向上を図ることができるが, 水素供与体の制御手法の確立を図ることが課題である。

●この研究を行ったのは

研究第二部長	中里 卓治
研究第二部総括主任研究員	野村 宜彦
研究第二部研究員	神谷 佳宏
研究第二部研究員	大塚 正典

●この研究に関するお問い合わせは

研究第二部長	中里 卓治
研究第二部総括主任研究員	片桐 晃
研究第二部研究員	神谷 佳宏
研究第二部研究員	大塚 正典