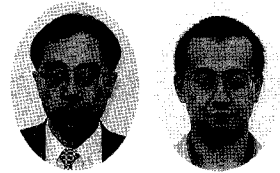


PABIO DENI プロセスによる窒素除去の新たな展開

Reinforced Nitrogen Removal with PABIO DENI



(環)製品開発室
野 中 信 一
Shinichi Nonaka
川 嶋 淳
Jun Kawashima

流動床式生物膜処理装置 PABIO MOVER を用いた窒素除去プロセス PABIO DENI は高い窒素除去能力を有していることを前報で報告した。

当社では、脱窒槽と硝化槽を多段に配置して原水を各段に分配注入する、担体投入型ステップ流入式多段硝化脱窒法の開発に取り組んでいる。実下水を対象としたパイロット実験では HRT 5 hr にて処理水 T-N10 mg/L が得られることが確認できた。

The moving bed biofilm treatment process (PABIO DENI), the activated sludge method combined with carrier elements shows high efficiency in nitrogen removal, as previously reported. Reinforced nitrogen removal was conducted, by distributing inflow direct to three units composed of nitrification and denitrification tanks. This pilot test using actual sewage achieved the performance of T-N 10 mg/L with hydraulic retention time of 5 hours.

Key Words :

硝	化	Nitrification		
脱	窒	Denitrification		
M	B	B	R	Moving Bed Biofilm Reactor
ステップ流入式多段硝化脱窒法				Nitrogen removal with step feeding

まえがき

閉鎖性海域の富栄養化の進行を防止するため1998年10月より、窒素・リンの排水規制が本格運用されることになった。各事業所においては地方自治体の指導のもとに鋭意対応策の検討がなされている状況にある。窒素除去は生物学的処理方法が最も経済的

と言われており、下水及び廃水処理分野で多くの実設備が稼動している。生物学的処理には各種の方式があり、従来は活性汚泥法が多く採用されてきたが、より省スペース、省コストな装置開発をめざして各機関で研究が行われている。

既報¹⁾で紹介したように流動床式生物膜処理装置

PABIO MOVER は、反応槽に特殊な形状の担体を投入して流動化させ、高活性の汚泥（細菌）を担体に付着保持させることでより高負荷処理を可能とする装置であり BOD、窒素いずれの除去分野にも適用できる。PABIO MOVER を窒素除去に適用するに当っては各種のプロセスがあり、原水水質及び処理目標水質ならびに経済性等を考慮して最適なプロセスを選定する。

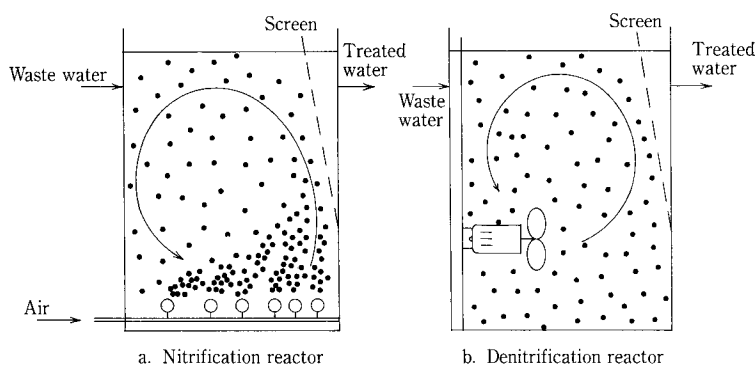
当社では窒素除去分野への新たな展開として、担体—活性汚泥併用法によるステップ流入式多段硝化脱窒法の開発に取り組んでおり、今回、実下水を用いたパイロット実験の実施例を紹介する。

1. PABIO MOVER の概要

1.1 原理・構造

当社では BOD 除去分野には PABIO MOVER を、窒素除去分野には PABIO DENI を商標として用いており、本報ではこれ以降 PABIO DENI の名称を使用する。

PABIO DENI プロセスにおける硝化槽及び脱窒槽の概念図を第 1 図に示す。硝化槽、脱窒槽内に充填した担体は、第 1 図 a, b に示したように硝化槽ではエアレーションによって、脱窒槽では機械攪拌によって流動化される。硝化槽のエアレーション装置はラテラル管方式の簡易な構造で、目詰りがなく圧損もほとんどつかないといった特長を有している。一方、脱窒槽ではエネルギー効率の面から通常はプロペラ型の攪拌機を使用するが、担体を投入しない場合と同程度の少ない動力で攪拌できる。各々の槽には担体が流出しないようにスクリーンを設けている。担体は材質がポリエチレン（密度約 0.95 g/cm^3 ）で、形状は直径 10 mm 、高さ 7 mm の円筒型である。円筒内は十字の仕切が、また周囲にはフィンが付いている。十字の仕切は担体強度のアップと表面積の増加に、フィンは攪拌効率の向上に役立っている。



第 1 図 PABIO DENI 装置概念図
Fig. 1 Scheme of PABIO DENI

る。担体の有効比表面積は約 $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ である。汚泥は写真 1 に示したように主として担体の内部に付着する。

1.2 特 長

PABIO DENI プロセスに用いる担体は、その独特な形状により次のような特長を有する。

- ①有効表面積が広く、高活性の微生物を保持できるため高負荷処理が可能である。
- ②担体は物理強度が高いため寿命が 20 年と長く、この間の補充は不要である。また、径が大きいため担体分離用に目幅の大きいスクリーンを使用でき、運転管理が容易である。
- ③担体の激しい攪拌、流動により増殖微生物による目詰まりがなく、逆洗が不要である。

2. 窒素除去プロセス PABIO DENI

PABIO DENI では排水の種類、処理目標値等に応じて様々なプロセスの適用が可能である。プロセスは(A)処理関与汚泥による分類と(B)排水の流向による分類の 2 つに大別される。次に各種プロセスを紹介する。

2.1 処理関与汚泥による分類

A-1. 担体単独法

担体に付着した汚泥単独で処理する方法であり、返送汚泥が不要のため運転管理が容易であるといった特長を有している。本法では槽有効容積の 60～70% の担体を投入する。

A-2. 担体—活性汚泥併用法

担体付着汚泥と活性汚泥の両汚泥で処理する方法であり、主として硝化処理に適用される。この方法は増殖速度の遅い硝化細菌を多量確保することを目的として、担体を 20～50% 程度投入する。活性汚泥法と同様に沈殿槽からの汚泥返送が必要である。

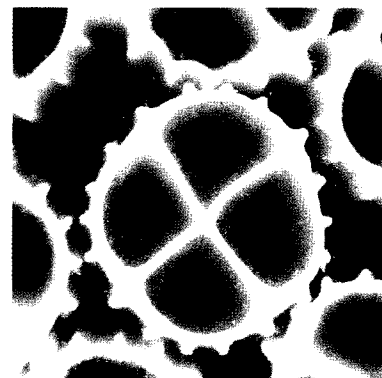


写真 1 汚泥付着状況
Photo.1 Biofilm-formed carrier elements

2.2 排水流向による分類

プロセス例を第2図に示す。

B-1. 直列式硝化脱窒法

このプロセスは有機物濃度（BOD）の低い排水に適用される。通常、硝化槽には pH 調整用にアルカリ剤が、脱窒槽にはメタノール等の水素供与体が外部注入される。アルカリ剤削減のため脱窒処理水を硝化槽に循環することもある。

B-2. 循環脱窒法

このプロセスは下水のように BOD と窒素（N）を含む排水に適用される。一般に、原水の BOD/N 比は 3 以上あることが望ましいとされる。この方法は硝化処理水を脱窒槽に循環返送することによって脱窒反応に必要な水素供与体や硝化槽での pH 調整剤を節減する方法である。硝化槽の後段に第 2 窒槽と再曝気槽を設けることでより高度な処理水質を得ることができる。

B-3. ステップ流入式多段硝化脱窒法

従来の有機物に加えて、窒素・リンの除去を含めた下水の高度処理化に対応できる有望な技術としてステップ流入式多段硝化脱窒法（以下多段硝化脱窒

法と称する）が挙げられる。多段硝化脱窒法は脱窒槽と硝化槽を 1 組とし、これを多段に配置して各脱窒槽に原水を等分割投入する方法である。多段硝化脱窒法において各段の脱窒槽、硝化槽それぞれに担体を投入することで、窒素処理に必要な滞留時間（HRT）をさらに短縮化することが可能になる。

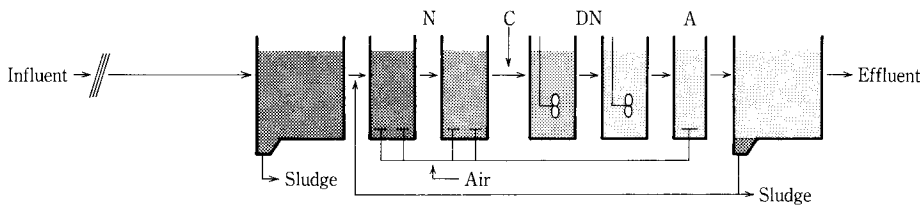
3. パイロット実験

分流式下水処理場の最初沈殿池流出水及び流入水を対象として、担体を用いるステップ流入式多段硝化脱窒法（以下、担体多段硝化脱窒法と称する）によりパイロット実験を行った。

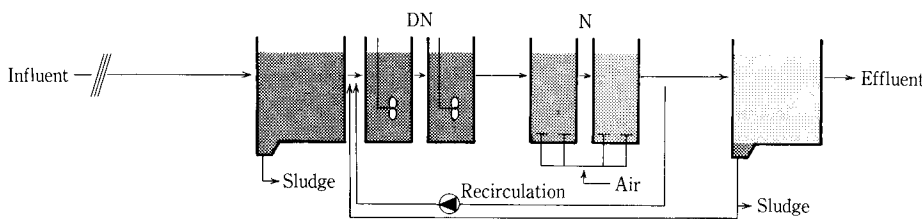
3.1 担体多段硝化脱窒法の概要

2.2項に示したように多段硝化脱窒法は短い HRT で BOD と同時に窒素、リンを除去でき、既設処理場の高度処理化に対応できる方法として期待されている。下水処理では従来 BOD を除去対象として標準活性汚泥法が多く採用されてきた。この方式は一般に HRT 約 8 hr で設計されているが、BOD と同時に窒素を除去するためには HRT 約 16 hr 必要であり、現状の約 2 倍の反応槽増設が必要となる。多段硝化脱窒法は 3 段式の場合で HRT

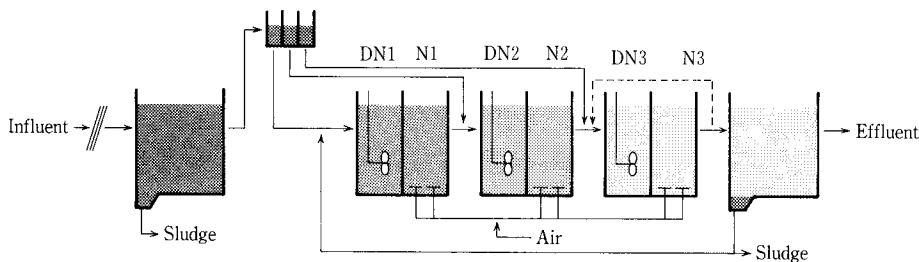
B-1 直列式硝化脱窒法—Series Nitrogen Removal



B-2 循環式脱窒法—Circulation Nitrogen Removal



B-3 ステップ流入式多段硝化脱窒法—Nitrogen removal with step feeding



N : Nitrification reactor
 DN : Denitrification reactor
 A : Aeration reactor
 C : Carbon source

第2図 PABIO DENI 窒素除去プロセス例
 Fig. 2 Process examples of PABIO DENI

11~13 hrにて窒素除去が可能とされているが²⁾、担体を投入することでHRTを5hr程度に短縮することも可能である。なお、本法ではリン除去は通常最終段の硝化槽に無機凝集剤を添加することで達成される。

3.2 原理, 特長

多段硝化脱窒法は日本下水道事業団において開発が進められてきたもので、基本原理や最大理論除去率計算方法等が各種文献^{3,4,5,6)}に紹介されている。多段硝化脱窒法の基本原理は次の通りである。

- ①各反応槽は完全混合を基本とし、一対の脱窒・硝化槽を複数段直列に配置する。
- ②原水を等分割し、各段の脱窒槽に流入させる。
- ③各段の活性汚泥量が等しくなるように槽容積を決定する。
- ④必要に応じて最終段の硝化槽~脱窒槽間の内部循環を行なう。

本法の硝化・脱窒反応による理論最大窒素除去率は、硝化槽での完全硝化、脱窒槽での完全脱窒を仮定した時、(1)式により定められる。

$$\eta_{TN} = \left(1 - \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{1+r+R}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

ここに、 η_{TN} : 理論最大窒素除去率 (%)

N : 多段化の段数

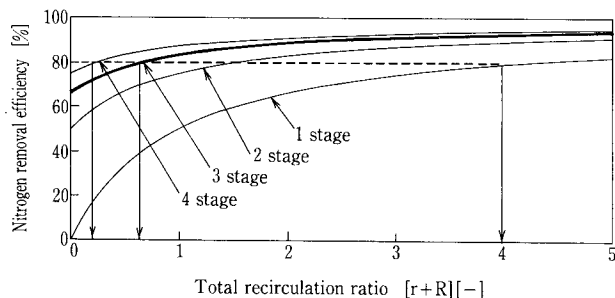
r : 汚泥返送比 (-)

R : 最終段における内部循環比 (-)

汚泥返送比と最終段における内部循環比の合計を総合循環比とすると、硝化脱窒による理論最大窒素除去率は第3図の関係となる。

多段硝化脱窒法の特長としては次の点が挙げられる。

- a) 反応タンク的大幅増設なしに、既設処理場の一部改造によって窒素・リン除去の高度処理に



第3図 総合循環比と理論窒素除去率の関係
Fig. 3 Relation between total recirculation ratio and theoretical nitrogen removal efficiency

対応できる。

- b) 第3図に示したように、硝化液の循環がなくとも高い窒素除去率が得られるため、循環脱窒法に比べて動力費が少なくて済む。
- c) 各段に保持される活性汚泥量が同じとなるよう設計されているため、各段の反応が等量となり、多段化しても維持管理が容易である。硝化槽では送風量を一定とすれば溶存酸素濃度(DO)は同じとなり、1箇所のDO測定で済む。pHについても各硝化槽は等しい値になるため1箇所の測定で十分である。
- d) 最終沈殿池流入MLSS濃度を標準活性汚泥法と同じとした場合、多段硝化脱窒法は平均MLSS濃度を高めることができ、容積当りの窒素除去効率が高くなる。

3.3 実験装置

実験フローを第4図に示し、装置仕様を第1表に示す。また、装置外観を写真2に示す。本プロセスは3段の脱窒・硝化槽と沈殿槽で構成され、この他に硝化処理水ピット、凝集攪拌槽及び薬品注入設備を有している。原水は計量槽で等分割して1~3段の各脱窒槽に供給し、沈殿槽からの返送汚泥は1段目の脱窒槽に導入する。硝化槽の汚泥滞留時間(A-SRT)管理を容易にするため、余剰汚泥引抜きは硝化処理水ピットより行った。反応槽内の活性汚泥及び担体の混合攪拌は、硝化槽は全面曝気により、脱窒槽は堅型攪拌機により行った。脱窒、硝化反応槽は、第1表に示すように寸法が幅1.5m、長さ5.88m、水深2.5mであり、有効容積は22.1m³である。

各段の容積比率は上述の設計計画に関する考え方に基づき1段目:2段目:3段目=1:1.4:1.8とした。脱窒槽、硝化槽には各々所定量の担体を投入した。

3.4 実験方法

1) 実験場所

分流式下水処理場にて実験を行った。

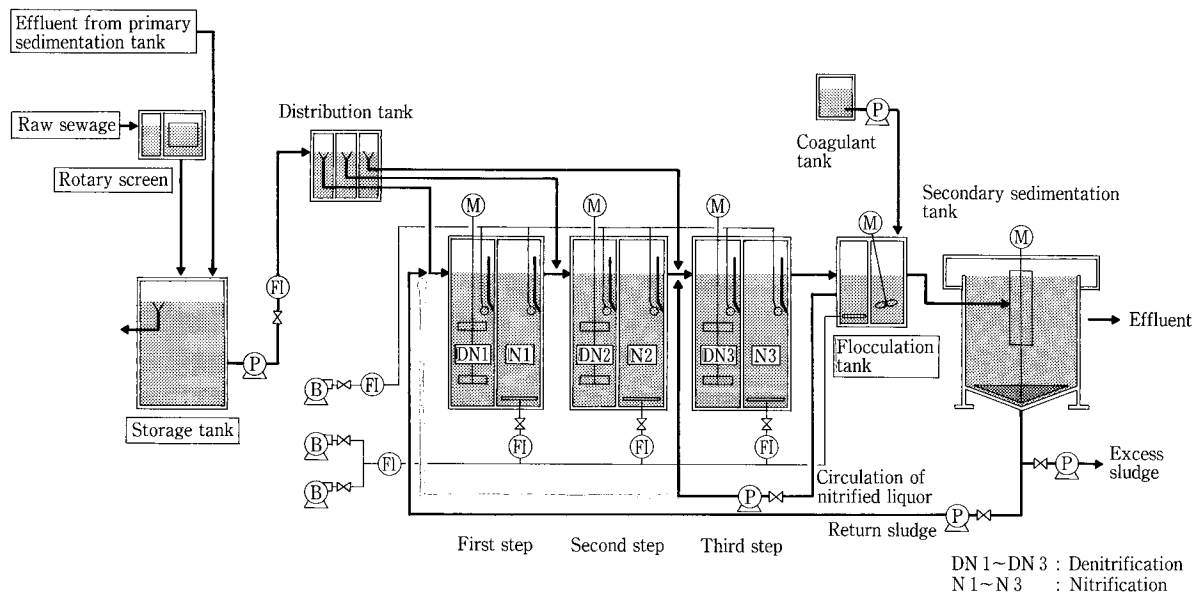
2) 目標値

総反応槽HRT: 5hr

処理目標水質: T-N10mg/L以下

3) 実験条件

第2表に実験条件を示す。実験原水には初沈流出水と初沈流入水を用い、総反応槽HRT及び汚泥返送比をそれぞれ5hr、0.5と一定にして実験した。硝化槽部のA-SRTは1.5~2.6日の範囲とし、最終段の硝化液の内部循環は行わなかった。硝化槽の設



第 4 図 パイロットテストフローシート
Fig. 4 Flow sheet for pilot test

第 1 表 実験装置概略仕様
Table 1 Specification for test equipment

Equipment name	Dimensions	Effective capacity (m ³)	Q'ty
Storage tank of raw sewage	1 050 mm ϕ × 1 300 mm ^H	1	1
Tank for Multi-Step (Denitrification and nitrification)	1 st	1 500 mm ^W × 700 mm ^L × 2 500 mm ^{WD}	2.63
	2 nd	1 500 mm ^W × 980 mm ^L × 2 500 mm ^{WD}	3.68
	3 rd	1 500 mm ^W × 1 260 mm ^L × 2 500 mm ^{WD}	4.73
Nitrified water pit	700 mm ^W × 700 mm ^L × 1 000 mm ^{WD}	0.49	1
Flocculation tank	400 mm ^W × 700 mm ^L × 1 000 mm ^{WD}	0.28	1
Secondary sedimentation tank	3 000 mm ϕ × 2 500 mm ^{WD}	15.3	1

第 2 表 実験条件
Table 2 Operation condition

	Effluent from primary sedimentation tank ①	Raw sewage	
		②	③
HRT [hr]	5	5	5
A-SRT [days]	2.6	1.5	2.1
Control DO in nitrification tank (N1~N3) [mg/L]	3	3	2
MLSS (3rd stage) [mg/L]	1 180	1 320	1 600
Temperature (3rd stage) [°C]	22.0	21.7	23.5



写真 2 パイロットテスト装置外観
Photo.2 Pilot test equipment

定 DO は初沈流出水では 3 mg/L としたが、初沈流入水では 3 mg/L と 2 mg/L の 2 条件で実験した。

最終段の MLSS 濃度は 1 180~1 600 mg/L の範囲であり、水温は 21.7~23.5 °C の範囲であった。

なお、今回は窒素除去についての実験とし、リン除去のための凝集剤添加は行わなかった。

3.4 実験結果

1) 窒素除去性能

原水及び処理水の水質の平均値を第 3 表に示し、T-N と NH₄-N の推移を第 5 図に示す。初沈流出水及び初沈流入水を実験原水としたときの処理水 NH₄-N は概ね 1 mg/L 以下の安定した硝化処理性能が得られた。処理水 T-N は、初沈流出水の場合は原水 BOD/T-N 比が 1.8 と低く、脱窒槽での NO_x-N 除去が不十分であったため 18 mg/L と高くなった。一方、初沈流入水の場合は原水 BOD/T-N 比が 2.9 と高くなったため処理水 T-N は約 11 mg/L に減少した。しかし、処理目標値には至らず、原因として硝化槽からの持込み DO によって脱窒に必要な

な BOD が不足すると考えられた。そこで、硝化槽設定 DO を 3 mg/L から 2 mg/L に下げたところ、処理水 T-N は 8.7 mg/L となり目標の 10 mg/L 以下を得ることができた。

2) その他の水質

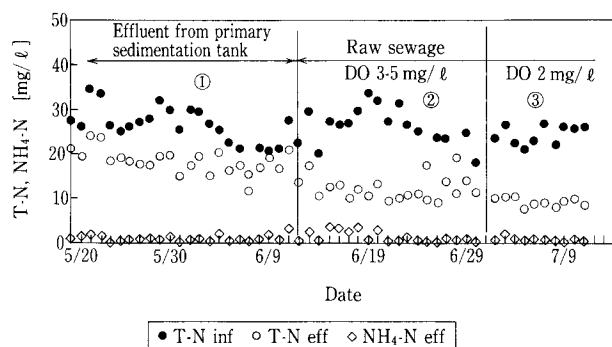
処理水 BOD (C-BOD) 及び SS はそれぞれ 5 mg/L 以下、8 mg/L 以下となっており、実験原水の種類に関わらず、良好な水質が得られることが確認できた。

3) 担体の硝化、脱窒能力

担体の硝化及び脱窒能力を下水試験方法に準じて回分試験により測定した。比較のため担体と活性汚泥の双方について測定し、単位容積当りの硝化、脱窒速度 (mg/L・h) として算出した。測定結果を第 6、7 図に示すが、硝化速度は担体が 27.5 mg/L・h、活性汚泥が 4.5 mg/L・h であった。硝化速度は担体の方が約 6 倍大きく、担体の投入効果が大きいことが判る。活性汚泥法においては A-SRT が 2 日程度では硝化はほとんど起こらないと言われているが、本実験の活性汚泥の硝化速度が 4.5 mg/L・h あったのは、担体多段硝化脱窒法の活性汚泥中には担体から剥離した硝化細菌が含まれているためと考えられる。一方、脱窒速度は担体が 6 mg/L・h、活性汚泥が 4.1 mg/L・h で大きな差は見られず、脱窒は硝化に比べると担体投入の効果は小さいと予想される。

3.5 今後の課題

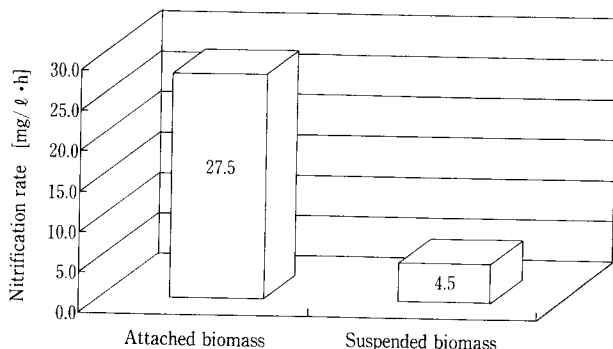
今回の実験により担体多段硝化脱窒法では、HRT 5 hr にて処理水 T-N 10 mg/L 以下が得られることが確認できた。しかし、更に低い処理水 T-N を得るためには、脱窒槽において水素供与体である原水 BOD を効果的に利用することで NO_x-N 除去



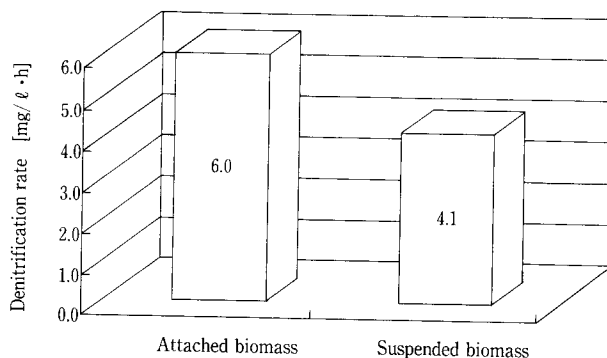
第 5 図 実験結果
Fig. 5 Pilot test result

第 3 表 原水及び処理水水質 (平均値)
Table 3 Water quality of pilot test (Mean values)

		Effluent from primary sedimentation tank ①	Raw sewage	
			②	③
BOD/-N ratio of influent		1.8	2.9	2.9
T-N	Influent [mg/L]	25.9	25.1	24.0
	Effluent [mg/L]	18.0	11.3	8.7
NH ₄ -N	Influent [mg/L]	19.8	18.9	17.0
	Effluent [mg/L]	0.7	1.1	0.5
NO _x -N	Effluent [mg/L]	17.0	9.8	7.1
BOD	Influent [mg/L]	45.5	73.5	85.7
	Effluent [mg/L]	< 5	< 5	< 5
SS	Influent [mg/L]	52	111	113
	Effluent [mg/L]	7.8	5.9	5.3



第6図 硝化速度測定結果
Fig. 6 Nitrification rate of biomass



第7図 脱窒速度測定結果
Fig. 7 Denitrification rate of biomass

率を高める必要がある。このためには硝化槽の DO 制御や脱窒槽の攪拌方法等の運転方法の最適化が課題となる。また、リン除去についても、最終段の硝化槽に無機凝集剤を添加する方法による実験を実施し、窒素・リン除去システムとしての確立を図る必要がある。

むすび

ここに紹介した担体を用いたステップ流入式多段硝化脱窒法は1999年度の日本下水道事業団の共同研究テーマ「既設処理場の高度化を可能とする下水処理システムの開発」に採用され、今後約3年間に亘って実用化のためのパイロット実験を行う予定になっている。負荷変動に対応でき、安定した処理水質を得るための運転技術の確立及び運転動力の低減化等、実用化に向けての研究開発を鋭意進める所存である。

[参考文献]

- 1) 野中信一ほか：神鋼パンテック技報，Vol.41，No.2，(1997)，p.10
- 2) 堺好雄ほか：既設処理場の高度処理化，第36回下水道研究発表会講演集（1999年），p.526
- 3) 堺好雄ほか：ステップ流入式多段硝化脱窒法について，第33回下水道研究発表会講演集（1996年）
- 4) 堺好雄，小池秀三：ステップ流入式多段硝化脱窒法について，—第2報— 第34回下水道研究発表会講演集（1997年）
- 5) 堺好雄，小池秀三：ステップ流入式多段硝化脱窒法の設計手法について，第35回下水道研究発表会講演集（1998年）
- 6) 堺好雄：既設処理場の高度処理化と超高度処理日本下水道事業団における高度処理技術開発，月刊下水道 Vol.20，No.5（1997）

連絡先

野 中 信 一 環境装置事業部
 製品開発室
 担当課長
T E L 078 - 992 - 6532
F A X 078 - 992 - 6503
E-mail s.nonaka@pantec.co.jp

川 嶋 淳 環境装置事業部
 製品開発室
T E L 078 - 992 - 6532
F A X 078 - 992 - 6503
E-mail j.kawashima@pantec.co.jp