流動床式高効率窒素除去装置「PABIO DENI」*

神鋼パントック株式会社 環境装置事業部水処理本部 ○知福 博行, 加治 正廣

High Rate Nitrogen Removal Process by Moving Bed Biofilm Reactor “PABIO DENI”

○Hiroyuki Chifuku and Masahiro Kaji

Proposal Department, Environmental Systems Division, Shinko Pantec Co., Ltd.

知福博行

The necessity for nitrogen removal is increasing from the viewpoint of eutrophication control in recent years. Although a Modified activated sludge process was prevalent in the nitrogen removal process, since there are some faults such as long Hydraulic retention time (HRT), the various efficient process of replacing with this process have come to be developed and put in practical use. We put in practical use nitrogen removal process, PABIO DENI, which is the fluidized bed using the carrier elements made from polyethylene as a moving carrier elements. This process has the characteristics that the treatment in the HRT of 1/2 to 1/3 of the modified activated sludge process is possible, the high nitrogen removal efficiency is acquired at 10°C, and it can be adapted for the various forms of existing reactors, etc.

A demonstration tests confirmed efficient and high treatment capability such as a high removal ratio as 98% or above with volumetric loading $0.9 \text{ kg-NH}_4\text{-N/m}^3 \cdot \text{d}$ for nitrification and with $3.5 \text{ kg-NO}_3\text{-N/m}^3 \cdot \text{d}$ for denitrification, the nitrogen in treated water becomes below 10 mg/L even if HRT is 5 hrs.

In this report, while an outline of the principle, the structure and the treatment method of the fluidized bed nitrogen removal process is introduced, a part of the demonstration test result is reported.

Key words : Nitrification, Denitrification, Moving Bed Biofilm Reactor, Carrier Elements

分類 : X_1 排水, X_2 紙パルプ産業環境一般

1. はじめに

1998 年 10 月より閉鎖性水域の富栄養化の改善を図り、水環境保全のため窒素・リンの排出規制が開始された。現在は各自治体での詳細検討がなされており、

窒素・リン除去は重要な課題となっている。窒素・リンのうち、窒素除去には経済的に優れている生物処理が適用されることが多く、浮遊汚泥を利用した活性汚泥変法が一般的であった。しかし、この方法は水理学的滞留時間 (HRT) を長くとらねばならず、従来の BOD 除去だけの場合に比べ 1.5~2 倍の設置面積が必要となり、よりコンパクトで効率的な方法が望まれて

*平成 13 年度年次大会講演 (講演 No. D 15)

いる。現在では、種々の効率的な方法が開発・実用化されるようになってきている。

実用化された効率的な方法の1つに担体投入法がある。これは曝気槽に比重が1に近い担体を投入し、効率的にアンモニアを硝酸に硝化後、脱窒し窒素除去を行う方法である。担体には形状や材質の異なる多くの種類があるが、われわれはポリエチレン製で、独特な形状を持つ担体を用いた流動床方式の硝化脱窒装置（商標：PABIO DENI）を実用化した。この方法は、既報¹⁾で紹介したように高負荷・高効率のBOD除去にも用いるが、窒素除去に最適で、従来の活性汚泥変法の1/2～1/3の滞留時間で窒素除去が行え、曝気槽容積が小さい既設設備でもBOD除去だけでなく窒素除去も可能になるという特徴を持っている。また、10℃という低温でも高い窒素除去効果が得られる、既設のさまざまな形状の反応槽に適用が可能等の特徴を持っている。

実証実験では、硝化に関して $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷 $0.9 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ で、脱窒では $\text{NO}_3\text{-N}$ 容積負荷 $3.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ でいずれも98%以上の高除去率が得られることや滞留時間が5 hrでも処理水中の窒素を 10 mg/L 以下にできる等、効率的で高い除去能力が確認できた。

PABIO DENIは海外を中心として工場排水では6件、下水分野では32件の実績を有しており、実装置での優秀性も広く認知されている。

本報告では、流動床式硝化脱窒装置PABIO DENIの原理・構造や処理方法の概要を紹介するとともに実証実験結果の一端を報告する。

2. PABIO DENIの概要

2.1 原理および構造

PABIO DENIプロセスにおける硝化槽および脱窒槽の概念図を図1に示す。

硝化槽、脱窒槽に投入された担体は硝化槽では曝気空気で、脱窒槽では機械攪拌によって流動化される。硝化槽の曝気はラテラル配管による粗大気泡方式を採用、通常の散気板は不要で、構造が簡単なため目詰まりもなく、圧損もほとんどない等の特徴がある。脱窒槽の攪拌は、基本的にはプロペラ型の機械攪拌を用いるが、槽内の無酸素空気の循環による攪拌も可能である。投入される担体は比重が0.95のポリエチレン製で、その形状は直径が10 mm、高さが7 mmの円筒形である。円筒内は十字の仕切が、外周にはフィンが付いており、仕切は担体の強度アップや比表面積の増大に、フィンは攪拌効果の向上や粗大気泡の微細化に役立っている。担体の比表面積は $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ である。担体の形状を写真1に示す。なお、後述するが汚泥は生物膜として外周にも付着するが、主として担体の円筒内部に付着する。

2.2 特徴

本装置で使用している担体は、その独特な形状から次のような特徴を持っている。

- ①比表面積が大きく、活性の高い微生物（汚泥）の保持ができ、高負荷処理が可能である。
- ②担体の激しい流動により、増殖汚泥による閉塞が無く逆洗操作が不要である。
- ③比重が0.95と水のそれに近く、容易に流動する。
- ④担体は物理強度が高いため寿命が20年と長く、

図1 PABIO DENI装置の概念図

硝化槽担体

脱窒槽担体

写真 1 PABIO DENI 担体の外観

この間の補充は不要である。また、形状が比較的大きく簡単なスクリーンで分離が可能。

一方、装置の特徴としては以下が挙げられる。

- ①活性汚泥変法の 1/2~1/3 の HRT で処理ができ、高効率処理が可能。
- ②水温 10℃ においても高い窒素除去率が得られ、低温でも高い処理性能が確保できる。
- ③担体付着汚泥で処理を行うため、汚泥の返送がなく汚泥管理が容易、汚泥量のコントロールも不要で運転管理も容易である。
- ④さまざまな形状の反応槽に適用ができ、既設タンク、槽類を流用可能で、改造も簡単。

2.3 処理プロセス

PABIO DENI は排水の種類、排水中の窒素の形態や濃度、目標水質等によって種々のプロセスに適用が可能であるが、①処理に関与する汚泥の種類による分類と②排水の流れ方向による分類の 2 つに大別できる。

2.3.1 処理に関与する汚泥の種類による分類

1) 担体単独法

活性汚泥変法のように汚泥を返送するのではなく、担体に付着した汚泥のみで処理する方法で、本法では負荷や目標水質に応じて槽容積の 50~67% の担体を投入する。

2) 担体—浮遊汚泥併用法

担体に付着した汚泥と活性汚泥の両方で処理する方法で、担体は主として硝化処理に使用される。この方法は増殖速度の遅い硝化菌を大量に確保することを目的として、すなわち硝化は担体付着汚泥で行い、担体の投入量は 20~50% である。この場合は、通常の活性汚泥法と同様に沈殿槽からの返送汚泥が必要である。

2.3.2 排水の流れ方向による分類

有機物の有無、目標処理水質は高低等によってプロ

セスは異なってくるが、その例を図 2 に示す。これらの方法は浮遊汚泥を利用した方法として実用化されてきたが、これに担体を投入することで処理時間の大幅な短縮が可能で、効率的な処理が行える。

1) 直列式硝化脱窒法

活性汚泥処理水等の有機物濃度が低い排水の窒素除去に適用される。前段の硝化槽には pH 調整用としてアルカリ剤（通常は苛性ソーダ）が、後段の脱窒槽には脱窒に必要な水素供与体として有機物（通常はメタノール）が外部注入される。アルカリ剤の削減のため脱窒処理水を硝化槽に循環させ、アルカリ度を回収する場合もある。

2) 循環式硝化脱窒法

このプロセスは適度の濃度の有機物（BOD）と窒素（N）を含む排水に適用される。一般に BOD/N 比は 3~3.5 が適しているといわれる。この方法は硝化処理水を前段の脱窒槽に返送・循環することによって、原水中の有機物を有効に利用し脱窒槽でのメタノール量を、また脱窒槽で増加するアルカリ度を回収し硝化槽での苛性ソーダ量を削減する経済的な方法である。脱窒槽と硝化槽のみの組合せの場合も多いが、硝化槽の後段に第 2 脱窒槽と再曝気槽を設けることで、さらに高度な処理水質を得ることも可能である。

3) ステップ流入多段硝化脱窒法

この方法は有機物に加えて、窒素の除去を含めた高度処理に対応できる処理方法として有望で、主として下水処理分野での研究・開発が進められている。本法は脱窒槽と硝化槽を 1 組として、これを複数組設置して各組の前段の脱窒槽に排水を等分割して流入させる方法である。それぞれの脱窒槽・硝化槽に担体を投入することで窒素処理に必要な HRT を更に短縮することが可能になる。通常の活性汚泥変法では窒素除去に必

1)直列式硝化脱窒法

2)循環式硝化脱窒法

3)ステップ流入式多段硝化脱窒法

図 2 処理プロセス例

N：硝化槽，DN：脱窒槽，A：再曝気槽，C：有機源

要な HRT は 12～16 時間，ステップ流入多段硝化脱窒法では 11～13 時間が必要といわれている²⁾が，担体を投入すれば 5 時間程度の滞留時間でも窒素除去が可能になる。

3. 各種窒素除去プロセスとの比較

下水や有機物を含有する工場排水の窒素除去には経済的にも前項の 2) 循環式硝化脱窒法が適している。下水の場合，循環式活性汚泥変法では前述のように 12～16 時間の HRT が必要になるが，硝化槽に担体を投入すれば，従来の有機物除去での HRT 8 時間で有機物だけでなく窒素除去も同時に可能となる。使用される担体には硝化菌を包含した包括固定型と表面に生

物膜を形成させる結合型があり，材質にはポリエチレンライコール，ポリプロピレン，スポンジ等がある。これらの担体を使用した処理方法（硝化促進型），活性汚泥変法とポリエチレン製の結合担体を用いる PABIO DENI との比較を表 1 に示す。PABIO DENI の特徴は先に紹介したが，硝化槽だけでなく脱窒槽にも担体が利用でき，さらに短時間での窒素除去が可能である。

4. 実証実験

4.1 ベンチスケール実験結果

4.1.1 HRT の影響

実験は図 1 に示した装置をそれぞれ用いて行った。

表 1 PABIO DENI, 消化促進型および従来法の比較

項 目		PABIO DENI	硝化促進型	活性汚泥変法
担 体		必要	必要	不要
担体投入率(%)	硝化	50~67	10~20	—
	脱窒	50~67	—	—
汚 泥 の 種 類		付着汚泥	付着汚泥+浮遊汚泥	浮遊汚泥
返 送 汚 泥		不要	必要	必要
HRT(時間)	硝化	2~3	2~3	6~8
	脱窒	2~3	4~5	6~8

表 2 合成排水の組成

項 目	成分	濃度(mg/L)
硝 化	NH ₄ Cl	12~125 as N
	NaHCO ₃	50~500 as CaCO ₃
脱 窒	NaNO ₃	35~150 as N
栄養塩	KH ₂ PO ₄	1~10 as P
	MgSO ₄ ·7 H ₂ O	1~10 as Mg
	CaCl ₂ ·2 H ₂ O	1~10 as Ca
	FeCl ₃ ·6 H ₂ O	0.2~2 as Fe

排水としては表2に示す成分の合成排水を使用し、本実験ではNH₄-N、NO₃-N濃度をそれぞれ13~25 mg/L、30~50 mg/Lに固定、HRTを段階的に短縮した。

硝化および脱窒処理でのHRTと硝化率およびNO₃-N除去率の関係を図3, 4に示す。硝化処理ではHRT 1~4時間で98%以上の硝化率が得られ、HRT 0.5時間でも90%以上と良好な結果が得られた。脱窒処理ではHRT 0.5~3.5時間の範囲で98%以上のNO₃-N除去率が得られた。これらより、PABIO DENIでの硝化・脱窒処理はそれぞれのHRTが0.5時間以上であれば、HRTによらず90%以上の高い除去効果が得られるといえる。

4.1.2 容積負荷の影響

HRTを所定時間に固定し、NH₄-NおよびNO₃-Nの濃度をそれぞれ125 mg/L、150 mg/Lまで段階的に高めて実験を実施した。硝化・脱窒処理における容積負荷と硝化率およびNO₃-N除去率の関係を図5, 6に示す。硝化処理では容積負荷0.9 kg-NH₄-N/m³・d以下で98%以上の高い硝化率が得られた。NH₄-N容積負荷と硝化量との関係は図7のようになり、容積負

図 3 硝化槽 HRT と硝化率の関係

図 4 脱窒槽 HRT と NO₃-N 除去率の関係 図 5 NH₄-N 負荷と硝化率の関係

荷 $0.9 \text{ kg-NH}_4\text{-N/m}^3 \cdot \text{d}$ までは硝化量と等しく、硝化速度は $0.9 \text{ kg-NH}_4\text{-N/m}^3 \cdot \text{d}$ となり、ほぼ 100% の硝化率が得られることを示している。

一方、脱窒処理では図 6 に示すように容積負荷 $3.5 \text{ kg-NO}_3\text{-N/m}^3 \cdot \text{d}$ の高負荷でも除去率として 98% 以上が得られた。

4.1.3 付着汚泥量

担体付着汚泥量の測定結果の一例を表 3 に示す。付着汚泥量は負荷と共に増加する傾向があり、最大負荷での付着汚泥量は硝化処理で $1,000 \text{ mg/L}$ 、脱窒処理では $3,000 \text{ mg/L}$ であった。汚泥の付着状態は先の写真 1 に示しているが、汚泥の大部分は円筒内部に付着している。また、本実験では合成排水を使用している

ため、無機の SS は含まれておらず、付着汚泥はほとんど菌体と見なせる。なお、増殖する付着汚泥は攪拌により一部が断続的に剥離し、槽内に浮遊するが、合成排水使用のため本実験では浮遊汚泥量は非常に少なく、いずれも 10 mg/L 以下であった。

4.1.4 単位汚泥あたりの除去能力

単位汚泥あたりの $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の除去能力を連続実験での容積負荷、除去率および付着汚泥量から検討した。

結果は表 3 に併記しているが、硝化処理では平均 $1.22 \text{ kg-NH}_4\text{-N/kg} \cdot \text{d}$ 、脱窒処理では $1.11 \text{ kg-NO}_3\text{-N/kg} \cdot \text{d}$ であった。合成排水を使用し、担体を投入しないときの 20°C における $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 除去能力はそれぞれ $0.25, 0.31 \text{ kg/kg-VSS} \cdot \text{d}$ であったと報告³⁾されているが、得られた結果はこれらの値の 3~4 倍となっている。これは、PABIO DENI では担体の激しい流動で付着生物膜が肥大することなく常に一定の厚みを保持しているため基質や酸素の拡散速度が大きいこと、および常時世代更新された活性の高い菌体が保持されているためと推定される。

4.1.5 硝化・脱窒処理での所要 HRT

以上の結果を元に $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有排水を対象として、硝化・脱窒処理における所要 HRT を求めた。原水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 40 mg/L とした。結果を表 4 に示すが、硝化と脱窒を合わせた反応槽の総 HRT は 24°C の場合 1.4 時間、 10°C の場合は 4.7 時間となり、海外の実績値と同程度で、低水温時でも短い HRT で処理可能であることが確認できた。

4.2 ステップ流入多段硝化脱窒法による実験結果

実下水を用いて 3 段の硝化脱窒実験を行った。実験は活性汚泥併用法で行い、硝化部の汚泥滞留時間 (A-SRT) は 1.5~2.5 日とした。水質結果を表 5 に、T-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の推移を図 8 に示す。

4.2.1 窒素除去

表 5 および図 8 に示すように、硝化処理での処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ は概ね 1 mg/L 以下と安定した処理性能が得られた。処理水 T-N は 18 mg/L 、 11 mg/L 、 8.7

図 6 $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷と除去率の関係

図 7 $\text{NH}_4\text{-N}$ 負荷と硝化率の関係

表 3 付着汚泥量

槽 名	硝 化 槽	脱 窒 槽
窒素負荷 ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{d}$)	0.61 0.97 1.27	0.50 3.48
付着汚泥量 (mg/L)	289 755 992	457 3,020
VSS/SS 比 (—)	0.94 — 0.96	— 0.96
窒素除去能力 ($\text{kg/kg} \cdot \text{d}$)	1.48 1.18 1.02	1.07 1.15

mg/L であった。T-N が 18 mg/L, 11 mg/L と高いのは BOD/N が 1.8 と低めで、脱窒に必要な有機物 (BOD) が不足していたこと、および硝化液循環による脱窒槽への DO 持ち込みが原因であり、十分な有機物量と適度な硝化槽 DO が保持されれば T-N は 8.7

mg/L となっており、10 mg/L 以下まで良好に処理されている。BOD, SS はそれぞれ 5 mg/L 以下、8 mg/L 以下と十分に除去されていた。

4.2.2 担体の硝化・脱窒能力

担体の硝化および脱窒能力を回分試験で確認した結果を図 9, 10 に示す。担体の硝化能力は $27.5 \text{ mg-NH}_4\text{-N/L} \cdot \text{h}$ 、浮遊している活性汚泥のそれは $4.5 \text{ mg-NH}_4\text{-N/L} \cdot \text{h}$ で、担体のほうが 6 倍大きく、担体投入の効果が非常に大きいことが分かる。A-SRT が 2.5 日と短い活性汚泥は通常は硝化能力を保持しないが、今回は一定の能力を保持していた。これは活性汚泥の中に担体から剥離した硝化菌が含まれるためと考えら

表 4 所要 HRT (原水 $\text{NH}_4\text{-N}=40 \text{ mg/L}$)

水 温	硝化槽 HRT (時間)	脱窒槽 HRT (時間)	総 HRT (時間)
24℃	1.1	0.3	1.4
10℃	3.7	1.0	4.7

図 8 T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ の推移

表 5 原水および処理水水質 (平均値)

原 水 種 類		初沈流出水①	初沈流入水②	初沈流入水③
BOD/N 比		1.8	2.9	2.9
T-N	原水 (mg/L)	25.9	25.1	24.0
	処理水 (mg/L)	18.0	11.3	8.7
$\text{NH}_4\text{-N}$	原水 (mg/L)	19.8	18.9	17.0
	処理水 (mg/L)	0.7	1.1	0.5
$\text{NO}_3\text{-N}$		17.0	9.8	7.1
BOD	原水 (mg/L)	45.5	73.5	85.7
	処理水 (mg/L)	< 5	< 5	< 5
SS	原水 (mg/L)	52	111	113
	処理水 (mg/L)	7.8	5.9	5.3

図 9 硝化能力測定結果

図 10 脱窒能力測定結果

れる。

一方、脱窒に関しては担体は $6 \text{ mg-NO}_3\text{-N/L} \cdot \text{h}$ 、活性汚泥は $4.1 \text{ mg-NO}_3\text{-N/L} \cdot \text{h}$ と担体のほうが 1.5 倍の能力を保有していることが明らかとなった。

5. 実 績

ポリエチレン製担体を使用した PABIO DENI は

1990 年に 1 号機がノルウェーで納入され、その後ヨーロッパを中心に、日本、オーストラリアでも実績を伸ばしてきており、2001 年 2 月時点で工場排水向けで 6 件、下水分野で 32 件の実績を有するまでに至っている。日本では建設中を含め 3 件の実績がある。

一方、納入された設備の反応槽容積は $20 \sim 19,000 \text{ m}^3$ であり、小規模から大規模設備まで適用できることが実証されている。

6. おわりに

流動床式硝化脱窒装置 PABIO DENI の原理・構造・処理方法の概要を紹介した。また、実験データを基に PABIO DENI は高負荷処理が可能な高効率の設備で、従来法に比べ優れていることを報告した。閉鎖性水域等の水環境の保全は人類にとって必要不可欠であり、窒素規制はますます厳しくなることが予想され、窒素除去に対する性能向上や効率化の必要性は今後さらに高まるのは必死であり、本報告が少しでも役立てば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 川嶋淳, 加治正廣: 高負荷対応型流動床式生物処理装置 (パビオムーパー) について, 紙バ技協誌 54 (8) 15-20 (2000)
- 2) 堺好雄ら: 既設処理場の高度化, 第 36 回下水道研究発表会講演集, p.526-528 (1999)
- 3) 財団法人土木研究センター 建設省総合技術開発プロジェクト: バイオテクノロジーを活用した新排水処理システムの開発報告書 (下水道編), p.634 (平成 3 年 2 月)