

脱窒性リン蓄積細菌を利用した下水処理技術および リン資源回収の可能性

Municipal Wastewater Treatment Using Denitrifying Phosphate-Accumulating Organisms and Its Potential for Phosphorus Recovery

常田 聡*, 大野 高史, 副島 孝一, 平田 彰
SATOSHI TSUNEDA, TAKASHI OHNO, KOICHI SOEJIMA and AKIRA HIRATA

早稲田大学理工学部応用化学科 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1

* TEL: 03-5286-3210 FAX: 03-3209-3680

* E-mail: stsuneda@waseda.jp

Department of Chemical Engineering, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

キーワード: 脱窒性リン蓄積細菌, 下水処理, 生物学的栄養塩除去, 余剰汚泥, リン回収

Key words: denitrifying phosphate-accumulating organisms, municipal wastewater treatment, biological nutrient removal, excess sludge, phosphorus recovery

(原稿受付 2004年9月6日/原稿受理 2004年12月24日)

1. はじめに

河川, 湖沼, 内湾等の閉鎖性水域は, 各種の排水, 山林や田畑からの流入水などによって汚濁の進行が著しい。また, 窒素・リンなどの栄養塩類の蓄積が進行すると, 藻類などの一次生産者の増殖が促進されやすく, アオコ・赤潮の発生, および貧酸素水塊(青潮)などの富栄養化現象が顕在化している。この問題の解決のためには排水中の窒素・リンを取り除く処理, すなわち高度処理の普及が必要不可欠である。

窒素やリンを除去する方法は大きく分けて物理化学的な方法と生物学的な方法があるが, 下水処理場のような大規模の処理には, 施設的, コスト的に見て生物学的処理がふさわしいと言われている。生物学的なリン除去法として, リン蓄積細菌を用いた嫌気好気法, 窒素除去法として, 硝化細菌と脱窒細菌を用いた循環式硝化脱窒法が一般的に知られている。また, 近年ではこれらを組み合わせ合わせた生物学的窒素・リン同時除去プロセスがいくつか考案され, 実用化されている。その例としてリン蓄積細菌・硝化細菌・脱窒細菌を用いた嫌気/無酸素/好気循環型処理 (Anaerobic/Anoxic/Oxic: A₂O) プロセス, UCT (University of Cape Town) プロセスなどがある。生物学的リン除去プロセスは, 汚泥全体の代謝として取り扱うことで, その原理が説明されている²⁾。しかしながら, リン蓄積細菌の生理学的な性質や種類が明らかになっていないため, リン除去プロセスの精密な制御は困難である。特に, 現場でしばしば報告されている, リン除去能の突然の消失などといった現象は, 説明しきれない問題である。

一般的な下水は C/N 比が低いために, 従来の生物学的窒素・リン同時除去プロセスでは, 有機物不足になり, 脱窒反応が十分に起こらないという問題がある。この問題を解決する手段として, 硝酸を電子受容体としてリンを取り込む「脱窒性リン蓄積細菌 (Denitrifying Phosphate-Accumulating Organisms: DNPAOs)^{3,7,15,19,22)}」が注目されている。この細菌は嫌気条件で摂取し蓄積した炭素源を, 無酸素条件での脱窒とリン取り込みに重複して使えるという特徴を持っている。つまり, リン蓄積機能と脱窒機能を両方持っており, 下水中から窒素・リンを同時に除去することができる。もしもこの細菌を系内に高密度に保持することができれば, 有機物不足の解消, 窒素・リンの除去率向上などが期待できる^{16,24)}。しかしながら, リン蓄積細菌と同様, 脱窒性リン蓄積細菌の詳細な生理学的性質や種類は明らかになっていない。

本稿では, 脱窒性リン蓄積細菌の性質や種類, および脱窒性リン蓄積細菌を利用した下水処理プロセスについて解説し, さらに下水汚泥からのリン資源回収の可能性について触れる。

2. 脱窒性リン蓄積細菌

脱窒性リン蓄積細菌はリン蓄積細菌と同様な特徴を持っている。脱窒性リン蓄積細菌は, リン取り込み時の電子受容体として硝酸を用いることができるため, 嫌気/無酸素条件で優位的に存在する。その代謝の概略図を図1に示す。このように, 嫌気条件において, 有機物を取り込み, 菌体内で PHA (Polyhydroxyalkanoates) の形で蓄積する。また, その際にグリコーゲンは還元力すな

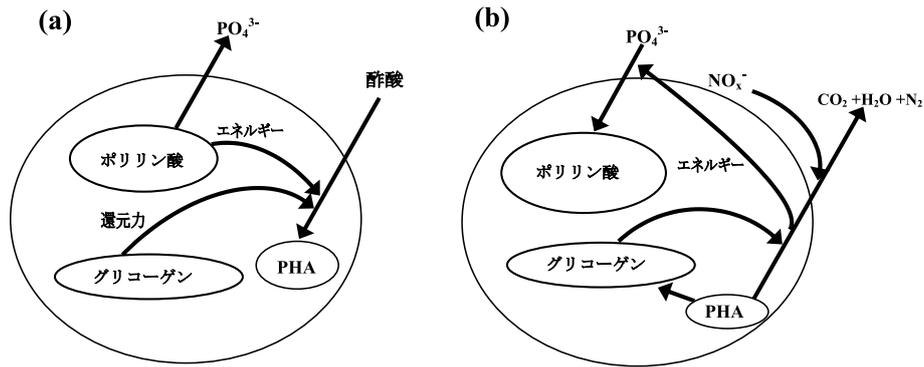


図1. 脱窒性リン蓄積細菌の代謝の概略 (a) 嫌気条件, (b) 無酸素条件。

わち電子供与体として作用する。そして、つづく無酸素条件において、この蓄積した PHA の分解によりエネルギーを獲得し、リンを取り込む。このような代謝を示す脱窒性リン蓄積細菌については、まだ詳しい種類や性質がわかっていないが、これまでに報告された知見について次に述べる。

今から10年ほど前にラボスケール¹⁹⁾ やフルスケール¹⁹⁾ の生物学的栄養塩除去 (Biological nutrient removal: BNR) プロセスにおいて、しばしば無酸素条件でのリン取り込みが観察されることが報告され、脱窒性リン蓄積細菌に関する研究が行われ始めた。この脱窒性リン蓄積細菌は、電子受容体として酸素の代わりに硝酸を用いる能力を持っており、無酸素条件でリンの取り込みと同時に脱窒を行うことができることから、BNR プロセスに積極的に利用することができれば脱窒のための有機物不足の解消ができると考えられた。

一方で、BNR プロセスにおいて脱窒速度を定量的に評価したところ、無酸素条件でのリン取り込み速度は好気条件でのリン取り込み速度の約2/3~3/4であること、また、この無酸素条件でのリン取り込み能力の消失といった予測できない現象が起こることから、脱窒性リン蓄積細菌を BNR プロセスに利用することに大きな利点がないとする説もある^{9,14)}。

現在の BNR プロセスにおける研究開発の大きな目的の一つとして、窒素・リン除去のための有機物 (COD 成分) の有効利用が挙げられる。一般の脱窒細菌とリン蓄積細菌を利用する場合、両者のあいだで有機物をめぐり競争が起こってしまう。これに対して、蓄積した有機物を使って脱窒とリン取り込みの両方を同時に行うことのできる脱窒性リン蓄積細菌は、C/N 比が低い下水の窒素・リンを同時に除去する場合に非常に有効である。

エネルギー効率の観点からは、硝酸を用いたエネルギー生産は酸素を用いたエネルギー生産より40%程度低いことから、電子受容体としての硝酸の利用は、発生する汚泥量を20%削減できるという側面も持っている^{16,24)}。よって、脱窒性リン蓄積細菌の利用は、有機物の有効利用と同時に発生する汚泥量の減少という利点も持ち合わせている。

近年は分子生物学的方法などにより脱窒性リン蓄積細菌の群集構造解析^{3,8,32)} や高度集積化^{1,10)} の検討も行われており、これらの成果や今後の研究から、脱窒性リン蓄積細菌についての更なる知見が得られ、脱窒性リン蓄積

細菌を利用した新しい下水処理プロセスの開発につながっていくと思われる。

3. 脱窒性リン蓄積細菌を利用した下水処理プロセス

脱窒性リン蓄積細菌を積極的に利用しようと開発されているプロセスがいくつかある。それらは利用する汚泥の種類の違い、すなわち脱窒性リン蓄積細菌と硝化細菌が共存しているか、していないかによって、Single-sludge system と Two-sludge system に分けられる。以下に、それぞれのプロセスについて、原理および特徴を説明する。

3.1. Single-sludge system

Single-sludge system において、汚泥は嫌気、好気、無酸素条件をすべて通過する。活性汚泥の中で特に硝化細菌はその増殖や活性に長い好気時間を必要とするが、その一方で長い好気時間は脱窒性リン蓄積細菌のリン取り込み活性や増殖を阻害するという問題を引き起こす¹⁷⁾。このため、Single-sludge system における窒素・リン同時除去のためには、硝化細菌と脱窒性リン蓄積細菌の両者に適切な条件を作り出すことが重要となる。

これまでに、Single-sludge system として、anaerobic-aerobic-anoxic-aerobic sequencing batch reactor ((AO)₂ SBR system²¹⁾ および anaerobic-aerobic-anoxic process (AOA process²⁸⁾、anaerobic-aerobic SBR (aerobic における溶存酸素 (dissolved oxygen: DO) 制御)³³⁾ などが提案されている (表1)。

(AO)₂ SBRでは、すべてのリン蓄積細菌 (Phosphate-accumulating organisms: PAOs) に対する脱窒性リン蓄積細菌の割合 (好気条件でのリン取り込み速度と無酸素条件でのリン取り込み速度から算出)^{22,29)} は、通常の嫌気/好気条件での11%から64%に上昇し、全有機物 (Total organic carbon: TOC)、窒素、リンの平均除去率は、それぞれ92%、88%、100%であったと報告されている²¹⁾。また、リアルタイムコントロールパラメーターとして、pH と酸化還元電位 (ORP) のプロファイルを用いることで、各条件の適切な時間をコントロールでき、栄養塩除去の信頼性や安定性を高めていくことができるとしている。このことは SBR により栄養塩除去を行う際に大きな利点となると考えられる。

筆者らは、嫌気/好気/無酸素 (Anaerobic/Oxic/Anoxic:

表1. Single-sludge system に属するプロセスの比較。

プロセス名称	(AO) ₂ ²¹⁾	AOA ²⁸⁾	anaerobic-aerobic ³³⁾
C/N/P 比 ^a	300/30/10	300/30/15	400/40/15
容積 (L)	4	2	4
SRT (days)	18	20	15
DNPAOs の割合 ^b	64%	40%	—
備考		好気条件で少量炭素源供給	好気条件で DO を 0.45~0.55 mg/L に制御

^a C/N/P: COD/NH₄⁺-N/PO₄³⁻-P

^b リン蓄積細菌に対する脱窒性リン蓄積細菌の割合

(好気条件でのリン取り込み速度と無酸素条件でのリン取り込み速度から算出)^{22,29)}

AOA) プロセスを提案し、模擬下水による連続処理実験を行い、単一槽で有機物・窒素・リンが効率よく除去できることを示している²⁸⁾。AOA プロセスでは、嫌気条件で有機物の取り込みとリンの放出、好気条件で硝化(一部リン取り込み)、無酸素条件でリン取り込みと脱窒を行うというものである。このプロセスにおいては、好気条件ですべてのリン取り込みが終わってしまうという現象も見られた。その場合、電子受容体(酸素や硝酸)と電子供与体(酢酸)が同時に存在する際の脱窒性リン蓄積細菌の性質²⁾に基づき、好気条件初期に炭素源(酢酸)を少量供給することで好気でのリンの取り込みを一時的に抑えることができた。単一槽において理想的な条件下で AOA プロセスが進行した場合、有機物、窒素、リンの各成分の1サイクルにおける挙動は図2のようになる。しかしながら、好気条件での硝化とリン取り込み一時的阻害をともに行うために、適切な量の炭素源を供給しなくてはならないという課題がある。AOA プロセスにおける炭素源供給後の窒素、リンの平均除去率は、それぞれ、88%、93%であった。また、すべてのリン蓄積細菌に対する脱窒性リン蓄積細菌の割合は、種汚泥(A₂Oプロセスから採取したもの)が21%であったのに対し、AOA プロセス内の汚泥では44%程度にまで増加した。

Zeng らは嫌気/好気条件における好気条件において DO を 0.45~0.55 mg/L 程度に制御することで、好気条件でリン取り込み・硝化・脱窒をすべて行うことができると報告している³³⁾。しかしながら、このプロセスにおける窒素除去はアンモニアから亜硝酸を経由して脱窒されることで達成されており、主要な脱窒の最終ガス生成物は N₂ よりもむしろ N₂O であったと述べている。N₂O

は CO₂ の310倍の温室効果ポテンシャルをもつことから、地球環境保全の面からも今後検討すべきである。また、微好気条件において、脱窒を担っている細菌は理想的には脱窒性リン蓄積細菌であるが、近年存在が示唆されてきた脱窒性グリコーゲン蓄積細菌(Denitrifying glycogen-accumulating organisms: DNGAOs)の存在も重要であると Zeng らは報告している³¹⁾。

3.2. Two-sludge system

脱窒性リン蓄積細菌は、嫌気条件と無酸素条件のサイクルで優占化する。脱窒性リン蓄積細菌の高度集積化のためには、嫌気/無酸素条件のみが理想的である。しかし、実際の下水処理においては、無酸素条件を作り出す前に、まず好気条件での硝化細菌による硝化が必要となる。脱窒性リン蓄積細菌と硝化細菌を高度に集積するために、それぞれを分けることが有効であるとの考えから、硝化を行う好気条件だけを切り離す外部硝化嫌気無酸素法(DEPHANOXプロセス⁴⁻⁶⁾、A₂N system^{18,27)}が開発されている(図3)。

これらのシステムでは、流入下水は嫌気槽に入り、そこで脱窒性リン蓄積細菌が有機物を取り込み蓄積する。次に、内部沈殿池において上澄みと汚泥との分離を行う。その後、上澄みは好気槽へ、汚泥は無酸素槽へ送られる。好気槽では硝化細菌によって硝化のみが起こる。そして、硝化液が無酸素槽へと流れ込み、汚泥と再混合し、嫌気槽で有機物を蓄積した脱窒性リン蓄積細菌により脱窒とリン取り込みが行われる。

これらの処理方式は、模擬下水¹⁸⁾、都市下水¹³⁾および豚舎排水⁴⁾に適用された例がある。模擬下水においては、COD、リン、窒素の平均除去率はそれぞれ、100%、99%、88%を達成している¹⁸⁾。また、流入下水における COD/N 比が3.4の時に最適な窒素・リン除去ができると報告している。豚舎排水においても、生物処理が非常に難しい低 C/N 比にもかかわらず、窒素98%、リン90%以上という高い栄養塩除去率が得られている⁴⁾。

Two-sludge system の利点として、Single-sludge system と比較して、「硝化」と「脱窒・リン取り込み」の工程をそれぞれ最適な条件で独立に運転できることが挙げられる¹⁸⁾。Single-sludge system では、硝化のために十分な長さの好気条件、長い SRT が必要になるが、Two-sludge system では、硝化における SRT は別に設定できる。また、UCT プロセスのような前脱窒のプロセスの

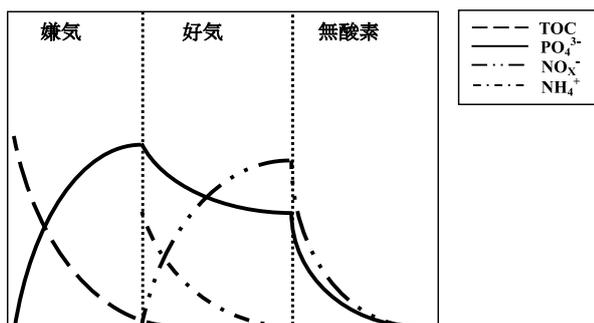


図2. AOA プロセスにおける各成分の挙動の概略図。

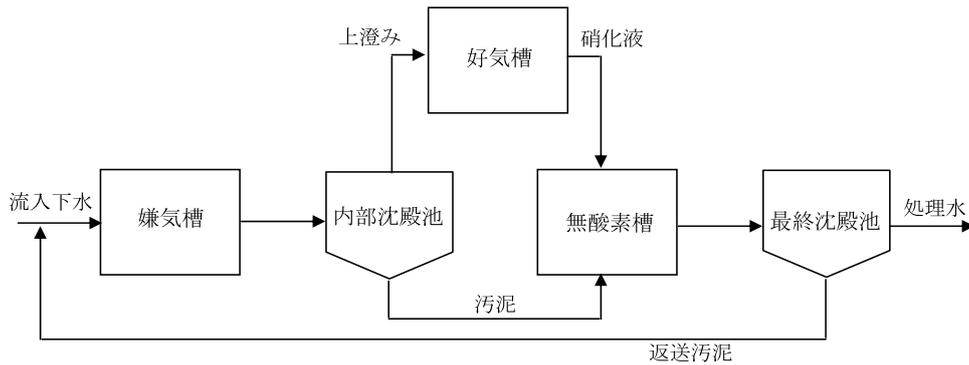


図3. 外部硝化嫌気無酸素法の概略図。

運転においては、処理水中の硝酸濃度を下げするためには、好気槽から無酸素槽への循環が必要であるが、外部硝化嫌気無酸素法においては、硝化の後に脱窒を行うため、完全な窒素除去が期待できる。外部硝化嫌気無酸素法においては、炭素源の節約効果として、消費された COD の最大55% (Activated Sludge Model No. 2d (ASM2d)¹²⁾ 基準) が脱窒とリン取り込みに重複して用いられたという報告もある³¹⁾。さらに、UCT プロセスと比べ、曝気量の削減が可能であるという報告もある¹¹⁾。

このように Two-sludge system は多くの利点をもつ反面、Single-sludge system のプロセスと比べ、余分に内部沈殿池が必要となるといった欠点もあり、設置スペースやコストの面で不利である。

一方、Two-sludge system の内部汚泥において、リン蓄積細菌に対する脱窒性リン蓄積細菌の割合^{22,29)} は、47%~66%に達するという報告もあり²⁷⁾、 A_2O プロセスの場合 (17~36%程度²⁶⁾ や AO プロセスの場合 (18~24%程度²⁵⁾) と比べてかなり高いことから脱窒性リン蓄積細菌の高度集積化が実現できていると言える。

4. 下水汚泥からのリン回収の可能性

近年、リン資源の枯渇化が懸念され、世界のリン資源の寿命は数十年とも言われている。このような背景を受けて、米国ではリン鉱石の輸出を禁止する措置を取っている。わが国では、リン資源の100%を海外からの輸入に頼っており、米国のこうした動きは深刻である。このようなリン資源の現状から、下水中のリンは単に除去するだけでなく、資源として循環させるべきとする考えが大きくなった。

一方、閉鎖性水域での富栄養化対策の一つとして下水処理の高度化が進んでおり、それに伴い、汚泥中のリン含有量も増加する傾向にある。汚泥中のリン含有量が増加することによって、①返流水中のリン負荷が増加する、②再溶出して不溶化したリン酸塩が配管を詰まらせる、③汚泥溶融時の排ガス処理プロセスへ悪影響を及ぼす、④焼却灰を各種リサイクル原料として有効利用する際の妨げになる、など様々な問題を引き起こす。

上記の問題を解決するために、高度処理後の下水汚泥から効率よくリンを回収する方法の開発が望まれている。下水汚泥からリンを溶出させる方法として、加熱処理²⁰⁾、フォストリップ、オゾン+アルカリ処理³⁰⁾ などの

方法が提案されている。それぞれに長所と短所があるが、いずれの方法においても汚泥中のリン含有率が高いほどトータルのリン回収率は高くできるはずである。

標準活性汚泥法では、一般の従属栄養細菌が有機物と同時にリン酸を取り込み、核酸やリン脂質などの細胞構成成分として蓄える。しかしながら、これらのリン化合物の重量は菌体乾燥重量の1%程度でしかない。一方、 A_2O プロセスでは汚泥中のリン含有率は4%程度まで増大する。これは、細胞内にポリリン酸を蓄積できる細菌 (PAOs) が存在するからである。しかしながら、処理槽内の優占種は従属栄養細菌であることから、汚泥全体として平均化すると、汚泥中のリン含有率は4%程度にとどまる。よって、 A_2O プロセスの余剰汚泥からリンを回収しても効率が低く、経済的に成り立たないとされている。これに対して、脱窒性リン蓄積細菌を利用した下水処理プロセスでは、有機物の添加量を極力減らすことが可能であり、脱窒細菌や従属栄養性細菌の存在量が減るので、汚泥中のリン含有率が高まる傾向にある。例えば、Single-sludge system である AOA プロセスにおいては、脱窒性リン蓄積細菌と硝化細菌が優占化した汚泥が各処理槽 (嫌気槽、好気槽、無酸素槽) を循環することによって、有機物・窒素・リンの除去がすべて達成されるため、脱窒細菌や従属栄養性細菌の出番がなく、これらの細菌の存在比率は低下する。筆者らは、AOA プロセスにおいて汚泥中のリン含有率は10~16%まで高まることを確認している。さらに、Two-sludge system の場合は、脱窒と脱リンを内部汚泥に、硝化反応を外部汚泥に担わせる (役割分担をさせる) ため、内部汚泥の脱窒性リン蓄積細菌の優占度が上がり、汚泥中のリン含有率は Single-sludge system 以上に高くなることが予想される。標準のリン鉱石に含まれるリン含有率が13%程度であることを考えると、重金属混入の問題と経済合理性の問題さえクリアできれば、これらの下水汚泥からリンを回収する日も近いのではないだろうか。

文 献

- 1) Ahn, J., T. Daidou, S. Tsuneda, and A. Hirata. 2001. Selection and dominance mechanisms of denitrifying phosphate-accumulating organisms in biological phosphate removal process. *Biotechnol. Lett.* 23: 2005-2008.
- 2) Ahn, J., T. Daidou, S. Tsuneda, and A. Hirata. 2002. Transformation of phosphorus and relevant intracellular compounds

- by a phosphorus-accumulating enrichment culture in the presence of both the electron acceptor and electron donor. *Biotechnol. Bioeng.* 79: 83–93.
- 3) Ahn, J., T. Daidou, S. Tsuneda, and A. Hirata. 2002. Characterization of denitrifying phosphate-accumulating organisms cultivated under different electron acceptor conditions using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis assay. *Water Res.* 36: 403–412.
 - 4) Bortone, G., F. Malaspina, L. Stane, and A. Tilche. 1994. Biological nitrogen and phosphorus removal in an anaerobic/anoxic sequencing batch reactor with separated biofilm nitrification. *Water Sci. Technol.* 30(6): 303–313.
 - 5) Bortone, G., R. Saltarelli, V. Alonso, R. Sorm, J. Wanner, and A. Tilche. 1996. Biological anoxic phosphorus removal — The DEPHANOX process. *Water Sci. Technol.* 34(1-2): 119–128.
 - 6) Bortone, G., L.S. Marisili, A. Tilche, and J. Wanner. 1999. Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process. *Water Sci. Technol.* 40(4-5): 177–185.
 - 7) Chuang, S.H., C.F. Ouyang, and Y.B. Wang. 1996. Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition. *Water Res.* 30: 2961–2968.
 - 8) Dabert, P., B. Sialve, J.P. Delgenes, R. Moletta, and J.J. Godon. 2001. Characterization of the microbial 16S rDNA diversity of an aerobic phosphorus-removal ecosystem and monitoring of its transition to nitrate respiration. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 55: 500–509.
 - 9) Ekama, G.A., and M.C. Wentzel. 1999. Denitrification kinetics in biological N and P removal activated sludge systems treating municipal wastewaters. *Water Sci. Technol.* 39(6): 69–77.
 - 10) 浜田康治, 岡崎光夫, 久場隆広, 楠田哲也. 2002. 脱窒活性を持つ脱リン細菌の高濃度化に関する実験的研究. 第36回日本水環境学会講演集. 494.
 - 11) Hao, X., M.C.M. van Loosdrecht, S.C.F. Meijer, and Y. Qian. 2001. Model-based evaluation of two BNR process-UCT and A_2N . *Water Res.* 35: 2851–2860.
 - 12) Henze, M., W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M.C. Wentzel, G.V.R. Marais, and M.C.M. van Loosdrecht. 1999. Activated sludge model No.2d. *Water Sci. Technol.* 39(1): 165–182.
 - 13) Hu, Z.-R., M.C. Wentzel, and G.A. Ekama. 2001. External nitrification in biological nutrient removal activated sludge systems. *Water Sci. Technol.* 43(1): 251–260.
 - 14) Hu, Z.-R., M.C. Wentzel, and G.A. Ekama. 2002. The significance of denitrifying polyphosphate accumulating organisms in biological nutrient removal activated sludge systems. *Water Sci. Technol.* 46(1-2): 129–138.
 - 15) Kernn-Jespersen, J. P., and M. Henze. 1993. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions. *Water Res.* 27: 617–624.
 - 16) Kuba, T., E. Murnleitner, M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen. 1996. A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms. *Biotechnol. Bioeng.* 52: 685–695.
 - 17) Kuba, T., M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen. 1996. Effect of cyclic oxygen exposure on the activity of denitrifying phosphorus removing bacteria. *Water Sci. Technol.* 34(1-2): 33–40.
 - 18) Kuba, T., M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen. 1996. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system. *Water Res.* 30: 1702–1710.
 - 19) Kuba, T., M.C.M. van Loosdrecht, F.A. Brandse, and J.J. Heijnen. 1997. Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants. *Water Res.* 31: 777–786.
 - 20) Kuroda, A., N. Takiguchi, T. Gotanda, K. Nomura, J. Kato, T. Ikeda, and H. Ohtake. 2002. A simple method to release polyphosphate from activated sludge for phosphorus reuse and recycling. *Biotechnol. Bioeng.* 78: 333–338.
 - 21) Lee, D.S., C.O. Jeon, and J.M. Park. 2001. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system. *Water Res.* 35: 3968–3976.
 - 22) Meinhold, J., D.M.F. Carlos, G.T. Daigger, and S. Isaacs. 1999. Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal. *Water Sci. Technol.* 39(1): 31–42.
 - 23) Mino, T., M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen. 1998. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Water Res.* 32: 3193–3207.
 - 24) Murnleitner, E., T. Kuba, E. Murnleitner, M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen. 1997. An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal. *Biotechnol. Bioeng.* 54: 433–450.
 - 25) 庄司 仁, 佐藤弘泰, 味埜 俊. 2004. 実下水処理場の生物学的リン除去プロセスにおける脱窒性脱リン細菌の評価. *水環境学会誌.* 27: 255–260.
 - 26) Shoji, T., H. Satoh, and T. Mino. 2001. Use of denitrifying polyphosphate accumulating organisms for simultaneous nitrogen and phosphorus removal. *Proceeding of First IWA Asia-Pacific Regional Conference, Fukuoka, Japan*, 813–818.
 - 27) Shoji, T., H. Satoh, and T. Mino. 2003. Quantitative estimation of the role of denitrifying phosphate accumulating organisms in nutrient removal. *Water Sci. Technol.* 47(11): 23–29.
 - 28) 常田 聡, 安 祐煥, 大道智孝, 大野高史, 平田 彰. 2002. 脱窒性リン蓄積細菌を利用した新しい高度排水処理プロセス. *水環境学会誌.* 25: 751–755.
 - 29) Wachtmeister, A., T. Kuba, M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen. 1997. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge. *Water Res.* 31: 471–478.
 - 30) 安永 望, 神谷俊行, 中津川直樹, 古川誠司. 2004. 下水汚泥からのリン溶出および回収技術の評価. *用水と廃水.* 46: 485–490.
 - 31) Zeng, R.J., Z. Yuan, and J. Keller. 2003. Enrichment of denitrifying glycogen accumulating organisms in anaerobic/anoxic activated sludge system. *Biotechnol. Bioeng.* 81: 397–404.
 - 32) Zeng, R.J., A.M. Saunders, Z. Yuan, and L.L. Blackall. 2003. Identification and comparison of aerobic and denitrifying polyphosphate-accumulating organisms. *Biotechnol. Bioeng.* 83: 140–148.
 - 33) Zeng, R.J., R.L. Lemaire, Z. Yuan, and J. Keller. 2003. Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor. *Biotechnol. Bioeng.* 84: 170–178.