

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20241019

研究課題名（和文）活性汚泥法からの脱却・インドからの超低コスト省エネ型下水処理システムの逆技術移転

研究課題名（英文）Reverse technology transfer of low cost and energy consuming wastewater treatment system in India to step out of traditional activated sludge process

研究代表者

大橋 晶良 (Ohashi Akiyoshi)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70169035

研究成果の概要（和文）：

カーテン型 DHS (Down-flow Hanging Sponge) リアクターは、途上国仕様を念頭に研究された処理装置で、先進国で要求されるような良好な処理水質は期待していなかった。しかし、超低コスト型にも係わらず長期連続処理運転において、余剰汚泥発生ゼロであり、処理水質は活性汚泥法と同等以上であることが明らかになってきた。そこで本研究ではインドで蓄積した知見を日本のような先進国に逆技術移転し、先進国も視野に入れた DHS リアクターの開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

Curtain type DHS (Down-flow Hanging Sponge) reactor has been studied for sewage treatment in developing countries, which was not expected to produce a good water quality applicable for developed countries. However, even though DHS is very cost effective and energy saving process, it was revealed that a system of UASB and DHS had a good effluent comparable to activated sludge process with less sludge production. In this study, novel DHS reactor for developed countries like Japan was tried to develop by transferring the knowhow accumulated in sewage treatment experiments in India.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2009 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2010 年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
年度			
年度			
総計	30,000,000	9,000,000	39,000,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：途上国, 下水処理, エネルギー, バイオテクノロジー, 地球温暖化ガス, UASB, DHS, 硝化・脱窒

1. 研究開始当初の背景

先進国において下・排水処理プロセスの主流は、活性汚泥法である。この 20 世紀の初期に開発された活性汚泥法は 100 年の歴史を持つクラシックなシステムであり、水環境の

保全に大きく寄与している。しかし、この方法が 21 世紀末までも継承されるのであろうか？もし、そうであるなら、生物学的排水処理技術は全く進歩のない研究分野であると言われても仕方ない。

活性汚泥法に代わる 21 世紀型の新しい下・排水処理システムを構築していこうという雰囲気は、水処理関連の学会において皆無に近い。現行の活性汚泥法で満足しておられるのであろうか。少々世界の動向が見えていないようにしか感じられない。現に、途上国において活性汚泥法は今や受け入れられていない。

途上国が活性汚泥法を採用しない理由が歴然とある。急速な人口増大と経済発展を続ける途上国では、経済発展を最優先するため、環境対策への社会資本投資がおろそかにされ、都市下水はほとんど無処理のまま流れ流し、あるいは処理効率の悪い低コスト処理システム（ラグーン等）が導入されているのみである。そのため、都市域の水質汚濁問題が深刻化し、生活環境の悪化のみならず、健康への脅威にもなっており、地域の経済構造、社会構造等の実状に応じた“適切”な下水処理システムを整備してゆくことが緊急課題となっている。

すなわち、日本のようにお金とエネルギーを存分にかけて、金ピカピカの処理をするような技術-活性汚泥法-をそのまま移転しても根付かないことは明白で、途上国仕様の“適正技術”=低コスト・簡易型の処理技術の開発・移転こそ求められている。

これらを鑑みると、上向流嫌気性スラッジブランケット（UASB）法などの嫌気性処理が途上国での下水処理に最も適していると言える。嫌気性処理法は汚泥発生量を低減でき、排水からメタンとしてエネルギーを回収できるなどの利点を有している。現にインドやブラジルでは UASB 法により都市下水を処理して、エネルギーの回収が図られている。しかし UASB 法を都市下水処理に適用した場合、グラニュー化が進行しにくい、良好な処理水質が得られない等の問題があり、適切な処理水質を得るための低コストで維持管理が容易な点を損なわない新たな後段処理プロセスが要求される。

このような背景を下に、我々は、低コスト（省エネルギー [エアレーションが不要]・創エネルギー [メタンガス回収]）で維持管理が容易な簡易型下水処理プロセスの開発に携わってきた。開発した処理プロセスは、汚泥保持能を向上させた改良型 UASB 法とその後段処理としてエアレーションを要しない好気性で新規のカーテン型の DHS（Downflow hanging Sponge-curtain）リアクター（特開平 10-263578）を直列でつなげたプロセスから構成されていて、実下水を供した長期連続処理運転において、余剰汚泥発生ゼロ、処理水質は活性汚泥法と同等であることをこれまでの研究で実証してきた。

国内では我々の新規システムの処理性能の素晴らしさに気づいている方はまだ数

少ないが、一方、途上国では申請者らのシステムを高く評価して頂いており、インドとニジェール（アフリカ）の両国に申請者ら協力の下に本システムのパイロット・プラントの建設と、実用化のための処理性能評価実験が実施された。

本研究室で開発したカーテン型 DHS リアクターは、途上国仕様を念頭に研究してきた処理装置で、先進国で要求されるような良好な処理水質は期待していなかった。ところが、超低コスト型にも係わらず長期連続処理運転において、余剰汚泥発生ゼロであり、処理水質は活性汚泥法と同等以上であることが次第に明らかになってきた。すなわち、途上国仕様に開発してきた DHS リアクターであるが、先進国にも適用可能な、活性汚泥法に代わる 21 世紀型の素養を秘めたシステムとして期待できる。

2. 研究の目的

DHS リアクターをインドに技術移転してきたが、本研究ではインドで蓄積した知見を日本のような先進国に逆技術移転し、先進国も視野に入れた世界標準の 21 世紀型排水処理システムを創成することを目的としている。活性汚泥法からの脱却は決して夢ではない。しかし、目的を達成するためには以下の課題を克服する必要がある。

1) 説得できる証拠の提示

UASB 法と DHS リアクターを組み合わせた下水処理システムは、エアレーション不要・余剰汚泥生成ゼロの省エネルギー・低環境負荷型の新規下水処理装置であり、なぜ余剰汚泥が出ないのか？、なぜ水質が良好なのか？、これらの理由を示すデータを提示し、浄化メカニズムなどの理論的裏付けを行う。

2) リン除去・回収

これまで開発した新規の下水処理システムは、余剰汚泥の引き抜きを必要としないため、リンは除去されずにシステム内を素通りして放出される。エアレーションなし、汚泥の引き抜き無しでも生物学的リン除去が可能な方法を考案しており、リン除去・回収技術を開発する。

3) 窒素除去の性能アップ

新規下水処理システムでは、下水がリアクター内を通過することで 40~50%の窒素除去が起こっていたが、窒素除去の性能を積極的に上げる技術を開発する。

4) 低温対策

開発してきた新規の下水処理システムは、途上国（東南アジア、中南米など）すなわち比較的温暖な地域を想定しており、低温での処理データはほとんどない。低温環境下での処理性能を把握すると共に、低温の影響を低減する技術を開発する。

5) 溶存メタンの回収

UASBリアクターで生成したメタンの一部は処理水中に溶存しており、処理水から大気中に放散され、地球温暖化の原因となる。この大気放散を防止するとともに、これを回収してエネルギー利用する技術を開発する。

3. 研究の方法

パイロットプラントおよびミニプラントのUASBとDHSリアクターのシステムを下水処理場に設置しての連続処理実験、またベンチスケールの室内人工下水連続処理実験を次のような方法で実施した。

1) 国内での新規下水処理パイロット・プラントの長期連続処理調査

国内において下水処理場にミニチュアのプラントを設置し、室温での実下水連続処理実験を開始し、低温下でも良好な先進国仕様の水質が得られるような運転条件、例えば水理学的滞留時間を検討する。これまで途上国用に25℃で処理した場合には、DHSリアクターの滞留時間が1.5時間でBOD10mg/l以下の処理が可能であったが、10℃以下でも環境基準をクリアできる運転条件を探る。

2) DHSリアクターの保水性等の原理と最適化

DHSリアクターがなぜ優れた性能を発揮するのか、この理由としてカーテン状に吊してあるスポンジの保水性を上げることができる。スポンジが保水できなく重力ですべての水が一瞬に流下してしまうと、微生物の生息できる場が失われ、高濃度の微生物を保持できない。一滴の排水がスポンジに滴下されると下部から一滴の処理された水が排出されることが重要である。これが満たされるかどうかは、スポンジのサイズ（主に三角柱の鉛直に相当する辺の長さ）、スポンジ内部のセルの大きさとスポンジの材質によって決まる。スポンジのサイズを小さくすれば、保水性の機能を持たせることに有利であるが、DHSリアクターの施工面からは大きなスポンジを使用したい。これまでに使用したスポンジは、たまたま保水性に問題は見られず適切であったが、最適化されているとは言えない。

DHSリアクターのもう一つの際だった特長は、酸素の取り込み早さである。ただ単に2mほどスポンジ内を流下する間に、エネルギーを投入することもなく、いとも簡単に空気中の酸素が排水に溶け込んで、無酸素水が飽和酸素水になる。この酸素ガスの効率的な交換の物理的メカニズムは、非常に不思議である。DHSリアクターが如何にして好気性を保たれているのか明らかにすることが、装置の最適な設計に欠かせない。また、スポンジ内の水の流路、流速を把握することで、スポンジ内での好気性部位と無酸素部位を予測することが可能となり、硝化・脱窒を促進させるための方策が打ち出せる。DHSリアクターを生物学的ではなく物理的な側面から、上記

のような原理の探求をバージンのスポンジを用いた実験を通して行った。

3) DHSリアクター内での硝化・脱窒促進および部分硝化・Anammox窒素除去のため設計・操作方法

DHSリアクターは、有機物除去に加え硝化・脱窒能力にも優れており、窒素除去率は約50%にも達する。本研究室では先端径が僅か数十マイクロの微小電極の開発を行っており、これらを微生物保持スポンジに適用し、酸素濃度プロファイルを測定したところ、深部まで溶存酸素が存在し、良好な酸素取り込み機能を備えていることが把握できた。そして内部は無酸素状態であり、ここで脱窒が起きていることが推測された。当然、スポンジのサイズが変われば、酸素ゾーンと無酸素ゾーンの割合は変化する。しかし、最適な硝化・脱窒が促進するスポンジサイズはいくらのか？またスポンジ内の流速と酸素取り込み速度の定量的な関係はどうなのか？など未だ不明である。そこで、最適な設計・操作方法を確立する。

また、DHSリアクターは低酸素制御することで、次世代の窒素除去技術として注目されている一槽型での亜硝酸型硝化/Anammox型窒素除去が可能である実験結果を得ている。そこで、Anammox型窒素処理の高速化・安定化を図るための操作方法を確立する。

4) リン除去・回収技術の確立

余剰汚泥を引き抜かない（発生しない）DHSリアクターでは、生物学的リン除去・回収は不可能であり、先進国仕様のシステムとしては適さないのではと考えていた。しかし、エアレーション不要・余剰汚泥無しでも、DHSリアクターは嫌気と好気状態のサイクルを施すことで生物学的に下水中のリンを除去・回収することが可能であることを発見した。DHSリアクターは高濃度の生物を保持する能力を有しており、密閉のDHSに空気送風量を制御して嫌気・好気を繰り返すことで、リン蓄積細菌をスポンジ内に特異的に生息させる。好気時にはリン除去未処理水中のリンをリン蓄積細菌に摂取・蓄積させ、嫌気時に下水などの有機物源を供給すれば、蓄積したリンが放出されて高濃度のリン含有水が得られるため、余剰汚泥を経由せず直接にリン回収を行うことができる。本リン除去・回収システムを実用化するため、まずラボスケールで一般的な有機物源として酢酸を用いた人工下水で実験を行う。分子生物学的手法を用いてリン蓄積細菌とその競合細菌の群集構造を把握しながら、嫌気・好気時間等の運転の最適化を図る。次に実下水にてリン含有水を高濃度化する制御技術を確立する。

5) 溶存メタンガスの大気放散防止技術の構築

UASBリアクターで生成したメタンの一部

は処理水中に溶存しており、処理水から大気中に放散される。メタンは二酸化炭素の 20 倍以上の温室効果があるとされており、微量でも地球温暖化の原因となる。UASB リアクター処理水に溶存しているメタン量は問題にされていないが、実は計算してみるとかなりの量であり、二酸化炭素排出量に換算 (m^3 当たり) すると、活性汚泥法で下水 1 m^3 を処理するのに要するエネルギー (エアレーション分) 量 (二酸化炭素排出量に換算) にほぼ匹敵する。では、本システムではどうであろうか? DHS リアクター内のメタン酸化細菌の活性や分子生物学的手法によるメタン酸化細菌動態解析を行ったところ、生物学的に酸化されるメタン量はごくわずかであり、大半の溶存メタンが物理的作用 (気相と液相間の物質移動作用) によって大気中へ直ちに放散することがわかった。これらを鑑みて、逆にこの物理的作用を利用して溶存メタンをガス化して回収しようという発想に至った。密閉した DHS リアクターの上部より嫌気性処理水を流下させ、下部より空気を調整して供給すれば、気相中のメタンガス濃度は容器内を上昇するに従って高濃度になるため、上部より高濃度メタン含有ガスが回収できる。これは単にメタンの大気拡散を防止するだけでなく、積極的なエネルギー回収としても意義が大きい。嫌気性処理水の滞留時間、空気供給量と回収メタン濃度の関係を明らかにし、溶存メタンの効率的な物理回収技術を確認する。

4. 研究成果

1) 日本のような先進国では温暖な途上国と異なり冬期では水温が低くて処理性能が懸念される。しかし、低温下でも DHS 前段の UASB 嫌気性処理の水理的滞留時間を 9 時間程度と長くすることで良好な先進国仕様の水質が得られる。

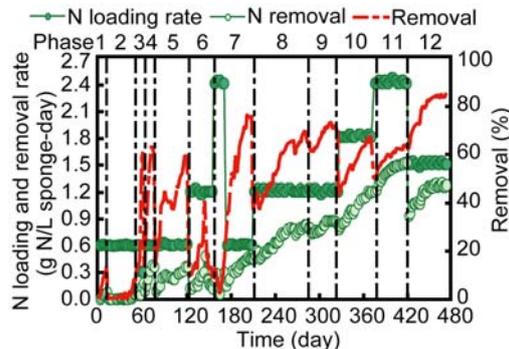


図 1 密閉型 DHS リアクターによるアンモニアの除去性能

2) DHS リアクターは低酸素制御することで次世代の窒素除去技術として注目されている一槽型での亜硝酸型硝化を行うことがで

きるが、低酸素下で亜硝酸性窒素が蓄積すると強温室効果ガスの亜酸化窒素が発生しやすくなることが明らかになった。しかし、この亜硝酸性窒素ガスはメタンとの共役で微生物分解できることを発見し、大気への放散を防止できる可能性が示せた。また、この新規の微生物の 16S rRNA 遺伝子に基づいた系統的な位置を明らかにした。

3) 密閉の DHS を嫌気・好気を繰り返すことで、好気時にはリン除去未処理水中のリンをリン蓄積細菌に摂取・蓄積させ、嫌気時に下水などの有機物源を供給すれば、蓄積したリンが放出されて高濃度 (100 mgP/L 以上) のリン含有水としてリン回収できることが分かった。その最適な嫌気・好気時間の運転は 4 時間・12 時間程度であることを見出した。

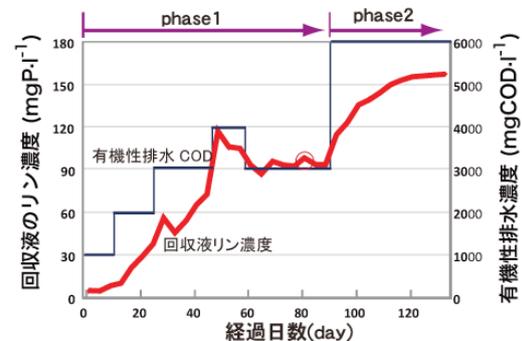


図 2 密閉型 DHS リアクターを用いたリン高濃度化性能

4) UASB リアクターで生成したメタンの一部は処理水中に溶存しており、大気中に放散されている。そこで密閉した DHS リアクターの上部より嫌気性処理水を流下させ、下部より空気を供給することで、気相中のメタンガス濃度は容器内を上昇するに従って高濃度になり、上部より自然のメタン含有ガスとして回収が可能であった。さらに、この密閉 DHS の後段に同一の DHS リアクターを設置することで、残存の溶存メタンは酸化分解され大気への放散を 99% 以上防止できることが分かった。

5) まとめ

途上国仕様として開発した下水処理装置は、低温でも良好な処理水が得られ、溶存メタンの大気放散防止、リンや窒素の除去、リン回収も可能であり、先進国にも適用可能な 21 世紀型の処理システムであることを実証でき、また、その性能の理由を分子生物学的手法による微生物叢解析から説明することができたなど、当初の計画を遂行した。

下水の嫌気性処理 (UASB 法) の後段処理として本研究で開発した DHS リアクターは、保

持微生物の高濃度化が可能であり、汚泥滞留時間が途轍もなく長い。この DHS リアクターを用いることで、増殖速度が遅くて、従来のバイオリアクター内に保持することが困難な難培養微生物でも培養でき、これまで不可能とされている環境技術の創生が可能となる。すなわち、エアレーションを要さない省エネ・低コストで、レアメタル等の資源回収や特殊な排水処理等への適用拡大が想起され、今後これら新規の環境技術開発を推進する。

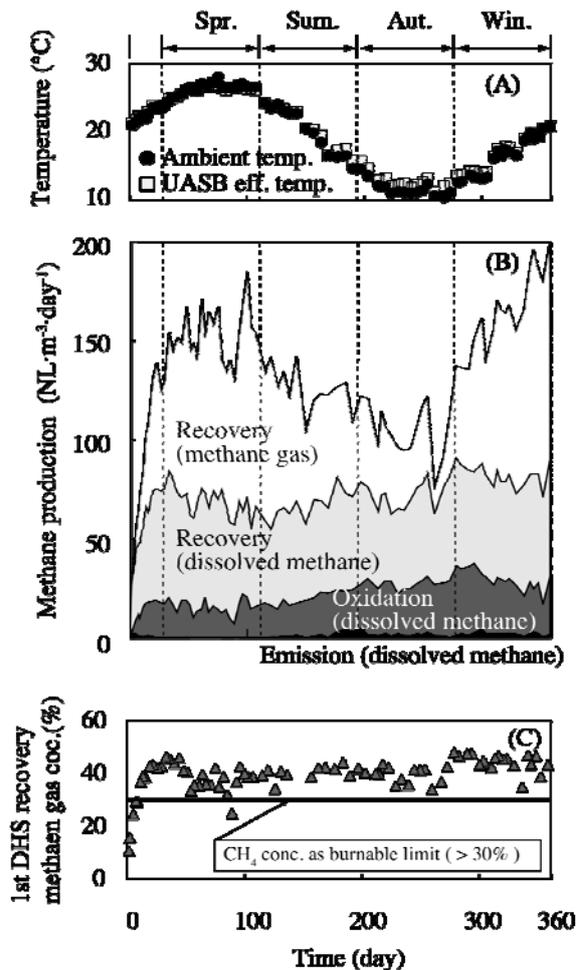


図 UASB 処理水溶存メタンの DHS リアクターによる回収と酸化除去性能の経日変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 11 件)

- ①. Masashi Hatamoto, Yusuke Koshiyama, Tomonori Kindaichi, Noriatsu Ozaki, Akiyoshi Ohashi., Enrichment and identification of methane-oxidizing bacteria by using down-flow hanging

sponge bioreactors under low methane concentration., Annals of Microbiology., 巻なし., pp.171-178., (2010)., 査読有 DOI: 10.1007/s13213-010-0171-8

- ②. N. Matsuura, M. Hatamoto, H. Sumino, K. Syutsubo, T. Yamaguchi, A. Ohashi., Closed DHS system to prevent dissolved methane emissions as greenhouse gas in anaerobic wastewater treatment by its recovery and biological oxidation., Water Science & Technology-WST., Vol. 61-No. 9., pp2407-2415 (2010)., 査読有 DOI:10.2166/wst.2010.219
- ③. 竹村泰幸, 木村晶典, 阿部憲一, 名取哲平, 大橋晶良, 原田秀樹, 上村繁樹., 塩分による DHS リアクター内の硝化細菌群の菌叢変化と亜硝酸化の促進., 水環境学誌., Vol. 33-No. 10., pp159-165(2010)., 査読有., https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswe/33/10/33_10_159/_article/-char/ja/
- ④. 松浦 哲久, 江口 拓, 幡本 将史, 原田秀樹, 大橋 晶良., 嫌気性下水処理の後段 DHS リアクターにおける溶存メタンの生物学的酸化と物理的揮散., 土木学会論文集G., Vol. 66-No. 3., pp111-119(2010) 査読有., https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsce/jg/66/3/66_3_111/_article/-char/ja/
- ⑤. 大河原正博, 幡本将史, 西山桂太, 松浦哲久, 阿部憲一, 珠坪一晃, 井町寛之, 原田秀樹, 山口隆司, 大橋晶良., 嫌気性処理水に含まれる溶存メタンの密閉型 DHS 装置によるガス化回収., 水環境学会誌., Vol. 33-No. 4., pp25-31(2010) 査読有り., https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswe/33/4/33_4_25/_article/-char/ja/
- ⑥. Masashi Hatamoto, Hiroki Yamamoto, Tomonori Kindaichi, Noriatsu Ozaki and Akiyoshi Ohashi., Biological oxidation of dissolved methane in edd luents from anaerobic reactors using a down-flow hanging sponge reactor., WATER RESEARCH., Vol. 44-No. 5., pp.1409-1418 (2010) 査読有り., DOI:10.1016/j.watres.2009.11.021
- ⑦. 角野晴彦, 大岩勇太, 小澤徹, 珠坪一晃, 原田秀樹, 大橋晶良., 硝化型 DHS/硫黄脱窒反応槽による低コスト型下水三次処理, 用水と廃水, Vol. 51-No. 8 pp. 50-59(2009) 査読有り., <http://jdream2.jst.go.jp/jdream/action/JD71001Disp?APP>

=jdream&action=reflink&origin=JGLOB
AL&versiono=1.0&lang=japanese&db=JS
TPlus&doc=09A0792218&fullink=no&md
5=74f172c521c26424df5cd5d7ffd264b7

- ⑧. 小野寺崇, 大久保努, 山口隆司, 原田秀樹, 村上繁樹, 大橋晶良., 実規模 DHS リアクターにおける硝化およびふん便性大腸菌群の除去性能評価, 下水道協会誌, Vol. 46-No. 561, pp106-116 (2009) 査読有り., <http://ci.nii.ac.jp/naid/10024885928>
- ⑨. Ai Miyashita, Hanako Mochimaru, Hiromi Kazama, Akiyoshi Ohashi, Takashi Yamaguchi, Takuro Nunoura, Koki Horikoshi, Ken Takai and Hiroyuki Imachi., Development of 16S rRNA gene-targeted primers for detection of archaeal anaerobic methanotrophs (ANMEs)., FEMS Microbiol Lett Vol. 297., pp. 31-37 (2009) 査読有り., DOI: 10.1111/j.1574-6968.2009.01648.x

[学会発表] (計 24 件)

- ①. H. Kodera, T. Kindaichi, N. Ozaki, A. Ohashi., Phosphorus recovery as condensed liquid using an anaerobic-oxic DHS reactor., International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2010)., 2010. 11. 1-3., 大連理工大学 (中国)
- ②. T. Awata, T. Kindaichi, N. Ozaki, A. Ohashi., Increases in anammox activity under the existence of acetate and nitrate., International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2010)., 2010. 11. 1-3., 大連理工大学 (中国)
- ③. T. Awata, T. Kindaichi, N. Ozaki, A. Ohashi., Evaluation of anammox activity and dissimilatory nitrate reduction in the presence of acetate or propionate., 13th International Symposium on Microbial Ecology (isme13)., 2010. 8. 22-27., Washington State Convention Center (USA)
- ④. H. Kodera, M. Hatamoto, T. Kindaichi, N. Ozaki, A. Ohashi., Effects of anaerobic-aerobic period on the microbia

l community structure of polyphosphate accumulating organisms., 13th International Symposium on Microbial Ecology (isme13)., 2010. 8. 22-27., Washington State Convention Center (USA)

- ⑤. H. Kodera, M. Hatamoto, K. Abe, T. Kindaichi, N. Ozaki, A. Ohashi., Recovery of Phosphorus as Highly Concentrated Solution Using an Anaerobic-Oxic DHS Reactor., Water and Environment Technology Conference International Forum for Scientists and Engineers., 2010. 6. 25-26., 横浜国立大学

[図書] (計 1 件)
大竹久夫, サイエンス&テクノロジー、リン資源の回収と有効利用, 2009, p.100-110

[産業財産権]
○出願状況 (計 1 件)
名称: リンの回収方法および回収装置
発明者: 大橋晶良、尾崎則篤、金田一智規、幡本将史、小寺博也
権利者: 広島大学
種類: 特願
番号: 2009-044797
出願年月日: 平成 21 年 2 月 26 日
国内外の別: 国内

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大橋 晶良 (Ohashi Akiyoshi)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 70169035

(2) 研究分担者

尾崎 則篤 (Ozaki Noriatsu)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50294541
(H21→)

金田一 智規 (Kindaichi Tomonori)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 10379901

(3) 連携研究者

原田 秀樹 (Hideki Harada)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70134971