

# 地球規模課題対応国際科学技術協力

(環境・エネルギー研究分野「地球規模の環境課題の解決に資する研究」領域)

エネルギー最小消費型の下水処理技術の開発

(インド)

平成 22 年度実施報告書

原田 秀樹

東北大学大学院 工学研究科 教授

<平成 22 年度採択>

## 1. プロジェクト全体の実施の概要

本プロジェクトの狙いは、途上国の人々の健康に重大な脅威を与えている劣悪な水環境汚染を修復・改善し、水起因衛生リスクを低減して、安全で快適な水環境を取り戻すことである。その為に、途上国が適用可能な下水処理システムを創成して、広く普及を図ることが我々の役目である。

原田らは低コスト、超省エネ型(エアレーションが不要)で維持管理が容易な新規の下水処理プロセスの開発に多年にわたって携わってきた。2010年度はインド・アグラ市での DHS (Down-flow Hanging Sponge) リアクターの実規模試験の準備として、インド側関係者との協議を行い、実施機関である環境森林省国家河川保全局(NRCD)との協議概要を M/M にまとめ、署名・交換した。また、東北大学と NRCD は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業「エネルギー最小消費型下水処理技術の開発(英名:UASB-DHS Integrated System – A Sustainable Sewage Treatment Technology)」の協同研究に関する合意文書(MOU)を締結した。平成 23 年度はインド側との協力体制のもと、アグラ市に実規模 DHS を建設する協力会社を選定し、また実験室・オフィスの整備を行う予定である。

## 2. 研究グループ別の実施内容

研究題目 1: インド・アグラ市の 78 MLD 下水処理場での実規模試験の準備と実施 (東北大学, 木更津高専, 長岡技大, NRCD, UP 水道公社, AMU, CPCB, CPHEEO)

### ① 研究のねらい

インド・アグラ市の下水処理場に新規建造する DHS リアクターで連続処理実験を行い、UASB—DHS システムの下水処理への適用性を実証できる。

### ② 研究実施方法

項目 1. DHS リアクター用担体の選定、発注、納品

項目 2. UASB-DHS システムの設計と建造

項目 3. 連続処理モニタリングと下水処理への適用評価

### ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

#### (1) 詳細計画策定調査に対する事前調査

2010年8月26日から8月30日までの日程で、原田秀樹(東北大学)、上村繁樹、大久保努(木更津高専)の三名でインドを訪問した。訪問目的は、ウッター・プラデシュ州上下水道公社(UP水道公社)に対しインド側カウンターパートとしての参加要請と DHS 実証プラントの建設候補地の選定であった。UP水道公社アグラ支局の V.P. Singh 氏 (General Manager) と Sushil Kumar 氏 (Chief Engineer) と協議の結果、本プロジェクトに対し意欲的でありカウンターパートとしての参加意思が得られた。また、実証プラントの候補地についても、アグラ 78 MLD 下水処理場内の敷地(敷地広さ 30m x 30m 程度)の無償提供が確認された。



打合せの様子



実証プラント建設用地の視察

## (2) 詳細計画策定調査

詳細計画策定調査団(鎌田寛子、宇多智之(JICA)、高橋昭男(JST)、原田秀樹(東北大学)、大久保努(木更津高専)、松原ひとみ(八千代エンジニアリング(株))は、2010年9月7日から9月15日までの日程でインドを訪問し、デリー、アグラ及びラックナウにおいてインド側関係者との協議を行い、実施機関である環境森林省国家河川保全局(NRCD)との協議概要をM/Mにまとめた。M/Mは、研究代表機関であるNRCDのBrijesh Sikka部長及びUP水道公社 AgraのV.P. Singh氏と署名・交換した。これらにより、合意されたプロジェクトの概要は、①プロジェクトの基本的枠組み、②PO(案)及びマスタープラン(案)、③合同調整委員会、④知的財産権、⑤パイロットプラン設置場所、⑥研究機関の変更、⑦インド国からの便宜供与、⑧投入資機材である。



アグラ 78 MLD 下水処理場の視察



M/M 締結の様子

### (3) MOU(東北大学-NRCD) 締結

東北大学と NRCD は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業「エネルギー最小消費型下水処理技術の開発(英名:UASB-DHS Integrated System – A Sustainable Sewage Treatment Technology)」の協同研究に関する合意文書(MOU)を締結した(NRCD 署名日:2011年3月23日、東北大学署名日:2011年4月15日)。以上のように、成果に向けた活動である「UASB-DHS システムの設計と建造」に向けた取り組みは着実に進んでいる。

- ④ カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)  
平成 22 年度は特になし。

研究題目2: 処理メカニズムの解明と重要微生物の検出・定量・モニタリング技術の開発、DHS技術の新展開  
(東北大学, 木更津高専, 長岡技大)

#### ① 研究のねらい

現行の DHS 技術を実機としての導入を促していくためには、そのメカニズムを明らかにする必要がある。本研究題目では、物理化学的反応の解明、生物学的反応の解明を行う。これらの情報を基に、本研究題目で、DHSリアクターの下水以外への展開も試みると共に、ポスト G6 型 DHS リアクターの開発を行う。

## ② 研究実施方法

項目 1. 物理化学的メカニズム解明

項目 2. 生物学的メカニズム解明

項目 3. 重要微生物モニタリング技術の開発

項目 4. 提案技術の新展開

## ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

## (1)物理化学的メカニズム解明

DHS 法は、これまでの国内実験やインド・カルナールでの長期連続実験の結果から、安定かつ優れた有機物およびアンモニア除去能力を有しており、また人為的な曝気無しにも関わらず DHS 処理水の溶存酸素(DO)が 5-6 mg/L になるなど、優れた酸素取込能力を有することも示されている。そこで、酸素取込能力や汚泥捕捉・保持能力等の物理化学的要因を追求するため、DO 微小電極を駆使した酸素移動効率( $K_{La}$ )の測定手法の確立に向け、これまでに実施してきた関連する研究を総括し今後の実験計画を立てた。また、 $K_{La}$ や汚泥捕捉能・保持能の解析実験に使用するリアクターの設計と製作及びポンプ類や微小電極を購入し実験の立ち上げ準備を行った。以上の取り組みは、成果に向けた活動である「物理化学的メカニズムの解明」に関連している。



作成したリアクターカラムと実験に使用するポンプ類

## (2) 生物学的メカニズム解明

DHS 技術は、汚泥保持担体としてスポンジを用いた好気性排水処理技術である。本技術は人為的な曝気操作を必要としないため、活性汚泥法と比較して省エネルギーであり、途上国に適用可能な下水処理プロセスとして注目されている。国内で実施した研究の結果、本技術を UASB 法の後段処理として用いることで、活性汚泥法と同程度の有機物・アンモニア除去能を示すことが明らかになっている。また、本研究グループは、インドのカルナール下水処理場に DHS リアクターを建造し、現地のプラクティカルな条件の下で実証試験を行っている。結果、本技術の優れた処理性能は実証試験においても示され、今後途上国での本格的な適用(実規模レベルでの適用)が計画されている。本項目では、インドに設置された実証規模 DHS リアクターの生物学的処理メカニズムを明らかにすることを目的に、実証規模 DHS リアクターの保持汚泥内微生物群集構造を 16S rRNA 遺伝子クローン解析により明らかにした。

DHS 保持汚泥は、リアクターの最上段(一段目)から最下段(六段目)までのスポンジ担体を採取し、これらのスポンジから搾取した汚泥を使用した。サンプリングは G3 型担体・G6 型担体それぞれについて、

冬期と夏期の2回に分けて行い、合計12種類の汚泥に対して、バクテリア100クローン程度をそれぞれのサンプルについて解析した(今回は10サンプルについて報告)。図中のサンプル名は、リアクターの最上段(一段目)から採取したG3型担体を「G3-1」と示す。実験の結果、DHS汚泥からは、門レベルで多岐に渡る多様なクローンが数多く検出された。季節による比較をした場合、夏期の汚泥試料は冬期と比較して多様性に富み、 $\alpha$ -proteobacteria 綱、 $\beta$ -proteobacteria 綱、 $\gamma$ -proteobacteria 綱、Bacteroidetes 門、Firmicutes 門に属するクローンが比較的高い頻度で検出された。一方、冬期の汚泥試料は夏期と比較して多様性に乏しく、 $\gamma$ -proteobacteria 綱、Firmicutes 門に属するクローンが優占的に検出された。DHSリアクターの高さ方向で比較をした場合、処理が進むにつれて $\gamma$ -proteobacteria 綱に属するクローンの検出頻度が減少し、一方で $\alpha$ -proteobacteria 綱、Bacteroidetes 門に属するクローンの検出頻度が増加する傾向が得られた。アンモニア酸化に参与する Nitrosomonas、Nitrosococcus に近縁なクローンは両保持汚泥の最上段(一段目)から検出されており、亜硝酸酸化に参与する Nitrospirae 門に属するクローンは、G3型担体の保持汚泥全てから検出された。またスポンジ担体別で比較した場合、微生物コミュニティの違いはほとんど見られなかった。

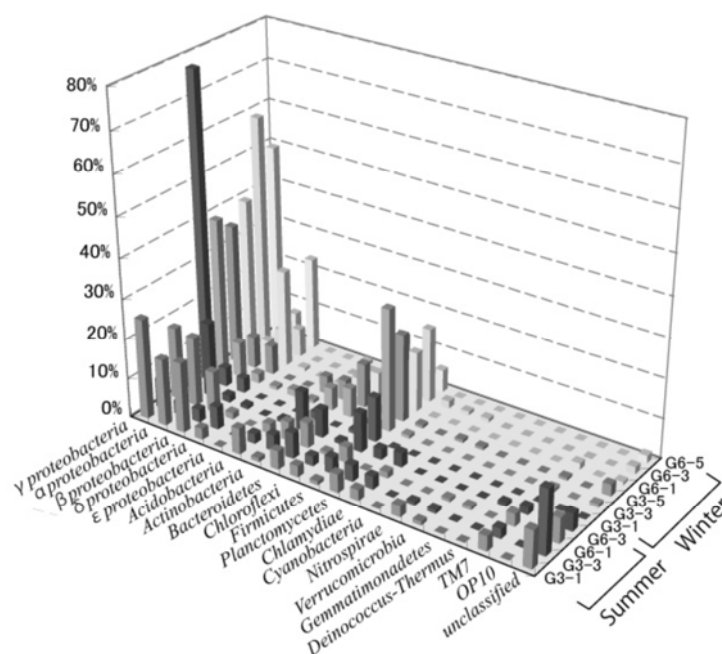


図 汚泥内微生物の門による分類と G3、G6 型スポンジ担体各段における検出頻度

表 クローン統計解析の結果

汚泥採取日	運転227日目(夏期)				運転118日目(冬期)					
	31.1				20.0					
汚泥採取日のDHS流入水温										
スポンジ担体型式	G3型		G6型		G3型		G6型			
汚泥採取段数	1段目	3段目	1段目	3段目	1段目	3段目	5段目	1段目	3段目	5段目
クローン解析数 A	110	82	100	79	107	123	136	126	112	107
Phylotype数 <sup>a)</sup>	73	71	70	56	25	45	62	42	38	29
1つのクローンにより構成されるphylotype数 B	56	62	56	42	19	28	45	25	25	19
2つのクローンにより構成されるphylotype数	9	7	10	8	2	8	7	8	8	3
Coverage <sup>b)</sup>	0.49	0.24	0.44	0.47	0.82	0.77	0.67	0.80	0.78	0.82
推定phylotype数(Chao1)	227	307	210	152	82	87	186	75	71	72
推定phylotype数(ACE)	227	327	250	155	80	101	199	99	77	86
Evenness index	0.86	0.95	0.87	0.89	0.33	0.63	0.71	0.61	0.83	0.54

a) 塩基配列相対性 97%以上を同一の phylotype とした  
 b) Coverage=1-(B/A) A: 解析クローンの総数, B: 1クローンにより構成される phylotype の総数

遺伝子配列の相同性 97%以上のものを同一のファイロタイプとして分類したところ、本実験の汚泥試料から検出されたファイロタイプの数は 25-73 ファイロタイプであった。Chao1 や ACE による統計解析を行った結果、汚泥内の推定ファイロタイプ数は 71-327 ファイロタイプであり、季節・高さ方向によって大きな差が生じた。解析したクローン数が汚泥内に存在する全てのファイロタイプをどれくらい網羅できているのかを示す Coverage を算出した結果、冬期汚泥試料は全てのファイロタイプの 7-8 割を網羅していたのに対して、夏期汚泥試料は 5 割以下となり、その多様性の高さを伺わせる結果となった。また、種の均等性を示す Evenness index から、冬期汚泥試料は特定のファイロタイプが優占して存在し、夏期汚泥試料は多様なファイロタイプが均等に存在している事が分かった。検出されたファイロタイプの中でも *Pseudomonas* 属の検出頻度が特に高く、その割合が冬期汚泥試料で高い事から、冬期 DHS リアクターの排水処理メカニズムにおいて *Pseudomonas* 属が重要な役割を担っている可能性が示唆された。

今後は DHS リアクターの基軸方向における水質プロファイルとの比較を行い、本 DHS リアクターの生物学的微生物処理メカニズムを明らかにしていく。以上の取り組みは、成果に向けた活動である「生物学的メカニズムの解明」に関連している。

研究題目3: 設計指針・維持管理マニュアルの作成 (東北大学, 木更津高専, 長岡技科大, NRCD, UP水道公社, AMU, CPHEEO)

① 研究のねらい

現行の DHS 技術は経験的な要素が多く、必ずしも科学的な根拠によって裏打ちされているとは言い難い。本研究題目では、UASB のポスト・トリートメント技術としての DHS プロセスの技術的特性を整理して、UASB-DHS システムの体系化を図る。これらの情報と研究題目 1 および 2 の知見を活用し、UASB-DHS システムの実機化・普及のために不可欠な設計指針と維持管理マニュアルを社会実装する。

② 研究実施方法

項目 1. UASB-DHS システムの技術的特性の整理と体系化

項目 2. 設計指針の作成とインド関係政府機関への認定

項目 3. 維持管理マニュアルの作成とインド関係政府機関への認定

③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

インド国が発行している河川等の水質データベースや学術論文等からの最新情報を入手し、インド国における水環境の現状について、情報収集を行っている。実際にインドに赴き、その現状について実態把握も行った。

### 3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 0 件、国際 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)
- ③ 論文詳細情報

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳(国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

#### 4. プロジェクト実施体制

##### (1) 「東北大学」グループ

研究題目：

1. インド・アグラ市の 下水処理場での実規模試験の準備と実施
2. 処理メカニズムの解明と重要微生物の検出・定量・モニタリング技術の開発、DHS技術の新展
3. 設計指針・維持管理マニュアルの作成

①研究者グループリーダー名： ○原田秀樹（東北大学・教授）

②研究項目

- ・基本設計と詳細設計（基本設計は日本国内、詳細設計はインド国内）
- ・提案技術の省エネ効果（既存施設の調査・実態把握）
- ・重要微生物検出定量モニタリング技術の開発
- ・UASB-DHS システムの技術的特性の整理と体系化

##### (2) 「木更津工業高等専門学校」グループ

研究題目：

1. インド・アグラ市の78 MLD下水処理場での実規模試験の準備と実施
2. 処理メカニズムの解明と重要微生物の検出・定量・モニタリング技術の開発、DHS技術の新展
3. 設計指針・維持管理マニュアルの作成

①研究者グループリーダー名： ○上村繁樹（木更津工業高等専門学校・教授）

②研究項目

- ・提案技術の省エネ効果（既存施設を含む）
- ・生物学的処理メカニズム解明（国内のみ）
- ・物理学的処理メカニズム解明（国内のみ）
- ・新規 DHS 技術(ポスト G6)の開発（国内のみ）
- ・UASB-DHS システムの技術的特性の整理と体系化

##### (3) 「長岡技術科学大学」グループ

研究題目：

1. インド・アグラ市の78 MLD下水処理場での実規模試験の準備と実施
2. 処理メカニズムの解明と重要微生物の検出・定量・モニタリング技術の開発、DHS技術の新展
3. 設計指針・維持管理マニュアルの作成

①研究者グループリーダー名： ○山口隆司（長岡技術科学大学・准教授）

②研究項目

- ・提案技術の省エネ効果（既存施設を含む）
- ・DHS 技術の高度処理への適用（国内のみ）
- ・UASB-DHS システムの技術的特性の整理と体系化

以上