

発展途上国に適用可能なエネルギー最小消費型の下水処理プロセスの開発

～ スポンジ担体散水ろ床 (DHS-G3) リアクターの処理特性～

水圏土壌環境工学研究室 高橋優信

指導教官 原田秀樹、大橋晶良

1. はじめに

現在、発展途上国では下水のほとんどが無処理で垂れ流しの状況にあり、適切な下水処理システムを整備することが緊急課題である。発展途上国における下水処理システムの導入の条件は、(1) 建設費・維持費が安価であること、(2) 維持管理が容易であること、(3) 敷地面積・規模がコンパクトであることが望まれる。UASB 法は、従来の好気性処理に比べ、(1) 曝気が必要ないため、その電力は不要で経済的、(2) 余剰汚泥の発生が少ない、(3) 維持管理が容易、(4) メタンとしてエネルギー回収が可能、等の特徴を有していることから、本法の下水処理への適用は古くから提案されている。しかしながら、下水処理を単独で下水処理に適用した場合、グラニュール化が進行しにくく、また良好な処理水質が得られない等の問題がある。すなわち、UASB の特徴を損なわない、新たなポストトリートメントシステムが要求される。

本研究室では数年来、途上国に適用可能な下水処理システムとして、UASB と懸垂型スポンジ (Downflow Hanging Sponge: DHS) を組み合わせたシステムを提案してきた。懸垂型スポンジカーテンリアクター第二世代型システム(DHS-G2)では、実下水を用いた 5 年間の連続運転から、平均全 BOD 除去率で 95% 以上の安定した処理特性を示した。

そこで本研究では、実プロセスへのスケールアップが容易な第三世代型のスポンジ担体散水ろ床リアクター (DHS-G3) を開発した。そして途上国における排水基準を満たす水質の確保を目的として、本法の処理特性および

適用性を検討するため、UASB と DHS-G3 を組み合わせたパイロットスケールプラントを都市下水処理場に設置し、実下水を用いた連続処理運転を行った。

2. 連続運転処理性能

2.1 実験装置および方法

本開発システムの概要を Fig.1 に示す。供給水はスクリーン通過後の実下水を用いた。実下水は UASB (全容積 155L、HRT6 時間) で前段処理され、その処理水は後段の DHS-G3 (スポンジ容積 52L、理論的 HRT2 時間) へ全量供給される。DHS-G3 では UASB 処理水を上部より散水し、重力で流下する過程でスポンジ担体の表面あるいは内部に付着・捕捉されている微生物によって浄化される機構である。使用した担体は、5024 個の円柱状スポンジ (材質:ポリウレタン、直径 22mm、高さ 27mm) を、ネットリング (材質:ポリプロピレン) に埋め込み、それをランダムにカラムに充填させた。そのときスポンジ担体の充填率は 38%とした。なお、温暖な途上国地域の年間平均気温を想定し、両プロセスともに 25 に温度制御した。

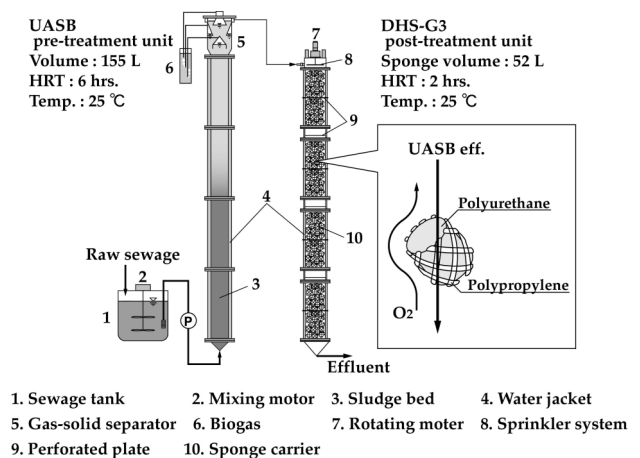


Fig.1 Schematic representation of whole system.

3 実験結果および考察

3.1 有機物除去能

有機物除去の一例として全 COD の経日変化を Fig.2 に示す。連続処理開始時の HRT は、UASB を 24 時間、DHS-G3 を 8 時間とし、徐々に HRT を短縮していった。UASB の HRT で 8 時間、DHS-G3 の HRT で 2.7 時間の運転条件では、卓越した有機物除去能を継続的に有した。運転開始 72 日目以降の UASB の HRT で 6 時間、DHS-G3 の HRT で 2 時間の運転条件では、UASB 流出水の汚泥負荷の増大から浄化に障害が発生し、システム全体の有機物除去能は低下した。しかしながら、運転開始 180 日以降の処理性能は回復の兆しを示した。207 日目以降は UASB も安定し、それ以降の平均値 (Tab.1) をみると、全 COD 濃度で下水が 473mg/L であったものが、UASB 処理水で 161mg/L となり、DHS-G3 処理水で 33mg/L となった。従って、全システムにおける平均除去率で 93%、溶解性 COD については全システムにおける平均除去率で 95% と卓越した有機物除去能力を有し、安定的な処理水を得ることができた。

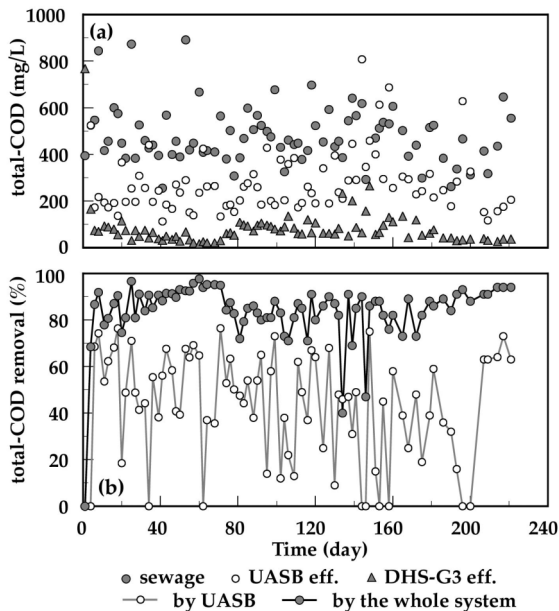


Fig.2 Time course of total-COD removal during treatment in combination of UASB and DHS-G3 reactor. Concentration of total-COD (Fig.2 (a)) in the influent (raw sewage), UASB effluent, and DHS-G3 final effluent. Total-COD removal (Fig.2 (b)) by UASB only and by the whole system.

Tab.1 Summary of process performances of UASB unit, of DHS-G3 post-treatment unit. (Jan. 7, 2002~Jan. 21, 2002)

Parameter	Raw sewage	UASB (6-hr HRT)	DHS-G3 (2-hr HRT)
Total-COD (mg/L)	473 (128)	161 (33)	33 (5)
Soluble-COD (mg/L)	153 (70)	83 (38)	23 (7)
Total-BOD (mg/L)	180 (68)	67 (31)	5 (4)
Soluble-BOD (mg/L)	57 (14)	28 (19)	3 (3)
Total-N (mgN.L-1)	53 (12)	47 (10)	34 (4)
Total-Kjeldahl (mg/L)	53 (12)	47 (10)	17 (7)
Soluble-Kjeldahl (mg/L)	37 (7)	44 (10)	15 (8)
NH ₄ -N (mg/L)	21 (5)	26 (5)	8 (7)
NO ₂ -N (mg/L)	N.D.	N.D.	2.5 (2)
NO ₃ -N (mg/L)	N.D.	N.D.	14.3 (5)
SS (mg/L)	211 (81)	35 (16)	14 (10)
VSS (mg/L)	183 (74)	29 (13)	10 (5)
DO (mg/L)	0.24 (0.15)	0.17 (0.11)	4.92 (0.28)
pH	6.60 (0.61)	6.40 (0.11)	6.39 (0.87)
ORP (mV)	-62 (59)	-200 (17)	136 (35)
v.s. Seepage (*: v.s. UASB eff.)			
Total-COD (%)		65 (4)	93 (2)
Soluble-COD (%)		83 (4)	95 (1)
Total-BOD (%)		64 (10)	98 (1)
Soluble-BOD (%)		85 (10)	98 (1)
NH ₄ -N (%)			73 (23) *
Total-N (%)			26 (15) *
SS (%)		81 (13)	92 (9)

(): standard deviation N.D. = not detectable

3.2 窒素除去能

窒素態の経日変化を Fig.3 に示す。このグラフにおいて (a) は実下水、(b) は UASB 処理水、そして(c) は DHS-G3 処理水の窒素態の挙動を示し、(d) に全窒素およびアンモニア性窒素の除去率を示す。

実下水の全窒素は平均 52mg/L であり、そのうちアンモニア性窒素は 46%程度、硝酸性窒素や亜硝酸性窒素は検出限界以下であった。UASB 処理水での平均全窒素濃度はほとんど変わらないが、有機性窒素がアンモニア化されるようで、実下水のアンモニア性窒素濃度より若干高い値を得る。一般的に嫌気性処理での窒素除去は望めない。DHS-G3 では運転開始 8 日目から硝化反応は進行した。

これまで運転開始 72 日目以降の UASB の HRT で 6 時間、DHS-G3 の HRT で 2 時間の運転条件では、有機物の処理性能が低下したが、やはり硝化においても反応が行われないうちに陥った。除去率のグラフをみても水理学的負荷変動時の処理性能の低下は明白であった。しかし、運転を開始して 180 日以降、硝化反応は起こり、処理能力が安定した運転開始 207 日目以降の平均値 (Tab.1) からは、アンモニア性窒素除去率で 73%と高い硝化率を有した。

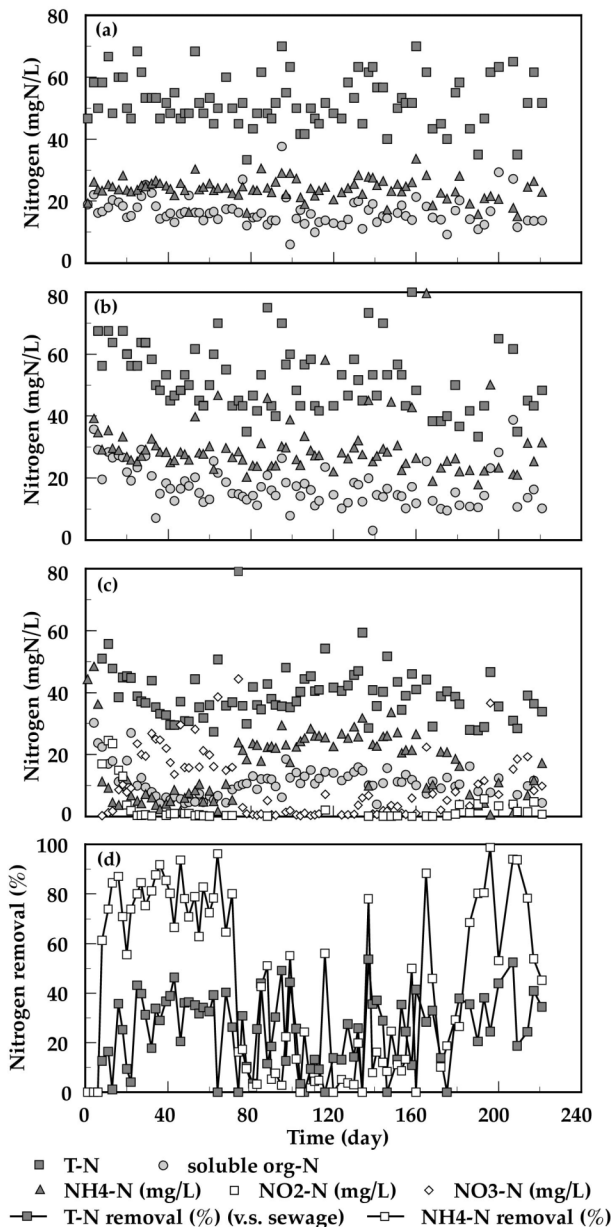


Fig.3 Concentrations of nitrogenous compound in the raw sewage (Fig.3 (a)), UASB effluent (Fig.3 (b)) and DHS-G3 effluent (Fig.3 (c)), and ammonia-nitrogen removal and total-nitrogen removal of DHS-G3 unit (Fig.3 (d)).

3.3 物質収支

Fig.4 に UASB と DHS-G3 リアクターにおける COD および窒素態の収支をそれぞれ図化した。COD および窒素態の物質収支は、UASB HRT 6 時間・DHS-G3 HRT 2 時間の運転条件下で、処理性能が安定した 207 日目以降の 5 回のルーチンデータを平均して算出した。

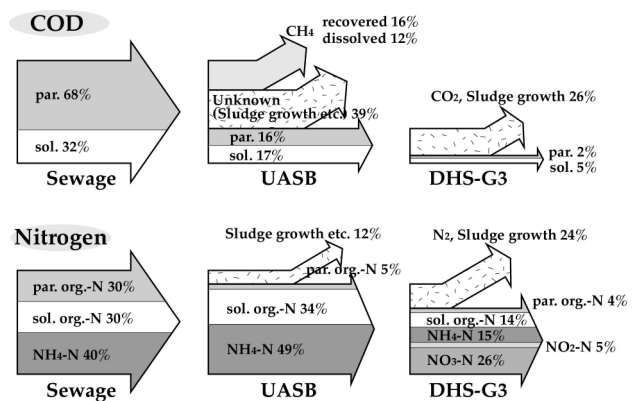


Fig.4 COD and Nitrogen massbalance within the UASB and DHS-G3 reactor based on raw sewage (influent).

3.3.1 COD 収支

下水中の COD は 68%が COD であり、UASB を通過することでその流出水中には 33%の COD が残存した。その内の約 48%が固形性 COD であり、SS 成分の抑制が重要な課題であることが示唆された。UASB では固形性 COD 以外の残りの COD は次のような形態で除去されていた。回収メタンガスとして 16%、溶解したメタンとして 12%、その他、UASB 汚泥ベットの蓄積を含めた不明分 39%となった。生成されたメタンの約 4 割が流出水中に溶解していたが、これはメタン回収プロセスとしての UASB のメリットが減ることとなった。また、不明分となった 39%は、期間が短いことによる蓄積分、硫化物、鉄等の還元、溶存メタンとしての流出分が考えられる。

後段の DHS-G3 を通過した処理水中には、流入下水 (原水) COD の 7%のみとなった。ここで除去された COD は、二酸化炭素に分解されるものと蓄積する汚泥として考えられる。また、UASB で溶解したメタンは、微好気条件下で生息とするメタン酸化細菌によりメタンが生物学的に酸化されているか、物理的に大気中に放出しているものと考えられる。

3.3.2 窒素収支

流入下水 (原水) は、全窒素の 40%がアンモニア性窒素、固形性有機態窒素 30%、溶解性有機態窒素 30%という結果となった。UASB を通過すると、49%がアンモニア性窒素、固

形性有機態窒素 5%、溶解性有機態窒素 34%、不明分が 12%であった。経日変化でも確認できるようにアンモニア性窒素の割合が増加しており、これは有機態窒素の大部分がタンパク質であるといわれていることから、それが UASB 内で消費者（微生物群）に摂取され、無機化産物としてアンモニア性窒素が放出されたためと考えられる。また、溶解性有機態窒素も割合が増加しているが、これは固形性有機態窒素が UASB ベット部で即座に溶解性窒素に可溶化されたためと考えられる。なお、不明分の 12%であるが、下水中に酸化態窒素が検出されていないことから脱窒の可能性はなく、おそらく固形性有機態窒素が蓄積したためによるものだと考えられる。

後段の DHS-G3 を通過した処理水中には、流入下水（原水）全窒素の 4%が固形性有機態窒素、溶解性有機態窒素 14%、アンモニア性窒素 15%、亜硝酸性窒素 5%、硝酸性窒素 26%であった。そして残りの 24%は脱窒もしくは汚泥に蓄積されていることになる。

4. DHS-G3 リアクターの基軸方向の基質分解の挙動と保持汚泥性状

4.1 基軸方向における基質分解の挙動

Fig.5 に、221 日目の DHS-G3 リアクターの

pH、DO、全 COD、溶解性 COD、全 BOD、溶解性 BOD、SS、VSS、ケルダール窒素（溶解性）、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の基軸方向での挙動を示す。

DHS-G3 の基軸方向の基質分解特性を調査したところ、微生物によって易分解性な有機物は流下高さ 0m から 1.68m の DHS-G3 上部において浄化され、それ以降の DHS-G3 下部において硝化反応が進行していることが明らかとなった。これは、DHS-G3 流入部、すなわち上部では有機物が多く存在するため有機物酸化細菌が優占的に存在し、下部では硝化細菌が優占的に存在していることを示している。また、本システムは人為的なエアレーションは一切付加していないが、0.765m 地点ではすでに 3.5mg/L 以上の DO を獲得しており、卓越した酸素取込機能を有していることが明らかとなった。しかしこの分解特性は、高い浄化能力を有したときの場合であり、UASB からの流入汚泥量が DHS-G3 の持つ浄化能力を超えた場合、その浄化能力は破綻する可能性が高いことも本連続運転処理実験で示されている。よって、DHS-G3 による水質浄化を期待するには前段の UASB の安定性が重要な鍵となる。

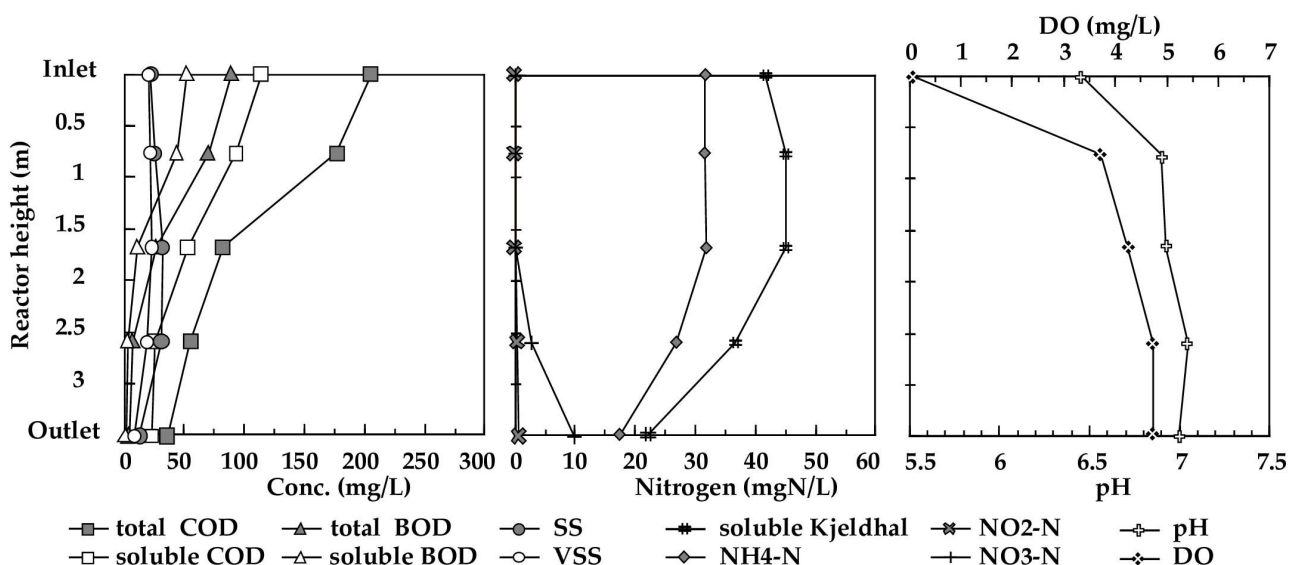


Fig.5 Profile of water quality along DHS-G3 reactor at 221th day.

4.2 保持汚泥性状

Fig.7 に運転開始 221 日目における基軸方向での保持汚泥量を示す。汚泥保持量は SS 密度で 30gSS/L-sponge 程度と高さ方向で安定していた。このとき、汚泥 SS 密度で 30gSS/L-sponge は保持しており、これは活性汚泥濃度と比較すると 10 倍近い汚泥濃度である。すなわち DHS-G3 は高濃度に汚泥を保持する能力を有しており、これが良好な処理性能の一因であるとも裏付けられる。

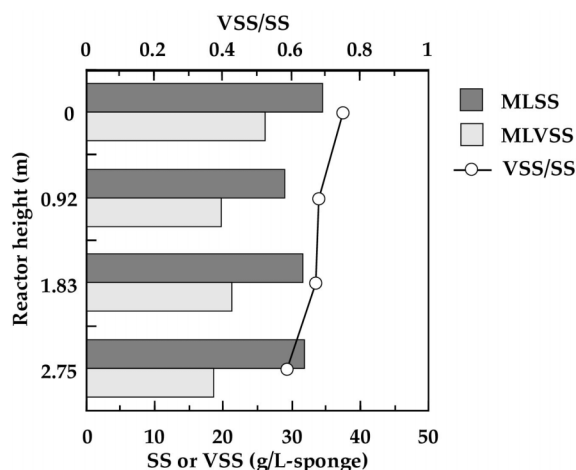


Fig.6 MLSS, MLVSS and VSS/SS profile in the DHS-G3 reactor at 221th day.

5. DHS-G3 リアクターの混合特性

DHS-G3 のような散水ろ床式のリアクターでは、たとえ保持汚泥量が十分であっても流入水と微生物膜との接触効率が良好でなければ、十分な水質の浄化は望めない。そこで、DHS-G3 リアクターがどの程度の混合状態（接触効率）で運転が可能であるかを把握すべく、インパルス応答法を適用したトレーサー試験により調査を行った。本 DHS-G3 プロセスの運転条件（流入条件）は水理学的負荷の変動のみにより行っており、その水理学的負荷はスポンジ容積当りの流入量、すなわち理論 HRT 値による運転としている。リアクター内の混合状態は流体の滞留時間分布（RTD 曲線）であらわせるが、その RTD 曲線から算出した実際の HRT 値と理論 HRT 値を比較することにより、本 DHS-G3 リアクターの混合特性を把

握できるとした。

Tab.2 に混合特性の調査結果を示す。クリーンなスポンジ担体ではリアクター全体で、実測 HRT と理論 HRT の異なり率は 76%であった。そしてそれは連続運転を開始することで汚泥が付着し、クリーンなスポンジ担体よりは流入水が比較的浸透しやすい環境となるため、その低い混合特性能力は改善傾向に至るであろうと予測された。しかしながら、理論 HRT が 2.7 時間および 2.7 時間の場合において、異なり率はいずれも 80%～85%程度となり、スポンジ担体がクリーンな状態よりも若干の混合特性の悪化傾向がみられた。理論 HRT 2.7 時間と設定し運転していた HRT は実際には約 24 分、理論 HRT 2 時間と設定し運転していた HRT は実際には約 20 分と極めて短いこと明らかとなった。けれども DHS-G3 リア

Tab.2 Results of impulse tracer experiment from DHS-G3 (sponge carrier trickling filter).

Condition	Flowrate (mL/min)	Theoretical HRT (min (h))	Observed HRT (min (h))	The percentage difference of observed to theoretical HRT (%)
Clean	323	160 (2.7)	39 (0.65)	76.1%
	430	120 (2)	28.8 (0.48)	76.2% (DHS-G2: 14%)
Contain biomass	323	160 (2.7)	23.5 (0.39)	85.3%
	430	120 (2)	20.4 (0.34)	83.0% (DHS-G2: 16%)

クターは実際 24 分の HRT による運転では卓越した処理能力を果たし、また 20 分の HRT による運転では UASB のウォッシュアウトによる汚泥負荷の増大が原因で一旦性能は破綻したものの、現在は高い浄化能力で安定した処理が行われている。ここで DHS-G2 のトレーサー結果をみると、クリーンな状態から理論 HRT 値と実測 HRT 値に異なりは 14%と少なく、また、理論 HRT が 2 時間の運転での異なり率は DHS-G3 に比べ 16%と非常に小さい。DHS-G2 の連続運転の処理成果は、理論 HRT が 2 時間の条件で 90%以上の卓越した有機物除去能と 70%以上の高い硝化能を実証しているが、混合特性を考慮するともっともな処理結果である。要するに、DHS-G2 リアクターの最大処理能力は未だ未解明で、まだまだ高負荷な運転が期待できる。一方、DHS-G3 リアクターはスポンジ担体の形状および材質等の改善により、接触効率を高めることで処理能力はより増大する可能性が示唆された。

6. 結論

以下に、本報告をまとめる。

全 COD 除去率 90%以上を有し、全 COD 濃度 30mg/L 程度と、途上国での放流基準を十分に満足した処理水を安定的に得ることが証明された。

全窒素除去率 25%以上を有し、アンモニア性窒素除去率 70%以上の高い硝化能を有した。

易分解性な有機物は、流下高さ 0m から 1.68m、いわゆる DHS-G3 上部までで浄化され、それ以降の流下方向（下部）で硝化反応が進行していた。

スポンジ担体の改善次第で処理能力は幾分にも増大できうる可能性を有した。

従って、DHS-G3 リアクターは卓越した有

機物除去能と高い硝化能を有し、エネルギー最小消費で維持管理が容易なプロセスとして途上国への適用が可能であるとの見解が得られた。なお、本提案プロセスは途上国の簡易型下水処理技術として大きく期待される。

参考文献

原田 秀樹, 嫌気性スラッジブランケット (UASB) 法による下・廃水処理, 下水道協会誌, Vol.22, No.255, pp.67-75, 1985

関口 勇地, 上昇流嫌気性スラッジブランケット (UASB) 法による下水の低コスト・高速処理プロセスの開発, 長岡技術科学大学修士論文, 1996

Machdar I., Harada H., Ohashi A., Sekiguchi Y., Okui H. and Ueki K., A Novel And Cost-Effective Sewage Treatment System Consisting of UASB Pre-Treatment and Aerobic Post-Treatment Units For Developing Countries, Wat. Sci. Tech., Vol.36, No.12, pp.189-197, 1997

Machdar I., Sekiguchi Y., Sumino H., Ohashi A. and Harada H., Combination of a UASB Reactor and a Curtain-Type DHS (Downflow Hanging Sponge) Reactor as a Cost-Effective Sewage Treatment System for Developing Countries, Wat. Sci. Tech., Vol.42, No.3-4, pp.83-88, 2000

Machdar I., A Novel Sewage Treatment System by a Combination of UASB Reactor and DHS (Downflow hanging Sponge) Reactor for Developing Countries, 長岡技術科学大学博士論文, 2001

既発表

発展途上国に適用可能なエネルギー最小消費型の下水処理プロセスの開発—第三世代型-スポンジ担体散水ろ床リアクターの処理特性—, 第 36 回水環境学会, 2002