

新“環境”社会を創造する商品と技術

[第二部] (水エンジニア編)

宮崎 徹 水エンジニアリング本部 本部長 常務
中原 啓介 エンジニアリング研究所 水システム研究部 部長

Toru Miyazaki
Keisuke Nakahara

当社は 1972 年に水エンジニアリング事業分野へ進出し、以後、高い技術力をベースに発展を続け、現在では連結売上金額ベースで約 500 億円の事業規模にまで成長してきている。本稿では、当社の水エンジニアリング事業開拓の歴史とともに、代表的な自社開発技術をいくつか紹介する。

NKK entered the water treatment field in 1972 and has been raised its consolidated sales figure to 50000 million yen in 2001 based on our high technologies. In this paper, we describe the history of pioneering business in this field and introduce some of our NKK-originally developed technologies in water and wastewater engineering division.

1. はじめに

当社における水エンジニアリング事業の始まりは、水道用鋼管の販売および据付を含めるとかなり古くまでさかのぼるが、現在ではプラント建設を中核とした水処理分野への進出を経営会議に提案した 1972 年を起源としている。事業進出にあたって、当初は高度処理を中心とした商品戦略をかかげ、ザーン社、テクフィナ社などの海外メーカーと技術提携し、営業・技術・研究各部門が一体となって技術の習得と新規事業の立ち上げに努力した。その後、1976 年 4 月に環境化工水道部、1977 年 4 月に上下水道部、環境プラント営業部の水エンジニアリング部門を経て 1984 年 6 月には下水道営業部が誕生した。

水エンジニアリング事業は公共工事が中心で、民需に比べて後発企業の参入が難しい構造であった。当社は横浜市、川崎市などの地元自治体へ営業力を集中し、技術力を前面に出した PR を展開することによって突破口を開くとともに、受注した建設工事を通じて次第に自治体側の信頼を高めて行った。認知度が高まるにつれて事業規模も拡大し、多くの重要工事を受注するようになった。Photo 1 は横浜市北部汚泥処理センター（汚泥集中処理基地）にある日本最大規模の卵形消化タンク群であり、当社は機械設備工事を担当した。

このような歴史を経て、水エンジニアリング本部は現在、水道、下水道などの公共施設の建設工事を中心に、連結売上金額ベースで約 500 億円の事業規模にまで育ってきている。

しかしながら、90 年代にはじまった日本経済の低迷、その後の公共工事コスト縮減などにより、水エンジニアリング事業が置かれている環境は激変しつつある。一例を



Photo 1 Egg-shaped sludge digestion tank in Yokohama Hokubu Sludge Treatment Center

挙げると、公共工事における PFI の導入はいまや世界的な流れになっており、日本でも通称 PFI 推進法が 1999 年に成立、公布、施行された。PFI は公共施設などの「設計」、「建設」、「維持管理」および「運営」に民間の資金、経営および技術的能力を幅広く導入することにより、財政資金の有効活用を図り、公共サービスを効率的かつ効果的に提供することを目指している。PFI の本来の趣旨は、公共と民間がそれぞれ得意とする分野で作業を分担し、互いに責任を負い、より安いコストで社会資本を整備することによって国民の税負担を減らすという点にある。PFI 事業を成功させる決め手は、公益性と収益性のバランスと、公共と民間の責任区分の明確化である。我々が現在対応している通常の公共工事では施設の建設資金と運転資金の調達、施設の運用は公共が行うが、PFI では原則としてそれらを民間が行うことになる。

現在、当社を含めた日本の水エンジニアリング会社のほとんどはプラント建設業を経営の柱としている。しかし、公共工事が今後、PFI の導入を含めて、仕様発注から性能発注へ、分割発注から一括発注へ転換して行く低コスト化の流れは避けられず、プラント建設業の金額的な市場規模

が縮小して行くことは必定である。また、近い将来、Vivendi, Thames Water など海外の巨大水民営化企業が日本市場に本格的に参入して来る可能性も大きい。

このように大きな経営環境の変化の下で、今後も水エンジニアリング事業を維持、発展させて行くためには、プラント建設業だけではなく、調査・計画などのコンサルタント業、施設の診断・補修・更新業、運転・維持管理サービス業などを新たな経営の柱に育てて行かなければならない。そのために必要不可欠なものは、高い技術力を備えた商品であり、自他ともに認める No. one, Only one の技術の一つでも多く保有することである。水エンジニアリング部門においてはこのような観点から、プロセス技術だけではなく、老朽化診断技術、更新工法や更新対応技術、シミュレーション技術などの有望な新技術の開発を着々と進めつつある。本稿では、それらの技術のなかから、バイオチューブと生物反応シミュレーション技術について紹介する。

2. バイオチューブシステム

2.1 開発の経緯

下水処理技術の課題である処理水質の向上、処理エネルギーの低減、施設面積の削減などに対処すべく、1985年度から1989年度にわたって新しい下水処理方式の開発に関する建設省の総合技術開発プロジェクト「バイオフォーカス WT」が実施され、当社は微生物固定化担体：バイオチューブ (Photo 2) を開発し、さらに、バイオチューブを用いた種々の下水高度処理システムを開発してきた。



Photo 2 Bio-tube

2.2 バイオチューブの特徴

微生物を担体に固定化する方法は包括法と結合法とに大別される。包括法とはポリエチレングリコールやポリビニルアルコールなどの水溶性高分子と微生物を混合し、水溶性高分子を重合、ゲル化させることにより、高分子ゲルの格子中に微生物を固定化する方法である。

一方、結合法とは砂や活性炭あるいはプラスチックビーズのような粒子の表面に微生物を、微生物自身が生産する粘性物質を介して自然発生的に付着させ生物膜を形成させる方法である。1986年当時、当社を含め水処理各社はこぞって包括固定化法の開発に取り組んだが、当社は包括法の問題点（内部の菌は死滅すること、酸素の拡散が律速とな

り表面の生物膜内で反応が完結することなど)を見出し、結合固定化法の開発に移行した。

当社が開発したバイオチューブは、ポリプロピレンを基材としており、サイズは外径 4mm, 内径 3mm, 長さ 5mm の中空円筒状の固体で、微生物付着性を改善するため、表面に微細な凹凸を設けている。バイオチューブには以下のような特長がある。

- (1) 比表面積が大きく、大量の微生物を保持できる。
- (2) 水の比重に近く、反応タンク内で均一に分散させることができる。
- (3) 基材のポリプロピレンは生分解されず、また、物理的強度が高いため摩耗に強く、担体の補充の必要がない。
- (4) 硝化細菌などの増殖速度の小さい有用微生物を反応タンク内に保持できる。
- (5) 湿潤状態で保存する必要がなく、保管が容易である。

2.3 バイオチューブシステムの実施例

バイオチューブを用いた流動床バイオリアクターシステムには種々の利用法が考えられる。その中から代表的なシステムを Fig.1 から Fig.5 に示し、以下に概説する。

(適用例 - 1)

Fig.1 に示すシステムは担体を投入した曝気槽(流動床バイオリアクター)へ一次処理水を導入し、担体に付着した生物による処理を行って、さらに、後段の固液分離装置で曝気槽処理水中の SS を除去して清澄な処理水を得るものである^{1),2)}。

このシステムでは曝気槽内の微生物濃度を高く保つことができるので曝気槽の小型化が可能となる。さらに従来の活性汚泥法と異なり、最終沈澱池での活性汚泥の沈降分離と沈降汚泥の返送を行わないため、バルキングの問題がないという特長がある。また、エアレーションタンクの各段において排水の性状と負荷に対応した微生物相が形成されることが確認されており、合理的な処理法と考えられる。

本システムは宮崎県都城市の新下水処理場設備に採用され、1996年5月より供用されている。担体の真容積基準の充填率(以下、充填率と略記する)は10%であり、処理水の BOD および SS の平均値はそれぞれ 2.8mg/L と 1.1mg/L と極めて良好であった。また、稼働中の同設備においても担体の流動性は良好であり、エアレーションタンク内において担体はほぼ均一に分布していた³⁾。

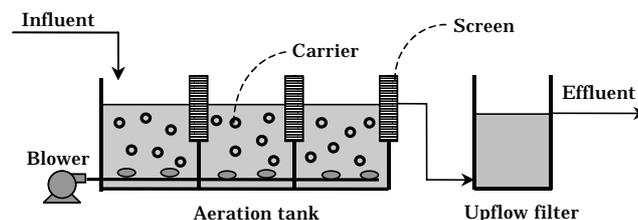


Fig.1 Flow diagram of BOD removal system ()

(適用例 - 2)

Fig.2 のシステムは従来の活性汚泥法の曝気槽に担体分離用のスクリーンを設け、曝気槽に担体を投入したものである。このシステムは栃木県高根沢町の設備に適用され、従来、長時間エアレーション法と浸積る床接触酸化の組み合わせ処理で日最大処理量 600m³/日であったものを日最大処理量 2100m³/日の施設へと改造した例である。この設備は、1993 年 3 月に供用開始となっている。担体充填率は 5%、反応槽内滞留時間は 4.6 時間という条件において処理水質は T-BOD が 4 mg/L、SS が 2 mg/L と目標値である T-BOD5mg/L、SS20mg/L を満たすものであった⁴⁾。

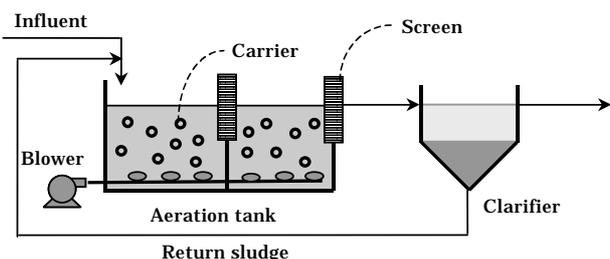


Fig.2 Flow diagram of BOD removal system ()

(適用例 - 3,4)

Fig.3 および Fig.4 のシステムは、それぞれ循環式硝化脱窒法および嫌気 - 無酸素 - 好気法の曝気槽（好気槽）に担体を投入したものであり、担体を利用して硝化細菌を曝気槽内部に高濃度に保持することにより、反応槽の小型化と硝化処理の安定化を図ったものである。

Fig.3 および Fig.4 のシステムに関しては、川崎市と共同して処理水量 15m³/日のパイロットプラントを用いた実験を実施している。Fig.4 に示したシステムを用いて滞留時間 9 時間、循環水量比 2.0、返送污泥比 0.3、MLSS1750mg/L、担体充填率 5%という条件において、処理水の T-N は 7.8 mg/L となり、10mg/L 以下という目標値をクリアした⁵⁾。Fig.4 に示したシステムは川崎市入江崎下水処理場において採用され、本格稼働に向けた試運転調整を行っている。

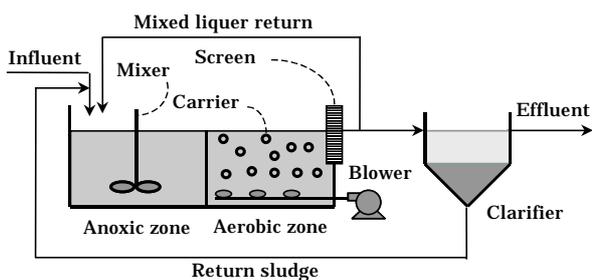


Fig.3 Flow diagram of BOD and nitrogen removal system ()

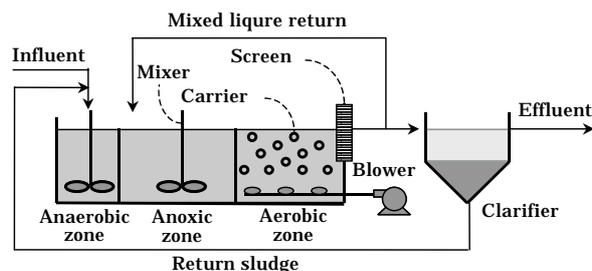


Fig.4 Flow diagram of BOD, nitrogen and phosphorus removal system

(適用例 - 5)

Fig.5 に示したシステムは、基本的に Fig.3 のシステム同様、循環型硝化脱窒法の好気槽に担体を投入したものであるが、好気槽の下流側 2 段にのみ担体を投入し、最上流側の好気槽には担体を投入していない点が Fig.3 と異なる。本システムに関して大津市との共同研究として大津浄化センターにおいて活性汚泥法実装置の一系列を改造した実験を実施した⁶⁾。大津浄化センターの反応槽の構造は Fig.6 に示されるようないわゆる深層型の反応槽となっており、散気装置は反応槽水深のほぼ中間の位置に設置されている。実験条件は流入水量が 11800m³/日、循環水量が 10200m³/日、返送污泥量が 7200m³/日、送風量が 43000m³/日、滞留時間が 5.2 時間であり、担体充填率は 1996 年 12 月 8 日までが 2.5%、それ以降は 3%である。本実験において処理水の T-BOD および T-N の平均値はそれぞれ 2.3 mg/L および 5.7mg/L となり、目標値である T-BOD10 mg/L および T-N10mg/L 以下を常に満足した。なお、本システムは「新規担体を適用した無酸素 - 微好気 - 好気法による下水の高度窒素除去法」として、日本水環境学会技術賞を受賞した。

包括固定化担体を深層型の反応槽に投入した場合には担体の流動性が低いために装置の基本的な改造が必要であったと報告されている⁷⁾が、本実験においては装置の基本構造を変更していないにもかかわらず、担体は良好に流動し、反応槽内にほぼ均一に存在した。

なお、本実験で使用したバイオチューブは、2 年 4 ヶ月連続運転した後においても目視による形状の変化が見られず、寸法の変化も見られず、深層曝気槽実施において使用しても長期間安定していることがわかった。

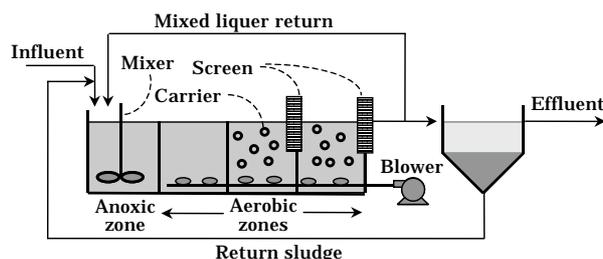


Fig.5 Flow diagram of BOD and nitrogen removal system ()

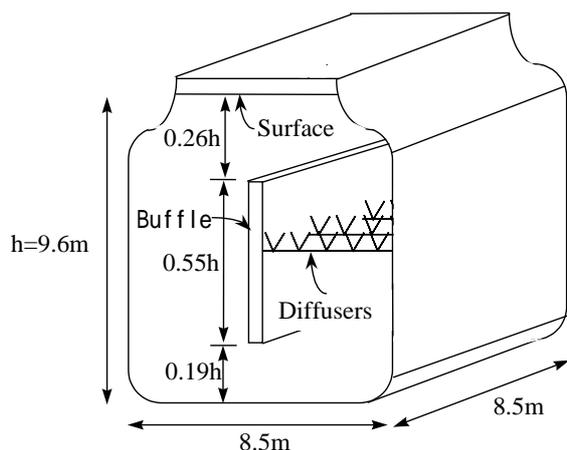


Fig.6 Configuration of deep aeration tank system

以上、パイオチューブを用いた排水処理装置に関して、担体選定・開発の経緯と各種下水処理システムへの適用例について概説した。これらのシステムに共通する特長は、担体に微生物が高濃度に固定化されるため処理装置が小型化できる点である。さらに、既存の処理施設を改造して高負荷対策、高度処理対策に適用する上でも有効かつ経済的である。

3. 生物反応シミュレーション技術

3.1 背景

下水処理分野におけるシミュレーションの応用は、かなり前から学者の間では行われていた。しかし、その手法は研究者によって大きく異なり、隣り合う研究室間でも、あるいは同じ研究室内でも異なる手法が用いられている状況であった。このため、一つひとつの手法は小さいグループ内で用いられるだけで多数の処理施設データによる実証は行えず、実施設計での設計・運転管理などに用いられることはなかった。

国際学会である IWA（当時は IAWPRC）が活性汚泥モデルの研究発展のために 1983 年にタスクグループを作り、その活動成果として 1986 年に「活性汚泥モデル No.1」を、また 1995 年に「活性汚泥モデル No.2」を発表したことを契機に、生物反応シミュレーションの数学モデルの実務的な利用への期待が急速に高まっている。特に下水処理施設の高度処理化により、プロセスが複雑化・高度化しつつあるため、より合理的な考え方にもとづく施設設計や運転管理が必要になってきたからである。この「活性汚泥モデル」は、ある汎用的な考え方のもとに、微生物反応・物理化学反応の構造をモデル化したものであり、必要とあれば同様な手法で新規の微生物反応・物理化学反応を加えることも可能なコアモデル的なものであり、排水処理研究者および数学モデル研究者に対して大きなインパクトを与えるものであった。

当社が取り扱っている下水処理施設としては、前述 6 方式のバイオチューブシステムを含め多くの方式があり、下水処理場の設計においてどの方式を採用するかは、流入水の条件や、要求される処理水水質などを考慮した上で、技術者の経験をもとに決定されてきた。しかしながら、最適な処理方式、処理施設規模を選定し、さらに最適運転条件で処理を行うことは、処理水水質の向上および処理コストの低減の面から非常に重要なことである。そこで、当社は下水処理設備の最適設計や最適制御を行うための新規技術として“下水高度処理シミュレーション技術”の開発を開始した。

3.2 当社のシミュレーション技術の特徴

(1) 生物膜（パイオチューブ付着微生物）のモデル

当社では前述のバイオチューブシステムのシミュレーションを「活性汚泥モデル」をベースとして組み上げるため、独自データをもとにパイオチューブに付着した生物膜に関するモデルの開発を行った。生物膜内で起こり得る反応プロセスと関与する要素は「活性汚泥モデル」と同様の手法で記述し、生物膜内の物質移動と生物増殖による生物膜体積の変化をモデル内に組み込んでいる。担体に付着した生物膜は、徐々に浮遊汚泥中へと剥離することで、際限なく厚くなることはないように考慮した。

このモデルを用いて、パイオチューブシステムの一つである Fig.4 に示したシステムのパイロット実験結果の再現を試みた。10月16日から2月13日の約4ヶ月間を対象としてシミュレーションを行い、パイロットプラント水質分析結果との比較の一例を Fig.7 に示す。

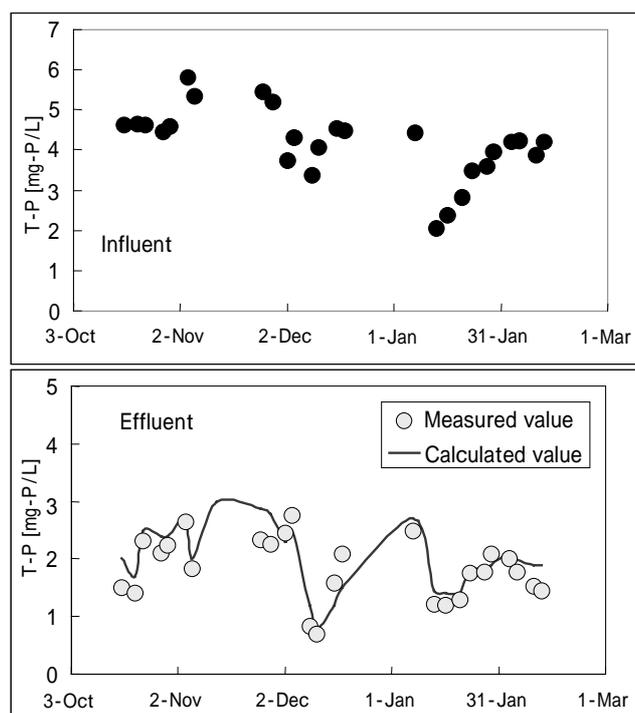


Fig.7 Comparison of simulated and measured values

Fig.7 に示したりんの処理状況を含め、有機物および窒素の処理状況とも、パイロットプラントでの実測データとシミュレーション結果は良く一致し、本シミュレーションモデルの妥当性が検証されている。また、4ヶ月の実験期間を通じて同一の反応パラメータを用いたシミュレーションでパイロット実験結果を再現できることが実証されている。

(2) オキシレーションディッチのモデル開発

オキシレーションディッチ（以下、OD と略記する）は中小規模の下水道向け処理施設であり、無終端の周回水路を反応タンクとした、運転管理の容易な施設として急速に普及している処理方式である。

OD 施設への流入水量、水質は、地域条件により大きく変動し、画一的な設計基準値を策定するに当たっては、ある変動幅を設けるか余裕率を考慮した数値とする必要がある。また、高度処理化を目的とした OD 法の施設設計手法および運転管理手法は、A-SRT など新たな設計因子の導入などにより改善されてきているものの、いまだ経験的な側面が強い。活性汚泥モデルを適用したシミュレーションソフトを用いて、数値計算による定量的な解析を行い、処理時間（HRT）、槽形状、汚泥滞留時間（SRT）、必要酸素量などの適正な設計基準を確立することで、比較検討や評価の合理化、効率化が図れるだけでなく地域条件に応じた最適な施設の設計が可能となる。

また、運転管理についても、従来経験的要素に負うところが大きかったが、特に窒素除去に関しては、適正な運転により良好な除去が行われていることが立証されてきた。

本モデルを用いたシミュレーションにより、流入状況に応じた間欠曝気運転方法など最適な運転方法を具体的に把握することは、処理性能の向上につながるるとともに、処理コストの低減にもつながる。

以上を踏まえ、当社では現在、下水道事業団と共同でシミュレーション手法の開発を行っている。

OD の特徴である無終端の周回水路を数槽に分割し、各槽内で「活性汚泥モデル」で記述されている生物反応が起こるものとした簡易なモデルを用い、NKK 商品であるプロペラ型 OD（酸素供給を送風機と散気装置で行い、槽内の流速発生は水中プロペラで行う方式）を例として、シミュレーションの適応性の確認を行った。

時間変動を考慮したシミュレーションを行った結果、Fig.8 に示したとおり、実データをよく再現することができている。今後、他の縦軸曝気装置（表面曝気により、酸素供給と槽内の流速発生を同時に行う方式）などの特性も考慮に入れたシミュレーションソフトの開発を行い、適切な設計基準や適切な運転条件の検討を行っていく予定である。

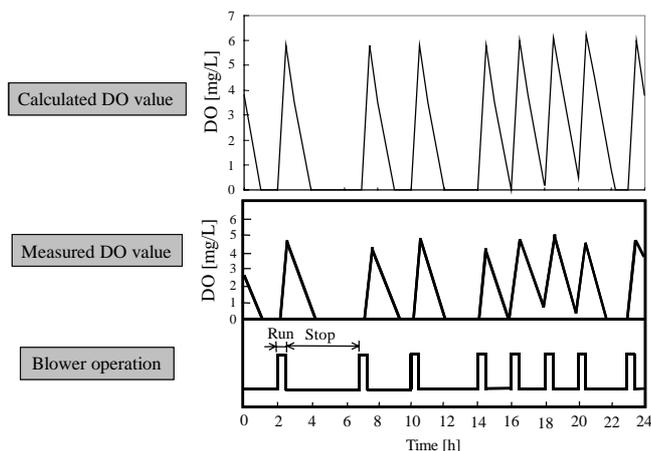


Fig.8 Results of calculated and measured DO (Dissolved Oxygen) concentration in OD system

3.3 シミュレーション技術の実用化

パイオチューブシステムおよび OD システムに対するシミュレーション開発を紹介したが、他のさまざまなシステムに関しても、シミュレーション技術の実用化に向けて開発を進めていく予定である。その用途としては大きく分けて、(1) 設計支援および(2) 運転支援の2つが考えられる。

設計者が、設計対象としてのシステムに対して定量的な検討を実施する手段として、また運転管理者が、運転条件を変更する場合の目安として、簡易にシミュレーションを行うことができるようなツールとして、その活用が大いに期待できる。Fig.9 に支援ツールの作業フローのイメージを示す。

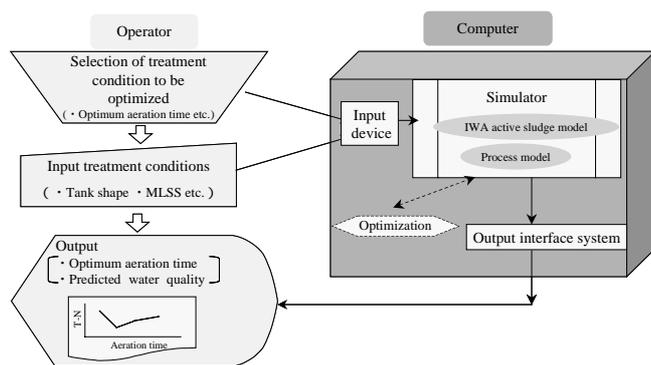


Fig.9 Operational pattern of software

また、活性汚泥モデルを活用したシミュレーションソフトを開発して、想定される外的条件の変化に対する最適な装置の設計と運転管理方法を提案および定量的に評価することは、今後、下水処理施設の計画、設計、運転管理において重要な因子の一つとなるライフサイクルコスト、ライフサイクルアセスメントの検討にも極めて有効に活用できると考えられる。

参考文献

4. おわりに

1998年には海域の富栄養化対策として窒素およびリンに関する一般排出規制が実施され、2002年には窒素およびリンが総量規制の対象となり、今後多くの地域での上乘せ規制が実施される予定である。さらに、今後は水環境だけでなく、地球環境全体を視野に入れた対策、対応が求められる時代となってきた。このような状況の中、今回紹介したバイオチューブシステム技術や生物反応シミュレーション技術、さらには当社が保有する技術・システムが今後の水環境・地球環境の改善・保全に少しでも貢献できれば幸いであり、また今後も、優れた新技術の開発にも積極的に取り組んでいく所存である。

- 1) Tsubone et al. "CHARACTERISTICS OF AN AIR-FLUIDIZED-BED BIOFILM REACTOR SYSTEM WITH A MULTI MEDIA FILTER". *Water Science & Technology*, Vol.30, pp.101-110(1994).
- 2) 高橋正宏ほか. "担体投入型生物処理システムの処理性能に関する一考察". *下水道協会誌論文集*. Vol.31, No.379, pp.49-60(1994).
- 3) 西川好久ほか. "担体投入型エアレーションタンクの初期運転状況". 第34回下水道研究発表会公演集, pp.28-30(1997).
- 4) 佐藤和明ほか. "微生物固定化担体投入による下水処理場の処理能力増強について". 題31回環境工学研究フォーラム公演集, pp.31-33(1994).
- 5) 阿部庄次郎ほか. "担体投入型嫌気-無酸素-好気法によるりん・窒素除去実験". 第33回下水道研究発表会公演集, pp.564-566(1996).
- 6) 横江勇ほか. 第35回下水道研究発表会公演集, 627-629(1998).
- 7) 船越泰司ほか. "担体添加活性汚泥法の深槽曝気槽への適用検討". 第31回下水道研究発表会公演集, pp.515-517(1994).