

平成 24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「微生物生育システムの制御による高効率水質浄化技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 25 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社 三水コンサルタント

再委託先 学校法人片柳学園 東京工科大学

目次

第1章 研究開発の概要.....	1
1-1 研究開発の背景および研究目的.....	1
1-2 研究内容および研究成果の概要.....	2
1-3 研究体制.....	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口.....	7
第2章 本編.....	8
2-1 研究の経緯.....	8
2-2 リアクターおよび実験槽の設計・製作.....	9
2-3 食品工場の廃水処理実験.....	10
2-4 化学工場の廃水処理実験.....	12
2-5 ラボスケール実験.....	13
2-6 供給酸素量の制御によるプロセスの開発.....	15
2-7 汚泥の分解・減量プロセスの検証.....	17
2-8 設計諸元の検討.....	19
第3章 全体総括.....	20

第 1 章 研究開発の概要

新規技術開発のポイント：余剰汚泥発生が大幅に削減された排水処理技術の開発

1-1 研究開発の背景および研究目的

食品製造業、化学工業等の工場廃水は濃度の高い有機物を含む。この高 BOD 濃度の廃水の大部分は活性汚泥法により処理されている。この活性汚泥法は自然微生物の能力を活用して、水中に溶解または微粒子として存在する有機物を後処理の容易な形状にして取り出すことができるものの、大量の余剰汚泥（産業廃棄物）が発生することが問題となっている。この余剰汚泥を処分するには脱水処理、焼却処理または輸送が必要で、そのために事業者には多大なコスト負担を課し、更にそのプロセスから生じる CO₂ が地球環境の悪化を助長している。

一方、この余剰汚泥を焼却せず埋設処分する場合、人口集積地域においては処分場所の確保が困難という社会的問題をひきおこしている。

活性汚泥法による処理工程から生じる余剰汚泥の減量は製造事業者のコスト削減および環境負荷軽減のために強く望まれている。この余剰汚泥の減量のために種々の技術開発が行われているが、このために開発されている技術は、メタン発酵、オゾンその他の酸化剤による処理、キャビテーション利用などによる力学的破碎、電気分解等、何れもいったん生成した余剰汚泥を取り出した後に新たな削減用のプロセスに供するものがほとんどである。このために、従来技術では新たな付加設備や処理剤、エネルギーの追加投入が必要となる。また、プロセス運転のための専従の要員を必要とするなど、特に中小規模の生産工場においては固定費および変動費共に負担が大きく、広くは普及していない。

我々はこれまでの経験から、廃水処理工程中に活性汚泥の固定床を付加するだけで余剰汚泥の排出を大幅に減少することのできる技術を独自開発しており、複数の生産現場でその効果を確かめていた。

この技術は実際の活性汚泥処理設備の前処理工程として一部利用されてはいるが限定された実績しかなく、今後広く国内外の廃水処理設備に適用するためには、より広範囲の条件に対応させるための詳細技術の検討が必要となった。

1-2 研究内容および研究成果の概要

実験設備は、有機廃水の流路の中に多孔状の固定床（リアクター）を設置した領域と、空気と廃水との接触を向上させるための充填材を設置した領域とを交互に配置したものである。ここに空気を送入しながら廃水を流すことで、有機物の分解と生成した汚泥の減量とを同時に可能とするシステムを構築した。

この処理システムを活用した廃水処理設備の構成の概念図を下に示す。（図 1 参照）

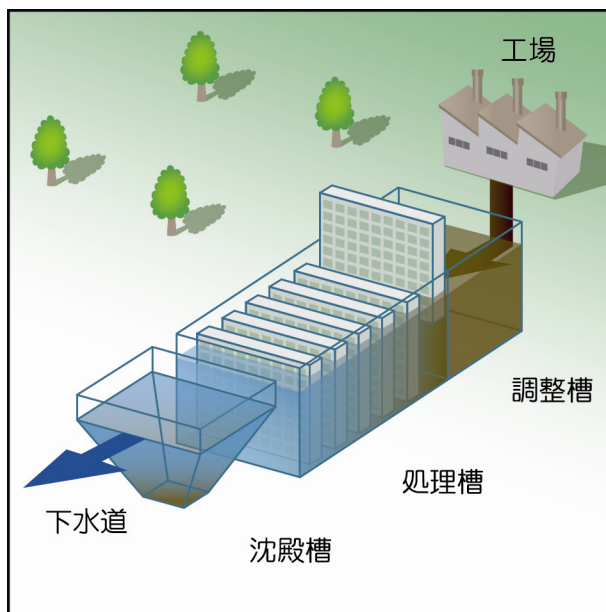


図 1 廃水処理設備の構成概念図

多孔状固定床として図 2 に示すようなプラスチック製のリアクターを使用し、空気分散用に図 3 に示す充填材を使用した。

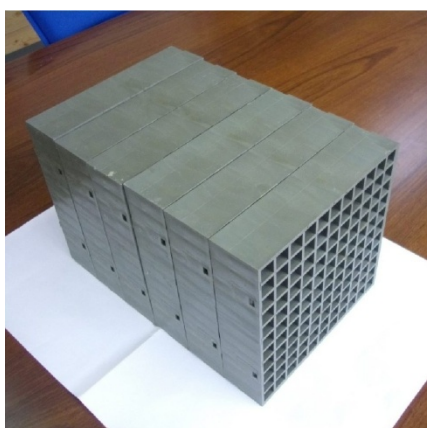


図 2 多孔状固定床



図 3 空気分散用充填材

多孔状固定床の開口部の口径を 3 段階準備し、また、その長さも可変として最適な配置構造を求めるための実験に供した。

システムの要求条件としては、処理水の水質が下水道排出基準を満たし、かつ、余剰汚泥の排出を極限まで減少することとし、この条件下で最も経済的なシステム構築の条件を明らかにすることを研究開発の目的とした。

本研究開発は、①食品工場および化学工場に大型実験設備を設置し、実際の工場操業状況に応じた実廃水による検討と、②大学実験室内に設置した小型実験設備による諸条件を計画的に制御できる条件での検討とを併行して推進した。

上記のような検討の結果、高い BOD 削減率を達成しながら、余剰汚泥をほとんど排出しない有機廃水処理システムを確立することができた。

○従来技術と新規開発技術の比較

- ① 新規開発技術は廃水処理設備の処理経路の中に汚泥削減のメカニズムを組み込むだけで構成されており、余剰汚泥減量のための付加設備および運転を必要としない。
- ② 新規開発技術は廃水処理工程が高 BOD 負荷で運転可能なため、コンパクトな有機廃水処理設備を構成することができる。
- ③ 新規開発技術は BOD 負荷変動を平滑化でき、従来技術よりも運転管理が容易なので専任の運転員を必要としない。
- ④ 新規開発技術は余剰汚泥処理のための薬剤費用、産廃処分費用を大幅に削減することが可能であり、とくに中小規模の高 BOD 廃水を排出する工場の廃水処理システムとして有効に活用することができる。

■新規開発技術の成績

新規開発された技術による有機廃水処理システムの実績を表1(食品工場)、表2(化学工場)に示す。実工場の廃水に対して省エネルギーかつ省スペースで長期にわたり余剰汚泥を発生させることなく、約90%のBOD除去が可能なことを実証できた。

表 1 食品工場廃水処理成果実績

廃水処理実施期間	H24.7~H24.10
平均水量	20 m ³ /日
平均流入BOD	1,940 mg/l
平均流出BOD	133 mg/l
平均BOD削減率	93 %
余剰汚泥引抜量	0 kg/日
使用装置設置スペース	30m ²
使用機器 送水用ポンプ	0.4kW 1台
空気送込用ブロワ	3.7kW 1台

表 2 化学工場廃水処理成果実績

廃水処理実施期間	H24.5~H24.8
平均水量	5.2 m ³ /日
平均流入BOD	2,220 mg/l
平均流出BOD	248 mg/l
平均BOD削減率	89 %
余剰汚泥引抜量	0 kg/日
使用装置設置スペース	10m ²
使用機器 送水用ポンプ	0.4kW 1台
空気送込用ブロワ	1.5kW 1台

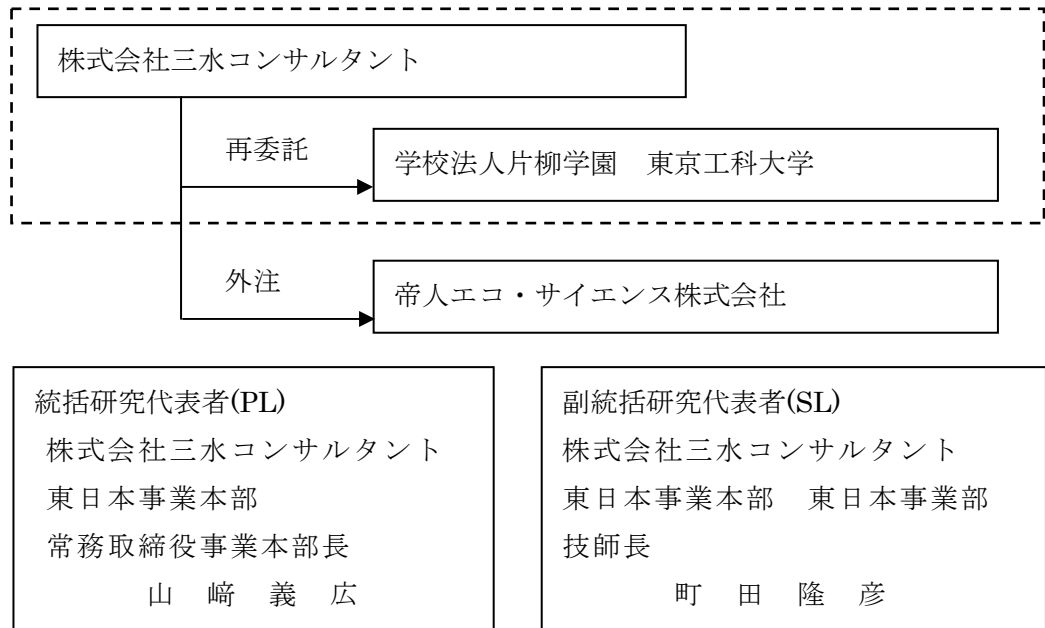
新規開発技術および従来技術のBOD容積負荷を表3に示す。

表 3 BOD容積負荷比較

処理技術	SiB 処理技術 【新規開発技術】	活性汚泥法 【従来技術】
BOD容積負荷 (kgBOD/m ³ /day)	標準: 1.5 最大: 3.0	0.4~0.6

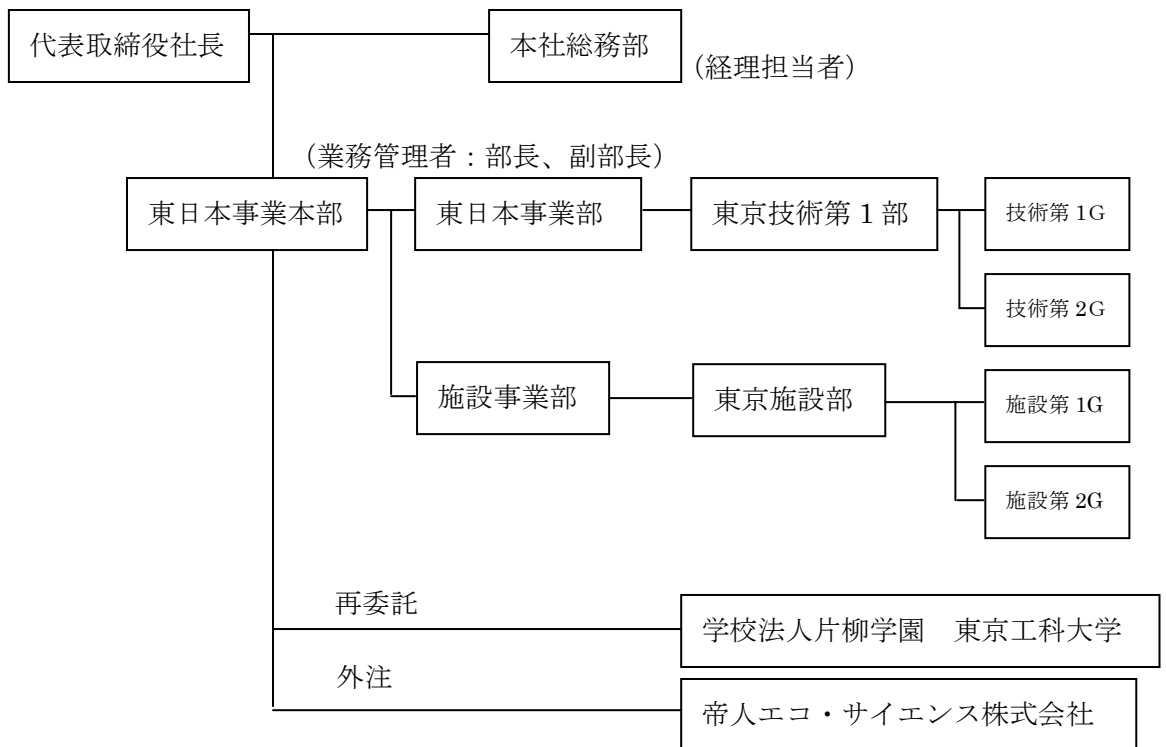
1-3 研究体制

(1) 研究組織 (全体)

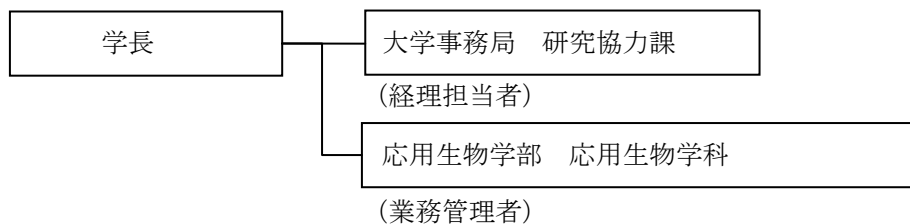


(2) 管理体制

①事業管理機関 [株式会社三水コンサルタント]



② 再委託先 [学校法人片柳学園 東京工科大学]



(3) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
山崎 義広	株式会社三水コンサルタント 東日本事業本部 常務取締役事業本部長	<input checked="" type="checkbox"/> PL
町田 隆彦	株式会社三水コンサルタント 東日本事業本部 東日本事業部 技師長	<input checked="" type="checkbox"/> SL
山本 則幸	株式会社三水コンサルタント 東日本事業本部 執行役員副本部長	<input checked="" type="checkbox"/>
浦瀬 太郎	学校法人片柳学園 東京工科大学 応用生物学部 応用生物学科 教授	<input checked="" type="checkbox"/>
和波 一夫	財団法人東京都環境整備公社 東京都環境科学研究所 調査研究科・主任研究員	アドバイザー
青嶋 俊夫	ユウキ食品株式会社 取締役社長室長	アドバイザー

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関名：株式会社 三水コンサルタント

所在地：〒171-0031 東京都豊島区目白2丁目1番1号

TEL：03-3980-4132(代) FAX：03-5396-9201

担当者名：伊澤 康

e-Mail：y.izawa@3wcon.co.jp

第2章 本編

2-1 研究の経緯

本研究は従来技術である活性汚泥法よりも余剰汚泥発生量が少なくなる iP 処理技術（基盤技術）の高度化を目指し、嫌気リアクターの開発および嫌気発酵と好気分解が連続的に発生するプロセスの開発に取り組んだ。

開発目標は、余剰汚泥発生量の80%以上の削減、電気代・薬品代の30%以上の削減であり、嫌気リアクターの筒状固定床の長さ、口径と酸素供給量の関係を把握するために、食品工場および化学工場の廃水を対象に実証実験を行った。また、ラボスケールの実験槽を用い、微生物生育システムの処理プロセス解明とマスバランスの把握を行い、新規開発技術による水質浄化機能の原理を解明することを目的とした。

しかし、iP 処理技術を用いた実験では、嫌気発酵を促進させるための運転条件範囲が狭いために安定的な浄化効果が得にくく、この問題を克服するためには多くの計装系と複雑な運転制御を必要とした。

そこで、安定的な浄化効果を得られるような制御パラメータ探索を行った結果、嫌気発酵を利用しない好気条件下での運転制御の方が安定的な浄化効果を得られることが分かった。また、リアクター内部に捕捉された汚泥の内生代謝による自己消化によって余剰汚泥発生量を減少させる制御方法を確立し、基盤技術である iP 処理技術と同程度以上の能力を有する技術の開発に成功した。

この新規開発技術を SiB 処理技術 (Sansui improved Bioreactor) と名付け、本研究の最大の成果と位置づけた。

表 4 技術の比較

	[従来技術] 活性汚泥法	[基盤技術] iP処理技術	[新規開発技術] SiB処理技術
処理 プロセス	有機汚濁は好気性分解によって行い、最終沈殿池において固液分離することで浄化水を得られる。	嫌気分解と好気分解を多数回繰り返す事で、余剰汚泥の発生を抑えつつ有機汚濁を分解する。	有機汚濁は好気性分解によって行い、リアクター内部を高MLSS状態に保つことで、効率的な内生代謝による自己消化により余剰汚泥発生量を減少させる。
リアクター 設置方法	無し	嫌気リアクターおよび好気リアクターを交互に配置する。	高MLSS保持リアクターと好気リアクターを交互に配置する。
制御因子	曝気風量、汚泥返送量など細やかな調整を必要とする。	嫌気リアクター内を嫌気状態になるように曝気風量を調整する。	曝気風量はiP処理技術(基盤技術)よりやや多めに設定し、調節はほとんど必要としない。
余剰汚泥 発生量	多い	少ない	少ない

2-2 リアクターおよび実験槽の設計・製作

目合いの異なるリアクターの開発を行った。また、実験槽の設計・配置図（実験槽、機器等）の作成を行うとともに、実験槽および付帯設備を製作した。



(1) 10mm×10mm

(2) 14.3mm×14.3mm

(3) 20mm×20mm

図 4 作成したリアクター

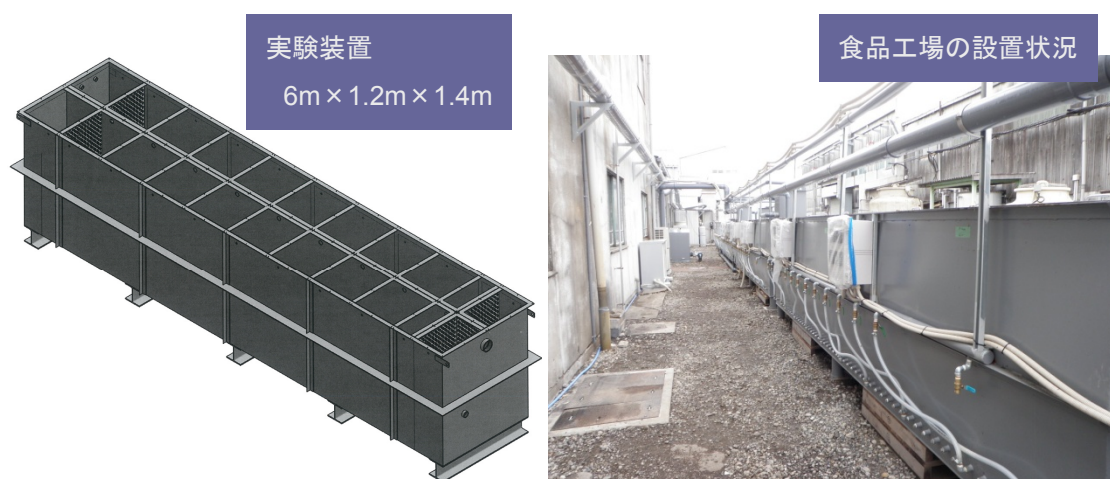


図 5 食品工場および化学工場用実験装置



図 6 ラボスケール用実験装置

2-3 食品工場の廃水処理実験

一般的に食品工場における廃水は有機性汚濁の割合が高いことが知られており、生物性分解とは相性が良く、基盤技術である iP 処理技術のこれまでの実績はほとんどが食品工場における実績である。

この実験では目合いの違う 3 種類のリアクターを使用し、食品工場の廃水に対して処理技術の処理効率の違いについて確認した。またリアクターの流路長を変化させ、処理技術の処理能力（処理水の除去率、処理水の安定性）を検証し、処理施設の諸元を決定するためにリアクターの口径・滞留時間との関係性を把握することを目的とした。

実験の結果、BOD 除去率 90%以上・余剰汚泥の発生がゼロとなることを確認できた。これは本研究開発の目標を上回る結果であった。

流入水質が安定的である時は、目合いによって大きな差異はなかったことを確認した。

また、リアクターの流路長を変化させた場合の実験についても試みたが、処理状況および処理能力について大きな違いは見られなかった。

また、図 7 のように流入水質の時間変動を受け止められるシステムであることを確認できた。

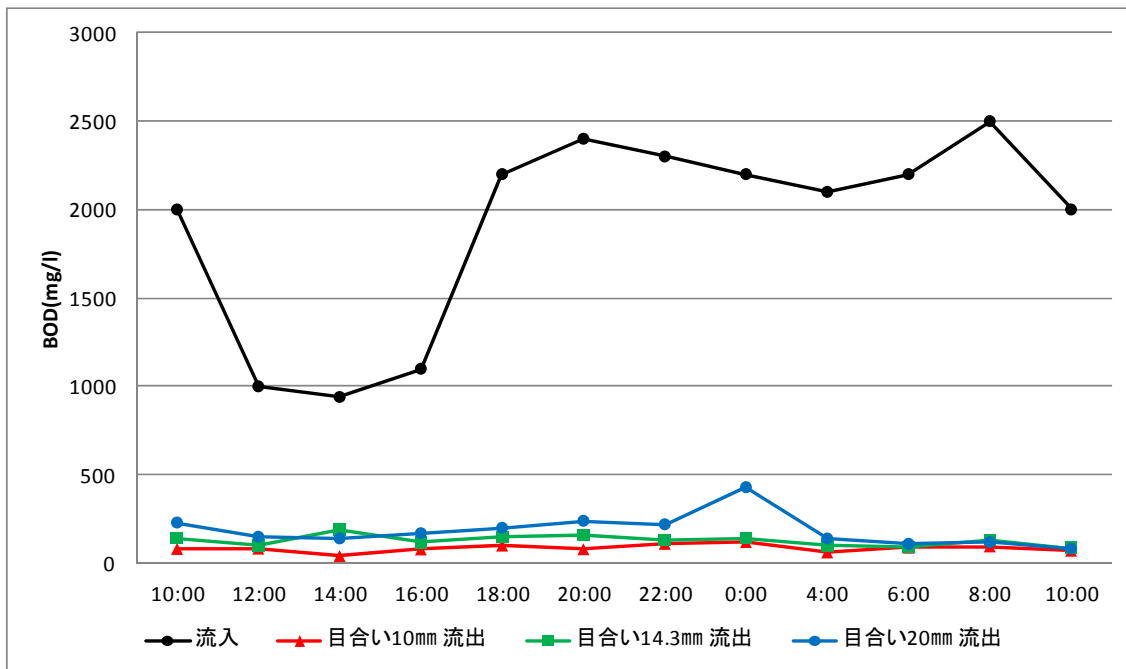


図 7 通日調査結果

長期間にわたる実験の中で目合いの小さい（10mm および 14.3mm）リアクターは処理が不安定になることがあった。今回開発したリアクターの中で 20mm 目合いのリアクターは他の目合いのリアクターよりも処理が安定的であった。

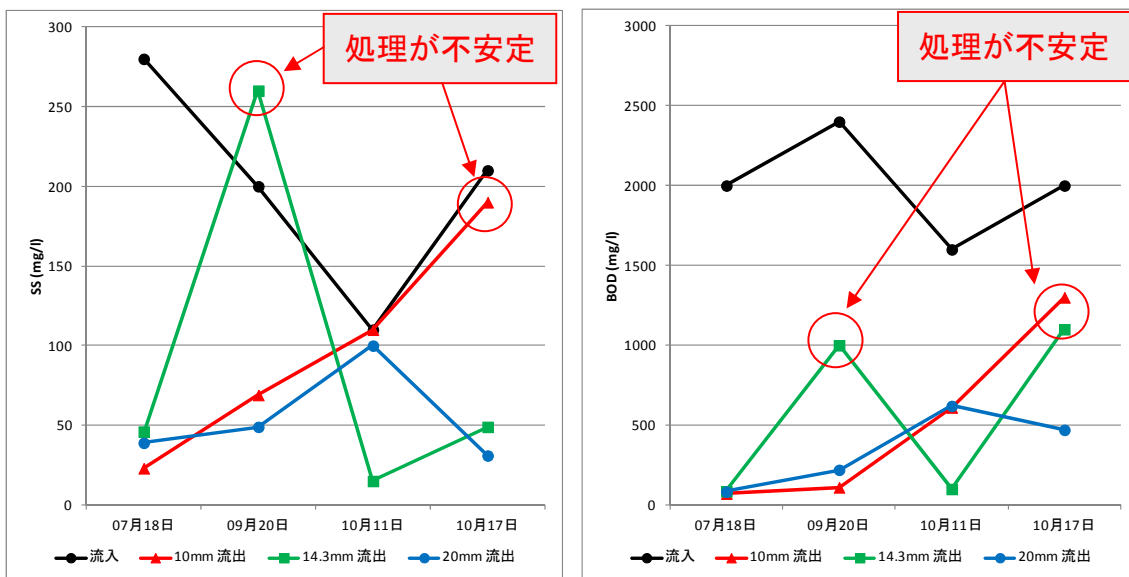


図 8 目合いによる水質の比較

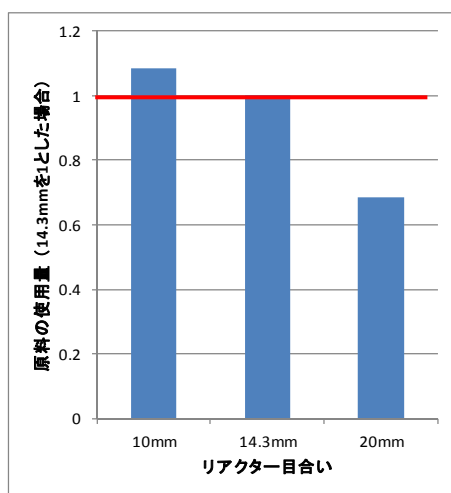


図 9 リアクター制作に必要な原材料使用料の比較

20mm 目合いのリアクターは従来の 14.3mm 目合いに比べ、リアクター製造に使用する原材料(ポリプロピレン)を 3 割以上削減可能であった。

これらのことから、本研究において開発した 20mm 目合いのリアクターが安定性および経済性において優位であると判断した。

2-4 化学工場の廃水処理実験

一般的に化学工場における廃水は難分解性物質や有害物質が含まれていることが多く、生物性分解による廃水処理技術単独では困難な場合が多い。基盤技術である iP 処理技術のこれまでの実績に化学工場は含まれていない。

この実験ではリアクターの目合いが 14.3mm のものを使用し、食品工場とは流入水質の異なる化学工場の廃水に対する処理技術の処理能力（処理水の除去率、処理水の安定性）の適合性を確認するとともに、滞留時間と曝気風量の変化に対する処理状況を観察し、本技術の適合範囲と施設設計に必要な諸条件を明らかにした。

実験の結果、BOD 除去率 80%以上・余剰汚泥の発生がゼロとなることを確認し、化学工場における基本的な適合性を実証した。

また、高容積負荷では処理が困難であることを確認した。

本技術の適合範囲である容積負荷 3kg は一般的な活性汚泥法（0.4~0.6kg）の約 6 倍の能力であり、曝気槽の大きさを 1/3 に、施設全体として半分の規模にできる能力である。

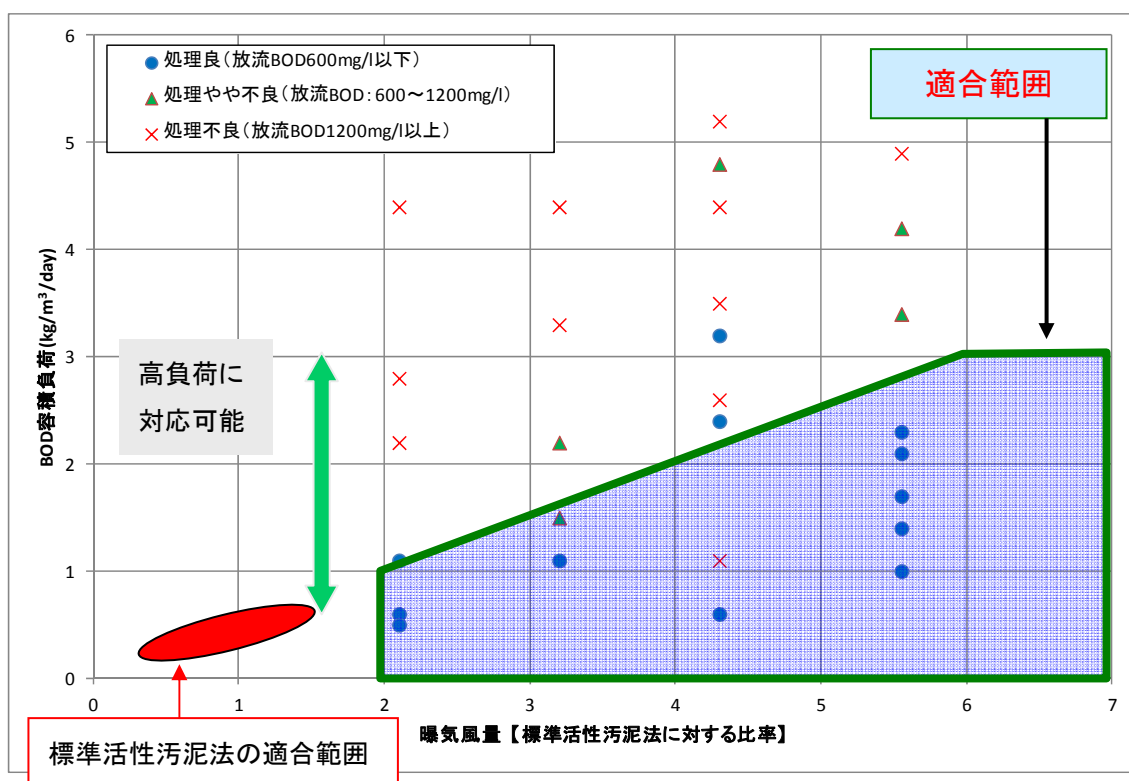


図 10 化学工場実験結果まとめ

2-5 ラボスケール実験

前述した食品工場および化学工場の実廃水を用いた実験では工場の操業変動に起因する流入水質の変動や処理水量の変動が大きく、実証といった観点からは十分な研究成果が上げられたものの、処理プロセスの解明には不向きであった。

そこで水質の安定した人工廃水を使用し、流入原水の水質・水量を自由にコントロールできるラボスケール用実験槽による処理実験を行った。

この実験の中で曝気風量の違いによる処理効率の違いの把握、内視鏡観察等により微生物の生育量を把握すること、さらに水質分析結果と合わせて処理プロセスの解明およびマスバランスの把握を行った。

実験の結果、BOD 除去率 90%程度が可能であることを確認できた。図 11 のように低負荷時の方が内部 MLSS が多く、除去率も高いことがわかった。また、図 12 のように水温が高い方が内部 MLSS が多く、除去率も高い。低水温時には生物活性が低下している。

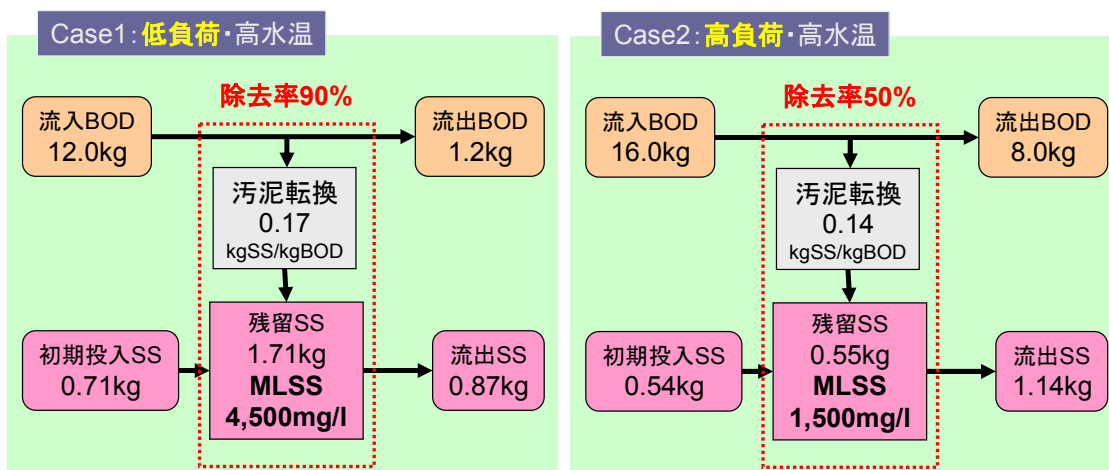


図 11 負荷量の違いによるマスバランスの違い

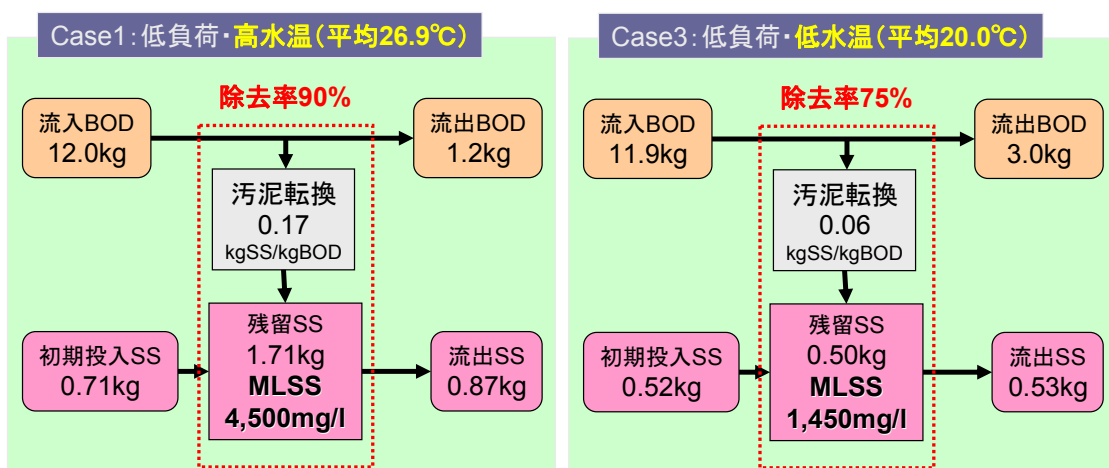


図 12 水温の違いによるマスバランスの違い

リアクター内部の汚泥を観察した結果、好気性の原生生物を確認できた。

これはリアクター内部が必ずしも嫌気状態ではなく、むしろ好気性での生物反応が起きていると考えられた。

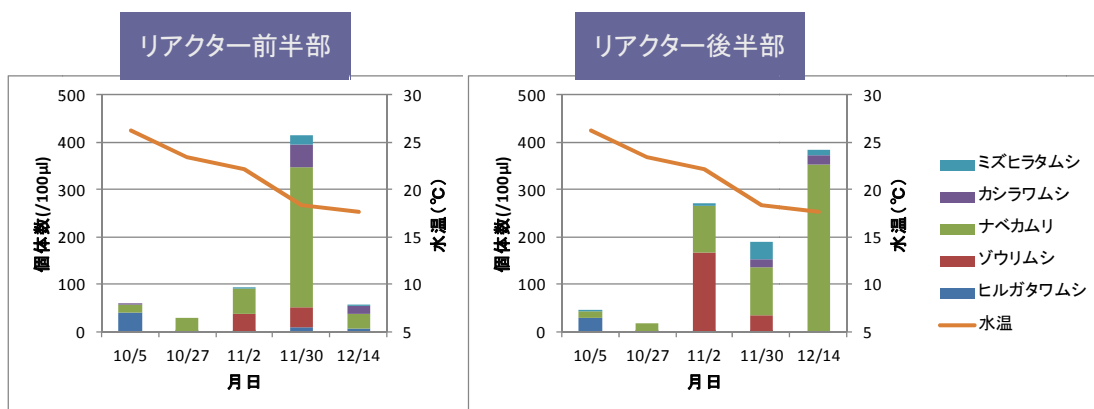


図 13 リアクター内部の生物相

また、通過流速に対する汚泥の補足能力に関する実験を行った。初期汚泥量と、6 時間循環運転した後の循環汚泥量を測定し、汚泥補足が可能な通過流速の範囲を明らかにした。

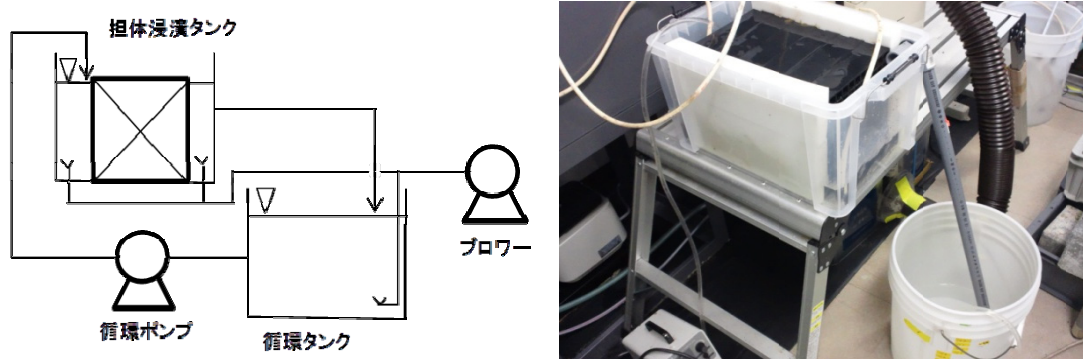


図 14 汚泥補足実験装置

2-6 供給酸素量の制御によるプロセスの開発

化学工場の実験結果から嫌気リアクターの効率的な運用を目標とした場合、流入水質の変動に応じた曝気風量の制御が必要であり、なおかつ、わずかな曝気風量不足が処理水質の悪化を誘因することが解明できた。

食品工場の実験において、酸化還元電位を運転管理指標に用いるための連続計測システムを構築した。このシステムを用いて、酸素供給量を変化させた場合の処理水質を把握しつつ、酸化還元電位を指標とした最適な酸素供給量を把握し、嫌気発酵と好気分解の連続的に発生するプロセスの開発を目指した。

しかし、この連続計測システムを用いてリアクター内の酸化還元電位を測定したところ、汚泥の堆積状況の違いにより酸化還元電位の変動が激しく定常的な連続観測を行うことが困難であった。

さらにラボスケール実験結果から、リアクター内部に多量の活性汚泥を確認でき、嫌気分解がなくとも十分な処理能力を有することを明らかにした。

iP 処理技術（基盤技術）を用いた実験では、嫌気発酵を促進させるための運転条件範囲が狭いために安定的な浄化効果が得にくく、この問題を克服するためには多くの計装系と複雑な運転制御を必要であると考えられた。

そこで、安定的な浄化効果を得られるような制御パラメータ探索を行った結果、嫌気発酵を利用しない好気条件下での運転制御の方が安定的な浄化効果を得られることが分かった。

このことから、一連の実験において良好な排水処理を達成した場合の運転方法は基盤技術とは異なるプロセスによって余剰汚泥発生量を削減していることが解明できた。

供給酸素量の制御によるプロセスの開発として、効率的な嫌気状態の促進を目的としたが、結果として、嫌気状態を作り出すための運転制御よりも好気性運転制御の方が浄化効果および汚泥削減量に関して優位であることを確認できた。

実験データの解析により、多孔状のリアクターを多数回通過する装置に対し、好気性運転制御条件下において余剰汚泥発生量が削減できるメカニズム（「2-7 汚泥の分解・減量プロセスの検証」を参照）を解明し、この新たに開発したプロセスが基盤技術とは異なる技術であることを明らかにした。

この基盤技術とは異なる新規開発技術は以下のような特徴をもつ。

- ① 有機物処理は好気性分解によって行われる。
- ② 通路状担体の内部に活性汚泥を高濃度で保持することで、それらの内生代謝による自己消化により、発生した汚泥を減量させ余剰汚泥の発生量を削減できる。

この新規開発技術を SiB 処理技術 (Sansui improved Bioreactor) と名付け、本研究の最大の成果と位置づけた。

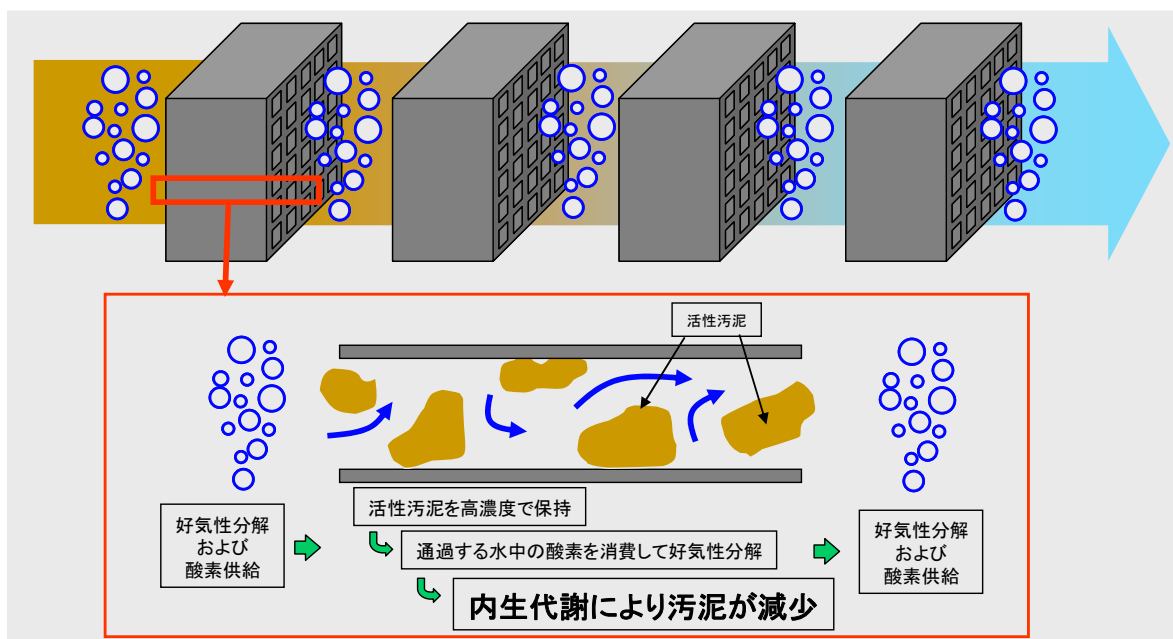


図 15 SiB 処理技術のメカニズム

2-7 汚泥の分解・減量プロセスの検証

実験結果をもとに、汚泥の分解・減量のプロセスに関して検討、解析を行った。

SiB 処理技術の特徴は好気条件下でのリアクターの機能にある。

- ① 通路状のリアクター内部に高濃度の汚泥を貯めることが可能である。
- ② 流出する SS を下水道排水基準内に抑えることが可能である。

上記 2 点の機能が、結果として内生代謝による汚泥減量の効果を増大させ、余剰汚泥発生量を大きく削減できることを実現可能にしている。

この模式図を図 16 に示す。

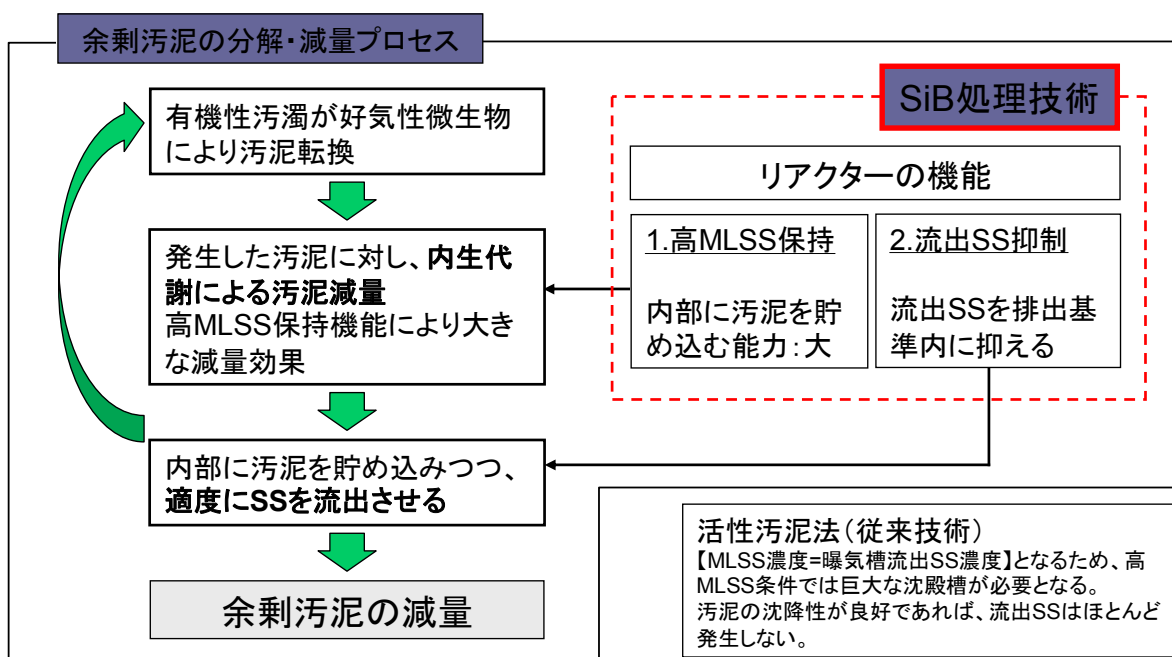


図 16 SiB 処理技術のメカニズム

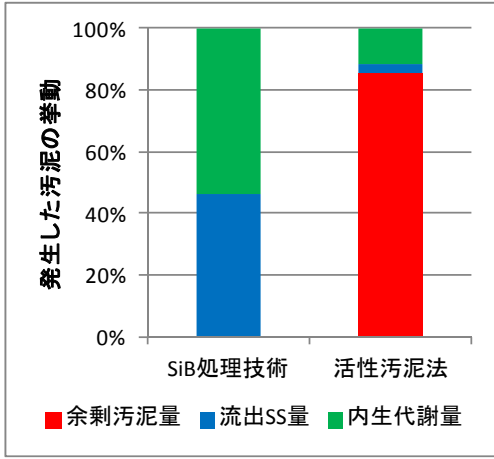
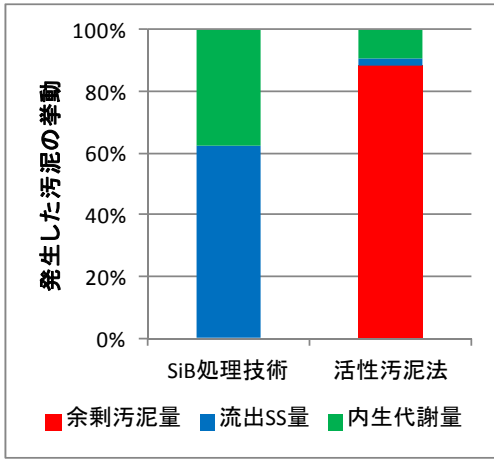
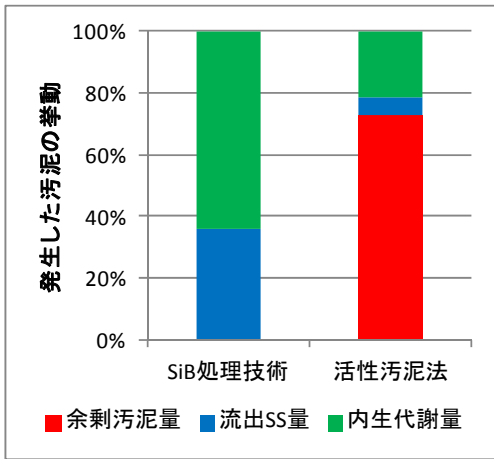
前述した SiB 処理技術のメカニズムについて、検証を行った。

一般的な、廃水浄化における余剰汚泥発生量の算出式に対し、各実験結果を適合した場合の余剰汚泥発生量（理論値）を計算した。計算式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 \text{余剰汚泥発生量} &= \text{全汚泥発生量} - \text{内生代謝量} - \text{流出 SS 量} \\
 \text{全汚泥発生量} &= \text{BOD 汚泥転換率} \times \text{流入水量} \times \text{除去 BOD 濃度} \\
 \text{内生代謝量} &= \text{自己消化率} \times \text{反応タンク容積} \times \text{MLSS 濃度} \\
 \text{流出 SS 量} &= \text{流出 SS 濃度} \times \text{流入水量}
 \end{aligned}$$

活性汚泥法に比べ内生代謝が大きく、また流出 SS 量が多い（ただし下水道排水基準内）ため、余剰汚泥発生量を削減できている。

表 5 汚泥発生量計算結果

	汚泥量計算結果	特徴
食品工場		<p>活性汚泥法（従来技術）では、全汚泥発生量の80%以上が余剰汚泥として発生しているのに対し、SiB 処理技術では余剰汚泥の発生量はゼロである。</p> <p>SiB 処理技術における内生代謝および流出SS量の割合が、活性汚泥法に対し、大きく増加している。</p> <p>SiB 処理技術において、流出SS量よりも内生代謝量のほうが大きな割合を占めている。</p>
化学工場		<p>活性汚泥法（従来技術）では、全汚泥発生量の90%程度が余剰汚泥として発生しているのに対し、SiB 処理技術では余剰汚泥の発生量はゼロである。</p> <p>SiB 処理技術における内生代謝および流出SS量の割合が、活性汚泥法に対し、大きく増加している。</p> <p>SiB 処理技術において、内生代謝量よりも流出SS量のほうが大きな割合を占めている。</p>
ラボスケール実験		<p>活性汚泥法（従来技術）では、全汚泥発生量の70%以上が余剰汚泥として発生しているのに対し、SiB 処理技術では余剰汚泥の発生量はゼロである。</p> <p>SiB 処理技術における内生代謝および流出SS量の割合が、活性汚泥法に対し、大きく増加している。</p> <p>SiB 処理技術において、流出SS量よりも内生代謝量のほうが大きな割合を占めている。</p>

2-8 設計諸元の検討

実験結果をもとに、実施設の概略設計の基礎となる設計諸元の算定根拠を明確にするための検討を行った。

実験結果から以下の諸元を得られた。

食品工場実験結果：リアクターの目合い ⇒ 20mm

化学工場実験結果：BOD 容積負荷 ⇒ 最大 3 kg/m³/day

(ただし、流入水の特性的の違いを考慮し、標準設計は 1.5 kg/m³/day)

ラボスケール実験結果：内部に汚泥を貯め込み、流出 SS を抑制するための平均通過流速以内に設定

これらをもとに施設の大きさを設定する。

・SiB 反応タンクの容積計算

$$\begin{aligned} \text{必要タンク容積 (m}^3\text{)} &= [\text{BOD (mg/L)}] \div 1,000 \times [\text{水量 (m}^3\text{/day)}] \\ &\quad \div [\text{BOD 容積負荷 : 1.5 (kg/m}^3\text{/day)}] \end{aligned}$$

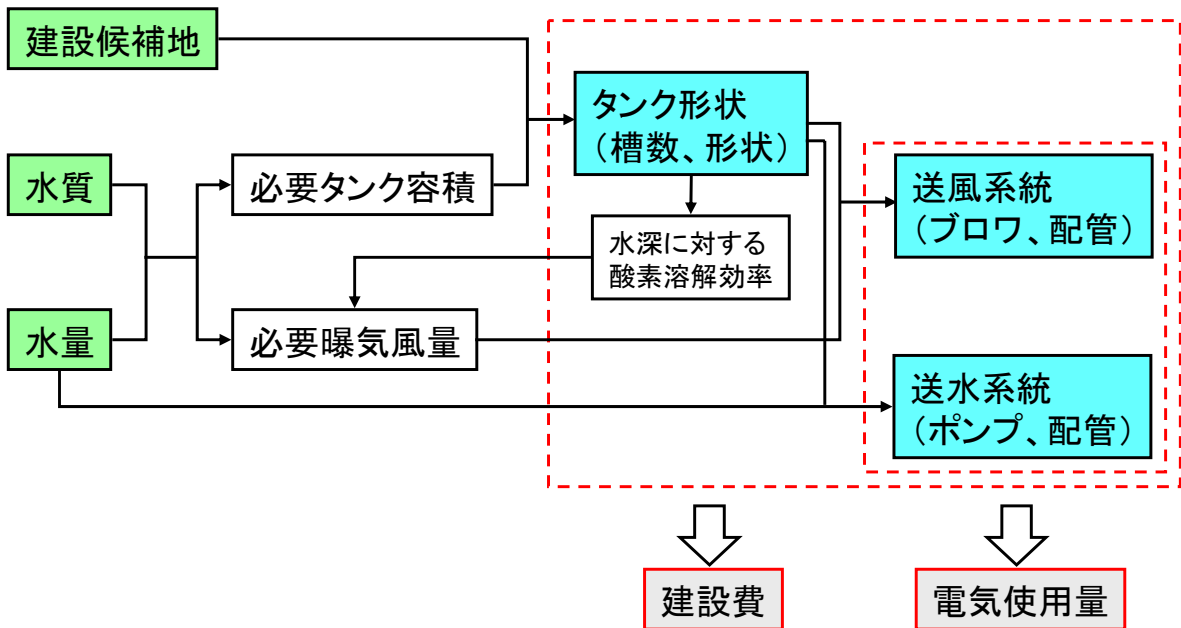


図 17 設計フロー

第3章 全体総括

本研究により、SiB 処理技術（新規開発技術）を確立できた。

SiB 処理技術は活性汚泥法（従来技術）に比べ、余剰汚泥発生量が少なく、ランニングコストの削減に寄与できる。

SiB 処理技術は iP 浄化法（基盤技術）に比べ、同等以上の余剰汚泥削減能力を有し、維持管理が容易である。

SiB 処理技術は活性汚泥法（従来技術）に比べ、高容積負荷での運転が可能のため、施設をコンパクトにできる。

以上の特徴から、SiB 処理技術の有用性を確認できた。

この新規開発技術は「廃水浄化装置」について、平成 25 年 2 月に特許出願済みである。（特願 2013-028463）

表 6 技術の比較

	[従来技術] 活性汚泥法	[基盤技術] iP処理技術	[新規開発技術] SiB処理技術
処理プロセス	有機汚濁は好気性分解によって行い、最終沈殿池において固液分離することで浄化水を得られる。	嫌気分解と好気分解を多数回繰り返す事で、余剰汚泥の発生を抑えつつ有機汚濁を分解する。	有機汚濁は好気性分解によって行い、リアクター内部を高MLSS状態に保つことで、効率的な内生代謝による自己消化により余剰汚泥発生量を減少させる。
リアクター設置方法	無し	嫌気リアクターおよび好気リアクターを交互に配置する。	高MLSS保持リアクターと好気リアクターを交互に配置する。
制御因子	曝気風量、汚泥返送量など細やかな調整を必要とする。	嫌気リアクター内を嫌気状態になるように曝気風量を調整する。	曝気風量はiP処理技術（基盤技術）よりやや多めに設定し、調節はほとんど必要としない。
余剰汚泥発生量	多い	少ない	少ない

また、平成 25 年度より事業化をスタートさせる予定である。

	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度
研究実施期間					
特許出願					
市場開発					
受注見込み			50,000千円 × 1基	50,000千円 × 3基	50,000千円 × 5基

以上