

広島県産学官共同研究プロジェクト

「有機性排水・余剰汚泥の高効率嫌気性処理システムの開発」

平成14年度報告書

(平成14年11月研究開始)

平成15年3月

(財)ひろしま産業振興機構

広島県産業科学技術研究所

・ 目 次 ・

1	成果概要	1
2	緒 言	1
3	乾式嫌気消化プロセスの開発	5
3.1	基礎検討	5
3.2	半連続汚泥嫌気処理試験	8
3.3	ラボスケール乾式嫌気消化装置の試作	9
3.4	参考文献	12
4	嫌気排水処理プロセスの開発	13
4.1	高濃度排水対応ラボスケールリアクター製作・試運転	14
4.2	パイロットプラント設計・製作	21
5	今後の計画	27
6	研究メンバー	30

1 成果概要

本年度、下水処理で用いられる活性汚泥法で排出される脱水汚泥を水に再懸濁することなしに、有機物含量50%以上の低減、容量として80%以上の低減を可能とする乾式嫌気消化装置の開発を目的として、ビーカーレベルでの脱水汚泥処理における種汚泥の選定・使用検討を行った。検討の結果、余剰汚泥高温嫌気消化脱水汚泥を10日間以上高温嫌気状態で馴養した微生物群を用いることにより余剰汚泥中の有機体炭素を最大で約50%除去できることを見いだした。また、詳細な乾式嫌気消化条件を検討するためにラボスケール乾式嫌気消化装置の選定・製作を行いその試験運転を行った。

さらに、汚泥をほとんど排出しない新規嫌気排水処理システムの実用化を目指し、低有機物含有排水である下水・農漁業集落排水、産業排水、合併浄化槽用の3種類のパイロットプラントを設計し東広島市浄化センター内に設置するとともに、高有機物含有排水に対応可能なラボスケール高速メタン発酵槽-嫌気排水処理装置の設計・製作を行った。

2 緒言

産業排水ならびに一般排水（下水）を活性汚泥法に代表される好気性処理により生成される余剰汚泥処理が深刻な問題となっている。日本全体では毎年170万トン（乾物基準）もの余剰汚泥が発生しており、焼却・埋め立て、セメント、コンポスト化がなされているが、8割が焼却または埋立処理されている。しかし、焼却による処理は、ダイオキシン等有害物質発生の可能性が問題視され、また、埋立地の確保も年々困難になっておりその処理コストは年々増加している。広島県では、現在、7,000円～15,000円/トンであるが、今後30,000円/トンまで上昇すると予測されている。また、近年、コンポストは全国的にほぼ需要を満たしつつあり（広島県では余剰気味）、今後も日々排出される全国の汚泥をコンポスト処理することは非現実的であり、汚泥処理は深刻な社会問題になりつつある。したがって、汚泥排出企業はもとより下水処理

の担い手である行政機関にとっては汚泥排出量の減容化とゼロエミッションは大きな課題になってきている。

広島市の静脈ライフラインである下水道終末処理場の脱水汚泥量を平成10年から平成13年にかけて排出量を調査したところ次のような結果であった。

表 2-1 下水処理場脱水汚泥発生量（トン/年）

	平成10年	平成11年	平成12年	平成13年
千田下水処理場	14,033	13,196	15,315	15,083
江波下水処理場	12,669	11,861	12,455	12,553
大洲下水処理場	1,996	2,143	2,056	2,141
旭町下水処理場	5,146	4,825	5,483	6,086
西部浄化センター	20,538	22,863	21,847	28,542
合 計	54,382	54,888	57,156	64,405

表 2・1 から平成13年度の脱水汚泥発生量を基準に下水道人口普及率90%とし一部地域を含めた発生量は250T/日であり今後、普及率の上昇及びし尿処理場も含めた場合脱水汚泥発生量は約300T/日に達することは必至である。また、広島県のライフライン（下水及びし尿処理施設）から発生する脱水汚泥量は約1000T/日に達するものと予想される。これを処理するためには、現状での処理費用を15,000円/Tとして計算した場合でも15百万円の処理費用がかかり、広島県の人口が約290万人なので、一人当たり年間約1万9千円を負担する計算となる。

また、広島県は比較的他県に比べ有機性廃棄物の中間処理施設が多くあるが、中小の施設が大半で処理方法は建設機械による堆積と自然発酵（コンポスト化）が主流である。この方法は臭気対策、劣悪な作業環境、処理に1ヶ月以上かかるなどの様々な問題が有り、コスト上昇を生む要因ともなっている。また、余剰汚泥は有機物であり貴重な循環型資源とも言えるが、好気性処理ではリサイクルが限定される（基本的にコンポスト化）。以上のことから、新しい汚泥減容化技術の開発が求められている。

一方で、余剰汚泥問題の根本的原因は排水処理のために活性汚泥法を代表とする好氣的処理法に依存していることにあるとも言える。好気処理法は、およ

そ1世紀前に開発された排水処理技術で、排水をほとんど極限まで浄化するという点では非常に優れた処理法である。しかし、好気処理では排水中の有機物量に対する菌体変換率が40～50%あるため大量の余剰汚泥が発生することを避けることはできない。また、処理には大量の酸素を必要とするため、通気・攪拌動力に大きなエネルギーを必要とする（日本全体の消費電力の約1%が消費されている）。しかも、空気を槽内の隅々に行き届かすために、曝気槽を深くできないので、処理施設設置面積が非常に大きいエネルギー・スペース浪費型プロセスとも言える。今後も排水処理を好気処理に依存することは将来のエネルギー枯渇問題を考えると極めて不都合である。従って、現在大量に排出されている余剰汚泥を効率的に減容化する技術の研究開発を行うとともに、好気処理法に取って代わる、余剰汚泥が少なく且つ省エネルギー型の新しい排水処理法の確立は日本国内のみならず世界的に見ても大きなインパクトを与えられらる。

新しい技術に求められる条件は、1) 省スペース、2) 省エネルギーであり、かつ3) 好気処理法と同等の処理水品質を保証できるプロセスであろう。このような条件を達成できる可能性がある現状技術として申請者が長年に渡り研究を行ってきた嫌氣的廃水処理法があげられる。本処理法は、通気攪拌が必要ないので槽を3次的に設計でき、処理設備を非常にコンパクトにすることができる。とともに、運転に必要なそもそものエネルギーが少なく済むのはもちろんのこと副産物としてエネルギーであるメタンを回収できるエネルギー製造装置としての側面も持っている。さらに、高濃度廃水への適用が可能であり、好気処理法と比較して生成される汚泥量が1/3～1/5と極めて少ないのも大きな特徴である。さらに、微生物を高密度に充填することにより高速化も達成している。以上のような利点からビールメーカーを始めとする食品製造工場への導入が急速に進んでいる。もし、嫌気性廃水処理法が全ての廃水処理プロセスに採用されれば、余剰汚泥問題解決に大きく前進するとともに、極めて経済的な廃水処理プロセスとなりうる。しかし嫌気処理の問題は、低温でメタン生成菌が活性化しないことから、都市下水のような低温かつ低濃度の廃水を対象とすることが難しいことや、中高濃度廃水を対象とすることがほとんどであり、通常一部有

機物が分解されず残ってしまうことであり、これが一般排水処理に嫌気処理法が用いられない理由である。

以上の背景より、本研究開発では、我々プロジェクトチームが持つ嫌気性廃棄物処理シーズを用いて、2つの装置開発を行う(図2・1)。一つは現在、大量に廃棄されている余剰汚泥の処理技術として、有機廃棄物の嫌気消化技術を活用して現状対応型の乾式嫌気消化法による余剰汚泥減量化装置の開発を行う。さらには、低温、低濃度排水の嫌気的高度水処理技術を活用した未来志向型である一般下水などの低温・低濃度排水へ全面的に適用可能な嫌気型排水処理装置の研究開発を行う。2つの装置は単独でも使用可能であるが、組み合わせることにより、滲出水をエネルギー使用の低い嫌気浄化装置で処理できるとともに、ディスポーザーにより粉碎された生ゴミの下水配管への直接放流が許可された場合に、固液分離後の固形分処理を乾式嫌気消化装置で対応できるなど、これまで別々に処理しなければならなかった一般排水(下水)と固体廃棄物(余剰汚泥、都市ごみ)を一括処理しうる高効率総合有機性廃棄物処理施設を構築できる。

そこで本年度はまず余剰汚泥の乾式嫌気消化に関するピーカースケールでの基礎検討を行うとともに、嫌気排水処理パイロットプラント及びラボスケールプラントの設計・製作を行った。



完全嫌気型有機廃棄物処理プロセス (CARPプロセス)
Complete Anaerobic Organic Matter Removal Process

図2-1 本プロジェクトの概要図

3 乾式嫌気消化プロセスの開発

3.1 基礎検討

(1) 使用汚泥の性状

今回の研究では嫌気消化微生物を含む種汚泥として広島市大洲下水処理場余剰汚泥高温嫌気消化脱水汚泥（以下大洲汚泥）、処理用標準脱水汚泥として広島県宮島町排水浄化センター余剰脱水汚泥（以下宮島汚泥）を用いた。その基本的な性状について示す（表3・1）。

表 3-1 使用汚泥性状

測定項目	種汚泥	
	大洲汚泥	宮島汚泥
pH	7.54	4.87
NH ₃ -N (ppm)	630	3300
水分 (%)	79.8	83
有機炭素含量 (% wet base)	5.4	7.7
(% dry base)	26.8	45.7

(2) 種汚泥のメタン発酵能

大洲汚泥のみを用いて55℃、15日間嫌気培養を行いメタン生成能を調べた。炭素源は汚泥に残存する未分解有機物のみであったが順調なメタン生成が確認された（図3・1）。種汚泥からのメタン生成は今後生汚泥の嫌気消化試験時のバックグラウンドとなるため、十分な期間種汚泥を嫌気培養しメタン生成を完了させておく必要がある。

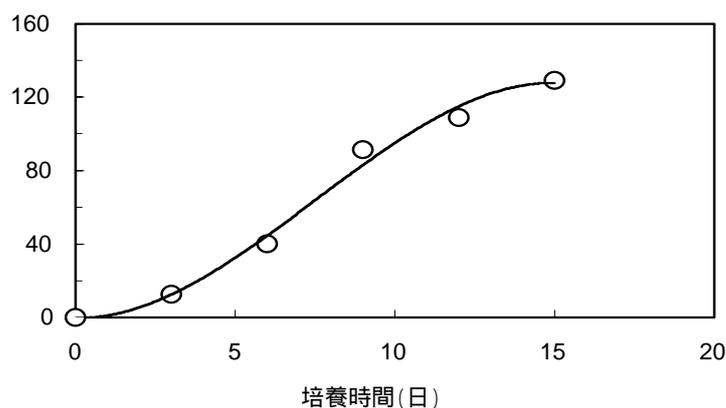


図3-1 高温嫌気消化脱水汚泥のメタン生成能

(3) 種汚泥馴養期間

大洲汚泥はもともと、98%以上の水分含量で嫌気消化されたものであり水分含量80%程度の低含水率での嫌気消化に最適化されていない。そこで、大洲汚泥のみを一定期間馴養したのち、馴養大洲汚泥：宮島汚泥の混合比を75：25（全量20g）として15日間培養を行った（表3・2）。その結果、馴養しなかった場合、全くメタンが生成せず代わりに水素が微量生成したのに対し、馴養を10日間以上行うことにより顕著なメタンが見られた。また、馴養期間を長くすることによりメタン生成及び有機炭素除去率の若干の向上が認められた。以上の結果から、乾式嫌気消化において種汚泥として嫌気消化汚泥を利用する場合、ある程度の馴養が必要であることが示唆される。

表 3-2 種汚泥馴養期間の乾式嫌気消化に及ぼす影響

馴養日数	CH ₄ 生成量	CO ₂ 生成量
(d)	(mmol/kg-wet w.)	(mmol/kg-wet w.)
0	ND	ND
10	976	910
20	803	823
40	933	902
60	1305	991

大洲汚泥：宮島汚泥重量比=3:1; 培養期間：15日

(4) 汚泥混合比率

種汚泥にどの程度生汚泥を添加できるかは処理速度を大きく左右する。そこで、大洲汚泥：宮島汚泥の混合比を変えpH調整なし、55にて培養を行なった。15日間培養後のメタン生成量を測定したところ宮島汚泥添加量を増やすと宮島汚泥当たりのメタン生成は減少した。大洲汚泥：宮島汚泥 = 7 : 1の時、1940 mmol/kg-宮島湿汚泥のメタンが生成し、この時有機炭素除去率は計算上50%に達した(表3・3)。しかし、大洲汚泥：宮島汚泥 = 3 : 1、1.7 : 1の場合、有機炭素除去率はそれぞれ35%、10%に低下した。その原因を探るためにメタン発酵の阻害要因として広く知られている有機酸およびアンモニア濃度を測定したところ、宮島汚泥の添加量の増加によりアンモニア濃度が上昇するとともに有機酸の蓄積が見られた。このことから、宮島汚泥添加量の増加によりアンモニアが過剰に蓄積し、その結果メタン生成が阻害され有機酸の蓄積を引き起こしたことが示唆された。

表 3-3 大洲汚泥及び宮島汚泥の混合比の乾式嫌気消化に及ぼす効果

条件	大洲汚泥 ^a (g)	宮島汚泥 (g)	CH ₄ (mmol/kg-wet w.) ^b	CO ₂ (mmol/kg-wet w.) ^b
	20.0	0.0	-	-
	17.5	2.5	1940	1307
	15.0	5.0	1305	991
	12.5	7.5	273	366

^a 60日間55で馴養済み

^b 培養15日目での宮島汚泥湿重量当たりの生産量

(5) pH

pHはメタン生成活性に大きな影響を与える因子である。そこで、メタン生成に及ぼす初発pHの影響について検討した(図3・2)。ここで、大洲汚泥：宮島汚泥を75 : 25の比率で混合したものをを用いた。含水率80%でのpH

調整が困難であったため、脱イオン水を汚泥重量の2倍量を加えて水分含量を94.5%とし、HClもしくは、NaOHを用いてpHを5、6、7、8、9に調整し15日間培養を行った。その結果、メタン、CO₂発生量ともpHが高いほど高くなり、pH5~6ではメタン生成はほとんど見られなかった。このことから、種汚泥馴養は、微生物群馴養効果とともに、混合汚泥をメタン生成に最適なpHに調整するためにも重要な因子であることが考えられる。

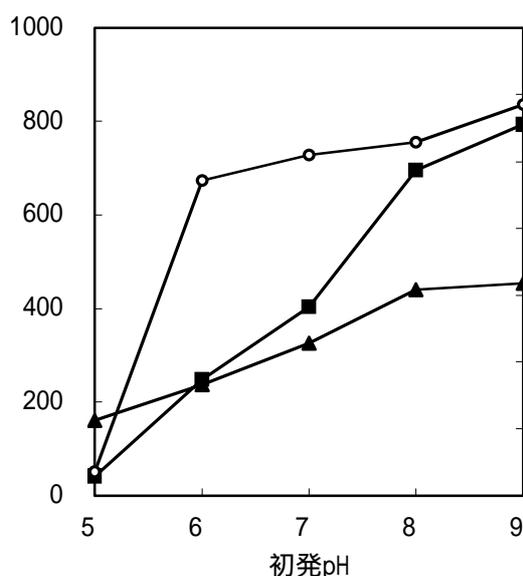


図 3-2 各 pH における培養 15 日後のメタン及び CO₂ 生成量
(宮島汚泥湿重量当たりの生産量)

3.2 半連続汚泥嫌気処理試験

上記検討結果に基づき、馴養大洲汚泥を種汚泥とし、宮島汚泥の反復回分処理を行った。ここで、大洲汚泥：宮島汚泥 = 75：25で混合、総重量120gとして15日間の乾式嫌気消化を行った。その後、汚泥を30g引き抜くとともに新鮮な宮島汚泥を30g添加し改めて15日間の処理を行った。本手順を3回繰り返した。その結果、1回目処理時には全汚泥湿重量当たり450 mmol/kg-t.wet w., 2回目、3回目でも200~250 mmol

/ kg-t . w e t w . のメタン生成が見られた (図 3 · 3) 。しかし、4 回目でメタン生成が完全に停止してしまった。この原因を探るため有機酸並びにアンモニア蓄積量を測定したところ、培養 4 回目に著量のアンモニアと有機酸の蓄積が見られた。これは、汚泥混合比を変えた場合と同様であり、アンモニア及び有機酸によりメタン生成が阻害されていることが示唆された。

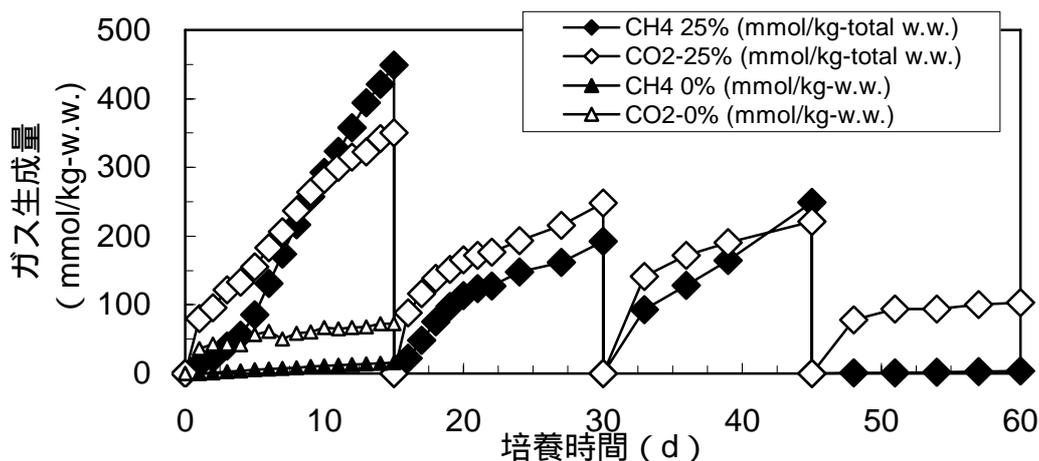


図 3-3 回分培養におけるメタン及び CO₂ 生成量

3.3 ラボスケール乾式嫌気消化装置の試作

上記検討に基づき、さらに詳細な乾式嫌気消化過程の解析を行うとともに、パイロットプラント設計・製作時に必要なパラメーターを取得するために、ラボスケール乾式嫌気消化装置を選定・製作を行った。

種々検討した結果、最終的に A B L E 製固体培養装置を基本とし一部改造を施したものを採用することとした (図 3 · 4) 。本装置は 7 0 °C まで加温可能であり、上部に攪拌翼を持っており (図 3 · 5) 優れた固体混合能力を持っている。さらに、下部から余剰水の排出機構を持っており (図 3 · 6) 、コンピュータ制御による温度、湿度コントロール機能が可能である (図 3 · 7) 。今後、本装置を用いて、乾式嫌気消化の更なる最適化を検討予定である。



図 3-4 固体培養槽とコントロールボックス



図 3-5 上部攪拌翼

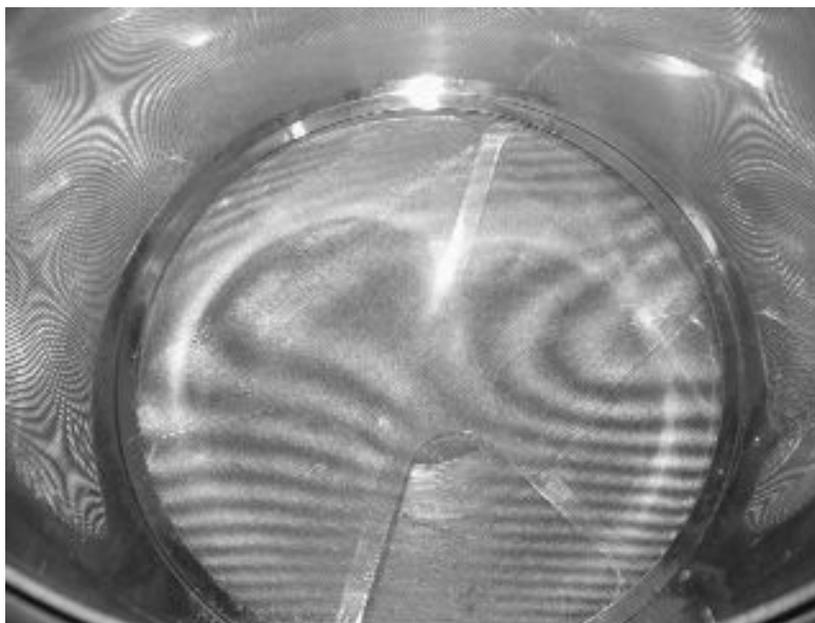


図 3-6 培養槽内部



図3-7 温度・湿度コントロール用コンピュータ

3.4 参考文献（書籍のみ掲載）

- 1) 広島県土木建築部都市局都市総室下水道室（2002）広島下水道2001
- 2) Mata-Alvarez、 J ed. (2003) Biomethanization of the organic fraction of municipal solid waste. IWA Publishing、 London.
- 3) Sedlak R. ed. (1991) Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater-principle and practice、 second edition. Lewis Publishers、 New York.
- 4) 化学工学協会編（1978）生物的水処理技術と装置、培風館.
- 5) Cheremisinoff、 N. P. eds (1989) Hand book of heat and mass transfer vol. 3: catalysis、 kinetics、 and reactor engineering. Gulf Publishing Co.、 Houston、 London、 Paris、 Tokyo.
- 6) 上木勝司、永井史郎編（1993）嫌気微生物学、養賢堂
- 7) Clesceri et al. eds (1989) Standard methods for the examination of water and wastewater、 17th edition、 APHA.

4 嫌気排水処理プロセスの開発

現在、都市下水の処理や産業排水の最終処理は、主に活性汚泥法等の好気性処理法によって行われている。しかし、活性汚泥法は、余剰汚泥発生量が多い、装置稼働のために莫大な電力エネルギーが必要といった問題点を有する。一方、これまで主として中高濃度廃水の処理に用いられてきた嫌気性生物処理法は、余剰汚泥の発生量、消費電力エネルギーが少ないという利点を有する。特に上昇流嫌気性スラッジブランケット（Upflow anaerobic sludge blanket、UASB）反応器は、その優れたパフォーマンスにより食品・ビール・醸造廃水から紙パルプ・高濃度脂質含有廃水まで適応廃水種を拡大している^{1),2)}。近年では、都市下水のような低濃度廃水へのUASB反応器のフィージビリティに関する研究が進み、既にインド、ブラジル等ではフルスケールプラントが稼働している^{3),4),5)}。しかし、国内においてUASBを主体とする装置を用いて低濃度排水の処理を行った知見は少ない状況にある^{6),7)}。都市下水に注目すると水量が膨大、冬季には水温が15℃程度にまで低下するという嫌気性微生物、特にメタン生成細菌にとって不適な特徴を有する。本研究では、メタン生成細菌以外の嫌気性微生物、即ち、硫酸還元細菌、および硫黄サイクルのパートナーである硫酸酸化細菌の活性化に着目した新規排水処理システムを考案し、その処理特性とリアクター保持微生物の生態評価を行う。

実験は下述する全4系の排水処理装置を設計・設置し、学術的な基礎的知見と本処理システムの実用化のためのパラメーターを収集し最適な運転条件を見出す。

ラボスケール・バイオリアクター

ラボスケールのメタン発酵リアクター：中温UASB（システム前段）と嫌気性処理を主体したプロセスに、中・高濃度食品工場排水の模擬排水を通水し、生物処理能力を評価する。システム前段はUASB反応器を用いて、流入排水BOD濃度数千～数万mg/Lを1000 mg/L未満にまで処理（メタン化）する。後段の排水処理システムは、硫酸還元細菌、硫酸酸化細菌を高濃度に保持できる装置構

造とし、前段メタン発酵処理水を流入水とし、その処理特性について評価する。

パイロットスケール・バイオリアクター

ラボスケールでは、十分な汚泥発生量の把握、構成機器の把握等が困難であることと、研究成果を早期に実用化に結びつける観点からパイロットスケール・バイオリアクターを3基設計・製作する。いずれも UASB を主体とした前段処理から構成される。2基は、50m³/日規模のパイロットスケール・バイオリアクター（系、系）である。系は排水処理装置の硫黄酸化部を接触曝気槽（固定床）で構成し、生活排水を対象とする。系は硫黄酸化部をスポンジ担体のろ床で構成し、最終的に産業廃水や特殊廃水を処理対象とする。残りの1基（系）は、10m³/日規模のバイオリアクターで合併浄化槽排水を対象とする。これらの UASB（嫌気性処理）を主体としたシステムに実下水を供給する装置としては国内最大となる。

4.1 高濃度排水対応ラボスケールリアクターの製作・試験運転

（1）実験装置

本システムは、当研究所東側駐車場脇のスペースに設けた仮設ハウス内（2階建）に設置した。

図4-1に本システムの概略を示す。処理フローは、まず前処理装置にメタン発酵リアクターである中温（35℃）UASBを配置する。UASB処理水は、2槽型嫌気性リアクターを通過し、その後スポンジ担体を充填した好気性散水ろ床リアクターで処理される。散水ろ床リアクター処理水は、最終処理水となると共にその一部は2槽型嫌気リアクターに返送されポリッシュアップする。基質は常時攪拌を行っている500Lタンクより、マスターフレックス社チュービングポンプシステムにて供給及び処理水の循環を行う。

次に各リアクターの詳細を述べる。前処理の中温 UASB は内寸法 15cm 角、塔長 130cm のカラムに GSS（Gas-Solid Separator：固液分離装置）を備えた装置で

全高 1.65m、水容積 38.0L (GSS : 8.8L) となる。カラムには高さ方向に 6 箇所
のサンプリングポートを設置し、リアクター内の汚泥保持状況や基質分解特性
を調査できるようにした。GSS にはスカムブレイカーを装着しており、適時作
動させることで浮上汚泥の増加を防ぐ役割とする。温度制御にはカラムの周囲 3
辺を 50mm のウォータージャケットで覆い、恒温装置付ポンプにてリアクター
内を 35℃ に保つ。生成メタンガスは水封槽(飽和 NaCl)と脱硫塔(鉄ペレット)
を通過して、湿式ガスメーターにて発生量を測定する。ガス組成は水封槽直後
のサンプリング孔よりプラスチックシリンジと 5mL バイアル瓶にて採取して分
析を行う。

2 槽型嫌気性リアクターは、各槽の内寸法は 15cm 角で、5.0L の脱窒槽と 13.5L
(GSS : 3.5L) の UASB から成り、槽間はパイプ(φ30、0.3L)にて接続してお
り、合計 18.8L の水容積となる。中温 UASB 処理水は脱窒槽上部より流入し、
下部よりパイプを通して UASB へ移り水頭差を利用して UASB 上部より流出さ
れる。両槽とも高さ方向にサンプリングポート(脱窒槽 3 箇所、UASB 7 箇所)
を設置しており、各槽における処理状況、保持汚泥菌叢を調査できるようにし
た。なお、脱窒槽内には、ポリオレフィン系樹脂の φ15mm、L=16mm 中空状担
体を見掛け体積 5L 充填する。

好気性散水ろ床リアクターは、内寸法 13cm、1 ユニット 50cm 高のカラムを 4
ユニット直列に積み上げる。各ユニット間にはサンプリングポートを設置し、
流入部の回転型散水装置と下部沈殿槽を合わせると全高 330cm のリアクターと
なる。ろ材は 1 辺 25mm の立方体スポンジをネットリング(ポリプロピレン製)
に埋め込み、1 ユニット当たり 200 個をランダムにカラム内に充填させ、合計
800 個でスポンジ体積 12.5L (充填率 37%) となる。沈殿槽は水容積 9.4L で蓄
積した汚泥は下部ポートより適時引き抜くこととする。なお、カラムには壁面
影響(短絡流)を低減するために、斜行板を 3 箇所/ユニットで設置した。

後段の 2 槽型嫌気性リアクターと好気性散水ろ床リアクターは、実際の排水
処理現場を想定し温度制御はフリーとした。

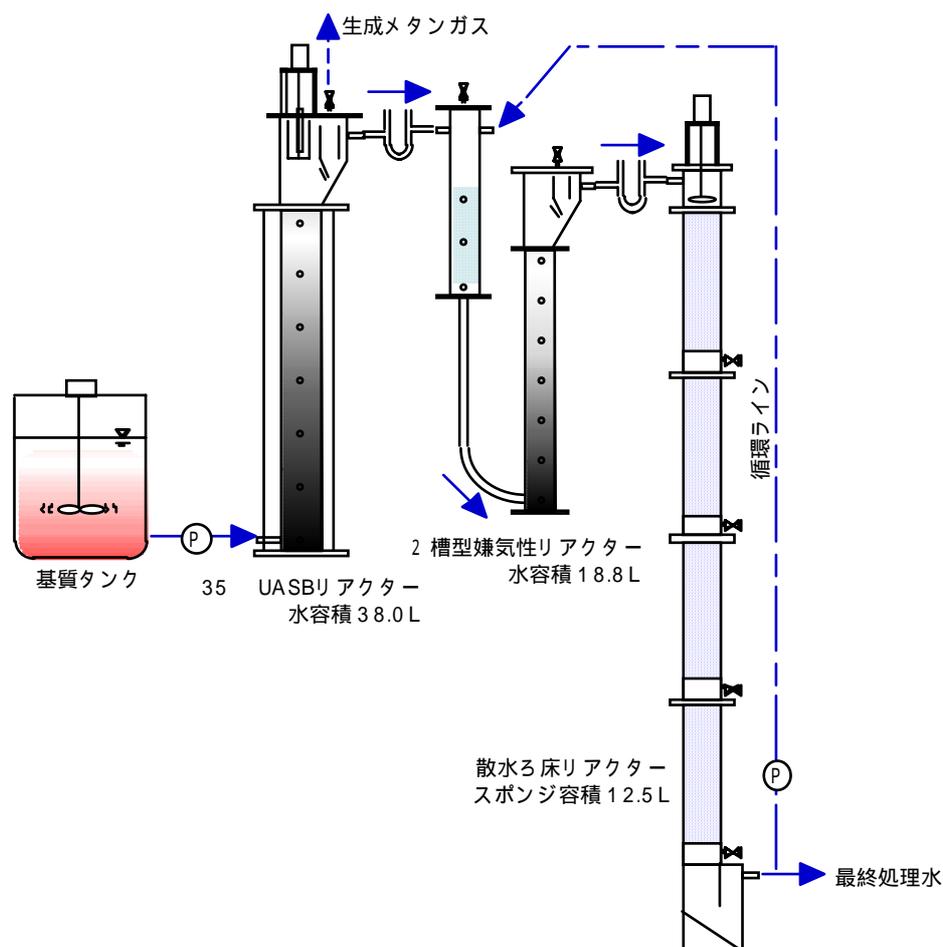


図4-1 中高濃度廃水対応型システムフロー

(2) ラボスケールリアクタースタートアップ状況

ラボスケールリアクターの目的は、食品やビール廃水をはじめとする産業廃水の最終処理である活性汚泥法に替わるシステムを構築することが目的である。そこで、本システムでは前処理である UASB の処理が定常（安定）状態であることが望まれる。よって、本節では UASB を先行してスタートアップを行ったのでその状況及び結果を報告する。

供給廃水

供給廃水は、ジャム工場廃水を選定した。選定理由としては、既に工場にお

いても UASB が稼働していることが大きい。廃水は製造工程や清掃作業から排出されることから、単にジャムを希釈したものに極めて近い。よって、本実験では廃ジャムを用い、工場模擬廃水を作成・供給することにした。また、工場模擬廃水には、実廃水に合わせて COD_{Cr}3000mg/L 程度に調整し、微量元素を表 4-1 の濃度となるように添加した。

表4-1 ラボスケールリアクター添加微量元素組成

(単位:mg/L)			
NH ₄ Cl	200	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.17
MgCl ₂ ·6H ₂ O	400	ZnCl ₂	0.07
KCL	300	H ₃ BO ₃	0.06
KH ₂ PO ₄	200	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.04
CaCl ₂ ·2H ₂ O	150	CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.027
FeCl ₂ ·4H ₂ O	5.0	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.025
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.61	Na ₂ SO ₄	221.5

植種汚泥

植種汚泥はジャム廃水処理を行っている実機中温グラニュールを用いた。投入量は、43000mgVSS/L (47000mgSS/L、VSS/SS=0.91) の汚泥を 12L 植種し、リアクター内には 516gVSS の汚泥保持量となる。

UASB 植種汚泥について、メタン生成活性、硫酸還元活性を評価した(何れも gCOD/gVSS/day 基準)。植種する汚泥を、窒素パージを行う嫌気的条件下で分散処理し、リン酸緩衝液、微量栄養源で培地の入っている 122mL バイアル瓶に分注した。テスト基質である酢酸、プロピオン酸、グルコース、水素(H₂/CO₂=80:20、1.4atm)を加え、35℃ 恒温ロータリーシェーカー(120rpm、回転半径 40mm)に装着して適時サンプリングを行い活性を評価した(詳細な手順は既報⁸⁾に準じた)。硫酸還元活性の測定では、硫酸ナトリウムをバイアル内最終濃度で 200mgS/L とし、メタン生成を停止させる目的でクロロホルムを 5mg/L となるように投入した。

その結果を図 4-2、4-3 に示す。メタン生成活性(COD/gVSS/day)は、酢酸基質: 0.158(±0.018)、プロピオン酸基質: 0.164(±0.002)、グルコース基質: 0.164(±0.004)、水素基質: 0.649(±0.051)となった。これらは一般的な値より若干低

い。その理由は汚泥を採取した UASB は前処理に酸生成槽を通過しているため、UASB 単体処理よりは負荷が低いことが挙げられる。本実験の UASB での馴養は、各基質からメタン生成活性は認められることと、リアクターへの供給基質がほぼ同様であることから、問題なく活性値は上昇するものと考えられる。

硫酸還元活性(COD/gVSS/day)は、酢酸基質:0.019(±0.002)、水素基質:0.048(±0.001)を示し、それぞれメタン生成活性のほうが 8.3 倍、13.5 倍と高い。これまでの供給廃水に硫酸塩が僅かしか存在しないことから妥当な活性値であると考えられる。今後、本実験条件下での馴養で如何に活性が変化するか追跡していく。

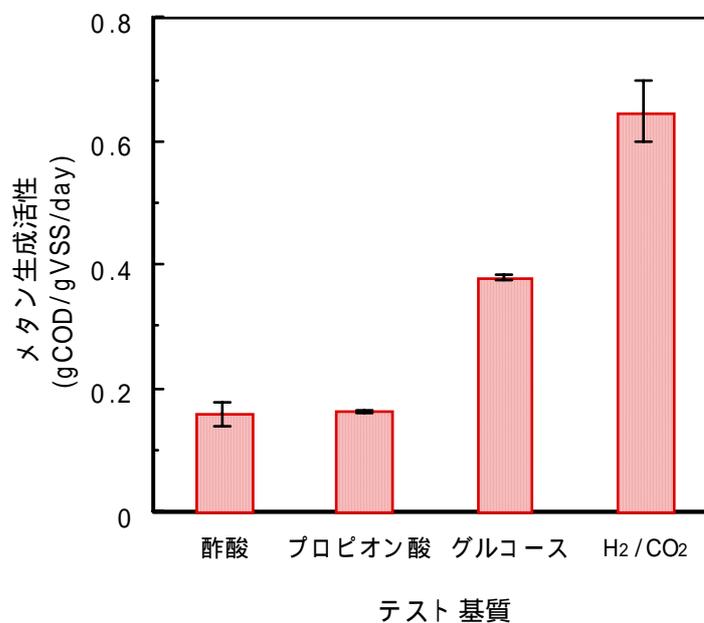


図4-2 UASB 植種汚泥の各基質におけるメタン生成活性

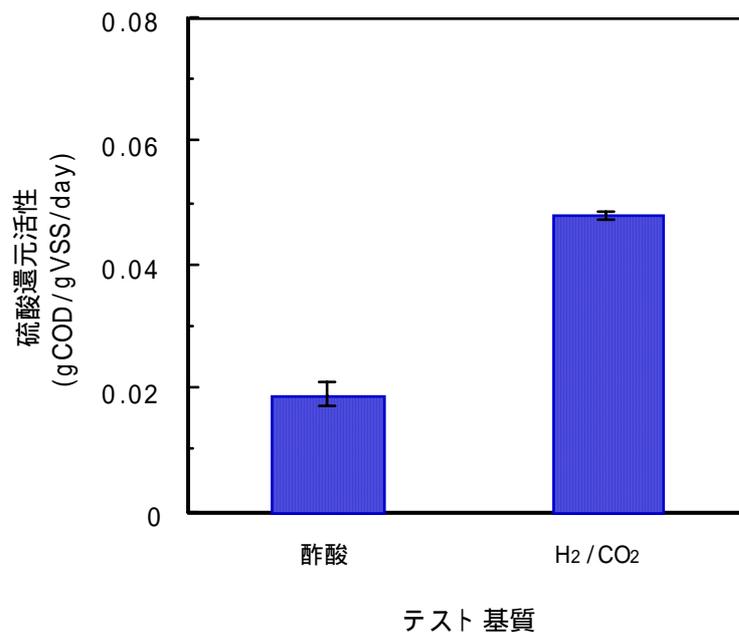


図4-3 UASB植種汚泥の各基質における硫酸還元活性

連続処理スタートアップ状況

図4-4に、35 UASBリアクターの連続処理実験のスタートアップ状況を示した。スタートは容積負荷 $1.5\text{kgCOD}/\text{m}^3/\text{day}$ 、HRT（水理的滞留時間）48時間で供給を開始した。運転開始後間もなく除去率は90%以上を達成したことから、18日目よりHRT24時間に短縮することで容積負荷 $3.0\text{kgCOD}/\text{m}^3/\text{day}$ に上昇させた。運転開始と負荷上昇直後に一時的な浮上汚泥によるウォッシュアウトが観察されたが、時間の経過とともに落ち着きをみせた。現在も容積負荷 $3.0\text{kgCOD}/\text{m}^3/\text{day}$ で廃水供給を継続しており、運転24日目において流入全COD $4240\text{mg}/\text{L}$ がUASB処理水で $420\text{mg}/\text{L}$ まで処理され、除去率は90%を達成している。メタンガス回収率は、全成分ベースで46%、溶解性ベースで98%となった。固形性と溶解性ベースで大きな差が認められたが、これは運転19日より基質タンク攪拌モーターの故障によりタンク内で微生物が増殖しはじめたものが、SS成分として流入し反応器内部で蓄積していると考えられる。

今後、1～2週間程度UASBの処理性能の安定を確認しながら、周辺機器を配置して後段のシステムに接続を行い、本実験の目的である中・高濃度廃水対応型のトータル処理システムのフィージビリティ調査を行う。

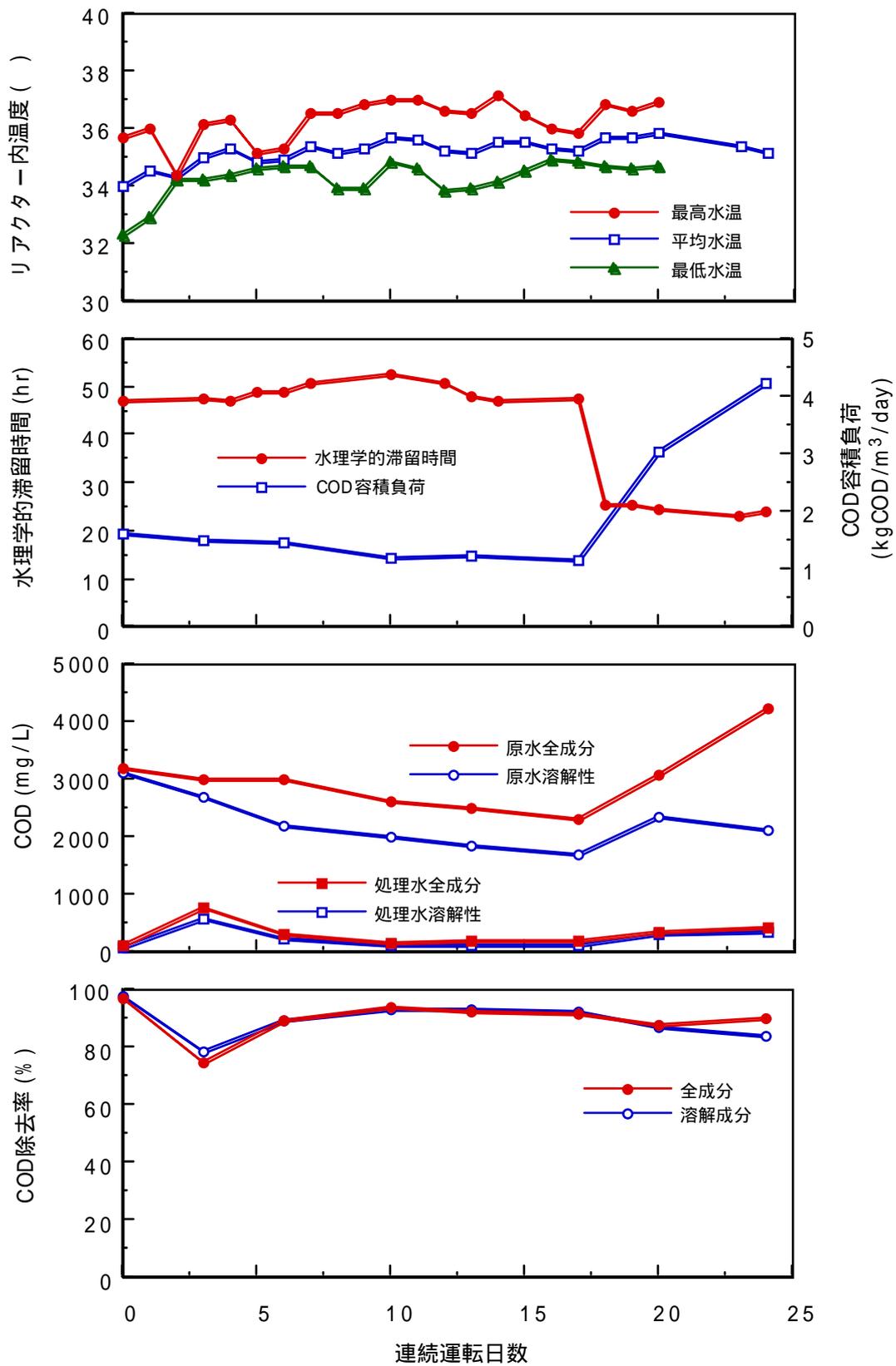


図4-4 UASBリアクタースタートアップ状況

4.2 パイロットプラント設計・製作

パイロットスケールリアクターは、設計期間 4 ヶ月、製作施工 4 ヶ月を費やし、6月中旬に東広島浄化センター内の分配槽前スペースに3系列設置した(写真4-1)。

本報告では、これらのパイロットスケールリアクターの実験装置の構成と諸元をまとめた。なお、実用化を想定したパイロットプラントであることから、温度制御は全系フリーとした。



(1) 共通設備

全ての系に供給する実下水は、浄化センター分配槽より汲み上げ原水調整槽(1.27m³)から各系に送られる。原水調整槽の流入部には掻き揚げ式微細目スクリーン(2.5mm幅)で大きめの夾雑物の流入を防ぐようにしてある。原水槽内は水中ポンプにより常時攪拌を行う。

全ての系の処理水と余剰汚泥は、一旦処理水返流槽(0.88m³)と汚泥返流槽

(0.22m³) に集められた後に分配槽に放流する。

(2) 系パイロットスケールリアクター -公共下水道及び農業集落排水向け-

図 4-5 に 系の概略図を示す。 系の処理フローと構成は、前段に脱窒槽と UASB を組み合わせた 2 槽型嫌気性リアクターを配置し、その処理水は次に接触曝気槽(固定床式)で好気的な処理を行う。この嫌気-好気処理を行った後に、沈澱槽を経て最終処理水となる。また、好気性固定床と沈澱槽の下部から、2 槽型嫌気性リアクターへ返送する循環するラインを設けた。

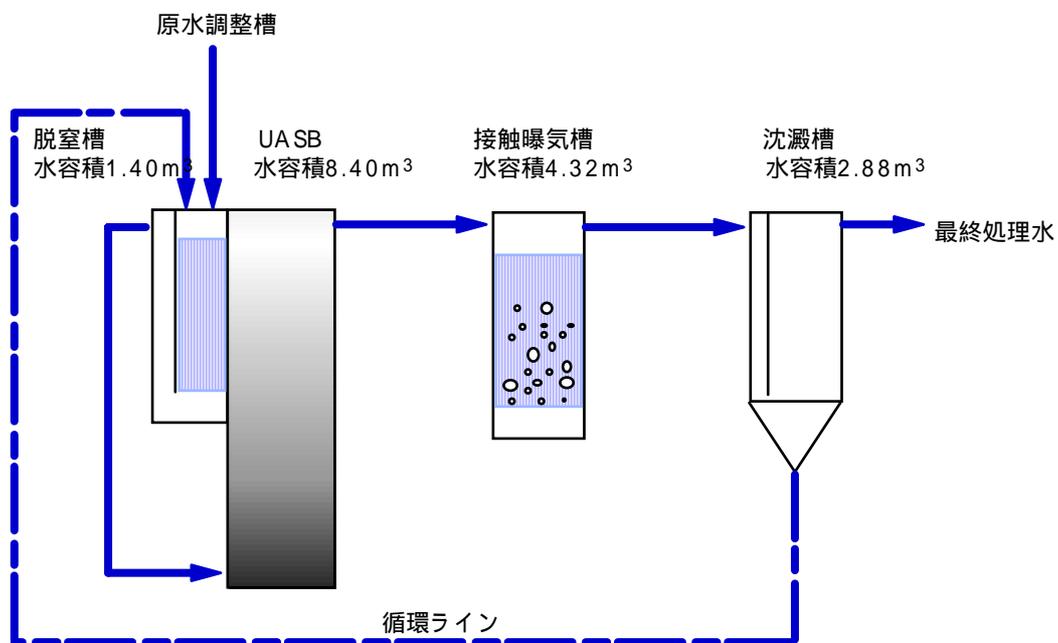


図4-5 系リアクター処理フロー (公共下水道及び農業集落排水向け)

各リアクターの詳細を次に述べる。2 槽型嫌気性リアクターは、脱窒槽(1.40m³、内寸法 0.5 × 1.0m) と UASB (8.40m³、内寸法 1.2 × 1.4m) を組み合わせたものである。合計の水容積は 9.8m³ で、塔長は 5m となる。流入水は、まず脱窒槽に流入し仕切板通過後オーバーフローして UASB 下部へ繋がる管を通して移動する。UASB では下部より上昇流で上部から排出される。UASB には高さ方向に 9 箇所

のサンプリングポートを設置、汚泥保持状況や基質分解特性を把握できるようにした。脱窒槽内は保持微生物の系外流出を抑えるために、スポンジを使用した固定床を設けた。

接触曝気槽は、内寸法が $1.2 \times 1.2\text{m}$ 、全高 3.0m 、水容積 4.32m^3 となっている。曝気方法は、下部に 3 本の散気管を等間隔に配置した全面曝気方式とした。曝気量は槽内の DO メーターにより、設定する溶存酸素濃度に合わせた空気供給を行えるシステムとした。槽内にはスポンジを使用した固定床を設け、硝化菌等の増殖速度の遅い保持微生物を保持できるようにした。

沈澱槽は、内寸法が $1.2 \times 1.2\text{m}$ 、全高 2.0m 、水容積 2.88m^3 となっている。槽内には短絡流防止のために仕切板を設けた。

(3) 系パイロットスケールリアクター –産業排水向け-

図 4-6 に 系の概略図を示す。系の処理フローと構成は、前段に 系と同スペックの脱窒槽と UASB を組み合わせた 2 槽型嫌気性リアクターを配置し、その処理水は次に散水ろ床リアクターで好気的な処理を行う。この嫌気-好気処理を行った後に、砂ろ過槽を経て最終処理水となる。また、散水ろ床リアクター下部のレシーピングタンクから、2 槽型嫌気性リアクターへ返送する循環するラインを設けた。

各リアクターの詳細を次に述べる。2 槽型嫌気性リアクターは、先述した通り 系と同スペックとした。散水ろ床リアクターは、内寸法が $2.15 \times 2.15\text{m}$ 、1 ユニット高 1m のカラムを直列で 3 ユニット積み上げたもので、全槽容積 13.87m^3 となる。槽内に充填するろ材は、1 辺 25mm の立方体スポンジをネットリング（ポリプロピレン製）に埋め込んだものを、合計 193,500 個、スポンジ体積 3.02m^3 （充填率 22%）となる。流入水は、上部の回転式散水装置で断面全体に分散され、スポンジろ材を通過し下部のレシーピングタンクに一旦貯留され、からオーバーフローした水が砂ろ過槽へ移される。

砂ろ過槽は、内寸法が $0.3 \times 0.9\text{m}$ 、全高 3.7m 、槽容積 1.00m^3 となっている。砂ろ過装置には、連続洗浄式を採用し、砂は見掛け体積で 0.45m^3 充填した。洗浄で剥離した汚泥は、散水ろ床レシーピングタンクへ返送され散水ろ床リアク

ターの剥離汚泥とともに蓄積される。

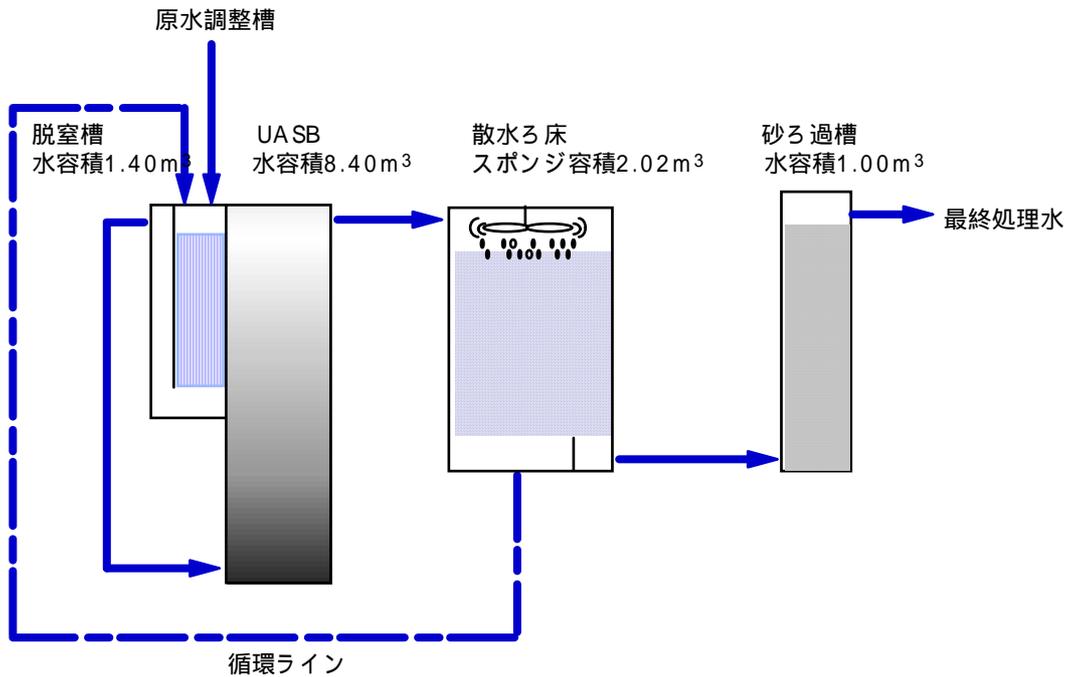


図4-6 系リアクター処理フロー（産業排水向け）

（4）系パイロットスケールリアクター ー合併浄化槽向け-

図4-7に系の概略図を示す。本リアクターのターゲットが合併浄化槽であるためにサイズのみならず、実機に合わせて各処理槽を一体化した。リアクターは、最初沈澱槽、2段式UASB、接触曝気槽（固定床式）、最終沈澱槽で構成されており、最終沈澱槽の下部から最初沈澱槽への循環ラインを設けてある。

本リアクターは、全幅1.20m、全長2.80m、槽高1.90mの一槽となっており、その中に仕切りを入れることで各処理槽に分けている。最初沈澱槽は、水容積 2.04m^3 （ $1.20\text{B} \times 1.00\text{L} \times 1.70\text{H}$ ）となっており、槽内に短絡流を防ぐために仕切板を設けた。最初沈澱槽流出水は、オーバーフローで2段式UASBへ移される。

2段式UASBは、1段当たり水容積 0.816m^3 （ $1.20\text{B} \times 0.40\text{L} \times 1.70\text{H}$ ）で、2段連続で配置しており $L=0.80\text{m}$ 、水容積 1.63m^3 となる。UASB内は仕切板で2ゾーンに分けてある。最初沈澱槽流出水は、まず下降流ゾーン（ $L=0.10\text{m}$ ）を通過して、リアクター最下部より上昇流ゾーン（ $L=0.3\text{cm}$ ）に移るフローを2段で行

う。

接触曝気槽は、水容積 1.04m^3 ($1.20\text{B} \times 0.53\text{L} \times 1.63\text{H}$) で、中に仕切板を入れ片側曝気とした。曝気は下流側の固定床下部より行うことで、UASB 処理水は流入直後の下降流によって槽内で混合される。散気管は固定床下部に等間隔で3本とした。また、固定床のろ材には 系に用いるスポンジ担体とした。接触曝気流出水は、槽下部より最終沈澱槽へと移る。

最終沈澱槽は、水容積 0.59m^3 となっており、沈澱（接触曝気槽流出）汚泥を最初沈澱槽に返送するために、下部を逆垂状とした。返送方法はエアリフト方式を採用し、せき高による分水流量調整を行う。

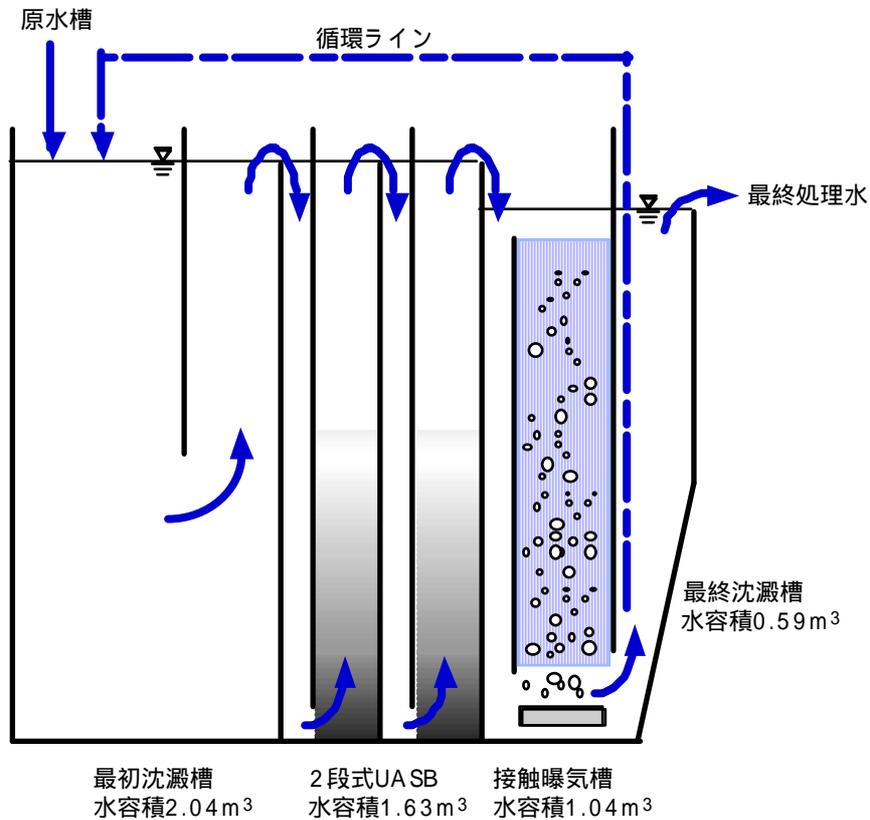


図4-7 系リアクター処理フロー（合併浄化槽向け）

4.3 参考文献

- 1) R.J. Frankin : Full-scale experiences with anaerobic treatment of industrial

wastewater, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.8, 1-6, 2001

- 2) 多川正、原田秀樹、高橋弘希、大橋晶良、関口勇地：新規の多段型 UASB 反応器による脂質・タンパク質含有廃水の高温嫌気性処理パイロットプラント実験、*環境工学研究論文集*、36、431-441、1999
- 3) Lucas Seghezze, Grietje Zeeman, Jules B. van Lier, H. V. M. Hamelers, Gatzke Lettinga : A Review; The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors, *Bioresource Technology*, 65, 175-190, 1998
- 4) C. Collivignarelli, G. Urbini, A. Farneti, A. Bassetti, U. Barbaresi : Anaerobic-aerobic treatment of municipal wastewaters with full-scale upflow anaerobic sludge blanket and attached biofilm reactors, *Water Science and Technology*, Vol.22, No.1/2, 475-482, 1990
- 5) 原田秀樹、上村繁樹、鈴木薫、Sunil K. Karn、Lalit K Agrawal : アフリカ・ニジェールの首都ニアメの衛生状況と世界初の UASB-DHS バイオタワー下水処理プラントに関する報告、*下水道協会誌*、Vol.40、No.486、2003
- 6) I. Machdar, Y. Sekiguchi, H. Sumino, A. Ohashi, H. Harada : Combination of a UASB reactor and a curtain type DHS(downflow hanging sponge) reactor as a cost-effective sewage treatment system for developing countries, *Water Science and Technology*, Vol.42, Nos3-4, 83-88, 2000
- 7) 大橋晶良、角野晴彦、屋井裕幸、関口勇地、原田秀樹 : エアレーション不要・余剰汚泥生成ゼロを目指した新規生活排水処理システムの開発、*浄化槽研究*、Vol.11、No.2、1999、47-56、1999
- 8) 珠坪一晃、原田秀樹、鈴木宏誌、桃井清至、大橋晶良 : 高温 UASB リアクターによるアルコール蒸留廃水処理特性と保持微生物群の生態学的挙動、*環境工学研究論文集*、32、201-212、1995

5 今後の計画

(1) 乾式嫌気消化プロセスの開発

1. 汚泥処理最適化並びにラボスケールリアクター運転・改良

平成14年度に引き続き、様々な条件での余剰汚泥の乾式嫌気消化過程をピーカースケール並びにラボスケールリアクターを用い解析することにより、高度な汚泥減容化（有機物含量50%以上、総容積80%低減）を達成しうる最適条件を決定する。

2. ベンチスケールリアクターの設計・製作・運転・改良

上記検討に基づきパイロットリアクターを製作する前に100kg/日（容積2m³）程度のベンチスケールのリアクターを設計・製作し、その性能を評価する。本工程で製作・運転に関わる問題点について可能な限り掌握し、有機物含量50%以上、総容積80%低減するように改良、仕様変更を行う。さらにスケールアップ時に必要な各種パラメータを決定し、スムーズにパイロットリアクターの設計・製作を行えるようにする。

3. 微生物群集解析

乾式嫌気消化処理に伴う微生物生態系（群集構造）の変動状況を把握し、より効率的な処理プロセス構築を目指すために処理汚泥中の遺伝子情報を利用した微生物群集構造の解析を行う。具体的には、DGGE等遺伝子解析を利用した菌群の変遷の解析を行う。その結果は運転状況の診断に用いることが出来るとともに余剰汚泥処理条件の最適化にフィードバックする。平成15年度は、ラボスケール並びにベンチスケールリアクターでの処理汚泥の解析を行う。

4. ガス利用調査

生ごみ、汚泥からメタン発酵させたガスをエンジン、マイクロガスタービン、燃料電池と組み合わせて実証している箇所および発電装置メーカーへ調査に向き、信頼性（発生電力量、出力変動、回収熱量等）、ガスの性状およびガス精製装置の仕様、電気・熱の利用状況、発電装置および周辺環境への影響等について調査を行う。さらに、発電以外のガス利用についても現地調査を行う。

(2) 嫌気排水処理プロセスの開発

1. ラボスケールリアクターによるパラメータ検討実験

ラボスケールリアクターを用いて、高濃度排水処理を対象とした嫌気排水処理プロセスの運転パラメータ（温度、pH、排水濃度、循環比率、担体の充填密度等）を検討し、プロセスの特性を把握する。流入排水BOD濃度数千～数万mg/Lを1000 mg/L未満にまで処理（メタン化）する。プロセス後段は、硫酸還元細菌、硫黄酸化細菌を高濃度に保持できる装置構造とし、プロセス前段からのメタン発酵処理水を流入水とし、その処理特性について評価する。処理水質の達成目標は、放流レベルである20 mg BOD/Lとする。また、低濃度排水処理を対象とした嫌気排水処理装置（プロセス後段のみ）の運転因子（排水濃度、温度、pH、循環比率、担体の充填密度等）を高知高専のリアクターを用いて検討する。

2. パイロットスケール・バイオリアクターの微生物培養および通年通水実験

パイロットスケール・バイオリアクター3基を製作、東広島浄化センターに設置する。下水を通水し、微生物の培養を行う。また、並行して装置処理特性の通年変動を各装置間で比較する。特にスタートアップ時の運転方法や処理状況と汚泥量の制御について十分なデータを取り、汚泥発生量を正確に把握する。

3. リアクター内の微生物群集解析

メタン発酵と同様に排水処理においても主役となる微生物を把握し、これが通年に亘って維持できることがプロセスの安定運転にとって非常に重要である。そこで、存在する微生物をPCR-DGGE法などの手法によりカタログ化する。生物の活性を、メタン発酵、硫酸呼吸、硫黄酸化などについて測定し、固定された微生物の重量あたりの活性を求め、実設計データとして反映する。本解析はすでに実績のある長岡高専に委託する。

4. プロセス評価と実用化検討

メタン発酵リアクターと硫酸還元・硫黄酸化リアクターの組み合わせによるラボスケール試験によって得られた運転データから、最適プロセス設計及び運転条件を決定する。さらに、嫌気排水処理プロセスパイロットスケール試験による有機物負荷量、汚泥発生量などの通年データも参考にして高濃度排水嫌気

処理プロセスのスケールアップ指標の検討を行う。

6 研究メンバー

研究項目	分担内容	氏名	所属・役職
	プロジェクト研究統括	西尾尚道	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授
(1) 乾式嫌気消化プロセスの開発	研究統括、リアクター開発	中島田豊	広島大学大学院先端物質科学研究科・助手
	汚泥嫌気消化条件最適化 リアクター開発・最適化	大島康隆	広島大学大学院先端物質科学研究科・学生
		南 久生	広島大学大学院先端物質科学研究科・学生
	研究アドバイザー	村上克治	産業技術総合研究所中国センター・主任研究員
		大谷津紀之	パプコック日立(株)環境研究部・室長
		花川哲夫	(有)エッチ・イー・シー
		山本 学	広島環境研究所
		横田真治	中国電力(株)・新エネルギー担当副長
		沖本 裕	広島ガス(株)・研究員
		濱田高義	菱明技研(株)環境技術部専門部長
(2) 嫌気排水処理プロセスの開発	リアクターの開発、研究	山口隆司	呉工業高等専門学校・助教授
		角野晴彦	広島県産業科学技術研究所・雇用研究員
	合併浄化槽系パイロットプラント設計・製作	椋本定雄	ノシロ工業(株)・代表取締役会長
	農集系パイロットプラント設計・製作	霜崎 敏	コトブキ技研工業(株)・課長
	産業・特殊排水系パイロットプラント設計・製作	長野晃弘	三機工業(株)・グループマネージャ