

当社の水処理技術

KOBELCO ECO-SOLUTIONS's
Technical Innovation of Wastewater Treatment



技術開発本部
水・汚泥技術開発部水処理室
長 谷 川 進
Susumu Hasegawa
(工学博士・技術士)

排水規制の強化に対応すべく、高度処理技術の開発に取り組んでいる。窒素除去については、3段階ステップ流入式硝化脱窒法により大阪湾流総目標値を達成できることを確認した。また、経済的な窒素除去法として当社独自の亜硝酸型硝化脱窒法を提案し、亜硝酸化率90%での安定運転を達成している。リン除去については、汚泥中のリンを加熱により溶出し、凝集沈殿して回収することにより、流入水中のリンを50%回収できることを実証した。膜分離活性汚泥法としては、中空糸膜をもちいた浸漬型と封筒状平膜をもちいた外圧型の2方式を検討している。外圧型は、ろ紙ろ過性の悪い汚泥に対して有効であることがわかった。

With tightening regulations for effluent quality, more efficient wastewater treatment technologies have been required. Three-step-feed biological nitrogen removal process operated by KOBELCO ECO-SOLUTIONS proved in achieving the stringent target discharge quality for sewage plants; COD, T-N, and T-P respectively below 11, 7.0 and 0.6 (mg/L). Our original nitrite-type nitrification process could recover 90% of nitrite as nitrites in the pilot scale test. The process may reduce running cost by 30%. As for phosphorous, 50% recovery of influent T-P was achieved with calcium coagulation of dissolved phosphorous by heating excess sludge. In the comparison of submerged membrane and flat case-type membrane, the latter is more economical for filtration of activated sludge with low permeability.

Key Words:

水 処 理 技 術	Waste water treatment
硝 化 脱 窒	Nitrogen removal
亜 硝 酸 型 硝 化	Nitrite type nitrification
リ ン 除 去	Phosphorus removal
膜 分 離 活 性 汚 泥 法	Membrane bio-reactor

まえがき

当社の水処理技術の歴史は、1957年12月の水処理部設置に始まる。米国水処理業界の名門ファウドラ・パームチット社と水処理装置に関する技術援助契約を締結し、除濁装置、ろ過器、加熱式脱気器、加圧浮上分離装置、イオン交換装置等の販売活動を開始した。記念すべき1号機は1958年(株)神戸

製鋼所灘浜工場ベンソンボイラー用純水装置である。当初販売した技術のなかでも、自動バルブレスろ過器(当社商品名:バルブレスフィルター)は、サイフォンの原理を応用したユニークな構造から脚光を浴び、ろ過器分野で短期間にして一世を風靡した。その後、高度成長にともなう工場廃水による環境汚染の問題から、1970年、水質汚濁防止法が制定

され、水処理ニーズが一段と高まった。工場廃水の多様化に対応するため、当社は他社に先駆けて生物学的処理法の導入を検討し、米国ヨーマンズ社と技術提携して開発した機械式曝気機（商品名：シグマウェーブエアレーター）を化学工場に納入し、好成績を収め、活性汚泥による水質汚濁の防止策として高く評価された。

当社の水処理技術は廃水処理だけではなく、浄水設備についても早くから取組んでいる。1986年社団法人水道協会選定による「近代水道百選」に水道技術の歴史的施設として、当社が1971年に納入した大島元町かん水脱塩浄水場が選ばれた。これは、イオン交換樹脂膜による電気透析法でかん水を脱塩した水が、厚生省の水道基準に適合した飲料水として住民に供給されたわが国初の大型プラントである。当社は、脱塩技術として他にも逆浸透膜をもちいた技術も開発し、超純水製造（商品名：II PLP）、海水淡水化（商品名：KOBEROX）、ゴミ浸出水処理（商品名：DTモジュールシステム）に適用している。

高度成長期が終わり、設備投資が冷え込む一方で、環境汚染に対する関心は高く、規制は強化される一方である。そのため、近年、省エネルギー、省スペース、省コストの水処理技術が求められている。当社は、これらニーズに応えるべく、生物学的処理法としては、反応タンク内微生物濃度の高濃度化を達成した、嫌気処理装置（商品名：PANBIC-H）、好気処理装置（商品名：PABIO-MOVER, AQUA-NITE）を世にだしてきた。

本稿では、現在当社が開発し、実用化を進めている、排水の高度処理プロセスについて紹介する。

1. ステップ多段式硝化脱窒法

大阪湾は1995年に窒素、リンに係わる環境基準における水域類型指定を受け、下水道事業においても「大阪湾流域別下水道整備総合計画」の策定がなされ、大阪湾への下水処理場からの放流水質として、COD_{Mn} 11 mg/L、T-N（総窒素）7 mg/L、T-P（総

リン）0.6 mg/Lという厳しい目標値が設定された。

神戸市では、目標水質を達成するため、垂水処理場増設系列においてステップ多段式硝化脱窒法を検討している。当社は、神戸市より委託を受け、垂水処理場実設備を改造しての実証試験の運転管理およびデータ収集を実施している。

1.1 3段ステップ流入式硝化脱窒法の概要

ステップ多段法は一般の都市下水を対象とした活性汚泥をもちいた生物学的窒素除去法の一変法である。脱窒槽、硝化槽のユニットを多段化し、各脱窒槽へ流入水を等分配することにより、

- ① 高い窒素除去率
- ② 反応槽の縮小
- ③ 維持管理の容易性をえることができる。

ステップ多段法の最終段における窒素収支より次式が成り立つ。

$$\frac{C_{NO_3, out}}{C_{N, in}} = \frac{1}{N} \frac{1}{1+r+RN}$$

ここで、

- N : 多段化の段数 (—)
- r : 汚泥返送比 (—)
- R_N : 最終段内部循環比 (—)
- C_{N, in} : 流入硝化対象窒素濃度 (mg/L)
- C_{NO₃, out} : 流出NO₃-N濃度 (mg/L)

これより、ステップ多段法における窒素除去率は、多段化の段数、返送汚泥比、最終段内部循環比により決定されることがわかる。汚泥返送比0.5、最終段内部循環比0.5とした場合、窒素除去率80%以上をえるための段数は3段と計算される。

1.2 実証設備概要

垂水処理場実証設備も段数を3段とした3段ステップ流入式硝化脱窒法としている。実証設備の概略フローを図1に示す。本実証設備ではリン除去のため最終段に凝集剤を添加している。

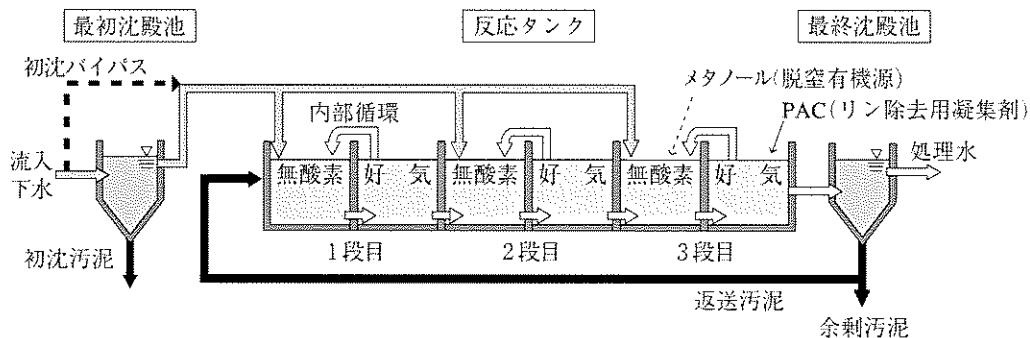


図1 3段ステップ流入式硝化脱窒法フロー

本設備には、無酸素槽に当社の粗大気泡攪拌装置を、また、好気槽にも当社の超微細気泡散気装置を設置しており、それぞれの性能確認も実施している。粗大気泡攪拌装置（図2）は、嫌気槽あるいは無酸素槽の攪拌装置として、酸素の溶解を抑制して嫌気状態、無酸素状態を維持しながら空気攪拌をおこなう方法で、当社独自のシステムである。また、超微細気泡散気装置は、直径が1mm程度の超微細気泡を発生させ酸素移動効率が従来の散気装置の2倍以上という、これまでの常識を破る散気装置である。細長いステンレス板と特殊樹脂製の散気膜を組合せたシンプルな構造（図3）で、目詰まりがなく、設計条件に応じ柔軟なレイアウトができる。

3段階ステップ流入式硝化脱窒法の処理性能としては、低水温期の冬期も含め、通年にわたり大阪湾流域目標値を達成している。また、最初沈殿池をバイパスして流入原水の有機物濃度を高めることにより、脱窒に必要なメタノールの添加を削減できることを確認している。

超微細気泡散気装置の性能としては、従来型セラミック散気装置の1.5～2倍の酸素溶解効率がえられており、運転費が15%程度削減できた。また、粗大気泡攪拌装置については、間欠曝気などの運転の最適化により、従来の機械攪拌に比べ運転費を

80%削減可能であった。実証設備では、60分間に1回、6分間連続送気の間欠散気運転をおこなった。風量約30 m³/h（単位容積当たり風量0.0035 m³/m³/min）以上で、汚泥沈降防止に必要とされる底部流速10 cm/s以上を確保できた。また、同条件で槽内MLSS濃度を均一に維持できることを確認した。

2. 高濃度窒素含有廃水処理技術

メタン発酵消化液や畜糞尿等の高濃度窒素含有廃水は、従来、液肥利用により土壤散布処理がおこなわれていたが、家畜排泄物法をはじめとする法規制により、廃水処理による浄化が必要となった。しかし、従来の生物学的硝化脱窒法による処理では、ランニングコストが高く酪農家の経営を圧迫する問題があった。当社では低コストで高濃度窒素除去が可能な亜硝酸型硝化脱窒法の開発に取り組んでいる。

2.1 亜硝酸型硝化脱窒法の概要

従来の生物学的硝化脱窒法は、アンモニア酸化細菌によるアンモニアから亜硝酸への酸化段階に続き、亜硝酸酸化細菌による亜硝酸から硝酸への酸化を経て、脱窒菌により分子状窒素に還元され、脱窒が完了する。一方、亜硝酸型硝化脱窒法は、亜硝酸酸化段階を抑えて、アンモニアの酸化を亜硝酸で止めて脱窒する方法であり、酸化過程における必要酸素量を25%、脱窒過程における必要水素供与体量を40

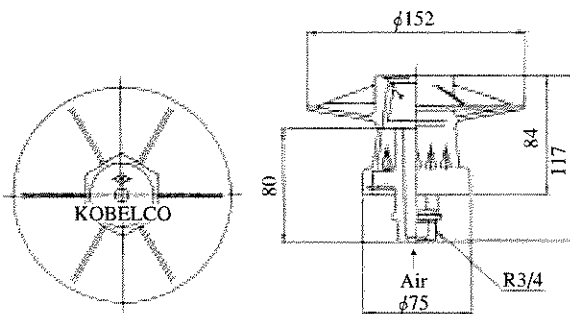
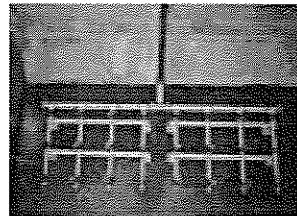


図2 粗大気泡散気装置



粗大気泡散気装置設置例

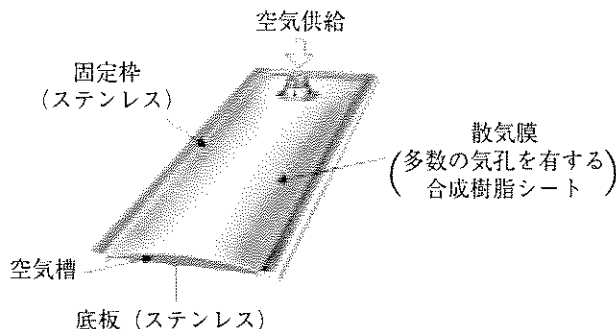
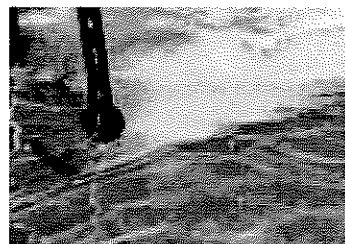


図3 超微細気泡散気装置（エアロナイト）



散気状態

%低減可能な方法である(図4)。理論的には知られている技術であるが、酸化段階を亜硝酸で止める制御が困難であり、これまで実用化されていない。

2.2 亜硝酸型硝化の制御方法

人工廃水をもちいたベンチスケールテストにより、亜硝酸型硝化の制御条件を検討した結果、残留アンモニア濃度100~200 mg/Lの範囲で、亜硝酸化率が最大になることがわかった。この運転条件を維持することで、人工廃水で80%、実際の豚糞尿を原水とした場合でも86%の亜硝酸化率がえられることを確認した。

2.3 実証試験概要

兵庫県内の畜産関連研究施設に実証試験設備を設置し、豚糞尿を対象とした実証実験を実施している。

実証試験設備のフローを図5に、外観および主要設備仕様を写真1に示す。

豚糞尿は畜舎ピットから汲み上げられ、遠心分離機により固液分離後、分離液を亜硝酸型硝化脱窒処理する。生物反応槽は単段の循環式硝化脱窒法で、反応処理後、沈殿槽で分離した汚泥はS-TE槽にて可溶化処理され、脱窒槽にて水素供与体として利用される。循環式硝化脱窒槽の後段には、「凝集剤添加+砂ろ過」によるリン除去装置が設置されている。

2003年度は、計画負荷(豚糞尿500 L/d)の60%の負荷で運転したが、亜硝酸化率は90%以上、窒素除去率は87%の良好な結果をえている。

今後、計画負荷での亜硝酸型硝化脱窒の実証、運転・制御技術の確立、経済性評価等について検討を続ける。

3. リン回収プロセス

近代の農業においては、農作物を高効率で収穫するため、大量のリン肥料を使用している。しかし、この肥料の原料となるリン鉱石は有限であり、質の良いリン鉱石の埋蔵量は残り少ないといわれている。一方で、生活排水から放出されたリンが、湖沼、港湾などの閉鎖性水域で富栄養化の問題を引き起こし

ている。したがって、生活排水からリンを回収して農業利用できれば、上述の2つの問題が同時に解決され、リンの循環が可能となる。

当社は広島大学と共同で、下水余剰汚泥を加熱してリンを溶出し、溶出したリンを凝集沈殿により回収する技術を開発した。

3.1 リン回収プロセスの概要

本プロセスは、嫌気好気(AO)生物学的リン除去プロセスと組み合わせると効率的である。AO処理により通常の2~3倍のリンを蓄積した汚泥を70℃で1~2時間加熱することにより、汚泥中のリンがポリリン酸、リン酸として液相に放出される。液相に放出されたリンは、固液分離ののちカルシウム系凝集剤を添加してカルシウムヒドロキシアパタイト[Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂]を生成し、沈殿物として回収する。回収した沈殿物は天然リン鉱石とほぼ同等のリン含有率を有することから「バイオリン鉱石」と称している。

本プロセスを導入すると、従来余剰汚泥を処理する際に再放出されて水処理系に返流されるリンを回収することになるため、水処理系へのリンの返流負荷が大幅に低減され、放流水のリン濃度を低くできる効果(水処理系リン除去率の向上)がえられる。

これまでに、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成10年度即効型提案公募事

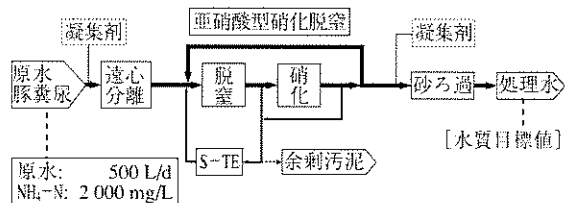


図5 亜硝酸型硝化脱窒実証試験設備フロー

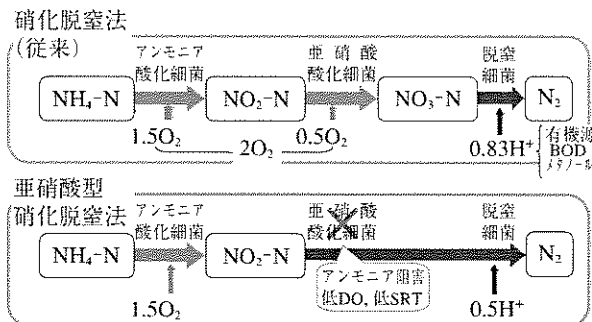
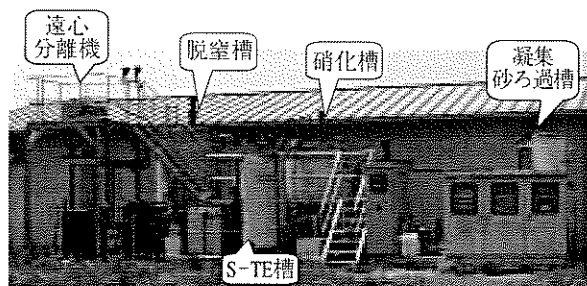


図4 従来の硝化脱窒法と亜硝酸型硝化脱窒法



機器名	仕様
遠心分離機	処理量0.5-0.8 m ³ /h
脱窒槽	φ1400 mm×1525 mmH (容積2 m ³)
硝化槽	φ1400 mm×1525 mmH (容積2 m ³)
凝集砂ろ過槽	PAC添加, 砂ろ過
S-TE槽	φ700 mm×1950 mmH (容積0.7 m ³)

写真1 実証試験設備全景

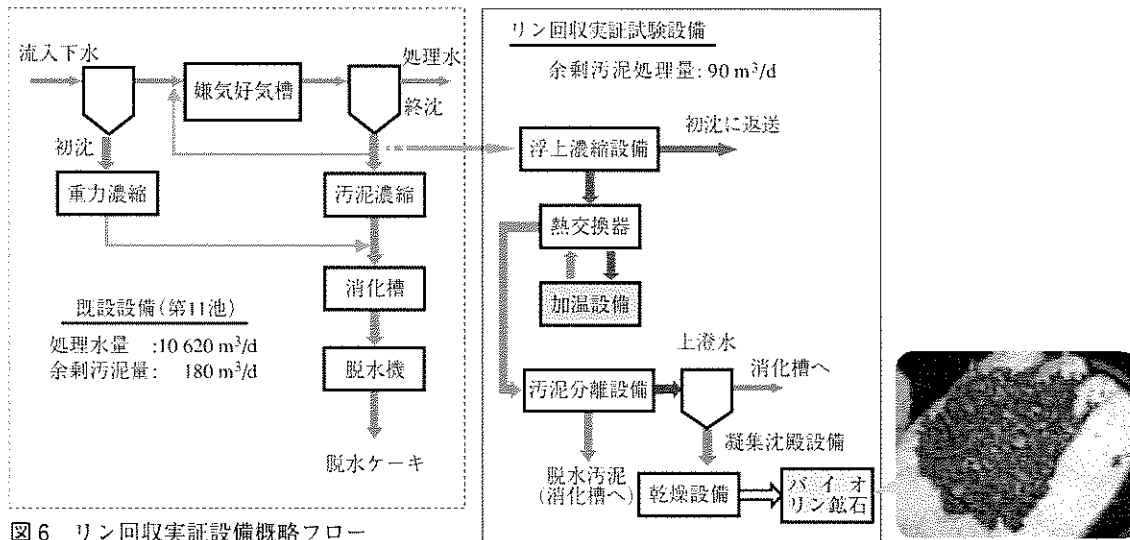


図6 リン回収実証設備概略フロー

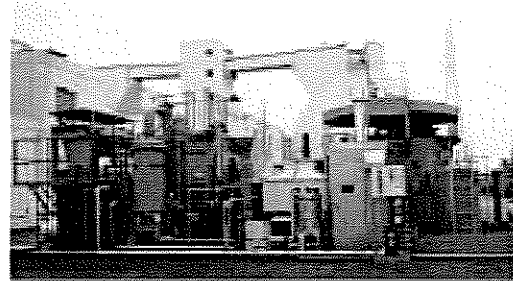
業の委託を受けて基礎実験を実施し、同じくNEDOの平成11年度マッチング・ファンド方式による産学連携研究開発事業の委託を受けてパイロットスケールテストを実施してきた。以下に紹介する実設備での実証試験は、経済産業省中国経済産業局の平成14年度即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業の委託（財）ひろしま産業振興機構よりの再委託）を受けて実施したものである。いずれの事業も、広島大学大学院先端物質科学研究科（現大阪大学大学院工学研究科応用生物工学専攻）の大竹久夫教授を総括代表者とする研究開発プロジェクトである。

3.2 実証試験概要

リン回収実証試験設備の概略フローを図6に示す。リン回収システムは①浮上濃縮設備、②加温設備、③汚泥分離設備、④凝集沈殿設備、⑤乾燥設備で構成される。実証試験設備全景および主要機器仕様を写真2に示す。

実証試験設備の水処理系はAO法で運転されている。日最大下水処理能力は約11 000 m³/dであり、余剰汚泥発生量は約180 m³/dである。実証試験設備の処理能力は、水処理系の余剰汚泥発生量の50%に相当する90 m³/dである。

本実証試験により、リン回収プロセスを導入することで流入原水中の約50%のリンを回収できることを確認した。また、リン回収により水処理系への返流水中のリン濃度が低減されるため、水処理系のリン除去率が導入前の60~80%から90%以上に改善されると推算された。本実証試験は試験期間が冬期を中心とした約4カ月の短期であったため、2004年度は通年データとして補完すべく、春期から秋期のデータを収集している。



機器名	形式	仕様
浮上濃縮設備	銅板製円筒型 加圧浮上濃縮槽	処理量675 kgDS/d (濃縮汚泥濃度約3%)
加温設備	スチーム加熱式 銅板製円筒型加温槽	φ1 000 mm×1 500 mmH, max 24 m³/d
汚泥分離設備	遠心脱水機	処理量max 24 m³/d, 脱水ケーキ含水率85%
凝集沈殿設備	銅板製円筒型タンク	φ2 000 mm×1 600 mmH(処理量20 m³/d)
乾燥設備	真空乾燥機	処理量2 m²/バッチ (投入汚泥濃度約3%)

写真2 リン回収実証試験設備全景

4. 浸漬型膜分離活性汚泥処理技術

従来、固液分離法としては重力沈殿法、凝集沈殿法がもちいられてきたが、それらは広大な設置面積を要する課題があった。そこで、とくに、濁質除去が主要工程となっている浄水処理においては、早くから膜の適用が検討されている。当社も、MAC21、ACT21、e-water等の国家プロジェクトに参画し、数種の膜について認定を取得している。近年では、膜技術の向上にともない、さらに濁質の高い活性汚泥法への適用検討もなされている。

活性汚泥法への適用については、1998年度より2000年度（第1期）および2001年度より2003年度（第2期）にかけての日本下水道事業団（JS）による共同研究により、その有効性が確認されている。当社も、独自に検討を開始し、平膜については1996から1997年度に実施した建設省（現国土交通省）

土木研究所との共同研究の成果を基に、すでにJSの入札資格をえている。現在、さらに経済性が期待できる中空糸膜について、神戸市との共同研究として玉津処理場にて実証実験を継続中である。以下、中空糸膜分離活性汚泥法について概説する。

4.1 中空糸膜分離活性汚泥法の概要

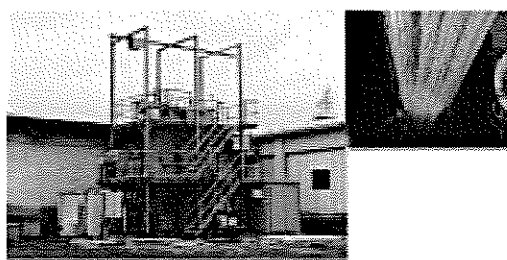
現在、BOD、T-N、SS（懸濁性固形物）を処理対象とした主なプロセスとして、循環式硝化脱窒法（中～大規模向け）、OD法（小規模向け）が挙げられる。またさらなる高度処理として、SS除去のため、後段に砂ろ過をつけたプロセスがある。膜分離活性汚泥法は、SS除去のための最初沈殿池、最終沈殿池、砂ろ過設備が不要となり、その代替として、反応槽内に精密ろ過（MF）膜を浸漬設置し、物理的な固液分離を実現するプロセスである。以下に本法の特長を示す。

- ① 最初沈殿池、最終沈殿池、砂ろ過の各設備が不要となり、プロセスが簡略化される。
- ② 反応槽内のMLSS濃度を10 000 mg/L程度と高濃度に維持でき、標準活性汚泥法と同等以下のHRT（水理学的滞留時間）で有機成分のみならず窒素処理をも実現できる。
- ③ 孔径0.1 μmのMF膜にて固液分離するため、SS成分を99 %以上除去できる。
- ④ SRT（汚泥滞留時間）を長くとることができるため、汚泥の自己酸化作用による汚泥減量化が見込める。
- ⑤ 膜による物理的な固液分離のため、バルキングが発生してもSS性物質のキャリーオーバーが発生しない。

4.2 実証試験概要

実証試験設備のフローを図7に、設備全景および主要機器仕様を写真3に示す。実証試験設備の処理能力は30 m³/dである。

原水には分流式下水処理場の最初沈殿池流入水をもちい、目幅1 mmの前処理スクリーンで夾雑物を除去した後に、反応槽に流入させた。反応槽には無酸素槽と好気槽を設け、流入水量に対し硝化液循環比を3とした循環式硝化脱窒法で運転した。処理水はポンプにより吸引ろ過する方式とし、定流量制御をおこなった。中空糸膜では構造上、膜内部から逆洗をかけることができるため、膜の目詰まりを防止する目的で通常の運転サイクルにおいて10分で1回の逆洗工程（吸引9分、停止5秒、逆洗50秒、停止5秒）をおこなった。また、1ヶ月に1回程度、次亜塩素酸ソーダによるインライン逆洗を実施した。膜透過フラックスは、逆洗によるろ過時間、逆洗水量のロスを含めて0.6 m³/m²/dとした。通気倍率は、膜洗浄用曝気と酸素供給用曝気とのトータルで、流入水量に対し20倍とした。



機器名	仕様	
反応槽	1 000 mm×1 000 mm×5 800 mmH×2区画	
膜モジュール	中空糸型MF膜 φ 150 mm×2 000 mm	
運転条件	MLSS	8 000-12 000 mg/L
	好気槽DO	1.5-4.0 mg/L
	BOD-SS負荷	0.05-0.10 kgBOD/kgSS/d

写真3 中空糸膜実証試験設備全景

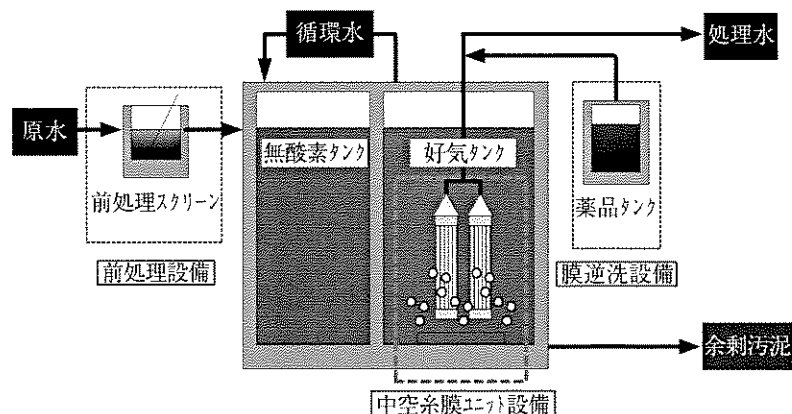


図7 中空糸膜分離活性汚泥法実証試験設備フロー

表1 中空糸膜分離活性汚泥法処理水質 (単位:mg/L)

	高水温期 (水温:25.7-33.5℃)		低水温期 (水温:13.3-20.6℃)	
	原水	処理水	原水	処理水
BOD	185	1.6	254	<1.0
SS	219	<1.0	320	<1.0
COD	107	5.6	161	6.5
T-N	37.4	7.2	53.1	6.7
T-P	7.6	1.7	10.2	0.7

約1年の連続運転において、所期の目標値(透過水量 $0.6\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ 、通気倍率20倍、薬液洗浄間隔約1ヶ月)での運転が可能であった。低水温時は活性汚泥のろ過性が悪くなる(ろ紙ろ過量が 10 mL 以下に低下)ため、膜間差圧も幾分高くなる傾向が認められたが水温の上昇とともに差圧も低下した。処理水質については、低水温期においても良好な水質が安定してえられている。(表1)

5. 加圧式膜分離活性汚泥処理技術

浸漬型膜分離活性汚泥法は、運転圧力も低く、膜分離装置としては省エネルギータイプといえるが、ろ過性の悪い汚泥の場合には運転圧力が上昇し、運転コストも増大する結果となる。当社が開発したUFキューブは、膜面洗浄のためのクロスフロー流速により、ろ過性の悪い汚泥に対しても高い透過流速をえることができる。

5.1 UFキューブの概要

UFキューブは膜モジュールを反応槽外に設置するクロスフロー方式に分類される。UFキューブをもちいた膜分離活性汚泥法では、排水と汚泥を含んだ活性汚泥混合液を循環ポンプで反応槽から膜モジュールに加圧供給することでろ過処理水がえられる。UFキューブの構造を図8に示す。

5.2 実証試験概要

実証試験設備のフローを図9に、外観写真を写真4に示す。活性汚泥は、消化脱離液を浸漬平膜型膜分離活性汚泥法で処理する既設の曝気槽から受け入れた。

本実証試験設備は、循環ポンプで活性汚泥を膜モジュールに循環している循環ライン中に原水ポンプにて曝気槽からの活性汚泥を受け入れ、循環ラインから濃縮液を一部排出しながら膜分離をおこなう構造である。

活性汚泥の性状は、ろ紙ろ過量が 5 mL 以下と難ろ過性で、既設の浸漬平膜では透過流速が 0.05 m/d と非常に低い状況であった。UFキューブをもちいて、膜面流速 1.0 m/s で運転した場合、 0.3 m/d の高い透過流速での安定運転が可能であった。

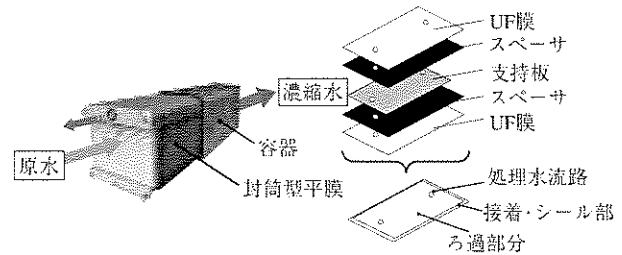


図8 UFキューブの構造

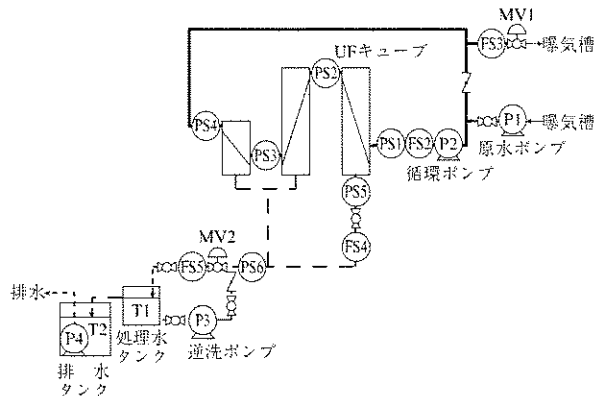


図9 UFキューブ実証試験設備フロー

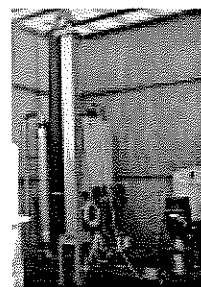


写真4 UFキューブ実証試験設備

項目	仕様
膜面積	18.9 m^2
使用膜モジュール長	2000 m ×2本+1000 mm ×1本
耐圧	0.5 MPa
処理水量(透過流速)	~1.6 $\text{ m}^3/\text{h}$ (~2.0 m/d)
循環水量(膜面流速)	~24 $\text{ m}^3/\text{h}$ (~1.2 m/s)
処理対象汚泥性状	原水COD 1000~1500 mg/L MLSS 4000 mg/L 5Cろ紙ろ過量 1~5 $\text{ mL}/5\text{ min}$

コスト試算の結果、UFキューブはクロスフローのための循環ポンプの電力費が高額になるが、膜面積が小さいために膜交換によるコストの上昇がないのに対して、浸漬平膜は膜交換により大幅にコストが増大するため総合的にUFキューブの方が有利となった。

むすび

当社が取り組んでいる水処理技術について概説した。主に生物学的処理法を中心に紹介したが、その他にも、極性転換方式電気透析装置(EDR)による地下水の硝酸性窒素除去など物理化学的水処理技術の実用化の検討もおこなっている。

本稿で紹介した技術は、すべて実証試験段階にあり、業界をリードする技術である。早期に市場デビューさせ、高度処理・低コストの顧客ニーズに応えたい。