特集・し尿処理技術の進歩

深層反応槽と限外ろ過膜を用いたし尿処理システム

石田宏司*・和泉清司*・師 正史*・橘 峰生*

1. はじめに

し尿処理技術は、生物学的硝化脱窒素法の開発により著しく進歩した。一方、高性能曝気装置を備えた高負荷処理技術もめざましく進歩し、し尿の無希釈処理が可能となった。この結果、総窒素の除去率は一段と向上し、pH 調整用のアルカリ、有機炭素源としてのメタノール等の薬剤が不要となった。一方、素材技術の進歩により膜分離技術が食品や医薬品の濃縮、排水処理などの分野で基本技術として定着しつつある。

本報告は、し尿の無希釈処理の基本技術となった水深10mの深層反応槽に限外ろ過膜を組み合わせた新しいし尿処理方式『クボタUM方式』を開発し、一年以上にわたって実証試験を行った結果の報告である。なお、本方式は、昭和62年1月20日付で、『指針外処理技術』の評価を受けた。

2. 遠心分離機による繊維除去

し尿中には表1に示すように1,000~9,000mg/ℓもの繊維が含まれている。これらの繊維は曝気槽において絡み合い塊となる。

活性汚泥の分離を限外ろ過膜で行う場合、膜の流路閉塞を防止するため、繊維はほぼ完全に除去しておかねばならない。従来のし尿処理施設で多く用いられている細目スクリーンの繊維除去率は5~50%と不安定であり、細目スクリーン処理液中には、1,000~7,000mg/ℓもの繊維が残留する。なお、し尿に凝集剤を添加し遠心分離する方法は、有機物の除去率が高すぎ生物学的脱窒素反応においてBOD不足をきたし、脱窒率の低下をまねくので望ましくない。

そこで、クボタUM法では、遠心分離機によるし尿の無薬注処理法を選定した。約1年間にわたる実証試験の結果を表2に示す。繊維の平均除去率は、99.1%と極めて高い。特に、遠心分離液中の残留繊維は、し尿中の繊維含有量に無関係に平均47mg/ℓであり、極めて安定している。表2から判るとおり、除去されたSS量はほぼ除去された繊維量に相当しており、し尿の無薬注遠心分離によれば、繊維分のみ効率よく除去することができる。分離された繊維分の含水率は平均65%程度であり、その平均発熱量は4,500Kcal/kgdsであった。

表1 細目スクリーンによる繊維除去性能

		O 処 理 場				S 処 理 場				T 処 理 場			
		1 回 目		2 回 目		1 回 目		2 回 目		1 回 目		2 回 目	
		処理前	処理後	処理前	処理後	処理前	処理後	処理前	処理後	処理前	処理後	処理前	処理後
pH			8.05		8.10	8.40		8.40				8.21	8.30
TS	(mg/ℓ)	24,018	21,690	25,724	24,532	29,178	25,242	19,966	18,286	7,776	7,664	12,136	12,962
VTS	(mg/ℓ)	16,738	15,652	17,474	17,676	20,028	15,790	13,336	11,272				
VTS/TS	(%)	69.7	72.2	67.9	72.1	68.6	62.6	66.8	61.6				
粗浮遊物	(mg/ℓ)	6,434	5,706	8,350	7,228	8,590	4,235	5,517	3,356	1,178	1,066	2,747	2,637
V粗浮遊物	(mg/ℓ)	5,783	5,197	7,372	6,498	7,516	3,256	4,906	2,480				
V粗/V	(%)	89.9	91.1	88.3	89.9	87.5	76.9	88.9	73.9				
COD	(mg/ℓ)		4,819.8		4,469.3								
cl	(mg/ℓ)		2,750		3,150								
NH ₃ -N	(mg/ℓ)		3,416.3	3,701.0									
PO ₄	(mg/ℓ)		998.1		957.7								

注1) 原水は粗目スクリーン(4mm/6mm)処理水。 2) 細目スクリーンの目開は1mm。

3) 粗浮遊物は試料200mlを100メッシュの篩にとり、水道水で充分水洗した後、蒸留水で水洗い磁皿に移し、110℃で乾燥した。定量値はほぼ繊維分に相当する。

*久保田鉄工(株)水処理プラント部 Hiroshi ISHIDA, Kiyoshi IZUMI, Masashi MORO, Mineo TACHIBANA

表 2 遠心分離機による繊維除去性能

	一次除渣し尿	二次除渣し尿 (遠心分離し尿)	厚生省構造 指針除渣後し尿
	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)
BOD	8,939	5,822	12,000
COD	5,439	4,108	6,200
SS	11,047	5,515	18,000
T-N	3,652	3,281	4,500
PO ₄ ³⁻	702	554	1,000
Cℓ ⁻	2,558	—	5,500
粗繊維	5,275	47	—

3. 深層反応槽の構造とUMシステムの構成

深層反応槽は、水深10mの深層曝気槽の一種である。従来の曝気装置の約10倍の酸素吸収効率をもっている。空気は、エゼクターにより、気泡の上昇速度より速い流速で下降する水流中に吸い込まれ、ここで微細気泡となって水流に巻きこまれる。そして、気液接触管内での強力な攪拌と水深による酸素分圧の増加で、酸素は高効率で水中に溶けこむ。図-1にUMシステムの基本構成を示す。受入及び一次除渣設備（粗目スクリーン）については、従来法と変りないが、主工程は深層反応槽と限外ろ過膜の二工程ですみ、工程は極めてシンプルである。余剰汚泥は限外ろ過ポンプ槽から引抜き、直接脱水機へ供給する。従って、汚泥濃縮槽や汚泥貯留槽は不要である。

4. 深層反応槽における硝化脱窒素反応

深層反応槽における硝化脱窒素反応は、曝気条件下において硝化反応と脱窒素反応を同時進行させ、BODと窒素を同時除去すること、すなわち、亜硝酸型脱窒を効率よく行わせ、曝気に要する電力消費量を低減することを狙っている。亜硝酸型脱窒を効率よく行わ

図-1 UMシステムの基本構成

せるためには、BOD存在下で、曝気槽の大部分にわたって溶存酸素濃度を1mg/ℓ以下に制御すればよいことが、経験的に判っている。

深層反応槽は完全混合型の曝気槽に属し、槽内の溶存酸素濃度は、図-2に示すように、ほぼ全槽にわたって1mg/ℓ以下にすることができる。一方、深層反応槽における窒素除去率を99%以上の高効率に維持するためには、BODの存在が不可欠である。この条件は、

図-2 深層反応槽のDO分布

表 3 UMシステム実証試験結果抜粋（深層反応槽の分析値はろ紙ろ過水）

S 61 月	B O D			C O D			色 度			T - N		
	深層反応槽 (mg/ℓ)	膜透過水 (mg/ℓ)	阻 止 率 (%)	深層反応槽 (mg/ℓ)	膜透過水 (mg/ℓ)	阻 止 率 (%)	深層反応槽 (mg/ℓ)	膜透過水 (mg/ℓ)	阻 止 率 (%)	深層反応槽 (mg/ℓ)	膜透過水 (mg/ℓ)	阻 止 率 (%)
4 / 2	25.4	8.8	65.4	551.6	230	58.3	3,000.0	816	72.8	71.6	22.9	68.0
4 / 9	15.4	4.8	68.8	511.2	206	59.7	2,552.5	656	74.3	67.0	27.4	59.1
4 / 16	21.1	10.4	50.7	415.6	210	49.5	2,110.4	688	67.4	76.3	27.4	64.1
4 / 23	19.5	5.4	72.3	617.2	187	69.7	2,765.5	625	77.4	70.3	28.9	58.9
7 / 23	17.7	5.9	66.6	614.4	196	68.1	1,752.2	608	65.3	59.2	26.4	55.4
7 / 30	17.2	4.2	75.6	404.2	211	47.8	1,771.1	588	66.8	57.7	28.8	50.1
8 / 6	40.9	8.1	80.2	413.0	197	52.3	1,853.6	671	63.8	57.9	27.4	52.7
8 / 20	19.2	5.3	72.4	493.9	241	51.2	1,996.8	621	68.9	62.8	27.8	55.7
8 / 27	12.1	4.2	65.4	521.9	226	56.7	1,862.7	719	61.4	67.0	30.8	54.0
9 / 24	17.0	5.4	68.2	352.3	180	48.9	1,562.0	650	58.4	63.7	32.6	48.8
10 / 1	9.5	3.0	68.4	432.7	209	51.7	1,927.6	692	64.1	56.2	29.1	48.2
10 / 8	25.1	10.3	59.0	457.3	214	53.2	1,886.7	666	64.7	65.0	30.5	53.1
平均値	20.0	6.3	67.8	482.1	208.9	55.6	2,086.6	666.7	67.1	64.6	28.3	51.5

深層反応槽に限外ろ過膜を組み合わせることにより極めて効果的に達成することができる。すなわち、表3に示すように限外ろ過膜のBOD阻止率は、平均68%と極めて高い。このため、深層反応槽には平均20mg/lもの溶存性BODが存在する。この条件下では、アンモニアは(1)式により、 NO_2^- まで酸化されるが、溶存酸素濃度が1mg/l以下の条件下では、生成した NO_2^- は、 NO_3^- まで酸化されることなく、直ちに(2)式の反応により脱窒される。すなわち、亜硝酸の生成反応と生成した亜硝酸の脱窒素反応が逐次的に進行する。

5. 深層反応槽における空気量制御

深層反応槽は、3~4時間を1サイクルとし、サイクルの初めにし尿の投入を行い、吹き込み空気量は図-3に示すように階段的に変化させ、深層反応槽に投入されたし尿を回分的に処理する。

深層反応槽内の溶存酸素濃度は、図-3のように変化するので、溶存酸素濃度の変化パターンを自動計測することにより、硝化反応の完了、または未完了を判別し、次のサイクルの空気量を自動設定することができる。深層反応槽における窒素除去率をメタノールの添加を行うことなく、99%以上の高効率に維持するためには、硝化菌及び脱窒菌の活動に最適な環境を作る必要がある。硝化菌が活動するためには、酸素が、脱窒菌が活動するためには、BODが必要である。各々の菌に最適な環境を作るため、空気量を3段階に変化させ、次の三つの工程を形成する。

図-3 深層反応槽におけるDOの経時変化

図-4 深層反応槽における窒素の経時変化

(1) 脱窒優先工程

この工程では、し尿中の有機物が深層反応槽内に豊富に存在し、活性汚泥の酸素要求量が大いため、曝気しても溶存酸素は殆んど無く、前サイクルで残留した亜硝酸・硝酸が脱窒される。

なお、この工程においてもアンモニアの硝化反応は進行しているが、深層反応槽へのし尿の投入が継続されているため、 NH_4^+ は図-4に示すように徐々に増加する。

(2) 硝化・脱窒同時進行工程

この工程では、亜硝酸型脱窒素反応が積極的に進行する。すなわち、図-4にみられるように、 NH_4^+ のみ減少し、 NO_2^- 、 NO_3^- は、殆んど増加しない。これは、生成した NO_2^- は、 NO_3^- に酸化されることなく、直ちに脱窒されていることを意味している。

空気量は、亜硝酸化を積極的に行うため、脱窒優先工程より多く吹き込む。溶存酸素濃度は、0.2~0.5mg/l程度である。

(3) 硝化優先工程

この工程では、有機物の残存量が少なくなるため、脱窒率が低下してくる。この結果、図-4に示すように NO_2^- 、 NO_3^- が徐々に増加する。特に、 NO_2^- の増加率が大きい。このことは、溶存酸素1mg/l以下では、 NO_3^- の生成が抑制されることを示唆している。

空気量は、硝化反応を完結させるため、前工程より更に多くなる。溶存酸素濃度は0.5~1.0mg/lである。

(4) 硝化完了

硝化が完了して、 NH_4^+ が殆んどなくなると活性汚泥の酸素要求量が極端に少なくなる。このため、溶存酸素濃度は急上昇する。サイクル終点での NH_4^+ は1~2mg/lであり、これは硝化反応が完了したことを意味している。そこで、サイクルの終点で溶存酸素が急上昇するか否かを判別すれば、そのサイクルで供給された空気量が適正であったか否かを知ることができる。この原理を応用して空気量の自動制御を行っている。

6. 硫酸ばんど注入によるリン除去

一般に、し尿の活性汚泥処理におけるリンの除去率は、50%程度と言われている。硫酸ばんどの注入を行わなかった冬季実証試験でのリン除去率は、42.8%（1次除渣し尿に対しては58.1%）であった。61年3月より、リン除去を目的として硫酸ばんどを深層反応槽へ添加した。硫酸ばんど添加量が約500mg/ℓで、透過水中の PO_4^{3-} が5mg/ℓ以下となったので、その後は硫酸ばんど添加量を500mg/ℓに維持し、春・夏・秋季実証試験を行った。硫酸ばんど添加による活性汚泥に対する阻害、残存 PO_4^{3-} 過少による機能障害等は、全くなく効率よくリンが除去できることが確認された。透過水中の PO_4^{3-} は平均4.3mg/ℓであった。

7. 限外ろ過膜による固液分離

し尿の高負荷脱窒素処理における固液分離は、主に重力沈降方式又は機械分離方式により行われているが、活性汚泥の解体等によるSS回収率の低下は、安定した処理水質の確保を妨げる主要因となっている。

この問題を解決する一つの方法として、限外ろ過膜による固液分離がある。限外ろ過膜を用いれば、技術の熟練度にかかわらず、SS、細菌類は完全に阻止され、安定した処理水質が得られ、沈殿槽や機械式固液分離装置が不要となるため、施設がコンパクトになる等の利点がある。し尿処理に最適なモジュールの形状（管内内圧型、平膜型、中空糸型）、膜素材（ポリオレフィン、ポリスルホン、ポリアクリロニトリル）、分画分子量（8,000、20,000、100,000）を選定するに当り、Flux、COD及び色度除去率、Fluxの洗浄回復性、流路閉塞の状況に注目して評価した。流路の閉塞は流路幅の広い管内内圧型モジュールでは、適切な前処理を施せば、流路の閉塞は全く見られなかったが、他のモジュールでは流路が狭いため、閉塞によるFluxの低下がみられた。

膜素材としては、COD・色度の阻止率でポリオレフィン、ポリスルホンが優れており、膜の耐久性からポリオレフィンを選定し、Fluxと阻止率のバランスから分画分子量は20,000の膜がし尿処理における活性汚泥の分離に最適であると判断した。

図-5にみられるように、水道水や酸性凝集混合液は、圧力の上昇に比例してFluxは上昇する。しかし、し尿の無希釈処理活性汚泥混合液では、圧力3kg/cm²まではFluxは圧力とともに上昇するが、これを越えると

図-5 限外ろ過膜のろ過特性

Fluxは頭打ちとなる。これは、し尿の無希釈処理では、溶解有機物質量が非常に多いため、圧力が上昇してFluxが増加すると膜面上で濃度極が生じ、ついには溶解している有機物（多糖類、蛋白）がゲル層を形成し、Fluxがそれ以上増加しなくなるものと考えられる。ゲル層は膜の細孔目づまり防止に役だっているとの意見もある。

8. 高度処理

限外ろ過膜透過水の水質は、表3に示すとおり、COD及び色度が高い。このため、COD及び色度の除去が必要である。実証施設規模で(1)活性炭薬液再生法、(2)酸性凝集膜分離法、(3)オゾン酸化法の三方式について試験を行ったので紹介する。

(1) 活性炭薬液再生法

活性炭薬液再生法とは、通常水処理に使用する活性炭に比較してマクロポアに富んだ活性炭を使用し、有機物を吸着させ、アルカリ液にて再生する方法である。マクロポアが発達していると、活性炭に吸着された有機物が2～4%の苛性ソーダに接触するとアルカリ塩となり、水との親和性が増したり、分子半径が小さくなったため、活性炭のマクロポアから外れやすくなる。破過点を色度30度としたときの平均処理水質とその時点までのCOD吸着量を表4に示す。この方法は、色度除去に有効である。

(2) 酸性凝集膜分離法

COD、色度除去法として凝集沈殿法があり、多くの施設で用いられているが、基本的には重力沈降によるものであり、固液分離の信頼性に不安なところがあった。すなわち、COD除去のためには、pHを4～5にするのが望ましいが、活性汚泥処理水のpHを酸性にすると炭酸ガスの微細気泡がブロックに付着し、沈降分離が悪化する。これらの欠点を補うため、固液分離に限外ろ過膜を使用し、凝集剤として塩化第二鉄

表4 活性炭薬液再生法試験結果

テスト No	原水性状 pH	(平均値) COD (mg/ℓ)	色度 (度)	処理量 (B.V)	処理水性状 pH	(平均値) COD (mg/ℓ)	COD吸着量 (g/kg)
1	4.5	210	870	325	4.70	30.5	65.1
2	4.6	220	927	169	5.49	42.1	62.5
3	4.5	225	922	88	4.07	45.5	63.2
4	4.6	216	843	83	4.10	44.3	57.0
5	4.6	211	870	79	4.30	33.0	56.2
6	4.4	227	827	95	3.93	39.4	71.3
7	4.4	225	861	77	3.40	49.2	54.1
8	4.4	248	952	65	3.83	54.0	50.4
9	4.5	268	1,118	56	3.70	55.8	47.5
10	4.4	265	1,238	56	3.85	32.9	52.0
11	4.6	287	1,438	64	3.98	30.9	65.6

表5 酸性凝集膜分離法試験結果

No.	酸性凝集混合液		透過液			
	液温 (℃)	SS (mg/ℓ)	pH	COD (mg/ℓ)	色度 (度)	PO ₄ (mg/ℓ)
1	26.8	8,100	4.7	72	98	0.1
2	27.5	9,700	4.8	55	71	0.1
3	30.0	12,000	4.6	60	66	0.2
4	28.2	11,500	4.5	68	82	0.1
5	24.6	11,600	4.5	87	84	0.2
6	22.7	12,400	4.6	76	88	0.1
7	25.7	10,300	4.3	84	91	0.1
8	22.4	11,400	4.4	81	85	0.2
9	26.5	12,100	4.5	89	84	0.1
10	29.8	12,350	4.5	79	76	0.1

を用い、pHを4.5に調整したのち、膜分離を行う酸性凝集膜分離法を実施した。限外ろ過膜は活性汚泥の分離に用いた膜と同じものを使用した。実証試験結果を表5に示す。

CODの平均除去率は72.5%、色度除去率は90%、PO₄³⁻除去率はほぼ100%であった。なお、この試験では、深層反応槽への硫酸ばんどの注入は、行わなかった。

(3) オゾン酸化法

限外ろ過膜透過水のオゾン酸化処理を行った。試験結果を表6に示す。オゾン添加率500mg/ℓで色度30度以下の処理水を得ることができる。

9. おわりに

深層反応槽に限外ろ過膜を組み合すことにより、し尿処理施設は、極めてシンプルになった。また、限外ろ過膜は、SSはもちろんのこと硝化菌や脱窒菌、大

表6 オゾン酸化法試験結果

反応塔容積		37 リットル	
仕様		125 φ×3,000 H	
オゾン発生量		15 g/hr	
オゾン 添加率 (mg/ℓ)	pH	処理水 COD	色度
300	7.85	202	70
400	7.88	185	32
500	7.80	130	25

腸菌までも透過しない。このため、従来の施設でしばしば問題となった汚泥膨化に基因するSSの流出問題は、限外ろ過膜の採用により完全に解消された。工程がシンプルになったことと相まって操作性は格段に改善された。UMシステムは、希釈水が不要なこと、施設がコンパクトなこと、処理が安定していること、運転に熟練度を要さぬこと、など従来法の問題点をほとんど解消したすぐれた処理方式である。