酸素活性汚泥法による製紙排水の処理

昭和エンジニアリング株式会社川崎研究センター 本田 一好

同 環境事業本部 植田 誠, 竹倉 紘一

Waste Water Treatment in Pulp and Paper with High Purity Oxygen Activated Sludge System (UNOX System)

Kazuyoshi Honda, Makoto Ueda and Koichi Takekura*

Showa Engineering Co., Ltd., Enviromental Business Headquarters, *Kawasaki Research Center

A lot of UNOX System have been employed in various indistrial field, about 30 plants for pulp and paper industries in Japan.

In this paper, we report the treatment performance of UNOX System on board-paper waste, DIP waste, KP waste and KP waste plus EVA drain with the data of actual plants and treatability tests. At the same time, we mention the case of adding of coagulant agent into aeration tank for reference. Removal efficiency of not only BOD and COD but also even AOX are remarkable.

1. はじめに

活性汚泥法において、曝気用ガスを空気に替えて高濃度酸素を用いる酸素活性汚泥法がわが国で昭和47年、初めて実設備が稼働したのは、ユノックス・システムと呼ばれる密閉多段槽式酸素活性汚泥法である。

ユノックス・システムは現在では、製紙排水、石油化学排水、食品排水に代表される産業排水¹⁾から下水、し尿の家庭排水まで広く採用されている。1995年現在で全世界では300基以上の実設備が稼働している。わが国では、約100基が稼働しているが、その内28基が製紙排水処理に採用されている。

ここでは、最近実施した処理試験と実設備運転データより、板紙、DIP、KP+EVA、KPの各排水についてユノックス・システムの処理性能を報告する。

2. ユノックス・システムとその特徴

図1にユノックス・システムの一般的なフローシートを示す。実設備の例を(写真)に示す。

本システムは酸素発生装置、各段に表面曝気機を備えた密閉多段槽式の曝気槽と沈殿槽から構成される。

曝気槽は通常2~4段の多段に仕切られ、酸素ガスと活性汚泥混合液は各段を並流し、排ガスは最終段より大気に放出される。曝気槽各段には液相の溶存酸素

濃度(DO)が3~10 mg/lとなるように設計された表面曝気機が設けられている。

酸素発生装置からの酸素ガスは、曝気槽内の気相圧力が通常50 mmAq程度となるように、圧力制御されて曝気槽第1段に供給される。曝気槽内での酸素要求量が増大すれば、気相の酸素は液相に溶解し、気相の圧力が低下する。この圧力を補うために酸素ガス供給弁が開き、所定の気相圧力になるまで酸素が供給される。最終段には排ガスの酸素濃度分析計と排ガス流量調節弁が設置されており、排ガスの酸素濃度が35~45%程度となるように排ガス流量調節弁の開度を設定する。排ガス酸素濃度とDOの間には相関関係があるので、酸素ガス濃度での運転監視が可能である。

図1のフローシートには最近注目されているオゾン処理による脱色、COD除去、消毒を行う場合についても付記されている²⁾。曝気に使用する酸素を用いてオゾンを安価に発生させ、オゾン処理後の排ガスを無駄無く曝気用の酸素として再利用する方式である。本方式はすでに下水、し尿、染色排水の処理に実設備が稼働している。

ユノックス・システムの特徴を列記する。

(1) 処理の安定性

流入負荷の変動に対して酸素ガス供給が自動調節されかつDOが高いので、排水の負荷変動への対応が強

図1 ユノックス法とオゾン処理の組み合わせ

(写真) 水処理施設全景

く、処理が安定する。

(2) 敷地面積の削減

高 DO、高濃度汚泥 (MLSS) での運転のため、容積負荷が従来の空気曝気活性汚泥法の 2~3 倍と高くとれる。

(3) 汚泥性状の改善

DO が高いため、汚泥の沈降性と圧密性が良好になり、沈殿槽の汚泥管理が容易である。高 DO のため汚泥の自己酸化が進み、余剰汚泥量が少なく、脱水性に優れている。

(4) 二次公害の防止

曝気槽が密閉槽なため、泡や飛沫の飛散が無い。酸素ガスが密閉多段槽で繰り返し活性汚泥に溶解するので、臭気が分解され、かつ排ガス量も通常の空気曝気活性汚泥法の 1/200 と少ない。

3. 処理結果の概要

(表) に今回取り上げる 4 種類の排水の処理結果の概要を示す。SS 込みの分析値を T-BOD, T-COD で示し、No.5 A ろ紙のろ液の分析値を F-BOD, F-COD で示す。

表より、各排水とも処理水 F-BOD はいずれも一桁

(表) 製紙排水の酸素曝気活性汚泥処理例

排水の種類 項 目			板紙排水		DIP 排水	KP+EVA 排水		KP 排水
				凝集剤添加			凝集剤添加	
T-BOD/F-BOD	流入水	mg/l	170/140	170/140	175/155	720/630	730/690	200/180
	処理水	mg/l	13/ 4	13/ 4	14/ 6	15/ 6	8/ 7	15/ 7
T-COD/F-COD	流入水	mg/l	180/150	180/150	215/175	810/800	735/700	250/220
	処理水	mg/l	45/ 38	37/ 35	92/ 83	220/205	155/140	105/ 95
SS	流入水	mg/l	80	80	120	35	45	115
	処理水	mg/l	22	16	50	60	63	40
MLSS		mg/l	4,800	4,800	5,600	5,300	5,100	5,600
MLVSS/MSLL		%	87	84	59	93	84	88
SVI		ml/g	140	45	65	125	50	55
曝気槽出口凝集剤添加率	Al ₂ O ₃	mg/l	—	35	—	—	18	—
	ポリマー	mg/l	—	1	—	—	1.3	—
備 考			流入水は前凝沈処理水		同左			

(注) T:SSを含む分析値, F:はNo.5 A ろ紙のろ液の分析値を示す。

と完全に生物酸化が完了しているにも拘わらず、処理水 F-COD は排水の種類によって大きく異なる。汚泥の沈降性を示す指標である SVI も排水の種類によって異なることが分かる。なお、曝気槽出口の凝集剤を添加した場合については後述する。

4. COD 除去性能

図 2 に COD 汚泥負荷と除去 COD 汚泥負荷の関係を示す。図の直線の勾配が COD 除去率を示す。

COD 汚泥負荷を算定する場合の汚泥濃度には、一般には MLSS を採用しているが、表に見るごとく排水の種類によって MLVSS/MLSS 比が大幅に異なっている。したがって、活性汚泥中の有効成分に近い MLVSS を用いて COD 汚泥負荷を示している。例えば、DIP 排水では流入排水中の無機質が汚泥中に蓄積するために、MLVSS/MLSS 比は 60% 程度と低く、KP+EVA 排水では流入 SS が低濃度なため、MLVSS/MLSS 比は 90% 以上と高い。すなわち、MLSS 当たりの汚泥負荷が同じでも、MLVSS 当たりの汚泥負荷では DIP 排水の方が KP+EVA 排水より約 50% 高いことになる。

図 2 より、板紙排水の場合は COD 汚泥負荷は 0.9 kgCOD/kgMLVSS・D まで勾配は直線上にある。すなわち、除去率の低下は認められず、平均除去率は

図 2 COD 汚泥負荷と COD 除去率の関係

81%である。

同様に DIP 排水では COD の平均除去率は 74% であるが, COD 汚泥負荷が $0.8 \sim 1.2 \text{ kgCOD/kg MLVSS} \cdot \text{D}$ の範囲では直線の上にあり, 板紙排水の除去率に近い除去率を示している。

KP+EVA 排水では変動幅が大きい, COD 汚泥負荷は $1.2 \text{ kgCOD/kg MLVSS} \cdot \text{D}$ 付近まで約 72% の除去率を達成している。

KP 排水では COD 汚泥負荷は $1.0 \text{ kgCOD/kg MLVSS} \cdot \text{D}$ 付近まで除去率 66% を示している。

KP と KP+EVA 排水では低負荷よりも高負荷側の方が除去率が向上する傾向が見られる。これは製紙工程の排水量と濃度の増加時には, 生物処理の比較的容易な成分が増加する傾向があることを伺わせている。

図 3 には COD 容積負荷と除去 COD 容積負荷の関係を示す。図 2 と同様に勾配が COD 除去率を示す。各排水について, COD 汚泥負荷と COD 除去率の関係と同様な傾向を示している。いずれも, 高負荷運転時でも安定した COD 除去性能が得られている。上記の COD 汚泥負荷に相当する COD 容積負荷を列記する。

COD 除去率が一定な負荷範囲		
	COD 汚泥負荷 ($\text{kgCOD/kg MLVSS} \cdot \text{D}$)	COD 容積負荷 ($\text{kgCOD/m}^3 \cdot \text{D}$)
板紙排水	0.9	3.5
DIP 排水	1.2	4.5
KP+EVA	1.2	4.7
KP 排水	1.0	4.5

5. BOD 除去性能

BOD 汚泥負荷と除去 BOD 汚泥負荷の関係を図 4 に示す。勾配が BOD 除去率を示す。

BOD は生物分解可能な有機物の濃度を示すので, COD に比べて除去率が高く, 高負荷領域まで除去率が一定なことを示している。

図 4 は T-BOD 基準で表示しているが, 表に示したように, SS を除いた処理水の F-BOD はいずれも 10 mg/l 以下 ($4 \sim 7 \text{ mg/l}$) なので, 生物分解可能な物質はほぼ完全に除去されている。したがって, 前述の COD 除去率は活性汚泥法の限界値を示していると言える。

図 4 の BOD 汚泥負荷の最大値と BOD 除去率を列記する。

図 3 COD 容積負荷と COD 除去率の関係

図 4 BOD 汚泥負荷と BOD 除去率の関係

最大 BOD 汚泥負荷 BOD 除去率
(kgBOD/kgMLVSS・D) (%)

板紙排水	0.9	98.0
DIP 排水	1.2	97.7
KP+EVA	1.15	99.4
KP 排水	0.7	95.4

図 5 には BOD 容積負荷と除去 BOD 容積負荷の関係を示す。図中の最大 BOD 容積負荷を列記する。

最大 BOD 容積負荷 BOD 除去率
(kgBOD/m³・D) (%)

板紙排水	3.5	98.0
DIP 排水	3.8	97.7
KP+EVA	5.1	99.4
KP 排水	3.4	95.4

6. AOX 除去性能

ダイオキシンとの関連で排水中の AOX 削減が重要な課題となっている。図 6 にユノックス・システムにおける COD と AOX 除去率の関係を示す。

一般に AOX の除去率は COD の除去率に比例するとされている。図 6 では KP+EVA 排水について、AOX と COD の除去率はほぼ等しいことを示している。

図 5 BOD 容積負荷と BOD 除去率の関係

図 6 COD と AOX 除去率の関係

る。KP 排水では AOX と COD 除去率の相関係数は 0.66 であるが、変動が大きい。KP 排水のデータは過去 3 年間に渡るもので、年々、原水 COD とともに AOX も低下し、現在の活性汚泥処理水の AOX は大幅に削減されている。

原水の COD が高い時、すなわち原水の AOX が高い時ほど、AOX の除去率が高く、AOX は T-COD より、F-COD との相関が強い傾向が見られた。

ユノックス・システムの処理水の凝集処理による AOX の除去性能の例を以下に示す。

8%硫酸バンド 添加率 (mg/l)	AOX 濃度 (mg/l)	AOX 除去率 (%)	COD 除去率 (%)
0	23	—	—
200	18	21.7	—
300	2	91.3	30

AOX の除去性能については、データの蓄積が少ないので、個々の排水について分析を実施する必要があるのが現状である。

7. 凝集剤添加活性汚泥

活性汚泥法の実設備において、汚泥の沈降性改善、処理水質改善および水量の過負荷対策等の対応として、曝気槽出口や沈澱槽に硫酸バンド等の無機凝集剤や高分子凝集剤（ポリマー）を添加する方法が従来より実施されている。

主に沈澱槽の敷地削減のために汚泥沈降性の向上を目的とした凝集剤添加の例を報告する。無機凝集剤と

して硫酸バンドを曝気槽流出配管に、アニオン系ポリマーをその下流に設置した凝集槽に注入した。

(1) 凝集剤添加による COD 除去効果

図 7 に KP+EVA 排水の処理における凝集剤添加の有無による COD 除去性能の差を示す。

凝集剤添加の経過は次の通りである。なお、硫酸バンドの注入率は Al_2O_3 基準で示す。

	硫酸バンド (mg/l)	ポリマー (mg/l)
当 初	25	1.8
変 更	18	1.3

凝集剤削減による COD 除去率の差が認められないので、図 7 には変更後のデータを示す。凝集剤添加により COD 汚泥負荷が高くなっているのは、MLSS 設定を同一としたため、凝集剤添加により MLVSS/MLSS 比が 93% から 84% に低下したためである。

凝集剤添加により、COD 除去率は 71% から 81% に上昇し、かつ除去率が安定している。BOD 除去率は前述のように凝集剤無添加でも 99% 以上達成しているので、凝集剤添加の有無による差は認められない。

(2) 凝集剤添加による汚泥沈降性の向上

無機凝集剤を添加した場合、汚泥中の無機質の割合が増加して、MLVSS/MLSS 比が低下する。すなわち、汚泥の比重が増加する。さらに、ポリマーを添加する

ことによって、汚泥フロック径が増大し、比重の増加との相乗効果で汚泥の沈降性が向上する。

実設備の運転管理上は、汚泥の沈降性を示す指標として、汚泥の 30 分静置後の汚泥容積 SV_{30} から求めた SVI が多く使用されている。一般に SVI は 100 以下では沈降性が良好と判定されている。

沈澱槽の計画設計上は、汚泥の初期沈降速度を測定することが重要である。図 8 に凝集剤添加の有無による汚泥の沈降速度を汚泥濃度に対して示す。図から分かるように、凝集剤添加により、汚泥の沈降速度が 2 倍以上向上している。

8. 排ガスと処理水の臭気

活性汚泥法の二次公害として、排ガスと処理水の臭気が重要なテーマとなっている。ユノックス・システムでの測定例を以下に示す。

	硫化水素	硫化メチル	二硫化メチル	メチルメルカプタン
排ガス	ND	ND	ND	ND
処理水	0.0010	ND	ND	0.0008

(単位：排ガス ppm, 処理水 mg/l)

ユノックス・システムでは酸素ガスが曝気槽内で繰り返し活性汚泥に溶解するために、排ガスの臭気が極めて低い。高 DO 下で生物酸化が十分に進むために、処理水中の臭気成分も低レベルである。

図 7 凝集剤添加の効果

図 8 汚泥沈降速度

9. 酸素消費量

活性汚泥法における酸素消費量の相関式は次式で与えられる。

$$O_2/BOD = A + B/(F/M)$$

ここで、

O_2/BOD : BOD 当たりの酸素消費量
($kgO_2/kgBOD$)

F/M : BOD 汚泥負荷
($kgBOD/kgMLSS \cdot D$)

A, B : 係数

右辺の第1項はBODの酸化に必要な酸素量を示し、第2項は活性汚泥自身の自己酸化に消費される酸素量を示す。 A, B とも活性汚泥で処理される流入排水の性状に影響される係数である。

KP排水を処理するユノックス・システムの実設備での酸素消費量のデータを図9に示す。ここで酸素消費量は供給酸素量から排ガス中の酸素量を差し引いて求めた値である。上記の相関式の係数は、 $A=1.0$ 、 $B=0.13$ となる。一般的な排水では、 A の値は0.45～0.8の範囲が多いが、KP排水の場合はBOD酸化に必要な酸素量が極めて高いのが特徴である。

酸素利用効率は曝気槽の排ガス中の酸素濃度で変化する。実設備の測定例を図10に示す。通常の排ガス中の酸素濃度の設定値は35～45%につき、酸素利用効率は85～90%程度である。

10. おわりに

ユノックス・システムによる製紙排水のCOD、BODおよびAOXの除去性能と凝集剤添加活性汚泥の汚泥沈降性について処理試験と実設備のデータより解析した。

今後は閉鎖水域の富栄養化防止のための窒素、リンの除去と和歌山市の着色水規制条例に見るように、処理水の脱色も重要なテーマとなってくる。窒素除去にはBOD除去以上に大量の酸素を必要とすること、脱色に効果が高いオゾン発生には酸素を使用することが設備規模と所要電力の面で有利なこと等、今後とも酸

図9 酸素消費量実測データ

図10 酸素利用効率

素活性汚泥法の改良・進歩が不可欠である。

参考文献

- 1) 斎藤, 竹倉, 植田, 浄光: PPM, Vol.11, No. 12, 16 (1980)
- 2) 本田, 竹倉: 加工技術, Vol.29, No.8, 541 (1994)