

再利用を目的とした生活廃水の高度処理

国立公害研 ○田井 慎吾

〃 須藤 隆一

〃 合田 健

1. はじめに

水の価格が低く押えられている現状で、廃水の再利用を行なうことは、高度処理単位操作の明確な選定基準が確立されていないこともあって、経済性の面からも懸念が多い。しかし、直接的な再利用でなくとも、廃水あるいは二次処理水の放流による水源地域の高栄養化および合成化学物質、塩素処理の産物やウイルス等の微生物による汚染が問題視されており、活性汚泥法を中心とした生物処理では御し切れず、さらに高度な処理によってこれらの汚染物質を除去する必要があることが広く認識されている。また、大都市域では膨大な水需要に対処するため、中水道のごとき、都市下水を水資源として有効利用することが検討され、総合的な立場で評価(E.A., Environmental Assessment)すべき問題となっている。この水に対して、種々の高度処理単位操作の適用が検討されているが、その単位操作の処理機能は、BOD, COD, 浮遊物質、一般細菌といった包括的な指標では十分に評価することができず、広義の利用目的に対して、適用する技術-処理プロセスが過剰であり、目的に合わない場合が多いことが予想される。

ここでは、国立公害研究所における生活系廃水(所内では一般廃水と呼んでいる)の高度処理施設の概要および処理成績を紹介し、これをもとに合理的な単位操作の選定、組合せに当たっては、これまでの指標を再検討するとともに新たな評価指標の導入が必要なることを述べる。

2. 高度処理施設の概要

国立公害研究所においては、生活污水を主体とした一般廃水と実験等による生じた有害物質を含む実験廃水とを別系統で処理している。すなわち、一般廃水は生活污水、実験器具等の洗浄水のうち4回目以降のもの、冷却水の一部、重金屬等の有害物質を不溶含まない動植物実験水からなっている。

一般廃水の処理施設は図-1のようなフローであり、それぞれ単位操作の規模は表-1に示したとおりである。研究所の各施設から汚水管によって廃棄物処理センターへ輸送された一般廃水は調整槽(112 m^3 2系列)によってpH調整を行い活性汚泥法によって処理される。さらに、この二次処理水は凝集沈殿(アルミ電極板の電解による水酸化アルミニウムによる)、急速砂ろ過、活性炭吸着処理水、水道水の節約、下水道への負荷の軽減のためにボイラー用水、動植物実験棟、コンピューター、分析機器等の冷却用水として再利用するほか、一部をバイオフィアームを含む水生生物の生態実験のための生物実験池(約2000 m^3 、水深約1 m)に導入している。なお、再利用に当たっては、必要に応じて逆浸透処理を行なうとしている。また、処理水の余剰の場合は下水道へ放流するが、モニタリング用貯水槽(200 m^3 、2系列)において自動測定および手分析でモニタリングを行ない、除去施設の基準を上回る値が検出された場合あるいはそのおそれのある場合は再度処理される。

処理能力は200 $\text{m}^3/\text{日}$ (活性炭吸着塔は一系列、100 $\text{m}^3/\text{日}$ である)であるが、現在は約100 $\text{m}^3/\text{日}$ の一般廃水を処理している。

以下に述べる処理成績はこのような高度処理施設から得られたものであるが、一般廃水の SiO_2 濃度が比較的低かった(30 mg/l 程度)ため、凝集沈殿はアルミ電解法によらず、硫酸パン土の投入による。また、アルミ電解と硫酸パン土による SiO_2 の除去効果の違いについては別途実験を行なった。さらに、活性炭吸着処理水を連続的に放流している生物実験池において、藻類の増殖について観察した。

3. 処理成績の検討

一般廃水の高度処理成績の一例を表-3に示す。なお、その際の各単位操作の運転条件は表-2および図-2とおりである。

表-3のように、TOD、窒素残留物、導電率などの包括的指標によれば一応の成績を収めているが、富栄養化あるいは再利用という立場から見ると、その目的によって、必ずしも十分ではなく、このプロセスが最も合理的とは必ずしもいい難い。たとえば、凝集沈殿+急速砂ろ過によって浮遊物質、TOD、磷はそれぞれ90%以上減少しており、また、逆浸透によって窒素残留物、導電率がそれぞれ80%以上減少している。しかし、活性炭吸着処理については、このような包括的指標によれば、溶解性の有機化合物の吸着という機能を十分に評価することができない。

一方、用水としている井水には 60 mg/l 程度の SiO_2 を含んでおり、逆浸透処理を行なうに当たって、この SiO_2 の析出によるトラブルを防ぐため、アルミニウム電極板の電解によって生成された新鮮な水酸化アルミニウムのフロックによって SiO_2 を抱合沈殿させるためにアルミ電解槽が設けられている。このアルミ電解による凝集沈殿の SiO_2 除去効果について硫酸バン土注入の場合と比較して表-4に示す。このアルミ電解によって消費されるアルミニウム量は通水量 $5 \text{ m}^3/\text{hr}$ で 300 g/hr であり、消費電力は 40 A 、 60 V であるが、50時間ほど運転すると電極板表面への付着物等によって抵抗が上がり、電流を一定(40 A)に保つため電圧は次第に上昇(150時間ほどで 250 V に達した)。

〔有機物質〕

一般論として、廃水中の有機物質は活性汚泥法によってほぼ除去されるというが、生物分解できるのは分子量が400以下で溶解性のものと、粒子径 $1 \mu\text{m}$ 以下でコロイドであり、しかも、一価のOH基、COOH基を有しない芳香族炭化水素や不飽和結合、アミ基、イミノ基、ニトロ基あるいはハロゲン基を有する化合物は生物分解困難である。したがって、都市下水の2次処理水中の有機物質は、主に全固形泥に由来する浮遊性のものと、生物分解されにくい高溶解性のものである。後者の溶解性の有機化合物は生物分解のおそいものや、明らかに難分解性のものなど、BODで表現されがたい。また、活性炭吸着では極性の

図-1. 処理施設フローシート

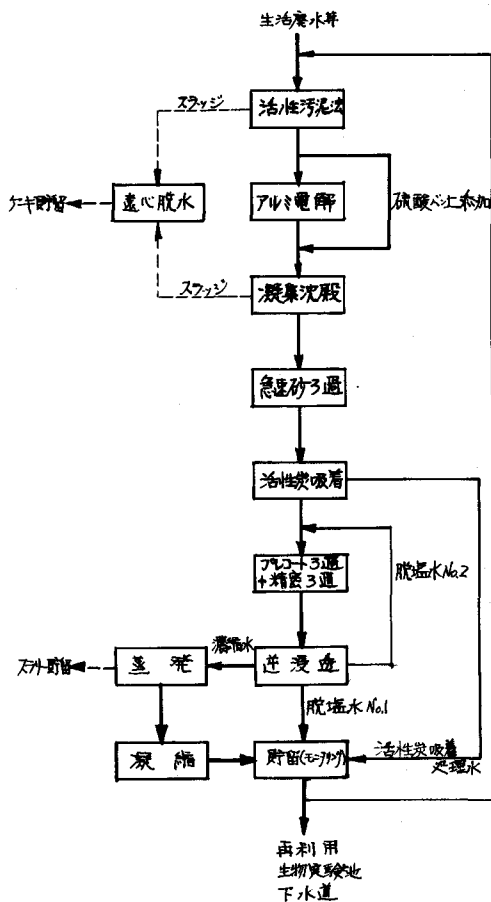


表-1. 処理施設規模

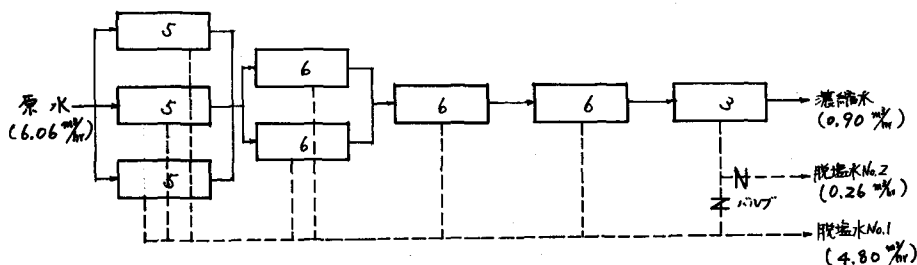
装置	規模
エラージナ	90 m^3
最終沈殿池	65 m^3
アルミ電解槽	アルミ電極板 $1 \times 1 \times 3 \text{ mm}$ 60枚
凝集沈殿池	78 m^3
急速砂ろ過塔	3通面積 2 m^2 , 砂 2 m^3
活性炭吸着塔	3通面積 2 m^2 , 活性炭 2 m^3
ろ過+3道器	3通面積 2.6 m^2 , 珪藻土
逆浸透膜装置	200% AT-7-100-5, 20% AT-7-100-5-1V
蒸発缶	最大加熱容量 $1,180 \text{ kg/hr}$
脱水機	$1 \text{ m}^3/\text{hr}$, 2台

高い低分子化合物と分子量が10,000以上の7
ミン酸等の化合物は除去されなく、しかも、その間
の物質であっても一定の粒子径であれば一様の吸着能
を示すということはなく、極性、溶解性あるいは構造的
な性質によって異なる吸着能を示す。

表-3の試料は蒸留水で5倍に希釈し(2次処理水
のみは1.2μmミリポフィルターで濾過)、紫外吸
光度(波長220nm, 260nm)を求めた。表-5

図-2. 逆浸透処理施設フローシート

うに、蒸留
水に比べ
て、各処理
過程で溶解
性の有機化
合物が残っ
ている可能
性のあるこ
とがわかる。



注: 数字はモジュール数

また、TODでは明確に有機物質の吸着除去を評
価できなかったが、紫外吸光度(220nm)によれば
溶解性の有機物質が減っていることがわかる。
(無機物質)

ボイラー用水等への再利用のため、溶解性の無
機物質の除去を目的として逆浸透処理、イオン交
換法、電気透析法を検討している。逆浸透処理
による無機物質の除去は表-3のとおりであり、
蒸留残留物、導電率はそれぞれ84.8%, 81.7%
の除去率であるが、処理水中にはCa²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺,
SiO₂がかなり残っている。さらに、表-6のよ
うに蛍光X線分析を行なうと極微量の成分も検出
され、定性的にはあるが重金属が残っているこ
とがわかる。この表の中でAsは実験に使ってい
ないため凝集沈殿に使用した硫酸バン土に含まれ
る不溶物に起因するものと思われる。なお、この
蛍光X線分析は活性炭吸着処理水および逆浸透処
理水100mlに対してフエン酸ソーダ20%濃液
10mlを添加し、塩酸でpHを5に調整したのち、
DDTC 2%濃液10mlを加えて振とうし、45分
間静置したのち0.45μmミリポフィルター
で濾過、紫外ランプで60℃, 5分間乾燥して蛍

表-2. 処理施設操作条件

操 作 条 件	
凝集沈殿	2次処理水通水量 10% 硫酸バン土添加量 70 mg/l
急速ろ過	通水量 10% hr
活性炭吸着	通水量 10% hr
逆浸透	通水量 6% hr, 高圧ポンプ圧 37 MPa, 25℃

表-3. 処理成績

水質項目	活性汚泥法 処理水	凝集沈殿 + 砂ろ過水	活性炭吸着 処理水	逆浸透 処理水
PH	7.40	7.10	7.00	6.05
導電率(μm)	220	228	215	39
蒸留残留物(%)	223	176	165	25
浮遊物	58.1	0.8	0.3	0.0
TOD	25	1.2	0.6	ND
T-P	0.315	0.035	0.022	0.032
PO ₄ -P	0.100	0.010	0.009	0.009
NH ₃ -N	0.57	0.38	0.21	0.48
NO ₂ -N	0.218	0.000	0.000	0.000
NO ₃ -N	4.30	2.47	2.27	0.98
Cl ⁻	16.4	18.3	11.3	3.2
Ca	-	-	18.3	1.6
Mg	-	-	3.94	0.97
Fe	-	-	0.65	0.023
SiO ₂	-	-	31.2	6.5

光X線分析装置にかけ、定性試験を行なったものである。

アルミ電解による SiO_2 の凝集沈殿除去は表-4のように、硫酸ベン土入による場合に対して、除去率が30%に対して60%であり、有効と思われる。しかし、アルミニウムの消費量、電気消費量、アルミ電極板に附着した酸化物の除去などの維持管理など、経済性について逆浸透処理との関連

において検討を要すると思われる。

〔栄養塩〕

国立公害研究所の高度処理施設は富栄養化の主要物質である窒素、リンの栄養塩除去を目的としているが、表-3のように、リンは凝集沈殿と急速砂3通で90%近く除去されている。また、窒素はリンにくらべて除去されにくい、硝酸性窒素、アンモニア性窒素が各処理過程でわずかに除去されている。

2次処理水中の窒素、リンの濃度は一般の生活廃水を主体とした団地下水の場合（2次処理水中の窒素30mg/l前後、リン3mg/l前後）にくらべて10分の1程度であり、下水の3次処理水中の濃度に近い値である。凝集沈殿によるリン除去はリン1g/lに対して2〜3g/lのアルミニウム（硫酸ベン土で25g/l〜37g/l）で90%以上達成される。表-3においてリン除去を目的とした凝集沈殿においては凝集沈殿操作の行なえる硫酸ベン土濃度、70%（重量比で $\text{P}:\text{Al} = 1:18$ ）といたるリン濃度に対して過剰である。また、表-4において、アルミ電解でさらに少量のアルミニウムを用いているがリンの減少は硫酸ベン土70mg/lの場合と同程度であった。なお、逆浸透処理においてリン濃度が増加しているのは逆浸透の前処理として用いたアレコートフィルターのセライト中の不純物としてのリン（セライト中に0.11%含有）によるものと思われる。

いづれにしても凝集沈殿以後の処理水中リン濃度は、湖沼における富栄養化の限界濃度といわれている、 $0.02 \sim 0.05 \text{ mg/l}$ の濃度であり、リン除去の限界に近い値と思われる。表-7に各処理過程の処理水を用いて藻類培養試験を行なった結果を示したが、2次処理水の場合、クロロフィルa量は 600 mg/l に近いのに対して、凝集沈殿と急速砂3通、活性炭吸着では 10 mg/l に減少している。また、この表で逆浸透処理水のクロロフィルa量は0となっているが、処理水をオートクレーブし *Chlorella sp.* を用いたAGPを求めると 9 mg/l であるため逆浸透処理に当たって用いた重塩素酸ソーダによる阻害が原因であると思われる。表-7の培養条

表-4、アルミ電解による SiO_2 の除去効果

		単位=mg/l						備考
区 分		SiO_2	T-P	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	
硫酸ベン土による凝集沈殿	原水(2次処理水)	49.2	0.059	0.044	4.42	0.399	2.55	
	凝集沈殿上澄水	34.6	0.018	0.012	2.71	0.240	2.30	硫酸ベン土70mg/l
	砂3通水	35.8	0.017	0.006	0.22	0.434	3.28	
アルミ電解による凝集沈殿	原水(2次処理水)	40.0	0.052	0.037	1.62	0.320	2.80	
	凝集沈殿上澄水	15.4	0.018	0.005	1.26	0.630	3.06	アルミニウム60mg/l
	砂3通水	15.2	0.017	0.004	0.18	0.392	3.55	

表-5、紫外吸光度

	吸光度		備 考
	220nm	260nm	
活性汚泥法処理水	0.209	0.071	蒸留水で5倍検出
凝集沈殿+砂3通水	0.190	0.053	・
活性炭吸着処理水	0.150	0.050	・
逆浸透処理水	0.125	0.049	・
蒸留水	0.073	0.049	3回測定

表-6、蛍光X線カウンタ数

	カウンタ数 (k.c)	
	逆浸透原水	逆浸透処理水
Fe	1,158	366
Ni	54	9
Cu	581	114
Zn	413	132
As	9	7
Br	68	49

件は、処理水1ℓに *Chlorella* sp. を接種し、25℃、10,000 luv (12時間明、12時間暗) で14日間の培養である。

培養試験においては、藻類生産力はSSで10%程度であり、大きい値ではないが、富栄養化の限界に近い磷濃度であっても、このような処理水が連続的に閉鎖水域に放流される場合には、藻類の増殖をやはり抑制する。図-3に活性炭吸着処理水を供給した生物実験池の藻類量の变化を、クロロフィルa、SSで測定した結果を示す。これは、2月からほぼ4日間隔で、午前11時に採水・測定したものであるが、クロロフィルa量が増加した時の藻類は、*Chlorella*、*Scenedesmus*、*Cosmarium* が優

占種である緑藻類および珩藻類であった。

供給される処理水の栄養塩が低濃度であっても、光、温度等の物理的条件が整えば、藻類は微量の磷を利用して増殖を続けている。藻類の増殖は温度、日射量に大きく左右されるようで、図-4に示す水温、気温の変化とクロロフィルa量およびSS量の変化がよく一致している。図-3において、5月の始めに一度増加したクロロフィルa量が急激に減少しているのは、4月の終わりと5月の始めにかけての雨と低温によるものである。この間の気温、水温は

図-4のように、午前11時に15℃前後に低下し、日射量が100 cal/cm²まで下がっている。

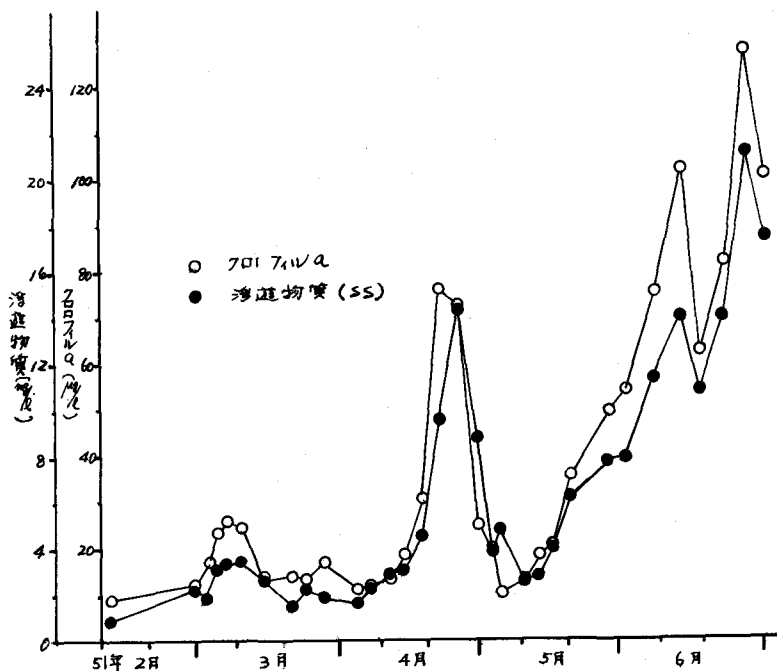
また、図-5に生物実験池における無機性窒素(アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素および硝酸性窒素の和)および正リン酸・燐の濃度変化を、図-6に全燐濃度の変化を示すが、燐は藻類の増殖に利用されT-P濃度はクロロフィルa量の増加に伴って増加している。逆にPO₄-Pと無機性窒素は消費されて低下している。

表-7、藻類培養試験結果

項目	活性炭法 処理水	活性炭+ 砂濾水	活性炭吸着 処理水	活性炭 処理水
pH	10.70	8.10	8.10	7.80
7007.11a(%)	577.1	12.5	11.6	0.0
浮遊物質(%)	135.3 (97.2)	8.1 (7.3)	10.5 (0.2)	0.0 (0.2)
T-P (°)	0.320	0.039	0.022	0.030
PO ₄ -P (°)	0.021	0.008	0.007	0.007
NH ₃ -N (°)	0.36	0.30	0.32	0.20
NO ₂ -N (°)	0.014	0.018	0.017	0.000
NO ₃ -N (°)	3.20	1.88	1.91	1.15

注) 浮遊物質の()は増加量を示す

図-3、藻類量の变化



このような例からもわかるように、高度処理の合理的な単位操作の選定に当たっては、利用目的に応じて除去すべき物質を明確にするとともに、その機能を前記して、かなりの信頼度で評価できる新たな指標が必要であり、加えて、そのような見直しや評価を裏付け、あるいは反省フィードバックするため、高度の分析機器による、原水、処理水の構成物質に関する詳細な水質情報も必要となることがい知れる。

図-4, 温度変化

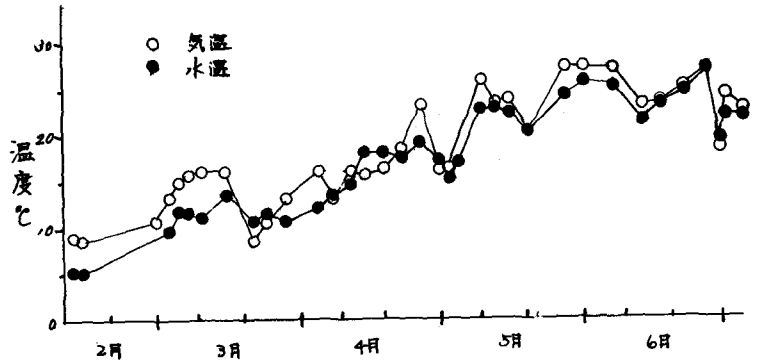


図-5, 窒素、磷濃度の変化

4. まとめ

高度処理施設から得られたデータに若干の検討を加えたが、これを要約するならば

①、処理水の利用目的によっては、水質の詳細な情報が必要とせよ、

②、処理に当たって化学薬品等を用いる場合には、それに含まれる不純物に留意する必要があるとせよ、

③、栄養塩の除去に当たっては、AGP だけでなく

連続的に栄養塩が供給される場合の藻類の増殖を考慮する必要があるとせよ、

④、処理水の利用目的に応じて合理的な単位操作の選定と組合せを行なうための新たな指標が必要とせよ、

などである。なお、処理データの収集に当たって協力いただいた、建設管理業務委託を受けている栗田整備株式会社、若村剛巳氏、土井賢二郎氏に謝意を表す。

〔参考文献〕

(1), "Standard Method for The Examination of Water and Wastewater, 13th edd." A.P.H.A., N.Y.

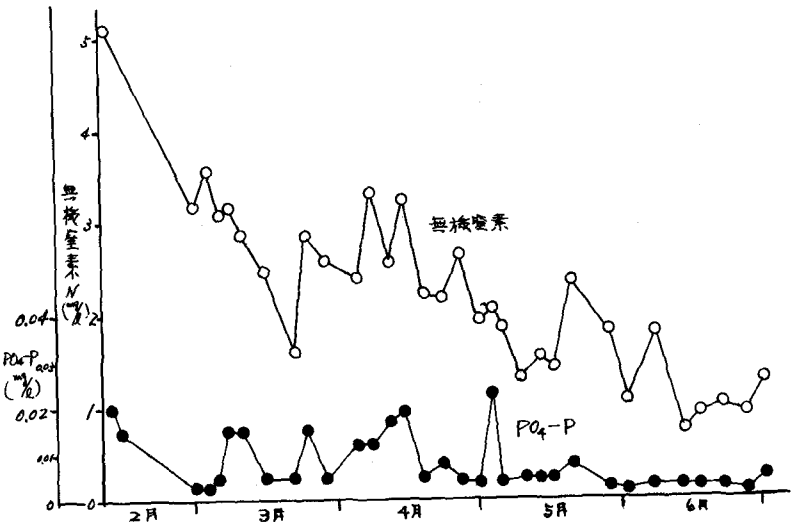


図-6, 全磷濃度の変化

