

原著論文

工場排水処理施設に関する技術相談事例 —味噌製造事業場の活性汚泥の管理と全リンとの関係—

熊谷博史*, 志水信弘*, 永淵義孝*, 松尾宏*, 中村又善*, 若松美知子**

全リンの排水基準値を超過した味噌製造業者の原因究明を行うために排水処理調査を行った。各工程の排水及び排水処理施設の活性汚泥を分析した。その結果、調査した各工程排水・活性汚泥の物理的性状に問題はなかった。一方、曝気槽の活性汚泥中のリン含有量は一般の値より低く、曝気槽中の溶存酸素も不足する傾向にあった。以上から、曝気量増加等の提案を行ったところ、活性汚泥中のリン含有量も増加し、放流水中の全リン濃度も大幅に低下した。

[キーワード：事業場排水、排水基準、全リン、活性汚泥]

1 はじめに

2002年7月に、福岡県南部の味噌製造業者に対して、水質汚濁防止法〔以下単に法という。〕第二十二条に基づく特定事業場（法第二条第五項に基づく特定施設〔法第二条第二項に基づく汚水又は廃液を排出する施設〕を設置する工場または事業場）の立ち入りにより採取された排水を測定したところ、全リン(T-P)の項目が59mg/lであり、法第三条第一項に定められた排水基準16mg/l(日間平均値8mg/l)を大幅に超過していた。

そこで、排水基準を超過していた当該事業場に対し、原因究明のための負荷量及び排水処理施設の調査を実施した。さらに事業者に対し、排水基準達成のための遂行可能な改善策の提案を行った。

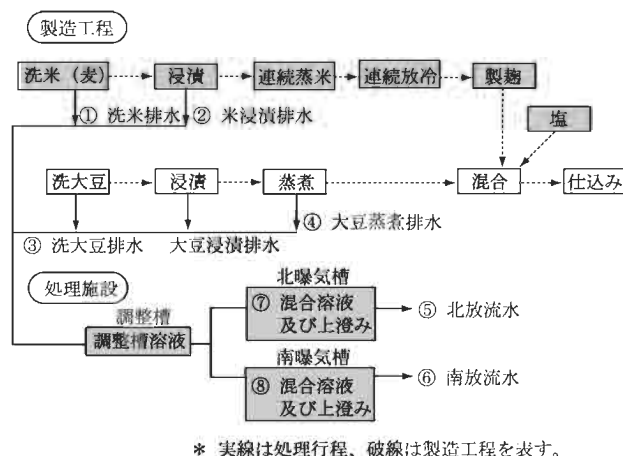
2 調査方法

2・1 調査対象

調査対象となった事業場は、味噌の製造を行っており、原料の種類及び使用量は、米3,000kg/日・麦3,000kg/日・大豆3,000kg/日であった。また、操業に伴う排水量は平均85m³/日(最大150m³/日)であった。処理方式は、2槽並列の回分式活性汚泥法(処理能力150m³/日)であり、間欠曝気で運転されていた。

2・2 製造工程、排水系統及び試料採取箇所

調査は2002年10月に行った。製造工程、排水系統及び試料採取箇所を図1に示した。すなわち、①：洗米排水、②：米浸漬排水、③：洗大豆排水、④：大豆蒸煮排水、⑤：北放流水、⑥：南放流水、⑦：北曝気槽内混合溶液



* 実線は処理行程、破線は製造工程を表す。

図1 製造工程、排水系統及び試料採取箇所

とブロー停止時の上澄み溶液、⑧：南曝気槽内混合溶液とブロー停止時の上澄み溶液を、それぞれ採取した。なお、大豆浸漬排水については、この工程の作業が調査日の前日に行われたため採取できなかった。また、調整槽においては、槽の容量が小さく、調整槽としては機能していないと判断して採取しなかった。

2・3 分析項目及び方法

それぞれの試料について、分析項目を水温・溶存酸素(DO)・pH・電気伝導率(EC)・生物化学的酸素要求量(BOD)・化学的酸素要求量(COD)・全窒素(T-N)・全リン(T-P)・リン酸態リン(PO₄³⁻-P)とした。各項目の分析方法は、工場排水試験方法¹⁾に従い実施した。現場

* 福岡県保健環境研究所(〒818-0135 太宰府市大字向佐野39)

** 福岡県山門保健福祉環境事務所(〒835-0025 山門郡瀬高町大字上庄1784の1)

においては、両曝気槽において、曝気の停止・開始に伴う DO・酸化還元電位 (Eh) の動向調査を行った。各項目について、水温・DO・Eh 以外は、研究所に持ち帰り測定した。両曝気槽の活性汚泥については、活性汚泥浮遊物質 (MLSS)・活性汚泥沈殿率 (SV)・汚泥容量指標 (SVI) を測定した。SV は現場で、それ以外は研究所に持ち帰り測定した。これらについては、下水試験方法²⁾に従い実施した。

3 調査結果

3・1 水質調査

各工程排水の水質測定結果を表1に示す。また、どの工程排水がリンの排出に大きく関与しているかを明らかにするため、各工程からのリンの排出負荷量 (リン濃度×排水量) を算出した。次に、各工程からのリンの排出負荷量を加算して全工程のリンの排出負荷量を求めた。さらに、全工程のリンの排出負荷量に占める各工程のリン排出負荷量の割合を算出した。結果を表2に示す。なお、調査当日の各工程からの排水量については、今回、事業者から提出された資料 (洗米排水：10m³、米浸漬排水：3m³、洗大豆排水：15m³、大豆蒸煮排水：4m³、大豆冷却排水：2m³、機械洗浄排水：2m³) に基づいた。なお、提出された資料の排水量を合計すると40m³/日となる。なお、法第5条は、工場又は事業場から公共用水域に水を排出するものが特定施設を設置するときに、排出水の汚染状態及び量等を都道府県知事に届け出ることを規定している。本事業場の届出書に記載された平均排水量は85m³/日であり、届出時の排水量と大きく異なっていた。

リンの排出源として大きく寄与している工程は、洗米排水 (33.1%) と大豆蒸煮排水 (53.6%) であり、この2工程で全体の約87%を占めていた。また全工程から排出される負荷量を積算した。BOD：N：P の比をみると、BOD：N：P = 100：3.6：1.1であった。

処理施設への流入排水を活性汚泥で処理する場合、一般に、BOD：N：P の比は100：5：1が適当とされている³⁾。このように、調査結果は一般値と比較して、ほぼ同程度であった。すなわち、最終的に曝気槽に流入する負荷量の BOD：N：P のバランスについては問題がないと考えられた。

3・2 曝気槽調査

3・2・1 曝気槽のDO等の変化

事業者によると、曝気槽の運転サイクルは、曝気時間が8時～12時、14時～18時及び21時～3時であり、停止時

表1 各工程排水の水質測定結果

	採水箇所	排水量 (m ³ /day)	水温 (℃)	DO (mg/ℓ)	pH	EC (mS/cm)	BOD (mg/ℓ)	COD (mg/ℓ)
①	洗米排水	10	—	—	6.9	0.86	1,900	3,000
②	米浸漬排水	3	25.4	7.4	6.6	1.08	3,000	1,700
③	洗大豆排水	15	19.8	8.0	7.7	2.02	200	170
④	大豆蒸煮排水	4	—	—	6.1	3.95	13,000	13,000
⑤	北放流水	—	26.6	0.4	7.6	2.29	4	15
⑥	南放流水	—	26.6	0.3	7.8	2.41	3	19

	採水箇所	T-N (mg/ℓ)	T-P (mg/ℓ)	PO ₄ ³⁻ -P (mg/ℓ)	PO ₄ ³⁻ -P / T-P (%)
①	洗米排水	26.5	31.1	4.2	13.5
②	米浸漬排水	26.2	25.7	16.9	65.8
③	洗大豆排水	16.2	3.2	2.8	87.5
④	大豆蒸煮排水	600	126	—	—
⑤	北放流水	2.3	1.1	1.1	100.0
⑥	南放流水	2.1	14.2	13.3	93.7

表2 排出負荷量

	BODの排出負荷量 (g/day)	窒素の排出負荷量 (g/day)	リンの排出負荷量 (g/day)	全行種のリン排出負荷量に占める各工程のリン排出負荷量の割合 (%)
① 洗米排水	19,000	265	311	33.1
② 米浸漬排水	9,000	79	77	8.2
③ 洗大豆排水	3,000	243	48	5.1
④ 大豆蒸煮排水	52,000	2,400	504	53.6
合計	83,000	2,987	940	
BOD排出負荷量を100としたときの割合	100.0	3.6	1.1	

間が3時～8時、12時～14時及び18時～21時としている。いわゆる間欠曝気である。そこで、曝気槽内の DO の変動調査を行った。結果を表3に示す。

11時50分頃の曝気が継続されているときの DO は0.4～0.5 mg/ℓ であった。次に12時から2時間ほど曝気を停止し、再び曝気を開始した際、約1時間経過しても DO は、0.1～0.2 mg/ℓ であり、曝気が継続されている午前中の DO にまで回復するにはかなりの時間を要すると考えられた。また、曝気の停止中における DO は0.1 mg/ℓ 程度か、又はそれ以下であったと推測される。

3・2・2 曝気停止時の上澄み液の性状

曝気停止時の上澄み液の性状を表4に示す。上澄み液の DO は両槽とも0.1mg/ℓ であった。また、リン濃度は、北曝気槽で8.6mg/ℓ、南曝気槽で20.7mg/ℓ であった。

表3 DOの変化

	曝気槽調査時刻	水温 (℃)	曝気槽中のDO (mg/l)	Eh (mV)	備考
北曝気槽	11:50	27.2	0.4	+376	曝気中
	12:00	曝気停止			
	13:50	曝気開始			
	13:55	27.1	0.1	+245	曝気中
	14:25	26.9	0.1	+280	
	14:40	26.8	0.1	+307	
南曝気槽	11:50	27.6	0.5	+397	曝気中
	12:00	曝気停止			
	13:50	曝気開始			
	14:40	27.1	0.2	+411	曝気中

表4 曝気停止中の上澄み液の性状

	採水箇所	時刻	水温(℃)	DO (mg/l)	pH	EC (mS/cm)
㉑	北曝気槽(上澄み液)	13:40	25.5	0.1	7.5	2.28
㉒	南曝気槽(上澄み液)	13:40	26.7	0.1	7.4	2.36

	採水箇所	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	Eh (mV)
㉑	北曝気槽(上澄み液)	27	41	2.5	8.6	+317
㉒	南曝気槽(上澄み液)	70	73	4.4	20.7	+394

3・3 活性汚泥調査

3・3・1 活性汚泥の性状

両曝気槽で採取された活性汚泥の性状を表5に示す。活性汚泥浮遊物質 (MLSS) は、北曝気槽で11,600 mg/l、南曝気槽では12,500 mg/lを示した。事業者の排水処理計画仕様書によると、基本設計諸元から算定された適正な MLSS は2,000~2,500 mg/lであった。現状の MLSS 濃度は、この値と比較して、両槽とも5倍ほど高いことが分かった。

さらに、この活性汚泥中のリンを測定⁹⁾したところ、乾泥中に占めるリンの割合は、1.6~1.8%程度であった。一般の活性汚泥のリン含有率は、2~3%と報告されている⁹⁾。この数値と比較すると、両曝気槽の活性汚泥のリン含有率は、やや低かった。

3・3・2 汚泥容量指標

活性汚泥沈殿率 (SV) 及び汚泥容量指標 (SVI) は活性汚泥の沈降性状を表す指標として広く用いられている。北曝気槽の SV (試料1ℓをメスシリンダーにとり、MLSS 濃度が均一になるように緩やかに攪拌した後、30分間静置したときの沈殿体積 a (ml) を読みとり、(a / 1,000) × 100の式で算出したもの) は95.5 vol.%であり、南曝気槽でのそれは93.5 vol.%であった。また、SVI を(1)式から求めた。

表5 活性汚泥の性状

	活性汚泥採取時刻	固形分率 (%)	MLSS (mg/l)	mg P/g 乾泥	乾泥中に占めるリンの割合 (%)
北曝気槽	11:50	4.7	—	17.6	1.76
	14:00	4.8	11,600	17.5	1.75
南曝気槽	11:50	4.3	—	16.6	1.66
	14:00	4.5	12,500	15.9	1.59

$$SVI (-) =$$

$$SV \text{ (vol. \%)} \times 10,000 / MLSS \text{ (mg/l)} \quad \cdots (1)$$

今回の北槽活性汚泥の SVI は82.3であり、南槽活性汚泥のそれは74.8であった。SVI を人為的にコントロールすることは難しいが、SVI は50~150の範囲にあることが好ましいと言われており、活性汚泥がバルキング (bulking) すると SVI は200以上になると言われている⁹⁾。このことから、今回の汚泥の沈降性は、適正な状態にあると考えられた。

3・3・3 活性汚泥からのリンの溶出

活性汚泥は嫌気的な環境条件になるとリンを放出するとの報告がある⁹⁾。そこで、次のような実験を行った。活性汚泥に空気あるいは窒素ガスを吹き込んで酸化還元

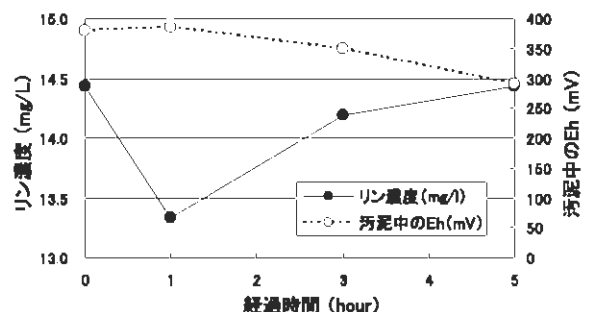
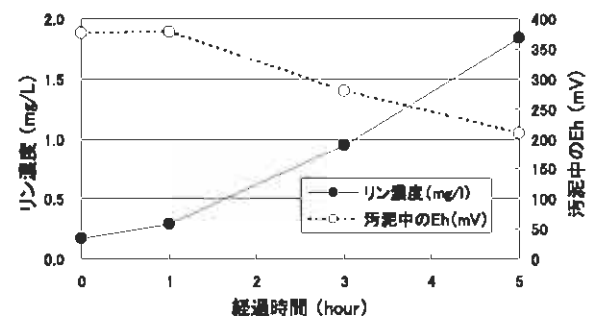


図2 リンの溶出実験結果
(上：北曝気槽，下：南曝気槽)

電位 (Eh) を現場での測定値 (+380mV 付近) に調整し、5時間放置した。結果を図2に示す。なお、経過時間を5時間としたのは、曝気槽内での固液分離に要する時間が同時間に設定されていたためである。

図2から明らかなように、両曝気槽では時間の経過に伴って、酸化還元電位が減少し、活性汚泥中に含まれていたリンが溶出したことによるリン濃度が上昇する傾向がみられた。実験開始1時間後から5時間後までのデータの勾配から、最小二乗法を用いて、リンの溶出速度を算定した。その結果、溶出速度は、北側曝気槽で0.77 mgP/l/hour、南側曝気槽で0.90mgP/l/hourであった。

4 改善計画

以上の結果から、次のような改善計画を示した。

- 1) 活性汚泥浮遊物質 (MLSS) は、北曝気槽で11,600 mg/l、南曝気槽では12,500 mg/l を示した。事業者の排水処理計画仕様書によると、MLSS は2,000~2,500 mg/l であり、適正な濃度まで汚泥を引き抜くなど、日常的な汚泥管理の必要性が認められた。
- 2) 活性汚泥を嫌気的な環境に維持することによって、活性汚泥からのリン溶出現象が室内実験で確認された。当事業場の曝気槽内の DO は不足傾向にあり、ブロワーの運転・停止には格段の注意を払う必要があると考えられた。

この改善計画に基づき、事業者は、以後、1. 間欠曝気を連続曝気に変更、2. ブロワーの修理、3. 定期的な汚泥の引き抜きを行い、排水水質の改善を図った。

5 排水水質改善結果

2003年2月に、再度立ち入り調査を実施した。調査試料を、⑤：北放流水、⑥：南放流水、⑦：北曝気槽内混合溶液、⑧：南曝気槽内混合溶液、及び、両曝気槽の活性汚泥とした。分析項目・方法については、前回調査の方法に従い実施した。

表6に改善後の排水の水質結果を示す。北曝気槽では、放流水中のリンの濃度は0.060mg/l となり改善前の5.5% (94.5%削減) に減少した。南曝気槽においても0.190mg/l となり改善前の1.3% (98.7%削減) に減少し、両放流水とも、排水基準値を満足していた。また、Eh については、改善前と比較して、北曝気槽で143~274mV ほど、南曝気槽で117~131mV ほど増加していた。DO については、改善前と比較して、北曝気槽で2.9~3.2mg/l ほど、南曝気槽で2.2~2.5mg/l ほど増加していた。このように、両曝気槽とも改善前よりも好気的な条件になっていた。なお、改善前調査時の水温に比較して、改善後調査時の水温は、約10℃低下していた。

表7に改善後の活性汚泥の性状を示す。改善前と比較し、乾泥中に占めるリンの割合も、前述の一般値に近いものとなっていた。MLSS については、改善前と比較して、あまり変化がなかった。しかし、同一 MLSS 値でも微生物の含有量は異なることが指摘されており⁷⁾、乾泥中のリン含有量の増加は、活性汚泥中の微生物量が増加したことを示唆している。また、改善後調査時の水温が約10℃低下しているにも係わらず、活性汚泥中の微生物量が増加している。活性汚泥中微生物の増殖速度への温度の影響は顕著であると言われており、 $Q_{10}=2$ 前後になるといわれている⁸⁾。今回、 $Q_{10}=2$ を仮定すると、改善後の微生物の増殖速度は、改善前の半分程度であったことになる。それにも係わらず微生物量が増加していることから、改善前の汚泥中の微生物量は DO 律速の条件下にあったと考えられる。なお、SV については、北曝気槽で97.0 vol. %、南曝気槽で96.5 vol. %あった。SVI については、北曝気槽で70.8であり、南曝気槽で77.8であった。このことから、活性汚泥の沈降性は、改善前とほぼ同程度であると考えられた。

次に、両曝気槽中の水中・活性汚泥中のリン総量の比較を行った。活性汚泥中のリン総量は(2)式で求めた。

$$\begin{aligned} \text{活性汚泥中リン総量 (g)} \\ = a / 100 \times C_{\text{MLSS}} \times V \quad \cdots (2) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} a &: \text{乾泥中のリン含有率 (\%)} \\ C_{\text{MLSS}} &: \text{MLSS (mg/l)} \\ V &: \text{曝気槽の活性汚泥容量 (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

である。一方、水中のリン総量は(3)式で求めた。

$$\begin{aligned} \text{水中リン総量 (g)} &= (100 - \phi) / 100 \times C_{\text{r}} \times V \quad \cdots (3) \\ \text{ここで、} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi &: \text{固形分率 (\%)} \\ C_{\text{r}} &: \text{曝気槽上澄みリン濃度 (mg/l)} \end{aligned}$$

である。ただし、改善後の曝気槽上澄み濃度は放流水濃度で代用した。結果を図3に示す。両曝気槽とも、改善の前後において、水中に占めるリン総量の割合 (北曝気槽3.9%、南曝気槽9.9%) が減少し、曝気槽中に占めるリン総量のほとんどが、活性汚泥中に移行していることがわかる。また、改善後には活性汚泥中に占めるリン総量も増加していた。

このように水質及び活性汚泥が改善した原因として、活性汚泥中の DO が増加し好気的条件になり、活性汚泥からのリンの溶出が抑えられたことと、汚泥中に含まれ

る微生物量が増加したことが挙げられる。

表6 改善後の各工程水質測定結果

	採水箇所	水温(℃)	DO (mg/l)	pH	EC (mS/cm)	BOD (mg/l)
⑤	北放流水	(26.6)	(0.4)	7.8 (7.6)	2.28 (2.29)	2.6 (3.9)
⑥	南放流水	(26.6)	(0.3)	7.8 (7.8)	1.96 (2.41)	7.8 (3.3)
⑦	北曝気槽 混合溶液	15.3 (26.8~27.2)	3.3 (0.1~0.4)	7.9	2.25	—
⑧	南曝気槽 混合溶液	15.4 (27.1~27.6)	2.7 (0.2~0.5)	8.0	2.08	—

	採水箇所	COD (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	Ek (mV)
⑤	北放流水	11 (15)	1.45 (2.30)	0.060 (1.1)	(+317*)
⑥	南放流水	34 (19)	3.67 (2.10)	0.190 (14.2)	(+394*)
⑦	北曝気槽 混合溶液	—	—	—	+519 (-245~+376)
⑧	南曝気槽 混合溶液	—	—	—	+528 (-397~+411)

下段 () の値は、改善前調査の値を表す。
*改善前調査の曝気槽上澄み液の値。

表7 改善後の活性汚泥の性状

	固形分率 (%)	MLSS (mg/l)	mg P/g 乾泥	乾泥中に占めるリンの割合 (%)
北曝気槽	4.7 (4.7~4.8)	13,700 (11,600)	24.9 (17.5~17.6)	2.49 (1.75~1.76)
南曝気槽	5.0 (4.3~4.5)	12,400 (12,500)	22.9 (15.9~16.6)	2.29 (1.59~1.66)

下段 () の値は、改善前調査の値を表す。

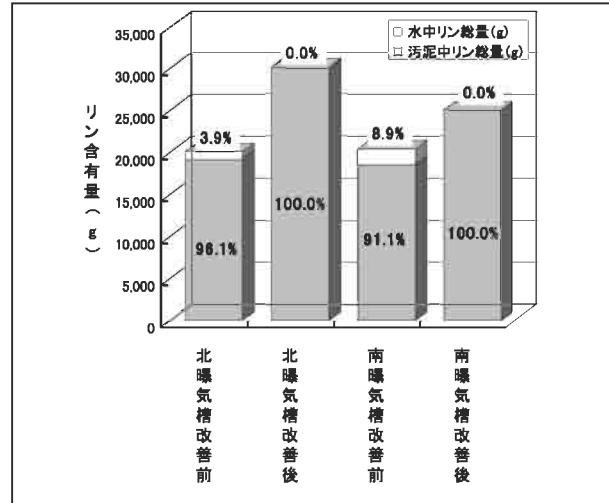


図3 曝気槽内のリン含有量の比較

6 まとめ

今回の事例については以下のように結論づけることができる。すなわち、通常よりも高濃度に存在していた曝気槽内の活性汚泥が、間欠曝気の採用・曝気装置の不具合等の原因により嫌氣的条件下におかれた為に、高濃度の活性汚泥中から水中への大量のリンの放出が起こった。そしてブロー停止時に、その上澄み液が放流水として排出されたために、排水基準値を超過したと考えられる。なお対策後の MLSS 値はほとんど変化がなかったことから、依然として汚泥引き抜き量が不足している。今後、適正な排水処理を行うためにも、MLSS 適正值までさらに汚泥引き抜きを行う必要がある。

文献

- 1) 日本規格協会：工場排水試験方法 JIS K 0102, 1998.
- 2) 建設省都市局下水道部・厚生省生活衛生局水道環境部：下水試験法, pp. 271-272, 日本下水道協会, 1997.
- 3) 須藤隆一：廃水処理の生物学, p. 228, 産業用水調査会, 1977.
- 4) 前掲 2), pp. 329-331
- 5) 橋本奨ほか：新しい活性汚泥法, p. 12, 産業用水調査会, 1986.
- 6) 大野茂：し尿浄化槽ハンドブック, pp. 328-329, 産業用水調査会, 1981.
- 7) 前掲 3), pp. 219-224
- 8) 前掲 3), pp. 228-229

A case of technical advice for an industrial wastewater treatment facility: Effects of changes in activated sludge treatment on total phosphorus concentration

**Hiroshi KUMAGAI*, Nobuhiro SHIMIZU*, Yoshitaka NAGAFUCHI*, Hiroshi MATSUO*,
Matayoshi NAKAMURA*, and Michiko WAKAMATSU****

** Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences*

39, Mukaizano, Dazaifu, Fukuoka, 818-0135 Japan

*** Yamato Health, Welfare and Environment Office*

1784-1, Kaminoshou, Setaka, Fukuoka, 835-0025 Japan

A survey was conducted on the wastewater treatment by a miso maker in the southern part of Fukuoka Prefecture, from which wastewater was beyond the total phosphorus (T-P) effluent standard. The wastewater from each production process and the activated sludge in the water treatment facility were investigated. We found that, in the aeration tanks, the dissolved oxygen level and the phosphorus content in the activated sludge were low, the latter being probably due to a decreased activity of aerobic biodegradation of organic substances as a consequence of the low oxygen level. Based on the results, we proposed a plan to improve the aeration process in the tanks. This resulted in an increase in the phosphorus content in the activated sludge, and a decrease in total phosphorus concentration in the final wastewater, satisfying the effluent standard.

[Key words : industrial effluent, effluent standard, T-P, activated sludge]