

利用厭氣、好氣法去除排水中含磷之基礎研究

Fundamental Studies on the Phosphorus Removal from Wastewater Using Anaerobic/Aerobic Process

淡江大學土木工程學系教授兼系主任

徐 銳 基

Ting-Chi Hsu

摘 要

本研究以葡萄糖調製成之人工含磷排水為基質，探討有機物濃度對厭氣、好氣法去磷效果之影響。在厭氣槽和好氣槽之水力停留時間各為 1.9 小時和 6.6 小時，原水中含磷濃度 20~25mg/l, MLSS 濃度 2500~3000mg/l 之條件下進行連續處理實驗之結果，顯示厭氣、好氣法能有效地去除磷，當 TOC 污泥負荷 0.2kg TOC/kg MLSS·day 和一般標準活性污泥法相同負荷範圍之下，可得 80% 以上之 TOC 及 O—P 去除率。若欲求得較高之 O—P 去除率，厭氣槽之 TOC 污泥負荷應在 1.0kg TOC/kg MLSS·day，去除之 O—P 與去除之 TOC 比應在 0.062，基質中之 O—P/TOC 應小於 0.064 為宜。

Abstract

The effect of organic concentration on the phosphorus removal of Anaerobic/Aerobic Process was investigated by using synthetic wastewater as substrate. Results obtained from collected anaerobic reactor and aerobic reactor with a hydraulic retention time of 1.9 hr and 6.6 hr, respectively, an influent O—P concentration of 20-25mg/l and the MLSS concentration of 2,000-3,000mg/l, reveal that Anaerobic /Aerobic Process will able to remove the phosphorus from wastewater while the TOC-sludge loading was 0.2kg TOC/kg MLSS·day, the O—P removed/TOC removed was 0.062 and the O—P/TOC in the substrate should be smaller than 0.064.

一、前 言

臺灣地區近年來，由於使用含磷的合成清潔劑及化學藥劑的量激增⁽¹⁾，使得各種排放水中含磷的濃度日益增高，且又因下水道系統之建設尚在起步階段，含磷的排水未經收集處理而任意排放，以致

於造成了目前許多河川、湖泊如淡水河⁽²⁾、澄清湖⁽³⁾、翡翠水庫⁽⁴⁾等水中藻類叢生，溶氧降低等優養化問題，同時也帶給了水在利用上，環境生態上之種種困擾。因此如何減少排水中含磷濃度之水處理技術為刻不容緩值得研究探討的課題。

去除排水中之磷原係以化學去磷法為主，然而

由於此方法必須添加混凝劑才能將磷凝聚沉澱去除，不但增加了水處理的成本甚不經濟，同時對於產生之化學沉澱污泥若是缺乏適當的處理，反而易造成二次的公害問題，因此近年來，許多學者專家積極研究開發更經濟有效的生物去磷方法⁽⁵⁻⁶⁾，其中厭氣、好氣法為一種組合厭氣槽及好氣槽之活性污泥法，由於此方法僅須在傳統之活性污泥曝氣槽的前端，增設厭氣性之處理，即可馴養出磷積蓄菌而有效地去除磷，而不須添加化學藥劑且改造簡單經濟，在省能源的現在成了最受注目的生物去磷法。

厭氣、好氣生物去磷法係由 Barnard⁽⁷⁾ 於 1975 年提出，之後雖有少數處理廠在試行操作運轉，但因發展年代尚短，對於其生物去磷機構，處理條件及操作因子等不明之處尚多，仍有待探討。因此，本研究以葡萄糖調製成的人工含磷排水為基質，以基質濃度為變數，探討其對厭氣、好氣法去磷效果之影響，以作為實際操作與設計之參考。

二、實驗設備、材料與方法

2-1 實驗設備

本研究之連續式實驗設備概要如圖 1。

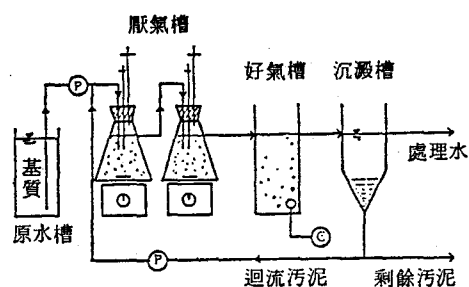


圖 1 連續式實驗設備之流程

每套實驗設備係由 2 個厭氣槽（錐形瓶，500 l ），1 個好氣槽（PVC 製，10 l ）及 1 個沉澱槽（PVC 製，5 l ）所構成。厭氣槽以橡皮塞封住，防止空氣進入，維持無溶氧之狀態，槽底下利用磁攪拌器攪拌混合。好氣槽則以空氣壓縮機曝氣，維持槽內溶氧在 2mg/ l 以上。流入前段厭氣槽之基質和迴流污泥係利用可定量之變速抽水機抽送。

2-2 實驗材料與實驗方法

實驗之基質係以葡萄糖為單一有機碳源，並添加微生物生長所需之無機營養鹽類調製而成，其組成比例如表 1。

表 1. 人工含磷排水之組成

成 份	濃 度 (mg/ l)
葡 萄 糖	150
氯 化 鉍	30
磷 酸	20
硫 酸 鎂	0.25
氯 化 鈣	0.025
氯 化 鐵	0.025

實驗中使用之污泥係採自中興新村污水處理廠之迴流污泥，在實驗室以厭氣、好氣交替及 fill and draw 方式並利用表 1 之合成基質經 2 個月以上之馴養而得。

實驗分四個階段即改變進流葡萄糖濃度為 150, 450, 750 及 900mg/ l 進行連續處理實驗。MLSS 濃度平均為 2465, 2898, 3042 及 2929mg/ l ，厭氣槽與好氣槽之水力停留時間分別設定為 1.9 及 6.6 小時。四階段之基質含磷濃度不隨葡萄糖濃度之不同而改變，平均各為 19.5, 23.6, 25.8 及 20.8mg/ l 。基質以 17 l /日，迴流污泥以 8.5 l /日之流量流入前段之厭氣槽中。迴流污泥濃度調節在 5000mg/ l 。

本實驗進行時之操作條件如表 2。分析之方法依照「Standard Methods」⁽⁸⁾ 第 15 版所述。採樣分析之項目及頻度如表 3。

表 2. 實驗進行時之操作條件

實 驗 編 號	1	2	3	4
原水葡萄糖(mg/ l)	150	450	750	900
原水 TOC(mg/ l)	76.3	175.8	288	323.3
原水 O-P(mg/ l)	19.5	23.6	25.8	20.8
平均 MLSS(mg/ l)	2465	2898	3042	2929
厭氣槽容量 (l)	2	2	2	2
好氣槽容量 (l)	7	7	7	7
原水流量 (l /日)	17	17	17	17
迴流污泥流量(l /日)	8.5	8.5	8.5	8.5
迴流污泥濃度 (mg/ l)	5000	5000	5000	5000
原水 O-P/TOC	0.256	0.134	0.089	0.064

表3. 採樣分析項目及頻度

分析項目	原水	厭氣槽	好氣槽	沉澱槽	放流水
PH	●	●	●	●	●
MLSS		○	○	○ 沉澱 污泥	○
TOC	○	○	○	○	○
BOD	○				
COD	○				
O-P	○	○	○	○	○
T-P	○	○	○	○	○
SVI		△	△		
微生物相 (顯微鏡觀察)		○	○		

分析頻度：●每日 ○每週3次 △定常狀態期間

三、實驗結果與討論

實驗之操作條件設定以後，分別在不同之有機物負荷下開始將原水抽送進入反應槽中，進行連續實驗直至各實驗達到定常狀態，分別採樣測定各 TOC, O-P 等值。表 4 所示為各階段實驗之分析結果平均值。

表4. 各實驗結果之平均值

實驗編號	1	2	3	4	
厭氣槽	TOC(mg/l)	60.6	91.9	126.4	164.4
	O-P (mg/l)	24.8	26.4	28.3	22.6
好氣槽 (處理水)	TOC(mg/l)	47.3	37.2	33.3	47.2
	O-P (mg/l)	14.6	14.8	10.2	3.7
去除率	TOC (%)	38	79	88	85
	O-P (%)	25	37	60	82

3-1 有機物負荷對 TOC 及 O-P 去除率之影響

一般生物處理工程中有機物負荷是反應槽設計及操作上重要因子，也關係着 TOC 及 O-P 之去除效果。本實驗因各原水之 TOC 濃度不同，實驗 1~4 中對整個厭氣及好氣反應槽計算求得之 TOC-SS 負荷各為 0.058, 0.115, 0.179 及 0.208kg TOC/kg MLSS·day, TOC 容積負荷則各為 0.144, 0.332, 0.544 及 0.611kg TOC/

m³·day。實驗之結果得知，TOC-SS負荷，TOC容積負荷與 TOC 及 O-P 去除率之關係如圖 2 及圖 3。

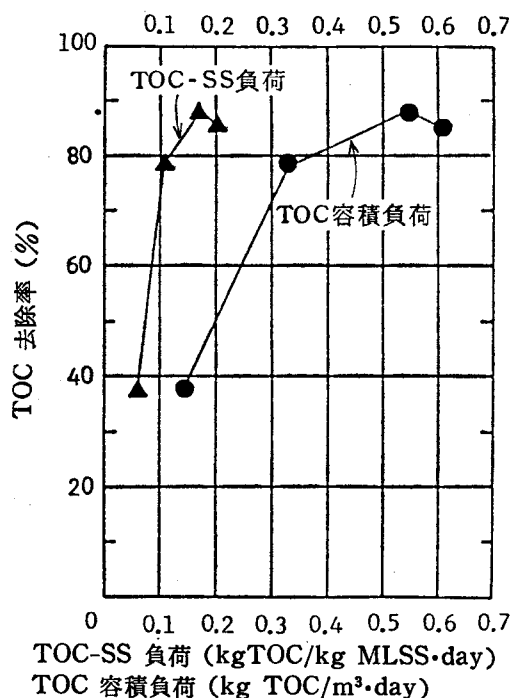


圖2. TOC-SS 負荷，TOC 容積負荷與 TOC 去除率之關係

通常，標準活性污泥法之有機物負荷範圍在 0.2~0.4kg BOD/kg MLSS·day 或 0.4~0.8kg BOD/m³·day，亦即處理時，操作在此基準條件下可得良好之 BOD 去除效果。本實驗之結果由圖 2 得知，TOC 去除率隨 TOC-SS 負荷及 TOC 容積負荷之增大而增加，如果欲獲求 80% 以上之 TOC 去除率，TOC-SS 負荷宜設定在 0.12~0.20kg TOC/kg MLSS·day (約等於 0.22~0.37kg BOD/kg MLSS·day) 或 TOC 容積負荷在 0.35~0.60kg TOC/m³·day (約等於 0.65~1.11kg BOD/m³·day) 為宜。此和標準活性污泥法之有機物負荷基準範圍相同，也說明了標準活性污泥法可在原有之反應槽前端，部份改做厭氣性處理即可簡單改做厭氣、好氣法處理之原因。

又，由圖 3 得知，O-P 去除率亦隨 TOC-SS 負荷及 TOC 容積負荷之增大而增加。當 O-P 去除率達 80% 以上時，TOC-SS 負荷應在 0.2kg TOC/kg MLSS·day, TOC 容積負荷應在 0.6kg TOC/m³·day 以上。根據以上之實驗結果推測，

以厭氣、好氣法處理含磷排水時，如欲獲得較高之去除效果，TOC-SS 負荷及 TOC 容積負荷分別在 $0.2\text{kg TOC/kg MLSS}\cdot\text{day}$ (約等於 $0.37\text{kg BOD/kg MLSS}\cdot\text{day}$) 及 $0.6\text{kg TOC/m}^3\cdot\text{day}$ (約等於 $1.11\text{kg BOD/m}^3\cdot\text{day}$) 為宜。

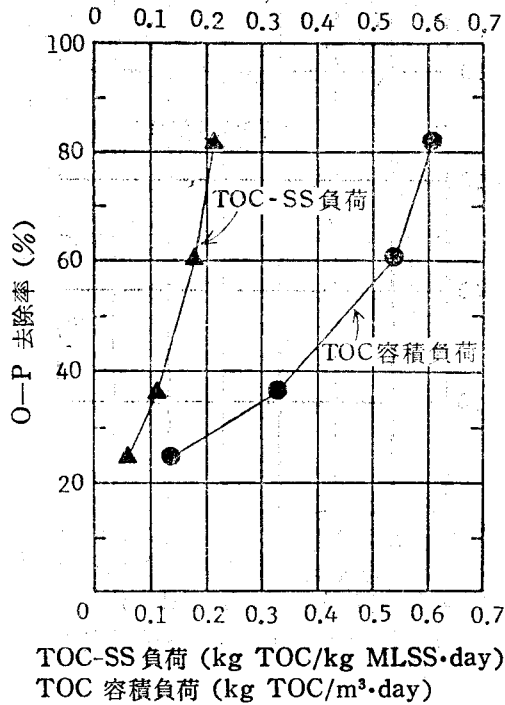


圖 3. TOC-SS 負荷, TOC 容積負荷與 O-P 去除率之關係

3-2 厭氣槽之 TOC-SS 負荷及 TOC/MLSS 對 O-P 去除率之影響

根據松尾⁽⁹⁾等提出之生物去磷理論，微生物在厭氣狀態時，細胞體內之 poly-p 加水分解而形成 O-P 並產生能量，利用此能量微生物將水中有機物吸收而積蓄，同時將 O-P 放出。當處於好氣狀態時，積蓄於細胞內之有機物質氧化分解而放出能量，利用此能量微生物將水中之 O-P 攝取而予以去除 (參考圖 4)。因此，原水中之有機物主要是在厭氣槽中被吸收去除，但吸收之量根據柴田等⁽¹⁰⁾之報告指出應有極限，此極限值可由厭氣槽之 TOC-SS 負荷或 TOC/MLSS 來探討。

本實驗 1~4 中，厭氣槽之 TOC-SS 負荷各為 $0.261, 0.518, 0.806$ 及 $0.936\text{kg TOC/kg MLSS}\cdot\text{day}$, TOC/MLSS 各為 $0.031, 0.061, 0.095$ 及 $0.110\text{kg TOC/kg MLSS}$ 。實驗之結果，兩者與 O-P 去除率及處理水中 O-P 濃度之關係如圖 5 及圖 6。由圖 5 得知，提高厭氣槽之 TOC-SS 負荷可降低處理水中之 O-P 濃度，亦即增高 O-P 去除率，同樣地由圖 6 可知 TOC/MLSS 愈大，O-P 去除率愈高，因此在本實驗設定之條件下，欲求得較高之 O-P 去除率或較低之處理水 O-P 濃度，厭氣槽之 TOC 負荷應為 $1.0\text{kg TOC/kg MLSS}\cdot\text{day}$ (約等於 $1.85\text{kg BOD/kg MLSS}\cdot\text{day}$), TOC/MLSS 應為 0.1kg TOC/kg MLSS (約等於 0.185kg BOD/kg

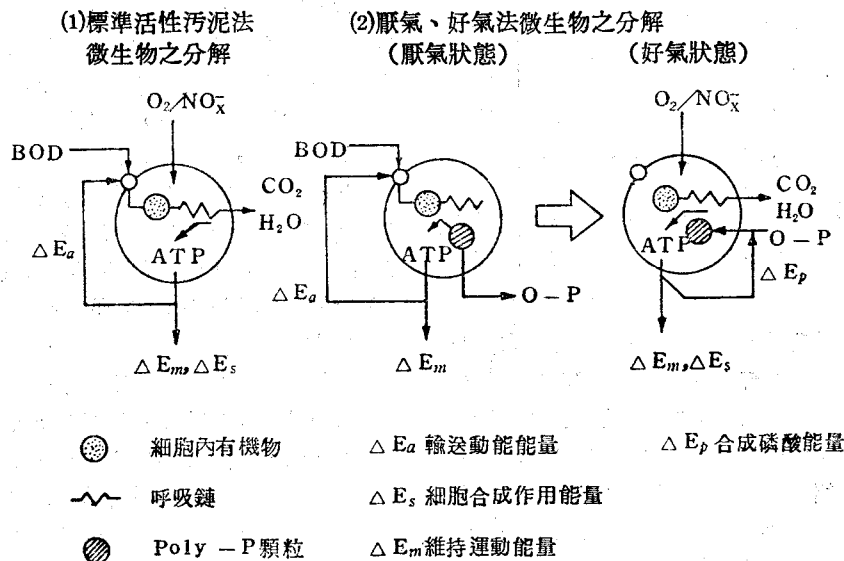


圖 4. 厭氣、好氣法生物去磷機構⁽⁹⁾

MLSS) 以上。至於在厭氣槽中，微生物吸收有機物濃度之極限值，本實驗設定之條件下，無法以厭氣槽之 TOC-SS 負荷或 TOC/MLSS 來探討。

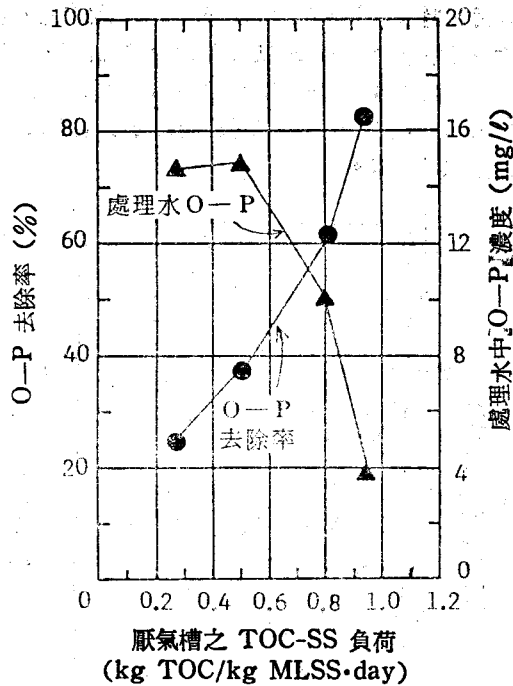


圖 5. 厭氣槽之 TOC-SS 負荷與 O-P 去除率及處理水中 O-P 濃度之關係

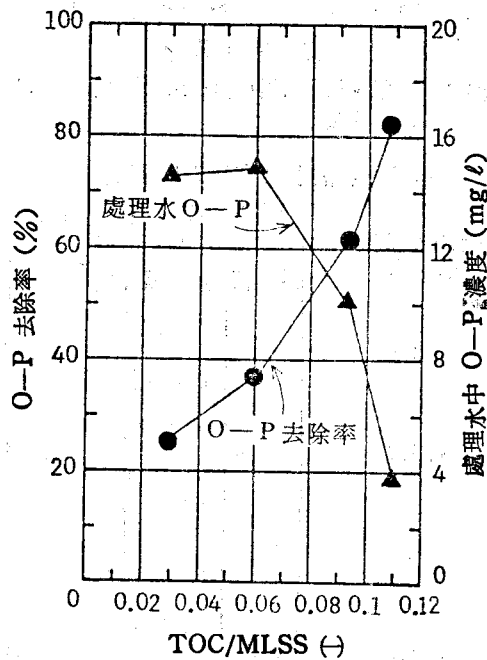


圖 6. TOC/MLSS 與 O-P 去除率及處理水中 O-P 濃度之關係

3-3 $\Delta O-P/\Delta TOC$ 及原水中 O-P/TOC 對 O-P 去除率之關係

如 3-2 中所述，厭氣、好氣法去除磷是利用微生物在好氣槽中將磷吸收而最終以剩餘污泥之形式去除。因此，評估磷之去除效率時，TOC 之單位去除量所對應之 O-P 去除量亦為重要之因子。本實驗 1~4 中，O-P 去除量對 TOC 去除量之比 (即 $\Delta O-P/\Delta TOC$) 各為 0.169, 0.063, 0.061 及 0.062。若由 TOC 去除率，O-P 去除率均佳的實驗 4 計算，求得之 $\Delta O-P/\Delta TOC$ 為 0.062 ($\Delta O-P/\Delta BOD=0.034$)。而一般標準活性污泥法中 $\Delta P/\Delta BOD=0.01$ ，此仍說明厭氣、好氣法去除每單位 TOC 時，所能去除磷之量遠較標準活性污泥法為多。

由於原水中 TOC 濃度愈高，則在厭氣槽中被污泥吸收積蓄之量愈多，同理在好氣槽中 TOC 被分解，水中 O-P 被污泥吸收之量也愈多，因此，原水中 O-P 濃度對 TOC 濃度之比 (即 O-P/TOC) 亦關係着 O-P 之去除效率。本實驗 1~4 中，原水之 O-P/TOC 分別為 0.256, 0.134, 0.089 及 0.064，其中 TOC 及 O-P 去除率均

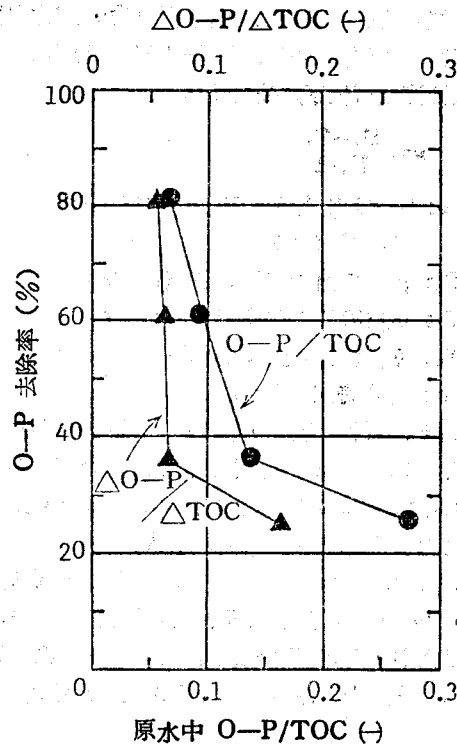


圖 7. $\Delta O-P/\Delta TOC$ 及原水中 O-P/TOC 與 O-P 去除率之關係

較高時之值為 0.064 (原水中 O—P/BOD=0.035)。

圖 7 為 $\Delta O-P/\Delta TOC$ 及原水中 O—P/TOC 與 O—P 去除率之關係，由此推測在進行厭氣、好氣法之處理時， $\Delta O-P/\Delta TOC$ 約為 0.062，而原水中 O—P/TOC 宜在 0.064 以下可得較佳 TOC 及 O—P 去除率。此結果與佐佐木⁽¹¹⁾，深瀬⁽¹²⁾ 等以其他基質作為實驗求得之值大致在同一範圍。

3-4 TOC 比去除速度與原水中 TOC 濃度之關係

圖 8 為本實驗過程，厭氣槽及好氣槽中 TOC 及 O—P 之濃度變化情形。在厭氣槽中，由於 TOC 被污泥大量吸收，故槽中 TOC 濃度呈急速減少之現象，然而在厭氣狀態下，污泥放出 O—P 於細胞外，故此時厭氣槽中之 O—P 濃度反而較原水中之 O—P 濃度為高。在好氣槽中，被污泥吸收積蓄之 TOC 氧化分解，此時水中之 O—P 大量被污泥吸收去除，因而好氣槽中之 O—P 濃度呈急速減少之現象。至於槽中 pH 之變化情形，在厭氣槽中，由於 O—P 之放出，一度使得 pH 降至平均約為 .6 左右，之後在好氣槽中，由於 O—P 被污泥吸收，故 pH 再度回昇至中性。

根據單槽連續培養之物質平衡理論，在厭氣槽及好氣槽或整個反應槽 (厭氣槽+好氣槽) 中 TOC 之比去除速度可依下述公式計算：

$$\nu = \frac{S_0 - S_e}{X_a \cdot t}$$

式中 ν : TOC 比去除速度 (mg TOC/mg MLSS·day)

S_0 : 流入槽內 TOC 濃度 (mg/l)

S_e : 流出槽外 TOC 濃度 (mg/l)

X_a : 槽內污泥濃度 (mg/l)

t : 停留時間 (day)

根據上式計算的結果得知，本實驗 1~4 中，厭氣槽之 TOC 比去除速度依順序為 0.076, 0.354, 0.669 及 0.682 mg TOC/mg MLSS·day，在好氣槽之 TOC 比去除速度依順序為 0.020, 0.062, 0.112 及 0.146 mg TOC/mg MLSS·day (參照表 5)。TOC 在厭氣槽中之比去除速度遠快於在好氣槽中，由此可知，厭氣、好氣生物去磷法對水中 TOC 之去除作用，大部份是在厭氣槽中完成。

圖 9 為各槽中 TOC 比去除速度與原水中 TOC 濃度之關係。由圖得知，隨着原水 TOC 濃度之增

加，各槽中 TOC 比去除速度也隨着增大。惟有當原水 TOC 濃度大於 300mg/l 時，在厭氣槽中之 TOC 比去除速度之增大並不顯著，此現象可能與污泥對 TOC 濃度之吸收有極限值之說有關。若本實驗中平均 MLSS 以 2834mg/l 計算，則此極限值推測為 $300/2834=0.106$ (mg TOC/mg MLSS)，亦即每 1mg 之污泥最大約可積蓄 0.106 mg 之 TOC。

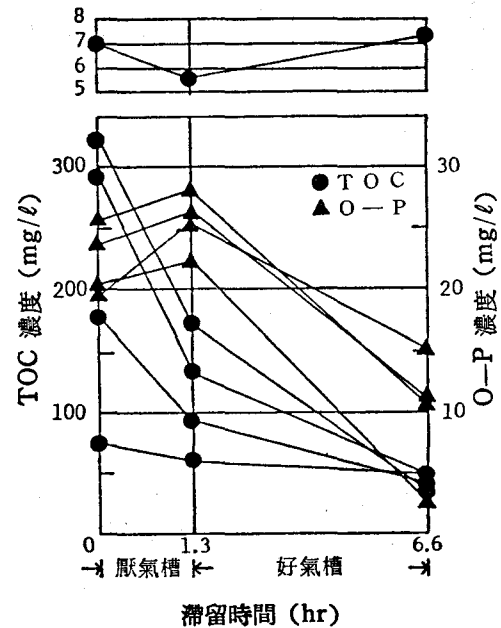


圖 8. 厭氣、好氣槽中 pH 及 TOC, O—P 濃度之變化

表 5 各槽中之 TOC 比去除速度

原水 TOC 濃度 (mg/l)	TOC 比去除速度 ν (1/day)		
	厭氣槽	好氣槽	全槽 (厭去槽 + 好氣槽)
76.3	0.076	0.020 (0.015)	0.033
175.8	0.354	0.062 (0.014)	0.131
288	0.669	0.112 (0.022)	0.236
323.3	0.682	0.146 (0.023)	0.266

() 為好氣槽中 O—P 比去除速度

誌 謝

本研究承蒙國家科學委員會提供經費，謹誌由衷之謝意。

參 考 文 獻

1. 葉宜顯、高肇藩：「水中清潔劑之處理研究」，國立成功大學環境工程研究所報告第38號，民國72年10月。
2. 郝道猛：「生態學概論」，民國71年10月。
3. 曾怡禎、陳是瑩：「澄清湖生態的研究II、澄清湖水質的評估」，第一屆給水技術研討會論文集，民國73年10月。
4. 郭瑞華：「翡翠水庫集水區磷污染源之調查研究」，第二屆給水工程技術研討會論文集，民國74年12月。
5. Barnard, J.L.: Design Consideration Regarding Phosphorus Removal in Activated Sludge Plants, IAWPRC Post Conference Seminar on Phosphorus Removal in Biological Treatment Process, 1982.
6. Hong, S.: Biological Phosphorus and Nitrogen Removal via the A/O Process-Recent Experience in the United States and United Kingdom, Water Science and Technology, 1984.
7. Barnard, J. L.: Biological Phosphorus Removal in the Activated Sludge Process-Review and Proposal, Paper Presented at the S. A. Branch of IWPC, 1975.
8. Standard Methods—for the Examination of Water and Waste Water, 15 Edition, American Public Health Association, 1981.
9. 松尾吉高：「生物脫リン法—嫌氣、好氣法—のし尿および下水への適用」，第18回衛生工學研究討論會講演集，1982。
10. 柴田雅秀：「生物的リン除去法—リン除去反應と操作因子について」，PPM, No. 10, 1983.
11. 佐佐木正一：「Anaerobic-Oxicシステムによる生物學的脱リン法」，用水と廢水, Vol. 24, No. 10, 1982.
12. 深瀬哲郎：「生物的リン除去法の機構に關する基礎的檢討」，水質汚濁研究, Vol. 5, No. 6, 1982.

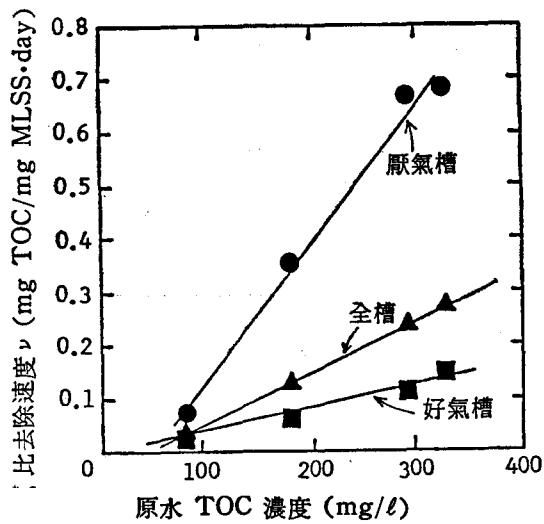


圖9 原水 TOC 濃度與比去除速度之關係

四、結論與建議

本研究以葡萄糖調製之人工合成基質，探討有機物濃度改變對厭氣、好氣法去磷效果之影響，所得之實驗結果歸納如下：

1. TOC-SS 負荷為 $0.2\text{kg TOC/kg MLSS}\cdot\text{day}$ 或 TOC 容積負荷為 $0.6\text{kg TOC/m}^3\cdot\text{day}$ 之條件下操作，可獲得80%以上之 TOC 及 O-P 去除率。

2. 若欲求得較高之 O-P 去除率或較低之處理水 O-P 濃度，厭氣槽之 TOC-SS 負荷宜為 $1.0\text{kg TOC/kg MLSS}\cdot\text{day}$ ，而 TOC/MLSS 宜為 0.1kg TOC/kg MLSS 。

3. 厭氣、好氣法可有效地去除磷，其去除之 O-P 濃度與去除之 TOC 濃度比 (即 $\Delta\text{O-P}/\Delta\text{TOC}$) 宜為 0.062，而原水中之 O-P/TOC 小於 0.064 為佳。

專營土木、水利、建築等工程

伯 獅 營 造 有 限 公 司

負責人
林 慶 威

地 址：苗栗縣竹南鎮大厝里南大路 158 號
電 話：036) 6 2 1 5 5 8