

廢水生物活性碳 處理技術應用

◎執筆 陳文卿

摘要

許多產業廢水因含有生物難分解物質，雖經二級生物處理系統，其排放COD仍高於100 mg/L，無法符合放流水標準，因此傳統上常採取活性碳吸附等方法去除污染物。本文介紹在活性碳上植入適當量經馴養之生物污泥，並藉由輸入氧氣使活性碳吸附槽能擁有與生物膜反應槽類似及功能以遂行生物分解作用。在該生物活性碳處理系統中，藉由吸附、分解、脫附、再生、再吸附等過程，可以維持活性碳表面保持有效的活性吸附空間，因此雖經長時間處理有機物，尚不致飽和。實際應用於染整、農化、造紙等廢水之處理，皆能確保放流水COD 100mg/L以下，且處理成本估算每噸水僅需約新台幣5元以下，是一值得推廣於產業界應用之高級生物處理技術。

關鍵字：生物活性碳、染整廢水、臭氧氧化、高級氧化處理

前言

生物活性碳(biological activated carbon, BAC)是一種結合活性碳吸附與生物分解功能，同時具備物化與生物處理特點的一種高級處理技術，對於國內產業廢水處理與自來水廠之水質淨化可發揮極高之效益，允為極適合當前環境需求之一種環工應用技術。

以國內目前產業廢水之處理現況而言，若依據環保署所規定之 87 年放流水標準與 82 年標準比較，可發現對許多行業，BOD 標準從 50 mg/L 降至 30 mg/L 並不困難，但考慮 COD 標準從 82 年之 200 mg/L 降至 87 年之 100 mg/L，對於大部份之行業(如染整、石化、化工、造紙等)皆是極沉重的壓力。從一個簡單的算術就可以明白，如果某一工廠放流水恰符合 82 年標準，則其放流水中 BOD/COD 之比例應為 $50/200=0.25$ ，若要改善至符合 87 年標準，BOD/COD 為 $30/100=0.30$ 。亦即若以符合 87 年標準的目標來看，努力的重點在於生物不易分解部份的 COD 去除，因此採用物化處理乃為大部份業者之主要選擇。物化處理之特性是處理效率高，且污染去除量取決於化學劑量之多寡(如化學混凝之混凝劑量、化學氧化之氧化劑強度或用量、活性碳吸附量等)，因此理論上可以達到放流水濃度極低之目標，但是相對的處理成本高。另一方面，除化學氧化可具有 COD 分解之效果外，大部份之物化處理僅具有將污染物自液相轉移至固相之「相轉換」功能，往往衍生污泥或其他固體廢棄物之後續處理問題。為解決此種困難，可採取雙管齊下的策略，其一是由污染物著手，將廢水中的難分解物質，利用化學部份氧化的

手段轉變成生物易分解成分，亦即提高廢水之 BOD/COD 比值，使其更有利於生物分解；其二是由微生物著手，藉由馴養、增殖及固定化之手段，於反應槽中馴育且維持大量具分解特殊污染物能力之微生物，以加速有機物之分解。

技術特點與原理

BAC 廢水高級處理技術是在傳統的一級或二級生物處理單元之後增加一 BAC 處理單元，並以人工方式將污泥植種於反應槽中，污泥經馴養後會附著在活性碳顆粒上形成生物膜，此生物可進一步將廢水中及吸附於活性碳顆粒中之殘留污染物質加以生物分解。因此 BAC 廢水高級處理技術不僅具有活性碳單元的吸附功能，更因所植種的微生物能分解去除所吸附的污染質，而延長活性碳的使用壽命。

BAC 原理主要是利用活性碳吸附作用，將有機物吸附於活性碳上之後，再利用已於活性碳上生成之生物膜將有機物分解，達到生物再生之目的。如果生物再生去除量大於或等於活性碳之吸附量，則活性碳除需補充磨損量外，可無需取出再生而一直使用，惟當廢水有機物負荷增加時，BAC 主要去除有機物之機制是活性碳吸附作用，此時活性碳上有有機物之淨吸附量大於生物再生之淨去除量，因此活性碳上可用之吸附孔隙會逐漸減少；當廢水有機物負荷較低時，活性碳上有有機物之淨吸附量小於生物再生之淨去除量，因此可增加活性碳上可用之吸附孔隙；故短暫之突增負荷，對 BAC 系統處理水質應無影響，而最佳之操作狀況則為，達到生物再生去除量大於或等於活性碳之吸附量。BAC 相較於

傳統之粒狀活性碳(GAC)具有以下之優點：

1. 除有高效率之化學吸附作用外，並兼具經濟性的生物分解能力。
2. 吸附於活性碳之有機污染物，被同時附著於活性碳上之微生物分解後，活性碳將可再騰出餘裕之吸附空間，以吸附更多之COD。故整體而言可延長活性碳使用期限，大幅降低更換或之再生之期限，約可達5~10倍(依處理對象濃度而定)，因此除可簡化操作程序，減少活性碳之添加外，降低活性碳廢棄量，減少後續處理之困擾。
3. 活性碳表面可形成生物膜，具有兩種功能：
 - (1) 微生物附著生長，可以維持較高濃度之微生物量，故可提高生物處理系統之有機負荷率。
 - (2) 對於廢水中之難分解有機物，可藉由馴養程序，馴育具分解功能之特殊微生物，並可附著於活性碳上而不致沖刷流出(wash out)，因此BAC可擁有對於難分解有機物之生物分解能力。
4. 搭配臭氧預氧化處理系統將水中生物難分解性成份轉換成生物可分解性，提高處理效果。
5. 產生之污泥可自行分解，不致產生大量污泥。
6. 對於如有機負荷等環境因子之變動，具生物緩衝之機能，維持放流水質之穩定性。

BAC之應用範圍極為廣泛，包括石化、染整、造紙、農藥、垃圾滲出水中等有機廢水之處理中，可發揮其對於難分解有機成份所擁有的優異分解能力，

除可分解COD外，對於氨氮之去除亦具有特殊之功能。除此之外，較常被應用的例子是在淨水處理，一般淨水廠常使用GAC吸附處理有機物，但約僅2~3個月左右活性碳即吸附飽合，故必須更換或再生；然而BAC將可能延長活性碳使用壽命約長達18個月以上，此在歐洲以及日本等國皆有很好的實例^[1-4]。

BAC之所以被視為高級處理技術乃因其對於難處理有機物之特殊分解能力，因此常結合臭氧預氧化單元將難分解有機物經部份氧化分解改變官能基，或如雙鍵氧化皆可能使有機化合物轉變為生物易分解成份，因此完整之生物活性碳處理程序乃如圖1所示。

臭氧氧化配合活性碳處理有下列好處：

- (1) 大幅提高有機碳去除率(最高可達十倍以上)。
- (2) 臭氧氧化搭配活性碳可較單獨使用臭氧或單獨使用活性碳更減少臭氧量及活性碳量。
- (3) 活性碳塔除可分解有機物外可同時將氨氮氧化，對水質受氨氮污染的

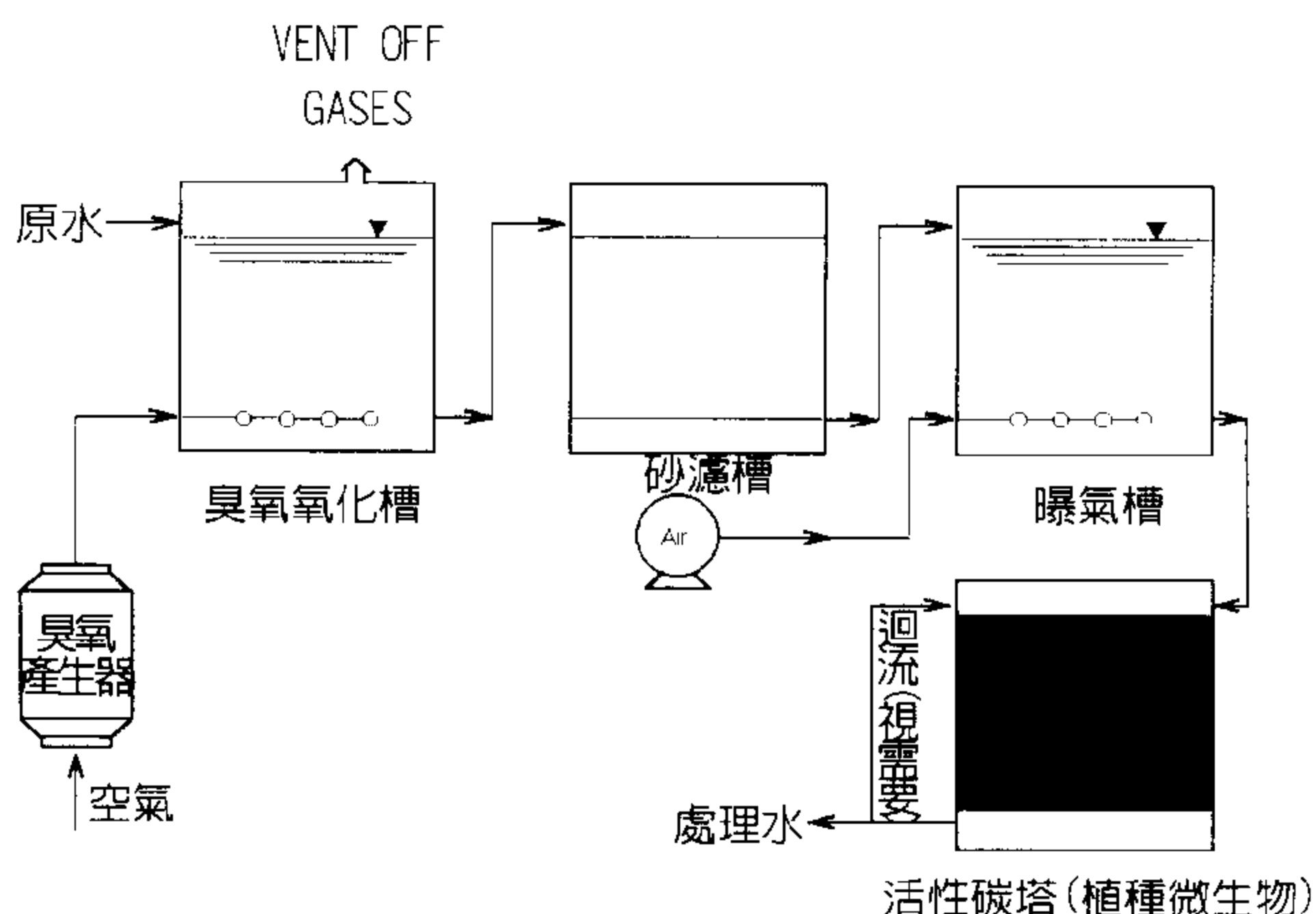


圖1 生物活性碳系統

原水，目前淨水廠所採用的處理程序對其去除極為有限，一般而言，GAC 對氮氮的吸附能力極低，故欲僅藉由活性碳去除氮氮並不可行，唯有採用 BAC 的方式，在 GAC 上馴育並植入硝化菌，將可使水中之氨態氮氧化成硝酸態化合物。

表 1 中比較結合臭氧預氧化之生物活性碳(BAC)與 GAC 在淨水處理之成本估算^{[5][6]}。

微生物在活性碳表面形成生物膜，

表 1 BAC 與 GAC 應用於淨水處理之成本比較

項 目	GAC 處理 (無臭氧單元)	BAC 處理 (臭氧加生物活性碳)
處理水量 (CMD)	50	50
空床接觸時間 (min)	18	18
活性碳使用壽命	2.4 個月	3 年
處理成本 (元/m ³)*	1.6	1.8
備 註	約 2.4 個月後 活性碳需再生處理	約 3 年後 活性碳需再生處理

【註】*：處理成本包括硬體、整體的操作與維護 (BAC 處理含臭氧處理) 及活性碳再生等費用。

而可對於有機物進行生物分解功能之機制如圖 2 所示。

- (1) 有機物吸附於活性碳表面，增加有機物於反應槽之停留時間。
- (2) 微生物附著於活性碳上，並形成生物膜，對於同時附著在其上之有機物可進行生物分解作用，分解後之代謝產物乃自活性碳上脫附，除部份轉化為氣相產物外，部份溶入液相中可被系統中懸浮生長之微生物分解。
- (3) 有機物被分解並自活性碳上脫附後，可騰出活性吸附空間 (active site) 再行吸附水中之有機物，故活性碳循環使用。
- (4) 水中之難分解有機成份被活性碳吸附乃為自水相中被移除之第一步驟，此外另可賴特殊微生物之馴養以進行分解。因大部份易分解有機物被吸附後可分解脫附，故慢慢的活性碳上的活性吸附空間乃以吸附難分解有機物為主。

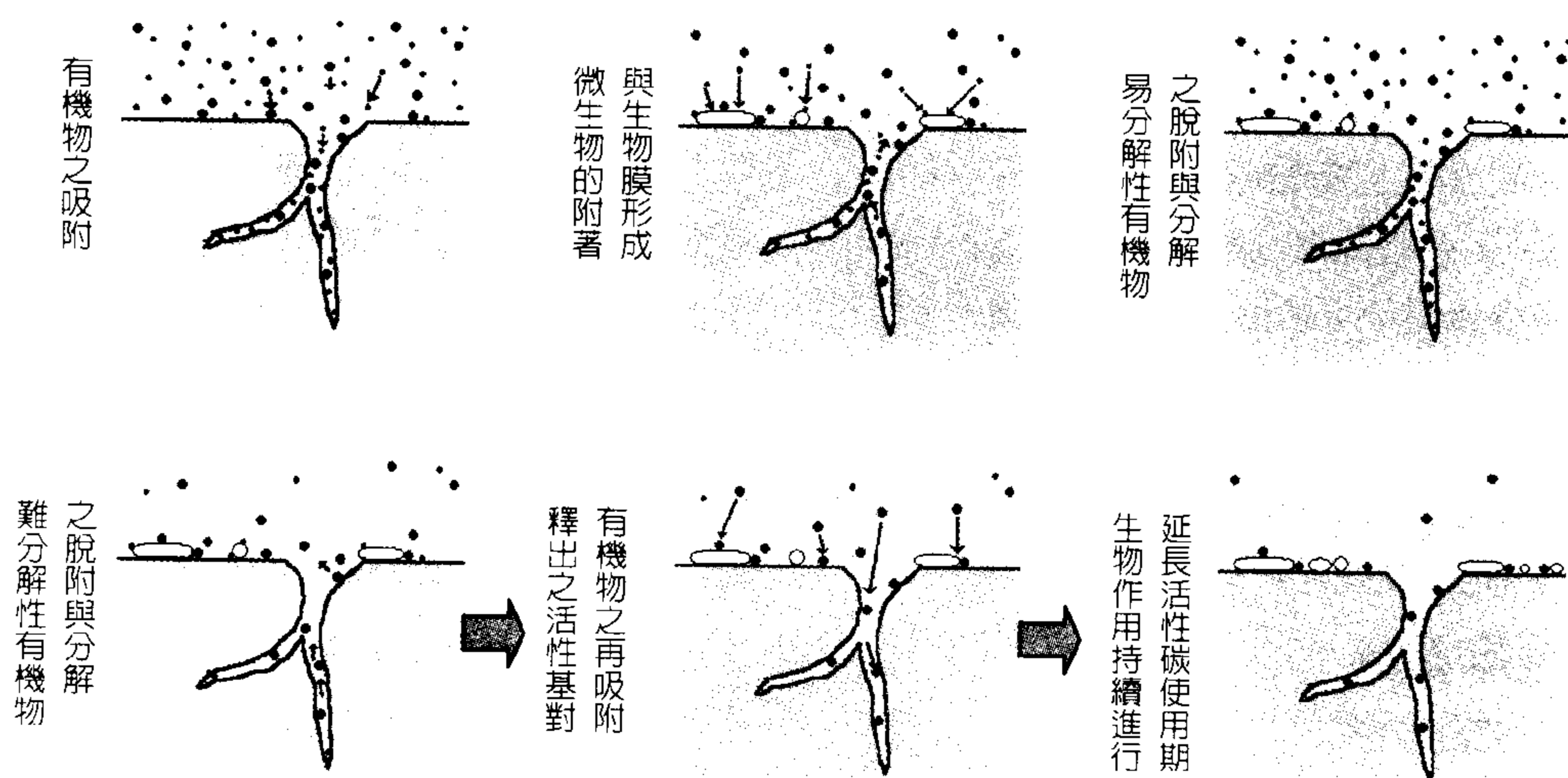


圖 2 生物活性碳對於有機物之分解機制示意圖

生物活性碳技術應用

BAC 之技術應用包括兩部份重點，工程設計實務需考慮之事項為：反應槽體設計、供氣量、供氣槽設計、迴流循環比等。在操作控制技術方面對於活性碳選擇、活性碳填充率、活性碳吸附特性測定及反應槽微生物篩選、植種與培養、生物膜控制等皆應深入研究。如果必須結合臭氧預氧化則臭氧量控制條件亦須注意。

對於特定廢水之處理，選擇適當之活性碳是很重要的，須考慮活性碳之比表面積、孔隙大小分布、粒徑大小、硬度、表面官能基與極性等。一般可對各種設定去除廢水作等溫吸附實驗，並作出吸附曲線，進而可瞭解每克活性碳對於有機物之飽和吸附量，據以選擇作為植種並處理用之 BAC 系統。BAC 與一般活性碳之最大差異是生物膜，控制適當量之生物膜系統得以發揮良好生物分解功能之關鍵。生物活性可以如傳統活性污泥系統觀察比攝氧率 (SOUR) 而得知，至於生物膜厚度則為生物量之直接指標，生物量之測定可以藉分析細胞中之蛋白質量而推估。可取附著生物膜之活性碳擔體，以濃硫酸在高溫 (360~400 °C) 下進行消化蒸餾測定氮含量，由有機含氮量可推估生物膜細胞量^[7] (有機含氮量以 9.3% 推估，即 $\text{mg-N}/\text{mg-VSS}=0.093$)。在穩定狀態下，活性碳上之細胞量約為 6~10 $\text{mg-VSS}/\text{g-GAC}$ ^[8]。

應用實例

1. 染整廢水處理

染整業由於製程中添加大量漿料、界面活性劑、助劑及人工合成的有機性染料，這些物質是形成廢水中有機污染

物與真色色度的主要來源，且此類污染物質較難為生物所分解或具生物毒性，會長時間殘留在水體中，對環境水體造成嚴重的環境負荷。

由於染整廢水具有溫度高、BOD/COD 比值偏低、廢水量與水質隨製程改變而不穩定等特性，傳統之染整廢水處理最普遍併用生物活性污泥法與化學混凝法，經生物活性污泥法處理後之二級出流水 BOD/COD 比值經常可降至 0.1 以下，但色度去除率僅達 10~20 %^[9]；化學混凝法則對溶解性反應性染料去除效果不佳^[10]，且有大量化學污泥的產生；所以國內目前染整業所面臨的最大問題為如何去除廢水中所殘留的有機物與色度，以符合 87 年的環保標準。

目前，較普遍採用於染整廢水之高級處理程序多以活性碳吸附法或化學氧化法為主，但該等方式常因操作成本高及產生大量的廢棄活性碳與化學污泥，且脫色技術也隨染料的特異而有所不同，導致處理技術需求提高，操作過程無法有效調控加藥量，因此經濟效益不高。工研院能資曾以 BAC 技術應用在染整廢水之實廠可獲致良好成效，本案例中之設計處理水量為 2000 CMD，反應器型式採揚昇式流體化床，6 槽並聯操作，水力停留時間 3.5 小時。活性碳為以無煙煤製造者，添加比例 4 %，並裝設自動反洗砂濾設備。處理流程如圖 3 所示，實廠測試結果如表 2 及圖 4 所示。由表 2 中可發現歷經長達一年以上之現場測試，除極少數幾天由於進流濃度突增至超過 COD 250 mg/L ，而導致放流 COD 偏高外，餘皆可保持符合放流水標準之於 100 mg/L 以下，證實係極穩定之處理技術。

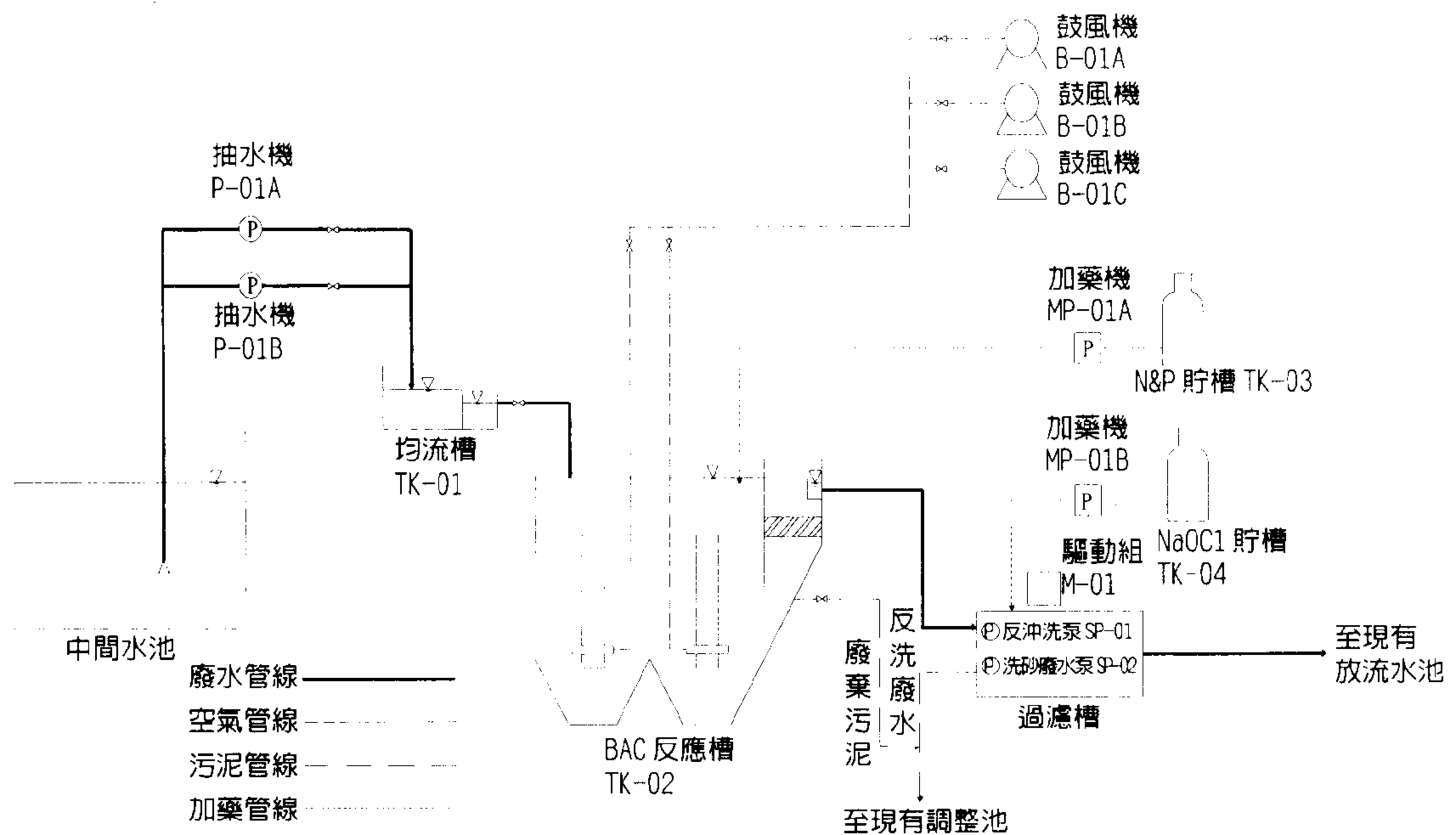


圖 3 BAC 系統處理染整廢水流程

表 2 染整廢水實廠處理結果

	處理前水質 (經化學混凝後)	處理目標(以符合 87 年 放流水標準為目標)	實際處理結果 (經 400 天以上測試)
pH	8-10	6-9	6.5-9
COD	150-250 mg/L	<100 mg/L	<80 mg/L
BOD	30-50 mg/L	<30 mg/L	<20 mg/L
S.S	20-50 mg/L	<30 mg/L	<10 mg/L
真色色度	100-500 unit	<400 unit	<200 unit
備 註		活性炭預計使用期限:90 天	活性炭實際使用時間:超過一年

<經濟效益>

國內對染整廢水處理以往係視為高難度之課題，面臨 87 年排放水標準壓力，曾有許多機構相繼開發相關處理經驗，然因成本皆偏高以致難為業者所接受。本案例中，對於 2000 CMD 之 BAC 實廠，整理其實際運轉資料之經濟評估如下：

- (1) BAC 處理廠初設成本:5,000~10,000 元 /CMD
- (2) BAC 每日實際操作費用計算
 - 活性炭補充費用：857 元 / 天
 - 動力機械消耗費用：1000 元 / 天
 - 生物營養劑添加費用：205 元 / 天
 - 自動反洗砂濾設備消毒費用：129 元 / 天

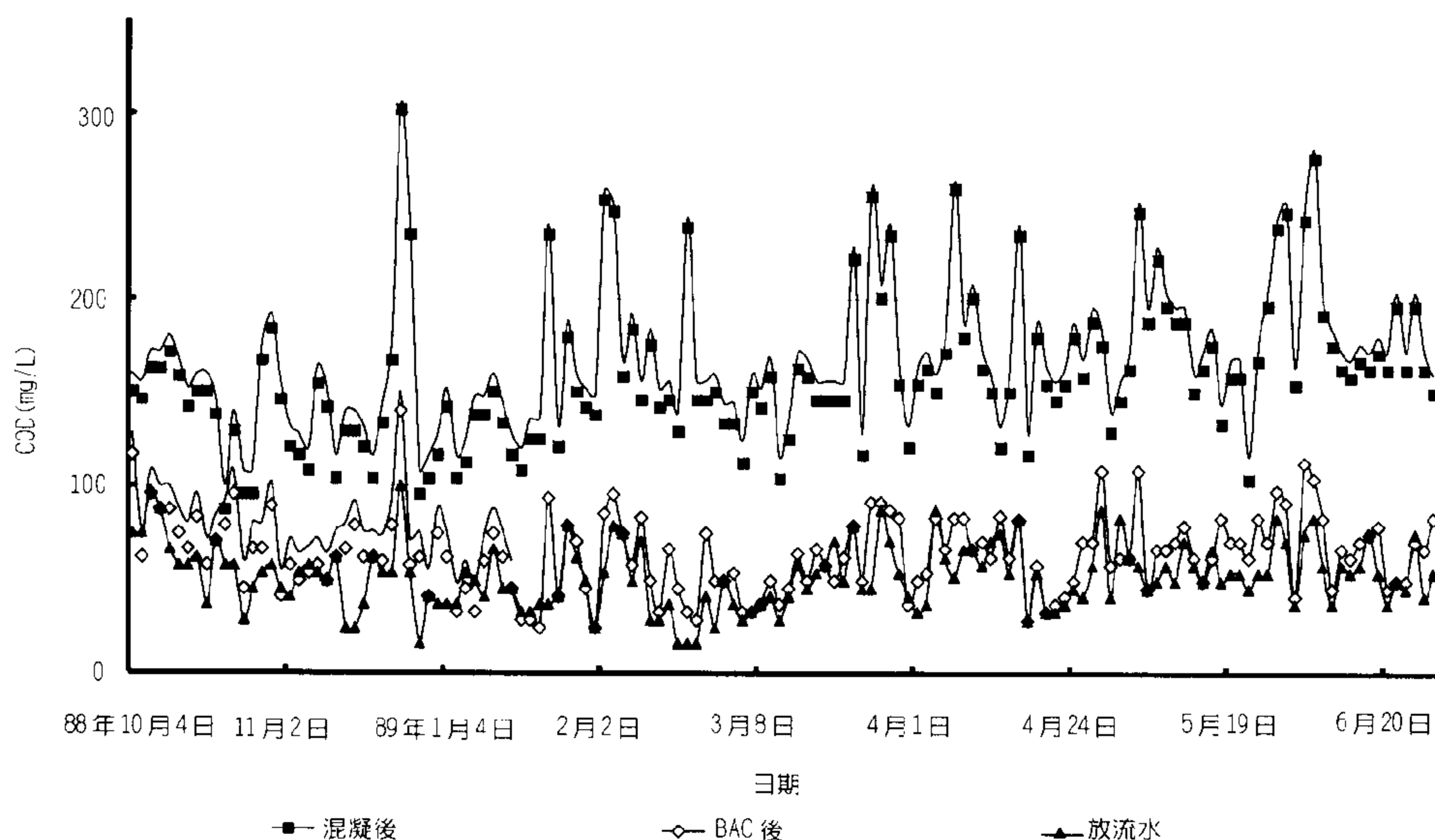


圖 4 染整廠廢水處理長期測試結果

表 3 生物活性碳與其他處理程序應用在染整廢水之處理成本比較

項目	生物活性碳 (BAC)	活性碳吸附 (GAC)	化學混凝	Fenton 氧化
特點	兼具生物分解及吸附有機物	吸附有機物	混凝有機物	氧化有機物
COD 去除率 (%)	40-85	20-75	20-50	65-85
技術差異性	活性碳更換頻率低	活性碳更換頻率高	需添加化學藥劑	需添加化學藥劑及調整 pH
後續處理需求	簡易砂濾處理	需再生活性碳	需處理污泥	需處理污泥
設備成本 (萬元/噸)	0.5-1	0.9-1.5	0.3-0.5	0.3-0.5
操作成本 (元/噸)	1.5-5	12-40	3-15	10-25

資料來源:工研院能資所研究整理

增加之操作成本：2191 元 / 天
 $(1000+205+857+129)$ 元 / 天 / 2000CMD
 $\div 1.1$ 元 / CMD

表 3 乃彙整目前曾公開之數種處理技術及其處理成本，由本案例之分析可瞭解生物活性碳具高度之經濟競爭優勢。

2. 農藥與染整助劑混合廢水

本案例亦為實廠成果報告，日處理

量 35 噸，平均進流 COD 為 185~260 mg/L。採膨化床 BAC 反應槽，填充率為 40%，設計水力停留時間為 3 小時；迴流比為 20：1。歷經 200 天以上之測試如圖 5 所示，平均放流 COD 為 80 mg/L，且運轉超過 250 天無須更換活性碳。

3. 造紙廠廢水

本案例為日處理量 50 噸規模之造紙廢水模廠測試資料，進流 COD 為

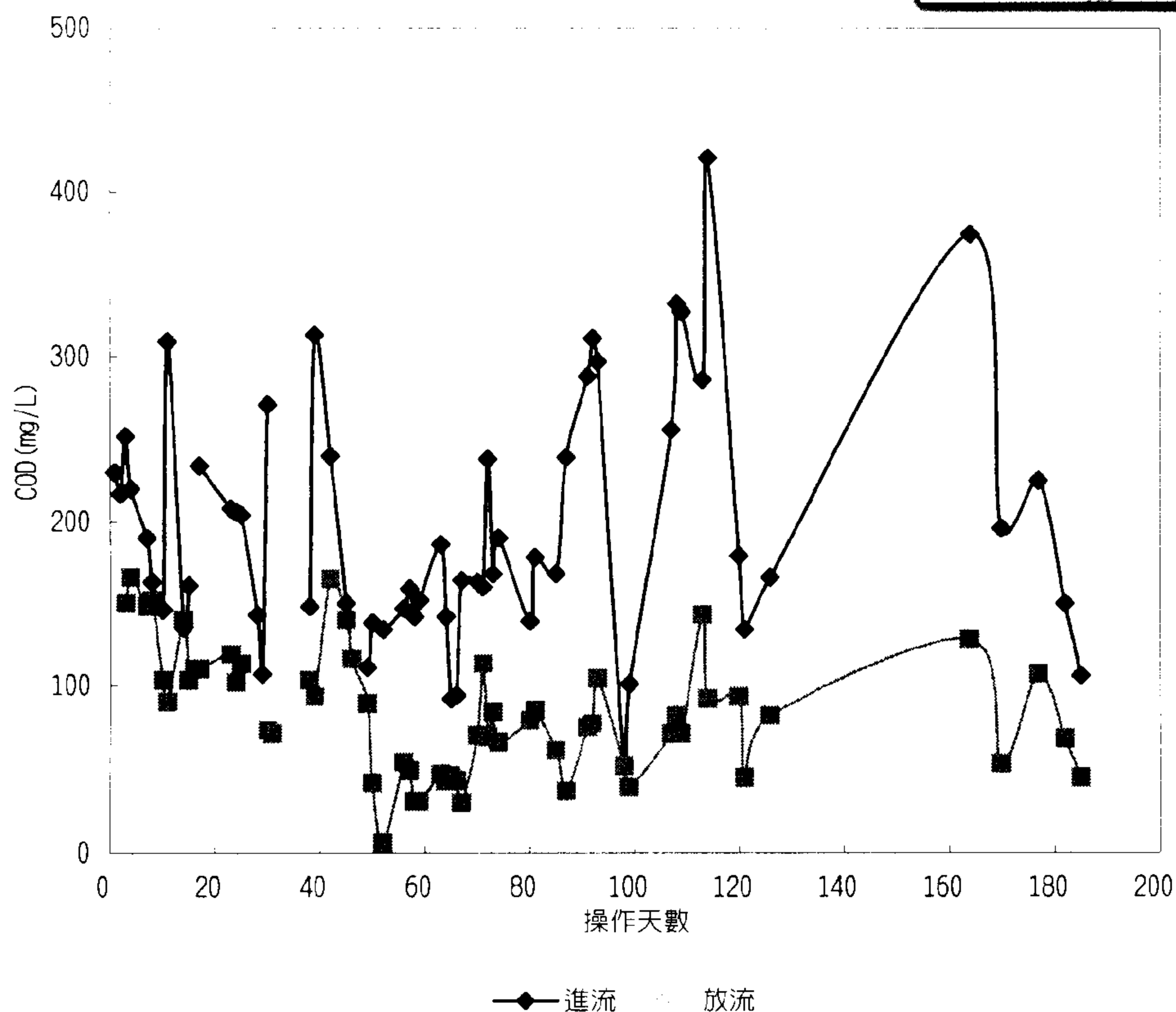


圖 5 農藥與染整助劑混合廢水長期運轉測試結果

125~185 mg/L。採膨化床反應槽，活性碳填充率為 40%，設計水力停留時間為 2 小時，迴流比為 20:1。歷經一年之運轉處理成果如圖 6 所示，平均放流水 COD 皆可低於 100 mg/L，且運轉超過一年無須更換活性碳。

結語

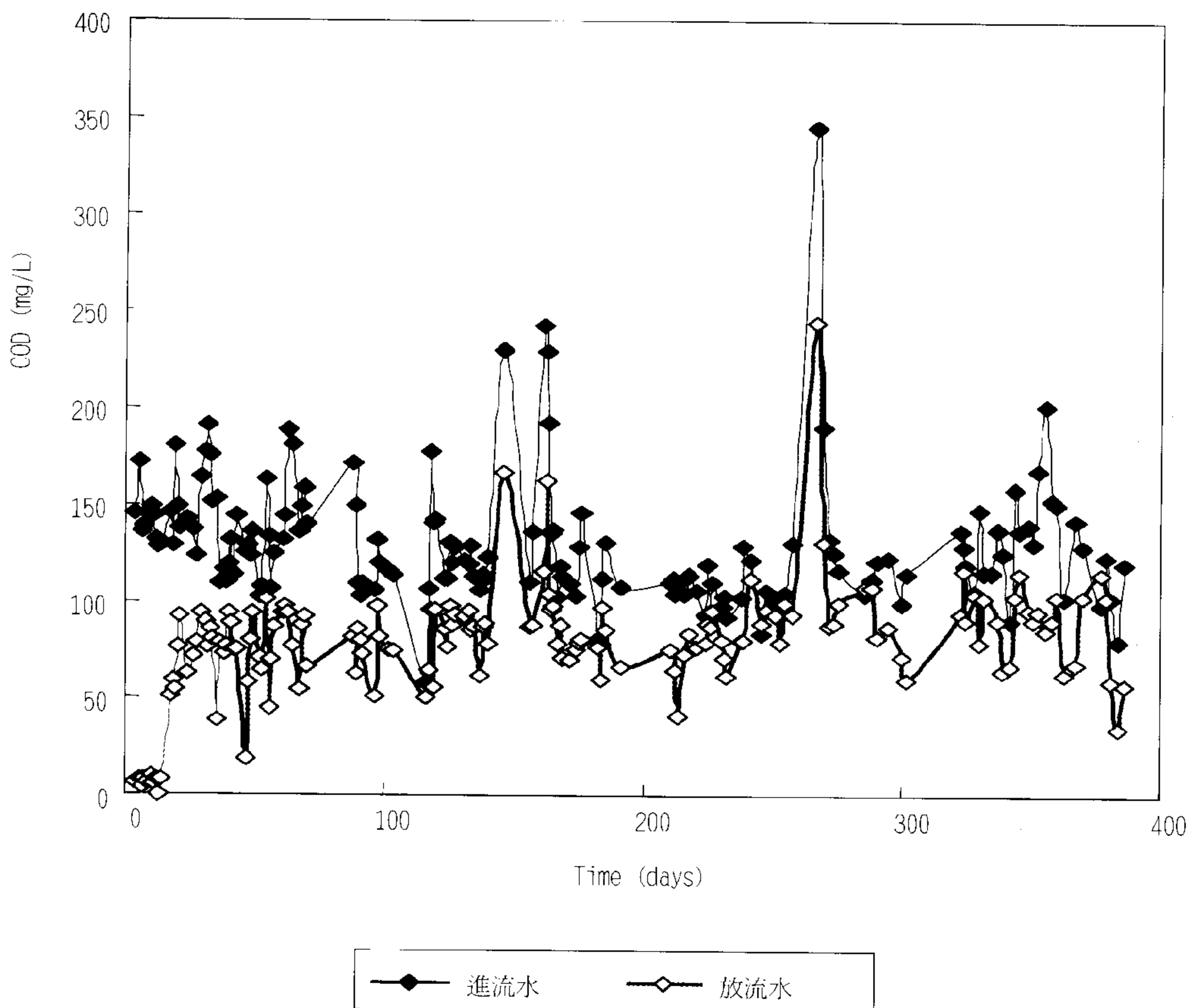
日前國內的廢水處理技術發展誠屬極為成熟，為了環境品質提昇之目標，環保放流水標準乃逐步提高，許多業者乃不得不增設高級處理系統，且均偏重於採取物化處理設施。但卻常因高級處理系統耗費太高之電費與藥劑等耗材費用，因此缺乏主動意願維持經常性的操

作，對於水質之改善有限，另一方面污泥的處置更是常構成極大的困擾。BAC 技術操作簡單，且可配合現有之活性碳吸附系統作局部改良而能充份發揮高級處理之功能，除對於本文中所敘述之染整、造紙、農化等廢水處理可獲致良好之成效外，亦可應用於如垃圾滲出水、化纖廠廢水等之處理，此確是經實驗、模廠、實廠等三階段之完整驗證，並確認兼顧處理成效與成本效益之技術，將可視為廢水高級處理之主流技術之一。

6

參考文獻

1. Perrootti, A. E., and Rodman, C. A. (1974) "Factors involves



BAC 反應槽進出流水 COD 濃度及去除率變化圖

圖6 造紙廢水處理長期運轉測試結果

- with Biological Regeneration of GAC", AIChE Symp. Ser., 144, 316-325.
2. McCreary, J.J. & V.L. Snoeyink, (1977) "Granular Activated Carbon in Water Treatment", J. Am. Water Works Assoc. 69(8):437-444.
 3. 海賀信好、石川勝廣、西島衛、鈴木靜夫、眞柄泰基 (1991), 「藉由臭氧及生物活性炭高度淨水處理現場實驗」水道協會雜誌, 第60卷第6號, PP.2-7
 4. 日本水道協會 1988, 「高度淨水處理施設技術資料(活性炭處理施設)」
 5. Clark, R.M. & R.G. Stevie, (1978). Meeting the Drinking Water Standards: The Price of Regulation". Presented at the National Conf. on Drinking Water Policy Problems, Resources For The Future, Washington, D. C., March 6-8, 1978.
 6. Miller, G.W., (1978). "Capital & Operating Costs of Ozonation Systems", Presented at Seminar on Drinking Water, Intl. Bank for Reconstruction &

Development, Washington, D.C., Jan.
11, 1978.

7. 鄭幸雄，陳文欽，張希聖(1994)
「固定生物膜之生物質量測定法之建
立」，第十九屆廢水處理技術研討
會論文集，591~539
8. 林奇剛，曾淑鳳，劉俊清，陳文
卿，鄭幸雄(1997)膨化床生物活性
碳高級處理技術於造紙廢水之應用
研究，第二十二屆廢水處理技術研
討會論文集，461~468
9. Venceslau M. C., Tom S. and Simon
J. J., (1994) "Characterization
of Textile Wastewater - A
Review", Environ. Tech., 15,
917-929.
10. Vendevivere P.C., Bianchi R.
and Verstraete W., (1998)
"Treatment and Reuse of Waste-
water from the Textile Wet-Pro-
cessing Industry: Review of
Emerging Technologies.", J.
Chem. Technol. Biotechnol., 72,
289-302.

◎陳文卿—工業技術研究院環境與安全衛生
技術發展中心

2001年7月創刊號

敬請期待

王繼國 主編

2001

8月專輯

國體廢棄物