

原水中硝酸氮以 BioNET 處理之模廠研究

鄒文源*、張王冠*、洪仁陽*、吳漢松**、劉有清***

摘要

近年來，地下水由於受到工業廢水及農牧污水的影響，水中硝酸鹽有逐年增加的趨勢，如何利用生物脫氮法來降低自來水處理之費用，為當前生物處理技術開發之重點。本研究利用 0.5m³ BioNET 脫氮槽與 0.3m³ BioNET 除碳槽串聯之模型廠，對自來水公司大林第二淨水廠之地下原水，進行去除硝酸氮鹽之試驗，結果顯示：

1. 進流水 NO₃-N 平均濃度在 15.71mg/L 時，BioNET 脫氮槽之 HRT 為 50 分，進流/迴流比為 1：1，除碳槽之 HRT 為 30 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 2：1，處理水之 NO₃-N+NO₂-N 之濃度可下降至 8.47mg/L，NO₃-N 去除率為 47%。
2. 進流水 NO₃-N 平均濃度在 12.04mg/L，脫氮槽之 HRT 為 25 分，進流/迴流比為 1：1，除碳槽之 HRT 為 15 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 2.7：1，處理水之 NO₃-N+NO₂-N 之濃度平均可下降至 6.41mg/L，NO₃-N 去除率平均仍為 47%。顯示脫氮槽雖然縮短 HRT，NO₃-N 的體積負荷提高，但硝酸氮的去除率不受影響。
3. 進流水 NO₃-N 平均濃度在 11.89mg/L，脫氮槽之 HRT 為 25 分，脫氮槽不迴流，除碳槽之 HRT 為 15 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 3.3：1，處理水之 NO₃-N 之濃度平均可下降至 4.03mg/L，NO₃-N 去除率可達 67%，顯示提高 C/N 比，脫氮槽不迴流不會降低去除率，反而可避免溶氧增加而提高去除率。

綜合實驗結果，BioNET 處理技術同時具有操作簡單及操作彈性大之優點，反應槽水力停留時間短，可節省建造所需土地面積及反應槽體積，應用於自來水淨水廠之原水前處理，對硝酸氮去除具有良好之處理效果。因此為避免 NO₃-N 大於 10mg/L 可能影響人體健康，在現有的自來水處理流程前，增添此一操作簡單又經濟的處理單元，以去除硝酸氮，應是直接可行方式。

關鍵詞：自來水原水、硝酸鹽、生物脫氮、BioNET

工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心* 研究員 ** 副研究員 *** 助理研究員

一、前言

台灣由於地狹人稠，而且工業及農業發達，使得大多數地區的飲用水水源，或多或少都受到污染。西元1940年，人們發現水中含有多量硝酸鹽時會使嬰兒產生變性血色蛋白血症(methemoglobinemia)的疾病，愛我華(Iowa)、明尼蘇達(Minnesota)及俄亥俄(Ohio)等諸州問題最嚴重，研究也最廣範澈底，研究結果顯示硝酸鹽的量必需受限制，西元1962年，美國公共健康協會(U.S.Public Health Service)建議給水中硝酸鹽的量(以氮來表示)不得超過10mg/L(吳宗榮，1982)。因此，如何去除硝酸鹽污染物，就成了淨水技術研發的重要課題。目前研發的技術，包括膜分離(李丁來，1996；游惠宋等1998)、離子交換(張王冠等，1997)、化學氧化還原等物化處理技術及以硝化脫氮為主的生物處理技術，但整體而言仍以生物處理最為可行(邱創汎等，1997；洪仁陽等，1997)。

含氮污染物的生物處理包括生物分解、硝化、脫氮等三種不同類型的反應，當原水中的污染物為有機氮時(例如動物排泄之蛋白質、氨基酸等)，這些污染物必須先經由異營性微生物分解成無機氮(如氨氮、硝酸氮)，再經硝化菌將氨氮氧化成硝酸氮，最後再由脫氮菌將硝酸氮還原成氮氣，達到水質淨化的目的。這三種反應，分別由不同的微生物，在不同的環境下進行，所以在技術上必須同時考慮微生物的生長控制及反應器設計，才能達到經濟有效的效果。

脫氮微生物可以依照微生物碳元素的來源加以區分成異營性脫氮菌及自營性脫氮菌兩大類，前者是指必須由有機物取得合成菌體所須要碳源的微生物群，後者是指可以由二氧化碳或碳酸根合成菌體的微生物。利用異營性脫氮菌脫氮，必須加入碳源作為微生物的氧化對象，乙醇沒有毒性，不容易受到黴菌污染，是原水脫氮最佳的碳源。若以乙醇為例，脫氮反應的化學平衡可以寫成：



也就是每去除1kg硝酸氮需要1.37kg乙醇，其他常用的碳源還有醋酸、甲醇等。

BioNET 處理技術，是利用反應槽添充高分子擔體刻意培養特殊微生物，以提高處理槽之功能，以利去除自來水原水中之硝酸氮，降低自來水處理之操作成本，其原理為利用擔體作為微生物附著生長之擔體，於適當之環境條件下，微生物於擔體之表面增殖，形成生物膜，藉由大量微生物生物膜之作用，分解水中之污染成份，可達到淨化水質之目的。由於 BioNET 反應槽採用之接觸濾材高分子擔體具有極大之比表面積(m^2/m^3)，可提供大量之表面積作為微生物增殖之環境，因此，對於水質之淨化，具有相當大之處理潛力；而另一方面，由於原水水質之懸浮固體物濃度不高，因此採用 BioNET 反應槽淨化法，處理效率可提高。BioNET 反應槽所具有之技術特點如下：

- a. 提高懸浮固體物之攔截，又由於擔體屬於開放性孔洞，有助於水流流況之穩定。
- b. 多孔性擔體提供廣大表面積以供微生物附著，可累積大量生物膜微生物，有助於達到去除各種污染物之目的。同時反應槽具有高負荷、高效率、高穩定性的優點。
- c. 生長於多孔性擔體之生物膜型態，有助於特定族群微生物之馴養。
- d. 採用固定床/膨脹床方式操作，具有操作簡易之特點。
- e. 對於有機污染物之處理，多孔性擔體之成本與浸水濾床材質相近，但其處理功能為浸水濾床之二倍。

由目前相關研究結果可知，採用 BioNET 反應槽淨化技術，對於受污染原水之淨化、提昇自來水之品質，去除硝酸氮等具有良好之處理效果。

二、研究方法

本研究採用多孔性高分子擔體之生物浮動床技術，配合自來水公司之需求，在大林第二淨水廠進行原水脫氮處理試驗，現場以 $0.5m^3$ 級 BioNET 脫氮槽與 $0.3m^3$ 級 BioNET 除碳槽串聯之模型廠，進行處理試驗，其目的在求取放大設計參數及建立 BioNET 處理槽之應用技術。

2.1. 實驗設備

0.5m³級 BioNET 脫氮槽與 0.3 m³級 BioNET 除碳槽串聯之模型廠處理流程示意如圖 2.1 所示。使用之設備包括：進流泵、迴流泵、流量計、BioNET 脫氮槽、BioNET 除碳槽、磷酸桶、乙醇桶、空壓機等。

2.1.1 BioNET 脫氮反應槽

BioNET 脫氮反應槽為圓柱體，槽體直徑 55cm、高 245cm，有效體積為 0.5m³，反應槽為不銹鋼 SUS304 材質製，底部設有曝氣盤。

2.1.2 BioNET 除碳反應槽

BioNET 除碳反應槽為圓柱體，外觀直徑 45cm、高 195cm，有效體積為 0.26m³，反應槽為不銹鋼 SUS304 材質製，底部設有曝氣盤。

2.1.3 高分子擔體

反應槽中填充之高分子擔體主成份為二異氰酸甲苯與聚丙二醇聚合物，擔體呈扇形狀，如圖 2.2 所示，每顆擔體直徑為 2.2cm、厚度為 2cm，體積為 4.5cm³，脫氮反應槽填充擔體量為槽體之 83%，除碳反應槽填充擔體量為槽體之 76%，孔隙率為 70%。

2.2 實驗操作與控制

處理試驗將依處理水質狀況，調整進流量及碳源比例，以掌握反應槽之脫氮效率。模廠試驗引水廠進水口之原水，流入一緩衝槽，再用泵浦抽送至 BioNET 脫氮反應槽，脫氮出流水靠重力流入除碳槽，經曝氣處理後，先流入放流水槽後再排放。模廠試驗初期先控制進水量為 10L/min，脫氮反應槽起動時外加食品工廠活性污泥 40L 植種微生物，控制進流/迴流比為 1:1，大約經過 15 天連續馴養後，擔體因附著生長微生物，重量增加後會下降而形成浮動床，第三試程則停止迴流；除碳反應槽採全面曝氣，初期曝氣量為 0.8Nm³/min，反應槽未進行迴流，第三試程提高曝氣量為 1.7Nm³/min。

模型廠試驗進行中，脫氮槽主要之控制參數為水力停留時間及乙醇添加量，除碳槽

則控制曝氣量，試驗過程中將連續採取原水、脫氮槽及除碳槽之水樣進行分析，以評估模型廠之處理性能與穩定性，以確實掌握原水脫氮處理之可行性。模型廠試驗採樣分析之項目包括有機物質(TOC、TCOD、SCOD、SS)、營養鹽物質(TKN、氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮等)與濁度，分析方法如表 2.1 所示。

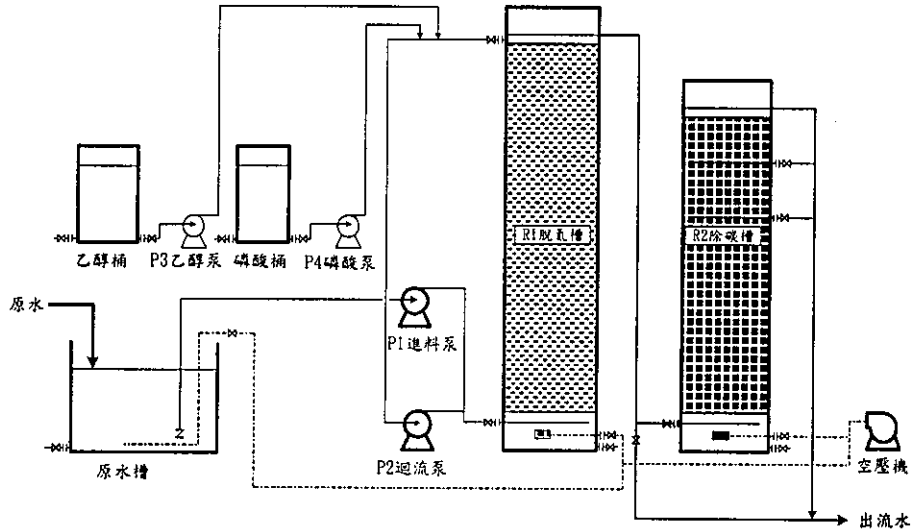


圖 2.1 BioNET 模型廠流程示意圖

表 2.1 水質分析方法

項目	方法
PH	SUNTEX pH meter SP-2200
TOC	TEKMAR-Dohrmann Phoenix 8000
TCOD	混合均勻水樣, Standard Methods 508.B Closed Reflux, Titrimetric Method
SCOD	0.45 μm 過濾水樣, 同上
SS	行政院環境保護署, 方法 210.1
濁度	HACH/U.S.A. Model 2100P
TKN	CNS K9017, 廢水污水總凱氏氮檢驗法
TP	行政院環境保護署, 方法 427.1
氨氮	DIONEX /U.S.A. DX-100 Ion Chromatograph
硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮	同上

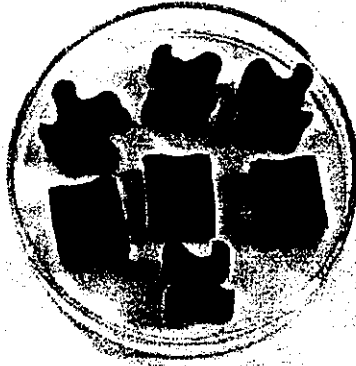


圖 2.3 BioNET 反應槽使用的高分子擔體

三. 結果與討論

大林第二淨水廠 BioNET 脫氮處理試驗，對原水水質調查與模廠試驗結果分別討論，模廠脫氮試驗共進行 3 個試程，第一試程 89.5.11~89.8.19 控制脫氮槽水力停留時間(HRT)為 50 分，並控制迴流水與進流水比為 1:1，控制除碳槽 HRT 為 30 分。第二試程 89.8.20~89.10.8 控制脫氮槽 HRT 為 25 分，同時控制迴流水與進流水比為 1:1；控制除碳槽 HRT 為 15 分。第三試程 89.10.10~89.12.15 控制脫氮槽 HRT 為 25 分，但不迴流，除碳槽 HRT 控制為 15 分。

3.1 原水水質調查

大林第二淨水廠原水水質自 89.5.11 至 89.12.15 採樣分析結果整理成表 3.1，由表中可知：原水 pH 平均值為 7.12。TOC 最高為 2.76mg/L、最低 0.36mg/L，平均為 0.94mg/L。TCOD 最高為 29.70mg/L，最低為 0.45mg/L，平均為 10.66mg/L；SCOD 平均為 6.34mg/L，SCOD 濃度 < 5mg/L 佔最多為 58%，其次是 5~10mg/L 的佔 29%。

原水 SS 最高達 17.5mg/L，最低為 2.5mg/L 平均為 4.92mg/L。濁度最高是 13.4NTU，最低為 0.32NTU，平均為 4.37NTU。濁度在 < 3NTU 的佔最多為 47%，3~6NTU 的佔 25%，濁度在 6NTU 以下的原水共佔 72%。

原水TKN最高達2.87mg/L，最低為0mg/L，平均為0.55mg/L。氨氮最高為0.38mg/L，最低為0mg/L，平均為0.03mg/L。大部份原水不含氨氮。硝酸氮最高為19.90mg/L，最低為10.06mg/L，平均為13.77mg/L。原水亞硝酸氮最小值為0mg/L，最大值為0.25 mg/L，平均為0.003 mg/L，因此99%的原水不含亞硝酸氮。原水總磷平均為0.04mg/L，大部份的原水沒有磷的污染。

表3.1 大林第二淨水廠原水水質分析結果

項目	最小值	最大值	平均值
pH	6.32	7.94	7.12
TOC (mg/L)	0.36	1.65	0.71
TCOD (mg/L)	0.45	29.70	10.66
SCOD (mg/L)	0.25	18.60	6.34
SS (mg/L)	2.50	17.50	4.92
濁度 (NTU)	0.32	13.40	4.37
TKN (mg/L)	0.00	2.87	0.55
氨氮(mg/L)	0.00	0.38	0.03
硝酸氮(mg/L)	10.06	19.90	13.77
亞硝酸氮(mg/L)	0.00	0.25	0.003
總磷(mg/L)	0.00	0.68	0.04

※表中0為低於偵測極限值。

綜合以上之原水水質分析結果可知，大林第二淨水廠原水含有較高硝酸氮成分，濃度介於10mg/L至20mg/L之間，其他TKN、氨氮、總磷及有機物如TOC、TCOD、SCOD等，則大致符合飲用水水源水質標準。為使原水達到飲用水水源水質標準，避免硝酸氮可能影響人體健康，原水應採適當的脫氮前處理。

3.2 模廠試驗試程一結果與討論

第一試程 89.5.10~89.8.19 控制脫氮槽水力停留時間為 50 分，迴流水與進流水比為 1：1，控制除碳槽 HRT 為 30 分，其它操作條件及結果示於表 3.2。

3.2.1 試程一進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 TOC、TCOD、SCOD 之變化

由表 3.2 試程一 TOC 之變化可知，試程一進流水、脫氮槽及除碳槽 TOC 平均值分別為 0.54mg/L、3.81mg/L 及 1.10mg/L。由 TCOD 之變化可知，進流水、脫氮槽及除碳槽

表 3.2 大林原水脫氮模型廠試驗操作條件及結果

操作條件	Run1		Run2		Run3	
試驗日期	89.5.11~89.8.19		89.8.20~89.10.8		89.10.9~89.12.15	
	脫氮槽	除碳槽	脫氮槽	除碳槽	脫氮槽	除碳槽
反應槽體積(m ³)	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3
進料量(m ³ /day)	14.4	14.4	28.8	28.8	28.8	28.8
水力停留時間(min)	50	30	25	15	25	15
有機物體積負荷(kgCOD/m ³ .day)	1.21	1.05	2.43	1.73	3.10	6.88
硝酸氮體積負荷(kgNO ₃ -N/m ³ .day)	0.45	0.42	0.73	0.46	0.70	0.23
進流水水質						
pH	7.14		7.12		7.13	
TOC (mg/L)	0.54		-		1.11	
TCOD (mg/L)	10.15		7.53		12.38	
SCOD (mg/L)	7.00		5.84		8.23	
SS (mg/L)	5.94		5.70		9.46	
濁度 (NTU)	3.44		4.01		7.73	
TKN (mg/L)	0.62		0.65		0.59	
NH ₃ -N (mg/L)	0.04		0.01		0.06	
NO ₃ -N (mg/L)	15.71		12.04		12.09	
NO ₂ -N (mg/L)	0.00		0.00		0.00	
TP (mg/L)	0.03		0.05		0.04	
出流水水質						
pH	7.11	7.25	7.07	7.29	6.95	7.27
TOC (mg/L)	3.81	1.10	-	-	7.62	1.38
TCOD (mg/L)	21.16	12.84	18.04	11.75	38.20	16.18
SCOD (mg/L)	16.86	9.38	14.76	10.92	28.99	12.00
SS (mg/L)	7.66	4.84	6.82	4.20	30.10	15.64
濁度 (NTU)	3.81	1.21	2.46	2.01	25.99	4.29
TKN (mg/L)	1.16	0.92	0.86	0.63	1.52	0.70
NH ₃ -N (mg/L)	0.26	0.15	0.01	0.06	0.15	0.09
NO ₃ -N (mg/L)	7.80	8.29	2.89	6.01	4.21	4.03
NO ₂ -N (mg/L)	1.02	0.18	3.49	0.40	0.23	0.00
TP (mg/L)	0.91	0.78	1.48	1.47	1.89	1.73
TOC 增加(mg/L)	3.27	0.56	-	-	6.51	0.27
TCOD 增加(mg/L)	11.83	3.53	10.51	4.22	25.82	3.80
SCOD 增加(mg/L)	9.86	2.83	9.06	5.08	20.76	3.77
SS 增加(mg/L)	1.72	-1.10	1.12	-1.50	20.64	6.18
濁度增加(NTU)	0.37	-2.22	-1.55	-2.00	18.26	-3.44
TKN 增加(mg/L)	0.54	0.30	0.21	-0.02	0.93	0.11
NH ₃ -N 增加(mg/L)	0.22	0.11	0.00	0.05	0.09	0.03
NO ₃ -N 去除率(%)	43.68	47.02	47.01	46.76	63.19	66.67
TP 增加(mg/L)	0.88	0.75	1.43	1.42	1.85	1.69

註：(1) 出流水 TOC、TCOD、SS 等增加(mg/L)，是與進流水水質比較。

(2) NO₃-N 去除率(%)是包括 NO₃-N 與 NO₂-N，也是與進流水水質比較。

TCOD 平均值分別為 10.15mg/L、21.16mg/L 及 12.84mg/L。又由圖 3.1 試程一 SCOD 之變化可知，原水、脫氮槽及除碳槽 SCOD 平均值分別為 7.01mg/L、16.41mg/L 及 9.08mg/L；造成脫氮槽及除碳槽 TOC、TCOD 及 SCOD 上升的原因，是因脫氮處理時添加乙醇當碳源，使得脫氮槽之有機體積負荷較高，達到 1.21 kgCOD/m³.day，而脫氮反應時沒有完全利用完，以致脫氮槽之 TOC、TCOD 及 SCOD 上升。而除碳槽 TOC、TCOD 及 SCOD 上升的原因，是因為除碳槽微生物量不夠或除碳槽之水力停留時間(HRT)太短，無法完全分解碳源所致。

3.2.2 試程一進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 SS 及濁度之變化

由表 3.2 試程一 SS 之變化可知，進流水平均為 5.94mg/L，脫氮槽出流水為 7.66mg/L，除碳槽處理後可下降至 4.84 mg/L。由濁度之變化可知，進流水平均濁度為 3.44NTU，經脫氮槽處理後之出流水卻上升為 3.81NTU，造成脫氮槽出流水 SS 及濁度上升的原因，是因添加乙醇當脫氮碳源，以致微生物增殖，造成出流水 SS 及濁度上升；脫氮槽出流水再經除碳槽處理後濁度可下降至 1.29NTU。

3.2.3 試程一進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 TKN 及氨氮之變化

由表 3.2 試程一 TKN 及氨氮之變化可知，試程一 HRT 為 30 分時，進流水平均 TKN 為 0.75mg/L，進流水幾乎不含氨氮，平均僅有 0.04mg/L，經脫氮槽處理後之出流水 TKN 上升為 1.16mg/L，氨氮則上升為 0.26mg/L，造成 TKN 與氨氮上升的原因，是微生物利用硝酸氮與乙醇、磷酸合成新的微生物，微生物再隨出流水流出時，TKN 與氨氮就相對增加。至於再經除碳槽處理後 TKN 下降為 0.92 mg/L、氨氮稍微下降為 0.15 mg/L，則是因放流水 SS 減少所致。

3.2.4 試程一進流水及脫氮槽、除碳槽出流水硝酸氮及亞硝酸氮之變化

由圖 3.2 試程一模廠試驗硝酸氮之變化可知，進流水 NO₃-N 平均濃度為 15.71mg/L，由圖 3.3 亞硝酸氮之變化可知，進流水 NO₂-N 平均濃度為 0mg/L。由表 3.2 及圖 3.4 可知脫氮槽之硝酸氮體積負荷為 0.45kg NO₃-N/m³.day，此時添加的碳源與硝酸氮比是 2.04：1，脫氮槽出流水 NO₃-N 為 7.80mg/L，NO₂-N 為 1.02mg/L；再經除氮槽處理後 NO₃-N 變為 8.29mg/L，NO₂-N 為 0.18mg/L；經除氮槽處理後硝酸氮增加的原因是 NO₂-N 氧化回 NO₃-N 所致。綜合 NO₃-N 與 NO₂-N 去除率，脫氮槽的平均去除率為 43.68%，除碳槽的去除率為 47.02%。

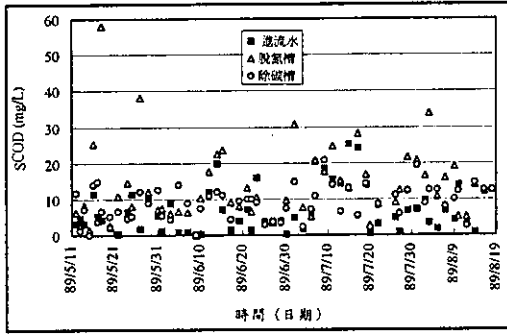


圖 3.1 試程一進流水、脫氮槽及除碳槽 SCOD 之變化
進流水 7.01mg/L、脫氮槽 16.41mg/L、除碳槽 9.08mg/L

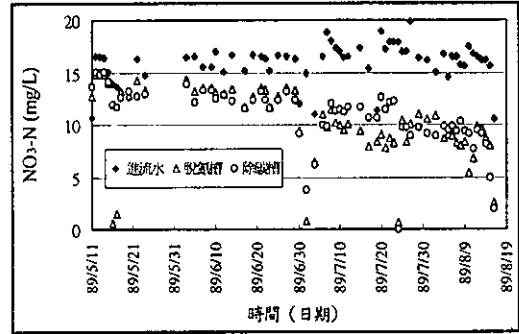


圖 3.2 試程一進流水、脫氮槽及除碳槽 NO₃-N 之變化
進流水 15.71mg/L、脫氮槽 7.80mg/L、除碳槽 8.29mg/L

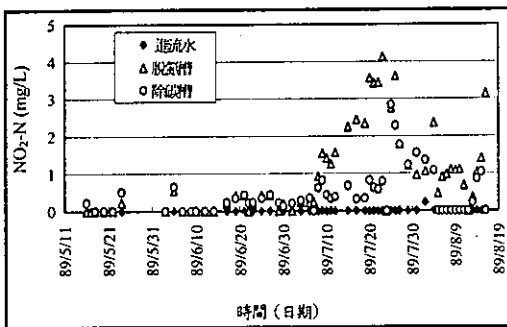


圖 3.3 試程一進流水、脫氮槽及除碳槽 NO₂-N 之變化
進流水 0.00mg/L、脫氮槽 1.02mg/L、除碳槽 0.18mg/L

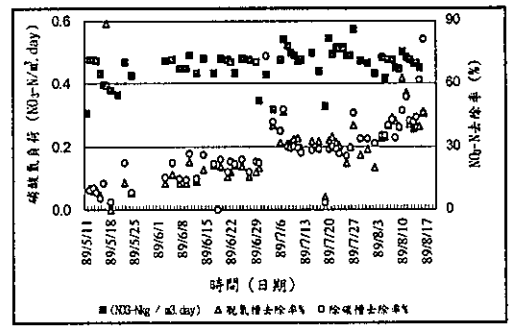


圖 3.4 脫氮槽 NO₃-N 體積負荷及脫氮槽、除碳槽去除率
脫氮槽去除率 43.68%、除碳槽去除率 47.02%

3.2.5 試程一進流水及脫氮槽、除碳槽出流水總磷之變化

由表 3.2 試程一總磷之變化可知，原水幾乎不含磷，總磷平均值為 0.03 mg/L；脫氮槽及除碳槽出流水總磷平均值分別為 0.91mg/L 及 0.78mg/L。脫氮槽及除碳槽磷酸上升的原因是，因脫氮處理時添加磷酸當營養源，或提供分解代謝能量傳遞之用，本試程添加之 C:N:P 比例約為 10:5:1。由於脫氮反應時總磷沒有完全利用完，以致脫氮槽及除碳槽出流水總磷濃度上升。

3.2.6 試程一期間擔體中之污泥量

試程一試驗於 89.8.11 從 BioNET 反應槽頂取樣口，取泡綿 20 顆，利用純水擠壓清洗 6 次，擔體烘乾並測其重量，此重量與原始新泡綿重量比較，結果減少了 4.0%。污泥液利用高速離心機 8000rpm 離心 20 分，刮取沉澱污泥經 105°C 烘乾是為 SS，乾污泥經 550°C 高溫爐烘乾，揮發掉的成份為 VSS 即是有效菌體量。經分析結果每顆泡綿污泥含有 SS 為 26.83mg，VSS 為 20.24mg，VSS 與 SS 的比值為 0.75。

脫氮反應槽添加約 51,400 顆泡綿，每顆泡綿含微生物(VSS)20.24mg，因此槽中共有微生物量 1,040g，如果以此微生物量，計算試程一的 COD 生物負荷為 1.21 kg COD/kg VSS day，硝酸氮生物負荷為 0.22 kg NH₃-N/kg VSS day。

綜合試程一的結果可知，當進流水 NO₃-N 平均濃度在 15.71mg/L，使用 BioNE 脫氮處理技術，脫氮槽之 HRT 為 50 分，維持進流/迴流比為 1：1，除碳槽之 HRT 為 30 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 2：1，處理水之 NO₃-N+NO₂-N 之濃度可下降至 8.47mg/L，NO₃-N 去除率為 47%。

3.3 試程二實驗結果與討論

第二試程 89.8.20~89.10.8 控制脫氮槽水力停留時間(HRT)為 25 分，除碳槽 HRT 為 15 分，並控制脫氮槽迴流水與進流水比為 1：1，其它操作條件及結果示於表 3.2。

3.3.1 試程二進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 TCOD、SCOD 之變化

由圖 3.7 試程二 TCOD 之變化可知，進流水、脫氮槽及除碳槽 TCOD 平均值分別為 7.53mg/L、18.04mg/L 及 11.75mg/L。由圖 3.8 試程二 SCOD 之變化可知，進流水、脫氮槽及除碳槽 SCOD 平均值分別為 5.84mg/L、14.76mg/L 及 10.92mg/L；造成脫氮槽及除碳槽 TCOD、SCOD 上升的原因，是因脫氮處理時需添加乙醇當碳源，造成脫氮槽之 COD 體積負荷較高，達到 2.31 kgCOD/m³.day，而脫氮反應時又無法完全利用完，以致脫氮槽之 TCOD、SCOD 上升。而除碳槽 TCOD、SCOD 上升無法完全分解的原因，除了體積負荷太高外，也可能是因為微生物量不夠或水力停留時間(HRT)太短。因為理論上除碳槽體積負荷在 2.0 kgCOD/m³.day 以下，只要曝氣足夠，SCOD 應可完全分解。

3.3.2 試程二進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 SS 及濁度之變化

由表 3.2 試程二 SS 之變化可知，進流水平均 SS 為 5.70mg/L，經脫氮槽處理後出流水上升為 6.82mg/L，造成脫氮槽出流水 SS 上升的原因，是因添加乙醇當脫氮碳源，以致微生物增殖，造成出流水 SS 上升；脫氮槽出流水再經除碳槽處理後則下降至 4.20

mg/L。由表 3.2 試程二濁度之變化可知，進流水平均濁度為 4.01NTU，經脫氮槽處理後之出流水降為 2.46NTU；脫氮槽出流水再經除碳槽處理後更下降至 2.01NTU。

3.3.3 試程二進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 TKN 及氨氮之變化

由表 3.2 試程二 TKN 之變化可知，試程二 HRT 為 25 分時，進流水平均 TKN 為 0.65mg/L，經脫氮槽處理後之出流水上升為 0.86mg/L，造成 TKN 上升的原因是微生物利用硝酸氮與乙醇、磷酸合成新的微生物，微生物再隨出流水流出時，TKN 就相對增加。至於除碳槽 TKN 稍微下降為 0.63 mg/L，則是因放流水 SS 減少所致。

由表 3.2 試程二氨氮之變化可知，脫氮槽之進流水幾乎不含氨氮，平均僅有 0.01mg/L，經脫氮槽處理後之出流水亦維持為 0.01mg/L。再經除碳槽處理後，氨氮則稍微上升為 0.06 mg/L。

3.3.4 試程二進流水及脫氮槽、除碳槽出流水硝酸氮及亞硝酸氮之變化

由圖 3.9 程二硝酸氮之變化及圖 3.10 亞硝酸氮之變化可知，試程二進流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均濃度為 12.04mg/L，亞硝酸氮為 0mg/L；由表 3.2 及圖 3.11 可知脫氮槽之硝酸氮體積負荷為 0.73kg $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ ，此時添加的碳源與硝酸氮比是 2.7 : 1，脫氮槽出流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 為 2.89mg/L， $\text{NO}_2\text{-N}$ 為 3.49mg/L；再經除氮槽處理後 $\text{NO}_3\text{-N}$ 變為 6.01mg/L， $\text{NO}_2\text{-N}$ 為 0.40mg/L，硝酸氮增加的原因是 $\text{NO}_2\text{-N}$ 氧化回 $\text{NO}_3\text{-N}$ 所致。綜合 $\text{NO}_3\text{-N}$ 與 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之去除率，脫氮槽的去除率為 47.01%，除碳槽的去除率為 46.76%。試程二雖然 HRT 縮短，但硝酸氮的去除率並未減少。

3.3.5 試程二進流水及脫氮槽、除碳槽出流水總磷之變化

由表 3.2 試程二總磷之變化可知，進流水幾乎不含磷，總磷平均值為 0.05 mg/L；脫氮槽及除碳槽出流水總磷平均值分別為 1.48mg/L 及 1.47mg/L。脫氮槽及除碳槽磷酸上升的原因是，因脫氮處理時添加磷酸當營養源，或提供分解代謝能量傳遞之用，本試程添加之 C : N : P 比例約為 25 : 8 : 1。由於脫氮反應時總磷沒有完全利用完，以致脫氮槽及除碳槽出流水總磷濃度上升。

綜合試程二的結果可知，當進流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均濃度在 12.04mg/L，使用 BioNE 脫氮處理技術，脫氮槽之 HRT 為 25 分，維持進流/迴流比為 1 : 1，除碳槽之 HRT 為 15 分，

控制乙醇添加量之 C/N 比為 2.7 : 1，處理水之 $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ 之濃度平均可下降至 6.41mg/L， $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率為 47%。

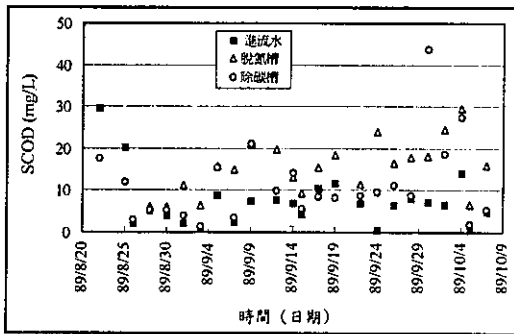


圖 3.5 試程二進流水、脫氮槽及除碳槽 SCOD 之變化
原水 5.84mg/L、脫氮槽 14.76mg/L、除碳槽 10.92mg/L

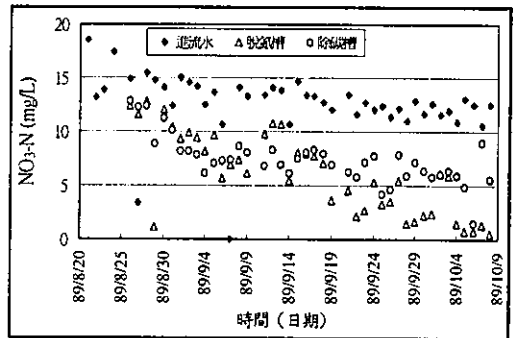


圖 3.6 試程二進流水、脫氮槽及除碳槽 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之變化
進流水 12.04mg/L、脫氮槽 2.89mg/L、除碳槽 6.01mg/L

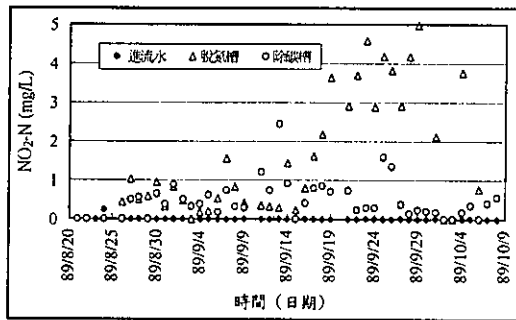


圖 3.7 試程二進流水、脫氮槽及除碳槽 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之變化
進流水 0.00mg/L、脫氮槽 3.49mg/L、除碳槽 0.40mg/L

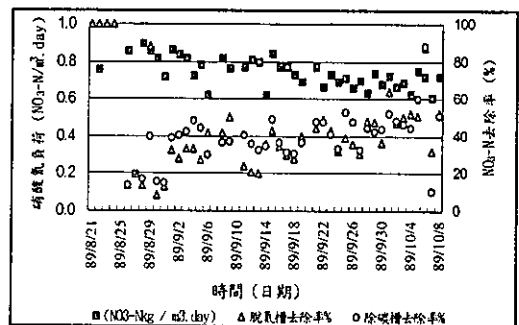


圖 3.8 試程二脫氮槽 $\text{NO}_3\text{-N}$ 體積負荷及去除率
脫氮槽去除率 47.01%、除碳槽去除率 46.76%

3.4 試程三實驗結果與討論

第三試程 89.10.10~89.12.15 控制脫氮槽水力停留時間(HRT)為 25 分，乙醇添加量控制 C/N 比為 3.3 : 1，平均 COD 體積負荷為 2.57kgCOD/ $\text{m}^3\text{.day}$ ，硝酸氮體積負荷為 0.67kg $\text{NO}_3\text{-N}$ / $\text{m}^3\text{.day}$ ；除碳槽 HRT 為 15 分，脫氮槽不迴流，其它操作條件及結果示於表 5.2。

3.4.1 試程三進流水及脫氮槽、除碳槽出流水之 TOC、TCOD、SCOD 變化

由表 3.2 試程三 TOC 之變化可知，進流水、脫氮槽及除碳槽 TOC 平均值分別為 1.11mg/L、7.62mg/L 及 1.38mg/L。由 TCOD 之變化可知，進流水、脫氮槽及除碳槽 TCOD 平均值分別為 12.38mg/L、38.20mg/L 及 16.18mg/L。由圖 3.9 試程三 SCOD

之變化可知，試程三原水、脫氮槽及除碳槽 SCOD 平均值分別為 8.23mg/L、28.99mg/L 及 12.00mg/L，脫氮槽及除碳槽 TOC、TCOD、SCOD 上升的原因，是因為脫氮處理時添加乙醇當碳源，造成脫氮槽之有機物體積負荷高達 2.57kgCOD/m³.day，而脫氮反應時又無法完全利用完，以致脫氮槽 TOC、TCOD 及 SCOD 上升。而除碳槽 TOC、TCOD 及 SCOD 上升的原因，是因為除碳槽之有機物體積負荷太高，而無法完全分解所致。將原水及除碳槽出流水做三鹵甲烷潛能(THMFP)分析，結果原水為 67 μg/L，出流水約為 100 μg/L，為確保自來水之總三鹵甲烷能維持在 0.1ppm 以下，未來之實驗或實廠操作應儘量提高碳源之利用率，降低殘留量。

3.4.2 試程三進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 SS 及濁度之變化

由表 3.2 試程三 SS 之變化可知，進流水平均 SS 為 9.46mg/L，經脫氮槽處理後之出流水上升為 30.10mg/L，造成脫氮槽出流水 SS 上升的原因，是因添加乙醇當脫氮碳源，以致微生物增殖，造成出流水 SS 上升；脫氮槽出流水再經除碳槽處理後則下降至 15.64mg/L。由於脫氮處理後出流水，在自來水處理流程會經過混擬沉澱單元處理，因此脫氮處理出流水 SS 上升不會造成問題。

由表 3.2 試程三濁度之變化可知，進流水平均濁度為 7.73NTU，與試程一、二進流水濁度比較，試程三之濁度比較高，這可能是季節變化的原因造成；經脫氮槽處理後之出流水上升為 25.99NTU，造成濁度上升的原因，是因為污泥增殖，出流水 SS 增加所致；脫氮槽出流水再經除碳槽處理後，因一部份 SS 分解，一部份凝聚成大顆粒，所以濁度下降為 4.29NTU。

3.4.3 試程三進流水及脫氮槽、除碳槽出流水 TKN 及氨氮之變化

由表 3.2 試程三 TKN 之變化可知，當脫氮槽 HRT 為 25 分時，進流水平均 TKN 為 0.59mg/L，經脫氮槽處理後之出流水上升為 1.52mg/L，造成 TKN 上升的原因是微生物利用硝酸氮與乙醇、磷酸合成新的微生物，微生物再隨出流水流出時，TKN 就相對增加。至於除碳槽 TKN 稍微下降為 0.70 mg/L，則是因放流水 SS 減少所致。

由表 3.2 試程三氨氮之變化可知，脫氮槽之進流水幾乎不含氨氮，平均僅有 0.06mg/L，經脫氮槽處理後之出流水亦不高為 0.15mg/L。再經除碳槽處理後，氨氮則下降為 0.09 mg/L。

3.4.4 試程三進流水及脫氮槽、除碳槽出流水硝酸氮及亞硝酸氮之變化

由圖 3.10 試程二硝酸氮之變化及圖 3.11 亞硝酸氮之變化可知，試程三進流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均濃度為 12.09mg/L ，亞硝酸氮為 0mg/L ；由表 3.2 及圖 3.12 可知脫氮槽之硝酸氮體積負荷為 $0.70\text{kg NO}_3\text{-N/m}^3\cdot\text{day}$ ，此時添加的碳源與硝酸氮比是 $3.3:1$ ，脫氮槽出流水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 4.21mg/L ， $\text{NO}_2\text{-N}$ 為 0.24mg/L ；再經除碳槽處理後 $\text{NO}_3\text{-N}$ 變為 4.03mg/L ， $\text{NO}_2\text{-N}$ 為 0.00mg/L ，除碳槽硝酸氮增加的原因是 $\text{NO}_2\text{-N}$ 氧化回 $\text{NO}_3\text{-N}$ 所致。綜合 $\text{NO}_3\text{-N}$ 與 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之結果，脫氮槽的去除率為 63.19% ，除碳槽的去除率為 66.67% ，顯示脫氮槽不迴流不會降低去除率，反而可避免溶氧增加而提高去除率。

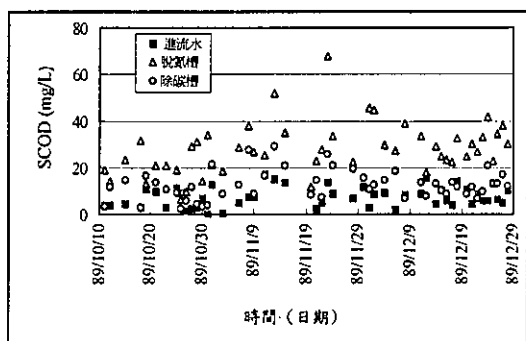


圖 3.9 試程三進流水、脫氮槽及除碳槽 SCOD 之變化
進流水 8.23mg/L 、脫氮槽 28.99mg/L 、除碳槽 12.00mg/L

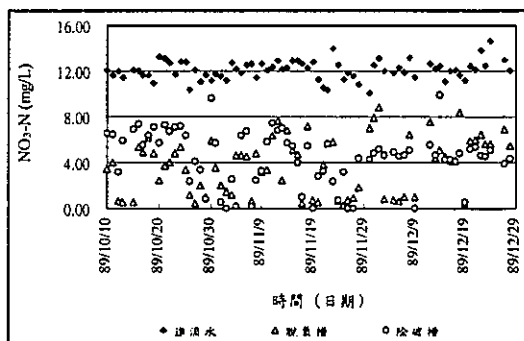


圖 3.10 試程三進流水、脫氮槽及除碳槽 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之變化
進流水 12.09mg/L 、脫氮槽 4.21mg/L 、除碳槽 4.03mg/L

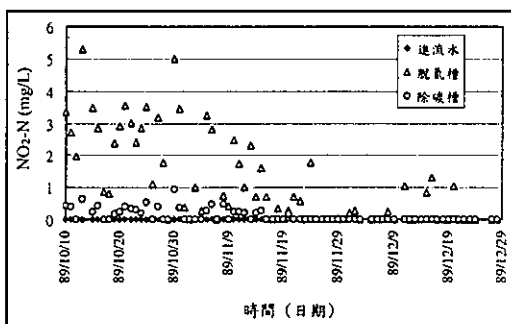


圖 3.11 試程三進流水、脫氮槽及除碳槽 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之變化
進流水 0.00mg/L 、脫氮槽 0.24mg/L 、除碳槽 0.00mg/L

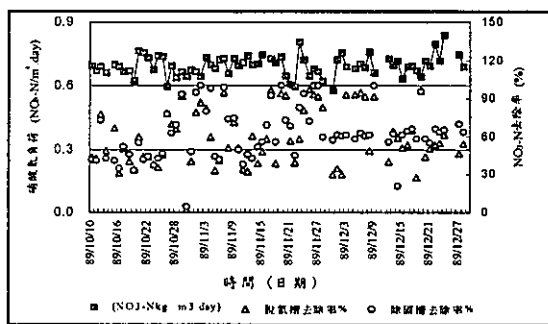


圖 3.12 脫氮槽 $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷及脫氮槽、除碳槽之去除
脫氮槽去除率 63.19% 、除碳槽去除率 66.67%

3.4.5 試程三進流水及脫氮槽、除碳槽出流水總磷之變化

由表 3.2 試程三總磷之變化可知，進流水幾乎不含磷，總磷平均值為 0.04mg/L ；脫氮槽及除碳槽出流水總磷平均值分別為 1.89mg/L 及 1.73mg/L 。脫氮槽及除碳槽磷酸上升的原因是，因脫氮處理時添加磷酸當營養源，並提供分解代謝能量傳遞之用，本試

程添加之 C:N:P 比例約為 20:6:1。由於脫氮反應時總磷沒有完全利用完，以致脫氮槽及除碳槽出流水總磷濃度上升。

綜合試程三的結果可知，當原水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均濃度在 12.09mg/L，脫氮槽之 HRT 為 25 分，脫氮槽不迴流，除碳槽之 HRT 為 15 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 3.3:1，處理水之 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之濃度平均可下降至 4.03mg/L， $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率可達 67% 左右。

四、經濟評估

設計每天處理 3,000 m^3 自來水原水，原水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 為 16mg/L，採用 BioNET 處理技術之流程如圖 4.1，其建造費與操作費預估如下：

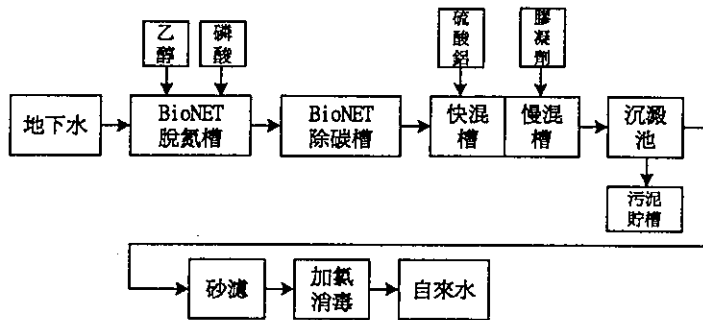


圖 4.1 自來水原水處理流程

4.1 脫氮處理廠建造費評估

原水脫氮處理廠建造費及土地需求如表 4.1。總建造費預估為 NT\$1,475 萬元，土地需求為 410 m^2 。

表 4.1 原水脫氮處理廠建造費及土地需求

計算基準	脫氮反應槽	除碳反應槽	快混慢混槽	沉澱槽	污泥貯槽	其他桶槽	合計
HRT(分)	25	25	25	120	25 天		-
體積(m^3)	55	55	55	250	10	30	485
土地需求(m^2)	33	39	48	250	10	30	410
造價(萬元)	220	220	165	750	30	90	1475

註：脫氮反應槽高 6m、除碳反應槽高 5m、快混慢混槽高 4m、沉澱槽高 3m、其他桶槽高 3m。

反應槽建造費含填充擔體，單價為 NT\$40,000/ m^3 ；

其他桶槽包括：快混慢混槽、乙醇桶、磷酸桶、PAC 桶。建造費為 NT\$30,000/ m^3 。土地需求包含管路及週邊設備，因此約為槽體的 3 倍。

4.2 脫氮處理廠操作費評估

原水脫氮處理廠操作費計價基準及總操作費如表 4.2。每天需要處理費約 6,615 元，平均每 m³處理費為 2.2 元。

表 4.2 原水脫氮處理廠操作費計價基準及總操作費

費用種類	計價基準	操作費(元/天)
乙醇	100L/day ; 40NT\$/L	4,000
磷酸	5L/day ; 30 NT\$/L	150
PAC	600kg/day ; 3.0 NT\$/kg	1,800
電費	1.2KWH/kg CODremoved, 1.8NT\$/KWH	345
污泥處理費	0.25kg SS/ kg CODremoved, 8NT\$/kg 乾污泥	320
合計		6,615

五、結論與建議

5.1 結論

1. 綜合原水水質分析結果可知，大林三角仔水廠原水含有較高硝酸氮成分，污染濃度介於 10mg/L 至 20mg/L 之間，平均為 13.77 mg/L，其他 TKN、氨氮、總磷及有機物如 TOC、TCOD、SCOD 等，則大致符合水源水質標準。為使原水達到飲用水水源水質標準，避免自來水可能影響人體健康，原水宜採適當的脫氮前處理。
2. 試程一結果顯示，當進流水 NO₃-N 平均濃度在 15.71mg/L，脫氮槽之 HRT 為 50 分，進流/迴流比為 1：1，除碳槽之 HRT 為 30 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 2：1，處理水之 NO₃-N+NO₂-N 之濃度可下降至 8.47mg/L，NO₃-N 去除率為 47%。
3. 試程二的結果顯示，當進流水 NO₃-N 平均濃度在 12.04mg/L，脫氮槽之 HRT 為 25 分，進流/迴流比為 1：1，除碳槽之 HRT 為 15 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 2.7：1，處理水之 NO₃-N+NO₂-N 之濃度平均可下降至 6.41mg/L，進流水 NO₃-N 去除率為 47%。顯示脫氮槽雖然縮短 HRT，提高 NO₃-N 的體積負荷，但硝酸氮的去除率不受影響。
4. 試程三的結果顯示，當進流水 NO₃-N 平均濃度在 12.09mg/L，脫氮槽之 HRT 為 25 分，脫氮槽不迴流，除碳槽之 HRT 為 15 分，控制乙醇添加量之 C/N 比為 3.3：1，處理

水之 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之濃度平均可下降至 4.03mg/L ， $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率可達 67% 左右。顯示脫氮槽不迴流不會降低去除率，反而可避免溶氧增加，而提高硝酸氮的去除率。

5. 評估每天處理 $3,000\text{m}^3$ 原水， $\text{NO}_3\text{-N}$ 為 16mg/L ，採用 BioNET 處理技術，其建造費預估為 NT\$1,475 萬元，土地需求為 410m^2 ；操作費預估約 6,615 元，平均每 m^3 處理費為 2.2 元。

5.2 建議

BioNET 處理技術具有操作簡單及操作彈性大之優點，反應槽水力停留時間短，可節省建造所需土地面積及反應槽體積，應用於自來水淨水廠之原水前處理，對硝酸氮去除具有良好之處理效果。為避免 $\text{NO}_3\text{-N}$ 大於 10mg/L 可能影響人體健康，在現有的自來水處理流程前，增添此一操作簡單又經濟的處理單元，以去除硝酸氮，應該是直接可行的方式。

參考文獻

1. 吳宗榮、蔡基湧 (1982)，水及廢水分析，復文書局出版
2. 李丁來 (1996) 薄膜技術應用之探討，中華民國自來水協會會刊，第十五卷第一期，p. 40 ~ 52。
3. 游惠宋 (1997) 喜氣流動床技術開發，工業技術研究院化學工業研究所。
4. 邱創汎、游惠宋、洪仁陽、張王冠、邵信 (1997)，飲用水含氮污染物處理技術(一)：生物脫氮，中華民國自來水協會會刊，第十六卷第三期，p. 62~67。
5. 洪仁陽、邱創汎、游惠宋、張王冠、邵信 (1997)，飲用水含氮污染物處理技術(二)：生物脫氮，中華民國自來水協會會刊，第十六卷第四期，p. 24~30。
6. 張王冠、洪仁陽、邱創汎、游惠宋、邵信 (1997)，飲用水含氮處理技術(三)：離子交換脫氮，中華民國自來水協會會刊，第十七卷第一期，p. 89~95。
7. 鄭幸雄 (1997)，台灣南部給水源污染特性及生物處理程序功能之探討，中華民國自來水協會會刊，第十六卷第一期，p. 30~56。

8. 游惠宋、張王冠、洪仁陽、邵信、邱創汎 (1998), 飲用水含氮處理技術(四): 薄膜分離除硝酸鹽氮, 中華民國自來水協會會刊, 第十七卷第四期, p.25~29。
9. 曾四恭、張志誠(1999), 比較不同固定化方法固定自營脫氮菌 *Alcaligenes eutrophus* 處理水源中硝酸鹽之研究, 第二十四屆廢水處理技術研討會, 國立交通大學, Nov. 26~27, p.529~534。
10. 鄒文源、張王冠、洪仁陽、吳漢松、莊順興 (1999), BioNET 生物程序處理自來水原水之研究, 中華民國自來水協會會刊, 第十八卷第四期, p.22~33。
11. 張王冠、莊順興、洪仁陽、鄒文源 (2000), “應用 BioNET 技術處理化工業廢水二級處理出流水”, 2000 產業環保工程實務技術研討會, 經濟部工業局, Nov. 17, p.39~56。
12. Chang, W-k, Tzou, W-Y, Wu, H-S, Chuang, S-H and You, H-S, (1999), Application of BioNET Process for Pretreatment of Raw Water, 7th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, Tapei, Taiwan, October, p.18-20.
13. Dahab, M. F., (1993), Comparison and Evaluation of In-Situ Bio-Denitrification Systems for Nitrate Reduction in Groundwater, Wat. Sci. Tech., Vol.28, No.3-5, p.359-368.
14. Deguchi, H. and M. Kashiwava, (1994), Study on Nitrified Liquor Recycling Process Operations Using Polyurethane Foam Sponge Cubes As Biomass Support Medium, Wat. Sci. Tech., Vol.30, No.6, p.143-149.