

臭氧應用於淨水處理——模場試驗

Use Ozone for Water Treatment—A Pilot Plant Study

江弘斌* 吳民鐘**

摘要

台灣地區水源受污染情形日益嚴重，原水預先處理或新的淨水方法在可見將來應該被採用以改善出水品質，而臭氧處理為常被考慮引用的方法之一。事實上，臭氧在歐洲已被廣泛應用於淨水處理，成效良好。本研究針對六堵基隆河水源，以小型臭氧模型廠分別採用四種試程進行淨水處理效果之試驗與探討，初步結果顯示處理效果均佳。在各試程中，原水經前臭氧處理後，細菌數量急劇減少，續經混膠凝沉澱及快濾後，鐵、錳、氨氮、生化需氧量、 UV_{254} 、吸光度、三鹵甲烷含量均大幅降低，氨氮含量無大變化，而經快濾床後，則減少許多，唯快濾床經反沖洗後，氨氮去除效果先降低後再回升，顯示濕熱之台灣，濾床硝化作用旺盛，而濾床微生物附著情況並不理想。生物活性碳床置於快濾床之後，具有除氨氮、生化需氧量、 UV_{254} 、吸光度等效果。在四種不同試驗中，以預濾—前臭氧處理—混膠凝—沉澱—快濾—生物性活性碳處理程序之總結表現最佳。

一、緒論

1-1 緣起和目的

臭氧應用於淨水處理之主要用途包括減除水中溶解性有機物、色度、臭味、濁度、硫化物、氰化物、鐵、錳、氨氮（常配合生物性活性碳）、消毒（滅菌及不活化病毒）等（1-20）。與加氯方式之傳統淨水處理法很大不同者為加氯處理因常會與水中有機物反應因而導致有機鹵化物的增加，而臭氧處理卻常可將較大分子量之有機物氧化／切斷成較小，易為微生物分解之小分子，配合生物性活性碳處理因而降除溶解性有機物之含量，也進而達到減除水中有機鹵化物（包括三鹵甲烷）之目的。

臭氧用於淨水處理原始於法國尼斯（Nice；1906），用途為消毒（1,3,7），迄今在歐洲，尤其是瑞士、法國、德國、奧地利、荷蘭等已有許多淨水處理廠使用臭氧於淨水處理，近年來英、美等國對以臭氧應用於淨水處理也有日益重視及推廣應用之趨勢。而在台灣，水源污染日益嚴重，水公司使用之基隆河、高屏溪、東港溪水源均已受到相當程度之污染，以新的淨水處理方式代替傳統處理方式（加氯→膠凝→沉澱→過濾→加氯）在可見之未來有必要考慮引用

* 台灣省自來水公司水質研究中心組長

** 台灣省自來水公司第一區管理處工程員

，而臭氧淨水處理為其中常被提及之方法之一。有鑑於此，水公司在六塔基隆河畔建小型臭氧淨水處理模廠一座，進行實驗，期能初步對臭氧應用於台灣地區之淨水處理方式加以探討，同時藉由模廠設計建造和實驗過程建立水公司參與人員對臭氧淨水處理之初期經驗。本模廠係由漢記工程企業公司配合本公司北工處設計建造，由一區處檢驗室及六塔營運所人員負責操作實驗，另由總管理處水質中心協助實驗之進行及負責研究報告之撰寫。

1—2 臭氧性質 (3,7,18,20,21)

臭氧係由 3 個氧原子結合而成之一種具有強烈刺激性及帶有藍色之不穩定氣體，故需現場製備，現場使用。因其帶有刺激臭味，在 0.01-0.05 ppm 時即可感覺其存在。在含臭氧之空氣環境連續曝露 8 小時之最大容許量為 0.1 ppm，為安全起見，於使用臭氧之淨水處理廠內，在臭氧機及處理場相關環境中(1)最好加裝臭氧偵測警報系統；(2)工作人員進入臭氧接觸槽前，需先用空氣吹洗接觸槽，或甚至需穿著獨立吸氣系統裝備。在一大氣壓下，臭氧沸點為 -112°C ，其在紫外光 2537 \AA (253.7 nm) 處有最大吸收，因此可利用此種特性而藉光學儀器設備測得空氣中之臭氧含量。臭氧可溶於水，在 20°C 時其水溶性質比氧約高 13 倍，在 PH 愈高，溫度愈低時，臭氧愈能溶於水。臭氧在 20°C 蒸餾水中，其半衰期約 20—30 分鐘，在較低水溫時，其半衰期會延長許多。若水中具有有機物質等可被氧化之成份，則其半衰期會大為縮短，在溫度 / PH 增加時也會加速其分解。臭氧在乾燥空氣及常溫條件下，其半衰期約為 12 小時，但溫度 / 濕度增加時，其分解速度則加快。商業性臭氧發生機如以乾燥空氣為原料，可產生 1—3 % 臭氧，如以乾燥氧氣為原料，則可產生 2—6 % 臭氧。這樣低臭氧濃度並沒有爆炸性 (若空氣中臭氧含量超過 15—20 %，則有爆炸危險性)。臭氧係極強之氧化劑，可將水中還原性物質氧化之。下表係一些淨水處理藥劑之氧化還原電位：

表 1 淨水處理藥劑氧化電位

氧	化	反	應	伏特電位 (25°C)
$\text{F}_2 + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	2F^-		2.87
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$		2.07
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	$2\text{H}_2\text{O}$		1.76
$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^-$	\longrightarrow	$\text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$		1.68
$\text{HClO}_2 + 3\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	\longrightarrow	$\text{Cl}^- + 2\text{H}_2\text{O}$		1.57
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^-$	\longrightarrow	$\text{Mn}^{++} + 4\text{H}_2\text{O}$		1.49
$\text{HOCl} + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	$\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$		1.49
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	2Cl^-		1.36
$\text{HOBr} + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	$\text{Br}^- + \text{H}_2\text{O}$		1.33
$\text{ClO}_2(\text{gas}) + \text{e}^-$	\longrightarrow	ClO_2^-		1.15
$\text{Br}_2 + 2\text{e}^-$	\longrightarrow	2Br^-		1.07

氧化電位僅表示該氧化劑氧化其他物質之能力，其並未能指出氧化速度之快慢，也未能表示氧

化反應能進行到何種程度。一般言之，在淨水處理中，即使用很強的氧化劑如 O_3 也很難將有機物完全氧化成 CO_2 和 H_2O ，而使用較 O_3 為弱之氧化劑如 Br_2 、 ClO_2 、 Cl_2 、 $HOC1$ 等則可能產生較多「部份分解」之有機物質或有機鹵化物。

由於臭氧空氣具有強氧化力及高腐蝕性，與臭氧空氣接觸之管線材質最好採用 304、304 L、316、316 L 或 321 不銹鋼材質者。未加塑化劑之硬 PVC 塑膠管可為暫代用品，接合管線不得以化學溶劑為之，只能用凸緣銜接方式需使用 Viton, Silicon rubber 或 Teflon 襯墊，線式銜接則需使用 Teflon tape 纏繞 (18,22,23,24)。

1-3 臭氧空氣製造 (17,18,22)

製造臭氧有電化學反應法、紫外線照射法和電擊法，而電擊法係目前淨水處理廠中臭氧發生機內最常使用的方法。基本臭氧發生器包括兩片可導電之電極，二者極性相反，距離很小，中間隔有絕緣材料。當乾燥空氣（或氧氣）流經其間時，施以高壓電擊，會產生藍紫色光臭氧氣體，其基本構造如下圖：

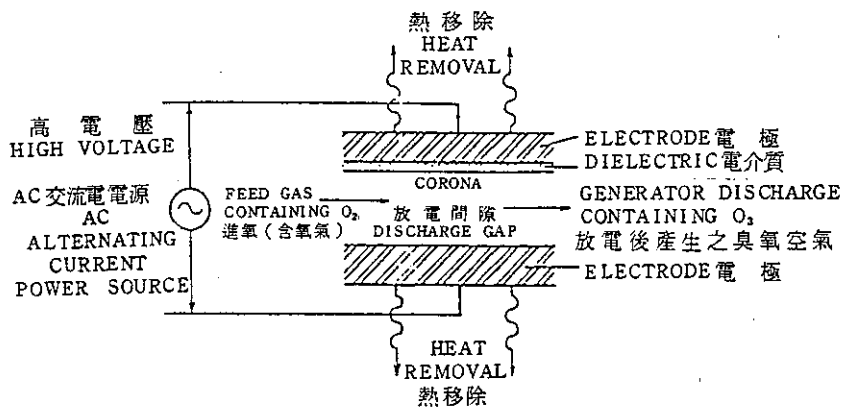
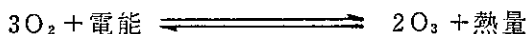


圖 1 臭氧發生機 CORONA CELL 構造

製造臭氧之反應可以下列方程式表示：



此反應為雙向平衡反應，也即在臭氧產生之同時，逆向反應同時進行，並且在高溫時不利於 O_3 之形成，當溫度超過 $40^\circ C$ 時，臭氧產量變成非常之低。由於上式反應產生大量的熱，因此欲使臭氧能持續的被製造出來使用，大量的熱量必需以冷卻水帶走。據估計，在製造臭氧時，約有 90% 以上電能在反應進行時以幅射、聲、熱量（最主要者）耗失掉。因此臭氧發生機製造出來的成品 O_3 ，其成本並不便宜。空氣在進入臭氧發生機前需經前處理，未經處理的空氣含有油滴、灰塵及水份。油滴會降低乾燥劑表面之吸附能力，灰塵會降低臭氧發生機的效能，因而需要常常清潔臭氧發生機內部，水份則會降低臭氧發生機的產能，又因濕度會造成硝酸積聚於內，造成電極腐蝕，也可能縮短絕緣體之壽命（儘管長年使用乾燥空氣製備 O_3 ，臭氧發生機內部仍會累積少許硝酸，正常狀況下最好每年至少清除一次）。基本上，空氣需經濾過、壓縮、冷卻後，才能移除大部份水份，唯此種空氣乾燥度仍然不夠，需要通過乾燥器濾過除濕後，才進

入臭氧發生機。一般最常被使用之乾燥劑為 Alumina 或 Silica Gel，二者均可再生。經過乾燥劑處理後之乾燥空氣，露點 (Dew Point) 達 -50°C 以下，甚至超過 -60°C 。有關露點和水份移除率可參考下表 (22)：

表 2 露點與水份移除率關係

露 點 ($^{\circ}\text{C}$)	水份移除率 (%)
5	80.20
- 40	99.71
- 51	99.92
- 60	99.98

典型之臭氧發生機剖析構造及空氣前處理—臭氧製造—臭氧使用程序如下二圖所示：

說 明
LEGEND

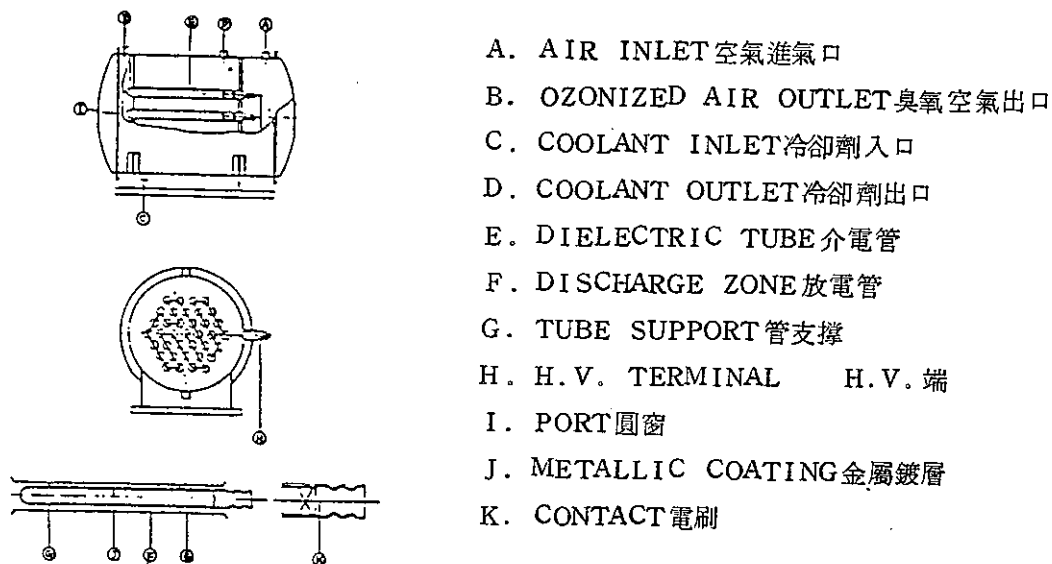
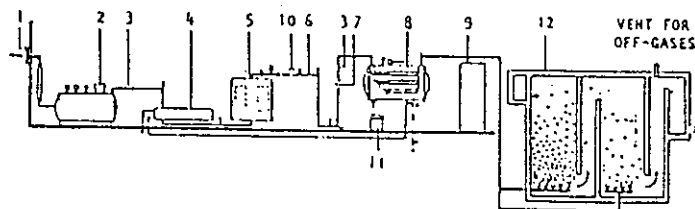


圖 2 臭氧發生機剖析構造



- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. AIR FILTER 空氣過濾器 | 7. AIR FLOW METER 空氣流量劑 |
| 2. COMPRESSOR 壓縮機 | 8. OZONE GENERATOR 臭氧發生機 |
| 3. AIR CONTROL VALVE 空氣控制閥 | 9. SWITCHGEAR CONSOLE 開關面盤 |
| 4. HEAT EXCHANGER / COOLER
熱交換機 | 10. PRESSURE REDUCING VALVE
降壓閥 |
| 5. DESICCANT DRIER 乾燥器 | 11. TRANSFORMER 變壓器 |
| 6. HYGROMETER 濕度表 | 12. CONTACTOR 接觸槽 |

圖 3 空氣前處理—臭氧製造—臭氧處理

而在空氣前處理程序中，壓縮機最好為 Non-lubricating type compressor，雖然較貴，但不會帶入油污、碳氫物質（Oil sealed compressor 常有此種麻煩），過量飽和水蒸氣（Water sealed compressor 常有此種麻煩）。因此在歐洲最普遍，也最為客戶樂意使用者。

總結來說，為維護臭氧發生機壽命，維持其產能，必需(1)源源不斷提供無油、無塵埃、無水氣（即極低露點）之極乾淨、乾燥之冷空氣(2)維持臭氧發生機系統內溫度不要升高，也即使用乾淨冷水（愈近 4°C 愈佳）進入臭氧發生機冷卻系統以帶走熱量。

1-4 臭氧化費用

應用臭氧於淨水處理至少需牽涉到(1)空氣前處理(2)臭氧空氣製造(3)讓臭氧空氣以散氣器（Diffuser）或打氣器（Turbine）方式注入接觸槽與水中可氧化物質反應。由於輸進臭氧發生機之空氣必需是清潔、低溫和乾燥的，因此在氣候寒冷和空氣較為乾燥之地區，空氣前處理所耗之費用較為低廉，在高溫、潮濕地區則空氣前處理所需之費用較為高昂。又因在生產臭氧空氣過程中，所耗之能量絕大部份（90%以上）轉為熱能，此熱能必需迅速以冷水帶走，以維持臭氧發生機內部環境在低溫狀態，使其能維持較有效率的產能。台灣由於是亞熱帶海島型氣候，空氣處在高溫高濕狀態，冷水溫度也較高，如欲應用臭氧於淨水處理，生產同一單位量臭氧所耗電力勢將比歐、美、加、蘇地區為高。

臭氧空氣自 1906 年在法國尼斯（Nice）被使用以來，其生產費用已大為降低，當時在尼斯製造臭氧所需電力為 73 KWH/Kg，而 1980 年在加拿大 Montreal 啓用之大型臭氧淨水處理廠（1980 年啓用一半 Capacity，水處理量為 636 ML/day，臭氧產生量為 2300Kg/

day)，其製造臭氧所耗之電力為 23.4 KWH/Kg (包括空氣前處理及臭氧製造等) (7)。Lepage 曾對美國密西根州 Monroe 臭氧淨水處理廠 (該廠水處理量為 68 ML/day，臭氧產生量為 204 Kg/day) 操作費用中之有關臭氧電力消耗曾有較為詳盡的分析 (25)。由表 3 可見臭氧輸出量愈大時，製造每單位臭氧所需耗電量愈低，反之則愈高。

表 3 密西根 MONROE 臭氧淨水處理廠臭氧電力消耗費用

臭 氧 輸 出		電 力 消 耗				
總輸出能力百分比 %	每小時臭 氧輸出量	臭氧發生機內 Corona cells	所有附屬系統 (空氣前處理等)	臭氧發生機+ 所有附屬系統	溢氣再注入 系 統	總耗電力
	Kg/h	KWH/Kg	KWH/Kg	KWH/Kg	KWH/Kg	KWH/Kg
10	0.72	7.63	29.25	36.88	21.99	58.87
20	1.19	9.08	17.70	26.78	12.82	39.60
30	1.66	10.60	12.69	23.29	9.19	32.48
40	2.12	11.13	9.93	21.06	7.20	28.26
50	2.57	11.52	8.19	19.71	5.94	25.65
60	2.97	12.05	7.09	19.14	5.14	24.28
70	3.34	12.49	6.31	18.80	4.57	23.37
80	3.68	12.93	5.72	18.65	4.15	22.80
90	3.99	13.51	5.28	18.79	3.82	22.61
100	4.23	14.11	4.98	19.09	3.61	22.70

在 100% 臭氧製造輸出能力時，空氣前處理加上臭氧製造所耗電力為 19.09 KWH/Kg，如加上 OFF-gas 再注入系統之考慮，則耗電量為 22.7 KWH/Kg。Miller 等曾對歐加等地臭氧處理廠問卷調查中 (18)，顯示臭氧發生機製造臭氧所耗電力範圍多在 15-26 KWH/Kg，而品牌有 Trailgaz、Sauter、Degremont 等，此等耗電能力與 Lepage 者所示者大約在同範圍內。又據日本住友精密工業株式會社提供之水冷式臭氧發生機資料中顯示臭氧製造量為 30 Kg/hr 的臭氧發生機，其所需耗費電力為 15 KWH/Kg (26)，其與上述所列者也大略一致。

臭氧發生系統愈大者，成本愈低，系統愈小者，則其單位成本愈高。一般而言，逐項電力消耗如下 (17)：

空氣前處理：2- 4 KWH/Kg O₃

冷卻水冷卻：4- 6 KWH/Kg O₃

臭氧製造：14-22 KWH/Kg O₃

臭氧殘餘破壞：1- 2 KWH/Kg O₃

(臭氧溢氣再注入)：(本項耗電未計)

在溫帶國家，冷卻水溫度低，如瑞士經常用底層湖水 (年平均溫度常在 4 - 5 °C 間) 作為冷卻

水，其並不需冷卻水冷卻系統。在台灣，由於常年水溫高，冷卻水冷卻系統需納入考慮，否則臭氧發生機系統溫度高，將導致臭氧產能（Yield）不佳，效率大打折扣。

1—5 臭氧應用於淨水處理

臭氧可以前臭氧處理、後臭氧處理、或前臭氧處理暨後臭氧處理加入於淨水處理程序，也有注入臭氧於貯水池 2 - 3 天後，再引水入淨水廠處理者。後臭氧處理通常是使用擴散器（Diffuser）將含臭氧之空氣導入接觸槽中。為使臭氧接觸槽發揮良好傳輸效率，通常使用進入接觸槽中會產生 3 - 5 mm 氣泡之擴散器（1,17,18,22,27），而將池深設計為約 4 - 7 m（1,7,17,18,22,23,25），以達成良好之臭氧傳輸率（Transfer Efficiency）。氣泡自池底上升後臭氧空氣充分與池水接觸以進行臭氧氧化分解反應，但通常仍會有少許臭氧溢出。溢出之殘餘臭氧通常由密閉接觸槽上方之出口導入前臭氧處理槽中與原水接觸，以充分利用臭氧，其有氧化鐵、錳，降低色度，提高助凝效果，並有促進水中有機物質分解成為「易為生物分解」者。有些報告指出，只要少許臭氧，即可達到良好助凝效果，因而節省了膠凝劑之耗用量。為達助凝效果通常只需要施用少許臭氧，有時加太多臭氧量反而會破壞較大膠羽成為較小膠羽，使沉澱效果轉壞（22）。因此最常被應用之方式係將後臭氧接觸槽用過後之餘臭氧接至前臭氧接觸槽，以 Turbine 方式打出使用，既可增加經濟效益和處理效果，又可減少臭氧溢出於大氣之濃度（18）。經過了前臭氧處理槽中水液之吸收，其逸出液面之空氣中所含之臭氧已經很少。為求安全起見，廢氣中臭氧可經吸收、熱解、觸媒破壞或稀釋等方法移除。

有關生物性活性炭配合臭氧應用於淨水處理，通常於後臭氧處理程序後，加入生物性活性炭處理程序。臭氧處理之主要用途係應用於水中微量有機物之去除，原水經臭氧處理後，水中有機大分子被氧化分解為較小而易為生物分解之有機分子，其容易由生物性活性炭中之微生物將其進一步分解利用，以達成將水中有機物質含量減少之目的。由於水中有機物常是臭、味、色或有機鹵化物前驅物之主要來源，因此利用臭氧處理來改善水質效果明顯，文獻顯示臭氧處理常可降低三鹵甲烷含量，唯也有例外者（7）。生物性活性炭在開始使用期間，主要依靠物理性吸附作用濾除有機物、細菌等，經一段時間運轉後，好氧性微生物逐漸長成，活性炭之生物性功能日益明顯，此時活性炭中之微生物不但具有滅除水中「可為生物分解」有機物之功能，也因硝化菌大量繁衍而得以轉換氨氮、亞硝酸鹽氮。曾有報導指出配合臭氧處理之生物性活性炭，其去除溶解性有機物效果比單獨使用 GAC 好上 10 倍以上，也有報導其效能優於慢砂濾 10-100 倍者（18）。

生物性活性炭對有機物質去除量常和進水中有機物濃度及進水停留於生物性活性炭濾床時間之長短有關，亦即和負荷量有關。通常理論空床停留時間（EBCT）30 分鐘已足夠，文獻顯示 EBCT 10—30 分鐘為最常被使用之範圍。一般言之，延長 EBCT（即降低生物活性炭之濾率或增加濾床體積）可提高有機物去除效果，減少生物性活性炭顆粒大小也可提高有機物去除效果，唯需考慮濾床過濾順暢否。在溫帶氣候之國家，生物性活性炭夏天發揮之效果比冬天好，顯受溫度影響。生物性活性炭可使用遠比吸附性活性炭為久才需要再生，通常可使用數月至數年之久，依水質情形而定。再生時不要全部取走活性炭，留下約 20—30 % 以保留菌種

(18)。

臭氧雖為強有力之消毒劑，對於滅菌及不活化病毒效果很好，但大多數淨水場通常在將淨水送出淨水場前加入少許氯以維持供水之安全可靠。此種做法之理由係因臭氧雖能將許多大的有機分子氧化分解成小的有機分子，卻很難完全將有機物氧化成 CO_2 和 H_2O 。這些較小的有機分子容易被微生物所利用，導致微生物易滋長於配水管線中，如在淨水中維持少許餘氯 (0.2 mg/L) 即可免掉此種困擾。儘管如此，歐洲仍有少數淨水場純以臭氧作為消毒劑，證明消毒效果良好。此種做法之先決條件為配水管線必需清潔乾淨，且配水管網規模不大者。

Miller 等人及蕭氏曾提及使用臭氧為消毒劑之必要條件為 (18,28)：

- 配水溶解性有機物要低。
- 配水管網要短。
- 配水水溫必需低。
- 配水在管網時間不得超過 12 小時。
- 配水管必需乾淨且無漏。
- 配水必需無鐵、氮 (以避免鐵菌或硝化菌繁衍)。

1—6 臭氧淨水處理對健康之影響

臭氧很少被應用於臭氧淨水處理之最後程序。通常後臭氧處理程序之後附有生物性活性炭處理程序，經其處理後續加少量氯消毒後送入清水池停留一段時間，再進入配水管網系統。由於臭氧在水中之半衰期很短，其後又有生物性活性炭，再加上清水池及配水管網停留時間，因此經臭氧處理之飲用水在到達客戶水龍頭時均已分解，不致構成問題。

以臭氧為氧化劑或消毒劑，在歐洲或加拿大未發現對健康有不良影響之報告。而在美國，Bull 等發現膠凝沉澱後過濾的 Ohio 河水，經臭氧處理後會增加小老鼠致皮膚瘤的可能性 (29)，該作者認為此僅為初步結果，尚待進一步試驗證實確認。惟 USEPA 一篇報告中亦曾提過有些研究初步結果顯示經臭氧處理過之水會增加變株沙門氏菌之突變性 (依據 Ames Test) (30)。

一般言之，有機物質被臭氧所氧化後，新的氧化物分子較小，較易為生物所分解，並且較不具毒性 (18)。但也有例外，如有些水中殘存農藥經臭氧不完全氧化所產生之中間物可比原來農藥更具毒性。Voge 與 Stig 認為高有機污染水源在應用臭氧進行處理前盡量先將有機物質去除，因為有機物質與臭氧反應能產生未知有機氧化物，其對健康可能具有潛在危險性 (31,32)。

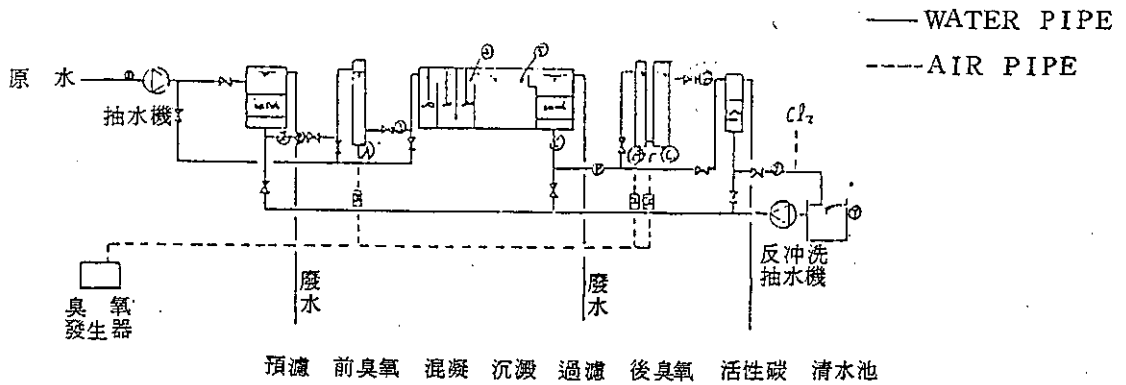
二、實驗設備及方法

2—1 臭氧模廠

臭氧模廠建於六堵淨水場內靠基隆河畔，原水採自淨水場內原水集水井送往淨水場之 400 公升原水管，其處理流程如圖：本模廠大致上係依六堵淨水場實廠縮小而成，其各處理單元資

料如下（設計處理水量為 48 CMD）：

臭氧模廠流程圖



可供取樣點：

- ①原水 ②預濾後水 ③前臭氧後 ④混凝後 ⑤沉澱後 ⑥過濾後 ⑦後臭氧後
⑧ G A C 後 ⑨加 Cl_2 後清水

臭氧注入點：

- (A)前臭氧(逆向) (B)後臭氧(逆向) (C)後臭氧(同向) (P)加壓幫浦 □流量表

圖 4 六堵臭氧模廠流程圖

1. 預濾池：

大 小：0.5 M × 0.5 M × 2.7 M

濾 率：192 M / day

停留時間：20 min

砂 濾 層：厚度 1 m，粒徑 1—2 mm

2. 前臭氧接觸槽：

大 小：150 %φ × 3.5 M (水深 3.0 M)，透明壓克力材質

臭氣空氣注入：擴散式注入器，能力 250 L / hr

接觸時間：1.6 min，逆向流式 (Countercurrent)

3. 混凝池：

大 小：0.5 M × 0.5 M × 0.75 M

鐵製水槽，設電動混和攪拌機，用以充分混和所加化學藥品。

停留時間：5.6 min

混和機裝置 (一台)：

電動機傳動豎軸槳葉式 (包括減速機、聯結器等)。

三相，220 V，AC，60 HZ， $\frac{1}{4}$ HP

轉速 150 RPM

中心軸，SUS 316 不銹鋼實心棒， ϕ 20 mm。

槳葉：2 塊 SUS 316 不銹鋼片，尺寸 10 cm \times 5 cm (厚度 6 mm)。

其外緣距中心軸 \sim 10 cm，槳葉板中心距池底 \sim 15 cm。

4. 膠羽池：

大 小：0.5 M \times 0.5 M \times 0.75 M；共三池，每池設旋槳式攪拌機。

轉 速：0.3、0.2、0.1 RPM

停留時間：16.8 min

膠羽機裝置(三台)：

電動機連接減速機經鏈條傳動之豎軸槳葉式。

三相，220 V，AC，60 HZ， $\frac{1}{4}$ HP。

轉速分別為 0.3、0.2、0.1 RPM。

中心軸 SUS 304 不銹鋼空心。

每台槳葉，2 塊不銹鋼片，尺寸 5 cm \times 5 cm (厚度 6 mm)。

每對槳葉板距中心軸 \sim 15 cm。

槳葉板底端距膠羽池底 \sim 25 cm。

5. 沉澱池：

大 小：0.5 M \times 2.8 M \times 2.5 M

停留時間：105 min

6. 快濾池：

大 小：0.5 M \times 0.5 M \times 2.7 M

濾 速：192 M/day

砂 濾 層：厚度 30 cm，粒徑 0.5 mm

厚度 20 cm，粒徑 0.8 mm

厚度 10 cm，粒徑 1—1.5 mm

停留時間：20 min

7. 後臭氧接觸槽：

大 小：雙筒式 150 mm ϕ \times 3.5 M 及 200 mm ϕ \times 3.5 M 透明壓克力造(水深 3.0 M)。

臭氧空氣注入方式：擴散式注入器。

接觸時間：1.6 min、2.8 min。分別為逆向流式及順向流式。

8. 粒狀活性炭過濾槽：

大 小：600 mm ϕ \times 2.5 M (水深 2.0 M)

碳床厚度：1.25 M

濾 率：170 M/day

粒 徑：1.68—3.36 mm (6 \times 12 mesh)

空床停留時間：17 min

9.清水池：

大 小：壓克力配合角鋼補強之方形池，1.5 M × 1.5 M × 1.5 M

10.原水抽水機：

48 CMD × 10 M × 1/2HP

反沖洗水抽水機

1600 CMD × 3 M × 2 HP

11.臭氧發生機 (法國 Trailgaz Minibloc Ozone Generator)

臭氧發生機大小：40 D × 80 W × 150 H cm

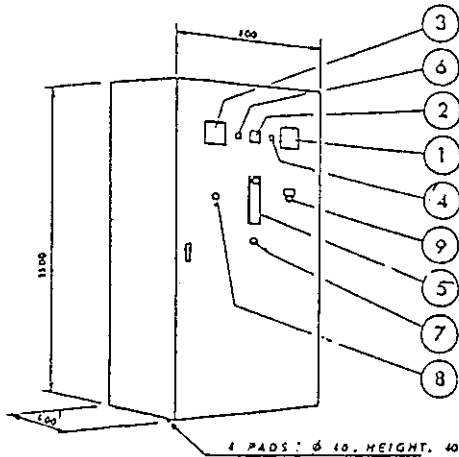
電源：單相，220 V，3 A，50 - 60 HZ

臭氧產生量：2 - 18 g / hr

冷卻水溫度：15 °C (實際上本省水溫高於 15 °C，因此最大臭氧產生量應無法達到 18 g / hr)。

臭氧空氣流率：100 - 1600 NL / hr

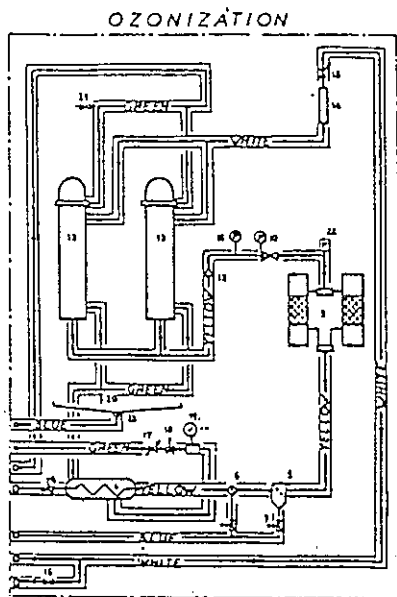
冷卻水流量：80 L / hr



1. 臭氧壓力計
2. 臭氧機計時器
3. 臭氧電力瓦特計
4. 異常指示燈
5. 臭氧流率指示計
6. 臭氧機開動指示燈鈕
7. 手動壓力出氣按鈕
8. 臭氧機開關
9. 起動開關

圖 5 臭氧發生機面盤

內部裝置與管路：



- | | |
|----------|---------------|
| 1. ————— | 13. 臭氧產生裝置 |
| 2. ————— | 14. 臭氧空氣流率計 |
| 3. ————— | 15. 調整閥 |
| 4. 冷卻器 | 16. 取樣閥 |
| 5. 微細過濾器 | 17. 調整閥 |
| 6. 預過濾器 | 18. 電氣閥 |
| 7. 電動閥 | 19. 接觸式流量控制單元 |
| 8. 電動閥 | 20. 流出閥 |
| 9. 乾燥器 | 21. 孔 閥 |
| 10. 減壓器 | 22. 壓力開關 |
| 11. 壓力計 | 23. 凝結水氣收集盤 |
| 12. 閥 | |

圖 6 臭氧發生機內部裝置管路

12. 空壓機：

英國製 "Hydrovane 5"
馬力 1.1 HP
三相，110 V
使用壓力最大 7 Kg/cm^2

台灣製 "復盛"
馬力 2 HP
三相，220 V

13. 臭氧監測器 (美國 MCI Ozone Monitor Model HC-12)：

範圍：0.000 — 9.999 % by weight

準確度：3 %

靈敏度：0.001 PPM

線性：在 0.000 — 9.999 % 間，優於 1 %

電 源：115 V ± 10 % AC，50 — 60 HZ，25 W

14. 管中加壓幫浦 (2 台)：

三相，220 V， $\frac{1}{2}$ HP

2—2 研究方法

本試驗以定流量 20 L/min 進行實驗，前臭氧處理管柱為逆向流方式，原水由管柱上端進入，由管柱下端流出，臭氧空氣則由管柱底端注入擴散盤，由管柱底部以細氣泡方式上升至管柱上端，溢出液面後由細管線導出室外。後臭氧處理槽則為雙管柱型。第一管柱與前臭氧處理管柱規格、體積均一樣，亦為逆向流方式 (即氣泡與水流方向相反)，第二管柱則為同向流方式 (臭氧氣泡與水流方向相同)，管徑、體積則較大，而臭氧空氣注入方式同前臭氧處理管

柱。本試驗共分四個試程：

試程 1：原水→前臭氧處理→混膠凝→沉澱→快濾→生物性活性碳→清水。

試程 2：原水→前臭氧處理→混膠凝→沉澱→快濾→後臭氧處理→生物性活性碳→清水。

試程 3：原水→預濾→前臭氧處理→混膠凝→沉澱→快濾→生物性活性碳→清水。

試程 4：原水→預濾→前臭氧處理→混膠凝→沉澱→快濾→後臭氧處理→生物性活性碳→清水。

所有試程均係每天 24 小時連續運轉，如遇故障則停機維修後再行恢復。

由於產製臭氧耗電，因此進行臭氧處理試驗時，均以低劑量臭氧加入。在試程 1 及 3 僅進行前臭氧處理時，所注入臭氧劑量均在 $2 \text{ mg} / \text{L}$ 以下。在試程 2 及 4 進行前後臭氧處理時，係採前稀後濃方式進行（此與一般通行方式同。臭氧實際應用於實廠時，前臭氧處理程序以收集後臭氧處理槽未耗盡而溢出空氣中之臭氧殘餘，導入前臭氧處理槽利用之，由於其濃度偏低，也有略加臭氧空氣以補充其濃度者）。注入後臭氧處理管柱之臭氧劑量在 $2 \text{ mg} / \text{L}$ 以下，注入前臭氧處理管柱之臭氧劑量則多在 $1.2 \text{ mg} / \text{L}$ 以下。

2-3 儀器設備及分析方法

儀器設備：

1. 濁度計：

美國 Hach 公司產品，Model 2100 A。

2. PH 計：

德國 WTW 公司可攜帶式 PH 計。

3. 紫外/可見光分光光度計：

日本 Shimadzu double beam spectrophotometer UV-160。

4. 臭氧計：

美國 MCI 公司產品，Model HC-12。

5. 氣體層析儀：

美國 Varian 公司產品，Model 3300，配合 ECD detector 及 4870 Integrator。

操作條件：

Column：2 mm i.d. ; glass ; 10 % Squalane Chromosorb

W, A/W, 80 / 100, length 2 m.

Injector 溫度：125 °C

Column 溫度：95 °C

Detector 溫度：200 °C

Carrier Gas：26 psi ; 29.5 mL/min ; N₂

6. 平底燒瓶電加熱分解裝置：德國 Gerhardt 公司產品，COD 消化分解用。

7. 電熱板：

德國 Gerhardt 公司產品，鐵錳分析用。

8. BOD 定溫箱：

美國 Hotpack 公司產品，Model 352700。

9. 培養箱：

光勝製作所，番號 896 培養箱。

分析方法：

濁度以美國 HACH Turbidimeter 2100 A 測定，PH 以德國 WTW PH 計測定。UV 254 以“Micro Filtration Systems” 0.45 μm cellulose nitrate 濾膜過濾水樣後測定。餘氯以 O-tolidine 比色器測定。臭氧空氣中臭氧含量以美國 MCI Model HC-12 監測之。三鹵甲烷則以美國 Varian Model 3300 氣層分析儀測定，測定操作條件如儀器設備-5。溶劑為 pentane，方法則為 Liquid-Liquid Extraction Method。其他項目分析檢驗則依照美國 APHA 等出版之 15 版標準法中所述者⁽³³⁾，臭氧殘餘以方法 422 測定之，鐵以方法 315 B 測定之，錳以方法 319 B 測定之，氮以方法 417 B 測定之，亞硝酸鹽氮以方法 419 測定之，硝酸鹽氮以方法 418 測定之，溶氧以方法 421 B 測定之，生化需氧量以方法 507 測定之，化學需氧量以方法 508 A 測定之。總菌落數以方法 907 測定之，大腸菌以方法 908 A 測定之。

2-4 採 樣

模廠保持每天 24 小時連續運轉，原則上每天採樣檢驗一次。採樣地點包括原水、預濾後、前臭氧處理後、混凝沉澱後、快濾後、後臭氧處理後、活性炭處理後及清水等。採得之水樣，除水樣中臭氧殘餘在現場分析檢驗外，其餘均攜至約 30 公尺外之一區處檢驗室檢驗。運轉中之預濾、快濾及活性炭濾床於水頭損失至一定程度時均進行反沖洗，以維持流程及處理功能正常運作。

三、結果與討論

本試驗四個試程中，試程 1 及 3 為前臭氧處理，試程 2 及 4 則為前、後臭氧處理，而其注入之前臭氧劑量（或後臭氧劑量）略有差距。試程 1、4 係臭氧發生機維修後重新啟動者，故臭氧產能效率較佳，而其注入前後臭氧處理管柱之濃度亦分別高於試程 3、2 者約 0.4~0.5 mg/L。

注入試程 1、2、3、4 前臭氧處理管柱之臭氧平均劑量分別為 1.63、0.76、1.06、1.15 mg/L，而處理水自管柱下端流出時，其臭氧平均濃度分別為 1.55、0.66、0.96、0.99 mg/L（表 4-7），顯示水中臭氧量減少有限，此與管柱槽體積不大，水力停留時間短暫有關。又臭氧在水中不穩定，半衰期短，加上水中耗臭氧物質之消耗，處理水流經混膠凝池，至沉澱池出口時，臭氧濃度已大為降低，甚有僅剩微跡或無臭氧存在情形，而處理水經過快濾後，則已無任何臭氧殘餘。試程 2、4 則另加有後臭氧處理槽，注入臭氧平均劑量分別為 1.21、1.64 mg/L，而處理水自其管柱流出時，其臭氧平均劑量分別為 1.06、1.10 mg/L（表 5 及 7）。但處理水流經活性炭濾床後，已無臭氧存在，可見活性炭床具有相當耗除臭氧能力，試程 2、4 採前後臭氧處理，所加臭氧劑量則採前稀後濃原則，此與一般常用處理方式同。

表 4 試程 1 試驗結果與分析一覽表

處理程序		前臭氣	混膠凝	沉澱	快濾	活性炭		
項	目	原水	混膠凝沉澱後水	沉澱後水	快濾後水	快濾後水	活性炭後水	累積去除率 (平均值)
		前臭氣後水	累積去除率 (平均值)	快濾後水	快濾後水	快濾後水	累積去除率 (平均值)	累積去除率 (平均值)
體積負荷	($m^3/m^3 \cdot d$)	—	—	—	192	81.6	—	—
濾速	(m/day)	—	—	—	115	102	—	—
流量	(l/min)	20	20	20	20	20	—	—
停留時間	(min)	2.65	37.50	175	33.75	28.26	—	—
減除率 (平均值)								
臭氧殘餘	mg/L	1.55 (1.26-1.80)	0.11 (0.00-0.30)	—	0.00 (0.00-0.00)	0.00	0.00 (0.00-0.00)	—
PH		7.1 (6.9-7.2)	7.0 (6.8-7.2)	—	7.0 (6.7-7.5)	7.0	7.0 (6.7-7.7)	—
濁度	NTU	10.4 (4.1-18)	4.4 (2.5-6.6)	+ 23%	0.7 (0.1-3.9)	0.4	0.4 (0.2-0.7)	+ 97%
鐵	mg/L	1.2 (0.8-1.8)	0.5 (0.3-0.6)	+ 10%	0.04 (Trace-0.4)	0.004	0.004 (Trace-0.02)	+ 100%
錳	mg/L	0.3 (0.1-1.2)	0.1 (0.05-0.40)	+ 19%	0.02 (0-0.07)	0.002	0.002 (0-0.02)	+ 100%
氨	mg/L	1.1 (0.3-3.8)	1.0 (0.2-3.8)	+ 3%	0.8 (0-3.6)	0.6	0.6 (0-3.6)	+ 83%
生化需氧量	mg/L	1.6 (0.6-2.7)	1.6 (0.9-2.9)	+ 45%	1.4 (0.1-2.1)	0.9	0.9 (0.2-2.3)	+ 75%
化學需氧量	mg/L	—	—	—	—	19	19 (1.9-34)	+ 82%
UV 254		0.018 (0.008-0.030)	0.010 (0.003-0.016)	+ 23%	0.008 (0.003-0.014)	0.006	0.006 (0.002-0.012)	+ 75%

* 係注入原水之臭氧劑量，由前臭氣槽下端注入。

** 上列數據為平均值，下列數據為範圍。

表 5 試程 2 試驗結果與分析一覽表

處理程序	原水	臭		混膠凝		沉澱		快濾		濾		後臭		活性碳		性	
		前	後	減除率 (平均)	混膠凝 後	混膠凝 後	快濾 後	快濾 後	後臭 後	後臭 後	果糖 後	果糖 後	果糖 後	果糖 後	果糖 後	果糖 後	果糖 後
體積負荷 (m ³ /m ² ·d)	-	-	-	-	-	-	-	192	-	-	81.6	-	-	-	-	-	-
濾速 (M/day)	-	-	-	-	-	-	-	115	-	-	102	-	-	-	-	-	-
流量 (ℓ/min)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
停留時間 (min)	2.65	37.5	175	33.75	7.35	28.26	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35
項目	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭	臭
臭氣殘餘 mg/L	0.76* (0.46-1.10)	0.66 (0.36-1.02)	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH	6.9 (6.7-7.3)	7.0 (6.8-7.2)	-	6.9	6.9	6.9	6.9	6.7	6.7	6.7	6.7	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
濁度 NTU	24 (10-41)	21 (5-36)	+16%	4.8	4.8	4.8	4.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
鐵 mg/L	2.0 (1.2-2.8)	1.6 (1.0-2.0)	+15%	0.4	0.4	0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
錳 mg/L	0.25 (0.18-0.35)	0.23 (0.13-0.30)	+10%	0.10	0.10	0.10	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
游氨氮 mg/L	0.8 (0.4-1.1)	0.78 (0.4-1.0)	+7%	0.7	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
生化需氧量 mg/L	5.4 (1.5-10)	2.1 (0.9-3.2)	+27%	2.4	2.4	2.4	2.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
化學需氧量 mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV ...	0.024 (0.013-0.035)	0.021 (0.014-0.033)	+10%	0.010	0.010	0.010	0.010	0.006	0.006	0.006	0.006	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
細菌總數	34000 (27000-40000)	708 (40-1500)	+98%	540	540	540	540	219	219	219	219	0	0	0	0	0	0
大腸菌數	85660 (9300-240000)	4718 (230-11000)	+93%	416	416	416	416	168	168	168	168	0	0	0	0	0	0

* 係注入原水之臭氣劑量，由前臭槽下端注入。

** 上列數據為平均值，下列數據為範圍。

表 6 試程 3 試驗結果與分析一覽表

處理程序	原水	預濾		前臭	臭	氣	混膠	凝沉	沉澱	快濾	濾		活性	性	水
		預濾後水	減除率 (平均値)								前臭後水	果糖除率 (平均値)			
體積負荷 (m ³ /m ³ ·d)		115		—			—		—	192			81.5		
濾速 (M/day)		115		—			—		—	115			102		
流量 (ℓ/min)		20		20			20	20	20	20			20		
停留時間 (min)		33.75		2.65			37.50	175	175	33.75			28.26		
項目	水	預濾後水	減除率 (平均値)	前臭後水	果糖除率 (平均値)	混膠凝沉後水	果糖除率 (平均値)	果糖除率 (平均値)	果糖除率 (平均値)	快濾後水	果糖除率 (平均値)	果糖除率 (平均値)	活性後水	果糖除率 (平均値)	果糖除率 (平均値)
臭氧殘餘 mg/L	—	1.06* (0.94-1.23)	—	0.96 (0.90-1.08)	—	0.06 (Trace-0.12)	—	—	—	0.00 (0-0)	—	—	—	—	—
PH	7.0 (6.9-7.0)	6.9 (6.8-7.0)	—	7.0 (6.8-7.1)	—	6.8 (6.4-7.0)	—	—	—	6.6 (6.5-6.7)	—	—	6.7 (6.6-6.8)	—	—
濁度 NTU	20 (9.4-41)	20 (7.6-40)	+4.8%	17 (8.8-33)	+17%	3.4 (1.6-5.2)	+81%	+81%	+81%	0.5 (0.3-0.7)	+97%	+97%	0.6 (0.3-0.9)	+97%	—
鐵 mg/L	1.7 (1.0-3.2)	1.5 (0.8-1.6)	+8%	1.3 (0.8-2.7)	+21%	0.2 (0.1-0.5)	+85%	+85%	+85%	Trace (Trace-Trace)	+100%	+100%	Trace (Trace-Trace)	+100%	—
錳 mg/L	0.23 (0.13-0.25)	0.22 (0.08-0.25)	+7%	0.19 (0.10-0.32)	+18%	0.07 (0.03-0.15)	+69%	+69%	+69%	0 (0-0)	+100%	+100%	0 (0-0)	+100%	—
氨氮 mg/L	1.17 (0.40-2.00)	0.92 (0.25-1.80)	+26%	0.81 (0-1.80)	+32%	0.73 (0.22-1.20)	+40%	+40%	+40%	Trace (Trace-Trace)	+100%	+100%	Trace (Trace-Trace)	+100%	—
生化需氧量 mg/L	5.1 (1.5-9.0)	3.2 (2.5-4.4)	+43%	1.0 (0.5-1.5)	+72%	0.7 (0.4-1.1)	+79%	+79%	+79%	0.4 (0.1-0.6)	+89%	+89%	0.4 (0.3-0.6)	+88%	—
UV ...	0.028 (0.016-0.037)	0.025 (0.016-0.033)	+7%	0.018 (0.013-0.026)	+30%	0.009 (0.003-0.013)	+68%	+68%	+68%	0.006 (0.002-0.008)	+78%	+78%	0.004 (0.003-0.007)	+85%	—
總細菌菌數 CFU/ML	39000 (26000-53000)	36333 (24000-55000)	-3%	27 (20-30)	+100%	160 (35-400)	+100%	+100%	+100%	57 (0-90)	+100%	+100%	27 (15-40)	+100%	—
大腸菌 MPN/100mL	125333 (43000-24000)	109700 (43000-24000)	+17%	103 (40-230)	+100%	175 (23-460)	+100%	+100%	+100%	9 (0-23)	+100%	+100%	17 (4-43)	+100%	—

* 注入前臭氣槽前之臭氣劑量。

** 上列數據為平均值，下列數據為範圍。

表 7. 試程 4 試驗結果與分析一覽表

處理程序	原水	預濾	前臭氣	混膠凝	沉澱	快濾	後臭氣	活性碳	項
目	水	預濾後水	前臭氣後水	混膠凝後水	泥沉澱後水	快濾後水	後臭氣後水	活性碳後水	果積減除率(平均)
		減除率(平均)	果積減除率(平均)	果積減除率(平均)	果積減除率(平均)	果積減除率(平均)	果積減除率(平均)	果積減除率(平均)	果積減除率(平均)
體積負荷 (m ³ /m ³ ·d)	—	115	—	—	—	192	—	81.5	
濾速 (M/day)	—	115	—	—	—	115	—	102	
流量 (ℓ/min)	—	20	20	20	20	20	20	20	
停留時間 (min)	—	33.75	2.65	37.5	175	33.75	7.35	28.26	
臭氣殘餘 mg/L	—	1.15* (0.96-1.33)	0.99 (0.60-1.08)	0.21 (0.12-3.6)	—	0	1.64(in) (1.43-2.00)	0 (0-0)	—
PH	7.1 (6.9-7.2)	7.0 (6.9-7.2)	7.1 (6.9-7.2)	6.9 (6.8-7.0)	—	6.7 (6.5-6.8)	7.0 (6.7-7.1)	6.8 (6.6-6.9)	—
濁度 NTU	12 (9.0-25)	11 (6.0-24)	10 (6.0-24)	3.6 (0.5-6.2)	+ 17%	0.5 (0.2-1.0)	1.1 (0.3-2.1)	0.6 (0.3-1.0)	+ 94%
鐵 mg/L	1.1 (0.9-1.8)	1.0 (0.6-1.7)	0.9 (0.6-1.7)	0.3 (0.2-0.6)	+ 22%	0.0 (0.0-0.0)	0.0 (0.0-0.0)	0.0 (0.0-0.0)	+ 100%
錳 mg/L	0.15 (0.12-0.23)	0.13 (0.07-0.26)	0.12 (0.08-0.26)	0.04 (0.03-0.12)	+ 27%	0.00 (0.00-0.00)	0.00 (0.00-0.00)	0.00 (0.00-0.00)	+ 100%
氨氮 mg/L	2.6 (2.0-3.4)	2.4 (1.8-3.2)	2.3 (1.8-2.8)	1.8 (1.4-2.4)	+ 10%	Trace (Trace-Trace)	Trace (Trace-Trace)	Trace (Trace-Trace)	+ 100%
生化需氧量 mg/L	9.9 (9.0-12)	3.2 (2.7-3.6)	3.5 (3.1-3.8)	2.5 (1.2-4.5)	+ 64%	0.9 (0.5-1.2)	0.6 (0.3-1.5)	0.5 (0.1-0.9)	+ 95%
UV 254	0.041 (0.018-0.053)	0.040 (0.017-0.051)	0.031 (0.014-0.039)	0.022 (0.008-0.031)	+ 25%	0.018 (0.004-0.027)	0.011 (0.005-0.016)	0.008 (0.004-0.011)	+ 80%
總細菌菌數 CFU/mL	46600 (29000-90000)	51400 (32000-100000)	560 (480-700)	2324 (120-8000)	+ 98%	1712 (360-2800)	4 (0-10)	50 (0-220)	+ 100%
大腸菌 MPN/100mL	171800 (43000-460000)	113800 (43000-240000)	3326 (430-4300)	7172 (460-11000)	+ 96%	7100 (65-1100)	0 (0-0)	11 (0-43)	+ 100%

* 注入前臭氣槽前之臭氣劑量。

** 上列數據為平均值，下列數據為範圍。

原水 P H 在各試程中，無甚變化，但在快濾或活性炭濾程序中，伴隨濾床硝化作用之進行，P H 有略降之情形。

預濾過對於原水濁度略有去除能力，但效果卻極為有限。此應與預濾床砂粒徑較大有關。預濾後或未經預濾之原水經前臭氧處理後對濁度去除率增為 16-23%，而與原水是否有預濾處理無關，亦由此可見前臭氧處理對六堵基隆河水有一定的去除濁度效果。此外，由圖 7 也可見到在四個試程中混膠凝沉澱及快濾對於濁度去除效果最大。與原水比較，經快濾後水其濁度已移除 93% 以上。此時因處理水濁度已低，再經後臭氧處理或活性炭濾床處理看不出明顯移除濁度效果，有時處理水經後臭氧處理後濁度不減反增的情形，可能係後臭氧處理槽管壁附著物經後臭氧處理後，剝落被帶出以致濁度增加。也有可能是在處理水中之物質經後臭氧處理後，反以懸狀物質出現⁽⁷⁾，故濁度反而略為增加。依圖 7 觀之，以試程 2、3 對濁度去除效果較佳，而以試程 4 表現最差。

在鐵、錳去除方面，四個試程顯示出來之移除曲線（圖 8 及 9）與濁度移除曲線（圖 7）類近，即預濾雖有移除鐵、錳之效果，但不見得有助於以後處理程序之累積移除率。又原水鐵、錳在混膠凝沉澱及快濾過程中，被移除之比率最高。經快濾後，除試程 1 外，試程 2、3、4 之處理水皆已達成 100% 之鐵、錳去除率。而前臭氧處理對鐵、錳去除效果沒有想像中的好，可能是水在前臭氧處理槽停留時間不夠長，因此臭氧與水中鐵、錳反應時間過程，而導致在此階段鐵、錳去除效果偏低。也有可能水中鐵、錳已和臭氧反應，但尚未形成足夠大的膠羽，故懸浮於水中，並隨同流出處理槽，故水樣檢驗結果，鐵、錳含量減少有限。在四個試程中，以試程 1 表現最差，其他三個試程則相差無幾，但以試程 3、4 表現較佳。

在氨氮去除方面，四個試程中以試程 3、4 表現較佳。試程 3、4 在前臭氧處理程序之前，加進預濾處理，六堵基隆河原水經其過濾，已有除氨效果（圖 10），其續經前臭氧處理、混膠凝沉澱處理，快濾處理，其累積氨氮去除率均高於試程 1、2 者。值得一提的是，原水經前臭氧處理及混膠凝沉澱處理後，在快濾床中發生極為明顯的除氨效果，此係快濾床中發生劇烈的硝化作用所致，此時由化驗資料，可發現氨氮大量減少，硝酸鹽氮明顯增加，以及快濾床出水溶氧明顯降低。臭氧雖無法與氨氮直接反應，但其配合砂濾床（或活性炭床）卻有明顯除氨效果，此因臭氧不但促進水中有機分子分解，也相對補充水中溶氧，活化濾床硝化作用之進行。

在試驗初期，亦即進行試程 1 之試驗時，快濾床及活性炭濾床因硝化菌尚未大量繁衍發展，除氨氮作用差，但模廠經連續運轉一週後，硝化作用日益明顯，尤以活性炭濾床幾可達成 100% 除氨氮效果。此時活性炭濾床出水溶氧明顯降低，但仍在 4.7 mg/L 以上，約二週後，快濾床除氨作用也可達到 100%，而快濾床溶氧也見下降情形。圖 10 顯示，試程 1 之氨氮去除率曲線相對於其他試程 2、3、4 者明顯偏低，此係試程 1 之曲線包括了砂濾床（或活性炭濾床）硝化作用尚未完全正常時之數據，故氨氮去除率效果比試程 2、3、4 者低。事實上如果濾床硝化作用功能正常，試程 1 之曲線應可接近試程 2、3、4 者。

在 BOD₅ 減除方面，以試程 3、4 表現較佳（圖 11），試程 3、4 比試程 1、2 多加進預濾處理程序，其對原水 BOD₅ 有明顯減除成效，而其以後處理程序所累積的 BOD₅ 減除率也一

直高於試程 1、2 者。試程 3 與 4 在至快濾時，二者對水中 BOD₅ 減除率分別為 89 % 及 91 %，十分相近，但試程 4 因另加入後臭氧處理程序，以致處理水經過活性碳濾過後，對 BOD₅ 的減除效果稍高於試程 3 者。

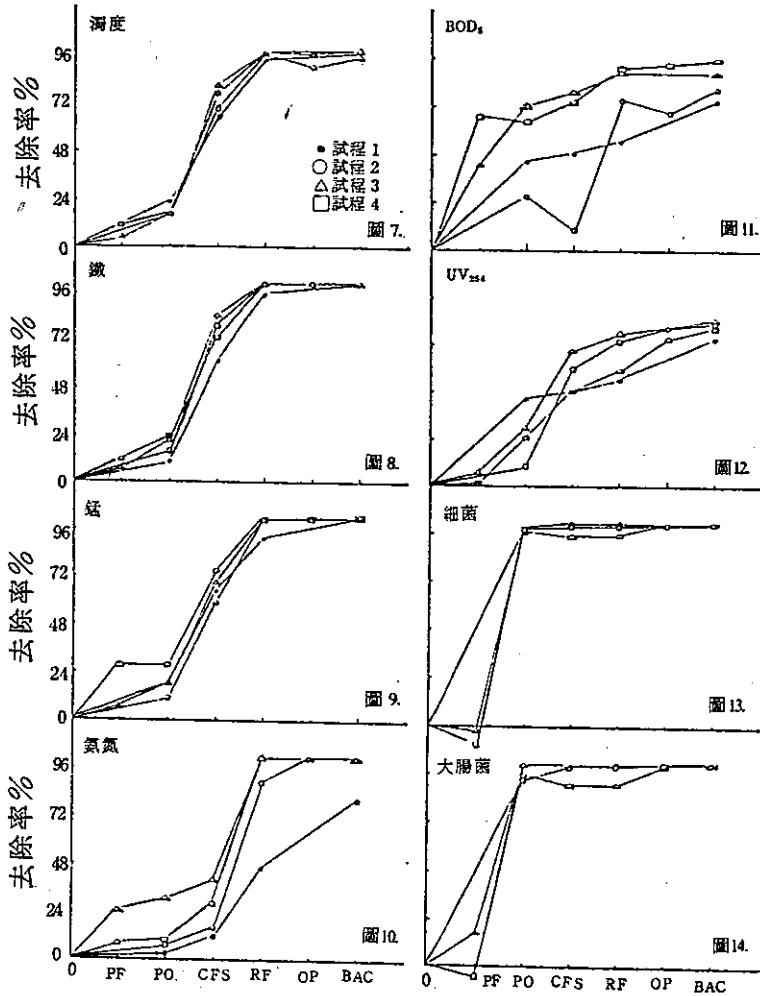
在 UV₂₅₄ 減除方面（見圖 12），以試程 3 表現最佳，試程 2 次之，試程 4 又次之，而以試程 1 表現最差。在表現較好的試程 2、3 中，又以前臭氧處理後至沉澱這個階段對 UV₂₅₄ 之減除效果最為明顯。

在三鹵甲烷減除方面，由於三鹵甲烷基本上是淨水處理中加氯後產生之衍生物。在本次試驗中，僅將模廠試程 1、2、3、4 中加氯之清水與六堵淨水場之加氯清水所含三鹵甲烷量略做比較，六堵淨水場採原水一抽進淨水場即行加氯的做法，由於原水耗氯量大，且加氯採一次加足原則（亦即除非快濾後清水餘氯偏低，再行補加氯以提高餘氯濃度），因此原水加氯濃度偏高，且與水接觸時間長。而模廠試驗係採活性碳濾後加氯，由於活性碳濾後水已相當乾淨，其耗氯量低，且活性碳後水經加氯後，流至清水池時，氯與清水接觸時間短暫。因此欲精確比較模廠清水與六堵淨水場清水中之三鹵甲烷不可能，但二者仍可略作比較。表 8 列出模廠試驗試程 1、2、3、4 之清水與其時六堵淨水場清水所含三鹵甲烷量之平均值。此等數據顯示模廠試驗中之試程 1、2、3、4 均可大幅減少清水中三鹵甲烷含量，其減除效果以試程 4 表現最佳，減除效率為 90.5 %，試程 2 次之。不過四個試程中之清水三鹵甲烷平均含量介於 4.6—7.8 μg/L 之間，差異並不大，而模廠和六堵淨水場清水中三鹵甲烷主要為氯仿（CHCl₃），顯然係淨水處理過程中，加氯引起者。

表 8 試程 1—4 清水與六堵淨水場清水三鹵甲烷之比較

注入臭氧平均濃度		模廠清水		淨水場清水池			
試程	前臭氧	後臭氧	餘氯 mg/L	三鹵甲烷 μg/L	餘氯 mg/L	三鹵甲烷 μg/L	減除率
1	1.53	—	0.7	7.8	1.3	29.4	+ 72.2 %
2	0.76	1.21	0.3	5.6	1.2	32.0	+ 77.0 %
3	1.06	—	0.8	7.0	1.3	30.2	+ 74.1 %
4	1.15	1.64	1.1	4.6	1.8	53.8	+ 90.5 %

在總細菌數和大腸菌減除方面，試程 3 和 4 之預濾處理程序對於菌數並無減除效果，反因預濾床關係，預濾後水之菌數多呈不減反增的情形（圖 13 及 14）。由圖也可看出，不論原水有無預濾處理，經前臭氧處理以後，菌數已大為降低，其減除率至少 93 % 以上，此乃因臭氧具有極強氧化能力，故在短瞬間在除菌方面即發揮強大殺傷力。原水續經混膠凝沉澱及快濾，雖然其累積除菌率仍維持 90 %，但菌數卻時有增加，尤其在試程 4 更明顯（其時原水中氮氮高，BOD₅ 高，水質較髒）。此時，如果處理水再經後臭氧處理，除菌率皆可達 100 %。處理水經活性碳濾過後，雖然除菌率幾乎達 100 %，但水中仍有菌類存在。在四個試程中，以試程 2、3 表現較佳，而與試程是否有無預濾處理無關。試程 4 表現稍差可能和其時水質較髒有關。



O : 原水
 P F : 預濾後水
 P O : 前臭氧處理後水
 C F S : 凝膠凝沉後水
 R F : 快濾後水
 O P : 後臭氧處理後水
 B A C : 生物性活性碳後水

圖 7 — 14 試程 1-4 各項水質項目經各處理單元後之去除效果

綜合言之，本試驗四個試程對原水濁度、鐵、錳、氮氮、生化需氧量、UV₂₅₄、細菌及三鹵甲烷之去除可以以下表示之：

表 9 試程 1—4 各處理單元處理原水之效果

項 目	去除表現佳之試程	去 除 表 現 佳 之 處 理 單 元
濁度、鐵、錳	1, 2, 3, 4	前臭氧後一快濾
氨氮	2, 3, 4	快濾(佳), 預濾(次佳)
生化需氧量	3, 4	預濾(佳), 前臭氧(次佳)
UV ₂₅₄	2, 3	混膠凝沉澱(佳), 前臭氧(次佳)
細菌(含大腸菌)	2, 3, 4	前臭氧(佳), 後臭氧(佳)
三鹵甲烷	2, 3, 4	

其中濁度、鐵、錳之去除主要係高氧化力之前臭氧配合混膠凝沉澱及快濾之結果。氨氮去除主要為快濾床及預濾床硝化作用進行之結果。生化需氧量之去除主要為預濾床生物作用及前臭氧分解作用之結果。UV₂₅₄之去除主要則為前臭氧處理及混膠凝沉澱之結果。細菌之去除主要為前或後臭氧處理，次為混膠凝沉澱過濾之結果。三鹵甲烷減少之主要原因為(1)原水未做前加氯處理，而混膠凝、沉澱、過濾後，水中已有部份有機物被移除，又因砂濾床、活性碳床物、化、生物等作用，使水質大為改善，再因所加氯量大為減少，因此三鹵甲烷生成量相對減少許多。(2)水中三鹵甲烷前驅物質經臭氧作用後，分解為非三鹵甲烷前驅物質之小分子，或分解後之有機物質雖為三鹵甲烷前驅物質，但因其易為生物所分解利用，因此其在砂濾床或活性碳床中多已被生物分解利用，三鹵甲烷前驅物質濃度大為減少，與所加氯反應產生之三鹵甲烷量也相對減少。在四個試程實驗中，以試程 3 表現最佳，試程 2、4 次之。值得注意的是試程 3 所施用之臭氧偏低(表 6)，且無後臭氧處理單元，但卻加進了預濾及生物性活性碳處理。此種處理程序不但對降低成本有益，且能減少水中氨氮及生化需氧量，對水質改善甚有益處。

本次試驗中，意外發現的是配合前臭氧處理及快濾床已可發揮極佳的除氨效果，此應和台灣地處亞熱帶，硝化作用活躍，較不受溫度抑制有關係。相對的是生物性活性碳床處理表現不明顯，對於濁度、鐵、錳、氨氮、細菌等項目而言，處理程序至快濾時已可將其充分去除。唯生物性活性碳對 BOD₅ 及 UV₂₅₄ 減除仍有效果(圖 11 及 12)，可進一步減少水中溶解性有機物含量及其毒性，另在快濾床遇洗砂或其他狀況以致除氨功能降低時，也可成為去除水中氨氮之第二道保險關卡。而處理水經快濾後，其濁度已非常低，因此生物性活性碳床濾程相當長，並不常常反沖洗。在臭氧應用於淨水處理中，配合生物性活性碳於其後應是極佳之選擇。

四、結論與建議

4—1 結論

1. 傳統淨水處理對水質改善大有助益，淨水廠工作人員對傳統淨水處理應予以肯定及重視，加強混膠凝、沉澱、快濾等操作之研討，以提升處理後清水之品質。
2. 預濾對於六堵基隆河原水氨氮及生化需氧量減除效果明顯。

- 3.低劑量前臭氧處理配合快濾可獲得極佳除氮及 UV₂₅₄ 減除效果，再配合生物性活性碳處理則效果更佳。
- 4.低劑量前臭氧處理配合混膠凝、沉澱、快濾對有機物之去除具有效果，而對濁度、鐵、錳去除則有極佳之成效。
- 5.對於六堵基隆河原水，以低臭氧劑量處理之最佳選擇為試程 3，亦即傳統處理程序前加入預濾及前臭氧處理，而於快濾後加入生物性活性碳處理。
- 6.由於前臭氧處理配合傳統淨水處理程序對水質改善已相當好，以致後臭氧處理對水質進一步改善效果不明顯。
- 7.以試程 1、2、3 或 4 方式，應用於六堵基隆河原水之淨水處理，在加氯前因先經臭氧、混膠凝、沉澱及過濾等處理，已移除大部份三鹵甲烷前驅物質，故可大幅減少水中三鹵甲烷之生成。

4—2 建議

- 1.針對臭氧高氧化能力，建廠所需材料材質需嚴格考慮，以不銹鋼材為宜，抗氧化特殊塑膠材次之。
- 2.臭氧處理廠操作，實驗人員對臭氧性質及其製造、檢修、維護需有專業化知識與訓練，以免操作不當，易生危險，並且導致經常當機，造成極大不便及困擾。
- 3.台灣氣候高溫多濕，進入臭氧發生機乾燥空氣之前處理必需加強，其處理能量 (Capacity) 要足夠。
- 4.臭氧如欲應用於後臭氧處理，其逸出之臭氧殘餘應考慮回收注入前臭氧處理槽，以達充分利用臭氧殘餘原則。
- 5.本試驗係以低劑量臭氧配合定流量原水進行實驗，一些參數如濾速、活性碳床 E B C T 等與一般實際應用所報導者類近，唯可進一步做臭氧劑量與水量負荷、氮負荷、有機負荷等最適量化之研究，以為實際應用時之參考。

五、誌謝

首先感謝水公司各有關單位及主管在經費、人力方面予以支持，調配，便利了試驗的進行。

本計劃在水公司北工處及一區處有關同仁共同努力及漢記工程企業公司、信誌貿易股份有限公司協助下，完成初步試驗，謹在此表示謝意。

我們特別感念一區處檢驗室廖故主任四郎先生，由於其鼎力支持，使得本計劃在模廠運轉及試驗初期，重重困難得以逐一克服。

在此必需要提到的是一區處檢驗室林豐國主任及吳民鐘先生、陳培智先生、黃寶麟先生、林義順先生和歐麗花小姐，由於他們的付出努力使得本試驗有了初步的結果。尤其是吳民鐘先生在本計劃進行期間，其在臭氧模廠操作、維護、試驗等方面作出很大的貢獻。

也十分感謝信誌貿易股份有限公司林義典先生在百忙之中，經常為臭氧發生機維護提供服

務，使試驗得以順利進行。

此外，本報告在撰寫時，得水質研究中心主任蕭榮超先生，一區處主任林豐國先生及吳民鐘先生等惠提許多寶貴意見及指正，謹此致謝。

六、參考文獻

- 1.C. Gomella, Ozone Practice in Frances, J. AWWA, 64:1:39 (1972).
- 2.W. C. Harris, Ozone Disinfection, J. AWWA, 64:3:182 (1972).
- 3.J. J. Mc Carthy and C. H. Smith, A Review of Ozone and Its Application to Domestic Wastewater Treatment, J. AWWA, 66:12:718 (1974).
- 4.J. T. Cromley and J. T. O'Connor, Effect of Ozonation on the Removal of Iron From a Ground Water, J. AWWA, 68:6:315 (1976).
- 5.P. L. Knoppert, et al., An Overview of European Water Treatment Practice, J. AWWA, 72:11:592 (1980).
- 6.Ozone Treatment of Potable Water, Emery Data Sheet 791A, Emery Industries, Inc., July, 1980.
- 7.R. G. Rice, et al., Uses of Ozone in Drinking Water Water Treatment, J. AWWA, 73:1:44 (1981).
- 8.R. A. Stoebner and D. A. Rollag, Ozonation of Municipal Ground Water Supply to Reduce Iron, Manganese, and Trihalomethane Formation, Proc. AWWA ACE, St. Louis, Missouri (June, 1981).
- 9.M. Rapinat, Recent Developments in Water Treatment in France, J. AWWA, 74:12:610 (1982).
- 10.D. Roy, R. S. Englebrecht, and E. S. K. Chian, Comparative Inactivation of Six Enteroviruses by Ozone, J. AWWA, 74:12:66 (1982).
- 11.Ozone for Potable Water Treatment, H-P Klein, BBC Brown, Boveri & Co Ltd, Switzerland, 1982.
- 12.M. Schalekamp, All about Ozone-Its Advantages and Disadvantages in Treating Water, Aqua, 3, 89 (1983).
- 13.J. Beck, Organics in Danish Drinking Water, Part I, Aqua, 4, 204 (1984).
- 14.D. A. Reckhow and P. C. Singer, The Removal of Organic Halide Precursors by Preozonation and Alum Coagulation, J. AWWA, 76:4:151 (1984).
- 15.B. Z. Wang, J. Z. Tian, and J. Yin, Purification of Polluted Source Water with Ozonation and Biological Activated Carbon, Aqua, 6, 351 (1986).
- 16.Ozone For Potable Water, Ozotech Ltd., England.
- 17.Ozone Plant for Water Treatment, Publication No. OT18, Ozotech Ltd., England.
- 18.G. W. Miller, et al., An Assessment of Ozone and Chlorine Dioxide Technologies for Treatment of Municipal Water Supplies, EPA-600/2-78-147, USEPA, Washington, D. C. (August, 1978).
- 19.Ozone in Water Treatment-Applications, Operations, and Technology, Am. Water Works Assoc., Denver, Co, 1985.

20. 臭氧應用於飲用水及廢水處理，法國 Trailigaz 公司演講提供之資料（1982年11月於台北）。
21. 法國 Trailigaz 公司臭氧簡介資料。
22. R. C. Renner and K. L. Rakness, Ozone Design Considerations of Water Treatment, Presented at AWWA Rocky Mountain Sec. Meeting, Keystone, Colo (September, 1984).
23. A. J. Varas, et al., Making Ozonation Reliable and Economical, Proc. AWWA ACE, Las Vegas, Nevada (June, 1983).
24. R. Anderson, Sewage Treatment Processes-The Solution to the Odor Problem, Publication No. OT 11, Ozotech, England.
25. W. L. Lepage, The Anatomy of an Ozone Plant, J. AWWA, 73:2:105 (1981).
26. 日本住友精密工業株式會社提供之 PSA オゾイザ資料。
27. J. P. Legeron, Chemical Ozone Demand of a Water Sample by Laboratory Evaluation, Presented at the Symposium on Advanced Ozone Technology, Toronto, Canada, 1977.
28. 蕭榮超赴南非共和國參加國際臭氧會議報告，1984。
29. R. J. Bull, Health Effects of Alternate Disinfectants and Their Reaction Products, J. AWWA, 72:5:299 (1980).
30. A. E. Greenberg, Public Health Aspects of Alternative Water Disinfectants, J. AWWA, 73:1:31 (1981).
31. C. Vogt and S. Regli, Controlling Trihalomethanes while attaining disinfection, J. AWWA, 73:1:33 (1981).
32. K. E. Longley, et al., Disinfection, J. AWWA, 74:7:376 (1982).
33. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 15 th Edition, APHA, AWWA, WPCF, 1981.

附錄 臭氧劑量計算*

臭氧製造相當耗能，產生之臭氧空氣也因臭氧不穩定，而需儘快立即使用。典型臭氧應用於淨水處理中，先將臭氧以擴散器接觸方式注入於後臭氧接觸槽中與水反應後，溢出水面之臭氧殘餘再以適當可行方式稀釋／破壞之（或將臭氧空氣殘餘用接連管線以 Turbine 方式打出注入前臭氧處理槽中以充分利用空氣中之臭氧殘餘，溢出之更稀臭氧空氣殘餘再以適當可行方式稀釋／破壞之）。適用於實驗室之靜態批次（Batch）操作中，臭氧耗用量可以下列公式計算之：

$$O_3 U = \frac{(O_{3in} - O_{3out}) Vg}{V_1} - O_{3residual}$$

$O_3 U$ = 被水中物質耗用之臭氧量 (mg / L)

O_{3in} = 餵入水中之臭氧空氣含臭氧劑量 (mg / L)

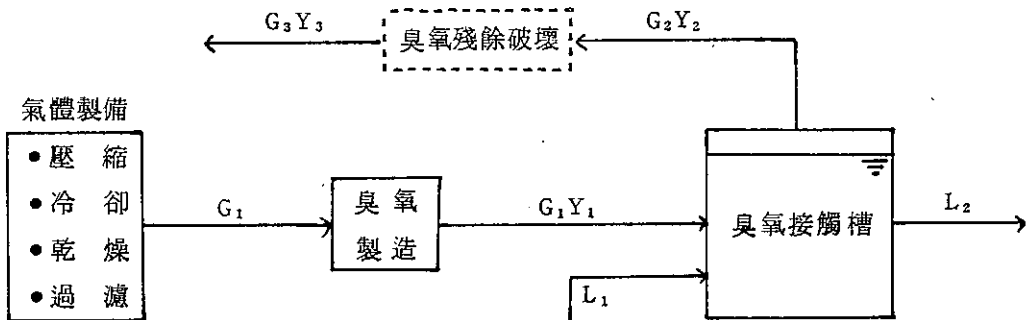
O_{3out} = 離開處理水後之臭氧空氣含臭氧殘餘劑量 (mg / L)

V_1 = 所處理之水量 (L)

Vg = 使用之臭氧空氣體積 (L)

$O_{3residual}$ = 接觸槽出口處水中臭氧殘餘 (mg / L)

至於動態連續式（Continuous）流程操作，其簡單示意圖及有關計算如下：



G_1 = 進氣流量 (m^3 / min)

Y_1 = 進氣臭氧濃度 (g / m^3)

G_2, G_3 = 離氣 (Off gas) 流量 (m^3 / min)

Y_2 = 離氣 (Off gas) 之臭氧濃度 (g / m^3)

Y_3 = 排放氣 (Exhaust gas) 之臭氧濃度 (g / m^3)

L_1, L_2 = 水流量 (m^3 / min)

$O_{3residual}$ = 接觸槽出口處水中臭氧殘餘

$G_1 Y_1$ = 臭氧產量 (g / min)

$\frac{G_1 Y_1}{L_1}$ = 施用於水中之臭氧劑量 (g / m^3 或 mg / L)

$$\text{OTE}\% = \text{臭氧使用率 (Ozone Transfer efficiency)} = \frac{G_1 Y_1 - G_2 Y_2}{G_1 Y_1} \times 100\% \cong$$

$$\frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \times 100\%$$

O U = 被水中物質耗用之臭氧量 (Ozone Utilized)

$$= \frac{G_1 Y_1 - G_2 Y_2}{L_1} - O_{3\text{residual}} \cong \frac{G_1 (Y_1 - Y_2)}{L_1} - O_{3\text{residual}}$$

* 材取自參考資料 22 及 J. AWWA, 74:1:38 (1982)

表 10 在一大氣壓下，不同溫度之乾空氣比重 **

t °C	Sp.Gr.×10 ⁴	t °C	Sp.Gr.×10 ⁴	t °C	Sp.Gr.×10 ⁴	t °C	Sp.Gr.×10 ⁴
-25	14.240	15	12.255	60	10.59	140	8.541
-24	14.182	16	12.213	62	10.53	142	8.500
-23	14.125	17	12.170	64	10.47	144	8.459
-22	14.069	18	12.129	66	10.40	146	8.419
-21	14.013	19	12.037	68	10.34	148	8.379
-20	13.957	20	12.046	70	10.28	150	8.339
-19	13.902	21	12.004	72	10.22	155	8.242
-18	13.847	22	11.964	74	10.16	160	8.147
-17	13.793	23	11.923	76	10.10	165	8.054
-16	13.739	24	11.883	78	10.05	170	7.963
-15	13.685	25	11.843	80	9.99	175	7.874
-14	13.632	26	11.803	82	9.93	180	7.787
-13	13.580	27	11.764	84	9.88	185	7.702
-12	13.527	28	11.725	86	9.82	190	7.619
-11	13.476	29	11.686	88	9.77	195	7.537
-10	13.424	30	11.647	90	9.71	200	7.457
-9	13.373	31	11.609	92	9.66	205	7.379
-8	13.322	32	11.570	94	9.61	210	7.303
-7	13.272	33	11.533	96	9.56	215	7.228
-6	13.222	34	11.495	98	9.50	220	7.155
-5	13.172	35	11.458	100	9.45	230	7.013
-4	13.124	36	11.420	102	9.40	240	6.881
-3	13.075	37	11.383	104	9.35	250	6.753
-2	13.026	38	11.347	106	9.30	260	6.624
-1	12.978	39	11.310	108	9.25	270	6.504
0	12.931	40	11.374	110	9.21	280	6.389
+1	12.883	41	11.238	112	9.16	290	6.277
2	12.836	42	11.202	114	9.11	300	6.166
3	12.790	43	11.167	116	9.06	310	6.062
4	12.743	44	11.132	118	9.02	320	5.942
5	12.697	45	11.097	120	8.97	330	5.847
6	12.652	46	11.062	122	8.93	340	5.755
7	12.606	47	11.027	124	8.88	350	5.664
8	12.561	48	10.993	126	8.84	360	5.578
9	12.517	49	10.958	128	8.79	370	5.493
10	12.472	50	10.924	130	8.75	380	5.407
11	12.428	52	10.857	132	8.71	300	5.248
12	12.385	54	10.791	134	8.66	320	5.101
13	12.341	56	10.725	136	8.62	340	4.952
14	12.298	58	10.660	138	8.58	360	4.812

潮溼空氣密度計算：

$$d_t = D_t \times \frac{P - 0.3783e}{760}$$

d_t ：t °C時，潮溼空氣密度

D_t ：t °C時，乾燥空氣密度

P：大氣壓，單位 mmHg

e：該露點 (Dew Point) 溫度時之水蒸氣壓，單位 mmHg

例 1. 校正後大氣壓為 750mmHg，溫度 20 °C，露點 10 °C 之潮溼空氣密度為何？

$$d = 0.0012046 \times \frac{750 - 0.3783 \times 9.209}{760} = 0.0011832 \text{ g/ml}$$

例 2. 上例，設其時前臭氧管柱氣體流量 4.0 l/min，監測器臭氧濃度為 0.760 %，水流為 20l/min，則注入臭氧處理管柱之臭氧濃度為何？

$$\text{dose} = \frac{0.0012 \text{ g/ml} \times 4000 \text{ ml/min} \times \frac{0.76}{100}}{20000 \text{ g/min}} = 0.0000018 \text{ g/g} = 1.8 \text{ PPM}$$

** 材取自 Lange's Handbook of Chemistry, 1973.