

水處理程序之氯氣替代品分析比較

林裕嘉* 周更生**

摘要

氯氣為公告之毒性化學物之一，然目前使用者眾，遍佈各行各業，不但用量不貲，而且過去發生意外災害的記錄不少，因此極有必要依法管理，然則因其數量龐大，管理不易及業者之規避為可預見之潛在問題。所以尋求比較安全的非毒性化學替代品，應為較佳之管理之策略。本文即在於檢討分析在水處理用途上，可作為氯氣之替代品，例如液態或固態之其它含氯用藥、二氧化氯、臭氧、UV等，而水處理之用途則包括：自來水、游泳池、民生污水、食品廠用水、工廠冷卻水等，並分別就替代品在「功能」，「環保及安全」以及「經濟」上與氯氣之比較，提供具體之相關資料及數字，以作為未來管理輔導氯氣使用者之參考，進而達到減少毒性發生意外災害的機率，保障人民健康安全之最終目標。

【關鍵字】

1. 氯氣(chlorine)
2. 水處理(water treatment)
3. 成本分析(cost & analysis)

*國立清華大學化學工程系研究助理

**國立清華大學化學工程系教授

一、前　　言

氯氣為我國已公告之毒性化學品之一，並於83年1月31日起開始實施申報核准制，必須取得使用核可文件，及申報登記取得製造，輸入，販賣許可證等。此一措施雖將增加使用者之營運成本，但有鑑於氯氣之毒性，而且腐蝕性強，在微量水氣存在下，容易生成鹽酸，進而對大部份金屬材料產生腐蝕作用，致使管路，閥體或容器本身受損破裂，造成外洩的災害頻傳，成為社會的損失，而為必要。

然則在毒性化學物質的管理上，除了制訂嚴謹的管理辦法之外，應以尋求毒性較低甚或無毒性之替代用品，以根本消除毒性化學物質之使用，才是最佳之對策。本文之目的即針對國內使用氯氣進行水處理的情況，提出可被考慮的諸種替代品，並分別就其「功能性」，「環保及安全性」，以及「經濟性」，加以分析檢討，期能提供給相關人員參考，作為檢討是否改用替代品之基礎，達到減少氯氣化災意外之發生，保障人民的健康安全之最終目標。

二、氯氣之基本特性

國內目前共有五家氯氣生產者，其中以台塑、台灣志氯及義芳為市場之主要供應者，另外兩家（華夏海灣及中華紙漿）則以自用為主，總年產量約28萬噸，其中用於水處理部份約1萬2千噸，但使用之家數不少，而以自來水處理之場站數目最多，其它用戶則包括：游泳池、食品業者、工業用水及冷卻水，民生污水等。在水處理之程序上，氯之主要用途包括¹：消毒、氧化、抑制微生物之生長、以及消除異味(taste and odor)。但是來自酚類與氯的反應產物，氯化酚也具強烈異味，必須足夠的氯將之進一步氧化後，才可消除味道。

當氯氣溶於水中，它會立即完全水解，生成次氯酸(HOCl)及鹽酸，使水溶液呈酸性，其中次氯酸為一弱酸，會依溶液pH值不同而進行不同程度之解離作用，生成OC1⁻離子¹。一般HOCl被認為是主要的消毒及氧化反應的物種，所以水溶液的pH值對於氯的消毒與氧化功能具有重要的影響。若使用其它含氯之用藥時，如次氯酸鈉或次氯酸鈣，它們會先解離生成OC1⁻離子，然後再水解成爲

HOC1。由於此一反應將消耗氫離子，會提高溶液pH值，不利於HOC1之生成。但無論如何，只要溶液最終pH值相同，則其HOC1分率就應該相同，而與氯之來源無關。

次氯酸在水中進行氧化—還原反應，其最終產物為氯離子，此外因為含氯物種為親電子性，會與親核中心，如還原態之碳或氮原子進行置換或添加反應，而得到氯化產物，具致癌性之三鹵甲烷(THM)即為循此途徑產生之消毒副產物之一。

次氯酸及次氯酸根離子一般稱之為自由有效氯。但當水中存在氨時，則會進行氯化反應，生成一氯胺，二氯胺乃至於三氯胺²，此等氯胺稱之為結合有效氯，其與自由有效氯之和則為總氯。氯胺之消毒效果要比氯差，但可以在水中保存較長之時間。當水中有氨氮化物時，氯氣用量必需要超過轉折點，以確保消毒效果，及消除水中異味的優點，不過氯氣用量增加，則其與水中有機體進行氯化反應的機會，以致生成如氯仿類的有害物的機會也隨之增加。綜合可能造成氯氣損失，以致於影響其消毒作用的原因至少包括：

1. 與氨反應；與有機物反應
2. 與水中之亞鐵、錳、H₂S等反應
3. 與水中之碳氫化物反應
4. 與其它添加之用藥反應，如冷卻水系統使用的腐蝕抑制劑，壁垢抑制劑
5. UV光照射分解
6. 攪拌擾動造成之逸失

而氯氣在水處理應用時之最大顧慮，為其環保與安全方面的問題，亦即：意外洩漏以及水中有機物反應生成消毒副產物；其中後者，多半具有生物累積性及致癌性，影響十分深遠，近年已引起學者及公共衛生專家的注意，並尋求解決之道，改用替代品顯然為重要方案之一。而在意外洩漏方面，則或因過去台灣社會對化災預防工作的認識不足，以致於幾乎年年都會發生，例如：

- 1990高雄中洲污水處理廠氯氣外洩
- 1991高雄台灣氯乙烯廠裝卸時洩漏，1人死亡，上百人就醫
- 1992高雄合迪化工氯氣外洩（上千人受害）
- 1993高雄自來水公司之氯氣廢鋼瓶餘氯外洩

由以上的討論看來，氯氣雖然是有效又便宜的消毒用藥，但一則它已被列

爲毒性物質，且有洩漏之顧慮，二來則它在水處理時會生成有害的消毒副產物，所以尋求有效之替代品並推廣之，實有其必要性。

三、各種水樣之消毒及特性

氯之用於飲用水消毒已有70年之歷史，理想的操作在於添加足量之氯，使在轉折點之上，以除去所有的有機微生物及病毒，且能保有少許之餘氯於處理過的水中。然對於不同水樣之水質要求，自當以自來水最爲嚴格，其次爲飲料或食品用水，再次爲游泳池水，排放之廢水或污水，最後爲冷卻水。

1. 自來水

近年，多數水源受經濟發展的影響造成高度污染，因此原水的處理及消毒以使之符合飲用水標準，維護人民健康，就成爲一大問題。一般之水處理程序包括：取水，加壓，加藥混凝、沉澱，過濾調整pH值，再消毒，最後加壓輸出。在此程序中，氯氣多在混凝前（前氯處理）及輸出前之消毒步驟加入（後氯處理），以期除去水中之菌類病毒等有害微生物。理論上，各種水處理程序，如物理化學程序，沉降，活性污泥法等，對於除去細菌，虫卵，病毒，孢子胚胎等都具有不同之除去效果³，不過主要還是要靠消毒劑達成去除目的。

2. 游泳池用水

爲了維護使用者之健康，避免任何傳染性病毒或細菌經水媒傳染，將游泳池內的水加以循環消毒及過濾處理，遂有其必要，其中過濾之目的在於除去游泳者所帶入毛髮雜物，而消毒之程序則可採用氯氣或其它代替用藥。

3. 民生污水（廢水）

目前國內僅台北市及高雄市設有民生污水處理廠，處理經由下水道工程收集到的民生污水。其處理流程大致包括：浮渣篩分壓縮，欄柵破碎，沉砂，沉澱濃縮，厭氧消化，曝氣處理，以及加藥消毒等，其中所稱之加藥消毒，傳統上多以添加液氯，但或自高雄市中洲氯氣外洩意外後，中洲目前已改爲自海水中電解產生次氯酸鈉的方法，台北民生污水處理廠直接採用次氯酸鈉，而僅有迪化污水處理廠使用液氯法消毒。將處理過的污水或廢水，再注回地下，以補充地下水，不失爲在水資源缺乏的情況下之作法，在工業

界，則可採行回收再利用之途徑。對於注回地下灌溉，或排放至敏感地區，如海邊之養殖區，遊樂區時，則其水質除了一般規定外，也會特別規範水中之菌類，所以此時必須採用消毒程序，期能符合法規標準。

4. 工業冷卻用水

除了工廠的冷卻用水外，一般有空調的建築物，也同樣需要用到冷卻水。因為在循環式冷卻水使用的過程中，水樣會接觸大氣，而有機會引進菌類繁殖。另外因冷卻水之蒸發，或為避免某些雜質在循環水中累積，而必須適量排放(blowdown)，造成一些損失，而須補充；此時就可能引進不同數量及種類的微生物。此外，循環水中所含之溶解物，會因環境而有所不同，所以其最可能滋養之細菌種類，也會隨之而異，此一特性或將影響消毒劑的使用效果⁴。由於微生物之繁殖受到陽光及溫度影響甚巨，所以這類的問題在夏天要比在冬天嚴重些。

在工廠用冷卻水中，除了殺菌劑外，尚仍需要添加如腐蝕抑制劑及壁垢生成之抑制劑，以確保最佳之熱交換效果。一般循環水所用之殺菌滅藻劑可分為兩大類；氧化性及非氧化性，其中氧化性類包括：氯氣、二氧化氯、臭氧以及含氯藥品如次氯酸鈉等。非氧化性殺菌滅藻劑，則包括：氯化苯酚，有機硫化物，硫酸銅，硫酯，有機錫化物，四級胺鹽，松香胺鹽等。氧化劑的好處為可以將產生臭味等之其它化學品一同氧化除去，但其有效性較短，須經常且連續添加，但如果添加量過高，則有腐蝕副作用之顧慮，所以通常都混合好幾種（氧化性及非氧化性）藥劑，一併或輪流使用，以加強效果。

5. 其它用水

除了以上情況外，需進行消毒殺毒菌的水樣，至少包括

- 食品廠或飲料廠之用水，及清洗用水。
- 醫院等特殊地區或場所之消毒用水，一般多偏向於批次使用法，且用量亦較低。
- 醫院廢水，以符合環保法規。

四、重要的氯氣替代品

為了減少生成有毒之氯化有機物，除了乾脆改用其它替代性消毒劑外，也可藉助處理程序之改進達成一些效果，其基本構想為：在加氯前就先降低水中的有機物，或是採用高級處理程序將已生成的消毒副產物去除^{5,6}。例如在飲用水處理程序上，可使用曝氣，粒狀活性碳過濾床(GAC)或粉狀活性碳粒子(PAC)，預臭氧，或增加一除氯程序(dechlorination)於程序末端等不同方法，但由此增加之成本及其它副作用，也須一併考慮。

4.1 其它含氯用藥

4.1.1 次氯酸鈉水溶液

俗稱為漂水，目前市售商品多以12%左右之濃度出售，間或以較稀薄，如5%或1%濃度出售使用者，但後者以小量用者為限。一般產品溶液pH值約在12～13間，因此當用於循環水之時，多半需添加少量酸（如硫酸），以調整其pH值到中性附近，如此當可增加溶液中HOCl含量，增加其消毒作用。其它有關次氯酸鈉漂水之特性尚包括：

1. 慎選適當尺寸之輸送幫浦，避免過大，並注意此溶液之腐蝕特性。
2. 此水溶液之安定性稍差，所含自由氯會隨時間遞減，使用暗色PE容器，並存於陰暗處，可減慢其衰減率；可能影響次氯酸鈉分解的因素包括：陽光，熱，有機物，某些重金屬離子如銅，鎳，鉻等也會加速其分解⁷。
3. 如果水中受到油脂類物質之污染，則添加次氯酸鈉後可能引起自化反應（生成鹼金屬鹽），或許會形成沉澱物，造成管路堵塞問題。
4. 由於漂水為鹼性，所以如果配製較高濃度之消毒水（如數百ppm）時，所用稀釋水之水溫及硬度應需列入考慮，以免結垢現象發生。

4.1.2 高效率漂白粉(HTH)

此係次氯酸鈣粉末($\text{Ca}(\text{OCl})_2$)，目前市售有粉末狀，顆粒狀，以及錠狀等不同形態。依其分子式，此物質內有效氯含量（以OCl計）為72%，較另一種較簡單之氯化石灰（亦稱為漂白粉： $\text{Ca}(\text{OCl})\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）中之有效氯含量35.5%高出許多，故稱高效率(high test)。實際上此二物質皆為石灰氯化反應製得，

只不過HTH產品之氯化程度較為徹底而已。次氯酸鈣安定性良好，但會與有機物激烈反應，應避免接觸以免危險。

本產品在使用時至少具有以下幾點特色：

- 溶解性視產品之形態而異，粉末狀優於顆粒狀，而以錠狀溶解速度最慢，故可依須添加的量及添加速度，而選用不同形態應用；
- 一般產品皆無法完全溶解，會殘留一些極細的雜質微粒（其成份可能為石灰或氫氧化鈣），所以必須有效濾除，以免造成管路堵塞之問題；
- 使用此產品亦會造成水樣之pH逐漸增高，所以也需要添加酸調整之。

4.1.3 固態氯化異三聚氰酸鹽

此為新近合成出來的含氯用藥，它至少包括以下三種形式：

1. 三氯異三聚氰酸(trichloro isocyanuric acid, TICA)， $(\text{CONC}_1)_3$ 學名為1,3,5 triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione，環狀結構；其分子量為232.41g/mole，可釋放出三摩爾之有效氯（注意：1mole之氯氣也只產生1mole之次氯酸而已），故其理論有效氯含量達91.53%，較其它含氯用藥諸值皆高。TICA為強氧化劑，所以具一定之危險性，例如不可與可燃物接觸，它亦與氨劇烈反應，釋放出氮氣，有爆炸之虞。
2. 二氯異三聚氰酸鈉鹽(sodium dichloroisocyanurate, SDIC)，其分子量為220，所含有效氯為64.5%。
3. 二氯異三聚氰酸二水鈉鹽(sodium dichloroisocyanurate dihydrate, DICD)，此化合物之分子量為256g/mole，有效氯含量佔約55.4%。

其中鈉鹽之溶解度比純異三聚氰酸高出許多($25 \sim 26 \text{ g}/100\text{H}_2\text{O} @ 25^\circ\text{C}$ V.S. $0.12 \sim 0.2 \text{ g}/100\text{gH}_2\text{O}$)，此一特性必將影響其應用時之裝置設計，亦即有效氯被水帶出的數量及速度。溶解後，TICA所得水之pH約在3~4間，而SDIC、DICD生成pH在6~7間之水溶液。三氯異三聚氰酸對人體之眼睛，皮膚及呼吸器官具刺激性，動物實驗顯示異三聚氰酸對腎臟有害⁸，Moody等人⁹曾進行皮膚對異三聚氰酸的吸收作用，結果發現因人而異的程度頗大，而平均值約為 $0.06 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 而已，所以應比經喝下游泳池水而吞入的異三聚氰酸要少許多。當此類氯鹽用於游泳池消毒時，異三聚氰酸有助於穩定水中之有效氯，尤其在陽光照射之夏天，使之能停留在水中較長時間，以殺滅細菌。

Kfir等人¹⁰曾以由SDIC與硫酸鋁（明礬）組成之錠劑（重600mg，其中

SDIC佔2.5%），以批次實驗法，對一公升的合成硬水水樣（同時也含有一些有色之有機物）進行消毒試驗，其結果發現，在4分鐘內，以一錠劑可極有效的消滅大腸菌，小兒麻痺病毒等，此時其自由有效氯為 2.5mg/L ，pH值為7.25。

4.1.4 二氧化氯(ClO_2)

含氯之另一用藥為二氧化氯(ClO_2)，為黃綠色至黃紅色氣體，極易溶於水溶解度約為氯氣之10倍(70g/L @ 20°C)¹¹。不過氣態之二氧化氯反應性極高，不安定，會與有機物劇烈反應，而且在光照射下(超過10%濃度時)，有爆炸之慮。二氧化氯之毒性亦高， 5ppm 下就會感受其刺激性， 19ppm 可以致死¹²，其容許濃度(TLV)為 0.1ppm 。正因如此，它多半為現場製造，而非以氣體方式運送。縱然如此，在生產現場，仍須極為小心避免參與反應的兩種化學品之外接觸，例如盛裝此兩種溶液原料之儲槽，必須有防護牆，以應付意外洩漏狀況。在國內亦使用此法在現場生產二氧化氯，用於游泳池，及處理取自地下水之飲用水，其使用之亞氯酸鈉溶液濃度為7.5%，而鹽酸濃度為9.0%，由此產生之水溶液中，其中含氯成份約90~95%為二氧化氯，仍有4~7%為氯氣¹³。一般言，二氧化氯在歐洲的使用率也還算高。如何有效提高二氧化氯生產之效率，以降低其成本，仍為許多相關公司的研發方向。

二氧化氯會溶於水中，其被還原之最初產物應為亞氯酸根離子 ClO_2^- ；此離子然後，可進一步被還原成 Cl^- 離子。在中性水中，未反應前之二氧化氯，應多以 ClO_2 形式存在。與氯相類似，二氧化氯亦可用於各種水樣之消毒，滅藻，漂白，乃至於除臭之處理上。二氧化氯之氧化能力強，約為氯氣之2.5倍左右，但實際情形得視反應條件及反應機制而定。二氧化氯在水處理上之其它特性，尚包括：

1. 它僅進行氧化反應，不進行氯化反應，所以它不會與氨反應生成氯胺；不會與溴反應生成 HOBr ，也不會生成致癌性的有機鹵化物，如三鹵素甲烷(THM)產物。
2. White¹¹指出，在美國地區使用二氧化氯之主要目的，係在於消除受污染原水內之酚類化物所造成之味道與臭味，法國巴黎地區的二氧化氯操作人員，甚至認為經此處理過水的味道，尤勝於使用氯氣及臭氧。
3. 一般而言，二氧化氯的消毒功能對pH值不像氯之敏感，它也比氯具有更佳的

餘氯效果（保存期較長）。當pH值由7升到9時，氯之殺菌功能會明顯減弱，但二氧化氯則會增強，不過其理由可能與微生物本身的敏感性有關，而非藥效之增加。

4. 雖然二氧化氯不會生成三鹵甲烷，但它所生成之氯酸及亞氯酸根離子，可能具有毒性，所以也可能對排放區其它生物造成影響，以法國Deauville及Trouville區之規定為例³，排放水內之ClO₂含量應低於0.38mg/L，美國則規定ClO₂、ClO₃及ClO₄之總量在1mg/L以下¹⁴。
5. 二氧化氯溶於水中，但並不與水反應，雖然其溶解度高，但所表現之蒸氣壓也高，再加上二氧化氯氣體之毒性，所以在生產製造時，有必要採取設計，以確保二氧化氯氣體不會跑出來。

4.2 直接電解食鹽水（或海水）法

當所需要處理的水，是生活廢水或冷卻水，且就在海邊時，吾人可採用將海水直接電解以生成含次氯酸鈉之溶液，以處理生活廢水或用作冷卻水。國內最早一套海水電解系統應於72年裝設於台電公司的第三核能發電廠內，目前則有高雄的中區污水處理廠，永安天然氣接收站之回溫海水（與冷卻水用途相仿），以及多所台電發電廠所需用的冷卻水¹⁵，採用本法。

由於海水中含有相當量之氯化鈉鹽，具導電性，可以直接電解，在陽極生成氯氣，在陰極則生成氫氣及氫氧化鈉，氯氣溶於海水中，立即與NaOH反應生成次氯酸鈉。在實際的情況下，由於海水成份複雜，所以還有許多副反應發生，如氯氣之生成反應，次氯酸根離子被電解氧化成氯酸根離子，或是在陰極附近生成Mg(OH)₂及Ca(OH)₂等之沉澱產物，不但降低電流效率，而且可能造成堵塞問題，必須採行適當之設計以改善之。現有之在台地區電解系統，其氯氣產生的設計值，自30kg/hr（有效氯）到480kg/hr，正在八里施工中的污水處理廠亦採此法消毒，其設計容量為780kg/hr，將為國內最大之一套系統。

4.3 臭氧

臭氧之用於消毒程序，或始於1886年之法國，目前也已在歐洲使用率較高，而國內則尚停留在實驗室研究階段。除了水處理程序外，臭氧也可用於味道控制，工業合成，紙漿漂白等，其中紙漿漂白係取代較早期使用的氯及次氯酸鈉。

與其它氧化性消毒劑相比，臭氧的氧化消毒性顯然為高。由於臭氧之安定性不好，容易解離成為氧氣，所以皆為現場生產使用的方式。而其水中解離損失之速率，隨OH⁻離子濃度增加而加速²。目前絕大部份臭氧之製造，係以空氣作為原料。一些新的科技則針對此部份加以改良，例如可將使用純氧，並配氧氣循環，或者使用壓力振盪吸附法(PSA)，以分子篩之材質，直接自空氣中現場生產富氧（或純氧）之氣體，再進行臭氧產生程序，期能降低使用臭氧之成本。

一般產生臭氧的系統包括：氣體處理（乾燥與過濾），電源供應，臭氧產生及氣—水接觸等四個部份。其中臭氧產生的方式可分為(a)高壓放電法：為最常使用之方法，所用電壓為5千至2.5萬伏，電流50~60Hz之交流電，偶亦有用到1,000Hz頻率者，使用高介電質材料及良好之冷卻系統，亦為理想操作之必要條件(b)UV法：只能用於生產低濃度低體積流量之臭氧。

通常臭氧的產生量約在15~25g/m³，最高或可達30g/m³(1.4 mole%)，所以濃度不算高，其能量之耗損量約為13~22KWH/kg O₃，若使用純氧，則能量須求可減半或更多¹⁴。一般生成之臭氧濃度約在1~3%（空氣中；若在氧氣中則為2~6%），再加上臭氧在水中之溶解度不高，所以必須讓含有臭氧之空氣與水密切混合，減小空氣氣泡尺寸，增加其質傳表面積，而常選用之氣液混合裝置包括：射出機(injector)多孔分散器以及范式混合器(venturi)等，而一般之接觸時間則在5~15分鐘左右。臭氧生產的其它特色包括：

1. 確保進氣之乾燥程度(露點在-60°C為佳；此時水份去除率為99.98%)¹⁶為十分必要之事；微量水份易形成硝酸，造成材料腐蝕問題。
2. 需定期性維修，以保持良好之生產效率。
3. 不宜長時間在最大容量下運轉，否則介電材料容易受損。
4. 維修過程中要注意人員安全，以免吸入過高之臭氧，臭氧之TLV-TWA值為0.1ppm，而短時間量平均容許濃度(STEL)則為0.3ppm。
5. 臭氧生產時，相當大的一部份能量皆轉為熱能，光（輻射），所以需要冷卻，以免產率降低，此也是其成本高的原因之一。

而臭氧在水中之用量(dosage)，須依原水水質及所欲達成之目標而定，以飲用水為例，一般之經驗用量在0.2~1.5mg/L間，而為確保消毒效果，經處理過的水樣中宜含0.1~0.4mg/L的臭氧。臭氧在水中的保留時間不長，不若氯

氣，此為其在一些用途上（如飲用水消毒）不利之點，所以往往仍須伴隨著添加少量之含氯用藥，提供餘氯之消毒功能。臭氧之特性之一，為可在極低濃度下被聞到¹³，此限值約為0.01~0.05ppm。臭氧在水中的氧化作用，或為直接的反應，或為先生成OH自由基，再進行連鎖反應而達到氧化效果，水中的碳酸鹽，碳酸氫鹽以及若干有機物為其連鎖反應之終結物種(radical-scavenging species)，亦即有不利之影響。

使用臭氧的好處之一是它本身不會變成有毒之物質，而且除非在溴的存在以及較高用量下，它也不易生成三鹵甲烷的化合物。甲醛，乙二醛(glyoxal, CHO-CHO)，環氧化物等為曾被提及可能生成的毒性副產物^{5,17}。使用臭氧的另一可能問題為，它會將一些非生物分解性的有機物氧化成容易被生物分解的物質(assimilable organic carbon, AOC)，反而增加細菌的養份，可能引發細菌再生長的現象。為了除去這些亦為生物吸收的有機物，於是必須再增加過濾設施，如生物性活性碳之過濾，如此必然增加成本。同樣理由，臭氧處理也很少被用作飲用水處理之最後一步。雖然臭氧的強氧化能力，會產生一些AOC，但它也同時能讓水樣之化學或生化需氧量得以降低，因此實際應用時，必須充份考慮所擬處理之水質特性，及所欲達成之主要目標後，才可以定論臭氧之適用性。

根據Langlais等人之報導¹⁸，到1990年為止美國共有40自來水廠使用臭氧消毒，且另有20個廠在規劃或施工中，其中最大的水廠可供應一百萬人口之用水，其中並有越來越多大廠使用臭氧之趨勢，而非早期的限於特定小型用戶。目前世界最大的臭氧用戶，應為法國巴黎地區的12個水廠，其臭氧量達500kg/hr，而處理水量為每天300萬噸，服務之人口則超過1,000萬人。在日本其最大之臭氧用者在Chiba，其臭氧量為30kg/hr。

4.4 UV法

UV法消毒程序，雖早在1900年代即已被發現，但早期因為設備(光源)之穩定性不好，加上成本也高，所以無法推廣，根據Wolfe的資料¹⁹，近年來至少有約2,000套UV設備用於水之消毒程序。UV照射殺菌之主要作用為改變細胞核酸(nucleic acid即DNA)，使之無法生長，其中尤以264nm波長之光束滅菌效果最佳¹¹。紫外光之消毒效果與所用之UV光強度(W/cm²)和照射時間之乘積(即照射

總計量)成正比，大部份細菌與病毒在 $2,000 \sim 6,000 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 之範圍內有90%之死滅率¹⁹。一些經驗顯示，合理的設計，可以將三級排放廢水內之糞便屬性之大腸菌數降低到 $200/100\text{ml}$ 。但對原生動物類之殺滅計量，則遠超過目前大多數UV設備所能提供的照射計量($< 35,000 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)、美國政府曾在1966年發佈政策，規定使用UV法消毒時，其最低計量應為 $16,000 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ ，而最大水樣深度不超過7.5公分¹⁹。

目前較常使用中的UV光源，包括低壓水銀燈及中壓水銀燈，其中前者可產生在 254nm 附近之紫外光，多用於小型系統上，國內許多飲水機，便附裝設此一消毒裝置。中壓水銀燈，則可提供較廣的光譜，而且光線強度也比較強，在英國倫敦有一飲用水廠，其出水量達 $1.45 \times 10^7 \text{ton/d}$ ，即採用16枝中壓水銀燈，作為主要的消毒程序。紫外光在消毒程序中的一些其它特點，尚包括：

1. 水中之濁度及色度，或某些溶解性有機物，會降低UV光被細菌吸收之效率，因此須有良好之過濾設備在UV法之前。大體而言，UV之效率比較不受pH及水溫之影響。
2. UV光在水中之穿透深度也有限，所以在使用時，最好能設計讓待處理之水樣以薄膜方式(如膜厚小於5mm)，流過燈管之表面，以增進其殺菌效果。
3. 燈管表面容易沾污微生物，需經常清理。
4. UV容器內UV光強度分佈，並非均勻，尤其當使用多支燈管時；再加上水流亦非簡單之流動形態，所以真正的照光情形不容易估算。
5. UV之計量並非十分穩定可靠，但此將隨科技之進步而改善；奧地利規定在容器離光源最遠的地方也要有 30mJ/cm^2 的強度²⁰。
6. 微生物可能再生長，此乃因細菌可能再受到可見光照射後，可能修復受破壞之DNA之故。
7. UV燈管平均可用8,000小時，但其輸出能量，多半會與時遞減，換言之，在開始時，可能需要稍為設計過量，以補償之。

UV光有時也可與其它消毒技術併用，以追求最佳效果，如：

- 由於UV消毒亦無保持性，所以仍需添加少許其它消毒劑，如含氯用藥；換言之，可以借助UV法以降低氯氣之用量²¹。
- 與臭氧或過氧化氫併用：此屬於高級氧化處理程序之一種，此法可更有效的除去味道及色度，但在消除微生物方面，則不如僅使用臭氧之情形¹⁹。

- 先用超音波，振散凝聚成團的物質，然後施以UV照射，可以殺死較多的細菌¹³。

4.5 其它消毒用藥

其它也可作為消毒殺菌之用的藥品，如雙氧水、溴、碘、過錳酸鹽、過鐵酸鹽等等¹⁴，但其使用頻率較低。金屬銀在近年來，常被用在家庭式飲水過濾機上（附於活性碳床上），以減少細菌之滋生。一般而言，過錳酸，雙氧水，及銀並非理想之選擇，高pH值與過鐵酸尚可，次氯酸，次碘酸，UV照射可謂理想，碘及溴則提供最佳之效果。

溴及溴化物(如BrCl)，易溶於水，生成次溴酸，其消毒，氧化，漂白之能力與氯相當，但速度較快。HOBr之解離常數低於HOCl，所以在消毒過程中，要比次氯酸顯得功能強些。BrCl也會與氨反應生成溴胺，不過溴胺的消毒作用與HOBr相當，所以影響不若氯胺¹¹，也會與酚反應，但其產物不似氯酚般之毒性及味道¹³。與氯相比，次溴酸的殺菌能力要比次氯酸為佳，尤其在偏鹼性（如pH=8），及氨存在之環境之下²²。Fellers等人提及溴之另一好處，為減低含銅合金之腐蝕速度，氯因為氧化能力高於溴，所以對銅之氧化腐蝕作用也較強些。

五、氯氣與替代性消毒劑之分析比較

在此吾人將就氯氣與其常用的替代品，進行功能性，環保與安全性，以及經濟性之分析比較工作，其中在功能性之比較上，僅將以成功之實例作為佐證。

5.1 功能性之比較

5.1.1 自來水系統

目前國內在自來水消毒處理程序上，非氯氣之消毒劑仍以次氯酸鈉為主，而經此類替代品處理所得之水質，皆能符合現行自來水水質之標準。至於使用其它較為先進的消毒劑，例如臭氧則仍停留在實驗室實驗評估階段。

台北市之雙溪及陽明淨水場，自80年度起即使用次氯酸鈉，平均加氯量為

1~2mg/L之間，其效果與使用氯氣者並無差異。在台灣省自來水公司方面，根據其公司的年報，改用漂白液、漂白粉淨水場站數有增加的趨勢（截至83/1月止至少已有40以上場站使次氯酸鈉為消毒劑）。在83/1/31之後，由於毒管法中有關氯氣之管制及對安全的要求，自來水公司計劃將現有之絕大部份場站改用次氯酸鈉替代品，故其氯氣使用站數將由目前的300多處下降到10、20站之譜，應有助於減少任何意外發生之可能性，使民眾能免於毒氣外洩之恐懼。

5.1.2 民生污水處理

下表為國內三家污水處理廠之消毒狀況，三家分別採用漂水，氯氣及海水電解以生產次氯酸鈉方式進行消毒程序，其中高雄中區之污水處理廠有關處理水量及加藥濃度數據為設計值，以其放流水內所含菌數而言，其實際加藥濃度應與台北之兩處污水處理廠相當，但無論如何，經處理後之放流水，其含菌數皆符合現行放流水標準（台北市者分別放流至基隆河與淡河水，高雄市則為海洋放流）。換言之，無論改用次氯酸鈉，或用海水電解法，皆可達到原先之消毒目標，但由高雄中區污水處理場之排放水內細菌數看來，其真正之加藥濃度並非原先之設計值，而可能與台北民生站之加藥濃度相當。

表1 國內民生污水消毒程序之比較

污水廠	處理水量	加藥種類	加藥濃度	放流水含菌數
台北民生 ⁽¹⁾	13,500CMD	次氯酸鈉	1.2 mg/L	90 個/ml
	2,000	次氯酸鈉	2.1	120
台北迪化	240,000	氯氣	3.0	1.4
高雄中區 ⁽²⁾	500,000	海水電解	15.0	140~190

[註](1)民生廠之污水分別來自二級處理及高級處理程序；迪化廠僅為初級處理程序；高雄中區廠亦屬初級處理程序；

(2)實際作用者亦為次氯酸鈉；表中所列加藥濃度為設計值，實際加藥量顯然較低，受電解槽條件及運轉狀況而定。

5.1.3 工業用冷卻水

在此用途上，主要的替代品為次氯酸鈉，以及與之併用的含溴用藥（如Acti-Brom），後者應為一含溴鹽及生物分散劑的冷卻水用藥，與次氯酸鈉併用，以增進其效果，減低氯之用量，避免任何餘氯過高之困擾。

實際上在冷卻水的處理程序上，所關心的項目包括：

1. pH值，導電度，氯離子....多與腐蝕性有關。
2. 鹼度，總硬度，磷酸根離子，二氧化矽，懸浮固體....多與生成水垢或沉積物有關。

所以消毒滅藻之考量僅為其中之一項而已，一般皆以能將水中之總菌數保持在 $5 \times 10^4/\text{ml}$ 以下就可以了，所以絕大部份之消毒滅藻劑皆能輕易達成此一目標，以是之故，目前較大型之工廠用冷卻水藥品，多為外包給處理公司作綜合之用藥考量，而這些公司所擁有之特殊配方，則分別來自國外的技術。以吾人訪查之心得而言，大部份工廠皆以「沒有出什麼狀況」，作為評估之準則，而非追求最適化的方式，探討所用諸藥品之效用，至於熱交換機部份，則多採定期（或依操作狀況）清理維修，以保持其熱交換之功能。

5.1.4 游泳池使用消毒劑之調查結果

根據調查，目前國內游泳池所使用的消毒劑包括：氯氣，次氯酸鈉溶液，次氯酸鈣，及氯化異三聚氯酸鹽，二氧化氯，臭氧及UV法。

在上述諸替代品中，二氧化氯，次氯酸鈉及氯錠(HTH)皆可提供良好之消毒效果，使用臭氧及UV者為最新建好的兩家游泳池，初期資料顯示在添加少許的含氯用藥之輔助下，都可以符合衛生法規之要求，但長期運轉的經濟性及有無其它問題，則尚不得知。此外由訪查中亦可得知，游泳池中之水循環設計，關係到水池內有無死角的問題，對於整體水質之影響亦極為重要，而且定期用水底吸塵器，清除所有外來雜質粒子，亦有其必要。

5.2 環保及安全性之比較

有關此一特性之考量，在前面幾節內，已分別討論過，在此僅將其綜合列如表2所示。

5.3 經濟性上之比較

本節之目的在於討論不同替代品間之價格問題，對許多人來說，物品之經濟性，往往為決定使用與否之最重要考慮因素。然而在此吾人必須首先指出經濟問題實在具有「因人」、「因時」、以及「因地」而各不相同之基本特性，再加上各種水處理情況下，所加入藥劑之作用，並非僅僅消毒而已，以及可能

採用多種消毒劑綜合處理之程序，所以實在無法以一組數字，代表所有的情況，此處吾人將列出值得考量之特性及項目，以供參考。

表2 諸消毒用藥之環保及安全性之比較

消 毒 用 藥	環 保 及 安 全 性
氯氣	<ul style="list-style-type: none"> • 毒性化學物質，可能意外洩漏造成傷害 • 水處理時會生成致癌性消毒副產物，如THM • 紙漿漂白程序中可能生成戴奧辛之類氯化產物
次氯酸鈉	<ul style="list-style-type: none"> • 水處理之副作用應與氯氣相同，但程度較輕 • 本身非毒性物質，沒有洩漏造成傷害之顧慮
氯錠(HTH)	<ul style="list-style-type: none"> • 本身非毒性物質，沒有洩漏造成傷害之顧慮 • 水處理之副作用應與氯氣相同，但程度較輕
氯錠(有機氯鹽)	<ul style="list-style-type: none"> • 本身非毒性物質，沒有洩漏造成傷害之顧慮 • 水處理之副作用應與氯氣相同，但程度較輕 • 其分解產物（異三聚氰酸）對人體具有刺激性
二氧化氯	<ul style="list-style-type: none"> • 用於生產二氧化氯之兩種液體原料，若意外彼此接觸會立即生成有毒之二氧化氯氣體 • 不會生成氯化有機物之毒性副產物如THM • 所生成之亞氯酸及氯酸根離子之毒性有待進一步探討
臭氧	<ul style="list-style-type: none"> • 若干副產物如乙二醛，環氧化物應具毒性，但程度上應遠低於氯氣 • 作業場所宜有偵測器，其TLV-TWA僅0.1ppm，有臭味任何維修保養時工作人員須注意
UV技術	<ul style="list-style-type: none"> • 不會生成有害之消毒副產物

首先在表3所列為使用氯氣時必要安全費用，在過去，許多氯氣使用者都完全不考慮此一項目的費用，但自毒管法實施後，這些費用理當列入成本計算，不能任意忽略。表4則為使用氯氣或其它替代性消毒劑之成本考量，包括硬體投資以及消耗性支出，對於氯氣而言，其中應包括安全方面的費用。

表3 使用氯氣時須考慮之安全相關項目

固定投資	<ul style="list-style-type: none"> 1. 氯倉（尺寸） 2. 吊車 3. 偵測器及警報器 4. 控制與警報系統 5. 人員防護及緊急用品 6. 遮斷漏氣口之防護器具 7. 阻絕系統（抽氣及中和）7
消耗性支出	<ul style="list-style-type: none"> 8. 儀器校正，維修 9. 設備維修 10. 額外之人事及行政費用 11. 阻絕系統之中和鹼液更換 12. 氯作業環境測定費 13. 違規罰金（環保法規）
風險成本	<ul style="list-style-type: none"> 14. 意外災害賠償費 15. 停工損失 16. 形象損失（公司及產品） 17. 法律責任

表4 使用氯氣或其它替代品之硬體及消耗成本考量項目

硬體投資	
1. 安全相關部份	<ul style="list-style-type: none"> 氯氣部份如前表所述 臭氧及二氧化氯本身亦具毒性，雖然後二者皆為現場生產，故理當在控制之下，但加裝偵測器與警報器，及人員防護用品應仍屬必要
2. 儲藏室（空間）	<ul style="list-style-type: none"> 視加藥機大小，藥品儲存空間而定 臭氧因需處理空氣，可能需要稍大之空間 次氯酸鈉用者所需空間可以簡陋些
3. 加藥機或設備費	<ul style="list-style-type: none"> 對氯氣，次氯酸鈉，二氧化氯言，所需者為加藥用之特定幫浦，其中二氧化氯應為自動控制方式，所以必定加上儀錶部份； 與氯氣功效對等所需之UV機及臭氧機之尺寸，將最難估計，因為所使用的技術，其功能非僅消毒而已，所以實在應該個案考量；考量時應注意待處理之水量、水質，及所欲達成之目標 臭氧機方面，外國貨（德國，日本，美國）之價格及本地自製之機台，其差異可能很大，至於各機台之操作性與可靠性如何，則須使用者個別探詢 此部份係大同小異，皆需要線上偵測儀（如餘氯濃度），電腦設備，控制器等
4. 加藥自動控制系統	
5. 折舊與利息	<ul style="list-style-type: none"> 指前四項投資而言
消耗性費用	
6. 加藥機維護費	
7. 藥品費用	
8. 電費	<ul style="list-style-type: none"> 基本上為加藥機耗用之電費為主，偵測儀及控制系統亦將消耗少許電量
9. 安全費用	<ul style="list-style-type: none"> 如表3中8到13項之費用

最後再針對游泳池業者使用較多的用藥，進行比較（表5），此表之計算基礎，係以每日使用2.5kg HTH用藥（其有效氯含量= 2.5×0.7 ），其它消毒劑則須提供相同數量之有效氯；各藥品皆以平均價計算；例如：

1. 氯氣以30元/kg × (2.5×0.7) kg/天 × 30天 = 1575元
2. 次氯酸鈉以5.5元/kg × $2.5 \times 0.7 \div 0.12 \times 1.2 \times 30$ = 2888元（×1.2係加入其隨時間遞減之特性考量）
3. HTH（顆粒狀）190元/kg × 2.5×30 = 14250元
4. 餘皆仿此計算而得

但有安全顧慮者，例如氯氣，宜加入安全費用部份，如此將略增其費用。以本處所用之藥量，再加上一般游泳池循環水量約100噸/h，假設每天循環10小時，則循環總水量為1,000噸，此時其加藥量為1.75mg/L。

表5 若干固態氯鹽之價格調查

項 目	有 效 含氯量	價 格 (元/kg)	相對藥品費 (元/月)
氯氣	100% 高壓液體	10~45	1,575
次氯酸鈉	12%	3~8	2,888
次氯酸鈣(HTH)	70% 顆粒狀 70% 錠狀	130~250 150~260	14,250 15,375
三氯異三聚氰酸(TCICA)	90% 顆粒狀 90% 錠狀	300~400 200~500	20,420 20,420
二氯異三聚氰酸鈉鹽(SDIC)	60% 細顆粒狀	300~400	30,625

5.3.1 綜合討論

由以上之估算程序，吾人大概可以知道使用氯氣或替代品之成本分佈，本節之目的主要在於指出所需要考慮的項目，可供業者自行就其個別之狀況，再代入所查詢到的價格，如此將可輕易判斷出替代品在經濟因素上的比重。至於其它值得注意的因素尚包括：

1. 使用氯氣或次氯酸鈉之最大不利之處，為其生成三鹵甲烷之潛力，目前對飲用水言，其標準在0.15mg/L以下，大都能合格，但未來可能降為0.10mg/L，對受有機物污染較為嚴重的地區水源，則其超過標準的機會大增，所以若仍繼續使用氯氣時，則有必要加裝去除此等氯化有機物的設備，

其投資與運轉費用亦需加入考慮，此時在大型氯氣用戶上，是否仍佔有優勢，則不得而知。

2. 本文主要之考量為消毒殺菌，但以臭氧為消毒劑時，其所具備之強氧化能力，將同時具有降低水中BOD值之能力，因此具有降低其它費用之特點，所以總體評估之後之經濟效應，勢必個別再深入考慮。
3. 對二氧化氯而言，目前最大的難處為其藥品費偏高之故，但當使用量增加，或增加原料供應商之競爭性後，其藥品單價應可望降低，在目前的情況看來，二氧化氯多僅能在小用量的情形下，與其它消毒用藥競爭，其不易生成氯化有機物之特性為本用藥之最大優點。
4. 如同一些國外成功的案例，最佳的處理程序必須通盤考量，而所得之結論很可能是同時使用兩三種消毒劑，以達最理想之效果，然而若要如此，則必須限定對象，如特別針對東港溪或基隆河之水，以及處理後所欲達到的水質標準，方可進行，此一工作本身範圍甚廣，故不在本文考慮之列。
5. 不同技術（用藥）之可靠性，及可操作性亦應列入實際考量項目之一，以UV為例，一些不太成功之例子都顯示，在其運轉其間維護與維修工作，會造成使用者的困擾（與原氯氣系統相比），因而可能落入不易推廣的結論，不過吾人以為此一情況必定因人因地而異，所以不宜驟下結論。
6. 最後如同前節正文所述，在許多場所（例如游泳池業者），消毒所用之費用僅佔其總營運成本之極小部份，以是之故，換不換用比較安全的替代品，應該是十分容易的選擇了。

六、結論

氯之使用雖然在經濟性，功能性上有其優越之處，但因為安全及產生致癌有機氯化物的顧慮，所以有必要積極考慮朝向減少其用量，或改用其它替代品等方向著手。在本研究中吾人已將國內氯氣之用途及各種用量，大致調查清楚，並且分別介紹可用之替代品及成功的案例，分別就其「功能性」、「環保及安全性」、及「經濟性」加以討論，其中尤其以提出所謂之安全成本，應為較為進步之作法，可以推廣其觀念給一般之民眾與氯氣使用者，使其明瞭所應負擔之成本，並非單純的氯氣價格而已。以下將就吾人所得之結論敘述如後：

1. 在自來水處理的用途上，自來水公司應按照其計畫，執行次氯酸鈉的替代方案，而對於用量大的淨水場而言，則開始積極規畫減少氯氣用量的具體作法，應不為過，其可仿參歐洲地區採行之多段消毒方法，使用如二氧化氯，臭氧等之替代品，以減少氯之用量；尤其是在水源污染較為嚴重的地區，大量的前加氯程序，必然大幅增加有害消毒副產物的生成機會，所以採用合適的替代品或增加除氯的設備，以確實保障民眾的健康，至於具體之作法，則宜考量地區性水源特性後，深入研究後再定訂之。
2. 在游泳池水處理上，無論改用次氯酸鈉，固態之次氯酸鈣或有機氯鹽，二氧化氯，臭氧等替代品，在國內皆有成功的實例，其中以價格考量，則次氯酸鈉或次氯酸鈣為較佳之選擇，未來發展出將消毒劑混凝劑一齊加入待處理之水中，以提供更佳的水質，應為正確之方向。當然正確的池中水循環系統之設計，對水質之影響亦不可忽視；此外對於大多數游泳池業者而言，其消毒用藥費用，在營運成本中所佔不多，所以改用安全的替代品，應該不困難。
3. 在工廠冷卻水方面，同樣的改用次氯酸鈉，或添加含溴用藥，二氧化氯，臭氧，都是可以選擇的替代品，由於消毒用藥的費用，同樣只佔成本之極小部份，所以只要替代品能合於該廠之環境，應亦無太大之問題。
4. 在食品工廠之用水上，改用次氯酸鈉，臭氧或UV方法，皆有成功之實例可供參考，且其價格因素，在成本中亦所佔比率不高。
5. 在污水處理之程序上，雖然目前僅有台北迪化廠使用氯氣，但其用量不貲，然由文獻資料看來，考慮使用UV法，以降低或避免使用氯氣，應為值得探討的方向之一，此時其意義並不止於氯氣外洩的顧慮，而是其所排放水中有無過量有害消毒副產物的問題，此一考慮，自然也適於其它污水處理廠。

誌謝

本研究承蒙環保署毒管處支持（計畫編號：EAP-83-J203-09-15），特此誌謝。

參考資料

1. Morris, J.C. Aqueous chlorine in the treatment of water supplies, Chpt. 2 in, Organic carcinogens in drinking water-detection, treatment and risk assesment, John Wiley & Sons, New York, 1986.
2. Manahan, S.E., Environmental Chemistry, 5th ed., Lewis Publishers, Chelsea, Michigan USA, 1991.
3. Dernat, M. and M. Pouillot, Theoretical and practical approach to the disinfection of municipal waste water using chlrine dioxide, Wat. Sci. & Tech., 25 [12], 145-154, 1992
4. 蔡騰龍，工業水處理，163-185，正文書局，台北，1992。
5. 蔣本基，張宜宜，張勝棋，顧洋，預臭氧處理對活性碳吸附消毒副產物之響，環保署報告，EPA-82-E3-J1-0903，1993。
6. 葉宣顯與林達昌，台灣南部地區受嚴重污染自來水原水處理程序改進之研究，環保署報告，EPA-82-E3-J1-0903，1993。
7. AWWA Standards for Hypochlorites, American Water Works Association, ANSI/AWWA B300-87, 1987.
8. Tucker, S.P. and L.M. Blade Determination of cyanuric acid or trichloroisocyanuric acid in air Analytical Letters, 25 [12], 2265-2277, 1992.
9. Moody, R.P., B. Nadeau, S. MacDonald and I. Chu, In vitro skin absorption of C(14)-cyanuric acid in a simulated swimming pool, Bull. Enviro. Contam. Toxicol., 50, 12-18, 1993.
- 10Kfir, R., B.W. Bateman, B.A. Pitout and P. Coubrough, Disinfection of polluted water by chlorine-flocculant tablet, Wat. Sci. Tech., 21 [3], 207-213, 1989.
- 11White, G.C., Handbook of chlorination and alternative disinfectants, 3rd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- 12王正雄，安定化二氧化氯溶液消毒法，食品工業，22 [10]，14-17，1990。

- 13Chermisinoff, N.P. and P.N. Cheremissnoff, Water Treatment and Waste Recovery, Chpt 2, Prentice Hall, Englewood cliffs, N.J., USA, 1993.
- 14Stevens, A.A. and J.M. Symons, Alternative disinfection processes, Chpt. 10 in, Organic carcinogens in drinking water-detection, treatment and risk assesment, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- 15高雄市中區污染水處理廠資料，1994。
- 16江弘斌及吳民鐘，臭氧應用於淨水處理一模廠試驗，自來水會刊雜誌，VOL 33，109-136，1990。
- 17Sato, T., H. Yamamori, H. Matsuda, H. Nagase and H. Kito, An estimation of safety of ozonation and chlorination of a water purification plant, Water Sci. Technol., 26(9-11), 2385-2388, 1992.
- 18Langlais, B., D.A. Reckhow and D.R. Brink, Ozone in water treatment, application and engineering, Lewis Publishers, 1991.
- 19Wolfe, R.L., Ultraviolet dishinfection of potable water, Envir. Sci. & Tech., 24(6), 768-773, 1990.
- 20Sommer, R and A. Cabaj, Evaluation of the efficiency of a UV plant for drinking water disinfection, Wat. Sci. and Tech., 27(3-4), 357-362, 1993.
- 21Sobotka, J., The efficiency of water treatment and disinfection by means of UV radiation, Wat. Sci. & Tech., 27(3-4), 343-346, 1993.
- 22Fellers, B.D., E.L. Flock and J.C. Conley, Bromine replaces chlorine in cooling-water treatment, Power, 132 (6), 15-19, 1988.