

自來水三鹵甲烷 (THMs) 健康危害 及其去除方法之探討

蔡文田*

摘要

本文搜集、整理國內外最近有關THMs之物性、毒性、法規及去除技術資料。在物性及毒性方面，則特別針對含量最高且毒性最大的三氯甲烷；此外，並搜集去除THMs之指標常數，包括亨利定律常數、蒸發潛熱、碘吸附能力等。在法規方面，THMs之最大容許標準為美國 100 ppb、加拿大 350 ppb、日本 100 ppb、歐洲經濟體 (EEC) 1 ppb (除農藥外之有機氯化物)，而國內為200 ppb；另外世界衛生組織(WHO)之遵循值(Guideline Value)為 30 ppb (僅指三氯甲烷)。最後在探討 THMs去除技術方面，針對粒狀活性碳(GAC) 吸附法及氣提法作詳細描述；前者包括有再生系統，其再生尾氣須處理(例如焚化/洗滌)，以符合排放標準(例如HCl 80 ppm)，後者則使用逆流式填充塔，其氣提尾氣也須處理(例如焚化/洗滌、碘吸附)，以符合排放標準或有機氯廢溶劑(可能屬於毒性事業廢棄物)之處理/處置問題。最後並說明THMs去除技術之成本分析。

一、前言

1970年初期，美國「環保署」(EPA)發表從新奧爾良市(New Orleans)淨水廠之淨水中發現含三鹵甲烷(Trihalomethanes, THMs)在內的合成有機化合物(Synthetic Organic Compounds, SOC)，促使國會於1974年頒佈「安全飲用水法」(Safe Drinking Water Act, SDWA)。同年，Rook氏公佈了一項研究結果，其中證實加氯消毒處理會導致THMs之增加，且隨後證實其形成原因乃氯與原水中之有機物質反應而成，而有機物質的主要天然性前驅物質(Precursors)為腐植酸(Humic Acids)、黃酸(Fulvic Acids)、甘寧酸(Tannic Acids)等植物腐敗分解產物，其次為微藻類(Algae)；至於人為性的前驅物質則導因於工業廢水和有害事業物之處理/處置不當所造成水源(包括湖、河、川、地下水等)之污染，前者主要是指酚類(Phenols)，後者則指有機氯化物(Organic Chlorinated Compounds)。

1976年美國「國立癌症研究機構」(National Cancer Institute, NCI)公佈一項研究報告，其中發現THMs中含量最高的三氯甲烷(俗稱氯仿)會使老鼠致癌。同年，美國「食物及藥物管理局」(Food and Drug Administration, FDA)發佈禁令，禁止氯仿當作咳嗽感冒藥、敷膏、牙膏等添加劑。1979年11月29日，美國「環保署」於「安全飲用水法」中「國家暫行主要飲用水法規」(National Interim Primary Drinking Water Regulations, NIPDWR)之第二次修正(Amendments)，增列對總THMs之最高污染限值(Maximum Contaminant Level, MCL)為0.1mg/L (100ppb)。

反觀國內，近年來自來水水源受工業廢水、都市污水及畜牧廢水之污染日益嚴重，水源中之有機物及氮氮含量日益增多，此種現象將增加預氯 (Prechlorination) 處理之加氯量，而增加生成THMs等可能致癌物。同時根據最近給水系統水質調查資料顯示，本省一些污染嚴重地區其自來水中之THMs含量已偏高，如岡山大約 70~80ppb，新營亦曾有高達140ppb；另一項研究亦顯示，新營、東港、烏山頭、白河等水廠於冬季之THMs皆超過100ppb。為此，政府於民國七十四年修訂的「台灣省自來水水質標準」中，將總THMs標準訂為0.2mg/L，以促使各自來水事業機構重視此問題。同時政府一直有意推動自來水生飲計畫，而行政院環保署也正擬訂全國性飲用水水質標準草案，並自七十九年度起辦理有關飲用水水質現況調查，逐步建立飲用水水質資料庫，且擴大辦理飲用水水質監測，檢測項目中將增列揮發性有機物質。

從以上所述，今後THMs的問題將日益受到重視，且如何降低THMs含量更是當前研究自來水的一大課題。有鑑於此，本文特搜集、分析及整理有關THMs之健康危害性、管制法規、去除技術等最新資料，其中針對THMs含量最高且最具危害性的三氯甲烷作較詳細描述，以及匯編成物質安全資料卡 (Material Safety Data Sheet, MSDS)，並著重檢討THMs去除技術中之粒狀活性碳 (Granular Activated Carbon, GAC) 及氣提 (Air Stripping) 法。

二、THMs特性

如前所述，THMs乃是淨水廠加氯消毒過程中，水中有機物與氯作用所反應生成，主要有三氯甲烷 (Trichloromethane, CHCl_3)、三溴甲烷 (Tribromomethane, CHBr_3)、二氯溴甲烷 (Bromodichloromethane, CHBrCl_2) 及二溴氯甲烷 (Chlorodibromomethane, CHBr_2Cl) 四個化合物，其中以三氯甲烷最常被測得，且含量也最高。至於對人體潛在健康危害性方面，三氯甲烷已經動物試驗證實為具有腫瘤性 (Neoplastic)、致癌性 (Carcinogenic) 及畸形性 (Teratogenic)，三溴甲烷初步動物試驗顯示有腫瘤性，而二氯溴甲烷及二溴氯甲烷則尚未發現有致癌性。

本文特別針對THMs之物性及毒性資料，前者可作為THMs去除之參考，後者則作為法規之依據。由於三氯甲烷於THMs中含量最高且最具危害性，因此將對其作較詳細的描述。

1. 物性

① 三氯甲烷

三氯甲烷俗稱氯仿 (Chloroform)，分子量 119.38，沸點 61.3°C ，熔點 -63.5°C ，比重1.481 (25/ 4°C)，蒸氣密度 4.12 (空氣=1)；無色揮發性液體，有獨特的氣味及甜味，不易燃燒，微溶於水，可和酒精、乙醚等溶劑混合；在日光下慢慢分解成為光氣 (Phosgene)、氯化氫、二氧化碳、水等。表1為三氯甲烷之物性資料，圖1為三氯甲烷於水中隨溫度變化之溶解度。

② 三溴甲烷

三溴甲烷俗稱溴仿 (Bromoform)，分子量 252.75，沸點 149.5℃，熔點 7.7℃，比重 2.891 (20/4℃)，蒸氣密度 5.17 (空氣 = 1)；無色揮發性液體，有三氯甲烷一般之氣味，不易燃燒，微溶於水，可溶於酒精、乙醚、丙酮、三氯甲烷等有機溶劑中；在日光下逐漸分解變為黃色。

③ 二氯溴甲烷

分子量 163.83，沸點約 90℃，熔點 -57.1℃，比重 1.971 (25/25℃)；無色液體，不易燃燒；微溶於水，可溶於酒精、醚、三氯甲烷、酮等有機溶劑中。

④ 二溴氯甲烷

分子量 208.29，沸點約 -120℃，熔點約 -20℃，比重 2.440 (25/25℃)；無色至淡黃色液體，不易燃燒；微溶於水，可溶於酒精、醚、酮、三氯甲烷等有機溶劑中。

除上述物性外，在考慮使用曝氣 (Aeration) 或氣提 (Air Stripping) 去除技術時，需知亨利定律常數 (Henry's Law Constant)；亨利定律乃表示“在定溫下，能溶於定量液體中之氣體量，與作用於液體表面的氣體壓力成正比”。根據最新資料顯示，THMs之亨利定律常數 H (單位： $\text{m}^3 \text{ atm mol}^{-1}$) 與溫度 (單位：K) 之關係如下：

$$\text{三氯甲烷 (CHCl}_3\text{)} \quad : H = \exp (11.9 - 5200/T)$$

$$\text{三溴甲烷 (CHBr}_3\text{)} \quad : H = \exp (11.6 - 5670/T)$$

$$\text{二氯溴甲烷 (CHBrCl}_2\text{)} \quad : H = \exp (11.3 - 5210/T)$$

$$\text{二溴氯甲烷 (CHBr}_2\text{Cl)} \quad : H = \exp (10.7 - 5210/T)$$

此外，THMs之蒸發潛熱 (單位： kcal/mol) 為

$$\text{三氯甲烷 (CHCl}_3\text{)} \quad : 7.04$$

$$\text{三溴甲烷 (CHBr}_3\text{)} \quad : 8.86$$

$$\text{二氯溴甲烷 (CHBrCl}_2\text{)} \quad : 7.62$$

$$\text{二溴氯甲烷 (CHBr}_2\text{Cl)} \quad : 8.23$$

2. 毒性

① 三氯甲烷

三氯甲烷主要的危害在於因重複暴露 (吸入或攝入) 所導致的肝及腎傷害；於人體所得證據顯示，在小於其臭味閾限濃度 (約 200 ppm) 下，重複暴露即可導致

此種傷害，且腎傷害通常與肝傷害一起發生，但嚴重性較小。

高濃度的吸入可導致瞳孔膨脹，並減低對光線之反應，最後是平衡的錯亂或失去知覺等中樞神經系統 (Central Nervous System) 傷害，因此在過去三氯甲烷曾被廣泛使用為一種外科麻醉劑，但如今因暴露於高濃度 (Narcotic Conc.) 下常導致對心臟及循環系統影響所產生突發性的死亡而被淘汰。

三氯甲烷的攝入會對口腔、喉嚨等消化器官有嚴重的灼傷，並使胸部及腹部產生疼痛和嘔吐，緊接而來的是知覺的喪失，而長期性對肝或腎之傷害，則與攝入量有關。

單純、短暫的接觸，可對皮膚及黏膜有溫和的刺激，但不會經由皮膚有明顯的吸收而進入體內，但重複性的皮膚接觸，可導致局部的刺激，甚至發炎。

當三氯甲烷濺灑而進入眼睛，將導致局部的疼痛及刺激，但不會有嚴重的傷害發生。若在高溫或開放式的火焰下，三氯甲烷可分解生成毒性、刺激性氣體，包括光氣、氮及氮化氫，這些物質尤其對呼吸系統有嚴重的危害。

1976年，美國「國立癌症研究機構」(NCI) 經由動物試驗證實在高劑量下，可導致 mice 得到肝癌，以及 rat 得到腎腫瘤。同年，美國「食品及藥物管理局」(FDA) 禁止一系列使用三氯甲烷之產品；此外，美國「環保署」(EPA) 也於聯邦法規 (40 CFR 61.01) 中將三氯甲烷公告為潛在危害健康或致癌性之空氣污染物，並被列為高危害性物質 (Extremely Hazardous Substances)，而需受 1986年10月17日所頒佈「緊急計畫及社區有權知法」(Emergency Planning and Community Right-to-Know Act) 之管制。

三氯甲烷之 50% 致死劑量 (Lethal Dose, LD50)、50% 致死濃度 (Lethal Concentration, LC50)、最低毒性劑量 (Toxic Dose Low, TDLo)、最低毒性濃度 (Toxic Concentration Low, TCLo) 等詳細資料，可參考文獻⑨。

三氯甲烷之暴露標準，一般常引用者有「美國政府工業衛生師協會」(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) 之工作場所中之每日工作八小時，每星期工作五天時量平均 (Time-Weighted Average) 恕限值 (Threshold Limit Value, TLV)，美國「勞工安全與健康局」(Occupational Safety and Health Administration, OSHA) 之允許暴露限值 (Permissible Exposure Limit, PEL)，「德國研究協會」(German Research Society, GRS) 之最大容許濃度 (Maximum Allowable Concentration, MAK)，以及國內「勞工委員會」之勞工作業環境空氣中有害物質容許濃度標準。此外，評估三氯甲烷對人體之急性影響尚有兩個指標，分別為 ACGIH 恕限值之短時期暴露限值 (Short Term Exposure Limit, STEL) 及 OSHA 之對生命或健康有立即危害限值 (Immediately Dangerous to Life or Health, IDLH)，前者乃定義為勞工可連續暴露於一短暫期間 (15分鐘)，而不使其遭受刺激 (Irritation)、慢性或無法恢復之組織損害，以及足夠程度之昏迷狀態 (Narcosis) 的濃度，後者之目的乃在於作為選用呼吸

罩 (Respirator) 之參考。表2 為三氯甲烷的物質安全資料卡 (MSDS)，此表除列有三氯甲烷之物性、健康危害性 (包括急性和慢性影響) 及暴露容許標準外，也涵蓋其著火爆炸性、反應性及一般防護預防措施，DOT Class 表示美國「運輸部」 (Department of Transportation, DOT) 對於該物質於運送過程中所規定標示的字樣，NFPA 704M 則表示美國「國家消防協會」 (National Fire Protection Association, NFPA) 所制定的材料危險標示，其中將化學品危險性中之健康 (Health, 藍色標誌)、燃燒 (Flammability, 紅色標誌) 及反應 (Reactivity, 黃色標誌) 分為等級4、3、2、1、0 五級，數字愈大表示愈具危險性。

② 三溴甲烷

三溴甲烷具有類似三氯甲烷之麻醉性質，也是一種新陳代謝的毒物 (Metabolic Poison)，但揮發性較差，且毒性較高，因此在醫學上已導致許多中毒事件發生；除此，它具有催淚的特性。

人類吸入少量的三溴甲烷可導致刺激，以及眼淚和唾液流出，並使臉部泛紅；長期影響可損及肝至嚴重程度，甚至死亡。目前於動物試驗顯示有腫瘤 (Neoplastic) 症狀發生，其毒性資料可參考文獻(9)。另外須知三溴甲烷受熱分解可產生含溴之毒性氣體。

三溴甲烷暴露標準中，僅 ACGIH之TLV-TWA 為0.5ppm (skin)，skin表示該物質易從皮膚、粘膜滲入體內，以及OSHA-PEL為0.5ppm (skin)；此外，DOT Class 為“Poison B”，而NFPA 704M 則無規定。

③ 二氯溴甲烷

二氯溴甲烷對口部具刺激性，於高濃度下有麻醉性；當其被加熱可分解產生含溴及氯之有毒氣體。其毒性資料顯示尚未有致癌性症狀發生，可參考文獻(9)。

④ 二溴氯甲烷

二溴氯甲烷類似三氯甲烷及三溴甲烷，具有刺激性及麻醉性；當其被加熱可分解產生含溴及氯之有毒氣體。其毒性資料顯示尚未有致癌性症狀發生，可參考文獻(9)。

三、法規現況

自從1974年發現於加氯淨水廠之淨水中含有THMs，以及1976年美國「國立癌症研究機構」(NCI) 公佈三氯甲烷會使老鼠致癌之報導後，因考慮自來水為人類日常生活之飲用水，會累積影響人體健康，故世界各國紛紛訂定最大容許限值。

美國基於1974年所通過之「安全飲用水法」(SDWA)，在具有強制執行之「國家暫行主要飲用水規定」(NIPDWR) 中，於1979年11月29日第二次修正案中增列自來水水中

總THMs最高污染限值 (MCL) 為 0.1 mg/L (100 ppb)，其生效日期及規定，則依供水系統大小而定，詳見附錄 I。

自從美國訂定自來水總THMs之最高污染限值後，世界主要工業化國家也訂定自己的標準，包括

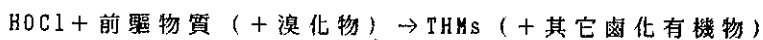
1. 加拿大：最大許可限值 (Maximum Acceptable Limit) 為 0.35 mg/L 。
2. 日本：最高許可量為 0.1 mg/L
3. 歐洲經濟體 (EEC)：最大允許濃度 (Maximum Admissible Concentration) 0.001 mg/L (指除農藥外之有機氯化物)

其中加拿大及歐洲經濟體標準不具強制性 (Nonenforceable)；除此，聯合國世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 也頒定其遵循值 (Guideline Value) 為 0.03 mg/L (僅指三氯甲烷)。

反觀國內，由於THMs的問題日益嚴重而受到重視，政府於七十四年四月修訂的「臺灣省自來水水質標準」中增列總THMs之最大容許量為 0.2 mg/L (以年平均值表示)，而檢驗頻率為每季取樣一次。

四、控制技術

在檢討THMs去除技術之前，首先須瞭解其形成機構。自來水加氯消毒主要優點在於自由有效餘氯 (即次氯酸或次氯酸根離子， HOCl or OCl^-) 含量可維持相當長的時間；此淨水程序中，因 HOCl 或 OCl^- 與THMs之前驅物質反應而生成THMs，如下式所示：



從上式可引導出三種基本的原則來控制THMs，即

1. 使用另一種不會形成THMs之消毒劑。
2. 在加氯之前，去除THMs之前驅物質。
3. 在THMs形成後去除之。

此三種原則可各別使用，亦可聯合使用之，重要者有曝氣 (Aeration) 或氣提 (Air Stripping)、吸附 (Adsorption)、混凝 (Coagulation)、pH調整、降低加氯量或改變加氯點，以及替代消毒劑 (例如臭氧、氯胺、二氧化氯)。本文特別針對吸附處理中之粒狀活性碳 (Granular Activated Carbon, GAC) 及氣提法作詳細的說明，並提出相關問題。

1. 粒狀活性碳 (GAC)

GAC 已被證實為有效去除THMs及其前驅物質之方法，且可去除臭味及其它有機化

合物。而近年來由於GAC再生技術的進步，使其已逐漸廣泛應用於THMs之控制；同時美國「安全飲用水法」(SDWA)中之「國家暫行主要飲用水法規」(NIPDWR)中，更規定供應75,000人以上之飲用水，須於淨水過程中使用GAC，以期控制飲用水中所含THMs在內之合成有機物(SOC)含量能在容許限值以內。

GAC乃將活性碳填充於反應床中，藉由THMs與活性碳表面吸引力之作用將THMs吸附於碳粒內之隙洞(Pore)中，其吸附強度與THMs之特性(例如分子量、分子結構)及活性碳特性(例如pH值、表面積、隙洞大小及分佈、體密度、粒徑大小、灰含量及組成)有關。當碳粒隙洞中吸附飽和後，即達到“Breakthrough”，則“Spent”活性碳須再生(Regeneration)。根據參考文獻(8)資料，THMs中之吸附能力(單位：mg/g)為三氯甲烷 2.6，三溴甲烷 20，二氯溴甲烷 7.9，二溴氯甲烷 4.8。

隨著GAC市場擴大，現場再生處理設施明顯地具有降低成本之誘因。再生的選擇包括蒸氣或高溫二種系統，其中後者幾乎可達到完全再生的效果；一般的作法乃將GAC加熱至約815℃，以使乾燥、烘烤及氣化(Gasification)現象發生。傳統上，高溫再生是在多床爐(Multiple Hearth Furnaces)或旋轉窯爐(Rotary Kilns)下進行，近年來則有使用流體化床再生器(Fluidized Bed Regenerators)或電帶爐(Electric Belt Furnaces)。選擇高溫再生系統之基準有

① “Spent”活性碳特性

- 焦炭(Char)生成量
- 腐蝕傾向
- 熔渣(Slagging)傾向

② 高溫再生器評估

- 再生能力
 - 質量傳送能力
 - 粒子滯留時間分佈(Resident Time Distribution, RTD)
 - 壓力控制
 - 溫度控制
- 特殊考量
 - 容量限制
 - 空間利用
 - 間歇性使用

③ 再生成本

- 設備折舊
- 補充碳成本
- 公用設施成本
- 操作成本
- 維修成本

由於再生後將產生一股含THMs在內之有機氯化物，其特性是對水微溶解性，故可使用冷凝分離或焚化洗滌程序處理；但前者其經濟效益及去除效率上不高，且投資成本不低，後者則使用後燃燒器（Afterburner），將有機污染物完全氧化成 CO_2 、 H_2O 、 HCl 等。由於焚化後廢氣中含有 HCl 之毒性氣體，為符合固定污染源空氣污染物排放標準（國內的標準為 HCl 80ppm），須加裝鹼液洗滌塔（Caustic Scrubber），因此高溫再生及尾氣焚化／洗滌設施將大大地增加GAC系統之投資成本；圖2為典型GAC系統之概示。

GAC系統之成本可分為資本（Capital）及操作與維修（Operation & Maintenance, O&M）成本。前者包括活性碳吸附系統、泵浦設施（Pump Station）及再生系統；後者包括對吸附系統之電力及人工費用，以及再生系統之維修、電力、燃料、補充碳和人工費用。

2. 氣提

氣提為曝氣的一種。傳統上是被用來增加溶氧量或去除 H_2S 、氨氣等，但近年來研究建議可作為去除水中微量有機物污染物（例如THMs）之成本有效方法。

以氣提法去除水中微量有機物污染物之原理，主要是通空氣於水中，將此污染物從液相水中轉移至氣相空氣中，其效率在於氣／液平衡分佈（Vapor-Liquid Equilibrium Distribution）及質量傳送係數（Mass Transfer Coefficient）。一般而言，有較高蒸氣壓及對水低溶解度的化合物較易被氣提。因此亨利定律常數為可氣提性（Strippability）之指標；亨利定律常數低者較難被去除，而含溴之THMs其亨利定律常數較低，故其較三氯甲烷難去除。

氣提的方法有數種，其中以逆流式填充塔（Countercurrent Packed Tower）對去除水中有機物為最具成本有效的方法；圖3之為典型氣提系統之概示。

在設計氣提塔時，除了考慮亨利定律常數外，也須決定出塔高，包括空氣及水排放限量，而水力流量可定出塔的直徑。除此，一般的經驗有空氣流量／水流量比為15：1，以及水流量／塔的截面積比為20：1，以確保去除效率。

由於氣提系統之高去除效率（>97%）及高處理量，將導致尾氣中含可觀之有機物量，如此將導致環境污染之問題。尾氣排放之選擇有三種：

- ① 直接排放至大氣中：此項運作之允許有賴當地環保標準之要求。欲評估其接受性將做空氣排放模擬、暴露評估研究，以及成本上之考量。
- ② 焚化處理：使用焚化器來處理有機氯化物，將導致 CO_2 、 H_2O 、 HCl 、 NO_x 、 CO 等之生成。為符合排放標準80 ppm(HCl)，必要時須加裝鹼液洗滌塔；圖4為氣提尾氣以焚化／洗滌處理之系統簡示，圖中並示有洗滌液為一股酸性廢水，以鹼液作pH調整後，送入廢水處理場。
- ③ 氣相碳吸附處理：以碳吸附系統去除氣提尾氣中之有機物，系統中之再生則使用蒸氣的方式，將碳吸附床溫度提高，以吹除（Purge）有機物，然後將其冷凝，送入油／水分離器，則上層液為含相當量之有機氯化物，此可能屬於毒性事業廢棄物

(依「有害事業廢棄物認定標準」之規定，有機氣廢溶劑含量超過 1% 即屬之)，須有妥善之回收處理／處置，下層液則送入廢水處理場或可直接排放。圖 5 為氣提尾氣碳吸附系統之簡示。

除此，尚有一些氣提尾氣處理技術可考慮使用，包括以鍋爐代替焚化器、冷凝、氣／液吸收及燃燒 (Flaring)。

氣提系統包括氣提塔及其尾氣處理設施。前者之資本尚包括建造、運送、鼓風機、泵浦、工程等費用，O & M 成本則有電力、人工及維修費用；後者則視所選用技術之不同而有所差異，若焚化／洗滌系統則資本尚包括建造、配管等費用，O & M 成本則有電力、燃料、人工、維修及鹼液之費用，若碳吸附系統，資本則指碳吸附／蒸氣再生單元，而 O & M 成本除電力、人工及維修費用外，尚有蒸氣及有機氯化物液之處理／處置費用。根據一項資料顯示，上述氣提塔及各氣提尾氣處理系統之成本比如下：僅考慮資本，則氣提塔：氣提塔／碳吸附：氣提塔／焚化器：氣提塔／焚化器／洗滌塔 = 1 : 2.8 : 4.2 : 7.7；但若將每年 O & M 成本列入，則成本比變為 1 : 3.5 : 6.5 : 9.9。

五、結語

近年來，台灣地區的一些自來水水源受到工業廢水、事業廢棄物、都市污水及畜牧廢水之不同程度污染，使得淨水廠之氯化消毒量不斷地增加，此舉造成有致癌性 THMs 含量之增加是可預期的，因此面對自來水為人類日常生活所必須之飲用水，THMs 之去除控制實為目前研究自來水的一大課題。

眾所周知，THMs 中以三氯甲烷之含量最多，且毒性最大。本文特搜集有關三氯甲烷之詳細物性及毒性資料，並匯編成物質安全資料卡 (MSDS)。除此，也搜集三溴甲烷、二氯溴甲烷及二溴氯甲烷相關資料。上述資料中並包括有亨利定律常數、蒸發潛熱等去除 THMs 之重要指標數值。

在 THMs 法規方面，目前世界各國的最大容許標準為美國 100 ppb，加拿大 350 ppb，日本 100 ppb，歐洲經濟體 (EEC) 1 ppb (除農藥外之有機氯化物)，而國內為 200 ppb。另外，世界衛生組織 (WHO) 之遵循值 (Guideline Value) 為 30 ppb (僅指三氯甲烷)。

最後在討論 THMs 之去除技術方面，特別說明粒狀活性碳 (GAC) 吸附法及氣提法。GAC 系統包括有再生設施，故其再生尾氣須處理 (例如焚化／洗滌)，以符合排放標準 (例如 HCl 80 ppm)；氣提法則使用逆流式填充塔，其氣提尾氣也須處理，包括焚化／洗滌或碳吸附法，前者也須符合排放標準，後者則須考慮有機氣廢溶劑 (可能屬於毒性事業廢棄物) 之處理／處置問題。

六、參考文獻

1. Alben, K.T., Shpirt, E., and Kaczmarczyk, J.H., "Temperature Dependence of Trihalomethane Adsorption on Activated Carbon: Implications for Systems with Seasonal Variations in Temperature and Concentration", *Environ. Sci. Technol.*, Vol.22, No.4, pp.406-412, April, 1988.
2. Contruvo, J.A., "THMs in Drinking Water", *Environ. Sci. Technol.*, Vol 15, No.3, pp.268-274, March, 1981.
3. Dworkin, D., and Cawley, M.W., "Aquifer Restoration: Chlorinated Organics Removal Considerations in Proven vs Innovative Technologies, *Environmental Progress*, Vol.7, No.2, pp.99-103, May, 1988.
4. Liu, P.K.T., and Wagner, N.J. "Thermal Regeneration of Granular Activated Carbon", *Environmental Progress*, Vol.4, No.2, pp.136-140, May, 1985.
5. Nicholson, B.C., Maguire, B.P., and Bursill, D.B., "Henry's Law Constants for the Trihalomethanes: Effects of Water Composition and Temperature", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 18, No.7, pp.518-521, July, 1984.
6. Sayre, I.M., "International Standards for Drinking Water", *Journal AWWA*, Vol.80, No.1, pp.53-60, January, 1988.
7. Thompson, J.C., "Updating the Safe Drinking Water Act and the Drinking Water Regulations", *WATER/Engineering & Management*, pp.21-24, August, 1986.
8. Kirt, R.E., and Othmer, D.F., Encyclopedia of Chemical Technology, 3d ed., Wiley-Interscience Co., New York, N.Y., 1982.
9. Sax, N.I, and Lewis, R.J., Dangerous Properties of Industrial Materials, 7th ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York, N.Y., 1989.
10. 曾迪華、應堅聖, 「自來水中三鹵甲烷處理技術之回顧與評估」, 自來水會刊雜誌, No.23, pp58-75, 1987.
11. 江弘斌, 「美國安全飲用水法案及其進展」, 自來水會刊雜誌, No.31, pp.35-49, 1989.
12. 環境法令, 環保通訊社, 台北市, 1989.

附錄 I : NIPDWR 第二次修正案所增列 THMs 之規定

① 最高污染限值 (Maximum Contaminant Level, MCL)

0.1ppm 總 THMs 含量 (TTHM 包括 CHCl_3 、 CHBr_3 、 CHBrCl_2 及 CHBr_2Cl)

② 適用範圍

地面 / 地下水淨水處理程序中加入消毒劑之社區供水系統。生效日期：

供水系統 > 75000 人 : 頒佈日期 2 年後 (1981 年 11 月 29 日)

供水系統 10-75000 人 : 頒佈日期 4 年後 (1983 年 11 月 29 日)

供水系統 < 10000 人 : 由主位權責單位自行決定 (通常是州, 如果該州未具有主位權, 則為 EPA)

③ 監測要求

每季每處理廠至少 4 個水樣。在主位權責單位同意下, 使用多口井的淨水廠可視為單一處理廠。

(a) 生效日期

供水系統 > 75000 人 : 頒佈日期 1 年後 (1980 年 11 月 29 日)

供水系統 10-75000 人 : 頒佈日期 3 年後 (1982 年 11 月 29 日)

供水系統 < 10000 人 : 由主位權責單位自行決定

(b) 取樣地點

75% 於供水人口代表性地區

25% 於供水系統遠末端地區

(c) 取樣頻率調整

地下水供水系統經一段時間證明其最大總 THMs 潛量 (Maximum Total Trihalomethane Potential) < 0.1mg/L 時, 主位權責單位可斟酌降低其監測次數, 最低要求為該供水系統末端地區每年至少一次。對於未符合上面條件之地下水及所有地面水供水系統, 如其經過一年監測, 其 TTHMs < 0.1mg/L 時, 經由主位權責單位之同意, 可將監測次數減為每處理廠每季一個水樣 (需為供水系統遠末端地區)。如果 TTHMs > 0.1mg/L 或處理方式改變, 則原先監測規定需恢復。

④ 報呈要求

在 30 天內將每季分析平均報呈 EPA。如具有主位權州已採用本規定, 則報呈主位權州之權責機關。如果每季採樣分析的年平均值 > 0.1mg/L, 則需公告週知民眾。

⑤ 其他要求

(a) 分析要求

使用 purge and trap method 或 liquid-liquid extraction method, 由 EPA 鑑定合格實驗室分析之。

(b) 微生物品質保證要求

為合乎規定, 淨水處理程序可申請改變, 唯需經主位權責單位同意, 並確保微生物品質合乎規定。

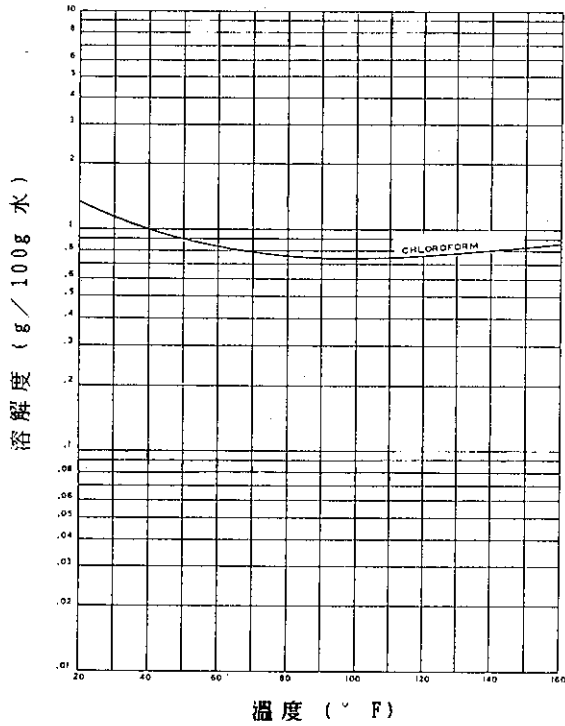


圖 1 三氯甲烷於水中之溶解度 (g/100g 水)

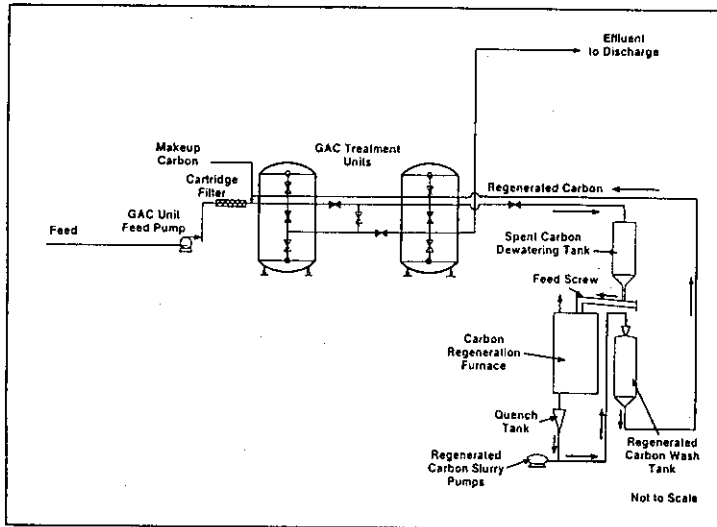


圖 2 典型 GAC 系統之概示

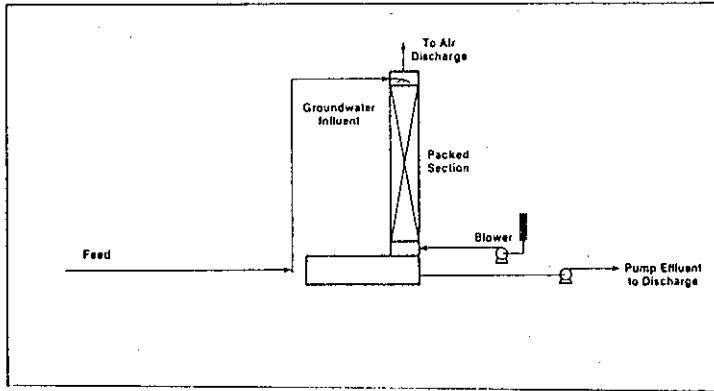


圖 3 典型氣提系統之概示

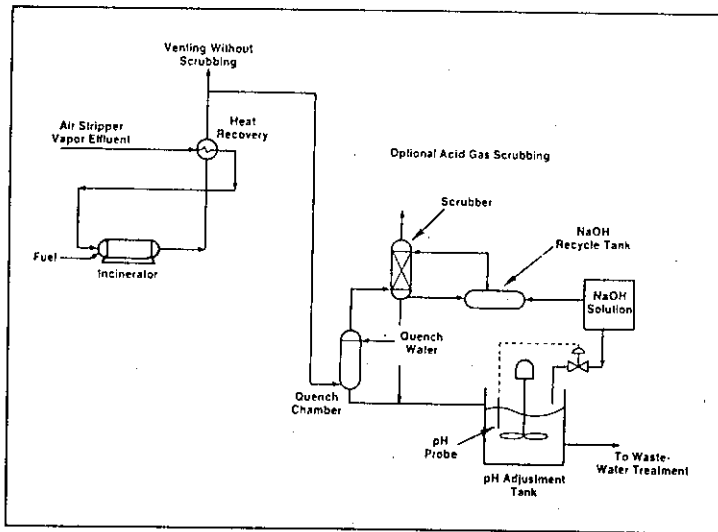


圖 4 氣提尾氣以焚化/洗滌處理之系統簡示

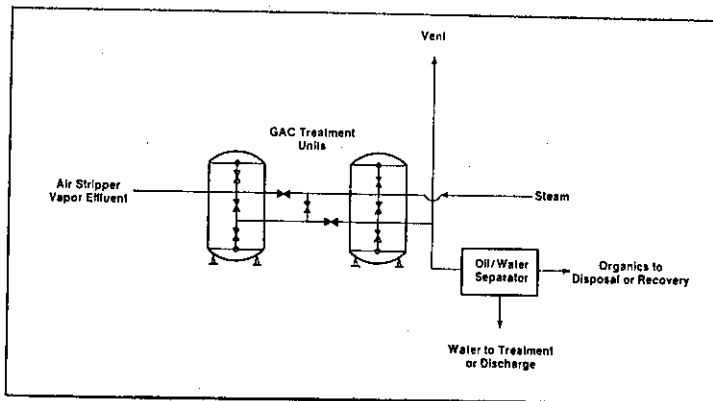


圖 5 氣提尾氣以碳吸附處理之系統簡示

表 1 三氯甲烷 (氯仿) 物性一覽

分子式, Chemical formula	CHCl ₃	蒸發潛熱(KJ/kg), Latent heat of evaporation (at 沸點)	247
分子量, Molecular weight	119.38	氣仿於水中溶解度(g/kg Hg O), Solubility of Chloroform in water	
折射率(20°C), Refractive index	1.4467	0 °C	18.62
自燃溫度(°C), Autoignition temperature	> 1800°C	10 °C	8.95
閃火點, Flash point	none	20 °C	8.22
熔點(°C), Melting point (at 101 kPa)	-63.5	30 °C	7.76
沸點(°C), Boiling point (at 101 kPa)	61.3		
比重, Specific gravity			
	0/4 °C	水於氯仿中溶解度(g/kg chloroform), Solubility of water in chloroform (at 22°C)	0.886
	25/4 °C	液體黏度(cP), Viscosity	
	60.9/4 °C	-13 °C	0.855
蒸氣密度(kg/m ³), Vapor density (at 101 kPa, 0°C)	4.36	0 °C	0.708
表面張力(dyn/cm), Surface tension		15 °C	0.596
空氣(20°C)	27.14	20 °C	0.563
空氣(50°C)	21.73	30 °C	0.510
水(20°C)	45.0		
熱容(KJ/kg.k), Heat capacity (at 20°C)	0.979	蒸氣壓(kPa), Vapor pressure	
臨界溫度(°C), Critical temperature	263.4	-60 °C	0.11
臨界壓力(MPa), Critical pressure	5.45	-50 °C	0.27
臨界密度(kg/m ³), Critical density	500	-40 °C	0.63
臨界體積(m ³ /kg), Critical volume	0.002	-30 °C	1.33
熱傳導係數(W/m.k), Thermal conductivity (at 20°C)	0.13	-20 °C	2.61
立方膨脹係數, Coefficient of cubical expansion	0.001399	-10 °C	4.63
介電常數, Dielectric constant (at 20°C)	4.9	0 °C	8.13
偶矩(C.m), Dipole moment	3.84×10 ⁻³⁰	10 °C	13.40
燃燒熱(MJ/kg.mol), Heat of Combustion	373	20 °C	21.28
生成熱(MJ/kg.mol), Heat of formation (at 25°C)		30 °C	32.80
氣體(gas)	-89.66	40 °C	48.85
液體(liquid)	-120.9	50 °C	70.13

表 2 三氯甲烷安全資料卡 (MSDS)

物質安全資料卡				D. 健康危害性			
Material Safety Data Sheet, MSDS				(結膜)刺激, 而		局部性的刺激及發炎	
A. 化學品				皮膚		吸入	
中文名稱	三氯甲烷	英文名稱	Chloroform; Trichloromethane	眼		皮膚	
商品名	氯仿	分子式	CHCl ₃	痛		痛	
類別	氯代化合物	分子量	119.38	食		食	
成分	三氯甲烷	~100%wt.		嘔		嘔	
				吐		吐	
B. 物性				對肝、腎有損; 人體潛在致癌物			
沸點(°C)(at 760mmHg)	61.3	熔點(°C)	-63.5	眼		眼	
比重(25 / 4 °C)	1.48069	蒸氣密度(空氣=1)	4.12	痛		痛	
蒸氣壓(mmHg)(at 20°C)	168	溶解度(g/100g水, 20°C)	0.822	食		食	
外觀	無色液揮發性液體			國		國	
C. 着火性與爆炸性				內		內	
閃火點(°C)(測法:)	N.A.	空氣中可燃或可	LEL	50 ppm		OSHA PEL 50 ppm(CL)	
自然溫度(°C)	> 1000	燃範圍(Vol.%)	UEL	TIU- 10 ppm		REL 2 ppm (60 min CL)	
DOT Class	ORM-A	可燃度(NFPA 704H)	0	TWA		NIOSH IDLH (Cancer)	
滅火物質	N.A. (非可燃性液體)			TIU- 50 ppm		健康度 (NFPA 704H) 2	
特殊救火程序或火警注意事項	火災中如牽涉有三氯甲烷, 救火人員須帶自給式呼吸器			GRS (總)		健康度 (NFPA 704H)	
	當受熱可導致分解			ACCIN		NIOSH	
異常引起着火或爆炸危害性	當受熱可導致分解			MAX		健康度 (NFPA 704H)	
	當受熱可導致分解			N.A.		健康度 (NFPA 704H)	
E. 反應性				不相容或		不相容	
F. 防護及預防措施				避免物質		避免物質	
呼吸防護				自給式呼吸器		自給式呼吸器	
眼睛防護				護目鏡		護目鏡	
皮膚防護				棉皮手套; 防護衣服		棉皮手套; 防護衣服	
處理與貯存之預防措施				保護容器勿受撞擊損壞; 容器須經常蓋好, 儲存於陰處		保護容器勿受撞擊損壞; 容器須經常蓋好, 儲存於陰處	
其它防護或預防之措施				防止日光直射及潑灑水分		防止日光直射及潑灑水分	
通風				適當的通風		適當的通風	