

# 智慧化之下水道系統與污水處理廠

駱尚廉

國立台灣大學環境工程學研究所特聘教授

台灣下水道協會理事長

## 摘要

污水下水道系統與處理廠之建設，原為解決水環境污染的問題，對改善都市生活品質貢獻宏大。隨著水資源缺乏、全球暖化與氣候變遷的議題與挑戰，下水道系統與污水處理廠之溫室氣體排放盤查與生命週期評估為檢視問題與尋求改善的第一步，建置智慧物聯網 (AIoT)，以即時監控管理污水下水道系統，提昇節能減排功效，為未來生活污水回收再利用、生質能源效能提昇之新挑戰與新契機。

## 壹、前言

正當號稱「日不落國」的大英帝國稱霸西元十九世紀之際，蜿蜒穿越首都倫敦心臟的泰晤士河污染日益嚴重。有一次泰晤士河口翻了一艘客輪，死傷嚴重，據說有一部分的人是被都市污水臭死的。西元 1849 年，倫敦因廢污水排放造成霍亂，二萬五千多人死亡，因此，英國在 1850 年開始於倫敦興建下水道。西元 1858 年，泰晤士河達到有史以來最臭的高峰，這年夏天，維多利亞女皇(1819-1901)按往例出巡泰晤士河，要與兩岸的市民揮手致意，官員想出一條妙計，將整條船堆滿香氣濃郁的鮮花以掩蓋泰晤士河的臭氣(此為花船、花車的由來)。英國國會隨即全額通過整治泰晤士河的工程預算，1865 年設立皇家水污染委員會，積極展開泰晤士河之污染防治研究，而倫敦在 1891 年終於完成具有污水處理廠的污水下水道系統，大幅降低泰晤士河的生化需氧量，改善了發臭的問題。

美國早期的下水道係由私人或當地居民出錢建造，有些地方管渠用得過大，造成流速過緩，沉積物蓄積分解產生難聞的臭味，甚至有坡度顛倒，污水倒流的現象。西元 1833 年波士頓開始興建污水下水道系統；1857 年紐約州布魯克林建了下水道。在各地區陸續完成污水下水道與二級污水處理廠後，圍繞白宮地區的波多馬克河仍然臭味難聞，探討是氨氮耗氧與藻類滋生之故，因而普遍提昇為除氮、磷的三級處理，恢復河川的正常生態，美國工程師學會(ASCE)會員，亦評選下水道工程為「二十世紀土木工程十大貢獻」之一。

1980 年代，蔣經國前總統常坐車到圓山飯店去會見貴賓，經國中山橋時曾提到基隆河、淡水河的惡臭要改善(當時全台西部河川已經普遍有發黑、發臭的問題)，促成淡水河整治計畫。受到瑞士洛桑管理學院將污水下水道普及率列入國家競爭力評估項目之壓力，以及全台民眾要求回復河川自然生態的期盼，政府於民國 77 年核定「污水下水道發展方案」，據以推動了六期的建設計畫，並將此

基礎工建設提升為永續水資源的新使命。

## 貳、低碳永續家園的挑戰

全球暖化與氣候變遷已被認為是人類廿一世紀所要面臨的最大挑戰之一，2015 年 195 國國家元首或代表共同簽訂巴黎協定(Paris Agreement)，接替已實施約二十年的京都議定書(Kyoto Protocol)，目標訂定本世紀「將全球升溫限制在 2°C 下，並努力將升溫控制在 1.5°C 下」；國際間每年籌措 1,000 億美元氣候基金，投入溫室氣體減量工作；各國應自主擬定國家減排計畫、措施及行動方案，並每五年檢視各國自主承諾貢獻(NDCs)及減量執行成效，進行滾動式檢討。但近期聯合國氣候變遷小組報告，全球暖化速度仍快於預期。

造成溫室效應的氣體，除二氧化碳外，尚有甲烷、氧化亞氮(這兩項都是污水厭氧與脫硝過程的產物)及氫氟碳化物等，其中以二氧化碳的排放量為最大宗(我國約為 95%)，但以全球暖化潛勢(GWP)而言，甲烷是二氧化碳的 21 倍，氧化亞氮為 310 倍，各類氫氟碳化物更高達千倍至萬倍。為何美國與歐盟在最近的 COP26 世界領導人峰會，僅提到 2030 年前將減少甲烷排放量 30%(與 2020 年比)呢？

相對於兩百多年前的大氣狀況，大氣中甲烷的含量已從 700ppb 升高到現今的 1900ppb，增加幅度是二氧化碳升高幅度的六倍以上，造成全球升溫約有一半是甲烷造成的。加上甲烷在大氣中的滯留時間大約只有十多年，比二氧化碳的百年滯留期要短很多，因此估計全球若能減排 30%的甲烷，2050 年的升溫將可減少 0.2°C。污水厭氧所產生的甲烷氣體，若能善加利用，既可減排，亦能回收為能源

配合巴黎協定，我國在 2015 年通過溫室氣體減量及管理法，預定在 2050 年國家排放目標將減為 2005 年總排放量(2.45 億公噸)的一半(1.23 億公噸)，但至 2019 年末，我國溫室氣體總排放量更再上升至 2.88 億公噸，總排放量高居世界第 22 名，人均排放量更為第 19 名。下水道與污水處理系統要配合節能減排的政策，第一步就是要進行碳足跡的盤查與生命週期評估。

## 參、溫室氣體排放盤查

Shahabadi *et al.* 針對廢污水生物處理廠 (流程如圖 1) 所排放之溫室氣體進行推估 [1]，但不考慮污泥調理和脫水過程中所排放之溫室氣體，且亦不考慮用於廢污水消毒的化學物，在製程中所排放之溫室氣體。他們針對污水廠「現地溫室氣體」之排放，第一項就是厭氧反應槽和厭氧消化槽，廢水以可溶性含碳基值  $C_{10}H_{19}O_3N$  和微生物之生質物  $C_5H_7O_2N$  作為代表，BOD 在厭氧條件下經由反應式計算轉換成  $CO_2$ 、 $CH_4$  或合成新的生質物之量，部分的生質物藉由體內呼吸會更進一步轉換成  $CO_2$  與  $CH_4$ 。因此，厭氧槽中的  $CH_4$  排放量為 BOD 的氧化作用和生質物的分解作用所生成的  $CH_4$  之加總。部分比例之  $CH_4$  會溶在出流水中帶

出厭氧槽(由亨利定律計算)，故純為氣態之  $\text{CH}_4$  需再扣除溶解態  $\text{CH}_4$ 。 $\text{CH}_4$  經由燃燒後又會形成  $\text{CO}_2$ 。因此，厭氧槽中的總  $\text{CO}_2$  排放量為 BOD 的氧化作用和生質物的分解作用所生成的  $\text{CO}_2$ ，再加上由  $\text{CH}_4$  轉化成  $\text{CO}_2$  之總和。

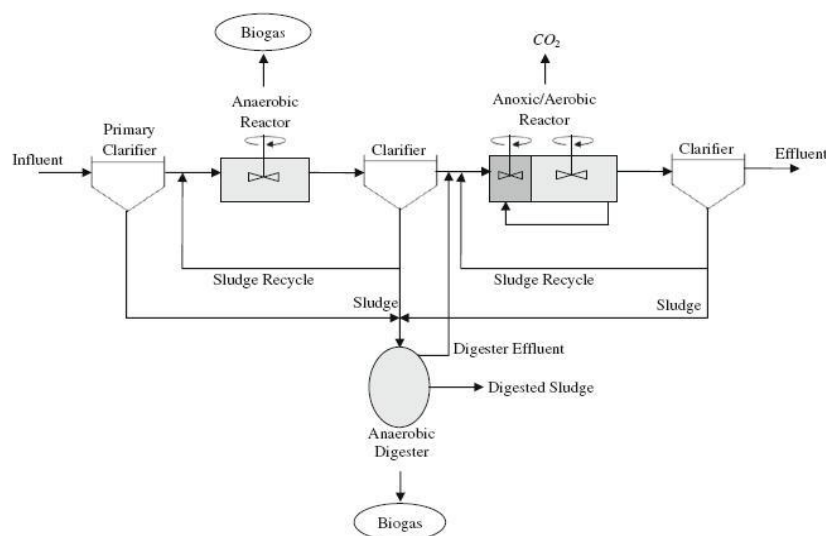


圖 1 廢污水生物處理廠之流程圖

「現地溫室氣體」排放之第二項是在無氧/好氧反應槽，經沉澱池之出水，會先進入無氧槽，去除含碳 BOD 且進行脫硝作用，再流入好氧槽，此時由於消化作用而產生硝酸根離子，再循環回流至無氧槽，進行脫硝作用。含碳 BOD 在無氧及好氧環境下去除，且部分的 BOD 會因在無氧環境的脫硝作用，亦會被消耗掉。好氧槽中的  $\text{CO}_2$  排放量為含碳 BOD 的去除和生質物的分解作用所生成的  $\text{CO}_2$  之加總；由脫硝作用去除之含碳 BOD 伴隨著生成污泥和  $\text{CO}_2$ 。若厭氧槽的出流水中所殘留之 CBOD 足夠無氧槽中脫硝作用使用，就不需要外加碳源；若是不足，則需外加碳源，如：甲醇。故以甲醇作為碳源而生成之  $\text{CO}_2$  排放量亦可根據其反應式求出。

「非現地溫室氣體」之排放，主要是反應槽所需的電能與熱能。第一項為厭氧反應槽部分，如果厭氧反應槽所生成之生質氣體(biogas，主要為甲烷與  $\text{CO}_2$ )可以回收，且用來產電，則可以節省廢污水處理廠所需的能源；若回收之  $\text{CH}_4$  轉換成熱能，則可提供為廢污水的加熱。厭氧反應槽溫度通常需維持再  $25\text{-}35^\circ\text{C}$ ，提供一個穩定的操作環境，故其進流水就需要先進行加熱；另外亦需補償熱散失至反應槽壁、地板、屋頂之熱損失。所有熱能可由生質氣體、化石燃料或電力來提供。利用生質氣體，則無額外的溫室氣體排放；利用化石燃料和電力，則需利用排放係數計算額外增加的溫室氣體之排放量。「非現地溫室氣體」排放之第二大項為好氧反應槽，在好氧反應槽內，需計算提供曝氣機之電能，再經由電力排放係數換算成  $\text{CO}_2$  排放量。

Shahabadi *et al.* 以一處理  $2000\text{ kg BOD/day}$  之污水廠為例，發現「非現地溫

室氣體」排放量明顯高於「現地溫室氣體」排放量許多，且生質氣體有無回收亦會影像現地和非現地溫室氣體之排放量，總溫室氣體排放量可從 7640 kg CO<sub>2</sub>e/day，降至 1023 kg CO<sub>2</sub>e/day。因此建議：(1)使生質氣體回收再利用可取代化石燃料之使用，也可滿足處理廠之能源需求；(2)提昇各處理程序的能源效率，使廢污水處理廠對電力需求下降；(3)提昇厭氧反應槽及消化槽之效率，可生產更多生質氣體，且降低反應溫度使能源需求下降。

## 肆、下水道生命週期評估

生命週期評估(LCA)是對產品或服務在生命週期中，從原料的取得、製造、使用和棄置等階段，整個生命過程中的環境考量面與潛在衝擊評估。ISO14040 生命週期評估包含四個主要步驟：目標及範疇界定、盤查分析、衝擊評估、及結果闡釋。衝擊評估結果通常包括中間點型之全球暖化議題，與終點型之氣候變遷，必須算出全球暖化指標(kg CO<sub>2</sub>eq)。

Lundie *et al.* 早在 2004 年對澳洲城市水處理系統進行生命週期評估 [2]，包含 9 個淨水廠、13 個供水系統、40 個污水下水道系統及 31 個污水處理(或再生)廠，以一年供水量為功能單位，能源組成為 91%燃煤、6%水力發電以及 3%再生能源。全生命週期之 CO<sub>2</sub> 排放量為每年 721 千噸 CO<sub>2</sub>，其中以污水處理廠為衝擊最大宗，共佔 49%，建議首先應該改善污水廠設備之能源效率，以降低暖化衝擊。

Amores *et al.* 進行西班牙城市水處理系統之生命週期評估 [3]，包含取水、淨水、配水、供水、用水、污水處理等階段，並假設污水再生利用與極端缺水兩種情境。結果發現主要的衝擊在於水配送與污水輸送階段；污水與污泥再利用於農業可以減少肥料施用、減少優養化衝擊及淡水資源的壓力，每千噸水亦可減少 3kg CO<sub>2</sub>eq 之排放；在極端缺水情境下，海水淡化的高耗能造成高度之衝擊。

Opher 與 Friedler 對以色列污水處理與再生利用進行生命週期評估 [4]，以色列過去多以海水淡化為供水水源，因此欲透過污水再生開發新的水資源。評估之四種情境分別為：情境零：基礎方案，無城市再利用；情境一：由集中式污水廠產出再生水，利用於沖廁與澆灌之非飲用水；情境二：將灰水(生活污水)、黑水(排泄水)分離，由集中式污水廠將灰水再生利用於沖廁、澆灌之非飲用水；情境三：將灰水與黑水分離，由分散式污水廠將灰水再生利用於沖廁、澆灌之非飲用水。評估之功能單位為一年之再生水供給量，系統邊界則包含污水處理和再生水輸送。分析結果發現溫室氣體排放衝擊有 65%來自於海水淡化之能源耗用；基礎情境之衝擊最高，分散式灰水處理再生利用(情境三)為最佳情境；2012 年分析資料之電力結構為 40%燃煤、50%天然氣及 10%太陽能發電，若 2030 年能達到 15%燃煤、65%天然氣、13%太陽能及 7%風力發電，則可改善海水淡化與水再生利用之環境衝擊；若 2050 年水源改為 42%海水淡化與 58%為處理之再生水，更有助於改善環境之衝擊。

駱等人亦評估金門境外飲水、海水淡化及污水再生利用各情境之碳排放評估[5]，得知碳排放結果與環境衝擊結果有相同的趨勢，能源消耗為最主要衝擊，改善能源供給方式與提昇能源使用效率為最有效之減碳方案；海水淡化為衝擊度最高之方案；污水再生之衝擊雖低，但水量有限；境外引水若供水量穩定，環境之衝擊度為最低。

#### 伍、下水道系統管線之監測與維修

在氣候變遷及極端氣候影響下，颱風或豪大雨的頻率逐年增高，帶來的瞬間雨量對於已越趨複雜的下水道管網系統造成負擔及損壞，尤其強降雨會導致下水道溢流，如路面淹水或人孔氣衝、水衝等事件，從而對下水道網絡的性能產生不利影響，溢流釋放出許多有害污染物，並將污染物、營養物質和有害物質擴散到郊區的小溪和水道中，影響接收水域的生態系統和生物群(Nasrin et al., 2017) [6]，不僅影響環境衛生，亦可能造成民眾發生意外，因此如何早期調查管線狀況，強化其維護管理以發揮功能，延長使用壽命，是極為重要且不容忽視之工作。

目前調查管線的方式，多為直接檢視或間接利用閉路電視（CCTV）逐段檢查下水道內狀況之檢視方式，而此種方式除需耗費較高的人力、設施成本，亦無法長時間監測下水道狀況。鄭利用安裝於人孔內之即時水位監測移動式設備進行長時間連續監測 [7]，以經常發生氣衝或水衝位置的周邊人孔，逐步調查其管線狀況，確認管線是否有損壞、阻塞或不敷使用的狀況，移動式設備可依監測狀況機動設置，降低維護檢查成本，監測結果再搭配 CCTV 檢視找出精確位置，而研究範圍針對臺北市污水下水道管網系統，分析監測人孔水位及氣象局雨量，以評估臺北地區下水道管網排水功能性及降雨衝擊，未來可做為建置、維護及管理參考依據。

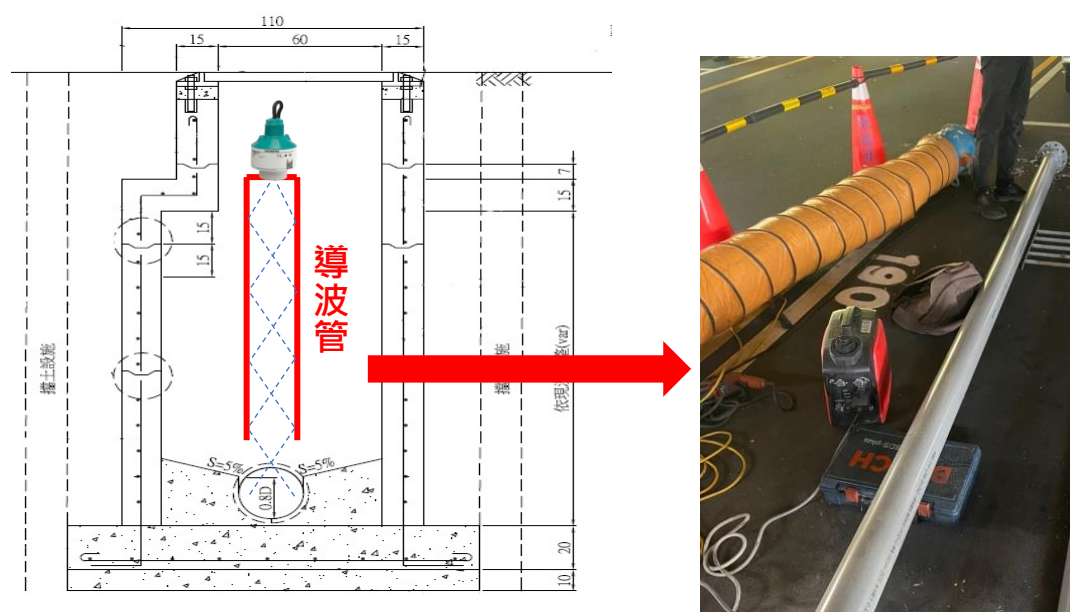


圖 2 水液位計裝設位置示意圖

移動式連續監測裝置可將監測數據即時上傳雲端，供使用者存取查詢，檢測項目包含水位、溫度、pH、導電度及懸浮固體等，依需求機動調度並分配於各排放口即時監測，亦可使用於處理設施流程，達成提高污水處理效能及節能。一體型雷達波液位計發射一個訊號，當信號傳遞至液面時，液面反射該音波再經由一體型檢知器接收並回傳至上方的主機(如圖 2 所示)；主機則計算從發射訊號到訊號傳回的這段時間，再將此一時間除以 2，再加以雷達波的分析技術，計算出此段的距離來。由此即可測得檢知器面到液位的空間距離。

## 陸、節能與產能的污水廠

眾所周知，下水道系統與污水處理廠最耗能的設備就是抽水、曝氣及脫水機等。圖 3 為 10 mgd 二級處理程序之典型的能源使用概況 [8]。採用高效幫浦和馬達之潛在節能為 10-30%；採用變頻驅動器(VFD)通過調整幫浦驅動器的轉速，維持各種流量下高抽水效率，與節流器或分項閥相比節能 5-50%；使用細泡型或微細氣泡擴散器，裝設自動溶氧控制系統、溶氧感測器及光學感測技術，均可提高氧氣轉移與使用效率，可能在曝氣系統節省 30%能源；高速渦輪鼓風機既節能又減少維護成本；監測數據的深度學習並用於程序控制，可有 5-10%的節能潛力。而用於水回收再利用的三級處理技術，也必須詳細評比耗能指標，以避免出現「以電換水」的窘境。

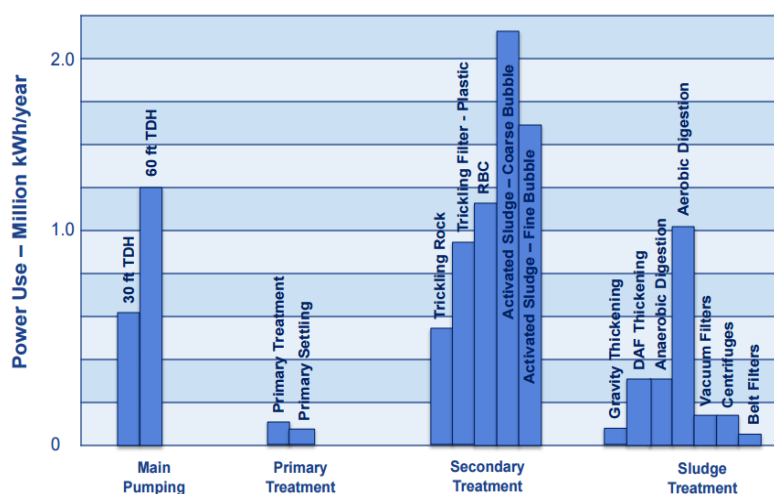


圖 3 10-mgd 二級處理程序之典型的能源使用概況

傳統污水廠之操作模式對專業工程師的經驗判斷有一定依賴性，且操作邏輯較為死板，借助人工智慧物聯網(AIoT)實現的高效污水廠運作模式不僅能最適化加藥量、減少污泥量、減少能耗，更可以提供品質穩定的再生水 [9]。在目前台灣的高科技企業發展迅速，產業回流的社會背景下，可以預見未來的污水處理需求量會持續增加，具有足夠的發展前景。利用 IoT 設備採集到的水質資料，建立一套基於人工智慧概念（如機器學習，神經網路，資料挖掘等）的自動化決策系統，結合區塊鏈技術歸納出合適的管理方式，包括狀況感知、即時分析、智慧

決策及執行系統等(如圖 4 所示)。提高水廠之整體運行效益，實現水廠智慧化管理、污泥減量及資源利用效率最大化，達到永續利用水資源的目的。

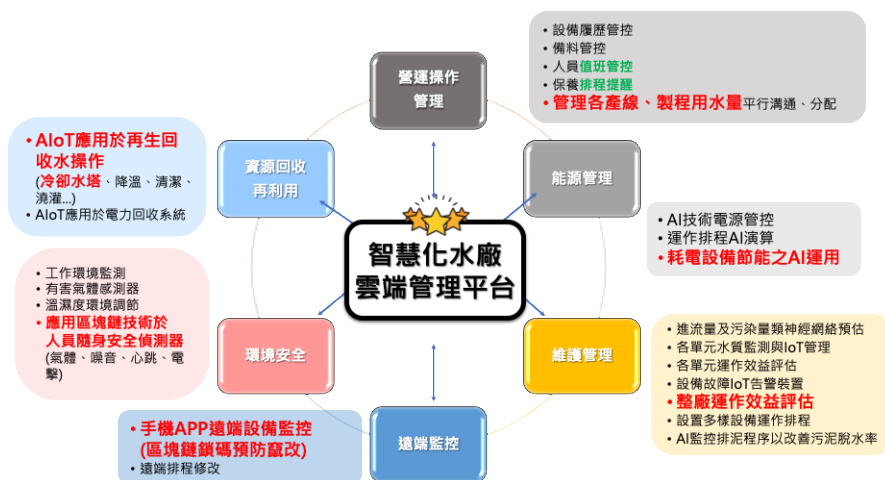


圖 4 智慧化水廠節能減碳管理平台-AIoT 管理效能最佳化

污水廠污泥可以利用甚多技術來回收資源與能源 [10-14]。筆者在 2013 年參觀美國洛杉磯 Hyperion 污水處理廠，親見污泥與廚餘共同厭氧消化來產能之成功案例。Hyperion 廠之參觀由廠長 Steve Fan 親自解說，此為每日晴天污水達 450 百萬加侖(mgd)之全美最大污水廠之一，設計最大流量可達 850mgd，服務人口達四百萬人。Hyperion 污水廠設立於 1892 年，佔地 58 公頃，採純氧活性污泥系統，進水 BOD 為 295mg/L(396,000kg/day)，TSS 329mg/L(441,000 kg/day)，放流水則降至 BOD 18.9mg/L、TSS 19.8mg/L，去除率均可達 94%。活性污泥池平均需氧量為 268 噸/day，由 5 台各 4500HP 之純氧壓縮機供應，純氧濃度達 97%，否則操作會有問題，目前維持在 99%。污泥利用 16 個修正式蛋形消化槽(Modified Egg-Shaped Digesters)及 4 個蛋形批次消化槽進行厭氧消化，溫度維持在 53℃，消化時間平均為 15 天(第一階段 12 天，第二階段 3 天)，VS 降低率為 56%，氣體產生量為 198,000m<sup>3</sup>/day，消化氣體經壓縮、脫硫處理(Desulfurization Scrubber)後，送至一天然氣發電廠(Department of Water and Power's Scattergood steam Generating Station)進行能源回收，每日產生電力 22.5 百萬瓦，可供 Hyperion 80% 之電力，每年省下數百萬美元經費。

Hyperion 污水廠雖在若干設施附近仍有些異味，但並不嚴重，臭味控制可說是相當成功，廠長說明除硬體除臭設備(例如 24 個 Packed Tower Scrubbers，17 個活性炭吸附塔及在 Grit Pad 之臭味中和系統)外，對污泥清運時間控制等管理也非常重要，由於中午過後有海風吹進會造成民眾易聞到污泥臭味，故所有污泥必須在 11 點前運出至農場作為肥料(每天運出 35 卡車)。最近幾年經試驗將 50 家餐廳之廚餘注入蛋形消化槽(如圖 5 所示)，可增加 30%甲烷氣體，且濃度從 60% 上升至 64%，後續會更積極將餐廳廚餘回收產生沼氣。另，純氧密閉系統亦因生物分解產生 CO<sub>2</sub> 會溶入水中，造成第 5 個 Chamber 之 pH 會下降至 6.3~5.7，會

影響 nitrification 作用，經試驗在第 5 個 Chamber 開孔，溢出 CO<sub>2</sub>，pH 不再下降至 6.7 以下，硝化功能逐漸改善。Hyperion 廠二級處理出水，每日有 20 mgd 由幫浦抽送至 West Basin Water Recycling Plant，經高級處理後供工業及景觀綠地使用。兩廠除有許多硬體設備及管理制度很值得參觀外，在環境教育及解說上，亦是值得國內參考借鏡的。

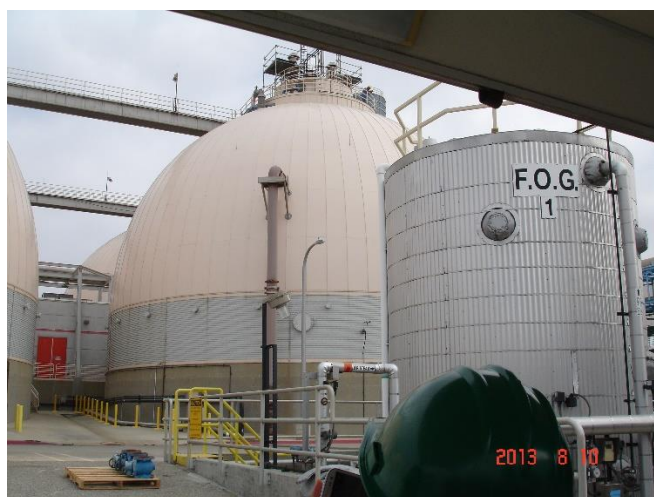


圖 5 Hyperion 污水處理廠蛋形消化槽(FOG 為餐廳廚餘之攪拌槽)

## 柒、結語

經過三十多年的努力，台灣下水道與污水處理系統已漸見其改善水環境污染，提昇都市環境品質之成效，然而面對水資源缺乏、全球暖化與氣候變遷的挑戰，污水處理廠不僅要升級為水資源回收廠，也要共同承擔節能減排，甚至將廚餘與污泥共同厭氧消化來產能、產電的污水廠。因此，從下水道管線系統與污水處理廠的規劃、設計，到運用智慧物聯網(AIoT)之監控、管理與操作最佳化，都要再納入原有知識與技術之中，台灣下水道協會與台大環工所可共同負責協助政府辦理從業人員的再教育訓練、技術研發與移轉之角色，將新挑戰轉進為新契機。

## 參考文獻:

1. Shahabadi, M.B., Yerushalmi, F. Haghighat, "Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants - Model development and application", *Chemosphere*, 2010, 78, 1085-1092.
2. Lundie, S., G.M. Peters, P. Beavis, "Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning", *Environ. Sci. Technol.*, 2004, 38, 3465-3473.
3. Amores, M. J., M. Meneses, J. Pasqualino, A. Anton, F. Castells, " Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach", *J. of Cleaner Production*, 2013, 43, 84-92.

4. Opher, T., and E. Friedler, "Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse", *J. of Environ. Management*, 2016, 182, 464-476.
5. 駱尚廉、王根樹、吳先琪、李志源、林正芳、林郁真、林財富、林志高、林鎮洋、黃志彬、童心欣、溫麗琪、蔣本基、劉聰桂、劉華獄、關蓓德，「金門水資源及水質改善計畫」2015，(3/3)，(科技部計畫，MOST-104-2119-M-002-001)。
6. Nasrin T., A.K. Sharma, and N. Muttill, "Impact of Short Duration Intense Rainfall Events on Sanitary Sewer Network Performance", *Water*, 2017, 9(3), 225.
7. 鄭雅宸，「多點位即時監測設備應用於都市污水下水道系統管線調查」，國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文，2022。
8. U.S. Department of Energy, "United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment", 2002.
9. Cheng, Y.Y., and S.L. Lo, "The Real Time Water Quality and Alerting for Wastewater Treatment Plant by Intelligent System", *J. of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 2021, 33(6): 451-459.
10. Tyagi, V.K., and S.L. Lo, "Application of Physico-chemical Pretreatment Methods to Enhance the Sludge Disintegration and Subsequent Anaerobic Digestion: An up to date review ", *Rev. Environ. Sci. Bio/technol.*, 2011, 10: 215-242.
11. Tyagi, V.K., and S.L. Lo, "Microwave Irradiation: A Sustainable Way for Sludge Treatment and Resource Recovery", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 288-305.
12. Tyagi, V.K., and S.L. Lo, "Sludge: a Waste or Renewable Source for Energy and Resources Recovery", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: 708-728.
13. Tyagi, V.K., S.L. Lo, and A. Rajpal, "Chemically Coupled Microwave and Ultrasonic Pre-hydrolysis of Pulp and Paper Mill Waste-activated Sludge: Effect on Sludge Solubilisation and Anaerobic Digestion", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2014, 21: 6205-6217.
14. Tyagi, V.K., S.L. Lo, L. Appels, and R. Dewil, "Ultrasonic Treatment of Waste Sludge: a Review on Mechanisms and Applications", *Critical Reviews in Env Sci. Technol.*, 2014, 44(11): 1220-1288.