

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：專題研究)

廢水處理技術

生活污水人工濕地處理生態工法技術之研究

服務機關：行政院環境保護署

姓名職稱：薦任技士黃靖溱

派赴國家：美國

出國期間：100年9月23日至100年12月22日

報告日期：101年3月7日

摘要

生活污水是人類活動不可避免生成的產物，早期僅將糞尿水排入化糞池處理，而生活雜排水則排入土壤或河川，再藉由吸收或自淨作用分解污染物。隨著人類生活型態的改變，產生更多量且性質複雜的污水。解決生活污水一般污染問題，物理、化學或生物方法是污水處理的基本流程，但若考慮污水中氮、磷營養鹽大量排入水體，將造成藻類繁殖致水體缺氧、水質惡化，則需以成本較高的高級處理加以去除，而本研究之人工濕地污水處理系統可以低成本有效去除營養鹽，且有多項附加效益，如改善河川水質、營造野生生物棲息地、創造令人愉悅的戶外景觀、增加公園面積、提供自然生態之旅及具環保教育意義等，故污水人工濕地處理技術為符合環境保育、永續發展概念的生態工法。

台灣地區自 2002 年起開始採用人工濕地處理系統，並有初步成效，而美國佛羅里達州奧蘭多東部濕地(The Orlando Easterly Wetlands)自 1987 年啟用，引進 Iron Bridge 污水處理廠二級處理後之放流水，加以處理以去除營養鹽，有 20 餘年豐富的濕地處理經驗，另該州中佛羅里達大學對人工濕地處理技術等相關環保課題均有研究，故於佛羅里達州中佛羅里達大學進行研習。依奧蘭多東部濕地(OEW)水質紀錄，人工濕地總磷之平均去除率為 67.71%，總氮去除率約為 42.86%，為經濟且有效去除營養鹽的處理方法；另中佛羅里達大學研究之「向上流式」及「漂浮式」人工濕地處理系統為最近之研究成果，除了有傳統之濕地系統功能外，「向上流式」系統之特點為較不易阻塞，並杜絕惱人的堵塞和積水問題；「漂浮式」系統之特點為設置、維護簡單且易移動或移除，可供國內參考。

目次

| | |
|---|----|
| 壹、研究目的 | 1 |
| 一、序論 | 1 |
| 二、污水現地處理方式及功能簡介 | 1 |
| 三、台灣地區污水現地處理概況 | 3 |
| 四、目的 | 5 |
| 貳、研究過程 | 6 |
| 一、生活污水濕地處理技術研析 | 6 |
| (一)向上流式濕地處理系統 | 6 |
| (二)浮動式濕地處理系統 | 13 |
| 二、觀摩實習參訪 | 15 |
| (一)奧蘭多東部濕地(The Orlando Easterly Wetlands) | 15 |
| (二)Iron Bridge 污水處理場 | 20 |
| (三)佛羅里達綠色建築展示屋 | 28 |
| (四)參加海洋波浪研討會 | 31 |
| (五)中佛羅里達大學暴雨管理研究院 | 32 |
| 參、研究心得 | 34 |
| 一、人工濕地處理污水具經濟、生態保育及環境教育等多項效益 | 34 |
| 二、向上流式濕地處理系統可杜絕堵塞及積水等問題 | 34 |
| 三、動浮式濕地處理系統具易設置、好維護及快移除等優點 | 35 |
| 四、透水性鋪材使用於新開發基地可降低淹水機率 | 35 |
| 肆、建議事項 | 36 |
| 一、加強民眾建築物污水處理設施操作維護教育宣導 | 36 |
| 二、適時採用人工濕地處理系統輔助處理生活污水 | 36 |
| 三、建立與美國環保相關機關或學校之合作關係與聯繫管道 | 36 |
| 四、人工濕地處理系統之設置列為綠建築評估指標 | 37 |
| 五、宣導開發基地多利用透水性鋪材以降低淹水機率 | 37 |
| 六、鼓勵同仁參與公務人員出國專題研究 | 37 |

壹、研究目的

一、序論

生活污水是人類日常生活作息中不可避免製造出來的副產物，早期人類生活較為簡樸，生活污水水質亦較單純，且科技尚未蓬勃發展，當時僅是任由污水自然排入土壤或河川，再藉由河川的自淨即可分解掉那些較不複雜、污染性較低的污染物；然而隨著人類對舒適的生活渴望、生活品質的提昇，科技的發展，也使的食、衣、住、行等的生活習慣隨之改變；因為這些因素的加入，再再都讓生活污水的水量增加、污水水質也較之前為複雜些，以致於先前自然的處理方式已無法負荷，具科學性的污水處理方式也因此運應而生。而早期發展的生活污水處理技術，因廢水水質較單純，所以採用較基本的物理處理及簡單的化學處理，即可去除、降低及分解污染物含量。一般而言，污水處理依據處理程度不同而分級，通常分三級，分別為初級處理、二級處理及高級處理，初級處理：為最簡易的處理方式，包含篩濾、沉砂、沉澱等方式，先用欄污柵攔下垃圾、毛髮等大型物體，再進入沈砂池利用重力沉降方式使水中大顆粒污染物沉降分離。二級處理：因生活污水均屬於有機污水，二級處理主要以活性污泥進行處理，簡單的講，就是利用微生物在適當的環境下，把水中的有機性污染物吃掉(即分解掉)，達到淨化水質的目的。高級處理：係指污水經過二級處理後，再經其他的處理程序，例如使用臭氧或加氯消毒，或是逆滲透等處理，使排放水質更加乾淨。就一般生活污水而言，二級處理是最基本的，經二級處理才能確保處理後之排放水不致污染環境。生活污水利用上述之污水處理方式，集中至污水處理場處理，仍為主要的污水處理方式；但隨著人類對環境保護要求的提高、對自然資源利用、保育觀念的提昇並創造優質的生活環境，應用生態工法處理廢污水技術也運用而生。

二、污水現地處理方式及功能簡介

利用生態工法處理污水主要採現地處理（on-site treatment）方式處理，現地處理(On-site treatment)是在污水排放的附近將污水集中就地處理，去除污染物或減低污染濃度後，再排入河川等水體的處理方法。其與傳統的污水收集處理方式不同之處，在於不需利用污水下水道管線系統將自各地污水集中到污水處理廠處理。現地處理的種類有人工溼地、接觸氧化處理、植栽濾床、土壤滲濾等處理方式，其中接觸氧化有礫間曝氣接觸氧化（有曝氣）、礫間氧化（未曝氣）或以接觸濾材（或蜂巢板）作為

微生物附著生長的接觸氧化方法。以下為現地處理各方式及原理簡介：

(一)表面流人工溼地

表面流人工溼地種植許多耐污染的挺水性水生植物，根部深入溼地底層的土壤中，茂密的根系可讓許多微生物附著生長，空氣中的氧氣也可以經由植株傳送至溼地底層，提供氧氣給微生物利用，讓微生物發揮分解污染物質的功用。表面流人工溼地一般包括沉澱池凝聚沉澱污水中大部分的懸浮顆粒、大面積的開放水域，使空氣中的氧氣藉由空氣對流和植物作用進入溼地底層，再由土壤中的微生物分解污染物；另以水生植物營造適合生物的生態景觀池，作為野生生物的棲息地。

(二)地下流人工溼地

地下流人工溼地由溝渠、濾床、水生植物組成，在溝渠中填入礫石或其他濾材作為濾床，並栽種水生植物，讓水流在地面下快速通過時，與濾材表面和植物根系附著的微生物接觸，讓微生物發揮分解污染物、淨化水質的功效，濾材覆蓋水面，可以避免臭味散逸與蚊蟲滋生。地下流人工溼地可依水流流動方向分為「垂直流動系統」(vertical flow system)及「水平流動系統」(horizontal flow system)。地下流人工溼地中，氧氣可以藉由擴散作用進入水中，而且濾床上的水生植物根系生長盤根錯節，溼地中會出現溶氧量不同的區塊，使好氧性與厭氧性的微生物可以同時存在，各自發揮分解污染物的功用，大幅提高污水淨化的潛力。

(三)草溝、草帶

草溝、草帶淨化污水，係「讓人類使用過的東西，安全返回大自然」的概念，並推動將低污染或處理過的污水回收再利用，作為公園、高爾夫球場草坪等的灌溉水。提倡讓污水排到長滿草的地上，讓草根與周邊土壤中的微生物發揮淨化水質的功能。當草溝中的水往下流時，植物能保護土壤，減緩因水流集中而產生的侵蝕；平緩的坡度也能幫助滯留沉澱物。草溝、草帶的植物栽種與管理，可以增加當地動物棲息的數量。使用原生種或適應當地環境的植物物種作為草溝、草帶的植物物種時，可以同時提供野生動物需要的食物與棲息地遮蔽；但要注意於繁殖季時，需降低草溝、草帶區域的除草頻率，以避免對動物的干擾。

(四)土壤滲濾

土壤滲濾概念來自於 19 世紀，當時農夫將污水排到填滿土壤的大坑中，以解

決污水臭味問題，並種上植物。學者認為因土壤能減緩污水流速，讓土壤中的微生物有機會將污水中的有機物分解，進而淨化污水。污水快速流過砂層，只要保持砂層的空氣流通，砂層間的微生物就能分解污染物。土壤滲濾依水流滲濾的速度不同，分「慢濾」與「快濾」兩種。慢濾為普遍使用的自然處理方法，快濾處理則是較進階的污水處理，處理後的水流會成為地下水的補注。自然處理系統中的化糞池（septic tank）便是土壤快濾的應用。

(五) 礫間接觸

19 世紀德國科學家曾將污水引入埋滿煤渣、石頭的坑中，讓微生物在煤渣與石頭的表面附著生長，以分解污水中的污染物；後來發展為將煤渣與石頭改成比較大的顆粒，讓水流通得比較快以處理大量的污染，稱為「礫間接觸」。礫間接觸的成本比表面流人工溼地貴，但單位時間內可處理的污水量較大，且較不會滋生蚊蟲、臭味，可以在土地面積較小、污水處理需求量較高的地方採用。

(六) 曝氣

污水中若有足夠的微生物與氧氣，微生物就可以分解處理污染物質，因此提高水中的溶氧，是污水處理的重要方式。增加水中溶氧量最直接的方法，可以從水面或水底打氣或是製造水位落差，造成跌水作噴水設計，讓污水與空氣的接觸的面積和時間都增加。此外，種植耐污染的挺水性水生植物也是增加水體中溶氧量的方式。另寬廣的開放水面也可以增加水中的溶氧量，空氣中的氧氣會因著擴散或對流進入水體。

三、台灣地區污水現地處理概況

台灣地區工業廢水之管理已行之有年，加上中央及地方環保單位的努力，工業廢水污染管制已有成效，目前面對的水污染問題，以生活污水產生的污染為主。台灣地狹人稠，生活污水排放量將近占河川污染總量的 50%，惟台灣地區截至 101 年 2 月底止，公共污水下水道普及率僅 29.12%，多數家庭污水皆經由雨水排水溝直接排入河川。鑑於公共污水下水道系統的建設進度緩慢，及民眾對河川水質的高度要求及期望，環保署自 2002 年起，開始輔助地方政府在各污染源附近、受污染的河川支流匯流處，設置現地處理設施，包括人工溼地、礫間接觸、曝氣設施等水質淨化工程，透過污水與自然環境中的氧氣、土壤、微生物、植物交互作用，使水

質淨化，藉以削減排入河川的污染量。該等現地處理設施除了具備水質淨化功能，並有營造景觀及生態教育等功能。

台灣地區早在 1980 年代就有類似的生態工法工程，其中最著名的就是宜蘭縣冬山河親水公園，日本的工程師在冬山河濱水陸相接之處，建成台階平台，使人易於親水、接近自然，這開創性的設計也成功帶動了當地的繁榮。在此之前，台灣河流的灘地多是雜亂無章、亂草叢生，傾倒垃圾、棄置廢物更是屢見不鮮；直到冬山河的成功，台灣才發現了河濱灘地可以提高公共利益的用途。

此外，自 2002 年起也開始引進歐、美、日本等國家現地處理的工法與技術，並陸續在各地建置多處生態工法場址，包括表面流與地下流人工溼地、地下滲濾、礫間接觸氧化、草溝草帶、人工浮島等工程。運用河濱灘地設置現地處理的生態工程，除了能淨化水質，並改善河濱灘地風貌，使其兼具保育、休憩與教育的功能。且現地處理過的水除能再利用外，更能補注河川水量、維持河川生態健康。表面流人工溼地由水池、土壤、水生植物組成，透過污水與自然環境中的氧氣、土壤、微生物、植物交互作用，達到水質淨化的目的。表面流人工溼地是現地處理工法中與自然溼地最相似的一種，也是較早被且較普遍使用的方法。

現地處理的操作維護費用，以人工溼地為例約 0.54 元/公噸，接觸礫間氧化設施操作維護費約 1.7 元/公噸，皆較傳統的二級污水處理廠操作維護費用約 14.9 元/公噸低廉。不過因污水處理廠有處理高濃度、高污水量、高處理效率、不受氣候環境變化、土地面積較小及操作控制穩定性高等特性，仍應為生活污水最適當的處理方式。河川水質現地處理現階段僅作為削減污染的應急措施之一，補足公共污水下水道普及率的不足。現地處理設施設置完成後，由地方政府操作維護，以充分發揮水質淨化功能。

在污水下水道系統及家戶未完成接管前，家庭污水未經妥善處理，即由雨水排水溝排入河川，造成污染。為減緩污水排水直接排入河川中，在污水下水道系統未完成前，環保署推動截取晴天排水利用公共或工業區污水處理廠餘裕量，或設置人工溼地、或礫間接觸氧化等現地處理予以處理後再排入河川，作為削減污染的應急措施之一。至今已完成 93 處現地處理設施，處理水量約 54 萬公噸，有機污染削減量約 8,352 公斤。河川水質淨化的現地處理工程，在台灣各處改善了河川水質，也改善當地河岸環境與生態環境，同時，民眾參與河川污染整治，共同參與人工溼地

等現地處理的管理維護，皆促使河川污染整治工作大步邁進，並且願意親近這些有助水質淨化的溼地，進而肩負起維護、管理、學習與投入的責任，一起守護台灣河川的健康。

四、目的

位於美國大陸的最東南方的佛羅里達州，若以面積計，為美國第 22 大州，面積為 58,560 平方公里；若以人口計，為美國第四大州，人口約 1,500 萬人，且有逐漸增加的趨勢；因良好的氣候與生活環境，越來越多人選擇到此居住。佛州又以觀光產業聞名，該境內有許多旅遊景點，吸引世界各國的觀光客到此一遊，故該州水污染的主要來源為生活污水。佛州氣候與灣類似，以充足的陽光、溫暖的氣候，佛羅里達州內人工池水塘遍佈，利用其地理環境特色，研究發展出特有的固定式及移動式生活污水人工濕地處理生態工法，應用上極具彈性，具備生態保育、永續發展之意義，且處理後的水可回收再利用，符合資源永續利用之原則。

目前生活污水處理廠以二級處理居多，若要去除污水中氮、磷營養鹽，則需成本較高的三級處理加以去除；該等營養鹽若大量排入水體，將造成藻類繁殖致水體缺氧、水質惡化。人工濕地污水處理系統以低成本有效去除營養鹽，且有多項附加效益，如改善河川水質、營造野生生物棲息地、創造令人愉悅的戶外景觀、增加公園面積、提供自然生態之旅及具環保教育意義等，故污水人工濕地處理技術為符合環境保育、永續發展概念的生態工法。

台灣地區未納入公共或專用下水道之生活污水，依規定均應排入合併式建築物污水處理設施處理，但部分未妥善管理或處理效果不佳排入河川、湖泊等水體，在下水道系統未全面普及前，若可搭配人工濕地生態工法處理生活污水，將可減低河川水體的污染負荷。美國佛羅里達州奧蘭多濕地自 1987 年啟用，引進 Iron Bridge 污水處理廠二級處理後之放流水，有 20 餘年豐富的經驗；另該州佛羅里達大學設有環境工程系，對生活污水處理技術、人工濕地處理技術、綠建築、綠屋頂(Green Roof)等相關技術之研究，均投入相當大的努力進行研究，該校並設有暴雨管理研究中心，藉由研究成果，保護及強化有價值的地面水及地下水供應，並造福現今及後代子孫。中佛羅里達大學對人工濕地處理技術等相關環保課題均有研究，乃以佛羅里達州中佛羅里達大學為研究機構進行研習。

中佛羅里達大學對生活污水處理、雨、污水回收技術及節能減碳設施之研究頗有成效，本次乃以生活污水人工濕地處理生態工法技術為學重點赴該校進行短期專題研究。

貳、研究過程

一、生活污水濕地處理技術研析

(一) 向上流式濕地處理系統(A Subsurface Upflow Wetland System for Removal of Nutrients and Pathogens in On-Site Sewage Treatment and Disposal Systems)

1. 摘要

現地污水處理及處置系統(OST)通常被稱為化糞池系統(septic system)，其基本上包括一個化糞池、土壤吸附場地或澆灌場地或稱排水區(drainfield)，並有可能對地下不飽和含水層(vadose zone)及地下水系統帶來大量營養鹽負荷及病原體的衝擊。其不僅包括氮及磷，還有病原體指標，如糞便大腸菌(fecal coliform)和大腸桿菌(*Escherichia coli*)，這顯示有一些致病微生物已流入水生物系統(aquatic system)，且有危害大眾健康之虞。人工濕地的建立是一個小規模、效率好、低能源、低維護需求、及低操作成本的廢水處理系統，而且可以達到現今去除營養鹽及病原菌的需求。在這個研究(調查)中，新一代的地表下向上流式濕地處理系統，其構造為填充綠色吸附介質(如使用混合之回收天然物質)，並配合特選的水生植物種類，以進行測試作為替代化糞池系統中傳統的澆灌場地。利用設置四個平行的地表下向上流式濕地(三個有植栽對比一個無植栽)，以處理一天 454 公升(即一天 120 加侖)的化糞池排出之污水，其中三個栽種水生植物，而另一個未栽種，結果證明它可有效地去除營養鹽及病原菌。在 2009 年測試階段中，植栽有水生植物的濕地系統之去除效率分別為總氮去除率 84.2%、總磷去除率 97.3%、糞便大腸菌去除率 98.93%、及大腸桿菌去除率 99.92%。在 2010 冬天進行的壓力測試(stress test)成功地證明這個處理程序的可靠性。從質量平衡(mass balance)和即時的聚合鏈反應分析中證實脫硝(denitrification)及沉澱(precipitation)為去除氮和磷的主要作用路徑。

2. 簡介

雖然美國市鎮居民產生的生活污水一般來說都是經由集中的污水處理設施處理，但仍然有大於 25%的人口(或約 2 千 5 百萬個家庭)靠現地污水處理系統來滿足其污水處理及處置的需求。地下水中逐漸升高的營養鹽及致病菌濃度將對兒童大眾健康造成危害，並可能損害對環境敏感的生物棲息地(habitats)。地表水中營養鹽及致病菌濃度的增加，並可能導致過剩的植物及藻類生長與水污染。當植物及藻類死亡並腐爛時，將消耗水中的溶氧，降低氧的濃度，且讓整個水體水質變差。

氮從一個階段轉化至另一個階段的過程就是所謂的「氮循環」。當氨(ammonia)與有機物質結合時，可能會產生銨基鹽(ammonium)。在有氨氧化菌及亞硝酸氮氧化菌存在時，銨基鹽先被轉化為亞硝酸鹽，再進一步變成硝酸鹽，這兩個反應合稱「硝化作用」。相反地，脫硝則由脫硝菌作用，是一個以硝酸鹽為最終電子接受者的厭氧呼吸程序，這過程是由微生物的逐步還原硝酸鹽、亞硝酸鹽、一氧化氮、二氧化氮成為氮氣。硝酸鹽的去除效率是受主宰硝化及脫硝作用的緩慢生長的微生物所影響，研究發現脫硝菌的最佳溫度在 10°C 至 25°C 之間。磷的去除則是透過介質吸附、化學沉澱、植物吸收、及微生物的同化作用而達成。

事實上，有許多方法可以讓採用化糞池系統的屋主的現地污水處理及處置系統減少其可能之營養鹽及致病菌對於環境造成的衝擊，佛羅里達礁島群(Florida Keys)現地污水營養鹽減量系統(On-site Wastewater Nutrient Reduction Systems, OWNRS)示範計畫是在 1995 開始進行的，目的是在示範利用現地污水營養鹽減量系統以減少排入礁島群沿海海域的營養鹽濃度。在現地污水營養鹽減量系統的五個處理系列之一是一個化糞池後接著一個循環式砂濾池，總體來說，被動式的現地處理及處置系統顯示去除約 96.52%總懸浮固體(TSS)、95.46%總克氏氮量(TKN)、47.58% 總氮(TN)、及 92.84%總磷。化糞池出流水過濾池的評估是以場地特性而定。一種新型的填滿了輕質黏土骨材的分配及預處理單元組合已被應用在污水土壤過濾系統。依據 Healy 等人 2004 年研究發現，乳牛擠乳場(dairy parlor)清洗廢水在水力停留時間(HRT) 6.6 天，迴流比(recirculation ratio) 3.0 的操作狀況下，其去除效

率為總氮(TN)83.2%、NH₄-N 100%，磷(P) 43.3%、及懸浮固體(SS) 100%。Urynowicz 等人於 2007 年以化糞池出流水氮去除率為指標，進行循環式砂濾池之處理效能評估，發現在迴流比為 5.0 及 3.7 的情況下，其對氮的去除率分別為 72.0%及 63.0%。

目前已發展出許多替代性的非傳統型現地污水處理系統，可用於去除氮和磷，在此種新系統中，好氧處理單元被設計應用於處理廢水，而不單是使用傳統的化糞池。曝氣槽是好氧系統中最重要的一個單元：其利用泵供應固定流量的空氣，再利用一項攪拌裝置使氧氣溶入水中，以創造一個使好氧性微生物分解有機物的最佳狀態。應用好氧性處理單元可以顯著地降低健康風險。好氧處理單元的主要缺點是需要外加的能源及較高的操作維護水準。通常可將一個砂濾池與化糞池或好氧處理單元連結，以提供進一步的出流水處理，砂濾池的主要功能為降低水中的懸浮固體量及溶解性有機物。附著於砂粒上的微生物可以消化水中的有機物。Havard 等人(2008)利用 6 個橫向流的過濾池(LFSFs)來處理化糞池的出流水，並評估坡度及砂的性質對 LFSFs 處理效能的滿意度指標評如下：BOD (98.5%)、TSS (95.5%)、及 *Escherichia coli* (5.4 log reduction)。細砂過濾池及粗砂過濾池對磷的去除率分別為 98% 與 71.2%，而對 TN 的去除率則分別為 60%與 66%。然而，業主必需周期性地耙除或更新被阻塞的表層濾砂。除了此二種現地廢水處理方法有些缺點外，尚可以發現此二方法因為存在有好氧的環境，因此其脫硝作用無法達到預期的結果。至目前，美國環保署及許多州政府正加諸予 TN、磷、及病原菌等更嚴格的標準，以管制化糞池系統的出流水注入滲入場(leach fields)。因此有迫切的需求去尋找更有效的單元操作方法，以協助化糞池系統有能力滿足未來的美國環保署法規。

多年來，濕地已經在水質保育、氣候法規、土壤侵蝕控制、貯存洪水以供旱季使用、及環境淨化等方面扮演重要的角色。基於與天然濕地淨化廢水相同的原理，有效管理的人工濕地可以增強其改善放流水質的能力。濕地系統藉由許多機制包括生物的、物理的、及化學的反應以去除水中的氮，其在適當條件下的生物作用如氨化、硝化－脫硝、及植物吸收等，對於水中氮的去除是相當重要的作用。對於特殊型態的磷之沉澱是水中磷去除的主要路

徑，而微生物吸附及蓄積亦扮演部分的角色。人工濕地可以分為二種主要類型：自由地表水流式(SF)濕地及地表下水流式(SSF)濕地。

SF 式濕地包括挺水植物(emergent vegetation)、土壤或介質，以支撐挺水植物及基材上的水表面。此種型式的人工濕地對於病原菌的去除特別有效，因為廢水被高度地曝露於陽光下之故，但是此系統確提供了一個蚊子理想的繁殖環境，同時因為廢水曝露於空氣中，也導致降低脫硝的效果。

在 SSF 系統中，廢水由進水口進入，通過過濾之介質後到達出口區，因為廢水在濾池中的長時間停留，在水平流系統中發生顯著的還原作用，但是因為缺乏氧氣之故，完全的硝化作用則是受到限制的，此為此類系統的特性。在設計人工濕地時，如何最適地整合物理的、化學的、及生物的程序以利用不同的吸附介質及植栽來去除營養鹽，已經吸引全世界的注意。再者，由大量的文獻發表，顯示應用人工濕地以處理特定的廢水已經持續地被研究探討。

Steer 等人(2002)評估利用化糞池/人工濕地系統處理單一家庭污水之水質改善效能，其結果顯示處理家庭污水的人工濕地可以去除糞便大腸菌達

88%±27%、TSS56%±53%、BOD70%±48%、氨 56%±31%、及磷 80%±20%。Mbuligwe (2005)

提出了應用於處理及回收小社區的一對化糞池/人工濕地系統，該系統可以平均去除氨達 60%、硝酸鹽 71%、硫酸鹽 55%、COD 91%、糞便大腸菌、及總大腸菌幾乎達 100%。Tanaka 等人(2006)試驗了一個用於處理學生宿舍污水的化糞池出流水的整合型挺水性植物(emergent plants)與沉水性植物(submerged plants)系統，其總體的污染物去除率為 BOD 65.7%、COD 40.8%、氨氮 74.8%、硝酸鹽氮 38.8%、磷酸鹽 61.2%、TSS 65.8%、及糞便大腸菌 94.8%。

經由完整的文獻回顧，可以發現水平的 SFF 式人工濕地已被廣泛地應用於都市的、工業的、及農業的廢水處理上，同時各種不同的介質亦被研究及建議過，並已被證明由回收的或天然的材料製成的綠色吸附介質，是更有利於營養鹽去除的環境。對於不同種類濕地與綠色吸附介質間的整合，尚未被試驗以探討出最經濟有效及永續的解決方法。因此本研究的目的為評估(1)應用地表下向上流式濕地(SUW)系統於現地污水處理的效能；(2)應用創新的吸附介質對於符合水質標準的狀況；及(3)植栽植物所扮演的總體角色。本研究進行一個全尺寸的模廠試驗，以展示此項被動式現地廢水處理系統在中佛羅里達

州被應用的可能性。

3. 材料及方法

(1) 場地概述及實驗設計

本廢水處理研究為應用一套地表下向上流式濕地處理系統(SUW)處理來自 BPW 學人宿舍(中佛羅里達大學 15 人宿舍)的每日 454m³(120 gallons) 化糞池出流水，SUW 系統的容量為 1,000 gallons/day，可以提供 2-3 天的水力停留時間。一組礫石填充的重力式廢水分配系統包括一個歧管、均勻分配槽、分配管、流量計、及 4 床填充特殊綠色吸收介質(為回收的天然材料)的濕地。在實場研究時，在 SUW 中使用了一組新的吸附介質，以去除營養鹽及病原菌，當使用高孔隙率的礫石做為濕地床的基材時，採用一個創新的向上流式(亦即 SUW 的出流口高於進流口)設計，以誘導產生一個均勻的水力流況及適宜的硝化-脫硝環境，同時避免發生阻塞及溢流的情形，如此可以克服傳統式地表下水流式(SSF)濕地的主要缺點。此外，此種設計可以使暴雨雨水對系統的影響降至最低。在傳統的地表下水流式(SSF)濕地(亦即進流口高於出流口)中，當雨天時，暴雨雨水向下流動穿透整個濕地床，最後與廢水一起由濕地床之底部排出。而在本研究使用之地表下向上流式濕地處理系統(SUW)中，濕地床之水位被保持與出流口同高，因此部分的雨水會從較高的出流口直接排掉，而不致於與濕地床下部的廢水發生混合的現象。因此僅有較少的雨水會流達採樣孔，如此可以更精確地評估此種新型設計的介質之處理效能。當廢水流經砂層(亦即濕地床底部的好氧層)及污染控制層(亦即濕地床中間的厭氧層)，及至植物生長層，藉由各種物理的、化學的、及生物的程序，廢水中大部分的細菌、病毒、及營養鹽都已被消耗及截留去除。藉由結合置於砂層下的礫石層與種植於植栽層介質上的植物，SUW 系統可以經由硝化、脫硝、吸附、離子交換、過濾、及沉澱等總體的作用，提升對廢水中病原菌、氮、及磷的去除效率。此試驗分別栽植了 3 種植物於 3 座濕地床上，以對比於無植栽的平行控制組。

(2) 植物種類的選擇

作為濕地系統的組成部分，植物種類在淨化污染物方面具有無法取代的功能，在地表下的濕地系統中，植物根圈(rhizosphere)周圍的生物膜提供了一個細菌潛在的附著場所，以達成將污水中的溶解性有機物好氧分解及硝化的目的。基於氧氣傳輸的特性，其顯示在根圈周圍為一個”好氧-缺氧-厭氧”的狀態，相當於一序列



平行的”厭氧-缺氧-有氧(A²O)”的處理程序，此程序為廢水處理常用的營養鹽去除程序。靠近植部根部的好氧區是有助於硝化作用進行的，而遠離根部的厭氧區則是脫硝作用發生的區域，二者均扮演將化糞池出流水中殘餘磷淨化的功能。硝酸鹽將在根圈區被脫硝作用有效地去除，而 TN 及 TP 則可藉由定期的植物收割而自系統中移除。Seidel (1955)的研究被公認為是最早使用濕地植栽以自廢水中去除多種污染物的學者，從此有許多研究者就不懈地試圖以各種不同的植栽，以提升廢水中污染物的去除率。

(3) 綠色吸附介質的選擇

發展特定的濕地多孔性介質，以取代傳統的土壤、砂、及礫石，而提升污染物的去除能力之重要性，已經受到普遍的認同。Mann and Bavor (1993)代表最早以實驗室規模進行試驗，以比較不同地區礫石與工業爐石、飛灰做為替代的吸附介質，對於磷吸附的效果，結果顯示最大的吸附能力為地區性礫石 25.8-47.5 $\mu\text{gP/g}$ 、高爐爐石 160-420 $\mu\text{gP/g}$ 、飛灰 260 $\mu\text{gP/g}$ 。Coombes and Collett (1995)使用粉碎的玄武岩及石灰石碎片於水平流的蘆葦(*P. australis*)濕地，可以使放流水之氨氮平均降低至 2 mg/L 以下。Pant et al. (2001)發現 Fonthill 砂對於自廢水中去除磷之效果較 Lockport 白雲石及 Queensto 頁岩為佳。Vohlaet 等人(2007)研究利用自油頁岩焚化後得到的油頁岩灰做為磷的貯留，依據實驗室規模試驗的計算，其生命週期應為 8 年，但實際僅為數個月，究其原因可能為

在灰渣上生物膜的快速生長造成的飽和或阻塞。Korkusuz 等人(2007)使用顆粒狀的高爐爐渣進行實驗，結果顯示顆粒狀的高爐爐渣具有高的磷吸附能力，主要因為其高鈣含量及多孔性的結構所致。Park and Polprasert (2008)使用填充牡蠣殼做為吸附及過濾介質的整合型人工濕地系統，研究其對磷的去除能力，結果顯示之去除率為 N 85.7%、P 98.3%。Tee 等人(2009)研究指出有植栽及填充礫石及稻草介質之人工濕地，相較於無植栽者，對酚及氮具有較佳之去除效果，同時制定了一套包含 6 項指標用於篩選吸附介質的基準：(1)硝化或脫硝程序的適合性(2)透水性(3)成本(4)就吸附、沉澱、及過濾容量而言之去除率(5)介質在佛羅里達州的可取得性(6)附加的環境效益。新吸附介質與先前被研究過的其它種類介質之差異可以在 Ryan 等人(2009)發表的文獻中查得。在一段長期的試誤試驗後，本研究得到最終的配方為：(1)污染控制介質：柑橘園砂(citrus grove sand)50%，輪胎屑 15%，膨脹黏土(expanded clay)15%，木屑 15%，及石灰石 20%。(2)植栽介質：膨脹黏土(expanded clay)75%，蛭石(vermiculite) 10%，及泥炭蘚(peat moss)15%。所示之百分比為體積百分比(Xuan *et al.*, 2010)。

(4) 結論

就去除營養鹽及病原菌之效率而言，地表下向上流式濕地處理系統(SUW)的超大能力，在這個研究中已被充分的證明。研究結果顯示種植美人蕉(Canna)的 1 號濕地去除效率分別為總氮(TN) 97.1%、總磷(TP) 98.3%、糞便大腸菌(fecal coli) 99.98%、及大腸桿菌(E. coli)。就美觀及營養鹽的去除及控制而言，美人蕉將會是全年都適合種植且最具有競爭力的植栽。脫硝細菌在 1 號濕地之污染控制介質(PC medium)中三倍增長的事實，是脫硝作用成功的最佳證明。從工程學的角度看，所建議的地表下向上流式濕地處理技術，不只是一去除營養鹽的好選擇，也是一個很出色的病原菌控制方法，但是目前仍沒有答案的問題是‘此類地表下向上流式濕地處理系統中，流體動力學、地球化學交互作用、及生物活性之間的偶合機制(coupling mechanism)為何?’，期望能回答此科學問題的最終工具應為一個系統動力學的機制模型。未來的研究工作可以聚焦於一

些進階研究，以探討周遭的環境的不確定性、污染物的非理想傳輸、及吸附反應、化學平衡，以及介質對污染物的吸附或釋放特性等之不足知識。

(二)浮動式濕地處理系統(Floating Mat Treatment Systems)

因非點源污染或農業灌溉廢水的貢獻，增加了改善或減低豐富營養鹽逕流的壓力，也增加對水體水質的傷害。表面流及表層流之人工濕地，常應用於改善營養鹽過高的水體，但因需要大面積濕地的設置，往往限制了人工濕地的應用性。浮動式濕地處理系統(FMSs)是具有潛力可替代大型人工濕地來改善營養鹽過高的水體水質的替代方案。該系統所提供的營養鹽去除功能，與人工濕地擁有大量的根部暴露於水中的效果相類似，漂浮的植物根部系統提供足夠且適切的區域供微生物的生長、繁殖、過濾、沉澱及植物營養的吸收攝取。另一項優點是植栽長成後較容易處理收割，有利於進一步的營養鹽去除。設置人工濕地時，經常以特定的功能為主要設計考量，植栽收割處理的難易，大多沒有被列入考慮。浮動式濕地處理系統可以提供類似的功能，同時它可快速設置、快速安裝，植栽較容易收割處理。任何被吸附在植物根部或幼苗的營養鹽，均會在植栽收成時從水體中移除。這些割下的植栽可作為堆肥的原料，並可提供適度的營養來源。浮動式濕地處理系統具有改善移除營養鹽的巨大潛力。

該研究案的目標係評估利用浮動式濕地處理系統改善含農用化學品的廢水排入水體前的水質的可能性及潛力。該試驗係分成二個處理類別，第一個為小型規模，其組成包含 1 個 88 立方英尺及 2 個 51 立方英尺單元的渠道，第二個為大型規模，其組成包含 1 個 500 立方英尺及 1 個 918 立方英尺的水塘。於 2008 年 4 月 14 日將進行測試的植栽種植於飄浮流動床分別固定安置於流的渠道及水塘



中，另外，5 月 2 日起開始施肥，所以在設立的第一階段並沒有額外的養分供應，黃花美人蕉(*Canna flaccida*)、莎草科植物類(*Eleocharis Montana*)、禾本科植物(*Agrostis sp.*)及燈心草(*Juncus Effuses*) 設置在使植物生長的處理渠道內。黃花美人蕉、燈心草及莎草科植物種植於浮動人工濕地上，並置於水塘中做為營養鹽去處處理用途。採樣工作自開始添加肥料的第三天起開

始，採樣包括量測每一處理單元的溶氧(dissolved oxygen)、pH 及水的導電度(Conductivity)，並量測植栽嫩芽的生長高度及寬度及根部的長度及寬度等側面、橫向的寬度，三種植栽的成長狀況，並自水塘及渠道的固定點採取一個水樣檢驗分析。

應用浮動式濕地處理系統中之植栽，其營養鹽濃度隨著植栽的不同而有所差異，在所有試驗植栽中，燈心草是最有效吸附去除氮、磷營養鹽的品種(Table 2, Figure 2)。美人蕉去除效率次之，各種不同品種的植栽中，在水塘及渠道中的處理效果存在有很大的差異，在所有種類的水生植物持續的吸收營養鹽，也在水塘浮動式濕地處理系統營造了更好的生長狀態及更美觀的生態環境。所採用之植栽中，莎草科植物在去除氮、磷功效表現最差。在浮動式濕地處理系統中，燈心草展現出為最有潛力的去除營養鹽的品種。然而，混合各類植栽品種的功校可能較單一品種更有功效，因此，可就單一或多種類植物之浮動式濕地處理系統進行試驗，以進一步探討其對水質改善的成效。



總而言之，浮動式濕地處理系統是非常有效率的污染改善系統，特別是在磷的去除上是非常有成效的，因磷的放流水質標準是最難經濟有效地達到的標準。浮動式濕地處理系統有多項優點，它容易設置、方便維護，易於收割，經過證明該系統可降低磷的濃度、改善水質，且為經濟上合理可行的處理技術。

中佛羅里達大學在校區內及校園附近的社區各建置一個浮動式濕地處理系統，校園內之系統設置於校內道路旁，其設置方式係利用浮動式的平台種植具有吸附污染物質之植物，藉由該等介質及植物的吸附作用，去除污染物；由該州之交通部門



Florida Department of Transportation (FDOT)委託中佛羅里達大學設立，因佛州許多道路兩側有水塘，該等水塘若未善加管理運用，任其雜草叢生，將影響景觀，藉由該系統處理校區產生的部分生活污水，並將成果做為交通部門改善州內道路旁濕地處理功能及景觀改善之參考。

另一個位於附近社區內的浮動式濕地處理系統，主要以試驗各種不同浮島介質及植物種類之處理效率為設置目地，該案則由介質生產公司委託辦理；實地參觀時發現水塘斜坡上有一水管，經詢問係因社區水量不穩定，若水位不足，將阻礙植栽生長，進而影響濕地處理系統功能的運作，故埋設該管線，於必要時注水補充水量，以維持該系統之運作。



二、觀摩實習參訪

(一)奧蘭多東部濕地 (The Orlando Easterly Wetlands)

1. 歷史沿革－符合自然的方法

奧蘭多市的鐵橋污水處理廠擁有每天處理 24 百玩加侖的處理容量，相較於台灣，已是一個規模非常非常大的污水廠，但因奧蘭多市東北方越來越多社區的興建，生活污水排放量急速增，加上法令對放流水質要求的提高，及既有總量管制之限制，該廠將無法負荷其處理量；另因對市政府承諾降低對排入安哥河(Little Econlockhatchee River, 54.5miles 87.7km，為聖瓊斯河(St. Johns River, 310miles, 500km)的支流，聖瓊斯河為佛羅理達州最長的河川)氮及磷的排放濃度，故進一步的處理或尋找其他的處置或再利用方式，是必要的趨勢。

研究顯示，利用濕地處理是一個可行的解決方法，再當時，並沒有大型的人工濕地處理系統可提供相關的資詢或參考，且政府單位也沒有這方面的

規範，但由於很多工作團隊的努力合作，開始在一千一百九十英畝的土地上，建立一個提功每天處理 20 萬加侖廢水的人工溼地處理系統。這個選定為設置”奧蘭多東部濕地”的場址，位於佛羅里達州橘縣(Orange County, FL)東



方 1 千 6 百 5 十英畝的土地上，大約再聖瓊斯河主要河道的西及西南方二英里處，調查顯示，在 1948 年左右這裡曾是一個潮濕的大牧場，有較小區塊的硬木沼澤，從當時到 1900 年間，這塊地是抽水並導入灌溉渠道，供農

業發展用；在那個時候，這個規劃案是抽水然後用一系列的沼澤及渠道，將水直接排入聖瓊斯河，該土地利用位於小區塊肥沃的地及較低窪的濕地，以提供牲畜較優質的牧草。該抽水系統降低了地下水位，也減少了流入聖瓊斯河的逕水流量(runoff)，也因為如此，該區的植被無法在該場地持續生長。這個溼地處理系統的建立，使的該市達到處理及處置的需求，重新讓該濕地成為一個生氣勃勃的地方，更創造樂無價的野生生物良好的棲息環境。



2. 生活污水溼地處理程序

奧蘭多東部濕地，自 1980 年中開使興建，起因於奧蘭多市的鐵橋污水處理廠(Iron Bridge Regional Water Reclamation Facility)需要提高其受理之污水處理水量，另其處理後之排放水質氮、磷含量亦過高，無法符合排

放水質之要求，放流水亦對承受水體造成傷害。氮、磷的來源來自於肥料的廣範使用，二者均會促進藻類的生長，消耗且降低水中的溶氧，使水中魚類死亡及其他不良的影響。

因經證實水棲植物之生態系統可以天然的方式去除氮和磷，所以奧蘭多市即利用一原本既有的濕地，建構一個超大規模的濕地處理系統，該濕地原址為多年的放牧場，以土製造的斜坡遍佈全區，在濕地裡栽種了 2 百 1 萬大型水棲植物，以製造 17 種個區塊，使更加強化自 Iron Bridge 污水處理場以管線輸送引進之污水水質改善功效，也讓排放水質不致對敏感的聖瓊斯河(St. Johns River, 500km，佛州最長的河川)水體不造成有害的影響。



經過超過十年的操作、實驗，奧蘭多東部濕地向全世界證明了大規模的人工創造出來的濕地，可以長期的被運用，且運作非常成功，遠近馳名，不但是是一種更高級的處理方法，廢水亦可有效的回收再利用。

3. 運作方式

首先將鐵橋區域性污水處理廠初部處理後的廢水，利用管線排入溼地，在一控制中心將污水分為三道，然後由三路分別導入溼地系統，系統包括三個植物群落，包括一個 410 英畝的較深層濕地(沼澤)，植物種類包括香蒲(水蠟蠟)、蘆葦，兩者均有移除氮磷營養鹽的功效；另一個 380 英畝的混合濕地(沼澤)，含有 60 種以上的草本浮水植物及沉水植物，有去除污染營養鹽及提供野生生活良好的棲息地的功用；還有一個 400 英畝的硬木(較高大樹種，如)濕地(沼澤)，主要提供為野生生物(如鳥類等)的棲息地，利用土壩總共設立了 17 個互相連結貫通的溼地區塊。引進之廢水，自進入該濕地至排出系統，約需經過 20-40 天時間，經水生植物充分處理吸收營養鹽後，才由放流口排出該濕地處理系統，其放流水導入該濕地區北方之小溪，再排入聖瓊斯河或

讓任其流佈天然沼澤中。

該濕地的主要目標有三，一為減低超高的營養鹽，二是提供野生生物良好的棲習環境，三為提供大眾舒適、愉悅的公共設施。

4. 社區與民眾參與

奧蘭多東部濕地有一大部份的場區是開放當該市之生態公園，供大眾入園，一年開放八個月，估計開放期間，每年約有 10,000 人入場參觀；該園區提供了很多可進行的休閒活動，如建行、慢跑、騎單車等，另還提供個別團體辦理活動之機會，自 1999 年起，該園區開始辦理一年一度的溼地嘉年華會，每次均有超過 500 人參與，參與者還有機會利用步行、騎單車、坐巴士等方式，參加自然生態導覽，由其他不同方式來呈現濕地及野生生物相貌、各式各樣的示範及展示攤位；因為嘉年華會辦理相當有成效，已變成每年必辦的活動。

這個園區提供了各種各樣的景觀，讓遊客欣賞到佛羅里達野生生物在天然棲息地的優美景致。各環保團體還參與了園區內的各項活動，如每年的蝴蝶調查，另外有很多社會團體贊助的賞鳥活動，佛羅里達原生植物協會也曾在此舉辦植物觀察建行活動。社區志工亦參與支持，藉以強化野生生物棲息地，

例如由童子軍團體辦理”保育日”，在當天製作並裝設鳥屋及蝙蝠箱；另有 2000 株的松樹幼苗全部由一



大群的幼童軍種植。附近學校也常以該濕地作為環保教育的天然實驗室及研究設施。此外，每年約接待並導覽 10 至 15 個來自其他國家對濕地處理有興

趣的代表們。

5. 成果評析

奧蘭多東部濕地在 1987 年 7 月首次引進 8 百萬加侖的污水，至 1988 年增加到約 1 千 3 百萬加侖，至 1994 年每年均維持不超過 1 千 3 百萬加侖的處理水量，至 1995 年，處理污水量逐漸達到承諾的 2 千萬加侖處理量，目前，該市期望提高其處理容量到 3 千 5 百萬加侖。

經過十多年運轉之資料及數據顯示，奧蘭多東部濕地展現了復原溼地及重建野生生物良好棲息地的成功經驗，因為這個原因，佛羅里達州已將其列為佛羅里達州環保部門之有效回收再利用資料庫的一部分。其排放水濃度一直維持在標準以下，總氮 2.31 mg/L TN，總磷 0.20mg/L。且未排入濕地前比較，大大改善了農業用水的逕流量。採樣作業並在該濕地的上游及下游持續的進行中。

因為濕地系統的設置及顯著的水質改善，市政府目前著力野生生物棲息地這方面的改善，將近三分之二的規劃都在為促進及提高野生生物的使用率，最大的沼澤區是用來避免不受歡迎的擾人植被的生長，另一個在園區內種植有硬木的 90 英畝的湖，亦是用來提功更適合野生生物的棲息所在地。在濕地區域，將近 10 約有 200 種的鳥類及動物，包括不少瀕臨絕種的品種，目前都在這個濕地建立它們的家。相較於未設立該濕地之前只有大約 20 多種，增加了的將近 10 倍之多。

本濕地野生動物棲息地建立之成效已有實例可印證，該濕地經證實為最北邊可看見沼澤鳶(Everglades snail kite)的地方，這種鳥類以蘋果螺(Apple Snail)為主食，而蘋果螺只在水質極佳的環境中生長，由此可見奧蘭多東部濕地有非常良好的水質。此外，在這個規劃園區內的每一個區域均充分被應用，瀕臨絕種的動物及植物也在此陸續出現，17 種類的州列植物也在此被看見。

6. 設置經費

- (1) 購置 1,650 英畝牧場計 4 百 40 萬美元，約新台幣 1 億 3 仟 2 佰萬元。
- (2) 抽水系統及 16 英里(25.6 公里)管線設置費用計 1 仟零 5 佰萬美元，折合新台幣約 3 億 1 仟 5 佰萬元。

- (3) 引擎購置計 1 佰 60 萬美元，折合新台幣約 4 仟 8 佰萬元。
- (4) 濕地系統之建設 4 百 20 萬美元，折合新台幣約 1 億 2 仟 6 佰萬元。
- (5) 溼地植被之栽植計 75 萬美元，折合新台幣約 2 仟 2 佰 50 萬元。
- (6) 總計花費 2 仟 1 佰 50 萬美元，折合新台幣約 6 億 4 仟 3 佰 50 萬元。

7. 設置效益

- (1) 改善下游河川水質。
- (2) 提供重要的野生生物棲息地。
- (3) 運用較低費用去除營養鹽。
- (4) 創造漂亮且另人愉悅的野外景觀。
- (5) 提供環保教育的機會。
- (6) 提供自然生態之旅。
- (7) 增加公園面積。

(二)Iron Bridge 污水處理廠

Iron Bridge 污水處理廠為設計處理來自 Orlando, Winter Park, Maitland, Casselberry 市及代管(unincorporated)之 Orange 和 Seminole Counties 等約 400,000 人口之污水，約相當於 727,300 個 55 加崙桶(1 加崙=3.78533 公升)之污水量。此污水廠之建造主要是為了保護中佛羅里達州之地表河川 Little Econlockhatchee River 之水質。來自 Iron Bridge 污水廠的放流水/回收水分別排放至 the pristine Little Econ River 及都市的人工濕地計畫。人工濕地的放流水則再藉由重力排放至聖瓊斯河(St. John' s River)。Iron Bridge 污水廠的效益如同其它 Orlando 的水回收處理廠，是符合其「環境保育與保護公眾健康」之目標。此亦與該市的任務—「以創新、責任、知識、專業及禮貌服務奧蘭多」是一致的。

1. 設施概要

Iron Bridge 水污染控制設施為一個地區性的廢水處理廠，由奧蘭多市所擁有及操作維護。雖然 Iron Bridge 主要的廢水來自奧蘭多市，但是尚包括其它來源，如部分的 Winter Park, Maitland, Casselberry 及非管轄的 Orange 及 Seminole Counties。

Iron Bridge 污水廠的排放許可水量為 40mgd，該廠為配合地區發展的需求分三期開發。第一期為設置旋轉生物圓盤接觸(RBC)處理廠，並自 1982 年開始操作。該設施原先設計處理量為 24mgd，後來在 1986 年時擴增為 28mgd，再後來則因為第三期的 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷除系統處理廠的完工，而減量至 16mgd(其中 12mgd 由旋轉生物圓盤接觸處理，4mgd 由布袋蓮池塘(Water Hyacinth Ponds)處理)。

第二期處理廠為處理能量 12-mgd 的 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷處理廠，自 1989 年開始操作，該廠主要為處理來自奧蘭多市及其它社區的增量污水。第三期名為「旋轉生物圓盤更新」處理廠，亦稱為 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷系統處理廠，主要設施類似第二期的 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷系統處理設施。此設施是為了更新第一期 RBC 所減損的 12mgd 處理能量，並自 1991 年開始運轉。

第一期 RBC 處理廠：

Iron Bridge 處理廠原先設計為處理能量為 24mgd 之 AWT 高級處理廠(Advanced Waste Treatment)，其處理準則如下：

- (1)生化需氧量(BOD) 5 mg/l
- (2)總懸浮固體量(TSS) 5 mg/l
- (3)總氮量(TN) 3 mg/l
- (4)總磷量(TP) 1 mg/l

旋轉生物圓盤接觸(RBC)設施包括下列各項：

- (1)主抽水站及東主幹管
- (2)反沖洗/迴流抽水站曝氣沉砂池
- (3)破碎機
- (4)初級沉澱池
- (5)調勻池
- (6)旋轉生物圓盤接觸(RBC)組 (去除 BOD 及硝化)
- (7)沉浸式脫硝旋轉生物圓盤接觸(RBC)組
- (8)脫硝迴流抽水站
- (9)脫硝鼓風機房

- (10) 最終沉澱池
- (11) 濕地抽水站
- (12) 自動反洗過濾器(ABW)
- (13) 加氯/除氯
- (14) 後曝氣及河川放流

所有進流的原污水均由主抽水站進入污水廠，污水首先流經間距 6 mm 的攔污柵以去除較大的固體物及污物，以保護下游之抽水機、管線、閘門免於被污物阻塞。去除之篩渣收集至垃圾箱，然後再委由清除機構清運至合法之掩埋場處置。

2. Iron Bridge 污水廠投資成本

| 年度 | 期/規模 | 美元 |
|-----------------------|---|-------|
| 1982 | 第一期旋轉生物圓盤處理廠/24 mgd | 75百萬 |
| 第一期總投資成本 包括污水收集系統及截流站 | | |
| 1989 | 第二期Bardenpho五階段生物脫氮除磷系統處理廠/12 mgd及固體物處理程序 | 47百萬 |
| 1991 | 第三期Bardenpho五階段生物脫氮除磷系統處理廠/12 mgd | 16百萬 |
| 總投資成本 | | 138百萬 |

Iron Bridge 處理廠年操作維護費用(1996) 7.3 百萬美元

從再曝氣池流出的懸浮液流入適當的 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷除系統之明礬混合槽，在此槽中視沉澱池出流水中溶解性磷的濃度添加適量的明礬。明礬的添加可能是需要的，其目的是為了去除在生物處理程序無法被去除而殘餘的磷。

3. 二級沉澱池

從明礬混合槽流出的懸浮液流入沉澱池進流分流槽，在此懸浮液被分流至多個二級沉澱池。二級沉澱池是由中央進水周邊出水的方式，並設置有機械式污泥抽除設備。污泥的抽除速率是由個別的閘門(telescoping valve)加以控制的，然後流入迴流活性污泥(RAS)抽水站。在濕井中之泵將沉澱之固體物迴送至 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷程序之醱酵池，來自沉澱池之沉澱固體物流至迴流活性污泥(RAS)抽水站，然後再迴送至 Bardenpho 程序。

自系統中廢棄之汚流，藉由裝置於迴流活性污泥(RAS)抽水站濕井中之廢棄活性污泥(WAS)泵抽除至污泥貯留桶。由沉澱池旋轉臂刮除之浮渣(scum)利用氣動式浮渣排除裝置收集至廢棄活性污泥之污泥貯留桶。

4. 放流水過濾

第二沉澱池之出流水藉由重力流入深床過濾池(DBF)分流井，在分流井中的堰閘可以分配來自 Bardenpho 系統沉澱池之廢水流至任一深床過濾池或 ABW 過濾器。自深床過濾池濾除之固體物藉由反沖洗從濾砂中移除後排至迴流反沖洗抽水站，然後將固體物抽送至旋轉生物圓盤接觸處理設施。過濾池之出流水與 ABW 過濾器之出流水混合後，或者流至氯氣消毒池，或流至人工濕地抽水站。

除氯後之出水流經再曝氣池，然後再由最終放流渠流入河川。池中設置的漂浮式曝氣機可以使放流水在排入河川之前增加其溶氧量。

5. 第 II&III 期 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷處理設施

Bardenpho 五階段生物脫氮除磷處理廠包括第二期(處理線 1 及 2)及第三期(處理線 3 及 4)系統，每一處理線之處理能力為 6mgd，合計為 24mgd。Bardenpho 五階段生物脫氮除磷系統被設計為產生經沉澱及過濾後之放流水符合下列性質：

生化需氧量(CBOD5)=5mg/l

總懸符固體物(TSS)=5mg/l

總氮(TN)=3mg/l

總磷(TP)=1mg/l

6. 預先處理

原廢水經攔污機後由主抽水站泵送流經西主幹管後流入 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷預先處理設施。預先處理設施之功能為去除原廢水中之砂粒，以降低其可能對下游機械設備造成的損害，及避免在下游之處理池中沉積。砂粒是藉由四台渦流式抽砂機加以移除，經脫水後之砂粒由市府清運至合法的處置場。

7. Bardenpho 五階段生物脫氮除磷活性污泥程序

由強制渦流式除砂池流出之預先處理水流至二套 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷處理程序(第二及第三期)。Bardenpho 五階段生物脫氮除磷處理程序分為五段，藉由厭氧/缺氧/好氧活性污泥之生物處理程序去除水中之養分，每一期包括二套平行的處理線及沉澱池。每一 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷處理線由下

列 5 個處理池構成：

- 醱酵池
- 第一缺氧池
- 好氧(硝化)池
- 第二缺氧池
- 再曝氣池

8. 預先處理

廢水自主抽水站抽送流經東壓力幹管注入旋轉生物圓盤接觸處理廠之預先處理設施，然後再經由西壓力幹管注入 Bardenpho 五階段生物脫氮除磷之預先處理設施。旋轉生物圓盤接觸處理廠之預先處理設施包括一個曝氣除砂系統及破碎機，砂(grit)為結合進行廢水中之砂粒、cinder、蛋殼、及其它無機物質而成。除砂可以提供保護下游之泵、管線、閥門等之受侵蝕及提早損害，同時可以避免砂粒沉積於後續之處理池內，占用了寶貴的處理能量。由預先處理設施去除之砂粒由市府清運至合法的處置場，而由破碎機粉碎之物質則流入旋轉生物圓盤接觸處理廠。

9. 初級處理

廢水經預先處理後流入初級沉澱池，將廢水中之較大固體物分離以降低廢水中之 TSS 與 BOD 至旋轉生物圓盤接觸程序可以有效率操作之程度。由沉澱池抽除之污泥注入厭氣消化池以進行體積減量及” B” 級安定化處理。

跟隨在初級沉澱池之後的為二座 2MG(百萬加侖)之曝氣式調勻池，當流入下游旋轉生物圓盤接觸程序之廢水量超過預定之流量時，則過量之廢水將被暫存於調勻池內，當流量降低時在調勻池內之廢水則被抽送至旋轉生物圓盤接觸處理，藉此系統可以緩和流量的變化。

10. 旋轉生物圓盤接觸槽(RBC)

旋轉生物圓盤接觸槽(RBC)為類似滴濾池之固定膜處理系統，其功能為去除 BOD 及硝化作用。該廠共使用 19 條平行並由空氣傳動(air-driven)之 RBC 處理線，每一條處理線有 9 個軸。每一處理線之前三個 RBC 軸具有標準密度之載體，而其它 6 軸則具有高密度之載體。需要使用之 RBC 處理線之數量端視其處理效率而定，廢水會流經甲醇混合槽後再進入脫硝段之 RBC’ s。

有 6 條脫硝 RBC' s，每一條脫硝 RBC' s 具有 6 軸，脫硝旋轉生物圓盤為完全浸入水中，以避免附著之微生物與空氣接觸，以增進缺氧狀態。脫硝 RBC' s 為利用甲醇做為碳源之固定膜系統，利用兼氣性微生物將亞硝酸鹽氮轉化為氮氣。設置在每一條處理線最後面之曝氣器則將廢水中之氮氣排除至空氣中。

| 參數 | 限值/範圍 |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 許可限值—Little Econ River放流口 001 | |
| 許可放流量 | 28 mgd |
| CBOD ₅ | 5 mg/l |
| TSS (消毒前) | 5 mg/l |
| TN | 3.6 mg/l |
| TKN | 2.5 mg/l |
| TP | 1.1 mg/l |
| 糞便性大腸菌 | 小於200個/100 ml |
| pH | 6.0 - 8.5 |
| D.O. (受溫度影響) | 大於3.81 mg/l |
| 預氯處理前之總餘氯 | 大於0.5 mg/l (在尖峰流量下停留時間15分鐘) |
| 最終放流水總餘氯 | 小於0.01 mg/l |
| 許可限值 — 濕地進流水 | |
| 許可處理量 | 20 mgd |
| CBOD ₅ | 10 mg/l |
| TSS (消毒前) | 15 mg/l |
| TN | 6.0 mg/l |
| TP | 0.75 mg/l |
| pH | 6.0 - 8.5 |
| 總餘氯 | 不小於1.0 mg/l |
| 許可限值 — 濕地放流口002 | |
| CBOD ₅ | 10 mg/l |

| | |
|-----------|-----------|
| TSS (消毒前) | 15 mg/l |
| TN | 2.31 mg/l |

11. 二級沉澱池

由脫硝旋轉生物圓盤接觸槽流出之廢水流入迴流抽水站，然後被抽送流經高分子混合槽再至沉澱池。在抽水站的出水管線中加入明礬以利磷之去除。在混合槽中加入高分子凝集劑以增進固體物之膠凝及沉澱效率。沉澱污泥被收集於沉澱池之污泥斗(sludge hopper)中，然後再抽送至厭氧消化系統進一步處理。

12. 放流水過濾

從旋轉生物圓盤接觸槽流出之出流水流至自動反洗過濾器(ABW)，在過濾器之濾砂上裝置有自動行走式之濾砂反沖洗設備，旋轉生物圓盤接觸槽出流水先流入預過濾連結箱(junction box)，在此可以與未經深床過濾器處理過之 Bardenpho 沉澱池之出流水混合。

13. 放流水消毒

要排入濕地之放流水在濕地之主幹管中藉由裝置於濕地抽水站進流井之加氯系統加以消毒處理。欲放流至 Little Econlockhatchee River 之放流水先加氯消毒後，再在氯接觸槽中加以除氯。

加氯系統中之加氯接觸池大小設計成能達成折點氯消毒(breakpoint chlorination)之目的，折點氯消毒是將氨氧化為氮氣的程序。該系統設計成能將流量 24mgd 廢水中的氨去除至 5mg/l。該處理程序相當的昂貴，通常在上游生物處理程序無法有效去除氨至符合排放許可要求時才會使用。折點氯消毒系統中包括了一個加鹼的系統，以整調廢水之 pH 值至處理程序所需之程度。所有流出消毒池之放流水，再利用硫氧化注入系統進行脫氯處理至總餘氯小於 0.01mg/l，然後再排放至 Little Econ River。

14. 污泥處理及安定化

來自初級沉澱池、RBC' s 系統及 Bardenpho 五段式脫氮除磷程序之污泥被送至厭氧消化池進一步安定化。厭氧消化池為第三個完全不同的生物處理程序，其包括完全不同操作條件之厭氧對喜氧及厭氧對缺氧之程序。在一般情況下其系統操作條件如下：

- 初級污泥被抽送至消化池

- RBC 污泥被抽送至二個 RBC 污泥貯留槽之一，然後至重力帶式濃縮機，再送至消化池。

- Bardenpho 五階段生物脫氮除磷程序之污泥被抽送至二個養分的污泥貯留槽之一，然後至重力帶式濃縮機，再送至消化池。

消化池是將污泥中殘存之有機物去除、降低揮發性固體物濃度及致病菌數目，以達成污泥安定化的目的。消化後之污泥進行最終之土地處置。污泥處理系統裝置有帶壓式脫水機，以利於潮濕天氣不利於將污泥作土地撒布處置時，可以將消化污泥進行脫水處理。污泥脫水產生之過濾液則迴送至第一期之 RBC 系統處理。

15. 放流水之排放

Iron Bridge 處理廠有二個放流承受水體，其一為 Little Econ River，另一則為人工濕地，二者均受到聯邦環保署(EPA)及州環保局(DEP)的排放許可管制。在符合排放限值的情況下，可以排放 28mgd 放流水至 Little Econ River，20mgd 放流水至人工濕地。

原廢水與來自沉澱池之迴流活性污泥(RAS)混合後由分流井進入醱酵池，實際上原廢水與迴流活性污泥混合會產生醱酵之狀態，使貯存於微生物內之磷釋出。微生物一致性地處於此狀態下，可以馴養出當其再被導入好氧狀態時具有貯存更多磷的能力。醱酵池中使用機械式攪拌機以溫和地保持池中固體物處於懸浮之狀態，而又不致於使氧氣溶入水中。醱酵池之出流水進入第一缺氧池，在此與來自好氧(硝化)池之迴流懸浮液混合。在此硝化池中產生之硝酸鹽與迴流污泥及原廢水混合，在缺氧的狀態下，細菌利用流入之 BOD 作為碳源及硝酸鹽中之含氧完成生化脫硝作用。在此池中同樣地必需提供足夠的混合能力，以確保固體物處於懸浮狀態、避免氧溶解、及持續保持生化活性。

第一缺氧池之出流水進入好氧池(氧化渠)，氧化渠之造型類似運動場的跑道，在此去除在第一缺氧池中殘餘之 BOD，同時進行硝化作用(將氨氧化為硝酸鹽)。同時，在醱酵階段所馴養出之微生物在此池中享受地攝取磷。當污泥從 Bardenpho 程序排除時其中貯存的磷就被從系統中去除，雙轉速的機械式曝氣機(每池二台)可以提供氧化渠保持在好氧及充分混合之狀態。

自厭氣槽可調式溢流堰流出之出流水被用於控制硝化池之 D.O. 濃度。好氧/

硝化池之流出之懸浮液進入第二缺氧池，第二缺氧池的作用為將廢水中的硝酸塩濃度降低至 0.5-1.5mg/l 的程度。池中裝置有機械式攪拌機，以避免氧氣之溶解。

由第二缺氧池流出的懸浮液進入再曝氣池，藉由添加氧氣以免再釋出硫。進一步的除硫、氮氣氣提、及硝化作用均可能在此池中發生。池中是使用粗氣泡式散氣器進行曝氣以保持好氧狀態。

(三)佛羅里達綠色建築展示屋(FSGE)

佛羅里達州墨爾本市綠屋頂建案的產生，係因承包商馬克(Mark Baker)和他的太太娜妮(Nonnie Crystal)在幾年前的 11 個月當中，受了法蘭西斯、珍妮及卡翠娜(Frances、Jeanne 及 Katrina)等三個颶風餘波之苦，這三個颶風使三個個房子幾乎全毀，包括馬克媽媽在佛羅里達的房子、娜妮父母及妹妹在露依絲安納的房子。

2004 年 9 月，颶風法蘭西斯、珍妮分別掃過中佛羅里達的東部海岸，不幸的是馬克的媽媽的房子正在該颶風路徑上，還好老人家有及時逃。經離過這個創傷，身為退伍軍人且為前綠色和平組織之成員，和太太娜妮以十多年的在健康管理部門行銷販賣經驗，決定建造一個佛羅里達綠建築展示屋(以下簡稱 FSGE)，是一個在馬克媽媽海邊房子的原址建造的建築。因開始就有了一個很好的組合，加上娜妮十多年在傳統、互補及替代性醫療的健康管理背景，以及兩夫妻努力不懈的研究、秉者拓荒者的精神，最近六年內在綠色建築及綠色生活科技的勤奮學習，再再都是使的這個佛羅里達綠色建築展示屋 (FSGE, Florida Showcase Green Envirohome) 在世界各國的綠色方案



表現出色的背後原因。

FSGE 方案計畫達到 12 項指導原則，及獲得 8 項證書，包括美國綠建築協會 (USGBC, U.S. Green Building Council) 白金證明，還有 Fortified 等其他的肯定。FSGE 是一個二層樓的建築，3,292 平方英尺(平方公尺,坪)，幾乎是零損失、零排放、不需能源、沒有逕流水及不需維護的房子。它是以使用者需求為導向而產生的建築，可抵抗颶風、龍捲風、淹水、防火災、防霉菌產生、抗白蟻等，甚至防震，故可降低房屋保險費用，降低能源、水及維護費用的消耗。最好的是採用綠建築概念建造房子，可提高房子的價值、降低房屋保險費用，且馬上看見消耗能源的降低、水費及房子維護費也同時大幅下降，另增加抵稅額度、誘因及轉讓機率。increased government tax breaks/incentives/grants，並提高公共事業公司對安裝太陽能發電、風力發電或其他型態發電及房屋貸款公司降低貸款利率的機會。

在法蘭西斯颶風來襲時，這個房子受到嚴重的狂風暴雨的破壞，屋頂幾乎被龍捲風拆解(見照片)，這使得大雨及洪水傾倒進整個房子。因為當時未建立有效的緊急排水系統，而那些停留不退的水使得產生大量的霉菌(其形成只需 72 小時即可)，並持續在整個屋子增長。而珍妮颶風更帶來進一步的損害，當時聯邦緊急應變聯盟



(FEMA, Federal

Emergency Management

Association)在 2004 年 10 月 31 日到現場勘查結果判定屋頂為”無法修復

(beyond repair)”,另因保險公司嚴重的拖延修復費用的給付，所以在 2005 年 3 月 15 日建康調查報告部門判定內容為”完全的損毀”，是一點也不意外的事。該部門的報告還表示這個家有”明顯的健康風險”，故“不適合居住”，且應規定配戴有保護設備並有充足合理理由的人才能進入及停留，也就是說,如果該郡有這

項法令規定，這個房子早就被宣告沒收(充公) (黴菌危害照片)。

基於上述原因，這個重建工程中需要對黴菌問題作適當的處理，以去除致命的毒性，在馬克決定尋找更好的建築方式時，他母親的未來的安全性是他的首要考量。在 2005 年 5 月娜妮提議參加一個綠建築的討論會，在討論會馬克體認到建築業者自 1940 年代起，並沒有更新他們興建房屋的方法；當懸臂式系統被提出後，馬克覺得他可以結合這種建築方法來重建房子，尤由當他從一位開將近 1000 英里來參加研討會的一位女士那裡知道在 2004 年的颶風中，僅有二間房子倖存，因為它們都以”綠建築”概念興建，更加肯定了他的想法。

在 2005 年 8 月 29 日，卡翠娜颶風摧毀娜妮父母及妹妹在露依絲安娜的家，跟他們在佛羅里達的房子一樣，兩間房子”完全的損毀”，幸運的是娜妮的家人在有限的時間內都安全逃離，因為兩個家庭相距在不到一年內受到颶風的嚴重傷害，讓兩夫婦更積極投入於讓世界減少天然災害的損害、降低天然災害求償機率，讓並保險費、能源、水及維護費用，不但可讓人活的更健康，也使地球資源可永續利用。

台灣有一說”有一就有二，有二就有三，無三不成禮”，而在美國也有同樣的說法(things really do happen in “three’ s”)，在 2007 年，一場大火把正在存放興建中的 FSGE 設備的 70,000 平方呎倉庫燒毀，財物損失慘重，如果當初倉庫設備置入綠建築防火設計概念，即使沒有防範，火災延燒程度亦可減緩，損失應不致如此慘重。

這個事件也啟發了兩夫婦透過 FSGE 成為一個環境教育計畫，讓人們從中學習到綠建築的重要性。因為該次火災的發生，FSGE 的外牆係採第一級的不可燃、獨立的建築材料面板(Structural Insulated Panels,SIPs). FSGE 宣稱是世界上第一個特別的展示案，屋子裡面的木材及外部均塗裝有無毒、防火的建築，應與單純的”防火”與極大的不同。

目前有非常多的綠色科技，需要較高級的維護、且運用較老式的建築方法，包括建商、消費者、投資者、土地開法者、建築師或工程師，在工程開始前即需要瞭解這些技術，就短期或長期而言可降低成本，提供較安全、較健康的環境，並減低對環境的衝擊。

(四)參加海洋波浪研討會(Ocean Wave Workshop)

民國 90 年於屏東縣恆春鎮墾丁國家公園龍灣地區發生西臘籍阿碼斯號郵輪擱淺案，環保署負責該案之處理，職為當時緊急應變中心幕僚成員，瞭解海洋波浪之知識對海洋污染防治有一定的助益，故把握這難得的機會，除可將相關知識及美國最新之相關技術，攜回給業務相關單位參考，並藉此機會參與國際會議，拓展視野，並讓與會人員看到中華民國台灣行政院環境保護署之代表與會，增加國家的曝光率。

該研討會於 2011 年 11 月 17 日假紐奧良大學之琳蒂·伯格國際會議中心(Lindy C. Boggs International Conference Center)辦理。研討會計分四個階段，進行的方式為各單元由專人就特定主題提出報告，另幕僚單位已就該單元主題設計列出 8-12 個討論事項，報告結束後即分組就該等主題進行討論，討論結束後，每組再推派代表發表討論結果，供相關單位參考。預期研討會參加人員包括海洋學家、工程師、科學家、氣像學及海洋學工作者、高空氣象觀測員、海洋科技工程師、學術界的管理者、業界及政府官員。與會中見到研討會主席之一的紐奧良大學研究所教務長史考特博士 Scott L. Whittenburg，另有多位在密西西比美國太空中心(NASA--National Aeronautics and Space Administration)園區之美國海洋研究實驗室工作的專家，包括業界代表、密希根大學教授、海軍代表、7 位美國海軍研究實驗室代表，其中 2 位為來自台灣的博士。

研討會第一場主題為「利用海洋波浪量測來輔助各項操作及製造替代能源」，由海洋動力科技的凱特·愛德華博士(Kate Adward)介紹可藉海洋波浪動力發電之動力浮筒測試過程及結果。第二場為「利用海洋波浪模式架構之建立，保護生命及財產安全」，由美國海軍研究實驗室之艾瑞克(Eric Rogers)研究員報告應用海洋波浪觀察於海軍艦艇操作。第三場為「介紹最新提出及藉上市之海浪浮筒(Buoy)科技」，由 AXYS 科技公司之藍道夫(Randolph Kashino)介紹目前由浮筒量測海洋波浪的科技。第四場為「較為科學家、工程師及管理者採納應用的海洋波浪資訊介紹」，由密希根大學的教授主講。

藉由研討會的辦理，達到下列五項目標：

1. 討論海洋波浪所提供的資訊之應用及技術。
2. 從與會者具有之不同背景及專長，交換不同的資訊與最先進的海洋波浪量測方法及模式功能。
3. 分享在各方案中利用海洋波浪量測去闡述在真實的海洋學中會碰到的問題及解決方法。
4. 展示海洋波浪量測對海洋科學及氣象學的貢獻。
5. 利用此機會交換相關的資訊及技術。

(五)中佛羅里達大學暴雨管理研究院

中佛羅里達大學暴雨管理研究院(UCF Stormwater Management Academy)設置宗旨為保護及強化有價值的地面水及地下水供應，並造福現今及後代子孫。該研究院下有 5 個實驗室，分別為暴雨侵蝕及沉澱管理實驗室、環境工程工法設計實驗室、生物環境系統研究實驗室、水文環境及生態監控與模型實驗室及綠建築測試床實驗室等；研究院之設立目標為有下列 4 點：

1. 作為暴雨逕流管理研究之領導先驅資源。
2. 提供國內最先進的教育及訓練課程。
3. 作為政府、非政府組織及工業界最好的伙伴。
4. 資訊成功的運用及流通。

研究單位設置效益如下：

1. 建立研究單位及相關基金會的伙伴關係。
2. 藉由輔導及雇用學生來創造就業機會。
3. 提供一個終身學習的工作機會。
4. 提供公告及發佈資訊的窗口及管道。

該研究室設置於該校校園內，係就州內有價值的自然資源保護進行研究，另該研究單位並就綠屋頂、透水性鋪築材料及暴雨模擬製造器等進行專案研究。該研究室設有多個實驗室「暴雨侵蝕及沉積控制實驗室」設置於主校區內，實驗室之設備、研究及涵蓋能力包括：相關指數之測試、可調節水文學的測試床、透水性鋪面材料、降雨模擬器、侵蝕控制試驗、慢速釋放肥



料測試及渠道聚合物處理測試等。實驗室設置有北美州最大的暴雨模擬製造機，規模僅次於日本。暴雨實驗室已運作至今已3年多，實驗室負責測試及分析評估來自不

同材料的暴雨逕流中之化學物質，暴雨模擬製造機可以讓研究者學習雨水如何降落在不同的地表面上、雨水如何溢流及其如何移動塵埃致侵蝕土壤而阻塞排水管道。

該研究院還設有一個重要的綠屋頂(green roof)研究團隊，為佛羅里達州具領導性的團隊，該團對現行設置了一個實驗室規模的綠污頂，另又再該校內一建築的頂樓設立了大規模的綠屋頂，並檢驗記錄綠屋頂的水質、水量等資料，而植栽的選擇也是該設置案的重點，另並就建置技術及材料等進行審試。該實驗室之綠建築

測試床即先前介紹位於佛州默爾本市之佛羅里達綠色建築展示屋(FSGE, Florida Showcase Green Envirohome)。另研究院亦針對8種不同型態之透水性材料的安裝進行測試，主要重點為



測試再生鋪面材料的滲透率、負荷及透水性等，該等結果對於綠建築的推動及技術均有所助益。

參、研究心得

一、人工濕地處理污水具經濟、生態保育及環境教育等多項效益

(一)利用人工溼地中的自然淨化機制，透過污水與環境中的水生植物、氧氣、微生物、土壤及陽光等沉澱、吸附、吸收、氧化及生物分解交互作用，營造具淨化水質的生態系統，藉以達到水質淨化的目的。人工溼地的設置有多項效益如下：

1. 改善下游河川水質。
2. 提供重要的野生生物棲息地。
3. 運用較低費用去除營養鹽。
4. 創造美觀且另人愉悅的野外景觀。
5. 有環境教育、生態、休憩等功能。
6. 增加公園面積。
7. 結合社區居民共同維護，凝聚向心力。

(二)為改善河川的水質，家庭污水應納入污水下水道系統及污水處理廠處理，在污水下水道建設尚未完成前，為加速河川水質的淨化，將處理效果不佳之化糞池或合併式建築物污水處理設施放流水集中，利用人工濕地處理設施再加以處理，可降低污水對水體的污染負荷，進而改善河川水質及營造景觀。

(三)應用現地處理以淨化河川水質，雖已於台灣地區應用多年，但該等技術仍在國際間推陳出新中，台灣地區可吸取其他國家的經驗，應用為技術研究之參考，藉以發展出適用於台灣區域特性的人工濕地處理工程技術。

二、向上流式濕地處理系統可杜絕堵塞及積水等問題

與向下流及水平流人工濕地處理系統比較，向上流式濕地處理系統主要優點在於比較有除臭及防堵塞的功能。向下流及水平流濕地處理系統，因污水原水更接近於水體表面，導致臭味容易擴散，向上流式濕地處理系統較能解決這一個問題。此外，堵塞一直是向下流及水平流濕地處理系統一大問題。污水中的顆粒在自上往下的沉降中容易填塞進濕地內部的空隙，導致濕地內部堵塞，表面積水致滋生蚊蠅，甚至導致污水外溢。同樣的問題，在向上流式濕地處理系統較不會產生，影響也較小，污水中的較大顆粒進入濕地後將直接沉在底層，不會隨水流向

上，可杜絕堵塞和積水等惱人問題。

三、浮動式濕地處理系統具易設置、好維護及快移除等優點

- (一)相較於其他類型的濕地處理系統，浮動式濕地處理系統的特點，顧名思義在於漂浮。不同種類的濕地植物的根系有長有短，隨著植物的品種而有所不同。水位波動亦會影響其生長，進而影響到其淨化水體的功效。漂浮式濕地處理系統則不會受水位波動的影響，而且漂浮濕地更容易鋪設，保養及移除。從生態角度，浮動式濕地處理系統能降低覆蓋面積以下的水體溫度，並能提供水生動物理想的棲息地，同時有利於一些反硝化菌(denitrifier, or denitrifying bacteria)的生長，從而進一步提高除氮效力。
- (二)漂浮式濕地處理系統具有多項優點，它容易設置、維護簡單、易於收割水生生物、且方便移除或移動，經過證明可降低磷的濃度、改善水質，為經濟上合理可行的處理技術。行政院環保署補助各地方政府設立多處人工濕地，其中補助屏東縣環境保護局於高屏溪畔之人工濕地，在暴雨來時全部破壞流失，若採浮動式濕地處理系統，也許可在得知暴雨來襲前，將該浮動式濕地處理系統先行移除，避免所投入的經費人力完全流失。
- (三)台灣地區設置的人工浮島與浮動式濕地處理系統類似，曾在南投縣的日月潭及花蓮縣的鯉魚潭作測試，也許因該等湖泊面積過大，效果有限，如應用在小型社區建築物污水處理設施放流水的再處理，應可發揮較大的處理功效。

四、透水性鋪材使用於新開發基地可降低淹水機率

- (一)參觀墨爾本之綠建築時，據屋主表示，該建築完成後，如有暴雨來襲，其建物附近之暴雨逕流均可快速退去，不會有積水問題，這與其排水系統設計良好、房屋四週空地無不透水層覆蓋、地磚採透水性鋪材均有直接關聯；台灣地區近年來每遇暴雨極造成嚴重淹水，可能原因如下：
 1. 部分民眾丟棄垃圾，下雨時垃圾被沖刷至排水溝，導致排水不良。
 2. 都市化的結果，使空地變成建築物、高速公路、快速道路，減少了雨水入滲的機會及面積。
 3. 綠建築概念仍不普及，未能確實應用於生活及各建設上，如停車場、人行道之興建，往往全部以混凝土鋪設，若可以透水性材料鋪設，對淹水的改

善應有所幫助。

(二)以往工程或建築基地開發，常採用不透水鋪面設計，造成大地喪失良好的吸水、滲透、保水能力，減弱滋養植物及蒸發水分潛熱的能力，無法發揮大地自然調節氣候的功能，並引發都市熱島效應，同時也使得暴雨時雨水無法入滲、快速排入排水系統，造成低窪地區每遇大雨即淹水的窘境。綠建築之推廣，將有助於促進大地水循環能力、改善生態環境、調節微氣候、緩和都市氣候高溫化現象。

肆、建議事項

一、加強民眾對建築物污水處理設施妥善管理之教育宣導

目前台灣地區未納入公共或專用下水道之生活污水，依規定均應排入合併式建築物污水處理設施處理，公共或專用下水道污水處理設施有專責人員操作管理，處理後之排放水質較無問題，但合併式建築物污水處理設施之放流水質則較有疑慮，放流水質良好與否的關鍵在於污水處理設施是否妥善操作維護；建議加強民眾妥善管理建築物污水處理設施的教育宣導工作，俾使該等建築物污水處理設施發揮其功效。

二、適時採用人工濕地處理系統輔助處理生活污水

生活污水依規定均應排入化糞池或合併式建築物污水處理設施處理，但若未妥善管理或處理效果不佳，營養鹽排入河川、湖泊等水體，造成藻類繁殖致水體缺氧、水質惡化。在下水道系統未全面普及前，建議搭配人工濕地生態工法處理生活污水，不但可減少污染濃度、降低河川水體負荷，並有景觀營造、生態保育等附加價值。

三、建立與美國環保相關機關或學校之合作關係與聯繫管道

於中佛羅里達大學研習之向上流式人工濕地系統，為該校 2010 發表之研究成果，另浮動式人工濕地系統亦為該校受託執行之實績。生活污水人工濕地處理生態工法技術仍在推陳出新，而佛羅里達州氣候與台灣類似，人工濕地處理條件因此極為相似，建議與其相關機關(構)或學校建立合作關係與聯繫管道，吸取其經驗應用發展出適合台灣的人工濕地處理工程技術。

四、人工濕地處理系統之設置列為綠建築評估指標

綠建築係追求地球環保之永續建築設計理念，而人工濕地污水處理系統之設置正符合這樣的概念；濕地的設置有許多效益，如降低水污染、添加綠意、貯留雨水、廢水回收利用、增加保水性，並可提高生物的多樣化等，各效益均與綠建築評估指標相契合，建議將該系統之設計列為綠建築評估指標。

五、宣導開發基地多利用透水性鋪材以降低淹水機率

以往工程或建築基地開發，常採用不透水鋪面設計，造成大地喪失良好的吸水、滲透、保水能力，減弱滋養植物及蒸發水分潛熱的能力，無法發揮大地自然調節氣候的功能，並引發都市熱島效應，同時也使得暴雨時雨水無法入滲、快速排入排水系統，造成低窪地區每遇大雨即淹水的窘境。綠建築之推廣，將有助於促進大地水循環能力、改善生態環境、調節微氣候、緩和都市氣候高溫化現象保護及有效運用地球有限資源；而該概念不僅適用大型公共工程或建案上，小型建案亦可應用，如小型公共或私人停車場、人行道等透水鋪材的採用。應從生活中、從小地方作起，並適度宣導相關知識及觀念；公務機關及公共工程新建或改建時，更可將綠建築概念納入規劃設計施工中，以起示範作用，對減低暴雨時的淹水、國土保育、維護生命財產安全及環境的永續利用均有正面作用。

六、鼓勵同仁參與公務人員出國專題研究

身為政府機關人員，有機會赴國外進行 3 個月的短期，在公務生涯中是實屬難得的經驗，除了可吸收環保相關專業知識，亦是人生難得的歷練，過程雖有極大的文化差異衝擊，確是獲益良多，也擴大人生視野；在行程安排過程中，包括研究機關(構)的選擇、指導教授或專家學者等聯繫、赴國外食、衣、住、行的安排，再再都是一種學習；而國外生活偶發事件的處理，亦是很好的訓練。這些經驗都讓參加人員從中學習了組織、溝通、協調及應變等能力，對建全獨立的人格、強化危機處理及組織能力均有極大助益。公務人員是公務體系的根本，強化其根本將可讓公務體系實力更堅強、運作更順暢，提高機關的執行力，因此，建議鼓勵同仁參與出國專題研究之甄選，不但可拓展視野、吸收環保新知，並可瞭解其他國家之環境保護工作概況及最新訊息，對未來環保業務相關工作將有所啟發。

參考資料：

一、書籍部分

1. Environmental Engineering Science
2. Journal of Cleaner Production
3. The Science of the Total Environment
4. HortTechnology
5. Journal of the American Society for Horticultural

二、網路資料部分

1. 行政院：<http://www.ey.gov.tw>
2. 行政院環保署：<http://www.epa.gov.tw>
3. 內政部營建署：<http://www.cpami.gov.tw>
4. 材團法人台灣建築中心：<http://www.tabc.org.tw>
5. 水環境研究中心：http://www.cc.ntut.edu.tw/~wwwwec/eco/eco_index.htm
6. 美國佛羅里達州環境保護部 Department of Environment Protection, Florida：<http://www.dep.state.fl.us>
7. 美國綠建築協會：<http://www.usgbc.org>
8. 中佛羅里達大學：<http://www.ucf.edu>
9. 佛羅里達州橘縣政府：<http://www.orangecountyfl.net/>
10. Bioprocess and Biosystems Engineering：
<http://www.springer.com/chemistry/biotechnology/journal/449>
11. <http://journal.ashspublications.org/content/current>
12. <http://horttech.ashspublications.org/>