

出國報告（出國類別：訪問）

自畜牧廢水生物精煉回收氮磷技術研習

服務機關：農業部畜產試驗所

計畫來源：111 年度科發基金「農產業生產技術優化與擴散」子計畫「推廣研發

成果及橋接國際畜產業」（編號：MOST 111-3111-Y-067E-001）

姓名職稱：李欣蓉副研究員、黃雅玲助理研究員

派赴國家：美國

出國期間：112 年 8 月 18 日至 112 年 8 月 27 日

報告日期：112 年 11 月 28 日

摘要

本次參訪前往美國南卡羅萊州 (South Carolina) 拜訪美國農業部農業研究署－濱海平原土壤、水及植物研究中心 (USDA-ARS Coastal Plains Soil Water and Plant Research Center, CPSWPRC) 的 Dr. Matias B. Vanotti，學習氮、磷回收及處理技術，Dr. Vanotti 開發之營養鹽回收處理技術已在美國獲得多項專利。本次學習內容包含利用透氣膜技術 (gas-permeable membrane process) 回收糞尿中的氮及磷，以及利用厭氧氨氧化菌 (Anammox) 去除氮等技術，並與 Dr. Vanotti 討論我國畜牧場之三段式廢水處理設施中常有管線結晶而使管線阻塞之問題並尋求解決方法。

接著由該研究中心其他研究人員分享相關試驗成果並進行討論，例如該研究中心主任 Dr. Ariel Szogi 介紹快洗磷回收 (quick wash phosphorus recovery) 方法、Dr. Tom Ducey 介紹環境微生物實驗室，監測土壤微生物基因體受到外來物質所造成的影響、Dr. Wooiklee Paye 分享其自糞便中回收氮磷後施用於植體之農藝性狀測試、Dr. Ken Stone 分享透過精準施灌管理及其試驗場域實際應用介紹、Dr. Kyoung Ro 分享以雷射方式測量溫室氣體排放以及新型態的生物炭製作技術 (Hydrochar)、Dr. Clement Sohoulade 分享糞肥管理的環境評估與減量方法學碳權抵換估算 (carbon credit)。

本所亦於該研究中心進行現場與線上的討論會議，由黃雅玲助理研究員分享臺灣畜牧業及畜牧糞尿水目前處理現況，並由李欣蓉副研究員報告本所近年來著手與糞尿管理、循環再利用與低碳生產等相關研究成果，該會議同步邀請本所黃振芳所長一同上線參與討論，雙方皆對後續進一步合作與交流有更進一步的共識。

之後再前往維吉尼亞州 (Virginia) 拜訪USDA之合作夥伴－Pancopia 公司與HRSD公司SWIFT研究中心，這兩間公司皆利用 Dr. Vanotii 的氮回收技術進行產業應用與實踐，其中Pancopia 公司係一家研究環境與能源工程的私人研究中心，其與USDAARS及NASA共同合作開發應用於太空的水循環系統；並參訪 HRSD 公司SWIFT研究中心，該中心是一家處理維吉尼亞州東部沿海地區民生廢水的公司，將民生廢水處理至飲用水之標準，再將處理後的水重新注入地下水層以補充該地區長期缺乏的地下水資源。

此次參訪除了學習氮、磷回收技術外，亦學習USDA-ARS研究精神，研究人員於每次實驗後皆詳細記錄實驗過程，即便只是操作簡易步驟讓我們瞭解，操作過程有任何問題或未見過的

小狀況亦詳細記錄並進一步尋求原因，實驗過程充分展現細心與耐心。在開發新技術同時，亦考量過程中所需處理之成本，採用多種不同方法比較成本，如在廢水之氮回收技術中需要降低pH，會考量採用在地次級品蔬果共消化，取代化學藥品來降低pH之成本，甚至可以考量到利用電化學方式利用正負電極差異來調整廢水中的pH。本計畫後續將先嘗試解決國內畜牧場三段式廢水處理過程中之長期管線阻塞問題，不定期與 **Dr. Vanotii** 針對試驗數據資料進行線上討論，再應用此次所學之氮、磷回收技術應用於相關示範場域，以提高國內資源化再利用率，持續未來與美國技術交流與合作效益。

目錄

壹、	目的.....	5
一、	申請背景與目的.....	5
二、	前往機構與研究計畫之相關性.....	5
三、	經費來源.....	5
貳、	過程.....	6
一、	美國農業部農業研究署 CPSWPRC	7
二、	參訪 Pancopia 公司.....	27
三、	參訪 HRSD 公司—SWIFT 研究中心.....	29
參、	心得與建議.....	31

壹、 目的

一、 申請背景與目的

為解決國內畜牧業三段式廢水處理設施現有問題，以及導入新技術以提升畜牧糞尿回收再利用率，延續農業部臺美合作議題，自 2020 年起與美國農業部農業研究署－濱海平原土壤、水及植物研究中心（USDA-ARS, CPSWPRC）的 Dr. Vanotii 取得聯繫，透過多次線上與實體研討會邀請，與雙方研究單位互相參訪討論，實質討論瞭解美國目前自畜牧糞尿中回收營養鹽之技術，為國內畜牧業引進糞尿處理新技術，除了提升畜牧糞尿資源再利用率外，亦希望創造新經濟價值。

二、 前往機構與研究計畫之相關性

美國農業部農業研究署－濱海平原土壤、水及植物研究中心（USDA-ARS, CPSWPRC）位於美國南卡羅來納州，研究方向主要針對畜牧場糞便管理與處理系統建立、土壤與水環境品質管理監測與營養鹽回收利用等，希望可以在維持高效率與高營利的農業生產中，找到保護環境與強化自然資源循環利用的解決方案，與本所目前針對畜牧廢水循環利用的方針不謀而合，其中 Dr. Vanotii 針對自畜牧廢水利用生物精煉技術回收氮磷，有多件論文與專利發表。本次前往美國 CPSWPRC 研習，主要希望透過美國實場應用案例經驗分享，以及臺灣畜牧場廢水處理系統目前遭遇到的問題進行面對面討論，期望未來能提供國內業者廢水處理場域規劃建議。

三、 經費來源

本次計畫經費係由 111 年度科發基金「農產業生產技術優化與擴散」子計畫「推廣研發成果及橋接國際畜產業」（編號：MOST 111-3111-Y-067E-001）經費支應，參訪人數共計 2 名，於本（112）年 8 月 18 日至 27 日，由本所飼料作物組畜禽糞管理與循環再利用 2 位研究人員—李欣蓉副研究員與黃雅玲助理研究員前往美國執行。

貳、 過程

本次計畫參觀研習行程安排如下表：

	時間	地點	活動事項
臺灣	8月18~20日	臺灣臺北→美國南卡羅萊州	去程
美國	8月21日	美國農業部農業研究署－濱海平原土壤、水及植物研究中心(CPSWPRC)	學習氮回收技術及了解 USDA-ARS CPSWPRC 其他糞尿相關處理及再利用技術計畫。 <ul style="list-style-type: none"> ● Dr. Matias Vanotti：氮回收技術 ● Mr. William Brigman：氮回收實驗室操作 ● Dr. Tom Ducey：環境微生物實驗室 ● Dr. Wooiklee Paye：糞便氮磷回收施用後農藝性狀分析 ● Dr. Ken Stone：灌溉管理
	8月22日		學習磷回收技術及了解 USDA-ARS CPSWPRC 其他糞尿相關處理及再利用技術計畫。 <ul style="list-style-type: none"> ● Dr. Matias Vanotti：磷回收新思維與生物法氨氣移除 ● Mr. William Brigman：水質分析與磷回收操作 ● Dr. Ariel Szogi：磷回收快洗模式 ● Dr. Kyoung Ro：水熱炭化製作技術與以雷射量測糞便養分釋放 ● Dr. Clement Sohoulade：糞便養分和碳信用額度的環境評估
	8月23日		上午由李欣蓉副研究員與黃雅玲助理研究員介紹臺灣畜牧業現況與畜產試驗所近年研究；下午與 Dr. Matias Vanotti 前往維吉尼亞州
	8月24日		Pancopia 公司、HRSD 公司 - SWIFT 研究中心 參訪與 USDA-ARS CPSWPRC 合作參與太空廢水處理及再利用計畫之研究 Pancopia 公司及處理維吉尼亞州沿海地區民生廢水的 HRSD 公司-SWIFT 研究中心
	8月25~27日		美國維吉尼亞州-臺灣臺北
臺灣			

一、 美國農業部農業研究署 CPSWPRC

濱海平原土壤、水及植物研究中心

(USDA ARS Coastal Plains Soil Water and Plant Research Center, CPSWPRC)



(一) 氮回收技術

由 Dr. Matias Vanotti 介紹兩種氮回收技術，一為以透氣膜 (gas-permeable membranes) 回收氮 (圖 1)，另一為以生物處理移除氮 (圖 2)。以下分別針對兩種方式進行說明：

Gas-permeable membrane system:
The ammonia gas (NH₃) passes through

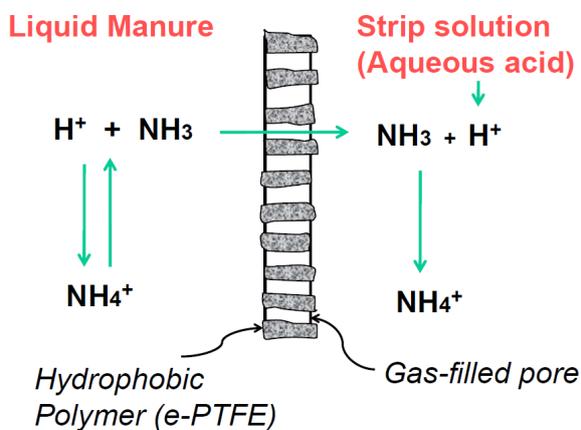


圖 1. 以透氣膜回收氮

Anammox: new shortcut for the biological removal of nitrogen

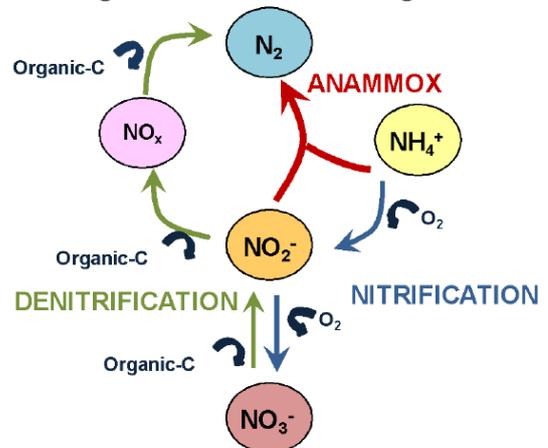


圖 2. 以生物精煉處理移除氮

1. 透氣膜回收氨：

本技術係利用廢水中的 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 的轉換，進行氨回收。透氣膜係由膨體聚四氟乙烯（expanded polytetrafluoroethylene, ePTFE）製成（圖 3），其為具微孔的疏水性透氣膜（即類似目前坊間的 GORE-TEX 材質，水蒸氣可以穿透，但是水分無法出來）。此技術利用提高廢水中的 pH 值，將廢水中的 NH_4^+ 轉換成 NH_3 ， NH_3 可以通過透氣膜進到管線內，再以管線內流通酸液酸洗的方式，將管線內的 NH_3 氣體抓住並轉換成 NH_4^+ ，完成 NH_4^+ 回收。

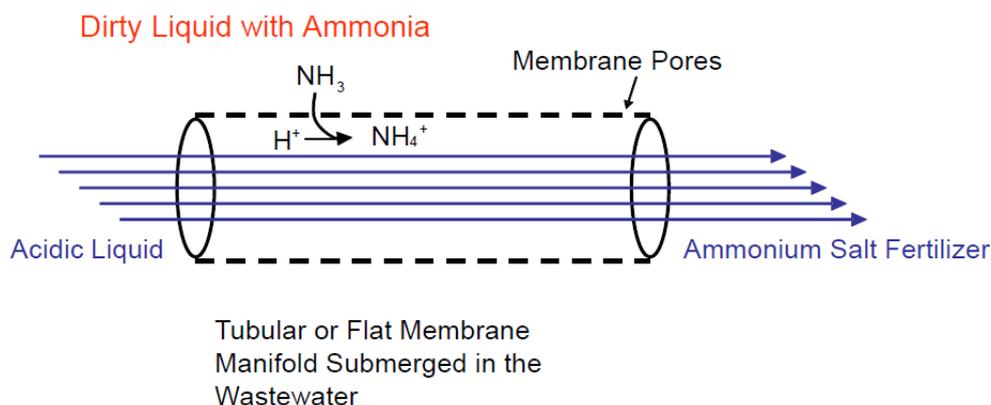
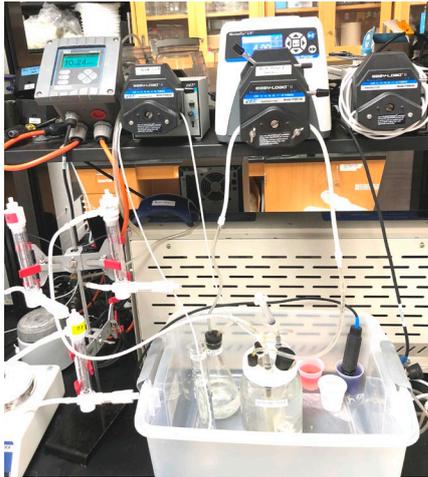


圖 3. 透氣膜近拍，裡面可以流過酸液以回收管線內的 NH_3

此技術廢水中的 pH 越高， NH_4^+ 轉換成 NH_3 能力越多，回收率也就越高。而提高廢水 pH 值方式有 3 種，（1）添加化學藥劑（圖 4）、（2）低速率曝氣（圖 5）及（3）透過電化學方式（圖 6）；此外，亦可加入硝化抑制劑，抑制曝氣處理過程中銨離子氧化。此技術不僅可用於糞尿水中（圖 7），亦適用於雞舍內（圖 8），降低畜舍內的氨氣，最後可產生液態肥料。



Experimental device for ammonia capture from manure using gas-permeable membranes (closed loop).

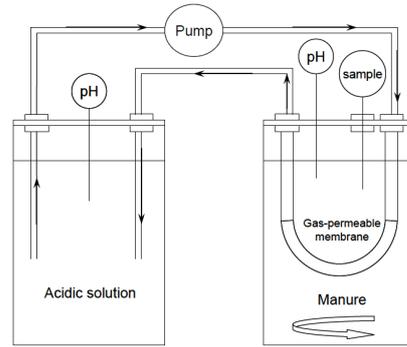


圖 4. 添加化學藥品提高 pH 值

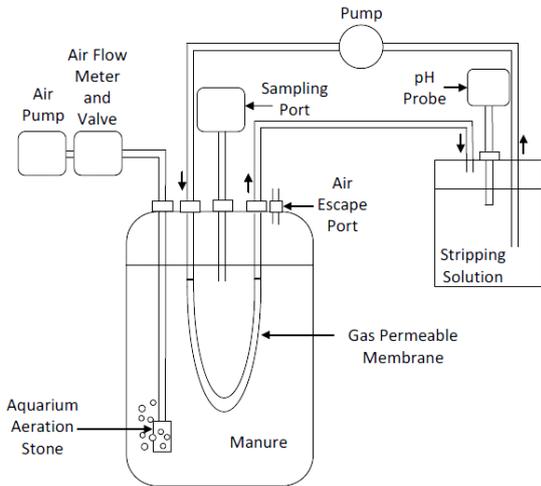


圖 5. 低速率曝氣方式提高 pH

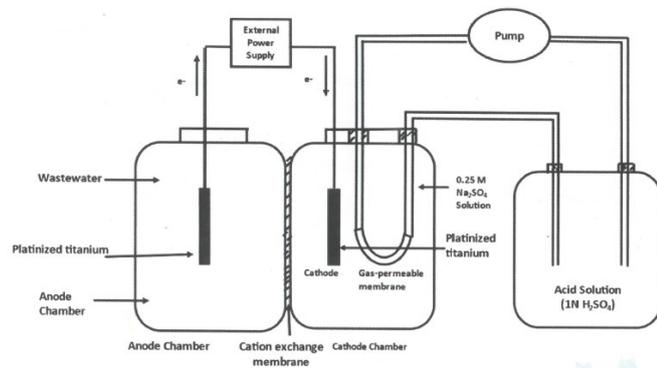


圖 6. 以電化學方式提高 pH 值

Recovery of Ammonia from Liquid Manure with Gas-permeable Membranes

- Technology recovers ammonia from liquid manure
- Produces liquid fertilizer with > 50,000 ppm nitrogen
- **US Patent in 2015:** "Systems and Methods for Reducing Ammonia Emissions from Liquid Effluents and for Recovering the Ammonia" (US 9,005,333, Vanotti, M.B., and Szogi, A.A)

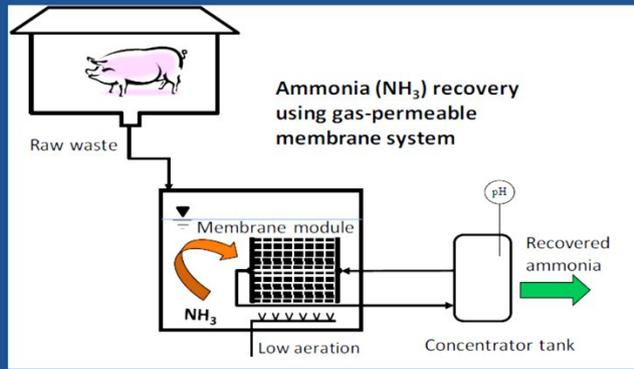
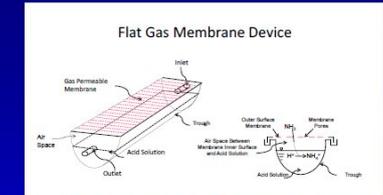


圖 7. 以透氣膜應用於豬場回收氨

On going research: Testing at Univ. Maryland Eastern Shore



Prototype hanging ammonia recovery module being tested at chicken house

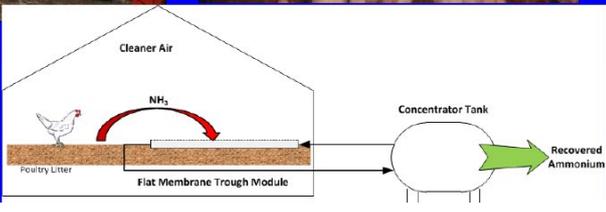


圖 8. 以透氣膜應用於雞場回收空氣中的氨氣

2. 以生物處理移除氮 Deammonification (Anammox) :

此技術係結合厭氧氨氧化菌 Anammox bacteria ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N}_2$) 以及部分 Nitrification ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$)，於單一槽體完成氮轉換及移除。Dr. Vanotti 自北卡羅

萊州一養豬場之糞便中分離出一株新型的厭氧氨氧化菌(*Candidatus Brocadia caroliniensis*) (圖 9)，此菌株可高效移除氨氣。Dr. Matias Vanotti 將此菌株應用於廢水氮循環中，以厭氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, anammox) 方式將 NH_4^+ 轉換成 N_2 (圖 2)，可降低曝氣需求及處理成本，與一般的硝化/脫硝作用 (nitrification–denitrification, NDN) 過程相比，可節省 50% 氧氣提供節省曝氣成本，以及節省脫硝作用所需的外部有機碳源。此外，此技術可於單一槽體處理完成亦可節省設備成本。此技術已成功於 NASA 的計畫測試，提供在太空中廢水的淨化及回收再利用 (圖 10)。



Anammox *Brocadia caroliniensis*
discovered in NC swine farm

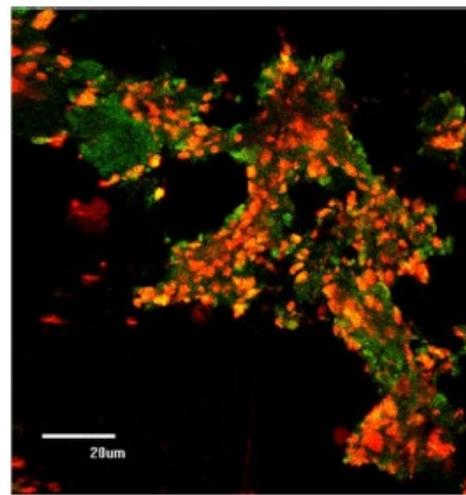


圖 9. 實驗室內 Anammox 的 10 L 培養槽與培養液



圖 10. 應用 Anammox 於太空中回收尿液中氨的模型管柱

(二) 磷回收技術 (Dr. Matias Vanotti、Dr. Ariel Szogi)

因糞肥用於田間的施用量，是以作物所需的需氮量去計算，容易導致磷過量施用累積於土壤，而磷可能透過逕流至水體導致水體優養化。為解決此問題，該研究室開發回收畜牧廢水中的可溶性磷。磷再以可銷售的肥料形式被回收，即磷酸鈣，做為肥料販售並再利用。

由該中心主任 Dr. Ariel Szogi 與 Dr. Matias Vanotti 分別介紹不同的磷回收技術，包括 Quick Wash 處理法、gas-permeable membranes 法以及加入在地次級品水果於糞肥中，以自然發酵後產生的有機酸萃取磷。此外，Dr. Matias Vanotti 亦安排於實驗室實地操作磷萃取及回收磷步驟 (圖 11)。



圖 11. 與中心主任 Dr. Ariel Szogi (左 2) 與 Dr. Matias Vanotti (右 2) 合照

1. Quick Wash 處理法：

由 Dr. Ariel Szogi 介紹 Quick Wash，一開始的發想是觀察到來自一種叫 *Lupinus albus* (白羽扇豆) 的植物，因其根圈會分泌有機酸，使土壤中的有效性磷增加。此方法也已獲得專利，是以結合酸、熟石灰(hydrated lime)以及有機聚電解質(organic polyelectrolytes)

分離糞肥或污泥中的磷，取得磷酸鈣（calcium phosphate）。首先將酸洗與固體糞便或污泥混合，產生水洗後的固體殘留物及磷萃取液體。接著添加氧化鈣或氫氧化鈣至磷萃取液中，使磷在鹼性條件下沉澱，最後添加有機陰離子絮凝劑（organic anionic polymer），提高富含磷的沉澱物與回收。（圖 12）

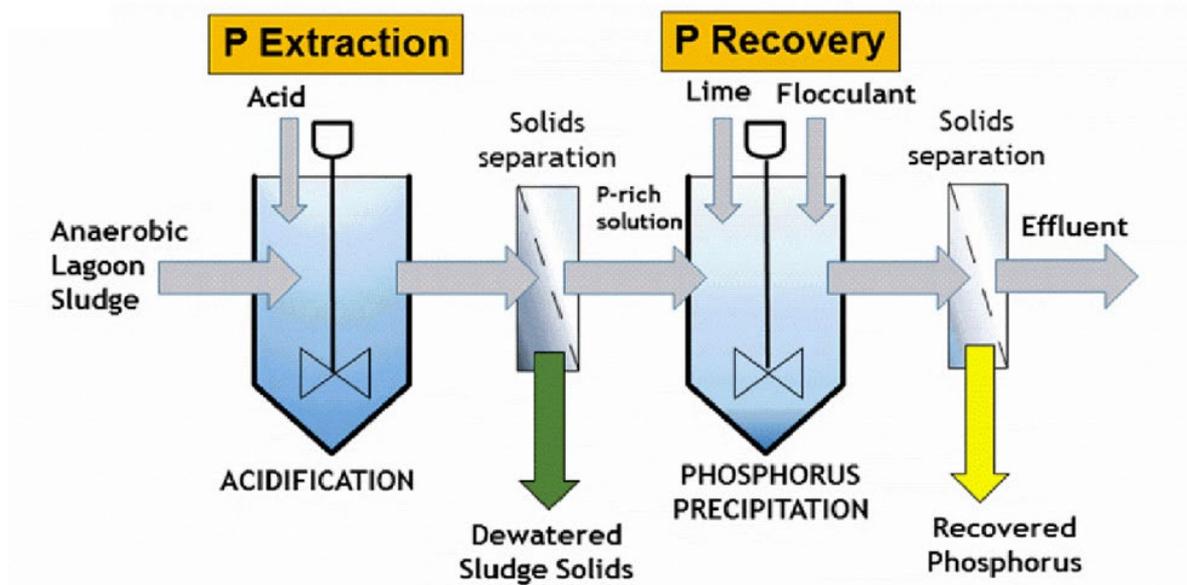


圖 12. Quick Wash 處理法

Quick Wash 處理法可以快速濕提出磷並以固體濃縮形式回收磷，從而改善糞渣或是污泥中的氮和磷平衡。可以從廢棄物中回收 80% 以上的磷，同時將大部分氮留在洗滌後的固體殘渣中。因此，洗滌後的固體殘渣對於作物生產具有更平衡的氮磷比，可以較安全的施用於土壤中。可在室溫環境下進行，避免了洗滌殘留物中有機碳和氮的損失，同時降低土壤過量磷的環境風險。濃縮後的磷約 90% 以上為植物可有效利用的型態，同時將磷作為有價值的產品進行回收和循環利用。

Dr. Ariel Szogi 強調此技術在磷萃取階段僅需花費約 20 分鐘，萃取的多寡取決於 pH 值。此技術可應用於多種有機廢棄物中，例如家禽墊料、新鮮豬糞固體、瀉湖中的污泥及都市生物性固形物。此方法使用的 polymer，為聚丙烯醯胺（Polyacrylamide, PAM），是水溶性高分子中應用最廣泛的種類之一，其陰離子型的聚丙烯醯胺經常被用作為對耕地土壤改良劑。執行 Quick Wash 處理法為陰離子型的 PAM，電荷密度約 34%，添加量大約為 5~10 ppm。

2. gas-permeable membranes 法：

由 Dr. Matias Vanotti 介紹，透過以 e-PTFE 製成之 gas-permeable membranes，進行前述的氮回收後，再添加幫助磷沉澱化合物（氯化鎂 $MgCl_2$ ）於廢水中，形成鎂磷石 Newberyite ($MgHPO_4$) 或磷酸銨鎂 Struvite (Magnesium Phosphates, $MgNH_4PO_4$)，以此兩種型態回收磷（圖 13）。

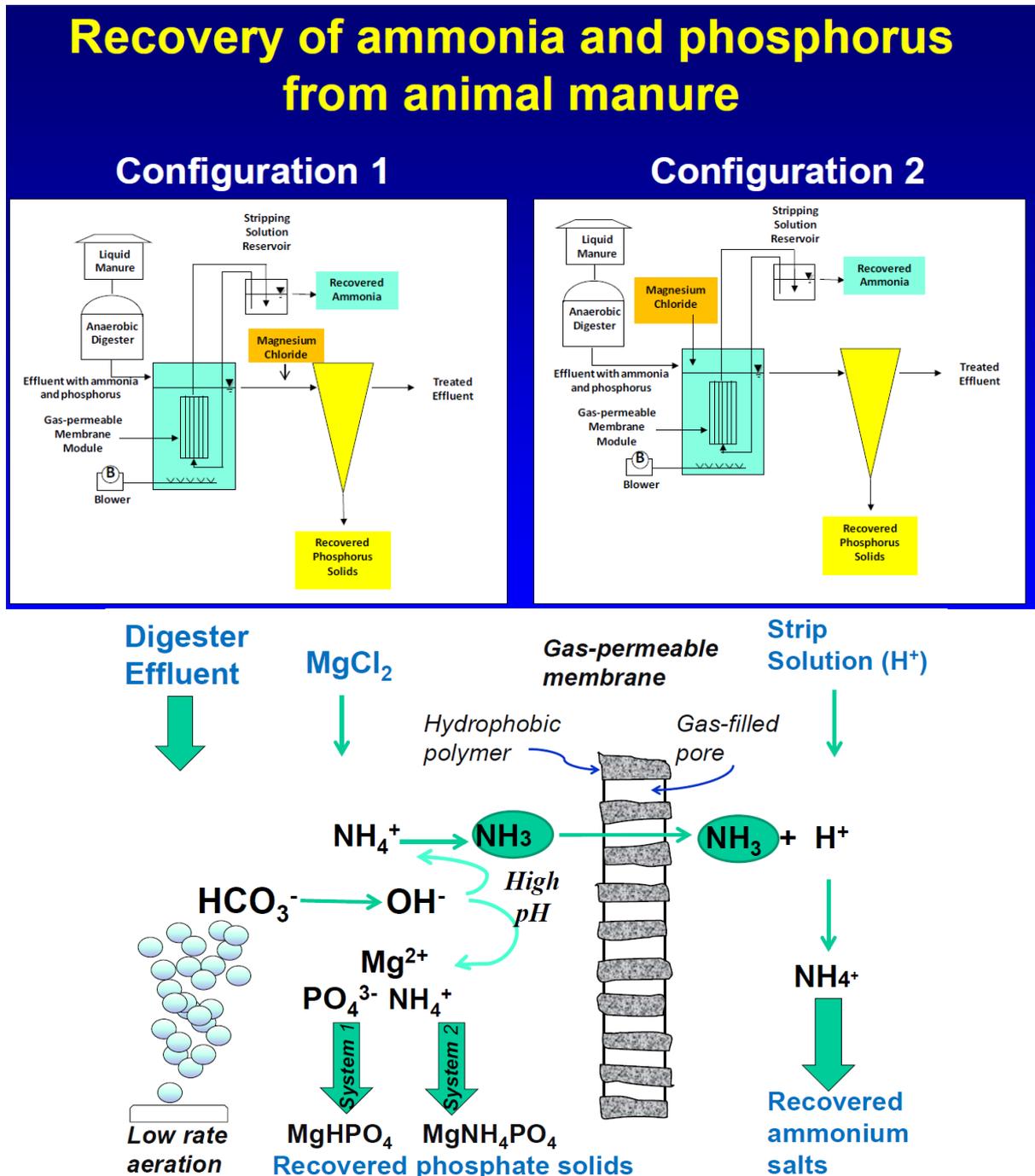
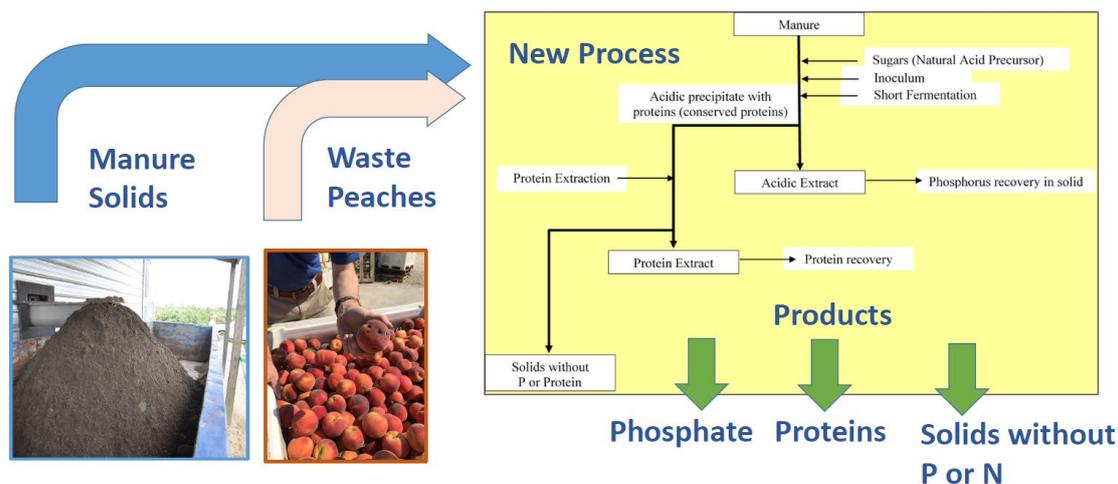


圖 13. 結合 gas-permeable membranes 法與 Quick Wash 處理法，同步回收糞便中氮與磷

3. 糞便與農副產物增值化磷肥回收：

結合在地農業廢棄物，以自然發酵後產生的有機酸萃取磷，由 Dr. Matias Vanotti 介紹，將糞肥混合在地廢棄桃子，透過自然發酵產生的有機酸萃取磷。在美國東南部地區有大量的預廢棄的桃子（含 8%糖），無須支付任何費用便可取得，本試驗便結合兩種農業廢棄物萃取磷，糞便富含磷及蛋白質、水果廢棄物含糖，發酵後產生酸（可作為酸前驅物）透過使用富含糖的廢棄物產生天然的酸，取代購買酸性化學品，以提高利潤。磷可與鈣或磷一起沉澱，獲得有價值的肥料（with 93% plant available P）（圖 14）。

Synergistic combination of two wastes: Manure contains the P, and Fruit Wastes provide the acid precursors (sugars) to extract the P



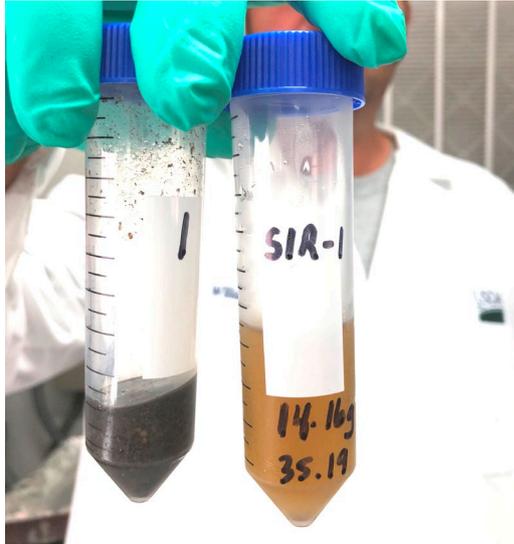
M. Vanotti et al. 2020 US Patent 10,710,937 (USDA)

圖 14. 固體糞渣與水果廢棄物進行混合發酵

4. 實驗室實作磷萃取及回收磷：

於實驗室實際操作萃取及回收磷技術。首先將已預先與乳酸菌（模擬農場用廢棄水果發酵產酸）一夜的糞便進行離心（pH 已下降至 5 以下），離心後下層為殘留固體物與上層為磷萃取液，將磷萃取液取出後另外加入氫氧化鈣（石灰）調整 pH 值至鹼性（約 pH 值 9），磷漸漸與鈣結合形成磷酸鈣後沉澱，最後以抽氣過濾方式，將沉澱物與上層液分離後後，進行 35°C 乾燥後，即可獲取磷酸鈣（圖 15）。

實驗過程中發現當 pH 調整至 7 左右，已經有少量結晶形成。Dr. Vanotii 表示，磷在 pH 5~6 左右，可能會形成磷酸氫鈣 CaHPO_4 （di-calcium phosphate, DCP）。畜牧產業會添加飼料級 DCP 作為礦物質添加劑。現場廢水磷回收說明如圖 16。



右側為離心後上層的磷萃取液



觀察沉澱狀況



以氫氧化鈣調整上層液 pH 值，使磷沉澱（右側樣品）



進行抽氣過濾取得磷酸鈣沉澱物

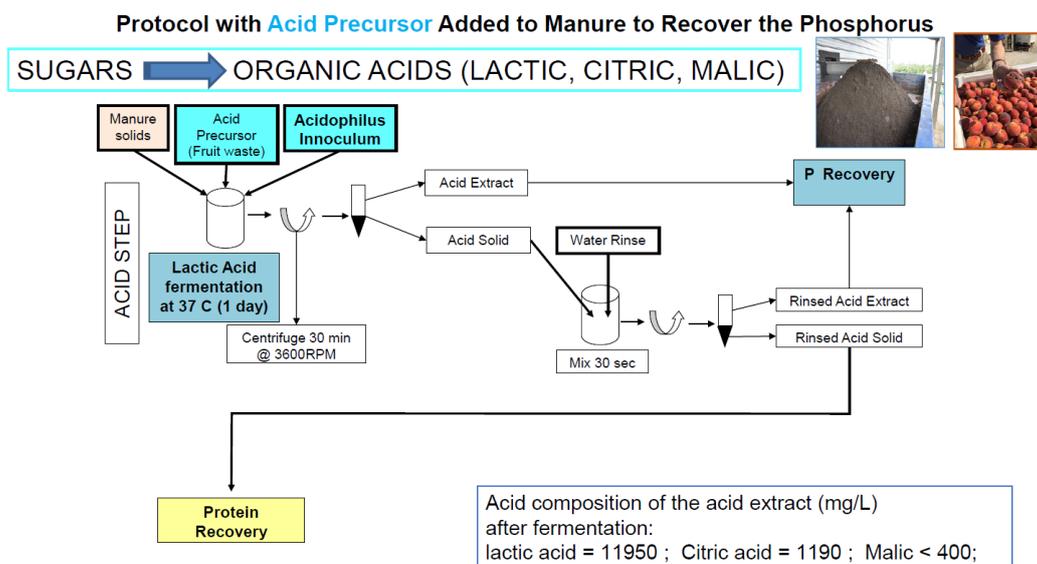


圖 15. 實驗室操作磷萃取與沉澱流程



利用 pH 控制現場石灰加入量



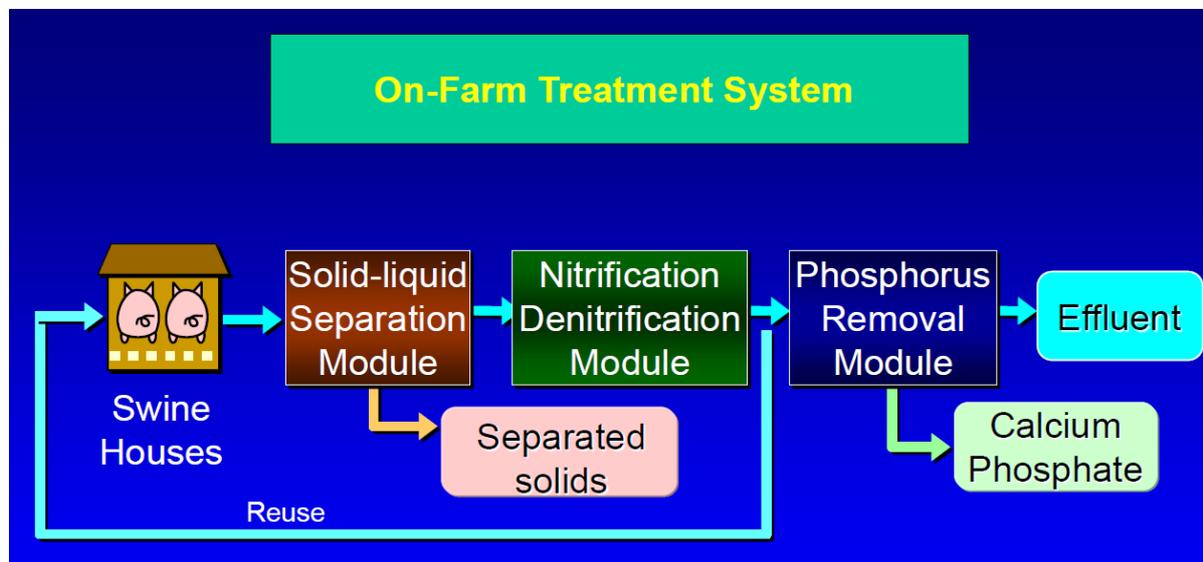
磷沉澱沉降方式



用濾袋與添加 polymer 去除水分



現場取得的磷酸鈣沉澱物



現場畜牧廢水氮磷回收機制

圖 16. 實場磷回收模式

(三) 解決國內廢水場之管線、馬達結晶問題

與 Dr. Matias Vanotti 討論國內廢水場常有管線與馬達發生沉澱物結晶問題，不定期遇到管線阻塞造成無法持續進行廢水處理需停工維修，Dr. Vanotii 表示，臺灣不同於美國以潟湖方式進行畜牧廢水處理，而是以三段式廢水處理模式，其中曝氣池的曝氣操作，導致曝氣池中的 pH 值上升，使廢水中的氮與磷酸結合鈣、鎂等其他離子而結晶，以至於沉水馬達與管線容易因結晶塞住須隨時更換（圖 17），Dr. Matias Vanotti 建議如下：

1. 換掉沉水馬達，改成外抽式馬達，將馬達移至水面上。
2. 設置 bypass 管線及酸液槽（圖 18）：裝設一專門清洗管線的 bypass 管線於經常結晶段的兩端，清洗管線時酸液不致流入廢水池中。
3. 管線定期以酸液進行清洗。
4. 清洗頻率：一周 1-2 次即可，每次 5 分鐘。
5. 判斷現場酸液更換方式：現場可使用 pH 試紙測試 pH 值，當 pH 從紅色變成橘色則須置換槽體內的酸液。



圖 17. 臺灣畜牧廢水場管線與馬達結晶

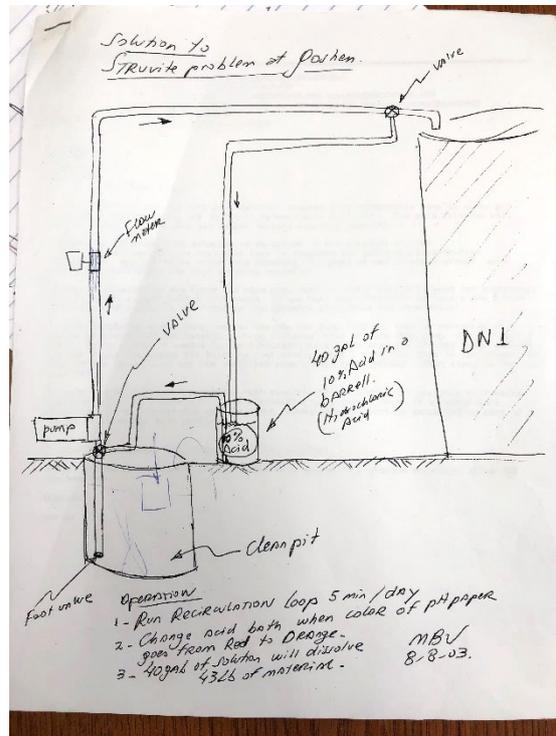


圖 18. Dr. Matias Vanotti 繪製解決方式圖

(四) 其他實驗室參訪

1. 環境微生物實驗室

Dr. Tom Ducey 介紹環境微生物實驗室，該實驗室透過萃取土壤中的 DNA 序列，了解土壤中的基因或是酵素的多樣性，亦可以藉此診斷土壤健康。用 DNA 晶片快速建立土壤 DNA 的資料庫，雖然每次分析費用成本高（約 30 萬台幣），但是後續效益大。可作為土壤污染來源追蹤劑，甚至可以透過資料庫判定商業用土壤定序產品之 QA/QC。目前該實驗室已經有美國地區大約 3000 筆土壤 DNA 資料庫（圖 19）。

Dr. Tom Ducey 提到，畜牧廢水中含有些大腸桿菌等病原菌，回到土壤中對土壤有益有弊。廢水中的大腸桿菌甚至可以存活好幾個月以上；厭氣消化過程中，如果溫度沒有超過 42°C，很難消滅大腸桿菌。施灌廢水生長的牧草，如果透過青貯再去餵飼牛隻，大腸桿菌因為其 pH 變化可以消滅，比較不會造成危害健康疑慮。

美國的生物炭費用較一般肥料費用貴兩倍以上，常用在較高經濟作物栽種上，例如：大麻。生物炭容易吸收重金屬離子，可用於重金屬污染土壤，搭配石灰施用（或是應用在石灰質土壤中），使其不容易移動，避免危害人體與作物。而畜禽糞來源的生物炭，因水分含量高，且重金屬含量容易被濃縮，不適合用來製作生物炭。

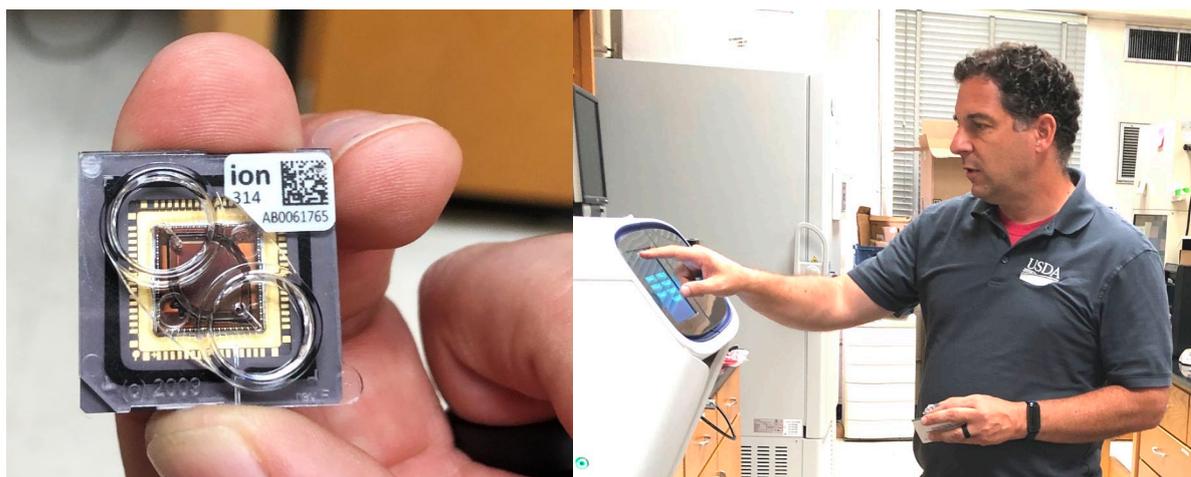


圖 19. Dr. Tom Ducey 展示實驗室分析土壤 DNA 儀器與晶片資料

2. 自糞肥回收之氮磷進行農藝測試（Dr. Wooiklee Paye）

Dr. Wooiklee Paye 表示，透過盆栽試驗種植黑麥草（ryegrass）來測試氮磷回收後的肥料與市售化肥施用，在農藝性狀上的差異。該草種之需氮量為 200 kg/ha，需磷量為 88 kg/ha。結果發現在穩定提供磷肥標準下，回收氮肥施用超過需氮量越多，作物生物量下降但是含氮總量越高，反之在穩定提供氮肥標準下，磷肥亦有同樣的結果，尤其是回收氮肥與磷肥越多，其作物中總含量越高，兩者加乘有大於二的效果。目前雖然不確定原因為何，但是預測可能是廢水回收氮磷肥料，還有一些微量元素同步結晶，導致植體吸收後增進生長所致，例如含有微量鎂元素。廢水回收氮中，與酸液混合的硫酸銨，多年後再檢測濃度不變，顯示該回收之液肥型態很穩定，液肥濃度取約 6~10% N（圖 20）。

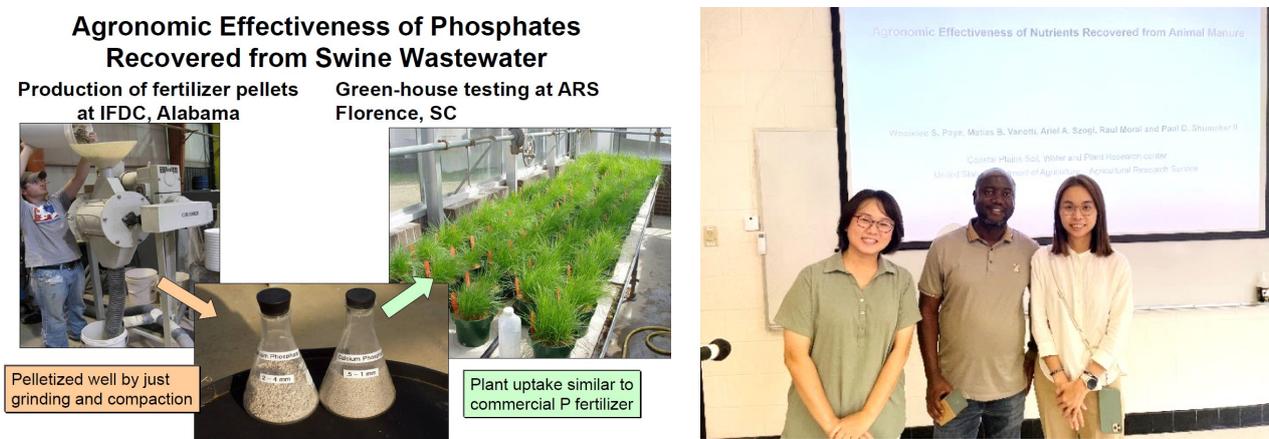


圖 20. Dr. Wooiklee Paye 與本所研究同仁合影，並說明施用回收肥料對作物的影響

3. 精準施灌管理

由 Dr. Ken Stone 介紹精準施灌管理，表示作物生長模式與土壤水分含量多寡有密切正相關。應用變量灌溉系統（Variable-rate irrigation systems）進行精準施灌，此系統基於生產者過去的經驗及相關參數，如土壤導電度來管理，有助於改善作物的水分利用效率，再應用下方 3 種灌溉處理系統了解植物生長狀況，包含 Irrigator Pro、常態化差異植生指標（normalized difference vegetation index, NDVI）進行作物覆蓋率感應（Crop Canopy Sensor），或使用 TDR 去檢測土壤水分潛勢（soil water potential, SWP），這些灌溉處理系統均可進行灌溉管理並可使該地區作物生產足夠。目前中心設置一組半徑 450 英尺（大約 137 公尺）的精準施灌系統，繞圓心方式進行施灌規劃（圖 21）。



土壤水分測定儀 TDR



精準施灌系統



Dr. Ken Stone 說明精準施灌原理



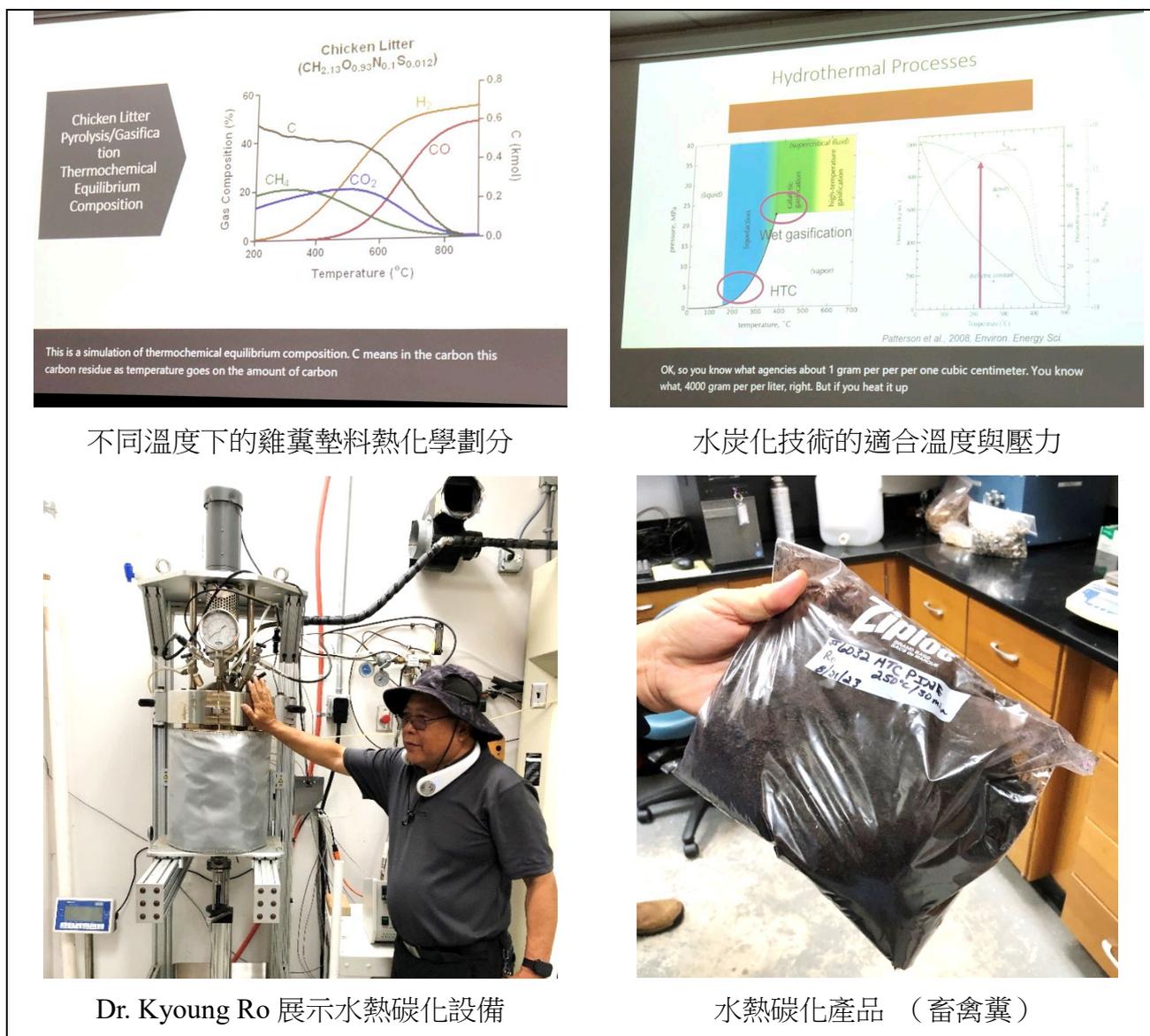
用葉面溫度感應作物覆蓋率之 Sensor

圖 21. 精準施灌系統說明

4. 水熱碳化技術

由 Dr. Kyoung Ro 介紹水熱碳化技術 (hydrothermal carbonization, HTC)，此技術係藉由適當溫度與壓力下，進行濕氣化作用 (wet gasification) 的熱化學轉換，可以將原本水分含量高的生物質，直接去水後碳化變成水熱碳 (Hydrochar)，以動物糞便為原料可轉換成具有高熱值及高灰分量的碳，作為生物能源原料，可燃燒生成熱及電力。利用動物糞便水熱碳作為傳統非碳化生物質，可擴展再生燃料的來源，不僅可大幅降低密集飼養區所產生的過量糞便，水熱碳亦作為於土壤改良劑、綠碳、烹煮燃料、碳匯、環境吸附劑，雖然此技術成本為直接進行農地施用的 4 倍，然對環境效益、產業永續發展具正面效果，例如

可利用於斃死畜禽進行水熱碳化處理後回田，可以避免病原菌 DNA 污染生態系統（圖 22）。



不同溫度下的雞糞墊料熱化學劃分

水炭化技術的適合溫度與壓力

Dr. Kyoung Ro 展示水熱碳化設備

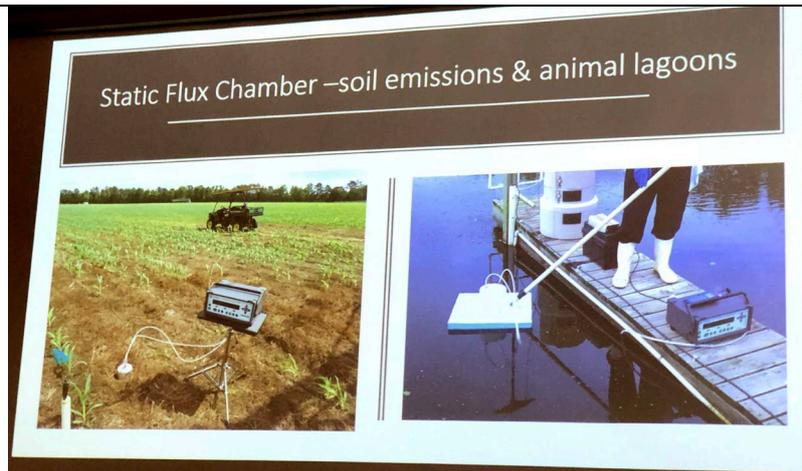
水熱碳化產品（畜禽糞）

圖 22. Dr. Kyoung Ro 講解新的碳化技術 HTC

5. 以雷射量測糞肥溫室氣體排放（Dr. Kyoung Ro）

由 Dr. Kyoung Ro 介紹以雷射量測糞肥溫室氣體排放，使用 Open-Path Tunable Diode Laser Absorption Spectrometer（TDLAS）測量約 5,000 頭肉豬場糞便處理系統—瀉湖（logoon）的 NH₃ 排放量（圖）。TDLAS 是使用可調式二極體雷射（tunable diode laser, TDL）（圖）及光聲光譜氣體分析儀（photoacoustic gas analyzer）測量 NH₃ 濃度，屬於一種大氣候偵測技術，無須破壞現場，也可以每秒進行測定。Dr. Kyoung Ro 以一場位於北卡羅萊

州的豬場，豬場內設有兩個僅使用兩年的瀉湖，該處理系統結合高效率的固液分離及氮磷去除技術，Dr. Kyoung Ro 亦發現導入新糞尿處理技術， NH_3 排放顯著減少，是畜牧場原本瀉湖 43.9 kg-N/ha/d 溫室氣體排放量減少到 6.8 kg-N/ha/d （圖 23）。此外，常透過 3-D sonic anemometer 來校正風向風速影響，可每秒量測 20 次資料，透過標準氣體釋放來看回收率損失。



傳統的氣體腔室法採集土壤與廢水中的溫室氣體



使用 TDLAS 測量農地的 NH_3 排放量



使用 TDLAS 方法測定溫室氣體排放，會搭配 3-D 風速計進行校正（左圖）以雷射方式測定溫室氣體，距離越遠，接收端的 Bin 數量就要更多（右圖）

圖 23. 不同測定溫室氣體排放量模式

6. 糞肥及碳權之環境評估

由 Dr. Clement Sohoulade 首先分享糞肥管理的環境評估。首先介紹長達 10 年以上密集畜牧區進行區域性水域環境監測，同時也比較 10 年來以實際測量環境水樣的實際值（包括總氮、硝酸態氮、可溶性磷等資料），以及透過美國 ARS 於 1990 年開發的 SWAT 模式（soil and water assessment tool），由天氣、地表徑流、蒸散、傳輸損失、作物生長和灌溉、地下水流等營養鹽輸入輸出影響因子模擬數據，進行兩者資料比對。結果顯示，密集畜牧區的水域環境，若保有濕地樣態，可以減少約 49% 硝酸態氮流失、以及控制磷流失，但是無法避免極端降雨造成的干擾誤差。

接著，Dr. Clement Sohoulade 針對畜牧廢水管理差異產生的溫室氣體減排量碳權估算。其中基線為一般畜牧廢水以滷湖方式管理並施灌回田，專案情境為透過畜牧廢水固液分離方式，減少溫室氣體排放。利用現有的清潔發展機制（Clean Development Mechanism, CDM）方法學 AMS-III.Y（Methane avoidance through separation of solids from wastewater or manure treatment systems（透過廢水或糞肥處理系統的固體分離以避免甲烷生成））進行計算，以該州畜牧場為案例，可以減少約 65% 甲烷排放（圖 24）。

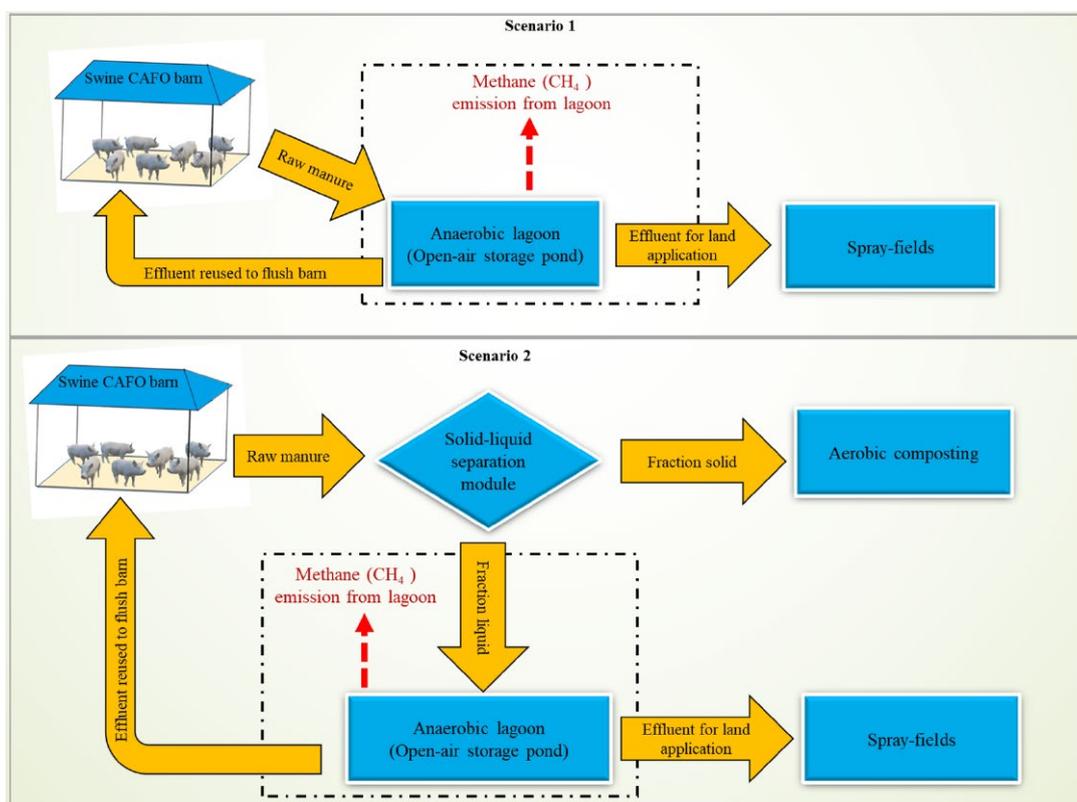


圖 24. 透過畜牧廢水固液分離減少碳排基線與專案情境

(五) 本所簡報-臺灣畜牧產業循環實踐分享

畜試所李欣蓉副研究員與黃雅玲助理研究員，也在 USDA ARS-CPSWPRC 分享臺灣畜牧業及畜禽糞尿資源化現況、產業循環實踐與低碳農場案例分享（圖 25）。

首先由黃雅玲助理研究員介紹畜產試驗所、臺灣畜牧產業的背景、畜牧廢水處理方式與現況，以及近年來推動循環農業，在畜牧業方面目前執行資源化再利用情形。目前依據 112 年第 2 季畜禽統計調查結果及 112 年 5 月底養豬頭數調查報告顯示，臺灣地區牛隻在養 15.4 萬頭（1,172 場），豬隻在養 524.2 萬頭（5,893 場），牛隻以每日每頭牛產生約 200 公升的廢水計算，豬隻以每日每頭進入厭氧發酵槽的糞尿水量 30 公升計算，年產約 6,908 萬公噸廢水。在臺灣，畜牧糞尿水資源化再利用已入法，畜牧糞尿水經厭氧發酵後可作為肥料或土壤改良劑施用於農地上，亦可處理至放流水標準後作為水資源澆灌路樹，依據臺灣環境部統計至 112 年 8 月底止，全國已有 3,331 家畜牧場採取畜牧糞尿資源化利用，施灌農地面積為 5,045 公頃，施灌量為 1,111 萬公噸，相當於節省 544.7 萬包之化學肥料量，故仍有約 5,797 萬公噸有待利用。在畜牧業密集地區之養分過剩形成一環境問題，急需開發多元之畜牧糞尿水利用方式。

接著由李欣蓉副研究員介紹國內畜牧產業面臨之問題，以及畜產試驗所目前的研究成果，包括建置低碳乳牛場、透過預熱及保溫系統提高沼氣產量、透過生命週期評估建置鮮乳碳足跡、修改鴨蛋及羊乳 PCR、建置節水減廢的模組化肉豬舍、氮磷回收、應用微藻去除廢水氮磷及雞糞造粒等。會中 Dr. Kyoung Ro 亦分享韓國所面臨的問題與臺灣相同，如何善加利用廢棄物為此次參訪的目的，研討會結束後，與 ARS-CPSWPRC 全體學者合影（圖 26）。



圖 25. 黃雅玲助理研究員（左圖）分享臺灣畜牧業現況；李欣蓉副研究員（右圖）分享畜試所近年研究



圖 26. 與 USDA ARS-CPSWPRC 全體學者合影

二、 參訪 Pancopia 公司

Pancopia 公司係一家位於美國維吉尼亞州—漢普頓的研究環境技術開發與能源工程的研究中心環境技術公司，Pancopia 公司使用 USDA ARS-CPSWPRC 之專利菌株 Anammox，以協助美國國家航空暨太空總署（NASA）開發生物淨化系統，將太空廢水回收處理成可飲用水，一瓶成本要 10,000 美元。其中微生物不容易固定在系統中容易隨著廢水流動而流失，透過多孔性濾網作為載體，可以提高淨化水質的效率（圖 27）。



Pancopia 公司 CEO, Bill Cumbie 介紹該公司以糞尿水製成的可飲用水



多孔性濾材讓微生物可以附著於其中不流失



附著微生物後的多孔性濾材



初代反應器

圖 27. Pancopia 公司展示使用 Anammox 協助處理太空人生活廢水淨化方式

Pancopia 公司也提到，在北卡的畜牧場，與臺灣遇到相同問題，因為畜牧場戰地不多，飼養頭數太高，導致廢水處理空間不足，加上有該區域颶風，常使瀉湖方式處理的畜牧場廢水造成污染。該區域大部分的畜牧廢水皆用於施灌與沖洗畜舍，若為了蒐集沼氣，將瀉湖覆蓋進行厭氣消化，常於廢水再利用沖洗畜舍時造成畜舍氨氣濃度過高，導致豬隻呼吸道疾病產生。因此，該公司結合上述 Anammox 處理模式，同步使用 Panoxic 處理方式，也就是透過微生物與氧氣提供，讓瀉湖中的氨氣行硝化作用生成亞硝酸鹽或是硝酸鹽態，維持銨鹽與硝酸鹽離子平衡，更透過公司即時監測系統，可以遠端測定廢水池中的 pH、水溫等資訊，並遠端開啟氧氣供應等，等於是硝化作用與脫硝或脫銨作用同時進行，讓 N 在廢水中維持硝酸銨型態平衡，最後以氮氣形式排出（圖 28）。

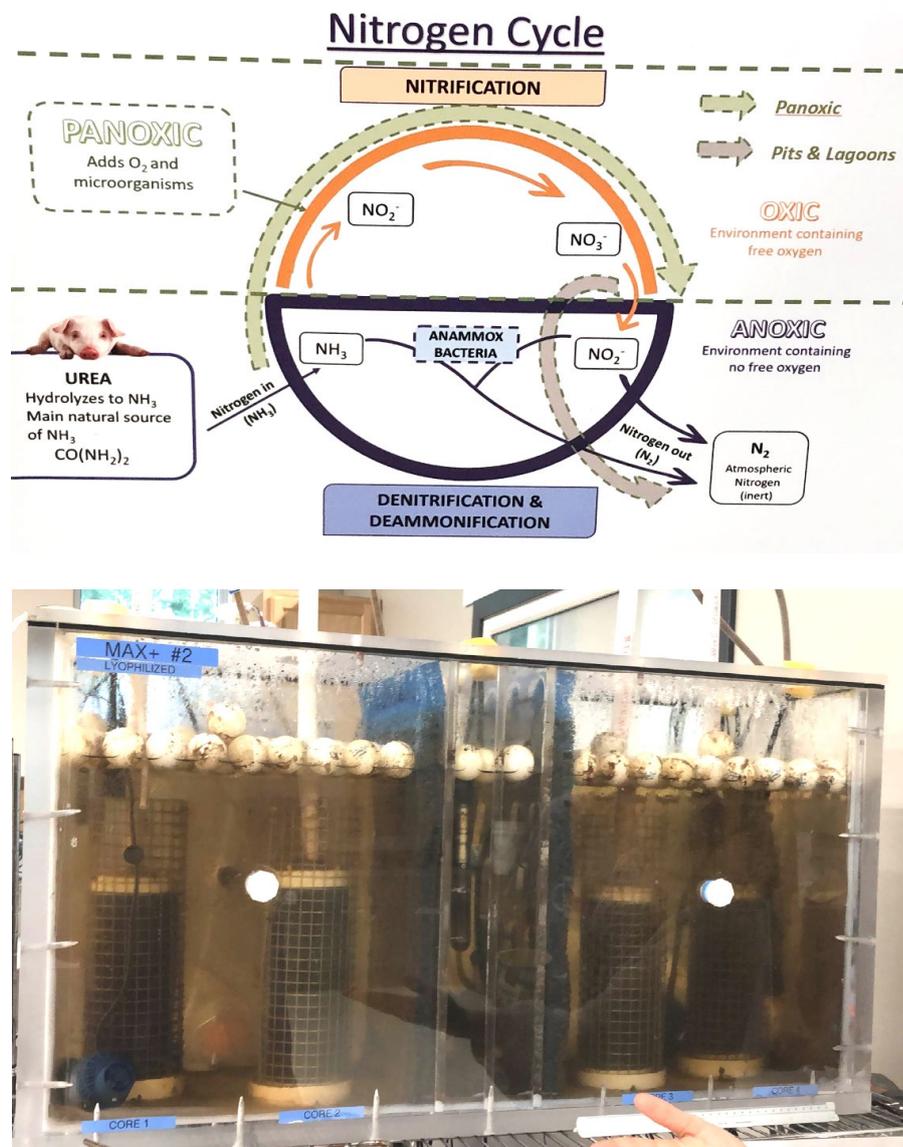


圖 28. Pancopia 公司展示透過遠端手機監控，以間歇性提供氧氣方式，減少廢水氨氣排放

三、 參訪 HRSD 公司—SWIFT 研究中心

HRSD 公司—SWIFT 研究中心（The Sustainable Water Initiative for Tomorrow）位於維吉尼亞州東部，專門處理沿海地區民生廢水的公司。該公司不僅處理該地區民生廢水並將水處理至飲用水之標準，並將處理後的水重新注入地下補充該地區（維吉尼亞州 Fall Zone 至 Chesapeake Bay）長期超抽地下水造成海水倒灌與土壤鹽化而缺乏的地下水資源。

其廢水系統處理模式與一般生活廢水處理場類似，先進入初級處理，以 ACH（氯化銦鋁 Aluminum Chlorohydrate）polymer 將固形物沉澱之後，再經過二級厭氣處理。由於採管線連續式處理流程，廢水通過厭氣處理區域的時間大約是 8 分鐘；再利用以生物膜方式進行生物三級處理，最後測定水質，並經過 UV 照射殺菌之後，才將處理好的生活廢水，以緩慢的速度回灌至約 4000 英尺深地下水層（圖 29）。

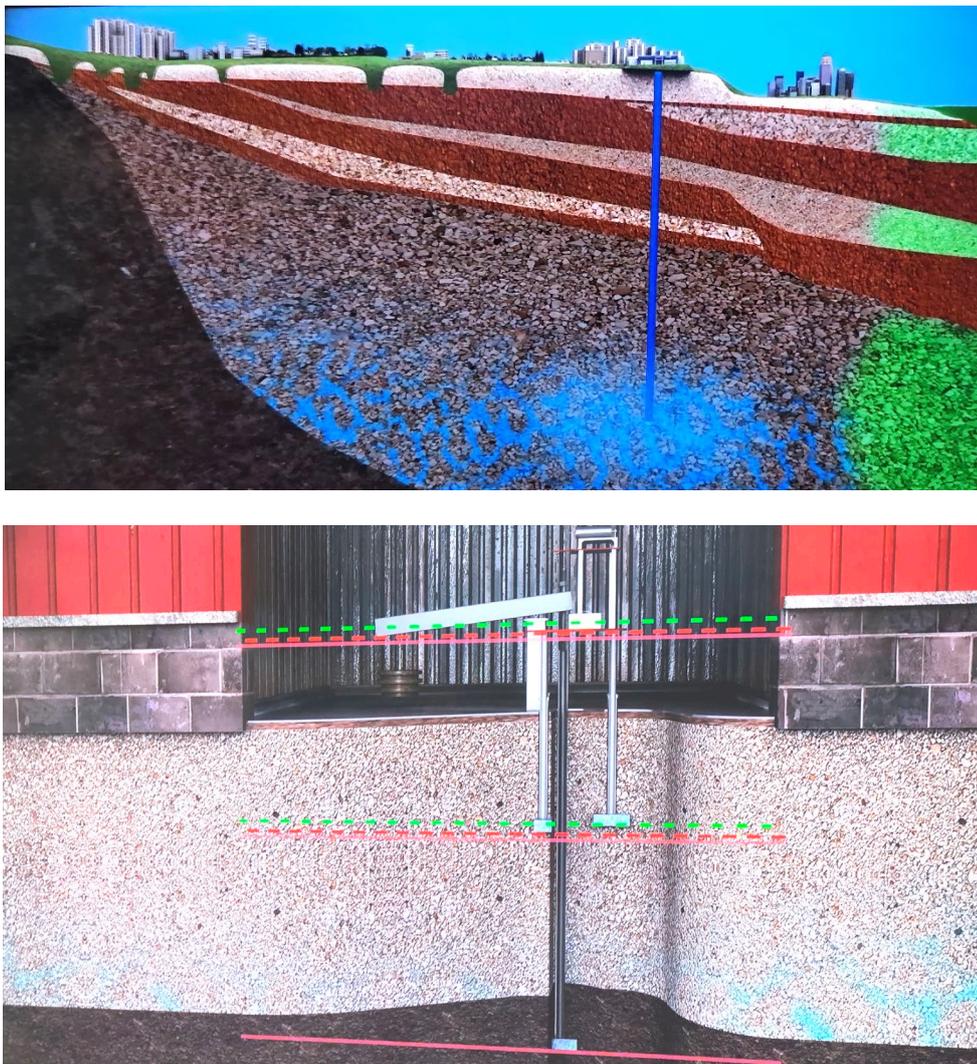


圖 29. SWIFT 研究中心每年監測地層高度，有逐年微幅上升的趨勢

注入後的地下水緩慢擴散，大約 3~7 天擴散約 50 呎，之後大約 50 年才能擴散至 1 英哩。檢測水質項目包括總有機碳、可溶性氮、總菌數與重金屬等，大約至可飲用水等級才可回注入地下水層（圖 30、31）。

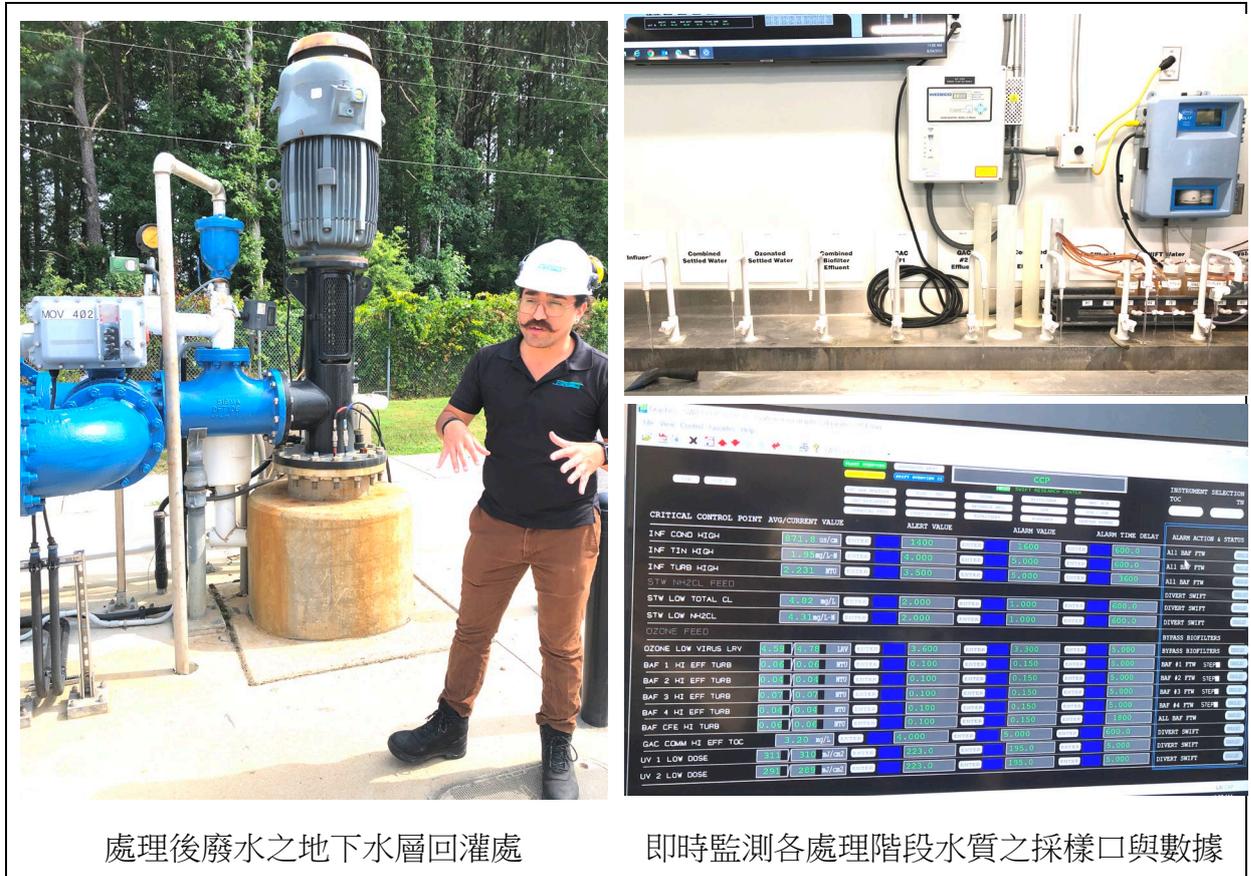


圖 30. SWIFT 研究中心處理後廢水回灌處與採樣口



圖 31. 於 SWIFT 接待人員（右 2）合影留念

參、心得與建議

此次拜訪行程，獲益良多，期能將此次所學之多項技術進行實驗室小規模測試，必進行必要的經濟效益評估，評估適合推動之商業規模，推動至國內產業。心得與建議如下：

1. 開發多元化畜牧糞尿再利用方式

臺灣目前再利用方式包含，厭氣發酵後的糞尿水可作為植物肥分使用、處理至符合放流水標準作為水資源澆灌路樹或場內再利用；糞便則進行堆肥化處理應用於農地。然考量部分地區飼養密度較高，養分過剩已為一環境問題，如載運大量養分含量低的糞尿水或體積大的糞便至距離較遠的農地應用，不僅增加運輸成本，亦增加溫室氣體排放，故開發多元化畜牧糞尿再利用方式實屬必要。

2. 願意為環境永續付出多少

聽到 Dr. Kyoung Ro 使用水熱碳技術進行動物糞便再利用之技術，其成本為直接進行農地施用的 4 倍左右時，詢問他，以畜牧糞尿施灌於農地之牧場，載運多遠距離適用此方法，他表示：「回收處理成本固然重要，然其背後所帶來的環境效益是無法計算的」。一直以來，農民從事畜牧業多僅考量前端動物飼養階段的投入成本及生產利潤，後端廢棄物處理階段，農民的思維多為「只有花錢不會賺錢」，而以消極的態度面對，僅做到符合法規的最低標準，不願再投入過多於後端。因此，研究人員做研究時亦優先考量產業實用性，再考慮要不要做。然而，現今淨零循環的浪潮襲來，應改以考量「願意為環境永續付出多少？」為前提，如果方法可行，後續再考量成本，進行方法上的修改，例如利用在地農業廢棄物，降低處理過程所需化學品的支出，再套用於適合的生產規模。期能以反向思考的模式，取得環境與經濟效益的平衡。

3. 國際交流增廣研究視野

持續提升英文能力，加速知識獲取並降低溝通障礙，此次國際交流除了學習國外技術外，透過汲取國外學者的經驗分享，我們可以省去從頭摸索的時間，更重要的是，透過國際交流增廣研究視野，避免淪為閉門造車。