



沼氣能源與整合型農業之開發及產業化應用

撰文/石家興

前言

二十世紀將近結束時，曾有許多人討論農業的方向在那裡？二十一世紀的農業趨勢是什麼？雖然農業是歷史最悠久的產業，但其發展似乎未跟上社會的腳步。當時，農業經濟學家曾提出四個大趨勢：

第一，商業化 (Commercialization)。農業將從勞力為主的小型農戶轉型為資本與技術為重 (capital and technology intensive) 的大型農業，透過大型農企業的經營，才能有效降低糧食價格，滿足膨脹人口的需要，而小型農業將被大型農企業整合為“一條龍”產業，在歐美稱之為垂直整合 (vertical integration)。以養雞業為例，由飼料、種雞、飼養、屠宰、加工、上市、甚至到快餐，全部由一個公司完成，如此一來可降低成本，達到最高效率。未來的農企業經營者需考慮到成本、利潤以及效率間的平衡，隨著傳統農業邁向商業化路程，政府扮演的保護角色將逐漸淡化，企業在產業影響力增強。同時，家庭農業也將逐步轉型為鄉村風格的休閒農業。

第二，國際化 (Internationalization)。農產品不再是一個國家自己享受，全球市場和國際貿易越來越重要，以色列的橘子行銷全歐洲，在台灣能吃到各國的蘋果，台灣蘭花可能像電子產品一樣暢銷全球。隨著各國加入 WTO、簽訂自由貿易協定 (Free Trade Agreement, FTA) 以及台灣於 2010 年 6 月簽

訂的兩岸經濟合作架構協議 (ECFA)，未來地區性的共同市場 (common market) 將扮演重要角色，達到調和保護的目的，而在市場、價格、技術發展方面，大型跨國農企業將扮演舉足輕重角色。

第三，重視科技 (Science and Technology)，特別是生物科技 (biotechnology) 的發展，已經在醫藥界掀起了革命，在農業界也將大展身手。基因改造 (GMO) 產品雖持續引起社會關注與爭論，但面對世界人口壓力，耕地面積減少，要解決糧食問題，使用基因改造科技將是大勢所趨。科技發展產出的智慧財產權如專利發明等，也逐漸像工業界一樣，被刻意申請保護，使得知識性農業 (knowledge-based agriculture)，日受重視。

第四，環境保護 (Environmental Protection)。因為過去大量的農地開發，造成水土流失；而化學肥料、殺蟲劑及殺草劑的大量施用，也讓環境汙染問題嚴重。另大型養殖場的興起，所產生大量的動物廢料，一旦處理不當便汙染空氣、土壤與水源。新世紀農業面對上世紀留下的問題，必須開發有利環境 (environmentally friendly) 的新技術、新產品和衍生新經營方式。

第五，能源生產 (Energy Production)。二十一世紀開始不到十年，石油價格飆升和地球暖化的問題，造成全世界的緊張和警惕。大量經費投入，為了開發非化石的清潔能源，避免被石油綁架，並可降低二氧化碳排放量。目前考慮最多發展最快的，就



是太陽能、風能、還有生質能。生質能包括了生質酒精 (bioethanol)、生質柴油 (biodiesel) 和生質沼氣 (biogas)。生質燃料的最大好處就是碳平衡，所有動植物體的碳元素皆來自於大氣中的二氧化碳，經光合作用而固定，經呼吸作用或燃燒後，再回歸大氣層循環。農業既有大量的農畜廢料，又能生產能源作物，也只有農業系統才能大規模地生產、倉儲、運輸，來供應生質能源的原料。要開發生質能源，如果沒有農業參與是無法成功的。因此，應該將能源生產列為新世紀農業第五大趨勢。以下本文針對筆者過去在沼氣能源與整合型農業之開發經驗，到最後商品產業化歷程，提供個人淺見與經驗分享，供產業界相關人員參考。

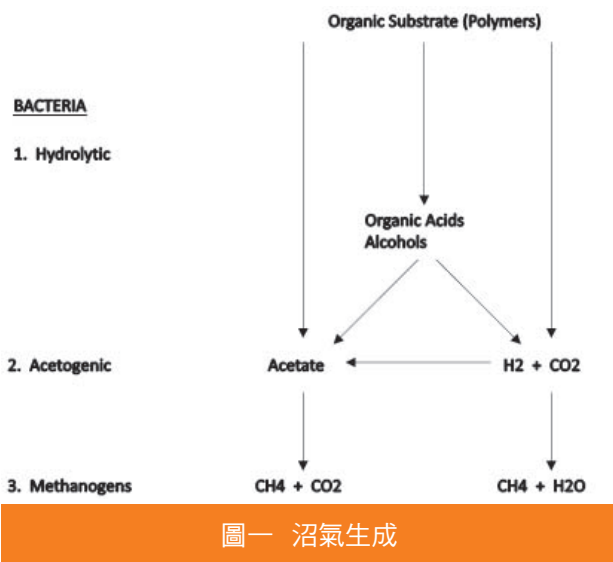
沼氣能源

在無氧環境下，有機廢料經過水解變成小分子，再經過小分子之間的分解轉換，最後由甲烷菌生成甲烷和二氧化碳的混和氣體，俗稱沼氣，因為沼氣含 60-70% 甲烷，是一種可燃燒的氣體能源（圖一）。

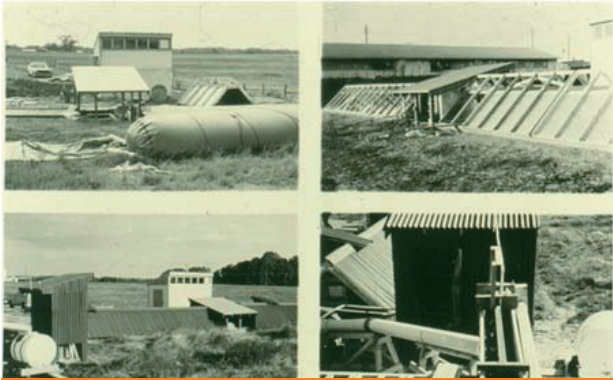
1980 年，我們在實驗室建立了小型沼氣瓶，有系統地進行試驗，以找出由雞糞料生產沼氣的最佳條件。最後發現雞糞料是很好的原料，在高溫 (50-

60°C) 下，出氣率非常高，甚至在瓶內即可看見微細氣泡冒升，其出氣率是中溫 (30-40°C) 的 3-4 倍，常溫 (10-20°C) 的 10-20 倍。換句話說，同量的廢棄物，能用較小的消化槽進行反應而達到高產氣率，因此，在工程上，消化槽的建造成本可降低很多；而且較小的槽體，熱散失率亦較低。若用實驗室的結果來估算，一百萬隻蛋雞的農場，其每日產生約一百噸的廢棄物，則每日可以產生 12,000 度電 (kWh)，一年約可產生 400 萬度的電。最近在中國建造的超大型沼氣廠，位於北京德青源生態園區，係利用三百萬隻蛋雞的廢棄物發電，每年可以產生出 1,400 萬度電，與實驗室數據依照比例量化後相當接近。

台灣早期將紅泥塑料袋設在豬舍旁的坑洞內，將豬糞料沖入袋內，從上方抽出沼氣，另一端流出反應後的廢水，因為流程簡易，風行一時，但該法的缺點是常溫發酵，以致效率不高。台南的畜產試驗所，曾將一紅泥塑料袋裝置在車頂，充氣後一個袋子約可跑 7 公里（圖二）。現在瑞典的公共汽車已使用生質沼氣作燃料，在中國的城市也正建造大型沼氣廠，集中處理全城市的垃圾、人畜糞料、食物廢料及汙水，產生的沼氣純化後，利用地下管道輸送至全城各處加氣站，供應全城汽車燃料，如果實施成功，將成為城市清潔能源。



圖二 台灣早期生質沼氣之生成與應用實例



圖三 1984年北卡州大高溫沼氣槽

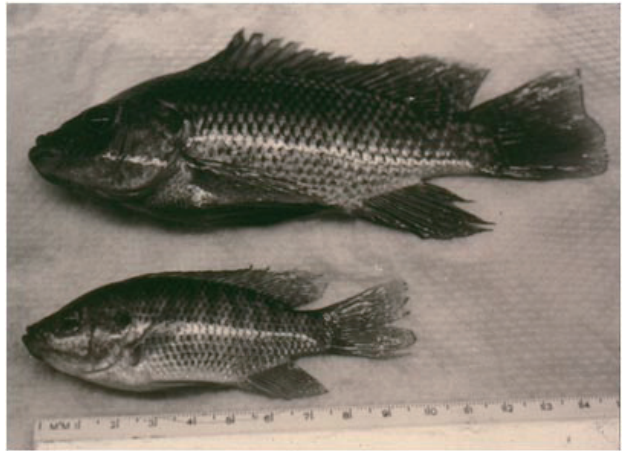
在北卡州大實驗農場上，我們在 1981-1984 年間曾建造一座高溫沼氣槽，又稱高溫厭氧消化器 (thermophilic anaerobic digester, 簡稱 TAnD)，它連接一座雞房，其內飼養 4,000 隻蛋雞，每日 400 公斤雞糞，設計為推塞式，也用紅泥塑膠袋，取其簡易，但採高溫操作 (圖三)，目的在測試實驗室成果擴大的可行性，運作三年後，達到與實驗室相近的結果，証實了高溫沼氣正確可行，對以後更大型的沼氣系統設立帶來信心。

自從農場上設置了較大型的 TAnD，便可進一步研究其他副產品的利用，包括了沼液與沼渣。沼液試用於養魚，將吳郭魚苗放入魚籠，沼氣發酵後所產生的沼液導入魚池，另對照池則不加沼液，由於沼液含豐富的營養成分，提供池中生態系統養分來源，使得池水碧綠，魚苗肥美，相對不含沼液的對照池，無藻無草，魚苗則較細小 (圖四)。另將沼渣乾燥後進行分析，含粗蛋白質 (10%) 及多種維生素，其中維生素 B₁₂ 的含量極高，是因為 B₁₂ 是甲烷菌的產物，其他氮、磷、鉀等成分分別占 3%、6% 及 3%，是優良的肥料元素成分比。經將沼渣加入雞群飼料，成為替代磷源，養殖結果小雞成長正常，證實沼渣不含毒性並富營養。

此外，對於高溫沼氣槽內可能的微生物病原，也經過一系列的測試，包括大腸桿菌 (coliforms)、真菌 (fungi)、原生蟲 (protozoa) 與病毒 (virus) 的測



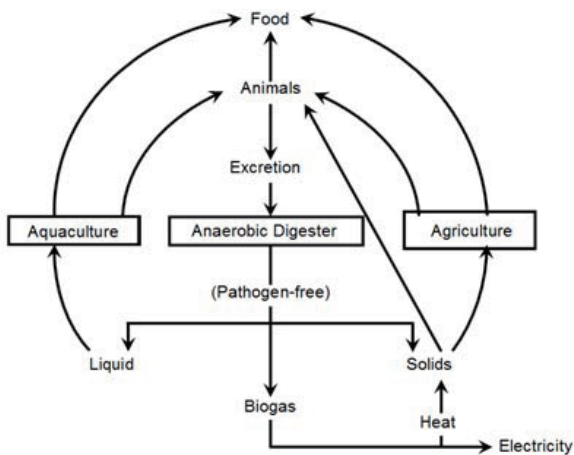
圖四 沼氣發酵副產品-沼液的應用實例



試，發現高溫沼氣槽滅絕所有測試過的病原，這對保護農場衛生，產品安全，工作人員及動物、甚至消費大眾的健康都有莫大的助益。

整合型農業 (Holistic Farming)

天地之間，各類物質分解合成循環不息，是自然界的大循環。在農畜場上，各種產物，包括廢物，如果都能充分循環利用，便可形成整合型農業。前一章節中，在高溫厭氧消化操作之下，因為效率高，環境衛生好，則形成整合的可行性，厭氧消化將廢棄物轉化為固態、液態及氣態三類產物，固體可以做為作物的肥料，液體可以養魚，而氣體便是沼氣能源，可發電並取熱 (圖五)。



圖五 整合型農業Holistic farming



圖七 中國第一座大型高溫沼氣設備

1. 中國廣東整合型農業

1985年，筆者在中國廣東第一次見識了整合型農業，一個農村70戶，養了700頭豬，豬糞尿沖入地下沼氣池進行常溫消化，所得沼氣通過鋼管傳輸至共用的大餐廳及廚房，村民在此用餐並取熱水，沼氣即全村的熱源，部分沼液進池塘養魚，大部分沼液和沼渣作為全山柑橘園的灌溉及施肥。但因為發酵效率低，沼氣池體積甚大，占地面積大若籃球場（圖六）。



圖六 中國廣東整合型農業實例

2. 北京留民營村大型高溫沼氣

1992年，筆者被邀請協助設計建造了中國第一座大型高溫沼氣設備，地點在北京市留民營村，由聯合國開發計劃署（United Nations Development Programme, UNDP）資助，基本設計與美國北卡州大的設備相似，但材料改用鋼筋水泥，糞料每天約5噸來自5萬隻蛋雞，發酵槽僅100 m³，約為一節火車廂長度，日產沼氣300 m³，除硫後供給於200戶村民煮食、熱水、取暖，同時沼液供稻田灌溉施肥。而沼渣乾燥後出售為有機肥，該有機肥價格甚高，建造成本3年內回收，歷經18年，目前仍在使用中（圖七）。



圖八 德青源生態園沼氣設備

3. 北京德青源生態園

北京長城外德青源生態農業擁有一座大型養雞場，飼養蛋雞 300 萬隻，每日產生約 250 噸糞料，2008 年建立了沼氣發電廠，轉化雞糞為電力及熱源，主要設備有 4 座沼氣發酵槽，每座 3000 立方米，另有雙層的球形儲氣設備，與 2 台大型發電機，沼氣發電每年約 1,400 萬千瓦上輸電網，除了養雞場利用外，也是附近鄉鎮民生用電，發電共生熱水，且回收為沼氣發酵加熱。沼渣及沼液則用來灌溉葡萄園、蘋果園及蔬菜大棚，該生態農場是筆者所見最大型的 Holistic Farming (圖八)。

綜合上述案例，可知厭氧消化是一種平台技術 (platform technology)，有多重功能：

1. 生產清潔的沼氣能源，沼氣來自動植物廢料，燃燒取熱或發電，代替化石能源，產生的碳權(carbon credit)有經濟價值，可進入國際碳市場交易。
2. 除臭減廢，防治污染，優化環境。
3. 殺滅病菌或病毒，改善環境衛生，有益公眾健康。
4. 沼渣與沼液保留了氮、磷、鉀元素，並含有機養份，可開發為高價值肥料，也避免二次汙染環境。

為了達到以上綜合功能，除了單項技術改進外，必須多種技術系統整合才能成功，包括 (1) 工程設計改進，達到簡易設施與高效能；(2) 生物技術開發，改良菌種與菌相，突破產氣上限；(3) 肥料工業合作，開發新型有機肥；(4) 水處理技術，有效循環利用沼液。最後，由於沼氣槽富含微生物生態，成為開發全新生物或生化產品的寶庫。以下試舉例說明之，同時，也是由科技新發展，改進農業之實例之一。

角蛋白酶 (Keratinase) 之發現與應用

本研究團隊在農場操作厭氧消化時，發現羽毛在經過沼氣槽處裡後即找不到蹤影，因為羽毛的結構類似毛髮、指甲，90% 是角蛋白質 (keratin)，結構堅密而難以分解，因此猜測槽內可能有細菌能夠分解羽毛角蛋白。花了兩年時間，我們終於成功地

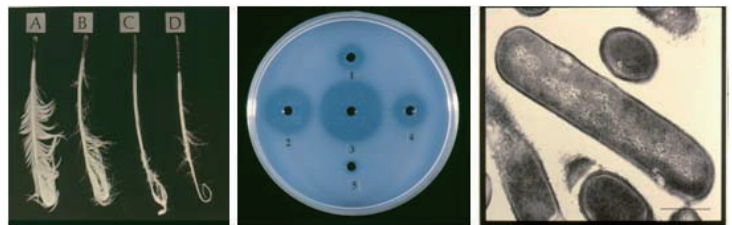
篩選出一株細菌，有能力消化並生長在羽毛上，將之定名為 *Bacillus licheniformis* PWD-1 (圖九)。之後，研究團隊純化出分解酵素，稱為角蛋白酶，同時分離出其基因，定序 DNA。再進一步利用遺傳工程技術，提高酶產量。這一連串的探索與發現，共獲得 7 項國際專利，而世界多處研究室近年也陸續發現了不少新的角蛋白酶。

(一) 角蛋白酶之應用

經由美國北卡生物科技中心的資助，我們研究室裝設了一套 150 公升中型發酵設備，可自行生產角蛋白酶，從數十毫克提升到數百公克，並得以進行相關的應用研究。

第一項應用，是利用酵素來處理羽毛，全世界每年大約可收集羽毛 400-500 萬噸，是家禽業主要的副產品。羽毛在高壓蒸煮之後，乾燥磨碎為羽毛粉，可用做飼料添加物，補充蛋白質，但是消化率不高，營養價值不大，若利用角蛋白酶加工羽毛粉，便可提高消化率，增加營養價值。成為角蛋白酶對於農業生技產業的一個特有用途。

第二項應用，則是意外發現，研究團隊嘗試直接添加角蛋白酶於飼料當中，結果發現提高了小雞在動物室裡的生長效率，後來在農場上進行試驗，得到同樣的效果。肉雞在農場飼養 42 日達上市年齡，利用高蛋白含量及低蛋白質含量的飼料進行添加角蛋白酶的測試，結果在低蛋白質含量的飼料添加角蛋白酶的一組，雞隻可以成長得跟高蛋白飼料組相等，而高蛋白飼料添加酶則可增加更多的體



圖九 具分解羽毛角蛋白的細菌 *Bacillus licheniformis* PWD-1



重(圖十)，對農戶而言，使用角蛋白酶可替代部分飼料蛋白，有助於節省飼料成本，具經濟價值。

經過一連串的試驗，包括在大學農場和產業農場，皆確定角蛋白酶能提高飼料消化率及蛋白質利用率，有助動物成長。目前估計，每1公噸的飼料添加0.5公斤的酵素則可節省10%的蛋白質；以大豆市場價格計算，每噸飼料可節省約20-30元美金，以全球3億噸飼料來估計，每年可節省60-90億美元。

為了將研發成果產業化，筆者與長子石全博士於2000年在美國共同創辦了BioResource International 生物科技公司，將該項技術朝向商業開發，經過10年的努力，終於將當年實驗室的發現，發展成為商業產品，該角蛋白酶目前已工業化大量生產，產品也已進入全球市場，深受使用者歡迎。

結語-經驗與淺見

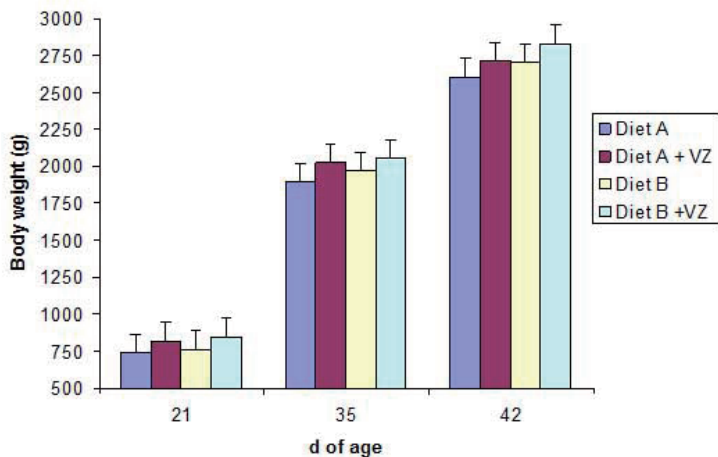
應用和基礎之間，應該是沒有界限的，從實驗室走向農場，到產業開發，從個人的經驗來看，這是一條基礎研究和應用研究互相交流的雙向道(two-way street)。當初，如果自限於基礎或應用研究，至今，這條道路恐怕尚未開通。

誌謝

本文緣起於2010年6月9日筆者在台北中央研究院的演講，感謝中央大學黃雪莉教授，林怡雯，陳新同學代為錄音、打字、整理初稿。

AgBIO

石家興 北卡羅萊納州立大學 榮譽教授
中央研究院 特聘講座教授
國立中央大學 國鼎講座教授
BioResource International 創辦人/董事長



圖十 不同蛋白質含量添加角蛋白酶對雞隻生長影響