

植物工廠的未來性與關鍵技術

方煒

台灣大學生物產業機電工程學系

摘要

永續社會是低碳的社會，也是資源循環使用的社會，更是與自然和諧相處的社會。人類過去因為宗教信仰、意識形態、油糧水等資源的爭奪而打仗，未來該如何因應的探尋告訴我們邁向永續社會才是人類文明該有的走向。在全球人口激增，資源日漸匱乏，可耕地快速減少，城鄉差距拉大，全球暖化風險不斷提高，貧富差距拉大，三農問題不斷浮現的現況下，高效、低風險、節能、減碳、節水、省地、循環、永續的設施/環控農業是該走的一條路，其中的亮點，可以是植物工廠。本文針對植物工廠相關的 "2 低 2 無 1 高"、"3C"、"4 定"、"4 好" 與 "5 多" 提出說明，也針對建立植物工廠的關鍵技術進行盤點與討論。台灣目前的研究多只涉及產品品質提升、生長促進、栽培環境最適化、收穫率提升與病害預防等量產相關範疇，後續在行銷、經營與品項選擇上宜優先發展。

關鍵詞：植物工廠 (Plant Factory)，永續社會 (Sustainable Society)，環控農業 (Controlled Environment Agriculture)，關鍵技術 (Knowhow)

一、前言

當運輸成本因為油價高漲而大幅提高，當肥沃土地受到汙染、良田因休耕而荒廢、沿海農地面臨海平面上升而淹沒、江河湖泊等卻面臨枯竭，當糧食受到油料作物的排擠而造成價位高漲，造成目前全球尚有十億的飢餓人口；凡此種種都在告訴我們資源有限，也告訴了我們分配不均，拯救地球是錯誤的口號，人類需要自救才對。

多蔬少肉最養生，是嗎？素食如果以吃蔬菜為主，我們的蔬菜安全嗎？農藥問題之外，硝酸鹽問題也漸受全球重視，但台灣一直沒有相關法規訂定，與歐盟、日本、澳洲與中國等地相比，我們是相對落後。有沒有兼具低碳足跡、低食物里程、高效、節能、節水、節地、高產，又能確保產品安全、對人體健康有益的蔬菜生產方式呢？當然有的，農業可以是高科技產業，但這需要產業的提升與創新，政府應有計畫的鼓勵業者朝向可以不需靠天吃飯、節水、節能的設施去發展。

二、 食品安全

過去人類消費歷史上的幾次重大食品安全事件，致使當前的消費者在食品的選擇上愈趨安全導向，英國狂牛症的發生造就其國民對食品具有高度的安全需求意識即是一例。再者，農業過去在追求生產效率的生產模式下，大量使用農藥以提升生產效率，農產品農藥殘留問題日益威脅消費者健康，美國曾發佈統計資料顯示在癌症案例中，有 20 % 是因致癌性農藥所引起。美國食品藥物管理局日前公布的一份資料提到致病的十種農產品中，排第一名的竟然是鮮食的葉菜類，致病原因就在於生菌數高。排第二名的是雞蛋，主因是蛋殼表面容易殘存沙門氏桿菌。可見得在食品安全健康上，致病的病原菌是個大問題。

在消費者對農產品食用安全的考量下，安全農業的發展日益被重視，也造就了有機農業的發展。但有機農業目前最大的行銷障礙為消費者信任不足，消費者多數不認識認證機構的標章，且市面上存有未經認證的有機農產品。再者，如果有機食品為進口貨，雖然健康，但碳足跡與食品里程數高，顯然不夠環保。

全球人口目前為 68 億，未來四十年有可能增加到 92 億，以目前仍有 10 億的飢餓人口來估算，40 年內需要提升將近 58 % 的糧食產能頗具挑戰。以現有耕地已經使用了 80 %，加上全球暖化、海平面上升、氣候異常、土地沙漠化、農地轉型工業或都市用地、油價高漲、能源匱乏等不利因素下，如何提高單位面積產能應是現階段農業的核心價值之一。有機產品標榜不用化肥、不施農藥，雖說比較安全，但是單位土地面積的產量銳減。二次大戰後全球因飢荒而死亡的人數大幅減少，要歸功於農藥與肥料的發明（綠色革命）。有機農業要推廣到甚麼程度，是否需要兼顧糧食安全供應量的考量，值得進一步思考。

消費者要的蔬菜是無農藥殘留/無重金屬汙染/低生菌數/低硝酸鹽/高營養價值，這是田間或簡易設施內生產的蔬菜絕對難以達到的品質保證。植物工廠除在生產技術上能達到高效與節能之環保價值外，因生產過程中乃透過非農藥防治技術進行作物的生長管理，故其作物具「潔淨」之特質，可在免洗的情況下即可進行鮮食或烹煮，在現代社會忙碌又重視食品安全的環境下，極具「安全」與「便利性」之市場價值。

三、 植物工廠

3.1 簡介

植物工廠是國際上公認的設施農業最高級發展階段，是一種技術高度密集、不受或很少受自然條件制約的全新生產方式。植物工廠是指環境可控制且可依照計畫允許全年無休的穩態量產植物的設施，包括了”太陽光與人工光源併用型”與”完全人工光源型”兩大類。

植物工廠在全球已有多年的研究成果，自然光型植物工廠的運作始於 1960 年代初期奧地利 Rusuna 公司的立體式植物工廠，荷蘭的設施園藝大型化、自動化、資訊化則是自 1970 年代至今穩定發展，至 1990 年代之後，與「自然光型植物工廠」名稱相符的植物工廠生產系統開始大規模地運作。自然光型植物工廠的進階即為具備人工光源的精密溫室，由於還須利用到陽光，限制了植物必須單層栽培，也受限於季節性光量變化，產期與品質都比較難掌握，且夏天的降溫與冬天的加溫成本都不少。

人工光源型植物工廠始於 1957 年丹麥的 Kristensen 農場，以量產水芹 (cress，十字花科) 的嫩芽為主，在美國，1970 年代初期的通用電力 General Electric 公司，1980 年代的 General Foods 公司、General Mills 公司皆展開人工光源型植物工廠的運作，但是，至 1990 年代前半為止，三家公司皆因為收支不平衡而停止運作。其瓶頸在包括降溫與照明所需的能源成本居高不下。過去使用高壓鈉燈做為室內植物光源，不僅照明成本高，產生的熱能更使得空調系統的降溫負荷大增，產能增加也有限。拜光電科技發展神速之賜，目前 LED 的光量、發光效率與單價都有長足的進步，雖說單價仍高但已可進行葉菜類的栽培。更有利的是使用人工光源之後允許採立體化栽培，產能可大幅提升，可做到真正的穩態量產。

3.2 植物工廠是台灣該發展的新 3C 產業

植物工廠是新 3C 產業，此 3C 分別為 Clean, Clear 與 Cool。除了字面上的意義之外，都各有隱喻。Clean 除了代表產品潔淨，也指符合京都議定書所訂 Clean Development Mechanism (CDM, 清潔發展機制) 規範，包括節能、低碳等均屬之；Clear 除了指產程透明與產期可規畫之外，也指符合農產品可追蹤化，可建立產銷履歷；Cool 則有更多元的意義，可代表栽培環境都有空調所以很涼或指工作輕鬆、環境舒適，也代表所有產品都具備產地的認證 (Certification Of Origin Labeling, COOL)，生產者自負產品的所有責任。

台灣發展植物工廠有非常好的優勢，首先是工業優勢，相關設備包括空調、無塵室、隔熱資材、節能燈具、控制系統、機電設備等有不少廠商，經過整合，系統造價絕對可以比日製系統便宜一半以上。加上台灣高學歷人才豐富，學界也已建立相關的關鍵設備與技術。再者，目前各縣市也有不少廢棄蚊子館或是各大企業停用的廠房或倉庫，這些硬體設施都可以改來建置植物工廠。政府提供一些誘因，相信很多企業願意加入這一新產業。

植物工廠採用了製造業生產的光源、空調、感測、控制、節電、隔熱及資訊等相關技術。從這一意義上來說，植物工廠具有“工業性”，而栽培植物本身又是一種生命現象，需要採用農業和農學相關的栽培技術及經驗，所以又具有“農業性”。有人認為植物工廠是介於工業和農業之間的“中間產業”，事實上，不僅二者缺一不可，而且可說是一種超越了工農業

的新產業。植物工廠還可能會涉及環保產業、服務業、知識產業及包括醫療、保健及福利在內的健康產業等，成為可稱作環保健康產業的新產業。

3.3 植物工廠可以確保產品的 2 低 2 無 1 高與 4 定

完全密閉型植物工廠可以定期、定量、定品質地量產無農藥、無重金屬、低生菌數、低硝酸鹽、高營養價值 (2 低 2 無 1 高) 的蔬菜、香料及草藥。售價上也可以全年固定的單一價格。簡言之，產品的四定為定期、定量、定質與定價。此處的定期可以依銷售計畫做彈性設計，可以是每天、每兩天或是每週收穫。簡言之，當產品的生產週期為 30 天，使用 30 套栽培系統，每天採收一套系統，即可做到每天收穫；每兩天採收一套系統的話，只需 15 套栽培系統。當產品的生產週期為 30 天，也代表一年可以收穫 12 次。產品可以做到此四定，產能規劃與後續的行銷規劃都相對容易進行了。

3.4 企業推動植物工廠的 4 好

企業推動植物工廠可帶來至少四個好處：

首先是賞心悅目，企業內部空曠空間、廢棄倉庫、停用的半導體廠、無塵室等可以用來建立植物工廠，可使組織中的員工於每個月有數次在安全愉悅的環境下進行蔬菜或是小型觀賞盆栽，譬如：放在桌上觀賞用的迷你玫瑰、迷你蝴蝶蘭、迷你仙克萊、觀賞用番茄、觀賞用辣椒等的生產。

其次是讓員工紓解工作壓力，不僅可以減少公司內部員工福利社買菜/佈置支出，更可增加美觀；還可以在收穫作物甚至是增加收入的同時享受生產與接觸到生物的樂趣，能體會此樂趣的人若增多，相信能減輕精神壓力，平日就可發揮植物的療效，不要等發生了心理疾病才想到園藝治療。

其三可以確保健康，自己種菜有沒有噴農藥自己知道，員工福利社使用自己種的蔬菜可確保安全；辦公室的空氣與植物工廠的空氣還可以互通，利用植物來淨化空氣。

其四，植物成長的乾物重，都等同於累積了二氧化碳，一旦碳足跡成為品牌價值，當低碳成為品牌的一部份，當碳稅成了可交易的金融商品，更顯植物工廠的優異性。由植物工廠的產能推算減碳量，在碳交易上也可有額外收入。大公司尤其是製造業在污染地球的同時還須考量地球責任，那麼推動植物工廠也可收減碳之效，推動在地化的植物工廠其實可以拯救工業。

3.5 植物工廠的五多

植物工廠採多層式立體化栽培，所以需要蓋廠的用地面積不大，日本最大的植物工廠是為年產 300 萬株葉菜（約 300 噸）的童話天使(Fairy Angel)公司福井廠，其廠房也不過 2850 m²。要達到類似產能的溫室，至少要數十倍以上的面積。植物工廠可建築在不平坦的耕地、大小都市中的空地/畸零地、大型建築物的屋頂、室內、地下室、海埔新生地或荒地上，廢耕農地，混合住宅地，辦公大樓內或中、小鄉村中；將可為希望從事半日輕勞動作業的人帶來工作機會及生存價值並增加區域經濟收入。

由於植物工廠可提供安全愉快的輕勞動工作，老農不用退休，每天從事半天輕勞動，不僅可當做運動健身也可以有收入，生活可以比現在仰賴補貼更有尊嚴。除了老年人之外，也可提供身障者、家庭主婦或失業者新的就業機會，可增加缺乏平坦耕地之地區及都市中新的就業機會，增加農家及相關人員的全年就業機會，也可讓從事不同領域工作的居民於日常生活中參觀、體驗植物工廠，或於工廠內實際勞動，讓居民更加了解農業，也有助於食物教育及環境教育。

植物工廠的“五多”指的是允許在多樣的地區中以多樣的形式由多樣的人以多層的方式進行多樣植物的生產，可振興/創造以農業為基礎的全體環境健康產業。由植物工廠生產出的蔬菜及花卉提供給鄰近的都市社區，只需短程運輸，食品里程數短。減少輸送時間及包裝就是降低成本。除了在地生產、在地消費之外，也可實現產地直銷，做到生產者與消費者雙贏。目前有機風氣盛行，但是台灣的大多數有機產品來自海外，或空運或海運，其碳足跡不少，顯然講究健康卻不管地球。植物工廠的產品可以做到又健康又環保。

四、 植物工廠的關鍵技術

傳統的作物栽培仰賴陽光提供光合作用之所需，日光固然免費，但也限制了植物必須單層栽培，再加上田間、網室或簡易設施內完全無環控能力，整年的產能低；採用燈管或 LED 為人工光源則立體化栽培為可行。早期人工光源型植物工廠的發展主要針對隔熱材、自動化設備、光源種類與效率、空調設備效能等。

透過燈具的開發或是給光方式的調整，在不減少光量與效率的前提下能夠降低燈具的表面溫度，就能允許光源與植物盡量接近。由於光量與距離平方成反比，燈具與植物的距離縮短了，燈具投資與電費都可以大幅降低。太陽能、風力等再生能源之利用，供電提供給 LED 或其他高效能燈具免費的電能當然也是關鍵重點，但是這部分有其他的產業在支撐，就植物工廠的研究而言，就是工程上的選用與整合，只能期待。

在密閉建築的栽培系統可完全不需使用殺蟲或殺菌的農藥，但以類似無菌室的方式栽培作物，其硬體成本頗高，透過空氣清淨與水體滅菌技術的建立，可以不需在類似無菌室的環境中量產蔬菜，則硬體建設成本可以大幅降低。針對栽培環境的控制技術（包括光環境溫濕度控制，特別是二氧化碳補充技術）與養液調整技術也是研發的重點。透過高效能冷熱雙效熱泵的研發，允許對室內環境進行恆溫恆濕的調控且設備成本可以比一般室內空調還低。低硝酸鹽蔬菜的養液調控技術是另一個重點。植物工廠對於肥料供應的控制亦可做到精緻細微，可大幅降低致癌的硝酸鹽的含量。在植物工廠量產的產品與其他地區的產品自然能有區隔，對養生盛行的都會區消費者可有高度的吸引力。

在立體床架的設計上，整合水體循環、打氣、滅菌技術與養液調整技術，作物容器移動技術、整列技術、播種與收穫省力化技術等都有進一步研究的空間。另外搭配全廠的影像與環境因子的監控可建立每批作物的生產履歷系統，消費者更可隨時透過網路觀看栽培廠的狀況，提高公信力。

以上種種關鍵技術的建立使得完全人工光源型植物工廠的實用化成為可能；再加上諸如機械化，自動化，網路化、電腦化、智慧化、雲端化等所帶來之分散協調統合等的技術發展，使得完全人工光源型植物工廠更具永續性，可以是任何型式，可以在任何地區，可以做到無所不在的 U 化 (Ubiquitous)。

五、 結論

植物工廠被認為是二十一世紀解決人口、資源、環境問題的重要途徑，也是未來航太工程、月球和其他星球探索過程中實現食物自給的重要手段。現階段農業的核心價值除了追求高效能之外，基於縮短食品里程數，在地生產、在地消費理念應是另一個核心價值。

做為全球的新 3C 產業，具備 4 定 4 好 5 多的特質，植物工廠值得政府跨部會整合資源來大力推動。目前植物工廠的關鍵技術多針對產品品質提升、生長促進、栽培環境最適化、收穫率提升、病害預防等量產相關範疇，後續在行銷、經營與品項選擇上宜優先發展。

台灣有不錯的工業與商業優勢來建立相關產業，產業建立後更可以以植物工廠整廠輸出模式在國際上推動，協助紓解全球化的包括三農/環境/水資源/能源/糧食等問題，行銷的內容可以是相關產品/設備/廠房/技術等。植物工廠的新型生產方式正成為改變日本傳統農業生產方式的新亮點，它不但有望以更少的資源產出更多的蔬菜和糧食。在農村年輕人力流失的現況，植物工廠還可為提高農村就業率做貢獻，為縮小城鄉差距作貢獻。更終極目標是促進高效糧食增產目標之實現，還農地於山林或海洋，為人類未來做出貢獻。