

荷蘭與日本植物工場最新發展

蔡致榮¹、邱相文²

¹ 行政院農業委員會農業試驗所 研究員兼主任秘書

² 行政院農業委員會農業試驗所農業工程組 助理研究員

摘要

荷蘭園藝作物發展成功，以蔬菜、水果、花卉植物、球根和苗木等項目為主，其中蔬菜和鮮花出口量為世界第一，鮮花產量佔全球市場的五成以上。在農產貿易方面，荷蘭為全球第二大農產品出口國，僅次於美國，園藝栽培技術幾乎全數採取設施栽培，且自動化程度高，相關栽培經驗與重點技術值得國內產業生產改進參考。荷蘭最新發展的園藝作物永續節能溫室生產技術與應用，包括溫室內部微氣候環境量測、遠距無線傳輸、控制與資料整合運算管理系統；蔬花產業環保節能設施策略與荷蘭溫室設備高效環保節能系統；LED等人工光源之光照技術、光質、光量以及遠端自動監測控制系統整合等相關資材整合。另歐盟各國對於綠色能源利用的研究與推廣工作成效卓著，可參考引進先進技術與理念，應用於病蟲害發生管理，以減少農藥使用量，降低化學藥劑殘留風險，進而達到周年生產高品質、安全的農產品。

植物工場為一種在氣密性較高的栽培設施環境下，實現對植物生長環境與營養需求提供最佳化條件精準調控的作物栽培體系，並利用高科技化的栽培輔助設施結構的投入應用，建構一種可以達成高產能、安全性與無季節性限制的植物生產體系。日本在植物工場推動與發展已經邁入第三波的發展熱潮，目前的技術發展經驗與推展成效，已經位居領先全世界各農業科技先進國家之地位，植物工場的產業技術也已經實際被日本民間與農企業界所廣泛應用，進行植物工場商業化的生產運轉與相關產品的販售。

關鍵詞：植物工場、設施栽培、節能溫室、周年生產

1. 緒論

人類工業化蓬勃發展，溫室氣體（GHG）大量排放，造成全球暖化與氣溫逐年攀升，使得不尋常的極端氣候發生頻率增加，這種氣候變遷的現象，對於農業生產勢必造成嚴峻的考驗，所以包括台灣地區在內，採行設施溫網室栽培的比例與日俱增，其中又以園藝作物之各類蔬菜、花卉及種苗等為最。荷蘭總面積（約 41,000 平方公里）較台灣稍大，無高山峻嶺，人口（約 1,600 多萬人）較台灣少約 1/3，人口密度約每平方公里 400 人，屬於歐洲人口密度較高的國家。荷蘭土地資源並不豐富，農業和非農業用地分別佔 70%和

30%，然而泰半人口從事與農業相關工作，且園藝作物實施溫室栽培者逾萬公頃，生產額占農業總產值（197 億歐元）的 39%強，自然成就其為全球之農業大國。荷蘭園藝作物發展成功，以蔬菜、水果、花卉植物、球根和苗木等項目為主，其中蔬菜和鮮花出口量為世界第一，鮮花產量佔全球市場的五成以上。在農產貿易方面，荷蘭為全球第二大農產品出口國，僅次於美國，園藝栽培技術幾乎全數採取設施栽培，且自動化程度高，相關栽培經驗與重點技術值得國內產業生產改進參考。

日本在植物工廠產業的發展具有世界前

端水準，建立植物工廠化的生產技術，是達到高產量與產值，提升農業競爭能力的重要方法；此外，糧食危機也可以透過植物工場立體化栽培，倍增產量來因應。由於植物工廠化生產，可完全控制生產環境，運用在高價值的作物生產上，可強化農業競爭力，並提升農業產值；在設計上結合養液栽培零排放和能源利用之規範，係友善環境的生產體系。同時發展並推動植物工廠化生產，不僅可創造農業之新營運模式，為工業創造新產業平台，也可為我國社會創造新商業模式與就業機會，因此，植物工廠的發展與推動將可達成環境、社會與經濟三贏的農業生產目標。

本文針對荷蘭的永續節能溫室生產技術與應用及日本植物工廠發展現況，探討荷蘭與日本植物工場最新發展，期望相關技術的整理呈現有利未來各類管理技術與高效、節能設備得以在國內整合運用，以降低農作物生產成本，並使用潔淨能源以符合環保需求，進而提升台灣蔬菜、花卉等園藝作物之永續經營與國際競爭能力。

2. 荷蘭的永續節能溫室生產技術與應用

2.1 Zonneterp 溫室村概念

Zonneterp 溫室村包括生態住宅區作為能量產製溫室(圖 1)，是符合生態永續性、環境友善性與經濟可行性之解決方案。其概念呈現具有分散式水與廢水處理設施，並以溫室產生熱能提供社區。此設計係基於在夏天從太陽輻射捕獲過剩熱，熱能被儲存在地下自然水池(地下儲水層)中，並在夜裡或冬天使用以暖和溫室。能量平衡顯示仍有足夠能量剩下可用以加熱大量之房子(據估算 2 公頃溫室可以加熱達 200 戶房子)。另外，溫室可提供自來水、處理廢水並產製電力，整個溫室組合在能源與水方面係屬自足，並循環再利用營養與碳。此概念仍非常先進，雖有示範計畫目前並無實際成果，其進一步發展仍值得持續觀察。

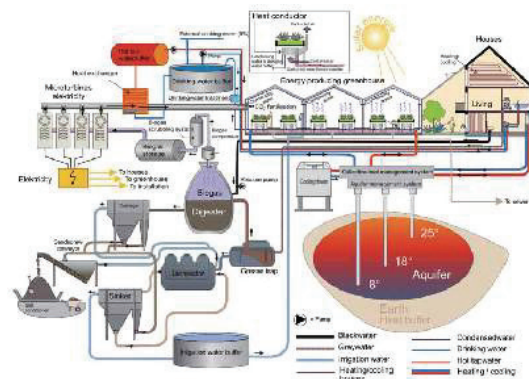


圖 1.溫室村之技術佈局(Andel et al., 2007)

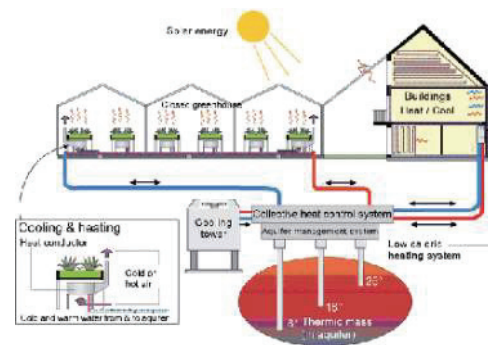


圖 2.溫室與住房區塊之微氣候控制系統 (Andel et al., 2007)

圖 2 顯示能量產製溫室微氣候控制所用熱能(並非電)系統。此概念為夏天吸收過剩熱能，且將其以溫水形式貯存在地下儲水層中，然後具特殊專利權的熱交換器可將溫室氣溫保持在 30°C 下，並把溫度 11°C 的地下水加溫到 25-27°C。此熱交換器移除溫室中過剩熱能(大約 25°C)，而且以 23 至 24°C 的水加熱周圍居住房子，這種同時完成移除過剩熱能與低溫加熱的技術，便是倚靠細線熱交換器(Fine Wired Heat Exchangers, FiWiHEX)。細線熱交換器特別適合小溫差下熱量的有效交換，由於與強制空氣循環結合，其冷卻與加熱空氣的效果比傳統板狀熱交換器有效達 22 倍(COP 值可達 60)，能讓 23 至 24°C 的水加熱所居住的房子。

圖 3 為溫室中實際使用編織式細線熱交換器以移除過剩熱能的情形與其間流體熱交換示意圖，其在每 40m² 溫室地板面積一個細線熱交換器的密度下安裝於番茄植行間，最

大冷卻功率為 25kW，而從植栽葉冠正上方經由透明塑膠管煙囪吸入暖空氣，並於地板上與植物生長所在之介質槽間以水平方向吹出和暖之空氣流(大約 1 m/s)。使用 23 至 24°C 的地下儲水層將溫室村居住房子加熱，成為最低能量需求的溫室加熱房子 (greenhouse-heated houses)，主要透過輻射加熱 (radiation heating) 並輔以細線空氣加熱，藉由捲繞式空氣/空氣熱交換器結合呼吸窗 (breathing windows) 而達成(如圖 4 所示)。

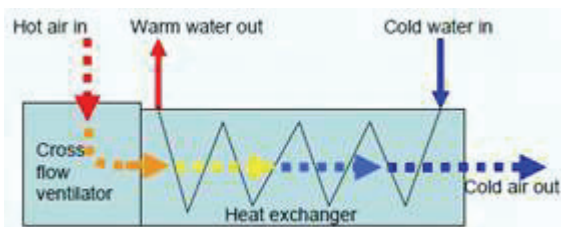


圖 3.溫室中實際使用編織式細線熱交換器以移除過剩熱之情形(上)與其間流體熱交換示意圖(下)(Nederhoff, 2006)

這項技術不僅解決超密閉防透風房子必須通風(耗費大約 35%至 45%之能量)之問題，而且較新分散式 CO₂ 控制型立窗通風可讓空氣從住居內部至外界極低溫狀況下獲得 95% 的能量。

適於熱貯存之地下儲水層由成層的隔離砂分隔(互層之砂質含水層)，而隔離砂可維持其中儲水溫度，大多數的荷蘭地區均有這類砂質地下儲水層。居住用的房子必須裝設由

地板、牆壁與天花板之管線所組成的加熱與冷卻系統，溫室村終年提供空調，並根據需求傳遞熱能與進行冷卻。荷蘭法律規定地下儲水層整年能量平衡須保持中性，而且溫度不能超過 25°C 以避免土壤加熱或冷卻過慢，同時冷卻塔也得加到設計中以保持平衡。

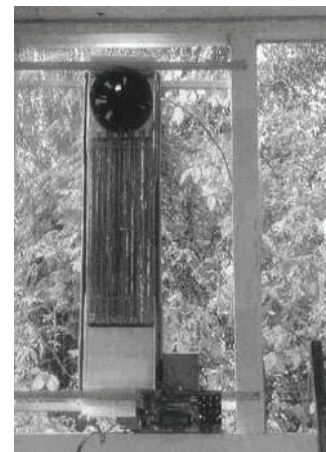
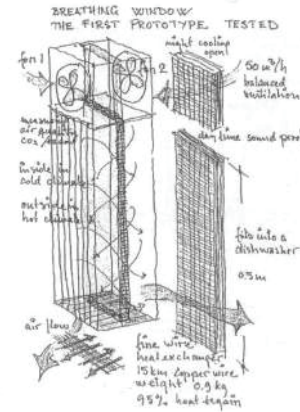


圖 4. 捲繞式空氣/空氣熱交換器之最先概念(上)與置於建築物正面之呼吸窗雛型(下) (Kristinsson, 2006a)

2.2 荷蘭溫室之環控與監測系統

荷蘭園藝目前的高優先議題是經濟可行性、生產效率、能源成本、勞力成本與可得性，以及社會的較高需求與永續性。而 2011 年的研究主要集中在永續與節能溫室、水與排放、先進作物與生產系統、作物與產品品質的感測器技術及永續性作物防治，而且 2010 至 2011 期間 WUR Greenhouse Horticulture 也以其所發展模式化整合再設計達成“適應性溫室(adaptive greenhouse)”

的技術，與土耳其、阿布達比、馬來西亞及挪威等國合作研究。

WUR 溫室園藝創新及展示中心試驗溫室(圖 5)、環境控制(圖 6)、電腦區域(圖 7)與監測(圖 8 與圖 9)的一般公共設施，在這些公共設施支援下，各試驗溫室隔間可依需求個別設定，可謂相當完善。



圖 5. WUR 創新及展示中心試驗溫室



圖 6. 試驗溫室的环境控制裝置



圖 7. WUR 創新及展示中心試驗溫室雙螢幕控制電腦

2.3 節能溫室設計概念與應用狀況

荷蘭設施園藝發展以不使用石化能源為發展目標，進而將溫室視為能量來源發展節能溫室，並設定以至 2020 年 CO₂ 排放應較 1990 年減少 48%，亦即減排 3.3 Mton；每年應提高能源使用效率 2%；設施生產使用永續能源應達 20%及應具備經濟可行性設施發展概念等目標而努力。一項針對 2000 年與 2009 年能源使用分析顯示：天然氣使用量由 $3.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增加至 $4.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ；CO₂ 排放量由 6.5 Mton 減少至 5.1 Mton；淨發電量由 $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增加至 $11.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ；永續能源使用率由 0.1%增加至 1.3%；每單位產量能源使用率由 82%降低至 47%，在在顯示荷蘭溫室產學各界在節能減碳發展的重視及研究成果。在 2005 年一項節能溫室設計競賽“Design an energy-neutral greenhouse”中有三型設計獲勝，並依其設計概念建置示範溫室於 WUR 創新及展示中心供進行相關栽培試驗，此三型溫室分別為：



圖 8. 養液供應控制系統



圖 9. 各區溫室的養液調配儲存桶

1. Sunergy Greenhouse

顧名思義 Sunergy Greenhouse 設計重點在於最大太陽光量的應用及結合最佳技術應用於園藝生產上，主要設計概念在於陽光利用率愈高就愈能節能。為了在相對高溫時能夠收穫太陽能源，它在高太陽輻射的時期被關閉，但在陰天與夜晚期間讓外界較乾空氣進來以供除濕目的。此型溫室(圖 10)被覆材料使用抗反射玻璃，溫室高 7 公尺並使用輕量結構且無通風氣窗，微氣候控制使用熱水經軌道式鐵管加溫(圖 11)，降溫則使用冷空氣配合風扇(top cooler)進行熱交換，可降溫至 20°C。設置雙層節能網降低熱損失，並引入外界乾空氣除濕，冬季加溫熱源則使用於夏季儲存於地下水體的熱源。高架的冷卻單元(overhead cooling units，每 100 m² 一個)作動時，以每平方公尺溫室每小時 40m³ 進行循環。空氣流不能被改變，因此冷卻的力量係以冷卻水流(溫度被維持在 11°C)而被控制。空氣處理單元(air treatment unit)以經由在植槽下面的空氣導管以每平方公尺每小時 5 至 15 m³ 的可控制流率吹送空氣進入溫室。空氣可被從外面與溫室內部以一可控制比率而獲得。當溫室變得太潮濕時，外界空氣被導入。當空氣取自內部時，空氣處理單元可被用以改進均勻度。

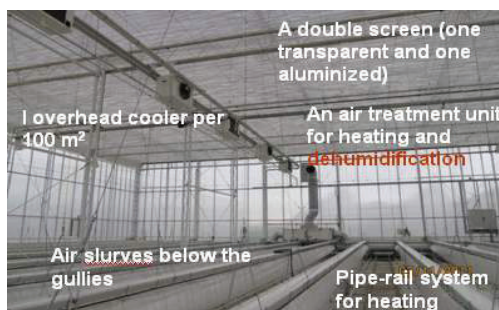


圖 10. Sunergy 節能溫室的配備



圖 11.軌道式加溫管路

Sunergy Greenhouse 總體性能如下：1. 當適度的能源消耗與 CO₂ 投入被考量時，產量黃瓜達 30g/MJ 外界輻射，而番茄達 20g/MJ 外界輻射，兩者都是高的。2. 由於熱力網的密集使用與高濕度的接受，此溫室的耗熱量只在每年每平方公尺 32 m³ 左右，其大約比荷蘭一般慣例低 25%。3. 由於在晴朗與溫暖日子的期間溫室保持關閉的事實，內部 CO₂ 濃度可在只有 100 kg/(ha·h) 的供應率下被維持在 900 與 1000 ppm 之間，這大約是荷蘭蔬菜溫室所用平均供應率的 40%。4. 一年當中，此溫室已經儲存每年每平方公尺 500 MJ 的剩餘熱。此意即太陽能源溫室可提供太陽熱能給使用熱幫供加热的非密閉溫室。根據此第一次測量時期的結果，為提供長期熱中立的季節性儲存系統，密閉與非密閉溫室間的面積比率大約是 1 比 1。因此，Sunergy Greenhouse 節能溫室為可能商品化推廣應用的設計型式，適合果菜類作物栽培，特別是應用於胡瓜栽培。

2. Sun Wind Greenhouse (Zon Wind Kas)

此型節能溫室(圖 12)使用創新的百葉板設計吸收太陽熱幅射用以加熱熱水，加熱溫度可達 65°C，並將熱水儲存於溫室下的暫存水槽以備冬季加溫使用，在南向的溫室屋頂雙層玻璃間設計可調整式太陽能收集百葉板(圖 13)裝置，當溫室需要加溫時，使用暫存水槽內熱水經加溫系統加溫。在實際應用上，Sun Wind Greenhouse 也可使用風車發電提供溫室所需電力。



圖 12.Sun Wind 節能溫室原理



圖 13.溫室屋頂百葉板太陽能加熱管路

3. Flow Deck Greenhouse

此型節能溫室屋頂使用雙層被覆材，其間設計有水流，除提供溫室更好的絕熱效果外，水流並可吸收及收集熱源，並使溫室內溫度保持低溫，通常冷水溫度約 9°C 、加熱回收之熱水溫度約 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，收集的熱源以熱水型態儲存於暫存水槽以備冬天使用。此型溫室已實際應用於傳統的 Venlo 溫室，設計有通風氣窗，微氣候控制使用 ClimecoVent 系統，除濕作業可達到零熱損失，惟有漏水不易修護之致命特性。

4. Venlow Energy Greenhouse

此型節能溫室為 WUR 創新及展示中心示範最低通風的溫室(圖 14)，在 2010 年 8 月開始使用，其屋頂使用雙層玻璃，主要節能設計在於較好的絕熱功能及較多的太陽光吸收應用，屋頂玻璃厚 3 mm，尺寸為 $3.5 \times 1.6\text{m}$ ，因此需有較強的結構設計。為以最低之可能通風移除過剩太陽熱，當空氣濕度下降至某特定門檻時，霧化冷卻被立即啟動，而裝設於溫室牆壁的熱再獲得平衡通風系統

(a balance ventilation system for heat regain)，會於溫室除濕時由潮溼空氣回收熱量，並被加熱至溫室內溫度之外界乾空氣進行均勻分布之通風。在實際應用發現，番茄植株生長良好並可提早一週採收，雖產量與傳統溫室相當，但能源使用相對較少，可節省約 43% 之能源；應用於胡瓜栽培方面，可節省 62% 的能源，平均產量約為 21 kg/m^2 。較好的絕熱功能使溫室氣溫上昇得較快，降低果實結露的機率，同時可減少加溫管路的設計。



圖 14. VenLowEnergy 節能溫室

5. Daylight Greenhouse

此型溫室屋頂使用聚光板(圖 15 至圖 17)，將太陽光聚焦於收集器用於發電、儲熱及控制光量，散射光源則用於植物生長。聚光板使用光照感測器控制，當日照強度大時聚焦太陽光用於發電或儲熱，日照強度低時則不聚光而讓陽光直接進入溫室內，藉此原理用以調節控制進入溫室之光量。據指出 Daylight Greenhouse 聚光設計發電量約為 $16 \text{ kWh/m}^2/\text{year}$ ，加熱熱源約為 $4,000 \text{ MJ/m}^2/\text{year}$ ，惟因建造成本過高，目前僅供研究試驗用，並未商品化推廣。



圖 15. Daylight 節能溫室外觀

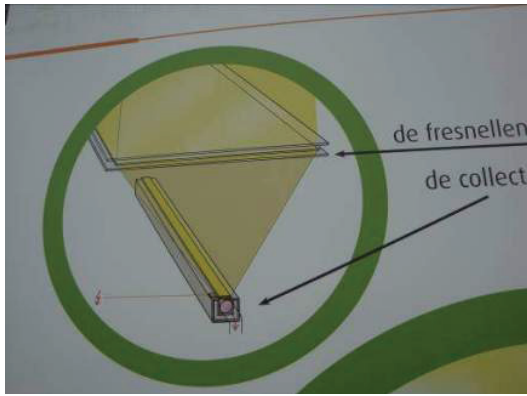


圖 16. Daylight 節能溫室設計原理



圖 17. Daylight 節能溫室聚光板屋頂結構

3. 日本植物工場發展現況

3.1 千葉大學植物工場佈局

千葉大學目前為日本學術界在植物工場研究發展的代表典範，除了技術與成本效益已經達到商業化生產推廣之等級，而且與日本約 60 幾家企業公司進行植物工廠相關技術的產學合作。該研究中心除進行相關技術的開發與系統功能的驗證之外，同時也推廣植物工場之技術發展經驗供日本農民進行參訪及教育訓練。目前該校植物工廠發展中心主要的負責人－丸尾達教授指出在千葉大學的植物工場類型有『陽光利用型』、『陽光與人工光源並用型』和『完全人工光源密閉型』等三種類型。目前運轉中的植物工場有 5 棟陽光利用型植物工場進行番茄的栽種與生產，以及 2 棟完全人工光源型的植物工場進行**萵苣**的多層架式水耕栽培，該中心利用多樣化環控策略與營養管理措施來達成『高產

能、低成本』的植物工廠化之生產目標(圖 18)。由於千葉大學因與不同的公司財團進行合作開發而發展出以各種不同環控策略與栽培措施而達到不同目標的陽光利用型植物工場，其中包括提高生產量、提高栽植密度、提高產品品質、提高收穫期的果實整齊度、提高能源效率、提高人工勞動效率、減少肥料與藥劑的施用、減少灌溉水使用量與減少能源損耗等策略來達到提高產量、降低生產成本與節省能源等目標。



圖 18. 日本千葉大學植物工場配置圖，其中有 5 棟為陽光利用型植物工廠及兩棟人工光源型 (Maruo Toru, Chiba University, Japan)

3.2 日本植物工場技術利用特點

在千葉大學陽光利用型植物工場技術，可以將其應用特點區分為幾點來論述：一、設施與栽培結構：利用高透光型的塑膠薄膜以增加陽光之穿透，運用保溫與濾光披覆材料的應用進行光照與溫度的控制；利用可移動床架來增加種植密集度可充份利用空間(如圖 19)；設施外面建構的雨水回收利用系統更可以增加水資源的利用(圖 20)；利用鋼索懸吊以提高作物之高度以增加種植密度和提高單位面積之產能(圖 21)；增加設施頂端橫樑高度並配合日光照射方位以提高日照效率。二、環控策略與系統：提高設施的氣密性並阻隔地面能量的傳導，可在設施內達到較高精準的環境條件控制；充份利用熱泵進行溫度與濕度的調控以達到節能的效益；施

用 CO₂ 以促進光合作用效率並於作物近側進行人工光源的補光照射。三、營養供應與管理：利用薄膜水流(NFT)、滴灌與噴霧灌溉等方式，進行養液的回收與再利用措施，可達成節水、養份充分利用吸收與零排放的目的，並且可達到提高產能與降低成本的效益；進行養液溫度、EC 值、pH 值、液位與流速的監控以提供根系最佳化的生長條件。四、栽培與管理策略：選用(育)最適合植物工場環境栽種與高產量之品種，利用不同栽植時段的控制，進行高密度與多層次栽植以達穩定和全年度出貨的目標；維持作物最適合的生長發育條件，並發揮作物本身最極限的產能為目標。

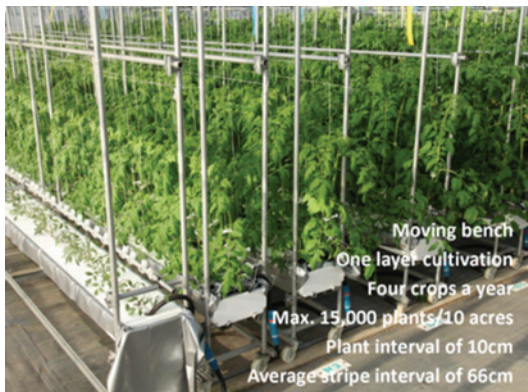


圖 19.利用可移動式床架可進行作物 4 個不同生長階段的栽培管理與進行內部空間的調節運用，以增加植株密度。(Maruo Toru, Chiba University, Japan)



圖 20.設置有雨水收集與過濾再利用系統可充份利用水資源

完全人工光源密閉型植物工廠以立體化多層架水耕栽培方式，並利用 T5 螢光燈為人工光源進行**萵苣**的植物工廠化生產。為提高單位面積之產能而達到降低生產成本的目的，目前立體栽培層架於人工進行作業的情況下可達成 10 層的高效率栽培生產(圖 22)。空間規劃利用可同時進行播種、移植與採收作業，在 406 平方公尺的設施面積上，一天可以達成收穫 2000 棵**萵苣**之生產量，並且可穩定的進行周年計畫性生產。在栽培環境中人員的作業均以無塵室的作業規範進行服裝與口罩、手套等衛生方面的要求，因此，所生產的**萵苣**不用清洗即可以安心的進行生食。為了節省電費與增加人工光源的效率，千葉大學利用曲面反射板來增加光能的利用效率以進行結球**萵苣**的栽培(圖 23)，其用電只需為原來的四分之一，目前之生產成本已經可以與露天栽培之結球**萵苣**作價格上之競爭。使用人工光源完全密閉型植物工場所生產作物以葉菜為主，包括**萵苣**、菠菜與藥草。因此，千葉大學完全密閉型植物工場之特點為：一、不受天候影響，可以達到定時、定量與品質穩定之要求。二、不受地域限制。三、單位面積生產效率高。四、水份、肥份之施用精準，無農藥使用。五、作業環境舒適，可適合身障人士就業。六、可栽培多樣性作物。在節能的應用方面，丸尾達教授同時提到東京燃氣曾探討將氫氣站回收的二氧化碳供應給植物工廠使用的成本與效益，千葉大學也進行評估向植物施予回收二氧化碳的效果，同時還調查包括工廠內冷氣及換氣在內的最佳二氧化碳供給方法，考慮向設施園藝領域廣泛應用，並探索將來與氫氣站相鄰建設植物工廠的可行性。



圖 21.應用金屬線將番茄植株往高處懸吊以增加空間利用率而達到提高單位面積產能之目標



圖 22.完全人工光源型植物工場以水耕栽培方式種植 10 層**萵苣**

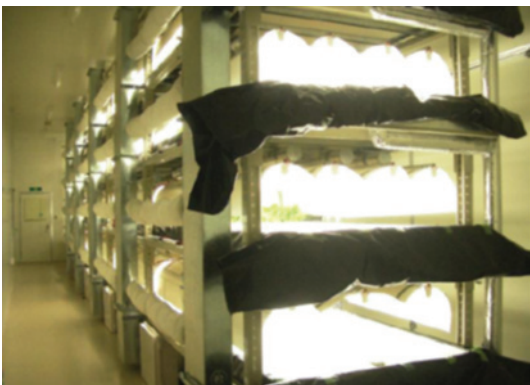


圖 23.利用曲面反射板增加人工光能的利用效率以進行結球**萵苣**的栽培 (Maruo Toru, Chiba University, Japan)

3.3 民間農企業植物工場發展現況

3.3.1 未來公司店鋪型植物工場

該未來公司植物工場創立於 2004 年 9 月，所經營的業務為進行密閉型植物工場水

耕栽培系統的研究開發設計與設備的販售施工，以及植物工場生產之蔬菜產品販賣。該公司的營業植物工廠店鋪位於千葉縣松戶市五香，是一間展示密閉式完全人工光源型植物工場的店鋪，並且有櫥窗展售其植物工場所生產的蔬菜。店鋪內之植物工場面積約有 20 坪(圖 24)，因為該植物工場為日本最早設立的，當時的建造成本一坪約 100 萬日元，投資金額約達 2000 萬日元，預計 5 至 6 年就可回收成本。該店鋪以 20 坪的單位面積進行 7 層的立體化水耕栽培，生產量每天可以採收 300 棵**萵苣**等蔬菜，若是栽種香草類蔬菜每天約可採收 600 棵，目前的經營規模已經有營業利潤，並有接受其他公司的委託進行植物工場的規劃設計與施工業務。

因為其生產的產品以安全衛生的方法進行生產，在密閉的全環控條件下沒有病蟲害的污染，並沒有施用任何農藥，因此產品不用清洗便可以安心的生吃食用(圖 25)，其客戶對象大部份為高級餐廳與超市。該公司同時接受委託替人設計 1~500 坪的植物工場，並且提供未來的栽培技術和顧問諮詢，因此不具農業專業的人也可以很簡單的在其所建設的植物工場內栽種蔬菜，擁有土地或建築物的人可以活化利用其未善加利用的空間以植物工場來進行清潔衛生蔬菜的栽培，無論是自產自用或是開創新事業都可利用植物工場來達成。

從未來公司的發展經驗中我們可以發現完全人工光源型的植物工廠其初期投資的成本非常的多，而且營運的電費成本很高，尤其在人工光源上的用電約佔用電量的 50%。因此，為了要能符合經濟效益，所選擇種植的作物以較高經濟性與短生長週期性的葉菜類或香料類作物為主。在台灣許多超市與餐廳已經有利用完全人工光源型的植物工場進行香料作物與生菜類**萵苣**的生產，但規模都還太小且以展示櫥窗為主，若能比照未來公司的模式進行約 20 坪面積的多層次式立體栽培，相信亦可以達到合乎經濟效益規模的

植物工廠化生產，以自產自銷的方式供應給消費者安全沒有農藥施用的生食蔬菜。



圖 24.未來公司五香店內之立體水耕栽培植物工廠



圖 25.未來公司植物工廠店鋪櫥窗所展示的蔬菜與免洗即可生食之葉萵苣菜

3.3.2 野菜工房股份有限公司建置與營運

野菜工房位於東京西北方的埼玉縣秩父市的工業區內，原先為一間電子工廠，目前由野菜工房株式會社承租下來，進行植物工場葉菜類蔬菜的栽培生產與販賣(圖 26)。該廠是以利用租用已停工之電子工廠廠房進行植物工場的建置與銷售營運，可以大量削減建築本體的設備成本。該廠之栽培面積為 430 平方公尺，為完全人工光源型多層架立體化水耕栽培之模式，使用光源為白色螢光燈，數量有 1800 支燈管，照度約為 15,000 Lux，日照時間設定在 16~18 小時，環境溫度以 4 台 10 馬力冷氣配合布袋風管進行空調，栽培室溫度管理在 20~24°C 之間，清靜度等級為 10 萬等級。環控條件方面濕度設定管理在 60

±10%、二氧化碳濃度為 1000 ppm。以 3 層之立體化承架栽培，每層可定植 7 列，日產約可達到 1000 棵之萵苣產量。養液供應方式以對作物根部進行噴霧式水耕栽培(圖 27)，並利用微酸性電水進行廠房與栽培承盤的殺菌消毒作業。噴霧式水耕栽培的特點有：使根部更加健康的成長、降低細菌的滋生、水的使用量較少與肥料的使用量較少，但所需的噴霧栽培槽會比較大。相對的，蓄液式水耕的蓄液槽較小，可進行種植的層數可以比噴霧式多且設備簡單，同時其水與肥料的使用量也相對會較多。野菜工房強調他們的農法是“栽培與自然站在同一邊的 eco：完全無農藥、水的使用量為露地栽培的 5 分之 1、肥料的使用量為露地栽培的 7 分之 1。周藤一之社長補充說根據東京大學沖繩研究室的資料，一般野地栽培種植一株生菜(65 g 換算)要使用 11 公升的水，野菜工房只使用 2.3 公升，茨城縣的施肥基準栽培一株生菜(65 g 換算)所使用的肥料(氮基礎)為 0.54g，野菜工房只使用 0.08g。

以野菜工本身所經歷的建廠經驗而言，周藤一之社長整理出建造密閉型植物工廠的原則有以下幾點：一、大幅削減初期的投資：活化利用停工閒置不用的廠房，設置地點不一定得在市場附近，善加利用宅急便可擁有可以發送到各店面的競爭力。二、重視與蔬菜的對話：不引進不必要的高科技，以觀察蔬菜的狀況來生產。只在必要的時候給予必要的養分，不需要營養過剩的蔬菜。三、生產出健康的蔬菜：維持根系的健壯，便會從茂盛葉面生長表現出來。另外需進行細菌滋生的管控，以期能有低細菌數的安全健康蔬菜。以每日能生產 2500 棵蔬菜為例進行植物工場的建造成本費用進行估算的話，栽培系統應在 100~150 百萬日圓；環境系統的牆壁、天花板、地板維持在 12~20 百萬日圓，空調則在 15~25 百萬日圓之間。其他附加設備包括--電源設備：8~10 百萬，冷藏庫、包裝室：2~3 百萬，其他雜項設備：

10~15 百萬，合計應管控在 147~223 百萬日圓之間。設置植物工場的合適規模應與販售能力相呼應的生產量為主要原則，並以設定終極最大產能目標，分階段進行建設，例如：第一階段達到 1000 棵/日；第二階段達成 3500 棵/日；第三階段達最大產能的 6000 棵/日。

所以，野菜工房用 3A 來描述其用完全人工光源型植物工場所生產的產品品質，即以日文開頭發音的「免洗」、「美味」、「安心」作為標榜，並強調低細菌、低硝酸鹽與無農藥。用很衛生的方式進行栽培，因此不用清洗便可以馬上生食，用水清洗反而會流失一部分水溶性的維他命 C。也因為在完全密閉的植物工廠內栽培，不會有害蟲的侵入為害，所以完全不用施用農藥。養液栽培只在蔬菜需要時才給予必要的營養成份，所以可以達到 2000 ppm 以下的低硝酸鹽含量之蔬菜(對照露地栽培的 4000~5000 ppm)。



圖 26.位於埼玉縣秩父市工業區內的野菜工房

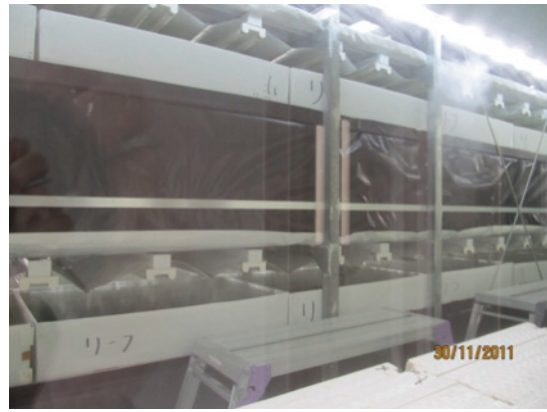


圖 27.野菜工房三層式立體噴霧水耕栽培系統

3.3.3 太陽光利用之圓頂型植物工場

Granpa 農場位於東京西南方神奈川縣的秦野市，面積約有一公頃，蔬菜的栽種設施是應用太陽光利用型的設施型植物工場來進行**萵苣**類蔬菜水耕無土栽培的生產與販售。該農場比較特別的是採用圓頂型的氣泡式塑膠布溫室來進行**萵苣**的植物工廠化生產(圖 28)。該設施為一如體育館樣子的正圓形罩幕，利用空氣往內輸送所形成的正壓力撐起整個塑膠布結構，最大內部壓力為 150 Pa，換氣效率最大為 917 m³/min。結構之外徑為 29 公尺，內部可利用空間直徑為 27 公尺，圓頂中心最大高度為 5 公尺。栽培系統利用可自動旋轉的放射型滑軌，滑軌槽溝上裝置有可以定植蔬菜的塑膠滑塊，每個滑塊即是一個栽培單元。當由圓心往外延伸之滑軌轉動時，滑軌槽內的栽培單元會受到一由圓心往外迴旋螺旋狀導軌的牽制而呈螺旋狀往外輸送，形成了一個圓形的栽培面。該圓形栽培水槽的直徑為 20 公尺，栽培池面積為 302 平方公尺，可以同時栽種 125,000 棵**萵苣**菜，最少每天可以採收 195 棵，並可以達成周年生產。因為該結構體係利用正壓空氣撐起而沒有使用柱子，因此不會遮到陽光產生陰影，其他一般的溫室會有 18%的面積受當影子的影響，因此會減少約 1%的產量。此種圓頂型的栽培設施特點為有效利用平面地板的面積，果菜類蔬菜需要往上利用空間，而葉

菜類蔬菜便要能將平面空間充分有效利用。傳統栽植方法因作物由小到大成長要預留生長的空間間隔，因此會造成幼苗時期的空間浪費，但是若種植的太密集又會彼此遮到光線與妨礙生長。圓形種植則可以利用自動化設計從內圈密植幼苗，然後隨著滑軌槽的迴轉如蚊香的形狀逐漸向外圈旋轉並同時加大空間，等栽植單元轉到最外圈時便可以進行採收(圖 29)。



圖 28. 圓頂型太陽光利用型植物工場外觀與其架設方式



在最內圈定植 → 螺旋狀往外自動移動 → 在最外圈採收

圖 29. 圓頂型植物工場的作業流程與方式

3.4 日本植物工場事業的現狀與今後之展望

目前在日本有 50 家植物工廠在營運，其

中 34 家是完全人工光源型，16 家為太陽光利用型與太陽光及人工光源併用型，而其中 60%都是虧本的，30%能達到收支平衡，只有 10%是有營業利潤的。由於日本植物工廠的發展背景可以使工商業者之廠商有投入的機會，再加上政府對投入植物工場建造有短期間的補助，因此吸引了一些廠商的爭相投入尋找商機。但是由於大部份的廠商沒有農業技術與栽種經驗，更重要的是沒有產品的銷售通路，因此大部份的植物工場都沒有很成功。在日本發展成功的植物工廠有以下特點：一、經營較久的業者，要有 10 年以上經驗，因為其設備的投資成本已回收，因此可以開始有營收利潤。二、在投入植物工場營運之前已經有自己銷售通路的業者，如一家經營定食連鎖式餐廳的『大戶屋』（未來公司技術支援），以完全人工光源型的植物工場進行產品的自產自用，該公司同時也在台灣、新加坡和香港開設連鎖店並設置植物工場進行蔬菜的自用生產。此外，大戶屋於四月開始使用位於山梨縣自設植物工場的三種蔬菜，作為無農藥沙拉用，該植物工場每日約可生產 30 公斤蔬菜，大戶屋計畫提高即將於明年啟用的第二家植物工場產能為三倍，且將照明用的螢光燈管改為 LED 燈管以降低本。另外有一家 SG Green House 的公司，引進其他植物工場公司 (JFE) 的整廠設備與技術，建置太陽光與人工光源併用型的植物工場生產烤肉店用的**萵苣**菜，在其建設完成後即刻可以投入生產，因此該公司 2 年後就有營業利潤。目前的產能達到每天生產 12,000 棵的**萵苣**供應其廣大的銷售通路網，其產品每包約 85~95 公克，售價為 198 日元。SG Green House 公司因為本身已經有其蔬菜的銷售通路，再加上該公司引進其他植物工場公司的整廠設備與技術，因此可以在短時間內就達到成功的經營模式和獲得利潤

日本很早之前就已經有二波的植物工場發展熱潮，目前的熱潮為第三波，因為 2009 年日本的農地法修訂後使很多民間企業可以

投入農業的生產，再加上政府有 150 億元的補助預算去發展福利型的農業生產，即發展植物工場的水耕承架式栽培法，使得坐輪椅的身障人士也可以在植物工場工作。目前 AEON 永旺集團的 300 個超市，因考量植物工場所生產的蔬菜不受天候影響，具生產量及價格平穩等優點，今年三月已開始販售購自外部工廠所生產的三種**萵苣**，袋上明確標示「未使用農藥」，但價格較其他同種**萵苣**高約 2 至 3 成，乃工廠設備及電氣成本昂貴所致。

3.5 日本植物工廠經驗對台灣發展的啟發

由千葉大學發展植物工場的經驗可以得知日本植物工場發展方向的趨勢，以農業生產面而論，陽光利用型的植物工場可視為溫室栽培設施的升級，其改善了傳統設施的氣密性，因此可以進行較為精密的環境控制，如二氧化碳的施用與溫濕度的調控，再加上人工光源的補充與立體栽培的空間的充份利用，可以增加作物的密度而達到極限的單位面積產能。因此，在充份利用陽光與遮蔽、阻隔過濾材料的充份配合應用下，可以達到低耗能與低投資成本的植物工廠化之周年計畫性生產規模，這樣的成功發展經驗值得台灣發展陽光利用型的植物工場借鏡與參考，使台灣的溫室設施可以提昇成為植物工場的等級。在完全人工光源型全密閉式的植物工場方面，雖然其初期投資成本較大，而且營運與生產成本較高，但是，透過單位面積產能的提昇與人工光源利用效率的增加，亦可以大量的降低生產成本。而在其所強調的產品安全衛生與產品的全年無休的穩定性供應上，也成為其與一般露天栽培與傳統式設施栽培相對較佳的競爭優勢。此外，由發展完全人工光源型植物工場所帶動的相關設備與光電資訊產業發展，如 LED 人工光源與監控電子設備等資訊與通訊產業也提供另外一個發展機會。

4. 結論

荷蘭溫室生產朝向大面積發展，番茄、蝴蝶蘭等蔬花溫室生產，不僅栽培面積數以公頃計，且幾乎完全環境監測與控制，其中感測器廣泛應用、儘量接近作物量測及對於 CO₂ 的重視程度，值得研究人員深入了解；再加上各類盆栽介質裝填、陸空運輸，乃至於分級、選別與包裝等機械化及自動化輔助作業，也值得學習與仿效。荷蘭溫室栽培作物以番茄為最大宗，由於氣候型態不同，荷蘭溫室番茄栽培體系與台灣有很大差異，荷蘭以養液介質耕為主，使用的介質為岩棉，溫室內普遍使用人工光源、二氧化碳肥化、熱水管加熱及大黃蜂授粉等來增加產量與提升品質；而台灣地區番茄設施栽培，大部份的農民仍維持簡易溫室及土耕栽培；目前設施番茄最大瓶頸為高溫蓄熱無法解決，因此在高溫期無法生產。台灣與荷蘭所面臨的生產瓶頸不同，因此荷蘭溫室生產體系不見得適合台灣，但他們在介質、養液、環控設備及設施推廣的經驗仍值得我們借鏡。

由千葉大學發展植物工場的經驗可以得知日本植物工廠發展方向的趨勢，以農業生產面而論，陽光利用型的植物工場可視為溫室栽培設施的升級，其改善了傳統設施的氣密性，因此可以進行較為精密的環境控制，如二氧化碳的施用與溫濕度的調控，再加上人工光源的補充與立體栽培空間的充份利用，可以增加作物的密度而達到極限單位面積產能。因此，在充份利用陽光與遮蔽、阻隔過濾材料的充份配合應用下，可以達到低耗能與低投資成本的植物工廠化周年計畫性生產規模，這樣的成功發展經驗值得台灣發展太陽光利用型植物工場借鏡與參考，使台灣的溫室設施可以提昇成為植物工場的等級。在完全人工光源型全密閉式的植物工場方面，雖然其初期投資成本較大，而且營運與生產成本較高，但是，透過單位面積產能的提昇與人工光源利用效率的增加，亦可以大量降低生產成本。而在其所強調的產品安

全衛生與產品全年無休的穩定性供應上，也成為其與一般露天栽培與傳統式設施栽培相對較佳的競爭優勢。此外，由發展完全人工光源型植物工場所帶動的相關設備與光電資訊產業發展，如 LED 人工光源與監控電子設備等產業也提供另外一個發展機會。

參考文獻

1. 邱相文、蔡致榮、林木連、黃禮棟。2012。日本植物工廠參訪與發展現況介紹－學術單位篇。101 年第二季農業資訊科技應用發展電子報。
2. 張瑞明、邱相文、蔡致榮。研習植物工廠與肥料效率提升技術。出國報告。
3. 蔡致榮、方怡丹、田雲生、沈原民、鍾瑞永、許涵鈞。2011。荷蘭永續節能溫室生產技術與應用。出國報告。
4. 蔡致榮。2011。荷蘭溫室村簡介。100 年第一季農業資訊科技應用發展電子報。

New Development of Plant Factory in the Netherlands and Japan

Jyh-Rong Tsay¹, Hsiang-Wen Chiu²

¹ Taiwan Agricultural Research Institute

² Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute

Abstract

The development of horticultural crops in the Netherlands is successful. Major items are vegetables, fruit, flower plant, bulb and nursery stock. Among them, the export volumes of vegetables and flower are the first in the world. The flower production volume accounted for more than half of the global market. In agri-trade, the Netherlands is the world's second largest exporter of agricultural products, only less than the United States. For horticultural cultivation technology, facility cultivation with high automation level is almost completely adapted. The related cultivation experience and key production technologies are worthy of being referenced for improving the domestic industry. Sustainable energy saving greenhouse production technologies developed in the Netherlands include measuring of micro-climate environment in greenhouse, distantly wireless transmission, control / data integration and operation management system, strategies of environment protection and energy saving facilities for vegetable and flower industry, high efficiency environmental protection and energy saving systems for greenhouse installations, LED artificial lighting technology, light quality and light intensity, as well as the integration of remote automatic monitoring and control system and other related materials. Moreover, other EU countries gained remarkable achievements on establishing green energy application and extension. The advanced technologies and concepts could be introduced and applied on pest and insects management to reduce the use of agricultural chemicals and its residual level, and thus achieving the annual production of high-quality and safe agricultural products.

A plant factory is an airtight environment system of cultivation facilities, in which plants are grown with optimized conditions and precise regulations of nutrition supply. It also uses high technical cultivation assistant facilities to accomplish the goals of high yield, safe and year-round production. The promotion and development of plant factory in Japan has entered into its third boom stage. The experience in technology development and extension has been in the leading position among the advanced countries of agricultural science and technology around the world. Industry technology on plant factory has been widely used by the Japanese people and agricultural entrepreneurs to conduct commercial production and sales of the related products.

Keywords: plant factory, facility cultivation, energy-saving greenhouse, year-round production