

稻米農業廢棄物之生質能源生產規劃模式分析

撰文/胡明哲·唐鈺清

前言

臺灣有 20 多萬公頃的稻米耕地面積，年產量約 130 萬噸，但稻米生產最後也創造的相當大量的農業廢棄物，若能作為原料來生產生質能源，則可提高農業生產附加價值，並提供額外的再生能源，本文將針對稻米農業廢棄物的生質能源生產規劃模式，進行介紹及分析。

工業革命後，人類社會快速發展，造成二氧化碳等溫室氣體排放量遽增，導致全球暖化、環境氣候變遷現象，近年來科學家為減少化石燃料使用及其溫室氣體排放，積極推廣生質能源、風力、太陽能、地熱等，利於永續發展且潔淨環保的再生能源。生質能源 (biomass energy) 是一種再生能源 (renewable energy)，其原理是將生物所產生的有機生物質 (biomass) 轉化為能源，生質能源的原料包含農產品、木材、農業廢棄物、林業廢棄物、畜牧廢棄物、垃圾、事業廢棄物、污廢水、有機污泥等，所產生的能源型態包含生質酒精、生質柴油、固態生質燃料、生質沼氣、電力、熱能等。生質能源目前已廣泛被使用，僅次於煤、石油、天然氣，是全球使用量第四大的能源，可提供全世界 14% 的初級能源使用，且佔全球再生能源的 80%，相當具有潛力，值得投入研究。

第一代生質能源以糧食作物作為原料，生產過程使用玉米、豆類、高粱、甘蔗等糧食作物和經濟作物，利用發酵 (fermentation) 作用製造生質酒

精，以供應能源使用，但第一代生質能源的生產過程，可能造成能源與糧食間的競爭衝突，導致糧食價格升高，同時也引發生產糧食競爭耕地與水資源的爭議，故非糧食作物的第二代生質能源開始被積極的推廣。第二代生質酒精利用含有木質纖維素 (lignocellulose) 的農林業廢棄物或非糧食作物等作為原料，其中農林業廢棄物是指生產糧食作物後剩餘的廢棄物，例如：稻米桿、玉米桿、甘蔗渣、稻殼、木材及林業廢棄物等，而非糧食作物則包含芒草 (miscanthus)、柳枝稷 (switchgrass) 等，第二代生質酒精的原料，經化學與生物作用，產生生質酒精，其優點是不與糧食競爭，且創造農業的附加價值，但目前成本仍過高，技術仍有改善空間。第三代生質能源是指利用藻類生產生質柴油、生質酒精及甲烷等。

生質酒精是指利用物理、化學、或生物方法，將生物質轉為生質酒精，以生產原料來區分，常見的生質酒精種類包含糖類酒精、澱粉酒精、纖維質酒精等。醴類可以直接經由發酵作用轉換為生質酒精，其原料包含甘蔗、甜菜、甜高粱等。而澱粉則須先經水解作用，將多醴分子轉為單醴分子，再經發酵產生質酒精，其原料包含玉米、小麥、木薯。而纖維質酒精的生產過程，主要分為四步驟，第一步驟為前處理 (pretreatment)，利用物理或化學方式，先將木質纖維素的結構破壞後，釋放出纖維素與半纖維素；第二步驟再利用水解作用 (hydrolysis)，將纖

維素與半纖維素分解，產生六碳糖或五碳糖的單醣分子；第三步驟利用發酵作用，將單醣分子發酵來產生質酒精；第四步驟再將生質酒精蒸餾回收。

稻米是世界上最重要的糧食作物之一，生產量僅次於玉米及小麥，主要生產於亞洲、大洋洲、歐洲、非洲及中南美洲，全球稻田面積高達 150 萬平方公里，每年稻米總生產量超過 7 億噸。臺灣稻米耕地面積約 20 多萬公頃，臺灣稻米產量約 130 萬噸，同時也產生了許多的稻米農業廢棄物，若能用來作為生質能源生產的原料，必能同時創造能源以及農業的雙贏局面。稻米桿為臺灣常見之農業廢棄物，利用前處理、水解、發酵、蒸餾作用，可生產纖維質生質酒精，其成本因技術關係，目前生產成本仍相當高，美國能源部估計每公升成本為新臺幣 9-18 元。

規劃管理模式

以下建立三個稻米桿生質能源規劃管理之數理模式，第一個模式是假設工廠尚未完工且規模尚待確立，為滿足生質能源需求的最小生質能源轉換工廠規模模式，整個模式包含方程式 (1) 的目標函數及方程式 (2)-(7) 的限制式。若工廠已完工且其生產容量已確定，第二個模式改為最小生產成本模式，整個模式由方程式 (8) 的目標函數及方程式 (2)-(7) 的限制式組成。但前二個模式尚未考慮生質能源的利潤，故當已知生質能源的價格時，方程式 (9) 的目標函數可計算生產總利潤，則第三個模式為最大生產收益模式，第三個模式包含方程式 (9) 的目標函數及方程式 (2)-(7) 的限制式。

首先定義模式中的二類決策變數，第一個變數是在 t 時間農田 i 因生產稻米，所產生的農業廢棄物作為生質能源原料，運送到生質能源轉換工廠 j 的原料量為 $straw_{i,j,t}$ ，第二個變數為在 t 時間工廠 j 生產給區域 k 的生質能源是 $bioe_{j,k,t}$ 。

第一個模式的方程式 (1) 為目標函數，目標函數等於工廠 j 的規模單位成本 $COST1_j$ 乘以工廠規模 cap_j 的總成本，計算最小目標函數就是求取最低的

生質能源轉換工廠成本。方程式 (2) 限制農田 i 在 t 時間供應給所有工廠的生質能源總原料量，必須小於等於農田 i 所產生的總農業廢棄物，也就是小於等於農田面積乘以單位面積原料生產量。方程式 (3) 限制工廠 j 所處理的生質能源總原料量，不能超過其工廠規模 cap_j 。方程式 (4) 計算工廠 j 所生產的生質能源總量，等於所有農田在 t 時間供應給工廠 j 的生質能源總原料量，乘以原料與生質能源的轉換比例 $RCON_j$ 。方程式 (5) 要求所有工廠生產並運送到區域 k 的生質能源總量，必須滿足區域 k 的生質能源需求量 $DEMAND_k$ 。方程式 (6) 為非負限制式，要求已定義的二個決策變數不可小於零。

若利用已運轉的工廠，來生產生質能源，且其工廠生產容量已確定，則第二個模式改為尋求最小生產成本模式，模式的方程式 (7) 計算總生產成本，包含原料運送、原料處理、及生質能源運送，方程式先計算成本原料運送單位成本 $COST2$ 與生質能源生產單位成本 $COST3$ 的總和，乘以工廠總處理的原料量 $straw_{i,j,t}$ 的總成本，再計算生質能源單位運送成本 $COST4$ ，乘以生質能源在 t 時間由工廠 j 運送至區域 k 量 $bioe_{j,k,t}$ 。

第三個模式的目標函數為方程式 (8)，此目標函數為生產總利潤，生產收入為生質能源價格 $PRICE_{j,t}$ 乘以生質能源總產量 $bioe_{j,k,t}$ ，再扣去方程式 (1) 的工廠成本與方程式 (7) 的生產成本，則可得到生質能源生產總利潤，第三個模式就是求取最大生產收益。

以上所建立之最佳化規劃模式，可利用如 EXCEL solver、lindo、lingo、GAMS、cplex 等常見有效的電腦軟體協助建立模式並求解，以協助決策者進行生質能源生產的規劃。

$$\text{Min } z_1 = \sum_j [(COST1_j) \times (cap_j)] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_j straw_{i,j,t} \leq (FARM_i) \times (RST_i) \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$\sum_i straw_{i,j,t} \leq (cap_j) \quad \forall j, t \quad (3)$$

$$(RCON_j) \times (\sum_i straw_{i,j,t}) = \sum_k bioe_{j,k,t} \quad \forall j, t \quad (4)$$

$$\sum_j bioe_{j,k,t} \geq DEMAND_k \quad \forall k, t \quad (5)$$

$$\text{straw}_{i,j,t}, \text{bioe}_{j,k,t} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (6)$$

$$\text{Min } z_2 = \sum_{i,j,t} [(\text{COST2} + \text{COST3}) \times (\text{straw}_{i,j,t})] + \sum_{j,k,t} [(\text{COST4}) \times (\text{bioe}_{j,k,t})] \quad (7)$$

$$\text{Max } z_3 = \sum_{j,k,t} [(\text{PRICE}_{j,t}) \times (\text{bioe}_{j,k,t})] - \sum_j [(\text{COST1}_j) \times (\text{cap}_j)] - \sum_{i,j,t} [(\text{COST2} + \text{COST3}) \times (\text{straw}_{i,j,t})] - \sum_{j,k,t} [(\text{COST4}) \times (\text{bioe}_{j,k,t})] \quad (8)$$

結論

生質能源是一種被廣泛使用、永續發展、且潔淨環保的再生能源，而利用農業廢棄物來生產再生能源，更是在不額外消耗土地與水資源的情況下，提高農業生產的附加價值，是一種值得研究與推廣的能源。本文介紹最小工廠成本、最小生產成本模式、最大生產收益模式等三個數理規劃模式，可用來進行農業廢棄物之生質能源生產規劃與模擬，在實務面上將有利於生產流程之規劃。

AgBIO

胡明哲 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系 副教授
唐鈺清 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系 研究助理

參考文獻

- 財團法人工業技術研究院，推動生質柴油及稻稈生質能處理策略分析及成本效益評估，專案工作計畫，2005年12月。
- 經濟部能源局，2007年能源科技研究發展白皮書，From http://web3.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/content/ContentLink.aspx?menu_id=473。
- 國際能源總署(IEA)，世界能源展望2007，2008年。
- 葉桂碧，我國能源市場問題探討，國立中山大學經濟學研究所碩士論文，高雄，2007年。
- 蕭代基、林益豪，台灣推動生質燃料發展政策之評估，碳經濟，第12期，2009年2月。
- 左峻德、蘇美惠，台灣生質能產業化發展之潛能，碳經濟，第12期，2009年2月。
- 生質能源的液態利用方式：生質酒精與生質柴油，From <http://pansci.tw/archives/10985>。
- 張智淵，生質能之生命週期評估—以甘蔗提煉燃料酒精為例，國立台北大學資源與環境管理研究所碩士論文，台北，2006年。
- 徐敬衡，生質酒之能源開發，化工技術，第147期，六月號，第179-189頁，2005。
- 黃宗煌、黃瀨儀，稻田轉種能源作物生產生物能源的評估與政策整合，2005年，第85-107頁。
- 吳耿東、李宏台，生質能源——化腐朽為能源，科學發展，第383期，2004年11月，第20-27頁。