



栽植生質能源作物 可增加再生能源使用與 減緩溫室效應

◎吳俊賢 / 行政院農業委員會林業試驗所林業經濟系副研究員兼主任

◎林俊成 / 行政院農業委員會林業試驗所林業經濟系助理

◎李國忠 / 國立台灣大學森林學研究所教授

◎魏名聰 / 國立台灣大學森林學研究所研究助理

一、前言

溫室氣體大量排放加劇溫室效應，引發「全球溫暖化」(Global Warming)，對環境產生極大的衝擊，根據1996年聯合國氣候變化政府間專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)的評估報告指出，人類活動所排放的溫室氣體，如不採取任何防治措施，預估平均地面氣溫於2100年時將比1990年時增加1-3.5℃，海平面將上升15-95公分，其後果將是使氣候系統發生變遷。大氣中主要的溫室氣體有二氧化碳(CO₂)、



甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、臭氧(O₃)及氟氯碳化物(CFCs)等氣體。與二氧化碳相比，甲烷、氧化亞氮、氟氯碳化物的溫室效應較高，不過由於二氧化碳含量遠大於其他氣體含量，因此二氧化碳的溫室效應仍是最大的。二氧化碳占溫

室效應貢獻量的55%，甲烷為15%，氧化亞氮為6%，氟氯碳化物（CFC）為24%（Jäger et al., 1991）。

台灣地區在1990年溫室氣體總排放量約為149百萬公噸，其中以二氧化碳排放量占82.9%為最高，排放來源以石化能源使用燃燒所排放的二氧化碳量最高，約占二氧化碳總排放量的91%（112.7百萬公噸）（楊任微，1998）。1995年時，我國能源部門所排放的二氧化碳總量為166百萬公噸（全世界排名第24位），約占全球排放總量的0.5%，每年每人平均排放量為7.7公噸（排名第36名）。根據經濟部1996年5月公布之「能源政策白皮書」及「抑制二氧化碳排放之能源策略研究計畫八十五年度期末報告」，推估我國未來初級能源總需求及二氧化碳排放趨勢顯示，依現階段各項已規劃之經建目標與能源使用趨勢，在不考慮新增各項能源措施之情形下，預期2000年我國二氧化碳將比1990年的排放水準增加82%，此十年間的平均年成長率達6.2%。排放總量成長到2030年將達到1990年之3.2倍（陳雄文、賴麗瑩，1997）。

我國能源消費量在過去二十年間增加十分快速。1977年國內能源消費量僅2,080萬公秉油當量，其中煤炭占9

1%，石油占48.6%，天然氣占8.4%，電力占33.9%。其後隨著國內經濟的快速成長及國人生活水準的提高，國內最終能源消費量亦迅速增加，至1997年達7,737萬公秉油當量，其中煤炭占11.8%，石油占40.4%，天然氣及液化天然氣占3.6%，電力占44.2%。在此二十年間之平均能源消費成長率為6.8%（經濟部能源委員會，1998）。就能源供應的來源而言，臺灣地區自產能源嚴重不足，所需能源大部分仰賴進口，以1995年為例，自產初級能源供給量為3,361.4千公秉油當量，約占總供給量75,153.9千公秉油當量的4.2%，其餘的95.8%均仰賴進口，此外，過去二十年來，臺灣地區能源總供給增加5.4倍，而自產能源反而減少30%，因此，兩次石油危機造成國內經濟莫大的衝擊（王京明等，1997）。

能源使用促進社會進步與繁榮，然而人類大肆濫用能源的結果導致全球環境極大的負面傷害，如地球臭氧層的破壞及溫室效應的加劇。近年來民眾環保意識抬頭，對易產生環境污染之石油、煤炭等傳統能源使用極為關切，因此如何在減少溫室氣體排放量及增加能源供給來源的目標下，開發本省特有清潔安全、且不受外國控制的綠色能源實有其重要性與必要性。再生能源發電方式基

於其有永續燃料來源及對環境衝擊較小特性，勢必成為未來發電方式的主要考慮方案之一。

利用石化能源供做能源使用通常會產生各種氣態、液態與固態的污染物，所以此類科技與能源屬「灰色科技」與「灰色能源」。具有再生能源(Renewable Energy)性質的太陽能、風能、水力能、生質能、海洋能、地熱能等，則可稱之為「綠色能源」。此種綠色能源不會對環境產生不良影響，是未來解決環保問題的根本辦法。1997年制定之「京都議定書」中，明白規定締約國所應採行的八大政策與措施中，即包括「推廣、發展和增加使用新能源與再生能源」一項。1998年的「全國能源會議」結論中，建議開發「新能源及潔淨能源」(黃秉鈞，1998)。

檢視未來各種具有潛力之可能能源中，生質能相對於傳統耗竭性能源發電方式而言，生質能發電具有對環境生態衝擊較小、固定設備的總投資較低、不虞匱乏而有再生的能力、技術上之困難度較其他非傳統性能源為少等優點，因此將生質能直接或間接地充當能源使用，可滿足未來之能量需求，例如，家庭需求、偏遠地區之開發或石油之取代等，均將扮演相當重要之角色。

二、不同再生能源的環境成本

從永續發展的角度來看，再生能源將是人類未來所依賴的主要能源，1998年7月17-19日歐盟各國環保部長在奧地利舉行的再生能源諮商會議中，即明白表示：「再生能源是用以達成京都會議時歐盟所做的國際環保承諾，同時又可維持經濟發展的一項重要工具。」再生能源為自產能源，符合各國能源政策(競爭力、安全、安全供給與環保)，又可提供就業機會，在區域發展上是一項重要議題(邱錦松等，2000)。各種發電方式之環境成本可由表1看出，傳統能源的環境成本較再生能源為高，而每單位的發電成本，傳統能源則較再生能源略低，但總發電成本再生能源皆較傳統能源為低，而再生能源中的生質能源(木材)，其環境成本為0-0.7 US¢ / kWh，總發電成本為4.6-7.7US¢ / kWh，在所有發電方式中，總發電成本僅略高於水力發電，而比其他發電方式為低。

三、生質能源作物對減少溫室氣體及增加再生能源的貢獻

目前各種科學數據均顯示，大氣中二氧化碳濃度的提高，主要因為石化原料的大量燃燒，該原料在千百萬年前即貯存於地表下成為大氣碳貯存庫，燃燒地表下的石化原料將嚴重干擾目前地

表一 各種發電方式之環境成本與總發電成本

能源
種類傳統
能源再生
能源

發電種類 ^a	環境成本 ^a (US¢ /kWh)	發電成本 ^b (US¢ /kWh)	總發電成本 (US¢ /kWh)
煤 (1.2% 硫)	5.7	3.1	8.8
煤 (1.1% 硫, AFBC) ¹	2.8	3.1	5.9
煤 (IGCC) ²	2.5	3.1	5.6
石油 (2.2% 硫)	6.7	3.9	10.6
石油 (1% 硫)	3.8	3.9	7.7
石油 (0.5% 硫)	2.7	3.9	6.6
天然氣	1.0	6.1	7.1
天然氣 (SCR) ³	0.7	6.1	6.8
核能	2.9	2.8	5.7
廢棄物能源	4.0	3.6-7.2	7.6-11.2
太陽能	0-0.4	6.0-8.0	6.0- 8.0
風力能	0-0.1	5.0-7.0	5.0- 7.1
生質能 (木材)	0-0.7	4.6-7.0	4.6- 7.7
水力	0-0.2	3.6-7.2	3.6- 7.4
地熱	-	-	5.7- 7.5

註：1.AFBC=Atmospheric Fluidized Bed Combustion.

2.IGCC=Integrated Gasified Combined-Cycle.

3.SCR=Selective Catalytic Reduction.

a.Public Power Weekly, Oct. 1980, by J.NYSEDA⁴ and DOE.

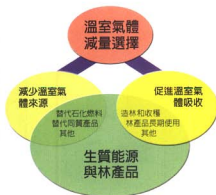
b.“新能運及淨潔能源研究開發規劃總報告”，經濟部能源委員會，1999年5月。

資料來源：邱錦松等，2000

球本身的碳循環過程，相反的，位於地表上的森林資源，其吸存二氧化碳能力已無庸置疑，且若燃燒木材而使二氧化碳釋放回大氣，亦屬於中短期的碳循環過程之一。事實上，若森林不加以經營而任其枯倒腐爛，其中所含的碳量亦會再度釋放回大氣中，只要地表下的石化碳貯存量不釋放至大氣中，地表上的總碳量是不會增加的。因此，相較於人類目前燃燒石化原料，而將千百萬年前的地下儲碳量釋放回大氣的作法，則以適

當經營森林的作業方式促進大氣碳循環則是較明智的選擇。

在世界為一地球村的理念下，如何降低溫室氣體濃度以減緩氣候變遷的衝擊，已成為世界各國所共同關注的議題與努力的目標。其方法可由二氧化碳減量 (mitigation) 及環境調適 (adaptation) 著手。在減量方法上，可從調整產業結構，積極增加能源使用效率，抑制能源消耗來進行。在環境調適方法上，可促進永續的森林管理經營策



圖一 生質能源與林產品在溫室氣體減量的角色
(IEA, 1998)

略，加強造林和復舊更新以吸存大氣二氧化碳。

在溫室氣體減量的可選擇方案中，減少溫室氣體排放量與來源及增加溫室氣體的吸存為兩種可行的方案，而生質能源及林產品在溫室氣體減量上，則兼溫室氣體減量及增加溫室氣體吸存，扮演著一個具雙重效果的角色。林木生長期間，藉由光合作用可吸存大氣中的二氧化碳，並可延緩碳的釋放。當林木收穫時，便將生物體原先所吸存的碳，以某種形式固定於林產品中。林木轉供為能源作物使用，不僅可供發電，生質能源及林產品可替代石化燃料成為有效能源，且可相對減少石化原料的消耗，而

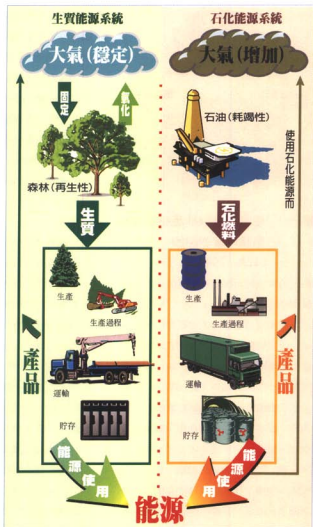
林產品可替代其他同等的材料，減少在製程中二氧化碳的消耗，在增加溫室氣體的吸存方面，造林及森林的存在，可增加對大氣二氧化碳的吸存，在林產品中可延緩碳的釋放（圖一）。因此開發能源作物為一種「積少成多」的策略，在能源使用上的取得成本也較低，就環境效益貢獻上也較高，且林木為一再生性資源，藉由良好的森林經營體系，可源源不斷的提供，因此森林資源被稱為生態材料。

森林具再生性，因此適當經營可永續提供資源，石化燃料為耗竭性資源，不具再生性，會因使用而減少。在碳的流動與能源的產出，生質能源系統，森林為再生性資源，藉由光合作用吸存大氣中的二氧化碳，而轉化為生質，生質經收穫、生產過程、運輸、貯存等流程，成為產品，當然在經一連串的流程中，因使用石化能源而排放部分的碳，而部分生質成為有效能源，再供能源使用也會釋放出原先所固定的碳。因此就整個生質能源系統而言，森林與大氣間碳的變化為一穩定的系統，森林僅具有延緩碳釋放的角。在石化能源系統，石油為一耗竭性資源，從地表將石油開採成為石化燃料，石化燃料經生產、運輸、貯存等流程，成為產品，當然在經

一連串的流程中，因使用石化能源而排放部分的碳，部分成為有效能源，在供能源使用會釋放碳。因此就整個石化能源系統而言，石油與大氣間碳的變化為一變動的系統，在石化能源使用時，造成大氣中的碳增加（圖二）。

四、國外實例

加拿大的森林能源計畫（Energy from Forest Program, ENFOR）乃由加拿大林務署（Canadian Forest Service, CFS）主導經營森林以提供能源使用，其研究改善生質（bio-mass）生產量供能源使用，和促進育林技術來改善生質生產力，有兩個主



圖二 石化能源與森林能源系統在溫室氣體減量與能源產出流程

（修改自 IEA, 1998）

要可供能源使用的森林生質的來源，一為森林的殘留物，包括森林收穫時所殘留，二為生質作物的栽植，包含短伐期作物如速生樹種柳樹（willow）和楊樹（poplar）。森林在整體碳循環扮演著一個重要的角色，ENFOR 也肯定森林在減少大氣二氧化碳排放的潛在效益。其已將柳樹和楊樹的能源栽種在 Ontario 和 Quebec 地區的農地上。

美國紐約州立大學雪城校區環境科學與森林學院（SUNY ESF）為因應地球溫室效應及空氣污染日益嚴重，能源短缺危機日漸浮現，減少進口能源之依賴及振興農村經濟之發展，於是進行一項再生能源之研究計畫，此項計畫獲得非常多相關機構之支持，包括 Electric Power Research Institute、Empire State Electric Energy Research Corporation、Gas Research Institute、New York Gas Group Corporation、New York State Electric and Gas Company、New York State Energy Research and Development Authority、Niagara Mohawk Power Corporation、SUNY-ESF Research on Energy and Materials Conservation Program、U. S. Department of Energy through the National Renewable En-

ergy Laboratory and Oak Ridge National Laboratory、U.S. Department of Agriculture CSREES等，在過去十數年之研究，選擇柳樹作為發展能源林之樹種，並發展出一套完整之柳樹生質作物作業系統（The Willow Biomass Cropping System）

柳樹生質是乾淨的，多用途的木材能源林，將可能成為北美火力發電廠之主要燃料之一，它能直接地被燃燒或與煤共燃、氣化後供氣渦輪使用，或轉換成為液體的燃料。投資生產一單位的柳樹生質和變換為電能，可產生 20 到 30 單位的能量。柳樹能有效地吸收日光而且轉換成生質，是能量平衡裡的主要因素，於下一個十年裡在生產系統改善後，生產量預計將會有百分之百的提升。柳樹與煤共燃能減少 SO_x 產生，而且在某種情況也會減少 NO_x 的產生，此兩個產物的複化合物是引起酸雨主因。柳樹是 CO_2 平衡的能源，在光合作用時吸收的 CO_2 數量是等於在機器裡燃燒產生 CO_2 的數量，柳樹生質的生產和使用將會減少溫室效應對地球的威脅，而且其四季不斷生長的特性表示對於土壤沖蝕潛在性危險和殺蟲劑的應用都會比多年生的農作物為少。短期輪植的能源作物如柳樹、楊樹、桉樹等樹種，經 6~7 年

便可收成，每英畝土地平均每年可生產10-14公噸的木材。由此觀之，以一座100MW發電廠的廠區為中心，若在六哩半徑內遍植林木，則可永久供應發電之需。就經濟成本而言，美國計劃利用柳樹、白楊樹及桉樹等木材為火力電廠的燃料，再以捆樹燃燒的方式，以節省人力與時間，每度成本預計為5美分。

五、能源作物栽植之未來方向

利用生質發電的趨勢有二，一是採獎勵補助的方式處理城市垃圾廢棄物，一是改良收割技術及種植快速成長作物。因此栽植能源作物，在未來溫室氣體減量及能源提供應為可行，在未來思考的方向可由提高森林資源使用效率及增加能源作物種植面積著手。

台灣地區森林資源豐富，根據第三次台灣森林資源及土地利用調查（林務局，1995），森林面積約占台灣全島土地面積之58.5%（2,102,400公頃）。其中，人工林面積為422,600公頃（占20.1%），竹林為152,300公頃（占7.2%）。在蓄積方面，全島森林地林木蓄積約358,744千立方公尺。其中，人工林總蓄積為47,676千立方公尺，平均每公頃蓄積量為113立方公尺；竹林總蓄積為535千立方公尺，平均每公頃蓄積量為4立方公尺。人工林占全島森林面積比例及

蓄積量雖不及天然林，但由於森林對大氣中二氧化碳的吸收能力主要表現於森林的淨生長量，尤其以人工林及未成熟林的吸收能力最高，目前林業政策中，對天然林採禁伐政策，使得在森林對大氣碳吸存及生質能源供應上，人工林的經營變得相對重要，如何有效增加大氣碳吸存及供應生質能源，能源作物的栽植便成為一個值得注意課題，增加木竹類的用途及利用率，將林木做為能源使用，也可解決林木產銷及利用的問題，對解決森林經營的問題，尤其是提高私人營林的經濟效益及誘因，有很大的助益。

種植能源作物為增加生質能的方法之一，目前較具發展潛力之能源作物，包括：快速成長作物樹木、糖與澱粉作物（供製造乙醇）、含油與碳氫化合物、草本作物、水生植物等。

就能源作物栽植可行性之研究方向，可探討種植能源作物對生質能源之產出效率、生長量，評估能源作物在台灣地區可行性及預期效益，以及現有木竹資源之生質能潛力進行研究，並針對不同森林經營型態，分析林木對增加二氧化碳吸存量、燃燒排放所產生的能量，以及相對減少的二氧化碳排放量。

