

研究報告

木質能源於國內能源利用之評估分析

林裕仁¹⁾ 潘薇如^{1,2)}

摘 要

臺灣能源資源貧瘠，能源高度仰賴進口高達99%，過去政府雖投資鉅額資金發展核能，然面對2011年日本福島核災所導致之核能安全與環境危害等疑慮，非核家園呼聲湧起，新核電廠不得不面臨停工封存之困境。木質能源是近年來歐美先進國家大力發展的再生能源，不但逐年成長，且在未來能源政策中，均訂有中、長期達成之目標。本研究透過分析國內現有各型再生能源利用現況，評估臺灣發展木質能源利用之可行性，並提出策略建議。研究結果顯示，木質能源發電成本約為新台幣NT\$2.24~2.7 kWh⁻¹，低於化石燃油NT\$5.99 kWh⁻¹及天然氣NT\$3.25 kWh⁻¹。在慣常水力、風力及太陽光電無法有效供電之區域，皆有木質能源廣泛分佈，由南至北如屏東、高雄、台南、嘉義、新竹、新北市山區、宜蘭及花東等地區；透過妥善分配與管理，運用現有的人工撫育材與林木加工廢棄資材資料，預估木質能源年發電量可替代停工封存之核四廠年發電量約2.5~5.9%。此可提升能源多元化利用，達到改善停止核能發電所導致的缺電困境，並掌握低碳能源經濟發展之契機。

關鍵詞：木質能源、再生能源、燃料發電。

林裕仁、潘薇如。2016。木質能源於國內能源利用之評估分析。台灣林業科學31(3):169-80。

¹⁾ 林業試驗所森林利用組，10066台北市南海路53號 Division of Forest Utilization, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail:tt11031209@gmail.com

2015年6月送審 2015年7月通過 Received June 2015, Accepted July 2015.

Research paper

Feasibility Analysis of Wood Bioenergy on the Current Energy Supply in Taiwan

Yu-Jen Lin,¹⁾ Wei-Ru Pan^{1,2)}

【 Summary 】

Because of the serious scarcity of energy resources in Taiwan, energy supplies entirely rely on imported energy at up to 99%. Although Taiwan's government invested vast resources to develop nuclear energy in the past decades, the construction work of new nuclear plant cannot continue but was asked to be stopped and the plants sealed, after the public faced the nuclear disaster caused by the Fukushima nuclear power plant in Japan in 2011. People are paying increasing attention to concerns about nuclear safety and environmental jeopardy. A movement asking for a nuclear-free homeland has sprung up. In recent years, woody bioenergy has been rapidly developed as a renewable form of energy in advanced Western countries, and the development has not only increased annually, but there are targeted goals for the medium and long term in their future energy policies. By analyzing the current domestic status of various renewable energy utilizations, the objectives of this study were to assess the feasibility of developing woody bioenergy in Taiwan and make policy recommendations to the related energy authorities. Research results showed that the cost of power generated by woody bioenergy was around New Taiwan (NT) \$2.24~2.7 kWh⁻¹ (EUR\$1≈NT\$38.04), which was less than fossil fuels at NT\$5.99 kWh⁻¹ and natural gas at NT\$3.25 kWh⁻¹. In regions where conventional hydropower, wind power, and solar photovoltaic cannot effectively be supplied, there are mass distributions of woody bioenergy throughout the island. Based on existing data, which were collected on materials of thinning of plantations and residues of wood processing, woody bioenergy was estimated to substitute for around 2.5~5.9% of power generation capacity each year of a new nuclear power plant, if these materials were properly distributed and managed. This alternative could upgrade energy diversification, improve power shortages due to the closing of nuclear power plants, and grasp the opportunities for a low-carbon energy economy.

Key words: woody energy, renewable energy, electricity generation from fuel.

Lin YJ, Pan WR. 2016. Feasibility analysis of wood bioenergy on the current energy supply in Taiwan. *Taiwan J For Sci* 31(3):169-80.

緒言

為因應時代變遷，滿足全球龐大經濟發展與民生市場需求，耗費大量資金與勞力，人類不曾停歇地開採新能源。然在全球資源受限及生活環境受危害的情況下，早已加速縮減能源

蘊藏的可開採年限，終究僅能延遲能源耗竭，短暫地改善當下問題，是否真具永續利用之投資效益？依地理特性來看，臺灣能源資源貧瘠，為高度仰賴進口達99%之主因。政府雖投

資巨額資金發展核能，欲以減緩攀升性用電之需，然礙於諸多核能安全及環境危害等疑慮；尤其是在2011年3月於世界第三大核能發電國日本，發生觀測史上芮氏規模9.0強震，造成海嘯侵襲，及引爆福島核電廠輻射外洩等危害事件，大幅降低國人對核能發電安全之信心；其主要關切面向包含放射性核廢料處置問題、對周遭居民與環境之衝擊，及後續衍生的經濟發展和能源安全之堪慮，終至面臨新建核四電廠停工封存及廢核之困境。目前政府能源新政策推動主軸為穩健減核，以遵循「環境基本法」第23條所揭示，逐步邁向非核家園為目標，並積極推動多元化能源替代政策，加強節能及提升用電效率，來改善能源供需之困境(Chen 2012, Pan 2013)。

此外，為遵循「京都議定書」抑制CO₂排放量之國際共識，避免溫室效應造成氣候變遷之威脅，因為其嚴重後果包含20~30%物種滅絕、農林作物產量下降、乾旱頻率增加、冰河與冰原融化等危害(Kerr 2007)。Shiu (2007)分析指出，全球擬定因應策略不外乎以減少化石燃料使用與發展新能源為主軸。依據IEA (2014)調查資料可知，2012年全球燃料燃燒之CO₂排放量約為317 x 10⁸ ton，而臺灣排碳量雖僅約為2.5 x 10⁸ ton，居全球排名第24位，然每人平均排放量約為10.9 ton，高於日本、中國大陸、新加坡及經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Cooperation and Development, 簡稱OECD)平均值。顯見，過高排碳量與核能發電潛在危機等迫切性問題，是我國未來能源政策發展須嚴肅面對，朝向低碳能源與抑制碳排放為優先發展方向。

強化再生能源利用是近年來歐美先進國家大力發展的能源方向，不但逐年成長，且在其未來之能源政策中，均訂有中、長期之達成目標。參照國外經驗，各國政府為維護環境生態，推展綠色能源，均相繼制訂諸多強制規範及獎勵措施等法令條文，落實強化再生利用及永續家園之理念，德國聯邦環境局(FEAG 2010)德國政府為降低80~90%溫室氣體排放量，訂定於2050年再生能源發電占比將達100%。而

歐盟於EU2020策略規劃中，制定再生能源發電占總能源比例需達20%以上，2010年歐盟委員會更提高獎勵補助金由原6%增為12%，預估將減少(2.3~2.6) x 10⁸ ton的CO₂排放量。美國雖未制定全國性再生能源發電佔比目標，然主要是由各州採取強制性法規政策，於全國境內約29州實行再生能源發電配額標準(Renewable Portfolio Standards, RPS)，預期至2030年再生能源發電佔比達總發電量10~40%。日本也於未來能源政策中強化發展使用再生能源之比例，擴大木質顆粒燃料使用需求，來舒緩全球暖化及環境變遷等危害。可望於2020年如同歐盟使再生能源佔比達20% (Magelli et al. 2009, Jeng 2012, Sikkema 2014)。韓國則因1990~2006年間，CO₂排放量大幅增長約97%，是故積極採取再生能源利用措施，而木質能源即為其中重要發展項目之一；預計木質顆粒需求量於2012年超過75 x 10⁴ ton，2020年擴增至500 x 10⁴ ton。該項預測乃基於韓國期盼2020年再生能源占比達11% (Roos and Brackley 2012)。臺灣屬地狹人稠，能源資源貧瘠，能源高度仰賴進口之海島型國家，如何挑戰化石燃料短缺衝擊、提升再生能源使用比例，實現低汙染低排碳等能源自足之目標，著實為未來能源政策首要考量之議題。

然而，單憑發展使用再生能源也並非就此一勞永逸，乃因發展再生能源亦會產生污染或製造廢棄物，例如太陽能發電必須使用之蓄電池中就含有重金屬，必須將其所產生廢棄物妥善處理，才得以確保對環境安全無虞(TRI 2014)。另如風力發電使用之風力機，設置地點之適宜性與產生之噪音，亦會對環境產生負面影響。在目前再生能源選項中，木質能源係以回收木質廢料為原料之能源，基於碳循環中立原理，木質能源排碳量低，經歷壓製程，可產製具高密度、易運輸、易貯藏與安全等特性之木質顆粒燃料(wood pellets)，發電熱值高，供熱具高效率(Peng et al. 2010)。木質能源是近年來歐美先進國家大力發展的再生能源，歐盟在獎勵補助及稅收減免刺激下，大量利用木質燃料顆粒供應住宅及小型區域產熱製電，同時

可改善燃煤採運成本波動甚具之缺失，每年以25%漲幅速度擴增。德國、挪威和瑞典更將該燃料視為歐洲減緩溫室氣體的主要計劃之一。北美則估計約有 50×10^4 具鍋爐燃燒設備，木質能源年消費量達 65×10^4 ton (Magelli et al. 2009, Weng 2009)。此外，木質能源因可取自於木屑殘材、鋸末或刨花等，相較採礦燃煤運輸系統，更具環保及經濟效益(Pa et al. 2012)。顯見木質能源已為世界燃料利用之趨勢，值得深入探究其價值。

臺灣擁有占比面積達58%的豐富森林資源，其中人工林約占20%，面積近 40×10^4 ha，可為發展木質能源永續利用的最佳資材來源。如何妥善運用現有資源，來創造高價值之附加效益，極具探究之必要。本研究乃先瞭解我國目前可用再生能源之特性，並藉其特性試以評估能源之有效配置，進而探究木質能源未來於國內發展之契機，期盼對木質能源利用合理定位，舒緩木質廢棄殘材無效益焚燒，降低資源無謂耗損等缺失。再者，估算我國木質能源最大年產量之可行性與敏感度分析，依其結果試擬相關政策措施，作為後續推動之參考，同時於多目標及生態系經營原則下，激勵振興國內木質產業健全發展。研究目的是欲評估我國自主性能源，多元化利用之可行性，於價格及產量上詳加探討，以期減緩進口依存度之威脅，開創小規模備載用電之需。

材料及方法

一、研究材料

研究材料係參照經濟部能源局(Bureau of Energy (BOE), Ministry of Economic Affairs) 2013年發行之能源統計手冊(Energy Statistics Hand Book) (BOE 2013)，依其所述資料詳加分析再生能源使用現況，包含各項再生能源發電量、發電占比及相較2003年發電量增減之比率等，並利用2014年台灣電力公司(Taiwan Power Company, TPC)實際營運之各項再生燃料發電成本、電力設廠區位分佈與用電負載結構等資訊作為依據，藉以瞭解不同再生能源之屬性、

製電成本、發電及輸電限制等差異。此外，應用行政院環境保護署(Environmental Protection Administration, EPA) 2009年垃圾焚化廠轉型生質能源中心可行性評估規劃專案工作計畫報告，所載農產剩餘資材(含稻草稻穀、雜用作物剩餘資材及果樹剪定枝)、林產剩餘資材(含林木伐區剩餘資材及漂流木)與巨大垃圾(含廢棄家具、沙發及樹枝)年產資材量及相關國內外文獻報告數據，推估我國木質能源最大年產量與發電效能，檢視木質能源發展之可行性。並另以敏感度分析，推估替代核四電廠發電量之比例。

二、研究方法

本研究方法主要依據蒐集國內外實際營運或估算數據等文獻資料，進行質性與量化分析，研究步驟如下：

- (一) 歸納各類型再生能源特性之差異，並針對其差異及優缺點進行比較分析。
- (二) 研擬分析再生能源在受限條件下，最適之產能利用與配置。
- (三) 應用地理區位疊圖方式，區劃出我國人工林發展木質能源最具潛力之地區。
- (四) 推估應用現有資材發展木質能源最大發電效能及替代核能四廠發電比例。
- (五) 研擬短、中、長期策略規劃，提供落實再生能源推廣策略。

結果與討論

一、我國再生能源利用現況與發電成本

(一) 再生能源利用現況

依據我國「再生能源發展條例」第3條用詞定義：「再生能源係指太陽能、生質能、地熱能、海洋能、風力、非抽蓄式水力、國內一般廢棄物與一般事業廢棄物等直接利用或經處理所產生之能源，或其他經中央主管機關認定可永續利用之能源。」顯見再生能源須符合永續利用之特質。而「再生能源發展條例」所指生質能是指「農林植物、沼氣及國內有機廢棄物直接利用或經處理所產生之能源」。

我國利用再生能源發電項目，由經濟部能源局2013年能源統計手冊(BOE 2013)得悉，再生能源發電量為 108×10^8 kWh，占總能源發電量約4.28%，其中以慣常水力發電占最大宗，發電量為 54×10^8 kWh，約占2.15%，其次依序為廢棄物能發電量 31×10^8 kWh，占比為1.25%、風力發電量 16×10^8 kWh，占比為0.65%、太陽能發電量 3.3×10^8 kWh，占比為0.13%及生質能發電量 2.5×10^8 kWh，占比為0.10%。相較2003年發電量 60×10^8 kWh，占總發電量比率為2.9%，使用比例明顯增長，其中以慣常水力發電 30×10^8 kWh變動幅度最大，占比為1.45%，增加約0.7%；次者為風力發電 0.23×10^8 kWh，占比為0.01%，增加約0.64%及太陽光電 50×10^4 kWh，占比為0%，增幅約0.13%。而廢棄物能及生質能發電則呈負成長趨勢，廢棄物能 26×10^8 kWh，占比為1.26%，降幅約0.01%；生質能發電 3.7×10^8 kWh，占比為0.18%，降幅達0.08%，可知近10年來，我國致力投資於慣常水力、風力及太陽光電，對於廢棄物能與生質能發電卻有不增反減之現象。

另檢視我國再生能源慣常水力、風力及太陽能之發電特性，並參照臺灣電力公司電廠配置現況可知悉，慣常水力發電廠設置地點較為廣泛，分設於南、北部及東部水力資源較豐等地，然因地形、地質及水文氣象等天然條件限制，優良水力發電處不多，且大都已開發利用，冬季時期有時亦有水量乾枯等問題。風力發電是藉由空氣之氣動力轉動風機葉片，隨風速增加發電效率愈高，因此建置地點須位於空曠且風源穩定處，目前風力發電廠地理區位分布集中於西部雲林以北沿海地帶，發電機共計306座。然風力發電受東北季風季節變化落差影響，每年1~3月及10~12月發電量占風力年度發電量70%，其餘月份發電量並不顯著，供電較不具穩定性。太陽光電須架設電板，將板面朝南仰角設定23.5度吸收0.2~0.4 μm 波長之太陽光，架設處須避免任何遮蔽物，所用地面積廣，鋪設成本高，且需配合日照時間、強度及裝置面積，所吸取貯藏之能量呈區域性及季節性差異，夜間有不得儲能之缺失，目前設置

分佈集中於西部地區；受日照時數影響，每年6~10月才有較大發電量，11~12月則急速下降，亦如同慣常水力、風力發電般無法長時間提供穩定運轉供電。

(二) 再生能源成本分析

根據2014年台灣電力公司經營資訊公告，自發電力實際營運之發電成本數據，各型再生能源成本最低者為慣常水力發電，每度成本約為NT\$1.54，其次依序漸高為風力發電NT\$3.48 kWh^{-1} ，及成本較易波動者之太陽光電為NT\$10.14 kWh^{-1} 。相較2013年慣常水力NT\$1.22 kWh^{-1} 、風力發電NT\$3.39 kWh^{-1} 及太陽光電NT\$11.36 kWh^{-1} ，顯見，除太陽光電外，皆有小幅上漲之情況。若納入木質燃料能源成本相較可知，參照Francescato and Bergomi (2009)木質燃料手冊，依其燃燒成本及年產量換算結果，木屑切片燃料成本約為NT\$2.24 kWh^{-1} 、木質顆粒約為NT\$2.7 kWh^{-1} ，詳見如Table 1所示。

二、木質能源特性

木質能源係以木質材料作為提供能源之原料，燃燒形體可以木屑切片或木質燃料顆粒呈現，其中木質燃料顆粒是利用小徑木材、鋸木殘材、廢棄木屑、刨花或枯枝等廢棄資材粉碎細磨後壓製成粒，便可作為供熱發電的高效益再生燃料。木質顆粒燃料具低碳排放、體積小易貯藏及方便與安全運輸等優勢，且其設廠較無區位限制，技術門檻與投資成本低，唯一需考量點為運輸成本，然得以小規模區域型態取代遠距離營運模式，降低耗能。木質顆粒燃料發電成本約為NT\$2.7 kWh^{-1} ，雖高於燃煤NT\$1.25 kWh^{-1} ，但皆低於化石燃油NT\$5.99 kWh^{-1} 及天然氣NT\$3.25 kWh^{-1} (TPC 2014)。故木質顆粒燃料已成為歐美國家全力投資與發展之再生能源，取代傳統化石能源比例近年來呈現快速增長中，統計於2010年全球木質顆粒消費量約為13.5 M ton，並預測木質能源未來消費需求量至2025年突破50 M ton (Statista 2015)。

再生能源中風力及太陽光電礙於發電廠受

Table 1. Comparison of different renewable energy generating capacities and generating costs in Taiwan based on data from related authorities

Item (Unit)	Conventional hydropower	Wind power	Solar photovoltaics	Wood fuels	
				Wood chips	Wood pellets
Power generation (10^8 kWh)	54 ¹⁾	16 ¹⁾	3.3 ¹⁾	---	---
Power generation rate (%)	2.15 ¹⁾	0.65 ¹⁾	0.13 ¹⁾	---	---
Power generation cost (NT\$ kWh ⁻¹)	1.54 ²⁾	3.48 ²⁾	10.14 ²⁾	2.24 ³⁾	2.7 ³⁾

¹⁾ BOE (2013).

²⁾ TPC (2014).

³⁾ Conversion from *Wood Fuels Handbook* by Francescato and Bergomi (2009); currency exchange rate EUR\$1 \approx New Taiwan (NT) \$38.04 in Dec 2014.

天候、季節及日照時數影響甚鉅，無法長時間穩定性運轉，皆屬間歇性能源。然而，不論是慣常水力、風力或太陽光電皆有無法貯藏電力之問題，意指在產製電力的過程中，電力無法貯存，需立即完成輸電用電，除非裝置儲能液流電池系統，但該系統尚在研發階段且成本昂貴，故目前仍有儲存電力之疑慮。反觀，木質能源不受季節及區域性之限制，若透過有效率之規劃管理，使料源定得以穩定供應，便可減緩風能及太陽能產業淡季缺電或配合緊急調度指令臨時增產電力等狀況。

三、木質能源應用潛力

參照臺灣電力公司(TPC 2015)目前電力系統配置網絡，可概分為基載、中載及尖載電能。基載需符合長時間運轉且發電成本低廉之特性，如核能及燃煤等；中載則係供應基載及尖載的用電負載，應具日初升載且深夜可降載，或解聯停止發電之性能，以配合民生作息用電之需，如燃油及天然氣等；尖載需具備隨時起停運轉之功能，滿足尖峰期間用電需求，如抽蓄水力及氣渦輪機等。

以我國再生能源發展條件，現今雖無法完全取代核能、燃煤、天然氣及燃油等化石燃料，但因所有發電廠所產製之交流電是無法儲存的，僅能透過預測備載電力維持用電供需，然備載電力過低會造成缺電及限電，過高則耗能浪費。因此，依再生能源屬性將其歸類，作為我國發電輔助之部分備載用電，如慣常水力

發電成本低，電廠設置廣泛且較趨於穩定，適宜作為基載之備載電力；太陽能發電雖受光照時數限制，但符合日出升載夜間降載之特性，產製電力與用電負載呈正相關，可視為中載之備載電力；風力發電因東北季風之故，可填補冬季使用高耗能電熱設備之尖載用電；另外，木質燃料能源易貯藏運輸，得運輸至東部、南部等偏內陸地區作為備載能源，改善風能與太陽能不利發電之負載平衡，亦可推廣偏遠鄉鎮妥善運用，提升穩定供給用電之生活環境。以下利用木質能源區位分布及我國木質能源最大年產能等面向，來說明木質能源未來發展之潛力評估。

(一) 地理區位分佈

依據行政院農業委員會林務局台灣的自然資源與生態資料庫III (TFB 2006)：「農林漁牧第三次森林資源調查人工林區位分布圖」得知，我國林木資源多集中於內陸地區，且廣泛散布於北中南東等地，若以其為基底圖，套疊慣常水力、風力及太陽光電廠設置標的，便可知前項再生能源不易供電輸電之地理區位，即為發展木質能源及推動木質燃料之最佳地點(如Fig. 1)。顯見，由南至北如屏東、高雄、台南、嘉義、新竹、新北市山區、宜蘭及花東地區等，皆有豐富的木質能源，可作為替補再生能源供電不足之缺失，亦可改善偏遠地區電力調度或用電限制，以增加多元化再生燃料之可及性，詳如Fig. 2所示。

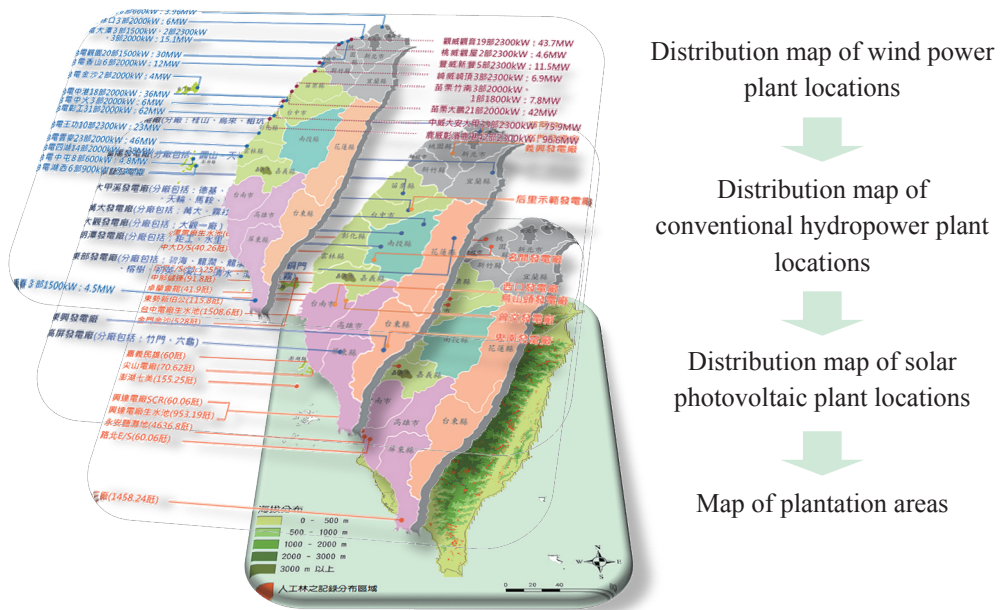


Fig. 1. Map overlay using renewable energy power plants with plantation areas. (sources: Taiwan Forestry Bureau 2006, Taiwan Power Company 2014)

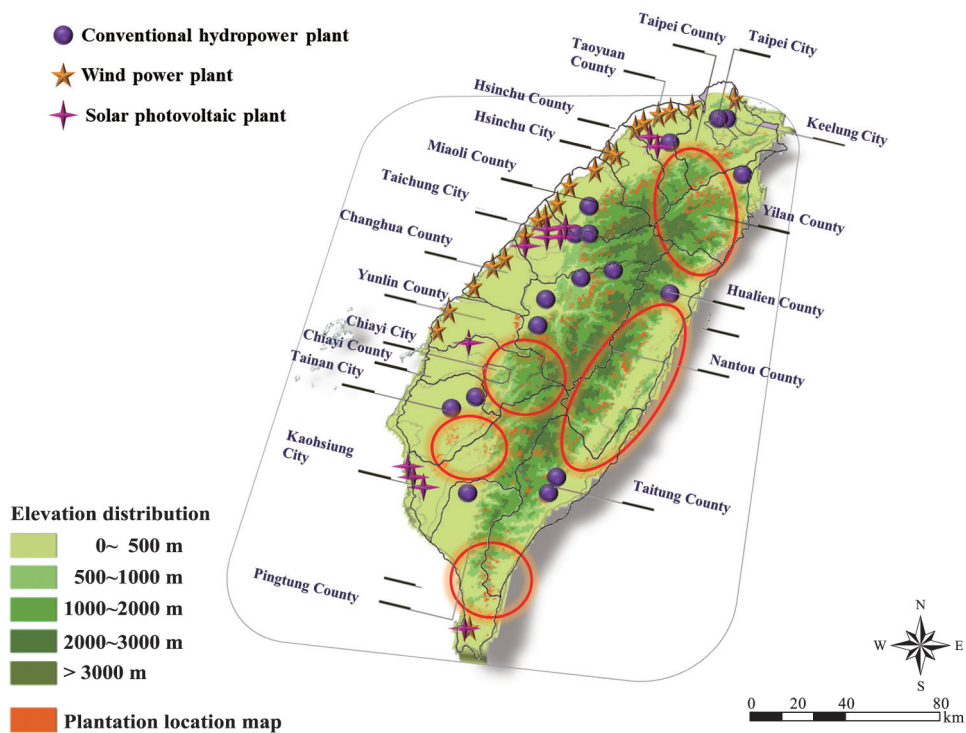


Fig. 2. Potential regions for woody bioenergy development. (sources: Taiwan Forestry Bureau 2006)

(二) 年發電量預估

在過去以能源作物為料源之生質能因遭受「與糧爭地、與人爭糧」之疑慮，政策被迫中斷。對此，若得以妥善建構廢棄木屑殘材回收機制，發展木質能源便可避免類似堪慮，對環境廢棄物處置更具助益。因國內林木資源廢棄殘材尚未有完善的統計數據，本研究參照行政院環境保護署2009年垃圾焚化廠轉型生質能源中心可行性評估規劃專案工作計畫統計報告數據(EPA 2009)，並假設該項數據皆得以作為木質顆粒之原料，來估算我國林木廢棄殘材最大年產量。其中，依據該報告指出農業剩餘資材量(含果樹剪定枝、稻草稻殼及雜用作物剩餘資材)約1,269,953 ton、林產剩餘資材量(含林木伐區剩餘資材及漂流木)約22,295 ton及巨大垃圾資材量(廢家具、沙發、樹枝)約137,923 ton，共計1,430,171 ton。

根據聯合國農糧組織(FAO)於2010年聯合國歐洲經濟委員會林產品轉換因子報告書(Forest product conversion factors for the UNECE region)內文數據(FAO 2010)，以1 m³之原木轉製顆粒燃料，其轉換係數為1.52估算，可知木質顆粒燃料年產量約為94 x 10⁴ ton，另參考歐洲顆粒中心(European pellet center)質量標準，瑞典木質顆粒燃料熱值(calorific value)約為16.9 MJ kg⁻¹(EPC 2015)，及愛爾蘭再生能源局(Sustainable Energy Authority of Ireland)公告所示，木質顆粒燃料熱值約為4.7 kWh kg⁻¹(1 MJ = 0.278 kWh)，故以熱值4700 kWh ton⁻¹計算(SEAI 2015)，並考量我國焚化廠發電效率約為18.5%，則我國木質顆粒發電量年產能約達8.2 x 10⁸ kWh。

(三) 木質能源替補核四發電之可行性

若以核四電廠兩部機組，每部機組1350 MW裝置容量，並考量機組利用率85%、電材耗損率4%及運轉8760 h，預估核四廠年發電量約為193 x 10⁸ kWh，另，參照2013年能源手冊總發電量為2523 x 10⁸ kWh，得知核四廠占總發電量約為7.6%，詳如Table 2所示。

依上述納入我國木質顆粒發電量年產能8.2 x 10⁸ kWh，相較核四廠預估年發電量193 x 10⁸ kWh，約占其4.2%。雖無法完全替代核四發電效能，但因木質能源原料取得不須額外開闢土地，具貯藏與運輸之特性，可作為備載燃料，不僅得以替補其他再生能源離峰時期發電量不足之缺失，紓解尖峰負載用電之需，亦能提昇廢棄殘材與林木產業等經濟之綜效。

(四) 敏感度分析

敏感度分析是使情境變數在某特定範圍內變動，並觀察該情境變化情形的分析模式。我國礙於木質資源廢料殘屑，並未有詳細的統計數據，僅能以相關文獻調查數值作一評估分析，依據上述行政院環保署2009年垃圾焚化廠轉型生質能源中心可行性評估規劃專案工作計畫統計數據及2010年聯合國農糧組織(FAO)聯合國歐洲經濟委員會林產品轉換因子報告書等相關文獻所估算出我國木質顆粒最大年產量約為94 x 10⁴ ton，藉其估計值為基值，試以模擬該產量隨回收率增減時，最大發電年產能之電量。如下，假設為四種情境模擬，分別為降幅20及40%，漲幅20及40%，以估算各種情境下，年發電量之變化(詳如Table 3)。

Table 2. Operational information of the 4 current nuclear power plants in Taiwan in 2015

	First plant (Chinshan)		Second plant (Kuosheng)		Third plant (Maanshan)		Fourth plant (Lungmen)	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 1	Reactor 2
Commission date	Dec. 1978	July 1979	Dec. 1981	Mar. 1983	July 1984	May 1985	shut down	
Installed capacity (10 MW)	63.6	63.6	98.5	98.5	95.1	95.1	135	135
Power generation rate (%)	4.46 ^{a)}		7.48 ^{a)}		6.67 ^{a)}		7.6 ^{b)}	

^{a)} Reference value of the total generating capacity in 2014.

^{b)} Reference value of the total generating capacity in 2013.

Table 3. Sensitivity analytical results of the capacity of woody bioenergy substituted for the fourth nuclear power plant based on output fluctuations

Context simulation	Case 1: drops 40%	Case 2: drops 20%	Original	Case 3: rises 20%	Case 4: rises 40%
Annual output (10^4 ton)	56	75	94	113	132
Annual electricity generation capacity (10^8 kWh)	4.9	6.6	8.2	9.8	11.5
Substitution rate for nuclear power generation (%)	2.5	3.4	4.2	5	5.9

情境模擬結果如Table 3所示，當林木剩餘資材量回收效率不彰時，設為情境一林木資材回收量降幅達40%，則其年發電量約為 4.9×10^8 kWh，占核四預估年發電量約為2.5%，情境二為林木資材回收量降幅20%時，年發電量約為 6.6×10^8 kWh，占核四預估年發電量約為3.4%；另當林木剩餘資材量回收率增加時，以情境三漲幅20%，年發電量約為 9.8×10^8 kWh，占核四預估年發電量約為5%，情境四漲幅達40%時，年發電量約為 11.5×10^8 kWh，占核四預估年發電量高達5.9%。

惟此該估計值僅計算木材剩餘資材量，並未考量竹林資源及鋸木廠殘材回收量等原料，若得以建立完善多元化料源回收機制，增加原料穩定性，以及原料廣泛取得之便利性，勢必可添補再生能源之使用，達到化石燃料降幅之利。

四、政策措施策略規劃

為帶動林木再生資源有效利用，實行相關政策措施有其必要性。參照國外能源政策，則包含獎勵補助、稅賦減免、監管措施及法定規範等，如奧地利自2008年起推動生質能供熱廠作住宅使用之獎勵方案(Subsidy Campaign for Biomass Heating Plants for Residential Use)，鼓勵民眾購置小型木質能發電設備資金補助，亦擬定獎勵農業發展生質能源補助計畫(Financial Incentives for Rural Biomass Energy Generation)，激發農民發展木屑和沼氣資源轉化熱值之動力；美國則研擬相關法令規範，廣泛宣導木質燃料之綜效，以減少焚燒煙霧及溫室氣體排放等危害；與我國地理區位相近似的日本，早自1980年發展木質顆粒產業，於2010年木質燃料混燒量約為 6×10^4 ton。

藉以檢視我國發展木質顆粒產業之可行性，如上所述，木質能源得以作為電力備載用電之需、提供偏遠地區自產電力，以及刺激木質產業經濟復興等優勢，本研究將其特性試擬相關政策措施，以短、中、長期作為初步規劃，將具體推動策略概分為1.分期分區示範計畫、2.獎勵措施補助計畫、3.擬定法規監管執行等，茲說明如下：

(一) 短期策略規劃-分期分區示範計畫

為扶植木質燃料產業發展，採循序漸進之方式，建構永續及再生的用電環境。短期得以推廣示範性質，分期分區於小型社區或偏遠地區先行推廣，本研究參照中央氣象局地震測報中心歷史統計資料(CWBSC 2015)，標示出近5年規模達5以上，深度約0~300 m之間的地震頻繁帶，再套疊各縣市區域名及我國再生能源發電廠不易供電處之人工林木質資源區域分布，如Fig. 3所示。

可依地震頻繁度較高者先行示範推廣，本研究將其計畫期程概分為三期，第一期可至台南、高雄及花東地區優先實行，乃因受地震災害之影響，較易發生缺電、斷電或難以即時供電之阻礙，一方面可解決緊急臨時用電之需，另一方面亦可改善偏遠地區供電不易之缺失；第二期可以新北市山區及宜蘭等地延續作業，推動高人口密集度小型燃料發電供需機制，第三期則為中南部南投及屏東等地，強化民眾木質燃料使用認知，以擴增木質能源之普及性。

(二) 中期策略規劃-獎勵措施補助策略

透過區域性小規模發展木質能源，激發木質能源產業商機，進而帶動相關產業隨之興

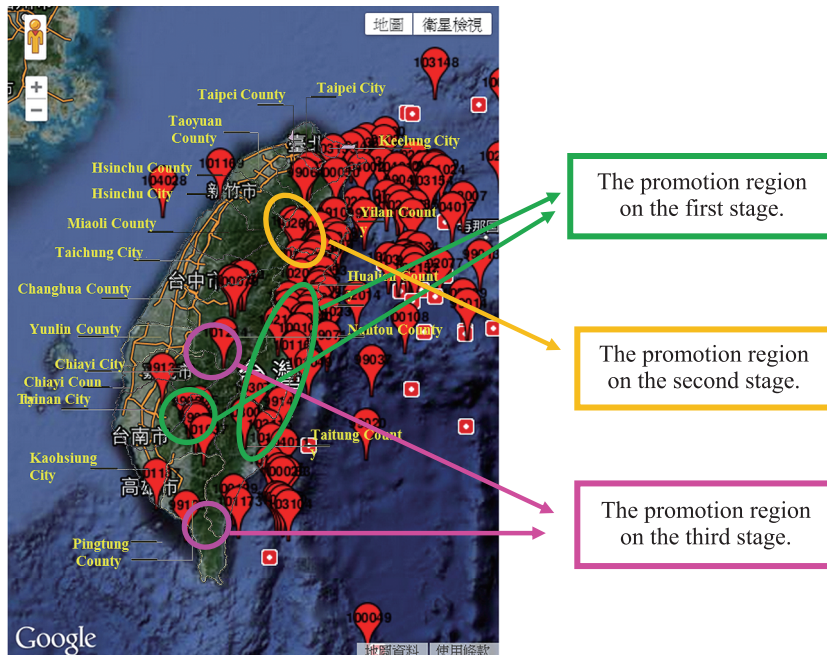


Fig. 3. The schemes to promote woody bioenergy based on different stages.
(Resource: Central Weather Bureau Seismological Center 2015)

起。於政府部門單位，可作為垃圾焚化廠發電燃料填補之需，我國垃圾焚化廠共計24座，其中有2座並未運轉，多以發電及供熱之用，近年來因執行資源回收垃圾分類方式，有效降低垃圾焚燒廢氣排放等危害，然亦影響垃圾燃料供給量不足，發電效能大幅下降之勢。參照經濟部能源局2013年能源統計手冊廢棄物能發電占比約為1.25%，相較2004年1.29%降幅約達3.1%。是故，若得以利用木質燃料替補為燃燒原料，便可改善垃圾焚化廠閒置缺失。

另於民營機構方面，可研擬相關獎勵措施，如購置木質能燃燒設備補助計畫、高密度住宅建設綠能投資計畫、大型工廠、學校或軍營某比例木質混燒優惠方案等，以擴增木質能源使用需求。

(三) 長期策略規劃-研擬法規監管執行

長期而言，木質能源為永續性資源，待建構完善木質能源回收機制，使原料得以大量且穩定性生產時，降低CO₂排放量，打造低碳的用

電環境，制定相關法規及定期查核監管燃燒成效，皆有其必要性。我國木質能源雖較國外發展大幅落後，但基於我國木、竹林資源甚為豐富，在強化國人使用認知及有效推動木質能源多元化利用下，即可逐步提升國際市場之競爭力，亦能提高我國木材自給率。

結論

依據我國目前能源結構，短期內化石燃料仍有不可取代之處，因此再生能源發展進度始終緩慢。然就長遠來看，台灣位屬海島地形，電力網絡為獨立系統，無法從鄰近國家進口電力，若不積極提高再生能源自給比例，擬定相關政策措施，對未來經濟發展實為一大隱憂，對環境生態更是危害。本研究分析結果顯示，我國林木能源於其他再生能源發電廠不易供電處，皆有廣泛的資源分布，就地理區位特性來看，不需耗費大量運輸成本，便可推展北、中、南、東等地之木質燃料製電供熱計畫。另

外，利用木質廢棄資材生產木質燃料顆粒，應用於發電之年發電量，約可占核四廠所評估之年發電量2.5~5.9%，且不受季節及區位性限制。若透過有效率之規劃管理，料源得以穩定供應，利用其特性截長補短，整合其優劣條件並相互搭配，將可開啟能源供給與環境保護功能雙贏之契機。

謝誌

本研究承蒙行政院農業委員會104農科-13.2.5-森-G2及103農科-13.2.6-森-G4科技計畫補助，特予誌謝。

引用文獻

- Bureau of Energy (BOE), Ministry of Economic Affairs (MOEA). 2013.** Energy statistics handbook. p 84-87. [in Chinese].
- Central Weather Bureau Seismological Center (CWBSC). 2015.** Earthquake advanced search. Available at <http://scweb.cwb.gov.tw/EarthquakeDetail.aspx>. Accessed 2015 May 18.
- Chen JY. 2012.** Requirements for quality assurance program of nuclear power plant in decommissioning stage. *Taiwan Power Nuclear Mon Mag* 356:16-23. [in Chinese].
- European Pellet Center (EPC). 2015.** Quality standards for pellets in European countries. Available at <http://www.pelletcentre.info/cms/site.aspx?p=2550>. Accessed 2015 May 10.
- Federal Environment Agency Germany (FEAG). 2010.** Energy target 2050: 100% renewable electricity supply. Dessau-Roßlau, Germany: Federal Environment Agency Germany. 4 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2010.** Forest product conversion factors for the UNECE region. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe. 26 p.
- Francescato V, Bergomi LZ. 2009.** Wood fuels handbook. Legnaro, Italy: Italian Agroforestry Energy Association. p 61-2.
- International Energy Agency (IEA). 2014.** Key world energy statistics. Paris, France: IEA. p 48-57.
- Jeng WJ. 2012.** The necessity of renewable energy development planning with energy storage. Hsinchu, Taiwan: Industrial Technology Research Institute. E-newsletter 10104.1p. [in Chinese].
- Kerr RA. 2007.** Global warming is changing the world. *Science* 316:188-90.
- Magelli F, Boucher K, Bi HT, Melin S, Bonoli A. 2009.** An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe. *Biomass Bioenergy* 33(3):434-41.
- Pa A, Craven JS, Bi XT, Melin S, Sokhansanj S. 2012.** Environmental footprints of British Columbia wood pellets from a simplified life cycle analysis. *Intl J Life Cycle Assessm* 17:220-31.
- Pan WY. 2013.** Nuclear power plant key issues report. Taipei, Taiwan: CTCI Foundation, no.102-02:29-31. [in Chinese].
- Peng JH, Bi HT, Sokhansanj S, Lim JC, Melin S. 2010.** An economical and market analysis of Canadian wood pellets. *Intl J Green Energy* 7(2):128-42.
- Roos JA, Brackley AM. 2012.** The Asian wood pellet markets. Portland, Oregon: United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station. General Technical Report. p 10-3.
- Shiu GR. 2007.** Greenhouse full of self-help manual. Taipei, Taiwan: Taiwan Environmental Protection Union. 7 p. [in Chinese].
- Sikkema R. 2014.** Forests: future fibre and fuel values. Woody biomass for energy and materials: resources, markets, carbon flows and sustainability impacts. Energy and Resources Group, Copernicus Institute of Sustainable

Development, Faculty of Geoscience, PhD dissertation, Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ. p 13-4.

Statista. 2015. Global wood pellet market in 2010 and 2012 with projections through 2025. Available at <http://www.statista.com/statistics/243910/global-wood-pellet-consumption-outlook/>. Accessed 2015 Jan 10.

Environmental Protection Administration (EPA). 2009. The evaluation on the feasibilities of the transformations from refuse incinerators to bio-energy. Taipei, Taiwan: SinoTech Engineering Consultants. Environmental Protection Administration, Executive Yuan. 8 p.

Sustainable Energy Authority of Ireland (SEAI). 2015. Renewable energy in business and industry. Available at http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Sources/Wood_Energy_and_Supply_Chain/Wood_Pellets/. Accessed 2015 May 10.

Taiwan Forestry Bureau (TFB). 2006. Tai-

wan natural resources and ecology database III Agriculture, Forestry, Fishery and Husbandry. 106 p.

Taiwan Power Company (TPC). 2014. Disclosure of information - electricity costs. Available at http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-a02.aspx?LinkID=22. Accessed 2014 July 4.

Taiwan Power Company (TPC). 2015. Disclosure of information - nuclear power plant information. Available at http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-b21.aspx?LinkID=7. Accessed 2015 May 20.

Taiwan Research Institute (TRI). 2014. Facing global warming Taiwan's response - renewable energy development. Available at <http://www.tri.org.tw/unfccc/main05.htm>. Accessed 2014 Dec 22.

Weng FY. 2009. The current development of wood pellets in Europe and America. *Energy Mon.* no.98(08):28-31. [in Chinese].