

再生能源發展政策之效益評估-結合實質選擇權法與成本效率曲線*

李珣琮**、施勵行***

摘要

本文主要目的在於運用實質選擇權法與成本效率曲線，建構再生能源發展之政策效益評價模式，模式中探討影響政策效益評價的不確定性與主要因素，正確評估再生能源發展之效益價值。並以風能進行實證分析搭配政策模擬（收購價格變動與外部成本內部化），進而協助政府規劃最適的再生能源發展政策與改善方向。研究結果顯示，當考量實質選擇權價值時，發展再生能源是具有投資效益的政策規劃。當外部成本內部化時，更能突顯發展再生能源所帶來的政策效益價值。在目前風能技術發展下，過度提高收購電價金額是不具投資效益的政策規劃。

關鍵詞：實質選擇權、成本效率曲線、再生能源、政策模擬、政策規劃

JEL 分類代號：G18, O21, Q48

* 本研究承蒙兩位匿名審查人提供諸多寶貴意見，特此致謝。文中如有任何缺失，當由作者自負。

** 台灣經濟研究院副研究員，本文聯繫作者。電話：(02)8978-3900#807；傳真：(02)8772-5979；Email: d30407@tier.org.tw。

*** 國立成功大學資源工程系教授。

再生能源發展政策之效益評估-結合實質選擇權法與成本效率曲線

李珣琮、施勵行

壹、緒論

為對抗全球暖化及減少溫室氣體的排放，各國政府積極推動發展再生能源等相關綠色能源政策，如 2009 年美國新當選總統歐巴馬的能源政策中指出，綠化新政主要涵蓋風力發電、太陽能、廢棄物處理和水資源等四大綠能產業，未來將推動包括風力發電等為期 2 年的振興經濟方案，期望綠化新政能為提振美國經濟，解決失業問題。此方案估計 2 年內要投入 7,000 億美元，至 2030 年，美國總電力需求將有 20% 將來自風力發電，同時可創造 25 萬個就業機會，整體綠化新政可減少約 50 億噸的二氧化碳排放量，整體綠能產業能創造 500 萬個就業機會。在臺灣，行政院於 2007 年底舉行的產業科技會議中，針對「再生能源」、「節約能源」與「前瞻能源」等三大能源科技項目進行討論並達成多項具體策略建議，2009 年於第三次全國能源會議達成建立「低碳家園」，同年經濟部提出「綠色能源產業旭升方案」，配合新政府的節能減碳政策目標以及於 2009 年 6 月通過的「再生能源發展條例」，再再顯示我國為推廣再生能源發展、增進能源多元化、改善環境品質，並帶動相關產業及增進國家永續發展之決心。

然再生能源與仰賴化石燃料之傳統能源不同，能量來源與發電方式種類繁多，因此再生能源之發展受到許多不確定性所影響，諸如天然條件限制、化石燃料價格變動、發電技術改良與政府政策規劃等，欲發展成功之關鍵乃在於政府的政策支持及相關的法源依據。綜觀全球再生能源發展成功國家之經驗，基本上可分為三個階段以推廣再生能源

之發展，分別是技術研發與示範階段、市場推廣階段與長期發展階段。技術研發與示範階段的主要目的在於降低技術研發初期之不確定性、刺激投資者的投資誘因與降低消費者的投資成本，進而提升再生能源之裝置容量，如美國之「能源政策法案」(energy policy act, EPA) 與風力發電稅賦抵減措施 (production tax credit, PTC)。市場推廣階段則多提供協力推動措施，主要目的為刺激再生能源之供給量與發電，諸如固定購電費率 (feed-in tariffs, FIT)、固定補貼價格 (fixed-premium systems)、保證收購年限與再生能源配比標準 (renewable portfolio standard, RPS) 等措施。實例如德國之「饋電法」(electricity feed law, EFL)、美國及日本的 RPS 制度與丹麥政府所實施的環境補貼等。長期發展階段，則藉由制定相關配套法源以促使能源市場自由化，如溫室氣體排放交易 (emission trade, ET) 與可交易之再生能源憑證 (renewable energy certificates, RECs)，主要目的為逐漸縮小傳統能源與再生能源發電成本之差距，使再生能源發展回歸市場機制。諸如丹麥之 RECs、德國之「再生能源優先法」(Act on Granting Priority to Renewable Energy Sources) 與臺灣之「再生能源發展條例」等。

近年來實質選擇權理論開始被廣泛應用於投資決策與策略規劃上，主要論點表示其評價模式可量化投資內外部環境改變時所產生的管理彈性（意指決策者可藉由管理的原則性與手段，使管理對象在一定條件限制下，自我進行彈性調整以適應環境的變化），政策制定者可利用管理彈性適度的調整政策規劃，有效達成政策規劃目標。當運用實質選擇權法衡量再生能源發展政策之效益評估時，可將傳統評估方法所忽略管理彈性予以量化並減少政策效益價值低估的可能性，簡言之，選擇權價值即來自於投資計畫中的不確定性與風險。然而現階段再生能源之發展，由於關鍵技術尚待突破與投資風險難以評估，整體而言仍不符合投資效益，導致許多有意願投資的企業望而怯步。因此，現階段應由政府先行投資先期技術，再利用示範系統、電能收購等多種推動措施協助再生能源之發展，在此發展過程中，若能建構適當的政策效益評價模式，有效衡量各種政策規劃下所產生的效益價值，方能輔助政府規劃再生能源發展政策。

綠能產業與永續發展已成為近年各國政府重視的推廣項目，政府為鼓勵再生能源產

業，勢必正確地評價相關產業發展政策之推動能帶來多少投資效益，以做為判斷政策施行成效之良莠。政府一方面持續投入補助資金扶持產業發展，增加自主研發能力，以提升產業自製率與降低成本；另一方面又不希望補助過於浮濫，除造成政府財政負擔，亦使得廠商單純只想賺取投資利潤。因此，本文之主要目的即在提供一種評價模式，協助政府評估及規劃未來的相關政策制定。與傳統淨現值法相比之下，就內在環境而言，政府政策之規劃有許多選擇行為，外在則有油價波動等投資環境之變動。簡言之，本研究提供一完整之評價模式，考量影響政策效益變動的主要因素與不確定性，正確評價再生能源產業發展政策所能帶來的實質政策價值。

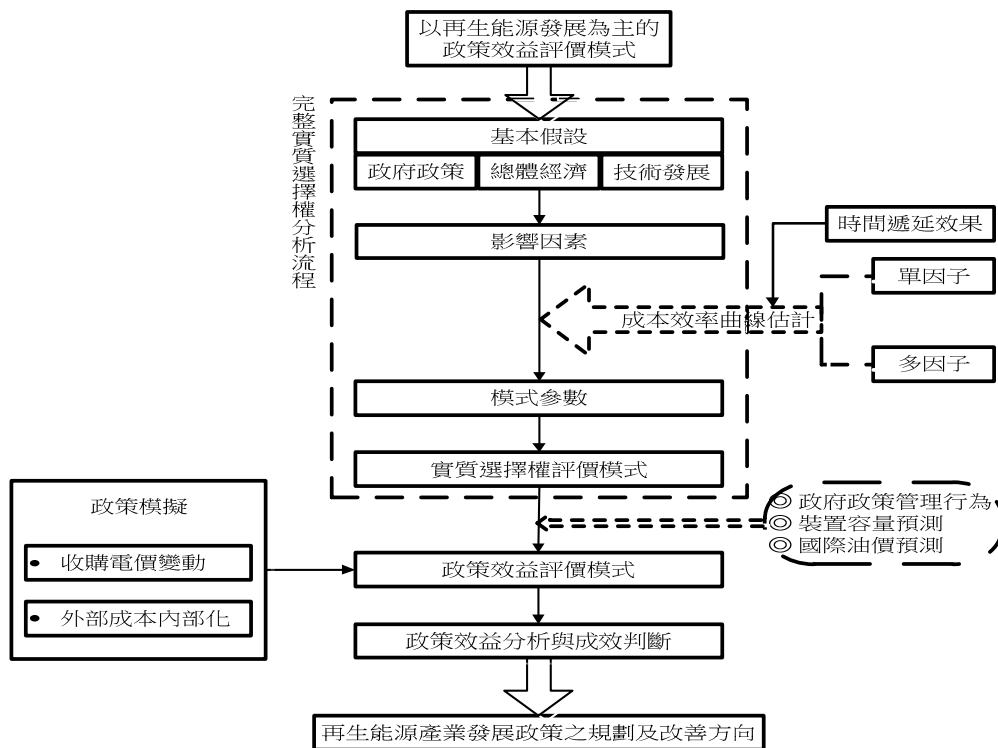


圖 1 研究基本架構圖

圖 1 即為本文之研究架構圖，研究方法主要透過投資決策與資源管理的角度，以系統化的方式探討政府對於再生能源產業發展的政策規劃行為。架構主軸為運用實質選擇權法，建構以再生能源產業發展為主的政策效益評價模式，首先歸納出影響政策效益評估的主要因素（模式參數），以實質選擇權評價模式建構再生能源產業發展之政策效益評價模式。針對再生能源發電成本效率預測部份，則運用成本效率曲線理論，模擬再生能源發電成本效率與裝置容量、政府補助資金等學習因素之間的關聯性。另一部份則參考世界各國成功推動再生能源發展之經驗，模擬「外部成本內部化」與「收購電價變動」二種政策，分析二種模擬情境所造成的政策價值變動與政策規劃差異。後續章節規劃如下，第二節為相關文獻的回顧與探討，第三節為政策效益評價的主要影響因素，第四節為政策效益評價模式建構，第五節為案例分析與政策模擬，第六節為結論。

貳、文獻探討

一、傳統評價模式與實質選擇權

傳統評估投資方案價值的評價模式以現金流量折現法 (discounted cash flow, DCF) 中的淨現值法 (net present value, NPV) 為主。此法為考慮貨幣時間價值的資本預算決策準則，其內涵在於所有的現金流量必須以資金成本折現，使其產生的時間回到決策時點，並在相同的時間基礎上比較各期淨現金流量與投入成本的大小，作為判斷投資計畫可行性的依據 (Fisher, 1907)。當 NPV 大於 0 時，則為可接受的投資計畫；當 NPV 小於 0 時，則應拒絕此計畫；至於 NPV 等於 0 時，則此計畫接受與否皆可。此模式的優點在於擁有簡易的計算方式與直觀的思考邏輯，但主要缺點即在於對未來的現金流量預先假設情境，即對未來市場變化只考慮一組可能性，並在投資初期就決定未來所有的現金流量，因此只適用於短期、不確定性低的投資方案評估，在實務應用上明顯缺乏彈性 (Dixit and

Pindyck, 1995; Herath and Park, 1999)。同時，DCF 法無法將投資後的不確定性資訊納入評估投資方案的考量之中，也就是無法適時表達投資決策上的管理彈性，造成低估投資方案的機會價值與實際價值 (Hayes and Abernathy, 1980; Hayes and Garvin, 1982; Trigeorgis and Mason, 1987; Trigeorgis, 1996)。

實質選擇權法 (real option analysis, ROA) 係 Myers (1977) 提出的概念，認為一個投資案藉由所產生的現金流量而創造出來的利潤，乃來自於目前對其擁有資產的使用，再加上一個對於未來投資機會的選擇，因此將 Black and Scholes (1973) 所發展的金融選擇權觀念應用在投資計畫或實質資產取得的應用上。Luenberger (1998) 將實質選擇權理論定義為：『將選擇權理論運用於評估實體資產價值波動，就稱為實質選擇權理論』。Copeland and Antikarov (2001) 則定義實質選擇權是權利而非義務，它可以用預定的成本（履約價格），在預定時間內（選擇權壽命，即存續期間），採取遞延、放棄、擴張或縮減等交易行動。依據履約日期的不同分為「美式選擇權」與「歐式選擇權」，兩者差別在於決定執行選擇權的時間，美式選擇權可在到期日前的任何一天執行此權利，而歐式選擇權僅可在到期日當天執行此權利。若此權利為買進標的物，稱為「買入選擇權」，若為賣出標的物，稱為「賣出選擇權」。此外，依據公式計算架構則可分為離散型與連續型二種模式。有別於傳統的投資方案決策，實質選擇權在於可衡量傳統評價模式所無法評價的管理彈性，Trigeorgis and Mason (1987) 稱此含有管理彈性之選擇權價值的投資方案價值為擴展或策略的淨現值 (expanded or strategic NPV)，其價值為傳統淨現值與實質選擇權價值之加總。繼 Myers 之後，實質選擇權的概念陸續被提出，大致上的形式可分為七個形式 (Brach, 2003; Trigeorgis, 1996)：遞延選擇權、階段選擇權、變更操作規模選擇權、放棄選擇權、轉換選擇權、成長選擇權與多種互動選擇權。

再生能源發展之政策規劃與技術發展如同研發投資計畫，具有短、中、長期等階段性目標，期間長達數十年以上，在這投資期間內不確定性難以完全預測，若採用傳統的評價模式，會產生錯誤的價值判斷與策略規劃，因此傳統評價模式較不適用於衡量能源專案的投資評價 (Tseng and Barz, 2002)，更不易於價格大幅波動的能源市場中，反應再

生能源技術的價值 (Deng and Oren, 2003; Awerbuch and Berger, 2003)。通常研發投資專案的價值並非立即可實現的報酬，而是在於研發成功後所產生之未來投資機會所創造出來的利潤 (Myers, 1977; Kester, 1984)，所以在估算投資專案的價值時，如何將投資機會轉換為量化的價值是非常重要的，而運用 ROA 則可精確的衡量出專案的價值 (Herath and Park, 1999; Benninga and Tolkowsky, 2002)。Herath and Park (2002) 也指出企業的研發活動其實就是屬於多階段之企業投資決策，初期的投資會帶來未來的投資機會，其實就是一種實質選擇權。Fraye and Uludere (2001) 亦指出，管理者並非放棄傳統的淨現值評估法，而是要補足傳統淨現值法的不足，由選擇權的性質可知，當未來情況愈不確定、投資期限愈長，會降低傳統淨現值的價值，但相對造成選擇權的價值愈高，抵銷掉降低傳統淨現值價值降低的負面效果。簡而言之，研發投資計畫的各發展階段、現金流量與未來效益具有許多之不確定性，期初之投資亦無法立即獲得報酬。運用 ROA，可藉由選擇權的特性充份反映「投機機會」與管理彈性價值，以突顯計畫的實質價值，因此以 ROA 衡量研發投資價值較為合適 (Newton et al., 2004)。

二、實質選擇權分析與再生能源投資決策及發展策略

投資計畫與政策規劃的持續執行，往往取決於未來是否能產生投資效益，而投資效益的多寡則可用來判斷投資計畫與政策執行之成效良莠，再生能源技術之投資計畫亦是如此，過去文獻中，許多學者運用 ROA 來判斷是否設置再生能源電廠與評估整體發展政策是否具有推動成效。在投資計畫決策方面，Venetsanos et al. (2002) 運用 Black and Scholes 評價模式衡量風力發電電廠的投資計畫效益，評估當面對能源市場競爭的不確定時，風力發電電廠的設置是否具有經濟利潤。文中指出影響投資計畫的不確定性因素來自於傳統燃料價格、環境法規、能源供給、技術以及能源市場結構。Kjaerland (2007) 說明為何挪威有許多計畫中的小型水力電廠及既有水力電廠的擴建計畫，但是卻遲不執行，主要為受到在電力自由化市場機制下，電價受到許多因素影響，使得投資獲利不確

定性提高，因而導致投資延宕。該研究運用 ROA 模式來分析水力發電於挪威的投資機會價值，模式中考量電力價格與其波動率、水資源蘊藏量、無風險利率、投資成本與變動成本等因素，文末並運用此模式求出最佳的投資時點。Bøckman et al. (2008) 運用 ROA，在面對電力價格不確定下評估水力發電投資計畫，以估計興建水力發電廠之電力價格門檻值與發電廠最適大小。Ansar and Sparks (2009) 假設因節能措施所產生的收益為依循幾何布朗運動 (geometric Brownian motion, GBM)，運用 ROA 及經驗曲線推導出障礙率，以評估節能技術的最適投資策略。其他如 Botterud and Korpås (2004)、Rothwell (2006) 及 Wang and Min (2006) 等學者同樣運用 ROA 來評估再生能源電廠的投資決策上。

在應用於評估整體再生能源發展政策之推動成效上，Davis and Owens (2003) 以美國再生能源（風能）為例，在面對傳統燃料價格的不確定性下，估計再生能源技術的價值，並利用敏感度分析求出再生能源的最佳補助資金支出金額。Siddiqui et al. (2007) 運用二項式實質選擇權法 (Cox et al., 1979) 評估在不同市場風險與能源組合下，再生能源研發計畫的實質選擇權價值，並將其價值分為現有價值、持續研發價值與放棄投資價值等三種價值。文中並指出過去評估再生能源研發效益的方法論有三項缺點，分別是未考慮非再生能源成本變動的不確定性、無法調整補助資金投入金額與未考量技術風險。

近年來由於全球暖化與氣候變遷，使得實質選擇權開始應用於探討二氧化碳 (CO₂) 相關議題上，諸如封存設備之投資決策、排放成本波動與減量政策成效等。Fuss et al. (2009) 亦針對化石燃料、碳燃料（燃油+CCS）和再生能源（風力）三種發電方式，運用 ROA 分析 CO₂ 排放價格不確定下所產生之 CO₂ 密集度，選擇最佳電力生產之能源配比。Anda et al. (2009) 運用 ROA 決定氣候政策（CO₂ 排放目標值）的法則，並衡量在過渡期所產生的潛在未來經濟價值，以量化不確定因素所造成價值低估之影響，結論顯示 ROA 所估計之含管理彈性的經濟價值較 NPV 法所估計的價值為高。Abadie and Chamorro (2008) 運用二維二項式決策樹探討燃煤電廠設置碳開採封存設備之投資策略，模式中考慮 CO₂ 排放量限制（京都議定書訂定之 2008 至 2012 年歐洲市場 CO₂ 排放量）和電價（西班牙躉售物價水準）等風險因素。Szolgayova et al. (2008) 對於 CO₂ 排放成本的不確定情況下，

運用 ROA 評估 CO₂ 排放成本上限或安全價值，研究結果得到以下幾點結論：在漸進稅制下，生質能源發電廠比化石能源發電廠有利；在面對 CO₂ 排放成本波動下，化石燃料發電並不比生質能源發電差；生質能源發電廠比化石能源發電廠對於 CO₂ 排放成本波動更為敏感；碳開採封存設備的投資時機則不受 CO₂ 排放成本上限的影響。Kumbaroğlu et al. (2008) 運用實質選擇權觀念並結合學習曲線，利用動態規劃法建構政策規劃模型，模型中考量發電成本、可利用率、容量因素、學習率與建造前置期等因素，案例是以土耳其能源供給市場為例，以情境分析的方式模擬 6 種不同的能源配比政策，探討何種能源配比方式能對再生能源的發展與 CO₂ 排放減量產生最好的效果。

表 1 整理出應用實質選擇權法於各種產業投資計畫評估之相關文獻，可發現到應用產業型態偏向於不確定性較高之產業，且直至現今仍持續地被使用。

此外，再生能源是否得以順利發展，其中一關鍵因素為「發電成本效率」，亦即為發電成本下降幅度的速度。再生能源之技術研發與發電成本之間有著很強烈的關聯性，當再生能源技術研發的資金投入增加時，會使得再生能源技術愈趨成熟，當技術不斷提升時，相關發電設備成本也會跟著下降，使得發電成本得以下降。成本效率曲線的概念於 1936 年由 Wright 提出並予以公式化，主要概念說明當累積產量為 2 倍時，單位平均成本會呈現等比例的下降，即直接人工成本與累積產量間存在某一特定的關係。直至今日，已發展為雙因子 (two-factor) 之成本效率曲線，用以探討邊做邊學 (learning by doing) 效果與探索中學習 (learning by searching) 效果對於再生能源發電成本下降之關係 (Barreto and Kypreos, 2004; Klaassen et al., 2005; Jamasb, 2006; Sagar and Zwaan, 2006; Söderholm and Klaassen, 2007; Söderholm and Sundqvist, 2007)。

總結來說，根據上述文獻回顧，許多學者指出傳統化石燃料與再生能源之電力成本、R&D 補助、再生能源技術發展情形與再生能源需求等，均會影響再生能源技術的發展 (Venetsanos et al., 2002; Kjaerland, 2007; Davis and Owens, 2003; Siddiqui et al., 2007; Kumbaroğlu et al., 2008)。更進一步指出藉由實質選擇權法，不但能將政策規劃中的不確定性納入考量，並可正確衡量投資環境變動下的管理彈性，提供策略制定者一種決策機制，因應未來可能發生的情勢變化而做出正確的決策判斷。此外，藉由與成本效率曲線

理論的結合，亦可模擬再生能源發電成本能因雙重學習效果（裝置容量增加與技術進步）而使發電成本下降之關係，因此，本文即以實質選擇權法，做為建構政策效益評價模式之研究方法。

表 1 應用實質選擇權法於各種產業投資計畫評估之相關案例

模式	年份	作者	應用產業
連續型	1999	Perlitz et al.	Pharmaceutical
	2001	Frayar and Uludere	Energy
	2002	Venetsanos et al.	renewable energy
	2003	Davis and Owens	renewable energy
	2004	Botterud and Korpås	renewable energy
	2004	Cassimon et al.	pharmaceutical
	2006	Rothwell	renewable energy
	2006	Wang and Min	renewable energy
	2007	Kjaerland	renewable energy
	2008	Bøckman et al.	renewable energy
	2008	Kumbaroğlu et al.	renewable energy
	2008	Szolgayova et al.	renewable energy, energy
	2009	Anda et al.	energy
	2009	Ansar and Sparks	energy
2009	Fuss et al.	renewable energy, energy	
離散型	2000	Kellogg and Charnes	biotechnology
	2002	Benninga and Tolkowsky	biotechnology
	2002	Herath and Park	manufacturing
	2003	Boer	pharmaceutical
	2005	Health and Bremser	biotechnology
	2005	Kerstin and Joachim	pharmaceutical
	2005	Brandão et al.	energy
	2007	Siddiqui et al.	renewable energy
	2008	Abadie and Chamorro	energy
	2008	Willigers and Hansen	pharmaceutical

參、政策效益評價的主要影響因素

根據文獻回顧之結論，本文即以傳統化石燃料電力成本、再生能源電力成本、再生能源技術發電裝置容量及獎勵與補助措施，做為影響政策效益評價模式的主要因素：

一、傳統化石燃料電力成本

自1972年來石油價格從每桶不到20美元到2008年已超過每桶100美元，中間經歷二次石油危機以及波斯灣戰爭，姑且不論短期的價格波動，不難觀察出石油價格從1970年代迄今，長期而言是呈現上升之趨勢。由於傳統能源價格變昂貴，使得原本被視為不符成本的再生能源相對地不再遙不可及，這也可以解釋為什麼日本發展太陽能比起美國有後來居上的趨勢。原因之一是日本的傳統能源價格比較昂貴，對日本家庭來說，使用太陽能和傳統能源的負擔差距沒有美國家庭來得大，所以對再生能源接受程度較高。當化石燃料價格較低時，以化石燃料為來源的電力成本往往也呈現一定比例的下降，政策傾向傳統發電方式，使得原本發電成本就較高的再生能源面臨更大的衝擊而不利於發展；反之，當化石燃料價格較高時，則造成再生能源的市場競爭力提升。此外，化石燃料波動率更能帶動再生能源發展之需求，由歷史國際石油價格發展軌跡可發現，70年的石油危機至今，油價的波動與不確定，反而是促使世界各國積極投入再生能源發展與制定相關推動政策的主因，由此可知，化石燃料價格波動與不確定性與再生能源發展息息相關。

二、再生能源電力成本

再生能源之技術研發與發電成本之間有著很強烈的關聯性，一般而言，增加再生能源技術研發的資金投入會使得再生能源技術愈趨成熟，當技術不斷提升時，相關發電設

備成本也會跟著下降，使得發電成本得以下降。IEA (2009) 報告指出，當風力發電裝置容量每增加一倍時，發電成本約減少 10%，未來每度電發電成本有可能降至 3 美分左右，可與傳統能源發電成本相抗衡。此外，由於傳統燃煤發電未計溫室氣體排放之外部處理成本，使得再生能源發電成本相對偏高。政府正積極加速「溫室氣體減量法草案」與「能源稅條例草案」的通過，主要目的為使傳統能源價格能反映內部發電成本與外部處理成本。隨著再生能源技術不斷提升與市場規模擴大，預期使用成本會逐漸下降，配合傳統能源發電成本納入外部成本，促使再生能源發電成本接近甚至低於傳統化石燃料能源，提升市場競爭力。

三、再生能源技術發電裝置容量

除固定收購費率外，我國政府也採用再生能源配比標準的方式，來提升再生能源的發展，但我國的再生能源配比標準與 IEA 政策架構中歸類為從供給面刺激發電量不同，我國的再生能源配比制度是以裝置容量為導向的政策考量。此外，我國能源配比政策與英美制度相比，不僅實施方式不同，政策目的亦不相同。英美主要以環境保護為考量重點，目的在於降低二氧化碳排放量，而我國主要的目的是在於推廣能源多元化及改善能源結構，並降低燃氣與燃煤機組的成本差異，讓各種能源發電成本趨於一致。能源配比政策規定於電業法修正草案增修條文第七條中，條文主旨在於期望法令規定再生能源發電之配比能達到某一程度的百分比，以營造有利於再生能源發展之環境。我國目前也藉由再生能源技術發電裝置容量的設置來達成此目標，規劃中訂定 2025 年我國再生能源之累積發電裝置容量為 845 萬瓩，占全國總裝置容量 14.9%，其中風力發電為 300 萬瓩，期望利用各階段目標之裝置容量來提升再生能源發電之裝置容量，相對而言也能增加再生能源技術發電量占全國總發電量的配比，進而創造有利再生能源發展的能源市場。

四、獎勵與補助措施

一般而言，再生能源發電成本相對於傳統能源偏高，以風力發電為例，因受自然條件影響，每瓩裝置容量每年可發電度數低於傳統燃煤電廠，使單位發電成本相對偏高，陸上式風力機發電成本為 $5-8 \text{ US}\$/\text{kWh}$ 、離岸式風力機為 $8-12 \text{ US}\$/\text{kWh}$ (IEA, 2000)。若要推動風力發電發展，則需有長期穩定之政策及法源依據。如德國及西班牙等國之成功經驗，發展初期給予設備補助，之後則透過立法給予風力發電較高之固定收購電價，方能保障民間之投資回收，並獲致合理利潤。隨著補助再生能源發展的資金不斷地投入，搭配政府提供的保證收購電價、規定電業併網義務、設備補助與財稅優惠等相關推動措施與法源依據，建構有利於再生能源發展的環境，使得再生能源之市場競爭力大幅提升。

肆、政策效益評價模式建構

本文之研究主軸為運用二項式實質選擇權法，建構以再生能源發展為主的政策效益評價模式。首先運用二項式隨機過程模擬傳統化石燃料電力成本的變動性，再藉由發電成本效率曲線建構，模擬再生能源電力成本效率提升的學習效果，最後運用二項式實質選擇權評價模式建構政策效益評價模式。因此，本節首先探討傳統化石燃料電力成本的變動性與發電成本效率曲線，再針對政策效益評價模式進行模式建構與闡述。

一、傳統化石燃料電力成本變動性

一般而言，當國際原油價格下降而帶動傳統化石燃料電力成本降低時，會造成發展再生能源的誘因大幅降低，而不利再生能源發展。反之，當傳統化石燃料電力成本過高時，又使得發展再生能源發展的誘因提升，因此，傳統化石燃料電力成本的變動性可視

為再生能源發展的成功失敗機率。本文運用二項式隨機過程來模擬化石燃料電力成本的變動情形，如圖 2 所述， $S(k, i)$ 表示再生能源發展的計畫週期中，傳統化石燃料電力成本的變動情形，是隨著時間點 k 與節點 i 的變動而改變。期初的傳統化石燃料電力成本可表示為 $S(0, 0)$ ，而下一期的傳統化石燃料電力成本則可表示 $S(1, 1)$ 與 $S(1, 0)$ ，其變動是隨機性且服從 GBM，因此會產生二種價值，如下表示之：

$$\begin{cases} S(1,1) = uS(0,0), \text{ when probability is } p \\ S(1,0) = dS(0,0), \text{ when probability is } 1-p \end{cases}$$

若以一般式表示則為：

$$\begin{cases} S(k+1, i+1) = uS(k, i), \text{ when probability is } p, 0 \leq k \leq T \text{ and } 0 \leq i \leq k \\ S(k+1, i) = dS(k, i), \text{ when probability is } 1-p, 0 \leq k \leq T \text{ and } 0 \leq i \leq k \\ \Rightarrow S(k, i) = S(0, 0)u^i d^{(k-i)}, 0 \leq k \leq T \text{ and } 0 \leq i \leq k \end{cases}$$

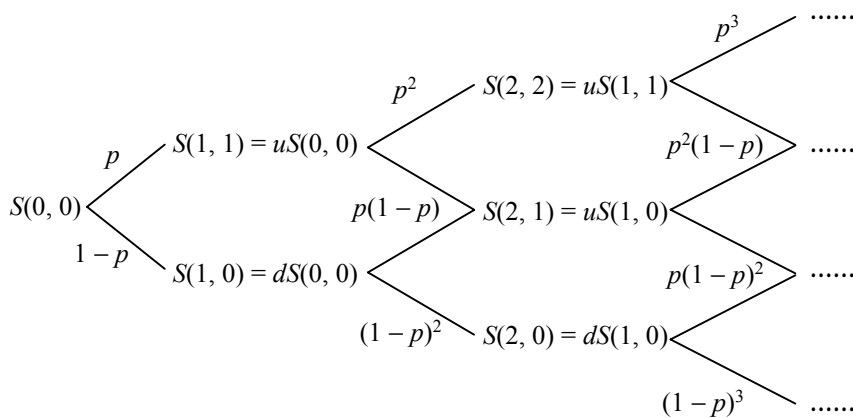


圖 2 二項式隨機過程

其中， S ：傳統化石燃料電力成本

T ：計畫週期總期數

n ：波動率週期

k ：計畫執行次數， $0 \leq k \leq T$

i ：傳統化石燃料電力成本變動次數， $0 \leq i \leq k$

u ：上漲幅度， $u = e^{\sigma\sqrt{T/n}}$

d ：下跌幅度， $d = \frac{1}{u} = e^{-\sigma\sqrt{T/n}}$

α ：無風險利率

p ：成功機率， $p = \frac{e^{\alpha(T/n)} - d}{u - d}$

σ ：波動率

二、發電成本效率曲線

成本效率 (cost efficiency) 曲線理論於 1936 年由 Wright 提出並予以公式化，當時 Wright 所闡述的現象稱為進步曲線。Wright 發現飛機機體的累積產量為 2 倍時，單位平均成本會呈現等比例的下降，即直接人工成本與累積產量間存在某一特定的關係。Arrow 在 1962 年也提出了邊做邊學 (learning by doing) 的說法，指出可透過學習效果產生技術進步，所謂「邊做邊學」是指勞工或管理階層在工作的過程中，不斷累積經驗，導致生產效率的提高，所形成的技術進步。邊做邊學可用來描述隨著生產量不斷的累積，勞工或管理階層不斷汲取經驗，使得平均生產每單位產品所需的要素投入量減少。因此，成本效率曲線又可被稱做為改善曲線、製造進步函數、經驗曲線、效率函數、績效曲線、產品加速曲線或學習曲線等 (Argote and Epplé, 1990; Dutton and Thomas, 1984)。成本效率曲線模式如 (1) 式所示 (Colpier and Cornland, 2002; Hamon, 2000; Neij, 1999)：

$$C_t = \delta_0 CUMS_t^{-\delta_D} \quad (1)$$

取對數：

$$\ln C_t = \ln \delta_0 - \delta_D \ln CUMS_t + \varepsilon_t \quad (2)$$

其中， C_t ：第 t 年的成本

δ_0 ：累積產量為 1 單位時的成本

δ_D ：邊做邊學指數

$CUMS_t$ ：第 t 年之累積裝置容量

ε_t ：相加性干擾項，假設 $\varepsilon_t \stackrel{i.i.d.}{\sim} N(0, \sigma^2)$

在成本效率曲線中常使用進步比例 (progress ratio, PR) 表示技術進步幅度，定義為 $PR_D = 2^{-\delta_D}$ ， δ_D 表示累積產量變為兩倍時，相對成本之變化程度。而學習率 (learning rate, LR) 則為 $LR_D = 1 - PR_D$ 。舉例而言，如圖 3(a) 中，風力發電技術之學習率為 18%，代表風力發電技術進步比例為 0.82，隱含著產量增加兩倍時，成本將會下降至原有成本的 82%，即下降了 18%。

近來，有學者指出在再生能源成本效率曲線的設定上，除了考量累積產量來反應成本下降幅度外，補助資金投入、經濟規模、土地成本、薪資與利率等因素，也會影響成本下降率 (McDonald and Schrattenholzer, 2001)。Barreto and Kypreos (2004) 則認為由於單因子模式相當簡化，且解釋變數為單一，並不能真實反應成本下降的比例。認為除了透過累積產量或裝置容量外，累積的補助資金支出亦會造成成本的下降。此模式亦稱為雙因子 (two-factor) 的成本效率曲線，如圖 3(b) 所示，除邊做邊學的效果外，增添了一項探索中學習之效果 (learning by searching)，用以表示累積補助資金的不斷投入而使技術進步，使得成本下降之關係，模式如 (3) 式所示。直至今日，已發展為利用雙因子之成本效率曲線，用以探討邊做邊學 (learning by doing) 效果與探索中學習 (learning by

searching) 效果對於再生能源發電成本下降之關係 (Klaassen et al., 2005; Jamasb, 2006; Sagar and Zwaan, 2006; Söderholm and Klaassen, 2007; Söderholm and Sundqvist, 2007)。

$$C_t = \delta_0 CUMS_t^{-\delta_D} CUMR_t^{-\delta_S} \quad (3)$$

取對數：

$$\ln C_t = \ln \delta_0 - \delta_D \ln CUMS_t - \delta_S \ln CUMR_t + \varepsilon_t \quad (4)$$

其中， δ_S ：探索中學習指數

$CUMR_t$ ：第 t 年之累積補助資金存量

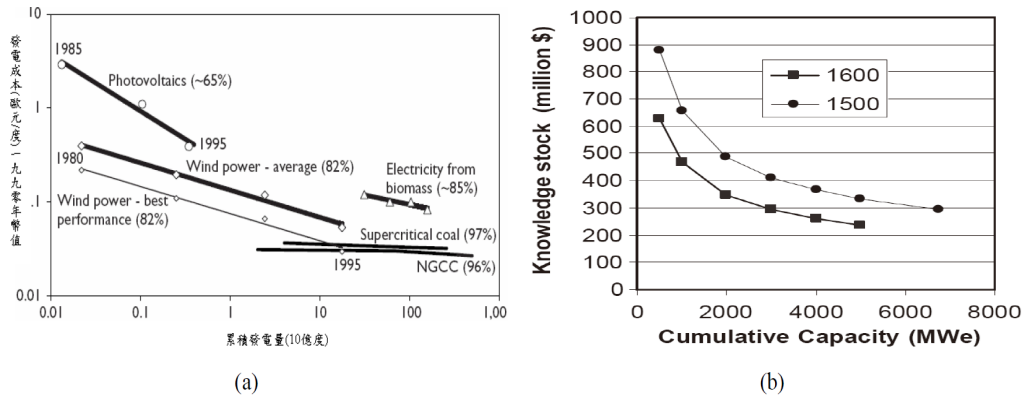


圖 3 單因子與雙因子之成本效率曲線

資料來源：IEA(2000) 及 Klaassen et al. (2005)

三、政策效益評價模式建構

本文藉由二項式實質選擇權評價模式、傳統化石燃料電力成本變動性、再生能源發

電成本效率曲線、影響政策效益評價的主要影響因素與發展政策之選擇權行為，建構再生能源發展之政策效益評價模式。根據再生能源發展政策制定之二項式決策樹，以二項式評價模式之逆向反覆程序，求解我國再生能源發展上的整體政策效益。模式中，假設政府在每一個政策制定點時，須考量再生能源是否需要持續發展。於下一階段的決策點仍必須考量下一階段是否需要持續發展再生能源。其二項式決策樹示意圖如圖 4 所示：

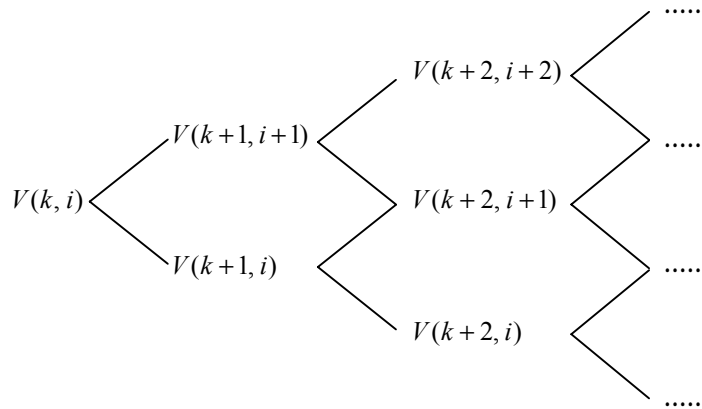


圖 4 再生能源發展之二項式決策樹

其中， $V(k, i)$ ：政策制定點

k ：計畫執行次數， $0 \leq k \leq T$

i ：傳統化石燃料電力成本變動次數， $0 \leq i \leq k$

首先， $V(k, i, r, j)$ 代表持續發展政策下之政策效益價值函數，其中， k 為計畫期數參數、 i 為傳統化石燃料電力成本變動的變動次數參數、 r 為補助資金投入次數參數、 j 為因投入行為為持續投資而使再生能源技術發電之裝置容量得以進行設置的次數參數。舉例來說， $V(1, 1, 1, 1)$ 代表當政策為持續發展政策時，若再生能源技術發展計畫的計畫期數經過了 1 期、傳統化石燃料電力成本隨著計畫期數增加了 1 期而相對應變動了 1 次、在

這 1 期計畫期數當中補助資金投入了 1 次，而再生能源技術因持續發展政策而進行 1 次的裝置容量設置的情況下之政策效益價值。同理， $V(1, 0, 1, 1)$ 即代表當政策為不持續發展政策時之政策效益價值，完整之政策效益評價模式如 (5) 式所述。

$$\begin{aligned}
 V(k, i, r, j) = & \left\{ \left[\left((S(k, i) + CE_{\text{cost}}) - (C(k, r)^{PR_D, k \times PR_{S, r}}) \right) X_{RE}(k, j) \right] \right. \\
 & \left. - [(R_G - C(0, 0)) X_{RE}(k, j)] \right\} \\
 & + \left\{ p(V(k+1, i+1, r+1, j+1)) + (1-p)(V(k+1, i, r+1, j+1)) \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中， $V(k, i, r, j)$ ：政策效益價值函數

$S(k, i)$ ：傳統化石燃料電力成本

$C(k, r)$ ：再生能源電力成本

$X_{RE}(k, j)$ ：再生能源技術年發電量

CE_{cost} ：二氧化碳外部排放成本

R_G ：收購電價金額

T ：計畫週期總期數

n ：波動率週期

α ：無風險利率

p ：成功機率， $p = \frac{e^{\alpha(T/n)} - d}{u - d}$

u ：上漲幅度， $u = e^{\sigma\sqrt{T/n}}$

d ：下跌幅度， $d = 1/u = e^{-\sigma\sqrt{T/n}}$

σ ：波動率

PR_D ：邊做邊學之進步比例

PR_S ：探索中學習之進步比例

k ：計畫執行次數， $0 \leq k \leq T$

i ：傳統化石燃料電力成本變動次數， $0 \leq i \leq k$

r ：補助資金投入次數， $0 \leq r \leq k$

j ：再生能源技術發電裝置容量設置次數， $0 \leq j \leq k$

估計完所有決策點 $V(k, i, r, j)$ 後，便可利用逆向反覆程序，由計畫到期日向前逆推至計畫期初日，最後可得期初時，我國再生能源技術發展之政策效益評價模式，其價值函數 $V(0, 0, 0, 0)$ 如 (6) 式所述。

$$\begin{aligned}
 V(0, 0, 0, 0) = & \left\{ \left[((S(0, 0) + CE_{\text{cost}}) - (C(0, 0)^{PR_{D,k} \times PR_{S,r}})) X_{RE}(0, 0) \right] \right. \\
 & \left. - [(R_G - C(0, 0)) X_{RE}(0, 0)] \right\} \\
 & + \{ p(V(1, 1, 1, 1)) + (1 - p)(V(1, 0, 1, 1)) \} \quad (6)
 \end{aligned}$$

伍、案例分析與政策模擬

本文以風力發電技術做為實證分析之案例，進行發展政策之效益評價與政策規劃。此外，由於再生能源發展之政策規劃受許多因素所影響，諸如傳統化石燃料電力成本結構改變、環保法規的制定、再生能源發電技術改變，甚至於政策的臨時改變，都會影響再生能源之發展，同時也會影響整體發展政策的效益。參考世界各國成功推動再生能源發展之經驗，本文模擬「收購電價變動」與「外部成本內部化」二種政策情境，探討不同情況下，對於再生能源發展之政策效益價值與政策規劃有何影響，模擬情境簡述如下，相關參數設定如表 2 所述。

表 2 各情境之模式參數設定一覽表

變數	定義	基本情境	情境1	情境2	備註
$S(k, i)$	傳統石化燃料電力成本	1.6830 元/度	同基本情境	同基本情境	2006年台電之發電成本（以燃油、燃煤、燃氣、核能之平均加權）。
$C(k, r)$	再生能源電力成本	1.9733 元/度	同基本情境	同基本情境	三座風力發電示範系統之平均發電成本（10年折舊）。
$X_{RE}(k, j)$	再生能源技術年發電量	252.1MW ~ 1,480 MW	同基本情境	同基本情境	假設年發電量等於總裝置容量，累積至2015年之總裝置容量為1,480MW (BOEMEA, 2009)。由2000年至2007年之實際裝置容量為指數成長方式，進而假設2008年至2015年之裝置容量亦為指數成長方式。
CE_{cost}	二氧化碳外部排放成本	0元/度	同基本情境	0元/度	2001年至2006年之風能平均容量因素為28% (BOEMEA, 2009)，可得累積至2015年之總能源供給為29,017百萬度，傳統石化燃料之二氧化碳排放係數為0.636 Kg CO ₂ e/kWh (BOEMEA, 2009)，風力發電之二氧化碳排放係數為0.0088 Kg CO ₂ e/kWh (Ardente et al., 2008)，本研究假設在再生能源發電能取代傳統能源發電下，可得至2015年，共可減少排放二氧化碳1,8919,920噸。於溫室氣體減量成本的設定上，由於在再生能源發展條例通過前，政府大多採取教育宣導與自願減量等方式，因此，此處採較保守之數值，每噸約為8美元 (郭迺鋒等, 1999; Levine et al., 2007)。

表 2 各情境之模式參數設定一覽表 (續)

變數	定義	基本情境	情境1	情境2	備註
R_G	收購電價金額	2.0 元/度	2.0 元/度 5.0 元/度	同基本情境	台灣電力股份有限公司再生能源電能收購作業要點。
T	計畫週期總期數	8	同基本情境	同基本情境	計畫年間為2008年至2015年。
n	波動率週期	8	同基本情境	同基本情境	每年變動一次。
α	無風險利率	0.035	同基本情境	同基本情境	政府10年期公債利率平均值。
p	成功機率	0.41	同基本情境	同基本情境	$p = \frac{e^{\alpha(T/n)} - d}{u - d}$
u	傳統石化燃料電力成本上漲幅度	1.65	同基本情境	同基本情境	$u = e^{\sigma\sqrt{T/n}}$
d	傳統石化燃料電力成本下跌幅度	0.61	同基本情境	同基本情境	$d = 1/u$
σ	波動率	0.50	同基本情境	同基本情境	1972年至2007年之WTI歷年油價變動百分比標準差。
PR_D	邊做邊學之進步比率	0.9593	同基本情境	同基本情境	以2001年至2006年，台電風力發電之實際之單位建置成本、裝置容量與補助資金，估計成本效率曲線。
PR_S	探索中學習之進步比例	0.9408	同基本情境	同基本情境	
k	計執行次數				
i	傳統石化燃料電力成本移動次數				
r	補助資金投入次數	0~7	同基本情境	同基本情境	每年變動一次
j	再生能源技術發電裝置容量設置次數				

情境 1：基本情境

我國於 1998 年召開「全國能源會議」後，歷經「再生能源發展方案（2002 年）」、「第二次全國能源會議（2005 年）」與「產業科技策略會議（2007 年）」後，大致抵定我國再生能源各階段之推廣目標，短期以風力發電、太陽光電及生質能為主要推動項目，長期以地熱、燃料電池及海洋能為推動方向，全面有效運用再生能源，達成 2015 年之累積裝置容量為 4,972 MW、2025 年之累積發電裝置容量為 8,450 MW。本文按經濟部於 2009 年所提出之「綠色能源產業旭升方案」中所訂定之目標年（2015 年）為基礎，做為基本情境之政策規劃年限，評估政府對於風能發展之政策規劃能帶來多少效益價值。

情境 2：收購電價變動

「再生能源發展條例」已於 2009 年 6 月通過，對各類再生能源電能之收購價格亦有初步共識結果，但民間業者仍希望提高收購金額以提升投資誘因。然而收購金額的提高，亦代表政府對於再生能源發展之補貼支出的增加，是為另一種財政支出，對整體政策價值會產生負面影響 (van der Linden et al., 2005)。此外，由於各國自然資源環境（如風能潛能）與總體經濟情況（如國民生產毛額）的不同，造成各國政府設定不同的收購水準，幅度約在每度 2 元至每度 5 元之間變動，如表 3 所示。因此，本情境即討論收購電價金額的變動，對於整體再生能源發展之政策效益有何種影響。

情境 3：外部成本內部化

2009 年年底「聯合國氣候變化綱要公約」(united nations framework convention on climate change, UNFCCC) 締約國會議於丹麥哥本哈根舉辦，探討全球暖化與氣候變遷等議題。目前傳統化石燃料發電未計溫室氣體污染排放之外部社會成本 (CO₂ emission cost)，造成傳統化石燃料發電並不符合使用者付費原則，使用者並未負擔完全使用成本（內部發電成本與二氧化碳外部處理成本），導致非再生能源的過度消費行為，造成再

生能源發電成本相對偏高。我國政府同樣積極推動「溫室氣體減量法」的立法工作，期望能源價格能充份反映其內外部成本。因此，此情境即探討當傳統化石燃料電力成本納入排放二氧化碳之外部處理成本時，會對整體政策效益價值產生何種程度的影響。

表 3 各國風能之收購價格一覽表

單位：NTD/kWh

Country	price	Country	price
Austria	3.576	Latvia	4.368
Australia	1.718	Lithuania	4.171
Belgium	3.600	Zealand	4.224
Czech	4.205	Norway	2.194
Denmark	3.331	Poland	3.600
Estonia	3.528	Portugal	3.840
France	3.936 (onshore)	Spain	4.483
Germany	4.416 (onshore)	Switzerland	2.957
Greece	3.504 ~ 4.320	UK	2.678 ~ 2.856
Ireland	3.120 (onshore)	US	1.814
Japan	3.504 ~ 4.286		

資料來源：BTM (2009)

一、發電成本效率曲線之分析

再生能源如風力發電之所以能在未來與傳統能源分庭抗禮的原因，即在於傳統石化燃料因蘊藏量有限的危機與社會大眾對環境品質要求的逐漸提高，使得傳統電力成本價格逐漸上漲。反觀風力發電，由於風能技術的進步、微觀選址專業能力的成熟，配合政府再生能源發展政策所訂定的裝置容量目標與相關補貼措施，使得風電成本呈現逐年下降的趨勢，進而促進臺灣風電產業的發展。藉由發電成本效率曲線之模擬，即可詮釋前述所闡述之概念，此外，由於研發過程充滿高度之不確定性，研發的投入努力與由其產

生效益之間，常有時間上的落差 (time lag) 現象，這段時間之差距很難估算，而使得績效評估工作不易。換言之，技術研發是持續性活動，具有時間遞延效果 (effect of time lag) (Kobos et al., 2006)，因此，本研究將 (3) 式中之 $CUMR$ 參數修改，用以納入政府補助產生之知識存量的時間遞延效果，如 (7) 式所示：

$$CUMR_t = CUMR_{t-1} + RDPE_{t-g} \quad (3)$$

其中， g ：時間遞延效果

$RDPE_t$ ：第 t 年之累積研發支出資金存量

本研究以風力發電做為分析之案例，運用 SPSS 17.0 統計軟體進行學習率參數之估計運算。資料來源部份，各年之風力發電裝置容量、補助資金支出金額資料分別來自經濟部能源局與台灣電力公司。此外，由於風力發電實際單位建置成本之資料收集不易（公部門之資料收集困難度），因此，本研究僅分析 2001 至 2006 年之樣本資料。基本情境為分析 2001 至 2006 之再生能源發電成本效率與裝置容量、補助資金等學習因素之間的學習效果，情境模擬部份則假設遞延 1 至 3 年 (Davis and Owens, 2003)，而研發支出資金部份則假設廠商會提撥 10% 之補助資金收入做為研發支出 (Lee and Shih, 2011)。

利用 2001 年至 2006 年台電公司風力發電之實際單位建置成本、裝置容量、補助資金與研發支出等資料（如表 4 所述），估計出的風能成本效率曲線相關參數值如表 5 所示。於基本情境下，邊做邊學之進步比例為 0.9553、學習率為 4.47%；探索中學習之進步比例為 0.9493、學習率為 5.07%；模式驗證分析中， R^2 為 0.902、 DW 值為 1.976、 VIF 值 7.318。遞延效果之情境模擬下，其邊做邊學之進步比例與學習率的變動幅度分別為 0.9593–0.9553 及 4.07–4.47%、探索中學習之數值變動幅度則分別為 0.9500–0.9408 及 5.00–5.92%；模式驗證分析中， R^2 、 DW 與 VIF 值的變動幅度分別為 0.905–0.911、2.052–2.201 與 6.073–7.502。

表 4 2001-2006 歷年之風能發電成本、裝置容量與補助資金數值一覽表

年	單位建置成本 (元/kW)	裝置容量 (MW)	補助資金 (百萬元)
2001	65,417	5.0	38.4
2002	62,292	8.5	94.4
2003	59,167	8.5	94.4
2004	54,133	8.5	104.1
2005	51,382	23.9	129.5
2006	44,989	103.7	200.9

表 5 雙因子發電成本效率曲線

	Time lag (年)	累積裝置容量		累積補助資金		模式驗證分析		
		δ_D	LR_D (%)	δ_S	LR_S (%)	R^2	DW	VIF
基本情境 (無遞延效果)	0	-0.066	4.47	-0.075	5.07	0.902	1.976	7.318
情境模擬 (有遞延效果)	1	-0.066	4.47	-0.074	5.00	0.905	2.201	6.073
	2	-0.060	4.07	-0.088	5.92	0.911	2.065	6.619
	3	-0.061	4.14	-0.085	5.72	0.906	2.052	7.502

由表 5 可觀察出，不論是基本情境或遞延效果之分析結果可看出裝置容量的增加與補助資金二種學習因素，對再生能源發電成本效率是有顯著反應的，此外，裝置容量與補助資金二因子之間無共線性問題，誤差項之間也相互獨立（前後觀察值並不會產生相互影響）， R^2 均在 0.9 之上，整體而言，所推估之成本效率曲線的模擬性良好。此外，再藉由表 4 中各模式所估計出之參數值，還原各模式下之各年單位建置成本並估算與實際值之間的誤差百分比，如表 6 所示，可看出當時間遞延效果為二年時之誤差百分比為

2.78%，其誤差百分比之數值所有模式中之最小，且並無共線性與變數自我相關等問題。因此，根據分析結果，時間遞延效果為二年最適的預測模型，換言之，政府藉由對再生能源電能的補助資金支出，會反應至二年後的民間投資，進而使裝置容量增加，同時也因規模經濟與技術進步，而使再生能源的發電成本得以下降。此外，本研究亦採用上述最適預測模型下所估算之進步比例，做為後續實證分析中所需之參數值。

表 6 不同雙因子發電成本效率曲線下之單位建置成本彙整表

年	原始數據 (元/kW)	模式 1		模式2		模式3		模式4	
		(Time lag = 0)		(Time lag = 1)		(Time lag = 2)		(Time lag = 3)	
		預測值 (元/kW)	誤差 (%) ¹	預測值 (元/kW)	誤差 (%) ¹	預測值 (元/kW)	誤差 (%) ¹	預測值 (元/kW)	誤差 (%) ¹
2001	65,417	65,674	0.39	65,836	0.64	66,018	0.92	66,035	0.95
2002	62,292	57,851	7.13	57,875	7.09	57,789	7.23	57,865	7.11
2003	59,167	57,851	2.22	57,622	2.61	57,587	2.67	57,865	2.20
2004	54,133	57,428	6.09	57,222	5.71	56,858	5.03	57,210	5.68
2005	51,382	51,627	0.48	51,519	0.27	51,400	0.03	51,483	0.20
2006	44,989	44,640	0.77	44,636	0.78	44,621	0.82	44,715	0.61
平均誤差(%)		2.85		2.85		2.78		2.79	

註 1：絕對值

二、基本情境模擬與分析

基本情境分析之目的在於探討目前政府對於風力發電發展之政策規劃能帶來多少效益價值。現階段政府對於風力發電發展之階段目標為至 2015 年時，累積裝置容量為 1,480 MW，占全國總發電裝置容量 3.4%，配合固定收購電價之措施，以每度 2 元收購再生能源電能，有效推廣再生能源之發展。發展期間，政策規劃期數為 8 年、無風險利率為 3.46%、期初（2008 年）傳統石化燃料電力成本與風力發電成本分別為 1.6830 元/度和

1.9733 元/度、波動率為 50%、傳統石化燃料電力成本上漲幅度與下跌幅度分別為 1.65 和 0.61、上漲機率與下跌機率分別為 0.41 和 0.59。將基本情境中之參數估計值代入政策效益評價模式，求得各年風力發電發展之政策效益價值，如圖 5 所示。

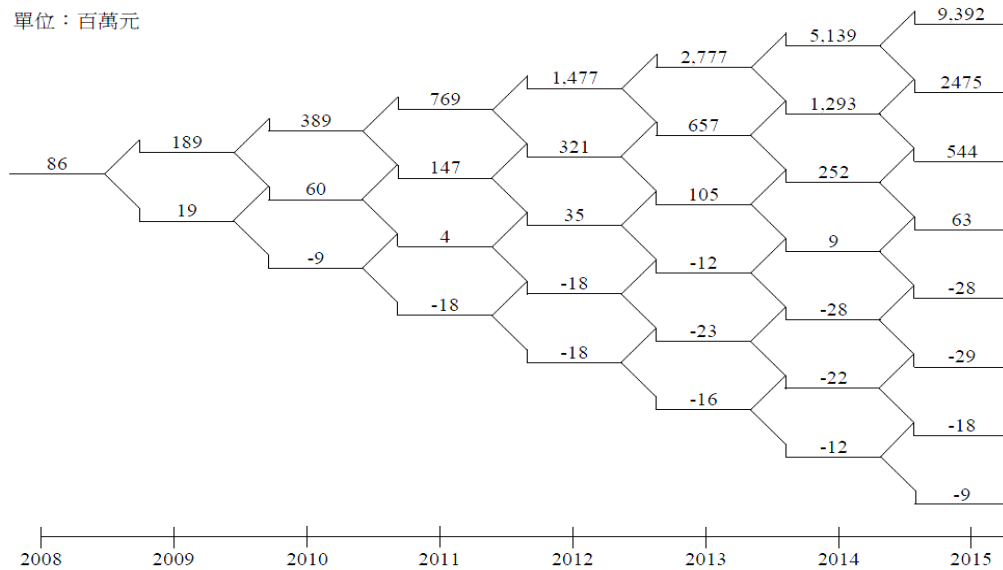


圖 5 基本情境下政策效益價值之二元樹展開圖

考量發展風能是否能為政府帶來投資效益，由淨現值法求得其政策規劃之傳統淨現值為 -963 百萬元 (Kerstin and Joachim, 2005)，若以傳統評價模式之評估結果顯示不具獲利能力，是屬不可行的政策規劃；但若以本文所提出之政策效益評價模式進行估算時，則與傳統評價模式大不相同，反而屬於可行的政策規劃，直至 2015 年發展風力發電所帶來的政策效益價值為 86 百萬元。由分析結果可得知，傳統評價模式並無法將政策規劃時之不確定性與管理彈性納入考量，造成低估發展風力發電之政策效益價值；當運用實質選擇權模式做為評估依據時，則能正確的顯示政策規劃的真正價值，使其政策價值現值由-963 百萬元，增加至含管理彈性之實質選擇權價值的 86 百萬元。

三、收購電價變動之模擬結果

考量目前對於風力發電發展之補助措施是否已提供足夠之經濟誘因，此情境將模式中之收購電價金額參數由每度2元逐漸提高至每度5元（模擬依據參考表3），探討提高收購金額之做法對整體政策效益價值有何種影響。分析結果如表7所示，當收購電價金額提高至每度5元時，政策效益價值由86百萬元下降至-606百萬元，每單位補貼資金可換得政策效益價值（投資效率）由0.1623下降至-0.0101。此分析結果顯示政府對於再生能源發展補貼支出的增加（530百萬元提高至60,106百萬元），對整體政策價值會產生負向的影響外，亦表示提高收購電價之政策措施不符合投資效益。

表7 收購電價變動對政策效益價值之變化

收購電價 (元/度)	傳統淨現值 (百萬元)	管理彈性價值 (百萬元)	政策效益價值 (百萬元)	投資效率	補助資金 (百萬元)
	(1)	(2)	(3)	(3)/(4)	(4)
2	-963	1,049	86	0.1623	530
3	-1,552	1,343	-209	-0.0103	20,389
4	-2,141	1,712	-429	-0.0107	40,247
5	-2,731	2,124	-606	-0.0101	60,106

四、外部成本內部化之模擬結果

在外部成本內部化之情境方面，此情境探討外部處理成本之加入對整體政策效益價值有何種影響。分析結果如圖6所示，當傳統化石燃料電力成本未包含外部成本時，政策效益價值為86百萬元，分析結果如同基本情境。當外部成本內部化時，政策效益價值由86百萬元增加至677百萬元。整體而言，不論傳統評價模式或是實質選擇權模式，皆顯示此項政策規劃為可行之政策措施，除可符合經濟效益與環境保護，亦能為整體政策價值帶來正面的效益。

進一步將 5.3 與 5.4 小節結合進行敏感度分析，如圖 7 所示，更可明顯看出當收購電價金額參數由每度 2 元逐漸提高至每度 5 元時，不論外部成本是否內部化，其政策效益價值均逐漸遞減。此外，當收購電價金額為每度 2.26 時，其政策效益價值（不含外部成本）為 0；而當外部成本內部化時，收購電價金額則為每度 4.91。舉例來說，若政府將風力發電之收購電價金額訂為每度 3.0 元時，當外部成本無內部化時，即使考量管理彈性價值，其政策效益價值仍小於 0；而當外部成本內部化後，其政策效益價值則大於 0，代表此項措施為可行之政策。此外，此項政策能對傳統淨現值產生正向的貢獻，也顯示若傳統能源未納入二氧化碳外部排放成本時，有低估政策效益價值的現象，進而產生錯誤的政策規劃。

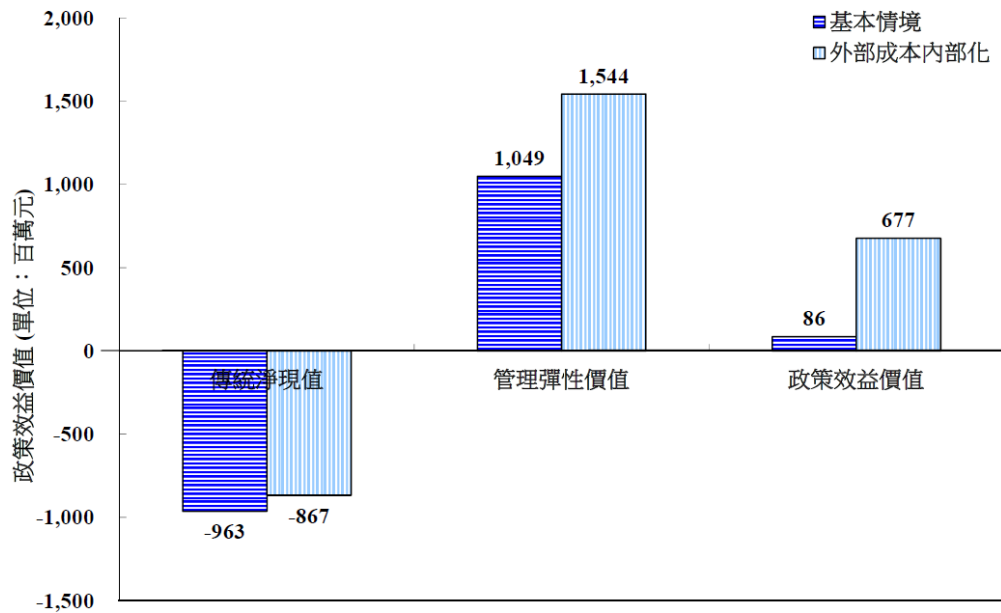


圖 6 基本情境與外部成本內部化之政策效益價值

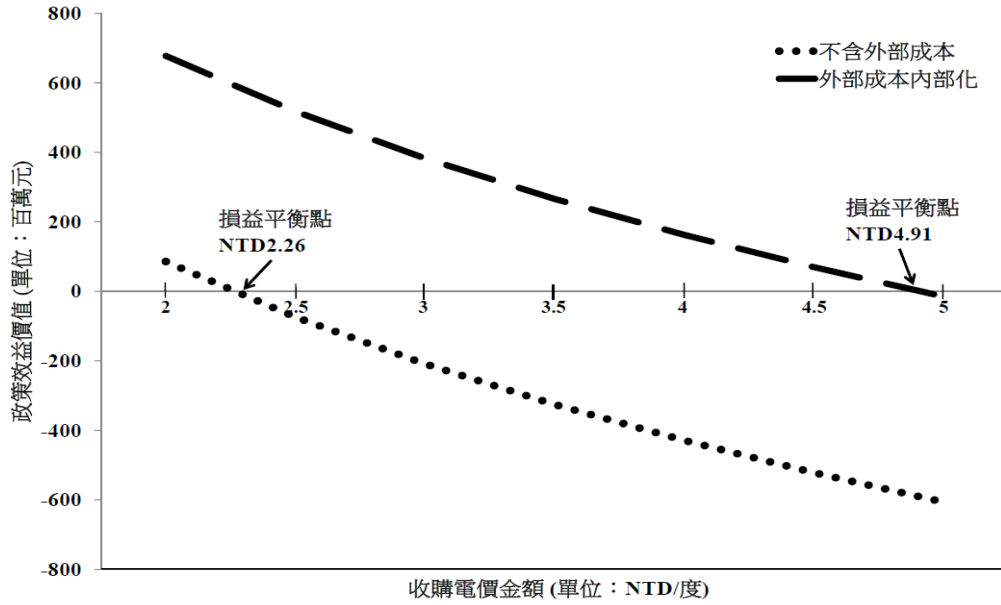


圖 7 收購電價金額與外部成本內部化之敏感度分析

五、小結

總結而論，若以傳統淨現值法來判斷目前政府對於風能發展政策是否具有可行性時，由於 NPN 小於 0，因此應拒絕發展風能發電，並不符合當前政策施行情況。當運用實質選擇權法做為判斷政策可行性之依據時，則顯示發展風力發電是具有投資效益的，除符合實際情形外，亦可估算出至 2015 年時，發展風力發電所帶來的政策效益價值為 86 百萬元。在政策模擬方面，當傳統化石燃料反映二氧化碳之外部處理成本時，不論是傳統淨現值或是實質選擇權價值都能為整體政策價值帶來極具正面的效益，亦顯示此項政策規劃為可行之措施。此外，由於風力發電技術已逐漸成熟，預期未來能隨技術進步使發電效率逐漸提升，發電成本也能逐漸下降。採取提高收購電價金額提升民間投資風力發電並不符合投資效益。因此現階段針對風力發電不應過度提高收購金額，以使政策規

劃符合投資效益原則外，並能節省政府之財政支出。

再者，藉由成本效率曲線的模擬結果得知，政府部門透過提供相關政策的法源依據，收購由再生能源技術所供給之電能與營造適合再生能源發展的投資環境，進而降低民間產業初期投資之風險與不確定性，相對能刺激投資者的投資誘因而投入更多 R&D 資金，進而提升再生能源之裝置容量。再者，民間業者也因 R&D 資金的投入增加，使得相關技術愈趨成熟，發電成本亦隨之下降，配合政府收購電能制度，促使再生能源技術之實際供給量亦大幅增加，造就再生能源產業的蓬勃發展。但由實證分析得知，當收購電價金額持續提高時，政府效益價值亦逐漸遞減，再生能源技術發展初期雖可仰賴政府財政支援以達經濟效益，但政府的補貼措施卻並非永無止盡的挹注，追本溯源，投資廠商應致力於利用方式的創新、技術的發展創新、量能擴大以達經濟規模與能源利用之外部成本廣泛內部化後，再生能源將可與傳統發電方式在開放市場上競爭。

陸、結論

本文針對政府規劃再生能源發展政策所需面臨之不確定性進行探討，歸納出影響政策效益評價的主要因素，依此建構再生能源發展之政策效益評價模式，評估發展政策之投資效益與判斷政策推動成效。並探討投資廠商是否會運用政府補貼與 R&D，提升發電技術，進而改善發電成本效率。於協助政策管理上，模擬「收購電價變動」與「外部成本內部化」二種情境，探討政策效益變動、政策推動成效與管理意義。模式中，同時考慮傳統能源市場價格波動、二氧化碳排放的外部排放成本、再生能源發電技術進步之特性與政府補助資金投入多寡等。相較過去研究對於技術風險參數採取固定值之設定，或對再生能源發電技術進步只考量單因子與未考慮時間遞延效果等假設，更能符合現今政府面對再生能源投資環境的現實情況。

透過政府對於再生能源投資的環境建構、推廣計畫與政府及民間對風電技術的研

發，配合內需市場的拓展，即可讓臺灣風電產業發展更為茁壯，技術也愈之成熟。經濟部已於2010年1月按各種技術種類，訂定各類再生能源電能適合的躉購費率，但按現行再生能源發展條例規定，電力業者所繳納的再生能源基金費用，可轉嫁由全民負擔，但若全數轉嫁，無疑對未來電價產生上漲壓力，恐造成一般民眾對再生能源之接受度降低，反而不利於再生能源發展。因此，建議政府可透過成本效率曲線之模擬，預測未來技術的成熟度與發電成本下降率，以定期檢討再生能源躉購費率之合理性與公平性。就本文所分析的風能為例，因技術趨於成熟，發電成本接近傳統能源，建議政府對於風能之收購電價不宜過度增加，由案例分析結果可知，至多增加至每度3元（2010年訂定費率水準為10瓩以上每度2.3834元，2011年為每度2.6138元），避免政府編列過多補助預算於風能技術上，而將補助資金運用於其他更具有發展潛力之再生能源發展上，亦能讓風能技術於市場競爭下自由發展。此外，也應加速通過「溫室氣體減量法草案」與「能源稅條例草案」，使能源價格能透過市場機制的運作，反映內部成本（如發電成本），並呈現非市場之外部成本（如二氧化碳排放成本），使能源價格得以合理、充分、有效反映且公平運作，不僅可符合經濟與環境利益，同時亦能為整體再生能源之政策規劃帶來正面的效益。

本文所提出之評價模式可適用於其他再生能源種類，協助衡量政策效益價值與政策規劃。然而，眾所皆知，再生能源發展政策之規劃受到許多因素影響，因此，本文中有部份未盡完善之處與限制值得注意與加以改善。首先，本文並未考慮技術風險（再生能源電力成本的波動率）、CO₂ 排放成本採固定值、傳統能源與再生能源之成本估計採平均值方式估計與假設服從GBM。若加以改善其估計方式，則更能充份的反映成本的變動情況，政策效益價值的估算也愈趨於準確。再者，針對CO₂ 減量成本的設定上，本文與梁啓源(2007, 2009)及林俊成與柳婉郁(2010)所設定之數值相比之下較低，雖無法充份反映外部成本，但其模擬效果卻如出一轍，於實證分析中也可看出外部成本內部化之政策規劃，符合社會成本效益與經濟可行性，因此若未來政府課徵能源稅實屬經濟可行，值得政府採行此措施。此外，本文實證分析之資料來源來自於政府公開資訊與文獻回顧，

由於資料來源的取得及限制，本文僅以風能為例做為實證分析且資料分析時間為 2001 年至 2006 年，雖不致於影響本文結論，但仍不免影響評估的準確性與可靠度。為提高政策模擬能力及其效益價值評估的準確度，更新模式中所有參數資料與改善估計方式有助於評價模式的改善，並藉此重估模擬政策之效益價值，是未來值得進行的研究方向。

(收件日期為民國 99 年 9 月 2 日，接受日期為民國 100 年 7 月 12 日)

參考文獻

(1)中文部份

林俊成與柳婉郁，2010，「考慮機會成本下碳吸存成本效益之經濟分析」，應用經濟論叢，88：61-102。

郭迺鋒、楊浩彥與溫麗琪，1999，「碳稅收入循環利用之『雙重紅利』效果—臺灣多部門 CEG 實證模型」，東吳經濟學術研討會，台北：東吳大學經濟學系。

梁啓源，2007，「我國永續發展之能源價格政策」，臺灣經濟預測與政策，37：1-35。

梁啓源，2009，「能源稅對臺灣能源需求及經濟之影響」，臺灣經濟預測與政策，40：45-78。

(2)英文部份

Abadie, L. M. and J. M. Chamorro, 2008, "European CO₂ Prices and Carbon Capture Investments," *Energy Economics*, 30: 2992-3015.

- Anda, J., A. Golub, and E. Strukova, 2009, "Economics of Climate Change under Uncertainty: Benefits of Flexibility," *Energy Policy*, 37: 1345-1355.
- Ansar, J. and R. Sparks, 2009, "The Experience Curve, Option Value, and the Energy Paradox," *Energy Policy*, 37: 1012-1020.
- Ardente, F., M. Beccali, M. Cellura, and V. L. Brano, 2008, "Energy Performances and Life Cycle Assessment of an Italian Wind Farm," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 200-217.
- Argote, L. and D. Epple, 1990, "Learning Curves in Manufacturing," *Science*, 247: 920-924.
- Arrow, K. J., 1962, "The Economic Implications of Learning by Doing," *Review of Economic Studies*, 29: 155-173.
- Awerbuch, S. and M. Berger, 2003, "Energy Security in the EU: Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-making," International Energy Agency Report, Paris.
- Barreto, L. and S. Kypreos, 2004, "Endogenizing R&D and Market Experience in the Bottom-up Energy System ERIS Model," *Technovation*, 24: 615-629.
- Benninga, S. and E. Tolkowsky, 2002, "Real Options: An Introduction and an Application to R&D Valuation," *The Engineering Economist*, 47: 151-168.
- Birger Tuemand Madsen (BTM) Consult ApS, 2009, International Wind Energy Development, World Market update 2009. Available from <http://www.btm.dk/>.
- Black, F. and M. Scholes, 1973, "The Pricing of Options and Corporate Liabilities," *The Journal of Political Economy*, 81: 637-654.
- Boer, F. P., 2003, "Risk-adjusted Valuation of R&D Projects," *Research Technology Management*, 46: 50-58.
- Bøckman, T., S. E. Fleten, E. Juliussen, and H. Langhammer, 2008, "Investment Timing and Optimal Capacity Choice for Small Hydropower Projects," *European Journal of Operational Research*, 190: 255-267.
- Botterud, A. and M. Korpås, 2004, "Modelling of Power Generation Investment Incentives under Uncertainty in Liberalised Electricity Markets," 6th IAEE European Conference, Zurich.
- Brach, M. A., 2003, *Real Option in Practice*, New York: John Wiley & Sons.

- Brandão, L. E., J. S. Dyer, and W. J. Hahn, 2005, "Using Binomial Decision Trees to Solve Real-option Valuation Problems," *Decision Analysis*, 2: 69-88.
- Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs (BOEMEA), Executive Yuan, Taiwan, R.O.C., 2009. Available from <http://www.moeaec.gov.tw>.
- Cassimon, D., P. J. Engelen, L. Thomassen, and M. V. Wouwe, 2004, "The Valuation of a NDA Using a 6-fold Compound Option," *Research Policy*, 33: 41-51.
- Colpier, C. U. and D. Cornland, 2002, "The Economics of the Combined Cycle Gas Turbine: An Experience Curve Analysis," *Energy Policy*, 30: 309-316.
- Copeland, T. and V. Antikarov, 2001, *Real Options - A Practitioner's Guide*, New York: Texere LLC.
- Cox, J. C., S. A. Ross, and M. Rubinstein, 1979, "Option Pricing: A Simplified Approach," *Journal of Financial Economics*, 7: 229-263.
- Davis, G. A. and B. Owens, 2003, "Optimizing the Level of Renewable Electric R&D Expenditures Using Real Options Analysis," *Energy Policy*, 31: 1589-1608.
- Deng, S. J. and S. S. Oren, 2003, "Incorporating Operational Characteristics and Start-up Costs in Option-based Valuation of Power Generation Capacity," *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 17: 155-181.
- Dixit, A. K. and R. S. Pindyck, 1995, "The Options Approach to Capital Investment," *Harvard Business Review*, 73: 105-115.
- Dutton, J. M. and A. Thomas, 1984, "Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity," *Academy of Management Review*, 9: 234-247.
- Fisher, I., 1907, *The Rate of Interest: Its Nature, Determination, and Relation to Economic Phenomena*, New York: Macmillan.
- Frayser, J. and N. Z. Uludere, 2001, "What Is It Worth? Application of Real Options Theory to the Valuation of Generation Assets," *The Electricity Journal*, 4: 40-51.
- Fuss, S., D. J. A. Johansson, J. Szolgayova, and M. Obersteiner, 2009, "Impact of Climate Policy Uncertainty on the Adoption of Electricity Generating Technologies," *Energy Policy*, 37: 733-743.
- Hamon, C., 2000, "Experience Curves of Photovoltaic Technology," IIASA Interim Report

- IR-00-014, Laxenburg, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria.
- Hayes, R. H. and W. J. Abernathy, 1980, "Managing Our Way to Economic Decline," *Harvard Business Review*, 58: 67-77.
- Hayes, R. H. and D. Garvin, 1982, "Managing as If Tomorrow Mattered," *Harvard Business Review*, 60: 70-79.
- Herath, H. S. B. and W. G. Bremser, 2005, "Real-option Valuation of Research and Development Investment: Implications for Performance Measurement," *Managerial Auditing Journal*, 20: 55-72.
- Herath, H. S. B. and C. S. Park, 1999, "Economic Analysis of R&D Projects: An Options Approach," *The Engineering Economist*, 44: 1-35.
- Herath, H. S. B. and C. S. Park, 2002, "Multi-stage Capital Investment Opportunities as Compound Real Option," *The Engineering Economist*, 47: 1-27.
- International Energy Agency (IEA), 2000, *Experience Curves for Energy Technology Policy*, OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA), 2009, *Technology Roadmap – Wind Energy*, OECD/IEA, Paris.
- Jamasb, T., 2006, "Technological Change Theory and Learning Curves: Progress and Patterns in Energy Technologies," *EPRG Winter Research Seminar*, Faculty of Economics, University of Cambridge.
- Kellogg, D. and J. M. Charnes, 2000, "Real-options Valuation for a Biotechnology Company," *Financial Analysis Journal*, 56: 76-84.
- Kerstin, M. B. G. and M. G. Joachim, 2005, "Determining the Value of Drug Development Candidates and Technology Platforms," *Journal of Commercial Biotechnology*, 11: 155-170.
- Kester, W. C., 1984, "Today's Options for Tomorrow's Growth," *Harvard Business Reviews*, 62: 153-160.
- Kjaerland, F., 2007, "A Real Option Analysis of Investments in Hydropower: The Case of Norway," *Energy Policy*, 35: 5901-5908.
- Klaassen, G., A. Miketa, K. Larsen, and T. Sundqvist, 2005, "The Impact of R&D on

- Innovation for Wind Energy in Denmark, Germany and the United Kingdom,” *Ecological Economics*, 54: 227-240.
- Kobos, P. H., J. D. Erickson, and T. E. Drennen, 2006, “Technological Learning and Renewable Energy Costs: Implications for US Renewable Energy Policy,” *Energy Policy*, 34: 1645-1658.
- Kumbaroğlu, G., R. Madlener, and M. Demirel, 2008, “A Real Options Evaluation Model for the Diffusion Prospects of New Renewable Power Generation Technologies,” *Energy Economics*, 30: 1882-1908.
- Lee, S. C. and L. H. Shih, 2011, “Forecasting of Electricity Costs Based on an Enhanced Grey-based Learning Model: A Case Study of Renewable Energy in Taiwan,” *Technology Forecasting and Social Change*, 78: 1242-1253.
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli-Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, and H. Yoshino, 2007, “Residential and Commercial Buildings” in Metz, B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, and L. A. Meyer, ed., *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 387-446, Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Luenberger, D. G., 1998, *Investment Science*, New York: Oxford University Press.
- McDonald, A. and L. Schrattenholzer, 2001, “Learning Rate for Energy Technologies,” *Energy Policy*, 29: 255-261.
- Myers, S. C., 1977, “Determinants of Corporate Borrowing,” *Journal of Financial Economics*, 5: 147-175.
- Neij, L., 1999, “Cost Dynamics of Wind Power,” *Energy*, 24: 375-389.
- Newton, D. P., D. A. Paxson, and M. Widdicks, 2004, “Real R&D Options,” *International Journal of Management Reviews*, 5: 113-130.
- Perlitz, M., T. Peske, and R. Schrank, 1999, “Real Options Valuation: The New Frontier in R&D Project Evaluation?” *R&D Management*, 29: 255-269.
- Rothwell, G., 2006, “A Real Options Approach to Evaluating New Nuclear Power Plants,” *The Energy Journal*, 27: 37-53.

- Energy Journal*, 27: 37-53.
- Sagar, A. and B. Zwaan, 2006, "Technological Innovation in the Energy Sector: R&D, Deployment and Learning-by-doing," *Energy Policy*, 34: 2601-2608.
- Siddiqui, A. S., C. Marnay, and R. H. Wisner, 2007, "Real Options Valuation of US Federal Renewable Energy Research, Development, Demonstration, and Deployment," *Energy Policy*, 35: 265-279.
- Söderholm, P. and G. Klaassen, 2007, "Wind Power in Europe: A Simultaneous Innovation-diffusion model," *Environmental and Resource Economics*, 36: 163-190.
- Söderholm, P. and T. Sundqvist, 2007, "Empirical Challenges in the Use of Learning Curves for Assessing the Economic Prospects of Renewable Energy Technology," *Renewable Energy*, 32: 2559-2578.
- Szlogayova, J., S. Fuss, and M. Obersteiner, 2008, "Assessing the Effects of CO₂ Price Caps on Electricity Investments: A Real Options Analysis," *Energy Policy*, 36: 3974-3981.
- Trigeorgis, L., 1996, "Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation," *Massachusetts Institute of Technology Press*, 11: 121-135.
- Trigeorgis, L. and S. P. Mason, 1987, "Valuing Managerial Flexibility and Strategy in Resource," *Midland Corporate Finance Journal*, 5: 14-21.
- Tseng, C. L. and G. Barz, 2002, "Short-term Generation Asset Valuation: A Real Options Approach," *Operations Research*, 50: 297-310.
- van der Linden, N. H., M. A. Uytendinck, C. Vrolijk, L. J. Nilsson, J. Khan, K. Astrand, K. Ericsson, and R. Wisner, 2005, "Review of International Experience with Renewable Energy Obligation Support Mechanisms," ECN-C--05-025, Energy Research Centre of the Netherlands.
- Venetsanos, K., P. Angelopoulou, and T. Tsoutsos, 2002, "Renewable Energy Sources Project Appraisal under Uncertainty: The Case of Wind Energy Exploitation within a Changing Energy Market Environment," *Energy Policy*, 30: 293-307.
- Wang, C. H. and K. J. Min, 2006, "Electric Power Generation Planning for Interrelated Projects: A Real Options Approach," *IEEE Transactions on Engineering Management*, 53: 312-322.

Willigers, B. J. A. and T. L. Hansen, 2008, "Project Valuation in the Pharmaceutical Industry: A Comparison of Least-squares Monte Carlo Real Option Valuation and Conventional Approaches," *R&D Management*, 38: 520-537.

Wright, T. P., 1936, "Factors Affecting the Costs of Airplanes," *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3: 122-128.

The Benefit Evaluation for Renewable Energy Development Policy Using Real Option Analysis and Cost Efficiency Curve*

Shun-Chung Lee** and Li-Hsing Shih***

Abstract

This study presents a policy benefit evaluation model that integrates cost efficiency curve information on renewable power generation technologies into real options analysis (ROA) methods. The proposed model evaluates quantitatively the policy value provided by developing renewable energy (RE) in the face of uncertain fossil fuel prices and RE policy-related factors. The empirical analysis is based on data for Taiwan wind power and used to simulate two policy scenarios: varying feed-in tariff (FIT) and internalized external costs (CO₂ emission cost). Besides assessing the policy value of current RE development policy, this model also compares policy value and policy planning in the two scenarios, which will help the government to formulate and improve its renewable energy development policies. The analysis shows that RE development provides investment benefits when considering real options value. The scenario simulation results demonstrate that when CO₂ emission costs are internalized, real options

* The authors are indebted to two anonymous referees for their constructive suggestions and insightful comments. Any errors or shorting are the authors' responsibility.

** Associate Researcher, Taiwan Institute of Economic Research. Corresponding Author. Tel: (02)8978-3900 ext. 807, Fax: (02)8772-5979, Email: d30407@tier.org.tw.

*** Professor, Department of Resources Engineering, National Cheng Kung University.

value generated by RE is increased. In the current environment for developing wind power technology, policies that support higher FIT level are not beneficial.

Keywords: Real Option, Cost Efficiency Curve, Renewable Energy, Policy Scenario, Policy Planning

JEL Classification: G18, O21, Q48