

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

低碳發電技術對我國新及再生能源發展之策略評估

**Evaluating the development strategy of new and renewable energy
technology under low-carbon generation schemes**

計畫編號：1062001INER001

受委託機關(構)：中原大學應用經濟模型研究中心

計畫主持人：林晉勗

聯絡電話：03-2655226

E-mail address：jxlin@cycu.edu.tw

協同主持人：林師模

研究期程：中華民國 106 年 1 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 113 萬元

核研所聯絡人員：郭春河

報告日期：106 年 10 月

中文摘要

能源是經濟發展的驅動力，然近幾年來因國際地緣政治、環境保護及油源過度掌握在某些國家如中東地區等之影響下，國際能源情勢依然嚴峻。在此同時，全球溫室效應所引發的氣候變遷議題熱度不減，倡議溫室氣體減排的聲浪一直居高不下，使得再生能源的推動已成為各國能源政策最重要的一環。目前多數國家再生能源或低碳技術之發電成本相對於傳統發電方式仍然偏高，導致其在開放市場中仍不具競爭力，惟即便如此，低碳技術及再生能源仍可為環境或能源自主帶來許多的助益。然而，究竟低碳技術的發展對能源、環境及經濟可以帶來多少效益？與再生能源之間的關係為何？如果在投入研發前，或是研發期間沒有經過詳細的評估，將有可能導致資源的浪費，進而損及國家整體經濟的發展。本計畫的目的在於利用過去年度核能研究所持續發展的 3E 評估模型 - GEMEET 為基礎，更新相關參數及設定，產生新的基線預測，並特別針對國際上新及再生能源情境蒐集相關資料，以提供低碳及再生能源發展策略模擬之情境參考。

英文摘要

The deterioration of global energy and environmental problems in recent years has forced many countries to accelerate their paces in developing and utilizing alternative energies. However, generation cost using low-carbon and renewable energy technologies are still high compared to that of conventional ones. Moreover, although most of the low-carbon and renewable energy technologies can bring about significant energy, environmental, and economic benefit to the economy, they are inevitably associated with huge risks and uncertainties. As such, a careful assessment of the low-carbon technology strategy in facing the potential energy risk is necessary before the decision of development is made. The aims of this project are to update the GEMEET-based framework for generating baseline projections, and to conduct a series of policy simulations to provide guidelines of formulating development strategies of new and renewable technologies.

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
壹、計畫緣起與目的	1
貳、國內外減碳及能源展望報告	3
一、 減量策略及國內相關措施.....	3
二、 國內低碳相關研究報告	7
三、 國際能源展望報告	14
參、GEMEET 模型介紹	29
肆、基線推估設定及結果	34
一、 基線變數估計	34
二、 基線推估結果	38
伍、結論與建議	42
陸、參考文獻.....	44

表目錄

表 1 減量策略.....	5
表 2 我國減量政策與能源相關措施.....	6
表 3 國內低碳發展研究之情境設計及部份結果.....	12
表 4 國際能源展望報告之出版品.....	15
表 5 IEA 的 WEO2016 的情境設計.....	19
表 6 EIA 的 IEO2017 之參數設定.....	20
表 7 EIA 的 AEO2017 之情境設計.....	20
表 8 IEEJ 的 AWEO2016 之情境設計.....	22
表 9 APEC 的《ENERGY DEMAND AND SUPPLY OUTLOOK 6TH》之情境設計.....	23
表 10 BP 的《2017 ENERGY OUTLOOK》之情境設計.....	24
表 11 國外能源展望報告之情境設計及部份結果.....	25

圖目錄

圖 1 模型基本架構	30
圖 2 模型內生產巢式結構	31
圖 3 原油進口價格假設	35
圖 4 液化天然氣進口價格假設	35
圖 5 燃料煤進口價格假設	35
圖 6 煉焦煤進口價格假設	36
圖 7 未來家計戶數推估	36
圖 8 躉購費率設定	37
圖 9 自發性投資與出口成長率設定	37
圖 10 參考情境經濟成長率比較	39
圖 11 參考情境二氧化碳排放量	39
圖 12 參考情境發電結構	40
圖 13 參考情境能源消費結構	40
圖 14 參考情境實質產質產業結構	41
圖 15 參考情境實質附加價值產業結構	41

壹、計畫緣起與目的

能源是經濟發展的驅動力，然近幾年因國際地緣政治、環境保護及油源過度掌握在某些國家如中東地區等之影響下，國際能源情勢依然嚴峻。此外，能源議題已與經濟與環境議題相結合，形成了許多 3E (Energy, Economic, and Environment) 之議題，其中，能源使用所產生之大量溫室氣體排放，因為是造成全球暖化的元凶，已成為國際間熱烈討論的話題，進而促成了多項具體之溫室氣體減排之協議，例如：京都議定書 (Kyoto Protocol)、國家溫室氣體適當減緩行動 (Nationally Appropriate Mitigation Actions, NAMAs)、國家自訂預期貢獻 (Intended Nationally Determined Contribution, INDC) 等。這些國際協議除了展現各國減緩全球環境持續惡化之決心，也同時宣示各國將致力於尋求一能同時兼顧經濟發展、環境永續與能源安全之解決方案。針對能源及環境問題的日益惡化，各國對化石能源早已產生一定程度的不確定感及不安全感，而此一不確定及不安全感也誘使各國積極尋求各種替代性的能源，以降低其能源供應的潛在風險，並同時解決其環境不斷惡化的問題。新及再生能源之發展現今已被視為是可減緩二氧化碳排放、提升能源自主、降低能源供應風險之重要因應之道，因此如何提出有效之發展策略來擴大新及再生能源的利用日趨重要。

近年來，在原子能委員會核能研究所支持與中原大學應用經濟模型研究中心的合作下，開發了適合於再生能源政策及產業發展效益評估的 3E 評估模型—GEMEET (General Equilibrium Model for Energy, Economic and Technology Analysis)。此一模型有三個最主要的重點：(1) 符合經濟現況，並納入重要之新及再生能源產業與

主要發電技術；(2) 可以用於評估新及再生能源產業發展的成本與效益；及 (3) 可以與能源工程模型做軟連結，以發揮兩類模型的最大效益，提升政策評估的品質。

在過去的研究計畫中，已針對生質酒精、太陽光電、離岸風力發電、陸域風力發電及燃料電池等相關再生能源進行技術經濟分析，並結合 3E 模型進行能源、經濟、環境效益評估，最後整合研究成果與發現，提出具體之產業化建議。本團隊將利用過去所累積之研究能量，與核研所合作在今年度 (106) 完成新的基線推估。研究目的可概分為三個面向，一為更新動態 3E 模型參數資料庫，進行重要變數之估計及設定；二為完成相關模型的資料更新工作後，更新我國之基線推估；三為整理國內相關研究報告的模擬情境設計，以作為後續模型進行相關模擬情境設定之參考。以下具體說明本計畫之研究目的。

一、蒐集相關減碳政策研究報告之模擬情境

GEMEET 經過幾年的研發及持續的資料更新，目前已具備了完備的能源政策評估功能，也能夠與能源工程模型 TIMES 進行整合，因此可以用於評估更多元的新及再生能源政策。惟在情境設計上仍可多加參考國際上相關研究機構之報告，以做為模型在設定情境時之參考，使模型在後續進行議題分析時更具有政策意涵。

二、更新動態 3E 模型參數資料庫及進行重要變數之估計及設定

蒐集正確且可利用的資料，是任何研究最重要的一個步驟，綜觀本研究由技術分析、模型驗證與確認、3E 效益評估、成本效益評估，一直到提出產業化建議為止，所需的資料相當眾多，包含產業面的生產技術特性、成本結構、技術演進等，也包含總體面的總

體經濟資料、人口資料、國際能源價格資料等，此外更需參考國內外相關研究文獻，以及國際間對市場潛力之評估等。關於產業面的資料，除了可藉由網際網路尋找國內外參考資料與文獻外，當然更需要實際訪察相關研究機構、廠商、產業聯盟或工會組織等單位，以確認資料的正確性；而關於總體經濟資料則可藉由官方公布出版的統計數據資料庫或紙本資料進行蒐集；國際市場潛力評估則可參考國內外相關機構或廠商對未來市場的評估，另外也可利用相關計量方法進行推估並比較。這些資料的蒐集與整理是需要投入相當的人力與時間的，且資料的蒐集並非僅在研究初期進行，而是一個持續性的工作。

三、基線推估

在完成上述資料更新及未來年重要之參數推估後，即可進行參考情境或基線之推估，而推估完所要觀察之重點結果為經濟成長率、實質 GDP、二氧化碳排放量、能源消費及電力消費等。

貳、國內外減碳及能源展望報告

減量問題涉及複雜且多元的能源使用與溫室氣體排放形態，政策選擇又須面對多重考量，因此，選擇一個適當的模型，搭配多種政策情境設計，有助於研擬與分析溫室氣體減量的影響程度，以作為政府制定相關政策之參考，故本章先整理國際上所涉及到的減量策略，及我國目前所進行的減量相關政策及相關配套措施，再分別整理國內減量相關研究報告及國際研究機構或油公司的能源展望報告，其模型、參考情境之參數設定、模擬情境設定、評估項目及其他主要研究發現。

一、減量策略及國內相關措施

目前國際上的減量策略大致可分為七類，分別為清潔發展機制（clean development mechanism，簡稱 CDM）、排放權交易（emissions trade，簡稱 ET）、綠色租稅、取消能源價格補貼、提升能源使用效率、增加天然氣使用量及發展再生能源，各減量策略的簡要說明整理至表 1。清潔發展機制及排放權交易係在京都議定書的規範所發展出來的彈性機制，利用國際的市場機制實現全球溫室氣體減量的目標，相同的，各國政府也會採取一些經濟手段，如綠色租稅、取消能源價格補貼，透過市場機制減少使用化石燃料的使用，進而達到減量效果，此外，已開發國家或多數的開發中國家都朝向低碳經濟轉型，如何提升能源使用效率、增加天然氣使用量、發展再生能源也都是各國研擬可能的因應策略之一。

而我國在面對全球氣候變遷之議題發展，也表現出主動承擔合理減量責任，除了 2015 年 7 月開始施行的「溫室氣體減量及管理法」（簡稱溫管法），明訂我國溫室氣體長期減量目標，及 9 月提交的國家的自定預期貢獻（Intended Nationally Determined Contribution，簡稱 INDC），也提出各項配套措施及行動方案，以免減量造成經濟過大的衝擊，例如：再生能源推廣目標、電力系統電源開發方案、穩健減核年度檢討報告、能源部門溫室氣體排放管制行動方案與排放管制成果報告等，我國各項減量政策及能源相關措施之說明請參閱表 2。

表 1 減量策略

減量策略	簡要說明
清潔發展 機制 (CDM)	由「京都議定書」中的附件一國家、非附件一國家及公私部門共同參與，藉由技術與資金的投資，協助非附件一國家達到永續發展，且附件一國家也能履行京都議定書的減量承諾
排放權 交易 (ET)	當排放權交易市場建立後，「京都議定書」中的附件一國家有誘因在總量控制下，將排放權以配額方式發放給各企業，減排成本高的企業，可以在排放權交易市場中，購買其他企業的配額或核證自願減排量，以較低成本達到減排目標
綠色 租稅	例如能源稅、碳稅等，導致廠商生產成本增加，進而減少消費能源產品，達到減量效果，惟課徵碳稅也會對經濟造成相當程度的負面衝擊。政府在課徵綠色租稅時，搭配降低其他稅賦，如降低所得稅、取消貨物稅等，藉以減少環境污染，同時有機會增加就業、改善所得分配等，有機會達到雙重紅利
取消能源 價格補貼	若取消化石燃料的補貼政策，可以降低補貼所造成的資源分配扭曲，減少對化石燃料的使用，對環境有正面影響
提升能源 使用效率	推動節能減碳措施，如提升燃煤、燃油與燃氣機組的發電效率、更換照明設備等，提高能源使用效率，對於減碳有相當顯著的貢獻
增加天然 氣使用量	增設燃氣電廠取代燃煤及燃油電廠，是低碳能源發展趨勢，惟天然氣的主成分是造成全球暖化更甚於二氧化碳的甲烷，如何阻止甲烷洩漏是全球所關切的重點
發展再生 能源	發展再生能源可提高能源自給率，減少溫室氣體排放，促進再生能源相關產業之發展。常見的再生能源有太陽能、風力、地熱、水力、潮汐、海洋熱能轉換、生質能等

資料來源：本研究整理

表 2 我國減量政策與能源相關措施

政策	說明
溫室氣體減量及管理法（溫管法）	2015 年 7 月公佈施行，我國溫室氣體長期減量目標：2050 年溫室氣體排放量減至 2005 年的 50% 以下，五年為一期之階段管制目標，採行滾動式檢討各階段目標。
國家的自定預期貢獻（INDC）	我國 2015 年 9 月主動提交 INDC，訂定 2030 年溫室氣體排放量為現況發展趨勢（BAU）減 50%，亦即 2005 年排放水準再減 20%。
再生能源推廣目標	依據 2009 年公布的「再生能源發展條例」第 6 條規範，自條例施行起 20 年內，每 2 年訂定再生能源推廣目標及各類別所占比率。我國歷經五次修正裝置容量目標（2010、2011、2014、2015、2016 年），最新目標為 2025 年 27,423MW，其中太陽光電及離岸風力需達到 20 GW 及 3 GW，且再生能源發電占比 20%
電力系統電源開發方案	台電每年推估我國未來電力負載預測，再依據需求規劃我國電力系統的電源開發方案，盡可能滿足我國的備用容量率目標值（15%）
穩健減核年度檢討報告	依據 2011 年 11 月總統宣布的「新能源政策」，以「確保不限電、維持合理電價、達成國際減碳承諾」為原則，積極邁向非核家園，經濟部能源局自 2012 年起每年檢討我國穩健減核目標之達成情況
能源部門溫室氣體排放管制行動方案與排放管制成果報告	依溫管法，環保署應擬定我國因應氣候變遷行動綱領及溫室氣體減量推動方案，能源局應依據上述綱領以及推動方案，每五年擬定能源部門溫室氣體排放管制行動方案，並每年應編寫執行排放管制成果報告。其中行動方案應包含溫室氣體排放管制目標、推動期程、策略及措施等，而排放管制成果報告則包含目標達成情形及分析與檢討等

資料來源：本研究整理

二、國內低碳相關研究報告

減量¹問題涉及複雜且多元的能源使用與溫室氣體排放形態，政策選擇又須面對多重考量，因此，選擇一個適當的模型，搭配多種政策情境設計，有助於研擬與分析溫室氣體減量的影響程度。而我國的能源經濟模型多數以單國可計算一般均衡(CGE)模型為主，散見於各學術及研究單位的研究報告，大部份為了探討經濟、能源與環境的議題而建置，因此，在模型建置上納入較細的能源部門及多種發電技術的特性，一般可歸類為混合模型，例如：TAIGEM-III、TaiSEND 及 GEMEET，而在非 CGE 但亦納入詳細之能源及電力設定的模型中，則以 DGEMT 最為知名。在多區域的能源經濟模型在國內仍算少數，目前國內已有機構引進國外知名能源模型架構，經過改良及創新，發展出涵蓋台灣的多區域 CGE 模型，例如，以美國普渡大學的 GTAP-E 模型為基礎的，如李叢禎等(2007)等，以美國 MIT 的 EPPA 模型為基礎，如中原大學團隊為中油公司所建置的兩區域 CGE 模型--Taiwan Energy Portfolio Model (簡稱 TEP-CPC 模型)，及核能研究所目前與 MIT 共同開發的多國模型--EPPA-Taiwan 模型。

雖然國內針對減量相關議題之研究不乏少數，但其研究成果並非全數公開，因此，以下所整理國內研究報告，主要核研所內部所提供的資料及部份由網路上公開取得的研究報告為主，實際上，國內探討減量策略之相關研究不止於此。以下整理國內研究報告之情境設計、研究方法及部份重要結果，作為後續本研究在模擬情境規劃之參考。

¹ 我國排放的溫室氣體中有 90% 是二氧化碳，且二氧化碳大多由燃料燃燒產生，其餘溫室氣體排放源大多來自非燃料燃燒排放，如：農業部門耕種排放甲烷及氧化亞氮、工業製程排放含氟溫室氣體等，故多數國內能源經濟模型都以減少二氧化碳排放作溫室氣體減量之代理目標。

黃宗煌(2000)利用 TAIGEM-D 台灣動態一般均衡模型(Taiwan General Equilibrium Model – Dynamic，簡稱 TAIGEM-D 模型)，預測台灣二氧化碳之基線排放，以全國能源會議結論中之「至 2020 年累積節約能源 28%」作為減量情境，設定自 2001 年起每年平均能源密集度下降率約為 1.4%，推估於 2020 年時約可減少 20%的 CO₂ 排放量。結果顯示，(1) 在能源結構中，以煤的使用量增幅最大，其次為天然氣；(2) 在發電結構中，由於核能陸續除役，造成電源結構配比部分趨向燃油與燃氣；(3) 建議未來評估溫室氣體減量時，應納入其他溫室氣體的考量，並進行各種減量情境及減量策略之模擬分析，如：提昇燃氣、燃煤與燃油機組之發電熱效率、課徵碳稅、取消能源價格補貼等，以利決策單位之政策研擬。

徐世勳等(2006)建立 TAIGEM-E 模型與 JISEEF 模型的軟連結架構，並以 TAIGEM-E 模型進行 2005 至 2030 年之二氧化碳排放的基線預測，配合第二次全國能源會議結論(即自 2025 年自願減量幅度需達 1.7 億噸二氧化碳)，設計五種模擬情境，分別為(1) 提高能源使用效率情境，即每年能源使用效率提高 2.6%，達到 2030 年累計提高 100%；(2) 能源密集度模式情境，即每年分別降低 1.35%，達到 2025 年累計下降 27%；(3) 電力價格合理化情境，即電價每年調漲 4.95%，達到 2025 年累計上漲 99%；(4) 課徵碳稅情境，即 2020 年至 2030 年間，扣除自願減量後，需課徵碳稅達減量 0.995 億噸二氧化碳；(5) 德國密集度減量模式情境，即 2013 年至 2030 年每年溫室氣體密集度降低 2%。研究指出，(1) 採用部門自願自行減量方式，如降低能源密集度、提高能源使用效率或提高電價，可以達到減碳效果，且對實質 GDP 並無不妥影響；(2) 各情境中以課徵碳稅之減碳效果最佳；(3) 建議政府調整能源價格、

推廣新及再生能源、調整電力部門裝置容量與能源結構、降低輸配電效率損失等配套方式達減量目標，課徵碳稅應視為最後手段。

中華經濟研究院（2006）引進日本國立環境研究所（National Institute for Environmental Studies, NIES）的 AIM（Asia-Pacific Integrated Model）模型，建立 24 個國家、18 個部門的全球模型，及單國由上而下的 Material 模型及由下而上的 Enduse 模型，前者是在 MPSGE 結構上，探討不同二氧化碳減量模式，對我國整體經濟和各產業的衝擊，後者僅建立台灣電力部門模型，在追求規劃期間內成本最小化下，找到最適的發電組合。該研究設計四種碳稅額度，分別為每公噸二氧化碳新台幣 100 元、250 元、500、1000 元，但對於其他參數設定並未加以說明。其研究發現，（A）限制碳排放對能源密集度高或與能源密集產業關聯度高的產業有較大的衝擊，衝擊最大的為非金屬礦物製品業；（B）政府採取課徵碳稅的減碳效果會逐年遞減；（C）建議碳稅以每公噸二氧化碳不高於新台幣 2,000 元之效果較佳。

台灣綜合研究院（2012）利用「台灣永續能源發展模型（TaiSEND 模型）」及「3E 多目標規劃模型」，分析產業結構調整對於達成我國節能減碳目標之影響。在情境設計方面，依據當時政府所推動的政策，規劃出黃金十年情境，該情境中考慮產業推動方案項目之投入金額的同時，也提高相關部門的總要素生產力，即工業部門的總要素生產力年增率在 1.2 至 0.8%，而服務業的總要素生產力年增率為工業部門年增率的 1.2 至 1.7 倍。其研究發現，即使產業結構轉向低能源密集，仍無法達到節能減碳目標，建議搭配其他措施，如能源效率提升、能源價格合理化或低碳能源應用等。

工業研究院（2015a）利用 soft-linking 方法，以反覆求解與校

估的過程，整合「TaiSEND 模型」與「臺灣 MARKAL/TIMES 能源工程模型」，探討課徵碳稅對我國節能、經濟及能源之影響，且採用近似無關迴歸估計法（SUR）之計量方法，分析國內能源價格與可支配所得對各所得階層的能源消費支出之影響，在情境設計方面，以「2015-2025 年電價凍漲」為對照情境，比較情境的設定為自 2015 年起課徵碳稅，稅額除油氣類貨物稅外，加計二氧化碳減量成本每噸二氧化碳約 500 元新台幣，且自 2015 年後每年電力與電燈之平均電價每度將課徵 0.33 元的碳稅，此外，也考量自發性節電投資及碳稅稅收重分配的情況。其研究指出，課徵碳稅所造成的能源價格上漲，對高（低）所得家庭的能源消費支出會產生抑制（增長）效果，在電價凍漲的情境下沒有雙重紅利效果，但若電價可正常反應，有機會促使產業與家計單位增加自發性節電投資而導入節能技術，創造第二重紅利。

工業研究院(2015b)運用「台灣 2050 能源供需情境模擬器」，探討不同核能發電情境下之整體能源與電力供需規劃與衝擊分析。在電力需求面設計三種情境，即 2015-2030 年我國電力系統的需電量年均成長率為 2%、1%及 0%，而在電力供給面設計六種情境，以台電 10405 方案為基礎，另外再搭配 2017 年起禁燒生煤、核四商轉、核一二三延役、興建中新燃煤機組無法商轉、興建中燃煤與燃氣機組皆無法商轉等五種情境。其研究發現，(1)僅需求 1% + 核四商轉或核一二三延役的組合，備用容量率尚可維持在 7.4% 以上。或需求 0% + 台電 10405 方案、核四商轉或核一二三延役，其餘組合皆發生電力供不應求；(2)需求設定 2% + 台電 10405 方案時，備用容量率會在 2019 年低於 7.4%，2023 年後開始缺電。

核能研究所（2016）利用與核研所共同開的 GEMEET 模型，

探討不同的國際能源價格走勢下，對我國新及再生能源發展策略之影響。在能源價格參數的設定中，採用計量方法推估煤油氣之進口價格，並且設計高案與低案油價情境，在情境設計方面，以落實我國減碳目標（含溫管法及 INDC）為基礎，分別搭配實現再生能源推廣目標、達到再生能源發展上限（該研究自行估算）、提升能源使用效率（每年提升 1%）等三種情境。其研究指出，政府需提出更強力的誘因政策才有機會達到 2025 年的再生能源發展目標，而僅仰賴再生能源發展及能源效率提升，是無法完全消除減碳所帶來的負面衝擊，建議盡早引進其他新進的低碳技術（如 CCS 等）。

黃郁青等（2017）利用 TIMES 模型探討大規模間歇性發電併網後，如何搭配電網級儲能進行我國電力系統調度，在情境設計上，可分為無減碳目標的參考情境及落實我國減量目標（含溫管法及 INDC）的減碳情境，其中，減碳情境再區分為樂觀情境及保守情境，2030 年後太陽光電與風力發電設定可開發上限之高案與低案來區別。其研究指出，（1）相較樂觀情境，保守情境下的再生能源發展目標較低，需導入更多燃氣汰換燃煤發電，將提前抑低用電，而不利於我國電網級化學儲能的發展；（2）雖然儲能系統與燃氣機組具有競爭性，但是隨著太陽光電成長，建議利用燃氣機組搭配儲能系統以調節太陽光電日夜間之差異。

表 3 彙整上述的國內研究報告之情境設計及部份重要結果。

表 3 國內低碳發展研究之情境設計及部份結果

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
<p>黃宗煌 (2000) / TAIGEM-D 模型</p>	<ul style="list-style-type: none"> 減量情境：全國能源會議結論中之「至 2020 年累積節約能源 28%」，設定 2001 年起每年平均能源密集度下降率約 1.4% 	<ul style="list-style-type: none"> 建議評估溫室氣體減量時，應納入其他溫室氣體的考量 建議進行各種減量策略之模擬分析，如提升發電效率、課徵碳稅、取消能源補貼等
<p>徐世勳等 (2006) / TAIGEM-E 模型</p>	<ul style="list-style-type: none"> 能源使用效率情境：每年提高 2.6%，2030 年累計提高 100% 能源密集度情境：每年降低 1.35%，2025 年累計下降 27% 電價合理化情境：電價上漲 4.95%，2025 年累計上漲 99% 課徵碳稅情境：2021 至 2030 年減量至 2012 年之水準 德國密集度減量情境：2013-30 年每年溫室氣體密集度降低 2% 	<ul style="list-style-type: none"> 建議政府調整能源價格、推廣新及再生能源、調整發電與能源結構、降低輸配電效率損失等方式達減量目標 課徵碳稅應視為最後手段
<p>中經院 (2006) / AIM 模型</p>	<p>四種碳稅額度情境：碳稅分別為每公噸二氧化碳新台幣 100 元、250 元、500 及 1000 元</p>	<ul style="list-style-type: none"> 課徵碳稅造成最大衝擊的是非金屬礦物製品業 建議碳稅每公噸二氧化碳低於新台幣 2,000 元之效果較佳
<p>台綜院 (2012) / TaiSEND + 3E 多目標 規劃模型</p>	<ul style="list-style-type: none"> 黃金十年情境：工業部門總要素生產力年增率在 1.2-0.8% 間，服務業總要素生產力年增率在工業部門年增率之 1.2-1.7 倍之間 	<ul style="list-style-type: none"> 即使產業結構轉向低能源密集，仍無法達到節能減碳目標，建議搭配其他措施，如能效提升、能源價格合理化或低碳能源應用

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
工研院 (2015a) / 台灣 2050 能源供需情 境模擬器	<ul style="list-style-type: none"> • 3 種需求情境：2015-2030 年我國電力系統的需電量年均成長率為 2%、1%及 0% • 6 種供給情境：台電 10405 方案外，再搭配 2017 年起禁燒生煤、核四商轉、核一二三延役、興建中新燃煤機組無法商轉、興建中燃煤與燃氣機組皆無法商轉 	<ul style="list-style-type: none"> • 僅需求 1%+核四商轉或核一二三延役的組合，無限電危機。或需求 0%+台電 10405 方案、核四商轉或核一二三延役，其餘組合皆發生電力供不應求 • 需求 2% + 台電 10405 時，2023 年後將開始缺電
工研院 (2015b) / TaiSEND + MARKAL / TIMES 模型	<ul style="list-style-type: none"> • 2015 年起課徵碳稅，稅額除油氣類貨物稅外，加計二氧化碳減量成本每噸二氧化碳 500 元新台幣 • 每年對電力與電燈之平均電價每度課徵 0.33 元之碳稅 • 考量自發性投資及稅收重分配 	<ul style="list-style-type: none"> • 若電價可正常反應，有機會促使產業與家計增加自發性節電投資，導入節能技術，創造第二重紅利
馮君強 (2016) / GEMEET 模 型	<ul style="list-style-type: none"> • 以計量方法推估煤油氣之進口價格，且設計高案與低案油價情境 • 搭配減碳目標（溫管法+INDC）及三種配套措施情境，分別為再生能源推廣目標情境、再生能源發展上限情境及能源使用效率提升情境（每年提升 1%） 	<ul style="list-style-type: none"> • 建議政府提出更強力的誘因政策才有機會達到 2025 年的再生能源發展目標 • 發展再生能源及提升能效不足以完全消除減碳所帶來之衝擊，建議盡早引進其他低碳技術
黃郁青等 (2017) / TIMES 模型	<ul style="list-style-type: none"> • 相對參考情境，模擬達到減碳目標（溫管法+INDC），且考量各部門能源需求減量的情況，針對再生能源的發展分別設計樂觀情境與保守情境，即 	<ul style="list-style-type: none"> • 保守情境下需導入更多燃氣汰換燃煤發電，提前抑低用電，而不利我國電網級化學儲能的發

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
	2025 年以前依據我國「105 年綠色能源政策目標」規劃的再生能源開發上限，2030 年後設定可開發上限之高案與低案	展 • 建議燃氣機組搭配儲能系統，以調節太陽光電日夜間之差異

資料來源：本研究整理

三、國際能源展望報告

在國際上，與減量相關研究及模型工具不一而足，為了同時掌握未來能源發展趨勢及低碳情境的規劃方向，本研究著重於國際上較常見的能源預測報告，而國際研究機構、大型油公司與主要國家（如美國、日本）都會定期或不定期出版未來能源供需展望報告，而各個展望報告的內容視不同需要而採用特定模型進行分析及預測，並且進行多種情境分析，以降低未來的不確定性。本小節收錄目前國際上較受矚目幾份研究報告，比較各研究報告之出版時間及分析的範疇，其次簡要說明各研究報告所採用的模型工具，並整理各報告之情境設計及摘錄部分結果，最後彙整於表 11，作為後續於情境設計時之參考。

(一) 出版品之出版時間及分析範疇

通常，國際研究機構的能源預測報告於第三或四季發布，例如：國際能源總署（IEA）、美國能源部能源資訊局（EIA）、日本能經濟研究院（IEEJ）、亞太經濟合作組織（APEC）等，而油公司（如 BP）的預測報告則發布於年初，且除了 APEC 的《Energy Demand and Supply Outlook 6th》大約 2 至 3 年才出版，其餘研究報告均每年出版；在分析標的方面，通常將全球拆解成十多個區域國家進行分析，如 IEA、EIA、MIT、IEEJ、BP 等，多數的研究報告對重點分析的國家提供各國預測結果，

其中，APEC 及 IEEJ 出版的能源展望報告，有涵蓋較多的亞洲國家（包含台灣）；在預測期間，最短的僅至 2035 年（如 BP），大部份則預測至 2040 年（如 APEC、EIA）及 2050 年（如 IEA、IEEJ、EIA），而麻省理工學院 MIT 出版的《2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook》，主要係分析氣候變遷相關的議題，故最長預測至 2100 年，如表 4 所示。

表 4 國際能源展望報告之出版品

研究機構/報告名稱	出版週期	預測年	範疇
IEA / World Energy Outlook 2016	每年 11 月	2050	全球
EIA / Annual Energy Outlook 2017	每年 1 月	2050	美國
EIA / International Energy Outlook 2017	每年 9 月	2040	全球
APEC / Energy Demand and Supply Outlook 6 th	2~3 年	2040	21 個會員國
IEEJ / Asia / World Energy Outlook 2017	每年 10 月	2050	全球
MIT / 2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook	每年	2100	全球
BP / 2017 Energy Outlook	每年	2035	全球

資料來源：本研究整理

(二) 出版品之模型工具

基本上，出版研究報告的主要國家或研究機構通常都會發展一至多個模型，視不同需要而採用特定模型進行分析及預測，並且模型工具的介紹通常會公開至研究機構的網站上，但是油公司（如 BP）的研究報告對於模型工具都很少著墨，故無比較，以下整理各國際研究報告之模型工具，主要分析標的以全球為主，故模型多數以多國或多區域模型，例如：IEA 的 World Energy Model（簡稱 WEM）、美國 EIA 的 National Energy Modeling System（簡稱 NEMS）及 World Energy Projections Plus（簡稱 WEPS+）模型、日本 IEEJ 的 Energy supply-demand

model、美國麻省理工學院 MIT 的 Economic Projection and Policy Analysis (簡稱 EPPA) 模型等，以下分別簡要說明國際研究報告所採用的模型工具：

1. IEA 的《World Energy Outlook 2016》

採用的模型為 WEM (World Energy Model)，主要的三個模組，分別為能源終端需求模組、化石燃料與生質能源供給模組及能源轉換模組。外生給定經濟成長、人口、技術發展、電力消費與電價，動態連結到能源需求與能源轉換，預測全球能源供需結構、能源投資及二氧化碳排放量等情況。

2. 美國 EIA 的《Annual Energy Outlook 2017》

採用的模型為 NEMS (The National Energy Modeling System)，主要有 13 個模組，分別為碳排放、總體經濟、國際能源、住宅的能源需求、商業的能源需求、工業的能源需求、運輸的能源需求、電力需求、液態燃料市場、油氣供應、天然氣輸配、煤市場及再生能源。預測在不同經濟成長和能源價格下，美國的能源、經濟、環境及安全之交互影響。

3. 美國 EIA 的《International Energy Outlook 2017》

採用的模型為 WEPS+ (World Energy Projections Plus) 模型，係由多個部門能源模型所組合的系統模型，模型透過消費與價格的迭代運行至收斂來達到均衡解，而最終的能源預測結果納入其他能源議題分析結果及專家意見給予修正。

4. APEC 的第六版《Energy Demand and Supply Outlook》

採用的模型為 APERC'S Energy Demand and Supply Model，係由七個子模組所組成，分別為一個總體經濟模組、

三個最終能源需求模組(工業部門、運輸部門及住商部門)、再生能源模組、電力模組及投資模組，21個 APEC 會員國各自有單一模型，而 APEC 區域的能源供需預測結果，透過這些模型的產出進行加總而得之。

5. 日本 IEEJ 的《Asia/World Energy Outlook 2016》

採用的模型為 Energy supply- demand model，以迴歸計量模型為核心，以 IEA 的能源平衡表為基礎，搭配各種經濟數據，透過與 IEEJ 相關的模型（如技術發展模型、最適電力規劃模型等），互相傳遞及參考分析結果，提升預測之精確度及分析結果之可信度。

6. 美國 MIT 的《2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook》

採用的模型為 EPPA (Economic Projection and Policy Analysis) 模型，係一多國動態 CGE 模型為核心，模型包含詳細的能源及電力技術部門，也考量自然資源耗竭的問題，可以分析及預測溫室氣體排放的相關議題，也能連結 MIT 的地球系統，整合成全球系統整合模型 (IGSM)。

(三) 出版品之情境設計

如同前述，各出版品的研究範疇及模型工具有所不同外，各國國際機構及國家為了降低未來的不確定性，除了參考情境外，也會設計幾種模擬情境，由於各研究機構的參數及情境設定不同，致使其預測結果也有所差異，以下分別整理各研究機構最新的研究報告之模擬情境設定說明，以掌握目前國際上的能源議題趨勢，作為本研究在設計模擬情境時之參考。

1. IEA 的《World Energy Outlook 2016》

在全球能源領域相當有權威性的國際能源總署 IEA，最

新的能源展望報告係 2016 年出版的 World Energy Outlook (簡稱 WEO2016), 而下一版的《World Energy Outlook 2017 (簡稱 WEO2017)》已公告將於今 (2017) 年 11 月 14 日出版, 除了提供不同情境下至 2040 年能源供需預測外, 也會深入分析中國經濟與能源轉型、探討美國頁岩氣革命對天然氣市場之影響及燃氣發電造成之甲烷排放風險等議題, 在情境設計共有三種, 如表 5 所示, 分別為既有政策情境(Current Policies Scenario)、新政策情境 (New Policies Scenario) 及 450 情境 (450 Scenario), 其中新政策情境的設計核心主要是依據各國在巴黎協議下所提出的國家自定貢獻 (Nationally Determined Contributions, 簡稱 NDCs)。然而, 研究結果指出, 即便全球落實國家自定貢獻(即新政策情境), 仍然無法達到巴黎協定所訂定的長期目標 (即 450 情境), 建議各國需要竭盡所能的提升能源使用效率及發展再生能源技術、碳捕捉與封存技術 (Carbon dioxide capture and storage, 簡稱 CCS) 等措施, 控制能源部門的二氧化碳排放量在 2020 年以前達到排放的最高峰, 才有機會達到 450 情境的目標。此外, 也提及未來各國能源政策重點將轉向併網, 應更關注於電力市場的設計及供電安全等議題。

表 5 IEA 的 WEO2016 的情境設計

模擬情境	情境說明
既有政策情境	假設 2016 年中期已實施或通過的能源與環境政策維持不變
新政策情境	假設 2016 年中期既有的政策或已宣佈的承諾與措施皆能實現
450 情境	假設控制全球長期溫室氣體濃度維持在 450 ppm 左右，達到於 2100 年平均全球溫度上升不超過 2°C 之目標

資料來源：WEO2016，本研究整理

2. EIA 的《International Energy Outlook 2017 及《Annual Energy Outlook 2017》

美國能源部能源資訊局 EIA 今（2017）年分別出版《International Energy Outlook 2017（簡稱 IEO2017）》與《Annual Energy Outlook 2017（簡稱 AEO2017）》，前者是今年的 9 月 14 日出版，主要是預測全球各種化石燃料及能源使用部門之能源消費情況；後者出版於 2017 年 1 月 5 日，主要推估美國未來能源供需發展趨勢。

這兩份研究報告之情境設計，可分為參考情境及側面情境（side cases），在 IEO2017 有高/低經濟成長及高/低油價之四種側面情境，主要的參數設定如表 6。而在 AEO2017 的側面情境中，除了有 IEO2017 的四種情境外，更細緻地考量美國國內能源產能與低碳技術及能源政策，新增了高/低油氣資源及技術發展（High / Low Oil and Gas Resource and Technology）及無施行潔淨電力計畫（No Clean Power Plan），共七種側面情境，整理如表 7。

其研究指出，（1）IEO2017 的報告中，預測全球 2015

年至 2040 年間以再生能源(含水力)成長最快速，將於 2040 年達到與燃煤發電相的的占比(31%)；(2) 在 AEO2017 的參考情境下，2026 年美國轉型為淨能源出口國，且在高油氣資源和技術情境、高油價、低經濟成長情境下，有機會提早轉型，此外，未來碳排放多寡與燃氣或燃煤的選擇息息相關，若 2030 年時，無 CPP 情境下的碳排放較 2005 年僅減少 13% (參考情境減少 19%)。

表 6 EIA 的 IEO2017 之參數設定

參數	參考情境	高成長	低成長	低油價	低油價
2015-2040 年 GDP 年均成長率	3.0 %	3.3 %	2.7 %		
2040 年布蘭特原油每桶價格	US\$ 109			US\$ 43	US\$ 226

資料來源：IEA (2017a)，本研究整理；表格內的原油以 2016 年計價

表 7 EIA 的 AEO2017 之情境設計

側面情境	情境設定
高/低油價情境	油價設定與 IEO2017 相同：2040 年布蘭特原油每桶 \$226 及 \$43 美元 (參考情境 \$109)，油價主要受 NEMS 模型外部因素影響
高/低油氣資源和技術情境	相對參考情境，在高油氣資源和技術情境中，假設有較低成本且較多資源可用於生產，並允許低價格實現高產量，而低油氣資源和技術案例則採用較悲觀的資源和成本假設
高/低經濟成長情境	假設 2016-2040 年美國 GDP 年成長率分別為 2.6 % (高成長) 及 1.6% (低成長) (參考情境 2.2%)
無 CPP 情境	美國無施行潔淨電力計畫 (CPP)

資料來源：IEA (2017b)，本研究整理

3. IEEJ 的《Asia/World Energy Outlook 2016》

IEEJ 每年出版以亞洲及全球為分析標的《Asia/World Energy Outlook (簡稱 AWEO)》，目前最新版本於 2016 年 10 月出版的 AWEO2016，著重於國際能源新情勢下對全球 3E+S 的思考 (3E+S 即 energy security, economic growth and environmental conservation + safety)，前一版本《Asia/World Energy Outlook 2015 (簡稱 AWEO2015)》，著重探討新能源情勢下的油價與氣候變遷之對策，因此，AWEO2015 在情境設計方面，除了參考情境、技術進步、技術進步+CCS 情境之外，也新增了低油價情境 (假設 2040 年原油每桶 134 美元) 及國家自定預期貢獻 (Intended Nationally Determined Contributions, 簡稱 INDC) 情境；而 AWEO2016 同樣也模擬技術進步+CCS 情境及 INDC 情境，配合亞洲最新關切的能源議題，更新增了技術進步+氫氣、高核能發電及低核能發電的情境，各情境說明如表 8。其研究指出，(1) 相較基準情境，技術進步情境下 2050 年能源消費量減少 12%，最大的減排效果來自節能；而高核電情境下，CO₂ 減少、自給率不變、發電成本下降，改善了 3E 問題；(2) 在難以實施 CCS 或封存量有限的地區，以氫能取代燃煤/氣，加上燃料電池車加速普及，2050 年氫能發電將占總發電量的 13%。

表 8 IEEJ 的 AWEO2016 之情境設計

模擬情境	情境說明
技術進步	假定所有國家強勢執行能源與環境政策，極大化運用各種減量工具，促使未來各種先進技術得以廣泛使用，例如：節能家電、燃料電池汽車、再生能源發電技術、新建核能電廠、各種高效率低污染燃煤及燃的發電技術等
INDC	分別模擬(1)8個主要溫室氣體排放國(包括歐盟、美國、日本、中國大陸、俄羅斯、巴西、印尼及印度，總占2010年全球65%的二氧化碳排放量)的INDCs情境，及(2)東協7國有或無已開發國家的資金援助下的INDCs
技術進步+CCS	技術進步情境外，搭配碳捕捉與封存技術的推廣
技術進步+氫能	技術進步情境外，部份能源消費國應用氫能發電
高核能發電	全球2040年的核電裝置容量為2014年的3倍，亞洲約7倍
低核能發電	全球及亞洲2040年的核電裝置容量為2014年的約六成

資料來源：IEEJ (2016)，本研究整理

4. APEC 的《APEC Energy Demand and Supply Outlook 6th》

亞太經濟合作組織 APEC 每 2 至 3 年出版《APEC Energy Demand and Supply Outlook》，前一版於 2013 年 2 月發行，目前最新版本係 2016 年 5 月發行的第六版，該報告彙整 APEC 21 個會員國的再生能源及生質燃料相關政策與措施，在情境的設計方面，除了參考情境外，模擬六種不同發電組合之情，分別為能源效率提升情境 (Improved Efficiency Scenario)、高再生能源情境 (High Renewables Scenario)，以及替代電力組合情境 (Alternative Power Mix Scenario)，其中替代電力組合情境再分為燃氣占 50% (High Gas 50%

Case)、燃氣占比 100%(High Gas 100% Case)、淨煤(Cleaner Coal Case)及高核電(High Nuclear Case)之四種發電結構，各情境說明如表 9。其研究指出，台灣 2040 年在效率提升情境的能源消費量最低，但該情境下煤占比是所有情境下最大(41%)，天然氣占比則是最低(13%)，而油占比在所有情境下仍維持一定的占比(35~38%)，而再生能源占比在高度再生能源情境下可以提高至 7.5%(參考情境時為 4.1%)。

表 9 APEC 的《Energy Demand and Supply Outlook 6th》之情境設計

模擬情境	情境說明
效率提升情境	2035 年 APEC 能源密集度較 2005 年水準減少 45% (台灣設定每年能源效率提高 2%)
高度再生能源情境	達到 APEC 再生能源目標，即 2030 年在發電部門及運輸部門的再生能源占比倍增 (相比 2010 年)
替代電力組合情境	淨煤：2020 年後的燃煤發電先進技術效率為 45-50%
	燃氣占比 50 %：新燃煤電廠半數由燃氣機組取代
	燃氣占比 100%：新燃煤電廠全數由燃氣機組取代
	高核電：興建中或計劃中的核廠皆能實現(台灣既有的核廠延役至 2040 年)

資料來源：APEC (2016)，本研究整理

5. BP 的《2017 Energy Outlook》

英國石油公司 BP 每年年初發布能源展望，提供投資者了解未來 20 年能源市場發展趨勢，最新版本於 2017 年 1 月發行的《2017 Energy Outlook》，提供至 2035 年全球能源的供需預測。在情境設計方面，如表 10 所示，除了基準情境 (base case) 外，因應 2017 年的汽車革命時代，新增了數位汽車情境 (Digital revolution mobility scenario，即無人駕

駛汽車情境)及電動汽車情境(Electric revolution mobility scenario)，此外，考量未來低碳能源的發展趨勢，也新增快速過渡情境(faster transition case)及更快速的過渡情境(even faster transition case)。其研究指出，(1)數位汽車情境下，技術進步降低旅行成本的部份，反而提高里程數而增加對石油的需求；在電動汽車情境下將會增加對電力的需求，而不是石油的需求；(2)在快速及更快速的過渡情境下，均降低對油的需求，不同的是前者對天然氣的需求溫和增加，後者由更多非化石燃料取代油氣需求。

表 10 BP 的《2017 Energy Outlook》之情境設計

模擬情境	情境說明
數位汽車情境	相較基準情境，電動汽車、汽車共乘共享等較快速，但電池成本及電動汽車的滲透率大致相同。
電動汽車情境	以數位汽車情境為基準，電動汽更加普及，且汽車共乘共享均透過電動汽車來落實。
快速的過渡情境	相較基準情境，所有既定的政策皆完全達成，2035 年實質達碳價達到每公噸 100 美元，且有其他更多的措施促使能源效率提升及燃料轉換。
更快速的過渡情境	假設減量達到 IEA 的 450 情境所設定

資料來源：BP (2017)，本研究整理

6. MIT 的《2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook》

美國麻省理工學院 MIT 於 2016 年出版的《2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook》，將氣候變遷的議題延伸至全球糧食與水資源的展望。報告中模擬 COP21 展望情境(COP21 Outlook Scenario)，假設各國實現 COP21 的請願，並且在 2030 後維持不變下，其推測 2100 年全球表面平均溫

度仍比工業化時代前上升 3.1~5.3°C，與達到 UNFCCC 所訂定 2°C 目標仍有一定的差距。此外，由於氣候對於溫室氣體的敏感度不同，也會造成未來升溫幅度有所差異，因此，報告中設計 2°C 情境，假設 2025 年以前全球按照巴黎協議的溫室氣體排放路徑之規劃，爾後依據氣候的高度、中度、低度反應，設計三種溫室氣體排放路徑（意指若氣候屬於高度敏感，則設定全球溫室氣體排放量應更少，才有機會實現 2°C 的目標），分別命名為 2CH、2C、2CL 排放路徑，其研究發現，幾乎可以確定只有 2CH 的排放路徑下，我們才有可能維持升溫不超過 2°C 的門檻，並且強調未來能源技術（如核能、再生能源、生質能、CCS、儲電、電網等）的發展與突破是至關重要的。

表 11 彙整上述的國外能源展望報告之情境及部份結果。

表 11 國外能源展望報告之情境設計及部份結果

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
IEA/ World Energy Outlook 2016 / WEM 模型	<ul style="list-style-type: none"> • 既有政策情境：2016 年中期已實施或通過的能源與環境政策維持不變 • 新政策情境：2016 年中期既定的政策或已宣佈的承諾與措施皆能實現 • 450 情境：維持 2100 年全球升溫不超過工業化時代前的 2°C 	<ul style="list-style-type: none"> • 即使達成各國 NDC 目標，距離實現 2°C 目標仍有相當的差距 • 2040 年低碳及再生能源與技術已能滿足半數新增的能源需求 • 能源政策重點將轉向併網，關注於電力市場的設計及供電安全

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
EIA/ International Energy Outlook 2017 / WEPS+模型	<ul style="list-style-type: none"> • 高/低油價情境:2040年布蘭特原油每桶\$226及\$43美元(參考情境\$109) • 高 / 低 成 長 情 境:2016-2040年全球GDP年均成長率分別為3.3%及2.7%(參考情境3%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2015-2040年再生能源發電(含水力)成長最快速,2040年達到與燃煤發電占比相同(31%)
EIA/Annual Energy Outlook 2017 / NEMS 模型	<ul style="list-style-type: none"> • 高/低油價情境:設定與IEO2017相同 • 高/低油氣資源和技術情境:相對參考情境,高油氣資源和技術情境,假設有較低成本且較多資源可用於生產,並允許低價格實現高產量,而低油氣資源和技術情境採用較悲觀的資源和成本假設 • 高 / 低 經 濟 成 長 情 境:假設2016-2040年美國GDP年成長率分別為2.6%(高成長)及1.6%(低成長)(參考情境為2.2%) • 無CPP情境:美國未施行潔淨電力計畫 	<ul style="list-style-type: none"> • 參考情境下,2026年美國轉型為淨能源出口國,且在高油氣資源和技術情境、高油價、低經濟成長情境下,有機會提早轉型 • 碳排放多寡與燃氣或燃煤的選擇息息相關 • 無CPP情境下,2030年的碳排放較2005年僅減少13%(參考情境為減少19%)
IEEJ/ Asia/World Energy Outlook 2016 / Energy supply-	<ul style="list-style-type: none"> • 技術進步情境:假定各種先進技術廣泛使用,如節能家電、燃料電池汽車、再生能源發電技術、新建核能電廠、高效低污的 	<ul style="list-style-type: none"> • 相較基準情境,技術進步情境下2050年能源消費量減少12%,最大的減排效果來自節能;而高核電情境下,

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
demand model	燃煤/燃氣發電技術等 • INDC 情境：模擬 8 個溫室氣體排放大國及東協 7 國有或無已開發國家的資金援助的 INDC 情境 • 技術進步+CCS 情境 • 技術進步+氫能情境 • 高核能發電情境：全球及亞洲 2040 年的核電裝置容量為 2014 年的 3、7 倍 • 低核能發電情境：全球及亞洲 2040 年的核電裝置容量為 2014 年的六成	CO ₂ 減少、自給率不變、發電成本下降,改善了 3E 問題 • 在難以實施 CCS 或封存量有限的地區,以氫能取代燃煤/氣,加上燃料電池車加速普及,2050 年氫能發電將占總發電量的 13%
APEC / APEC Energy Demand and Supply Outlook 6 th / APERC'S Energy Demand and Supply Model	• 效率提升情境：2035 年 APEC 能源密集度較 2005 年水準減少 45% • 高再生能源情境：2030 年 APEC 電力及運輸部門的再生能源占比較 2010 年倍增 • 替代電力組合情境：分為四種電力情境：淨煤、高天然氣比 50%、高天然氣比 100%、高核能比	• 2040 年台灣在效率提升情境下的能源消費量最低,但煤的占比卻是最大,而天然氣占比最低 • 油在各情境中均維持一定占比 • 再生能源占比在高度再生能源情境下可以提高至 7.5%
BP/ 2017 Energy Outlook	• 數位汽車情境：相較基準情境,電動車、汽車共乘共享等較快速落實 • 電動汽車情境：以數	• 數位汽車情境下,技術進步降低旅行成本,進而增加對石油的需求;在電動汽車情境下,將

文獻/模型	模擬情境	部份重要結果
	<p>位汽車情境為基準，電動車更加普及，汽車共乘共享均透過電動車來落實</p> <ul style="list-style-type: none"> • 快速的過渡情境：相較基準情境，所有既定的政策皆完全達成，2035年實質碳價達到每公噸 100 美元，有更多的措施促使能源效率提升及燃料轉換 • 更快速的過渡情境：假設減量達到 IEA 的 450 情境所設定 	<p>增加對電的需求，非油的需求</p> <ul style="list-style-type: none"> • 快速及更快速的過渡情境下，均降低對油的需求，不同的是前者對天然氣的需求溫和增加，後者由更多非化石燃料取代油氣需求
<p>MIT/ 2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook/ EPPA 模型</p>	<ul style="list-style-type: none"> • COP21 展望情境：COP21 的請願皆實現，並 2030 後維持不變 • 2°C 情境：假設 2025 年按照巴黎協議的排放路徑，爾後依據氣候對溫室氣體的高度、中度、低度反應，設定三種的排放路徑 	<ul style="list-style-type: none"> • 目前減量目標不夠積極，與達到 2°C 目標有所差距 • 若欲落實 2°C 目標，未來能源技術的發展與突破是至關重要的

資料來源：本研究整理

參、GEMEET 模型介紹

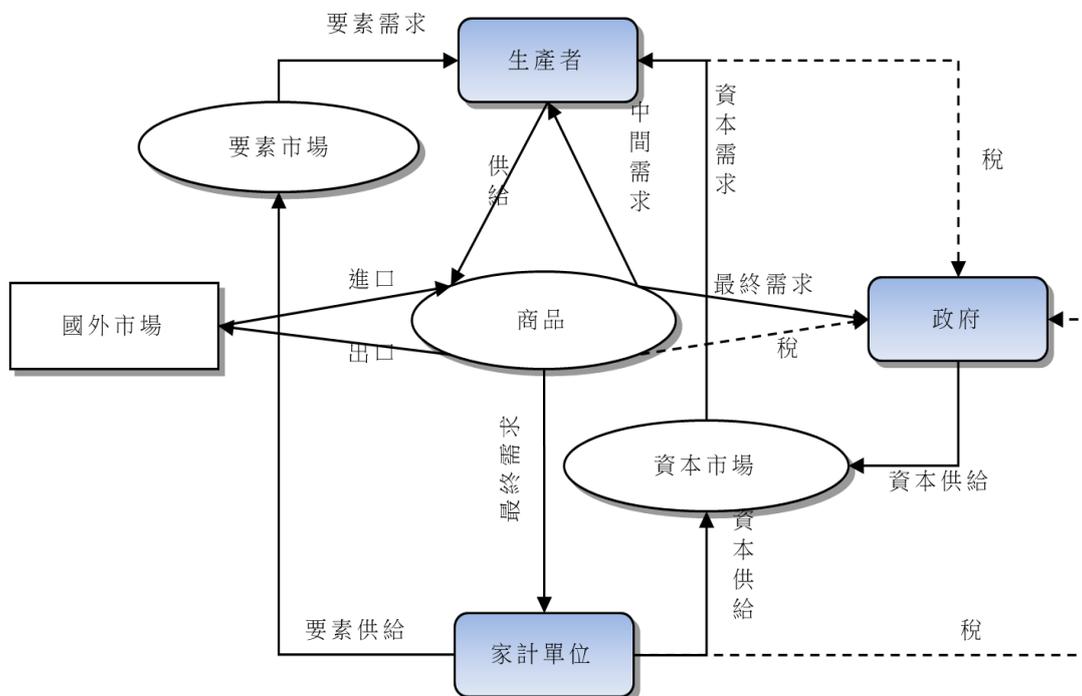
GEMEET (General Equilibrium Model for Energy, Economic and Technology Analysis)經過幾年的研發及持續的資料更新，目前已具備了完備的能源政策評估功能，也能夠與能源工程模型 TIMES 進行整合，因此可以用於評估更多元的能源及再生能源政策。GEMEET 目前已全面完成模型研發，除持續更新模型相關參數資料以外，在 104 年度計畫中亦配合主計處公佈的最新 100 年度產業關聯資料大幅度更新模型基準資料，並重新檢視模型內新能源資料並調整新能源技術之成本結構，反覆測試求解模型基準資料，再由求解結果產製各種重要觀察指標，不斷檢視這些結果是否符合現況、政策規劃目標及專家預期等。除了上述外，研究也已納入各種新的分析及政策模擬功能。目前建置的 GEMEET 模型特色可歸納如下：

- 一、納入特殊之新能源及再生能源部門(包含纖維酒精製造業、生質柴油製造業、風力發電設備製造業、太陽光電發電設備製造業、纖維酒精設備製造業)
- 二、發電部門係由不同之發電技術所組成(包含傳統的火力發電、水力發電、核能發電，以及再生能源發電如太陽光電發電、風力發電)
- 三、部份新能源或再生能源主要用於發電，部份則以作為一般消費為主，另有一些則屬於組件及設備製造為主
- 四、考量了內生技術變動的機制(學習曲線效果及 R&D 累積)，並連結了科技政策的影響機制
- 五、考量了能源政策中的誘因或補貼政策，針對租稅及補貼有特殊的處理

六、考量環境政策的施行，設計了課徵碳稅或能源稅，以及直接進行總量管制之機制

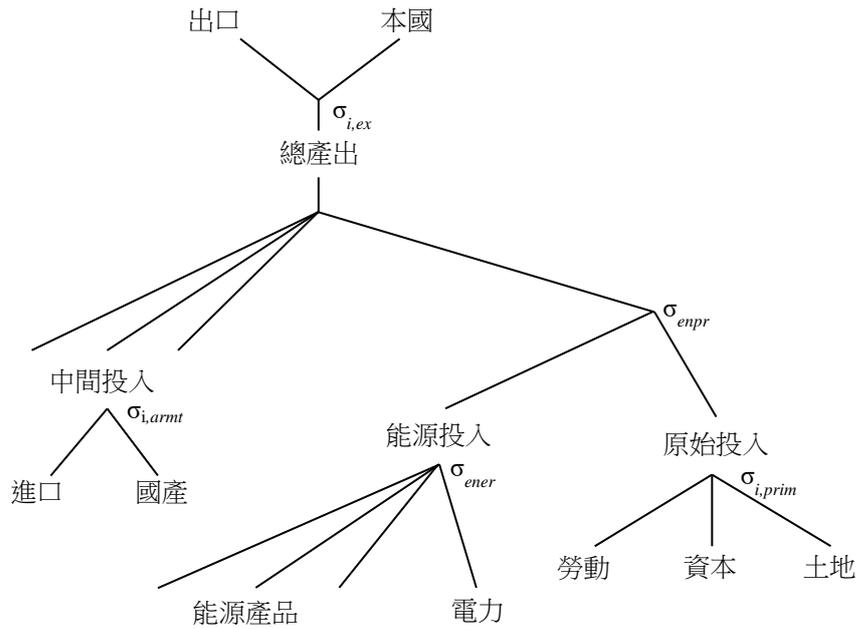
七、事先考量將來與能源工程模型整合的策略，擬定合理的部門分類

在建置的 GEMEET 模型基本架構中（圖 1），生產者購買包括商品（中間需求）及原始要素（要素需求）來進行生產，而就家計單位、政府及國外購買者等最終需求者而言，其僅購買商品，並無原始要素的購置。而政府可以針對商品、家計及生產者課徵稅收。惟不論中間或最終需要，其所購買之商品均可分為國產品及進口品。至於在決策行為模式的設定上，係利用投入—產出弱可分割假設（Weak Separability Assumption），將生產者、投資者及消費者之決策行為以巢式（Nested）的結構設定處理，表示巢式結構內各商品之需求完全取決於該結構內商品之相對價格，與其他巢式結構是完全獨立的。



資料來源：Lin et al. (2015)

圖 1 模型基本架構



資料來源：Lin et al. (2015)

圖 2 模型內生產巢式結構

生產者行為的設定是在成本最小化的前提下，在特定的生產函數中選擇最適投入組合以求取最適的產出。在投入面方面，圖 2 下層的投入組合代表各個產業是採用 Leontief 生產函數將中間產品與複合能源原始投入作為要素來生產商品，這樣的設定代表著上述各項投入之間無替代性，只是反映出各生產投入將隨著產出的擴張或緊縮而呈等比例的增減。而中間投入各商品的組合是由該商品國產與進口品透過 CES (Constant Elasticity of Substitution, CES) 函數加總而成之複合產品。而在 CES 函數中，則是透過其替代彈性 (σ) 的大小來反應投入之間的替代性。而複合能源原始投入則代表著能源與原始投入之間有相互替代之關係，能源投入在模型內也有相當詳盡之刻畫。而原始投入一樣是由勞動、土地、資本透過 CES 函數加總而成。在產出的部分，圖 2 最上層的 CET (Constant Elasticity of Transformation, CET) 加總函數所代表的是生產者在追

求利潤極大化的前提下，以固定轉換彈性決定最適的產出分配。換句話說，國內的產業會依照各個產品的價格進而決定各種產品的生產比例來追求收入的最大化。而廠商生產供本國或是出口使用的比例則是由本國與出口的相對價格而定。

本模型也涵蓋了相關能源產品。在能源投入中，煤及製品、燃氣、汽油產品、柴油、其他油品以及電力互相為一不完全替代之關係，而汽油產品分別由纖維酒精與汽油做複合加總而成，燃氣則為液化石油氣及天然氣所組成。現實社會的狀況也類似於此，當其中某種能源相對價格高漲，廠商對該種能源之需求量會減少，自然會提高其他能源的需求量。在電力投入方面，目前模型內電力主要分為非汽電共生及汽電共生，非汽電共生則依照不同發電技術之特性在區分為基載與中尖載電力，基載電力包含了核能與燃煤發電技術，而在燃煤發電中，又透過將傳統燃煤與 IGCC + CCS 複合加總而成。其他的發電技術則歸類至中尖載。

由於新能源及再生能源產業技術目前仍處於初期發展階段，高額的期初研發投入使得產品成本相較於其他化石能源產品高出許多，因此無法刺激市場需求。然而隨著環境變遷，各種有利條件出現及在相關政策配合之下，再加上研發經費投入及產業學習效果，將使其成本逐漸具有競爭力。為了體現再生能源產業的研發投資及產業生產的學習效果，因此模型中將生產成本與研發資本存量及累積產品產量進行連結。此外，由於政府針對再生能源實施 FIT 政策，由電力業者向再生能源投資人以一固定費率保證收購，如此將使得電力業者成本提高。

模型中有設定許多外生變數以及參數數值，而這些變數與參數值在整個模型的模擬過重中扮演相當重要的角色，而模型內的參數

大致上可以分為三種，第一種是彈性，實際在模型中，由於 CES 函數被廣泛的運用，在函數內包含了關鍵的設定參數—替代彈性，故彈性的決定往往在模型的設定中扮演相當重要的角色，當替代彈性愈大，代表兩者間的替代性愈高，反之則越小。所以由此可知彈性設定的依據是相當重要的。一般來說，彈性的設定依據有兩種，第一種是自行估計，第二種是根據過去的文獻做設定。如果是自行估計的話，還要考慮到在估計過程中所使用到的歷史資料是否過舊？是否需要更新？而如果是根據過去的文獻做設定的話，同樣地也要注意到所引用文獻之時間性，以及產業部門對應是否恰當？

第二種參數為歷史校準參數。在模型中，我們稱已實現或是過去的年度為歷史年（2011-2016），之後則為未來年（2017-2050）。為了讓模型在歷史年所解出之重要變數能與實際已發生狀況符合，一般來說這些重要的變數會被設定為外生且參照官方所公布之資料，我們稱之作歷史校準。所以這部分的設定通常都會參照過去之實績值。而最後一種參數為參考情境之參數，這類的參數在模型內包含了家庭或人口成長趨勢、國際能源價格與相關政策或技術設定。通常這類的參數主要是依據未來可能之情況或政策做設定，所以設定的準則通常為相關研究機構或文獻估算或未來已經確定的政策。如果皆無以上的資料可做參考的話，那麼也要檢視自行所估算的結果是否合理。在完成上述資料更新及未來年重要之參數推估後，即可進行參考情境或基線之推估，而推估後所要觀察之重點結果為經濟成長率、實質 GDP、二氧化碳排放量、能源消費及電力消費等。GEMEET 經過幾年的研發及持續的資料更新，目前已具備了完備的能源政策評估功能，也能夠與能源工程模型 TIMES 進行整合，因此可以用於評估更多元的新及再生能源政策。唯獨在情境設計上

仍需多加參考國際上相關研究機構之報告，以做為模型在設定情境時之參考，使模型在後續進行議題分析時更具有政策意涵。

肆、基線推估設定及結果

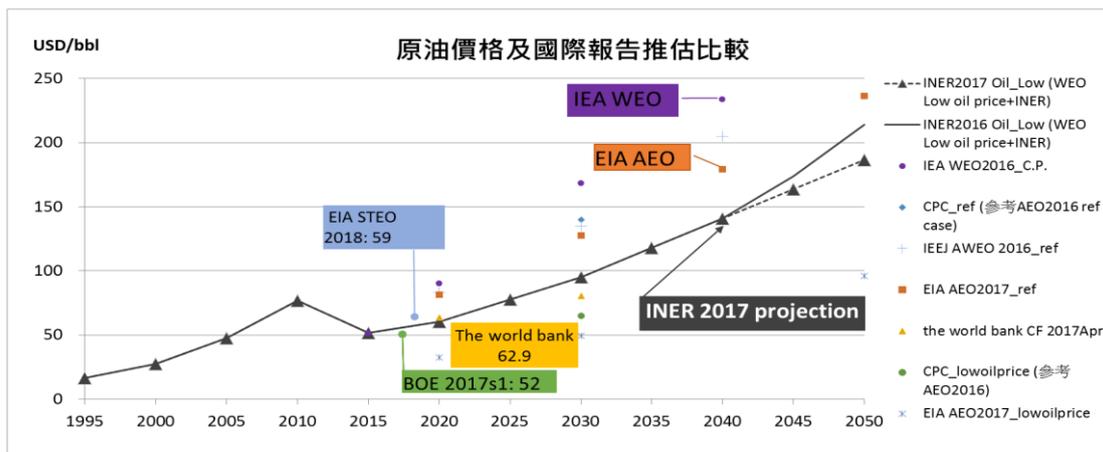
GEMEET 模型為一動態可計算一般均衡模型，主要以所編製完成 2011 的新能源產業關聯表為基期，透過歷史模擬至 2016 年，而從 2017 年逐步求解模擬至 2050 年，本研究稱 2017-2050 這段期間為未來年。而未來年相關參數之估計及設定則如下：

一、基線變數估計

國際能源價格推估：我國對進口能源之依存度高，國際已有不少具公信力能源研究機構在其出版之展望報告中揭示其對未來能源價格之假設，本研究採用的參考價格主要來自 IEA 出版之 WEO。不過由於國際價格與我國實際進口價格間仍有差異，故本研究以計量方法推估我國原油和燃料煤進口價格與國際價格之連動關係、天然氣進口價格與油價連動關係，作為我國未來價格推估之依據。參採 WEO 之原因及本土化參數之推估方式可參考柴蕙質和葛復光（2014）。

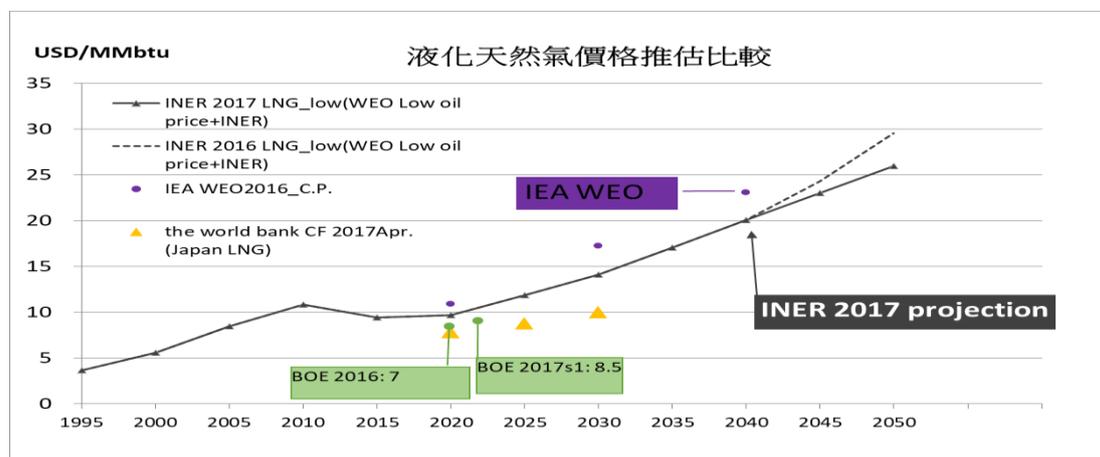
WEO 2015 因應 2014 年底油價大幅下跌，在現有政策情境（current policy）、新政策情境（new policy）及 450 情境（450 ppm）以外，增列低油價情境（low oil price scenario），由於 2014 年底油價崩跌迄今仍維持在 50 美元/bbl 左右，因此本研究主要參考 IEA WEO 2015 低油價情境，另外有鑑於 WEO 2016、AEO 2017 的參考情境皆較上一版本下修長期油價，因此本研究也較過去下修 2040~2050 推估值（如圖 3~圖 6 所示）。煉焦煤 2017 第一季之實際值波動與推估差異甚大，原因在於澳洲天災導致大量減產，故建

議不宜因短期事件，上修長期價格推估值。



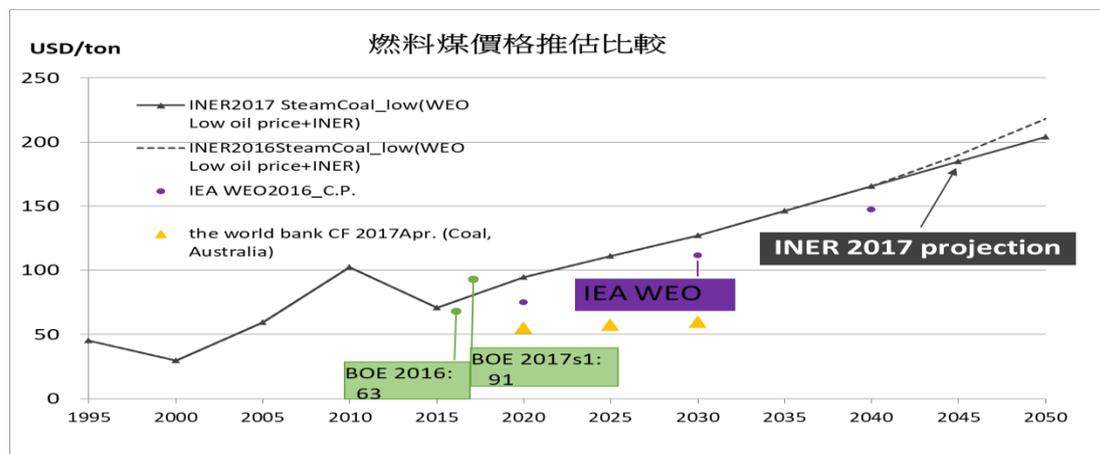
資料來源：本研究推估。

圖 3 原油進口價格假設



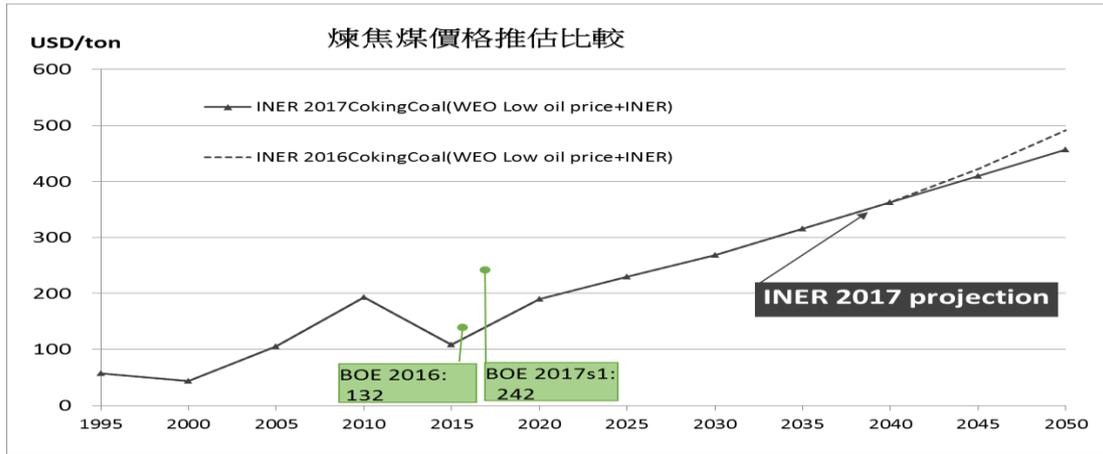
資料來源：本研究推估。

圖 4 液化天然氣進口價格假設



資料來源：本研究推估。

圖 5 燃料煤進口價格假設

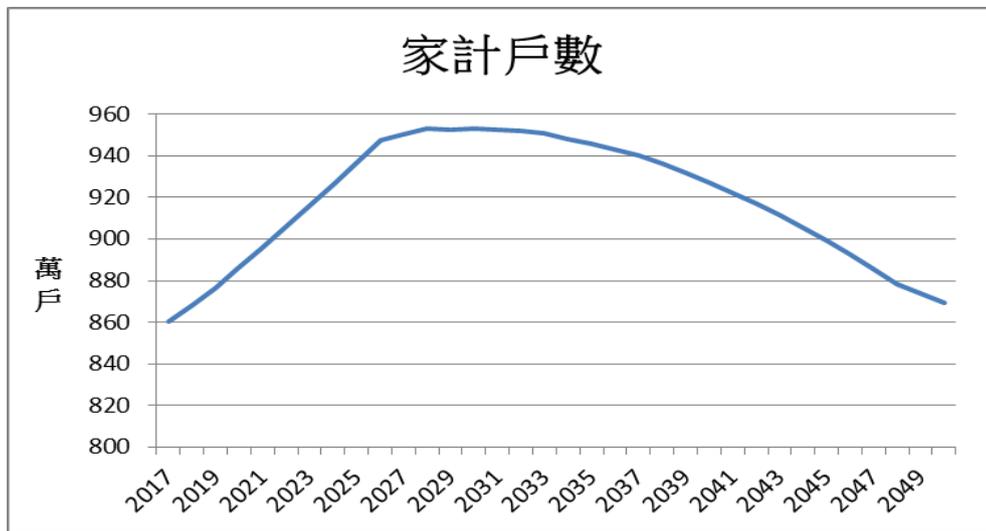


資料來源：本研究推估。

圖 6 煉焦煤進口價格假設

(一) 家計戶數趨勢

模型內家計戶數主要反映家計消費之總額，本研究利用資策會產研所（2014）所估計之未來戶量趨勢，搭配國發會中推計之未來人口預測結果，來推估未來家庭戶數的趨勢（如圖 7）。



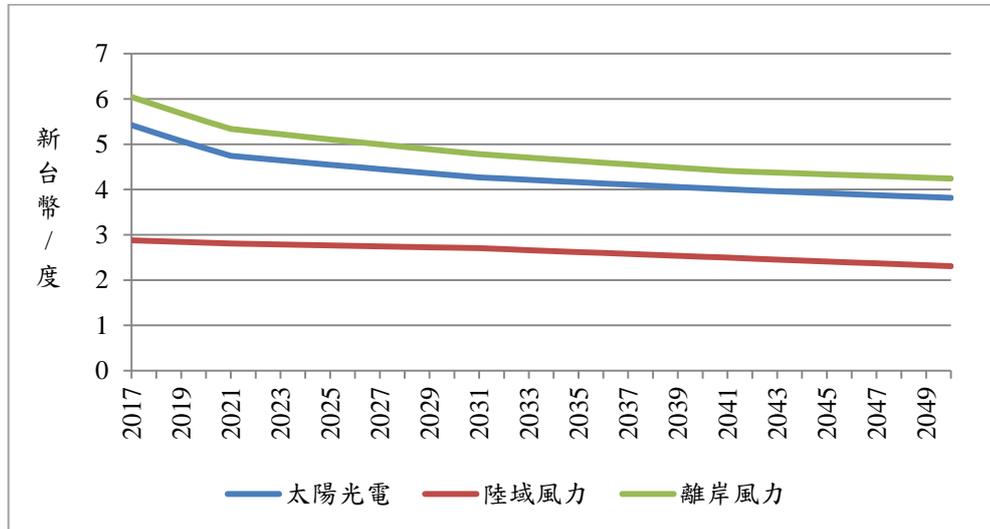
資料來源：本研究推估。

圖 7 未來家計戶數推估

(二) 新及再生能源產業補助機制

假設未來對太陽光電、陸域風力及離岸風力發電（躉購費率或設備補貼）為已確定之政策，而基準年 2017 年再生能源

之躉購費率則是以各再生能源不同級距過去之申裝量為權重做加權平均所得，補助的下降速度皆依 JRC (2014) 之各個新及再生能源的設備成本下降率做設定。設定值如圖 8 所示。

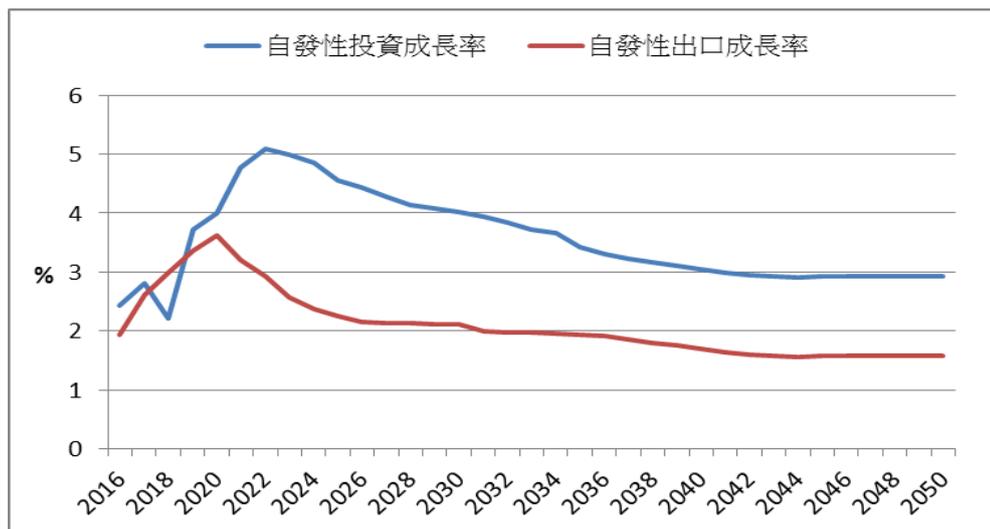


資料來源：本研究推估。

圖 8 躉購費率設定

(三) 自發性投資及出口需求

本研究使用 GI (2017) 於 2017 年對台灣未來投資及出口之預測值，如圖 9 所示。



資料來源：Global Insight (2017)。

圖 9 自發性投資與出口成長率設定

(四)核能發電

依照目前所規劃之核能政策，在模型內設定核一廠於 2015 年、2017 年分別停轉一部機組，核二廠於 2016 年、2023 年分別停轉及除役一部機組，核三廠於 2024 年、2025 年分別除役一部機組，並設定核四廠停工不商轉。

(五)水力發電

由於台灣水力發電之河川有限，且也已幾乎開發殆盡，所以在未來年裡發電量並不會有太大幅之增加。但如果在模型內不去外生限制其發電量的話，那麼在其低成本之優勢下未來年會持續地大幅成長且不符合現實狀況。故在模型內我們將水力發電設定為外生變數，並依據再生能源政策目標做設定。

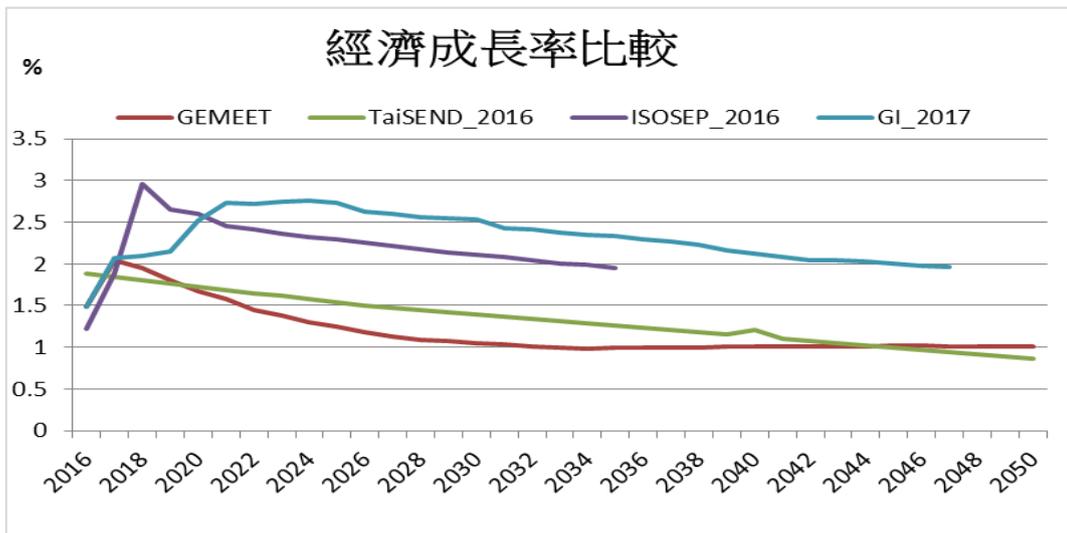
(六)自發性能源使用效率提升 (AEEI)

假設未來每年提升 1%。

二、基線推估結果

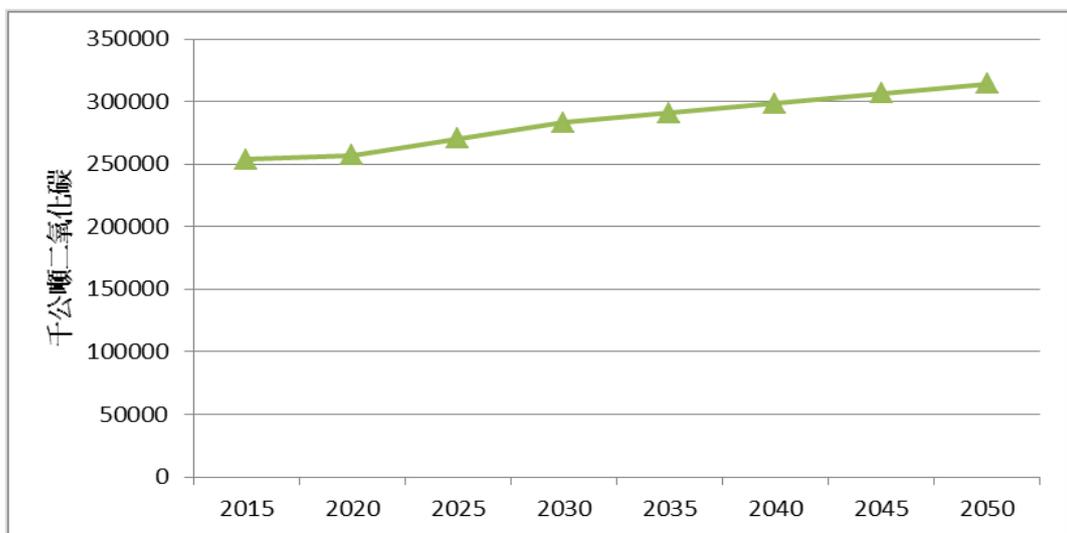
根據以上參考情境的設定，由圖 10 經濟成長率之結果可知，在考量到國際機構對於台灣未來投資及出口的看法下，我國經濟成長率未來 2030 年後約在 1% 左右。而本研究所解出之經濟成長率與較其他機構或研究低，主要因為參考情境中我們並沒有考慮未來相關經濟及產業政策。至於二氧化碳排放量方面（圖 11），隨著經濟成長，排放量逐年增加，但值得注意的是，在 2020 年以前因為煤價相較於其他傳統能源漲幅還要高，在發電結構中（圖 12）燃煤發電增加的幅度也較慢，天然氣發電成長的速度較快，造成二氧化碳排放量上升的速度也較緩。而整體的能源消費結構中（圖 13）仍以石油產品為最大比例，而電力成長的幅度相較於其他能源產品快，煤及天然氣之占比在未來則沒有太大的變化，主要反映模

型內電力其他能源替代的機制，在未來能源價格持續上升的情況下，電力相對於能源產品的價格較低，直接替代掉部分能源產品，導致電力的占比日益增加。在產業結構方面，由於未來自發性出口及投資持續增加，對於我國以出口為導向之工業來說有相當程度的幫助，所以無論從實質產值或附加價值的產業結構來看，占比皆呈現上升趨勢。



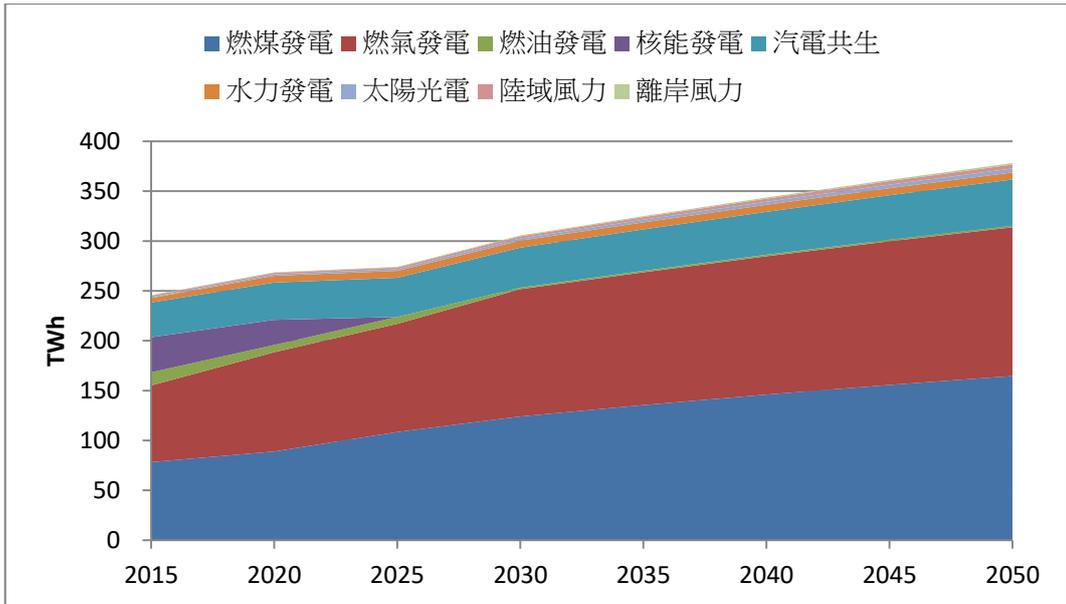
資料來源：本研究推估。

圖 10 參考情境經濟成長率比較



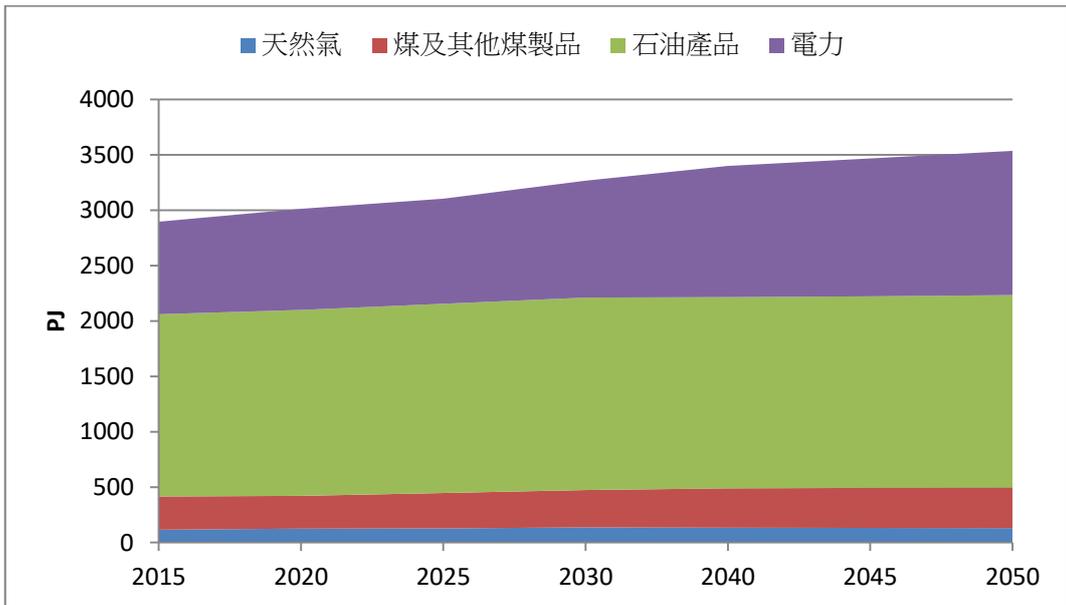
資料來源：本研究推估。

圖 11 參考情境二氧化碳排放量



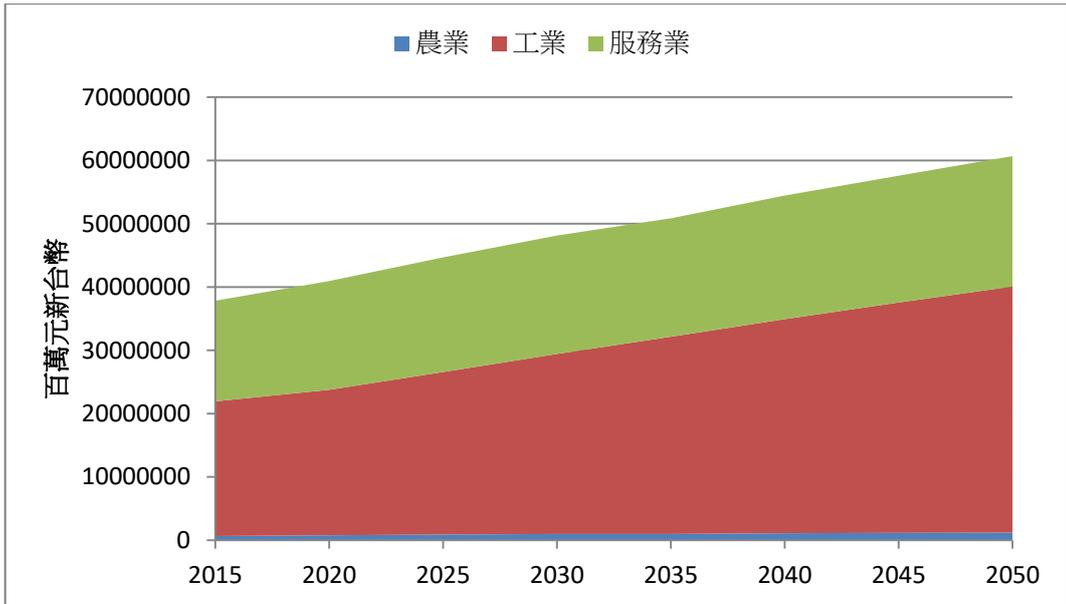
資料來源：本研究推估。

圖 12 參考情境發電結構



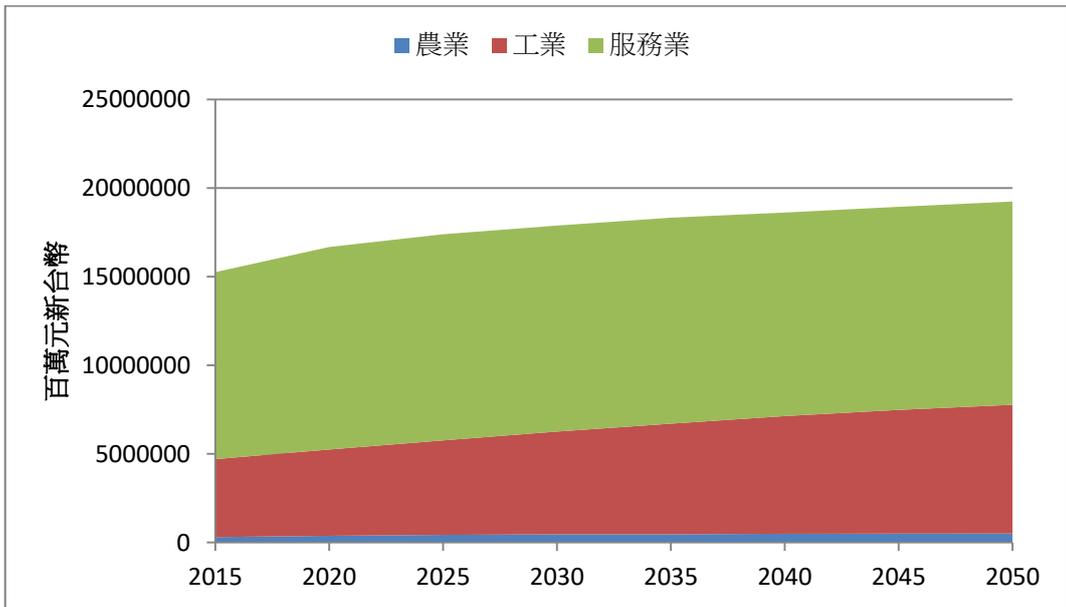
資料來源：本研究推估。

圖 13 參考情境能源消費結構



資料來源：本研究推估。

圖 14 參考情境實質產質產業結構



資料來源：本研究推估。

圖 15 參考情境實質附加價值產業結構

伍、結論與建議

一般來說，新及再生能源的發展其中一個重要的目的為減少溫室氣體排放量，而減量（減碳）問題涉及複雜且多元的能源使用與溫室氣體排放形態，政策選擇又須面對多重考量，因此，選擇一個適當的模型，搭配多種政策情境設計，有助於研擬與分析溫室氣體減量的影響程度，以作為政府制定相關政策之參考。

在我國相關研究中，可發現與 INDC 減量或溫管法有關的研究其實相當有限，除馮君強（2016）及黃郁青等（2017）有針對政府減碳政策搭配新及再生能源之發展進行相關之模擬及分析外，其他研究主要著重在電價及電力供給、能源使效率改善及課徵碳稅等。另外在碳稅研究中，也多以自行假設之碳稅進行模擬，並無參考國際研究報告如 IPCC 未來可能的稅額，或分析達減碳目標下所需之碳稅，較無涉略到減碳方面之政策研究。

在國際上，與減量相關研究及模型工具不一而足，為了同時掌握未來能源發展趨勢及低碳情境的規劃方向，本研究著重於國際上較常見的能源預測報告，而國際研究機構與主要國家（如美國、日本）都會定期或不定期出版未來能源供需展望報告，而各個展望報告的內容會因其出版的目的及功能而有所不同，基本上，出版研究報告的主要國家或研究機構通常都會發展一至多個模型，視不同需要而採用特定模型進行分析及預測，並且進行多種情境分析，以降低未來的不確定性。

相較於國內研究，國際上有較多知名機構針對減量目標與新及再生能源發展之研究。值得注意的是，IEEJ 每年出版以亞洲及全球為分析標的 Asia/World Energy Outlook（簡稱 AWEO），目前最新版本於 2016 年 10 月出版的 AWEO2016，著重探討國際能源

新形勢下對全球 3E+S 的思考，除了參考情境、技術進步情境之外，配合亞洲關切之能源議題，新增 INDC、技術進步+氫氣情境、高核能發電情境及低核能發電情境。由於 IEEJ (2016) 及 APEC (2016) 有針對亞洲所著重之議題設計模擬情境，故建議可參考其情境設計之精神，設計 INDC、CCS 及其他再生能源發展之情境，另外再搭配 APERC (2016) 裡的效率提升情境中，來進行模擬分析。

陸、參考文獻

1. 黃宗煌 (2000)。台灣溫室氣體基線排放與減量評估--台灣動態一般均衡模型(TAIGEM)之應用，財團法人國家政策研究基金會。
2. 徐世勳、李秉正、徐世榮等 (2006)。能源、經濟與環境整合策略之評估，行政院環境保護署委託研究計劃。
3. 中華經濟研究院 (2006)。運用總體經濟模型評估我國溫室氣體減量目標、策略及經濟影響，行政院環境保護署委託研究計劃。
4. 台灣綜合研究院 (2012)。產業結構調整對於達成我國節能減碳目標之影響與效益評估，行政院原子能委員會委託研究計劃。
5. 工業研究院 (2015a)。國家能源發展規劃與決策支援計畫，104年經濟部能源科技研究發展計畫。
6. 工業研究院 (2015b)。維護總體能源經濟評估模型及策略模擬分析計畫 (2/3)，103年經濟部能源科技研究發展計畫。
7. 馮君強 (2016)。國際能源市場趨勢之我國新及再生能源發展策略評估，能源價格、自主減量貢獻與能源配比研討會。
8. 黃郁青、陳治均、葛復光 (2017)。利用 TIMES 模型進行我國電網級儲能分析，臺灣能源期刊，第 4 卷第 1 期，第 45-58 頁。
9. 李叢禎，蕭之晴，李堅明，曾瓊瑤。(2007)。溫室氣體減量之遵循成本與健康附屬效益。臺灣經濟預測與政策, 37 (3) , 1-30.
10. APEC (2016) . APEC Energy Demand and Supply Outlook 6th Edition.
11. BP (2017) . 2017 Energy Outlook.
12. EIA (2017a) . International Energy Outlook 2017.
13. EIA (2017b) . Annual Energy Outlook 2017.

14. IEA (2016) . World Energy Outlook 2016.
15. IEEJ (2016) . Asia/World Energy Outlook 2016.
16. Lin, J. X. Feng, C. C. Lin, S. M. Ko, F. K. and Chu, Y. P. (2015) .
R&D, Technological Change and Rate of Feed-in Tariff. The
Empirical Economics Letters, 14 (2), 161-172.
17. MIT (2016) . 2016 Food, Water, Energy and Climate Outlook.