

開發臺灣2050能源供需情境模擬器之基因演算 優選模組及其應用

李沛濠^{1*} 朱証達² 洪明龍³ 劉子衙⁴

摘要

工業技術研究院於2013年引進英國能源及氣候變遷部(Department of Energy and Climate Change, DECC)技術開發臺灣2050能源供需模擬器(Taiwan 2050 Calculator)一系列溝通工具，做為我國能源政策的溝通平台。不過Taiwan 2050 Calculator並無優選能力，無法根據設定的低碳能源發展願景與限制，決策出最佳能源發展路徑組合。本研究因而整合基因演算法(Genetic Algorithm)，將Taiwan 2050 Calculator的能源發展路徑設計成發展路徑染色體解，透過世代競爭機制，決定優選模型的較佳解。並應用所發展的優選程序找出2030年的較佳減碳路徑，與近似現行能源政策的參考路徑比較後，發現優選結果雖較參考路徑花費多5.7%，不過2030年總碳排放量可大量減少達28.7%。顯然採用所發展的優選程序進行決策，可在維持能源供給安全穩定的前提下，達成更佳的減碳成果。本研究採用案例僅在示範優選程序的可操作性，因此案例仍未充分考量政策可行性，未來應用時應進一步考量措施執行困難度、市場因素，設定優選模型限制條件，如技術最大可行情境限制等，使優選結果更具參考價值。最後再依據專家意見驗證調整，而非直接將結果當作可行的政策措施。

關鍵詞：臺灣2050能源供需情境模擬器、能源供需、能源工程模型、優選決策、基因演算法

1. 前言

我國為能資源缺乏的國家，大約98%以上的能源仰賴進口。因此，維持能源供給穩定並同時確保環境品質為維繫我國永續發展的重要政策發展方向。惟能源技術眾多而複雜，卻缺乏大眾適用的分析工具，造成各界在溝通能源供需發展的巨大挑戰。工業技術研究院(後簡稱為工研院)因而於2013年引進英國能源及氣候變遷部(DECC)技術開發臺灣2050能源供需

情境模擬器(Taiwan 2050 Calculator)的一系列溝通工具。Taiwan 2050 Calculator為合理反應臺灣能源系統特性，包含多達130項能源供給與需求技術，並將個別技術的發展趨勢，設定保守、積極、前瞻、極限等情境，由使用者自行調配各技術的發展情境，組合出各自支持的能源發展路徑，具有極高的彈性。該工具的技術參數、能源技術潛能推估與情境分析，亦被應用到2015年初舉辦的全國能源會議上，做為具不同立場團體、個人間的論述依據(經濟部，

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所資深研究員

² 工研院綠能所研究員

³ 工研院綠能所經理

⁴ 工研院綠能所組長

*通訊作者, 電話: 0958-415217, E-mail: peihaoli@gmail.com

收到日期: 2015年09月02日

修正日期: 2015年11月18日

接受日期: 2015年11月24日

2015a)，顯見Taiwan 2050 Calculator已逐漸為各界採用，作為溝通能源發展願景的重要工具。

不過Taiwan 2050 Calculator並未納入優選程序，因此無法由系統操作者設定特定優選目標與須滿足的限制條件建構一低碳能源優選模型進行分析，譬如求取發電成本在特定價格以下，而可達成最大減碳量的發展路徑；使用者僅能透過冗長的試誤程序(trial-and-error)求取可行發展路徑，無法保證由使用者花費長時間組合出的發展路徑為最佳解，因此不利於最佳能源發展路徑的規劃探討。然而Taiwan 2050 Calculator提供多達34個情境選項，可能的組合解多達 10^{20} 以上，而各情境選項之間亦相互關聯，因而無法應用線性規劃優選模型求取全域最佳解。本研究因而整合一基因演算(Genetic Algorithm)程序，發展基於Taiwan 2050 Calculator的優選模組，利用該演算法的演算機制，在龐大的解空間中，盡可能搜尋出較佳的組合解，以解決前述問題。

以下首先回顧國內外能源分析模型以及2050 Calculator，進而說明Taiwan 2050 Calculator的建構運作程序，以及如何應用基因演算法發展優選程序，最後應用所發展的優選程序建構一優選模型，決策至2030年較佳減碳發展路徑，並與現行政策相似的參考路徑比較，以驗證優選模式是否可找出最佳的組合解。

2. 文獻探討

2.1 能源規劃模型

能源系統幾乎包含一國經濟體中所有主要的活動，包括工業部門、住宅部門、服務業部門、運輸部門、能源轉換以及能源部門等，為一相當複雜的系統。因此各國在進行低碳能源發展路徑規劃時，常需借重龐大的數值分析模型系統。國際上既有的能源分析模型眾多，主要可以分為從上而下(Top-down)

與從下而上(Bottom-up)兩類。從上而下模型如AIM (Asia-Pacific Integrated Model)、MDM-E3 (Multisectoral Dynamic Model)等，主要是根據經濟驅動力，推估能源各部門的能源供需變化趨勢，此類一般均衡模型考量了錯綜複雜的產業結構、政府支出結構、消費者行為、投資行為、以及國際貿易等因素，在代表性個人與產業最適選擇下，決定市場供需均衡，不過此類模型較缺乏各類能源技術的細節，如能源技術效率等。相對而言，從下而上的模型，如MARKAL (MARKet ALlocation Model)與整合EFOM (Energy Flow Optimisation Model)的次世代能源模型TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)以及LEAP (Long range Energy Alternatives Planning System)等模型，則是根據各部門所包含的能源使用技術的效率與使用量，堆疊出各類能源的供給與需求特性，富含眾多豐富的能源技術細節，相當適合應用在能源技術的發展規劃上，可以提供能源政策決策者相當豐富的決策輔助細節。其中MARKAL與TIMES模型並已整合優選程序，可根據設定條件決策出最小成本的技術組合，以滿足長期能源服務需求。全球能源模型眾多，其基本特性的比較可進一步參考附表1由Connolly *et al.* (2010)所彙整的資訊。

在國內既有的從上而下能源分析模型中，則包含梁啟源(2006, 2009)使用臺灣動態一般均衡模型(Dynamic General Equilibrium Model of Taiwan, DGEMT)評估我國電價變動所造成的經濟衝擊。臺灣綜合研究院的臺灣永續能源發展模型(Taiwan Sustainable Energy Development, TaiSEND)(黃宗煌, 2008)，也為我國主要評估能源政策的模型之一。另外楊浩彥(2009)也探討在可計算一般均衡模型架構下，考慮參數不確定性的能源稅效果。

國內從下而上能源模型中，則以工研院的臺灣能源工程模型(MARKAL/TIMES)以及核能研究所的MARKAL模型為代表，其中臺灣能源工程模型(MARKAL/TIMES)已廣泛被利用到能

源相關政策評估上，例如郭瑾璋等(2012)應用臺灣TIMES模型評估我國能源密集度下降可行性，而蔡妙珊等(2009)利用臺灣MARKAL模型評估臺灣低碳社會發展路徑等。

然而這些能源模型僅能由對能源系統有深入了解且經過訓練的研究人員才能操作，無法交由對能源系統有一般認識或者有興趣的非專業人員，研擬符合理想的低碳能源發展路徑。社會大眾因而缺乏一套易操作的能源分析工具。

2.2 2050 Calculator

英國是目前全球減碳最積極的國家之一，二氧化碳排放自1990年來不斷下降，2011年的二氧化碳排放量已經降低到1990同年水準的77.3% (DECC, 2012)。英國於2008年頒布了極具指標性的2008氣候變遷法案(Climate Change Act of 2008)，其最重要的意義在於規範了具約束力之法定減量目標，在2050年前將溫室氣體排放降低到1990年等量之20%。

在極具企圖心的減量目標驅使下，英國能源與氣候變遷部(DECC)不斷藉由與研究單位和民間顧問公司合作進行多項能源與減碳工程模型之研究，以推估未來能源、經濟及環境之情境。但社會大眾無法接觸這些模型，了解其假設與計算邏輯，僅能被動接受其結果。DECC遂在2010年透過企業、非政府組織、技術領域和學術界專家的協助共同建立能源與減碳情境模擬工具2050 Calculator。英國政府冀由此工具來分析民意，並讓各界意見能充分溝通整合。後續不斷持續更新及建構延伸應用，在2011年底隨著『碳計畫』(DECC, 2011)的公告提出了整合成本計算之版本，正式將模型工具之分析成果導入國家未來能源發展規劃。目前已被英國政府視為重要的能源與減碳政策溝通工具。

由於2050 Calculator為基於Excel試算表的簡單能源運算模型，可快速模擬出不同能源技術發展組合下的長期能源供需組合結果，一般民眾皆可很方便的操作使用，有助於各界以

此工具為平台進行能源政策研討。因此，逐漸被多國所採用，至2015年總計完成系統的國家包括：澳洲、比利時、孟加拉、中國、哥倫比亞、印度、印尼、日本、模里西斯、葡萄牙、南非、南韓、瑞士、臺灣、泰國、越南等，我國為第5個完成系統的國家(2050 Calculator Community, 2015)。而各國在發展2050 Calculator時皆根據該國能源系統特性與需求，在英國系統架構下開發出具有不同特色的能源模擬系統。日本針對未來發展社會經濟發展情境，考量未來經濟發展、資源獨立性以及社會福利，設定出日本製造、研究發展、分享社會等5個情境，並將核能發展情境分為既有電廠重啟以及新建電廠兩項，兩發展項目的情境皆多達5個(IGES, 2015)。而印度則因電力等基礎建設不足，交通運具普及率也不及已開發國家高，因此亦納入未來都市化程度為情境選項之一，並納入跨國電網平衡機制(Gupta, 2015)。而中國的系統則將運輸部門分為城市內與城市間的運輸需求分析，而工業部門僅分為重化工業、新興產業以及輕工業，以整體產出、單位能耗進行情境分析，並強調煤炭使用量的變化(Nan, 2015)。工研院於2013年引進建構Taiwan 2050 Calculator，作為國內溝通能源發展的平台。我國能源系統的最大挑戰在確保電力供應的穩定，因此系統亦新增備用容量、變動性再生能源占比、夏季限電時數、電力排放係數、進口能源占比、售電成本、全國電力供給支出、全國節能支出等眾多分析資訊。

不過2050 Calculator為以Excel試算表為基礎的模擬系統，透過各類技術的發展情境組合決定未來能源供需變化趨勢，不能如臺灣MARKAL/TIMES能源工程模型般，可根據各年度技術成本與效率決策最低成本的最佳技術組合，須透過不斷的試誤法(trial-and-error)搜尋恰當的發展路徑，且無法確保所求得組合為最佳解。因此有必要發展一個優選程序，以輔助系統操作者利用Taiwan 2050 Calculator搜尋較佳的能源發展組合。(2050 Calculator與其他能

源模型的比較請參考附表1)

2.3 基因演算法

基因演算法的基本理論是由John Holland於1975年首先提出，為基於自然選擇過程的一種優選搜尋機制。其基本精神在於仿效生物界中物競天擇、優勝劣敗的自然進化法則。自然界的生物透過傳遞自身的DNA，讓更適合生存條件的DNA存活下來，並藉由交配機制(cross over)融合其它較優的DNA，或傳遞基因給下一代的過程出錯突變(mutation)。這所有的過程加起來，一代一代傳遞，使得生物高度適應其環境。基因演算法則利用電腦演算的方式，模仿前述生物改進自我的特性，以染色體代表決策問題的解，並定義一適應函數(fitness function)，評估該染色體解的優劣，藉由染色體世代交替，將具備較佳適應函數值(fitness value)的染色體部分組合解與其他較優解的組合整合為新的組合解，進而逐次改善適應函數值，逐次趨近較佳解。

基因演算法相當適合應用於複雜的組合問題，與不易線性化的龐大系統。目前基因演算法已被成功的應用到能源領域眾多議題上，包括探討建築能源系統的優選設計(Ooka and Komamura, 2009)、分散式系統優選設計(Alarcon-Rodriguez *et al.*, 2010)甚至於估算運輸能源消費量(Haldenbilen and Ceylan, 2005)等。

鑒於Taiwan 2050 Calculator在建構能源發展路徑時，須操作達34個情境選項，總計可能的路徑組合大約為 1.66×10^{20} ，而能源系統供需結果須透過各模組間的連動平衡進行估算，無法線性化路徑組合與能源供需間的關係，進而採用線性規劃或整數規劃優選方法決策出全域最佳解。因此本研究採用基因演算法建構適用於Taiwan 2050 Calculator的優選程序，以搜尋出對優選模型較佳的能源發展路徑組合解。

3. 研究方法

3.1 臺灣2050能源供需情境模擬器之建構

Taiwan 2050 Calculator核心模型為一Excel試算表檔案。最底層為能源供應端與能源需求端各技術或部門別情境模組，例如燃煤發電、住宅照明及鋼鐵業節能等。一個模組可包含多個選項。例如住宅空調包含了溫度設定、建築隔熱及設備效率等項目。這些情境模組在Excel模型裡會以單獨工作表(worksheet)呈現，與選項控制表連結。各模組的主要運算邏輯會實作在這些工作表裡，模組彼此互相獨立。這些模組工作表會隨著選項控制表裡的設定去變更情境參數，經過這些工作表的運算後，以統一的形式存放在不同資料輸出表。(朱証達等, 2013)

單一技術或部門別模組的主要運算邏輯會實作在個別的模組工作表裡。其目的是讓每個模組保持獨立，減少彼此間相依性，例如在陸域風力的模組裡，其運算就不與離岸風力、太陽光電甚至是燃煤模組裡的運算有關聯。這樣做的好處是增加系統的彈性，可以很容易的增加或整併模組，並且單一模組主要的運算邏輯完全由設計者決定，可簡單可複雜。

Taiwan 2050 Calculator的關鍵之處在於針對每一項能源技術，皆設定推動發展積極度不同的四個情境，包含最保守到最極端的發展情境，因此可反應出各界對於未來技術發展的想像，進而組合出符合不同立場的能源供需發展路徑，以達成節能減碳、能源安全、環境保護等目標。大多數能源技術具有4個發展情境選項，即L1保守、L2積極、L3前瞻及L4極限情境，定義如表1所示。每個情境項目的未來4個情境根據工研院各項技術專家建議進行設定，再由國內專家學者共同討論修訂。部分選項情境不易以節能減碳的積極度區分，則以英文字母A~F表示，僅表示發展方向之選擇，而不代表任何價值判斷，例如未來產業結構占比情境

表1 Taiwan 2050 Calculator情境選項之定義(朱証達等, 2013)

情境	說明
L1: 保守	在此項目上無積極的作為或相對較為循序漸進的作為所達成之目標。
L2: 積極	在一定程度努力下可達成之目標，但須有額外的規劃與作為方可達成之目標。
L3: 前瞻	須要有非常積極規劃與動作才能達成之目標，須要排除政策許多限制或科技發展有重大的突破才可達成。
L4: 極限	須要突破所有限制、窮盡所有資源及技術極限的發展才可能達成之目標。
英文字母表示者，如A~F	僅表示情境組合的差異，而非如L1~L4隱含節能減碳積極度的不同。

項目。

3.2 臺灣2050能源供需情境模擬器之運作架構

Taiwan 2050 Calculator的核心為一個複雜龐大的Excel計算表，可合理的反應我國能源系統的供需平衡特性，進行複雜情境的探討運算。對於長期從事能源相關研究的專家學者或者研究人員而言，可以直接設定各能源技術發展的情境進行分析比較，甚至於修改擴充運算核心的設定參數，比如太陽光電的能源轉換效率或者增加火力電廠發電造成的健康衝擊等，為一內容公開而架構彈性的能源模擬工具。

不過核心模型的細節眾多，雖然所有計算程序與設定都已透明公開，惟對於能源系統較少接觸的一般民眾仍較難理解操作。且因為原始Excel運算表相當龐大，若要進行情境分析時，往往須要花費較長的時間重新執行能源系統的模擬運算，不利於進行需要大量比對能源發展情境的研析探討，單次重新計算約需數十秒，若要應用如基因演算法執行優選搜尋，進行上萬次運算則可能需花費數天的時間，無法直接應用在需要大量重複計算的優選搜尋程序上。

因此，原始完整但低運算效率的Excel核心模型透過轉換程序，將在Excel核心中的能源供需運算邏輯以及完整技術資料庫，轉換為運算速度更快的電腦程式，以提升能源系統供需模擬的運算速度，將每次模擬計算降至1秒以內。

在此基礎下，更開發出網頁介面系統(包括專業版與一般版)，讓一般民眾可透過網頁操作各能源技術發展情境，進行情境分析。

3.3 基於基因演算法之優選程序

雖然透過前述轉換程序與所建構的電腦程式分析介面，Taiwan 2050 Calculator可更快速的進行低碳能源情境分析。不過Taiwan 2050 Calculator卻無法回答對於能源規劃更為直覺的決策目標，比如在滿足發電成本最多3.5元/度條件下的最小成本減碳發展路徑等。本研究進一步應用基因演算法整合前述經過轉換的Taiwan 2050 Calculator運算原始碼，開發基於Taiwan 2050 Calculator之優選決策程序，協助各界探討各類決策目標與限制下，較佳的低碳能源發展路徑。

所應用的基因演算法優選搜尋程序如圖1所示，其基本演算原理如2.3節所述。為了可以在龐大的能源發展路徑組合中進行搜尋，一開始需要產生大量的路徑組合染色體族群母體，而每個染色體組合解皆進行運算計算相應的適應目標值(fitness value)，以決定其優劣程度，若運算世代已達預設的次數，則將最終搜尋世代的較佳路徑組合輸出為優選解。若尚未達到預設的運算世代，則在考量基因優劣的條件下，隨機選取染色體組合解進行交配。並隨機進行染色體組合解基因的突變運算，避免過快收斂到目前已經找到的較佳組合，以增加搜尋到更佳組合的機會。運算終止世代總數的決定

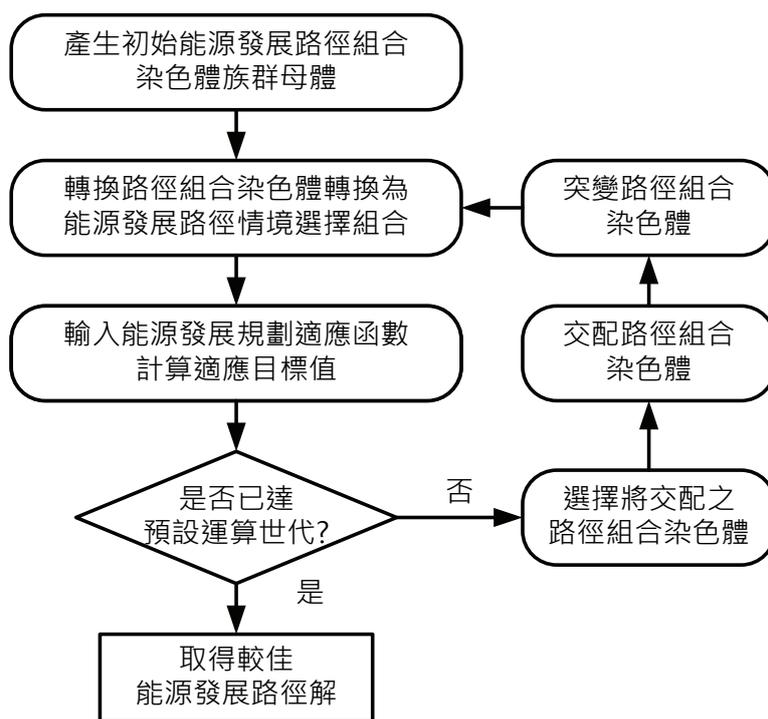


圖1 基因演算法優選程序(本研究繪製)

須要根據適應函數值是否已經收斂，不再有顯著的改善，在此研究中，以執行1,500個世代進行測試，幾乎所得的決策結果皆已收斂，因此採用該世代數作為終止條件。而每一世代產生200個染色體解，作為搜尋較佳解的依據。

前述染色體組合解的意義與交配機制如圖2所示。每一組路徑組合染色體由一系列各能源技術的情境選擇組成，因Taiwan 2050 Calculator中有多達34項情境選項，所以染色體的路徑組合長度為34個基因，每一個基因代

表的就是相對應能源技術所選取的發展情境。而進行路徑組合染色體交配時，則為兩兩染色體的基因，進行隨機交換，圖中路徑組合染色體B中灰色的基因在交配之後，帶到路徑組合染色體C中，而其他技術選項基因情境則由路徑組合染色體A中的基因提供，因此路徑組合染色體C就同時擁有來自父代染色體A、B的技術發展情境資訊。因為具備較佳適應函數的路徑組合染色體被選取進行交配的機率較高，因此較佳的路徑組合資訊就會有較高的機會傳

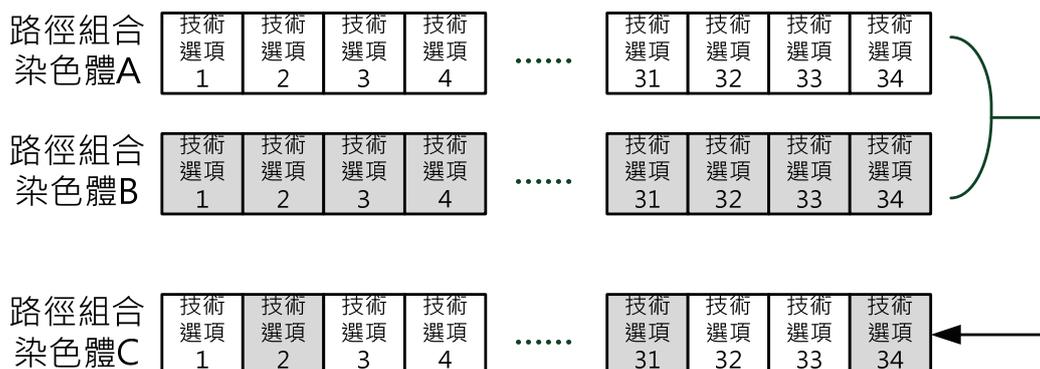


圖2 能源發展路徑染色體解交配機制示意(本研究繪製)

遞到下一個運算世代中。在此研究中，參考過往相關研究的經驗，設定染色體解交配機率為70%，而突變機率為5%，使得逐漸收斂的染色體解能有機會嘗試其他路徑組合，求取最佳的解。

本研究進一步整合前述經過轉換運算速度更快的Taiwan 2050 Calculator運算程式，以及基因演算優選程序，建構出一優選模組，其運作程序如圖3所示，其運作機制簡要說明如下。

系統操作者須要先設定規劃目標，比如最小化溫室氣體排放量、發電成本、能源密集度或者總能源系統成本等。並進一步考量決策過程中必須要滿足的限制條件，如在能源系統限制方面，至少須滿足三個條件，包括：

- (a) 設定變動性再生能源占比在特定比例之下，以確保系統供電穩定性；
- (b) 為確保能源系統供需，亦須設定總供給能源需要大於或等於總能源需求量；
- (c) 並進一步設定電力系統須滿足特定的備用容量率，以確保系統可滿足尖峰負載需求。

甚至於考量固定特定能源技術的發展情

境，而不開放進行優選決策，比如核電發展情境可設定為未來核四不商轉，核一～三屆齡除役或者延役20年等。

前述能源發展路徑的優選決策目標與限制條件，接續轉換為基因演算法優選模組可以理解的運算程序，並定義出適應函數(fitness function)，以決定不同路徑發展組合的優劣程度。在此適應函數中，除包含決策目標之外，亦將限制條件併入計算，以同時反應決策目標的優劣程度以及是否滿足限制條件，在不滿足限制條件的情況下，通常是設定一個相對於目標函數而言極大的數值，使得演算程序認定此路徑組合為一較不佳解。

適應函數須將非線性優選模型轉換為可評估特定解的適應函數，以單一數值評估解的優劣，與其他組合其他組合解進行比較，基因演算法則會依據解的優劣判斷是否留存該解的組合資訊。本研究依據應用基因演算相關研究的做法，將求取較小成本的適應函數定義為：

$$\text{適應函數} = \text{優選模型目標函數} + \text{極大加權數} \times \text{違反限制式的差異量}$$

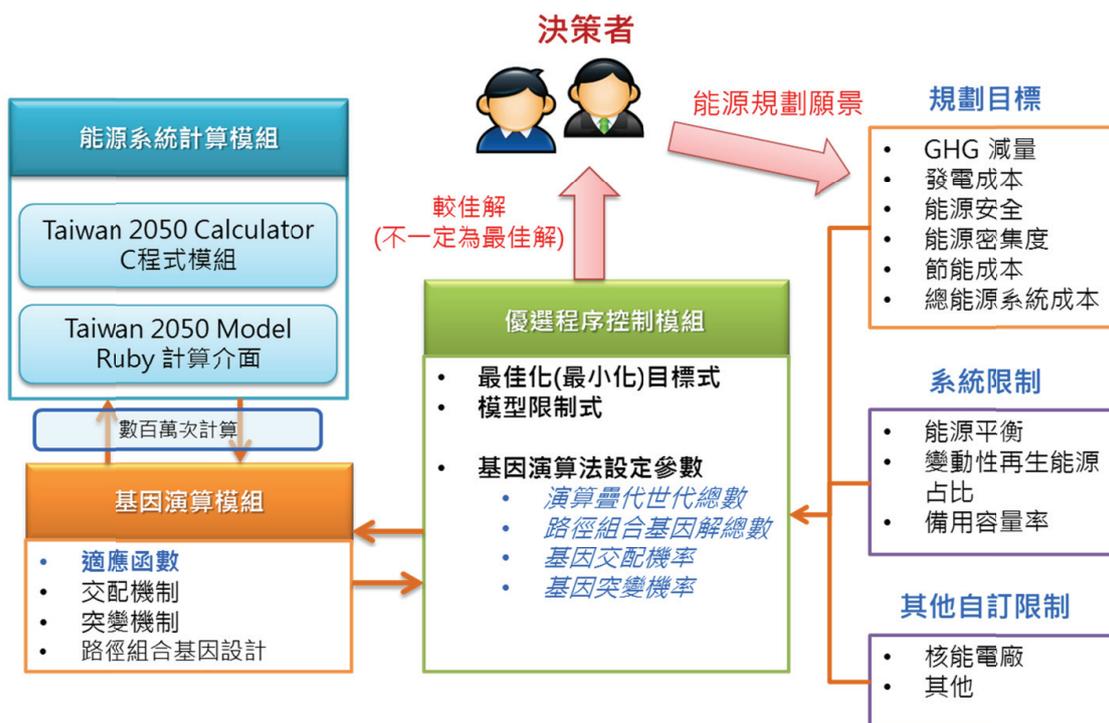


圖3 Taiwan 2050 Calculator優選模組運作架構(本研究繪製)

其中上式右邊的第二項為違反限制式時的懲罰項，僅有在違反限制式時，才會累加一極大的數值，使得整體數應函數數值趨向於一較大的數值，在基因演算的搜尋過程將把該違反限制式而有較大數值的解，當作較差的組合，而逐漸在演算過程剔除掉。

而所定義的適應函數將在基因演算的過程中，不斷將不同的發展路徑組合輸入Taiwan 2050 Calculator運算程式中進行能源供需模擬運算，分析結果回傳給基因演算模組，以決定該路徑組合的優劣程度，作為後續演算程序搜尋較佳解的依據，以搜尋到更佳的路徑組合。

由於基因演算法為一啟發式演算法(heuristic algorithm)，應用隨機程序搜尋較佳的能源發展路徑解，不如線性規劃等優選方法可以取得全域最佳解，因此最後取得的優選解為一相較於人工決策結果較佳的結果，不代表一定是最佳的解，且由於其隨機特性，每次執行優選決策都可能取得不同的優選解，因此建議推求優選解時，應多執行幾次以確保取得較佳的結果。

4. 研究案例

為驗證所發展的Taiwan 2050 Calculator優選程序是否有效的求取出較佳的低碳能源發展路徑，本研究將所發展的優選模組求取2030年較佳減碳路徑組合，並與按照與現行能源政策較為相近的參考路徑進行比較。兩分析情境

的簡要設定比較如表2所示，其中參考路徑的詳細設定與發展情境，請進一步參考附表2。由於經濟成長為驅動能源使用的重要影響因子，因此在兩個分析案例中皆設定經濟成長情境為中成長，相同核能發展的影響亦高，因此兩案例接設定未來無新增核能，而既有核電廠如期除役。另外，本研究採用於2015年3月更新的Taiwan 2050 Calculator 2.3版(工業技術研究院，2015)進行模擬。

4.1 參考路徑設定

我國能源政策主要依據2012年訂定之「能源發展綱領」以促進我國能源系統之安全、效率、潔淨為我國能源發展的核心，在需求面透過分期總量管理、提升能源效率(包括推動最佳可行技術、能源管理、能源節約、能源效率提升等)(經濟部能源局, 2012a)。在本研究中，參考路徑即盡可能利用Taiwan 2050 Calculator既有的情境設定，貼近既有政策內涵與既有能源發展規劃目標(相關詳細設定可參考附表2)。

在能源供給上，為落實節能減碳政策，火力發電技術將逐漸淘汰燃油發電機機組，增加天然氣的發電裝置容量，並增加再生能源總裝置容量，以降低電力排放係數。而核四廠也於2014年決議封存，核一～核三電廠目前亦無延役的決議，因此在本研究中假設未來將無核四廠商轉，核一～核三廠將如期除役。

由於本研究在執行時採用於2015年3月更新的Taiwan 2050 Calculator 2.3版(工業技術研究

表2 參考路徑與較佳減碳路徑情境設定(本研究整理)

	參考路徑	2030年較佳減碳路徑
路徑決策機制	情境組合	優選決策
經濟成長	2012~2030年GDP平均成長率約2.8%	2012~2030年GDP平均成長率約2.8%
再生能源	2030年達到13,750 M	由模型決定
汽電共生	2030年達到10,850 MW	由模型決定
核能發電	無核四，核一～三屆齡除役	無核四，核一～三屆齡除役
節能策略	按照現行政府規範推動節能措施(能源使用設備最小能效標準、運具能效提升等)	由模型決定

院, 2015), 為參考台電公司2014年發布的10302案電源開發方案(台電公司, 2014)進行設定電廠開發規劃, 而2025年之後的設定, 則假設燃煤電廠不再新增, 僅在電廠屆齡之後更新。燃氣電廠2025年之後, 除既有電廠屆齡更新, 亦將於每5年新增500 MW容量的新機組。

汽電共生機組則按照新能源政策規劃, 於2020年達到10,000 MW, 2025年達10,500 MW, 2030年達到10,850 MW裝置量目標(經濟部能源局, 2013)。再生能源開發目標則依據經濟部能源局提升國內自主能源比例, 規劃至2030年時, 再生能源總裝置容量將達13,750 MW。其中太陽光電自目前約400 MW裝置量, 至2025年達4,100 MW, 2030年達6,200 MW。陸域風力由目前約600 MW, 至2020年達1,200 MW之後即不再增加。而離岸風力將於2025年裝置達1,520 MW, 2030年達3,000 MW。地熱發電裝置容量將於2030年達200 MW。水力發電僅微幅增加至2,200 MW。生質能則將至2030年裝置達950 MW(經濟部能源局, 2015)。

在能源需求面的措施上, 工業部門考量各產業的既定產業政策以及節能推動措施, 如電子業實施製程設備更新與公用設備效率管理制度, 而鋼鐵業實施能源管理(連續式加熱爐能效管理、高爐爐頂氣(BFG))回收利用; 材化業考量三輕更新、五輕遷廠以及公用設備效率管理制度, 其他產業也依據既有節能政策進行設定。住宅與服務業部門則考量空調MEPS(最低能效標準, minimum energy performance standards)能效標準提升, 2016年起小型空調機採用CSPF(冷氣季節性能因數, cooling seasonal performance factor)能效標準; 2015年起建築外牆隔熱按照2013年出版的建築技術規則; 照明則按照既有法規, 提升產品能效並鼓勵高效能照明設備, 如LED路燈補助等; 其他電器設備亦按照MEPS最低能效標準進行管制, 並於每10~15年提升標準。運輸部門則考量目前使用者自小客車轉換至公車、捷運的效果, 以及增加新技術車輛在市場上的占比, 包括提升混合

電力、電動車、電動機車的占比, 並納入電動公車、電動機車的政策推動目標。

4.2 2030年較佳減碳優選決策

參考路徑採用目前較明確的政策內涵, 以Taiwan 2050 Calculator既有各類能源技術情境設定盡可能趨近。惟以政策為基礎的能源發展路徑, 不一定可以確保為考量整體最佳條件下的優選解, 比如可能不是最小成本或者達成最大減碳量的低碳能源發展路徑。本研究利用所發展的優選程序探討如何在Taiwan 2050 Calculator的眾多路徑中, 選取出較佳的低碳能源發展路徑組合, 在盡可能減少總經費的前提下, 達成最大的減碳量。

由於基因演算法進行優選求解時, 僅能處理單一目標式, 若要規劃在最小成本下的較佳減碳策略, 則為一多目標優選問題, 須透過設定權數將多目標整合為一單目標, 由於成本的單位為億元, 溫室氣體排放單位為百萬噸, 數值級數差10的3次方, 經本研究初步測試之後, 10的6次方權數可提供溫室氣體排放較強的減量驅動力, 因此採用僅此數值整合目標式, 示範所發展優選程序的可行性。後續相關研究亦可進一步採用不同權數設定, 探討對於決策結果的影響。

另外, 考量我國為一獨立的電網系統, 並未與其他國家連結, 無法透過跨國電網輸入或輸出電力以穩定系統, 因此在未設置恰當的配套措施下, 不宜容納過多的變動性再生能源, 包括風力與太陽光電系統, 2012年通過的「智慧電網總體規劃方案」中提及臺灣系統可容納之變動性再生能源比例政策目標, 雖未交代設定的依據, 而國內亦無其他可參考的研究成果, 因此在模型中以相對應的政策目標為限制條件(經濟部能源局, 2012b)。目前各界對我國最適的備用容量率仍有爭議。雖然我國電力系統法定備用容量率為15%, 以確保尖峰負載時供電無虞, 根據過往經驗統計, 當備用容量率低於10%時, 就可能有缺電風險; 低於7.4%

時，則限電幾乎無法避免(經濟部, 2015b)，因而本研究採用接近過往缺電風險最低限的8%為最小應滿足的備用容量率，探討最小成本發展規劃。

規劃目標與限制可以優選模式表示如下：

$$\text{Minimize } tc_{2030} + 10^6 \times ghg_{2030} \quad (1)$$

s.t.

$$esup_t \geq ecomp_t \quad \forall t \in \{2015 \dots 2030\} \quad (2)$$

$$reserv_t \geq 8\% \quad \forall t \in \{2015 \dots 2030\} \quad (3)$$

$$re_{2020} \leq 20\% \quad (4)$$

$$re_{2025} \leq 25\% \quad (5)$$

$$re_{2030} \leq 30\% \quad (6)$$

$$\text{EconGrowth} = B \quad (7)$$

$$\text{NuclearDev} = B \quad (8)$$

其中 tc_{2030} 為自2015年至2030年所有能源技術發展所總累計成本； ghg_{2030} 為2030年當年度的溫室氣體排放量； $esup_t$ 為 t 年度電廠總發電量； $ecomp_t$ 為 t 年度電力總需求量； $reserv_t$ 為 t 年度備用容量率； re_{2020} 為變動性再生能源(風力、太陽光電)占總電力裝置容量的比例； EconGrowth 為經濟成長設定； NuclearDev 為核能發展設定。方程式(1)表示最小化所選取能源發展路徑組合的累計花費總成本，並同時最小化2030年度時的溫室氣體排放量，且由於溫室氣體排放量設定一相當高的權重值，因此將優先最小化溫室氣體排放量。而方程式(2)則確保規劃年度中的總電力供給都要大於、等於總電力需求量，以確保電力供給平衡。方程式(3)則限制每一年的備用容量率要大於8%，以確保電力系統可在用電尖峰負載時供應足夠的電力。方程式(4)~(6)則限定變動性再生能源占比必須在2020年、2025年以及2030年分別應小於等於20%、25%以及30%。方程式(7)則設定經濟成長情境固定為情境B，方程式(8)限制核能發展為情境B，未來無新增核電，既有電廠如期除役，前述兩者不受優選搜尋程序影響而變動。

5. 參考路徑與2030年較佳減碳路徑之比較

參考路徑的路徑組合以及經過基因演算法優選選取的2030年較佳減碳路徑組合如表3所示，為便利兩發展路徑之比較，若較佳減碳路徑的情境選項較參考路徑積極，則以顏色標示該情境選項。而兩發展路徑至2030年的總花費經費、溫室氣體排放、每度電發電成本、能源密集度下降率以及電力排放係數則如表4所示。

由表3可以發現兩發展路徑的情境組合差異相當大，較佳減碳路徑雖然考量在最小成本之下，尋求最大的減碳組合，不過最大減碳決策的驅動力大於最小成本決策的驅動力，結果該優選結果趨向選取更積極的發展情境，以降低2030年的溫室氣體排放水準，不論是在供給面或者需求面都較參考路徑積極非常多。

其中在電力供給面，明顯選取更多低碳排放的發電技術，比如離岸風力、太陽光電、波浪發電、洋流發電、海洋溫差發電、生質能發電等。其中離岸風力開發至2030年裝置達5.95 GW，而陸域風力的裝置容量至2030年亦增加裝置達2.43 GW，而太陽光電的裝置量同樣較參考路徑為高，至2030年總裝置量達14.76 GW。在海洋能與生質電力亦較為積極。不過地熱發電的裝置則較參考路徑保守，主要可能是因為深層地熱的開發成本較高，且地熱發電開發潛力在2030年之前仍相當有限，非最有效的發電選項。同樣燃料電池也是非常昂貴的技術，且至2050年最高潛力僅約1.8 GW，因此在優選決策中被設定為推動效益較低的技術。

在火力發電技術方面，優選模型為確保未來備用容量率，且盡可能降低碳排放量，因此選取發電成本較高的燃氣發電，從參考情境的Level 2提升為Level 3，並搭配電廠碳捕捉與封存(CCS)最大化的裝置情境，在既有與新增的燃煤電廠以及新增的燃氣電廠裝設CCS，降低火力發電的二氧化碳排放量，提供充足的基中載電力。根據情境設定電廠CCS的安裝，僅

表3 參考路徑與2030年較佳減碳路徑比較(本研究整理)

項次	情境選項	參考路徑	較佳減碳	項次	情境選項	參考路徑	較佳減碳
1	經濟成長	B	B	18	住宅照明	1	4
2	燃煤發電	3	3	19	住宅電器設備與其他	2	3
3	燃氣發電	2	3	20	住宅能源管理系統	2	2
4	汽電共生	2	1	21	服務業空調設備效率	2	4
5	電廠碳捕捉與封存	1	4	22	服務業建築隔熱	2	2
6	核能發電	B	B	23	服務業照明	1	4
7	陸域風力	3	4	24	服務業電器設備與其他	2	4
8	離岸風力	2	4	25	服務業能源管理系統	2	1
9	太陽光電	2	4	26	電子業	2	4
10	地熱發電	3	2	27	鋼鐵業	2	4
11	波浪發電	1	4	28	材化業	2	4
12	洋流發電	1	4	29	其他能源密集產業	2	4
13	海洋溫差發電	1	3	30	導入餘熱發電	2	2
14	生質能發電	2	4	31	工業碳捕捉與封存	2	3
15	燃料電池	2	1	32	運具移轉	A	B
16	住宅空調設備效率	2	4	33	新技術車輛	2	4
17	住宅建築隔熱	2	2	34	生質燃料替代	2	3

表4 2030年時參考路徑與2030年較佳減碳路徑決策結果差異(本研究整理)

比較項目	單位	參考路徑	2030年較佳減碳路徑
溫室氣體排放量	百萬噸CO ₂ e/年	289.57	206.49
全能源系統累計總成本	億元	328,851	347,635
電力部門累計總成本	億元	168,887	172,268
節能投資累計總成本	億元	40,219	52,600
發電成本	元/度電	3.88	4.21
電力消費	億度/年	3,241.8	3,050.2
最終能源消費(不包含電力)	千公秉油當量/年	99,957.7	89,445.8
電力排放係數	公斤CO ₂ e/度電	0.566	0.407
備用容量率	%	-1.2	15.8
再生能源占比	%	21.7	36.8

在2030年之後具有商業可行的可能性，因此在2030年新增燃煤CCS裝置容量達4.6 GW，燃氣CCS裝置容量則達4.821 GW，以捕捉90%因為火力發電所排放的二氧化碳氣體。其餘系統中CCS所降低的碳排放則是由裝置在工業部門所貢獻，包括鋼鐵業、石化業、水泥業。

在能源需求面，相較於參考路徑，較佳減碳路徑節電達158.6億度電，主要是由電子業節能(79.8億度)、服務業空調(50.7億度)、住宅照明(28.4億度)等所貢獻。幾乎所有的措施都比參考情境為積極，甚至於許多部門的能源技術措施皆選取到最極端的情境，包括住宅部門的空

調、照明、其他電器；服務業部門的空調、照明、其他電器；工業部門的電子業、鋼鐵業、石化業、其他耗能產業的節能措施等；運輸部門的運具移轉、潔淨車輛與生質燃料替代等。

而住宅與服務業的建築隔熱與能源管理系統發展情境，並未較參考情境積極，主要原因在能源管理系統與建築耗電量連動，因其他節電措施皆相當積極的情況下，能源管理系統所能貢獻的總節電效果就不顯著，同樣建築隔熱的節電貢獻亦與空調耗電量連動，而在採用最節能的空調設備下，隔熱所能貢獻的節電效果亦被降低。在工業部門的餘熱發電，也因為各產業積極節能總耗能量降低，使得餘熱發電的成效不佳，因此發展情境上較不積極。雖然在需求面選取更為積極的技術發展情境，惟因未考量市場面因素，並不代表所選取的情境必然可以發展，相關結果僅作為所開發優選方法示範之用。

透過主要指標的比較，如表4所示，可以發現在2030年時，較佳減碳路徑的溫室氣體排放量較低僅206.49百萬噸CO₂e，而參考路徑則高達289.57百萬噸CO₂e，較佳減碳路徑約減少28.7%的溫室氣體排放量。若進一步比較能源系統累計總成本、電力部門累計總成本以及節能投資累計總成本，2030年較佳減碳路徑至2030年總累計花費約較參考路徑僅多5.71%，而電力部門累計總成本較參考路徑多約2%，而節能投資則多了約30.78%，亦即較佳路徑在節能措施上更為積極，並藉由改善能源供給組合達到更佳的減碳效果，不過因為採用更多的燃氣發電以及採用較貴的再生能源技術，使得電力部門成本增加。其中能源系統總花費指的是能源系統中所包含的所有部門，包括能源、住宅、服務業、工業、運輸部門等更換設備、操作與維護的總花費，而電力部門則僅指在電力設備新增、操作維護與燃料等費用等，而節能投資則僅包括需求面，如住宅、服務業以及工業部門的設備更新與操作維護費用等。

在供給面，雖然較佳減碳路徑花費多2%經

費大量採用潔淨的發電技術，包括各類再生能源技術以及CCS等，使得電力排放係數較參考路徑減少約28%，降低到約0.407公斤CO₂e/度電。也因為較積極的節能減碳措施，在2030年時減碳路徑的電力消費較參考路徑減少約5.9%（約191.4億度），而最終能源消費約減少10.5%（約為10,512千公秉油當量）。

參考路徑在2030年時的備用容量率降至-1.2%，顯示已無法滿足尖峰負載的需電量，主要是電力供給面所選用的發展情境設定，為參考台電公司10,302案、政府既有技術發展規劃以及相對應的社會經濟發展預估而設定，亦即假設電力供給面選擇新核能電廠不商轉，而又無其他新電廠即時完工商轉，且在需求面的節能措施情境亦未採用更積極的發展情境，因此會有備用容量不足的結果，相關詳細設定請參考附表2。另一方面，優選模型為了確保尖峰負載供電無虞，選取較多的燃氣機組，做為基中載電力，以維持一定的備用容量率，至2030年備用容量率為15.8%，可確保尖峰用電時有足夠的供給電力。

參考路徑與較佳減碳路徑在各部門的溫室氣體排放變化趨勢則如圖4與圖5所示。未來能源部門溫室氣體排放仍占總體排放量最高的比例，其次為工業部門，接著是運輸部門。參考路徑在2030年在未扣除CCS與生質能扣抵的量之前，總溫室氣體排放量約為310百萬噸CO₂e，而在考量CCS捕捉的15.3百萬公噸CO₂e與生質能扣抵的5.7百萬公噸CO₂e後，總溫室氣體排放量達到289百萬公噸CO₂e。

而較佳減碳路徑的溫室氣體排放量，在考量CCS捕捉的51.6百萬噸CO₂e與生質能扣抵的17百萬噸CO₂e，總溫室氣體排放量降至206.5百萬噸CO₂e。由於較佳減碳路徑在需求面選取更為積極的節能措施，造成電力供給需求相對降低，且在供給面採用低碳能源，因此較佳減碳路徑至2030年於能源部門的溫室氣體排放量為194百萬噸CO₂e，相較參考路徑減少約9.6%。較佳減碳路徑除了前述因為採用更積極的節能

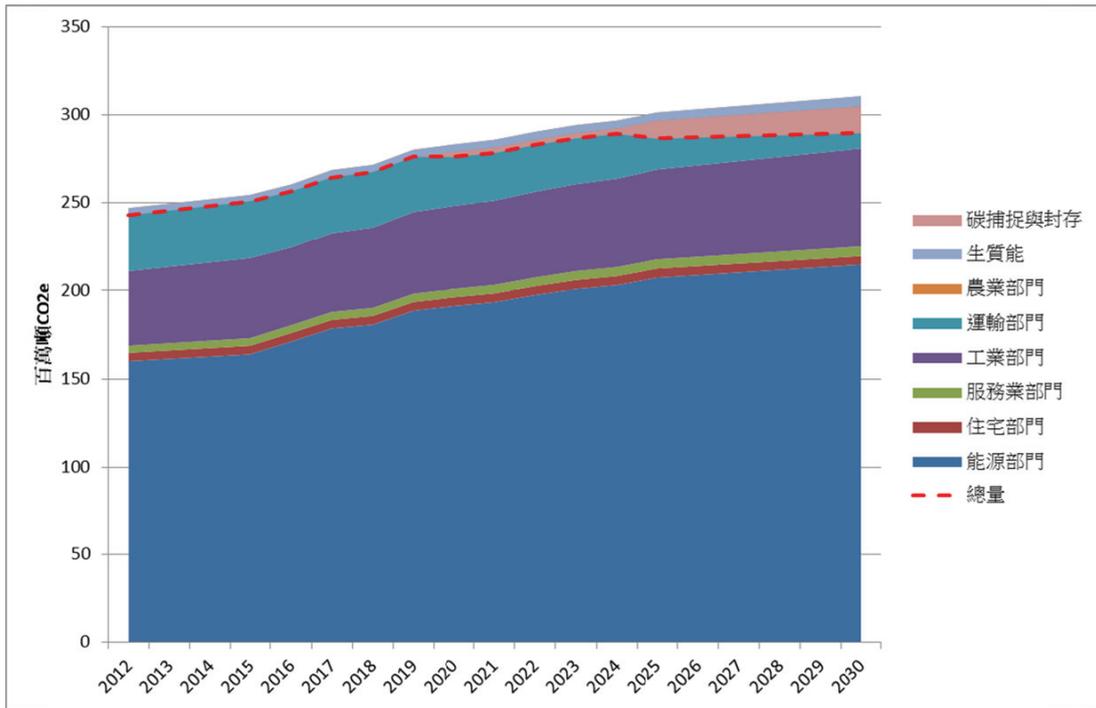


圖4 參考路徑至2030年前各部門溫室氣體排放量(本研究繪製)

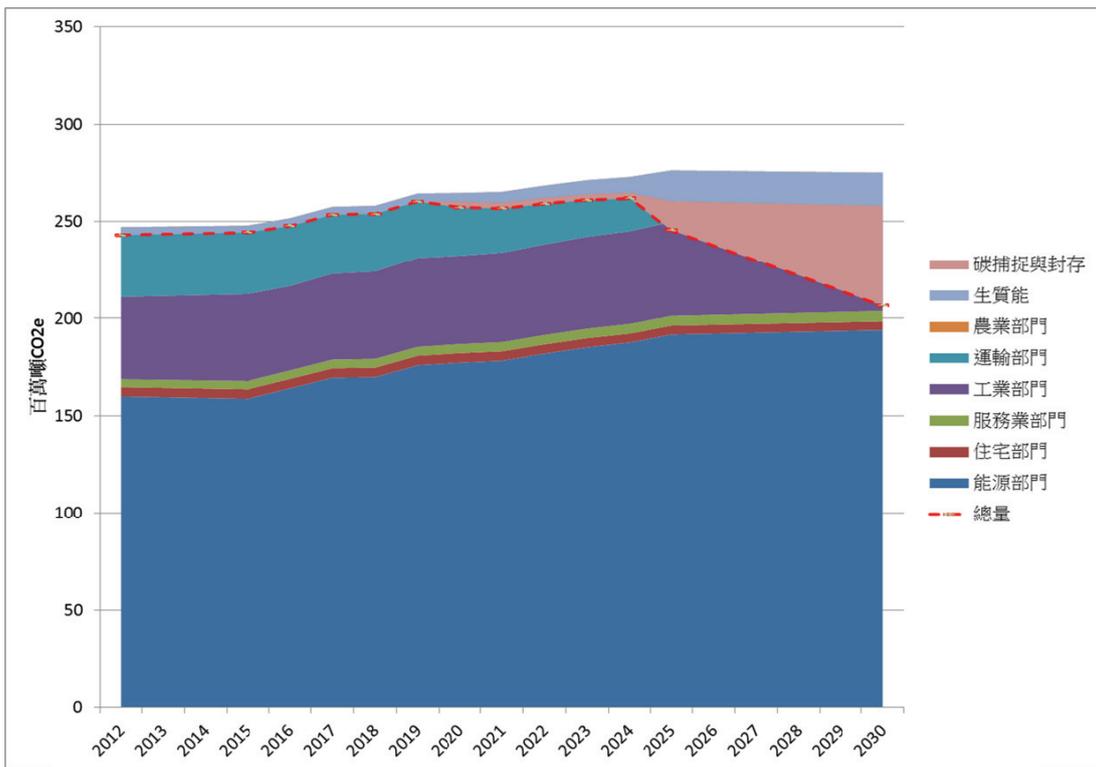


圖5 2030年較佳減碳路徑至2030年前各部門溫室氣體排放量(本研究繪製)

措施以及低碳能源之外，也因為採用CCS與生質能而進一步降低總溫室氣體排放量。

6. 結 論

臺灣進口多達98%的能源，且能源系統獨

立而複雜，工研院因而於2013年引進英國能源及氣候變遷部所發展的2050能源供需情境模擬器，作為國內溝通能源發展的平台。惟該工具仰賴使用者花費大量的時間操作調整，無法輕易決策出特定條件下的最佳能源發展策略。本研究因而應用基因演算法發展一彈性的優選程序。

系統操作者可依據設想的節能減碳發展目標，如最佳減碳、最低成本等，同時兼顧複雜的能源安全與系統穩定限制條件，亦可設定更合理反應政策可行性的限制條件，搜尋到需由人力花費大量時間而求得的較佳路徑組合解。並應用到2030年與較佳減碳路徑優選模型的探討上，繼而與現行政策相近的參考路徑相比較，證實開發的優選程序所決策出的較佳路徑組合可在相近的總花費成本下，更顯著的減少溫室氣體排放量。本研究獲得的相關結論條列如下：

(1) 臺灣2050能源供需情境模擬器為能源情境分析的有效工具

工研院於2013年所引進的Taiwan 2050 Calculator根據既有的臺灣TIMES能源工程模型、臺灣邊際減碳成本資料庫等本土化資料庫，經過內外專家檢視各項參數設定與技術發展情境，以驗證模擬模式的可信度。並經由程式轉換為決策效率更高且對外公開的專業版及遊戲版操作介面，進一步提升系統決策分析的效率與簡易度，為有效的能源發展溝通工具。

(2) 整合基因演算法的優選程序可找出更佳的能源發展路徑

經由比較參考路徑與2030年較佳減碳路徑的優選結果可以發現，本研究開發基於基因演算法的優選程序，的確可以在眾多的可能能源發展組合中，搜尋出以盡可能低的總能源系統成本，削減2030年的溫室氣體排放量，較參考路徑減少約28.7%的排放量，且能源系統總累計成本僅增加約5.7%，並同時兼顧優選規劃事前設定所需滿足的系統限制條件，包括備用

容量率維持在8%以上，變動性再生能源占比不得過高。相對而言，參考路徑除了溫室氣體排放較高之外，於2030年的備用容量率亦低於0，顯然無法滿足尖峰負載用電需求。因此本研究發展的優選模型，相較於耗費時間的人工操作分析，的確可以更有效的搜尋出符合條件的低碳能源路徑組合解。

(3) 優選程序決策應透過多次執行並納入合理的限制條件以提升結果的可參考性

因基因演算法具隨機特性，而能源技術可能組合數量龐大，所求得的優選解不一定是全域最佳，每次求解的結果也可能不同，建議在採用所發展方法求解時，可執行多次的優選運算以取得更可靠的發展路徑。以本研究而言，經多次執行適應函數值僅有極小差異，因此取具最小值者為最終較佳發展路徑解。

且優選決策結果受所採用權數的影響，因此在採用此優選程序時，亦應多嘗試多個權數，以探討對決策結果的影響，甚至於產出最佳前緣曲線(Pareto Front)，在該曲線上的每個點都代表一組最佳解，而在曲線上的最佳解，皆不比其他解為優，該最佳前緣曲線可供系統操作者作為更完整的參考依據。

優選決策的結果雖然證明相較於參考路徑，較佳減碳路徑可在相近的成本下，達到更佳的減碳效果，不過諸多技術發展皆選取最極限的情境，並未充分滿應措施執行的困難度與市場可行性。因此後續相關應用可在此架構下，納入更多反應政策推動可行性的相關限制，比如限制特定技術如CCS或地熱發電的最積極可選情境，比如不可選取到Level 4等，使結果更具參考價值。最後再透過專家判斷，進行最終路徑的微調，使結果可更為合理。

(4) 臺灣2050能源供需情境模擬器在能源供需運算上有其限制

臺灣2050能源供需情境模擬器為基於Excel計算表的能源供需計算模型，個別技術不同積極度的發展情境已事前設定在模型的資料表中，無法動態更改，使用者僅能由既有的情境

中，組合出接近自己理念的技術發展組合。因此，此模型有諸多限制，如：(a) 技術間無法透過成本關係動態比較，進行替代；(b) 多種能源使用技術整合為單一選項，如住宅其他設備包含電冰箱、電熱水器、電熱水瓶等，技術解析度較為簡化；(c) 能源供需僅能有限度的平衡，若能源供需差異過大，則會有供給不足或過低的狀況；(d) 個別技術發展情境一經選定，無法在不同時間點，改用不同發展積極度的發展情境。後續應可根據分析議題，進一步改善此計算模型。

(5) 恰當可行的能源發展路徑仍須更縝密的驗證探討

本研究重點在研提一基於Taiwan 2050 Calculator的優選程序，並驗證其可操作性。較佳減碳路徑所選取出的技術組合常包含多項極限技術發展情境，而在實務上是否可行並未在此研究中進行探討。未來在決策過程中，或許可將恰當的發展路徑推動困難度因子納入考量，或者限定各技術可容許的最高發展情境，並在取得優選結果後，根據現實條件進一步研討調整，而非直接將較佳解當作可行的能源發展政策。

誌 謝

感謝經濟部能源局於「維護總體能源經濟評估模型及策略模擬分析」計畫給予本研究經費之補助與行政事務方面之協助。同時感謝工業技術研究院綠能與環境研究所提供本研究模型工具，並協助工具設定、使用及結果研析等，以及提供研究進行之行政支援。作者一併感謝審查委員所提供的寶貴意見，幫助提升本文的完整性。

參考文獻

工業技術研究院 (2015)，臺灣能源供需情境模擬器(Taiwan 2050 Calculator) 2.3版(2015年

3月公開版)。(https://goo.gl/C9J28L)
 台電公司 (2014)，電源開發方案(10302案)。
 朱証達、李沛濠、張景淳、何叔憶、陳庚轅、李孟穎、洪明龍、劉子衙、胡耀祖 (2013)，建構臺灣2050能源供需情境模擬器，臺灣能源期刊，第一卷第一期，17-34頁。
 梁啟源 (2006)，電價調整對電力需求及臺灣經濟之影響，行政院國家科學委員會專題研究計畫。
 梁啟源 (2009)，能源價格波動對國內物價與經濟活動的影響，中央銀行季刊，第31卷：頁9-34。
 黃宗煌 (2008)，TaiSEND能源政策模型與電力規劃模型之整合，2008兩岸能源、環境及經濟整合評估模型之理論與實務研討會。
 郭瑾璋，周裕豐，劉子衙 (2012)，應用臺灣TIMES模型評估我國能源密集度下降可行性，碳經濟，第26卷：頁17-35。
 楊浩彥 (2009)，能源稅的經濟效果：考慮參數不確定的可計算一般均衡分析，臺灣經濟預測與政策，第40卷：頁79-215。
 經濟部 (2015)a，全國能源會議 背景資訊釐清結果。(http://2014energy.tw/viewwill_meeting.php)
 經濟部 (2015)b，核能議題問答集—1-4、如果核四持續無法運轉，臺灣真的會缺電嗎？。(http://anuclear-safety.twenergy.org.tw/mobile/Faq/faq_more?id=52)
 經濟部能源局 (2012)a，能源發展綱領。
 經濟部能源局 (2012)b，智慧電網總體規劃方案。
 經濟部能源局 (2013)，全國長期負載預測與電源開發規劃(102~111年)。
 經濟部能源局 (2015)，104年4月9日新聞稿「再生能源於短、中期尚無法取代傳統供電，但仍為政府積極發展之重點能源」。
 蔡妙姍，楊斐喬，郭瑾璋，周裕豐，簡慧貞，呂鴻光 (2009)，從國際低碳社會建構看我

- 國節能減碳推動，碳經濟，第13卷：頁 2-33。
- 2050 Calculator Community, 2015. The 2050 Calculator-A Fresh Approach to Modelling Energy and Emissions. (<http://www.2050.org.uk>)
- Alarcon-Rodriguez, A., Ault, G., Galloway, S., 2010. Multi-Objective Planning of Distributed Energy Resources: A Review of the State-of-Art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(5), 1353-1366.
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen B.V., Leahy, M., 2010. A Review of Computer Tools for Analysing the Integration of Renewable Energy into Various Energy Systems. *Applied Energy* 87, 1059-1082.
- DECC, 2011. The Carbon Plan: Delivering our low carbon future. HM Government, London.
- DECC, 2012. UK emissions statistics: 2011 Provisional UK Figures. HM Government, London.
- Gupta, H., 2015. India Energy Security Scenarios. In: International Conference on 2050 Calculator, Taipei, Taiwan.
- Haldenbilen, S., Ceylan, H., 2005. Genetic Algorithm Approach to Estimate Transport Energy Demand in Turkey. *Energy Policy* 33(1), 89-98.
- IGES, 2015. Japan 2050 Low Carbon Navigator. (<http://www.en-2050-low-carbon-navi.jp>)
- Ooka, R., Komamura, K., 2009. Optimal Design Method for Building Energy Systems Using Genetic Algorithms. *Building and Environment* 44(7), 1538-1544.
- Nan, L., 2015. China Regionalisation: Beijing and Inner Mongolia and Other Calculators. In: International Conference on 2050 Calculator, Taipei, Taiwan.

附 錄

附表1 能源模型比較(Connolly and *et al.*, 2010)

工具	逐時 模擬	逐年情境 分析	能源市場 平衡	Top-down	Bottom-up	操作 優選	投資 優選
AEOLIUS	Yes	-	-	-	Yes	-	-
BALMOREL	Yes	Yes	Partial	-	Yes	Yes	Yes
BCHP Screening Tool	Yes	-	-	-	Yes	Yes	-
COMPOSE	-	-	-	-	Yes	Yes	Yes
E4cast	-	Yes	Yes	-	Yes	-	Yes
EMCAS	Yes	Yes	-	-	Yes	-	Yes
EMINENT	-	Yes	-	-	Yes	-	-
EMPS	-	-	-	-	-	Yes	-
EnergyPLAN	Yes	Yes	-	-	Yes	Yes	Yes
energyPRO	Yes	Yes	-	-	-	Yes	Yes
ENPEP- BALANCE	-	Yes	Yes	Yes	-	-	-
GTMax	Yes	-	-	-	-	Yes	-
H2RES	Yes	Yes	-	-	Yes	Yes	-
HOMER	Yes	-	-	-	Yes	Yes	Yes
HYDROGEMS	-	Yes	-	-	-	-	-
IKARUS	-	Yes	-	-	Yes	-	Yes
INFORSE	-	Yes	-	-	-	-	-
Invert	Yes	Yes	-	-	Yes	-	Yes
LEAP	Yes	Yes	-	Yes	Yes	-	-
MARKAL/ TIMES	-	Yes	Yes	Partly	Yes	-	Yes
Mesap PlaNet	-	Yes	-	-	Yes	-	-
MESSAGE	-	Yes	Partial	-	Yes	Yes	Yes
MiniCAM	Yes	Yes	Partial	Yes	Yes	-	-
NEMS	-	Yes	Yes	-	-	-	-
ORCED	Yes	Yes	Yes	-	Yes	Yes	Yes
PERSEUS	-	Yes	Yes	-	Yes	-	Yes
PRIMES	-	-	Yes	-	-	-	-
ProdRisk	Yes	-	-	-	-	Yes	Yes
RAMSES	Yes	-	-	-	Yes	Yes	-
RETScreen	-	Yes	-	-	Yes	-	Yes
SimREN	-	-	-	-	-	-	-
SIVAEL	-	-	-	-	-	-	-
STREAM	Yes	-	-	-	-	-	-
TRNSYS16	Yes	Yes	-	-	Yes	Yes	Yes
UniSyD3.0	-	Yes	Yes	-	Yes	-	-
WASP	Yes	-	-	-	-	-	Yes
WILMAR Planning Tool	Yes	-	-	-	-	Yes	-
2050 Calculator	-	Yes	Partial	-	Yes	-	-

附表2 參考路徑情境設定

項次	能源發展選項	情境設定	情境說明
1	經濟成長	B	為目前政府所規劃之經濟成長趨勢，與國際機構預測趨勢相近。中長期經濟成長將逐漸趨緩，至2050年平均年成長2.46%。
2	燃煤發電	3	燃煤發電2030年前依照最新電源開發方案，2030年後不新增，既有機組更新，維持等量裝置量19.8 GW至2050年。
3	燃氣發電	2	燃氣發電至2025年較L1增加100萬噸，預計於2050年完成第三接收站，供應量可達2,000萬噸。
4	汽電共生	2	汽電共生2010年總裝置容量7,6428 MW，政府積極加強推廣汽電共生之容量，至2050年總裝置容量達9,030 MW。
5	電廠碳捕捉與封存	1	我國CCS技術於2018年~2020年間，在既有電廠(臺中或大林)設置捕獲示範場，裝置量為30 MW。
6	核能發電	B	核一~三屆期除役，核四不商轉，於2025年起我國未有核能裝置量。
7	陸域風力	3	完成我國目前已完成規劃以及正在開發中陸域風力之100%目標，最大裝置量為1,200 MW。
8	離岸風力	2	離岸風力開放環境保護限制因素(如海床)，最大土地裝設面積為1,410 km ² ，最大裝置量為7.8 GW。
9	太陽光電	2	太陽光電情境設定除開放屋頂面積之外，亦開放100%汙染地(其中可用率為50%)，最大土地裝設面積為69 km ² ，最大裝置量為9.0 GW。
10	地熱發電	3	地熱發電除了淺層地熱與國家公園淺層地熱之開發，亦新增大屯山深層地熱開發，至2050年最大潛力為1,315 MW。
11	波浪發電	1	我國波浪發電僅選擇臺灣近岸之廠址(東北角)進行開發，至2050年最大潛力為70 MW。
12	洋流發電	1	海流發電僅進行少量機組裝設，2050年進行10 MW海流示範電廠建置，至2050年最大潛力為15 MW。
13	海洋溫差發電	1	溫差發電發展10 MW級岸基式電廠(離岸距離< 4 km)，至2050年最大潛力為15 MW。
14	生質能發電	2	我國生質電力2030年成長至950 MW後，焚化爐持續轉型，裝置容量持續增加。
15	燃料電池	2	燃料電池之情境設定以國際預估燃料電池市場的成長，國內設置量於2020年達到60 MW，之後在2030年達到500 MW，於2050年達到1,000 MW。
16	住宅空調設備效率	2	住宅部門空調以分離式及窗型冷氣機為主，國內小型空調機2016年起採用CSPF能效標準，規範MEPS能效標準每5年提升10%，住宅空調到2050年能效較2010年提升51-63%。
17	住宅建築隔熱	2	住宅部門新建築物符合2013年出版之建築技術規則，配合既有建築之都更(拉皮)計畫等策略，舊建物2015年起須符合2013年出版之建築技術規則：外牆U值2.75 (W/m ² K)。窗戶U值4.7 (W/m ² K)，遮陽係數0.35。
18	住宅照明	1	住宅照明維持目前已執行規劃的法規與推廣策略，如LED路燈補助等方案，依產品效能趨勢、光源特性與市場價格等因素，傳統燈具於2030-2047年起全數換為LED高效率照明。
19	住宅電器設備與其他	2	針對住宅其他設備，2015年實施MEPS基準管制及能源效率分級標示，MEPS基準管制調整頻率為10-15年，2050年能源效率較2010年提高3-55%。

20	住宅能源管理系統	2	住宅部門裝置能源管理系統數量逐年成長，平均節電率為3%且平均年成長戶數約1-3萬戶。
21	服務業空調設備效率	2	服務業部門空調以分離式、箱型機與中央空調為主，國內小型空調機2016年起採用CSPF能效標準，規範MEPS能效標準每5年提升10%，中央空調採用美國2010年公布之能效標準作為國內中央空調冰水設備MEPS能效規範基準，規範2016年後中央空調每5年性能提升5%，服務空調到2050年能效較2010年提升35-64%。
22	服務業建築隔熱	2	服務業建築隔熱新建築物依2013年出版之建築技術規則，配合既有建築之都更(拉皮)計畫等策略，舊建物窗戶隔熱2015年起須符合2013年出版之建築技術規則：規範外牆U值2 (W/m ² K)。窗戶U值6.8 (W/m ² K)，遮陽係數0.25；2025年起新舊建物外牆U值為1.75 (W/m ² K)。既有建物依各場域能源需求不同，2050年市場安裝率達0-10%。
23	服務業照明	1	服務業照明維持目前已執行規劃的法規與推廣策略，如LED路燈補助等方案，依產品效能趨勢、光源特性與市場價格等因素，傳統燈具於2026-2033年起全數換為LED高效率照明。
24	服務業電器設備與其他	2	針對住宅其他設備，2015年實施MEPS基準管制及能源效率分級標示，MEPS基準管制調整頻率為10-15年，2050年能源效率較2010年提高3-55%
25	服務業能源管理系統	2	服務業能源管理系統市場以每年3-5%滲透安裝且於2050年市場裝置占比達60%
26	電子業	2	電子業(DRAM、面板、晶圓等主要產業中之多數廠商均具有節能改善意識。實施製程設備更新與公用設備效率管理制度，至2050年較該行業BAU整體能耗可節省約21.68%。
27	鋼鐵業	2	鋼鐵業實施能效管理(連續式加熱爐能效管理、高爐爐頂氣(BFG)回收利用)，至2050年較該行業BAU整體能耗可節省約2.40%。
28	材化業	2	化材業實施三輕更新、五輕遷廠(產量減少50萬噸/年)與公用設備效率管理制度，至2050年較該行業BAU整體能耗可節省約11.91%。
29	其他能源密集產業	2	其他主要能源使用產業(水泥、造紙、紡織、金屬製品製造)實施製程設備更新及公用設備效率管理制度，至2050年較該行業BAU整體能耗可節省約：水泥業1.67%；造紙業8.72%；紡織業4.85%；金屬製品製造業3.37%。
30	導入餘熱發電	2	餘熱發電，所有可裝設的工廠中溫廢熱發電裝置率達40%，低溫廢熱發電裝置率達40%，2040年後裝置量達833 MW。
31	工業碳捕捉與封存	2	鋼鐵業於2025年分別於中龍鋼鐵廠既有之高爐工廠熱風爐及煉焦爐，增加設置年捕獲量140萬噸及85萬噸CO ₂ 之商轉廠。化材業於2025年在台塑公用三廠既有之燃煤鍋爐，加裝設置乙座年捕獲量5百萬噸CO ₂ 之商轉廠；2030年台塑公用一廠更新裝設，再設置乙座年捕獲量5百萬噸CO ₂ 之商轉廠。水泥業於2013年及2017年設置鈣迴路捕獲二氧化碳先導型試驗廠及試驗廠後，於2020年在台泥和平廠裝設捕獲量3百萬噸CO ₂ 之示範廠。
32	運具移轉	A	至2050年，小客車與機車占總客運需求之82%，公車占5%，軌道運輸占12%，國內航空占0.4%，自行車占1%。
33	新技術車輛	2	至2050年，小客車與小貨車市場有60%與45%銷售比例為混合動力或電動車，市區公車已無傳統燃油車型，並且10%純電動化，機車有30%電動化。長程大客貨車相較2010年省油率達20%。
34	生質燃料替代	2	至2050年生質柴油添加比例提升至5%。

The Development and Application of a Genetic Algorithm-based Optimization Module for Taiwan 2050 Calculator

Pei-Hao Li^{1*} Cheng-Ta Chu² Ming-Lung Hung³ Tzu-Yar Liu⁴

ABSTRACT

Industrial Technology Research Institute (ITRI) developed Taiwan 2050 Calculator in 2013 with the technical support from Department of Energy and Climate Change, UK. The Calculator has been accepted by various stakeholders and become an ideal communication platform for energy policy in Taiwan. However, this tool is lack of an optimization procedure to determine optimal energy pathways for low-carbon development. This study thus integrates a Genetic Algorithm to construct an optimization module for Taiwan 2050 Calculator. Candidate pathways are converted into chromosomes to compete with each other in the iterative searching procedure. The best chromosome (pathway) is gradually reached by stochastically combining the better pathways in each searching generation. This module has been applied to determine the optimal pathway with lowest GHG emissions in 2030. In comparison with the reference pathway, which is similar to current energy policy, the optimal pathway can reduce GHG emissions by 28.7% with an extra 5.7% of total cost. The result verifies the developed module can identify the optimal pathways efficiently. In the future application, more practical considerations, such as maximum allowed level for technology development, should be taken as the constraints to ensure the feasibility of the optimized pathways. It is also noteworthy that the determined pathways should not be regarded as plausible strategies directly without further investigations.

Keywords: Taiwan 2050 Calculator, Energy Supply and Demand, Optimization, Energy Model, Genetic Algorithm

¹ Senior Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

² Researcher, GEL, ITRI

³ Manager, GEL, ITRI

⁴ Division Director, GEL, ITRI

* Corresponding Author, Phone: +886 958-415217, E-mail: peihaoli@gmail.com

Received Date: September 2, 2015

Revised Date: November 18, 2015

Accepted Date: November 24, 2015