

## 本月專題

### LEAP 模型與 TIMES 模型之差異分析

黃韻勳<sup>1</sup>

#### 摘要

面對多面向及高度複雜的能源政策規劃問題，能源模型可適時提供政策規劃與決策者具一致性與系統性的量化分析工具，以作為訂定能源策略之重要參考工具。其中，能源工程模型之主要優點為可直覺顯示那些技術為節能減碳量的主要貢獻者，並能夠建立基準情境和不同情境下的節能減碳潛力估算，藉由估算結果可使決策者清楚明瞭未來該針對那些技術進行改善以達到節能減碳效果，故近年來國際上所發展的重要能源模型，如：TIMES 模型與 LEAP 模型皆屬於能源工程模型，且已被許多國家及研究機構廣泛使用。本文分別針對 TIMES 模型與 LEAP 模型進行介紹，並比較兩種模型的特點與主要差異，最後提出結論與建議。

#### 一、前言

因應國際政經情勢及能源環境快速變遷與挑戰，全球處於能源轉型的關鍵時期，能源不僅為推升經濟發展的動力，綠能技術與節能發展亦為許多國家創造新興產業及帶動綠色就業。而在能源轉型過程中，在確保能源穩定供應下，同時兼顧經濟發展與環境永續，已成為全球共同關注的課題。面對多面向的能源轉型議題及高度複雜的政策規劃問題，能源模型可適時提供政策規劃與決策者具一致性與系統性的量化分析工具，以作為能源策略決策參考之重要工具，故被各國所廣泛採用。

依據所使用的經濟理論、變數的拆解程度、考量的地區(全球、區域或單國)等因素，可將能源模型區分為不同種類，其中一項最常用的分類

<sup>1</sup> 國立成功大學資源工程系副教授

方法即將能源模型區分為「由上而下」(Top-down)及「由下而上」(Bottom-up)的能源模型。基本上,「由上而下」之模型主要為總體與產業經濟數量模型,如:可計算一般均衡模型(Computable General Equilibrium, CGE)、投入產出模型、總體計量模型等。其分析對象涵蓋經濟體系所有部門(視加總程度而定),而能源部門僅為眾多部門之一,因此除求解能源部門相關變數外,「由上而下」模型尚包含許多總體經濟變數(如:工資、利率、政府支出)。「由下而上」的模型則主要以某特定部門為分析對象的部份均衡模型,特別對「能源部門」有相當詳細的刻劃,故可對能源部門內各種現有及未來的技術皆可進行詳盡的設定,常用以規劃滿足未來能源需求下之各項能源技術組合。

相對於「由上而下」模型,「由下而上」的能源模型之主要優點為可直覺顯示那些技術為節能減碳量的主要貢獻者,且能夠建立基準情境和不同情境下的節能減碳潛力估算,藉由估算結果可使決策者清楚瞭解未來該針對那些技術進行改善以達到節能減碳效果,故近年來國際上所發展的重要能源模型,如:TIMES(The Integrated MARKAL-EFOM System)模型與 LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning System)模型皆屬於「由下而上」的能源工程模型,且已被許多國家及研究機構廣泛使用,我國亦積極發展此兩種能源工程模型。基此,本文旨在針對 TIMES 模型與 LEAP 模型進行介紹,並比較兩種模型的特點與主要差異,最後提出結論與建議。

## 二、TIMES 模型簡介

### (一)TIMES 模型緣起

為因應第一次能源危機,國際能源總署(International Energy Agency, IEA)於 1976 年成立了多國共同合作的能源技術系統分析研究計劃(Energy Technology Systems Analysis Program, ETSAP),此計劃主要目的在建立各會員國之能源系統分析能力,並成功的開發 MARKAL 模型(MARKet

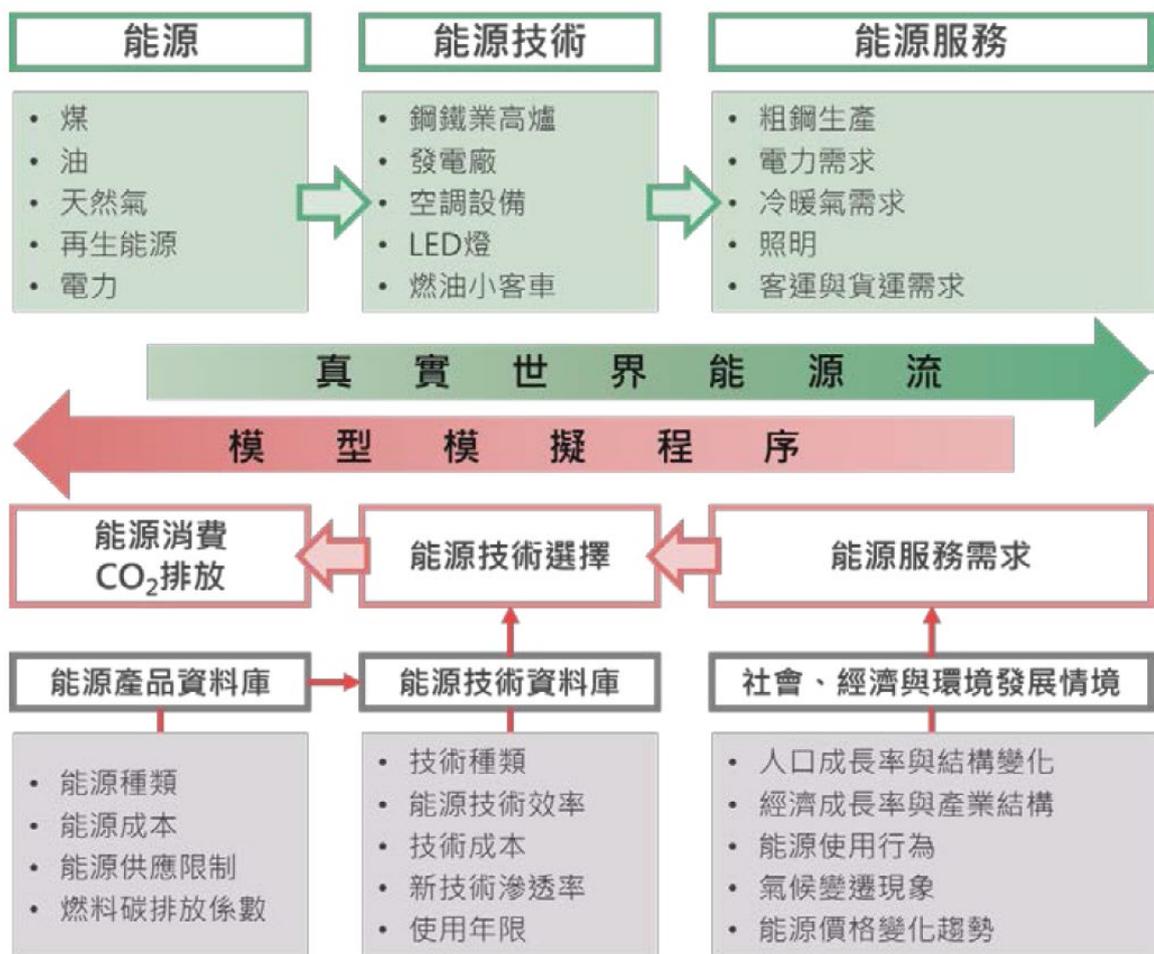
Allocation)，初期的 ETSAP 僅有 16 個 OECD 國家參加，並分成兩個團隊，兩團隊以平行的方式發展 MARKAL 模型。一個中心位在於美國的 Brookhaven National Laboratory，另一個中心則在德國的 Research Center Julich。MARKAL 模型可提供各國於全球、區域及國家的能源系統規劃、能源技術研發之排序評估與溫室氣體減量研究。不過隨著時間演進，現實世界所需模擬的議題日趨複雜，MARKAL 模型之既有功能尚有許多考量不周全的地方，因此如何彌補既有的弱點，並加強此能源工程模型的強處，為 ETSAP 持續努力的目標。因此 ESTAP 於 ANNEX VI(1996-1998) 期間開始發展 TIMES 模型，於 ANNEX VII(1999-2001) 期間進行此模型之驗證與應用。TIMES 為 The Integrated MARKAL-EFOM System 的縮寫，表示其為 MARKAL 與 EFOM(Energy Flow Optimization Model) 兩模型之結合；其中，EFOM 亦為能源工程模型，主要用於歐洲各國，其特點在於可模擬彈性的投入與產出機制，因此 TIMES 模型比 MARKAL 在投入與產出關係之設定上更具彈性。此外，TIMES 模型比 MARKAL 模型在時段的劃分上更加具有彈性，不僅可針對所有的能源服務需求進行更細緻的劃分，且劃分的時段亦可由模型使用者自訂，故使得模型的功能更為強大。

## (二)TIMES 模型分析架構

在現實世界中，能源開採、冶煉並經過處理後的能源產品，可提供能源設備使用，並產生能源服務，以滿足人類生活所需，如：煤炭經過開採與運輸後可進入發電廠產生電力，電力可供住宅使用，以滿足人類日常生活的需求。依據能源服務需求類型的不同，可再細分為工業(如：粗鋼生產)、住宅(如：照明)、服務業(如：冷暖氣需求)與運輸(如：客運與貨運需求)等需求部門。因此現實生活的能源流向係從初級能源經過能源技術之處理產生能源產品，再進入各需求部門產生能源服務需求。

不過 TIME 模型的分析流程恰好相反，在能源供需平衡的原則上，評估若要滿足各類能源服務需求，須使用多少能源，而能源服務需求到能

源投入間的轉換，係由許多能源技術加以提供。因此模型求解的程序，與現實生活的能源流向相反從能源服務需求出發，選擇滿足能源服務需求所需的各類能源技術，進而估算所耗用的能源與所排放的汙染物(如圖 1 所示)。換言之，TIMES 模型求解的驅動力即為各類能源服務需求的數量。而這些能源服務需求需要事先外生給定，通常會依據未來經濟(如：各行業經濟成長率、產業結構)、社會(如：人口數量與結構變化、家庭戶數變化)、環境(如：氣溫)之發展或變化，推估各類型的能源服務需求之未來趨勢。



資料來源：工研院 TIMES 模型團隊 (2018)

圖 1 TIMES 模型模擬程序與現實世界能源流向

而模型中建置的能源技術資料庫，主要可以提供滿足這些能源服務需求下所需的能源，這些能源技術包含如：工業的水泥業旋窯、運輸的

大客車、住宅與服務業的照明或空調設備等，此外尚包括原油煉製和發電等處理或轉換技術甚至能源開採技術。透過各類型新舊技術效率、成本、使用年限等參數資料，可估算若要滿足給定的能源服務需求，在最小成本的目標下，所需要的技術組合及各類能源投入量與產生的碳排放。

此顯示 TIMES 模型屬於數學規劃模型，即在不同類型的限制條件下，求解目標函數的最適解。一個最佳化數學規劃問題包含三大主體，分別為決策變數、目標函數與限制式；其中，決策變數係由模型求解的內生變數，TIMES 模型主要變數包含技術投資量、技術活動量、裝置量、各燃料別能源消費量與碳排放等。目標函數則為極大或極小化目標值，TIMES 模型的目標函數為極小化折現後的能源系統總成本，成本項目包含進口原物料成本、變動及固定運維成本、投資成本等。此外，限制式為最佳化求解必須滿足的條件，由決策變數組成的等式或不等式，TIMES 模型的限制式涵蓋技術轉換方程式、技術流量占比限制式、容量使用限制式、容量轉換方程式、尖峰附載限制式及使用者所自訂的限制式等。圖 2 為 TIMES 模型分析架構，首先須先設定能源服務需求及成本、效率、可用率及汙染排放係數等參數，在滿足各類限制式下，以成本最小化為目標函數進行最佳化求解。

綜言之，TIMES 模型係以龐大且複雜的能源技術由下而上組合而成的數學規劃模型，以能源服務需求(外生變數)為驅動力，考慮能源系統發展情境，在能源系統成本最小化目標下，滿足能源供需平衡、環境與資源各類限制條件下進行最佳化求解。

### (三)TIMES 模型之應用

目前全世界共有超過 60 個國家、約 234 個研究機構正在使用 TIMES/MARKAL 模型，主要應用於國家中、長期的能源供需規劃與淨零排放規劃，如：國家自主減碳貢獻(Nationally Determined Contributions, NDCs)與淨零排放路徑的設定；亦有一些國家將 TIMES 模型應用在碳預算的制定。台灣方面，主要由工研院綠能所於 1993 年引進 MARKAL 模

型，建置臺灣本土化版本。2010 年轉版為臺灣 TIMES 模型，透過更細緻化與彈性的模型操作功能，協助我國多項重大能源政策決策評估，以及協助溫管法階段管制目標的二氧化碳排放路徑規劃、減煤路徑規劃及 2050 淨零排放路徑規劃等。



資料來源：Loulou et al. (2016); 郭瑾璋、周裕豐(2020)

圖 2 TIMES 模型分析架構

### 三、LEAP 模型簡介

#### (一)LEAP 模型緣起

LEAP 模型(Long-range Energy Alternatives Planning System, 中文又稱長期能源替代規劃系統模型)係由瑞典斯德哥爾摩環境研究所(Stockholm Environment Institut, SEI)於 1997 年所開發，可用以分析能源政策和氣候變遷減緩策略的能源工程模型。此模型可設定與能源相關的環境參數(如：溫室氣體排放係數、空污排放係數)，模擬空污減量的共同效益。LEAP 模型可依據使用者的設定決定模型所需資料，且模型操作介面相當簡易

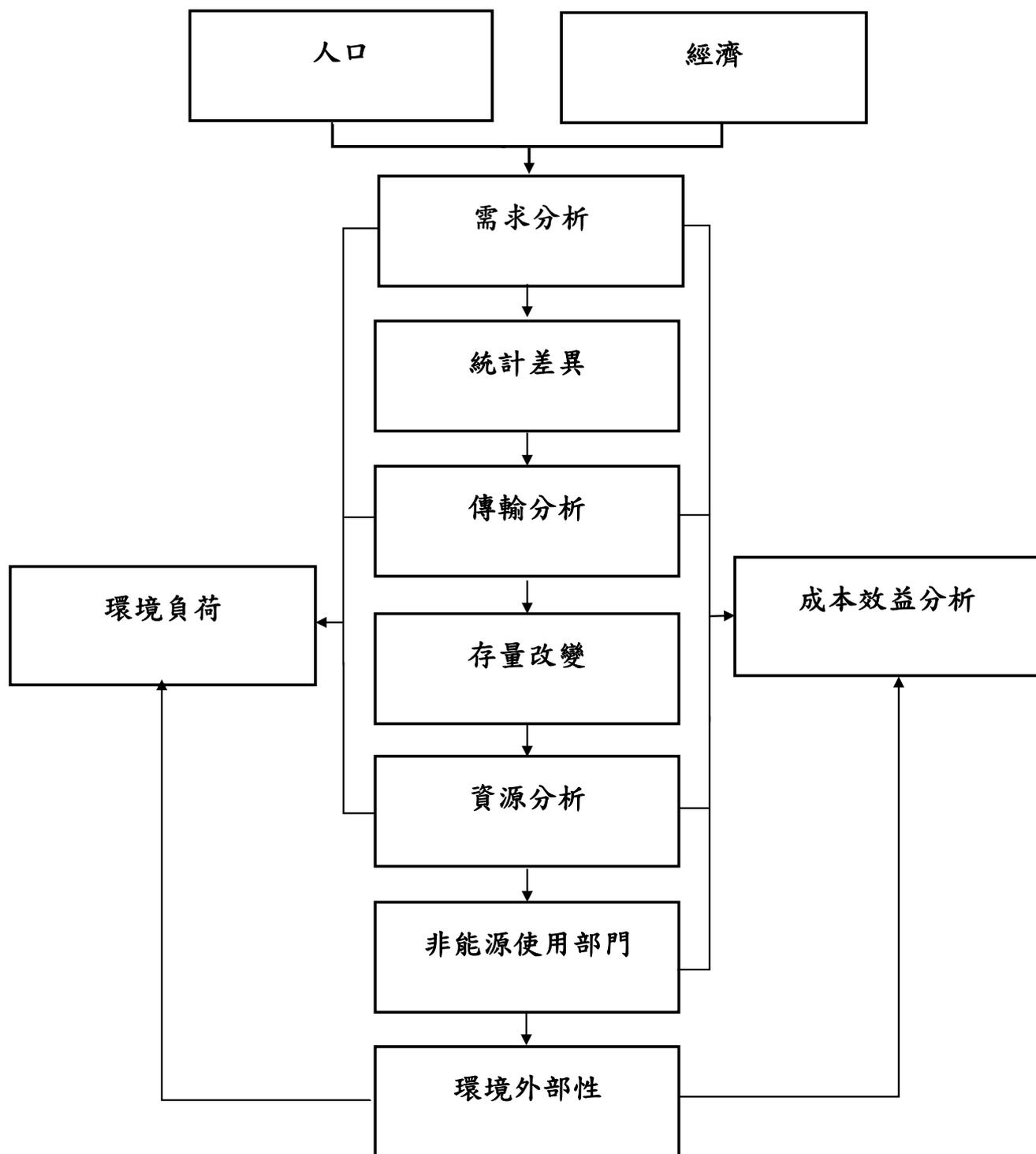
與具有親和力。目前已有超過 190 個以上的國際研究機構/政府單位使用此評估模型，4,000 多位使用者運用 LEAP 模型模擬低碳發展策略、提交聯合國氣候變遷綱要公約(The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 報告之決策依據。

## (二)LEAP 模型分析架構

LEAP 模型分析架構彙整如圖 3 所示，人口與總體經濟為推估能資源需求分析的主要變數，扣除統計誤差並分析傳輸效率、存量變動，可得到能資源供給估計值，加上非能源使用需求分析，可得環境負荷(亦即污染排放量)和估算成本效益。

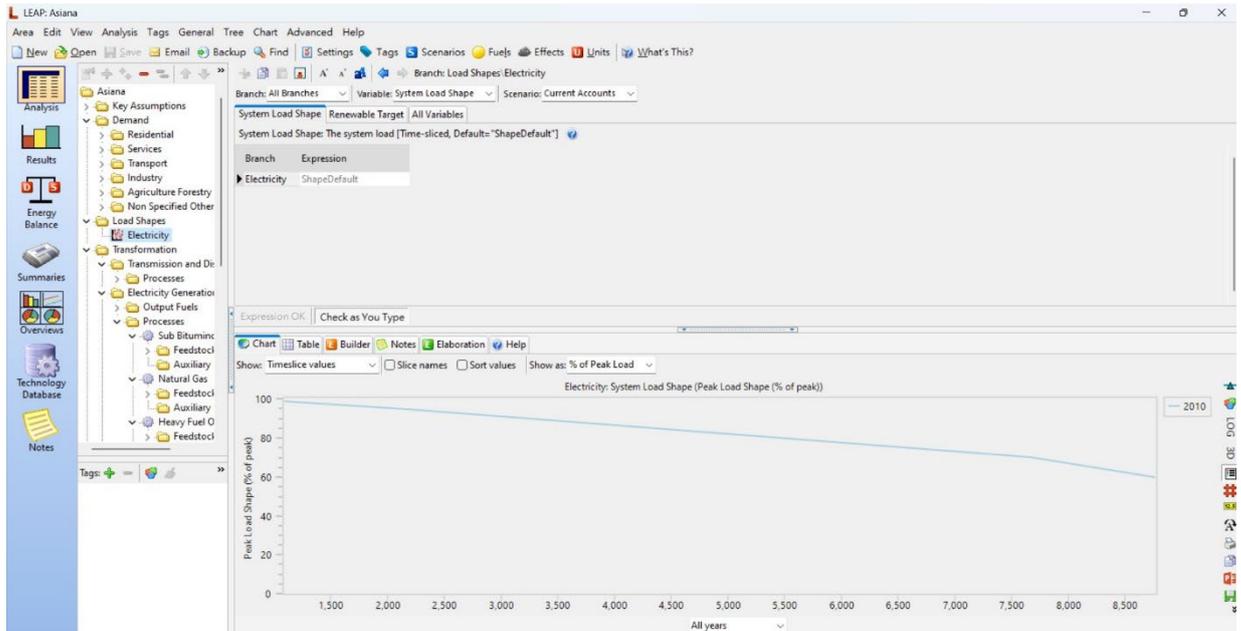
對應模型分析架構，LEAP 模型操作介面示意圖如圖 4 所示；其中，圖 3 的人口與經濟屬於 Key Assumption 的參數，使用者可在 Key Assumption 下建構未來的人口與經濟預測，屬於外生變數。接著為能資源需求(Demand)，可視使用者需求區分為不同部門，如：工業、住宅、服務業及運輸部門。發電、原油煉製、煤炭開採等須於能源轉換(Transformation)下進行設定，系統中各種使用到的能資源則由自動歸屬到能資源(Resource)下，又可進一步細分為初級能源和最終能源。

此外，模型的操作介面相當便利(User friendly)，以需求部門為例，各項技術和參數值可用絕對值(如：100 萬人口數)、成長函數或占比進行設定；效率同樣可以絕對值(如：50%效率)、單位耗能量(如：kW/台)或密集度(如：能源密集度)表示。電力技術除了設定設備裝置容量、發電效率及成本參數外，亦可依據使用者需求切分為不同時段，設定全年 8,760 小時不同時段下的電力需求占比。此外，透過煉油業的投入產出關係，可計算滿足需求部門所需的初級能源供應量，並據此估算能源使用所產生的溫室氣體和空污排放量。其中，排放量計算方式可依使用者要求採用參考方法或部門方法，參考方法係由能源供給面計算二氧化碳排放量，部門方法則由最終消費部門計算其能源消費所產生之二氧化碳排放量。



資料來源：Heaps (2020)

圖 3 LEAP 模型分析架構



資料來源：本研究繪製

圖 4 LEAP 模型操作介面示意圖

### (三) LEAP 模型之應用

由於聯合國氣候變化綱要公約締約國為符合巴黎協定之遵約要項，須以科學為基礎針對不同情境進行溫室氣體減量與管理模擬，故開始選用氣候公約建議之能源工程或整合評估模型，以估算各國未來溫室氣體排放與符合之遵約路徑。其中，以國家自主減碳貢獻(NDCs) 為例，氣候公約締約國已有 37 個國家使用 LEAP 模型建構資料。此外，LEAP 模型亦協助這些締約國建構國家通訊(Third National Communications, TNCs)、兩年期更新報告(Biennial Update Reports, BURs) 與國家適當減緩行動(Nationally Appropriate Mitigation Actions, NAMAs)。

而在長期低碳發展策略(Long-Term Low Emission Development Strategy, LEDS)中亦有包括智利、以色列、菲律賓、越南等超過 30 個國家以 LEAP 模型建構其溫室氣體低碳排放路徑，並與具有大型整合評估模型之國家，如：日本 AIM 模型，荷蘭 IMAGES 模型，美國 GCAM 模型，奧地利 MESSAGE 模型，德國 REMIND 模型等進行研究交流；而愛爾蘭亦利用 LEAP 模型與其他整合評估模型推估愛爾蘭 2050 淨零排放路

徑。台灣方面，主要由工研院綠能所於 2017 年開始建置 LEAP 模型與本土化資料庫，並結合區域投入產出模式，進行區域低碳路徑整合評估規劃，模擬長期能源替代規劃之溫室氣體減量和空氣品質與健康效益之影響。此外，亦利用 LEAP 模型，考量現況策略之減碳趨勢，評估強化政策與商用技術下最大減碳潛力與淨零排放差距，並提出台灣各部門發展趨勢與減碳方案，探討各部門減碳方案之成本與可行性，分析未來達成溫室氣體減量及管理法 2050 年目標或淨零排放轉型下之技術與策略組合。

#### 四、LEAP 模型與 TIMES 模型之差異分析

如前所述，雖然 TIMES 與 LEAP 模型同屬能源工程模型，但仍存在一些差異，茲綜合分析如下：

##### (一)方法論

首先是模型所使用的求解方法，TIMES 模型為最佳化數學規劃模型，以能源系統總成本最低為目標函數，考量滿足能源服務需求、能源供需平衡和其他限制條件(如：資源限制、政策目標等)求解能源系統最佳技術組合，並加以估算在此組合下的能源耗用與溫室氣體排放量；但模型求解時，必須同時滿足各項限制條件，否則無法求出最佳解。LEAP 模型除了針對電力部門可採用最適化求解外，主要則是採用計算法(Accounting)或模擬法(Simulation)進行模式運算，透過建立數種未來可能之情境，由使用者設定各類情境的最終能源消費變化及技術效率變化趨勢，再由模式模擬出未來能源供給的組合及在此組合下所帶來的成本與造成的環境影響與衝擊，並非在特定的目標函數與滿足各類限制條件下，以求得最具成本效益的技術組合。

##### (二)資料需求

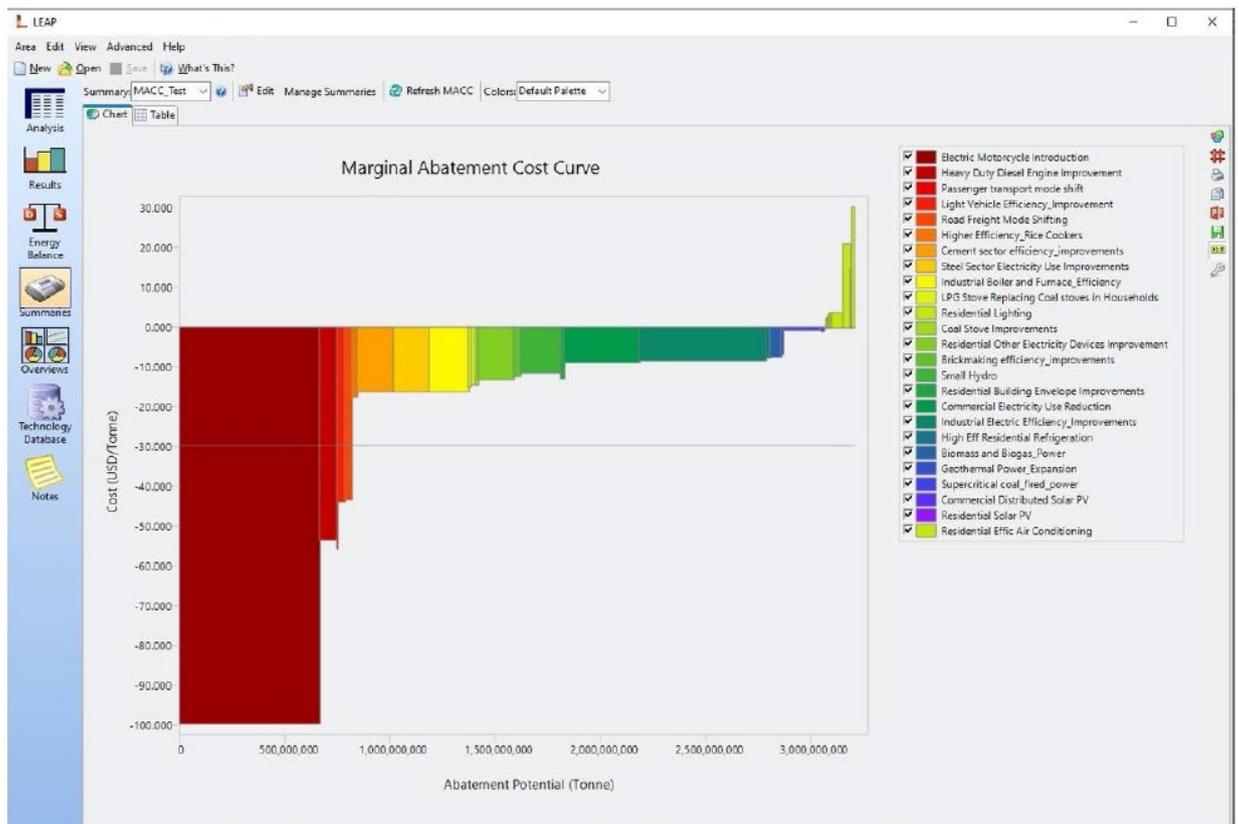
其次為資料需求，如前所述建置 TIMES 模型時，首先需要外生推估各部門下各類別的能源服務需求。此外，能源技術包含各種開採、處理及需求技術等，模型進行最佳化求解前，須詳細設定這些技術的各類成

本資料、效率、年可用率、汙染排放係數等，所需資料相當龐大且複雜，建置時間長。LEAP 模型資料結構彈性大，使用者可根據資料的可得性及分析目的建構資料，若使用者只想進行能源需求分析，可僅針對各部門的需求進行資料建置與模擬，並不用建置能源轉換與傳輸的相關技術或環境相關的汙染物排放。此外，在資料建置過程亦相當具有彈性，如：建置需求部門時，若僅有較為加總的部門別能源消費量，可針對部門別進行建置，若進一步蒐集到部門中各項器具(或設備)的能源消費資料，亦可針對各類設備的能源消費量進行建置。此外，需求量的設定可使用成長率函數或內插函數，效率的設定亦可使用絕對值、單位耗能或密集度指標。綜言之，TIMES 模型對能源技術的刻劃較為細緻，但相對資料需求較為龐大，且無預設的環境參數或排放係數可供使用者使用。而 LEAP 模型則可視使用者和資料可取得狀況，彈性調整資料庫格式，有預設的排放係數可供使用者使用，且可加入環境參數資料庫共同模擬低碳策略對環境之影響，較適合模型初學者使用。

### (三)模型操作介面

最後則是兩模型在操作介面上具有明顯差異；其中，TIMES 模型的操作介面主要供使用者建置能源服務需求及技術的成本與效率等相關資料，資料設定完成後模型會呼叫 GAMS 軟體的求解器進行最佳化求解，若能順利求得最佳解，再將製程活動量、技術裝置量、能源耗用量及汙染物排放量等決策變數結果回傳至模型，由使用者自行進行匯整或使用其他軟體進行視覺化處理。相較於 TIMES 模型，LEAP 模型則是進一步將視覺化功能內建於模型操作介面中，可直觀且易於使用圖表詮釋產出結果，亦是相對於其他能源模型較為突出的一大特色。換言之，LEAP 模型可將大量的模擬結果輕易的透過操作介面選取，繪製為各類圖形、表格甚至地圖，其視覺化操作介面使得呈現不同維度的搭配結果變得非常容易，以能源需求分析結果為例，共包含燃料、年份、情境和分支(即分析的部門和子部門)等維度，使用者只需選擇在圖表的每個軸上欲顯示的

維度，即可呈現出不同效果的模擬結果。此外，操作介面中亦有許多選項可用於調整圖表，包含：圖表類型選擇(面積圖、長條圖、折線圖、圓餅圖等)、圖表顏色、數字格式(絕對值、增加比率、百分比)、表格中顯示的小數位數等；同時亦可直接繪製邊際減量成本曲線(Marginal Abatement Cost Curves, MACC)(如圖 5 所示)或使用多圖合一的方式將多個圖形或表格組合在同一張圖加以顯示。綜言之，LEAP 模型強大的視覺化功能為模型的主要特點，可有效解釋模擬結果，並協助制定相關政策。



資料來源：工業技術研究院(2022)

圖 5 LEAP 模型所呈現的邊際減量成本曲線

## 五、結論與建議

在國際追求淨零碳排的趨勢下，所遭遇的能源議題日趨複雜，因此能源政策或技術對經濟、能源、環境的影響，需要透過分析模型，提供具有邏輯性且量化的影響評估，讓不同領域的決策者，能以共通性的方

法進行決策參考。TIMES 與 LEAP 模型為國際所發展的重要能源工程模型，且已被許多國家所廣泛採用，用以評估達成淨零碳排的路徑規劃，故本文主要介紹這兩個模型的緣起、分析架構及應用狀況，並分析主要差異處，以提供想要瞭解能源工程模型的研究者或決策者作為參考。本文主要結論與建議說明如下：

### (一)並沒有完美的模型，每個模型各有其長處

能源工程模型主要特點在於可瞭解達成節能減碳的關鍵技術，並可分析技術在短、中、長期的導入順序及各技術導入或移除對能源系統的影響，亦可探討技術可行性、成本、能源價格、需求等面向之不確定性影響。但沒有哪種模型是完美的，每個模型各有其長處，以 TIMES 模型為例，主要長處在於其為成本最小化模型，使得所分析出的技術組合或政策具成本效益。此外，建置的技術相當多元且複雜，可高達上百種甚至上千種以上的能源開採、處理與需求技術，故能詳細的探討各類技術發展對能源系統的影響或衝擊，但缺點則是建置時間冗長，需要投入大量人力與時間。LEAP 模型主要則透過計算與模擬的方式，探討未來可能發展的各類情境下，能源供給的組合及所造成的成本與環境影響。因此，其主要專長在於情境模擬，可同時設定許多不同情境，分析各種情境的差異，但缺點是這些組合可能並非成本最小化下的技術組合。LEAP 模型另一個主要長處在於視覺化效果的呈現，可非常便利的將分析結果以各種圖表呈現，而不需要再將模擬結果匯出至其他軟體進行繪圖，故可有效的解釋模擬結果，協助制定相關政策。

### (二)能源工程模型並非預測模型

能源工程模型所用的方法雖然可能不同，以 TIMES 模型而言所用的為最佳化方法，而 LEAP 模型則是透過計算或模擬的方法，但兩者皆非預測模型。換言之，不論是 TIMES 模型或 LEAP 模型的主要功能並非在預估未來會發生哪些事情，而是在探究不同經濟發展條件、能源價格、技術發展路徑(如：技術效率變化)與政策推動下所造成的衝擊，透過模型的

量化分析(如：量化各措施的減量貢獻與成本)，提供能源部門決策者之參考。因此模型評估結果是否與未來趨勢相符合，絕大部分是取決於給定的情境條件與未來實際發展情形的差異大小。因此，TIMES模型或LEAP模型無法預測未來的能源發展走向，但透過定期的資料庫維護更新與檢核工作，可應用於未來可能發展之情境模擬，提供各情境條件下的能源供需發展趨勢量化資訊，作為能源決策或能源開發討論的參考。

### **(三)模型估算結果與政策結合的重要性**

台灣能源大多仰賴進口，在未來天然氣價格持續波動、核能仍存在許多爭議以及變動性再生能源具有間歇性的情況下，提升能源效率與節約能源勢必扮演重要的角色。使用能源工程模型雖可估算出各類技術的節能潛力與所需的投資成本，但這些所估算的節能潛力若要實際達成，則有賴政府推動更積極的政策措施，顯示模型估算結果與政策執行結合的重要性。

### **(四)模型需長時間擴充與維運**

目前許多國家在淨零碳排路徑、能源效率提升、節能潛力估算、經濟衝擊與政策評估等皆會仰賴模型支援。然而當模型功能愈多、精緻度越高時，架構也就越龐大，須仰賴足夠的人員與時間進行擴充與維護。因此，建議可投入更多資源長期培訓專業的模型運維人才，從資料建置、模型維護、執行與政策建議評析，進行整合。

## 參考文獻

1. Aryanpur, V., Balyk, O., Daly, H., Gallachóir, B. Ó., & Glynn, J. (2022). Decarbonisation of passenger light-duty vehicles using spatially resolved TIMES-Ireland Model. *Applied Energy*, 316, 119078.
2. Avellaneda, J. A. C., Rodriguez, A. U., Yañez, E., & Rey, R. M. (2024). Assessment of the Colombian long-term energy planning scenarios for the national hydrocarbon value chain: Insights from the TIMES-O&G model. *Energy Conversion and Management*, 306, 118317.
3. El-Sayed, A. H. A., Khalil, A., & Yehia, M. (2023). Modeling alternative scenarios for Egypt 2050 energy mix based on LEAP analysis. *Energy*, 266, 126615.
4. Emodi, N. V., Emodi, C. C., Murthy, G. P., & Emodi, A. S. A. (2017). Energy policy for low carbon development in Nigeria: A LEAP model application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 247-261.
5. Heaps, C. G. (2020). LEAP: The Low Emissions Analysis Platform.
6. Loulou, R., Goldstein, G., Kanudia, A., Lettila, A., Remme, U., & Noble, K. (2016). Documentation for the TIMES Model PART I-Concepts and Theory.
7. Lv, F., Wu, Q., Ren, H., Zhou, W., & Li, Q. (2024). On the design and analysis of long-term low-carbon roadmaps: A review and evaluation of available energy-economy-environment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113899.
8. Mac Uidhir, T., Rogan, F., & Gallachóir, B. Ó. (2020). Develop a LEAP GHG Ireland analytical tool for 2050. Environmental Protection Agency: Wexford, Ireland.
9. Mirjat, N. H., Uqaili, M. A., Harijan, K., Walasai, G. D., Mondal, M. A. H., & Sahin, H. (2018). Long-term electricity demand forecast and supply side scenarios for Pakistan (2015–2050): A LEAP model application for policy analysis. *Energy*, 165, 512-526.
10. Nieves, J. A., Aristizábal, A. J., Dynner, I., Báez, O., & Ospina, D. H. (2019). Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application. *Energy*, 169, 380-397.
11. Pedinotti-Castelle, M., Pineau, P. O., Vaillancourt, K., & Amor, B. (2022). Freight transport modal shifts in a TIMES energy model: Impacts of endogenous and

- exogenous modeling choice. *Applied Energy*, 324, 119724.
12. Prina, M. G., Manzolini, G., Moser, D., Nastasi, B., & Sparber, W. (2020). Classification and challenges of bottom-up energy system models-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109917.
  13. Yang, D., Liu, D., Huang, A., Lin, J., & Xu, L. (2021). Critical transformation pathways and socio-environmental benefits of energy substitution using a LEAP scenario modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110116.
  14. 工研院 TIMES 模型團隊 (2018)，臺灣 TIMES 能源工程模型介紹。
  15. 工業技術研究院(2018)，溫室氣體淨零排放路徑發展評估專案工作計畫，行政院環境保護署 110 年度委辦專案計畫計畫。
  16. 工業技術研究院(2022)，氣候變遷科技決策機制及低碳路徑整合評估規劃專案工作計畫，行政院環境保護署 106 年度委辦專案計畫計畫。
  17. 郭瑾瑋、周裕豐(2020)，應用能源工程模型評估運輸電氣化對能源系統影響，綠色經濟電子期刊，第 6 卷，第 A24-41 頁。