

# 多元能源風險評估方法論整合與應用

張耀仁<sup>1\*</sup> 黃孔良<sup>2</sup> 韓佳佑<sup>1</sup> 馮君強<sup>1</sup> 柴蕙質<sup>1</sup> 葛復光<sup>3</sup>

## 摘要

「能源風險」是當前全球能源面臨的重要議題，因能源風險不只關係到國家經濟產業發展，嚴重甚至會危及國家安全，而對高度倚賴能源進口的我國更無法置身事外。本研究運用美國商會國際版能源安全風險指標、歐盟永續能源系統成本評估及線上問卷調查建置多元能源風險評估方法論，評估國家能源政策之能源安全、環境衝擊及社會風險，並以INER-TIMES能源工程與INER-GEMEET能源經濟模型共同模擬之基準與減碳情境為評估標的，進行未來年多元能源風險量化評估。根據評估結果顯示：兩情境至2050年能源安全風險程度皆逐年升高，但減碳情境的幅度相對較小，因減碳情境逐年提高再生能源、燃氣及具碳捕捉之燃煤發電，因而大幅降低對燃煤發電的依存度，所以同時提升電力供應的多樣性與降低環境衝擊程度。基準情境因逐年增加燃煤發電而使環境衝擊程度逐年上升。根據問卷調查結果，至2030年時，基準情境可能遭遇的社會風險約為減碳情境的1.5倍，原因為有很大比例受訪者不支持燃煤發電。整體來說，本研究減碳情境未來年的能源安全、環境衝擊及社會風險的量化評估結果皆低於基準情境。證實擴大再生能源與深度減碳有助於未來長期建立更安全、永續且社會可接受之能源發展路徑。

**關鍵詞：**能源風險，能源安全，環境衝擊，社會風險，減碳

## 1. 前言

「能源風險」是當前全球能源使用面臨的重要議題，能源風險不只關係國家經濟產業發展，嚴重甚至會危及國家安全。我國能源高度倚賴進口且為獨立的電網系統，以致國家的能源供應相對其它國家脆弱，政府應將能源風險列為能源政策研擬的重要考量。我國目前處於能源轉型的道路上，姑且不論我國能源轉型能否達成，對於能源政策可面臨的風險評估卻是必要的，否則難以論述能源轉型對我國能源發展之影響為何？鑑於我國能源政策尚缺乏完整的風險評估，因此本研究整合各種風險面向，建

置適用我國之多元能源風險評估方法論，並以本研究研擬之能源發展情境進行風險評估方法論應用。國際上目前對於能源風險尚無一致的定義，需納入那些風險面向或採用何種方法進行風險量化分析也無一致的標準。許多國際機構也各自提出能源風險的定義或評估指標，但大多侷限於能源(供應)安全面向的討論。國際能源署(International Energy Agency, IEA)定義能源安全應該是能源需供應滿足可靠度(不間斷的供應)、可負擔(有競爭力的供應)及可取得(有效的供應)三面向(IEA, 2017)。IEA依各種能源供應的類別建置供應風險與彈性指標，以國家內在(例如：能源儲量)與外在(例如：能源進口依

<sup>1</sup> 行政院原子能委員會核能研究所能源經濟及策略研究中心 副工程師

<sup>2</sup> 行政院原能會核研所能源經濟及策略研究中心 薦任技術員

<sup>3</sup> 行政院原能會核研所能源經濟及策略研究中心 研究員兼主任

\*通訊作者電話: 03-4711400#2719, E-mail: kjonkjon@iner.gov.tw

收到日期: 2018年02月13日

修正日期: 2018年05月01日

接受日期: 2018年05月11日

存度)影響因子，進行能源安全的量化分析，並將各種能源供應安全程度由A(佳)至E(劣)進行排序(IEA, 2011)。

美國商會(U.S. Chamber of Commerce, USCC)則由21世紀能源研究所(Institute for 21st Century Energy)提出國際能源安全風險指標，該指標用於分析各國從1980至2013年的能源安全風險程度。USCC國際能源安全風險指標是由全球燃料、燃料進口、能源支出、價格及市場波動、能源使用密集度、交通運輸部門、電力部門、環境等八大構面，共29項副指標組成，再根據各副指標權重進行能源安全加權評分計算(Institute for 21st Century Energy, 2016)。USCC國際能源安全風險指標提供明確的指標權重與評分計算定義，因涵蓋層面廣且採用綜合加權指數進行安全評分計算，是目前國際上架構較完整的能源安全風險指標。世界能源理事會(World Energy Council, WEC)則是建立能源三維指標(Energy Trilemma Index)，用於評估世界各國的整體能源績效表現。WEC能源三維指標係由能源安全、能源公平及環境永續三層面組成主要的能源績效指標(權重75%)，搭配政治、社會及經濟層面所組成的周邊績效指標(權重25%)，從多面向評估世界各國整體的能源績效表現，並給予指標評分(能源安全、能源公平及環境永續)及全球的排名(WEC, 2016)。WEC能源三維指標同時涵蓋能源安全、能源環境、能源公平、政治、社會及經濟面向進行能源績

效表現評量，為目前考慮面向較為廣泛的能源評估指標，相較IEA與USCC國際能源安全風險指標偏向能源供應安全，可更廣泛且客觀地評估能源風險。

本研究架構將參考WEC能源三維指標架構建置多元能源風險評估方法論，保留原有能源安全與環境面向，考量社會支持度是影響政策推動能否成功的關鍵因素，特加入社會風險評估面向(如圖1)，此為本研究有別於WEC能源三維指標之處。核能研究所因長期從事能源工程模型、能源經濟模型及能源安全評估相關的研究工作(陳中舜等，2014；胡瑋元等，2016a；胡瑋元等，2016b；黃郁青等，2017；韓佳佑等，2017；Lin *et al.*, 2015；Lin *et al.*, 2011)，是目前國內少數具備同時可分析未來年能源發展情境(能源配比、碳排放等)與社會經濟發展(人口、GDP、能源價格、能源需求等)，以及進行能源風險評估之研究團隊。本研究將整合以上評估工具，研擬我國未來能源發展情境做為評估標的，進行情境未來年能源安全、環境衝擊與社會風險的量化評估。

## 2. 文獻回顧

能源安全為能源風險最重要的評估面向，國內外針對能源安全議題提出不少評估工具應用與研究成果。國外文獻部分，Loschel *et al.* (2010)以能源市場集中度、能源出口國的政治

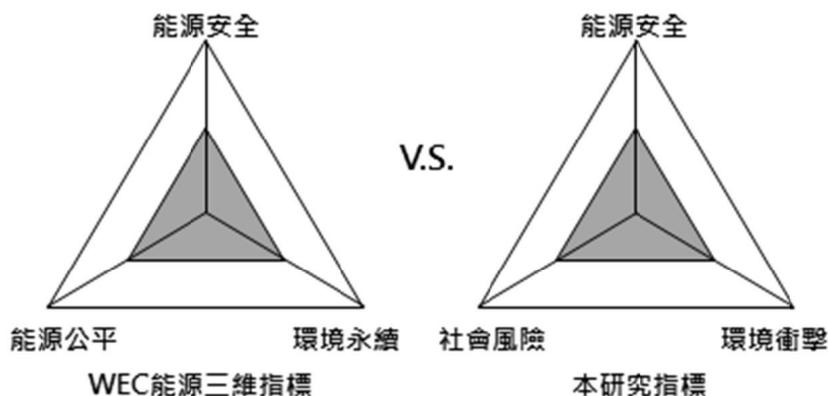


圖1 WEC能源三維指標與本研究多元能源風險評估方法之比較(本研究繪製)

風險、總初級能源供應等項目建置能源安全評估指標，並用於評估歷史年(1996~2005年)與未來至2030年德國、紐西蘭、西班牙及美國的能源安全表現，顯示能源出口國的政治風險是影響這些國家未來能源安全的關鍵因子。Jewell *et al.* (2014)以能源脆弱度(Vulnerability)指標評估低碳能源情境之能源安全，以區域能源貿易與彈性對能源密集度與能源多樣性之影響評估視為風險來源，該研究共設計43個能源情境，並進行歷史年與未來至2100年之能源安全風險程度比較，研究發現某些低碳情境會因為天然氣貿易增加與電力來源多樣降低而導致風險升高。Ang *et al.* (2015)以經濟、能源供應鏈及環境面向建置新加坡的能源安全指標，發現新加坡的能源供應鏈全與環境副指標的歷史年評估值皆有明顯的改善，但經濟指標卻呈現逐年惡化的趨勢，該研究另運用指標計算未來至2035年的經濟、能源供應鏈及環境的整體能源安全風險評分。Matsumoto and Shiraki (2018)以能源供應多樣性指標評估日本在不同社會經濟與能源條件下，至2050年達成低碳社會情境的能源安全表現，研究顯示若未來日本政府不追求高經濟成長的話，日本的能源安全將逐年改善，而減碳的程度將成為未來日本能源安全改善的主要驅動因子，再者才是社會經濟條件的影響。雖然國際間有不少從事能源安全風險未來年評估(事前評估)的研究，但各研究對於能源安全風險的定義與計算差異甚大，顯示國際間對於能源安全之定義皆不相同。

國內文獻部分，林師模與馮君強(2010)運用可計算一般均衡模型評估我國的能源安全程度，評估發現我國於2000年後能源安全度明顯下降，主要因我國產業結構無法擺脫能源密集產業有關，導致我國經濟體對於能源供應中斷或價格上漲之承受能力不足。臺灣經濟研究院曾參考USCC國際能源安全風險指標，協助能源局建置我國能源安全指標，該指標衡量範圍涵蓋穩定、可負擔及均衡供需三大構面，共12項副指標(黃釋偉與顏君聿，2012)。該指標完

成建置至今，因尚無完整的計算流程與研究成果釋出，本研究難以論述該指標對於我國能源安全評估之適用性。核能研究所曾運用USCC國際能源安全風險指標進行能源政策長期影響評估，以核能研究所MARKAL模型進行未來年能源發展情境研擬，結合未來年相關能源經濟推估數據，進行未來年長期能源安全評估，此研究亦是我國首次以USCC國際能源安全風險指標進行未來年能源風險之研究(陳中舜等，2014)。梁啟源等(2017)參考WEC能源三維指標建置我國能源脆弱度評估工具，該工具以初級能源供應、基礎設施及最終能源消費等3構面共15項指標量化我國能源系統之脆弱度，從過去1990年第1季至2017年第2季分析結果顯示，初級能源構面造成的脆弱度受惠能源進口多元而大幅下降；基礎設施構面則因天然氣接收站不足而導致脆弱度大幅躍升；最終能源消費構面因國際能源價格劇烈波動而使脆弱度改善不明顯。MARKAL模型結合USCC國際能源安全風險指標可應用於未來能源政策風險評估，且USCC國際能源安全風險指標已提供明確的指標計算定義，本研究將沿用USCC國際能源安全風險指標作為本研究能源安全風險的量化評估工具，並運用新的能源情境研擬工具取代舊版的MARKAL模型。

環境影響亦是評估能源風險相當重要的面向，USCC國際能源安全風險指標雖有將環境構面納入，但只以碳排放作為評估依據，WEC能源三維指標則是以碳排放與污染物排放作為能源環境的評估依據。整體來說，USCC國際能源安全風險指標與WEC能源三維指標的環境面向皆只考慮能源相關排放的環境影響，對於評估能源對環境的衝擊風險含量稍顯不足。若能從能源生命週期的角度探討其對環境的衝擊風險，將可更全面且客觀地評估能源技術發展對環境的衝擊影響。國際上目前最完整的能源環境衝擊評估資料當為歐盟的永續能源系統成本評估(Cost Assessment for Sustainable Energy System, CASES)，而CASES更將各種能源技術

的環境衝擊貨幣化成外部成本(EC, 2015; EC, 2018)。CASES考慮的環境衝擊類別相當廣泛，包括：空氣污染、水污染、土壤污染、溫室氣體、輻射線等環境衝擊，並個別計算燃油發電、燃煤發電、燃煤(碳捕捉)、燃氣複循環、燃氣汽力機、核能發電、汽電共生(燃煤)、汽電共生(生質煤)、抽蓄水力、慣常水力、太陽光電、陸域風力、離岸風力、及化學儲能技術之外部成本。廖孟儀等(2016)運用衝擊路徑法評估我國燃油、燃煤及燃氣發電之健康衝擊並計算外部成本，外部成本由高往低依序為燃油(0.352元/度)、燃煤(0.062元/度)及燃氣(0.036元/度)發電技術，燃油發電健康衝擊來自硫氧化物排放，燃煤與燃氣發電的健康衝擊則來自氮氧化物排放。該研究雖是我國本土化外部成本資料，但只估算火力發電技術的外部成本，做為能源政策的環境衝擊評估稍顯不足。

社會意向常能左右政府的決策，尤其我國近來民眾意識高漲，社會風險已是研擬能源政策時不容忽視的重要考量。WEC能源三維指標雖以國家貪腐控制、法治素養、教育程度、健康程度等因素建置社會指標，輔助評估國家能源表現(WEC, 2016)。該指標只能呈現被評估國的社會現況，無法反應社會對於能源政策的態度，無法評估能源政策的社會風險。若能透過與民眾直接互動的方式進行評估，直接反應民意對能源發展的態度，相對適用於評估政策的社會風險。核能研究所2015年即開始進行我國民眾電力願付價格的相關調查研究，以網路問卷針對全臺民眾進行抽樣調查，分別以「再生能源極大化」、「非核家園」或「民眾自選」情境向網路用戶的進行意向探詢。其中，非核家園2015年民眾的平均願付電價為3.25元/度；而2016年再進行調查非核家園的願付電價為3.91元/度(胡瑋元等，2016a；胡瑋元等，2016b)，顯示我國民眾對於非核家園政策的願付電價有上升的趨勢。核能研究所另以非核願付電價3.91元/度為2025年電價調漲上限，透過電力評估模型求解若2025年要同時達成20%

再生能源發電占比與非核家園政策目標時，該年電力組合需由40.48%的燃煤、36.41%的燃氣與20%的再生能源組成，顯示目前政府燃氣50%、燃煤30%及再生能源20%之電力配比目標尚無法符合民眾可接受之非核電價調漲上限(張耀仁等，2017)。透過網路問卷進行社會意向調查，確實可反應民眾對於能源政策的意向，且網路問卷具發放便利與成本低的優點。

### 3. 研究方法

本研究運用核能研究所能源工程TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)與能源經濟GEMEET (General Equilibrium Model for Energy, Environment and Technology)模型共同研擬未來年之能源發展基準情境與減碳情境為評估標的，進行未來年能源安全、環境衝擊與社會風險評估方法論之應用，研究架構如圖2所示。其中，能源安全運用USCC國際能源安全風險指標進行量化分析；環境衝擊則直接採用CASES外部成本資料進行未來年情境外部成本計算；社會風險則以社會意向網路平台詢問我國網路用戶對於能源發展情境的支持程度與願付電價。三項風險面向之定義如下：

能源安全：USCC國際能源安全風險指標評分越高，代表可能面臨能源安全風險越高。

環境衝擊：CASES計算外部成本越高，代表可能面臨的環境衝擊越高。

社會風險：受訪者不支持度與願付電價低於實際電價樣本數總和越高，代表可能面臨的社會風險越高。

國內針對能源風險提出不少評估指標與研究，目前多著重於歷史年的能源安全評估，即所謂的事後評估，該種評估可讓決策檢視歷史年風險趨勢，可供決策者記取前車之鑑。而有部分研究從事未來年能源相關風險的評估，即所謂的事前評估，對於未來決策上可達到預警的效果。未來年能源風險評估相關文獻與本研

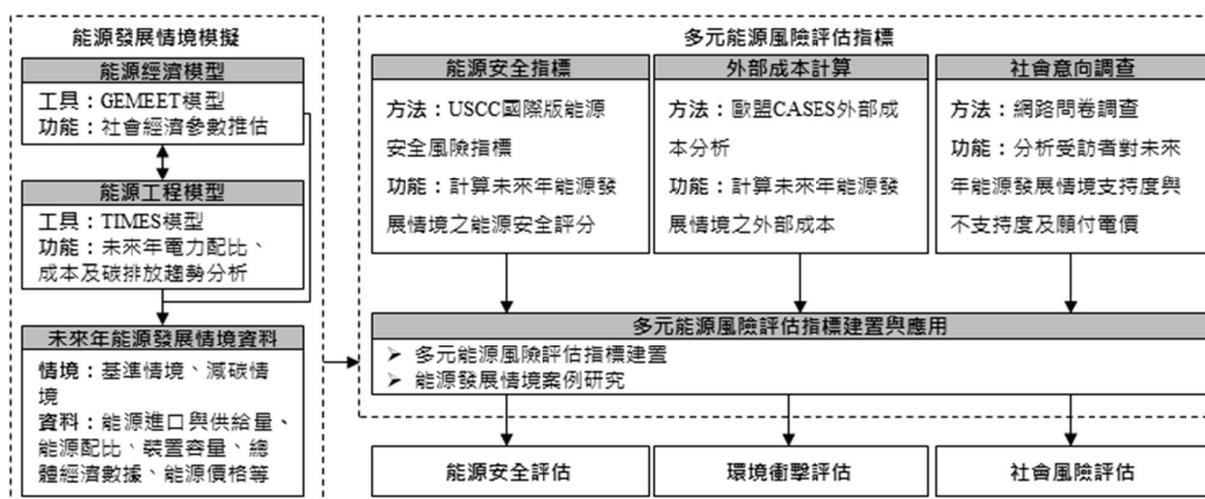


圖2 研究架構(本研究繪製)

究之比較如表1所示。各研究對於能源風險或安全定義皆不同，Chuang and Ma (2013)的研究以能源依存、脆弱、可負擔及可接受作為評估能源安全之依據。馮君強(2015)年的研究則以經濟衝擊作為衡量未來年能源風險的評估指標，其研究主要運用機率模型計算未來年能源供應中斷機率，並搭配為來年價格上漲推估，運用CGE模型評估對我國未來年GDP、CO<sub>2</sub>、消費者福利、就業及出口之影響進行評估。能源政策的經濟衝擊其實是相當重要的議題，但我國對於經濟議題的討論多著重在電價上，弱

化了能源政策對經濟影響的論述，此研究增加能源風險議題研究的廣度。陳中舜等(2014)以MARKAL模型之未來年情境模擬資料為標的，運用USCC進行能源安全分析，此研究開創我國能源工程模型與能風險評結合之先例。本研究延續陳中舜等(2014)研究，以更新版能源工程模型(TIMES模型)結合GEMEET模型，模擬未來年能源發展情境，再分別以USCC國際能源安全風險指標、CASES外部成本及線上問卷調查進行能源安全、環境衝擊及社會風險評估。環境衝擊與社會風險評估亦為本研究之創

表1 國內未來年(事前)能源風險評估相關研究比較(本研究整理)

作者	Chuang and Ma*	陳忠舜等**	馮君強***	本研究
年度	2013	2014	2015	2018
風險評估面向	能源依存 能源脆弱 能源可負擔 能源可接受	能源安全	經濟衝擊	能源安全 環境衝擊 社會風險
評估方法論	多面向能源安全指標	USCC指標 MARKAL模型	Logit模型 Probit模型 CGE模型	USCC指標 CASES外部成本 問卷調查 TIMES/GEMEET模型
可評估時程	2030年	2025年	2030年	2050年

\* : M. C. Chuang & H. W. Ma, 2013. An assessment of Taiwan's energy policy using multi-dimensional energy security indicators, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 17, pp. 301-311.

\*\* : 陳中舜、蔡翼澤、韓佳佑與葛復光，2014。從能源安全風險指標看我國重大能源政策與影響，經濟前瞻，第155期，第101-106頁。

\*\*\* : 馮君強，2015。臺灣能源安全之動態評估：系統建立與應用，中央大學產業經濟研究所，博士論文，臺灣桃園。

新與特色。

### 3.1 USCC國際能源安全風險指標

USCC國際版能源安全風險指標涵蓋地理政治、經濟、環境、可靠性等四大面向，分為八大構面，共包含29個副指標，如圖3所示。該套指標涉及層面廣泛，且評估方法係以透過專家討論後，給予各指標權重值，採用綜合加權指數方式計算能源安全得分，指標考量層面與計算方法相對較具客觀性。

USCC雖然在報告中皆有對所使用的副指標進行定義，但並無提供各指標明確的指標計算式，本研究為重建USCC國際版能源安全風險指標計算公式，特與負責單位進行兩年的技術交流，該單位則提供各項副指標的詳細計算式，並協助本研究確認與驗證計算結果，促成本研究可完成USCC國際版能源安全風險指標重建及進行參數本土化。根據美國商會指標的定義，各項副指標值可直接使用各種現有國家能源經濟相關數據呈現或透過定義的公式進行計算，USCC國際版能源安全風險指標過去多用於分析歷史年各國能源安全情勢，歷史年資料取得困難度相對較低。但若要用於計算未來年能源情境安全評分時，礙於某些副指標計算

缺乏未來年數據，例如：能源消費量、電力配比、能源支出等，但本研究可借助能源工程或經濟模型計算未來年所需資料，進而計算指標的能源安全評分。模型根據指標所需之參數單位輸出運算結果，例如：指標中諸多能源消費量皆使用百萬英熱單位(MBtu)，模型會將各種能源進口量或消費量之單位轉換為指標所需單位。原則上，用於指標計算的模型輸出結果皆與指標需求是一致的，若無法透過模型計算可得知數據，本研究沿用USCC國際能源安全風險指標歷史年數據、我國現有推估資料(例如：人口數)或本研究運用計量模型進行推估(例如：原油價格)。相關參數來源及單位彙整如附表1。

#### 3.1.1 全球燃料構面

全球燃料構面包含全球石油存量、全球石油產量、全球天然氣存量、全球天然氣產量、全球煤炭存量、全球煤炭產量等。六項副指標計算說明如式(1)~(6)：

$$IND\_GLO\_OIL\_RES_i = GLO\_OIL\_RES_i \quad (1)$$

$$IND\_GLO\_OIL\_PRO_i = GLO\_OIL\_PRO_i \quad (2)$$

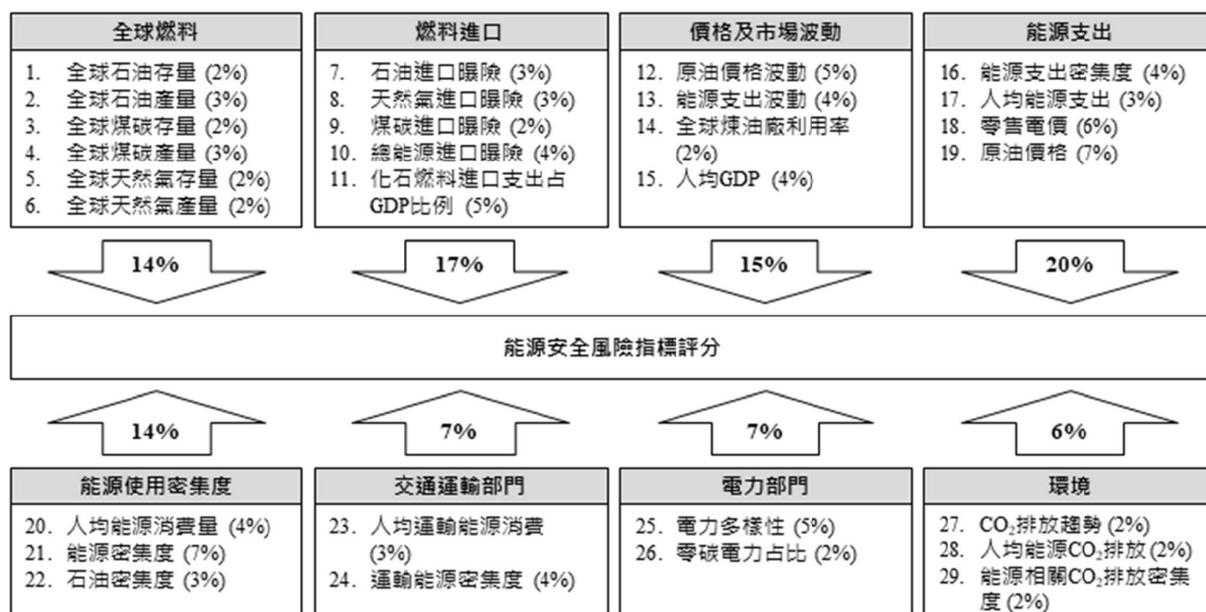


圖3 USCC國際版能源安全風險指標項目及權重(本研究繪製)

$$IND\_GLO\_NGA\_RES_t = GLO\_NGA\_RES_t \quad (3)$$

$$IND\_GLO\_NGA\_PRO_t = GLO\_NGA\_PRO_t \quad (4)$$

$$IND\_GLO\_COA\_RES_t = GLO\_COA\_RES_t \quad (5)$$

$$IND\_GLO\_COA\_PRO_t = GLO\_COA\_PRO_t \quad (6)$$

其中， $IND\_GLO\_OIL\_RES_t$  為  $t$  年全球石油存量副指標； $IND\_GLO\_OIL\_PRO_t$  為  $t$  年全球石油產量副指標； $IND\_GLO\_NGA\_RES_t$  為  $t$  年全球天然氣存量副指標； $IND\_GLO\_NGA\_PRO_t$  為  $t$  年全球天然氣產量副指標； $IND\_GLO\_COA\_RES_t$  為  $t$  年全球煤炭存量副指標； $IND\_GLO\_COA\_PRO_t$  為  $t$  年全球煤炭產量副指標； $GLO\_OIL\_RES_t$  為  $t$  年全球石油存量； $GLO\_OIL\_PRO_t$  為  $t$  年全球石油產量； $GLO\_NGA\_RES_t$  為  $t$  年全球天然氣存量； $GLO\_NGA\_PRO_t$  為  $t$  年全球天然氣產量； $GLO\_COA\_RES_t$  為  $t$  年全球煤炭存量； $GLO\_COA\_PRO_t$  為  $t$  年全球煤炭產量。

### 3.1.2 燃料進口構面

燃料進口構面包含5項副指標，其中，石油、天然氣及煤炭進口曝險副指標值由燃料進口多樣性指標、進口國的自由度及燃料進口占國內總供應之比例進行計算，如式(7)、(8)及(9)所示：

$$IND\_OIL\_IMP\_EXPO_t = \frac{OIL\_FW_t * \sqrt{OIL\_HHI_t} * OIL\_NI_t}{OIL\_FW_{2015} * \sqrt{OIL\_HHI_{2015}} * OIL\_NI_{2015}} * BYS_{2015} \quad (7)$$

$$IND\_LNG\_IMP\_EXPO_t = \frac{LNG\_FW_t * \sqrt{LNG\_HHI_t} * LNG\_NI_t}{LNG\_FW_{2015} * \sqrt{LNG\_HHI_{2015}} * LNG\_NI_{2015}} * BYS_{2015} \quad (8)$$

$$IND\_COA\_IMP\_EXPO_t = \frac{COA\_FW_t * \sqrt{COA\_HHI_t} * COA\_NI_t}{COA\_FW_{2015} * \sqrt{COA\_HHI_{2015}} * COA\_NI_{2015}} * BYS_{2015} \quad (9)$$

其中， $IND\_OIL\_IMP\_EXPO_t$  為  $t$  年石油進口曝險副指標； $IND\_LNG\_IMP\_EXPO_t$  為  $t$  年天然氣進口曝險副指標； $IND\_COA\_IMP\_EXPO_t$  為  $t$  年煤炭進口曝險副指標； $OIL\_FW_t$  為  $t$  年石油進口國自由度加權(如式10)； $LNG\_FW_t$  為  $t$  年天然氣進口國自由度加權(如式11)； $COA\_FW_t$  為  $t$  年煤炭進口國自由度加權(如式12)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)； $OIL\_HHI_t$  為  $t$  年石油進口多樣性指數(如式13)； $LNG\_HHI_t$  為  $t$  年天然氣進口多樣性指數(如式14)； $COA\_HHI_t$  為  $t$  年煤炭進口多樣性指數(如式15)； $OIL\_NI_t$  為  $t$  年石油進口占供應比例； $LNG\_NI_t$  為  $t$  年天然氣進口占供應比例； $COA\_NI_t$  為  $t$  年煤炭進口占供應比例。

$$OIL\_FW_t = \left( \frac{\sum_{i=1}^N Q\_OIL_i * FDM_i}{Q\_OIL_{total}} \right)^2 \quad (10)$$

$$LNG\_FW_t = \left( \frac{\sum_{i=1}^N Q\_LNG_i * FDM_i}{Q\_LNG_{total}} \right)^2 \quad (11)$$

$$COA\_FW_t = \left( \frac{\sum_{i=1}^N Q\_COA_i * FDM_i}{Q\_COA_{total}} \right)^2 \quad (12)$$

$$OIL\_HHI_t = \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q\_OIL_i}{Q\_OIL_{total}} \right)^2 * 10000 \quad (13)$$

$$LNG\_HHI_t = \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q\_LNG_i}{Q\_LNG_{total}} \right)^2 * 10000 \quad (14)$$

$$COA\_HHI_t = \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q\_COA_i}{Q\_COA_{total}} \right)^2 * 10000 \quad (15)$$

其中， $Q\_OIL_i$  為從  $i$  國進口之石油量(百萬英熱單位, MBtu)； $Q\_OIL_{total}$  為我國進口之石油總量(MBtu)； $FDM_i$  為  $i$  進口國的自由度； $N$  為進口國數； $Q\_LNG_i$  為從  $i$  國進口之天然氣量(MBtu)； $Q\_LNG_{total}$  為我國進口之天然氣總量(MBtu)； $Q\_COA_i$  為從  $i$  國進口之煤炭量(MBtu)； $Q\_COA_{total}$  為我國進口之煤炭總量(MBtu)。

總能源進口曝險副指標由初級能源淨進口

量除初級能源總消費量得之，如式(16)所示。

$$\begin{aligned} IND\_TOT\_IMP\_EXPO_t &= \frac{PRI\_ERG\_NET\_IMP_t / PRI\_ERG\_CON_t}{PRI\_ERG\_NET\_IMP_{2015} / PRI\_ERG\_CON_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (16)$$

其中， $IND\_TOT\_IMP\_EXPO_t$  為  $t$  年總能源進口曝險副指標； $PRI\_ERG\_NET\_IMP_t$  為  $t$  年初級能源總進口量(MBtu)； $PRI\_ERG\_CON_t$  為  $t$  年初級能源總消費量(MBtu)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

每單位 GDP 之化石燃料進口支出副指標由化石能源進口總支出除以 GDP 進行計算，如式(17)所示。

$$\begin{aligned} IND\_FOS\_IMP\_EXP_t &= \frac{FOS\_IMP\_EXP_t / GDP_t}{FOS\_IMP\_EXP_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (17)$$

其中， $IND\_FOS\_IMP\_EXP_t$  為  $t$  年單位 GDP 化石燃料進口支出副指標； $FOS\_IMP\_EXP_t$  為  $t$  年化石燃料進口支出(百萬美元)； $GDP_t$  為  $t$  年之 GDP (百萬美元)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

### 3.1.3 能源支出構面

能源支出構面包含能源支出密集度、人均能源支出、零售電價、原油價格等四項副指標。能源支出密集度副指標為當年能源支出除以當年 GDP 之值，評分計算說明如式(18)所示。

$$\begin{aligned} IND\_ERG\_EXP\_DEN_t &= \frac{ERG\_EXP_t / GDP_t}{ERG\_EXP_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $IND\_ERG\_EXP\_DEN_t$  為  $t$  年能源支出密集度副指標； $ERG\_EXP_t$  為  $t$  年能源支出(百萬美元)； $GDP_t$  為  $t$  年之 GDP (百萬美元)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

人均能源支出副指標為當年能源支出除以當年人口數之值，如式(19)所示。

$$\begin{aligned} IND\_ERG\_EXP\_CPA_t &= \frac{ERG\_EXP_t / POP_t}{ERG\_EXP_{2015} / POP_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (19)$$

其中， $IND\_ERG\_EXP\_CPA_t$  為  $t$  年人均能源支出副指標； $ERG\_EXP_t$  為  $t$  年能源支出(百萬美元)； $POP_t$  為  $t$  年之人口數(百萬人)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

零售電價副指標則是直接由當年之電價當作該副指標之評分，如式(20)所示。

$$\begin{aligned} IND\_POW\_PRI_t &= \frac{POW\_PRI_t}{POW\_PRI_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (20)$$

其中， $IND\_POW\_PRI_t$  為  $t$  年零售電價副指標； $POW\_PRI_t$  為  $t$  年之平均電價(美元/度)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。受限模型計算結果，本研究將以平均發電成本(美元/度)代替平均電價。

原油價格副指標直接由當年之原油價格當作副指標評分，如(21)所示。

$$\begin{aligned} IND\_OIL\_PRI_t &= \frac{OIL\_PRI_t}{OIL\_PRI_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (21)$$

其中， $IND\_OIL\_PRI_t$  為  $t$  年原油價格副指標； $OIL\_PRI_t$  為  $t$  年之原油價格(美元/桶)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

### 3.1.4 價格與市場波動構面

價格與市場波動構面包含原油價格波動、能源支出波動、全球石油提煉利用、人均 GDP 等四項副指標。原油價格波動副指標由前三年原油價格變動之平均值進行計算，如式(22)及(23)所示。

$$\begin{aligned} IND\_OIL\_PRI\_FLU_t &= \frac{OIL\_PRI\_VAR_t}{OIL\_PRI\_VAR_{2015}} \times BYS_{2015} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} OIL\_PRI\_VAR_t &= (|OIL\_PRI_t - OIL\_PRI_{t-1}| \\ &+ |OIL\_PRI_{t-1} - OIL\_PRI_{t-2}| \\ &+ |OIL\_PRI_{t-2} - OIL\_PRI_{t-3}|) / 3 \end{aligned} \quad (23)$$

其中， $IND\_OIL\_PRI\_FLU_t$  為  $t$  年原油價格波動副指標； $OIL\_PRI\_VAR_t$  為  $t$  年的原油價格的平均變動(美元/桶)； $OIL\_PRI_t$  為  $t$  年的原油價格(美元/桶)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)。

能源支出波動副指標為前三年能源進口支出之變動除以當年GDP之值，如式(24)及(25)所示。

$$IND\_ERG\_PRI\_FLU_t = \frac{ERG\_PRI\_VAR_t / GDP_t}{ERG\_PRI\_VAR_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (24)$$

$$ERG\_PRI\_VAR_t = (|ERG\_IMP\_EXP_t - ERG\_IMP\_EXP_{t-1}| + |ERG\_IMP\_EXP_{t-1} - ERG\_IMP\_EXP_{t-2}| + |ERG\_IMP\_EXP_{t-2} - ERG\_IMP\_EXP_{t-3}|) / 3 \quad (25)$$

其中， $IND\_ERG\_PRI\_FLU_t$  為  $t$  年能源支出波動副指標； $ERG\_PRI\_VAR_t$  為  $t$  年的能源價格平均變動(百萬美元)； $ERG\_IMP\_EXP_t$  為  $t$  年的能源進口支出(百萬美元)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)。

全球石油提煉利用副指標則以當年全球石油提煉利用率當作該指標評分，如式(26)所示。

$$IND\_GLO\_OIL\_REF_t = GLO\_OIL\_REF_t \quad (26)$$

其中， $IND\_GLO\_OIL\_REF_t$  為  $t$  年全球石油提煉利用副指標； $GLO\_OIL\_REF_t$  為  $t$  年全球石油提煉利用率。

人均GDP副指標則以當年之GDP除以人口數進行計算，如式(27)所示。

$$IND\_GDP\_CPA_t = \frac{GDP_t / POP_t}{GDP_{2015} / POP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (27)$$

其中， $IND\_GDP\_CPA_t$  為  $t$  年人均GDP副指標； $GDP_t$  為  $t$  年之GDP(百萬美元)； $POP_t$  為  $t$  年之人口數(百萬人)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)。

### 3.1.5 價格與市場波動構面

能源使用密集度構面包含人均能源消費、能源密集度、石油密集度等三項副指標。人均能源消費副指標為當年最終能源消費除以人口數，如式(28)所示。

$$IND\_ERG\_CON\_CPA_t = \frac{END\_ERG\_CON_t / POP_t}{END\_ERG\_CON_{2015} / POP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (28)$$

其中， $IND\_ERG\_CON\_CPA_t$  為  $t$  年人均能源消費副指標； $END\_ERG\_CON_t$  為  $t$  年之最終能源消費量(MBtu)； $POP_t$  為  $t$  年之人口數(百萬人)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)。

能源密集度副指標為當年初級能源消費量除以GDP，如式(29)所示。

$$IND\_ERG\_DEN_t = \frac{PRI\_ERG\_CON_t / GDP_t}{PRI\_ERG\_CON_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (29)$$

其中， $IND\_ERG\_DEN_t$  為  $t$  年能源密集度副指標； $PRI\_ERG\_CON_t$  為  $t$  年初級能源消費量(MBtu)； $GDP_t$  為  $t$  年之GDP(百萬美元)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)。

石油密集度副指標為當年石油消費量除以GDP，如式(30)所示。

$$IND\_OIL\_DEN_t = \frac{OIL\_CON_t / GDP_t}{OIL\_CON_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (30)$$

其中， $IND\_OIL\_DEN_t$  為  $t$  年石油密集度副指標； $OIL\_CON_t$  為  $t$  年石油消費量(MBtu)； $GDP_t$  為  $t$  年GDP(百萬美元)； $BYS_{2015}$  為2015年基準分數(本研究定義為100分)。

### 3.1.6 電力部門構面

電力部門構面包含電力多樣性及零碳發電佔比兩項副指標，電力多樣性副指標為裝置容量與發電量兩多樣性指標的平均值，如式

(31)、式(32)及式(33)所示。

$$IND\_POW\_HHI_t = \frac{(CAP\_HHI_t + GEN\_HHI_t) / 2}{(CAP\_HHI_{2015} + GEN\_HHI_{2015}) / 2} \times BYS_{2015} \quad (31)$$

$$CAP\_HHI_t = \sum_{j=1}^k \left( \frac{CAP_j \times CF_j}{CAP_{total}} \right)^2 \times 10,000 \quad (32)$$

$$GEN\_HHI_t = \sum_{j=1}^k \left( \frac{GEN_j}{GEN_{total}} \right)^2 \times 10,000 \quad (33)$$

其中， $IND\_POW\_HHI_t$  為  $t$  年電力供應多樣性副指標； $CAP\_HHI_t$  為  $t$  年的發電裝置容量多樣性指標； $GEN\_HHI_t$  為  $t$  年的發電量多樣性指標； $CAP_j$  為  $t$  年發電機組  $j$  裝置量(百萬瓦)； $CF_j$  為  $t$  年發電機組  $j$  容量因數； $CAP_{total}$  為  $t$  年發電機組總裝置容量(百萬瓦)； $GEN_j$  為  $t$  年發電裝置  $j$  發電量(百萬度)； $GEN_{total}$  為  $t$  年總發電量(百萬度)； $j$  為發電技術； $k$  為發電技術數量； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

零碳電力占比副指標由零碳發電量(核能發電、慣常水力發電、再生能源發電等)除以整體發電量進行計算，但零碳電力占比越高，代表其能源自主越高，相對能源安全表現越好，因此該指標評分計算應為零碳電力占比的倒數，如式(34)所示。

$$IND\_ZERO\_CARBON\_GEN_t = \frac{1}{\frac{\sum_{j \in ZC} GEN_{jt} / \sum_{j=1}^k GEN_{jt}}{\sum_{j \in ZC} GEN_{j2015} / \sum_{j=1}^k GEN_{j2015}}} \times BYS_{2015} \quad (34)$$

其中， $IND\_ZERO\_CARBON\_GEN_t$  為  $t$  年零碳發電佔比副指標； $GEN_{jt}$  為  $t$  年的發電裝置  $j$  之發電量(百萬度)； $ZC$  為零碳發電技術組合； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

### 3.1.7 運輸部門構面

運輸部門構面包含人均運輸能源及運輸能源密集度兩項副指標。人均運輸能源消費副指

標由運輸部門能源使用量除以總人口數計算，如式(35)所示。

$$IND\_TRAN\_ERG\_CON\_CPA_t = \frac{TRAN\_ERG\_CON_t / POP_t}{TRAN\_ERG\_CON_{2015} / POP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (35)$$

其中， $IND\_TRAN\_ERG\_CON\_CPA_t$  為  $t$  年人均運輸能源副指標； $TRAN\_ERG\_CON_t$  為  $t$  年的能源消費量(MBtu)； $POP_t$  為  $t$  年之人口數(百萬人)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

運輸能源密集度副指標則是由當年運輸能源消費量除以當年 GDP 進行計算，如式(36)所示。

$$IND\_TRAN\_ERG\_DEN_t = \frac{TRAN\_ERG\_CON_t / GDP_t}{TRAN\_ERG\_CON_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (36)$$

其中， $IND\_TRAN\_ERG\_DEN_t$  為  $t$  年運輸能源密集度副指標； $TRAN\_ERG\_CON_t$  為  $t$  年的運輸能源消費量(MBtu)； $GDP_t$  為  $t$  年之 GDP(百萬美元)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

### 3.1.8 環境構面

環境項目包含  $CO_2$  排放趨勢、人均  $CO_2$  排放量、 $CO_2$  排放密集度等三項副指標。 $CO_2$  排放趨勢副指標直接由當年  $CO_2$  排放量表示，如式(37)所示。

$$IND\_CO_2\_TREND_t = \frac{CO_2\_EMI_t}{CO_2\_EMI_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (37)$$

其中， $IND\_CO_2\_TREND_t$  為  $t$  年  $CO_2$  排放趨勢副指標； $CO_2\_EMI_t$  為  $t$  年的能源相關  $CO_2$  排放量(百萬公噸)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

人均  $CO_2$  排放量副指標由當年  $CO_2$  排放量除以當年人口數進行計算，如式(38)所示。

$$\begin{aligned} IND\_CO2\_EMI\_CPA_t & \\ &= \frac{CO2\_EMI_t / POP_t}{CO2\_EMI_{2015} / POP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (38) \end{aligned}$$

其中， $IND\_CO2\_EMI\_CPA_t$  為  $t$  年人均  $CO_2$  排放量副指標； $CO2\_EMI_t$  為  $t$  年的能源相關  $CO_2$  排放量(百萬公噸)； $POP_t$  為  $t$  年人口數(百萬人)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

$CO_2$  排放密集度副指標由當年  $CO_2$  排放量除以當年 GDP 進行計算，如式(39)所示。

$$\begin{aligned} IND\_CO2\_EMI\_DEN_t & \\ &= \frac{CO2\_EMI_t / GDP_t}{CO2\_EMI_{2015} / GDP_{2015}} \times BYS_{2015} \quad (39) \end{aligned}$$

其中， $IND\_CO2\_EMI\_DEN_t$  為  $t$  年  $CO_2$  排放密集度副指標； $CO2\_EMI_t$  為  $t$  年的能源相關  $CO_2$  排放量(百萬公噸)； $GDP_t$  為  $t$  年之 GDP (百萬美元)； $BYS_{2015}$  為 2015 年基準分數(本研究定義為 100 分)。

USCC 指標總評分為各項副指標評分與指標權重(如圖 3)相乘後再進行加總，如式(40)所示。

$$ERG\_SAFE\_INDEX_t = \sum_{i=1}^{29} W\_IND(i)_t \times IND\_i_t \quad (40)$$

其中， $ERG\_SAFE\_INDEX_t$  為  $t$  年能源安全指標總評分； $W\_IND(i)_t$  為  $t$  年  $i$  指標權重(如圖 2)； $IND\_i_t$  為  $t$  年  $i$  指標評分(如式(1)~(39))。

### 3.1.9 指標計算限制與假設

USCC 國際能源安全風險指標主要設計用於計算歷史年各國之能源安全評分，若要用於計算未來年之能源風險評分時，某些副指標未來年所需資料無法取得，無法取得資料須進行合理的假設。各項假設說明如下：

全球燃料構面：儘管全球油煤氣存量與生產量對於高能源依存度的我國相當重要，但我國對於此六項國際能源變因並無實際控制與影響力，因此本研究暫以美國商會 2013 年針對六項指標的評分作為基準年(2015)及未來年評

分。其中，全球石油存量、全球石油產量、全球天然氣存量、全球天然氣產量、全球煤炭存量及全球煤炭產量之全期評分分別為 956、811、978、870、696 及 1,830 分(Institute for 21st Century Energy, 2016)。

燃料進口構面：石油、天然氣及煤炭進口曝險副指標由燃料進口多樣性指標、進口國的自由度及燃料進口占國內總供應之比例進行計算，計算三項副指標所需的未來年資料目前尚無法取得，例如：燃料進口來源國占比、進口國自由度等，本研究將先假設未來年石油、天然氣及煤炭從各來源國之比例與 2015 年實績值相同。我目前燃料進口合約主要以長約為主，假設短中期燃料進口來源比例變化不大，但計算中長期進口曝險值可能會產生偏誤，但此為資料取得上的限制。進口國自由度則採用自由之家(Freedom House) 2015 年各國家自由度評比資料，但自由之家並未對各國家未來年自由度進行預測，本研究先假設各進口國未來年國家自由度與 2015 年相同。最後，假設我國未來年石油、天然氣及煤炭 100% 皆倚靠進口。

價格與市場波動構面：用於計算原油價格波動副指標之原油價格平均變動，如式(23)所示。該項計算需用前 3 年之原油價格進行計算，配合 TIMES 模型未來目標年為 5 年一個區間，本研究原油價格未來年預測區間也為 5 年 1 期，數據無法套用式(23)進行計算，因此本研究將簡化式(23)成 5 年一期的原油價格變動，如式(41)所示。

$$OIL\_PRI\_VAR_t = |OIL\_PRI_t - OIL\_PRI_{t-5}| \quad (41)$$

能源支出波動副指標之能源價格平均變動同樣需使用前 3 年的能源進口支出進行計算，如式(25)所示。侷限於未來年能源進口支出也是 5 年 1 期，同樣簡化式(25)成為式(42)。

$$ERG\_PRI\_VAR_t = |ERG\_IMP\_EXP_t - ERG\_IMP\_EXP_{t-5}| \quad (42)$$

因暫無法獲得全球石油提煉利用未來年預

測資料，先暫以美國商會於2013年針該指標的評分1,149作為基準年(2015年)與未來年之評分(Institute for 21st Century Energy, 2016)。

### 3.2 歐盟永續能源系統成本評估 (CASES)

CASES運用歐盟執委會2005年委託德國能源研究所(Institute for Energy Research, IER)建置之ExternE-Externalities of Energy評估方法，針對各種能源技術分別進行2010、2020及2030年的外部成本分析。CASES共分析10大類33種能源技術之外部成本，此研究先盤查10大類能源技術之環境排放項目，包括：空氣污染、水污染、土壤污染、溫室氣體、輻射線等。再透過衝擊路徑法或規避成本法評估環境排放對人體健康、環境多樣性、農業生產、建築物損害、資源消耗及全球暖化之衝擊程度，再運用市場價格與願付成本法將各種能源技術的環境衝擊進行貨幣化成為外部成本(EC, 2015)。

#### 3.2.1 CASES外部成本

CASES為目前國際上建置最完整的電力外部成本資料，本研究將直接運用此數據計算我國未來年情境電力配比之電力外部成本，CASES各項外部成本說明如表2所示。本研究彙整CASES的14種發電技術外部成本資料，包括：燃煤、燃煤CCS、燃油、燃氣汽力機、燃氣複循環、核能、汽電共生(燃煤)、汽電共生(生質能)、抽蓄水力、慣常水力、太陽光電、陸域風力、離岸風力及化學儲能，作為我國未來情境電力配比的電力外部成計算依據。CASES尚未分析地熱與海洋能的外部成本，地熱與海洋能發展目前尚未成熟及大規模布建，難有其它可替代的數據可使用，若情境電力配比未來年有地熱與海洋能技術浮現，將暫不計算其電力外部成本。

#### 3.2.2 CASES外部成本資料應用假設

表2 發電技術單位外部成本

發電技術	外部成本(元/度)								
	2010年**	2015年***	2020年**	2025年****	2030年**	2035年*****	2040年*****	2045年*****	2050年*****
燃煤	1.4444	1.4816	1.5188	1.7131	1.9074	1.9074	1.9074	1.9074	1.9074
燃煤CCS	-	0.1752	0.3503	0.3922	0.4340	0.4340	0.4340	0.4340	0.4340
燃油	1.1042	1.2425	1.3807	1.5294	1.6781	1.6781	1.6781	1.6781	1.6781
燃氣(複)	0.6418	0.6559	0.6700	0.7716	0.8732	0.8732	0.8732	0.8732	0.8732
燃氣(汽)	0.9603	1.0076	1.0549	1.2081	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613
核能	0.0986	0.0817	0.0648	0.0587	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525
汽電(煤)	1.3255	1.3835	1.4414	1.6447	1.8481	1.8481	1.8481	1.8481	1.8481
汽電(生質)	0.6153	0.6539	0.6925	0.7622	0.8319	0.8319	0.8319	0.8319	0.8319
抽蓄水力	0.0289	0.0317	0.0344	0.0381	0.0419	0.0419	0.0419	0.0419	0.0419
慣常水力	0.0334	0.0364	0.0394	0.0439	0.0483	0.0483	0.0483	0.0483	0.0483
太陽光電	0.4091	0.3936	0.3781	0.4024	0.4266	0.4266	0.4266	0.4266	0.4266
陸域風力	0.0472	0.0401	0.0329	0.0337	0.0344	0.0344	0.0344	0.0344	0.0344
離岸風力	0.0432	0.0376	0.0320	0.0331	0.0342	0.0342	0.0342	0.0342	0.0342
化學儲能	0.4314	0.4431	0.4548	0.5108	0.5669	0.5669	0.5669	0.5669	0.5669

\*：年均匯率為46.07NTD/ 1EURO (2008年)；\*\*：CASES分析結果；\*\*\*：取2010與2020年平均值；\*\*\*\*：取2020與2030年平均值；\*\*\*\*\*：假設與2030年相同。

資料來源：EC, 2018, CASES, <http://www.feem-project.net/cases/index.php>。

我國雖已有本土化電力外部成本的研究成果(廖孟儀等, 2016), 但項目僅限於燃油、燃氣、燃煤等傳統火力發電技術, 用於評估整體電力配比的外部成本稍顯不足。CASES雖是歐盟提出的電力外部成本評估資料, 若假設每種發電技術在不同的區域對環境生態或人體健康的衝擊價值是相同的, 而外部性貨幣化主要是要將其指標化, 相同的量化單位較易進行比較, 而不在於它真正是否等於貨幣價值, 因此本研究運用CASES作為本研究環境衝擊指標有其正當性。唯此研究在2008年即完成, 當時尚未發生311福島核災, 就目前時空背景來看, CASES的核能外部成本可能會有低估的現象, 但本研究已將非核家園政策納入, 2025年前核能發電機組將逐年除役, 核能外部成本低估對中長期評估所造成的影響應不大。CASES只針對2010年、2020年及2030年的發電技術外部成本進行評估, 為符合本研究每5年一個區間的資料需求, 假設2015年的外部成本為2010年與2020年的平均值; 2025年的外部成本為2020年與2030年的平均值; 2030年後之每5年外部成本與2030年相同。

### 3.2.3 環境衝擊評估

本研究將以CASES外部成本資料進行我國未來情境電力配比之單位外部成本計算, 並將單位電力外部成本視為評估未來年情境電力對比對環境之衝擊指標, 單位外部成本越高則代表該情境對整體環境衝擊越大, 未來可能面臨較高的環境風險。計算如式(43)所示。

$$SCE\_EXTCOST_t = \sum_{i=1}^{14} ELE\_GEN_{it} \times ELE\_EXTCOST_{it} \quad (43)$$

其中,  $SCE\_EXTCOST_t$  為情境電力配比  $t$  年之電力外部成本(元/年);  $ELE\_GEN_{it}$  為  $t$  年  $i$  發電技術之年發電量(度/年);  $ELE\_EXTCOST_{it}$  為  $t$  年  $i$  發電技術之外部成本(元/度), 如表2所示。

本研究最後將情境電力配比之單位電力外部成本定義為環境衝擊指標值, 計算如式(44)

所示。

$$ENV\_DAM\_INDEX_t = \frac{SCE\_EXTCOST_t}{SCE\_TOT\_GEN_t} \quad (44)$$

其中,  $ENV\_DAM\_INDEX_t$  為情境電力配比  $t$  年之單位外部成本(元/度);  $SCE\_TOT\_GEN_t$  為情境電力配比  $t$  年之總發電量(度/年)。

## 3.3 社會意向調查

### 3.3.1 定義

本研究社會風險評估運用網路問卷調查受訪民眾對於情境電力配比之支持程度與電力願付電價, 假設受訪民眾對於各種情境電力配比的不支持程度越高則代表情境形成政策可能面臨的社會風險越高, 反之則越低。另考量電價為社會大眾關心的影響因子, 本研究將電力願付價格視為評估能源社會風險的重要變因, 電力願付價格高於情境實際電價者, 被認定為較支持此情境者, 低於實際電價者反之。綜合上述, 本研究定義情境的社會風險來源為受訪者不支持情境電力配比與願付電價低於情境實際電價之樣本數總合, 樣本數總和越高則情境形成政策後可能面臨的社會風險越大。

### 3.3.2 問卷設計

本研究以兩情境電力配比與願付電價變項設計問卷, 如表3與表4所示, 抽樣調查網路受訪者對於情境電力配比之支持程度與受訪者對情境之願付電價。為降低受訪者填答問卷調查的困難度, 問卷調查將只詢問受訪者對於情境中燃煤、燃氣、核能及再生能源配比的支持程度, 以及詢問受訪者對兩情境2020~2030年之電力配比變化的支持度與願付電價。

## 4. 能源發展情境

本研究運用TIMES能源系統與GEMEET能源經濟模型共同研擬之「基準情境」與「減碳情境」作為評估標的, 進行多元能源風險評估

表3 電價較便宜的電力市場發展情境(基準情境) (本研究設計)

<b>情境說明：</b> 此情境假設政府干預電力市場發展力度小，溫室氣體減量及空氣污染排放較不受到重視，為維持電價相對低廉，未來台電公司須持續以成本較低的發電技術進行電力供應。				
➤ 請問在電費較便宜的情境下，2020-2030年燃煤發電仍為我國主要發電來源，相對2015年，2030年燃煤發電配比將成長至4成，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 在電費較便宜的情境下，2020-2030年燃氣發電將逐步成為我國主要發電來源，相對2015年，2030年燃氣發電配比將成長至4成，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 在電費較便宜的情境下，相對2015年，2020-2030年核能發電配比將逐步歸零，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 在電費較便宜的情境下，2020-2030年再生能源發電配比只成長至5%，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 請問在電費較便宜的情境下，您每度電願意支付的電價為？				
_____ (實際電價：2.79元/度)				

表4 對環境較友善的電力市場發展情境(減碳情境) (本研究設計)

<b>情境說明：</b> 此情境假設溫室氣體減量較受重視，為維持相對較低的電力碳排放，未來台電公司需大量以低碳發電技術及再生能源進行電力供應，發電成本較高。				
➤ 請問在對環境較友善的情境下，相對2015年，2020-2030年燃煤發電將逐漸減少至2成以下，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 在對環境較友善的情境下，相對2015年，2020-2030年燃氣發電將逐步成為我國主要發電來源(近6成)，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 在對環境較友善的情境下，相對2015年，2020-2030年核能發電配比將逐步歸零，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 在對環境較友善的情境下，相對2015年，2020-2030年再生能源發電配比將逐步增加至2成以上，請問您的支持程度為？				
<input type="checkbox"/> 非常不支持	<input type="checkbox"/> 不支持	<input type="checkbox"/> 普通	<input type="checkbox"/> 支持	<input type="checkbox"/> 非常支持
➤ 請問在對環境較友善的情境下，您每度電願意支付的電價為？				
_____ (實際電價：3.25元/度)				

方法論之應用。兩情境說明如下：

### 基準情境

燃煤發電將逐年增加，比例將從2015年的32.31%上升至2050年的57.55%。燃氣發電比例先增後減，2030年前，燃氣發電增加為因應非核家園之核能發電缺口，2030年後，燃氣發電

因燃煤發電逐年增加而減少，至2050年，燃氣發電比例將維持約30%。2025年後將不再使用燃油發電。配合非核家園政策，2025年後將全面廢核。再生能源只微幅成長，至2050年，發電比例約5%不到。總結：基準情境因不考慮減碳，我國未來電力將大量使用化石燃料，至2050年，我國化石燃料(燃煤、燃氣及汽電共

生)發電比例將超過93%，如圖4所示。因此，基準情境碳排放量將由2015年的252百萬噸增加至2050年的317百萬噸，排放量增加26%。此情境代表政府在再生能源與減碳政策較無做為，放任市場以成本較低的電力配比滿足電力需求。

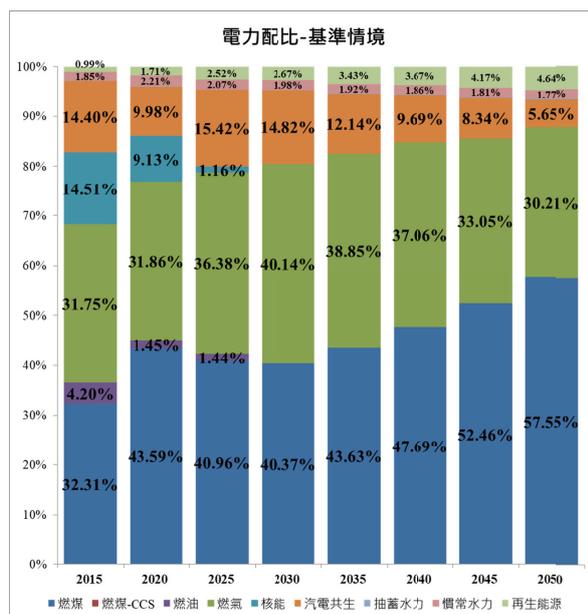
## 減碳情境

燃煤發電比例先增後減，從2025年開始，燃煤CCS發電將逐步取代傳統燃煤發電，2045年開始，燃煤CCS全面取代傳統燃煤發電。燃氣發電用量逐年擴大，但至2050年，部分燃氣發電則被大量導入的燃煤CCS電力所取代。因應減碳需求，未來將大量發展再生能源，至2050年，再生能源發電比例將超過35%。減碳情境發展至2050年時，主要電力供應將分別為燃煤CCS、燃氣發電及再生能源。減碳情境碳排放量將由2015年的252百萬噸減少至2050年的123百萬噸，排放量減少約51%。此情境代表政府積極推動再生能源與減碳政策，與目前政府政策較相近。

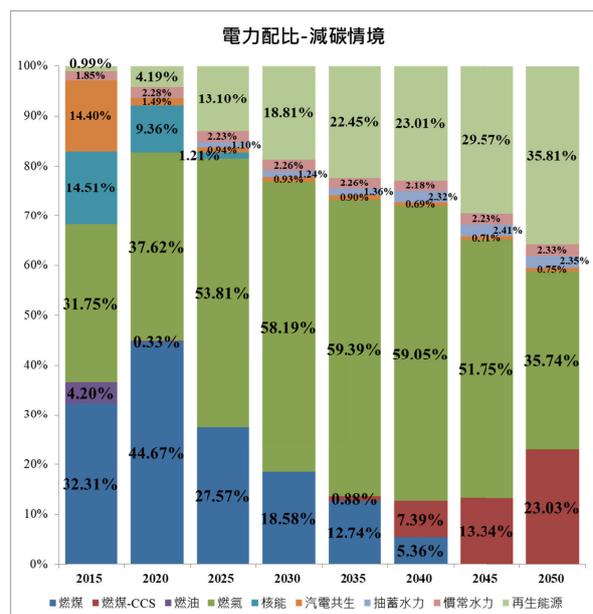
## 5. 結果與討論

### 5.1 能源安全評估

能源安全評估如圖5所示，兩情境能源安全風險皆會逐年升高，主要是因為大量依靠進口能源(燃煤或燃氣)所造成。基準情境至2050年的整體能源安全風險約是2015年的1.7倍(100.00→175.26)，主要因基準情境須大量使用燃煤發電，導致能源支出與價格與市場波動構面所造成的風險大幅升高。另外至2050年時，燃料進口構面所造成的風險約是2015年的1.6倍(17.00→27.20)；能源支出構面所造成的風險約是2015年的3倍(20.00→57.37)；價格與市場所造成的風險約是2015年的2倍(15.00→36.63)，以上可歸類為能源進口依存度高所造成的風險。另外，電力部門風險也逐年提高，主要是因為大量使用化石能源電力，導致電力供應來源多樣性不足，過度倚靠個別能源導致能源安全風險增加，至2050年，電力部門所造成的能源安全風險約是2015年的2倍(7.00→13.02)。基準情境未來年的化石燃料電力雖大幅度增加，



(a)基準情境



(b)減碳情境

圖4 能源發展情境未來年之電力配比(本研究繪製)

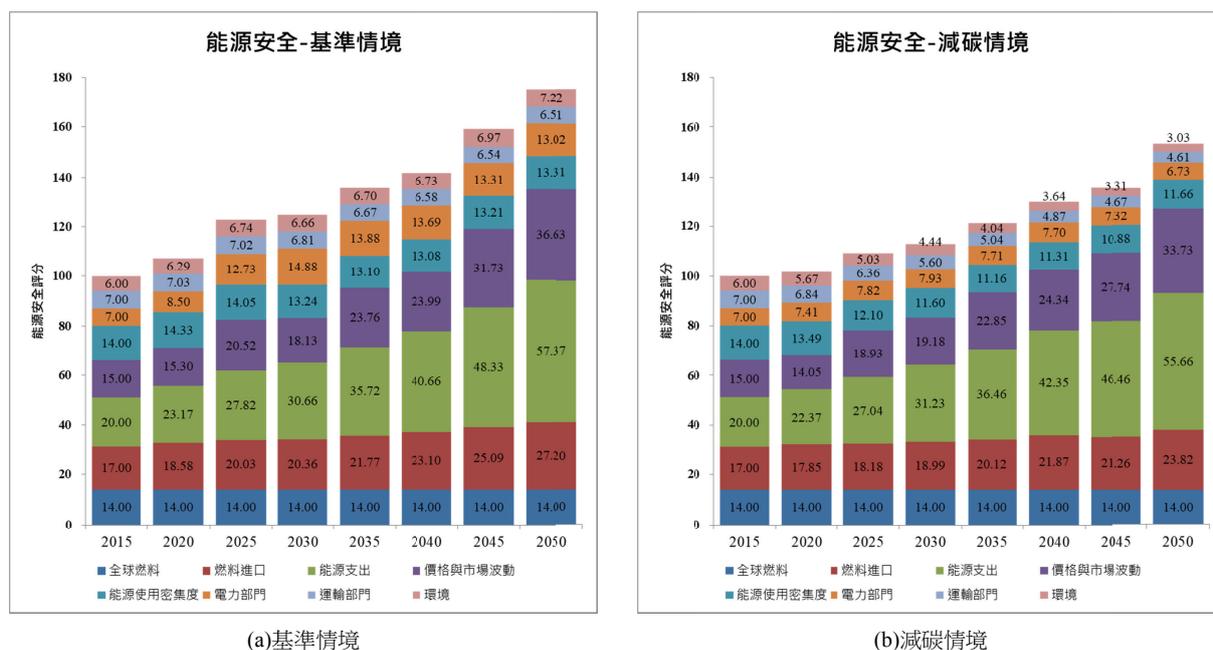


圖5 能源發展情境之能源安全評估(本研究繪製)

但環境構面所造成的風險卻只微幅升高，主要因為環境構面的計算權重只有6%，較難反應能源對環境的衝擊效果，因此本研究特以外部成本做為評估環境衝擊的指標。

減碳情境至2050年的整體能源安全風險約是2015年的1.5倍(100.00→153.25)，減碳情境因大量使用燃氣發電，同樣導致能源支出與價格與市場波動構面所造成的風險大幅升高。至2050年時，燃料進口所造成的風險約是2015年的1.4倍(17.00→23.82)；能源支出所造成的風險約是2015年的3倍不到(20.00→55.66)；價格與市場所造成的風險約是2015年的2倍(15.00→33.73)，以上仍可歸類為能源進口依存度高所造成的風險。有別於基準情境，減碳情境電力部門風險則呈現先增後減的趨勢(7.00→7.93→6.73)，減碳情境因逐年增加再生能源發電比例，提升電力供應來源的多樣性，有助降低電力部門所造成的能源安全風險。而發展再生能源可提升能源自主性，同時減少對進口化石能源的依存度，且有助降低環境構面所造成的風險(6.00→3.03)，有助於減緩我國整體能源安全風險升高。

綜合以上分析，影響基準與減碳情境未

來年能源安全風險的關鍵風險構面為能源支出與價格與市場波動，因大量使用燃煤或燃氣發電所致，而基準情境又因過度依靠燃煤發電而導致電力部門風險增加，加劇整體能源安全風險惡化。雖然兩情境未來能源安全風險都呈現升高的趨勢，但減碳情境升高幅度相對較小，因逐年提高再生能源發電比例，減少化石能源的依存度，同時也提升電力供應的多樣性。減碳情境的發展趨勢與我國政府目前政策趨勢相似，間接說明大量發展再生能源對於我國中長期能源安全是正面的。

## 5.2 環境衝擊評估

本研究運用歐盟永續能源系統成本評估(CASES)資料進行基準與減碳情境之外部成本分析，並將兩情境外部成本視為情境的環境衝擊程度，如圖6所示。結果顯示：基準情境未來年的外部成本將逐年升高，從2015年起，因非核家園使核能發電逐年減少，改以大量的燃煤及燃氣發電取代所致，導致基準情境外部成本從2015年的0.96元/度成長至2050年的1.98元/度，外部成本約成長1倍，代表環境衝擊也增加1倍。基準情境未來年對環境的衝擊主要來自燃

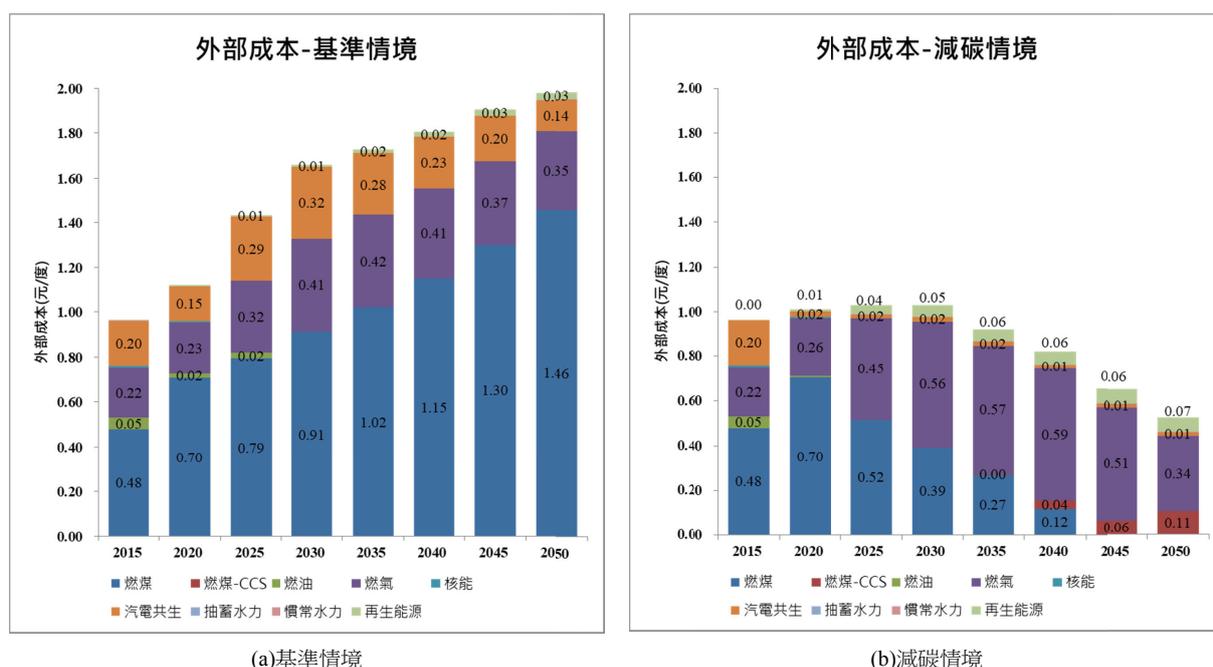


圖6 能源發展情境之環境衝擊評估(本研究繪製)

煤發電，至2050年外部成本貢獻約1.46元/度，約占當年整體外部成本的74%。其次是燃氣發電，至2050年外部成本貢獻約0.35元/度，約占當年整體外部成本的18%。

減碳情境外部成本呈現先微幅增後降的趨勢，從2015年的0.96元/度微幅增加至1.03元/度，之後再降至2050年的0.53元/度。因從2015年起，非核家園政策使核能發電量逐年減少，2020年前選擇先以燃煤發電填補核能所造成的電力缺口；2025年後改以燃氣發電作為主要電力供應，2040年因再生能源與燃煤CCS導入因而減少燃氣發電使用，以致減碳情境的燃煤與燃氣發電外部成本貢獻呈現先增後減，至2050年燃氣為主要的外部成本貢獻者(64%)，其次為燃煤CCS(20%)與再生能源(13%)。至2050年時，減碳情境對環境的衝擊程度約只有基準情境的1/4 (0.53/1.98)，且相對2015年而言，對環境的衝擊程度約減少一半(0.96→0.53)，可視為對環境相對較友善的電力配比發展情境。

### 5.3 社會風險評估

本次網路問卷委託思多葛市場研究股份有限公司進行調查，樣本來源為該公司經營之我

國大型網路樣本群體，本次調查是針對我國20歲以上之網路使用人口，有效問卷為1,234份，在95%信心水準下，抽樣誤差為正負2.83百分點。問卷樣本篩選條件為我國20歲以上網路使用人口，調查樣本符合臺灣網路人口結構。樣本之性別、年齡、教育程度及居住地分布如附表2所示。本研究以適合度檢定(卡方檢定)檢測樣本與母體差異性，進而推估樣本相對於母體之代表性，而母體資料取自行政院主計總處2017年全國統計資料。卡方檢定統計量計算方式如式(45)所示。

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (45)$$

其中， $O_i$ 為第*i*組樣本觀察次數； $E_i$ 為第*i*組期望次數(或理論次數)； $k$ 為組數； $i$ 為樣本數。

本研究以性別、年齡、教育程度及居住地四個統計變項進行卡方檢定統計量的計算，結果如表5所示。滿足顯著水準( $\alpha = 0.05$ )前提下，依據各變項的自由度( $k-1$ )，獲得各變項比較之卡方分配臨界值( $X^2_{k-1-m, \alpha}$ )，如表5所示。性別與居住地變項的卡方檢定統計量( $X^2$ )皆小於卡方分配臨界值( $X^2_{k-1-m, \alpha}$ )，推論該樣本與全國母體間差異性低，所以樣本對於母體仍具有代表性。

表5 樣本適合度檢定(卡方檢定)(本研究整理)

統計變項	卡方檢定統計量 ( $X^2$ )	自由度 ( $k-1$ )	顯著水準 ( $\alpha$ )	卡方分配臨界值 ( $X^2_{k-1, \alpha}$ )
性別	0.0003	1	0.05	3.8415
年齡	369.7198	4	0.05	9.4877
教育	976.0399	4	0.05	9.4877
居住地	19.3162	21	0.05	32.6706

問卷調查因考量詢問困難度，因此只針對2015~2030年之電力配比與願付電價變化趨勢進行意向調查，因此情境之社會風險評估將只探討2030年之評估值。本研究以情境電力配比之不支持度與電力願付價格低於情境實際電價之樣本數進行2030年電力配比情境之社會風險的量化分析，如圖7所示。基準情境的4項能源配比不支持度分析顯示皆高於減碳情境，尤其受訪者強烈不支持基準情境高達4成的燃煤占比，呼應我國近來空氣品質持續惡化，普遍認為燃煤發電是主要兇手之一。基準情境燃氣發電占比的不支持度也高於減碳情境，顯示為達減碳或改善空氣品質，反對燃氣發電增加的樣本數相對較少。不論基準情境或減碳情境，2030年核能發電占比將降為零，但仍有部分樣本反對完全沒有核能發電。基準情境的再生能

源不支持度略高於減碳情境，但兩情境不支持度相差不大，顯示民眾對於再生能源發展多寡相較無感。整體來說，基準情境的整體電力配比不支持度比例仍高於減碳情境的2倍。從情境願付電價來看，基準情境願付電價低於情境實際電價的樣本數低於減碳情境，顯示基準情境來自電價的風險略低於減碳情境。整體來說，因基準情境電力配比不支持度所造成的風險遠高於減碳情境，而基準電價風險只略低減碳情境，使得整體基準情境2030年可能面臨的社會風險約是減碳情境的1.5倍(1,957/1,322)。

#### 5.4 發電成本分析

本研究評估結果雖說減碳情境之綜合風險較參考情境低，但僅限於此三構面評估結果之詮釋。而天下沒白吃的午餐，減碳情境須付出

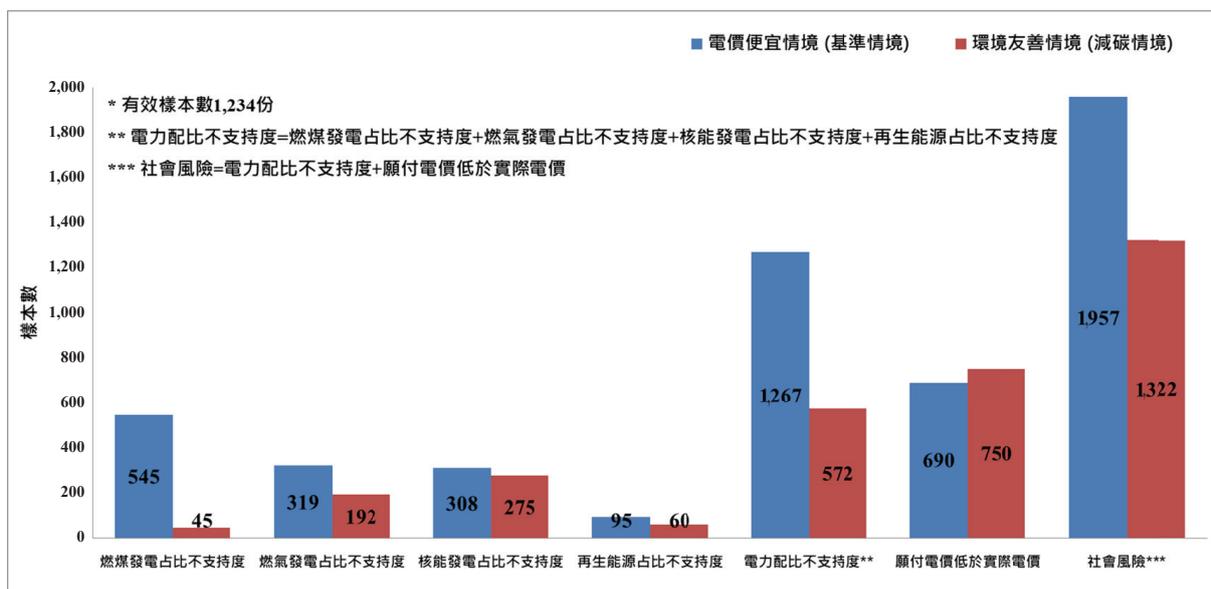


圖7 能源發展情境之社會風險評估(本研究繪製)

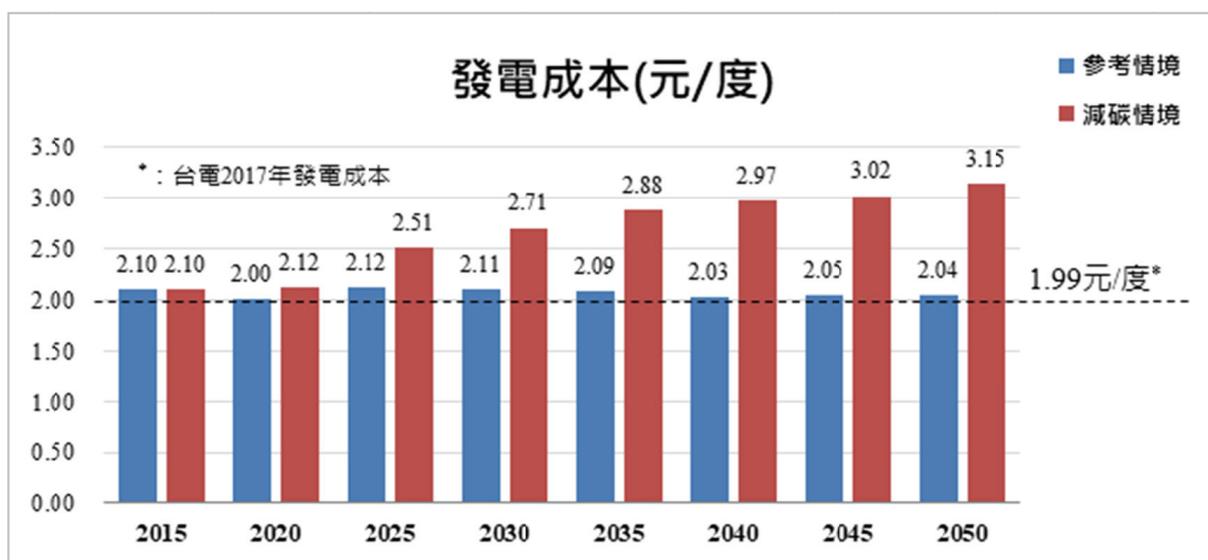


圖8 能源發展情境之未來年發電成本比較(本研究繪製)

比參考情境更高的發電成本，參考情境未來年之發電成本波動不大，約都介於2.00~2.11元/度之間，相對2017年的發電成本而言，最大漲幅約只有6%。但減碳情境未來年的發電成本逐年上升，至2025年相對2017年會上漲26%；至2050年相對2017年會上漲58%。發電成本波動未必全是減碳與大量發展再生能源而導致的，也須要考量燃料成本上漲、設備投資等因素。圖8比較兩情境之發電成本顯示：2025年減碳情境的發電成本是參考情境的1.18倍；到2050年減碳情境的發電成本相對參考情境將高達1.54倍。減碳情境增加的發電成本若反映到電價上，屆時可能會影響我國GDP成長或導致物價指數上升，對民生經濟將產生影響。本研究因無納入經濟衝擊評估，暫時無法針對情境的經濟風險進行評估，僅以電價上漲論述減碳情境並非完美無缺，達成情境仍須承受經濟可能造成損失的代價。

## 6. 結 論

本研究以能源安全、環境衝擊及社會風險進行多元能源風險評估方法論整合，並運用TIMES能源工程與GEMEET能源經濟模型共同研擬之我國未來能源發展基準與減碳情境作

為評估標的，進行未來年能源風險分析。基準情境因不考慮減碳，我國未來電力將大量使用化石燃料，至2050年，我國化石燃料(燃煤、燃氣及汽電共生)發電比例將超過93%。減碳情境至2050年時，主要電力供應將分別為燃煤CCS (23.03%)、燃氣發電(35.74%)及再生能源(35.81%)。各風險量化評估結果彙整如下：

**能源安全：**基準與減碳情境未來年能源安全風險的關鍵風險構面為能源支出及價格與市場波動，因使用大量的燃煤與燃氣發電所致，而基準情境又因過度依靠燃煤發電而導致電力部門風險增加，加劇整體能源安全風險惡化。雖然兩情境未來能源安全風險都呈現升高的趨勢，但減碳情境升高幅度相對較小，因減碳情境逐年提高再生能源發電比例，減少化石能源的依存度，同時也提升電力供應的多樣性，因此減緩整體能源安全風險惡化。

**環境衝擊：**減碳情境各年度對環境衝擊程度(外部成本)皆低於基準情境，可視為對環境相對較友善的電力配比發展情境。基準情境因非核家園使核能發電逐年減少，而改以大量的燃煤及燃氣發電取代，導致對環境的衝擊大幅提升。減碳情境2025年後改以燃氣發電作為主要電力供應，而2040年因再生能源與燃煤CCS導入使燃氣發電比例降低，因而使減碳情境的

環境衝擊風險逐年下降。

**社會風險：**基準情境電力配比不支持度所造成的風險遠高於減碳情境，但願付電價風險又只略低減碳情境，因此基準情境2030年可能面臨的社會風險仍高於減碳情境，基準情境風險值約為減碳情境的1.5倍。基準情境社會風險較高的主要因為燃煤占比過高，而問卷中有很大比例的受訪者不支持高燃煤發電占比，呼應我國近來空氣品質持續惡化，普遍多認為與使用燃煤發電的關係甚大。

整體來說，未來年減碳情境的各面向風險皆低於基準情境，主要因為擴大再生能源並減少燃煤的使用，而擴大再生能源使用與減碳是有助於未來長期可建立更安全、永續且社會可接受之能源發展路徑。減碳情境對於未來年中長期是低風險的策略，但該情境推動上仍有許多技術的風險是本研究無法評估的，例如：大量發展間歇性再生能源對於電力系統調度上的風險，該類技術風險的評估必須仰賴更精細的電力系統調度模型，且涵蓋的技術層面過於複雜，恐須是電力系統實際營運機構(例如：台電公司調度處)或是電力工程專業研究團隊方有能力進行。本研究所建置的評估方法主要針對未來年中長期的能源政策風險評估，只適用評估較大範疇的議題或面向，無法用於評估政策推動後所造成的技術或工程風險，此為評估工具運用上的限制。因此，本研究量化評估結果顯示：大量投入再生能源與減少燃煤發電確能提高我國未來年的能源自主，進而提升未來國家的能源安全，降低環境衝擊程度，問卷調查也顯示減碳情境的社會風險相對較低。但此結論可能與目前社會上諸多觀點相悖，主要差異在於本研究所謂的能源安全是長期且大面向的，但目前社會上對再生能源的疑慮可能是間歇性供應所造成的技術風險，此為本研究結論與目前社會上諸多觀點差異所在。但無所謂對與錯，只是對於風險評估切入點不同而已，且中長期的能源政策風險評估仍有其必要性。

## 參考文獻

- 林師模與馮君強，2010。臺灣能源安全評估，農業經濟叢刊，第15卷2期，第99-131頁。
- 黃釋偉與顏君聿，2012。我國能源安全風險管理，能源報導，第5-8頁。
- 陳中舜、蔡翼澤、韓佳佑與葛復光，2014。從能源安全風險指標看我國重大能源政策與影響，經濟前瞻，第155期，第101-106頁。
- 梁啟源、劉致峻、鄭睿合、呂易恂與郭博堯，2017。我國能源脆弱度分析與因應策略建議，臺灣能源期刊，第4卷第4期，第361-400頁。
- 廖孟儀、馬鴻文、李孟穎、洪明龍與李沛濠，2016。臺灣火力發電健康衝擊外部成本分析，臺灣能源期刊，第3卷第3期，第277-292頁。
- 胡瑋元、張耀仁、陳中舜與曾家宏，2016a。電力願付價格與能源的社會風險溝通，2016臺灣科技與社會研究學會年會，臺灣臺南。
- 胡瑋元、張耀仁與姜漢儀，2016b。低碳電力的社會意向與願付價格研究，2016能源經濟學術研討會，臺灣臺北。
- 張耀仁、蕭子訓、胡瑋元與張嘉諳，2017。非核家園與再生能源政策對我國電力結構之影響，臺灣能源期刊，第4卷第2期，第131-144頁。
- 黃郁青、陳治均與葛復光，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。
- 韓佳佑、陳治均與葛復光，2017。生質煤燃料替換對電力結構影響研究，臺灣環境與資源經濟學會年會，臺灣臺北。
- 馮君強，2015。臺灣能源安全之動態評估：系統建立與應用，中央大學產業經濟研究所，博士論文，臺灣桃園。
- Ang, B. W., W. L. Choong and T. S. Ng, 2015. A

- framework for evaluating Singapore's energy security, *Applied Energy*, vol. 148, pp. 314-325.
- Chuang, M. C. and H. W. Ma, 2013. An assessment of Taiwan's energy policy using multi-dimensional energy security indicators, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 301-311.
- EC (European Commission), 2015. *ExternE-Externalities of Energy (Methodology 2015 Update)*, Institute for Energy Research (IER), Germany.
- EC (European Commission), 2018. *Cost Assessment for Sustainable Energy System (CASES)*, Available: <http://www.feem-project.net/cases/index.php>.
- Institute for 21st Century Energy, 2016. *International Index of Energy Security Risk (2016 Edition)*, U.S. Chamber of Commerce (USCC), Washington, DC, USA.
- IEA (International Energy Agency), 2011. *The IEA Model of Short-term Energy Security*, International Energy Agency, Paris, France, Working Paper.
- IEA (International Energy Agency), 2017. *Energy Security-What Is Energy Security?*, Available: <https://www.iea.org/topics/energysecurity/subtopics/whatisenergysecurity/>.
- Jewell, Jessica, Aleh Cherp and Keywan Riahi, 2014. Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices, *Energy Policy*, vol. 65, pp. 743-760.
- Lin, J. X., C. C. Feng, S. M. Lin, F. K. Ko and Y. P. Chu, 2015. R&D, Technological Change and Rate of Feed-in Tariff, *The Empirical Economics Letters*, vol.14, no. 2, pp. 161-172.
- Lin, S. M., J. C. Feng and F. K. Ko, 2011. Assessing Taiwan's energy security under climate change, *Nat Hazards*, vol. 62, pp. 3-15.
- Loschel, Andreas, Ulf Moslener and Dirk T.G. Rubbelke, 2010. Indicators of energy security in industrialised countries, *Energy Policy*, vol. 38, pp. 1665-1671.
- Matsumoto, Ken'ichi and Hiroto Shiraki, 2018. Energy security performance in Japan under different socioeconomic and energy conditions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 391-401.
- WEC (World Energy Council), 2016. *2016 Energy Trilemma Index: Benchmarking the sustainability of national energy systems*, World Energy Council, London, UK.

附表1 USCC國際能源安全風險指標參數說明

參數項目	參數名稱	單位	參數來源	備註
全球石油存量	<i>GLO_OIL_RES</i>	分數	USCC	
全球石油產量	<i>GLO_OIL_PRO</i>	分數	USCC	
全球天然氣存量	<i>GLO_NGA_RES</i>	分數	USCC	
全球天然氣產量	<i>GLO_NGA_PRO</i>	分數	USCC	
全球煤炭存量	<i>GLO_COA_RES</i>	分數	USCC	
全球煤炭產量	<i>GLO_COA_PRO</i>	分數	USCC	
石油進口占供應比例	<i>OIL_Nit</i>	%	-	假設
天然氣進口占供應比例	<i>LNG_Nit</i>	%	-	假設
煤炭進口占供應比例	<i>COA_Nit</i>	%	-	假設
我國進口之石油總量	<i>Q_OILtotal</i>	MBtu	模型計算	-
我國進口之天然氣總量	<i>Q_LNGtotal</i>	MBtu	模型計算	-
我國進口之煤炭總量	<i>Q_COAtotal</i>	MBtu	模型計算	-
從i國進口之石油量	<i>Q_OILi</i>	MBtu	依能源統計手冊進口比例計算	-
從i國進口之天然氣量	<i>Q_LNGi</i>	MBtu	依能源統計手冊進口比例計算	-
從i國進口之煤炭量	<i>Q_COAi</i>	MBtu	依能源統計手冊進口比例計算	-
進口國的自由度	<i>FDMi</i>	-	自由之家(Freedom House)	-
初級能源總進口量	<i>PRI_ERG_NET_IMP</i>	MBtu	模型計算	-
初級能源總消費量	<i>PRI_ERG_CON</i>	MBtu	模型計算	-
化石燃料進口支出	<i>FOS_IMP_EXPT</i>	百萬美元	模型計算	-
GDP	<i>GDP</i>	百萬美元	模型計算	-
能源支出	<i>ERG_EXPT</i>	百萬美元	模型計算	-
人口數	<i>POPT</i>	百萬人	國發會推估資料	
平均電價	<i>POW_PRI</i>	美元/度	模型計算	以發電成本代替
原油價格	<i>OIL_PRI</i>	美元/桶	本研究運用計量模型推估	-
能源進口支出	<i>ERG_IMP_EXPT</i>	百萬美元	模型計算	-
全球石油提煉利用率	<i>GLO_OIL_REF</i>	%	USCC	-
最終能源消費量	<i>END_ERG_CON</i>	MBtu	模型計算	-
石油消費量	<i>OIL_CON</i>	MBtu	模型計算	-
發電機組裝置量	<i>CAPj</i>	百萬瓦	模型計算	-
發電裝置發電量	<i>GENj</i>	百萬度	模型計算	-
運輸能源消費量	<i>TRAN_ERG_CON</i>	MBtu	模型計算	-
能源相關CO <sub>2</sub> 排放量	<i>CO2_EMIT</i>	百萬公噸	模型計算	-

附表2 樣本基本資料表

性別	樣本(n = 1,234)		母體(N = 23,571,990)*	
	樣本數	百分比	母體數	百分比
男	613	49.7%	11,715,824	49.7%
女	621	50.3%	11,856,166	50.3%
年齡	樣本(n = 1,234)		母體(N = 19,121,282)**	
	樣本數	百分比	母體數	百分比
20-29歲	278	22.5%	3223754	16.9%
30-39歲	383	31.0%	3732974	19.5%
40-49歲	327	26.5%	3680233	19.2%
50-59歲	197	16.0%	3634503	19.0%
60歲以上	49	4.0%	4849818	25.4%
教育	樣本(n = 1,234)		母體(N = 20,231,709)**	
	樣本數	百分比	母體數	百分比
國中以下	13	1.1%	4850309	24.0%
高中(職)	155	12.6%	6257888	30.9%
專科	215	17.4%	2299017	11.4%
大學	601	48.7%	5402872	26.7%
碩(含)以上	250	20.3%	1421623	7.0%
居住地	樣本(n = 1,234)		母體(N = 23,571,990)*	
	樣本數	百分比	母體數	百分比
臺北市	157	12.7%	2,680,218	11.4%
基隆市	22	1.8%	371,119	1.6%
新北市	233	18.9%	3,986,382	16.9%
宜蘭縣	27	2.2%	456,068	1.9%
桃園市	121	9.8%	2,196,349	9.3%
新竹市	25	2.0%	442,315	1.9%
新竹縣	31	2.5%	552,877	2.3%
苗栗縣	23	1.9%	552,161	2.3%
臺中市	115	9.3%	2,792,164	11.8%
彰化縣	53	4.3%	1,280,528	5.4%
南投縣	22	1.8%	500,103	2.1%
嘉義市	14	1.1%	269,307	1.1%
嘉義縣	30	2.4%	510,018	2.2%
雲林縣	30	2.4%	689,098	2.9%
臺南市	100	8.1%	1,885,882	8.0%
高雄市	146	11.8%	2,775,935	11.8%
屏東縣	44	3.6%	828,654	3.5%
花蓮縣	17	1.4%	328,695	1.4%
臺東縣	11	0.9%	219,466	0.9%
澎湖縣	5	0.4%	104,086	0.4%
金門縣	7	0.6%	137,642	0.6%
連江縣	1	0.1%	12,923	0.1%

\*：中華民國統計資訊網，人口數及人口增加率(2017年資料)。

\*\*：中華民國統計資訊網，人口數按教育程度區分(2017年資料)。

# Application of an Integrated Multi-Energy Risk Assessment Methodology

Yao-Jen Chang<sup>1\*</sup> Kong-Liang Hunag<sup>2</sup> Chia-Yu Han<sup>1</sup> Chun-Chiang Feng<sup>1</sup>  
Hui-Chih Chai<sup>1</sup> Fu-Kuang Ko<sup>3</sup>

## ABSTRACT

Energy risk is an important issue facing the world today. It will affect not only national economics and industries but also security. This study employed international index of U.S. energy security risk, cost assessment for sustainable energy system of the EU and online questionnaire to establish a multi-energy risk assessment tool. This tool was used to evaluate national energy security, environmental damage and social risk for energy policies. Both BAU and decarbonization scenarios simulated by the INER-TIMES model with INER-GEMEET model were designated as research subject. The results show that both scenarios will raise energy security risk levels from 2015 to 2050. The risk levels of the decarbonization scenario are smaller than the BAU scenario. The decarbonization scenario employs a lot of low and zero carbon technologies, such as renewable energy, gas-fired and coal-fired with capture. It reduces dependence on coal-fired generation. For this reason, the decarbonization scenario will increase power supply diversity and reduces environmental damage in the future years. The BAU scenario will increase environmental damage from 2015 to 2050 because it still depends on large number of coal-fired generation. In 2030, social risk levels of the BAU scenario will be one and a half times as much as the decarbonization scenario because a large of proportion of respondents do not support coal-fired generation. Overall, the energy security risk, environmental damage and social risk for the decarbonization scenario will be lower than the BAU scenario from 2015 to 2050. For long-term planning, promoting renewable energy and deep decarbonization will be helpful to establish safe, environmentally sustainable and socially acceptable energy roadmap.

**Keywords:** energy risk, energy security risk, environmental damage, social risk, decarbonization

---

<sup>1</sup> Associate Engineer, Center of Energy Economics and Strategy Research, Institute of Nuclear Energy Research.

<sup>2</sup> Associate Technical Specialist, Center of Energy Economics and Strategy Research, INER.

<sup>3</sup> Researcher and Director, Center of Energy Economics and Strategy Research, INER.

\*Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400#2719, E-mail: kjonkjon@iner.gov.tw

Received Date: February 13, 2018

Revised Date: May 1, 2018

Accepted Date: May 11, 2018