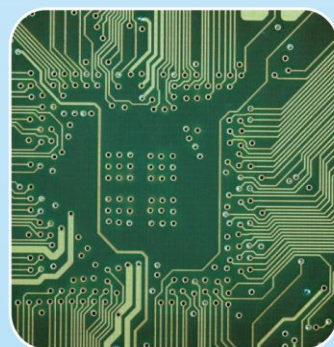


財團
法人

中技社

2017 台灣能源績效世界評比 與系統脆弱度

CTCI FOUNDATION



財團法人中技社(CTCI Foundation) 於 1959 年 10 月 12 日創設，以「引進科技新知，培育科技人才，協助國內外經濟建設及增進我國生產事業之生產能力為宗旨」。初期著力於石化廠之設計與監建，1979 年轉投資成立中鼎工程，承續工程業務；本社則回歸公益法人機制，朝向裨益產業發展之觸媒研究、污染防治與清潔生產、節能、及環保技術服務與專業諮詢。2006 年本社因應社會環境變遷的需求，在環境與能源業務方面轉型為智庫的型態，藉由專題研究、研討會、論壇、座談會等，以及發行相關推廣刊物與科技新知叢書，朝知識創新服務的里程碑邁進，建構資訊交流與政策研議的平台；協助公共政策之規劃研擬，間接促成產業之升級，達成環保節能與經濟繁榮兼籌並顧之目標。

本著創社初衷，為求對我們所處的環境能有更深的貢獻以及協助產業發展，對國內前瞻性與急迫性的能源、環境、產業、經濟、社會等不同面向的議題，邀集國內外專家進行研究探討。為了廣為周知，特將各議題研究成果發行專題報告，提供產官學研各界參考。

本專題報告係由國立中央大學梁啟源管理講座教授擔任召集人，由財團法人中技社能源技術發展中心與財團法人中華經濟研究院合組團隊進行研究，共同進行本報告之撰寫，並由本社發行。

發行人：潘文炎

作者：梁啟源、王鈺鎔、劉致峻、鄭睿合、呂易恂、郭博堯

主編：梁啟源、余騰耀

執行編輯：王鈺鎔、郭博堯、許湘琴、劉致峻、邱炳欽

發行者：財團法人中技社

地址 / 106 台北市敦化南路二段 97 號 8 樓

電話 / 886-2-2704-9805

傳真 / 886-2-2705-5044

網址 / www.ctci.org.tw

本社專題報告內容已同步發行於網站中，歡迎下載參考

ISBN：978-986-96057-2-4

目錄

前言.....	I
摘要.....	III
第一章 緒論.....	1
第二章 文獻回顧.....	5
一、 能源安全定義.....	5
二、 國外相關能源安全風險指標.....	6
三、 國內相關能源經濟指標.....	17
四、 小結.....	20
第三章 能源建構績效指標之方法論與實證結果.....	23
一、 能源建構績效指標之方法論.....	23
二、 能源建構績效指標之實證結果.....	28
第四章 台灣能源經濟脆弱度之方法論與實證結果.....	45
一、 台灣能源經濟脆弱度之方法論.....	45
二、 台灣能源經濟脆弱度之實證結果.....	54
第五章 結論與建議.....	75
參考文獻.....	79

前言

在全球能源市場的持續變動下，許多先進國家已紛紛發展出可考量能源安全、經濟發展與環境保護的綜合性指標系統，取代傳統僅以供給面為主的能源安全指標，以有效評估一國整體能源情勢的發展及其影響。然而相對上，台灣卻尚未見到一套可以有效評比能源使用對國家經濟成長及產業競爭、能源可取得性與多樣性以及環境永續發展等不同構面的績效表現之指標系統，使得主事者在檢視能源部門對於國家發展的貢獻程度時，常流於空談，也不利於與競爭對手國做出相對比較。

而近年來，國內將面臨既有核能電廠屆齡除役與核四廠封存、火力電廠空氣汙染物與二氧化碳排放增加、再生能源土地難尋與供電穩定度不足、能源儲發輸設施建置不易與國際能源價格劇烈波動等內外挑戰，能源供給、能源消費與能源系統的基礎設施等三大系統也都呈現日益脆弱的趨勢。而國內也缺乏一套全面且易懂的能源系統脆弱度指標，做為事先預警及因應、事後追蹤並檢討的參考，政府、產業與一般大眾對於能源情勢看法不一、政策走向莫衷一是，最終可能會造成能源系統受到衝擊，同時也對工商活動、經濟成長及民眾生活品質帶來衝擊。

爰此，為彌補前述的資訊缺口，本社自 105 年起，與財團法人中華經濟研究院合作，進行「能源建構績效指標」與「能源經濟脆弱度」兩套評估指標的研究。前者遵循世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF)的 Energy Architecture Performance Index (EAPI)之方法論，可呈現我國能源部門績效表現及其於國際間相對排名；後者則將世界能源理事會(World Energy Council, WEC)的能源脆弱度評估方法論，以我國國情進行調整，並可清楚呈現國內能源系統脆弱程度。本社並於今(2017)年 8 月 10 日召開「我國能源安全指標」研討會，由本社與中經院研究團隊、台經院、原委會核能研究所等國內重要能源政策智庫，分別發表研究成果；當天另以圓桌論壇方式，分析國內能源現況，並提出政策建言。此外，本社與中經院共同研究成果也在改寫後，分別發表於第 15 屆國際能源經濟學會歐洲年會(15th IAEE European Conference)及台灣能源期刊 106 年第 4 卷第 4 期。

本社特別感謝國立中央大學梁啟源管理講座教授擔任本研究之召集人，同時也非常感謝財團法人中華經濟研究院的研究團隊的投入與協助。未來本社仍將秉持公益智庫的腳色，繼續投身國家能源的重要議題，促成國家邁向永續發展的大道。

摘要

我國 1998 年與 2005 年兩次全國能源會議，除檢視我國既有的能源政策與能源結構發展方向，也強調能源政策的研訂須兼顧經濟發展、能源供應及環境保護之 3E 策略，因此建構能源經濟指標，得以呈現我國能源、環境和經濟等面向之績效表現，同時進行國際排名，瞭解我國在國際間之相對位置有其必要性。其次，依據 2009 年全國能源會議結論，能源不僅是社會經濟活動的基礎，更具國家安全的戰略重要性，各國視能源安全等同國家安全，故應提升能源安全議題位階，重點之一即在建立預警指標，以進行風險管理與應變機制。

故本報告參考世界經濟論壇 (World Economic Forum, WEF) 之能源建構績效指標架構 (Energy Architecture Performance Index, EAPI)，以呈現我國在能源、環境和經濟等三構面之績效表現，並進一步完成跨國比較，掌握我國過往於經濟發展、能源供應及環境保護等相關策略之推動成效。此外，本報告另參考世界能源理事會 (World Energy Council, 2010) 和 Frondel and Schimdt (2013) 之分析架構，以初級能源供應、基礎設施和最終能源消費等構面，並考量我國本土能源系統的特性進行修改，量化我國能源系統的脆弱程度，組成包括三大構面與十五項次指標，並經過標準化方式以 0-100 量化呈現，數值愈高表示相關風險愈高，脆弱度亦愈高。再者，考量能源系統本為一體，若是任何一個構面出現問題，就對整體能源系統帶來衝擊，故總能源脆弱度以取各構面脆弱度最大值來呈現，從而解析我國歷年能源脆弱度變化，並據以提出因應策略。

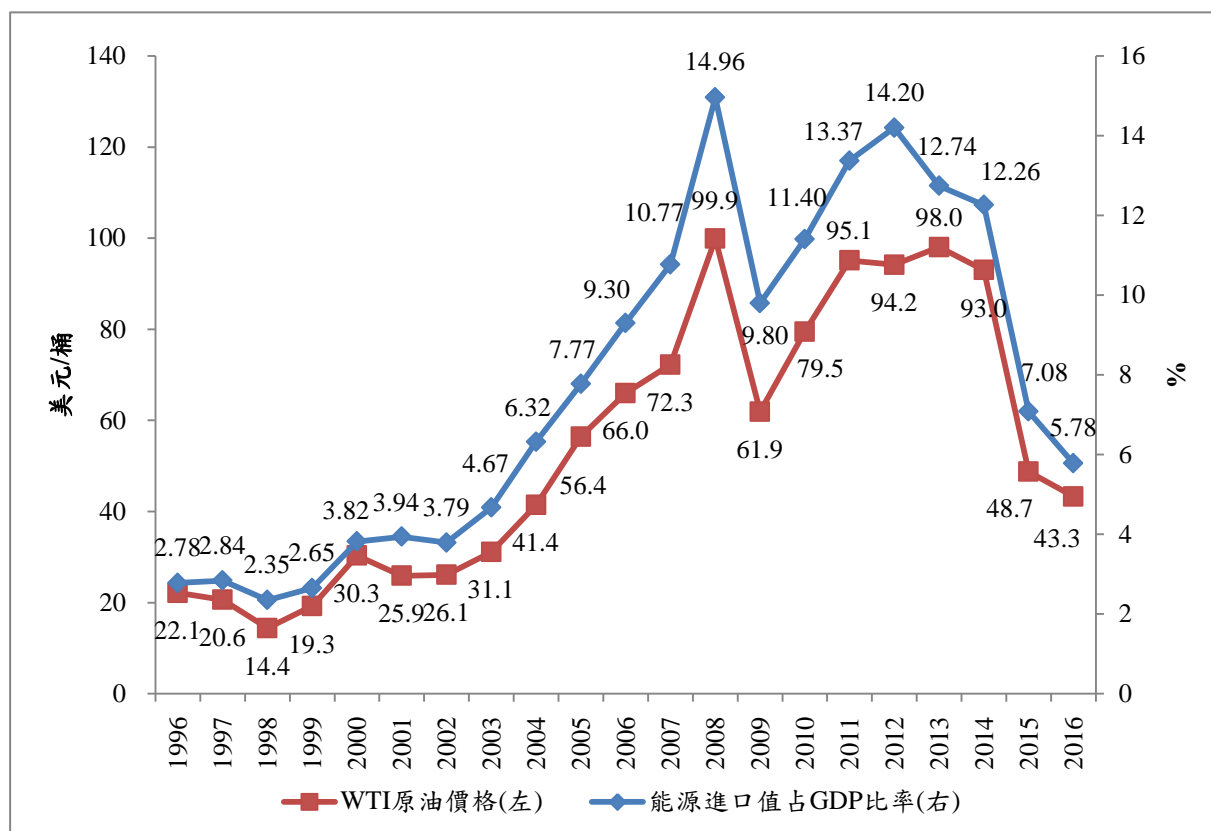
在能源建構績效指標方面，實證結果顯示 2017 年台灣總指標排名於 128 個國家中名列 62，相較 2016 年進步 1 名。以能源部門在經濟成長與發展面的表現來看，台灣在國際排名不差，排名為 47，主因在於較高的能源生產力與偏低的工業電價等，惟汽柴油的扭曲程度屬於後段班，顯示我國的油品稅率離最適稅率仍有一段差距，故維持合理油價調價機制有其必要性；再以能源部門在環境永續面的表現來說，台灣在 128 國中僅排名 110 名，主因在於無碳能源占比偏低加上空氣污染排放數值偏高，建議應提高低碳或無碳能源使用，並且加強空氣污染管制；至於能源部門在能源取得與安全方面的績效則取得了 46 名的表現，主因在於電氣化程度和供電品質較佳，然而應該注意的是，2017 年的排名相較 2016 年退步 7 名，如何穩健地增加自產能源比重，降低能源淨進口比重，是提高我國在此分項績效表現的政策重點。

就能源脆弱度部份，1990 年初至 2017 年第二季間，我國初級能源供應脆弱度受惠於進口來源的多元化，由 90.16 大幅降至 32.46；最終能源消費脆弱度則因國際能源價格劇烈波動，僅從 85.79 小幅降為 80.54，呈現偏高與震盪態勢；而基礎設施脆弱度由 65.54 躍升為 97.94，原因在於天然氣消費持續增加，現有輸儲設備應接不暇，加上電源開發不順，使我國備用與備轉容量率屢創新低。簡言之，我國總能源脆弱程度的變化，長期受基礎設施面的完備性及需求面的國際能源價格變化影響，近年更因電力和天然氣基礎建設不足，總脆弱度已接近 1990 年代缺電危機、2004-2008 年國際能源價格大漲等重大事件時的高點，此為本報告建立之能源脆弱度所顯示的政策意涵，與傳統只著重供應面的能源安全指標之相異

處。而未來政府要達成能源轉型政策的目標，宜務實評估期程，並保有彈性空間，妥善運用各類發電機組；而應對供電缺口所採行的短期措施，仍應考慮成本與環境承受能力。其次，當務之急為加速增設天然氣接收站、管線及儲存設備，以降低供氣中斷的風險。再者，偏高的負載率加上偏低的備轉容量代表抑低尖峰負載空間有限，且機組長期高負荷運轉而難以檢修維護，加上長期存在的區域電力供需失衡狀況，加深電網脆弱度，故增加電力供應及平衡區域供電才是治本之道。此外，為推動再生能源，宜早日推動將再生能源有效併入電網的措施，以降低對電力系統穩定性的影響，並讓民眾瞭解其成本對電價的必然影響。最後，提升能源效率仍為降低消費面脆弱度的有效方式，政府不宜再補貼能源價格，透過能源價格合理化反映真實成本，才能導正能源用戶的消費行為，進而增進能源效率。

第一章 緒論

依據經濟部能源局 2016 年能源統計年報，我國進口能源依存度超過 97%，顯示出我國能源自主性甚低且易受國際能源價格波動影響的特性。對照我國能源進口值占 GDP 比率和國際油價走勢，我國能源進口值占 GDP 比率由 1996 年之 2.78%，於 2014 年達 12.26%，至 2016 年時則因國際能源價格下跌，能源進口值占 GDP 比率已降至 5.78%，同期間西德州中質原油(WTI)的年均價格亦由 22.1 美元/桶增加至 99.1 美元/桶，至 2016 年時年均價格則下跌為 43.3 美元/桶，可知兩者具高度一致性。(見圖 1)



資料來源：經濟部能源局 2016 年能源統計年報、本報告繪製。

圖 1 我國能源進口值占 GDP 比率和國際油價走勢

鑑於我國能源安全易受國際能源經濟情勢影響，政府自 1973 年公布「台灣地區能源政策」以來，持續依循全球局勢修訂國內能源政策。例如 1994 年於聯合國總部通過的「聯合國氣候變化綱要公約(The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」，以及 1997 年 UNFCCC 第三次締約國會議(3rd Conference of Parties to the UNFCCC, COP3)所通過的「京都議定書(Kyoto Protocol)¹」，使得溫室氣體減量議題倍受重視，促使政府分別於 1998 年與 2005 年辦理全國能源會議，以因應 UNFCCC 及京都議定書對我國之影響。在兩次會議中，除檢視我國既有的能源政策與能源結構發展方向，也強調我國能源政策的研訂須兼顧經濟發展、能源供應及環境保護之 3E 策略。(謝惠子，2004、2008；

¹ 京都議定書於 2005 年 2 月 16 日生效。

經濟部，2009^a、2009^b)

其後，政府於 2008 年 6 月宣布《永續能源政策綱領》，設定兼顧「能源安全」、「經濟發展」與「環境保護」之政策目標，並於同年 9 月通過「永續能源政策綱領－節能減碳行動方案」，並在 2009 年第三次全國能源會議中，針對永續發展與能源安全、能源管理與效率提升、能源價格與市場開放、能源科技與產業發展等核心議題進行討論。再於 2009 年 7 月通過《再生能源發展條例》，以鼓勵發展潔淨能源，促使我國再生能源推廣目標持續提升。然而，由於日本福島核災事件，影響國內能源政策走向，政府於 2011 年 11 月制訂「新」能源政策，規劃 2025 年再生能源裝置容量達(995.2 萬瓩)，並推動「千架海陸風力機」計畫和「陽光屋頂百萬座」計畫，作為鼓勵再生能源發展的措施。爾後再於 2014 年 1 月將我國再生能源推廣目標提高到 2030 年總裝置容量達(1,375 萬瓩)。此外，2015 年初的第四次全國能源會議中，就需求有效節流、供給穩定開源、環境低碳永續等構面提出總結建議，包含能源效率及能源節約、推廣再生能源發展、呼應全球減碳願景，並為因應全球氣候變遷課題、預先響應該年年底將召開的 UNFCCC 第 21 次締約國會議(COP 21)²。並且於 2015 年 9 月自發性地公布我國「國家自定預期貢獻(Nationally Determined Contribution, NDC)」的減量目標。(行政院經濟建設委員會，2008；行政院國家科學委員會，2009^a、2009^b、2009^c、2009^d；經濟部能源局，2008、2015)

後於 2016 年 5 月，新政府提出「永續的能源與資源管理」政策，設定至 2025 年時再生能源總裝置容量將達 2,742 萬瓩(27.42GW)，以及再生能源發電量占總發電量達 20%之政策目標。且為加速再生能源發展，特制訂「風力發電 4 年計畫」和「太陽光電推動 2 年計畫」，預計於 2025 年完成 120 萬瓩(1,200 MW) 的陸域風場設置與 300 萬瓩(3,000 MW)的離岸風場設置，以及於短期內達到太陽光電系統設置量 152 萬瓩(1,529 MW)，長期的設置目標則為 2,000 萬瓩(20 GW)，如表 1 所示。

表 1 至 2025 年再生能源發展目標

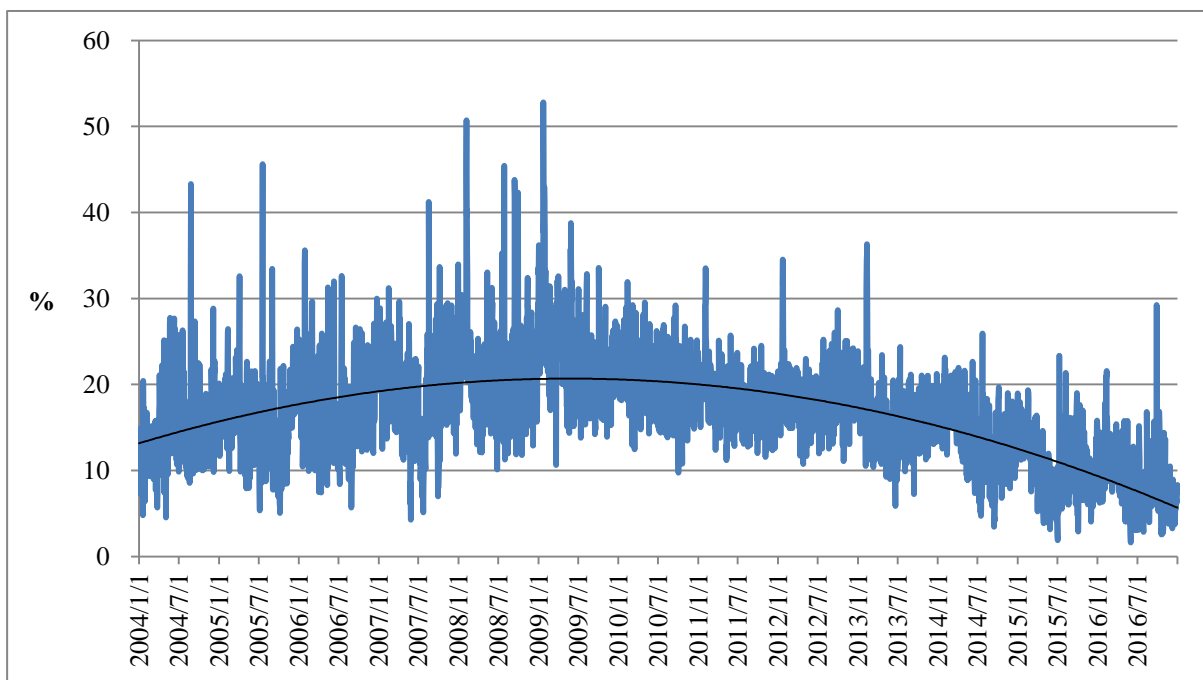
能源別	蔡英文政府目標		馬英九政府目標		裝置容量增幅 (%)	
	裝置容量 (萬瓩)	發電量 (億度)	裝置容量 (萬瓩)	發電量 (億度)		
太陽光電	2,000	250	620	78	222.6	
風力	陸域	120	29	120	29	0
	離岸	300	111	200	67	50
地熱能	20	13	15	10	33.3	
生質能	81.3	59	81	59	0	
水力	215	48	215	48	0	
燃料電池	6	5	N/A	0	N/A	
總計	2,742	515	1,251	292	119.2	

資料來源：經濟部能源局(2016)。

² COP 21 於 2015 年 11 月 30 日至 12 月 12 日在法國巴黎舉行，並通過「巴黎協議(Paris Agreement)」，取代京都議定書。其主要內容為：控制全球平均升溫在 1.5~2.0°C 之內，以減少氣候變遷的風險與影響。

隨著政府能源政策制訂與發展方向，可預期基載電源占電力系統比重將持續降低。由台電備轉容量率數值可發現，隨著經濟發展、民生生活品質提升、電力供應規劃及氣候條件等因素，電力備轉容量率自2010年之後呈下降趨勢(如圖2)，漸趨緊澀。根據台電統計，歷年備轉容量率前10低，有7次發生在2016年，表示電力供給越顯不足，台電備轉容量燈號屢屢逼近限電狀況³。是故，現階段發生電力短缺可能性相當高，而假使發生電力短缺時，對產業和民生之影響將十分顯著，亦影響國家能源安全。

能源不僅是社會經濟活動的基礎，更具國家安全的戰略重要性，各國視能源安全等同於國家安全，故應將能源安全議題位階提升及建立安全預警指標，以進行風險管理與應變機制⁴。而國內在能源低度自主性下，仍需持續面臨國際能源價格波動和國內能源轉型之挑戰，惟現階段尚無一系統性指標可完整顯示我國能源安全程度與變化。故本文回顧國際機構對於能源安全之定義與評估一國能源安全之方法論，並分別提出「能源建構績效指標」與「能源經濟脆弱度」的兩套評估成果。其中，前者遵循世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF)的方法論，其編製結果可呈現我國能源部門的績效表現及其於國際間相對排名；而後者則以世界能源理事會(World Energy Council, WEC)的方法論為架構，再配合我國國情進行方法論的調整，而其成果則可清楚呈現國內能源系統脆弱程度。



資料來源：台灣電力公司。

圖 2 台灣 2004-2016 年備轉容量率曲線

³ 依據台電備轉容量率燈號說明：備轉容量率大於等於 10% 為系統供電餘裕充足；備轉容量率 10%~6% 之間為系統供電吃緊餘裕緊澀；備轉容量率小於等於 6% 為系統限電機率增加；備轉容量 90 萬瓩以下為限電警戒；備轉容量 50 萬瓩以下為限電準備。

⁴ 2009 年全國能源會議結論

第二章 文獻回顧

一、 能源安全定義

傳統的能源安全定義強調一國能源供應的穩定程度與使用者享用能源服務的可及程度。例如：Patterson(2008)認為「政治家所擔憂的能源安全，關注於石油和天然氣的進口供應」，而提供能源服務，例如照明、冷暖氣、冷凍、烹飪或其他能源服務等，則非重點。不過上述看法不為 Noel 與 Findlater(2010)所苟同，他們定義能源安全包括了(特定)能源服務的可取得性，認為「天然氣供應安全是指在發生天然氣供應中斷情況下，一個國家能源供應系統仍可滿足對能源服務需求的能力」。而 Haluzan(2013)則認為最佳的能源安全定義應為「在給定時段內(長期或短期)，能源消費所需自然資源的可及性。此外，能源安全並不僅指一個國家能夠擁有的能源資源數量，還涉及適當的能源分配網絡(Adequate Energy Distribution Network)」。

除了上述傳統從能源供應面出發的能源安全定義之外，能源價格的水準或其變動也會對一國的能源安全造成影響，Winzer(2012)即整理了不少討論能源價格對能源安全影響的文獻。例如：Intharak et al.(2007)認為「在能源價格處於不會對經濟產生不利影響的水準時，能夠保證能源供應的可持續性和及時性」。Rutherford et al.(2007)則認為能源安全代表「和能源相關的商業風險普遍較低，即指在能夠預測的價格水準下，可迅速取得穩定的電力/能源供應，並且不受主要價格上漲的威脅、電壓不足(Brownout)或外部帶來的限制等」。而 Bohi et al.(1996)則指出「當能源價格或能源可及性改變，導致社會福祉發生減損，則表示能源不安全」。

爰此，國際上的主要機構綜合了上述的考量，認為能源供應的穩定性與能源價格的可負擔性均為衡量國家能源安全程度之重要面向，並據以定義何謂能源安全。例如：國際能源署(International Energy Agency, IEA)定義能源安全(Energy Security)為「在可負擔的價格下能夠不間斷地取得能源」，且能源安全包含許多面向。長期下之能源安全主要在於伴隨著經濟發展與永續環境所需，及時地增加能源供給與調節需求，而短期內之能源安全則著重於能源系統在供需平衡中迅速應對突發性變化的能力(IEA, 2014)。另外，世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF)所定義的能源安全，則是指「在可承受的價格之下，能有可靠、穩定和可持續的能源供應，並透過全球合作來有效地實現」(Yueh, 2010)。

除此之外，國內學者討論能源安全時，則將能源安全考量的面向更加擴大。例如：Li(2010)認為能源安全包括能源供應安全和能源使用安全。其定義的能源供應安全即能源供應的穩定性，是指滿足國家正常生存發展所需之能源供應保障與穩定程度，為國家能源安全的基本目標，屬於「量」的概念；而所謂能源使用安全，即生態環境安全性，是指能源消費及使用不應對人類自身的生存與發展環境構成任何威脅，係國家能源安全的更高追求，屬於「質」的概念。顏君聿(2012)則認為能源安全係指「在特定時間及能源需求水準之下，如何滿足環境友善、能源穩定供應及效率應用之目標，且必須透過多項措施構面的進行(分散來源、完善設施、產銷供應鏈、訂價機制等)方能均衡三個目標之發展」。惟各國因國情之

不同、國民的共識而對特定目標有所偏重，而有不同的能源安全或管理政策。

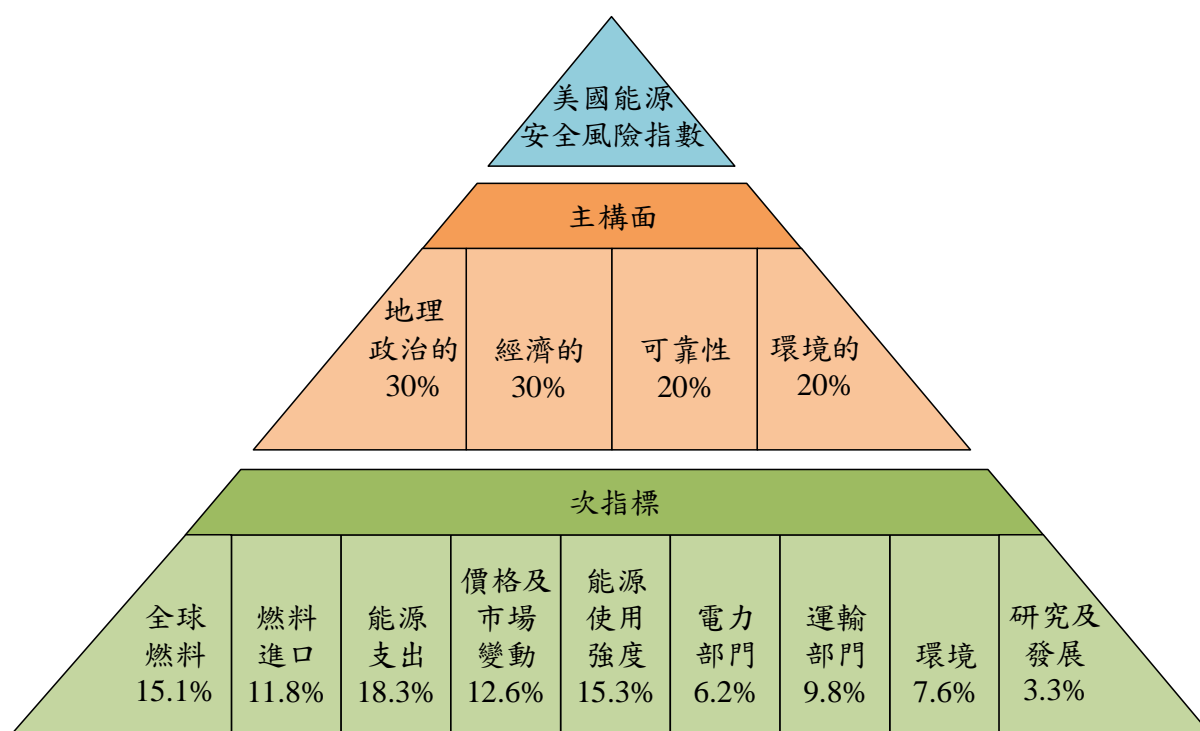
綜合以上看法，我們可以說一國的能源安全程度，端看能源來源(進口或自產)是否穩定、使用能源的成本可否為國民所能承擔，並透過完善的能源相關基礎設施的建置，來確保能源供應的無虞，並即時滿足能源服務的需求。短期內，國家需具備應付偶發性的政治、經濟、天災等事件衝擊的能力；長期下，則透過完善的能源政策規劃來達成國家經濟與環境面之永續發展目標。

二、 國外相關能源安全風險指標

(一) 美國商會—美國能源安全風險指標(U.S. Energy Security Risk Index)

美國商會所建構的美國能源安全風險指標(U.S. Energy Security Risk Index)之目的為：使用可取得之數據，發展出一套衡量標準，以單一指標來綜合描述美國在地理政治、經濟性、可靠性與環境等四大構面下的能源風險。在權重的設計上，地理政治(Geopolitical)、經濟性(Economic)、可靠性(Reliability)和環境面(Environmental)分別占比 30%、30%、20%及 20%，顯示美國能源安全風險指標相對較重視地理政治與經濟性等構面。

其次，在四大構面之下，更進一步劃分為 9 個次指標，分別為全球燃料(15.1%)、燃料進口(11.8%)、能源支出(18.3%)、價格及市場變動(12.6%)、能源使用強度(15.3%)、電力部門(6.2%)、運輸部門(9.8%)、環境(7.6%)、研究及發展(3.3%)，如圖 3 所示。以上權數之設定方式係以分析及參考專家意見方式執行，且本指數適用範圍僅限美國本地，惟該指數並非只評估當年度，亦可對往後年度進行預測。



資料來源：USCC(2015a)。

圖 3 美國能源安全風險指標

此外，美國商會在選取美國能源安全風險指標時有下列準則：

1. 合理的一資料必須和一般常識及預期相關；
2. 可信的一資料來源需完善且具備可信度；
3. 可觸的一資料來源能被公眾取得；
4. 透明的一資料來源和運用須透明；
5. 完整性一資料須有較長期的歷史數值(此處可回溯至 1980 年開始)；
6. 更新性一歷史資料須經逐年檢視因此隨時間經過下仍可被衡量；
7. 未來的一歷史資料須與預測資料吻合。

(二) 美國商會—全球能源安全風險指標(International Energy Security Risk Index)

因美國能源安全風險指標僅用於衡量美國本土能源安全風險，無法進行國際比較，故美國商會亦建立一套全球能源安全風險指標(International Energy Security Risk Index)，其目的為使用量化之數據、歷史趨勢資訊及政府計畫，來檢視政策及其他因素對於全球能源安全造成正面或負面的影響。

全球能源安全風險指標主要分為八大構面，分別為：全球燃料(Global Fuels)、燃料進口(Fuel Imports)、能源支出(Energy Expenditures)、價格與市場的波動度(Price & Market Volatility)、能源使用強度(Energy Use Intensity)、電力部門(Electric Power Sector)、運輸部門(Transportation Sector)和環境(Environmental)等，進行風險程度衡量。各構面之權重占比分別為 14%、17%、20%、15%、14%、7%、7%和 6%。此八大構面之下，分別有幾個次指標，架構圖如圖 4 所示，並說明如下：

1. 全球燃料包括世界油儲量的安全(2%)、世界油生產的安全(3%)、世界天然氣儲量的安全(2%)、世界天然氣生產的安全(3%)、世界煤儲量的安全(2%)、世界煤生產的安全(2%)等 6 個次指標；
2. 燃料進口包括石油進口揭露(3%)、天然氣進口揭露(3%)、煤進口揭露(2%)、總能源進口揭露(4%)、每單位 GDP 之石化燃料進口支出(5%)等 5 個次指標；
3. 能源支出包括能源支出強度(4%)、人均能源支出(3%)、零售電力價格(6%)、原油價格(7%)等 4 個次指標；
4. 價格及市場變動包括原油價格的變動(5%)、能源支出的變動(4%)、世界原油精煉廠使用(2%)、人均 GDP(4%)等 4 個次指標；
5. 能源使用強度包括人均能源消費(4%)、能源強度(7%)、石油強度(3%)等 3 個次指標；
6. 電力部門包括電力多樣性(5%)、電力產生時非二氧化碳氣體排放之占比(2%)等 2 個次指標；



資料來源：USCC(2015b)。

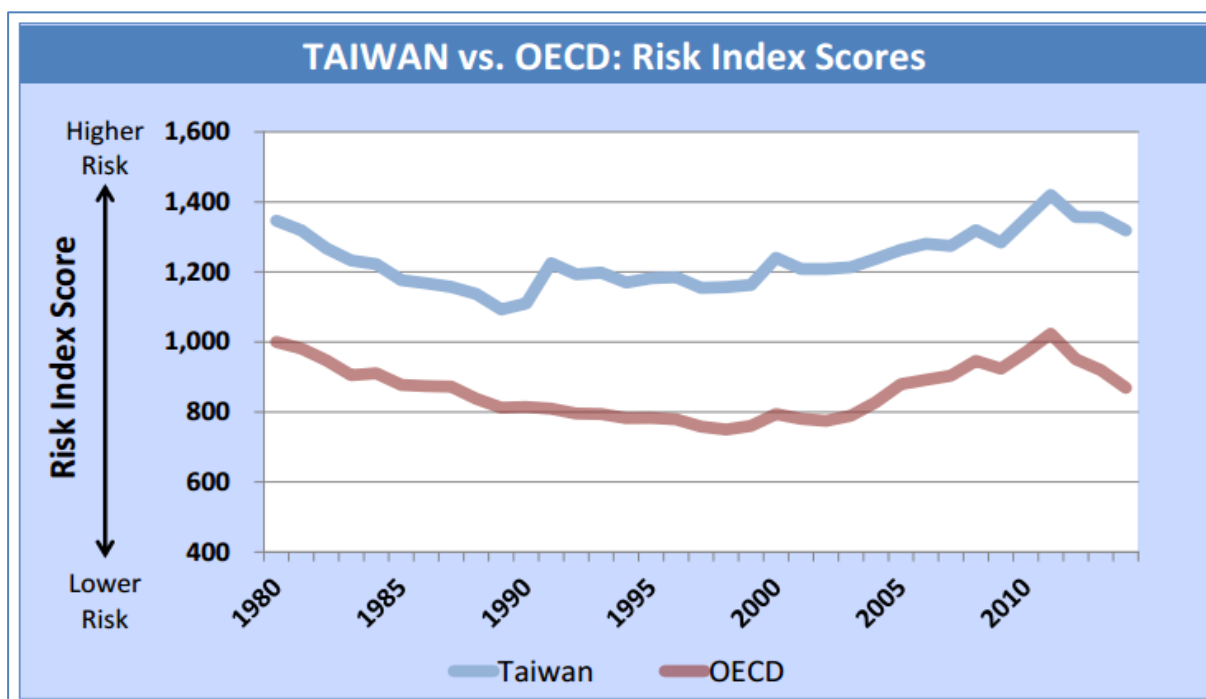
圖 4 全球能源安全風險指標

7. 運輸部門包括人均交通運輸能源(3%)、交通運輸能源強度(4%)等 2 個次指標；
8. 環境包括二氧化碳排放趨勢(2%)、人均能源相關二氧化碳排放量(2%)、能源相關二氧化碳排放強度(2%)等 3 個次指標。

美國商會所發布之全球能源安全風險指標所包含了能源消費前 75 大國家(亦含台灣)，而若將台灣與這些能源消費大國及 OECD 國家平均值進行排名比較(國家序位排名越前面代表能源風險較低)可以發現：2012 年至 2014 年台灣在前 75 大能源消費國暨 OECD 國家平均值(共 76 個)之能源風險排名依序為 52、51、與 53，而台灣自 1980 年至 2014 年風險分數變化，趨勢大致與 OECD 國家相同，基本上 1980-2000 年風險值呈下降走勢(但 1990 年代初期上升)，而 2000 年之後又逐漸走升，並於 2011 年達高峰，2011 年過後風險分數下降(見圖 5)。

此外，在台灣與其他亞鄰國家(包含日本、韓國、中國大陸與新加坡)的排名比較部分，2014 年台灣總排名優於新加坡(排名第 76)，但較日本(排名第 33)、中國大陸(排名第 46)與韓國(排名第 51)為差。2012-2014 年，台灣及亞鄰國家排序變動不大，惟韓國序位略微上升。

整體而言，台灣的能源安全風險與能源消費前 75 大國家相比，約位於後三分之一位置。韓國排序略優於台灣，而日本則約位於前 40%。中國大陸在亞鄰國家中，排名僅次於日本，約落於前百分之六十位置，新加坡則是 76 個國家當中風險程度最高的國家，但因其並未公布各細指標分數，故無法得知變好或變壞的原因(見表 2)。



註：包含了能源消費前 75 大國家(含台灣)及 OECD 國家平均值。

資料來源：International Index of Energy Security Risk 2016 Edition, USCC。

圖 5 1980-2014 年風險分數變化

表 2 全球能源安全風險指標台灣與其他亞鄰國家比較

International Energy Security Risk Index	排名比率		
	2012	2013	2014
台灣	52/76 68%	51/76 66.6%	53/76 70.6%
日本	33/76 42.6%	32/76 41.3%	33/76 42.6%
韓國	54/76 70.6%	52/76 68%	51/76 66.6%
中國大陸	46/76 60%	47/76 61.3%	46/76 60%
新加坡	76/76 100%	76/76 100%	76/76 100%

註：包含了能源消費前 75 大國家(含台灣)及 OECD 國家平均值。

資料來源：International Index of Energy Security Risk 2016, USCC，本報告整理。

(三) 世界能源理事會－能源三難指標(Energy Trilemma Index)

世界能源理事會(World Energy Council, WEC)則建置一「能源三難指標(Energy Trilemma Index)」，以「平衡計分(Balance Score)」方式⁵，呈現當國家處於「能源安全(Energy Security)」、「能源公平(Energy Equity)」及「環境永續(Environmental Sustainability)」這三個目標間彼此相互衝突情形下的「能源績效(Energy Performance)」，其中，最佳之平衡計分為 AAA，最差之平衡計分為 DDD，並據此進行國際間各國之比較與分析。

其次，本指標除了上述的能源績效之外，還包含了「周邊績效(Contextual Performance)」，考量了「政治強度(Political Strength)」、「社會強度(Societal Strength)」和「經濟強度(Economic Strength)」等三個構面。並由這綜合該國於此兩大類的表現進行跨國比較。其六個構面的權重分別為 25%、25%、25%、8.3%、8.3%和 8.3%，顯示出該指標較著重於能源環境相關之範疇，當能源/環境面之指標產生變化時，對總指數的影響程度高於社經因素(WEC, 2015)。再者，六大構面下可進一步區分出數個次指標，如圖 6 所示，並說明如下：

1. 能源安全：包含總能源生產對總能源消費之比例(1/6)、電力生產多樣性(1/6)、線損率(1/6)、總初級能源消費量除以 GDP 之五年複合年均增長率(1/6)、石油及石油產品庫存天數(1/6)及燃料淨進口占 GDP 的比例(進口國部分)或燃料淨出口占 GDP 的比例(出口國部分)(1/6)等 6 個次指標；
2. 能源公平：包含零售汽油價格可負擔程度(50%)、電力取得的負擔能力與品質(50%)等 2 個次指標；

⁵ 分為 A、B、C、D 四等級，若評分項目分數在 8.01-10 則為 A 等級，評分項目分數在 5.01-8 則為 B 等級，評分項目分數在 2.51-5 則為 C 等級，評分項目分數在 0-2.5 則為 D 等級。

3. 環境永續：包含總初級能源消費量除以 GDP(總初級能源密集度) (25%)、二氧化碳密集度(25%)、空氣與水污染的影響(25%)、電力排放係數(25%)等 4 個次指標；
4. 政治強度：包含政治穩定度(1/3)、管理/法規品質(1/3)、政府治理的有效性(1/3)等 3 個次指標；
5. 社會強度：包含貪腐的控制(25%)、法律的規範(25%)、教育的品質(25%)、健康的品質(25%)等 4 個次指標；
6. 經濟強度：包含生活支出的成本(1/3)、總體經濟穩定性(1/3)、私部門對於信貸可取得程度(1/3)等 3 個次指標。

國家績效 100%	能源績效 75%	能源安全 25%	總能源生產對消費之比例(1/6) 電力生產多樣性(1/6) 線損率(1/6) 總初級能源消費量除以GDP之五年複合年均增長率(1/6) 石油及石油產品庫存天數(1/6) (進口國部分)燃料淨進口占GDP的比例(1/6) (出口國部分)燃料出口占GDP的比例(1/6)
		能源公平 25%	零售汽油價格可負擔程度(50%) 電力取得的負擔能力與品質(50%)
		環境永續 25%	總初級能源密集度(25%) 二氧化碳密集度(25%) 空氣與水污染的影響(25%) 電力排放係數(25%)
	周邊績效 25%	政治強度 8.3%	政治穩定度(1/3) 管制/法規品質(1/3) 政府治理的有效性(1/3)
		社會強度 8.3%	貪腐的控制(25%) 法律的規範(25%) 教育的品質(25%) 健康的品質(25%)
		經濟強度 8.3%	生活支出的成本(1/3) 總體經濟穩定性(1/3) 私部門對於信貸可取得程度(1/3)

資料來源：WEC(2015)。

圖 6 能源三難指標

另一方面，世界能源理事會建置指標時有下列選取準則：

1. 相關性— 在計畫目標下，指標選取或發展需能洞察一國的情況；
2. 獨特性— 每一項指標專注在被發現議題下的不同觀點，除非有必要予以強化；
3. 平衡性— 在每個維度(和跨指標間的維度)中的指標展現涵蓋不同的議題；
4. 上下文敏感性— 指標能捕捉不同國家情況(例如財富、規模)，且若適合的話，指標能被 GDP 以購買力平減(PPP)和人均予以一般化；
5. 涵蓋性— 個別指標需涵蓋 85% WEC 會員國。只有能提供所有指標中 75% 以上資料的國家才會被列入指標計算中；
6. 強健性— 指標取自信譽良好且具最新資訊的來源；
7. 比較性— 被用於計算成指標的單一資料來源需確保國家間的比較性。

WEC 所發布之能源三難指標報告涵蓋約 130 個國家，排序越前面越佳。而 2012 至 2015 年間，台灣分別排名第 24、27、34 與 30 名，約在前三分之一的位。而依據報告中指出，台灣在能源安全、能源公平部分有較明顯改善，環境永續構面則顯著變差，政治強度、社會強度與經濟強度相較於前面幾個構面，排名變動幅度較小，惟因報告中並未進一步公布各構面下細指標之變化，故無法分析導致排名變化因素。

(四) 世界經濟論壇—能源建構績效指標(Energy Architecture Performance Index, EAPI)

世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF)所建構之「能源建構績效指標(Energy Architecture Performance Index, EAPI)」，係一套提供決策者檢視國家整體能源系統的績效表現的評估工具，本質上與一般的關鍵績效指標(Key Performance Index, KPI)類似。

能源建構績效指標共分為「經濟成長與發展」、「環境永續」及「能源取得與安全」等三大構面，權重配比為各占三分之一，分析國家數超過 120 國，唯不包含台灣。其次，在 3 大構面下分別有幾個次指標，彙整如圖 7 所示，並說明如下(WEF, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017)：

1. 經濟成長與發展
 - (1) 能源生產力：GDP(經 PPP 調整)除以能源使用量(公斤油當量)，權重為 25%。
 - (2) 能源進口成本占 GDP 比重：以能源進口值佔 GDP 比率表示，權重為 12.5%。
 - (3) 能源出口價值占 GDP 比重：以能源平衡表估計出口總金額再除以 GDP，權重為 12.5%。
 - (4) 汽油價格扭曲程度：參考 GIZ 之 International Fuel Prices 報告進行設

算，數值為 1 代表無扭曲，權重為 12.5%。

- (5) 柴油價格扭曲程度：參考 GIZ 之 International Fuel Prices 報告進行計算，數值為 1 代表無扭曲，權重為 12.5%。
- (6) 工業電價：可直接由官方單位之統計資料取得，單位須換算為美元/度，權重為 25%。

2. 環境永續

- (1) 替代能源及核能占總能源使用比重：即替代能源(含生質能、水力、地熱、太陽能、風力發電等)及核能占總能源使用的比例，權重為 20%。
- (2) 每度電力生產所排放的二氧化碳：即每度電所產生的二氧化碳量，單位為 gCO_2/kWh ，權重為 20%。
- (3) 能源部門之人均甲烷排放量：能源部門甲烷排放量除以全台灣總人口數，權重為 10%。
- (4) 能源部門之人均氧化亞氮排放量：能源部門氧化亞氮排放量除以全台灣總人口數，權重為 10%。
- (5) 懸浮微粒濃度($\text{PM}_{2.5}$)：單位為微克/立方公尺，權重為 20%。
- (6) 平均汽車燃油經濟性：即每百公里所需油耗量，單位為 Liter/100KM，權重為 20%。

3. 能源取得與安全

- (1) 電氣化比率：即可取得或接觸電力人口占總人口比率，權重為 20%。
- (2) 電力供給品質：透過問卷調查詢問受訪者，對於本國電力品質之程度，1 分為電力不足及時常斷電、7 分為電力充裕且可信賴，權重為 20%。
- (3) 使用固體燃料烹煮之人口百分比，權重為 20%
- (4) 能源淨進口占能源使用比重：能源總需要(能源使用)減去自產能源可得淨進口能源，再將淨進口能源除以能源總需要(能源使用)算出其占比，權重為 20%。
- (5) 初級能源總供給的多樣程度：以 HHI 指標作為能源供給分散程度之衡量，權重視該國能源進出口狀況分別設為 10% 或 20%⁶。
- (6) 進口來源國的多樣程度：以 HHI 指標作為進口來源多樣程度之衡量，權重視該國能源進出口狀況分別設為 10% 或 0%⁷。

此外，世界經濟論壇在建置指標時係採用下列選取準則：

- 1. 使用實際數據－選取可觀察資料或最佳的代理變數(Proxy)，而非估計值；

⁶ 淨進口者權重 10%；淨出口者權重 20%。

⁷ 淨進口者權重 10%；淨出口者權重 0%。

2. 可信賴度—由知名機構取得可信賴的來源資料；
3. 具複製性—以年為基礎自相同供應者取得資料，即該機構持續更新資料；
4. 品質—所選取資料儘可能代表最佳的衡量變數；
5. 完整性—資料處理應具一致性並定期檢視，以確保 EAPI 未來的永續性。

惟本指數雖可進行國際比較，然該指數只評估各國當年度能源安全風險程度，並未對往後年度進行預測研析。

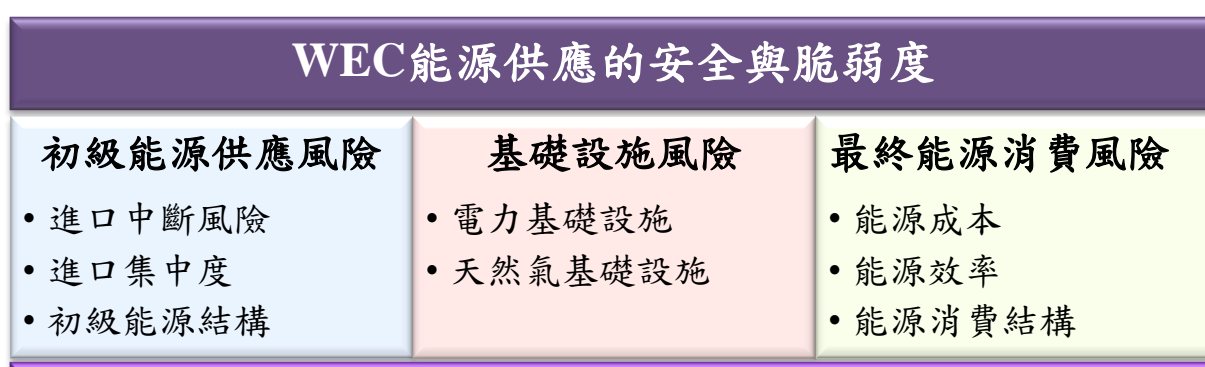


資料來源：WEF(2016)。

圖 7 能源建構績效指標

(五) 能源風險及脆弱度之衡量(Security of Energy Supply Indicators for Measuring Vulnerability and Risk)

世界能源理事會(World Energy Council, WEC)自 2008 年起與歐盟合作，進行歐盟成員國之能源風險的衡量，其基礎架構參考 Frondel et al. (2009)之方法學概念，特點包括了：考量一國各類燃料供給中自產的貢獻、進口份額及燃料出口國之供應中斷機率，即著重於相對稀少性；其重點在於量化長期能源供給風險，數值反應潛在的化石燃料進口損失，換言之，此指標可被歸類為資源脆弱度或實體可取得性的指標。然而，Frondel 等人(2009)之方法學，僅著重供給面的變化，並未能充分考量需求面的情況，故有視能源需求為外生給定的限制。因此，WEC (2010)即在此方法學的基礎上，將能源風險及脆弱度的衡量擴展至三個層面，詳如圖 8 所示。



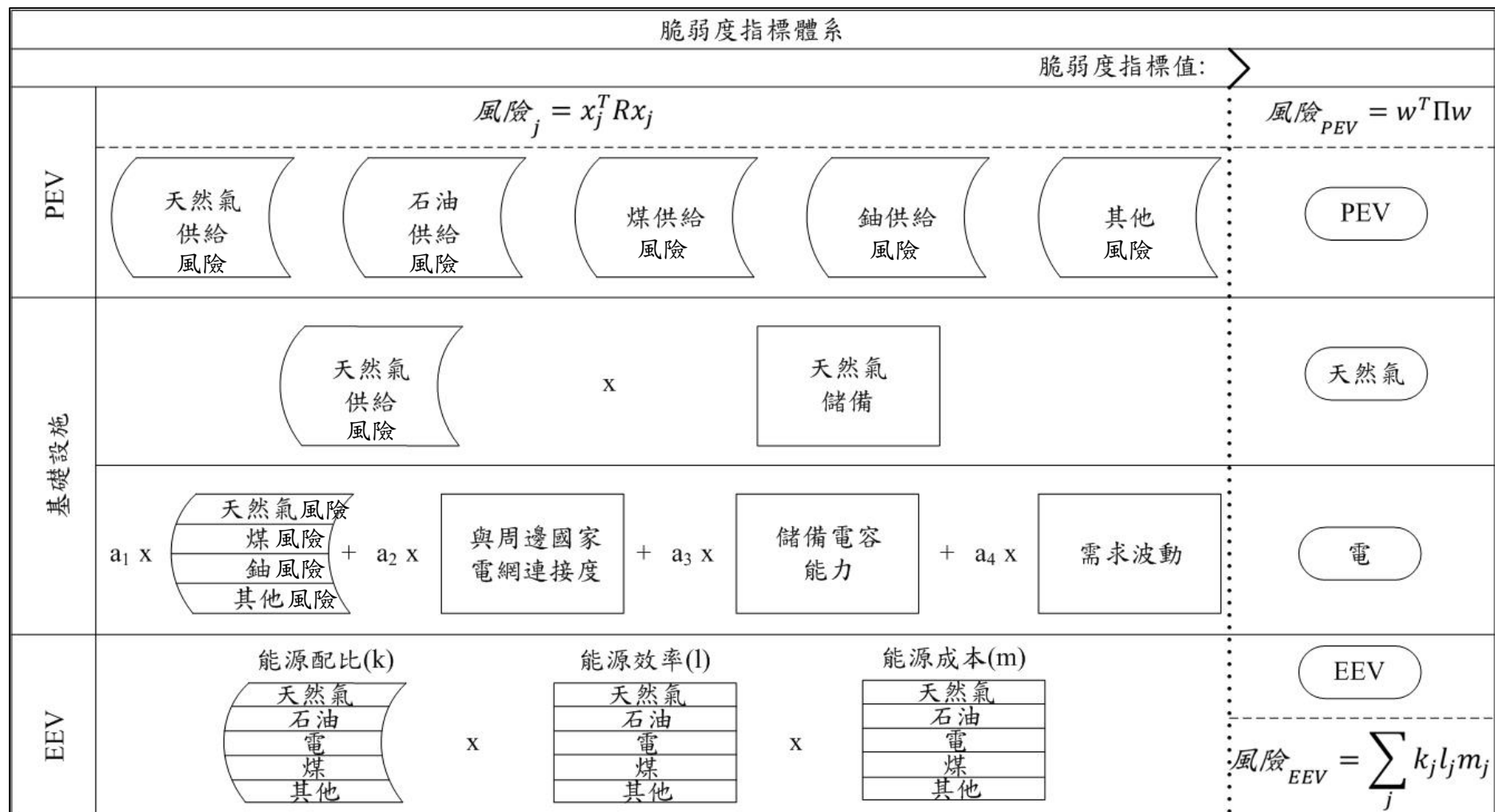
資料來源：Frondel et al. (2009)、Frondel and Schimdt (2013)、WEC (2010)、本文整理。

圖 8 能源風險及脆弱度衡量概念圖

第一層為初級能源供應風險，考量了初級能源的多樣性、進口集中度和能源進口來源國的供給中斷風險；第二層則考量電力和天然氣等之基礎建設的品質和可靠度；第三層則考量能源消費端所面臨的風險及其承受能力，例如消費端可透過增加能源使用效率，促使能源使用與經濟成長脫勾等，可減緩能源危機帶來的潛在影響。

值得一提的是，上述的三個層面並非各自獨立，各類初級能源的供應風險除了影響整體的初級能源供應脆弱度之外，亦透過發電結構與最終能源消費結構，進入基礎設施脆弱度及最終能源消費脆弱度，故每個環節都具有相互的連接性。詳細的方法學及次指標架構如圖 9 所示，並說明如後。

1. 在初級能源供應風險部分，衡量了煤、油、天然氣、鈾及其他初級能源之進口概況，以及各類能源之進口分散程度和各進口來源國之政治風險程度，並據上述因素來計算初級能源供應風險。
2. 基礎設施風險分做兩個部分：
 - (1) 一者為天然氣基礎設施風險，其考量了第一層當中之天然氣供應風險，以及國內天然氣儲存能力，藉由兩項數值之乘積來衡量天然氣基礎設施風險變化；



註：PEV 係初級能源供應脆弱度；EEV 係最終能源消費脆弱度。

資料來源：Frondel et al.(2009)、WEC(2010)、本報告整理。

圖 9 能源風險及脆弱度衡量細部架構圖

(2) 二者為電力基礎設施風險，其以電力生產結構風險(以發電結構加權計算各類初級能源供應風險)、與週邊國家電網連接度、儲備電容能力(即備用容量率)和需求波動等指標，並以各次指標的標準化數值加權結果來呈現一國電力基礎設施風險程度。

而整體基礎設施風險，則以天然氣與電力基礎設施風險值之標準化數值進行加權來呈現。

3. 最終能源消費風險方面，則假設其風險函數為能源消費結構風險(以最終能源結構加權計算各類初級能源供應風險與電力生產結構風險)、能源效率與能源支出等三類風險的相乘型態，並以三者的標準化數值乘積作為觀察該國最終能源消費脆弱度。

最後，將初級能源供給風險、基礎設施風險和最終能源消費脆弱度經由標準化加總，可得總能源安全脆弱度及風險。

三、 國內之相關能源經濟指標

(一) 多維度能源安全指標

莊銘池等人(2013)提出多維度能源安全指標(Multi-dimensional energy security indicators)，其目的為藉由各指標的變動趨勢，分析能源安全政策推動成效對能源安全各面向的影響，指數總共分為依存度、脆弱度、可負擔度與可接受度等4大構面，彙整如圖10。



資料來源：Chuang and Ma (2013)。

圖 10 多維度能源安全指標

而4大構面下再進一步區分數個次指標，並列示如下：

1. 依存度包含進口能源依存度；
2. 脆弱度包含能源供應種類分散度、能源密集度等 2 個次指標；
3. 可負擔度包含進口能源支出負擔率、人均負擔能源進口值等 2 個次指標；
4. 可接受度包含單位能源 CO₂ 排放強度。

指標的計算公式以赫芬達爾-赫希曼指數(Herfindahl-Hirschman Index, HHI)與香農-韋納指數(Shannon-Wiener Index, SWI)為基礎，HHI 與 SWI 之計算公式如下：

$$HHI_1 = \sum_{i=1}^I p_i^2$$

$$SWI_1 = -\sum_{i=1}^I p_i \ln p_i$$

其中， p_i ：各類能源供應量占總能源供應量的比例

再者，作者另參考 Von Hirschhausen 和 Neumann(2003)所提出之調整後香農-韋納-紐曼指數(Adjusted Shannon Weiner-Neumann Index)，納入各類能源供應能力(即可靠度)，以解決傳統多樣性指標忽略各類能源對整體能源系統安全實質貢獻度有所差異的問題，公式如下：

$$HHI_2 = \sum_{i=1}^I (1 - q_i) * 1/f_i * p_i^2$$

$$SWI_2 = -\sum_{i=1}^I (1 + q_i) * f_i * p_i \ln p_i$$

其中， p_i ：各類能源供應量占總能源供應量的比例

q_i ：各類能源供應量占總自產量的比例

f_i ：各類能源供應能力

此外，亦應用了由 Markowitz(1952)提出的「平均變異數投資組合(Mean-Variance Portfolio, MVP)」投資風險理論，以掌握各類能源間之變動關聯性對能源安全與風險的影響，並藉由相關係數來兩兩比較能源進口來源供給習性的變異情況，來掌握其對整體能源供應系統風險的影響(即納入能源共變特性)，並用價格變化代表該項能源在市場之供需特性，公式如下：

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I p_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I p_i p_j \sigma_{ij}$$

其中， p_i ：第 i 種資產之投資比例

$p_i p_j \sigma_{ij}$ ：第 i 種與第 j 種資產之共變數

$p_i^2 \sigma_i^2$ ： i 選項的變動程度所造成不確定的風險

$p_i p_j \sigma_{ij}$ ：各類能源間變動關聯性所造成的風險的影響

故納入能源共變特性之指標計算方式如下：

$$HHI_3 = \sum_{i=1}^I (1 - q_i) * 1/f_i * p_i^2 + \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^I p_i p_j \sigma_{ij} ; i > j$$

其中， p_i ：各類能源供應量占總能源供應量的比例

q_i ：各類能源供應量占總自產量的比例

f_i ：各類能源供應能力

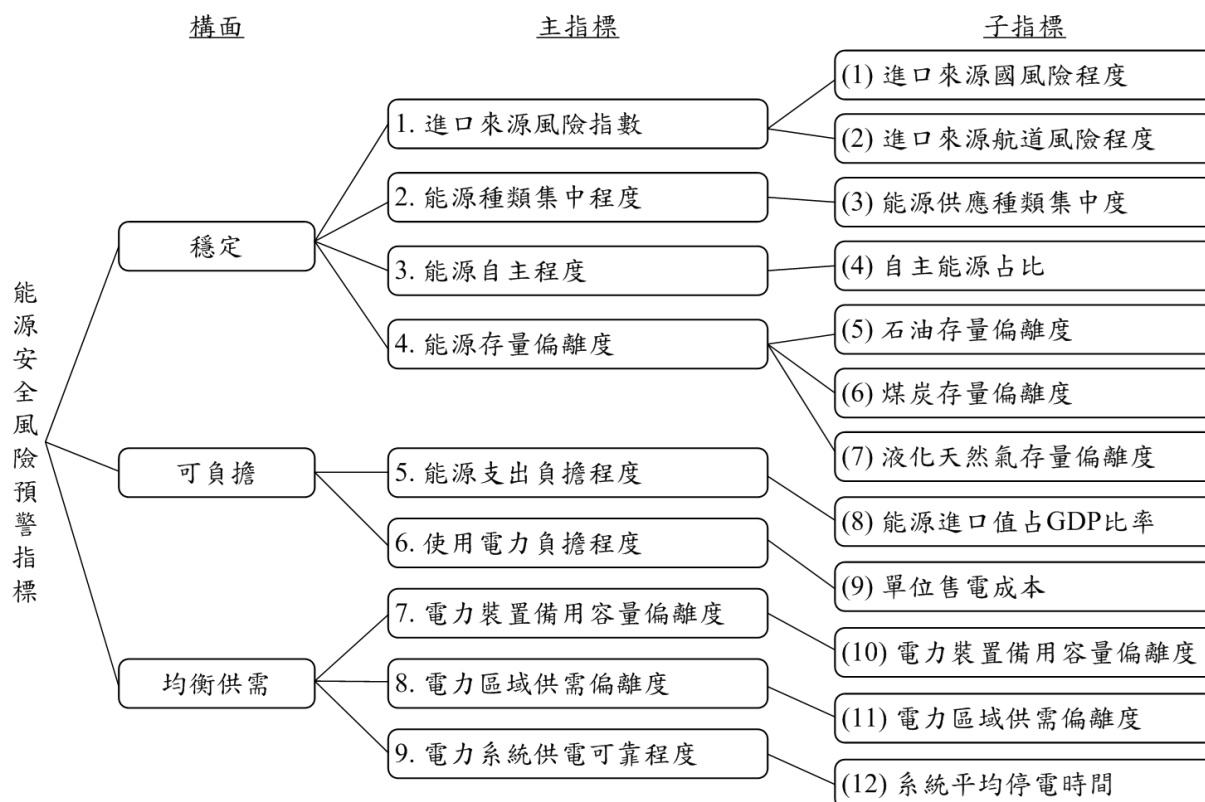
σ_{ij} ：第 i 種能源與第 j 種能源價格之共變數

多維度能源安全指標的研究除了評估當年度外，亦對往後年度提出預測，然而，其成果屬於學術研究，並無對外發佈實績，且其適用範圍僅限台灣，並無跨國比較。

(二) 能源安全預警指標

經濟部能源局依據 2009 年第三次全國能源會議結論，自 2010 年起委託台灣經濟研究院，建置能源安全預警指標。依能源供應鏈安全各環節(供給端、系統端、需求端)規劃多項能源安全預警指標項目，用以反映能源穩定供應、效率運用、環境友善狀態，其編製基礎係參考前述美國商會所建構的「能源安全風險指標(U.S. Energy Security Risk Index)」的架構，權重設定則依能源供應鏈三大環節對能源安全之影響，分別給予權重配置，在歷經多次修訂下，將能源安全預警管理指標分為 31 項子指標。

爾後，因行政院於 2012 年 10 月核定「能源發展綱領」之能源政策指導方針中，明確揭示能源安全目標，以建構可負擔、低風險之均衡能源供需體系為願景，將穩定能源供給來源與管道、確保能源供需均衡與系統正常運作、完善系統風險管理訂為原則。故於 2013 年配合能源發展綱領，依「穩定」、「可負擔」和「均衡供需」等三構面，修改能源安全預警管理指標，同時劃分為 9 項主指標和 12 項子指標進行風險衡量，架構圖如圖 11 所示。



資料來源：台經院(2013)。

圖 11 能源安全預警指標架構

能源安全預警指標以台灣為適用範圍，而該指數除評估當年度外，亦對往後年度各相關變數的變化，提出預測數值。然而，該指標的編制成果並未對外發佈，其成果亦僅用於政府主管機關內部參考之用。

四、 小結

綜整及比較國內外各項衡量能源經濟指標方法如表 3 所示。其中，全球能源安全風險指標、能源三難指標和能源建構績效指標等，均屬用於國際比較之衡量指標。大致以總體經濟、能源和環境等構面進行研析，而各主指標再細分次指標作為衡量基準，指標間的權重分配則為主觀給定或均等分配。其次，資料取得原則係依循公開透明、具可信度、具延續性、完整性、可比較性，以及採用實績值而非估計值加以設算。然而，這些指標雖可概要捕捉國家間相對風險程度與排序，但因其風險指標不含能源基礎設施風險，較不易顯現一國能源基礎設施對國家能源安全之影響。再者，多數指標中之能源安全構面僅為其整體指標部份內涵，並非完全針對國家能源安全而設計，故不易完整確知一國能源安全風險程度。另外，由於美國商會全球能源安全風險指標及 WEC 能源三難指標並未公布其指標編制細節，與有公布方法論的 WEF 能源建構績效指標相比，在透明度上有所不及。此外，考量當前國內缺乏一套讓民眾易懂的能源經濟指標，使得政府、產業與一般大眾之間，對台灣能源現況常常出現解讀不同、各執一詞的狀況。而上述的多維度能源安全指標及能源安全預警指標，雖然有針對國內現況與特性進行考量，但可惜的是，其編製成果未能對外發佈，而未能為國人所知，無法增進一般大眾對於國內能源安全現況的了解。

因此，綜合上述考量，本報告一方面遵循 WEF 的方法論編制我國的「能源建構績效指標」，並與 WEF 原報告所發布的 120 餘國的績效值進行跨國比較(原報告不包含台灣)，呈現我國能源部門的績效表現及其於國際間相對排名；另一方面，考量我國現階段推動能源轉型下，基礎設施的完備程度攸關國家的整體能源安全，而 WEC 將國家能源安全依能源供應、能源基礎設施和最終能源消費等面向進行系統性分析，可深入解析一國能源風險細緻的變化，故本報告以 WEC 的方法論為架構，並配合我國特殊國情(如獨立電網、以液化天然氣為唯一天然氣進口方式、天然氣接收限制等)進行方法論的調整，編製「能源經濟脆弱度」，以清楚呈現國內能源系統脆弱程度。

表 3 國內外主要能源安全風險指標彙整

單位/學者	美國商會		WEC		WEF	Chuang and Ma
指標名稱	美國能源安全風險指標	國際能源安全風險指標	能源三難指標	能源供應安全風險/脆弱度	能源建構績效指標	多維度能源安全指標
目的	以單一指標衡量美國能源安全風險	運用量化資料、歷史趨勢資訊和政府預測等，以確認政策和其他因素對國際能源安全產生正面或負面影響。	指標排序用以衡量一國在管理能源安全、能源公平及環境永續性等三項間之抵換關係之整體表現。	為了增加能源供給脆弱度在政治和公共討論中對潛在能源危機之討論更為可視化和可及性而建立	需有適合的策略工具用以理解不同路徑對未來的影響，遂建立此指標	藉由各指標的變動趨勢，分析能源安全政策推動成效對能源安全各面向的影響。
涵蓋範圍	U.S.	國際(含台灣)	國際(含台灣)	歐洲主要國家	國際(不含台灣)	台灣
是否推估未來	是	無	無	無	無	是
主構面	1.地理政治(30%) 2.經濟(30%) 3.可靠性(20%) 4.環境(20%)	1.全球燃料(15%) 2.燃料進口(16%) 3.能源支出(19%) 4.價格與市場的變動(14%) 5.能源使用強度(15%) 6.電力部門(7%) 7.運輸部門(8%) 8.環境(6%)	1.能源安全(25%) 2.能源公平(25%) 3.環境永續(25%) 4.政治的強度(8.3%) 5.社會的強度(8.3%) 6.經濟的強度(8.3%)	1.初級能源供應風險 2.基礎設施風險 3.最終能源消費脆弱度	1.經濟成長與發展(1/3) 2.環境永續(1/3) 3.能源取得與安全(1/3)	1.依存度 2.脆弱度 3.可負擔度 4.可接受度
次指標	1.全球燃料(15.1%) 2.燃料進口(11.8%) 3.能源支出(18.3%) 4.價格及市場變動(12.6%) 5.能源使用強度(15.3%) 6.電力部門(6.2%) 7.運輸部門(9.8%) 8.環境(7.6%) 9.研究及發展(3.3%)	1.全球燃料包含：世界油儲量的安全(2%)、世界油生產的安全(3%)、世界天然氣儲量的安全(2%)、世界天然氣生產的安全(3%)、世界煤儲量的安全(2%)、世界煤生產的安全(2%)。 2.燃料進口包含：石油進口揭露(3%)、天然氣進口揭露(3%)、煤進口揭露(2%)、總能源進口揭露(4%)、每單位 GDP 之石化燃料進口支出(5%)。 3.能源支出包含：能源支出強度(4%)、人均能源支出(3%)、零售電力價格(6%)、原油價格(7%)。 4.價格與市場的變動包含：原油價格的變動(5%)、能源支出的變動(4%)、世界原油精煉廠使用(2%)、人均 GDP(4%)。 5.能源使用強度包含：人均能源消費(4%)、能源強度(7%)、石油強度(3%)。 6.電力部門包含：電力多樣性(5%)、電力產生時非二氧化碳氣體排放之占比(2%)。 7.運輸部門包含：人均交通運輸能源(3%)、交通運輸能源強度(4%)。 8.環境包含：二氧化碳排放趨勢(2%)、人均能源相關二氧化碳排放量(2%)、能源相關二氧化碳排放強度(2%)	1.能源安全包含：總能源生產對消費之比例(1/6)、電力生產多樣性(1/6)、線損率(1/6)、總初級能源消費量除以 GDP 之五年複合年均增長率(1/6)、石油及石油產品庫存天數(1/6)、燃料淨進口占 GDP 的比例(進口國部分)/燃料出口占 GDP 的比例(出口國部分)(1/6) 2.能源公平包含：零售汽油價格可負擔程度(50%)、電力取得的負擔能力與品質(50%) 3.環境永續包含：總初級能源密集度(25%)、二氧化碳密集度(25%)、空氣與水污染的影響(25%)、電力排放係數(25%)。 4.政治強度包含：政治穩定度(1/3)、管制/法規品質(1/3)、政府治理的有效性(1/3)。 4.社會強度包含：貪腐的控制(25%)、法律的規範(25%)、教育的品質(25%)、健康的品質(25%)。 5.經濟強度包含：生活支出的成本(1/3)、總體經濟穩定性(1/3)、私部門對於信貸可取得程度(1/3)。	1.初級能源供應風險包含煤、油、天然氣、鈾、再生能源等，依其占初級能源消費結構比率為權數 2.基礎設施風險包含天然氣及電力基礎設施風險，其中電力基礎設施風險涵蓋電力生產結構風險、與周邊國家電網連接度、儲備電容能力、電力需求波動等指標，採均等權重 3.最終能源消費脆弱度包含能源成本、能源密集度、最終能源消費結構風險，採均等權重	1.經濟成長與發展包含：能源生產力(25%)、汽油價格扭曲程度(12.5%)、柴油價格扭曲程度(12.5%)、工業電價(25%)、能源進口成本占 GDP 比重(12.5%)、能源出口價值占 GDP 比重(12.5%)。 2.環境永續包含：替代能源及核能占總能源使用比重(20%)、每度電力生產所排放的二氧化碳(20%)、能源部門之人均甲烷排放量(12.5%)、能源部門之人均二氧化氮排放量(12.5%)、懸浮微粒濃度(20%)、平均汽車燃油經濟性(20%)。 3.能源取得與安全包含：電氣化比率(20%)、電力供給品質(20%)、人口使用固體燃料烹煮之百分比(20%)、能源淨進口占能源使用比重(20%/12.5%)、進口來源國的多樣程度(0%/12.5%)、初級能源總供給的多樣程度(20%)。	1.依存度包含：進口能源依存度 2.脆弱度包含：能源供應種類分散度、能源密集度 3.可負擔度包含：進口能源支出負擔率、平均每人負擔能源進口值 4.可接受度包含：單位能源 CO ₂ 排放強度
指標是否透過問卷調查進行	否	未說明	否，其使用 60 個數據集之基礎發展出 23 項指標	無	有 電氣化比率、電力供給品質	無
權數設定方式	以專家判斷及分析後給定適宜權重	未說明	以 3:1 之比例加權能源績效的權重計算	均等權重	在專家諮詢後，認為主構面及次指標同等重要故權數均分	未說明

資料來源：USCC (2015a；2015b)、WEC (2010；2015)、WEF(2013；2014；2015；2016)、Chuang and Ma (2013a；2013b)、本文彙整。

第三章 能源建構績效指標之方法論與實證結果

本章說明由 WEF 所提出的「能源建構績效指標(EAPI)」的方法論、本土化實證結果與 WEF 原報告所發布的 120 餘國績效值的跨國比較。另外，應事先敘明的，為與 WEF 所採用的各國資料時點一致，以利跨國比較有共同基礎，各次指標均有不等年數的延遲，故本報告在進行跨國比較時，所列出的年份並非資料時點，而是 WEF 原報告發布之年份。

一、 能源建構績效指標之方法論

(一) 指標內容及方法

EAPI 以三大面向進行能源經濟指標衡量，第一類為經濟成長與發展，衡量一個國家能源架構對於經濟成長和發展的增加或減損程度；第二類為環境永續，代表一個國家能源架構之能源供給與消費對於環境的影響程度；第三類為能源取得與安全，呈現一個國家能源供給安全、能源取得性與能源多樣性之程度。

經濟成長與發展類包含能源生產力、汽油價格扭曲程度、柴油價格扭曲程度、工業電價、能源進口成本占 GDP 比重、能源出口價值占 GDP 比重等 6 個次指標；環境永續類包含替代能源及核能、單位電力生產所排放的二氧化碳、能源部門之人均甲烷(CH₄)排放量、能源部門之人均氧化亞氮(N₂O)排放量、懸浮微粒(PM_{2.5/10})濃度、平均汽車燃油經濟性等 6 個次指標(不過受限於資料取得不易，平均汽車燃油經濟性次指標並未納入在本報告的評估當中)；能源取得與安全類則包含電氣化比率、電力供給品質、人口使用固體燃料烹煮之百分比、能源進口依賴程度、進口來源的多樣程度、初級能源總供給的多樣程度等 6 個次指標。

三大面向之權重各占三分之一，其設定之各別權重以及歷年調整內容如表 4 所示，並說明各指標之定義及意涵如後：

1. 經濟成長與發展

- (1) 能源生產力：GDP(經 PPP 調整)除以能源使用量表示。若能源生產力越高代表能源效率越佳，可降低國家能源經濟風險。
- (2) 能源進口成本占 GDP 比重：以能源進口值佔 GDP 比率表示。因進口為 GDP 減項，進口值越高則一國之 GDP 越低，同時亦作為能源部門對經濟負成長影響的指標。
- (3) 能源出口價值占 GDP 比重：以能源平衡表估計出口總金額，再除以 GDP 表示。因出口為 GDP 加項，若一國之能源出口價值越高則有助於 GDP 提升、促進經濟成長，可作為能源部門對經濟正成長影響的指標。

表 4 EAPI 各項指標歷年採用情況與權重變化

大類	次指標名稱	2013年		2014年		2015年		2016年		2017年	
		採用	權重	採用	權重	採用	權重	採用	權重	採用	權重
經濟成長與發展	能源生產力	●	0.25	●	0.25	●	0.25	●	0.25	●	0.25
	能源進口成本占GDP比重	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125
	能源出口價值占GDP比重	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125
	汽油價格扭曲程度	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125
	柴油價格扭曲程度	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125	●	0.125
	工業電價	●	0.25	●	0.25	●	0.25	●	0.25	●	0.25
權重合計		1		1		1		1		1	
環境永續	替代能源及核能占總能源使用比重	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
	電力生產所排放的二氧化碳	■	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
	能源部門人均甲烷(CH ₄)排放量			●	0.125	●	0.125	●	0.1	●	0.1
	能源部門人均氧化亞氮(N ₂ O)排放量	●	0.2	●	0.125	●	0.125	●	0.1	●	0.1
	懸浮微粒濃度 (PM ₁₀ /PM _{2.5})	●	0.2	●	0.2	●	0.2	◆	0.2	◆	0.2
	平均汽車燃油經濟效率	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
權重合計		1		1.05		1.05		1		1	
能源取得與安全	電氣化比率	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
	電力供給品質	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
	人口使用固體燃料烹煮之百分比	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
	初級能源總供給的多樣程度(淨出口/淨進口)	●	0.2	●	0.2/0.125	●	0.2/0.125	●	0.2/0.1	●	0.2/0.1
	能源淨進口占能源使用比重	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2	●	0.2
	進口來源國的多樣程度(淨出口/淨進口)			●	0/0.125	●	0/0.125	●	0/0.1	●	0/0.1
權重合計(淨出口/淨進口)		1		1/1.05		1/1.05		1		1	

註：■表示其採用單位與其它年度不同；◆表示懸浮微粒濃度採用 PM2.5 數據。

資料來源：WEF(2016)，本報告整理。

- (4) 汽油價格扭曲程度：參考 GIZ 之 International Fuel Prices 報告(每兩年公布一次)進行設算，數值為 1 代表無扭曲，公式如下：

$$\text{扭曲程度} = (1 - |A - B| \times C)$$

其中，A = GIZ 報告中類別 3 最大值與類別 4 最小值兩者之平均，B = 各國家每公升汽油/柴油價格(單位為美分)，C = 標準差。

因價格扭曲可能係受補貼或課稅所影響，若一國之能源價格存在補貼，除了造成經濟體財政負擔外，亦等同鼓勵能源耗用，故需與全球市場進行校準，以促進經濟成長、能源效率，亦降低財政支出；若一國能源價格課徵過高的稅率，則可能對消費端增加較高的能源使用成本、造成物價上升，進而不利於經濟發展。是故，一國之能源價格因補貼或課徵過高稅率導致扭曲程度越高，均不利於經濟成長。

- (5) 柴油價格扭曲程度：參考 GIZ 之 International Fuel Prices 研究報告進行設算，數值為 1 代表無扭曲，其意涵同上。
- (6) 工業電價：單位須換算為美元/度表示。一國工業電價越低表示產業能源使用成本較低，進而有助於經濟成長。

2. 環境永續

- (1) 替代能源及核能：即替代能源(含生質能、水力、地熱、太陽能、風力發電等)及核能占總能源使用的比例。增加替代能源及核能在能源使用中的比率，顯示一國降低對化石燃料的依賴，進而減少溫室氣體排放和空氣污染。此外，此指標亦假設核能相對於化石燃料更為安全且友善環境。
- (2) 單位電力生產所排放的二氧化碳：即每度電所產生的二氧化碳量，又稱為電力排放係數，單位為 gCO_2/kWh 。由生產電力所產生的碳排放對氣候變遷造成影響，進而導致環境破壞，若此數值越高則對環境將造成越大衝擊。而為與其他國家有相同的統計基礎，本報告計算此次指標所選擇的二氧化碳數據來源出自國際能源總署(International Energy Agency, IEA)，其數值較經濟部能源局的統計資料略高。
- (3) 能源部門之人均甲烷(CH_4)排放量：能源部門甲烷排放量(千公噸二氧化碳當量)除以總人口數。甲烷為溫室氣體之一，排放甲烷對氣候產生負面影響。
- (4) 能源部門之人均氧化亞氮(N_2O)排放量：以能源部門氧化亞氮排放量(千公噸二氧化碳當量)除以總人口數。氧化亞氮是破壞臭氧層之化合物之一，亦是溫室氣體之一，也會對呼吸系統產生負面影響。
- (5) 懸浮微粒($\text{PM}_{10/2.5}$)濃度：可直接由官方單位之統計資料取得，單位為微克/立方公尺。懸浮微粒會引起急性下呼吸道感染和其他疾病，如癌症，且細微粒($\text{PM}_{2.5}$)會深入至肺部組織中，危害性大於粗微粒(PM_{10})。而在計算時，WEF 的 2013-2015 年之 EAPI 報告使用 PM_{10} 濃度，2016-2017

年之 EAPI 報告則改用 PM_{2.5} 濃度，為求一致，本報告也仿效處理。

- (6) 平均汽車燃油經濟性：即每百公里所需油耗量，單位為 Liter/100km。在增進環境永續性中，運輸部門扮演最重要的角色之一，全球約有 50% 以上的油品用於運輸，故燃料效率直接地影響污染排放，故以此指標衡量一國運輸系統的效率程度，而以平均汽車燃油經濟性作為運輸部門的代理變數。惟受限於資料不足，本報告在本地化及國際排序時並未納入此指標，並將其權重平均攤提給本構面的另外五項次指標。

3. 能源取得與安全

- (1) 電氣化比率：即取得或可接觸電力人口占總人口比率，此數值越高，代表該國人民可取得或接觸電力的比率越高，亦代表家庭可負擔電力使用的比率越高。而根據世界銀行資料，中國大陸於 2014 年的電氣化比率已達 100%，考量台灣的電氣化程度理應不小於中國大陸，故將此次指標設定為 100%。
- (2) 電力供給品質：其數據來源為 WEF 發布知名的「全球競爭力報告(The Global Competitiveness Report)」所進行之「企業主管意見調查(Executive Opinion Survey)」，該問卷以企業主管為訪談對象，詢問對該國電力供應品質之感受，1 分為電力不足並時常斷電、7 分為電力充裕且可信賴。
- (3) 使用固體燃料烹煮之人口百分比：因仍有大量人口採用傳統的生物質能源，如木頭或肥料，若家庭在通風不良處使用爐具燃燒此類物質將產生空氣污染，預計於 2030 年時可能導致每年有 150 萬人提早死亡，隱含需進行潔淨爐具設備投資以因應此課題。而根據 WEF 的編製說明，若人均國民所得毛額超過 10,500 美元，且缺乏該項資料的情形下，可假設其人口使用固體燃料烹煮之百分比為 0%。因台灣自 1992 年起，人均國民所得毛額已超過設定金額，故將此次指標設定為 0%。
- (4) 能源進口依賴程度(能源淨進口)：能源總需要(能源使用)減去自產能源可得淨進口能源，再將淨進口能源除以能源總需要(能源使用)算出其占比。若一國能源進口依賴程度越高則對國家能源安全威脅性越大，受國際能源價格暴漲和供給衝擊影響亦大，將提升國家能源經濟風險。
- (5) 初級能源總供給的多樣程度：以 HHI 指標作為能源供給多樣程度之衡量。首先計算各類能源(煤、原油、天然氣、水力、核能、地熱、風力、太陽能、生質能等)占總初級能源比重之平方，再加總求得 HHI。若指標數值越低，則初級能源總供給的多樣程度越高，一國的能源安全亦越高。
- (6) 進口來源國的多樣程度：以 HHI 指標作為進口來源多樣程度之衡量。首先計算本國由各類能源品項進口國之進口金額占本國能源品項總進口值比率，得出各國對本國能源品項貿易往來比重，再將份額平方加總求得 HHI。若此指標數值越低，則多樣程度越高，代表該國進口能源的風險較為分散，能減緩發生供給中斷時的衝擊，或是關稅、國際能源價格暴漲和政治決策風險等潛在風險。

(二) 標準化及資料處理

由於各項指標之單位不同，故加總時需做標準化處理，公式如下：

$$\text{標準化後 Score} = \begin{cases} 0, & X_{i,t} < \text{BASE} \\ (X_{i,t} - \text{BASE}) / (\text{TOP} - \text{BASE}), & \text{TOP} > X_{i,t} > \text{BASE} \\ 1, & X_{i,t} > \text{TOP} \end{cases}$$

其中，設定 TOP 與 BASE 兩個端值(原始資料平均值正負兩個標準差)時，需視該數據之意涵，其餘落於兩端值間之數據，服從線性分配。例如：原始指標數據為數字越大越佳者，TOP 的計算為平均值加兩個標準差，BASE 的計算為平均值減兩個標準差；反之，若原始指標數據為數字越小越佳者，則 TOP 與 BASE 的設定亦相反。

但實證時，由於部份指標使用之 TOP 與 BASE 值，可能不符合原始資料之經濟意涵或資料形態(例如懸浮微粒濃度平均值減兩個標準差為負值，但濃度不可能為負)，故將部分指標之 TOP 與 BASE 值做修正。經調整之指標名稱、修改後數值以及詳細說明請見表 5。

表 5 指標 TOP 值與 BASE 值調整說明

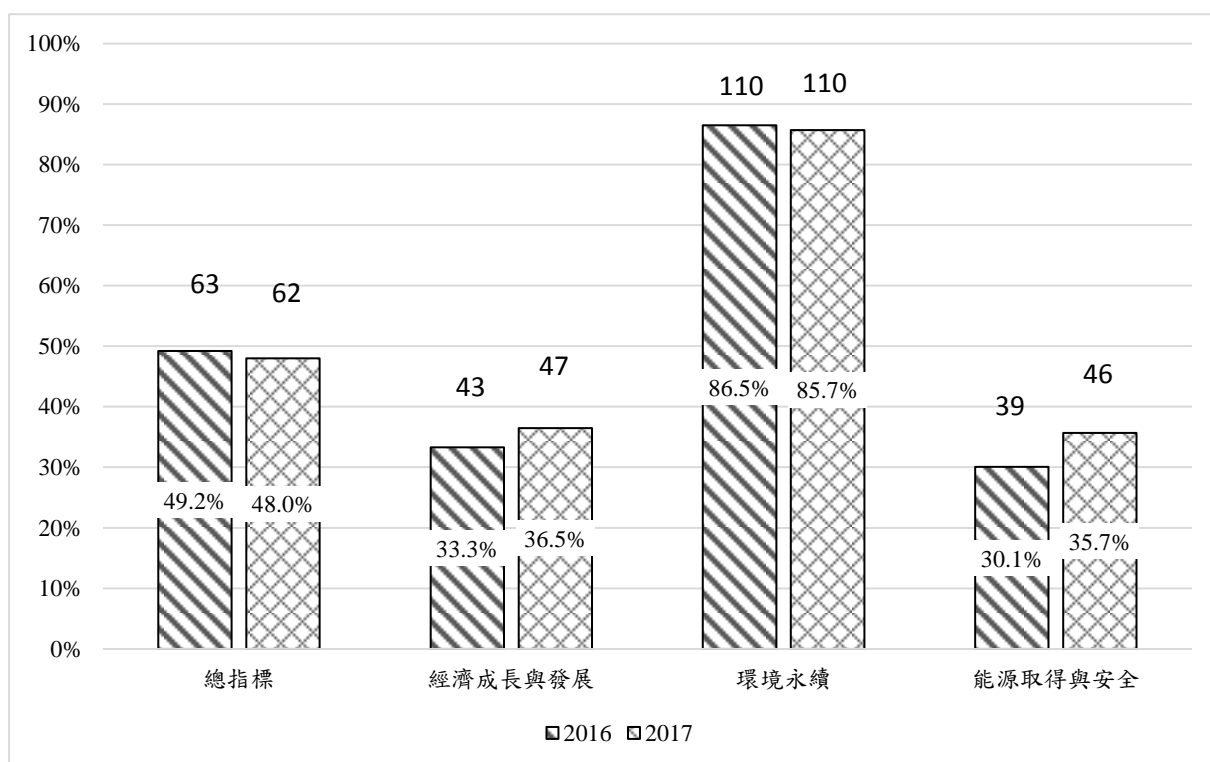
指標名稱	修改後 TOP 值	修改後 BASE 值	說明
汽油價格扭曲程度	1	0	因原始數據為 0-1 的指數型態，故最大為 1，最小為 0
柴油價格扭曲程度	1	0	因原始數據為 0-1 的指數型態，故最大為 1，最小為 0
能源部門之人均氧化亞氮排放量	0	未更動	因該指標數據最小是 0，不可能為負值，故將原本負的 TOP 值修改為 0
電力生產所排放的二氧化碳	0	未更動	因該指標數據最小是 0，不可能為負值，故將原本負的 TOP 值修改為 0
能源部門之人均甲烷排放量	0	未更動	因該指標數據最小是 0，不可能為負值，故將原本負的 TOP 值修改為 0
懸浮微粒(PM _{2.5/10})濃度	0	未更動	因該指標數據最小是 0，不可能為負值，故將原本負的 TOP 值修改為 0
電氣化比率	100	0	因本指標最大不會超過 100，最小為 0
電力供給品質	7	1	因原始數據為 1-7 的 index 型態，故最大為 7，最小為 1
人口使用固體燃料烹煮之百分比	0	100	因本指標最大不會超過 100，最小為 0
初級能源總供給的多樣程度	0	1	因本指標為 HHI 數值，故極值應介於 0 和 1 之間
進口來源國的多樣程度	0	1	因本指標為 HHI 數值，故極值應介於 0 和 1 之間

資料來源：本報告整理。

各指標數據在標準化後會產生一數值，將該數值乘以其權重再加總後，即可獲得該國家之 EAPI 分數，惟若指標資料數據出現 n/a 時，會將其權數攤提至該所屬分類之其他次指標。

二、 能源建構績效指標之實證結果

根據實證結果，台灣之能源建構績效指標排名呈現如圖 12，序位越前面表現越佳，就總指標排名方面，以 2017 年為例，在評比之 128 個國家當中，台灣名列第 62 序位，大約為前 48%。而細看三大構面，近年台灣在經濟發展與成長面的排名序位較 2016 年略為退步，不過仍位於前三分之一。另外，台灣在環境永續面則表現不佳，大約位於後五分之一位置。最後，在能源取得與安全面的部份，台灣則在 128 個評比國家當中排名 46 位，序位為前 35.7%。



資料來源：本報告計算。

註 1：圖中所指年份為報告發布年份，非實際數據年份，台灣數據年份與 WEF 一致。

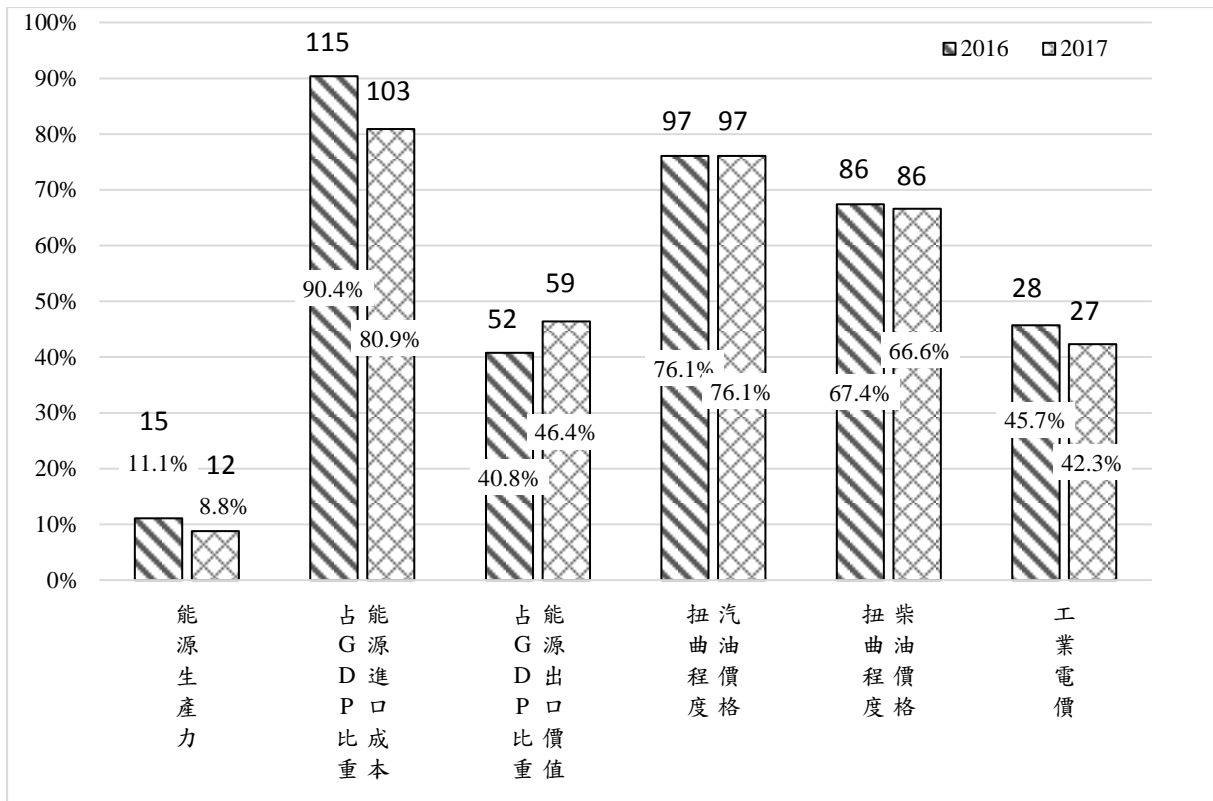
註 2：未必同一年份各次指標比較國家數目皆相同。

註 3：長條圖裡之百分比表示台灣數值在該次指標所在排序位置；長條圖上之數字表示台灣數值在該次指標所排列之名次。

圖 12 台灣之能源建構績效指標排名

1. 經濟成長與發展構面

觀察台灣 EAPI 經濟成長與發展面的六項次指標排名(如圖 13)。雖然相對 2016 年，2017 年有三項次指標排名進步，一項次指標的排名惡化，兩項次指標的排名持平，但因為能源出口價值占 GDP 比重排名退步幅度較大，使得經濟成長與發展面的整體排名在 2017 年下降到第 47 名，比 2016 年退步 4 名(如圖 12)。以下針對各次指標的變化趨勢(如圖 14)分別作更詳細討論。



資料來源：本報告計算。

註 1：圖中所指年份為報告發布年份，非實際數據年份，台灣數據年份與 WEF 一致。

註 2：未必同一年份各次指標比較國家數目皆相同。

註 3：長條圖裡之百分比表示台灣數值在該次指標所在排序位置；長條圖上之數字表示台灣數值在該次指標所排列之名次。

圖 13 EAPI 經濟成長與發展大類各次指標變化

(1) 能源生產力(經 PPP 調整)：

近年來，台灣之能源生產力指標數據逐年轉佳，由 2013 年的每公斤油當量 12.45 美元上升至 2017 年的每公斤油當量 14.46 美元。年均成長率為 3.74%，而 2016-2017 年能源生產力指標成長 4.25%，故近年成長速度較前幾年增加。而其他國家的能源生產力指標平均值亦呈現轉佳趨勢，從 2013 年的每公斤油當量 7.14 美元上升至 2017 年的每公斤油當量 9.28 美元，年均成長率為 8.89%，2016-2017 年能源生產力指標成長 1.64%，近年成長速度較前幾年減慢。(見圖 14)

在上述的趨勢之下，2017 年台灣的能源生產力指標排名為 128 國的第 12 名，為前 8.8 百分位，較 2016 年(第 15 名，11.1 百分位)有微幅的進步。(見圖 13)

(2) 能源進口成本占 GDP 比重：

台灣於 2015 年至 2017 年間能源進口成本占 GDP 比重有逐年下降的趨勢。其中，在 2016 至 2017 年間，能源進口成本占 GDP 比重即大幅減少 42.3%，其原因為國際油價大幅下跌，使能源進口總額降低，顯著改善

此指標。於此同時，各國能源進口成本占 GDP 比重指標平均值的變化趨勢也與台灣雷同，2016-2017 年能源進口成本占 GDP 比重指標減少 27.60%。

由於台灣能源進口成本占 GDP 比重下降幅度大於各國平均水準(見圖 14)，故在此次指標的排名有所提升，唯因台灣多數能源仍來自進口，提升之幅度有限，故仍在所有 128 國中排第 103 名，為 80.9 百分位，表現屬於後段班。(見圖 13)

(3) 能源出口價值占 GDP 比重：

台灣能源出口價值占 GDP 比重在 2013 至 2017 年間呈現一凸形(見圖 14)，亦即呈現先好再衰的變化，在 2016-2017 年間，能源出口價值占 GDP 比重減少幅度達 42.15%，原因主要在於我國所出口的石油製品，受國際油價下跌的影響，導致產品售價大跌的緣故。相對地，各國能源出口價值占 GDP 比重的平均值則在 2013-2017 年間呈現較為穩定的下降趨勢，其中在 2017 年能源出口價值占 GDP 比重大幅減少 36.89%。(相關數值走勢見圖 14)

在此狀況之下，台灣與各國能源出口價值占 GDP 比重的世界排名，於 2017 年出現微幅退步的狀態，由第 52 名退步到第 59 名，百分等級亦由 40.8% 退步到 46.4%。(見圖 13)

(4) 汽油價格扭曲程度

油品補貼與油品稅率為影響油價之重要因子，較高的補貼會使得價格變得更有競爭力，但會造成政府財政上的負擔，以及燃料使用浪費；而較高的油品稅率雖可提升稅收，但增加消費者的成本，故適宜稅率對公部門或私部門均有其必要性。此外，因消費者會隨時間而改變消費行為，一般而言長期下之能源需求彈性值較大，因此價格變化將對油品需求有顯著影響，進而導致稅收有相對較大的變動。故設定合理之油品價格，對於促進經濟、能源效率以及減少國家的財政負擔有很大助益，這也是該指標的最大意義。本指標以 0 到 1 間的指數形式呈現，若該指標數值越接近 1，則表示越接近 GIZ 所設定之最適價格(Optimal Price)，隱含補貼或課稅較少、越接近市場自由機制。

而觀察近年台灣汽油價格扭曲的程度，呈現出了一個先優再差的現象(如圖 14)，主要原因在於：

- A. 我國政府於 2012 年 3 月 16 日提出「油電價調整方案」，與油價相關的部分為將油價緩漲機制調高門檻，不再採取減半調漲機制，另外 2013 年 7 月也通過新的油價幅動公式，將中油油價成本分購油與營業費用，購油費用原來依照原油價變動幅度的 8 成來調整國內油價，後改為百分之百反映，而原本以 92 無鉛汽油為調價油品基準，後改為較貴的 95 無鉛汽油，經過修改後，顯示政府干預市場價格程度降低。然而，因 EAPI 報告所採用的數據資料之年份有落後情形，故政府干

預市場程度降低的狀況，遲至 2013-2014 年汽油價格扭曲程度指標才呈現提高轉佳情況。

- B. 2014 年因美國頁岩油革命，在需求減緩與原油供給大量提升下，導致國際油價大幅下跌，而台灣根據油價公式所調降的國內各類油品價格也隨之調降，相對 GIZ 所設定之最適價格差距變大，並反映在 2015-2017 年間的數據。

另一方面，各國汽油價格扭曲程度的平均值在 2013-2017 年間，並沒有太大的波動，亦即各國汽油零售價格，相對於 GIZ 所設定之最適價格，平均而言，並沒有太大變化，也顯示全球油品市場自由化的程度相當穩定。

不過值得注意的，由於 GIZ 的 International Fuel Prices 報告每兩年才出版一次，故台灣與各國汽油價格扭曲程度在 2016 及 2017 年並沒有變化，故在研究期間，台灣在此次指標的排名均為第 97 名，百分等級亦均為 76.1%，這也顯示出台灣在油品相關稅率離最適稅率仍有一段差距。

(5) 柴油價格扭曲程度

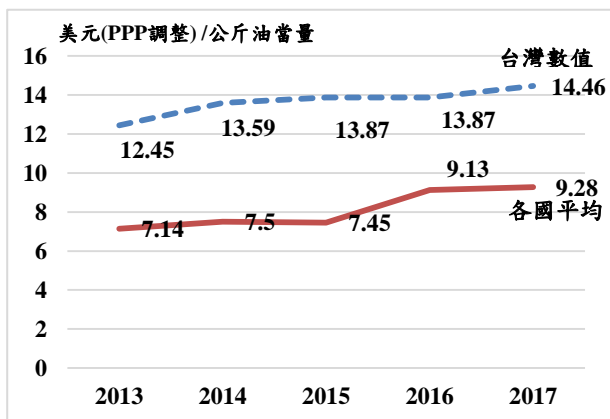
柴油價格扭曲程度的計算概念與經濟意涵同汽油價格扭曲程度，故台灣數值與世界各國的該指標平均值的變化趨勢與汽油價格扭曲程度指標一致(如圖 14)。簡而言之，台灣在 2016 及 2017 年的柴油價格扭曲程度，在 128 個國家中排名均為第 86 名，百分等級則分別為 67.4% 及 66.6%，稍優於汽油價格扭曲程度的表現。(如圖 13)

(6) 工業電價

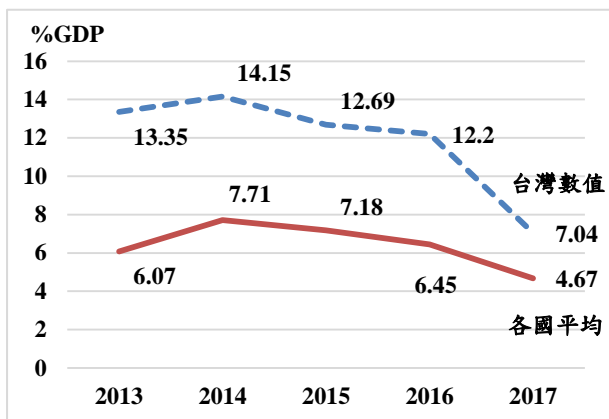
在工業電價部份，WEF 原報告採用的數據之年份有延遲，故我國在 2015-2017 年間所出現的工業電價上漲，係反映自 2012 年後的國際燃料價格上漲(如圖 14)。由於工業電價越高，對經濟成長與發展越不利⁸，故 2015 年後工業電價的走高，導致此項指標的排名有所惡化，惟 2017 年，我國工業電價相對其他國家(僅 64 國納入報告評比)平均值降低，故較 2016 年好轉，在 64 個國家中，排第 27 名，百分等級 42.3%。這個狀況也顯示了，近年政府減少住宅用電價格上漲幅度，使之原本與工業用電價格較大差距的狀況有所縮減。

⁸ 理論上，工業電價越高，造成工業電力消費量減少，進而使環境面汙染降低，會反映在環境永續面。

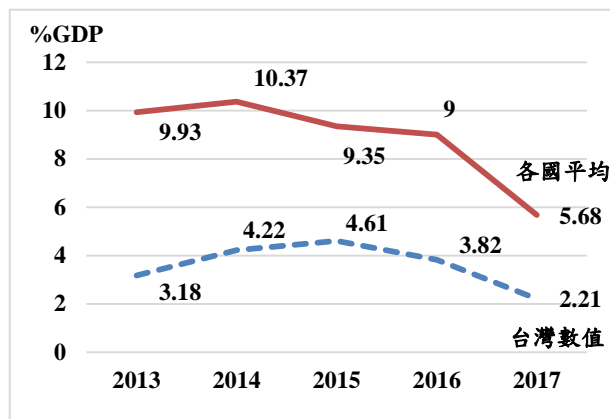
能源生產力



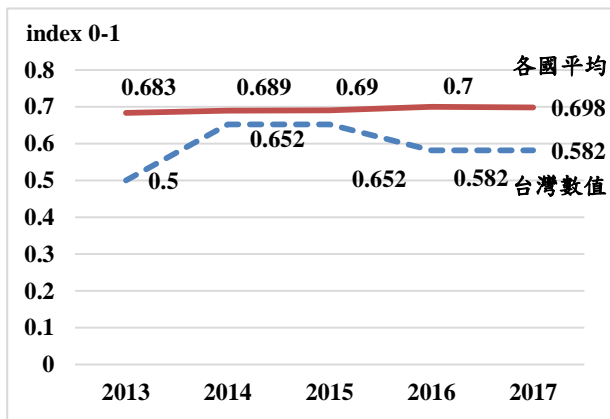
能源進口成本占 GDP 比重



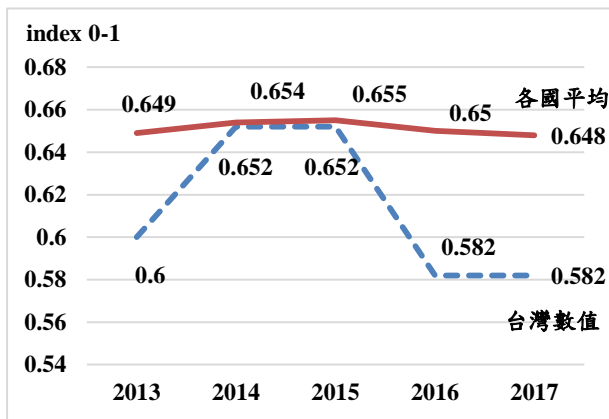
能源出口價值占 GDP 比重



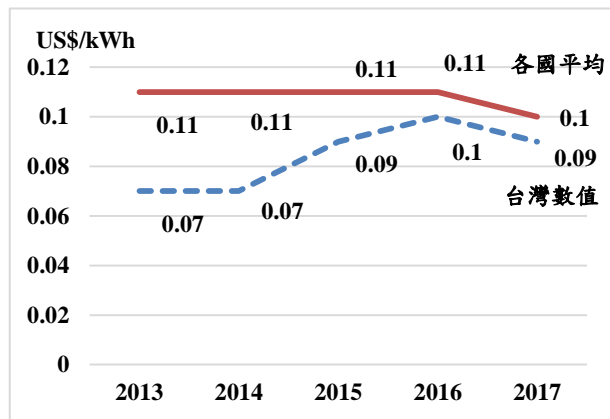
汽油價格扭曲程度



柴油價格扭曲程度



工業電價



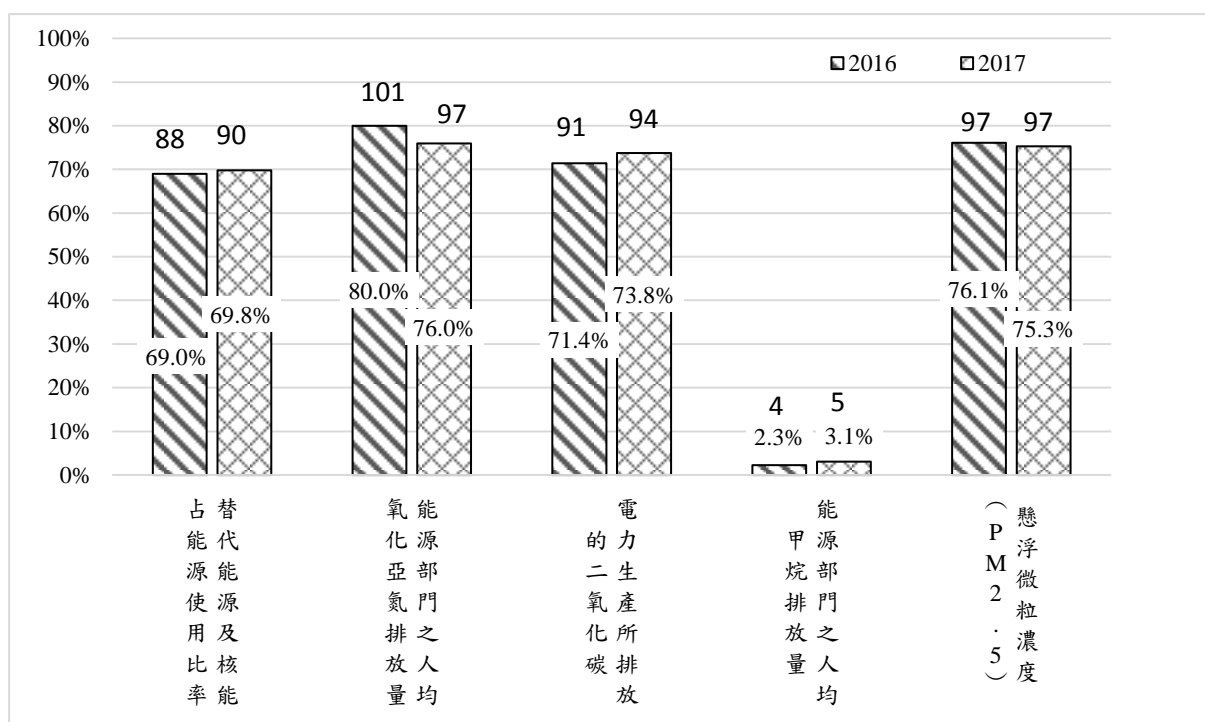
資料來源：本報告整理。

圖 14 EAPI 經濟成長與發展大類各次指標歷年趨勢

2. 環境永續構面

在原始的 WEF 的 EAPI 報告中，環境永續面共有六項次指標，但是受限於 WEF 的保密協定，以及台灣資料無法取得的限制，本報告並未進行平均燃油經濟性指標的本土化及國際排序，並將其權重平均均攤給本構面的另外五項次指標。

圖 15 呈現了台灣在環境永續面的五項次指標排名結果，整體而言，在 2016 年至 2017 年間，各次指標的排名沒有太大差異，使得整體環境永續面排名依然在 2017 年維持第 110 名，與 2016 年相同(如圖 12)。以下將針對各次指標分別作更詳細的討論。



資料來源：本報告計算。

註 1：圖中所指年份為報告發布年份，非實際數據年份，台灣數據年份與 WEF 一致。

註 2：未必同一年份各次指標比較國家數目皆相同。

註 3：長條圖裡之百分比表示台灣數值在該次指標所在排序位置；長條圖上之數字表示台灣數值在該次指標所排列之名次。

圖 15 EAPI 環境永續大類各次指變化

(1) 替代能源及核能占能源使用比率：

台灣與各國平均的替代能源及核能占能源使用比率的變化趨勢如圖 16 所示。自 2013 年至 2017 年，台灣之替代能源及核能占能源使用比率微幅下降，2017 年占比僅 10.28%。主要係因再生能源的增幅未能即時填補核電發電實績降低造成的缺口。於此同時，各國的替代能源及核能占能源使用比率平均值則呈現轉佳趨勢，2017 年已達 29.49%。

在上述的趨勢之下，2017 年台灣替代能源及核能占能源使用比率的排名

降到第 90 名，百分等級 69.8% (見圖 15)。除相較 2016 年退步兩名之外，考量非核家園政策目標下，現有核電廠將屆齡除役，核四廠仍處封存狀態，而我國短期再生能源占比提升的可能性仍低，故未來幾年此項次指標持續惡化的機會較高，不利於我國在環境永續面的績效表現。

(2) 能源部門之人均氧化亞氮排放量：

氧化亞氮(N_2O)為《京都議定書》所列的 6 種溫室氣體之一，也是導致臭氧層損耗的物質之一。氧化亞氮會於耕作、氮肥、生產尼龍以及燃燒化石燃料時產生，氧化亞氮與二氧化碳相比在大氣中的含量雖低，但其單分子增溫潛勢卻是二氧化碳的 296 倍，故對全球氣候的增溫效應影響相當大。根據聯合國政府間氣候變化專門委員會(IPCC)的數據顯示，種植農作物所使用氮的肥料中，有 2% 的氮會轉化成氧化亞氮釋出；故若以玉米等生質燃料取代傳統化石燃料的同時，亦要注意耕種過程產生的氧化亞氮對環境的影響。

台灣能源部門之人均氧化亞氮排放量在 2013-2017 年間，雖有所降低，但仍穩定高於其他 127 個國家的平均值(見圖 16)。故在此次指標的排名評比上，僅由 2016 年的第 101 名進步到第 97 名，百分等級則為 76%，在全球排名上仍屬於後段班(見圖 15)。

(3) 單位電力生產所排放的二氧化碳：

影響單位電力生產排放的二氧化碳量(又稱為電力排放係數)的主因為一國的發電結構，當前我國各類燃料的發電量占比分別為燃煤發電 39%、燃油發電 5%、燃氣發電 37%、核能發電 14%、水力發電 4%，而風力發電和太陽光電合計占比則約為 1%。跟早前(2000 年前)相比，核能發電、燃油發電在電源配比中的角色大幅降低，同時燃氣發電、燃煤發電的重要性大幅提升，而不含水力的再生能源占比則不及 2%。

而在樣本期間，我國的單位電力生產的二氧化碳排放量則呈現下降趨勢，由 2014 年的 633(gCO_2/kWh)降到 2017 年的 581(gCO_2/kWh)⁹。而同期間，各國平均值則從 453(gCO_2/kWh)降到 433(gCO_2/kWh)，整體平均值的降幅沒有比我國來的顯著。(見圖 16)

而在近兩年排名方面，我國在此次指標由 2016 年的第 91 名(71.4 百分位)微幅退步到 2016 年的第 94 名(73.6 百分位)，雖然衰退幅度並不大，但考量到替代能源及核能占能源使用比率次指標的影響，本次指標在未來幾年可能仍無法替台灣在環境永續面爭取更好的績效評比。(見圖 15)

(4) 能源部門之人均甲烷排放量：

⁹ 為與其他國家有相同的統計基礎，以利跨國比較支用，本報告計算此次指標所選擇的二氧化碳數據來源出自國際能源總署(International Energy Agency, IEA)，其數值較國內機構(如經濟部能源局與台電公司)的統計資料為高。舉例來說，根據政府資料開放平台(<https://data.gov.tw/dataset/30151>)的資料顯示，2015 年國家電力排放係數為 528(gCO_2/kWh)、台電公司(僅台電系統)電力排放係數則為 487(gCO_2/kWh)，均低於本報告採用的 581(gCO_2/kWh)。

相對於其他環境永續面的次指標來說，能源部門之人均甲烷排放量的表現相對優異，長期以來，均遠低於世界各國的平均值。以 2017 年為例，台灣的能源部門之人均甲烷排放量僅 0.02 公噸二氧化碳當量，而各國平均則高達 0.88 公噸二氧化碳當量(見圖 16)。主要原因是我國自產天然氣占比僅占總天然氣使用的 1%，故較其他國家為低。

總的來說，2016 年與 2017 年，我國在此次指標的排名分別為第四名(2.3 百分位)及第五名(3.1 百分位)。不過值得注意的是，由於此項次指標未來要改善的空間極小，而隨著其他國家的能源部門針對甲烷排放量減少的努力，我國透過這項次指標提升環境永續面的整體評比空間將更形縮減。(見圖 15)

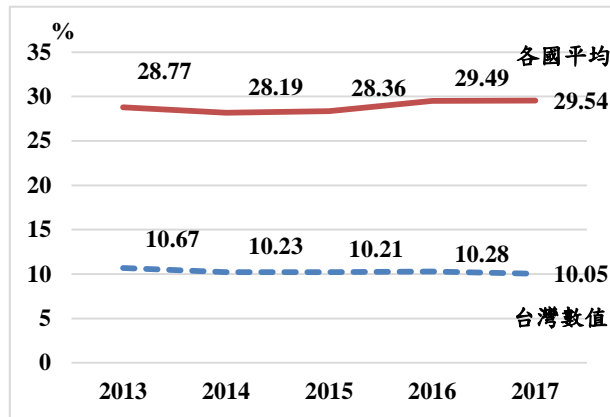
(5) 懸浮微粒($PM_{2.5/10}$)濃度：

在 WEF 歷年的 EAPI 報告中，先是使用了懸浮微粒(PM_{10})濃度作為代理變數捕捉能源部門的固定源空氣汙染排放對環境與人體健康的影響。不過考量細懸浮微粒($PM_{2.5}$)因為能深入人體肺部組織，其健康影響遠大於 PM_{10} ，故自 2016 年起的報告，改以細懸浮微粒($PM_{2.5}$)濃度取代。因此，也造成追蹤此項次指標的歷史變化趨勢時，在 2016 年出現的結構性轉變(見圖 16)。

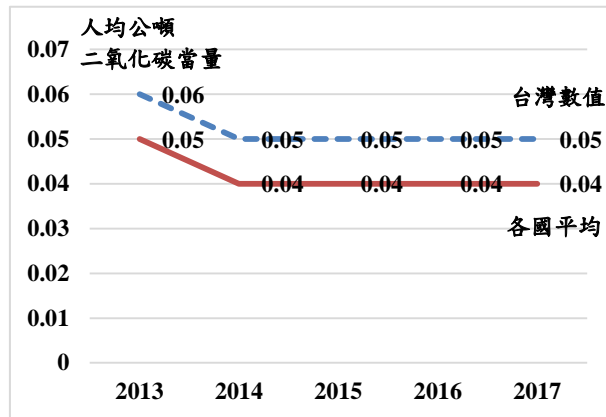
不過即使如此，仍可以發現台灣的懸浮微粒濃度($PM_{2.5/10}$)濃度，仍長期高於各國的平均值，2016 與 2017 年分別為 $23.99(mg/M^3)$ 及 $22.04(mg/M^3)$ (見圖 16)，雖有所改善¹⁰，但仍不足使台灣在此次指標的排名提升，兩年的排名均為第 76 名(見圖 15)。

¹⁰ 為與其他各國資料時間一致，本次指標數據有四年的延遲(即 2017 年反應的為 2013 年之數據)，為本次指標所呈現之趨勢與當前民眾感受有所不同之原因。

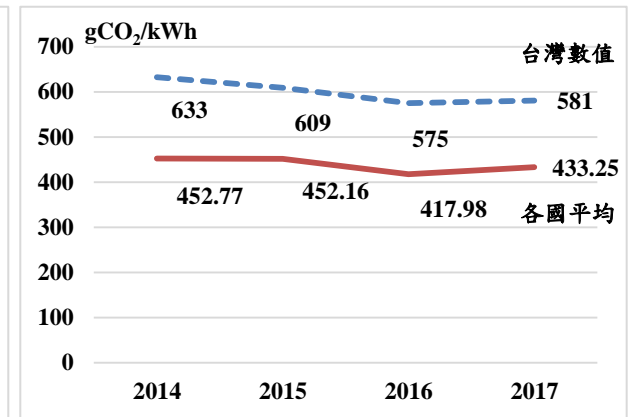
替代能源及核能占比



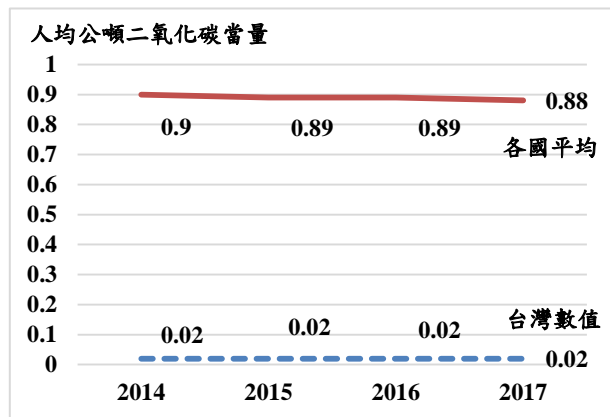
能源部門之人均氧化氮排放量



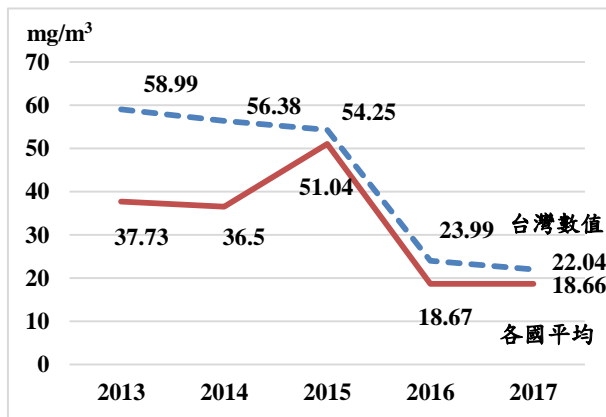
單位電力生產所排放的二氧化碳



能源部門之人均甲烷排放量



懸浮微粒濃度



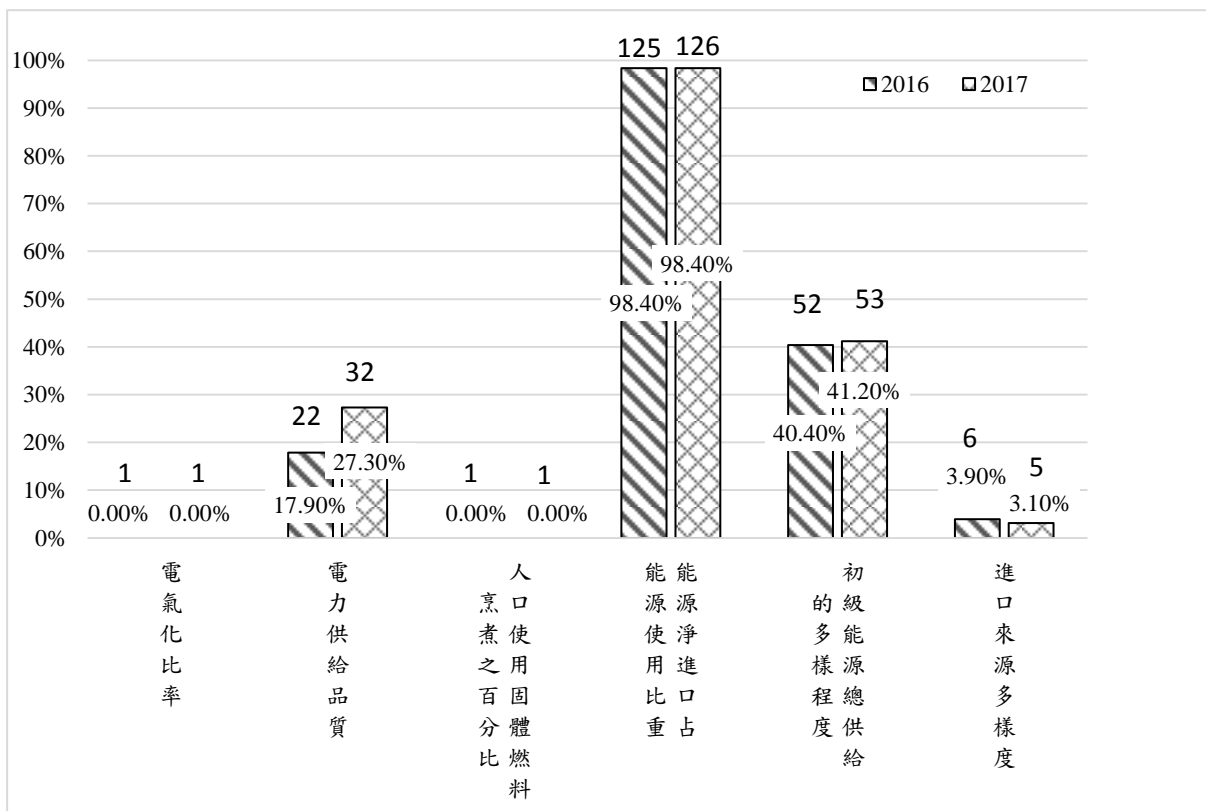
資料來源：本報告整理。

圖 16 EAPI 環境永續大類各次指標歷年趨勢

3. 能源取得與安全構面

能源取得與安全構面同時考量了該國能源部門提供人民可負擔能源的程度與該國能源供應安全的程度，台灣在各項次指標排名結果如圖 17。六項次指標中，有五項不是持平，就是變化幅度不大。不過，電力供應品質次指標的排序出現了較大幅度的衰退是造成能源取得與安全構面的整體排序由 2016 年的第 39 名(30.1 百分位)退步到 2017 年的第 46 名(35.7 百分位)的主要原因。

然而應再次提醒的是，為了方便進行跨國比較，此構面並非完全針對國家的能源安全風險或脆弱程度而設計，故不易完整確知一國能源安全風險程度。故針對台灣的能源安全風險或脆弱程度的趨勢與分析，本報告留待第四章的能源經濟脆弱度再作研討。



資料來源：本報告計算。

註 1：圖中所指年份為報告發布年份，非實際數據年份，台灣數據年份與 WEF 一致。

註 2：未必同一年份各次指標比較國家數目皆相同。

註 3：長條圖裡之百分比表示台灣數值在該次指標所在排序位置；長條圖上之數字表示台灣數值在該次指標所排列之名次。

圖 17 EAPI 能源取得與安全大類各次指標變化

(1) 電氣化比率：

一國可取得或接觸電力人口數占總人口比率代表的是該國人民可負擔電力使用程度，是評估人民生活水準的重要指標。根據世界銀行的資料，世界各國電氣化比率的平均值於 2013 年至 2017 年間，均在 86.78% 及 87.61% 波動，2017 年則是 87.56%。(見圖 18)

而台灣的電氣化程度雖然未見於 WEF 所引用的世界銀行的數據中，但考量在該數據內中國大陸於 2014 年的電氣化比率已達 100%，而台灣的電氣化程度理應不小於中國大陸；且全球能源網路研究所(Global Energy Network Institute, GENI)的資料¹¹中顯示，台灣早於 2005 年電氣化比率已達 100%；另外，根據經濟學人(The Economist)所做的「數位包容指標(Inclusive Internet Index)」中，針對電力基礎設施的市區電力可及性(Urban Electricity Access)與郊區電力可及性指標(Rural Electricity Access)均達 99%¹²。故本報告將之設定為 100%，與 68 個國家並列第一(2017 年)。

(2) 電力供給品質：

此次指標呈現的是企業主管對該國電力供應品質之感受，其數據的根據是 WEF 的「全球競爭力報告(The Global Competitiveness Report)」內的「企業主管意見調查(Executive Opinion Survey)」。

可以看到台灣的企業主管對於電力供應品質的平均感受(指數由 1 到 7，越高越好)，從 2014 年的 6.31 逐年降低到 2017 年的 6，由於 2017 年數據是取自於 2016 年的調查，故相當程度上顯示出了近年產業界對於國內電力供應穩定的疑慮(見圖 18)。在此狀況之下，此項次指標由 2016 年的第 22 名退步到 2017 年的第 32 名(見圖 17)。考量 2017 年國內曾發生 815 大停電事件，2018 年此項次指標呈現的企業主管感受將可能更形惡化，且短期或難以回復。

(3) 人口使用固體燃料烹煮之百分比：

人口使用固體燃料烹煮比率是台灣另一個與其他多數先進國家長期並列第一的次指標，以 2017 年為例，我國在人口使用固體燃料烹煮比率與 33 個國家並列第一。原因是 WEF 在編製此次指標，出現許多國家無法取得相關數據，故其方法論中設定：若人均國民所得毛額超過 10,500 美元，且缺乏該項資料的情形下，可假設其人口使用固體燃料烹煮之百分比為 0%，而我國自 1992 年起，人均國民所得毛額即已超過 10,500 美元，故設定為 0%。

我國在此次指標的排序雖然持續不變，但其對能源取得與安全構面的整體評比的影響，將隨其他國家的人口使用固體燃料烹煮之百分比的變化而波動，隨著整體世界生活水平的提升，此次指標對我國整體績效的貢獻將會減低。

(4) 能源淨進口占能源使用比重：

若一國能源進口依賴程度越高，受國際能源價格暴漲和供給衝擊影響亦大，對國家能源安全威脅性越大，而台灣自 2013 年至 2016 年，台灣之能源淨進口占能源使用比重指標數據雖有所下降，2017 年卻又增加到 98.04%(見圖 18)，使得我國在 128 個國家的評比當中，排在第 126 位，

¹¹ <http://www.geni.org/globalenergy/library/energytrends/electrification-ratios/index.shtml>

¹² <https://theinclusiveinternet.eiu.com/assets/external/downloads/inclusive-internet-index.xlsm>

百分等級為 98.40%，顯示我國能源稟賦的不足，極大多數的初級能源仰賴進口，面臨國際能源市場波動(例如價格暴漲)的風險極高。

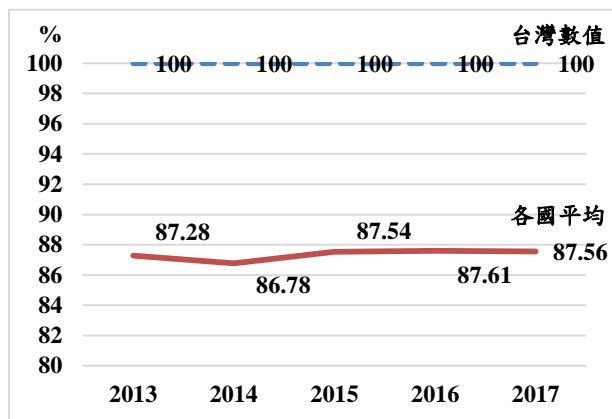
(5) 初級能源總供給的多樣程度：

WEF 以 HHI 指標衡量一國初級能源供給的多樣程度，2013 至 2014 年間，台灣之初級能源總供給的多樣程度指標數據持平，不過近年 HHI 指標微幅上升到 0.26，無太大變化。整體而言，優於世界各國的平均值(2013-2017 年間為 0.346~0.364)，2017 年排名約第 53 名，與 2016 年相差無幾。(見圖 17 及圖 18)

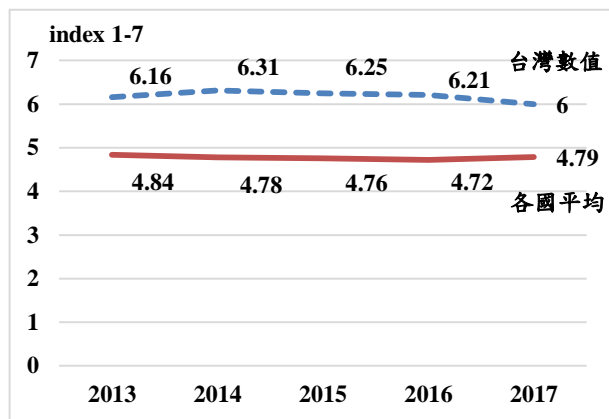
(6) 進口來源國多樣度：

若一國能源進口來源國多樣程度越低，則代表該國表示進口能源的來源較為集中，較容易受到地緣政治、關稅或外貿協議等潛在風險的影響，加深供給中斷時的衝擊，對國家能源安全威脅性越大。而台灣在過去五年，不但此項指標顯得相對穩定，且其數值更遠低於世界各國的平均值，2017 年排在世界第 5 位。將此次指標與前述的能源淨進口占能源使用比重一同分析，可以發現，以一極度依賴能源進口的國家來說，可以看出我國能源部門在分散能源進口來源的努力。(見圖 17 及圖 18)

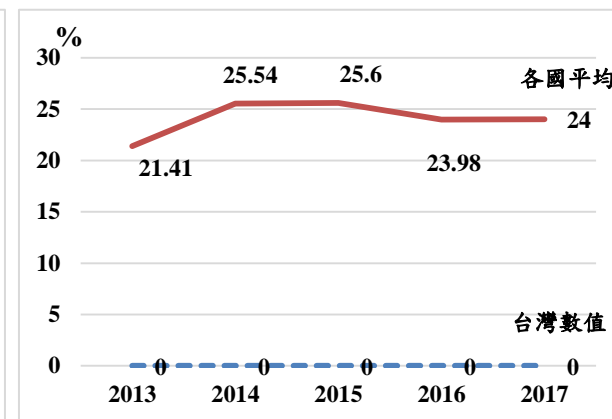
電氣化比率



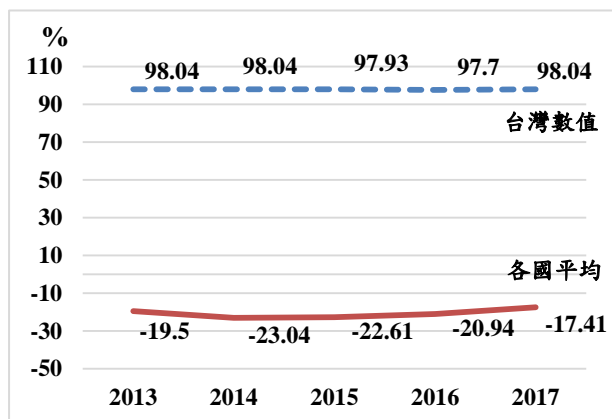
電力供給品質



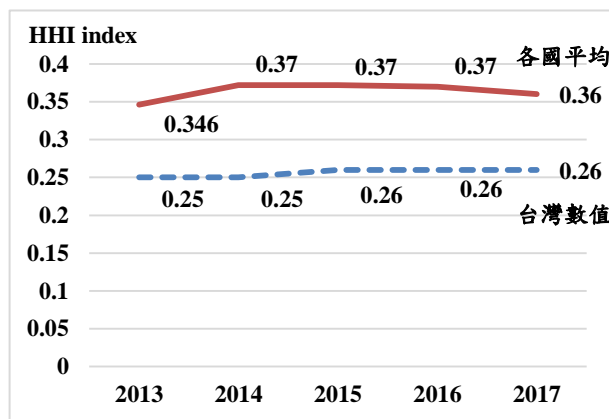
人口使用固體燃料烹煮之百分比



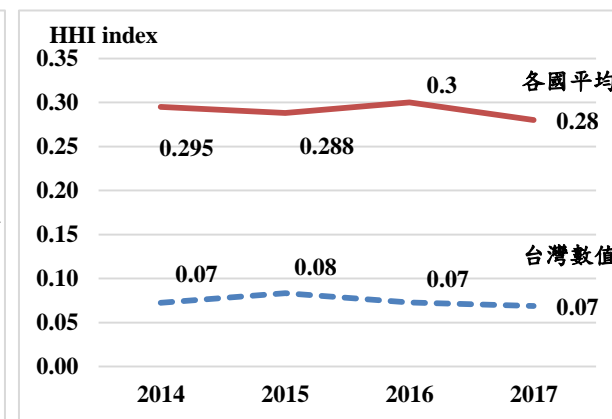
能源淨進口占能源使用比重



初級能源總供給之多樣程度



進口來源之多樣程度



資料來源：本報告整理。

圖 18 EAPI 能源取得與安全大類各次指標歷年趨勢

4. EAPI 指標之跨國比較

彙整與計算完成台灣 EAPI 總指標和各項次指標後，本報告亦進行台灣與其他主要的亞鄰、歐、美、中東國家之跨國比較。比較國家包含瑞士、英國、德國、法國、美國、俄羅斯、沙烏地阿拉伯、卡達、印度、澳洲、日本、韓國、新加坡與中國大陸等十四國，列示 2016 年(表 6)與 2017 年(表 7)各大類指標及總指標之名次變化，並說明相關結果如後。

以 2017 年為例，在總排名方面，瑞士為全世界排名最佳的國家，其次為法國，位居全球第 5 名，英國與德國則分別為第 15 名與第 19 名，新加坡、日本與韓國排名約在前三分之一左右位置，美國與澳洲、俄羅斯則位於前 40% 附近，台灣則約位於前 50%，印度、中國大陸、卡達與沙烏地阿拉伯的名次則相對較為落後。

- (1) 經濟成長與發展構面：以瑞士表現最佳，新加坡、澳洲、法國、英國與德國則落在前四分之一之前位置，台灣與韓國排名位於前三分之一位置附近，再來則為日本，俄羅斯、美國與印度名次較為接近，位於前 50% 位置，卡達與沙烏地阿拉伯的名次相對較於落後。
- (2) 環境永續構面：排序較佳的為法國和瑞士，排名位於全球前 20 名內，台灣在本構面表現為 EAPI 指標三個構面中最差，與美國、沙烏地阿拉伯、卡達、印度、澳洲及中國大陸共同位於最後五分之一的地位。
- (3) 能源取得與安全構面：瑞士、英國、美國與澳洲位在前十名內，表現最佳，台灣為第 46 名，位於前 35.4% 位置，中國大陸與印度在眾國家中表現最差。

表 6 2016 年台灣與其他國家之能源建構績效指標排名比較

主要國家 比較	總指標		經濟成長與發展		環境永續		能源取得與安全	
	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
瑞士	0.79	1	0.72	5	0.76	18	0.88	7
英國	0.71	16	0.60	33	0.66	55	0.89	6
德國	0.7	24	0.58	39	0.63	62	0.87	14
法國	0.76	4	0.6	30	0.80	8	0.88	11
美國	0.64	48	0.54	59	0.5	103	0.89	4
俄羅斯	0.64	52	0.55	57	0.58	80	0.79	42
沙烏地 阿拉伯	0.48	114	0.4	104	0.21	125	0.82	27
卡達	0.5	11	0.47	31	0.25	24	0.78	18
印度	0.53	90	0.51	68	0.49	108	0.61	96
澳洲								
中國大陸	0.53	94	0.45	85	0.42	113	0.71	69
新加坡	0.68	36	0.68	9	0.55	94	0.81	36
韓國	0.63	55	0.55	56	0.52	101	0.84	22
日本	0.64	50	0.53	62	0.56	90	0.84	20
台灣	0.61	63 (49.2%)	0.57	43 (33.3%)	0.47	110 (86.5%)	0.80	39 (30.1%)
126 國 平均得分 (不含台灣)	0.60		0.51		0.61		0.68	
127 國 平均得分 (含台灣)	0.60		0.51		0.61		0.68	

註：括弧內數字表示百分位排序。

資料來源：Energy Architecture Performance Index 2016 報告，本報告整理。

表 7 2017 年台灣與其他國家之能源建構績效指標排名比較

主要國家 比較	總指標		經濟成長與發展		環境永續		能源取得與安全	
	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
瑞士	0.8	1	0.74	3	0.77	16	0.88	7
英國	0.72	15	0.62	29	0.66	50	0.89	6
德國	0.71	19	0.62	31	0.64	58	0.88	15
法國	0.77	5	0.62	28	0.81	6	0.88	11
美國	0.65	52	0.54	63	0.50	105	0.89	5
俄羅斯	0.65	48	0.55	62	0.6	75	0.8	37
沙烏地 阿拉伯	0.46	121	0.36	116	0.21	126	0.81	32
卡達	0.48	116	0.41	101	0.25	124	0.77	51
印度	0.55	87	0.54	64	0.49	109	0.62	95
澳洲	0.64	53	0.65	21	0.4	115	0.88	8
中國大陸	0.53	95	0.46	81	0.42	112	0.72	70
新加坡	0.67	39	0.65	20	0.55	93	0.81	33
韓國	0.66	43	0.59	41	0.54	96	0.85	19
日本	0.66	45	0.57	58	0.56	85	0.84	20
台灣	0.62	62 (48.0%)	0.59	47 (36.2%)	0.49	110 (85.8%)	0.79	46 (35.4%)
127 國 平均得分 (不含台灣)	0.61		0.52		0.61		0.69	
128 國 平均得分 (含台灣)	0.61		0.52		0.61		0.69	

註：括弧內數字表示百分位排序。

資料來源：Energy Architecture Performance Index 2017 報告，本報告整理。

第四章 台灣能源經濟脆弱度之方法論與實證結果¹³

要能完善國家整體能源政策規劃、執行、追蹤與檢討發展，需要一套能清楚呈現國家能源安全程度之相關指標。而我國經濟部能源局雖有定期發布 11 類能源安全指標¹⁴，然各指標具高度專業性，指標內容與政策意涵各異，一般大眾不易解讀，兼且指標之間各自獨立，難以對我國能源安全做出系統性地衡量。

故在本報告的第二章回顧國內外各主要研究機構的能源安全指標後，選擇以世界能源理事會（World Energy Council, WEC）提出的「能源供應安全之風險與脆弱度」作為基礎架構，建構一套考量我國能源經濟特性的本土化能源脆弱度方法論，量化我國從初級能源供應、能源基礎設施到最終能源消費三個層面的脆弱程度。

本章的第一部分將簡單介紹本報告提出「台灣能源經濟脆弱度」之本土化方法論與數據來源；第二部份為「台灣能源經濟脆弱度」之實證結果，呈現 1990 年第一季至 2017 年第二季之間，我國能源脆弱度和各項次指標之變化趨勢；至於相關結論與建議則統一彙整於本報告第五章。

一、台灣能源經濟脆弱度之方法論

台灣能源經濟脆弱度係由初級能源供應脆弱度(PEV)、基礎設施脆弱度(IV)和最終能源消費脆弱度(EEV)所組成。本報告考量我國電力系統屬於獨立電網，並未對外連接的特性，進一步調整基礎設施風險衡量項目，調整後之架構如圖 19 所述，並說明方法學如後。

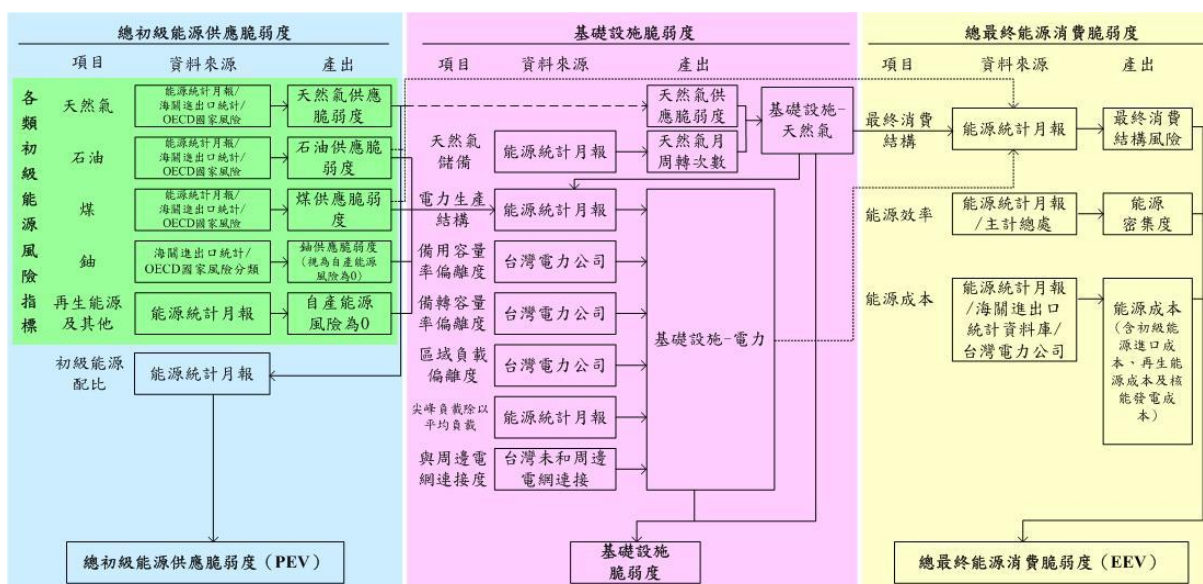


圖 19 調整後之本土化能源脆弱度衡量細部架構圖

¹³ 本章節亦於改寫後，投稿並收錄於《臺灣能源期刊》106 年第 4 卷第 4 期，「我國能源脆弱度分析與因應策略建議」。

¹⁴ 包括進口能源依存度、石油依存度、進口石油依存度、中東原油進口依存度、石油進口值佔總進口值比率、石油進口值佔總出口值比率、石油進口值佔 GDP 比率、能源進口值佔總進口值比率、能源進口值佔總出口值比率、能源進口值佔 GDP 比率、平均每人負擔能源進口值。

(一) 初級能源供應面

計算初級能源供應脆弱度的步驟有兩個階段，首先計算特定初級能源別的供應風險(PEV_i)，再於第二階段依據初級能源占比加權計算成總初級能源供應的脆弱度(PEV)，指標意涵與公式分述如下：

1. i 類初級能源供應風險(PEV_i)指標

$$PEV_i = x_i^T \cdot R \cdot x_i = x_{id}^2 \cdot r_d + \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 \cdot r_j$$

其中，i 類初級能源的項目包括了煤、石油、天然氣、鈾及再生能源(含其他)等初級能源。x_i = (x_{id}, x_{i1}, ..., x_{ij}, ..., x_{ij}) 表示一國能源進口占比之矩陣，表示一國之能源來源(進口)的分散程度；其中 x_{ij} 表示自 j 國進口 i 類能源占本國 i 類能源總供應占比；x_{id} 代表 i 類能源於國內自產之比率。

另外，R 則為能源出口國政經穩定度的風險矩陣，其表示方法如下：

$$R = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & r_j \end{bmatrix}$$

其中，r_j 即能源由來源國 j 供應之風險指標，而 r_d 為自產能源之供應風險，原則上以 0 計算，因為即使短期有可能因偶發事件中斷(Supply Disruption)，但長期來看，仍會修復並維持供給，然而若有需要，其值亦可非為 0。值得注意的是，在式(1)中隱含之假設為供給中斷事件的發生在各出口國家彼此之間是無相關的，故若要考慮部分出口國家之間有聯合關係(Cartel)，例如像石油輸出國組織(Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC)，則風險矩陣可修改如下：

$$R_c = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & r_1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_c & \dots & r_c \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & r_c & \dots & r_c \end{bmatrix}$$

其中，r_c 代表共同的中斷機率(Common Disruption Probability)。R_c 隱含將所有聯合關係會員國視為一個單一國家，而其占比為所有聯合關係內會員國各別占比(x_{ij})之加總。而實務上，有時會因兩個能源出口國出現戰爭導致供給中斷的事件發生時(例如兩伊戰爭、波斯灣戰爭等)，即可將 R 右下方的 2x2 矩陣設為 r_c。

在本報告中，係引用經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)所建構的政經風險指數(OECD Political Risk)每半年定期發布的數據，作為前述之各進口來源國的政經風險值來設定 R 矩陣，以觀察能源出口國政治風險程度對一國進口能源風險影響。

值得強調的是，再生能源是自產能源，在定義上沒有進口中斷的風險，故供應風險為 0，但這並非代表再生能源是毫無風險的能源，相反地，再生能源發電

比重的提高對於電網穩定與能源使用成本的影響，則會透過本報告的另外兩個構面(基礎設施面與最終能源消費面)的次指標來反映。

此外，本指標的經濟或風險意涵為：若某一類能源過於集中自少數國家進口時，顯示該類能源的進口來源不夠多元化，容易產生較高風險，假使各進口來源國的政經風險又偏高，則對一國之該類能源初級供給風險將更為嚴峻。反之，假使進口來源國的政經風險較低，則隱含即使進口來源雖屬集中，但因進口來源國家的風險低，對一國之該類能源初級供給風險影響相對較小。綜言之，在衡量某一類能源之初級供給風險時，須同時觀察進口來源國數目或分散程度，以及各國之政經風險高低。

2. 初級能源供應脆弱度(PEV)指標

$$PEV = w^T \cdot X^T \cdot R \cdot X = w^T \cdot \Pi^T$$

其中， $w = (w_1, \dots, w_i, \dots, w_I)$ 表示各類初級能源供應占比向量，亦即 $w_1 + \dots + w_I = 1$ 。 Π 為各類能源供應脆弱度矩陣；本矩陣的對角線 π_{ii} 即為 PEV_i ，故 $\pi_{ii} = PEV_i = x_{id}^2 \cdot r_d + \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 \cdot r_j \geq 0$ 。

值得注意的是，在原始 WEC 的架構之中，PEV 係從 PEV_i 以 i 類能源供應量占該國總能源供應「占比平方」為權數計算而得。然而，後述之基礎設施面的電力生產結構脆弱度及最終能源消費面的最終能源消費結構風險所採用之權數係以 i 類能源占該國總發電量「占比」，及 i 類能源占該國最終能源消費量「占比」，出現了不一致的狀況。本報告考量指標編制應滿足一致性(Consistency)的原則，故改採取一致的權數設計，以各類初級能源供應「占比」取代「占比平方」作為權數。

就經濟與風險意涵方面，一國之總初級能源供應脆弱度，受到國內各種初級能源數量比重，和各種初級能源之供應風險所影響。是故，若在一國當中的某一類初級能源供應占總初級能源供應比率過高時，顯示該國在初級能源供應種類不夠多元，容易產生較高風險，假使該類能源的初級能源供應風險又高，則對總初級能源供應脆弱度更為嚴峻，即脆弱程度大。反之，假使各類初級能源供應占總初級能源供應比率分散，則即使部分進口來源國存在可能出現戰亂導致供給中斷的風險，脆弱程度可能仍能維持較低的水平。

綜而言之，在觀察一國總初級能源供應脆弱度時，需進一步細究該國初級能源供應的多元或集中化程度，同時衡量各類初級能源供應所對應的初級能源供應風險高低，藉以判斷一國之總初級能源供應脆弱度情形。

(二) 基礎設施面

在原 WEC(2010)之分析架構中，基礎設施的脆弱度係由電力基礎設施與天然氣基礎設施兩構面所組成(權重各為 50%)，其中在電力基礎設施的部分考量了儲備電容能力、與週邊國家電網連接度、需求波動、天然氣月周轉次數以及電力生產結構脆弱度等次指標。然因我國電力系統狀態與歐洲國家並不相同，如歐洲各國間彼此電網相連，且需求波動應為需求面變化而非屬基礎設施面，加上各次指

標未能充分體現「風險」的意涵，故加以修改並增加數項次指標。

本報告所建構的基礎設施脆弱度共由七項次指標所組成，包括了備用容量率負偏離度、備轉容量率負偏離度、區域負載負偏離度、與他國電網連接負偏離度、負載率(捕捉負載轉移餘裕降低的風險)、天然氣月周轉次數(捕捉天然氣供應中斷下可撐天數降低的風險)以及電力生產結構脆弱度。

值得注意的是，因為我國天然氣的用途主要係做發電之用，故本報告係將天然氣的基礎設施的風險與其他電力基礎設施風險同採七等分權重進行計算(詳細的權重設定說明請見(四))。茲說明七項次指標的計算方式與內涵如下：

1. 備用容量率負偏離度

$$\lambda_1 \times \frac{|\text{PRM}_t - \text{ORM}|}{\text{ORM}} \times I(\text{PRM}_t > \text{ORM}) + \lambda_2 \times \frac{|\text{PRM}_t - \text{ORM}|}{\text{ORM}} \times I(\text{PRM}_t < \text{ORM})$$

其中， PRM_t (Percent Reserve Margin)為備用容量率實績。 ORM (Optimal Percent Reserve Margin)為最適備用容量率，本報告依據政府核定長期電源開發規劃的政策目標，將之設為 15%。 $I(\cdot)$ 為指標函數(Index Function)。公式前項代表資源閒置，後項代表備用不足。 λ_1 及 λ_2 為權數，分別設為 0 與 1，亦即僅考慮電力供應可能不足的風險。

備用容量率可用來衡量電力系統發電端供電可靠度，而若該國當期之備用容量率大於最適備用容量率，則表示資源存在閒置現象，有過量投資的疑慮，但無電力供給不足疑慮；備用容量率如果低於最適值且負偏離度愈高，代表電源開發不順、系統可靠度下降，有電力供應短缺之虞，致使國內電力基礎設施也益形脆弱。

2. 備轉容量率負偏離度

$$\lambda_1 \times \frac{|\text{POR}_t - \text{OOR}|}{\text{OOR}} \times I(\text{POR}_t > \text{OOR}) + \lambda_2 \times \frac{|\text{POR}_t - \text{OOR}|}{\text{OOR}} \times I(\text{POR}_t < \text{OOR})$$

其中， POR_t (Percent Operating Reserve)為備轉容量率實績。 OOR (Optimal Percent Operating Reserve)為最適備轉容量率，本報告遵循台電公司的備轉容量率燈號的說明，以供電充裕(綠燈)及供電吃緊(黃燈)的標準 10%進行設定。公式的前項代表資源閒置，後項代表備用不足。 λ_1 及 λ_2 分別設為 0 與 1，亦即僅考慮電力供應可能不足的風險。

備轉容量率衡量每日電力系統的實際供電餘裕(扣除歲修、檢修及故障的機組裝置容量)，相較於備用容量率的年資料，資料頻率更高，可更為即時呈現該國電力基礎設施概況。備轉容量率如果低於最適值，代表當天實際可調度之發電容量裕度不足。故若負偏離度愈高，代表執行限電措施的可能性也越高。

3. 區域負載負偏離度

$$\sum_i \left[\left(\lambda_1 \times \frac{|\text{S}_{it} - \text{D}_{it}|}{\text{D}_{it}} \times I(\text{S}_{it} > \text{D}_{it}) \right) + \left(\lambda_2 \times \frac{|\text{S}_{it} - \text{D}_{it}|}{\text{D}_{it}} \times I(\text{S}_{it} < \text{D}_{it}) \right) \right]$$

其中， $i = N, M, S$ 。公式前項代表 i 區域電力供應大於電力需求，後項則代

表電力需求大於電力供給。 λ_1 及 λ_2 分別設為 0 與 1，亦即僅考慮區域間電力供應可能不足的風險。

我國電網分為北、中、南三區¹⁵，區域內應維持發電與用電相當為最佳，若區域內發電不足以供應用電需求時，必須透過跨區域的輸電幹線輸送電力支援。故若負偏離度愈高表示各區域內電力供需愈不均衡，區域間電力輸送壓力較高。

4. 與他國電網連接負偏離度

$$\lambda_1 \times \left| \frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} - \text{最適連接度} \right| \times I \left(\frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} > \text{最適連接度} \right) +$$

$$\lambda_2 \times \left| \frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} - \text{最適連接度} \right| \times I \left(\frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} < \text{最適連接度} \right)$$

其中，最適連接度設為 10%，此係因為若一國電網能和他國電網連接，則電力系統在可獲得他國支援下得以較為穩定，惟若此項數值太高，亦有可能過於依賴他國，故歐盟建議的最適值為 10%。 λ_1 及 λ_2 分別設為 0 與 1，亦即僅考慮我國與他國電網連接度低於歐盟建議最適值的風險。

我國的供電系統孤立，無法藉助鄰國輸電進行供需調節，故若負偏離度愈高表示電力系統自立求生的壓力越大。迄今我國與他國電網連接的程度為 0，壓力最高，標準化後的風險數值即為 100(標準化方法詳述於 3.2)，若未來我國電網能與他國連接，將可降低風險。

5. 負載率(捕捉負載轉移餘裕降低的風險)

$$\text{平均負載}_t / \text{尖峰負載}_t$$

其中，分子為特定時間內(日、月、年)每小時之輸出電力的平均值。例如：全年發電量除以 8,760 小時(一年小時數)，分母則為特定時間內每小時之輸出電力的最高值。

一般而言，負載率越高越好，但是假若負載率接近其極值(100%)，亦代表未來再進行負載轉移的空間已所剩無幾，餘裕有限，故本報告以此指標捕捉負載轉移空間餘裕降低的風險。除此之外，若高負載率加上低備轉容量，代表多數的發電機組長期處於高負荷狀態，難以排修、維護。若是電力需求突增，或機組出現故障，又或者出現任何的意外事故，都將導致跳電；另一方面，雖然低負載率代表資源閒置，但本報告並未視資源閒置為風險項目之一，此亦與本報告備用及轉容量率正偏離度未被視為風險的作法一致。

6. 天然氣月周轉次數(捕捉天然氣供應中斷下可撐天數降低的風險)

$$\text{天然氣當季最大月用量}_t / \text{天然氣可儲存容量}_t$$

其中，分子為當季天然氣月消費量最大值，分母則為全國商轉中的天然氣接收站設計容量加總，但不包含規劃或建設中的容量。

¹⁵ 北部地區為新竹縣鳳山溪以北地區，中部地區為新竹縣鳳山溪以南至濁水溪以北地區，南部地區則為濁水溪以南地區。

在直觀上，本指標表示天然氣的最大儲存容量每月將用盡幾次，也代表一國面臨天然氣的供應來源中斷時，該國既有的天然氣儲藏能力可支持國內多長的運作時間，因此，若國家擁有越高的天然氣儲藏空間，較能因應意外事件所帶來的天然氣供給中斷影響。

雖然就一般的商業活動來說，以存貨為例，若存貨週轉率越高，代表存貨從取得至消耗所經歷的天數越少，故週轉次數越高也代表存貨管理效率越好。然而，由於液化天然氣載運船若在入港前後遇到颱風，須因安全因素遠離待命。因此，若天然氣進口來源中斷可撐天數小於3天，台灣將有可能因為颱風因素而斷氣。故本報告以此月週轉次數捕捉天然氣進口來源中斷下可撐天數降低的風險。

7. 電力生產結構脆弱度

$$\sum_i S_i \times PEV_i$$

由上式可知，電力生產結構脆弱度受一國各類能源發電量占總發電量比重(S_i)和各類發電燃料所對應之 PEV_i 而定。例如，一國電源結構以發電技術區別，可分為燃煤、燃油、燃氣、核能及再生能源發電，其所對應的能源供給風險即分別為煤初級能源供應風險(PEV_{Coal})、石油初級能源供應風險(PEV_{Oil})、天然氣初級能源供應風險(PEV_{NG})、鈾供應風險(PEV_U)與再生能源供應風險(PEV_R)等。若一國之電力資源組合集中於某一發電技術，且該發電技術所對應的能源供應風險偏高，將使該國電力生產結構脆弱度較大，因此需以不同能源組合作為電力配比，藉由分散化措施降低可能風險。

值得一提的是，雖然再生能源發電視為自產能源而不具風險，隨著再生能源發電占總發電比重提高，電力生產結構脆弱度將會越低，進而促使電力基礎設施風險下降，惟因再生能源發電屬間歇性和不可調度能源，當再生能源發電占比持續提高，將影響整體電力系統之備用容量率和備轉容量率，故電力基礎設施風險之次指標間存在相互關連與影響。

(三) 最終能源消費面

本報告所建構的最終能源消費脆弱度係以能源成本、能源使用效率和最終能源消費結構風險等三個面向加以衡量，與WEC(2010)相同。但值得注意的是，在原始WEC(2010)中，對於最終能源消費脆弱度的函數型態的設定是「乘法型」，亦即將此三項次指標在標準化後進行相乘，而本報告考量不同層面的指標運算方法應採一致作法，才能滿足一致性的指標原則，故將最終能源消費脆弱度的函數型態的設定是「加法型」，同基礎設施脆弱度，以等分權重的方式進行加總計算。茲說明三項次指標的計算方式與內涵如下：

1. 能源成本

$$\sum_i S_{i,t} \times P_{i,t}$$

其中， P_i 為標準化後的煤、油、氣平均進口價格、再生能源(含水力)發電成本、核能發電成本(含核後端成本)。 S_i 為依據煤、油、氣與電力占最終能源消費結構比重，以及煤、油、氣、再生能源(含水力)、核能占發電結構比重，所計算

的煤、油、氣、再生能源、核能的結構占比。

本指標捕捉能源進口成本、各類再生能源發電成本、核能發電成本(含核後端成本)的變化對於能源用戶使用能源的壓力增減幅度。

2. 能源密集度

$$\text{最終能源消費量}_t / \text{實質國內生產毛額}_t$$

本指標表示我國的能源使用效率。數值越低代表能源使用效率越高，當能源使用越有效率時，可提高能源用戶因應能源使用成本(價格)上漲的能力，進而減少能源消費脆弱度。

3. 最終能源消費結構脆弱度

$$EEV = \sum_i S_i \times EEV_i$$

其中， EEV_i (PEV_i , 基礎設施脆弱度)表示一國*i*類能源消費的來源風險程度，其中， S_i 為*i*類能源的最終消費占比。另外，電力部門對能源消費者的風險則以基礎設施脆弱度代表。

本指標表示能源用戶消費各類能源的來源風險程度。數值越高表示該國越集中消費特定能源，風險程度越高，若能源消費的品項越分散，則能源消費的來源風險越低。

(四) 標準化及權重設定

為了解決不同指標具有不同單位與數值範圍的問題，WEC(2010)原依據歐盟議會所建議的方法進行標準化，也就是指標*q*在地區*c*及時間*t*的標準化值(I_{qc}^t)，等於該指標之原始值(X_{qc}^t)減去其最小值之後，再除以其最大值與最小值的差(亦即全距)，如下所示：

$$I_{qc}^t = \frac{X_{qc}^t - \min_{t \in T}(X_{qc}^t)}{\max_{t \in T}(X_{qc}^t) - \min_{t \in T}(X_{qc}^t)}$$

但此標準化方式可能因新資料加入，改變原序列極值，產生全部回溯的情況，使結果不具一致性，加上部份數值經標準化後，可能其標準化值未能顯現原水準值代表之風險意涵。例如某一指標在特定時點下之原始數值為整個時間序列資料最小值時，則在標準化後將為0，造成原始數值的風險因標準化後歸零的缺點，故本報告將標準化方式加以修改，參見下式：

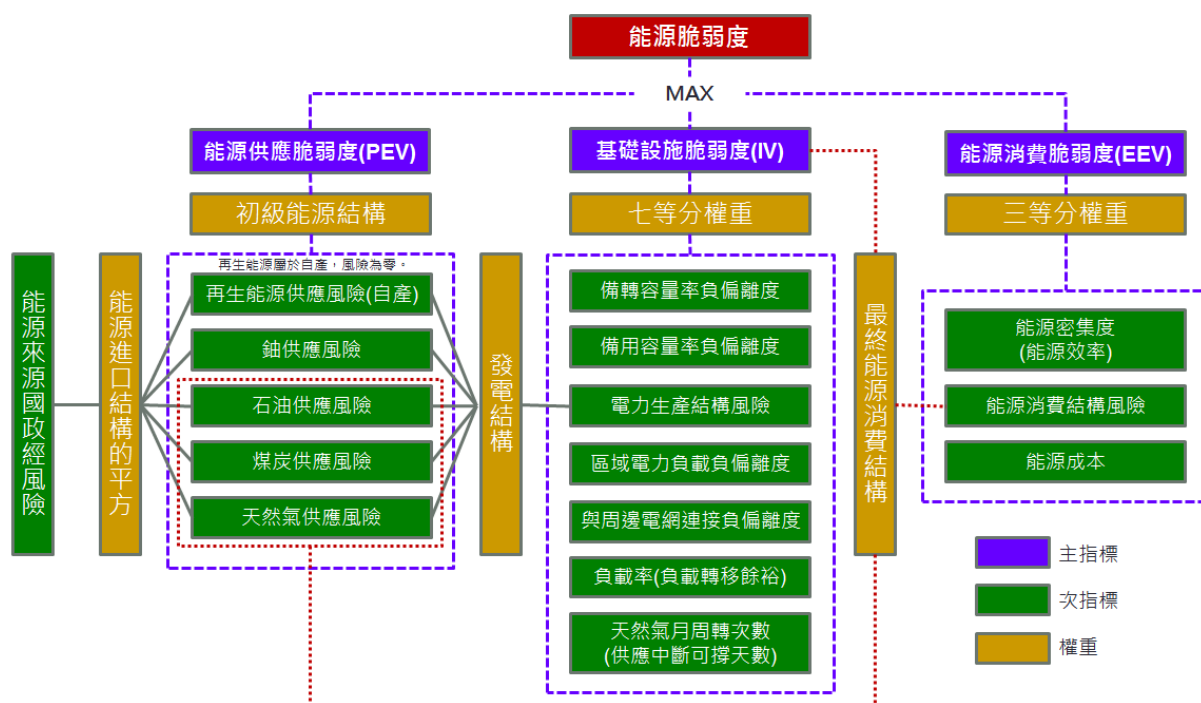
$$\begin{cases} I_{qt} = \{(X_{qt} - \text{Base}) / (\text{Top} - \text{Base})\} \times 100 & \text{if } X_{qt} \leq \text{Top} \\ I_{qt} = 100 & \text{if } X_{qt} > \text{Top} \end{cases}$$

其中，Top為歷史最高點；Base值則直接設為0。

指標標準化後進行加總時，本報告係採由下往上的方式(Bottom-Up)，由最底層的次指標開始計算，向上加總成主指標。而次指標加總成主指標時所採用的權重(Weighting)，理論上可以應用因素分析法(Factor Analysis, FA)或主成份分析法(Principle Component Analysis, PCA)等計量方法，以較少數的假設變項

(Hypothetic Variables), 亦即本報告的三個構面的脆弱度, 來代表一組原先較多的變項, 亦即三個構面中的各種次指標。其萃取的過程中, 將可以獲得「統計的客觀」的權重值¹⁶。另外一種常被應用的方法(主要見於政府委託計畫), 則採用專家問卷或是層級分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP), 依據其專業與偏好來獲取「專業的主觀」的權重值。

WEC(2010)雖然建議採取前者來獲取客觀的權重, 但是在其研究中, 其實並未採因素分析法或主成份分析法, 而是以「主觀的等分權重」的方式來進行設定。本報告則是考量: 在應用因素分析法或主成份分析法時, 各變數必須滿足定態(Stationary)的條件, 故若變數的時間序列資料具有「隨機趨勢¹⁷」, 必須先去除隨機趨勢(例如以變動率或是變動量來刪除隨機趨勢), 才能進行因素分析或主成份分析。但是考量脆弱度想捕捉的即是日益惡化或改善的「趨勢性」, 故本報告視指標性質之不同, 採用不同的權重設定, 如圖 20 所示, 並說明如下:



資料來源：本報告繪製。

圖 20 指標權重說明

1. 供應面：各能源來源國的政經風險係以能源進口占比的平方作為權數，加總出各類初級能源供應風險(PEVi)；接著，再以初級能源占比為權數，加總出初級能源供應脆弱度(PEV)。

¹⁶ 雖然因素分析法與主成份分析法都是可以達到刪減變數/維度的數學手段, 但其做法與意涵則有所不同: 因素分析法是以共變異數為導向, 選取少數因素(Factor), 解釋原變數之間的相關情形。並且著重於分析資料結構(亦即事先假設資料滿足某種結構)。在某些狀況下, 需要透過旋轉(Rotation), 才能對因素進行命名與解釋。主成份分析法是以變異數為導向, 選擇一組成份(Component), 盡可能地解釋原來所有變數的總變異。主成份分析法以簡化資料為目的, 並不會事先假設資料是否有結構。

¹⁷ 隨機趨勢又稱為單根(Unit Root)。

2. 設施面：以發電結構作為權數，加總出電力生產結構風險；再以等分權重，將各次指標加總出基礎設施脆弱度(IV)。
3. 消費面：以最終能源消費結構作為權數，加總出最終能源消費結構風險；再以等分權重，將各次指標加總出最終能源消費脆弱度(EEV)。

最後也最重要的，為了計算總能源脆弱度，本報告捨棄加權計算的一般方法而改採「取當期各構面脆弱度最大值作為當期總能源脆弱度」的創新方法。此係考量國家的能源系統本為一體，若是任何一個構面出現問題，代表整體能源系統的崩解，此方法亦可以用來彰顯不同期間國家能源脆弱度的來源構面為何。

(五) 資料來源與處理

基於各機構編製指標時所的考量資料特性，本報告依據國內各項經濟與能源統計出版物、資料庫等，進行各項指標計算，藉以符合數據來源之透明性、完整性、一致性、相關性與具備可信度等。詳細的資料來源說明請見表 8。

表 8 本土化能源脆弱度之資料來源說明

指標	項目	資料之頻率和說明	
初級能源供應脆弱度	天然氣進口量及來源國	月	AREMOS、能源統計月報、海關進出口統計
	石油進口量及來源國	月	AREMOS、能源統計月報、海關進出口統計
	煤進口量及來源國	月	AREMOS、能源統計月報、海關進出口統計
	鈾進口量及來源國	月	海關進出口統計
	再生能源及其他能源數量	月	AREMOS、能源統計月報
	OECD 國家風險分類	月	Country Risk Classification Report, OECD
	各初級能源數量	月	AREMOS、能源統計月報
基礎設施脆弱度	天然氣月周轉次數(國內天然氣消費量及接收站儲量)	月	AREMOS、能源統計月報、台灣中油公司
	電力生產結構風險(發電配比)	月	AREMOS、能源統計月報
	備用容量率負偏離度(備用容量率)	年	AREMOS、能源統計月報、台電公司
	備轉容量率負偏離度(備轉容量率)	日	AREMOS、能源統計月報、台電公司
	區域負載負偏離度(區域發電實績及用電需求)	年	台電公司
	負載率	月	能源統計月報
	與周邊電網連接度負偏離度	無	台灣現階段尚未和周邊電網連接
最終能源消費脆弱度	最終能源消費結構風險(最終能源消費結構)	月	AREMOS、能源統計月報
	能源密集度(總最終能源消費量及實質國內生產毛額)	季	AREMOS、能源統計月報、國民所得統計
	能源成本 1. 煤、油、氣平均進口價格 2. 再生能源成本(含水力) 3. 核能發電成本(含核後端成本)	月	AREMOS、能源統計月報、海關進出口統計資料庫、台電公司

資料來源：本報告整理。

本報告的計算期間為 1990 年第一季至 2017 年第二季，脆弱度以季呈現，故資料的頻率必須加以調整。其中，屬於年資料的備用容量率和區域負載係假設該年度的四個季節裡數值均相同；而屬於月資料的大部分變數則彙整為季資料；其次，屬於日資料的備轉容量率則以當季之備轉容量率最低值進行轉換。

此外，因基礎設施面的備轉容量率負偏離度及區域負載負偏離度的資料啟始點分別為 2004 年與 2006 年，需進行額外假設：

- (1) 1990 年至 1996 年間：因當時多次限電，故假設該時期的備轉容量率負偏離度標準化值設定為 100；另外，因該期間無區域負載資料，故其權重攤提給其他指標，以維持六項指標皆均等權重。
- (2) 1997 年至 2003 年間：因無備轉容量率與區域負載資料，故兩者的權重攤提給其他指標，以維持五項指標皆均等權重。
- (3) 2004 年至 2006 年間：因無區域負載資料，故其權重攤提給其他指標，以維持六項指標皆均等權重。

二、 台灣能源經濟脆弱度之實證結果

(一) 初級能源供應脆弱度指標

在初級能源供應面，考量了燃料煤、原油、天然氣、鈾及再生能源(含其他)等五類供應風險。不過，在本節中不特別呈現鈾及再生能源(含其他)的供應風險結果。這是因為我國所進口的鈾(黃餅)均來自美國，但在 OECD 的國家風險評估中，美國被歸類為無風險國家，故雖然進口來源只有美國單一國家，我國歷年的鈾供應風險仍然為 0；而再生能源(含其他能源)因屬自產能源，在本報告的定義中，自產能源並無進口中斷的風險，因此我國再生能源(含其他能源)供應風險亦為 0。

不過值得注意的是，核能的後端處理成本係由最終能源消費面的能源成本次指標來反映，且本報告並未將核能的安全風險納入考量。此外，再生能源發電比重的提高對於電網的衝擊與能源使用成本的影響，則會於基礎設施面與最終能源消費面的次指標來反映。

1. 燃料煤供應風險指標

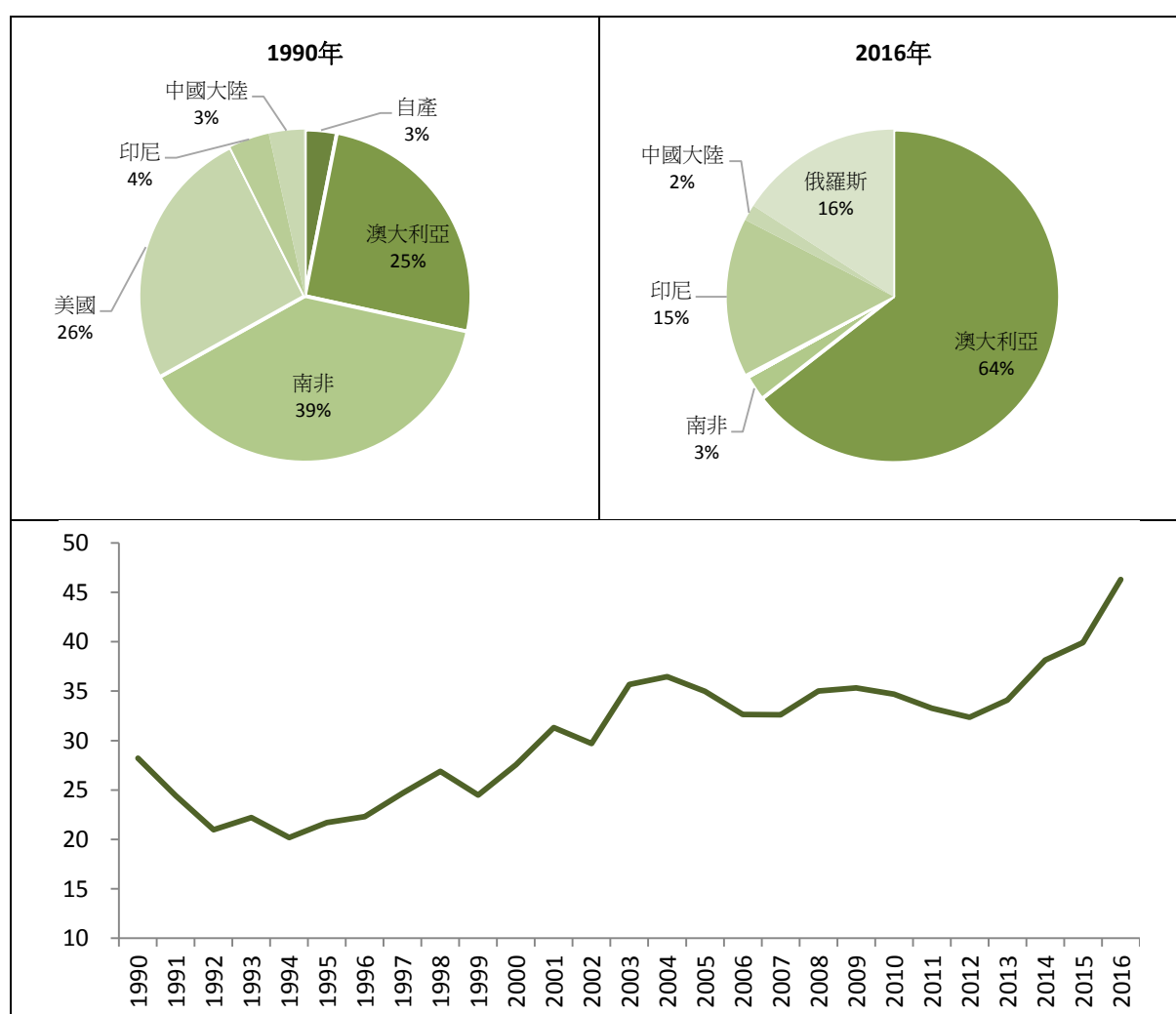
我國 1990 年與 2016 年的燃料煤進口來源占比與集中度的變化趨勢如圖 21 所示，而本報告計算之我國燃料煤供應風險指標的歷史趨勢則如圖 22 所示。

1990 年代初期我國燃料煤進口來源國集中於南非、美國和澳洲等風險較低之國家，各國占進口來源比重分別為 39%、36%和 25%。之後我國自南非和美國進口的數量逐步減少，轉而朝向從印尼和中國大陸進口燃料煤，但是因為此二國家屬於風險較高國家，也導致我國燃料煤供應風險隨之增加。

至 1990 年代末期至 2000 年代中期，我國自中國大陸和印尼進口之燃料煤比重已大幅提升，以 2003 年為例，我國從中國大陸和印尼進口燃料煤的比重分別達到 51%及 25%，進口集中度與來源國的政經風險過高下，燃料煤供應風險一度達到高點。舉例來說，2003 年中國大陸境內發生多起煤礦事故，下令關閉所有礦

場以執行安全檢查，煤炭產量因而急遽下降，到了第四季更進一步限制煤炭出口，不但對我國與日本的供應大幅縮減，甚至停止銷售現貨和不供貨予南韓，引發亞洲煤荒。

而後為了避免類似情事發生，我國首先進行分散燃料煤進口來源的措施，減少中國大陸進口比重，而增加澳洲和印尼進口比重。以 2006 年為例，當時我國的燃料煤的前三大進口國為澳洲(36%)、印尼(36%)與中國大陸(25%)，其占比相當均衡，促使我國燃料煤供應風險顯著下降。惟之後我國自澳洲進口燃料煤的比重又大幅攀升，2016 年占比高達 64%，其占比之高前所未見，導致我國目前燃料煤的集中度¹⁸已達樣本期間的最高點。雖然澳洲是政經相對穩定的國家，因此我國目前燃料煤供應風險仍然走低，但是過度倚賴單一進口國，未來可能因為其他難以預料的因素而造成供應中斷¹⁹。

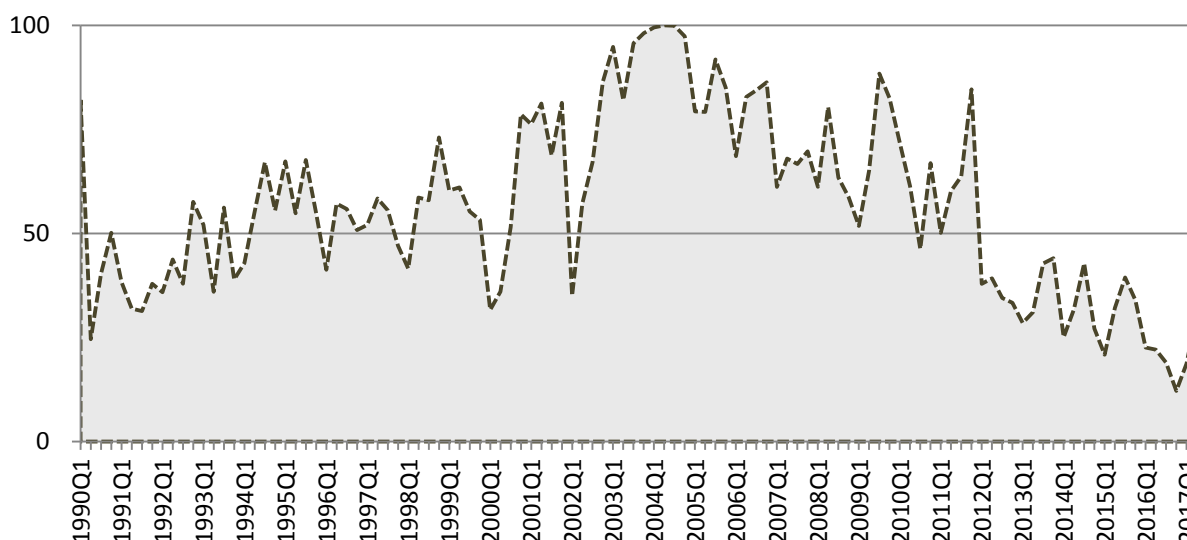


資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本報告繪製；集中度為本報告計算。

圖 21 我國燃料煤進口來源與集中度

¹⁸ 本報告採用的集中度指標是 Herfindahl-Hirschman Index(HHI)。

¹⁹ 澳洲過往曾飽受水災之苦，例如 2011 年與 2013 年昆士蘭省兩度遭遇洪災，而昆士蘭同時是世界最大的焦煤礦區，一度導致停產數月，並使國際煤炭與鋼鐵的價格上揚(黃柏誠等人，2013)。



資料來源：本報告計算。

圖 22 我國燃料煤供應風險指標(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

2. 原油供應風險指標

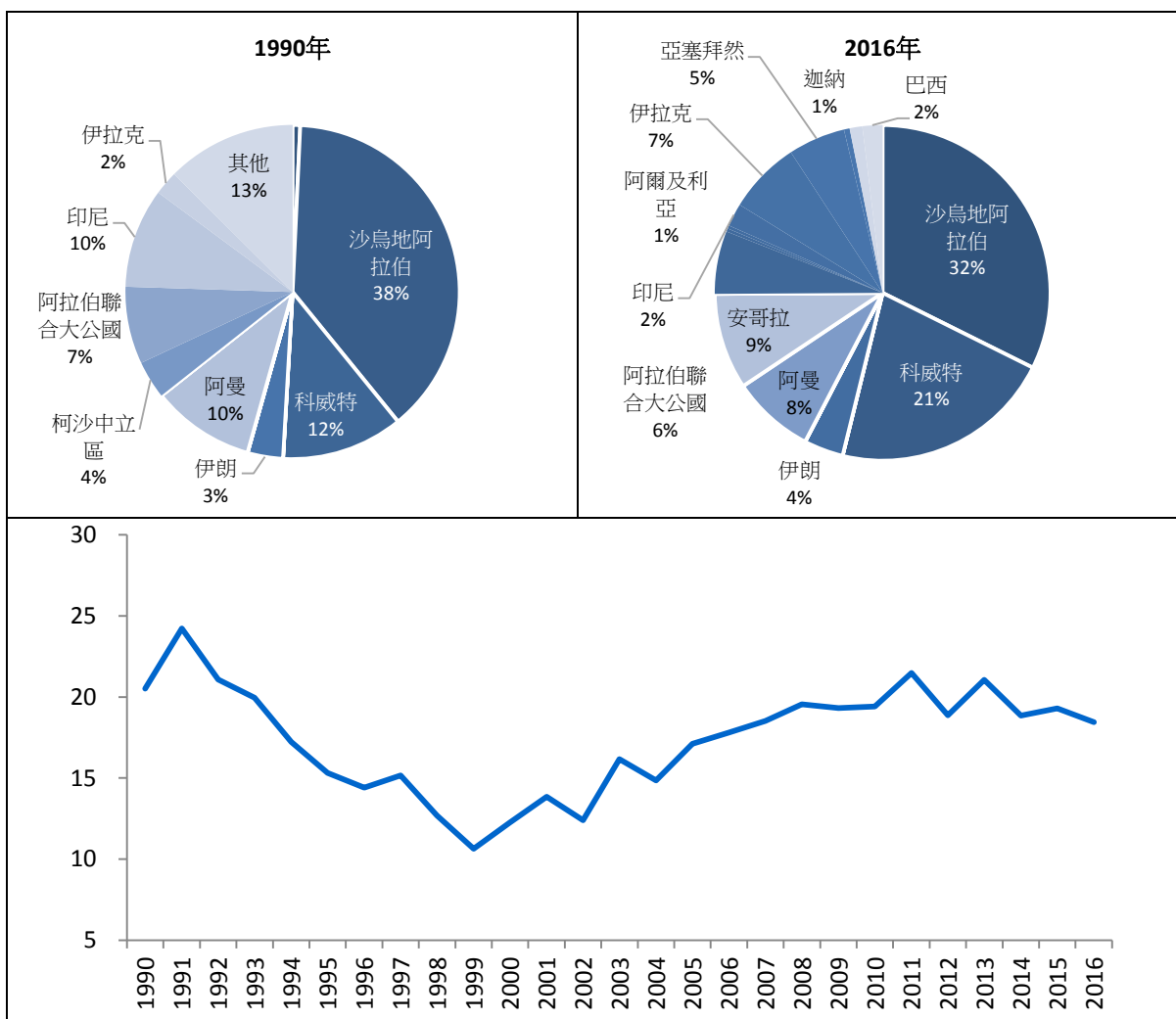
我國 1990 年與 2016 年的原油進口來源占比與集中度如圖 23 所示，而本報告計算之我國原油供應風險的歷史趨勢則如圖 24 所示。

1990 年時，我國前五大原油進口來源國分別為沙烏地阿拉伯、科威特、印尼、阿曼、阿拉伯聯合大公國，進口占比分別為 38%、12%、10%、10%和 7%，主要集中於中東地區，常有紛爭，影響我國原油進口來源，導致原油供應風險偏高。例如 1990 年伊拉克入侵科威特，爆發波斯灣戰爭，荷姆茲海峽遭到封鎖，一度影響原油供應並造成國際原油價格遽增，我國原油供應風險一度飆高，幸賴當時中油公司調度得宜，才避免斷油危機²⁰。直到 1991 年初，多國部隊執行聯合國安理會決議，對伊拉克發動攻擊，中止波斯灣戰爭之後，OPEC 為維持每桶 21 美元的目標油價，調整原油產量上限為 2,235 萬桶/日，加上我國重新再由科威特進口原油之後，我國偏高的原油供應風險才開始回降。

波斯灣戰爭之後到 2000 年間，我國原油進口集中度由 1991 年的 24.23 下降到 2000 年的 12.26 的樣本期間低點，加上中東地緣緊張局勢和緩，部份來源國的政經風險被 OECD 調降，使得原油供應風險漸次降低。2000 年後，中東地區雖偶有緊張情事(大多集中於奈及利亞)，但 OECD 仍調降阿曼、科威特等中東國家之國家風險。但於此同時，我國自高政經風險國家(如安哥拉、伊朗)進口原油的比重也增加，加上原油進口集中度再度上揚(曾於 2011 年一度達到 21.47，僅次於 1991 年的高點，2016 年則回降到 18.45)。正反因素抵消之下，我國原油供應風險在過往十餘年呈現震盪態勢，不過整體而言仍維持在風險偏低的水準。

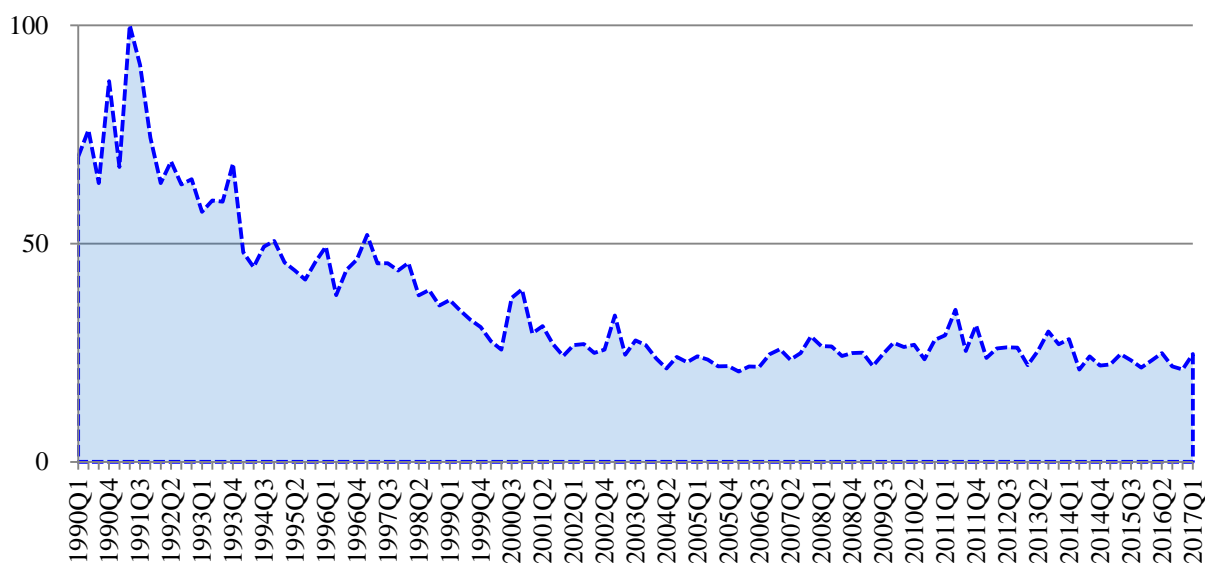
²⁰ 陳中興(2003)，「石油危機 練就中油「葵花寶典」」，<http://old.ltn.com.tw/2003/new/mar/31/today-e6.htm>(最後瀏覽日期：2017 年 7 月 15 日)

²¹ 張心紘(2015)，「油氣的冒險之旅」，<http://energymonthly.tier.org.tw/outdatecontent.asp?ReportIssue=201505&Page=20>(最後瀏覽日期：2017 年 7 月 15 日)



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本報告繪製；集中度為本報告計算。

圖 23 我國原油進口來源占比與集中度



資料來源：本報告計算。

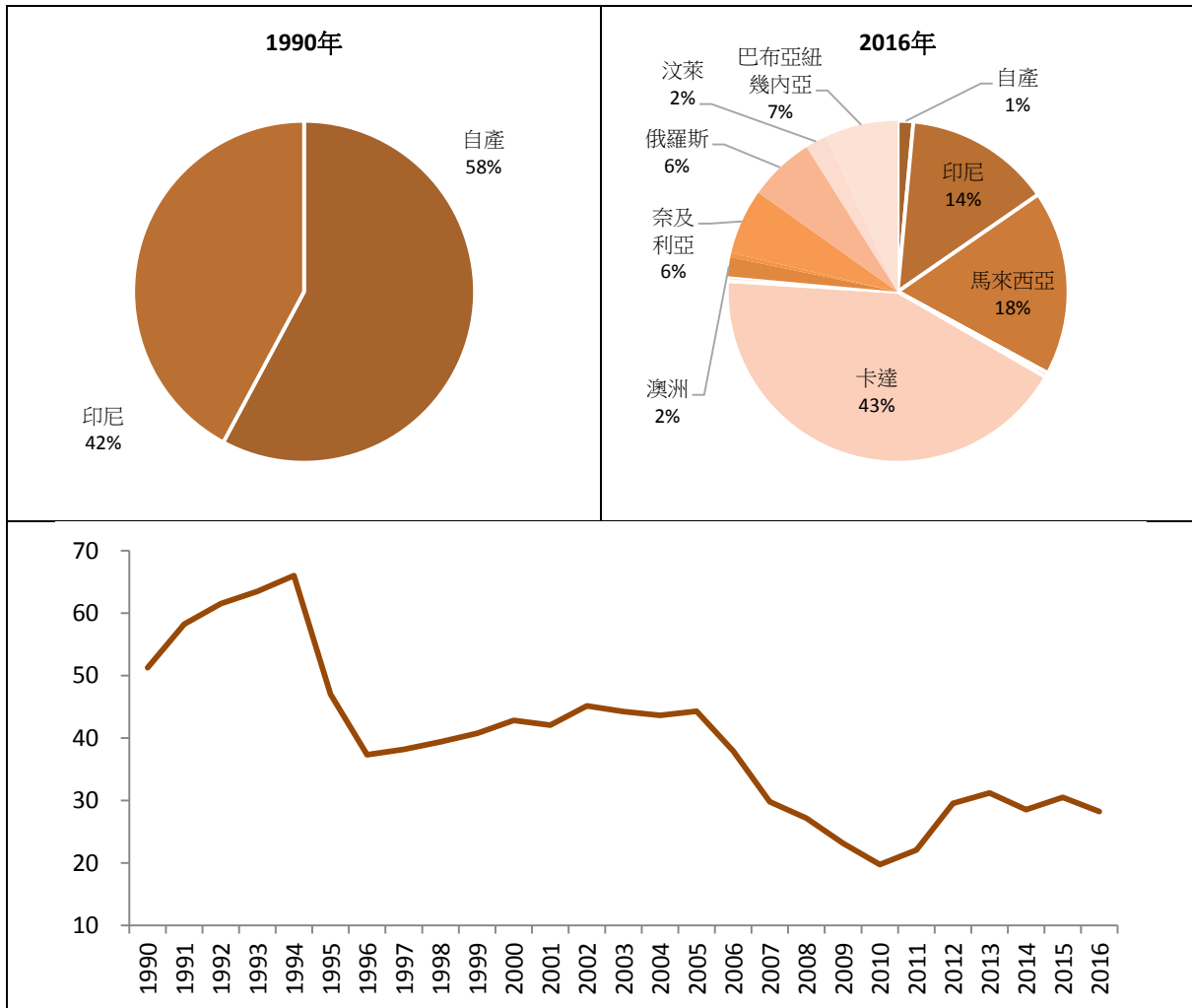
圖 24 我國原油供應風險指標(1990年Q1至2017年Q2)

3. 天然氣供應風險指標

我國 1990 年與 2016 年的天然氣進口來源占比與集中度變化趨勢如圖 25 所示，而本報告計算之我國天然氣供應風險的歷史趨勢則如圖 26 所示。

我國在 1990 年代以前未曾進口天然氣，對於天然氣的使用以自產為主。自 1990 年開始從印尼進口天然氣之後，我國自產天然氣占比逐漸降低，從 1990 年接近六成的占比，到 1994 年僅剩約兩成左右，進口天然氣的占比則從四成上升到接近八成。由於天然氣的來源由自產轉為進口，加上進口來源僅印尼一國，這段期間我國天然氣供應的風險偏高。

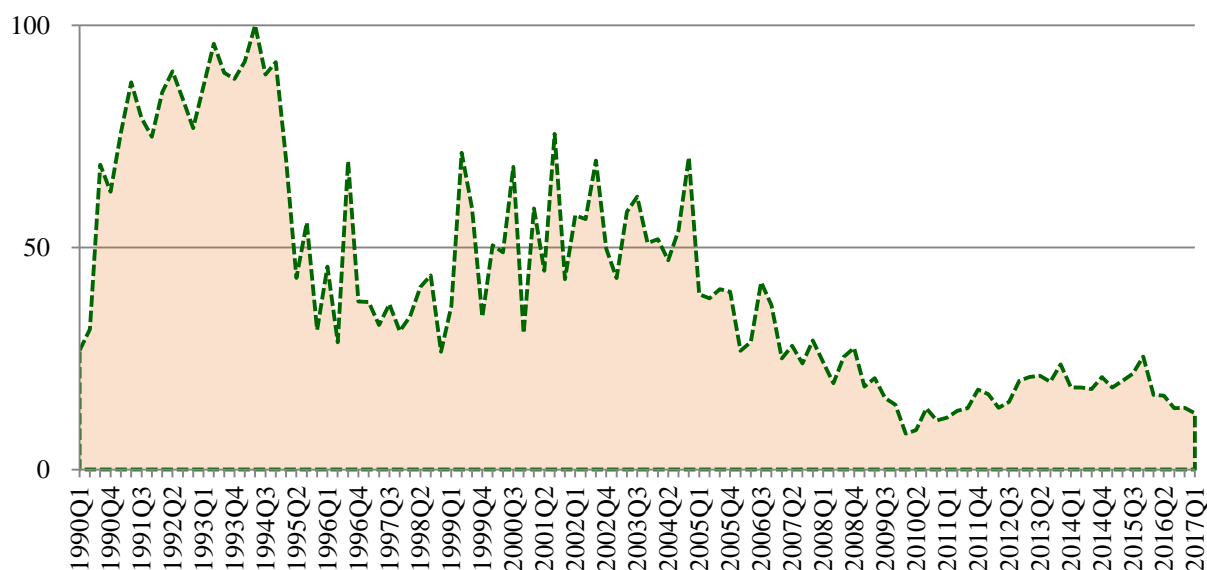
1995 年我國開始自馬來西亞進口天然氣，使得進口來源較為分散，加上在 OECD 國家風險分類報告中，馬來西亞的政經風險相對於印尼較低，故使天然氣供應風險開始降低。其後直到 2005 年，印尼與馬來西亞為我國唯二的天然氣來源國，加總的占比逐年上升至 2005 年的 95%(分別印尼 51%與馬來西亞 42%)，但因為無風險的自產天然氣的比重僅止 5%，故供應風險無法再進一步降低，呈現震盪的態勢。



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本報告繪製；集中度為本報告計算。

圖 25 我國天然氣進口來源占比與集中度

其後，我國開始執行分散氣源的策略，隨著進口來源國數量逐年增加(2016年的進口來源國已達 11 國)，天然氣供應風險不但進一步降低，風險波動的幅度也有所縮小。不過我國天然氣的氣源有逐年更為仰賴中東地區的趨勢，對於未來的天然氣供應的穩定性投下變數。目前我國進口天然氣的來源以卡達的 43% 最高，高於第二與第三名的印尼、馬來西亞加總(32% 上下)。卡達本來並非政經風險高的國家，不過 2017 年 6 月卡達遭到中東各國斷交，沙烏地阿拉伯、巴林、阿聯、埃及禁止和卡達的航運往來，使多條波斯灣航線被迫調整，一度引起天然氣期貨價格上漲。故若未來我國天然氣更為仰賴中東地區的趨勢不變，天然氣供應的脆弱度可能因而增加。



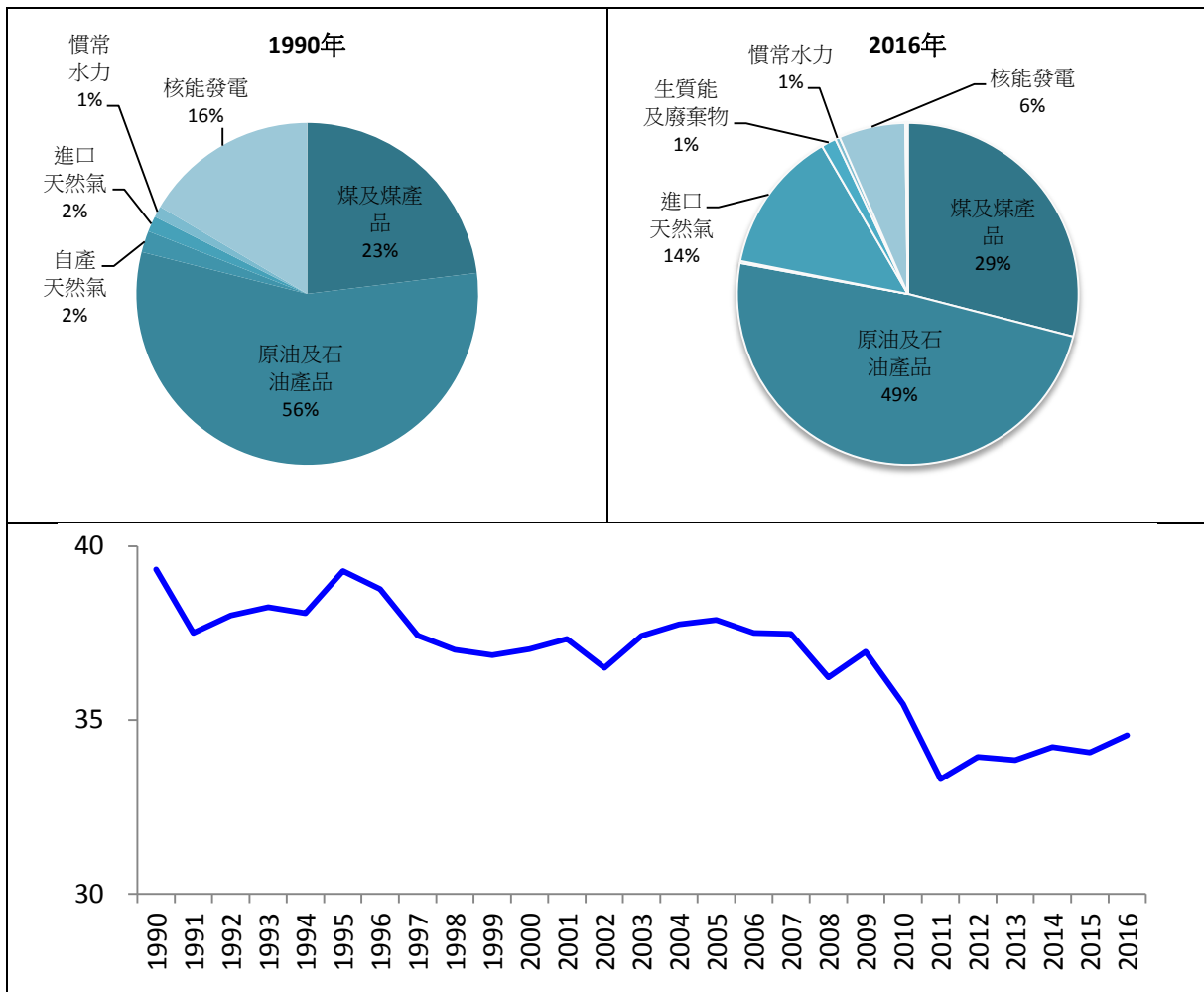
資料來源：本報告計算。

圖 26 我國天然氣供應風險指標(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

4. 小結

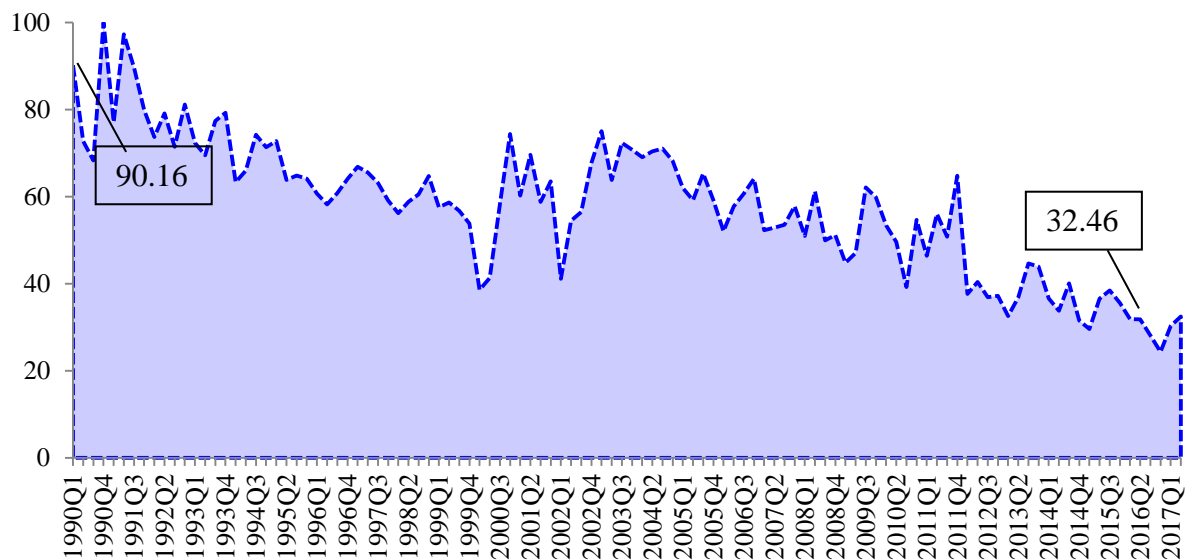
我國 1990 年與 2016 年的初級能源占比與集中度變化趨勢如圖 27 所示，將此占比做為權數來加總前述的五項初級能源供應風險次指標，可得我國初級能源供應脆弱度，如圖 28 所示。

我們可以看到，在 1990 年代初期，我國初級能源供應以原油及石油產品為主，占比高達 56%，故總初級能源供應脆弱度受原油供應風險變化程度較高。隨著時間經過，煤炭的占比逐漸提升，但是仍然一直維持石油與煤炭占比相加接近八成的態勢。另外，由於我國能源政策的調整，天然氣占初級能源的比重逐漸提升，從 1990 年的 1.5% 快速地增加到 2016 年的 13.5%；而核能發電占總初級能源占比則在同期間內顯著下降，由原本的 16.5% 減少至 6.3%；此外，再生能源的供應雖有增加，但是幅度相對有限。到 2016 年為止，我國的煤及煤產品、原油及石油產品、進口液化天然氣、生質能及廢棄物、核能發電等初級能源供應的占比分別為 29%、49%、14%、1%、6%。整體而言，我國初級能源供應結構是朝向分散化在走。但值得注意的是，這個分散化並非由高碳能源轉向低碳能源，而是低碳能源之間彼此取代。



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本報告繪製。集中度為本報告計算。

圖 27 我國初級能源占比與集中度



資料來源：本報告計算。

圖 28 初級能源供應脆弱度指標(1990年Q1至2017年Q2)

在更為分散的初級能源供應結構之下，加上各類初級能源供應風險的變化於近年的下降趨勢(燃料煤供應風險和原油供應風險呈下降趨勢，而天然氣供應風險呈現先降後升趨勢)，我國總初級能源供應脆弱度數值，整體上呈現下降趨勢，由1990年第一季的90.16降低到2017年第二季時的32.46，顯示出我國在能源安全的改善程度。

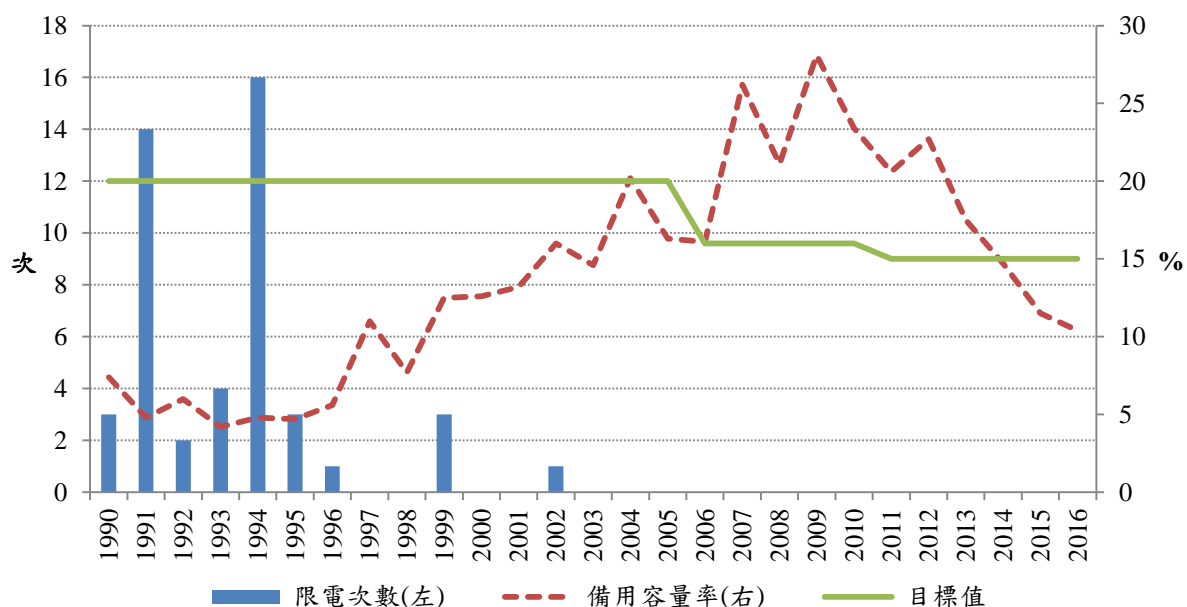
然而，由於屬於類自產能源之核能發電占比持續降低，若是再生能源發展不如預期，加上國內對於天然氣的倚賴程度將大幅增加(2025年天然氣消費量預期將較2016年倍增)，假若來源日益仰賴中東地區的趨勢不變，未來我國的初級能源供應脆弱度將更容易受到天然氣供應脆弱度的變化所影響。

(二) 基礎設施脆弱度指標

在基礎設施面，本報告考量了備用容量率負偏離度、備轉容量率負偏離度、區域負載負偏離度、與他國電網連接負偏離度、負載率(捕捉負載轉移餘裕降低的風險)、天然氣月周轉次數(捕捉天然氣供應中斷下可撐天數降低的風險)以及電力生產結構脆弱度，共計七項次指標。其中，與他國電網連接負偏離度，因我國屬於孤島型的獨立電網，未曾與他國進行併聯，故本數值在樣本期間中均為風險最高的100，不另表述。但是假若未來我國的電力系統在可與他國併聯，連接度將離最適值(歐盟建議10%)較為接近，負偏離的程度將縮小，代表在不過於依賴他國的前提之下，電網的穩定程度將可獲得提高，進而降低整體基礎設施的脆弱程度。

1. 備用容量率負偏離度

依據台電資料，1990年代我國備用電源不足，限電次數共46次，其中1994年一年之內曾達16次之多，而當時的備用容量率多在4.2~7%的水準，一直到政府開放民營電廠興建，才逐漸回升到政策目標值之上(詳如圖29)。



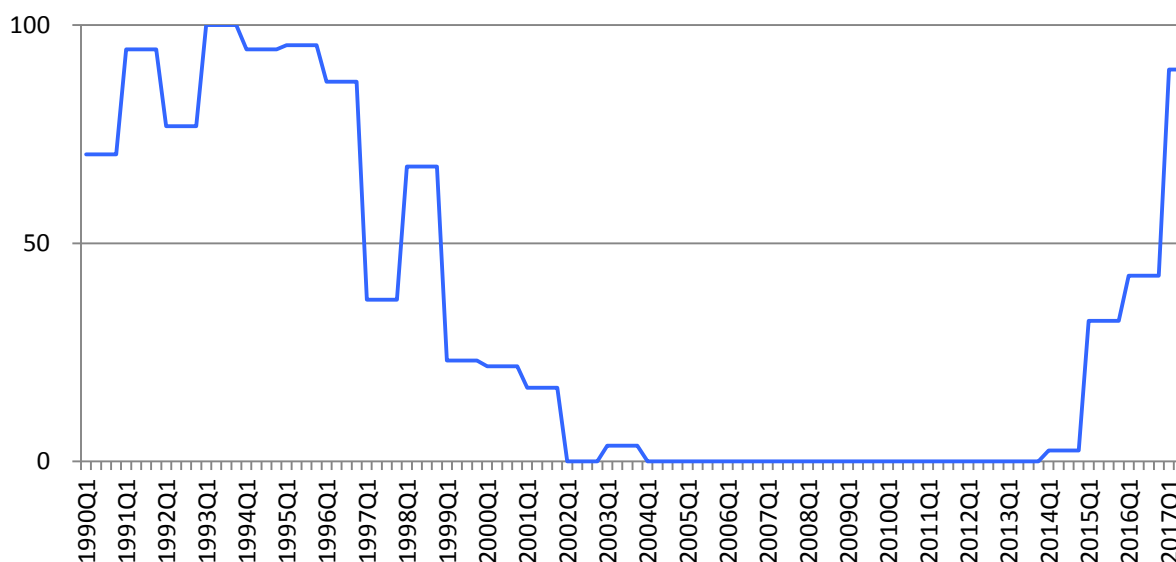
資料來源：台灣電力公司、本報告繪製。

圖 29 我國歷年備用容量率

2014 年後，因為電源開發未能如期進行，加上核四廠封存，我國備用容量率再度降低至政策目標值以下。加上非核家園政策的推動，既有核電廠部分機組大多時間處於歲修逾程狀況而未能運轉，2016 年台電的實績備用容量率已降到 10.4%(此數值將核一廠一號機、核二廠二號機計入系統，但林口新一號機未計入系統。倘若核一廠一號機、核二廠二號機皆不計入系統，但計入林口新一號機併聯試運轉的貢獻計入系統，則為 8.1%²²)。2017 年台電的備用容量率雖然預期仍能維持 10%，但假若再扣除核二廠二號機(目前仍處於歲修逾程狀況)，實績備用容量率可能僅有 7.3% 的水準。

因此，若最適備用容量率以政策目標值(2006 年以前的政策目標為 20%；2006-2011 年政策目標為 16%；2012 年之後則為 15%)作為電力供應穩定衡量標準，來計算負偏離度，將呈現一個凹字型的樣子(詳如圖 30)，並在近年急速惡化，已接近 1990 年限電年代的水準，顯示我國電源供應餘裕降低所帶來的風險激增。

另外值得提醒的是，在 2002 至 2013 年間，備用容量率高於最適備用容量率，雖可能有過度投資的現象，但就電力供應安全而言則因較無缺電疑慮，故其負偏離度的數值接近 0，風險極低。



資料來源：本報告計算。

圖 30 備用容量率負偏離度(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

2. 備轉容量率負偏離度

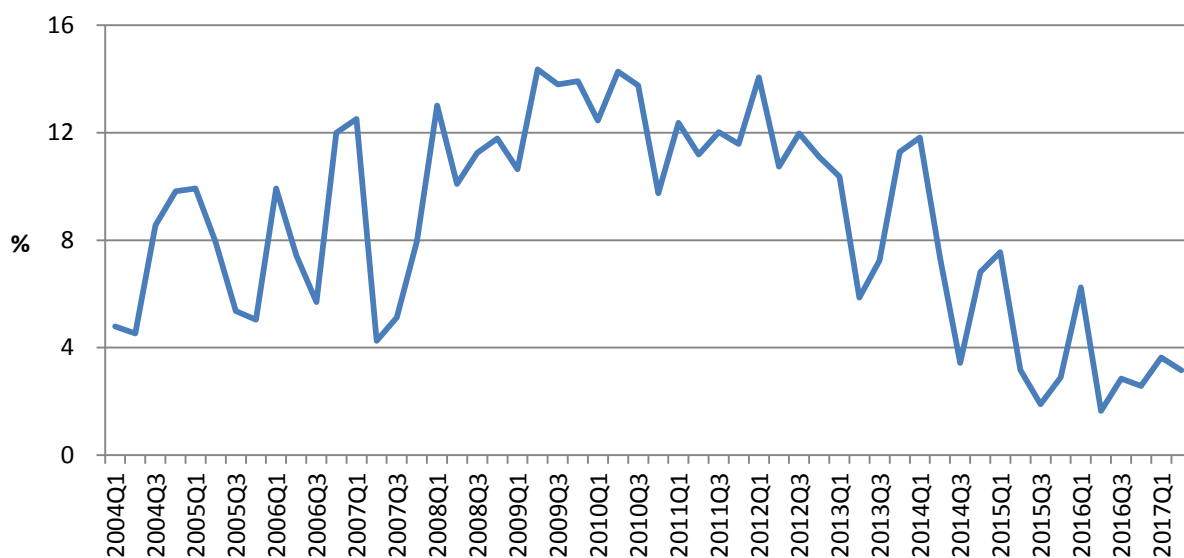
根據台電公司自 2004 年至 2017 年第二季的每日備轉容量與容量率的資料，並取「當季的最低值」可以看到，2004 年第一季備轉容量率最低值為 4.79%，隨著電力供需變動，2007-2013 年間，備轉容量率最低值發生於 2007 年第二季，達 4.26%，多數時段我國備轉容量率均在 10% 之上，僅 2013 年第二季時降為 5.86%，然而，至 2014 年之後我國備轉容量率即逐步下降，2015 年第三季最低時僅為 1.9%，至 2016 年第二季時之備轉容量率更低達 1.64%，幾近台電公司執行限電措施的狀

²² 台灣電力公司(2016)，「備用容量之說明」，

http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c33.aspx?LinkID=13(最後瀏覽日期：2017 年 9 月 20 日)

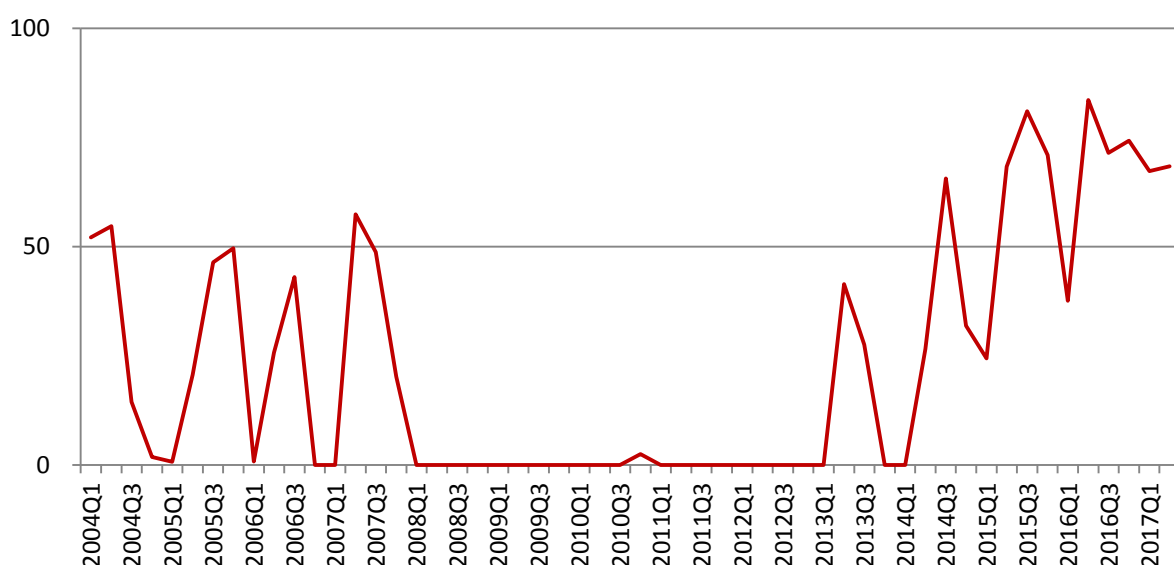
態，是樣本期間內的最低值(詳如圖 31)。

在這樣的狀態之下，我們可以用備轉容量率負偏離度來捕捉電力系統每天實際可調度之發電容量裕度緊澀所帶來的風險。將台電公司的備轉容量率燈號中界定綠燈(代表供電充裕)或黃燈(代表供電吃緊)的 10%，作為最適備轉容量率的標準；並且將樣本期間內的每日備轉容量率，取當季的最低值後，來計算備轉容量率負偏離度。可以發現我國的備轉容量率負偏離度也在近年快速惡化，2017 年第二季已達 68.4(2016 年第二季則高達 83.6)，顯示我國電力系統每天實際可調度之發電容量裕度緊澀，有可能因為天災與事故而造成停限電的發生(詳如圖 32)。例如：在樣本期間外的 2017 年 7 月底發生雙颱襲台，造成和平電廠對外輸電鐵塔倒塌，台電公司供電能量頓時減少 130 萬瓩，並在其後兩度出現限電警戒的紅燈。



資料來源：台灣電力公司、本報告繪製。

圖 31 各季備轉容量率最低值(2004 年 Q1 至 2017 年 Q2)



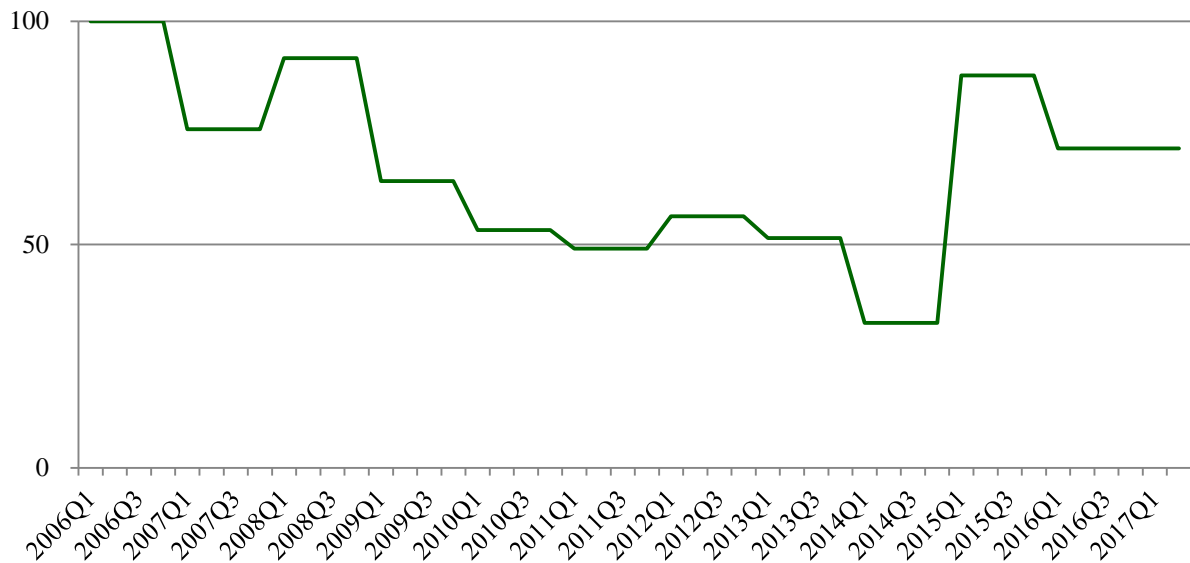
資料來源：台灣電力公司、本報告繪製。

圖 32 備轉容量率負偏離度(2004 年 Q1 至 2017 年 Q2)

3. 區域負載負偏離度

在台灣各區域之電力供需負載概況中，北部地區之電力需求均大於電力供給，需仰賴中部地區輸送電力，長期以往呈現南電北送現象，在這樣的狀態下，本報告以區域負載負偏離度捕捉區域電網供需失衡與輸電壓力風險。在 2006-2016 年間，區域負載負偏離度曾一度好轉，降至 2014 年之 32.4，但其後因北部電源供應不足、電力需求上升，2015 年之負載預測偏離度又回升到 87.9，2016 年回降到 71.5，如圖 33 所示。

不過這並不代表區域供需缺口將會縮小，相反地北部地區長期電力供應不足的問題可能短期無解。依據台電資料，2017 至 2023 年間，北部地區的電源均將不足以支應負載²³。若未來全面停用核能，加上協和電廠除役，淡水河以東的大台北地區將無電廠，而被寄予厚望的風力與太陽光電，因為先天條件的限制，未來興建的地點也將多半集中在中南部地區，因此未來北部地區的供電缺口將有可能會超過中北輸電幹線可靠送電能力(200-300 萬瓩)。中北輸電幹線電塔數量逾萬，若未來其中有一個超高壓電塔因天災而倒塌，北部地區將有大規模停電的危機，例如 2017 年 6 月北部暴雨造成核一廠聯外電塔倒塌，以及 7 月和平電廠聯外電塔因颱風倒塌的事件均是警訊。



資料來源：本報告計算。

圖 33 區域負載負偏離度(2006 年 Q1 至 2017 年 Q2)

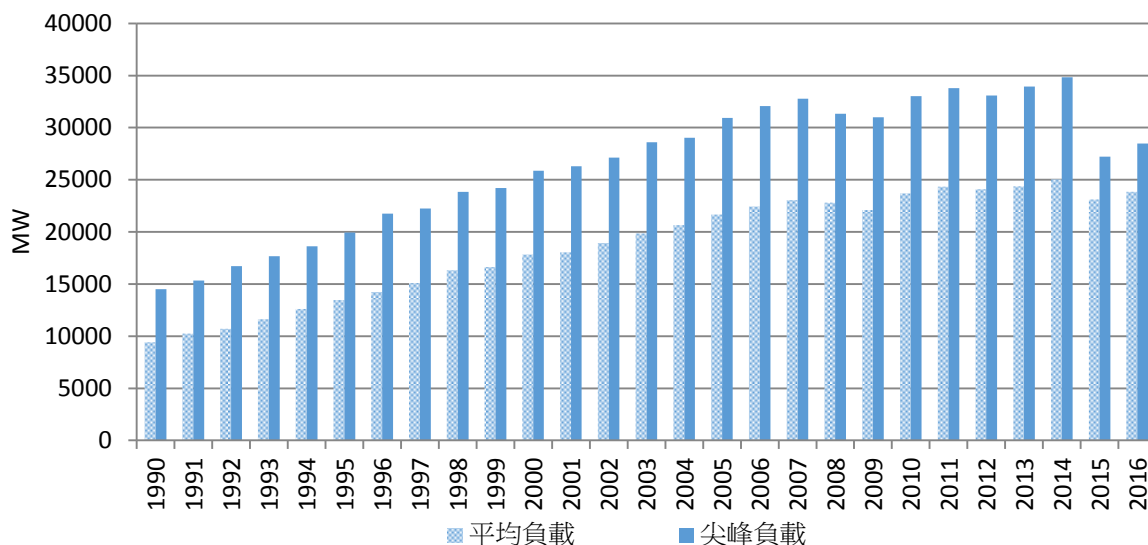
4. 負載率

依據能源統計資料如圖 34 顯示，1990 年我國尖峰負載和平均負載分別約為 14,511MW、9,401MW，其後隨著經濟發展和生活水準提升，產業及家計部門之電力消費量持續增加，至 2016 年時我國尖峰負載和平均負載已分別達 28,472MW、23,839MW，年均成長率則分別為 2.63%、3.64%，即平均負載增長速度高於尖峰負載，如圖 35 所示。故觀察我國負載率變化，1990 年第一季負載

²³ 台灣電力公司(2016)，「北部電網供電現況」，

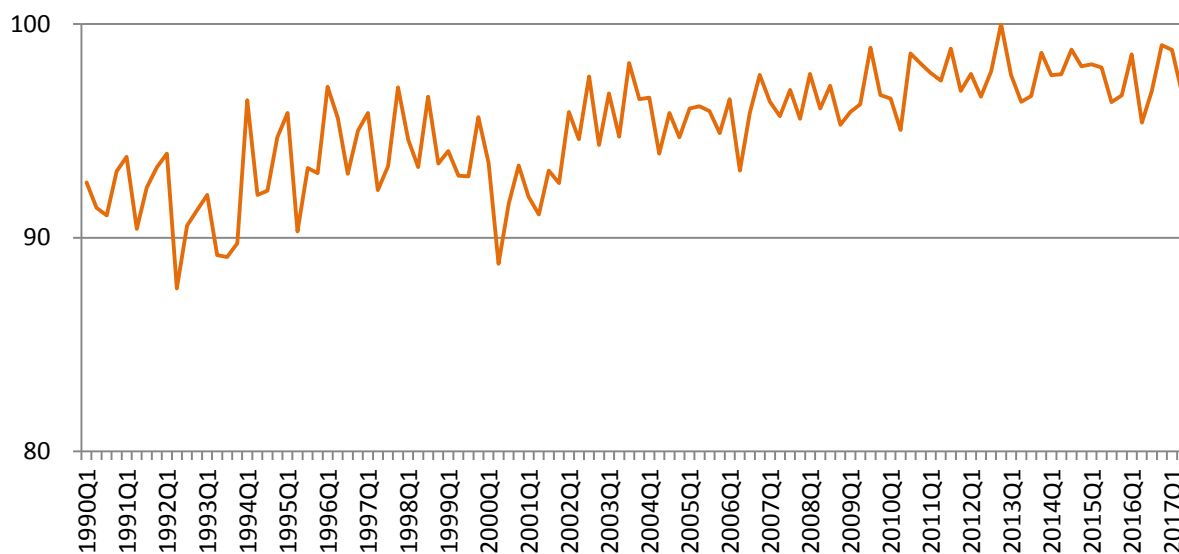
http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c23.aspx?LinkID=12(最後瀏覽日期：2017 年 7 月 18 日)

率為 77.87%，其後負載率漸次提高，至 2012 第四季時達到最高值 84.1%，至 2017 年第二季時則為 81.39%。



資料來源：AREMOS 統計資料庫、本報告繪製。

圖 34 我國尖峰負載與平均負載



資料來源：AREMOS 統計資料庫、本報告繪製。

圖 35 負載率(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

一般而言，負載率越高越好，但是因為負載率具有極值(100%)，加上和主要國家比較，我國的負載率已經達到極高的水準。台電公司的資料顯示，我國 2012-2016 年的負載率「平均值」約為 82%；但是根據日本電氣事業聯合會(The Federation of Electric Power Companies of Japan, FEPCJ)2015 年報告指出，德國在 1990-2011 年間的負載率「最高值」僅 77%，其他國家的負載率「最高值」更是遠遠低於我國的「平均值」，例如美國(61%)、英國(67%)、加拿大(69%)、法國(70%)、義大利(59%)、日本(68%)。因此，現階段較高負載率亦代表未來要透過加強抑低尖峰來穩定電力系統之空間已所剩無幾。過高的負載率加上我國目前的低備轉容

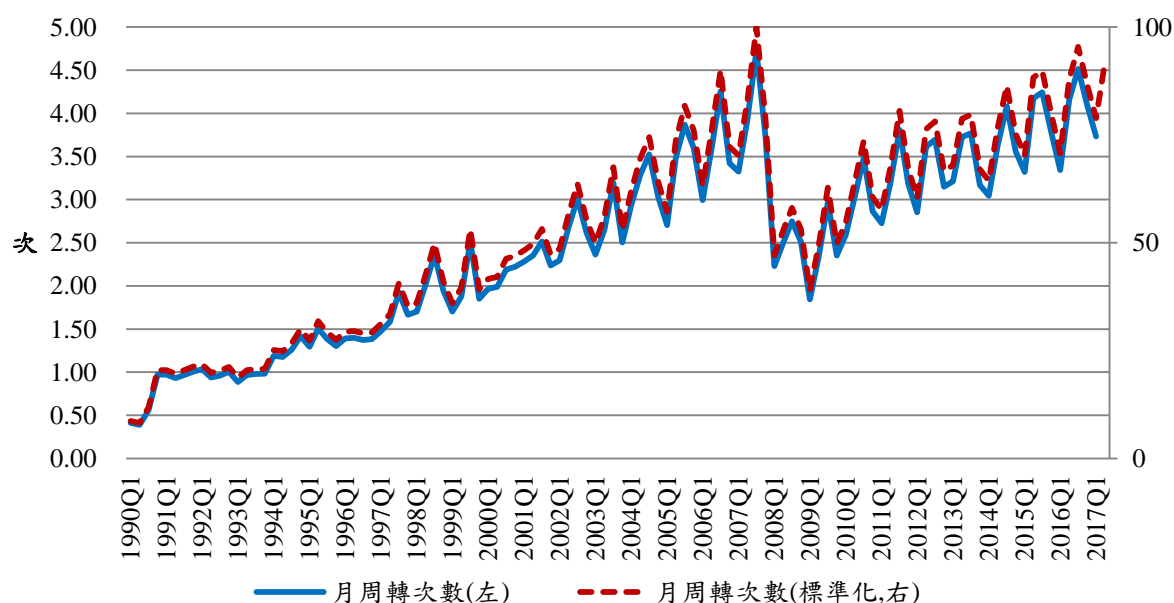
量狀況，代表多數的發電機組長期處於高負荷狀態，難以排修、維護。若是電力需求突增，或機組出現故障，又或者出現任何的意外事故，都將導致跳電。

舉 2017 年 8 月 15 日的大潭燃氣機組跳機的例子而言，其實事件發生的時間已接近傍晚時分，但是負載卻沒有因此大幅下降，大潭電廠的各機組仍滿載發電，故當中油公司於電廠旁的計量站因人為疏失導致中斷供氣時，全部六個機組均跳機，進而造成全台大範圍停電的嚴重事故。因此，在抑低尖峰為國內需求面的主要措施之下，負載轉移餘裕空間的降低將造成相當大的風險。

5. 天然氣月周轉次數

天然氣的接收與儲存設備建設不易，1990 年 4 月我國首座天然氣接收站，永安液化天然氣接收站啟用，儲槽容量 69 萬公秉。至 2009 年 7 月，台中液化天然氣接收站啟用，合計儲槽容量 48 萬公秉。然而，近年來隨著我國天然氣消費量的快速提升，我國天然氣存量的月週轉次數也快速提高，天然氣相關儲輸設備的營運壓力也水漲船高。

根據 IEA 2016 年「全球天然氣安全回顧(Global Gas Security Review)」所彙整的資料顯，我國天然氣儲輸設備的營運壓力在所有亞洲主要的液化天然氣進口國家中最高。舉例來說，韓國的液化天然氣再氣化設備利用率約為 34%；而台灣的設備利用率不但在 2015 年超過百分之百，2016 年還能夠百尺竿頭更進一步，設備利用率比前一年更高。另外，日本與韓國之年平均天然氣周轉天數分別為 36 天及 53 天，而台灣則僅有 13 天。



資料來源：本報告計算。

圖 36 天然氣月周轉次數(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

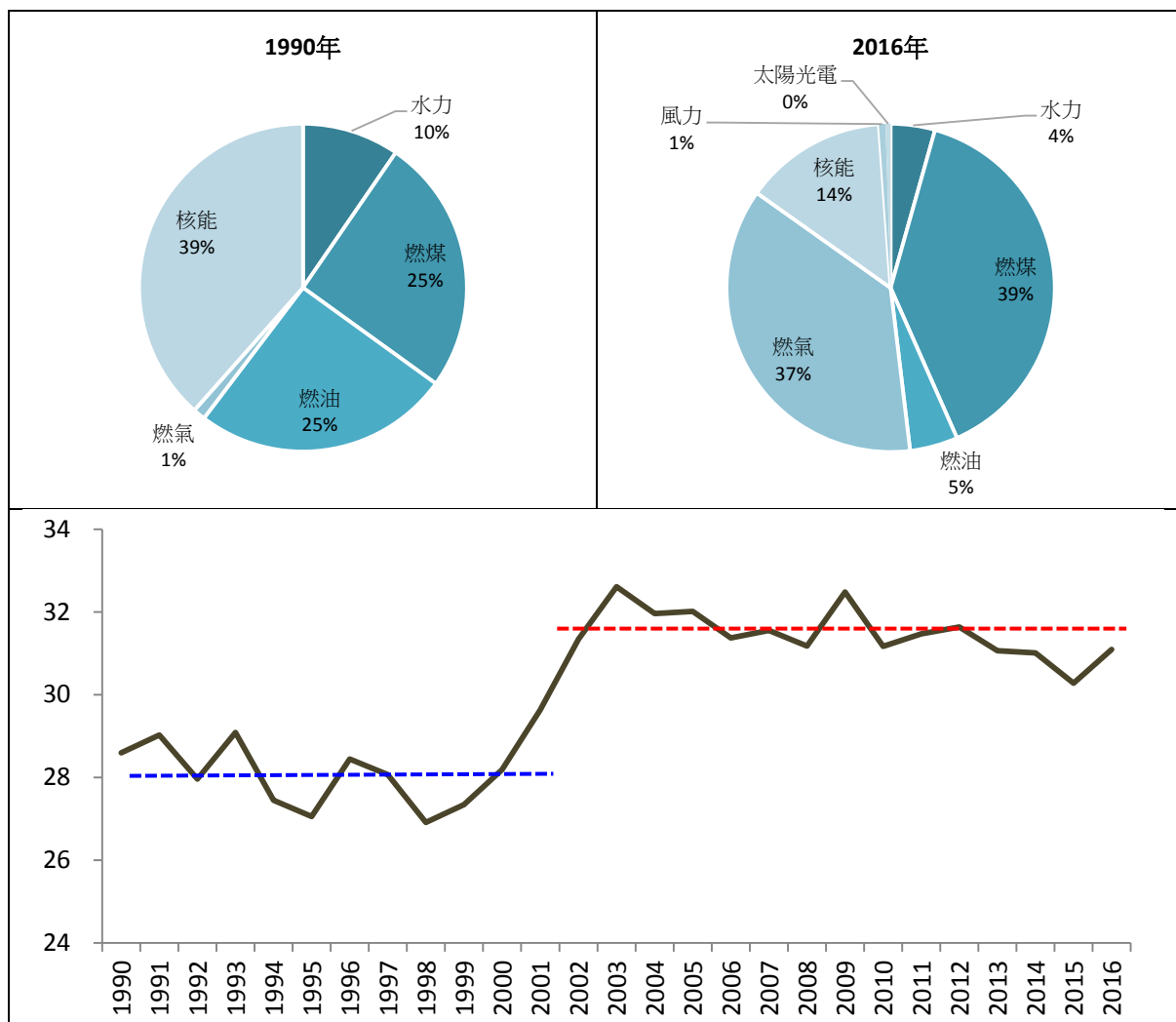
在一般的企業營運中，以存貨為例，存貨的週轉次數高本來是件好事，但考量台灣夏季颱風較多，由於液化天然氣載運船若在入港前後遇到颱風，須因安全因素遠離待命。因此，若天然氣進口來源中斷可撐天數小於 3 天，即有可能因為颱風因素而斷氣，甚至一次接連發布兩個颱風陸上警報也在 2017 年 7 月成真，

因此本報告以天然氣月周轉次數來捕捉供應中斷時可撐天數降低所代表的風險。

由圖 36 可知，我國天然氣月周轉次數由 1990 年第一季之 0.411 次，一路上升至 2007 年第三季之 4.73 次，其後得益於 2006 年永安站儲槽擴建及 2009 年台中站儲槽完工而一度好轉。惟至 2017 年第二季再次上升至 4.35 次，換言之，即使我國儲存天然氣的貯槽滿載，假若於夏季用電尖峰期間發生天災或其他事件(海運封鎖)導致天然氣供應中斷，若不採行應變措施減少天然氣使用量，預計可用的天然氣數量僅能支撐國內消費 6.9 天左右。由於現行政策之下，2025 年我國燃氣發電占比將高達 50%，對於天然氣的倚賴程度更將大幅增加，因此第三接收站是否能如期完工，將攸關我國未來的能源安全。

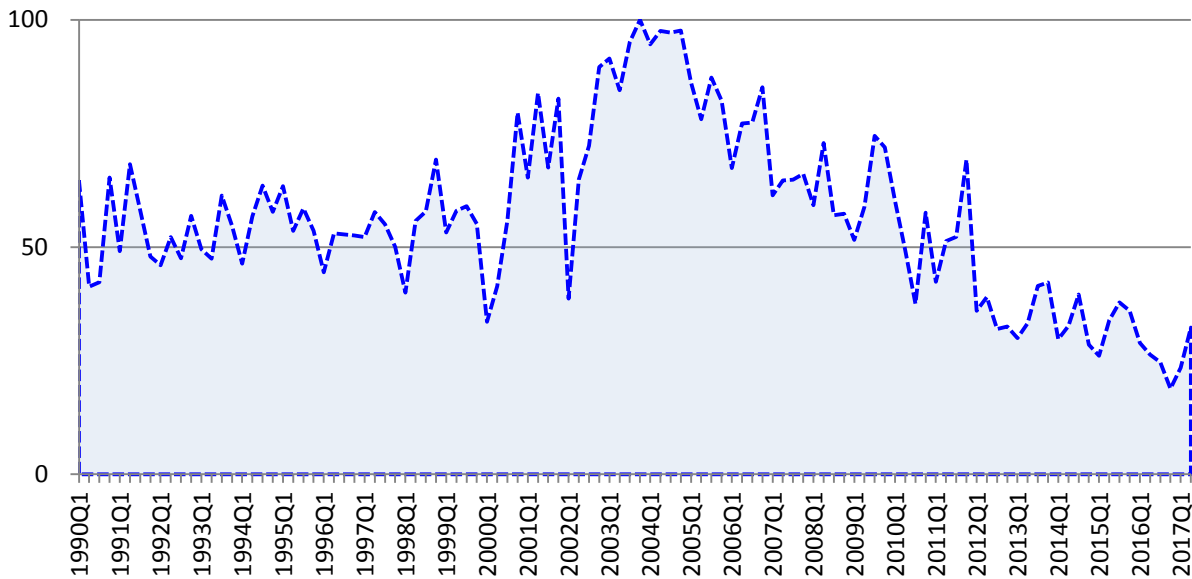
6. 電力生產結構脆弱度

我國 1990 年與 2016 年的發電占比與集中度變化趨勢如圖 37 所示，將此占比做為權數來加權各類電源對應之 4.1 的五項初級能源供應脆弱度，可得我國電力生產結構脆弱度，如圖 38 所示。



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本報告繪製。集中度為本報告計算。

圖 37 我國發電占比與集中度



資料來源：本報告計算。

圖 38 電力生產結構脆弱度(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

1990 年時我國燃煤發電、燃油發電、燃氣發電、核能發電和水力發電，占發電量比重分別為 25%、25%、1%、39%及 10%；至 2016 年時，燃煤發電、燃油發電、燃氣發電、核能發電和水力發電，占發電量比重則分別為 39%、5%、37%、14%與 4%。發電集中度在 2000 年之後出現了跳躍式的結構性變化(Structural Change)，核能發電、燃油發電在電源配比中的角色大幅降低，同時燃氣發電、燃煤發電的重要性大幅提升，而風力發電和太陽光電合計占比則不到 2%。

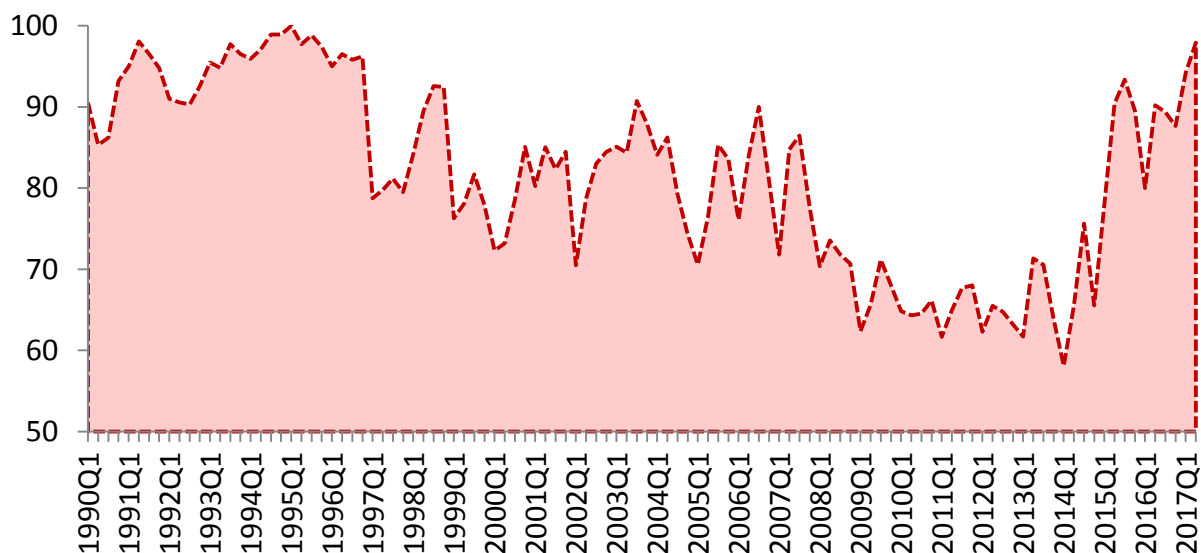
由於電力生產結構脆弱度為發電占比和各類電源對應之初級能源供應風險之乘積加總，且由前述分析發現，雖然我國初級能源供應脆弱度中，原油與天然氣的供應脆弱度下降(見圖 23 及圖 25)，但因燃油發電占比逐年減少，燃氣發電比重 2000 年前並不太高，而長期以來占比最高的燃煤發電所對應的供應風險則呈現一個凸字形(見圖 21)。故電力生產結構脆弱度的走勢與煤炭供應風險的變化相當一致，亦先由 1990 年第一季之 64.66，隨著燃煤發電比重的增加且煤炭供應風險的遞增，逐漸增加到 2003 年第四季的高點，其後因煤油氣的供應脆弱度均維持下降趨勢不變，故我國於 2017 年第二季時之電力生產結構脆弱度降為 32.29。表示我國近期電力生產結構脆弱度已較 2000 年中減少許多，是近年基礎設施面中唯一有助於減緩我國基礎設施脆弱程度的次指標。

7. 小結

整合前述基礎設施面的七項風險次指標(與他國電網連接負偏離度屬於最高風險狀態)，可計算得出我國 1990 年第一季至 2017 年第二季之基礎設施脆弱度指標，如圖 39 所示。1990 年第一季基礎設施脆弱度數值為 90.52，其後則因開放民營電廠投資，備用電源餘裕增加(備用與備載容量均有所回升)，同時區域負載也較為均衡之下，基礎設施脆弱度有所好轉，降低至 2012 年初 61~63 的水平。

然而，近年來國內面臨了電力和天然氣基礎設施投資不足的窘境，基礎設施

脆弱度再度劇烈惡化。雖然電力生產結構脆弱度受惠於初級能源供應脆弱度降低而減少的正面因素存在，但是因為電源開發再度受挫，加上處於能源轉型期間，備用容量率再度下降至政策目標值之下，備轉容量率履創新低，區域供電轉而吃緊，負載率也超過 80%、抑低尖峰的空間有限，難以透過需求面管理抵消電力供應緊澀狀態。另外，天然氣儲存空間已難以應對快速提升的消費成長，月周轉次數急速上升，若是在夏日尖峰時出現進口中斷事件，將無法支撐國內的消費量超過一周，是故，我國的基礎設施脆弱度於 2017 年第二季時之數值已增為 97.94，已臨近 1990 年代的限電狀態局勢。



資料來源：本報告計算。

圖 39 基礎設施脆弱度指標(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

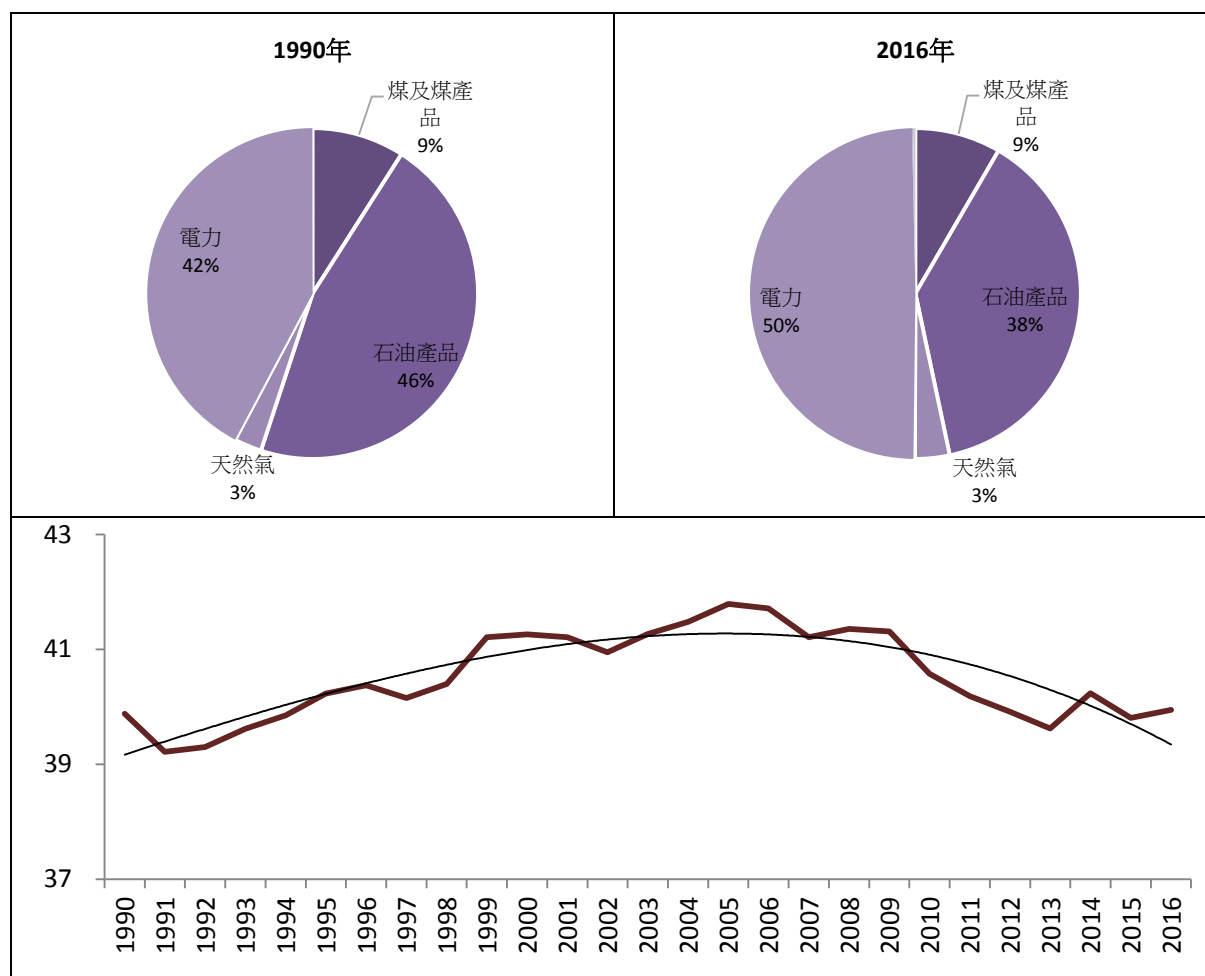
(三) 最終能源消費脆弱度指標

1. 最終能源消費結構風險

我國歷年的最終能源消費占比與集中度變化趨勢如圖 40 所示。我國煤及煤產品、石油產品、天然氣、電力等最終能源消費品項，1990 年的比重分別為 9%、46%、3%、42%；2016 年時，則分別為 9%、38%、3%和 50%。其中，電力占比略微提升，而石油產品比重則降低，惟兩者仍為主要能源消費品項。值得注意的是，電力占比的提升也顯示出我國電氣化的進程，隨著未來更多透過電力提供的能源服務商品(例如電動車)出現，此項進程將會一直持續，若是電力消費所對應到的基礎設施脆弱度未能改善，可能也會使最終能源消費結構風險有所增加。

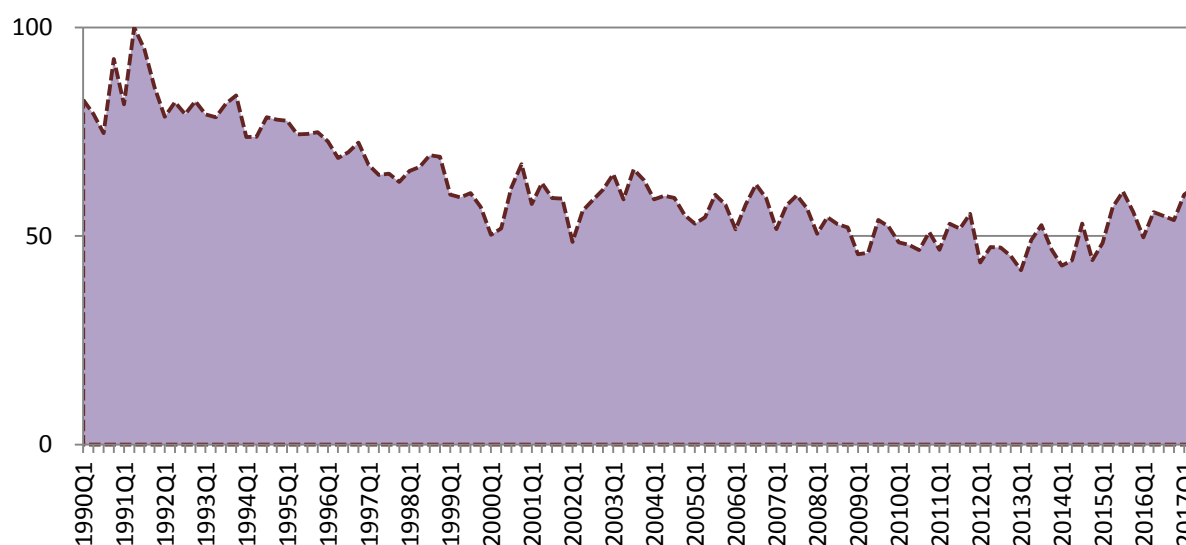
將此最終能源消費占比做為權數，與各類最終能源消費對應的初級能源供應風險(對應煤、油、氣最終消費)與基礎設施脆弱度(對應電力最終消費)進行加權計算，可得到我國最終能源消費結構風險，如圖 41 所示。1990 年代前期，最終能源消費結構風險因中東局勢不安、國內基礎設施完備性不足的兩大負面因素而偏高。其後，在原油、天然氣的供應脆弱度好轉，以及基礎設施脆弱程度減少下，最終能源消費結構風險於 2002 年降低到 48.58 的水準，並在之後呈現震盪的態勢。惟近年來受基礎設施脆弱度惡化影響，抵消了能源消費結構分散化與初級能源供

應風險的降低效果，近期的最終能源消費結構風險呈現波動且微幅增長的態勢，2017年第二季時最終能源消費結構風險值已回升至 61.72。



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本報告繪製。集中度為本報告計算。

圖 40 我國最終能源消費結構與集中度



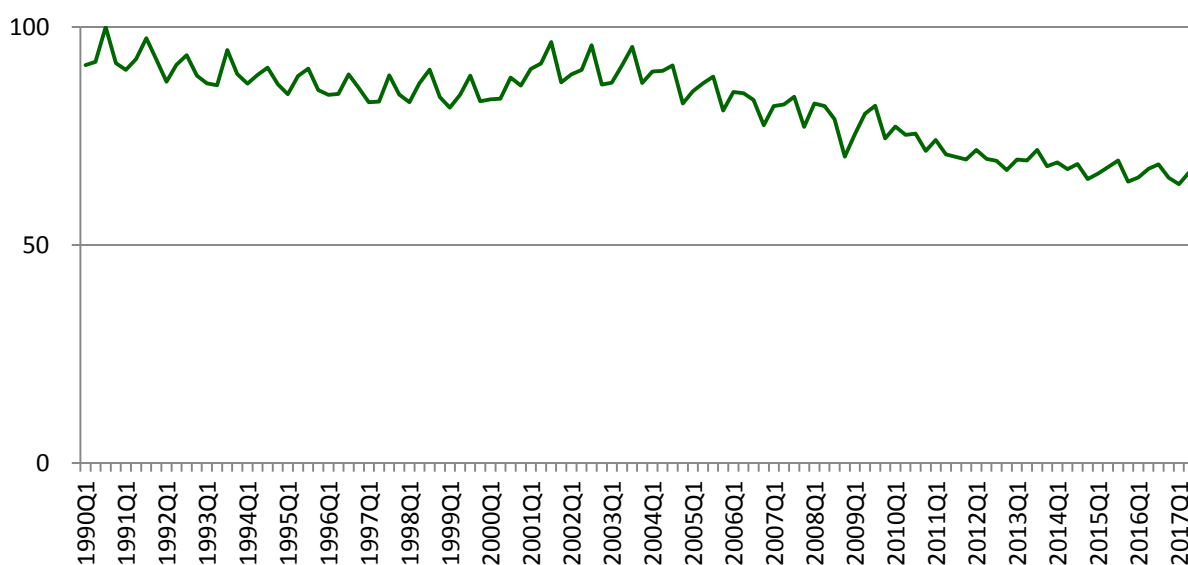
資料來源：本報告計算。

圖 41 最終能源消費結構風險(1990年Q1至2017年Q2)

2. 能源密集度

本報告以能源密集度來代表我國的能源使用效率。當能源使用越有效率時，會在能源成本(價格)上升之際，具有較佳的因應能力，減低能源成本(價格)波動的衝擊影響。因此，能源效率越高(能源密集度越低)將可減緩我國最終能源消費脆弱程度。

1990年至2016年間，我國能源密集度持續降低，能源效率改善幅度相當顯著。依據主計總處和能源局資料顯示，我國1990年第一季能源密集度為10.03公升油當量／千元，至2016年第四季時，已降為7.19公升油當量／千元，總效率提升幅度約為28.3%，約當年均增幅1.37%(能源密集度的標準化數值則如圖42所示)，在能源使用效率改善下，有利於因應能源價格變化。



資料來源：本報告計算。

圖 42 能源密集度標準化數值(1990年Q1至2017年Q2)

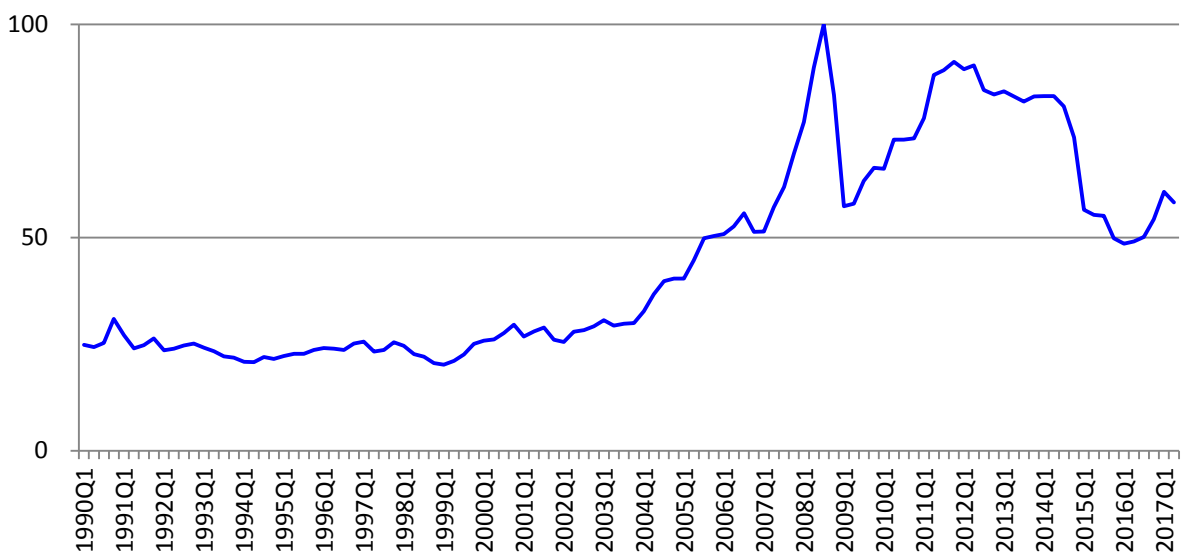
3. 能源成本

本報告計算的能源成本包含了初級能源平均進口價格(含煤、油與液化天然氣)、再生能源(含水力)發電成本與核能發電成本(含核後端支出)，若一國部門之相關能源支出較少，受到國際價格波動變化影響亦較低，反之，假使能源支出費用較高，則在能源價格上漲之際，對國內各產業及家計部門衝擊也較大，進而使得總能源消費脆弱度上升。

1990年至2000年時，我國能源進口價格大致平穩。惟隨著全球經濟成長，各國對能源和原物料需求提高，以及熱錢流入金融市場，帶動國際能源價格大幅走升。2008年全球金融風暴期間，除了國際原油價格崩跌，也帶動煤炭和天然氣價格走跌，使得我國各類能源進口成本快速降低。隨後在世界景氣復甦下，國際能源價格再度走升，促使我國能源成本上漲，一度接近金融風暴前水準。2014年下半年之後，因頁岩油和傳統原油的市場競爭下，國際油價再度大幅下跌，使得國內能源支出降低。2015-2016年，國際油價小幅反彈，但尚未觸及前波高點。另一方面，我國早期再生能源主要為水力發電，隨著我國能源政策定調為加速再

生能源推廣和非核家園，風力發電與太陽光電占再生能源(含水力)發電比重大幅提高，致使再生能源(含水力)平均發電成本在近年走高甚多；加上核能電廠之部份機組因燃料池滿池而停擺，發電實績減少，和因應國際財務報導準則改變等，亦造成每度核能發電成本需攤提更高的核後端費用，至 2017 年第二季時能源成本的標準化數值約為 54.29，如圖 43 所示。

展望未來，我國規劃於 2025 年達到再生能源發電比重至 20%，並以「太陽光電 2 年推動計畫」、「風力發電 4 年推動計畫」和提高再生能源躉購費率等方式作為配套措施，同時核能發電在陸續除役間可能增加提列核後端處理費，以及搭配再生能源發展所須的強化電網、擴增儲能、提升機組調度靈活性等之投資成本等，加上政府規劃燃煤發電比重將由目前的 45% 提高為 2020 年的 50%，然後再降為 2025 年的 30%。2020 年後大批燃煤電廠必然閒置，每度攤提的固定成本將從而大增，燃煤不再便宜，故前述三者可能是未來我國能源成本增加的主要驅動力。



資料來源：本報告計算。

圖 43 能源成本標準化數值(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

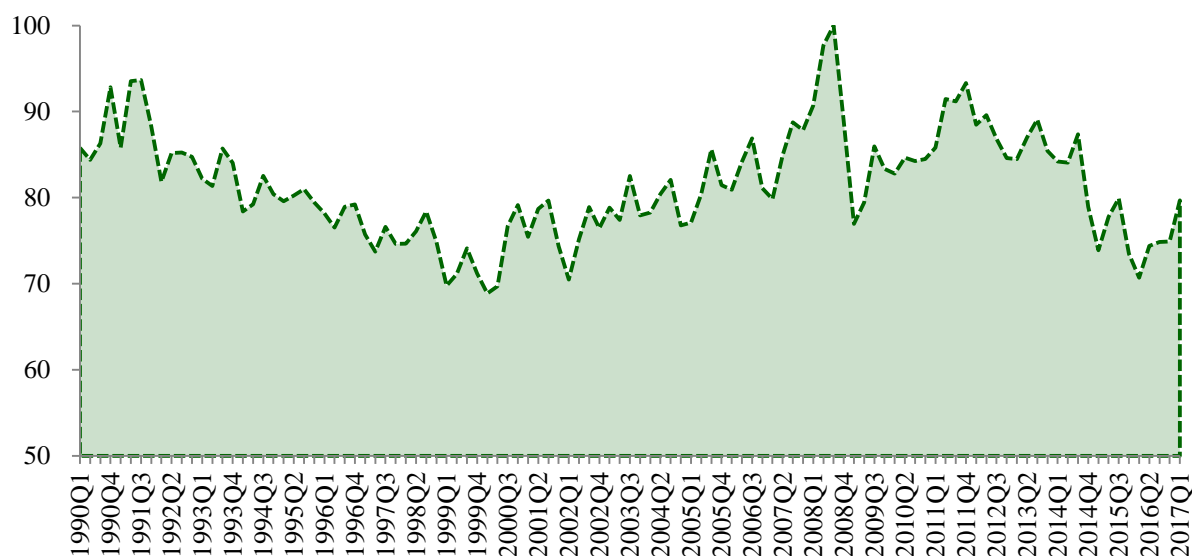
4. 小結

綜合前述三項指標，並給予等分權重，可得出我國 1990 年第一季至 2017 年第二季之最終能源消費脆弱度指標，如圖 44 所示。

1990 年第一季我國的最終能源消費脆弱度指數標準化值為 85.79，而 1990 年至 2000 年間因能源成本指標尚稱穩定，加上最終能源消費結構風險及能源密集度降低，故總最終能源消費脆弱度呈改善趨勢，並於 2000 年第一季觸及樣本期間低點的 68.87。

然而，之後即使我國能源效率持續改善，仍未能有效抵消國際能源價格大幅提高帶來的龐大風險，最終能源消費脆弱度惡化程度顯著，並於金融海嘯前達到樣本期間的高點。2015 年至 2016 年則受惠於全球能源價格下跌，有助於降低我國的能源成本壓力，加上政府持續推動能源效率提升措施，使總最終能源消費脆

弱度相對好轉，於 2017 年第二季降回 80.54 的水準。惟整體而言，最終能源消費脆弱度長久處於中間偏高的水準，此也是能源稟賦不足的淨進口國難以擺脫的現實。

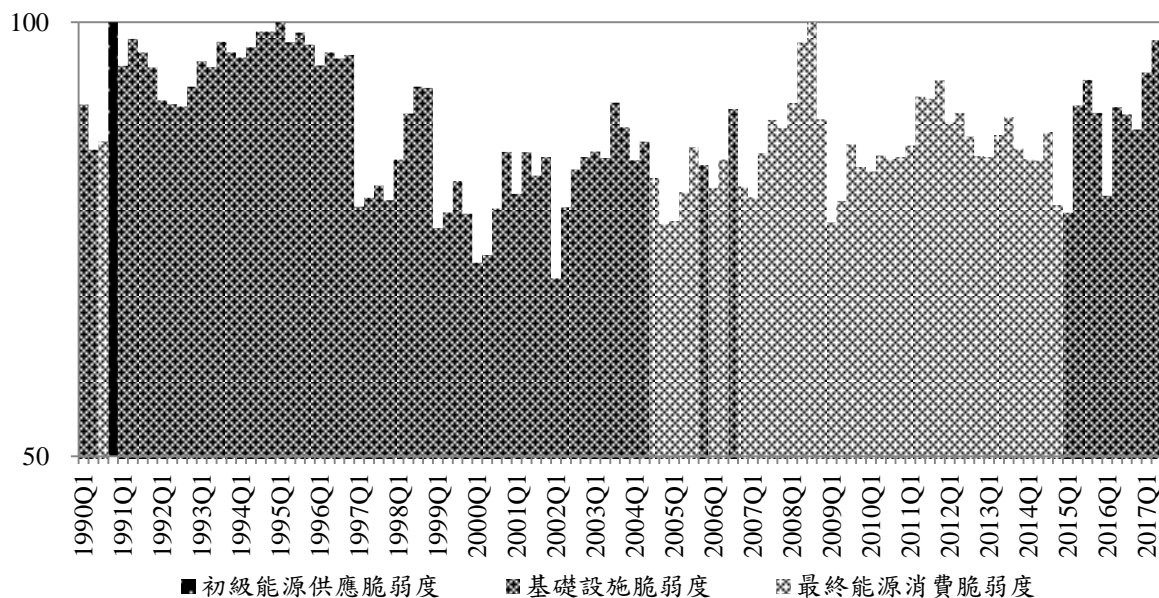


資料來源：本報告計算。

圖 44 最終能源消費脆弱度指標(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

(四) 總能源脆弱度指標

由於一國的能源系統在供需與基礎設施三個層面均缺一不可，故初級能源供應脆弱度、基礎設施脆弱度和總最終能源消費脆弱度中，只要有一項指標呈現高脆弱性，即顯示我國能源情勢不安全，故本報告取樣本期間內，各期三者的最大者作為當期總能源脆弱度指標。我國 1990 年第一季至 2017 年第二季之總能源脆弱度指標如圖 45 所示。



資料來源：本報告繪製。

圖 45 我國總能源脆弱度指標(1990 年 Q1 至 2017 年 Q2)

1990 年第一季總能源脆弱度指標為 90.52，而 1990 至 2003 年，除了波灣戰爭期間，多數時期的總能源脆弱度源自於基礎設施的不足。2004-2014 年間，則是偏高的國際能源價格，造成我國能源經濟脆弱度的惡化。近年來，則因為電源設備和天然氣儲輸建設跟不上需求的成長，基礎設施面再度成為我國能源脆弱度惡化的主要原因，2017 年第二季時高達 97.94。倘若未來電力供需失衡現象未解，或是能源價格持續攀升，我國總能源脆弱度惡化可能性較高。

第五章 結論與建議

能源不僅是社會經濟活動的基礎，更具國家安全的戰略重要性，而國內在能源低度自主性下，仍需持續面臨國際能源價格波動和國內能源轉型之挑戰，然而國內卻尚無一系統性指標可完整顯示我國能源安全程度與變化。

故本報告提出「能源建構績效指標」與「能源經濟脆弱度」的兩套評估成果。前者遵循世界經濟論壇的方法論，可用以觀察台灣的能源部門在經濟成長與發展、環境永續與能源取得與安全等三個構面之績效表現及其於國際間相對排名；後者則以世界能源理事會的方法論為架構，再配合我國國情進行調整，可用來衡量台灣能源經濟風險，讓民眾可以對我國能源供應的脆弱度有一清晰的感受。兩套指標的評估成果及其政策意涵與建議茲說明如下：

能源建構績效指標

- 一、能源建構績效指標含三大構面、18 項次指標。其中，第一構面(經濟成長與發展)包含能源生產力、汽油價格扭曲程度、柴油價格扭曲程度、工業電價、能源進口成本占 GDP 比重、能源出口價值占 GDP 比重；第二構面(環境永續)包含替代能源及核能占總能源使用的比例、電力生產所排放的二氧化碳、能源部門之人均甲烷排放量、能源部門之人均二氧化氮排放量、懸浮微粒濃度、平均汽車燃油經濟效率；第三構面(能源取得與安全)含電氣化比率、電力供給品質、人口使用固體燃料烹煮之百分比、能源淨進口占能源使用比重、進口來源國的多樣程度、初級能源總供給的多樣程度。
- 二、總指標排名方面，以 2017 年為例，在評比之 128 個國家當中，台灣名列第 62 序位，大約位於前 48%，相較於 2016 年退步一名。而細看三大構面，近年台灣在經濟發展與成長面的排名序位較 2016 年略為退步，不過仍位於前三分之一。另外，台灣在環境永續面則表現不佳，名列第 110 序位，大約為 85.8 百分位。最後，在能源取得與安全面的部份，台灣則在 128 個評比國家當中排名 46 位，序位為前 35.7%。
- 三、台灣在環境永續面向表現不佳，2017 年雖相較於 2016 年持平且各項次指標的排名也沒有太大差異，但展望未來，在國內非核家園政策目標已定，短期內再生能源占比大幅提升的可能性仍低的狀況之下，我國在替代能源及核能占總能源使用的比例、電力生產所排放的二氧化碳、懸浮微粒濃度等三項次指標在未來幾年將更形惡化，不利於台灣在環境永續面向的排名。
- 四、比較國際主要國家的排序，2017 年排名最佳的國家為瑞士，亞鄰國家如新加坡、日本與韓國等，排名約在前三分之一左右，台灣則約位於前二分之一，印度、中國大陸之名次則分列 87 名、95 名。

能源經濟脆弱度指標

- 一、在 1990 年第一季至 2017 年第二季間，受惠於進口來源的多元化，我國的初級能源供應脆弱度指標由 90.16 大幅降至 32.46；
- 二、最終能源消費脆弱度指標則因國際能源價格的劇烈波動，呈現偏高與震盪態

勢，且僅從 85.79 小幅降為 80.54；

- 三、基礎設施脆弱度指標由 65.54 躍升為 97.94，主要原因在於國內現有天然氣輸儲設備無法消化持續增加的天然氣消費量成長，加上電源開發不順，備用和備轉容量率持續偏離最適值，兼且在區域供電失衡下，跨區送電的壓力也偏高。
- 四、因我國偏高的負載率導致進行負載轉移的餘裕空間有限，難以透過需求面管理來抵消供給面壓力，諸多因素造成缺電危機如影隨形。
- 五、除非重要的能源進口國出現戰亂或政經局勢緊張，我國總能源脆弱程度的變化，長期以來係多受基礎設施的完備性及國際能源價格變化影響。而近年因電源和天然氣基礎建設不足，目前的總脆弱度已接近 1990 年代缺電危機、2004-2008 年國際能源價格大漲等重大事件時的高點，此為本報告所建立之能源脆弱度所顯示的政策意涵與傳統著重在供應面的能源安全指標之相異處。

依據上述的研究成果，本報告提出下列建議：

- 一、首先以能源部門在經濟成長與發展方面的表現來看，台灣在國際比較中排序位於前段，主因在於較高的能源生產力、偏低的工業電價等，惟汽柴油扭曲程度在國際排名上位於後段班，顯示出台灣在油品相關稅率離最適稅率仍有一段的差距，故維持合理油價調價機制有其必要性。
- 二、再以能源部門在環境永續方面的表現來說，台灣在國際比較中排序位於後段，主因在於核能與再生能源合計占比低於國際水準，而空氣污染排放數值高於國際平均，建議應提高低碳或無碳能源使用，並且加強空氣污染管制。
- 三、至於能源部門在能源取得與安全方面的績效表現，台灣排序位於前段，主因在於電氣化程度和供電品質較佳，然而應該注意的是，2017 年的排名相較 2016 年退步 7 名，如何穩健地增加自產能源比重，降低能源淨進口比重，是提高我國在此分項績效表現的政策重點。
- 四、歷史數據顯示我國能源進口供應風險降低，但考量我國未來天然氣用量將持續提高，可評估自北美進口頁岩油氣之可行性與運輸成本等相關因素衡量，藉以增進能源來源之多元性和面向。
- 五、由於長期來看電力供給仍是個令人擔心的問題，建議政府宜務實評估能源轉型的方向、目標與期程。而要達成政策目標，政府宜保有彈性空間，來妥善運用各類型的發電機組，包括核能及部分燃煤機組等基載電力，宜於再生能源等替代電源實際建置完成時除役。
- 六、在目前再生能源發展所須可靈活調度之替代電源、強化電網和儲能等設施仍待大量建置前，政府提前將核能機組除役，恐難以避免缺電、電價大幅上漲及達不到國際減碳承諾等問題。
- 七、應加速增設天然氣接收及輸儲設施建置，以因應持續提高之天然氣發電需

求，同時應增加設備用的管線與儲槽空間，以降低供氣中斷的風險。

- 八、在需求面部分，提升能源效率仍為降低最終能源消費脆弱度的有效方式，政府不宜再對能源價格進行補貼，透過能源價格合理化反映真實成本，才能有效導正能源用戶的消費行為，進而增進能源效率(尤其是用電效率)。
- 九、針對再生能源發展部分，政府宜根據我國發展再生能源的限制及困難，務實評估未來各年再生能源發展目標，並對可能發生的問題未雨綢繆、預作防範。
- 十、行政院宜做跨部會協調，盡速解決設置離岸風機所面臨的漁權、航權、環保抗爭及海事工程港埠興建等問題；妥訂離岸風機及海事工程的國內自給率，以減少風機快速佈建及扶植國內相關產業發展無法兼顧的問題。
- 十一、政府對於推動再生能源所需的快速調度發電系統、儲能設備、強化電網的建置仍相當有限，應早做準備，並務實讓民眾瞭解電價將因而大幅上漲的必然性。而台電公司為此宜大幅增加相關投資，惟因台電公司目前資產負債比率已破八成，此電網投資的財源如何籌措亦是難題，建議將現行電價公式中之合理利潤率提高至 6% 以上，以避免造成空有再生能源設備而無法供電的窘境。

參考文獻

1. 行政院國家科學委員會(2009a),「98 年永續發展與能源安全核心議題總結報告」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=811(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
2. 行政院國家科學委員會(2009b),「98 年能源管理與效率提升核心議題總結報告」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=810(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
3. 行政院國家科學委員會(2009c),「98 年能源價格與市場開放核心議題總結報告」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=809(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
4. 行政院國家科學委員會(2009d),「98 年能源科技與產業發展核心議題總結報告」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=808(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
5. 行政院經濟建設委員會(2009),「永續能源政策綱領—節能減碳行動方案(2009 年度版)」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=800(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
6. 經濟部能源局 (2008),「永續能源政策綱領」。取自 <http://www.eigic-estc.com.tw/Main/Contents.aspx?id1=3&id2=2&id3=39>(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
7. 經濟部能源局 (2015),「全國能源會議全體大會」。取自 <http://www.eigic-estc.com.tw/Main/Contents.aspx?id1=3&id2=2&id3=39>(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
8. 經濟部能源局 (2017),「能源轉型白皮書」。取自 <http://energywhitepaper.tw/upload/201707/150034896153156.pdf>(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
9. 經濟部(2009a),「87 年全國能源會議結論執行成效與檢討」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=803(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
10. 經濟部(2009b),「94 年全國能源會議結論執行成效與檢討」。取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=802(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
11. 黃柏誠、吳啟瑞、傅鏗漩、林欣弘,2013,「2013 年 1 月澳洲水災事件分析」。災害防救電子報,國家災害防救科技中心。取自 http://www.ncdr.nat.gov.tw/upload/epaper/091_2.pdf(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 15 日)。

12. 謝惠子，2004，「國家能源新舵手—能源政策與能源局的形成」，能源報導，頁 11。取自 <http://energymonthly.tier.org.tw/outdatecontent.asp?ReportIssue=200408&Page=11>(最後瀏覽日期：2017 年 09 月 12 日)。
13. 謝惠子，2008，「與時俱進擘畫未來國家能源政策走向與變遷」，能源報導，頁 26。取自 <http://energymonthly.tier.org.tw/outdatecontent.asp?ReportIssue=200811&Page=26>(最後瀏覽日期：2017 年 07 月 12 日)。
14. 顏君聿，2012，「國際能源安全管理課題及其趨勢演變」，能源報導，頁 9-13。取自 <http://energymonthly.tier.org.tw/outdatecontent.asp?ReportIssue=201201&Page=9>(最後瀏覽日期：2017 年 07 月 12 日)。
15. Bohi, Douglas R., Michael A. Toman, and Margaret A. Walls (1996), *The Economics of Energy Security*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
16. Chuang, M. C. and Ma, H. W. (2013a), “An Assessment of Taiwan’s Energy Policy Using multi-dimension Energy Security Indicators,” *Renewable and Sustainable Reviews*, 17, 301-311.
17. Chuang, M. C., & Ma, H. W. (2013b), “Energy security and improvements in the function of diversity indices—Taiwan energy supply structure case study,” *Renewable and Sustainable Reviews*, 24, 9-20.
18. FEPCJ (2015), “Electricity Review Japan,” The Federation of Electric Power Companies of Japan.
19. Frondel, M., & Schmidt, C. M. (2013), “A measure of a Nation’s Physical Energy Supply Risk,” *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 54(2): 208-215.
20. Frondel, M., Ritter, N., & Schmidt, C. M. (2009), “Measuring Energy Supply Risks: A G7 Ranking,” *Ruhr Economic Papers*.
21. Haluzan, Ned (2013), “Energy security – Meaning, definition and importance,” *Renewables Talk*, Last update at January 2013, Available at: <http://renewablestalk.blogspot.tw/2013/01/energy-security-meaning-definition-and.html>.
22. IEA (2016), “Global Gas Security Review: How Flexible are LNG Markets in Practice?” International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalGasSecurityReview2016.pdf>
23. Intharak, N., Julay, J. H., Nakanishi, S., Matsumoto, T., Sahid, E. J. M., Aquino, A. G. O., & Aponte, A. A. (2007), “A Quest for Energy Security in the 21st Century,” *Asia Pacific Energy Research Centre Report*, Available at: http://www.ieej.or.jp/aperc/2007pdf/2007_Reports/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf.
24. Li, T. (2010), “Japan, Korea and China's Energy Security Strategy of the Enlightenment,” *The Conference on Web Based Business Management*.
25. Markowitz H. (1952), “Portfolio selection,” *The Journal of Finance*, 7(1): 77-91.

26. Noel, P., & Findlater, S. (2010), "Gas Supply Security in the Baltic States: A Qualitative Assessment," EPRG Working Paper, Cambridge.
27. OECD (2016), "Country Risk Classifications of the Participants to the Arrangement on Officially Supported Export Credits," OECD.
28. Patterson, W. (2008), "Managing Energy Wrong," Working Paper, Managing Energy: for climate and security, University of Sussex, Available at: <http://www.waltpatterson.org/mewfinal.pdf>.
29. Rutherford, J. P., Scharpf, E. W., & Carrington, C. G. (2007), "Linking Consumer Energy Efficiency with Security of Supply," *Energy Policy*, 35(5): 3025-3035.
30. USCC (2015a), "Index of U.S. Energy Security Risk," United States Chamber of Commerce.
31. USCC (2015b), "International Index of Energy Security Risk: Assessing Risk in a Global Energy Market," United States Chamber of Commerce.
32. Von Hirschhausen, C., & Neumann, A. (2003), "Security of (Gas) Supply: Conceptual Issues, Contractual Arrangements, and the Current EU Situation," In INDES Workshop on Insuring against Disruptions of Energy Supply, Amsterdam, the Netherlands.
33. WEC (2010), "Sicherheit unserer Energieversorgung – Indikatoren zur Messung von Verletzbarkeit und Risiken," Untersuchung im Auftrag des Weltenergieerat – Deutschland. Endbericht. Münster, Berlin, EEFA-Energy Environment Forecast Analysis GmbH & Co. KG.
34. WEC (2015), "2015 Energy Trilemma Index: Benchmarking the sustainability of national energy systems," World Energy Council.
35. WEF (2013), "The Global Energy Architecture Performance Index Report 2013," World Economic Forum.
36. WEF (2014), "The Global Energy Architecture Performance Index Report 2014," World Economic Forum.
37. WEF (2015), "The Global Energy Architecture Performance Index 2015: Methodological Addendum," World Economic Forum.
38. WEF (2016), "The Global Energy Architecture Performance Index 2016: Methodological Addendum," World Economic Forum.
39. Winzer, C. (2012), "Conceptualizing energy security," *Energy policy*, 46, 36-48, Available at: <http://www.econ.cam.ac.uk/dae/repec/cam/pdf/cwpe1151.pdf>
40. Yueh, L. (2010), "An international approach to energy security," *Global Policy*, 1(2): 216-217.

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

台灣能源績效世界評比與系統脆弱度. 2017 / 梁啟源等作. -- 臺北市 : 中技社, 民 106.12
88 面 ; 21 × 29.7 公分. -- (專題報告;2017-07)
ISBN 978-986-96057-2-4(平裝)

1. 能源政策 2. 能源經濟 3. 能源安全 4. 臺灣

400.15

106025468

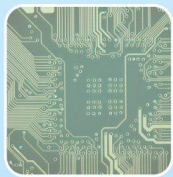
版權聲明 © 財團法人中技社

本手冊用於教育或非營利目的時，得在未取得原版權所有人允許下複製全部或部分內容，唯須註明出處。財團法人中技社感謝您提供給我們任何以本手冊做為資料來源出版的相關出版品。

未取得財團法人中技社書面同意，禁止使用或轉售本手冊於其他商業用途。

免責聲明

本出版品所提及的實體名稱和資料之表示，並不代表財團法人中技社的觀點：包括不同國家、領土、城市或區域的法律地位及其地位的權威性，以及國與國之間邊界和臨界的界定。此外，文中觀點與所提及的貿易名稱或商業程序，並不代表財團法人中技社的觀點或政策。



財團
法人 **中技社**

CTCI FOUNDATION

106 台北市敦化南路2段97號8樓

Tel : 02-2704-9805~7 Fax : 02-2705-5044

<http://www.ctci.org.tw>