

我國能源脆弱度分析與因應策略建議

梁啟源¹、劉致峻²、鄭睿合^{3*}、呂易恂⁴、郭博堯⁵

摘要

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，重點之一在建立預警指標，以進行風險管理與應變機制。故本文參考世界能源理事會(World Energy Council, 2010)和Fronedel 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。此外，本文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。實證結果顯示，在1990年第一季至2017年第二季間，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的劇烈波動，僅從85.79小幅降為80.54，呈現偏高與震盪態勢；相對上基礎設施脆弱度由65.54躍升為97.94，主要原因在於天然氣消費量持續增加，現有天然氣輸儲設備應接不暇，加上電源開發推展不順，使得我國備用和備轉容量率屢創新低。總的來說，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，近年更因電源和天然氣基礎建設不足，總脆弱度已接近過往幾次重大事件時的高點，此為本文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。鑑於能源基礎設施的增設要進行規劃、評估與建置，往往耗時較長。因此，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，妥善運用各類現有發電機組；在應對目前供電缺口所採行的短期應變措施，仍應考慮投入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，以因應國內不斷增長的天然氣需求，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。

關鍵詞：能源脆弱度，能源安全，基礎設施，能源效率

¹國立中央大學管理講座教授／財團法人中華經濟研究院諮詢委員

²財團法人中技社能源技術發展中心副工程師

³財團法人中華經濟研究院分析師

⁴財團法人中華經濟研究院輔佐研究員

⁵財團法人中技社能源技術發展中心組長

*通訊作者, 電話: 02-27356006#6232, E-mail: mike.jen@cier.edu.tw

收到日期: 2017年07月19日

修正日期: 2017年09月30日

接受日期: 2017年10月25日

1. 前言

根據2016年能源統計年報，我國進口能源依存度超過97%，顯示能源自主性甚低且易受國際能源價格波動影響。統計資料指出，我國能源進口值占GDP (Gross Domestic Product, GDP，國內生產總值)比率由1996年之2.78%，至2014年已達12.05%，近年來則因國際能源價格下跌，能源進口值占GDP比率已降至5.78%，由數據變化可知我國能源進口與國際能源經濟情勢發展具密切關連。

鑑於我國能源低度自主且易受外在影響，政府自1973年公布「臺灣地區能源政策」以來，持續依循世界局勢變化修訂國內能源政策。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第三次締約國會議所通過的「京都議定書(Kyoto Protocol)¹」，溫室氣體減量議題大受重視，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，鼓勵產業、運輸與住商部門減少溫室氣體的排放、增加綠色能源應用並提高能源使用效率。(謝惠子，2004；謝惠子，2008；經濟部，2009a；經濟部，2009b)

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

展等四大核心議題進行討論。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。後因日本福島核災事件，政府先於2011年11月制訂「新」能源政策²，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³。2015年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，並制訂國家自主預期貢獻等。(行政院經濟建設委員會，2009；行政院國家科學委員會，2009a；行政院國家科學委員會，2009b；行政院國家科學委員會，2009c；行政院國家科學委員會，2009d；經濟部能源局，2008；經濟部能源局，2015)

2016年政黨輪替，新上任政府重新提出未來能源規劃，設定2025年再生能源總裝置容量將達2,742萬瓩，及再生能源發電量占總發電量達20%之政策目標。其中，太陽光電裝設容量即達2,000萬瓩，占再生能源總裝置容量比重達72.9%，風力發電(含陸域風力及離岸風力)占比則約15%，如表1所示。

伴隨著上述各項能源政策推動，我國的能源結構已進入轉型期。我國再生能源裝置容量和發電量占整體系統比重持續提升，例如2009年我國的風力和太陽光電之裝置容量僅38.38萬瓩，占整體系統比率約為1%，但至2015年時，風力和太陽光電總計之裝置容量已達148.87萬瓩，占整體系統比率已達3%。於此同時，燃氣發電裝置容量占整體比重亦漸次提高，而燃煤發電及核能發電占比則緩步降低，如圖1所示。

但是轉型期也將對我國的能源安全造成影響，電力供給不足的狀況越來越嚴重。例如：2010年之後，備轉容量漸趨緊澀(如圖2)。據台電統計，歷年備轉容量率前10低，有7次發生在

¹ 京都議定書於2005年2月16日生效。

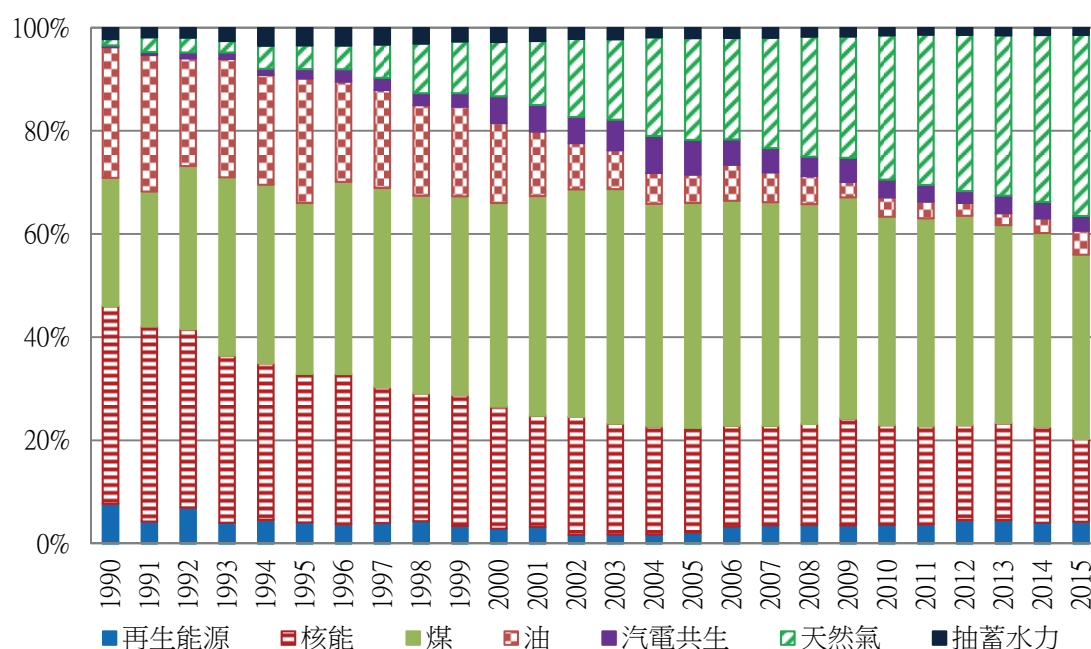
² 規劃2025年再生能源裝置容量達995.2萬瓩(占發電總裝置容量14.8%)，並推動「千架海陸風力機」計畫和「陽光屋頂百萬座」計畫，作為鼓勵再生能源發展措施。

³ 其中太陽光電設置量大幅提高，由310萬瓩提高至620萬瓩。

表1 再生能源至2025年發展目標

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(2017)。



資料來源：台灣電力公司，台電系統歷年裝置容量，http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c37.aspx。

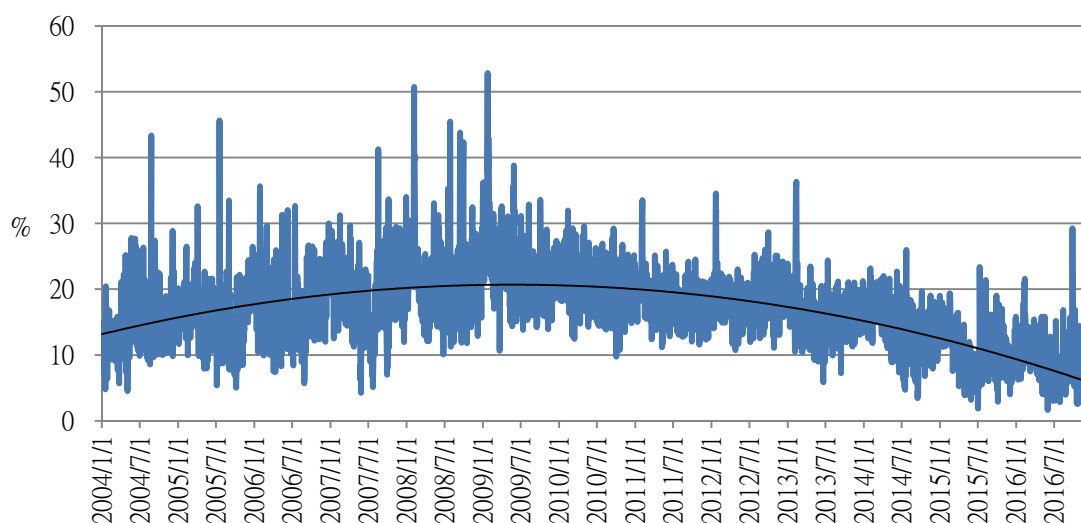
圖1 我國各類發電機組之裝置容量占比

2016年。然而，國內電源開發的進程卻因為民眾環保意識的提高而有所窒礙，加上「2025年非核家園」的政策目標與現階段核四封存、核一廠一號機及核二廠二號機停止運轉，核能發電已不被列為政府長期電源開發的選項之一，在發電選項有限的狀況之下，我國的能源結構是否能順利轉型？能否降低對產業和民生的影

響？是目前政府施政的一大挑戰。

是故，要能完善國家整體能源政策規劃、執行、追蹤與檢討發展，須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⁴，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

⁴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。



資料來源：台灣電力公司，歷年每日尖峰備轉容量曲線，http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info_in.aspx?LinkID=26。

圖2 臺灣2004-2016年備轉容量率曲線

獨立，難以對我國能源安全做出系統性地衡量。故本文在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。

本文除前言外，第二部分為文獻回顧，說明國內外各機構與學者針對能源安全之定義，介紹相關機構提出的能源安全或風險指標的架構與意涵。第三部分為研究方法和資料來源，闡述我國能源脆弱度之方法論與數據來源。第四部分為實證結果，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。第五部分為結論與因應策略建議。

2. 文獻回顧

2.1. 能源安全的定義

傳統的能源安全定義強調的是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。然而，Noel and Findlater(2010)對於上述看法不予苟同，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⁵」。而Haluzan (2013)認為「最佳的能源安全定義為給定時段內(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)」。

而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

⁵ 這種觀點也能根據商品提供能源服務的持續性，討論商品供應中斷的價值損失，因商品供應中斷時將可能導致服務供應中斷。例如，油電混合車即使當燃料供應中斷時，仍能持續提供運輸服務一段時間。

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)。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。所謂能源供應安全，即能源供應的穩定性，是指滿足國家生存與發展正常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⁶，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，國家須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。

2.2. 國內外衡量國家能源安全之指標

本節研析美國商會(United States Chamber of Commerce, USCC)、世界經濟論壇、世界能源理事會(World Energy Council, WEC)及Chuang and Ma (2013a & 2013b)等國際機構與國內學者所建構之討論能源安全與風險的評量指標，各指標特性彙整於表2並說明如後。

美國商會所建立「美國能源安全風險指標(U.S. Energy Security Risk Index)」，用於衡量在地緣政治、經濟性、可靠性與環境等四大構面下的能源風險。然因美國能源安全風險指標僅限於分析美國國內情況，為了進行跨國比較，美國商會再建構一「全球能源安全風險指標(Global Energy Security Risk Index)」，透過八大構面⁷與24項次指標，分析全球75個主要能源消費國(含臺灣)，藉以描繪出各國能源風險

⁶環境友善係指能源供應水準應滿足「必須」之需求水準與資源耗用，能源穩定供應係指能源供應的波動(幅度及頻率)能維持最小幅度，至於效率應用係指能源供應效率能符合最大經濟效率。

⁷八大構面包括了全球燃料(Global Fuels)、燃料進口(Fuel Imports)、能源支出(Energy Expenditures)、價格與市場波動(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)。

表2 國內外能源安全風險指標彙整

研究單位	USCC		WEC		WEF	Chuang and Ma
指標名稱	美國能源安全風險指標	全球能源安全風險指標	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
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、歷史趨勢和政府預測，確認政策和因素對國際能源安全產生正面或負面影響	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	藉由各指標變動趨勢，分析能源安全政策推動成效對能源安全各方面的影響
涵蓋範圍	美國	國際(含臺灣)	國際(含臺灣)	歐洲主要國家	國際(不含臺灣)	臺灣
推估未來	是	無	無	無	無	是
主構面	1. 地緣政治(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. 政治力強度(8.3%) 5. 社會力強度(8.3%) 6. 經濟力強度(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	1. 能源安全包含：總能源生產與消費之比例(1/6)、電力生產多樣性(1/6)、分配流失占電力生產百分比(1/6)、五年年複合增長率與總初級能源消費量除以GDP的比率(1/6)、石油天數及石油產品儲量(1/6)、淨燃料進口占GDP的比例(進口占國部分)燃料出口占GDP的比例(出口占國部分)(1/6) 2. 能源公平包含：零售汽油可負擔程度(50%)、電力取得的	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，其中電力生產結構風險、與周邊國家電網連接度、儲備電容量、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、	1. 經濟成長與發展包含：能源強度(25%)、人為扭曲汽油價格程度(12.5%)、人為扭曲柴油價格程度(12.5%)、工業電價(12.5%)、能源出口價值(12.5%)。 2. 環境永續包含：替代能源及核能(20%)、電力生產所排放的二氧化碳(20%)、能源部門之甲烷排放量(12.5%)、能源部門之二氧化碳排放量	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

表2 國內外能源安全風險指標彙整(續)

研究單位	USCC		WEC		WEF	Chuang and Ma
指標名稱	美國能源安全風險指標	全球能源安全風險指標	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
次指標		能源支出(3%)、零售電力價格(6%)、原油價格(7%)。 4. 價格與市場變動包含：油價變動(5%)、能源支出變動(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%)、無碳能源占發電量比率(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(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%)	負擔能力與品質(50%) 3. 環境永續包含：總初級能源強度(25%)、二氧化碳強度(25%)、空氣與水污染的影響(25%)、生產電力的二氧化碳(25%)。 4. 政治的強度包含：政治的穩定(1/3)、管理的品質(1/3)、政府的效力(1/3)。 5. 社會的強度包含：貪腐的控制(25%)、法律的規範(25%)、教育品質(25%)、健康品質(25%)。 6. 經濟的強度包含：生活支出的成本(1/3)、總體經濟的穩定(1/3)、私部門對於信貸可取得程度(1/3)。	能源密集度、最終能源消費結構風險，採均等權重	(12.5%)、懸浮微粒(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%)、能源進口依賴程度(20%/12.5%)、能源進口來源的多樣程度(0%/12.5%)、初級能源總供給的多樣程度(20%)。	
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，如電氣化比率、電力供給品質等指標，係透過問卷調查而得	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軸的權重值計算	均等權重	能源專家諮詢、WEF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)、USCC (2015b)、WEC (2010)、WEC (2013)、WEC (2015)、WEC (2016)、WEC (2013a)、Chuang and Ma (2013b)、本文整理。

形勢。

世界經濟論壇則建立了一套「能源建構績效指標(Energy Architecture Performance Index, EAPI)」，用來檢視國家的能源系統在該國的經濟成長與發展、環境永續及能源取得與安全等3大構面的績效表現。該績效指標所分析的國家數超過120個(不含臺灣)，並給予排名。雖然能源建構績效指標的概念如同企業或組織所採用的關鍵績效指標(Key Performance Index, KPI)一般，但三大構面之一的能源取得與安全，仍與能源風險之概念有所關連。

「能源三難指標(Energy Trilemma Index)」則是由世界能源理事會建置，用以呈現當國家面對能源安全、能源公平及環境永續這三個目標間彼此相互衝突情形下的能源績效。該指標採用平衡計分卡(Balanced Score Card, BSC)概念，給予受評國家從AAA (最佳)至DDD (最差)的綜合表現評價。其中，與能源安全較為相關的指標權重占比為18.75%。

此外，世界能源理事會也曾就一國能源系統面，建置了一套「能源供應安全之風險與脆弱度(Security of Energy Supply Indicators for Measuring Vulnerability and Risk)⁸」。該指標參考Frondelet *et al.* (2009)之方法學概念，並且將其考量的層面擴大，除了初級能源供應面之外，亦納入基礎設施面和最終能源消費面，作為衡量能源脆弱度的三大面向。

在國內學者部分，Chuang and Ma (2013a & 2013b)則提出「多維度能源安全指標」，其目的在於分析臺灣能源安全政策推動成效對能源安全各面向的影響，指標分為依存度、脆弱度、可負擔度與可接受度等4大構面，並採用財務金融的投資組合概念，以指標數值的變異程度衡量風險變化，同時推估各別指標的未來趨勢，設算未來臺灣的能源安全風險。

上述的指標中，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。此外，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。其次，多數指標中之能源安全構面僅為其整體指標部分內涵，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。

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更為細緻的變化成因，且其指標所需資料亦能符合公開透明、具可信度、具延續性、完整性等相關原則。加上臺灣目前為獨立電網且以液化天然氣為唯一天然氣進口方式，而在我國現階段推動能源轉型及電源配比規劃之下，基礎設施的完備程度更攸關國家的整體能源安全，故本文選擇以WEC之能源風險及脆弱度作為分析我國能源脆弱程度之主要架構，並在此基礎上進行本土化的試編工作。

3. 研究方法及資料來源

WEC自2008年起與歐盟合作，進行歐盟成員國能源風險的衡量，其基礎架構參考Frondelet *et al.* (2009)⁹之方法學概念來衡量能源風險，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

⁸ WEC, 2010, "Sicherheit unserer Energieversorgung – Indikatoren zur Messung von Verletzbarkeit und Risiken," Untersuchung im Auftrag des Weltenergieerat – Deutschland. (德文報告)

⁹ Frondelet, Manuel, Nolan Ritter, and Christoph M. Schmidt, 2009, "Frondelet, Manuel, Nolan Ritter, and Christoph M. Schmidt, 2009, pers.

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；適合用於衡量能源供給端如何受限於基礎設施，例如天然氣接收站等。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3所示。

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。以上特點是本文選擇了WEC (2010)作為分析我國能源安全程度之架構的原因，並據此進行後續的本土化調整。

3.1 研究方法：「臺灣能源脆弱度」本土化方法學

臺灣能源脆弱度係由初級能源供應脆弱度(primary energy supply vulnerability, PEV)、基礎設施脆弱度(infrastructure vulnerability, IV)和最終能源消費脆弱度(end-use energy (final energy consumption) vulnerability, EEV)所組成。本文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4所述，並說明方法學如後。

3.1.1 初級能源供應面

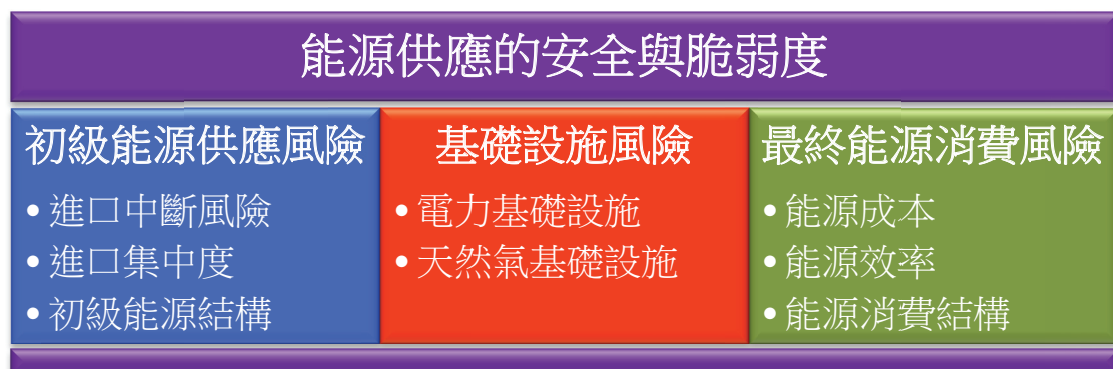
計算初級能源供應脆弱度的步驟有兩個階段，首先計算特定初級能源別的供應風險(PEV_i)，再於第二階段依據初級能源占比加權計算成總初級能源供應的脆弱度(PEV)，指標意涵與公式分述如下：

1. i類初級能源供應風險(PEV_i)指標

$$PEV_i = x_i^T \cdot R \cdot x_i = x_{id}^2 \cdot r^d + \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 \cdot r_j \quad (1)$$

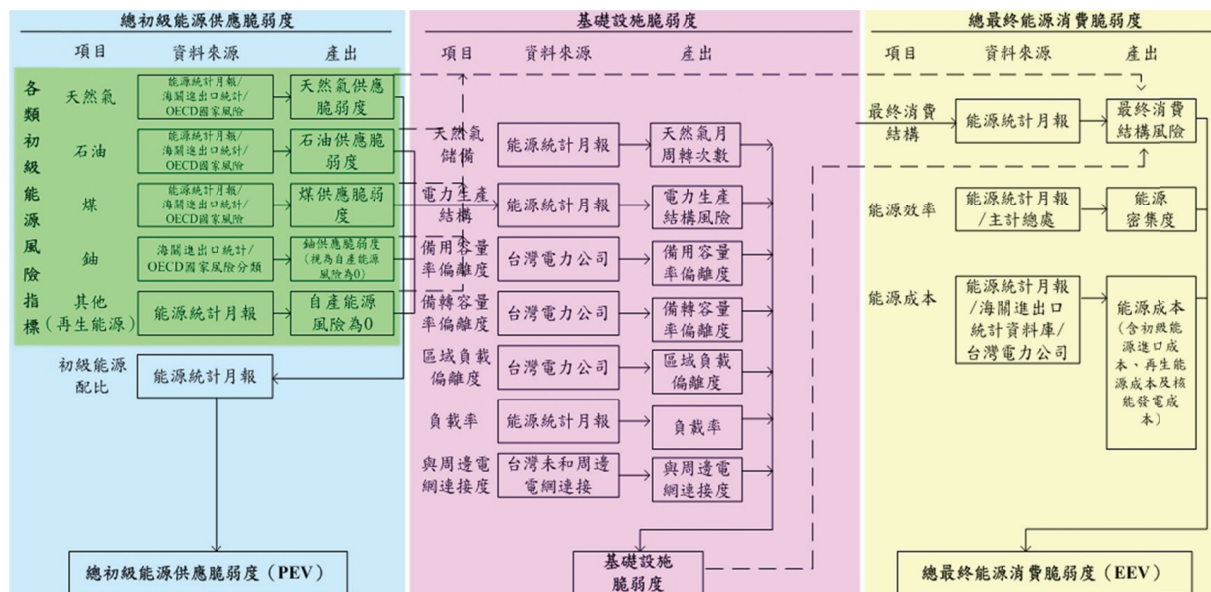
其中，i類初級能源的項目包括了煤、石油、天然氣、鈾及再生能源(含其他)等初級能源。 $x_i = (x_{id}, x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iJ})$ 表示一國能源進口占比之矩陣，表示一國之能源來源(進口)的分散程度；其中 x_{ij} 表示自j國進口i類能源占本國i類能源總供應占比； x_{id} 代表i類能源於國內自產之比率。

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：



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

圖3 WEC能源風險及脆弱度衡量概念圖



資料來源：Fron del *et al.* (2009)、Fron del and Schimdt (2013)、WEC (2010)、本文繪製。

圖4 調整後之本土化能源脆弱度衡量細部架構圖

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

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 2×2 矩陣設為 r_c 。

在本文中，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(OEDC, 2016)。

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，則會透過本文的另外兩個構面(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

$$PEV = w^T \cdot X^T \cdot R \cdot X = w^T \cdot \Pi^T \quad (2)$$

其中， $w = (w_1, \dots, w_i, \dots, w_l)$ 表示各類初級能源供應占比向量，亦即 $w_1 + \dots + w_l = 1$ 。 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 $\pi_{ii} = PEV_i = x_{id}^2 \cdot r_d + \sum_{j=1}^l x_{ij}^2 \cdot r_j \geq 0$ 。

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。本文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，須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。

3.1.2 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。

本文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，故本文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3.3)。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

$$\lambda_1 \times \frac{|\text{PRM}_i - \text{ORM}|}{\text{ORM}} \times I(\text{PRM}_i > \text{ORM}) + \lambda_2 \times \frac{|\text{PRM}_i - \text{ORM}|}{\text{ORM}} \times I(\text{PRM}_i < \text{ORM}) \quad (3)$$

其中， PRM_i (Percent Reserve Margin)為備用容量率實績。ORM (Optimal Percent Reserve Margin)為最適備用容量率，本文依據政府核定長期電源開發規劃的政策目標，將之設為15%。 $I(\bullet)$ 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

$$\lambda_1 \times \frac{|POR_t - OOR|}{OOR} \times I(POR_t > OOR) + \lambda_2 \times \frac{|POR_t - OOR|}{OOR} \times I(POR_t < OOR) \quad (4)$$

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，本文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

$$\sum_i \left[\left(\lambda_1 \times \frac{|S_{it} - D_{it}|}{D_{it}} \times I(S_{it} > D_{it}) \right) + \left(\lambda_2 \times \frac{|S_{it} - D_{it}|}{D_{it}} \times I(S_{it} < D_{it}) \right) \right] \quad (5)$$

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¹⁰，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

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \times \left| \frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} - \text{最適連接度} \right| \\ & \times I \left(\frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} > \text{最適連接度} \right) \\ & + \lambda_2 \times \left| \frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} - \text{最適連接度} \right| \\ & \times I \left(\frac{\text{與他國並聯容量}_t}{\text{本國裝置容量}_t} < \text{最適連接度} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

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)

$$\text{平均負載}_t / \text{尖峰負載}_t \quad (7)$$

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，故本文

¹⁰ 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。

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，但本研究並未視資源閒置為風險項目之一，此亦與本研究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)

$$\text{天然氣當季最大月用量}_i / \text{天然氣可儲存容量}_i \quad (8)$$

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。

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，故周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，臺灣將有可能因為颱風因素而斷氣。故本文以此月周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

$$\sum_i S_i \times \text{PEV}_i \quad (9)$$

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，因此須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。

3.1.3 最終能源消費面

本文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，而本文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

$$\sum_i S_{i,t} \times P_{i,t} \quad (10)$$

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

$$\text{最終能源消費量}_i / \text{實質國內生產毛額}_i \quad (11)$$

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

$$EEV = \sum_i S_i \times EEV_i \quad (12)$$

其中， $EEV_i = (PEV_i, \text{基礎設施脆弱度})$ 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。

3.2 標準化

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：

$$I_{qc}^t = \frac{X_{qc}^t - \min_{t \in T}(X_{qc}^t)}{\max_{t \in T}(X_{qc}^t) - \min_{t \in T}(X_{qc}^t)} \quad (13)$$

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，加上部分數值經標準化後，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，故本文將標準化方式加以修改，參見下式：

$$I_{qt} = \begin{cases} (X_{qt} - \text{Base}) / (\text{Top} - \text{Base}) \times 100 & \text{if } X_{qt} \leq \text{Top} \\ 100 & \text{if } X_{qt} > \text{Top} \end{cases} \quad (14)$$

其中，Top為歷史最高點；Base值則直接設為0。

3.3 權重設定

指標標準化後進行加總時，本文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)，亦即本文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¹¹。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。本文則是考量：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¹²」，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

¹¹ 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。

¹² 隨機趨勢又稱為單根(Unit Root)。

量脆弱度想捕捉的即是日益惡化或改善的「趨勢性」，故本文視指標性質之不同，採用不同的權重設定，如圖5所示，並說明如下：

- (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)。
- (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，本文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。

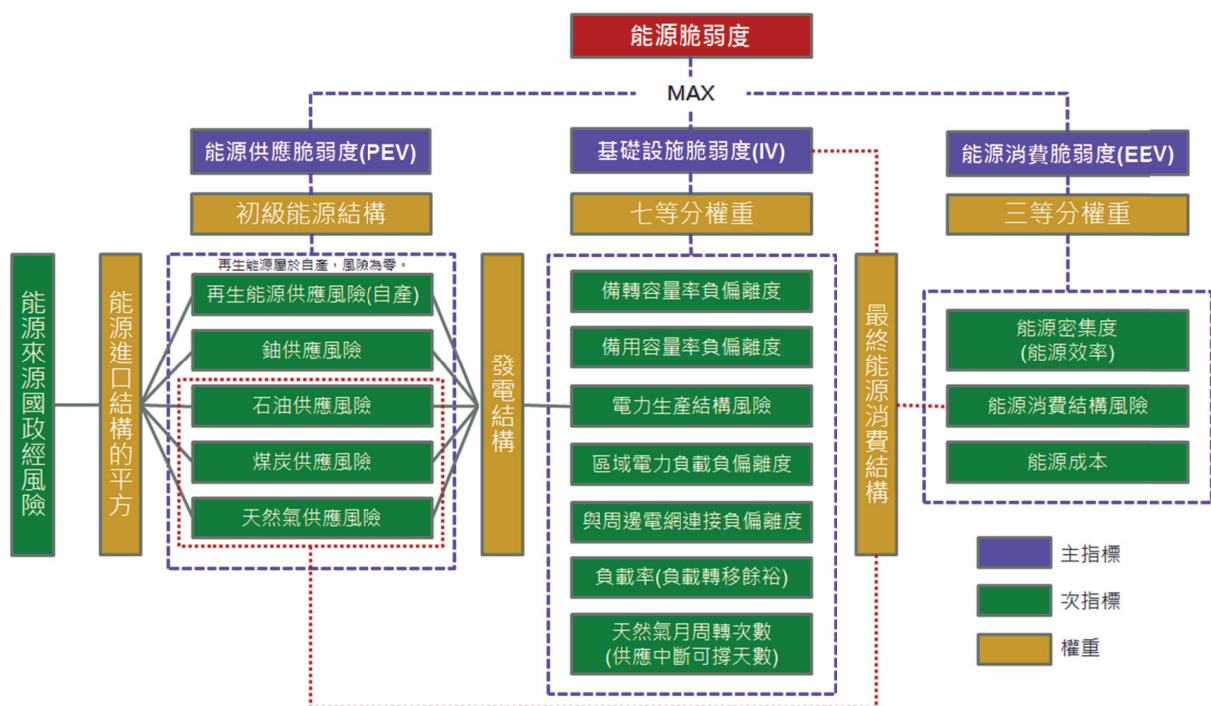
3.4 資料來源與處理

基於各機構編製指標時所考的資料特性，本文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3。

本文的計算期間為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，須進行額外假設：

- (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



資料來源：本文繪製。

圖5 指標權重說明

表3 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 (Advanced Retrieval and Econometric Modeling System)、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	臺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：本文整理。

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。

4. 我國能源脆弱度計算結果

本文所建構之臺灣能源脆弱度，涵蓋三大

構面與十五項次指標，資料期間則跨越了1990年第一季至2017年第二季的數據，茲將編制結果摘述如下：

4.1 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，在本文的定義中，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。

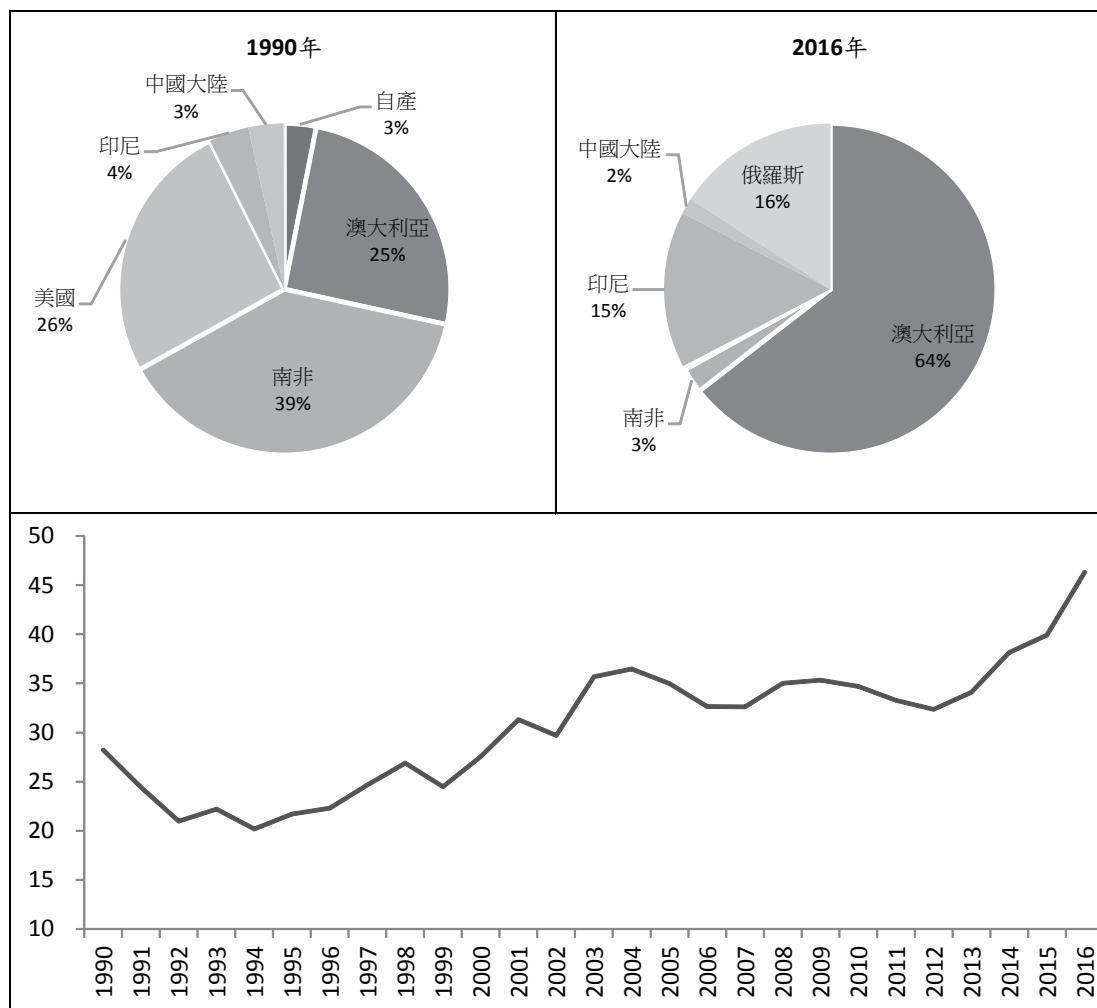
不過值得注意的是，核能的後端處理成本係由最終能源消費面的能源成本次指標來反映，且本文並未將核能的安全風險納入考量。此外，再生能源發電比重的提高對於電網的衝擊與能源使用成本的影響，則會於基礎設施面與最終能源消費面的次指標來反映。

4.1.1 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6所示，而本文計算之我國燃料煤供應風險指標的歷史趨勢則如圖7所示。

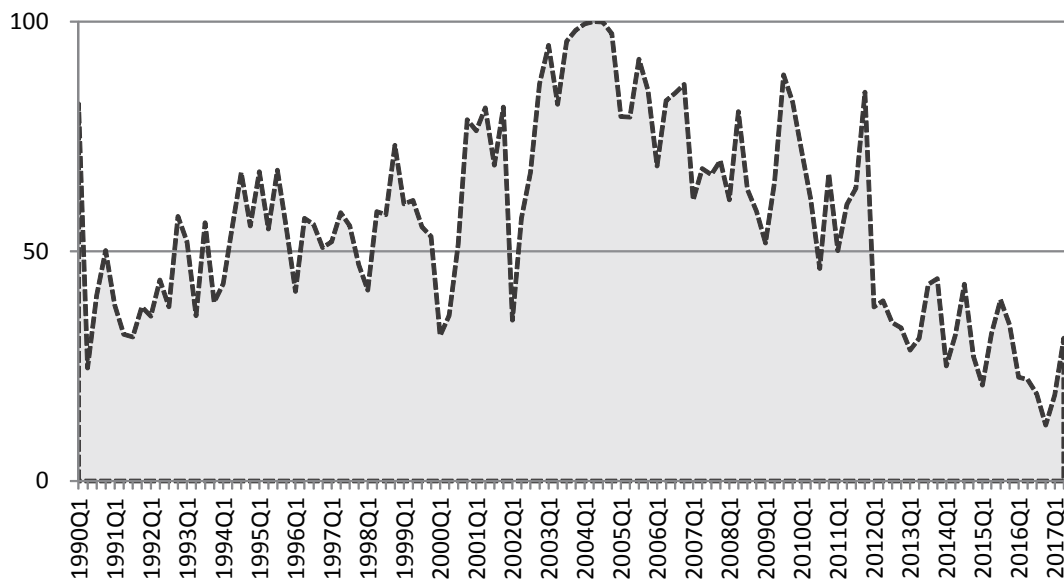
1990年代初期我國燃料煤進口來源國集中於南非、美國和澳洲等風險較低之國家，各國占進口來源比重分別為39%、36%和25%。之後我國自南非和美國進口的數量逐步減少，轉而朝向從印尼和中國大陸進口燃料煤，但是因為此二國家屬於風險較高國家，也導致我國燃料煤供應風險隨之增加。

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



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本文繪製；集中度為本文計算。

圖6 我國燃料煤進口來源與集中度



資料來源：本文計算。

圖7 我國燃料煤供應風險指標(1990年Q1至2017年Q2)

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¹³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¹⁴。

4.1.2 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8所示，而本文計算之我國原油供應風險的歷史趨勢則如圖9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^{15, 16}。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。

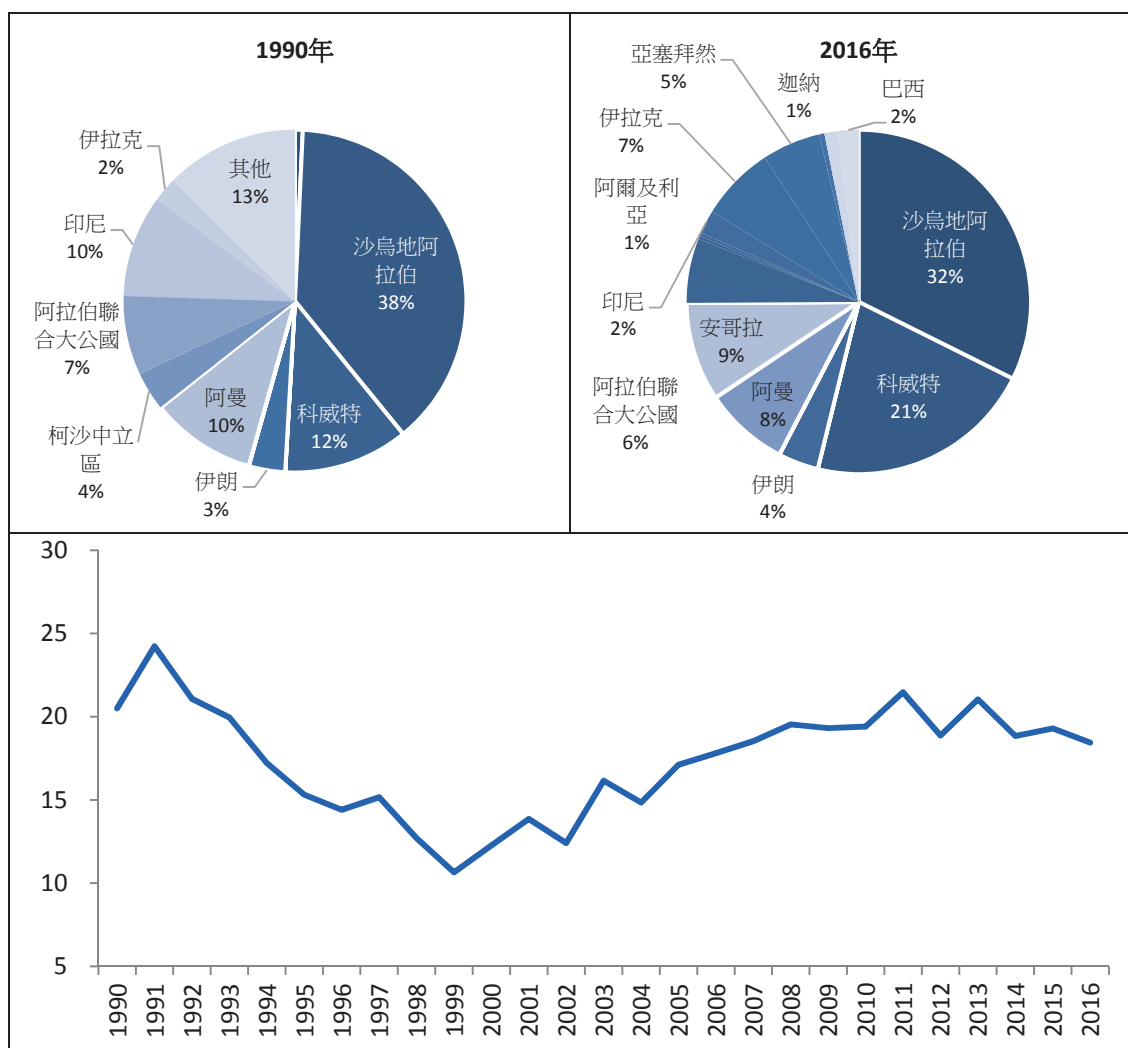
波斯灣戰爭之後到2000年間，我國原油進

¹³ 本研究採用的集中度指標是Herfindahl-Hirschman Index (HHI)。

¹⁴ 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)。

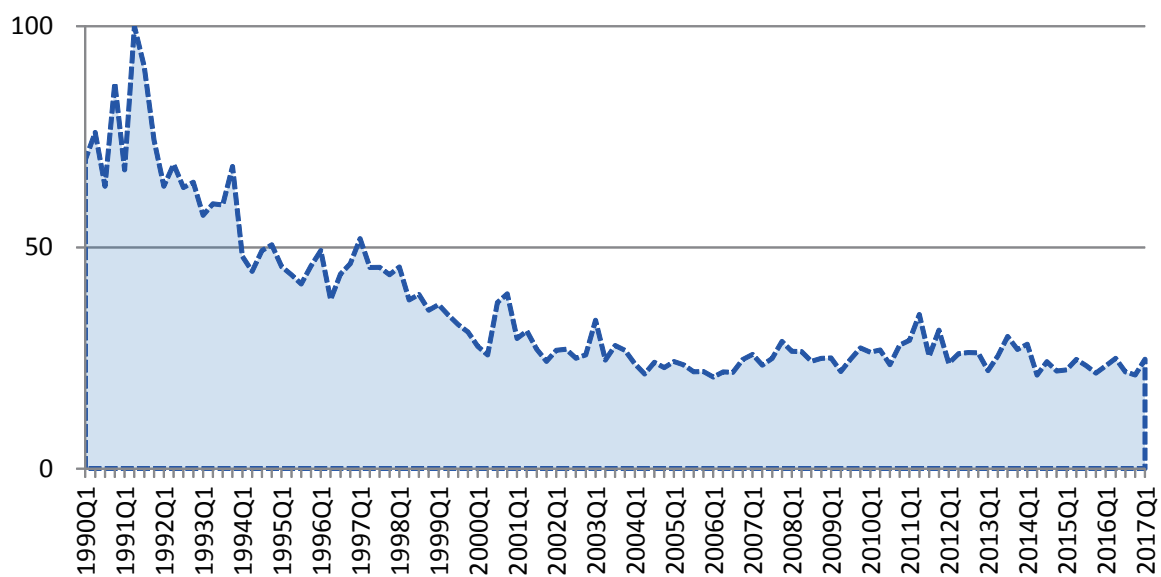
¹⁵ 陳中興(2003)，「石油危機 練就中油「葵花寶典」」，<http://old.ltn.com.tw/2003/new/mar/31/today-e6.htm> (最後瀏覽日期：2017年7月15日)。

¹⁶ 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、本文繪製；集中度為本文計算。

圖8 我國原油進口來源占比與集中度



資料來源：本文計算。

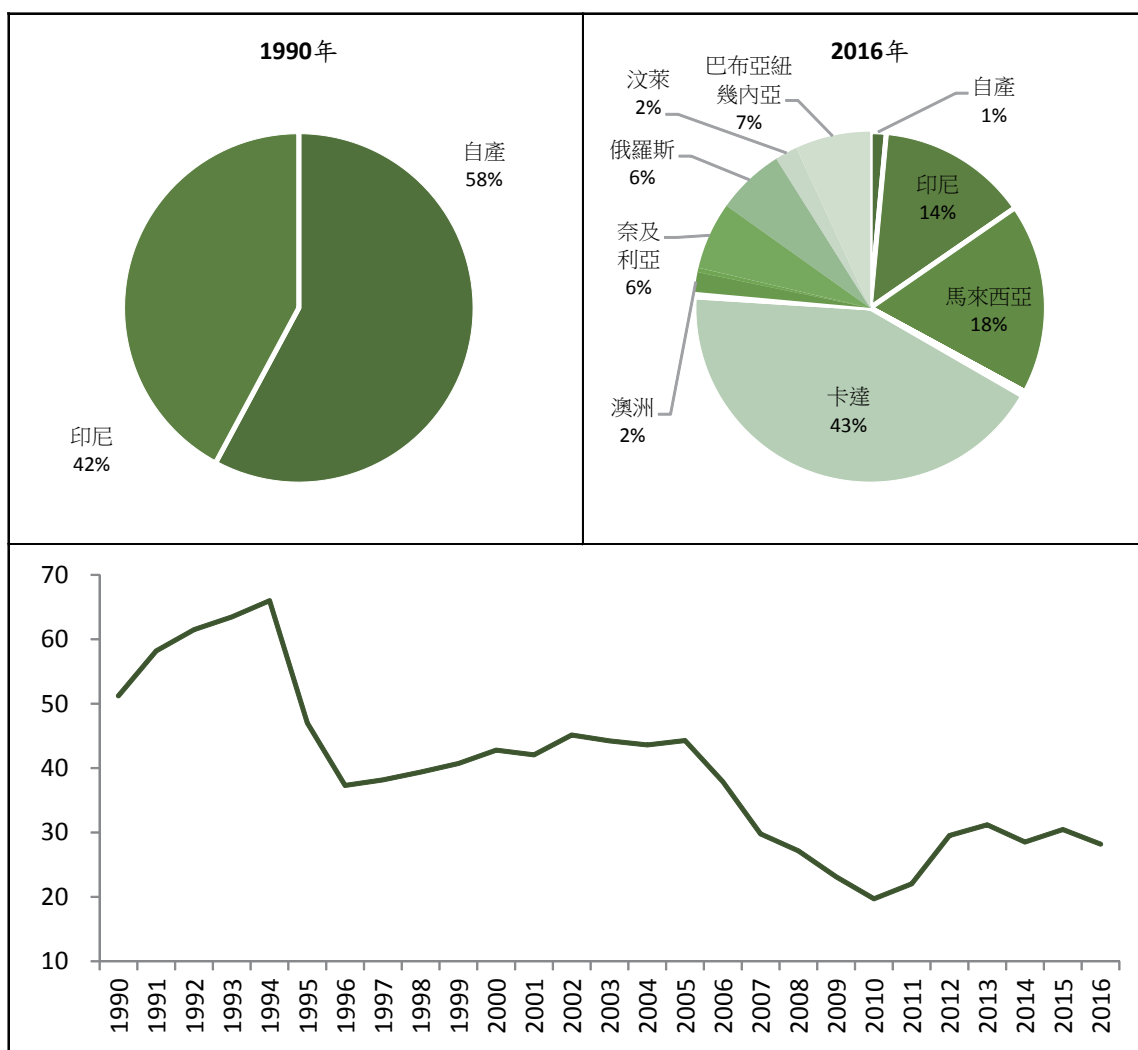
圖9 我國原油供應風險指標(1990年Q1至2017年Q2)

口的集中度下降，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，部分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)。正反因素相互抵消之下，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。

4.1.3 天然氣供應風險指標

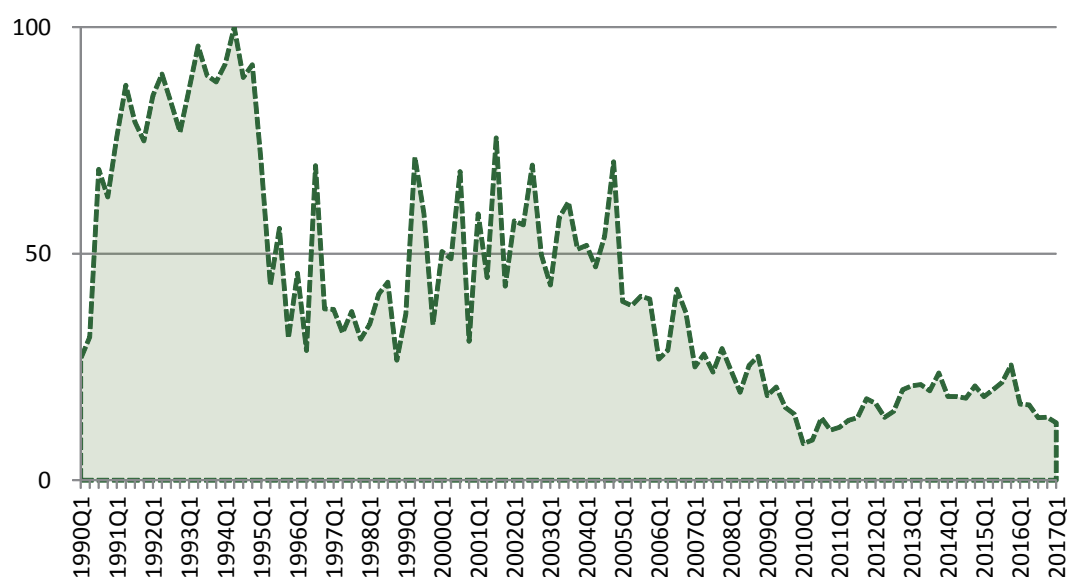
我國1990年與2016年的天然氣進口來源占比與集中度變化趨勢如圖10所示，而本文計算之我國天然氣供應風險的歷史趨勢則如圖11所示。

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。



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本文繪製；集中度為本文計算。

圖10 我國天然氣進口來源占比與集中度



資料來源：本文計算。

圖11 我國天然氣供應風險指標(1990年Q1至2017年Q2)

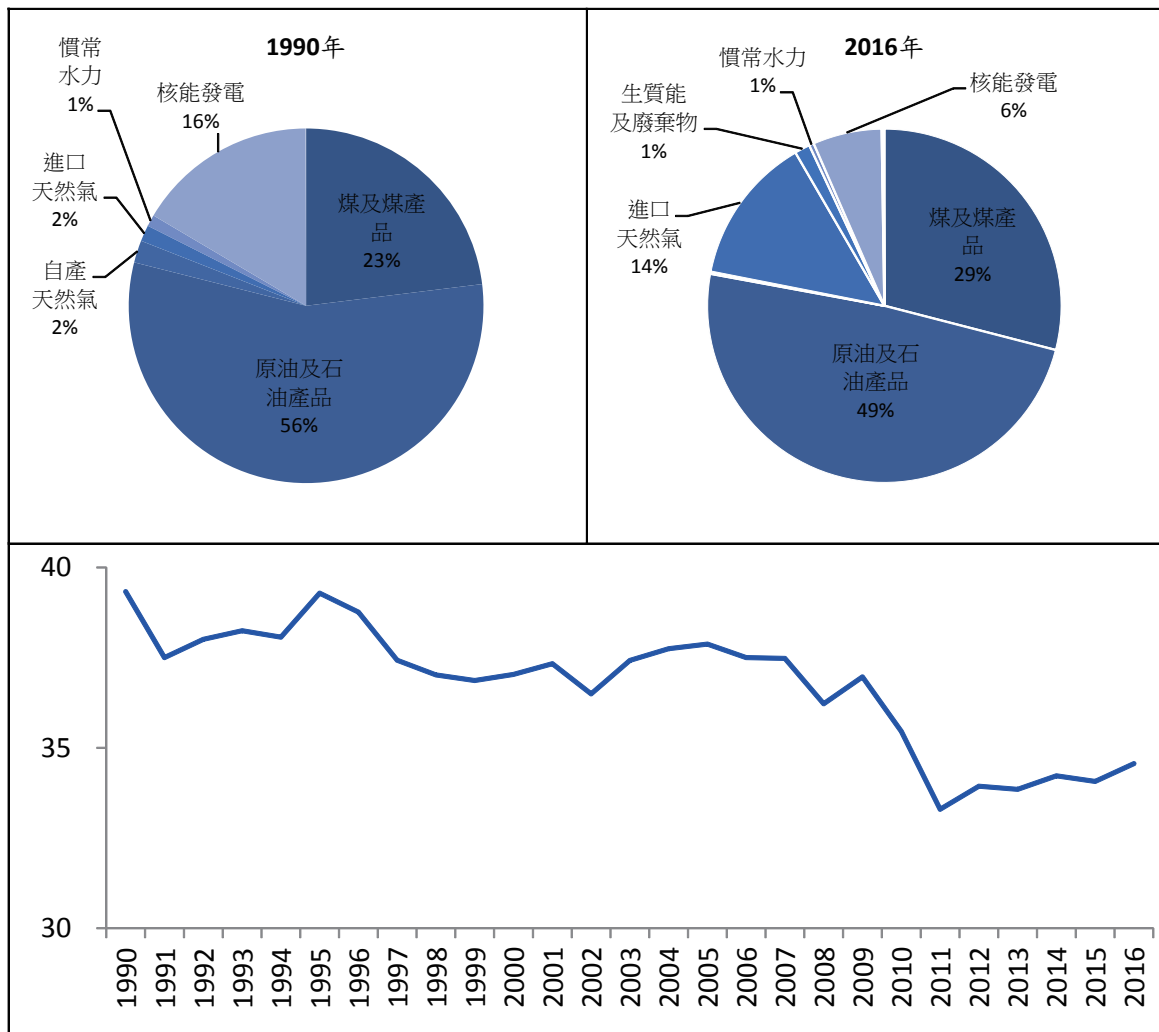
1995年我國開始自馬來西亞進口天然氣，使得進口來源較為分散，加上在OECD國家風險分類報告中，馬來西亞的政經風險相對於印尼較低，故使天然氣供應風險開始降低。其後直到2005年，印尼與馬來西亞為我國唯二的天然氣來源國，加總的占比逐年上升至2005年的95%(分別印尼51%與馬來西亞42%)，但因為無風險的自產天然氣的比重僅止5%，故供應風險無法再進一步降低，呈現震盪的態勢。

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。

4.1.4 小結

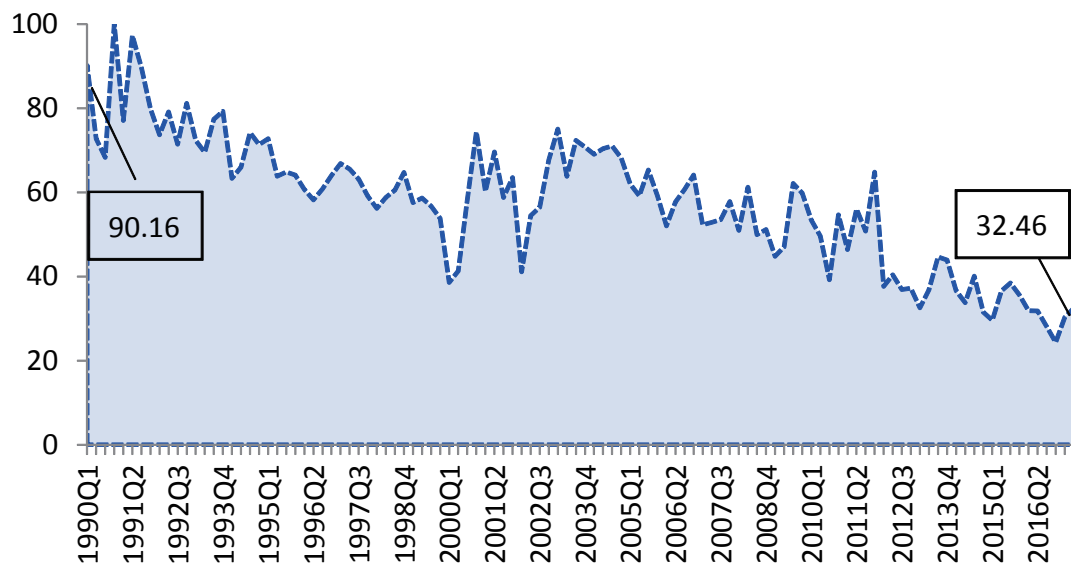
我國1990年與2016年的初級能源占比與集中度變化趨勢如圖12所示，將此占比做為權數來加總前述的五項初級能源供應風險次指標，可得我國初級能源供應脆弱度，如圖13所示。

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



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本文繪製。集中度為本文計算。

圖12 我國初級能源占比與集中度



資料來源：本文計算。

圖13 初級能源供應脆弱度指標(1990年Q1至2017年Q2)

代。

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。

4.2 基礎設施脆弱度指標

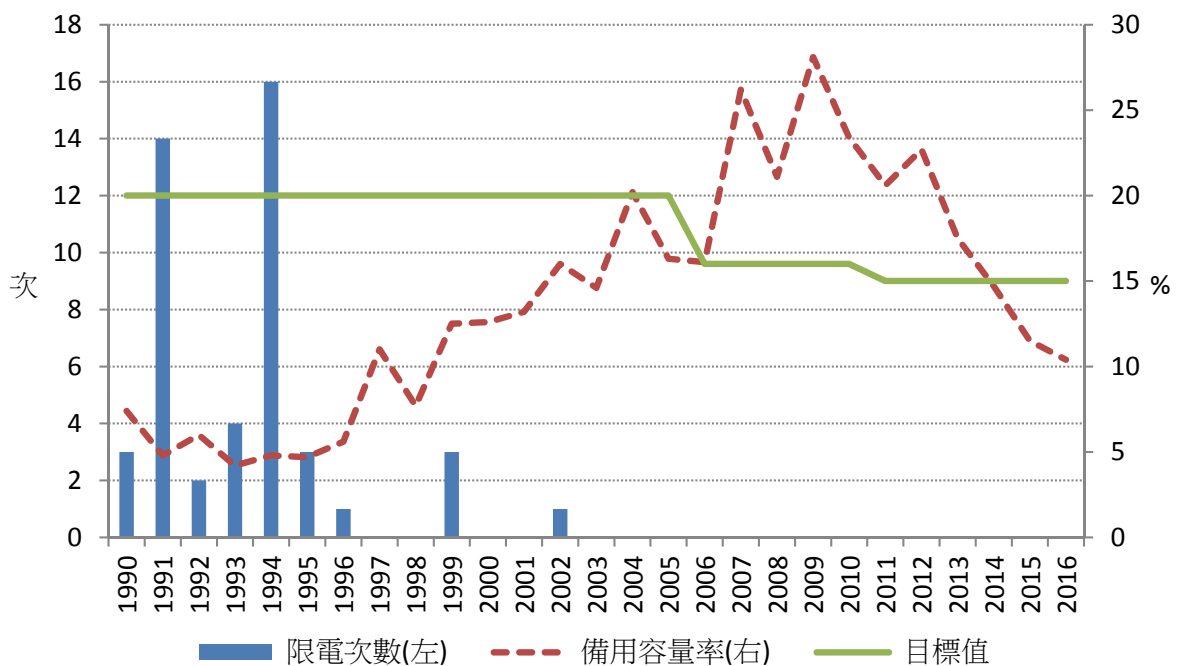
在基礎設施面，本文考量了備用容量率負偏離度、備轉容量率負偏離度、區域負載負偏離度、與他國電網連接負偏離度、負載率(捕捉

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。

4.2.1 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14)。

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，



資料來源：本文繪製。資料來自台灣電力公司，歷年停限電次數，http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-d22.aspx。

圖14 我國歷年備用容量率

既有核電廠部分機組大多時間處於歲修逾排程狀況而未能運轉，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%¹⁷)。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(目前仍處於歲修逾排程狀況)，實績備用容量率可能僅有7.3%的水準。

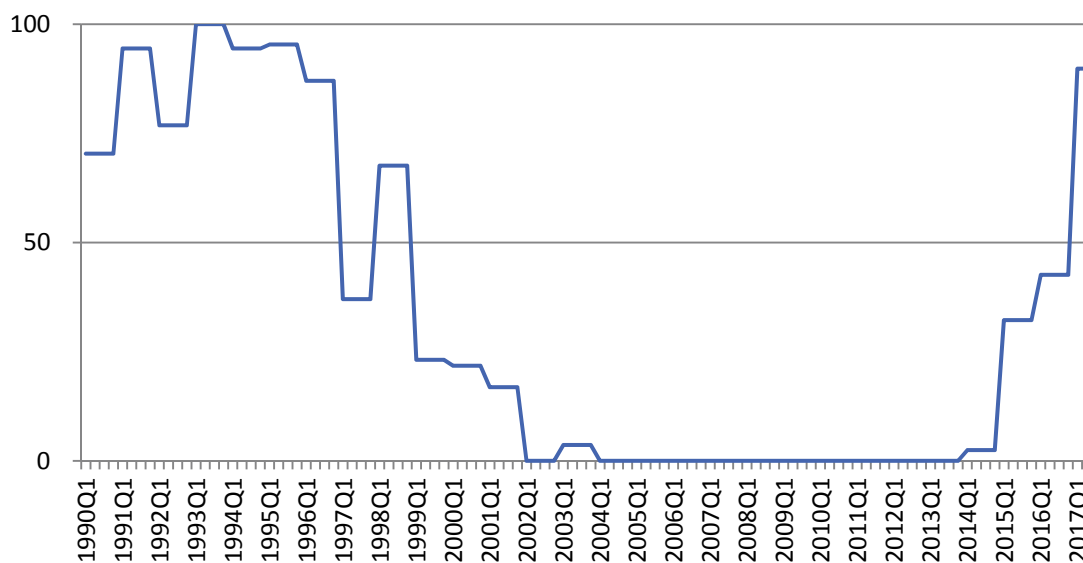
因此，若最適備用容量率以政策目標值(2006年以前的政策目標為20%；2006-2011年政策目標為16%；2012年之後則為15%)作為電力供應穩定衡量標準，來計算負偏離度，將呈現一個凹字型的樣子(詳如圖15)，並在近年急速惡化，已接近1990年限電年代的水準，顯示我國電源供應餘裕降低所帶來的風險激增。

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。

4.2.2 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態，是樣本期間內的最低值(詳如圖16)。

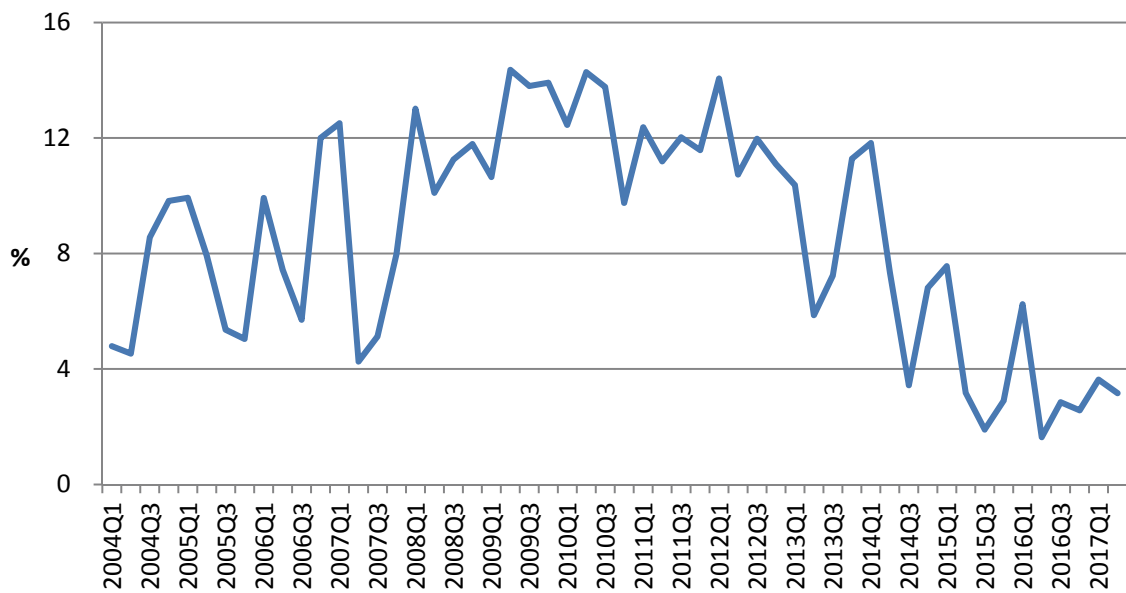
在這樣的狀態之下，我們可以用備轉容量率負偏離度來捕捉電力系統每天實際可調度之發電容量裕度緊澀所帶來的風險。將台電公司的備轉容量率燈號中界定綠燈(代表供電充裕)或黃燈(代表供電吃緊)的10%，作為最適備轉容量率的標準；並且將樣本期間內的每日備轉容量率，取當季的最低值後，來計算備轉容量率負偏離度。可以發現我國的備轉容量率負偏離



資料來源：本文計算。

圖15 備用容量率負偏離度(1990年Q1至2017年Q2)

¹⁷ 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)。



資料來源：本文繪製。資料來自台灣電力公司，歷年每日尖峰備轉容量曲線，http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info_in.aspx?LinkID=26。

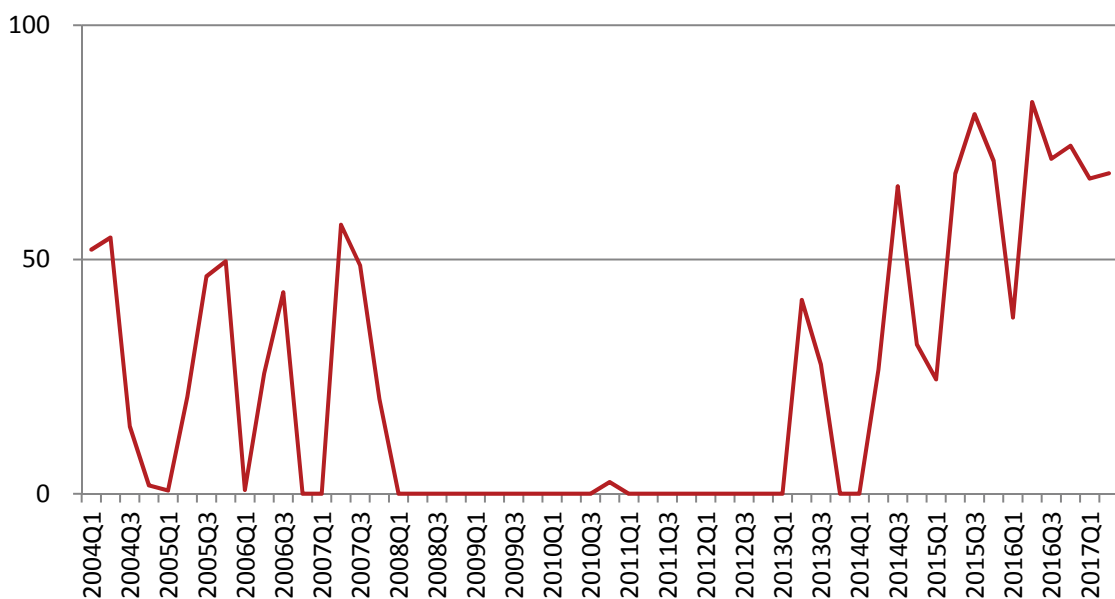
圖16 各季備轉容量率最低值(2004年Q1至2017年Q2)

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17)。例如：在樣本期間外的2017年7月底發生雙颱襲臺，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。

4.2.3 區域負載負偏離度

在臺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



資料來源：本文繪製。資料來自台灣電力公司，歷年每日尖峰備轉容量曲線，http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info_in.aspx?LinkID=26。

圖17 備轉容量率負偏離度(2004年Q1至2017年Q2)

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，本文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18所示。

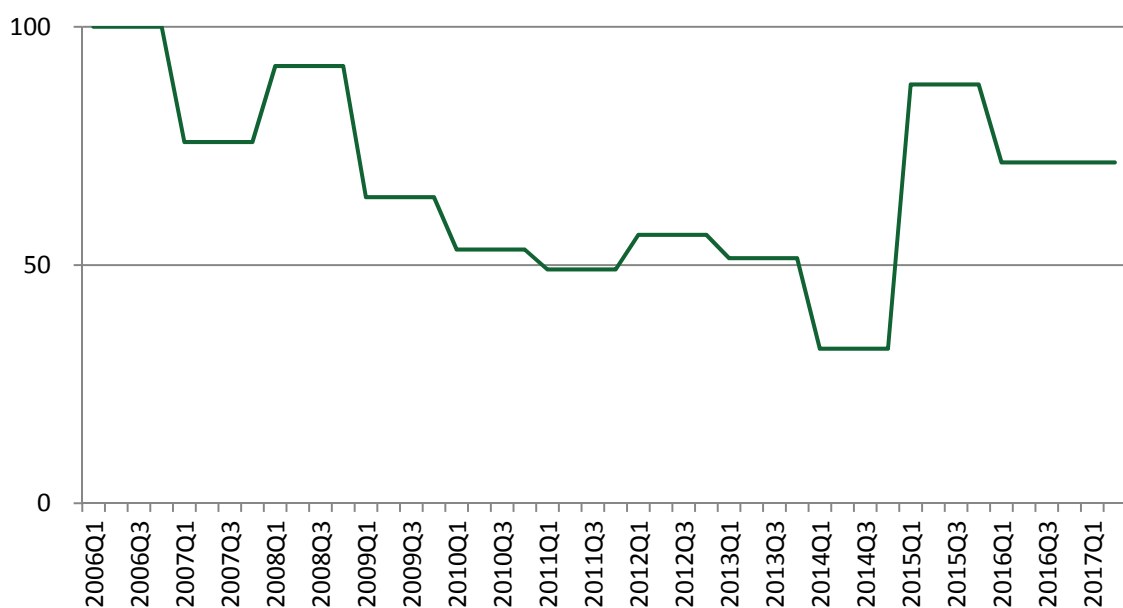
不過這並不代表區域供需缺口將會縮小，相反地北部地區長期電力供應不足的問題可能短期無解。依據台電資料，2017至2023年間，北部地區的電源均將不足以支應負載¹⁸。若未來全面停用核能，加上協和電廠除役，淡水河以東的大臺北地區將無電廠，而被寄予厚望的風力與太陽光電，因為先天條件的限制，未來興建的地點也將多半集中在中南部地區，因此未來北部地區的供電缺口將有可能會超過中北輸電幹線可靠送電能力(200-300萬瓩)。中北輸電幹線電塔數量逾萬，若未來其中有一個超高壓電塔因天災而倒塌，北部地區將有大規模停電的危機，例如2017年6月北部暴雨造成核一廠

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。

4.2.4 負載率

依據能源統計資料顯示，1990年我國尖峰負載和平均負載分別約為1,451.1萬瓩、940.1萬瓩，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2,847.2萬瓩、2,383.9萬瓩，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19所示。故觀察我國負載率變化，1990年第一季負載率為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%。

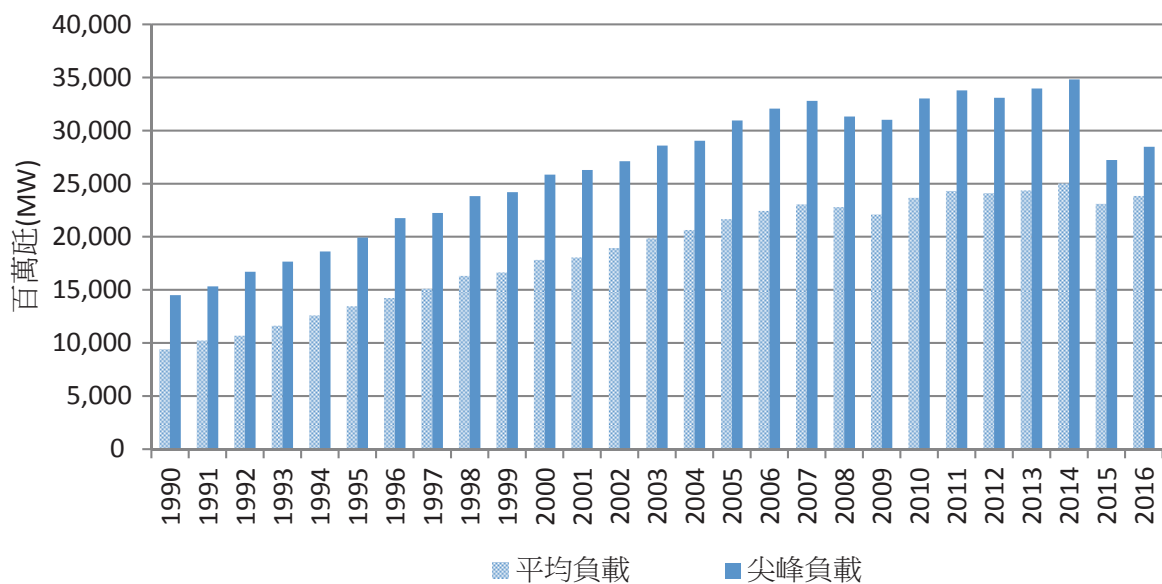
一般而言，負載率越高越好，但是因為負載率具有極值(100%)，加上和主要國家比較，我國的負載率已經達到極高的水準。台電公司的資料顯示，我國2012-2016年的負載率「平均值」約為82%；但是根據日本電氣事業聯合會(The Federation of Electric Power Companies of



資料來源：本文計算。

圖18 區域負載負偏離度(2006年Q1至2017年Q2)

¹⁸ 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)。



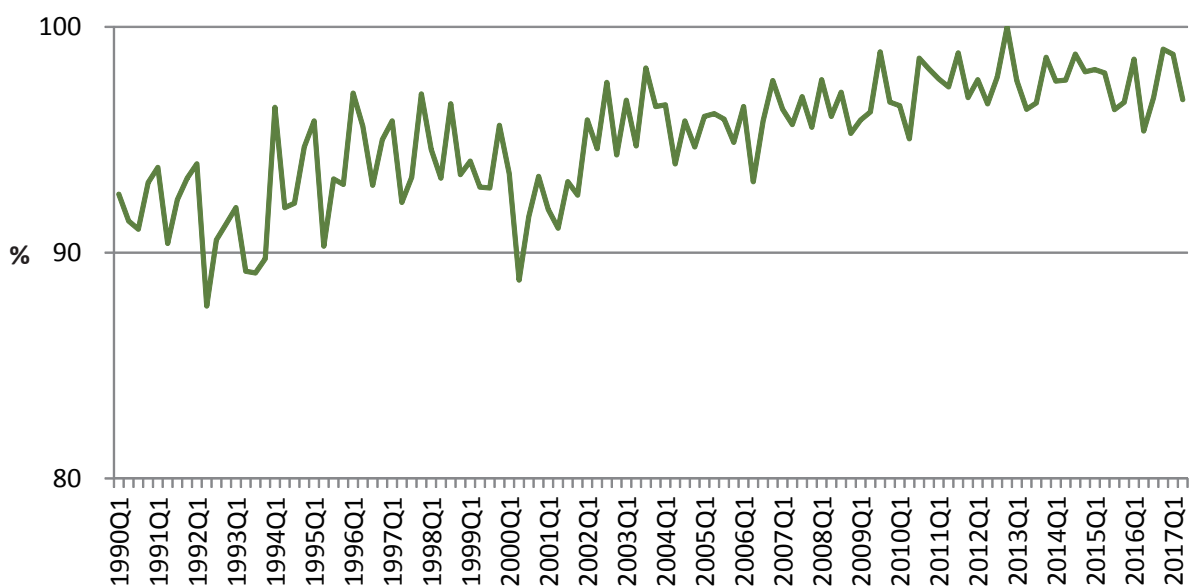
資料來源：本文繪製。資料來自AREMOS統計資料庫，<http://net.aremos.org.tw/>。

圖19 我國尖峰負載與平均負載

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%) (FEPCJ, 2015)。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。如圖20所示。

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



資料來源：本文繪製。資料來自AREMOS統計資料庫，<http://net.aremos.org.tw/>。

圖20 負載率(1990年Q1至2017年Q2)

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，進而造成全臺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。

4.2.5 天然氣月周轉次數

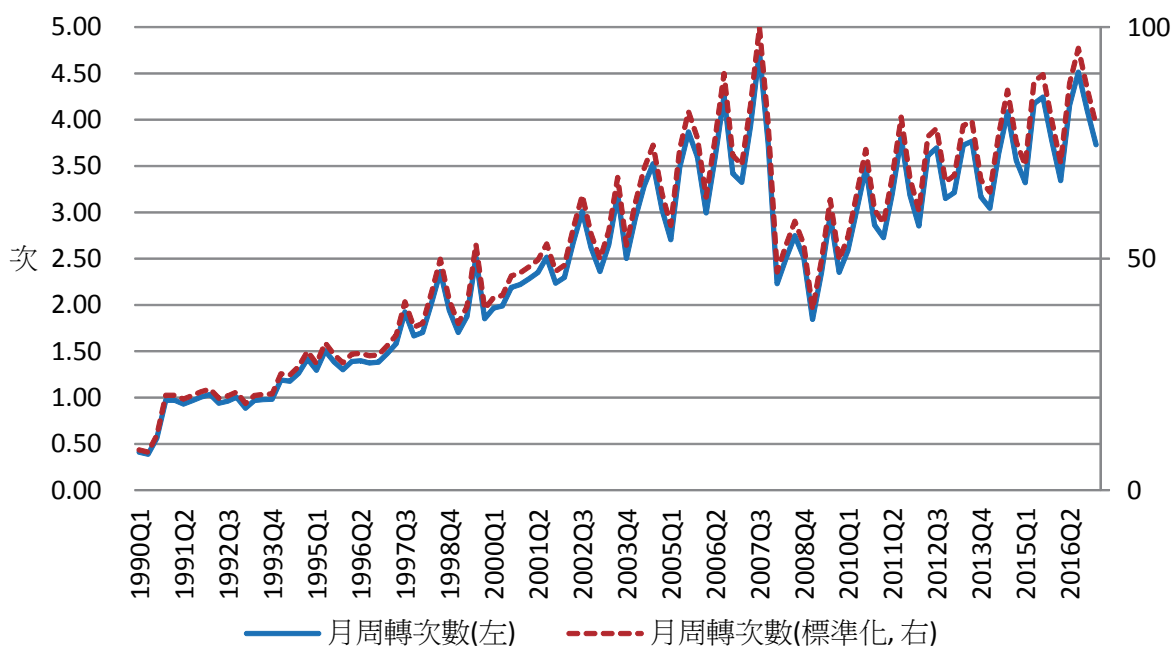
天然氣的接收與儲存設備建設不易，1990年4月我國首座天然氣接收站，永安液化天然氣接收站啟用，儲槽容量69萬公秉。至2009年7月，臺中液化天然氣接收站啟用，合計儲槽容量48萬公秉。然而，近年來隨著我國天然氣消費量的快速提升，我國天然氣存量的月週轉次數也快速提高，天然氣相關儲輸設備的營運壓力也水漲船高。

根據IEA 2016年「全球天然氣安全回顧(Global Gas Security Review)」所彙整的資料顯示，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(IEA, 2016)。舉例來說，韓國的液化天然氣再氣化設備利用率約為34%；而臺灣的設備利用率不

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，而臺灣則僅有13天。

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，但考量臺灣夏季颱風較多，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，因此本文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21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年臺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



資料來源：本文計算。

圖21 天然氣月周轉次數(1990年Q1至2017年Q2)

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。

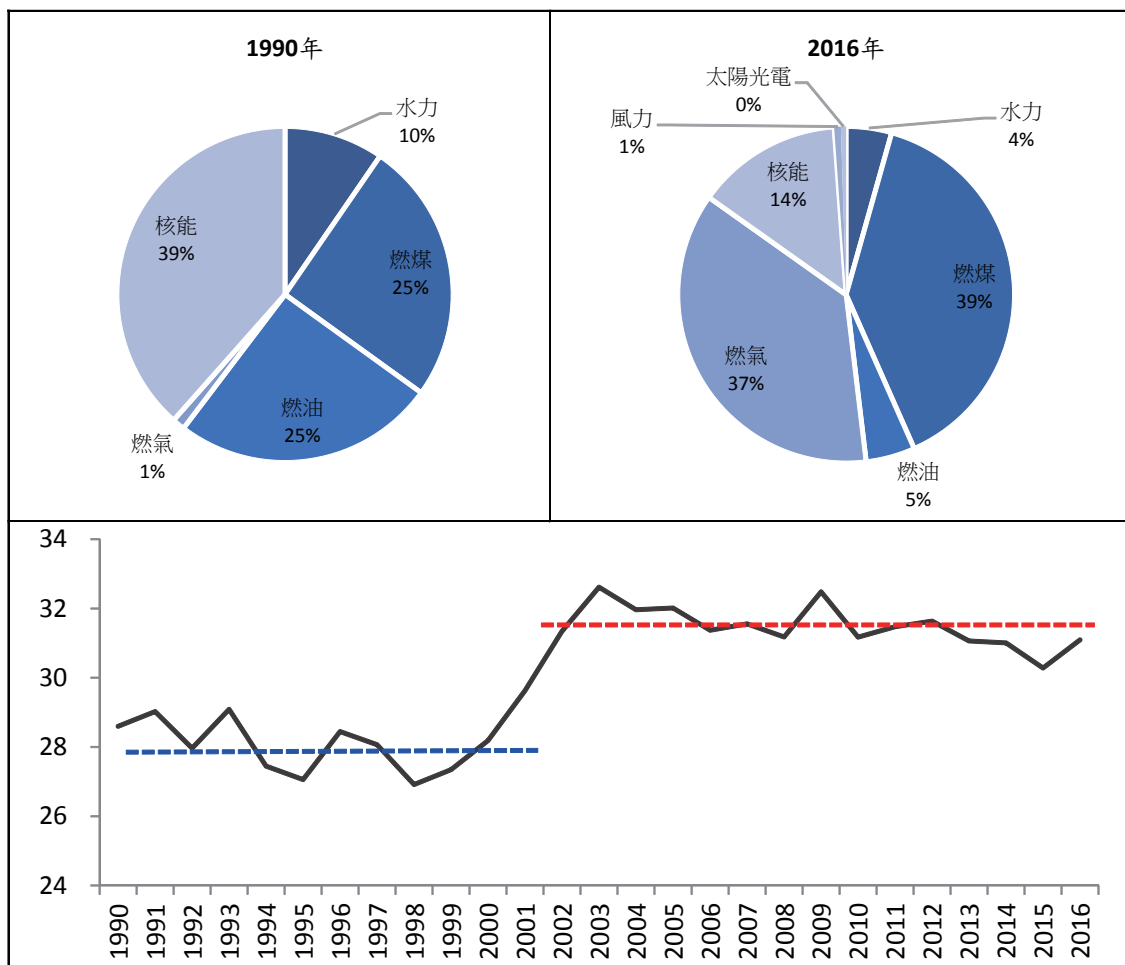
4.2.6 電力生產結構脆弱度

我國1990年與2016年的發電占比與集中度變化趨勢如圖22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23所示。

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

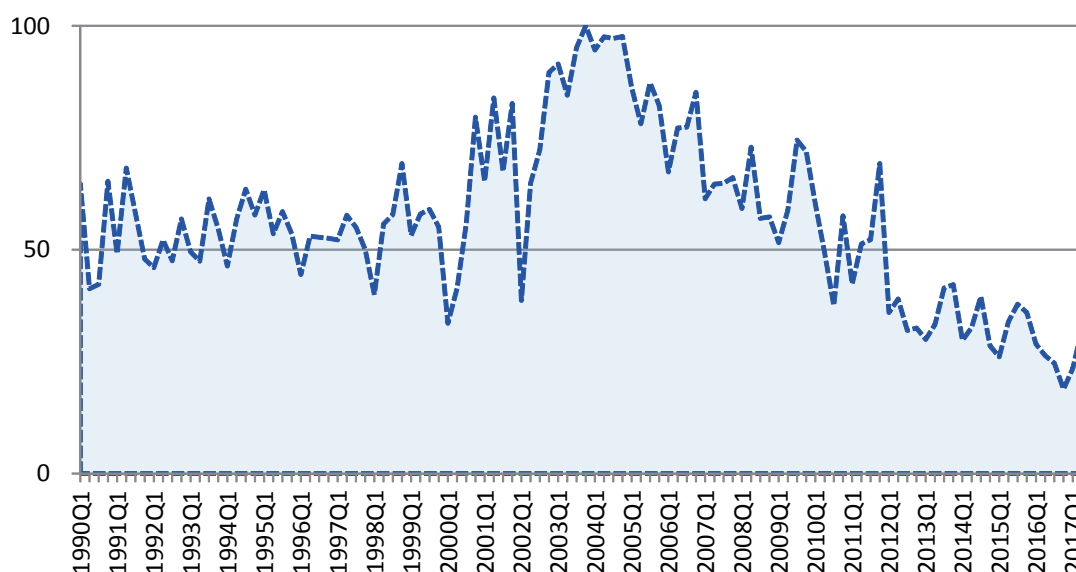
電和水力發電，占發電量比重則分別為39%、5%、37%、14%與4%。發電集中度在2000年之後出現了跳躍式的結構性變化(Structural Change)，核能發電、燃油發電在電源配比中的角色大幅降低，同時燃氣發電、燃煤發電的重要性大幅提升，而風力發電和太陽光電合計占比則不到2%。

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8及圖10)，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6)。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



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本文繪製。集中度為本文計算。

圖22 我國發電占比與集中度



資料來源：本文計算。

圖23 電力生產結構脆弱度(1990年Q1至2017年Q2)

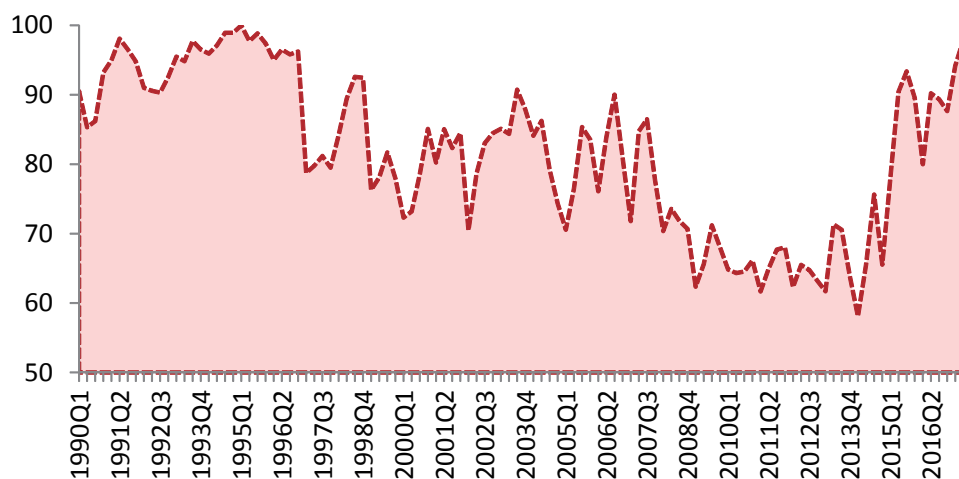
年第一季之64.66，隨著燃煤發電比重的增加且煤炭供應風險的遞增，逐漸增加到2003年第四季的高點，其後因煤油氣的供應脆弱度均維持下降趨勢不變，故我國於2017年第二季時之電力生產結構脆弱度降為32.29。表示我國近期電力生產結構脆弱度已較2000年中減少許多，是近年基礎設施面中唯一有助於減緩我國基礎設施脆弱程度的次指標。

4.2.7 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24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



資料來源：本文計算。

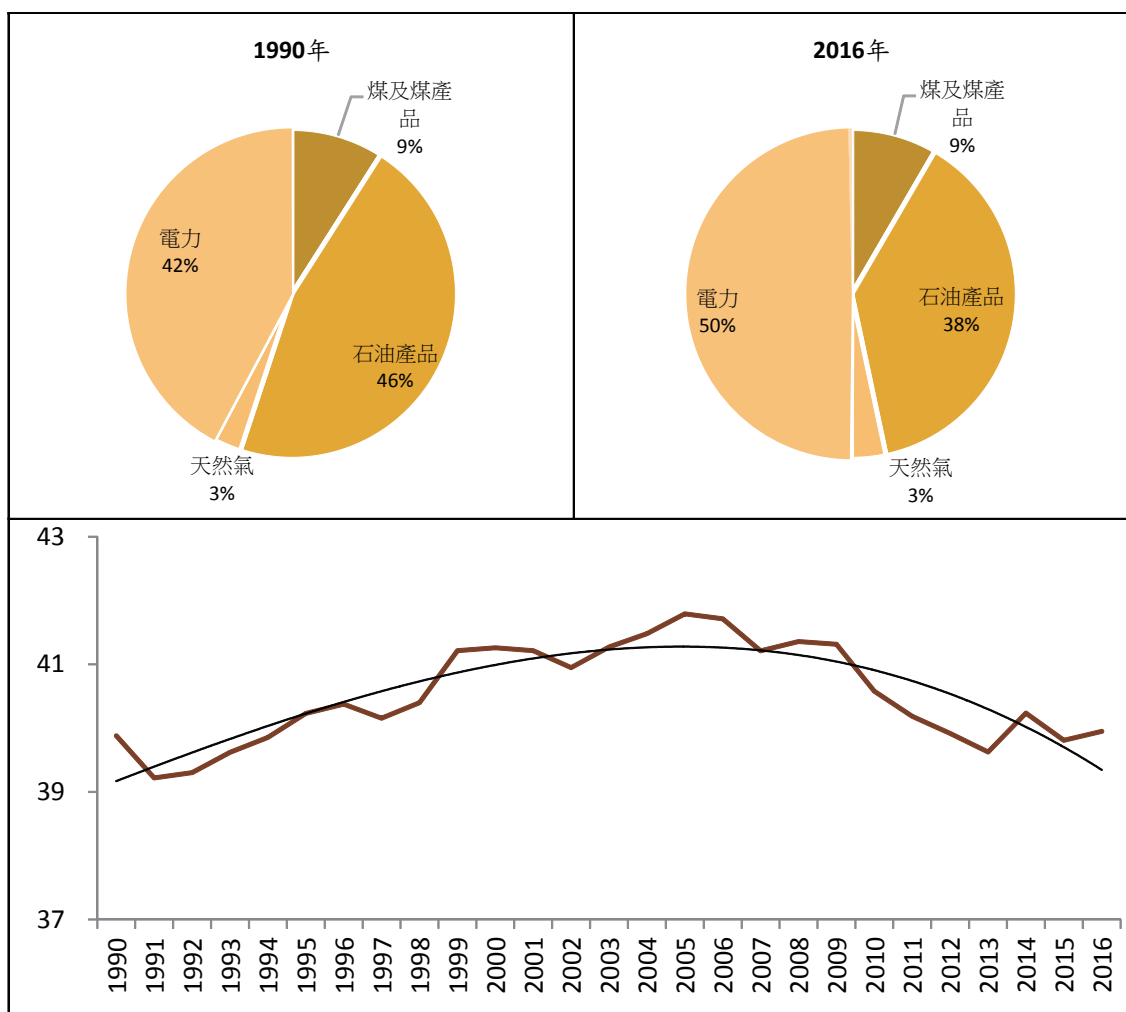
圖24 基礎設施脆弱度指標(1990年Q1至2017年Q2)

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。

4.3 最終能源消費脆弱度指標

4.3.1 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25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%、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。



資料來源：占比來自歷年能源統計月報、本文繪製。集中度為本文計算。

圖25 我國最終能源消費結構與集中度

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26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。

4.3.2 能源密集度

本文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

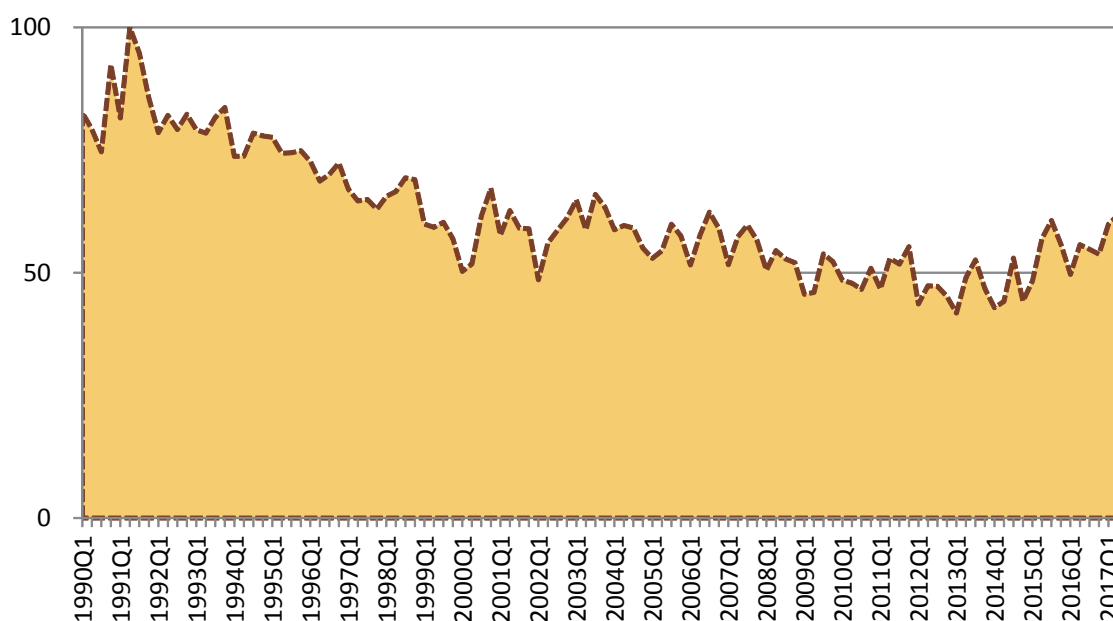
能源消費脆弱程度。

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27所示)，在能源使用效率改善下，有利於因應能源價格變化。

4.3.3 能源成本

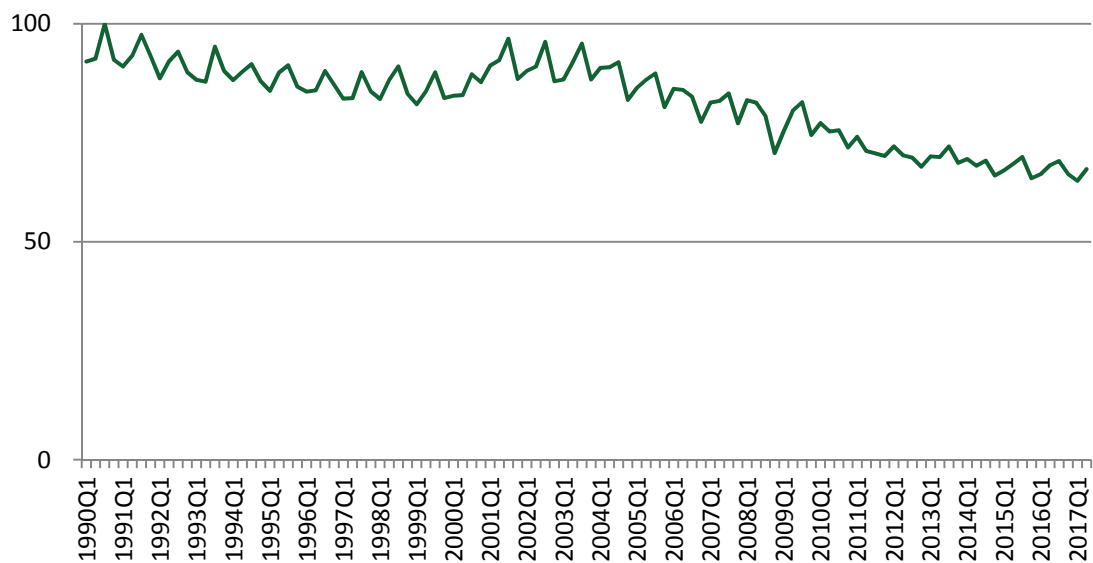
本文計算的能源成本包含了初級能源平均進口價格(含煤、油與液化天然氣)、再生能源(含水力)發電成本與核能發電成本(含核後端支出)，若一國部門之相關能源支出較少，受到國際價格波動變化影響亦較低，反之，假使能源支出費用較高，則在能源價格上漲之際，對國內各產業及家計部門衝擊也較大，進而使得總能源消費脆弱度上升。

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



資料來源：本文計算。

圖26 最終能源消費結構風險(1990年Q1至2017年Q2)



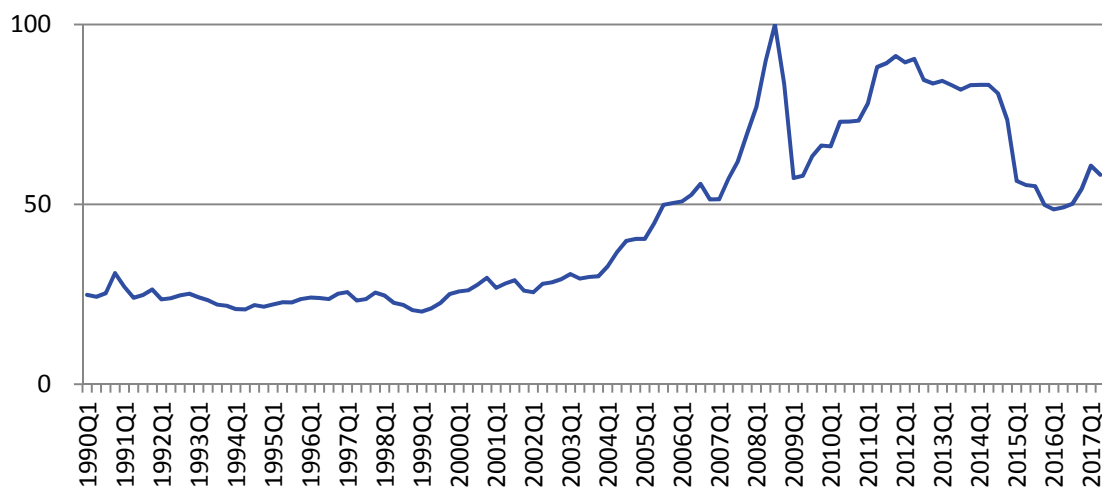
資料來源：本文計算。

圖27 能源密集度標準化數值(1990年Q1至2017年Q2)

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；加上核能電廠之部分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須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28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



資料來源：本文計算。

圖28 能源成本標準化數值(1990年Q1至2017年Q2)

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需的強化電網、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。

4.3.4 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29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。

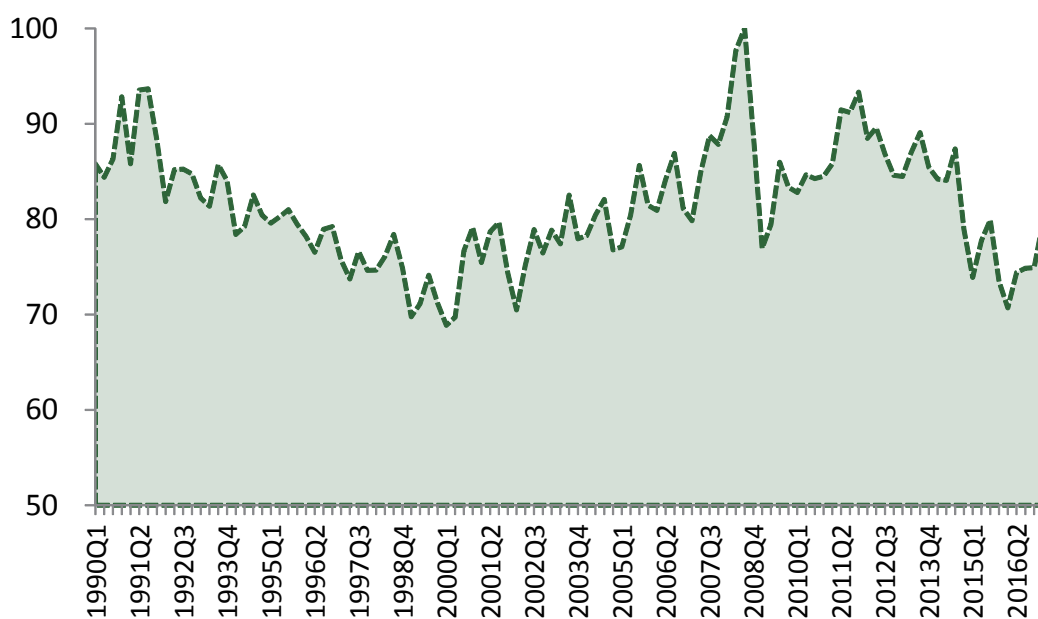
然而，之後即使我國能源效率持續改善，仍未能有效抵消國際能源價格大幅提高帶來的

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。

4.4 總能源脆弱度指標

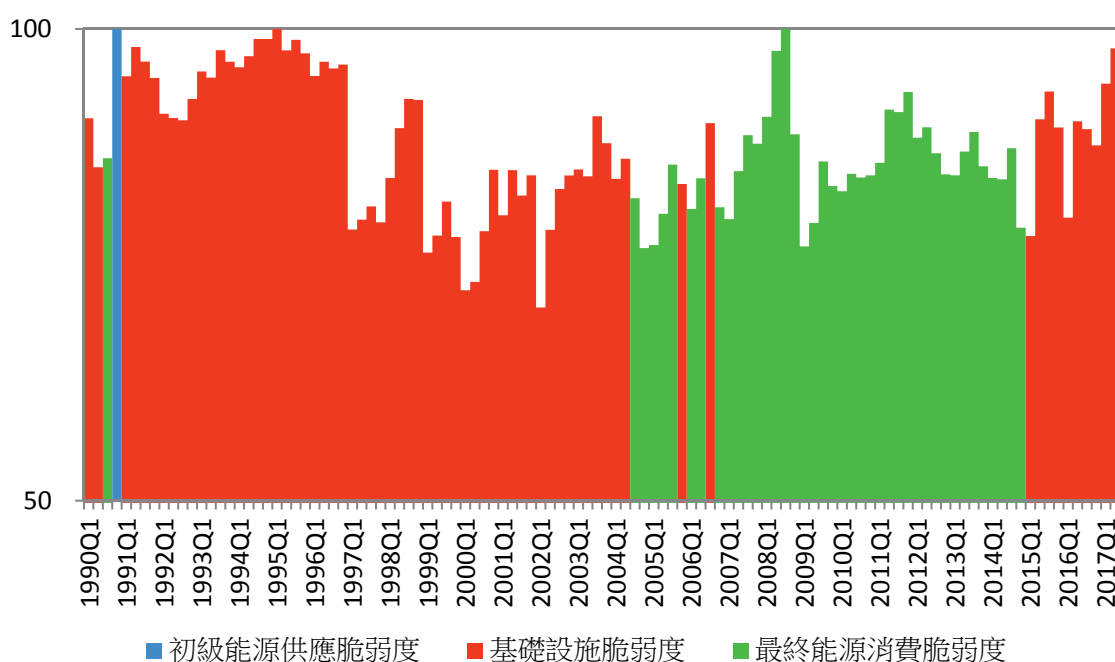
由於一國的能源系統在供需與基礎設施三個層面均缺一不可，故初級能源供應脆弱度、基礎設施脆弱度和總最終能源消費脆弱度中，只要有一項指標呈現高脆弱性，即顯示我國能源情勢不安全，故本文取樣本期間內，各期三者的最大者作為當期總能源脆弱度指標。我國1990年第一季至2017年第二季之總能源脆弱度指標如圖30所示。

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



資料來源：本文計算。

圖29 最終能源消費脆弱度指標(1990年Q1至2017年Q2)



資料來源：本文繪製。

圖30 我國總能源脆弱度指標(1990年Q1至2017年Q2)

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。

5. 結論與因應策略建議

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。本文在回顧國內外主要研究機構的能源安全指標後，選擇以WEC (2010)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指標，以十五項風險指標量化我國初級能源供應、基礎設施到最終能源消費等三個層面的脆弱程度。此外，考量能源系統本為一體，以取各構面脆弱度最大值作為總能源脆弱度之創新作法，來解析我國在1990年第一季至2017年第二季期間的能源脆弱程度的變化。

實證結果顯示，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；而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；唯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。另一方面，又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。

本文也發現，雖然臺灣是能源稟賦不足的能源淨進口國，但是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。而近年因電力和天然氣基礎建設不足，目前的脆弱度已經接近過往幾次重大事件的高點，這也是本文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。

雖然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。另一方面，面對短期可見的限電危機，政府當前的相關對策包括：緊急通過協和、通霄等電廠延役，協調地方政府展延麥寮燃煤電廠執照、放寬生煤使用限制，並於大潭新增二部單循環氣渦輪機組，各30萬瓩，作為緊急供電機組，加入夏天供電行列。其次，原委會已審查通過核二廠1號機重啟運轉，後續應核准核二廠燃料池擴充及併聯發電等相關計畫，增加電源供電能力。另外以每度10~12元的需量競價或各項抑抵尖峰負載等方式，進行供需面管理做法來因應，但上述對策多半屬於短期措施，目的僅是延緩限電壓力，難有釜底抽薪之效，並且這些應對供電缺口的短期應變措施，欠缺對投入成本與環境(如空氣品質)承受能力的考量，反而造成整體社會成本的提高。

由於長期來看電力供給仍是個令人擔心的問題，在未來會有限電陰影情況下，必然影響廠商投資意願、我國經濟成長及就業，但鑑於能源基礎設施的增設往往需要耗費較長時間進行規劃、評估與建置，因此，本文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。在目前再生能源發展所需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。另一方面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。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)。惟政府也應了解到目前進一步抑低尖峰負載的空間有限，加上長期存在的區域電力供需失衡的狀況，不能僅靠需求面管理，增加電力供應才是根本之道。

另外，針對再生能源發展之部分，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。例如：於地層下陷地區靠抽地下水的養殖業不宜同時兼營「種電業」；汙染土地則必須於整治後，才能設置再生能源設備，以避免道德危機(Moral Hazard)的發生。另外，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，以減少風機快速布建及扶植國內相關產業發展無法兼顧的問題。最後，目前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。

致 謝

本文修改自「臺灣能源經濟指標之建構與應用」研究計畫，係承蒙財團法人中技社之支持，且由中技社與中華經濟研究院共同執行，謹表謝意。

參考文獻

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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 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)。
- 謝惠子(2008)，「與時俱進擘劃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)。
- 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)。
- Bohi, Douglas R., Michael A. Toman, and Margaret A. Walls (1996), *The Economics of Energy Security*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- 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.
- Chuang, M. C., and 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.
- FEPCJ (2015), "Electricity Review Japan," The Federation of Electric Power Companies of Japan.
- 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.
- Frondel, M., Ritter, N., & Schmidt, C. M. (2009), "Measuring Energy Supply Risks: A G7 Ranking," *Ruhr Economic Papers*.
- 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>.
- IEA (2014), "Energy Supply Security: The Emergency Response of IEA Countries - 2014 Edition," International Energy Agency.
- 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>.
- 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.
- Li, T. (2010), "Japan, Korea and China's Energy Security Strategy of the Enlightenment," The Conference on Web Based Business Management.
- Noel, P., & Findlater, S. (2010), "Gas Supply Security in the Baltic States: A Qualitative Assessment," EPRG Working Paper, Cambridge.
- OECD (2016), "Country Risk Classifications of the Participants to the Arrangement on Officially Supported Export Credits," OECD.
- 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>.
- Rutherford, J. P., Scharpf, E. W., & Carrington, C. G. (2007), "Linking Consumer Energy Efficiency with Security of Supply," *Energy Policy*, 35(5): 3025-3035.
- USCC (2015a), "Index of U.S. Energy Security Risk," United States Chamber of Commerce.
- USCC (2015b), "International Index of Energy Security Risk: Assessing Risk in a Global Energy Market," United States Chamber of Commerce.
- WEC (2010), "Sicherheit unserer Energieversorgung – Indikatoren zur Messung von Verletzbarkeit und Risiken," *Untersuchung im Auftrag des Weltenergieerat – Deutschland. Endbericht. Münster, Berlin, EEFA-Energy Environmenat Forecast Analysis GmbH & Co. KG*.
- WEC (2015), "2015 Energy Trilemma Index: Benchmarking the sustainability of national energy systems," World Energy Council.
- WEF (2013), "The Global Energy Architecture Performance Index Report 2013," World Economic Forum.
- WEF (2014), "The Global Energy Architecture

- Performance Index Report 2014,” World Economic Forum.
- WEF (2015), “The Global Energy Architecture Performance Index 2015: Methodological Addendum,” World Economic Forum.
- WEF (2016), “The Global Energy Architecture Performance Index 2016: Methodological Addendum,” World Economic Forum.
- 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>.
- Yueh, L. (2010), “An international approach to energy security,” *Global Policy*, 1(2): 216-217.

The Study of Energy Vulnerability Indicators in Taiwan and Strategy Suggestions

Chi-Yuan Liang¹ Chih-Chun Liu² Ruei-He Jheng^{3*} Yi-Hsun Lu⁴ Po-Yao Kuo⁵

ABSTRACT

According to the conclusion of the National Energy Conference in 2009, energy is not only the basis of social economic activities but also plays a strategic role in national security. In order to establish the mechanism of risk management, it is important to establish an early warning indicator of energy security. For this, we revise the framework of World Energy Council (WEC, 2010) and the work of Frondel and Schimdt (2013) to construct the energy vulnerability indicator. The Energy Vulnerability Indicator of Taiwan which is composed of three main vulnerability indicators. That is primary energy supply vulnerability (PEV), infrastructure vulnerability (IV), and end-use energy (final energy consumption) vulnerability (EEV). Comparing with the conventional energy security indicators such as U.S. Energy Security Risk Index, Energy Architecture Performance Index or Energy Trilemma Index which mainly focus on supply-side and macro-level, this energy vulnerability indicator focuses not only supply-side but also infrastructure and demand side. Besides, all indicators are standardized to 0-100 scale to quantify the energy vulnerability in Taiwan, the higher the standardized value of the indicators show the higher the risk and the vulnerability is. In addition, instead of employing a weighted average, this study chooses the maximum value of the main vulnerability indicators to calculate the Energy Vulnerability Indicator, because the energy system as a whole would crash even if only one of PEV, IV, and EEV is in danger. The empirical results show that the PEV has dropped sharply from 90.16 to 32.46 during 1990 Q1 to 2017 Q2, due to the increasing diversity of the source of energy imported. The EEV has increased from 85.79 to 100 during 1990 Q1 to 2008 Q3 and reversed to 80.54 in 2017 Q2, showing a dramatic fluctuation in the last decade as a result of international energy prices' changes. The IV has deteriorated from 65.54 to 97.94 because of lack of storage and regasification facilities of natural gas, and the low reserve margin and operating reserve of electricity. In general, the Energy Vulnerability in Taiwan has been driven mainly by the infrastructure vulnerability and energy price change. It is now close to the highest vulnerability level during the sample period, such as electricity rationing in the early 1990s and the unprecedentedly high oil price in 2008. This is the main difference between Energy Vulnerability Indicator proposed by this study and the other conventional energy security indicators focused on supply-side factors. It is suggested that the government should pragmatically reassess the direction, objectives, and timetable of current energy transformation policy, remaining the flexibility to use existed various types of power generation, and reconsider the environmental impact and social cost of the short-term emergency generators. In addition, to reduce the risk of the disruption of gas supply, it is necessary to construct new LNG receiving stations, storage, and pipelines to match the growing domestic demand for natural gas. The high load factor in recent years implies the limitation of load management, such as peak clipping, valley filling, and load shifting. And hence to increase the power supply and to balance the regional gap between supply and demand is essential for reducing the energy vulnerability in Taiwan. As for the development of interruptive renewable energy, effective measures for its electricity grid integration are critical to reducing the impact on grid stability. Finally, enhancing energy efficiency is also a very important way to reduce the vulnerability of energy consumption. The government should not subsidize energy prices any longer. It should allow the energy prices to reflect real cost for inducing the energy users to improve their energy efficiency.

Keywords: Energy Vulnerability, Energy Security, Infrastructure, Energy Efficiency

¹ Chair Professor, National Central University & Consultant, Chung-Hua Institution for Economic Research (CIER).

² Associate Engineer, Energy Technology Development Center, China Technical Consultants, Inc. (CTCI) Foundation.

³ Analyst, CIER.

⁴ Assistant Research Fellow, CIER.

⁵ Section Manager, Energy Technology Development Center, CTCI Foundation.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-27356006#6232, E-mail: mike.jen@cier.edu.tw

Received Date: July 19, 2017

Revised Date: September 30, 2017

Accepted Date: October 25, 2017