

全球變遷下的低碳電力發展方向

馬小康

國立台灣大學機械工程學系教授

摘要

由於全球暖化的衝擊，溫室氣體的排放與減量已成為當今全世界亟需共同面對的問題。而我國2014年進口能源依存度為97.75%，石油進口能源依存度更高達99.98%，如果能源供應不足或中斷，就會形成國家安全問題。日本福島事件發生後，已造成臺灣核四電廠興建工程緩建，再加上台灣中部地區的PM2.5數值超標，因而影響台中燃煤發電廠發電量。基載發電之供應短缺，進而影響電網供電之穩定。雖然再生能源-低碳排放發電可降低碳排放並可減少基載發電之需求，但未來10年內其占比仍偏低。因此，如何穩定能源及基載電力之供應？已成為我國當前最棘手的問題。雖然，預估燃料價格之走勢將隨美國頁岩氣之大量開發而走低，本文依節能及溫室氣體(CO₂)減量原則，提出未來低碳電力發展方向。

關鍵詞：溫室氣體、節能減碳、基載發電、低碳電力。

一、前言

隨著京都議定書的簽訂，環境議題逐漸受到重視，溫室氣體的減量為當今全世界亟需共同面對的問題。我國是自產能源極為缺乏的國家，98%能源仰賴進口。在311日本福島事故後，日本於2012年5月5日將50部核能基組停機，引起國人對核能發電安全有所疑慮，並造成核四工程緩建及運轉日期遙遙無期。雖然政府提出的新能源政策朝向穩健減核的非核家園規劃，並以風力、太陽能等再生能源及擴大使用天然氣來填補電力缺口，其前提是確保不限電及維持合理電價。面對國際溫室氣體減量及能源高漲的壓力，新執政黨所提未來十年綠能發電成長計劃藍圖，如何強化電力供應保障、優化能源結構並構建穩定、經濟、清潔、安全的能源供應與服務體系已成為我國當前最棘手的問題。

(一) 國家自定預期貢獻 (INDCs)

巴黎氣候協議 (Paris Agreement, COP21) 2015年12月12日獲得近200個國家一致通過，成為繼京都議定書之後，具有法律約束力的全球溫室氣體減量新協議。「巴黎協議」不再區分工業國與非工業國家，是要求所有國家自己提出可以做到的國家自定預期貢獻 (Intended National Determined Contributions, INDCs)，對氣候變遷問題的關切加上地主法國努力溝通，會議開幕前195締約國中有187國提報 INDC。「國家自定預期貢獻」(INDC) 要求各國每五年要提送一次 INDC。政府也在2015年10月左右提出台灣的 INDC「國家自定預期貢獻」(INDC) 揭示溫室氣體自願減量目標與期程，表達我國支持巴黎氣候協議立場，宣稱2030年會比「一切如常」(business as usual, BAU) 排放總量428 CO₂e MT/year 基準，利用能資源(熱汽電)整合、地熱發電、碳捕存等綠能低碳前瞻技術，並參與國際市場機制之境外減量，將可減少一半排放總量為214 CO₂e MT/year。並宣示於2050年將溫室氣體排放總量回到2005年排放基線 (Business as usual, BAU) 245CO₂e MT/year 減少50%，亦即排放總量減至123 CO₂e MT/year (圖1)。2016年在中國杭州召開的G20峰會二十國集團杭州峰會(2016 G20 Hangzhou summit)是二十國集團第

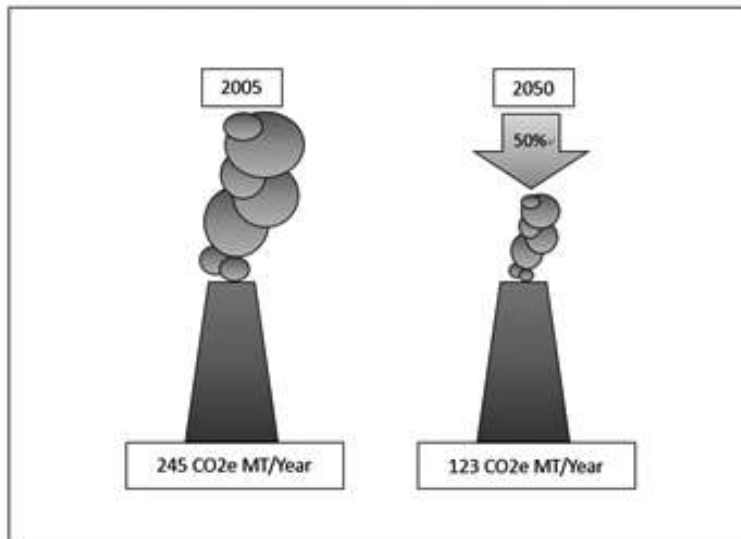


圖1 台灣國家自定預期貢獻(Taiwan's INDC, 2005-2050)

十一次峰會。就在杭州峰會正式展開前一日，大陸國家主席習近平與美國總統歐巴馬聯合批准《巴黎氣候變化協定》，承諾年底前將正式採納減慢全球變暖的巴黎協議。大陸與美國都是「排碳大國」，中國排碳量占全球的25%，美國占15%，兩國加起來就占全球排碳量的4成之多。這兩個最具影響力、也是最大排碳國家同時承諾批准遵守巴黎協議，不僅得到全球普遍的肯定，更使其他推動仍有困難的國家，不得不加速其減碳承諾的推動。今年(2016)11月，聯合國氣候變化綱要公約第22次締約國大會(UNFCCC COP22)將由摩洛哥負責籌備，會議進行的地點是馬拉喀什(Marrakech)，摩洛哥首都馬拉喀什市市議會已正式宣布，將推行汰換公共照明設施的節能計畫，來達成減少全市60%能源花費的目標。很明顯第22次締約國大會各國將加速其減碳承諾的推動，因此，台灣能源部門及台電公司將面臨更大的溫室氣體自願減量壓力。

(二) 火力發電溫室氣體(CO₂)減量之原則及目標

火力發電廠是二氧化碳的主要排放來源，近一百年來溫室氣體的大量排放導致全球暖化問題。通常每產生一度電，褐煤排放的二氧化碳大約是天然氣的3倍，無煙煤則是天然氣的2倍。從溫室氣體(CO₂)減量

$$CO_2 = CO_2 \quad \text{公式(1)}$$

$$CO_2 = CO_2 \cdot \frac{GDP}{GDP} \cdot \frac{Population}{Population} \cdot \frac{Energy}{Energy} \quad \text{公式(2)}$$

$$CO_2 = Population \cdot \frac{GDP}{Population} \cdot \frac{Energy}{GDP} \cdot \frac{CO_2}{Energy} \quad \text{公式(3)}$$

之基本公式(1)、公式(2)及公式(3)來分析，CO₂減量之基本原則包括：節能(降低能源密集度，Energy/GDP)及減碳(降低CO₂排放密度，CO₂/Energy)，先進國家提出之四項節能減碳方向包括有效能源之產出、有效能源之分佈、使用再生能源及有效能源之消費(圖2) (Danesi et al., 2011; 馬小康, 2015)。



圖2 先進國家節能減碳的有效處方

其中有效能源之產出包括使用高效率之汽渦輪與蒸氣渦輪機組、燃氣複循環、汽電共生、燃煤機組之碳捕獲及儲存等；有效能源之分佈包括使用智慧型電網、高電壓輸電系統、分散式區域熱電系統等；使用再生能源則包括使用風能、太陽能、生質能等；有效能源之消費則包括使用節能之高效率運具、燈具、設備、綠建築及能源管理。

在311日本福島事故後，由於能源價格高漲已衝擊我國的經濟發展，近年氣、煤價之走勢隨美國頁岩氣之大量開發而走低。臺灣未來基

載發電之開發，顯然必須考量溫室氣體的排放與減量，燃氣複循環與燃煤發電結合碳捕捉及封存(Carbon Capture and Storage)已成為未來基載發電之必要選項。

二、德國、日本與我國電力能源配比之省思

(一)德國之經驗

德國於2014年7月有192萬千瓦的裝機容量(圖3)，再生能源佔83萬千瓦，佔總裝機容量的44%左右。這是德國特別是通過上網電價(FIT)大力支持再生能源政策的結果，再生能源在裝機容量方面，是由太陽能光伏發電(PV)和陸上風電領導。生物質能、水力發電以及其他再生能源發電(如地熱)，佔不到所有已安裝的再生能源容量的四分之一。然而天然氣、硬煤、褐煤以及核能仍佔顯著裝機容量比率。

德國在2014年電力產出容量(圖4)顯示褐煤和硬煤佔生產的所有電力約44%，核電仍佔2014年電力產出的15.8%，但核電規劃將在2022年被淘汰。德國佔著與歐盟國家電網相通之優勢，2014年再生能源電力生產量達到157.4億千瓦時，或全部電力產出的25.8%。需要注意的是，從再生能源在總電力產出的占比也顯示其供電的不穩定性，在一年中某些時候會更高或會更低。截至目前，德國再生能源在電力消費的最大占比時刻是發生在2014年5月11日(中午)為總電力消費量之80%。圖5顯示德國2014年的再生能源電力產出量持續逐年增加，較2013年增加了2.10%，以化石燃料生產的電力則下降了2.70%。

(二)日本之經驗

日本為能源消費大國，但自產能源極為有限，絕大多數仰賴進口。各項能源進口依存度，分別為原油99.6%、天然氣96.1%、煤炭93.9%。日本於2011年3月11日東日本大地震和福島核事故後，日本要求所有核反應廠通過新修訂的安全標準，以確認其在自然的災難情況下能繼續安全運行前保持關閉，直到日本當局接受審查結果。圖6顯示2012

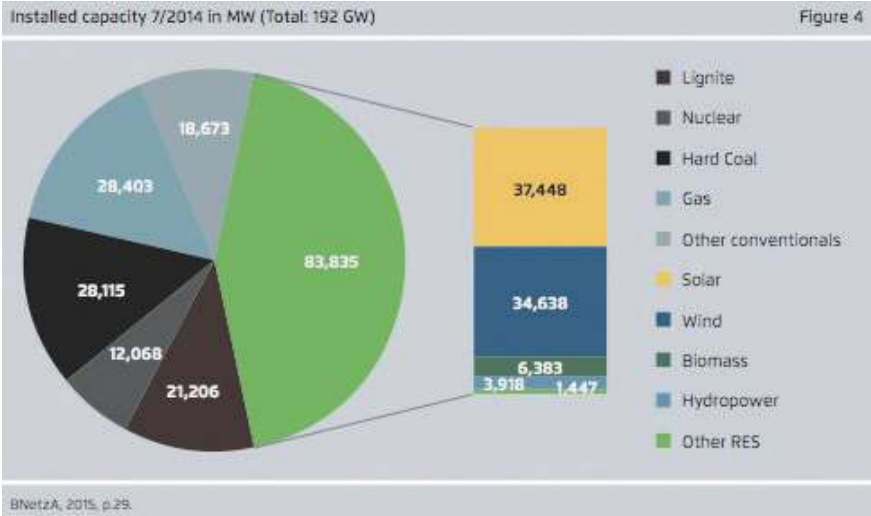


圖3 德國2014年7月的裝機容量 (Total: 192 GW)

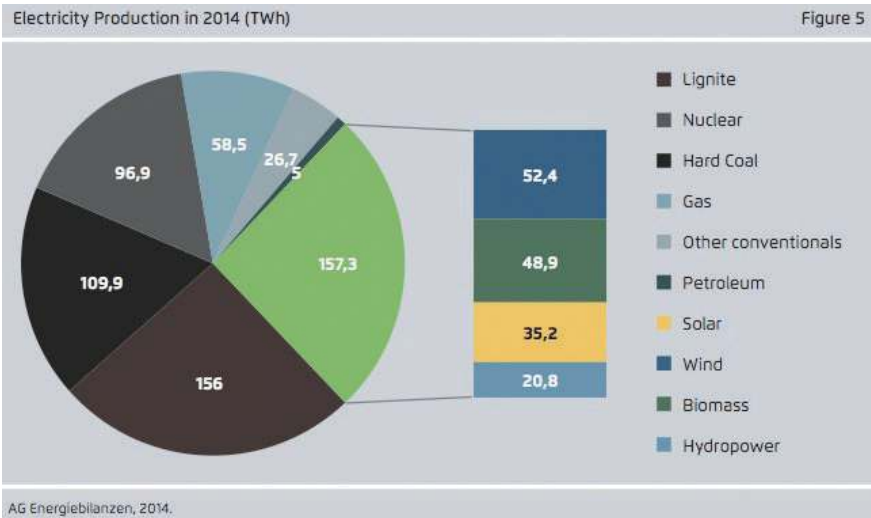


圖4 德國2014年的電力產生量 (Electricity Production, TWh, 十億度)

年1月核能發電的貢獻從平均的日本總發電量的30%下降至2%。日本使用化石燃料發電的上升到日本總發電量的90%，與2011年相比，2012年化石燃料發電量增長了21%，這增長的大部分是在液化天然氣(LNG)的消耗，煤的消耗則為較小量的增加。昂貴的進口化石燃料和日元的價值大幅下降，增加了日本國內的電力成本價格，促成了持續數十億美元的每月貿易赤字。據IEEJ統計，2013年日本總電力供給達9,229.02億ktoe，發電量為7437.01億ktoe，其中水電佔7.9%、化石燃料佔90.5%、核電佔1.3%、新能源僅佔0.3%。2013年日本電力銷售量8485.41億kWh。

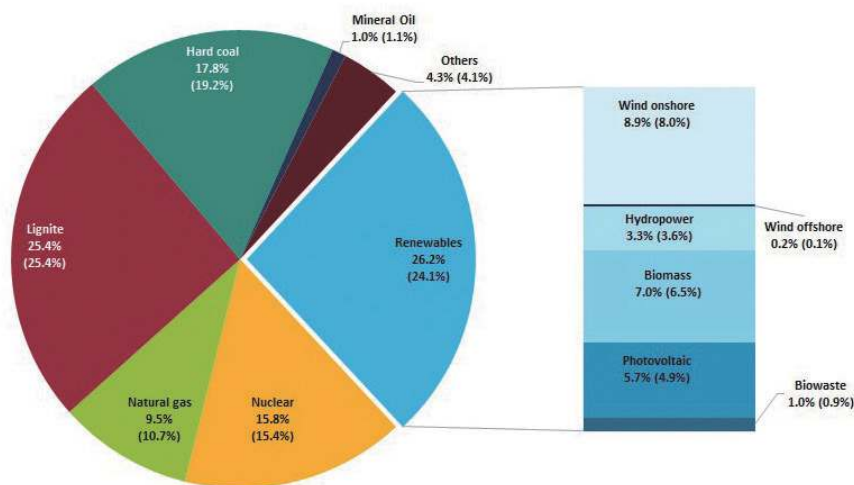


圖5 德國2014年的電力產生量 (2013 values in parentheses).

資料來源:AG Energiebilanzen, 2015

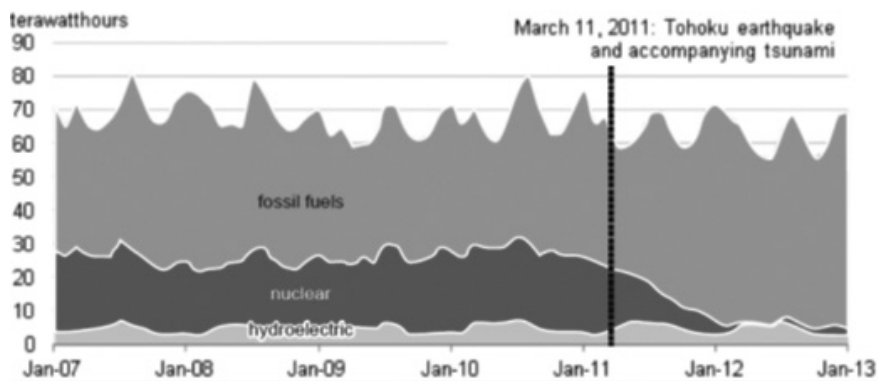


圖6 日本2007年至2013年的電力月產生量比較

2014年4月日本政府通過了日本第四次戰略能源計劃(SEP)修訂了日本能源開發和使用方式。該SEP是為了滿足日本的“3E+S”能源目標：能源安全(Energy Security)，經濟效率(Economic Efficiency)，環境和安全(Environment and Safety)。根據修訂後的計劃，燃煤發電電力和重啟閒置的核動力發電單位(electric generating units, EGUs)的一定數量，提供基載電力。同時研究在一個較長的時間框架下逐步引入再生能源。此外，在SEP促進高效率的燃煤發電單位(EGUs)的更多的銷售，作為減少全球二氧化碳排放量的方法。關於再生能源，基本計畫明確表明“重要的低碳國產能源，有太陽能和風力、地熱、水力、木質生物質等”。提出要鼓勵從法規改革和進一步的研究和開發著手，加快引進再生能源，並積極推進其利用。雖然再生能源在“穩定供應和成本方面”面臨各種挑戰，例如“太陽能的發電成本高，並且功率

輸出是不穩定的”，未來太陽能發電設定在分佈式小規模的發電，因此，進一步的技術創新是必要的。成本降低有望推動中期至長期的“作為補充白天高峰的用電需求”。有關能源政策的基本“能源組合（最佳組合）”，基本計畫規定要“避免對某特定電源和燃料的過度依賴，確保低廉且穩定的基本負荷電源維持在國際同等的水準上”。

(三)我國電力能源配比之省思

根據能源局統計資料顯示2013年台灣電力裝置容量為4,118萬瓩，其中抽蓄水力佔6.3%、燃煤佔27.4%、燃油佔8.1%、燃氣佔37.0%、核電佔12.5%、再生能源佔8.7%。發電量為2,134億度，其中抽蓄水力佔

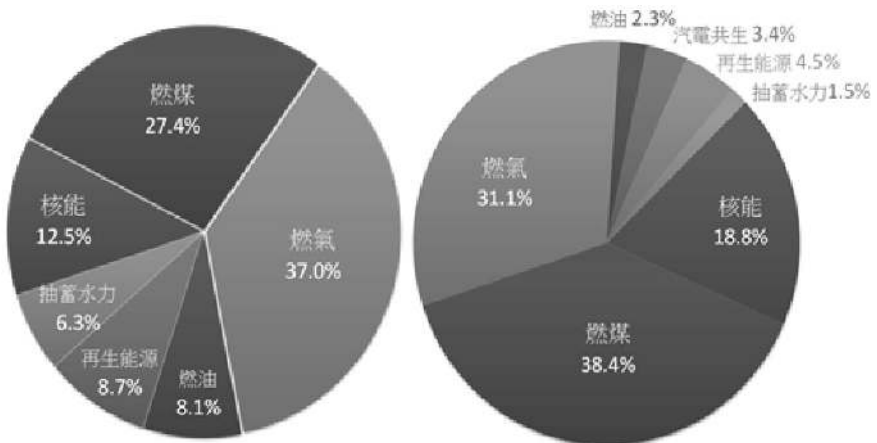


圖7 台灣2013年各類燃料電力裝置容量及發電量佔比

註：1. 汽電共生之垃圾、沼氣自100年起計入再生能源

104年台電系統裝置容量占比

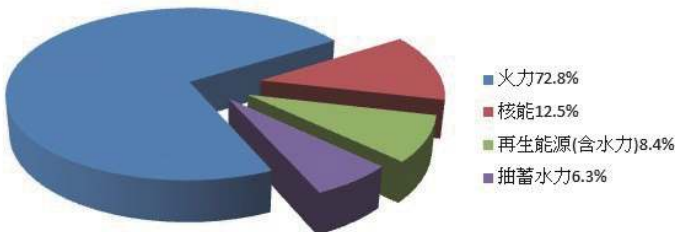


圖8 2015年台電系統裝置容量及發電量佔比

1.5%、燃煤佔38.4%、燃油佔2.3%、燃氣佔31.1%、核電佔18.8%、再生能源佔4.5%、汽電共生佔3.4%。圖7顯示燃煤及核電因其燃料價格較便宜，發電成本較低，屬於基載發電，而再生能源受限於氣候及燃油成本高，發電效益較低（經濟部能源局，2014）。我國近8年（2008至2015年）能源密集度年平均下降2.5%，已達成我國每年提升能源效率2%目標（總統府，2016）。圖8為台灣2015年各類電力生產佔比，再生能源僅佔3.1%。依台電公司104年長期電源開發方案（10405案），105年備用容量率為9.2%，瞬時尖峰附載為27,576.0MW（臺灣電力公司，2015a, b）。顯然再生能源受限於氣候，尚無法承擔基載發電任務，燃氣及燃煤發電仍屬必要選擇，過渡期間逐步降低核能發電比例，以讓民生、經濟、產業有時間調適，使衝擊降至最低。

三、我國海域能源開發及低碳電力發展藍圖

(一) 積極開發海域能源以降低能源進口依存度

我國能源過度倚賴進口能源，不僅讓我國承擔能源價格上漲的衝擊，更造成我國能源安全議題的重大隱憂，對產業活動與民眾生活產生重大的影響。圖9顯示我國2014年進口能源依存度為97.75%，石油進口能源依存度更高達99.98%，能源進口總值為643.39億美元。

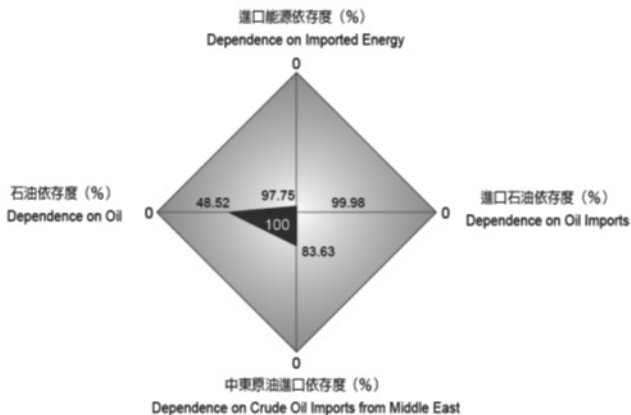
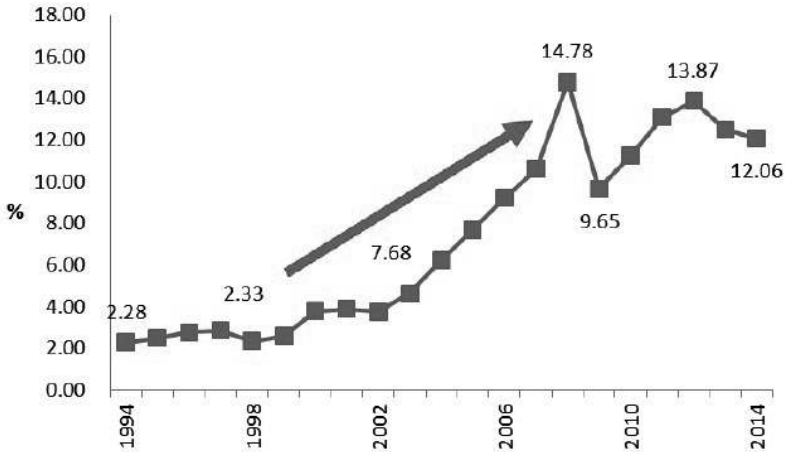


圖9 我國2014能源安全度-進口能源依存度(%)

1. 我國能源進口值占GDP比率已上升至2014年之12.06%

圖10我國進口能源佔GDP之百分比更顯示我國能源進口值占GDP比率由1994年之 2.28%上升至2014年之12.06%。2014年臺灣付給能源出口國費用占GDP的比例，高達1998年5倍之多。能源價格高漲已衝擊我國的經濟發展，國內急需努力降低進口能源的倚賴，避免未來國際能源價格上漲傷害我國的經濟。降低能源倚賴的最佳方式包括積極開發海域能源、節省能源、提升能源效率與發展自產替代能源，其中以積極開發海域能源最具前瞻性與挑戰性。



資料來源：經濟部能源局(2013)，能源統計手冊。

圖10 我國進口能源佔GDP之百分比

台灣四周環海，海域面積為陸域面積6倍，海洋資源豐富，卻因過去兩岸長期對立，海岸和海域未能妥適開發，近年海洋委員會已於成立外，但尚未結合政府有關部門資源，欠缺海洋科技人才之培育與各大學相關系所及研究機構之合作等。我國須建立海洋國家人民之新思維，領導人必須有如海洋之胸襟方能海納百川，民眾也應更具包容性尊重不同想法方能成其大，才能讓台灣成為真正的海洋國家！

台灣海峽從釣魚台島至南海地區資源蘊藏量豐富，近日海牙國際仲裁法院裁決，主張有權審理菲律賓就南海主權爭議提出的訴訟。針對南海地區，我國實際掌握的籌碼只有東沙環礁、太平島、中州礁還有一小部分的水域而已，無論就歷史、法律及地理而言，太平島等區域是台

灣不可分割的一部分，目前仍有兩百名台灣部隊住在太平島，並建造大碼頭，太平島具秋葵、玉米、木瓜、芭樂等作物以及地下水，可以自給自足並維持人類居住及經濟生活。近來由於太平島依《聯合國國際海洋法公約》(UNCLOS)中規範了「陸地支配海洋原則」(Principle of Domination或稱land dominates the sea)，可主張專屬經濟海域，也就是可主張陸地向外延伸200浬海中的生物資源(漁業)，或主張海洋底土中的非生物資源(也就是石油天然氣)皆專屬於我國可開發的話，我國未來與大陸或美國等其他國家尋求共同開發及共享其資源之機會將大增，降低我國能源進口依賴度之機會亦可成真。

2. 越南已成為南海地區最大油氣輸出國

越南位於中南半島東部，東南濱海，海岸線長達3,400公里；北接中國大陸；西鄰寮國；西南有高棉。總面積約331,210平方公里，人口9,435萬人(2015年7月估計)。2014年之GDP估計值為1,860億美元，人均GDP為5,600美元。越南天然資源相當豐富，但目前越南國內並沒有石油煉製工業，所生產之原油全數出口，所需油品再從國外進口。由於越南政府掌控上游的探勘與開採，以及下游的油品進口、運輸與銷售，因此外資投資業務都必須與該國國營石油公司Petro Vietnam (PVN)合作。

在台灣內部政黨內鬥及中國與南海各國發生爭端之際，2007年8月越南聯手俄羅斯於萬榮寶(Bao Vang)探井首次產出每天40萬立方米油氣，2013年10月在莫克靜省(Moc Tinh)和海西哈奇(Hai Thach)以及Kim Cuong Tay發現氣體和凝析油(gas condensate)油田。兩個天然氣和凝析氣油田的總儲量為556億立方米的天然氣和超過2,500百萬噸(million tons)凝析油。評估可採儲量的氣體為360億立方米和超過1,500百萬噸凝析油。

PVN計劃把重點放在五個關鍵領域包括石油勘探、開採和煉油、天然氣和電力等行業、以及高品質的石油服務。2014年6月PVN已申請美國-越南商業服務，獲得包括越南市場的石油和天然氣設備最先進的技術，提高產量、增加油氣採收率、保護環境和自然資源。越南的活動範圍覆蓋離岸約一百萬平方公里，包括六個大型三級盆地包括宋泓

Oil reserves and production

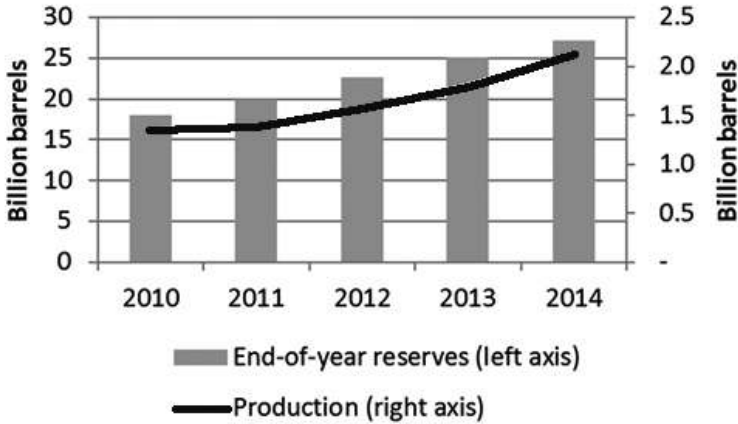


圖11 越南石油輸出占其國內生產總值(GDP)之百分比

(Song Hong)、富慶(Phu Khanh)、九龍江(Cuu Long)、南刀生(Nam Con Son)、馬來壽楚(Malay-Tho Chu)以及Tu Chinh-Vung May。其中，九龍江(Cuu Long)和南刀生(Nam Con Son)最具油氣潛力。迄今為止，大約有100含油氣具開發潛力分布於50個油氣井，估計蘊藏量天然氣約6.43億噸及原油680 billion cubic meters (bcum)或(23 trillion cubic feet - Tcf)儲量。

石油和天然氣被視為越南政府對國家經濟增長和能源安全的最重要行業發展。在石油和天然氣行業是越南最大的外匯收入者和引進技術、服務和設備的主要採購者。越南國家石油公司(PVN)，全國石油和天然氣集團，2014年財政收入佔全國GDP的20%，促進了國家預算的25%-30%領先其他國有經濟群體。PVN持有行業上游、中游和下游地區的壟斷地位。在2013年，PVN及其關聯公司生產1671萬噸(million tons)原油和9.75 billion cubic meters天然氣，發電的收入組合美金\$ 36 billion。2014年PVN計劃生產1683萬噸原油，9.8十億立方米天然氣與約美金\$ 32 billion總收入。靠在南海上採集石油和天然氣，越南一躍從貧油國變成了原油出口國，南海石油工業已成為越南第一大經濟支柱，圖 11顯示2015年原油出口更占其國內生產總值(GDP)的30%，不僅賺取了大筆外匯，也支撐著越南每年7%的GDP增長。

太平島依《聯合國國際海洋法公約》(UNCLOS)中規範，可主張專屬經濟海域，也就是可主張陸地向外延伸200浬海中的生物資源(漁業)，或主張海洋底土中的非生物資源(也就是石油天然氣)皆專屬於我國可開發的話，我國未來與大陸或美國等其他國家尋求共同開發及共享其資源之機會將大增，降低我國能源進口依賴度之機會亦可成真。

(二)提高再生能源發電量

我國2009年7月8日公布施行「再生能源發展條例」，並於2015年已修正擴大至17,250MW。表1為我國擴大各類型再生能源推廣目標-裝置容量，主要係擴大太陽光電及離岸風力，其中太陽光電部分，考量其發電特性符合電網負載特性且近年發電成本大幅下降，並可帶動國內產業發展，因此擴大太陽光電設置以每年500MW為目標，至2030年推廣目標將由原6,200MW提高至8,700MW。由於每1MW的裝置容量，需要1.5平方公里的土地，太陽能成長目標8,700MW，總共需要13,050平方公里的土地。土地從哪裡來及如何確保低廉且穩定的基本負荷，將是未來執行之困境。

表1 我國擴大各類型再生能源推廣目標-裝置容量(單位: MW)

能源別	2015年	2020年	2025年	2030年
陸域風力	737	1,200	1,200	1,200
離岸風力	0	520	2,000	4,000
水力	2,089	2,100	2,150	2,200
太陽光電	1,115	3,615	6,200	8,700
地熱能	0	100	150	200
生質能	741	768	813	950
合計	4,682	8,303	12,513	17,250

註1：2015年8月31日修正

另離岸風力部分，調查我國海域氣象特性、水深地形、海底斷層等自然環境，避開應予保護、禁止或限制、規劃或開發中等區域，並考量海域利用情形及區塊劃設完整性，配合國內相關產業發展進程及趨勢，審慎劃設具開發潛力之區塊場址，表1將2030年離岸風電目標由3,000MW提高至4,000MW。由於海底電纜遇到民眾抗爭，造成澎湖島的低碳島風電項目計劃延期，減少每年可發電116.251億千瓦。我國雖有海洋開發之潛能，但欠缺相關之海事工程施工團隊，如何確保低廉且穩定的離岸風電，將是未來執行之困境。

表2為2016年新政府上任滿月後，經濟部於6月22日赴立院報告再生能源設置目標，太陽光電裝置容量確定以20GW為目標、風力發電則以離岸風力為主力，且裝置目標自2GW提升至3GW。土地從哪裡來、如何建立本土之海事工程施工團隊及確保低廉且穩定的基本電價，將是未來執行之困境。

表2 2025年各類型再生能源目標裝置容量(單位：MW)

能源別	2015年	2016年	2020年	2025年
太陽光電	842	1,342	8,776	20,000
陸域風力	647	747	1,200	1,200
離岸風力	0	8	520	3,000
地熱能	0	1	150	200
生質能	741	742	768	813
水力	2,089	2,089	2,100	2,150

資料來源：經濟部能源局，Energy Trend整理

臺灣地處太平洋火環帶，溫泉與地表具地熱徵兆區有百餘處，代表地下的熱源蘊藏充沛，具備了地熱資源開發上的優勢，同時地熱發電可為基載發電，更增加其發展之潛能。本文將針對地熱發電與垃圾及生質能發電作較詳細之探討。

1. 積極開發地熱發電

義大利於1904年發展世界第一座地熱發電廠，隨之美國於1922年建立了世界第二座地熱電廠。根據國際地熱協會(International Geothermal Association)統計截至2013年為止，全世界已有25個國家設有地熱發電廠，總裝置容量合計約11,772.0MW(如表3所示)。圖12為2015年世界各國地熱發電裝置容量比較(MW)，其中發電量前5大之國家為美國、菲律賓、印尼、墨西哥、紐西蘭。

美國地熱電廠大多數設立於阿拉斯加、加利福尼亞、佛羅里達、夏威夷、愛達荷、內華達、新墨西哥、奧勒岡、猶他和懷俄明等州。表4為美國各地區發電容量配置。其總發電容量可達3GW，但實際運作的只有2GW，其中有將近12%是在2005年新設立(將近500MW)。另外有2.4GW的地熱電廠正在建造或進一步評估階段，美國全部地熱發電約有17GWh 相當於整個國家再生能源生產的4%。從2005年開始，有許多地熱電廠就已經在加利福尼亞州運轉，如：10 MW(Gould)，10 MW(Heber South)，

49 MW(North Brawley)還有使用雙循環機組的Heber地區(Imperial Valley)，以及使用乾蒸氣機組的The Geysers地熱電廠。

表3 世界各國地熱發展概況 (MWe)

國別	1990	1995	2000	2005	2010	2013
阿根廷	0.7	0.6	0	0	0	0
澳大利亞	0	0.2	0.2	0.2	1.1	1.0
奧地利	0	0	0	1.0	1.4	1.4
中國	19.2	28.8	29.2	28.0	24.0	27.0
哥斯大黎加	0	55.0	142.5	163.0	166.0	207.1
薩爾瓦多	95.0	105.0	161.0	151.0	204.0	204.4
衣索比亞	0	0	8.5	7.0	7.3	8.0
法國(瓜德羅普島和亞爾薩斯)	4.2	4.2	4.2	15.0	16.0	17.0
德國	0	0	0	0.2	6.6	11.9
瓜地馬拉	0	33.4	33.4	33.0	52.0	48.0
冰島	44.6	50.0	170.0	322.0	575.0	644.4
印度尼西亞	144.8	309.8	589.5	797.0	1197.0	1341.0
義大利	545.0	631.7	785.0	790.0	843.0	875.5
日本	214.6	413.7	546.9	535.0	536.0	537.0
肯亞	45.0	45.0	45.0	127.0	167.0	248.5
墨西哥	700.0	753.0	755.0	953.0	958.0	1017.4
紐西蘭	283.2	286.0	437.0	435.0	628.0	842.6
尼加拉瓜	35.0	70.0	70.0	77.0	88.0	149.5
巴布亞紐幾內亞	0	0	0	39.0	56.0	56.0
菲律賓	891.0	1277.0	1909.0	1931.0	1904.0	1848.0
葡萄牙(亞速群島)	3.0	5.0	16.0	16.0	29.0	28.5
俄羅斯	11.0	11.0	23.0	79.0	82.0	81.9
泰國	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
土耳其	20.6	20.4	20.4	20.4	82.0	166.6
美國	2774.6	2816.7	2228.0	2544.0	3093.0	3389.0
合計	5831.8	6866.8	7974.1	9064.1	10716.7	11772.0

資料來源：International Geothermal Association, 2014

美國地熱電廠最主要以Binary系統最為普遍，其次為Double flash。最大地熱生產區加州的The Geysers電廠則最主要以Dry steam為主。而針對Binary系統而言最主要的製造商則為ORMAT和UTC Turboden。

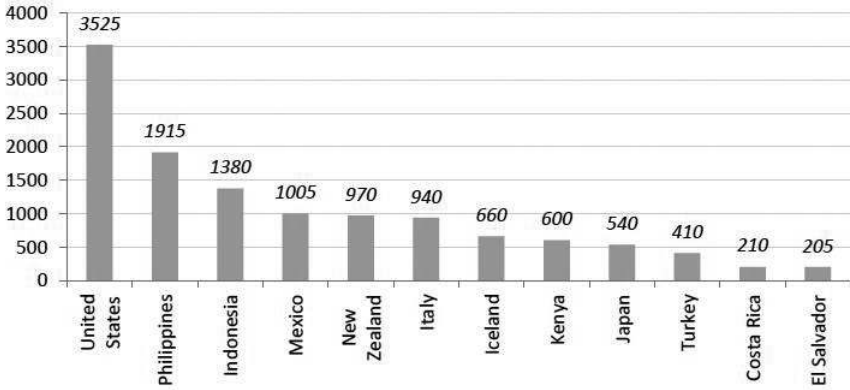


圖12 2015年世界各國地熱發電裝置容量比較 (MW)

表4 2013年美國地熱各州裝置容量

地區	裝置容量 (MW)	佔全美地熱比率
加利福尼亞	2732.2	80.7%
內華達	517.5	15.3%
猶他	48.1	1.4%
夏威夷	38.0	1.1%
愛達荷	15.8	0.5%
阿拉斯加	0.7	<0.1%
奧勒岡	33.3	1.0%
新墨西哥	4.0	0.1%
懷俄明	0.3	<0.1%
合計	3389.9	100%

資料來源：International Geothermal Association, 2014

菲律賓會成為世界第二大地熱發電國其最主要因素為菲律賓地處於環太平洋地震帶地底下熱流體儲存豐富，經評估約有4339MW之地熱含量。另一方面，菲律賓政府也極力支持菲律賓國內之地熱發展，相繼通過許多法律和政策去輔助地熱產業的發展，諸如：RA5092地熱法、PD1442菲律賓地熱服務契約法、RA9136電力工業改革法案、RA9513可再生能源法…等等。其外也跟紐西蘭、日本、義大利等國家簽訂雙邊協議以持續地熱探勘和發展，而在學術方面則和冰島、美國、日本等國家進行地熱工程師的短期培訓任務以及碩博士生之培育。菲律賓地熱電廠最主要以flash和Binary為主。而其Binary系統最主要製造商亦為ORMAT，而flash系統則為Mitsubishi、Fuji和Toshiba。另外值得一提的是菲律賓有近半地熱電廠為美商Chevron所擁有。

印尼位於太平洋火山環上，擁有超過28 GWe之龐大地熱潛能，並散佈於國內各處，但至2014年其總設置容量僅1,341MW(<5%)；據此，為加速地熱發展，印尼政府訂定國家能源政策第5/2006命令，設定於2025年裝置發電量達9,500MW之目標。歸納印尼開發地熱資源效益，因其所需土地面積小、低二氧化碳排放、高潛能、低開發使用率，因此可開發潛力大且對環境造成衝擊小。政府可藉由承擔探勘風險或提升電與蒸氣價格兩項措施達成加速印尼地熱發展之目的，目前當地政府促進地熱發展並達到地熱活動永續發展之突破性地熱法規包括：(1)印尼永續地熱法；(2)設立具地熱相關活動全部義務與責任之獨立政府機構並統合各部門及技術領域；(3)提升經濟誘因，對初步調查與探勘活動提供投資貸款；(4)建置合理空間規畫，依各區域特性規畫空間利用模式，包含保護區域與其他功能區域。印尼地熱電廠最主要以Flash和Dry steam為主。而其主要系統設備商則為Mitsubishi、Fuji。印尼部分電廠狀況與菲律賓相似，皆會搭配國外有技術之廠商來發展地熱資源。

臺灣地處太平洋火環帶，溫泉與地表具地熱徵兆區有百餘處，代表地下的熱源蘊藏充沛，具備了地熱資源開發上的先天優勢。尤其是國內自產能源極為有限，能源消耗幾乎仰賴進口，開發地熱資源擴大自主能源比例，意義尤為重大。經濟部能源局《新能源政策》再生能源推廣目標，於2006年補助宜蘭縣政府進行清水地熱補助探勘並鑽鑿1口探勘井，2007年至2009年委託工研院完成3口井之修井作業，2011年新鑽鑿1口地熱井。2012年5月，宜蘭縣政府以「宜蘭縣清水地熱發電整建、營運、移轉案」(ROT)案方式發包給民間廠商，地熱發電廠由四座250瓩地熱機組所組成的裝置容量1MW示範廠。合作對象為噶瑪蘭清水地熱發電公司與工研院。工研院研發地熱發電機組為我國首座國產雙循環地熱發電示範機組，裝置容量達50瓩。

根據台灣地熱資源初步評估結果，全台灣地區有近百處顯示具溫泉地熱徵兆，但較具開發地熱潛能者有26處，依據儲集層體積排序前5名分別是大屯山區、清水、金侖、廬山、及土場，其儲集層平均溫度分別是245℃、200℃、160℃、180℃、及170℃。其中大屯山區約具50萬瓩，惟因係屬火山性地熱泉，其酸性成分太高或蒸氣含量太少，如能克

服地熱酸性成分高與蒸氣含量少兩項科技發展上之瓶頸，則地熱發電在台灣地區將會有較好的發展前景。

菲律賓及印尼會成為世界第二及第三大地熱發電國，其最主要因素均處於環太平洋地震帶地底下熱流體儲存豐富，並有完善的地熱法規與搭配國外具先進技術之廠商共同開發地熱資源。台灣雖處於環太平洋地震帶，但欠缺完善的地熱法規與引進國外具先進技術之廠商共同開發地熱資源之決心，至今依然大幅落後於菲律賓及印尼。

2. 垃圾及生質能發電

台灣土地資源有限，1990年垃圾處理方式已由「掩埋」(landfill)轉採「焚化」(Incinerator)為主，採取垃圾焚化方式主要是減少廢棄物體積及將廢棄物能量轉換成電能。同時1998年起政府大力推動資源回收政策，透過垃圾分類、廚餘分類，不只減少很多焚化爐無法處理的垃圾，也減少許多高水分的廢棄物，使燃燒時熱值提升，有效減少了垃圾量。目前垃圾發電主要來源為遍佈全台的24座焚化發電廠，設計垃圾處理容量24,650 Ton/day，圖13為2012年能源局的台灣發電量統計資料，2012年利用廢棄物發電已佔全國發電量之1.23%。目前由於台北市內湖焚化廠及新北市樹林、新店焚化廠已接近除役時間，再加上許多縣市開放一般事業廢棄物進入都市焚化廠焚化處理，”垃圾焚化爐轉型生質能源中心”政策或將現有的垃圾焚化爐升級，結合新科技成為能處理更多種生物質的地區性能源中心，已成為政府需妥善處理之問題。例如台北市內湖焚化廠及新北市樹林、新店焚化廠焚化爐如能升級，可將焚化爐熱能轉成電能之發電效率從15%大幅提升至25%以上，預估廢棄物發電未來可佔全國發電量之2.0%。

生質能發電是利用廢棄農作物、樹木或動物排泄物所生成的沼氣來發電，主要是以內燃機的方式帶動發電機。台灣亦有養豬場將豬糞所產生的沼氣回收，利用瓦斯引擎進行發電。另外，也有人曾考慮於地廣人稀的地方，大量種植生長快速的樹木，燃燒木材來發電，砍伐後立即重新植樹，如此周而復始。而二氧化碳排放後，即可由樹木吸收，對溫室效應無任何負面的影響。2012年能源局的台灣發電量統計資料也顯示火力與核能合計共佔了94.5%的發電量，而生質能發電在2012年僅提供

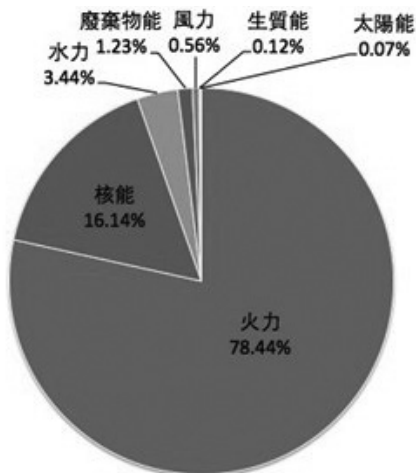


圖13 2012年能源局的台灣發電量統計資料

了0.12%發電量。生質物種類包括生質垃圾、稻草稻殼、雜用作物剩餘資材、果樹剪定枝、漂流木等。

此外，國際市場生質材料之交易已逐年成熟，並成為除燃氣、石油、燃煤外之主要國際商品市場。燃燒生質材料發電較成功之案例為燃煤電廠採燃料多元化-結合生質燃料減碳，丹麥的Aved re發電廠2號超臨界發電機組包括兩組50MW之氣渦輪機組(2 x 50MW gas turbine)，可使用100% 粉煤燃燒或100% 重油(HFO)，亦可使用生質燃料鍋爐提供70% 生質燃料(Straw or wood pellets)熱能替代原來粉煤或重油燃料(圖14)，可增加電力輸出 150MWe並提升機組整體效率至51%。此外，圖15為生質物磨碎機可將生質物(wood pellets)磨成粉狀物，在磨碎機之空氣與木質粉狀物混合比(Mill air/wood ratio)為2 kg/kg，直接從多功能燃燒器噴進燃燒爐中。

3. 尋求核能發電之共識

「非核家園」是全民共同的目標，但立即廢核衝擊大，民生、經濟、產業需時間調適，執政黨(民進黨)規劃2025年要創造500億度再生能源(綠電)的目標，並希望2025年達成非核家園。如果沒有先做好詳細評估與準備工作，就貿然停止核能發電，將有缺電風險，並因電價上漲帶動物價上漲、增加交通運輸與產業成本，也會對民眾日常生活、經濟發展、投資意願及就業機會等造成重大影響。

2016年3月台灣永續能源研究基金會委託全國意向顧問股份有限公司調查台灣民眾對於氣候變遷與能源的認知度、民眾對政府政策之看法及民眾自身及政府的因應作為。調查期間為2016年3月1日至3月4日，調查方法為分層隨機抽樣法，共完成樣本數1,102份(全國意向顧問股份有限公司，2016)。其中有兩題有關能源與核能之問卷調查，其問題及個人解讀如下：

問題(1) 請問您支不支持未來我國能源總使用量維持零成長？

問卷調查結果為66.0%的民眾支持未來能源總使用量零成長，但55~64歲民眾支持比例較高(70.6%)及教育程度國(初)中的民眾比例較高(69.0%)。顯然大多數民眾認知氣候變遷與能源之折衝在於未來能源總使用量零成長，但政府面臨的問題是在經濟成長與能源總使用量零成長間之脫鉤問題。

問題(2) 在確保核能安全規範下，請問您支不支持核能發電？(歷屆問項)

問卷調查結果顯示支持的比率由2014年的39.6%上升至42.2%，上升2.6個百分點。而不支持的比率仍然過半，由2014年的53.7%下降至50.6%，下降3.1個百分點。在能確保核安的前提下，民眾支持核能發電的比例有所上升，而不支持的比例下降。

表5 我國電力最適能源配比之探討

燃料	燃煤	核電	燃氫	燃油	抽蓄	再生	汽電
情境	%	%	%	%	水利	能源	共生
一：核四不運轉、既有核電廠不延役	39.90	2.80	41.30	2.80	1.10	7.50	4.70
二：核四運轉、既有核電廠不延役	39.20	10.40	36.70	0.60	1.10	7.30	4.60
三：核四不運轉、既有核電廠延役	39.20	14.70	32.40	0.60	1.10	7.30	4.60
四：核四運轉、既有核電廠延役	39.20	22.40	24.70	0.60	1.10	7.30	4.60

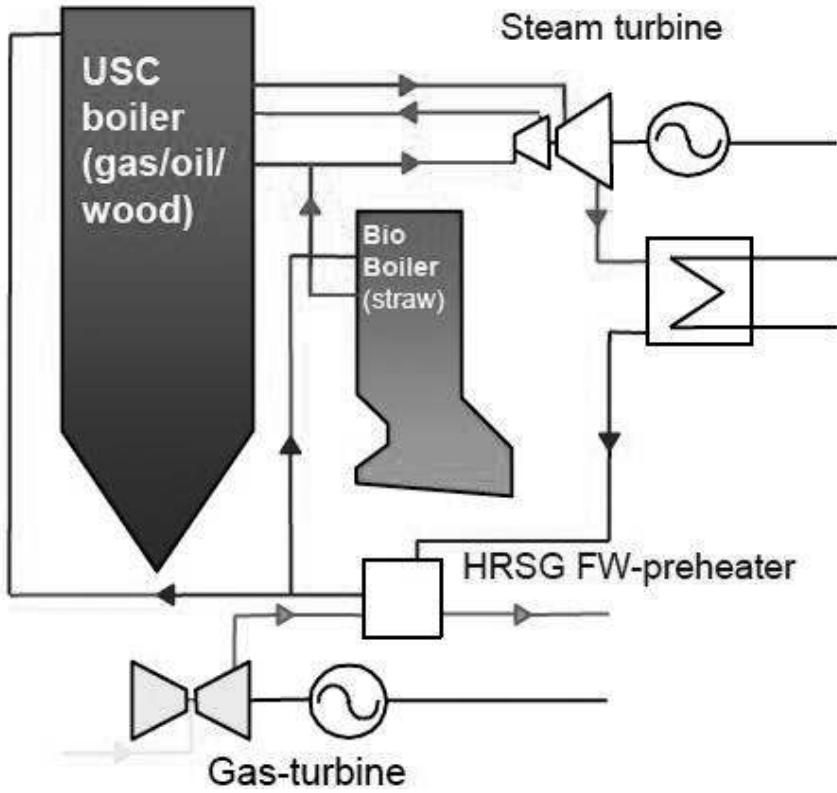


圖14 生質燃料鍋爐可提供超超臨界粉煤鍋爐70%熱能



圖15 生質物磨碎機

日本2011年1月核能發電從30%下降至2013年之1.3%，使用化石燃料發電則上升到日本總發電量的90%，新能源僅佔0.3%。日本經驗顯示昂貴的進口化石燃料和日元的價值大幅下降，增加了日本國內的電力成本價格，促成了持續數十億美元的每月貿易赤字。表5為中技社2015年在“我國電力最適能源配比之探討”提出了四種情境，很明顯是以碳排放較低之燃氣發電來替代核能發電，再生能源發電則固定於7.5%。其中情境一：核四不運轉、既有核電廠不延役作為降低非核家園對經濟成長之衝擊較被視為較符合新政府過渡期間(2016-2025)之可行方案。但由於政府未能核准重啟核一廠一號機、核二廠二號機等兩部大型機組，反而要求台電向國外租用臨時的發電設備，外界不免質疑，將徒增發電成本。再加上台化公司彰化廠之M16、M17及M22燃煤鍋爐汽電共生程序操作許可證，於105年9月28日屆期，該廠於105年6月27日提出展延申請，卻始終拿不到彰化縣政府的續操作許，將減少支援台電至少10萬瓩電力，可能造生缺電的「骨牌效應」。政府還需再投入多少經費？民眾還需等多久時間？再生能源及燃氣發電才可替代既有核電廠？台灣為一獨立電網，不能像德國或蘇格蘭大量補貼再生能源，尚無法承擔基載發電任務，過渡期間增設LNG接收站進而提升燃氣及再生能源發電比例乃屬必要選擇，但須考量經費籌措及民生、經濟、產業時間之調適，使衝擊降至最低。

4. 燃煤低碳電力發展

近年國際化石燃料成本大幅下降，台電公司按電價公式之104年度盈餘為606.77億元。比較台電公司104年元月及105年元月之每度發電成本（臺灣電力公司，2015C），其中基載發電核能及燃煤機組每度發電單價分別從為104年之1.05元/度及1.25元/度調整為105年之1.20元/度及1.04元/度，燃氣機組每度發電單價(元/度)由104年之3.25元/度下降至105年之2.40元/度，而重油機組每度發電單價(元/度)由104年之5.99元/度下降至105年之4.27元/度。依2016年9月份國際煤市資訊\國際煤市半月報顯示(圖16)，煤價已由民國97年中旬之每噸190美元高價降至目前每噸75.97美元，由於預估未來煤價之走勢將隨美國頁岩氣之大量開發而走低，臺灣未來基載電力之開發，顯然必須朝向燃煤及燃氣發電



圖16 2016年9月份亞太地區澳洲煤現貨(NEX)離岸(FOB)價格

作一規劃。燃氣發電須配合增建北部天然氣接收站與輸氣管線約需10年，而從電力需求面來看，節能減碳及產業結構調整等手段，涉及民眾生活習慣的改變、產業轉型及環境生態影響的調整，也需要較長的時間調適。然而隨著地方政府《禁燒生煤自治條例》的立法、區域空污總量管制等訴求，以及用過核燃料的處置困境引發核電廠提早除役等問題，在核四停建及替代能源尚無法承擔基載發電任務的過渡期間，燃煤及燃氣發電仍屬必要選擇，以讓民生、經濟、產業有時間調適，使衝擊降至最低。

針對新或舊燃煤機組，從上述之溫室氣體(CO2)減量原則，提出下列三種溫室氣體減量方向：(1)發電高效率化；(2)供電區域化；(3)低碳永續化。

1. 發電高效率化-超臨界機組減碳 (Lewis, 2014)

煤產生的污染要比石油或者天然氣嚴重，尤其是算上二氧化碳溫室氣體的話，雖然台灣地區已無自產煤礦，煤之輸儲依然存在環境汙染與溫室氣體二氧化碳排放的問題，然而隨著地方政府《禁燒生煤自

治條例》的立法、區域空污總量管制等訴求，台中燃煤發電廠已被要求降載以降低PM2.5之排放量。根據熱力學熱機循環分析結果顯示，在超臨界機組之蒸汽參數範圍下：主蒸汽壓力每提高1Mpa，機組的熱效率可提高0.13%~0.15%；主蒸汽溫度每提高10℃，機組的熱效率可提高0.25%~0.30%；再熱蒸汽溫度每提高10℃，熱效率可提高0.15%~0.20%。超臨界粉煤發電(Supercritical, SC)：246~250bar，600/610℃，發電廠效率已達43~44%(LHV)。超臨界粉煤發電(Ultra-supercritical, USC)：280~300bar，600/620℃，最高效率可達50%(LHV)。目前台電公司林口電廠(3座800Mw)及大林電廠(2座800Mw)更新機組，均使用高效率之超臨界蒸氣渦輪機組，發電效率大於44%，較現行發電效率33%高出許多。圖17為超臨界粉煤發示意圖，世界上能量效率最高的發電廠是丹麥的Aved re發電廠。

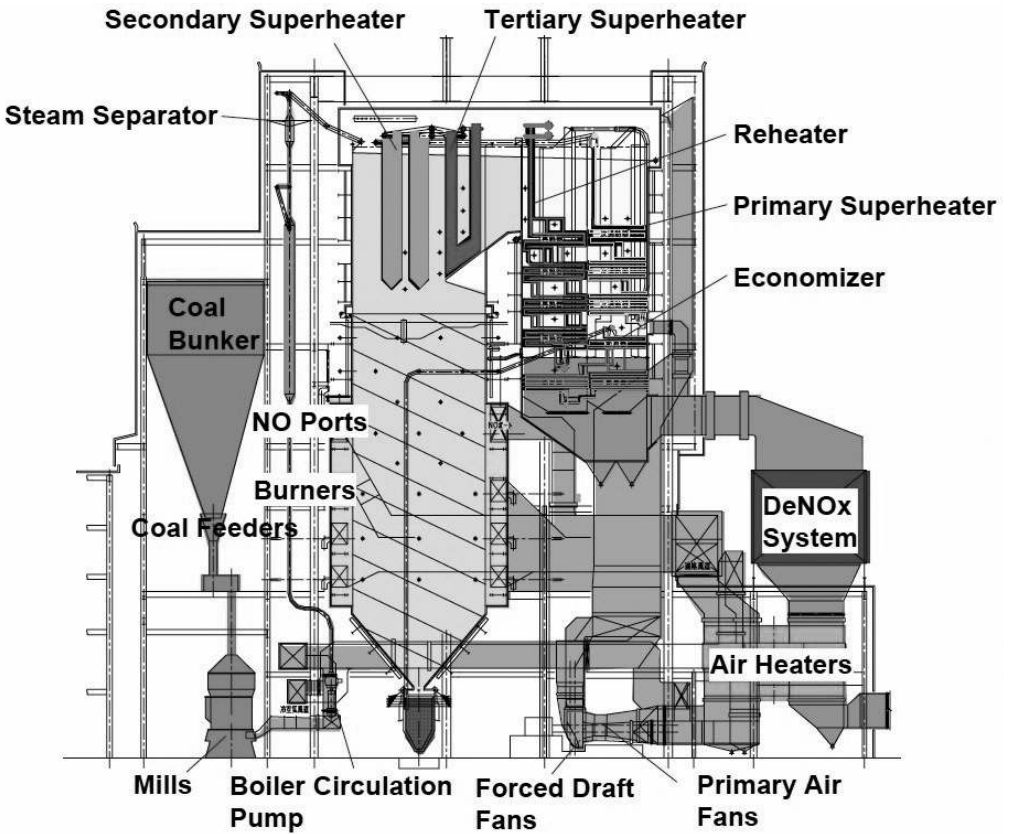


圖17 超臨界粉煤發電(Ultra-supercritical, USC)

2. 供電區域化-區域熱電整合 (The Aved rev rket CHP plant , 2009 ; Brensen , 2011 ; 馬小康 , 2011 ; 行政院環境保護署 , 2011)

面臨全球能源供應安全、氣候變遷的挑戰下，行政院環保署目前正在推動低碳永續家園，希望利用創新的研發技術並包括整合式的能源管理模式：結合水資源管理調適、建築法規、新電力網、綠色交通及清潔生產系統等，盼能達到「低碳永續城市」目標。有效能源之配置包括使用分散式區域冷熱電能整合，係由中央工廠集中生產及經網路供應周邊所需之冷能、熱能和電能，主要供應的形式有空調用冰水、製程用蒸汽、生活用熱水和電力(圖18)。目前，台灣地區區域供熱的形式以汽電共生系統供應工業製程所需的蒸汽為主，汽電共生又稱熱電聯產，是指用電廠同時發電和廢熱供熱。儘管從熱力循環中抽熱會導致電廠熱效率有所降低，但是如果專門使用一部分燃料燃燒來供熱，總效率反而更低，所以汽電共生設備如果設計得當有其利基點存在。熱電聯產技術在丹麥等斯堪的納維亞國家以及德國已被廣泛使用。在2001~2010年間，台灣地區汽電共生系統的發電量占總發電量16.43~19.51%，與國外比較算是在中等程度。

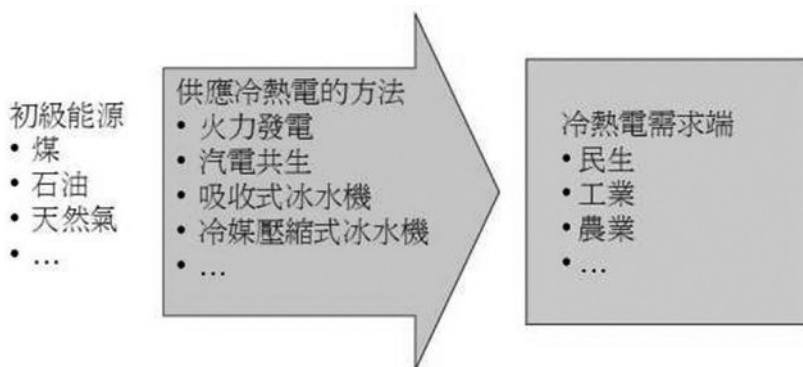


圖18 冷熱電需求端與供應端的連結架構

與先進國家相較，國內缺乏如日本東京都及丹麥哥本哈根等都會區域冷熱電能之整合。日本東京都日本東京(北緯35°)臨海新都心設置3座能源工廠，目前供熱容量152.8 MW，供冷容量144.9 MW，冷熱網路管線長度合計約32 km，服務樓板面積2.2百萬平方米。製冷設備有離心式和吸收式冰水機，蒸汽由鍋爐及垃圾焚化廠提供，垃圾焚化廠供應

的熱能約占全年耗能的17.4%。丹麥哥本哈根市區分為八個潛力供冷地區(圖19)，總冷能需求為150MW。我曾參訪之Congens Nytorvn計畫供應約5平方公里之地區，供冷量約為20MW，其DH及DC管線位於地下40M，需用吸收式冷凍系統(2×3200KW及2×1600KW)壓縮機及海水冷卻等系統，其餘熱來源為附近焚化廠及電廠。

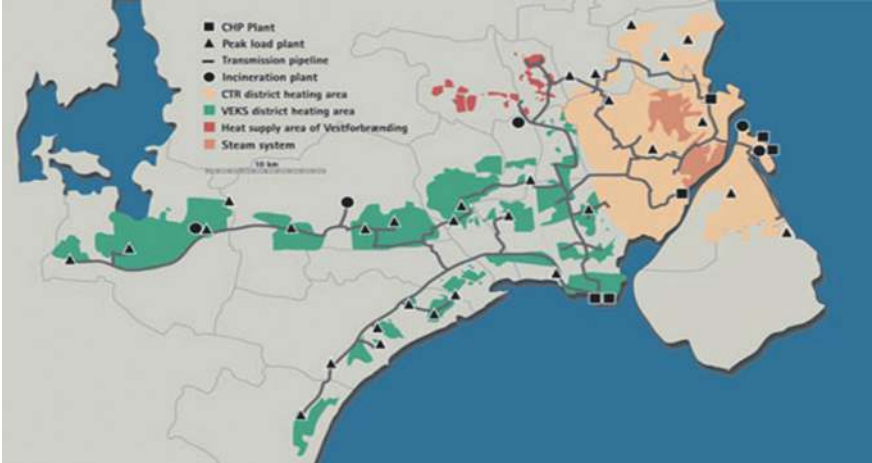


圖19 丹麥哥本哈根都會區域冷熱電能之整合

3. 低碳永續化-結合炭捕捉及封存(CCS)

圖20為國際能源總署(IEA)2013年估計之未來減碳方式與效益圖(國際能源總署, 2013)。國際能源總署指出欲達成2050年全球溫室氣體排放量降為2009年一半之目標, CCS技術所貢獻之減量效果將占14%。全球總共有21個大型碳捕存整合計畫(large-scale integrated CCS projects, LSIPs)正在建造及運轉中, 每年的二氧化碳總捕集量近40百萬公噸。北美預計將有兩個大型CCS專案分別於2014年開始運轉, 這兩項專案是電力業所開發的第一個CCS大型專案。另一個重大發展是位於阿拉伯聯合大公國鋼鐵業的大型CCS專案已經進展到建造階段。中國目前有12個CCS的試驗計畫正在進行, 在數量上僅次於美國(20個)。歐洲目前規劃的專案, 進度最為領先的是英國的White Rose CCS專案、Peterhead Gas CCS專案以及荷蘭的ROAD專案。

圖21為地質封存的方式(US EPA, 2014; Wikipedia), 其中包括(1)Depleted oil and gas reservoirs; (2)Use of CO₂ in enhanced

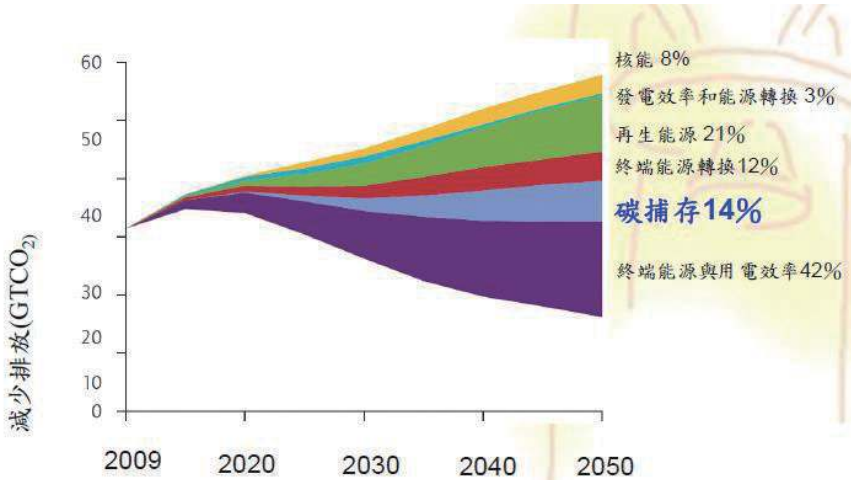


圖20 國際能源總署2013年估計之未來減碳方式與效益圖

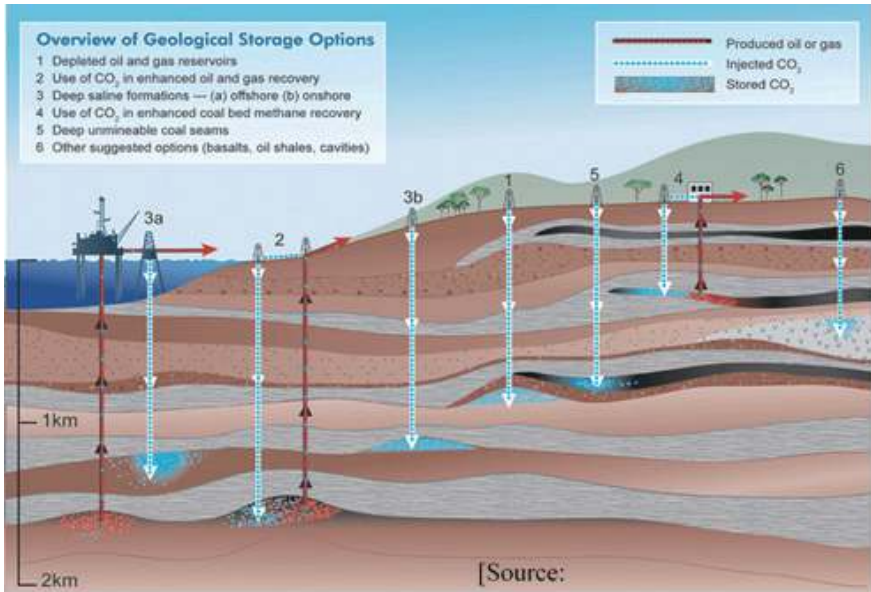


圖21 地質封存的方式

oil and gas recovery ; (3)Deep saline formation ; (4)Use of CO₂ in enhanced coal bed methane recovery ; (5)Deep unmineable coal seams ; (6) 其他方法。目前澳洲維多利亞省境內推展2個重要碳封存計畫，包括澳洲第一個CO₂地下封存示範計畫-Otway示範計畫及CarbonNet Project（維多利亞省政府，2010、2014）。Otway示範計畫是利用離岸廢棄之探勘井或生產井作為封存之方式。而CarbonNet計畫經費由澳洲

政府及維多利亞省政府所資助，該計畫處於可行性研究階段，封存目標為每年1~5百萬噸，可封存量約2,000萬噸~1億噸，CO₂來源為該區工業廢氣及燃煤電廠。

對於我國而言，若欲達成國家減量目標，探詢CCS技術與實務上應用之發展進程，以及了解相關環境管理架構，乃是我國當前的重要工作。目前經濟部在推動之實施策略為優先處理CO₂排放集中的大排放源，首要實施對象為火力電廠，次要實施對象為石化與鋼鐵業，並於2025年逐步達成大規模CCS商轉。實施手段包括捕集及地質封存，地質封存可能地點包括(1)西部陸域油氣封存構造:2,800 Mtons及(2)濱海與離岸深部鹽水層:目前初估西北部:6,000~43,600 Mtons及西南部:3,000~24,400 Mtons，合計9,000~68,000 Mtons。此外，科技部基礎研究發展第二期能源國家型科技計畫包括11件捕集及再利用技術與封存技術專案。

我國的二氧化碳封存潛能評估，初步估計西部至沿海一帶封存潛能可達到459億公噸。此外，陸域的14處油氣構造若改為二氧化碳地質封存之用，估計約有28億公噸的儲存量，若把其上方的鹽水層也納入估算，則封存潛能更大（歐陽湘，2015）。為了2050年之前使全球暖化控制在攝氏2度以內，二氧化碳捕獲封存與再利用技術可望在全球溫室氣體減量上扮演重要的角色。

四、結論與建議

由於全球暖化的衝擊，溫室氣體的排放與減量已成為當今全世界亟需共同面對的問題。而我國能源98%依賴進口，如果能源供應不足或中斷，就會形成國家安全問題，在預估煤價之走勢將隨美國頁岩氣之大量開發而走低及面對溫室氣體的減量下，本文從巴黎氣候協議國家自定預期貢獻(INDC's)、溫室氣體(CO₂)減量原則、國內電力能源配比現況及檢討德國、日本與我國電力能源配比，提出(1)積極開發海域能源以降低能源進口依存度；(2)提高再生能源發電量；(3)尋求核能發電之共

識；(4) 燃煤低碳電力等四項溫室氣體減量方向，以達到溫室氣體的減量與經濟永續發展目標。

參考文獻

1. P. Danesi, Utilization of USC Multi-Fuel Boiler for Enhancement of Energy Efficiency, International Forum on Establishment of Combined Cooling, Heating and Power System toward Low Carbon Community(低碳家園冷熱電供應系統國際論壇), Taipei, May 2011.
2. 馬小康，“燃煤發電低碳化”，科學發展，510期，2015/6。
3. RAP: Report on the German power system. Study commissioned by Agora Energiewende, 2015.
4. Electricity Review Japan, The Federation of Electric Power Companies of Japan 2014.
5. 2014年ENERGY基本計畫，日本經濟產業省資源能源廳，2014/4。
http://www.enecho.meti.go.jp/topics/kihonkeikaku/new_index.htm.
6. 水野哲，“日本的第四次能源基本計畫”，中國綜合研究交流中心，2014/6。
7. 能源統計手冊，經濟部能源局，2014。
8. 「能源政策推動與面臨問題」，總統府財經月報，2016/4。
9. 台灣電力公司a，電力裝置容量及發電量佔比，2015年。
10. 台灣電力公司b，104年長期電源開發方案(10405案)，2015年。
11. 台灣電力公司c，第二次董事會，2015年。
12. 全國意向顧問股份有限公司，“台灣民眾對於氣候變遷與能源的認知度、民眾對政府政策之看法及民眾自身及政府的因應作為”，台灣永續能源研究基金會，2016年3月。
13. 中技社，我國電力最適能源配比之探討，2015年6月。
14. 國際煤市資訊\國際煤市半月報，2016年9月。

15. Michael Lewis, “Can “Ultrasupercritical” Technology Save Coal Power?”, IMT, 2014.
16. E. Bernsen, Establishment of District Heating and Cooling System: The Danish Experience, International Forum on Establishment of Combined Cooling, Heating and Power System toward Low Carbon Community(低碳家園冷熱電供應系統國際論壇), Taipei, May 2011.
17. H. K. Ma(馬小康), Strategy on Promotion of Multi-Fuel Boiler in Taiwan, International Forum on Establishment of Combined Cooling, Heating and Power System toward Low Carbon Community(低碳家園冷熱電供應系統國際論壇), Taipei, May 2011.
18. The Avedøreværket CHP plant, Dong Energy Copenhagen District Heating System, Application for the ‘Global District Energy Climate Award’, September 2009.
19. 行政院環境保護署，建置電廠區域熱冷供應系統策略規劃，2011。
20. 國際能源總署2013年CCS技術藍圖報告（Technology Roadmap Carbon capture and storage, 2013,IEA）
21. “Carbon Dioxide Capture and Sequestration”, US EPA, 2014.
22. “Carbon sequestration”, Wikipedia, the free encyclopedia.
23. 維多利亞省政府，CarbonNet示範計畫，2014。
24. 維多利亞省政府，“Defining CCS Ready: An Approach to An International Definition”, 23 February 2010, Prepared by: ICF International.
25. 歐陽湘，“二氧化碳地質封存”，科學發展，510期，2015年6月。