

合理、實際的做法——

核能，不能輕言放棄的選擇

以目前的技術，僅依賴綠色能源是不切實際的，事實上核能發電的低成本、低二氧化碳排放量，證明其具有高度經濟效益，同時滿足環保訴求。

李敏

人類文明的持續發展需要能源，根據國際能源署的資料顯示，2005年人類使用的能源有80%來自化石能源，而全球77%的能源被少數28%的人口耗用。2007年世界人口為65億人，預估2050年將成長為85~100億人。人口的成長加上全人類對物質文明的追求，可以預期人類未來將耗費更多的能源，化石燃料的蘊藏量不足以支撐人類文明的發展，恐怕只是時間早晚的問題。

近年來，金磚四國——巴西、蘇俄、印度與中國的經濟大幅成長，石油需求成長率

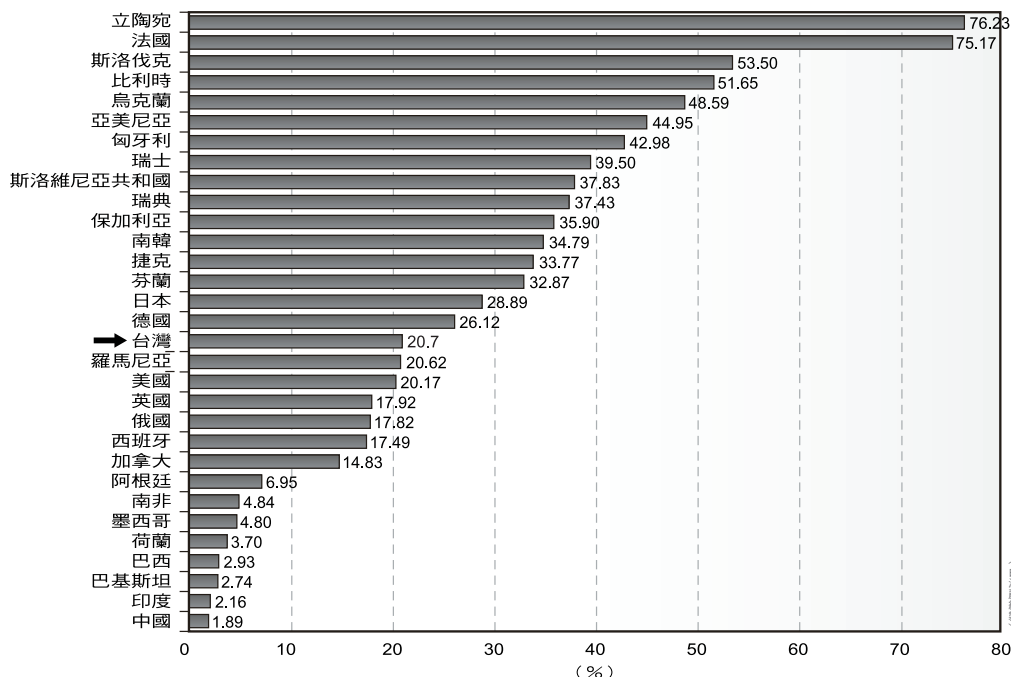
超出全球平均甚多，需求的增加造成了價格的上升，2008年時，石油價格一度逼近每桶150美元。

化石燃料的供需與價格不穩定，可能還不是化石燃料最麻煩的問題。燃燒化石燃料會產生二氧化碳，加劇地球大氣層的溫室效應。目前大氣中二氧化碳含量約為380ppm（ppm = 百萬分之一），工業革命前為100ppm，且以每年2ppm的速率增加中。有科學家預測只要超過450ppm，就會發生「毀滅性災難」，若以現在二氧化碳累積的

速度來估算，距離地球毀滅的時間只剩下35年了。

1987年聯合國世界環境與發展委員會發表《我們共同的未來》報告，將永續發展定義為：「能滿足當代需求，同時不損及後代子孫滿足其本身需求的發展」。追求永續發展是人類崇高的理想，但前提是要找到「永續能

2009年世界核能使用國家的核能發電占比



圖一：2009年歐洲國家如立陶宛及法國有近四分之三的電來自核能，而當年台灣的國內核能發電占比為20.7%。

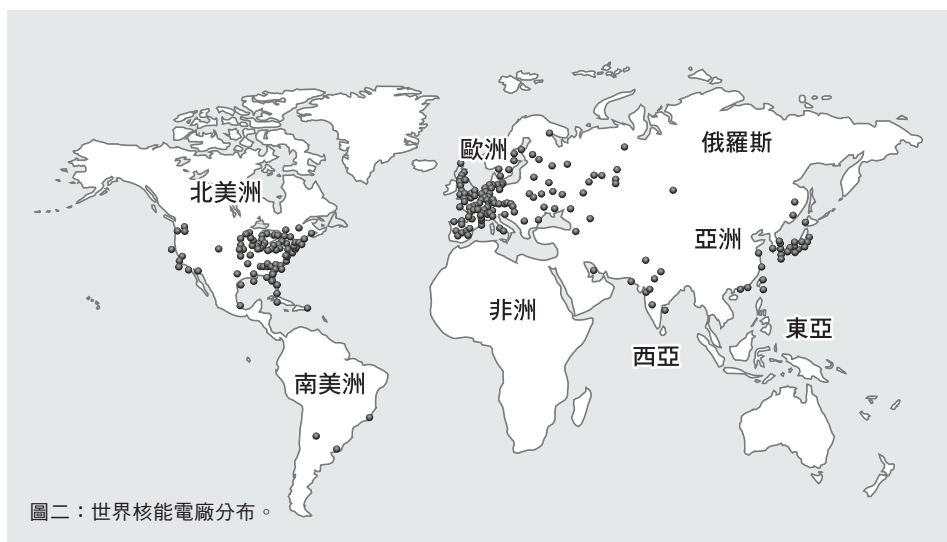
源」。有人認為利用風力、太陽能、潮汐、地熱、水力等再生能源發電，可以視為「永續能源」；但從實務面來看，所有的再生能源能量密度均偏低，且能量存在的溫度不高，故能量

之熱功轉換的效率受限於熱力學第二定律（能量不可能 100% 地由熱轉換為功，轉換比例的上限值與能量存在的溫度有關）而無法提升，故再生能源發電裝置均較為龐大，且需要大量的土地來建置。

風力、太陽能、水力等能源均與環境及氣候狀況有關，無法全年無休地提供穩定電力，因此當再生能源無法供電時，還是需要其他能源輔佐。在節能減碳的風潮中，可以確定的是各類型之再生能源發電均會在未來能源供應占有一席之地，而節約能源及提升能源使用的效率，也有助於降低能源需求的成長率，但是可能尚無法替代化石燃料，成為提供基本需求之主要能源，所以已經使用超過 50 年的核能發電，仍然會是一個無法輕言放棄的選擇。

核能發電發展現況

1954 年 6 月，世界第一座功率為 6000 瓩（千瓦）的民用核能電廠，於前蘇聯的奧布寧斯克（Obninsk）商轉；1957 年第一艘核子動力潛艇鸚鵡螺號於美國下水，同年第一座壓水式反應器的核能電廠於美國賓州的西濱堡（Shipping Port）商轉，功率為 6 萬瓩，從此人類在能源的選擇上多了個選項。



圖二：世界核能電廠分布。

（由國際原子能機構提供）

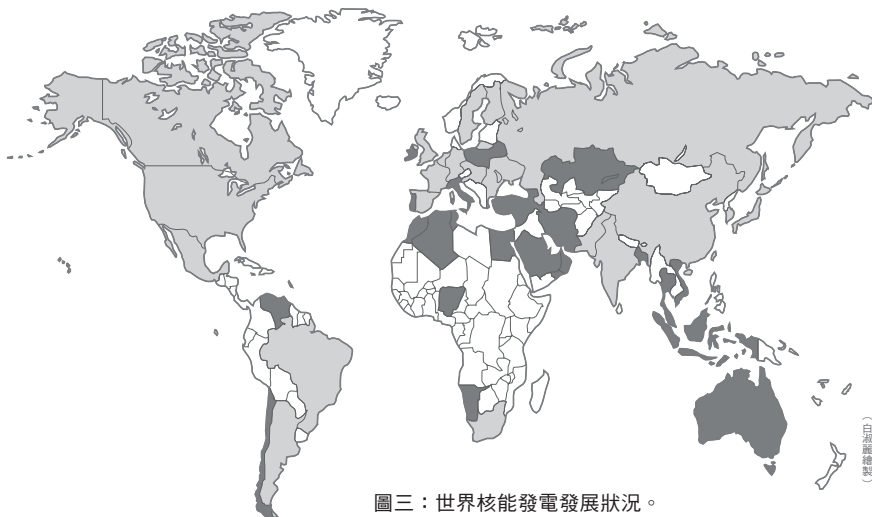
核能發電進入市場的早期成長非常快速，由 1960 年的 100 萬瓩大幅增加至 70 年代末期的 1 億瓩、80 年代末期的 3 億瓩，直至 90 年代初期核能發電的成長開始放緩，2005 年之全球裝置容量達 3.66 億瓩。自 1970 年 1 月後，由於受到第一次能源危機帶來之經濟不景氣的影響，超過三分之二以上訂購之核能電廠並未興建。

核能的使用一直是個具爭議性的議題。反核人士主要的論點包括：核能電廠可能發生毀滅性事故、對放射線的恐懼、核能的使用會加速核武的擴散、核電廠產生之放射性廢棄物的運輸與處置等。

1979 年美國的三哩島核電廠事故及 1986 年前蘇聯車諾比核電廠災變，引起核電廠的停建風潮，有些國家甚至考慮逐步淘汰核能電廠。但是能源極端依賴進口的國家，如法國、韓國與日本，仍然選擇持續大規模地發展核電。

到 2009 年為止，法國、韓國與日本的核電比例分別為 75.2%、34.8% 與 28.9%。瑞士、瑞典及烏克蘭的核電比例亦達到了 39.5%、37.4% 與 48.6%。目前美國仍是全球最大的核能使用國，共擁有 144 部機組，2009 年時其裝置容量達 1.063 億瓩，發電量

● 已使用核能發電的國家 ● 考慮使用核能發電的國家



圖三：世界核能發電發展狀況。

為 7967.5 億度，至於核能發電占比則為 20.2%。圖一所示為 2009 年世界核能使用國家的核能發電占比。

時至今日，核分裂反應發現後的 70 年，世界第一座動力核反應器運轉後的 50 年，全球有 438 座反應器在 30 個國家運轉（圖二），總裝置容量為 3.72 億瓩，2007 年的發電總量為 2 萬 6080 億度，占世界電力供應的 16%，占世界初級能源（指蘊藏於大自然，且未經任何人工轉化過程的能源，如煤礦、陽光、鈾）供應的 6%。目前有 61 座反應器在 15 個國家興建中，總裝置容量為 5822.9 萬瓩。

2004 年化石燃料價格開始攀升，2005 年 2 月 16 日京都議定書生效，使得決策者對已沉寂一段時間的核能再度產生興趣。2002 年芬蘭國會同意第五座核電廠的興建，是歐洲超過 10 年來第一座獲得興建執照的核電廠。歐亞洲許多國家，如蘇俄、日本、中國、韓國、印度、阿拉伯聯合大公國等國均規畫積極發展核能。

尚未使用核能但在考慮的有馬來西亞、越南、約旦、泰國、義大利、波蘭與土耳其等（圖三）。國際能源總署

（International Energy Agency, IEA）剛公布的《全球核能科技發展藍圖》（Nuclear Energy Technology Roadmap）報告指出，若希望於 2050 年時，把與能源使用相關的二氧化碳降低 50%，需要 12 億瓩的核能機組（相當約 900 座核四廠的機組），為目前的 3.24

倍，屆時核能將提供全球 24% 的電力。

國際能源總署認為要達到此目標，並不需要任何技術上的突破，需要面對的是資金籌措的問題。同一份報告也預估，2020 年核能機組的裝置容量為 4.75~5 億瓩。未來幾年有可能開始興建核能機組的國家包括：加拿大、捷克、立陶宛、羅馬尼亞、英國與美國。美國電力公司考慮興建的機組有 30 個，2009 年底前已經有 22 個機組向政府提出執照申請。

核能發電與能源供應安全

核能發電燃料體積小、重量輕（表一），運輸貯存方便，1 公斤鈾在反應器內釋出的能量相當於 2 萬 2000 公斤的煤、1 萬 5000 公斤的石油或 1 萬 4000 公斤的液化天然氣。2007 年台灣共消耗 625 萬公噸的液化天然氣，而全國液化天然氣儲存設施可容

表一：核能發電燃料與傳統燃料的功率密度比較。

燃料量	產生電力
1 公噸煤礦	2070 度
1 桶原油	580 度
1 立方公尺天然氣	0.1 度
1 粒核燃料丸	2044 度

（資料來源：台電公司）

容納 30 萬公噸，每天最高使用量 3 萬 5976 公噸，安全儲存量為 7 天；相較之下，核能發電通常會在發電廠儲存下一燃料週期使用之燃料，故安全存量最短為 18 個月，最長為 36 個月。

使用核能發電能避免能源供應上可能的風險。台灣是個海島，超過 99% 能源依賴進口，如何確保能源供應的安全是政府必須面對的議題。以中國大陸兩年前春節期間的大風雪為例，即使煤礦、電廠、鐵路系統、輸配電系統都已修復，卻還是無法供電，因為發電要煤，煤在煤礦產地，鐵路運煤要電，三者有環環相扣的困擾，如何將初級能源由產地運到使用地點，亦是個重要的議題；若初級能源具有高能源密度，運輸的困擾會比較小。正因為核能發電能夠降低上述的風險，因此許多具有自產能源的國家如蘇俄、美國、中國都選擇積極發展核能發電。

核能發電的經濟特性

燃煤、燃氣、核能等各類發電方式的相對成本與電廠的所在地有關；一般而言，除了建於礦區旁的化石燃料電廠外，核能發電皆具有競爭力。根據台電公司公布的 2007 年發電成本，核能 0.63 元 / 度是各種發電方式中成本最低的，但這不是核電受政策制定者青睞最重要或唯一的原因。

核電廠的高建廠成本，使得核能發電燃料成本占總發電成本比例低（約 16%），故其發電成本穩定，較不易受到國際能源價格波動的影響。電力公司發電系統中若維持適當比例之核能，可以穩定發電成本。圖四所示為台灣電力公司近年各種發電方式的成本，如圖所示，2004 年起，燃煤與複循環（以天然氣為燃料）的發電成本，受國際化石燃料價格飆升的影響，逐年上漲，而核能

車諾比核電廠事件

1986 年 4 月 26 日的凌晨 1 點 23 分，蘇聯烏克蘭車諾比核電站發生嚴重的核子反應爐事故，該事故是國際核事件分級表（international nuclear event scale）中唯一的第七級事件，被認為是歷史上最嚴重的核子電廠事故。由於事故發生前，核電廠正在進行一項試驗，導致功率劇增而破壞反應爐，釋放出高量放射性物質，其輻射線劑量是投在廣島原子彈的 400 倍以上，烏克蘭、白俄羅斯及俄羅斯境內均遭到嚴重的核汙染。根據國際原子能總署和世界衛生組織的車諾比事件報告，有 56 人的死亡被歸咎於此事件（47 名救災人員，9 名罹患甲狀腺癌的兒童），並估算在高度輻射線物質下暴露的大約 60 萬人中，會有將近額外的 4000 人死於癌症。此次事件引發國際對核能發電工業安全議題的高度關注，也促進前蘇聯政府的資訊趨向較為透明化。

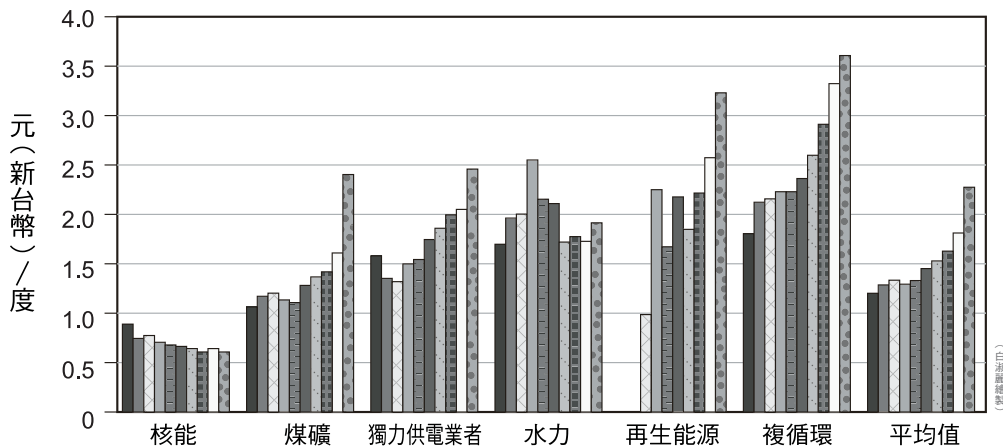


車諾比核電廠熔毀的爐心。



車諾比核電廠事件發生後整個隔離區宛如死亡之城。

圖四：台灣電力公司 1999~2008 年各種發電方式發電成本。



過程會消耗石化能源，也就會產生二氧化碳；核能廢料的處理也將耗費能源與產生二氧化碳。在計算各類能源使用的二氧化碳排放量時，應考慮整個生命週期的

發電的成本則因運轉績效的改善，呈穩定下降的趨勢。

使用核能發電固然可以避免能源供應與國家能源價格波動的風險，但也必須承受其他風險。核電廠的高建廠成本會使電力公司承擔財務風險，台電龍門電廠就是一個活生生的實例，但龍門電廠完工後，其發電成本必定讓人「驚豔」。

運轉中的核能電廠亦有經濟上的風險。2007年7月16日，日本新瀨中越地震造成東京電力公司柏崎刈羽核電廠7部核電機組全部急停。雖然所有機組均安全停機，沒有任何損毀或故障，可是地震發生時，廠址的地表加速度超過電廠安全停機地震設計值，已經違反核電廠安全設計哲學，在東電加強電廠的防震設計後，日本法規管制單位已允許電廠的部份機組重新啟動，但超過3年的停機已經造成電力公司重大的財務損失。

核能發電的二氧化碳排放

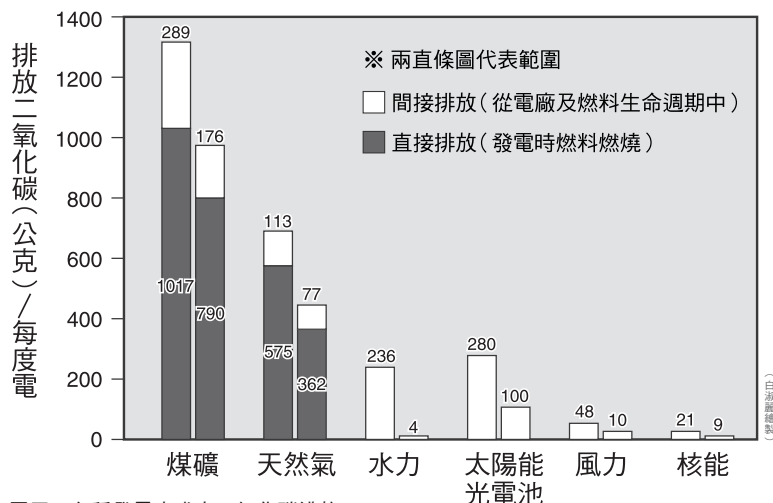
核能發電不是靠燃燒發電，故發電時不會排放二氧化碳，但是核能電廠的興建會使用大量的鋼材、水泥及其他需要精煉的材料，這些

二氧化碳排放量，因此核能發電的單位發電量排放之二氧化碳不會是零。

圖五是國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 估算各類型發電方法的單位發電量所排放之二氧化碳，而核能發電的二氧化碳排放是所有發電方法最低的，然而即便是乾淨的太陽能發電，製造晶片過程中仍排放不少二氧化碳。

核能發電與再生能源發電的比較

除了潮汐及地熱發電，再生能源的源頭均為太陽。化石燃料有蘊藏量不足的問題，再生能源中的太陽能與風能也有分布的問題。此外，再生能源最大的問題為能量密度非常低，需有廣大的土地面積來收集。



圖五：各種發電方式之二氧化碳排放。

台灣人口占世界之0.3%，土地面積僅占世界之0.06%，而我們的能源消耗為全球之1%，以單位國土面積耗能來說，台灣排名第一，是美國的10倍、日本的近2倍、德國的近3倍、荷蘭的1.3倍。由此可知土地面積不足是台灣發展再生能源為作為主要能源的最大困難。

台灣的日照再生能源發電，平均每平方公尺不到1000瓦；假設我們完全不考慮成本，在中山高速公路上面加蓋太陽能光電板，高速公路全長373公里，假設平均寬度為50公尺，則總面積為18.67萬平方公尺，如果太陽能光電池的效率為17%，意味著單位面積可安裝容量為170瓦（2008年的造價為4萬新台幣），則總裝置容量將為317萬瓩（僅面板總價即7568億），以台灣日照量每千瓦太陽能光電池裝置容量每年可以發電900~1300度來估計（南北部不同），則總發電量介於28億6000萬與41億3000

萬度間，與核四預估之年發電量201億度（假設容量因數為85%）相比，僅為核四發電量的14.2~20.5%。

再談談風力發電，截至2009年底，台灣共有182台風機，總裝置容量為31.69萬瓩，98年總發電量為8億4800萬度電，所有風機的平均容量因數為30.5%。假如我們將大型風機建在台灣海峽，沿著西部海岸線每1~2公里建一台（共300台），總共建三排（共900台），假設裝的機組是2009年功率最高的4500瓩，總裝置容量為405萬瓩，總發電量為108億2000萬度間，為核四發電量的53.8%。

從數字來看，雖然再生能源的量可以非常龐大地以10億或億為單位，但是與我們的能量消耗相比還是有段距離。再生能源發電除了「量」的問題外，還有「質」的問題。電不能儲存，系統的供應與消耗必須平衡。因此電力輸配電系統必須要調度，當電力需

三哩島核電廠事故

位於美國賓州哈里斯堡附近的三哩島核電廠在1979年3月28日發生第二號機故障導致核子事故。由於一系列的機械與人為失誤，造成反應爐的爐水降低，冷卻系統失效，使反應爐心燃料熔毀近半。所幸，最後一道防線的圍阻體發揮功效，將爐心熔毀後所釋出的放射性物質包封住，幾乎所有放射性物質都被滯留在反應器或輔助廠房之內，沒有洩漏到環境中，故沒有造成電廠附近居民的健康損害。於是在三哩島事件之後，美國的法規管制單位提出不少新的規定，力求電力公司改正缺失，包括如硬體設施的改善，這些要求使得核電機具的建造成本大幅攀升；此外，也讓當時的核能界意識到對爐心熔毀的物理及化學現象了解不夠，因此大幅度增加相關研究的經費。



三哩島核電廠發生事故前的照片，右邊為發生事故的二號機，目前已拆除。

求增多時，增加發電量；當電力需求減少時，減少發電量。而再生能源發電系統不但無法接受調度，還會製造調度的問題。

以風力發電為例，風的強度會隨時間早晚、季節、年度而有所變異，甚至在任何瞬間都會有可觀的擾動，因此大規模使用風力發電的國家必須要有適當的方法克服這些問題。以全球風電使用比例最高的丹麥為例，其土地面積為台灣的 1.19 倍，人口為台灣的 24%，電力裝置容量為台灣的 31.7%，2007 年總發電量為台灣的 19.4%。為了平衡風力發電的不穩定性，丹麥的輸電系統與德國、瑞典及挪威相連，利用其他三國的電力設施來平衡風電；由於水力發電可快速增加與降低發電量，故瑞典與挪威的水力發電更成為丹麥風電的靠山；根據 2007 年資料，丹麥電力出口 114 億度，進口 104 億度，在國與國之間流動的電力總量占了丹麥總發電量的 55.6%，由此看來，即使丹麥的風力發電近總發電量的 20%，也並非人民真正使用風電的比例。

丹麥 2007 年分別自挪威與瑞典進口（淨值）28 與 26 億度電；對德國的電力出口（淨值）為 63 億度。附帶一提的是，電力輸出與輸入並非等價值，即有時高價購入，但要賣出時為低價；記錄顯示，丹麥電力輸出價值曾有負值的情形發生，即花錢請別人消耗電力。而根據國際能源總署的資料，丹麥

2008 年家庭用電的價格為每度 0.396 美元，可能是全世界最高的。而獨立電網的國家或地區可能無法像丹麥一樣地幸運，可以利用別國的設施來完成自己的目標。值得深思的是，當全世界的國家都說要以再生能源來因應時，那該由誰來承擔電網穩定性的責任。

結語

世界人口大幅成長，人類為追求更舒適的生活，導致對能源的需求更為殷切。地球化石資源蘊藏有限，化石燃料的使用會產生二氧化碳，使地球大氣層溫室效應加劇，造成近年來氣候的變遷。與其他發展中的再生能源技術相較，已使用了超過 50 年的核能是一個成熟、有效、安全且不排放二氧化碳的能源使用技術。核能提供能源依賴進口國家一定程度之能源自主性，在人類未來的能源供應上一定會扮演著舉足輕重的角色。

核能的復甦已經激起另一波關於核廢料與核能安全的辯論；一些準備發展核電的開發中國家，工業安全紀錄非常差，政治清廉亦是普遍性的問題。大部分已經在使用核能的國家，對使用過的核燃料都還沒有最終解決方案；將核廢料深埋在地底是共同的說辭，但也都還沒找到長期儲存高強度輻射廢棄物的適當場址。此外，有些反核人士更擔心核能的擴張，會大幅增加核武擴散與核子恐怖主義的風險。

能源的使用是一個複雜的議題，包括技術、經濟與社會等層面。一個國家會選擇何種能源可能與其特殊的條件有關；但若選擇核能時，也許最難解決的是社會與政治層面的問題，而非技術或環保問題。☉

李 敏：任教清華大學工程與系統科學系

丹麥



面積：4 萬 3094 平方公里
 人口：551 萬 5575 人
 電力裝置容量：1210 萬瓩
 發電量：392 億度
 風力發電裝置容量：312 萬瓩
 風力發電量：72 億度