

我國未來的能源結構

各類能源的發電成本，可分為內部成本與外部成本。

在規劃國家能源結構時，各種能源的這兩項成本須同時納入考量。

■ 呂錫民

在規劃國家未來能源發電結構時，除了考量傳統的內部成本外，尚需考慮影響生態環境與社會的外部成本，以及技術實務上的可行性。

理想上，延續目前發電主力的「碳捕捉及儲存」（carbon capture and storage, CCS）發電成本最低，未來卻有很高的不確定性。大體上，再生能源的外部成本極低，技術可行性也高於CCS，雖然內部成本與發電本質評價不高，但無可諱言，再生能源的確是現今全球新興能源發展的趨勢。

如果說要符合上述3項規劃要項的能源，核電似乎是最佳選項，因為不但零污染且發電成本低。況且核電商業營運至今已半世紀有餘，核安應變與廢料處理已是成熟的技術。唯一的缺點是要顧及政治干擾，前者是可人為努力的目標，後者卻是不可預期的因素。

發電成本定義

各類能源的發電成本，可分為內部成本與外部成本。前者包括電力事業部門在興建發電廠時所需要的成本，以及電廠完成後營運所需要的維運成本、燃料成本等；後者則包括電廠營運後所排放的CO₂、NO_x、SO_x等影響地球環境和人體健康所造成的社會成本。

再生能源的外部成本極低，技術可行性也高於碳捕捉及儲存技術，雖然內部成本與發電本質評價不高，但無可諱言，再生能源的確是目前全球新興能源發展的趨勢。

在規劃國家能源結構時，各種能源的這兩項成本須同時納入考量。因為外部發電成本攸關人類社會的永續經營，事關重大，尤其是溫室氣體排放所造成的氣候變遷，更是目前熱門的話題，也是各國急欲解決的施政議題。

溫室氣體（包括CO₂）的排放，隨著採用最佳可行技術，加上政府訂定及執行管制規範與措施，雖然未臻理想，但已見大幅改善，因此本文僅考量CO₂溫室氣體所造成的外部成本。

排碳量與成本

各式發電設施的碳排放計算

方法，是採用符合ISO14000標準的「生命周期評估法」，或稱「搖籃至墳墓法」。計算時考慮各種能源材料從原物料開採、提煉、處理、運輸，到使用運轉、維修及除役過程中消耗或產生能量時，所排放的溫室氣體。

再生能源與核能發電 太陽光電、海洋能發

各種發電技術的排碳量

	排碳量 (g CO ₂ / kWh)
燃煤電廠 (IGCC)	800
燃煤+CCS	125
燃油電廠	650
燃氣電廠	400
燃氣+CCS	250
生質能 (芒草)	80
生質能 (木屑)	25
太陽能	58
風力 (離岸)	5.3
風力 (陸域)	4.6
海洋能	50
水力	5
核能	5

各類能源發電成本 (單位: NTD / kWh)

	技術起始年	建廠成本	維運成本	燃料成本	可用率 (%)	使用年限 (yr)	內部成本	外部成本	發電成本
燃煤 (IGCC)	2010~2030	41,424	912	0.057	0.9	35	0.464	0.744	1.208
燃煤 (IGCC)+CCS	2010~2030	51,696	1,248	0.124	0.9	35	0.646	0.116	0.762
燃氣 (New GTCC)	2010~2030	18,168	318	0.0968	0.83	35	0.279	0.372	0.651
燃氣 (New GTCC)+CCS	2010~2040	27,672	580	0.0968	0.83	35	0.387	0.232	0.619
燃油	2000	24,000	768	0.0121	0.41	30	0.624	0.604	1.228
核能	2000	112,584	2,064	0.00864	0.82	40	1.118	0.005	1.123
水力	2000	54,000	5,400	0.00	0.37	40	2.539	0.005	2.544
太陽能 (PV)	2000	289,800	0	0.00	0.083	30	23.75	0.054	23.81
風力 (陸域)	2005	32,400	1,296	0.00	0.37	25	1.057	0.004	1.061
風力 (離岸)	2005	70,728	1,680	0.00	0.36	25	2.007	0.005	2.012
生質能	2000	75,600	3,168	0.0225	0.83	20	1.24	0.023	1.236
海洋能	2010	133,392	1,296	0.576	0.31	30	3.981	0.046	4.027

註：1英鎊=48 NTD；折現率=0.0425；1澳元=30 NTD；1 GJ=277.8 kWh；1 Ton CO₂=31澳元=930 NTD

電、水力發電、風力發電等再生能源，在發電過程中雖不產生溫室氣體，但在製造渦輪機、太陽能板等設備的過程中仍會少量釋放，因此只能視為低碳能源。而使用燃煤、氣、油的電廠，則是聲名狼藉的溫室氣體製造者。

太陽光電—製造太陽能板所需的矽，必須在高溫下從石

英沙中提煉，而這過程會消耗整個製程60%的能量。就現有技術而言，太陽光電的CO₂排放量約為每瓩小時58公克，預期未來的排放量可降至每瓩小時15公克。

海洋能發電（波浪與潮汐）—目前尚無商業化量產的數據，但這方法大部分的二氧化碳是在製鋼過程中產生的。

估計製造一組波能轉換器需665公噸鋼（額定功率是750瓩），計算它的排碳量大約每瓩小時50公克，未來可望降至每瓩小時15公克。

水力發電—排碳分為儲存設施（攔水壩，排放量約為每瓩小時10公克）與發電設施（渦輪，排放量是每瓩小時3公克），其中儲存設施的排碳量



● 使用燃煤、氣、油的電廠，是聲名狼藉的溫室氣體製造者。（圖片來源：日創社）

人類幾百年來極力發展科技，
但因為一直未把外部成本納入考量，
致使溫室氣體大量排放，嚴重影響氣候變遷。

較高，因建設儲存設施需大量的混凝土與鋼鐵。在所有的發電技術中，水力發電屬於排碳量最低的，排放的二氧化碳甚少，但美中不足的是，水中植物會因腐敗而釋放出甲烷。

風力發電一約有98%的排碳發生於建造時，例如塔架所需的鋼、基座所需的水泥、葉片所需的玻璃纖維與樹脂等，而在運轉時的排碳，則發生於維修過程中。依生命周期評估，陸域風機的排碳量約為每瓩小時4.6公克，而離岸風機因基座較大，每瓩小時約5.3公克。

生質能發電一來自生長周期較短的灌木柳樹、草、芒草等，且被視為是「碳中和」的能源（因燃燒所釋放的二氧化碳大約等於生長期間所吸收的量）。但若進一步考慮植物生長期間所施加的肥料等，生質能只能視為低碳能源；又因其能量密度較低，大量載運時會增加二氧化碳排放量。據估計，芒草、氣化的木屑及稻草的排放量，各約為每瓩小時80、25及230公克。

核能發電一排碳量大約是每瓩小時5公克，未來減排空間很小。因為不需燃燒，在運轉過程中排碳量所占比率小於1%，大部分的排碳來自於鈾礦開採、濃



圖片來源：日創社

基於新能源技術起始期內部成本很高，這時政府宜利用政策獎勵建廠，使民間在有利可圖下樂於隨量提升技術層次，建廠成本也會逐步下降。

縮與燃料製備，除役時則占約35%的排碳量。

化石能源及廢棄物發電
 燃煤電廠一是現今排碳量最大的電廠。我國若導入新一代整體氣化複循環技術（integrated gasification combined cycle, IGCC）燃煤電廠，二氧化碳排放量將是每瓩小時0.8千公克。

燃油電廠一排碳量僅次於燃煤電廠，大約是每瓩小時0.65千公克。由於國際油價變動劇烈，考慮未來的風險，現有的燃油電廠將逐步以同樣發電量的燃煤或燃氣電廠搭配CCS技術取代。

燃氣電廠一排碳量居第三名，大約是每瓩小時0.4千公克。另外，利用都市廢棄物燃燒發電的排碳量則是每瓩小時1.36千公克。

國家能源結構規畫

如前所述，各型電廠的內部成本關係到建造投入資金與

營運成本，以及每一度電的成本，若電價越便宜，國家經濟發展將越有競爭力。

人類幾百年來極力發展科技，在內部成本上確實降低了許多，但因為一直未把外部成本納入考量，致使溫室氣體大量排放，嚴重影響氣候變遷，也造成社會與生態的打擊與損失。如今外部成本的考量漸受重視，本文將就廣泛的發電成本，構想我國未來20年應有的發電能源結構。

能源政策與發電成本

就各種發電能源的內部成本分析顯示，在3種內部成本中，占最多的是建廠成本，這與能源的開發技術時間長短有關。傳統能源，包括煤、石油、天然氣和核能，由於人類已使用多時，因此比新開發的再生能源（如太陽能、風力、生質能等）便宜。但是，化石能源的社會成本太大，使得各

國轉向推廣低碳能源。基於新能源技術起始期內部成本很高，這時政府宜利用政策獎勵建廠，使民間在有利可圖下樂於隨量提升技術層次，建廠成本也會逐步下降。

據研究，一些新能源發電技術，例如「整體氣化複循環」（IGCC）、「氣渦輪機複循環」（gas turbine combined cycle, GTCC）與「捕碳儲碳技術」（CCS），將陸續於未來二、三十年因技術成熟而進入商業營運。尤其是CCS與風力、太陽能等再生能源，若能隨著政策的推動（如政府的獎勵措施）與技術的演進（如發電效率的提升），在量價增減相互作用下，使得內部成本逐漸下降，加上民間興建低碳電廠意願提高，外部成本的降低自是水到渠成。

當然政府的補助應隨著時間而下降，在數量增加後，技術原本會因政府補助下降的刺

激而提升層次，但這時如果仍然依賴政府的高檔補助，技術將因怠惰而停滯，內部成本自是居高不下。且因數量停止增加，降低外部成本的目標自然也無法達成。更危險的是，政府持續高檔補助這種不當的政策，將造成財政赤字與經濟衰退，德國與西班牙就是前車之鑑。

各類能源發電成本估算

依據經濟部99年再生能源躉購費率及其計算公式可知，各種能源發電的內部成本，是由建廠、維運與燃料3項所構成，其中又以建廠成本是最大宗，也是影響內部成本最主要的。而在這方面，傳統火力電廠的內部成本最低廉，一度電只要0.5元新台幣。

值得一提的是，由於普通電廠的建廠資金是向銀行借貸的，因此建廠成本是每年還給銀行的部分本金與利息。基本上，若電廠的可用率高，不但適合當作基

載發電，每年發電量維持連續高檔，加上長期使用年限，實際上是可大幅減少每年付給銀行的建廠成本。

相較之下，再生能源燃料成本雖然幾乎是零，但因無法穩定供電，使得電力公用事業部門基於經濟因素，與考慮電網併聯的穩定性和管理性，對於間歇性的高價分散式再生能源發電是有所顧忌的。

數據分析

由前述可知，傳統化石能源發電的單位溫室氣體排放量較高，相對地，外部成本也水漲船高。但顧及這些化石能源發電具有的較低內部成本與龐大的蘊藏量，例如，評估全球的煤可再使用200年，天然氣是60年，爲了增加傳統能源的延續性，相關產學界開發了低排放的火力發電技術—IGCC、GTCC與捕碳儲碳技術（CCS），讓燃煤與燃氣電廠能在更潔淨的狀態下繼續發電運作。

然而，這些技術至少在二、三十年後才能商業化，實在緩不濟急。這時，另一種傳統能源—核電—似乎是個不錯的選項。據研究，核電外部成本與再生能源一樣低，能源可用率（即穩定性）卻與火力電廠一般高，且核電技術目前已臻成熟，是一種可行性極高的低碳能源。

如前所述，雖然再生能源的外部成本極低，是一種潔淨能源，但由於供應不穩定，即使技術啓蒙很早，內部成本仍然居高不下，單位發電成本自然無法下降，若要當作主流發電能源，可能尚有待考量。

呂錫民

臺灣大學能源研究中心

雖然再生能源的外部成本極低，
是一種潔淨能源，但由於供應不穩定，
即使技術啓蒙很早，內部成本仍然居高不下。