



# 臺灣能源轉型機會與挑戰

行政院能源及減碳辦公室主任 / 蘇金勝

關鍵字：能源轉型、太陽光電、離岸風力、再生能源

## 一、前言

2019年聯合國氣候變化綱要公約第25屆締約方會議（COP25）於西班牙馬德里召開之際，歐盟委員會於12月11日同步提出歐洲綠色新政（European Green Deal），規劃於2050年達成碳中和目標（即碳淨排放量降為零），並建立階段減量目標，以1990年為基準年，2020年減量20%，2030年減量50-55%，2050年則減量100%，做到淨零碳排放目標，以達成2015年巴黎協定期望在本世紀將全球平均溫度升高保持在與工業化之前水平攝氏2度至1.5度以下的目標。為實現這一目標，歐盟針對主要排碳部門採取積極行動，包括推動能源部門脫碳行動，能源生產及使用所產生的溫室氣體排放量占歐盟總排放量的75%以上；更新建築物，建築物占能源消耗的40%；推出潔淨的公共及私人交通工具，交通運輸約占總排放量的25%；同時支持綠色產業創新成為全球領導者，以發展綠色經濟。在能源方面，則以推動提高能源效率與發展再生能源為主，建立安全且負擔得起的

能源供應體系，及整合互聯電網與數位化能源市場。

我國在2016年5月起推動能源轉型政策，以達成非核家園、穩定供電、降污減碳等政策目標。在轉型過程則以展綠、增氣、減煤、非核為推動方向，期於2025年再生能源發電占比由4.8%提高至20%，天然氣發電占比由32%提高至50%，燃煤發電占比由45%降至27%，既有核能電廠如期除役及核四不啟封，至2025年底進入無核能電廠運轉狀態。其政策方向與國際推動能源轉型發展綠能之大趨勢一致，其中又以再生能源發電占比擴展至20%最具挑戰性，太陽光電20GW及離岸風力5.5GW為推動主軸，同時也帶動國內綠能產業及綠色就業。

臺灣經濟發展正追上已開發國家行列，能源耗用及用電量仍然每年成長，2019年用電尖峰於7月17日創下歷史新高，瞬時尖峰負載達37,383 MW，當時再生能源發電量為3,878 MW，已超越核電的3,815 MW。各類



再生能源發電，又以太陽光電貢獻最大，高達1,726 MW，發電占比為4.62%，水力發電與抽蓄水力次之，達1,336 MW與594 MW，風力發電則為222 MW。也就是說全年用電尖峰時，太陽光電對供電能力的貢獻度已達4.62%[1]。這個比例將隨著太陽光電設置量增加而逐年增加，不僅可紓解臺灣夏季尖峰供電壓力，同時在降污及減碳方面也有顯著效果。回頭檢視政策推動過程及展望未來發展，再生能發展目標絕不是順其自然Business As Usual即可達成，可說是處處充滿挑戰，必須強而有力的政策措施及政府各部門通力合作，才能克服各種障礙達成預定目標。本文旨在探討未來再生能源還有多大的發展空間，面臨的挑戰以及達成目標的相關路徑。

## 二、能源轉型為永續發展必然趨勢

工業革命以來，傳統能源架構係以提供低廉及穩定的能源及電力為使命，以滿足產業發展及生活需求。但隨著傳統化石能源日益枯竭及衍生的環境問題日益嚴重，永續發展議題獲得國際社會極度重視，而能源生產及使用又是造成環境污染及二氧化碳排放的主要來源，因此能源議題轉而為以兼顧3E（Energy Security, Economic Development, Environmental Protection）為基調，即能源安全、經濟發展、及環境保護，這三者在前現況互有矛盾衝突，必須謀求某程度的妥協及平衡。世界能源理事會（World Energy Council）2010年起每年與顧問公司Oliver Wyman合作，以指數方法定期編撰發布「世界能源三難指標（World Energy Trilemma Index）」，評估各國在能源安全、能源公平，以及環境永續三個指標之表現。這三個指標

著重平衡及健全的發展。能源安全係評估初級能源是否自主供應及多元管理，能源基礎建設是否充足可靠，能源供給可否滿足目前及未來的需求，相關指標包括進口能源依存度、初級能源來源多元化、GDP成長與能源消費關聯性、電源配比多元化、能源安全儲存等。能源公平係評估國民取得能源普及度及價格的可負擔性，評估指標包括電力普及度、電力供應品質、城鄉能源使用品質、電力價格、汽柴油價格、天然氣價格等。環境永續係評估能源供需體系的效率、低碳及再生能源的開發，評估指標包括能源密集度、發電效率、輸配電線路損失、電力排碳係數、人均碳排放量等。此外，世界能源理事會也將國家政策推動因素納入，包括政策的延續性和可預測性、穩定的管制環境、技術研發獎勵、投資誘因、空氣汙染及對土地和水的影響等[2]。

我國最近一次納入能源三難指標排名為2015年，該年130個國家中我國總排名第30名，分別為能源安全54名、能源公平12名、環境永續96名。2013年至2015年我國表現穩定，能源安全與能源公平指標逐年進步，僅環境永續指標為退步趨勢。能源公平為我國表現最佳指標，表示我國在能源取得普及程度和價格負擔方面，為國際排名前段班。在能源安全方面，我們高度仰賴能源進口，能源自主性低，受先天資源秉賦限制表現為中段班。在環境永續方面，我國用電密集度及人均排放量均高，而被擠到後段班，整體而言，提升我國能源自主與提高環境永續，為我們推動能源轉型當務之急。

解決能源三難問題也非僅採行平衡措施



即可達成，隨著近十年來再生能源技術突破性發展，特別是太陽光電及離岸風力發電成本已接近市電價格，為解決三難問題提供了最佳良方。太陽光電等再生能源的分散化特性亦有助於擴大電力普及，在偏鄉、離島及山區提供自主電源。而分散式電源不僅可單獨自主供電，亦可透過電網相互融通發揮其最大效益。由於資通訊技術快速發展，成就了數位化及智慧化的基礎設施，智慧電表及智慧電網便在技術驅動及市場牽引下應運而生。全球能源轉型便在電源分散化、環境低碳化、及系統智慧化的潮流下，電力供需體

系轉向以再生能源為主軸的發展趨勢。

### 三、再生能源成本大幅下降為推動能源轉型趨動力

依據國際再生能源總署（International Renewable Energy Agency, IRENA）評估資料[3]，太陽光電近年來成本大幅下降，2018年較2017年下降13%，與2010年比較則下降77%，大型太陽光電發電廠平均每度電均化成本約新臺幣2.64元（如下圖1）。臺灣嘉義鹽田太陽光電開發案由政府辦理土地變更並

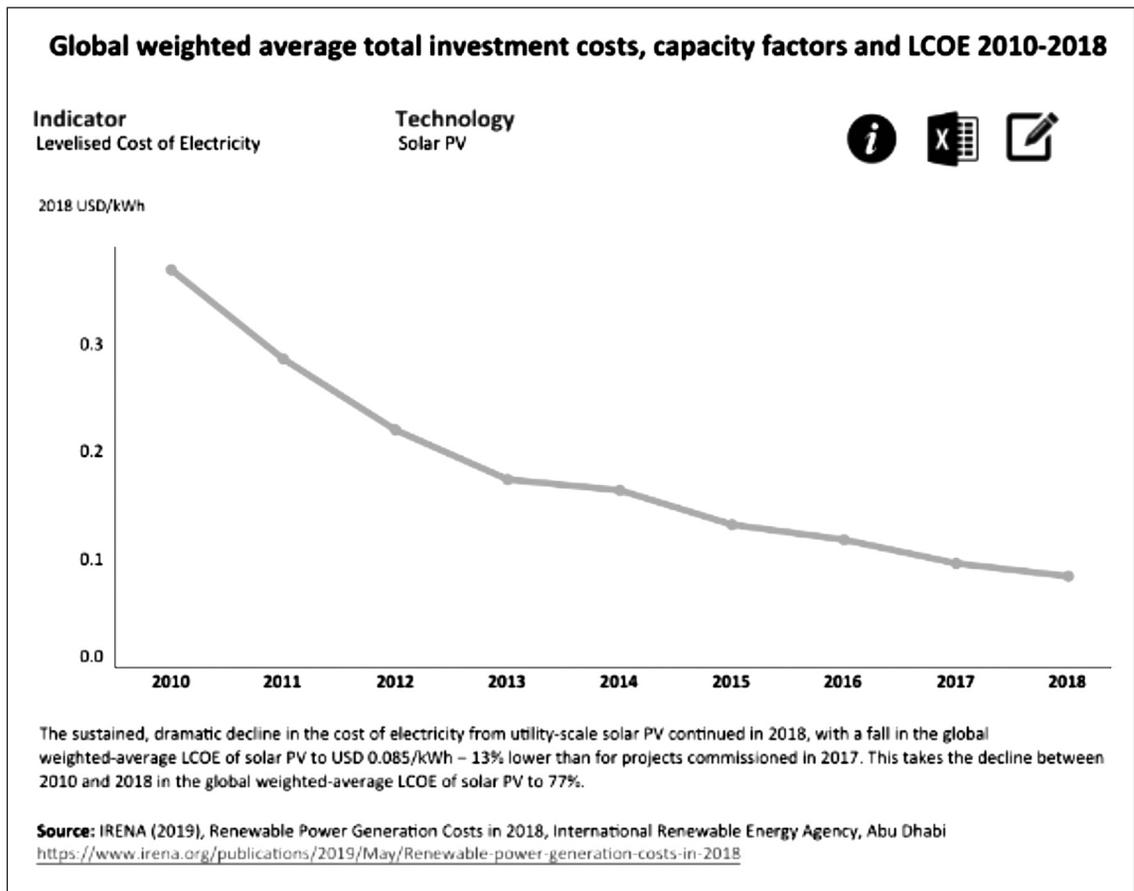


圖 1 2010-2018 年全球太陽光電均化發電成本



開放競標，最低得標躉售電價為2.6元/度。

在風力發電部分，2016年新設陸域風場發電成約在0.05美元至0.12美元/度之間，由於風力發電機價格持續下降，以及輪轂高度提高，增大掃風面積及使風力條件變佳，平均發電成本仍有繼續下降趨勢。離岸風電2014-16年度投產案場發電成本約在0.10美元至0.21美元/度之間，全球離岸風電（裝置容量截至2018年為4,500 MW）2018年成本較2017年微幅下降1%，而較2010年則下降

20%，平均每度電均化成本約新臺幣3.94元（如下圖2）。臺灣預定2025年商轉的離岸風場競價價格為2.2元到2.5元，已低於台電公司對用戶平均售電價格之2.62元。歐洲近年來離岸風場競標案已大多為零補貼（即與其他電源在市場上自由競爭，無需政府補貼），或接近市電價格每度電折合新臺幣約2.0-2.5元。

依國際目前太陽光電及風力發電成本現況，其發電成本已達市電同價水準，且將來

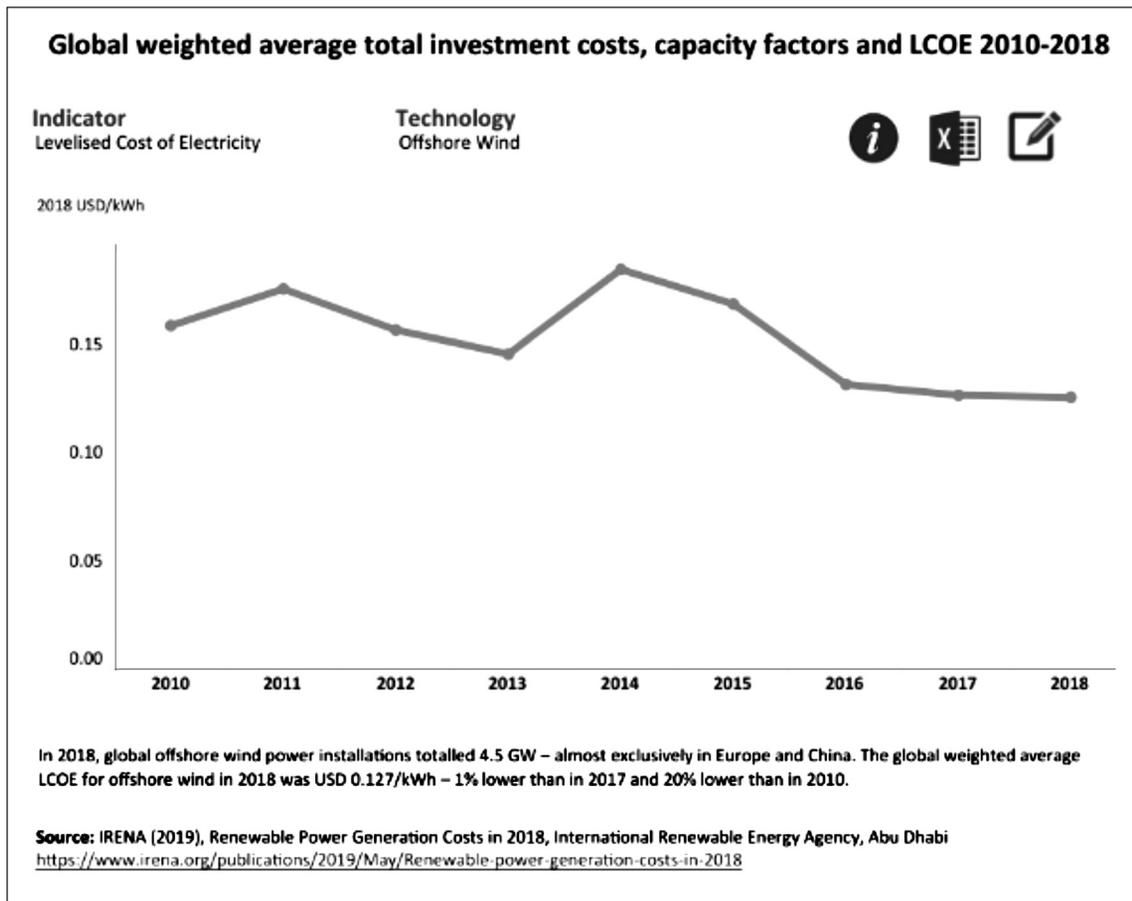


圖 2 2010-2018 年全球離岸風電均化發電成本



隨技術進步及規模經濟不斷擴增，成本仍將持續下降，因此，太陽光電及風力發電已成為全球發展再生能源的主力，亦為推動能源轉型及解決氣候變遷問題的主要項目。在可見的未來，再生能源的發展將徹底解決化石燃料使用所造成的能源問題，如化石能源枯竭、價格劇烈波動、空氣污染、氣候變遷，為地球永續發展找到解決方案，徹底擺脫當前能源三難困境之情勢。

#### 四、再生能源發展潛力與限制

再生能源發展潛力取決於自然資源秉賦，如陽光、風力、地熱、生質能等，各地區各類別再生能源資源或有不同。為評估全球再生能源發展潛力，IRENA進行了再生能源路徑圖（Remap）計畫，以評估國家、地區以及全球擴大設置再生能源的潛力[4]。該路線圖不僅著重於再生能源發電技術，還擴展至運輸及熱能相關再生能源技術。除了各種可能的技術路徑及指標外，尚包括許多其他指標，如系統成本、投資需求、空氣污染及氣候有關的外部性、二氧化碳排放量、以及就業和經濟成長等經濟指標。目前全球每年再生能源發電新增容量已超過非再生能源發電新增容量，IRENA的分析表示，再生能源在整體能源系統（包括電力、熱能及運輸）中占比將持續加速成長。隨著新科技的發展，電力將成為主要的能源載體，至2050年全球電力供應可能會增加一倍以上。包括太陽能和風能在內的可再生能源可以滿足86%的電力需求，能源轉型將使全球國內生產總值（GDP）增長2.5%，總就業人數增長0.2%。這還將帶來更廣泛的社會和環境效益。報告指出，在30年內，與健康，補貼和氣候相關

的儲蓄累計價值高達160兆美元。因此，根據對外部性的評估方式，每花費一美元用於全球能源系統的轉換，收益至少為3美元，甚至可能超過7美元。同時，再生能源將創造新的就業機會，其新增工作將高於淘汰化石燃料行業所失去的工作。

臺灣位處亞熱帶，日照充足，適合發展太陽光電，臺灣海峽風力條件優良，西部沿岸地區適合發展陸域風力，臺灣海峽適合發展離岸風力，臺灣地處環太平洋火山地震帶，富含地熱能源，降雨豐沛，可發展水力發電，四周環海，具豐富海洋能源，此外，尚可利用農林廢棄物及沼氣，可作為生質能料源。

太陽光電是臺灣最具發展潛力的再生能源類別，同時也是臺灣最具競爭能力的綠能產業。國內太陽光電設置之國產比率約為九成以上，且太陽光電產業的產值有九成以上為出口，因此產業及綠能發展具有相輔相成的效果。

臺灣中南部地區日照條件良好，年平均日（幅）射量約為1,400-1,600 kWh/m<sup>2</sup>，推估年發電量約為1,200-1,400 kWh/kWp；中北部年平均日（幅）射量約為1,000-1,200 kWh/m<sup>2</sup>，推估年發電量約為900-1,000 kWh/kWp [5]。以太陽光電發電效率約為16%-20%估算，每千峰瓦（kWp）所需面積約為6平方公尺，考量系統設置支架及通道需求，為簡便計，本文將以10平方公尺面積設置1 kWp，每kWp年發電量1,000度（依躉購費率參數為1,250度/kWp）估計，即每公頃屋頂或土地可設置太陽光電容量為1 MWp，年發電量為100



萬度/公頃。推估結果，以臺灣可用的土地面積設置太陽光電提供自給自足的電力供應是可能的。

臺灣2018年全國用電量為2,643億度，總發電量為2,736億度，預估至2025年發電量將成長至3,132億度[6]，假設全部由太陽光電供應國內需求，則所需設置面積約為31.32萬公頃。大家都知道臺灣土地面積為3萬6千平方公里，即360萬公頃。也就是說，臺灣的土地利用10%，不管是直接使用或是複合式利用，以屋頂設置或是漁電共生、農電共生、或水面型設置，即可百分之百供應全國所需的用電量。比較各類土地的使用情形，相信只要做好規劃，太陽光電絕對是臺灣再生能源最重要的類型。依據內政部統計各類別已登記土地資料[7]

如表1，農牧用地約81萬公頃，建築用地及都市土地約55萬公頃，水利用地約6萬公頃，養殖用地約2.6萬公頃。這些土地如充分以複合使用設置太陽光電在執行面可行性是

表 1 臺灣各類別已登記土地統計表

單位：公頃

建築用地	64,764
農牧用地	819,436
林業用地	1,364,977
養殖用地	26,989
鹽業用地	3,900
水利用地	59,968
遊憩用地	6,369
殯葬用地	8,627
特目用地	46,464
都市土地及其他	488,980
	2,890,474

很高的，臺灣要從能源98%依賴進口到完全自給自足似乎不再是夢想，而是可實現的理想。

臺灣第二順位具發展潛力之再生能源應為風力發電，其中陸域風力因受限土地利用，發展受限，僅在西部沿海人口稀少的海邊適合設置，估計可設容量約為1,200 MW，而離岸風力發電則具有更大的潛力，臺灣海峽水深5-20 m（淺海）面積約177,920公頃，潛能約9 GW（以每平方公里5 MW粗估），水深20-50 m（深海）面積約654,700公頃，潛能約33 GW，水深50 m-100 m（深海）面積約1,195,400公頃，潛能約60 GW。目前以打樁型離岸風力發電機組技術較為成熟且適合臺灣颱風地震環境使用，其技術適合50米以內水深，風力潛能約42 GW，如扣除保護區、禁限建區、漁業權區、航道、及其他規劃用途，可利用潛能約為10-20 GW，如以10 GW估算，全年發電量約375億度，約占2025年預估總發電量的12%。深海部分雖然尚有設置潛力，但尚須待浮動型機組技術較成熟時才能進一步發展，其可利用潛能亦約為10-20 GW。

生質能源的利用，以廢棄物焚化發電為主，目前已設置629 MW，但因垃圾減量致發電容量擴增受限；另外利用農林廢棄物發電，已設置77 MW，因料源限制及集運成本高，故可增規模不大；此外利用垃圾掩埋、畜禽場及衛生下水道等沼氣發電，已設置約20 MW，目前政府推動養豬場沼氣發電利用，臺灣總養豬頭數約600萬頭，其沼氣發電潛能約40 MW。

有關地熱發電潛力，依據工研院彙整我



國地熱區歷史調查資料及利用美國地質調查所熱儲集層法 (Store heat USGS circular 790) 地熱潛力區計26處，發電潛能約986 MW。依據調查資料較完整之8大地區及綠島等區域，我國地熱發電潛能約744 MW。

但要完成發展再生能源為主軸之能源轉型願景尚有諸多挑戰及限制待克服，首先是開發成本的下降，我們必須善用技術發展及規模經濟優勢，以降低總體再生能源發電成本。其次，提昇電網韌性，臺灣電網為獨立系統，電力供需要自我平衡，當再生能源發電占比提高時，併網的普及與營運調度的穩定措施，如智慧電網建置等必須同步跟進。第三，再生能源可開發資源雖然足夠，但對環境景觀的保護及土地複合利用等議題須同時兼顧，建立國人可接受的發展模式及機制，以利擴大推廣使用。最後也是最重要的，儲能系統的發展成熟度將攸關我國再生能源占比的多寡，現行雖有抽蓄水力及快速反應機組調節系統頻率，但如無普遍性的儲能系統平衡區域供需，再生能源占比終將受限在一定程度。

## 五、能源轉型路徑與展望

我國現行能源轉型目標於2016年訂定，規劃2025年再生能源發電占比達20%之目標，並以太陽光電及離岸發電為主要核心項目。其中太陽光電累計裝置容量為20 GW、離岸風力發電為5.5 GW，陸域風力為1.2 GW，生質能發電為813 MW。立法院於2017年1月通過電業法修正案，開放綠電先行、用戶購電選擇權，行政院於2017年4月核定修正能源發展綱領，以能源安全、綠色經濟、環

境永續、社會公平為發展目標，6月啟動能源轉型白皮書撰擬，經由政府民間協作，擴大公民對話等程序，擴大地方及公民參與，以建立共識。政府並於2019年5月公布修正再生能源發展條例，進一步優化我國再生能源發展環境，提升政策推動的效能。

太陽光電之推廣，經由太陽光電2年推動計畫 (2016. 7-2018. 6)，以短期達標、長期固本原則，於2年內達成推動目標1.52 GW。後續更以中央與地方共同推動、產業園區、畜、農、漁電共生等三大主軸，建立示範，帶動設置能量，以達成中長期目標，截至2019年底太陽光電裝置容量已超過4 GW，並規劃於2020年總裝置容量達成6.5 GW目標。

離岸風電部分，2019年第一座示範風場海洋風電128 MW已於10月完成併聯運轉，包含其他已遴選及競標開發案，於2025年計裝置容量將達5.7 GW。蔡英文總統並於海洋風電落成典禮宣示將打造臺灣成為亞洲綠能發展中心，並請經濟部提出2026年到2035年，下一個十年階段的新目標。經濟部也隨即規劃2026年到2035年，10年10 GW（也就是每年1 GW）的區塊開發政策目標。

能源轉型2025年再生能源占20%目標看似艱鉅，但卻是國際的大潮流，也是我們必走的路，相信不會在2025年即停止腳步，而是將順應全球永續發展及綠能減碳的潮流持續前行，所幸臺灣再生能源蘊藏量尚有餘裕，發展為綠能主軸的電力供應體系是有可能的，因此如何在發展綠能方面建立國人共識，進一步規劃發展目標則是我們必須持續努力面對的工作。



## 六、結論

工業革命以來，經濟發展及民生需求加速耗竭傳統化石能源如煤碳、石油及天然氣，不僅引發多次能源危機造成能源價格高漲及物價動盪，另一方面化石燃料的使用也伴隨著污染及二氧化碳的排放，嚴重造成全球暖化現象。面對氣候變遷全球暖化議題，2015年巴黎協定決議在本世紀將大氣氣溫控制在與工業化前比較溫升不超過攝氏1.5度-2度水準，並推動國家自主貢獻機制(NDC)。根據IRENA的分析，如要達到此一目標，到2050年，與能源有關的二氧化碳排放量必須較目前減少70%。而歐盟委員會亦在COP25大會期間，提出歐洲綠色新政計畫，於2050年達到淨零碳排放目標，其中能源部門的脫碳行動是為關鍵。

我國於2015年制定溫室氣體減量及管理法，將國家自主貢獻入法，明定2050年較2005年減碳50%。2016年開始推動能源轉型，以展綠、增氣、減煤、非核為目標，於2025年達成再生能源占總發電量20%之目標。太陽光電必須由約1 GW提高至20 GW，離岸風電由無到有增加5.5 GW。政府啟動跨部會協商機制，以開發各類型潛在設置案場，克服技術及行政障礙，分階段訂定執行計畫，目前太陽光電已超過4 GW，首座離岸風場也於2019年併聯運轉，顯見政策的力道及民眾的支持是推動的關鍵。因此欲達成2025年目標，仍須持續加強政策的強度及各部門的合作。然而2025年亦僅是階段性目標，顯然離2050年國家排放自定目標或碳中和目標還有很大空間。

本文盤點臺灣自主再生能源秉賦及所需設置面積，發覺臺灣尋求以再生能源為主軸的未來電力供應體系是可行的。但在土地利用、電網建構、電力市場、複合使用及基礎設施等方面要有新的看法及共識。隨著國際綠能發展潮流，綠能成本將逐年降低，甚至低於化石燃料發電成本，所帶動的環境效益及環境永續，將是人類文明的一大進展，而我們長久以來追求的經濟成長亦將蘊含其中，這是我們未來的希望及機會，亦是你我大家共同的志業。

### 參考文獻

1. 台灣電力股份有限公司，<https://www.taipower.com.tw/> 台電公司官網首頁 > 資訊揭露 > 電力供需資訊 > 過去電力供需資訊
2. World Energy Trilemma Index 2019, published by the World Energy Council 2019 in partnership with OLIVER WYMAN.
3. IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2018, International Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.
4. IRENA, Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, 2019 edition, Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.
5. 經濟部能源局，各年度全天空日(幅)射量與推估年發電量統計表，101年。
6. 經濟部能源局，107年全國電力資源供需報告，108年。
7. 中華民國統計資訊網，<https://www1.stat.gov.tw/ct.asp?xItem=15262&CtNode=4648&mp=3>