

2016 年世界能源展望(WEO)—太陽光電之現況及展望

黃孔良

核研所-能源經濟及策略研究中心

2017/07

一、前言

隨著世界各國對氣候變遷議題的關注，加上第 21 屆巴黎氣候峰會通過對溫室氣體減量之協議，明訂控制全球平均升溫較工業革命前低於 2°C，及致力於追求全球平均升溫控制於 1.5°C 之目標，為確保減緩地球暖化得以實現，各國亦制定有其減碳政策，使低碳能源的發展更為重要。

再生能源的發展是確保朝向減碳目標的必要途徑之一，而本文的目標聚焦於再生能源之主力之一：太陽光電，藉由觀察全球太陽光電市場，並剖析國際能源總署發布的世界能源展望報告中，所設定的情境趨勢，以作為未來我國發展太陽光電政策之參考資訊。

二、太陽光電現況與發展趨勢

根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)公布之 2016 世界能源展望報告，至 2014 年為止全球主要能源需求為 13,684 百萬噸油當量(Mtoe)。其中，除水力及生質能之外的再生能源需求為 181 百萬噸油當量，佔整體能源需求的 1.3%。依據世界能源展望報告所設定的三種情境¹，未來再生能源將大幅成長，其占整體能源的比例也將由現今的 1.3%，成長至 2040 年的 4.1~11.8%。(如表一)

表一：全球主要能源需求以燃料及情境區分

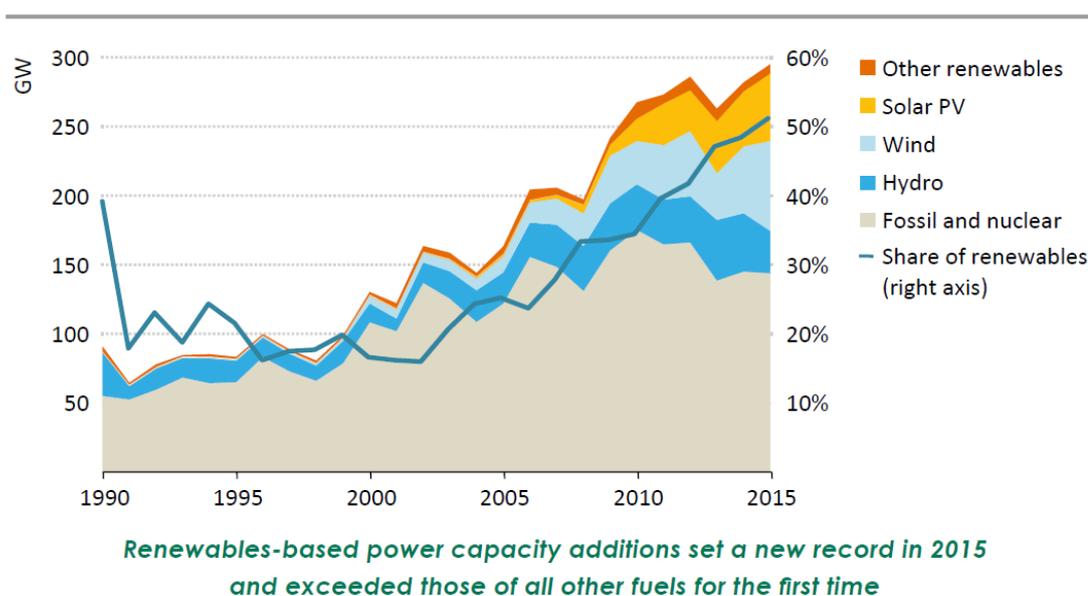
(資料來源：IEA WEO2016 表 2-2) (單位：百萬噸油當量)

| | 2000 | 2014 | 新政策情境 | | 現行政策情境 | | 450情境 | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 2025 | 2040 | 2025 | 2040 | 2025 | 2040 |
| 煤 | 2,316 | 3,926 | 3,955 | 4,140 | 4,361 | 5,327 | 3,175 | 2,000 |
| 石油 | 3,669 | 4,266 | 4,577 | 4,775 | 4,751 | 5,402 | 4,169 | 3,326 |
| 天然氣 | 2,071 | 2,893 | 3,390 | 4,313 | 3,508 | 4,718 | 3,292 | 3,301 |
| 核能 | 676 | 662 | 888 | 1,181 | 865 | 1,032 | 960 | 1,590 |
| 水力 | 225 | 335 | 420 | 536 | 414 | 515 | 429 | 593 |
| 生質能源(含傳統固態燃料) | 1,026 | 1,421 | 1,633 | 1,883 | 1,619 | 1,834 | 1,733 | 2,310 |
| 其他再生能源 | 60 | 181 | 478 | 1,037 | 420 | 809 | 596 | 1,759 |
| 合計 | 10,042 | 13,684 | 15,340 | 17,866 | 15,937 | 19,636 | 14,355 | 14,878 |
| 化石燃料占比 | 80% | 81% | 78% | 74% | 79% | 79% | 74% | 58% |

由於電力占全球五分之一的終端能源消費，且電力部門佔目前能源相關碳排放量 42%，因此成為全球致力減碳的目標，過去 10 年來，針對性支持再生能源(特

¹在能源發展分析情境上，目前政策情境(Current Policies Scenario)代表的是截至 2016 年中全球各國執行中的能源政策情境；新政策情境(New Policies Scenario)代表各國於巴黎氣候峰會後簽署國家達成其自我減量承諾(Nationally Determined contribution, NDC)的可能政策情境；450 情境(450 Scenario)代表嚴格的要求達成聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)所設定的本世紀末全球增溫不超過攝氏 2°C 的情境。

別專注電力部門)的國家已由不到 20 個增加為 150 多國。圖一顯示 2015 年再生能源新增裝置容量佔全球新增容量一半以上，且再生能源累積裝置容量(約 1985 GW)首度超過燃煤裝置量(1950 GW)。過去兩年再生能源(主要為太陽能 and 風能)容量增加了 200 GW，並在 2015 年達創紀錄的 114 GW，而 2015 年增加的容量中，風能較上一年度增長近 35% 達 65 GW，太陽光電則達 49 GW，又以中國增加近 15GW 的新裝置量，一舉超越德國成為太陽光電裝置量最大的國家。美國太陽光電容量則大幅增加至 7.3 GW，首次超過天然氣總新增容量。英國是歐洲太陽光電裝置量增長最高者 (3.7 GW)，而曾經為全球太陽光電擴張最快的德國則有所放緩。



Note: Other renewables include biomass, CSP, geothermal and marine.

圖一：全球再生能源裝置容量以類型及增加量占比 (資料來源：IEA WEO2016 圖 10-5)

根據世界能源展望報告，電力供應組合依據不同的排碳情境下所設定的不同排碳強度，會有很大的差異，唯一共同點是石油發電將降到總發電量的 1.5% 以下。燃氣發電(已在 2000-2015 年成長兩倍)將於現行政策情境再成長一倍；在新政策情境下成長四分之三，在 450 情境下，將於 2020 年末期達到高峰(較目前水準增加四分之一)，之後回落到目前的水準。而再生能源(含水力發電)在各種情境下發電量都將大幅成長，而其中最大增長來源來自風能和太陽能，且在 450 情景下的產量至 2020 年將增加超過一倍。(如表二)

2015 年全球投資再生能源金額計 2,880 億美元，而再生能源部分已達發電容量投資的 7 成，其中主要投資於風能 37%、太陽光電 34% 及水力發電 20%。在太陽能產業方面，2015 年模組製造容量增加 20% 達到 62 GW，而其中一半的容量來自中國。

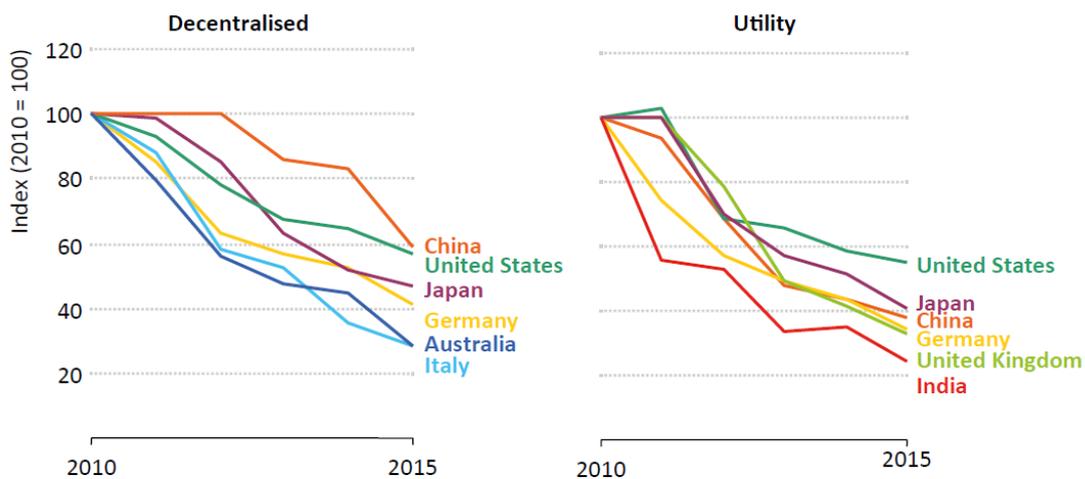
電力技術成本的快速下降與政策性支持，支撐再生能源發電的擴張。而分散式(Decentralise)發電(特別是屋頂型光電)也逐漸受到重視，在澳洲及比利時的電力市場中，已經可見到採用高比率的家用屋頂型太陽光電。

表二 全球發電 以燃料及情境區分 (資料來源：IEA WEO2016 表 6-2)

單位：TWh

| | 2000 | 2014 | 新政策情境 | | 現行政策情境 | | 450情境 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 2025 | 2040 | 2025 | 2040 | 2025 | 2040 |
| 合計 | 15746 | 23809 | 29540 | 39047 | 30886 | 42511 | 27688 | 34092 |
| 化石燃料 | 10,017 | 15,890 | 17,175 | 20,243 | 19,183 | 26,246 | 14,113 | 8,108 |
| 煤 | 6,005 | 9,707 | 9,934 | 10,787 | 11,479 | 15,305 | 7,062 | 2,518 |
| 石油 | 2,753 | 5,148 | 6,514 | 8,910 | 6,957 | 10,361 | 6,466 | 5,389 |
| 天然氣 | 1,259 | 1,035 | 727 | 547 | 746 | 580 | 585 | 200 |
| 核能 | 2,591 | 2,535 | 3,405 | 4,532 | 3,319 | 3,960 | 3,685 | 6,101 |
| 水力 | 2,619 | 3,894 | 4,887 | 6,230 | 4,817 | 5,984 | 4,994 | 6,891 |
| 其他再生能源 | 250 | 1,489 | 4,047 | 8,041 | 3,567 | 6,320 | 4,896 | 12,992 |
| 化石燃料 | 65% | 67% | 58% | 52% | 62% | 62% | 51% | 24% |
| 煤 | 38% | 41% | 34% | 28% | 37% | 36% | 26% | 7% |
| 石油 | 18% | 22% | 22% | 23% | 23% | 24% | 23% | 16% |
| 天然氣 | 8% | 4% | 2% | 1% | 2% | 1% | 2% | 1% |
| 核能 | 17% | 11% | 12% | 12% | 11% | 9% | 13% | 18% |
| 水力 | 17% | 16% | 17% | 16% | 16% | 14% | 18% | 20% |
| 其他再生能源 | 2% | 6% | 14% | 21% | 12% | 15% | 18% | 38% |

太陽光電引領再生能源的成本降低，從 2010 年開始，在主要市場中公用事業和分散式規模的安裝成本下降了 40-75% (圖二)。歐洲是降低太陽光電成本的領導者，而中國的低成本製造業也具有重要的影響，使得成本從佈設開始就迅速下降。相比之下，美國由於各種非硬體成本，如許可/管制、安裝和維護成本，是太陽光電的高成本地區，但成本仍持續往下降。由圖二也可發現各國發展太陽能的重心不同，義大利和澳洲主要發展市場為分散式家用太陽能板，而英國和印度則以中大型地面型太陽光電為主。我國地狹人稠，住宅常為公寓或大樓型式，屋頂型太陽能板設置難以滿足家庭需求，由能源局規劃屋頂型及地面型太陽光電裝置容量分別為 3 GW 及 17 GW，可見我國規劃方向將以地面型太陽光電為主。由太陽能設備整體成本的下降趨勢，亦顯示我國能源局規劃之太陽光電政策採先緩後急，是有脈絡可循。

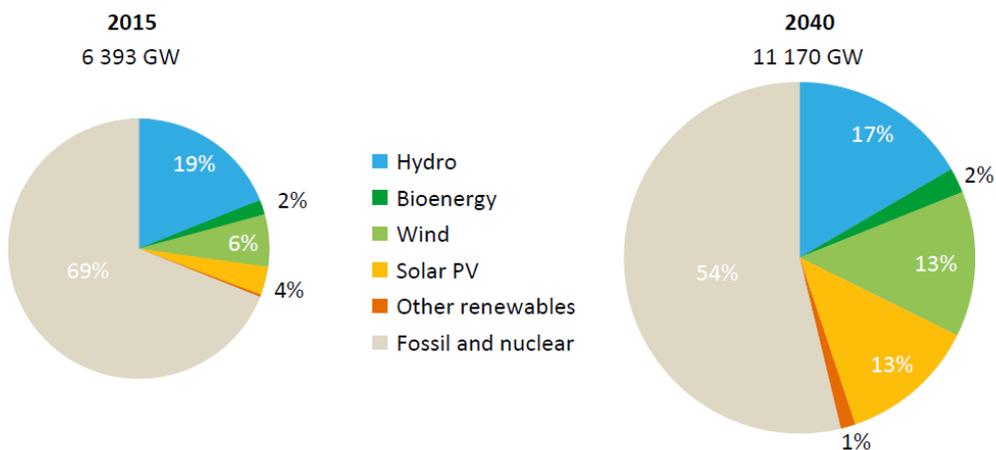


Solar PV investment costs have fallen rapidly around the world

Notes: For buildings, no data are available for China in 2010 and 2011. For utility, no data are available for the United Kingdom and Japan for 2010.

圖二：不同市場的太陽光電投資成本指標 (資料來源：IEA WEO2016 圖 10-6)

在新政策情景中，再生能源占到 2040 年全球新發電裝機容量的近 60%。從 2016 年到 2040 年，新增容量超過 4,000 GW，是燃煤增加量的四倍。至 2040 年，再生能源新增容量中，有 37% 是風能（由中國和歐盟領導），35% 的太陽光電（中國，印度和美國）以及約 20% 的水電（中國和拉丁美洲），整體再生能源佔總發電量的近一半，高於 2015 年的不到三分之一（圖三）。太陽光電由 2015 年佔 4% 成長至 2040 年佔 13%，其成長幅度超過風能(由 6% 成長至 13%)。



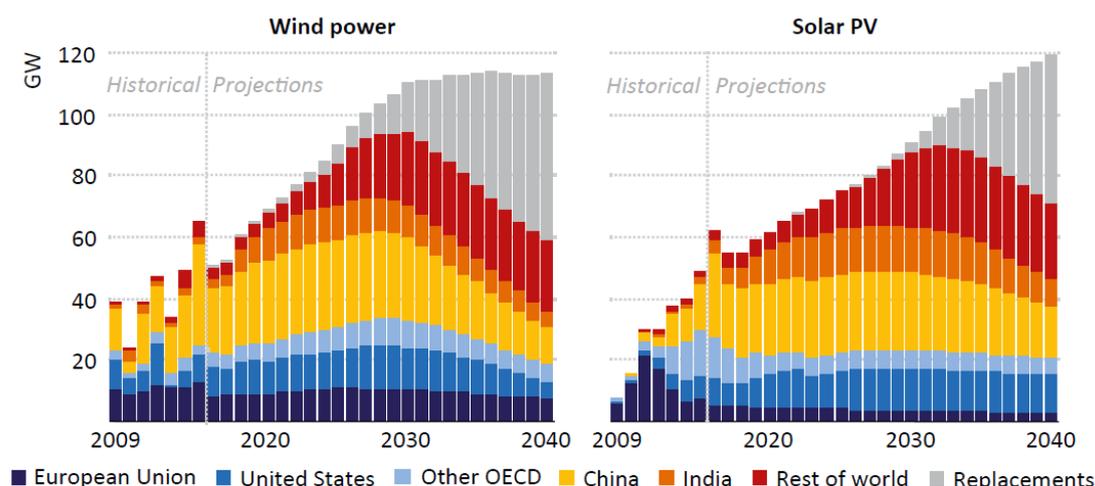
Renewables account for nearly half of total installed capacity by 2040, up from 31% today

Note: Other renewables include CSP, geothermal and marine.

圖三 新政策情境下全球電力裝置容量增長比較 (資料來源：IEA WEO2016 圖 10.9)

在 450 種情境下全球能源需求持續增長，但不到新政策情境的三分之一，與能源相關的二氧化碳排放量與需求不再呈現正相關，排放量並開始下降。到 2040 年，全球能源需求量比現在低不到 10%，但全球能源二氧化碳排放量下降了 43%（幾乎是新政策情景的一半），其中電力部門至 2040 年將削減四分之三的排碳量(新政策情境下為增加 6%)。

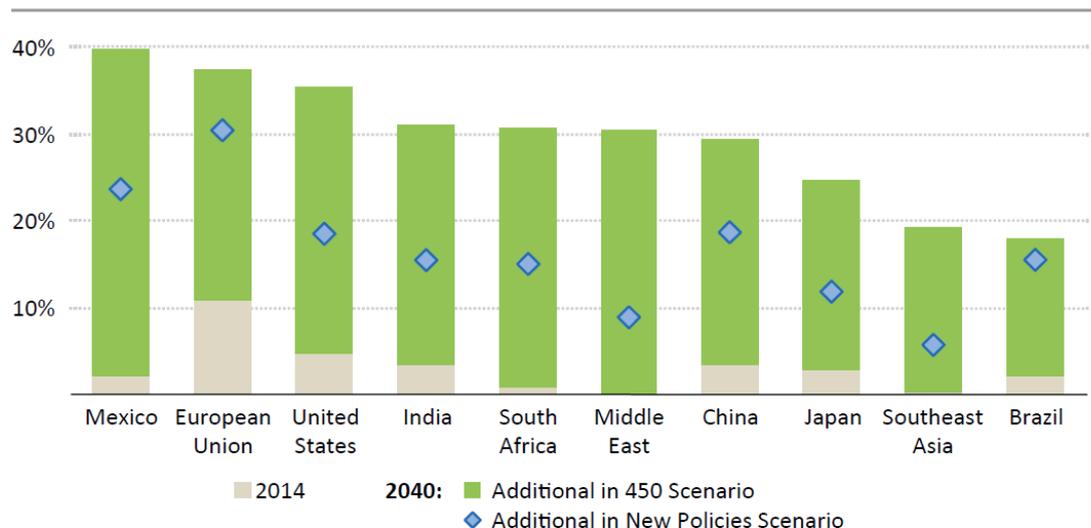
2040 年再生能源佔全球發電裝置容量的 60%，為現今的 3.5 倍，其中風力發電、水電、太陽光電累積裝置容量均超過 2,000 GW。所有再生能源皆大幅成長，尤以風力發電和太陽光電為最。圖四顯示在 450 情境下，至 2030 年，風能新增裝置量將以每年超過 100 GW 成長，而太陽光電新增裝置量於 2030 年前以每年超過 90 GW 成長，之後至 2040 年則以每年超過 110 GW 成長。其中，仍然以中國、美國及印度為最主要成長的市場，超越前幾年大幅成長的歐盟市場。且至 2030 年後，汰換老舊的太陽能板(Replacements)亦將成為市場重要的成長主力。



The global market size for wind and solar PV doubles in the 450 Scenario

圖四 450 情境下風能及太陽光電新增裝置量年成長(資料來源：IEA WEO2016 圖 10.18)

在新政策情景中，到 2040 年風能發電量將達到 2014 年發電量的五倍，太陽光電電量將增長十一倍。風能和太陽光電合計佔全球發電量成長的三分之一，並在 2040 年提供全球發電量的 15%。風力和太陽光電在總發電中的比率以歐盟最高（超過 30%），其次是墨西哥和澳大利亞（各約四分之一），中國和美國在 20% 以下。(圖五)



More than one-quarter of global electricity is generated by wind and solar PV by 2040 in the 450 Scenario

圖五 新政策情境與 450 情境下，不同區域的風能與太陽光電總電力容量占比 (資料來源：IEA WEO2016 圖 12.1)

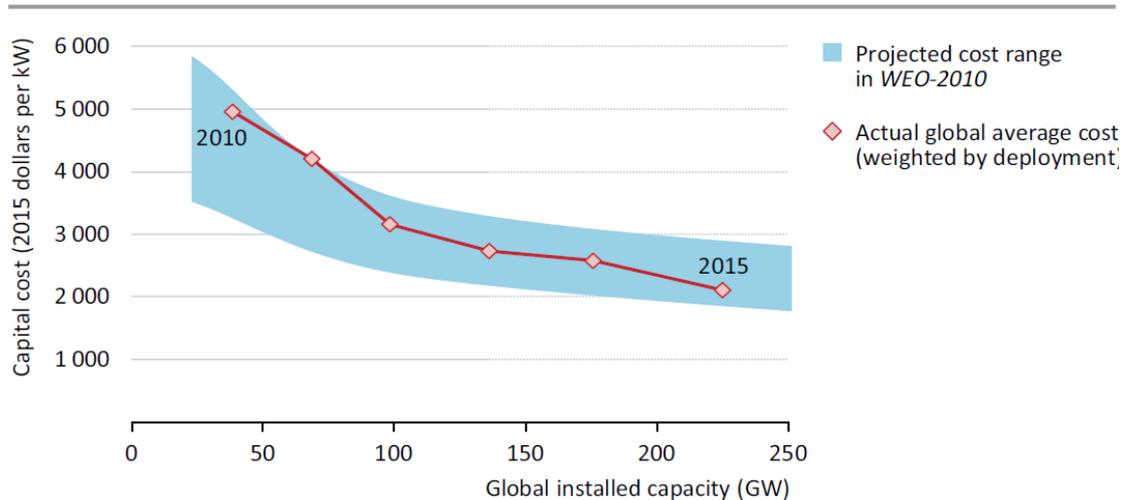
表三 各情境下全球再生能源消費情形(資料來源：IEA WEO2016 表 10.1)

| | 2014 | New Policies | | Current Policies | | 450 Scenario | |
|-------------------------------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|--------------|---------------|
| | | 2025 | 2040 | 2025 | 2040 | 2025 | 2040 |
| Electricity generation (TWh) | 5 383 | 8 960 | 14 271 | 8 384 | 12 305 | 9 890 | 19 883 |
| Bioenergy | 495 | 785 | 1 353 | 754 | 1 151 | 843 | 1 899 |
| Hydropower | 3 894 | 4 887 | 6 230 | 4 817 | 5 984 | 4 994 | 6 891 |
| Wind | 717 | 2 118 | 3 881 | 1 859 | 3 132 | 2 575 | 6 127 |
| Geothermal | 77 | 150 | 361 | 141 | 299 | 181 | 548 |
| Solar PV | 190 | 953 | 2 137 | 761 | 1 539 | 1 153 | 3 209 |
| Concentrating solar power | 9 | 61 | 254 | 49 | 170 | 137 | 1 118 |
| Marine | 1 | 6 | 54 | 3 | 30 | 7 | 92 |
| <i>Share of total generation</i> | <i>23%</i> | <i>30%</i> | <i>37%</i> | <i>27%</i> | <i>29%</i> | <i>36%</i> | <i>58%</i> |

表三全球再生能源的消費需求預估顯示，整體再生能源的需求將由 2014 年的 5,383 TWh 成長至 12,305 TWh~19,883 TWh，其中太陽光電將繼水力發電及風能後最大的發電來源，且成長幅度將超越風能及水力發電。

三、太陽光電成本趨勢

近年來，有越來越多的國家藉由干預市場，以促進再生能源的發展，特別是對於風能和太陽能發電技術，使再生能源的成本下降並改善競爭力，其中電力部門是主要受益者，太陽光電和風力發電成本的大幅下降，已將理論的成本下降曲線轉換為現實（圖六）。自 2010 年以來，各國不斷強化支持太陽光電的政策，使得太陽光電得以在 5 年內達成預期耗費 15 年才能達成的目標。

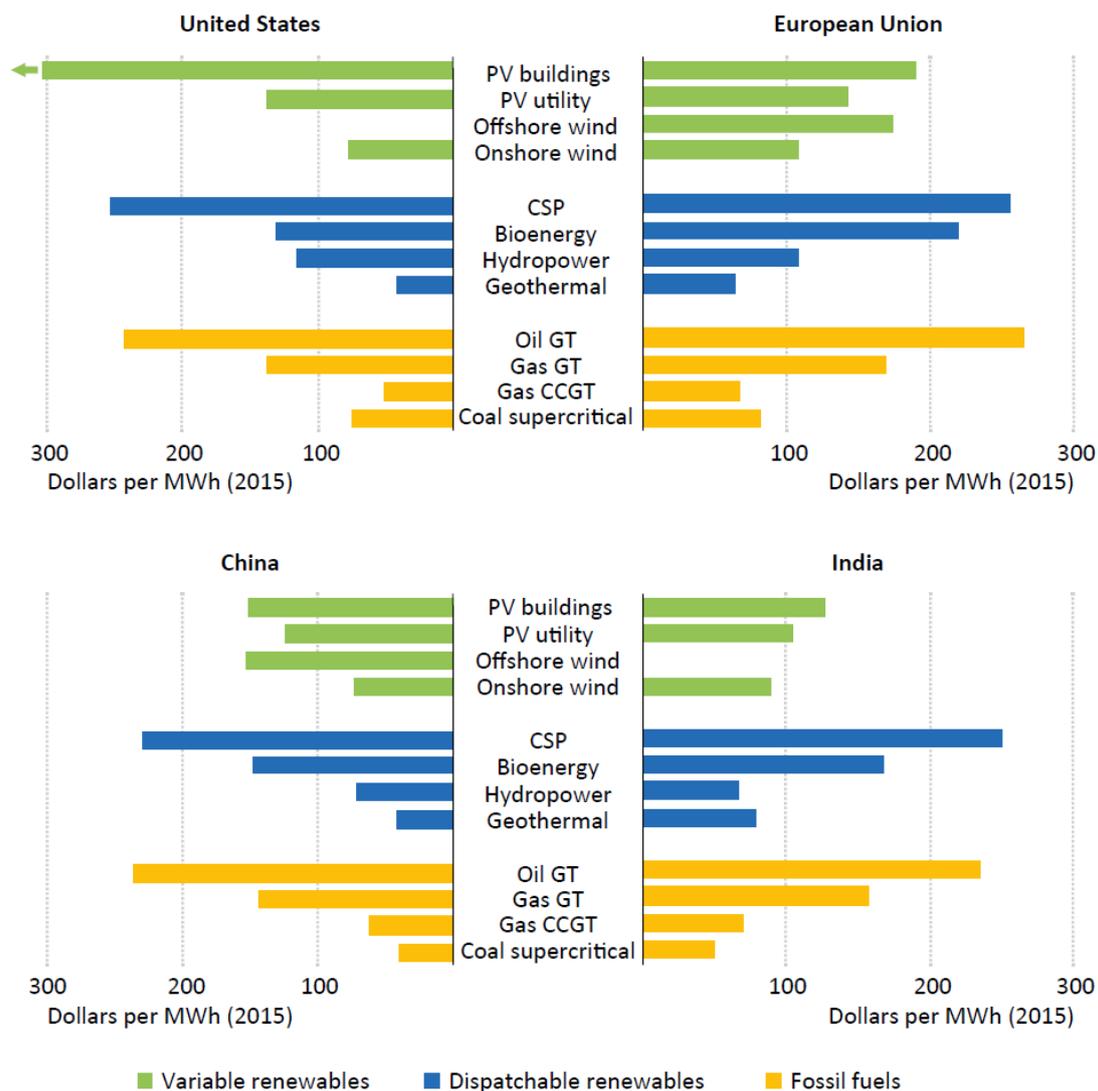


Increasing policy support has accelerated the cost reductions of solar PV

圖六 太陽光電的理論與實際加權平均資金成本(WACC) (資料來源：IEA WEO2016 圖 11.2)

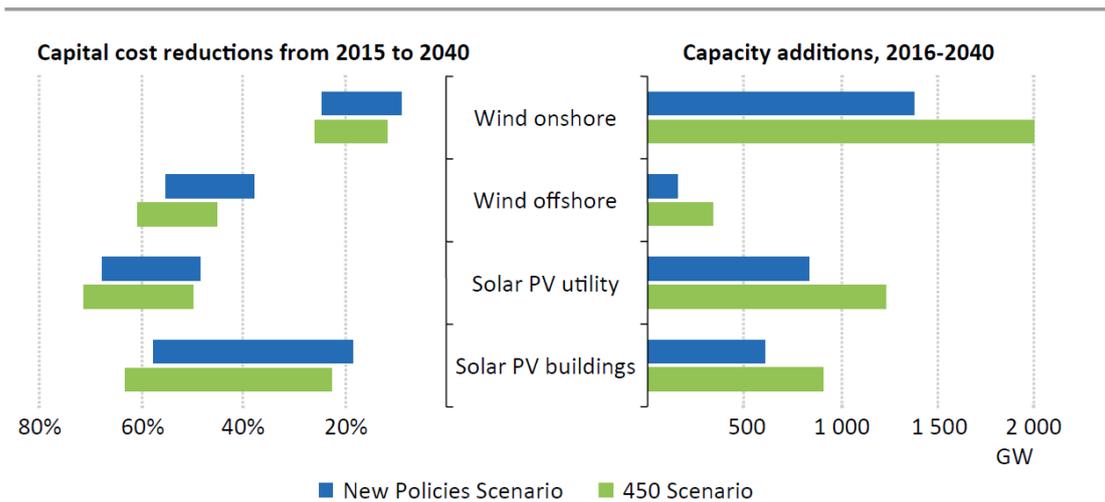
過去五年太陽光電全球平均資本成本下降了近 60%。2015 年完成的公用事業規模太陽光電計畫的全球平均資本成本約為 1,700 美元/kW，其中德國、中國和印度的成本最低，約在 1,200-1,450 美元/ kW 之間，而在美國，南非和日本等成本較高的市場，平均約 2,000 美元/kW 以上。另外，因為缺乏規模經濟和特定場地的需求，增加了每次安裝的時間和成本，2015 年安裝建築物上的太陽光電系統的全球平均資本成本高於 2,400 美元/ kW，相較大規模安裝之成本幾乎高出 50%。在總資本成本中，太陽光電模組之成本，目前在大多數市場上，佔公用事業規模太陽光電系統之成本不到一半，是建築物太陽光電系統的四分之一。

在發電均化成本(Levelised Cost of Electricity, LCOE)方面，2015 年完成的公用事業規模太陽光電計畫平均約 135 美元/MWh，區間大致落在 100~300 美元/MWh。（圖七）。2015 年建築物太陽光電全球平均資本成本為 260 美元/MWh，區間大致上落在 100 至 400 美元/ MWh。



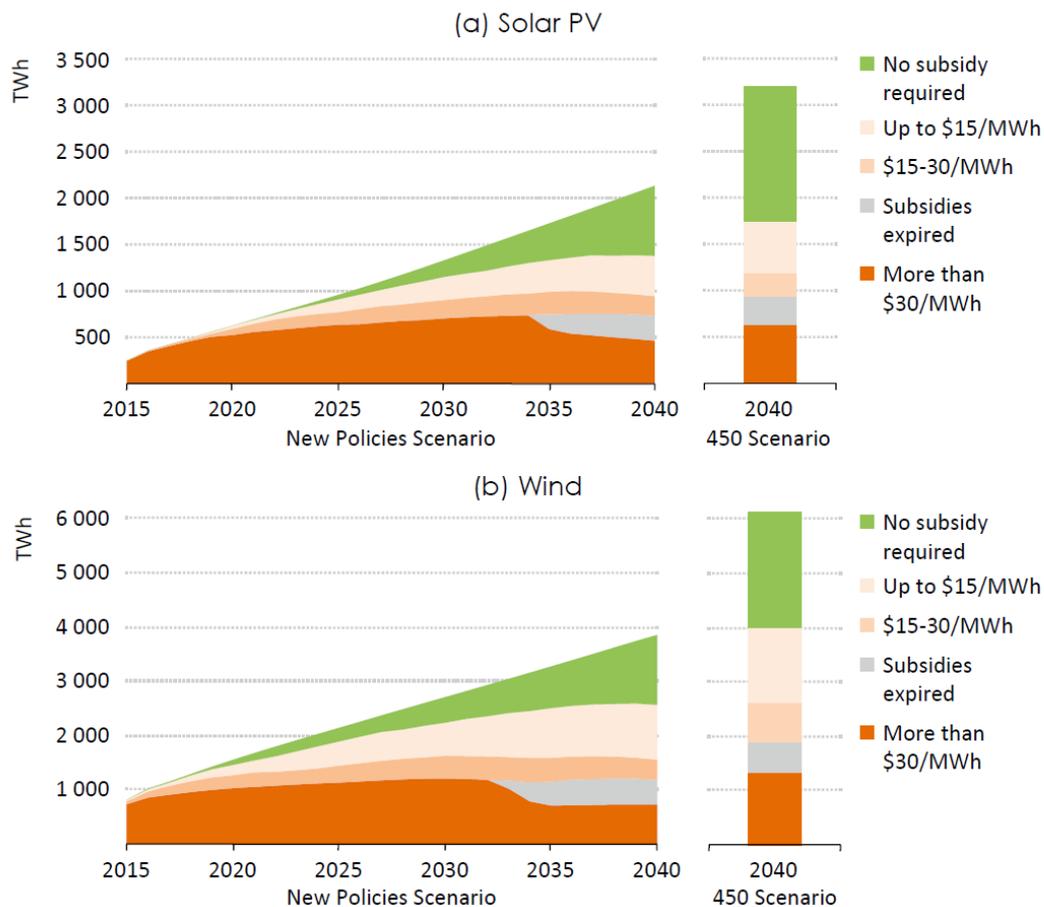
圖七 2015 年不同技術和地區的發電均化成本比較(資料來源：IEA WEO2016 圖 11.3)

電力部門的再生能源技術成本預計未來 25 年持續下降。根據報告中假設之技術學習率估計，在 450 情境下布置更多的太陽光電將使其資本成本更低於新政策情境(圖八)。但勞動成本的上漲及最適場地的減少則會對未來成本下降帶來壓力。另外，太陽光電強勁的增長量也加速技術的進步，並降低太陽光電模組相關成本，預期至 2040 年主要市場公用事業規模的全球平均資本成本將降低至 800 美元以下。此外，技術的進步也有助於提高太陽能板的效率，降低單位容量的大小，進而降低運輸和安裝的成本，對於建築物太陽能板的成本降低有很大的助益。在新政策情境中，建築物太陽光電的市場將持續成長，至 2040 年含更換將接近 40 GW，占整體太陽光電市場的 40%，2016 年到 2040 年也將累積增加 600 GW 的裝置容量，資本成本於主要市場也將下降 40~50%。



圖八 至 2040 年預期風能及太陽光電增加容量及成本減少比例 (IEA WEO2016 圖 11.6)

再生能源的成本持續下降，在 2040 年之前風能和太陽光電的發電均化成本於大多數市場將遠低於 100 美元/MWh。另一方面，化石燃料發電廠的成本則會因為燃料價格的上漲而超過 100 美元/MWh，對於化石燃料電廠，更高的碳稅價格將使未配備碳捕捉和儲存技術的石化燃料工廠大大提高發電均化成本。在太陽光電發電補助方面，因成本的逐漸下降，至 2040 年太陽光電發電總量的 30% 已不需要補助，而 2040 年後，具競爭性的新裝置或替換的太陽光電占比將達到 40%。(圖九)



圖九 不同情境下風能及太陽能發電補助情形(IEA WEO2016 圖 11.14)

四、結論

本報告整理 WEO 2016 報告有關太陽光電之發展及成本趨勢，不論是依據巴黎協議後各國自我減量承諾所訂定之新政策情境假設，或是管制全球升溫不超過 2°C 的 450 情境，太陽光電都將較現今大幅成長，預計從 2014 年年消費 190 TWh 成長至 2040 年年消費 1,539 TWh~3,209 TWh。

透過各國支持性的政策，令太陽光電製造達到技術創新與規模經濟效應，從而使得太陽光電的全球平均資本成本於過去 5 年大幅度的下降 60%，更有利於太陽光電的推廣，推估 2016 年太陽光電發電量將達 300TWh，到 2020 年成長達 500 TWh[2]。而其設置成本也將隨著技術創新而下降，將由 2015 年平均資金成本 1700 美元/kW 下降到 800 美元以下。另外在太陽光電的發電均化成本方面，2015 年完成的公用事業規模太陽光電計畫平均約 135 美元/MWh，本報告預計至 2040 年將下降至 100 美元/MWh，但印度 2017 年 5 月最新的太陽光電競標電價已達 2.62 盧比/kWh(約 40.6 美元/MWh)[3]，也顯示太陽光電的確有能力達到具競爭效益。然而在太陽光電硬體設備成本下降後，也應思考如何降低各種非硬體成本，圖二顯示美國由於各種非硬體成本，如許可/管制、安裝和維護成本，使其太陽光電成本遠高於英國和印度等國家。相關非硬體成本如許可或管制機制是否會延

宕設備裝設的時間，造成廠商資金成本上升，且太陽光電投資期程非常長，為了鼓勵民間業者投入發展太陽光電，如何營造適合投資的環境，簡化申請程序及鼓勵融資措施都是應思考的方向。

新政府上任後規劃 2025 年我國能源轉型目標，再生能源發電佔比增至 20%，燃氣發電增至 50%，燃煤發電則降低至 30%。與 WEO 報告(表二)預估 2025 年化石燃料占比達到 51~62% 相較，我國廢核後化石燃料占比反而將由 2014 年 75.23% 上升至 80%，雖然石化燃料結構有改變，但能否兼顧全球減碳目標，是值得多加注意的。而我國再生能源將由 2015 年佔發電量 4.06% [4] 提升至 2025 年 20%，增加近 5 倍，也需注意 WEO 報告中所提到有關電力系統無法隨著再生能源比例上升有效整合，而讓能源轉型效率下降且昂貴的問題。以中國大陸而言，近年來全力發展太陽光電和風能，但電網建設並未銜接到位，造成生產出來的電力無法送出的棄光棄風現象已慢慢開始發酵 [5]，而我國現在積極發展再生能源政策，也需要評估相應的智慧電網架設是否得以跟上再生能源發展的腳步。

另依據能源局太陽光電 2 年推動計畫規劃 2025 年太陽光電設置容量達 20GW [6]，與 2016 年底設置容量 1.21GW 相比，仍有相當大的努力目標。現今能源局規劃太陽光電 2 年推動計畫政策採先屋頂後地面，先緩後急的方式推廣太陽光電。但實務上屋頂型太陽能板除了公有屋頂較無產權問題，可全力配合政策推行外，民間屋頂不管住宅或是商業用途，都會面臨到資金回收期過長 [7]，且可能牽涉到產權所有人整合，以及和屋頂廣告收益競合的問題。而地面型太陽能板也面臨如鹽業用地有環保與生態衝擊的疑慮，以及農地產生假種田真種電等問題 [8]，凸顯出在地狹人稠的台灣，太陽光電用地取得不易的問題。

在 106 年電業法修正通過後，已明列核能發電將於 2025 年走入歷史，再生能源的發展除了代表我國實現力抗全球暖化的決心，更肩負填補我國能源缺口的重責，故如何確保再生能源發展政策順利執行相當的重要。建議政府除可優先以較不具爭議的公有屋頂及土地建置太陽光電之外，也須持續溝通，透過政策補助鼓勵民間推廣太陽光電。此外，也需注意當再生能源占比上升後，相關電網饋線如何有效整合，以因應太陽光電或風力發電間歇性發電的特性，及避免產生棄電的風險。

參考文獻：

[1] World Energy Outlook 2016.

[2] IEA Renewable Energy Medium-Term Market Report 2016.

[3] The Guardian, 2017 年 5 月 10 日, website :

<https://www.theguardian.com/environment/2017/may/10/indian-solar-power-price-s-hit-record-low-undercutting-fossil-fuels>

[4] 中華民國 104 年能源統計手冊，能源局，2016 年。

[5] “中國棄風棄光 對台灣再生能源有什麼啟示？”天下雜誌，2016 年 10 月 27 日，website : <http://www.cw.com.tw/article/article.action?id=5079045>

[6]太陽光電 2 年推動計畫，能源局，2016 年 9 月 8 日。

[7] “太陽能發電的機會與挑戰”，能源報導，2015 年 10 月。

[8] “假種田真種電 政府看不見?”，聯合晚報，2016 年 12 月 20 日，Website：

<https://money.udn.com/money/story/5648/2180395>