

國際再生能源總署「2017年再生能源發電成本」報告

—2017年均化成本，太陽光電 10 美分/kWh、陸域風電 6 美分/kWh

林祥輝

國家能源發展策略規劃及決策支援能量建構計畫

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

國際再生能源總署(IRENA)的「2017年再生能源發電成本」報告指出，自2010年到2017年期間，太陽光電成本下降約73%，陸域風電成本下降約23%；2017年全球電力均化成本(LCOE)，太陽光電降至10美分/kWh、陸域風電降至6美分/kWh、水力發電為5美分/kWh、生質能與地熱發電為7美分/kWh，這些再生能源正逐漸成為具有價格競爭力的電源。預測到2020年，太陽光電的成本有望降至6美分/kWh，陸域風電則將降至5美分/kWh。最好的陸域風電和太陽光電項目，到2019年可能會以3美分/kWh或更低的價格提供電力。該報告還強調，拍賣結果顯示，2020年至2022年期間投入營運的離岸風電和聚光型太陽能項目的成本將在6~10美分/kWh之間。因此，IRENA預測到2020年所有再生能源技術將與化石燃料展開電力價格的競爭。除了全球競爭性採購的擴大，技術創新的持續發展、大量經驗豐富的大中型計畫開發業者競相尋求擴大全球市場業務等，被認為是近期再生能源電力成本降低的主要推動因素。這些技術成本的下降是前所未有的，顯現再生能源正在打破全球能源系統的樣貌。

關鍵字：再生能源、電力均化成本、LCOE

一、前言

依據國際再生能源總署(IRENA)的統計資料[1]顯示，全球再生能源發電裝置容量(installed capacity)從 2010 年的 1,229 GW 持續增加至 2016 年的 2,011 GW，年均成長約 8.6%。在 2016 年的總設置量中，如圖 1 所示，水力(不含抽蓄水力)占一半以上達 56.1%，其次為風力(陸域風電和離岸風電)占 23.2%、太陽能(太陽光電和聚光型太陽能發電)占 14.7%、生質能占 5.3%。

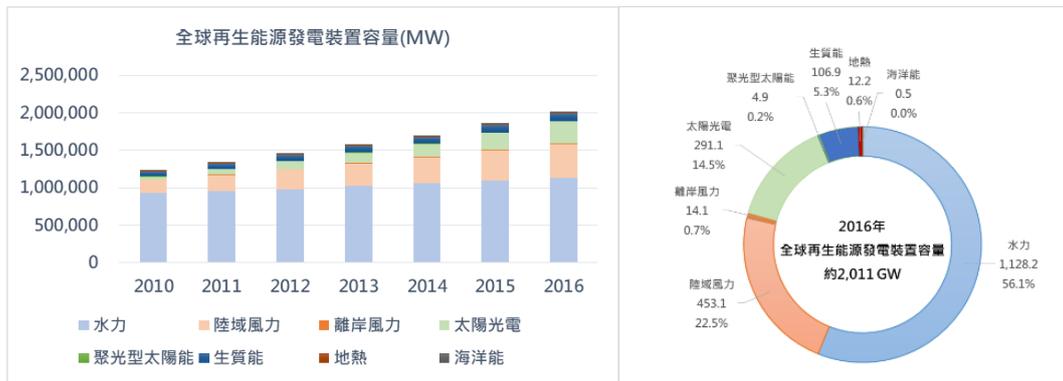


圖 1、全球再生能源的設置量[1]

就風力和太陽能來看，如圖 2 所示，2016 年陸域風電設置量達 453 GW，較 2010 年增加 1.5 倍；離岸風電設置量 14 GW，較 2010 年增加 3.5 倍；太陽光電設置量 291 GW，較 2010 年增加 6.4 倍；聚光型太陽能發電(Concentrating Solar Power, CSP)設置量 4.9 GW，較 2010 年增加 2.8 倍。

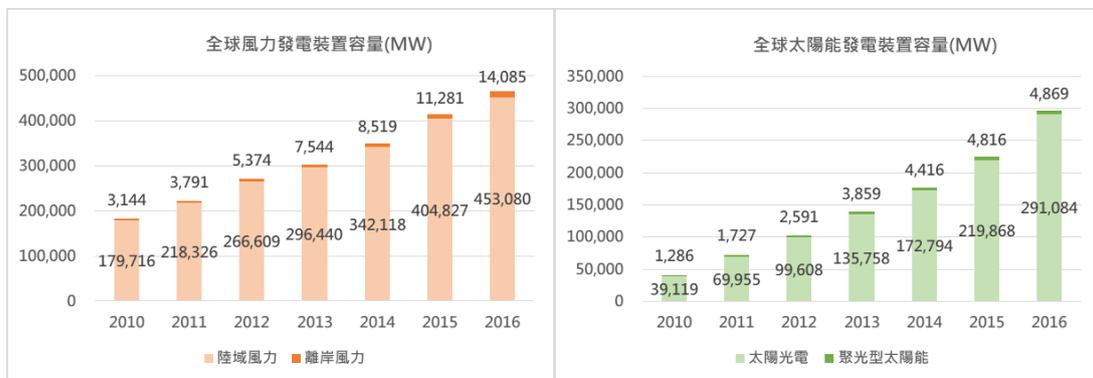


圖 2、全球風力和太陽能的設置量[1]

國際再生能源總署(IRENA)擁有 2 個資料庫，一為再生能源成本資料庫，包含來自全球公用事業規模(utility-scale)15,000 個計畫案的詳細資料，裝置容量超過 1,000 GW；另一為拍賣資料庫，涵蓋 7,000 多個計畫，近 300 GW 的裝置容量。IRENA 根據這 2 個資料庫的數據，預測主要再生能源技術的發電成本趨勢，並於 2018 年 1 月 13 日公布「2017 年再生能源發電成本」報告[2]。

該報告指出，全球再生能源設備的競爭性採購，包括拍賣，雖僅占全球再生能源部署的一小部分，然而這些機制在新市場上正促使發電成本的快速下降，進而加快再生能源的部署，特別是太陽光電和風力發電，相較於化石燃料的發電成本，這些再生能源在沒有財務支援下已具有價格競爭力，對進一步擴大再生能源的發展，產生了良性的循環。

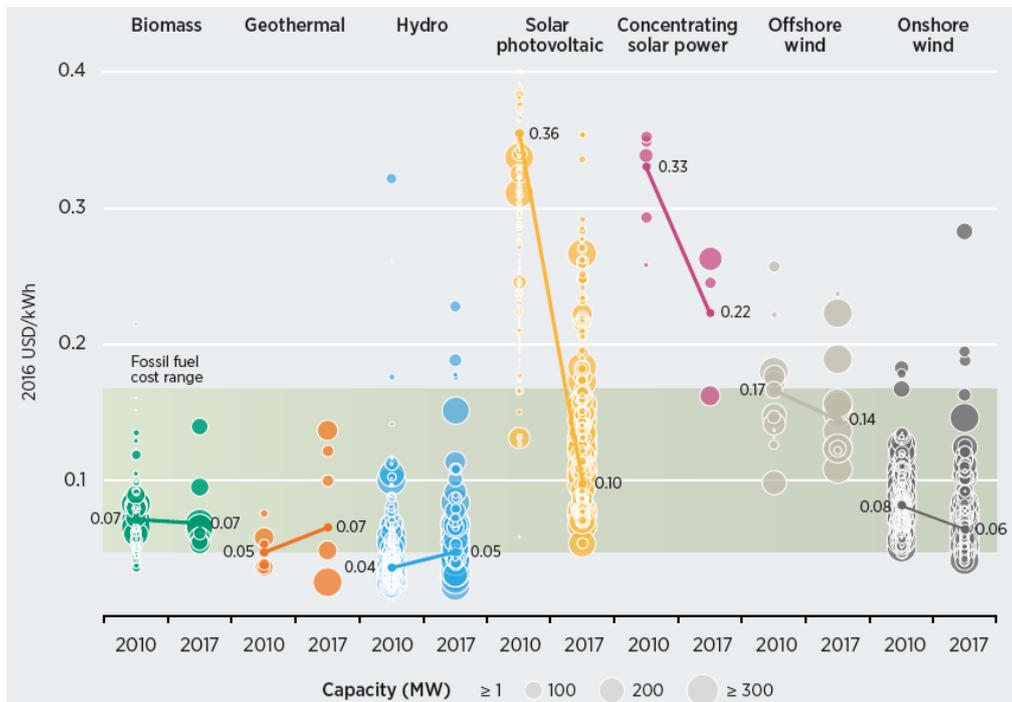
二、再生能源的電力成本

依據 IRENA 的「2017 年再生能源發電成本」報告，以下擇要說明主要再生能源技術的電力均化成本(levelised cost of electricity, LCOE)、學習曲線(learning curve)、總安裝成本和容量因數。

(一)全球加權平均的電力均化成本(LCOE)

2010 年至 2017 年公用事業規模再生能源的全球加權平均的電力均化成本(LCOE)如圖 3 所示，太陽光電(solar photovoltaic)成本下跌幅度為非常顯著的約 73%，至 10 美分/kWh(約新台幣 2.95 元/度)；陸域風電(onshore wind)成本下降約 23%，至 6 美分/kWh(約新台幣 1.77 元/度)，目前日常運轉成本為 4 美分/kWh；此外，2017 年水力發電(hydropower)成本為 5 美分/kWh、生質能與地熱發電成本為 7 美分/kWh。這些再生能源的發電成本已落在化石燃料發電成本 5~17 美分/kWh 之範圍。(以 1 美元兌新台幣 29.5 元換算)

離岸風電(offshore wind)和聚光型太陽能發電(CSP)雖然仍處於初期部署階段，但其成本在 2010 年至 2017 年間持續下滑。2017 年離岸風電的 LCOE 為 14 美分/kWh，CSP 為 22 美分/kWh。



註：圓圈的直徑表示計畫案的大小，圓心代表每個計畫案的成本。粗線是每年投入營運發電廠的全球加權平均 LCOE 值。綠色區代表化石燃料發電成本範圍 5~17 美分/kWh。

圖 3、全球公用事業規模再生能源技術的電力均化成本(LCOE)[2]

近期再生能源的拍賣結果，其即將在未來幾年陸續投入營運的項目，提供有關未來電力成本走向的寶貴價格訊號，可以確認是到 2020 年之後其成本將持續降低。到 2020 年，所有商業化的再生能源發電技術預計將落在化石燃料電力成本的範圍內，且大部分在範圍的較低端，甚至低於該範圍。

根據全球最新拍賣和計畫案的成本數據，預測到 2020 年，太陽光電的成本有望再減半降至 6 美分/kWh，陸域風力發電的成本則將降至 5 美分/kWh，如圖 4 所示。最好的陸域風電和太陽光電項目將以 3 美分/kWh 或更低的價格提供電力，遠低於化石燃料目前的電力成本。

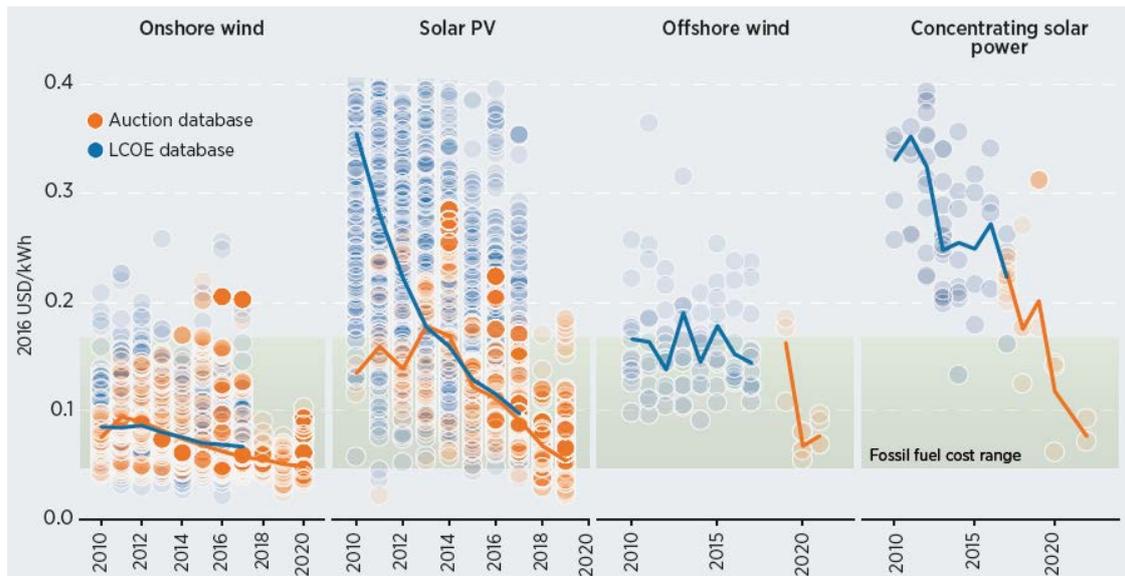


圖 4、太陽光電、CSP、陸域和離岸風電的 LCOE 和拍賣價格[2]

支持以上預測的理由是，在 2016 年和 2017 年杜拜、墨西哥、秘魯、智利、阿布達比及沙烏地阿拉伯的太陽光電拍賣價格創下新低紀錄，顯示在適當的條件下，2018 年以後 LCOE 可以降至 3 美分/kWh。最近，巴西、加拿大、德國、印度、墨西哥及摩洛哥的陸域風電拍賣結果，價格非常低，LCOE 已低至 3 美分/kWh，這表示陸域風電是最具價格競爭力的電源之一。

此外，最近 2016 年和 2017 年在比利時、丹麥、荷蘭、德國、英國的離岸風電拍賣結果顯示，對於 2020 年以後將投入營運的計畫，成本可能會降至 6~10 美分/kWh。CSP 也出現類似的情況，將在 2020 年投入營運的南澳洲計畫的成本為 6 美分/kWh，而在杜拜的一個計畫，從 2022 年開始投入營運的成本為 7 美分/kWh。IRENA 預測，到 2020 年，所有再生能源技術將與化石燃料呈現價格上的競爭力。

除了全球競爭性採購的擴大，技術創新的持續發展、大量經驗豐富的大中型計畫開發業者競相尋求擴大全球市場業務等，被認為是近期再生能源電力成本降低的主要推動因素。

(二)再生能源技術的學習曲線

IRENA 預測到 2020 年，陸域風電 712 GW，離岸風電 31 GW，太陽光電 650 GW，CSP 的全球累計裝置容量預計將達到 12 GW。對於此四種主要的太陽能 and 風力技術，從 2010 年到 2017 年的電力成本，以及從拍賣數據所顯示的 2020 年電力成本，可描繪 2010~2020 年期間的學習曲線(learning curve)，如圖 5 所示。

1. 陸域風電的學習率 (learning rate；即全球累計裝置容量每增加一倍時，LCOE 的下降率)，從 2010 年至 2020 年期間為 21%，在此期間的新增容量將達到 2020 年累計裝置容量的 75%。
2. 離岸風電的學習率，2010 年至 2020 年為 14%，在此期間的新增容量估計約為 2020 年累計裝置容量的 90%。
3. 太陽光電的學習率最高，2010 年至 2020 年為 35%，新增容量估計為 2020 年累計裝置容量的 94%。
4. CSP 的學習率較高，2010 年至 2020 年為 30%，新增容量估計為 2020 年累計裝置容量的 89%。

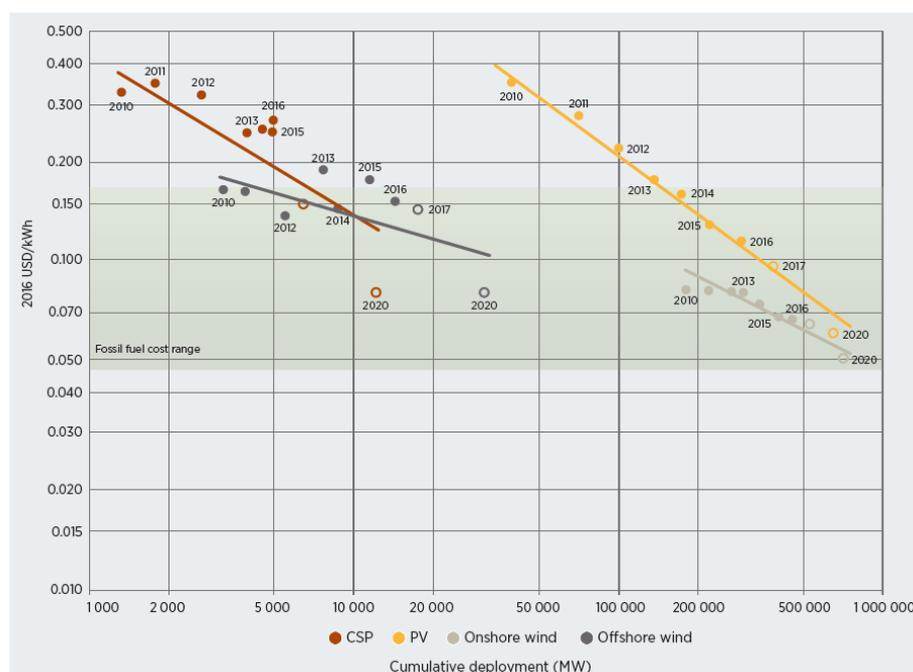


圖 5、太陽光電、CSP、陸域和離岸風電的 LCOE 學習曲線[2]

(三)全球加權平均的總安裝成本、容量因數¹及 LCOE

總體安裝成本的降低正在推動太陽能 and 風力發電技術不同程度的 LCOE 下降，特別是太陽光電的成本下降最為顯著。從 2010 年至 2017 年間四種再生能源技術的全球加權平均總安裝成本，相較於同一期間 LCOE 的下降如下：

1. 太陽光電的總安裝成本下降 68%，同期 LCOE 下降 73%。
2. 陸域風電的總安裝成本下降 20%，同期 LCOE 下降 23%。
3. 離岸風電的總安裝成本下降 2%，同期 LCOE 下降 13%。
4. CSP 的總安裝成本下降 27%，同期 LCOE 下降 33%。

公用事業規模太陽光電的全球加權平均總安裝成本從 2010 年的 4,394 美元/kW 下降到 2017 年的 1,388 美元/kW。容量因數(capacity factor)不斷提高，平均從 2010 年的 0.14 提高到 2017 年的 0.18，這是因為太陽光電的部署往擁有更好太陽能資源的區域轉移。由於總安裝成本的下降和容量因數的提高，使得太陽光電的 LCOE 急劇下降至 2017 年的 10 美分/kWh。(圖 6)

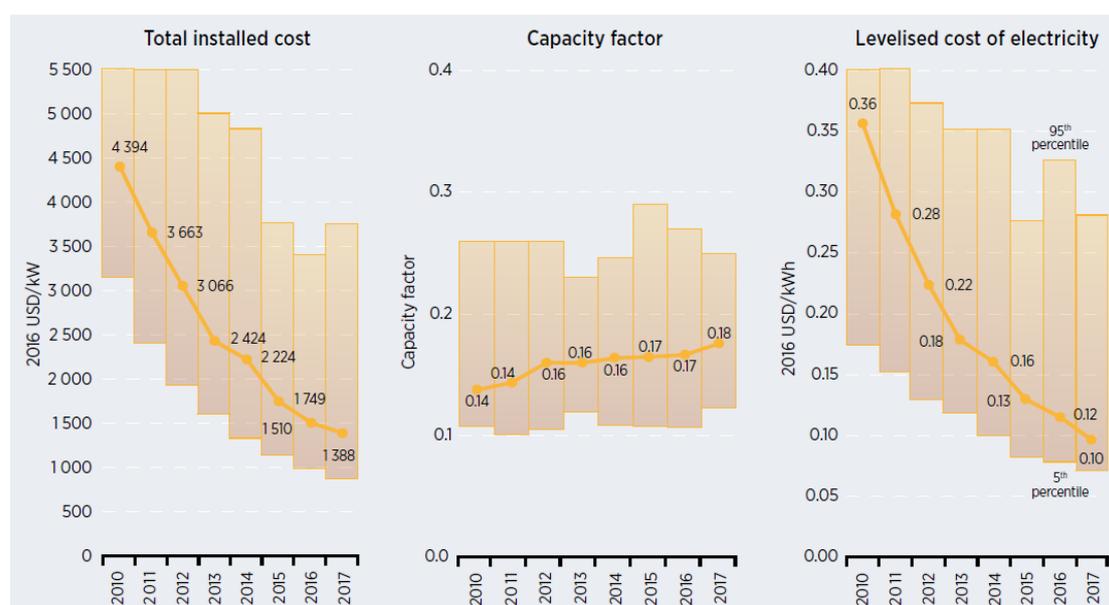


圖 6、太陽光電之總安裝成本、容量因數及 LCOE [2]

¹容量因數=特定機組的全年實際發電量/理論上全年最大發電量

在沒有財務支援下，陸域風電已可作為低成本的電力來源。隨著性能改善，容量因數提高，平均從 2010 年的 0.27 提高到 2017 年的 0.30，以及總安裝成本從 2010 年的 1,843 美元/kW 下降到 2017 年的 1,477 美元/kW，特別是因為相對較低成本結構的中國大陸和印度的部署量增加，使得全球加權平均的 LCOE 降低至 2017 年的 6 美分/kWh。(圖 7)

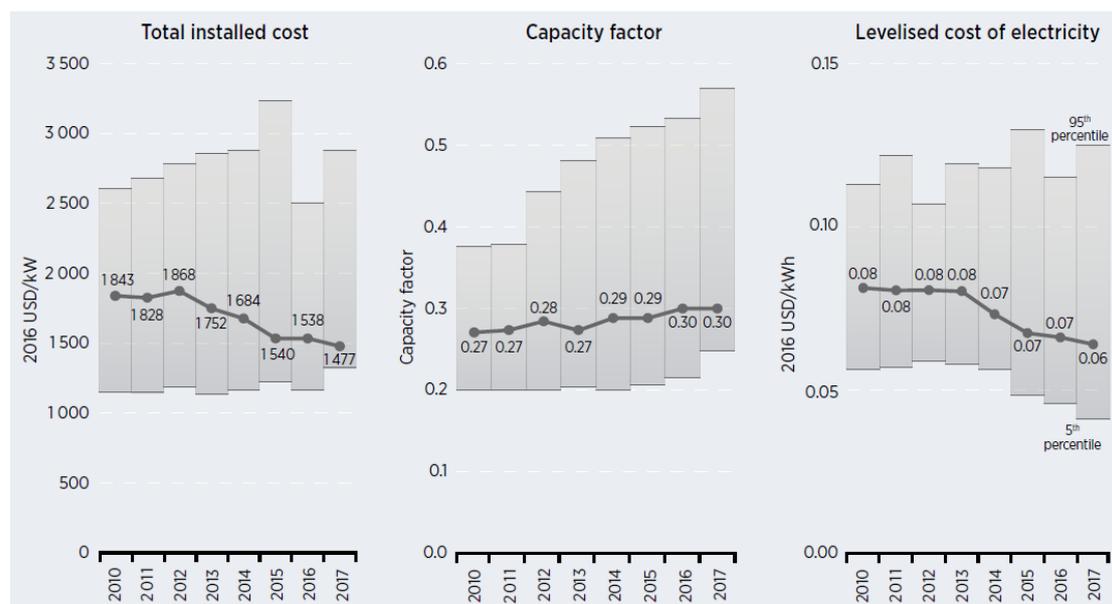


圖 7、陸域風電之總安裝成本、容量因數及 LCOE [2]

至於，離岸風電的累計裝置容量相對較低，2016 年底公用事業規模的安裝量僅為 13 GW。部署集中在歐洲，特別是比利時、丹麥、德國、荷蘭及英國。2000 年代初期離岸風電成本攀升，隨著部署的加速和進入更深遠的海域，進一步墊高基礎設施和安裝的費用。然而，成本已經達到頂峰，並且近年來已經顯現下降的趨勢，LCOE 約為 14~15 美分/kWh。此外，2016 年和 2017 年在比利時、丹麥、荷蘭、德國及英國的近期拍賣結果都顯示，離岸風電將成為歐洲非常具有價格競爭力的電源。(圖 8)

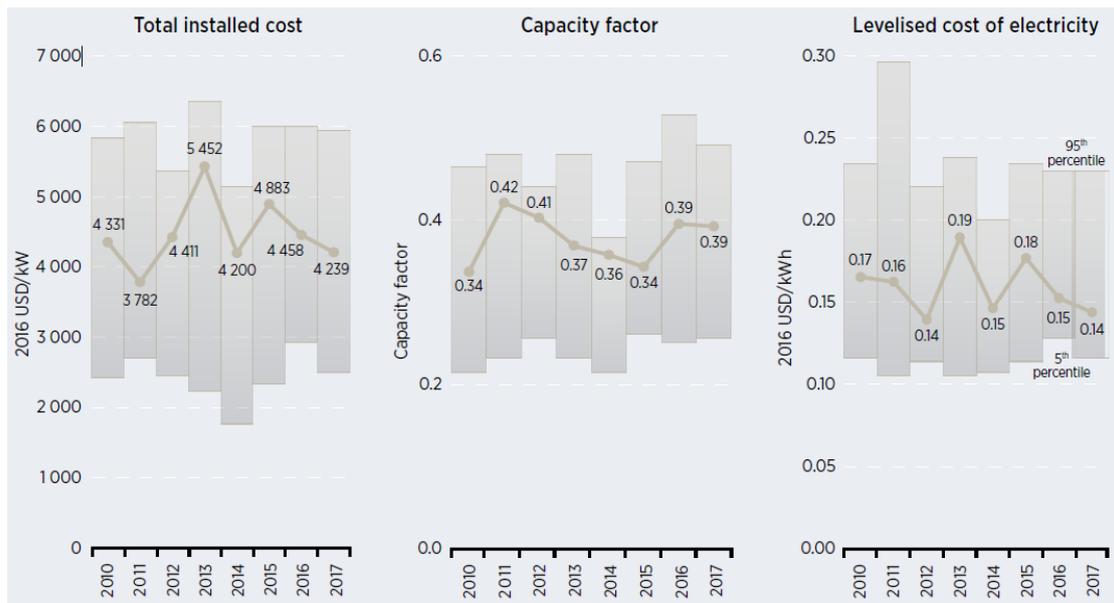


圖 8、離岸風電之總安裝成本、容量因數及 LCOE [2]

三、我國再生能源發展目標與躉購價格

我國政府規劃 2025 年實現再生能源發電量占 20%、天然氣 50%、燃煤降至 30% 以下的潔淨能源發電結構目標。目前我國再生能源以太陽光電、離岸風電為主要推動項目，經濟部已提出「太陽光電 2 年推動計畫」及「風力發電 4 年推動計畫」，以短期達標、中長期治本之策略，逐步達成 2025 年之發展目標。2025 年的設置目標量，太陽光電為 20 GW，其中屋頂型 3 GW、地面型 17 GW；風力發電為 4.2 GW，其中陸域風電 1.2 GW、離岸風電 3 GW[3]。

我國太陽光電推動原則，初期以屋頂型設置為主，逐步推動地面型大規模開發。經濟部於 2017 年 11 月 16 日公布「綠能屋頂 全民參與」推動規劃，採取「民眾零出資、政府零補助」原則，透過地方政府遴選適當營運商來協助民眾屋頂設置太陽光電系統，並以全額躉購、優先自用、餘電併入電力系統等方式，以完工時間之躉購費率，維持 20 年不變，鼓勵全民儘早參與設置[4]。

此外，為加速離岸風電推動，經濟部將 2025 年離岸風電裝置容量目標從 3GW 增至 5.5GW，「先遴選 3GW，後競價 2.5GW」推動策略。其中的 3GW 採遴選制，以躉購(FIT)費率保證收購綠電；2.5GW 採價格競標，低價者勝出[5]。

我國 2018 年度各類別再生能源電能躉購費率，如表 1 和表 2 所示，其中太陽光電和風力發電的躉購費率與全球 2017 年的 LCOE 的概略比較如下：

1. 太陽光電第一期地面型躉購費率為新台幣 4.3785 元/度，為全球太陽光電成本 10 美分/kWh(新台幣 2.95 元/度)的 1.5 倍；
2. 陸域風力發電(30 kW 以上、加裝低電壓穿越 LVRT 者)躉購費率為新台幣 2.7669 元/度，為全球陸域風電成本 6 美分/kWh(約新台幣 1.77 元/度)的 1.6 倍；
3. 離岸風力發電固定 20 年躉購費率為新台幣 5.8498 元/度，為全球離岸風電成本 14 美分/kWh(約新台幣 4.13 元/度)的 1.4 倍。

表 1、我國 2018 年度太陽光電設備電能躉購費率[6]

再生能源類別	分類	裝置容量級距	第一期上限費率(元/度)	第二期上限費率(元/度)
太陽光電	屋頂型	1瓩以上不及20瓩	5.8744	5.7493
		20瓩以上不及100瓩	4.7906	4.6885
		100瓩以上不及500瓩	4.4564	4.3636
		500瓩以上	4.3264	4.2429
	地面型	1瓩以上	4.3785	4.2943
	水面型(浮力式)	1瓩以上	4.7723	4.6901

註：

1. 符合高效能太陽光電模組者，躉購費率依表中上限費率加成 6%。
2. 參與經濟部「綠能屋頂全民參與推動計畫」設置之太陽光電發電設備，躉購費率依表中上限費率加成 6%後，再加成 3%。
3. 北部地區(包含北北基、桃竹苗、宜花)設置太陽光電，躉購費率再加成 15%。

表 2、我國 2018 年度再生能源(太陽光電除外)發電設備電能躉購費率[6]

再生能源類別	分類	裝置容量級距	躉購費率(元/度)		
風力	陸域	1瓩以上不及30瓩	8.6685		
		30瓩以上	有安裝或具備 LVRT 者	2.7669	
	離岸	1瓩以上	固定20年躉購費率 ^{註1} (上限費率) ^{註2}		5.8498
			階梯式躉購費率 ^{註3}	前10年	7.1177
				後10年	3.5685
川流式水力	無區分	1瓩以上	2.7988		
地熱能	無區分	1瓩以上	固定20年躉購費率 ^{註4}		5.1956
			階梯式躉購費率 ^{註5}	前10年	6.1710
				後10年	3.5685
生質能	無厭氧消化設備	1瓩以上	2.5765		
	有厭氧消化設備		5.0161		
廢棄物	無區分	1瓩以上	3.8945		
其他(海洋能、氫能或其他經中央主管認定可永續利用之能源)	無區分	1瓩以上	2.3226		
註1：屬離岸型風力發電設備，選擇適用固定20年躉購費率者，躉購費率為5.8498元/度。 註2：屬離岸型風力發電設備競標適用對象者，其上限費率為5.8498元/度。 註3：屬離岸型風力發電設備，選擇適用階梯式躉購費率者，前10年適用費率為7.1177元/度，後10年起適用費率為3.5685元/度。 註4：屬地熱能發電設備，選擇適用固定20年躉購費率者，躉購費率為5.1956元/度。 註5：屬地熱能發電設備，選擇適用階梯式躉購費率者，前10年適用費率為6.1710元/度，後10年起適用費率為3.5685元/度。					

四、結論

依據國際再生能源總署(IRENA)的「2017年再生能源發電成本」報告，對於全球公用事業規模再生能源發電計畫案和拍賣結果分析的主要發現為：

- (一)太陽光電的電力均化成本(LCOE)在2010年至2017年間下降73%，至10美分/kWh。
- (二)2010年至2017年，陸域風電的LCOE下降23%，至6美分/kWh，目前日常運轉成本為4美分/kWh。
- (三)到2019年，最好的陸域風力和太陽光電項目將以相當於3美分/kWh或更低的價格提供電力。
- (四)2017年投入營運的生質能和地熱項目的LCOE約為7美分/kWh。
- (五)在杜拜、墨西哥、秘魯、智利、阿布達比及沙烏地阿拉伯的太陽光電價格創下新低紀錄，3美分/kWh以下。
- (六)到2020年，計畫案和拍賣結果顯示，目前所有商業化的再生能源發電技術預測將落在3~10美分/kWh的範圍內競爭，甚至低於化石燃料的電力成本。

比較我國2018年度代表性的太陽光電、陸域和離岸風力發電的躉購費率和全球2017年的LCOE，約高於50%左右。隨著這些再生能源技術的創新發展，並透過全球競爭性的採購，將進一步帶動我國再生能源電力成本的降低，促使再生能源技術更具有價格競爭力，並有助於我國加速實現能源轉型的目標。

參考文獻

- [1] Featured Dashboard, International Renewable Energy Agency(IRENA), 2017.
<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>
- [2] Renewable Power Generation Costs in 2017, IRENA, 2018/1/13.
<http://irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>
- [3] 建置太陽光電技術平台2年推動計畫(核定本)，行政院前瞻基礎建設，2017/7。
<http://achievement.ey.gov.tw/cp.aspx?n=1E42BEB0F68720CB&s=CF1743EBF6B37034>
- [4] 「綠能屋頂 全民參與」，邀全民打造綠能家園！經濟部能源局，2017/11/16。
http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=11866
- [5] 網路「離岸風力發電政策恐引發政治風暴」 經濟部澄清說明，經濟部能源局，2017/11/29。
http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=12881
- [6] 中華民國一百零七年度再生能源電能躉購費率及其計算公式，經濟部，2018/1/8。
https://www.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/Law/Content.aspx?menu_id=5824