



再生能源之相關成本分析

—未來的太陽光電與風力發電成本將持續下降

蕭國鑫、闕棟鴻、洪嘉業

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

未來太陽光電的製造技術仍然遵循學習曲線21%的降幅，即發電成本仍在下降中。而在不同的裝置容量規模下，若太陽光電使用年限為25年，則2016年的均化發電成本將下降至新台幣1.4~2.7元/度，系統價格約為新台幣34,000元/kW；推估2026年的均化發電成本可以降至新台幣1~2元/度，系統價格將下降至新台幣24,800元/kW，年均降幅約3%。未來在發電效率提升後，太陽光電的發電成本將會趨於市電同價，或低於市電價格。

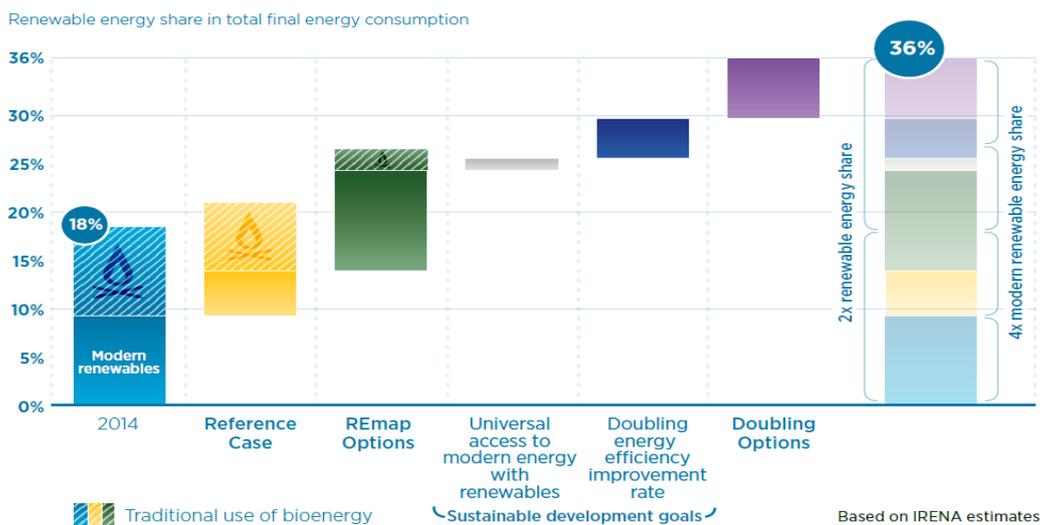
NREL 也評估國際上未來新型風力機組將具更佳效率，發電單位成本亦呈下降趨勢。例如國際上安裝 1-10MW 大型風力機組的平均單價為 2,346 美元/kW，每年營運成本約 33 美元/kW。而具備良好的風力潛能、低的風力機價格與風場投資成本、低棄風率、完善的電網連結及政府補助等均是影響風力發電成本的重要因素；美國有上述條件的支持，2015 年風力業者平均電發成本為新台幣 0.85 元/度，還原政府補助後的平均發電成本為新台幣 1.59 元/度。國際上的離岸風電發電成本目前仍高於陸域風電，主要離岸風電機組的興建成本遠高於陸域風力機組，評估整體發電成本約為陸域風電的 1.5~2 倍左右。

我國再生能源躉購費率的估算，主要是參考期初設置成本、年運轉維護費、年售電量、年營業利益及運轉年限等資訊後加以計算。推估我國陸域風力發電躉購費率約為 2.8 元/度，而離岸風力雖然年售電量高，但期初設置成本約為陸域風力機組的 3 倍，推估躉購費率約為 5.7 元/度。

關鍵字：再生能源、太陽光電、風力發電、均化成本

一、前言

美國能源資訊局(EIA)在 2016 年全球能源展望(IEO2016)參考情境中，說明再生能源是未來發展最快速的能源，2040 年前平均年增率達 2.3% [1]。國際再生能源總署(IRENA)2016 年 3 月出版之全球再生能源路徑分析報告，估計 2030 年的全球能源組合中，再生能源將呈現倍數成長，其在最終能源消費中的占比，將由 2014 年的 18% 成長至 2030 年的 36% (圖 1)，除了可創造就業機會外，亦將降低空氣污染及減緩全球氣溫上升 2⁰C 的可能性[2]。IRENA 及 Greenpeace 積極情境模擬中，亦預估 2050 年再生能源將占初級能源供給的 50%~70%；全球能源評估(GEA, Global Energy Assessment, UK, USA, Austria)也預測未來的住商及工業能源使用，因為能效的提升而降低需求，使得再生能源占比可能達 50% 以上(圖 2)[3]。



說明：

Reference Case:每個國家目前採行的規劃與政策。

REmap Options:目前既有政策上，再增加再生能源技術佈局。

Doubling Options:加速再生能源技術佈局與投資創新外，再加上深度的結構變動。

圖 1、2014 年~2030 年全球再生能源占比[2]

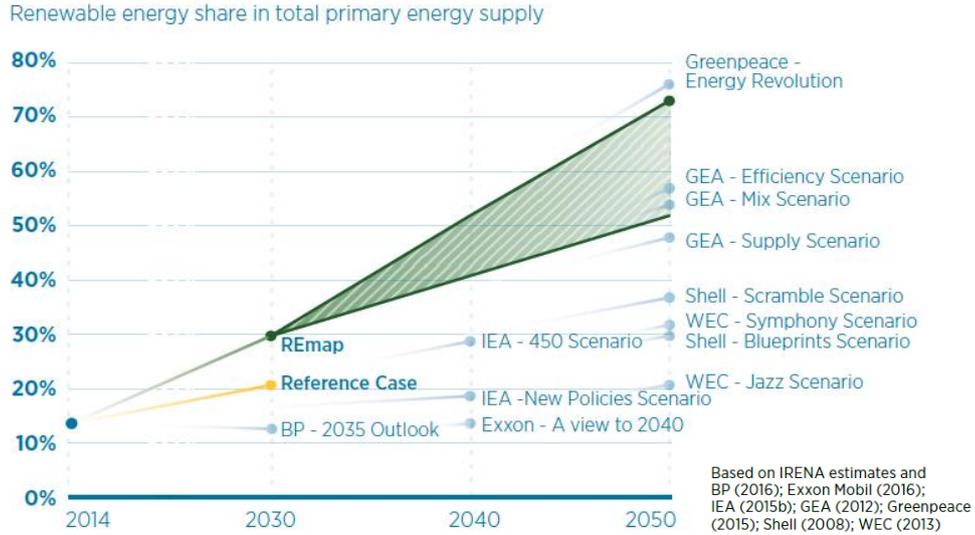


圖2、未來全球再生能源占比趨勢[3]

2030年要達到再生能源呈現倍數成長，除了結合各國能源政策的宣導外，重要關鍵是需要具有經濟投資效益的誘因。例如國際太陽能技術路徑圖(ITRPV)的研究報告，太陽光電的製造技術仍遵循過往的學習曲線21%的降幅；即除了再生能源的設備資本不斷下降外，未來太陽光電的發電成本仍呈現逐年下降趨勢(圖3)[4,5]。另外，美國國家再生能源實驗室(NREL)評估風力發電的單位成本亦在下降中，未來新型風力機組的風力渦輪機具有更佳效率，顯示風力發電單位投資金額也是呈下降趨勢[6]。

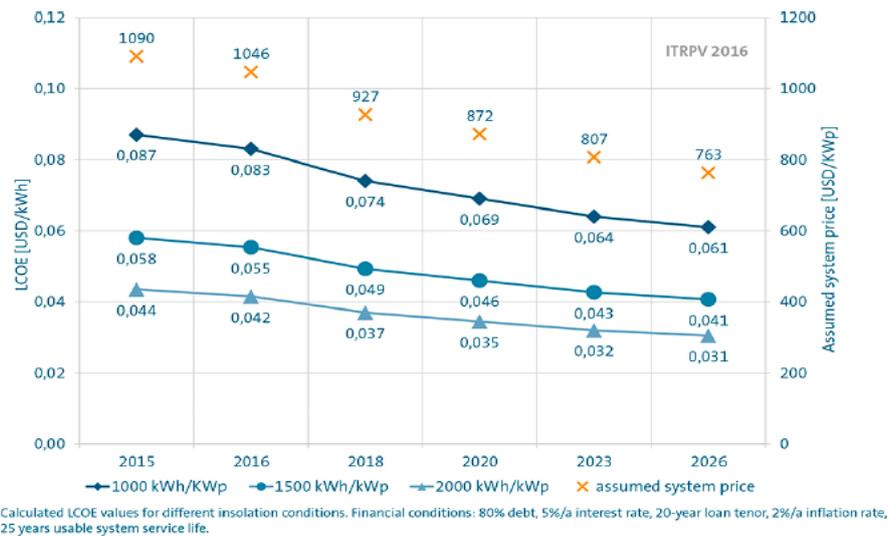


圖3、各種裝置容量下的太陽光電均化發電成本[5]

二、 再生能源發展

截至 2015 年底，全球再生能源累計裝置容量達 1,985GW(比 2015 年增加 152GW，年成長 8.3%)，並以水力發電占 61%最多(2015 年增加 33GW，如圖 4)；其中水電的裝置容量達 1,209GW，超過 3/4 以上都是裝置容量大於 10MW 的大型水力發電廠。而近五年新增的風力與太陽光電裝置容量最多(累計全球裝置容量分別為 432GW 與 227GW；2015 年風力增加 63GW，年成長 17%；太陽光電增加 47GW，年成長 26%)，其他再生能源之生質能、地熱能及海洋能的累計裝置容量分別為 104GW、13GW 及 500MW [7]。

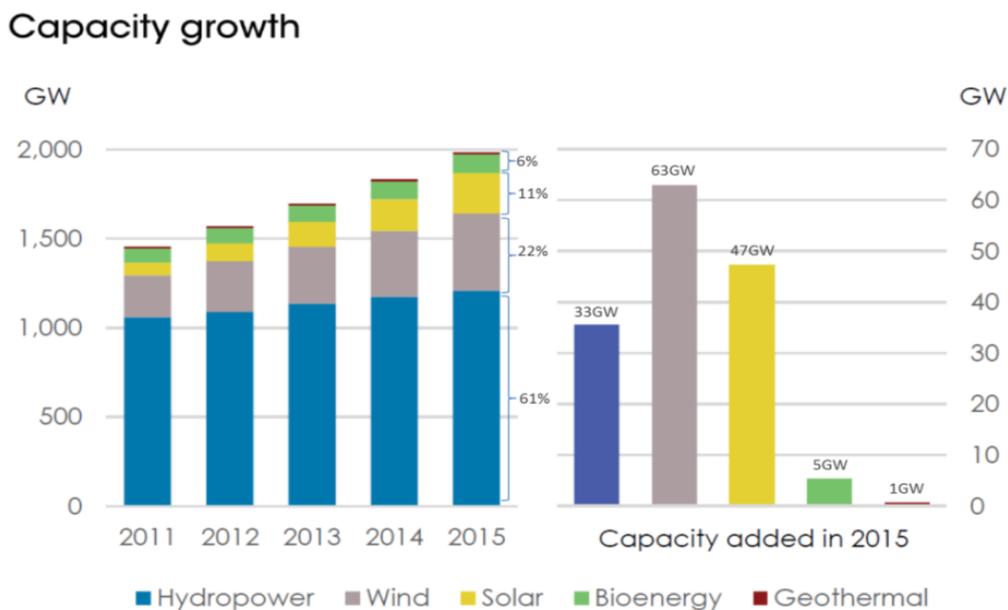
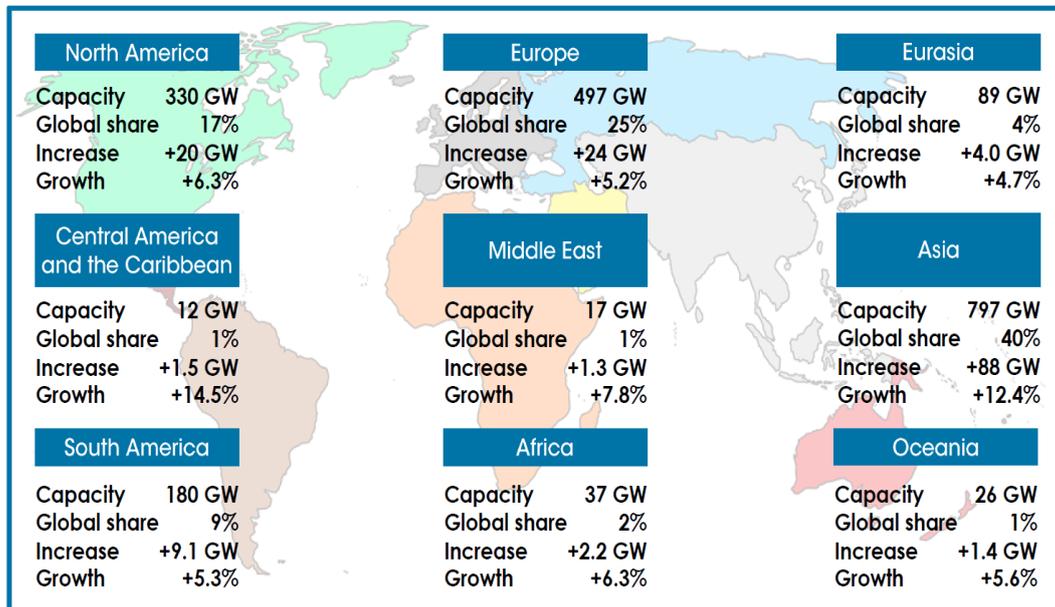


圖 4、全球近五年的再生能源成長趨勢[7]

截至 2015 年為止，亞洲、歐洲及北美地區的再生能源裝置容量合計超過全球的 80%。亞洲地區是全球再生能源安裝最多的區域，累計裝置容量達 797GW(約占全球 40%)，其中 2015 年新增的再生能源裝置容量為 88GW(占當年度增量之 58%)；歐洲與北美地區的再生能源累計裝置容量為 497GW 與 330GW(2015 年分別增加 24GW 與 20GW)。南美地區的再生能源累計裝置容量 180 GW(約占全球 9%，2015 年增加 9GW)；中東、非洲與澳洲地區累計的再生能源比例更小，占比均在 5% 以下(圖 5)[7]。

2015 年全球之再生能源新增裝置容量超過 1GW 的國家有 19 個，這些國家新增裝置容量即占全球再生能源裝置容量 90% 以上。



For the complete dataset see: IRENA, 2016, Renewable Capacity Statistics 2016, available at: www.irena.org/publications

圖 5、2015 年全球再生能源裝置容量統計(依地區別)[7]

三、 再生能源成本分析

未來再生能源發展以太陽光電及風力為主，以下針對此兩項再生能源相關成本進行說明。

(一)太陽光電

NREL 依據各類別再生能源全週期使用年限(表 1)、安裝面積與大小規模(表 2)等，並參考 2012 年~2015 年的資料，於 2016 年 2 月提出最新的再生能源發電平均系統安裝與每年的營運成本[8]。由於資料來自多處，故依據資料統計其平均值，並給予該值的標準差；標準差大者，表示該項的高/低範圍差異較大。表 3 為 NREL 評估各類別再生能源平均發電成本及標準差，圖 6 為 NREL 評估各類別再生能源的安裝成本。

表 1、各類別再生能源使用壽命[8]

再生能源種類	系統使用壽命年
太陽光電 (Photovoltaics, PV)	25 到 40 年
風 (Wind)	20 年
生質熱電聯產系統 (Biomass Combined Heat and Power)	20 至 30 年
生質能熱 (Biomass Heat)	20 至 30 年
太陽能熱水器 (Solar Water Heat)	10 至 25 年
太陽能通風預熱 (Solar Ventilation Preheat)	30 到 40 年
地源熱泵 (Ground Source Heat Pump)	20 年的內部元件 (接地迴路 100 年)

表 2、再生能源系統與占地大小[8]

再生能源種類	大小(英畝/百萬瓦) 1 公頃=2.47 英畝	再生能源種類	大小(英畝/百萬瓦) 1 公頃=2.47 英畝
太陽光電 < 10 kW	3.2	風力 < 10 kW	30
太陽光電 10 – 100 kW	5.5	風力 10 – 100 kW	30
太陽光電 100 – 1,000 kW	5.5	風力 100 – 1,000 kW	30
太陽光電 1 – 10 MW	6.1	風力 1 – 10 MW	44.7
生質能熱	0.3	生質燃燒熱電聯產	3.5

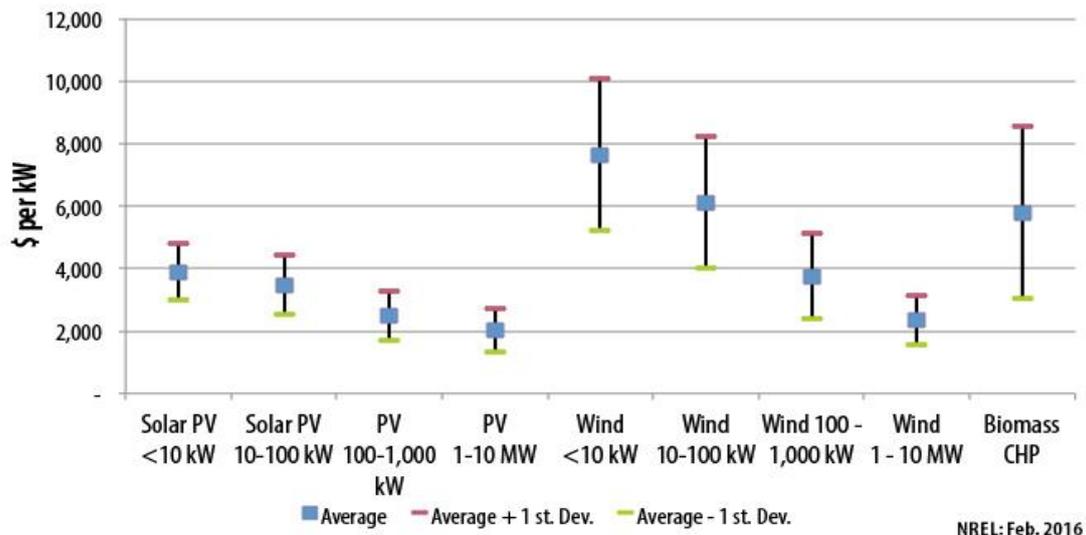


圖 6、NREL 評估各類別再生能源安裝成本[8]

表 3、NREL 評估各類別再生能源的平均發電成本及標準差[8]

技術類型	平均安裝成本 (美元/千瓦)	安裝成本 標準差 (+/- \$/kW)	每年固定營運 與管理費 (美 元/千瓦-年)	每年固定營運與 管理費標準差 (+/-美元/千瓦- 年)	全生命週期 使用年限 (年)	全生命週期 標準差 (年)
太陽光電 < 10 kW	\$ 3,897	\$ 889	\$ 21	\$ 20	33	11
太陽光電 10 –100 kW	\$ 3,463	\$ 947	\$ 19	\$ 18	33	11
太陽光電 100–1,000 kW	\$ 2,493	\$ 774	\$ 19	\$ 15	33	11
太陽光電 1 – 10 MW	\$ 2,025	\$ 694	\$ 16	\$ 9	33	9
風力 < 10 kW	\$ 7,645	\$ 2,431	\$ 40	\$ 34	14	9
風力 10 – 100 kW	\$ 6,118	\$ 2,101	\$ 35	\$ 12	19	5
風力 100 –1000 kW	\$ 3,751	\$ 1,376	\$ 31	\$ 10	16	0
風力 1 – 10 MW	\$ 2,346	\$ 770	\$ 33	\$ 16	20	7
生質燃燒熱電聯產(僅 發電成本，不含熱成本)	\$ 5,792	\$ 2,762	\$ 98	\$ 29	28	8
太陽能熱水器，平板 式與真空管	\$ 162	\$ 91	初始安裝成 本 0.5~1.0%		31	14
太陽能熱水器，塑膠 集	\$ 59	\$ 15	0.5-1.0%		20	10
太陽能通風預熱	\$ 31	\$ 14			25	
生物熱(木熱轉為熱， Btu/小時)	\$ 575	\$ 252	\$ 98	\$ 29	32	8
地源熱泵	\$ 7,765	\$ 4,632	\$109 +/- \$94		38	25

2015 年全球安裝 60GW 太陽光電產能中，90%是矽晶型、10%為薄膜型產品；由於原始供應鏈產能技術的提升與材料的精進，推估未來幾年仍依照歷史趨勢 21%的幅度下降(圖 7)。根據 ITRPV 指出，預估整體太陽光電的均化發電成本仍有下降趨勢；若假設太陽光電使用年限為 25 年，在不同的裝置容量規模下，2016 年均化發電成本將下降至 0.042-0.083 美元/度(約新台幣 1.4~2.7 元/度；1 美元換算新台幣 32.5 元)，其中系統價格為 1,046 美元/kW(約新台幣 34,000 元/kW)。估計 2026 年的均化發電成本可以再降至 0.031~0.061 美元/度(新台幣 1.0~2.0 元/度)，系統價格將下降至 763 美元/kW(約新台幣 24,800 元/kW)，年均降幅約 3%[9]。



另外，法蘭克福財經管理學院-聯合國環境規劃署(FS-UNEP)於2016年3月發布的全球再生能源投資趨勢中，說明太陽光電的均化發電成本是近年來降幅最大的再生能源發電種類之一。2015下半年已經達到0.122美元/度(新台幣3.97元/度)，對比2014年的0.143美元，下滑將近15%。且下降趨勢仍在延續中，如圖8所示[10]。但其均化成本與ITRPV的估算仍有差異，推測原因為太陽光電使用年限不同所致。

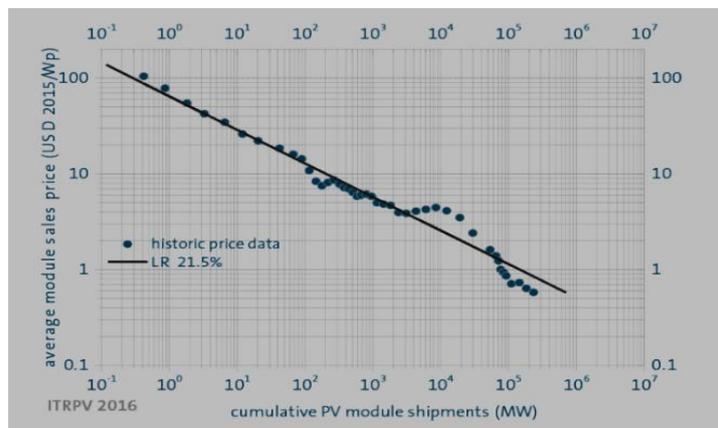


圖7、太陽光電模組價格的學習曲線[9]

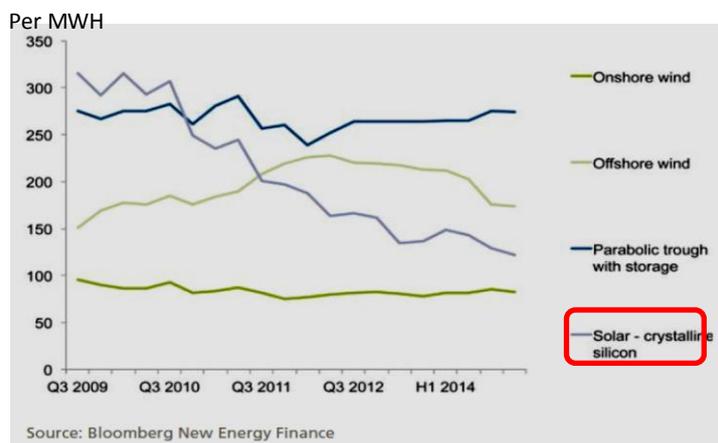


圖8、FS-UNEP之太陽光電與風力發電均化成本變化趨勢[10]

未來太陽光電單位安裝面積會逐漸縮小，周邊設施成本也隨之減少，加上發電效率的提升[9]，使得整體太陽光電發電成本逐漸下降後，終會趨於市電同價，甚至低於市電價格。例如2015年杜拜一座200MW太陽光電合約價為0.0585美元/度(新台幣1.9元/度)；印度在

印巴邊界的 420MW 太陽光電計畫，投標廠商價格平均為 4.34 盧比/度電(新台幣 2.15 元/度)[11]。2015 年 3 月日本在公布的再生能源收購價格中，對於 10kW 以上的非住宅太陽光電系統收購價格為 24 日圓/度(不含稅)，收購價格 20 年。該價格已低於 2014 年日本家庭平均電價(25.51 日圓/度)[12]。

(二)風力發電

如表 3 所示，NREL 評估風力機組平均使用年限為 20 年，中小型風力機(<1MW)占地面積約為 30 英畝/MW(12.1 公頃/MW)，而大於 1MW 風力機的葉片長度大，相對需要較大的單位面積(44.7 英畝/MW，約 18.1 公頃/MW)。風力機組的平均安裝成本隨著裝置容量的增加而減少，例如安裝 1-10MW 等較大型的風力機組，平均單價為 2,346 美元/千瓦，每年的營運成本約為 33 美元/千瓦；若加上發電容量因數(Capacity Factor, CF)等條件(容量因數:離岸風電>陸域風電>太陽光電)，目前大型陸域風力機的發電成本遠比太陽光電便宜。

依圖 9 之美國與丹麥在 2002~2013 年風力發電單位成本中，顯示風力發電的成本為下降趨勢；而評估大型風力機發電的均化成本在風級達 4 級(7.0~7.5 公尺/秒，如表 4)以上，高度 50 公尺的風力發電成本就可下降到 0.07 美元/度(新台幣 2.1 元/度)以下。若風力達到 5 或 6 級，則風力潛能更高，發電的單位成本可以再下降。

以美國為例，IRENA 之 2015 年資料顯示美國的風力發電總裝置容量達 15,179GW；其中陸域風電 10,955GW，離岸風電 4,224GW(陸域與離岸風力機裝置容量比例約 7:3)。在 2015 年風力總發電量 49,760TWh 中，陸域風電發電量 32,784TWh(容量因數 34.16%)，離岸風電 16,976TWh(容量因數 45.88%)。而位於陸域風力發電之中部州(Interior)，海拔 80 公尺地方的平均風速多數達 8 公尺/秒以上(6 級風)，甚至部分地區可達 9~9.5 公尺/秒或更高者；五大湖區(Great Lakes)的風速約在 6.5~7.5 公尺/秒之間(3~4 級風)，其他地區的風力資源比中部州與五大湖區稍差[14]。

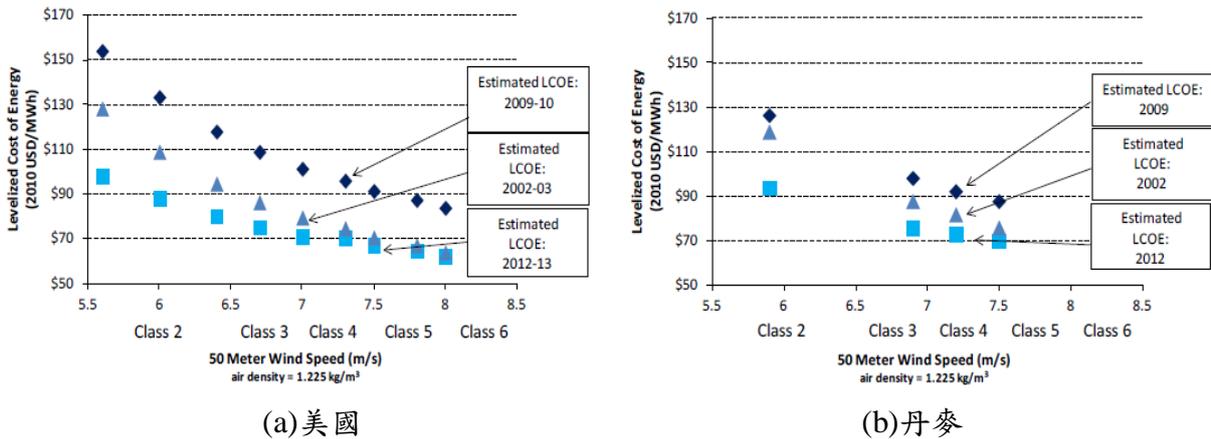


圖9、NREL評估2002~2013年美國與丹麥在不同級數之風力發電成本[6]

表 4、風能分級表[13]

風力級數 Wind Class	30 m 高之潛能		50 m 高之潛能	
	風速(m/s)	風能(W/m ²)	風速(m/s)	風能(W/m ²)
1	0-5.1	0-160	0-5.6	0-200
2	5.1-5.9	160-240	5.6-6.4	200-300
3	5.9-6.5	240-320	6.4-7.0	300-400
4	6.5-7.0	320-400	7.0-7.5	400-500
5	7.0-7.4	400-480	7.5-8.0	500-600
6	7.4-8.2	480-640	8.0-8.8	600-800
7	8.2-11.0	640-1600	8.8-11.9	800-2000

美國的風電價格主要是採用全國電力採購協議/購電協議(Power Purchase Agreement, PPA；為風力發電業者出售電力的價格)[14]，全國平均風力發電價格約為 26 美元/千度(新台幣 0.85 元/度)。其中在中部州為 22 美元/千度(新台幣 0.72 元/度)；五大湖地區風力潛能稍低，風力發電成本 44 美元/千度(新台幣 1.43 元/度)；美國東北部地區與西部地區 PPA 價格分別是 53 美元/千度(新台幣 1.72 元/度)與 60 美元/千度(新台幣 1.95 元/度)(圖 10)。

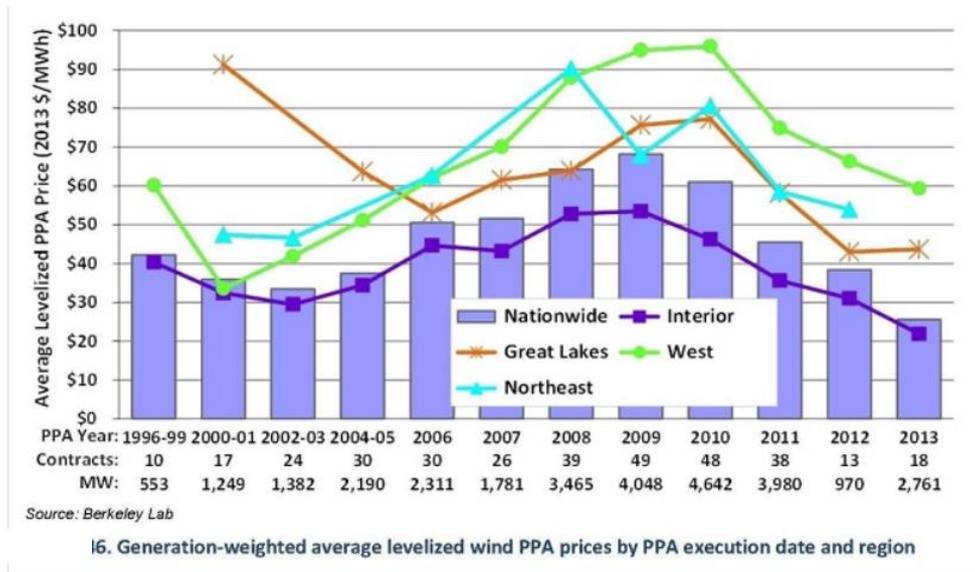
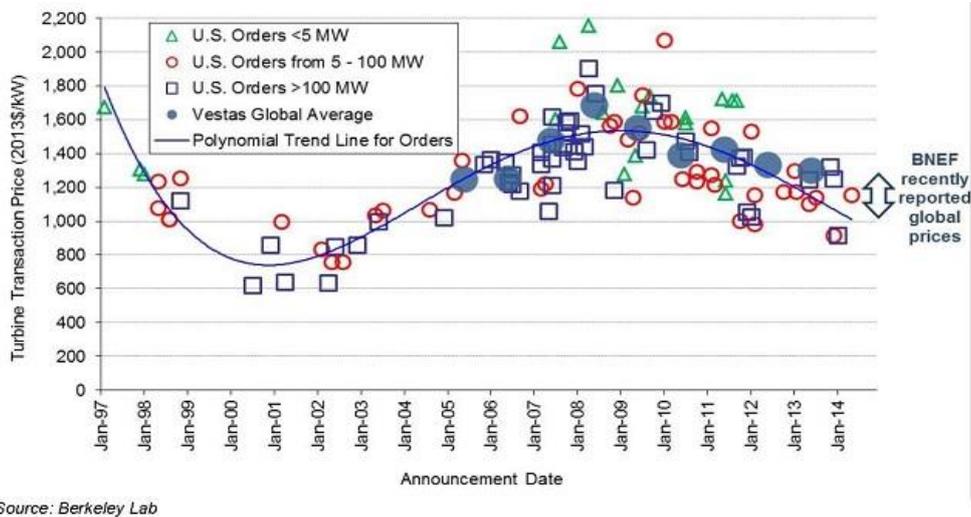


圖 10、美國境內四大風力分區及平均全國發電成本示意圖[14]

美國的陸域風電成本所以相對較低廉，除了有優越的地理條件外，便宜的風力機價格(2014 年大於 100MW 風場的風力機價格低於 100 萬美元/MW，小於 100MW 風場的風力機價格接近 120 萬美元/MW，平均約為 100 萬美元/MW，圖 11)，低廉的風場投資成本(2014 年風場投資金額約在 170 萬美元/MW)及超低的棄風率外(2012 年平均棄風率僅 2.7%)。加上美國聯邦政府的補助是重要誘因之一，包括 (1)聯邦補助生產稅收抵免(Production Tax Credit, PTC)或投資稅收抵免(Investment Tax Credit, ITC)；(2)折舊期加速縮短至 5~6 年；(3)推行再生能源配額制度(Renewable Portfolio Standard, RPS)，即多數美國的州立法要求電力公司必須出售一定比例的再生電力給用戶，如果無法達到要求，電力公司必須自行購買配額。RPS 的配額風電價格各州不同，約在 5~50 美元/千度之間。

美國風力發電業者對於政府的補助，可以選擇 PTC 取得前十年之 23 美元/千度的補助；或是選擇 ITC 得到投資金額的 30%作為聯邦企業所得稅抵免。通常陸域風力機的設計壽命為 20 年，折舊年限是 10 年，加速折舊可以讓初期的成本增加，以減少企業繳稅金額，效果相當於無息貸款，加上再生能源配額制度的推行。如果在風力發電成本中將 PTC 補助視為風電的發電成本之一，則還原美國的風電成本

約在台幣 1.46-2.70 元/度之間(1 美元換算台幣 32.5 元)，平均美國的風電成本為台幣 1.59 元/度(表 5)。



Source: Berkeley Lab

8. Reported wind turbine transaction prices over time

圖 11、美國的風力發電機組交易價格[14]

表 5、2013 年美國陸域風力機 PPA 價格[14]

地區	PPA Price (US\$/MWh)	NT\$/kWh (1:32.5)	前十年 PTC 補助 (US\$/MWh)	風電成本 (還原補助) (US\$/MWh)	風電成本 (還原補助) (NT\$/kWh)
全國平均	26	0.85	23	49	1.59
中部州	22	0.72	23	45	1.46
五大湖	44	1.43	23	67	2.18
東北部	53	1.72	23	76	2.47
西部	60	1.95	23	83	2.70

(1 美元換算台幣 32.5 元) Source: Berkeley Lab, AWEA, Maxwell, 2014

雖然離岸風力機發電容量因素大於陸域風力機，但目前離岸風力機組建設地點需要選擇在風力潛能高、且儘量避免容易發生如颶風 (Hurricane) 或遠離地質不穩定的海上地區；而多數工程需在水下進行，所以建置成本遠高於陸域風力機組。例如美國的離岸風力機設置地點，即避免興建在墨西哥灣沿岸與大西洋沿岸等較容易發生颶風地區，而較積極的朝大西洋沿岸的中北部位置高潛能區開發，以避免因為增加防禦颶風等措施，或是因為其他天然災害而增加維護費用，進

而增加發電成本。另外隨著技術的提升，離岸風力機已朝著更大型裝置容量(6MW)發展，而美國 GE 公司與中國大陸等均著力研發 10MW 的離岸風力機組，且試驗區評估容量因數均可超過 47%。若是研發成功且可以穩定運轉，評估將可減少離岸風力機的發電成本。因此，不論是陸域或是離岸風力機組，未來會逐漸採用新型的風力渦輪機，因為性能的改良而具有較佳的效率，同時風力發電成本亦會下降。

(三)風力與太陽光電發電併入系統成本

通常計算再生能源的發電成本，為發電業者將所發的電力，利用自有的電路傳送到最近的高壓電網進行整合，或是輸送到指定的電網節點(node)上就算完成；實際上，電力營運業者需要再將併入的電力與系統整合後再輸往使用者端。通常可再細分為「電網成本」、「電力平衡成本」及「替代傳統電廠成本」等三部份：這些成本的評估，依據本身電力系統與計算推估方式，而有極大的差異。

1. 電網成本：將再生能源自其發電端傳送至需求端之成本。
2. 電力平衡成本：彌平再生能源預估與實際發電量差異投入之成本。
3. 替代傳統能源成本：因再生能源發電量增加，導致傳統火力電廠無法滿載發電，所增加之成本。

再生能源發電後，若不是儲存或自用，則需透過低壓電網將電力輸送至臨近的高壓電網進行整合。依據德國與歐洲針對屋頂型及地面型太陽光電、陸域及離岸風力等四種類型再生能源發電進行的研究[15]，電網與電力平衡成本分別為 0.5 歐分/度(新台幣 0.18 元/度，1 歐元換算台幣 36.0 元)、0.9 歐分/度(新台幣 0.32 元/度)、1.3 歐分/度(新台幣 0.47 元/度)及 3.7 歐分/度(新台幣 1.33 元/度)，如圖 12。同時再生能源發電會排擠原有傳統能源發電，使得備用電力成本增加。而在不同碳價格與燃氣價格的假設下，依據德國統計替代傳統能源成本將介於-0.6~1.3 歐分/度(新台幣-0.22~0.47 元/度)，如圖 13 所示[15]。

上述之電網成本包括自發電端傳輸到臨近的高壓電網，再輸送到需求端來應用；但也有部分業者將前者之發電端傳輸到臨近的高壓電網的費用附屬在發電成本內，所以統計電網成本時，需要清楚的定義出電網傳輸費用從何地開始計算，以避免重複計算而增加成本。

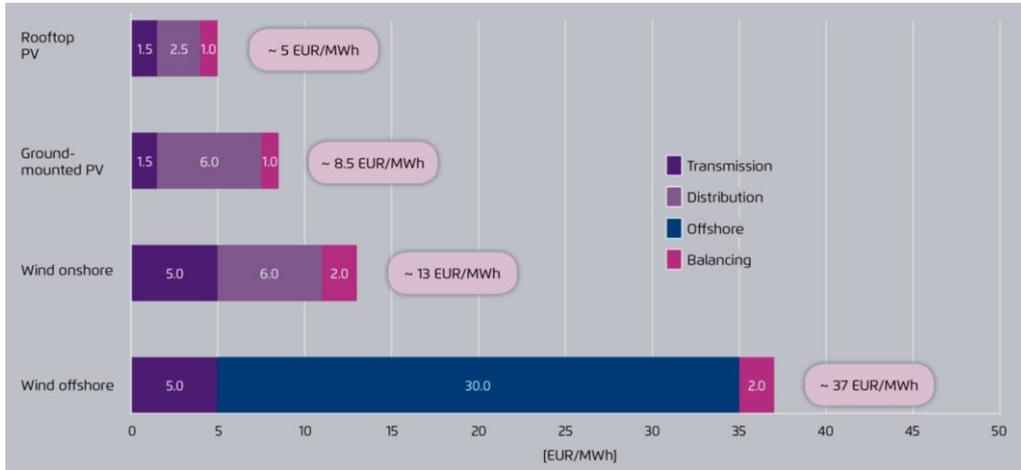


圖 12、德國與歐洲地區對風力與太陽光電的電網與電力平衡成本推估[15]

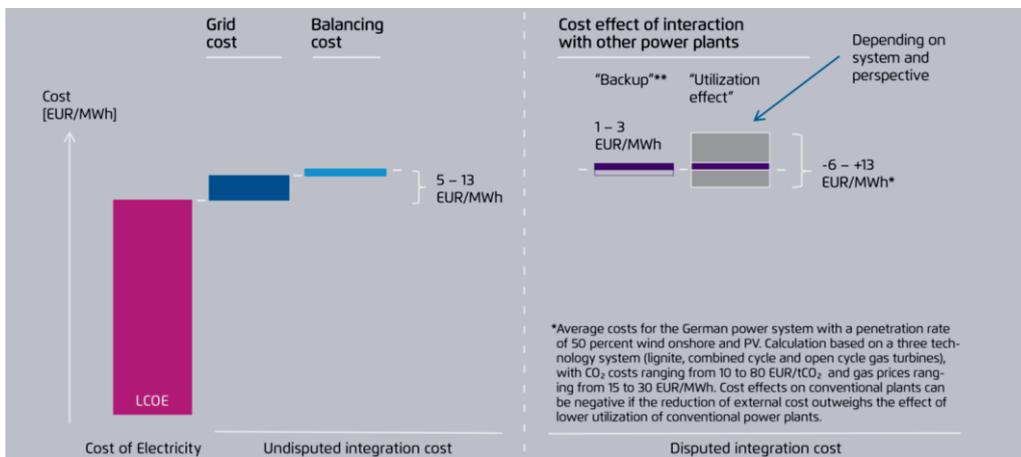


圖 13、德國再生能源發電均化成本及電網、電力平衡與替代傳統能源成本[15]

四、我國再生能源成本推估

我國經濟部於今(2016)年 5 月擴大再生能源發展目標；到 2025 年再生能源發電量希望達全國發電總量 20% (約 500 億度/年)；其中太

陽光電預估裝置容量 20GW，離岸風力機預估裝置目標 3GW，如圖 14。



資料來源: 經濟部

圖 14、2016 年 5 月經濟部提出 2025 年再生能源發電占總發電量 20%

105年度再生能源電能躉購費率審定會第3次會議(2015年8月27日)，提出105年度太陽光電電能躉購費率「期初設置成本」計算使用參數，包含期初設置成本、年運轉維護費及年售電量等資訊。而考量成本價格變動趨勢及市場供需變化情形，原則上期初設置成本上半年反映一半國際預估成本降幅，下半年則全額反映，詳細資訊如表6所示。

我國再生能源的發電成本可以由表6推算，例如陸域型風力機躉購費率由期初設置成本(20年折舊)，加上每年營業利益5.25%及考量當年度維護費後，推估陸域風力躉購費率約為2.8元/度，而離岸風力雖然年售電量較高，但期初設置成本約為陸域風力機組3倍，推估躉購費率約為5.7元/度。

表6、我國的太陽光電及風力發電躉購費率參數

太陽光電躉購費率(20年)				
再生能	規模大小	期初設置成本	年運轉維護費	年售電量

源類型				
屋頂型	1 瓩以上未 達20瓩	第一期為7.61萬元/瓩 第二期為7.46萬元/瓩	期初設置成本2.08%	全臺平均 1,250度/瓩
	20瓩以上未 達100瓩	第一期為6.12萬元/瓩 第二期為6.00萬元/瓩		
	100瓩以上 未達500瓩	第一期為5.65萬元/瓩 第二期為5.54萬元/瓩		
	500瓩以上	第一期為5.48萬元/瓩 第二期為5.37萬元/瓩		
地面型		第一期為5.48萬元/瓩 第二期為5.37萬元/瓩		
風力發電躉購費率(20年)				
陸域型 風力	1 瓩以上未 達20瓩	15.27萬元/瓩	期初設置成本1.00% (1,527元/瓩)	1,650度/瓩
陸域型 風力	20瓩以上	6.10萬元/瓩(無加裝加 裝低電壓持續運轉能 力(LVRT)者為6.00萬 元/瓩)	期初設置成本2.86% (年運轉維護費1,747元 /瓩)，無加裝LVRT為 2.91%	2,400度/瓩 (容量因數 32~35%)
離岸型 風力		18.01萬元/瓩	期初設置成本3.24% (年運轉維護費5,844元 /瓩)	3,700度/瓩 年

資料來源：能源局

五、 結語與建議

ITRPV指出，未來太陽光電的製造技術仍然遵循學習曲線21%的降幅，即未來太陽光電的發電成本仍在下降中。而NREL評估未來國際上新型風力機組將更具有更佳的效率，風力發電的單位成本亦呈下降趨勢。

在不同的裝置容量規模下，若太陽光電使用年限為25年，則2016年均化成本將下降至台幣1.4~2.7元/度，其中系統價格約為新台幣34,000元/kW；推估2026年的均化發電成本可以降至新台幣1~2元/度，系統價格將可下降至新台幣24,800元/kW，年均降幅約達3%。

未來太陽光電需要的單位面積逐漸縮小，加上效率提升、發電單位成本下降後，終會趨於市電同價，甚至低於市電價格。2015年杜拜與印度之大型太陽光電合約價分別為台幣1.9元/度及2.15元/度；日

本在 2015 年 3 月公布的再生能源收購價格中，10kW 以上的非住宅太陽光電系統收購價格為 24 日圓/度(不含稅)，已低於 2014 年日本家庭平均電價(25.51 日圓/度)。

陸域風力機平均安裝成本隨著裝置容量的增加而減少。國際上安裝 1-10MW 大型風力機組的平均單價為 2,346 美元/千瓦，每年營運成本約 33 美元/千瓦；雖然風力發電機組的建置單價高於太陽光電，但結合發電容量因數後，大型陸域風力機的發電成本仍比太陽光電便宜。

欲降低風電的發電成本，除了須具備優越的風力潛能外、相對便宜的風力機價格、低廉的風場投資成本、低的棄風率及完善的電網連結等影響因素外；政府的補助是目前投資最重要的誘因，包含生產稅收抵免或投資稅收抵免、長期且優厚的躉購費率、以及政策的立法支持等。例如美國有上述好的條件支持，2015 年風力業者平均的電發電成本為台幣 0.85 元/度，若加上政府補助，全國平均的風力發電成本僅為台幣 1.59 元/度。

離岸風電的發電成本目前仍高於陸域風電，主要是離岸風電機組須在海上興建，且需增加各種防禦措施，或是因為避免天然災害而增加維護費用，所以建置成本遠高於陸域風力機組。雖然發電容量因數大於陸域風力機，但評估整體的發電成本約為陸域風電的 1.5~2 倍左右。

評估再生能源的發電成本，通常是業者將所發的電力傳輸到最近的高壓電網，或是輸送到指定的電網節點上就算完成；若考慮整體的發電成本，則需要再加上(1)電力併網後傳送至需求端的電網成本；(2)彌平再生能源預估與實際發電量差異投入之電力平衡成本；(3)因再生能源發電量增加，導致傳統火力電廠無法滿載發電所增加之成本等要素。依據德國與歐洲針對屋頂型及地面型太陽光電、陸域及離岸風力等再生能源發電的研究資料，顯示電網與電力平衡成本分別為新台幣 0.18 元/度、0.32 元/度、0.47 元/度、1.33 元/度；而再生能源發電



排擠傳統能源發電增加備用電力成本，在不同碳價格與燃氣價格的假設下，德國統計替代傳統能源成本介於新台幣-0.22~0.47 元/度之間。

我國再生能源躉購費率的估算，主要是參考期初設置成本、年運轉維護費、年售電量、年營業利益及運轉年限等資訊後加以計算。例如推估陸域風力躉購費率約為新台幣 2.8 元/度，而離岸風力雖然年售電量高，但期初設置成本約為陸域風力機組的 3 倍，推估躉購費率約為新台幣 5.7 元/度。

參考文獻

- [1] International Energy Outlook 2016, EIA, May 11, 2016.
http://www.eia.gov/forecasts/ieo/exec_summ.cfm
- [2] IRENA, Roadmap for a renewable energy future, 2016.03.
- [3] **Doubling Global Share of Renewable Energy by 2030 Can Save Trillions**, 17 March, 2016.
http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=A&mnu=cat&PriMenuID=16&CatID=84&News_ID=1443.
- [4] 21% solar PV learning curve to continue, report projects.
<https://cleantechnica.com/2016/03/26/21-solar-pv-learning-curve-to-continue-report-projects/>
- [5] 7th ITRPV: PV tracks 21 percent learning curve. 200GW cumulative landmark passed in 2015. http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/7th-itrpv--pv-tracks-21-percent-learning-curve--200-gw-cumulative-landmark-passed-in-2015_100023778/#axzz439YkQUGZ
- [6] The Past and Future Cost of Wind Energy, *2012 World Renewable Energy Forum*, NREL.
- [7] Renewable capacity highlights,
http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_stats_highlights_2016.pdf
- [8] Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs,



- NREL, 2016.
http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html
- [9] ITRPV, International technology roadmap for photovoltaic 2015 results , 2016/03.
<http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>
- [10]FS-UNEP, Bloomberg , Global trends in renewable energy investment 2016 , 2016/3.
http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsinrenewableenergyinvestment2016lowres_0.pdf
- [11]The Times of India, Rs 4.34 a unit: Solar power tariff drops to record low, 2016.01.19. <http://timesofindia.indiatimes.com/india/Rs-4-34-a-unit-Solar-power-tariff-drops-to-record-low/articleshow/50643394.cms>
- [12]再生可能エネルギーの平成 28 年度の買取価格・賦課金単価を決定しました，経済産業省，2016/3/18。
<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160318003/20160318003.html>
- [13]Wind Energy Danish Assoc. WindPower.org. Wind class standard definitions “Wind Class”. 11/Feb/2004.
<http://www.windpower.org/es/stat/unitsw.htm>
- [14]為何美國風力發電成本較低? 科技新報，2015。
<http://technews.tw/2015/03/23/usa-windpower/>
- [15]The Integration Costs of Wind and Solar Power, http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/integrationskosten-wind-pv/Agora_Integration_Cost_Wind_PV_web.pdf

