

2016 年世界能源展望(WEO)--風力發電現況與未來發展

楊珍鈴

2017/04/12

一、前言

全球能源的發展隨著氣候變遷的議題，尤其是 2015 年 12 月的 COP21 會議後各主要國家陸續完成簽署承諾達成國家自願減碳承諾(NDC)的文件，從 2015 年至 2016 年是一個重要的跨越轉變時期，特別是呈現在各國的新能源政策和投資上。國際能源總署(International Energy Agency, IEA)在 2016 年底發佈的世界能源展望報告(WEO 2016)針對上述的轉變，彙整現況以及針對三種發展情境(目前政策情境、新政策情境及 450 情境)做出全球性以及主要幾個國家的能源展望分析，WEO 2016 還特別增加水和空氣這兩個也和能源與環境息息相關的分析章節。依據 WEO 2016 報告的統計，2014 年再生能源在全球電力和熱能的供給上佔約 20%，分別為水力 14%、生質能 2.7%、風力 2.6%、地熱 0.3%、太陽光電 0.3%、其他聚光型太陽能 and 海洋能等都小於 0.1%。再生能源在全球建築、工業、和交通三個部門的電力和熱能的供給上各占其 12%、11.5%、和 3%。

本文將針對 WEO 2016 報告關於風力發電發展之現況，並分別進行風力發電發展現況及在三個情境項下的市場分析，以及風力發電在各項能源中展現的競爭力。

二、風力發電的發展現況以及三種發展情境項下的市場分析

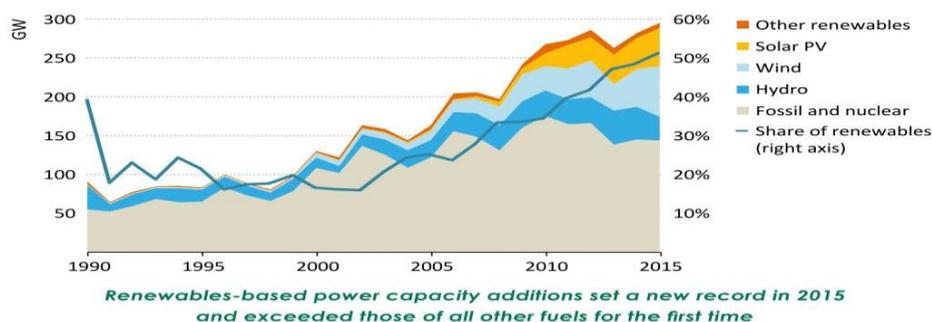
在能源發展分析情境上，目前政策情境(Current Policies,CPS)代表的是截至 2016 年中全球各國執行中的能源政策情境；新政策情境(New Policies,NPS)則是 CPS 加上全球主要 COP21 簽署國家達成其 NDC 承諾的可能政策情境；450 情境(450 Scenario,450S)則是更嚴格的要求達成聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change,UNFCCC)所設定的本世紀末全球增溫不超過攝氏 2°C 的情境。WEO 2016 估計 2015~2040 年止，450S 增加的減碳能力可以比 NPS 多減碳達 201 Gt，減碳貢獻包括再生能源、節能、能源效率、碳捕存、核能、以及其他技術等，其中 450S 相當的倚賴再生能源的減碳貢獻，估計其佔 450S 的增加減碳能力達 34%。因此，在再生能源的電力需求預估上(表 1)，NPS 在 2025 年和 2040 年分別為 8,960 TWh(89,600 億度電)和 14,271 TWh；450S 在 2025 年和 2040 年則分別增加至 9,890 TWh 和 19,883 TWh。其中除了水力發電外，風力發電均為最主要的再生能源電力貢獻者。

	New Policies			Current Policies		450 Scenario	
	2014	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
Share of total generation	23%	30%	37%	27%	29%	36%	58%

表 1. WEO 2016 預估三種情境下的電力需求

(本表參考自 WEO 2016 表 10.1)

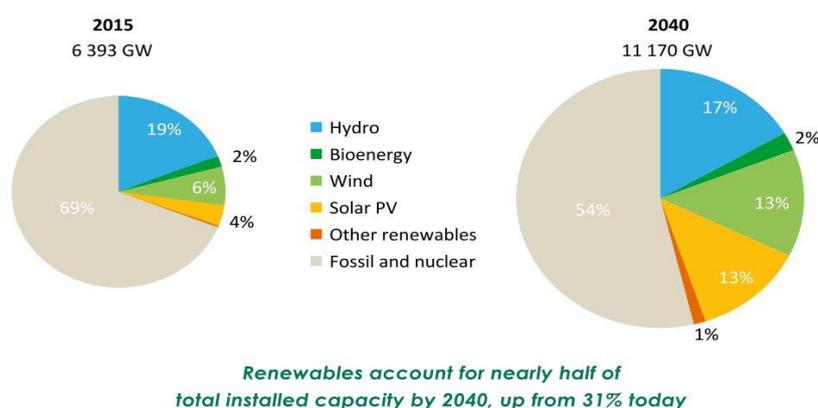
2015 年全球的再生能源投資額達到 2,880 億美金；在新增電力容量上(圖 1)，相較於化石燃料和核能，2015 年再生能源是一個重要里程碑，佔比已超過 50%，增加超過 150 GW，近十年來，風力發電和太陽光電更是快速擴充，風力發電更是領先，在 2015 年的再生能源電力新增容量上，比前一年多出 35%，新增 65 GW(相較於太陽能的新增 49 GW)。超過半數的風力發電新增容量來自大陸，大陸、歐盟(主要為德國)和美國合佔這些新增容量的 80%。



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

圖 1.全球再生能源歷年新增電力容量及其新增占比
(本圖參考自 WEO 2016 圖 10.5)

再生能源在 2015 年的電力裝置容量約 1,985 GW，超過煤的 1,950 GW。相視於化石燃料和核能，再生能源累計容量佔 31%(圖 2)。風力發電約佔 6%(384 GW)，太陽光電約佔 4%(256 GW)。依據 NPS 情境 2040 年的預估，再生能源在電力容量上預估會達約 5,138 GW，累計佔比會提高至 46%；風力發電和太陽光電累計容量均分別達到約 13%(各約 1,452 GW)。¹

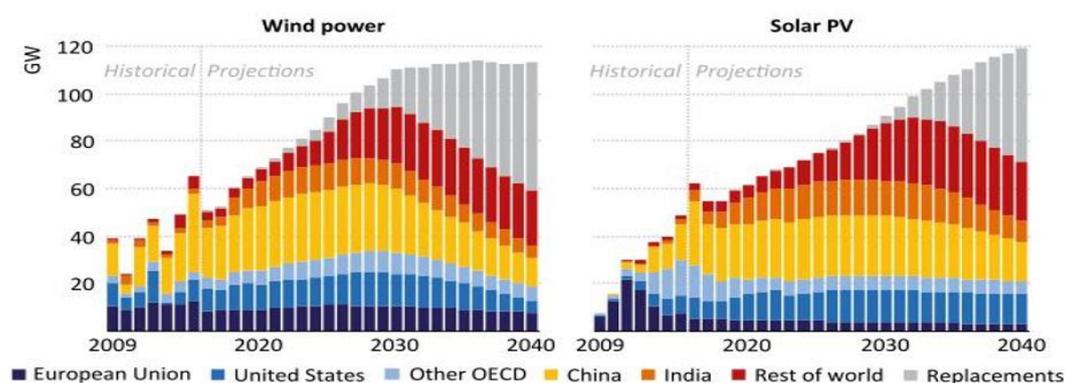


Note: Other renewables include CSP, geothermal and marine.

圖 2.全球各項能源之電力容量占比(左圖 2015 年現況，右圖為依據 NPS 情境的 2040 年預估)(本圖參考自 WEO 2016 圖 10.9)

¹ 2015 年 31%*6393GW=1985GW，風力發電容量 6%*6393=384GW；2040 年 46%*11170GW=5138GW，風力發電容量 13%*11170=1452 GW

若依據 450S 的評估，再生能源在電力容量的累計佔比上在 2040 年會超過 60%，水力發電、風力發電、和太陽光電這三種發電設施的累計裝置容量都會超過 2000 GW。風力發電在 2016 年的年新增裝置容量預估會比 2015 年稍減(圖 4)，但之後會恢復成長；2030 年以後則會以每年超過 100 GW 的裝置量在成長，其中包括很重要的風力機汰換，此汰換將不只是新舊風力機的汰換，還包括過往發電容量較小的機種升級為容量較高的機種。值得注意的是，風力發電安裝的全球領先市場，預估雖依次為中國、美國、印度、歐盟、和其他 OECD 國家，但全球其他國家累計的年增加容量也會越來越可觀(圖 3 顯示)。



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

圖 3.風力發電(左)和太陽光電(右)在 450 情境下，各主要國家和地區的每年新增容量預估(至 2015 年止為歷史資料)(本圖參考自 WEO 2016 圖 10.18)

三、風力發電在各項能源上的競爭力

各項再生能源在市場上的發展與競爭有三個主要思考方向：(1)具備基本競爭力(competitive)，通常指那些對投資者而言，不需政府補助或激勵即能有收益的再生能源；(2)具備財務誘因(financially attractive)，通常指那些對投資者而言，必須有政府補助誘因才能有收益的再生能源；(3)具備成本效益的(cost-effective)；通常指對整體社會而言，最具經濟效益的再生能源。

再生能源在電力市場上的競爭成本，通常可由兩個參數來表達，(1)單位裝置容量成本以 \$/kW 來表示，代表能源設施期初的設置成本，包括、土地、設備、監控儀器等；(2)單位發電量的均化成本(Levelised Cost Of Electricity, LCOE)，以 \$/MWh 來表示，包括期初建置成本、運轉和維護、資產投資的負債與報酬、燃料成本、碳稅、社會與環境責任成本、除役費用等。

在單位裝置容量成本方面，可調度的再生能源(Dispatchable Renewable Energy, DRE)而言，包括水力發電、生質能發電、地熱發電、以及聚光太陽能發電(Concentrating Solar Power, CSP)，從 2015 年剛完成的計畫來看，全球平均的大型水力和生質能發電的裝置容量成本約為 US\$ 2,000/kW，地熱發電約為 US\$ 2,600/kW，CPS 約為 US\$ 5,000/kW。以變動性再生能源(Variable Renewable Energy, VRE)而言，主要為太陽光電和風力發電，2015 年剛完成計畫的全球大型太陽光

電廠平均期初成本約為 US\$ 1,700/kW；但在德國、中國、和印度，則可以低到 US\$ 1,200~1,450/kW；美國、南非；和日本則稍高，可以高到超出 US\$ 2,000/kW；屋頂太陽光電的全球平均值約為 US\$ 2,400/kW。陸域風力發電約為 US\$ 1,500/kW；離岸風力發電則超過 US\$ 4,500/kW。陸域風力發電在各種再生能源發電期初建置成本上，算是最具競爭力。

至於發電均化成本 LCOE，圖 4 顯示出美國、歐盟、中國、和印度在 2015 年完成的各項能源計畫的發電均化成本評估。對於可調配的再生能源而言，全球的

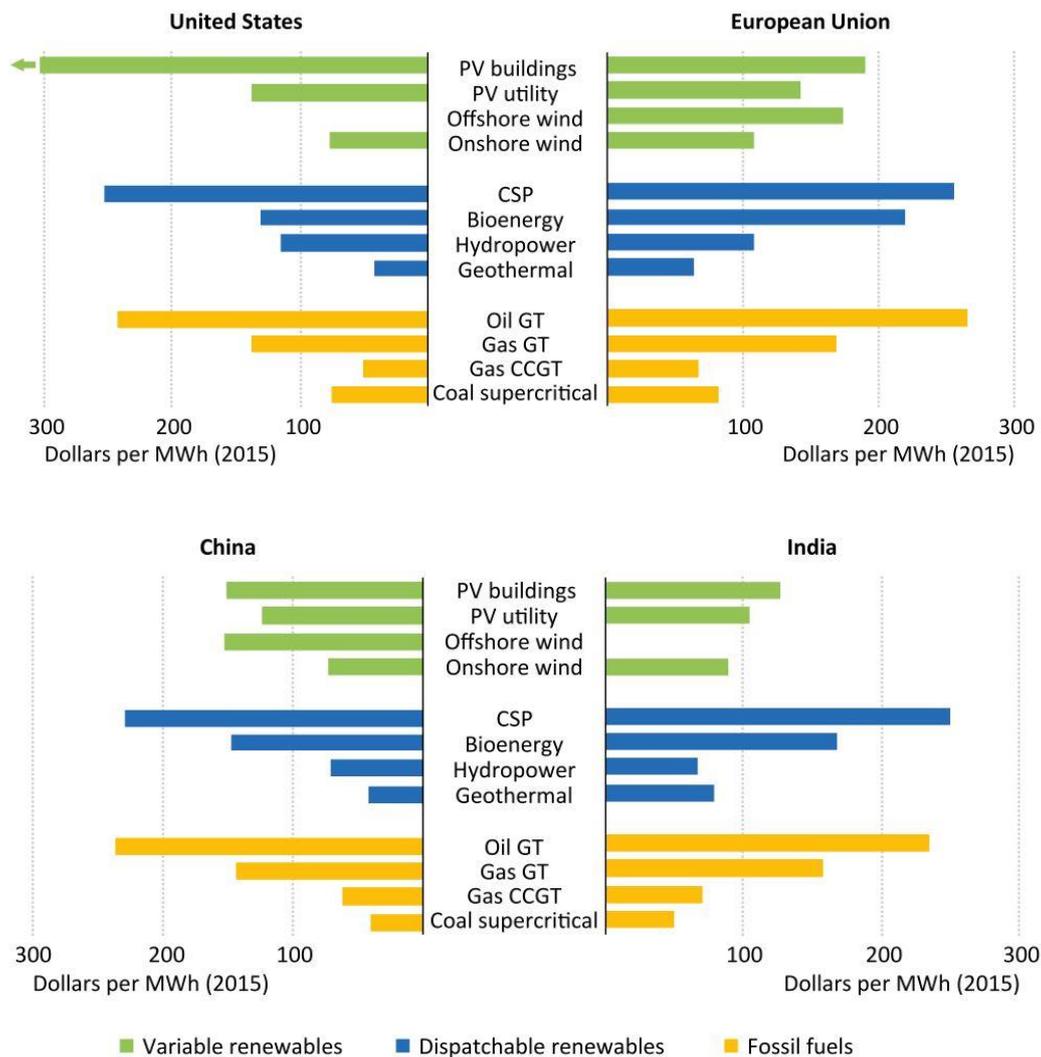


圖 4. 各主要國家在 2015 年完成的各項能源計畫的發電均化成本 LCOE 評估(從左上到右下，分別為美國、歐盟、中國、和印度)

(本圖參考自 WEO 2016 圖 11.3)

平均值則以地熱最低，約為 US\$ 40~90/MWh；水力發電次之，約為 US\$ 50~140/MWh；生質能發電約為 US\$ 100~180/MWh；CSP 則約為 US\$ 230~260/MWh。至於變動性的再生能源，2015 年完成的各項大型太陽光電計畫，

全球平均的 LCOE 約為 US\$ 135/MWh，各地區個別的計畫多數落在 US\$ 100~300/MWh；但最近有一些透過標售方式的計畫案，大型太陽光電的 LCOE 會低到 US\$ 50/MWh。屋頂太陽光電的 LCOE 較高，全球平均值約為 US\$ 260/MWh，但有一些各別安裝案例的 LCOE 會在 US\$ 100~400/MWh 之間。陸域風力發電的 2015 年全球平均 LCOE 約在 US\$ 80/MWh，但也有在巴西的案例低於 US\$ 50/MWh，而在美國有些風場條件較差或市場較不成熟的地區則會高到超出 US\$ 100/MWh。離岸風力發電的 2015 年全球平均 LCOE 約在 US\$ 170/MWh。陸域風力發電與各種再生能源比較，在 LCOE 上與地熱均屬相對地較低，但離岸風力發電則是陸域風力發電的兩倍。

針對太陽光電和風力發電在 NPS 和 450S 未來情境上的容量擴增以及成本競爭力來看，如圖 5 所示。對於太陽光電的 NPS 情境，2016~2040 累計新增裝置容量超過 1,400 GW(其中約 800 GW 為大型太陽光電，約 600 GW 為屋頂太陽光電)；450S 情境的大型太陽光電和屋頂太陽光電，依據圖 6 所示，合計之累計新增裝置容量則超過 2,000 GW。風力發電 2016~2040 累計新增裝置容量從圖 6 觀之，在 NPS 情境約為 1,500 GW(陸域及離岸)，在 450S 情境也將超過 2,000 GW(陸域及離岸)。

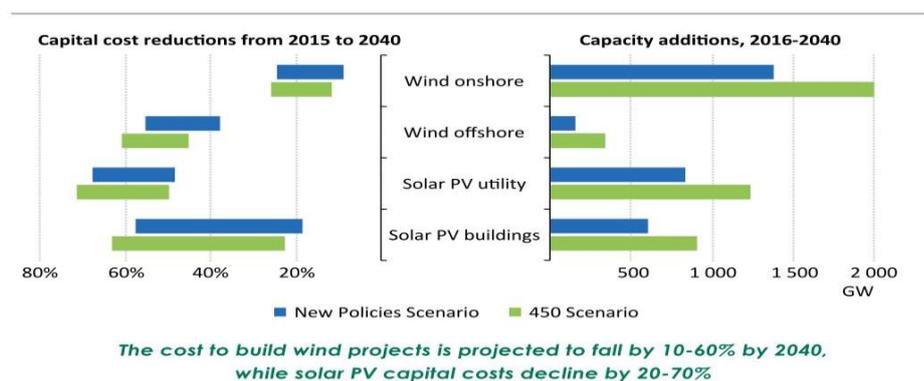


圖 5. 風力發電和太陽光電在 NPS 和 450S 兩種未來情境上的期初建置成本的降低比例以及 2016~2040 的累計新增裝置容量。

(本圖參考自 WEO 2016 圖 11.6)

整體而言，太陽光電和風力發電在未來的成本會持續下降，下降的幅度則多半是視個別的技术改進以及能源開發者營運經驗的累積而定。期初設置成本太陽光電會降至 US\$ 800/kW，陸域風力發電會降到 US\$ 1,400/kW，離岸風力發電則降至 US\$ 2,900/kW。從圖 6 可以看出，450S 情境的成本降低會比 NPS 情境多，風力發電(包括陸域及離岸)的成本下降在 2040 年約達到 10~60%，太陽光電(包括大型太陽光電和屋頂太陽光電)則約為 20~70%。

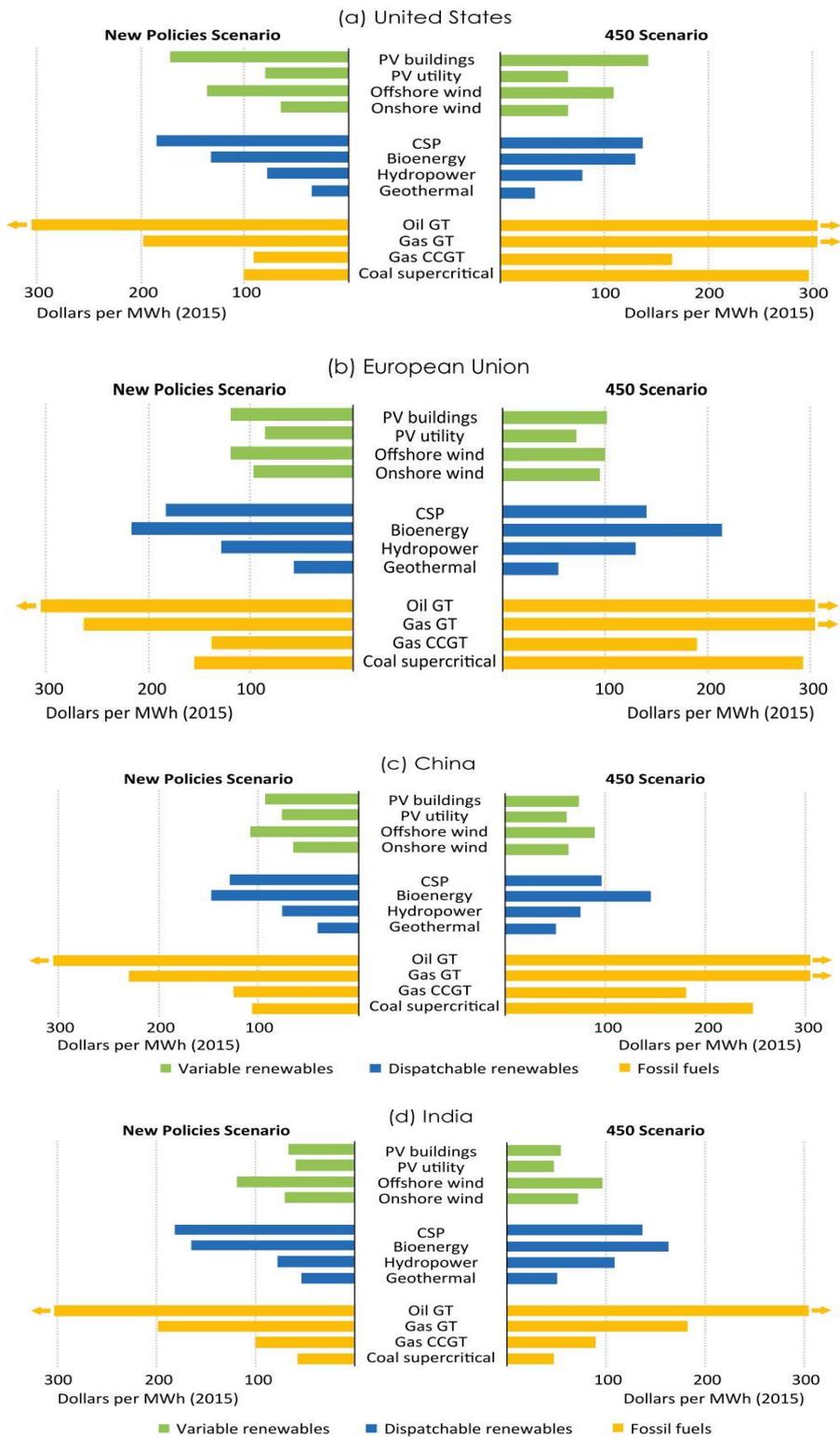


圖 6. 各主要國家在 2040 年 NPS 和 450S 情境之發電均化成本
(參考自 WEO 2016 圖 11.8)

在 LCOE 的未來情境評估上，和圖 5 所示 2015 年的各主要國家的 LCOE 比較，在圖 7 顯示的 不管是 NPS 或 450S 情境，再生能源的發電均化成本均比化石燃料下降速度快，因此更有競爭力。在 2040 年之前，風力發電和太陽光電在全球多數的市場都將低於 US\$ 100/MWh，但同時期的化石燃料卻在上升，在多數市場都會遠高於 US\$ 100/MWh，這在 450S 情境更為明顯。離岸風力發電在 2040 年的 450S 情境中，除了美國稍高於 US\$ 100/MWh，其餘地區都降至 US\$ 100/MWh 以下。

風力發電也和太陽光電一樣，在未來會依靠設計技術、設備的改良精進、運維技術提升等，以降低競爭成本。因此，就基本競爭力而言，風力發電會逐年遞增已無庸置疑，但就全球多數地區而言，風力發電也和太陽光電一樣，仍需政府持續性的政策激勵 15~25 年的期間，以從具備財務誘因，而逐步過渡到完全不需政府補助或激勵即能有收益的再生能源地位。

圖 7 顯示各種再生能源發電在 NPS 情境下，各自不需要政府補助的比例之全球逐年發展情形預測。到 2040 年，再生能源發電不需要補助的比例會佔超過 60%，此時仍約有 5,000 TWh 的再生能源發電還需要某些程度的政府補助。在可調配性的再生能源方面，水力和地熱發電本就具備基本競爭力，即使至 2040 年的新增裝置容量預估仍都不需政府補助；但生質能發電視其所運用的技術和各地料源供應等因素，其需補助的比例則相當不一致，估計至 2040 年，不須補助的比例約為 40%。對於變動性的再生能源發電方面，由圖 7 所示，太陽光電不須補助的比例在 2040 年超過 50%，陸域風力發電則超過 70%。

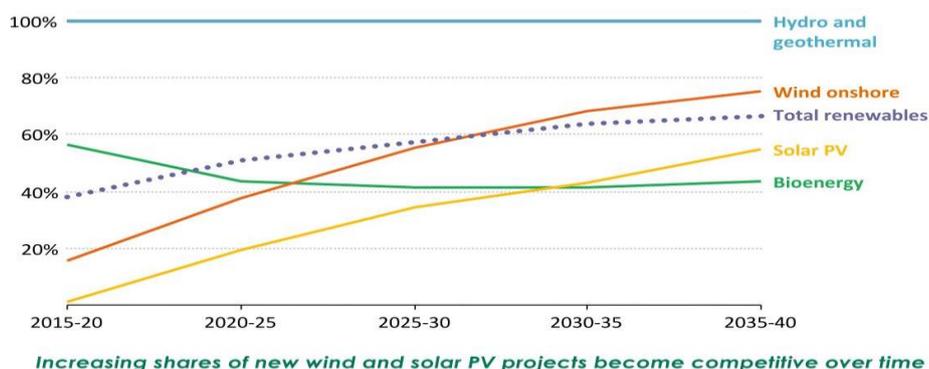
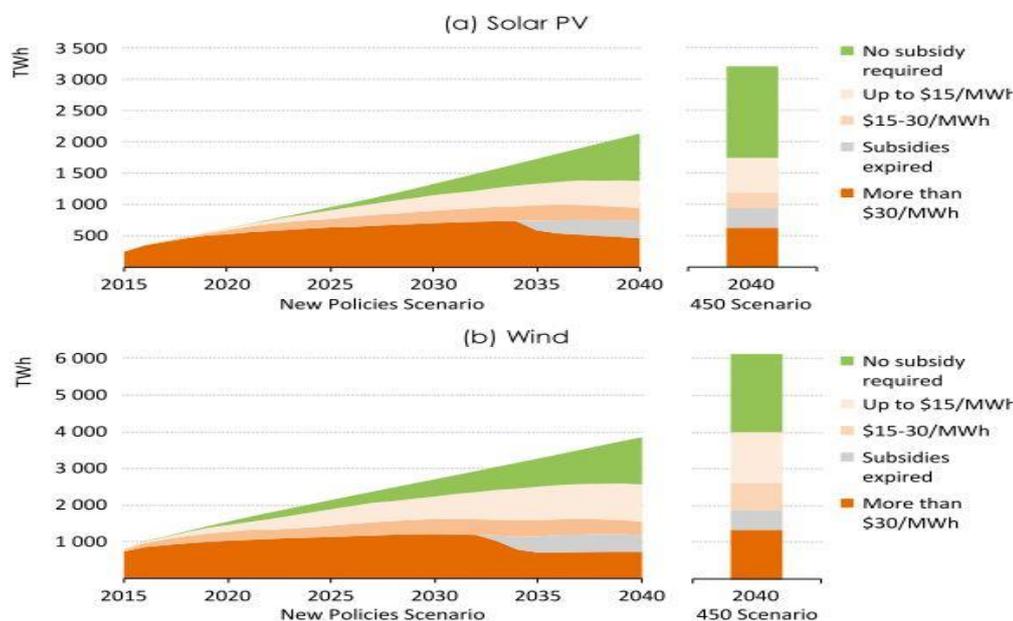


圖 7. 各種再生能源發電在 NPS 情境下，各自不需要政府補助的比例之全球逐年發展情形預測

(本圖參考自 WEO 2016 圖 11.13)

圖 8 顯示風力發電和太陽光電在 NPS 和 450S 情境上，所需各種程度的補助之比較。在 NPS 情境，至 2040 年，太陽光電產生超過 2,100 TWh 的電力中，約有 1/3 因已具備基本競爭力而不需要補助，13% 因為補助到期而不再補助，約 20% 的補助低於 US\$ 15/MWh；風力發電 2040 年產生約 3,800 TWh 的電力中，約 1/3 因已具備基本競爭力而不需要補助，約 1/4 的補助會低於 US\$ 15/MWh。在 450S

情境，至 2040 年，約 75% 的變動性再生能源發電因已具備基本競爭力而不需要補助，其中包括高於 1,000 TWh 的太陽光電和約 2,000 TWh 的風力發電；太陽光電在其發電中不需補助的約佔 50%，相較於風力發電，不需補助的則約佔 1/3，主要是離岸風力發電仍需要稍多的補助(圖 8 比較)。

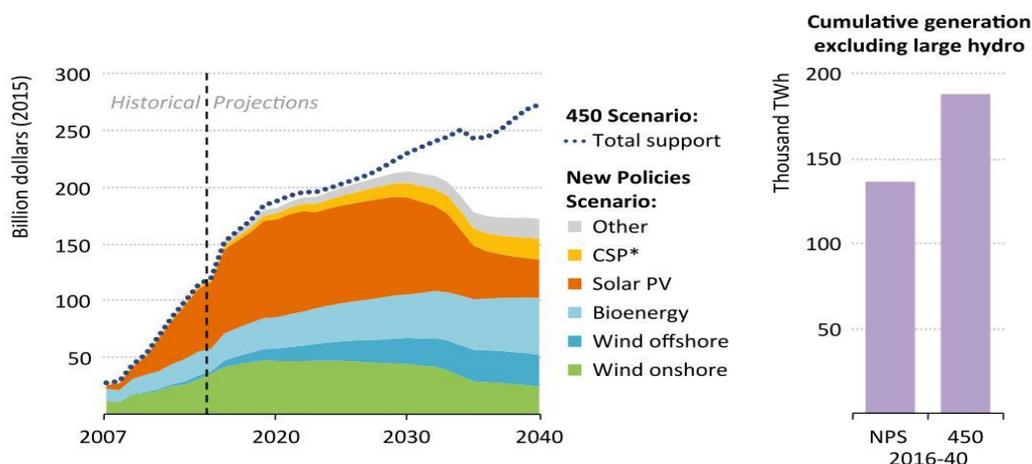


The majority of solar PV and wind power projects require no or very low government support in the New Policies Scenario in 2040

圖 8. 風力發電和太陽光電在 NPS 和 450S 情境上，所需各種程度的補助之比較。
(本圖參考自 WEO 2016 圖 11.14)

在政府的補助上，WEO 2016 考量了全球對再生能源有補助政策的國家，對全球各種再生能源躉購電力的補助總額進行了估算，補助總額是以每個地區的發電均化成本和市場上電力價格的差異，乘上各地區各種能源的總發電量來估算。在 2015 年的全球所有再生能源的躉購電力補助約 1,200 億美元，比 2014 年約高出 64 億美元，風力發電和太陽光電的補助最多並持續成長，但生質能發電 2015 年的補助卻比 2014 年少約 10 億美元，主要為歐盟的某些生質能補助已到期。2015 年各項能源的補助佔比為：太陽光電 50%、風力發電 30%、生質能發電 17%、地熱和 CSP 各佔 2%。2015 年補助額前五名的國家依次為德國、美國、中國、義大利、和日本，佔全部補助的 2/3。針對 NPS 情境，全球躉購電力補助在 2030 年達到高峰，超過 2,100 億美金，然後下降到 2040 年的 1,700 億美金(其中歐盟 29%、中國 14%、美國 12%、日本 6%、印度 6%、其他國家總合約 33%)。從 2016~2040 年，累計的總補助約 3/4 是給太陽光電和風力發電，20%給生質能發電、其餘的比例分給其他再生能源發電。但在 2040 年時，給太陽光電和風力發電的補助比例已從 2015 年的 80%降至 50%。若以再生能源每單位發電量的補助額而言，全

球的整個補助趨勢從現在至 2040 年是往下的。針對 450S 情境，全球躉購電力補助會持續上升至 2040 年，達到約 2,700 億美金(如圖 9)。



While support for renewable electricity will be needed for years to come, transitioning to a low-carbon pathway can be achieved for just 15% more support

圖 9. 各種再生能源在 NPS 和 450S 情境下的躉購電力補助總額比較。

(本圖參考自 WEO 2016 圖 11.15)

四、結論

本篇報告係針對 WEO 2016 報告進行與風力發電相關現況做部分的分析，包括：(1)風力發電發展現況及在三個情境項下的市場分析，(2)風力發電在各項能源的競爭力。風力發電在 2014 年和 2015 年每年新增容量分別為約 50 GW 和 65 GW(圖 4 顯示)，預期到 2040 年，在 NPS 情境下的風力發電累計容量會從 2015 年的 384 GW 成長到約 1,452 GW；若依據 450S 情境，則風力發電累計裝置容量在 2040 年會超過 2000 GW。不管是 NPS 或 450S 情境，從 2014~2040 年，風力發電的電力需求成長在各種再生能源中都屬最高的，NPS 情境成長 3,164 TWh，450S 情境成長達 5,410 TWh。

風力發電的競爭力，會倚賴未來在設計最佳化、設備的改良精進、運維技術提升等，以降低競爭成本。其期初設置成本和發電均化成本都會因上述的改進逐步降低，在 450S 情境下，陸域風力發電的期初設置成本成會降到 US\$ 1,400/kW，離岸風力發電則降至 US\$ 2,900/kW；發電均化成本則陸域風力發電會遠低於 US\$ 100/MWh，離岸風力發電則接近 US\$ 100/MWh。目前許多國家也會利用風場競標的方法，開放國際廠商以競標方式來取得風場，以強化期初設置成本的競爭和發電均化成本的降低。風力發電和太陽光電一樣，在目前都受到全球大多數國家的政策性補助，以從具備財務誘因，而逐步過渡到完全不需政府補助或激勵即能有收益的再生能源地位。不管是 NPS 或 450S 情境，在 2040 年發出的風力發電

中，約 1/3 因已具備基本競爭力而不需要補助，約 1/4 的補助會低於 US\$ 15/MWh。

我國目前陸域風力設置已達 682 MW，離岸風電則已在 2016 年底裝置了兩部示範機組，設定目標在 2020 年完成離岸風場 520 MW，與陸域合計共 1,720 MW；2025 年完成離岸風場 3,000 MW，與陸域合計共 4,200 MW。在未來十年內，風力發電的設置容量大幅增加，尤其是離岸風力發電，會是再生能源發展除了太陽光電以外的另一項主力。因此，本篇報告從 WEO 2016 報告內容中，略為分析出風力發電的市場和競爭力等面向，期以讓我們去深切思索我們的風力發電發展情境，在未來離岸風力發電宜縝密規劃選擇，個別風場陣列以大容量單一樣式風機當作目標，相關制度亦須配合修改以避免重蹈陸域風場開發問題；另透過躉購費率²適時調整與租稅優惠，以提高國內外業者投入之誘因，讓國內風力發電產業快速嵌入全球分工布局，並引領台灣成為全球風力發電系統供應商之一，以創造台灣產業發展新風貌及綠色工作機會。

參考文獻

[1] World Energy Outlook 2016.

[2] 我國能源供需結構階段性發展策略規劃，科技部 106 年專題研究計畫

[3] REN21 《2016 全球可再生能源發展現狀報告》Website: //www.ren21.net/gsr

[4] Global Energy Network Institute, GWEC.2016 全球風能協會最新資料 Website: <http://www.gwec.net/>

[5] 2016 年能源產業技術白皮書

² 106 年陸域風場裝置容量 1kW 以上不及 20kW 者，躉購費率為 8.9716 元/kWh，而 20kW 以上者為 2.8776 元/kWh(未加裝 LVRT 能力者為 2.8395)；離岸風廠，選擇適用固定 20 年躉購費率者，為 6.0437 元/kWh，選擇適用階梯式躉購費率者，前 10 年適用費率為 7.4034 元/kWh，後 10 年起適用費率為 3.5948 元/kWh。