

離岸風力發電發展趨勢與展望

The Trend and Outlook of Offshore Wind Power Development

陳美蘭 張永源 連永順

Mei-Lan Chen Yun-Yuan Chang Yung-Shun Lien

工業技術研究院 綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Laboratory, Industrial Technology Research Institute

摘要

全球風力發電市場自 1980 年代開始興起，至今發展已超過三十年，成為技術最為成熟、最具經濟規模，成本最為接近傳統能源的再生能源選項。我國已訂定「千架海陸風力機」目標，離岸風力示範獎勵辦法已啟動發展離岸風力之第一步，未來期望透過示範計畫之成功案例，建立國內離岸風力發展能量，再透過後續區塊開發之規模化市場商機，達成國內離岸風電設置量目標並有效帶動離岸風電產業發展。

ABSTRACT

Since 1980, the global wind power energy has developed over 30 years. It has become one of renewable energy which was most mature, most economical and closest to traditional energy cost. Taiwan government has set up "Thousand Wind Turbines Promotion Program", and has publicly announced "The Offshore Wind Power Demonstration System Incentive Program", declared the offshore wind farm development in Taiwan has officially begun. The demonstration incentive program is expected to establishing locally offshore wind energy technologies and then follow the policy of "Development Rounds" is expected to achieve the target of offshore wind power and effectively promote the development of offshore wind energy industry in Taiwan in future.

壹、前言

能源為人類本世紀最重要之議題，面對全球暖化與對於核能之疑慮，歐美等先進國家對於再生能源的研究與發展一直是無虞餘力也是世界領航者。2014 年全球風力發電量接近全球電力供應 5%，未來比例也將持續成長，而風電市場能如此蓬勃發展，均是仰賴各國政府設定明確再生能源設置量目標，並佐以適當躉購費率、融資協助、租稅優惠、技術研發及相關配套產業政策等，才能帶動一波波強勢成長。風力發電應用市場主要分為陸域以及離岸，其中陸域風力發電技術相對成熟，仍為市場發展主流，佔整體風電市場九成以上，但市場發展已趨緩，我國亦是如此；而離岸技術正快速發展中，市場成長快速，為各廠商研發投入重點。

我國已訂定「千架海陸風力機」目標，離岸風力示範獎勵辦法已啟動發展離岸風力之第一步，未來期望透過示範計畫之成功案例，建立國內離岸風力發展流程與技術能量，再透過後續區塊開發政策之規模化市場商機，達成國內離岸風電設置量目標並有效帶動國內離岸風電產業發展。故本文以離岸技術為主，參考歐盟相關調查報告，針對目前全球離岸風力發電設置現況、發展趨勢與未來展望作一介紹。

貳、全球發展現況

一、需求面

根據世界風能協會(World Wind Energy Association; WWEA)的統計[1]，2014年全球風力發電裝置量帶來新的紀錄，總累計裝置量已達370 GW(參見圖 1)、新增裝置量超過50 GW，大於2013年的40%，也大於2012年度44.6 GW新增裝置量的紀錄。其中光是全世界風力發電裝置容量最多的前十二名就有44.8 GW

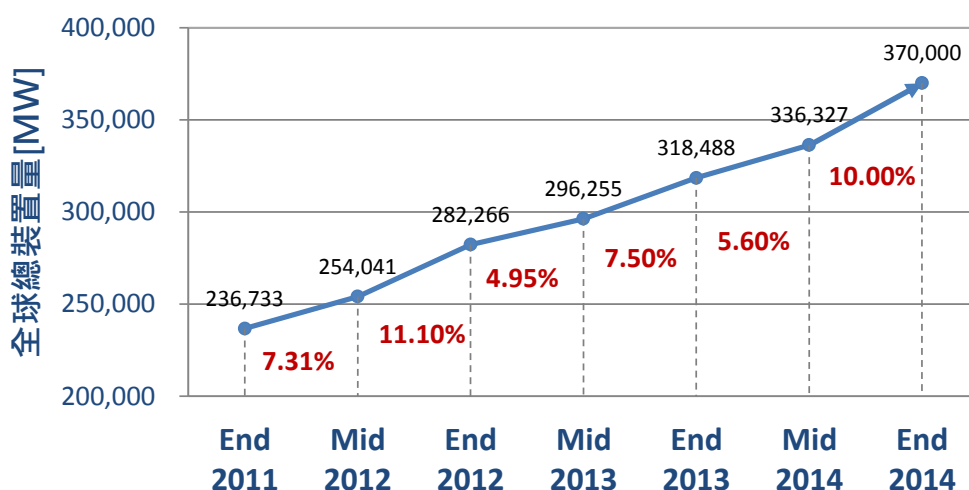


圖 1 2011-2014 年全球總裝置容量統計圖

表 1)，而且有一半的國家也都創新的紀錄：

- 中國新增裝置容量 23.3 GW，是目前世界排名第一，也是單一年度新增最多的國家，總裝置容量已達 115 GW。
- 德國已成為第二大的市場，陸域與離岸新增裝置容量共 5.8 GW。
- 美國市場正從低迷中恢復過來，新增裝置容量接近 4.9 GW。
- 巴西新增總裝置容量 2.8 GW，是第一個躍上前十二名排名的拉丁美洲國家。
- 加拿大以及瑞典也取得新的紀錄，新增總裝置容量分別為 1.9 GW 以及 1 GW。
- 丹麥創造新的世界紀錄，達到風電佔在國內電力供應的 39%。

- 其他國家像西班牙、丹麥和義大利則是有停滯發展的現象。

自 2009 年以後，每年風力發電成長速度明顯大於前一年，2014 年全球風力發電裝置容量成長了 16%，顯著高於 2013 年的 12.8%。可見在環境保護以及能源永續的議題上，風力發電在世界許多地區的電力供應已是一個無可爭議且全力發展的能源，而且 370 GW 的總裝置容量可貢獻全球電力供需的 5%，其中幾個國家更是有 10% 或以上的電力來自於風力發電，像是丹麥、西班牙、葡萄牙、愛爾蘭、英國和德國。

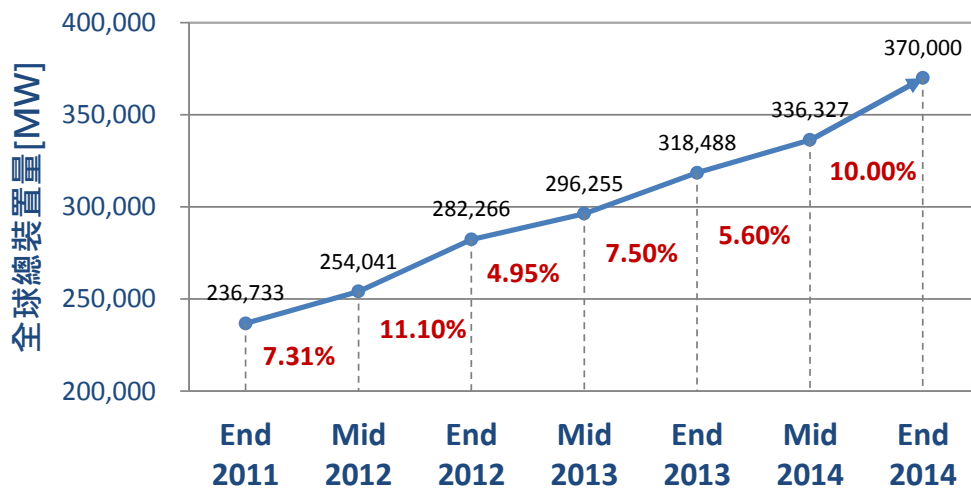


圖 1 2011-2014 年全球總裝置容量統計圖

表 1 全世界前十二名國家 2014 年裝置容量統計表

2013年排名	國家	2014年總裝置量 [MW]	2014年新增裝置量 [MW]	2014年長率 [%]
1	中國	114,763	23,350	25.7
2	美國	65,879	4,854	7.8
3	德國	40,468	5,808	16.8
4	西班牙	22,987	28	0.1
5	印度	22,465	2,315	11.5
6	英國	11,998	1,467	13.9
7	加拿大	9,694	1,871	25.9
8	法國	9,296	1,042	12.6
9	義大利	8,863	108	1.3
10	巴西	6,182	2,783	81.9
11	瑞典	5,425	1,050	21.4
12	丹麥	4,850	78	1.6
其他國家		47,300	7000 (預估)	16
總計		370,000	51,753	16.2

離岸風電的部分主要發展國家都在歐洲，根據歐洲風能協會(European Wind Energy Association; EWEA)的統計[2]，2014 年併網發電總計有 408 部風力發電

機組包含 9 個風場（總投資額 42 億歐元）與 1 個示範計畫（總投資額 59 億歐元）。2014 年歐洲離岸風電新增裝置容量為 1,483.3 MW，較 2013 年少 5.34%，總計有 536 部風力發電機組安裝完成，平均每天安裝 5.9 MW，其中 373 部風力發電機組正等待併聯發電，並且有 12 個計畫仍在持續進行。2014 年歐洲離岸風電總裝置量達 8,045.3 GW，迄今全歐洲總計有 11 個國家、2,488 部離岸風力機、74 個離岸風場完成併網發電，每年將可生產電力達 296 億度電(29.6 TWh)，約可供應歐盟電力需求的 1%。2014 年歐洲主要離岸風電總裝置容量依序分別為英國 4,494.4 MW(55.9%)、丹麥 1,271 MW(15.8%)、德國 1,048.9 MW(13%) 以及比利時 712 MW(8.8%)。其中 5,094.2 MW(63.3%) 風場位於北海海域，1,808.6 MW(22.5%) 風場位於大西洋海域，1,142.5 MW(14.2%) 風場位於波羅的海海域。而亞洲的中國大陸、日本、南韓及台灣以及美國亦積極發展中。

二、供給面

2014 年歐洲離岸風電新增裝置量達 1,483.3 MW[2]，主要還是來自增加的原因為英國離岸風電市場持續成長。2014 年在離岸市場供給面的部分，德國西門子(Siemens)為全球離岸風電主要設備供應商，供貨佔比為 65.2%；丹麥 DONG Energy 為主要離岸風場開發商，開發佔比達 24.1%；丹麥 Bladt 公司為主要水下基礎供應商，佔比達 43.7%；139 個風場陣列電纜是由 Nexans 所製造(34.2%)。位於英國東南方肯特郡(Kent)外海的 London Array 離岸風場[3]，安裝 175 支西門子 SWT-120 3.6 MW 離岸風力機，總裝置容量為 630MW，約可供應英國 50 萬戶家庭一年的用電，於 2013 年 7 月 4 日舉行啟用典禮，此風場容量超越英國 Greater Gabbard 風場，成為全球規模最大離岸風場。London Array 落成後，更加鞏固英國在離岸風電應用之全球領導地位。2014 年併網發電最大規模的是 West of Duddon Sands 風場，只有 389 MW。

參、台灣發展現況

一、政策面

(一) 再生能源發展條例

為推廣再生能源利用，增進能源多元化，改善環境品質，帶動相關產業及增進國家永續發展，政府於 2009 年特制定再生能源發展條例，明定政府可運用收購機制、獎勵示範及法令鬆綁等方式，提高開發再生能源誘因。藉由規範電業併聯再生能源發展設備及保障電能收購價格的雙重機制，獎勵設置再生能源發電設備，以達到再生能源的推廣利用、保護環境及帶動相關產業發展的三重目標。在再生能源收購機制方面，政府將提供再生能源發電設備設置者合理利潤，並要求經營電力網的電業應併聯、躉購再生能源電能。至於躉購電價，將由經濟部邀集相關部會、學者專家、團體組成委員會，審定、

公告再生能源電能的躉購費率及計算公式，並逐年進行檢討修正。

（二）千架海陸風力機

為達成國際減碳承諾原則，並宣示打造綠能低碳環境，逐步邁向非核家園等政策目標，我國積極發展再生能源。其中風力發電具有最佳之潛能及經濟性，因此在 2011 年日本 311 福島核災以及臺灣陸海域風能資源豐富的背景下，政府於該年度揭鑿了「千架海陸風力機」[4]，目標預計於 2020 年完成開發淺海風場 320MW，且將於 2030 年前安裝約 600 架 3,000 MW 離岸風力機，與陸域 450 架 1,200 MW 風力機，合計共設置超過 1,000 架風力機，總裝置容量將達 4,200 MW，約可占再生能源設置目標 33 % 以上。

（三）風力發電離岸系統示範獎勵辦法

為了加速國內離岸風力發電之開發設置及帶動台灣離岸產業的發展，經濟部已於 2012 年 7 月 4 日公告並啟動「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，正式向世界宣告臺灣風力發電將從陸地延伸至海域。

經濟部能源局針對千架海陸風力機計畫推動辦公室以及離岸示範獎勵辦法的政策推動離岸示範風場建置，目標是完成離岸示範獎勵辦法 4 架示範機組，並展開包含 1 個國營事業之 3 個示範風場建置，提高風力機國產化比例與自主系統技術。並以區塊開發方式，推動大規模風場開發，使得風電再生能源能夠有大幅的成長，成為具規模經濟之產業，帶動國內經濟成長。

二、技術面

依據國內風電產業發展歷程經驗及整體產業之特性，國內風電產業之產業鏈可展開為風電製造業、風電服務業、以及風電發電業三個環節。惟鑑於全球離岸風電的技術成熟度較低、投資風險較高，以及國內欠缺相關經驗，因此亦預期將會面臨較多的開發、融資、設備、工程技術的挑戰和風險。離岸風電場之施工及維運皆須仰賴風電服務業，考慮風場計畫之全程壽期成本，離岸風場中風力機設備佔計畫總預算僅約 30~40%，而維運及海事工程(含施工及海上併網)則約為 55%。配合政府積極推動風力發電之推廣應用之政策，並盱衡國內外風電市場發展趨勢，國內在推動風電產業價值鏈作法上將會以風電服務業為主，配合風電裝置容量成長逐步建構自主海事工程技術及維運團隊；同時亦將帶動風電製造業發展，開發並切入關鍵零組件及整機系統之市場；但因國內大型風電設備產業能量不足，亦必須加強推動產學研之技術開發，並積極與國外進行技術合作，才能填補未來離岸風電設備之技術規格不足之危機。

透過示範獎勵辦法之推動，其建造階段與營運維護過程之運轉資料均將公開做為未來離岸開發之參考，惟海上風場開發比陸域技術複雜得多，除了環境、生態、漁業與國防等問題外，還有離岸風電規劃、設計、施工以及未來運轉維運相關技術能量缺口急需建置，才能滿足國內風電產業發展之需求。離岸風場

開發流程所涉及的技術種類包含：

- 開發/申設：場址調查與環境評估技術、風場規劃與設計評估技術、施工運維規劃技術、風險評估與管理技術。
- 設計/施工：風場細部設計技術、海事施工安裝技術、施工管理與風險管控技術。
- 營運/維護：風場營運管理技術、機組與設備檢修技術、運轉操作技術、設備監測技術。
- 風力機設備：風力機系統設計與製造技術、基礎製造技術、電纜製造技術、變電站製造技術。

肆、技術發展趨勢

一、朝大型化發展

風力機容量規格從 450 kW 至 7-8 MW（參見圖 2）[5]，過去 20 年來成本降幅達 30%，2014 年離岸風力發電機組單機容量大小為 3.7 MW，平均併網發電之風場開發規模為 368 MW，較 2013 年少 24.1%，主要是因為上述所提及 2013 年完工商轉的 London Array 離岸風場（630MW）是目前最大規模的風場開發緣故。同時，當開發計畫隨著裝置容量的增加，電纜成本也隨之增加，而且施工以及併聯也隨之變得更具挑戰。以英國 504 MW 的「Greater Gabbard」計畫為例，計畫需求規劃了 2 個海上變電站、3 條輸出電纜以及一條長達 336.5 km 的海底電纜（包含其它陣列併聯的纜線），才能滿足所有的電力輸出。

歐盟 Upwind 計畫[5]於 2006 年-2011 以 5 MW 風力發電機型規格（參見

表 2) 外推 10 MW 以及 20 MW 進行最大化設計限制研究，如此一來此風力機可以擴大歐洲的離岸風電提供幾倍以上的電力，以作為現今風力機成本更低的解決方案之一。歐洲風能協會預測，2030 年風電將可提供 26 %-34 % 歐洲電力需求，而計畫研究顯示此 20 MW 機型在生產成本效益條件下可以滿足上述需求，然而，此 20 MW 機型需要新的、創新的、量身定做的設計才能使它運轉發電，包含葉片、應用方式、風場佈置、控制以及維護。

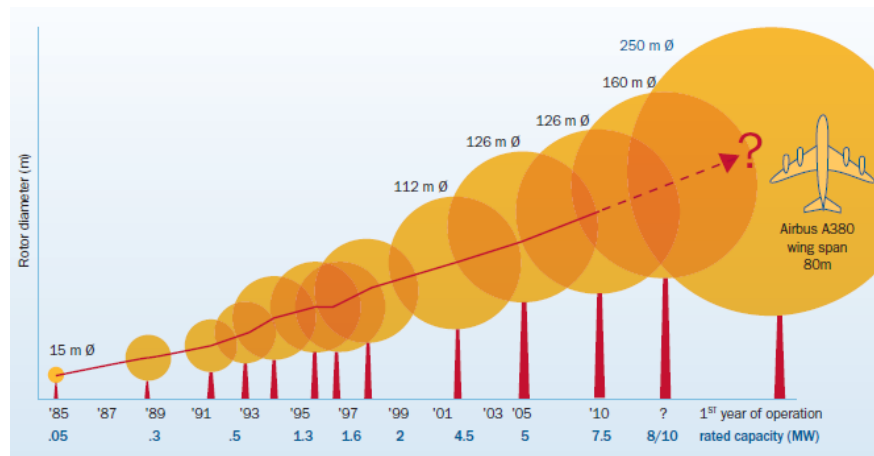


圖 2 大型化風力發電單機容量成長圖[5]

表 2 UpWind 計畫研究大型風力機設計規格表

風機規格	單位	Reference wind turbine 5MW	Extrapolated turbine 10 MW	Extrapolated turbine 20 MW
發電容量	MW	5.00	10.00	20.00
風力等級		IEC class 1B ¹	IEC class 1B	IEC class 1B
葉片數量		3	3	3
轉子形式		Upwind	Upwind	Upwind
控制		Variable speed, control pitch	Variable speed, control pitch	Variable speed, control pitch
葉片直徑	M	126	178	252
輪轂高度	M	90	116	153
轉子最大轉速	Rpm	12	9	6
轉子重量	Tones	122	305	770
塔頂重量	Tones	320	760	880
塔架種量	Tones	347	983	2,780
發電量理論值	GWh	369	774	1,626

二、離岸距離、水深

Emerging Energy Research 在 2010 年的全球離岸風電市場報告[3]中詳細說明全球目前已規劃離岸風電計畫發展現況，並且以發電容量規模、場址水深以及離岸距離為主要分析因子彙整分析，由下圖 3 分佈圖顯示，目前已規劃的離岸風電計畫都位於此分佈圖的左上方，也就是在技術、成本考量下，水深因子是相對離岸距離因子來得容易克服。其中又屬英國「Round 3 Zones」計畫為最大規模，包含 9 個場址、總計 24,100 MW 裝置容量、平均水深 45 m、平均離岸距離 80 km，各個場址的所在位置請參見此圖的左下英國地圖，此階段計畫中又以 9,000 MW 的「Dogger Bank」計畫所在離岸距離最遠，分佈長達 125 km-195 km 之遠，為其中之最。

¹ IEC 61400 class 1B is an average wind speed at hub height of 10 m/s, V50 extreme gusts 70 m/s, 16% characteristic turbulence, wind shear exponent is 0.2.

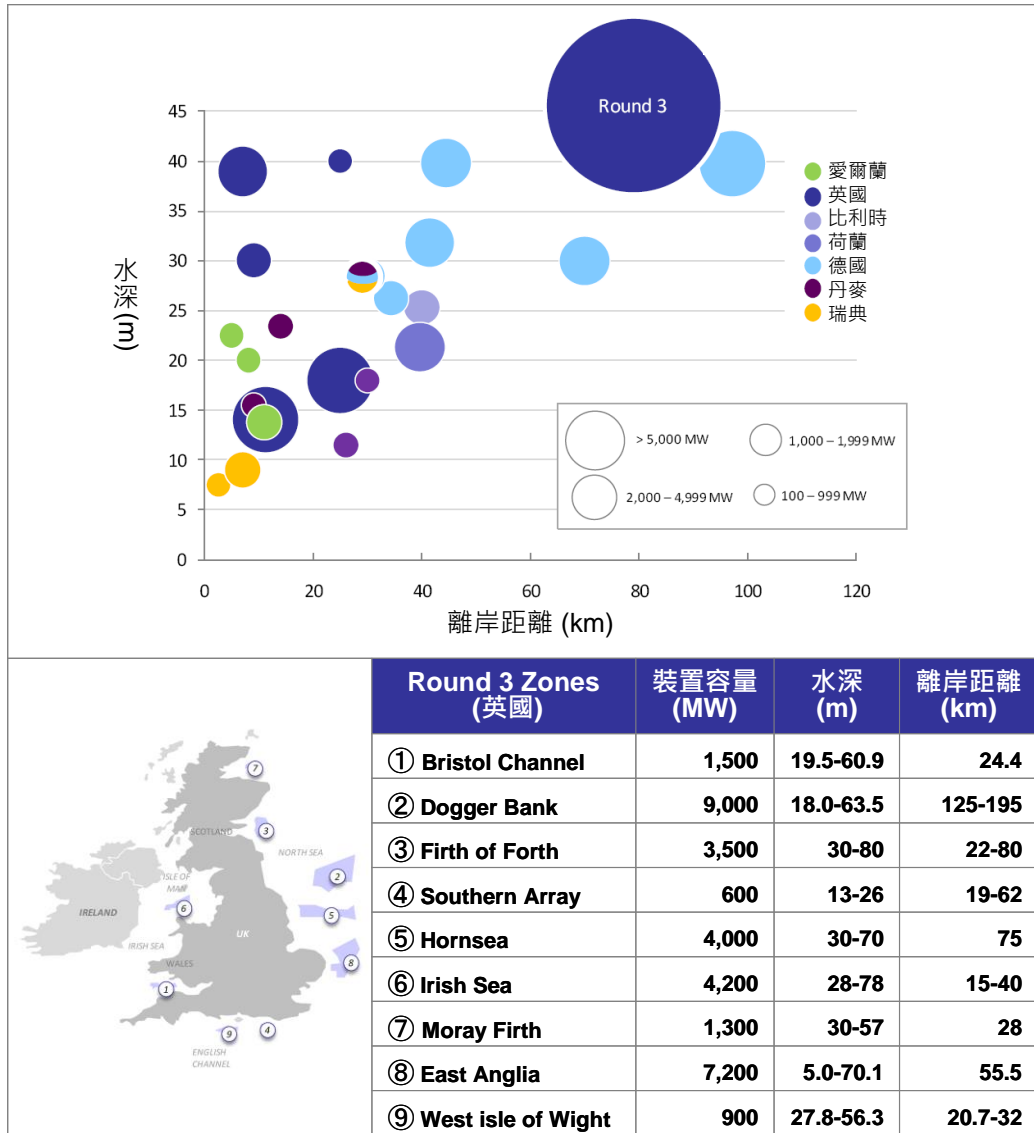


圖 3 歐洲已規劃的離岸風電計畫規模大小、水深與離岸距離統計圖

在 2014 年年底，已商轉的風場平均水深是 22.4 m 離岸距離是 32.9 km，歐洲離岸風電市場趨勢已朝向離岸更遠與水深更深的地區規劃與發展，最好被舉證的例子或許就是德國在北海的「BARD I」計畫，「BARD I」計畫在水深 41 m 以及離岸 100 km 的地方設置風力機組，是目前規劃離岸距離最遠的的開發計畫。當離岸風電場址越靠近高水深區以及海底更加複雜的區域時，離岸風力發電基礎也不斷地依需求演變，在離岸風電開發早期，單樁式基礎提供容易安裝、成本效益佳的解決方式；就未來長期發展看來，在目前規劃開發計畫中的問題，也將面臨更具挑戰的高水深或是複雜海床、地質等場址。

如圖 4 所示離岸風力發電水下基礎形式大致分為單樁式(Monopile)、Jacket、Tripile 或 Tripod、以及重力式(Gravity)，在一般正常土壤狀況下，0 m -5 m 水深適用重力式、5 m -25 m 水深適用重力式與單樁式、25 m -50 m 水深適用 jacket 以及 tripile，50 m -70m 水深適用 jacket 或者浮力式。2014 年歐洲地區離岸風場仍以單樁(Monopile)為主要下部結構，數量 490，占比 78.8%，其次依序分別為

重力式(10.4%)、jackets(4.7%)、tripods(4.1%) 以及 tripiles(1.9%)。除此之外還有兩個併網發電的大型浮式發電機組。

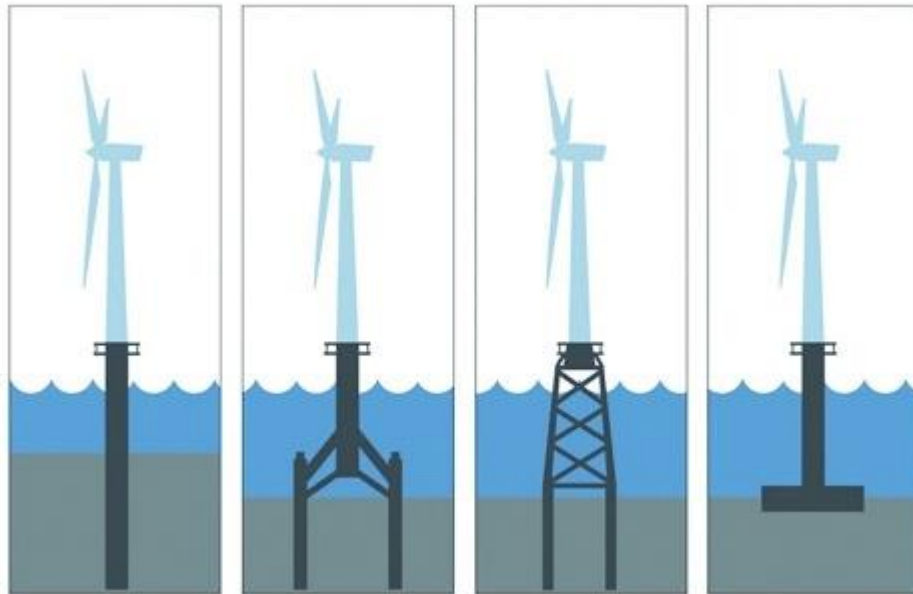


圖 4 離岸風力發電基礎種類²

伍、未來展望

面對全球暖化與對於核能之疑慮，各國積極投入再生能源之設置與技術開發，展望 2015~2020，全球風力發電市場仍強勁成長，風力發電已逐漸成為全球主要電力來源之一。風力發電佔全球電力需求配比逐年提高，根據 BTM[6]與 IEA[7]統計，風力發電量佔全球電力供應未來比例將持續成長，預計 2018 年可超過 5.06%，2023 年更高達 7.28%。展望 2015 年歐洲離岸風電仍會持續且快速發展中，為全球各國及各廠商主要關注焦點。

我國政府於 2012 年公布「千架海陸風力機」計畫，並由能源局支持成立「千架海陸風力機計畫推動辦公室」，希望於現有陸域風電 637.2 MW 設置量之基礎上，全力推動國內風力發電之設置與發展。我國風電應用短期目標於完成我國首座離岸風電示範機組；中期目標在 2020 年完成陸域風場開發，離岸風電累計裝置達 320MW；長期目標在 2030 年累計安裝約 600 架、容量 3000MW 離岸風力機，與陸域 450 架 1200MW 風力機，合計共設置超過 1,000 架風力機，總裝置容量達 4,200 MW，占我國再生能源設置目標 33% 以上。展望未來，於政府於今年召開全國能源會議後，希望能更為擴大再生能源之配比，於「千架海陸風力機」目標基礎下，提高風力發電設置目標量，更提前完成「千架海陸風力機」目標。我國風電產業上中下游整體產業鏈已漸趨完整，且具備完整製造業能量，目前陸域風力機組除塔架外，零組件幾乎 100% 進口，後續關鍵元件備品亦須仰

² Photo source <http://www.theengineer.co.uk/>

賴進口，不利於風場之運維成本與時效之掌控。展望未來，於此國內離岸風電市場正起步階段，且政府積極推動離岸風場設置目標政策下，期盼國內能建立相關國內製造業與服務業能量自主性[8]。

陸、參考文獻

1. WWEA, “New Record in Worldwide Wind Installations” .
2. EWEA, “The European offshore wind industry - key trends and statistics 2014” .
3. 『Global Offshore Wind Energy Markets and Strategies: 2010 - 2025. 2010 EMERGING ENERGY RESEARCH, LLC.
4. 千架海陸風力機風力資訊整合平台，<http://www.twtpo.org.tw/>。
5. Upwind, “Design limits and solutions for very large wind turbines” .
6. Navigant Research, a BTM Wind Report, “World Market Update 2013 International Wind Energy Development Forecast 2014-2018” , 26th March 2014.
7. 張永源 ,康志堅 , 2014 全球風力發電市場發展趨勢與展望 「中華技術」 ,(103),pp.26-37,20140731.
8. 何無忌等, 離岸風場調查分析及技術研發計畫年度執行報告, 經濟部能源局, 201412.