

2.3 風力發電

摘要

我國的地理位置受季風影響，風力資源相對豐富，再加上山脈地勢影響，造就臺灣西部及臺灣海峽擁有相對優良的風場環境。在邁向淨零排放目標的路徑上，風力發電絕對是我國除了太陽光電之外，不可或缺的無碳電力選項。為了加速拓展我國風力發電裝置容量，建議下列幾點：

1. 雖然陸域風電裝置成本較離岸風電低，但我國地狹人稠，土地取得不易再加上其噪音易遭社區民眾反對，使得陸域風電發展較受限。欲提高陸域風電裝置容量，必須取得鄰近社區居民之支持。因此，建議政府除了考量風速條件之外，應將居民人口因素放入陸域風電機選址考量評估，並加強社會溝通，或提供各式誘導配套措施提高社區居民支持度，例如：補助加裝隔音窗。
2. 未來風力發電將以發展離岸風電為主，目前政府雖已劃設適合發展風電之風場海域區域，但受未來風電技術發展之影響（如：大型化風機、深水區風機基座架設技術等），原有考量之限制條件可進行再檢討。因此，建議政府可重新檢視評估臺灣海峽風場區域，尋求發電最佳化之風場風機配置（單機裝置容量、風機數量、海域面積等），例如：深水區風場、漁場漁民溝通。
3. 目前離岸風電裝置能力受限於港口基地的工程吞吐量與海事工程的能力，為加速風力發電的布建，應同步建構相關基礎設施。欲提高此裝置能力至每年裝置 1.5 GW 或更高，須增加港口基地面積進行元件生產、儲存、組裝及維修等工程。因此，建議政府應針對我國港口碼頭之土地利用需求進行整體規劃與設計。
4. 雖然目前風力發電機組主要來自國際廠商，但因我國風力發電未來發展潛力大、商機大，除了引進國外技術之外（高發電效率與大型化風機），並於舊機組年限屆臨時汰換更新之外，更可投入開發適合我國國情之相關技術，以從建置到長期維運都達技術自主的目標。例如：浮動式風力發電技術、海事工程技

術、臺灣海峽風力發電系統管理（含精準風力預測與發電量預測資訊）、降噪音葉片設計等等。

5. 根據估計，我國於 2050 年風力發電裝置容量可能達到的目標為：陸域風電 1.2~3.8 GW、離岸風電 43.2~53.2 GW，總發電量約為 1,543.2~1,957.1 億度，平均值為 1,750.15 億度；若要再增加風力發電裝置容量，則須要在增加港口碼頭能量方面施行更強力的作為，方可能突破離岸風機裝置時間與空間的限制，以期在目標年期程內完成。

2.3.1 前言

除了前一節的太陽能之外，風能是目前「加速電力去碳化」的另一項關鍵再生能源。風能具有「能源資源永續且豐富」、「能源轉換為電力的過程相對環保」的特性，同時也是全世界發展迅速的無碳電力選項之一¹。但是，風能亦具有「能量密度低需要大量土地（陸上土地及海域面積）」、「能量來源間歇性及不穩定性」、「運轉時產生的噪音」、「需要有適當風場的地域性」、「初期基礎設施與設置成本較高」的缺點²，使得風力發電的發展，與太陽光電一樣，須要克服「擴大規模」及「穩定電力」的挑戰。

臺灣地理位置受季風影響，風力資源相對豐富，再加上山脈地勢影響，造就臺灣西部及臺灣海峽良好的風場，全臺灣前 10%風力最強的區域常年平均風速高達 8 m/s 以上，而平均風力密度則超過 700 W/m²；臺灣海峽平均風速高達 10 m/s 以上，而平均風力密度則超過 1,500 W/m²。此外，全球風力最佳的 20 處離岸風場，其中有 16 處位於臺灣海峽內，這也使得臺灣海峽擁有相對優良的風場環境，非常適合發展離岸風電³。至於陸域風電方面，臺灣地狹人稠，陸域風電難以避免鄰近民眾居住地區，也常因社區反對聲音，使陸域風電的發展較為受限。

¹ Our world in data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember. IEA (2020). Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025.

² 工業技術研究院(2011) 臺灣風能評估手冊。

³ Global wind atlas. <https://globalwindatlas.info/area/Taiwan>

雖然臺灣風力條件非常適合發展風力發電，風力發電也是臺灣可發展的無碳能源選項，可以有效降低臺灣的溫室氣體排放量，但是若要使用大量土地及海域面積發展風力發電（風場及基地場域），將面臨不同利用項目競爭土地的問題。因此，在有限的土地資源下，臺灣能發展多少風力發電、裝置潛能或極限是多少、減碳效益是多少？這是亟須分析的關鍵問題，有了這些答案方能進行後續的路徑研擬與相關布建分析。

2.3.2 我國發展風力發電之現況問題分析

我國自 2016 年開始將綠能科技列為「5+2」產業創新計畫之一，積極推動太陽光電及風力發電項目，希望能致力達成 2025 年再生能源發電占比達 20% 的目標，其中，風力發電是僅次太陽光電的再生能源項目。在此政策目標下，經濟部於 2017 年通過「風力發電 4 年推動計畫（106 至 109 年）」，積極優化設置環境，包括建立示範風場、完備離岸風電基礎建設、吸引國內外投資、簡化行政程序、本土產業升級等等，這些推動措施希望能長期帶動我國風力發電技術與產業。希望在 2025 年能完成設置 6.9 GW 的風力發電裝置容量（陸域 1.2 GW、離岸 5.7 GW），每年的預估發電量為 235 億度（陸域 28 億度、離岸 207 億度）⁴。

截至 2020 年底，我國陸域風電已經在 31 個風場中裝設 361 架風機，裝置容量達 726 MW；離岸風電在示範風場共設置 22 架風機，裝置容量達 128 MW，兩者總計達 0.85 GW 的裝置容量⁵，此數值尚不及目標裝置容量的一半，且距離 2025 年目標仍有不小的距離（圖 2.3.1）。此外，因離岸風機組件之長度、重量、寬度等特性使得離岸風機裝置須要廣大腹地之港口碼頭，作為儲存、組裝、水下基礎對接之用。因此，離岸風電裝置能力受限於港口基地的工程吞吐量，目前我國碼頭約可處理為每年 1 GW 的裝置容量，政府預定於 2026 年起釋放出 1.5 GW 的離岸風電裝置容量，以加速我國離岸風電發展。

⁴ 經濟部能源局。風力發電 4 年推動計畫（106 至 109 年）。

⁵ 綠能科技產業推動中心(2022) 能源月報。

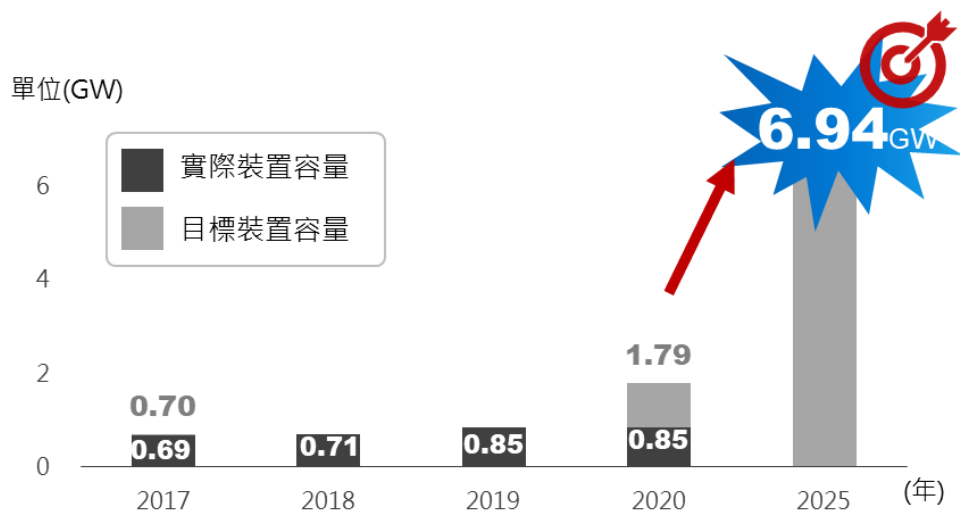


圖 2.3.1 我國歷年風力發電的裝置容量（目標值與實際值）

依據上述可知，政府即使已大力推動風力發電，在實際目標達成上仍存有一定落差，針對這些實務上推動問題，綜整分析如下：

1. **社會反對聲浪不斷：**風力發電雖被視為乾淨再生能源，但其設置仍會影響部分民眾，也因此引發我國社會一些反對意見，包括陸域風機之低頻噪音引起鄰近社區居民之抗議；離岸風電影響漁場及漁業權引發漁民團體抗議；離岸風電可能影響海洋生態（如鳥類、白海豚）引發環保團體反對；景觀變化的抗議聲音等等，這些社會反對意見使得風力發電推動上遇到阻礙，裝置進度不如預期⁶。
2. **風力發電技術仰賴國外廠商引進：**我國離岸風電技術不足，尤其是海事工程的經驗須要仰賴國際廠商、國外供應商與工人，假設一支單機裝置容量 8~10 MW 的風機，要達到 2025 年離岸風電 5.7 GW 裝置目標，那需要超過 600 座風力發電機，因近幾年 COVID-19 疫情的關係，進口的設備設施與工人行動的限制，使得工程進度受到影響⁷。雖然政府要求開發商要在地採購部分零組件，目前在地化政策雖有部分成果，然而離岸風電所需之系統零組件規格及認證要求高，國內供應鏈產業須要學習階段及時間，使得本地供應商無法在國際上

⁶ 國家海洋研究院(2020) 離岸風電場生態保育環境監測研究：底棲環境改變對海洋生態之潛在影響案。

⁷ 中技社(2021) 全面建構台灣離岸風電產業競爭力。

競爭，連帶使開發進度受到影響，整體策略未能發揮綜效。

3. **相關基礎設施不足**：我國風力發電的實際發電量主要落在 1~3 月與 10~12 月，約占整年度的 70%，而夏季(4~6 月)用電高峰卻是風力發電供電較少的季節，如同太陽光電一樣，此間接性特性無法穩定提供電源，必須透過超高壓電纜併網後方能持續提供。但我國離岸風場位於西南部外海，海底電纜若於彰化、雲林、嘉義等農業縣市上岸，原有農業用低壓電網將不敷使用，勢必須要重新建置輸配電電網、變電站變電所等基礎設施⁸；此外港口碼頭工程吞吐量亦影響布建速度，目前雖然未完全將現有港口基地空間利用殆盡，但空間問題未來勢必影響工程排程與進度⁹。

這代表著我國未來若欲達到、甚至超過目前設定的風力發電裝置容量目標，勢必須要克服不同社會意見的問題以及風電量能提升的種種挑戰。

2.3.3 我國發展風力發電之潛能與限制評估

為求每一座風機都能運用到最佳的風力，風機之間必須有合理的間距，通常越大裝置容量的風機，風機葉片越長、風機直徑也越長，機座之間所需間距也越長，所占土地面積也越大。換言之，同樣的土地或海域面積，若安裝大單座風機容量的風機（如 15~20 MW 風機），風機數目將不及小單座風機容量的風機（如 5~8 MW 風機），所以，該風場總發電量等於單座風機容量乘以風機數目。因此，風力發電的潛能與限制多以「風場面積」、「單座風機容量」、「風機數目」等因素進行綜合考量後，再予以估算其最佳化裝置容量。

1. 陸域風電

臺灣西部地區雖有良好風場，但因西部多為人口稠密之城鎮，因此，目前僅在西部沿海人口稀少的海邊適合設置，目前透過各縣市航照圖並考量風場開發的基礎條件（平均風速要 4 m/s 以上），可以得到可利用的土地面積約為 1,941 km²，

⁸ 經濟部工業局(2018) 離岸風力發電產業政策。

⁹ 交通部(2017) 臺中港離岸風電產業專區。

因陸域風機較適用於小單機風機容量之風機，故若使用每座風機裝置容量為 2 MW 進行估算，並以每平方公里 2 座風機的裝置容量密度(4 MW/km²)作估算，陸域風電的潛能預估為 7.7 GW；若使用每座風機裝置容量為 3.6 MW 進行估算，並以每平方公里 2 座風機的裝置容量密度(7.2 MW/km²)作估算，則陸域風電的潛能預估為 14 GW；若在合理的範圍調整風機間距—增加單位面積裝置容量密度，潛能可望再提高¹⁰。

但是在實務上，我國因地狹人稠，即使已選擇人口稀少的沿海地區，仍難以避免風機位置鄰近社區，風機運轉的低頻噪音對民眾生活與健康產生衝擊；此外，早期風機裝置規劃設計階段民眾參與程度較低，導致過去風機抗爭事件頻傳，如：苗栗縣苑裡鎮沿海地區、彰濱工業區等地，這也造成陸域風電推動不易，發展受到阻礙¹¹。陸域風電裝置容量若要從目前的 726 MW，達到 2025 年目標(1.2 GW)，甚至達到潛能預估的 7.7 GW，政府勢必要再優化社會溝通配套措施，才有機會達到所設定之目標。

因陸域風電推動不易，故本建議書預估未來陸域發電裝置容量約 1.2~3.8 GW，因各地風力條件不一，使得全臺各地之陸域風電容量因數不一，過去五年範圍在 26~30%之間¹²，因此，使用平均值(28%)作為容量因數來進行估算，預計陸域發電可達約 29~93 億度的發電量。

2. 離岸風電

我國西部海域離岸風場優良，離岸風電具有相當大的潛力，首先將以西部海域 12 浬領海外界線內，且水深為 5-100 m 以內為初步評估區域¹³，再選取符合風力條件之區域（海平面高 10 m 平均風速值為 8 m/s 以上），最後再扣除許多考量因素之海域空間，例如：航運安全、海底纜線、油氣管線、專用漁業權、火炮射擊區、地形陡峭區域等等，最後估算得到臺灣海峽之風能分布與可開發潛在

¹⁰ 溫珮伶等(2014) 臺灣陸域風力發電之成本效益分析。

¹¹ 行政院原子能委員會(2013) 台灣發展風力發電之技術經濟分析與 3E 效益評估。

¹² 台灣電力公司(2021) 本公司近 5 年風力發電營運情形。

¹³ 呂學德等(2015) 臺灣離岸風力潛能與優選離岸區塊場址研究。

區域，共有 36 處離岸風電潛力場址範圍，總面積約為 3,000 km²。

目前臺灣在西部外海所布建的離岸風機皆為固定型，水深在 50 公尺以內，裝置容量是以 8 MW 的風機為主，因此，若採用裝置容量 8 MW 的風機，並以 15.5 MW/km² 的裝置容量密度進行估算，總開發潛能預估可達 47 GW；而若採用裝置容量 10 MW 的風機，並以 24.7 MW/km² 的裝置容量密度進行估算，總開發潛能預估可達 74 GW；惟若採用未來科技之大型風機—裝置容量 20 MW 的風機，因風機直徑增加，單位面積風機數量減少，僅能以 17.8 MW/km² 的裝置容量密度進行估算，總開發潛能預估僅可達 53.4 GW。雖然使用大型風機並未能增加總裝置容量，但是，卻能減少風機的使用數量，進而降低裝置成本的優點(圖 2.3.2)。

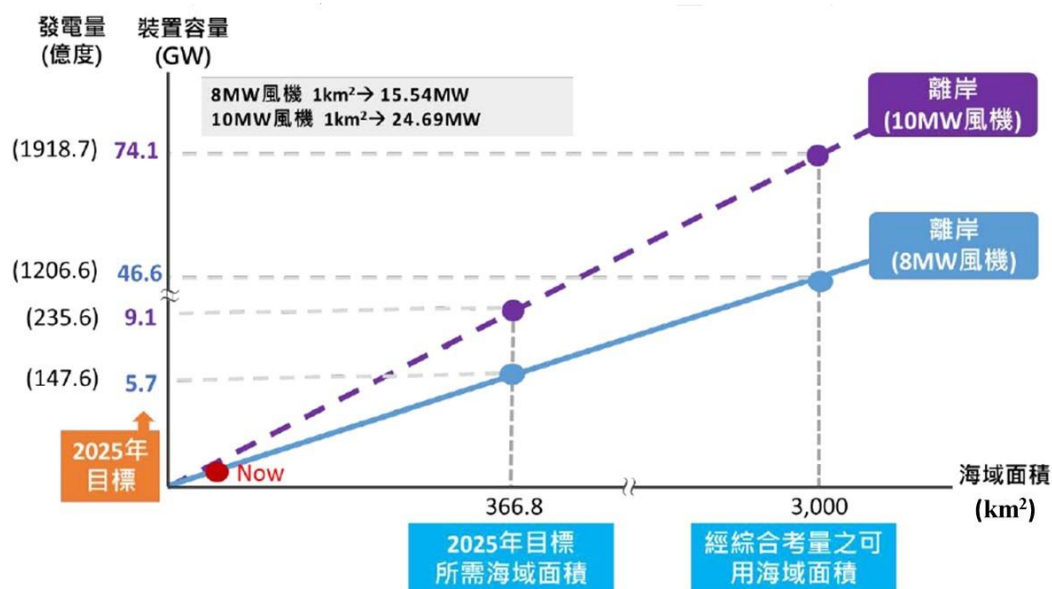


圖 2.3.2 離岸風電預估裝置容量

雖然離岸風電潛能評估可達裝置容量極大，但如前述，離岸風電發展潛能與布建速度受限於相關基礎設施之能量，離岸風場開發建置工程規劃包含泊靠港和陸上工作站，泊靠港主要提供工作船機進行海上施工作業期間所需裝載運輸及靠泊使用之施工碼頭；陸上工作站則作為水下基礎、塔架及風機各部元件製造、加工、組裝、儲放等作業之場地。目前我國以臺中港作為各風場開發商離岸風電機

組之生產、儲存、組裝及運輸之基地，占地約 60.5 公頃（#2、#5A、#5B 等碼頭），經由臺中港的統計，要每年建置 0.5 GW 的離岸風場，需要約 30 公頃的港口土地來進行零件存放與組裝¹⁴，根據目前政府公佈 2026 年至 2035 年的「離岸風電區塊開發選商規則草案」，預定於 2026 年起釋放出每年 1.5 GW 的離岸風電裝置容量與併網容量¹⁵，因此，臺中港須要擴大規劃至 90 公頃的港口興建。若未來離岸風機由單支 8 MW 提高至 14 MW 以上，港口的設計與載重更須要進行擴大規模興建，以容納更大型的風機零組件與大型的施工船舶的進駐。

因此，初步估計我國離岸風電之裝置容量目標，於 2026 至 2050 年的 25 年期間，可以新增 37.5 GW 的裝置容量，再加上 2025 年達到的 5.7 GW，預估 2050 年的離岸風電容量可達 43.2 GW。因離岸風電容量因數將較陸域風電大，但各海域容量因數變動範圍大，初步以較保守的數值(40%)進行估算，評估可每年預估發電量為 1,513.73 億度。

3. 未來風電科技

離岸風機技術正快速的發展中，其中發展迅速的風電技術為單機大裝置容量之風機，如 14 MW 以上風機；未來在固定型離岸風電的場域逐漸飽和的情況下，離岸風機的布建將逐漸往深水區（水深 50 公尺以上）移動(Box 2.3.1)。浮動式離岸風電將成為下一個階段風電技術開發的重點，浮動式的離岸風機是採用浮動式平台取代現有的固定式基樁，目前適用於離岸風機的平台技術有張力腿式、浮筒式與半潛式¹⁶，這些技術具有抗風、抗浪與抗流的能力。其中，半潛式離岸風機是目前最適合臺灣發展的技術，其優勢在於浮動平台與風機皆可在岸邊進行組裝，僅須要由船隻拖往外海置放即可，可減少因海象因素影響施工時間。而臺灣的外海深水區的離岸風電潛能預估可達 90 GW¹⁷。目前已規劃離岸風電浮動式風場示範計畫，目標在 2026 年完成總裝置容量 100 MW 浮動式離岸風機建置與併網，

¹⁴ 交通部運輸研究所(2021) 離岸風電海下工程技術研發計畫。

¹⁵ 經濟部能源局(2021) 離岸風電區塊開發選商機制規劃。

¹⁶ IRENA (2020) Fostering a blue economy: Offshore renewable energy。

¹⁷ 工業技術研究院綠能所(2011) 臺灣風能評估手冊。

預計在 2030 年可進行浮動式離岸風場的布建與商轉¹⁸，若以每年 0.5 GW 的裝置容量為目標，到 2050 年將可達到 10 GW 的裝置容量，每年預估發電量為 350.4 億度（容量因子以 40% 來計算）。

Box 2.3.1 Hywind Tampen 浮動式離岸風場

挪威能源公司(Equinor)將在挪威北海建置一個裝置容量 88 MW 的浮動式離岸風場，目的在於提供海上油田作業所需要的電力，將由 11 台 8 MW 的風力機所組成，水深範圍在 260-300 公尺，這是目前全球最大的浮動式離岸風電場，預計 2022 年可以完工。

隨著風力發電成本逐年下降且風場開發規模逐年擴大，由於風場的可調度性較差，整體電力供需會常出現不平衡的狀態，未來可透過整合天氣/氣候預報系統與風能發電裝置系統，提供較精準的風能發電量預測資訊，使電廠能及時排程調度電力與規劃長期發電策略¹⁹。若在電力調控管理無法即時達到平衡，將出現棄風的情況，因此，近期“Power to X”將電力轉換為其他能源儲存或燃料使用的概念越來越受到重視²⁰，目前最受重視則為離岸風電搭配電解製氫的模式，可紓緩部份季節或時間供電過剩的問題（可參閱 2.5 氫能章節）。此外，隨風場離岸距離增加，電網設置成本也將提高，可將部分電網投資費用轉用於建置氫能轉換及運輸的相關設備。丹麥開發商 Orsted 在 2021 年已完成 H2RES 示範計畫，為全球第一項正式運轉的離岸風電製氫計畫²¹。

預估至 2025 年，我國離岸風機安裝組數將會快速增加至 600 多座離岸風機，預計在 2035 年時，我國海域將有約 1,000 座離岸風力機組²²，整體離岸風機的維運時間長達 20 年，除定期基礎保養外，每當遭遇強烈颱風與地震後，勢必需要即時檢修。因此，建立在地化維運業者與零組件供應鏈是必要的，可大幅降低運

¹⁸ 經濟部能源局(2021) 離岸風電浮動式風場示範規劃說明。

¹⁹ 台灣電力公司(2018) 台電再生能源發電預測研究現況。

²⁰ Manuel Götz et al, (2016) Renewable Power to Gas: a technological and economic review. Renewable Energy 85, 1371-1390.

²¹ 4C OFFSHORE (2021) Uniper and Ørsted forge offshore wind and hydrogen alliance

²² 國家海洋研究院(2020)，離岸風場運維現況與趨勢。

維的成本。在離岸風場維運技術的發展趨勢將從傳統單點控制走向整體面管理，運用大數據分析與先進的監控系統及感測器，可提早診斷設備與零件的健康狀況以進行維護或更換，並且可透過預測整體風場現況評估出最佳的保養排程與檢修策略²³。另外，無人化設備將作為風力機組及水下結構維修的發展重點，包含：無人機巡檢、自動攀爬機器人、水下無人載具等²⁴，並透過創新科技設備加速診斷時間以降低人員實際維修活動的危險性。

2.3.4 政策建議

為了維持我國能源自主性、降低環境污染與降低溫室氣體排放，臺灣須要發展無碳排又「在地的」再生能源，其中，風力發電因臺灣擁有優良風場，成為減碳的重要選項。依據前述針對我國推動風力發電之問題分析以及潛能與限制評估，可以知道風力發電是目前所有無碳電力選項中，技術最成熟之再生能源，只要投入建置裝置容量及支援之基礎設施，短期便可提高再生能電力供給，但仍需社會支持、以及風電技術、產業、港埠空間等整體政策規劃，方可能解決目前實務上之問題，加速布建，以達長期減碳目標。本建議書有以下建議：

1. 全力提供離岸風電發展之各項支援措施，以提高離岸風電裝置容量與發電量

因我國離岸風電發展潛力高，未來風力發電將以發展離岸風電為主，目前政府雖已採取許多積極作為促進風力發電之發展，但因前述分析之問題，使得發展進度不如預期，因此，若要增加離岸風電之裝置容量，必須提供全面性的支援與配套措施，方可能加速設置與布建，本建議書提出以下推動建議：

- (1) 因離岸風電一旦設置，其水下基樁與電纜配置均須配合建設，開發商亦將投入大額經費，受未來風電技術發展之影響（如：大型化風機、深水區風機基座架設技術等），原有劃設風場區域之限制條件應可進行檢視，由淺水區移動至潛能更大的深水區，並尋求發電最佳化之風場風機配置（單機裝置容量、

²³ 經濟部(2017)，離岸風場維運作業效能提升技術開發計畫。

²⁴ 資策會產業情報研究所(2020)，水下無人載具產業觀測－以離岸風電應用為例。

風機數量、海域面積等等)，並針對調整之風場與開發條件，施行配套措施，例如：深水區風場、漁場漁民溝通等。

- (2) 積極進行我國西部港口碼頭之土地利用需求整體規劃與設計，包括港口基地腹地之開發（目前臺中港腹地，甚至其他港口之開發）、饋線之建設（輸配電電網、變電站變電所等鄰避設施）；藉此提高裝置能量至每年裝置 1.5 GW 或更高，以加速布建。
- (3) 持續關注並引進國際上最新風電技術，並投入研發適合我國國情之相關技術，以從建置到長期維運都達技術自主的目標。例如：浮動式風力發電技術、海事工程技術、臺灣海峽風力發電系統管理（含精準風力預測與發電量預測資訊）、降噪音葉片設計等等。
- (4) 適時調整目前我國發展離岸風電之在地化政策，除了扶植我國本土風電產業鏈之發展、鼓勵國內廠商投入之外，更應將裝置進度納入考量，一方面使本土採購政策更具彈性（如維修項目），另一方面發展多元風電產業與在地化海事自主工程技術，並提升我國供應商國際競爭力，將船舶、人才與技術深耕留在臺灣，未來再擴展至亞太及國際市場。

2. 強化社會溝通與相關公民參與機制，以取得社會支持

因陸域風電易影響鄰近社區民眾，離岸風電風場設置易影響漁業活動，因此，目前風力發電常常引發社會反對聲浪，建議政府應妥善進行社會溝通，才能在各種挑戰下穩健發展，本建議書提出以下推動建議：

- (1) 加強公民參與機制與社會溝通，尤其在陸域風電風場規劃設計初期，以及離岸風電風場規劃設置時主動與鄰近社區民眾及漁民團體溝通。
- (2) 提供各式誘導配套措施提高陸域風電鄰近社區居民支持度以及受影響漁民支持度，例如：補助加裝隔音窗、漁獲影響補貼等等。
- (3) 進行離岸風電風場海域區域的生態追蹤調查，以了解可能的生態衝擊、漁場衝擊。