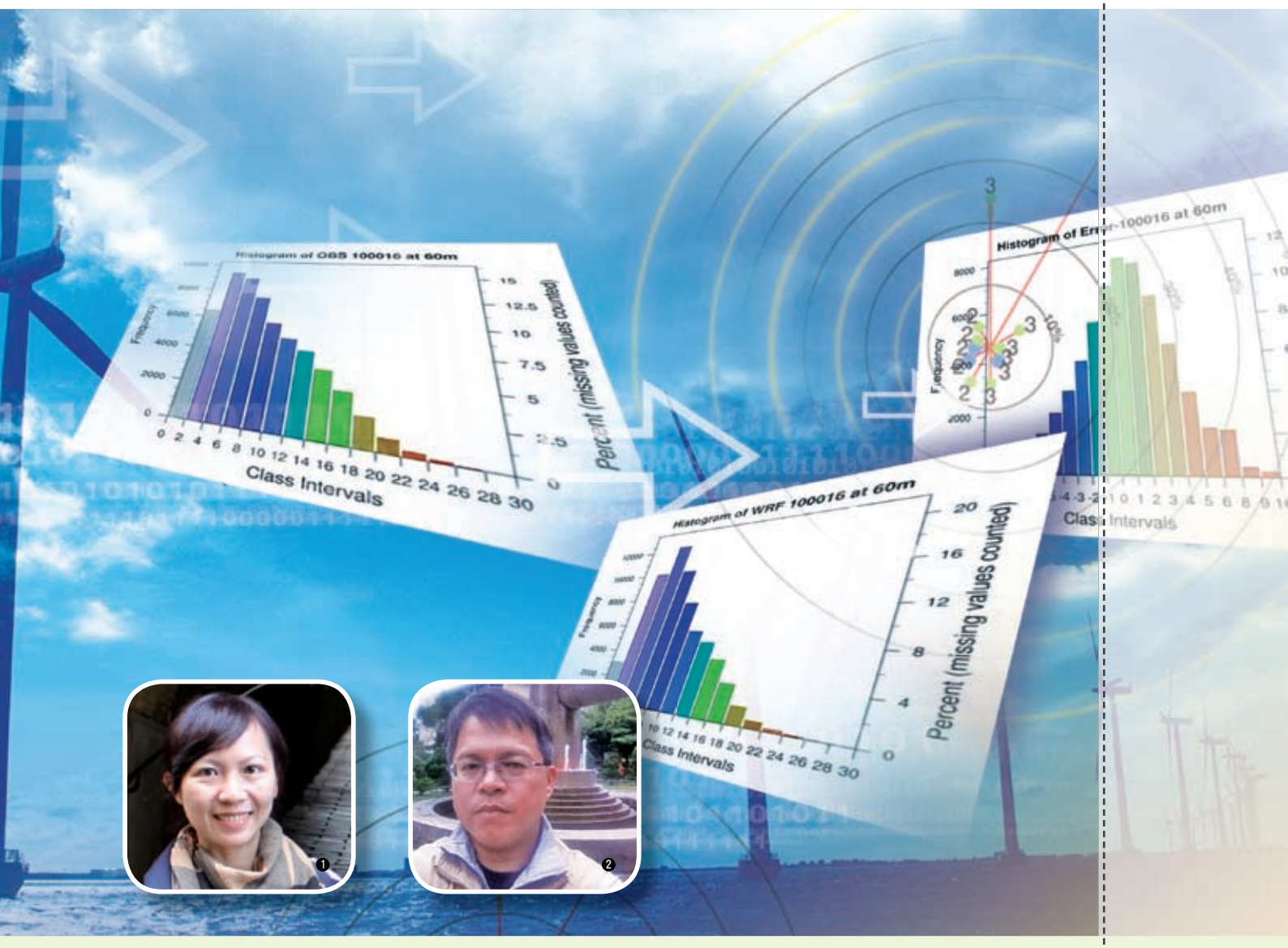
台灣地區風能評估與離岸風電開發潛能分析

◎ 關鍵字： 風能評估(Wind resource assessment)、離岸風場(Offshore wind farm)、潛在場址(Potential site)

工業技術研究院／綠能所／資源應用技術組風能開發研究室／研究員／陳美蘭 ❶
工業技術研究院／綠能所／資源應用技術組風能開發研究室／副研究員／胡哲魁 ❷

摘 要 ABSTRACT

找尋潛在場址是開發離岸風力發電場的首要任務，利用高解析度風力潛能模擬技術以及風能評估軟體，並蒐集風能觀測資料庫進行評估驗證，可提供潛在場址之風能評估技術服務，以規劃風場開發前置作業以及掌握風力電場投資風險。建構豐富的風能圖層資料庫，包含整合國內環境生態敏感區、地形地貌、發展管制區及變電所等影響開發資訊，利用地理資訊系統可快速篩選潛在場址，並預估離岸風力電場開發之可開發量，以作為未來政府擬定推動政策及業者投資之重要參考依據。



壹、前言

國外風電開發業者或風力機製造商陸續朝深水區域進行風電場開發或風力機測試，一方面可解決土地問題、減少影響人類活動範圍，另一方面也可以擷取到更好的風能得到更大的發電效益，並朝大型化風力機發展。除了積極發展大型化風力機組外，許多國家的政府研究機構成立風力資源研究部門，針對地區性的潛在風能進行國家型計畫研究與調查，為了全面性地瞭解風力潛能優劣分佈情況，以快速找尋適合風力發電開發的場址，作為風力發電後續開發時的參考依據。然而，風力發電最大的問題之一就是風的不穩定性，一個好的場址必須具備的首要開發條件就是風能優劣，故場址細部規劃評估工作有其必要性，唯有透過專業的審慎評估與規劃，對風電開發業者的投資較有保障，對融資銀行也是一種擔保證明，對國家整體推動風電之計畫更是不可或缺的研究。

台灣目前陸域優良風場開發已趨近飽和，朝離岸風場開發推動已是目前政府的主要能源政策。離岸風力發電場址之選擇條件除首重於風能優劣外，尚須考量當地的自然環境是否許

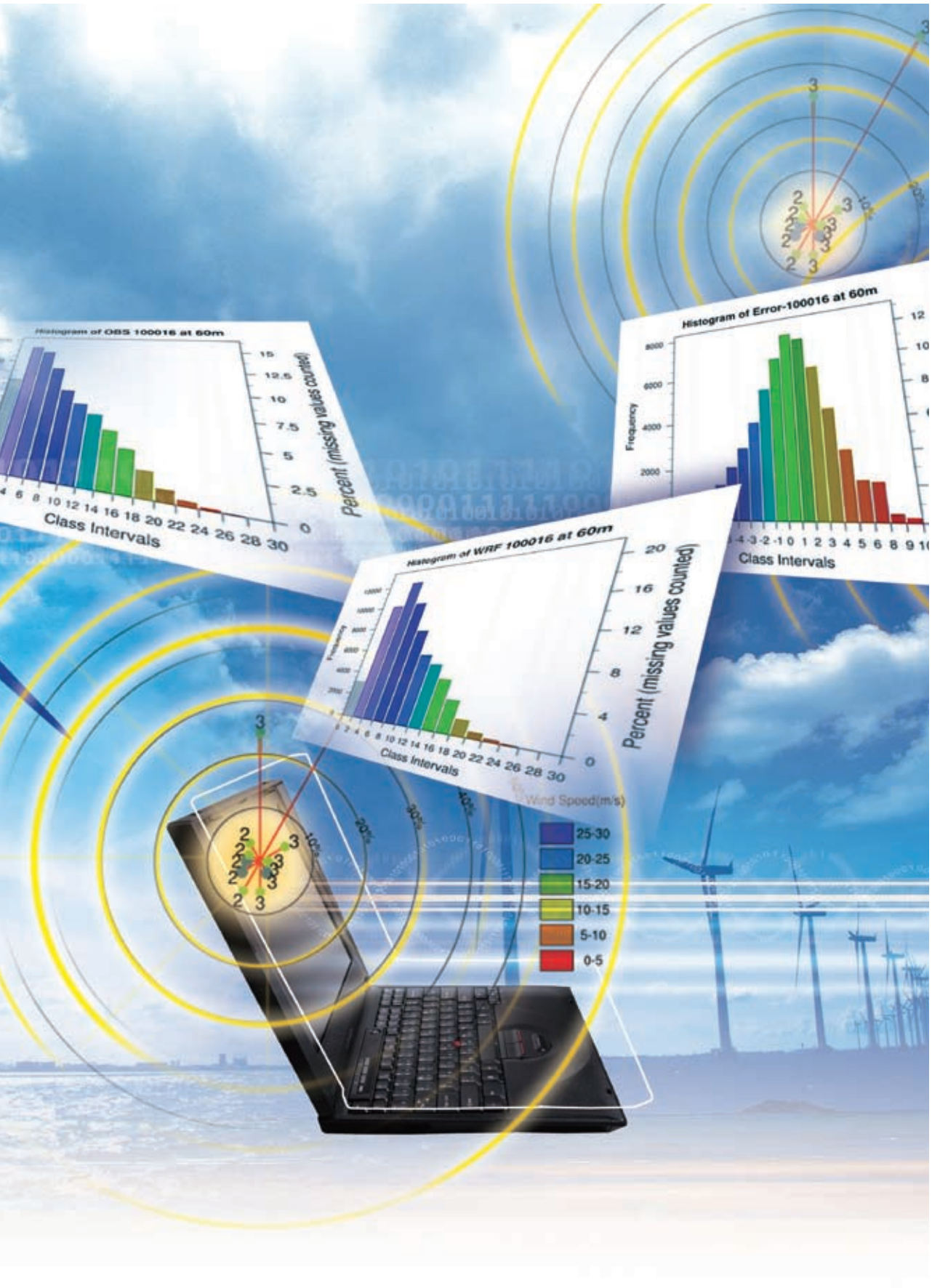
可，例如場址現地的波浪、海流等海象條件是影響風力機基礎的主要外力，潮汐、海溫則是風力機基礎設計需要考量的基本條件。場址海床之水深地形變化則會影響到風力機基礎的穩固性，而海域地質的背景條件則為風力機基礎選擇、設計、規劃的重要依據。為了因應未來深海地區風力開發，工研院已於FY99開始陸陸續續進行深水海域潛在場址評估，以下分別介紹風能評估應用以及我國離岸風力電場開發潛能之理論值。

貳、風能評估應用

台灣海峽因地理環境特殊，具有豐富的風力資源可作為再生能源發展。然而海域風能雖佳，但是離岸風力電場開發之風險高於陸域，在尚未瞭解風場實際特性之前，無法貿然投入開發，仍需進行細部的風能評估，才能有效降低風險。目前大部分的風能評估方式仍是實地觀測為主、數值模擬為輔，應用場址大致上分為三種類型：陸域、海域以及複雜地形，其中後者評估誤差是相對高許多，在應用上也是有許多不確定因素，以下就風能評估應用方式進行介紹。

一、台灣地區風力潛能分析

大範圍的長期氣象分析需仰賴具有全球氣象網格資料，此資料已將船舶、探空、地面觀測、遙測衛星與雷達等資料同化為分析場，資料遍佈全球而且時間長，唯一的缺點就是資料空間解析度不夠高，無法解析到風力電場的規模大小。離岸風能評估主要方法是利用氣象模式模擬、海域觀測、衛星影像或衛星反演風場進行多重比對分析，以得到大範圍高解析度之風能特性資訊。衛星資料總類繁多，應用於風能分析主要是以氣象海洋為主的衛星觀測，例如歐洲太空總署SAR（Synthetic Aperture Radar）、美國太空總署海洋衛星等。其中又以美國太空總署的（Jet Propulsion Laboratory）海洋觀測資料種類多且豐富，具有遍佈全球高解析度的海平面風場資料，包含SSM/I、TMI、AMSR、QuikSCAT、MSU等遙測衛星的氣象資料，以及提供全球即時之熱帶氣旋情報供瀏覽，除預測路徑外，亦有海水溫度、風場分佈和降雨強度等分析。因此衛星海平面風場資料對於缺乏觀測資料的海域有很大的幫助，歐洲北海、日本、巴西、中國、美國等海域地區，各國政府或研究單位在開放離岸電場開發前，皆已投入離岸風能評估研究，利用數值模擬進行長期評估以找尋優良潛在場址。工研院在2007年至2010年利用The Weather Research and Forecasting Model（以下簡稱WRF）數值模式進行時序列模擬研究，透過分析比對並推估不同高度的風


Histogram of OBS 100016 at 60m
Percent (missing values counted)
Class Intervals
Histogram of Error-100016 at 60m
Frequency
Class Intervals
Histogram of WRF 100016 at 60m
Frequency
Percent (missing values counted)
Class Intervals
Wind Speed(m/s)
25-30
20-25
15-20
10-15
5-10
0-5

場數據，完成建置台灣地區2 km × 2 km解析度之風場模擬分佈資料(如圖1所示)，可作為政府擬定風電推動政策以及篩選潛在場址之重要依據。

生一個風功率頻譜密度。風速計的特性、取樣速率和平均的週期對於記錄量測值都會影響擾流強度計算，從測量資料預估擾流強度時應考慮這些影響。若無實際觀測資料，亦可由鄰近

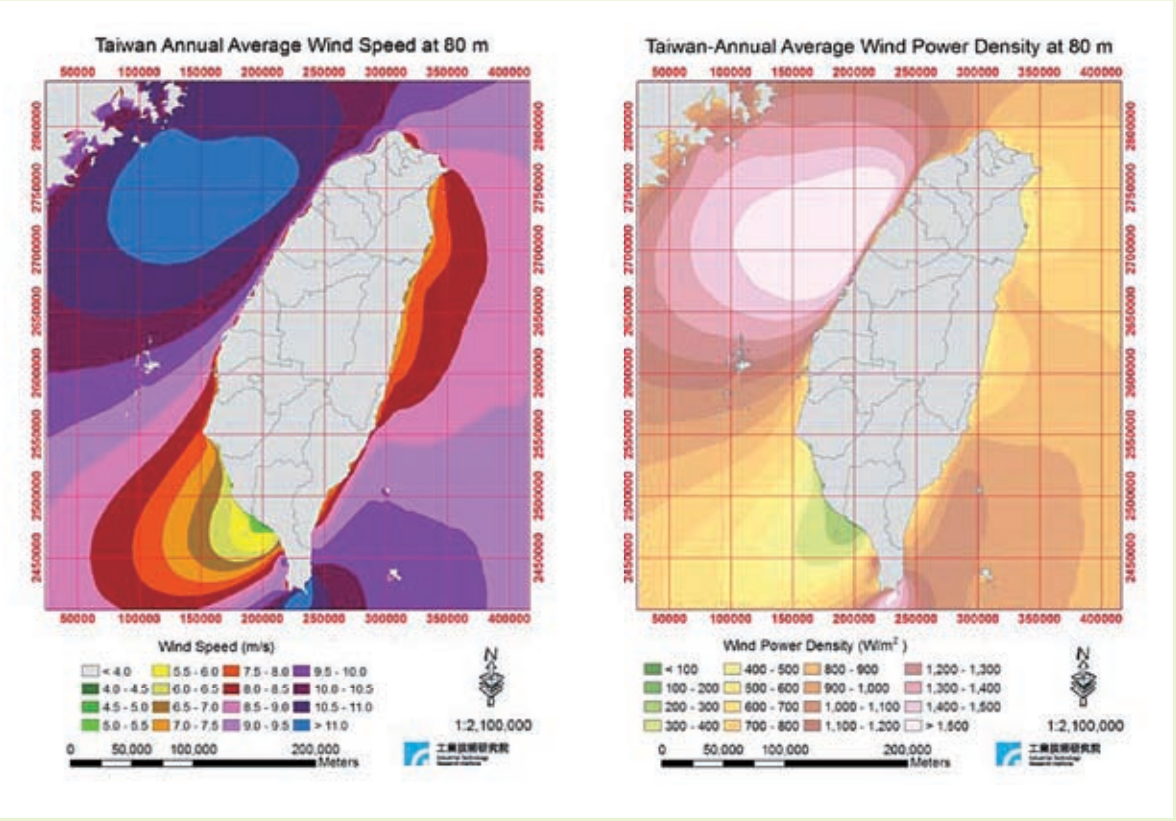


圖1　台灣離岸地區年平均風速（m/s）與風能密度（W/m²）之風力潛能分布圖

二、特定場址風能特性分析

在評估特定場址風能特性時至少須包含輪轂高度年平均風速50年再現週期之極端風速、風速機率分布函數、擾流強度、垂直風切以及空氣密度之基本參數。風況條件可以由特定場址的量測結果決定，其中空氣密度若無法由量測求得，則可由ISO2533:1975規範定義之，在此定義為1.225 kg/m^3。此外，量測期間須涵蓋所有季節變化以及顯著影響風況的天氣系統，如果是在海上則量測高度須足以消除海平面波浪之干擾。擾流標準差可藉由適當的統計方法從量測風速資料來求得，且量測頻率須足以產

測站透過風能相關性分析利用長期觀測資料推估之。

雖然海域風場變化相對穩定，但是缺乏觀測資料，不管是風能觀測站固定式觀測或者SODAR、RASS、Radar、LIDAR等移動式遙測，皆需針對定點場址投入時間與成本才得以完成，所以當特定場址鄰近地區無任何觀測資料可作為分析或參考依據時，透過中尺度數值模擬結合局部評估風能之方法，可提高資料的空間與時間解析度，以彌補長時間觀測資料之不足，進而有效性及快速性地評估場址風能特性。以嘉義外傘頂洲為例，進行2007-2013年WRF時序

列數值模擬與定點量化分析，並探討其風能特性，以期可應用至其它離岸場址之風能特性分析。分析結果採用模式Domain 3 2 km × 2 km解析度輸出之U向量與V向量，以網格內差方式計算各觀測站所在之網格點(U,V)風場大小，由於模式設計是採隨地勢座標，每一層在不同時間點輸出的高度場皆不盡相同，為了與風能觀測站60 m進行比對，其模式輸出的風場需額外藉由內差方式求得特定高度之風場。由圖2之 60 m高度與10 m高度風資料觀測、模擬、誤差之風花圖顯示，觀測值與模擬值其主風向均為22.5度，佔比均超過30%，第二盛行風向為0度，模擬值佔比稍微偏低，各16方位風向其風速平均誤差約為2-3 m/s，其平均風速觀測值6.7m/s～7.81m/s、平均風速模擬值7.00 m/s～8.07m/s、平均風向觀測值18.56度～18.82度、平均風向模擬值20.60度～20.61度之間。顯示模擬結果與實測值相當吻合。

再由風速機率分布圖顯示(詳圖3)，10 m高觀測值機率分布0~4 m/s約佔24.4 %、4~26 m/s約佔75.4 %，模擬值機率分布0~4 m/s約佔16.1 %、4~26 m/s約佔83.9 %；60 m高觀測值機率分布0~4 m/s約佔19.8 %、4~26 m/s約佔80.2 %，模擬值機率分布0~4 m/s約佔11.9 %、4~26 m/s約佔87.9 %，顯示模式對於低風速的解析能力偏低，高風速差異不顯著。此外，模擬與觀測誤差值其發生機率呈常態分布，發生大差異之機率其實很低，因此由風花圖與及機率分布圖分析說明，雖然模擬結果之風速風向均方差具有一定程度的差異，但模擬值可掌握長期風能特性，若採用數值模擬風速風向逐時資料進行風能評估，在上述統計指標信賴下，可有效解決空間時間資料不足之問題。

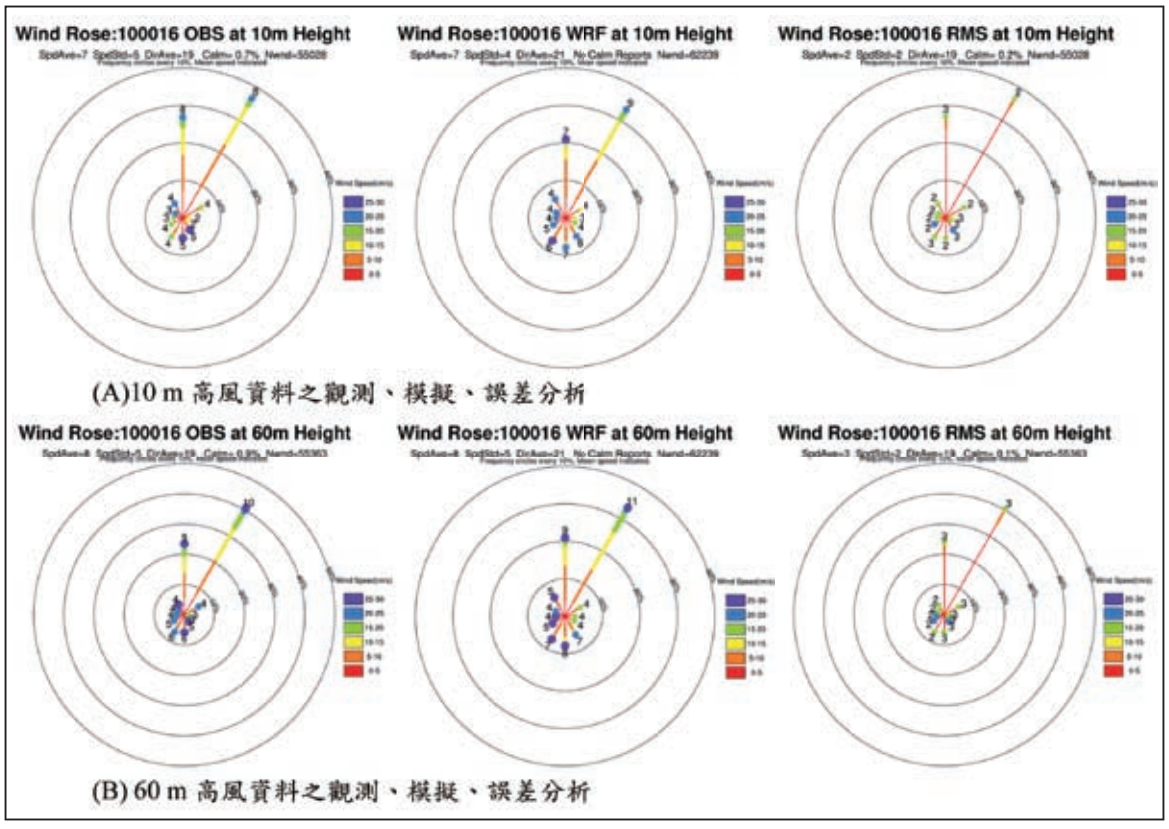


圖2　嘉義外傘頂洲風資料觀測、模擬、誤差之風花圖分析成果

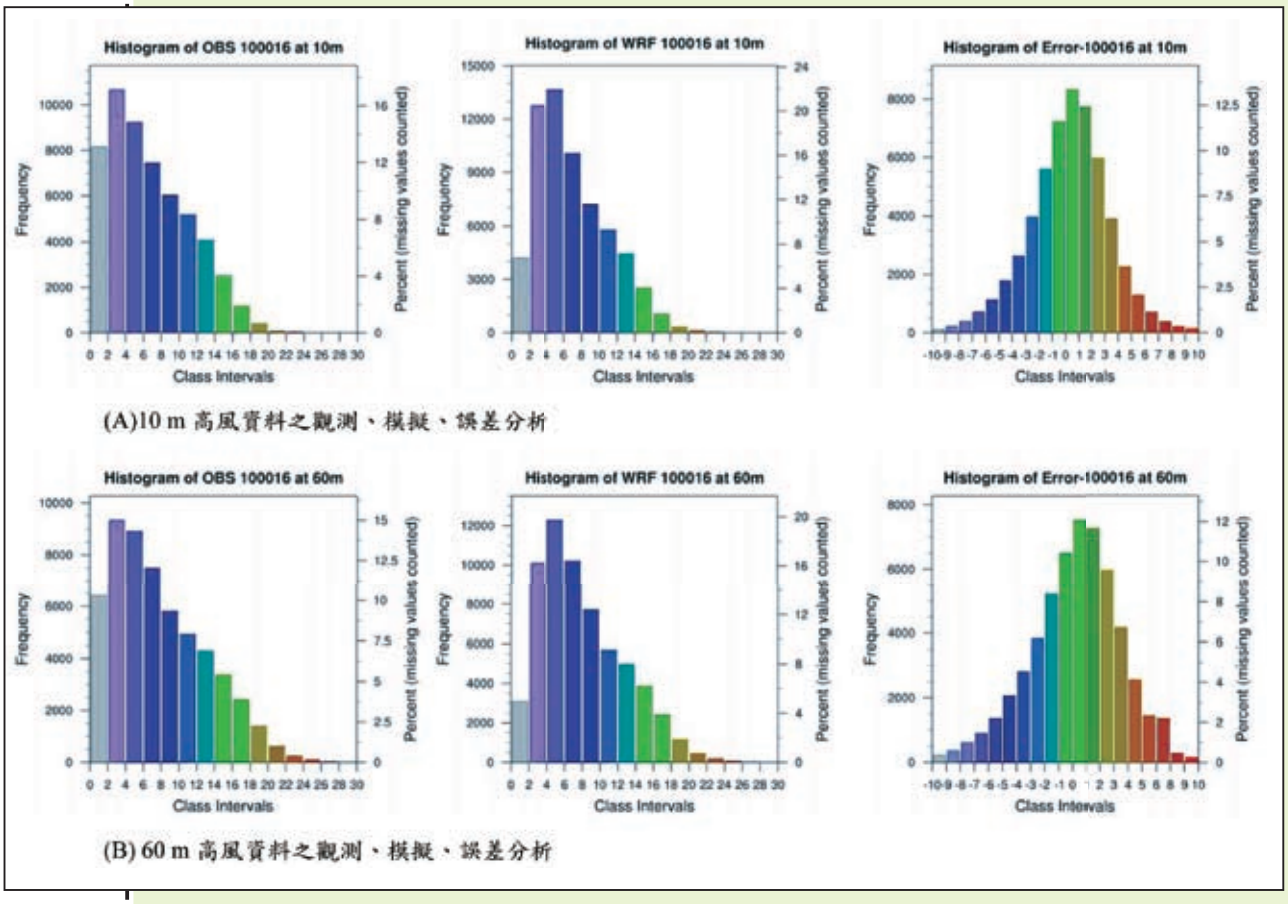


圖3　嘉義外傘頂洲之風速機率分布圖

三、特定場址發電量分析

此為風能評估的最後一個步驟，主要目的是為了量化小尺度區域的風能受地形地貌以及風力機彼此間尾流的影響，評估場址的潛在風能，所以透過Micro-Siting技術可以提供風力機佈置位址最佳化的功能，在同樣的土地面積與相同數量的風力機機組條件下，以達風力發電場最大發電量。

由於風力資源會受到地貌影響，主要包括地形（Orography）、粗糙度（Roughness）與障礙物（Obstacle）的遮蔽效應（Shelter effect）等三項因素，考量測站周圍地形、障礙物與粗糙度等地理因素之影響，可更精確地評估其風力資源，包括不同高度及背景粗糙度下之平均風速及風能密度，以及各方位之韋伯分布(Weibull Distribution) 與尺度參數。另外不同地區所需選用的風力機型也不盡相同，因為風力機是在不同的天候假定狀況下，依據不同的使用程度所設計或建造出來的，例如在高風速區或是地形非常複雜的地區，其所使用的風力機型必須有耐高風速與結構荷重的條件，所以風力機相對堅固而且價格相對昂貴，因此選擇適合風力機型是非常重要的。發電功率估算方式是利用風速機率函數與風力機功率曲線進行積分而得，除了上述參數設定會影響發電量評估結果外，風力電場本身的風力機機組也會相互影響，因此進行風力電場評估時需考量風機彼此相互衰減的尾流效應，若以單一風力機間相互影響，其下游風速變化量可表示如下：

$$\delta V_{01} = U_0\left(1-\sqrt{1-C_t}\right)\left(\frac{D_0}{D_0+2k_0X_{01}}\right)^2\frac{A_{overlap}}{A_1^{(R)}}$$

其中

U_0 表示實際風速（m/s）

C_t 表示推力係數

D_0 表示葉片直徑（m）

X_{01} 表示風機間距（m）

$A_{overlap}$ 表示下游風機受上游影響受風面積（m^2）

$A_1^{(R)}$ 表示下游風機受風面積（m^2）

k_0 表示尾流衰減常數

其中 k_0 值除了對於不同地區也需要加以考量改變此設定值，可針對不同風向進行設定外，因為不同的地形效應以及紊流穩定度皆會影響風力電場的整體尾流效應與評估結果。

參、離岸風電開發潛能分析

為因應未來海域地區調查資料日益豐富可進行優先場址篩選開發，以評估離岸風力開發潛能為主，先建置台灣西部海域之自然環境、人為活動與生態環境圖層資料，再評估深水區域潛在風能開發理論值。其中首要步驟為蒐集可行環境條件與開發需求條件；其次是評估區域範圍界定；第三則為潛在風能理論值推估。

一、可行環境條件與開發需求

在環境條件部分，包含自然環境、人為活動以及生態環境。其中自然環境部分，主要是地形、地質、氣象與海象之調查分析；人為活動則包括交通、國防、漁業與海底電纜等之現況分析；生態環境包含自然生態保護區、漁業資源及其它敏感區。在自然環境的部分，需考量長期風速與風向資料、水深、離岸距離、波浪、地震、潮汐與潮流、海床地形與地質等；其中又以風波流為主要考量因素，如圖 4為各項環境因子對於風電場址開發時之影響。

在人為活動方面，由於人類在近海區域活動頻繁，深海地區相對低很多，對於未來深水開發應用需依個案需求進行更詳盡的調查，方能得知是否為排除開發區域。大部分的歐洲國家都規定有對開發區域相關之利益團體舉辦公聽會的程序，來協調各團體潛在的利益衝突問題，這些可能的利益衝突基本上有航運交通、航空交通、國防和漁業…等。在交通部分，海運航線是離岸式風力計畫選址的限制條件之一，選址時必須避開已經劃定為海運航線、預定航線或進港泊錨區海域；另一個則是航空交通，為降低飛行物或船艦的撞擊風險，依據限高區域有其規範。在國防部分，軍事區在風力發電場址評估就應排除，軍事保護區或是雷達區也是離岸式風力發電場發展的重要問題。收集台灣西部港區及航道區綜合圖層，全台灣沿海漁港口區分佈非常密集，另外養殖區、漁礁區、保護礁區、定置漁業區、箱網養殖區、專用漁業權、漁業資源保育區等區域也都是在近海為主。

在生態環境方面，收集自然生態保護區、漁業資源及其它敏感區等圖層，自然生態保護區包括自然保留區、野生動物保護區、野生動物重要棲息環境、國有林自然保護區、重要野鳥棲地、濕地、沿海保護區、野鳥遷徙路徑與臺灣沿海鳥類分布，其中野鳥遷徙路徑範圍非

常廣。漁業資源包括人工魚礁禁漁區、保護礁區與漁業資源保育區，所在區域大部分為水深20m以內。中華白海豚活動範圍也是在近海處。

在開發需求部分，依據國外離岸式風力電場成本分析，海纜工程與基礎工程之成本相當，因此選擇一個最短路徑至陸上之變電所，明顯地將可降低成本，但仍需考慮一些環境因素，避開海底地形變遷劇烈之區域（含沖蝕、砂波移動）、河口區域、斷層帶、崩坍及含氣帶、魚礁區及底拖區、海岸保護區及防護區，除上述地區外，並確定不會與已存在之海纜及海底管線交叉。同時應選擇海纜總長短、水深淺、海底起伏小、底質易埋設海纜之路徑。

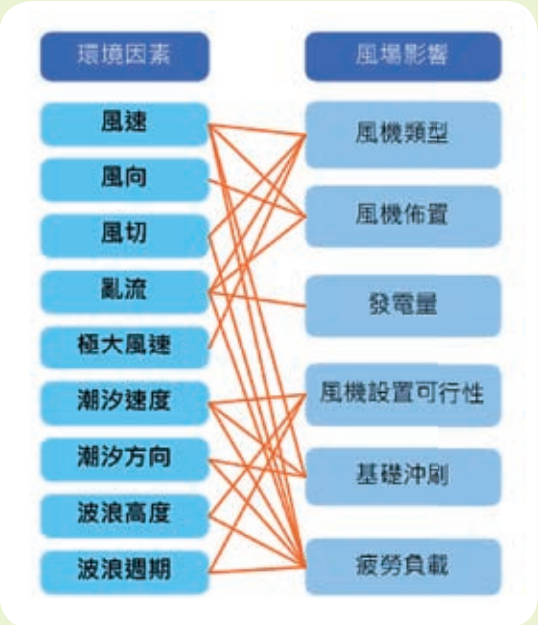


圖4 風波流環境因素與相對應之影響

二、區域範圍評估界定

利用ESRI之ArcGIS軟體建置整合上述離岸限制開發區域相關圖層資料（如圖5所示），利用圖層套疊方式篩選出可能潛在場址。以西部海域水深20 m至十二浬領海外界線內為主要評估區域，套疊海平面高程10 m平均風速模擬值8 m/sec以上之區域，並初步排除包含海底纜線、油氣管線、專用漁業權、火砲射擊區、地形陡峭區域等地區後，初步評估可開發潛在區域—總面積約為2400 km^2，如圖6所示。

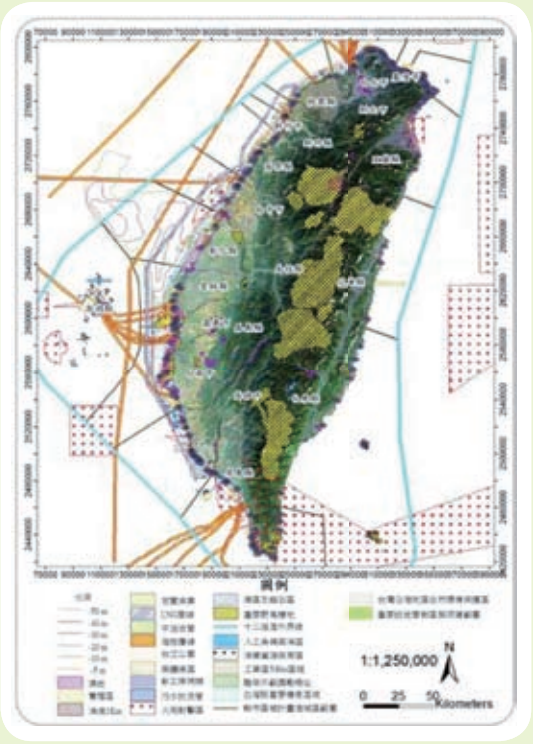


圖5 離岸限制開發區域示意圖

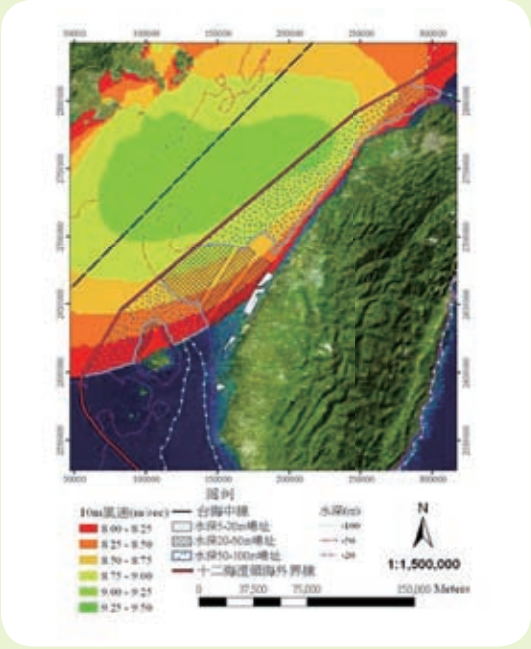


圖6 離岸可開發潛在區域分布圖

三、潛在風能理論值推估

針對上述區域範圍進行可裝置容量以及發電量估算，以下說明假設條件：

(一) 風力機佈置：採用平行盛行風向4倍距離以及垂直盛行風向10倍距離作為風力機彼此間隔。

(二) 風力潛能：假設此區域10 m高模擬平均風速為8.8 m/s，再依據不同機型塔高進行輪轂高度風速推估。

(三) 風力機型：採用 Siemens SWT_3.6 MW（葉片直徑120 m、塔高90m）以及AMSC SeaTitan 10MW（葉片直徑190 m、塔高125 m）空氣密度1.225 kg/m^{3}之發電性能曲線。

(四) 理想年發電量：係假設此潛在區域風速呈韋伯機率分布形狀k=2與空氣密度1.225 kg/m^{3}之發電性能曲線的乘積。

(五) 淨年發電量：假設運轉可用率80%、整體尾流效應10%以及線損效應約4%下之實際發電量。

其結果如表1所示，若採用3.6 MW進行開發潛能分析，則可設置4100部風力機組（14,760 MW），其容量因素約為0.43，預估風場總發電量約56,230 GWh；若採用10 MW進行開發潛能分析，則可設置1600部風力機組（16,000 MW），其容量因素約為0.45，預估風場總發電量約62,795 GWh。

表1 可開發潛在場址發電量預估

項目	3.6MW	10MW
Drive Train	Gearbox	Direct
Generator	非同步	HTS 同步
Rotor Dia. [m]	120	190
Hub Height [m]	90	125
估算平均風速[m/s]	11.0	11.3
單機理想年發電量[KWh]	19,843,470	56,781,430
預估總裝置數量 [部]	4100	1600
預估風場總發電量[GWh]	56,230	62,795
單機淨年發電量[KWh]	13,715,810	39,247,328
容量因素	0.43	0.45

肆、結論與建議

目前國內尚未有離岸風電開發案例，除了有待技術建立外，仍有許多政策面、環境面以及技術面等問題尚待解決。機上海域面積廣大，實際調查潛在場址需耗費許多資源與經費，更遑論整個西部海域進行開發資訊建置，故透過此選址排序與調查規劃，未來分階段建置優先開發條件或是進行潛在場址調查項目是必然之所需，除了可提供最佳可開發區域供政府做為推動離岸風電政策擬定依據外，亦可作為開發商優先開發區域之參考。當然最後風場開發場址的決定，還是得由開發商依據主要籌設要件，例如風能、併聯、環境衝擊以及施工條件等進行可行性綜合評估，並完成經濟效益以及風險分析之評估後才能決定開發與否。

本文主要針對西部海域進行風力潛能調查評估研究，旨在希望透過風力潛能大小來推估台灣西部海域潛在風力電場開發理論值，然而風能僅只是開發離岸風電的首要因子而非全部

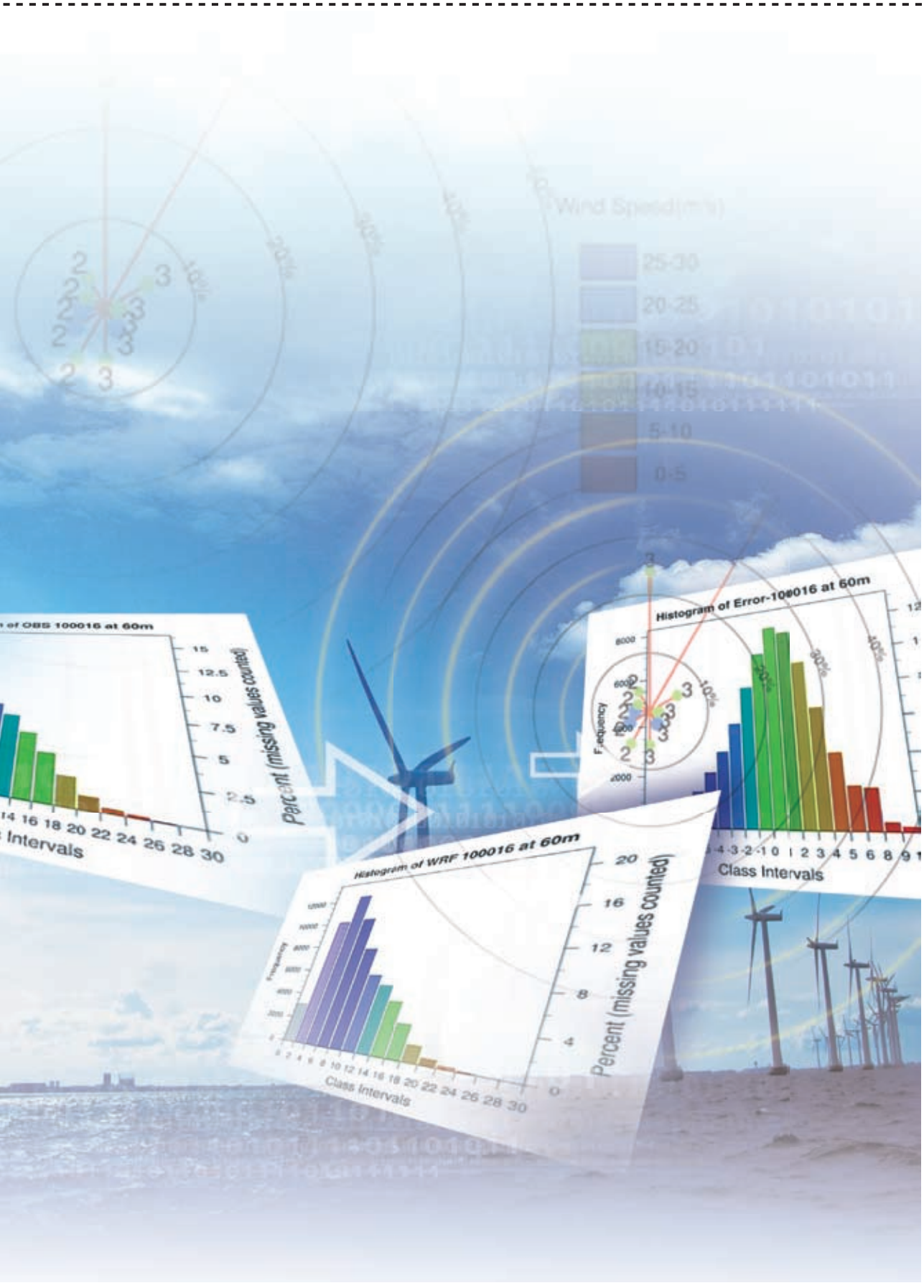
因子，光是自然環境調查與人為活動資料圖層分析，也無法完全決定是否具有不同水深之開發能力，開發可行性仍決定在基礎設施、施工技術、工程團隊以及開發成本等考量。本文重點為瞭解在特定條件下台灣西部海域區域之風力潛能及潛在場址，以期可提供開發業者進行第一步的場址篩選依據。

誌謝

本文感謝經濟部能源局(計畫編號103-D0105)支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. 陳美蘭、李宜宸，QuikSCAT衛星風場數值模擬離岸風能分析研究，台灣風能協會第二屆第二次會員大會暨台灣風能學術研討會，第319-324頁，中華民國98年12月。
2. 呂威賢等，陸海域風力發電技術發展及整體推動計畫期末報告，經濟部能源局，中華民國99年06月。
3. 財團法人工業技術研究院，「台灣風能評估手冊」，中華民國100年5月。
4. 財團法人工業技術研究院，“離岸場址選址條件綜合評估研析報告”，經濟部能源局，中華民國100年12月。
5. 財團法人工業技術研究院，離岸風場調查分析及技術研發計畫期末報告，經濟部能源局，中華民國102年12月。
6. ISO 2533:1975, Standard Atmosphere.
7. “The Wind Atlas Analysis and Application Program”, Web link http://www.wasp.dk/.
8. Rohatgi J. S., and V. Nelson, 1994: Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power. Alternative Energy Institute, 239 pp.
9. Skamarock W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, NCAR Tech. Note TN-475+STR, 2008; 113p.


Histogram of Error-100016 at 60m
Class Intervals
Histogram of WRF 100016 at 60m
Class Intervals
Percent (missing values counted)