

第 37 屆海洋工程研討會

論文集

臺中市 國立中興大學
2015 年 11 月 12 日、13 日

台灣海洋工程學會

108. 水下工程場址之輪廓重建與評估技術	633
	田文敏、盧禹晉
109. 海床裸露目標物工程現況與行為分析	639
	田文敏
110. 海床沙丘環境之聲學傳播分析與垂直海床探測及反算	645
	邱永盛、張元櫻、羅建育、陳琪芳、魏瑞昌、楊穎堅、陳信宏 王兆璋、謝明謀、盧鴻銘、黎光昀
111. 一種聲學感測元件之研製於水下技術應用	651
	郭承勳、卜一字、趙世峰、張順雄

H. 海洋能及離岸風能

112. 運用浮動式雷射光達測風系統探討台灣風場特性之分析研究	655
	張珮綺、洪靖博、林大惠
113. 浮動式離岸風力發電機動態響應與模組化設計之研究	661
	徐兆力、林宇銜
114. 台灣能源供應安全研析	667
	林家羽、張桂肇
115. 錨碇系統於離岸風機沉箱型重力式基礎沉放過程之研究	673
	江允智、李佩諭、陳琪芳
116. 氣球幕之水下低頻噪音減噪效益精進研究	679
	吳宇航、林天祥、吳誌豪、胡惟鈞、陳琪芳
117. 互制關係圖應用於離岸風機套管基礎受反覆軸向拉力下之穩定性分析	685
	郭玉樹、Martin Achmus、曾玉修、鍾智印、Khalid Abdel-Rahman
118. 離岸風場施工之水下噪音量測與分析	691
	胡惟鈞、陳琪芳、黃維信、馮宗緯、林稚堯
119. 離岸風電專用碼頭規劃研究	697
	林倣寬、廖學瑞、連永順
120. 離岸風機沉箱式基礎安裝之數值模擬	703
	張文忠、楊瑞源、洪萱淇、陳志芳
121. 離岸風場基礎設計標準與本土化地工參數研析	709
	吳佳騏、簡連貴、邱淑宜、馮宗緯
122. 離岸風場地質敏感分析與海纜風險評估之應用	715
	李元瑞、簡連貴、邱淑宜、馮宗緯
123. 臺灣西部離岸風場最適化之研究	721
	李禹擇、簡連貴、邱淑宜、吳敬平、黃偉柏
124. 應用不同 p-y 曲線模式分析離岸風機基樁於可液化海床砂土之行為	727
	倪勝火、范仲軒、馮宗緯
125. 槓桿式浮筒之波能轉換效能分析	733
	羅德章、楊輝雄、楊德良、羅玉玫

離岸風電專用碼頭規劃研究

林倬寬¹ 廖學瑞² 連永順³

¹ 台灣世曦工程顧問股份有限公司副理

² 台灣世曦工程顧問股份有限公司資深協理

³ 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所研究員

摘要

為推動國內替代能源開發，經濟部能源局規劃在 2030 年前建置 600 架海上風力發電機組。然海上風力發電機組之建造與安裝所面對之環境較一般工程更加嚴峻，除地形、地質、地震等基本條件外，海域中之風、波、流、潮汐等對工程人員及船機都是一大挑戰。而此施工船機皆須依靠必要之補給、靠泊或避難之港口，但國內目前並無相關港埠設施可資使用，亦無類似之船機與配套港埠設施之實際建造經驗，如何建置此施工船機與港埠專用碼頭等關鍵技術，須透過國外技術引進，才能順利完成工作。基此，本文乃蒐集國外既有相關案例，並分析國內可能動用之輔助船機與碼頭設施，針對建造與安裝所需之港埠物流作業技術重點作一初步探討與分析，俾利未來實際施工之參考。

關鍵詞：頂昇式平台船、支撐結構及基礎、吊架、專用碼頭

The Study of Specific Quays Planning for Offshore Wind Farm in Taiwan

Chu-Kuan Lin* Shynre-Ruey Liaw Yung Shun Lien

* Deputy Manager, Department of Harbor and Coastal Engineering, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

ABSTRACT

For coupling with the green energy exploration, the government of Taiwan plans to develop the offshore wind farm and establish 600 offshore wind turbines before 2030. Since the offshore marine work is the first project, it has become a serious challenge to construct and install marine structures and offshore wind turbines on open sea in Taiwan. A suitable port devices such as specific quays provide above work vessels to berth and to transit logistic supply including materials and persons will be necessary. The study tries to collect and analyze the data of vessel and specific ports facilities in Europe in order to find a development aspect for domestic marine industrial in the future.

Keywords: Jackup barge; Substructure and foundation; Crane; Specific quay

一、前言

為順應世界潮流及因應全球暖化減少溫室氣體排放量，近年來各國政府莫不積極尋找替代能源，減少對石化能源之需求。經濟部能源局乃於 2012 年 7 月 3 日公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，預計民國 2015 年將設置 6 架離岸示範風力機，

2020 年前完成離岸風力機裝置容量 300MW 以上，更於民國 2015 年七月二日公告能源局公告「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」鼓勵民間參與風電產業之投資，並預定至民國 2030 年前設置 600 架海上風力機，正式啟動國內離岸風電產業。

然海上風機建造所需動用之船隊龐大，由基礎建造至風力發電機組之裝設，必須動用之船機包括

各種吊架、打樁、佈纜、運輸、交通、警戒等。為使海上工作能順利完成，許多相關技術與設備，含物流補給、人員運輸及風力機裝載所需之碼頭設施等皆必先完成。並在考量海氣象之天氣窗期(weather window)之情況下，先在碼頭備妥後出港施工，此施工程序必先制訂嚴密之施工計畫與船舶調度計畫後，才能降低海上施工風險。基此，本文之乃從(1)既有相關規範(specificate)或指引(guideline)蒐集分析;(2)國內相關案例經驗分析;(3)國外資料及相關案例蒐集分析;(4)實地參訪紀實等方法研擬出適合於離岸風電專用碼頭規劃時應注意事項及其配置原則，供未來有興趣參與風電產業之業者參考。

其中有關國內與離岸風電有關之經驗，茲因國內離岸風電產業正值起步階段，雖然 104 年 8 月底前才完成離岸之海氣象觀測塔 2 座，然此階段所累積之經驗尚不足以應付未來離岸風力機組之海上施工，本文遂參考此二座離岸海氣象觀測塔之施工經驗，以施工碼頭台中港 #2 碼頭上之規劃配置略作分析。然後結合台中港未來整體規劃構想，在適當之地點上規劃出適合離岸風電施工之專用碼頭。

二、離岸風場施工船機規格

為探討離岸風場開發所需用到之船機與相關技術，必須先瞭解離岸風機之組成要件，如圖 1 所示，離岸風機主要構件包括：風機本體、風力機基座(水下支撐及基礎)、電力系統(含海底電纜)三大項，其中水下支撐及基礎部分又可概分為：單樁式(Monopile)、三腳管式(Tripod)、管架式(Jacket)及重力式(Gravity)四大類等，如圖 2 所示。所用到之施工船機均需配合工程主體的需求而有所不同，例如水下支撐結構之施工就必須使用打樁船機；而風機現場安裝時就必須使用吊裝船機，海底電纜鋪設時，又使用佈纜船等。每一種船機特性皆是不同，如何將其整合而納入離岸風場工程中，即成為整個開發案成功與否之重要關鍵，進而也影響港埠設施之平面配置與承載能力等需求。

2.1 風力機基座施工

離岸風力機基座由上到下分為轉接段(Transition piece)、支撐結構及基礎(Substructure and Foundation)等三部份，其中轉接段為連接風機塔架與支撐結構與基礎之過渡結構，而支撐結構基礎則

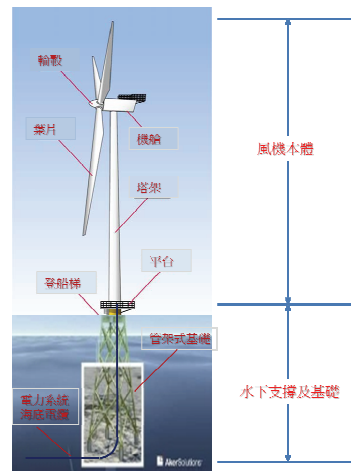
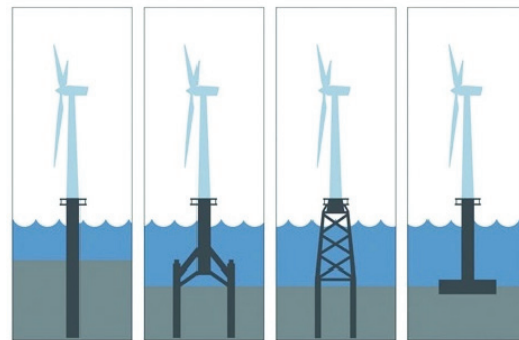


圖 1 離岸風機主要構件(Jacket type)示意

單樁式 (Mono pile) 三腳管式 (Tripod) 管架式 (Jacket) 重力式 (Gravity)



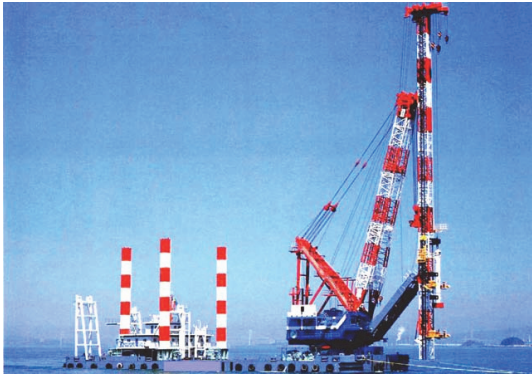
資料來源：
<http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/wind-energy-gets-serial> 本文整理

圖 2 離岸風力機主要基座(支撐結構及基礎)型式

為轉接段以下將風機組荷重傳遞至海床之支撐結構、基礎部分則為將支撐結構固定於海床上之地下構造物。然不論何種風力機基座，其結構物尺寸皆相當龐大，例如單樁基礎之管徑就約達 5 公尺~6 公尺之間，管長配合水深及地質條件動則 40 公尺以上，就施工性而言，必須動用大型船舶機具，同時掌握施工精度才能符合施工規範要求。至於轉接段之施工，基本上僅需考量運送船機之可負載重、吊裝設備及灌漿工作等較制式行為，仍須具足夠能量之施工船機，方可順利作業。

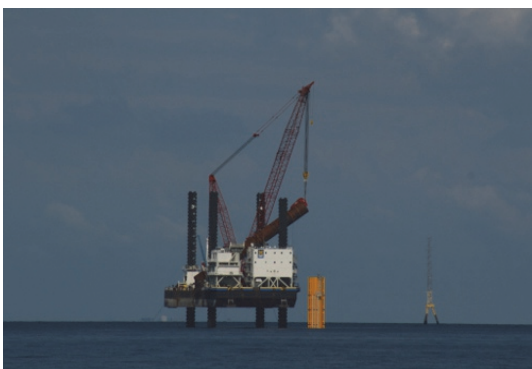
由於支撐結構及基礎部份因須先拋放防淘刷保護層及辦理基樁打樁工作，其施工難度較高且對施工船機需求大。因此，若能順利解決基座施工問題，則轉接段亦可順利執行。基本上無論選用單樁式基

礎或是三腳管式基礎，基本施工流程均大同小異，均先進行打樁後再安裝支撐結構，目前經常使用於離岸風機之施工船機，多為國外之大型打樁船機(詳如圖 3)，或以大型頂昇式平台船上架設打樁機(詳如圖 4)搭配使用。



資料來源：<http://www.workboatsinternational.com/>

圖 5 SKK-7000DT-L 打樁船示意圖



資料來源：<http://www.4coffshore.com>

圖 6 JU0059 頂昇式平台船施工安裝示意圖

2.2 離岸風機之海纜施工船機

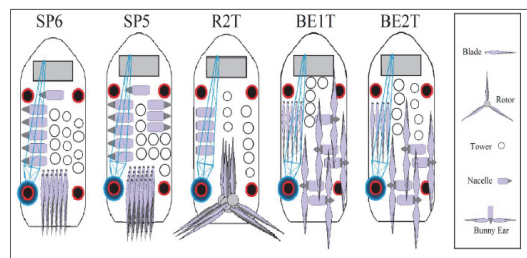
如圖 7 所示，海底電纜為聯接離岸風機 (Offshore Wind Turbine)及陸域電力網(Grid)之主要設備，在風機與風機間之海底電纜通常稱為場內海纜(Inter Array Cable)，聯繫到上岸人孔之海底電纜通常稱為輸出海纜(Export Cable)。其施工方式通常採用專業佈纜船(Cable Ship)搭配噴埋機或犁埋機 (ROV, Remote Operation Vehicle)進行，如圖 7 所示而佈纜船因須考量定位問題，一般而言會增加 DP(Dynamic Positioning)系統，不僅增加船舶之穩定度，亦可面對小型風浪，固定船舶位置，以免損傷海底電纜，或撞擊風機支撐結構。



圖 7 佈纜船吊放犁埋機 ROV 作業圖

2.3 離岸風力機之施工船機

按照各類型風機尺寸與重量，經蒐集歐洲地區目前風機構件之運送方式，得知主要係依據海外現場裝配、組立現況及躉運港口周圍環境變動，選擇運載方式，再採用不同之躉運方式由港區輸運至安裝現場。雖然配合運輸方式於海外建造現場進行風機裝配可減輕風險，但卻間接引起海事環境可能造成影響之風險。目前歐洲風力電場開發案例中，有經驗之風機製造商及立約廠商，較常希望使用專用船機(Purpose-built vessels)。如具有自升能力之船機 (Jack-up vessels)用來建構風機，以符合便利性及節省成本之需求，其運載方式包括 BE1T、BE2T、R2T、SP5 及 SP6 等 5 種模式，如圖 8 所示。



資料來源：Emre URAZ Visby (2011), "Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses", Master Thesis, Sweden

圖 8 離岸風機安裝船之裝載模式示意圖

除上述載運離岸風力機組外，現場安裝須使用特殊船機，一般而言皆採用有頂升能力之動力船 (Jackup vessel)或駁船(Jackup barge)，但又需配合不同之載運方式，其功能亦有所差異，惟初步統計安裝船隻尺寸如表 1 所示。

表 1 離岸風力機安裝船尺寸表

單元特性概要	尺寸
總長(Length Overall)	90~140 m (300~450 ft)
船寬(Beam)	30~40 m (100~130 ft)
吃水(Navigation Draft)	3.6~4.9 m (12~16 ft)
支架高度(Leg in up position)	多樣性，約 46m (150 ft)
塔架、兔耳高度(Tower section, Bunny ears)	46m (150 ft)
起重機收存高度	多樣性

三、離岸風電專用碼頭規劃

3.1 國外離岸風電碼頭案例分析

有關歐洲離岸風場開發之專用碼頭相關設施，包括：碼頭水深、碼頭寬度、碼頭承載力、碼頭後線土地面積、裝卸吊架及數量等，經蒐集相關資料，以荷蘭之BOW Terminal Vlissingen 港區為例進行分析，BOW Terminal Vlissingen 位於荷蘭，緊臨北海，最大水深 11m，港口寬度 250m，潮差 5m，碼頭總長 1,400m，碼頭承載能力為 15 t/m²，碼頭後線可用儲區面積約 13 公頃，可開發土地規模約 7 公頃。有關離岸風電專用碼頭發展現況及未來區位，詳圖 9 所示。



資料來源：<http://www.4coffshore.com>

圖 9 荷蘭 BOW Terminal Vlissingen 碼頭配置

依據上述國外案例，本文初步整理分析未來國內建造離岸風場專用港埠或碼頭等設施時，其最小需求如表 2 所示。

表 2 離岸風電專用碼頭設施最小需求分析表

港口設施	規範	設施最小需求
航道寬度(m)	1.1 倍船長	150m
航道水深(m)	滿載吃水+波浪俯沉+淨餘裕+底床因素	10m
碼頭長度(m)	船長+船寬	158m
碼頭水深(m)	滿載吃水+波浪俯沉+淨餘裕+底床因素	10m
碼頭後線土地面積(ha)	參考歐洲案例	4ha
碼頭承載力(t/m ²)	參考歐洲案例	10 t/m ²

3.2 離岸風電專用碼頭規劃考量因子

3.2.1 風力機組之重量及尺寸

離岸風電碼頭之規劃配置前必先瞭解風力機及其支撐結構與基礎各重要構、組件之重量與尺寸。遂依據 DNV GL 統計歐洲主要離岸風場之相關資料，並考量離岸風機之未來發展趨勢，有關離岸風力機及支撐結構之重量資料概如表 3 所示，而較細部之風力機組件尺寸則以 Vestas3.0MW 離岸風機之相關尺寸作為參考，包括：機艙(Nacelle incl. hub)；葉片(One blade)、轉接段及塔架(Tower section)..等。如表 4 所示。

表 3 離岸風力機整機構組件重量尺寸表

結構	構件	4MW	5MW	6MW	7MW	8MW
風力機	葉片重量(t)	19	23	28	34	40
	葉片之碼頭載重需求(t/m ²)	10	10	10	10	10
	機艙重量(t)	162	239	330	390	450
	機艙之碼頭載重需求(t/m ²)	7	8	10	7	8
	塔架重量(t)	185	215	250	280	310
基礎	塔架之碼頭載重需求(t/m ²)	6	7	8	9	10
	單樁式重量20m(t)	500	788	1076	-	-
	單樁式碼頭載重需求(t/m ²)	13	20	27	-	-
	管架式重量(t)	-	609	684	759	834
	管架式碼頭載重需求(t/m ²)	-	13	14	16	17
	重力式重量(t)	-	-	5970	8009	9691
	重力式碼頭載重需求(t/m ²)	-	-	12	11	10

資料來源：ASSESSMENT OF PORTS FOR OFFSHORE WIND DEVELOPMENT IN THE UNITED STATES, 2014，本文整理。

其中表 3 在風力機部分，碼頭承載力需求約 10t/m²，而支撐結構中則以單樁式支撐結構要求碼頭承載力最高，約 20~27t/m²，但管架式之碼頭承載力需求則須視儲存的方式而定，例如採平躺式儲

存時，其碼頭承載力需求約 13t/m²，但如採站立式儲存方時則高達 25 t/m² 以上。

表 4 離岸風力機構件尺寸表

風力機構件	重量 (Tons)	長度 (m)	高度 (m)	寬度/直徑 (m)
單樁基礎 (Monopile foundation)	150~210 (for 27~40 m long) 500 (for 60 m long)	27~40 to up to 60	N/A	D : 5.1 / 5.5
轉接段 (Transition piece)	170	17 per unit	N/A	D : 4.2
機艙 (Nacelle incl. hub)	125~150	14	3.3	W : 3.9
單一葉片 (One blade)	13~18	55	N/A	Max. W : 4.2
塔架(Tower Section)	約 70	32.5	組合後 60	d : 4~4.6

至於表 4 所示之重要構件中，以葉片長度最長，可達 55 公尺以上，且未來風機大型化趨勢，葉片長度將朝更長更寬方向發展，故碼頭儲存區之長度及載運卡車之轉彎半徑將為另一項挑戰。而重量部份則以機艙之重量最高，儲存區至碼頭面裝卸時，必須使用多輪車，方能降低儲存區及碼頭面層之承載力。

3.2.2 支撐結構與基礎之重量及尺寸

除碼頭之承載力需求外，碼頭上存放離岸風電之支撐結構與基礎所須知面積亦需一併分析，故蒐集國外相關資料，以未來國內可能採用之支撐結構與基礎型式—管架式進行探討，詳如表 5 所示。由表可知，承載愈大之風力機組則支撐結構愈重，但雖然設置之水深皆在 25 公尺，但考量結構體與風力機組之整機自然振動頻率必須在 1P~3P 之間，各管架間距未必因風力機組變大而增加。

考量未來離岸風力機有朝大型化之發展趨勢，目前示範獎勵辦法所採用之 4.0MW 風力機組，可能未來之市佔率降低。因此，依據經濟部能源局之「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」以近期內可能使用之機型 5MW 為目標，評估離岸風電碼頭及其後線土地利用之需求，以作為規劃之輸入因子。

表 5 支撐結構及基礎重量尺寸表

構件	參數	風力機型(MW)			
		5	6	7	8
管架式	管架重量	609	664	759	834
	固定樁(X4)重量[t]	284	328	372	416
	多輪車軸數	25	28	31	34
	管架間距[m]	25	23	20	18
	到 TP 高度[m]	58	58	58	58
	儲存面積(平躺)[m ²]	1740	1601	1392	1253
	儲存面積(站立)[m ²]	750	635	480	389
	承載面積(4 固定塊分配載重)[m ²]	48	48	48	48
	固定塊下之承載力[t/m ²]	13	14	16	17

資料來源：ASSESSMENT OF PORTS FOR OFFSHORE WIND DEVELOPMENT IN THE UNITED STATES, 2014，本文整理。

3.3 離岸風電專用碼頭配置方案

依據能源局之離岸風場開發之規劃，預定 2030 年前完成 4000MW 之開發量，如以每架 5MW 之風力機來估算，由 2020 年~2030 年必須每年製造約 60 架風力機，同時參考國外相關案例，每座碼頭每年約可製造 20~30 架整機之離岸風力機組，推估國內必須規劃至少 2 席離岸風電專用碼頭方敷使用。

但考量國內海氣象條件每年僅有 4 月~9 月適合進行海上施工作業，幾乎半年時間無法施工之情況下，碼頭後線之儲存面積至少需達 30 架整機風力機組以上，故每 2 席碼頭之作業面積需求分析如表 6 所示，共約 6.2 公頃，如再考量裝卸運輸所需之寬幅則需約 7.4 公頃。

如依據工研院民國 102 年之「離岸風電配套港埠設施方案研究」結果顯示，考量台灣西部海域北起桃園南至雲林布袋外海屬於風能較佳之區域，故以台中港作為離岸風電碼頭之進出口港埠及後續營運港埠較佳，因其在地理位置適中，且為國際商港，目前又為陸域風機進口港口，已有相關營運經驗。基此條件與情境分析下，台中港 # 5A 及 # 5B 碼頭之運輸經濟、與物流支援等條件最佳，初步規劃結果詳如圖 10 所示，包括未來運送支撐結構(substructure)及機艙(Nacelle)之重件輸送軌道等。

表 6 離岸風電專用碼頭配置面積需求

風力機組構件	單元尺寸	數量	儲存面積 m ²
支撐結構	20mx40m	30	24,000
支撐結構組裝廠	104mx180m	1	18,720
鋼管樁 (pile,D=1.2m)	L=75m	120	6,000
塔柱第三節(直立)	D=4.2~4.6m	30	750
塔柱第一二節(橫 放)	D=4.2m,L=60m	30	1,800
機艙(Nacelle incl. hub)	14mx4m	30	1680
葉片(blade,3支一 疊)	4.2mx66m	90	8,820
合計			61,770

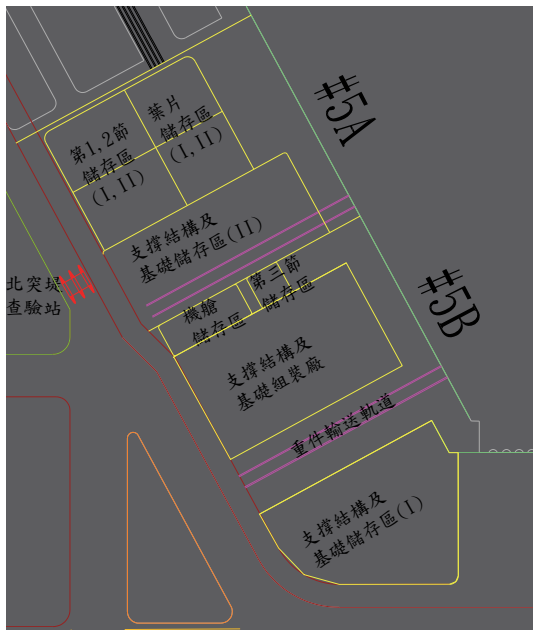


圖 10 離岸風電專用碼頭規劃配置方案

四、結論與建議

離岸風力電場之開發在台灣為首次案例，雖然歐洲北海已有許多經驗可資參考，但由於台灣地區地域特性與北歐地區截然不同，有許多關鍵問題，包括施工船機與港埠設施等必須借重國外之技術引進與移轉，政府單位為順利推動整個離岸風電替代能源之開發，已從產、官、學等三方面同時著手，希望透過各方面技術整合希望為台灣產業帶來新契

機。

海上離岸風機之安裝施工往往為計畫成功與否之重要關鍵，其中又以施工船機影響最大。而符合施工船機要求之專用碼頭，更是重要的一環。依據歐洲目前常用於離岸風電之大型吊船，其作業能量包括吊重 1000 噸、吊高 100 公尺以上之最小需求資料，台中港 # 5A 及 # 5B 碼頭之基地面積族數離岸風電使用，如能及早詳細規劃施工，則未來離岸風電之主要產業基地與永續發展，將指日可待。

參考文獻

1. 財團法人工業技術研究院(2011)台灣風能評估手冊。
2. 財團法人工業技術研究院(2013)離岸風電配套港埠設施方案研究。
3. 4C offshore Limited (2014) *Ports Database for the Offshore Wind Industry*, <http://www.4coffshore.com/windfarms/portSearch.aspx>
4. 4C offshore Limited (2014) *Ports Database for the Offshore Wind Industry*, <http://www.4coffshore.com/windfarms/vesselSearch.aspx>
5. Carl A. Thoresen (2010) *Port designer's handbook*, Second edition.
6. Emre URAZ Visby (2011) *Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses*, Master Thesis, Gotland University, Sweden.
7. Engineer Company (2013) <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/wind-energy-gets-serial>
8. Garrad Hassan America, Inc. (2014) *Assessment of ports for offshore wind development in the UNITED STATES*.
9. Tetra Tech Ec, Inc. (2010) *Port and Infrastructure Analysis for Offshore Wind Energy Development*.

104 年 11 月 13 日 上午 08 時 30 分至 10 時 15 分

子 題：海洋能及離岸風能(三)

場次：3 E

主持人：廖學瑞、連永順

地點：6 樓第三會議室

時間	題目	作者	頁碼
08:30 – 08:45	Obstacles' edge detection in radar images by utilizing Cross Teager Energy Operator (CTEO)	Mohammad Reza Mortazavi、 Ching Jer Huang Li Chung Wu	563
08:45 – 09:00	互制關係圖應用於離岸風機套管基礎受反覆軸向拉力下之穩定性分析	郭玉樹、 M. Achmus 曾玉修、鍾智印 K. Abdel-Rahman	685
09:00 – 09:15	離岸風場施工之水下噪音量測與分析	胡惟鈞、陳琪芳 黃維信、馮宗緯 林稚堯	691
09:15 – 09:30	離岸風電專用碼頭規劃研究	林倣寬、廖學瑞 連永順	697