離岸風力電場開發之海事工程施工船機與安裝技術初探

關鍵詞：動態定位(Dynamic Positioning)、離岸風機(Offshore Wind Turbine)、轉接段(Transition Piece)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／資深協理／廖學瑞 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／技術經理／丁金彪 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／副理／林俶寬 ❸

摘 要 ABSTRACT

為推動國內替代能源，經濟部能源局規劃在2030年前將建置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。尤其國內目前並無相關實際經驗，亦無類似之船機等資源可資利用，不論在船舶吊裝作業，或海上固定安裝所需要之關鍵技術皆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，針對建造與安裝之技術重點作一初步探討與分析，俾利未來實際施工之參考。

壹、前言

我國為順應世界潮流及因應全球暖化減少溫室氣體排放量，近年來積極尋找替代能源，減少對石化能源之需求。依國家發展委員會(前經建會)於2011年11月9日在立法院經濟委員會提出「因應全球暖化暨油價飆漲，國內關於低碳、綠能產業的發展」報告，截至2011年10月底，我國已完成開發25座風場，皆位於陸域，共計288台風力機，總裝置容量564MW（百萬瓦），未來仍繼續發展，並規劃至2020年開發風場共計1,200MW (1.2GW)。然囿於可供設置陸域風力發電之場址日趨減少，成本日益提高，而海上離岸風力發電之技術也愈趨成熟，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，累計至2030年將設置600架海上風力機。

考量上述政策及預定未來離岸風場開發區位，其工址所在地點之水深皆在-15公尺以上，以避開白海豚保護等敏感區域。這些區域通常離岸4、5公里以上，不論從風機之基礎建造至風力發電機組之裝設，必須動用各種吊裝、打設、運輸、交通、警戒等大批船機，才能將風機豎立於海上。為使海上工作能順利完成，許多相關技術與設備，甚至包括人員之教育訓練等都必須到位，在綜合各種條件配合海氣象之天氣窗期(weather window)等，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。

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，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，又用到佈纜船等。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，值得深入探討。

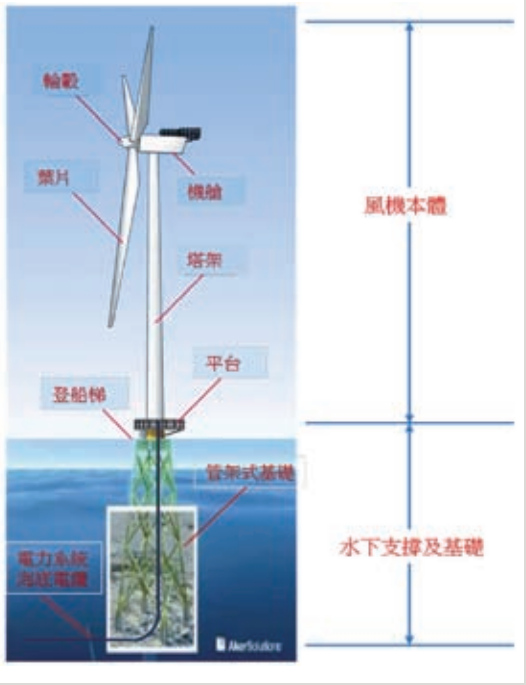
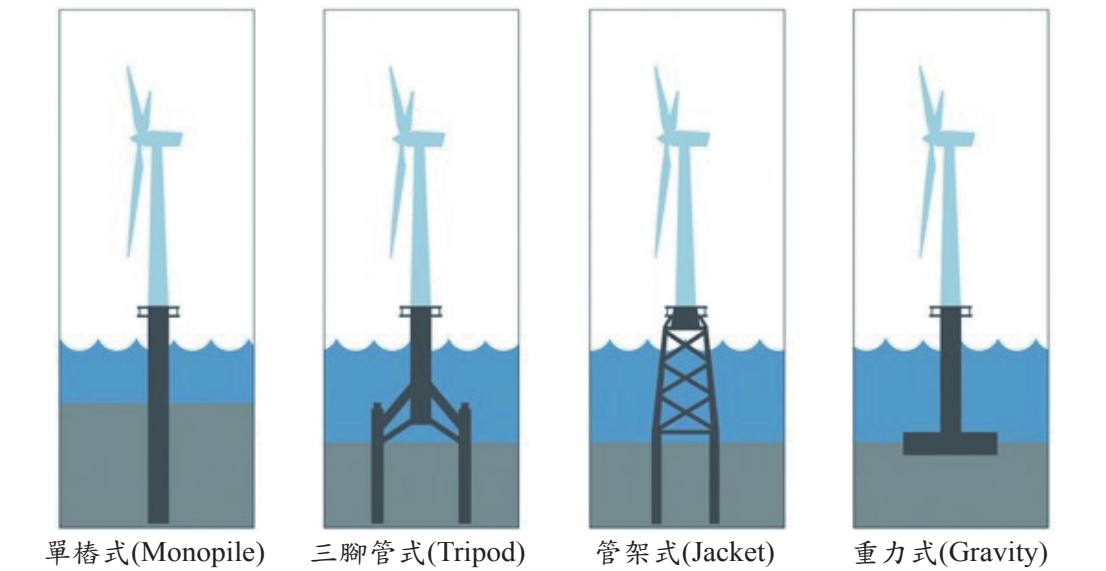


圖1 離岸風機主要構件(Jacket type)示意圖

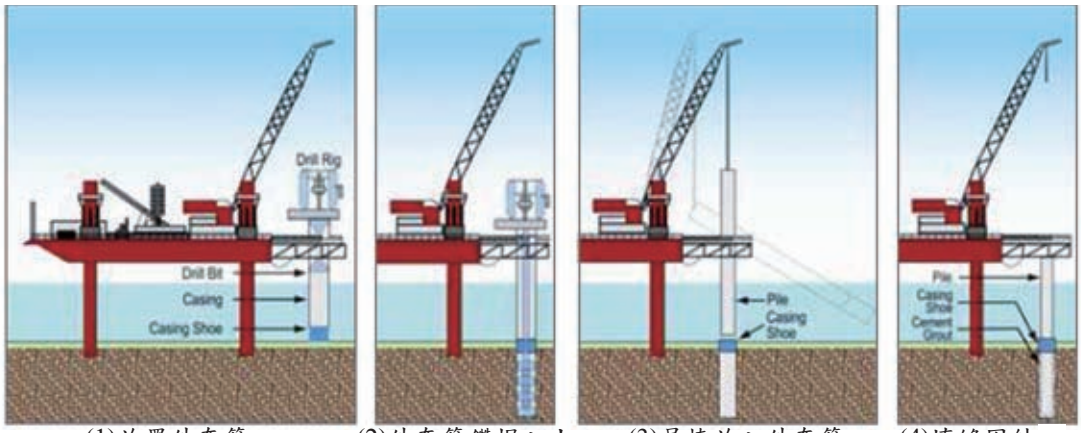
貳、離岸風機之基座施工船機及技術

離岸風機基座由上到下分可為轉接段(Transition piece，但三腳管式無此部分)、支撐結構及基礎(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，而支撐結構基礎則為轉接段以下將風機組荷重傳遞至海床之結構、基礎部分則為將支撐結構固定於海床上之地下構造物。然不論何種風機基座，其構造尺寸皆相當龐大，例如單樁其管徑約達5～6公尺之間，管長配合水深及地質條件動則30公尺以上，就施工性而言一般必須動用大型機具，且須掌握施工精度才能符合規範要求。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，須具足夠能量之施工船機，即可順利作業；但支撐結構及基礎部分因須設置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，基本施工流程均相同，其施工順序詳如圖3所示，而細部構件與施工機具協同作業詳如圖4



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(水下支撐及基礎)型式



(1)放置外套管　(2)外套管鑽掘入土　(3)吊樁放入外套管　(4)填縫固結

資料來源：Sanjeev Malhotra, “Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundation”

圖3 典型單樁式離岸風機基座施工順序

資料來源：工業技術研究院，本計畫繪製。

圖4 風機基座細部與機具協同施工示意圖

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自升式起重駁船示意圖

表1 國內可能用於離岸風電之施工機具彙整表

廠　商	施工機具	施工機具名稱	功　能	備　註
國煌營造	打樁船	國煌9號	施工樁錘8T、可打設樁徑1.2m	可更換為16T樁錘
協信營造	打樁船	大榮9號	施工樁錘8T、可打設樁徑1.2m	可更換為16T樁錘
宏華營造	國內升降式平台船	宏富號	長36m×寬22m	最大施工水深-15m、可載設打樁設備
宏華營造	國內升降式平台船	宏禹號	長56m×寬30m	最大施工水深-30m、可載設打樁設備
樺棋營造	國內升降式平台船	海岸一號	長48m×寬18m	最大施工水深-15m、可載設打樁設備
顏春發企業	油壓樁錘	-	施工樁錘16T、可打設樁徑2m	國內最大樁錘機

註：本計畫彙整。

所示。然目前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5)，或大型升降式平台船架設打樁機(詳如圖6)搭配使用。

依據上述國外案例之需求，初步分析國內可使用於離岸風力電場施工之可能用於離岸風場開發主要船機整理如表1所示。經分析結果顯示，國內船機均屬小型且打樁機能量不足，海上基樁打設直徑最大僅能達2m，未來如使用單樁基座時(直徑約6-7公尺)，必須另外引進新的打樁機才能施作。至於水深部分，目前僅宏禹號可達-30公尺，其餘升降平台船之作業水深不足，恐須再投入資金進行改造或重新造船方能符合需求。

台灣西部海域之海流流速強勁，尤其每逢朔望(陰曆初一、十五)之際，流速經常高達3～4節，當離岸風機基座在海上安裝完畢之後，基樁附近海床容易遭受淘刷，淘刷範圍詳如圖7所示，為避免淘刷過於嚴重而影響基座安全，必須進行基樁之防淘刷保護，其保護方式可概分為保護毯、拋石或地工沙袋等。但一般而言，拋石方式較能節省工期及充填縫細其完成示意圖詳如圖8，故使用之船機如圖9所示為底開式或側向拋放式為主，目前這二種船機及工法在國內屬於常用方式，技術上並不困難，惟須注意精準度與於拋放時對基樁之影響，最好輔以潛水人員及吊裝機具為佳。

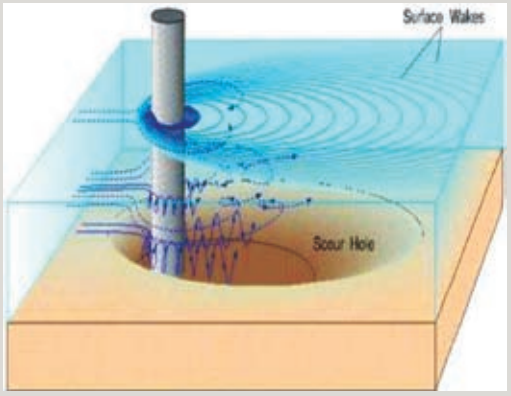


圖7 基樁淘刷範圍示意圖

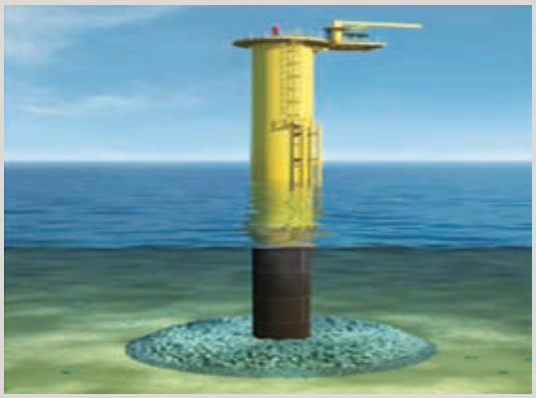


圖8 基樁淘刷拋石保護示意圖

圖9 基樁淘刷保護拋石施工作業

參、離岸風機之海纜施工船機及技術

如圖10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陣列海纜(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)。其中場內海纜係以串聯方式聯接風機，其與風機聯接之示意圖詳如圖11所示，將經由J tube 或I tube連至轉接段上方平台，與風機內之電力電纜串聯。

經分析台灣地區目前離岸風場所在之位置，在考量經濟性、營運需求及眾多環境限制因素，大多位於離岸10公里之內，海纜以埋設於海床下2公尺較能符合安全需求。

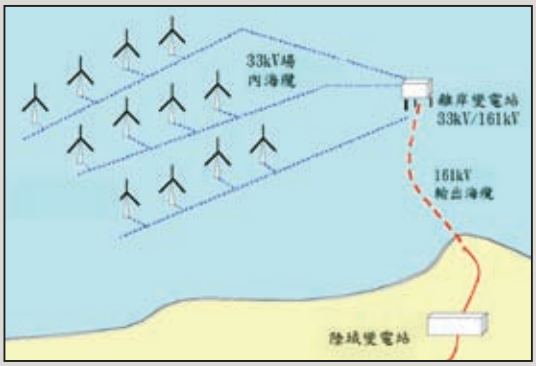
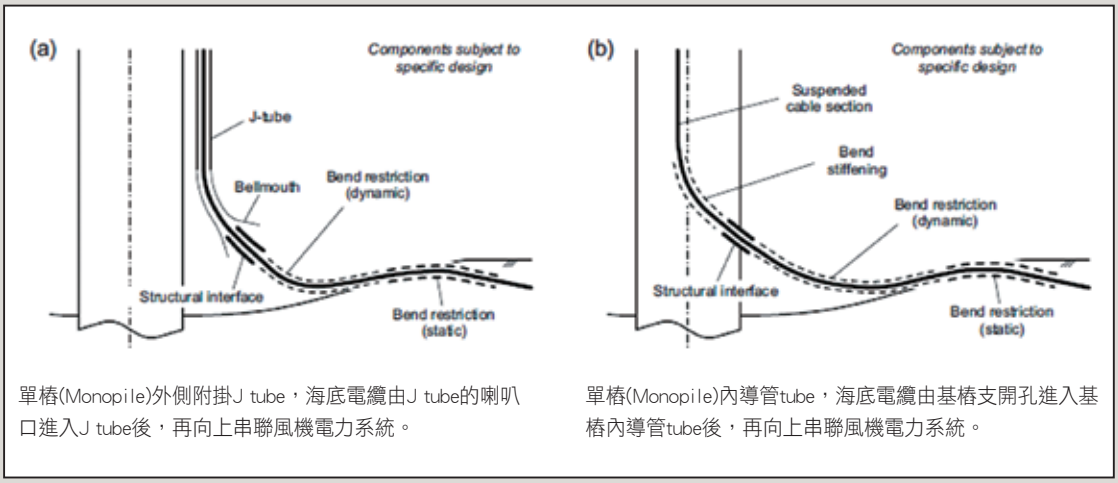


圖10 離岸風場海纜配置平面圖

至於風機基樁附近海纜之施工則依據DNV-RP-J301 “Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Application” 規範規定，訂有安全作業範圍以避免船舶碰撞風機基座。其規定係以佈纜船在有無配備動力定位系統(Dynamic Positioning)之情況來認定，有DP系統之船舶可

圖11 離岸風場海纜串聯示意圖



單樁(Monopile)外側附掛J tube，海底電纜由J tube的喇叭口進入J tube後，再向上串聯風機電力系統。

單樁(Monopile)內導管tube，海底電纜由基樁支開孔進入基樁內導管tube後，再向上串聯風機電力系統。

資料來源：DNV Feb. 2014 "DNV-RP-J301 Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Application"，本文補充說明。

圖12 海底電纜穿入離岸風機基座J或I Tube施工示意圖

於風機基座周圍50公尺定泊，但如無DP系統則須於100公尺以外，進行拋錨定位，然後再請潛水人員下去將海纜繫緊位於J tube內之導線(如圖12所示)，再以絞盤將導線與海纜拉到風機轉接段(Transition Piece)之平台(Platform)上與風機電力系統聯接與固定。

至於風機基座安全範圍外之海纜佈埋設施工，與一般兩端皆是陸域之海纜工程相同，以佈纜船(Cable Ship)搭配噴埋機或犁埋機(ROV, Remote Operation Vehicle)進行施工即可，至於海底電纜近岸登陸至上岸人孔施工技術部分可參閱中華技術第95期，不再贅述。

肆、離岸風機之風機吊裝施工船機及技術

一、施工考量重點

離岸風機之施工安裝主要受風機之大小、高度、構件重量等影響，故初步蒐集主要廠牌離岸風機之相關資料，詳如表2所示，可知其重量相當重，皆在百噸以上。但除重量外，吊裝時目標物之尺寸與吊高需求亦影響施工船舶之條件，故另蒐集Vestas3.0MW離岸風機之相關尺寸以資參考，包括：機艙(Nacelle incl. hub)長14m、高3.3m、寬3.9m之重量介於125公噸～150公噸；單一葉片(One blade)55m長、寬4.2m之重量介於13公噸～18公噸；另直徑4～4.6m、長32.5m之塔架(Tower section)約70公噸。

表2 離岸風機構件尺寸表

風機類型	Power (MW)	Hub (ton)	Blade (ton)	Rotor (ton)	Nacelle (ton)	*Tower (ton)	Total (ton)
Vestas 80	2.0	18	6.5	37.5	69	155	216.5
Siemens 2.3	2.3	32.3	9.2	60	82	130	272
Vestas V90	3.0	40	9	67	70	110	247
Siemens 3.6	3.6	42.4	17.2	95	125	180	420
Areva M5000	5.0	62	16.5	110	233	200	543
RePower 5	5.075	84	24	156	290	210	656
RePower 6	6.15	84	24	156	316	285	757
Vestas V164**	7.0	-	35	227.5	±390	-	-

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

二、離岸風機運輸模式

按照前述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，得知主要依據外海現場裝配、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外海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，茲分別敘述如下：

(一)專用船裝載

1.“Bunny Ear” with a Tower in One Piece (BE1T)

機艙(Nacelle)、輪轂(Hub)及兩個葉片(Blades)於港埠陸域上組成兔耳型(bunny ear)，另外將塔架(Tower)及第三個葉片等構件一併裝載於同一船上，如圖13所示，此種模式之運送及現場組裝皆包括前述3個組成。

2.“Bunny Ear” with a Tower in Two Pieces (BE2T)

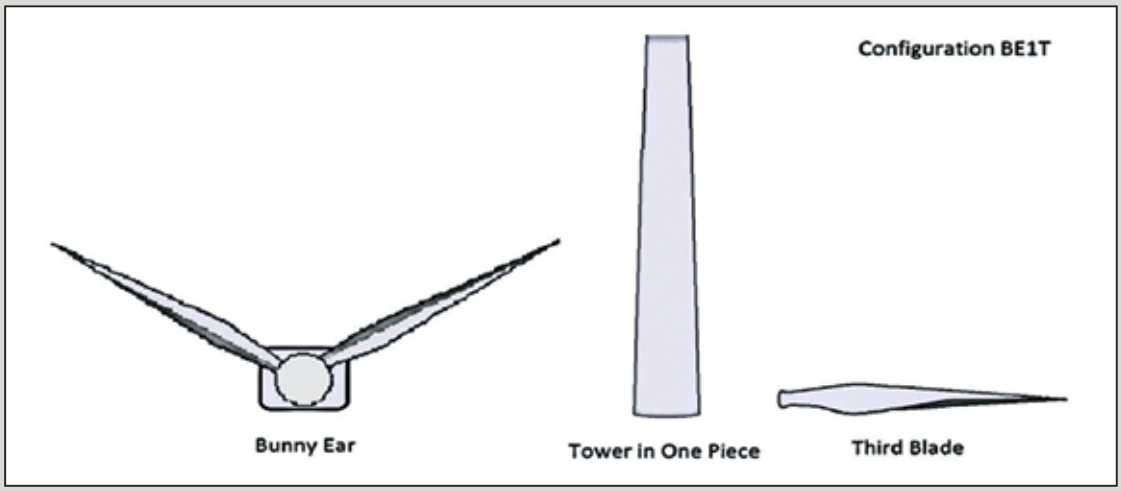
機艙(Nacelle)、輪轂(Hub)及兩個葉片(Blades)於港埠陸域上組成兔耳型(bunny ear)，塔架(Tower)則拆分為兩構件，另外將第三個葉片等一併裝載於同一船上，如圖14所示，此種模式之運送及現場組裝皆包括前述4個組成。

3.Pre-Assembled Rotor (R2T)

輪轂(Hub)及三個葉片(Blades)於港埠陸域上組成完整之旋翼(Rotor)，塔架(Tower)則拆分為兩構件，另外將機艙(Nacelle)等構件一併裝載於同一船上，如圖15所示，此種模式之運送及現場組裝皆包括前述4個組成。

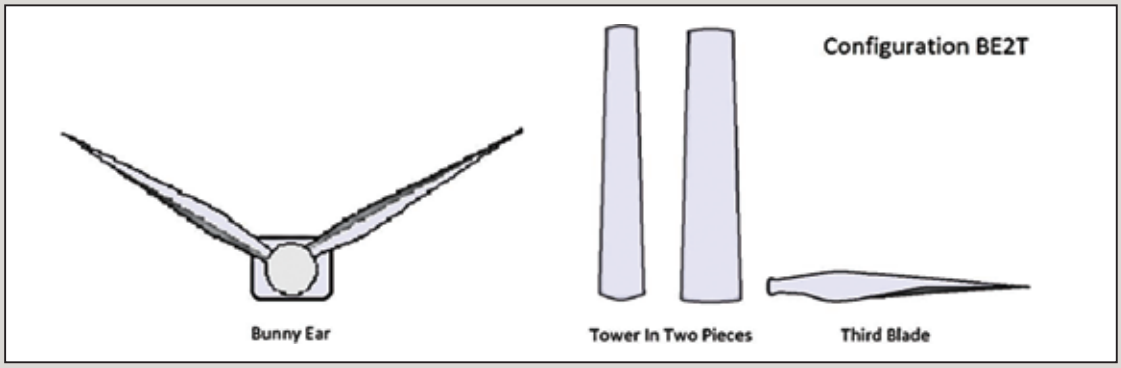
4.Five Pieces Separately (SP5)

機艙(Nacelle)與輪轂(Hub)於港埠陸域



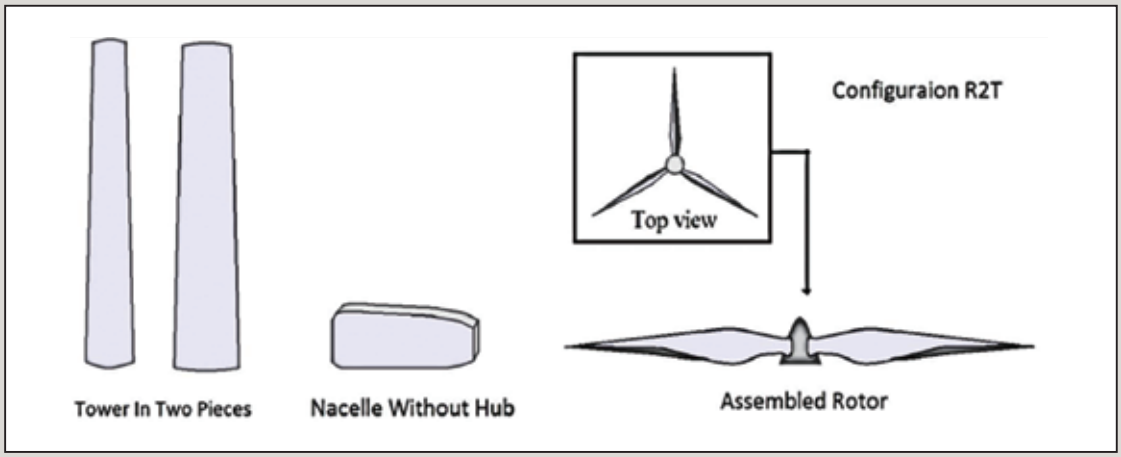
資料來源：Emre URAZ Visby (2011), “Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses”, Master Thesis, Sweden

圖13 “Bunny Ear” with a Tower in One Piece (BE1T)示意圖



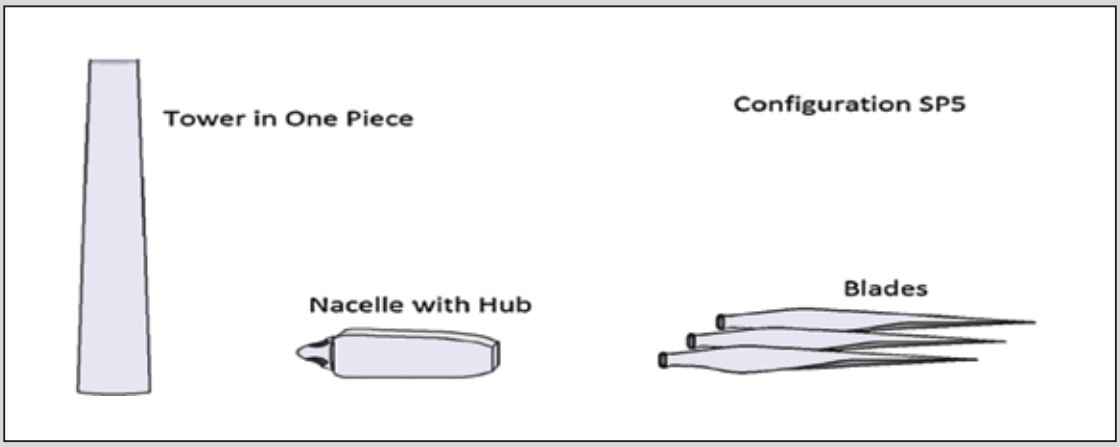
資料來源：Emre URAZ Visby (2011), “Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses”, Master Thesis, Sweden

圖14 “Bunny Ear” with a Tower in Two Pieces (BE2T)示意圖



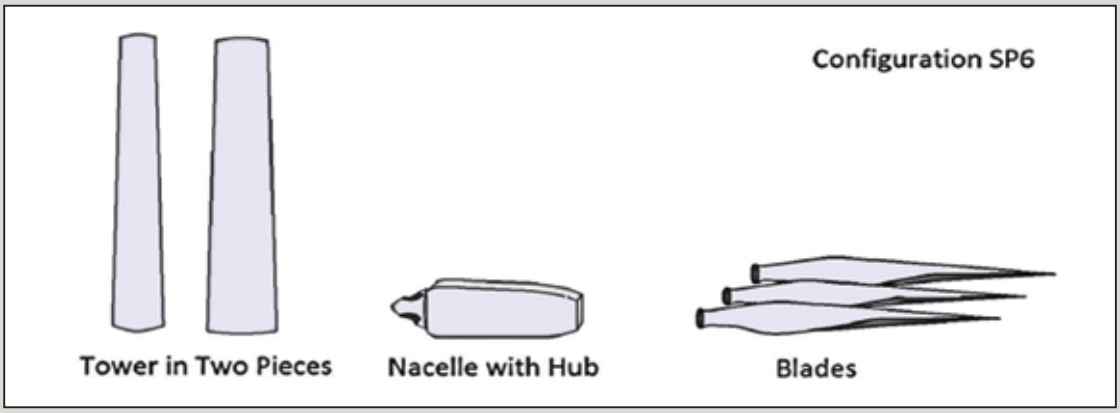
資料來源：Emre URAZ Visby (2011), “Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses”, Master Thesis, Sweden

圖15 Pre-Assembled Rotor (R2T)示意圖



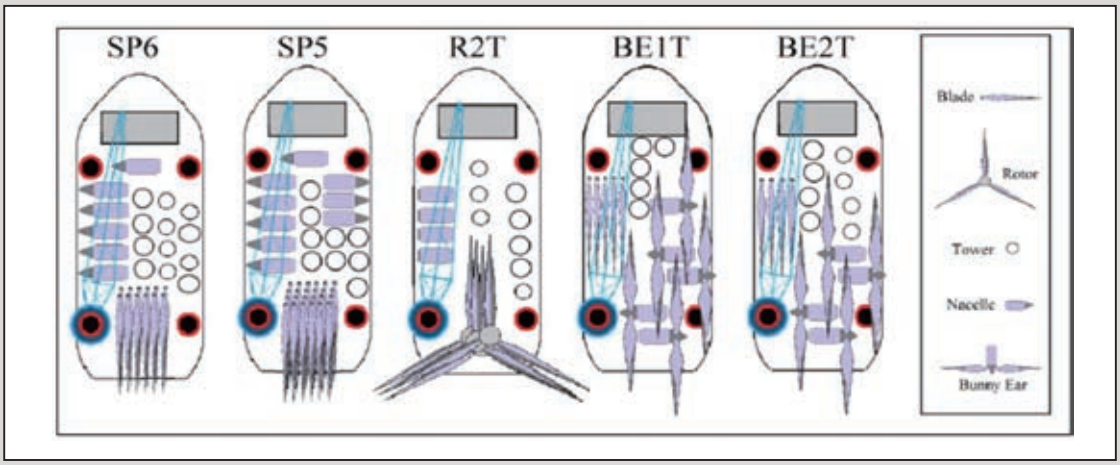
資料來源：Emre URAZ Visby (2011), “Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses”, Master Thesis, Sweden

圖16 Five Pieces Separately (SP5)示意圖



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

圖17 Six Pieces Separately (SP6)示意圖



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

圖18 離岸風機安裝船之裝載模式示意圖

上合組後，與塔架(Tower)及三個葉片等一併裝載於同一船上，如圖16所示，此種模式之運送及現場組裝皆包括前述5個組成。

5.Six Pieces Separately (SP6)

機艙(Nacelle)與輪轂(Hub)於港埠陸域上合組，塔架(Tower)則拆分為兩構件，另再將三個葉片等一併裝載於同一船上，如圖17所示，此種模式之運送及現場組裝皆包括前述6個組成。

綜合上述多種風機載運配置，現階段可能裝載於專用船之載運方式詳如圖18所示，其中有關R2T之現場載運方式詳如圖19所示。

(二)平台船裝載

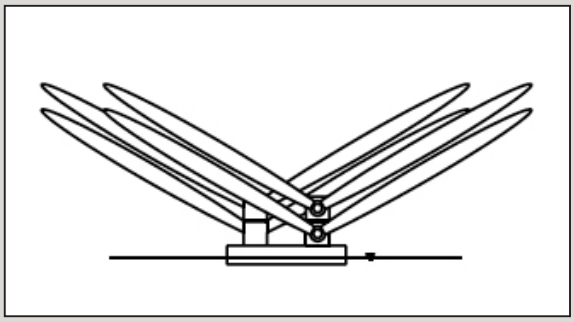
如考量經費有限時，離岸風機之裝載亦使用拖船+升降式平台船之方式來施工，詳如圖19～圖21所示，惟該類船機隱含較多風險且須較長施工時間，且因數量有限，該承租總費用亦屬偏高，有必要另行考量。

綜合上述，目前歐洲北海離岸風機載運以R2T為發展趨勢，其載運方式如圖22所示。

三、離岸風機安裝施工模式

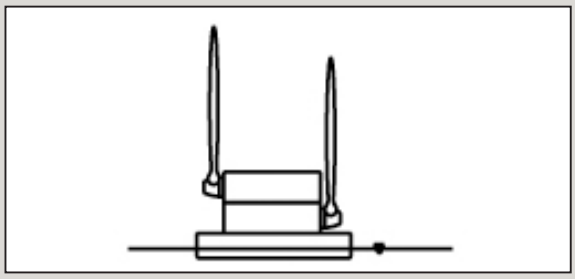
離岸風機海上吊裝之施工方式，一般而言配合前述之船運裝載方式而定，其安裝順序，如下所述。

(一) 風機塔架：下塔架安裝於轉接段上→安裝中塔架→安裝上塔架
(二) 機艙(通常含輪轂)：安裝於上塔架
(三) 葉片安裝，可分三種型式：
→一支葉片一支葉片逐一安裝。
→或先安裝二支葉片(兔耳形)後再安裝第三支葉片。
→或三支葉片(星形)同時安裝
(四) 線路聯接
(五) 測試。



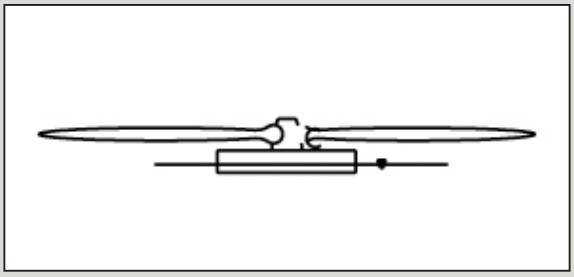
資料來源：“Port and Infrastructure Analysis for Offshore Wind Energy Development”, Tetra Tech Ec,Inc.,2010

圖19 兔耳形(側視)裝運示意圖



資料來源：“Port and Infrastructure Analysis for Offshore Wind Energy Development”, Tetra Tech Ec,Inc.,2010

圖20 兔耳形(前視)裝運示意圖



資料來源：“Port and Infrastructure Analysis for Offshore Wind Energy Development”, Tetra Tech Ec,Inc.,2010

圖21 星形(前視)裝運示意圖

資料來源：http://www.industrytap.com/great-gabbard-the-worlds-largest-offshore-windfarm-90-square-miles/1595

圖22 平台船風機星形R2T裝運示意圖

資料來源：http://www.seajacks.com - Seajacks UK

圖24 第一支葉片安裝施工圖

資料來源：Alstom's 6MW Haliade offshore wind turbine loaded at Ostend

圖23 塔架安裝施工圖

資料來源：http://www.ynnicymru.org.uk/blog/first-turbine-installed-at-one-of-europes-largest-offshore-wind-farms/

圖25 第三支葉片安裝施工圖

資料來源：http://www.wwindea.org/technology/ch01/en/1_3_3.html “Deep Offshore Wind Farms - Challenges and Opportunities”

圖26 兔耳形(Bunny ears)風機葉片安裝施工圖

資料來源：http://www.huismanequipment.com/ en/products/cranes/ wind_ turbine_installation cranes

圖27 整機安裝施工圖

上述海上安裝所使用之船舶包括專用船及升降式平台船(4腿～6腿)，詳如圖23～圖26所示。然近年來配合船舶大型化之趨勢，也考量降低海上施工之風險，已逐漸發展成整機吊裝之施工方式，詳如圖27所示。

伍、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，包括施工船機與施工技術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，以為台灣產業帶來新契機。

然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。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；然檢視目前國內市場上相關船機資料，得知並無任何類似之船機有如此巨大之作業能量，此部分儼然成為風場開發之瓶頸。如欲解決此問題，基本上可朝向國外租船或國內自行新建船舶二種方式來因應，但依據目前歐洲離岸風場開發之趨勢，未來大型吊船等施工船機在北海之需求更高，在市場供需不平衡之狀況下，要由歐洲引進離岸風電專用施工船機之可能性不高，要不然就是必須支付鉅額費用，才能吸引該船機前來施工。

因此，由國內自行新建專用吊船似乎成為一種可行之方案，但一艘完整全功能離岸風機之施工船機建造費動則三、四十億台幣，非一般企業所能支應，且船機之維護費用也相對

高，必須有足夠風場之運維工作才能支付這艘施工船機之維護成本，故除仰賴政府單位之大力支持外，建議在政策上鼓勵金融機構給予參與離岸風場開發的廠商優惠融資，以利離岸風電之替代能源產業得以在台灣海域成長茁壯。

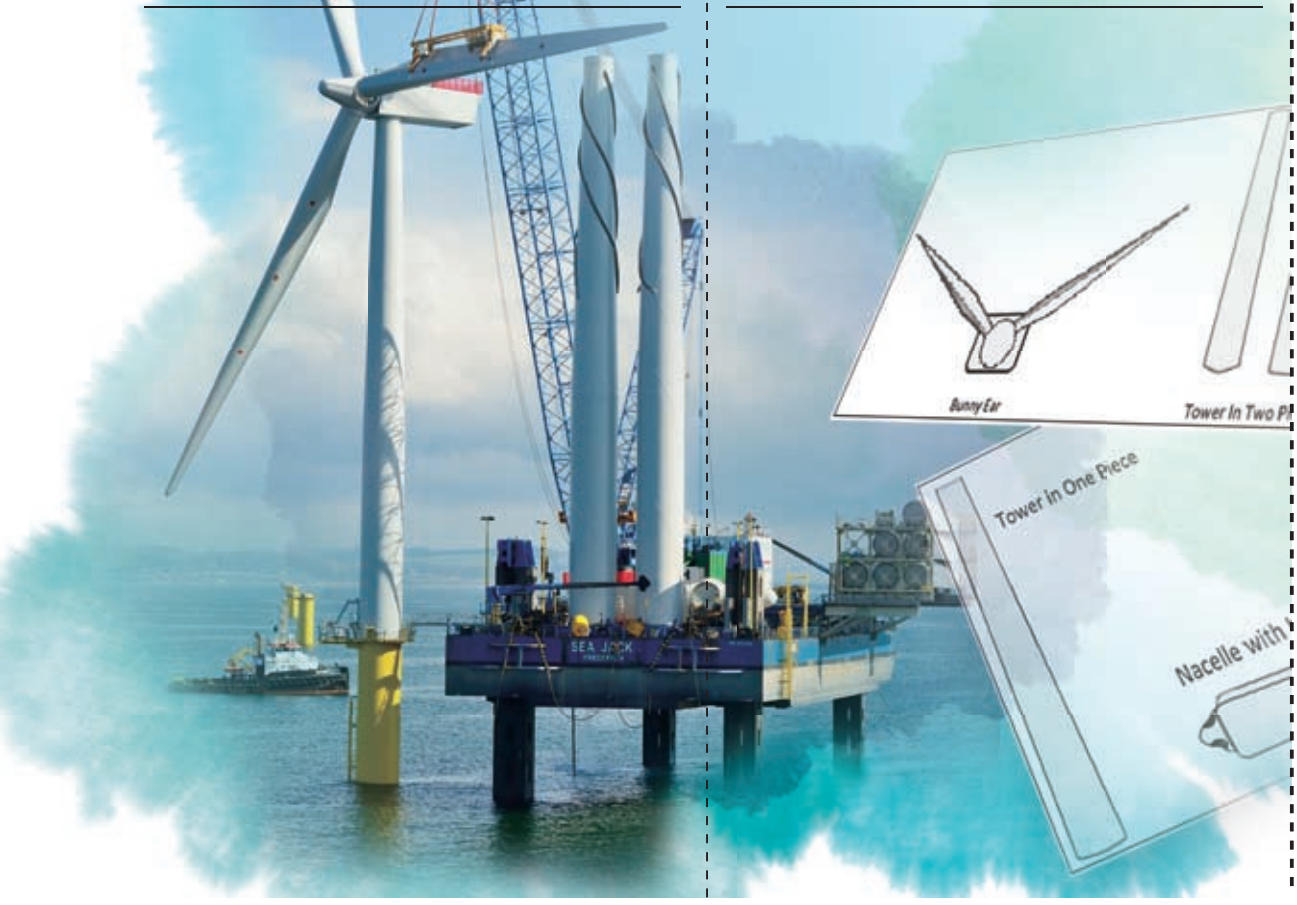
參考文獻

1. DNV Feb. 2014 “DNV-RP-J301 Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Application”

2. Emre URAZ, 2011 “Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses, Planning Optimal Marine Operations for Offshore Wind Projects”, Master Thesis, Gotland University.

3. G.J.W. van Bussel, W.A.A.M. Bierbooms, 2003, “Analysis of different means of transport in the operation and maintenance strategy for the reference DOWEC offshore wind farm”, OWEMES offshore wind energy Seminar, Naples, Italy.

4. Michiel Zaaijer, 2008, “Offshore Wind Farm Design Loads, dynamics and structural design”, Delft University of Technology.

5. Sanjeev Malhotra, “Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundation”.

6. Tetra Tech Ec, Inc., 2010, “Port and Infrastructure Analysis for Offshore Wind Energy Development”.