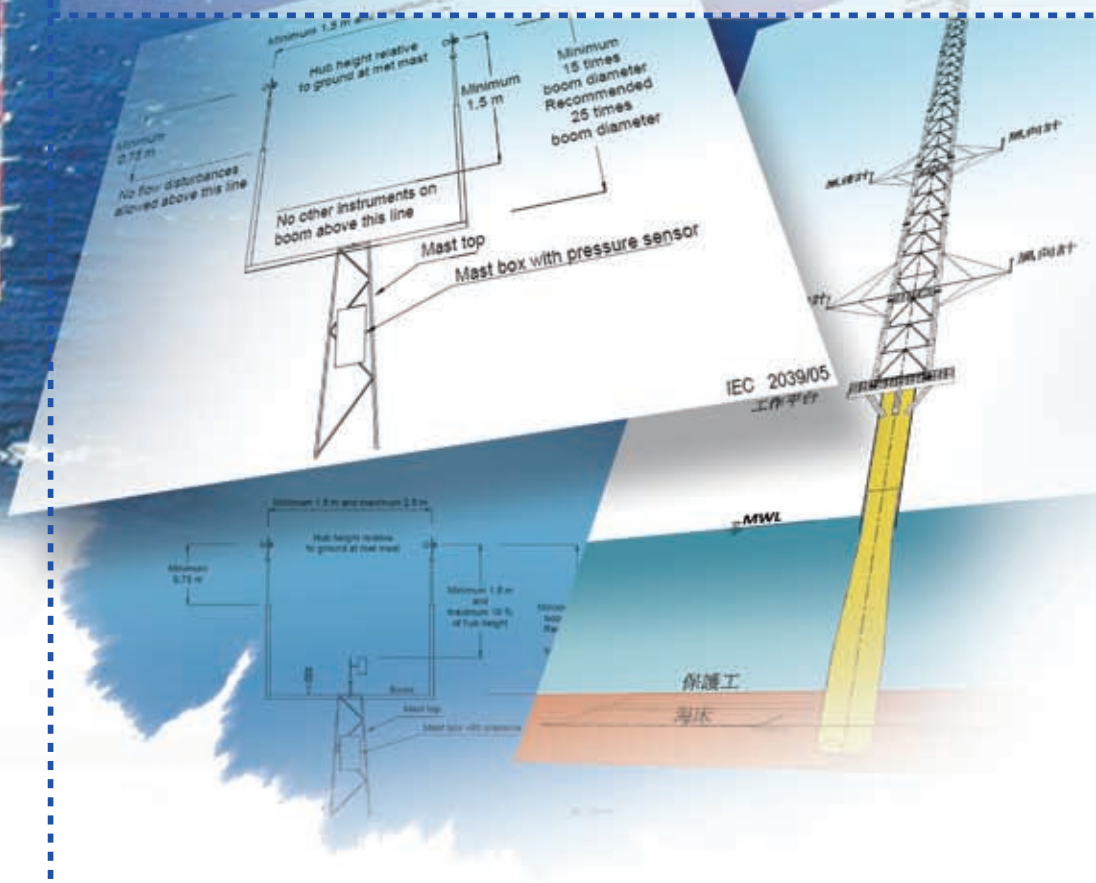
離岸風場海氣象觀測塔之規劃與設計技術

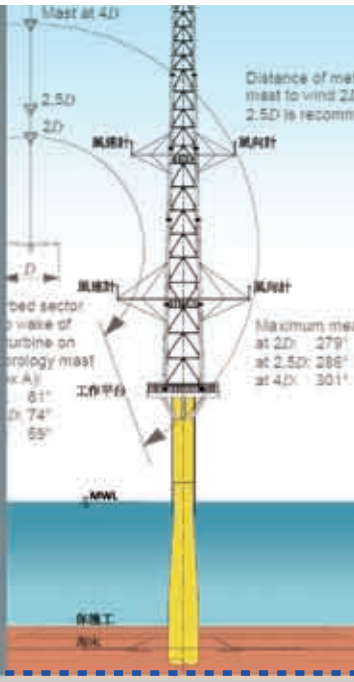
關鍵詞：海氣象觀測塔、規劃與設計技術、風力發電離岸系統示範獎勵辦法

台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／正工程師／張上君 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／正工程師／劉育明 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／正工程師／李磐柏 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／正工程師／林俊達 ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／副理／林俶寬 ❺



摘 要 ABSTRACT

為順應全球氣候變遷與節能減碳趨勢，政府於民國100年11月3日公布「確保核安、穩定健減核、打造綠能低碳環境、逐步邁向非核家園」之能源發展願景，全力擴大各類再生能源推廣，陸續推動「千架海陸風機」與「陽光屋頂百萬座」計畫。依規劃國內將在2030年前安裝約600架離岸風力機，裝置容量可達3,000MW，約占再生能源設置目標24%，可望成為國內電能替代最主要的來源之一。離岸風場之海氣象觀測塔設置，不論對於離岸風場開發前之風能掌握，或是開發後之持續監控、推估與預測，甚或是肩負離岸風場開發之前導工程功能，皆扮演極重要的關鍵角色，對國內離岸風力發電產業之發展至關重要。因有幸參與國內「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」海氣象觀測塔之規劃設計，略整相關內容以為楔子，約略闡述觀測塔規劃設計所需考量之因素與流程，以期拋磚引玉，使後續之觀測塔規劃設計得以更為完善。



❶ 台灣電力公司 綜合研究所 再生能源研究室 研究員 陳文福
❷ 台灣電力公司 綜合研究所 再生能源研究室 研究員 陳文生
❸ 台灣電力公司 綜合研究所 再生能源研究室 研究員 陳怡君
❹ 台灣電力公司 綜合研究所 再生能源研究室 研究員 陳文彬
❺ 台灣電力公司 綜合研究所 再生能源研究室 研究員 陳文德

壹、前言

經濟部於民國101年7月3日訂定「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，正式宣告我國離岸風力發電之推展邁入實際執行階段；然正因為國內目前尚無實際開發離岸風場之案例，且潛在離岸風場場址之現場海氣象實測資料十分缺乏，又台灣地區具有颱風、地震發生頻率高，以及海域地質條件較為鬆軟且變異性大之特性；使得在引進國外離岸風場開發經驗時，宜經由前期之現地工程驗證，以瞭解國外現行規範及經驗於台灣地區之適用性。故風場開發前之海氣象觀測塔建置，除原賦予之補充原可行性研究、環境資料調查及規劃設計條件之不足，以及蒐集場址風能資料作為後續風場開發效能評估、風機佈置檢討及營運維護依據之功能外，並肩負開發該場址之前導工程功能，可驗證擬採用之風機基礎形式，並藉由實際工程之演練，據以檢討國內製造、陸域運輸、組裝、作業母港、碼頭設施功能、陸海運轉換、海上運輸、海上施工及管理、後續營運維護作業等之能量與能力。由此可見，現階段海氣象觀測塔之規劃設計與建置，對整體離岸風場開發、甚至對國內離岸風力發電產業之發展至關重要。

貳、海氣象觀測塔設置需求

為確保所選定之離岸風場可達到可行性研究階段之預估產電效能，使得所投入之鉅額離岸風場開發案能獲致預定之效益，一般會於預定場址先進行現場風資料的實測與分析，以掌握該風場之可開發風能；並於風場開發初期，針對不同風與大氣條件下之各種風速範圍，進行風速及電力輸出資料之同步量測與蒐集，並建立足夠觀測長度之統計資料庫，以獲得功率曲線(power curve)，藉以決定風機之功率性能特

性(power performance characteristics)，進而評估風場的年發電量AEP(annual energy production)。而離岸觀測塔之設置，主要係作為觀測儀器的載具，以蒐集風場之相關資訊，供前期風力機組選擇、整體風場調整及後續營運階段之產能監控、推估、預測及營運管理維護之憑據。

一、「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」對測量項目及儀器之規定

依「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」對示範風場海氣象觀測塔規格之規定，海氣象觀測塔之水面上高度須達風力機輪轂高度(至少位於平均海水面70公尺以上)，量測項目包括風速、風向、氣溫、氣壓、濕度、降雨、淨輻射強度等水面上資料及流速、流向、波高、週期、波向、水溫、鹽度、水密度等水面下資料，各種資料之量測頻率、精度、儲存頻率如表1所示，量測儀器的設置須考慮固定架之安裝，其設置位置須避免因結構物所衍生之擾流影響而降低量測品質，同時必須避免受到結構振動及鹽分侵蝕的影響。有關測風塔之儀器安裝設置須符合IEC 61400-12-1規範之相關規定。

二、IEC 61400-12-1規範對測量項目及儀器之規定

IEC 61400-12-1規範主要係針對風力發電機之電力生產功率性能測量程序及報告格式予以嚴謹之規定，其對氣象觀測之項目及使用儀器規定摘要如下：

(一)風速：進行風速測量時應採用杯式風速計(cup anemometer)。作為功率性能測量(power performance measurements)之風速計應符合該規範對風速計等級要求之相關規定。杯式風速計應固定於風力機輪轂高度(hub height)之±2.5%之內。

(二)風向：風向之測量應採用風向計(wind vane)，其在風向測量之校正、操作、定向之不確定性應小於5°。

(三)空氣密度：空氣密度主要可藉由空氣溫度及氣壓之測量結果，由規範所規定之公式求得，在高溫地區建議亦對相對溼度進行測量，並依規範所規定之公式進行空氣密度修正。其中，空氣溫度計與濕度計應架設於風力機輪轂高度(hub height)10公尺範圍內；氣壓計則應架設於風力機輪轂高度(hub height)附近，如果氣壓計無法架設於風力機輪轂高度(hub height)附近，則氣壓測量結果應依照ISO 2533規範之規定進行修正，以求得風力機輪轂高度(hub height)之氣壓。

參、海氣象觀測塔設置規劃

一、設置地點選定原則

一般在進行海氣象觀測塔規劃與設計之前，應已藉由可行性研究初步選定離岸風場之預定場址，其評估要項概括有：風力資源評估、離岸距離、水深、海床地質條件、地形變遷及漂沙特性、波潮流條件、颱風及地震類型與活躍程度、電纜路徑及並聯引接點與方式、區位附近經濟活動規模相關開發計畫、飛航及雷達與軍事管制區、禁限建區、生態保護區、水產動植物繁殖保護區、漁業權區、礦業權區、通信及電力與油氣等海底管線保護範圍、船舶航道與航行安全、施工及營運作業母港位置、現有/預期海事工程能量等因素。故海氣象觀測塔設置地點的選定應考量上述因素，並參考下列的規定選定之：

表1 量測項目及規格表

量測項目	物理量	量測位置	量測頻率	量測範圍	解析度
風速	風速	10公尺、30公尺、50公尺、輪轂高度(70公尺以上)；輪轂高度須依照IEC 61400-12-1規定設置兩組風速計	連續取樣率至少1Hz 至少每1秒記錄一次	0 - 70 m/s	≦0.1 m/s
風向	風向	10公尺、30公尺、50公尺、輪轂高度(70公尺以上)	連續取樣率至少1Hz 至少每1秒記錄一次	0°- 360°	≦1°
氣壓	氣壓	10 公尺、輪轂高度(70公尺以上)	連續取樣率至少1Hz 至少每1分鐘記錄一次	500～1100 mb	≦1.0 mb at 0～40℃
氣溫	溫度	10公尺、輪轂高度(70公尺以上)	連續取樣率至少1Hz 至少每1分鐘記錄一次	-40℃～60℃	≦0.1℃
濕度	濕度	10公尺、輪轂高度(70公尺以上)	連續取樣率至少1Hz 至少每1分鐘記錄一次	0.8～100%	≦1%
降水	降雨量	10公尺	連續取樣率至少1Hz 至少每1分鐘記錄一次	4.73 ml/tip	0.5 mm (per tip)
淨輻射量	淨輻射量		至少每1小時記錄一次每次連續量測60分鐘連續取樣率至少為每3秒一次		最大0.01 w/m^2
水位	海面水位		至少每6分鐘量測記錄一次	至少 ±15 m	最大0.01 m
波浪	波高 週期 波向		至少每1小時記錄一次 每次至少連續量測20分鐘 連續取樣率至少為2Hz	波高：至少20公尺 週期：至少30秒 波向：0～360度	波高0.01m 週期0.1 sec 波向0.1度
海流	流速 流向	海床(平均水位)深度小於10公尺：至少觀測水深中層一層；深度大於10公尺至30公尺：至少觀測上、下兩層；深度大於30公尺：至少觀測上、中、下三層	至少每1小時記錄一次每次至少連續量測5分鐘連續取樣率至少為1Hz	至少 ±5 m/s	最大0.01m/s
海水溫度 鹽度 密度	溫度 鹽度 密度	至少涵蓋最低低潮位下1m處一點；深度大於10公尺至30公尺：增設底層一點；深度大於30公尺：增設中、底兩點。	至少每6分鐘量測記錄一次	溫度：至少0～40℃ 鹽度：至少0～40 psu 密度：至少1,000～1,040kg/m^3	溫度：最大0.01℃ 鹽度：最大0.01 psu 密度：0.01 kg/m^3

資料來源：風力發電離岸系統示範獎勵辦法(2012)

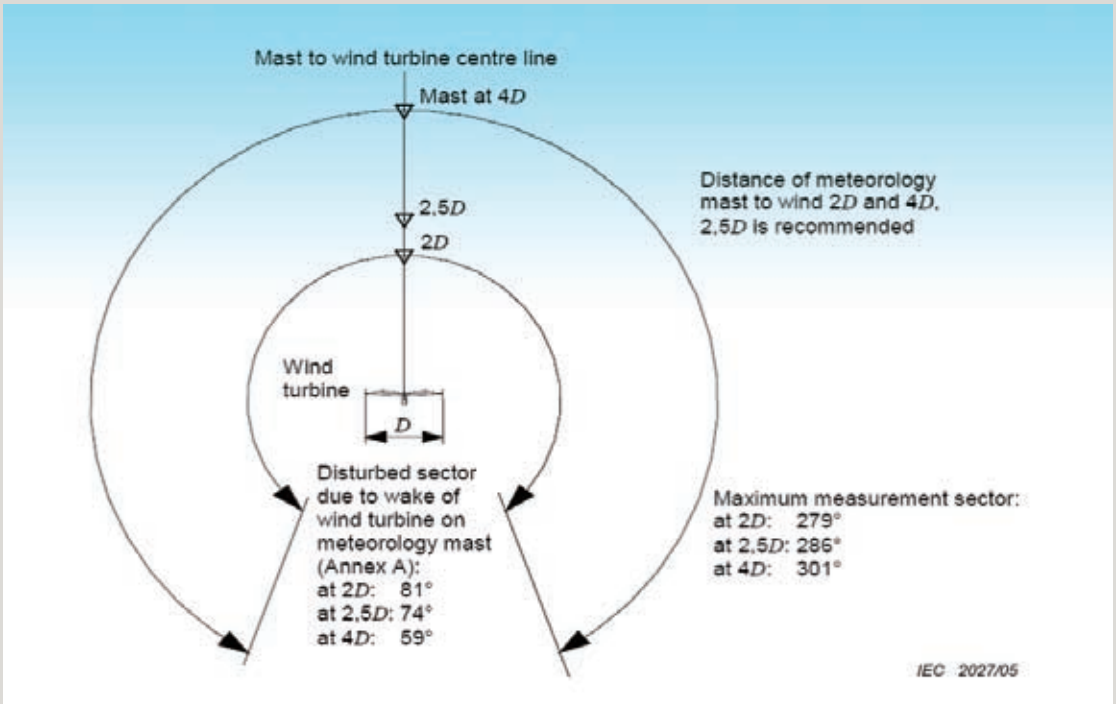
(一)「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」規定：設置地點須緊鄰示範風場規劃區域，並位於10公尺水深等深線以外海域。必須依據當地之海氣象條件、海底地形、船舶安全等特性選擇最佳的設置位置。前述10公尺水深等深線，係以最新版(採最大比例尺)海軍大氣海洋局刊行之中華民國海軍水道圖所示「深度為10公尺等深線」輔以水深地形量測為準。

(二)IEC 61400-12-1規範規定：觀測塔與風機間之距離應介於2～4倍之風輪直徑(rotor diameter)D間，推薦距離為2.5倍風輪直徑(rotor diameter)D，以免過於接近影響下風處受風之風速，或因為距離過遠使二者間之風速相關性減少。一般而言，觀測塔最佳設置地點位於風機的上風處，如圖1所示，其中亦對觀測塔之風速量測有效扇形範圍進行定義，然如受特殊地形之限制，將觀測塔設置於風機的側邊亦為可行的方案。

二、儀器架設相關規定

IEC 61400-12-1對觀測塔上儀器架設之方法有明確的規定，以避免觀測塔主體與固定橫桿(boom)所造成之擾流對量測結果產生顯著的影響。以下將相關之重要規定進行摘要綜整說明：

(一)頂端風速計最佳架設方法：風速計最佳架設位置位於觀測塔頂端且鄰近未架設其他設備，如圖2所示。其中，風速計應固定於一垂直圓桿上，其垂直度偏斜量應小於2°；此圓桿外徑應小於風速計本體且與此風速計進行校正時所採用之固定桿外徑相同，其長度不得少於0.75m；與此固定桿連接之觀測塔本體應堅固、平滑、對稱，且不得超出由風速計向下以1：5斜度投影之圓錐範圍，其他測量儀器則不得架設於風速計下方之1.5m範圍內。



資料來源：IEC 61400-12-1:2005(E)

圖1 觀測塔設置距離要求及最大容許測量扇形大小

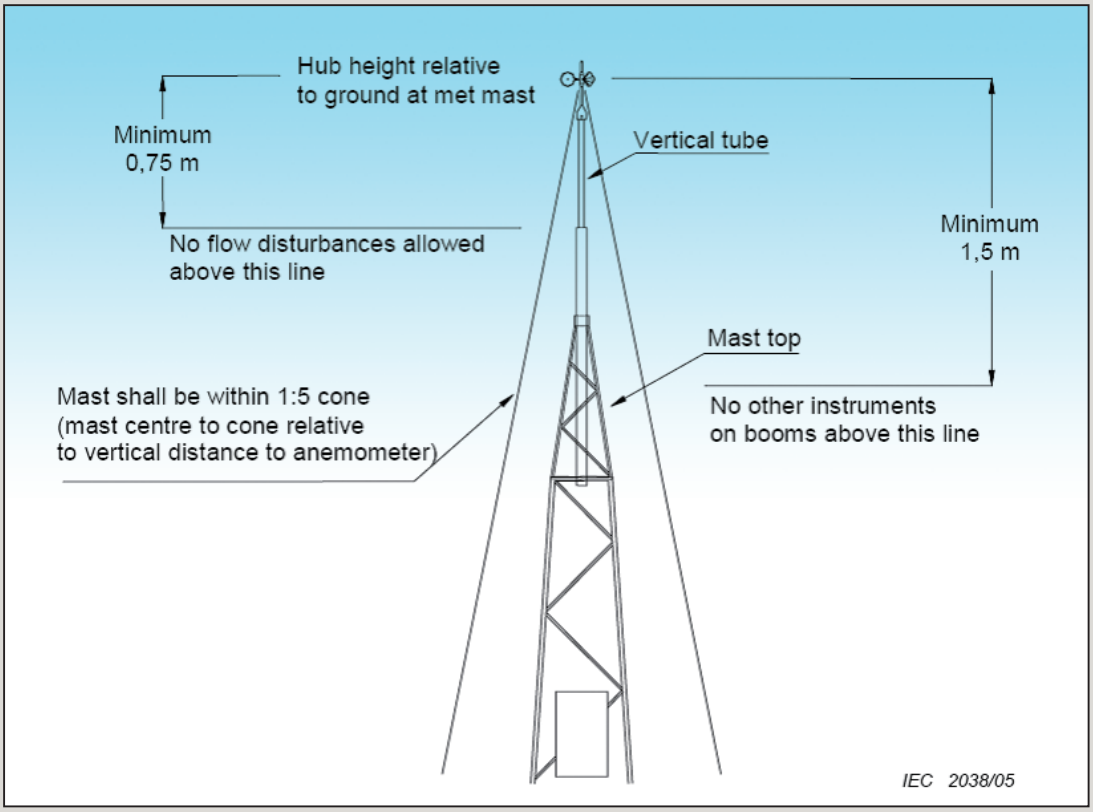
(二)頂端風速計架設替代方法：為確認功率曲線(power curve)測量期間所使用之風速計性能與最初校正時之性能相同，除可藉由測量完成後之再校正程序求得該只風速計之性能是否有衰減外，亦可藉由於主要風速計(primary anemomter)旁另行架設一只檢核風速計(control anemometer)，以確認測量中之風速計是否有故障之情事發生，如圖3所示。其中，風速計風杯(anemometer cups)應固定於固定橫桿(boom)上方至少15倍的固定橫桿直徑高度處，建議高度為25倍的固定橫桿直徑。另二只風速計間之距離至少應有1.5m，但不得大於2.5m。至於風速計之固定垂直圓桿及其他測量設備不得架設範圍同前述之規定。

(三)其他測量儀器架設規定：風向計(wind vane)應位於主要風速計(primary anemometer)下方至少1.5m，但仍需位於輪轂高度(hub height)10%之範圍內且流擾動效應最小處。溫度計與氣壓計應盡量靠近輪轂高度(hub height)，但仍應位於主要風速計(primary anemometer)下方至少1.5m，如圖4及圖5所示。

(四)避雷針架設高度規定：如觀測塔位於可能落雷區，則應設置避雷針以保護最上端之風速計。所設置之避雷針高度應使其所形成之60°保護傘範圍高於所設置之最上端風速計，以達保護功能。

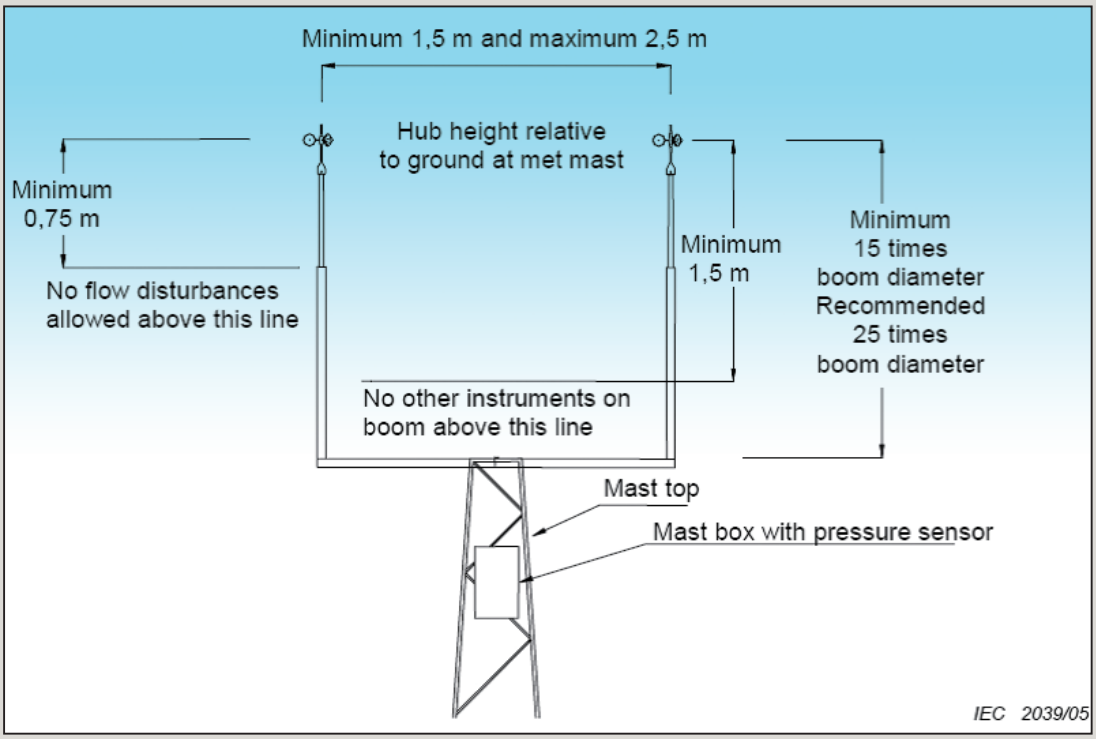
(五)塔架段風速計架設規定：塔架段之風速計一般會以固定橫桿(boom)固定於觀測塔上，由於觀測塔(mast)及固定橫桿(boom)將對行經風場造成流擾動效應，故輪轂高度(hub height)以下之塔架段風速計固定位置應考量此二者對風速計測量結果之影響。就圓管狀固定橫桿(round tubular boom)而言，風速計之風杯高度在固定橫桿(boom)上方15倍的固定橫桿直徑高度時，其對風速計之擾動影響為0.5%，故規範規定固定橫桿(boom)對風速計造成之擾動影響應小於0.5%。另規定觀測塔本身(mast)對風速計造成之擾動影響應小於1.0%；其因觀測塔設置而造成附近風速之變化量，可利用推力係數(thrust coefficient)C_T求得，而規範中亦針對不同格狀塔架(lattice tower)型式，建議其對應之推力係數(thrust coefficient)C_T簡易評估方法，並列舉位於觀測塔上風處中心線之衰減風速(Centreline wind speed deficit)U_d簡易推算公式供參考。在C_T=0.5條件下，三腳圓管格狀塔架附近之正規化理論風速平面分布如圖6所示，可供塔架段風速計架設位置規劃參考。

(六)觀測塔主體形式規劃：依循上述對觀測塔上各項測量儀器之架設規定，即可進行觀測塔主體形式之初步規劃。就觀測塔主體而言，其塔頂高程主要依開發商選定之風力機輪轂高度(hub height)訂定之，並依工作平台(platform deck)設置高程分為上部塔架及下部基礎二大部分。其中，有關工作平台底部高程之訂定原則如圖7所示，其主要考量因素有水深、天文潮位、暴潮水位、設計波浪、餘裕空間(deck clearance)等條件。而另一項規劃重點為觀測塔之設置方向，由於觀測塔主體會對欲進行測量之行經風場造成流擾動效應，故觀測塔及測風儀器之設置需面向當地之優勢方向，如圖8所示。



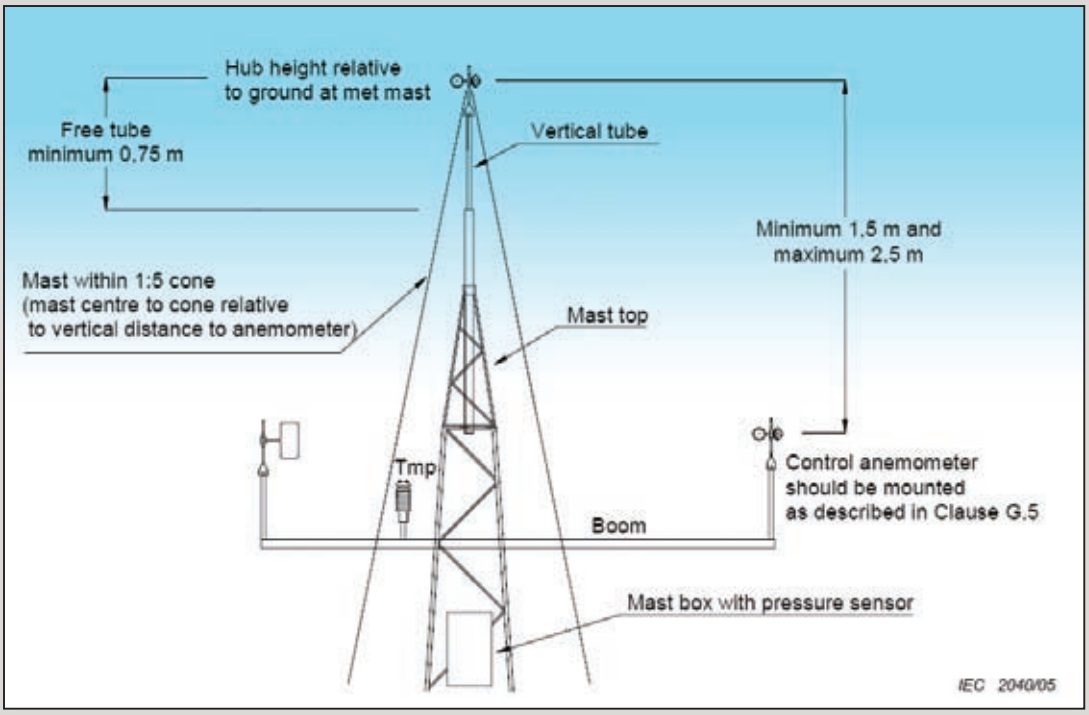
資料來源：IEC 61400-12-1:2005(E)

圖2 頂端風速計架設位置示意圖



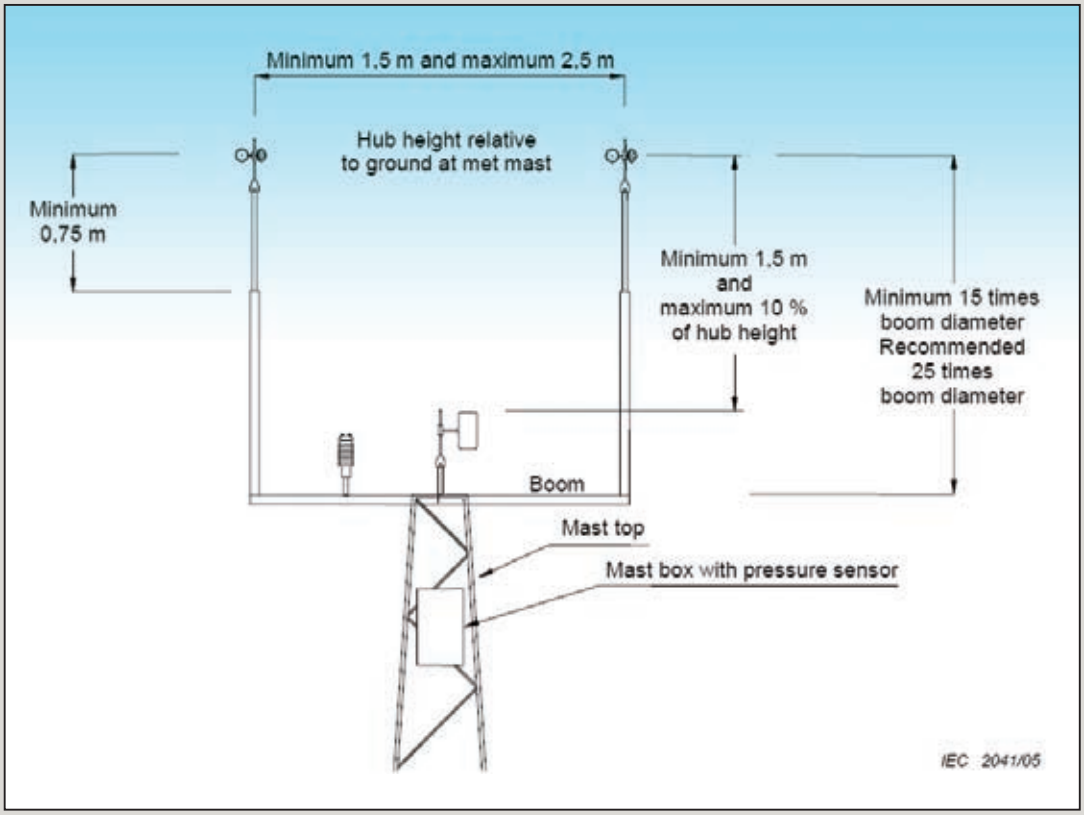
資料來源：IEC 61400-12-1:2005(E)

圖3 頂端風速計架設替代方法位置示意圖



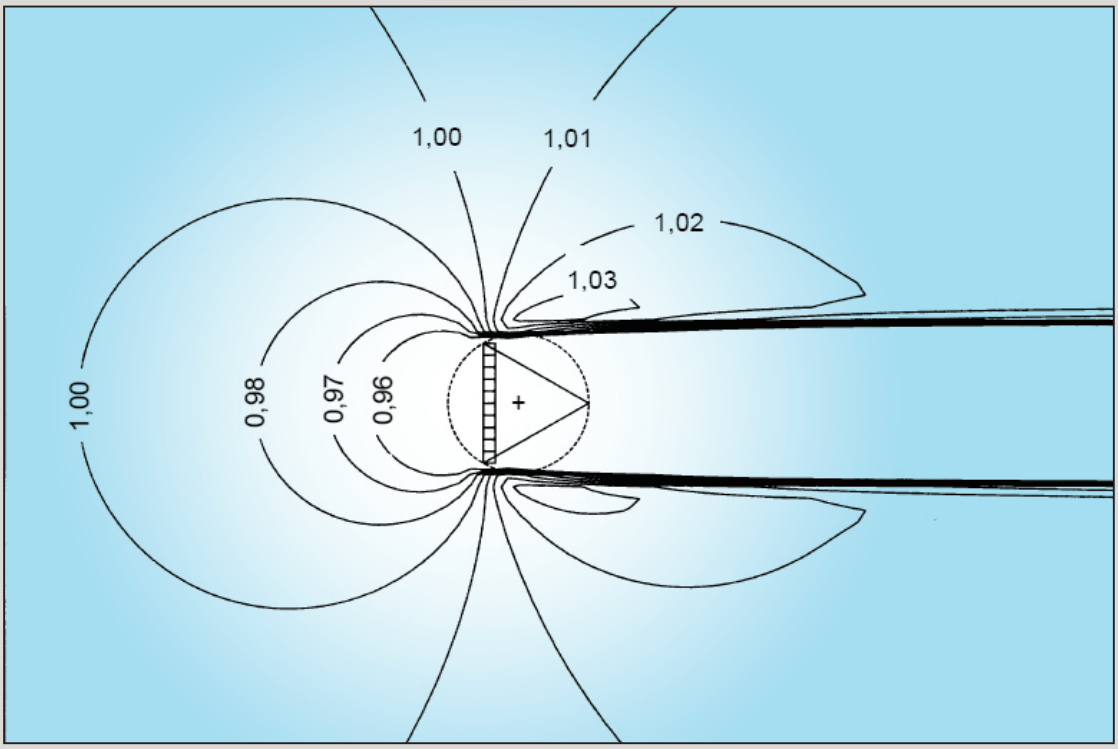
資料來源：IEC 61400-12-1:2005(E)

圖4 頂端及檢核風速計與風向計和其他測量儀器位置示意圖



資料來源：IEC 61400-12-1:2005(E)

圖5 主要及檢核風速計與風向計和其他測量儀器位置示意圖



資料來源：IEC 61400-12-1:2005(E)

圖6 C_T=0.5時三腳圓管格狀塔架附近之正規化理論風速平面分布圖

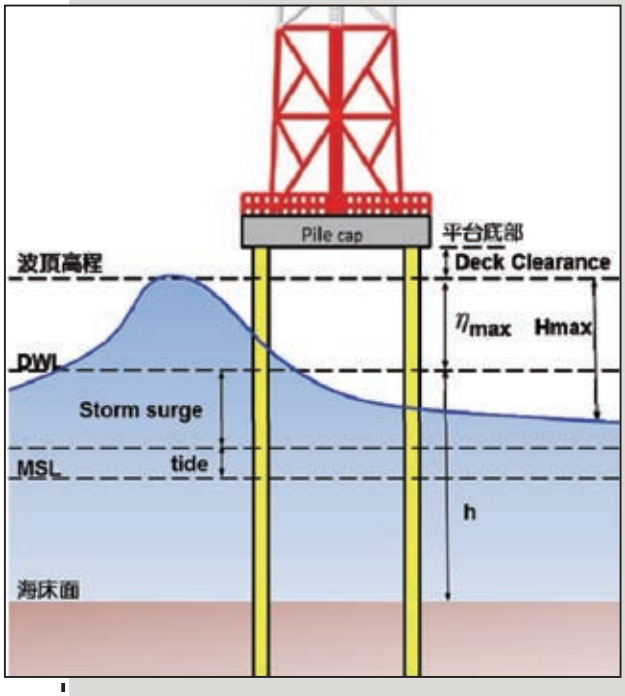


圖7 觀測塔工作平台設置高程訂定原則示意圖

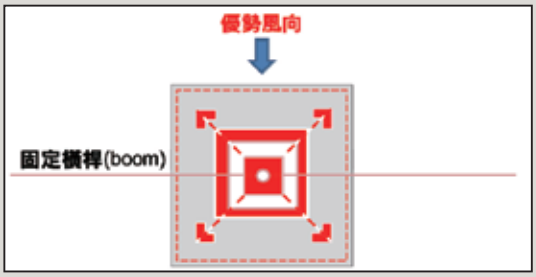


圖8 觀測塔設置方向訂定原則示意圖

肆、海氣象觀測塔設計

一、設計條件擬定原則

依據「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」之規定並參考DNV-OS-J101、IEC 61400-3等規範之相關內容，研擬各設計條件訂定原則如下：

(一)設計年限：7年。

(二)設計水位：考量極端氣候因素，以計畫

區域大潮平均高潮位加上50年復現期之暴潮偏差水位訂定之。

(三)設計水深：依水深測量結果及設置點位訂定之。

(四)地質條件：依設置點位之海床地質調查結果訂定之。

(五)設計波浪：採用50年復現期之颱風波浪Hmax。

(六)設計潮流：採用50年復現期之潮流。

(七)設計風力：採用50年復現期之颱風風速。

(八)設計地震：依最新之「建築物耐震設計規範及解說」訂定之。

二、上部塔架型式擬定原則

上部塔架主要功能為提供氣象觀測儀器安裝使用，並應考慮安裝、運轉階段人員作業需求。蒐集國內外觀測塔相關案例，其結構形式主要有塔筒塔架及格狀塔架(lattice tower)二種型式，格狀塔架結構又有三腳或四腳管柱(如圖9所示)或角鋼等種類，主要需參考施工船機之能量選定之。

三、工作平台擬定原則

工作平台主要功能為連接上部塔架及下部基礎結構，同時須考量工作人員及相關設備之登塔需求，以及測量資料之擷取、整合處理、儲存、傳輸所需之設備與獨立自給之電源供應、備援系統(如風力、太陽能發電設備及電池等)等設備之設置所需空間。

四、下部基礎型式擬定原則

下部基礎之設置主要為滿足承載上部構造物之需求，依計畫場址之水深、地質、海象條件及上部結構下傳力量，參考國內外海氣象觀測塔及風機基礎型式，大致可概分為重力式(Gravity-Based)、單樁式(Monopile)、三樁式(Triple)、群樁式(Pilegroup)、三腳架式(Tripod)及導管式(Jacket)等六種型式，圖10為針對彰化

資料來源：http://www.fino-offshore.de/en

圖9 三腳或四腳管柱格狀塔架觀測塔國外案例

離岸地區具開發潛能風場場址所進行之離岸觀測塔基礎型式初擬結果。選取基礎型式時，主要需參考計畫場址地質條件、基礎造價及施工船機施工能量選定之。

五、基礎附近海床防淘刷保護工擬定原則

一般座落於海中之柱體，因柱體之阻礙，將影響原本流場，造成附近流況相當複雜，導致海床淘刷，進而影響離岸結構物之使用安全。不同之基礎型式、不同海床地質條件及離岸結構物對海床淘刷後之使用安全靈敏度皆不同，一般可先針對淘刷深度及影響範圍進行評估，如基礎設計時尚可容忍海床淘刷對結構物使用安全之影響，則可利用改善基礎結構的方式予以考量；如基礎型式對海床淘刷行為相對敏感，則需設置基礎保護工，以加固基礎附近之海床土壤，以確保結構物之使用安全，如圖11所示。

六、附屬結構設計項目擬定

除主體結構外，離岸海氣象觀測塔尚需設置相關附屬結構，例如：觀測儀器支撐設備、避雷系統、接地系統、航空警示燈、維護工作平台、護欄、安全爬梯、防墜設施、電氣管線、起重機、導航燈標、船隻繫靠設施、防舷材、防蝕系統、照明設備及其他附屬設備等。

七、離岸海氣象觀測塔設計成果

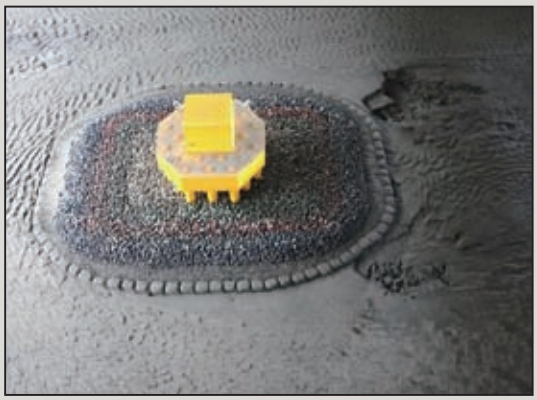
承辦獲經濟部「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」受獎勵人「福海風力發電股份有限公司籌備處」及「海洋風力發電股份有限公司籌備處」委託之離岸海氣象觀測塔設計初步成果如圖12及圖13所示。

伍、結論與建議

因此次離岸風場海氣象觀測塔之規劃及設計為國內首例，在執行過程中，於政府相關法令之規定與依循、國內外相關規範之適用性、國內現有製造及海事工程施工能力、國外施工能量引進可行性、第三認證需求等，皆獲業主、觀測塔建置推動小組，以及產、官、學、

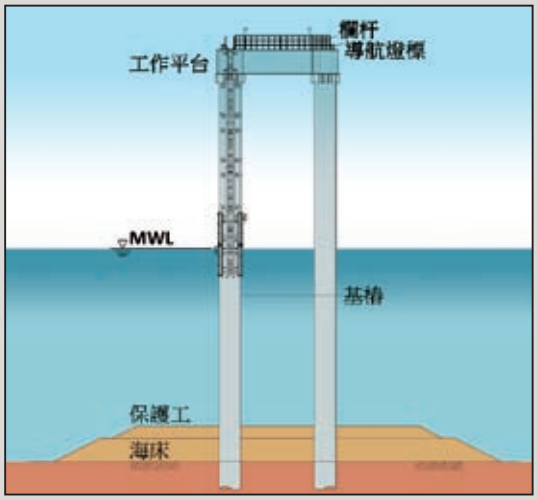
評估指標	Mono Pile	Tripod	4樁+RC台	4樁+鋼台	8樁+RC
平台構造	鋼製	鋼製	RC	鋼製	RC
基樁尺寸	4.5m	1.6m	1.6m	1.6m	1.2m
基樁總長	88m	36m	60m	81m	60m
貫入深度	59m	31m	31m	52m	31m
材料用量	673t	270t	233t	388t	310t
結構系統特性	2	1	2	3	3
本土施工性	3	2	1	2	1
建置成本	3	2	1	3	3
所需工期	1	2	1	3	3

圖10 彰化地區離岸觀測塔不同下部基礎型式初擬結果



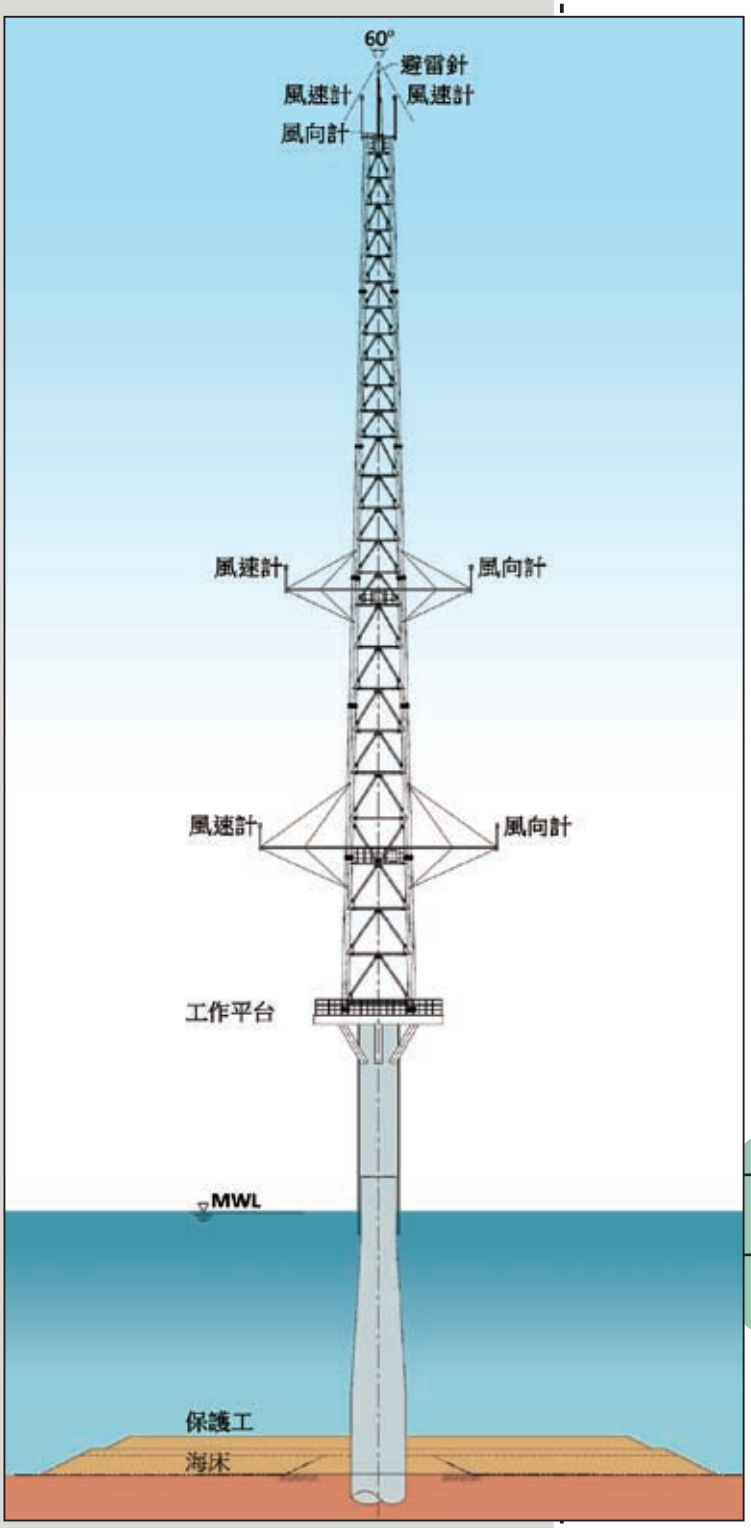
資料來源：金門大橋興建工程委託設計及配合工作—水工模型試驗報告(2011)

圖11 離岸結構物基礎附近海床淘刷及加固保護工示意圖



註：此圖由「海洋風力發電股份有限公司籌備處」授權專用，未經該處許可，不得引用。

圖13 四樁基礎式離岸海氣象觀測塔



註：此圖由「福海風力發電股份有限公司籌備處」授權專用，未經該處許可，不得引用。

圖12 單樁三腳管柱式離岸海氣象觀測塔

研各界先進不吝指教，才有現在如此之初步成果得以呈現，特此致謝。也由於面臨前述相關主、客觀環境的限制，使得觀測塔建置推動小組於成立之初面臨了許多的困難與挑戰。綜整此次規劃設計經驗，提出以下幾點初淺之建議供參考：

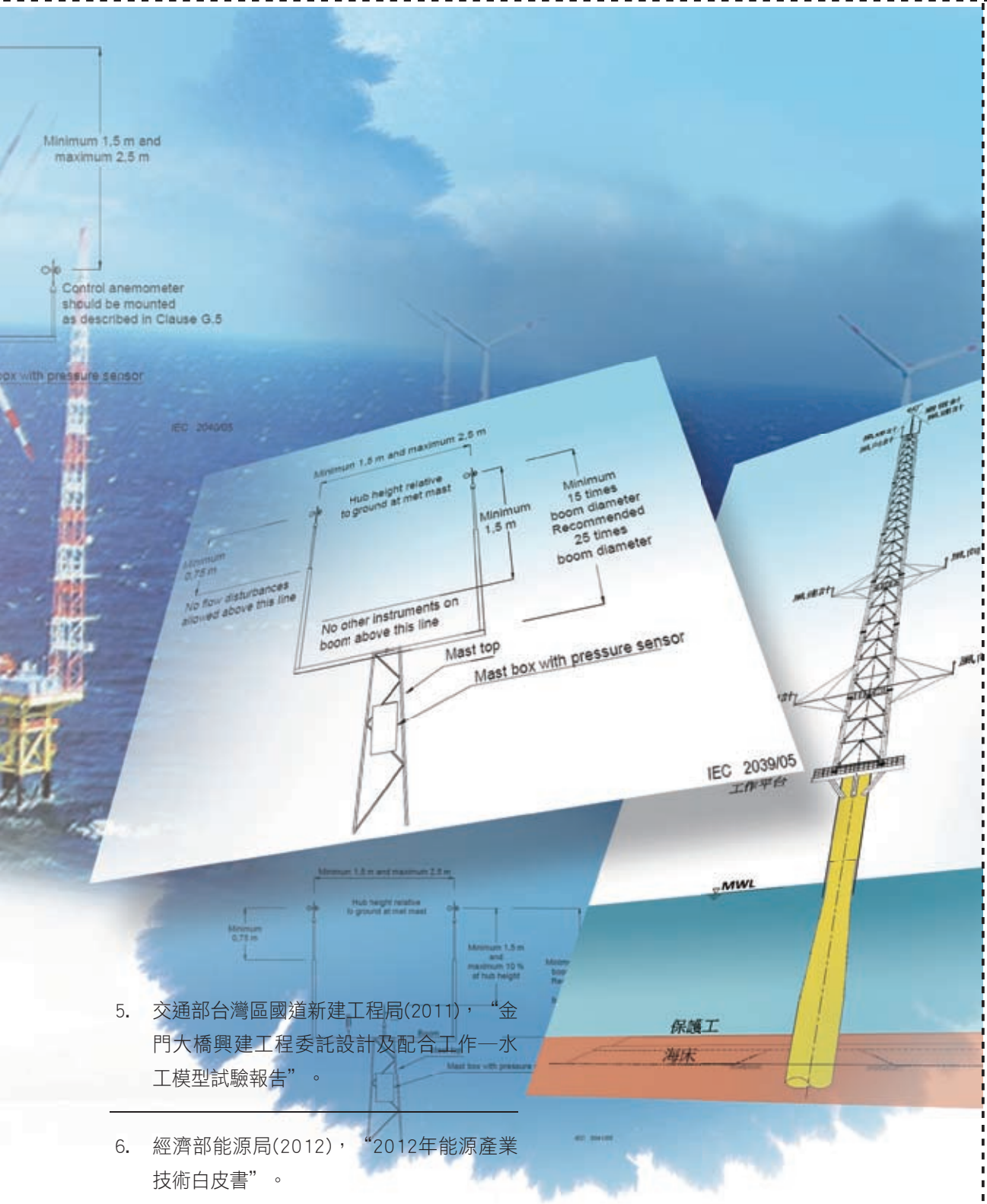
一、風場開發之可行性研究團隊應可續辦海氣象觀測塔之前端工程設計(Front End Engineering Design, FEED)工作，以確認海氣象觀測塔之設計基準及風場效益檢核等之需求。

二、離岸海氣象觀測塔之細部設計、製造、運輸、施工、安裝及運作皆與施工團隊擬採用之船機與施工機具與方法有絕對的關係，建議可採統包方式，由統包商負責綜整相關界面之技術問題，使建置工程最佳化。

三、因觀測塔之觀測資料為評估風場年發電量AEP(annual energy production)之重要依據，如第三認證單位能和統包商於同一階段進入專案組織，兼負細部設計驗證及建造工程見證(或監造)，對後續測量資料品質之提升將具決定性的貢獻。

參考文獻

1. DNV-OS-J101 (2013), “Design of Offshore Wind Turbine Structures”, Det Norske Veritas.
2. FINO1,2,3 http://www.fino-offshore.de/en
3. IEC 61400-12-1 (2005), “Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity”, International Electrotechnical Commision.
4. IEC 61400-3 (2009), “Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines”, International Electrotechnical Commision.



5. 交通部台灣區國道新建工程局(2011)，“金門大橋興建工程委託設計及配合工作—水工模型試驗報告”。

6. 經濟部能源局(2012)，“2012年能源產業技術白皮書”。

7. 經濟部(2012)，“風力發電離岸系統示範獎勵辦法”。