

出國報告（出國類別：洽公）

離岸風機工程技術報告（參訪 日立離岸風力發電製造所）

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳一成/處長

派赴國家：日本

出國期間：105/7/24~105/7/26

報告日期：105/9/12

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：離岸風機工程技術研習報告

頁數 10 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

陳一成/台灣電力公司/再生能源處/處長/04-26580151-8650

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：105/7/24~105/7/26

出國地區：日本

報告日期：105/9/12

分類號/目

關鍵詞：離岸風力、水下基礎

內容摘要：

離岸風場之水下基礎結構多以重力式(Gravity base)、單樁式(Monopile)、三桿式(Tripod)及套筒式(Jacket)為主流，其他諸如三樁式(Tripile)、而吸筒式(Suction bucket)及漂浮式(Floating)基礎型式尚在開發階段，基座設計上，則視不同水深、洋流、地質條件決定基座之種類與尺寸。國內欠缺有關將地震力與颱風等特殊外在環境設計條件納入離岸風機與其支撐結構與基礎之考量，目前並無針對離岸工程適用之耐震設計規範，因此僅能參考內政部營建署「建築物基礎設計構造規範」之建議計算方法，並透過「建築物耐震設計規範及解說」建議，決定設計地震反應頻譜進行地表水平加速度計算，水下基礎結構設計以設計載重、離岸風機環境載重之原則與方法。

目次

一、 研習目的.....	3
二、 離岸風機法規依據.....	3
三、 風機與水下基礎結構型式.....	3
四、 水下基礎結構設計原則與方法.....	7
五、 離岸風力相關規範.....	9
六、 結論.....	10

離岸風機基礎工程技術探討

一、研習目的

臺灣西部海域擁有巨大風力開發潛能，被國際工程顧問公司 4C Offshore 評定為全世界最優良海上風場之一，但也因獨特氣候條件，台灣地區颱風侵襲機率頗高，必須依風況、颱風資料及五十年回歸期推估，待取得完整測風塔資料後方可選定風機規格。另外我國離岸風場環境處於地震帶之地質條件與歐洲不同，雖然歐洲亦有地震災害案例，但多為芮氏規模 3 以下之地震，又因我國西部海域離岸風場海床表層多為疏鬆無凝聚性土壤；土壤條件與歐洲亦不相同，土壤強度遠低於歐洲北海區域，面對我國惡劣的環境條件，歐洲離岸風場成功開發經驗，並無法完全移植至我國離岸風場建置參考引用，爰此，我國欠缺有關將地震力與颱風等特殊外在環境設計條件納入離岸風機與其支撐結構與基礎之考量，此等將為我國發展離岸風機是否順利運轉發電之重要環節，然而台灣目前並無大型離岸風機製造商，因此本次研習地點選定鄰近我國日本，也具有颱風與地震國進行風機相關考察。

二、離岸風機法規依據

颱風引起之負載，目前諸如IEC、DNV GL對颱風並無相關討論，主要是目前已開發風場多不具此氣候條件，而地震引起之負載，目前IEC 61400-1標準中指定應根據當地法令之地表加速及響應頻譜而設定，由於我國目前並無針對離岸工程適用之耐震設計規範，因此僅能參考內政部營建署「建築物基礎設計構造規範」之建議計算方法，並透過「建築物耐震設計規範及解說」建議，決定設計地震反應頻譜進行地表水平加速度計算。故未來將整合我國營建署及IEC標準之要求，制訂適用於我國耐震風力機之設計準則，在此亦建議如我國國家標準CNS可以制定相關規範供開發設計依循亦將正向加速我國離岸風力開發。

三、風機與水下基礎結構型式

風機

風機本身設計參考及分類係依據IEC61400-1，其中依其設計風速可將風機分類成Class I II III三類，另再依擾流等級區分為A B C 三類，以及另依特定設計參數設計之S型等類詳如表1所示，然依目前颱風來襲的強度來看，部分颱風的平均風速已大於 Class I風機的規格，而本次參訪的日立製作所當下所研製的風機即為將設計極端風速提高之S級風機，但由於此等風機非為規格品因此將大大提高風場設置的期初成本，且該S級規範是否合於台灣環境亦有待

詳細分析其設計參數與台灣風況方能了解。

水下基礎

目前市場上離岸風場之水下基礎結構多以重力式(Gravity base)、單樁式(Monopile)、三桿式(Tripod)及套筒式(Jacket)為主流，其他諸如三樁式(Tripile)、而吸筒式(Suction bucket)及漂浮式(Floating)基礎型式尚在開發階段。以下作簡略介紹：

➤ 單樁式(Monopile)

單樁支撐結構基礎為一大口徑鋼管樁，風力機塔架(Tower)藉由法蘭接合(Flanged Connection)或是灌漿接合(Grouted Connection)與基樁銜接，並傳遞上方載重至所承載的海床上，如圖一所示。

單樁式(Monopile)	
特點	<ul style="list-style-type: none">■ 支撐基礎的地質條件屬砂質海床，若地質條件差時可能導致基樁量體過大，或是基樁無法施工(亞洲地區無大樁徑打樁機，勢必採用歐洲施工船隊)。■ 設計及製造簡單，組裝及運輸亦便捷。
應用水深深度	0~25公尺

➤ 重力式(Gravity base)

係基礎型式由巨大之混凝土結構座落於海床面上，藉著混凝土結構本身龐大重量抵抗外在荷重造成支側向力及彎矩，並傳遞上方構造載重至所承載之海床上，使整體風力機組結構維持穩定，如圖一所示。

重力式(Gravity base)	
特點	<ul style="list-style-type: none">■ 支撐基礎的土體強度需要有良好的承載能力，適用於堅硬岩盤或礫石沉積。■ 基礎製作場地及運輸、安裝成本較低。
應用水深深度	10公尺以內

➤ 套筒式(Jacket)

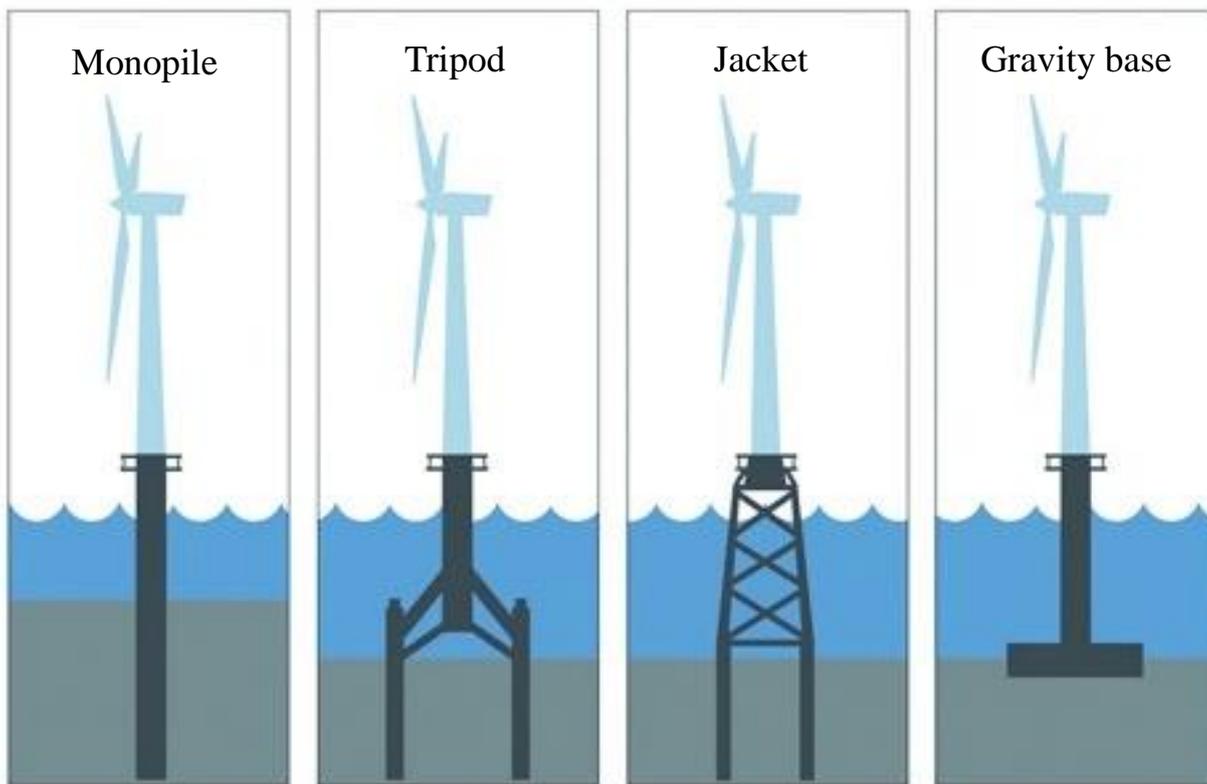
係基礎型式由鋼管(套筒)所組成，彼此間以多根交錯之細長連桿相連接，此鋼構架上方平台設置轉接段以法蘭接合(Flanged Connection)或是灌漿接合(Grouted Connection)與塔架(Tower)連接，海上平台結構多以此型式作為基礎提高安全性，確保人員安全，如圖一所示。

套筒式(Jacket)	
特點	<ul style="list-style-type: none"> ■ 由四根主桿件(Leg)所構成，彼此間藉由套管(Sleeve)與所打設的基樁連接，可減少須承受支流體力，因承載面積大及靜不定度高，可大幅增加穩定性。 ■ 支撐基礎的地質條件，如地質條件不適打擊樁工法者，不適採用本結構形式。 ■ 因基樁打設較為費時，因此施工階段自然環境的氣候、海域靜穩度要求較高。
應用水深深度	40公尺以上

➤ 三桿式(Tripod)

此基礎型式由三支斜桿以放射狀方式於主節點支撐主柱，基樁則通過斜桿底部之樁套筒將斜桿固定於海床上，如圖一所示。

三桿式(Tripod)	
特點	<ul style="list-style-type: none"> ■ 藉較大之承載面積以提升結構整體勁度及抵抗彎矩能力。 ■ 與單樁式(Monopile)相比可有效減少流體之衝擊。
應用水深深度	20~50公尺



資料來源 <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/wind-energy-gets-serial/1012449.article>

圖一 固定式基礎結構型式

➤ 漂浮式(Floating)

以數條繫索將懸浮之結構錨定於底部海床上，利用結構上浮力拉緊繫索，維持整體結構之穩定，如圖二所示。

漂浮式(Floating)	
特點	<ul style="list-style-type: none"> ■ 此基礎型式因懸浮特性，錨鍊容易產生扭轉行為，因此下部結構扭轉勁度須特別注重。 ■ 錨鍊間容易產生瞬間鬆-張之行為，引致高度之局部應力產生。
應用水深深度	50公尺以上



圖二 漂浮式基礎結構型式

四、水下基礎結構設計原則與方法

➤ 設計載重

水下基礎結構與風力機組關係密切並且需先選定風力機組後方能決定水下支撐結構之型式與尺寸，風力機組其外力條件基本上由安裝場地或場地類型決定。而風力機組之等級取決於風速和擾流參數。

表1 IEC 61400-1 風機等級基本參數

參數	Class I	Class II	Class III	Class S
V_{ref} 參考風速(m/s)	50	42.5	37.5	由設計者敘述之參數值 (Values specified by the designer)
年平均風速(m/s)	10	8.5	7.5	
50年3秒鐘極端風速(m/s)	70	59.5	52.5	
Class A I_{ref}	16%			
Class B I_{ref}	14%			
Class C I_{ref}	12%			

備註： I_{ref} 為風速於15m/s時之擾流強度(Turbulence Intensity)

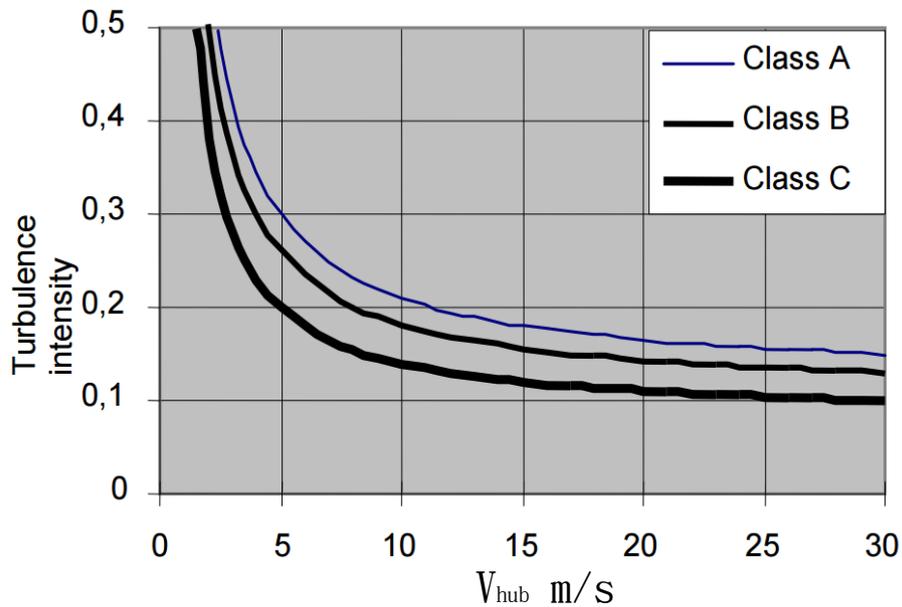
A表示較高擾流等級

B表示中等擾流等級

C表示中等擾流等級

$$V_{ave} = 0.2V_{ref}$$

$$V(z) = V_{hub} (z/z_{hub})^{\alpha} ; \alpha = 0.2$$



圖三 IEC 61400-1 風機等級之擾流強度風速數值比

➤ 離岸風機環境載重

環境載重係依風場所在之氣候、地形、水深及地質條件而定，其中包括風、波浪、海流、地震等，以下就風及地震特性說明。

(1) 風

風力機基礎依設計目的大致可分為常態風載(Normal Wind Condition)及極端風載(Extreme Wind Condition)。目前諸如 IEC、DNV GL 對颱風並無相關討論，主要是目前已開發風場多不具此氣候條件，未來台灣風場開發須將颱風所引致環境載重納入考量，另外也須配合 IEC 規範所描述風力載重釐清東北季風特性。

表 2 離岸風力機載重分類表

	常態風載 (Normal Wind Condition)	極端風載 (Extreme Wind Condition)
--	--	---

載重 分析	疲勞載重 (Fatigue load)	極限載重 (Extreme load)
風載 定義 參數	<ul style="list-style-type: none"> ■ 空氣密度 ■ 10 分鐘平均風速(long term distribution) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 極端氣候條件空氣密度 ■ 極端氣候之風速 ■ 風速、風向急遽改變參數

(2)地震

結構物及其構造物耐震設計採用之設計可採用以 475 年回歸期之強地動水準為標的，即考慮使用年限為 50 年下，超越機率 10%的強地動水準；主要結構物安全評估採用最大考量地震(MCE)，可以 2500 年回歸期之強地動水準為標的，即考慮使用年限為 50 年下，超越機率 2%的強地動水準。目前國內既有耐震規範—「建築物耐震設計規範及解說」，係針對陸域建築及橋梁結構訂定，離岸風力機組結構形式並無明確規定。

五、離岸風力相關規範

經由本次研習參訪過程中，日立製作所提供了相關離岸相關規範經整理後，可大概整理出 IEC 系列 DNV 系列以及 ISO 系列等，另外因為日本特殊颱風與地震條件下亦有發展出日本自己特有的相關規範，此部分有關颱風與地震的相關規範非常值得我國學習與參考。

表3 國際離岸風力相關規範表

規範	備註
IEC 61400-1	Wind Turbines-Design requirements
IEC 61400-3	2009-Design Requirements for Offshore Wind Turbines
IEC TC 88	Assessment of earthquake loading
DNV-OS-J101	2013-Design of Offshore Wind Turbines
DNV-RP-C203	2010-Fatigue Design of Offshore Steel Structures
ISO 19901-2	2004—Specific requirements for offshore structures

六、結論

雖台灣海峽西北部海域之風能條件相當良好，但由於台灣地區特性如颱風、東北季風、地震頻繁等關鍵問題較北歐地區截然不同，設計難度更甚於北歐地區，目前日本於設計風機考量颱風與地震等特殊環境因子正處於領先地位非常值得有方借鏡參考。然而這些特殊條件在目前國際規範或準則中並無確切之相關規定，因此當下恐無法直接成為歐洲風機主要供應商遵循之設計依據，短期內仍無法規格大量生產，因此S型風機之期初成本將仍居高不下；另外台灣沿海之海域資料包括颱風與地震強度、生態環境基本資料庫尚未建置完整，在離岸風力發電設計條件中有關極端風速、地震強度與海生物附著所產生之影響等問題，仍需進一步深入研究，在取得確切數據後方能規畫出專屬台灣環境的S級風機，在此條件下未來離岸風場開發之經濟與環境間取得平衡。

附錄 參訪照片

參考文獻

1. IEC 61400-1 Wind Turbines-Design requirements
2. IEC 61400-3 2009-Design Requirements for Offshore Wind Turbines
3. 台電離岸風力發電第一期計畫可行性研究
4. 台電離岸風力發電第一期計畫技術服務工作-設計地震評估報告
5. 中國工程師學會會刊-專題報導