

出國報告（出國類別：實習）

（裝訂線）

# 「赴丹麥及英國學習離岸風力發電規畫施工及運轉維護實習」報告

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：徐文科/十等機械工程監  
王平貴/十等電機工程監

派赴國家：丹麥與英國

出國期間：102/05/04~102/06/15

報告日期：102/08/02

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴丹麥及英國學習離岸風力發電規畫施工及運轉維護實習

頁數 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

徐文科/台灣電力公司/再生能源處/課長/04-26580151-3210

王平貴/台灣電力公司/再生能源處/課長/04-26580151-3320

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他(開會)

出國期間：102/05/04-102/06/15

出國地區：丹麥與英國

報告日期：102/08/02

分類號/目

關鍵詞：離岸風力、海底電纜

內容摘要：

離岸風電場之建置與開發概分為可行性評估、設計、建造與施工、營運與維護等階段，其中，離岸風場之開發可大略分為可行性評估(Feasibility Assessment)、主要次系統設計(Component Design)、風電廠建造(Construction)、營運維護(Operation & Maintenance)四大階段，各階段的主要技術以圖 1 之技術關聯圖顯示，圖 2 為國內目前與離岸風電產業相關之廠商，由圖可知，國內目前之產業體系大多可跨至離岸風場建置，唯在前期規劃如環境影響評估、風場布局、施工規劃以及施工計畫管理上較不具備能量，故這些項目為亟待發展之技術項目，圖 1 中紅色標示者為規劃優先要引進與技術建立之項目，包含離岸風場之初階設計(Preliminary Design)、風險評估(Risk Assessment)以及施工階段之計畫管理(Project Management)。

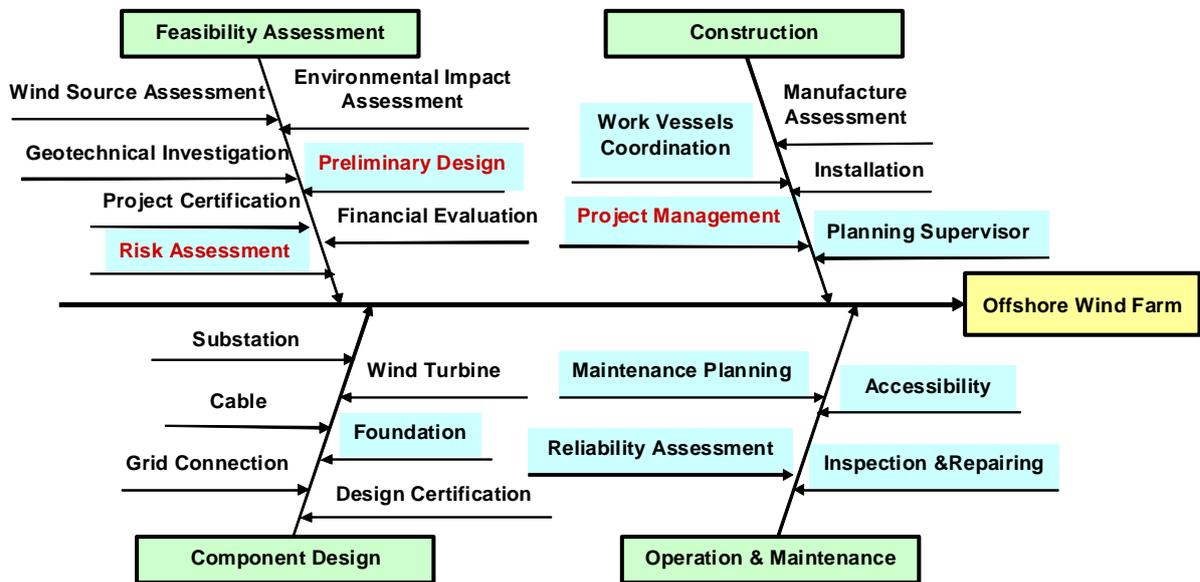


圖 1 離岸風場開發之技術關聯圖

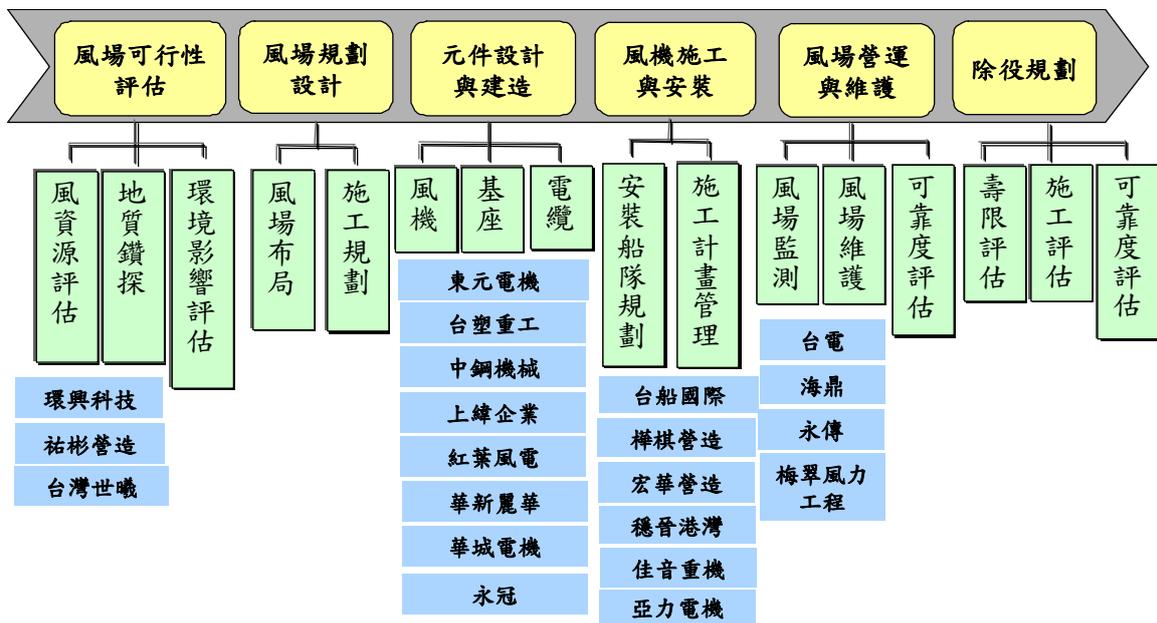


圖 2 國內目前與離岸風電產業相關之廠商

其中，初階設計係指風場之前期工程與設計 (Front End Engineering & Design-FEED)，其在建立風場開發計畫之可行性評估能力，以及進行至施工階段前之各項規劃設計，涵蓋內容相當廣泛，為計畫成功之最重要基礎，如風場之布局(Layout)即為其中一項重要項目，包含風資源評估與利用，風機規格、數量、布置方式之最佳化配置等，

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；風險評估泛指一切風場建立與營運時有關健康與安全之項目，舉凡航道、基座穩定、工作平台撤離規劃等均包含在內，大體而言，需含風險因素識別、風險項目量化、安全運作系統評估等項目，為一高度整合之技術；施工之計畫管理，則指施工階段之 EPC(Engineering、Procurement、Construction)規劃，含工程設計與施工資源之整合；牽涉現有機具、載台下，風力機之運輸與組裝方式、施工船之使用與時程規劃等項目。

本次訓練即在加強此方面之技術能量。

本報告內容主要在於說明建置離岸風場實務程序如下：

風場選擇與可行性評估(Site Selection & Feasibility)

先期設計與全期工程規劃(Pre-design & FEED)

歐洲離岸風場實例探討(Lessons Learned from European OWF)

風場計劃管理(Project Management)

WindGIS 技術轉移

另對於離岸風電廠址的選擇、機組及海底電纜之規劃，亦說明本次實習所蒐集之相關資料，包含：海底電纜種類、試驗、安裝及接續；離岸風力機組接地系統及安裝設施與設備等。

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 壹、目的與任務.....   | 5  |
| 貳、行程簡介.....  | 6  |
| 參、實習公司簡介.....  | 7  |
| 一、NIRAS.....   | 7  |
| 二、Garrad Hassen .....  | 9  |
| 三、Mott MacDonald.....  | 10 |
| 四、Wood group/Sgurr Energy .....                                    | 10 |
| 肆、實習內容概述.....  | 12 |
| 一、風場選擇與可行性評估(Site Selection & Feasibility).....                    | 12 |
| 二、先期設計與全期工程規劃(Pre-design & FEED).....                              | 15 |
| 三、歐洲離岸風場實例探討(Lessons Learned from<br>European OWF).....            | 16 |
| 四、海底電纜種類、試驗、安裝及接續 (Types、Test、<br>Installation & Connection) ..... | 20 |
| 五、離岸風力機組接地系統.....  | 27 |
| 六、離岸設施與運輸安裝設備.....   | 27 |
| 七、經濟分析模型.....  | 33 |
| 伍、心得與感想.....   | 37 |
| 柒、建議事項.....  | 38 |

## 壹、目的與任務

本公司近年來配合政府推動再生能源計畫，積極辦理風力發電及太陽光電等工程之新建，尤其以風力發電之效益為最大，考量本島陸域風機之新建已趨於飽和，離岸風力之新建對於政府推動再生能源的目標，的確是一項新的里程碑，有鑑於過內對於離岸風力工程相關資訊及經驗組織缺乏，遂於配合「財團法人船舶暨海洋產業研發中心」赴丹麥及英國，分別就「離岸風場開發規劃」及「離岸風電場建置與海事工程發展」等技術申請工業合作推動計畫(Industrial Cooperation Program-ICP)與科專計畫，並與英國 TWI、丹麥 NIRAS 等在離岸風場開發與維運上具備相當實績之機構進行實習。為加強技術學習及增進實際經驗以應用於國內離岸風場之開發，因此前往歐洲參加 ICP 第二階段訓練以了解建置離岸風場實務程序，受訓內容包含以下部分：

風場選擇與可行性評估(Site Selection & Feasibility)

先期設計與全期工程規劃(Pre-design & FEED)

歐洲離岸風場實例探討(Lessons Learned from European OWF)

風場計劃管理(Project Management)

WindGIS 技術轉移

另本公司自行拜訪英國 Garrad Hassen、Mott Hassen 及 WoodGroup/Sgurr 等三家離岸風力顧問公司，對於廠址的選擇、機組及海底電纜之規劃，亦蒐集相關之資料用。

## 貳、行程簡介

| 日期         | 主要行程內容                 |
|------------|------------------------|
| 102年05月04日 | 往程(台北—阿姆斯特丹—哥本哈根)      |
| 05月06日-17日 | Niras (Denmark) 上課與實習  |
| 05月18日-24日 | Niras (UK)上課與實習        |
| 05月25日-31日 | Garrad Hassen(UK)實習    |
| 6月01日-07日  | Mott MacDonald(UK)實習   |
| 6月08日-14日  | Wood Group/Sgurr(UK)實習 |
| 6月15日      | 返程(愛丁堡—阿姆斯特丹—台北)       |

## 參、實習單位簡介

### 一、NIRAS

NIRAS 為一大型綜合工程顧問公司，由 Jørgen Kristian Nielsen and Konard Rauschenberger 兩位工程師於 1956 年在丹麥成立，經過多年的發展及淬鍊，NIRAS 已成長為大規模且可提供多元性工程服務之公司，涉及之領域有建築及工業、能源、交通、營造及周邊建設、環境及氣候變遷、發展規劃顧問、公共設施等。

現在 NIRAS 總公司仍設在丹麥(圖 1)，但在全世界各地設有分支機構，共有約 1300 個員工，提供廣泛領域的工程服務；在離岸風場開發上，NIRAS 於 1989 年即參與丹麥第一個離岸風場案之顧問工作，自此即持續地參加離岸風場開發的相關工作，現在這個部門的人力已經擴充規模，且發展出的技術專長領域，涵蓋由初始風場的評估階段開始一直到建造營運及除役的各個階段，有相當多風場開發實績(圖 2)，目前已僱用超過 50 位曾經參與離岸風場計畫的員工，專長且有實績者包含下列所列項目：

- 技術及財務可行性分析(Technical and financial feasibility studies)
- 環評/環境管控(EIA / ES - management - screening - consent)
- 離岸探測及建模 (Offshore investigations and hydraulic modelling)
- 海上輸運及儲運港口管控(Load out and storage Port Management)
- 供應鏈(Supply chain)
- 前期工程研討(FEED studies)
- 基礎研討及前期工程設計(Foundation studies and FEED design (all types))
- 基礎細部設計(Detailed Foundation Design (piles, jackets and gravity foundation))
- 高壓電網路設計(HV Design)
- 風力機選擇(WTGs)

- 設計、材料、製造及安裝規範(Design, Material, Fabrication and Installation Specifications)
- 製造品管(Fabrication Assurance)
- 陸上及海上監造(On- and Offshore Monitoring/Inspection)
- 設計品質 / 公安衛 / 風險評估 / 介面管理 (QA / HSSE / Risk assessments/Interface register)
- 營運及維護(O&M)
- 合約管控策略 (Contractual in general (EPIC/EPC/O&M..), strategy)
- 啟用及除役(Commissioning and Decommissioning)
- 基礎及風力機認證(Certification, foundation and WTG's)
- 計劃管理(Project Management)
- 成本估算及成本控制(Cost Estimating and Cost Control)
- 計畫進度規劃(Project Scheduling)
- 意見管理(Claim Management)



圖 1 NIRAS 丹麥總部



圖 2 NIRAS 在風場開發上之實績

## 二、Garrad Hassen

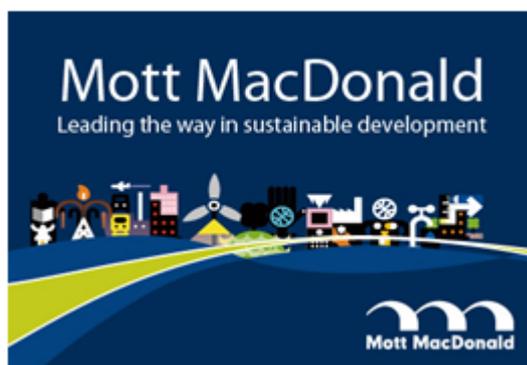
GL Garrad Hassen 為國際性知名大型能源顧問公司，其除提供相關 (offshore wind)、海浪 (wave)、潮汐 (tidal) 與太陽能 (solar) 獨立工程技術設計與產品服務外，並提供能源領域中相關專業相關訓練課程，GL 發展的風力發電相關應用軟體 - Blade 更是風力發電機開發設計階段經常使用的設計軟體之一。其在離岸風力發電專業上協助相關製造商、投資者、開發商 (擁有者)、運轉單位及相關政府提供專業服務，其可提供有關離岸風電服務範疇包含：可行性研究、開發設計、契約管理、建造以及後續運轉維護等工作，截至目前為止其參與建置之離岸風力總裝置容量合計達 12.6GW 以上。



### 三、Mott MacDonald

Mott MacDonald「莫特麥克唐納」為國際工程顧問公司，擁有超過 15000 名員工，業務遍佈 140 多個國家，年營業額達到 10 億英鎊，服務內容包含油氣、交通、能源、建築、水和環境到衛生和教育、工業和通信等眾多領域。其本身具備雄厚的技術實力、跨學科的專業優勢、廣闊的服務領域和遍佈全球的資源，此公司為世界頂尖的跨領域諮詢公司之一，為眾多公共部門和私營客戶提供管理、工程和發展方面的解決方案。

以離岸風電產業來看莫特公司提供的專業服務涵蓋環境(Environmental)、發電量分析(Energy yield analysis)、風機技術(Wind turbine technology)、基礎(Foundations)、電氣(Electrical)、契約(Contractual)、供應鏈(Logistics & supply chain)、建造(Construction)、運轉維護(Operations & maintenance)、許可(Permitting)等全生命週期技術服務，其參與建構的風場計有 Princess Amalia (Q7) Offshore Windfarm 與 Cruach Mhor Windfarm, UK 等，在歐洲地區參與建置之離岸風力總裝置容量合計達 5GW 以上。



### 四、Wood Group/Sgurr.Energy

峰能(Sgurr Energy)為國際獨立再生能源技術顧問，其總部位於英國格拉斯哥超過 125 名專門負責可再生能源領域的工程師和技術顧問，服務範圍包含先期計畫中廠址選擇、可行性研究、相關設計等並可涵蓋計畫執行管理、現場監造以及風場完工後之運轉維護工作；其主要提供相關能源服務範疇計有：陸上風電(Wind)、海上風電(Offshore Wind)、潮汐及海浪發電(Wave & Tidal)、太陽能(Solar)、生物質能(Bio-energy)、水力發電(Hydro)。截至目前為止峰能顧問公司直接參與逾 65GW 裝置容量的再生能源設計相關專案。



## 肆、實習內容概述

### 一、風場選擇與可行性評估(Site Selection & Feasibility)

本課程包含四個相關主題，主要針對建置離岸風場前應執行的各項評估，如風場風資源及年發電量評估、經濟評估、纜線鋪設及變電站設置評估…等。

#### 1. 風場風資源及年發電量評估

此課程由講師 Mr. Tony Bergoe 講授，內容有關場址選擇後，若在沒有測風塔實測資料的情況下，可先使用美國國家大氣研究中心(NCAR - National Center for Atmospheric Research)高密度全球網格計算資料以每六小時平均風速來進行相關風資源及風場發電量評估，如圖 3 至圖 5 所示，並經過豐沏特性(Wind Shear)如公式(1)，將 10 公尺高度測量風速推至輪轂高度，其中  $h_{hub}$  代表輪轂高度， $z_0$  代表表面粗糙度，而海面上風平浪靜時通常代入 0.0001m。

$$U_{hub} = \frac{U_{10}}{\ln\left(\frac{h_{10}}{z_0}\right)} \cdot \ln\left(\frac{h_{hub}}{z_0}\right) \quad (1)$$

取得風速資料後可配合市面上可取得的離岸風機相關特去曲線，來進行相關評估。比如可搭配 VESTAS 3.0MW、3.3MW 及 Siemens 3.6MW、6.0MW 等目前主流離岸風機廠牌與機型，他們相關功率曲線(各風速下相關之發電量關係圖)如圖 4，並參酌考慮風場營運時之相關年可用率、電網損耗、風機尾流損失…等損耗，即可初步推估開發風場選用各型風機之相關年發電量，並根據此結果來選擇較適合之風機機組，以此例風況特性風頻分佈及機組價格等參數為參考的條件下，本風場根據以上條件評估結果為 VESTAS 3.3MW 年發電量較佳。

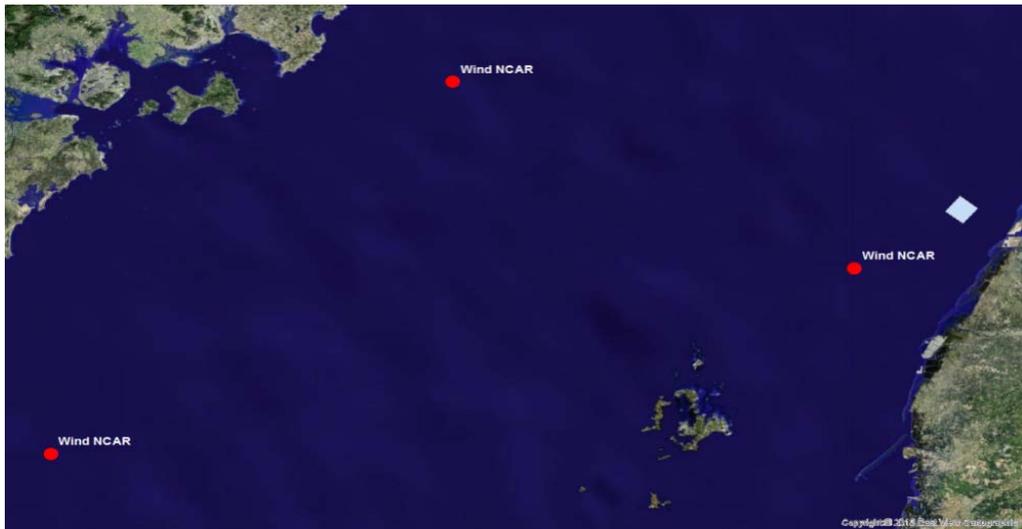


圖 3 NCAR 風速資料位置

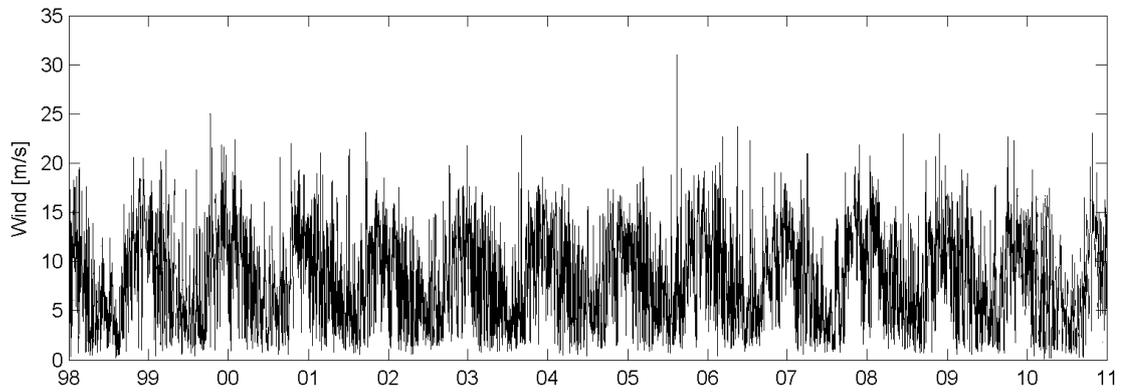


圖 4 1998 年至 2011 年風速統計

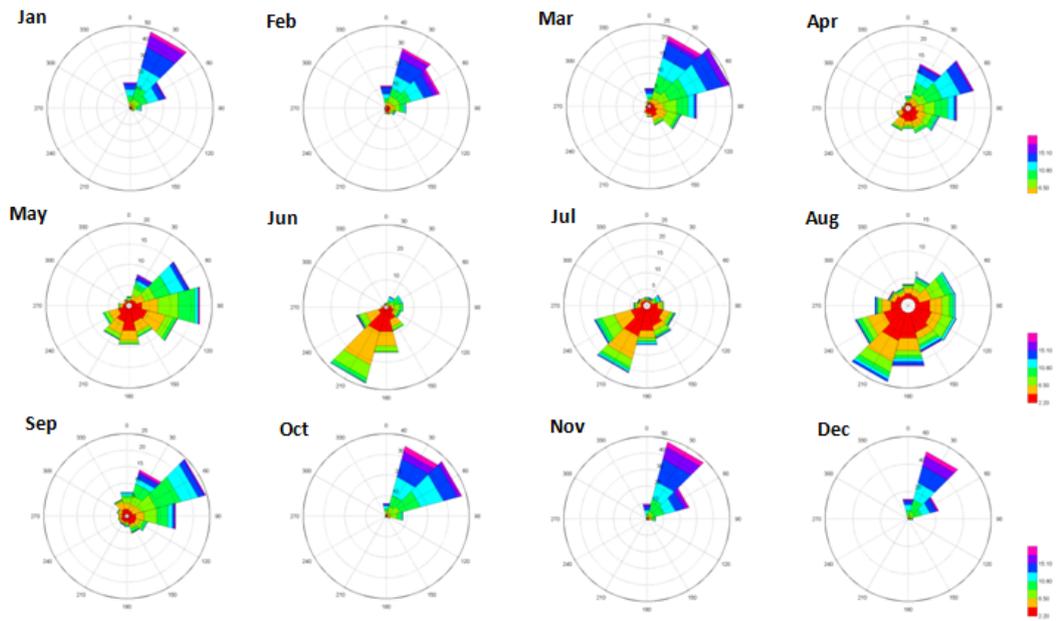


圖 5 各月分風速及風向統計

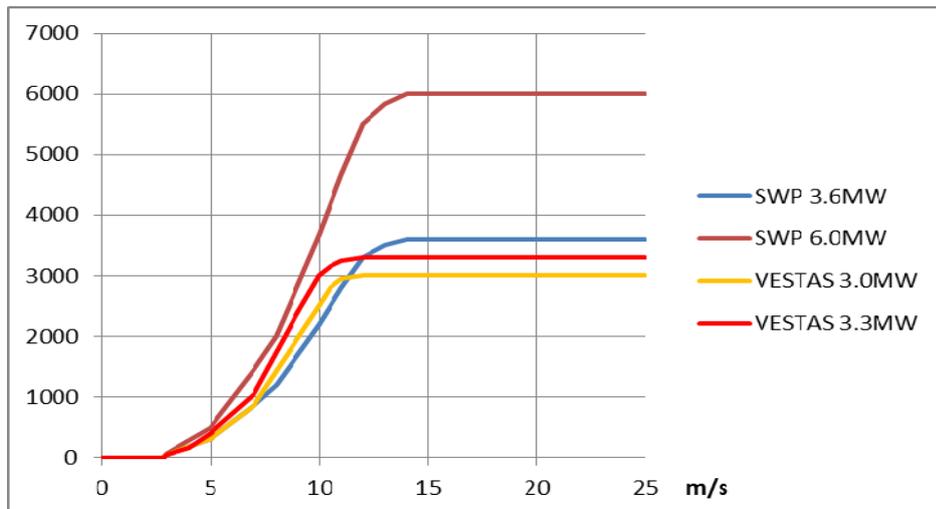


圖 6 常見離岸風機功率曲線

## 二、先期設計與全期工程規劃(Pre-design & FEED)

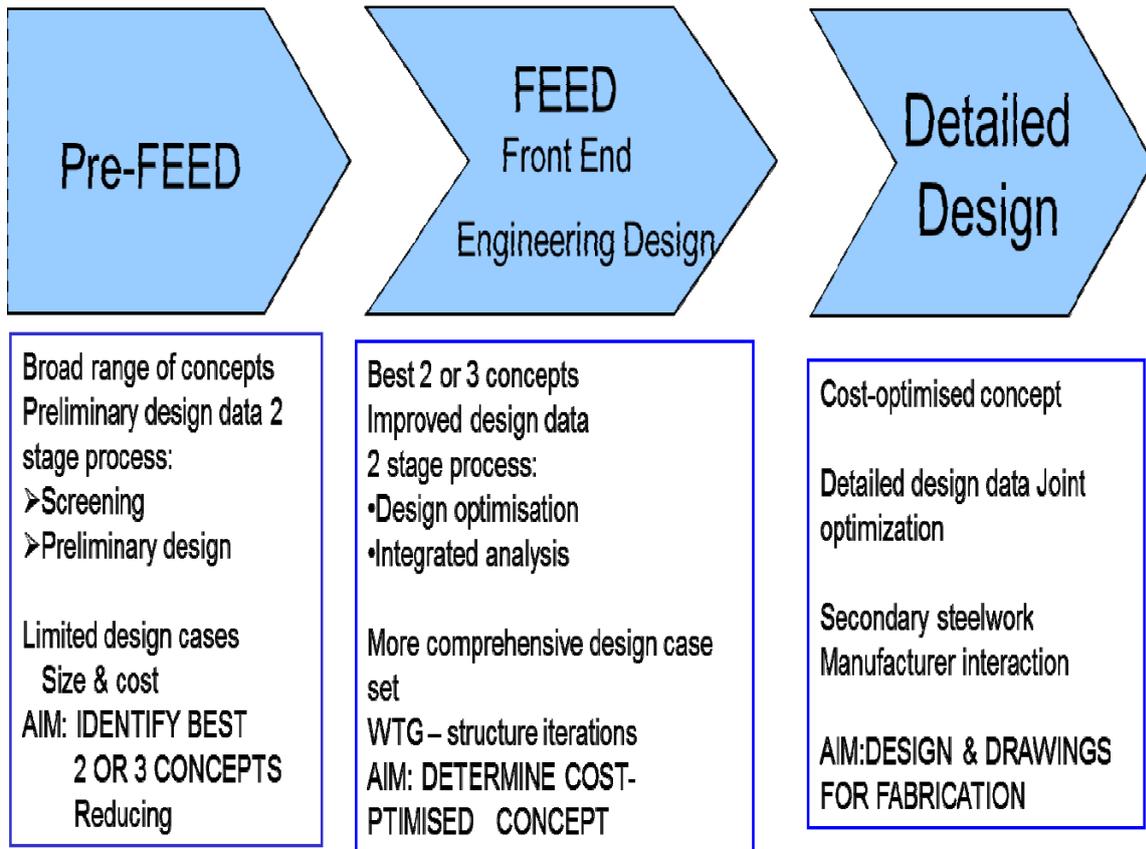


圖 7 風場設計開發階段圖

### 三、歐洲離岸風場實例探討(Lessons Learned from European OWF)

表1 英國離岸風力彙整表

|             |   |
|-------------|---|
| <b>專 案</b>  | <b>20</b>   |
| <b>發展計畫</b> | <b>Round 1~3</b>  |
| <b>機組數量</b> | <b>973台 ( 已運轉 )</b>   |
| <b>裝置容量</b> | <b>3,321MW ( Jun 2013 )</b>   |
| <b>年發電量</b> | <b>8,000,000,000,000Wh</b><br><b>約可供應2 million homes電力之需求</b>   |
| <b>未來目標</b> | <b>Around 8GW of capacity installed by 2016.</b><br><b>Around 18GW of capacity installed by 2020.</b> |

英國離岸風場建置遭遇的問題，第一階段由 2001 年開始，位於近岸及淺水(約 5m 至 15m)，共有 15 個計畫申請，目前已有 11 個離岸風場正在營運，3 個初期申請即被撤銷，離岸風場 Teesside(62MW)預計 2013 年第二季開始營運。第二階段則由 2002 年開始，位於水深較深之區域(約 15m 至 25m)，共有 17 個計畫申請，有 7 個離岸風場已經在營運階段，僅有 1 個被撤銷。

#### (一) 發展期程：

英離岸風力發展分為 Round1~Round3 等三個期程，另蘇格蘭政府亦積極發展離岸風場，其相關期程、計畫及布置如下表：

表2 英國離岸風力各階段發展期程與水深情形

|   |                      |                       |
|---|----------------------|-----------------------|
| <b>Round1 (1.5GW)</b>   | <b>2001 launched</b> | <b>Shallow(5~15m)</b> |
| 15 Projects : 3 withdrawn, 11 operational and one still under construction (Teesside 62MW)    |                      |                       |
| <b>Round2 (7.2GW)</b>   | <b>2002 launched</b> | <b>Deeper(15~25m)</b> |
| 17 Projects : 1 refused, 7 operational, 6 approved, 1 in application and 2 under construction |                      |                       |
| <b>Round3 (33GW)</b>  | <b>2010 launched</b> | <b>Offshore</b>       |
| 9 Zones : 6 pre-application, 3 have submitted the first project to the competent authority    |                      |                       |

|                                |               |          |
|--------------------------------|---------------|----------|
| Scottish(5GW) across<br>6 site | 2012 launched | Offshore |
|--------------------------------|---------------|----------|

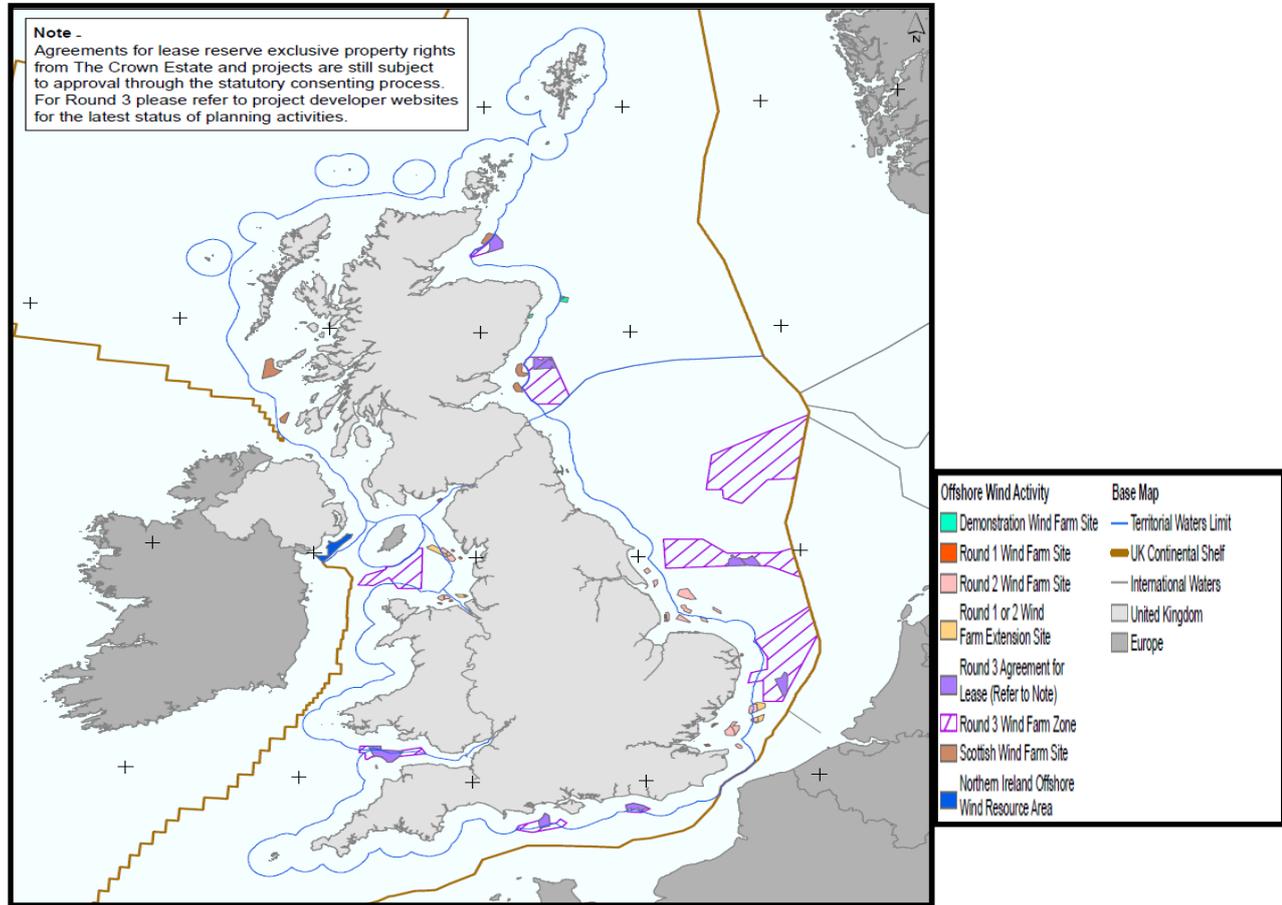


圖 8 英國離岸風力分佈圖

## (二) 機組型式

英國離岸風場目前使用之機組廠牌有 Vestas、Siemens 及 Repower 等三種型式如下表，未來離岸風場場址之機組選擇，將朝單機容量更大之機組裝設。

表 3 英國離岸風機及基礎使用統計表

| 製造廠商    | 型號          | 容量 (MW) | 數量  | 基礎型式     |
|---------|-------------|---------|-----|----------|
| Vestas  | V66         | 2.0     | 2   | Monopile |
| Vestas  | V80         | 2.0     | 60  | Monopile |
| Vestas  | V90         | 3.0     | 220 | Monopile |
| Siemens | SWT-2.3-93  | 2.3     | 27  | Monopile |
| Siemens | SWT-3.6-107 | 3.6     | 431 | Monopile |
| Siemens | SWT-3.6-120 | 3.6     | 226 | Monopile |
| Siemens | SWT-6.0-120 | 6.0     | 2   | Monopile |
| Repower | 5M          | 5.08    | 32  | Jacket   |

## (三) 英國離岸風場建置遭遇的問題

英國離岸風場建置遭遇的問題，基本上第一、第二階段均已建置 10 年以上，但都還未完全進入營運階段，主要原因大都在環境影響評估及纜線鋪設兩方面造成時程上的延遲，而環境影響評估又可分為生物因素造成的延遲如英國的鳥類與底棲生物，以及物理因素造成的延遲如地質探勘…等，其中又以環境改變對生物造成之影響的議題最為重視，如下表：

表 4 英國離岸風風力延遲原因統計表

| Round 1 OWF              | Cause of delay   |
|--------------------------|--|
| Barrow                   | Cable route  |
| Beatrice Demo            | Deep water technology  |
| Gunfleet Sands 1         | Very shallow site  |
| Lynn & Inner Dowsing     | Birds; Geotechnical (drilling through chalk); Onshore cable route (wildlife and other users) |
| Robin Rigg               | Birds  |
| Scroby Sands             | Birds  |
| <i>Shell Flat</i>        | <i>Birds; Scour problems; Navigation &amp; Radar (not built)</i>                             |
| <i>Cromer</i>            | <i>Seabed conditions (not built)</i>   |
| <i>Scarweather Sands</i> | <i>Environmental circumstances (not built)</i>   |

| Round 2 OWF          | Cause of delay                  |
|----------------------|---------------------------------|
| Walney 1 and 2       | Birds; seabed conditions        |
| Gunfleet Sands 2     | Birds                           |
| Race Bank            | Birds; Benthic Ecology; Finance |
| West of Duddon Sands | Benthic ecology                 |
| Triton Knoll         | Birds                           |
| London Array 1 and 2 | Birds                           |
| Docking Shoal        | Birds                           |

#### 四、海底電纜種類、試驗、安裝及接續 (Types, Test, Installation & Connection)

海底纜線通常是依不同離岸風場需求進行設計，目前並不像陸上風場有 IEC 或 EN...等針對纜線之規範，根據講師經驗歐洲離岸風場多以 XLPE 纜線為主

海底電纜依容量、接續、功能及連接圖如下所示

- ICC : Inter-array Connection Cables
- PCC : Platform Connection Cables (Turbine to Offshore Substation)
- Export Cable

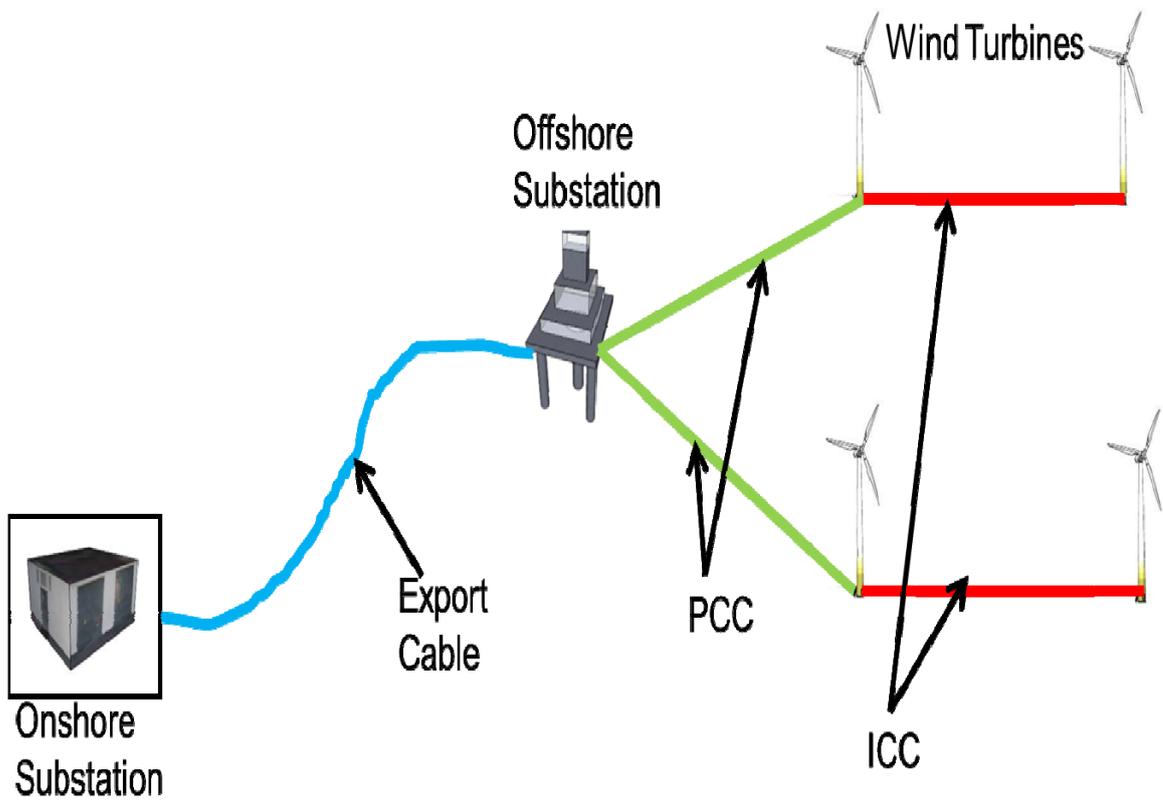


圖 9 離岸風力海纜分類圖

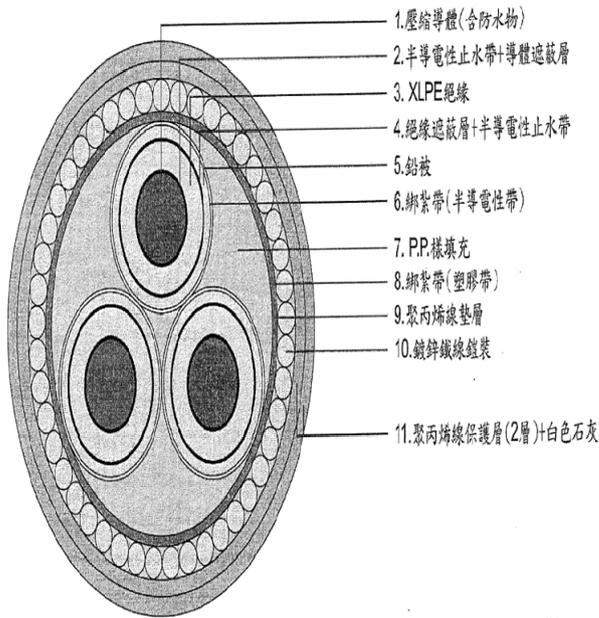
(一) 海底電纜廠家及型式

海底電纜在歐洲已是成熟之產品，目前有生產的國家及廠家如下表：

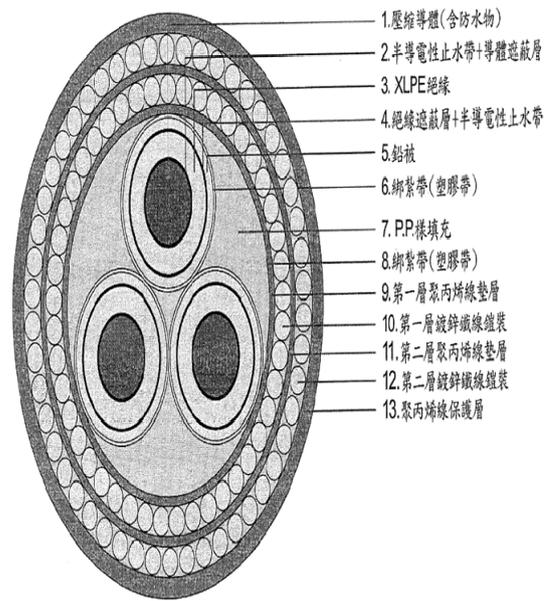
表 5 國際海纜製造廠家

| 國 別 | 廠 家 名 稱              |
|-----|----------------------|
| 法國  | NEXANS               |
| 丹麥  | NKT                  |
| 瑞典  | ABB                  |
| 英國  | JDR                  |
| 德國  | NSW                  |
| 義大利 | PIRELLI、PRYSMIAN     |
| 日本  | J-POWER、VISCAS、EXSYM |

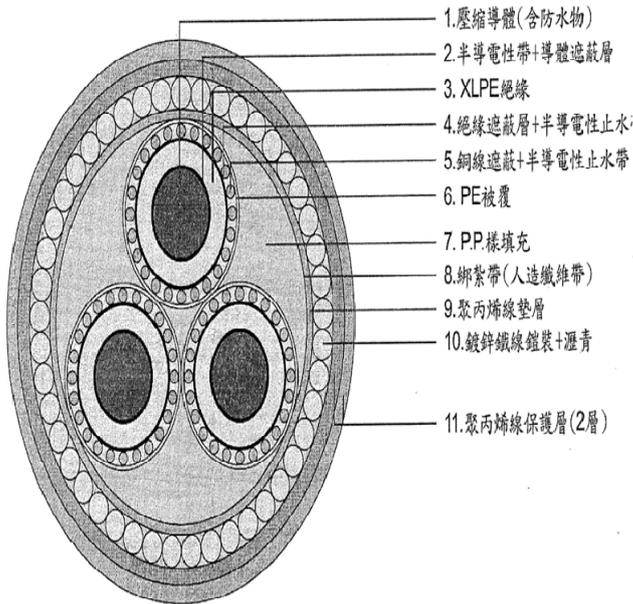
目前主要之高壓電纜有交連聚乙烯(XLPE - Cross-Linked Polyethelene) 電纜與乙丙烯橡膠(EPR - Ethylene Propylene Rubber) 電纜 2 大類；XLPE 呈熱固性質、遇熱不再變形、用於電纜會使其具有相當好之耐熱性，其他的優點還有重量輕、外徑小、易於鋪設；XLPE 電纜有 2 層傳輸高壓電之半導體層(semi-conductive layers)，為典型之 XLPE 海底電纜截面圖，其為三芯，每一芯之核心為含鋁或銅導體，早期海底電纜之核心多以銅為主要材料，因鋁與海水接觸會產生氣體而使電纜膨脹，現在於隔離方面的技術已有長足之進步，故可用鋁當作電纜之核心；鋁核心外有多層絕緣層與鉛保護層(lead sheath)、PE 保護層，各芯間填入聚丙烯(Polypropylene)填料，纜線外層則為鍍鋅鋼絲(galvanized steel wires)構成之鐵裝(armouring)，最後則為電纜外皮(serving)、由聚丙烯紗與瀝青組成；另外，亦介紹不同型式種類之海底電纜，如三芯 17.5 kV、12 kV XLPE、三芯 36 kV XLPE、二芯 600 kV 等。



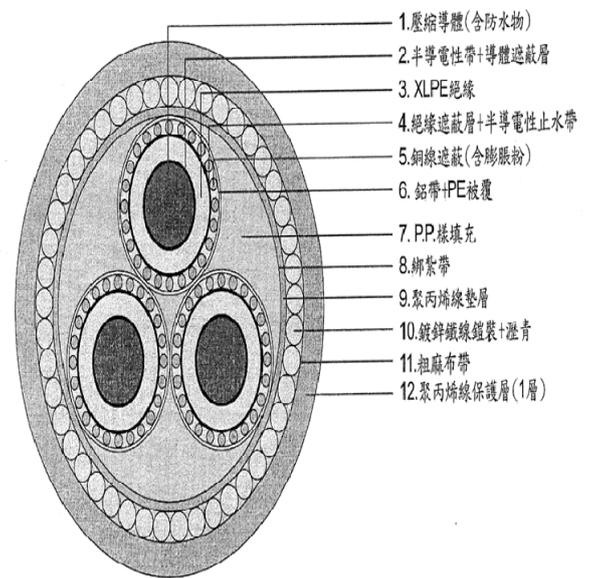
日本 EXSYM 海底電纜



日本 VISCAS 海底電纜



歐洲 ABB 海底電纜



歐洲 NEXANS 海底電纜

圖 10 海纜剖面圖

(二) 海底電纜之試驗標準

除了 CIGRE Electra 171 標準，是唯一已知的描述海底電纜相關機械性能試驗的試驗標準，其餘海底電力電纜試驗通常根據相同絕緣及導體截面之陸域電纜適用標準來進行，各試驗標準、項目及主要範圍如下表：

表 6 海纜試驗標準

| 機構            | 標準           | 主要範圍                     |
|---------------|--------------|--------------------------|
| 國際大電網會議 CIGRE | Electra 171  | 張力彎曲試驗                   |
| 國際大電網會議 CIGRE | Electra 189a | 30~150kV 擠包絕緣交流海底電纜      |
| 國際大電網會議 CIGRE | Electra 189b | 800kV 以下直流海底電纜           |
| 國際電工協會 IEC    | IEC 60840    | 30~150kV 擠包絕緣交流海底電纜及其附件  |
| 國際電工協會 IEC    | IEC 62067    | 150~500kV 擠包絕緣交流海底電纜及其附件 |

表 7 不同電壓等級海纜試驗標準

| 海纜類型 | 33kV 交流                            | 150kV 交流                           | 420kV 交流                                 | 450kV 直流                   |
|------|------------------------------------|------------------------------------|--|----------------------------|
| 絕緣   | 交連聚乙烯                              | 交連聚乙烯                              | 充油電纜                                     | 黏性浸油紙式                     |
| 機械試驗 | Electra 171                        |                                    |  |                            |
| 電氣試驗 | IEC 60840 或 Electra 189a           | IEC 60840                          | IEC 62067                                | Electra 189b               |
| 試驗順序 | TB<br>PD<br>Tanδ<br>HC<br>LI<br>AC | TB<br>PD<br>Tanδ<br>HC<br>LI<br>AC | TB<br>PD<br>Tanδ<br>HC<br>SI<br>LI<br>AC | TB<br>LC<br>PR<br>LI<br>SI |

### (三) 海底電纜之安裝及接續

目前海底電纜接續的方式類似陸域之電纜，惟防水之保護措施更顯為重要其接續如下圖，目前佈覽船分為 JSV: **Jetting Support Vessel** 及 CLB: **Cable Laying Barge**，佈覽的速度約 100m / hour，風機與風機間之佈覽時間約需 24 小時。

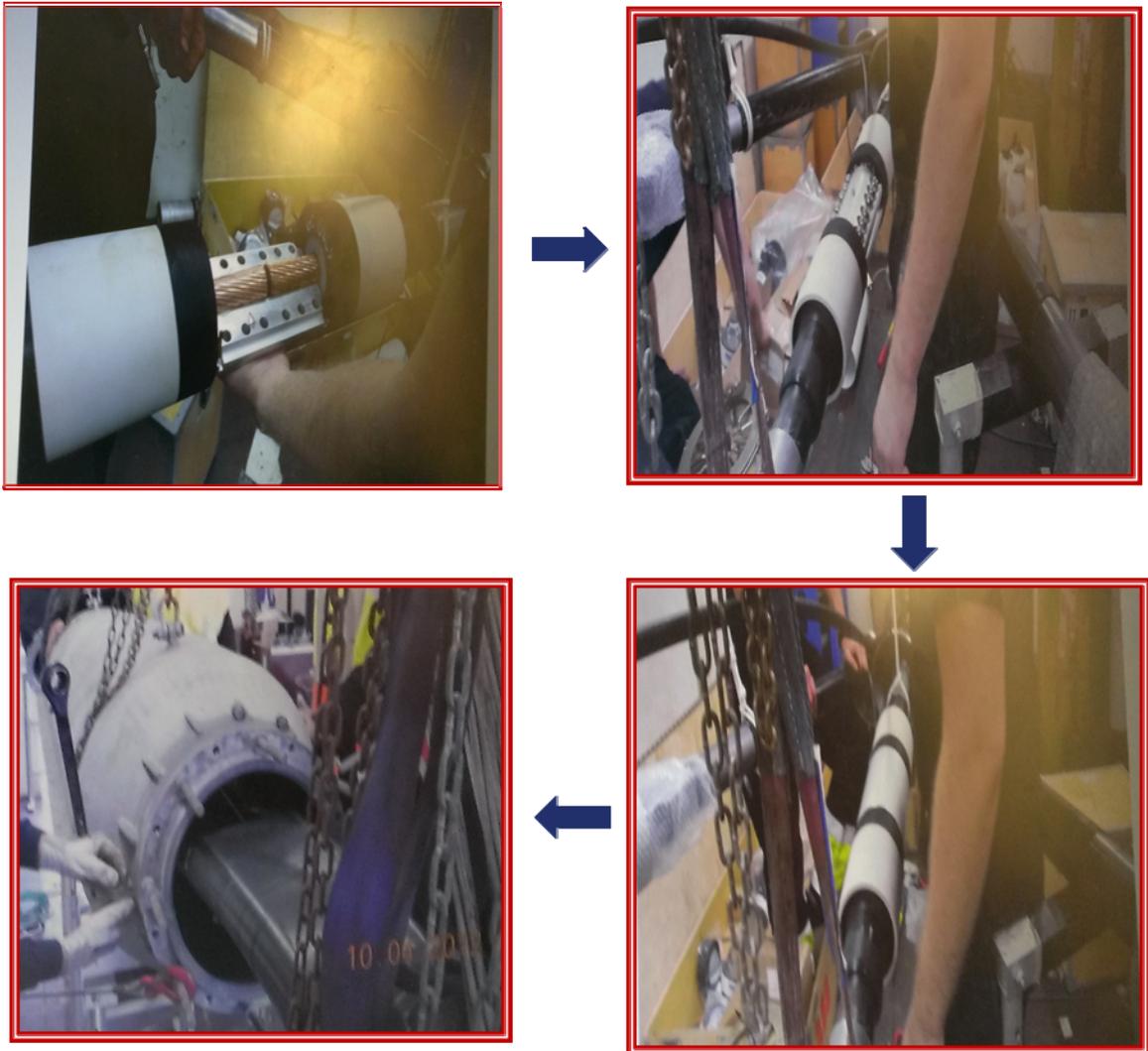


圖 11 海纜接續示意圖

#### （四）海底電纜受損原因

大部分海底電力電纜的故障都是由漁具和錨傷害而造成的，對不同的海域中、不同的電纜類型，損傷原因分布的差異非常大，淺海中的電纜比海港區的電力電纜受到漁具損傷的風險更大，下圖為電纜損傷之佔比。

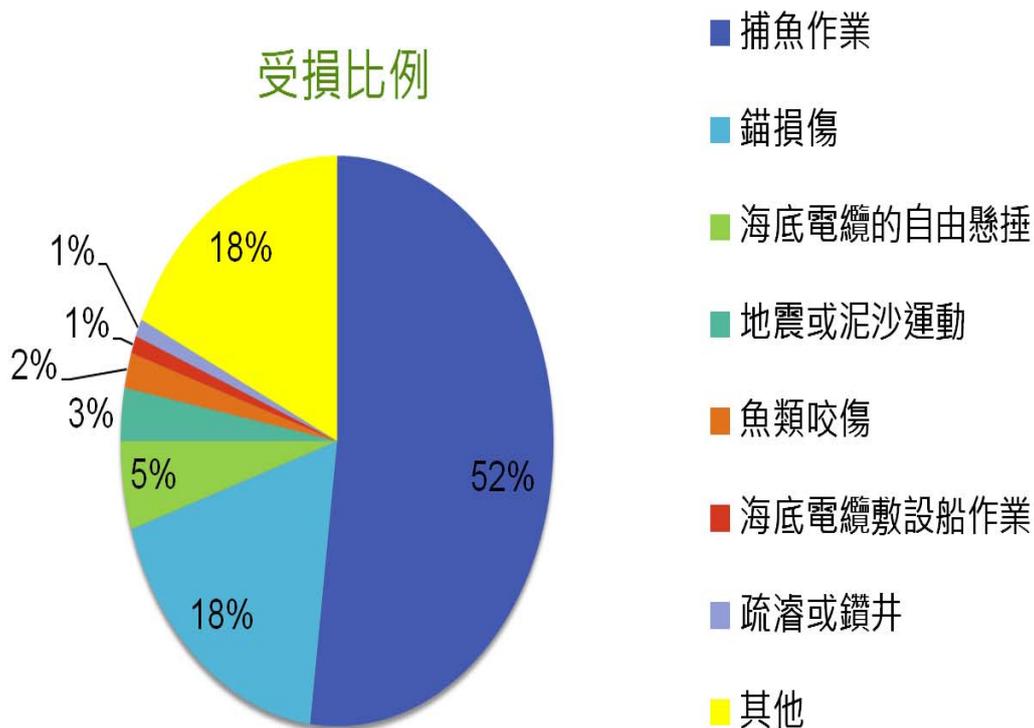


圖 12 海纜損壞原因統計分佈圖

#### （五）海底電纜故障定位

大多數情況下，電纜故障是因為電壓擊穿而引起，這表示電纜絕緣發生了擊穿，導致電纜無法運作，損傷範圍以高阻故障到低阻絕緣損傷，甚至可能是電纜完全破裂。

有許多故障定位的方法可供選用，每種方法都有自己的測定可能性和侷限性，根據電纜的故障及電纜的設計和部位特點，對於能否成功確定故障位置，為了節省時間，通常會同時採用不同方法，其方法如下：

- 1.時域反射 (Time Domain Reflectometry,TDR)
- 2.電橋測量法
- 3.精細定位法
- 4.光時域反射測量技術

#### (六) 海底電纜的挑戰

海底電纜工程往往因許多因素，造成整體離岸風場工程延宕，輕者商業運轉時程延後，重者造成開發商因無法商業運轉而發生財務困難倒閉，造成海底電纜工程延宕之因素如下：

1. Manufacturing and Transport
2. Weather Condition (45% Delay)
3. Crew
4. Seabed
5. Technical Solutions
6. Tests of Cables
7. Interface

## 五、離岸風力機組接地系統

因水是良好之導體，有別於陸域風機之接地系統需打接地棒，離岸風機之接地系統（含設備及避雷），皆透過  $3 \times 70\text{mm}^2$  之接地線引接至基礎至大海，其接線方式如下圖：

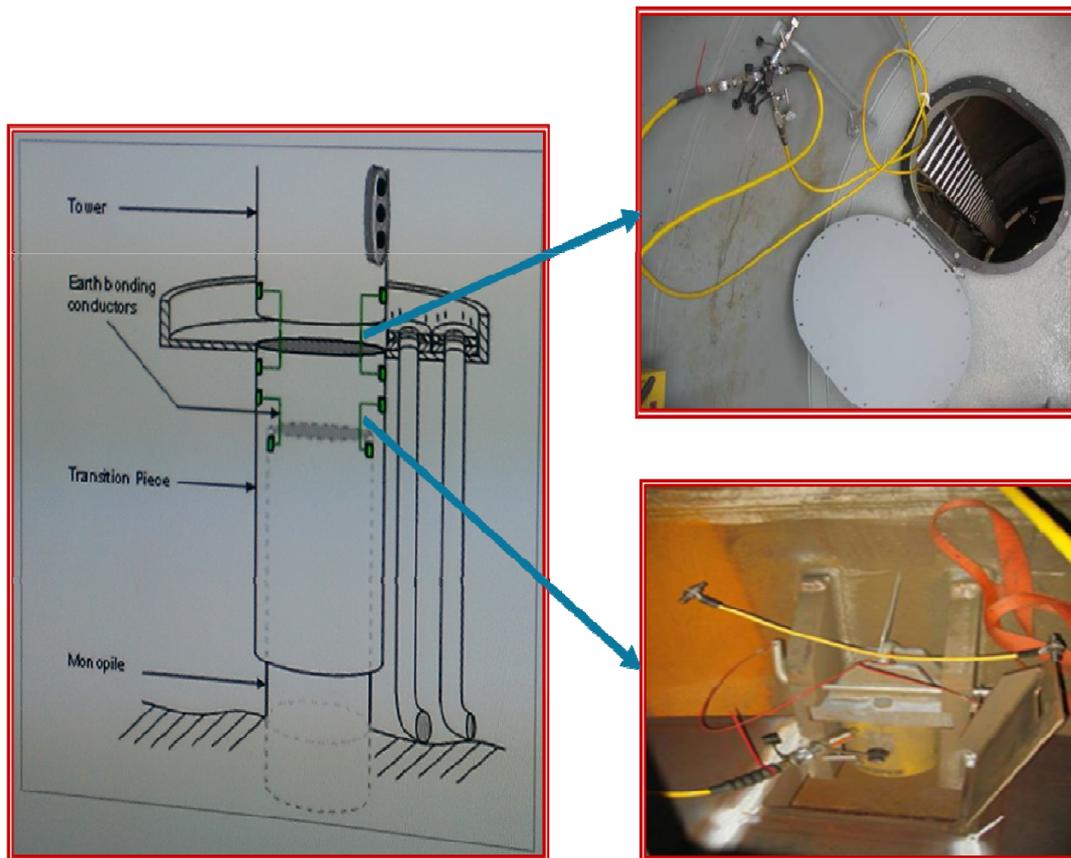


圖 13 離岸風機接地圖

## 六、離岸設施與運輸安裝設備

### （一）測風塔

通常實際進行一個離岸風場開發行為，須先進行相關場址調查，本調查目的主要在取得風況資料，以及外在環境物理條件以作為選擇風機與設計風場之相關依據，其應進行調查與收集的範圍至少包含海氣象( Metocean)：風況與海況(Wind resource, Wave climate & Current)；地質(Geology)：地球物理地質調查(Geophysical & Geotechnical surveys)其它外在環境特性。

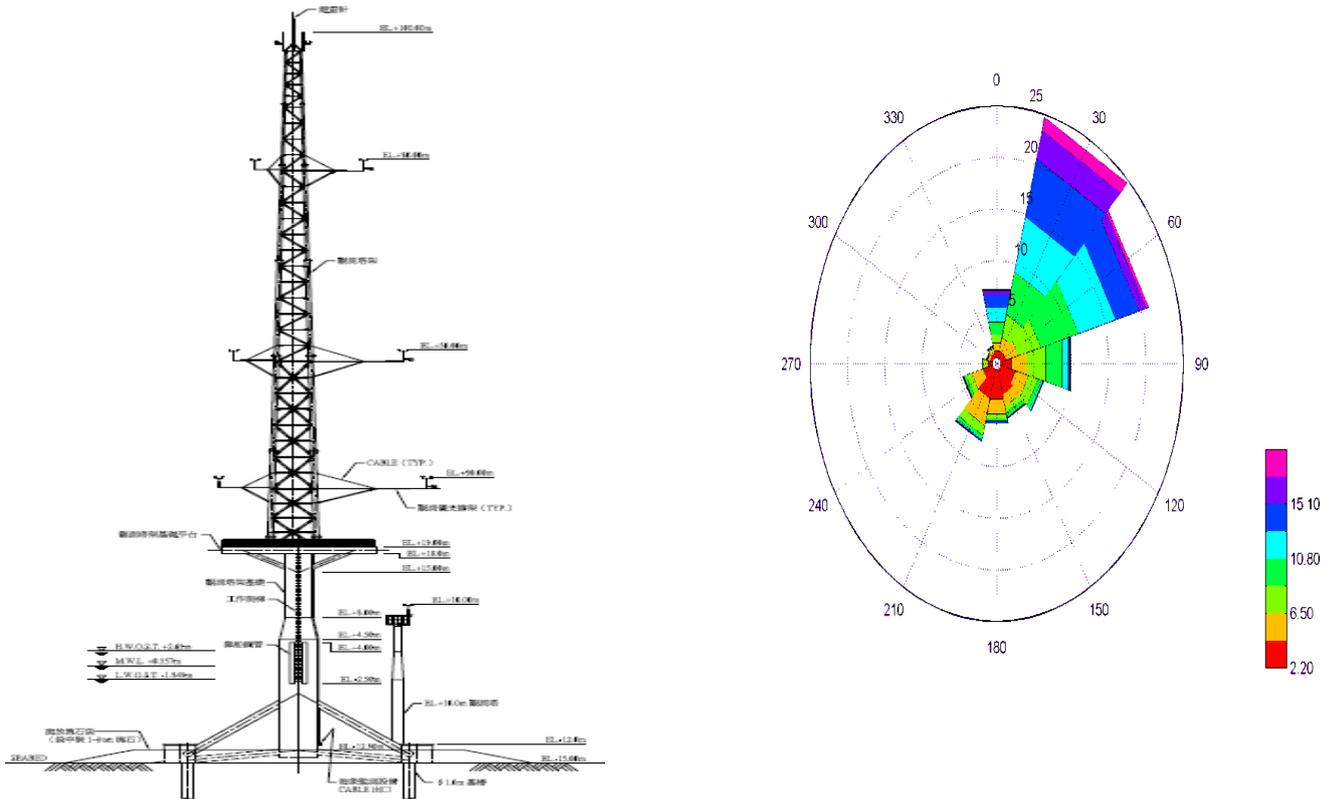


圖 14 典型測風塔與風花圖

## (二) 風機

歐洲為目前離岸風力機設備的主要發展基地，供應商有德國 Siemens、丹麥 Vestas、印度 RE power、德國 BARD、芬蘭 Winwind 與美國 GE 及法國 Areva 等。其中，以德國 Siemens 市占率最高（統計至 2012 年底），Vestas 居次，依照能源局獎勵示範辦法規定受獎勵之風機其 IEC 風機認證等級須符合 IEC CLASS I<sub>A</sub> 方可作為受獎勵之風機，另外由於台灣須加計受颱風侵襲之虞慮，因此除採買 I<sub>A</sub> 等級風機外，並需加入檢討極限風速條件與可能出現強風落差之相關因應作為。

離岸風場中最主要設備為風力發電機，有別於陸域風機離岸風機由於離岸風力環境特性趨使下，將使離岸風機發展朝下列幾點發展：

1. 機組大型化：風力機組大型化可使單位設置成本降低，加上大型化後同樣裝置量的條件下可以減少機組數，機組數量減少相對整體的機件數量也會減少，機組出現故障的機率會下降，且停機定保等作業次數亦會減少，因此機組大型化趨使下能使機組的運轉可靠性提升，再者機組數減少基礎的費用也可以明顯下降，可提升設置回收率。
2. 機件輕量化：可大幅降低支撐物(含基礎)及吊裝與維護成本。
3. 傳動鍊整合設計、或混合設計、採用直驅永磁發電機系統或將電力元件放置塔底：Enercon。

4. 葉片材質由碳纖維替代玻璃纖維或採組合式葉片設計：MHI。
  5. 傳動鍊設計方向如下：
    - 採中低速二階增速齒輪配 PMSG 系統：Vestas 與 Gamesa 等。
    - 採直趨式風力發電機系統-PSMG 永磁式同步發電機：Siemens、GE、Alstom、Nordex 與 XEMC 等。
  6. 直流激磁同步發電機系統：Enercon 等。
  7. 液壓傳動系統：Artimis、ChapDrive 與 Voith 等。
  8. 降低運維費用：備用設計、狀態監測、減少運動件或降低相對運動速度與配置自主吊裝機具等。
  9. 加強環境適應力：機艙內正壓設計與可過濾鹽分等腐蝕粒子等空氣調節系統。
- 目前市面上 3.0MW 到 3.6MW 的風機價格約落在 2,730,000 至 3,276,000 歐元，

| Model         | Power(MW) | Hub (t) | Blade (t) | Rotor (t) | Nacelle (t) | *Tower (t) | Total (t) | 重量分配 |
|---------------|-----------|---------|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|------|
| Vestas V80    | 2         | 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         | 40      | 9         | 67        | 70          | 110        | 247       |      |
| Siemens 3.6   | 3.6       | 42.4    | 17.2      | 95        | 125         | 180        | 420       |      |
| Areva M5000   | 5         | 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         | -----   | 35        | 227.5     | +/- 390     | -----      | -----     |      |

離岸風力發電機在選用的過程中除考量上述優化方向外，若以發電效益來做為考量時須配合場址風況調查特性，選擇適合於開發風場的風頻風佈與風機特性曲線搭配能取得最大年發電量為佳。

### (三) 基礎

離岸基礎形式(Foundation type)可分為如下圖所示

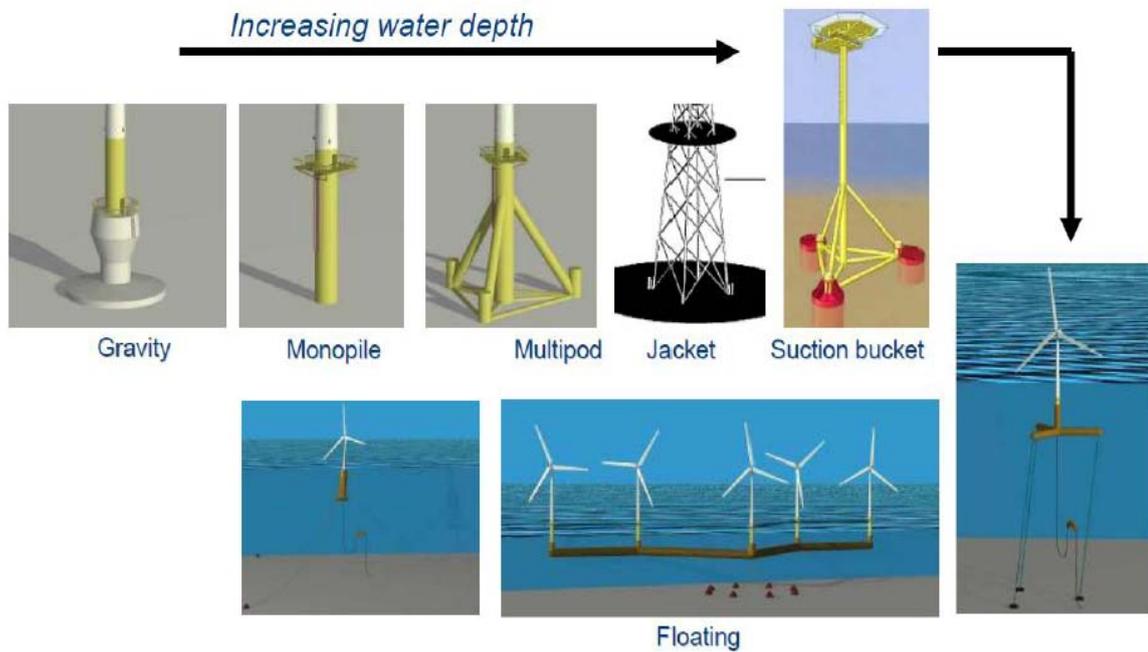


圖15 離岸風機基礎形式 資料來源G L G H

考量設置成本及配合台灣西部海岸海床現況，現有基礎型式中以單樁 (Monopile) 桁架(Jacket)式較為合適台灣區域使用，基礎設計以選用的過程中，除需檢討風力、海流、海浪以及風機各式荷載組合條件並加計安全係數下，其受力或應變大小是否符合相關材料之極限強度；然後再加以檢討在風機可能遭受交變應力荷載下，材料抗疲勞的能力是否足夠承受風機壽齡將承受之相關荷載與次數，一般在進行抗疲勞設計時安全係數會取 2 以上。

當極限強度與抗疲勞檢討皆以完成後，下一階段即進行自然頻率與共陣頻率檢討，由於現今大型風機皆採用可變轉速運轉模式，風機的運轉轉速大概範圍在 9-30rpm，其相對應的頻率為 0.15-0.50 Hz 左右，因為目前大型風機大都採 3 葉片型式配置轉子，因此會有三倍頻激振行為，此行為再大型三葉片式風機其頻率為 0.45-1.25Hz 左右，進行共振頻率檢討時必須避開 1P(0.15-0.50Hz) 及 3P(0.45-1.50Hz)等頻帶並加計 $\pm 10\%$ 以確實確保在風機運轉過程中不會長期受到共振影響。如下圖所示，一般海浪或風所產生的荷載頻率相當低會低於 1P 帶寬範圍，一般在設計上會將風機系統的自然頻率設計在 1P 與 3P 帶寬之間的安全範圍內，在以控制轉速方式讓風機在運轉的過程中快速通過 1P 頻帶(通常運轉上僅通過不作停留或發電等行為)。

## Types of the support structure

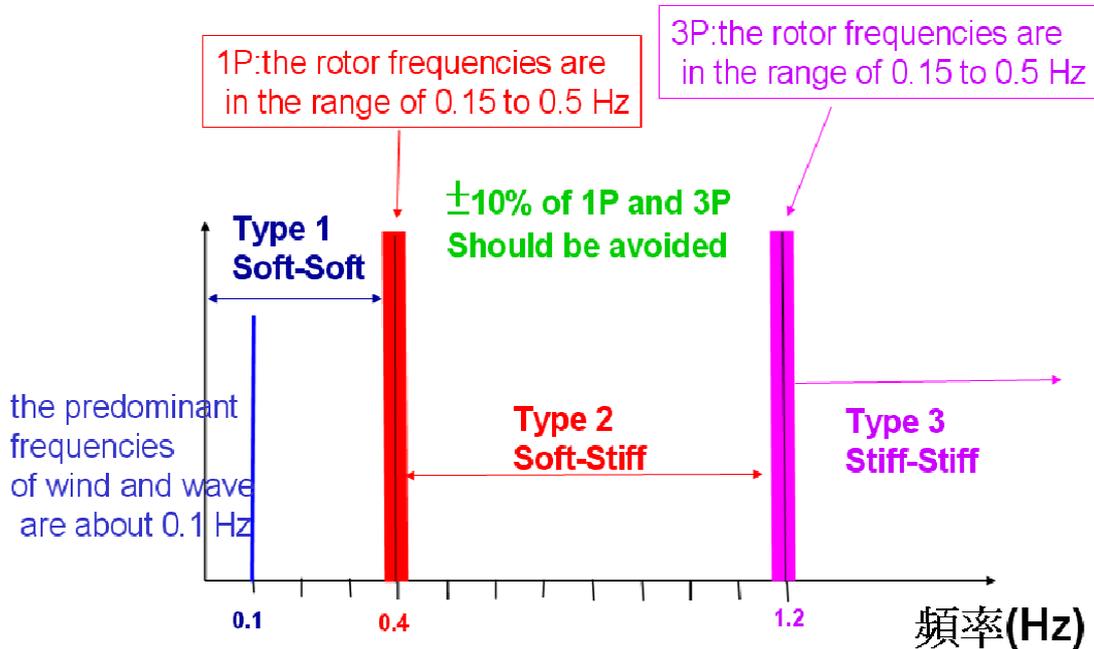


圖 16 基礎支撐型態與風機頻率關係圖

### (四) 運輸安裝設備

離岸風電產業在運輸安裝過程中可將設備細分為基礎(Foundation)、海纜(Cable)、離岸變電站(Offshore substation)及風機設備(Wind turbine)本身等主要主件，在安裝與運輸的過程中基礎、海纜及變電站因為元件單一且並無相關性連續工項，因此在運輸與安裝過程中較為單純。以離岸風電產業而論一般用於運輸與安裝之傳具可分為專用離岸風機運輸及安裝船具(Purpose built installation vessels)亦稱為風機安裝船(Wind Turbine Installation Vessels, WTIV)此種特殊船具有自主移動能力，並具備有大空間甲板以及高荷起重機；另一種機具為自升式船舶(Jack-Up barges)，此種船具相較於風機安裝船主要在於不具備有自主移動能力，需仰賴其他船具協助航行與移動。

就風力發電機本身原則上可將設備細分為塔架(Tower)(一般分兩節)、轉子(Rotor)、機艙(Nacelle)與三只葉片(Blade)等，依數量合計共有七項主要構件。由於風機含塔架等元件共計有七項在運輸與安裝過程中需考量安裝運輸機具特性、基地母港與離岸風場距離、風場海床與

海況情形以及風機重件大小等因素來選擇預組作業及運輸安裝的組合。依目前國際上經驗而論一般風機預組範圍與運輸組合的情況可分為五種情形，分別為：

1. BE2T : Bunny Ear with a Tower in Two Pieces，此種預組作業會將機艙、轉子並搭配兩只葉片於預組廠進行預組安裝，完成預組作業後搭配 2 節塔架及剩餘的一只葉片，共計四個組件進行裝船與運輸，安裝時共有四件元件須進行海上吊掛作業。
2. BE1T : Bunny Ear with a Tower in One Pieces，此種預組業會將機艙、轉子並搭配兩只葉片於預組廠安型預組安裝，其中塔架亦於預組廠完成組裝，運輸時併同剩餘的一只葉片共計三個組件進行裝船與運輸，安裝時共有三件元件須進行海上吊掛作業。
3. R2T : Pre-Assembled Rotor，此種預組作業會將轉子與葉片結合安裝，運輸時並同機艙以及兩節塔架計四個組件進行裝船與運輸，安裝時共有四件元件須進行海上吊掛作業。
4. SP5 : Five Pieces Separately，本模式係將機艙與機鼻以及塔架預組作業於預組廠完成，於運輸時併同其他剩餘元件三只葉片共計五個組件進行裝船與運輸，安裝時共有五件元件須進行海上吊掛作業。
5. SP6 : Six Pieces Separately，本模式係僅將機艙與機鼻預組作業於預組廠完成，於運輸時併同兩節塔架及三只葉片計六個組件進行裝船與運輸，安裝時共有六件元件須進行海上吊掛作業。

下圖為風機設備各種預組與裝船情形，其中所需面積為統計 2MW-6MW 離岸風機所需要裝載面積。統計資料來源 estas(V80-2,V90-3,V164-7)；Siemens(2.3-93,3.6-107)

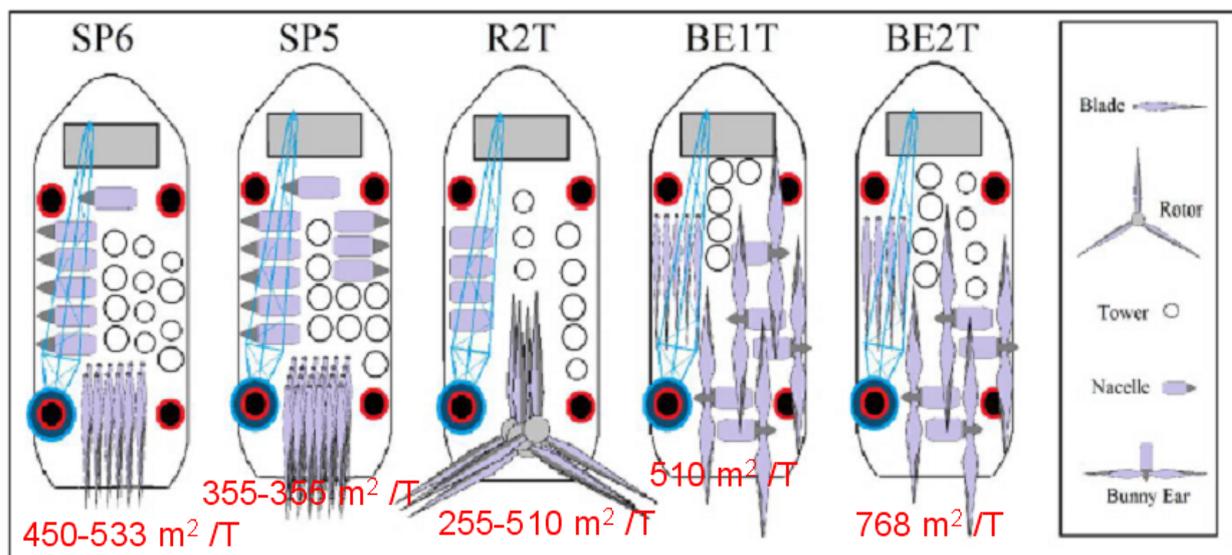


圖 17 風機機預組裝與運輸情形圖(資料來源：URAZ)

## 七、經濟分析模型

風場開發計畫中，可行性分析與前可行性分析(Pre-feasibility)之差別，在於前可行性評估為一較為大略之評估方式，目的在於確認欲開發場址在技術上與經濟效益上之可行性，經濟效益牽涉各項開發、採購、安裝、營運成本與收入間之評估，本課程即在介紹離岸風場開發評估階段中經濟效益模型之建立方法、重要參數與評估標準。

對開發商(developer)或投資者(investor)而言，首先要對該風場開發計畫確認其在經濟上的可行性，對開發商自不待言，若整個開發計畫無其效益，則無開發之價值；對投資者而言，因其可投資之標的眾多，為何該計畫值得其投資、而非將資金投入到別的產業，此時便需有可靠且具系統性之經濟效益評估結果以助其判斷，故經濟效益分析之重要性可見一斑。

經濟效益評估之主要參數有資本支出(capital expenditure - CAPex)、營運成本(operating expenses - OPex)與營業收入(revenues)，CAPex 指為了獲得固定資產、或為了延長固定資產之耐用年限而流出之費用，如風機之採購與安裝等，典型之離岸風場開發資本支出項目與比例如表 9 所示，資本支出會隨市場需求與供應鏈狀況、運輸、施工機具之可

取得性、原物料之市場價值、人力資本等因素而變動，如對採用套管式 (Jacket) 基座之風場，在基座之資本支出比例就會增加，此外，歐洲與亞洲之市場需求與供應鏈亦有所差異，這些都會影響到各項目所佔之比例。

表 9 離岸風場開發資本支出項目與比例

| Items                         | Proportion |
|-------------------------------|------------|
| Planning and Design           | 3%         |
| Turbines                      | 47-51%     |
| Foundations                   | 17-25%     |
| Cables                        | 19-22%     |
| Installation                  | 20%        |
| Commissioning/Decommissioning | 2-5%       |
| Organization                  | 5-6%       |

OPex 則包含行政開支、租金、利息支出、維護費用等有關營運方面之成本，如風場維運時所衍生之費用，在離岸風場方面，主要有營運時人員之成本，維運時之設備成本，通常以月份為基準進行成本量化評估；營業收入、亦稱營業額，指公司因正常商業活動所獲得之收入，在此，則為風場所發電所能賺到的錢，即售至電力公司之金額。

前面三者之彼此間之消長關係即構成經濟效益分析之主體，此外，還要考慮計畫開發與營運過程之資金籌獲(financing)與投資期(time horizon)之折舊問題等，所謂資金籌獲係指從公司外部得到的資金；考慮上面個因素後，可由此得出整個離岸風場計畫從開發階段、建造階段至長達 20 至 25 年之營運階段之淨現值(Net Present Value - NPV)即投資的未來現金流量(net cash flow)(即收入與支出之差距)，全部折現成投資始日的價值，做為經濟效益評估結果之指標；此外，亦可對可能之替代方案以相同之方式進行評估，以比較不同規劃方式在經濟效益上之優劣。

一般而言，歐洲之離岸風場開發計畫規劃為 8-10 年可開始有淨收益。

概念講授後，即開始實作訓練，即在假設離岸風場開發計畫於 2015

年開始，Plan and Design 以及 Organization 需費時 1 年、費用分別為 700,000 與 500,000 歐元；Construction 需 3 年、各項費用包含風機 (turbine)、水下基座 (foundation)、電纜 (cable)、試運轉 (commissioning)，所需花費亦分別以 10%、40%、50% 之比例於 3 年攤提；營運期間以 20 年計，經濟分析模型中，還要考慮各費用的通貨膨脹 (inflation rate) (此處為 1.5%)，以及資產之折舊率 (discount rate) (此處為 6%)，進行淨現值 (Net Present Value) 與回收期 (Payback Period) 計算，所有計算均於試算表介面下進行。

整個開發例中，由 2015 年開始，經過計畫與安裝共 4 年之時間，應預計 2019 年開始營運至 2038 年除役，所以考慮折舊率而計算淨現值時之時間基準應延伸至 2038 年。

在回收期計算中，以上述數值代入後，會發現年發電量所得到之收入高達 129,264,080 歐元，遠高於題目設定之計畫、採購與安裝成本 14,420,294 歐元，使得營運第 1 年即可回本，與現況有些差距，原因可能在於低估各項資本支出，然經由此程序，已對經濟分析模型與其運作方式有較為深刻之體認。

表 10 經濟分析模型實作內容

| Project elements    |            | Units    |
|---------------------|------------|----------|
| Project start       | 2015       | YEAR     |
| Plan and Design     | 1          | YEARS    |
| Construction        | 3          | YEARS    |
| Operation period    | 20         | YEARS    |
| Planning and design | 700,000    | EURO     |
| Organization        | 500,000    | EURO     |
| Turbines            | 10,000,000 | EURO     |
| Foundations         | 400,000    | EURO     |
| Cables              | 2,000,000  | EURO     |
| Commissioning       | 150,000    | EURO     |
| Inflation rate      | 1.50%      | PCT      |
| Revenue             | 0.15       | EURO/kWh |

最後，提到一重要的概念：不確定性 (uncertainty) 與風險 (risk) 之差別，因在計畫中之經濟模型評估時，要考慮所輸入的數據是否能確實反映後續開發時之現況，如可能通膨數據之變化、這些變化因素係由甚麼決定、會有哪些不確定因素會影響計畫，對不確定性而言，其可以信賴區間 (confidence range) 將其可能數據變化範圍考慮進去，然而對風險而言，無法以信賴區間之方式將其衡量；經濟模型考量之全面性對風場開發之財務面有很大的影響，如 Barrow，即因在計畫階段對經濟模型做了太樂觀的預估，

使得該計畫虧損不少。

## 伍、心得與感想

### 參加本實習之感想

- (一)職等有幸藉由參與船舶暨海洋產業研發中心赴英國及丹麥工合機會瞭解離岸風電發展情形及相關知識，對於離岸風場從開發、規劃、設計、施工、運轉及維護等階段皆有相當程度之了解，另參訪三家離岸風場之顧問公司，對於本公司日後尋找顧問公司參與工程也有相當的助益。
- (二)參與 NIRAS 與 TWI 舉辦之每一種技術研討會課程均須簽名，於全部會期結束後，由講師發給參與該課程之證明，表示相關單位非常重視此等教育訓練與實習課程。



- (三)針對丹麥及英國離岸風力發展所遇到之瓶頸及挑戰，可做為本公司離岸風展之借鏡及考量。
- (四)原訂參訪 LONDON ARRAY 行程因為當時天候不穩取消行程部分，除失望之餘，讓我們確實體驗於離岸風場設置與運轉過中相關氣候的掌握對整體影響會有多大，因此相關工項應配合之 WEATHER WINDOW 與天氣預報技術對於離岸風電的重要性。

## 陸、建議事項

- 一、有鑑於本公司目前已身為能源局離岸風力示範獎勵獎勵之廠家，且因為離岸風電海上作業的不確定性與投資規模遠大於陸域風力，因此需積極培養相關海事工程人力，以降低相關投資風險。
- 二、針對英國離岸風力開發的經驗，關於開發、設計、施工、運轉及維護等各階段，所遇到之瓶頸及挑戰，應儘速建立其因應之對策。
- 三、離岸風力日後於海上工作(包含施工、運維及除役)將長達二十年以上，有關離岸工作所工作規範應即早訂定以供後續據以執行。
- 四、風機預組場或安裝基地母港，一般而言需要投資大量資金，目前台灣受獎勵將進行離岸風場設置的廠家共計三家，就國家利益而言，共通設備諸如基地母港宜進行整合共同選擇一個合適港口以降低彼此成本。
- 五、有鑑於國際海底電纜成本過高及訂貨等待時程延宕之問題，目前國內有多家電力電纜製造廠商表達其有製造之能力，就降低電力電纜成本及扶植國內產業而言，應召集各電纜廠商針對其製造能力及試驗設備研議，以落實本土化之政策。
- 六、若政府政策未變，本公司未來將興建許多離岸風力場址，且許多場址將與民間投資興建之場址相近，是否考量引進 Offshore Transmission Owner 之理念，興建大型 Offshore Substation 除了可節省電力電纜佈設及成本，又可為本公司利用租賃電力電纜傳輸，帶來額外租金收入。