

## 目 錄

壹、目的與任務 .....	2
貳、行程簡介 .....	3
參、實習公司簡介 .....	3
一、Houlder .....	3
二、ODE .....	6
三、SMC .....	8
四、Cathie Associates .....	10
五、Gardline .....	12
肆、實習內容概述與心得 .....	14
一、離岸風力發電計畫風機基礎、碼頭容量與船舶運輸之考量 ..	14
二、海域工程地質調查與離岸風機基礎施工 .....	27
三、離岸風力發電機機組安裝與防蝕工程實務 .....	38
伍、建議事項 .....	47

## 壹、目的與任務

政府近年推動「再生能源極大化」之新能源政策，預計於 2030 年，離岸風力發電裝置容量規模達到 4.0 GW。本公司身為國營事業，肩負推動政府政策任務，刻正執行「離岸風力發電第一期計畫」。然本公司尚無離岸風力發電機組設計施工經驗，另因國內海事工程相關產業尚未成熟，故派員赴國外實習相關技術確有必要。

英國為近年來離岸風力發電成長最為快速，且離岸風力發電機組裝置容量全球最大的國家，故前往該國拜訪產業內國際知名公司 Cathie Associates、Gardline、Houlder、ode、SMC 等公司進行意見交流，汲取專業知識及經驗教訓，將有助推動本公司相關專案計畫，同時厚植本土技術能力。本次實習任務內容三大目標，分述如下：

### 一、離岸風力發電計畫風機基礎、施工碼頭容量與船舶運輸之考量

離岸風力發電計畫中，基礎型式選擇與分析與上部結構穩定及工程造價息息相關，故前往綜合工程顧問公司 ode 研習，並配合 Cathie Associates 及 Gardline 在地質地工專業加強認識。此外，碼頭設施及船舶運輸為海事工程不可或缺，故向海事工程機械設計顧問 Houlder、專案管理商 SMC、施工廠商 Seajack，及人員運輸船製造商 Alicat 等學習。

### 二、海域工程地質調查與離岸風機基礎施工

海域地質調查為離岸風力發電機基礎設計之基本資料，於規劃、設計及製造安裝等各階段，地質調查報告均需提供相對應的力學參數，以做為基礎下部結構之型式選擇、細部設計、施工安全之評估依據。因此，風機整體穩定性及工程造價之經濟性，繫於地質調查品質之良窳。惟國內對於海域地質調查經驗缺乏，亟需借鏡歐洲經驗以確保調查成果品質，故前往海域地質調查專業公司 Gardline 研習海域地質調查，及大地工程專業公司 Cathie Associates 研習海底電纜路徑規劃及基樁打擊監測。

### 三、離岸風力發電機機組安裝與防蝕工程實務實務

離岸風力發電場建置施工階段之重點即為風力發電機機組安裝海事工程作業，是否妥適將深切影響後續機組的運作，詳細資訊透過綜合工程顧問公司 ode、專案管理商 SMC、施工廠商 Seajack 而了解。另一個影響機組壽齡的要項便是基礎構件的防蝕工程，且良好的防蝕設計仍須配合完善的施工，方能發揮預期的功效，以期達到基礎構件的預定壽齡，相關技術知識則由綜合工程顧問公司 ode 提供。

本次實習涵蓋離岸風力發電機下部結構的規劃、設計及施工，希望此行在有限時間內與英國工程顧問、施工廠商當面對談及現場觀摩，能提升本公司該領域之核心技術，俾使後續離岸風力發電計畫順利推展。

## 貳、行程簡介

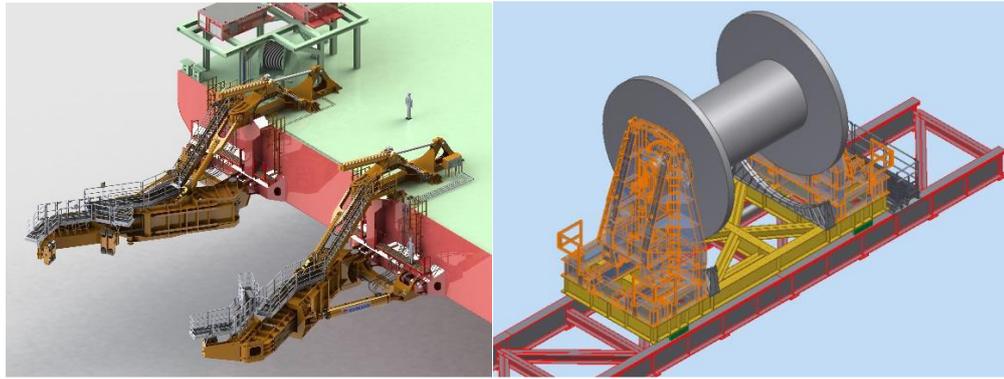
日期	主要行程內容
106年9月18日	往程(台北－英國倫敦)
106年9月19日	Houlder 公司實習
106年9月20日~22日	ODE 公司實習
106年9月23日~24日	路程及資料整理
106年9月25日	SMC 公司實習
106年9月26日	Cathie Associate 公司實習
106年9月27日	路程
106年9月28日	Gardline 公司實習
106年9月29日	路程
106年9月30日~10月1日	返程(英國倫敦－台北)

## 參、實習公司簡介

### 一、Houlder

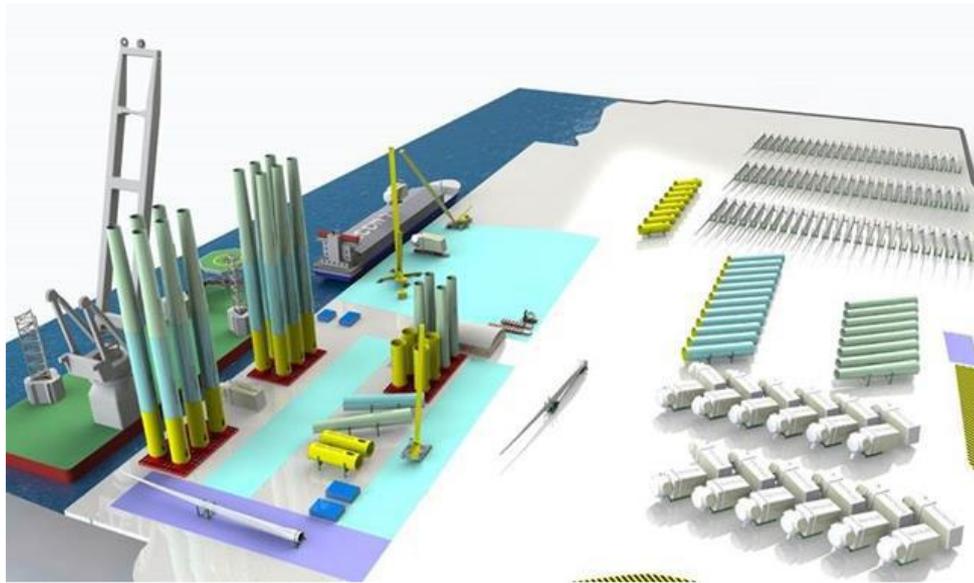
Houlder 成立於 1987 年，是一家海事工程顧問公司，其服務對象包括風場開發商、工程承包商、油氣業者等。該公司於美國休士頓(Houston)、英國倫敦(London)、朴茨茅斯(Portsmouth)、阿伯丁(Aberdeen)及泰恩賽德(Tyneside)均設有辦公室，其完整能源服務項目如下：船隻設計及設計審查、可行性研究、初步設計、結構設計與分析、施工管理、專案管理等，在離岸產業上已有 30 年工程實績。

此行拜訪 Houlder 位於倫敦之辦公室，參訪期間係由公司主管財務主管 Mr. Simon Hill、業務經理 Mr. Mike Carter 及資深海事工程師 Mr. James O Russell 負責，會議中以簡報方式介紹該公司強項海事工程機具設計外，並介紹離岸風場工程專案管理應用相關系統軟體，並與本公司人員進行意見交流。



圖表 1 海事工程機具設計

資料來源：Houder



圖表 2 離岸風電施工管理

資料來源：Houder



Compact Drillship



Ice-class Research Ship



Passenger Ferry



Wind Farm Installation



LNG Bunkering Barge



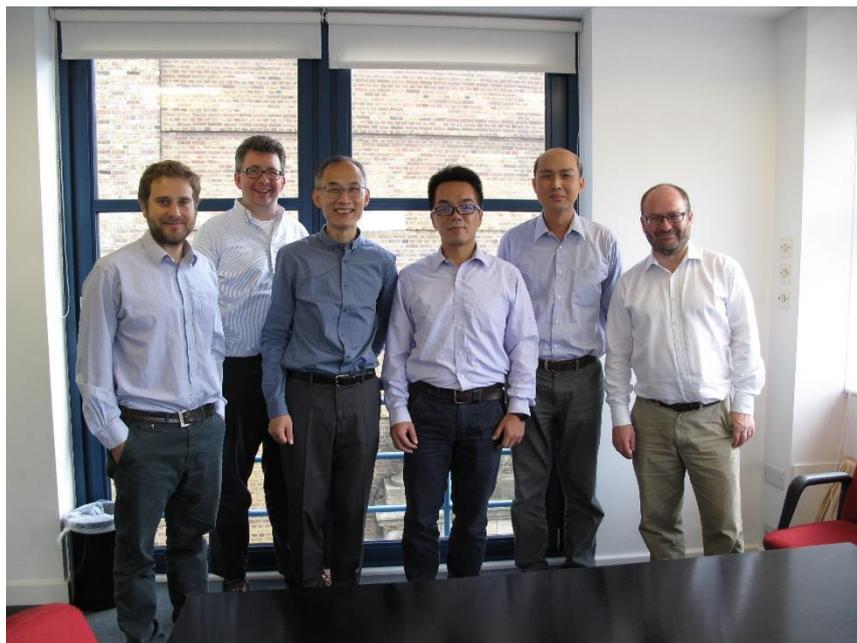
Militarised RORO

圖表 3 船舶設計

資料來源：Houder



圖表 4 Houlder 提供服務之客戶  
資料來源：Houlder



圖表 5 與 Houlder 接待人員合影

## 二、ODE



圖表 6 Ode 全球辦公室分布圖

資料來源：Ode

海德益公司(Ode Offshore Design Engineering Limited ,ODE)成立於 1978 年，是一家石油燃氣及再生能源綜合工程顧問公司，其服務對象除風場開發商、工程承包商等。該公司於法國巴黎、埃及開羅、台灣台北、及英國倫敦、大雅茅斯灣均設有辦公室，其完整能源服務項目如下：核心業務為工程顧問、棕地工程、資產開發管理、海事施工及離岸風場除役，在離岸產業上已有 50 年以上工程實績。



圖表 7 Ode 核心服務業務

資料來源：Ode

## Core Services – Renewables: 核心服務 – 再生能源

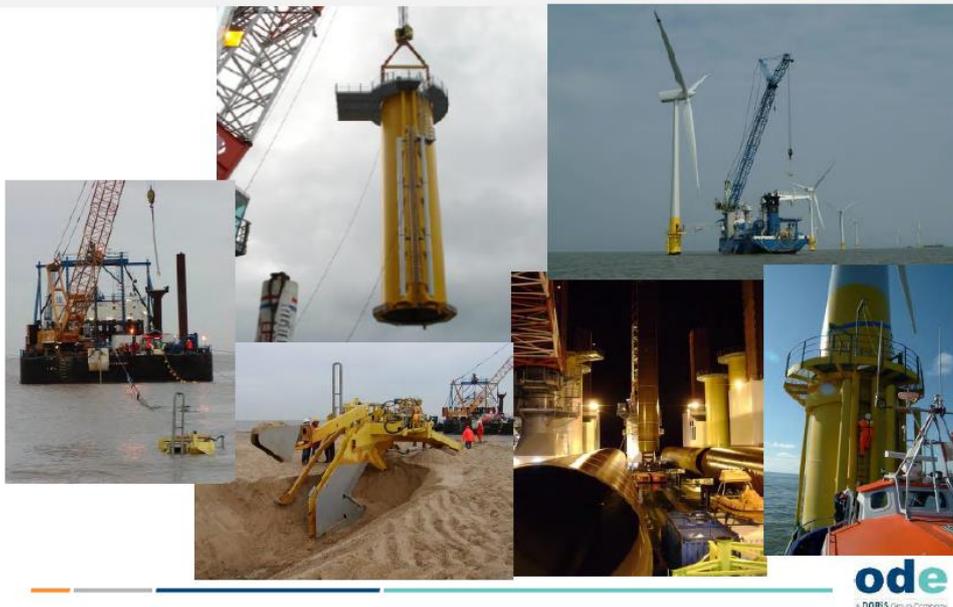


圖表 8 Ode 核心服務業務

資料來源：Ode

此行拜訪海德益公司位於倫敦溫布頓市，參訪期間係由公司計畫經理 Mr. Stephens Stuart-Matthews 及事業部門處長 Mr. Jeff Barnes 負責，會議中除以簡報方式介紹該公司工程設計與海事工程經驗，該公司專業同仁如工程部經理 Mr. Thomas 及結構工程經理 Dr. Wangwen Zhao 熱心分享相關技術心得。對於大地工程風險控管、離岸風機結構基礎型式及電纜路徑規劃風險分析等問題，與本公司人員進行交換意見，作為未來發展相關業務之參考。

## Offshore Construction Experience: 離岸施工經驗



圖表 9 Ode 核心服務業務

資料來源：Ode

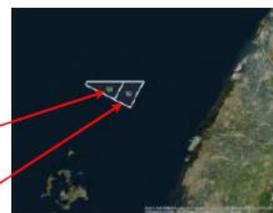
海德益公司目前為海龍離岸風力發電計畫擔任顧問公司角色，該公司對彰化風場開發表達高度興趣，並希望於今年底或明年初與台電公司進行拜訪及交流。（海龍風場業主為新加坡玉山 Yushan Energy 公司與加拿大北方電力 Northland power 公司合資，場址在彰化外海 18 號(612-696MW)、19 號(468-512MW) 風場，海龍計畫預計於 2023 年及 2024 年正式商轉，估計

將可提供 1,200MW 電力至國家電網。)

## Hải Lóng – Turbine Scope

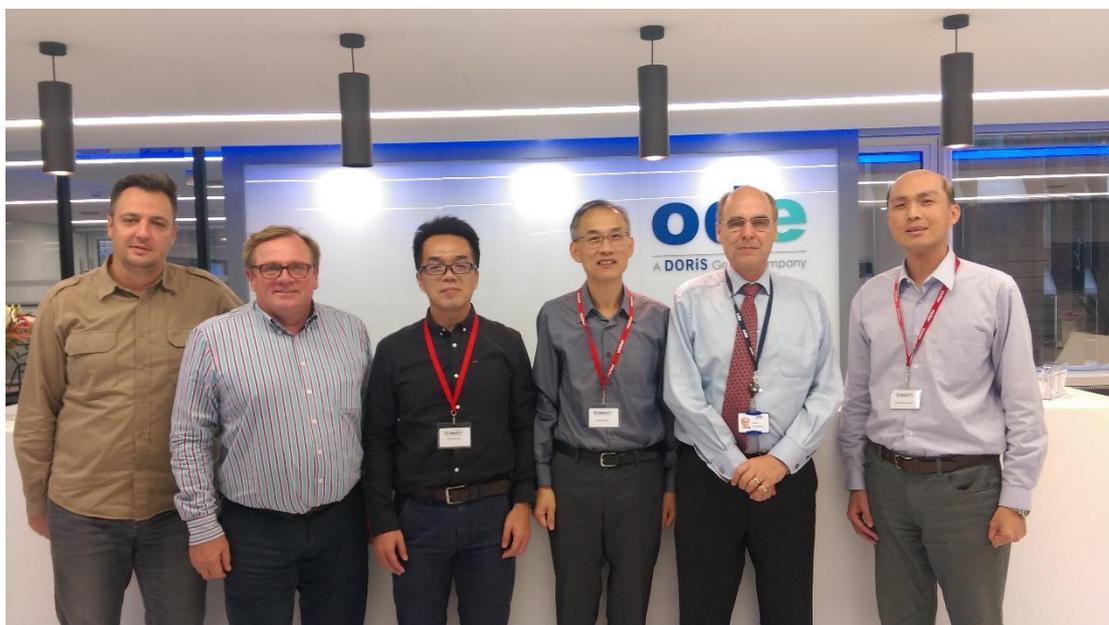
### ▪ Hải Lóng Sites - Turbine Example Options

Site 場址	Turbine 單機裝置容量	Units 數量	Total Capacity (MW) 總裝置容量
Site 18	6 MW	78	468
	8 MW	64	512
Site 19	6 MW	102	612
	8 MW	87	696



圖表 10 海龍計畫概要

資料來源：Ode

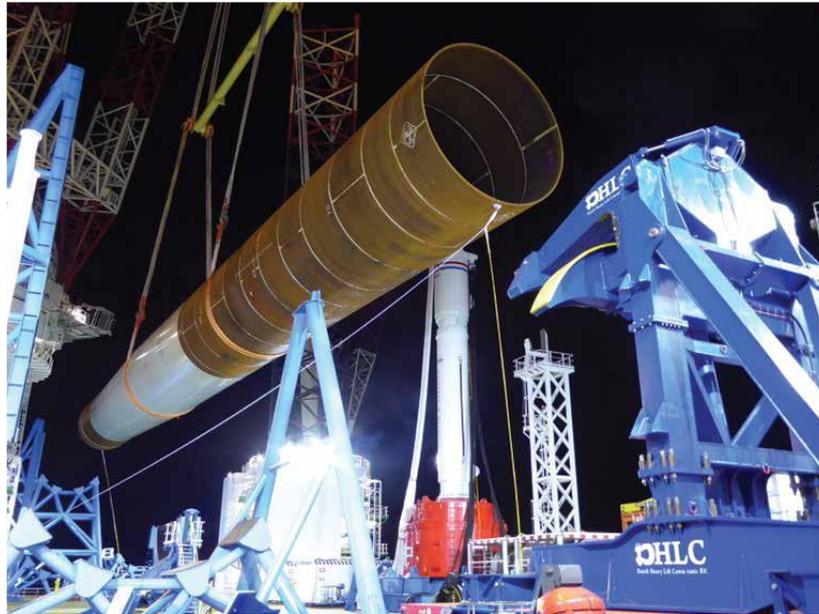


圖表 11 與 ODE 接待人員合影

### 三、SMC

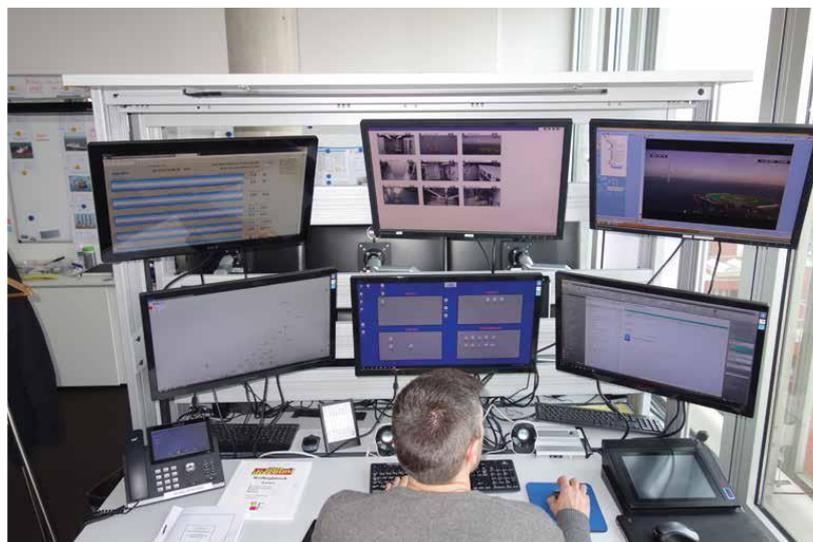
SMC(Specialist Marine Consultants Ltd)成立於 2006 年，最初 SMC 成立的目的是提供船舶檢查，特別是石油和天然氣行業。目前 SMC 已擴展為一家離岸海事工程服務公司，其服務對象包括風場開發商、工程承包商、風機業者等。該公司辦公室位於英國北約克郡(North Yorkshire)，並於施作現場有駐地辦公室，其完整能源服務項目如下：海事協調服務、船隻檢驗、施工管理、專案管理、技術人力提供、品質檢驗、風機安裝等。

此行拜訪 SMC 位於北約克郡之辦公室，參訪期間係與該公司董事總經理 Mr. Ian Coates、作業主管 Mr. Dean Coates 及作業經理 Mr. Steve Evans 進行會談，會議中以簡報方式介紹該公司主要核心業務外，並說明離岸風機施工過程中各流程及所需注意事項，及介紹離岸風場海事協調整合軟體(ATLAS)，並與本公司人員進行意見交流。



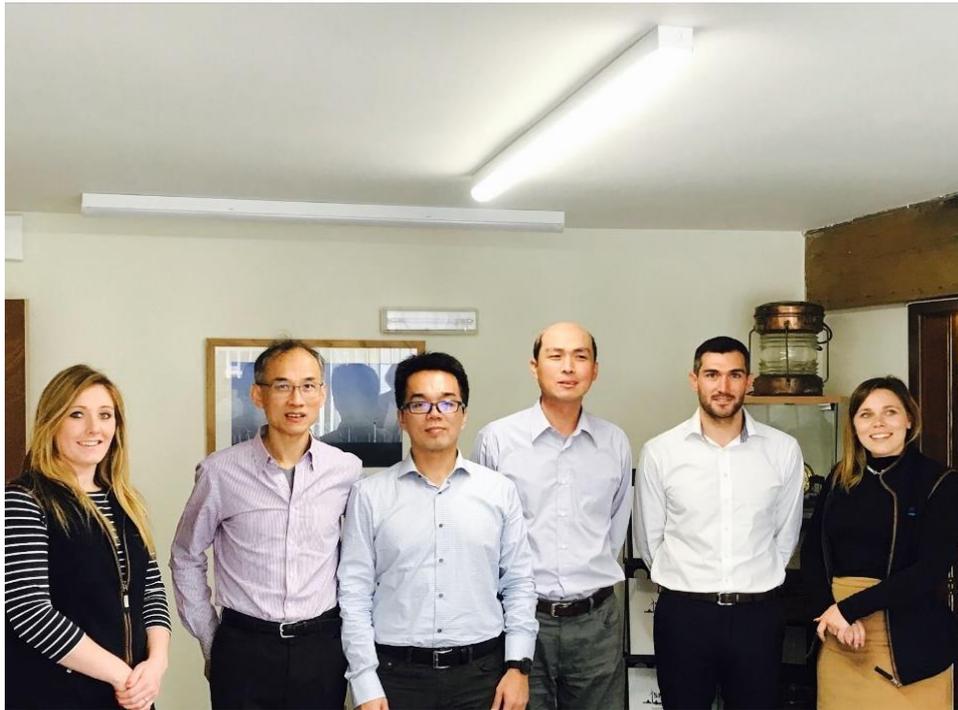
圖表 12 海事工程作業

資料來源：SMC



圖表 13 海事協調作業

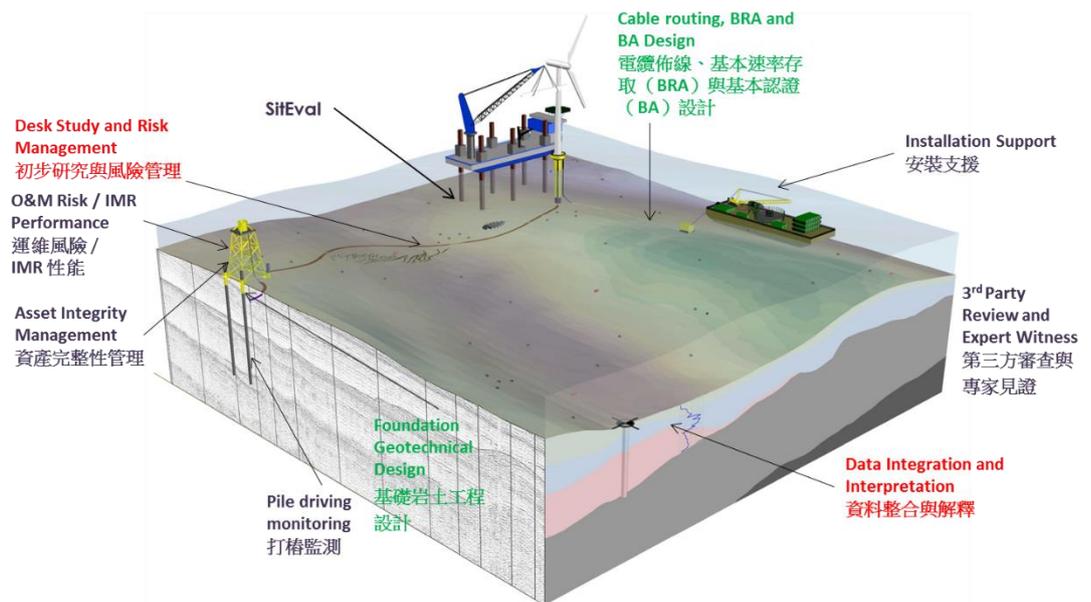
資料來源：SMC



圖表 14 與 SMC 接待人員合影

#### 四、Cathie Associates

由 David Cathie 創辦的 Cathie Associates 並非綜合工程顧問公司，而是一家大地工程、地質學、地球物理的專業公司，專長為海域大地工程及地球物理調查、海床風險控管、基礎工程、海底管線浚挖及數值分析，其完整服務項目的如圖表 15：



圖表 15 Cathie Associates 服務範圍

資料來源：Cathie Associates

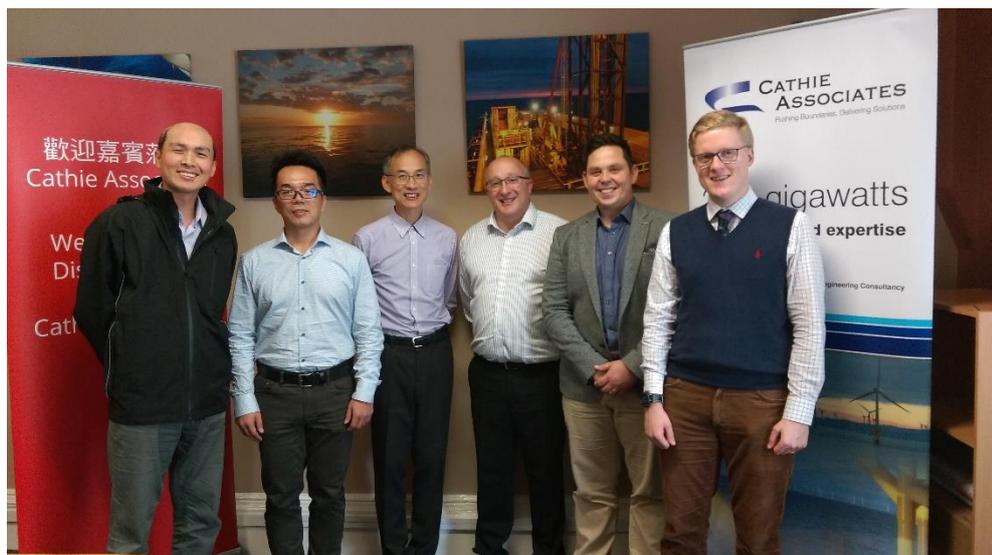
公司總部位於英國的新堡，並於法國巴黎、德國漢堡、比利時布魯塞爾、義大利米蘭、英國倫敦均設有辦公室，其服務客戶除風場開發商、工程承包商，亦提供綜合顧問公司地質土工專業協助(詳圖表 16)，在離岸風力產業已有高過 25GW 實績。



圖表 16 Cathie Associates 客戶列表

資料來源：Cathie Associates

在英國新堡總部參訪期間，承蒙業務發展經理 Gareth Ellery 及新堡辦公室總監 Robin Comrie 熱情接待(詳圖表 17)，並由該公司各專業同仁進行公司簡介、離岸風場地質調查、離岸風機下部結構及基礎設計、電纜路徑規劃風險控管、地理資訊系統應用等簡報說明，同時提供參訪人員英國相關技術文獻、規範供本公司作為未來發展相關業務之參考。



圖表 17 與 Cathie Associates 接待人員合影

經過簡報及意見交流後，即前往位於新堡地區泰恩河畔之套筒式(Jacket)基礎組裝場觀摩，了解組裝製造場所需的人力、設備、場地空間，同時也親身實際感受工程量體的巨大。



圖表 18，Smulders 組裝廠全景  
資料來源：Subsea World News

## 五、Gardline

Gardline 創建於 1968 年，今年 8 月份由荷蘭 Royal Boskalis Westminster 併購入集團旗下，現為世界最大的海域調查公司之一，其業務範圍包括：大地工程調查、地球物理、地球化學、水文地理、海洋學、海洋生態環境等。總部位於英國大雅茅斯(Great Yarmouth)，主要的業務可以分為下列三大領域：

### (一)地球物理調查

- 1.高解析度三維震測 (High Resolution 3D Seismic)
- 2.二維地球物理震測 (2D Seismic Geophysics)
- 3.下孔式地球物理探測 (Downhole Geophysical Logging)
- 4.震測資料處理 (Seismic Data Processing)
- 5.未爆彈調查 (UXO Surveys)
- 6.海底管線調查 (Cable & Pipeline Route Surveys)
- 7.海床地形測繪 (Seabed Mapping)

### (二)大地工程調查

- 1.現地試驗(in-situ Test)：圓錐貫入試驗
- 2.土壤取樣：薄管(Shelby Tube)取樣、振動式(Vibrocore)取樣
- 3.實驗室試驗：三軸壓縮試驗、壓密試驗、直接剪力試驗、反覆直接剪力、bender elements 等

4.地質災害評估與判釋 (Geohazard Assessment and Interpretation)

(三)海洋環境調查

- 1.海氣象資料量測
- 2.海洋生態調查

除辦理海域調查工作，Gardline 公司現有船隻約 22 艘，並於世界各大海域執行業務。

	<b>Near Shore Jack UP – UK / Europe - Lankelma</b> 12mtr Water Depth, Modular		<b>MV Ocean Vantage</b> DP2 Geotechnical Drill Ship
	<b>Gardian 1-13 – UK</b> 16-24m crew transfer vessels for the offshore wind industry 7 within the UK/Netherlands		<b>MV Ivero – North Sea</b> Multipurpose Geophysical & shallow geotech – Renewables sector
	<b>Titan – UK</b> Near-shore Environmental & Geophysical Vessels 8 – 16m 4 vessels in the fleet		<b>MV Confidante – UK</b> Shallow draft Multipurpose Geophysical/UXO vessel
	<b>MV Ocean Observer – SE Asia</b>		<b>MV Sea Explorer – North Sea</b>
	<b>MV Duke – SE Asia</b>		<b>MV Sea Surveyor – Atlantic region</b>
	<b>MV Ocean Reliance – North Sea (DP1)</b>		<b>MV Ocean Endeavour – North Sea</b>
	<b>MV Kommandor – North Sea (DP2)</b>		<b>MV Vigilant – North Sea</b>
	<b>RV Ocean Researcher – UK</b>		

圖表 19 Gardline 自有船隻

資料來源：Gardline

參訪當天由業務總管 Mr. Simon Redford 接待並進行公司簡介，由大地工程顧問部總管 Mr. Roi Soage Santos 進行海域地質調查業務簡介及相關詢答。當天另有其子公司運維人員運輸船製造商 Alicat、離岸風電顧問 4C Offshore、

離岸風電工程攝影公司 chpv 進行業務簡報。



圖表 20 與 Gardline 等多家公司接待人員合影

## 肆、實習內容概述與心得

### 一、離岸風力發電計畫風機基礎、碼頭容量與船舶運輸之考量

#### (一)下部結構基礎設計製造發展概述

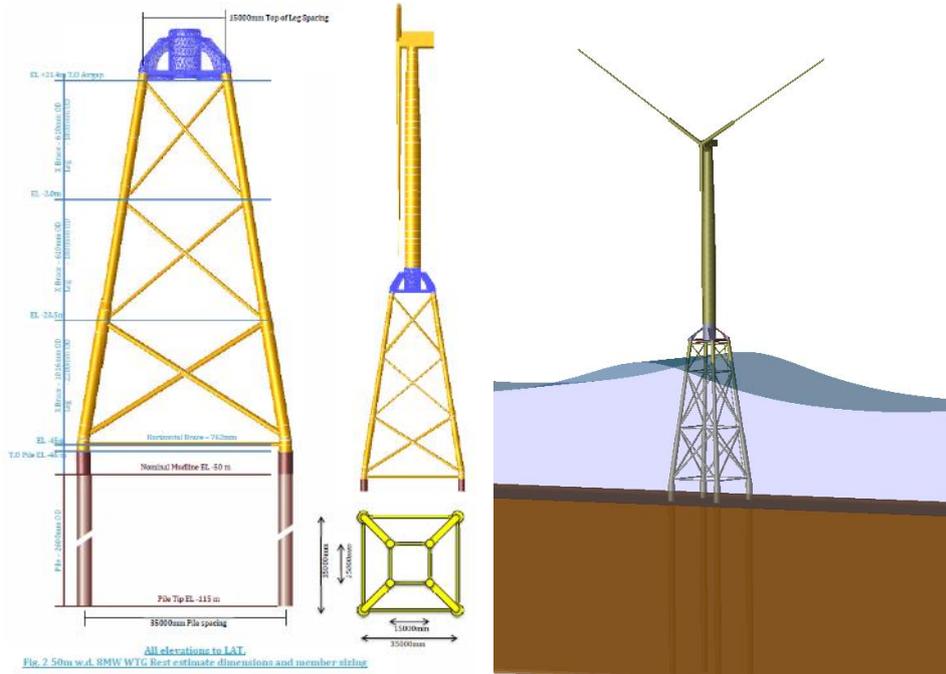
目前幾乎歐洲的開發商於深水區域海床固定式基礎的選擇仍不外乎採單樁、套筒式及重力式等基礎型式；業界雖視單樁為較成熟之選項，然而其設計尺寸卻已達其可行之界限，未來離岸風場計畫持續地往深水區域及大型化風機作規劃，對海床固定式基礎的效能及標準要求也從未降低。因此，套筒式基礎(Jacket type)及重力式(Gravity type)基礎型式相較下雖實績較少，但因其具備在材料選擇與價格經濟等因素，被視為具潛力之選項。目前業界的目標主要是在日益加深的設計水深及風機尺寸加大下，著手進行系列式生產下部結構基礎，考量如何：1.建立具經濟效益的設計準則 2.如何將系列式生產基礎模組化 3.在環境衝擊較低前提下，生產較具在地化原料及經濟優勢的基礎。

其中投入基礎標準化設計包含 1.採預先製造的元件進行自動化組裝 2.利用鋼廠的規格管材進行標準化設計 3.製造時採系列式生產 4.製造場地須考慮地域便利及出港安裝成效等降低建造費用的特性。

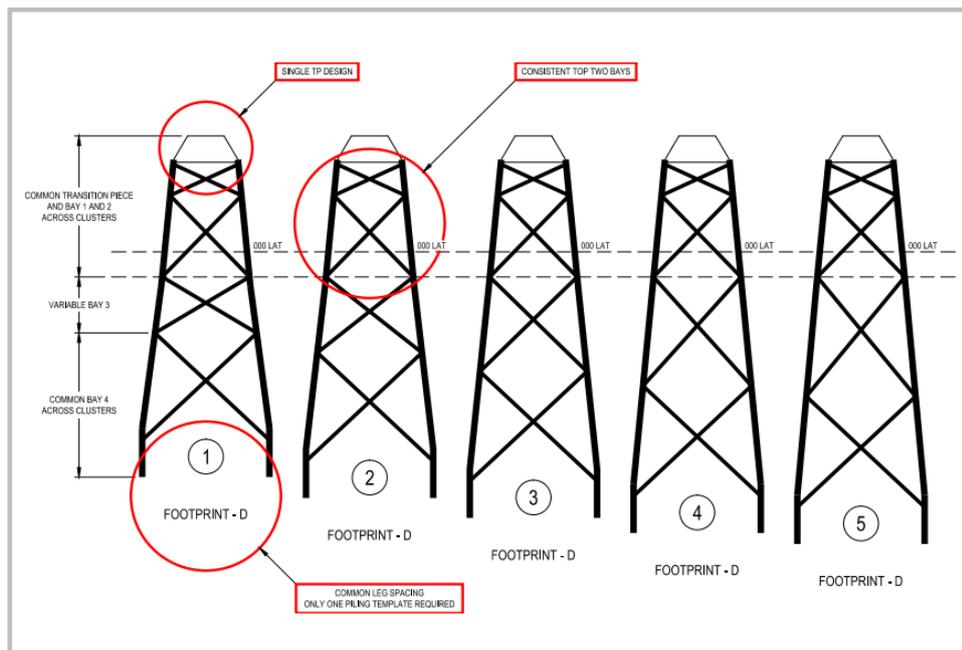
#### (二)套筒式基礎(Jacket)的設計考量包含

##### 1.群組的策略應用於基礎設計

- (1) 場域的水深變化
- (2) 土壤的重大變化
- (3) 樁突出段設計限制
- (4) 採用一致的上部段及連接段



圖表 21 套筒式(Jacket)基礎的設計  
資料來源：Ode



圖表 22 群組的策略應用於基礎設計  
資料來源：ATKINS

- (5)採用一致的跨距(foot print)，採用標準化的打樁模板(piling template)
- (6) J-tube 與海床銜接的標準化設計
- (7)彈性的運輸策略
- 2.地工設計的考量
  - (1)地工調查資料
  - (2)基樁的反應譜包括
    - i.勁度(土壤及突出段)
    - ii.群組限制條件的定義
  - (3)海床變動的不確定性
  - (4)基樁設計的需求包括
    - i.軸向容許承載
    - ii.側向力及運轉疲勞荷重
    - iii.反覆荷重的研究
  - (5)打樁設計包括
    - i.樁頭疲勞
    - ii.鋼材挫屈
    - iii.基樁回彈(refusal)
- 3.耦合及非耦合的策略運用
  - (1)並非所有群組皆需耦合分析
  - (2)可利用過渡段的群組來驗證分析方式
  - (3)非耦合分析可用來補資訊之不足
- 4.套筒式基礎(Jacket)的製造考量
  - (1)施工方式
    - i.垂直施作套筒式基礎及組裝



圖表 23 垂直施作及組裝  
資料來源：Smulders

ii.水平施作套筒式基礎，後續須利用翻轉器翻轉



圖表 24 水平施作運輸

資料來源：Burntisland Fabrications Ltd

(2)尺寸的選擇

- i.標準斷面或訂製的斷面
- ii.深厚比的限制條件

(3)焊接的比較

- i.點對點的施工方式
- ii.機械化及自動化焊接
- iii.單面焊及雙面焊接的比較
- iv.樁突出段與腳架焊接位置的選擇

5.運輸及安裝

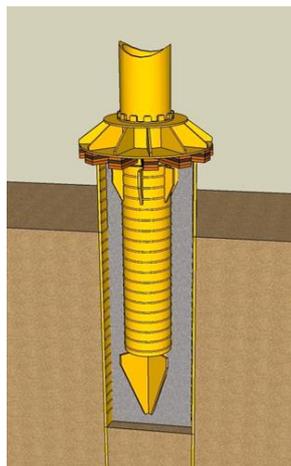
- (1)垂直運送及吊裝
- (2)水平運送及翻轉
- (3)Noble Denton 準則相對較保守

6.運輸中底部固定的設計

- (1)固定器(Gripper)設計條件
- (2)固定器(Gripper)的使用目的
  - i.改善下部構架穩定
  - ii.灌漿時可控制探針移動
  - iii.減少灌漿早期擾動行為

7.三腳與四腳的考量(套筒式基礎)

8.連結段灌漿早期承受反覆荷重的考量



A 60-inch Type ST Gripper welded into the skirt-pile sleeve of a 250-ft jacket. On this project, securing the jacket with the TPG's permitted top-of-jacket activities to take place while permanent sleeve-to-pile connections were made. This simultaneous activity shortened jacket installation time.

圖表 25 (左)連結段灌漿及(右)固定器(Gripper)

資料來源：ode /Oil States Inc

(1)尋求反覆荷重的發生原因

- i.考慮如何減少灌漿段的長度
- ii.側向位移限制需規定(DNVGL-ST-0126)

(2)固定器(Gripper)的位置：腳架探針及基樁上方連接段

- i.可預防軸向及側向位移
- ii.灌漿完成，可選擇拆除或留至既有腳架上
- iii.預防構件長期疲勞效應

(三)重力式(Gravity)基礎及智慧接頭基座(AWC)介紹：

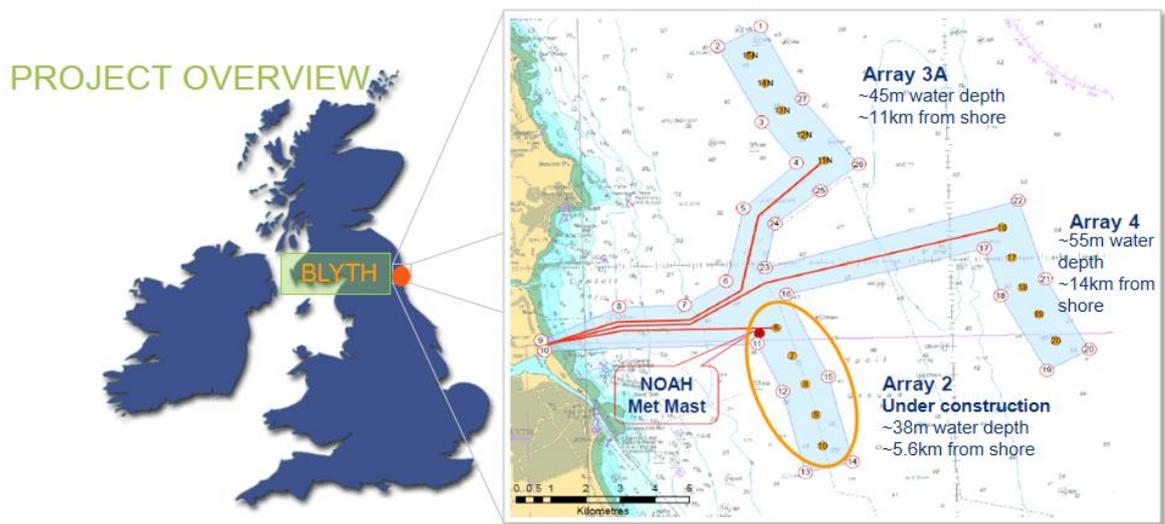
傳統的固定式(Bottom Fixed)基礎設計，需要動員大型起重船及重件碼頭搭配，部份開發商在碼頭尚未建造完備，且安裝船舶供應有限的情形下，英國目前已有實際實績，如重力式(Gravity)及智慧接頭基座(AWC)，下述範例採取基座浮式拖行，到達場址再利用重力佈放(Float-to-Sink)的方式，進行運輸安裝，減少大型船隻的動員及重件碼頭的巨額投資。

1.重力式基礎(Gravity)案例介紹：

(1)Blyth 計畫概述：重力式基礎具備環境面、運輸上、及在地化的優勢。

Blyth 示範計畫-第二陣列			
容量	41.5MW	水深	約 38m
風機型式	5 座 MHI Vestas V164-8.3MW	土壤	砂、沈泥及黏土
BOP	5 座重力式基礎及 66KV 電氣系統	電纜路徑	11 km 海纜，1.5km 陸纜
離岸位置	5.6km Offshore	規劃許可	2013 年 10 月通過
電網連接	Blyth Power Station	商轉時間	預定 2017 年 10 月

圖表 26 Blyth 示範計畫



圖表 27 Blyth 計畫位置

資料來源：bam/eDF

## (2)重力式基礎

主承包商 BAM 及基礎承商 SMULDERS，Van Ord 工作包含規畫設計、基座製造、海床整理及安裝 5 座重力式基礎(GBF)

## (3)挑戰的項目包括：緊迫的工期、創新安裝設計、複雜施工界面、海床整理工作、採基座浮式拖行再重力佈放之安裝作業及 HSE 海事安全作業基準製定。

### i.施工及製造的規劃

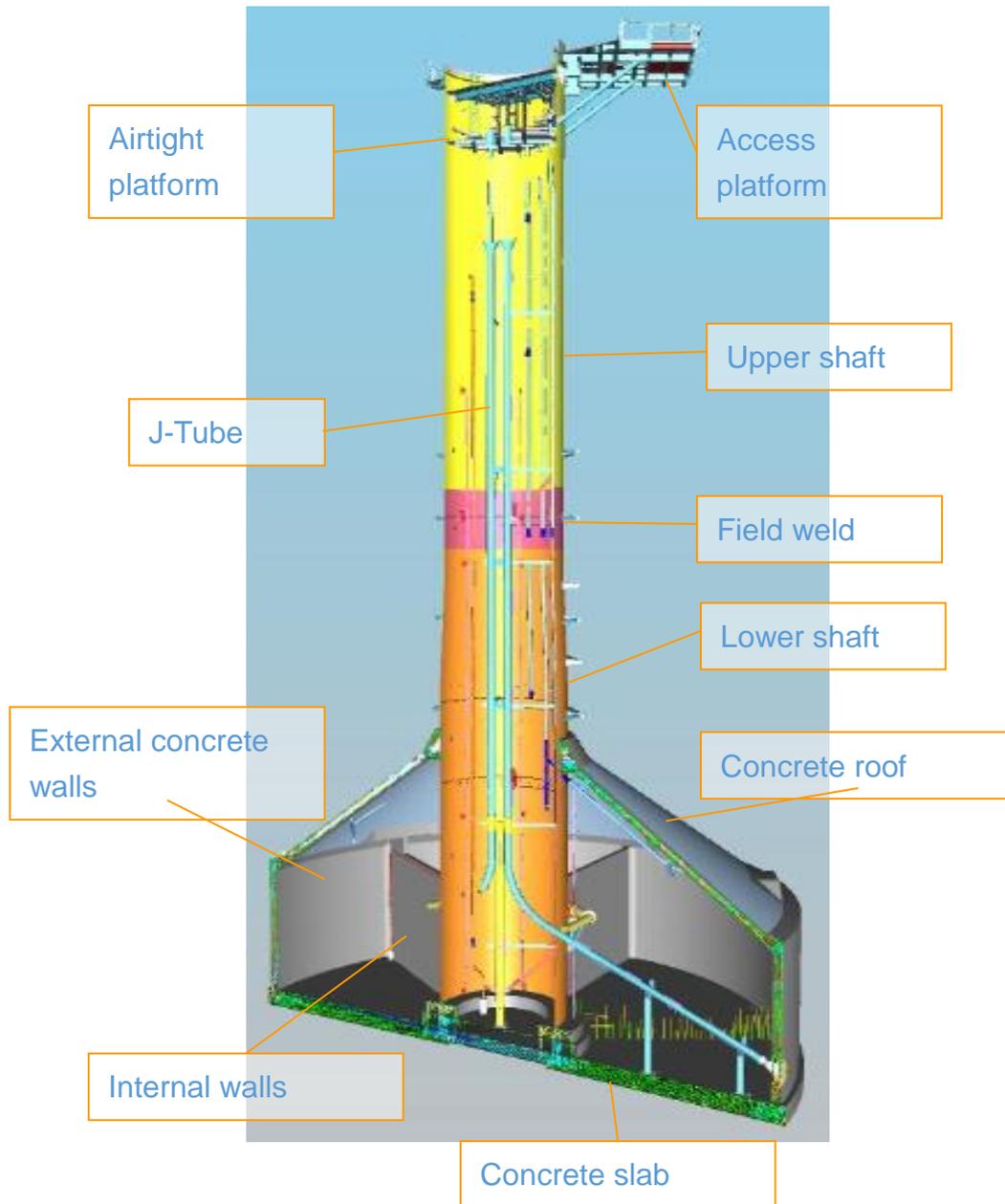
- (i)預製工項包含：沈箱底座及邊牆、上蓋、下部豎井、上部豎井
- (ii)組裝上述各項元件
- (iii)船塢滿水後採浮式運輸(Load Out)
- (iv)沈箱基座側牆及上蓋的製造
- (v)安裝後的公差考量包含法蘭水平公差、高程(LAT)、轉角及位置。

### ii.設計工作規畫及施作

- (i)上段單樁及下段底座採標準化斷面
- (ii)依賴下部壓重抵抗滑動及傾倒外力
- (iii)混凝土基座內部填砂料以穩定底座
- (iv)海床以礫石鋪設以利重力式基礎置放
- (v)採用浮式拖行以降低安裝及運輸費用

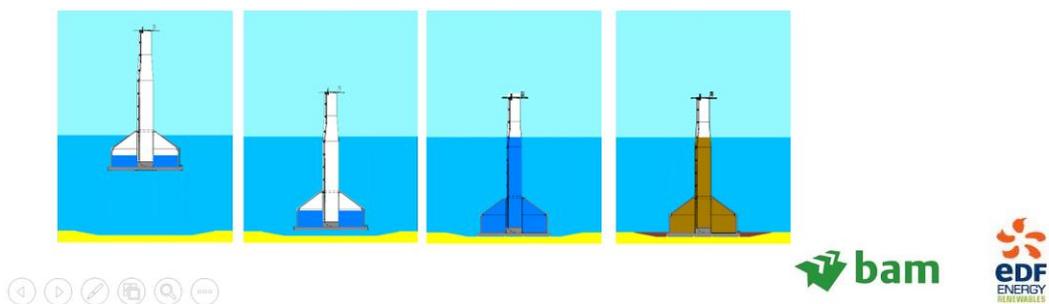
### iii.工期的安排：

- (i) 2015 年至 2016 三月進行招標、基本設計及地質調查
- (ii)2016 年七月至 2017 年六月施工
- (iii)2017 年夏季安裝



圖表 28 重力式基礎

資料來源：bam/eDF



圖表 29 重力式基礎採浮式運輸安裝

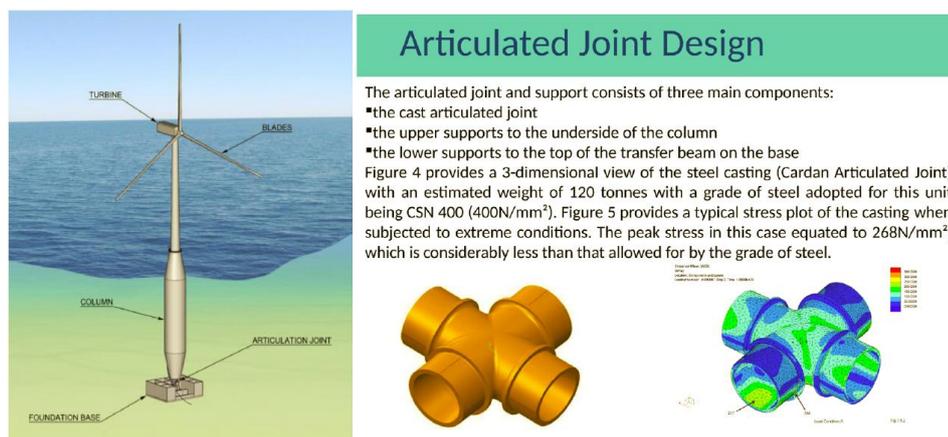
資料來源：bam/eDF

iv. 配套因應方式：

- (i) 所有基礎採標準化設計
- (ii) 詳細設計與施工製作平行作業
- (iii) 與利害關係者充分溝通
- (iv) 先期工程提前以確保主要工作時程能夠配合

## 2. 智慧接頭基座(AWC)案例介紹

- (1) AWC 係由油氣產業之下部結構基礎設計技術而來，在 1968 年由 Elf-Aquitaine 公司首次應用於 Bay of Biscay。目前在油氣產業的實績中，已安裝 13 座 AWC 在深水海域的環境中；AWC 在油氣產業的應用非常多元具有下列特性：**(1)**強化且經驗證之設計、**(2)**具經濟效益、**(3)**係由具實績及驗之廠商開發，由荷重塔柱至人工控制中心，在運維期間僅需有限的維護工作。
- (2) AWC 施工面向材料採用混凝土及鋼結構皆為適宜選項，主要是考量在地的原料、製造成本及是否符合經濟效益而選擇。另外 AWC 可採批次方式製造，一次採四組生產線，最佳製造為每週一座產量效率，另外在組裝、儲存及運送至碼頭出港安裝也非常容易。
- (3) 設計原理係在底座設計一組智慧接頭必須搭配塔柱之荷重，整組下部結構係利用浮力及慣性力提供穩定。據 ODE 公司表示，AWC 之最佳設計水深為 70m 至 200m，塔柱直徑與水深必須互相搭配，塔柱的製造成本與水深的深淺具正相關，惟土壤的性質及海床的特性並不會嚴重影響 AWC 的設置可行性。



圖表 30 智慧接頭基座(AWC)

資料來源：Ode

- (4) AWC 經由惡劣海象環境的北海實地測試驗證，對於下一代風機基礎的設計具有下列優勢：

- i 容易安裝，除役方式與安裝程序相反即可進行

- ii.海床平整度影響小，可於海床整理上減少工作成本
  - iii.ODE 公司建議採用混凝土製作係基於利用在地材料、生產及技術人員能力，並配合產業大量製造降低成本。
  - iv.經由油氣產業示範經驗及模型試驗及分析，具體瞭解 AWC 非常適用於深水區的風機場址
- (5)工程特性：在深水區的離岸，智慧型基座(AWC)係一項具價格競爭的施作方式。因為 AWC 具備下列特性：
- i.海床整理工作較少
  - ii.基礎穩定不受淘刷影響
  - iii.無須打樁對海洋鯨豚影響小
  - iv.無須徵調大型工作船
  - v.對 70m 至 200m 水深具工程效益

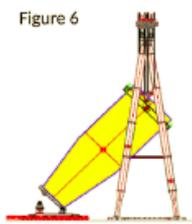
### Onshore Fabrication

In order to achieve a high production rate, well proven modern procedures and processes have been adopted for the construction of both the columns and bases.

The compliant vertical column units are planned to be constructed as two half units, which will be subsequently joined together and post-tensioned prior to placing in the water for mating with the base.

Two half column sections, each about 45m in length, will be constructed in the vertical by the use of variable slipform techniques. Rates of vertical slipforming will be about 3.5m/day, with the completion of a half column section being in about 20 days, allowing for end slab construction.

Figure 6 shows a sequence of downending a half column section prior to transportation to the column assembly area where the two half column sections would be joined together and post-tensioned.



### Installation

Once connected the completed base and column unit will be towed either to a wet winter storage area or directly to the proposed site, as shown in Figure 7.

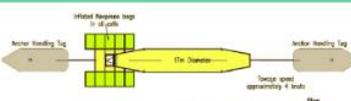


Figure 8 shows the initial positioning of the units on the seabed. The column is shown vertically, with a 'General Release Point of 10m' indicated. The seabed is shown in yellow.

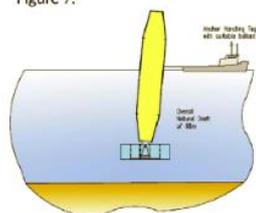
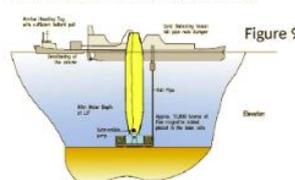


Figure 9 shows the final placement of heavy iron ore ballast into the 10 base cells. The column is shown fully installed on the seabed. Labels include 'Anchor mooring tags and release point', '1000 tonnes of ballast placed in the base cells', 'Elevation', and 'Figure 9'.



together with the deballasting of the column. It is estimated that solid ballasting of the 10 cells in each base would take approximately 6 ~ 8 hours. Final placement of the upper steel shaft, turbine and blades is achieved with the use of a heavy lift crane vessel.

圖表 31 智慧接頭基座(AWC)製造及安裝

資料來源：Ode

(6)遠景：

在油氣產業已具驗證之實例，AWC 創新技術在深水區及高風速區的離岸風力場址，與大風機產生很好的搭配而有經濟效益的設計工法，具有下列特性：

ODE 公司規畫於英國離岸風力示範計畫，設置二座 6MW 至 8MW 大型風機，搭配 AWC 基礎基座，與目前盛行之浮力式基礎相互競爭及合作。

(四)工作碼頭容量及船舶運輸之考量－部結構基礎之製造與組裝

隨著離岸風機持續地往離岸較遠的深海佈置，下部結構基礎尺寸及重量也不斷地向上攀升。目前大部分的風場開發商仍採用底座固定式(單樁及套筒式)基礎，主要原因仍來自相對其它基礎提供較好的經濟性。然而，單樁基礎逐漸受限於尺寸及吊裝的限制，目前僅有有限安裝船足以安裝大型單樁基礎，歐洲的產業鏈也因其一直不斷加大(重)的基礎尺寸而窮於應付。面對接踵而來的離岸風場建置計畫，歐陸開發業者目前發展具規格化套筒式的基礎設計及施工安裝；因此，套筒式構架之群組化設計構想將格外受關注。套筒式構架(Jacket)除結合傳統油氣產業經驗優勢並屏除大尺寸單樁重量及尺寸過大之既有缺點外，基礎的製造與組裝必須配合目前港區(碼頭)產業自動化的供應鏈，完成更可靠且經濟的離岸風場的建置。



圖表 32 下部結構基礎之出港運輸

資料來源：Smulders

1.Smulders 公司在歐洲港口及碼頭區域重件基礎的製造及安裝

9月26日由 Director Tom 及 Business Manager Eric 介紹 Smulders，Smulders 公司位於新堡附近的 Tyne Rive 基礎組裝場(Smulders Projects Newcastle upon Tyne River)

(1)主要工作區域面積包括三處

- i.室內廠房為 1.65 公頃(16500m<sup>2</sup>)、
- ii.外部製造及組立區域約 10.4 公頃(104000 m<sup>2</sup>)、
- iii.總面積約 32.5 公頃(325000 m<sup>2</sup>)包含可提供基礎重件輸出(load-out)碼頭共四席船位。

(2)碼頭容量具備輸出及製造能量為：

- i.13000ton 鐵件重件輸出能力
- ii.50000ton 基礎重件製造能力

2.Smulders 公司市場服務範疇包含離岸風力、油氣產業及重大基礎設。該公司在歐洲風力基礎製造及組裝場址包括五處位置、辦公處所及設施場，總部位於比利時 Arendonk、比利時製造場 Balen、比利時製造場 Hoboken、波蘭製造場 Zary 及英國製造場 Newcastle upon Tyne River。

(1)Smulders 離岸風力下部結構製造產品包含下列：

- i.AC 變電站基礎
- ii.DC 變電站基礎
- iii.連接段 TP
- iv.基礎 Jacket
- v. 離岸風機塔架

(2)新產品及推廣市場包含：

- (i). 重力式風機基礎
- (ii).重力式變電站

(3)推廣市場包含與 China Steel 簽署合作備忘錄(MOU)，預定在台南興達港新建重件碼頭，目前該公司亞太區域下部結構製造廠房，作業活動包含下部基礎製造(包含 Jacke Foundation 及 Suction Bucket)及碼頭現地預組裝(Pre-Assembly)。

3.該公司在歐洲生產線具備每年興建 50 座套筒式基礎的能力，港區組裝應具備基本下列條件：

- (1)技術合格焊工
- (2)碼頭運輸物流管理
- (3)高效能供應鏈
- (4)吊車及多輪車(SPMT)
- (5)高承載力碼頭作業區域
- (6)深水碼頭及航道



圖表 33 套筒式基礎港區組裝

資料來源：Smulders

4.Smulders 公司下部基礎 Jacket 製造分工策略可作為國內業者參考：

(1)上部結構在比利時製造，項目包含

- i.上段結構具塗裝(Primary Steel with Coating)
- ii..中間連接段(Mid-section)
- iii.二次構件(Secondary Steel)

(2)下部結構在英國(Newcastle Tyne River)製造及組裝，項目包含

- i.基樁製造及運輸
- ii.下段結構不含塗裝(Primary Steel without Coating)
- iii.防蝕片安裝(Anodes)
- iv.套筒式基礎 Jacket 吊裝及運輸出港(Load Out)

(五)船舶運輸之考量－風機基礎的安裝及安裝船

Seajacks 公司人事經理 Ian Robertson 簡報說明該公司以 Great Yarmouth 港(碼頭)為根據地，該公司有關風力機安裝船的全球佈局說明，主要介紹歐洲風電計畫之專業型自升式安裝船(WTIV of wider service)Seajacks Scylla 以及亞洲離岸風力計畫使用之自升式安裝船 Seajacks Zaratan。它執行的第一件工作係處理 Veja Mate Offshore wind farm67 座超大尺寸單樁(XL monopoles)安裝工作，每根單樁重達 1300 公噸。目前負責的工作則著重於 DONG Energy 所屬 Walney Extension 的離岸風場。



圖表 34 具安裝效能的自升船 Seajacks Scylla

資料來源：Seajacks

Seajacks Scylla 目前應是業界最大且最具安裝效能的自升船，Ian Robertson 表示其航速可達 12 節，配備 105 米，Scylla 係該公司第 5 艘具動力及最先進 DP2 Jack-up 自升船，主要是應用在離岸風力及油氣產業在安裝及運維上。它是由韓國三星公司建造，在 2015 年八月正式加入 Seajacks 的工作艦隊，其餘四艘分別是 Kraken、Leviathan、Hydra 及 Zaratan。

目前在市場上目標係針對離岸風力計畫及油氣產業，Scylla 的實績包括安裝目前離岸計畫盛行的超大型單樁(XL monopiles)、套管式基礎(Jacket Foundation)，而且曾經執行數量可觀目前市場上最盛行 7~8MW 風機安裝工作。

## (六)英國東部北海風力專用港(碼頭)Great Yarmouth 及其相關供應鏈介紹

### 1. Great Yarmouth 港(碼頭)的介紹

Great Yarmouth 位於北海南側自 1760 年開始原是個兼具漁港及休閒海濱渡假城市，1990 年後開始轉型提供各種適合離岸風力計畫的產業供應鏈，包含施工、製造、預組裝場地及運轉維護等工作。

由於港口提供全方位的條件，Great Yarmouth 區塊是英國政府設計吸引開發商投資的核心風力產業區塊之一。

Great Yarmouth 包括外港及河港，外港係設計供安裝及船隻維護的深水港，河港與外港相呼應沿著 Yare 河岸，有相當多知名的工程及北海油氣產業公司在此設置辦公據點或工廠。這裡也是東英格蘭沿岸貨櫃及風電產業運維的樞紐位置。我們在此拜訪除了 Gardline 公司外，另外還有 4C Offshore 公司、Seajacks 公司、Alicat 公司及 CHPV 公司。



圖表 35 英國東部北海風力專用港(碼頭)Great Yarmouth

資料來源：[www.eastportuk.co.uk](http://www.eastportuk.co.uk)

### 2. Great Yarmouth 港(碼頭)相關供應廠商及其服務範疇介紹：

#### (1) 執行長 Chris Anderson 介紹 4C Offshore 公司及服務範疇包含：

##### i. 海底電纜顧問：

有關海底電纜 4C Offshore 可負責計畫管理、業主工程師、路經規劃設計、地表調查、地工調查、船舶選擇、出港檢查、合約評估、工法評

估、安裝設備評估、資料管理、準備合約文件、風能評估及建議、海事作業活動規劃、工程完成後工作、計畫利害關係人協調。

ii. 網站資訊提供：

- (i). 風場電網及供應鏈資訊
- (ii). 海事計畫專案提供諮詢
- (iii). 供應鏈資訊提供
- (iv). 技術及商業知識情報

iii. 市場情報諮詢：

- (i) 負責追蹤當地法律、政策、財務及供應鏈
- (ii) 組成人員包含市場分析師、精算師、船舶專家、研究員及新團隊。

(2) ALAN ONEILL 介紹媒體服務，包含圖片及 3D 錄影、製作及目前有關無人飛行載具 drones 的應用，可於運維檢測提供圖相判斷結構物及資產是否有損傷，及即時資訊獲得及設備檢測。此外也特別說明無人飛行載 drones 提供快速的資訊供決策者參考，有效改善離岸風力運維作業效率及降低施工計畫的成本。

3. ALICAT 公司總經理 Andy Page 示範及介紹英國風場運維船隻 CTV 的設計及使用功能。

## 二、海域工程地質調查與離岸風機基礎施工

(一) 地質調查資料之整合及視覺化呈現

### 1. 資料整合必要性

每一種調查方式都有其專長及侷限：大地工程調查取得點狀資料，其在空間上的僅屬局部且僅具有有限的代表性，而地球物理調查是間接的調查資料，需要主觀的判讀解釋，因此將兩者結合才能獲得整體且正確的判斷。此外，地球物理調查的成果經常需配合大地工程調查的資料進行反覆調校。透過整合的資料，可以完整識別各種地質災害風險來源，同時對於海床的特性有全面且完整的看法。

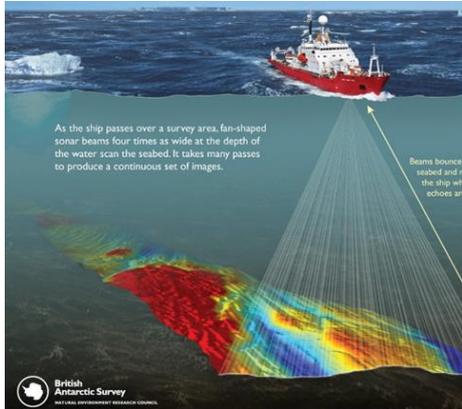
### 2. 資料的重要性

未知本身就是風險的來源，所以調查過程需盡可能獲取最多的資料。在離岸風力發電工程計畫中，所有具有空間座標，同時有可量測的數值資料，都應該整合在地理資訊系統 GIS 之中，其中主要包括：

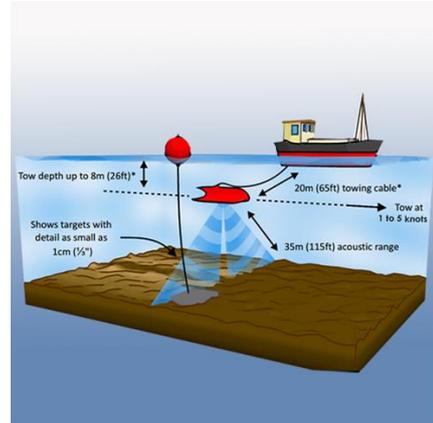
- (1) 海氣象資料：海流、潮汐、波浪、風速風向等氣象資料。
- (2) 地球物理調查資料：多音束迴音測深(Multi-beam Echo Sounder)、側掃聲納(Side Scan Sonar)、磁力探測、底質剖面(2D 及 3D)
- (3) 大地工程調查資料：各式圓錐貫入試驗 (CPT/CPTU/S-CPTU)，鑽探孔資料、土壤/岩石力學試驗

(4)環境資料：保留地、特殊保育區

(5)人為活動：海上活動(航運、漁業、軍事等)、海底電力電纜、海底電信電纜、海底管線、沈船、油氣井



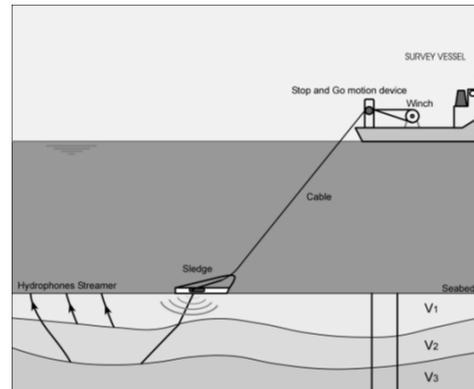
多音束迴音測深



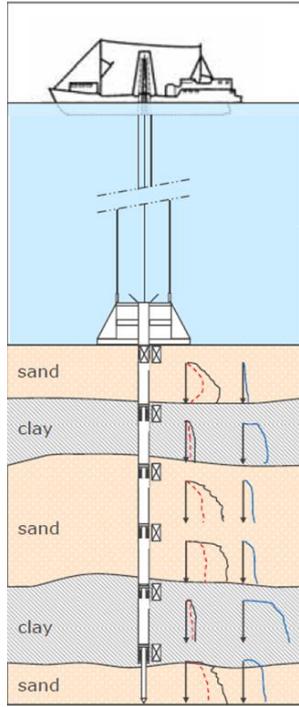
側掃聲納



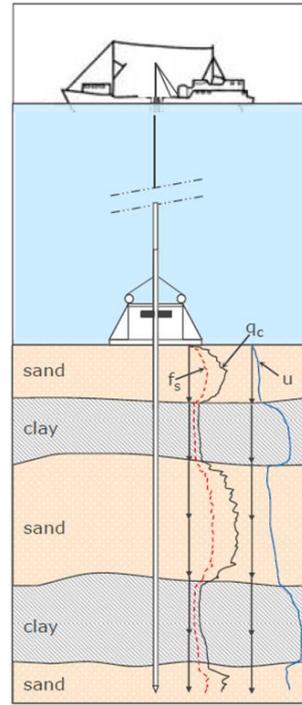
磁力探測



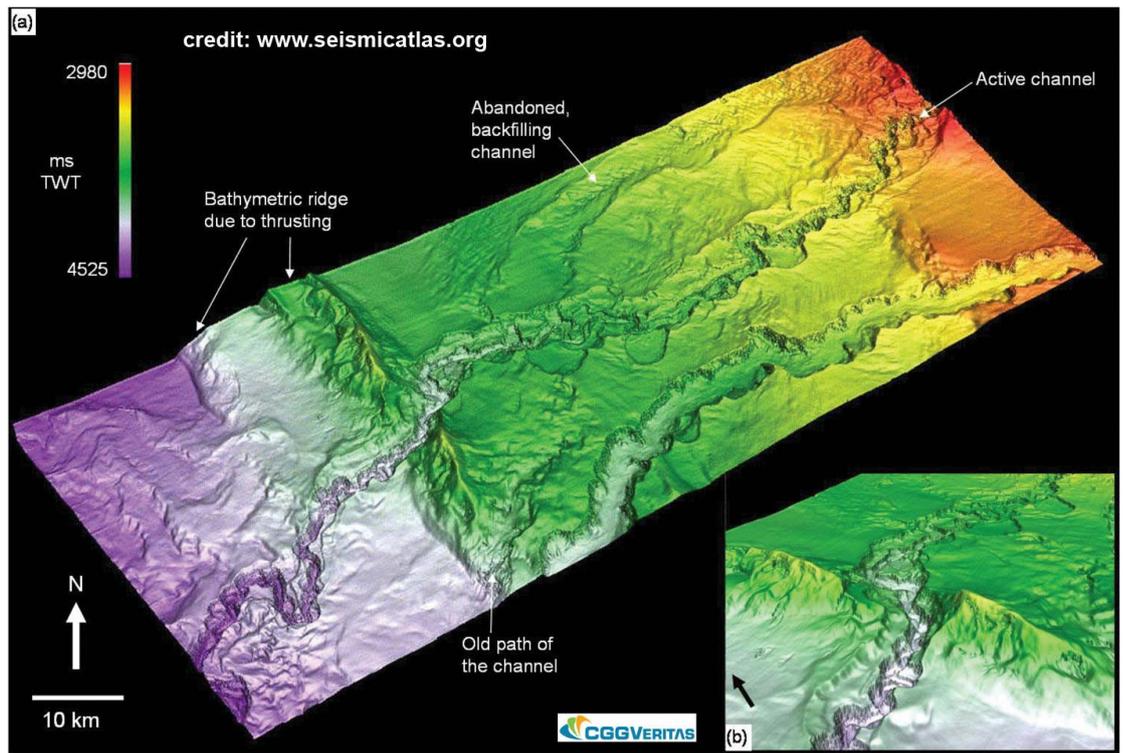
底直剖面



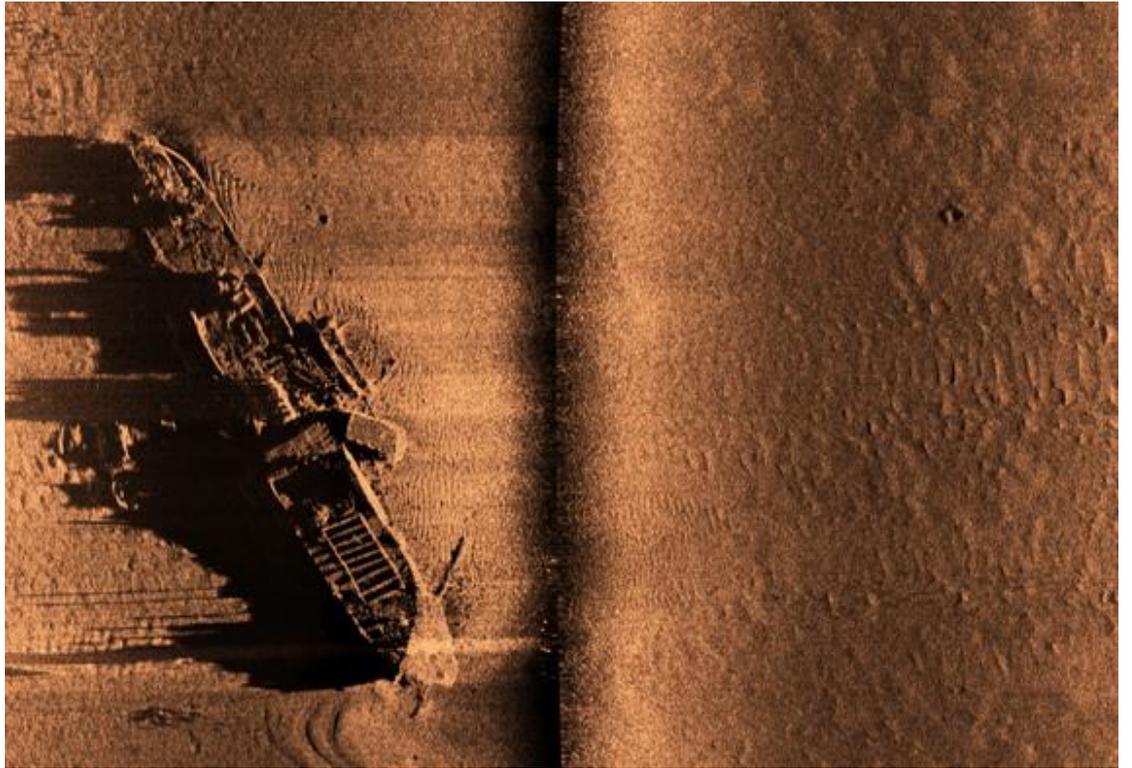
CPT 下孔式



CPT 海床式

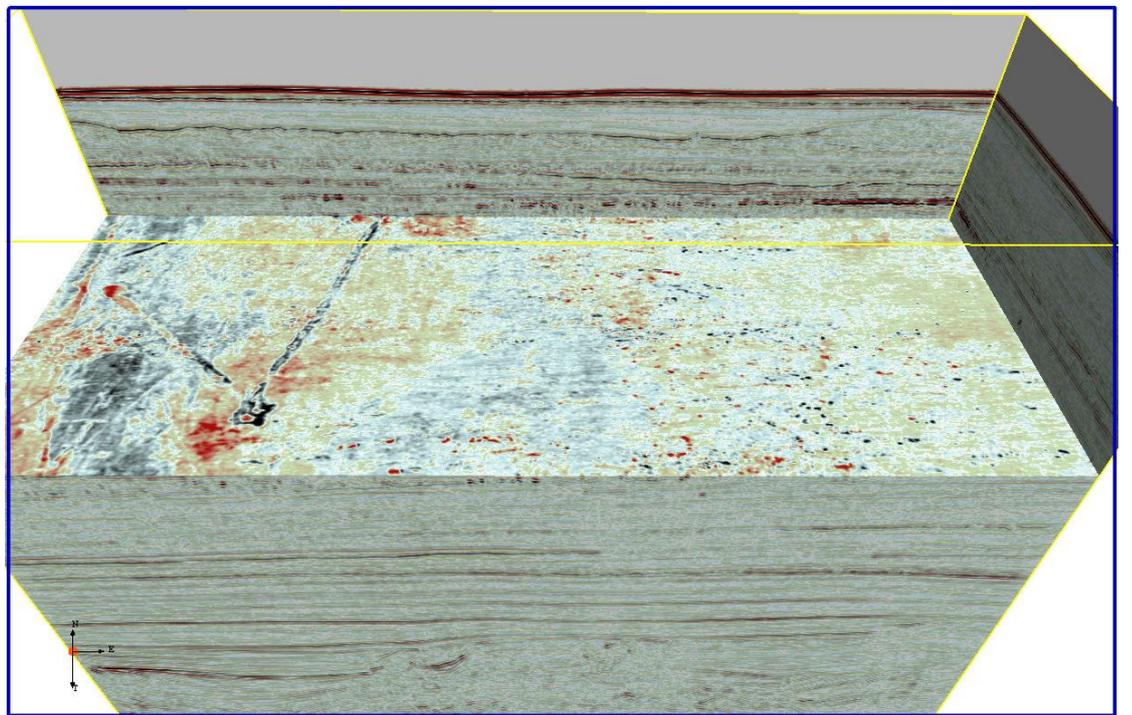


圖表 36 海底地形測繪成果例



圖表 37 側掃聲納成果例

資料來源：EdgeTech



圖表 38 三維震測成果例

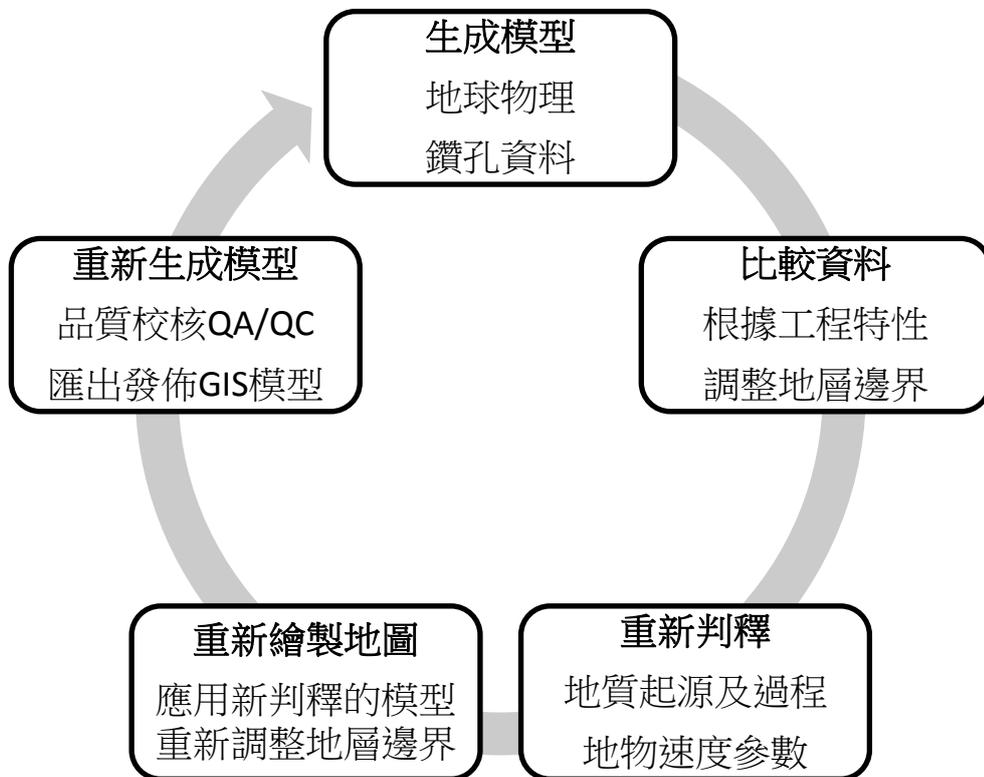
資料來源：Gardline

### 3.如何整合資料

從專案開始即應藉由既有的公開調查資料，配合場址相關(site specific)資料建立地質模型(Ground Model)。隨著專案的進展，藉著取得更多的資料降低專案風險。在每個取得新資料的時間點，都應該重新判釋、整合及評估整個地質模型。這樣的程序，需要反覆多次執行，甚至可以擴展到運維階段(O&M)來輔助資產管理評估。

過程中，分別將地球物理調查所建立的地層邊界，與鑽探孔地工調查成果建立於 GIS 中，此平台提供了一種簡單有效且直觀的方式來比對及驗證不同來源的資料。對比後，地球物理調查成果可以在專業軟體如 IHS Kingdom 或 CODA 經由專家判釋後，將重新調整之地層邊界匯入 GIS 系統。

整個程序是分階段且反覆執行，直到風險降低至可接受的程度。



圖表 39 地質模型建立的程序  
譯自 Cathie Associates 簡報資料

### 4.地質模型建置

因應工程需要，土壤一般需要在廣大面積且複雜的地質中建立分層，其中涉及到大量不同性質的土層及岩層，因此有必要建立次分層(subdivision)，而且單一土層在厚度及空間延伸狀況經常有顯著改變。土層的空間分佈主

要由地球物理判釋結果決定，並經過大地工程調查成果驗證。而對於地質模型的信心取決於：

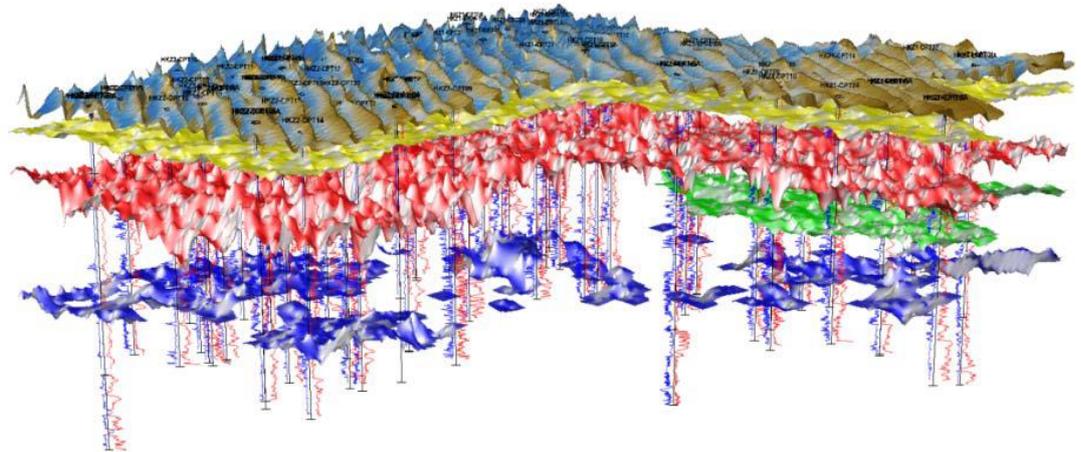
- (1)地質的複雜程度
- (2)地球物理調查的品質及探測深度
- (3)大地工程調查的密度

#### 5.資料整合所需團隊及資源

資料的具有不同的來源，因此團隊需要大地工程、地球物理、工程地質、地貌學等不同專業背景的人員。同時地質模型透過「地理資訊系統 GIS」方式呈現，因此 GIS 專家在團隊中關鍵亦扮演關鍵角色。在電腦軟硬體方面，GIS 屬必備軟體，雖有免費軟體可供使用，但 ArcGIS 是現行產業界標準；地球物理專業軟體如 IHS Kingdom, CODA 等在判釋地地層亦不可或缺，此外由於檔案龐大，常達數 TB 之譜，因此電腦的運算能力及儲存空間均需配合。

#### 6.地理資訊系統

地理資訊系統 GIS 可以儲存、管理、查詢且呈現資料在空間上的關係，並可以在不同資料來源間進行比對與判釋。在離岸風力發電領域包括海氣象、地球物理及大地工程調查資料，藉由 GIS 平台上整合之資料，可以進行地質風險之指認、評估，並採取其相應對策，甚至透過 Python 語言可進行簡單的設計工作。一般包含海底地形、地層、CPT 成果套疊，可以 GIS 以 3D 呈現地質模型(Ground Model)如下圖表 40：



圖表 40 三維地質模型  
資料來源：Fugro

## (二)海底電纜路徑規劃

依照歐洲經驗，海底電纜製造安裝的費用約占整體投資金額的 8-12%，然而從保險業者統計 80%歐洲離岸風場的理賠與電纜相關。傳統上採用之埋設保護指數 BPI (Burial Protection Index)法，已經被風險機率法取代，因為 BPI 只考慮一定尺寸的船錨、對於考量漁具造成破壞及軟弱黏土條件時過度保守、忽略了水深、船錨相關意外的發生機率、路徑上船隻的規模及其通過頻率，尤其是忽略了海岸的侵蝕及海床的地形變化，因此英國 Carbon Trust 提出了決定海底電纜埋深的技術指引 Cable Burial Risk Assuagement Methodology: Guidance for the Preparation of Cable Burial Depth of Lowering Specification.

### 1.資料蒐集

上述技術指引建議，完整的路徑規劃應至少審視並評估下列資料：

#### (1)大地工程調查

- i.除非經底質剖面確認土壤有明顯差異，一般需沿預定路徑並採適當間隔進行 PCPT 達海床下 5m。
- ii.需沿預定路徑並採適當間隔進行土壤取樣，取樣方式可採振動式 (Vibrocore)、重力式(Gravity Core)、活塞式(Piston Core)或其他類似方法。
- iii.室內土壤力學實驗確認沉積物工程特性。

#### (2)地球物理調查

- i.高解析度多音束迴音測深儀(MBES)建立風場內及聯外電纜廊道水深地形
- ii.側掃聲納決定海床的空間幾何
- iii.磁力探側儀確定金屬物位置
- iv.底質剖面解析海床下 5m 內的沉積物構造，同時分辨不同沉積物單元。

#### (3)埋放電纜評估調查

#### (4)水深地形資料

#### (5)區域地質圖

#### (6)AIS 船隻航跡資料

#### (7)漁業研究

#### (8)電纜尺寸

#### (9)電纜路徑(包括路徑變更紀錄)

#### (10)前人研究

#### (11)船隻事故紀錄

Desktop studies	Feasibility survey	Cable route survey	Near shore and landfall surveys
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Collect available data from public and client sources</li> <li>○ Generate 'ground model'</li> <li>○ Design specification for preliminary surveys</li> </ul> <p><b>Duration = three months</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bathymetry</li> <li>○ Side-scan sonar</li> <li>○ Sub-bottom profiling</li> <li>○ Possible UXO clearance for sampling locations</li> <li>○ Seabed sampling/CPT</li> <li>○ Magnetometer</li> <li>○ Environmental sampling and testing</li> <li>○ Laboratory analysis</li> <li>○ Update 'ground model' and propose scope of work for detailed survey</li> </ul> <p><b>Duration = three months</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ As for feasibility survey but focused on selected route</li> <li>○ Detailed UXO survey</li> <li>○ Detailed surveys of crossing points</li> <li>○ Update 'ground model'</li> </ul> <p><b>Duration = six months</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bathymetry</li> <li>○ Side-scan sonar</li> <li>○ Sub-bottom profiling</li> <li>○ Possible unexploded ordnance (UXO) clearance</li> <li>○ Seabed sampling/CPT and/or deeper boreholes for HDD design</li> <li>○ Environmental and geotechnical laboratory testing</li> <li>○ Update 'ground model'</li> </ul> <p><b>Duration = three months</b></p>

圖表 41 海纜路徑地質調查步驟

資料來源：The Crown Estate

## 2. 風險來源指認(Risk Register)

要決定海底電纜埋設深度，應先針對外在威脅的可能造成的傷害以及個別發生的機率進行風險評估。

### (1) 自然風險

i. 沉積物移動(Sediment Mobility)，依規模可分為

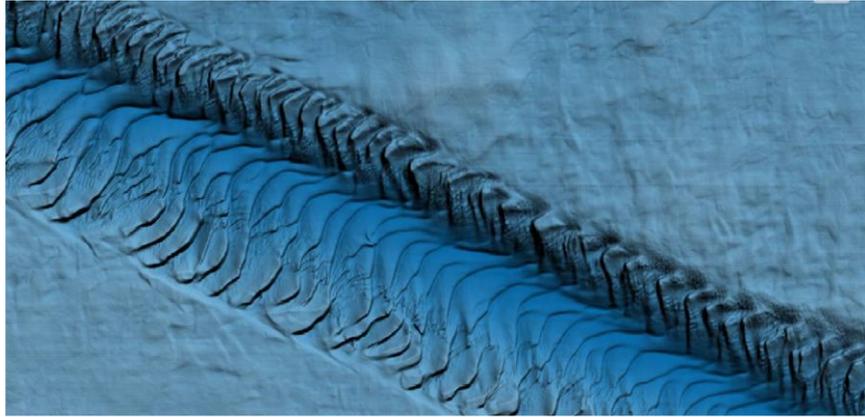
(i) 巨型漣漪(Mega Ripple)：小於 1.5m

(ii) 砂波(Sand Wave)：小於 25m

(iii) 沙洲(Sand Bank)：小於 50m

ii. 地震活動

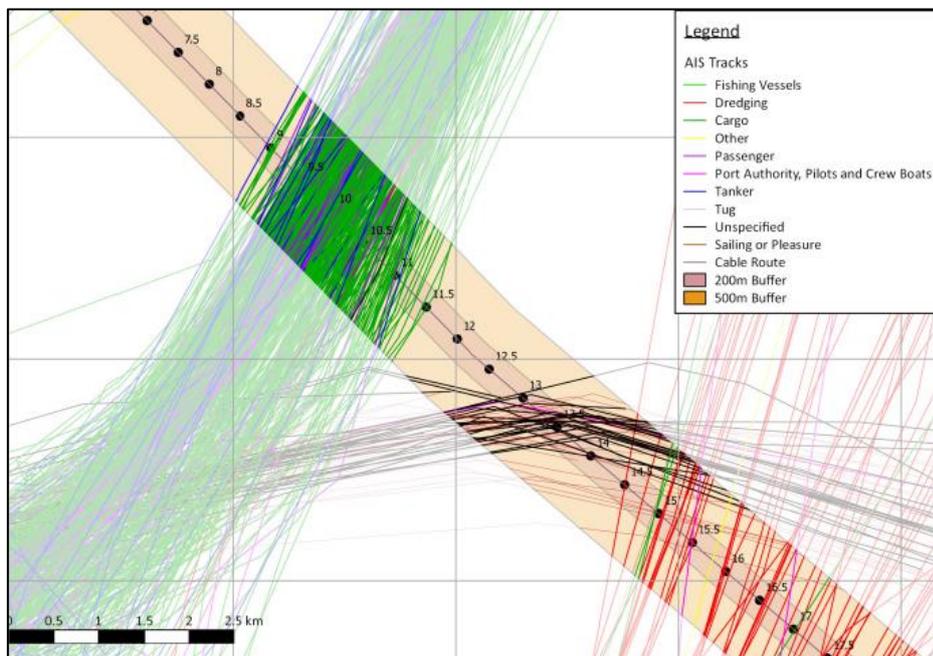
iii. 海底邊坡滑動



圖表 42 砂波地形特徵  
資料來源：Cathie Associates

(2)人為風險

- i.疏濬/抽砂/深海採礦/廢棄物傾到
- ii.其它電纜/電信纜線/輸氣管
- iii.底棲捕漁(Benthic Fishing)
- iv.航運：透過 AIS 船隻航跡資料，可以了解電纜廊道船隻種類，進而推估其下錨可能影響之深度。(如圖表 43)
- v.其它

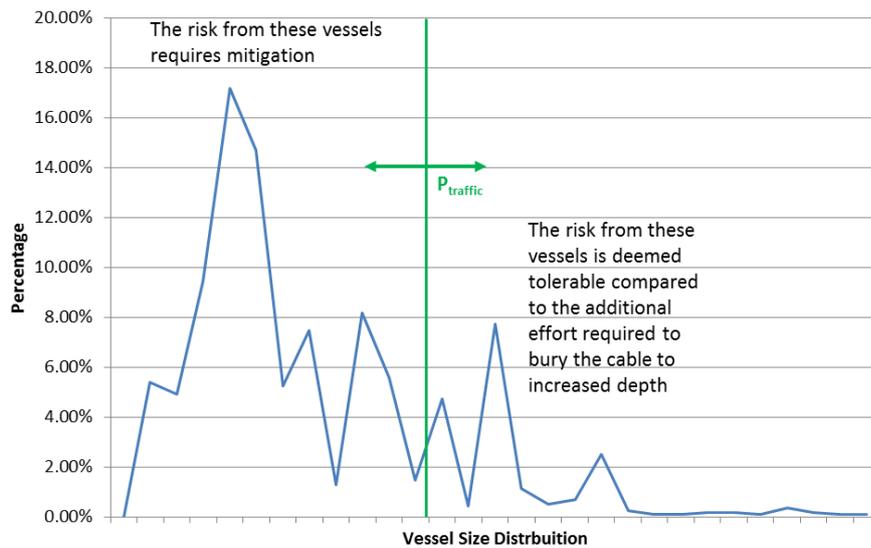


圖表 43 海纜路徑航運調查例  
資料來源：Cathie Associates

### 3. 風險事件發生率評估

依航運資料進行各類型、噸數船隻通過進行機率統計，再乘上意外事件發生機率，並給予水深修正，來求得風險事件發生機率(如式 1)，偶而行經路徑之船隻因其機率低且考量需付出額外成本，故採取接受風險之作法(如圖表 44)。

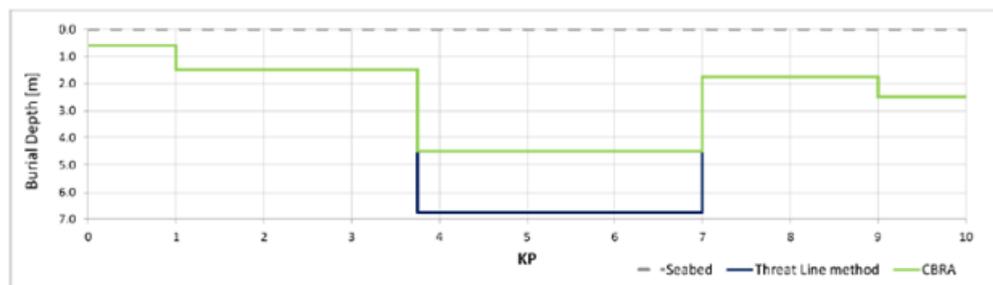
$$P_{strike} = P_{traffic} P_{wd} \sum_1^{No. \text{ ships in Section}} \frac{D_{ship}}{V_{ship} \times 8760 \text{ hrs per year}} P_{incident} \quad \text{式 1}$$



圖表 44 需避險之船隻尺寸決定例

資料來源：Carbon Trust

依前述方法所決定之電纜並非全路徑採取相同埋深，而視其風險調整成數個區段，相較於傳統的 Threat Line Method，CBRA 的方法決定的埋深相對較淺，有助於在風險與成本間尋得合理的平衡點。



圖表 45 海纜埋深變化例

資料來源：Cathie Associates

### (三)基礎施工：基樁打擊監測(Pile Driving Monitoring, PDM)

台灣西部沿岸離岸風機因水深及地質條件關係，下部結構初步規劃以單樁(monopile)或套筒式(Jacket)型式(如下圖)，無論採取何種型式，均需將基樁錘擊至海床，以將上部結構承受的風力、海流等外力傳遞至海床。然而要確認基樁承載力達設計要求，並且在錘擊過程中不致造成基樁損壞，進行基樁打擊監測是常用的工程手段。



套筒式(Jacket)



單樁式(monopile)

#### 1.辦理目的：

- (1)推估極限承載力並確認基樁設計假設條件
- (2)評估基樁尖端挫屈之風險
- (3)據以建立打樁阻力數值模型
- (4)評估打樁過程造成基樁疲勞的影響程度
- (5)可藉以建立反算(back analysis)模型，來推估其它未進行監測基樁之力學行為。

#### 2.辦理方式

- (1)將應力計與加速度計貼於基樁頂部
- (2)紀錄基樁錘擊之應力、衝擊波，及樁底反射波，藉以決定：
  - i.實際從夯錘傳遞到基樁的能量
  - ii.基樁的極限承載力以及在連續打樁的過程中遭遇的阻力
  - iii.沿基樁方向的軸向應力

#### 3.辦理效益：

- (1)打樁過程中即時品質管控：

PDM 是目前唯一可以樁身各處應力狀況之量測方法
- (2)驗證設計：

成果可以用來驗證設計時假設條件的正確性，在特殊局部地質條件造成基樁無法貫入時，PDM 的成果可用來確認軸向承載力是否已達設計要求。
- (3)安裝成本最佳化研究：

國外近期的專案計畫經驗顯示，PDM 成果可以用來檢討基樁尺寸及深度，並顯著的降低成本及工期。



圖表 46 PDM 現場實景照片

資料來源：Cathie Associates

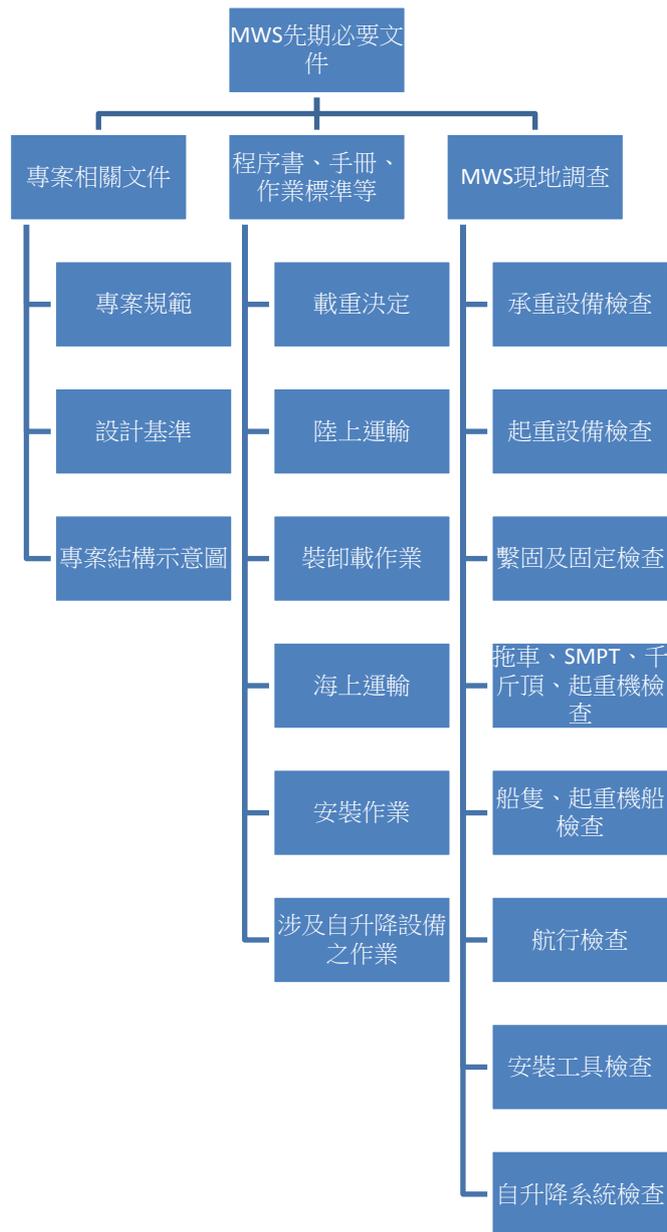
### 三、離岸風力發電機機組安裝與防蝕工程實務

#### (一)離岸風力發電機機組安裝工程

在歐洲，離岸風力發電已有數十年之發展歷史，對於離岸風力發電海事工程方面，相較於國內已經發展相當成熟。而對於海事工程作業方面，歐洲已有發展相應的規範，其中對於離岸風力發電機的海事安裝工程作業，根據國外顧問公司表示多依據 DNV-GL 或 EWEA 規範。

DNV-GL 已於 2016 年整合了多項相關的規範，進而整合提出了 DNVGL-ST-N001 Marine operations and marine warranty (Edition: 2016-06) 標準，作為整個離岸風力發電機的海事安裝工程作業的規範參考。

在海事工程作業中，MWS(Marine Warranty Survey)扮演相當重要且決定性的角色，其重要性亦現於相關標準中。在 DNVGL-ST-N001 標準中，對於 MWS 的要求亦已融合於其中。首先對於文件的要求，便可了解歐洲對於資料完整性及整體性評估的重視，通常所需資料的架構及內容如下圖所示：



圖表 47 MWS 要求所需文件  
資料來源：譯自 DNVGL-ST-N001

在海事工程作業前須進行相關計畫，並建立相關計畫及技術文件，包括：

1. 預定每項作業的時間和工期，並包括突發事件。
2. 能忍受的極限風速、浪高和海流狀態，以及適用於現場的能見度、溫度等限制的特定設備或施工方法。
3. 運輸路線，包括避難點。
4. 安裝船配合作業之駁船、錨船等配合船隻的安排
5. 對其他共同作業或來自其他共同作業所造成的影響

6.突發事件及緊急應變計畫。

7.MWS 的要求等。

此外，經由本次與國外廠商的交流經驗中，深感歐洲廠商對於風險管理相當重視，並有定期性(每月或有重要進程時)滾動式針對各種可能風險項目進行檢討與評估。對於所有可能的、可預想到的緊急情況或突發事件，都應準備好應變計畫或程序。海事工程可預見的緊急情況和突發事件可能包括有：

- 1.惡劣天候
- 2.在預報惡劣天候的情況下規劃的預防措施
- 3.結構或穩定性參數接近預設之限制
- 4.機械、電氣或控制系統故障
- 5.動態定位系統(DP)失效或動力全失("black ship")
- 6.火災
- 7.碰撞或擱淺
- 8.洩漏、淹水
- 9.污染
- 10.結構破壞
- 11.設備故障
- 12.繫泊失敗
- 13.人為錯誤
- 14.人員落水
- 15.人員事故或緊急醫療情況
- 16.恐怖主義和破壞活動。

在整個基礎安裝的打樁作業，若為先打樁(Pre-piling)工法則將使用打樁模板(Piling template)，在使用上應特別考量以下特性：

- 1.該模板之設計及製造需要時間，可依專案進行設計或修改其他專案來使用
- 2.打樁模板通常用於協助基樁定位，以確保基樁能垂直鑽掘或依照射設定的角度
- 3.該模板通常是放置在海床上，但亦可能是固定在自升式平台船的支腳上。若該模板採用固定在自升式平台船的方式，須特別考量該模板所必須額外承受的加速度或流體動力，以及等在水面下時可能額外產生的碰撞等其他風險
- 4.當海床不平整時，該模板應要能夠調整平整。一般而言，海床須先進行調查及清理作業，而該模板可調整角度約以 5 度為限
- 5.當在軟弱海床時，則應可考慮增加使用防沉墊板(Mud mat)



圖表 48 打樁模板(Piling template)

資料來源：DEME

6.模板容易在粘土或淤泥中產生沉降，故應設置噴射或其他方法來有利於抽腳脫身使用

在規劃基礎或風機組件裝載運輸(load out)作業時應考量以下事項：

- 1.場地佈局，包括物件的位置
- 2.運輸船的尺寸和結構強度
- 3.運輸船上的物體位置和支撐高度
- 4.運輸路線調查(考量淨空距離及障礙物)

- 5.水深
- 6.當地的環境影響，如可能浪高、漲潮、風速、航行期間的海流、可能發生的風雨和颱風等
- 7.碼頭的強度和狀況
- 8.卸載現場的碼頭面強度和條件



圖表 49 風機裝載作業  
資料來源：eurogate

其他海事工程注意重點：

- 1.關於起重設備的再度使用，在安裝操作之前，對於已經使用過、未發生事故之起重索具及吊升點，都應由具有合格資格人員進行目視重新檢查。但若曾發生事故或有過偏離原規劃之起重操作作業的起重設備，其起重索具及吊升點，都應重新進行檢查。
- 2.依據 DNVGL-ST-N001 Marine operations and marine warranty 規範規定，用於海事繫固的螺栓一般只能使用一次。在特殊情況下，只有初始預應力不超過螺栓降伏強度的 60%，並且運輸過程中的荷重未超過最大設計值時，才可以再次使用。對於螺栓的重複使用，應制定一份包括排除標準和更換週期在內的定期非破壞檢測的詳細檢查計畫。每個螺栓在每次使用後應進行目視檢查，且每使用三次後應進行磁粉探傷檢查(MPI，Magnetic Particle Inspection)。



圖表 50 海事(風機葉片)繫固作業  
資料來源：renewableenergyworld

## (二)離岸風力發電機組防蝕工程

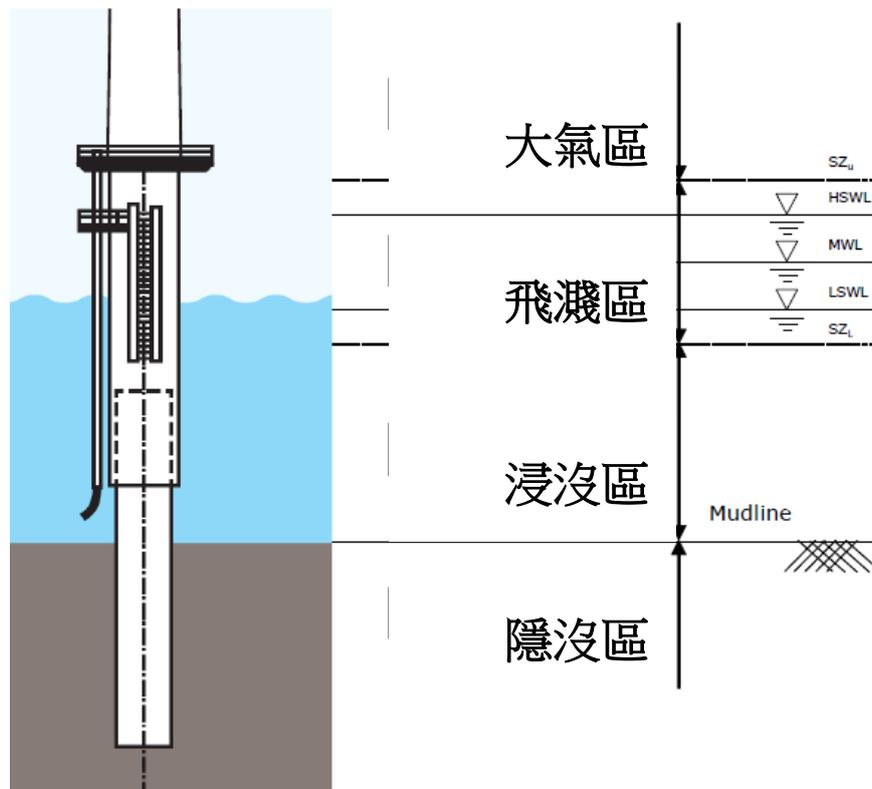
公司目前發展離岸風力發電的彰化外海風場，其鹽害污染區別達 E 級(等效鹽分附著量在  $0.5 \text{ mg/cm}^2$  以上)；依 ISO 12944 腐蝕環境分類，風場區位處彰濱工業區外海，海水鹽度約為 33~34psu，碳鋼之質量損失約介於  $650\text{-}1500\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ ，大氣腐蝕環境分類屬 C5-M，腐蝕性非常高。所以抗腐蝕課題，由於關乎耐久性及風場風機營運年限，對於本公司而言是相當重要的。

根據國內外資料顯示，對於離岸風力發電機組，影響鋼構造腐蝕因素有下列幾項：

- 1.化學因素：溶氧量、鹽度、PH 值
- 2.物理因素：海流流速、潮汐、溫度
- 3.生物因素：海生附著物

離岸風力發電機組整體結構包含上下兩部結構，其中在下部結構由於所處環境而有所差異變化，依其環境特性區分為大氣區、飛濺區、浸沒區及隱沒區，詳如示意圖所示。另根據與英國 ODE 顧問公司研討，除了飛濺區可能會變動外，海床變動(seabed mobility)也會發生，故將造成額外的覆蓋(cover)或暴露(exposure)，這都是在設計時必須要考慮的因素。

經過此行與國外顧問公司研討，其表示離岸風力發電工程的防蝕技術已經發展純熟，現今廣為使用的做法，即為塗裝(coating)、陰極防蝕及腐蝕餘裕，已經相當技術成熟，且目前尚無更新的較佳作法。關於各系統做法，分述如下：



圖表 51 下部結構防蝕分區示意圖

資料來源：Sinotech、DNVGL-RP-0416

### 1. 塗裝系統

依據國外顧問 ODE 提供資料顯示，塗裝系統一般能提供 15~20 年防蝕之使用年限，若需延長結構設計使用年限，則須額外考量腐蝕餘裕或進行塗裝之更新。

容許腐蝕年限為結構設計年限扣除已提供保護機制之有效年限。以飛濺區為例，結構設計年限為 25 年，如考慮採用使用年限 15 年之塗層系統，則須提供 10 年之容許腐蝕年限作為整體防蝕策略，以符合結構設計年限之要求。

### 2. 陰極防蝕

陰極防蝕方式有分為犧牲陽極法 (Galvanic Anodes Cathode Protection, GACP) 及外加電流法 (Impressed Current Cathode Protection, ICCP) 兩種，由於外加電流法須有穩定供電系統，在離岸而言較不方便；另犧牲陽極法具有施工單純、可用於取得電源困難處、無須額外設備，且工程實績豐富的優點，故國外離岸風機多採犧牲陽極法，此行國外觀摩之基礎組裝場亦使用此種陰極保護防蝕系統。

另依據 DNVGL-RP-0416 之建議，陰極防蝕的設計應考慮到沖刷 (scouring) 造成新產生的與海水接觸之暴露面，所以其保護深度應再依照

現場沖刷特性再予以延伸為宜。

### 3.腐蝕餘裕

腐蝕餘裕須視所在區域之腐蝕速率而定，而腐蝕速率依據 DNVGL-RP-0416 之建議，整理如下表所示。此外，腐蝕區的規範應考慮安裝時的所有不確定因素（例如最終的海床高度），且腐蝕裕量的規格應考慮到該結構構件的重要性。

依據 DNVGL-RP-0416 之建議，若在離岸風場大氣區及飛濺區欲使用不銹鋼材料，則至少要 316 等級以上。

區域	表面	腐蝕速率 (mm/yr)
大氣區	外表面	0
	內表面	0(塗裝)
		0.1(無塗裝)
飛濺區	外表面	0.4
	內表面	0.2
浸沒區	外表面	0
	內表面	0.1
海床以下(樁)	外表面	0
	內表面	0

圖表 52 不同區域腐蝕速率一覽

資料來源：Sinotech、DNVGL-RP-0416

綜上，依據 DNV-GL 所提出的各段防蝕工程，並以結構設計年限 25 年進行規劃，則防蝕採用方式方案可如下表所示：

區域	表面	保護系統	腐蝕速率 (mm/yr)	容許 腐蝕年限	腐蝕餘裕 (mm)
大氣區	內表面	塗裝	0	0	0
	外表面	塗裝	0	0	0
		無塗裝	0.1	25	2.5
飛濺區	外表面	塗裝	0.4	10	4.0
	內表面	塗裝	0.2	10	2.0
		無塗裝	0.2	25	5.0
平均海水面下方 1.0m 至 飛濺區下端	外表面	陰極防蝕	0	0	0
	內表面	塗裝	0.2	10	2.0
		無塗裝	0.2	25	5.0
浸沒區至淘刷 範圍下方 2m (含基樁)	外表面	陰極防蝕	0	0	0
	內表面	塗裝	0.1	10	1.0*
		無塗裝	0.1	25	2.5
海床以下 (含基樁)	外表面	無須保護	0	25	0
	內表面	無須保護	0	25	0
<p><b>*DNV-GL-0416 規定最小腐蝕餘裕應至少 1.0mm</b></p> <p>容許腐蝕年限為結構設計年限扣除已提供保護機制之有效年限。以飛濺區為例，結構設計年限為 25 年，如考慮採用使用年限 15 年之塗層系統，則須提供 10 年之容許腐蝕年限作為整體防蝕策略，以符合結構設計年限之要求。</p>					

圖表 53 各段防蝕工程建議案例

資料來源：Sinotech

## 伍、建議事項

一、未來下部結構基礎設計製造面臨挑戰：更大風機、更深水深及更遠距離。未來離岸風場計畫持續地往深水區域及大型化風機作規劃，對海床固定式基礎的效能及標準要求也從未降低，目前幾乎歐洲的開發商於深水區域海床固定式基礎的選擇仍不外乎採單樁、套筒式及重力式等基礎型式；業界雖視單樁為較成熟之選項，然而其設計尺寸卻已達其可行之界限。因此，套筒式(Jacket)及重力式(Gravity)基礎型式相較下雖實績較少，但因其具備在材料選擇與價格經濟等因素，被視為具潛力之選項。目前業界的目標主要是在日益加深的設計水深及風機尺寸加大下，進行系列式生產下部結構基礎，考量如何：1.建立具經濟效益的設計準則 2.如何將系列式生產基礎模組化 3.在環境衝擊較低前提下，生產較具在地化原料及經濟優勢的基礎。

另外投入基礎標準化設計包含 1.採預先製造的元件進行自動化組裝 2.利用鋼廠的規格管材進行標準化設計 3.製造時採系列式生產 4.製造場地須考慮地域便利及出港安裝成效等降低建造費用的特性。

二、傳統的固定式(Bottom Fixed)基礎設計，需要動員大型起重船及重件碼頭搭配，部份開發商在碼頭尚未建造完備，且安裝船舶供應有限的情形下，英國目前已有實際實績，如重力式(Gravity)及智慧接頭基座(AWC)，採取基座浮式拖行，到達場址再利用重力佈放(Float-to-Sink)的方式，進行運輸安裝，減少大型船隻的動員及重件碼頭的巨額投資。

三、地質調查除了完成一部調查報告，並不產出具體如風力發電機、塔架、下部鋼結構、基礎等工程實體，其重要性往往容易被忽略。然而可靠、詳細且高品質的地質調查，無論在陸域或離岸工程都是設計不可或缺的。尤其離岸風力發電投資龐大，設計時除需確認結構安全性外，因其屬常時無人之設施、破壞時通常不會造成工安事件，因此投資的經濟性反而是更重要的考量。在錙銖必較的設計條件，唯有配合包括風力、潮汐、海流、地質條件等環境資料的精密調查，始盡全功。然海域地質調查國內業界經驗及相關硬體設備仍缺乏，故建議持續派員出國考察實習、並參與國際研討會以提升專業知能。

四、風機受風力及海流的反覆加載的特性，土壤在「小應變」的變形及力學行為成為基礎設計考量的重點。然其並非傳統土壤力學重點議題，相關現地及實驗室試驗(in-situ/ lab test)及對應之判釋，應持續深入學習。

- 五、三維地質模型是離岸海域地質調查的利器，可將所有資訊整合於一個地理資訊系統(GIS)之平台進行綜合判釋，如此可彌補各項調查方法的弱點，進而對土壤/岩石的工程特性有完整且正確的判斷。由於操作 GIS 工作量繁重且具高度專業性，英國之地質調查公司都配置有 GIS 專門人員，建議本處亦視需要應調整人力專責辦理，以確保各階段調查資料均能妥善保存且獲得最大的效用。
- 六、建議未來專案工程從事基樁工程時，能於招標文件中增訂使用類似基樁打擊監測(Pile Driving Monitoring, PDM)機制，除了可驗證設計時假設條件的正確性，並可檢討基樁尺寸及深度，將顯著的降低成本及工期。
- 七、此行經與國外顧問公司研討後，國外顧問公司對於套筒式(Jacket)型式由於結構上的贅餘度高，所以對於腐蝕的關切度較小，且加上使用 gripper 對抗彎矩(torque)，以增加結構接合之穩定性與可靠性，故近期使用上已有增加使用該基礎型式的趨勢。另該型式亦較能符合國內目前鋼構廠生產能力之條件，故應可增加該型式基礎在國內之適用性。
- 八、由於海事工程的不確定性及風險性極高，並經由本次與國外廠商的交流經驗中，深感歐洲廠商對於風險管理相當重視，且定期性滾動式進行檢討與評估。故對於所有可能的、可預想到的緊急情況或突發事件，都應參考相關國際規範(如 DNV-GL 或 EWEA 規範)事先妥擬應變計畫或程序，以減少萬一緊急情況發生時之應變時間及應變成本。
- 九、此行參觀 Smulder 的基礎製造組裝場，觀察到其對於無法於廠內進行銲接及塗裝時，均在於銲接或塗裝處架設臨時性鋼構包覆空間，並將所有縫隙以塑膠布封緊，在模擬廠內環境中進行銲接及塗裝，以達到銲接及塗裝所需之環境控制條件。故將來公司風場專案進行施工生產鋼構物件時，應予比照上述國外施作方式，以達到鋼構銲接及塗裝品質之要求，提升結構物之耐久性。
- 十、海事工程的水下作業極為頻繁，在本次與國外廠商的交流經驗中，廠商表示在歐洲已經很少使用潛水夫，現都採用無人遙控水下載具(Remotely Operated Vehicle, ROV)進行水下作業，如此不僅無須設置減壓艙等設備，並可避免潛水人員罹患潛水夫病之後遺症。因國內近年來逐漸重視職業安全衛生，故在海事工程的水下作業方面，亦應全面改採 ROV 進行，以符合國際趨勢。