

離岸風力機的雙腳—水下基礎技術簡述

中國驗船中心風能組鄭偉成專案經理、
綠能科技產業推動中心技術發展組林曉琪副研究員

2019 年 7 月

壹、前言

繼去年經濟部工業局完成離岸風力發電產業關聯執行方案審查後，不論是與零組件廠商協調量產時程或洽談船舶施工等，風場開發商逐步開展各自的風電專案；在此之外，承接示範場域或前期無需滿足組件在地採購要求的風場，為確保建造期程符合專案規劃，早已如火如荼進行組件的訂單及運送，以上緯為例，其海洋風電示範風場第二階段購置的風力機葉片與塔架已於今年 4 月中陸續抵台（圖 1），正在台中港卸載及組裝，力拼年底完工，台灣著實邁入風電大舉開發時期。



資料來源：上緯提供

圖 1、海洋風電示範風場的塔架於台中港的運輸過程

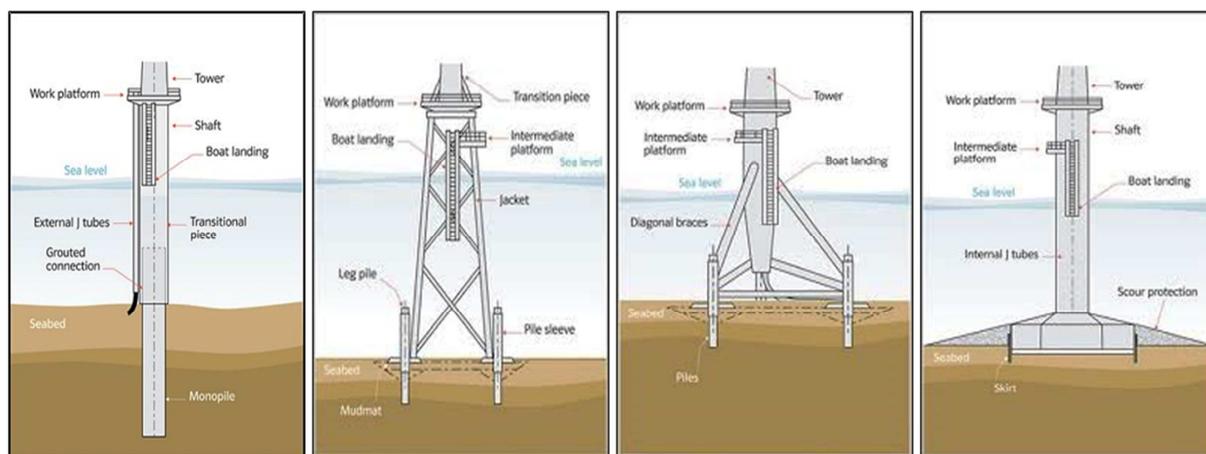
離岸風力機可謂風場核心，若以風力機對比人體構造，塔架猶如風力機的骨幹，支撐風力機；葉片猶如風力機的雙臂，透過空氣動力運轉形成風能；風力機艙是風力機的腦，將擷取的風能有效轉化為電能；使風力機穩固站立海中的，則是風力機的雙腳：水下基礎。

貳、水下基礎的形式—離岸風力機的雙腳，不同場址條件呈現不同樣貌

台灣的地質及海氣象情況均與歐洲不同，歐洲風場風況穩定，地貌多呈平坦，而台灣除了受颱風、地震等自然天災的威脅，由於西部海域多屬海床沈積層，以砂土與

黏土層層堆疊，容易面臨海流不斷沖刷而發生侵蝕問題，致使水下基礎在設計階段，即必須將這類特殊因子納入考量。

再進一步而言，容量更大的風力機有助於捕捉較多風量，伴隨風力機技術與製造愈加成熟，對水下基礎穩定度也愈加要求，不同的海床條件所適用的水下基礎型式亦不相同；依固定式基礎結構，水下基礎大略可分為四種型態（如圖 2 所示），包含單樁式(Monopile)、套管式(Jacket)、三腳式(Tripod)與重力式(Gravity)。



資料來源：節錄 4C Offshore

圖 2、水下基礎示意圖，由左而右分別為單樁式、套管式、三腳式與重力式。

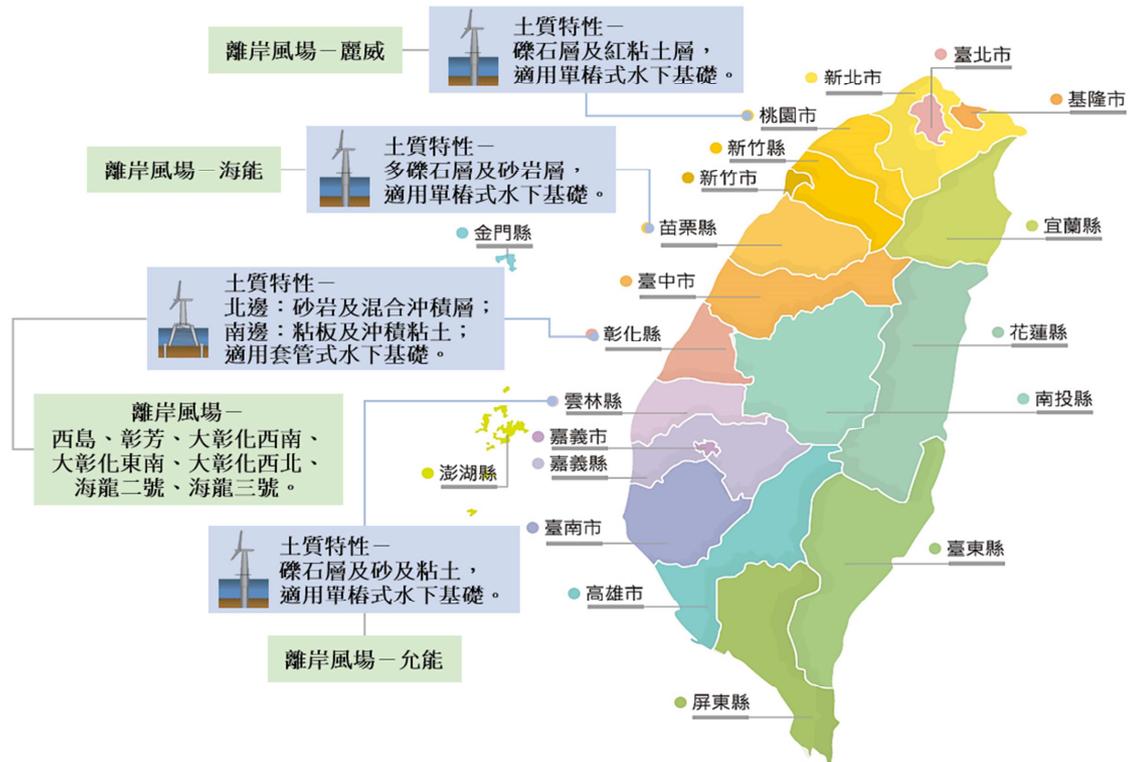
「單樁式水下基礎」適用淺水、海床條件為礫石、砂土或粘土的海域，面積小的風場可利用其縮短施工時程，或大規模的風場可用其降低開發成本，例如退居世界第二大的英國 London Array 風場、或經擴建的 Kentish Flats 風場與目前全球最大的 Walney Extension 風場均採用此型式。

若是深水且較不受海床條件限制的海域，「套管式水下基礎」應是首選，鋼構桁架系統非常適合應用在風量大或可能產生暴風的風場，採用此型式者包含南韓首批具商業規模的 Tamra 風場、美國首座商轉風場 Block Island 與法國即將在 2023 年商轉的 Saint Briec 風場。

同樣不受海床條件限制，但水深中等的海域，可選擇「三腳式水下基礎」，其適合應用在海流強或可能產生劇烈氣候的風場，然因重量偏重使得製造成本偏高，國際上較不普遍，德國首座離岸示範風場 Alpha Ventus 即為少數採用此技術者之一。若是淺水，而地質堅硬的海域，尚有另一個選項為「重力式水下基礎」，不過國際上多利用混凝土放置海床，故平坦地質較無施工疑慮，已於 2017 年除役的丹麥 Vindeby 風場即採用此型式。

依據中央地質調查所公布之地質資料對應台灣離岸風場，桃園、苗栗及雲林區域多為礫石層且土質偏粘土，故選用單樁式水下基礎較有利施工，而彰化區域因受濁水

溪與大肚溪同時沖刷，地質多為沖積層，土質更為鬆軟，水下基礎若採用套管式則較可穩固打入地質（如圖 3）。



資料來源：本研究繪製(2019)。

圖 3、台灣各場域風場對應之水下基礎型式

簡言之，各種固定式的基礎型式其適用環境條件、優勢及限制條件(初步整理如表 1)。

表 1、固定式的水下基礎型式比較表

基樁型式	適用海床條件	平均適用水深 (公尺/Meter)	優勢	限制
單樁	砂質偏軟岩盤	10-30	結構簡單，製造成本低；可降低生態環境及船隻航行影響。	不適用堅硬岩盤；打樁垂直度要求高。
套管	適用多種海床	30-50	穩定性強，可承載風暴負載。	焊接節點多、製造及施工成本高、易受疲勞影響。
三腳	適用多種海床	20-40	焊接節點少、承載能力強。	重量重、施工成本高、須強化焊接節點施工，以避免焊接節因彈性疲勞而產生裂痕。
重力	海床平坦且堅硬	10-20	結構簡單，成本低、疲勞影響低。	製造時程久、需整平海床。

資料來源：本研究整理(2019)。

叁、水下基礎的測試或驗證－取得國際認證，穩紮穩打的水下力量

與水下基礎技術最直接相關之產業包含鋼板及鋼管製造業、鋼構製造加工業與扣件業等，其中即囊括如吊裝、電銲、氣銲從業人員；一般而言，從事前述製造或加工業之企業，需取得由國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)制定的標準，即 ISO 9000 系列認證，以確保管理企業採用標準管理程序與穩定管理品質。另，基於風電技術規範大多來自歐洲，從事水下基礎的企業不僅須取得鋼結構製造規範 EN 1090 認證，更須取得銲接品質管理系統 ISO 3834 認證（如表 2）。

表 2：ISO 3834 各部分的內容

等級	說明
ISO 3834-1:2005	選擇適合品質要求等級的準則。
ISO 3834-2:2005	完整的品質要求。
ISO 3834-3:2005	標準的品質要求。
ISO 3834-4:2005	基本的品質要求。
ISO 3834-5:2015	宣告符合 ISO3834-2、ISO3834-3 或 ISO3834-4 時應符合之文件。
ISO 3834-6:2007	實施 ISO 3834 的指引。

資料來源：本研究整理(2019)。

ISO 3834 標準涵蓋銲接品質的生產計畫、母材儲存、設備安全、銲接材料與程序管理、銲接品質要求、銲接從業與管理人員的技能檢定等，並加以區分為基本(ISO 3834-4)、標準(ISO 3834-3)與完整性(ISO 3834-2)的等級（如表 3 所示）。

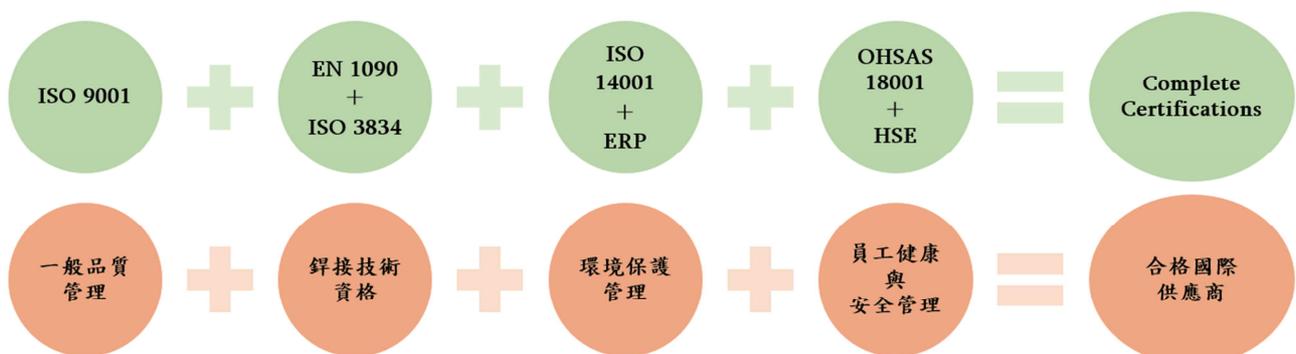
表 3：ISO 3834-2 至 ISO 3834-4 各部分的差異

要項	ISO 3834-2 完整的品質要求	ISO 3834-3 標準的品質要求	ISO 3834-4 基本的品質要求
審查要求	要審查且要記錄	要審查且可能需要記錄	要審查但不需記錄
技術要求	要審查且要記錄	要審查且可能需要記錄	要審查但不需記錄
最終品質責任	不論製造商是否將其生產或服務再對外發包， 最終品質責任仍為製造商。		
銲接作業者及 銲接操作者	均具備資格檢定認可的要求。		
銲接測試與 驗證人員			
銲接管理者	具備資格檢定認可之要求		無特定要求
生產與測試設備	準備過程、執行方法、檢測與驗證、運輸、升降均應結合安全設		

要項	ISO 3834-2 完整的品質要求	ISO 3834-3 標準的品質要求	ISO 3834-4 基本的品質要求
	施及防護等，且應確保安全設施及防護的適當性及可用性。		
設備維護	須確保設備確實可生產產品		無特定要求
	需有文件紀錄	建議有文件紀錄	
設備說明	需有設備說明的文件清單		無特定要求
生產計畫	需檢具生產計畫及相關文件清單	建議檢具生產計畫及相關文件清單	無特定要求
銲接程序規範書	均應檢具銲接程序規範書與程序檢定之相關文件		無特定要求
銲接程序檢定			
銲接材料之批次測試	被要求時實施		無特定要求
銲接材料之貯存與運輸	應依供應商要求檢具相關程序及說明之文件清單		依據供應商之要求
母材貯存	應檢具避免受到環境影響的保護措施，且應有存放位置與材料的識別方式。		無特定要求
銲接前、中、後檢測與驗證	要求實施		被要求時實施
銲後熱處理	應符合製品的標準要求或滿足規範		無特定要求
	應檢具程序及相關紀錄	建議檢具程序及相關紀錄	
不符合程序及矯正措施	落實管控措施，要求有修護或改正程序文件		無特定要求
檢測與驗證設備之校正及量測	需檢具設備校正及量測相關文件	建議應檢具設備校正及量測相關文件	無特定要求
過程中的識別性	應依供應商要求時要求實施		無特定要求
追溯性	應依供應商要求時要求實施		無特定要求
品質紀錄	應依供應商要求時要求實施		

資料來源：吳隆佃、莊士誠(2014)及本研究整理(2019)。

依國內已接到風場開發商訂單之業者經驗，通過前述之 EN 1090 與 ISO 3834 標準僅能表示及格，其他尚有各項專案規範引用之 ISO 非破壞性檢測(Non-Destructive Testing)要求需要滿足，以確保水下基礎結構與運作的可靠性（如圖 4）。



資料來源：世紀風電提供
圖 4、水下基礎至少應取得之國際認證

肆、小結—建構在地供應鏈，協助產業升級或轉型

固定式的水下基礎有其適用的水深範圍，超過適用水深可能致使成本增加，因此國際已出現浮動式載台的技術，以英國已併網的 Hywind Scotland 風場最為著名，鄰國日本也投入相關研究，並興建兩項示範案，伴隨離岸風電開發階段將由潛力場址走向區塊開發，當下的前瞻技術，都將有實現的可能。

我國離岸風電自去年邁入開發元年，作為台灣發展綠色能源重點項目之一，除了落實 2025 年 5.5 GW 的裝置容量目標以外，亦承載著建構本土產業供應鏈的期待；國內雖尚未有全面性的技術條件，藉由滿足政府在地採購的政策，逐步累積離岸風電的工程實務經驗，而水下基礎正顯現著傳統鋼構製造的技術轉型，為離岸風場提供穩定而札實的力量。

本文相關風場簡介

1. 由德國意昂集團(E. ON)、丹麥沃旭能源(Ørsted)與魁北克儲蓄投資集團(Caisse de dépôt et placement du Québec)共同開發英國 London Array 風場位於泰晤士河外海 11 公里處，採用單樁式水下基礎之水深約 25 公尺，共安裝 Siemens 3.6MW 風力機 175 座，總裝置容量達 630MW，於 2013 年 4 月商轉；資料來源：4C Offshore。
2. 英國 Kentish Flats 風場屬瑞典能源公司 Vattenfall 所有，位於英國 Thanet 海岸以南 11 公里處，採用單樁式水下基礎之水深約 10-16 公尺，原安裝 Vestas 3MW 風力機共 30 座，總裝置容量 90MW，Vattenfall 於 2013 年 2 月獲准擴建風場 49.5MW，新增 Vestas 3.3MW 風力機共 15 座，全數已於 2015 年 9 月併網；資料來源：4C Offshore。

3. 英國 Walney Extension 風場屬 Ørsted 所有，位於沃爾尼島以西約 15 公里處，採用單樁式水下基礎之水深約 30 公尺，原 Walney 1 與 Walney 2 風場已安裝 Siemens 3.6MW 風力機共 102 座，總裝置容量 367.2MW，並於 2012 年 3 月併網；隨著大型風力機出現，Ørsted 於 2014 年 11 月獲准擴建風場 659 MW，新增 Vestas 8.25MW 風力機 40 座與 Siemens 7MW 風力機 47 座，全數已於 2018 年 6 月併網；資料來源：Walney Extension 風場官方網站。
4. 南韓 Tamra 風場屬南韓東南電力公司(KOEN)所有，位於濟州島離岸 0.5 至 1 公里處，採用套管式水下基礎之水深約 20 公尺，共安裝斗山重工 3MW 風力機 10 座，總裝置容量 30MW，於 2017 年 9 月商轉，為南韓首批具商業規模的風場；資料來源：4C Offshore。
5. 美國 Block Island 風場屬 Ørsted 所有，距離羅德島州海灣約 6 公里處，採用套管式水下基礎之水深約 20 公尺，共安裝 GE 6 MW 風力機 5 座，總裝置容量 30MW，於 2016 年 12 月併網，為美國首批商轉的風場；資料來源：Block Island 風場官方網站。
6. 法國 Saint-Brieuc 風場由西班牙私營跨國電氣公司 Iberdrola 持有，位於 Saint Brieuc 海灣約 20 公里處，採用套管式水下基礎之水深約 40 公尺，將安裝 Siemens 8MW 風力機 62 座，總裝置容量 496MW，預計 2023 年商轉；資料來源：Iberdrola 官方網站。
7. 德國首座示範離岸風場 Alpha Ventus 由德國電力公司 EWE、E. ON 與 Vattenfall 共同持有，位於 Borkum 北方約 45 公里處，採用三腳式水下基礎之水深約 30 公尺，共安裝 Adwen 5MW 風力機 12 座，總裝置容量 60MW，於 2010 年 4 月併網；資料來源：4C Offshore。
8. 由沃旭持有的丹麥 Vindeby 風場是全球第一個離岸風場，鄰近 Lolland 約 2 公里處，採用重力式水下基礎之水深約 4 公尺，共安裝 Siemens 450kW 風力機 11 座，總裝置容量 4.95MW，已於 2017 年 9 月除役；資料來源：4C Offshore。

參考文獻

4C Offshore，<https://www.4coffshore.com/>。

Block Island 風場官方網站，<http://dwwind.com/project/block-island-wind-farm/>。

Iberdrola 官方網站，<https://www.iberdrola.com/home>。

Walney Extension 風場官方網站，<https://walneyextension.co.uk/>。

中央地質調查所，山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書，桃園市，2015 年 12 月，
[https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/announcement/1041231/L0011/
桃園市劃定計畫書_公告版\(定稿\).pdf](https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/announcement/1041231/L0011/桃園市劃定計畫書_公告版(定稿).pdf)。

中央地質調查所，山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書，苗栗縣，2015 年 12 月，
[https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/announcement/1041231/L0013/
苗栗縣劃定計畫書_公告版\(定稿\).pdf](https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/announcement/1041231/L0013/苗栗縣劃定計畫書_公告版(定稿).pdf)。

中央地質調查所，山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書，彰化縣，2015 年 12 月，
[https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/notice/1050523/彰化縣劃定計畫
書_預告.pdf](https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/notice/1050523/彰化縣劃定計畫書_預告.pdf)。

中央地質調查所，山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書，雲林縣，2015 年 12 月，
[https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/announcement/1050829/L0015/L
0015雲林縣劃定計畫書.pdf](https://www.moeacgs.gov.tw/newlaw/downloads/announcement/1050829/L0015/L0015雲林縣劃定計畫書.pdf)。

吳隆佃、莊士誠，與銲接品質管理有關的 ISO 標準—從 ISO 3834 的品質要求談起，〈銲
接與切割〉，頁 24-27，24 卷 3 期，103 年 9 月。