

行政院及所屬各機關出國報告書

(出國類別：實習)

離岸風力風場規劃與  
風力發電機最佳化之技術研習出國報告

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：林承龍/主管輔機

出國地區：法國、瑞士、奧地利

出國期間：107/8/12~107/8/25

報告日期：107年10月1日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

離岸風力風場規劃與風力發電機最佳化之技術研習出國報告

頁數 46 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

林承龍/台灣電力公司/主管輔機/(02)2366-6975

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他：

出國期間：107/8/12~107/8/25

出國地區：法國、瑞士、奧地利

報告日期：107年10月1日

分類號/目

關鍵詞：離岸風力發電、風力發電機、風場規劃、最佳化運轉。

內容摘要：(二百至三百字)

離岸風力發電為目前台灣發展再生能源的新潮流及未來趨勢，本公司預定109年底完成本公司第一座離岸風場，因此實習計畫主要為參訪法國、瑞士、奧地利離岸風力發電先驅、研究中心與顧問公司，藉由現場參訪以及技術討論，其豐富成功之研究發展經驗，將可學習及了解目前先進開發之技術，及了解所遭遇之困難處。本次出國任務針對未來歐洲地區等離岸風力的市場發展、離岸風力發電機技術發展趨勢、風場規劃、風力資源調查發展現況、風機最佳化運轉及未來市場潛力等多項議題，瞭解先進國家之經驗及未來技術之發展，本公司目前正積極發展離岸式風力發電，離岸風力工程正進行及規劃中，藉此提供本公司及台灣未來離岸風力發電發展方向。本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

## 目次

### 摘要

壹、 出國目的與過程.....	1
一、緣起	
二、目的	
三、行程	
貳、 參訪及實習內容 .....	3
一、GE Renewable 公司之參訪.....	3
1. 公司簡介	
2. 參訪內容	
二、ETH Zurich 蘇黎世理工學院之參訪.....	13
1. 公司簡介	
2. 參訪內容	
三、Ventus Engineering 公司之參訪.....	22
1. 公司簡介	
2. 會議內容	
四、離岸風力規劃之綜合資訊 .....	28
參、 心得與建議 .....	45

## 摘要

離岸風力發電為目前台灣發展再生能源的新潮流及未來趨勢，本公司目前已完成離岸風力一期工程招標，預定 109 年底完成本公司第一座離岸風場，因此實習計畫主要為參訪法國、瑞士、奧地利離岸風力發電先驅、研究中心與公司，藉由現場參訪以及技術討論，其豐富成功之研究發展經驗，將可學習及了解目前先進開發之技術。

由於近年來聯合國為抑止全球氣候繼續惡化，及抑制溫室效應氣體排放，要求各個工業國家減少污染排放量，巴黎氣候高峰會限制二氧化碳等溫室氣體排放，因此再生能源的推動成為各國電力業者發展的重點，為了減少二氧化碳的排放，風力發電以及其他再生能源將成為減少二氧化碳排放之重要角色。另外，石化能源價格之上漲，能源資源也日漸匱乏，環境污染的考量，新的替代新能源，將漸漸取代並減低目前依賴之核能、燃煤以及天然氣發電，其中以風力發電最為一個可行的方案，風力為取之不盡、用之不竭之新的再生能源，而風能由於其在經濟上比其他再生能源更具有競爭潛力，因而發展迅速，以目前再生能源的開發，採兼顧能源安全、經濟發展、環境保護等策略，現階段再生能源以離岸風力、太陽能等發展較為成熟，使用較為廣泛，由此可以預見離岸風力發電將是未來 20 年內再生能源開發之主力之一。

爰此，本次出國任務將針對未來離岸風力的市場發展、離岸風力技術發展趨勢、事故案例分析與預防、風機最佳化運轉等多項議題，藉由參訪全球離岸風機製造商 GE 公司、及世界及歐洲知名大學蘇黎世理工學院、以及奧地利風力發電顧問公司，瞭解先進國家之經驗及未來技術之發展，以期對本公司在推動離岸風力上有所助益。

## 壹、出國目的與過程

### 一、緣起

離岸風力發電為目前台灣發展再生能源的新潮流及未來趨勢，本公司目前已完成離岸風力一期工程招標，預定 109 年底完成本公司第一座離岸風場，因此實習計畫主要為參訪法國、瑞士、奧地利離岸風力發電先驅、研究中心與公司，藉由現場參訪以及技術討論，其豐富成功之研究發展經驗，將可學習及了解目前先進開發之技術，及了解所遭遇之困難處。本公司目前正積極發展離岸式風力發電，離岸風力工程正進行及規劃中，藉此提供本公司及台灣未來離岸風力發電發展方向。

### 二、目的

藉由此次國際離岸風力發電公司業務拜訪以及世界知名研究機構訪談，瞭解先進國家之經驗及未來技術之發展，並拓展技術交流與互惠合作的機會，除供目前本公司離岸風力發電第一期計畫規劃參考外更對本公司在未來推動離岸風力發展上有所助益。本公司為台灣電力主要供應者，面對國際二氧化碳減量的協議與環保的趨勢以及日本福島核災後，政府所推動再生能源之新能源政策，近期世界各國無不積極發展離岸風力發電，故藉由參訪歐洲離岸風力供應商、工程顧問公司等研習相關最新作法與技術，倘若能將此技術應用於未來離岸風場之建置，將更有助於本公司再生能源之推廣。

### 三、行程

本次行程主要針對離岸風力風場規劃、風力發電機技術發展趨勢、風場佈置、風機最佳化的挑戰及解決方案、離岸風機發展現況等進行研習考察，分別由法國巴黎 GE 再生能源總部拜訪開始，再至瑞士蘇黎世理工學院拜訪，最後參訪奧地利 Ventus Engineering 風力顧問公司，共計 14 天：行程紀要如下表所示：

參訪行程表

日期	主要參訪行程
107/8/12	往程(台北-巴黎)
107/8/13~107/8/22	GE Renewable 再生能源總部 參訪與簡報會議
	ETH Zurich 蘇黎世理工學院實驗中心 參訪與簡報會議
	Ventus Engineering 參訪與簡報會議
107/8/24~107/8/25	返程(維也納-台北)

## 貳、參訪及研習內容

### 一、GE Renewable 公司

#### 1. 公司簡介

奇異公司 GE 公司為世界著名之離岸風機製造商，其離岸風機製造技術為世界先驅，目前亦發展未來 10MW 以上風機研發，其相關技術或工程經驗可提供未來離岸風場規畫、風機發展、風機選擇及風機運轉的重要參考。隨著各風機製造商技術的精進，現今風機單機裝置容量已逐漸往大型化發展，目前市場上的主流離岸風機單機容量為 5~8MW，未來十年內，隨著風機技術的成熟及快速發展，加上各開發商尋求較低建置成本開發，風機大型化已成為未來的趨勢，8MW~12MW 單機容量之離岸風機將陸續進入市場，除了可降低各項工程成本，也提升風場的發電效益，讓各開發商可於開發經濟成本下降，持續推展開綠色能源。

奇異 GE 公司集團是全球電力、飛航、電器和自動化技術領域的領導廠商，致力卓越的技術讓電力公用產業與工業界客戶們能在提昇績效同時並減低對環境所造成的影響。GE 集團的業務遍佈全球多個國家，集團總部位於美國，其再生能源總部設在法國巴黎，有關風力發電的製造廠及設計中心遍及歐洲各國，包括風機組裝廠位於法國 Nantes 及 Saint Nazaire，另設立一研究發展中心於西班牙巴塞隆納，為開展研究和技術的重鎮，該公司承諾繼續投資研發技術，以不斷地創新作為企業的核心價值。GE 公司在全球設置各項售後運為服務據點，並提供全方位服務以達成以下目標

提升風機及風場可用率

改善發電效益

零組件最佳化運轉及提升使用壽命

另外，預防先期性的零組件故障偵測，例如潤滑油油品分析，震動測量等即時性監控，可即時於故障發生前作更換或更新，降低故障率及無預警的損害。

## 2. 參訪內容

本次參訪 GE Renewable 再生能源總部等，該再生能源總部主要負責歐洲陸域與離岸風力業務以及其他再生能源業務，係由該公司業務經理進行簡報介紹及進行雙方的意見交流，討論議題包括 GE 公司離岸風機研究發展與歐洲、法國離岸風力發展概況。



圖片:GE 公司巴黎再生能源總部

## GE 公司離岸風機之發展

歐洲目前主要風機製造商包含：GE、Siemens Gamesa、MHI Vestas、Adwen 及 Senvion 等，另美國、日本等國家亦積極投入開發離岸風力發電，然而由於離岸風機製造技術門檻較高，且須長期投入大量研發成本，故現僅有少數廠商具備製造離岸風機的能力，亞洲主要為日本 Hitachi 公司，而 GE 公司目前業務涵蓋歐洲及美洲市場。

GE 公司 Haliade 6MW 目前離岸風機原為 Alstom 公司所研發，後經 GE 收購後，該機組成為 GE 公司全球主要離岸風機市場機組，未來持續研發更大型離岸風力發電機組，機組單機容量 12MW 未來上市後，將成為全球單機容量最大之風力發電機。Haliade 6MW 風機為直驅式發電機，無配置齒輪箱，機艙空間配置較為簡化及寬敞，其基本規格如下：

## GE Haliade 6MW 風機基本規格



圖片:GE 6MW 風機示意圖，圖片來源: GE 官方網站//www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/

Rated power 額定出力	6 MW
Rotor diameter 轉子直徑	150 m
Blade length 葉片長度	73.5 m
Rotor swept area 葉片掃掠面積	17,860 m <sup>2</sup>
Hub height 輪轂高度	另定
Generator type 發電機型式	Direct drive permanent magnet 直驅永磁式

資料來源:GE 官方網站//[www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/](http://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/)

該風機 Haliade 6MW 風機主要設計創新點為

Pure Torque(純轉矩) 及 Direct Drive(直驅式)

Pure Torque(純轉矩)之設計，轉換及傳導由葉片傳遞過來之不必要或過餘應力直接傳遞至塔架主架構，藉此可保護發電機避免受過大應力並確保及增進發電性能。另採用最新直驅式永磁發電機技術，與先前傳統式直驅發電機相比，發電機配置較簡化且重量更輕，該項直驅

式發電機設計與純轉矩設計可提升風機運轉可用率及效能，並可大量減少運維成本。73.5m 長之葉片構成葉片轉子直徑 150m，其強度與耐用性可有效率提升發電效益，相較目前市場上之離岸風力發電機，發電量可藉此提升約 15%，每部機並可提供約 5000 戶歐洲居家用電。

資料來源:GE 官方網站//[www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/](http://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/)

## GE Haliade X 12MW 風機基本規格



圖片:GE12 MW, 風機資料及圖片來源:GE 官方網站//[www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/](http://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/)

Rated power 額定出力	12 MW
Rotor diameter 轉子直徑	220 m
Blade length 葉片長度	107 m
Rotor swept area 葉片掃掠面積	38,000 m <sup>2</sup>
Hub height 輪轂高度	另定
Generator type 發電機型式	Direct drive permanent magnet 直驅永磁式

資料來源:GE 官方網站//[www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/](http://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/)

該 GE Haliade-X 12 MW 目前正發展研發中，預計約 2021 年可量產上市，該風機將成為全球最大發電最多之離岸風力發電機，轉子直徑 220m 及 107 公尺長之葉片將由 LM 公司製造提供，除了成為世界最大的風機，也將成為海上最有效能的離岸風機，成為現代化風機中最能轉化風能成為電力的機械。該風機採用獨特之設計特徵，結合大轉子，長葉片，以及高容量因素特點，可因應較大的風速變異，增強其可預測性，可於低風速產生更多發電量，目前市面上，該風機將成為低風速的自然條件下年發電量可達最高之離岸風力發電機。一部 Haliade X -12MW 年發電量約 67 GWh，發電量高於目前市面上的機組約 45%多，年發電量也比 Haliade 6MW 近兩倍，若依據歐洲北海之氣候條件，每部機並可提供約 16,000 戶歐洲居家用電，若以一 750MW 風場採用 Haliade X -12MW 風機，將可提供約一百萬戶歐洲居家用電。

下表為目前離岸風力風機製造商及其單機型式與容量

### 離岸風機製造商

風機廠商	離岸風機機型
GE	Haliade 150-6MW (單機 6MW)
MHI Vestas	V164-8.0 MW , 9.5 MW (單機 8.0MW , 9.5MW)
Hitachi	HTW5.2-127 , 136 (單機 5.2MW)
Siemens Gamesa	SWT-6.0-154 (單機 6.0MW)
	SWT-7.0-154 (單機 7.0MW)
	SWT-8.0-167 (單機 8.0MW)
Senvion	6.2M 152 (單機 6.2MW)
Adwen	AD8-180 (單機 8.0MW)

資料來源:各風機廠商官方網站資料

## 法國離岸風力發展概況

法國目前為止，尚無任何大型離岸風場之建置，在 2012-14 年期間，法國政府核准六個離岸風力專案的投標予法國和外國公用電力事業公司，但民眾對風力發電場的反對導致這些專案開發延宕，且當時國際離岸風電價格成本已大幅降低，因此法國能源部門認為這些離岸風立專案成本太高，政府對計畫的補貼成本過高，因此造成該六個離岸風力專案開發遲延。

法國目前離岸風力之最新發展及其面臨的困難與挑戰，據了解，法國已於 2012 年起陸續標法國外海的離岸風場開發權約 3GW 裝置容量，然而目前仍未有任何離岸風場完工或發電，主要原因可能為受到當地居民的反對，較繁雜之申請程序及過高的政府躉售補貼，因此各個開發案都面臨延遲。下圖為該六個離岸風力專案開發之位置圖。

資料來源：<https://www.offshorewind.biz> 網站報導



圖片來源 <http://www.offshorewindindustry.com/news/> 網站報導

法國該六個離岸風力專案基本資訊如下：

**Fécamp 離岸風力專案**

(EDF 集團開發，總裝置容量 498 MW)

**Courseulles-sur-Mer 離岸風力專案**

(EDF 集團開發，總裝置容量 450 MW)

**Saint-Nazaire 離岸風力專案**

(EDF 集團開發，總裝置容量 480 MW)

**Saint Briec 離岸風力專案**

(Iberdrola 集團開發，總裝置容量 480 MW)

**Dieppe-Le Tréport 離岸風力專案**

(Engie 集團開發，總裝置容量 496 MW)

**Ile d' Yeu et de Noirmoutier 離岸風力專案**

(Engie 集團開發，總裝置容量 496 MW)

該六項海上離岸風力發電專案總裝置容量共計近 3GW，不過法國政府近期批准了六項延遲開發的海上離岸風力發電專案，但大幅削減了躉售補貼，從原有的 EUR200/MWh 的躉售價調整為 EUR150/MWh，各個開發案將陸續開始進行與動，因此未來數年後，該六項海上離岸風力發電專案將陸續動工及完工發電，為法國提供海上離岸風力發電。

## 二、ETH Zurich 蘇黎世理工學院

### 1. 機構簡介

蘇黎世聯邦理工學院 ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology) 是世界最著名的理工大學之一，高居世界前 20 名之名校，連續多年位居歐洲大陸理工科系先驅，在全世界範圍亦與美國麻省理工學院享有同樣崇高的學術地位，有歐洲第一名校的聲譽。該校創立於 1855 年，蘇黎世聯邦理工學院為世界一流科學研究人員、研究環境和條件，學生也可以在這裏接受全面扎實的各級、各科系的大學研究所高等教育，蘇黎世理工學院由分為 5 大學科類並由 16 個院系組成。現有 500 多位教授及 20000 多名學生，其教學研究領域涵蓋建築、工程學、數學、自然科學、社會科學和管理科學，該校曾經誕生了 21 位諾貝爾獎得主，世界著名科學家愛因斯坦亦為該校之校友。

蘇黎世理工學院為世界及歐洲知名的大學研究中心，從事各項再生能源研究，亦為風場評估的研究領先者，其研發之風場分析軟硬體及設備可精確量測風場及流經風機之氣動力負荷，可應用於離岸風場之先期規劃與評估及離岸風場佈置，以及提供未來離岸風場規畫及風機最佳化運轉的重要參考。

#### Laboratory for Energy Conversion (LEC) 能源中心實驗室

該實驗中心隸屬於蘇黎世理工學院機械與加工工程學系，該中心致力於各項研究從運輸至發電、能源轉換至能源消耗，藉由複雜先進之能源轉換技術應用於提升自然資源有效運用，降低環境衝擊並發展各項再生能源。

## 2. 參訪內容

### 機構研究領域

資料來源:<http://www.lec.ethz.ch/research/wind-energy.html> 官方網站

該研究中心其主要研究領域包括渦輪機械實驗 (Turbomachinery Experimental)、渦輪計算流體機械(Turbomachinery CFD)、風能(Wind Energy)、電漿科學(Plasma Science)、儀控(Instrumentation)、能源經濟與策略(Energy Economics and Policy)。有關風力發電及風力資源之研究領域如全尺度風機之現場實驗，動態風機之控制實驗，以及風場風流場及大氣模擬，該研究實驗利用傳統能源轉換技術創造出風場專案之增進風機性能，降低成本，保持高可靠度之間端整合性質之研究，其主要關鍵研究領域如下：

### 全尺度風機研究 Full Scale Wind Turbine Research

全尺度之實驗獲得相關性能數據及詳細流場測量，測量結果藉由該實驗中心研發之模擬工具軟體作比對及校核。由於現代化之風力發電機之轉子直徑高達 100 公尺以上，因此該研究中心採用移動式光達(Mobile Lidar)以及無人飛機 (UAV) 作各項量測與研究。



圖片來源:LEC 官方網站 Source:<http://www.lec.ethz.ch/research/wind-energy.html>

LEC 實驗中心配有一部移動式光達車(Mobile Lidar)，該車並配有 3D 光達掃描系統，光達系統可測量風速與風向，其可測距約 6km 以及 30m 空間解析度，可詳細化量測小範圍或大風場區域之風力資源，以及顯示單一或多風機之尾流(Wake)特性，進一步並配有量測風機結構氣動負荷態之儀器。另搭配一無人機協同測量風場資料，該無人機另配有該中心之快速響應氣動力探測儀，可測距約 1.5km 以及 5m 空間高解析度，應用於風速、風向、紊流等量測，地面控制站監控已程式化的飛行路徑之無人機，搭配 GPS 衛星定位資訊，該無人機可自主性飛行於風機前後與附近進行量測，無人機上之控制器控制該無人機之飛行速度及高度，使其可依所需控制其飛行模式環繞風機。

## 動態尺度風能研究 Dynamically Scale Wind Energy Research



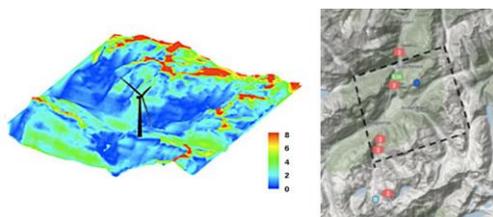
圖片來源:LEC 官方網站 Source:<http://www.lec.ethz.ch/research/wind-energy.html>

LEC 實驗中心配有一測試模擬實驗平台，該實驗設施採用水流體模擬風場流體，將等比例風機模型置於水中，風機模型上方配有一移動式台車，藉由台車的移動，創造出水流移動，該水流移動模擬風場移動，藉此觀測風場尾流現象以及風機受力情形，該實驗平台亦可模擬及測試各風機動態控制之研究，包括葉片旋角 Pitch Control 控制及風向轉向控制 Yaw Control。

該實驗平台可在一可控置環境下提供一等比例全尺寸風機流場雷洛數 Reynolds Number，結合轉矩量測計可精確測得各項性能數據及不穩定的負荷。詳細的流場量測採用水動力探測計及流速計等，未來各項研究可藉此實驗平台致力推廣應用於浮動式風機，葉片冰雪荷重影響，風場陣風，擾流，尾流等交互影響及量測。

## 進階模擬工具 Advanced Simulation Tools

LEC 實驗中心自行研發風場模擬軟體，採用 Immersed Boundary Method 邊界模式模擬地形風流動，及風機於風場風流動，藉此分析複雜地形的風流動狀態。該邊界模式採用單一卡式網格模擬風流動進而得到完整風花圖，該計算方式可比其他計算流體的計算省下不少運算時間，另外該模式採用高解析度網格模擬風機擷取風能的計算，因此，該中心研發之進階模擬工具可準確地作為分析地形影響、多風機尾流效應之應用，未來該中心持續目前的計算基礎研發增進，以求降低各項風場量測之不確定性，以及風場開發期程。



圖片來源:LEC 官方網站 Source:<http://www.lec.ethz.ch/research/wind-energy.html>



蘇黎世理工學院校園 LEC 實驗中心照片

## 風場量測方式比較

量測方式	量測範圍	量測空間解析度	量測範圍
固定式測風塔	點狀		垂直 0~200 m
光達 Lidar	線狀	20m	垂直 40~200 m
3D Lidar	體積	24~100m	水平 30~5000 m
無人機 UAV	體積	5m	垂直 50~3500 m 水平 0~1500 m

## 無人機 UAV 之風場量測

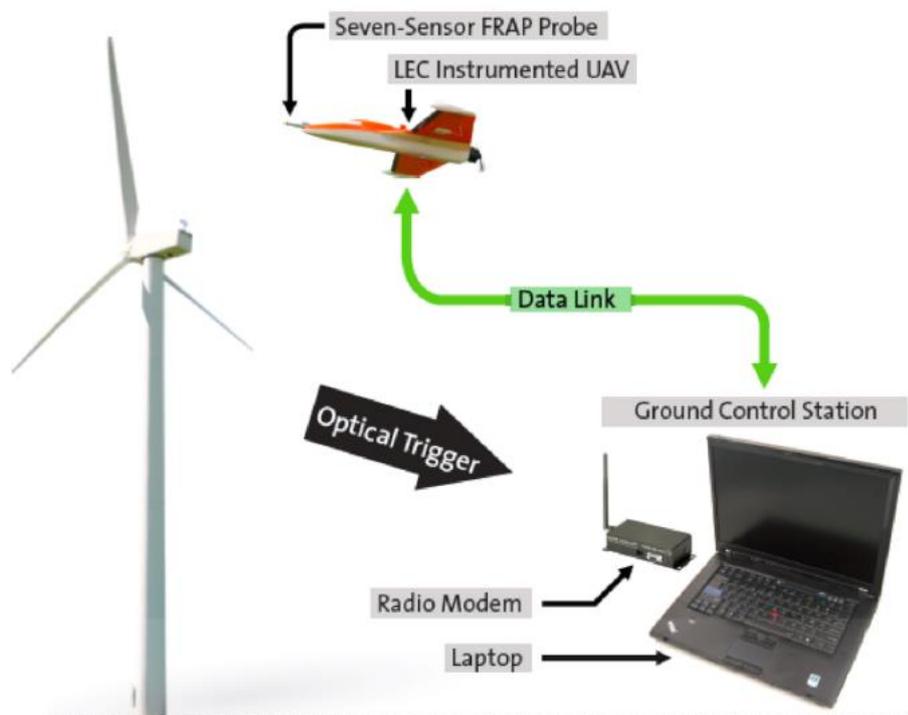
無人機的相對地表飛行速度向量  $V_{aircraft}$ ，該無人機上配置風速偵測計，該計所測之風速為風速相對飛機速度  $V_{rel}$ ，因此可以向量方式計算出實際風速  $V_{wind}$

$$V_{wind} = V_{rel} + V_{aircraft}$$

$V_{wind}$  : 實際風速

$V_{rel}$  : 風速相對飛機速度

$V_{aircraft}$  : 飛機飛行速度



圖片來源: Fig 6, Full Scale Wind Turbine Flow Field Measurement Using an Instrumented Uninhabited Aerial Vehicle, Doctoral Thesis by Kocer Gulru

上圖為該實驗中心之無人機量測之基本架構圖，該無人機翼展 0.8m，重量約 1kg，垂直飛行距離 500~3500m，水平飛行距離約 0~1500m，從圖上所示，無人機機鼻配有七孔的氣動探針頭 FRAP Probe 用來量測空氣壓力，藉此來測量風速與風向，該項氣動探針頭是 LEC 實驗中心多年來自行研發，該無人機藉由 GPS 定位及內建可程式飛行路徑，該無人機並與地面控制的筆記型電腦作即時資料傳輸，可自主性地飛行於風機前方及飛機尾流處作量測，該中心亦對無人機的飛行路徑作最佳化路徑規劃與控制，可因應擷取風場數據之最大化量測。

該實驗中心所研發的量測系統的主要目的為量測風機上風處之氣流以及風機下風處量測其尾流，氣動探針頭 FRAP Probe 裝置於無人機鼻頭量測空氣相對於無

人機飛行速度，藉此計算出風向量相對於地表參考點的速度，該風向量再分量垂直及水平分量，該風向量座標轉換須考量無人機之各項飛行姿態角度，如  $\alpha$  pitch angle 及  $\beta$  yaw angle 等。

### 實際全尺寸風機量測例

該中心以一座陸域 2000kW 實際全尺寸之風機進行 UAV 尾流量測與後續數據分析，測量位置為風機尾流方向(X 方向)1D、1.5D、2D、2.5D、3D，及葉片旋轉方向(Y 方向) 0D、0.25D、0.5D 及風機機艙高度垂直方向 hub height(Z 方向) 0.5H、1H、1.5H、2H 等 三軸方向 觀察其尾流風速的變化量及尾流的氣動力，該中心將三軸向所量測的數據以體積方式整合併繪製成風流場速度圖面如下圖

上圖白色圓圈為葉片直徑，白色點為風機機艙高度，風機尾流方向(X方向)1D、1.5D、2D、2.5D、3D 所量測及繪製風速度圖，從上圖可清楚顯示，藍色為較低風速，綠色與黃色為較高風速，藉由顏色的變化來了解實際風機尾流風速的流場及速度的變化，隨著尾流 X 方向距離的遠近，可發現尾流距離越大，其風速漸漸增速，恢復率越大，1D 的位置風速最低，因風機葉片擷取大部分的風能，使得風速漸少，風機葉片外圍高風速隨著尾流距離漸漸加速，故風機葉片內圍的風速逐漸恢復。

該中心藉此持續進行各項數據量測與分析，包括不同入流風向，不同風機量測，不同地形量測，風機佈置軟體升級與改進，以及尾流計算模式的推演，各項研究成果將可提供風場佈置與規劃之重要參考與依據，風場佈置可藉此更精確地得知地形的影響，風機與風機距離的影響，可預先於風機設置前了解風機影響及預測其未來的實際發電量，提供開發業者風場設置與佈置的評估參考。

### 三、Ventus Engineering 風力工程顧問公司

#### 1. 公司簡介

Ventus Engineering 公司為風力工程顧問，其專業於風場風能分析及評估、風機運轉最佳化、維修運轉，其專業技術及軟硬體設備可提供風場風能分析及評估，風機性能曲線之驗收測試驗證，可提供未來離岸風機驗收測試及最佳化運轉的重要參考。

Ventus Engineering 公司主要之專業技術服務項目

風力專案之風險管控與評估

風場測量與分析

風機運轉性能提升

風機功率曲線測試及風能擾流量測

風場資產及其最佳化運轉技術服務

風機零組件延長保固之保險項目

風機零組件狀況監控 CMS 及即時預警系統

葉片旋角控制分析及改善

## 2. 參訪內容

本次實習另一項主題為風機運轉最佳化，與 Ventus Engineering 公司技術部門經理討論目前陸域及離岸風力所經歷的運轉上的問題，討論議題涵蓋風場測量與分析、風機運轉性能提升、備品供應，運轉維護、保固維修、過保固維修，運轉故障的肇因、風機零組件狀況監控及即時預警系統、運轉保險以及風機最佳化運轉等議題討論，以下以本次實習主題風機最佳化作說明。

### 風機運轉最佳化

一座風場通常裝置數十台風力發電機組，經過一段時間的運轉，從運轉數據有時會發現某幾台機組的發電量較其他機組少，可能的推斷為風機位置所在地之地形的影響或風場的影響，然亦有可能是風向偏差造成風機的轉向偏差所造成之發電量的差異。

#### **轉向偏差 Yaw Misalignment**

風機運轉時機艙並未正對真實的風向，造成風機與風向有角度上的偏差，稱為轉向偏差，一旦風機未正對風向，就有轉向偏差將造成風機減少發電量，進而造成發電量損失，此外，風機也承受較多的氣動負荷，進而增加零組件之磨耗而故障，減低零組件之運轉壽命。

#### **轉向偏差之原因**

風機運轉時風向與風速之控制機制是依照風機機艙上方風向計與風速計的量測數據，然而風向計與風速計裝置於葉片轉子尾流後方，該尾流受葉片轉子轉動影響造成風向計與風速計量測之不準確性，因此造成風機風向與真實風向有一定的誤差，該誤差造成風機運產生轉向偏差。



圖片:歐洲地區某陸域風場風機

上圖所示為歐洲地區某陸域風場風機，紅色圈示之風機與黃色

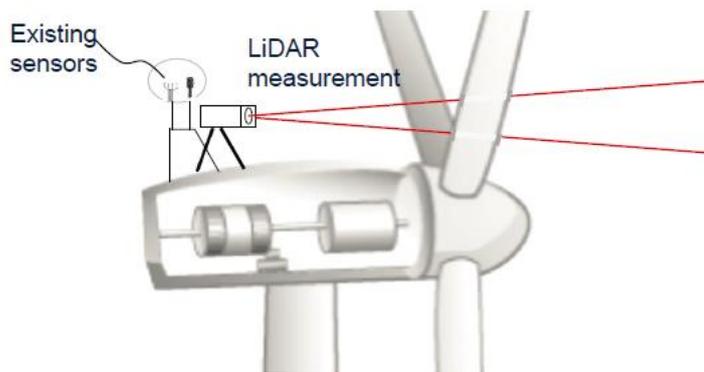
圈示之風機之機艙面對風向有所不同，代表該風機可能有轉向偏差的現象，至於為那一部風機面對正確風向，需經現場風向測量後方可了解轉向偏差的正確度及風向的正確度。

### 降低轉向偏差

可採用裝置於機艙上之光達 Lidar(如下圖)，用於量測與比對風機前方之風速與風向，藉以比對風機上風向計與風速計，經一定時間約一至六週的光達量測後，比對同期間風機風向計與風速計之量測資料，可了解實際風向與風機量測風向之差異，藉此找出該風機是否有轉向偏差。

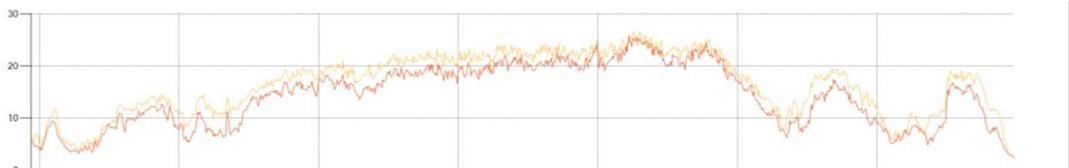


圖片來源: Source:Wind iris 型錄資料



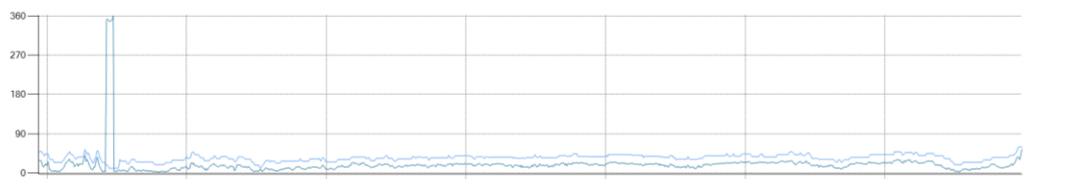
圖片來源: Ventus Engineering 簡報資料

下圖顯示某風場之某風機運轉之風速風向圖及光達量測之風速風向圖



風速圖(風機與光達量測)

由圖式，位於上方曲線為風機之風速量測，各風速皆高於光達之風速量測，可能之原因為風機機艙上之風速計受到葉片旋轉之尾流影響造成所量測之值略高於測風塔之風速 2~3%。

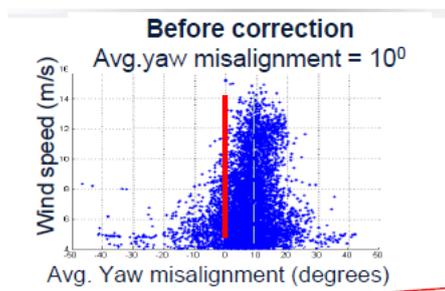


風向圖(風機與光達量測)

由圖示，位於上方曲線為風機之風向量測，各風向皆高於光達之風向量測，可能之原因為風機機艙上之風向計受到該風機葉片旋轉或鄰近風機之尾流影響造成

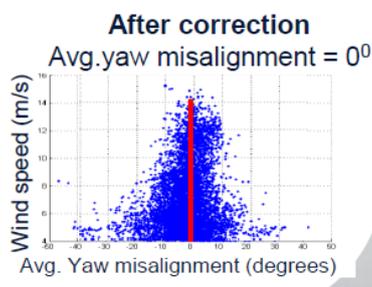
所量測之值略高於測風塔之風向 10~15 度不等，因此可該風機運轉時並無面對真正之風向，且有轉向偏差(Yaw Misalignment)的問題，且偏差角度頗大。

另下圖顯示某風場之某風機運轉之風速風向圖(如下圖)，低風速之轉向偏差較大，高風速轉向偏差較小，校正修正前平均轉向偏差(Yaw Misalignment)平均為 10 度



圖片來源: Ventus Engineering 簡報資料

經光達量測後並經系統參數修正後(如下圖)，其修正後平均轉向偏差(Yaw Misalignment) 約為 0 度，意即轉向偏差已修正，之後風機運轉將正確地對正實際風向。一般而言平均轉向偏差 10 度，該風機之發電量損失約 3%左右，因此轉向偏差(Yaw Misalignment)對於風機最佳化及發電量最大化有相當重要的影響。



圖片來源: Ventus Engineering 簡報資料

據統計，歐洲地區運轉中的風機約 50%以上之風機其轉向偏差(Yaw Misalignment)約為 6 度左右，20%以上之風機其轉向偏差(Yaw Misalignment)約為 2 度左右，其餘風機之風機其轉向偏差(Yaw Misalignment)約為 7~10 度左右，因此造成風機運轉 1~3%以上之發電損失，故如何調整及校正轉向偏差對於未來風機運轉壽命以及經濟回收收益有其重要性。

## 四、離岸風力規劃之綜合資訊

### 歐洲離岸風力發展概況

目前全球離岸風力發電裝機歐洲占世界風電總裝機容量約 80% 以上，世界其他國家也在積極發展，目前為止，全球已有 50 多個國家正積極發展風力發電，由於風力發電技術相對成熟，且相繼有許多國家投入、發展快速，使得風力發電的成本價格漸漸下降，也漸漸提升風力發電之可行性。目前世界離岸風力發電發展國家以英國為首位，全球風力發電裝置容量最大的國家，德國居次為，其中歐洲幾個國家如丹麥、荷蘭也名列前茅，因此風力發電的發展也隨之帶動其他亞洲國家，台灣目前於剛起步階段，也漸漸地快速成長。

英國、德國、丹麥為離岸式風力發電發展最快速的國家，離岸式風力及風力發電機組之製造及技術發展中心遍佈在上述國內風力場址，歐洲近海區域英吉利海峽、北海(North Sea)及波羅的海(Baltic Sea)海上風力資源非常豐富，開發的潛力非常大，而且在海上沒有障礙物，風力資源可得到充分利用。

### 歐洲累計離岸風力總裝置容量

國家	累計離岸風力總裝置容量MW(2018年4月止)
英國	6,361
德國	5,705
丹麥	1,271
荷蘭	1,118
比利時	877
瑞典	202
芬蘭	92
愛爾蘭	25
西班牙	5
法國、葡萄牙、挪威	2

資料來源:windpowermonthly.com 報導

### 歐洲離岸風力開發商

開發商	離岸風力開發裝置容量佔比
Orsted	17%
E.ON	7%
Innogy	7%
Vattenfall	7%
Macquarie Capital	6%
Northland Power	4%
Stadtwerke Muenchen	4%
Iberdrola	3%
Siemens	3%
Ocean Breeze Energy	3%

資料來源:WindEurope 報導

### 離岸風力下部結構型式裝置

下部結構型式	下部結構型式裝置佔比
Monopile	81.7%
Gravity Base	6.5%
Jacket	6.9%
Tripod	2.9%
Tripile	1.8%
Floating	0.1%

資料來源:WindEurope 報導

### 離岸風機單機平均裝置容量

年度	離岸風機單機平均裝置容量
2017	平均 5.9MW
2016	平均 5MW
2015	平均 4MW
2014	平均 4MW
2013	平均 4MW

資料來源:WindEurope 報導

### 離岸風場平均裝置容量

年度	離岸風場平均裝置容量
2017	平均 500 MW
2016	平均 380 MW
2015	平均 320 MW
2014	平均 370 MW
2013	平均 480 MW

資料來源:WindEurope 報導

## 未來離岸風機與風場之發展及研發方向

### 單機大型化，提升風力發電機性能

隨著各風機製造商技術的精進，現今風機單機裝置容量已逐漸往大型化發展，由於離岸式風力發電的成本相當高，因此建立離岸式風力發電場必須搭配大型風力機組，目前有許多廠家製造 5~8MW 機組或較大容量之風力發電機組，提升葉片性能，減低風機及塔架之重量，提升發電機發電效能。未來 8MW 以上至 12MW 之風機將陸續進入離岸風力市場，以增加發電效率，且可節省各項運輸、安裝、發電成本。近年來，風機平均單機裝置容量已超過 4~5MW，目前風力機組所採用之葉片直徑約為 130m 至 160m 左右，而未來為提供更大的發電量，葉片直徑將超過 200m。

### 風場大型化

未來風機朝向大型化發展，為因應各項成本的降低，因此風場之裝置容量也朝向大型化 300MW~700MW 或更大裝置容量之開發。

### 發展各項離岸式風力發電技術

陸上缺乏場址，離岸具有較高且較穩定的風速，海上蘊藏有巨大的風力資源，亂流較小可使風力機有較長的壽命，可減輕陸上開發壓力，可減除噪音、景觀等影響顧慮，可有較高的發電效益。

### 降低各項發電成本

離岸式風力發電場之各機組採用的支撐基礎從單樁、重力式、套筒式等進入浮式基礎，未來更多新基礎型式將導入離岸風力市場，以求降低各項製造、安裝成本。另海底電纜接連的方式及施工技術的提昇，將有助於發電

損失的降低，進而降低發電成本。

### 開發海上風力場址

歐洲近海區域英吉利海峽(English Channel)、北海(North Sea)及波羅的海(Baltic Sea)海上風力資源非常豐富，開發的潛力非常大，未來陸續各項離岸風力大型風場開發將於該海域內建立，台灣海峽風力資源亦相當豐富，也將吸引更多有經驗開發商陸續於 2025 年完成離岸風力發電場。

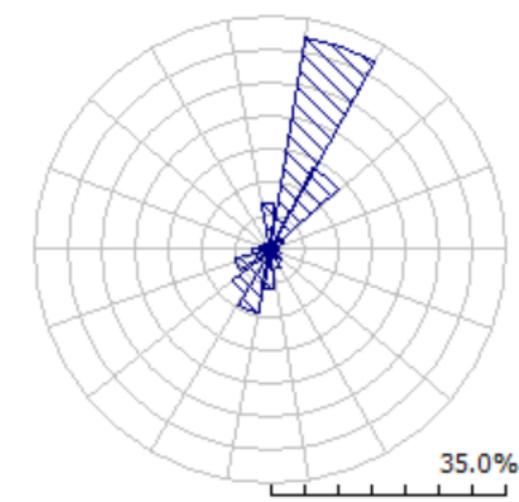
### 風場佈置規劃

離岸或陸域風場佈置，佈置的原則需考慮到該風場之風資源狀況，風資源的收集及統計，可採用固定式測風塔、光達 Lidar、海上浮動式光達 Floating Lidar、衛星資料的方式作測量，一般而言，仍以固定式測風塔作風場資源量測為主，一方面固定式測風塔量測資料較為可靠且正確，二方面固定式測風塔可作為長期性的量測作業，藉此可得到長時間之量測數據與資料，資料之正確率亦可提昇。



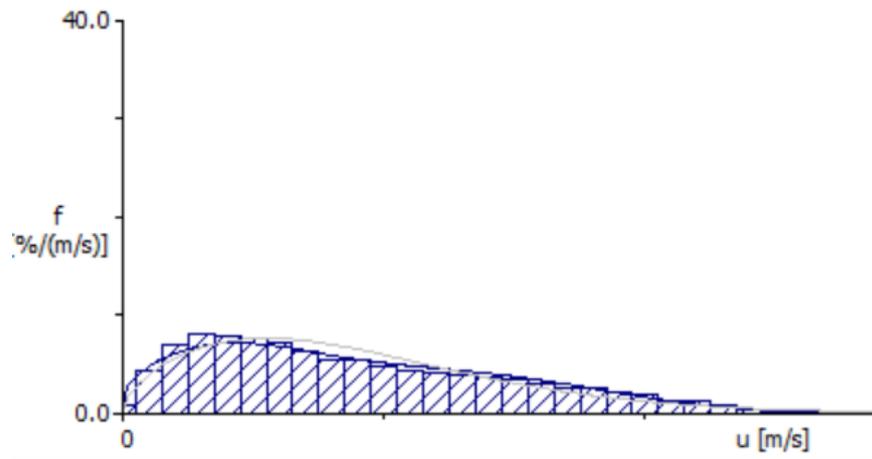
圖片：固定式海上測風塔

測風塔上不同高度裝置風速計、風向計、溫度計、氣壓計、雨量計、波浪計、水位計等各項風與海向資源的量測儀器，經過長時間風場及海象資源量測，測量出風向與風速的統計圖稱為風玫瑰圖 Wind Rose，該統計圖藉由圖示顯示風向分佈的百分比，下圖為某風場量測之風玫瑰圖，該圖所示北北東方向佔比約 33% 為主要風向，東北方向佔比約 13% 為次要風向，其餘佔比分別分佈在其他不同風向，該風玫瑰圖可作為風場規劃之重要參考依據。



圖片：某風場風玫瑰圖(Wasp 軟體繪製)

下圖為某風場量測之風速分佈圖，該風場之平均風速約為 8 m/s，風能密度約為 800 W/m<sup>2</sup>，各風速比例之分佈也集中於 6~10m/s 間，故從該圖及數據所示，可了解該風場風資源相當豐富，主風向與次風向也相當集中，有相當好的風場資源，該風場資源可提供風場風機位置佈置提供重要參考。



圖片：某風場風速頻率分佈圖(Wasp 軟體繪製)

## 離岸式風力發電場佈置所需工程設計資訊

### 1. 風場及氣候狀況

風速分布圖風花圖

擾流圖

風切圖

最大極限風速

溫度、濕度、雨量

### 2. 海洋狀況

波浪分布圖

波浪花圖

海流圖

潮位之範圍

水深暴潮位

最大波浪

最大海流

### 3. 地質狀況

海底地表調查

土壤調查

土壤鑽探

土壤頻譜

聲納資料

海床變化資料

除了風場佈置以外，離岸式風力發電規劃須考量及調查可分為下列項目：

### 4. 前期調查

環境影響評估

可行性評估

政府能源政策

電網並聯申請

環境衝擊影響

財務與預算評估

地方民眾接受度

土地開發申請

電價費用及發電成本評估

電力躉售政策

漁業影響調查

飛航安全調查

船舶影響調查

軍方影響調查

預算編擬

經濟效益評估

## 5. 工程現況調查

吊裝與運輸調查

碼頭運輸調查

碼頭安裝調查

備品倉庫

監控中心

## 離岸風力發電場佈置

下圖為某風場的風場佈置作案例說明，假設測風塔裝置於該風場前方數公里前處，該風場裝置 13 部風機，從測風塔風花圖所示，風玫瑰圖所示北北東方向為主要風向，而風場風機佈置根據主風向及其他次要風向發生比例作佈置，原則上主風向以 6~9D 葉片直徑為間距不等，垂直風向以 3~5D 葉片直徑為間距。依所提供之現場測風塔量測數據之風能條件及分析，經風場佈置分析電腦軟體模擬，電腦模擬考量風場風能，風速風向，各風機尾流影響，海纜佈置之考量等因素，模擬佈置風場並預估該風場之預估年總發電量，經分析結果再行檢視各風機位置是否需作位置微調或調整，若有部份風機位置因鑽探成果報告或其他地形因素影響

需作調整，再重新作電腦分析模擬風場佈置。



該風場經電腦軟體 WASP 模擬後如下圖，各風機之扇形面積為該風向之發電量，紅色面積為該風向之尾流發電損失，造成該尾流發電損失之主要原因為風向上風之風機尾流影響，一般而言，距風向上風風機具離愈近，尾流影響愈大，該尾流影響的發電損失約 3~5%，因此以該風場佈置為例作各風機間距重新調整。



該風場佈置經重新調整如下圖示，各風機紅色面積為該風向之尾流發電損失已大幅簡小，原因在於各風機主風向與垂直風向之間距已增大，間距增大，尾流影響亦將減少，因此尾流所致之發電損失亦減少。



綜合以上，上述範例為簡易之電腦風場模擬及佈置，所須考量的事項甚多，風力發電風場的量測及評估是決定設置風場前必須經過相當的數據及統計的資料收集，以及計算之預測來做評估，包況長時間之風速資料統計，風能密度的蘊藏，環境評估，風能方向頻率，土地取得，交通運輸，景觀評估等，各項資訊及數據都需要在設置風場前，必須作周詳的評估，另性能曲線 Power Curve 為風力發電機的一個重要性能指標，它代表風力電能輸出及風速的關係，如何選定一個適合的風力發電機來裝置於該風力場址以充分利用該風場的能源，此外推力係數 Thrust Coefficient 亦為風機重要數據曲線，該數據可提供電腦模擬計算尾流損失之重要參數數據。

## 風力發電之第三方驗證

風力發電之驗證為重要的程序，一般而言，風力製造商於風力機量產前，需先經第三方國際驗證公司驗證該風力發電機之設計、品質、製造等各項計算資料及程序書，經過驗證後，由驗證公司核發證明風機型式驗證，離岸風場各開發案再依開發場址條件設計其支撐及下部結構基礎，該設計亦需經第三方國際驗證公司驗證，並核發風場專案驗證。離岸風力發電開發多需引進保險及銀行融資，需要第三方驗證公司之驗證證明，才能讓離岸風場業者無後顧之憂地進行開發，這是市場機制需求所使然，尤其針對規模龐大且關係複雜的離岸風力發電產業，確有其存在之必要與價值，以維護開發商該有的權益，而驗證之主要的目的為

降低施作及投資之風險

投資開發的信賴

製造程序的標準化

產品之品管品質提升

產品的信賴度提高

設計資料經確認及校核

業主及保險公司之要求

一般而言，風力第三方驗證之項目可分為兩大項：

### 1. 風機型式驗證 Type Certificate

風力發電機經過以下項目之評估及檢驗後，即可取得單機型式驗證。

風機各零組件設計評估 Design Assessment

製造評估 Manufacturing Assessment

原型機測試 Prototype Testing

總結最終報告 Final Report

不定期之設計資料更新 Certificate Update

## 2. 專案驗證 Project Certificate

專案驗證主要是針對整個風力發電場各項資料之評估，主要驗證項目如下：

風場之評估 Site Assessment

設計評估 Design Assessment

督測 Supervision

製造之督測及檢驗

運輸之督測

安裝之督測

試運轉之督測

定期性之督測

## 五、參考資料

GE 公司官方網站//[www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/](http://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/)

ETH Zurich LEC 官方網站//[www.lec.ethz.ch/research/wind-energy.html](http://www.lec.ethz.ch/research/wind-energy.html)

Ventus Engineering 官方網站//[www.ventusengineering.com/](http://www.ventusengineering.com/)

Ventus Engineering 簡報資料

Doctoral Thesis by Kocer Gulru 論文資料， Full Scale Wind Turbine Flow Field Measurement Using an Instrumented Uninhabited Aerial Vehicle

Wind iris 型錄資料

WindEurope 報導

[www.offshorewind.biz](http://www.offshorewind.biz) 網站報導

[windpowermonthly.com](http://windpowermonthly.com) 報導

## 參、心得與建議

本次歐洲各國之參訪收穫良多，與各國之技術人員討論及詢問各項離岸式風力發電之技術及風機運轉最佳化工程問題，並了解其從規劃評估至運轉維護等各種項目，獲得許多寶貴經驗及知識。歐洲國家如英國、德國、法國等歐洲各國是一個非常好的環境發展離岸式風力發電，其海岸沿岸風力資源相當穩定及豐富，再加上上述各國政府的大力支持，也造就離岸式風力發電的繁榮景象，且能持續即不斷的成長，歐洲各國能源政策鼓勵民間及電力公司投資風力發電的開發，同時並扶植相關產業的發展，我國在風力推動工作上，也可效法歐洲各國的做法，一方面可降低對其他能源的依賴，另一方面可促進相關產業的進步。隨著各國各風機製造商技術的精進，現今風機單機裝置容量已逐漸往大型化發展，目前市場上的主流離岸風機單機容量為5~8MW，未來十年內，隨著風機技術的成熟及快速發展，加上各開發商尋求較低建置成本開發，風機大型化已成為未來的趨勢，8MW~12MW 單機容量之離岸風機將陸續進入市場，除了可降低各項工程成本，也提升風場的發電效益，讓各開發商可於開發經濟成本下降，持續推展開綠色能源。

離岸式風力發電場之設置需作好各項裝置前的評估及可行性研究，例如風速的測量、海象的勘查，海流的波動，當地氣候，海底地表的探勘，地質的分析，環境生態的影響等等的各項評估，經濟及各項商業成本的評估也是相當重要的項目。風場的規劃與佈置將決定未來風場的營收及營運效益，因此事先及預先之最佳化風場佈置規劃，尤其是離岸風力風場規劃與佈置，對發電效益有重要的影響，風機位置決定後，若風場調查之內容有問題，未來將影響整個風場的營運績效及發電量，因此藉由分析軟硬體及設備可精確量測風場及流經風機之氣動力負荷，可應用於離岸風場之先期規劃與評估及離岸風場佈置，以及提供未來離岸風場規畫

及風機最佳化運轉的重要參考依據。

藉由此次參訪離岸風電相關製造商及與國際知名研究機構與顧問公司，除瞭解到許多未來離岸風力發電相關政策與技術發展現況外，亦另學習到許多風力資源量測新知及新技術，風場規劃應考慮事項，另外也獲得許多有關風機運轉最佳化之經驗及執行方式，另外此次參訪蘇黎世理工學院收穫良多，除瞭解學術界與產業界的結合，也學習到世界知名的學術機構如何在風資源蒐集及風場佈置作最新的研發與分析，可提供各產業界以及學術界相當重要的參考及先進技術的研發，彼此教學相長，互相學習研發出更精確的量測方式，包括新的數學模式推演，新的量測方式的開發，新的計算與分析軟體的更新，將有助於更精確量測風場，更精確預測風場發電量及其運維模式，對本公司未來在推動及開發離岸風電工程、風場規劃及風機運轉上可提供重要參考。

大部份之國外參訪主要限於產業、製造商、顧問公司、工廠、電廠等相關產業，學術研究機構較少有參訪與交流，歐洲地區仍有相當多大學研究所從事各項離岸風力、風機、風資源量測、器材檢驗較正等，如丹麥理工大學從事風場模擬軟體開發、德國司徒加大學從事海事結構動態分析、荷蘭 ECN 研究中心從事各項量測與風場分析等學術研究機構，建議未來亦可派員與歐洲各學術研發機構參訪學習，吸收新知識與新技術，以及相關經驗，或邀請其他國家廠家或學術單位來台作專題研討會，藉由雙方各項意見之交換及討論，將有助於本公司及台灣風力產業的發展。