

出國報告（出國類別：實習）

## 高階振動診斷技術研習

服務機關：台電電力修護處南部分處

姓名職稱：蔡增祥 / 工業工程師

派赴國家：丹麥、德國

出國期間：101 年 09 月 22 日～101 年 10 月 07 日

報告日期：101 年 11 月 28 日

QP - 08 - 00 F04

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高階振動診斷技術研習

頁數\_\_\_\_\_ 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：臺灣電力公司/人資處 / (02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：蔡增祥 / 電力修護處南部分處/品質  
組/工業工程師/(07)2510195 ext. 272

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：101 年 9 月 22 日~ 101 年 10 月 07 日 出國地區：丹麥、德國

報告日期：101 年 11 月 28 日

分類號/目

關鍵詞：實驗模態分析(EMA)、操作振型分析(ODS)、操作模態分析(OMA)

內容摘要：(二百至三百字)

汽輪與氣渦輪發電機組係發電系統中之最重要組件，本部門負責發電廠各型汽輪與氣渦輪發電機組以及其相關迴轉設備之振動量測及診斷分析工作。隨著近年來節能減碳趨勢與燃料費用高漲影響，新型發電機組往超臨界、高熱效率與大型化發展，依國外新型發電機組之運轉經驗，機組各組件之動態特性亦更加複雜與難以掌控，為確實掌握國外最新振動診斷技術與監測系統的發展和應用，增進對各型迴轉機械振動分析診斷的正確性，以期提高發電機組運轉效率與可靠性。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網  
(<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

	<u>頁數</u>
一、 出國目的-----	4
二、 出國行程-----	4
三、 任務執行過程與內容-----	5
1. Bruel & Kjar 研習內容介紹-----	5
2. Bruel & Kjar Vibro 研習內容介紹-----	13
3. PRUFTECHNIK 研習內容介紹-----	19
四、 研習心得-----	22
五、 建議-----	22
六、 返國座談會簡報-----	23

## 一、出國目的

汽輪與氣渦輪發電機組係發電系統之最主要組件，本部門負責發電廠各型汽輪與氣渦輪發電機組以及相關迴轉設備之振動量測及分析診斷工作。其中機械動態特性的良窳，不僅是評斷設備運轉狀態與分析診斷機組振動問題之基本要項，更是確保發電機組運轉穩定性及可靠性的關鍵。目前國內所運用於實測機械動態測試方法不外乎實驗模態分析 Experimental Modal Analysis (EMA) 與操作振型分析 Operating Deflection Shapes Analysis (ODS) 兩種，對於可在設備運轉中即時量測分析模態參數之操作模態分析 Operational Modal Analysis (OMA) 則了解甚少。

隨著節能減碳趨勢新型發電機組往超臨界、高熱效率與大型化發展，依國外新型發電機組之運轉經驗，發電機組各組件之動態特性亦更加複雜與難以掌控，為了解機組實際動態特性，並增進對各型迴轉機械振動分析診斷的正確性，以降低發電機組現場振動平衡配重處理或結構改善之時間，提升發電機組運轉效率與可靠性。赴丹麥及德國研習新的機械結構動態測試方式及動態監測系統最新發展與應用，新的機械結構動態測試方式擬赴 Bruel & Kjar 研習；動態監測系統最新發展與應用則赴 Bruel & Kjar Vibro 與 PRUFTECHNIK 研習。

## 二、出國行程

101 年 9 月 22 日~23 日	往程 (高雄→桃園機場→法蘭克福→丹麥 哥本哈根)
101 年 9 月 24 日~29 日	在 Bruel & Kjar 進行機械結構動態測試研習與 Bruel & Kjar Vibro 進行動態監測系統研習
101 年 9 月 30 日	轉往德國 PRUFTECHNIK
101 年 10 月 1 日~3 日	PRUFTECHNIK 動態監測系統研習
101 年 10 月 4 日~5 日	奉准自費觀光
101 年 10 月 6 日~7 日	返程(慕尼黑→法蘭克福→桃園機場→高雄)

### 三、任務執行過程與內容

此次之研習分為二大主題，機械結構動態測試以及動態監測系統研習：  
機械結構動態測試：在丹麥 NARUM 之 Bruel & Kjar 公司研習。  
機械動態監測系統最新發展與運用：在丹麥 NAERUM 之 Bruel & Kjar Vibro 公司以及德國 ISMERING 的 PRUFTECHNIK 公司研習。

茲將各公司之研習過程及內容分述如下：

#### (一) Bruel & Kjar

1. 地理位置：該公司位於丹麥哥本哈根北方之 NARUM



圖 1. Bruel & Kjar 與 Bruel & Kjar Vibro 位置



圖 2. Bruel & Kjar 與 Bruel & Kjar Vibro 公司外觀

## 2. 公司簡介：

丹麥 Bruel & Kjaer 公司是全世界最頂尖的聲音、振動測量分析儀器的研發及製造公司，從 1940 年代初期創立至今，已具有超過七十年相關噪音及振動領域之技術與服務的豐富經驗，目前為英國 Spectris 控股公司旗下子公司，主要業務範圍包含：

(1) Aerospace：包含航空與太空相關產業。



(2) Airport Environment：主要為機場周圍之環境噪音量測與監控。



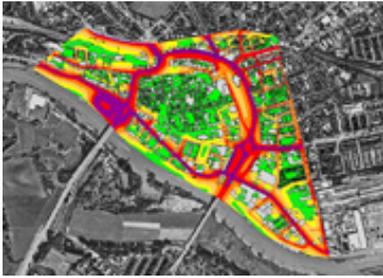
(3) Automotive / Ground Vehicles：各種地面車輛(汽車、機車、工程車輛…)與軌道車輛(火車、捷運…)等機動車輛 NVH 測試。



(4) Defence：國防軍火工業。



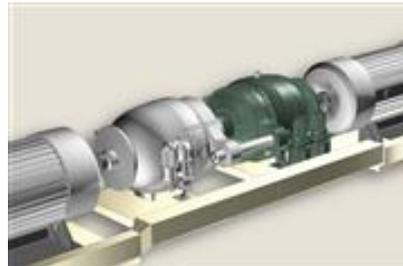
(5) Environmental Noise and Vibration：環境之噪音與振動量測。



(6) Telecom and Audio：通信與音響設備。



(7) Wind Energy：風力發電系統。



### 3. 研習過程：

當科技日新月異進步及環保減碳已成世界的趨勢，任何產品從設計到製造，利用結構動態測試方式進行 NVH (Noise Vibration Harshness) performance 測試已成產品品質的最佳保證，Bruel & Kjaer 公司已於 2006 年與其他兩大 NVH 供應商 MSC(Material Sciences Corp.)及 Link Engineering 共同合作於美國密西根州 Canton 市，建立一個超過 6000 平方公尺之 NVH 實驗室，該實驗室除提供各種機動車輛、各種零組件、通訊產品…等之用戶測試分析，以達成其產品在聲音與振動上最佳化之設計。故於丹麥 Bruel & Kjaer 公司研習主要內容為結構動態測試，並對最新量測方法與應用使用情形加以了解。

現今國內外進行結構動態測試的方式，主要分成兩部分

— 數值模擬方式：

如利用套裝軟體 ANSYS、Pro/E、NASTRAN...，在設計階段即可加以模擬計算是否符合相關法規要求與經驗值，如未達理想狀態，立即可在電腦軟體上進行修改，大幅減少產品開發時間與成本。

— 實際結構測試方式：

當有結構實體可進行測試時，可利用實驗模態分析 Experimental Modal Analysis(EMA)、操作振型分析 Operating Deflection Shapes Analysis (ODS)與操作模態分析 Operational Modal Analysis(OMA)三種方法加以實際測試分析。

(1)實驗模態分析 Experimental Modal Analysis(EMA)

為傳統測試方法，運用一外力激發待測結構自然頻率，由適當感測器量測後將時域訊號經由快速傅利葉轉換(FFT)為頻域訊號，得到結構之頻率響應函數(FRF)，再經由數學解析求得結構自然頻率、模態阻尼與模態振型等動態特性(模態)參數之結構動態測試方式。

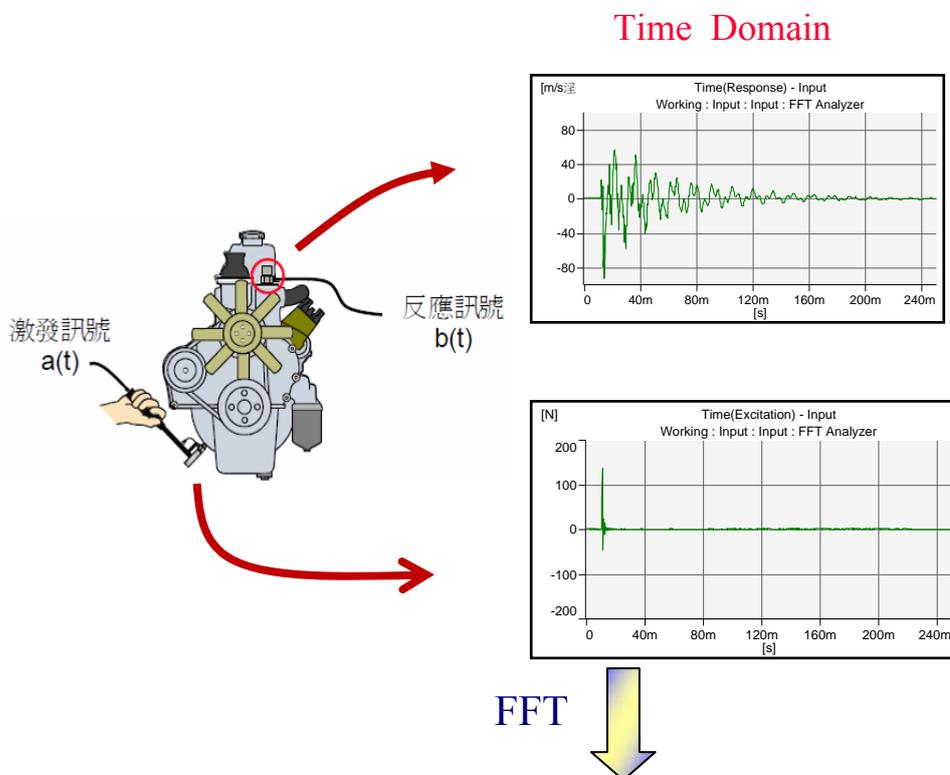
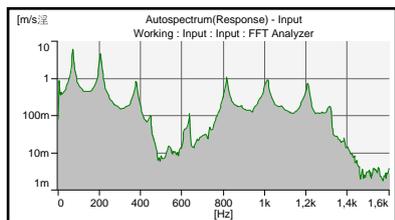


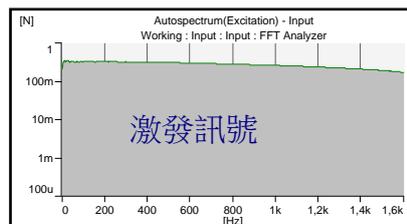
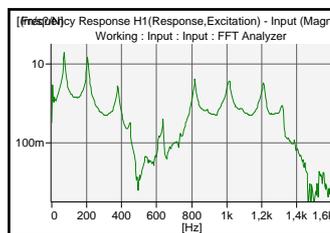
圖 3. 實驗模態分析(EMA)測試方法

## Frequency Domain

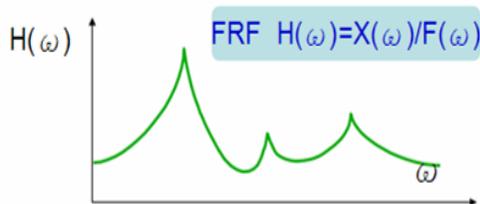
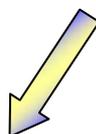
反應訊號



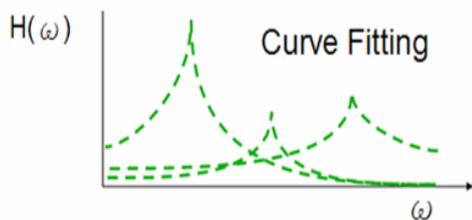
=



Frequency Response Function (FRF)



運動(物理)參數  
m、c、k



模態參數  
自然頻率、阻尼比、振型

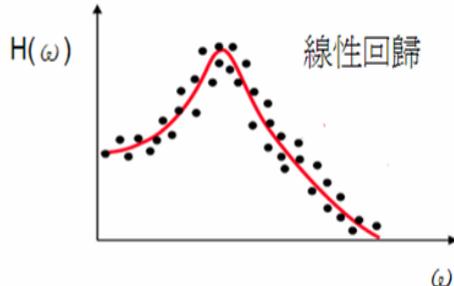


圖 4. 實驗模態分析(EMA)測試方法(續)

實驗模態分析(EMA)於實際量測的限制：

- 對稱結構的模態，以單一激發力方式通常無法完整測試。
- 對大型結構體而言，非常難以用人工方式施加激發力以進行整體測試。
- 有時會因為不適當的邊界條件限制與激發力，以 EMA 測試方式會造成偏差或錯誤。
- 進行 EMA 測試時，迴轉機組必需處於停機狀態。

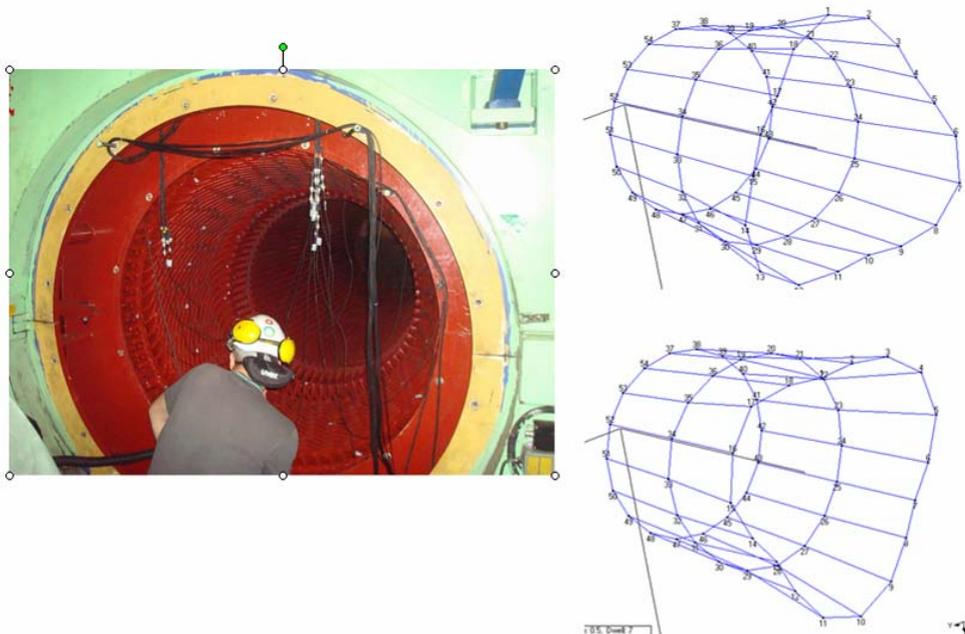


圖 5. 實驗模態分析(EMA)運用於發電機定子端部結構測試

## (2)操作振型分析 Operating Deflection Shapes Analysis (ODS)

量測方式與實驗模態分析(EMA)相似，其差異是將激發力改成另一個感測器，主要特點為可在設備運轉中進行量測，量測狀態與實際狀態一致，可了解量測結構在特定運轉(操作)狀態下振動型態，其振動狀態會隨著負載或外力而改變，在結構的不同點及方向進行量測後，再結合動態模擬軟體呈現結構之振動型態。

操作振型分析(ODS)運用的限制：

- 只可運用在基座鬆動與結構弱點檢測等項目。
- 無法確認設備異常振動是否是由結構共振所引起。

- 無法求得量測系統(設備)之模態參數，對複雜結構之振動改善未能提供足夠之詳細資訊。

目前在實際結構測試時，因運用限制的關係有時必需同時進行實驗模態分析(EMA)與操作振型分析(ODS)量測，才能確認振動問題之肇因。但因進行驗模態分析時設備又需處於停機狀態，有時將會產生巨大的經濟損失，致使振動的分析診斷陷於兩難情形。

### (3)操作模態分析 Operational Modal Analysis(OMA)

操作模態分析 Operational Modal Analysis(OMA)是近年來發展新的量測方法，可兼具有實驗模態分析(EMA)可求結構模態參數與操作振型分析(ODS)可在設備運轉當中進行量測的特性。

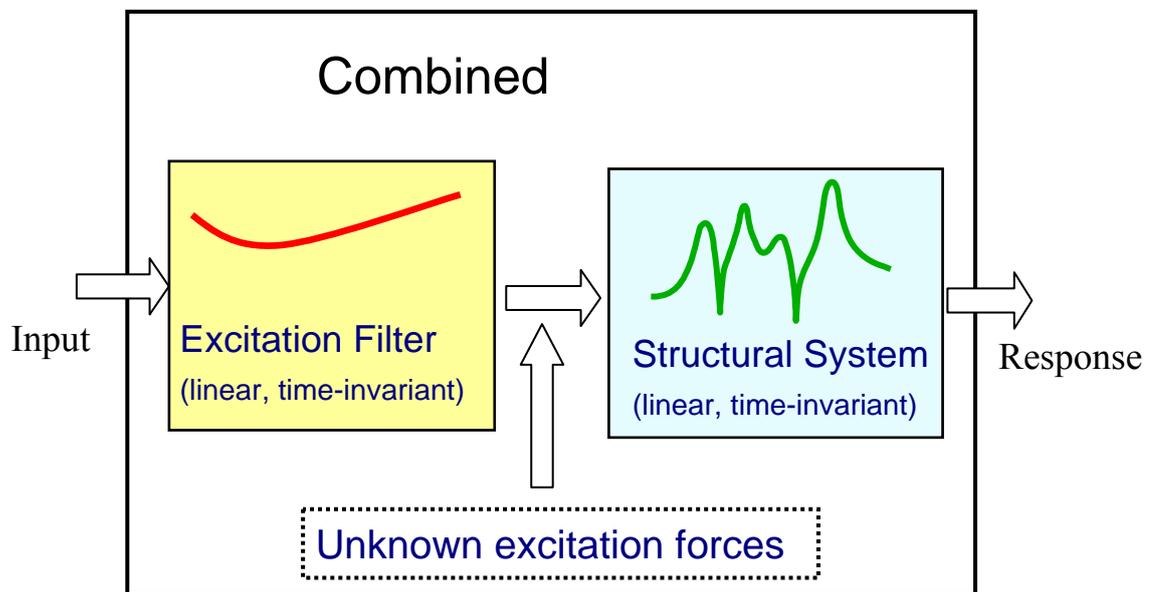


圖 6. 操作模態分析(OMA)原理

操作模態分析(OMA)特點：

- 可在設備運轉中加以量測分析(不需要停機)。
- 量測狀態和設備實際的運轉邊界條件與負載狀態一致，可大幅增加振動分析的準確性。
- 能夠在不需外加激振力的狀態下進行量測分析，可減少量測之程序與困難度。
- 當設備結構有部份非線性現象存在時，仍可得到相關模態參數。
- 大型結構如橋樑、油輪、鑽油平台…等，操作模態分析(OMA)是目前唯

—可得到結構模態參數的實測方法。

Bruel & Kjaer 公司發展之操作模態分析(OMA)軟體，可在現有 B&K 頻譜分析儀設備中加入 Type7760 模組，即可進行進行量測分析。

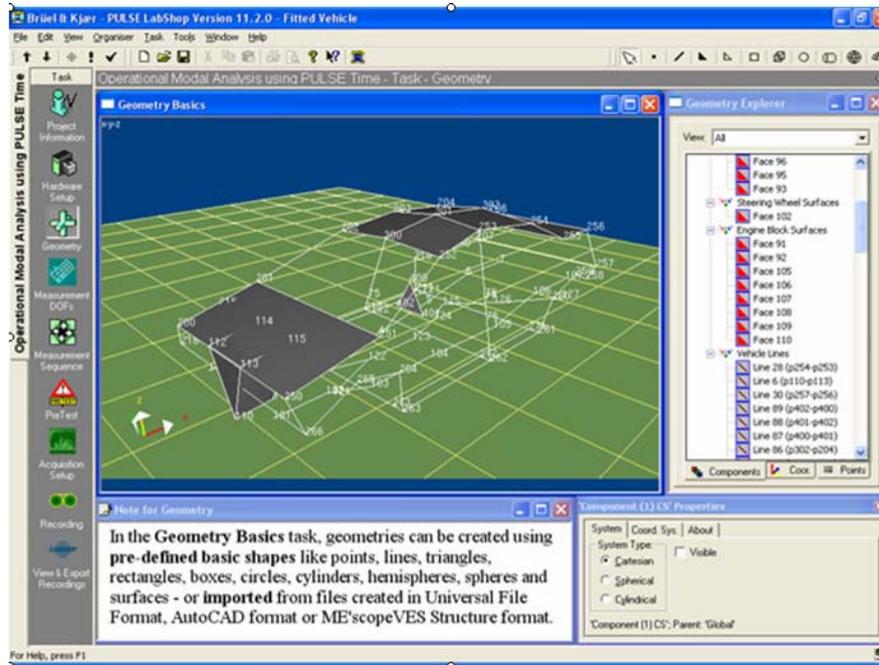


圖 7. B&K TYPE7760 OMA 模組

目前國內在進行結構模態測試作業時，大部份皆是先用頻譜分析儀 (B&K3560、IMPACT Elite...) 擷取規劃量測點之訊號，計算相關 FRF 轉換成 UFF 檔案，再將 UFF 檔案轉入動態模擬軟 ME' scopeVES 或 I-deas 進行動態呈現。目前 B&K 公司亦發展了一套整合式軟體 Reflex Modal Analysis Type8720 模組(圖 8)，可大幅減少結構模態測試作業之程序與時間。

因為科技與製造技術進步，B&K 公司亦開發 LAN-XI data acquisition hardware 新型頻譜分析儀(圖 9)，其特點如下：

- 攜帶性更佳，跟前一代相比大幅減小體積與重量。
- 運用彈性更大，有更大的擴充性以方便量測複雜結構(可同時連接與處理超過 1000 個訊號源)。
- 更大動態範圍，量測訊號動態範圍可達 50dB。
- 可單獨作業，量測時可不需與電腦連接，直接啟動量測。
- 低能源消耗，可由網路線直接供應所需電源，減少備用電池的需求。

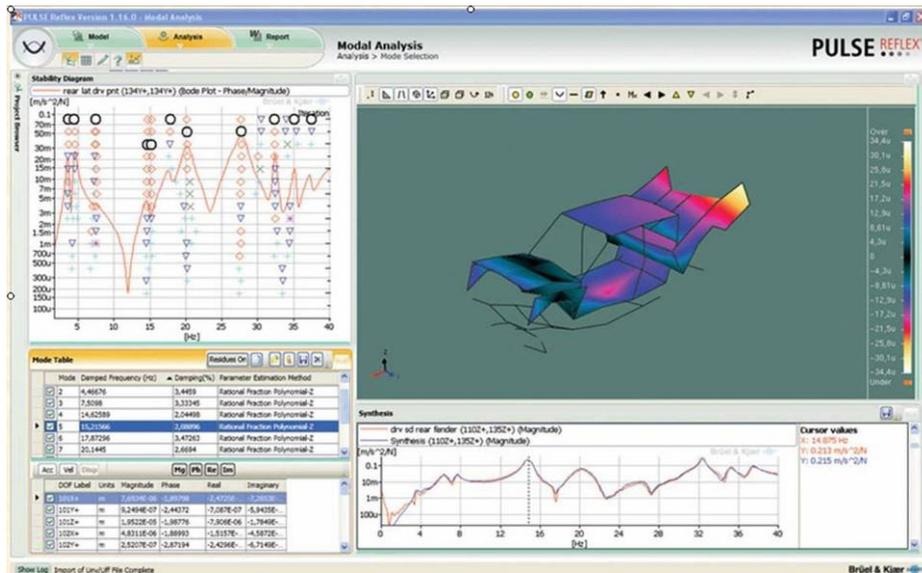


圖 8. B&K TYPE8720 模態測試整合模組



圖 9. B&K 新舊型頻譜分析儀

## (二) Bruel & Kjaer Vibro

1. 地理位置：該公司與 Bruel & Kjaer 位於同一廠區裡面(丹麥哥本哈根北方之 NARUM)

2. 公司簡介：

Bruel & Kjaer Vibro 公司是旋轉設備狀態監測解決方案領導者之一，也是英國 Spectris 公司旗下子公司之一，專精於精密儀表和控制技術的領域，目前正致力於擴展與統合風力發電機組之線上監測與診斷系統。主要服務範圍包括：

(1) 框架式多通道全廠監測整合方案(系統)。

- (2) 振動監測儀表。
- (3) 振動偵測器(加速度規、位移規、速度規)。
- (4) 手持式振動量測/分析/平衡分析儀。



圖 10. Bruel & Kjaer Vibro 公司業務領域

### 3. 研習過程：

在 Bruel & Kjaer Vibro 公司，主要是研習振動監測系統最新發展與運用，Bruel & Kjaer Vibro 在機械狀態監測系統已具有多年經驗及相當基礎。早期的機械設備設計主要是以經驗為參考基準，由於缺乏可供參考的可靠數據為了安全考量，設備之成本與效率並不是考量的重點，以致經常會使用過高的安全系數，所以運用定期維修的策略就足以解決大部份可能發生故障問題，因此除了極重要的設備，對一般運轉設備之即時狀態監控並未加以重視。

現今由於材料與能源成本高漲，以及隨著科技的發展企業彈性生產需求變成常態，生產效率的高低成為企業是否具有競爭力的關鍵因素，故各項生產設備要求高效率化、低裝置與運轉成本、可長時間運轉，再加上人力精簡等因素，使得能掌握完整設備動態，以及更完善與即時之設備動態監測及故障診斷系統變得更加重要。

Bruel & Kjaer Vibro 公司目前主要設備監控設備包含：

- (1) VIBROCONTROL 6000(VC-6000)安全監控保護系統

VC-6000(圖 11)為一模組化之框架系統，設計成可長期可靠的連續監測各項設備，其特點有：

- 高容量，最多可同時監控 36 個不同偵測器(點)。
- 使用彈性大，具有即插即用的模組化功能，可以依不同的需求與目的快速更換或增加不同量測監控功能。
- 高可靠性，儀器具有極高的平均無故障運轉時間，可有效掌控設備即時動態。



圖 11. VC-6000 安全監控保護系統

### (2) Compass 6000 全功能設備狀態監測系統

Compass 6000 全功能設備狀態監測系統(圖 12)是 Bruel & Kjaer Vibro 公司的最新開發整合平台，將設備狀態監測、安全保護與故障診斷分析軟體整併在同一系統，可即時與早期分析診斷監控設備之故障訊息，及早採取因應措施。

### (3) ADVISOR 專家診斷系統

目前於工業界與學術界已有大量研究，對於有效的建立設備故障模式或數學上之演算法，以利實現設備早期故障自動診斷。Bruel & Kjaer Vibro 公司也研發了奠基於類神經網路的 ADVISOR 專家診斷系統，並廣泛應用於風扇、空氣壓縮機、風力發電機…等領域，此種智慧型專家診斷系統能大幅減少監控診斷設備狀態的工作量，特別是對於需同時監控同一類型數百台設備的企業(工廠)而言。但目前此種專家診斷系統主要是協助相關工程師進行監控與診斷工作，並無法全面替代振動分析診斷工程師的工作。

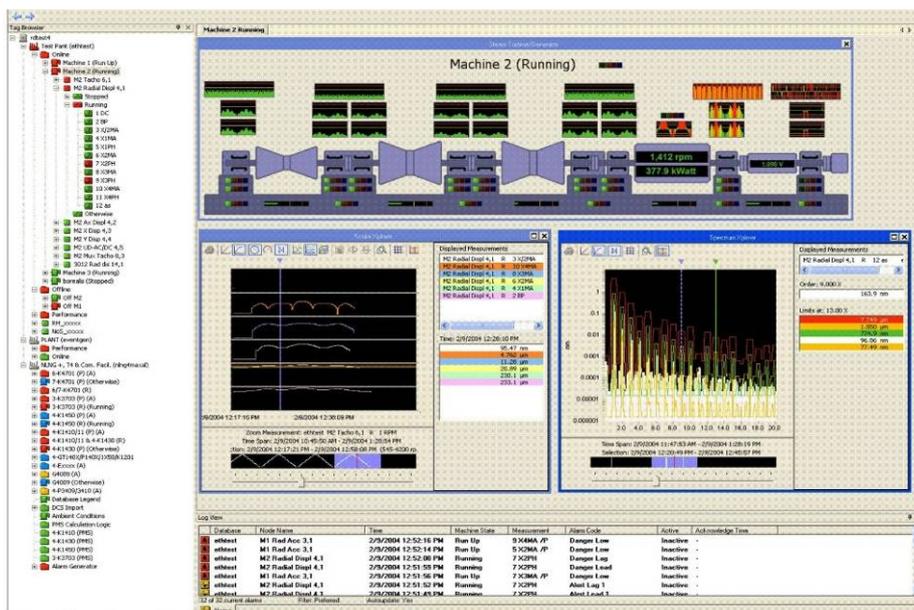
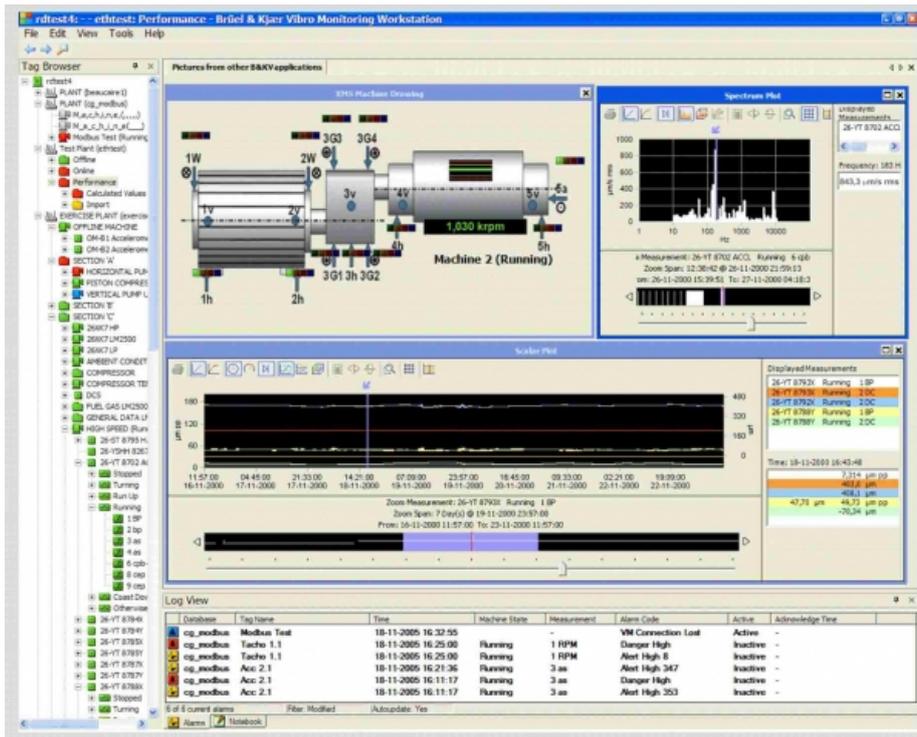
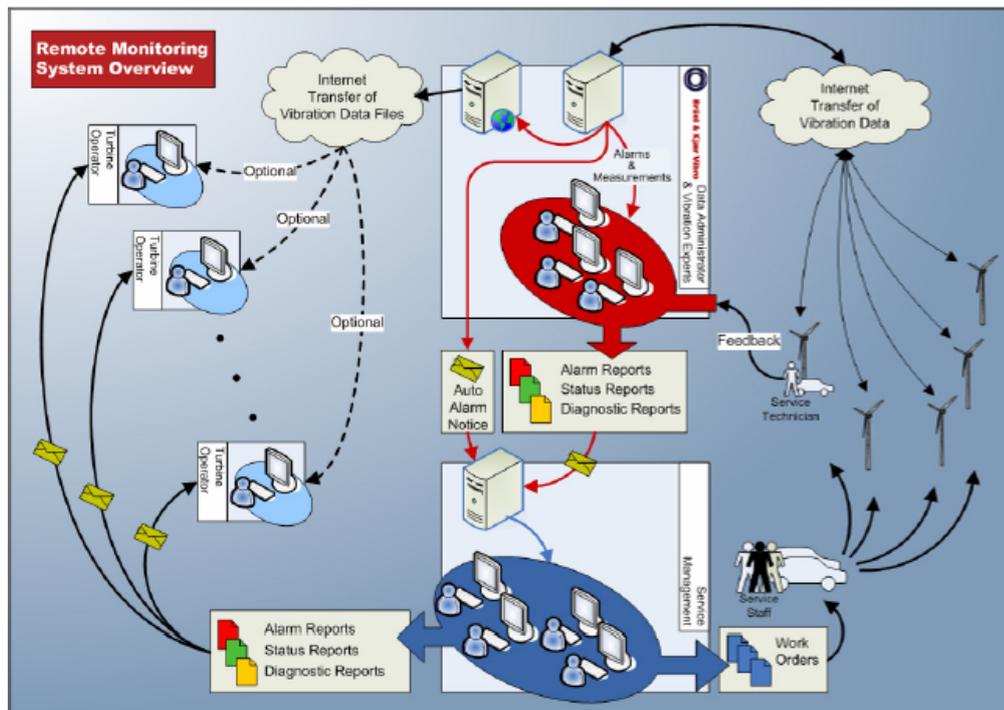


圖 12. Compass 6000 全功能設備狀態監測系統

#### (4) 整合式風力發電機組遠端監控系統

近年來由於對於綠能的重視，風力發電機組數目快速增加，為因應市場需求 Bruel & Kjaer Vibro 公司近年來致力於開發一個高效整合式風力發電機組遠端監控系統，目前此一系統已將運轉管理、動態監

測、故障診斷分析(包含相關設備故障專家群協助中心)及經由網路遠端監控與資料儲存中心於同一架構中(圖 13)，截至 2012/6/15 為止 Bruel & Kjaer Vibro 公司已與分佈在二十多個國家超過 1500 部風力發電機組簽約合作(圖 14)，進行線上及時動態監控及早期故障分析診斷之動態管理工作。



Severity	Type	Description	Required Action
1	Danger	Severe progressing failure	Immediate action. Operating the turbine has serious risk of functional loss and possible severe consequential damage.
2	Alert	Considerable progressing failure	Action as soon as possible. Recommended within 2 weeks.
3	Alert	Progressing failure	Action when convenient. Recommended within 3 months.
4	Alert	Small or none progressing failure	Action at next service.
5	Good	No abnormalities detected	No action required
6	System	Hardware system problem	Correct as soon as possible

圖 13. 整合式風力發電機組遠端監控系統

**Countries (Including offshore installations) and volume with online systems:**

Country	Total No. Online Systems	Country	Total No. Online Systems
Aruba	10	Italy	15
Australia	127	Netherlands	144
Austria	4	New Zealand	15
Belgium	55	Poland	35
Bulgaria	52	Portugal	11
Canada	58	South Africa	1
China	1	Spain	5
Danmark	17	Sweden	405
France	153	Turkey	50
Germany	350	U.K.	320
Greece	12	USA	598
India	1		

圖 14. Bruel & Kjaer Vibro 公司所監控風力發電機組

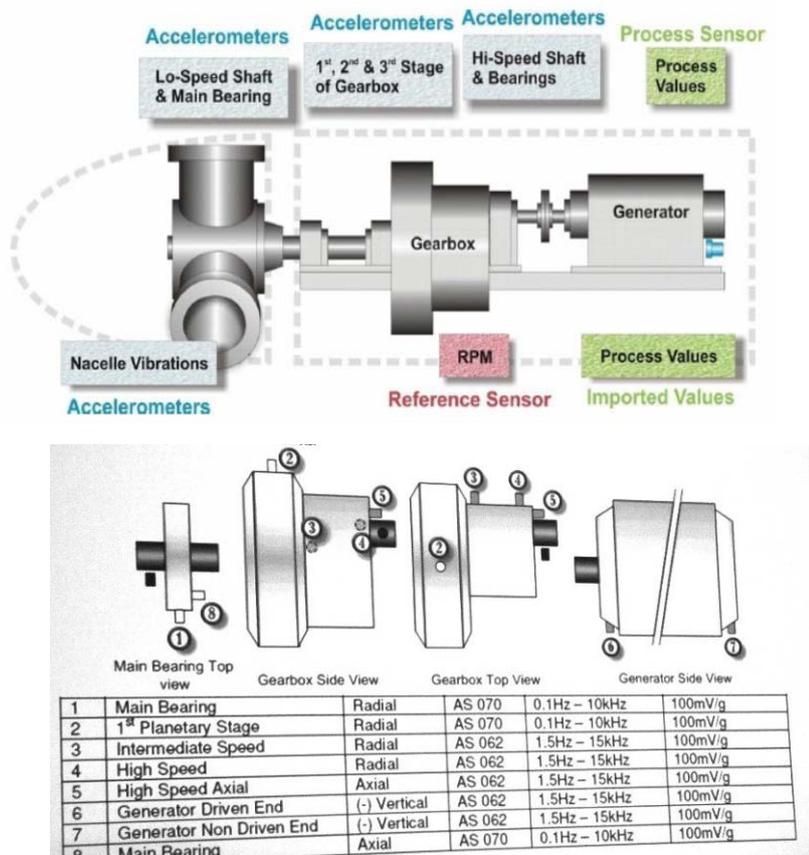


圖 15. 典型風力發電機組偵測點佈置圖

### (三) PRUFTECHNIK

1. 地理位置：位於德國南部巴伐利亞省慕尼黑市附近之 Ismaning。

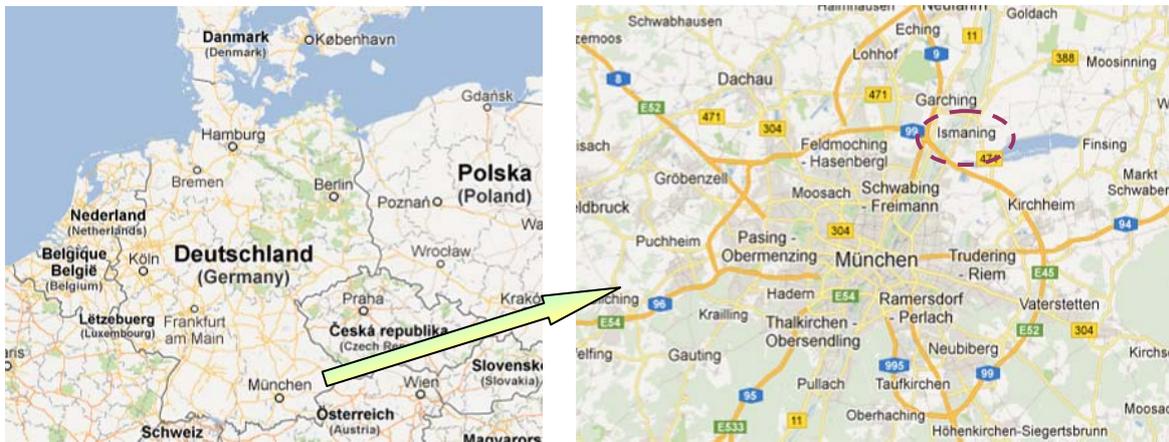


圖 16 .PRUFTECHNIK 公司位置

2. 公司簡介：

PRUFTECHNIK 公司是 1972 年創立，提供廣泛工業維修與設備監控服務的廠家，目前總共大約有 500 多個員工。其主要業務包含：

- (1) 設備裝狀態監控系統。
- (2) 雷射對心系統。
- (3) 非破壞檢測。
- (4) 機械相關服務與諮詢。



圖 17 .PRUFTECHNIK 公司業務領域

### 3. 研習過程：

在 PRUFTECHNIK 公司研習，主要是研習動態監測系統最新發展與運用，由於企業規模大型化、設備精密化與人員精簡化，工業界運用遠端狀態監測系統進行設備管理與早期故障預警與診斷分析，已經越來越普及且是大勢所趨。設置一個完善的監測系統可使企業大幅提升生產效率，但一個良好的監測必需能結合各種不同領域的經驗與知識，再加功能匹配的軟體上才可能成為成功產品。PRUFTECHNIK 公司目前已提供包含從狀態監控系統規劃、設備安裝、人員培訓與動態診斷分析全方面服務。

PRUFTECHNIK 公司目前主要設備狀態監控產品包含：

#### (1) 標準型設備動態監控系統

可由 PRUFTECHNIK 公司各種模組化之產品，如 VIBGUARD 狀態監測系統、VIBCONNECT RF 無線傳輸狀態系統、MPS 機械保護系統與各式感測器依個案需求組合而成一完整而獨立設備狀態監測系統(圖 18)。

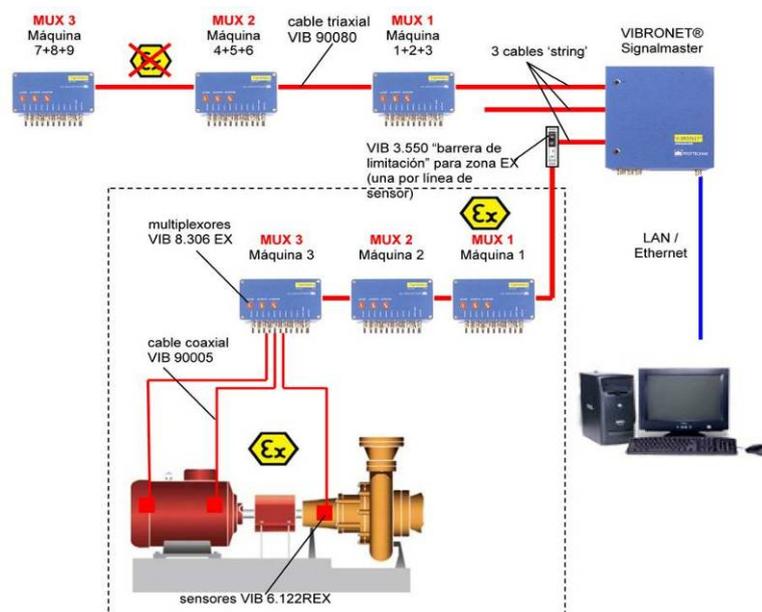


圖 18 .PRUFTECHNIK 設備動態監控系統

## (2)設備故障診斷分析型動態監控系統

一般設備監控系統可加入 OMNITREND 振動分析軟體，以及其他如滾動軸承資料庫等加以協助設備故障診斷分析模組與軟體，更進一步成為具有設備故障診斷分析功能之狀態監控系統。同時亦可經由網路將相關資訊傳送至 PRUFTECHNIK 公司設置於德國 Ismaning 的診斷中心，藉由診斷中心的專家群協助進行深入的診斷分析。



圖 19. PRUFTECHNIK 設備故障診斷分析型動態監控系統

## (3)設備磨耗偵測系統(WEARSCANNER)

常見的齒輪組、壓縮機、泵…等設備，會因長時間的運轉而逐漸磨損而大幅降低其性能，嚴重時會進而導致故障發生，PRUFTECHNIK 公司開發了 WEARSCANNER 設備磨耗偵測模組(圖 20)予以自動監控，由偵測潤滑油系統中金屬顆粒的數量與大小分布情形可顯示機械磨耗狀態，一般潤滑油系統存在金屬顆粒越大，通常表示設備磨損情況越嚴重，藉由設備磨耗偵測系統的監控及時了解相關設備磨耗狀態，可提早採取因應措施，PRUFTECHNIK 公司所推出設備監控系統皆可加入設備磨耗偵測系統(WEARSCANNER)，提供設備更全面的保護。

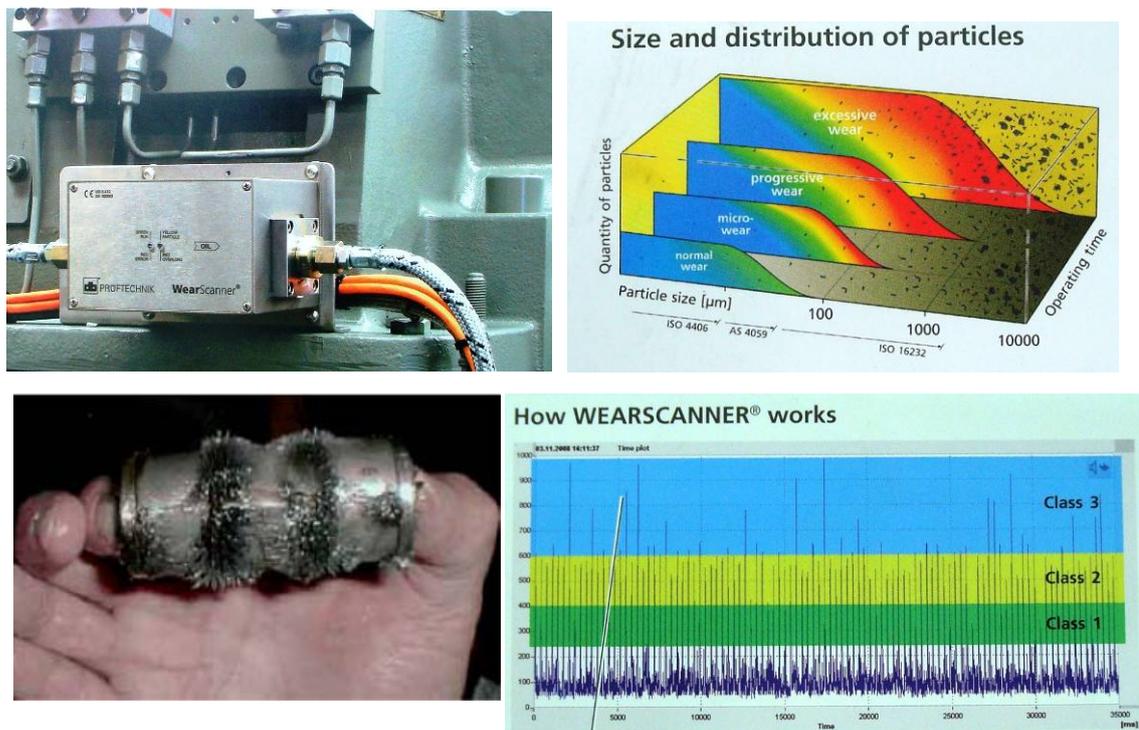


圖 20. PRUFTECHNIK 設備磨耗偵測系統

#### 四、研習心得

- (一)近年來因為材料與能源價格節節升高，以及使用石化燃料是否會引起全球暖化議題持續發燒，已使節能減碳成為必然的趨勢，加上生活水準提升及科技的進步，各項產品與設備有往兩極化發展趨勢，一是往輕薄短小的趨勢如電子類產品；另一趨勢是往大型化、高容量的趨勢如大型油輪、客機、發電機組…等。不論是往輕薄短小還是大型化、高容量的趨勢，結構動態特性的優劣，不僅是各項產品是否成功重要的關鍵因素，有時結構動態特性設計或量測失誤更會引起重大事故。以興達電廠與南部電廠所裝置的 SIEMENS V84.2 型複循環機組為例，其發電機定子線圈端部結構的動態特性，於設計階段並未充分考量發電頻率 50Hz 與 60Hz 的差異，致使機組在運轉十數年後陸續發生多部機組之定子線圈鬆動、定子線圈托架斷裂以及連接比流器引出線之軟銅帶斷裂等事故。
- (二)目前工程界有三種結構動態的實測試方法，包括傳統的實驗模態分析 Experimental modal Analysis(EMA)、可在設備運轉中進行有限量測分析

的操作振型分析 Operating Deflection Shapes Analysis (ODS)、最新發展的是兼具上述兩項量測特點的操作模態分析 Operational Modal Analysis (OMA)。目前國內應用較為普遍的是實驗模態分析(EMA)與操作振型分析(ODS)，而在量測分析較全面功能的操作模態分析 Operational Modal Analysis (OMA)則尚未有太多的著墨，但依國外經驗應極具有發展潛力。

- (三) 新型發電機組因朝大容量與高效率進展，以汽輪發電機組來說，新型機組已往超臨界及超超臨界設計製造，運轉蒸汽壓力及溫度提高，使得熱漲冷縮等熱影響程度亦大幅增加；而整個軸系往大跨距、柔性轉子設計時，又使其轉子運轉於更高階動態狀態；同時為了有效減少熱效率損失，亦將其動件與靜件間隙值(如汽封間隙等)減小，不僅會大幅增加轉子摩擦機率，也大幅增加非線性氣流擾動發生機率；而採用直列式複循環機組，其更複雜結構、更多激振源設計，又增加振動問題診斷分析困難度。故發展及設置更完善的監測/保護與診斷分析系統已成新型發電機組之必要裝備，而目前日趨完善線上監控系統功能，已有許多新裝置發電機組是由製造原廠與儀器廠家，透過網路即時取得運轉數據協助進行分析診斷。為能使公司重要資產之發電設備隨時處於安全可靠狀態，振動研測人員應更加精進其相關領域之最新研究發展和技術運用，以增進對機組振動問題正確分析與診斷能力。
- (四) 這次研習的地點德國、丹麥對於環境保護與綠能發展可說是世界典範，在兩國境內已設置大量風力發電機組，由其發展經驗顯示風力發電機組由於單一機組發電量低、數量龐大且往離岸發展，由發電廠家自行進行狀態監控，在人力與技術上有實際的困難，目前世界性潮流是委由專業廠家之監控中心進行監測與進行問題分析診斷。

## 五、建議

- (一) 代理商對原廠各種新開發之儀器與軟體以及應用實例，常無法提供充足之資訊和服務，造成國內客戶無法得到所需協助與詳細資訊，故派員至國外先進廠家進行研習有其必要性。

- (二)研究國外已廣泛運用 Operational Modal Analysis (OMA) 相關經驗與案例，將其靈活應用於電廠相關設備的振動診斷分析，定可收到事半功倍的效用。
- (三)雖然南部目前只有核三廠區內三部風力發電機組，仍應對國內外運轉中風力發電機組所產生振動相關問題加以了解收集，以備未來可能之風力發電機組相關振動診斷分析需求。
- (四)出國研習相關作業應儘早準備，並避開當地節慶日期以免住宿與交通產生問題。

## 六、返國座談會簡報

返國座談會由主任召集及主持，人資課主辦於 101 年 10 月 29 日上午 9 點舉行，各部門主管與工程師熱烈參與交流，座談會於 10：30 左右結束。