

出國報告（出國類別：實習）

研習離岸風力發電機葉片結構安全  
監測技術與參加國際多功能結構材料  
研討會及論文發表

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鄭錦榮、化學師

派赴國家：日本、香港

出國期間：97年7月19日至97年8月1日

報告日期：97年9月24日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：研習離岸風力發電機葉片結構安全監測技術與參加國際多功能結構材料研討會及論文發表

頁數 31 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人事處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鄭錦榮/台電綜合研究所/化學與環境研究室/化學師/02-80782246

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：中華民國97年7月19日至97年8月1日 出國地區：日本、香港

報告日期：中華民國97年9月24日

分類號/目

關鍵詞：葉片監控技術、光柵光纖、中樞神經系統、音洩

內容摘要：(二百至三百字)

一般風力機葉片是用玻璃纖維與發泡材建造的三文治複合材料構造，有時也部份使用碳纖維，積層樹脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，由於近代機械工業向機電一體化方向發展，機械設備高度的自動化、智慧化、大型化和複雜化，在許多的情況下都需要確保工作過程的

安全運行和高的可靠性，因此對其工作狀態的監視日益重要。隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在風力發電機正從百千瓦級向兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，一個部件出現故障，將可能引起整個發電過程中斷。目前大型風力發電機已加入服勤機組，為使其能依規制發揮功能，則建立適當的葉片劣化監控診斷計畫是首要步驟，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，預估待風機承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀破及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立監控、偵測、破損分析、修補及更換技術，公司內部將要面臨極大的考驗。

本次出國主要任務赴日本富士重工研習適合亞洲颱風環境之槳距控制系統及風力發電機葉片結構安全監測技術，後赴香港理工大學土木及結構工程學系研習風機葉片大型結構物智慧型監控方法，會後參加7月28-31日在香港理工大學舉行之國際多功能結構材料研討會及會上發表「風機葉片沖擊破壞之監控系統」論文，研討會結束後順道訪問香港電燈有限公司與相關研究維護同仁研討風力發電機葉片維護及破損偵測。

目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。

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

## 摘要

一般風力機葉片是用玻璃纖維與發泡材建造的三文治複合材料構造，有時也部份使用碳纖維，積層樹脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，由於近代機械工業向機電一體化方向發展，機械設備高度的自動化、智慧化、大型化和複雜化，在許多的情況下都需要確保工作過程的安全運行和高的可靠性，因此對其工作狀態的監視日益重要。隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在風力發電機正從百千瓦級向兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，一個部件出現故障，將可能引起整個發電過程中斷。目前大型風力發電機已加入服勤機組，為使其能依規制發揮功能，則建立適當的葉片劣化監控診斷計畫是首要步驟，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，預估待風機承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀破及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立監控、偵測、破損分析、修補及更換技術，公司內部將要面臨極大的考驗。

目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。

# 目 次

摘 要.....	5
目 次.....	6
一、目的.....	7
二、行程概要.....	9
三、會議及研習內容.....	10
1. 日本富士重工研習.....	10
2. 香港理工大學結構健康監測實驗室研習.....	14
3. 參加國際多功能結構材料研討會及論文發表.....	19
4. 風力發電機的線上監測系統研習.....	26
四、心得與感想.....	29
五、結論與建議.....	30

## 一、目的

依據 94 年「全國能源會議」相關結論，2010 年再生能源推廣目標占總能源 3%~5%，占總發電裝置容量 10%，約 500 萬瓩；並規劃適宜陸域風場及離岸風場開發方式。經濟部並在 96 年 9 月公告開放第一階段設置離岸風力發電廠，核准籌設裝置容量為 30 萬瓩，一般風力機葉片是用玻璃纖維建造的複合材料構造，部份也使用碳纖維，積層樹脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，因此風力機葉片是容易損壞的構件之一，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。離岸風機葉片在(鹽害及亞洲颱風)環境及監控上更較陸上風機為嚴苛，因此需派遣相關研究人員前往隣近相近環境風機製造及監控之日本地區參予相關資料收集與評估分析研討，另增赴香港參加國際多功能結構材料研討會及「風機葉片沖擊破壞之監控系統」論文發表與會專家學者及電力公司交換大型結構物之監測與討論，將有助於公司風力機組維護及監控技術提昇。

赴日本富士重工研習適合亞洲颱風環境之槳距控制系統及風力發電機葉片結構安全監測技術，後赴香港理工大學土木及結構工程學系研習風機葉片大型結構物智慧型監控方法，會後參加 7 月 28-31 日在香港理工大學舉行之國際多功能結構材料研討會及會上發表「風機葉片沖擊破壞之監控系統」論文，該會分項報告討論主要針對複合材料之 Damage Identification and Properties/ Integrity、Non-destructive Evaluation Technology、Structural Health Monitoring、Smart Materials and Structures

等主題，透過與會國際學者的學習及討論風力機葉片複合材料破損分析及劣化監測技術，作為未來工作規劃之參考，因應離岸風力葉片複合材料破損分析及劣化監測的研訂，研討會結束後順道訪問香港電燈有限公司與相關研究維護同仁研討風力發電機葉片維護及破損偵測。



## 二、行程概要

本案實習、開會期間含往返行程共十四天，即自民國 97 年 7 月 19 日至同年 8 月 1 日止。其行程概要簡述如下：

時間	參訪機構名稱	詳細工作內容
970720~970723	日本富士重工	風力發電機葉片結構安全監測技術
970725~970727	香港理工大學	風力發電機葉片結構安全監測技術
970728~970730	國際多功能結構材料研討會	參加國際多功能結構材料研討會及論文發表
970731	香港電燈有限公司	風力發電機葉片維護及破損偵測

### 三、會議及研習內容

#### 1. 日本富士重工研習

日本富士重工成立於1917年，為日本最先成立之飛機研發實驗室(亦是美國萊特兄弟首次 Kitty Hawk 飛機成功首航之後 14 年)，於 1953 年日本富士重工擴展至汽車製造業，以 Subaru 汽車名譽世界，近年更發展高附加價值之工業產品及 ECO 技術促進有效資源再生利用，主要產品分類如圖 1 所示。

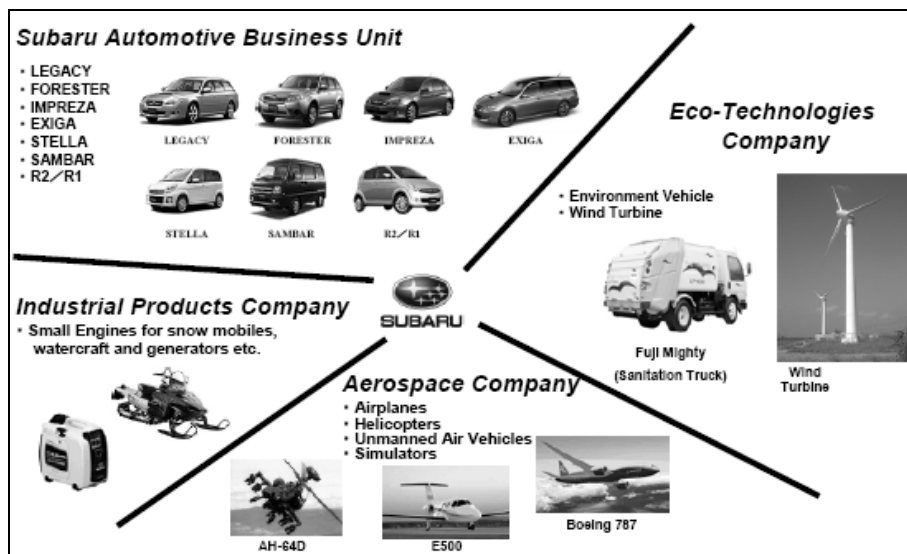


圖 1：日本富士重工公司組織產品構圖

日本富士重工 ECO 部門最近研發適合亞洲地形及氣候之陸上風力發電機，如圖 2 規格 SUBARU80/2.0 所示。

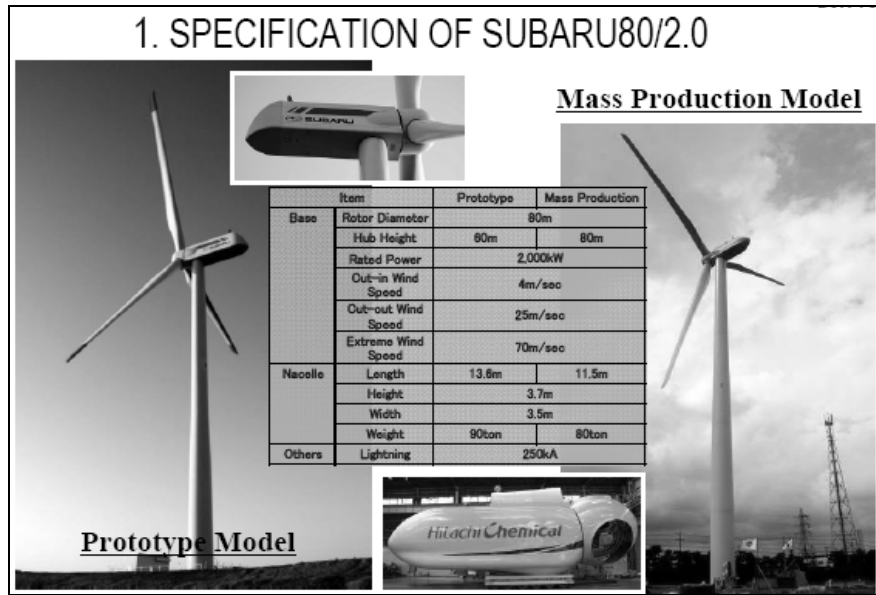


圖 2：日本富士重工研發適合亞洲地形及氣候之陸上風力發電機。  
 機組優點可分為(1)採背風式風向，適合日本崎嶇不平地形，減少因擾流所引起之氣流不穩定，(2) 機艙內構件採組合式，適合日本道路窄少地區運載，(3) 特殊避雷設計，防止雷擊，(4) 採背風式風向，有效降低颱風對機組傷害及對電網損耗。如圖 3 所示。

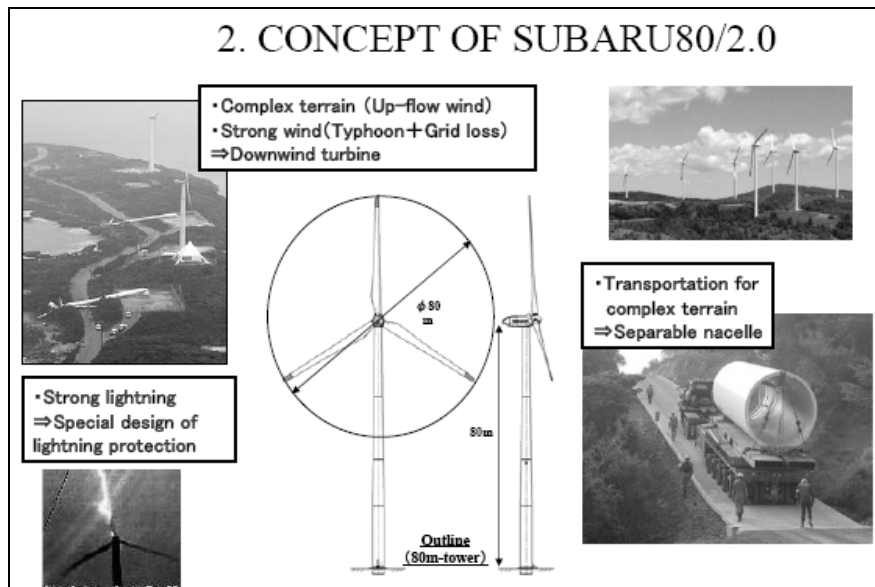


圖 3：SUBARU80/2.0 機組優點

目前世界各國仍以迎風式為主流，配合 yaw 控制迎風旋轉及葉片 pitch 控制取得最大風能效率，日本富士重工利用 CFD(動態流體電腦模擬) 及現場證明在上氣流夾角在  $6.9^\circ$  時流經背風式轉子與迎風式轉子所產生風能效率高約 8.4%，如圖 4、圖 5 所示，證明在山坡地上氣流時以背風式轉子風能效率較迎風式轉子為佳。

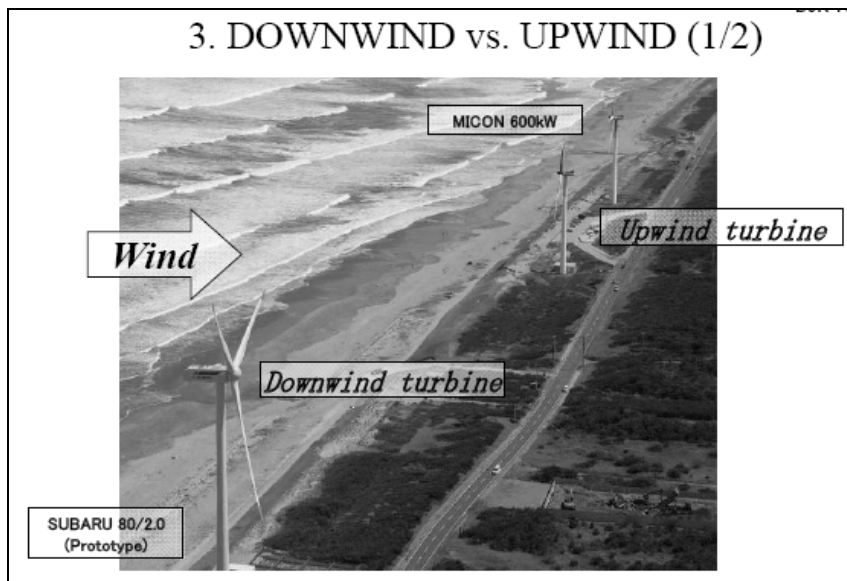


圖 4：背風式轉子與迎風式轉子現場風能效率試驗

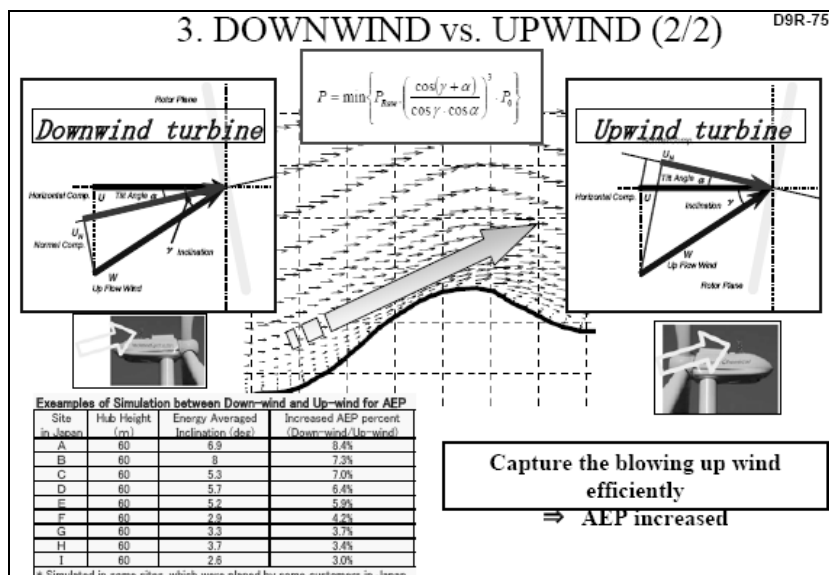


圖 5：背風式轉子與迎風式轉子 CFD(動態流體電腦模擬)風能效率試驗

SUBARU80/2.0 機艙內構件採組合式，適合日本道路窄少地區運載，詳如圖 6 所示。

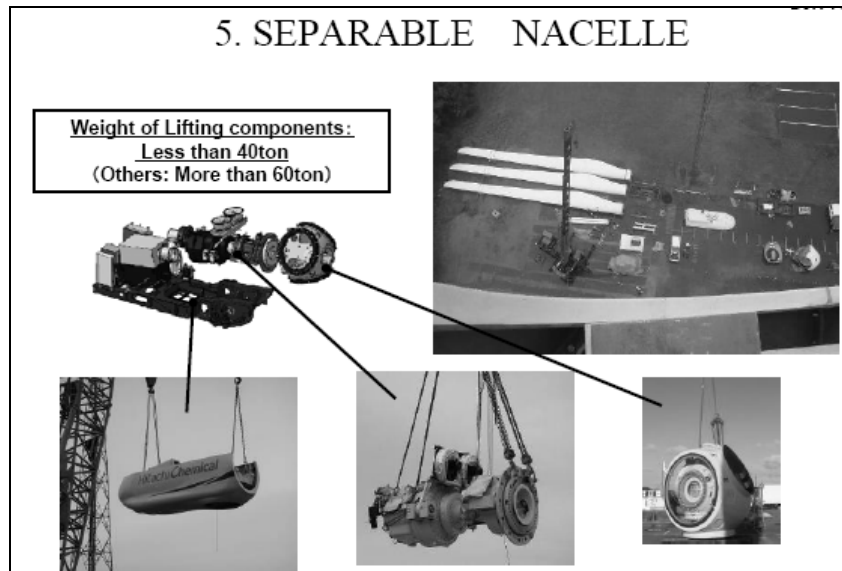


圖 6：SUBARU80/2.0 機艙內構件採組合式，適合日本道路窄少地區運載。此外考慮日本地區多雷雨氣候，其設計峯電流及轉移電荷、比電能均高於 IEC(CAT. I) 值，主要在葉緣端增大導電金屬面積，雷電沿着塔座導線接地，詳如圖 7 所示。

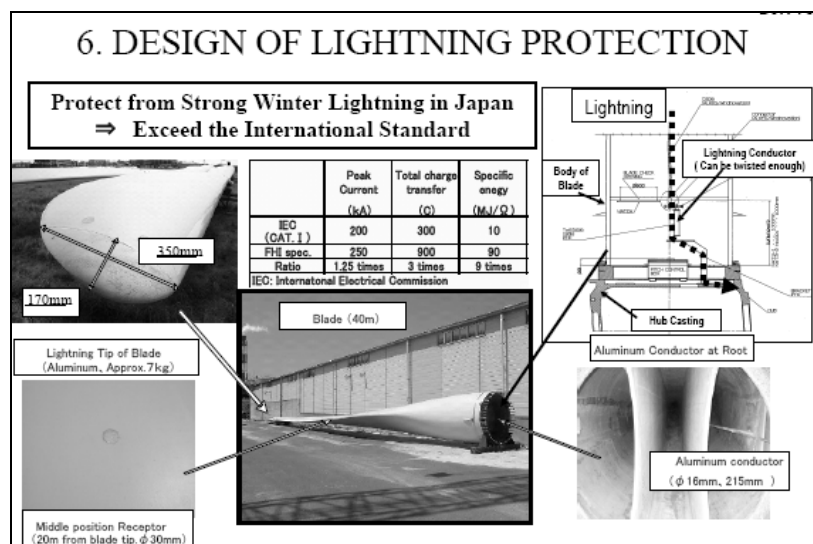


圖 7：SUBARU80/2.0 避雷系統設計。

## 2. 香港理工大學結構健康監測實驗室研習

香港理工大學結構健康監測實驗室主要從事結構物健康監測，包括香港機場之青馬大橋及目前在建構中之全世界最高(600m)之廣州電視塔如圖 8 所示，亦結合光柵光纖及神經中樞系統建立葉片健康監測系統，主要利用光柵光纖偵測結構物應變之光譜變化了解葉片破損狀況。

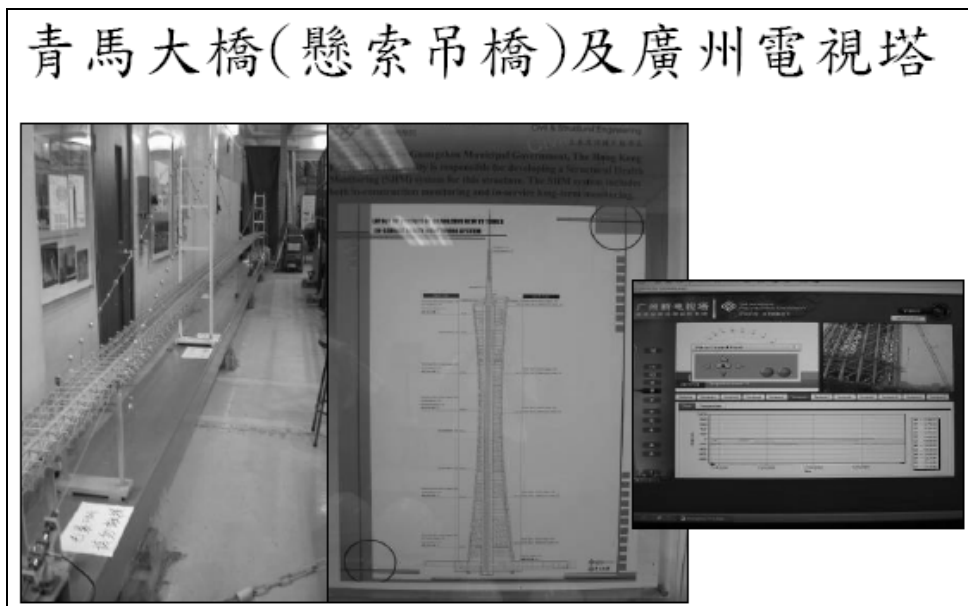


圖 8：香港理工大學機場青馬大橋結構及廣州電視塔健康監測

結構健康檢測包括結構動力學、感測技術資訊技術、最佳設計、材料科學、電腦軟體等學門，與非破壞檢測技術有局部相結合，詳如圖 9 所示。人工智慧系統，它採用埋入或表面粘貼的感測器系統作為神經系統，使其以生物界的方式感知結構內部的狀態(結構整體形變、局部應力應變、強度、剛度等)和外部的環境，線上監測結構的“健康”狀態。當遇到突發事故或危險環境，系統可通過調節與控制使整個結構系統恢復到最佳工作狀態。

系統可自動改變和調節結構的形狀、位置、強度、剛度、阻尼或振

動頻率使結構在危險發生時能自我保護，並繼續生存下去。結構健康監測將有可能把目前廣泛採用的離線、靜態、被動的監測轉變為線上、動態、即時健康監測。理想的結構健康監測方法能準確的在損傷發生的初期發現損傷，並能夠定位及確定損傷的程度，進而提供結構的安全性評估，並能預測損傷結構的剩餘壽命。

結構健康監測系統檢測出損傷位置、判斷損傷大小和損傷形式是結構健康監測系統的目標。結構健康監測系統中使用的損傷識別技術粗略分為兩種：(1)振動資訊方法；(2)波資訊方法。

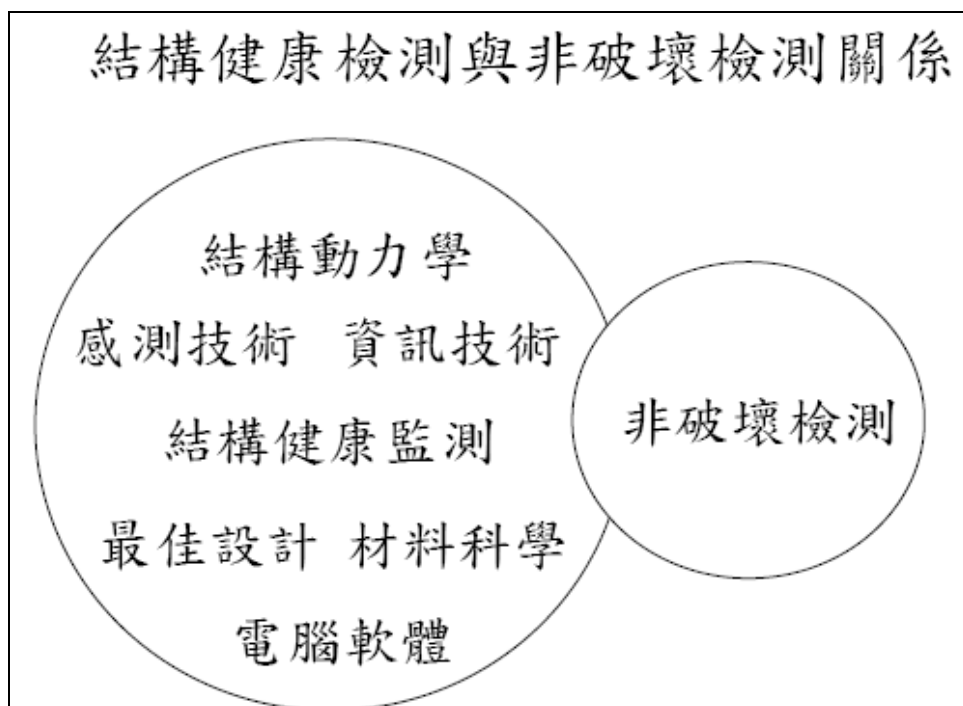


圖 9：結構健康檢測與非破壞檢測技術關係

傳統風機葉片利用音洩(AE) 測試葉片材質之劣化，必須建立多點感測器附著在葉片表層，利用導線擷取訊號再分送或無線傳輸至控制系統進行分析如圖 10 所示，缺點是寫耗費大量昂貴 AE 探頭及連續大量連接

線及加重系統擷取資料數量及運算負擔，成本昂貴。

香港理工大學結構健康監測實驗室提供結合人工智慧中樞神經網路系統在葉片內佈置壓電材料的感測器，利用縱橫軸串接各類壓電材料的感測器，降低生產成本及加速葉片劣化程度擷取速度，如圖 10 至圖 15 所示。

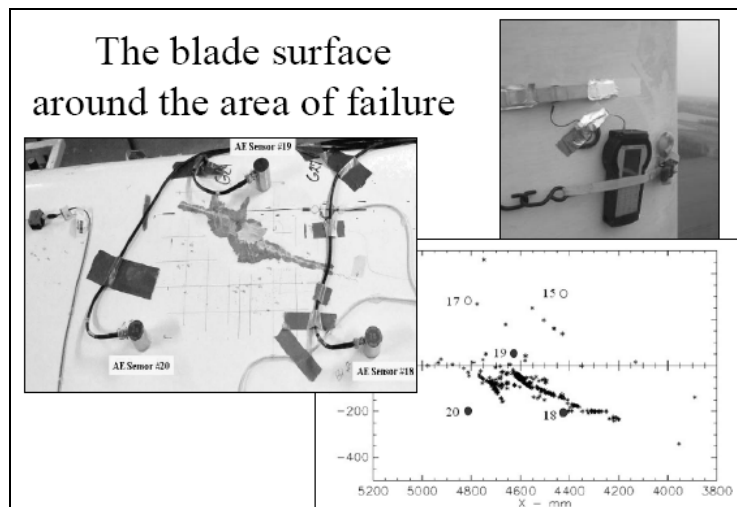


圖 10：傳統風機葉片利用音洩(AE) 測試葉片材質之劣化

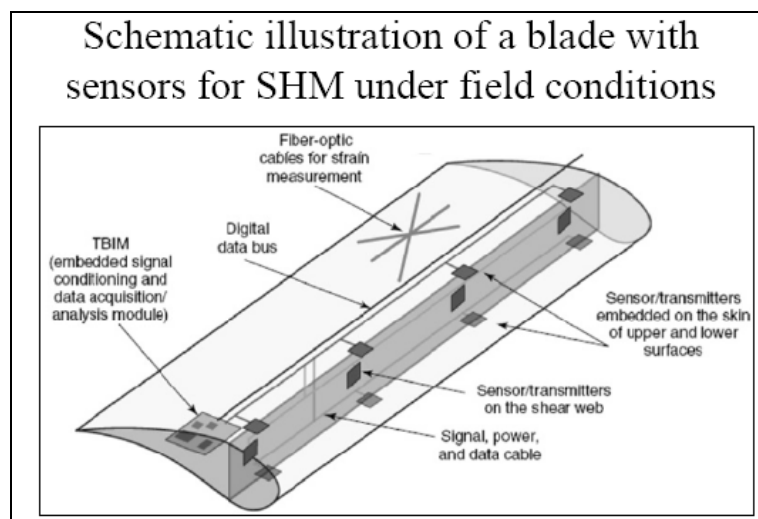


圖 11：利用縱橫軸串接各類壓電材料的感測器的健康監測系統偵測葉片破損狀況



## Layout of the acoustic emission NDT sensors and photoelastic panels

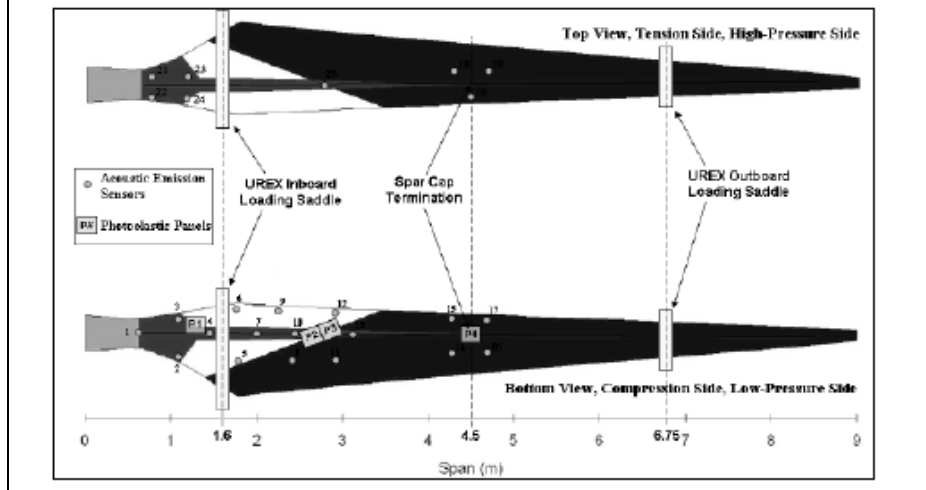


圖 12：利用縱橫軸串接各類壓電材料的音洩感測器佈置

## The SNS for WTBs: (a) detail of sensor connections and (b) sensor array

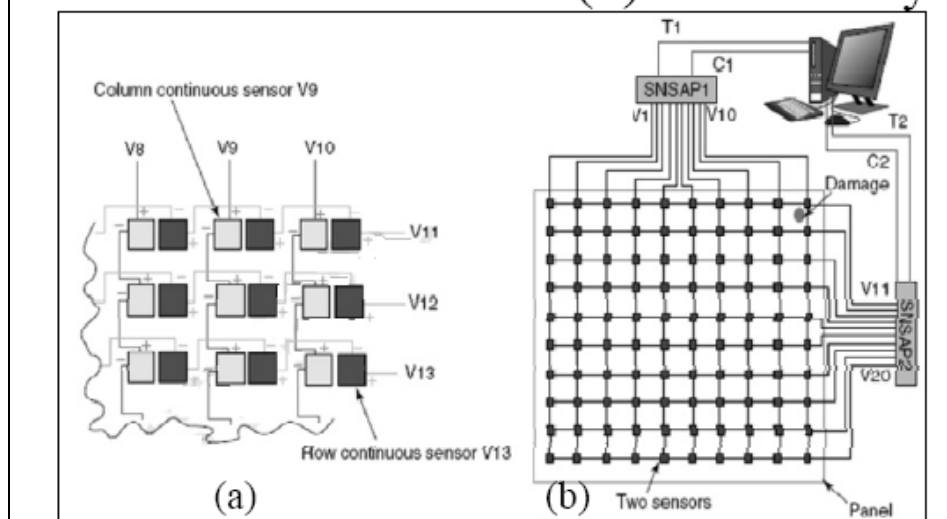
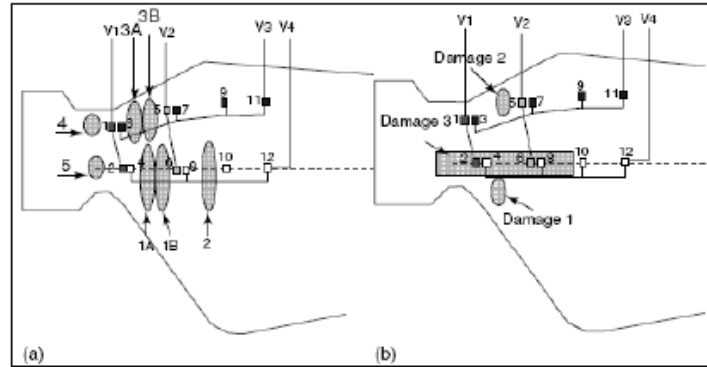


圖 13：結合人工智慧中樞神經網路系統在葉片內佈置壓電材料的感測器

## Comparison of the predicted and actual damage locations on the wind turbine blade



- (a) damage locations predicted by the SNS before sectioning of the blade
- (b) damage locations observed by the NREL engineers after the post failure sectioning of the blade.

圖 14: 結合人工智慧中樞神經網路系統偵測葉片損傷位置與真實破損位置。

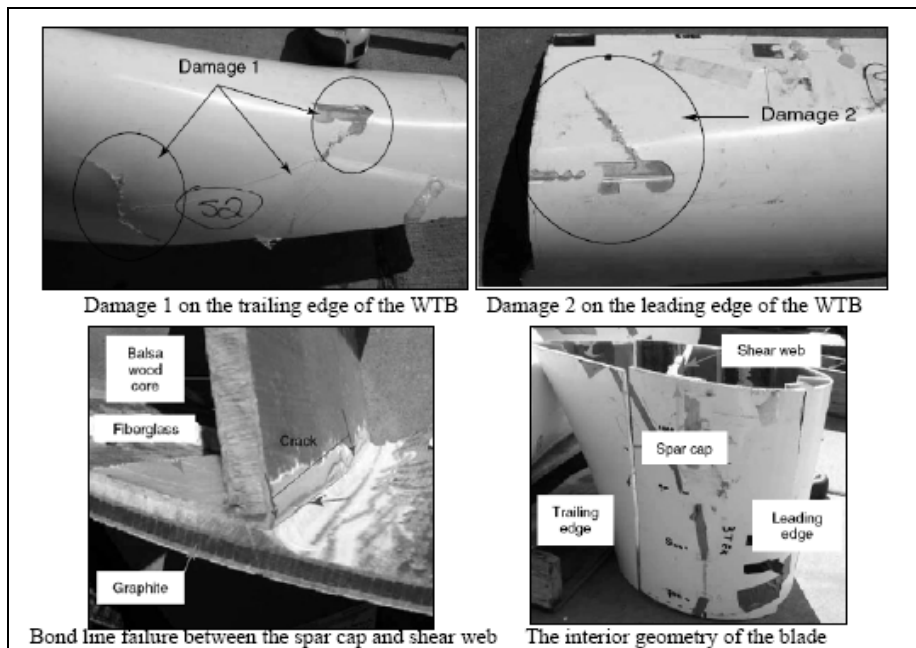


圖 15: 結合人工智慧中樞神經網路系統偵測葉片損傷位置與真實破損位置。

### 3. 參加國際多功能結構材料研討會及論文發表

參加在香港理工大學舉行之多功能結構材料研討會及論文發表，研討會主題涵蓋下列 15 項主題，共有來自全世界 30 個國家、500 人參加，會中四天議程共發表論文 420 篇，主要可區分為 1. Advanced Composites and their Applications; 2. Bio-sensors and Bio-actuators; 3. Bio-materials and Biomimetic; 4. Characterisation and Assessment; 5. Damage Identification and Properties/ Integrity; 6. Intelligent Processing of Materials and Structures; 7. Modelling and Analysis; 8. Nano-materials, -sensors and -actuators; 9. Non-destructive Evaluation Technology; 10. Ocean Engineering Materials; 11. Optical Sensor Technology; 12. Structural Health Monitoring; 13. System Integration; 14. Smart Materials and Structures; 15. Tribology (Surface Engineering) 等 15 部份。

其中以藍母波及結合影像機率辨識可考慮進一步評估葉片表面損傷診斷技術，如圖 16 至圖 19 所示。

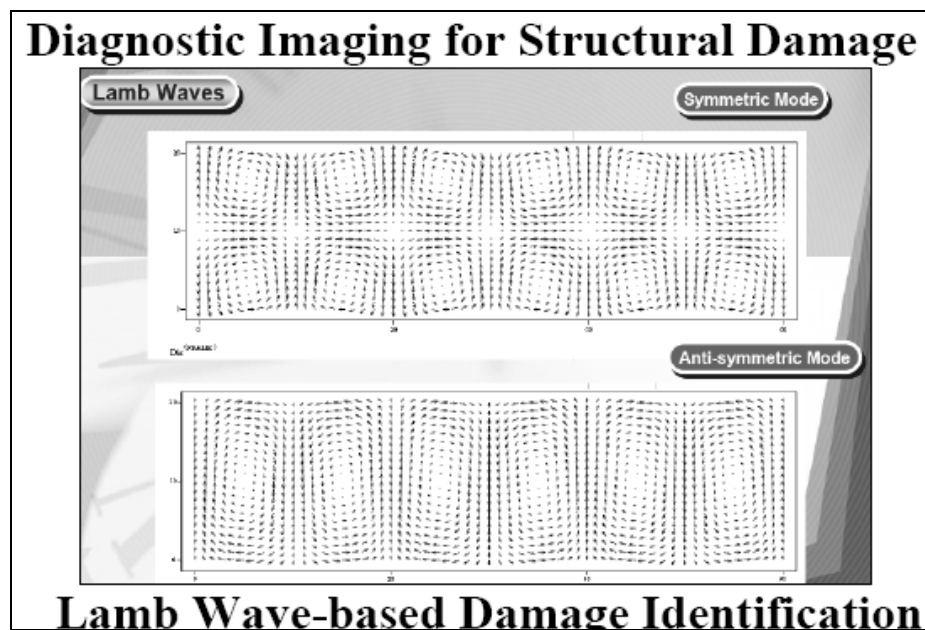


圖 16：藍母波評估複材表面損傷

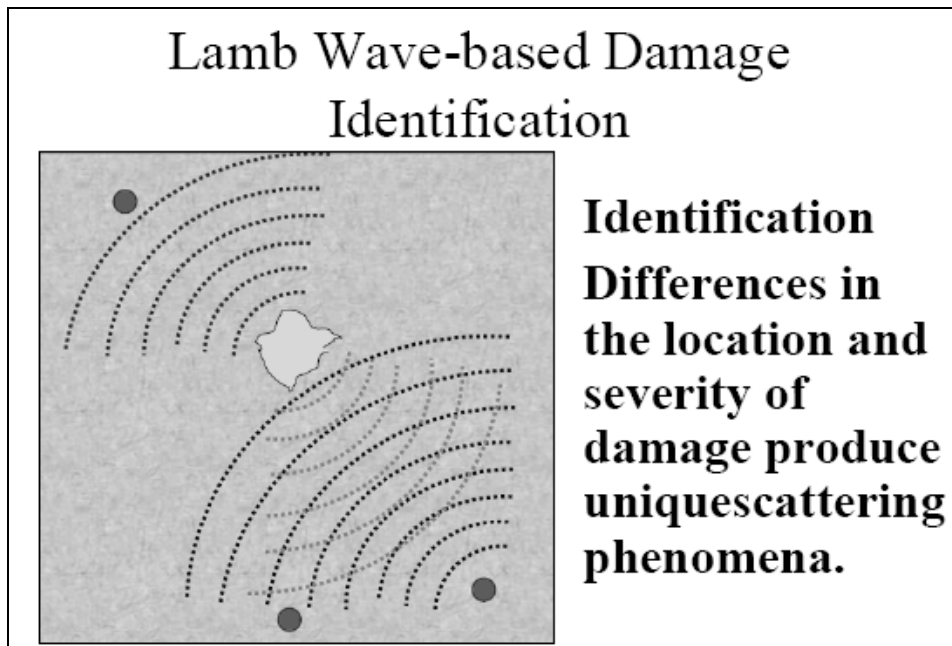


圖 17：藍姆波利用縱及橫應力波判斷表面損傷位置及狀況

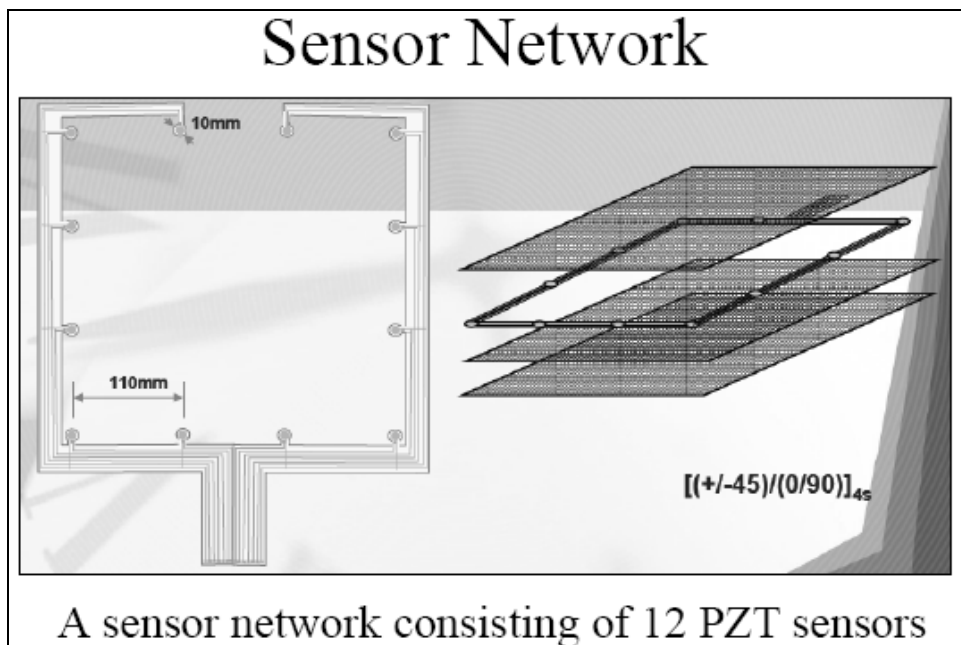


圖 18：在複合材料內鑲埋 12 片壓電狀感測器佈置及連接狀況

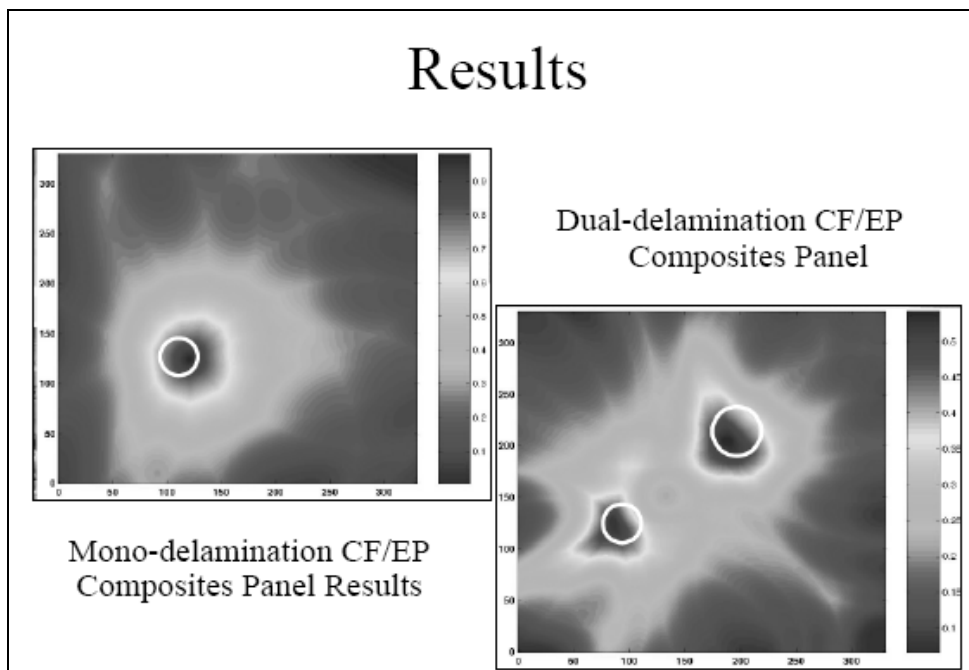


圖 19：藍母波及結合影像機率辨識可評估複合材表面損傷診斷

此外利用 FBG 鑲貼在葉片表面探討葉片因外力衝擊所受損位置判斷，由結果可知利用各種距離位置 1m~20m 及同側與異側方式，判斷受力所示波形與 FBG 擺放位置有關，詳如圖 20 至圖 26，由結果可知經由不同距離衝擊，FBG 以衝擊波成垂直擺放接受訊號較佳。

## Layout of the interrogation system

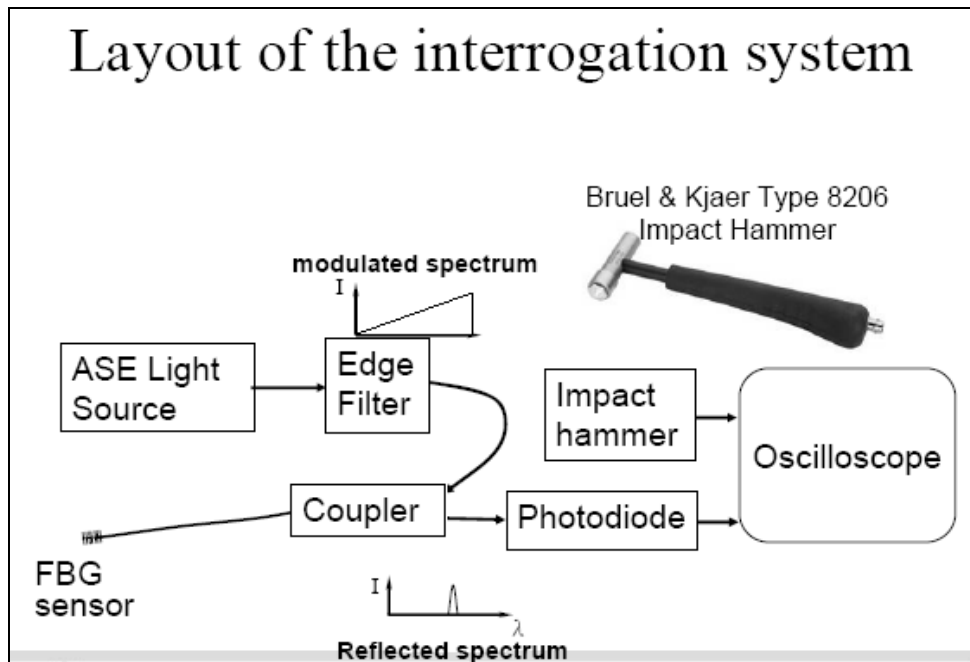


圖 20：應力鏈製造衝擊破壞後以 FBG 分析結構圖

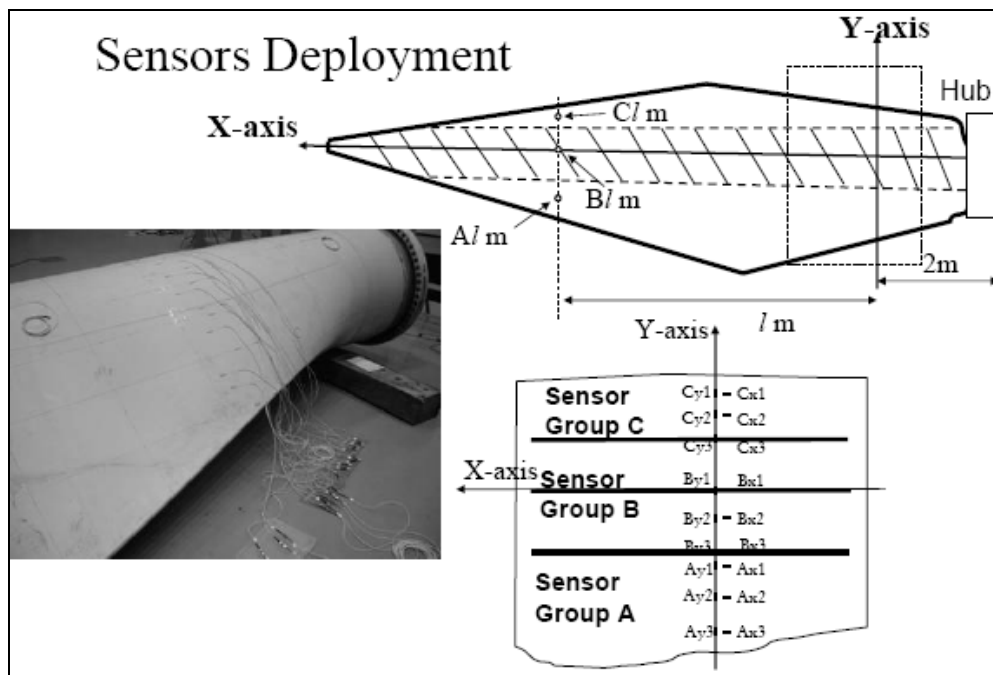


圖 21：將葉片 FBG 區分為三區域佈放

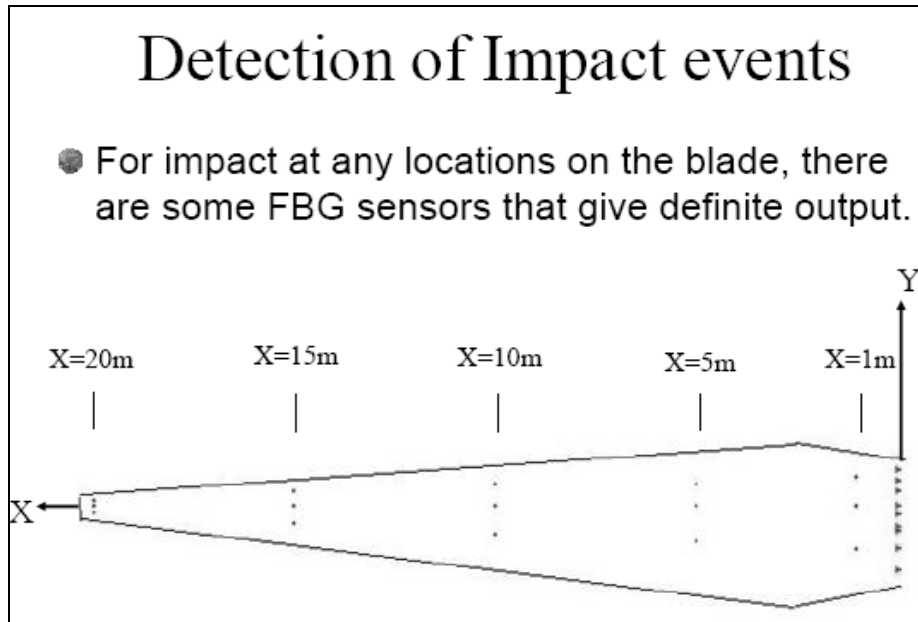


圖 22：為別量測佈放 FBG 感測器範圍由 1m 至 20m 衝擊位置。

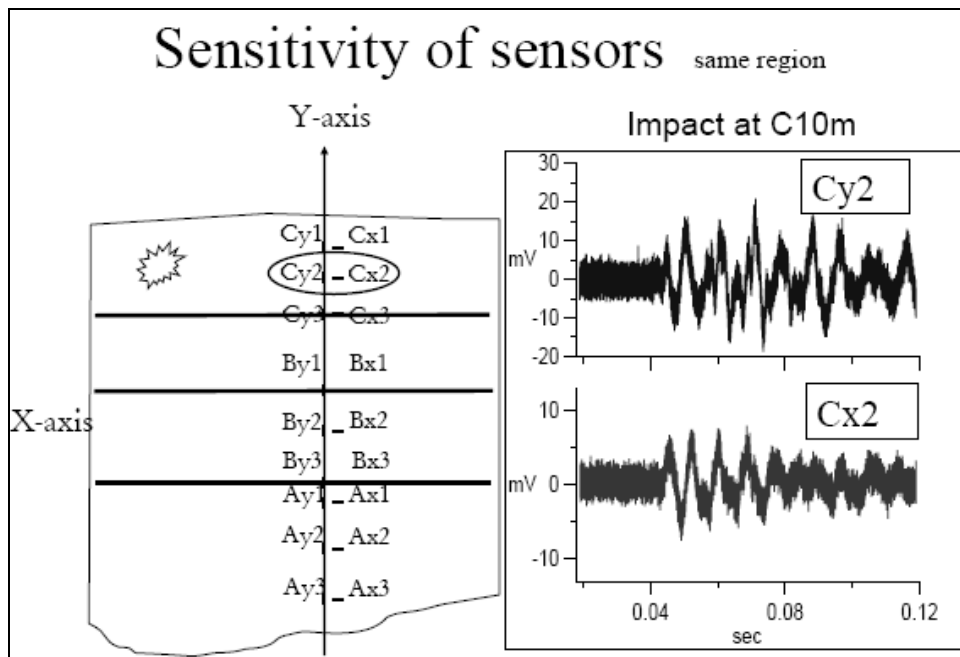


圖 23：衝擊位置與 FBG 感測器同側所測出訊號

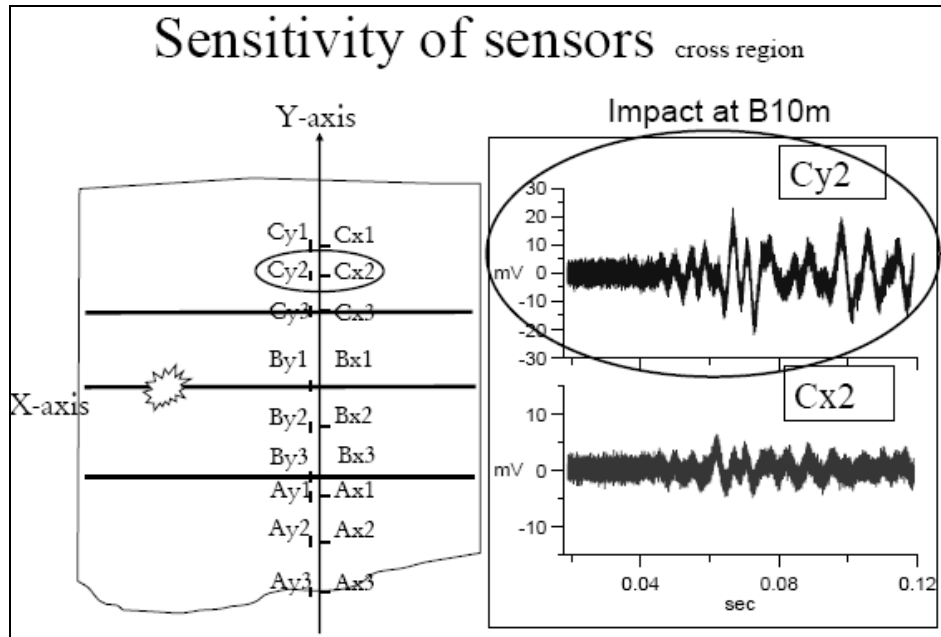


圖 24：衝擊位置在主軸上與 FBG 感測器異側所測出訊號

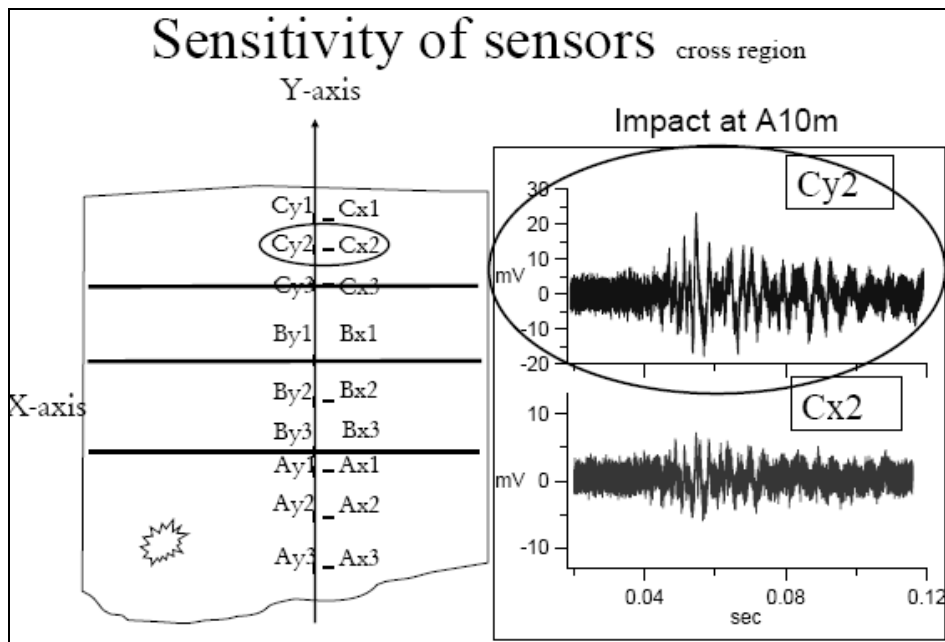


圖 25：衝擊位置與 FBG 感測器異側所測出訊號



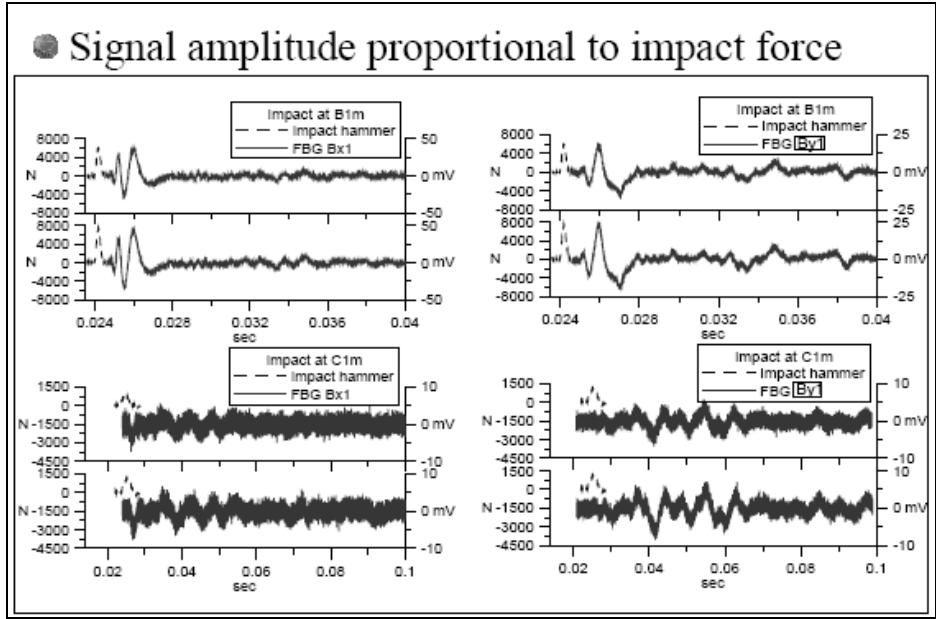


圖 26：衝擊力大小與 FBG 接受訊號強弱關係

## 4. 風力發電機的線上監測系統研習

線上監測系統是近 20 年來在大型機組上發展起來的一門新興交叉性技術，這是由於近代 機械工業向機電一體化方向發展，機械設備高度的自動化、智慧化、大型化和複雜化，在許 多的情況下都需要確保工作過程的安全運行和高的可靠性，因此對其工作狀態的監視日益重要。隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在風力發電機正從百千瓦級向兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，一個部件出現故障，將可能引起整個發電過程中斷。另外，近年來隨著風力發電機的快速發展，其技術的成熟度跟不上風力發電機的發展速度，在媒體上出現了大量關於風力發電機齒輪箱、主軸、葉片的損壞，甚至有風力發電機倒塌的報導。保險公司非常抱怨其高損壞率，因此在保險合同中加入了維修條款：保證其風力發電機能夠正常運轉 40000h 或者至少運行 5 年，除非裝上線上監測設備，接受保險公司的定期監測。在這種環境下，線上監測在風力發電機行業得到了飛速的發展。

線上監測系統：使用合適的感測器與風力發電機的控制系統相連，當風力發電機的零部件特徵開始變形時能夠發出警報聲音，其中包含齒輪箱、主軸及電機定子等的振動。自動評估其頻率範圍並與所設定的頻率譜圖相比較，當監控系統給出超出系統設定異常值時，風力發電機會自動地停機並且通過網路把警報值傳送到維修中心。

週期性機械診斷：爲了對線上診斷儀發出有預警值或異常值的零部件上進行進一步的監測。在週期性的檢查過程中，可將移動測量設備安裝在齒輪箱、發電機及軸等機械零部件上，記錄其頻譜圖並與以前

的確定的頻譜圖相比較和儲存。通過與標準的頻譜特性曲線比較，判斷產生故障的原因。

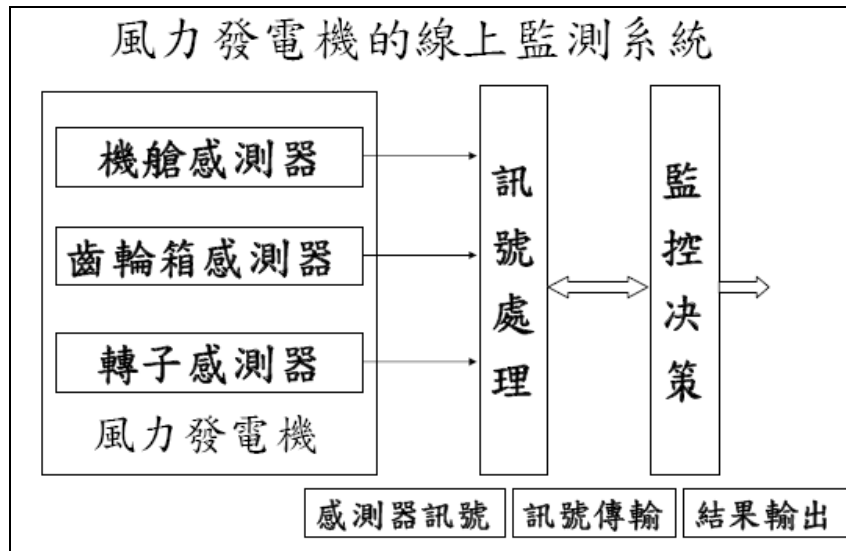


圖 27：風力發電機在線上監測流程圖

## Periodic Monitoring

Assembly	Inspection for / possible defects
Rotor blade	Surface damage, cracks, structural discontinuities. (Inspection from a lifting or stepping device: visual and structural examination using suitable methods (e.g. tapping, ultrasonic testing). Pretensioning of bolts. Damage to the lightning protection system
Drive train	Leakages, unusual noises, condition of the corrosion protection, greasing, pretensioning of bolts. Condition of the gearing (oil sample, if relevant).
Nacelle and force-and moment-transmitting components	Corrosion, cracks, unusual noises, greasing, pretensioning of bolts

圖 28：風力發電機週期性監控項目

<b>Assembly</b>	<b>Inspection for / possible defects</b>
Hydraulic system, pneumatic system	Damage, leakages, corrosion, function
Tower and foundation	Corrosion, cracks, pretensioning of bolts, covering of foundation
Safety devices, sensors and braking systems	Functional checks, compliance with the limiting values, damage, wear
Control system and electrics including transformer station and switchgear	Terminals, fastenings, function, corrosion, dirt
Perusal of documentation	Completeness, observance of the conditions, construction according to certified documents, test documents, maintenance carried out at regular intervals If applicable: execution of modifications / repairs according to approval

圖 29：風力發電機易故障項目

## 四、心得與感想

一般風力機葉片是用玻璃纖維與發泡材建造的三文治複合材料構造，有時也部份使用碳纖維，積層樹脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，由於近代機械工業向機電一體化方向發展，機械設備高度的自動化、智慧化、大型化和複雜化，在許多的情況下都需要確保工作過程的安全運行和高的可靠性，因此對其工作狀態的監視日益重要。隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在風力發電機正從百千瓦級向兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，一個部件出現故障，將可能引起整個發電過程中斷。目前大型風力發電機已加入服勤機組，為使其能依規制發揮功能，則建立適當的葉片劣化監控診斷計畫是首要步驟，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，預估待風機承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀破及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立監控、偵測、破損分析、修補及更換技術，公司內部將要面臨極大的考驗。

目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。

## 五、結論與建議

1. 線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，在許多的情況下都需要確保工作過程的安全運行和高的可靠性，因此對其工作狀態的監視日益重要，目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。
2. 目前台電公司風力機組分別由不同廠家提供，維修計畫特別煩重，針對葉片損傷，公司相關單位應籌組維護小組建立葉片力學結構分析、複合材料的組成研究、黏合接著技術開發、防雷擊設計規劃、材料之機械化學腐蝕特性、使用壽命預估、非破壞檢測、破損分析與維護修補技術等。
3. 維護小組全面整合各廠牌機組在保固合約期內維護、維修技術之學習，儘早購置檢測設備及建立相關技術，以迎戰歐美機組葉片的水土不服。
4. 建立上述基礎技術後再推展至其他廠牌機組才不致受制於系統廠商，爭取國內數百座風機維修保養、破損事故分析工作，日後更可立足台灣離岸風機，遠望新興的亞洲市場，納入台電風機維護事業之版圖。
5. 台灣岸上風力建置地點已趨飽和，岸上風機建置技術在歐美等國已是成熟技術，關鍵元件與系統整合完全掌握在國外數大風機廠商手中，國內產業已有共識投入離岸風機產業，共同開發適合亞洲(高溫、潮

濕、颱風)氣候的離岸風機，風機葉片修護技術的建立，亦將有助國內離岸風機產業之發展。

6. 目前國外預估離岸風機可發展至 12MW，針對台灣颱風、高溫、高濕、鹽害腐蝕氣候及腐蝕防治收集相關資訊，以配合政策釐訂離岸風機相關規範及設備維修診斷方法。