

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：實習)

實習「國外先進汽機老化與損傷之力學評估技術」

服務機關：台灣電力公司
出國人：職 稱：十等十級
姓 名：唐文元
(姓名代號)：879371

出國地區：義大利、德國
出國日期：91年09月20日至91年10月04日
報告日期：91年12月02日

66/CO9104716

行政院及所屬各機關出國報告提要

頁數 13 含附件：是 否

出國報告名稱：實習「國外先進汽機老化與損傷之力學評估技術」
出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/02-23667685
出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：
唐文元/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/(02)26815424 ext 279
出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他
出國地區：義大利、德國
出國期間：91年9月20日~91年10月04日
報告日期：91年12月02日
分類/號目：

關鍵詞：汽機老化、迴轉機械、殘餘的生命週期

內容摘要：(二百至三百字)

先進汽機廠家或學術機構應用電腦科技，開發了許多實用汽機診斷應用分析軟體技術，可見應用電腦科技進行汽機診斷技術是各製造廠家發展趨勢，應用分析軟體來模擬汽機老化與損傷情形，近年來已廣為學術及工業界所重視，藉由實地與該技術領先學術機構或代表性廠家交流討論，蒐集維護運轉資料加以悉心研究，並密切注意，隨時引進最新觀念與技術，有助於汽機老化與損傷之力學評估技術研究規劃，提供電廠最佳技術支援是本所目前進行的研發重點，研習應用電腦輔助工程(CAE)技術評估汽機及發電機轉子的結構完整性、運轉能力以及殘餘的生命週期、電廠汽機老化與損傷之力學評估技術及如何應用有限元素法模擬汽機轉子與迴轉機械轉軸動態行為，列為本次出國主要研習內容，有關模擬汽機老化與損傷的應用分析軟體評估技術甚具參考價值，有助於本所對該領域研究發展方向的規劃與技術引進。

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

目 錄

| | |
|--------------------------------|-----|
| 出國報告書審核表..... | I |
| 行政院及所屬各機關出國報告提要..... | II |
| 目 錄..... | III |
| 第壹章 出國任務..... | 1 |
| 第貳章 出國行程及內容..... | 3 |
| 第參章 公務內容..... | 5 |
| 壹、DYNARO 模擬電廠中轉動元件之動態行為..... | 6 |
| 貳、ABACO 多平面轉子平衡系統..... | 8 |
| 參、LASER 發電機與渦輪機轉子之結構完整性與殘餘壽命評估 | 9 |
| 第肆章 感想與建議..... | 12 |

第壹章 出國任務

本公司所屬電廠汽機運轉已有相當時日，汽機轉子長時期在高溫、高壓與高轉速下運轉，汽機轉子材料會產生疲勞、潛變、脆化及裂縫等現象，其它或因原廠家設計製造瑕疵，或因運轉人員運轉維修疏忽，以致汽機轉子偶有輪盤基座或葉片根部龜裂，護環斷裂等等事故，造成機組停機，至於如何預測這些現象的發生，並且在事先即進行檢修抽換的工作，確保汽機轉子安全的運轉，是目前本所進行研究發展計畫的重點工作之一。

過去本公司所屬電廠機組檢測汽機轉子之老化與損傷均採用材料檢測法進行微硬度、複製膜及軸孔超音波量測，檢測耗轉子材質潛變後組織情況，大多數是依據經驗與實驗數據進行判讀，但是一旦全盤依賴經驗傳承來評估壽命則是很危險的思維，因為數據採樣依邊界條件與運轉狀況而改變，所以每次的實驗分析結果都因人而異，較無一套標準經驗法則，往往只知有這種現象而無法瞭解原因，故對轉子殘餘壽命評斷有頗多的誤差，所以必須提升對汽機動態特性知識與專業技術資訊，從理論依據中充份瞭解其物理意義，才能提供正確的判斷與決定。

就汽機而言轉子是汽機的心臟，一旦因汽機老化與損傷產生的故障將會造成嚴重的事故，對工業與民生的影響也甚為深遠，因此在設計維護運轉時應該特別留心，近年來電腦軟應體日新月異的快速發展，運算處理速度倍增，相對地電腦輔助應用分析(CAE)技術也大幅成長，發展也相當成熟，對分析轉子動態特性、疲勞或壽命的問題，得到進一步解決。例如對汽機轉子承受高溫潛變及起停機所造成的低週次疲勞均會消耗轉子材料之使用壽命，則可配合電腦數值分析之應力

計算分析與機組運轉歷程及動態應力變化，並依據各運轉歷史進行評估計算，並與材料檢測推算之壽命消耗相比對，互相印證。

因此在各廠汽機逐漸老化之際，汽機老化與損傷之力學評估益顯重要，探究電廠汽機相關組件力學特性，各汽機製造廠家皆有發展各自評估汽機老化與損傷之力學技術，本公司也不例外的在研發自主汽機老化與損傷之力學評估相關技術，本次出國計劃之目的即前往義大利、德國等國外先進研究機構及汽機造廠家考察此類相關技術，作為本所日後進行汽機轉子動力分析、應力計算、破裂力學評估分析之參考與評估技術諮詢交流管道。

第貳章 出國行程及內容

此次赴義大利美與德國實習，主要是前往義大利國家綜合研究院 (CESI) 及 Alstom/Germany 汽機製造公司，實習汽機轉子老化與損傷之力學分析評估技術及觀摩實習汽機製造及葉片安裝技術，共為期十五天，內容詳如下表

| 日期 | 考察內容簡述 | 地點 |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|
| 9月20日~9月22日 | 往 程 | 台北→義大利羅馬 →米蘭 |
| 9月22日~9月29日 | 研討汽機轉子老化與損傷 之力學分析評估技術 | 米蘭 |
| 9月30日~9月30日 | 往 程 | 義大利米蘭→德國/ Mannheim |
| 10月1日~10月2日 | 觀摩實習汽機製造及葉片 安裝技術 | 德國/ Mannheim |
| 10月3日~10月4日 | 返 程 | 德國/ Mannheim→ 荷蘭阿姆斯特丹→ 台北 |

義大利國家電力綜合研究院 (CESI, Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano) 原本為 ENEL 之研發單位，其角色相當於台電公司綜合研究所。自六年前義大利電業法開放後，ENEL 為義大利目前最主要之電力供應者，而 CESI 也從 ENEL 獨立出來，成為一獨立營業機構。累積四十餘年之經驗，CESI 致力於電力系統之效能提昇與改善以及再生能源之開發與利用，目前 CESI 已成為世界知名的電力系統技術研究發展中心。尤其在汽機老化與損傷之力學評估相關技術技術上，開發出許多具有實際應用價值的軟、硬體技術，因此列為本次出國主要研習項目。

(1) 9月22日~9月29日共為期八天

◇ CESI 公司簡介與相關部門拜會。

◇ 介紹汽機老化與損傷之力學評估技術電腦軟體開發。

◇ 研習汽機老化與損傷之力學評估技術應用。

Alstom/Germany 艾斯敦是一家汽機製造公司專門負責渦輪機與發電機組裝，該部門於 1900 年建廠，至今以成為歷史悠久且聞名全球的渦輪機組裝與發電機定子製造重鎮之一，其間經過數次公司改組，如今以成為該公司氣渦輪機、汽渦輪機、氣冷式發電機及渦輪機葉片安裝中心與發電機冷卻風扇，定子製造中心基地，本公司核一廠換裝低壓汽機轉子就出於此。觀摩渦輪機與發電機組裝及葉片安裝技術，有助於對分析汽機老化與損傷之力學評估相關技術實際應用。

10 月 1 日~ 10 月 2 日共二天

◇ Alstom/Germany 公司簡介與部門拜會。

◇ 觀摩汽機安裝技術。

◇ 渦輪機與發電機新技術介紹。

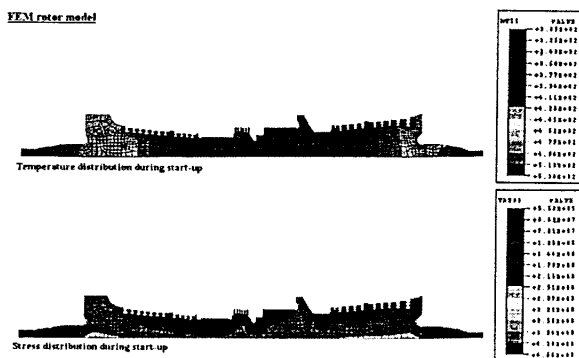
◇ 研討渦輪機與發電機研究發展趨勢員。

第參章 公務內容

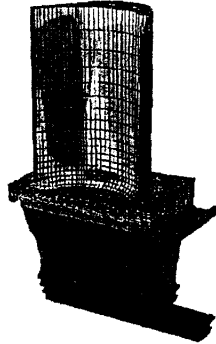
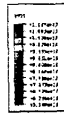
對汽機老化與損傷之力學評估技術相關之功能予以充分運用與驗證在高溫、高壓與高轉速的環境下運轉，均會面臨無可避免的劣化問題。如何提升這些設備的效率，或如何藉由可靠、有效的監測評估技術，選擇最經濟的時間點，對這些設備進行維修或更新，並有效延長使用壽命等均是本所研發的重要課題。

對汽機老化與損傷之力學評估技術必須建立連貫性轉子壽命評估體系本所目前大致規劃為：A.(逆向工程次領域) 建立電廠設備基本資料庫(幾何及性能)、設計改善與基本性能分析、運轉資料蒐集研判 B.(結構力學次領域) 結構力學模擬分析、發展先進檢測技術、葉片可靠度分析、力學資料庫之建立 ...C.(機械振動次領域) 各類機械振動之模擬與診斷、網路遙測、人工智慧、虛擬轉子參數鑑別 D.(破壞科學次領域)破裂力學評估、機械破損機制鑑別、轉子劣化與壽命評估、材料破損歷程回溯...等等，如此才能建立完備疲勞壽命評估之學識基礎與能量，完成評估現有電廠機組壽命狀態的技術能力。

如下圖所示即是利用有限元素法(Finite Element Method, FEM)分析大型汽渦輪機及發電機轉動元件之老化與損傷之力學評估技術及生命週期評估，



根據元件的殘餘應力、缺陷的大小及位置以及實際的操作狀況，配合有限元素法，即可估算出材料的剩餘壽命。



利用有限元素法可計算出材料所受的應力以及溫度分佈的情況

此次實習汽機老化與損傷之力學評估技術，主要利用三種已開發模擬分析應用套裝軟體進行系統結構完整性之分析，該套裝軟體運作分述如下：

壹、DYNARO-模擬電廠中轉動元件之動態行為

DYNARO (DINamic Analysis of ROTors) 為由 CESI (義大利國家電力綜合研究院) 利用有限元素法模擬汽機轉子與迴轉機械轉軸動態行為所發展出之應用分析軟體。進行模擬迴轉機械之振動情形，不僅適用於氣渦輪機，亦可用在飼水幫浦、大型馬達以及風扇等等。DYNARO 可針對各別轉子與轉子聯結軸線之對心、以及軸與軸間的耦合做以下運算：

- ◇ 靜態對心(Static alignment)
- ◇ 穩定性分析(Stability analysis)
- ◇ 穩態時之強制反應(Steady state forced response)
- ◇ 水平振動之敏感度分析(Sensitivity analysis for lateral vibration)
- ◇ 扭力之特徵頻率(torsional eigenfrequencies)
- ◇ 瞬間激發時的扭力反應 (Torsional response to transient excitations)

這套應用分析軟體程式操作容易，具有有效建立分析模型的功能及快速的邏輯計算方法，使得此程式運算速度大幅提升，致使能有效的計算出因為瞬間速度所導致的振動。可用在新設計機組之評估

亦可做為診斷工具，模擬各種不同的故障情形。

一、功能：

- ◇ 可計算一連串耦合轉子位於軸承的靜態負載。
- ◇ 可根據設計參數，計算出臨界速度並針對轉子、軸承以及支撐系統進行敏感度分析。
- ◇ 具有油膜性質資料庫。
- ◇ 具有可模擬多種不同形式的撓曲、變形概況，包括不平衡 (unbalanced)、圓盤傾斜(disk skew)、彎曲轉子 (bow rotor) 耦合錯誤(coupling errors)、對心不良(misalignment)、破裂 (crack)等；這些現象是導致轉動元件發生故障最常見的原因。
- ◇ 靜態變形、彎曲力矩及剪力分佈。
- ◇ 模態分析。
- ◇ 穩態強制響應之 Bode Diagram。
- ◇ 可指定速度與支撐系統之動態特性關係
- ◇ 計算彎曲與扭力振動時，末端截面的動態應力與靜態應力
- ◇ 具有彈性、多樣性、操作容易可建構各種不同的模型。
- ◇ 圖像化界面及結果顯示。

二、後處理器：

圖像化界面包含以下元件：

- ◇ 建構整個軸線之模型以及其中單一轉子之細部構建
- ◇ 靜態變形(static deformation shape)種類
- ◇ 靜態撓曲力矩以及剪應力
- ◇ 水平振動或扭力振動而產生之變形(deformation shape associated with the undamped lateral and torsional self-frequencies)。
- ◇ 給定轉速下之各種動態變形種類。

- ◇ 顯示穩態時的受力反應。
- ◇ 不同轉軸截面之最大力矩。
- ◇ 扭力變形的過程以及每個轉軸截面的扭力。

此軟體開發經過工程師長期累積現場實務經驗，針對汽機工作人員提供完善可靠的模擬工具，並可對迴轉機械轉軸的設計審核、最佳運轉模式、維修計畫之動態行為提供技術支援。

貳、ABACO-多平面轉子平衡系統

ABACO(Advanced BALancing COde)是由 CESI 利用多平面平衡法 (multiplane balancing approach)以影響係數法 (influence coefficient method) 為基礎所發展出來之一套互動式軟體，可增加發電機轉子之效率以及結構完整性，平衡運轉之準確性。

為了確保主要轉動機械能長時間在安全無虞的狀態下運轉，如何準確的平衡發電機中的轉子組以降低穩態運轉中的振動程度即成為一重要課題！藉由電腦的輔助，利用多平面平衡的方式可在模擬一次後就得到準確的平衡，如此一來即可避免轉子受不必要的應力，亦可加速系統達到平衡的過程。

一、特點：

- ◇ ABACO 可在現場使用。
- ◇ 具有完整的資料庫，可幫助使用者快速建立相同的系統。
- ◇ 可經由一系列不同的平衡模擬，計算出影響係數 (influence coefficients)。
- ◇ 若有新的平衡模擬，系統會自動修正影響係數。
- ◇ 可有效的處理轉子非重覆性動態行為的問題。
- ◇ ABACO 可用三種不同的方式計算平衡質量，故可確認數據的正確性。

- ◇ 可根據最初的振動模式找出最佳的平衡平面。

二、功能：

- ◇ 可選擇輸入數據。
- ◇ 計算影響係數。
- ◇ 計算單一平面或多平面的平衡質量(balanced masses)。
- ◇ 計算殘餘振動模式，以及對殘餘振動的敏感度分析。
- ◇ 評估每個平衡平面的相互獨立性。
- ◇ 選擇平衡平面。
- ◇ 結果顯示。

三、圖像化顯示：

- ◇ vibration polar diagram
- ◇ vibration differences polar diagram
- ◇ residual vibrations polar diagram
- ◇ influence coefficients polar diagram

參、LASER 發電機與渦輪機轉子之結構完整性與殘餘壽命評估

LASER(Life Assessment of **S**erviced **R**otors)為由 CESI 所發展出的計算軟體，用以評估汽機以及發電機中轉子的結構完整性、運轉能力以及殘餘的生命週期。此軟體操作容易、簡單的資料輸入與輸出形式。汽機與發電機的轉子是整個發電系統中很重要的元件，此元件會影響到電廠的可靠度、可用性以及維護成本，更不用說當此元件發生事故或意外時所造成的生命財產損失。影響到轉子結構完整性的原因主要來自於運轉的暫態時期，如啟動、停機或負載變化的時候，包括：

- ◇ 高暫態應力(high transient stresses)。
- ◇ 已存在的缺陷為一應力集中點(existing defects acting as stress concentrators)。

- ◇ 在中階溫度時相對的硬度較低(comparatively low toughness at intermediate temperatures)

利用有限元素應力分析的方法可計算出轉子在暫態階段如啟動、停機或負載變化時所引起的溫度及應力分佈，可檢查缺陷的大小及位置。而其餘的殘餘機械性質則可利用其它的方試驗方法直接量測，例如非破壞性微小試件取樣分析。

上述所有的資料都可以輸入 LASER 中幫助系統專家在短時間內進行以下評估：

- ◇ 根據國際認定的 R6 程序評估已存在缺陷之穩定性
- ◇ 根據國際認定的疲勞傳遞標準(fatigue propagation laws, Paris, etc.)計算缺陷的疲勞穿透，即在多少個週期後會破裂
- ◇ 計算缺陷的潛變傳遞
- ◇ 計算缺陷的潛變疲勞傳遞

LASER 的另一個優點在於可以匯入一般商用有限元素軟體如 ABAQUS 或 MARC 所得到之結果，例如轉子上溫度與應力隨時間變化的分佈。利用有限元素法所繪製出的轉子幾何外形亦會自動呈現出來。每個由有限元素法匯入的檔案都表示一個過程；啟動、停機、負載變化或是穩定運轉，可同時匯入所有的情況並根據每種情況在轉子運轉生命週期中所佔的比重加以分析。

為了要分析缺陷的穩定性以及傳遞，所有與材料有關會隨溫度變化的參數(強度、硬度等)都可以表列或方程式的方式輸入。針對每個不同的缺陷，LASER 利用有限元素法所匯入的溫度分佈計算缺陷所在位置的真實溫度進而計算出與缺陷有關的所有參數。

有關缺陷的輸入資料如缺陷所在的位置或尺寸等，可以是假設的，亦可以是真實量測到的。系統會預設一個橢圓形、位於軸向或徑向的缺陷方便使用者做評估。

LASER 可以處理單一缺陷，亦可將多個缺陷合併在一起評估其影響。LASER 使用缺陷合併法則(defect coalescence criteria)以評估多個缺陷。缺陷的資料可分別輸入 LASER，或者直接將檔案匯入，因為 LASER 可讀取一同種類的檔案型式。

圖像化顯示：

- ◇ 以 HTML 的形式顯示輸入的資料與輸出結果。
- ◇ 以表列的方式呈現缺陷的穩定度以及穿透結果。
- ◇ 從不同的角度呈現缺陷的分佈；B-Scan, C-Scan 以及 D-Scan。

市面上另一種常見的產品為由 EPRI 所發展出的 SAFER-PC，表列為兩者之比較

| LASER 與 SAFER-PC 之比較 | LASER | SAFER-PC |
|----------------------|-------|----------|
| 將 FEM 整合在系統中 | | YES |
| 可外部匯入 FEM 的結果 | YES | |
| 缺陷主要以傳遞分析進行 | YES | YES |
| 傳遞與缺陷相依之關係 | YES | |
| 分析靠近軸孔缺陷（徑向面） | YES | YES |
| 分析靠近軸孔缺陷（軸向面） | YES | |
| 分析葉片連接處的裂痕 | YES | YES |
| 分析套縮圓盤表面以及密封溝槽的裂痕 | YES | YES |
| 組合不同的運轉狀況模擬分析轉子的殘餘生命 | YES | |
| 可能性分析 | | YES |
| 圖像化處理 | YES | YES |

以上研習所得到的心得即任何開發汽機老化與損傷之力學評估技術，必須與電廠實務相互結合，應用專業知識提高電廠營運績效，將知識與經濟接軌並發揮最佳效益，值得本公司研究人員借鏡。

第肆章 感想與建議

- 一、先進汽機廠家或學術機構應用電腦科技，開發了許多實用汽機診斷應用分析軟體技術，可見應用電腦科技進行汽機診斷技術是各製造廠家發展趨勢，應用分析軟體來模擬汽機老化與損傷情形，近年來已廣為學術及工業界所重視，藉由實地與該技術領先學術機構或代表性廠家交流討論，蒐集維護運轉資料加以悉心研究，並密切注意，隨時引進最新觀念與技術，有助於汽機老化與損傷之力學評估技術研究規劃，提供電廠最佳技術支援是本所目前進行的研發重點，研習義大利國家電力綜合研究院所開發的應用分析軟體估技術甚具參考價值。
- 二、因應未來民營化的歷程中，推動技術自主化，並於學識基礎與提升研究分析能量架構下建立自有技術。方能評估現有電廠汽機老化與損傷的技術能力。
- 三、汽機界近二十年來發展迅速，不論硬體設備組件方面變良多，電腦運算速度也大幅提升致使軟體設計分析應更是日新月異，從事汽機務實及研究工作人員，除應瞭既的大型汽機的特性、蒐集維護運轉資料加以悉心研究更應密切注意各製造廠家發展趨勢，隨時引進最新觀念技術，才不致於劃地自限日趨落伍。
- 四、義大利國家電力綜合研究院（CESI）能夠從國營事業轉化民營機構仍致力於電力系統的研究發展的工作，含概認證部門、測試部門、環境部門、再生能源部門、輸配電部門、自動化部門、發電部門等領域，並在各領域中佔有一席之地，成為世界頂尖的電力研發機構之一，主要原因除了具有健全的組織架構外，並能配合電廠的實務經驗引進最新的技術，將理論基礎應用於電廠的實際需求，以降低電廠之運轉及維護成本、提高電廠相

關設備之可靠度以及可用率並且在安全無虞的條件下延長各設備及元件的壽命為前提，致力於各項技術之研究與應用。能成為在電力研究發展領域的領導者，不論技術面或管理面，都值得本公司借鏡與學習。

五、依據德國 Alstom/Germany 汽機製造公司認為汽機設計價值就是為市場服務也是一種(the-state-of-art)藝術，只要合乎經濟、可靠及效率概念即可獲得肯定，脫離市場需求的技術沒有任何競爭優勢。