

出國報告（出國類別：考察）

## 鍋爐燃燒效率提昇及氮氧化物抑低 控制技術之應用

服務機關：台灣電力公司

發電處 興達發電廠 南部發電廠 協和發電廠

姓名職稱：徐耀徽 鄭建業 黃任清 陳佳宏  
主管機組電腦 儀資一課長 運轉課長 鍋爐維護員

派赴國家：美國

出國期間：100年09月10日至100年09月21日

報告日期：100年11月18日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：鍋爐燃燒效率提昇及氮氧化物抑低控制技術之應用

頁數 45 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司人事處/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

徐耀徽/台灣電力公司/發電處/主管機組電腦/(02)2366-6553

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：100 年 09 月 10 日至 100 年 09 月 21 日 出國地區：美國

報告日期：100 年 11 月 18 日

分類號/目

關鍵詞：EPRI、鍋爐燃燒效率、氮氧化物抑低控制

內容摘要：(二百至三百字)

本公司在經營政策上期望能結合國際上先進發電技術以提升績效，藉助 EPRI 在各研究領域皆訂有專案計畫來推動本公司在發電業務上的技術研發，如 P71 為提昇鍋爐燃燒效率及抑低 NOx 排放之技術應用，P68 為儀器與自動控制，P79 為汽機與複循環，P87 為燃用化石燃料的鍋爐材質與維修。

此次係參加 100 年 9 月中旬在美國波士頓 (Boston, MA) 舉辦的 2011 發電顧問秋季年會 (Generation Sector Council meeting)。年會專案主題方向特別是研究如何針對燃煤電廠經由最小排放、最高效益、熱耗率效率提升及最大可靠度等來達到低成本及低風險的性能最佳化。

另參訪北卡州夏洛特 (Charlotte, NC) EPRI 材料實驗室了解鍋爐爐管材料應力破壞鑑定技術、堆焊焊接及第三方材料鑑定認證等。

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

# 摘要

本公司在經營政策上期望能結合國際上先進發電技術以提升績效，藉助EPRI在各研究領域皆訂有專案計畫來推動本公司在發電業務上的技術研發，如P71為提昇鍋爐燃燒效率及抑低 NO<sub>x</sub> 排放之技術應用，P68為儀器與自動控制，P79為汽機與複循環，P87為燃用化石燃料的鍋爐材質與維修。

此次係參加100年9月中旬在美國波士頓（Boston,MA）舉辦的2011發電顧問秋季年會（Generation Sector Council meeting）。年會專案主題方向特別是研究如何針對燃煤電廠經由最小排放、最高效益、熱耗率效率提升及最大可靠度等來達到低成本及低風險的性能最佳化。

另參訪北卡州夏洛特（Charlotte,NC）EPRI材料實驗室了解鍋爐爐管材料應力破壞鑑定技術、堆焊焊接及第三方材料鑑定認證等。

# 目 次

一、出國目的 .....	1
二、出國過程 .....	3
(一). 出國計畫行程 .....	3
(二). 主要工作紀要 .....	4
三、發電顧問秋季年會主要議程 .....	7
(一). P71 001 水牆管表面進行熱噴塗及陶瓷塗層之評估 .....	7
(二). P71 002 以雷射技術監控燃氣中 CO 及 NO 的含量 .....	12
(三). P71 003 粉煤流體控制評估 .....	16
(四). P71 004 依系統調度改變發電機組負載對於熱耗率的影響評估 .....	19
(五). P87 先進超超臨界機組發展現況 .....	24
(六). P68 控制工程最佳實務準則 .....	28
(七). P79 氣渦輪機及複循環之運轉與維護 .....	32
四、EPRI Charlotte 材料實驗室 .....	39
(一). 焊接實驗工廠 Welding Lab .....	39
(二). 效率展示實驗工廠 Performance Demonstration Lab .....	40
(三). 非破壞檢測實驗工廠 Nondestructive Evaluation Lab .....	40
(四). 金屬冶金實驗工廠 Metallurgical Lab .....	41
五、心得與建議 .....	43

## 一、出國目的

美國電力研究院EPRI (Electric Power Research Institute) 為一所獨立非營利之研究機構，對於發電、輸配電及在電力應用上會對公眾福祉產生影響的議題都是該機構主要評估與技術研發的方向。本公司在經營政策上期望能結合國際上新進發電技術以提升經營績效，因應這種趨勢因而加入成為EPRI正式會員。EPRI在各研究領域皆訂有專案計畫來推動電力事業的技術研發，如P71為提昇鍋爐燃燒效率及抑低NOx 排放之技術應用，P68為儀器與自動控制，P79為汽機與複循環，P87為燃用化石燃料的鍋爐材質與維修。各專案計畫皆有其延續性並由EPRI定期舉辦國際性研討會來向各會員報告執行進度及成果。本公司依照與EPRI所簽訂的合作計畫每年選派人員出國參與EPRI舉辦之相關電力研討會，並請EPRI代為安排相關之參訪考察活動，俾使出國人員了解新進的電力技術以作為各單位現場設備或系統維護或運轉操作效率提升的參考。

此次出國係參加9月中旬在美國波士頓 (Boston, MA) 舉辦的2011發電顧問秋季年會 (Generation Sector Council meeting)，該會議由各專案計畫主持人提出年度報告並檢討執行進度。發電處目前與EPRI所簽訂的專案計畫為P71，該專案主要目標在於研究最小排放、最高效益、熱耗率效率提升及最大可靠度等可行方法來達到燃煤電廠低成本及低風險的性能最佳化。此外，與會同仁亦就本身專業領域再選定參加旁聽其他專題研討會。

秋季年會之後，轉赴北卡州夏洛特 (Charlotte, NC) 參觀EPRI材料實驗室，瞭解EPRI在材料相關技術的先進研究。

(本頁空白)

## 二、出國過程

### (一). 出國計畫行程

本項出國計畫係前往美國波士頓參加EPRI 2011 Generation Sector Council meeting發電顧問秋季年會，再轉往位於北卡州夏洛特EPRI Materials Research Lab材料實驗室，原訂回程於舊金山的EPRI Palo Alto總部對年會專案進行回顧檢討，由於EPRI主要相關人員臨時因故出差，因而取消。原計畫出國行程摘要如下：

時 間	地 點	工 作 摘 要
100.09.10 至 100.09.11		往程（台北－洛杉磯－波士頓）
100.09.12 至 100.09.14	波士頓	參加 EPRI 發電顧問秋季年會 (Generation Sector Council meeting)
100.09.15 至 100.09.16	夏洛特	北卡州夏洛特（Charlotte,NC）EPRI材料實驗室了解鍋爐爐管材料應力破壞鑑定技術、堆焊焊接及第三方材料鑑定認證等。
100.09.19	舊金山	拜訪舊金山Palo Alto EPRI總部則是檢討波士頓秋季年會各專案計畫，並提出本公司希望EPRI未來能協助或指導的技術服務項目。
100.09.20 至 100.09.21		返程(舊金山－台北)

(二). 主要工作紀要

1. 2011EPRI Generator Sector council meeting發電顧問秋季年會



圖 2.1 P71 會議現場

2011 年發電顧問秋季年會議程安排如下：

09.12/Day 1 專案計畫計有：

P69：Maintenance Management and Technology，

P87：Fossil Materials & Repair，

PS178A：Technology Based Business Planning，

P75.002 IEC：Hazardous Air Pollutant Control，

P75 IEC- Multipollutant Technologies and FGD Operation，

P80：New Combustion Turbine/Combined Cycle。

09.13/Day 2 專案計畫計有：

P104：Generation maintenance Applications，

P64：Boiler & Turbine Steam & Cycle，



P68 : Instrumentation ,Controls and Automation ,  
P76 : Particulate & Opacity Control ,  
P66 : Coalfleet for Tomorrow ,  
P79 : Combustion Turbine and Combined-Cycle ,  
PS178B and PS178C : Power and Fuel ,  
P84 : Renewable Generation ,  
P174 : Renewable Integration ,  
P77 : Continuous Emissions Monitoring ,  
P63 : Boiler Life & Availability Improvement ,  
P73 : Post Combustion NOx Control , P78 : Coal Combustion Product Use ,

09.14/Day 3專案計畫計有：

P65 : Steam Turbines-Generators and Auxiliary Systems ,  
P108 : Operations Management ,  
P165 : CO2 Capture and storage ,  
P88 : Heat Recovery Steam Generator ,  
P178 : Power Technology, Market Analysis and Risk ,  
P71.002,P71.003,P71.004 : Combustion Performance and NOx Control ,  
P71.001 : Combustion and Fuel Impact on Boiler Tubes 。

各專案計畫分別在不同會議室舉行。本公司發電處因與EPRI簽訂P71專案合作計畫，所以此次出國人員主要參與P71專案會議，其他專案會議則以旁聽方式選擇性的依本身專業及現場設備維護領域聽取會議中的專案簡報以增加見聞，這些會議計有P68、P87、P79等。

而針對EPRI與發電處P71的合作專案所討論的議題則特別注重於發電機組熱

耗率、運轉成本最佳化、燃燒改善、燃煤及空氣流量量測及控制、燃燒對爐管壽命的衝擊影響等。

## 2. 參訪北卡州夏洛特EPRI 材料實驗室

美國電力研究院EPRI在全美共設置有三座頗具規模的實驗室，各實驗室所研究的專業領域都不同，位在麻州的Lenox實驗室是針對輸電系統設備，如雷擊接地、高壓直流系統HVDC、暖通空調HVAC、人孔測試、機械測試及訓練。田納西州Knoxville實驗室是針對配電系統設備，如能源效率、電磁相容EMC、配電系統、電力系統計量及控制、電力系統相容性。北卡州Charlotte實驗室則是針對材料的研究，如材質接合熱傳導效應測試、微材料腐蝕微觀測試等。

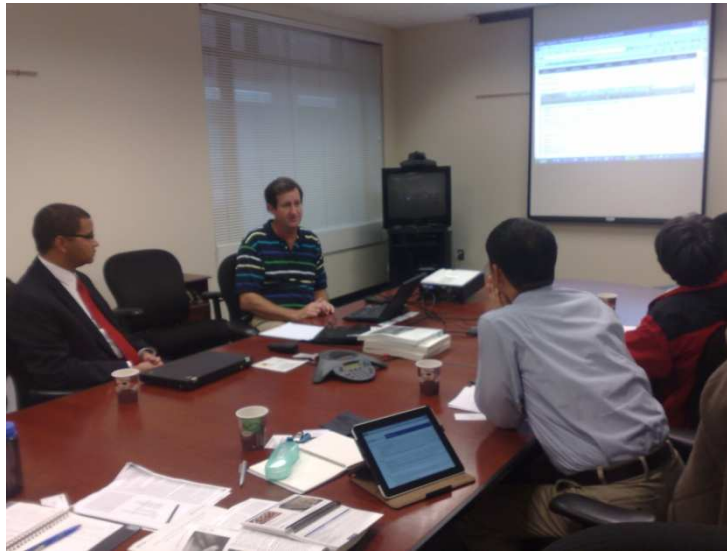


圖 2.2 Charlotte 材料實驗室現場聽取簡報

### 三、發電顧問秋季年會主要議程

#### (一). P71 001 水牆管表面進行熱噴塗及陶瓷塗層之評估

##### 1. 研究現況：

因應環保法規要求，許多發電機組自1990年起，陸續增設「階段燃燒設備」以控制氮氧化物排放量。階段燃燒使鍋爐燃燒火球提升至火上空氣口與上排燃燒器之間，造成該區域爐管溫度提高。缺氧環境下，硫化亞鐵熔點降低至1200°C，具有極強的侵蝕作用，因而使水牆管因火側腐蝕而嚴重薄化。美國之燃煤電廠多為坑口型(Pit-Mouth)電廠，意即依據區域內開採之煤礦特性就近設計、建造發電機組，因此煤質之硫份含量普遍較高，約在1%以上，造成鍋爐火側腐蝕情況較為嚴重。目前，本公司燃用之煤質因採購規範限制，其硫份含量約0.5%，因此火側腐蝕現象較不明顯。

目前，減輕火側腐蝕現象的方法主要是在水牆管表面進行熱噴塗層(Thermal spray)、陶瓷塗層(Ceramic Coating)及覆焊(Overlay)處理，其中前二者塗層的施作方式有利於進行水牆管排的大面積處理，所需時間較短，且塗層材料經過不斷改良與試驗後，於鍋爐燃燒環境下其保護性及耐久性皆有顯著提升，以下介紹熱噴塗層及陶瓷塗層的施作原理：

- (1). 熱噴塗層(Thermal Spray Coating)：熱噴塗技術係將熔化或幾近於熔化狀態的金屬合金噴塗於母材上，用於保護或改良母材或工件的表面性能。鍋爐水牆管腐蝕防護的應用大致趨向於大面積及現場施作，目前應用於工業用鍋爐的三種主要技術是電弧熔射(Standard Wire Arc)、高速連續燃燒(High Velocity Continuous Combustion)及高速火焰熔射(High Velocity Oxygen Fuel)。熱噴塗層於正確應用時應無裂紋和剝離層，然而隨著時

間變化將有兩種破壞機制產生：

- A. 滲透塗層的腐蝕性氣體或液體將侵蝕不耐腐蝕之母材合金管。
  - B. 塗層表面接觸腐蝕性煙氣或沉積物而逐漸侵蝕塗層。
- (2). 陶瓷塗層(Ceramic Coating)：目前做為水牆管腐蝕防治的陶瓷塗層為水性塗料，並包含陶瓷顆粒及矽基填料，塗層材料中因含有少量的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 而通常呈現綠色，黏著劑則由矽酸鉀及水溶性矽酸鋁所組成，塗層在室溫下進行噴覆並自然乾燥約30~45分鐘，再經過 $260^\circ\text{C}$ 的加熱固化，塗層將緊密地與母材金屬表面鍵結，但仍存在些許細微孔洞。

## 2. 實驗測試評估：

- (1). 實驗材料：EPRI由供應商取得14種測試樣品，涵蓋表面經陶瓷塗層處理之試片（如圖 3.1.1）、經熱噴塗處理之試片（如圖 3.1.2）和將陶瓷塗層加工覆蓋於熱噴塗層上(Dual Coating)之試片，母材則是超臨界鍋爐水牆管經常使用之ASME Grade11(T-11)鋼材。透過檢測技術可以發現，陶瓷塗層之主要成分確實由Si、O組成，並包含Cr、Al、K；表面呈現黑色之陶瓷塗層試片則額外添加了Fe、Ni；熱噴塗層樣品具有高含量之Cr、Fe元素。

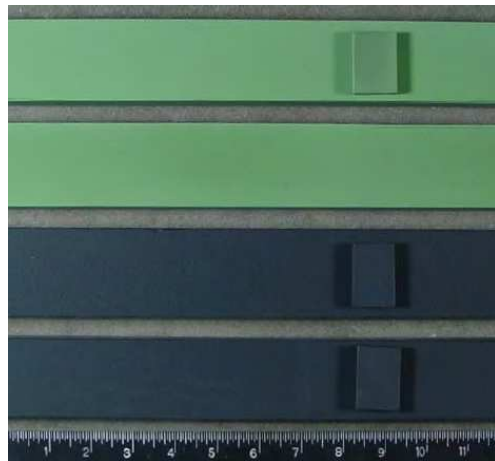


圖 3.1.1 陶瓷塗層



圖 3.1.2 熱噴塗層

- (2). 實驗設備及方法：將經過塗層處理之試片固定於510°C之加熱設備中(如圖 3.1.3)，並以飛灰沉積物覆蓋於試片上以模擬鍋爐燃燒時的腐蝕環境。飛灰沉積物「Deposit 22」之成分為80%FeS，20%飛灰，「Deposit 15」之成分為80%FeS，18%飛灰及2%氯化物，兩者差異在於，添加氯化物可模擬燃用腐蝕性較高煤質的鍋爐燃燒環境。另外，試片也因氣壓缸的施力產生周期性的位移及應力、應變，以加速塗層腐蝕疲勞破壞機制。

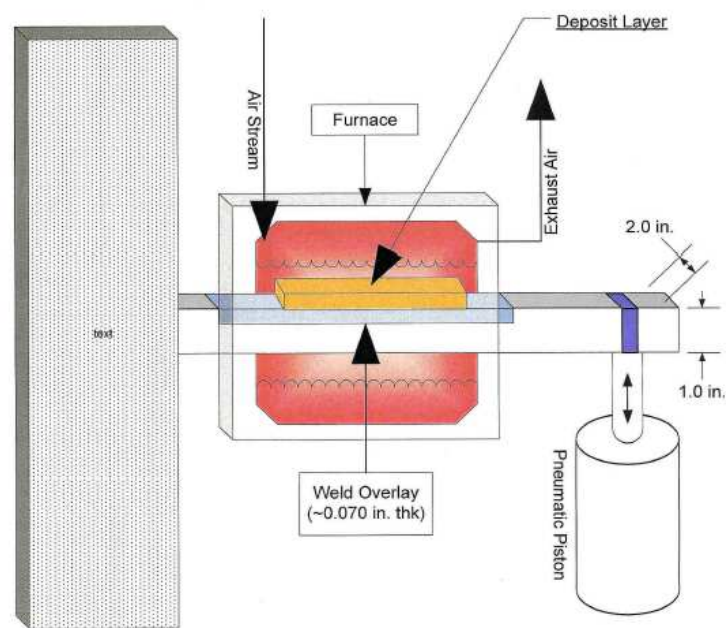


圖 3.1.3 腐蝕疲勞測試設備

- (3). 實驗結果：
- A. 將試片置於飛灰腐蝕環境下，並施予疲勞測試可加速比對各試片抗蝕能力的優劣。飛灰沉積物若含有2%氯化物，則具有更強的腐蝕性。陶瓷塗層因其特有的細微孔洞特性，使硫化物更加容易滲透而引發裂紋，在某些狀況下，甚至會引發母材的腐蝕疲勞裂紋。
  - B. 熱噴塗層之抗蝕能力主要取決於Cr含量的多寡，Cr含量越高，則抗蝕能力越強。另外，塗層施作前的母材表面處理、塗層密度及其滲透

性也有顯著影響。一旦腐蝕性產物逐漸累積於塗層與母材表面，將造成塗層產生應力集中，易引發剝落現象。實驗中發現，鎳基且含20%Cr之熱噴塗層其防護效果優於高含量鐵基之熱噴塗層。

C. 熱噴塗層之腐蝕防護能力明顯優於陶瓷塗層。另外，陶瓷塗層加工覆蓋於熱噴塗層上(Dual Coating)之試片，在測試過程中並無出現任何裂紋，顯示其抗腐蝕疲勞優於單獨使用熱噴塗或陶瓷塗層。

### 3. 發電機組測試：

- (1). 測試一：將陶瓷塗層施作於某燃煤機組水牆管表面，並分為「運轉7個月」及「運轉20個月」二種測試條件。實驗結果發現，經過以上兩種測試，爐管表面之陶瓷塗層均已大部分剝落，燃燒產生含有大量硫化鐵的腐蝕性產物已穿過塗層並覆蓋於爐管表面。另外，爐管均有發生明顯薄化現象，但無法確定該現象於塗層施作前是否已經存在。
- (2). 測試二：將Dual Coating施作於某燃煤機組水牆管表面，經運轉2年後取出檢查，發現爐管並無發生薄化。陶瓷塗層之局部區域有剝落現象，其表面裂紋延伸至熱噴塗層並到達爐管表面，因此爐管表面的沉積物有大量硫化鐵存在，如圖 3.1.4。於相同測試條件下使用熱噴塗層，巨觀下即可發現明顯的周向裂紋，並穿透至爐管表面。
- (3). 測試三：將熱噴塗層施作於燃用高硫份煤的鍋爐水牆管表面，並局部增加其厚度。經過5年的運轉時間後取出檢查。未做防護的爐管管壁薄化約1.3~1.7m/m，施以熱噴塗的爐管其管壁薄化約0.8m/m，由此可知，儘管塗層因機組運轉時間較長而被破壞或剝落，但仍一定時間內提供了保護作用。

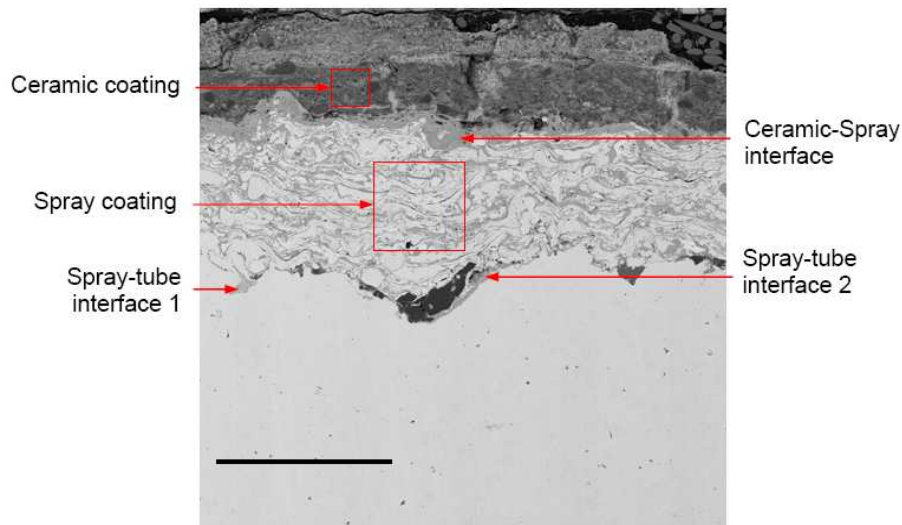


圖 3.1.4 Dual Coating 下，爐管表面之沉積物

#### 4. 結論：

為控制氮氧化物排放量而裝設「階段燃燒」設備的機組，若燃用高硫份粉煤，則部分水牆管容易出現因火側腐蝕而薄化的現象。由本年度EPRI提供的測試評估報告發現，水牆管表面塗覆Dual Coating (陶瓷塗層結合熱噴塗層)的防蝕能力明顯優於以上兩者的單獨施作，且陶瓷塗層因其多孔性的特徵，極易被腐蝕性硫化物滲透侵蝕。目前，因採購合約的規範限制，本公司各火力電廠燃用之粉煤、重油含硫量較低(約0.5%)，因此火側腐蝕現象較不明顯，尚無須對爐管做塗層防護。未來陸續興建的超臨界機組，因其鍋爐水牆管的溫度明顯高於亞臨界機組，且運轉條件更趨嚴格，是否需要進行水牆管的防護工作，宜持續觀察相關研究的未來發展。

## (二). P71 002 以雷射技術監控燃氣中 CO 及 NO 的含量

### 1. 研究現況：

對於燃煤發電機組而言，準確地監測燃氣中之CO、O<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及NH<sub>3</sub>含量，可以達到以下目標：

(1). 調整個別燃燒器之空氣與燃料配比使階段燃燒達到最佳化，有助於降低NO<sub>x</sub>排放，改善機組熱耗率。鍋爐燃燒過程中所產生的氮氧化物主要為NO和NO<sub>2</sub>，其中NO約佔95%。NO的生成來自於兩個方面，一是助燃空氣中氮的氧化；二則是燃料中所含氮化物在燃燒過程中熱分解再氧化，前者是NO的主要來源，稱之為Thermal NO<sub>x</sub>，後者稱之為Fuel NO<sub>x</sub>。調整空燃比，在過剩空氣少的情況下，降低燃燒溫度以減少Thermal NO<sub>x</sub>，同時必須降低CO的生成，避免產生過多未燃碳。

(2). 調整排煙脫硝設備(Selective Catalytic Reduction)進口之NH<sub>3</sub>與NO<sub>x</sub>配比，提升其設備效率並降低NO<sub>x</sub>排放量。SCR的工作原理是在含有NO<sub>x</sub>的煙氣中噴入氨、尿素或其他含氮化合物，使NO<sub>x</sub>還原成N<sub>2</sub>和水。還原反應若在較低的溫度範圍(315~400°C)內進行，則需要催化劑，即稱之選擇性催化還原(SCR)。SCR的操作重點在於，煙氣須與NH<sub>3</sub>充分混合，且依照進入反應區的NO<sub>x</sub>濃度及去除率嚴格控制NH<sub>3</sub>的注入量，不參與反應的NH<sub>3</sub>會隨著煙氣自煙道逸出，濃度過高則會產生許多副作用，如硫酸氫氨的生成等。

目前，O<sub>2</sub>的監測設備通常設置於省煤器出口，而NO<sub>x</sub>的監測設備則設置於SCR進出口，因為燃氣中的大量的飛灰及其他物質容易影響監測品質，進而限制燃燒最佳化及有效控制NO<sub>x</sub>排放的調整。因此，具有非侵入性、可即時監控、高精確度、可針對特定目標(如CO、NO)等特性的



雷射監測技術被視為可取代傳統監測設備的創新技術之一。雷射光譜吸收技術(Laser Absorption Sensors)之工作原理(如圖 3.2.1)如下：

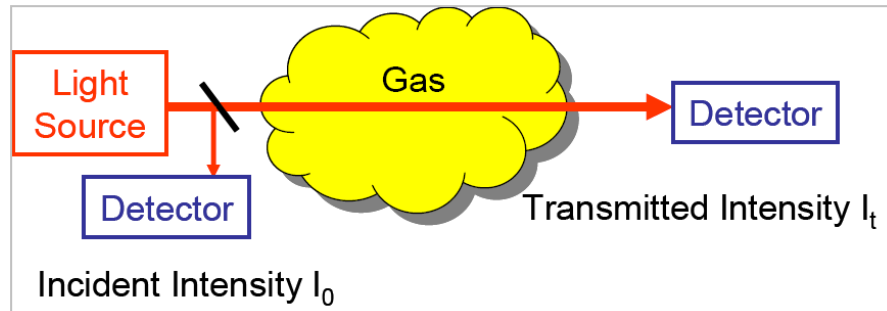


圖 3.2.1 雷射光譜吸收技術示意圖

- (3). 燃氣中的CO、NO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O...等分子均會吸收特定波長的光，如下圖 3.2.2，CO可吸收波長為1.65、2.3及4.6 $\mu$ m的光；NO則可吸收1.8、2.7及5.2 $\mu$ m的光，藉由設定雷射源發出特殊波長的光，由入射前強度(Incident Intensity  $I_0$ )與穿越燃氣後測得之傳送強度(Transmitted Intensity  $I_t$ )，經過換算即可求出特定分子於燃氣中的濃度。

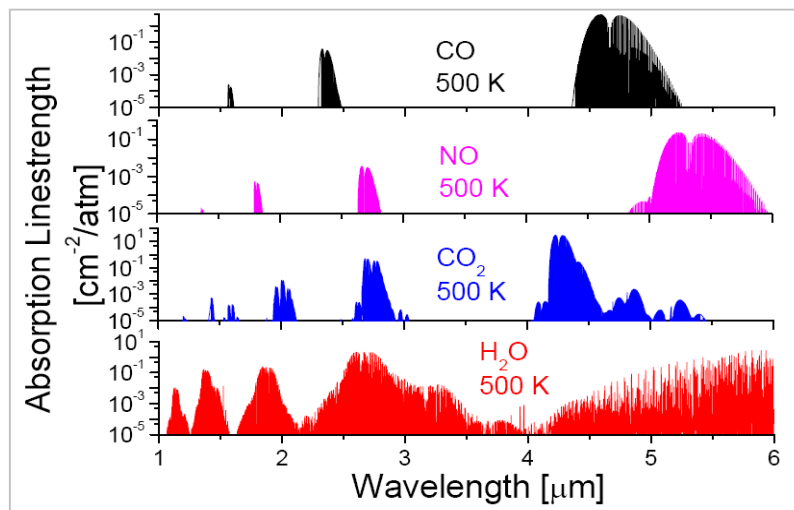


圖 3.2.2 分子吸收光譜圖

- (4). 由圖1可以發現，部分分子其吸收光譜範圍有重疊(Overlap)現象，如H<sub>2</sub>O與CO、NO皆有部分重疊，一般而言，燃氣中約含有8~14%的H<sub>2</sub>O及14%

的CO<sub>2</sub>，如此則可能造成量測結果上的誤差。

## 2. 測試評估：

- (1). 一氧化碳(CO)量測設定：為提升量測精準度並降低燃氣中其他氣體分子、飛灰及粉塵的影響，雷射光之波長應設定為2.3um，實驗設備的溫度設定約260～400℃，以模擬鍋爐省煤器(Economizer)出口的燃氣溫度。以溫度343℃、雷射源至接收器距離3公尺狀況下，CO的動態量測範圍約6～30,000ppm。
- (2). 一氧化氮 (NO)量測設定：因1.8um及2.65um範圍的波長明顯與水分子重疊，為提升量測精準度，雷射光之波長應設定為5.2um。測試設備置於高溫的燃氣煙道內，須設置有效的冷卻方式以保護感應器(sensor)。於燃氣溫度343℃狀況下，NO的動態量測範圍約1～1,500ppm。
- (3). 以雷射光譜吸收技術監測燃氣中氣體分子，目前有以下問題待改善：
  - A. 燃燒環境下，隨著量測接收距離擴大，雷射光將存在更多的傳輸能量損失及非目標氣體分子的吸收量，因此雷射光源應有更高、更穩定的傳輸功率設計。
  - B. 目前的光譜吸收監測設備均針對單一目標及其特性進行設計(如CO或NO)，未來成熟的商業化產品設計應將許多偵測目標整合於單一的傳輸及感測設備中。

## 3. 結論：

對於燃煤發電機組而言，準確地監測燃氣中之CO、O<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及NH<sub>3</sub>含量，可使階段燃燒達到最佳化，有助於降低NO<sub>x</sub>及其他污染物排放，並改善機組熱耗率。具有非侵入性、可即時監控、高精確度、可針對特定目標(如CO、NO)

等特性的雷射光譜吸收技術(Laser Absorption Sensors) 被視為可取代傳統監測設備的創新技術之一，然而目前該技術處於實驗測試階段，縱使放置於燃煤機組內進行測試，其量測接收距離亦有其限度，另外的問題如雷射光源設定最佳化、高溫燃氣中量測設備的冷卻保護及量測目標整合等仍有待進一步測試改善。

### (三). P71 003 粉煤流體控制評估

#### 1. 研究現況：

本年度EPRI進行粉煤均流評估的設備是由Babcock Power公司提供的「Anti-Roping Device」，其安裝於燃煤發電機組燃燒器的上游管路，目的使粉煤與空氣充分混合並均勻分布於整個管路的截面。「Anti-Roping」，意指避免粉煤於管路中發生繩索現象(Coal Roping)，該現象描述輸送管路中，大部份的粉煤集中傳輸於管路截面積的一小部分，如同繩索般地螺旋移動。

有許多原因會導致繩索現象發生，如粉煤與空氣組成之「兩相流」通過肘管(elbow)區域時，粒子受到離心力的作用而緊貼於管壁側一起流動。燃燒器上游管路若發生此一現象，將導致粉煤供輸失去平衡使燃燒效果不佳，將嚴重影響鍋爐效率並增加NO<sub>x</sub>排放量。「Anti-Roping Device」的設計原理是透過於管路中安裝特殊設計之硬體，以期對流體造成擾流效果並破壞繩索現象。該硬體由導流板(deflector plate)及nozzle kicker組成，如圖 3.3.1、圖 3.3.2。



圖 3.3.1 deflector plate



圖 3.3.2 nozzle kicker

#### 2. 測試評估：

為實際了解「Anti-Roping Device」對於改善空氣、粉煤輸送過程的均勻程度，

在流體狀況改變時對系統的影響，及管路額外增加之壓力損失，EPRI以其設計的循環、量測及控制設備(Coal Flow Loop)，模擬並驗證該粉煤均流解決方案，對於電廠燃燒器前之整段粉煤輸送管路中流體運動的改善情況，並進行評估：

- (1). 實驗設備配置如下圖 3.3.3，流體管路尺寸為12吋，流體速度由容量453.6公斤的灰倉下方可調速之rotary feeder控制，其線速度可達35m/s，流量可達1.515kg/s，並由風扇將空氣混合粉狀微粒後送入管路。

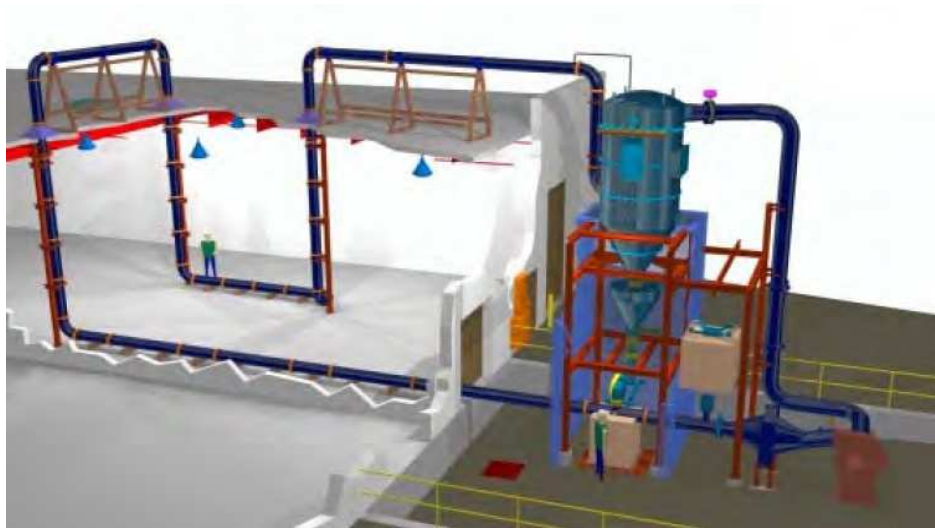


圖 3.3.3 Coal Flow Loop 系統

- (2). 選擇與粉煤密度、體積相當之滑石粉(ground pumice)進行測試，其顆粒直徑約100um，當循環運轉多次而導致體積變小時，即予以更換。
- (3). 圖 3.3.4 中，於向上(upflow)管路的90°肘管位置安裝deflector與kicker，則無論空氣、微粒於管路截面積的均勻程度及管路壓損，皆較不安裝以上兩者為差，顯示「Anti-Roping Device」安裝於以上位置的效果並不理想。
- (4). 圖 3.3.5 中，於向下(downflow)管路的90°肘管位置安裝deflector與

kicker，對於空氣或微粒於管路橫截面的均勻程度皆有顯著改善，顯示「Anti-Roping Device」適合安裝於輸送管路中的downflow肘管位置。



圖 3.3.4 Upflow 設備配置圖

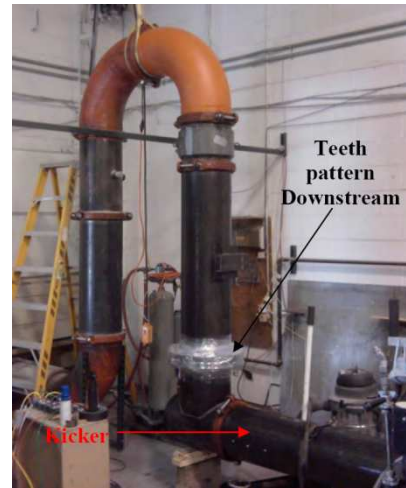


圖 3.3.5 Downflow 設備配置圖

### 3. 結論：

達成粉煤均流最佳化對於鍋爐燃燒效率及NO<sub>x</sub>控制有非常重要的影響，興達、台中、大林燃煤機組已陸續完成粉煤均流設備的改善。EPRI對於這方面的研究有長時間的投入，過去亦曾研究於粉煤輸送管路安裝縮管(orifice)來改善繩索現象(Coal Roping)。本次進行評估的「Anti-Roping Device」，其安裝方式相較於其他均流方法來的簡單，然而，其測試效果明顯因管路位置及特性而改變，確有其侷限性，但仍可提供未來超臨界機組粉煤輸送管路的規劃參考。

#### (四). P71 004 依系統調度改變發電機組負載對於熱耗率的影響評估

##### 1. 研究現況：

美國大部分的燃煤發電機組是以基載運轉為設計考量，然而近年來，因為發電調度上的需求，許多機組必須經常性地調整負載，意即一天之中常有負載的大幅度變化，此運轉模式即稱之「Load Following」。Load Following勢必為部分「高齡」的基載電廠帶來一些問題，其中包含較差的熱耗率。EPRI選擇了一個700MW亞臨界燃煤機組，透過三年時間的資料收集與測試，欲進一步了解Load Following運轉模式，對於熱耗率的短期及長期影響，並評估如何加以改善。以下是該測試機組的系統描述：

- (1). B&W前後牆對沖燃燒式(Opposed Wall-Fired)鍋爐，最大鍋爐效率(MCR)為84.8%。
- (2). 燃用亞煙煤，熱值約8200Btu/lb。
- (3). 主蒸汽壓力為2620psig，主蒸汽及再熱器蒸汽溫度為540°C。
- (4). Low NOx Burners及SCR。
- (5). 以湖水作為冷卻水來源。
- (6). 商轉日期為1978年。

##### 2. 分析評估：

- (1). 電廠運轉數據的收集時間範圍包含2008年，2009年，及2010年。EPRI計算淨機組熱耗率(Net Unit Heat Rate)的方式如下：

$$\text{NUHR} = \text{燃料(粉煤或天然氣)輸入的熱值(Btu)} / \text{淨輸出負載(kw-hr)}$$

熱耗率愈低，則機組發電效率越高。雖然以此方式估測熱耗率不若「能量平衡法」準確，但仍可從中發現在不同運轉條件下熱耗率的變化趨勢。

- (2). 觀察該機組2008年負載及熱耗率趨勢圖(如圖 3.4.1 )可以發現,前三季的負載幾乎穩定分布於625~670MW,熱耗率約10,100~10,200Btu/kw-hr;第四季開始,負載變化幅度增加,分布於450~670MW,熱耗率則約10,500~10,800Btu/kw-hr,略有提升。

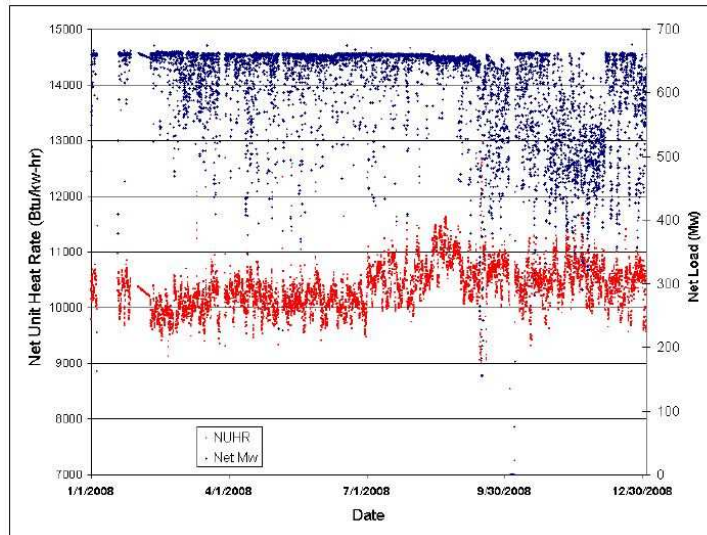


圖 3.4.1 2008 年負載及熱耗率趨勢圖

- (3). 2009年該機組延續2008年第四季的運轉模式,負載大致分布於450~670MW,值得注意的是,滿載(full load)運轉時間減少,運轉於500~600MW的時間則明顯地增加。除了夏季尖峰用電需求外,其他時間依循Load Following運轉模式。
- (4). 2010年負載及熱耗率變化趨勢如圖 3.4.2 所示,全年度含夏季尖峰用電時間,均運轉於Load Following模式,且負載變化幅度加大,分布於300~650MW。



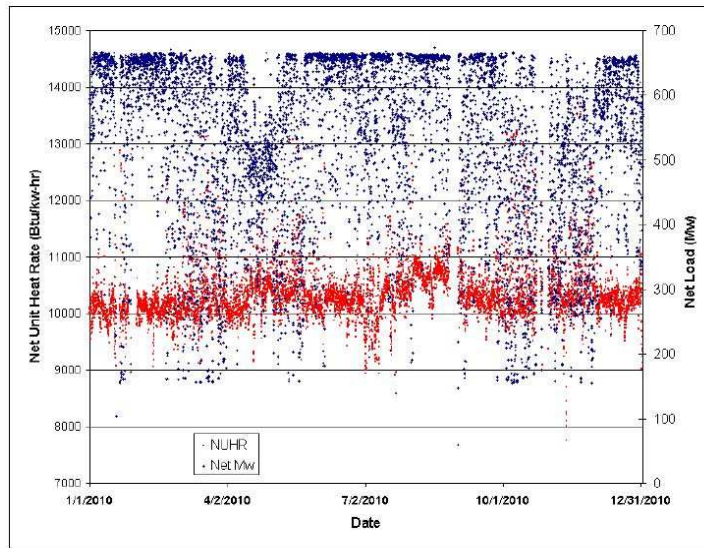


圖 3.4.2 2010 年負載及熱耗率趨勢圖

- (5). 從下表 3.4.1 可以發現，2010年之平均負載較2008年減少12%，然而平均熱耗率並無差異，顯示Load Following運轉模式對於平均熱耗率的影響有限。另外，2008年八月以前為基載運轉，八月以後逐漸轉變為Load Following，其平均熱耗率由10,277 Btu/kw-hr增加至10,517 Btu/kw-hr，有2.3%的增加幅度。

年	平均淨負載 (MW)	最大負載 (MW)	最小負載 (MW)	NUHR
2008	613	676	155	10,361
2009	583	677	325	10,374
2010	534	674	156	10,366

表 3.4.1 平均負載與熱耗率統計表

- (6). 現場測試：為了解Load Following運轉模式對於熱耗率的立即性影響，EPRI監控該機組連續二日的運轉數據：第一天，機組依照發電調度，執行正常的Load Following運轉，其負載變化於160~650MW；第二天，機組則設定運轉於數段固定負載，換言之，須穩定運轉於160MW、

280MW、420MW、650MW，且至少維持2小時以上。在相同的負載變化範圍內，進而比較機組操作於穩態及暫態模式(Load Following)熱耗率的差異，並有以下結果：

- A. 無論於穩態或暫態模式下運轉，高負載的熱耗率均較低負載為低，且穩態運轉之熱耗率低於暫態運轉(Load Following)之熱耗率。
- B. 從下圖 3.4.3 可以發現，於暫態(Load Following)模式下運轉，相同負載其升載(Increasing Load)時之熱耗率高於降載(Decreasing Load)時之熱耗率。舉例來說，升載時 600MW 之熱耗率約 10,500 Btu/kw-hr，而降載時600MW之熱耗率約9,500Btu/kw-hr，換言之，機組於升載時之發電效率低於降載時之發電效率。另外，機組於暫態與穩態運轉亦有以下關係：
  - i). 150~270MW：暫態運轉之熱耗率低於穩態運轉之熱耗率，差距約2.5%。
  - ii). 270~500MW：暫態運轉之熱耗率高於穩態運轉之熱耗率，差距約5%。
  - iii). 500~675MW：兩者之熱耗率無明顯差距。

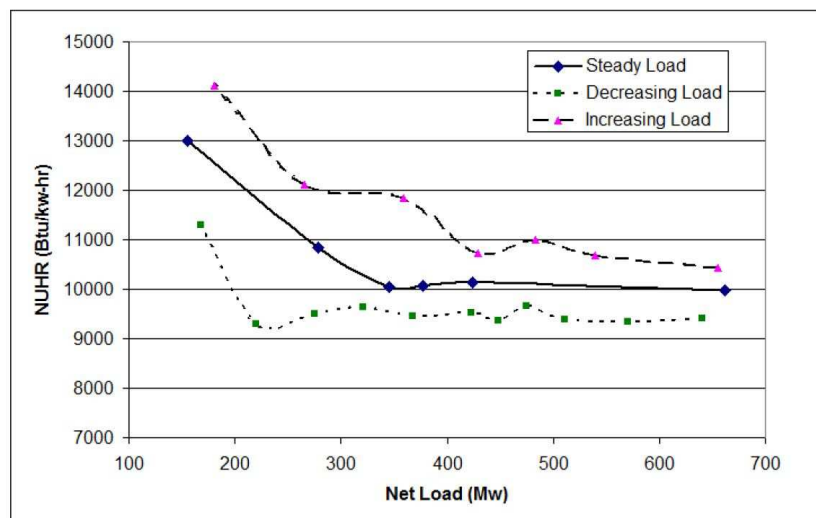


圖 3.4.3 暫態與穩態運轉之熱耗率比較圖

### 3. 結論：

目前，部分美國的燃煤機組因調度端需求，從原先設計的基載運轉改變為 Load Following 模式，面臨一天之中負載有大幅度的變化。為了解這些改變對於機組熱耗率的影響，EPRI 針對一亞臨界燃煤機組進行為期三年的觀察測試。2008 年秋天，該機組由基載運轉邁入 Load Following 模式，至 2010 年其負載變化幅度明顯擴大。機組高載時之熱耗率確實低於低載之熱耗率，顯示高載或滿載時發電效率較高。另外，在不同負載變化範圍下，暫態運轉 (Load Following) 與穩態運轉 (模擬基載運轉) 之熱耗率關係也有所改變。然而，觀察 2008 年與 2010 年之平均熱耗率，其差異並不明顯，宜持續了解其改善方案。

## (五). P87 先進超超臨界機組發展現況

### 1. 研究現況：

先進超超臨界(Advanced ultra-supercritical)燃煤機組技術的主要定義是主蒸汽溫度提升至700~760°C，機組淨效率將可提升至50%以上，將可大幅降低二氧化碳的排放，有利於未來碳封存(CO<sub>2</sub> Capture and Storage)技術與發電機組的整合。為達到如此高溫之蒸汽操作條件，歐、美、日等國家競相研發以鎳基為主之合金鋼並用於鍋爐及汽機相關材料，如Inconel 740鎳基合金鋼，有極高的潛變強度及優異的抗火側腐蝕及抗汽側氧化能力，可用於高壓蒸汽管、過熱器(Super heater)及再熱器(Reheater)。另外，實驗型先導電廠預計於4年內開始興建，並於2020年投入商業運轉，初期將以350~500MW的機組為設計目標以控制研發費用，並將運轉維護相關數據用來研發更高容量之機組。

目前全世界的發電機組中，以2009年投入商轉的日本J-Power Isogo 二號機組的主蒸汽運轉條件最高，達到263bar/600°C/620°C，這也是現有金屬合金材料所能容忍的極限運轉溫度。然而，藉由研發鎳基合金鋼材，未來可將蒸汽溫度向上提升至760°C，並將過熱器與再熱器的蒸汽壓力提升至5,015psia及1,115psia。為減少爐管壁厚、降低安裝成本及鍋爐飼水泵的電力消耗等經濟因素考量，也有研究提議將蒸汽壓力下修至4,515psia。先進國家對於先進超超臨界燃煤機組的相關技術研發可說是不遺餘力，如日本的Cool Earth Innovative Energy Technology Program、歐盟的AD-700，及美國的DOE/OCDO Boiler Materials Program，都有計畫地將新研發出的金屬材料安裝於現行超臨界(Super Critical)或超超臨界(Ultra Super Critical)機組進行測試。應用於高溫下的金屬材料應有以下特性：

- (1). 金屬材料應具備足夠之拉伸強度及潛變強度，以抵擋高溫下機械及熱應力造成的變形。
- (2). 金屬材料應具備較低的Cycle-fatigue strength，以避免因機組負載變化而造成金屬熱疲勞，進而產生裂紋。
- (3). 金屬材料應具備適當之熱膨脹係數，以降低異質金屬焊接時焊道熱影響區的應力集中。
- (4). 爐管的金屬材料應具備優異的抗火側腐蝕能力，及汽側的抗氧化能力。
- (5). 金屬材料應具良好的施作特性，如焊接、熱處理及加工修補等。

## 2. 材料發展：

相較於前述之J-Power Isogo 二號機組，先進超超臨界機組的設計規格將主蒸汽溫度一次性大幅提升了140°C，為何不採取逐步增加主蒸汽溫度條件方式，主要有以下二點原因：

- (1). 沃斯田鐵系(Austenitic)鋼材其材料特性於680°C附近有衰退的跡象。當應用於較厚的管件(如Header)時，其高熱膨脹係數及低熱傳導特性將導致管壁產生較大的溫度梯度變化，容易發生熱疲勞而破裂(Cracking)。
- (2). 當蒸汽溫度到達675°C時，爐管金屬外表面溫度約700°C，在該溫度下火側腐蝕(Fireside Corrosion)現象最為嚴重，當溫度再向上提高，爐管腐蝕現象反而有減輕趨勢。

鎳基合金於焊接及熱處理過程不會產生相變態(Phase Transformation)，因此無須如同肥粒鐵系的P91，進行焊接前預熱。焊接方式宜採GTAW(惰性氣體鎢棒電弧焊)及GMAW(遮蔽氣體金屬線電弧焊)，以避免氧氣與金屬中的少量元素(如鈦)反應，產生焊道缺陷，焊後須做熱處理以消除殘留應力。

目前，鎳基合金Haynes 230及Inconel 617被研發應用於700°C及344bar的主蒸

汽環境；而Haynes 282及Inconel 740則被應用於更高溫的760°C及344bar的主蒸汽環境，除Haynes 282外，其他材料均已取得ASME CODE，表 3.5.1 是鎳基合金材料成分分析。

	Ni	Cr	Co	Mo	Nb	Ti	Al	W	V	Mn	Fe
Inconel 617	52	22	12	9		0.6	1.1			0.8	2.5
Haynes 230	53	22	5	2			0.4	14		0.6	3
Inconel 740	50	25	20	1	2	1	1				
Haynes 282	56	20	10	8.5		2.1	1.5			0.4	1.5

**表 3.5.1 鎳基合金材料成分**

3. 先進超超臨界機組之鍋爐設計特性：

- (1). 鍋爐爐膛高度設計應使燃料可以完全燃燒，並維持其出口溫度以控制過熱器(Super heater)爐管表面的結渣速率。
- (2). 相較於傳統超臨界(SC)或超超臨界(USC)機組，因為效率的大幅提升，使相同發電容量下，燃料與空氣需求因而降低，爐膛的截面積也隨之減小。
- (3). 水牆管材質將採用T23、T24合金鋼，因此焊後熱處理須特別重視，避免產生焊道缺陷。因貫流式鍋爐特性，較上方之steam-cooled爐管則須採用T91、T92及Inconel 617等材料。
- (4). 相較於傳統超臨界(SC)或超超臨界(USC)機組，因水牆管溫度的提升，爐管表面應進行覆焊(Overlay)處理，以因應高腐蝕性的爐膛燃燒狀況，降低爐管薄化速率。

(5). 爐膛上方的高溫熱對流區域如過熱器(Super heater)及再熱器(Reheater)部分，則須採用鎳基合金材料。

#### 4. 結論：

為符合未來日趨嚴格的環保法規要求，並提升發電機組效率，歐、美、日等國紛紛展開長期的先進超超臨界(Advanced ultra-supercritical)燃煤機組研發試驗計畫。將主蒸汽溫度提升至700°C，其中面臨的最大挑戰是鍋爐與汽機部分的耐高溫鎳基合金材料開發，若相關計畫可以順利推行，將擺脫發電系統高污染排放及低效率的缺點，並得以兼顧環保需求。未來本公司將陸續興建超臨界機組，宜密切注意ASME CODE核准之新鋼材並了解其相關施作特性，將有助於提升現場維護技術並掌握合金材料的未來發展趨勢。

## (六). P68 控制工程最佳實務準則

### 1. 背景說明

發電事業中關於控制工程的最佳實務經驗其實是分散在許多不同的資料來源，如核能及化石燃料發電是由ISA(ISA: International Society of Automation)所制訂的控制標準，EPRI則著重於制訂系統更新、維護檢修及校調準則，另外其他實務經驗也可見於各種不同領域中有關控制技術文件及論文或是有關控制策略校調及警報管理的專業書籍內。凡此種種，欠缺的就是整理出一套簡潔易懂的控制準則(Guidelines)給從事發電控制工程的人員來參考或遵循。

### 2. 制訂出最佳控制實務準則的好處

可以用來紀錄留存業界的控制技術知識，改善控制工程的現場實務操作，驗證現有的控制設計及操作，辨認及更換較差的控制操作，提升較差控制操作的性能以達到最佳化的控制方法，縮短新進人員的學習時程，減少現場重新檢修的工作以避免浪費重複研發的時間，最後經由生產力及效率的提升來降低運轉或維護成本。

### 3. 專案研究的範圍

從控制系統的生命週期中去探討儀器、感測器及分析儀器、控制閥及風門、控制策略的規劃與設計、鍋爐控制的最佳化、智慧型程序控制(APC)、控制迴路的校調及效率監視、燃燒器管理系統、人機介面、警報系統及數據的歷史資料庫等。

### 4. 背景資料的來源

包括EPRI 指導準則,報告或技術資料的更新、ISA標準及技術報告、非ISA的其他標準與指導準則、會議報告及簡報資料、各種技術期刊及雜誌、技術



手冊及書籍與業界專家的訪談紀錄及EPRI會員的評估報告。

(1). EPRI 化石燃料電廠儀器及控制的指導準則

主要有儀器調校 (EPRI TU-1015715, 2008)及(TU-1017525, 2009)兩部份，其中控制器的調整部份包含：

- A. 資方的校調需求指導書：含蓋目的、人員、訓練、程序及衝擊等等，
- B. 技術人員指導書：主要使用嘗試、驗證及評估的方式來進行校調，不涉及高等的數學計算，
- C. 工程師的指導書：討論現場程序控制及相關的控制策略。

(2). ISA標準及技術報告

- A. ANSI/ISA77.14.01-2010 - Fossil Fuel Power Plant Steam Turbine Controls ，
- B. ANSI/ISA77.42.01-1999(R2006) - Fossil Fuel Power Plant Feedwater control system-Drum-Type ，
- C. ANSI/ISA-77.41.01-2010 - Fossil Fuel Power Plant Boiler Combustion Controls ，
- D. ISA-TR77.42.02-2009 ， ISA-RP77.60.04-1996 (R2008) ，  
ISA-RP77.60.05-2001 (R2007) ， ANSI/ISA-TR77.70.01-2010 ，  
ANSI/ISA-77.70.02-1994 (R2010)等。

(3). 非ISA的其他標準與指導準則

- A. National Fire Protection Association (NFPA) – Boiler and Combustion Systems Hazards Code: NFPA 85 ，
- B. Control System Integrators Association (CSIA) – Best Practices and Benchmarks Manual等。

(4). 會議報告及簡報資料

發表於ISA、ASME、IEEE、IFAC等協會上有關I&C之會議報告或是技術論文。

(5). 各種技術期刊及雜誌

Power / powermag.com ; Power Engineering ; Control and Control Engineering等。

(6). 技術手冊及書籍

A. Boiler Control Systems Engineering– Jerry Gilman 2005 ,

B. The Control of Boilers– Sam Dukelow, 1991 ,

C. Power Plant Control and Instrumentation - the Control of Boilers and HRSG Systems– David Lindsley, 2000等。

(7). 與業界專家的訪談紀錄及EPRI會員的評估報告

5. 本專案所面臨的挑戰

如下圖，由於所要參考料資料文件繁多，從中要摘錄整理出重點文件並能提供一套簡潔的指導準則（Guidelines）將是件費心費時及費力的重大工程。

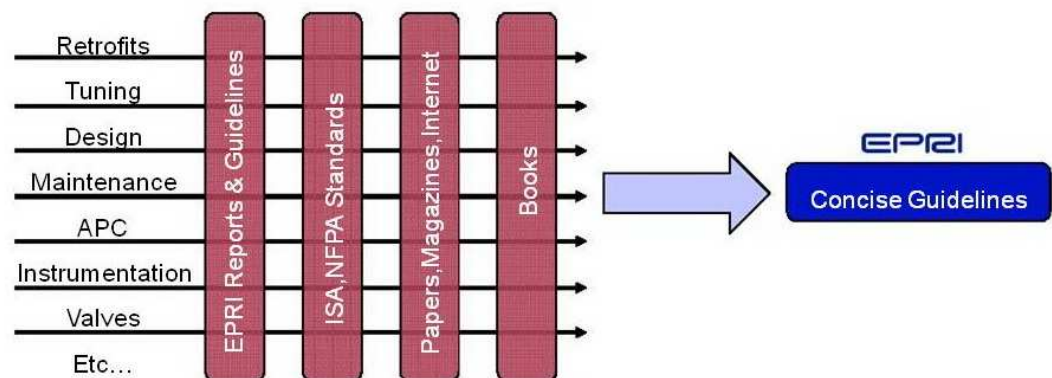


圖 3.6.1 最佳實務專案的整理工作示意圖

6. 結論：

- (1). P68專案是針對控制相關的主題所制定的專案計畫。
- (2). 本次年度P68專案特別提出要在2011-2012年間制訂出有關控制的Guidelines指導準則。只要該指導原則能順利發佈相信定能提供成為所有從事控制工程、設備維護或運轉操作的工程師最佳的參考文獻。本公司在發電控制上也累積了許多實務與理論經驗，或許也可以參酌EPRI P68專案對制定一套指導準則的精神來整理出一套屬於台電在發電運轉控制操作上的指導準則（Guidelines）來做為各電廠控制系統維修、訓練或系統更新時的參考範本或技術手冊。

## (七). P79 氣渦輪機及複循環之運轉與維護-

### 1. 天然氣發電趨勢

根據BP世界能源統計（2010年），至2009年年底，世界天然氣剩餘探明儲量近190萬億立方米。按目前開採速度計算，（靜態可採儲量）能滿足63年的開採，還有一些預測似乎更為樂觀，因為地質家們證實，天然氣的來源比石油要“寬廣”得多，佔天然氣主要成分的甲烷，不僅可以有機生成，也可以無機生成，甚至早在地球形成之初，甲烷就存在於地殼中，例如人類經常發現獨門獨戶“非常規”的頁岩氣，BP世界能源統計（2010年）就顯示，截至2009年年底，美國天然氣總產量近6000億立方米，其中有近40%是“非常規”天然氣。僅頁岩氣就有900億立方米。而最大的“非常規”天然氣潛伏在浩瀚海洋，這就是天然氣水合物（可燃冰），因為這些重大發現使得天然氣近年價格持續穩定，美國天然氣近月期貨價所依據的Henry Hub Spot Price歷史價格及未來預測圖如下：

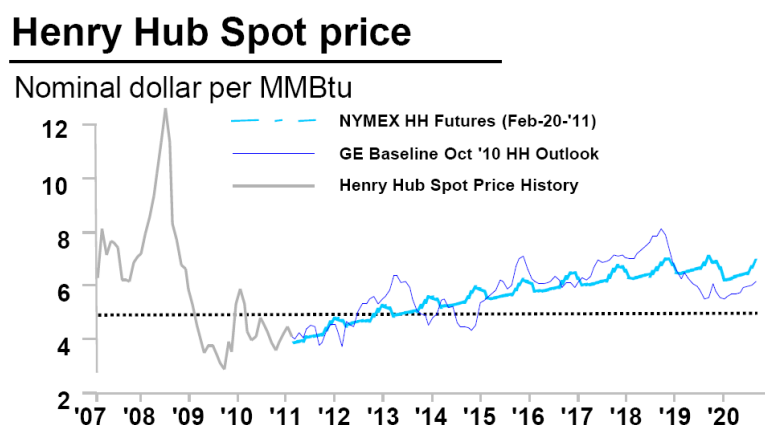


圖 3.7.1 美國天然氣歷史及未來價格預測圖

由於天然氣價格持續穩定，使得國際發電能源選擇趨勢也跟著改變，美國GE

公司對全球近十年發電量及其能源選擇預測比例圖如下：

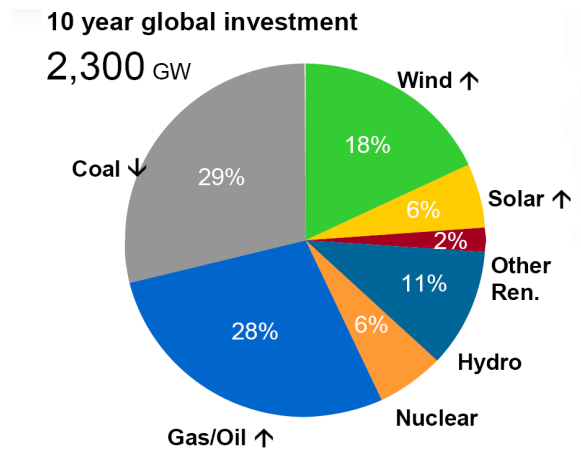


圖 3.7.2 美國 GE 公司對全球近十年發電量及其能源選擇預測比例圖

由於美國嚴格的國內環保法規、尚未明確的再生能源法律、日本福島核電廠事件的影響以及至今沒有一個全國性的碳稅政策，使得世界科技排名第一的美國發電能源選擇趨勢備受矚目，GE公司對美國近十年發電量及其能源選擇預測比例圖如下：

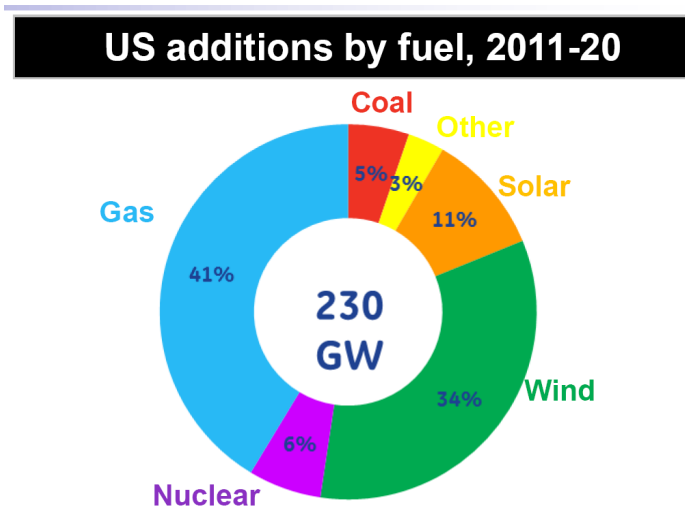


圖 3.7.3 GE 公司對美國近十年發電量及其能源選擇預測比例圖

由圖 3.7.2 與圖 3.7.3 作比較可以發現美國近十年發電能源選擇比世界平均更環保，因為天然氣的使用多13%，煤減少24%，尤其是最環保的風力多了16%。為什麼美國未來會使用41%發電能源選天然氣，根據美國GE公司對

不同發電方式成本做了研究比較如下圖：

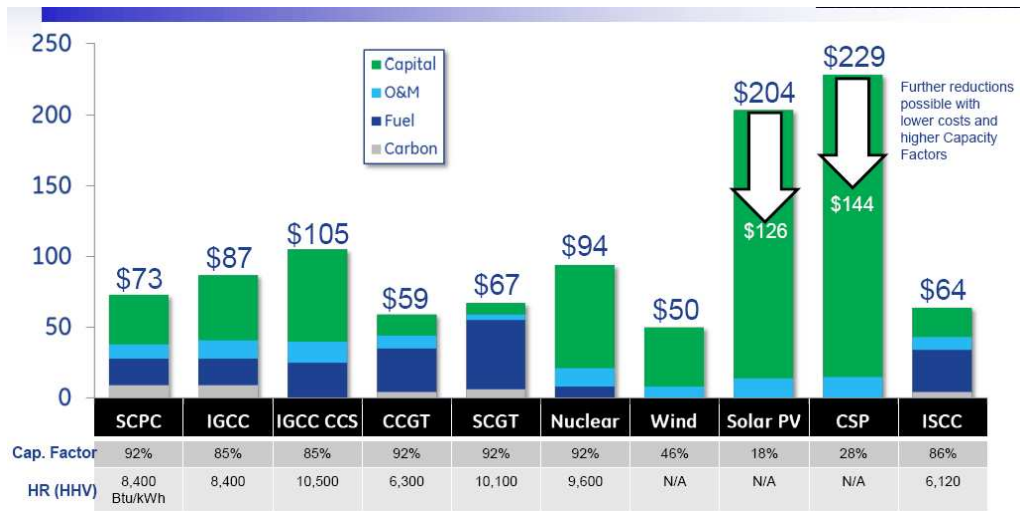


圖 3.7.4 不同發電方式每 GWH 成本比較圖

其中發電方式英文縮寫全文如下：

SCPC: Super Critical Pulverized Coal: 超臨界粉煤發電

IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle:

整合煤氣化複循環發電

IGCC CSS: Carbon Capture and Storage:

結合探捕捉與儲存的整合煤氣化複循環發電

CCGT: Combined Cycle Gas Turbine : 複循環發電

SCGT: Simple Cycle Gas Turbine: 氣渦輪機單循環發電

CSP: Concentrated Solar Power : 集光式太陽熱能發電

ISCC: Integrated Solar Combined Cycle: 整合太陽能複循環發電

Solar PV: Solar Photovoltaic : 太陽光電發電

根據圖 3.7.4 顯示所有火力發電成本最低廉的就是以天然氣為燃料的複循環發電，每壹千度發電成本為美金59元，略低於每壹千度發電成本為美金73元的傳統超臨界粉煤發電，另外值得一提的是風力發電居然是美國發電成本

最低廉的，每壹千度發電成本為美金50元，這也難怪圖 3.7.3顯示美國近十年發電能源選擇裏有34%為風力發電。

## 2. 複循環發電的結合應用：

(1). 雖然由於科技的進步使得天然氣按目前開採速度計算還能夠滿足63年的使用，但是全球煤炭儲藏量約為9842億噸，可供繼續使用230年，遠遠超過天然氣，於是工程師們嘗試以煤炭做為複循環發電的燃料來源，其中比較成功的方法為煤炭氣化 (coal gasification)，原理是把煤炭送進氣化爐內藉由高溫熱量發生氣化反應而產生合成氣 (Syngas)，經淨化系統清除合成氣中的空氣污染物質後做為複循環電廠燃料，這就是整合煤氣化複循環電廠 (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)，流程結構如圖 3.7.5：

因為藉由相互的氣體熱交換器，複循環機組可以完全提供煤氣化器所需要的熱量並且將此一能量大量回收，如此一來複循環電廠便能以煤炭作為其燃料，克服了以天然氣或輕柴油為其主要燃料的限制。

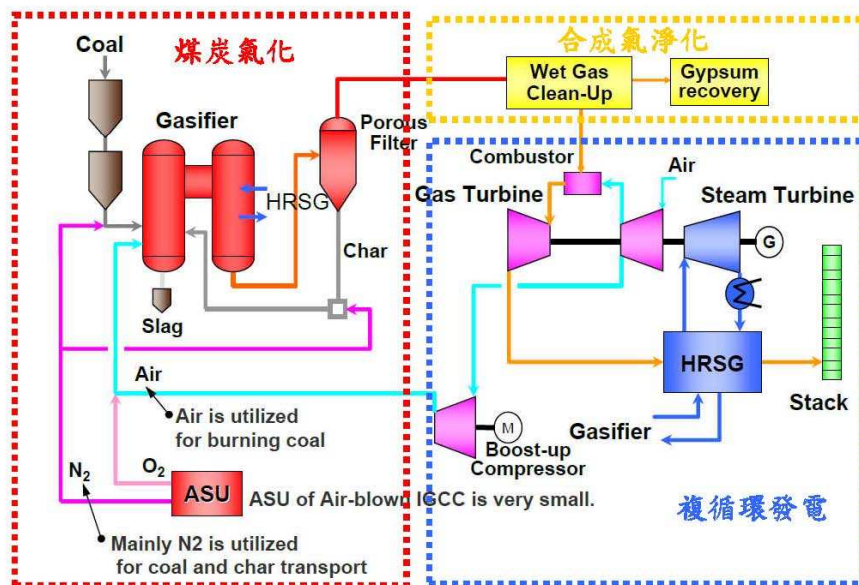


圖 3.7.5 整合煤氣化複循環電廠

IGCC最早是由美國發源，然後推廣至歐洲、及亞洲的新加坡、日本及印度。在電廠裝置容量上，已從1984年之120MW發展至1995年運轉之250MW及2000年之500MW以上之規模。IGCC在美國已經發展了將近25年，但是在煤氣化技術上仍然沒有完全成熟，尤其是可用率(Availability)，筆者在EPRI認識了一位擁有IGCC電廠12年工作經驗的化學工程師說全美國IGCC電廠的最高可用率只有86%，與一般CCGT高達98%可用率還有一段距離，不過最近已有IGCC電廠同時使用合成氣與天然氣為燃料，使可用率可以達到99%。

- (2). 複循環另一個結合應用的對象是太陽能，亦即整合太陽能複循環發電(Integrated Solar Combined Cycle, ISCC)，他是把集光式太陽熱能發電(Concentrated Solar Power, CSP)的熱能發電部分併入CCGT，所以  $ISCC = CSP + CCGT$ ，其流程結構如圖 3.7.6：

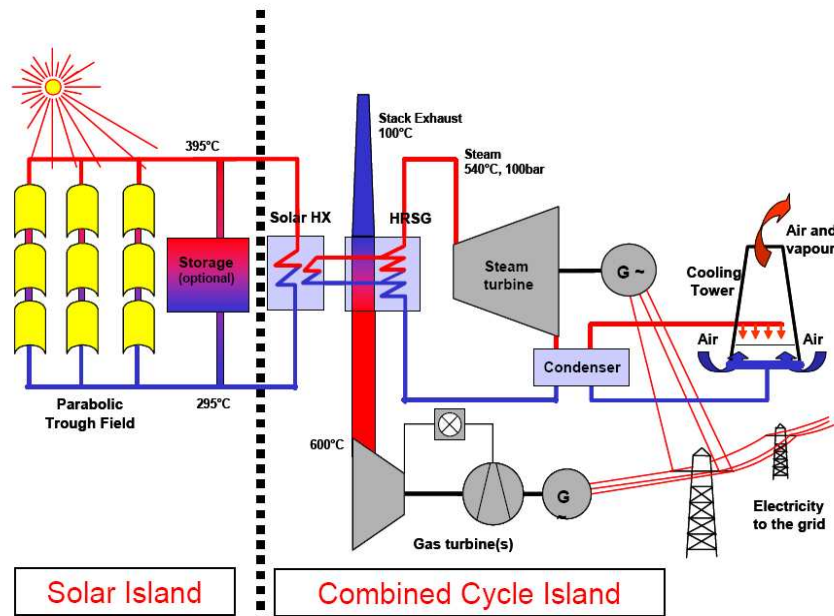


圖 3.7.6 整合太陽能複循環發電

圖 3.7.6 左側為CSP系統的主要前二個部份：太陽熱能收集場(solar field)、熱儲存槽 (thermal storage)，分別負責太陽熱能的收集以及儲存



工作。ISCC的原理同樣是藉由拋物線聚光型收集器收集太陽輻射來加熱熱傳遞流體 (Heat Transfer Fluid, HTF)，熱傳遞流體經過熱交換器進行熱交換把來自HRSG的水或飽和蒸汽加熱成為過熱蒸氣來帶動CCGT的汽輪機進行發電，理論上CSP也可以結合朗肯循環的粉煤發電廠，但是實務上SCPC大部分都是屬於基載電廠，尤其是白天幾乎都是滿載發電，而CCGT大部分都是屬於中載電廠，以自動發電控制(Automatic Generation Control, AGC)的運轉方式來調整系統頻率，因此與熱傳遞流體熱交換的低壓蒸氣可以直接導入低壓汽輪機進行發電而不超載，由於有額外來自CSP的熱能加入發電，相對的可以減少天然氣的消耗，而且不需要對原來CCGT結構做大幅度變更，也不會影響到AGC運轉方式。

### 3. 結論：

- (1). 想要提升機組出力及效率最重要的是提升氣渦輪機入口溫度，所以能承受高進氣溫度而不破壞熱元件，成了製造廠家最重要的研究方向。為了使氣渦輪機能承受更高的進氣溫度，可以從葉片的材質、冷卻方法及其表面塗佈三方面著手。
- (2). 雖然天然氣價格便宜但是在美國發電優先順序為核能、燃煤電廠、再生能源，天然氣複循環電廠、水力電廠，大致和台灣相同。
- (3). IGCC技術仍持續努力研究。

(本頁空白)

#### 四、EPRI Charlotte 材料實驗室

9月16日由EPRI Mr. John Shingledecker 陪同下來到該材料實驗室，再由 Mr. Kent Coleman 及Mr. Howard L. Hendrix 簡報EPRI公司組織業務及該實驗室所專研的研究項目。簡報後並參觀各實驗室工廠的研發情形，對於實驗室所具備的先進儀器及測試方法留下深刻的印象。

EPRI為位於Charlotte的材料實驗室主要有以下相關實驗工廠：

##### (一). 焊接實驗工廠 Welding Lab

該實驗工廠特別針對核能電廠所使用的容器在不同材質的焊接結合面做研究，以合乎核能電廠運轉安全的嚴格標準。因為核能電廠各種輸送管線若發生焊接面腐蝕或裂縫而洩漏，此時由管線所流出的氣體或液體都有可能衍生核安事件，所以管材接合面的焊接技術及焊材研究就相對的非常重要。實驗室配備及其具備的技術能力：

1. Tungsten Inert Gas(TIG)氬惰性氣體焊接、Metal Inert Gas (MIG)金屬惰性氣體焊接、Flux Core Arc Welding (FCAW) 包藥電弧焊接、Stick Welding 不鏽鋼焊接、Underwater Laser Beam (UWLB) 水下雷射焊接、Submerged Arc Welding (SAW) 潛弧焊等先進焊接設備。
2. 研發高電壓水下雷射焊接設備及技術，如此可以避免要將核能反應爐的冷凝水全部排掉才可以做焊接工作，以節省時間及金錢。同時該實驗工廠也會到設備製造商提供技術支援以加快設備製造商供貨時程。
3. 研發新進堆焊（Overlay welding）技術來加速完成焊接工作。一般來說，目前的堆焊技術每小時大概只能堆焊1.2磅的焊材在被焊面上。假設現在需要在24英吋或更大的管材上焊接幾百磅的焊材，依傳統堆焊技術就要一週甚至一

個月才能完成堆焊工作，因此焊接工作在此時就是影響整個工程進度的最大瓶頸點。EPRI新進的氬焊TIG技術上研發一種可行的熱焊條(hot-wire)技術，就是在做氬焊工作時，在焊條上通過電流，讓焊條提前加熱變軟，這樣就可以加快2至3倍的氬焊焊接時間且能保證完整的焊接工序及焊接面。

4. 配備高水壓艙來模擬在120英尺深的水壓下進行水下焊接並檢視其焊接完整性。

## (二). 效率展示實驗工廠 Performance Demonstration Lab

從核電安全的品管角度來看，透過嚴苛的管制機制及非破壞性檢測技術就能提前(一般來說大約可以提前一年)去發現材料本身些微的表面問題。效能展示實驗工廠所研發設計的軟體就在可以讓現場人員提前察覺到材料配件本身的潛變而及早因應。

為了合乎1990年所制定效能展示議案 (Performance Demonstration Initiative PDI) 規定，核能組織因EPRI具備有廣泛的非破壞檢測技術能力，於是就選定EPRI來規劃設計PDI相關測試管理程式。並經由各國，如日、韓、西班牙、瑞典、瑞士及台灣的專家協助發展出適合各個不同國情需要的PDI系統。

本實驗工廠所研發出來的功能展示程式，除PDI一般要求的檢測管線、壓力容器外，該展示程式的功能更超過PDI基本需求。主要是因本實驗工廠除收集了各電廠配件的樣本，甚至在實際市場上亦蒐羅完整各製造商配件的樣本，促使此展示程式更完整更合乎電廠的需要，如檢測焊接形式、不同材質、各型式噴嘴、核反應爐、汽輪發電機等。

## (三). 非破壞檢測實驗工廠 Nondestructive Evaluation Lab

EPRI在非破壞檢測實驗工廠已經累積了30年的檢測經驗，透過該實驗工廠經驗

及檢測技術就能提供客戶及早發現材質內部隱藏的問題來避免設備或元件發生不可預期的事故。EPRI非破壞檢測實驗工廠的檢測技術概約有：

1. 渦電流技術Eddy Current Technology：利用渦電流技術來檢測，如熱交換器、燃料輸送管線，甚至是核反應器，這些比較會因材質表面破壞而洩漏或溶出物質之電廠重要的容器元件。該實驗室並製作一組可以以空運方式來運送的一大模型檢測系統至現場，以方便現場工作之使用及訓練用。
2. 導波檢測技術Guided wave technology：超音波檢測應該是非破壞性檢測應用面最廣且檢測時間最短的技術。尤其是在檢測人員或儀器無法接近檢測物的地方，如燃料輸送管線或埋管都適用此技術。一旦發現配件材料有潛在的異常時，檢測者就可以應用此儀器來做更進一步的檢測。
3. 3-D 雷射輪廓繪製 3-D laser profilometry：通常要描繪金屬表面的特性輪廓是件相當困難及耗時的。採用3維的雷射描繪儀就可以高精準的描繪出配件表面的3-D圖像，如應用在噴嘴繪製上。所繪製出的圖像模型就可以應用到超音波的檢測上。
4. 陣列式超音波檢測技術 Phased-array technology：本實驗工廠所具備的陣列式超音波檢測技術能提供快速且完整的檢測功能。尤其是對汽機葉片、輸送管路、核反應高壓爐及其噴嘴內徑等。該技術長期運用於雷達、聲納及醫學領域，但是因為儀器本身體積龐大因此引入工業界的應用腳步就相對的緩慢。本實驗工廠發現此檢測技術及儀器在核電界的需求日殷，因此就以開路先鋒的角色來持續研發將，本儀器尺寸縮減並提升其檢測功能。

#### (四). 金屬冶金實驗工廠 Metallurgical Lab

一般來說，當電廠發生設備或配件故障時都會在第一時間想去了解或找出設備或配件發生故障的原因，以避免未來再次發生故障。EPRI金屬冶金實驗工廠就

具備所謂的故障分析或稱鑑識分析的特殊儀器及各領域分析故障的專業人員。

該實驗室從故障分析、應力分析到化學成分分析最後做機械測試，一旦故障原因出爐後，EPRI該實驗室就會將報告呈現給現場或製造商，讓製造商或現場更改作業程序或修改化學的製造成分，以避免下次再次發生故障的可能。

擁有一部全世界僅有五台的20000磅金屬潛變測試儀器 (20000 lb creep testing frame machine)，再透過impression creep高溫老化測試，如在爐管上切削一片25mm金屬圓片，再透過測試儀器及步驟即可判別該爐管未來的壽命，讓現場鍋爐能提早因應在哪一個時間點必須去更換爐管或增加維護的時程，以避免爐管因破管事故而影響電力生產。

## 五、心得與建議

- (一). 為了在發電產業技術上能與國際接軌，以期能透過世界級的技術交流使得本公司在電力生產上更具效率與競爭力，因而參加 EPRI (美國電力研究院) P71 專案。EPRI在世界的電力產業技術上有著許多先進與前瞻的思維與做法，本公司與EPRI所建立的長期合作計畫對於本公司在此發電領域上的技術提升絕對有所幫助。
- (二). 機組熱耗率與效率提升是決定公司營運能否獲利的最重要因素，本公司參與P71專案將有助於瞭解新進的熱耗率與效率提升研究。但實務上在現場執行設備維護運轉的工程師對於機組熱耗率的認知較為缺乏，造成現場工程師僅會做本身維護工作而不會去聯想該維護工作是否與熱耗率與機組效率有何重大關聯。因此建立或教育現場第一線維護工程師具備機組熱耗率或機組效率觀念，應是各級單位主管在人員教育訓練上需要努力的方向之一。
- (三). 為降低氮氧化物排放而設置「階段燃燒」的機組，若使用含硫量高於1%的粉煤，則部分水牆管容易出現火側腐蝕而過度薄化。目前，因採購合約規範限制，本公司各火力電廠燃用之粉煤、重油含硫量低於0.5%，火側腐蝕現象較不明顯，尚無須對爐管做塗層防護。未來陸續興建的超臨界機組，因其鍋爐水牆管溫度高於亞臨界機組，且運轉條件更趨嚴格，如何針對水牆管表面進行塗層或覆焊等防護工作，宜持續了解相關研究的進一步發展，並與建造廠家充分溝通。
- (四). 達成粉煤均流最佳化對於鍋爐燃燒效率及氮氧化物排放控制有非常重要的影響，本年度EPRI進行測試評估的「Anti-Roping Device」，安裝於特定位置、型態的粉煤輸送模擬管路之中，確能有效降低繩索現象(Coal Roping)，改善粉煤粒子運動過度集中的問題。另外，其安裝方式較其他均流方法簡單，可提供未來超臨界機組粉煤輸送管路的規劃參考。

- (五). 為符合未來日趨嚴格的環保法規要求，並提升發電機組效率，各先進國家紛紛展開長期的先進超超臨界(Advanced ultra-supercritical)燃煤機組研發試驗計畫，將主蒸汽條件提升至700°C/5,015psia，機組淨效率可望達到50%。其中面臨的最大挑戰是鍋爐與汽機部分的耐高溫鎳基合金材料開發，若相關計畫得以順利推行，燃煤發電將擺脫高污染排放及低效率的缺點，並能更有效率地使用煤礦資源及推動碳封存技術發展。宜密切注意ASME CODE核准之新鋼材並了解其相關施作特性，將有助於提升現有亞臨界及未來超臨界機組的現場維護技術，並掌握合金材料的發展趨勢。
- (六). 對於燃煤發電機組而言，準確監測燃氣中CO、O<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及NH<sub>3</sub>含量，可使階段燃燒達到最佳化，有助於降低污染物排放，並改善機組熱耗率。具有非侵入性、可即時監控、高精確度、可針對特定目標等特性的雷射光譜吸收技術(Laser Absorption Sensors) 被視為可取代傳統監測方法的創新技術之一。目前該技術處於實驗測試階段，其雷射強度設定最佳化、量測接收距離限制、高溫燃氣中量測設備的冷卻保護及多重量測目標整合等問題仍有待進一步改善，並投入長時間機組運轉測試。
- (七). 由於美國天然氣價格近年持續降低，使得複循環發電議題在EPRI的研究調查裏持續成長，在P79會議室內座無虛席，甚至連旁聽席都坐滿了EPRI其他部門的研究人員，代表了未來複循環發電一片看好。在P71會議中曾討論在燃煤電廠中加入天然氣一起混燒的相關技術與報告，這正說明了美國是一個天然資源豐富而且浪費的國家，因為天然氣以複循環發電時效率可達50%，如果以傳統朗肯循環發電時效率大約只有35%，儘管效率不佳，但是在天然氣價格便宜以及天然氣燃燒後，空氣污染排放量少的驅使下，仍然有許多燃煤電廠進行使用天然氣一起混燒。



- (八). 由於材料以及冷卻技術持續不斷的進步使得最新商業化的複循環發電機組效率(如美國GE H型)已達60%，如果將來煤炭氣化技術成熟時，即使因為煤炭氣化會使效率降5%左右，IGCC效率仍然能高達55%。
- (九). 本公司參與EPRI的研究專案計畫應有其持續性，否則預期效益將會減低。建議主辦部門就專案成立專門團隊，持續參與、熟悉該專案事務，並由團隊成員選派合格人員出席EPRI相關專案會議，以期在與會過程可以得到最大效益。