

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：實習)

火力電廠鍋爐高溫耐熱管件殘餘壽命監測技術

出國人 服務機關：台灣電力公司
 職 稱：機械工程師
 姓 名：謝運華
 出國地區：英國、義大利
 出國日期：94年9月10日至9月23日
 報告日期：94年11月22日

行政院及所屬各機關出國報告審核表

出國報告名稱：火力電廠鍋爐高溫耐熱管件殘餘壽命監測技術	
出國計畫主辦機關名稱：台灣電力公司	
出國人姓名/職稱/服務單位：謝運華/機械工程師/綜合研究所	
出國計畫 主辦機關 審核意見	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依限繳交出國報告 2. 格式完整 3. 內容充實完備. 4. 建議具參考價值 5. 送本機關參考或研辦 6. 送上級機關參考 7. 退回補正，原因： <ol style="list-style-type: none"> (1) 不符原核定出國計畫 (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容以 (3) 內容空洞簡略容 (4) 未依行政院所屬各機關出國報告規格辦理 (5) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 8. 其他處理意見
層轉機關 審核意見	<p>同意主辦機關審核意見</p> <p style="text-align: center;">全部 部分_____ (填寫審核意見編號)</p> <p>退回補正，原因：_____ (填寫審核意見編號)</p> <p>其他處理意見：</p>

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

	單位	主管處	總經理
報告人：	：	：	：
	主管	主管	副總經理

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：火力電廠鍋爐高溫耐熱管件殘餘壽命監測技術

頁數 24 含附件： 是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：謝運華/台灣電力公司/
綜合研究所/機械工程師
/ (02) 26815424#2211

出國類別： 1 考察 2 進修 3 研究4 實習 5 其他

出國期間：94 年 9 月 10 日至 9 月 23 日 出國地區：英國、義大利

報告日期：94 年 11 月 22 日

分類號/目

關鍵詞：鍋爐、複製膜、過熱器

內容摘要：(二百至三百字)

此次出國任務主要為研習鍋爐高溫耐熱管件殘餘壽命監測技術及參加電廠高溫元件材料潛變劣化與壽命評估會議，本報告內容包括 1. 利用應變量測技術之應用作為電廠設備之壽命監測之設計原理與現場應用情形，2. 在不破壞元件之完整性與結構之安全前提下，自元件擷取微小試片，進行機械強度、轉脆溫度及破裂強度因子等試驗以評估材料壽命之 SMALL PUNCH 技術應用與系統架構，3. 參加材料壽命評估與破壞分析國際會議心得。

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

目 錄

出國報告書審核表-----	1
出國報告提要-----	2
目錄-----	3
圖目錄-----	4
第一章 前言-----	5
1.1 任務之起源-----	5
1.2 任務之目標-----	5
1.3 行程與內容-----	6
第二章 心得報告-----	7
2.1 壽命監測之應變量測技術-----	7
2.2 SMALL PUNCH 技術研習-----	13
2.3 參加高溫元件材料會議心得-----	19
第三章 感想與建議-----	23
參考資料-----	24

圖目錄

圖 1 隨使用時間增長構件產生之應變增加-----	7
圖 2 SPICA 之原理-----	8
圖 3 實驗室進行 P22 材料之應變量測結果-----	9
圖 4 實際尺寸之電廠蒸汽管線之應變量測結果-----	10
圖 5 現場 SPICA 裝設步驟一：找尋量測位置並在表面噴砂處理使形成粗糙表面-----	10
圖 6 現場 SPICA 裝設步驟二：裝設定位插銷與相機固定之夾具-----	11
圖 7 現場 SPICA 量測：相機鏡頭一端插入固定夾具進行 image 拍攝-----	11
圖 8 定期至現場拍攝 image 後利用分析軟體分析-----	12
圖 9 取樣器於工件上之取樣情形-----	13
圖 10 取出之試件以線切割方式再加工成試驗用之微試件-----	14
圖 11 加工好的微試件：直徑 8mm、厚度 0.5mm-----	14
圖 12 為 SMALL PUNCH 試驗之試片與壓痕器於試驗機之組合情形-----	15
圖 13 為 SMALL PUNCH 試驗後之試片形狀-----	15
圖 14 為 SMALL PUNCH 試驗之壓縮強度與位移變化-----	16
圖 15 為 SMALL PUNCH 試驗獲致之破裂能量和溫度關係曲線進而得到轉脆溫度 $T_{SP}=-179.2$ -----	16
圖 16 實際應用案例 1-汽輪機轉軸之取樣-----	17
圖 17 實際應用案例 1-汽輪機轉軸之取樣樣後之輪廓-----	17
圖 18 實際應用案例 2-鍋爐集管之取樣-----	18
圖 19 實際應用案例 2-鍋爐集管取樣後之輪廓-----	18

第一章 前言

1.1、任務之起源

本公司目前火力電廠之鍋爐設備(含熱回收鍋爐)總計有 52 部,其中運轉 20-30 年有 15 部(28.9%) 運轉超過 30 年有 9 部(17.3%),若與一般火力機組之設計使用年限為 30 40 年比較,可知本公司發電設備接近設計年限之機組比率將逐年增加,而在材料老化隨時間增長而加速情況之下,各項組件之保養工作以及老化評估勢必付出更多,才能持續確保機組之正常運轉。

為了協助電廠落實「預知保養」之目標,過去本所除了執行各項事故肇因分析與改善研究外,並積極建立相關之壽命評估技術,此項技術目前已廣泛應用到本公司各電廠以及對民間電力設備提供服務。而為了精進本所所建立之壽命評估技術以及對國外目前新發展之應變量測技術用於電廠高溫元件壽命監測之應用進一步了解,出國研習。

1.2、任務之目標

此次出國任務有三 1.發展利用應變量測方式作為電廠壽命監測技術之英國 INSTRON 公司了解其設計原理與應用情形,2.義大利 CESI 公司研習 SMALL PUNCH 之材料老化評估技術,3.參加在英國由 ECCCE(European Creep Collaborative Committee)舉辦之材料會議,主題為探討高溫元件材料之潛變破壞特性與微組織之變化。此三大任務對公司在電廠壽命評估效能之提升以及破壞分析技術之精進有很大助益。

1.3、行程與內容

日期	地點	內容
09/10 09/11	倫敦	行程
09/12 09/14	倫敦	參加ECCC舉辦之材料會議
09/15 09/18	倫敦, INSTRON公司	研習鍋爐壽命監測技術
09/19 09/19	米蘭	行程
09/20 09/21	米蘭, CESI公司	研習small punch技術
09/22 09/23	台北	行程

第二章 心得報告

本次出國能有機會與國外著名機構就鍋爐設備之壽命監測與評估技術作深入討論，同時藉參加國際材料會議機會廣泛吸收國外目前之最新研究成果，獲益良多，茲就各項心得分述如下：

2.1 壽命監測之應變量測技術

火力電廠鍋爐之大型蒸汽管線與匯流蒸汽之集管箱等元件因處於高溫、高壓之環境，材料劣化或破壞機制大都是潛變引起，因此材料之壽命消耗端視潛變產生之永久變形量多寡而定，如圖 1 所示可知一般元件隨使用時間越長其所產生之應變量增大到某一程度即發生破壞，永久變形量之量測方法雖然可由外觀尺寸之變化取得，但對於形狀複雜或體積龐大之構件而言並不易量測，何況材料之破壞或裂縫起始位置往往侷限於某一微小區域，因此針對某一弱點位置之變形量量測最直接方式即是量測其應變（strain）。因此對電廠而言要掌握材料之破壞時程，於運轉期間監測其應變變化即可決定潛變速率進而達到防患事故發生於未然。

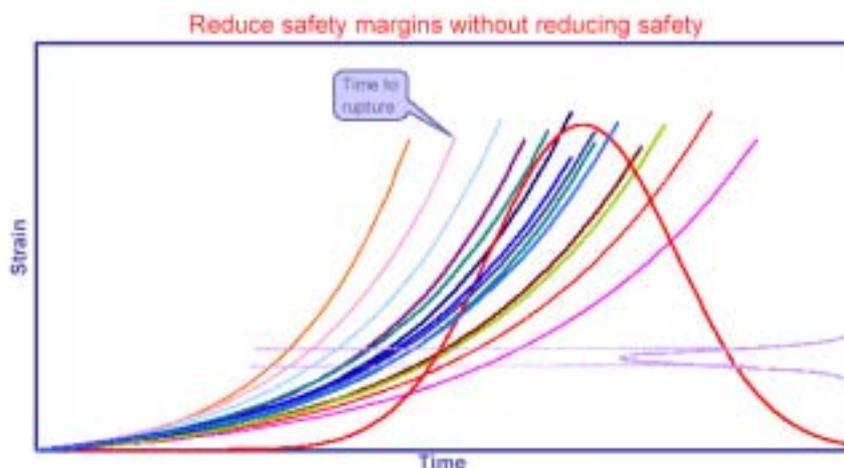


圖 1 隨使用時間增長構件產生之應變增加

。根據實驗與實際破壞案例分析結果顯示，對於有焊道之構件其破壞位置絕大部份發生於焊道熱影響區，由於焊道熱影響區寬度僅 12mm，故對於量測範圍至少達 20mm 以上之傳統應變計（capactive strain sensor）是不可行，何況長期曝露於高溫下其壽命也是一大問題。為了克服此項問題 INSTRON 公司發展出另一種應變量測方法 - Speckle Image Correlation Analysis（SPICA）如圖 2，此方法之原理甚為簡單，即在構件表面製作出粗糙之表面然後拍照紀錄，當經過一段時間該構件因應變增加，先前之 image 因而被改變，因此藉由兩者之間 image 差異可得應變增量。

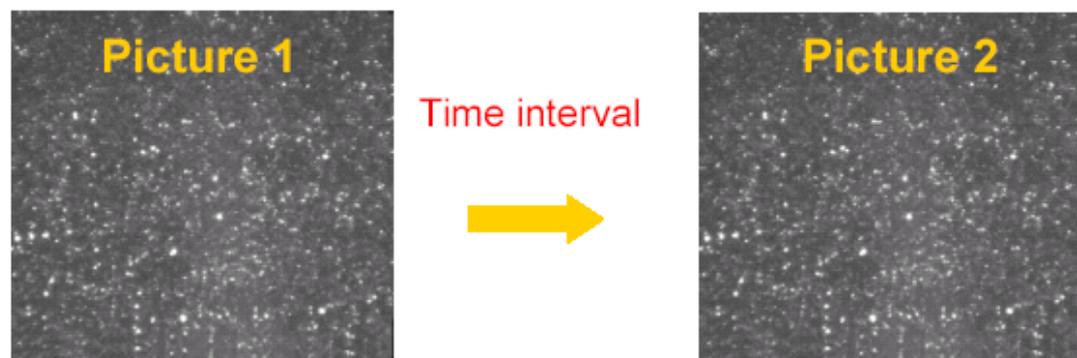


圖 2 SPICA 之原理

SPICA 之特點

- Strain distribution measurement in two directions
- Suitable for local strain measurement (HAZ)
- During operation but not continuous
- Applicable at very high temperatures (up to 1200 °C)

如圖 3 所示當熱量不斷施與焊道上，在溫度不斷增高其應變亦逐漸增加，而由結果可分別顯示基材 (base metal)、焊道 (weldment) 與熱影響區 (heat affected zone) 之應變分佈，同時 SPICA 也可量測 x 方向和 y 方向之應變，另外經過分析亦可呈現隨時間增長之應變增加情形。圖 4 於實驗室以實際尺寸之電廠蒸汽管線利用 SPICA 量測在接頭鞍部之應變結果，圖 5 圖 8 為現場裝設 SPICA 之步驟。

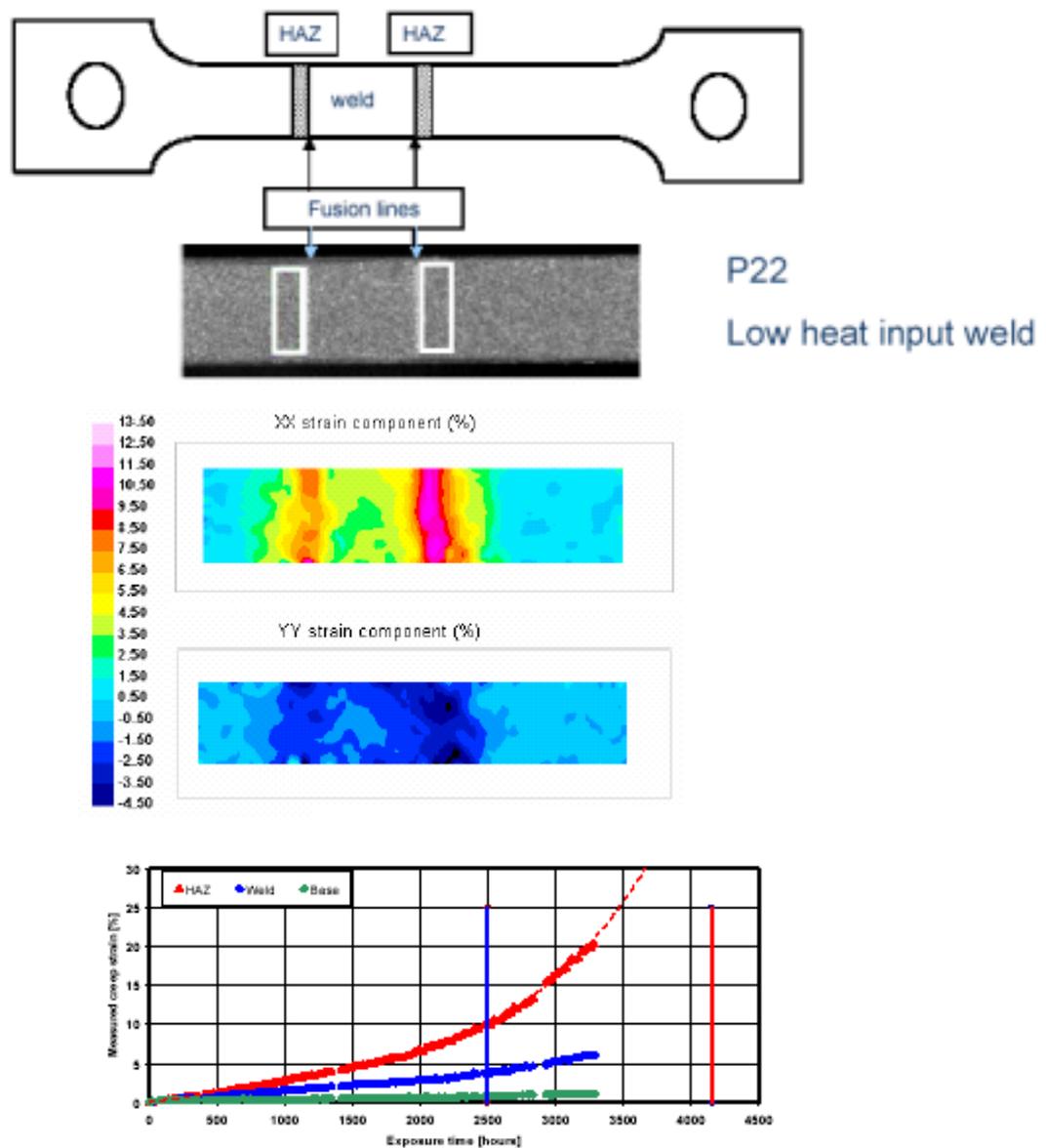


圖 3 實驗室進行 P22 材料之模擬結果

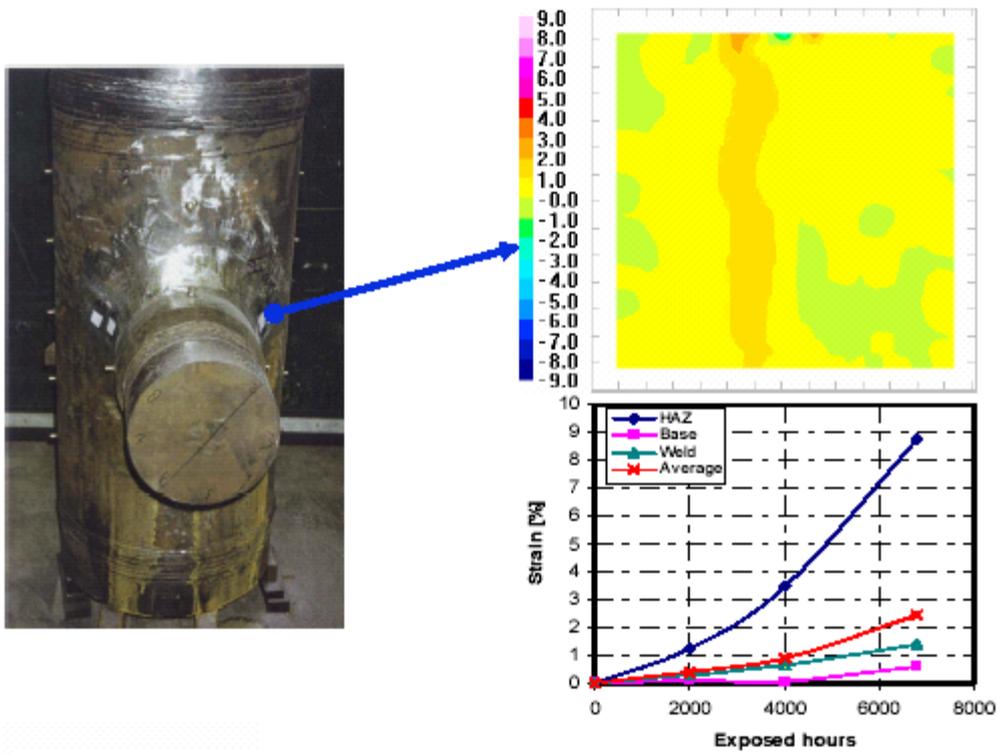


圖 4 實際尺寸之電廠蒸汽管線之應變量測結果



圖 5 現場 SPICA 裝設步驟一：找尋量測位置並在表面噴砂處理使形成粗糙表面



圖 6 現場 SPICA 裝設步驟二：裝設定位插銷與相機固定之夾具



圖 7 現場 SPICA 量測：相機鏡頭一端插入固定夾具進行 image 拍攝



圖 8 定期至現場拍攝 image 後利用分析軟體分析

2.2 SMALL PUNCH 技術研習

依 ASTM 規範所進行之材料機械性質試驗因有其一定之尺寸要求，故對被取樣之構件來說屬於破壞性，這樣方式對有些元件如火力電廠之鍋爐集管與汽機轉軸等會影響到其結構之完整性而不可行，因此 SMALL PUNCH 技術應運而生。SMALL PUNCH 之技術顧名思義即在不影響結構之安全為前提，自構件上取出微小之試片再配合強度試驗機進行壓縮試驗，以獲得材料之機械強度與轉脆溫度 FATT

(Fracture Appearance Transition Temperature) 及破裂韌性 K_{IC}

(Fracture Toughness) 此次前往 CESI 機構主要就系統架構與試驗程序再做討論，同時也對技術之應用領域進行了解。圖 9 為試片取樣器於元件之取樣情形，該取樣器之直徑 80mm、長度 230mm 利用放電加工方式對元件進行切削，切削過程以適當之壓力之去離子水為溶液將鐵屑清除，切取之試樣大小如圖 10 所示約厚度 3mm、直徑 30mm，在取樣過程中因有水做冷卻且電極之電力消耗功率不高故元件之溫度亦低 (低於 35)，因此不影響元件之顯微結構。圖 10 與圖 11 分別為取樣器取出之試片大小和最後試驗機進行微試件試驗之試片形狀。圖 12 圖 15 為實驗裝置與試驗結果。圖 16 圖 19 為應用於電廠之案例



圖 9 取樣器於工件上之取樣情形



圖 10 取出之試件以線切割方式再加工成試驗用之微試件



圖 11 加工好的微試件：直徑 8mm、厚度 0.5mm

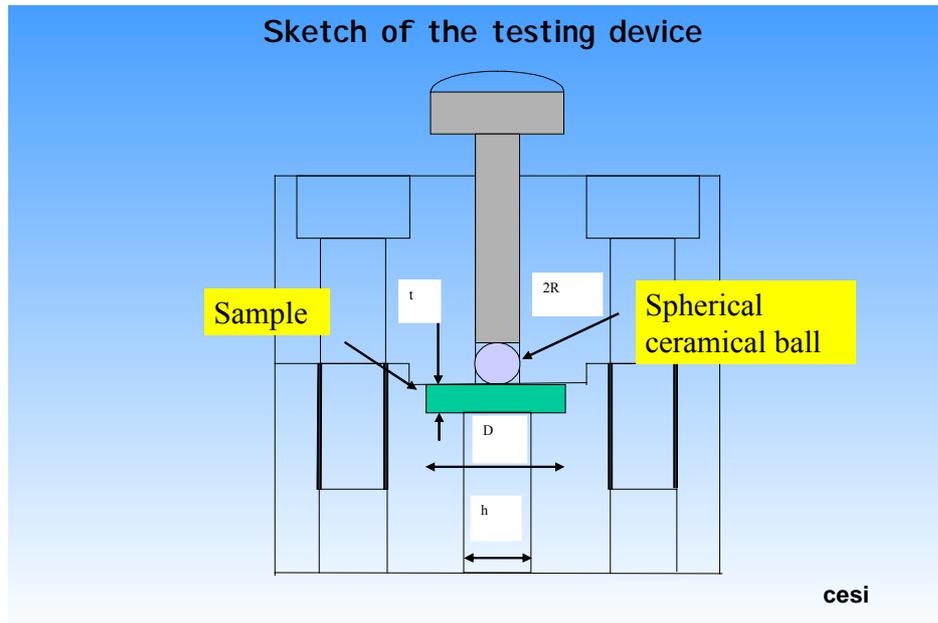


圖 12 為 SMALL PUNCH 試驗之試片與壓痕器於試驗機之組合情形



圖 13 為 SMALL PUNCH 試驗後之試片形狀

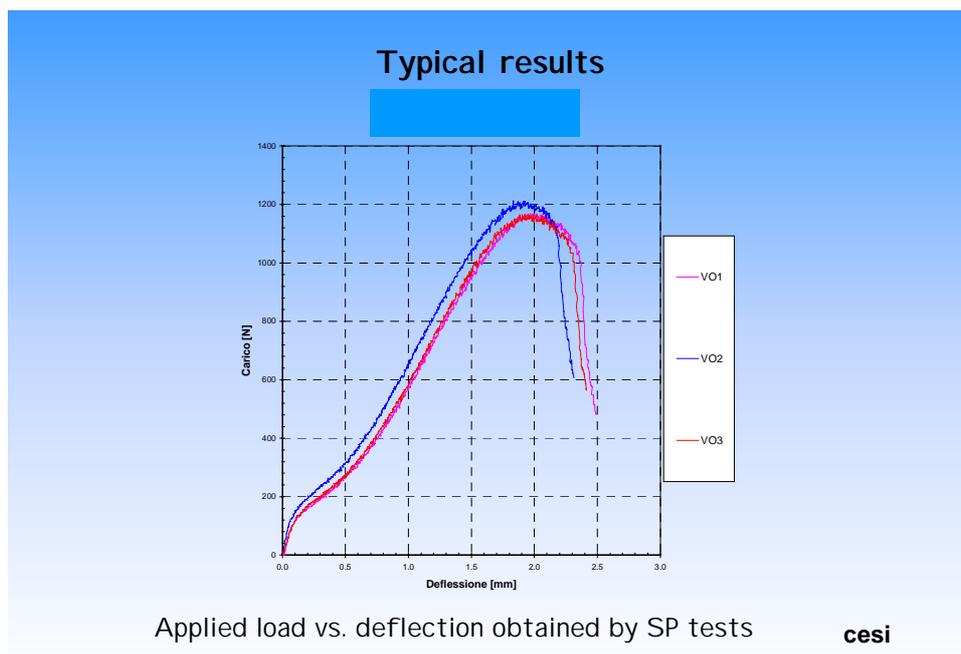


圖 14 為 SMALL PUNCH 試驗之壓縮強度與位移變化

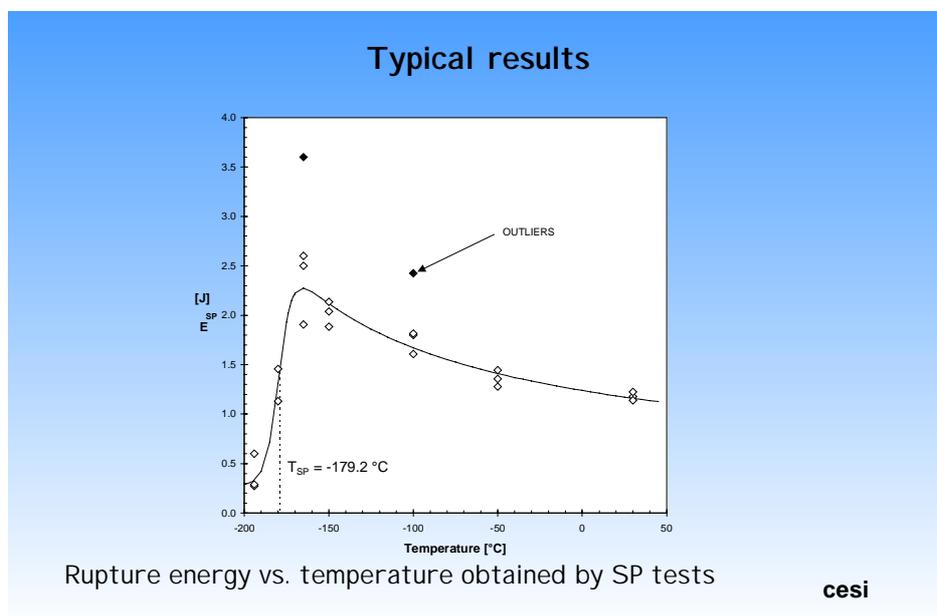


圖 15 為 SMALL PUNCH 試驗獲致之破裂能量和溫度關係曲線進而得到
轉脆溫度 $T_{SP} = -179.2$



圖 16 實際應用案例 1-汽輪機轉軸之取樣



圖 17 實際應用案例 1-汽輪機轉軸之取樣樣後之輪廓

圖 18 實際應用案例 2-鍋爐集管之取樣

圖 19 實際應用案例 2-鍋爐集管取樣後之輪廓

2.3 參加高溫元件材料會議心得

一年一度之電廠高溫元件材料國際會議於 9 月 12 日 9 月 14 日為期 3 天在英國倫敦舉行，此次會議是由 ECCC(European Creep Collaborative Committee)主辦，European commission、SIEMENS、IMECH E、ALSTOM 等機構協辦。會議主題是以電廠組件之設計、破損分析與壽命評估為主，因此參加人員大都是來自從事與電廠設備材料之顯微組織分析、破壞分析及壽命評估相關之學術機構、電力公司及設備製造廠家。職很榮幸能參加此一盛會並藉此機會與與會人員交換工作心得，獲益良多。此次會議之論文發表 100 多篇，其內容約可分成下列十大部分：

- 一、新發展之高溫材料
- 二、高溫材料之物理破壞量測
- 三、高溫材料試驗方法
- 四、資料分析
- 五、電廠性能
- 六、缺陷評估
- 七、高溫材料潛變疲勞
- 八、電廠元件焊接
- 九、高溫組件之殘餘壽命評估

十、電廠組件設計

以上各項子題皆與本公司目前所進行之壽命評估及破壞分析工作關係密切，茲把參加此次會議之心的簡述如下：

顯微組織分析方面—含 9%Cr 合金如 P91、P92 等材料是目前火力電廠用在高溫區逐漸取代 2.25Cr-1Mo (T22) 之常用爐管材料，這類材料具高潛變破斷強度主要是來自幾種硬化機構所造成，1. 由於 Cr 含量高使得材料即使熱處理後之低冷卻速亦會形成硬度相對較高之麻田散鐵組織，同時在麻田散鐵變態過程中會伴隨高度之差排因而增加硬化效果，2. 在沃斯田鐵化時於初沃斯田鐵晶界和麻田散鐵羽狀晶界會析出 $M_{23}C_6$ 之碳化物以及麻田散鐵羽狀晶粒內析出 Fe_3C ，而於回火熱處理時 Fe_3C 會被材料中微量之 V、Nb、N 取代以微細顆粒之碳化物、氮化物與氮碳化物，因而強化潛變強度。P91、P92 材料經過長時間使用之後 1. $M_{23}C_6$ 析出物會由小顆粒併合成大顆粒如於溫度 600 °C 下使用 17000h 其平均直徑達 90-150um，2. 固溶在基材中之 W 和 Mo 元素被取代而生成 Laves 相 ($Fe_2(Mo, W)$)，3. 由於高 Cr 會促進 CrNbN (Z 相) 之生成，因而使得維持高溫潛變強度之 Nb、V 氮化物消失，上述情況是造成 P91、P92 材料於高溫長時使用後潛變強度下降主因。

壽命評估方面—由日本 Isamu 等人所發表之 Residual Life Estimation for Long-Term Used Power Boiler Tubes 之論文實用性相當高，這篇文章以使用長達 195000 小時之 2.25Cr-1Mo 二次過熱器爐管進行之殘餘受命評估，使用之方法有 TTT 法 (time vs. temperature method)，此方法包括 Larson-Miller parameter (LMP)、Orr-Dom parameter (OSDP)、Mason-Haford parameter (MHP)、Iso-stress 法 (iso-stress temperature accelerated method) 和 Ω 法 (OMEGA method, $t_r-t=1/(\epsilon\Omega)$)，評估結果如下表所示，MHP 法之評估結果與其他方法相去

較大，略顯保守。至於其它法之評估結果頗為相近，本所採行方法為 Larson-Miller parameter (LMP)。

破壞分析方面—由 H. Kushima 等人所發表之 Metallographic Atlas for 321H Stainless Steel and Degradation due to Long-term Service at the Elevated Temperature 論文與本公司最近電廠接二連三發生 321H 爐管破損頗有關連，SA213TP321H 不鏽鋼係從 304 不鏽鋼中添加 Ti 經過

Prediction method		Residual life (h)
TTP	LMP	494000
	OSDP	474000
	MHP	383000
Iso-stress		408000
Ω (measured ε)		438000
Ω (estimated ε)		448000

高溫 900 之安定化熱處理後並藉著碳化鈦 (TiC) 之形成來降低碳化鉻之析出 (碳化鉻析出之溫度 425 -815) 以減緩晶界敏化進而達到降低粒間腐蝕發生，同時由於鈦碳化物在高溫下比鉻之碳化物較安定因此其高溫抗潛變能力亦比 304 不鏽鋼優，由於 SA213TP321H 不鏽鋼之組成元素複雜，經過高溫長期使用之後衍生之析出物有 σ 相、G 相、TiC、TiN、 $Ti_4C_2S_2$ 、 $M_{23}C_6$ ，這些析出物在材料內部各具不同形貌例如 TiC 係以細小之顆粒 (15-30nm) 狀散佈在晶粒間，TiN 之形狀以立方居多顆粒約 2-5 μ m， $Ti_4C_2S_2$ 呈不規則形狀其大小約 2-5 μ m， σ 相 (FeCr) 之顆粒大小依晶粒大小時效時間化學組成而定通常散佈在晶界或晶粒之三角交叉位置，G 相亦出現在晶界其組成為 $Ni_{16}Ti_6Si_7$ ， $M_{23}C_6$ 之析出數量與大小視使用時間而定，通常析出位置

以在晶粒邊界優先但經過長時間使用之後亦會在晶粒內分佈。 σ 相是扮演應力增強者 (stress-raiser) 角色，尤其形狀為針葉狀時為最，根據 H. Kushima 等人實驗發現 321 不鏽鋼之沿晶破裂通常可同時發現 σ 相， σ 相之多寡取決於溫度之高低，因為 (1) 沃斯田鐵相變，(2) δ 肥粒鐵相變，(3) $M_{23}C_6$ 碳化物相變均會產生 σ 相，根據 Cr-Fe 平衡圖在溫度低於 845 會有 σ 相產生，另外由於碳化物之析出使得基材內之碳元素逐漸消耗而剩下 δ 肥粒鐵，當處於高溫 (550 -850) 時 δ 肥粒鐵不穩定而直接快速相變成 σ 相，另外若當基材內部已存在之 $M_{23}C_6$ 碳化物時乃可藉由超過 700 之高溫環境而相變成 σ 相，因此破損最大因素是溫度過高情況下形成大量之 σ 相硬脆相以致於應力增高結果。

根據參予人員名冊此次與會人員與國家如下：

國別	人數
Australia	1
Austria	1
Belgium	2
Brazil	1
Canada	4
China	2
Czech Republic	3
Denmark	2
Finland	3
France	10
Germany	26
Hungary	1
India	2
Italy	10
Japan	23
Netherlands	4
Poland	3

Republic of China	1
Serbia and Montenegro	4
South Africa	4
South Korea	1
Sweden	1
Switzerland	1
UK	30
USA	13

第三章 感想與建議

1. 要做好電廠設備之壽命評估因牽涉之範圍、領域很廣，也因其重要性很高在國外不但是被重視之課題而且是一群人在做，在材料經時老化之必然定律之下，設備愈老舊潛在之風險愈高，因此不論是以延長壽命觀點或提高可靠度來看，唯有做好設備材料之性能評估方能達到上述目標。
2. 設備損壞機制除了與設備本身之製造有關外，使用環境之影響更是重要，因此要做好肇因研判工作除了對設備之了解外，經驗累積尤其重要，本所過去在這方面累積許多經驗，此次出國能與國外之設計、製造、研發以及現場實務經驗豐富之相關人員討論，獲益匪淺。
3. INSTRON 公司對電廠設備之壽命評估所開發之以應變量測方式之 SPECA 技術確實可做到如焊道熱影響之微區應變量測，克服傳統應變計所無法做到，由於可量測二維方向之應變，且現場之裝設簡便是一大利器。此項技術主要應用於大型管件如蒸汽輸送管路與集管箱等，量測時間可於停機期間或運轉期間進行，屬於半線上壽命監測方法，值得參考。
4. 如何在不破壞原件之完整性與結構之安全，又能取得材料之機械性質、轉脆溫度及破裂強度因子等參數，是力學評估壽命者困擾問題，由於傳統方式不可行，因此國外紛紛採用 Small Punch 技

術之概念，解決上述之問題。此次前往國外研習，對本所目前所建立之技術推展有更大幫助。

5. 此次參加電廠組件之設計與損壞分析之國際會議，除了擴大了解世界各國電廠所發生之問題種類與解決對策，作為本公司借鏡。同時也可擴展視野了解國外之研究領域與最新發展結果，作為本公司之電廠壽命評估與損壞分析之重要參考資料。

參考資料

1. “Miniature Specimen Test Technique for Estimating Toughness”. EPRI GS-7526 , October 1991.
- 2.R.C.Hurst et al., Standardisation-A Route to Enhancing the Acceptability of the Small Punch Creep Test, p349, ECCC Conference , Sept. 12-14,2005.
- 3.I.A. Shibli et al., Creep & Fracture in High Temperature Components –Design & Life Assessment, Proceeding, ECCC Conference , Sept. 12-14,2005.
- 4.H.J.M.Hulshof, Creep Strain Measurement for Risk Based Monitoring of Steam Pipes and Headers, p513, ECCC Conference , Sept. 12-14,2005.