

出國報告（出國類別：開會）

參加EPRI 87計畫之超臨界材料會議及參觀 EPRI材料實驗室

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：謝運華 機械工程師

派赴國家：美國

出國期間：101年10月13日至10月25日

報告日期：101年11月30日

出國報告審核表

出國報告名稱：參加 EPRI 87 計畫之超臨界材料會議及參觀 EPRI 材料實驗室		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
謝運華	機械工程師	台灣電力公司
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <u>國際會議</u> (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：101年10月13日至101年10月25日		報告繳交日期：101年11月30日
出國計畫主辦機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input type="checkbox"/> 4.內容充實完備. <input type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9..本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他_____	
	<input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式:	

說明：

- 一、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。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報告人		審核人	單位 主管	主管處 主 管	總 經 理 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：參加EPRI 87計畫之超臨界材料會議及參觀EPRI材料實驗室

頁數 34 含附件：是否

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

謝運華/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/(02) 8078-2211

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他(開會)

出國期間：101年10月13日至10月25日

出國地區：美國

報告日期：101年11月30日

分類號/目

關鍵詞：超臨界鍋爐、潛變、疲勞、壽命評估、增強潛變強度合金鋼(CSEF Alloy Steel)

內容摘要：(二百至三百字)

本報告內容包括出國緣由與任務說明、研討會內容、EPRI材料實驗室參訪紀要及心得與建議。

在研討會方面包括超臨界鍋爐使用增強潛變強度(CSEF)新材料研究的進展、潛變疲勞破壞壽命評估、熱回收鍋爐(HRSG)材料使用情形、過熱器再熱器管蒸汽側氧化層研究(OXIDATION)、非破壞檢查研究與應用(NDE)、異種

金屬焊接 (DMW)、高壓集管汽鼓元件等；並研討火力電廠主要元件之壽命評估的最新發展與應用情形，整合各種條件因素來建立預測材料損壞模式，透過冶金及非破壞檢測方法採取最佳的材料壽命管理，以最新的技術評估破壞機率及其影響運轉風險與成本之程度。

在 EPRI 材料實驗室參訪方面，與 EPRI 發電部門副總及各材料計劃相關經理討論 (1) 電廠維護運轉、(2) 研發計劃的相關議題，並溝通電廠在實務上對 EPRI 研究成果的應用情形，提供意見以便其能瞭解客戶的需求。

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

目 錄

出國報告書審核表-----	1
出國報告提要-----	2
目錄-----	3
表目錄-----	4
圖目錄-----	5
壹、前 言-----	6
一、出國緣起-----	6
二、出國任務-----	6
三、行程與內容-----	6
貳、研討會內容-----	8
一、導 論-----	8
二、增強潛變強度(CSEF)合金鋼-----	9
(一)焊接產生裂痕而失敗的型式說明-----	12
(二) CSEF 合金鋼焊接程序-----	13
(三)異種金屬焊接(DMW)-----	14
(四)硬度判別 CSEF 合金鋼性質-----	16
三、熱回收鍋爐 HRSG-----	18
四、非破壞檢測 NDE-----	18
五、氧化層 OXIDATION-----	22
六、潛變疲勞交替作用之壽命評估 CREEP/FATIGUE-----	25
參、參訪討論內容-----	28
一、各材料計劃簡介-----	29
二、議題討論-----	30
肆、結論與建議-----	33
伍、參考資料-----	34

表目錄

表 1、出國行程及工作概要-----	7
表 2、CSEF 合金鋼的族系-----	10
表 3、CSEF 合金鋼成份-----	10
表 4、異種金屬焊接之焊材表-----	15
表 5、厚件之焊後熱處理溫度表-----	15
表 6、薄件焊後熱處理溫度-----	16
表 7、潛變損壞評估方式-----	27

圖目錄

圖 1、CSEF 合金鋼與 T22 在高溫下允許應力的比較-----	11
圖 2、熱影響區依相圖的分區-----	12
圖 3、CSEF 合金鋼的四種破裂位置-----	13
圖 4、A/B、Case1 過熱再回火/Case2 過熱持溫降溫-----	17
圖 5、蛇形機械臂檢查集管及管內孔-----	19
圖 6、熱回收鍋爐 Finned Tube-----	20
圖 7、A/B/C、SPT 的取樣工具-----	21
圖 8、T91 的氧化層型態-----	23
圖 9、氧化層剝離模型-----	23
圖 10、氧化層應變與厚度成長造成剝離的過程-----	23
圖 11、T22 與 T91 氧化層剝離的形態-----	24
圖 12、TP347 氧化層剝離的機制-----	24
圖 13、各種材料之潛變疲勞交互作用之壽命評估圖-----	26

壹、前 言

一、 出國緣起

本公司為 EPRI 會員，今年起參加其 P87 為期 3 年之研究計劃，該計畫主要從事與本公司陸續興建之超超臨界機組有關之超超臨界材料高溫性能研發、設備保固檢測與壽命評估、材料焊接技術、國外運轉經驗、設備組件修護實務等開發研究。此次利用該計畫提供之保留基金於 101 年 10 月 13 日至 25 日到美國參加超臨界材料殘餘壽命評估會議及訪問 EPRI 材料實驗室並與其計劃負責人做技術研討及交流。

二、 出國任務

由於本公司目前之次臨界火力發電設備大部份都已運轉 20 年以上，對於設備運轉的可靠度及安全性一直是公司所關切的重要議題，因為決定機組設備是否更新或停止運轉對公司之營運成本具有重大影響。因此，設備檢查與壽命評估的技術是此階段重要的工作，參加本次會議除了了解世界各國之電廠對前述工作做法外並收集相關研究資料及獲取最新發展技術，同時亦將本公司之經驗與與會人員交流。

此外，目前本公司新建超臨界火力電廠汽力機組為符合政府減碳政策必須提高效率，因此，先進的超臨界或超超臨界機組成為未來新機組的型式。此類機組之高效率係基於超過臨界點的高溫及高壓蒸汽為作功媒介，使用的材料遂成為關鍵技術，材料開發及其設備維護異於傳統機組，本次會議內容對增強潛變強度材料列為主要議題，透過研討希望能吸取專家們的經驗，加強對增強潛變強度材料認識以便往後能順利完成新機組的維護工作。

三、 行程與內容

此次公務出國係應 EPRI 之邀請參加，表 1 為此次出國行程及工作概要。

表 1、出國行程及工作概要

時 間	地 點	工 作 概 要
10/13(六) ~ 10/14 (日)	台 北 → 紐 約 → 夏 洛 特 → 希 爾 頓 黑 德 島	去 程
10/15 (一)	希 爾 頓 黑 德 島	會 議 報 到 及 T91 材 料 維 修 計 畫 第 二 階 段 執 行 規 劃
10/16 (二)	希 爾 頓 黑 德 島	T92 材 料 執 行 規 劃 研 討
10/17 (三) ~ 10/19(五)	希 爾 頓 黑 德 島	超 臨 界 材 料 壽 命 管 理 會 議
10/20 (六)	夏 洛 特	搭 機 到 夏 洛 特
10/21 (日)	夏 洛 特	休 假
10/22 (一) ~ 10/23 (二)	夏 洛 特	拜 訪 EPRI 材 料 實 驗 室 及 參 訪 Structure Integrity 公 司
10/23 (二) ~10/25 (四)	夏 洛 特 → 舊 金 山 → 台 北	回 程

貳、研討會內容

一、導論

壽命評估的目的在於我們關心電廠關鍵設備儲如過熱器何時開始會發生破管事故或再熱器管何時開始成為事故主角等，尤其對超臨界鍋爐的材料 CSEF 合金鋼在高溫環境下使用的潛變情形，必須尋找最佳的 NDE 技術來檢查各高溫元件的狀態，以提供足夠資訊來決定設備檢修、更新或除役的適當對策。

現今發電業正面臨嚴苛的環保法規要求一如最大可達控制技術 (Maximum Achievable Control Technology, MACT)、水銀及空氣毒物排放標準 (Mercury and Air Toxics Standards, MATS) 的規則，例如對於運轉達 46 年以上的老舊設備，需要去考量如何改善才能符合法規、且又能符合企業經營理念的選項。機組除役的原因主要為經濟的需求性、氣體成本及法規要求，現役機組運轉時數已有超過 40 萬小時，未來 20 年將有機組運轉超過 60 年的紀錄，將會發生的問題點有：

(一) 依經驗，很多機組發生事故的主因大都來自材料潛變破壞尤其焊接管件之熱影響區。

(二) 然依現有的 ASME 規範—材料最小允許機械性質設計壽命在 20~30 萬小時，因此機組延長壽命時，需要重新對使用中的材料性質現況進一步分析，能否符合延壽的條件至為重要。

因此，有必要對機組設備檢視其母材老化破壞的情形，研擬一套材料壽命管理的策略，來達成安全運轉的目的。

以現在電力市場上來看，可以了解未來需求趨勢是：

(五) 修改設計規範以符合變動負載的運轉條件。

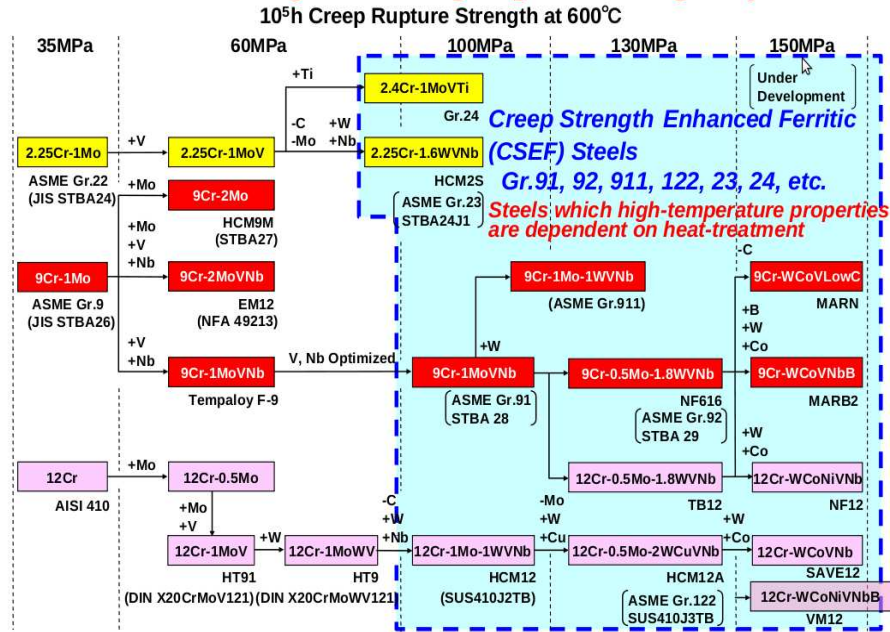
- (六) 改善及開發 NDE 技術如 AE, Digital RT, robots, eddy current gloves, and guided wave 技術等，能對材料正確檢測及判讀，且能應付大區域的檢測需求。
- (七) 發展及應用高階進步的材料，以因應節能減碳高效率即超臨界高溫高壓環境的材料。
- (八) 發展以小試片取樣方法及試驗，以檢視實際上運轉中元件的材料性質現況，提供更確實的資訊做合宜的因應對策。
- (九) 發展及創新維修方法如 PM 及 HIP 的製程研發新元件，製造可快速更換的零件及方法，來減少檢修工期並降低維修成本。
- (十) 開發對新合金的壽命預測工具，精確掌握材料的現況。

二、 增強潛變強度合金鋼特性 (CSEF, Creep Strength Enhanced Ferritic Alloy Steel)

所謂增強潛變強度合金鋼是以 2.25Cr-1Mo、9Cr-1Mo、12Cr 系列材料添加各種可以增加潛變強度元素的材料，主要為 Gr. 23/24/91/92/911/122 等之耐高溫潛變材料。在新建或更新鍋爐設備上 CSEF 合金鋼材已廣為應用，未來超臨界鍋爐將持續扮演重要的角色。由於 CSEF 合金鋼本質特性與傳統低合金鋼有很大差異，它們無法用原有傳統的製造，維護方式來處理，本次研討會將近來在這方面的研究進展及方向做討論，表 2 為 CSEF 合金鋼的族系。

表2、CSEF合金鋼的族系

Creep Strength Enhanced Ferritic (CSEF) Steels?
Question about long-term creep rupture strength of CSEF?



這些新一代材料在ASME以規範案例(Code Case)來定義，而其中T91則已完全納入規範內，成份如下表3：

表3、CSEF合金鋼成份

Grade	T23 ²	T24	T91	T911	T92
Code Case	CC2199	CC2540	N/A [SA-213]	CC2327	CC2179
C	0.04-0.10	0.05-0.10	0.07-0.14	0.09-0.13	0.07-0.13
Mn	0.10-0.60	0.30-0.70	0.30-0.60	0.30-0.60	0.30-0.60
Si	0.50	0.15-0.45	0.20-0.50	0.10-0.50	0.50
S	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
P	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020
Cr	1.90-2.60	2.20-2.60	8.0-9.5	8.5-9.5	8.5-9.5
Ni	-	-	0.40	0.40	0.40
Mo	0.05-0.30	0.90-1.10	0.85-1.05	0.90-1.10	0.30-0.60
W	1.45-1.75	-	-	0.90-1.10	1.5-2.0
V	0.20-0.30	0.20-0.30	0.18-0.25	0.18-0.25	0.15-0.25
Nb	0.02-0.08	-	0.06-0.10	0.06-0.10	0.04-0.09
N	0.030	0.0120	0.030-0.070	0.040-0.090	0.030-0.070
B	5-60ppm	15-70ppm	-	3-60ppm	10-60ppm
Al	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020
Ti	0.005-0.060	0.06-0.10	0.010	0.010	0.010
Zr	-	-	0.010	0.010	0.010

¹Values may vary with product form. Single values are maximum

²Ti/N = 3.5 minimum (not listed in 2010 edition of ASME B&PV II, SA-213). Changes were adopted in CC2199-4 to allow free boron to increase the hardenability of the alloy to a sufficient level.

CSEF合金鋼能夠耐高溫潛變的機構，主要是以所添加的元素(如Nb,V,N)能形成碳化物，透過冶金及熱處理的手段：即正常化時將碳化物完全固溶，冷卻時在晶粒內析出很細碳化物均勻分佈於層狀麻田散鐵，然後再進行退火處理形成回火麻田散鐵，增加材料的破壞韌性 (Fracture toughness)，這樣形成耐高溫的CSEF合金鋼，可以在高溫環境下承受較高的應力。

各種CSEF合金鋼的潛變強度比較如圖1，他們的潛變特性如圖1所示。T23及T24的改善相較於T22有大幅增強，甚至接近T91的潛變強度，且在現場維護焊接特性類似T22，最大的好處是有一般的厚度管件（薄件<12.5mm）可如同T22不需焊後熱處理，因此成為普遍採用的材料。唯目前AWS尚未建立焊接規範。使用仍需依靠原開發廠商的技術。

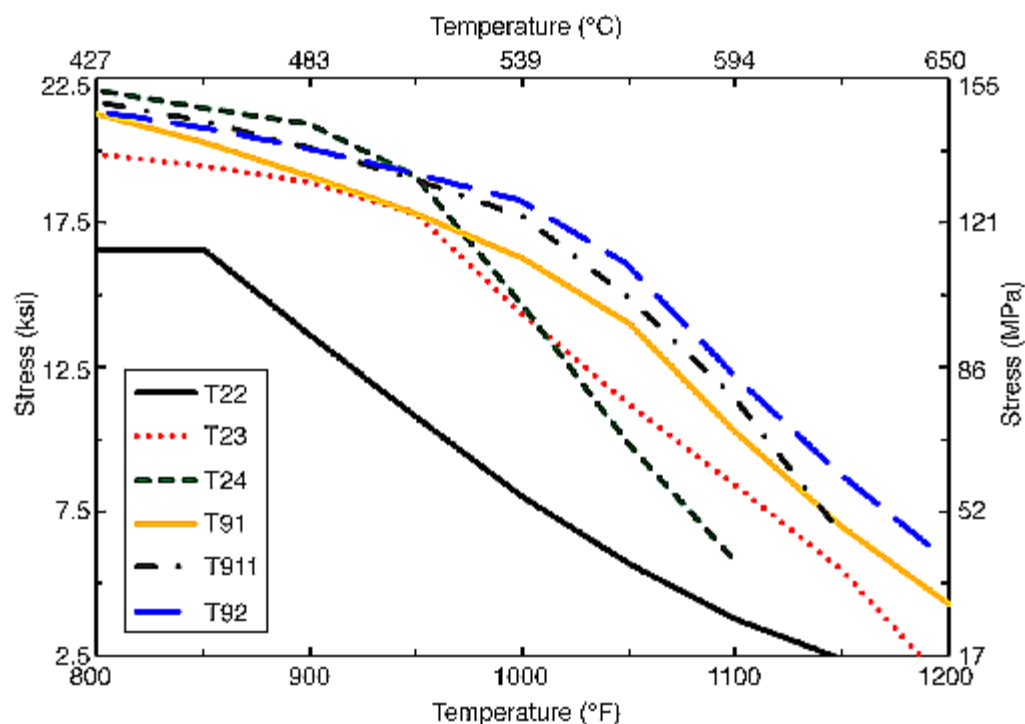


圖1、CSEF合金鋼與T22在高溫下允許應力的比較

CSEF合金鋼的焊接技術為了維持及保有高溫元件能與母材相同的潛變強度水準，焊接程序及施工品質就成為關鍵的事，分項敘述如

下：

(一) 焊接產生裂痕而失敗的型式說明

CSEF 合金鋼從焊接及熱處理施工，母材，焊接熱影響區 (HAZ)，焊材各經歷不同的相變化，其不同的顯微組織造成有不同的潛變特性。焊接的熱影響區相對應鐵碳平衡圖又可分成四個區域 (圖2)，其中FGHAZ及ICHAZ在硬度上有特別低稱為Soft Zone很容易在此位置發生破壞，稱為Type IV破裂。Type IV破裂影響潛變強度非常大，焊後的品質檢查不易發現，潛變空孔產生階段後即發生管材非延性的破裂。因此要避免上述Type IV損傷發生，材料之設計上以成份而言如N/Al比應在4以上，如此才能減少AlN化合物形成以穩定碳、氮化物析出物。一旦有Type IV破裂的情形，改善方法須重新調質熱處理即正常化及退火，但現場施工的困難度相當高。

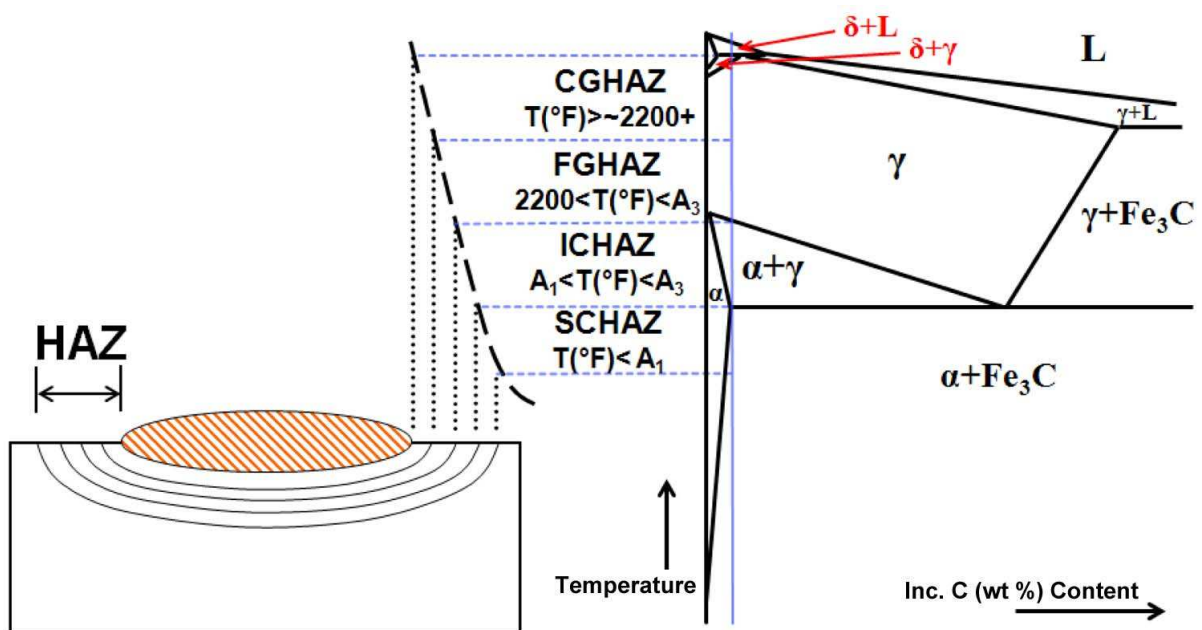


圖2，熱影響區依相圖的分區

CSEF 合金鋼主要的損壞分類有Type I裂痕為縱向或橫向發生在焊材上，Type II裂痕為縱向或橫向而裂痕會伸長至HAZ，Type III裂痕

則在粗晶粒區的HAZ上，Type IV 裂痕則發生在ICHAZ範圍。如圖3所示

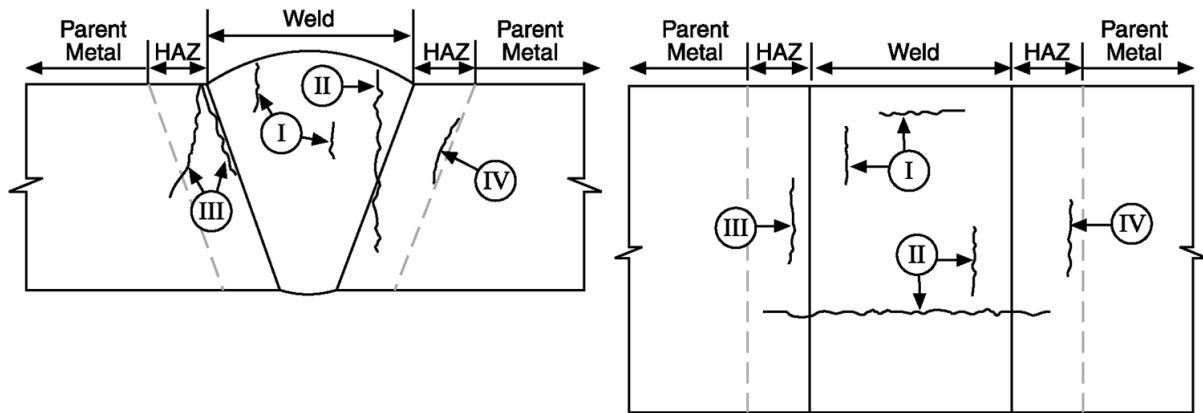


圖3、CSEF合金鋼的四種破裂位置

(二) CSEF 合金鋼焊接程序

1、 預熱及層間溫度

一般預熱溫度建議約 150°C 以上，但對厚件材料應提高溫度至 200°C。最大層間溫度在 T23，24 為 315°C，而 T91，92 則為 371°C 以避免不完全變態的相殘留，造成潛變強度的降低。

2、 焊後熱烘或焊接中斷

焊後熱烘目的在避免發生氫裂 (HIC)，尤其對厚件的處理更為重要，建議溫度在 260~315°C 時間約 15min~4hrs 視情況而定。

焊接中斷儘量避免，當發生時其焊接厚度必須超過 1/3 厚度，保持預熱的條件直到焊接再次開始。

3、 焊後熱處理的規則

- (1) 厚度小於 0.5 “ (12.7mm) 持溫時間 > 0.5hr。厚度大於 0.5” 時間每吋增加 1hr。厚度大於 5 “ 時則以 5hrs

再加上 15min/吋。

- (2) CSEF 合金鋼焊後熱處理溫度大約為 730~760°C，在較高溫限制區可達 790°C，但此時要特別留意 A1 變態點不可超過，以免產生殘留沃斯田鐵破壞了潛變強度。
- (3) 厚件 T23 建議需進行焊後熱處理
- (4) 熱處理的操作：熱電偶的裝設規定，工件尺寸效應，ID/OD 溫度梯度，升降溫率等皆有規範（可參考 AWS D10.10），務必使工件的各部份皆維持有效的抗潛變組織。
- (5) 硬度的測量是熱處理品質初步檢測，應在 220~280BHN 範圍內，若在 200~300BHN 時需進一步評估檢查。

(三) 異種金屬焊接 (DMW)

- 1、 在不同的環境設計使用不同的金屬，因此，異種金屬焊接是為必要的設計與施工，焊接適用的焊材如表 4 所示，而焊後熱處理設計除考量 CSEF 合金鋼的需求亦要考量異種金屬的特性，不能減少潛變特性也不可使材料過度回火，兩者需取得最適化的條件來符合使用需求。表 5-6 列出熱處理條件，其中 T22，23，24 等在薄件是不需熱處理的。

表 4、異種金屬焊接之焊材表

Grade	11/12	22	23	24	91	911	92	SS	
11/12	-B2	-B2 or -B3						SS	
22	-B2 or -B3	-B3	-B23				-B24		SS
23			-B23		-B24		-B91		SS
24			-B23		-B24		-B91		SS
91			-B23		-B24		-B91		SS
911			-B23		-B24		-B91		SS
92			-B23		-B24		-B91		SS
SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	

Color Key	
-B2	ER70S-B2L, E7018-B2L, E8XTX-B2LM ER80S-B2, E8018-B2, E8XTX-B2M
-B3	ER80S-B3L, E8018-B3L, E9XTX-B3LM ER90S-B3, E9018-B3, E9XTX-B3M
-B23	ER90S-B23, E9018-B23; Note: (As of 2011, still a "-G" material in AWS)
-B24	ER90S-B24, E9018-B24; Note: (As of 2011, still a "-G" material in AWS)
-B91	ER90S-B91, E9018-B91, E9XTX-B91M; Note: (As of 2011, still a "-B9" material in AWS)
-G(911)	ER90S-G(911), E9018-G(911); Note: No plans for AWS designation
-B92	ER90S-B92, E9018-B92, E9XTX-B92M; Note: (As of 2011, still a "-G" material in AWS)
SS	Stainless Steel; i.e. E308, etc.
Ni	ERNiCrFe-2, ERNiCrFe-3, ERNiCr-3, ENiCrFe-2, ENiCrFe-3, ENiCr-3
P87	EPRI P87

表 5、厚件之焊後熱處理溫度表

Grade	11/12	22	23	24	91/92	911	SS
11/12	1250±25°F	1275±25°F	1350±25°F			1325±25°F	1250±25°F
22	1275±25°F		1350±25°F			1325±25°F	1275±25°F
23	1350±25°F			1350±25°F			1350±25°F
24	1350±25°F			1350±25°F			1350±25°F
91/92	1275±25°F	1350±25°F			1375±25°F		1375±25°F
911	1350±25°F			1375±25°F			1375±25°F
SS	1250±25°F	1275±25°F	1350±25°F			None	

表 6、薄件焊後熱處理溫度

Grade	11/12	22	23	24	91/92	911	SS
11/12	None ¹				325±25°F	[Red checkered pattern]	None ¹
22							
23							
24							
91/92	325±25°F	1350±25°F			1350±25°F	[Red checkered pattern]	1350±25°F
911	1375°F±25°F						
SS	None ¹				1350±25°F		None ¹

對於維護工作而言熱處理在現場施工不易控制至精準，但 CSEF 合金鋼的潛變特性必須依靠熱處理來產生抗潛變的顯微組織，若有失誤或部份區域失誤將使材料潛變強度嚴重降低，產生未來使用上的問題。

(四) 硬度判別 CSEF 合金鋼性質

有關對 P91 材料的硬度規定：ASTM 為 190~250HB /196~265HV、TS ≥ 585MPa(174 HB)；而 EN 無硬度的規定但在抗拉強度則規定為 630MPa(195HB) ≤ TS ≤ 830MPa(250HB)，其中 () 內為 TS 與 HB 之換算相當值。在規定上 P91 的硬度有上下限，目的在規範元件在適當的熱處理能存在回火麻田散鐵的組織，確保其增強潛變強度的機械性質。依顯微組織的不同，在巨觀上由硬度值可以表現出來，若要對 CSEF 合金鋼以硬度檢測來對品質管理需要考慮的事情：

- 1、 材料的脫碳層—即使完全的回火麻田散鐵組織，一旦有脫碳時其硬度大約下降 20 HB
- 2、 表面加工硬化層

- 3、 攜帶型硬度計的精度範圍
- 4、 材料表面情況
- 5、 使用操作者的經驗

以案例來說明硬度對顯微組織的關連，若在焊後熱處理時發生了過熱情形，意即回火溫度 $>A_{c1}$ ：

圖 4A Case 1: 過熱, 正常冷卻至 M_f 後再進行一次正常的回火，正常空氣冷卻。

圖 4B Case 2: 過熱，修正冷卻至 A_{c1} 下持溫回火，正常空氣冷卻。

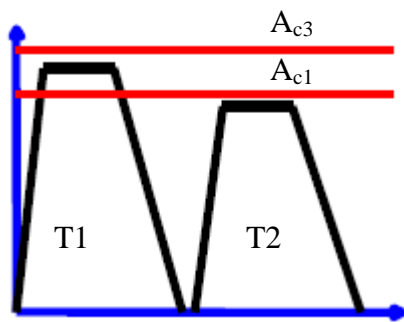


圖 4A、Case1 過熱再回火

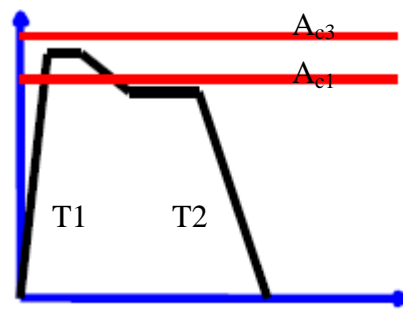


圖 4B、Case2 過熱持溫降溫

分析說明如下：

圖 4A、Case1: 第 1 次回火過熱超過 A_{c1} 溫度部份形成沃斯田鐵，碳重新固溶於新的沃斯田鐵內，而未變態的肥粒鐵則發生過度回火現象；冷卻時沃斯田鐵變態為麻田散鐵；第 2 次再回火時，則對新的麻田散鐵回火，但也會對肥粒鐵則又再次過度時效 (Overaging) 而產生硬度降低的情形。

圖 4B、Case2: 第 1 次過熱超過 A_{c1} 溫度部份形成沃斯田鐵，碳重新固溶於新的沃斯田鐵內，而未變態的肥粒鐵則發生過度

回火現象；由於慢速冷卻沃斯田鐵會變態為肥粒鐵及碳化物；而進行回火的持溫時對殘留的肥粒鐵過度時效，另一邊又產生粗大肥粒鐵及碳化物的組織，造成硬度降得很異常低。

因此，ASTM 最近將最小硬度納入規範內，就是著眼現場攜帶型硬度測量易實施，可以硬度來做為回火麻田散鐵組織的指標。理論上，用硬度的測量推斷熱處理後的金相組織是否有過熱回火的情形是可行，唯在現場的硬度測量要考量前面所說的因素，其再現性、穩定性或誤差變異較大，不見得可以完全做為品質認證唯一手段。

三、 熱回收鍋爐 HRSG

在 HRSG 的管路上如何避免 G91 材料潛變壽命減少，早期破壞的事件發生需注意的事項如下：

- (一) 材料的採購規範要指定製程及非製程上的品管方法，使失誤減少。
- (二) 在設計階段材料要符合甚至超越現有規範的性能
- (三) 異種金屬焊接 (DMW) 的設計特別注意或甚至要避免厚度不同的情形。
- (四) DMW 的焊接效率需以 FEM 建模型或以實體 mock-up 來驗證，並取代現有的規範值。
- (五) DMW 省略的焊後熱處理係假設殘留應力不超過其降伏強度。
- (六) 對於減溫器、凝結器及洩水等的管路系統很容易發生減少材料壽命的因素，應予特別注意設計條件、操作運轉的情形。

四、 非破壞檢測 NDE

材料的現況需靠非破壞檢測來檢查，CSEF 合金鋼材的非破壞檢查除原來的 PT，RT，UT 等，因其缺陷可能為顯微組織的變化、空孔或微裂，需用更細微及敏感的方法如複製膜或高階 Phase Array 來檢查。但複製膜的手續繁複，因此高階 Phase Array 成為發展的趨勢。壽命評估的數據亦需由 NDE 來取得及驗正。有關 NDE 近年研究發展的重點：

- (一) RT 數位化 Digital Radiography (DRT)：如 QDRT 使用數位式 RT 照相檢測方法來比對及計算裂痕深度。
- (二) 電磁檢測技術進化 Electromagnetic NDE：使用可撓性手套形渦電流檢測器應用於 (Flexible Eddy Current Array On Glove) 狹小空間的集管與管焊接品管、汽機葉片裂痕檢測。
- (三) 超音波導波 Ultrasonic Guided Waves
- (四) 相陣超音波檢測技術 Ultrasonic Phased Arrays
- (五) 對不易檢查位的非破壞檢測方法開發—鍋爐水管的腐蝕疲勞、HRSG 蒸發管及、有灰渣爐管的大面積檢查其熱疲勞龜裂、FAC 缺陷等 (圖 5)

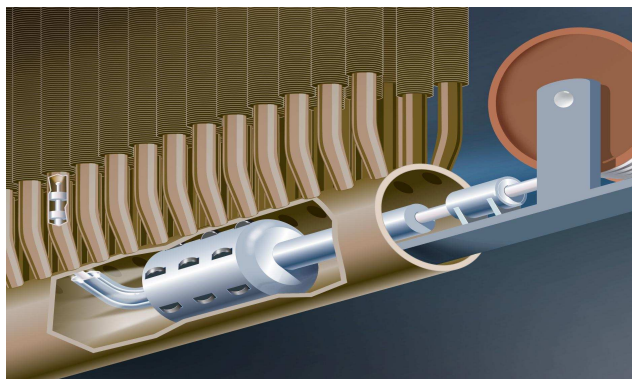


圖 5、蛇形機械臂檢查集管及管內孔

非破壞檢測未來重要研發方向如下：

- (一) 腐蝕疲勞裂痕的深度測量—探頭難靠近裂痕缺陷，裂痕深度不易測量，電廠又有需要以裂痕深度來決定對策。
- (二) UT 取代 RT—現場需求，UT 可偵測細微缺陷，法規要求剷除線形缺陷，判別微缺陷是否影響壽命
- (三) 熱回收鍋爐 Finned Tube 的檢測 (圖 6) 目前尚無較佳實用的方法，有待進一步開發。

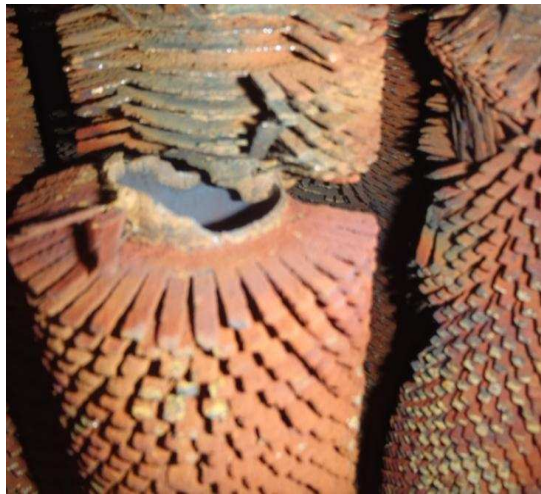


圖 6、熱回收鍋爐 Finned Tube

為了能瞭解運轉使用材料的機械性質及老化程度，無法以傳統大試片自使用中的材料取樣。因此，發展 Small Punch Testing, SPT 的方法--對使用中的材料以不影響材料結構的尺寸取下一小試片，而各種 SPT 試驗機測試各種機械性質包括潛變疲勞試驗，對於壽命評估提供更精確確實的資料。可試驗的項目如下：

- (一) 拉伸性質如抗拉強度、延性等。
- (二) 韌性如破壞韌性、 K_{ic} J_{ic} 或 Charpy V-notch(CVN) FATT。
- (三) 潛變、疲勞、疲勞-潛變試驗
- (四) 應力腐蝕龜裂強度 K_{ISCC}

(五) 模擬裂痕生長機制如 SCC, Creep, Fatigue, Creep-Fatigue

取樣的工具有 (1) Multiple Drillings (2) Cone Cutter
(3) Hemispherical Cutter 如下圖 7。



圖 7A、SPT 的取樣工具



圖 7B、SPT 現場取樣情形



圖 7C、SPT 試片

五、 氧化層 OXIDATION

超臨界鍋爐的氧化層問題在 CSEF 合金鋼上是非常重要的議題，因為含 Cr 量增加及操作溫度比次臨界鍋爐提升很多，使汽測內管氧化層生長變得明顯，另在過熱器最高溫段使用 TP347 等不鏽鋼氧化層在厚度 0.3mm 即開始剝落，造成管內堵塞形成短期過熱或造成汽機的固體顆粒沖蝕 (SPE) 問題等。因此，如何解決氧化層剝離成為各研究單位的熱門研究計劃。

圖 8 為 T91 的氧化層形態，可分管內緊貼母材的 Spinel 為 (Fe,Cr₃O₄), 再來為 Magnetite 磁鐵礦 (Fe₃O₄), 最表層偶有組織鬆散的 Haematite 氧化鐵 (Fe₂O₃)。其中，內兩層之間易形成空孔裂痕，加上冷熱溫度變化各層與母材膨脹系數不同造成氧化層剝離脫落，為了能減少此類損害減少爐管過熱之操作控制手段外，研究依各種運轉模式計算及建立氧化層模型 (Oxide Scale Exfoliation Modeling)，預測氧化層的成長，採取適當方式予以去除避免較嚴重的損壞。從機組運轉模式來測量起停或負載變化 (Cycling) 的條件，利用各氧化層與基材間的膨脹系數及溫度變化所產生的應力，依應力分析計算發生氧化層剝落的條件，建立了蒸汽管內氧化剝離的模型 (圖 9-10)，就可預測氧化層生長及剝離發生的時間，在發生問題之前先做預防的處理減低氧化層剝離的災害。

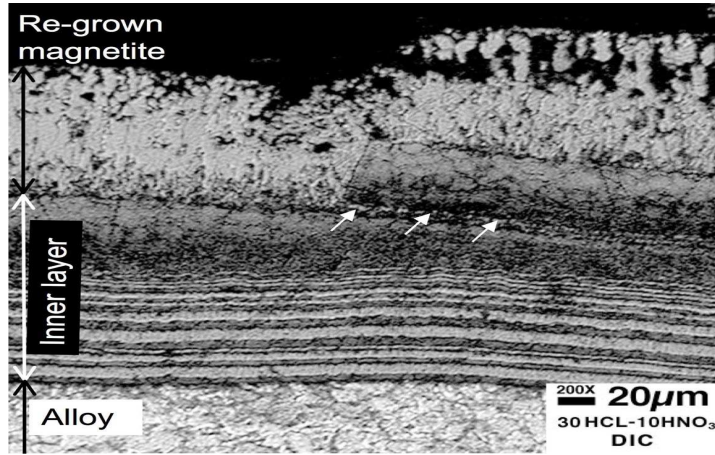


圖8、T91的氧化層型態

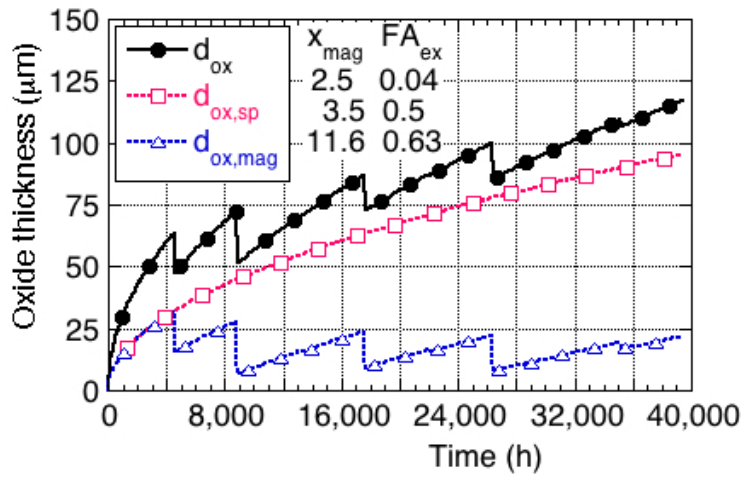


圖9、氧化層剝離模型

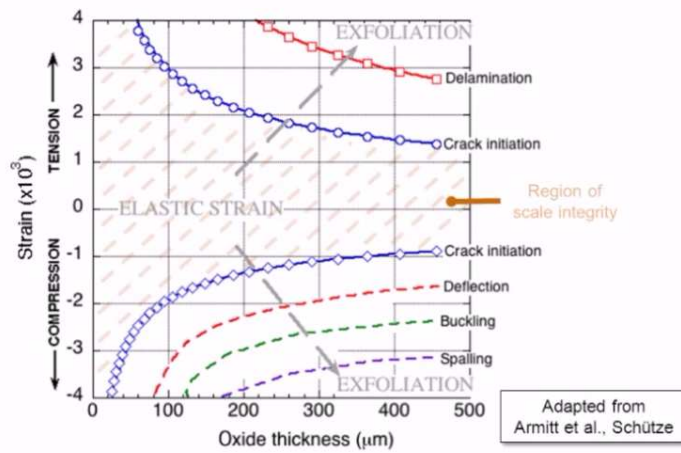


圖10、氧化層應變與厚度成長造成剝離的過程

對於 T22 的氧化層剝離外觀以較厚的部份片狀剝離，而 T91 或 TP347 則以較薄的整圈外層脫皮。如圖 11 所示。氧化層在高溫運轉時生成，於機組停機時溫度降低造成了氧化層受壓應力，當應變超過其剝離厚度時，氧化層即脫落，由圖 12 所示 TP347 的剝離厚度約 0.3~0.4um，依計算資料 T22 之剝離厚度約 0.7~0.8um。因此，氧化層的剝離問題在於成長的速度及起停的次數，故與機組運轉模式有直接關係。



圖 11、T22與T91氧化層剝離的形態

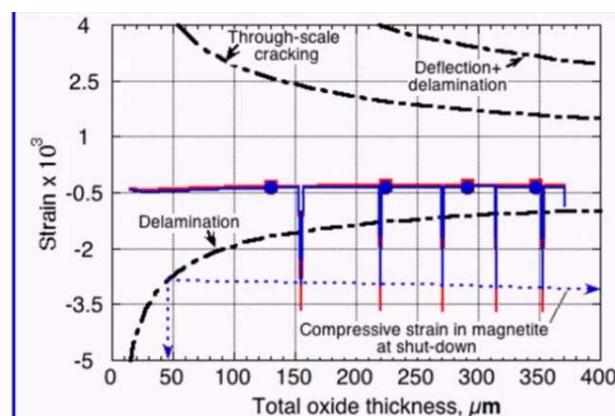


圖 12、TP347氧化層剝離的機制

六、 潛變疲勞交替作用之壽命評估 CREEP/FATIGUE

壽命評估的目的在於檢視電廠主要元件其可靠度，除了確認設備是否在大修週期內能安全運轉外，並估算設備殘餘壽命以供維護策略與計劃之依據。保守的壽命評估會提早維修機組或更新組件，使發電成本增加，而如何合理又精確的壽命評估是技術上的一大挑戰。

在 CSEF 合金鋼的高溫組件上更需要壽命評估，才能了解材料使用情形及老化的狀況，使設備維持安全的運轉。因為材料高溫潛變時承受應力之應變分三期不同的應變率，係由於金屬原子在高溫下的擴散移動所形成，而潛變先發生在次表面的金屬內部形成空孔，累積空孔形成微裂，再依裂縫成長模式，最後造成材料破壞。潛變發生的過程是依時間及溫度而變，檢查的方法除了使用 NDE 外亦需用實驗室金相複製膜取樣在實驗室做金相分析，故潛變是有壽命的。疲勞為金屬經由覆變應力應變後，由金屬表面開始形成裂痕，進而裂痕成長，同樣具有週次的壽命。

潛變與疲勞交互作用下，其應力應變使裂痕生成、成長、破壞皆可依各種材料實驗的數據來估算其壽命，目前各相關規範已有納入如 API/ASME FFS1 等。在歐洲有 R5 計劃研究用更精準的計算殘餘壽命，以減少保守的預測降低成本、增加預測有效性為其研究目標，使機組能延長使用壽命且能符合安全的運轉要求。

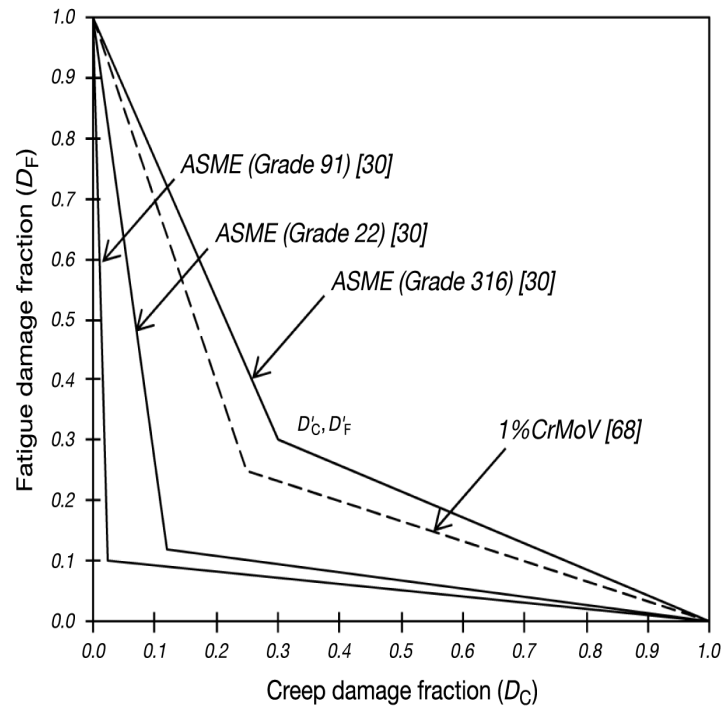


圖13、各種材料之潛變疲勞交互作用之壽命評估圖。

要進行壽命評估先利用實驗室對各材料進行連續潛變及疲勞試驗獲得圖 13 之壽命評估圖。再以材料實際運轉的時間、溫度、週數等資料計算潛變損壞指數 D_C 及疲勞損壞指數 D_F 。再由圖 13 取得目前材料的消耗壽命及依目前運轉模式的殘餘壽命。

因機組運轉模式增加了起停次數，暫態應力的因素必須加以考慮。在設計基礎上及殘餘壽命評估上就要研究採用比較可靠的潛變疲勞壽命評估方法。一般使用的壽命評估方法係先計算材料單純各別的潛變壽命 D_{C0} 及疲勞壽命 D_{F0} 。

疲勞損壞 $D_{F0} = 1/N_{F0}$ ；其中 N_{F0} 有以總應變或以非彈性應變兩種基礎計算。

潛變壽命消耗計算潛變損壞 D_{C0} 的方法有：應力（使用時間）、應變（延性消耗）及應變能量法的基礎來計算。

表 7、潛變損壞評估方式

Approach	Creep damage evaluation
Time fraction rule	$d_c = \int_0^{t_H} \frac{dt}{t_R(\sigma, T_{abs})}$
Ductility exhaustion model	$d_c = \int_0^{t_H} \frac{\dot{\epsilon}_{in}}{\delta(\dot{\epsilon}_{in})} dt$
Modified ductility exhaustion model	$d_c = \int_0^{t_H} \left(\frac{1}{\min[\delta(\dot{\epsilon}_{in}), \delta_0]} - \frac{1}{\delta_0} \right) \dot{\epsilon}_{in} dt$
Energy-based modified ductility exhaustion model	$d_c = \int_0^{t_H} \left(\frac{1}{W_f(\dot{W}_{in})} - \frac{1}{W_{f0}} \right) \dot{W}_{in} dt$
Hybrid modified ductility exhaustion model	$d_c = \int_0^{t_H} \left(1 - \frac{W_f(\dot{\epsilon}_{in})}{W_{f0}} \right) \frac{\dot{\epsilon}_{in}}{\delta(\dot{\epsilon}_{in})} dt$

日本電力工業研究所(CRIEPI)進行各種壽命評估方法(表 7)的實驗,實驗結果比較如下:

(一) 時間分數法—

- 1、 對大部份的材料(尤其對小應變範圍及長期測試的材料更強烈)預測結果趨向不保守的方向。
- 2、 對材料的變形性質十分敏感。
- 3、 無法用簡單的修正來符合大部份的材料。

(二) 延性消耗法—對肥粒鐵型材料比較保守,尤其在小應變範圍者更強烈。

(三) 修正延性消耗法—對一般材料有比較良好的預測結果,唯稍有一點保守的傾向。

(四) 能量基礎法—總體上為最佳的評估結果。

參、參訪 EPRI 實驗室與技術交流

下表為此次參訪 EPRI 之行程與討論議題內容

Monday, October 22		
TIME	TOPIC	PRESENTER
9:00 am	WELCOME AND INTRODUCTIONS	<i>Tom Alley, VP Generation</i>
9:15 am	TPC Presentation	
9:45 am	Introduction to EPRI and EPRI Generation Sector Overview	<i>Alan Grunsky, Sr. Program Mgr MCR</i>
10:20 am	BREAK	<i>All</i>
10:30 am	EPRI Program 87 Overview – 2012 Progress & 2013 Plans	<i>John Shingledecker, EPRI</i>
11:30 am	Specific Program 87 Topics of Interest <ul style="list-style-type: none"> •P87 Filler Metal •Temperbead Repair •Steam-Side Oxidation & Exfoliation 	<i>John Shingledecker, EPRI John Siefert, EPRI</i>
12:00 pm	LUNCH – EPRI CAFE	<i>All</i>
1:00 pm	Lab Tour	<i>All</i>
2:30 pm	Specific Program 87 Topics (continued)	<i>John Shingledecker, EPRI John Siefert, EPRI</i>
4:00pm	ADJOURN FOR THE DAY	
Tuesday, October 23		
TIME	TOPIC	PRESENTER
9:00 am	Overview of Program 63 – Boiler Life and Availability	<i>Kent Coleman, EPRI</i>
9:30 am	CSEF Supplemental Projects	<i>Jonathan Parker, EPRI</i>
10:00 am	BREAK	<i>All</i>

10:20 am	HRSGs	<i>Bill Carson, EPRI</i>
10:40 am	Steam Turbines	<i>Steve Hesler, EPRI</i>
11:00 pm	LUNCH – EPRI CAFE	<i>All</i>
11:30 am	Depart for Structural Integrity	
12:00 pm	Tour of Structural Integrity	
2:00pm	LEAVE FOR AIRPORT	

一、各材料計劃簡介

10/23 在 EPRI 的會議室由 EPRI 的發電部門副總 *Tom Alley (VP Generation)* 主持會議，先介紹 EPRI 的歷史、會員、主要任務、組織。其中與本次台電訪問團隊較密切相關為電廠主要元件可靠度 MCR (Major Component Reliability) 及 Materials/Chemistry Groups，包括下列各計劃：

- (一) NDE - Generation Sector Nondestructive Evaluation (7/2011)
- (二) P63 - Boiler Life and Availability Improvement Program (11/2009)
- (三) P65 - Steam Turbines-Generators and Auxiliary Systems Program (4/2012)
- (四) P79 - Combustion Turbine and Combined-Cycle Operations and Maintenance (6/2011)
- (五) P80 - Combustion Turbine/Combined-Cycle Plant Design and Tech. Selection (1/2011)
- (六) P88 - Heat Recovery Steam Generator Dependability (8/2011)
- (七) P104- Generation Maintenance Application Center (6/2011)
- (八) Flow Accelerated Corrosion Past Products (4/2012) Associated

Booklet:

(九) Generation Sector- Impacts of Cycling on Existing Fossil Assets

(十) P64 - Boiler and Turbine Steam and Cycle Chemistry Program
(5/2010)

(十一) P68 – Instrumentation , Controls and Automation (11/2009)

(十二) P69 – Maintenance Management and Technology (5/2011)

(十三) P87- Fossil Materials and Repair (8/ 2011)

以上各主要計劃經理(如 MCR 主持人/*Alan Grunsky ;P87 / John Shingledecke , John Siefert ;P63 / Kent Coleman , Jonathan Parker ;P88 / Bill Carson ;P65 / Steve Hesler*) 皆親自介紹其研究計劃內容與成果，詳如會議議程。同時我們亦向其介紹台電現況，增進雙方的溝通與了解。

二、 議題討論

(一) 異種金屬焊接 DMW (Dissimilar Metal Welding)

焊接技術 EPRI 目前正開發 E 化的 APP 程式，將現場的條件輸入即可獲得焊接程序，及 ASME,AWS Code 的資料包括焊條的種類、預熱、層間溫度、PWHT 等資料，方便維護人員使用，因為 EPRI 發現研究成果報告內容太多，使用者無法很短時間應用在現場工作，此改善方案就以目前流行的智慧手機的 APP 或以小手冊來讓工程師很容易操作使用。

G91 與 T22 材料異種金屬焊接上需注意有：

- 1、 尺寸效應：因 T22 需要的厚度遠大於 T91，熱膨脹應力會成為失敗原因之一，故先焊接一段較厚的 T91 短

管，以相同厚度的 T91/T22 焊接可減少熱應力造成失敗的問題；

- 2、脫碳：T22 含碳量較高，若使用 G91 焊材將會在 T22 側形成脫碳，而發生強度不足的情形，因此仍以 <3%Cr 的 9018-B3 焊條較佳。
- 3、熱處理溫度：G22 的 PWHT 溫度為 650~675C，G91 的 PWHT 溫度為 730~790C，若使用 G91 的高溫退火將會把 G22 材料過熱造成殘留沃斯田鐵或軟化的肥粒鐵，強度將不足而發生破壞，若退火溫度降低將使 G91 材料太硬，其破壞韌性不足易破裂，依 AWS D10.10 可以將退火溫度折中為 704C，但 PWHT 的溫度控制必須更為精準，否則易發生失敗的情形。
- 4、Type IV 損壞：雖然發生在母材 FGHAZ/ICHAZ 的軟化區，但此區的尺寸很小，幾乎像焊接的溶接線形邊界，很難以硬度來檢測發現，而其潛變破壞的過程僅在潛變空孔形成後微裂初始即以脆裂方式破壞，潛變的壽命約正常的 25% 左右，故為研究計劃中的重要題目。

(二) P87 Filler Metal 的開發及回火鐸珠技術

CSEF 合金鋼與不鏽鋼之間的異種金屬焊接由 EPRI 開發 P87 焊材，主要調整微量金屬成份，以改善合金鋼碳遷移至不鏽鋼而降低其強度，同時降低熱膨脹係數差異，延長焊接管材壽命。此外回火鐸珠技術也是目前 EPRI 進行重要研究項目之一，因為 PWHT 對 Grade 91 材料為必要的過程，才能維持其抗潛變的特性，但現場維護焊接工作尤其是大尺寸工件，要進行焊後熱處理有相當的困難；開發研究如何不需 PWHT 的技術需求強烈。回火鐸珠的

維護技術目前EPRI正在進行中，仍有待解決的問題，其效果尚未能確認，將列為P87下年度的研究計劃項目之一。

肆、結論與建議

- 一、 新建機組的材料及安裝的品檢制度：對於超臨界機組採用的材料(CSEF 合金鋼)的製造過程，要求在新材料的品質檢驗尤其成份與顯微組織，避開 Type IV 敏感材料成份、正確的原始熱處理(正常化+退火)、設計時避免應力集中等事項，確保其應有的潛變強度，以免在新機組運轉僅數年(10,000~30,000 小時)就發生材料潛變破壞的問題。
- 二、 未來超臨界機組維護品質的要求：超臨界鍋爐必須使用潛變強化材料，鍋爐的維護異於傳統亞臨界鍋爐材料，焊接的品質重要性成為最關鍵的工作，唯有合適的焊接程序才能獲得正確組織，尤其現場施工品質提升一直是有待努力地方。因此為確保焊接品質，除要有焊工證照外，亦需具備熱處理證照等要件，因此建議於工程(作)決標後開工前要求承商技工到本公司特定單位實際試做以驗證其品質是否符合要求。
- 三、 發展高階相陣超音波檢測 (Advance Phase Array)的技術：對於材料的檢測方法在高溫潛變材料上，國際普遍使用高階相陣超音波檢測 (Advance Phase Array)的技術，因其敏感度高檢測技術對於微裂 (Micro crack)的偵測可發現早期材料缺陷，儘早予以處理，唯檢測上需有經驗的人員判讀，本公司電力修護處已有發展此技術，期望能累積經驗應用於未來新建超臨界機組上，增加機組的可靠度。
- 四、 建立微區取樣技術 (small punch) 以評估材料潛變疲勞壽命：此項技術係於汽機或鍋爐構件上直接挖取微小尺寸之試樣，再於實驗室建立潛變疲勞壽命曲線，以評估構件之剩餘壽命，由於此一技術被歸於可接受之非破壞性工法且具有高效能優勢，目前 EPRI 正積極開發研究中，值得本公司之研究發展方向規劃參考。

伍、參考資料

1. J. Shingledecker , J. Siefert “Creep Strength Enhanced Ferritic (CSEF) Steel Welding Guide “ December 2011 , EPRI 。
2. J. Shingledecker , “Development of an Integrated Model to Predict and Control Oxide Scale Exfoliation ” , December 2011 , EPRI 。
3. K. Coleman , ” Service Experience with Grade 91 Components “ , Technical Update, August 2009 。
4. Meeting material of “International Conference on Advances in Condition and Remaining Life Assessment for Fossil Power Plants - Coal, Gas and HRSG” , October 17-19, 2012 Omni Hilton Head Oceanfront Resort, EPRI.