

出國報告（出國類別：開會）

# 參加 EPRI 87 計畫之研究成果技術 轉移會議及焊接技術討論

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：謝運華 / 機械工程師

派赴國家：美國

出國期間：102 年 6 月 19 日至 102 年 7 月 1 日

報告日期：102 年 8 月 26 日



## 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 計畫之研究成果技術轉移會議及  
焊接技術討論

頁數\_\_\_\_ 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)80782211

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：102 年 6 月 19 日~102 年 7 月 1 日 出國地區：美國

報告日期：102 年 8 月 26 日

分類號/目

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

內容摘要：

超臨界發電技術自 1960 年代即從亞臨界發電技術發展而來，期間隨者材料發展成熟而使運轉溫度與壓力逐漸增高，也因而提高發電效率，不久將來將進入 34.5MPa、760°C 之高效率先進超臨界發電（A-USC）時代。美國電力研究機構（EPRI）是發展推動超臨界材料

技術之先驅，其推動之 P87 研究計畫除了主要執行超臨界材料高溫性能研發、設備保固檢測與壽命評估、材料焊接技術外，亦不斷蒐集世界各國之運轉經驗與設備修護資料，作為後續改善問題方法與新材料發展之依據。本公司自 100 年參予該項研究計畫（EPRI-P87）獲致相當多寶貴技術資料，此次參予該機構舉辦之技術轉移研討會議，內容涵蓋 T23/24 與 Grade 92 材料之特性、Grade 91 材料之銲修（Weld Repair）與硬面處理（Hardface Disbonding）、超臨界材料之潛變疲勞、焊接技術、腐蝕/氧化、熱處理、FGD 腐蝕對策等議題，透過此一會議研討更深入了解材料高溫特性、潛變疲勞劣化機制、氧化層剝落機理、焊接製程設計及壽命評估技術等等，對未來機組運轉維護技術之提供有相當正面效益。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

(<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

# 目 錄

出國報告審核表	1
出國報告提要	2
目錄	4
表目錄	5
圖目錄	5
一、 前言	8
1.1 出國緣起	8
1.2 行程與內容	9
1.3 出國任務	10
二、 研討會內容與焊接技術討論	11
2.1 參加 EPRI P87 之計畫目的與效益	11
2.2 技術轉移研討會內容	12
2.3 Grade 23/24 與 Grade 91/92 材料	16
2.4 潛變疲勞損傷行爲	17
2.5 材料焊修製程	30
2.6 腐蝕、氧化與剝落	34

2.7 氧化層剝落導致之破管案例-----	38
三、 結論與建議-----	43
四、 參考資料-----	44

## 表 目 錄

表 1 出國行程及工作概要-----	9
表 2 Grade 91、92 材料之臨界氧化層厚度、金屬溫度與運轉時數之關係-----	36

## 圖 目 錄

圖 1 技術轉移研討會會場-----	12
圖 2 技術轉移研討會內容-----	13
圖 3 EPRI P87 計劃研究成員-----	15
圖 4 Fossil Materials Research 大型計畫研究導向 規畫情形-----	15
圖 5 疲勞、潛變與兩者交互影響之示意圖-----	18
圖 6 High/Low creep-ductility 材料之潛變疲勞特徵 示意圖-----	19

圖 7	潛變傷害實例 (1) -----	19
圖 8	潛變傷害實例 (2) -----	20
圖 9	潛變傷害實例 (3) -----	20
圖 10	Round-robin testing program 測試結果圖(1)--	21
圖 11	Round-robin testing program 測試結果圖(2)--	22
圖 12	不同材料受到潛變疲勞影響之壽命曲線與材料 僅單純受到潛變或疲勞影響之壽命曲線圖 -----	24
圖 13	受到潛變疲勞影響之材料實例 -----	24
圖 14	一般對於潛變疲勞之研究過程 -----	25
圖 15	熱流模擬與計算 -----	25
圖 16	溫度與應力模擬與計算 -----	26
圖 17	從應力、壓力對運轉時間曲線圖中，分別找出 相對應之潛變壽命與疲勞壽命 -----	27
圖 18	Creep-Fatigue Damage Envelope -----	28
圖 19	Creep-Fatigue Damage 實驗結果 -----	28
圖 20	Insignificant Cyclic Loading -----	29
圖 21	Significant Cyclic Loading -----	29
圖 22	常見之須焊修實例 -----	31
圖 23	典型之 Type IV cracking 焊修實例 -----	31

圖 24	使用 2Cr 焊材焊修材質為 $\frac{1}{2}$ CrMoV 之基材 ( 600 ° C 下 ) -----	32
圖 25	材質為 Grade 91 之集管冷焊焊修實例 -----	33
圖 26	9Cr Weld vs Bell Type IV at 600 ° C 實驗結果--	33
圖 27	氧化層剝落造成爐管局部過熱破損實例 -----	34
圖 28	氧化層熱膨脹係數隨溫度變化圖 -----	35
圖 29	氧化層厚度隨彈性應變變化之阿米特圖 -----	35
圖 30	氧化層剝落整合性預測與控制模型 -----	37
圖 31	不同晶粒結構與氧化速率比較圖 -----	37
圖 32	不同晶粒結構、不同溫度與運轉時間之氧化層 剝落堵塞預測比例圖 -----	38
圖 33	破損之樣品外觀 -----	39
圖 34	製備完成之金相試片外觀 -----	40
圖 35	爐管內壁氧化層 ( 左 ) 與氧化層碎片 ( 右 ) 厚 度與外觀 -----	40
圖 36	爐管各面向之氧化層厚度量測顯示厚度均勻 --	41
圖 37	氧化層結構與先前之研究結果比較 -----	41



# 一、前言

## 1.1 出國緣起

本公司現有之燃煤火力發電廠，其每部亞臨界機組發電容量為 300~500MW、主蒸汽出口溫度 560 °C、壓力 17.8 MPa，發電效率 36 %。為因應政府節能減碳政策，本公司除了積極推動二氧化碳捕捉和儲存技術研究外，同時汰換低效率之發電機組、改興建高效率之超臨界火力機組。目前興建中之超臨界機組有林口發電廠（3 部）和大林發電廠（2 部），每部機組之裝置容量均為 800 MW、運轉參數之主蒸汽溫度 600 °C、壓力 24.1 MPa，發電效率可達 42.1 %。由於超臨界火力發電機組之運轉溫度與壓力均遠高於亞臨界機組，故其使用之設備材料性能要求更為嚴苛，而且本公司過去亦無超臨界機組運轉經驗，因此要確保未來運轉可靠度與安全性，有必要廣泛收集資料參與國際研究計畫以及吸收可貴運轉經驗。

本公司自 100 年起即參加美國電力研究院（EPRI）之 P87 研究計畫，為期 3 年，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 102 年 6 月 19 日至 7 月 1 日到美國佛羅里達州德斯汀城市參加超臨界材料研發成果會議，以及訪問位於北卡

羅萊那州夏洛特城市之 EPRI 實驗室，並與其計劃負責人做技術研討及交流。

## 1.2 出國行程與內容

此次利用 EPRI P87 計畫之保留基金前往美國參加 EPRI 會議，自 102 年 6 月 19 日到 7 月 1 日，總計 13 天，行程如表 1 所示：

表 1 出國行程及工作概要

日期	地點	內容
6/19~20	台北→舊金山→夏洛特	去程
6/21	夏洛特	拜訪 EPRI 材料實驗室
6/22	夏洛特→德斯汀	路程
6/23	德斯汀	假日
6/24~28	德斯汀	參加 EPRI 87 計畫研 究成果技術轉移會議
6/29~7/1	德斯汀→舊金山→台北	返程

### 1.3 出國任務

先進的超臨界或超超臨界機組將成為本公司未來新機組型式，由於此類機組，是在較高之溫度與壓力等運轉參數條件下以獲致高效率，而其材料開發及設備維護均異於傳統機組，因此材料性能成為該類機組之安全與可靠度之關鍵技術，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。

## 二、研討會內容與焊接技術討論

### 2.1 參加 EPRI P87 之計畫目的與效益

EPRI P87 研究計畫執行內容主要針對超臨界材料進行高溫性能研發、設備保固檢測與壽命評估、材料焊接技術、國外運轉經驗交流、設備組件修護實務等一系列之開發研究，該項研究由資深計畫經理 J. Shingledecker 博士主持，在其團隊下有 J. Parker、J. Siefert、D. Purdy、E. Owensby 等人，分別負責不同項次之研究，計畫主要效益有：

- A. Improved materials selection guidance and procurement specifications.
- B. Guidance and best practices for welding and repair of high-temperature components.
- C. Reduction of failures from high and low-temperature corrosion.
- D. Understanding damage mechanisms due to increased cyclic service.
- E. In-depth knowledge of advanced alloys and fabrication processes.
- F. Technology transfer of key metallurgical information utilizing web-based tools.

透過該研究計劃，可深入了解材料特性，進而改善焊接與製造製

程，及掌握材料劣化機制，最後達到改善各項組件之壽命目的。



圖 1 技術轉移研討會會場

## 2.2 技術轉移研討內容

本次會議內容如圖 2，第一天主要闡述 T23/24 與 Grade 92 材料之特性，第二天內容為 Grade 91 材料之銲修 (Weld Repair) 與硬面處理 (Hardface Disbonding)、第三、四、五天涵蓋超臨界材料之潛變疲勞、焊接技術、腐蝕/氧化、熱處理、FGD 腐蝕對策等等議題。

Day	Meeting	Who Can Attend
Monday 8am-12	T23/24 Supplemental Project	Supplemental Project Funders Only
Monday 1-5pm	Gr. 92 Supplemental Project	
Tuesday 8am-12	Grade 91 Weld Repair	
Tuesday 1-5pm	Hardface Cracking Supplemental Project	
Wednesday 8am-5pm	EPRI Material's Forum •Creep-Fatigue •Oxidation/Corrosion •Weld Repair	Open to All -Free to P87 Members -Small fee for non-Members
Thursday 8am-12		
Thursday 1-5pm	EPRI Program 87 Technology Transfer Meeting: SPT, heat-treatment, Temperbead, Shot Peening, hardness	EPRI Fossil Materials & Repair (P87) Funders Only
Friday 8am-12		

**Maximize Value for Program 87 Participants & Engage Industry on Critical and Emerging Materials Issues**

圖 2 技術轉移研討會內容

在上述技術轉移會議之前，EPRI 首先介紹 P87 研究計畫組員，如圖 3 所示，另外又介紹在 Fossil Materials Research 大型計畫研究導向規劃情形，根據圖 4 說明，目前之規劃有三大部分，包括：

- A. 既有之超臨界材料計畫（P87）、時程 0~5 年之基本內容，包括材料特性探討、焊接技術與修護製程、腐蝕。
- B. 策略性計畫（TI），屬於長程（5~20 年）研究計畫，內容有先進火力和核能之材料發展。
- C. 增補型基金資助計畫，包括個別合作計畫、DOE 專案資助之超超臨界材料發展計畫、現有之增強潛變強度（Creep Strength Enhanced Ferritic, CSEF）合金鋼材料增補計畫。

接著介紹 2014 年 P87 超臨界材料計畫預定進行之研究方向，包括材料潛變疲勞資料知識豐富/精緻化、擴充至熱回收鍋爐（HRSG）之非壓力元件與異質金屬材料之設計與選用材料使用手則、先進超臨界不銹鋼材料之應變誘發析出硬化問題、利用微區取樣技術應用到 T22/T91 材料之壽命評估、複雜組件之現場銲後熱處理方法以及 CSEF 材料之銲道殘留應力量測技術...等。

在 2013 年下半年度，EPRI 將舉辦之 P87 計劃相關會議與課程如下：

- A. 8 月 20~22 日，P87 計劃破損分析課程，在夏洛特 EPRI 實驗室舉行。
- B. 10 月 21~25 日，EPRI 第七屆先進材料會議，內容涵蓋 Grade 92、23 與 24 之材料研究計劃、Grade 91 材料焊道修復技術、Hardface Disbonding 研究計劃與 FGD 腐蝕議題，在美國夏威夷州舉行。

Name	Contact	Pre-EPRI Experience	Research Areas	
John Shingledecker (Program Lead)	704-595-2619 <a href="mailto:jshingledecker@epri.com">jshingledecker@epri.com</a>	Oak Ridge National Laboratory (high-temperature mechanical testing)	Mechanical behavior, Metallurgy, Computational thermo, Corrosion	
John Siefert	704-595-2886 <a href="mailto:jsiefert@epri.com">jsiefert@epri.com</a>	B&W Research (welding engineer)	Welding, weld performance, Metallurgy, Wear/erosion	
Jonathan Parker	704-595-2791, <a href="mailto:jparker@epri.com">jparker@epri.com</a>	Structural Integrity, Failure Analysis, Swansea, CEGB (power plant materials)	Advanced steels, Weld performance, Metallurgy, Micro. Development, NDE for materials	
Dan Purdy	704-595-2603, <a href="mailto:dpurdy@epri.com">dpurdy@epri.com</a>	GE (Steam turbine & generator materials)	Turbine materials, laboratory testing, general materials project support	
Elizabeth Owensby	704-595-2716, <a href="mailto:eowensby@epri.com">eowensby@epri.com</a>	ATI Allvac, Rocketdyne	Laboratory testing, general materials project support	

圖 3 EPRI P87 計劃研究成員

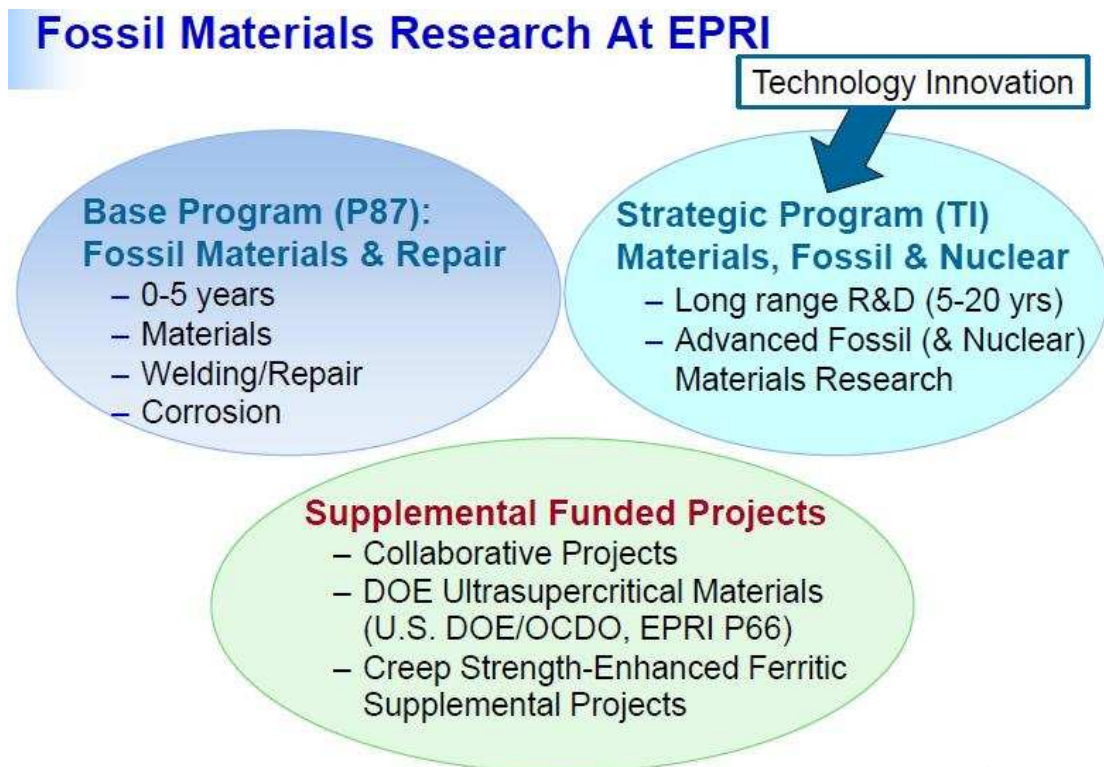


圖 4 Fossil Materials Research 大型計畫研究導向規劃情形



## 2.3 Grade T23/24 與 Grade 91/92 材料

由於近期 T23/24 材料用於水牆管或蒸發器管時，有不少產生 cracking 的案例發生，其原因可能與 S C C、H I C 或是 R H C 有關；再深入探究時，S C C、H I C 或是 R H C 之原因除了與鍋爐水質有關以外，與建造時之焊接程序亦有關聯。

EPRI P87 計劃內其中一項子計劃即針對 T23/24 材料之焊接回火行爲與材料本身特性作一研究，目標即在建立焊接時焊材與熱影響區之轉換溫度 (transformation temperatures)，以及透過不同區段之時間和不同溫度組合之回火行爲，建立新的、適當的焊接回火參數 (tempering parameters)。本子計劃預計進行的時間爲 2 年、研究經費爲 4 萬美元。

EPRI P87 計劃內另外一項子計劃是針對 Grade 92 材料進行壽命管理 (life management)，目標在訂出建議之製造方法與條件 (recommend methods and conditions for fabrication)，並提供對於 T/P 92 材料評估管理之策略 (strategy for asset management)。此子計劃預計進行 3 年，預計研究經費爲 9 萬美元。

關於 Grade 91 材料，EPRI P87 計劃內之子計劃是針對大型管件與組件之 Grade 91 材料焊道修補，包含如何能夠有效率的進行焊修、焊補與鏟修不良之焊道等現場工法，計劃中將發展出新的 Grade

91 材料之大型管件與組件焊修法。此子計劃預計先進行 2 年，預計研究經費為 6 萬美元。

另外，對於複循環機組硬面材料( **Hardfacing Alloys** )之閥( **Valve** )常出現裂痕( **cracking** )甚至於硬面層與基材分離( **disbonding** )情形，**EPRI P87** 計劃內亦提出子計劃進行硬面材料之破壞原因機制分析、蒐集與統計、處理方法等進行方法，最終目標是提出在傳統電廠環境下使用之 **Cr-Mo** 合金鋼材料，或新型電廠環境下使用之 **9Cr-1Mo** 材料，皆可適用之使用指引。此子計劃預計先進行 2~3 年（視合作之電廠對象而定），預計研究經費為 5 萬美元。

#### 2.4 潛變疲勞損傷 (Creep Fatigue Damage in Power Plant Steels)

在電力供應系統裡，複循環或超臨界機組因具有快速起停功能，因此對變化性( **variable** )需求較大之電力供應系統而言，該類機組逐漸扮演重要的角色，**EPRI** 自 2006 年起，對於複循環或超臨界機組舉辦多次彈性操作( **flexible operation** )之 **workshop** 以來，在歷屆之議題當中，常提出之問題有以系統整結合性( **Integration of systems**，比如說 **Output from GT as input to HRSG** 等)、運轉過程之參數多變化( **Variations / Inconsistencies in specifications**，如 **purge, startup, shutdown, hot, warm, cold, drum pressure at startup** )等相關問題最多，其中以複循環機組之熱回收鍋爐( **HRSG** )

或超臨界機組鍋爐所發生之潛變疲勞（creep fatigue）議題為最常見且重要。

疲勞（fatigue）、潛變（creep）與兩者交互作用下之示意圖如圖 5~6 所示，疲勞特徵為穿晶裂紋，主要由於材料受到循環應力（包含機械應力與熱應力）之作用；潛變特徵為沿晶界分布之潛變空孔，進而聚集成為沿晶微裂紋。然而兩者交互作用之下，易使得破壞機制變得非常廣泛。部份之潛變傷害實例照片如圖 7~9 所示，其中沿晶微裂紋並不一定代表材料為 low creep-ductility 材料。

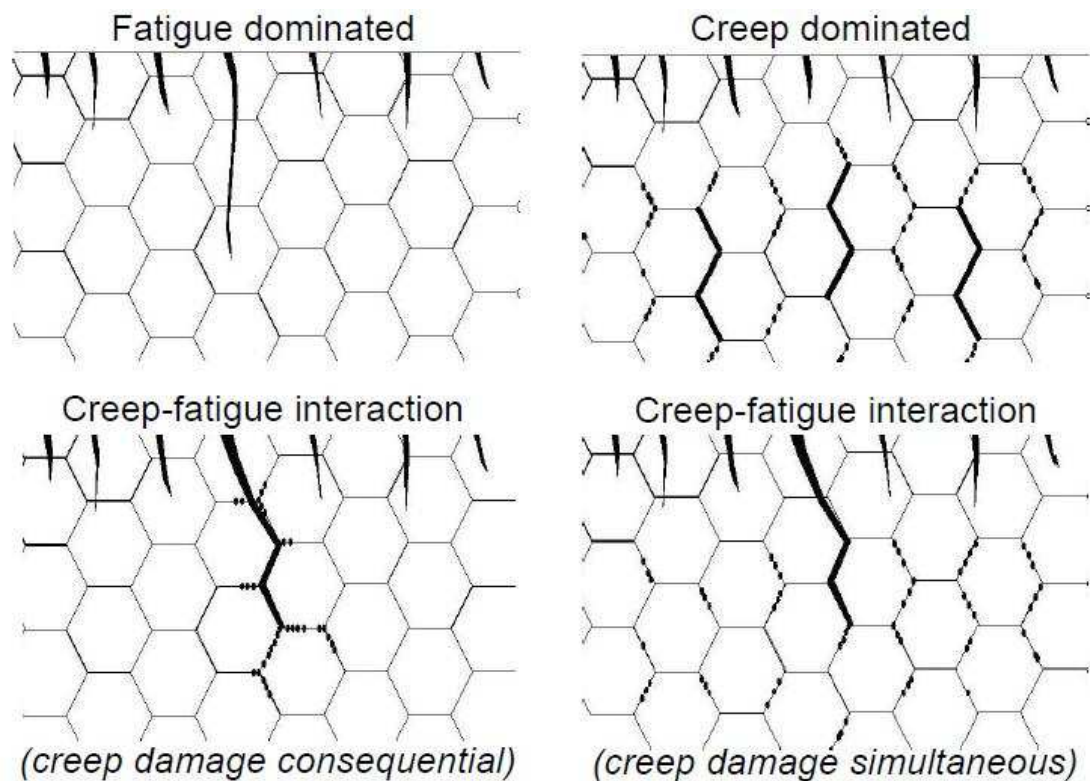


圖 5 疲勞（fatigue）、潛變（creep）與兩者交互影響之示意圖

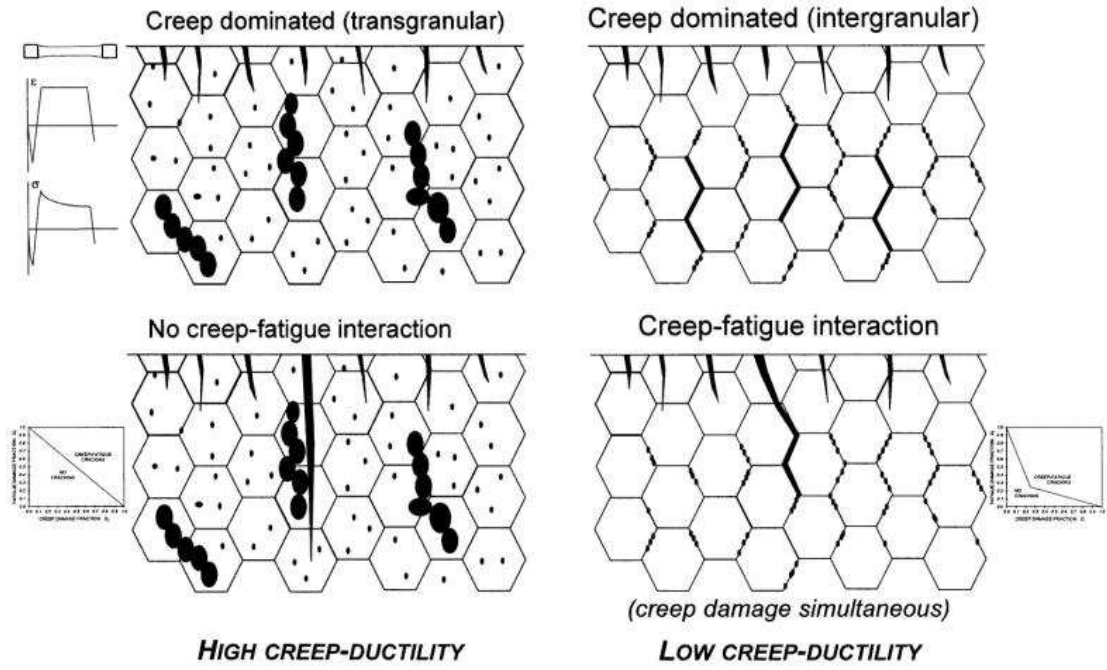


圖 6 High/Low creep-ductility 材料之潛變疲勞特徵示意圖

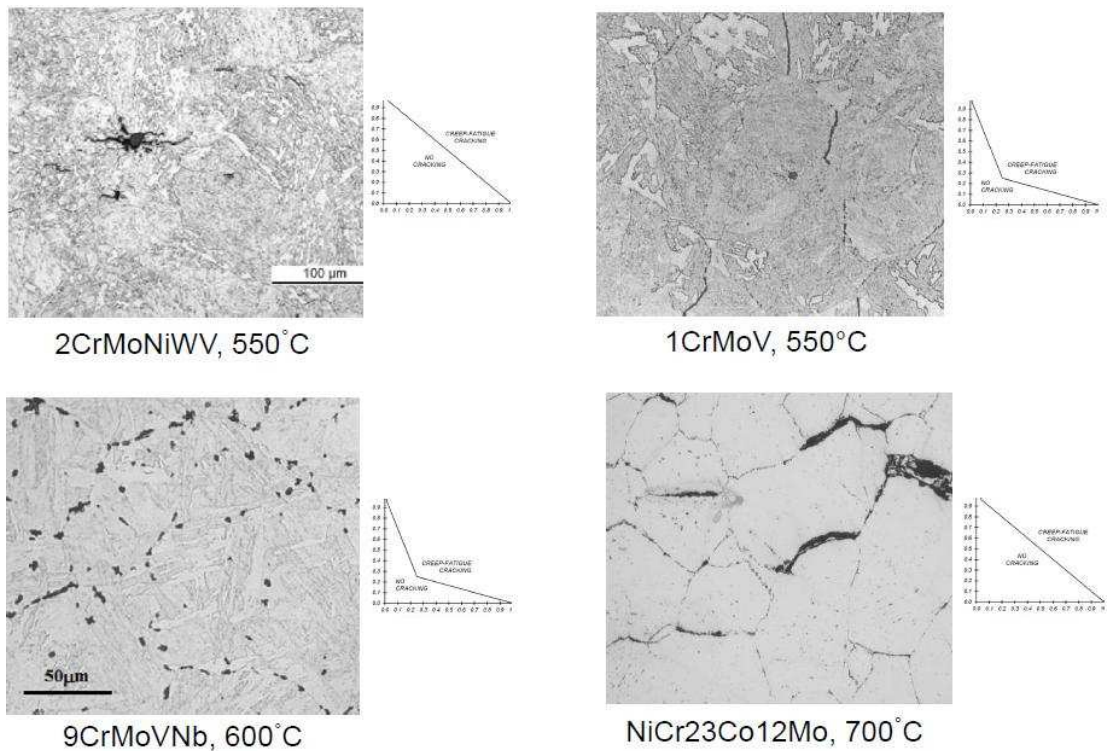
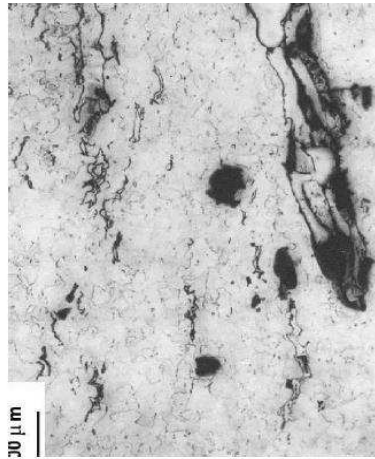


圖 7 潛變傷害實例 (1)



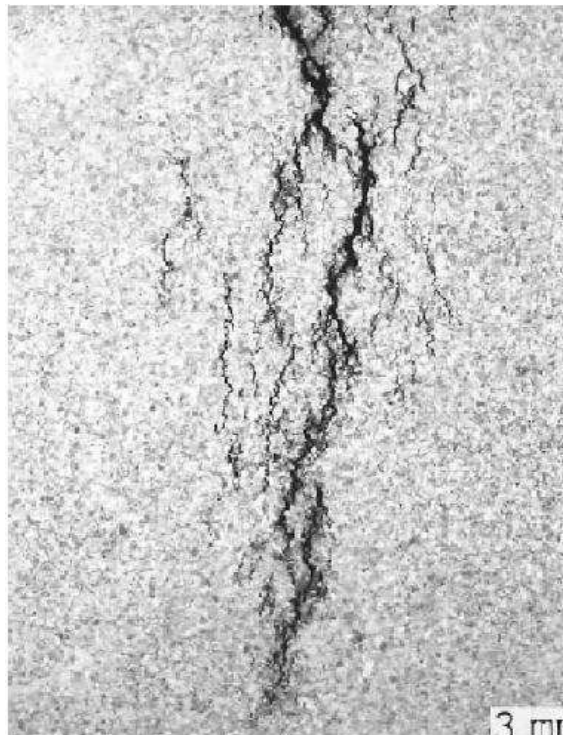


Multiple intergranular cracking in a 1CrMoV rotor which had run for 52,000h, with 190 starts [Skelton]

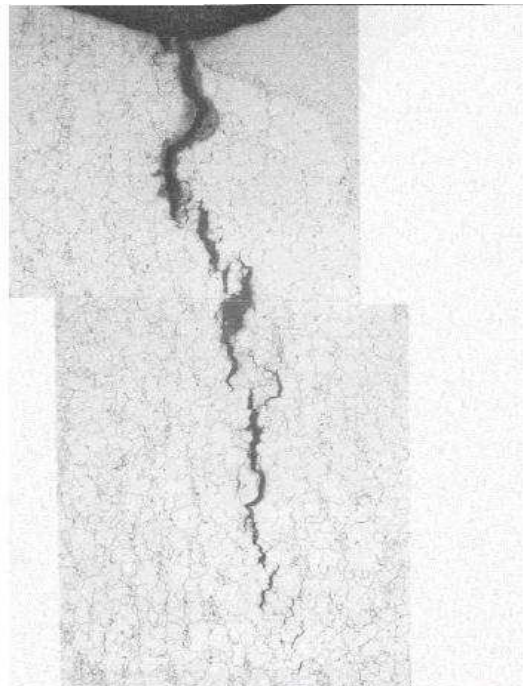


Tip of a major crack interacting with grain boundary creep damage in 1/2CrMoV component which had operated for 100,000h at 500°C with 2000 starts [Skelton]

圖 8 潛變傷害實例 (2)



Cracking in AISI 316 steam pipe taken from Eddystone Unit 1 supercritical power station in 1883 after 130,520h, and 315 start-up/shut down cycles [Masuyama]



Cracking in austenitic (AISI 316H) steel superheater pipework, 515-530°C [Skelton]

圖 9 潛變傷害實例 (3)

有鑑於潛變疲勞問題逐漸受到重視，因此 EPRI 與 ASTM 合作，針對 creep-fatigue 制定了 ASTM E2714-09（潛變疲勞測試法）與 ASTM E2760-10（潛變疲勞裂紋成長測試法）兩標準，作為無明顯缺陷之均質與非均質材料受到循環應力作用下，在潛變溫度範圍時，潛變疲勞裂紋產生以及成長幅度之評估準則。

EPRI 先前曾對於 ASTM E2714-09 規範，以 Grade 91 材料為測試樣品，舉辦了循環測試計劃（round-robin testing program），邀集各國從事相關研究之實驗室進行能力競賽，內容是採用應變控制之潛變疲勞測試（strain controlled creep-fatigue test），測試條件在 625 °C 環境下、三種不同應變振幅，最終成功蒐集了 13 組實驗數據，本次在會場上展示此一實驗數據結果，如圖 10~11 所示。

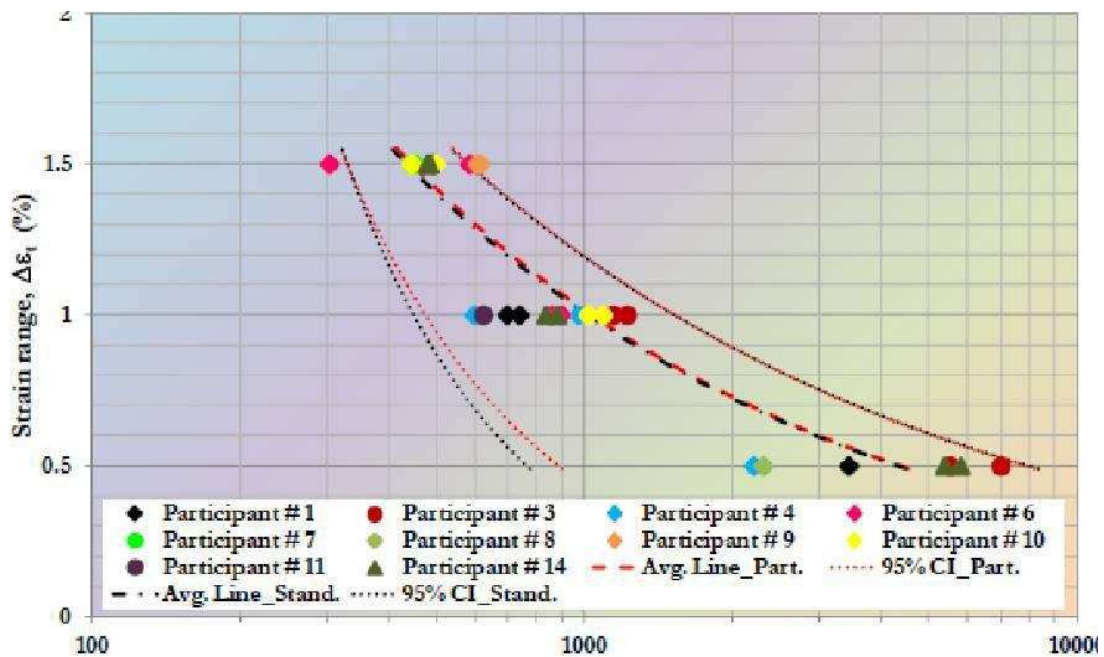


圖 10 Round-robin testing program 測試結果圖(1)

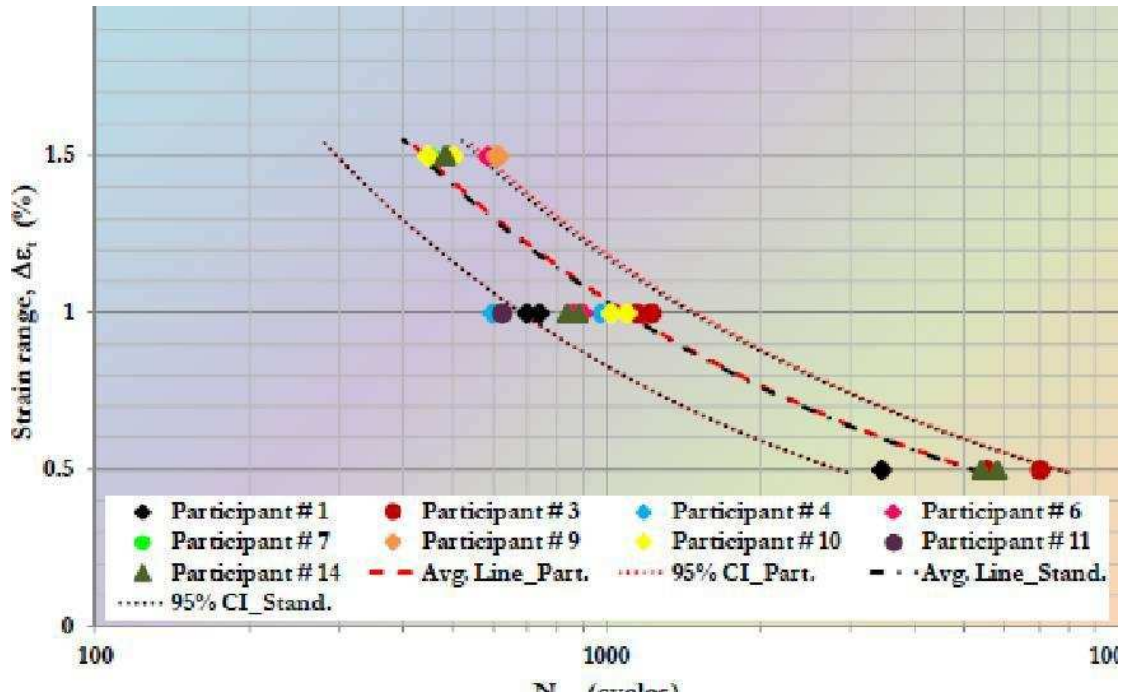


圖 11 Round-robin testing program 測試結果圖(2)

值得注意的是，評估統計發現，在 95%信心水準下，部份實驗數據變動幅度偏大，經深入分析其結果，發現其試驗條件具有過長之試片夾持時間、較低應變等原因，造成其實驗結果變動率較大。也因此針對實驗結果變動率較大之試樣，EPRI 建議必須對於試樣進行金相觀察，以確認該試樣潛變疲勞文是否在試樣之標距長度（gage length）內生長，且試樣不得有彎折或擠凸狀況，由此判斷當次測試是否成功；EPRI 預計即將進行之潛變疲勞裂紋深度測試計劃，持續以 Grade 91 材料作試樣，再加入以不同加熱方法作為測試條件，以探究不同加熱方法對於試驗結果之影響情形。

一般對於估計運轉中機組材料受到潛變疲勞損害之程度，必須待

機組停機時，對於材料進行常溫機械性質測試、常溫金相觀察、常溫化學成份分析等方式進行材料評估，可發現材料部份之物理性破壞（如裂紋起始點、氧化程度、多條裂紋以及其分支），然而這些測試結果之環境為常溫測試環境，運轉中環境除須佐以運轉條件參考之外，尚須考慮相繼性損害（**sequential damage**）與交互性損害（**interactive damage**）兩額外因素，這額外因素將使材料遭受潛變疲勞之壽命大幅低於材料僅受到潛變或疲勞影響之壽命，如圖 12 所示。因此估計運轉中機組材料受到潛變疲勞損害之程度較為複雜，運轉中機組材料壽命通常低於實驗室試樣對於破壞之忍受程度，降低之比例與焊道、厚壁、複雜幾何形狀、低延性、具缺陷材料皆有關。部份實例照片如圖 13 所示。

目前 EPRI 正在針對最常用之材料進行情資蒐集，並製作成分析人員可供參考之資料，內容涵蓋鍋爐內大型管件常用之鋼材（如 P22、AISI 316、P91、X10CrMoV9-1、P92、E911 等），以及汽機轉子與轉盤材料（如 IN718、IN706、X12CrMoWVNbN10-1-1、IN617 等）。



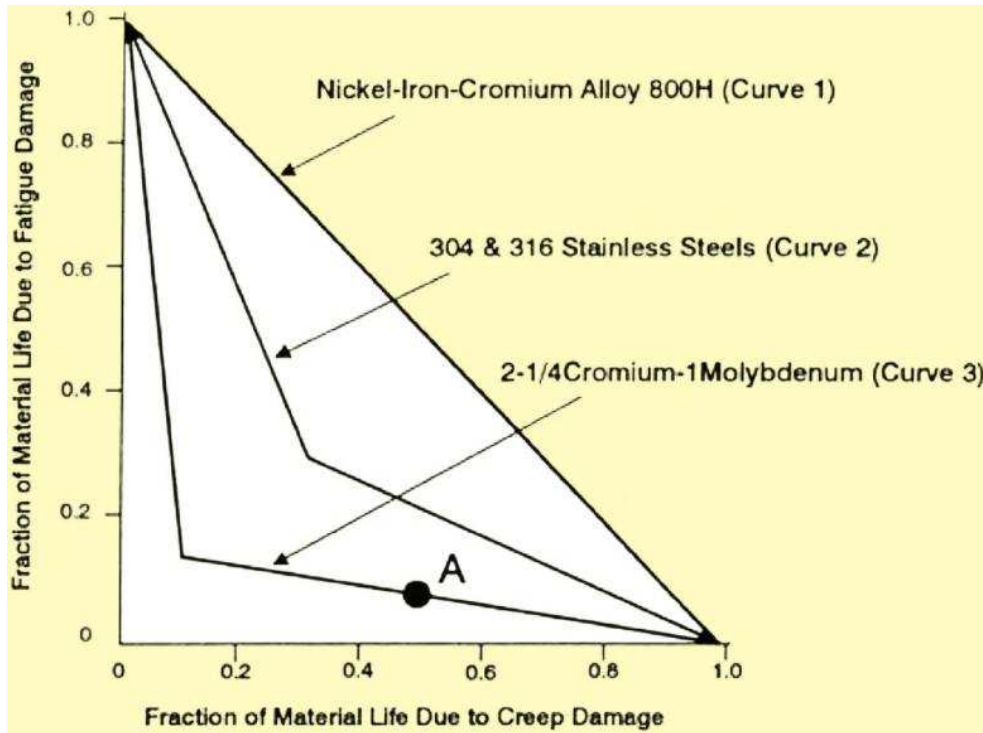


圖 12 不同材料受到潛變疲勞影響之壽命曲線與材料僅單純受到潛變或疲勞影響之壽命曲線圖

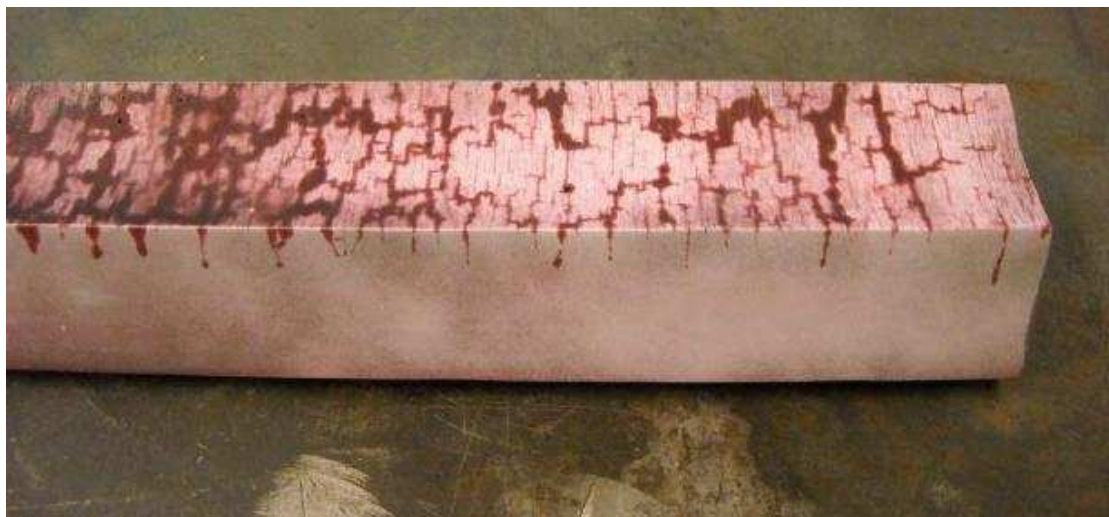


圖 13 受到潛變疲勞影響之材料實例

一般對於潛變疲勞之研究過程如圖 14 所示，首先擷取包含流體溫度、壓力與流質情形等數據之運轉資料，再進行熱交換、熱應力、機械應力及潛變疲勞之動態模擬與計算（如圖 15~16），其中重點因子（如一個完整 cycle 判定、複雜組件幾何尺寸量測數據等）將關係到模擬結果之準確度。

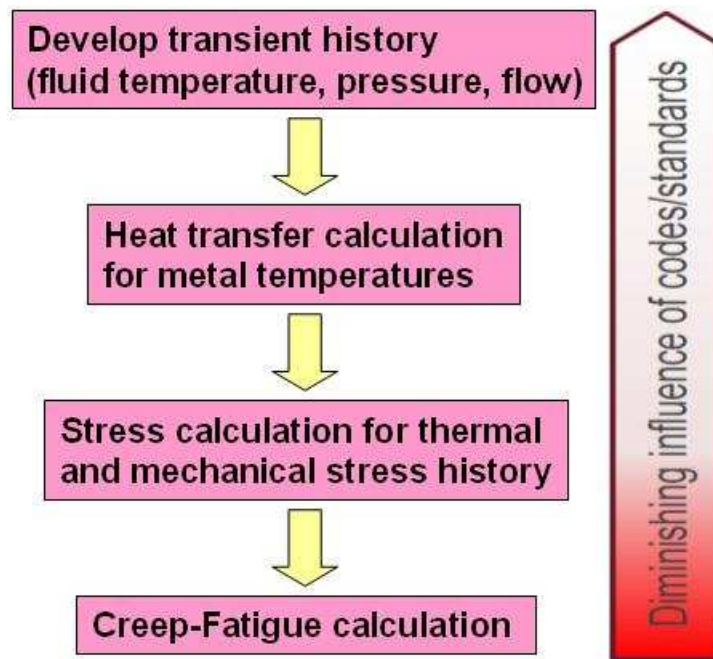


圖 14 一般對於潛變疲勞之研究過程

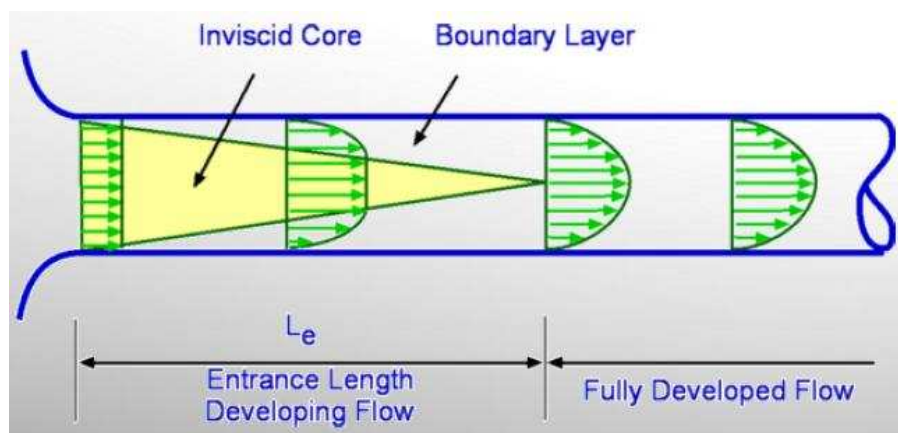


圖 15 熱流模擬與計算

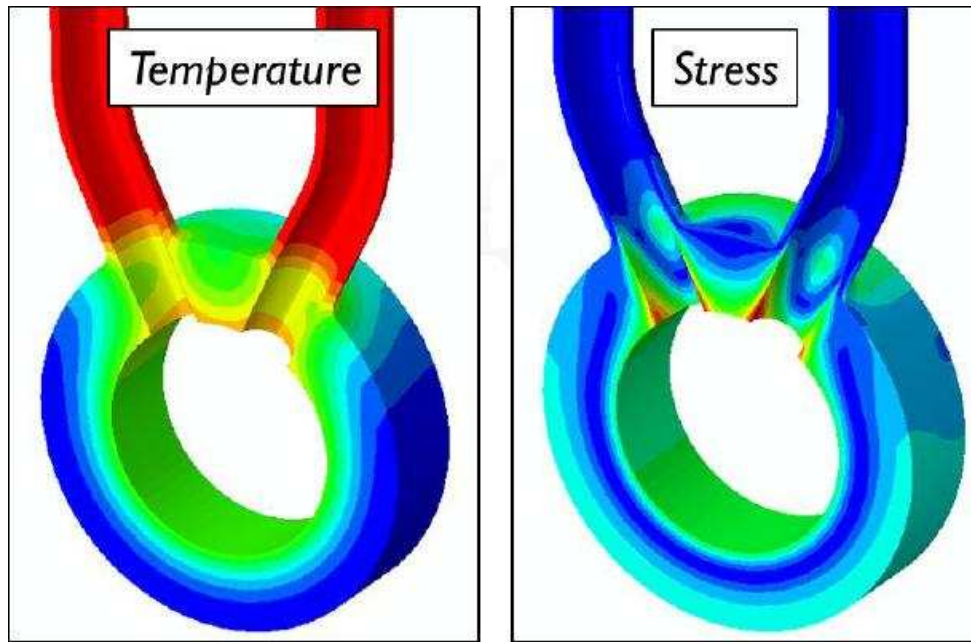


圖 16 溫度與應力模擬與計算

模擬結果首先假設潛變與疲勞不會互相影響，因此從應力、壓力對運轉時間曲線圖中，分別找出相對應之潛變壽命與疲勞壽命，如圖 17 所示，結果再代入交互影響圖（creep-fatigue damage envelope，如圖 18），得出如圖 19 之結果，其中可見大部份材料裡，潛變疲勞互相影響時對材料所造成之影響往往大於、甚至遠大於材料僅單獨受潛變或疲勞之傷害。

至於該如何分辨潛變與疲勞是否會相互影響，可簡易由循環應力來判別，如圖 20~21 所示，當每次循環應力皆小於材料之降伏強度時，稱作 Insignificant Cyclic Loading（圖 20），此時循環負載造成之疲勞不容易與潛變產生交互影響；反之若循環應力常常大於材料之

降伏強度（循環應力範圍過大）時，稱作 **Significant Cyclic Loading**（圖 21），將產生 **start-of-dwell stress reset** 情形，使得疲勞與潛變皆變得容易產生。

以上為潛變疲勞簡易判別方法，詳細之計算仍須蒐集許多資料，如循環應力與應變之真實行為（**actual cyclic stress-strain behavior**）、潛變鬆弛（**creep relaxation**）、潛變應變速率（**creep strain rate**）等。值得注意的是，材料使用時間愈久，其降伏應力會逐漸降低，以及應力評估時須留意應力集中情形，此二種情況將容易造成破壞肇因之誤判。

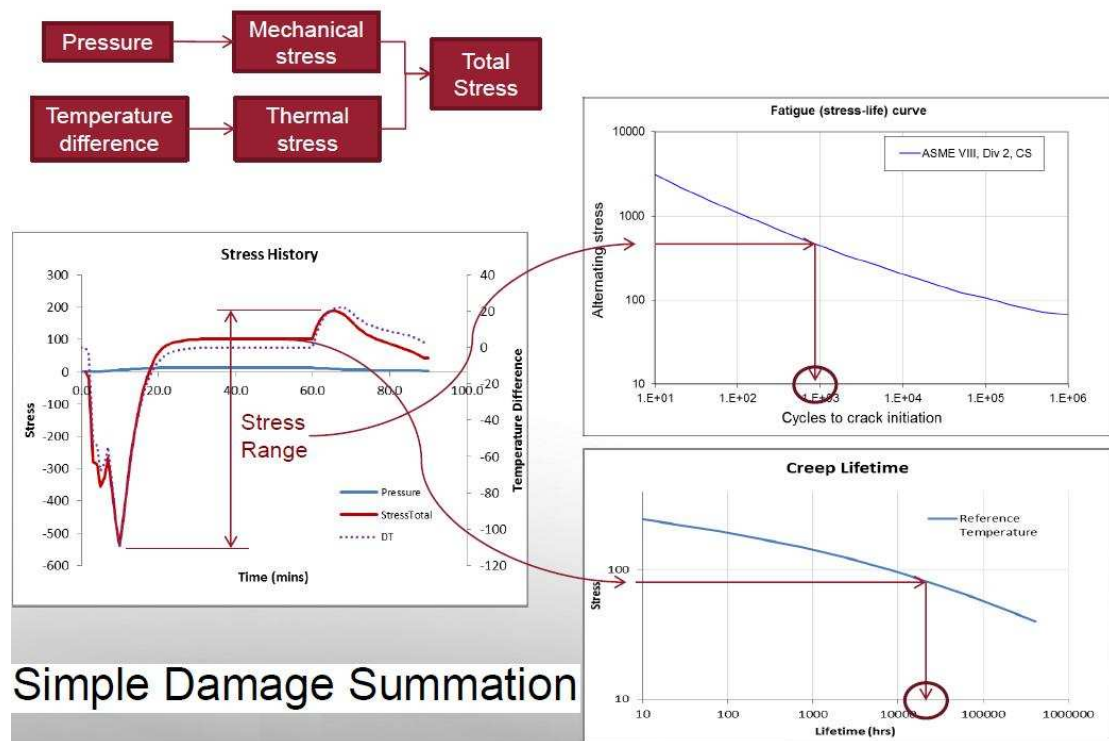


圖 17 從應力、壓力對運轉時間曲線圖中，分別找出相對應之潛變壽命與疲勞壽命

**Figure T-1420-2  
Creep-Fatigue Damage Envelope**

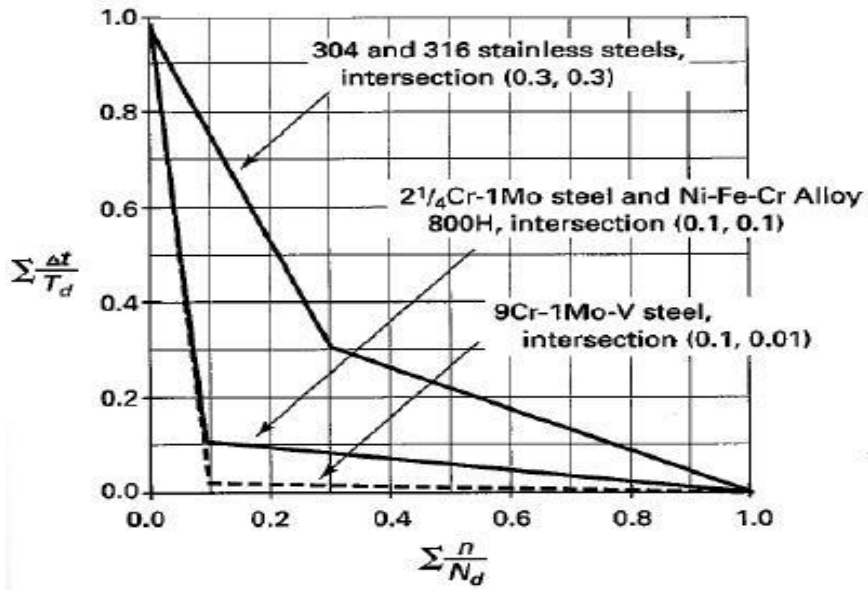


圖 18 Creep-Fatigue Damage Envelope

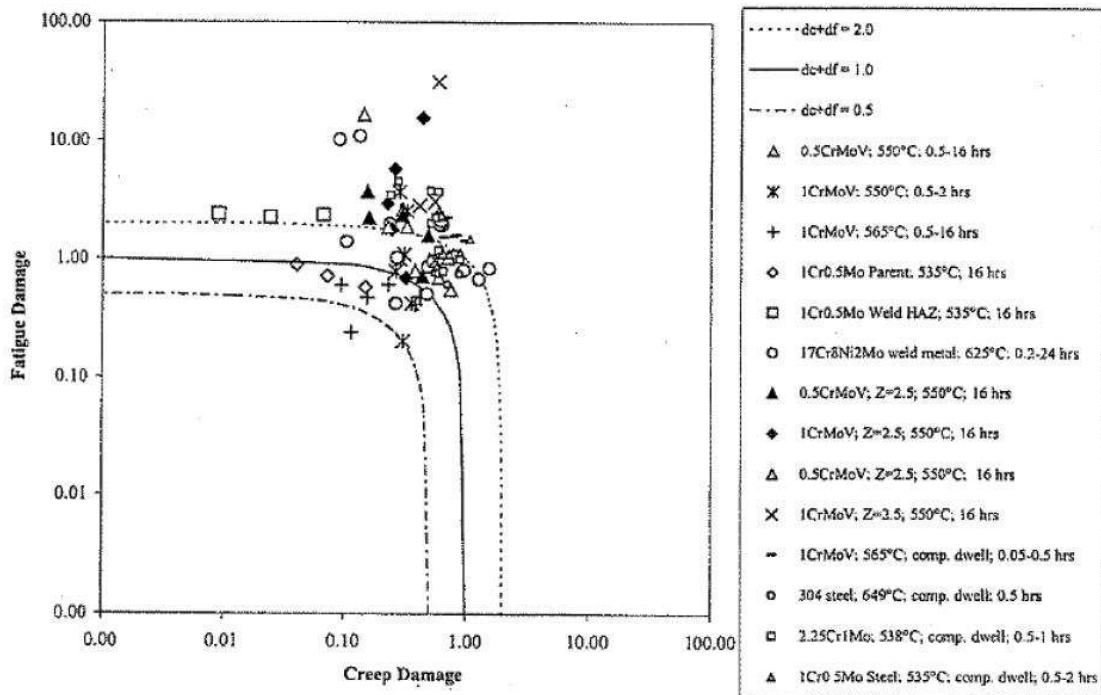


圖 19 Creep-Fatigue Damage 實驗結果



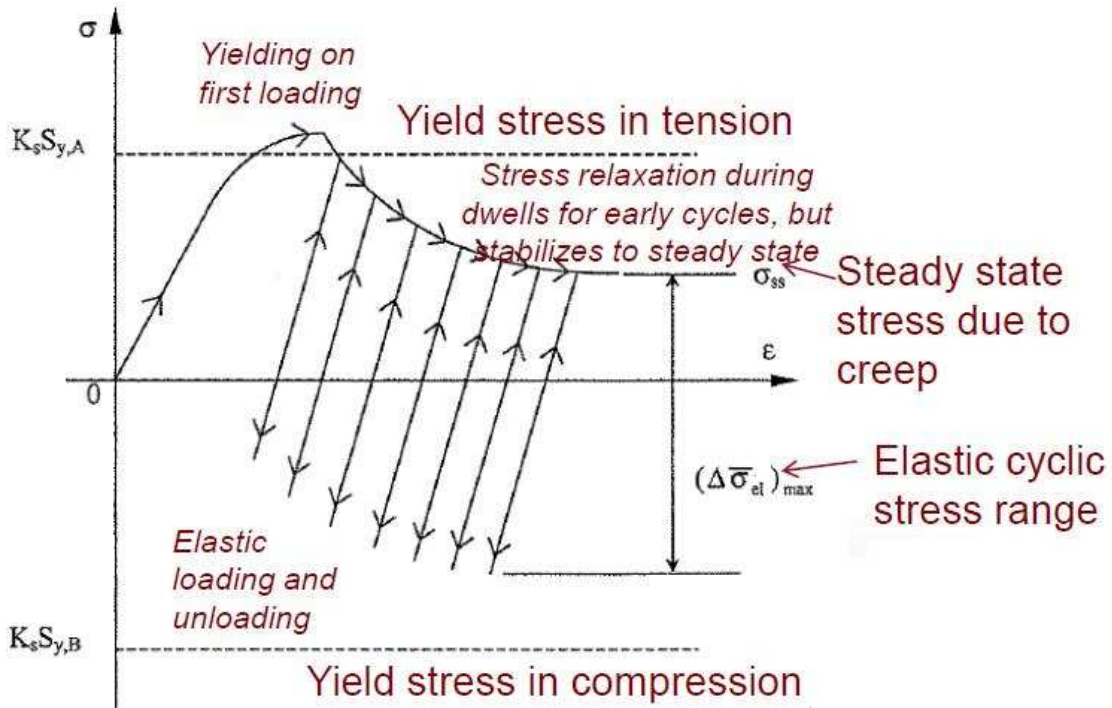


圖 20 Insignificant Cyclic Loading

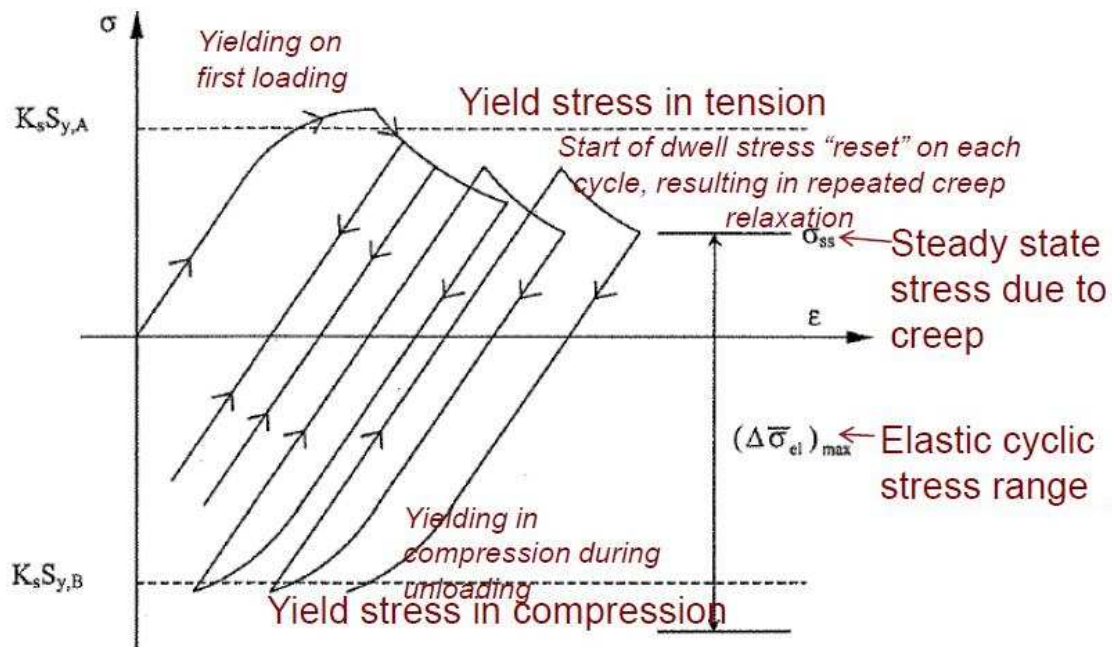


圖 21 Significant Cyclic Loading

## 2.5 材料焊修製程 (Weld Repair)

當壓力容器組件材料受到時各項因素影響（如機械力、腐蝕等）而無法正常使用時，必須透過材料焊修使其恢復原有使用能力；然而焊修前有許多條件必須考慮，如運轉條件（Operating conditions）、檢查歷史資料（Inspection history）、壓力容器之材質（Material of construction of pressure vessel）、損壞肇因（Reasons for failure）、損壞位置（Location of the damaged area）等，判斷是否可以採取焊修以及焊修之適宜度，再決定後續焊修所須採取之程序方法（一般為 ASME 或是 API 510 code，而 NBIC 目前僅在美國使用）。

常見之焊修實例有再熱裂紋（reheat crack）、type IV crack、type IIIa crack 以及鑿孔裂紋（bore crack）等四種，如圖 22 所示，其中發生先後次序為 reheat crack（約 2 萬運轉小時）→ type IV crack & type IIIa crack（約 2~4 萬運轉小時）→ bore crack。典型之 type IV crack 焊修如圖 23 所示，其焊修條件為開槽角度 10~15 度角、約 6 mm 半徑弧度、原管材深度 6 mm、焊道寬度左右增加 10 mm 等。

在焊修金屬選擇（Choice of Weld Metal）方面，歐洲不少火力發電廠服役年限皆超過原始設計之年限，由於實務上焊修作業多數用於組件建造時產生之缺陷與疏漏補強，處理材質老化問題相對較少，為了避免大幅更動原始設計條件，焊修金屬皆選擇潛變強度高於原始

母材強度之材料（如使用 2Cr 焊材用於焊修原始母材為 ½ CrMoV 之低合金鋼，如圖 24，但使用高潛變強度金屬焊修時須施予適合之焊後熱處理），使用潛變強度低之焊修金屬較少見。若對於已有材質老化之組件進行焊修，因基材本身強度（如機械性質、腐蝕行為等）已不如當初建廠時之狀況，故反而選用比基材材質稍弱之焊接金屬進行焊修作業較佳。

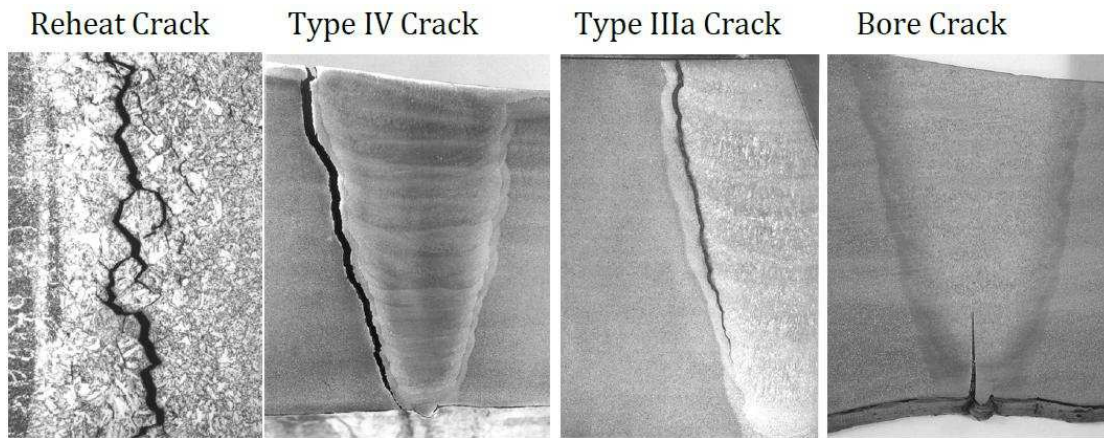


圖 22 常見之須焊修實例

### Typical Type IV Weld Repair

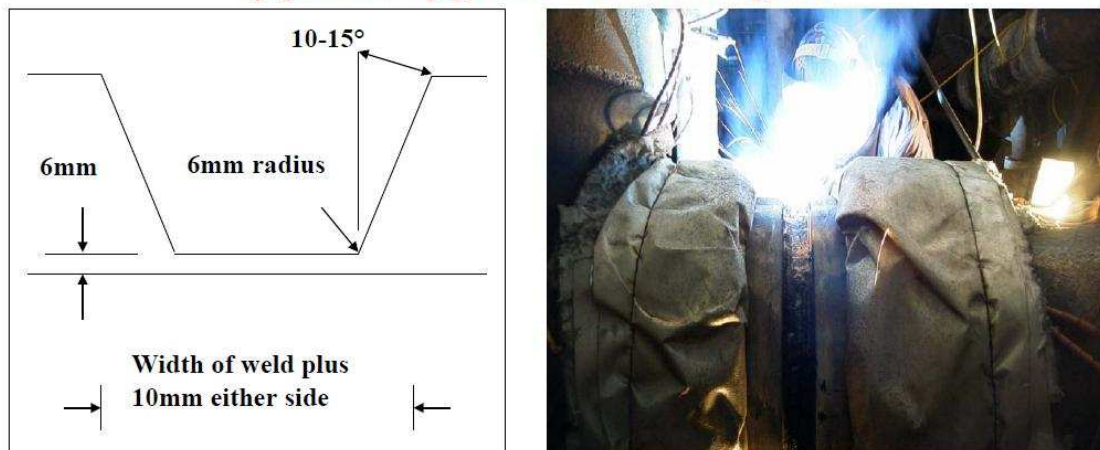


圖 23 典型之 Type IV cracking 焊修實例



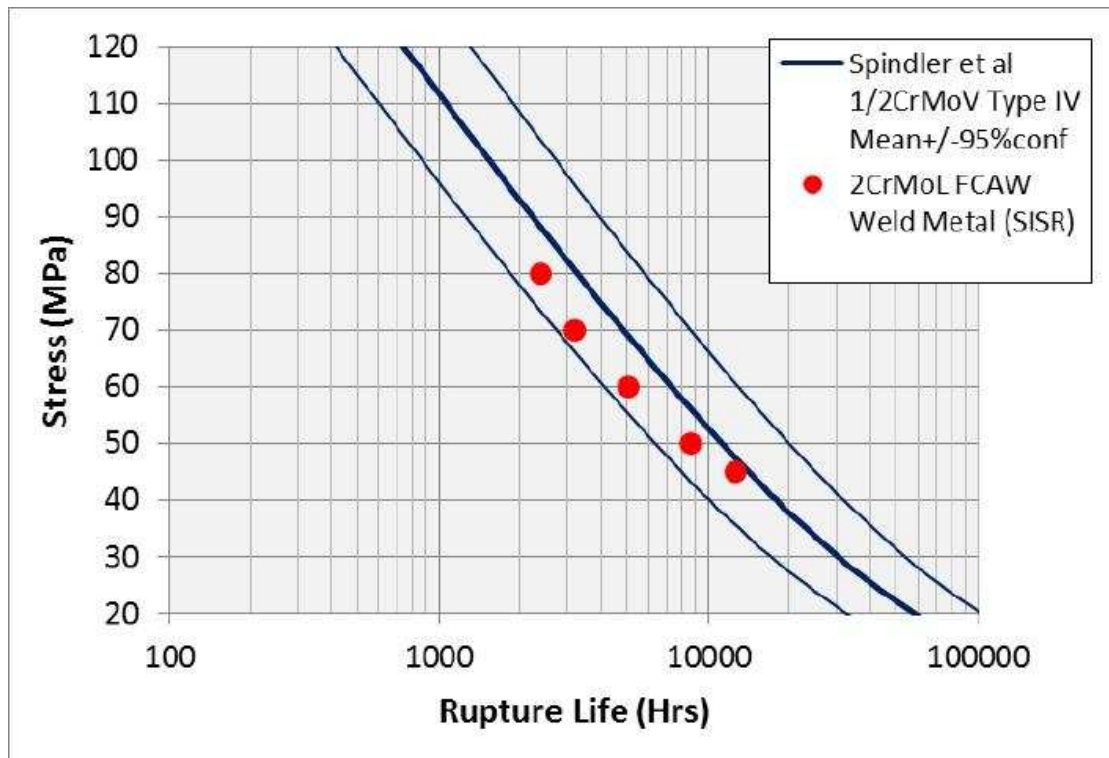


圖 24 使用 2Cr 焊材焊修材質為 1/2 CrMoV 之基材 (600°C 下)

另外一個實例是材質為 **Grade 91** 之二次過熱器集管 (圖 25)，在運轉了 8 萬小時後，發現了分支處有明顯之 **type IV cracking**，當時考慮了許多焊修金屬選用，但各有其缺點，如：**inconel** (強度過強)、**2CrMoL** (強度過低 & 須額外考慮碳化物遷移問題)、**Lower strength Nickel-Based** (存在異種金屬焊接問題)、**Grade 91** (焊材強度比已運轉過一段時間之 **Grade 91** 基材高出不少) 等，最終採取了冷焊 (**Cold Weld**) 與 **Standard 9Cr and 9CrL** 焊材進行焊修。不過經實驗結果 (圖 26) 顯示，原集管在運轉近 8 萬小時後，出現 **type IV cracking** 現象，在焊修後該管在同樣運轉條件下，再經同樣時間 (近 8 萬運轉小時) 時，仍存在相當高之 **type IV cracking** 再次發生

機率。

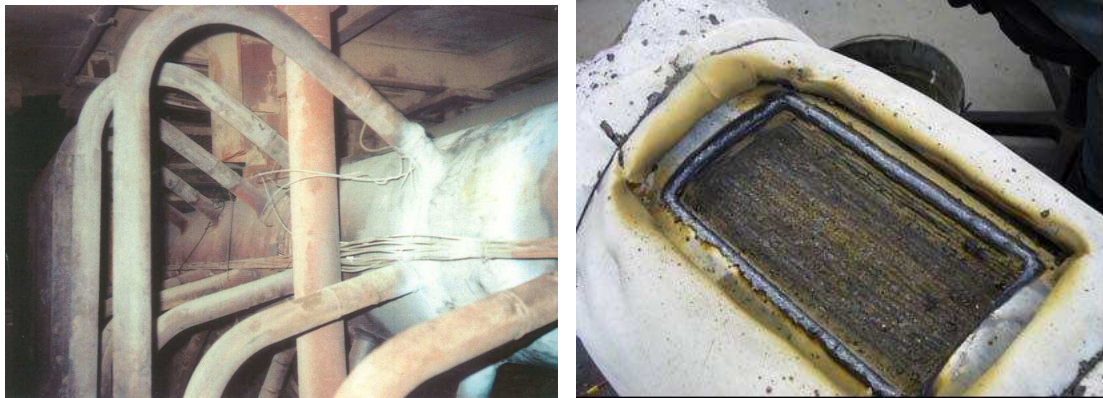


圖 25 材質為 Grade 91 之集管冷焊焊修實例

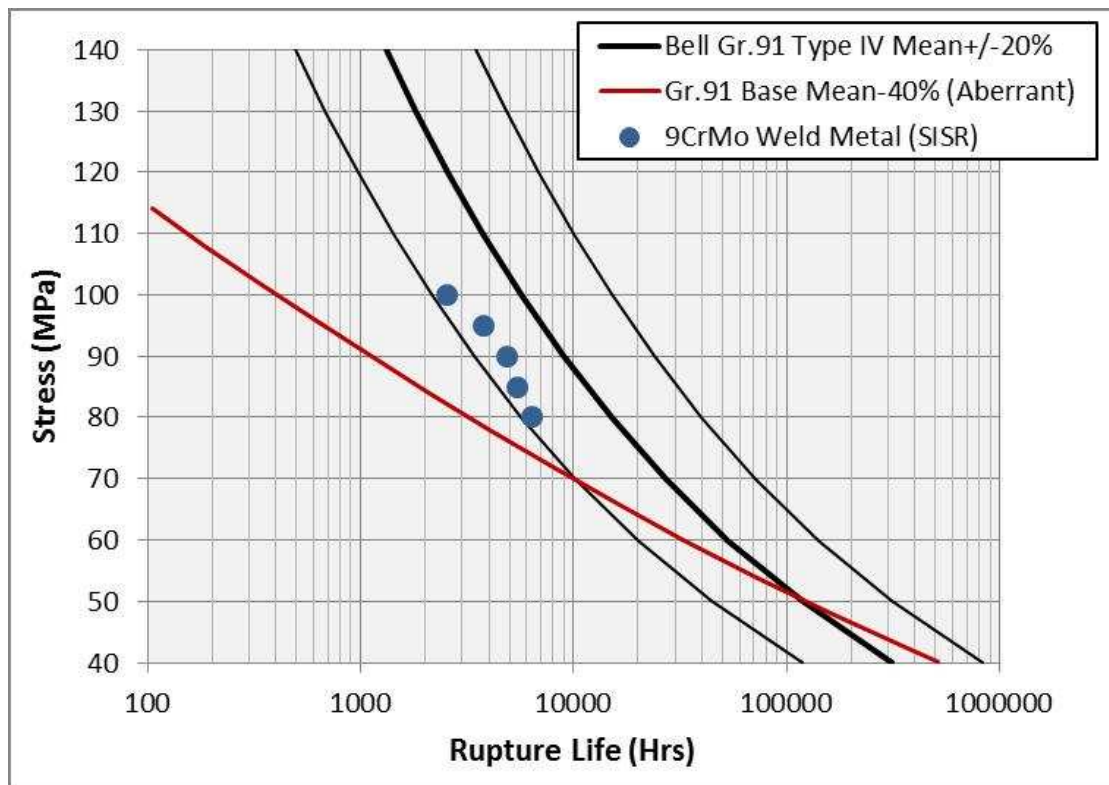


圖 26 9Cr Weld vs Bell Type IV at 600°C 實驗結果

## 2.6 腐蝕、氧化與剝落 (Corrosion, Oxidation & Exfoliation)

鍋爐組件長期在高溫高壓下運轉，由於氧化層剝落容易對組件造成各種傷害，如長、短期局部過熱及沖蝕等，其中之一實例如圖 27 所示，因此高溫氧化與高溫腐蝕亦為本次研討會上受到大家關心之議題。氧化層成長主要受到基材合金種類、溫度與時間三項因素影響，而氧化層剝落之原因來自組件幾何尺寸、熱膨脹係數不一致（如圖 28）、氧化層層間結構匹配度不同、潛變、氧化層生長厚度與彈性應變（圖 29）等，由圖中可見，當氧化層生長愈厚，受到拉（或壓縮）力作用愈大，氧化層剝落可能性愈大。對於常用 Grade 91、92 材料之臨界氧化層厚度、金屬溫度與運轉時數之關係如表 2 所示。

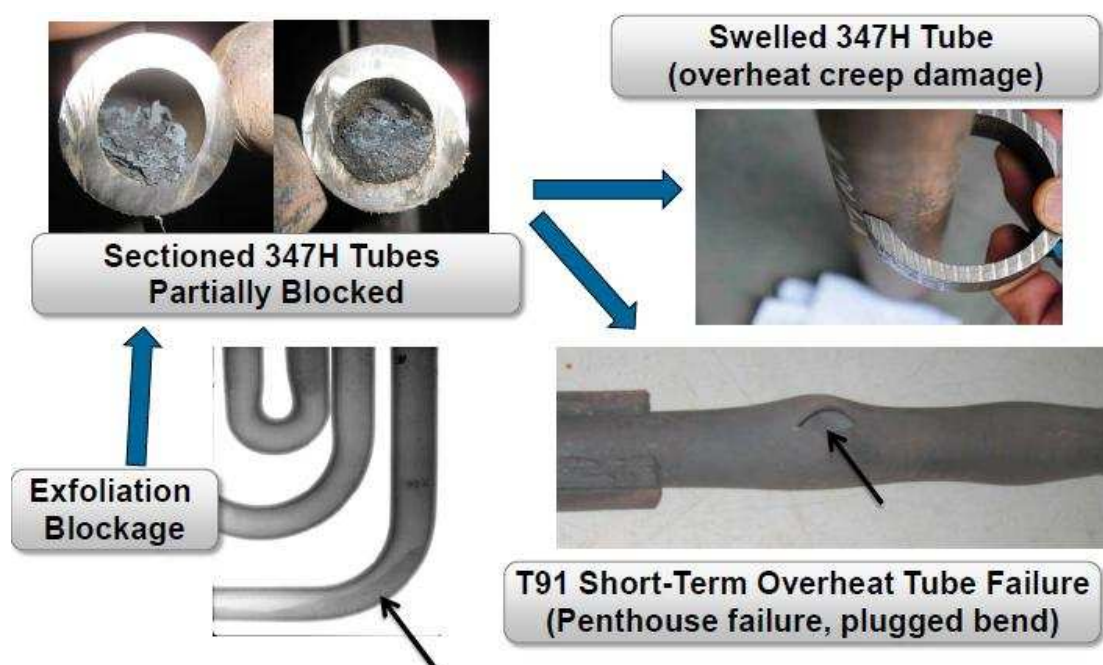


圖 27 氧化層剝落造成爐管局部過熱破損實例

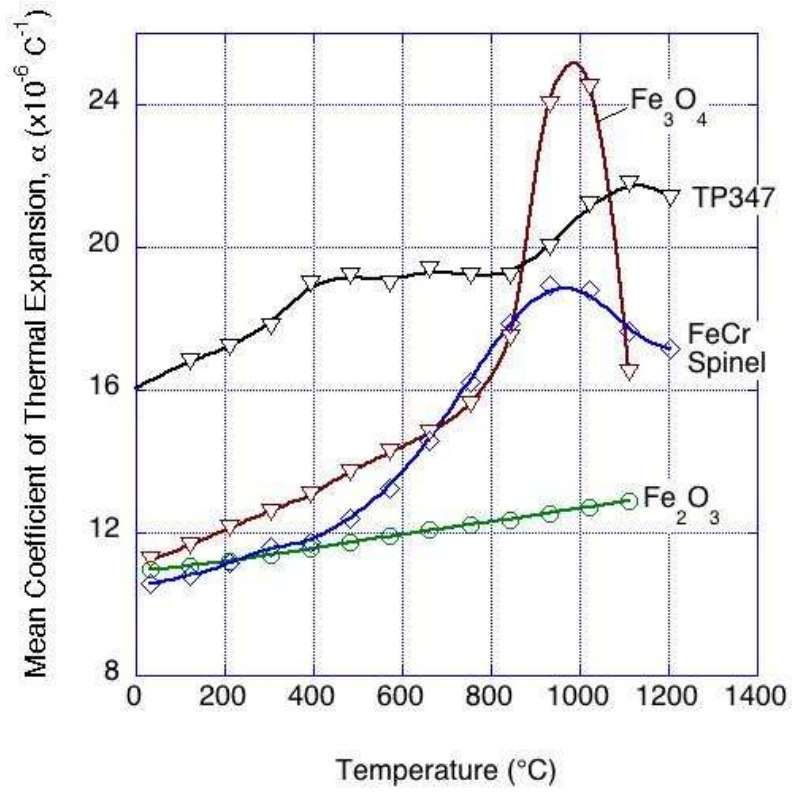


圖 28 氧化層熱膨脹係數隨溫度變化圖

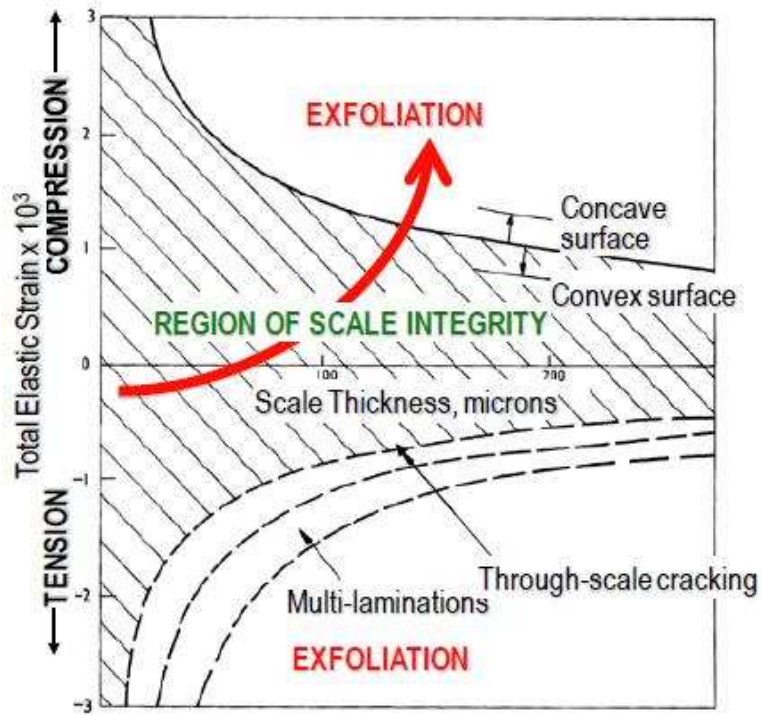


圖 29 氧化層厚度隨彈性應變變化之阿米特圖 (Armitt Diagram)

表 2 Grade 91、92 材料之臨界氧化層厚度、金屬溫度與運轉時數之關係

Alloy	Metal temperature (°C)	Critical oxide thickness ( $\mu\text{m}$ )	Time after which a shutdown will cause scale failure (hour)
Grade 22	580	830	241,000
Grade 91	600	200	30,000
	620	200	16,700

未來 EPRI 對於氧化層剝落將建立一個整合性預測與控制模型 (integrated model to predict and control oxide scale exfoliation)，方法是使用數學方法，代入管材材質、結構、位置、尺寸以及運轉條件等變數來預測氧化層剝落可能發生之時間 (圖 30)，並佐以真實組件運轉經驗作測試。其中管材材質、結構即便只有些許改變，但氧化行為將有明顯不同，如圖 31 之例，假設產生之氧化層疏鬆度 (多孔性) 皆相同 (porosity of deposit = 25%)，當管材為 TP347H (粗晶) 時，氧化速率與氧化層厚度將明顯多於 TP347HFG (細晶)，氧化層剝落將造成爐管堵塞之比例如圖 32 所示，TP347HFG 材質之堵塞比率低於 TP347H，也因此組件材質使用晶粒較細之材料將有助於降低氧化層剝落情形。



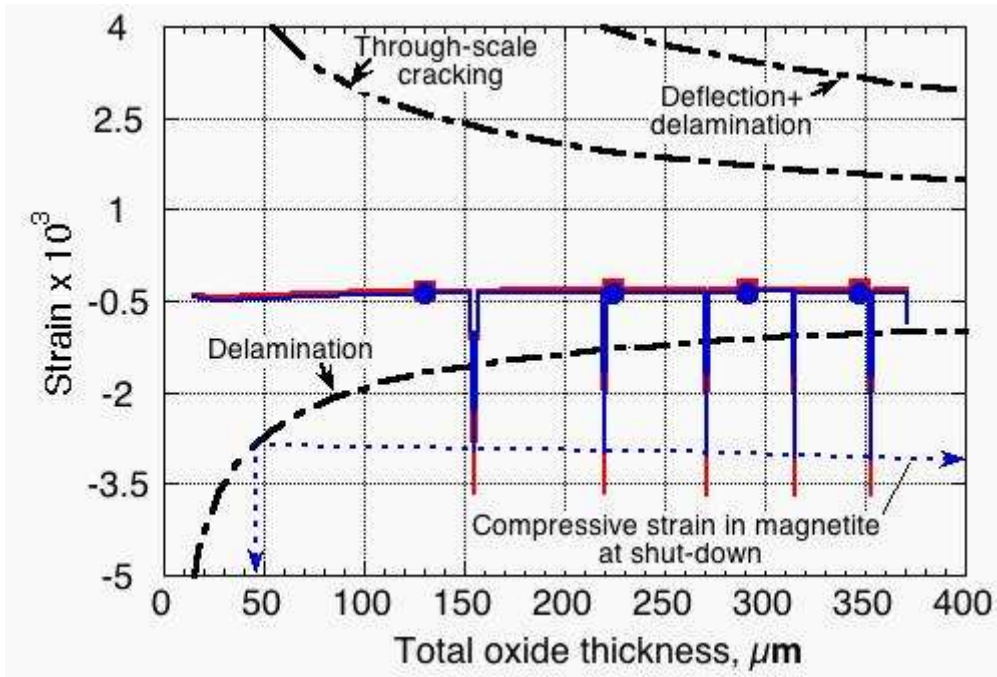


圖 30 氧化層剝落整合性預測與控制模型

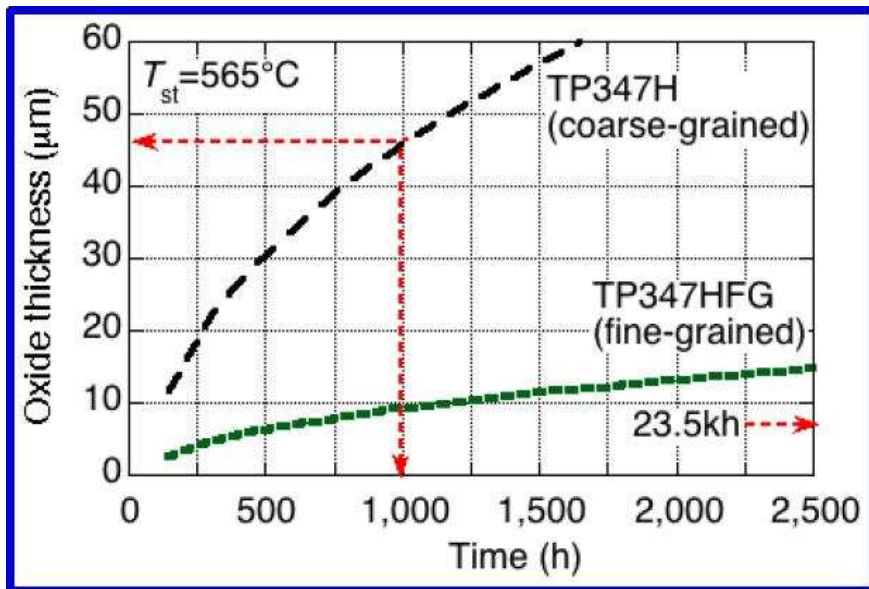


圖 31 不同晶粒結構與氧化速率比較圖

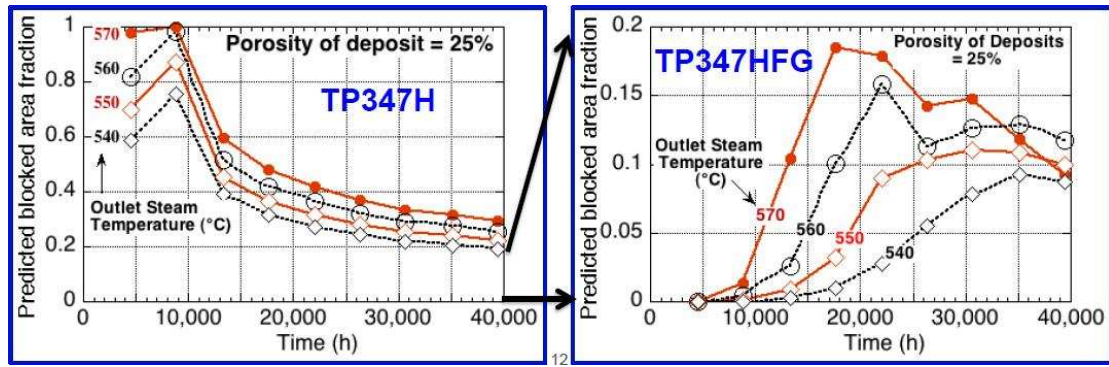


圖 32 不同晶粒結構、不同溫度與運轉時間之氧化層剝落堵塞預測比例圖

## 2.7 氧化層剝落導致之破管案例

會議上簡介 2013 年 2 月一個因氧化層剝落造成堵塞過熱破管之例子。

案件發生於發電量 850 MW 之超臨界發電機組之末段過熱器管（破管材質為 SA213-T91），內部蒸汽溫度、壓力分別為 582°C（1080°F）與 3,700 psi，至破管發生前之運轉時間約為 16,000 小時，破管外觀如圖 33，其中內部發現不少脫落之氧化層碎片（圖 34），分別做成金相試片（圖 35）後，觀察與量測爐管內表面上之氧化層及氧化層碎片（圖 36），兩者厚度皆為 240 μm 且均勻（圖 37），與 T91 爐管氧化層結構大致相同（圖 38），依 EPRI 先前之氧化模型結果，當 T91 材料氧化層厚度超過 200 μm 時就容易發生剝落，可印證該管確實有氧化層剝落情形。

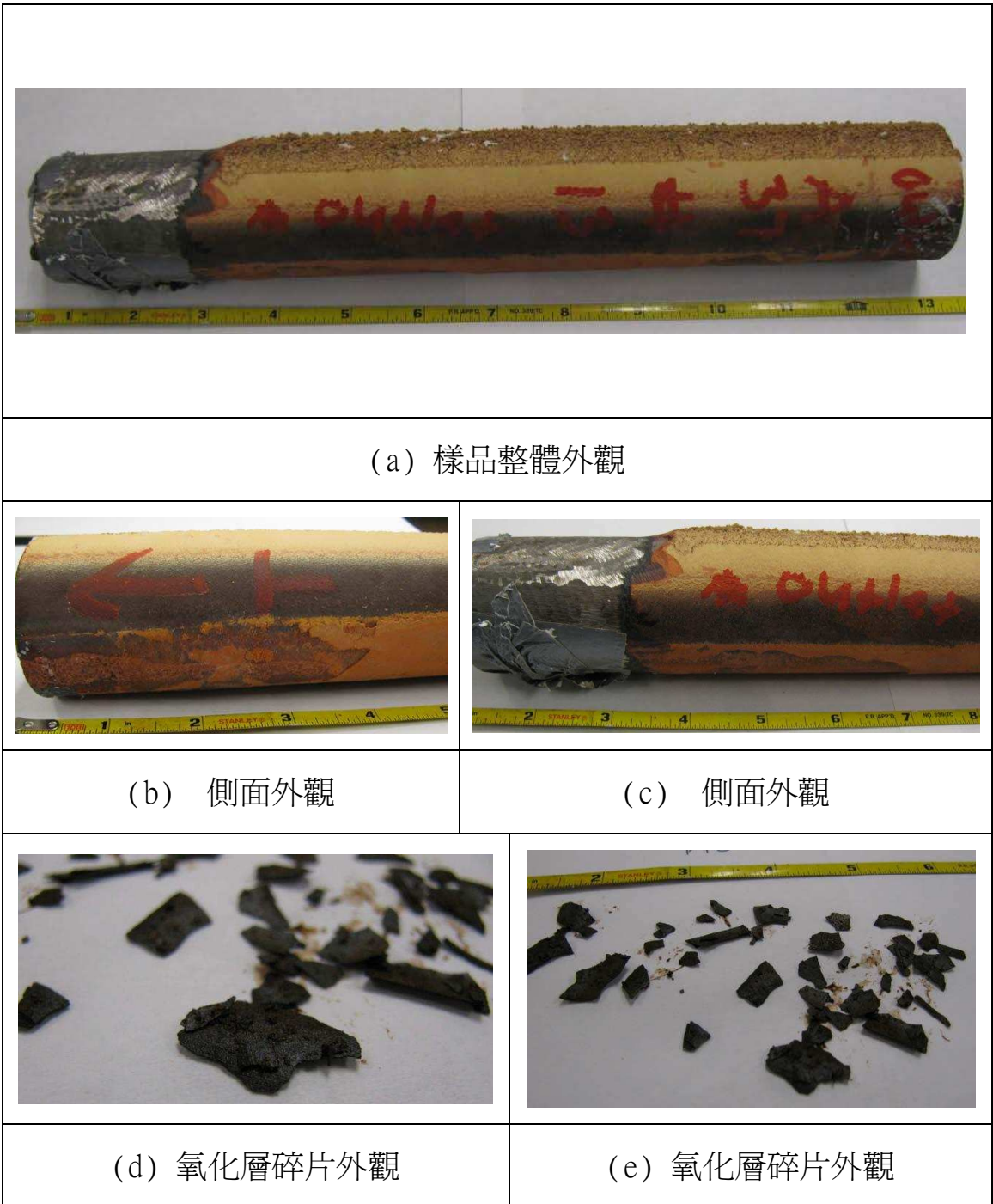


圖 33 破損之樣品外觀



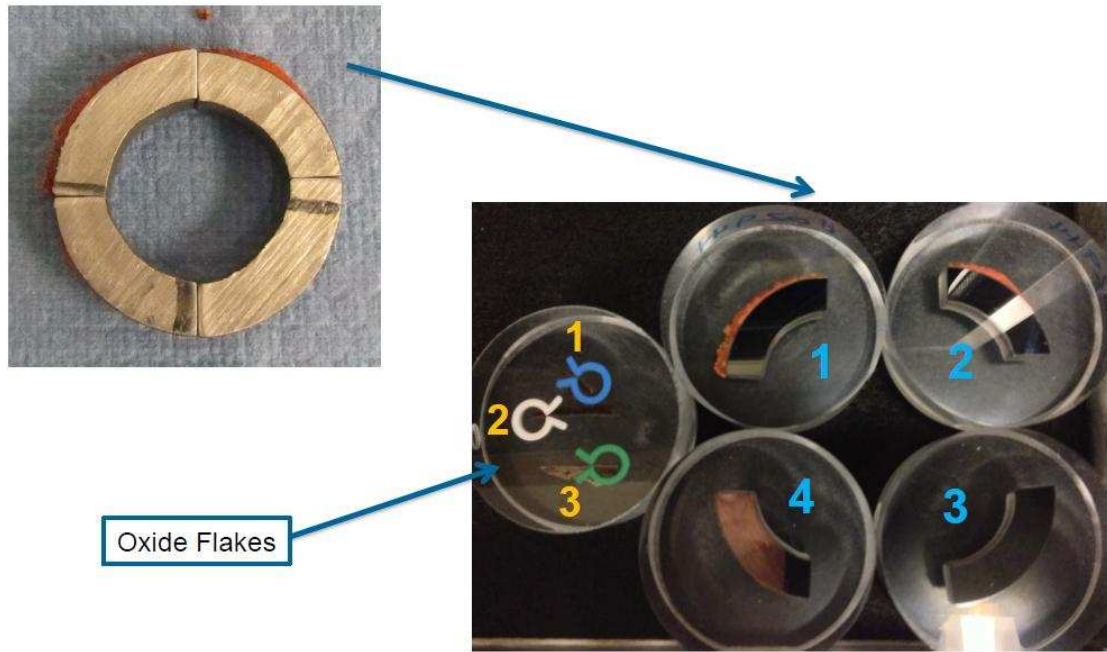


圖 35 製備完成之金相試片外觀

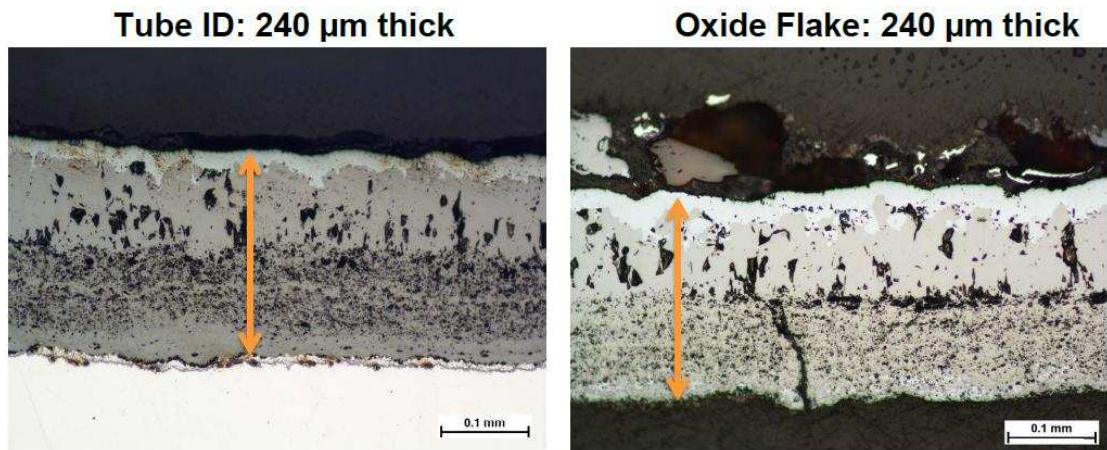
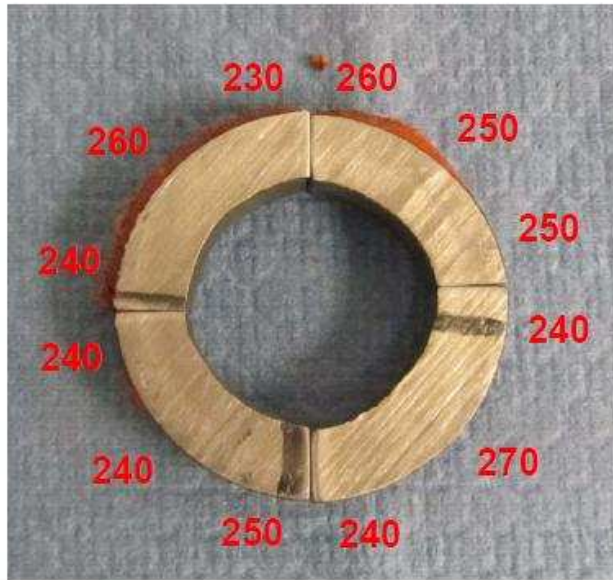


圖 36 爐管內壁氧化層（左）與氧化層碎片（右）之厚度與外觀



Uniform thickness suggests no large variations in heat flux/temperature

Location	( $\mu\text{m}$ )
Tube 1a	240
Tube 1center	260
Tube 1b	230
Tube 2a	260
Tube 2center	250
Tube 2b	250
Tube 3a	240
Tube 3center	270
Tube 3b	240
Tube 4a	250
Tube 4center	240
Tube 4b	240
Oxide 1	240
Oxide 1	250
Oxide 1	240
Oxide 2	230
Oxide 2	250

圖 37 爐管（非剝落區域）各面向之氧化層厚度量測顯示厚度均勻

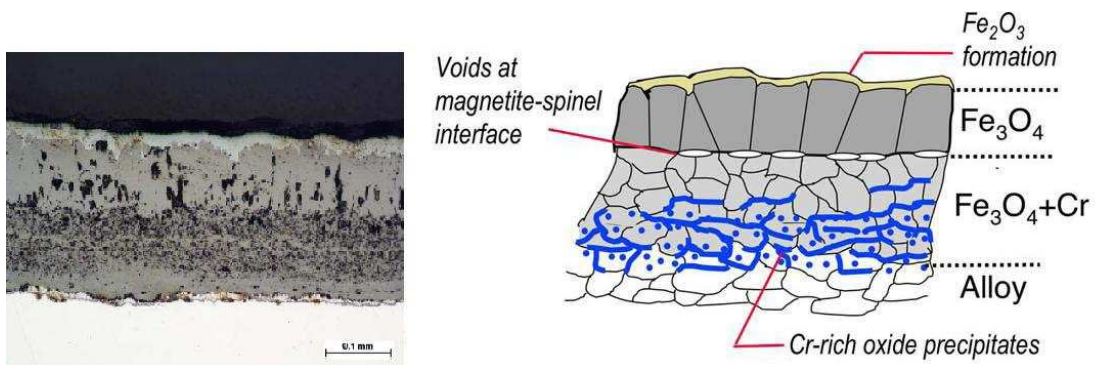


圖 38 氧化層結構與先前之研究結果比較

再依 T91 氧化動力學計算法，如下式：

$$d_{\text{ox}} = [ 2 \times A \times \exp(Q/RT) \times t ]^{0.5} \times ( 1 + r ) / r$$

代入氧化層厚度  $d_{\text{ox}} = 240 \mu\text{m}$ 、運轉時數  $t = 16,000$  小時，可得出爐

管之金屬溫度  $T = 618\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，顯示這完整剝落之氧化層確實降低了爐管之熱交換效率，造成爐管有局部過熱情形。

由於 T91 管之氧化遵守氧化動力學之拋物線率，即氧化層厚度  $200\text{ }\mu\text{m}$  以上之區域氧化速率極慢，然而一旦氧化層剝落後，剝落區域基材與環境直接接觸後，將使材料氧化速率加快至拋物線初始速率，此現象將造成不同區域間之管壁厚度改變，須日後定期檢查追蹤；另外，在破損區域亦可加裝額外之熱電偶溫度計，以掌握該區域之實際溫度分布與熱流狀況。

### 三、結論與建議

1. EPRI 自 1999 年迄今 2013 年提出之有關超臨界材料書面報告超過 150 篇之多，其性質涵蓋甚廣包括：材料基本性質手冊、焊接技術資料、損壞機制分析、蒸氣側氧化剝落行爲與預防、壽命評估技術、非破壞檢測實務…等等，由於內容深具應用與實務性，值得本公司業務相關同仁詳加研讀。
2. 根據 EPRI 從實務經驗獲致結果，超臨界機組或複循環熱回收鍋爐因具有快速起停功能特性，而被用來作為負載調控功能，因此使得材料之破壞行爲不再只是單純潛變或疲勞破壞機制，而是兩者之交互作用結果，因此未來壽命評估之分析或方法採行，值得注意、參考。
3. T23 材料因具良好高溫潛變性質，目前已逐漸大量應用於於超臨界鍋爐之過再熱器管或集管，但根據使用經驗顯示此類材料之焊接元件易發生再熱損壞 (reheat crack)，EPRI 提供改善此問題之建議，在施以焊後熱處理過程中當溫度到達 540-560°C 時宜先施行應力消除處理 (intermediate stress relief)，如此可大幅改善再熱損壞問題。
4. 此次會議之舉行係邀集所有參加 EPRI-P87 計畫之單位人員所進

行之研究成果研討，其進行方式除了主辦單位之研究成果介紹、延續性議題之後續進行規劃外，亦開放各單位所遭遇到之問題陳述與解決方案，以及大家對未來欲重視之議題提出，因此會議進行相當有彈性、多樣化，參予人員更能多方了解彼此之問題所在以作為借鏡並作收預防保養之目的。

#### 四、參考資料

1. J. Shingledecker, 2013 EPRI P87 Technology Transfer Meeting, 2013 EPRI Fossil Materials & Repair Program (P87) Technology Transfer Week, June 27-28, 2013.
2. D. Purdy and J. Siefert, 2013 EPRI P87 Technology Transfer Meeting, Weld Repair Activities in Program 87, June 25, 2013.
3. S. J. Brett, 2013 EPRI P87 Technology Transfer Meeting, Weld Repair to Boiler Headers and High Temperature Pipework in the UK, June 25, 2013.
4. J. Shingledecker, 2013 EPRI P87 Technology Transfer Meeting, Corrosion in Power Plants, June 27-28, 2013.
5. J. Shingledecker and E. Owensby, 2013 EPRI P87 Technology Transfer Meeting, Recent Boiler Tube Failure Analysis, June 28, 2013.
6. J. Parker, BSc, PhD, CEng, FIMMM and FIMechE, 2013 EPRI P87 Technology Transfer Meeting, EPRI Initiatives related to Flexible Operation of High Temperature Power Plant, June 28, 2013.