

出國報告（出國類別：開會）

參加 EPRI 舉辦 P87 計畫研究成果技術 轉移及超臨界鍋爐材料論壇等會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳燦堂；機械工程師

派赴國家/地區：美國 / 華盛頓州西雅圖

出國期間：107 年 6 月 17 日至 6 月 23 日

報告日期：107 年 8 月 13 日

出國報告審核表

出國報告名稱：參加 EPRI 舉辦 P87 計畫研究成果技術轉移及超臨界鍋爐材料論壇等會議		
出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
陳燦堂	機械工程師	台灣電力公司綜合研究所
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"/> 開會 <input type="checkbox"/> 其他_____ (請依出國任務填列，例如業務接洽、海外承攬、駐外等)	
出國期間：107年6月17日至107年6月23日		報告繳交日期：107年8月13日
出國人員 自我檢核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」) 3.無抄襲相關資料 4.內容充實完備 5.建議具參考價值 6.送本機關參考或研辦 7.送上級機關參考 8.退回補正，原因： (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 (3)內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 (4)抄襲相關資料之全部或部分內容 (5)引用相關資料未註明資料來源 (6)電子檔案未依格式辦理 9.本報告除上傳至公務出國報告資訊網外，將採行之公開發表： (1)辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享 (2)於本機關業務會報提出報告 (3)其他_____ 10.其他處理意見及方式：

報告人



單位



主管處

主管



總經理

副總經理



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「公務出國報告資訊網」為原則。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 EPRI 舉辦 P87 計畫研究成果技術轉移及超臨界鍋
爐材料論壇等會議

頁數 44 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電 人資處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳燦堂/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/(02)8078-2234

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：107 年 6 月 17 日至 6 月 23 日

派赴國家/地區：美國/華盛頓州西雅圖

報告日期：105 年 8 月 13 日

關鍵詞：超臨界機組、潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材、沃斯田鐵系鋼材、超超臨界發電鍋爐

內容摘要：(二百至三百字)

本次至美國參加美國電力研究院(EPRI)舉辦 P87 技術移轉會議、潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材(CSEF)論壇、鉻鉬鋼焊接技術論壇等，作為公司未來超臨界機組維護與研究之規劃。

藉由提昇發電效率之超臨界發電方式為目前降低 CO2 排放之實際執行措施，其瓶頸在於新材料開發及長期運轉性能確保，文中分別簡介抗潛變強化型肥粒鐵系、沃斯田鐵系等鋼材研究進展，及德國著名 RWE 電力公司新建超超臨界機組鍋爐之經驗，驗證高參數鍋爐之設計、運轉、維護等工作均具有高度專業性，欲保持機組長期運轉極為不易，其中異質焊接短件無論結構設計、焊接作業、熱處理程序等，目前技術未臻成熟化，建議後續新建同型發電鍋爐過程中如設計、安裝、運轉等階段務必採取保守且審慎態度。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

出國報告審核表.....	I
出國報告提要.....	II
目錄.....	III
一、出國緣由、行程及主要任務.....	1
二、心得報告.....	7
2.1 抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材之研究進展.....	7
2.2 沃斯田鐵系鋼材之研究進展.....	20
2.3 新建超超臨界電廠鍋爐經驗.....	35
三、感想與建議.....	42
四、參考文獻.....	44

表目錄

表 1-1	行程及工作內容	6
表 2.1-1	依據氧化物剝離模式建議 Grade 91 之適當運轉溫度	12
表 2.1-2	Grade 91 壽命計算器估算管件 10 年後因氧化膜增生 且伴隨不同情境下之潛變壽命影響程度	12
表 2.1-3	ASME 法規及 EPRI 建議之 Grade 91 組成	13
表 2.2-1	ASME CC-2328 與 TP304H 及 TP347H 之組成比較	27
表 2.1-2	EPRI 與 ORNL 合作研究 Super304H 材質之樣品	30

圖目錄

圖 1-1	6/18 議程(EPRI P87 技術移轉第一天會議)	2
圖 1-2	6/19 議程(EPRI P87 技術移轉第二天會議)	3
圖 1-3	6/20 議程(EPRI 潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材 CSEF 聯席會議)	4
圖 1-4	6/21 議程(EPRI 鉻鉬鋼材焊接及潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材 CSEF 聯席會議)	5
圖 2.1-1	氧化物剝離模式計算不同溫度及熱通量之結果	11
圖 2.1-2	歐美日等先進國家下修 Grade 91 之允許應力情形	12
圖 2.1-3	取樣不同介在物及析出物 Grade 91 材質經潛變試驗後分析結果	14
圖 2.1-4	取樣 Grade 92 材質經潛變試驗後不同介在物及析出物之分析結果	15
圖 2.1-5	硬度與 Hollomon-Jeffe 參數之關連性	16
圖 2.1-6	EPRI 進行現場量測硬度與實驗室量測硬度之關連性	16
圖 2.1-7	不同熱處理之低合金 Cr-MO-V 鋼於潛變試驗或高溫疲勞試驗之性能測定結果比較	17
圖 2.1-8	EPRI 研究 Grade 91 材質劣化與延展性關連性之試樣分類	17
圖 2.1-9	EPRI 研究 Grade 91 材質劣化與延展性關連性主要試樣之組成	18
圖 2.1-10	Grade 91 材質及焊道 HAZ 潛變劣化試驗結果比較	18

圖 2.1-11	以斷裂時間及面積縮減率作為潛變劣化程度之關連性比較	19
圖 2.1-12	不同試樣於高溫疲勞及高溫潛變疲勞試驗之結果	19
圖 2.2-1	ASME 規範於不同材質於 650°C 之允許應力比較	23
圖 2.2-2	與 SIPH 機制有關之彎管破損案例	23
圖 2.2-3	與 SIPH 機制有關之管夾與管件焊接處破損案例	24
圖 2.2-4	與 SIPH 機制有關之焊道旁破損案例	25
圖 2.2-5	與 SIPH 機制有關之未對心焊件破損案例	26
圖 2.2-6	以 JMatPro 模擬 347 材質於不同溫度下 sigma 相比例與碳含量之關連性	27
圖 2.2-7	ASME CC-2328 與 TP304H 之高溫機械性能比較	28
圖 2.2-8	Iseda 等人進行 Super304H 潛變破裂試驗之延伸率及破斷時間之關連性研究	28
圖 2.2-9	由 Eddystone #1 機鍋爐取樣 Super304H 管材及與未使用新管之室溫機械性能試驗結果比較	29
圖 2.2-10	取樣 Eddystone #1 機鍋爐 Super304H 管材及與實驗室中高溫試驗之韌性試驗結果比較	29
圖 2.2-11	不同樣品進行高溫潛變破裂試驗結果及比較	30
圖 2.2-12	ORNL 高溫潛變破裂試驗之樣品分析規劃	31
圖 2.2-13	ORNL 樣品以 EBSD 分析結果	32
圖 2.2-14	現場取樣以 EBSD 分析結果	33
圖 2.2-15	EPRI 彙整約 600°C 之異常組織含量	34
圖 2.2-16	本所進行不同溫度及時間 Super304H	34
圖 2.3-1	RWE 公司提供分享經驗之新建發電機組位置	38

圖 2.3-2	RWE 公司興建機組鍋爐之佈置與所用材料	38
圖 2.3-3	彙整 RWE 公司於 Eemshaven 及 Westfalen 興建鍋爐之破損案例背景	39
圖 2.3-4	RWE 公司於 Eemshaven 及 Westfalen 興建鍋爐之 RH2 發生破損情形	39
圖 2.3-5	主要合金材料 100k 小時之潛變強度及溫度關連性	40
圖 2.3-6	進行 Alloy 617 及 HR3C 管材焊接後之熱處理作業	40
圖 2.3-7	RWE 公司於 Eemshaven #A 機鍋爐 RH2 區段發生沿晶腐蝕之破損件微觀	41

一、出國緣由、行程及主要任務

出國緣由：

本公司陸續興建超臨界發電機組，105 年起部份機組已開始商業運轉，由於運轉參數如林口電廠二部機之溫度 604°C/壓力 25.4MPa，遠高於目前亞臨界機組如台中電廠 1 至 10 號機之溫度 542°C/壓力 17.5MPa，為確保與提升未來機組運轉之可靠度與安全性，研發與運轉等單位責無旁貸，需深入瞭解超臨界鍋爐的高溫材料設計與發展、材料微組織演變、腐蝕、保護性鍍層、焊接、製造、潛變疲勞等，並加強老化或異常診斷評估能力，以確保與提升未來機組運轉之可靠度與安全性，本公司在短、中、長期研發重點項目與內容之第二項「建立發電廠關鍵設備之壽命評估、再生自製與材料安全鑑定技術」，即訂定超臨界發電機組鍋爐延長壽命評估、破損分析與先進型燃燒系統材料性能評估等 3 項重點研究分項。

本公司參加美國電力研究院(EPRI)之 P87 計畫，計畫內容與興建中機組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、設備組件修護實務等開發及研究有關，EPRI 於 6 月 18-21 日於美國華盛頓州西雅圖(Seattle,WA)接續舉行 P87 計畫研究成果技術轉移會議、抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材群組聯席會、鉻鉬鋼材焊接修護研討會等，會中除發表超臨界材料最新研究成果外，同時匯集各製造廠家、研究機構、發電及維護單位等進行技術經驗交流，內容深具實務性與應用性，對本公司興建中及已運轉之超臨界機組所需之技術資料取得極為重要，另本公司亦受邀及安排簡報分享近年興建中及老舊鍋爐材料之破損經驗(Recent Failure Experiences of TPC's Constructing and Aged Boiler Materials)，因此擬前往參加。

每日議程安排如圖 1-1 至圖 1-5。

本次出國案件之出國核定書為 1070181 號，電人字第 1078057332 號函。

AGENDA

PROGRAM 87 TECHNOLOGY TRANSFER WEEK
June 18-19 • Seattle Marriott Bellevue, Bellevue, WA

MONDAY JUNE 18, 2018		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast	
8:30 a.m.	Welcome, Safety, Introductions	<i>M. Gagliano, EPRI</i> <i>R. Lynch, DTE</i>
8:50 a.m.	P87 "State-of-Union" Address <i>Program Health, Growth, Collaboration, Leverage, Resources</i>	<i>M. Gagliano, EPRI</i>
9:30 a.m.	Group Discussion 1: Deliverables/Content 1. How useful are reports? 2. If not reports, then what? 3. Methods for effective technology transfer? 4. How is EPRI P87 content being used? 5. What do we do (for TT) that is not working?	<i>All:</i> <i>Facilitated by M. Gagliano</i>
10:30 a.m.	BREAK	
11:00 a.m.	Technical Presentation: Corrosion	<i>S. Kung</i>
12:00 p.m.	LUNCH	
1:00 p.m.	Group Discussion 2: Value 1. Do members/advisors find value in P87? 2. If not, why? What can we do to add value? 3. Are we effectively communicating value? 4. If not, how can be better communicate value? 5. Do advisors have to continually make a case to stay in the program? 6. If so, what can we do to help make the case stronger?	<i>Group:</i> <i>Facilitated by M. Gagliano</i>
2:00 p.m.	Technical Presentation: Hardness	<i>J. King, EPRI</i>
2:30 p.m.	Break	
3:00 p.m.	Technical Presentation: Stainless Steels: - Industry Experience with Stainless Steels - Traditional Stainless Steels - Advanced Stainless Steel Lifting	<i>T. Lolla, EPR</i> <i>M. Gagliano, EPRI</i> <i>S. Heckman, RWE</i>
4:30 p.m.	Technical Presentation: Feature-type Testing	<i>A. Bridges, EPRI</i>
5:00 p.m.	Adjourn	
6:00 p.m.	Reception	

圖 1-1. 6/18 議程(EPRI P87 技術移轉第一天會議)

TUESDAY JUNE 19, 2018		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast	
8:30 a.m.	P87 Future: Core Tenets and Beyond 2018	<i>M. Gagliano, EPRI</i>
9:30 a.m.	Group Discussion 3: Future 1. Five-year Plan 2. What is P87? 3. What should P87 be? 4. Are we focusing efforts in the right areas? 5. What are we missing?	<i>Group: Facilitated by M. Gagliano</i>
10:30 a.m.	Break	
11:00 a.m.	Technical Presentation: Metallurgical Risk Factors	<i>J. Siefert, EPRI</i>
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Member Presentation: Recent Failure Experiences of TPC's Constructing and Aged Boiler Materials	<i>Tsan-Tang Chen, TPC</i>
1:30	Technical Presentation: Induction PWHT and Guidelines	<i>D. Purdy, EPRI</i>
2:30 p.m.	Break	
3:00 p.m.	Update on DOE EEM Project	<i>M. Gagliano, EPRI</i>
3:30 p.m.	Member Center Update	<i>E. Benton, EPRI</i>
4:00 p.m.	Round Table Discussion	<i>Group Facilitated by M. Gagliano</i>
5:00 p.m.	Adjourn	



圖 1-2. 6/19 議程(EPRI P87 技術移轉第二天會議)

AGENDA

9TH MEETING OF THE CREEP STRENGTH ENHANCED FERRITIC STEEL INTEREST GROUP – A FOCUS ON WELDING RELATED CHALLENGES IN POWER GENERATION

June 20 • Bellevue, WA

WEDNESDAY, JUNE 20		
TIME	TOPIC	PRESENTER
8:00 a.m.	Breakfast	
8:30 a.m.	Introduction and welcome	<i>J. Siefert, EPRI</i>
9:00 a.m.	Recent developments and on-going Efforts within NBIC Part 3 Repairs and Alterations	<i>G. Galanes, DTS</i>
9:30 a.m.	Recent developments within ASME Section IX and future challenges	<i>B. Newell, Euroweld</i>
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Hardfacing delamination in a C12A valve and application of an alternative weld repair to Welding Supplement 8	<i>S. Bowes, Duke</i>
11:00 a.m.	Continued Assessment of in-service Grade 91 Steel CSEF Steels	<i>I. Perrin, SIA</i> <i>T. Totemeier, SIA</i>
11:30 a.m.	Update on DOE Project Extreme Environment Materials	<i>M. Gagliano, EPRI</i>
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Welding without purge gas – Recent EPRI Research and Perspective on Industry Needs	<i>J. Siefert, EPRI</i>
1:30 p.m.	A review of options for welding without purge gas	<i>B. Newell, Euroweld</i>
2:00 p.m.	Welding large bore P91 without purge; challenges and successes in new build projects	<i>S. Bowes, Duke</i>
2:30 p.m.	Break	
3:00 p.m.	Root pass welding in P91 without purge gas – A perspective from Industry Practitioner	<i>P. Patrick, Maverick</i>
3:30 p.m.	Root pass welding in P91 without purge gas – A perspective from Kiewit	<i>J. Morse, Kiewit</i>
4:00 p.m.	Root pass welding in P91 without purge gas – A perspective from Fluor	<i>M. Lang, Fluor</i>
4:30 p.m.	Group Discussion	
5:00 a.m.	Adjourn	

圖 1-3. 6/20 議程 (EPRI 潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材 CSEF 聯席會議)

AGENDA

CRMo PROJECT REVIEW June 21, 2018 • Seattle Marriott Bellevue, Bellevue, WA

THURSDAY JUNE 21, 2018

TIME	TOPIC	PRESENTER
8:00 a.m.	Breakfast	
8:30 a.m.	Project Introduction	<i>John Siefert, EPRI</i>
9:30 a.m.	Review of Legacy Information and Key Learnings	<i>Tap Lolla, EPRI</i>
10:30 a.m.	Break	
11:00 a.m.	Recent and Continuing Research	<i>Tap Lolla, EPRI</i>
11:30 a.m.	Discussion and Future Plans	<i>Tap Lolla, EPRI</i>
12:00 p.m.	Adjourn and Lunch	

AGENDA

CREEP STRENGTH ENHANCED FERRITIC STEEL (CSEF) REVIEW

June 21, 2018 • Seattle Marriott Bellevue, Bellevue, WA

THURSDAY JUNE 21, 2018

TIME	TOPIC	PRESENTER
1:00 p.m.	Introduction	<i>John Siefert, EPRI</i>
1:45 p.m.	Interaction with the National Board Inspection Code and Technology Transfer	
2:30 p.m.	Break	
3:00 p.m.	Ongoing Research	
3:45 p.m.	Future Work and Plans for Group Procedure Qualification Records	
4:30 p.m.	Adjourn	

圖 1-4. 6/21 議程 (EPRI 鉻鉬鋼材焊接及潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材 CSEF 聯席會議)

出國行程及主要任務：

本次出國期間自 105 年 6 月 17 日至 6 月 23 日，主要的任務為至西雅圖(Seattle, WA)參加美國電力研究院(EPRI)舉行 P87 計畫研究成果技術轉移會議、抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材群組聯席會、鉻鉬鋼材焊接修護研討會等，藉由發表之超臨界材料最新研究成果及應用經驗等技術資料取得，對於超臨界機組鍋爐材料之最新發展動態、使用狀況、材料劣化歷程與損壞機制、分析與量測技術等可進行深入了解，對於未來電廠鍋爐檢測分析、提升運轉效能、確保機組運轉可靠度等研究工作之規劃及協助公司改善措施之擬定等，期將有重要助益。

行程及工作內容概要說明於下表 1-1：

表 1-1 行程及工作內容

項次	起始日	迄止日	地點	工作內容概況
1	1070617	1070617	桃園→西雅圖	路程
2	1070618	1070619	西雅圖	P87 計畫研究成果技術轉移會議及受邀簡報
3	1070620	1070620	西雅圖	P87 抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材論壇
4	1070621	1070621	西雅圖	鉻鉬鋼及抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材等焊補作業回顧論壇
5	1070622	1070623	西雅圖→桃園	路程

二、心得報告

2.1 抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材之研究進展【1-6】

提高發電效率為具體降低空氣污染、減少排碳量、節省能源之手段，世界各國興建發電鍋爐之潮流，已趨向產生更高運轉溫度及壓力之蒸汽為目標，當然眾所皆知瓶頸主要在於材料研發及包含各式焊接及塑性加工之製作技術。

抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材 (Creep Strength Enhanced Ferritic Steels, CSEF) 一般泛指由既有肥粒鐵基質下添加微量元素，藉由固溶、析出、相變態等強化機制，增強抗高溫潛變性能之鋼材，其中 Grade 91、Grade 92 最為知名，已普遍應用於國內各電廠各式鍋爐作為熱交換管、集管、蒸汽輸送管等使用。

由於正常運轉下鍋爐管材之機械性能普遍位處隨溫度提高而急速下降之溫度區間，加以一般鐵基金屬氧化物之熱傳導係數約僅為金屬之 1/250，些微、甚至僅 0.1 mm 厚度氧化膜之生成，都將大幅增高爐內熱交換管之管壁金屬溫度，交相惡化鍋爐運作效率及管材性能降低，涵蓋本公司破損分析經驗及眾多研究報導均指出鍋爐管件之短期破管或長期潛變破裂事故均與管內氧化膜過厚、剝落及堵塞蒸汽通道有關，掉落之蒸汽膜隨蒸汽流向也造成蒸汽渦輪發電機之汽機葉片或洩水管路之沖蝕破損事故，因此管材之蒸汽側氧化問題早已引起注意，而此問題因氧化膜生成速率約與溫度呈指數型關連，且其起始剝落之臨界厚度約隨合金組成含量之提高而下降等原因，預期對於高參數運轉之超(超)臨界發電鍋爐將更為注目焦點，因此 EPRI 近年積極進行研究，約於 2016 年(民國 105 年)首先提出初步研究報告，提醒會員應予重視，此次赴美參加 P87 技術移轉會議時，更進一步發佈對於 Grade 91 材質之最新而完整研究結果。

EPRI 指出目前 ASME B&PV Sec. 1 允許 Grade 91 可應用於 649 °C (1200 °F) 應不具保守性，一般設備製造商 (Original Equipment Manufacturers, OEM) 主要依據潛變強度考量，設計時下限溫度約 607 °C (1125 °F)，但即使如此並未考量蒸汽側氧化

問題及陸續剝落之影響，亦未顧及冶金風險(metallurgical risk)、焊接強度縮減因子(Weld Strength Reduction Factor, WSRF)、運轉疲勞(cyclic fatigue)等因素，EPRI 依據臨界氧化膜剝離厚度應於 250-400 um 之調查分析結果，以自行發展之蒸汽氧化物剝離模式(exfoliation model)演算 Grade 91 於傳統蒸汽發電鍋爐、熱回收鍋爐等，分別作為蒸汽輸送管或集管(無熱通量)、熱交換管(有熱通量)時之合理運轉溫度，演算邏輯係考量管內壁依序而外生成富鉻及貧鉻等二氧化層，依據氧化物成長動力模式、熱傳通量、材質及氧化物特性等而逐步疊代，其中傳統蒸汽發電鍋爐以過熱器熱通量 31,500 -47,500 W/m² 之上限及下限溫度作為比較參數，而熱回收鍋爐於熱交換管之計算部份，合理假設燃氣側至蒸汽側溫度差 30-60°C 且為線性變化，管壁厚度也已考量及設定為 2.54-3.18 mm(0.1” -0.125”)。

以 Grade 91 為對象之蒸汽氧化物剝離模式(exfoliation model)演算不同應用溫度及熱通量下氧化膜厚度隨時間增長之情形如圖 2.1-1，彙整結果與建議則如表 2.1-1。單純考量蒸汽側氧化問題之觀點，Grade 91 於無熱通量或作為輸送管及集管時，運轉溫度應設定於 600°C 以下，高熱通量之蒸汽鍋爐場合建議上限運轉溫度應下修至 560°C，預期於 40,000 小時氧化膜才開始剝離，超過 580°C 時約 20,000 小時即存在短期破管危機，而對於較低煙氣溫度之熱回收鍋爐而言，相較之下作為熱交換管用途時應用溫度則可再提高約 20°C、至 580°C，另外就因氧化膜增生伴隨如阻礙熱傳之管壁金屬溫度提高、壁厚減薄之應力提高等效應，致可能降低潛變壽命之觀點而言，EPRI 也以其自行發展之 Grade 91 材質壽命計算器(Gr 91 Life Calculator)，以一般認定可合理運轉之 600°C 蒸汽溫度作為估算基礎，分別比較每年提高溫度 2°C、4°C，提高 0.5%、1.0% 應力等情境，估算 10 年後結果如表 2.1-2，觀察表中數值可知內壁側氧化膜之成長引發管壁金屬溫度及相應應力等效應，綜合考量時可能大幅縮減材質之應用壽命。

除蒸汽側氧化觀點外，參酌日本國立材料科學院(National Institute of Material Science, NIMS)、歐洲潛變研究合作委員會(European Creep Collaborative Committee, ECCC)等長期研究結果，ASME 依據其 B&PV Code 下 CSEF 審議委員會之提議，已審慎考量將下修壁厚小於 3” Grade 91 材質之允許應力，如圖 2.1-2，EPRI 也提醒允許應力修正對於使用者而言，不應只是注意是否加強壁厚之問題，而是體認應保守對待，回歸品質管控、劣化成因探討、評估壽命等議題，有關前者，EPRI 多年努力於材質及焊接作業等研究，其中材質部份基於冶金風險因子之理念，於 2013、2016 年分別提出加嚴及修正微量元素種類及組成之建議，如表 2.1-3 所示，但可能考量製造不易因素，不完全為 ASME 所採納，此次 EPRI 藉由 P87 技術移轉會議，再提出新研究結果，佐證 CSEF 管材中微量元素之介在物或經由反應所生成析出物等，與造成管件破裂之潛變孔洞具有關連性，其中 Grade 91 部份，如圖 2.1-3，確認潛變孔洞旁均存在 MnS 介在物、AlN 析出物，而如圖 2.1-4，Grade 91 材質之試驗及分析結果，也驗證 B、N、Mn、S、Al 等含量應予嚴格管控，綜合上述，建議若仍須新購如 Grade 91 之管件或組件時，應儘可能遵循 EPRI 於 2016 年對於組成加嚴之提議。

另外對於使用中管件，材質劣化或堪用程度之判定，以作為是否或何時更換等維護措施之擬定參考，原本有其需要性，但如 Grade 91 之 CSEF 材質，已知潛變孔洞多發生於壽命中後期，且可能於次表面才發現起始微裂縫，不易經由非破壞檢測方法檢知及精確判定實際劣化程度，就無法切割取樣之場合而言，雖然 EPRI 約於 2013 年曾提出以量測硬度可作為劣化參考指標，如圖 2.1-5，另此次會議中亦提出以不同熱處理片狀試片或實體管件等試樣為對象，探討各式現場作業硬度計與實驗室儀器之量測結果比較，且從中獲致對於約 250Hv 以下硬度時具可行性之結論，如圖 2.1-6，但量測誤差普遍達約±10 Hv 以上，此若再考量一般無法追蹤得知管件於應用前硬度量測結果之前

提，以硬度法評估管件劣化程度僅能作為初步參考。

即使能切取實體樣品進行潛變破裂試驗以定量殘餘壽命時，EPRI 以低合金 Cr-Mo-V 鋼材為例，提醒試驗過程中實際上已附加塑性變形效應，影響定量精確程度，而且也無法充份鑑別出存在多軸向應力環境時之潛變劣化行為，建議應考量納入潛變破裂延性，及考量進行高溫潛變疲勞試驗等，如圖 2.1-7 所示。

為求驗證上述推論，EPRI 分別就材質及焊接熱影響區為實驗對象，其中材質部份取自現場經時使用管件，加工成單純試棒、雙刻痕試棒等，而焊接熱影響區之試樣則包含模擬熱影響區之試棒形式及由上述實體管件焊道部份切取成特定板狀形式等，上述試樣除進行 625 °C *60 MPa 潛變破裂試驗之外，材質部份另進行應變範圍 1%、應變速率 0.1%/sec 之 600 °C 高溫下疲勞及潛變疲勞(固定 1 小時)試驗，選定試驗對象如圖 2.1-8，依據取樣形式及組成之純淨度約分為 6 類，其中主元素組成相近但雜質組成明顯有別、預期展現不同潛變行為的試樣計二種，如圖 2.1-9，尤為研究重點。

研究結果證實具刻痕式試棒及實體跨焊件試樣(feature)比較單純試棒，其潛變破裂試驗結果具有大幅提高鑑別劣化程度之可行性，且斷裂點具有一致性、免除材質本身機械強度及試驗過程之塑性變形等效應，如圖 2.1-10，另外研究過程中也證實無論材質或模擬焊道熱影響區，以試樣經潛變試驗斷裂後之面積縮減率(ROA)作為延性參數，相較裂斷時間，與實體跨焊件試樣之裂斷時間具有更佳關連性，如圖 2.1-11。而藉由高溫潛變疲勞試驗之結果也驗證相較單純高溫疲勞試驗，具有充份鑑別材質於多軸向應力下耐受破損之性能表現，如圖 2.1-12。

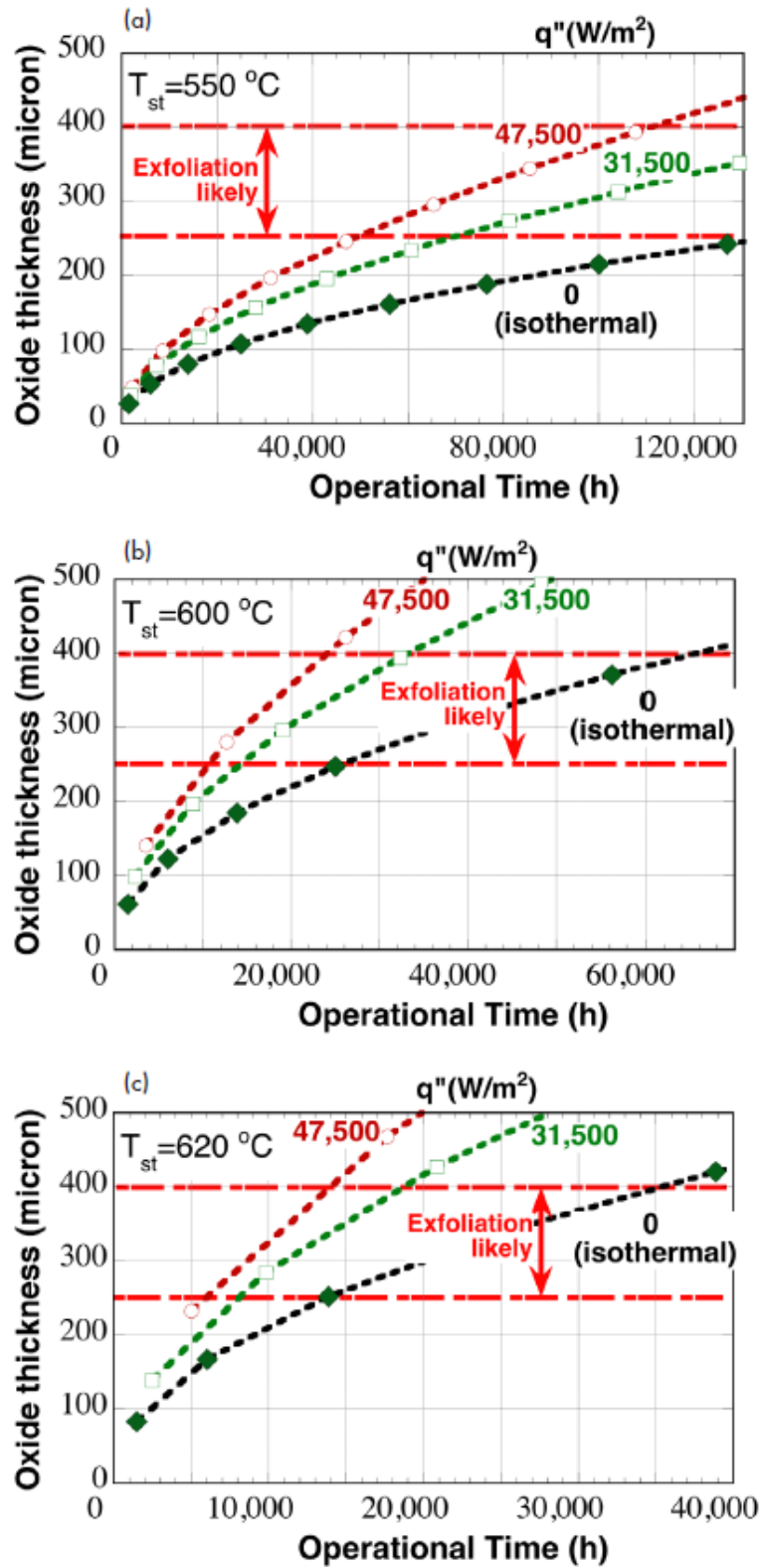


圖 2.1-1. 氧化物剝離模式計算不同溫度及熱通量之結果

表 2.1-1. 依據氧化物剝離模式建議 Grade 91 之適當運轉溫度

Steam Temperature*	Grade 91 – (Non Heat-Flux)	Gr 91 (Heat-Flux) – High Heat Flux and High Gas Temperature	Gr 91 (Heat-Flux) – Low Gas Temperature
Component	Boilers and HRSGs	Boilers	HRSGs
Recommended Use Temperature	<600°C Relatively small scale thickness expected at 100,000 hours	<560°C Exfoliation not expected in first 150,000 hours of operation	<580°C Minimal exfoliation expected for entire system
Maximum Recommended Use with a Design Review*	600-620°C Exfoliation likely after ~50,000 hours: will need to manage effects on equipment	560-580°C Exfoliation expected after ~40,000 hours: Increased tube temperatures must be accounted for in design	580-600°C Exfoliation is expected to occur, as more tubing approaches 600°C, more exfoliation will require management
Not Recommended	>620°C Exfoliation likely at less than 50,000 hours	>580°C Short-term overheat failures from exfoliation and tube blockages plus accelerating oxidation rates likely	>600°C Exfoliation will occur with potential for extensive I.D. and O.D. wall loss
ASME B&PV Sec I Code	649°C	649°C	649°C

* Steam temperature refers to main steam temperature for boilers and hot reheat outlet temperature for HRSGs.

表 2.1-2. Grade 91 壽命計算器估算管件 10 年後因氧化膜增生且伴隨不同情境下之潛變壽命影響程度

2°C Increase/year	2-12%
4°C Increase/year	27-32%
2°C+0.5%Stress Increase/year	12-25%
4°C+1%Stress Increase/year	64-99%

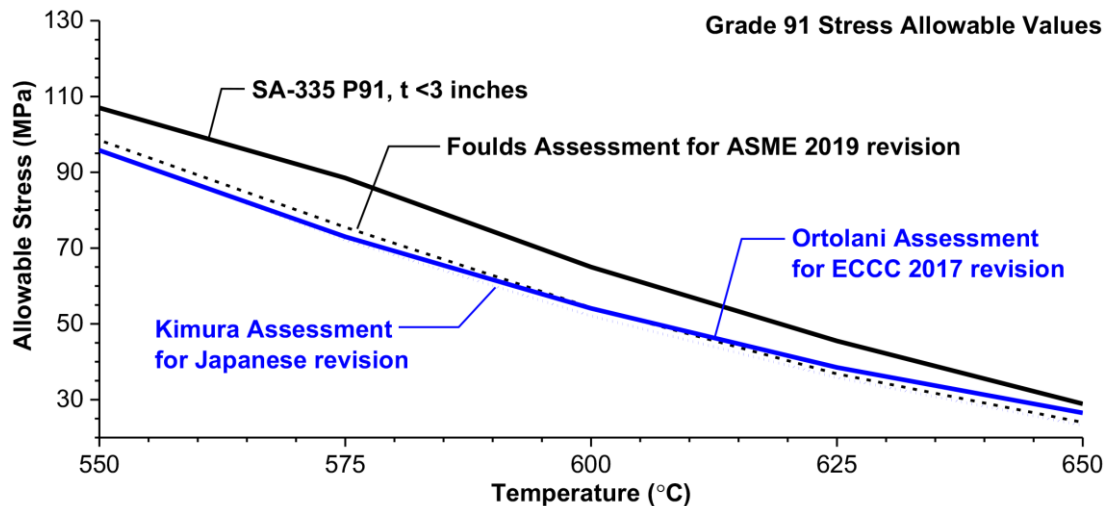


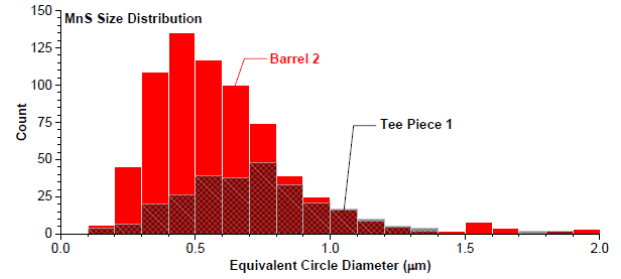
圖 2.1-2. 歐美日等先進國家下修 Grade 91 之允許應力情形

表 2.1-3 ASME 法規及 EPRI 建議之 Grade 91 組成

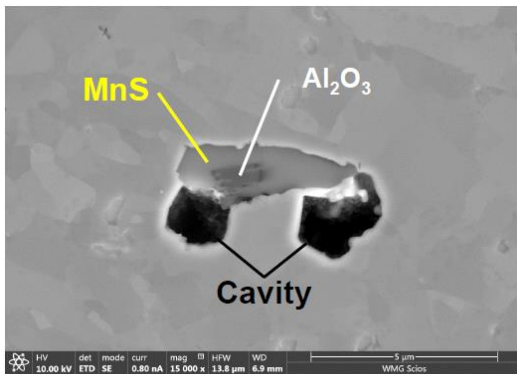
元素	EPRI		ASME
	2013	2016	SA-213
			2013-2017
C	0.08-0.12	0.08-0.12	0.07-0.14
Mn	0.30-0.60	<u>0.30-0.50</u>	0.30-0.60
P	0.02	0.02	0.02
S	0.01	<u>0.005</u>	0.01
Si	0.20-0.50	<u>0.20-0.40</u>	0.20-0.50
Cr	8.0-9.50	8.0-9.50	8.0-9.50
Mo	0.85-1.05	0.85-1.05	0.85-1.05
V	0.18-0.25	0.18-0.25	0.18-0.25
Nb	0.06-0.10	0.06-0.10	0.06-0.10
N	<u>0.035-0.070</u>	0.035-0.070	0.030-0.070
Ni	<u>0.20</u>	<u>0.20</u>	0.4
Al	0.02	0.02	0.02
Ti	0.01	0.01	0.01
Zr	0.01	0.01	0.01
Cu	<u>0.25</u>	<u>0.1</u>	-
As	<u>0.012</u>	<u>0.01</u>	-
Sn	<u>0.01</u>	0.01	-
Sb	<u>0.003</u>	0.003	-
N/Al	<u>4(min)</u>	4(min)	-
B	-	<u>0.001</u>	-
W	-	<u>0.05</u>	-

Particle	B2 (/mm ²)	TP1 (/mm ²)
Macro-inclusion analysis	142	18
MnS (fine and coarse)	720	295
AlN	~60,000	~10,000
Laves	~1,000,000	
M ₂₃ C ₆	~1,500,000	

(A) 試樣組成比較

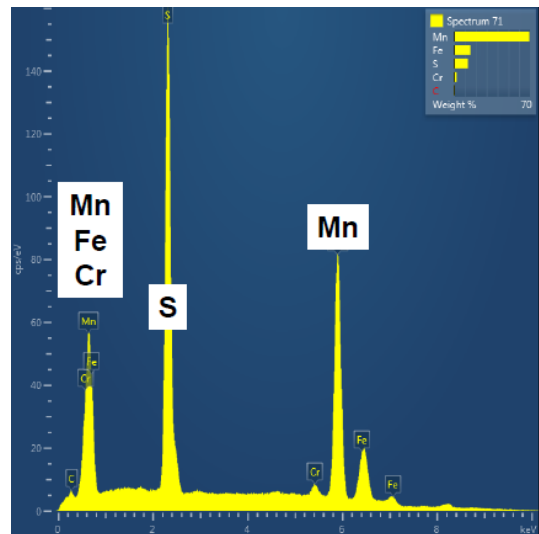


(B) 試樣 MnS 數量及尺寸

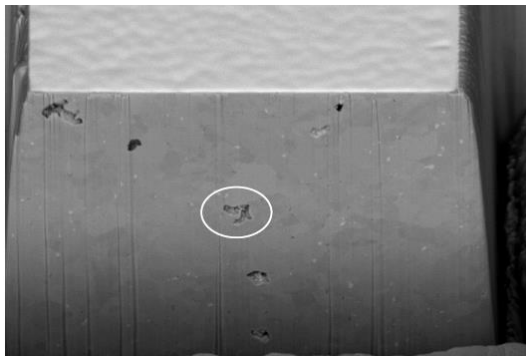


Secondary Electron Image

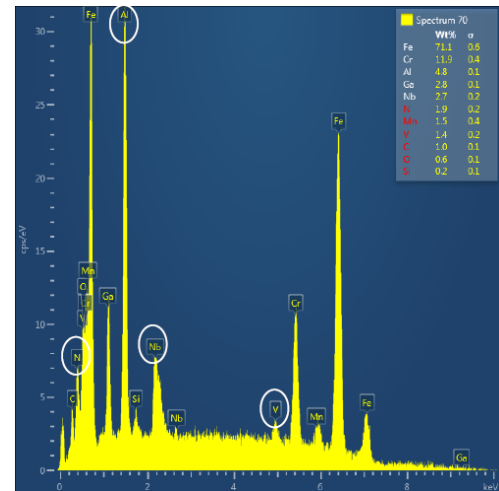
(C) 潛變孔洞與 MnS 關連



(D) 潛變孔洞旁顆粒物 EDAS

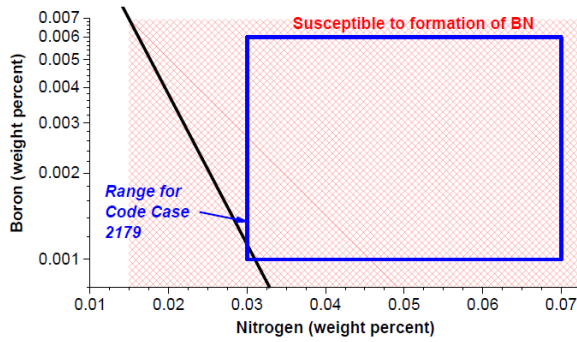


(E) FIB 逐層蝕薄後孔洞

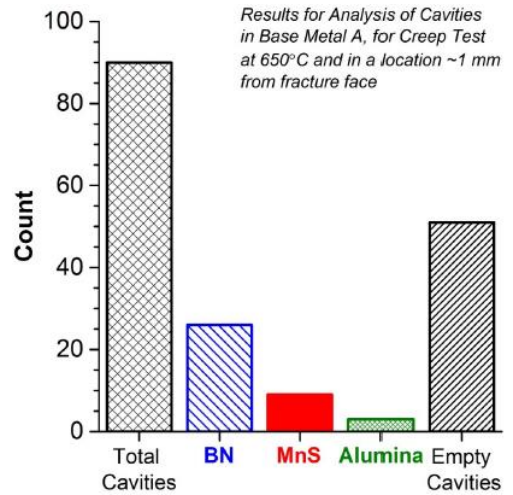


(F) 左圖孔洞內顆粒物 EDAS

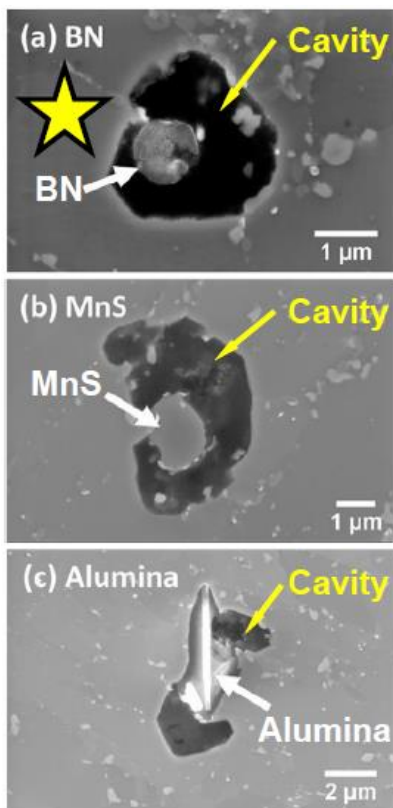
圖 2.1-3. 取樣不同介在物及析出物 Grade 91 材質經潛變試驗後分析結果



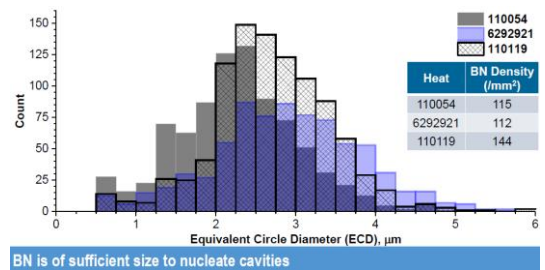
(A) Grade 92 易形成 BN 區



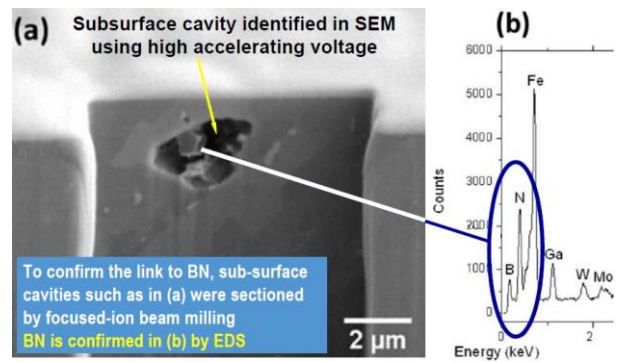
(B) 潛變孔洞與顆粒物關連



(C) 潛變孔洞與顆粒物形貌



(D) 不同試樣之 BN 粒徑分佈



(E) 潛變孔洞旁顆粒物 EDAS

圖 2.1-4. 取樣 Grade 92 材質經潛變試驗後不同介在物及析出物之分析結果

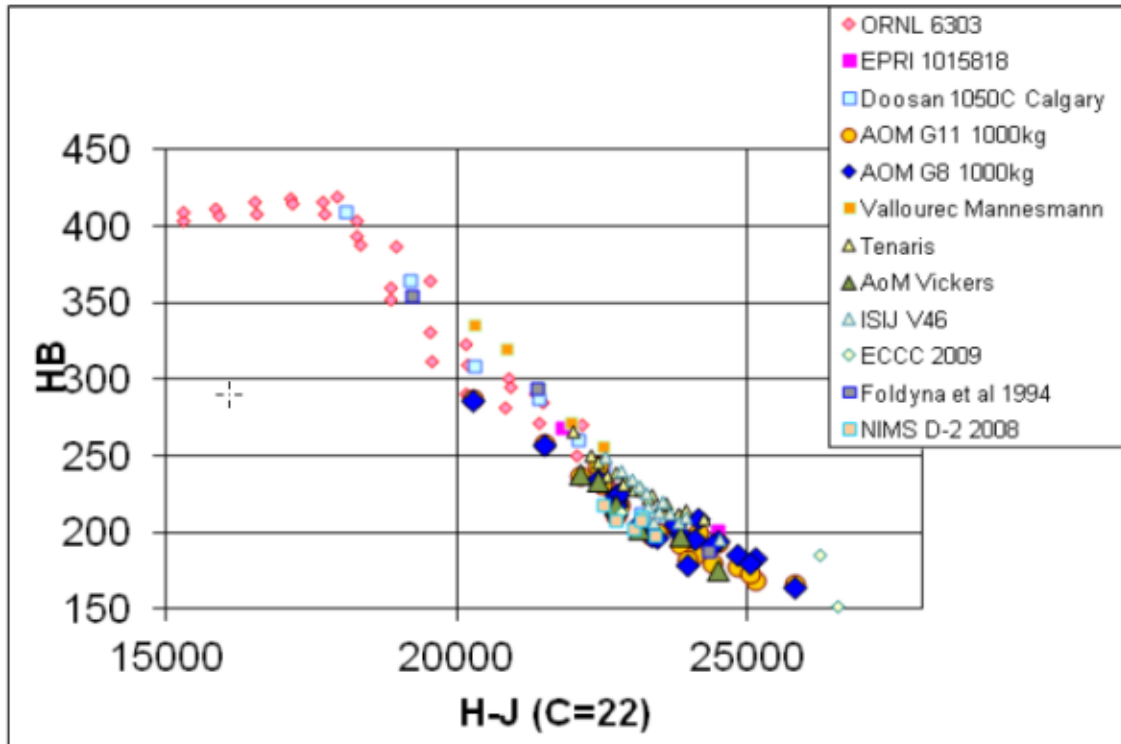


圖 2.1-5. 硬度與 Hollomon-Jeffe 參數之關連性

All Field Hardness Testers vs. Lab Data

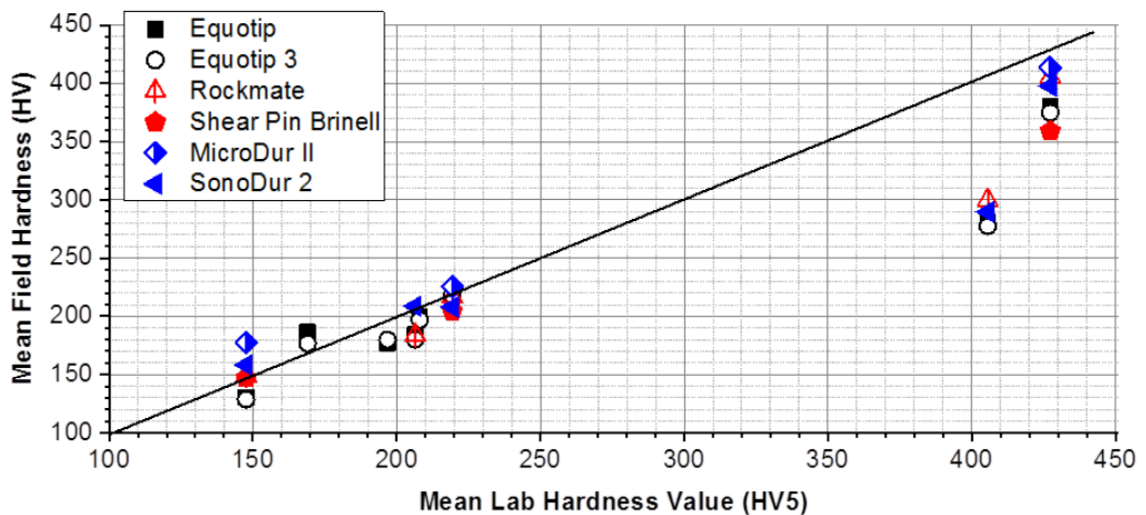


圖 2.1-6. EPRI 進行現場量測硬度與實驗室量測硬度之關連性

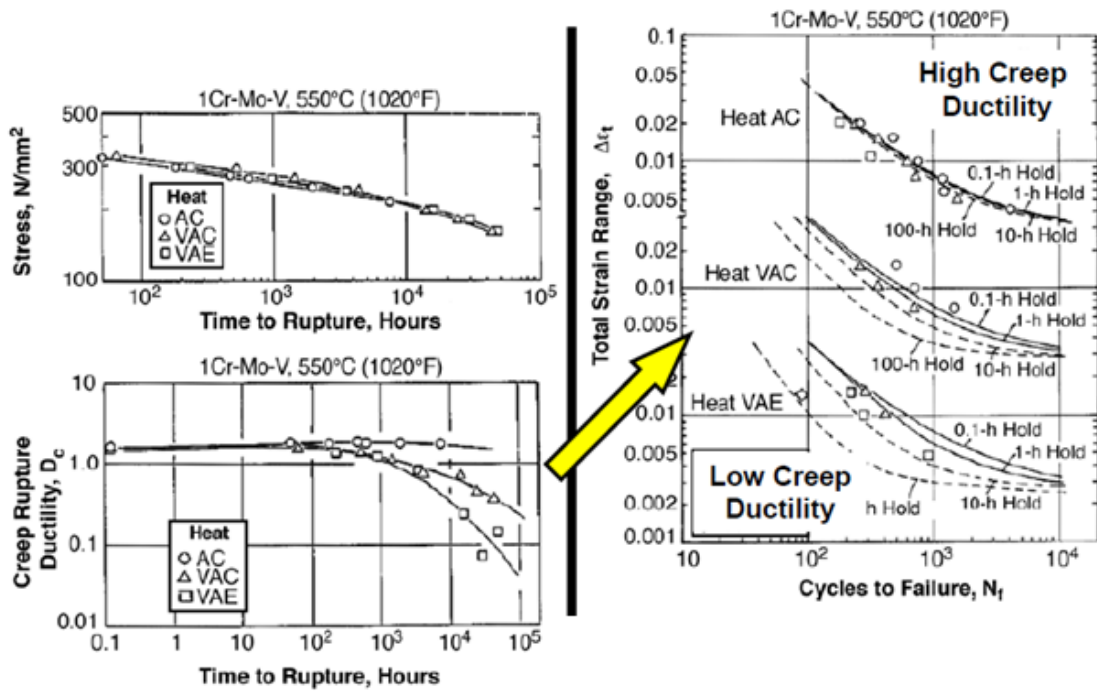


圖 2.1-7. 不同熱處理之低合金 Cr-MO-V 鋼於潛變試驗或高溫疲勞試驗之性能測定結果比較

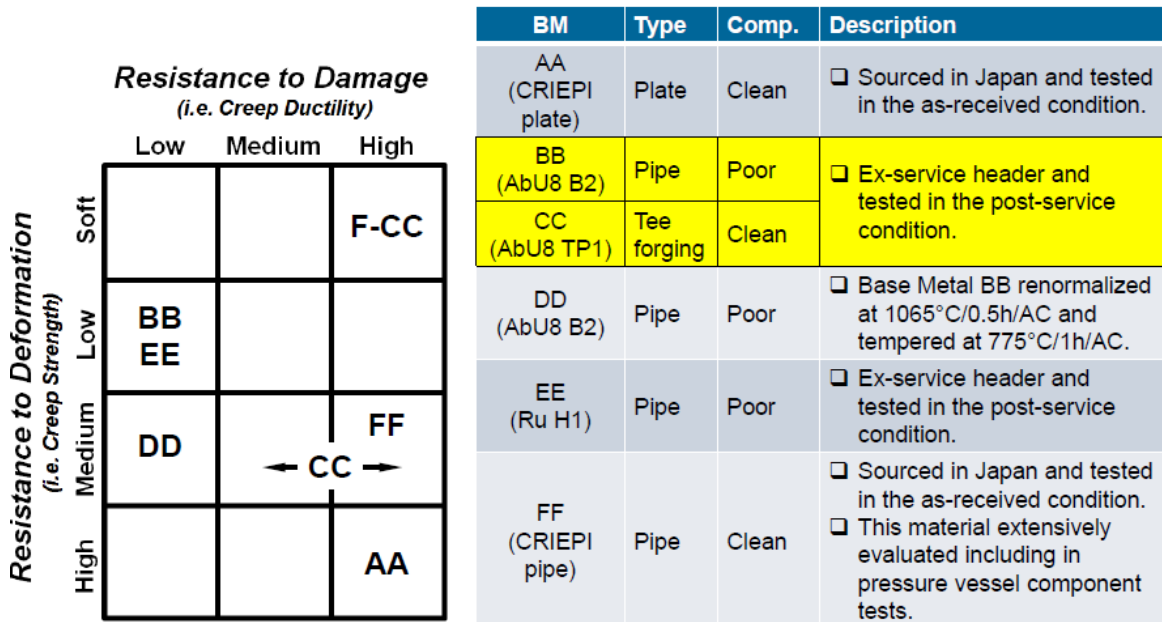


圖 2.1-8. EPRI 研究 Grade 91 材質劣化與延展性關連性之試樣分類

- Damage-susceptible (B2) and
- Damage-resistant (TP1)

Element	B2*	TP1*	What is the material response to a mechanical notch or a metallurgical notch? At the time of construction both heats were Code-compliant materials
Al	0.040	0.020	
S	0.010	0.002	
As	0.0128	0.0042	
Cu	0.19	0.05	
Sb	0.0023	0.00063	
Sn	0.0080	0.0030	
N:Al Ratio	1.1	2.1	

*Major alloying elements showed similar values between B2 and TP1 with no major deviations

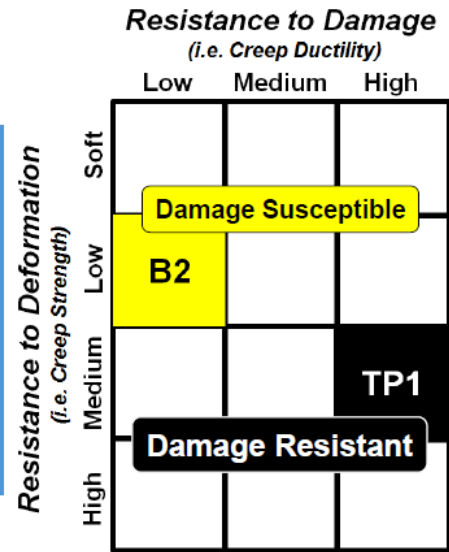


圖 2.1-9. EPRI 研究 Grade 91 材質劣化與延展性關連性主要試樣之組成

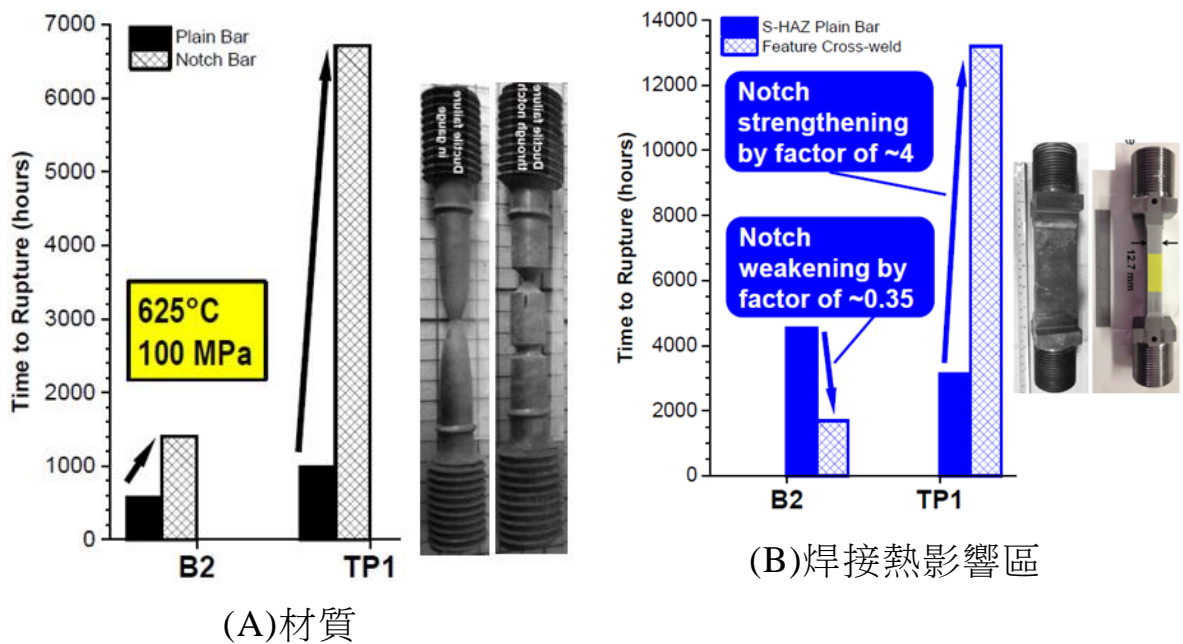
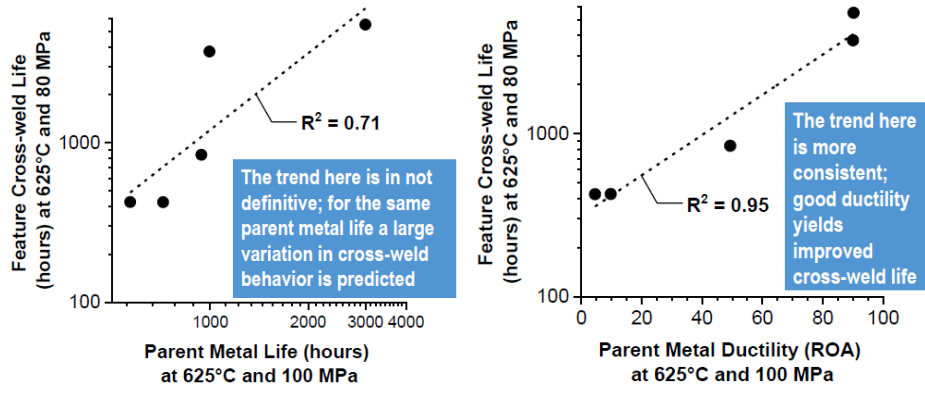
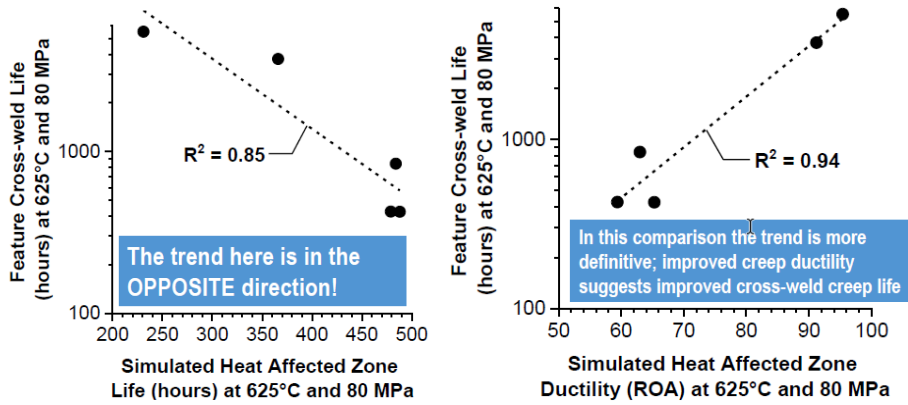


圖 2.1-10. Grade 91 材質及焊道 HAZ 潛變劣化試驗結果比較



(A) 材質



(B) 焊道熱影響區

圖 2.1-11. 以斷裂時間及面積縮減率作為潛變劣化程度之關連性比較

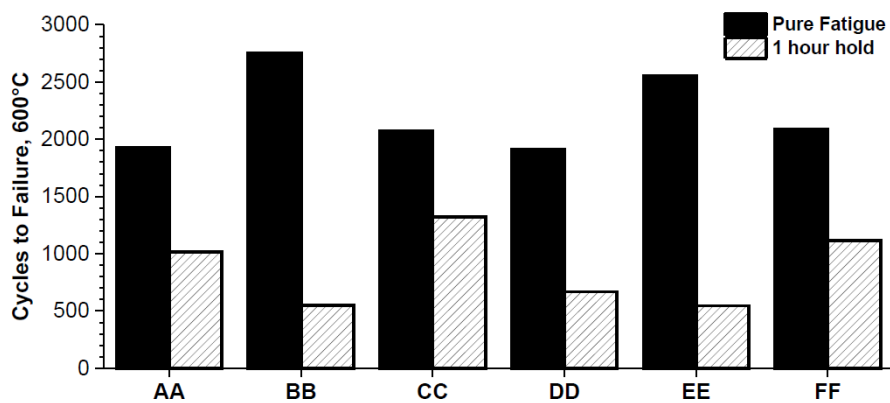


圖 2.1-12. 不同試樣於高溫疲勞及高溫潛變疲勞試驗之結果

2.2 沃斯田鐵系鋼材之研究進展【7,8】

沃斯田鐵系鋼材相較肥粒鐵系鋼材具有更高抗高溫潛變強度、抗高溫腐蝕性能、抗蒸汽側氧化腐蝕、相對鎳基鋼材較為便宜等特性，已逐步且廣泛應用於高溫度、高壓力之運轉參數環境，如圖 2.2-1 為 ASME 規範 650°C 下不同材質之允許強度比較，但 EPRI 指出近年此系列常用於次臨界發電鍋爐之 TP347 鋼材，已陸續發生過熱器、再熱器等破管案例，且幾乎多與應變引致析出硬化(Strain Induced Precipitation Hardening, SIPH) 機制所致，建議應予注意，此與本所近年電廠破管取樣分析，經常發現破裂起源處局部敏化程度異常提高、判定相同機制之結果具有一致性。

EPRI 提供研究報告所論述 SIPH 機制，較傳統單純認知晶界因敏化而致析出物集結、易於沿晶裂斷之說法有進一步闡釋；強調此機制與晶粒內析出強化、應變引致應力釋放之交互作用有關，局部應變之累積引起後續潛變孔洞發生、集結、微裂縫發生、傳播等連串破裂過程，而除運轉應力之外，殘留應力由於加速形成應變場，藉所產生高密度差排，間接促進異質成核及微細析出物之生成，扮演重要角色，由此 EPRI 藉以解釋近年發生沃斯田鐵系鋼材破損案例多與彎管、管夾與管件焊接處、焊道旁、未對心焊件等有關之所在，分別如圖 2.2-2、圖 2.2-3、圖 2.2-4、圖 2.2-5。EPRI 也提醒發生破管案例與合金元素組成也具有關連性，發現鉻(Cr)、碳(C)等含量不足時易於發生，應與強度不足時容易產生應變場有關，如圖 2.2-6，以 JmatPro 材質資料庫軟體模擬 347H 不銹鋼於約 540-550°C 溫度區間運作時，發現碳含量降低時 σ 相比比例隨之線性增加之趨勢。

除傳統沃斯田鐵系不銹鋼外，此次研討會也特別提及目前普遍應用於本公司之超超臨界鍋爐，作為過熱器、再熱器等熱交換管之 Super 304H 管材之最新研究結果。Super 304H 約為 1990 年代所研發，目的主要為改善超臨界鍋爐過熱器管之高溫強度，基本上發展構想是由前述添加鈮元素、具有晶粒細化機制之 TP347H 為起點，

再加入穩定沃斯田鐵相之氮(N)元素，及補強微細析出相而加入銅(Cu)元素，經由適當合金設計而成，其於 1998 年引介至 ASME B&PV material group 後，於 2000 年被認可，材質編號為 ASME CC-2328，目前已改版至 CC-2328-2，其與傳統沃斯田鐵系管材之組成、性能比較分別如表 2.2-1、圖 2.2-7 等所示，該材質機械性能約較 TP304H、TP347H 等提高 20%，另外發現由於細晶組織，其蒸汽側氧化腐蝕速率也大幅下降，視其細晶程度，蒸汽側氧化腐蝕速率甚至與同屬細晶之 TP347HFG 相當，可能由於後者製程繁複、成本較高，此為 Super304H 廣泛應用於高溫高壓鍋爐用途之由來。

EPRI 指出雖然一般認為該材質高溫下經久應用時具有相當延性，但潛變破裂試驗結果顯示當試驗時間超過 10,000 小時後，小於 20% 延伸率之數據點明顯增加，而比較 600°C 以上的數據時，也發現試驗達 30,000 小時試樣之延性有大幅下降之趨勢，如圖 2.2-8。另外 Super304H 材質於美國之應用雖不如日本或歐洲各國廣泛，但卻是早於 1991 年即含納於各式先進材料於著名的超超臨界示範發電廠 Eddystone #1 機鍋爐進行吊掛試驗，測試時間為 1991-2004，取樣歷時約 13 年、75,075 小時之過熱器出口管件進行室溫下機械性能試驗結果及與新管比較，如圖 2.2-9，降服強度不變、抗拉強度甚至略微提高約 60 Mpa，但伸長率即延性已明顯下降，而韌性之試驗結果，如圖 2.2-10，發現較低之 700°C 溫度時韌性較實驗室模擬試驗結果再下降約 20 J，且無平緩趨勢，及與迎氣方向有關，而高溫潛變破裂試驗結果，如圖 2.2-11，發現取樣 650°C 運轉試樣比較 700°C 運轉試樣，於約 150 Mpa 以上高應力試驗時，表現更明顯潛變劣化行為。

為釐清 Super304H 之高溫潛變劣化行為，EPRI 與橡樹嶺國家實驗室(ORNL)進行合作研究，取樣試樣計 ORNL 研究樣品及現場取樣各 3 樣，樣品類別及組成如表 2.2-2，其中 ORNL 樣品係取自於 600°C、650°C、700°C 等潛變破裂試驗結果中最長時數(即低應力試驗)之樣品，同如表 2.2-2 所示，所有取得試樣均進行包含以 EBSD、SEM 之觀察及分析，其中 ORNL 樣品更進一步分區，如圖 2.2-12。

ORNL 樣品之分析結果顯示約於 650°C 時材質組織有明顯

σ 相及麻田散鐵式之肥粒鐵相生成，尤其是近裂口區，顯示異常相之生成與塑性應變有關，而此結果也呼應表 2.2-2 中由 ORNL 所 650°C 樣品時即注意到延伸率有偏低現象，另外此樣品近裂口區進一步分析結果也發現潛變孔洞之發生與 σ 硬脆相有關，如圖 2.2-13。現場取樣分析結果也具有的一致性，如圖 2.2-14，較低溫(545°C)樣品之顯微組織無明顯變異，而參考表 2.2-2，同約 600°C 時運轉約 70,000 小時之樣品也發現 σ 相生成，運轉約 100,000 小時樣品亦發現大量肥粒鐵相生成，基於上述，EPRI 定量異常組織比例及彙整約 600°C 之實驗結果，如圖 2.2-15，並提醒此材質於 600-650°C 運轉時最容易產生如 σ 相之異常組織，且分別約於 50,000 小時、20,000 小時前即生成，而此結果與本所研究發現此材質約於 650°C 具有高度敏化且晶界析出物不再回溶現象，具有高度相關性，亦即初步推論 σ 相及臨近肥粒鐵相之生成可能由晶界析出物進一步衍化，此將留待後續研究證明。

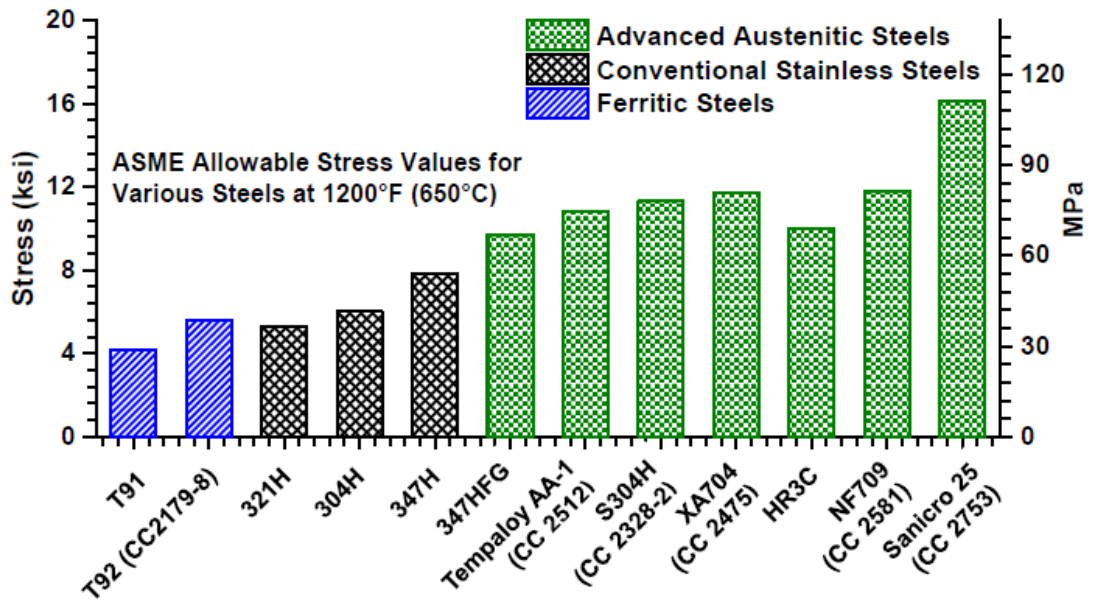


圖 2.2-1. ASME 規範於不同材質於 650°C 之允許應力比較

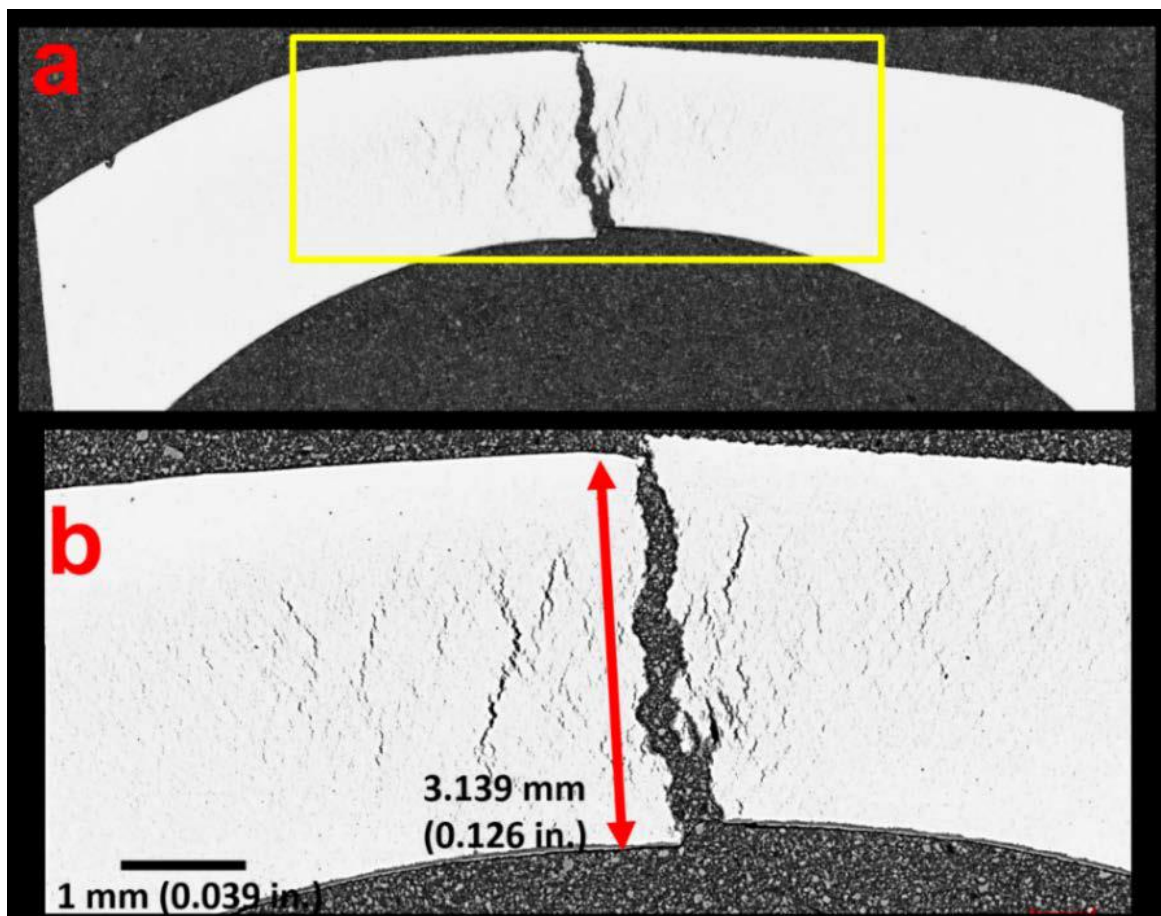


圖 2.2-2. 與 SIPH 機制有關之彎管破損案例

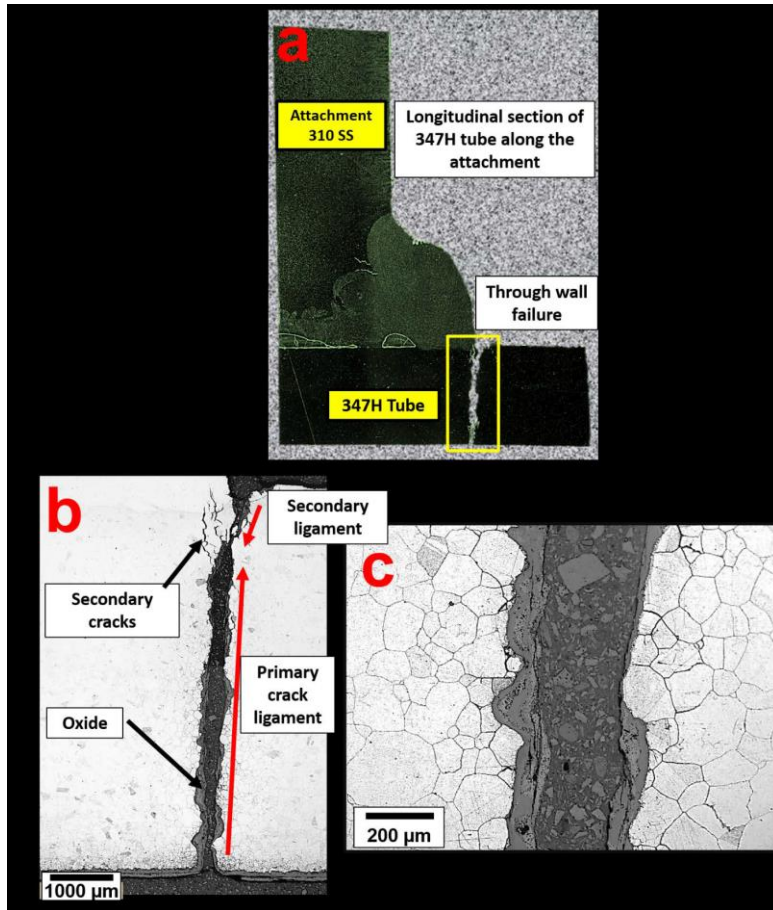
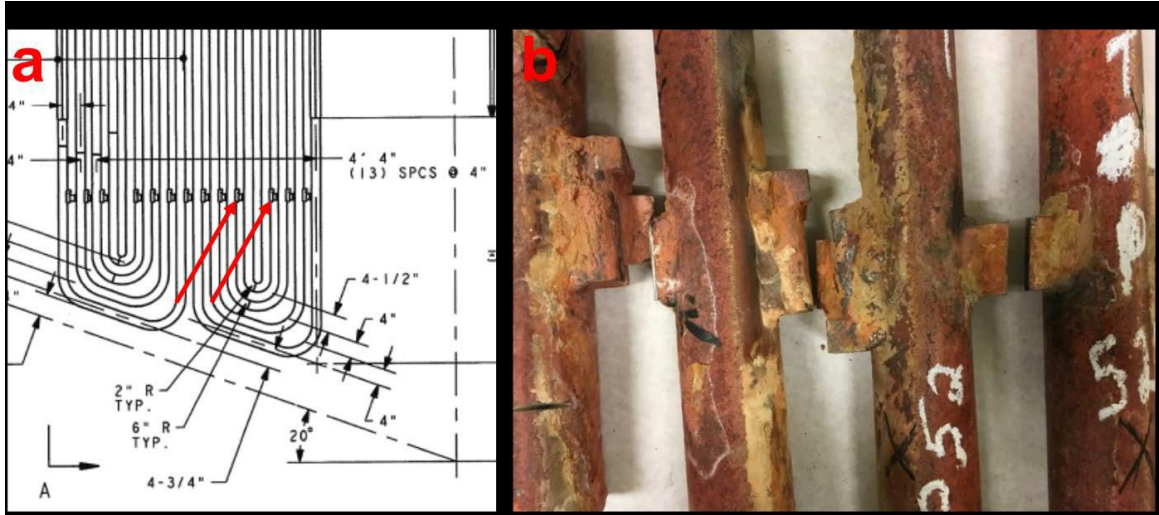


圖 2.2-3. 與 SIPH 機制有關之管夾與管件焊接處破損案例

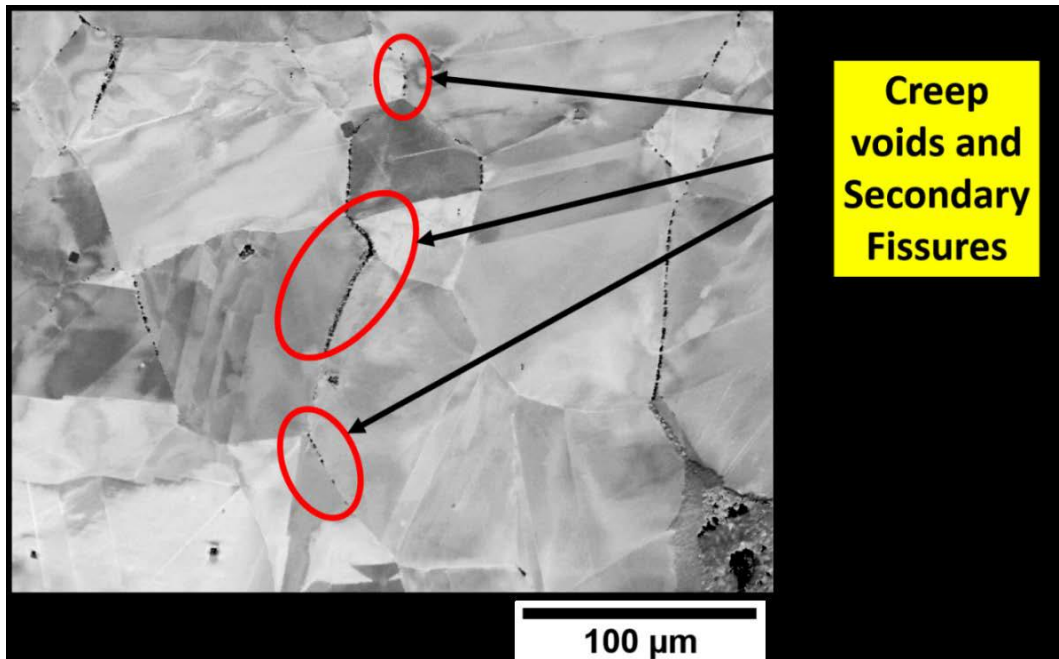
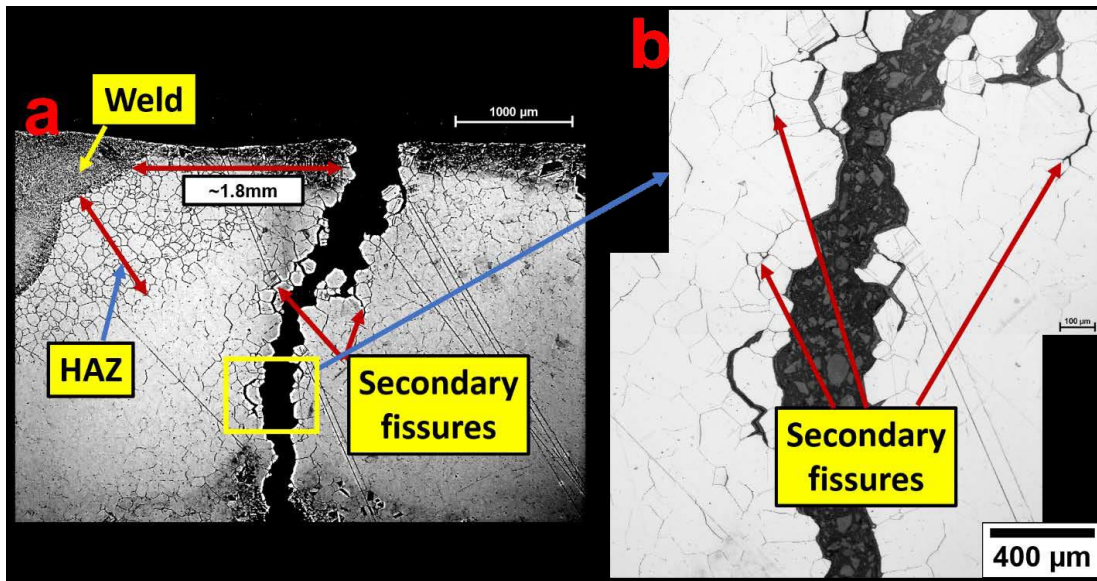


圖 2.2-4. 與 SIPH 機制有關之焊道旁破損案例

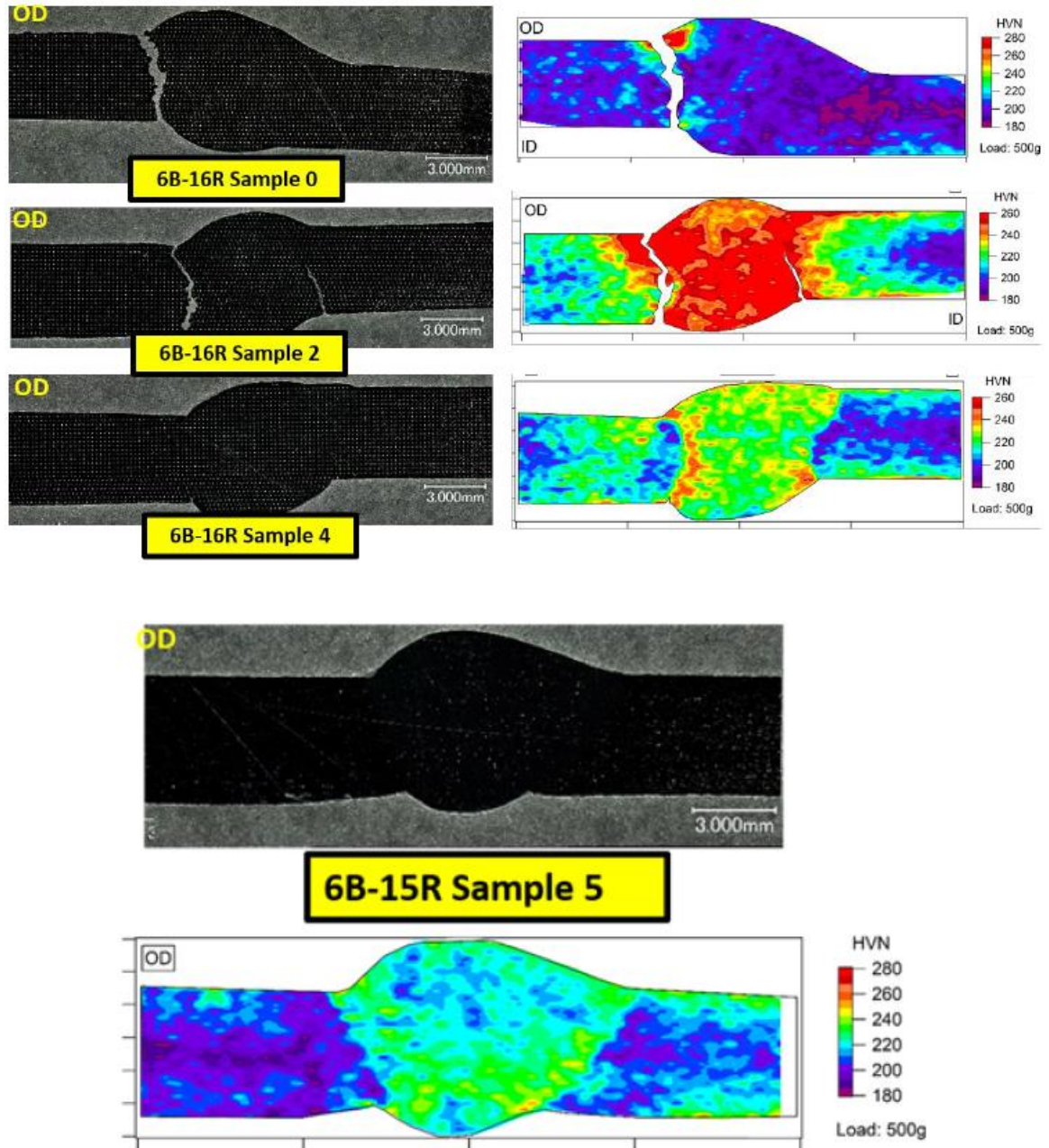


圖 2.2-5. 與 SIPH 機制有關之未對心焊件破損案例

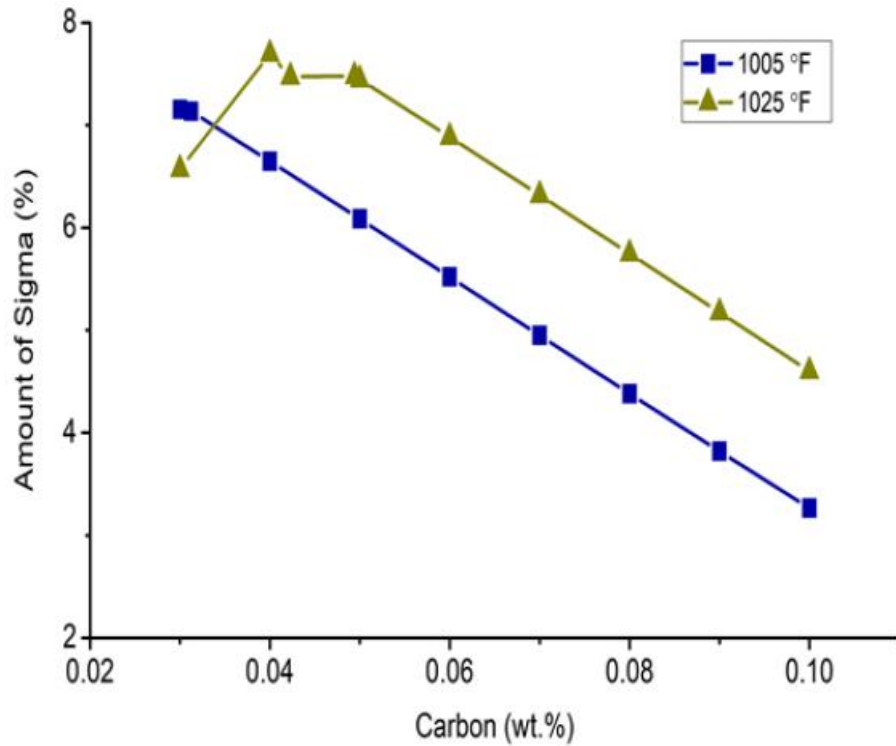


圖 2.2-6. 以 JMatPro 模擬 347 材質於不同溫度下 sigma 相比例與碳含量之關連性

表 2.2-1. ASME CC-2328 與 TP304H 及 TP347H 之組成比較

Grade	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Nb	N	Cu	Al	B
SA213-TP304H	0.04 – 0.1	2.0 Max	0.045 Max	0.03 Max	1.0 Max	18.0 – 20.0	8.0 – 11.0	–	–	–	–	–
SA213-TP347H	0.04 – 0.1	2.0 Max	0.045 Max	0.03 Max	1.0 Max	17.0 – 19.0	9.0 – 13.0	8°C – 1.10	–	–	–	–
ASME CC 2328	0.07– 0.13	1.0 max	0.04 Max	0.01 Max	0.3 Max	17.0 – 19.0	7.50 – 10.50	0.30 – 0.60	.05 – .12	2.50 – 3.50	.003 – .030	0.001 – 0.010

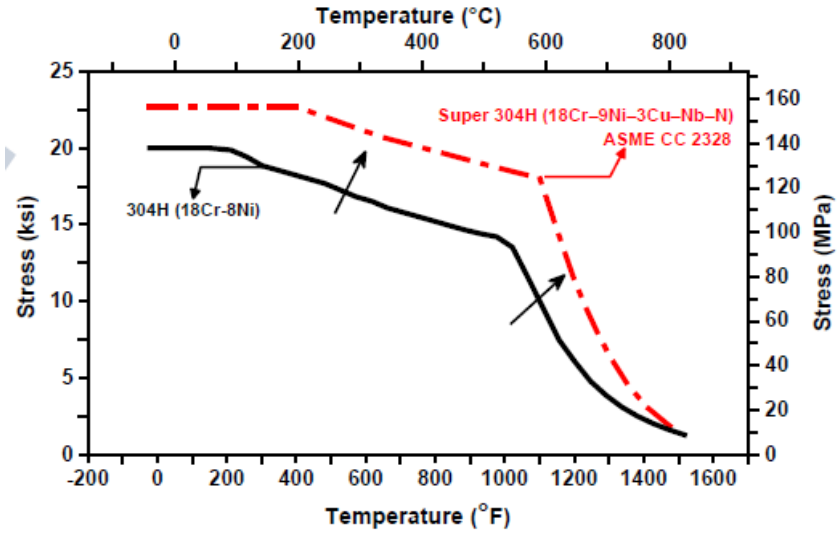


圖 2.2-7. ASME CC-2328 與 TP304H 之高溫機械性能比較

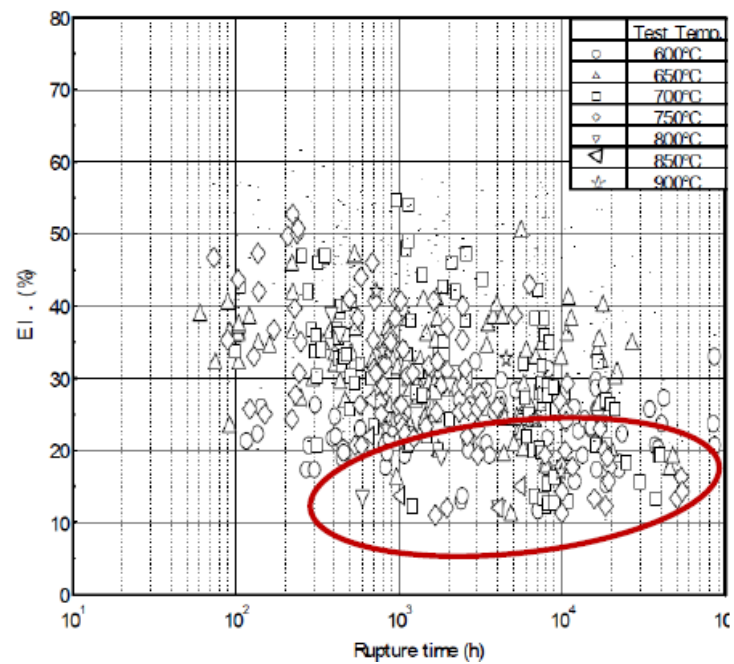


圖 2.2-8. Iseda 等人進行 Super304H 潛變破裂試驗之延伸率及破斷時間之關連性研究

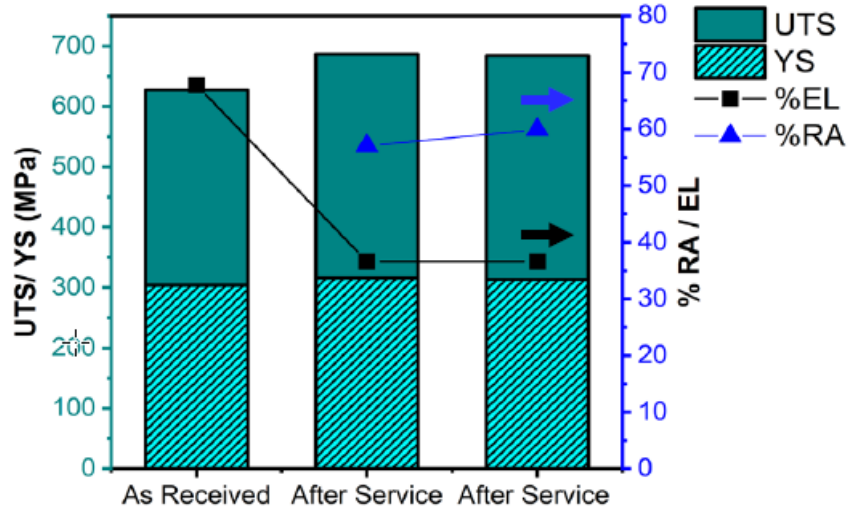


圖 2.2-9. 由 Eddystone #1 機鍋爐取樣 Super304H 管材及與未使用新管之室溫機械性能試驗結果比較

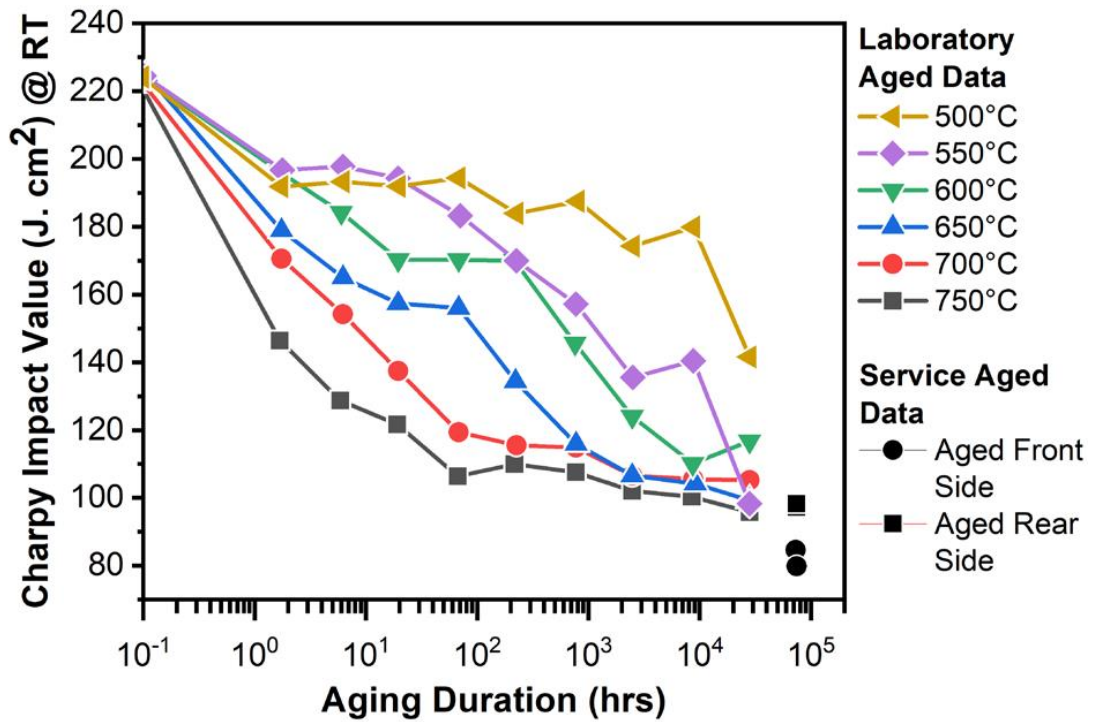


圖 2.2-10. 取樣 Eddystone #1 機鍋爐 Super304H 管材及與實驗室中高溫試驗之韌性試驗結果比較

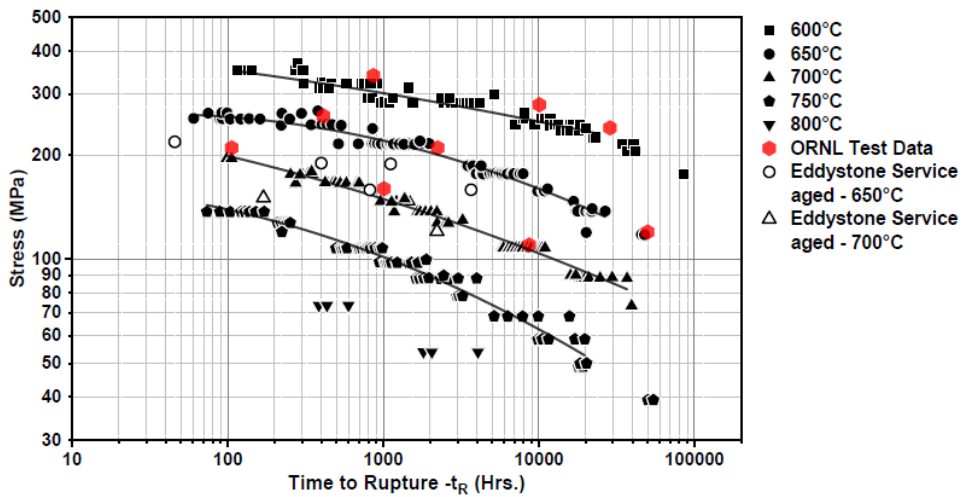


圖 2.2-11. 不同樣品進行高溫潛變破裂試驗結果及比較

表 2.2-2. EPRI 與 ORNL 合作研究 Super304H 材質之樣品

	Source	Temperature (°C/ °F)	Time (Hrs.)	Sample Type
1	ORNL	600/ 1112	28,709	Creep Test Sample
2	ORNL	650/ 1202	50,162	Creep Test Sample
3	ORNL	700/ 1292	8,677	Creep Test Sample
4	Utility 1	596/ 1105	68,550	RH Tube
5	Utility 2	600/ 1112	99,000	RH Outlet
6	Utility 2	545/ 1013	99,000	RH Inlet

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Cu	N	Al	B
ASME SA213/SA213M Code Case 2328-2	0.07-0.13	0.30 Max.	1.0 Max	0.04 Max	0.01 Max	17.0-19.0	7.5-10.5	0.30-0.60	2.50-3.50	0.05-0.12	0.003-0.030	0.001-0.010
ORNL Heat	0.084	0.20	0.45	0.019	0.0014	19.1	9.10	0.47	2.90	0.105	0.010	0.0032
Utility 1	0.091	0.04	0.83	0.030	0.0006	18.8	8.61	0.48	2.80	0.104	0.013	0.0030
Utility 2	0.084	0.16	0.85	0.029	0.0003	19.0	8.81	0.49	2.87	0.108	0.006	0.0044
Utility 2	0.092	0.248	0.81	0.031	0.0004	18.7	8.79	0.47	2.92	0.113	0.011	0.0039

#	Stress (MPa)	Temp. (°C)	Est. Life (hrs.)	Act. Life (hrs.)	Elongation (%)	Red. Area (%)	Min. Creep Rate (%/hr.)	
1	240	600	10,000	28,709	23.8	40.8	7.7e-5	✓
2	280	600	1,000	10,083	24.1	41.9	3.1e-4	
3	340	600	100	865	19.3	26.9	2.1e-3	
4	120	650	100,000	50,162	15.0	17.5	3.8e-5	✓
5	210	650	1,000	2,240	29.5	42.8	1.1e-3	
6	260	650	100	412	32.5	45.5	5.2e-3	
7	110	700	10,000	8,677	25.9	42.5	1.2e-4	✓
8	160	700	1,000	1,012	34.0	49.1	2.1e-3	
9	210	700	100	106	36.8	58.0	2.2e-2	

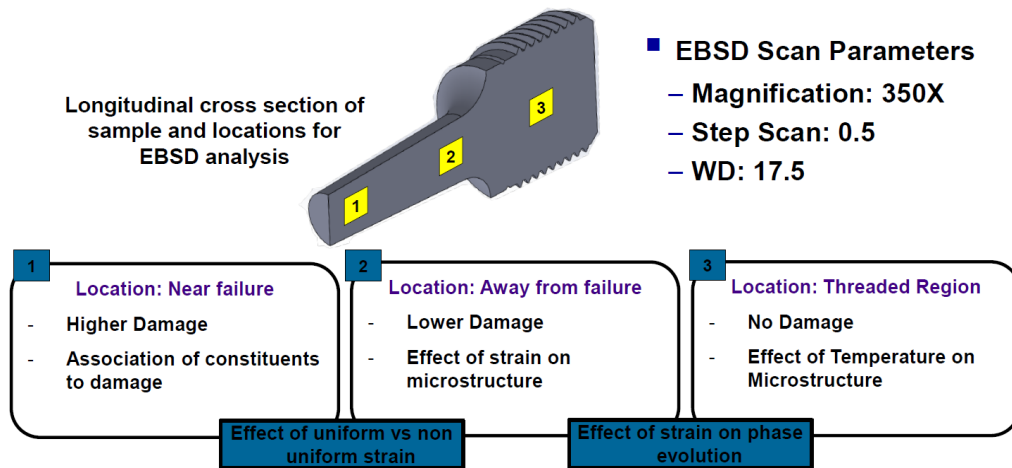


圖 2.2-12. ORNL 高溫潛變破裂試驗之樣品分析規劃

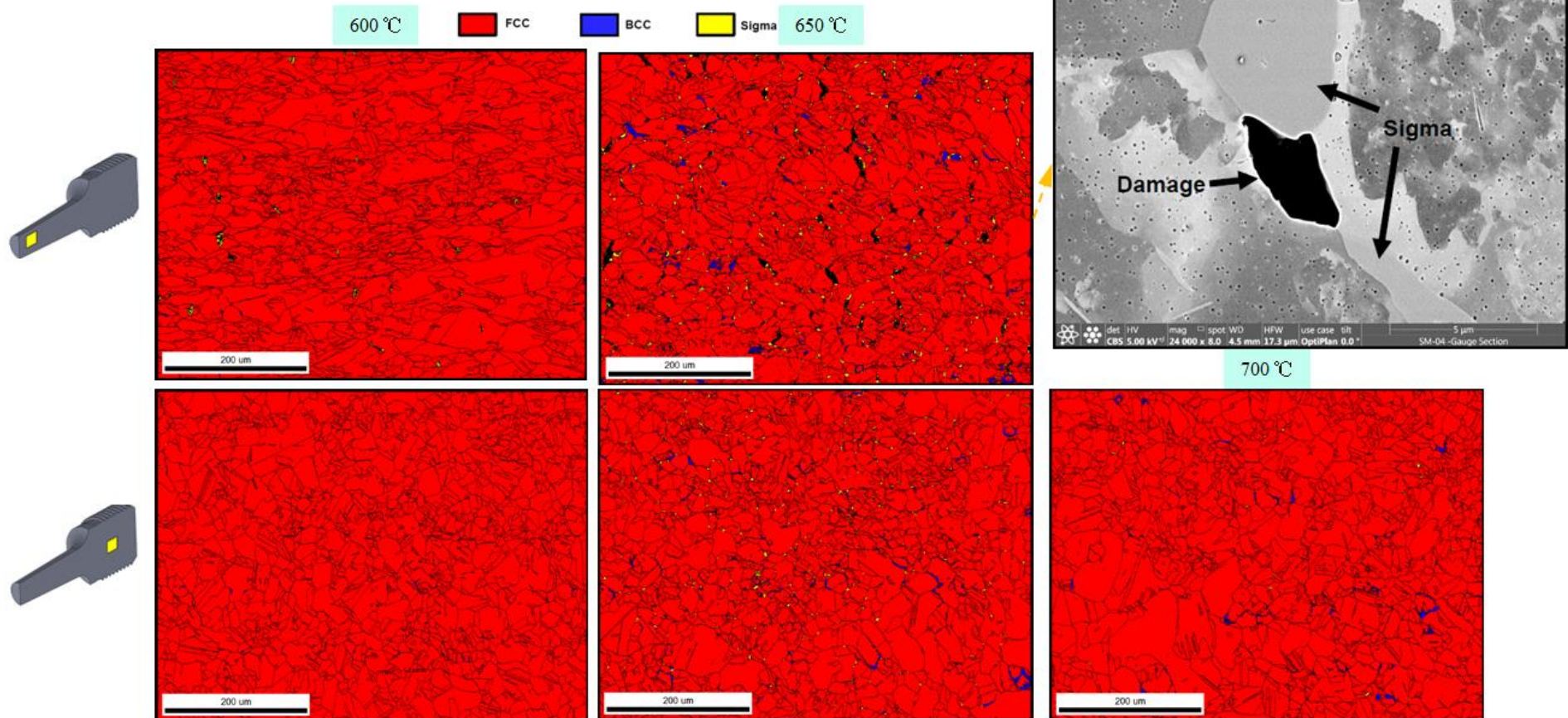


圖 2.2-13. ORNL 樣品以 EBSD 分析結果

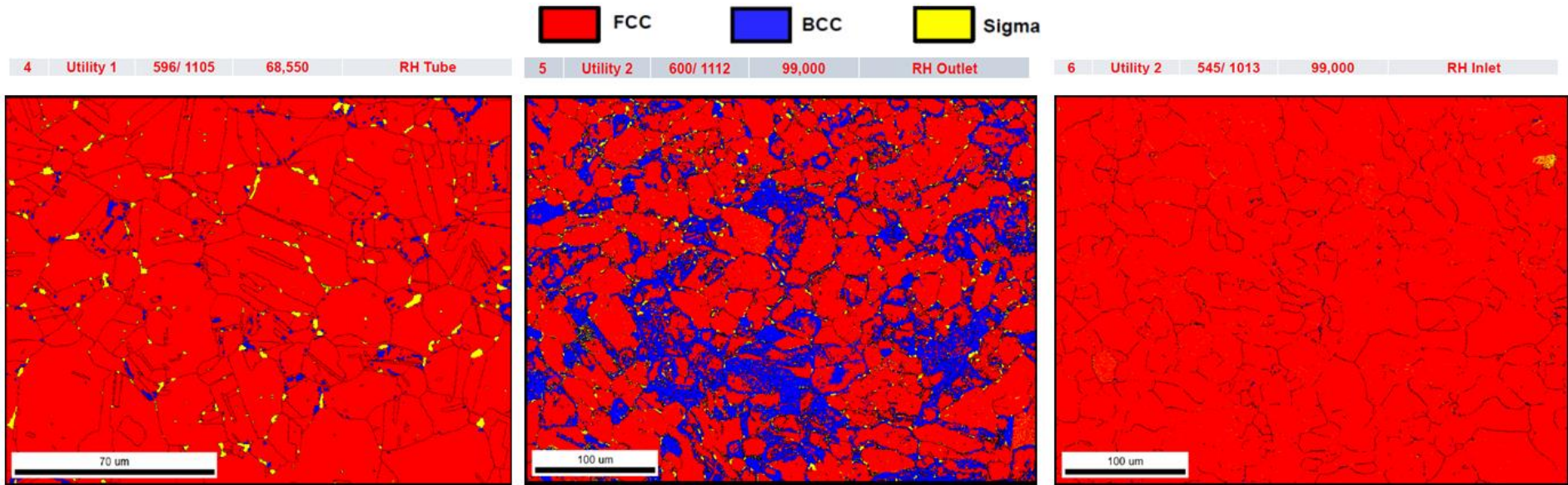


圖 2.2-14. 現場取樣以 EBSD 分析結果

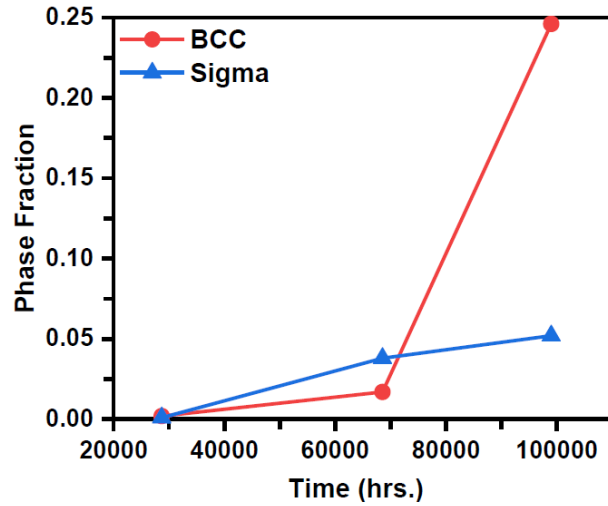


圖 2.2-15. EPRI 彙整約 600°C 之異常組織含量

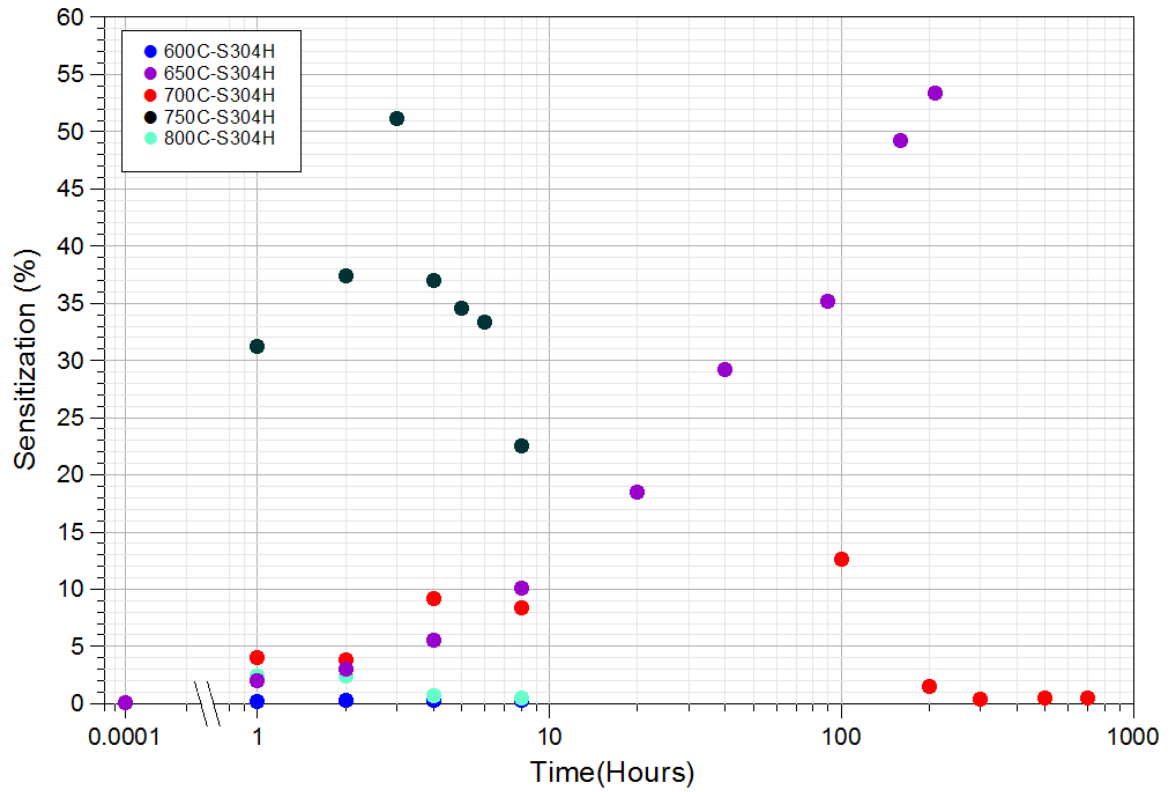


圖 2.2-16. 本所進行不同溫度及時間 Super304H 敏化定量結果

2.3 新建超超臨界電廠鍋爐經驗【9】

此次參加 EPRI P87 技技術移轉會議除代表公司發表近年新建超超臨界鍋爐之品質異常及既有老舊電廠鍋爐破管等分析及統計經驗外，會議中也聽取德國著名 RWE 電力公司與會代表發表近年新建電廠鍋爐之材質破損經驗，認為他山之石可以攻錯，值得作為參考。

RWE 電力公司於約相當於本公司新建超超臨界機組案之時程，於荷蘭 Eemshaven 及德國 Westfalen 分別新建 2 部各約 800 Mw、均為燃燒硬質煤(hard coal)發電機組，其中 Wesfalen 依序新建編號#D、#E 二部機組中，#D 機鍋爐於裝機後運轉 1,100 小時，因冷凝水拋光處理場(condensate polishing plant)運作失誤，再生樹脂用酸液污染系統約 10 分鐘，機組因高導電度信號而跳機(2013/08)，其後歷經多次管路潤洗、更換、維修、試運轉，仍繼續發生多處破漏，因此 2014/02 後 RWE 考量既有設備現況及客觀環境已不利於火力發電等，決定封存及拆售組件。

其餘 3 部鍋爐之興建過程也並不順利，RWE 新建鍋爐之額定蒸汽參數為過熱器 600°C/298 bar、再熱器 620°C/60 bar，亦即與本公司新建機組鍋爐相比較，同屬於超超臨界(USC)發電鍋爐，溫度相當但壓力更高於本公司約 255 bar，所用鍋爐組件材質因而更高等級，佈置及用料如圖 2.3-2 所示，除爐內高溫區過熱器、再熱器分別採用大量 Super304H、HR3C 材質外，水牆採用 T24 先進管材，與 P92 集管焊接之短件近爐內側亦採用固溶強化型鎳基 Alloy 617 材質，其中後二種材質未曾應用於本公司鍋爐。

依據 RWE 公司與會代表所述，於 Eemshaven 及 Westfalen 等興建同型機組 3 部鍋爐之破損案例均與順煙氣流向之 SH4、RH2、SH3 等區段，且近集管側經異質焊接約 12 cm 長之短件或管嘴有關，彙整破損之背景資料如圖 2.3-3，機制上自行分為近 HAZ(5-10 mm)之沿晶腐蝕龜裂、熔融線或 HAZ 之應力鬆弛龜裂、熔融線之單純裂斷等 3 類，其中除熔融線裂斷部份，經分

析發現有熔透不足、異常析出物、隨壁厚之異常硬度分佈等現象，確認 Alloy 617-T92 焊接程序及作業等有待商榷之外，檢視會議資料，由最大宗且運轉逾 20,000 小時仍持續於 SH4(Alloy 617 側)、RH2(HR3C 側)等區段 HAZ 發生應力鬆弛龜裂機制案例，如圖 2.3-4，及此短件與 HR3C 管件焊接後並無再進行焊後熱處理等，研判造成上述不同位置龜裂之原因與鍋爐所用短件材料設計、焊接作業、自我發展熱處理技術等應均有關連；此短件為以 Alloy 617(Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al)結合 HR3C 及 T92 等材質，立意明顯係藉由材質熱膨脹係數具有過渡性，及同以鎳基合金填料可抑制 T92 端因碳遷移機制而劣化等特點，但除短件有過短之虞及結構設計有待商榷之外，Alloy 617 及其後以近同材質 Thermanit 617 作為與 HR3C 焊接之填料，在強度匹配上也應有待考量，如圖 2.3-5，此由聲稱後續更換維修作業時改以強度較低填料亦得以證明，另外就此短件與 HR3C 焊接後無進行熱處理之原因，應與 HR3C-Alloy 617-T92 之異質焊接件不易進行退火作業，如圖 2.3-6，及 RWE 公司過度信賴自行研發爐膛退火熱處理技術等有關。

如前述，RWE 公司當其時即認為一般對於 T24、T23 等潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材可不需進行焊後熱處理之認知或廠家建議，應適度修正觀念，並且已自行開發封閉煙氣往後爐通道而採直上排放之爐膛退火技術，從而應用於發生問題之後續興建 3 部鍋爐，可能亦立意作為前述異質焊接短件之局部退火處理用途，同由會議資料，聲稱退火熱處理時爐膛控溫最高約 470°C、持續 48 小時，但由前述至今仍陸續發生應力鬆弛龜裂事故而言，除確認應無助於短件之退火處理外，可能另產生不良副作用；如圖 2.3-3，原海濱之 Eemshaven #A 電廠鍋爐、RH2 區段，於歷經 2,000 時發生以 HR3C 材質為主、Super304H 材質為輔之破漏事件，破損位置均位於離焊道 5-10 mm 處且源自內壁側、裂縫間腐蝕生成物檢出氯(Cl)、硫(S)等元素，如圖 2.3-7，被研判與瀕臨海邊、裝機過程管路兩端未封護、興建過程經常

需起動柴油發電機有關，但經更換、檢修後，約運轉 10,000 小時再以 UT 全數複檢#A、#B 等鍋爐 RH2 區段之集管、管件與管件、短管與管件等焊道周邊，SH3/SH4 區段除管件與管件外，亦進行部份複檢工作，結果除位處熔融線及焊道之顯示信號視為焊接瑕疵而無另行處理之外，再檢出沿晶腐蝕現象並分別再更換 450 件/10 件，由於現場檢測作業位置均為管外壁表面，顯示先前 470°C *48 小時之爐膛退火處理過程，已一定程度造成 HR3C 或 Super304H 等材質敏化。



圖 2.3-1. RWE 公司提供分享經驗之新建發電機組位置

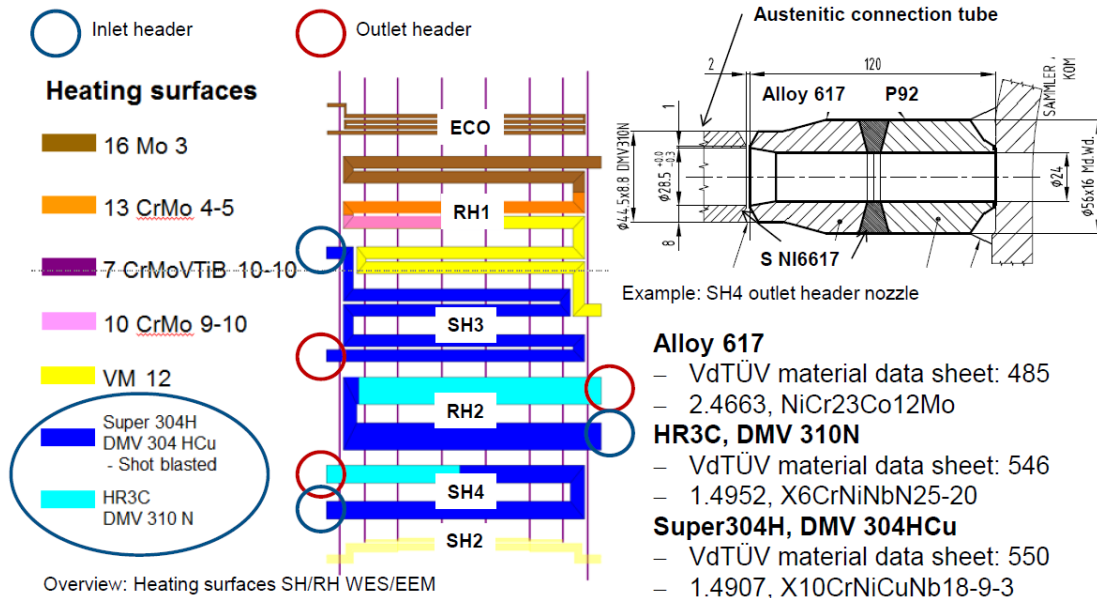


圖 2.3-2. RWE 公司興建機組鍋爐之佈置與所用材料

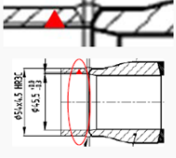
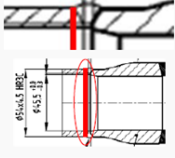
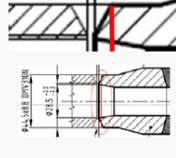
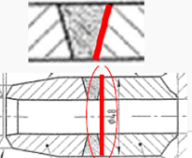
Damage	Intergranular corrosion cracking	Relaxation cracking		Cracking
Piece	Austenitic tube/tube and tube/nozzle welds	Austenitic tube/nozzle welds	Nickel-base tube/nozzle welds	DMW
Base material affected	HR3C	HR3C	Alloy 617	SNI6617 (to P92)
Area	Near HAZ	Fusion line/HAZ	Fusion line/HAZ	On fusion line
Component	RH2 (950 tubes)	RH2 (950 tubes)	SH4 (798 tubes)	SH3 (836 tubes)
Station	EEM	EEM/WES	EEM/WES	WES
Position (schematic)				

圖 2.3-3. 彙整 RWE 公司於 Eemshaven 及 Westfalen 興建鍋爐之破損案例背景

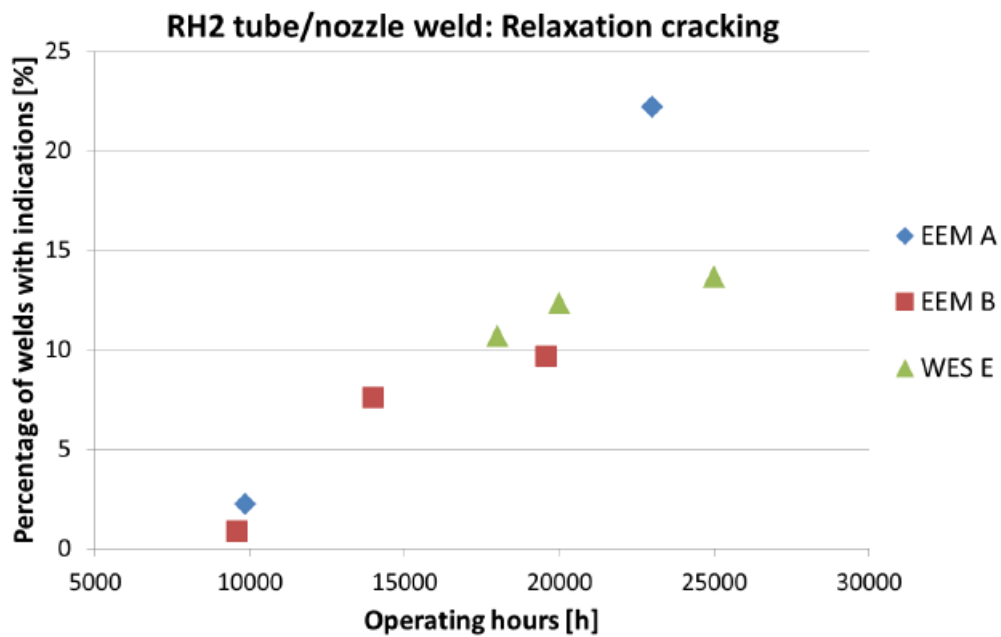


圖 2.3-4. RWE 公司於 Eemshaven 及 Westfalen 興建鍋爐之 RH2 發生破損情形

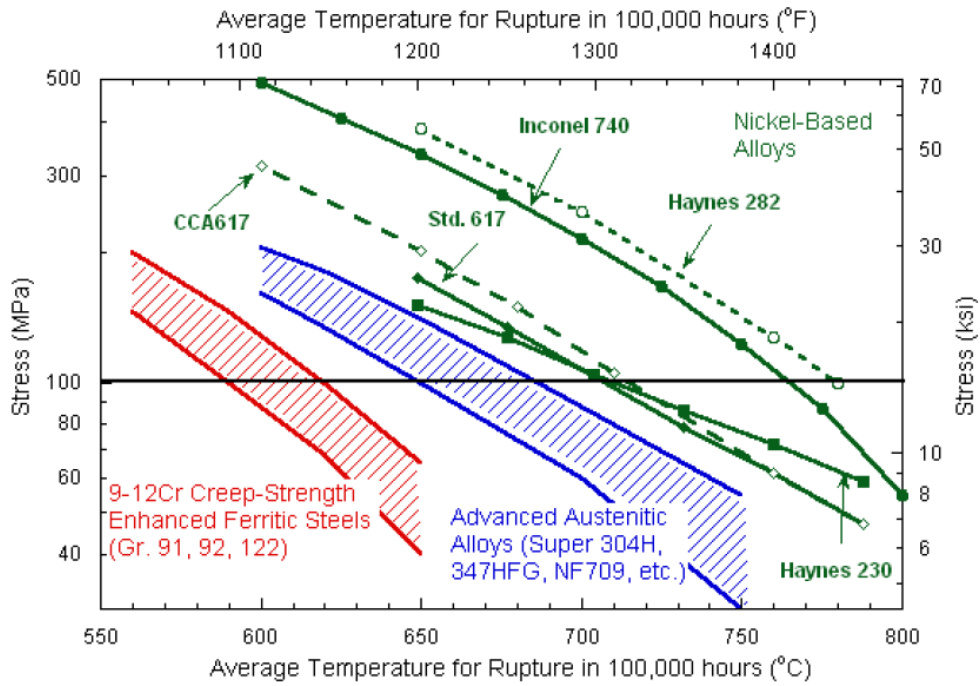


圖 2.3-5. 主要合金材料 100k 小時之潛變強度及溫度關連性

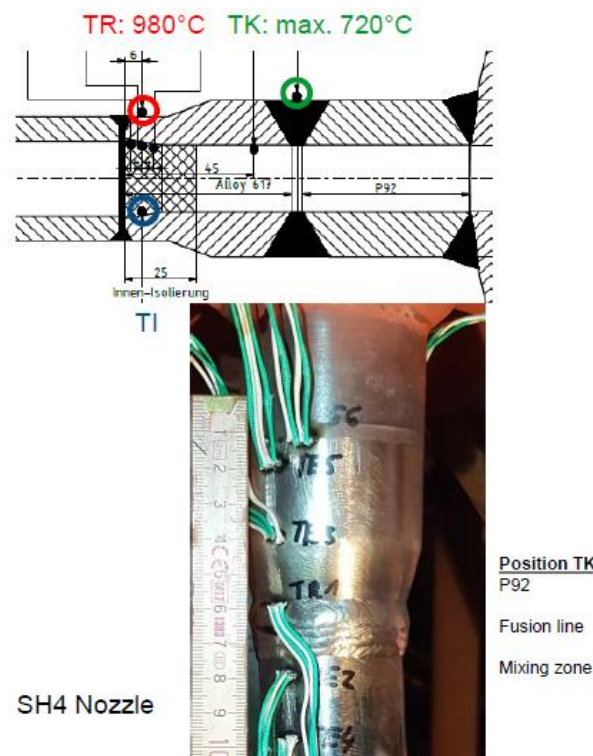


圖 2.3-6. RWE 公司進行 Alloy 617 及 HR3C 管材焊接後之熱處理作業

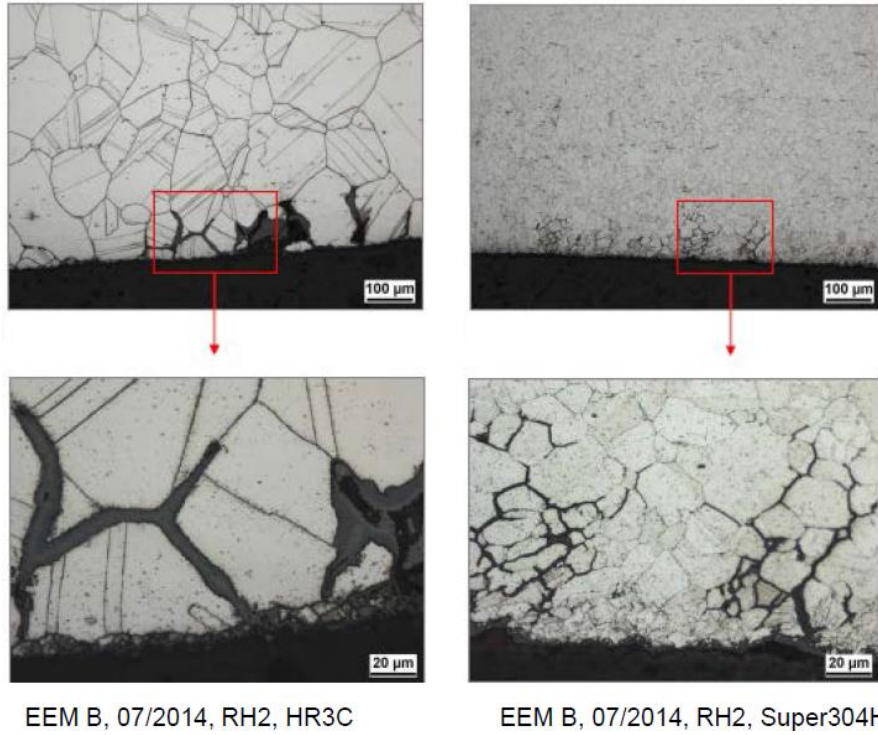


圖 2.3-7. RWE 公司於 Eemshaven #A 機鍋爐 RH2 區段發生沿晶腐蝕之破損件微觀

三、感想與建議

1. Grade 91 為目前電廠鍋爐過、再熱器集管、熱交換管、蒸汽輸送之常用鋼材，歷經約 40 年研究結果，證實以內壁蒸汽側氧化腐蝕之觀點，應設定不同熱傳環境之使用極限溫度，而各先進研究機構依潛變性能試驗結果，也有進一步下修允許應用強度之提議，證實其性能與次級 Grade 22 鋼材比較，差距已不大，值得作為應用上參考，建議若採購新品時對於組成部份可參照 EPRI 於 2016 年之提議標準，加嚴微量元素之管控，另對於已使用鋼材之劣化或壽命評估，除顯微組織、硬度量測、潛變試驗等手段外，初步研究證實藉由缺口(notch)式或仿真(feature)等試樣進行潛變破裂試驗或高溫潛變疲勞等試驗、並以延性作為指標，具有充份鑑別及精確定量殘存壽命之可行性，後續研究結果值得追蹤注意。
2. 依 EPRI 研究結果，近年國際間老舊鍋爐所用沃斯田鐵系鋼材頻傳破管事故，原因已證實多屬應變引起析出硬化(SIPH)機制，且與如彎曲塑性變形加工、夾持固定件焊接作業、管件對心不良等引起之殘留應力具有相當關連性，材質劣化過程將伴隨生成硬脆 sigma 相及退化肥粒鐵相，建議類似組件於焊接作業前後應注意及考量進行適當固溶處理，另目前盛行於超超臨界(USC)鍋爐之高溫高壓用 Super 304H 鋼材，也初步驗證於 600℃至 650℃之工作溫度區間時，分別約於 20,000、50,000 小時後將同樣產生硬脆 σ 相及退化肥粒鐵相，建議機組大修其間應持續追蹤性能及組織變異，以作為運轉維護工作之參考。
3. 由德國著名 RWE 電力公司新建超超臨界鍋爐經驗，顯示先進發

電機組之鍋爐設計、運轉、維護等工作均具有高度專業性，欲保持機組長期運轉極為不易，一時疏忽甚至將造成鍋爐永久封存，值得作為借鏡，而綜合 RWE 電力公司於 Eemshaven 及 Westfalen 等電廠鍋爐所發生類似本公司之短件破損案例經驗也證實，高參數發電鍋爐之異質焊接短件無論結構設計、焊接作業、熱處理程序等，技術層面上均未臻成熟化，建議對於後續新建同型發電鍋爐過程中如設計、安裝、運轉等階段務必採取保守且審慎態度為宜。

。

四、參考文獻

1. “Guide to Grade 91 Use Temperature Limits Due to Steam Oxidation and Exfoliation” , EPRI 3002011137, Aug. 2017
2. “Integrated Life Management of Grade 91 Steel Components a Summary of Research Supporting the Electric Power Research Institute’s Well-Engineered Approach” , EPRI Technical Update report, May 2018
3. “Metallurgical Risk Factors in 9%Cr Creep Strength Enhanced Ferritic (CSEF) Steels” , John A. Siefert and Jonathan D. Parker , EPRI P87 Technology Transfer meeting, 2018
4. “Comparison of Grade 91 Steel Heat Treatments Utilizing Lab Hardness vs. Field Hardness testers” , Jeffery King , EPRI P87 Technology Transfer meeting, 2018
5. ” The Grade 91 Steel Handbook” , EPRI 3002001465, Aug. 2013
6. ” Fujimitsu Masuyama, Advances_in_Creep_Damage Life Assessment Technology_for_Creep Strength Enhanced Ferritic_Steels”, 2013 6th International Conference on Creep, Procedia Engineering 55 (2013) 591 – 598
7. ” Characterization of Advanced Austenitic Stainless Steels -Microstructure Evolution in Super304H After Prolonged Exposure to High Temperatures” , Tap Lolla, Mike Gagliano, EPRI P87 Technology Transfer meeting, 2018
8. ” Long-term Creep Properties and Microstructure of Super304H, TP347HFG and HR3C for Advanced USC Boilers” , Iseda et.al, , Material Science and Engineering for Energy System, 2007
9. ” Recent Damage Evaluations on Austenitic Boiler Tubes associated with Supercritical Plant” , Simon Heckmann, Anne Woestmann, Ken Mitchell , EPRI P87 Technology Transfer meeting, 2018