

出國報告（出國類別：開會）

參加 EPRI_P87 計畫研究成果技術轉移
及計畫論壇等會議

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：美國

出國期間：105 年 6 月 11 日至 6 月 19 日

報告日期：105 年 8 月 8 日

QP-08-00 F04

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 EPRI_P87 計畫研究成果技術轉移及計畫論壇等會議

頁數 67 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)8078-2208

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：105 年 6 月 11 日至 6 月 19 日 出國地區：美國

報告日期：105 年 8 月 8 日

分類號/目

關鍵詞：超臨界機組、潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材、進步型超超臨界發電

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國至美國參加美國電力研究院(EPRI)舉辦之 P63 鍋爐可靠度(BRIG)論壇、P87 潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材(CSEF)論壇、P87 技術移轉等會議，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，其瓶頸在於新材料之開發及長期運轉性能之確保，文中除以材質極限應用溫度、材質組成、焊接作業及品質管理等為著眼，簡介 EPRI 關於 Grade 91 及 Grade 92 等目前廣泛應用於次臨界及超臨界鍋爐 CSEF 材料之最新研究成果及應注意事項外，亦彙整簡介目前美國、日本有關進步型超超臨界發電(A-USC)研究進展及鍋爐材料之開發狀況。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

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 美國電力研究院(EPRI)Grade 91 材質及焊接研究進展	7
2.1.1 材質極限應用溫度.....	7
2.1.2 材質組成.....	10
2.1.3 焊接作業及品質管理.....	19
2.2 Grade 92 及新型潛變強度增強型肥粒鐵鋼材研究進展.....	36
2.2.1 Grade 92.....	36
2.2.2 SAVE12AD.....	41
2.3 先進型超超臨界發電鍋爐之鎳基合金材料研究進展.....	48
三、感想與建議.....	57
四、參考文獻.....	58

表目錄

表 1-1	行程及工作內容	6
表 2.1.2-1	ASME 法規及 EPRI 建議之 Grade 91 組成	18

圖目錄

圖 1-1	6/13 議程(EPRI P63 鍋爐可靠度 BRIG 聯席會議).	2
圖 1-2	6/14 議程(EPRI P63 鍋爐可靠度 BRIG 聯席會議)	3
圖 1-3	6/15 議程(EPRI-P87 潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材 CSEF 聯席會議)	4
圖 1-4	圖 1-4.6/16 議程(EPRI-P87 技術移轉會議)	5
圖 1-5	6/17 議程(EPRI-P87 技術移轉會議)	5
圖 2.1.1-1	Grade 91 於不同溫度及熱通量下之氧化膜增長	8
圖 2.1.1-2	Grade 91 於 31500 W/m ² 熱通量下之氧化膜增長	8
圖 2.1.1-3	EPRI 考量金屬溫度及應力所估算之 Grade 91 潛變壽 命	9
圖 2.1.1-4	北美鍋爐 Grade 91 破管經驗及 EPRI 剝離模式預測結 果	9
圖 2.1.1-5	EPRI 建議 Grade 91 材質應用溫度與範圍	10
圖 2.1.2-1	英國 Aberthaw 電廠高溫集管與短管裂縫數量與 N/Al 比值關連性	13
圖 2.1.2-2	英國 Aberthaw 電廠取樣拉伸試驗結果	13
圖 2.1.2-3	Grade 91 試樣經潛變試驗後面積縮減率與 N/Al 比 值關連性	14
圖 2.1.2-4	B&W 公司評估 Grade 91 組成對潛變性能影響之試 樣	14
圖 2.1.2-5	B&W 公司 Grade 91 母材及跨焊件之潛變試驗結果	15
圖 2.1.2-6	B&W 彙整 625°C 進行 Grade 91 試樣潛變試驗結果	15

圖 2.1.2-7	不同 N/Al 比值鋼材進行 PWHT 後之硬度變化	15
圖 2.1.2-8	EPRI 依潛變試驗延性分析 Grade 91 合金組成結果	16
圖 2.1.2-9	EPRI 依 p 值檢定篩選 Grade 91 高危險性合金元素	17
圖 2.1.3-1	EPRI 提供 CSEF 材質焊接作業程序建議之示意	23
圖 2.1.3-2	肥粒鐵系鋼材隨溫度變化之氫溶解度及氫擴散速率	23
圖 2.1.3-3	Grade 91 焊件以 Y 槽式測定脆性之結果	24
圖 2.1.3-4	Grade 91 之麻田散鐵完成率與溫度關連性	24
圖 2.1.3-5	EPRI 依據其壽命評估資料庫示意不當熱處理對於潛變劣化壽命之影響	24
圖 2.1.3-6	Charpy 衝擊試驗測試 Grade 91 焊道及熱影響區及不同焊道堆疊程序之結果	25
圖 2.1.3-7	EPRI 探討 Grade 91 破裂力學特性之研究架構	26
圖 2.1.3-8	依 ASTM E1820-13 測定 Grade 91 不同焊後熱處理 (PWHT)破裂韌性之結果	26
圖 2.1.3-9	EPRI 彙整不同焊件之潛變破裂試驗結果	27
圖 2.1.3-10	以 DHD 法量測焊件殘留應力之結果	27
圖 2.1.3-11	不同 PWHT 溫度對於焊件硬度之影響	28
圖 2.1.3-12	模擬設定焊道表面為 700°C 時焊件內部溫度變化	29
圖 2.1.3-13	不同熱處理作業時焊件之溫度變化	30
圖 2.1.3-14	EPRI 熱處理作業教學影帶之片段	30
圖 2.1.3-15	熱回收鍋爐運轉參數及高壓材質之演進	31
圖 2.1.3-16	典型 Grade 91 與不銹鋼材異質焊接件於高溫運轉後之劣化組織	31

圖 2.1.3-17	Grade 91 與不銹鋼材異質焊接件之表面裂損組織	32
圖 2.1.3-18	Grade 91 異質焊接之氧化物侵入現象	32
圖 2.1.3-19	EPRI 研究 Grade 91 異質焊接之實驗工件	33
圖 2.1.3-20	大型異質焊件之高溫潛變破裂實驗結果	33
圖 2.1.3-21	小型異質焊件之細部實驗設計	34
圖 2.1.3-22	小型異質焊件之潛變試驗結果	35
圖 2.1.3-23	階梯式焊件之潛變破裂過程示意	35
圖 2.1.3-24	小型異質焊件之部份殘留應力分析結果	36
圖 2.2.1-1	EPRI 比較 Grade 91 及 Grade 92 不同試樣之潛變破裂試驗結果	37
圖 2.2.1-2	同約 26k 小時潛變破裂 Grade 92 試樣之斷面比較	37
圖 2.2.1-3	不同合金組成之 Grade 92 材質經 650°C *90MPa 之潛變試驗結果	38
圖 2.2.1-4	Grade 92 於 650°C 潛變試驗後斷面旁空孔定量結果	39
圖 2.2.1-5	材質中 BN 形成區間與元素組成關連性	39
圖 2.2.1-6	高量雜質 Grade 92 經固溶熱處理後潛變試驗結果	40
圖 2.2.1-7	美國 DOE 支助進行 Grade 92 材質之研究分工情形	40
圖 2.2.2-1	日本 A-USC 鍋爐用料規劃及候選材料	43
圖 2.2.2-2	SAVE12AD 合金元素設計	44
圖 2.2.2-3	9Cr-3Co-3W 添加Nd 之 SAVE12AD 潛變速率及破斷延性試驗結果	44
圖 2.2.2-4	SAVE12AD 潛變試驗結果及微組織	45
圖 2.2.2-5	新日鐵住金公司之 SAVE12AD 母材潛變試驗結果	45
圖 2.2.2-6	SAVE12AD 試驗不同焊條之潛變試驗結果	46

圖 2.2.2-7	EPRI 進行 SAVE12AD 研究選用材質及熱處理條件	47
圖 2.3.1-1	發電鍋爐蒸汽溫度演進及 A-USC 研究規劃	51
圖 2.3.1-2	MHI 試製 HR6W 集管組合件外觀及縱向焊道結構	51
圖 2.3.1-3	平板焊件(上)及大管焊件(下) 之潛變試驗結果	52
圖 2.3.1-4	不同材料蒸汽氧化(左)及熔融灰浸漬(右)試驗結果	53
圖 2.3.1-5	美國 A-USC 研究計畫之時程規劃	53
圖 2.3.1-6	美國 A-USC 研究計畫評估候選鎳基合金材料結果	54
圖 2.3.1-7	主要合金材料 100k 小時之潛變強度及溫度關連性	54
圖 2.3.1-8	美國 A-USC 研究計畫材料製造及焊接試製	55
圖 2.3.1-9	美國 A-USC 研究計畫材料高溫腐蝕試驗情形	56

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機組中，預計 105 年起部份機組即將商業運轉，由於運轉參數(溫度 602°C/壓力 24.5MPa)遠高於目前亞臨界機組(溫度 540°C/壓力 17.8MPa)，為確保與提升未來機組運轉之可靠度與安全性，本公司 101-103 年、104-106 年參加美國電力研究院 (EPRI)之 P87 計畫，計畫內容主要與興建中機組之超超臨界材料高溫性能、設備保固檢測與壽命評估、材料焊接、設備組件修護實務等研究及技術開發有關，101-103 年執行保留基金(Set-Aside Fund)計畫尚有部份剩餘，EPRI 通融須於 105 年內執行完畢，適逢其 105 年度舉辦技術移轉及分項論壇等會議，每日議程安排如圖 1-1 至圖 1-5，會中除將發表超臨界材料之最新研究成果外，同時亦匯集各製造廠家、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，復由於本公司在短、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」的短中長程研發重點中，即訂定相關超臨界機組鍋爐材料研究課題，需獲取最新研究成果及發電鍋爐維護經驗，因此擬前往參加。

本次出國案件之出國核定書為 EE105063 號，電人字第 1058048448 號函。

Monday June 13, 2016

Time	Topic	Presenter
7:30-8:30 am	CONTINENTAL BREAKFAST – STETSON ROOM	
8:30 am	WELCOME AND INTRODUCTIONS - SALON DEL REY	<i>K. Coleman/EPRI</i>
8:40 am	Historical Overview of San Antonio	<i>S. Walker/EPRI</i>
8:50 am	Previous BRIG Notes/Discussion	<i>M.Mallon/DTE</i>
9:00 am	Main Steam Pipe Integrity Monitoring Using Modern Wireless Technology	<i>B.Tossey/DNVGL</i>
9:30 am	Failure of a USC Desuperheater	<i>D.King/AEP</i>
10:00 am	MORNING BREAK - SALON DEL REY	
10:30 am	Easily Overlooked Potential Failures	<i>M.Horbaczewski/DTS</i>
11:00 am	Applying M&D Center Information to Boiler Reliability	<i>R.Coutant/Duke</i>
11:30 am	Latest Industry Trends in Fit-for-Service (FFS) of Power Piping	<i>J.Frey/Stress Engineering</i>
12:00 pm	LUNCH - STETSON ROOM	
1:00 pm	FFS in 2016 - Working With the AI	<i>M.Crichton/AEP</i>
1:30 pm	Recent Evaluation of Dissimilar Metal Weld Failures in T91 to Stainless	<i>J.Siefert/EPRI</i>
2:00 pm	Update on Integrated Approach to Asset Management of G91 Steel	<i>J.Parker/EPRI</i>
2:30 pm	Afternoon Break - SALON DEL REY	
3:00 pm	Round Table	
3:30 pm	Round Table	
4:00 pm	Round Table	
4:30 pm	Round Table	

圖 1-1 6/13 議程(EPRI P63 鍋爐可靠度 BRIG 聯席會議)

Tuesday June 14th, 2016

Time	Topic	Presenter
7:30-8:30 am	CONTINENTAL BREAKFAST – SALON DEL REY	
8:30 am	Round Table - SALON DEL REY	All
9:00 am	Round Table	All
9:30 am	Round Table	All
10:00 am	MORNING BREAK - SALON DEL REY	All
10:30 am	Innovative Attenuator Ideas	Ory Selzer/IMI CCI
11:00 am	Waterwall Bottom Slope Tube Failures	G.Lanthorn/Intertek
11:30 am	Overview of SWRI Tour and Facilities	G.Light/SWRI
12:00 pm	BOX LUNCH – PROVIDED AS YOU BOARD BUS FOR TOUR	
1:00 pm	Tour	
1:30 pm	Tour	
2:00 pm	Tour	
2:30 pm	Tour	
3:00 pm	Tour	
3:30 pm	Tour	
4:00 pm	Tour	
4:30 pm	Tour	
5:30-7:30 pm	RECEPTION @ - TERRACE GARDEN	

圖 1-2 6/14 議程(EPRI P63 鍋爐可靠度 BRIG 聯席會議)

WEDNESDAY JUNE 15		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:00 a.m.	Breakfast	
8:00 a.m.	Welcome, Introduction and Safety Topic	
8:15 a.m.	Background and Overview	
8:30 a.m.	Update on EPRI recommendations for Improved specification for Grade 91 and Grade 92 steel components	
9:00 a.m.	Consideration of Specifications for 9Cr type Cast Components	
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Consideration of Specifications for 9Cr type welding consumables Discussion / Comments / Actions	Bill Newell
11:30 a.m.	Applications of Hardness testing for screening 9Cr type steel components after fabrication, construction	
12:00 p.m.	Lunch	
1:30 p.m.	Recent Plant experience with Well-Engineered Weld Repairs in Grade 91 steels <ul style="list-style-type: none"> • Application of Welding Method 6 to Repair a Grade 91 Reheater • Recent Application of Alternative Weld Repair in a Grade 91 Steel Valve to Small Bore Application • Recent Application of Grade 91 Steel Alternative Weld Repairs in RWE Power Plant Systems • Recent Application of Grade 91 Steel Alternative Weld Repairs in FP&L Power Plant Systems 	Michael Crichton AEP Eric Dupont Xcel Energy Ken Mitchell RWE Keith Rapkin Florida Power & Light
3:00 p.m.	Break	
3:30 p.m.	Discussion, 2016 Creep Fatigue Meeting, 2016 Advanced Materials Conference, Actions and Future Meetings	
4:00 p.m.	Adjourn	

圖 1-3 6/15 議程(EPRI-P87 潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材 CSEF 聯席會議)

THURSDAY JUNE 16		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:00 a.m.	Breakfast	
8:00 a.m.	2016 P87 Ongoing Project Updates	<i>J. Shingledecker, EPRI</i>
8:00 a.m.	Small Sample Testing Projects: -SP Fracture Toughness & Comparison with ABI -Component Specific Sampling Guide -Impression creep / small punch database -Recent Gr 22 Seam-Weld Assessment & Material Sampling	<i>D. Purdy, EPRI</i> <i>-C. Ferguson, KCP&L</i>
10:00 a.m.	Break	
10:15 a.m.	Corrosion Projects -SH/RH Limits -Guideline for Shot-Peening -FGD wastewater materials selection & recent experience	<i>J. Shingledecker, EPRI</i> <i>S. Kung, EPRI</i>
11:15 a.m.	SCC in CSEF Steels -2015 completed project -Industry experience and next steps for SCC/HIC	<i>J. Siefert, EPRI</i> <i>-D. Downs, Southern</i> <i>-D. Wright, Exelon</i> <i>-E. Dupont, Xcel</i>
12:15 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Update on Dissimilar Metal Weld (DMW) Projects	<i>J. Siefert, EPRI</i>
2:00 p.m.	Update on PWHT Modeling and Technology Transfer	<i>D. Purdy, EPRI</i>
2:30 p.m.	Break	
2:45 p.m.	Metallurgical Risk Factors – Update	<i>J. Siefert / J. Parker, EPRI</i>
3:30 p.m.	P87 "State-of-Union" Address -Program Growth, Collaboration, Leverage, Resources -Cockpit/website usage	<i>J. Shingledecker, EPRI</i> <i>E. Benton, EPRI</i>
4:00 p.m.	Group Discussion: -Future of Reporting -"Training Center" -more Tech Transfer	<i>Group:</i> <i>Facilitated by, EPRI</i>
5:00 p.m.	Adjourn	

圖 1-4.6/16 議程(EPRI-P87 技術移轉會議)

FRIDAY JUNE 17		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:00 a.m.	Breakfast	
8:00 a.m.	Austenitic Stainless Steels Cracking Issues -Recent Experiences: DTE, Xcel, FE -New 2016 P87 Project to Address SS SH/RH Attachment Damage	<i>R. Lynch, DTE</i> <i>E. Dupont, Xcel</i> <i>A. Waddingham, FE</i> <i>J. Shingledecker, EPRI</i>
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Update (Brief) on Technology Innovation and Government Projects	<i>J. Shingledecker, EPRI</i> <i>D. Purdy, EPRI</i> <i>J. Siefert, EPRI</i> <i>S. Kung, EPRI</i>
11:30 p.m.	Action Item / Closeout	
12:00 p.m.	Adjourn	

圖 1-5 6/17 議程(EPRI-P87 技術移轉會議)

出國行程及主要任務：

本次出國期間自 105 年 6 月 11 日至 6 月 19 日，主要的任務為至聖安東尼(San Antonio, TX)參加美國電力研究院(EPRI)舉行 P63 鍋爐可靠度(P87 會員以觀察員身份)、抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材(P87 會員)等計畫論壇，及 P87 計畫研究成果技術轉移會議等，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	1050611	1050612	桃園→洛杉磯→聖安東尼奧	路程
2	1050613	1050614	聖安東尼	P63 鍋爐可靠度論壇(觀察員身份)
3	1050615	1050615	聖安東尼	P87 抗潛變強化型肥粒鐵系鋼材論壇
4	1050616	1050617	聖安東尼	P87 計畫研究成果技術轉移會議
5	1050618	1050619	聖安東尼→洛杉磯→桃園	路程

二、心得報告

2.1 美國電力研究院(EPRI)Grade 91 材質及焊接研究進展

Grade 91 為潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材(CSEF)系列中，最廣泛應用於次臨界及超臨界鍋爐之材料，也是 EPRI 中 P87(Fossil Material and Repair)研究計畫之主要對象，著眼於材質組成及微結構、焊接及熱處理作業等對於長時期應用之影響，從而基於研究結果，參與 ASME 分項審議委員會，並推動進行法規內容修訂，以下敘述最新研究結果：

2.1.1 材質極限應用溫度

一般委託製造廠家(OEM)普遍認為 Grade 91 材質可應用極限溫度約為 600°C，但此次會議中 EPRI 指出上述提議是基於等溫氧化模式，實際上需再考量熱通量及蒸汽氧化垢之成長及剝落效應，宜保守看待，圖 2.1.1-1 顯示氧化膜增長情形於 600°C、620°C 發展極為迅速，且呈現線性行為，而依據實驗結果，不同熱通量模式也有明顯差別(圖中 31500、47500 W/m² 等分別設定為一般及嚴苛運轉狀態)，由於已知 Grade 91 之氧化膜開始剝落時機約為 250-400 um，且易造成管材堵塞而爆管破裂，參考各圖可知，等溫模式下之 600°C 約於 60k-80k 小時才可能剝落，但於一般運轉情況下(31500 W/m²)，預測 600°C 運轉時將提前於 40k 小時內發生，圖 2.1.1-2 為 31500 W/m² 熱通量與等溫模式於不同實驗溫度之比較，可作為進一步參考，另外 EPRI 也根據其所發展不同估算模式進一步論證說明；首先如圖 2.1.1-3，EPRI 之 T91 管材壽命評估計算器(calculator)，以每 100k 小時之管壁金屬溫度約增加 20-60°C，即每年溫升約 4°C 為前提，計算 600°C、100MPa 之管材潛變壽命約縮減 30%，若再含計氧化減薄致應力增加之效應，潛變壽命縮減率可達約 70%，其預測結果約略與前述相互呼應，而另依據北美地區現場破管經驗統計結果及比對另發展之氧化膜剝離模式之估算結果，如圖 2.1.1-4，也發現 Grade 91 於 580°C 下運轉 100k 小時內將普遍因氧化膜剝落

而發生破管事故，因此 EPRI 提議 Grade 91 材質之應用應視有無熱傳應用而進一步區分，其建議之極限溫度及運轉注意事項如圖 2.1.1-5，注意圖中雖然 ASME 鍋爐於壓力容器法規允許 Grade 91 可於 650°C 下應用，但 EPRI 持極為保留態度，建議如 penthouse 或室外等管路無熱傳情況下，可應用於 600°C 蒸汽溫度，但若於鍋爐內部等有熱傳考量仍建議應設限於 550°C 為宜，即使於 550-580°C 下也預期將於 40k 小時開始有氧化皮膜剝落、管壁金屬溫度增加等問題，此點值得本公司提早注意及預作因應。

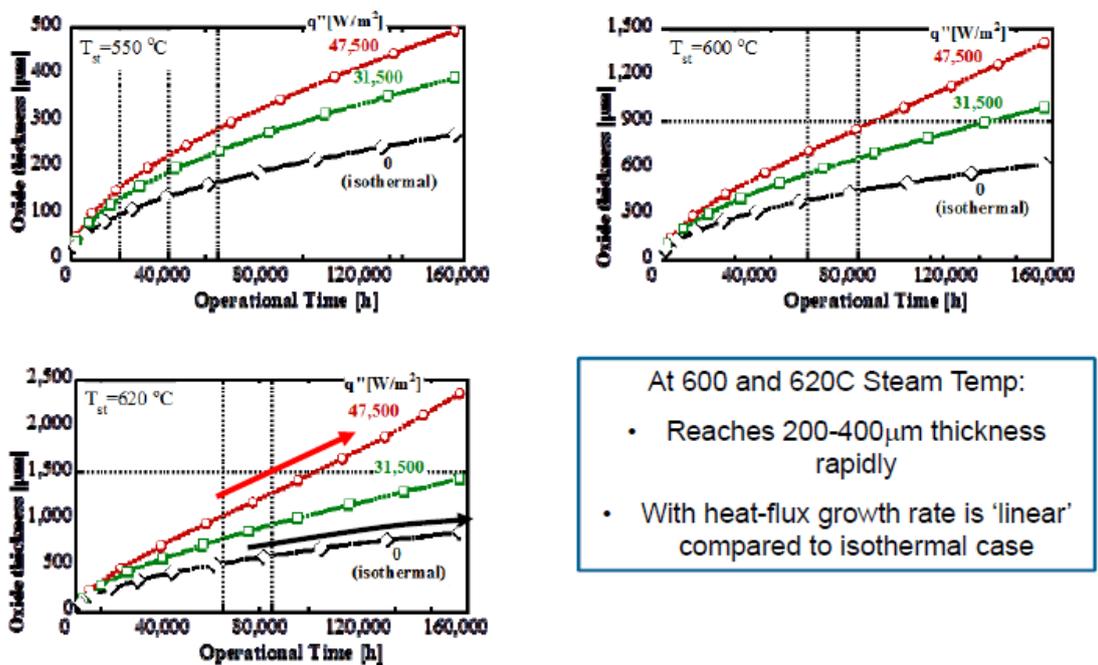


圖 2.1.1-1 Grade 91 於不同溫度及熱通量下之氧化膜增長

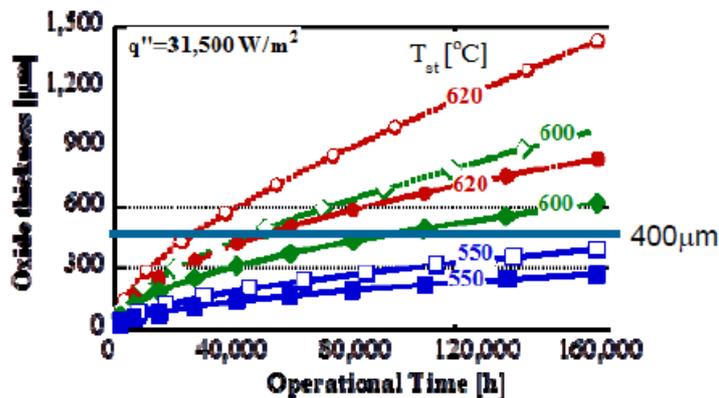


圖 2.1.1-2. Grade 91 於 31500 W/m² 熱通量下之氧化膜增長 (opened 及 closed 等分別標示特定熱通量及等溫模式)

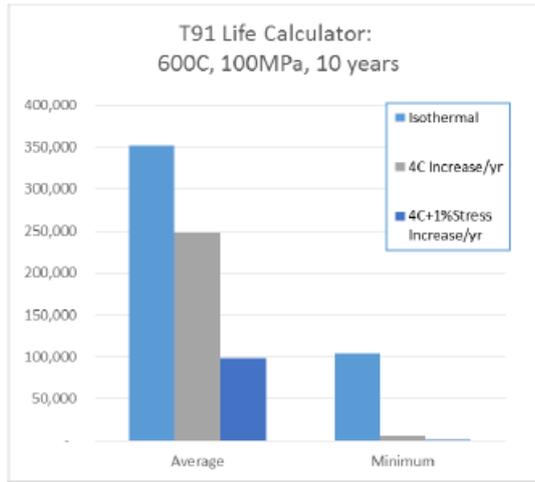


圖 2.1.1-3. EPRI 考量金屬溫度及應力所估算之 Grade 91 潛變壽命

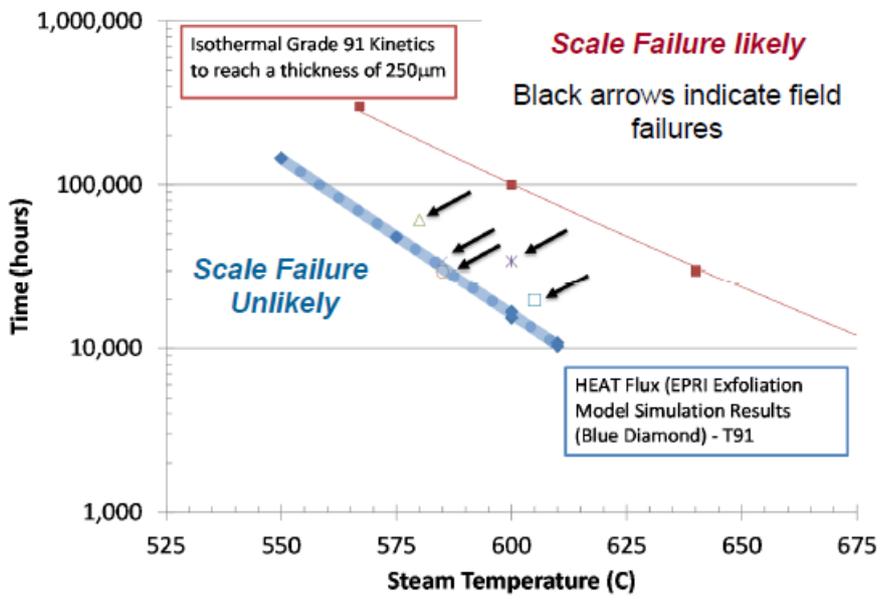


圖 2.1.1-4. 北美鍋爐 Grade 91 破管經驗及 EPRI 剝離模式預測結果

	Grade 91 (Non heat-transfer)	T91 (heat transfer)
Recommended Use Temperature	<600°C Relatively small scale thickness expected at 100,000hrs	<550°C Exfoliation not expected in first 150,000 hours of operation
Maximum Recommended Use with a Design Review*	600-620°C Exfoliation likely after ~50,000 hours: will need to manage effects on equipment	550-580°C Exfoliation expected after ~40,000 hours: Increased tube temperatures must be accounted for in design
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
ASME B&PV Code	650°C	650°C

**Design review includes materials selection, component design, and system design/operation*

圖 2.1.1-5. EPRI 建議 Grade 91 材質應用溫度與範圍

2.1.2 材質組成

Grade 91 之抗潛變強度由高密度差排(回火麻田散鐵)、固溶強化、碳氮化鈮/鈮等微細 MX 析出物(M 為 V/Nb、X 為 C 或 N 或 CN)等所構成，因此各合金組成、微組織等與其應用性能極有關連，必須詳加研究及界定，以維護正常運轉，EPRI 約自 2010 年起關注此議題，背景與英國 Aberthaw 電廠鍋爐之 Grade 91 高溫蒸汽集管約運轉 58k 小時後即廣泛且持續發生集管與短管間發生 Type IV 裂縫情事而有關，經審慎調查及分析，材質組成符合規範需求，運轉溫度與製作過程亦無異常，但發現各管段之合金組成與局部裂縫數量似乎具有關連性，N/Al 比值愈低時，裂縫數量明顯增加，如圖 2.1.2-1，其後持續研究結果也發現延性與此 N/Al 比值及 Sn、As、Sb、Pb 等雜質合金元素含量有關，如圖 2.1.2-2，由於潛變試驗結果也證實 N/Al 宜設限於 4，以保有適當延性，如圖 2.1.2-3，對於上述造成延性下降或產生 Type IV 裂縫等現象，EPRI 推論除與鋼材中應具足量 N，使形成 MX

強化相之外，也與 AlN 之形成會造成雜質元素之聚集有關，高 N/Al 比值時雜質元素難以聚積，因此於潛變劣化過程難以形成空孔，而低量雜質元素時即使低 N/Al 比值亦然，但若高量雜質元素、低 N/Al 比值時最為不利，EPRI 於 2013 年出版 Grade 91 鋼材手冊，其中即詳述各合金組成效應及重要性，會中著名鍋爐製造廠家 B&W 公司首先發表其內部探討 N/Al、雜質合金元素等對於抗潛變劣化之影響，充份支持 EPRI 多年致力於 Grade 91 品質穩定性之努力成果；圖 2.1.2-4 為 B&W 公司進行評估之試樣組成，實驗設計 N/Al 比值 2.4、11.3(編號 N:Al 13)、22.5(編號 N:Al 47)，雜質合金 Sn+An+Sb+Pb 含量為 0.015-0.018、約略為 Aberthaw 電廠組件組成之中間值(Aberthaw 之 tee piece 為 0.008%、B1-B4 為 0.023-0.027%)，彙整現階段母材及焊件試樣之潛變破裂試驗結果，如圖 2.1.2-5、圖 2.1.2-6，N/Al 比值 2.4 時母材及跨焊件之潛變破裂時間 1960 小時、2080 小時均最短，低於期望平均值 4850 小時、3210 小時，但斷面縮率 62%、仍具相當延性，N/Al 比值 11.3 時母材及焊件分別歷經 1500 小時、5200 小時未斷，N/Al 比值 22.5 時母材已於 2811 小時斷裂(625 °C*100MPa)、端面縮率仍達 64%，但低於平均期望值 4850 小時，焊件同歷經 5200 小時仍未斷，充份驗證 Grade 91 之抗潛變劣化性能確實與組成中 N/Al 比值及雜質合金元素有關。

會中 EPRI 也發表其最新研究組成效應之成果，包含就硬度量測結果及進行統計分析雜質元素與危害性之關連性等觀點：硬度量測部份，EPRI 認為 Grade 91 之焊後熱處理(PWHT)之適宜溫度約為 730-760°C，其相應焊道硬度應座落於 190-270 HBW 為宜，但若 N/Al 比值約低於 4 時，發現在略微超溫處理情形下焊道會有過度偏軟變化現象，推論原因與 N/Al 低比值時，MX 生成量不足有關。另外 EPRI 就既有潛變試驗資料庫中試驗後試樣之延性區分為高損傷(high damage)、低損傷(low damage)，並就其合金元素進行關連性分析，以中值(median)或平均值(mean)等具有明顯變化者作為敏感性指標，如圖 2.1.2-8，

檢出 Si、Al、Cu、S、As、Sn、Sb 等元素，另依 p 值(p-value) 小於 0.05 者定義具造成高損傷性元素，如圖 2.1.2-9，檢出強烈有關者包含 As、Sn、Sb、Pb、Al、Cu 等，Si、S 等不明顯，C、Mo、V 等則需與其他元素一併考量，因此綜合上述，EPRI 目前擬建立統合性冶金風險因子(Metallurgical Risk Factor, MRF)，初步擬定形式如 $MRF_{91}=[Cu+X(Sn+Sb+As)]/(N:Al)$ ，另外也提出新版材質組成建議，經與 2013 年版之彙整結果如表 2.1.2-1，EPRI 表示已於今年 2 月之 ASME 之 CSEF 工作群組無異議通過，目前已納入 SA-387 改版審議程序，比較後可知原 EPRI 之 2013 版提議修正 N、Ni，新增 Cu、As、Sn、Sb、N/Al 等項目，而 EPRI 之 2016 版較前版進一步限縮及修正 Mn、S、Si、Cu、As 之外，新增 B、W 等項目，亦即材質組成有加嚴趨勢。

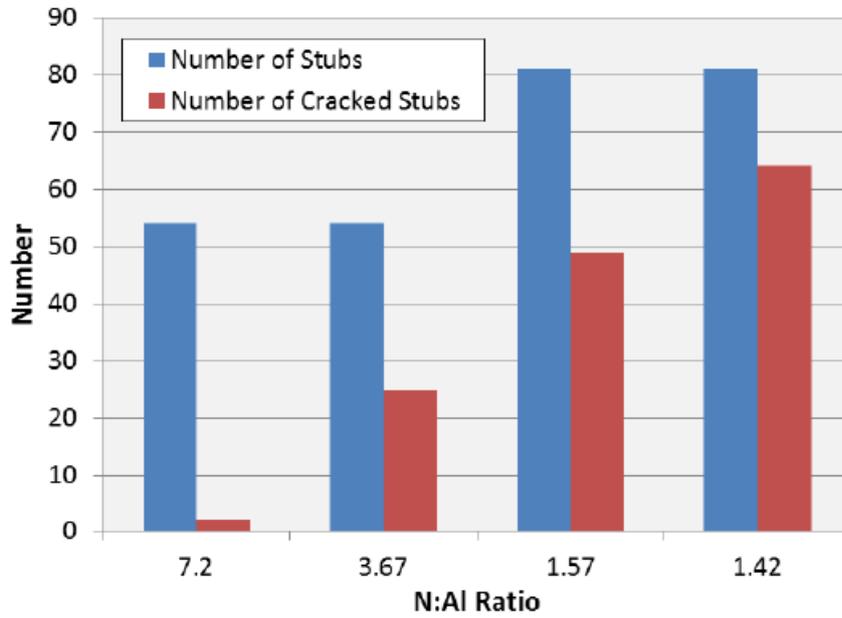


圖 2.1.2-1 英國 Aberthaw 電廠高溫集管與短管裂縫數量與 N/Al 比值關連性

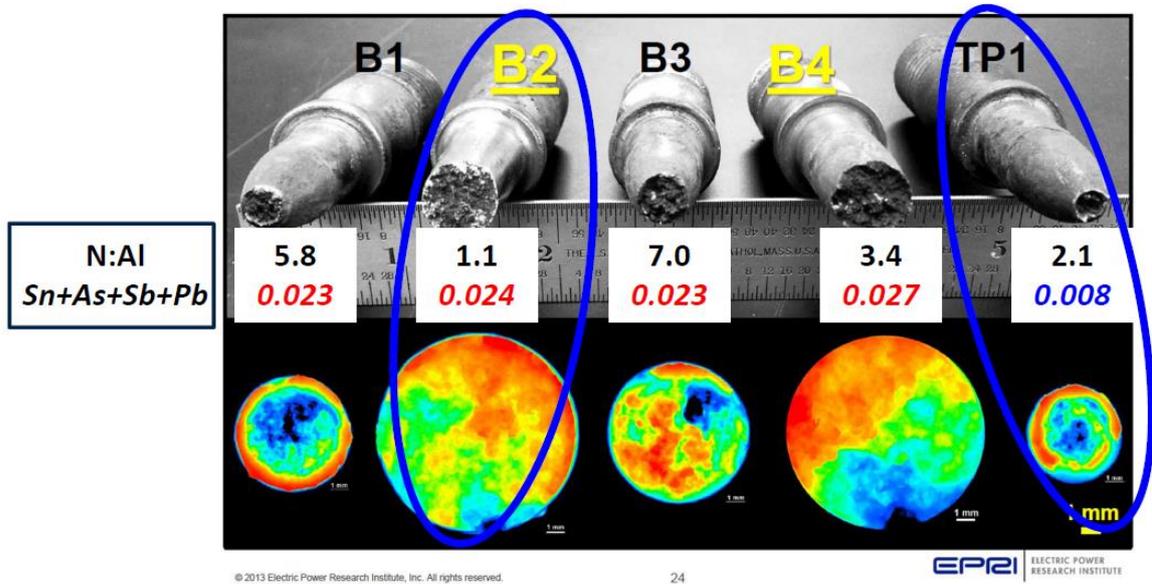


圖 2.1.2-2 英國 Aberthaw 電廠取樣拉伸試驗結果

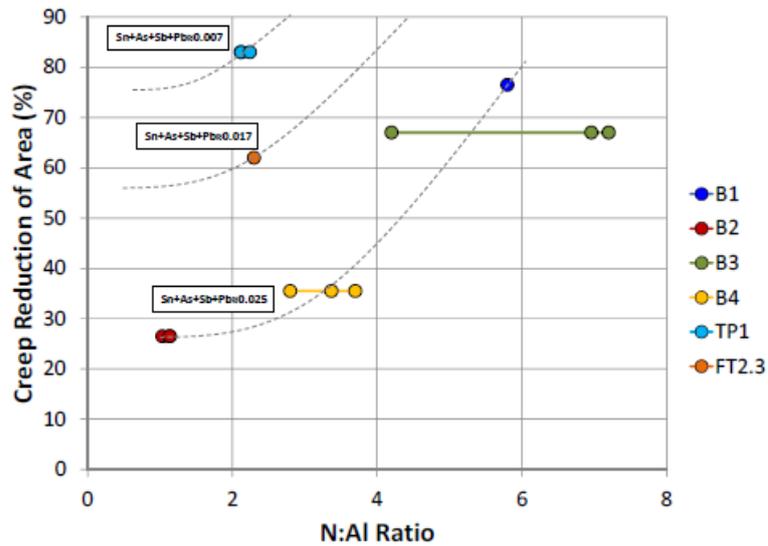


圖 2.1.2-3 Grade 91 試樣經潛變試驗後面積縮減率與 N/Al 比值
關連性

	Measured		
	N:Al 13	N:Al 47	Forged Tee
Mn	0.489	0.48	0.475
P	0.009	0.008	0.01
S	0.001	0.003	0.008
N	0.034	0.045	0.041
Ni	0.351	0.35	0.11
Al	0.003	0.002	0.017
B	<0.001	<0.001	<0.001
Cu	0.11	0.126	0.142
As	0.005	0.007	0.007
Sn	0.007	0.008	0.008
Sb	0.002	0.002	0.001
W	0.002	0.002	0.039
Pb	0.001	0.001	0.001
N:Al	11.33	22.50	2.41
Sn+As+Sb+Pb	0.015	0.018	0.017

圖 2.1.2-4 B&W 公司評估 Grade 91 組成對潛變性能影響之試樣

	B1	B2	B3	B4	TP1	N:Al 2.3	N:Al 13
N:Al (reported range)	5.8	1.1 (1.03-1.14)	7.0 (4.2-7.2)	3.4 (2.8-3.7)	2.1 (2.12-2.24)	2.3	11.3
Sn+As+Sb+Pb	0.023	0.024	0.023	0.027	0.008	0.017	0.015
Base Metal Rupture Time 625°C, 100 MPa Expected mean: 4,850 hours Expected min.: 1,160 hours	2990	784	2995	2629	2947	1960	1500+
Base Metal Rupture RA (%)	76.5	26.5	67	35.5	83	62	--
% Cracked Stubs	--	75	4	50	--	--	--
Cross-Weld Rupture Time 625°C, 80 MPa Expected mean: 3,210 hours Expected min.: 1,150 hours	?	384	?	1017	?	2080	5200+

圖 2.1.2-5 B&W 公司 Grade 91 母材及跨焊件之潛變試驗結果

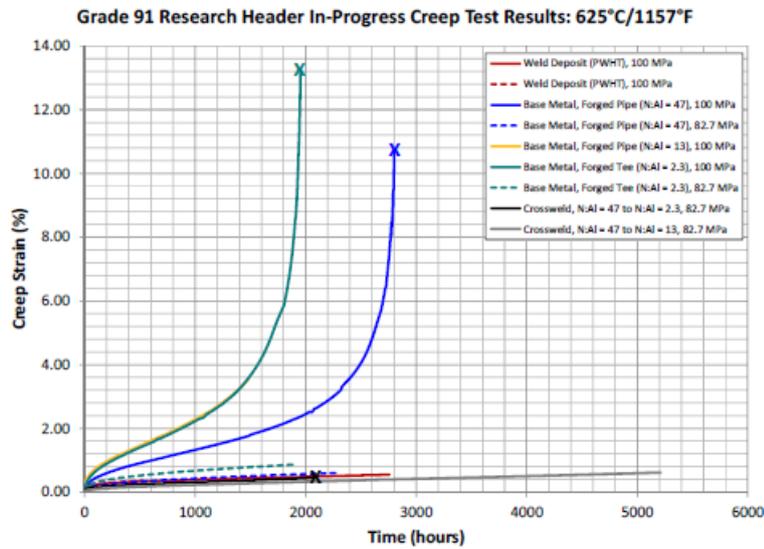


圖 2.1.2-6 B&W 彙整 625°C 進行 Grade 91 試樣潛變試驗結果

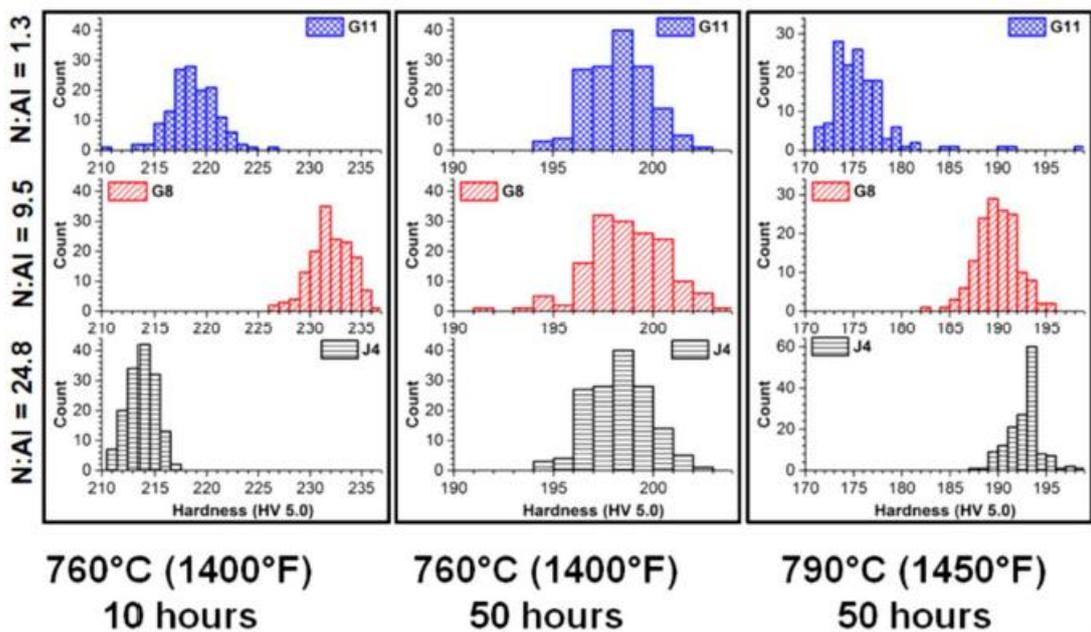
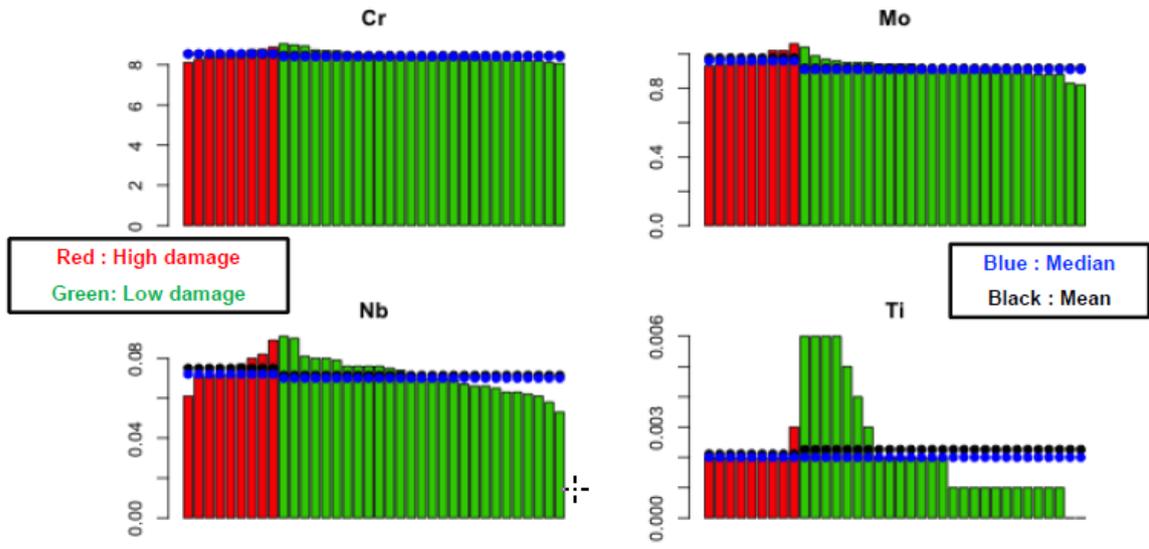
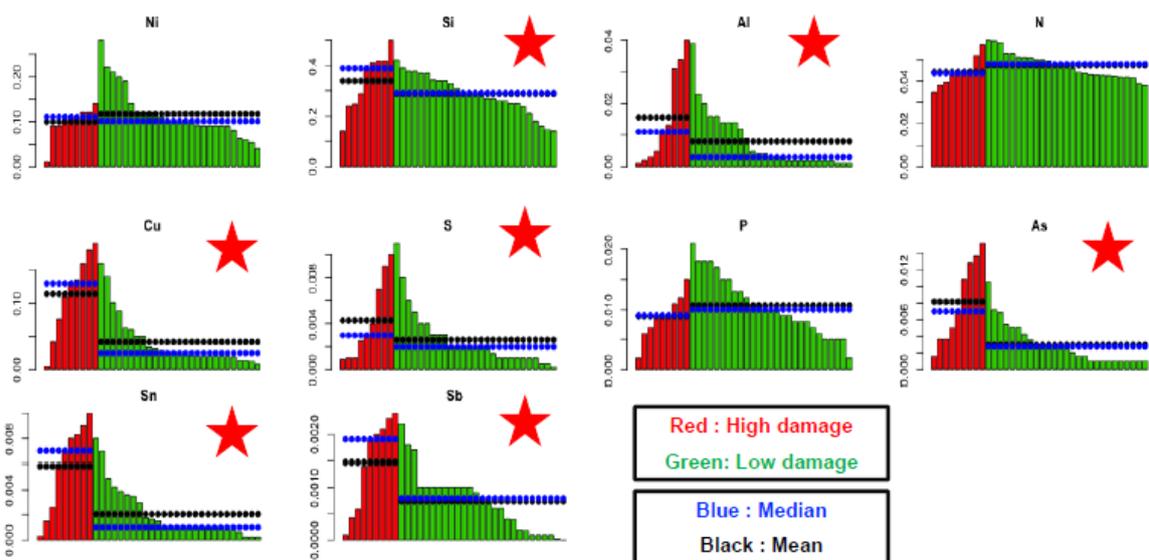


圖 2.1.2-7 不同 N/Al 比值鋼材進行 PWHT 後之硬度變化



No identified statistical trends for Cr, Nb, or Ti



No identified statistical trends for Ni or P

圖 2.1.2-8 EPRI 依潛變試驗延性分析 Grade 91 合金組成結果

	Coeff estimate	p-value	Accuracy	POD	FAR
Cr	1.253403	0.2697583875	0.6666667	0.0000000	0.11111111
Mo	34.417627	0.0009628924	0.7777778	0.4444444	0.11111111
W	-6.120701	0.4690962134	0.7500000	0.0000000	0.00000000
V	51.487793	0.0188808481	0.7222222	0.4444444	0.18518519
Nb	52.041904	0.1297447420	0.7222222	0.1111111	0.07407407
Ti	-81.968869	0.6872228739	0.7500000	0.0000000	0.00000000
C	48.899952	0.0314728249	0.7777778	0.2222222	0.03703704
Mn	8.306968	0.1374967235	0.7777778	0.3333333	0.07407407
Ni	-8.911979	0.1717490276	0.7500000	0.1111111	0.03703704
Si	5.849619	0.0549446983	0.8333333	0.4444444	0.03703704
Al	52.333527	0.0370736996	0.7777778	0.3333333	0.07407407
N	-82.599955	0.0786471317	0.7777778	0.3333333	0.07407407
Cu	25.147270	0.0001678878	0.8333333	0.6666667	0.11111111
S	195.297840	0.0546315905	0.7500000	0.3333333	0.11111111
P	-101.983795	0.1297819115	0.7500000	0.1111111	0.03703704
As	372.914536	0.0009459721	0.8055556	0.5555556	0.11111111
Sn	427.096248	0.0002246665	0.8611111	0.6666667	0.07407407
Sb	1324.105938	0.0016645741	0.8055556	0.5555556	0.11111111
Pb	6263.513638	0.0088046055	0.8333333	0.4444444	0.03703704

圖 2.1.2-9 EPRI 依 p 值檢定篩選 Grade 91 中高危險性合金元素

表 2.1.2-1 ASME 法規及 EPRI 建議之 Grade 91 組成

元素	ASME				EPRI	
	SA 335	SA 336	SA 387 plate		2013	2016
	Pipe (wt%)	Forging	Heat	Product		
C	0.08-0.12	0.08-0.12	0.08-0.12	0.06-0.15	0.08-0.12	0.08-0.12
Mn	0.30-0.60	0.30-0.60	0.30-0.60	0.25-0.66	0.30-0.60	<u>0.30-0.50</u>
P	0.02	0.025	0.02	0.025	0.02	0.02
S	0.01	0.025	0.01	0.012	0.01	<u>0.005</u>
Si	0.20-0.50	0.20-0.50	0.20-0.50	0.18-0.56	0.20-0.50	<u>0.20-0.40</u>
Cr	8.0-9.50	8.0-9.50	8.0-9.50	7.90-9.60	8.0-9.50	8.0-9.50
Mo	0.85-1.05	0.85-1.05	0.85-1.05	0.80-1.10	0.85-1.05	0.85-1.05
V	0.18-0.25	0.18-0.25	0.18-0.25	0.16-0.27	0.18-0.25	0.18-0.25
Nb	0.06-0.10	0.06-0.10	0.06-0.10	0.05-0.11	0.06-0.10	0.06-0.10
N	0.030-0.070	0.030-0.070	0.030-0.070	0.025-0.080	<u>0.035-0.070(*)</u>	0.035-0.070(*)
Ni	0.4	0.4	0.4	0.43	<u>0.20(*)</u>	0.20(*)
Al	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Zr	0.01	0.01	0.01	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>

2.1.3 焊接作業及品質管理

EPRI 對於 **Grade 91** 材質之壽命管理研究策略包含破損原因分析、適當採購規範、組件製造品質管理、檢測評估標準程序、焊補或新換程序等 5 部份。如前述，**Grade 91** 材質雖然具高強度，但其性能與組成或製造過程有關，另外已知不當焊後熱處理時會有加速潛變劣化致提早裂損等事故，因此焊接或焊補作業等程序及參數訂定，及品質管理向為其研究重點。

EPRI 網頁提供會員 CSEF 材質之焊接作業程序建議，典型如圖 2.1.3-1，對於 **Grade 91** 材質，特別著重於預熱(preheat)、層間(interpass)、後熱處理(PWHT)等溫度控制，並且依新焊或焊補、同質或異質焊接等亦有不同作業程序或參數建議，以下彙整此次會議心得及提供文件，進一步敘述其最新研究成果及觀點。

預熱溫度方面，提醒避免氫致脆裂(Hydrogen Induced Cracking, HIC)為著眼，說明氫致脆裂與拉伸限制、敏感微組織、預熱溫度、閘限氫含量等有關，其中前二者受限於設計幾何結構、材質組成及製造，較難以變更，閘限氫含量部份，除應考慮採行低氫焊條(至少 H4)之外，施焊前需充份清除焊件表面及焊材之油污、水份、髒污、銹蝕水合物等，尤其注意自動焊接時引線作業易導入污染物問題，至於適當預熱溫度之設定，主要考量肥粒鐵系鋼材於不同溫度下之相間氫溶解度及氫擴散速率，如圖 2.1.3-2，及 **Grade 91** 焊件之 Y 槽式脆性測試結果，如圖 2.1.3-3，訂定 150°C 為閘限溫度。

層間溫度意指多道焊接時，接續焊道前其相鄰焊道應保持溫度，此溫度設定除考量繼續脫氫反應以防止 HIC 冷裂外，亦與焊接完成速度、是否造成熱裂、麻田散鐵形成比例等有關，EPRI 認為 **Grade 91** 焊件之熱影響區(HAZ)組織與此設定溫度或其冷卻速率無明顯關連，並無如 **Grade 23** 之變韌鐵系鋼材較容易因設定溫度較低、焊件冷卻速度不足而生成肥粒鐵，容易產生再熱裂縫(reheat cracking)情況，但亦不可太高，致造成如潛弧焊接(SAW)或底道鎢極氣體保護電弧焊(GTAW)之焊道開裂(crack cracking)，或伴隨材質中 C、Nb、Si 等所引致偏析等熱裂(hot cracking)現象，依據 EPRI 統計

數十種 Grade 91 母材及焊道之相變態溫度，生成麻田散鐵起始/最終溫度分別為(372-393°C)/(159-196°C)、(390-418°C)/(200-237°C)，認為 150°C 可完成麻田散鐵變態，可依此作為層間溫度之下限，另取鍛製品、管件、平板等材料，模擬焊接過程，再以膨脹計(dilatometer)量測各區段之變態溫度，發現不同材料之各變態溫度彼此差異不大，由於趨近 100% 變態溫度時為漸進式，如圖 2.1.3-4，以設定完成 90% 麻田散鐵溫度作為較為明確而實際，其中焊道完成 90% 麻田散鐵之最低溫度約為 290°C，而相對之臨界熱影響區(ICHAZ) 最高溫度約為 350°C，EPRI 為保有焊接後機械性能起見，建議此層間溫度之上限設定，應視是否再進行焊後熱處理(PWHT)而定，分別定為 350°C、290°C，應與上述實驗結果有關。

EPRI 依據其資料庫，認為焊後熱處理對於焊件或母材之抗潛變劣化具有決定性影響，不當熱處理將大幅縮減壽命，如圖 2.1.3-5。而對於焊後熱處理的溫度設定，EPRI 對於新製焊接或焊補等作業，有不同而務實看法；新製焊接部份，EPRI 說明依據 ASME B&PV Code Section I 及 ASME Power Piping Code B31.1 等既有規範，Grade 91 之 PWHT 溫度為 730-775°C，實際上於 1980 年代中期其以 Code Case 1973 導入時所設定最低溫度為 700°C，其後此設定溫度之提昇乃基於衝擊試驗(Charpy test)結果考量，由於試樣於試驗過程中快速裂斷特性與實際以潛變或潛變/疲勞之破裂行為有明顯區別，且測定結果變異性大、與焊道堆疊程序有關，如圖 2.1.3-6，依此作為熱處理後裂斷特性之研判準則，應有審酌其適當性之必要，實際上自 2008 正名為 Grade 91 後以 700°C 低限 PWHT 焊件亦無立即脆斷報導。

EPRI 認為 PWHT 目的應為顯微組織回火、降低殘留應力、增加破裂韌性等，且應考量高溫應用之性能，實際製作焊件，以破裂力學分析為著眼，如圖 2.1.3-7，輔以潛變破裂壽命量測等進行研究，以探討作業合理性，其中製作平板焊件為主要實驗所需，乃依據 SA-387 規範取樣 2" 板材以遮蔽金屬電弧焊(SMAW)製作，焊接採 1G 位置，3.2mm Φ 之 E9015-B9 匹配焊條，計 161 焊道，預熱及層間溫度分別為 150°C、350°C，焊後依不同試驗規範，切割成相應試片，

視需要進行 675°C*2 小時之 PWHT，另進行另管形焊件為以深孔鑽洞法(Deep Hole Drilling, DHD)量測殘留應力所需，依據 SA-213 規範取樣外徑 88.8mm*壁厚 14.8mm 管材，以自動氣體鎢極電弧焊(GTAW)製作，焊接採 5G 位置，ER90S-B9 匹配焊條，計 12 焊道，無預熱、最高層間溫度為 350°C，焊後熱處理 675°C*0.5 小時。

研究結果顯示此經 675°C*2 小時 PWHT 焊件除通過 ASME B&PV code IX QW-462.1 室溫拉伸強度、ASME B&PV code IX QW-462.2 彎曲試驗等規範測試，其依據 ASTM E1820-13 之破裂韌性測試規範之結果與 700-730°C*2 小時 PWHT 結果無明顯差別，如圖 2.1.3-8，而 625°C*80 Mpa 潛變破裂試驗之結果，如圖 2.1.3-9，也證實高溫裂斷時間合乎平均焊道熱影響區(HAZ)行為，另外依據殘留應力測定結果，如圖 2.1.3-10，取保守值 150 MPa，並於破裂韌性 55 MPa.m^{1/2}、水壓試驗 17.6 MPa、加計軸向應力 150 MPa 等前提下，評估外徑 457mm*壁厚 50.8mm 管材之臨界內壁裂縫長度為 13.7 mm，EPRI 認為足夠以非破壞檢出方式監測裂縫成長及因應，另外比較不同 PWHT 溫度對於焊件之硬度分佈，如圖 2.1.3-11，也發現當溫度高於 700°C 時，熱影響區明顯低於 200Hv，且隨溫度提高，軟化區域隨之擴大趨勢，因此建議 PWHT 溫度宜設限於 675°C。

不過由於工件厚度及自然熱對流等具有降溫效應，焊道表面溫度必須相應提高，EPRI 依據 ABAQUS 模擬外徑 559mm*壁厚 76.2mm 管材於熱處理時之溫度變化，如圖 2.1.3-12，當設定焊道表面為 700°C 時，內壁溫度方可達 668°C，因此提醒需考量實際執行狀況，此次會議也提及對於厚度過渡(thickness transition)或異形焊接工件，如閥體與管件接合，需注意熱處理作業問題，如圖 2.1.3-13，經模擬計算結果，若遷就幾何形貌，溫度感知器(熱電耦)偏離加熱器中心位置，且閥體未充份絕熱時，焊道溫度將過溫，且極易超過 A1 變態轉換溫度，反之若閥體充份保溫，且設計獨立加熱系統時，焊件回火處理溫度將趨於均勻化且不會產生過溫現象，由於熱處理作業具有相當重要性，EPRI 已聽從本公司建議，預計製作 3 集示範教學影帶，將提供各會員參考，會議過程已播放首集片段，如圖 2.1.3-14。

有關焊補維修研究方面，本次會議提報與不銹鋼異質合金焊接(DMW)之最新成果，背景為此種焊接作業需求除汽力機組外，隨運轉參數提高，已擴及複循環機組之熱回收鍋爐(HRSG)，如圖 2.1.3-15，已知常見裂損組織與運轉溫度有關，550-600°C時以管壁中心及根部等熱影響區(HAZ)之密集潛變孔洞為主，如圖 2.1.3-16，而鄰近 550°C時，較容易發現由外壁起始之熔融線(fusion line)裂縫及 HAZ 密集潛變孔洞，如圖 2.1.3-17，另外如 HRSG 鍋爐起停頻繁時，也會發現氧化物沿 HAZ 逐步侵入(oxide notching)而造成裂斷事故，如圖 2.1.3-18，其原因與接近 600°C時，Grade 91 母材與 HAZ 之潛變強度差異較大，及約 550°C時，潛變過程之應變較容易集中於熔融線等有關，不過發現 HAZ 孔洞之發展有隨組成而定之現象，亦即雜質較少或 N/Al 比值較高時，孔洞數量將大為降低。

EPRI 研究 Grade 91 與不銹鋼材之異質焊接作業之對象分為依據常用程序之大型焊件，及篩選實驗用小型焊件，如圖 2.1.3-19，大型焊件主要進行 575-625°C、50-100MPa 之潛變破裂試驗，結果確認破裂時程及機制大致符合 HAZ 破裂行為，前者如圖 2.1.3-20，後者如前述之圖 2.1.3-16，小型焊件則依焊接程序、接口、焊材、焊後熱處理(PWHT)等，區分不同焊件，如圖 2.1.3-21，進行潛變實驗及順時伸長率變化量測，部份並殘留應力模擬分析，圖 2.1.3-22 為相對標準程序焊件之比較，結果顯示 Grade 91 與 TP347H 或 Alloy 800 異質焊接之最佳作業應以鎳基焊條為填料、階梯式工件設計為宜，預敷層應無需要，而 PWHT 與性能似並無關連性，其中階梯式工件設計具有彰顯第三階段潛變劣化特性，EPRI 認為具有益於早期偵測劣損、及時焊補功能，如圖 2.1.3-23，另殘留應力分析結果除建議焊件仍應經適度 PWHT 之外，施作預敷層時，即使經 PWHT 其焊件表面及芯部仍容易分別殘留拉伸、壓縮應力，最為不利，如圖 2.1.3-24。

Recommended Filler Metal & AWS Design
E901X-B9

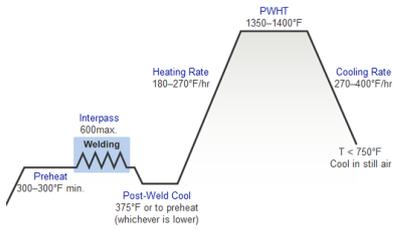
Bakeout/Storage & Usage Guidelines

Electrodes which are hermetically sealed may be used for several hours after opening. It is recommended to put them into an electrode oven at 250-300°F (121-150°C) after opening.

PWHT Range

1350– 1400°F

PWHT Chart (rotate to view)



Postheating Parameters (rotate to view)

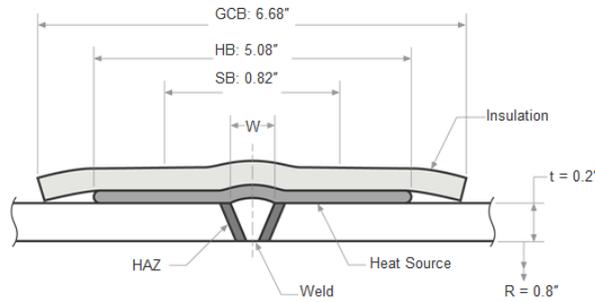


圖 2.1.3-1 EPRI 提供 CSEF 材質焊接作業程序建議之示意

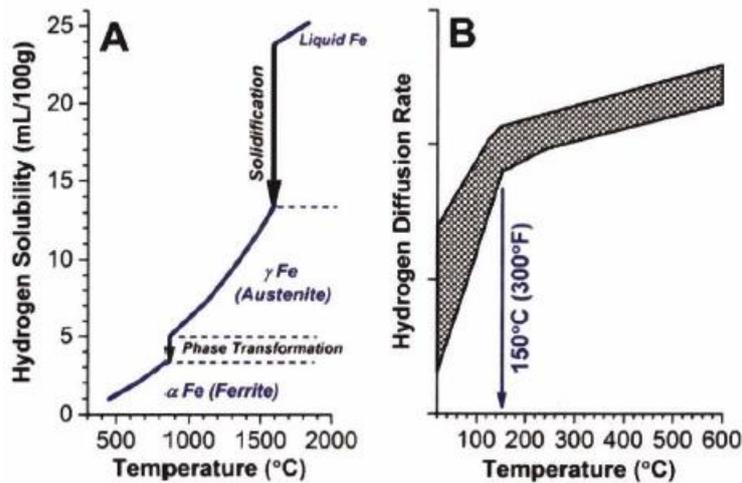


圖 2.1.3-2 肥粒鐵系鋼材隨溫度變化之氫溶解度及氫擴散速率

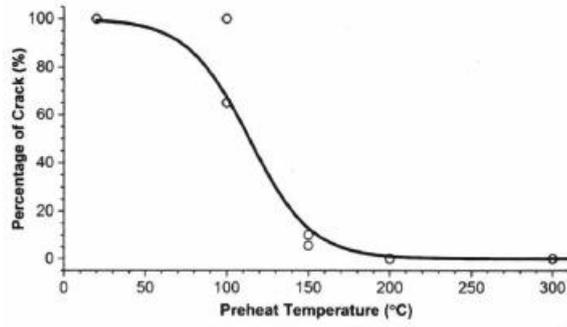


圖 2.1.3-3 Grade 91 焊件以 Y 槽式測定脆性之結果

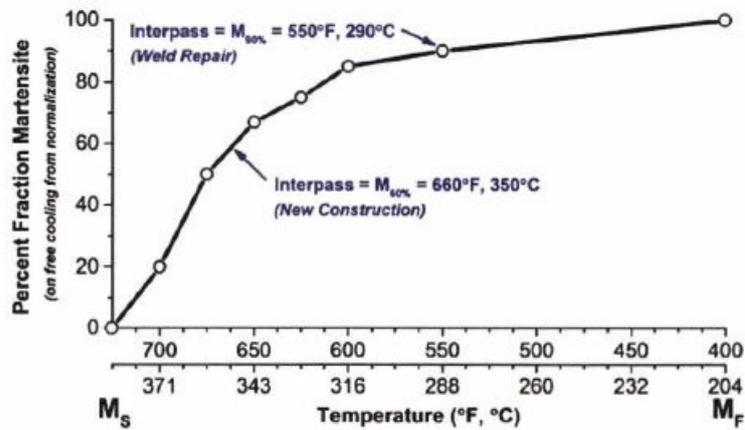


圖 2.1.3-4 Grade 91 之麻田散鐵完成率與溫度關連性

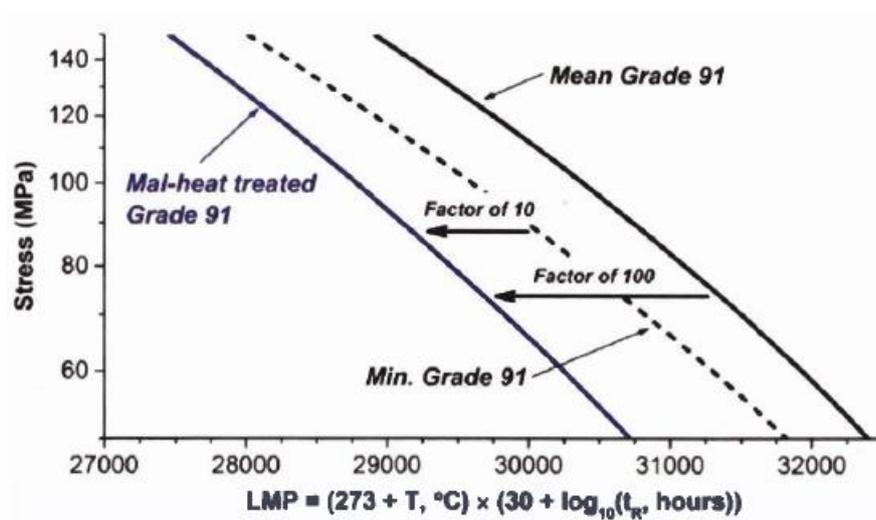


圖 2.1.3-5 EPRI 依據其壽命評估資料庫示意不當熱處理對於潛變劣化壽命之影響

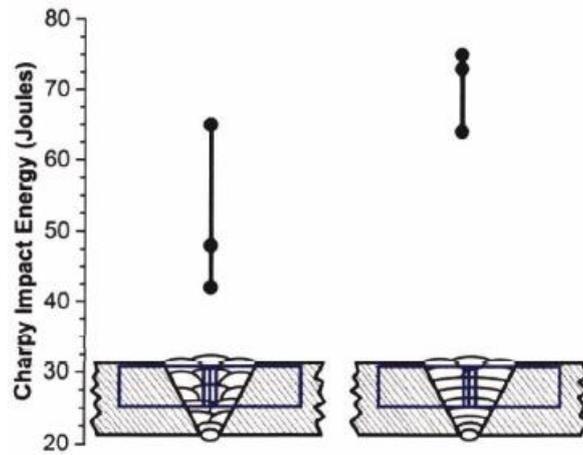
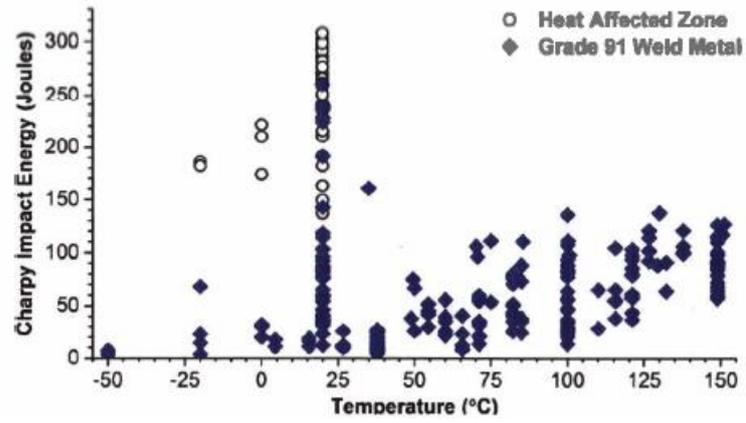


圖 2.1.3-6 Charpy 衝擊試驗測試 Grade 91 焊道及熱影響區及不同焊道堆疊程序之結果

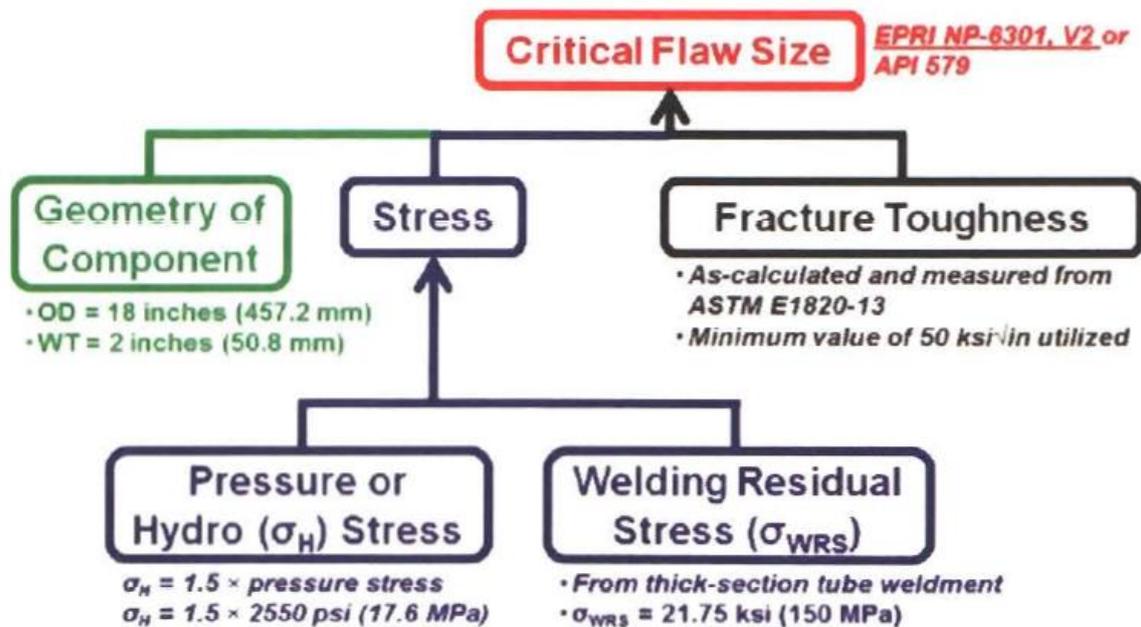


圖 2.1.3-7 EPRI 探討 Grade 91 破裂力學特性之研究架構

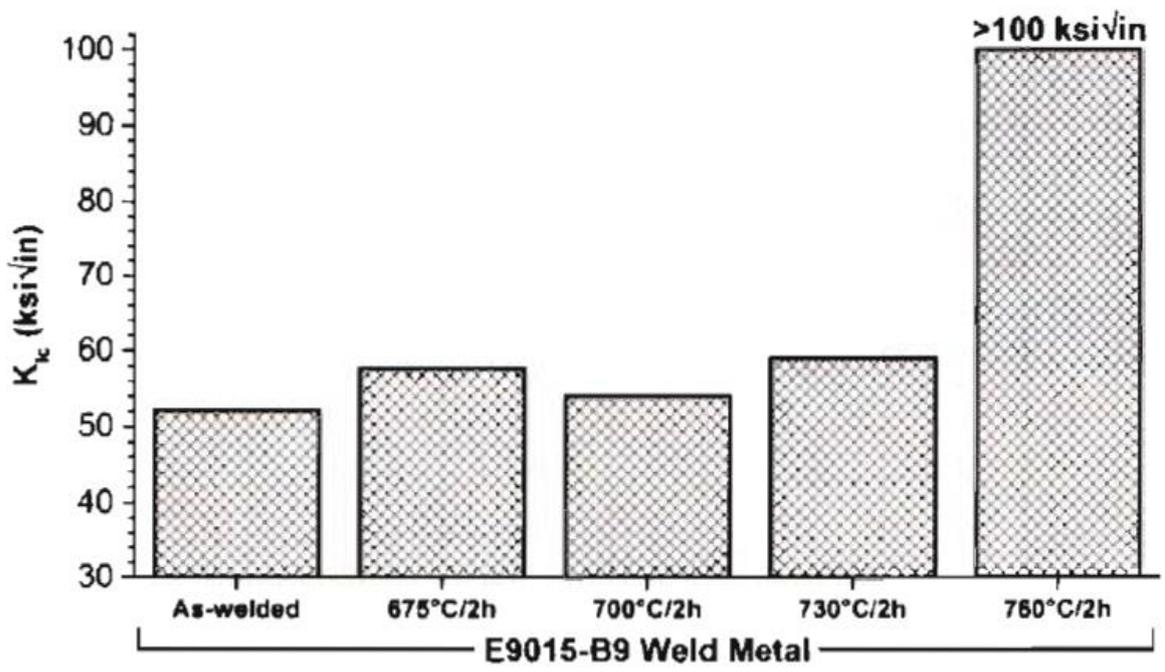


圖 2.1.3-8 依 ASTM E1820-13 測定 Grade 91 不同焊後熱處理 (PWHT)破裂韌性之結果

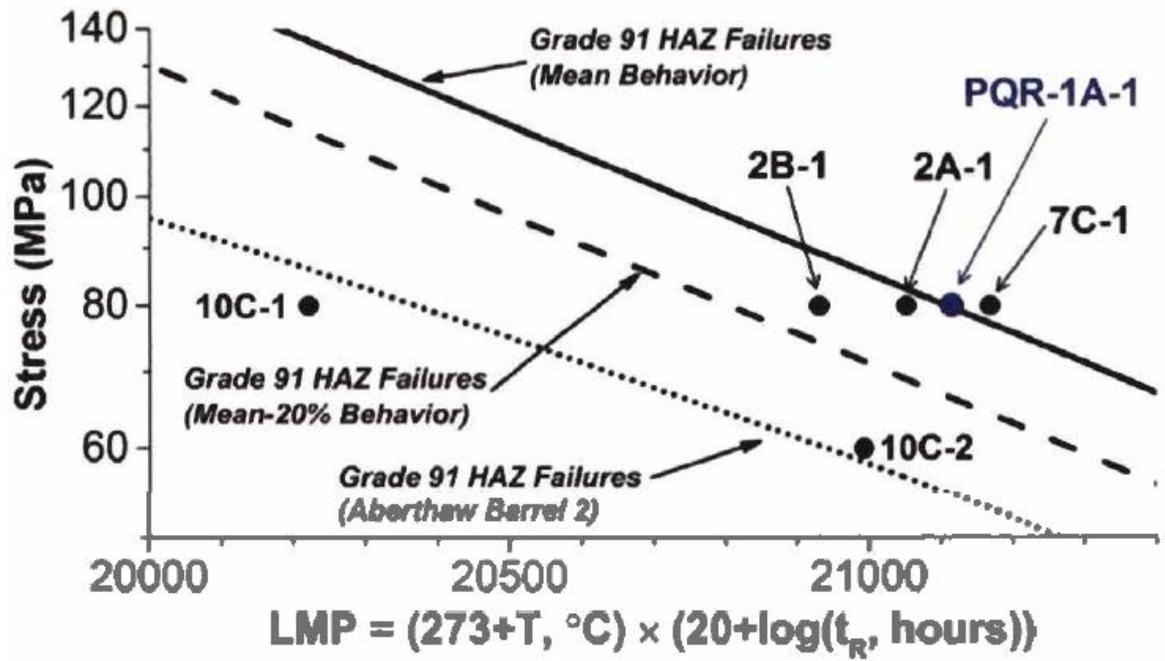


圖 2.1.3-9 EPRI 彙整不同焊件之潛變破裂試驗結果

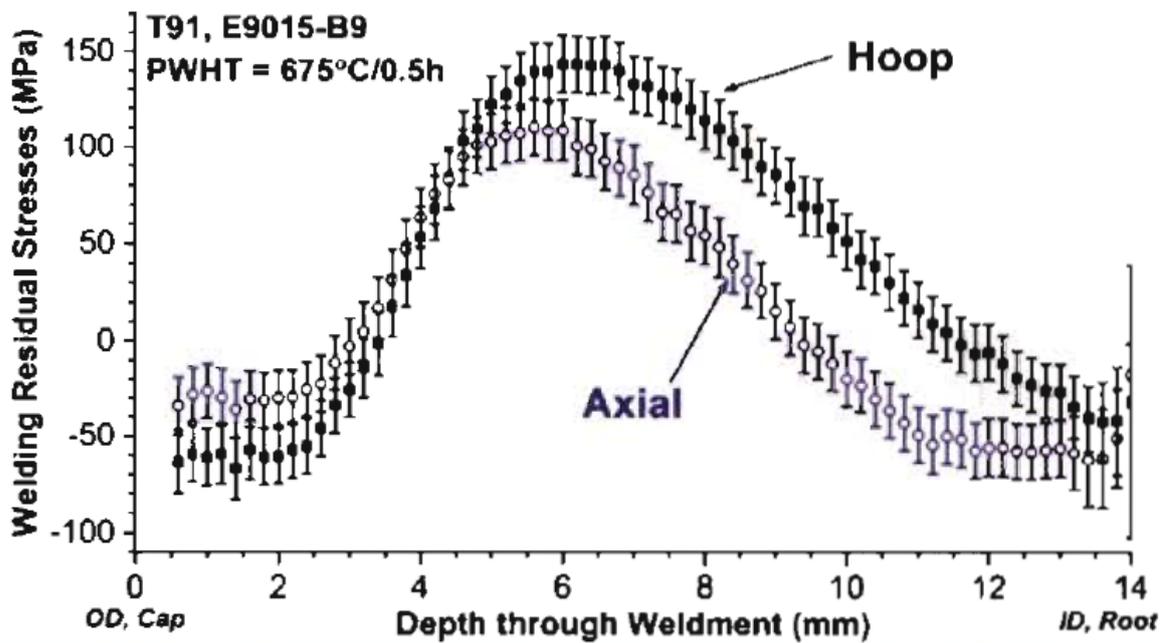


圖 2.1.3-10 以 DHD 法量測焊件殘留應力之結果

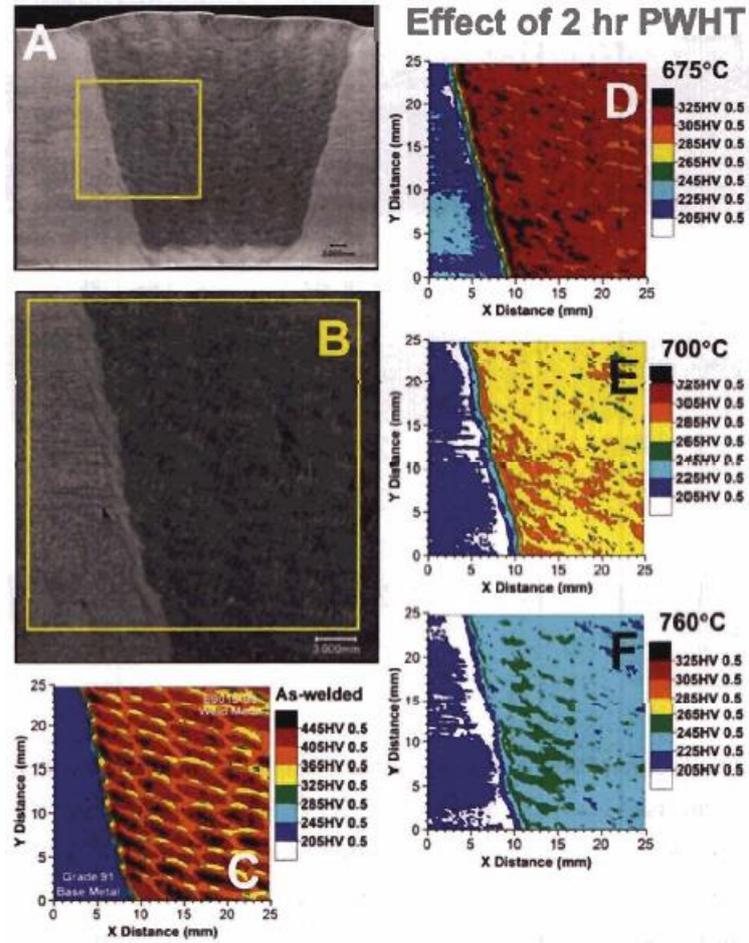


圖 2.1.3-11 不同 PWHT 溫度對於焊件硬度之影響

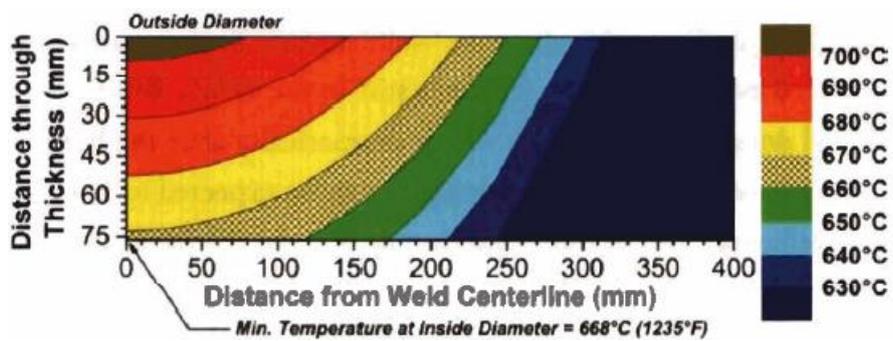
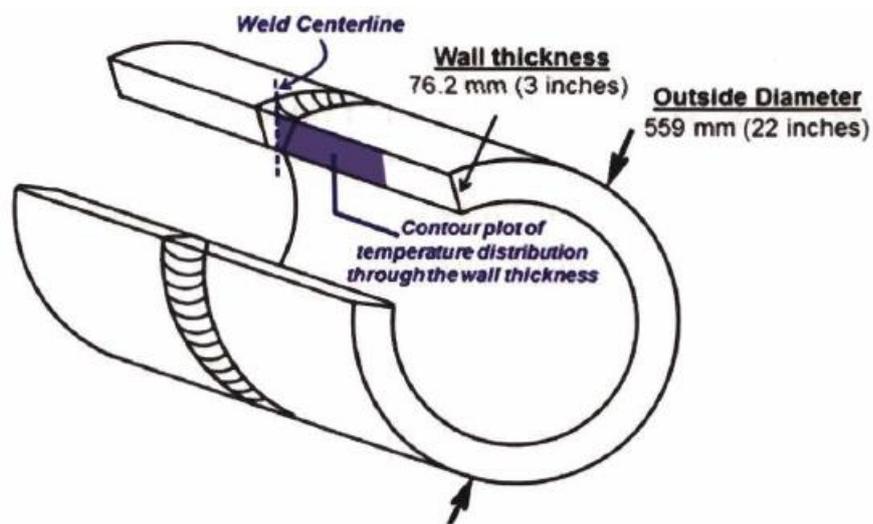


圖 2.1.3-12 模擬設定焊道表面為 700°C 時焊件內部溫度變化

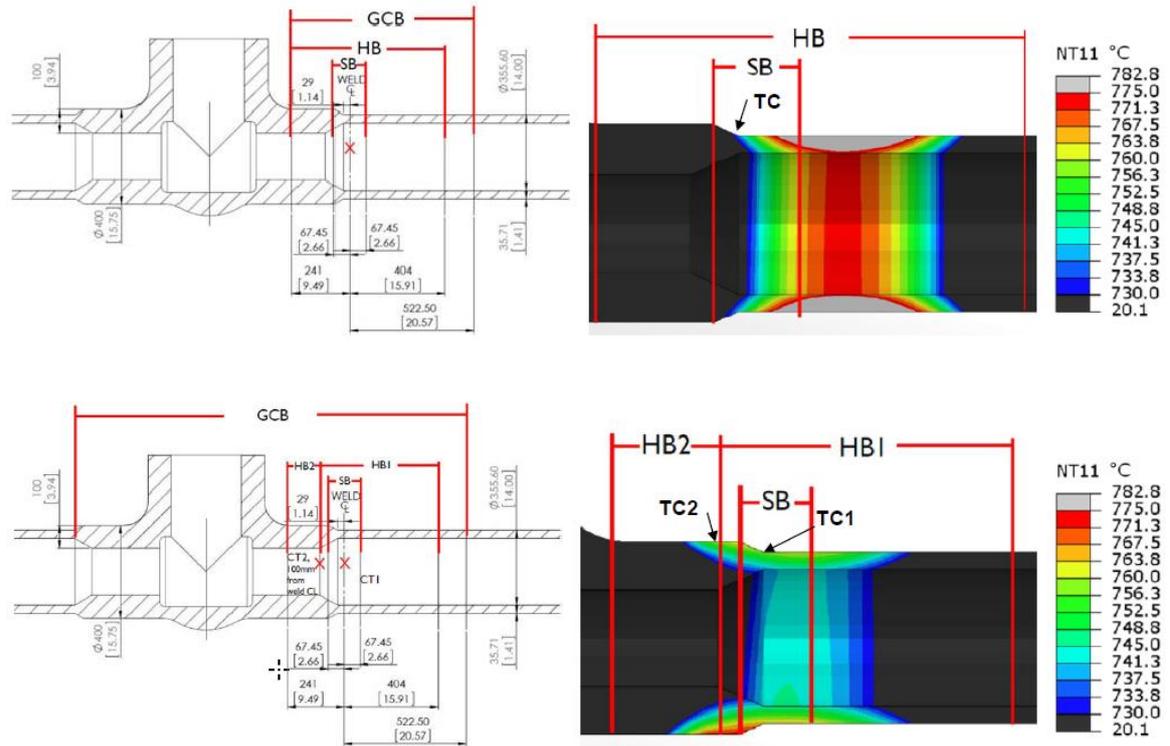


圖 2.1.3-13 不同熱處理作業時焊件之溫度變化



圖 2.1.3-14 EPRI 熱處理作業教學影帶之片段

Vintage	Main Steam (Maximum)		Hot Reheat (Maximum)		High Pressure Materials	
	Temp. (°C)	Pressure (MPa)	Temp. (°C)	Pressure (MPa)	Header/Pipe	Tube
1990s	568	12.4	568	3.1	P22, P91	T22, T91
2000s	585	16.5	596	4.8	P91/92, P23	T91, T23
2012+	602	16.5	623	4.8	Stainless steels will be required, materials selection/evaluation ongoing	

圖 2.1.3-15 熱回收鍋爐運轉參數及高壓材質之演進

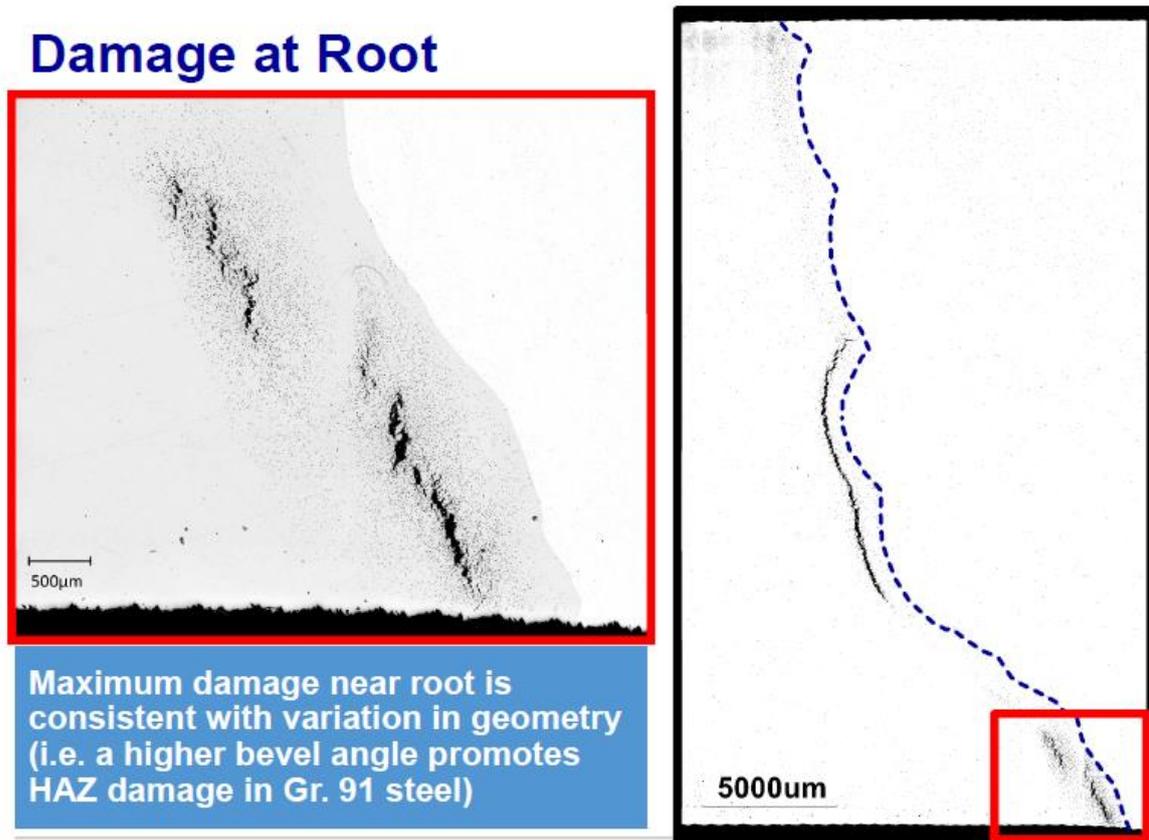


圖 2.1.3-16 典型 Grade 91 與不銹鋼材異質焊接件於高溫運轉後之劣化組織

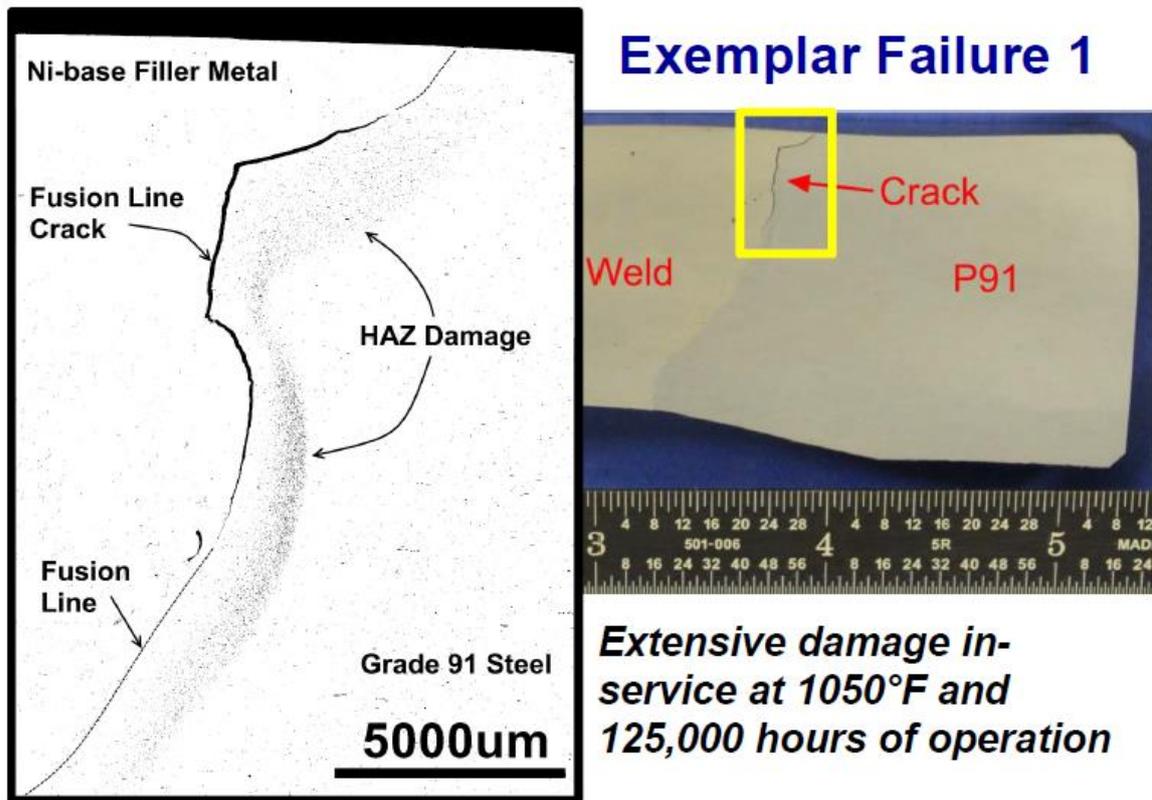


圖 2.1.3-17 Grade 91 與不銹鋼材異質焊接件之表面裂損組織

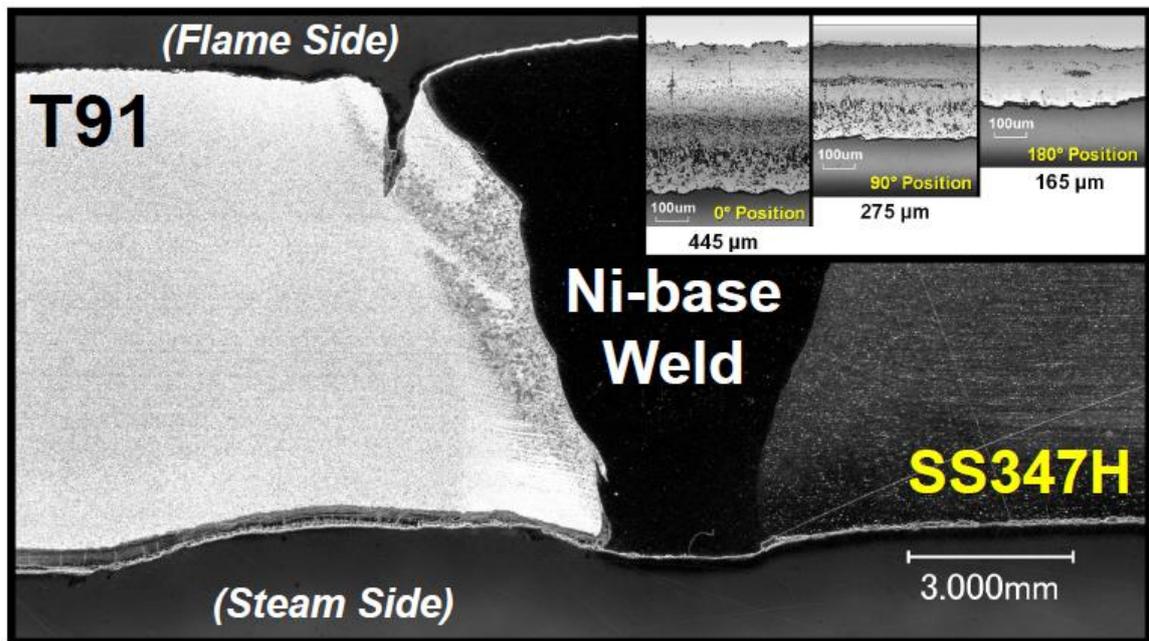
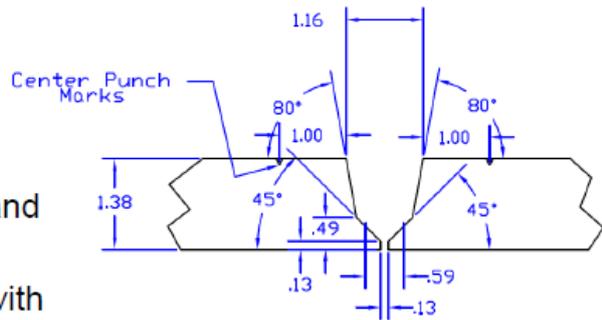


圖 2.1.3-18 Grade 91 異質焊接之氧化物侵入現象

▪ **Large diameter, Conventional DMW**

- 18" OD X 1.5" WT
- P91 buttered with ENiCrFe-3, and subcritical PWHT at 745°C/2h
- Buttered P91 welded to 347H with ENiCrFe-3 and left in as-fabricated condition
- Compound bevel (45° on 10°)



▪ **Screening DMWs** made in identical heats of P91

- 6.625" OD X 0.72" WT
- Single bevel geometry (50° included angle)

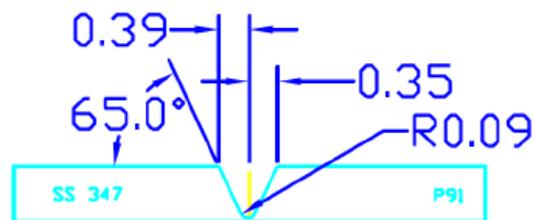


圖 2.1.3-19 EPRI 研究 Grade 91 異質焊接之實驗工件

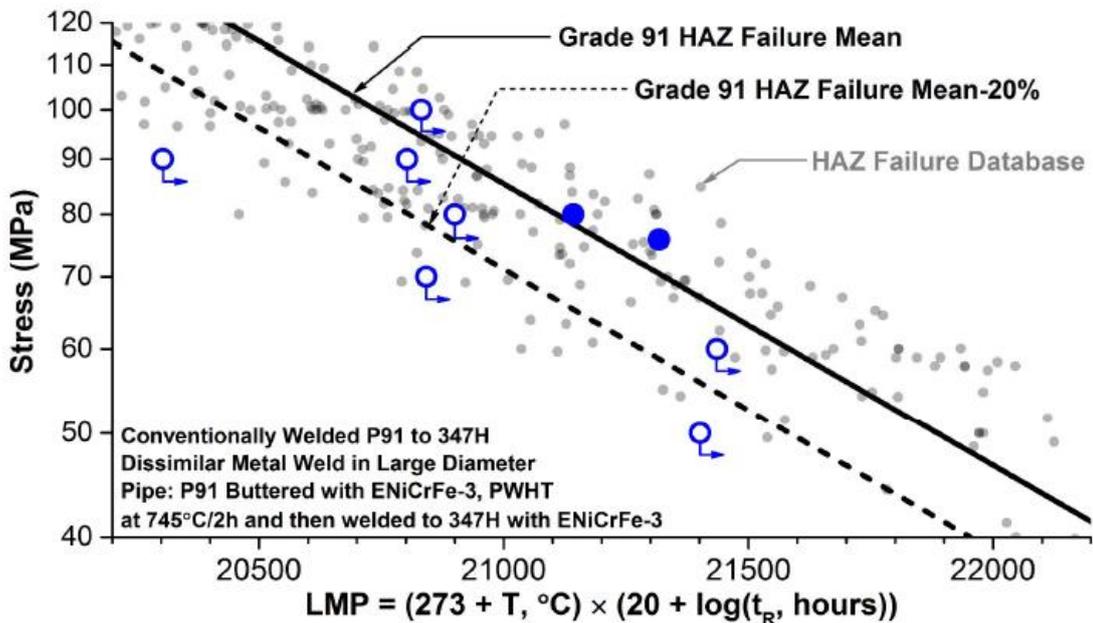


圖 2.1.3-20 大型異質焊件之高溫潛變破裂實驗結果

ID	BM1	Filler Metal	BM2	Manufacturing Sequence	PWHT
DMW-1A**	P91	ENiCrFe-3	TP347H	Butter P91, PWHT, Seal Weld	Yes (after butter)
DMW-1B	P91	ENiCrFe-3	TP347H	Seal Weld	No
DMW-1C	P91	ENiCrFe-3	TP347H	Seal Weld	Yes
DMW-1D	P91	ENiCrFe-3	TP347H	Step in P91, Seal Weld	No
DMW-2A	P91	E9015-B9	TP347H	Seal Weld	Yes
DMW-3A	P91	E8015-B8	TP347H	Seal Weld	No
DMW-3B	P91	E8015-B8	Alloy 800	Step in P91, Seal Weld	No
DMW-4A	P91	E16-8-2	TP347H	Seal Weld	No
DMW-5A	P91	ENiCrFe-3	TP347H	Butter P91, PWHT, Seal Weld	Yes (after butter)

**In thick-wall pipe for baseline testing

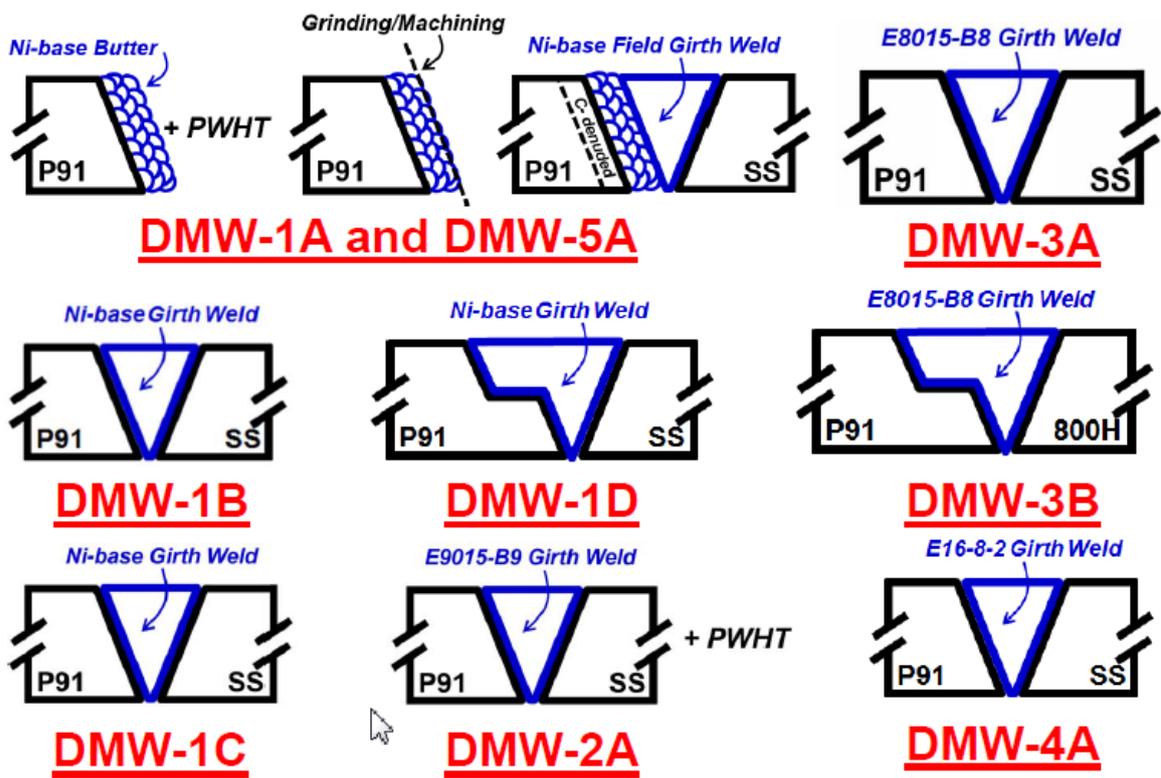


圖 2.1.3-21 小型異質焊件之細部實驗設計

Specimen	Welding Procedure	Time to Failure (hours)	Performance Relative to DMW-5A	Percentage of Life Spent in Tertiary Creep
DMW-1B	Ni-base + No PWHT	6,730	2.8X	1%
DMW-1C	Ni-base + 745°C/2h	4,142	1.7X	6%
DMW-1D	Ni-base + Step + No PWHT	3,917	1.6X	21%
DMW-2A	-B9 + 745°C/2h	1,624	0.7X	15%
DMW-3A	-B8 + No PWHT	811	0.3X	26%
DMW-3B ¹	-B8 + Step + No PWHT	1,515	0.6X	25%
DMW-4A	Stainless + No PWHT	4,201	1.7X	6%
DMW-5A	Ni-base butter + 745°C/2h + Ni-base	2,409	(1.0X)	18%

圖 2.1.3-22 小型異質焊件之潛變試驗結果

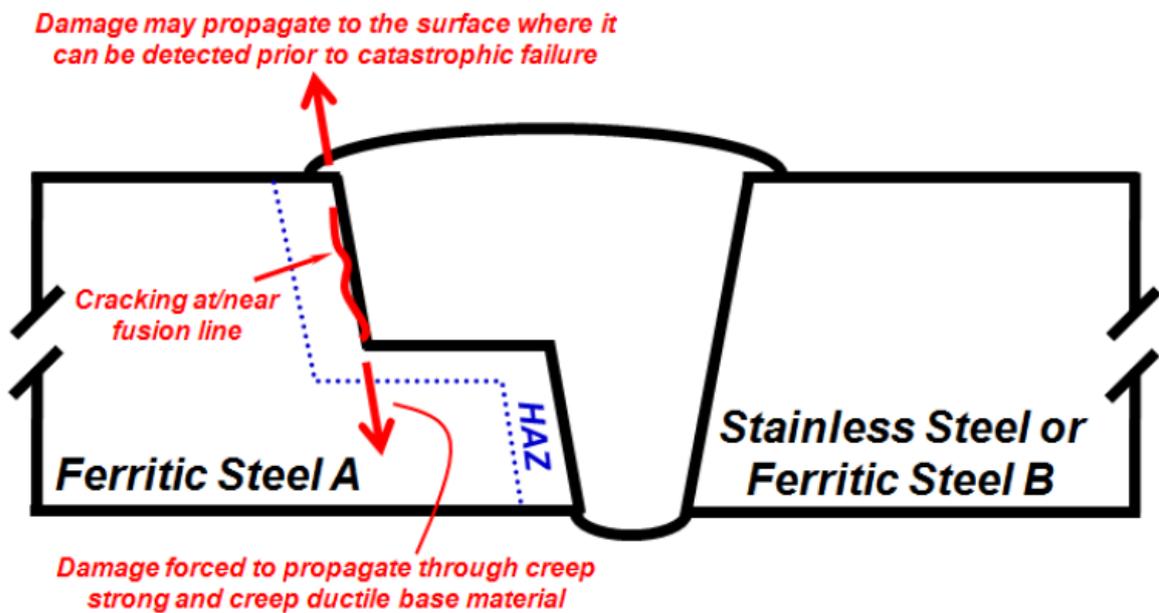


圖 2.1.3-23 階梯式焊件之潛變破裂過程示意

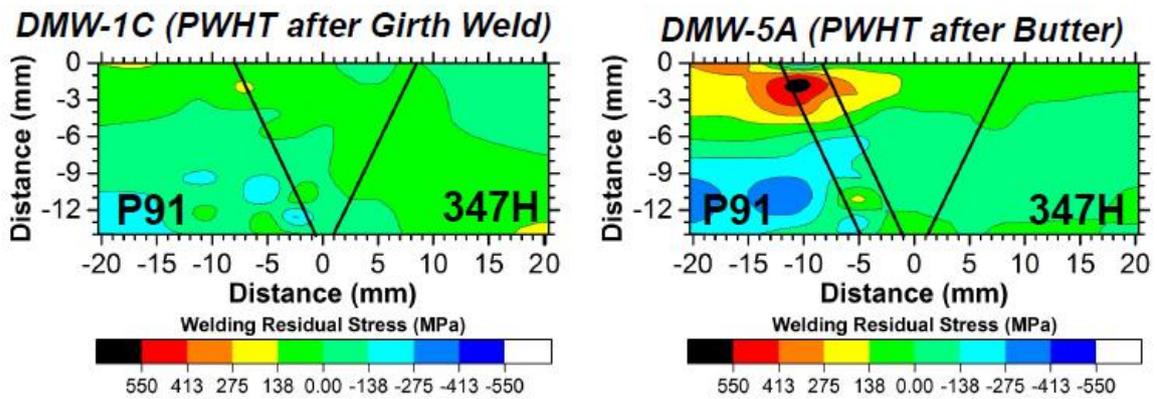


圖 2.1.3-24 小型異質焊件之部份殘留應力分析結果

2.2 Grade 92 及新型潛變強度增強型肥粒鐵鋼材研究進展

2.2.1 Grade 92

Grade 92 同為熟知潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材，一般認為較 Grade 91 適合更高溫高壓應用，但依據 EPRI 研究經驗，應注意 Grade 92 普遍存在高溫延性低下問題；圖 2.2.1-1 為其與純淨(微量雜質)Grade91 材質比較，分別以板狀及車槽式(notched)圓柱形試樣進行潛變試驗結果，雖然抗潛變強度較強，較適合低溫高壓力環境下應用，但若處於束縛狀態或多軸向受力時，壽命與 Grade 91 並無明顯差別，另外圖 2.2.1-2 為不同溫度但同約 26k 小時潛變試驗後斷面外觀及面積縮減率定量結果，就其普遍應用於 600-650°C 環境而言，顯示確實存在運轉中可能脆斷之疑慮。EPRI 驗證 Grade 92 之劣損與雜質或析出物等周邊空孔之形成有關，圖 2.2.1-3 為不同雜質組成之試驗結果，純淨合金時潛變壽命最長、斷面縮率(延性)愈大，反之，若材質中 Cu、O、S、Sb、Sn，或 Al、As 含量較多時，潛變壽命隨之縮短、斷面縮率(延性)愈小，至於析出物之影響部份，如圖 2.2.1-4，發現主要與 BN 強烈相關、MnS 及 Al₂O₃ 則次之，EPRI 引據 Abe 圖譜(Abe Diagram)，如圖 2.2.1-5，認為既有 Grade 92 規範組成有本質性生成 BN 之脆性裂斷疑慮。

除了同 Grade 91 研究訂立冶金危險因子(MRF)，探討 Grade 92

之適當合金組成之外，EPRI 發現藉由適當固溶熱處理方式，應有助於潛變壽命之延長；取樣圖 2.2.1-3 中 BM-A 進行 1200°C/1Hr/水淬及接續 777°C/1Hr/空冷，進行潛變試驗之結果，已歷時約 15k 小時，其抗潛變性能明顯增強，如圖 2.2.1-6，目前於美國能源署支助下，由 EPRI 主導進行” Optimization of Advanced Steels for Cyclic Operation through an Integration of Material Testing, Modeling and Novel Component Test Validation”計畫(DE-FE002620)，協同研究單位包含 Wyman Gordon、B&W、ORNL，共同執行 Grade 92 材質研究計畫，分工如圖 2.2.1-7。

Material ¹	Sample	Test Conditions		Time to Failure	Factor on Life ³
		Temp.	Stress ²	Hours	
Grade 91	Uniaxial	650°C (1202°F)	90 MPa (13.1 ksi)	1,400	7.1
Grade 92				10,000	
Grade 91	Type I Notch	650°C (1202°F)	90 MPa (13.1 ksi)	12,000	1
Grade 92				12,000	
Grade 91	Uniaxial	600°C (1112°F)	165 MPa (23.9 ksi)	300	16.7
Grade 92				5,000	
Grade 91	Type I Notch	600°C (1112°F)	165 MPa (23.9 ksi)	8,000	1.25
Grade 92				10,000	

¹Material: Grade 91 is assumed to be damage tolerant in this analysis

²Stress is the net section stress (i.e. note for the notch tests this stress value is at the base of the notch)

³Factor on life calculated by dividing the Grade 92 time to failure by the Grade 91 time to failure

圖 2.2.1-1 EPRI 比較 Grade 91 及 Grade 92 不同試樣之潛變破裂試驗結果

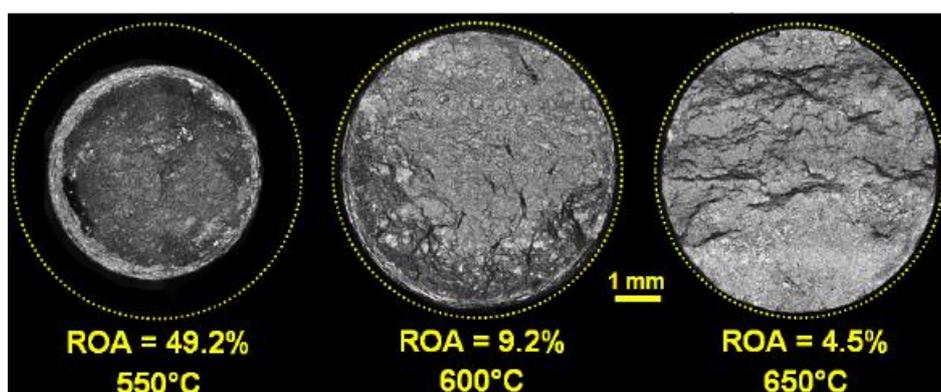


圖 2.2.1-2 同約 26k 小時潛變破裂 Grade 92 試樣之斷面比較

Conventionally Measured Elements	Gr92 Heat	Co	Cr	Ni	P	Mn	Mo	Si
	BM A	0.015	8.797	0.38	0.009	0.49	0.43	0.211
	BM B	0.016	8.776	0.25	0.012	0.54	0.33	0.182
	BM C	<0.001	8.939	0.19	0.009	0.40	0.43	0.252
	Gr92 Heat	B	C	N	Nb	V	W	
	BM A	0.0041	0.113	0.045	0.062	0.188	1.836	
	BM B	0.0041	0.131	0.0468	0.056	0.191	1.617	
	BM C	0.0042	0.093	0.0508	0.054	0.189	1.794	
	Gr92 Heat	Al	As	Cu	O	S	Sb	Sn
	BM A	0.002	0.0064	0.189	0.0053	0.008	0.0016	0.016
BM B	0.015	0.0082	0.135	0.0022	0.001	0.001	0.008	
BM C	0.001	<0.0001	0.001	0.0043	0.001	<0.0001	<0.001	

Also analyzed, with no detected amount: Pb, Bi, La, Nd, Ta, Ti, Zr and Ca ≤ 0.002

The Trends in Controlled Composition is Observed in Grade 92 [650°C/90 MPa]

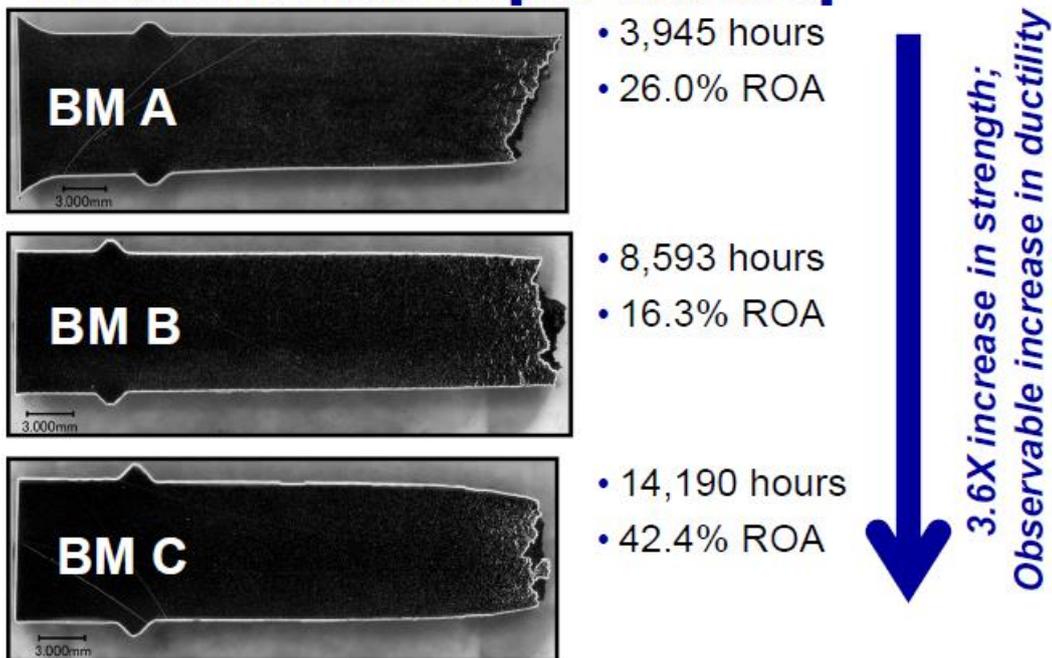


圖 2.2.1-3 不同合金組成之 Grade 92 材質經 650°C *90MPa 之潛變試驗結果

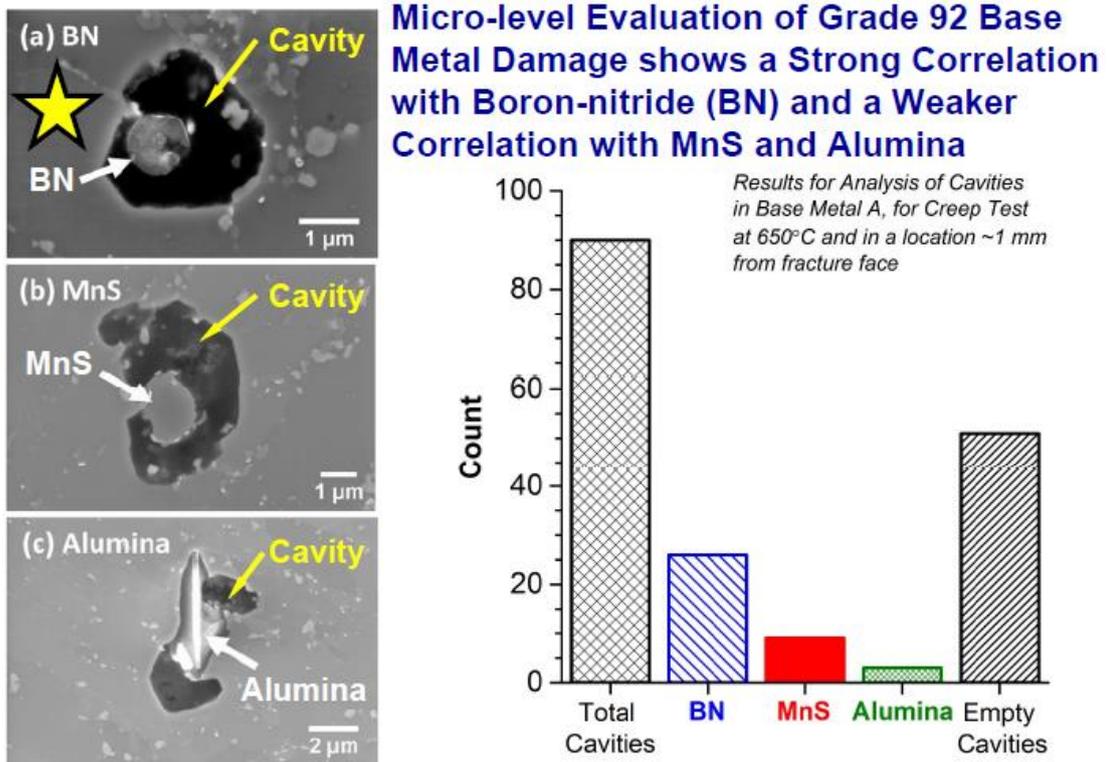


圖 2.2.1-4 Grade 92 於 650°C 潛變試驗後斷面旁空孔定量結果

All Heats of Grade 92 are Susceptible to the formation of BN (hence the development of MARBN-type steels such as SAVE 12 AD and others) – From Abe Diagram

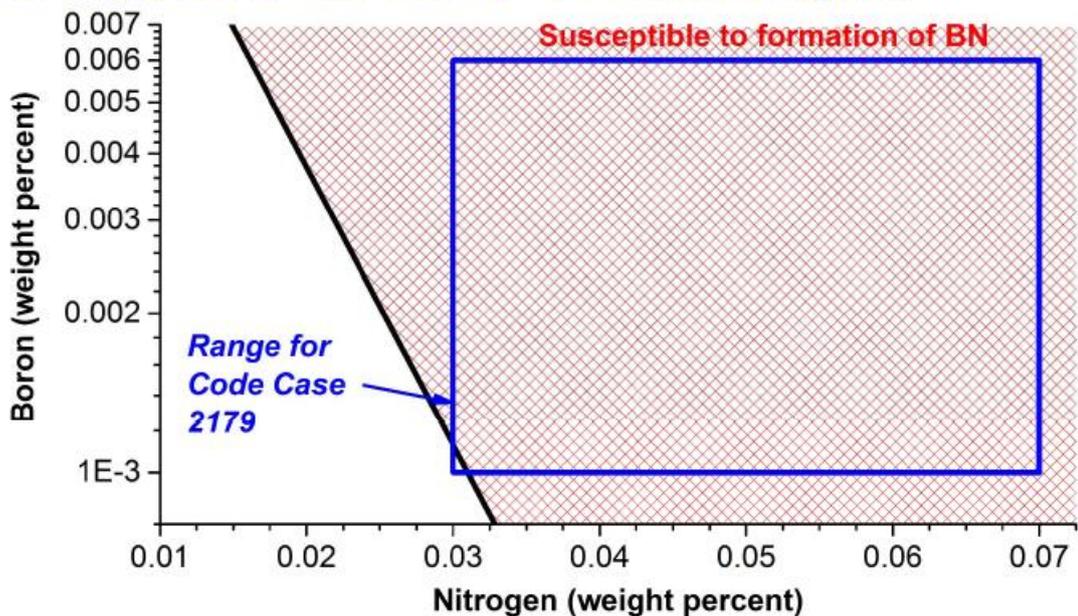


圖 2.2.1-5 材質中 BN 形成區間與元素組成關連性

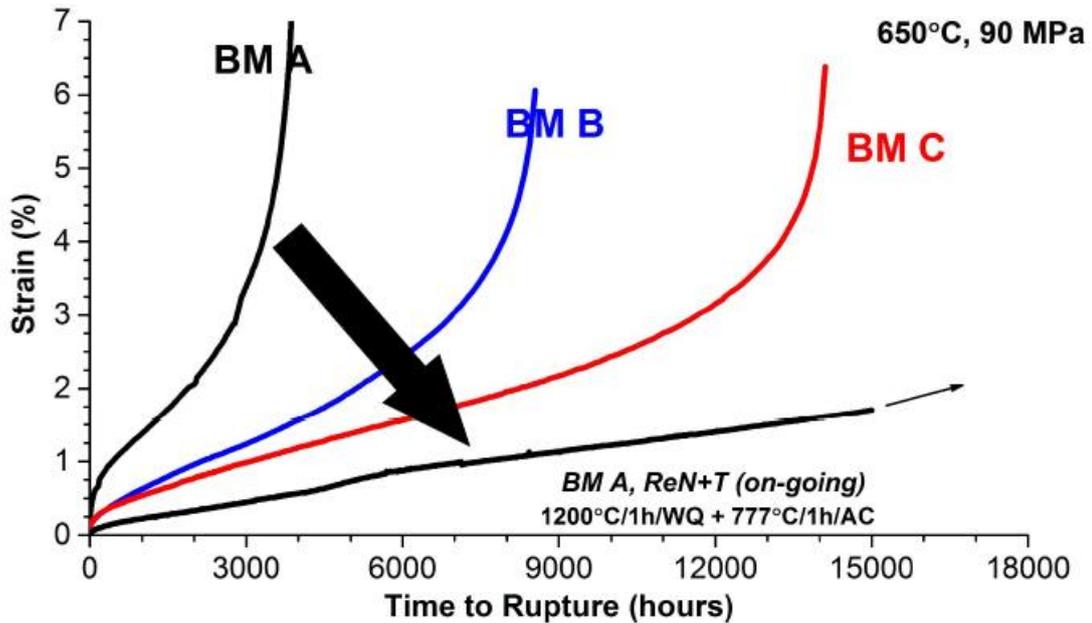


圖 2.2.1-6 高量雜質 Grade 92 經固溶熱處理後潛變試驗結果

Tasks in the DOE Project

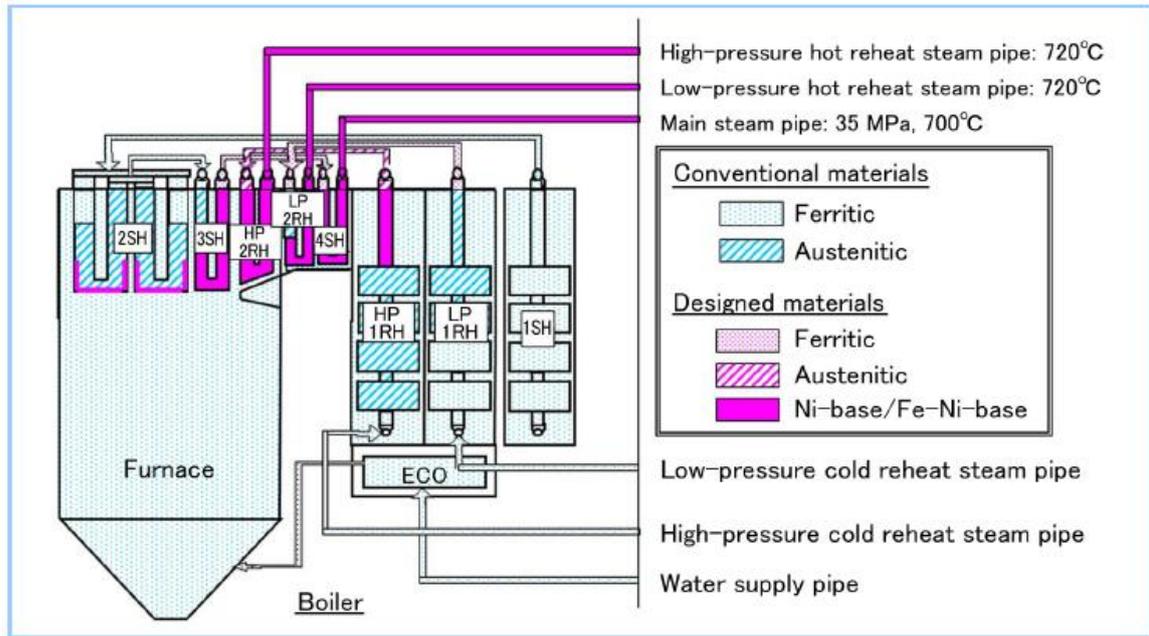
- Task 2.0 – P92 Alloy Procurement and Processing **[Wyman]**
- Task 4.0 – Laboratory Scale Creep, Creep and Thermal Cycling Testing of P92 Samples
- Task 5.0 – Microstructural Evaluation of Initial Material, Heat Treatments and as-Tested Samples
- Task 6.0 – Development of Constitutive Equations, Creep-Fatigue Models and Design of a Phase II Pressure Vessel Component Test **[Babcock & Wilcox]**
- Task 7.0 – Design and Fabrication of a Structural Feature Scale Creep-Fatigue Test **[ORNL]**

圖 2.2.1-7 美國 DOE 支助進行 Grade 92 材質之研究分工情形

2.2.2 SAVE12AD

為改善鍋爐用肥粒鐵系 Grade 91、Grade 92 於焊後細晶熱影響區軟化，容易導致 Type IV 裂斷，以及 Grade 92 脆性等問題，先進國家持續投入新合金設計之材料研發工作，近年陸續發展出 9Cr 鋼材如 Low-C 9Cr(9Cr-2.4W-1.8Co-VNb)、MARBN(9Cr-3W-3Co-VNbNB)、SAVE12AD(9Cr-2.9W-CoVNbTa-NdN)等，如圖 2.2.2-1，日本經濟產業省(METI)自 2008 年起所支助及推動產業及學術機構之大型低碳發電研究計畫中，已規劃超超臨界(A-USC)鍋爐內部各區段之材料種類，而上述材料列為應用之候選研試對象，目標除管材應用外，也可作為 650°C 集管。其中 Low-C 9Cr 主要是藉由降低 N、Al 含量，以穩定回火麻田散鐵組織，C 含量則降低至 0.035% 以改善焊接性，MARBN 及 SAVE12AD 則源自發現 B 含量提昇至 0.01%(100 ppm)時即具有充份改善細晶 HAZ 軟化區及焊道強度之功能，MARBN 合金設計為改善潛變強度加入 W，及藉由 Co 安定既有沃斯田鐵晶界(PAGB)周邊回火麻田散鐵，SAVE12AD 則再納入 Ta、Nd 等元素，而為了抑制 BN 析出之脆性問題，反而降低 N 含量至 0.01% 以下，其合金組成之選定理由如圖 2.2.2-2。相較於 9Cr-3Co-3W，加入約 0.02%Nd(鉍)對於潛變速度雖無明顯影響，但於 550-700°C 已達約 45k 小時之試驗結果顯示，破斷延性有大幅改善現象，如圖 2.2.2-3，原因可能與 Nd、S 容易結合生成硫化物，防止 S 於晶界偏析所致有關，另比較 Grade 91(JIS STBA28)、Grade 92(JIS STBA29)之潛變試驗結果及微組織，如圖 2.2.2-4，上述 2 鋼材於 600°C 經 40k-50k 小時後，於既有沃斯田鐵或麻田散鐵等晶界之析出物(主要 M₂₃C₆)普遍凝集粗大化，基地回火麻田散鐵也有明顯回復成等軸肥粒鐵化現象，但 SAVE12AD 仍保有高差排密度之回火麻田散鐵組織，前述晶界之 M₂₃C₆ 也仍呈現微細化，估計 600°C 時之潛變強度約可提高 30%。目前新日鐵住金株式會社(NSSM)已可製作 350mm ϕ * 40mm t 之管件，不同溫度之母材潛變試驗結果如圖 2.2.2-5，650°C * 100k 小時之許容應力可達 90 MPa，已分別試驗 Grade 92、INCO 82 等焊條進行焊接及經 740°C * 30

分鐘熱處理，並無發現明顯細晶 HAZ，但 Grade 92 焊條可能因組成不足匹配(under matching)，約 38k 小時潛變試驗結果，顯示有由焊道斷裂趨勢，如圖 2.2.2-6，另以 1.5Na₂AO₄-1.5K₂SO₄-1.0Fe₂O₃ (mol) 模擬灰、0.2%SO₂-2.6%O₂-14%CO₂-10%H₂O-N₂Bal. 氣氛，分別於 650°C、650°C 進行 100 小時試驗，其抗熱腐蝕性能與 Grade 91 無明顯差別，目前除繼續進行研究及現場試驗之外，已向 ASTM 申請登錄為 Grade 93 材質，而 EPRI 認為此材質應詳細考量正常化及回火等熱處理條件，以達性能最佳化，初步設定正常化、回火之溫度應約 1080-1170°C、780°C 為宜，已著手進行研究之選定試樣組成及研試條件如圖 2.2.2-7。



Material name		Composition	Thick large-diameter pipe	Small-diameter tube
HR6W	Ni-based	45Ni-23Cr-7W	- High-temperature header and connecting pipe - Main steam pipe - Hot reheat steam pipe	- Hot heat transfer tube
HR35	Ni-based	50Ni-30Cr-4W-Ti		
Alloy 617	Ni-based	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al		
Alloy 263	Ni-based	Ni-20Cr-20Co-6Mo-2Ti-Al		
Alloy 740	Ni-based	Ni-25Cr-20Co-2Nb-2Ti-Al		
Alloy 141	Ni-based	Ni-20Cr-10Mo-2Ti-Al	-	-
High B-9Cr steel	Advanced Ferritic steel	9Cr-3W-3Co-Nb-V-B	- Header - Connecting pipe (up to ≈650°C)	- Heat transfer tube (Temperature range similar to conventional high Cr steel)
Low C-9Cr steel	Advanced Ferritic steel	0.035C-9Cr-2.4W-1.8Co-Nb-V		
SAVE12AD	Advanced Ferritic steel	9Cr-3W-2.6Co-Nb-V-B		

圖 2.2.2-1 日本 A-USC 鍋爐用料規劃及候選材料

添加元素 (mass%)	選定理由
9Cr	9~12Crの中で長時間クリープ中の金属組織が最も安定
3W	固溶強化+微細ラーベス相析出強化
3Co	焼戻しマルテンサイト組織の安定化
0.2V	微細析出強化
0.05Nb	微細析出強化
微量Ta	微細析出物の安定化
微量Nd	クリープ延性と耐高温疲労特性改善
0.01B	溶接HAZの細粒化抑制 ⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 溶接部のクリープ強度改善
N<0.01	ボロン窒化物の生成抑制

圖 2.2.2-2 SAVE12AD 合金元素設計

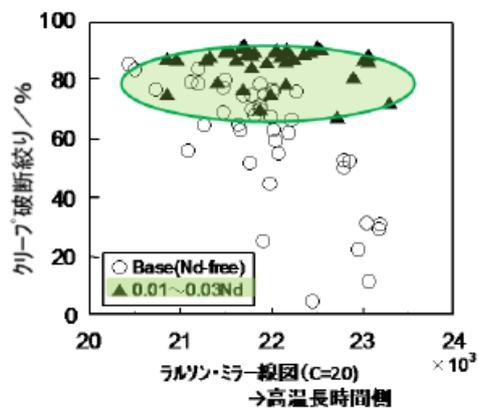
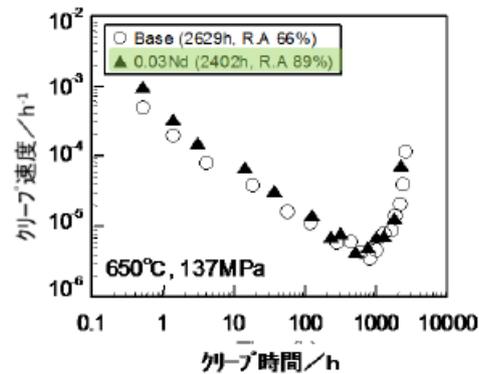


圖 2.2.2-3 9Cr-3Co-3W 添加Nd之 SAVE12AD 潛變速率及破斷延性試驗結果

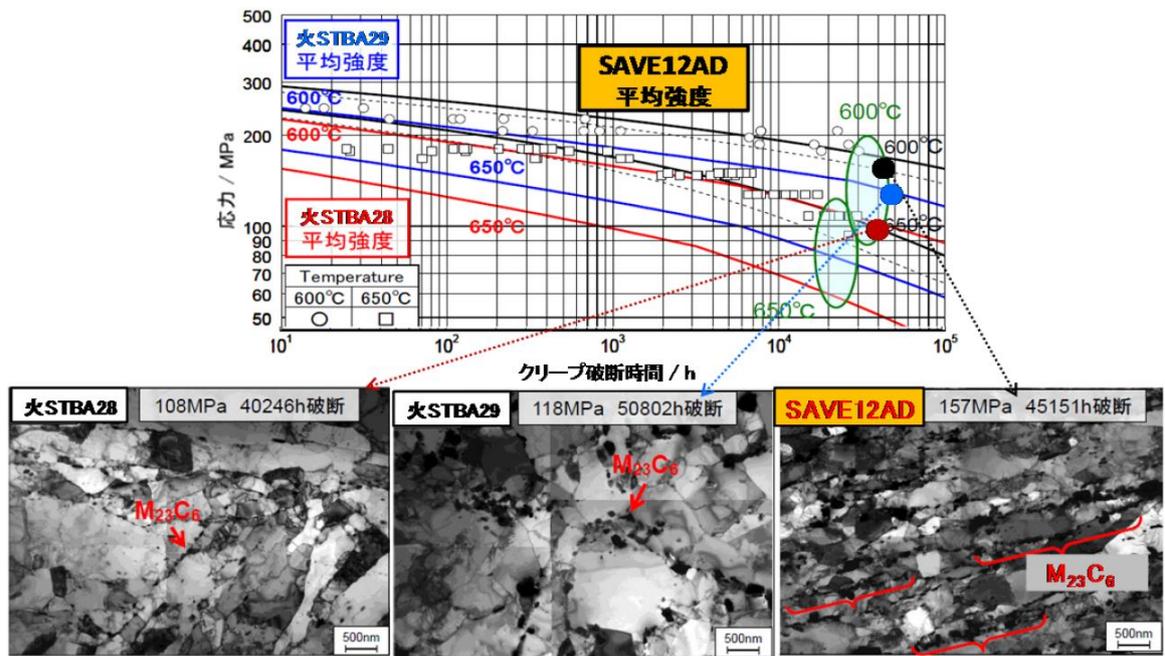


圖 2.2.2-4 SAVE12AD 潛變試驗結果及微組織

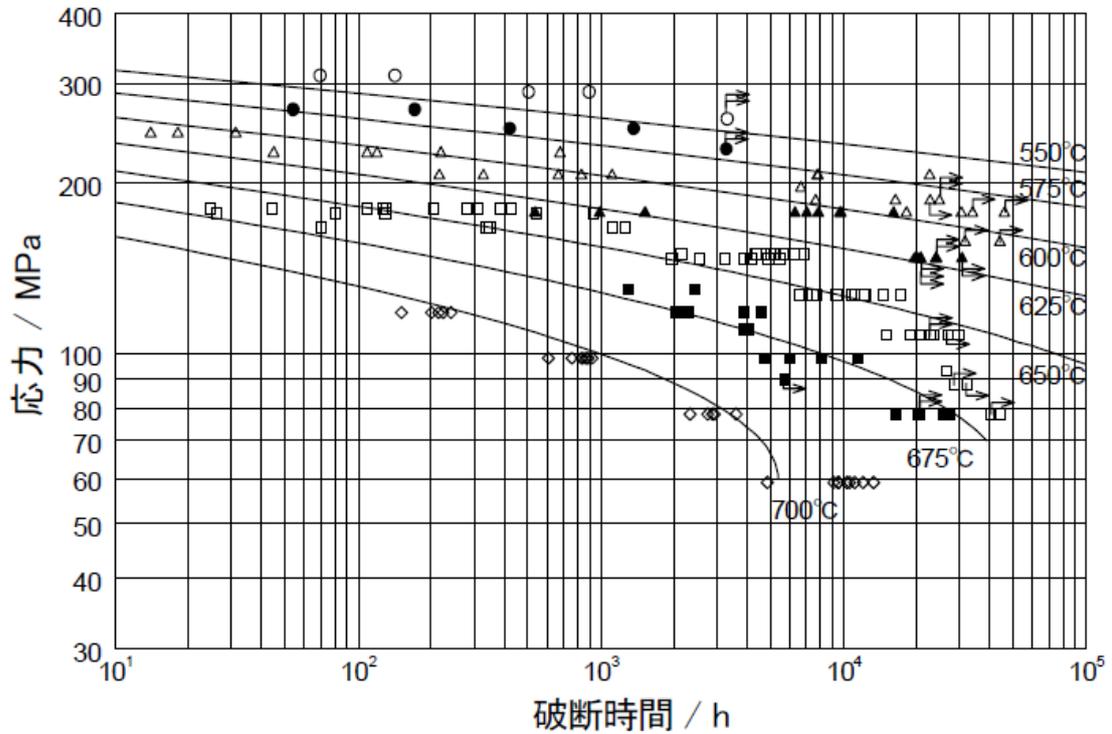


圖 2.2.2-5 新日鐵住金公司之 SAVE12AD 母材潛變試驗結果

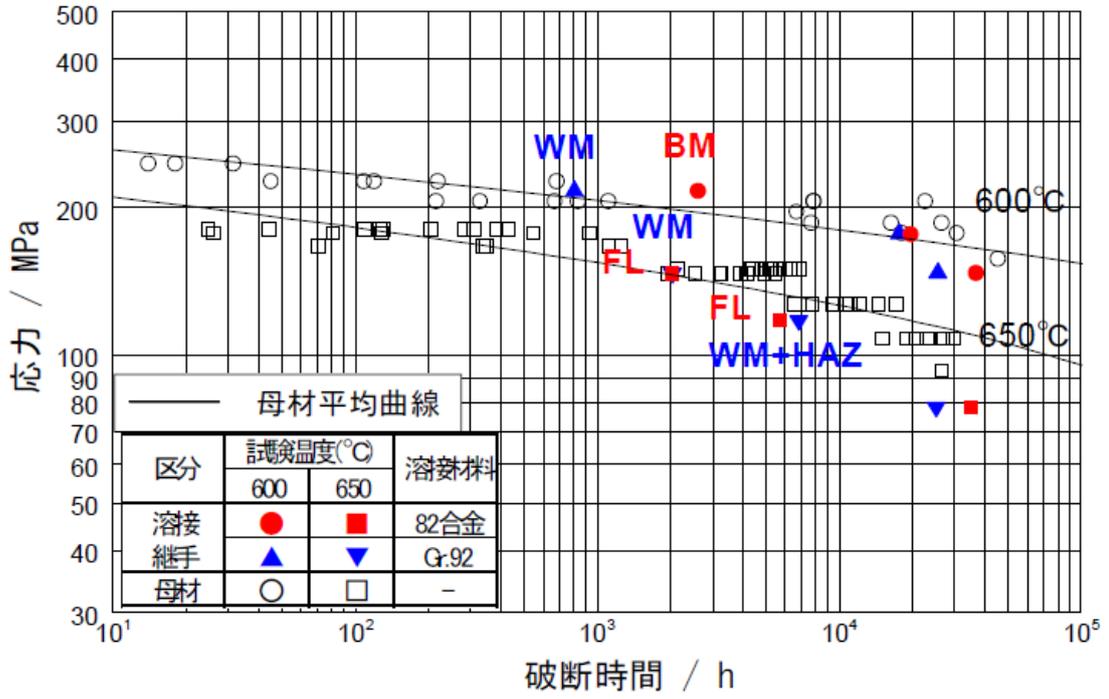


圖 2.2.2-6 SAVE12AD 試驗不同焊條之潛變試驗結果

Steel	Heat	Product Form	Dimensions (mm)	Heat Treatment
S1	Heat1	Plate	t15	1150°C x1h AC → 780°C x1h AC
S2	Heat2	Plate	t15	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
S3	Heat2	Plate	t15	1150°C x2h AC → 780°C x4h AC
S4	Heat3	Plate	t15	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
S5	Heat3	Plate	t15	1150°C x2h AC → 780°C x4h AC
S6	Heat4	Plate	t15	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
S7	Heat4	Plate	t15	1150°C x2h AC → 780°C x4h AC
S8	Heat5	Plate	t15	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
S9	Heat5	Plate	t15	1150°C x2h AC → 780°C x4h AC
S10	Heat6	Plate	t15	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
S11	Heat6	Plate	t15	1150°C x2h AC → 780°C x4h AC
S12	Heat7	Plate	t25	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
S13	Heat8	Plate	t25	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
T1	Heat9	Tube	38OD x 8.8WT	1150°C x 10min AC → 780°C x 2h AC
T2	Heat10	Tube	80OD x 20WT	1150°C x1h AC → 780°C x4h AC
T3	Heat11	Tube	45OD x 8.5WT	1150°C x 10min AC → 780°C x3h AC
P1	Heat12	Pipe	350OD x 50WT	1150°C x1h AC → 780°C x3h AC
P2	Heat13	Pipe	350OD x 40WT	1150°C x 30min AC → 780°C x6h AC
P3	Heat14	Pipe	350OD x 40WT	1150°C x 30min AC → 780°C x6h AC

Proposed range = 1080 to 1170°C

Heat	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Co	
Heat 1	0.07	0.25	0.52	0.016	0.0010	-	8.91	2.99	1.04	
Heat 2	0.08	0.24	0.52	0.011	0.0010	0.10	9.22	2.98	2.97	
Heat 3	0.08	0.25	0.50	0.010	0.0010	0.10	9.00	3.00	2.98	
Heat 4	0.08	0.24	0.51	0.012	0.0010	0.10	8.77	3.01	3.00	
Heat 5	0.08	0.25	0.50	0.012	0.0010	0.10	8.53	2.99	2.99	
Heat 6	0.08	0.24	0.51	0.011	0.0010	0.10	8.99	2.99	3.27	
Heat 7	0.08	0.26	0.51	0.009	0.0010	0.11	9.11	2.89	2.63	
Heat 8	0.08	0.25	0.52	0.009	0.0005	0.11	9.17	2.89	2.62	
Heat 9	0.08	0.26	0.52	0.009	0.0010	0.12	8.86	2.88	3.02	
Heat 10	0.08	0.24	0.53	0.011	0.0008	0.10	9.27	2.82	2.81	
Heat 11	0.08	0.29	0.49	0.011	0.0008	0.09	9.06	2.96	2.99	
Heat 12	0.08	0.23	0.49	0.013	0.0009	0.08	9.12	2.90	3.06	
Heat 13	0.08	0.27	0.50	0.013	0.0010	0.11	9.08	2.88	3.00	
Heat 14	0.08	0.24	0.52	0.014	0.0012	0.08	9.24	2.91	3.07	
Specification	min.	0.05	0.05	0.20			8.50	2.0	1.0	
	max.	0.13	0.50	0.70	0.020	0.010	0.50	9.50	3.5	3.5
	Min	0.07	0.24	0.49	0.009	0.0008	0.08	8.53	2.88	1.04
	Max	0.08	0.29	0.53	0.016	0.0012	0.12	9.24	3.01	3.07

圖 2.2.2-7 EPRI 進行 SAVE12AD 研究選用材質及熱處理條件

2.3 先進型超超臨界發電鍋爐之鎳基合金材料研究進展

發電鍋爐效率之提昇為減碳議題及降低污染之主要有效措施，但眾所周知瓶頸在於提高蒸汽溫度所需新材料之研發、製造、焊接等技術，圖 2.3-1 為燃煤鍋爐蒸汽溫度之演進歷程，圖中亦標示先進國家為提昇發電效率，規劃下一世代之進步型超超臨界(A-USC)發電之蒸汽溫度及時程。目標大略分為 700°C、760°C 等 2 類，700°C 部份，歐盟約自 1998 年率先開展如 AD700、COMTES700、GKM HWT II、ENCIO 等計畫，日本於 1990 年代即設立超超臨界發電(USC)機組，經濟產業省(METI)自 2008 年起支助及推動進行，中國大陸及印度於 2011 年、2012 年也陸續成立國家型研究計畫，760°C 部份則僅美國獨領風騷，於 2001 年起由 DOE/OCDO 結合主要鍋爐及汽機製造廠家、EIO、EPRI 等資金及任務分工，由國家能源技術實驗室(NETL)統籌推動及 ORNL 技術支援，以下參酌此次會議提供資料，簡述日本及美國之關鍵性鎳基合金材料之研究進展概況。

如圖 2.2.2-1，日本設定 HR6W、HR35、Alloy 617、Alloy 263、Alloy 740、Alloy 141 等 700°C 候選應用材料，其中前 3 者立意再作為集管或主蒸汽、高溫再熱器等管件應用，後 4 者已知另藉由運轉中 Ni₃(Al,Ti)析出強化功能，可提昇高溫運轉性能，但由於需外購，主要研試對象似乎以 HR6W、HR35 為主，目前已研製出 350 mm φ * 40 t mm 之 HR6W，與自動化 GTA 及手工 SMAW 全周焊接程序，另發現 Alloy 617 焊接作業需降低 B 及其他微量組成之含量，以避免熱裂，至於彎曲加工(bending)作業，管件部份，試驗冷彎及熱彎 2.5D、1.5D 各 2 種，前述 HR6W、Alloy 617 大型管以高週波感應加熱彎曲，以上加工及經固溶處理後均無龜裂、厚度明顯減薄或其他異常，已試製 HR6W 集管組合件及軸向焊道結構如圖 2.3-2。

焊接件潛變試驗分為平板試片及 HR6W 大型管件，均已進行數萬小時，結果如圖 2.3-3，700°C 時之平板焊件部份，確立性能依序而下為 Alloy 141、Alloy 740、Alloy 263、Alloy 617，抗潛變強度較

高，HR35、HR6W 則稍差，但試驗後期無加速劣化現象，HR6W 大型管件焊件之性能雖隨溫度而下降，但就實驗已達 70k 小時而言，可預估 700°C 應用 100k 小時之強度仍可達 90 MPa 以上，且焊件性能與母材無明顯差別，至於抗高溫腐蝕部份，進行蒸汽氧化(以 N₂ 除氧，約 10k 小時)及熔融灰(1.5 mol Na₂SO₄+ 1.5 mol K₂SO₄ + 1.0 mol Fe₂O₃，0.2 vol% SO₂，100 小時)試驗，如圖 2.3-4，800°C 蒸汽氧化試驗後，鎳基合金除 HR6W 外，氧化皮膜比 25Cr 材料 KA-SUS310J1(目前使用之 HR3C)略厚，但仍小於 10 um，熔融灰試驗結果則顯示，材質抗熱腐蝕特性主要與 Cr 含量有關，鎳基合金於 700°C 之抗性似乎較 650°C 明顯變差，推測與 SO₂ 氣氛下 Ni 易與 S 反應有關，不過評估影響程度不大。

現場試驗安排於福岡縣大牟田市三川電廠，自 2015 年 5 月開始，於 700°C 蒸汽環境下安裝集管、輸送管、高溫閥件、汽機殼(turbine casing)等組件進行實機運轉測試，除前述 A-USC 之 HR6W、HR35、Alloy 617、Alloy 263、Alloy 740 等候選材料，亦納入 KA-SUS304J1HTB(Super304H)、KA-SUS310J1TB(HR3C)等管件藉以比較，其中 HR6W 包含輸送管、熱彎件、周向焊件、高溫閥件等，Alloy 625 則用於汽機殼試驗，預計進行 10k 小時，試驗結束後將取樣評估耐蝕性及各項材料特性及組織變化，另外平行展開鎳基合金之潛變損傷、非破壞檢查技術等研究。

如前述，美國自 2001 年起即推展 A-USC 研究計畫，目標為建造 760°C *350MPa 蒸汽之發電廠，預估可降低國內 20% 之 CO₂ 排放量，時程規劃如圖 2.3-5，約分為 2001-2016 材料研究、2015-2022 材料及組件測試、2019-2029 示範運轉等 3 階段。第 1 階段材料研究部份已大致完成，步入測試階段中；原初始設計階段即認為使用鎳基合金有其需要性，且除抗潛變強度外，設定仍應考量製造性、焊接性、耐疲勞性、裂痕敏感性、耐蒸汽氧化及火側熱腐蝕特性等，研究團隊評估候選鎳基合金材料之適用組件及註記應用與限制特性之結果如圖 2.3-6，總結而言，合金材料雖各有優缺點、適合不同組件，但時效硬化型 Inconel

740 及 Haynes 282 極具應用潛力，為主要候選材料，除均具高強度外，Inconel 740 耐腐蝕性能極佳、易於製造及焊接，適合作為過、再熱器管，而 Haynes 282 兼具性能較不隨起始組織而變化，鍛造及鑄造性佳，適合轉子、閥件、外殼等應用，圖 2.3-7 為主要合金材料 100k 小時之潛變強度及溫度關連性，由運轉所需應力亦可查得合金材料相應運轉溫度限值，亦顯示上述 2 種時效硬化型材料強度優於固溶強化型之 Alloy 617。不過值得玩味的是，前述日本研試中之 HR6W 由於 Ni 含量低於 50% 而歸類為沃斯田鐵系，且考量 760°C 下應用時強度不足問題，並未進行廣泛試驗。

經由長期材料製造、焊接等研究及技術開發，已由 PCC 能源集團之 Special Metals 及 Wyman-Gordon 製造出 381 mm 外徑*203 mm 內徑*10.4M 長之 Alloy 740H 管件，且證實可焊接作業，另鍛造汽機轉子前，經 3 次熔煉(VIM/ESR/VAR)之 Haynes 282、約 4500kg 之 Haynes 282 鋼錠也已試製成功，如圖 2.3-8，至於鑄造部份，除試製 Haynes 282 及 Alloy 263 之 135-450kg 各型塊體、及 635kg 之 Haynes 282 離心式鑄造體外，開發出經驗證之模擬程式，並於 2014 年 11 月試製出 2700 kg、全世界最大型時效硬化型合金半閥體，已成功開發完成目標為可依據幾何形狀製造約 2700kg 各式閥件，正進行模擬計算研究中。

第 2 階段之材料性能測試(Component Test, ComTest)目的為驗證 A-USC 技術可行性，成員包含 AEP、Duke、First Energy、Southern、Tri-State 等電力公司，已初步規劃於 Ohio 州 Youngstown 進行，目前由 Alstom Chattanooga 工廠建造組件之 760°C 蒸汽冷卻式高溫腐蝕測試設施，已先進行 16k 小時實機吊掛試驗，材料包含 Inconel 740H、CCA617、HR6W、Super 304H、高鉻含量塗層或覆焊件等，主要試驗結果如圖 2.3-9，顯示 Inconel 740H 具有極佳抗高溫腐蝕性能，該材料目前已經 ASME B&PV B31.1 認證為 Code Case 2702，可使用至 800°C。

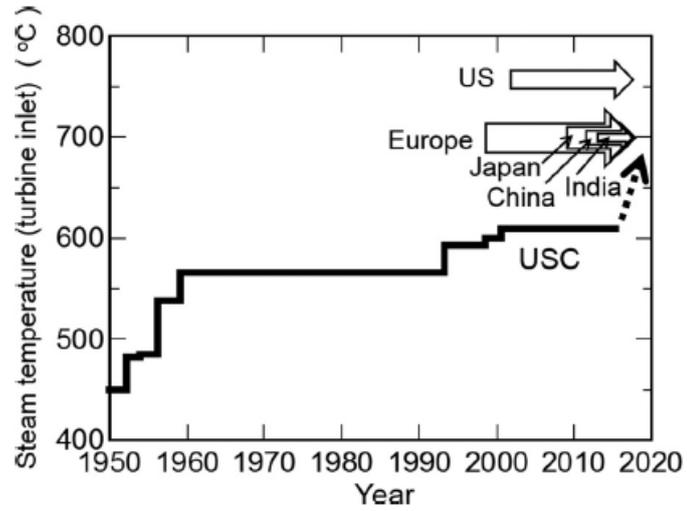


圖 2.3-1 發電鍋爐蒸汽溫度演進及 A-USC 研究規劃



圖 2.3-2 MHI 試製 HR6W 集管組合件外觀及縱向焊道結構

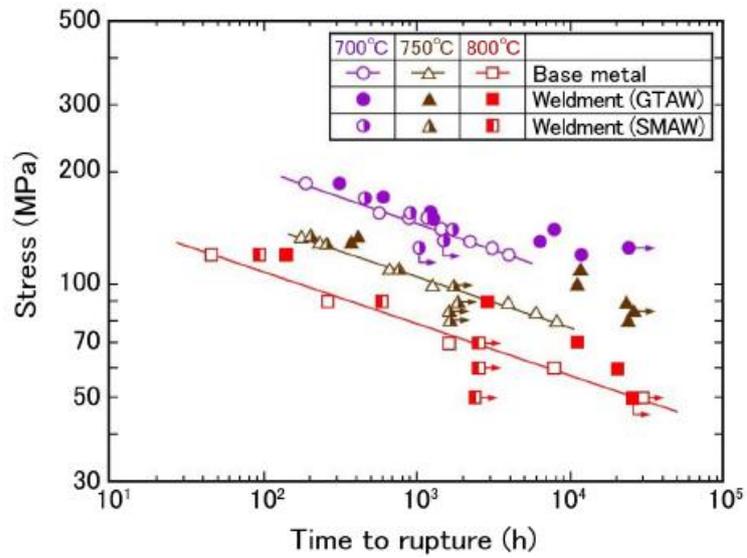
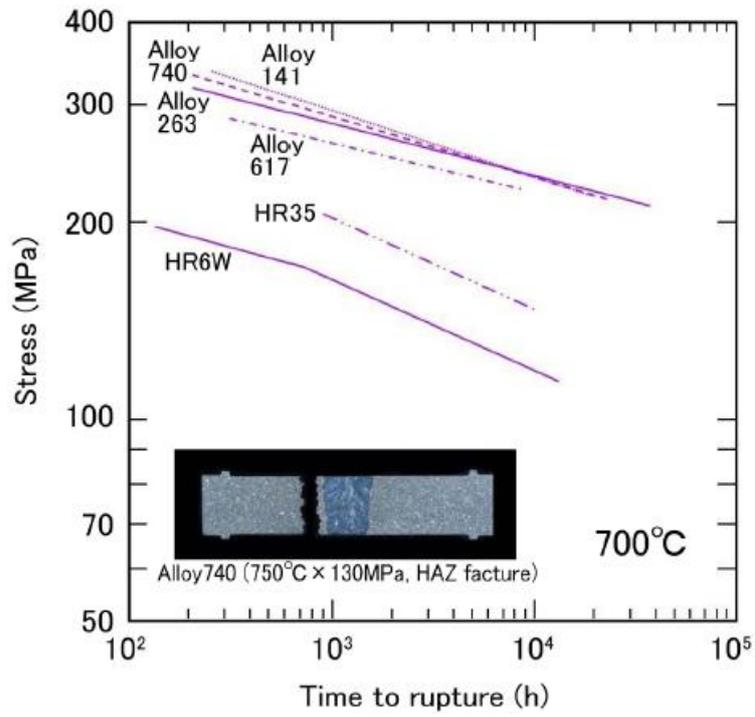


圖 2.3-3 平板焊件(上)及大管焊件(下)之潛變試驗結果

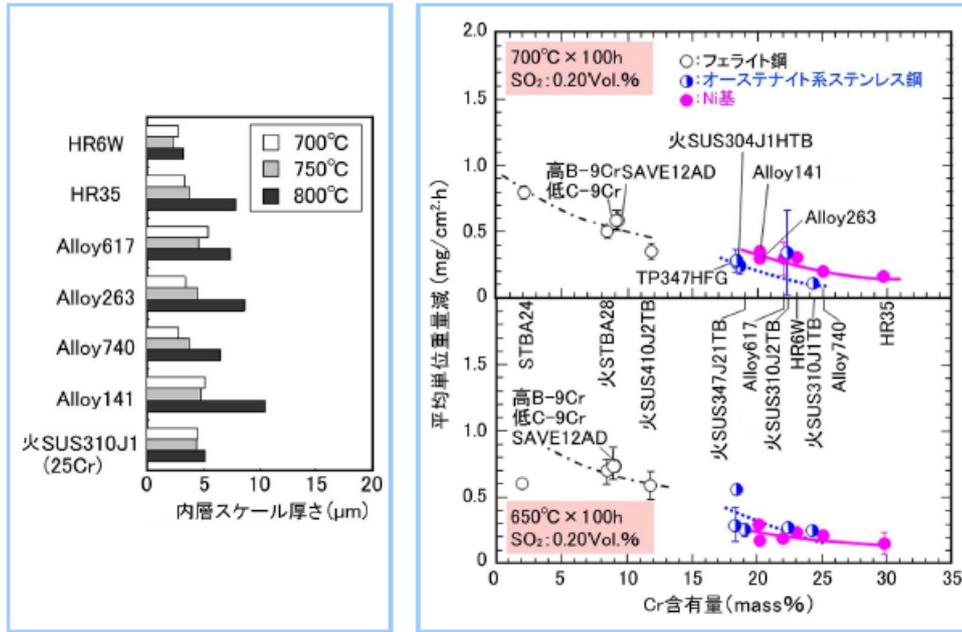


圖 2.3-4 不同材料蒸汽氧化(左)及熔融灰浸漬(右)試驗結果

Timeline for U.S. A-USC Development

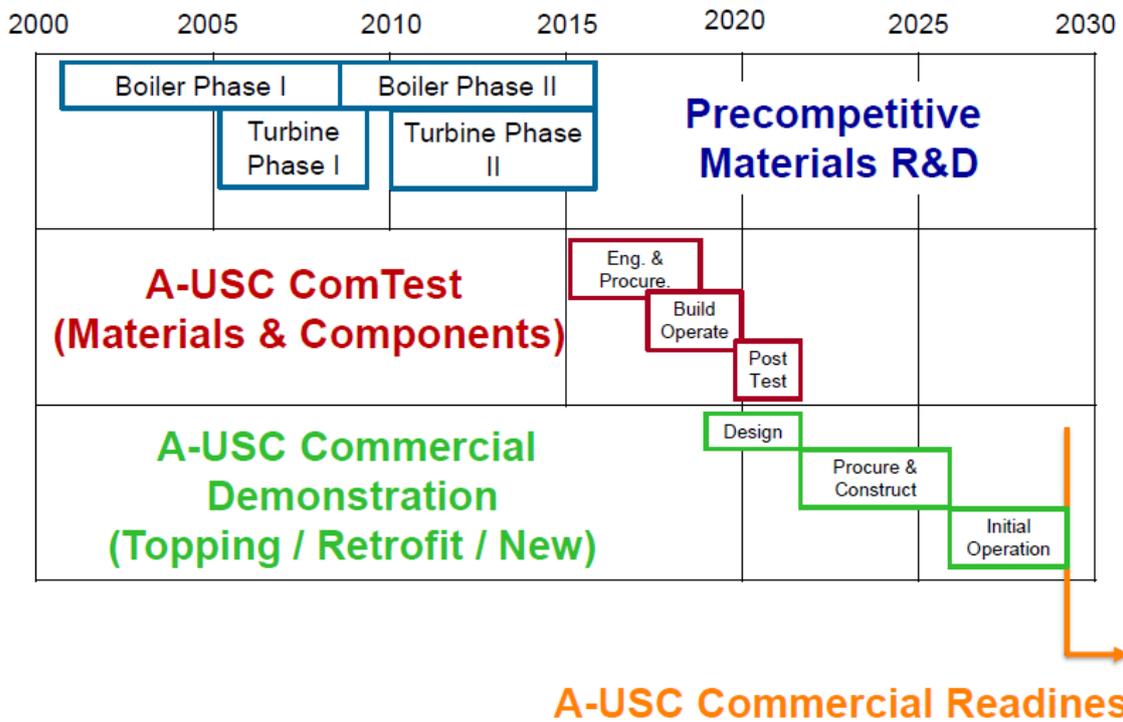


圖 2.3-5 美國 A-USC 研究計畫之時程規劃

Alloy	Component	Comments
Haynes 230	SH/RH, Pipe	Successful welding trials, maximum size limitations for pipe may limit applicability
CCA617	SH/RH, Pipe	Higher strength than 617 but not enough data to change ASME code stress values, not suitable for high sulfur coals, only successful SMAW welds in nickel-based alloys, strain-age cracking concerns, low strength limits applicability for turbine rotor
Alloy 263	Castings, Rotor	Back-up cast alloy to 282, good castability and weldability, lower strength but good ductility
Inconel 740/740H	SH/RH, Pipe	Highest strength alloy in ASME B&PV code to enable A-USC up to 760°C (1400°F), excellent fireside corrosion resistance, successful fabrication and welding, prime candidate for boiler components, cannot be air cast for valves and shells
Haynes 282	Castings, Rotor	Higher creep strength than 740, relatively insensitive to starting microstructural condition, good forging 'window' for rotor, can be cast for valves and casings
Waspalloy	Rotor, Bolts, Blades	Back-up alloy with good turbine history Cannot be welded reliably. Poor ductility
Nimonic 105	Bolts, Blades	Highest creep strength alloy. Only considered for bolting and blading (non-welded components).

圖 2.3-6 美國 A-USC 研究計畫評估候選鎳基合金材料結果

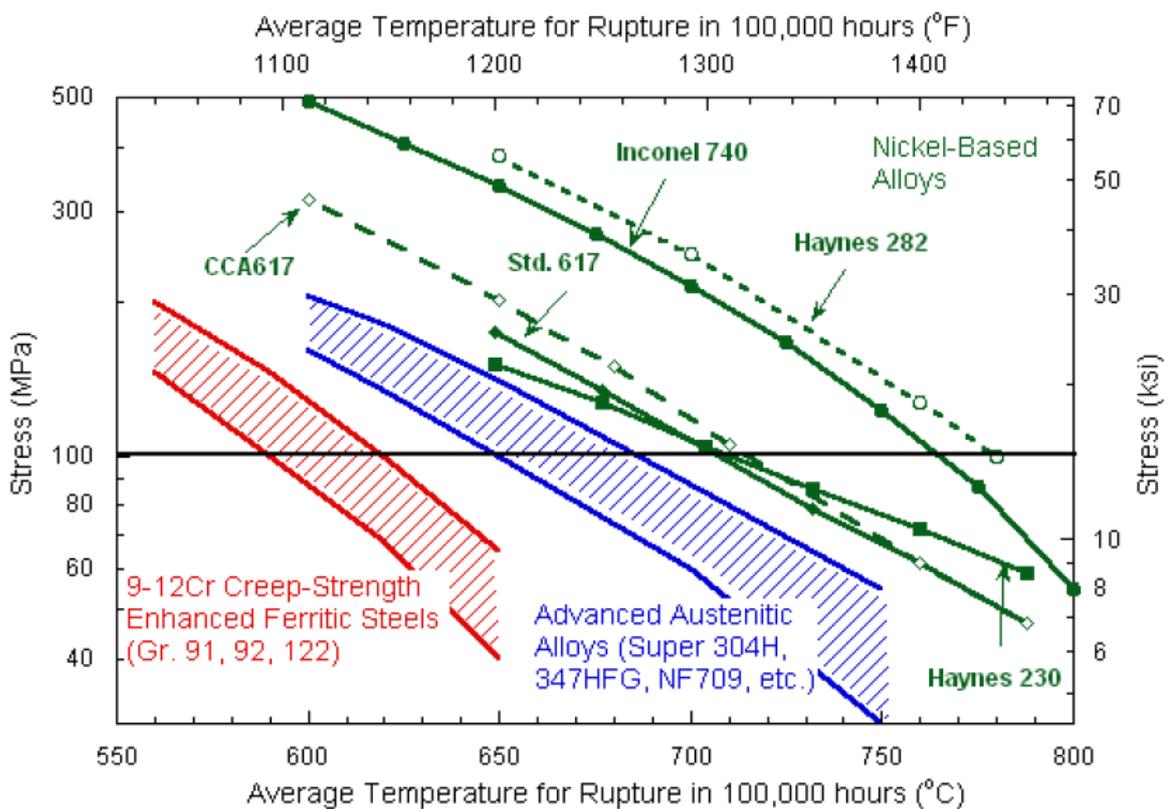


圖 2.3-7 主要合金材料 100k 小時之潛變強度及溫度關連性

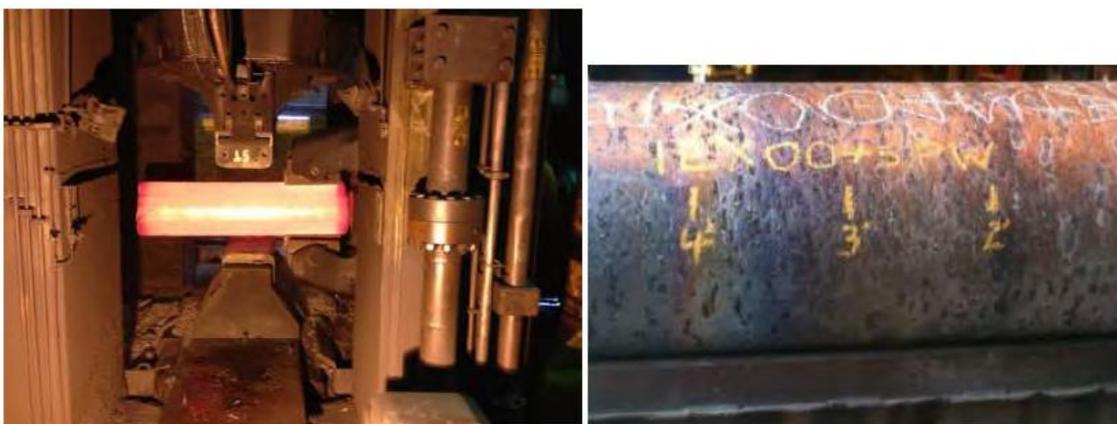


圖 2.3-8 美國 A-USC 研究計畫材料製造及焊接試製

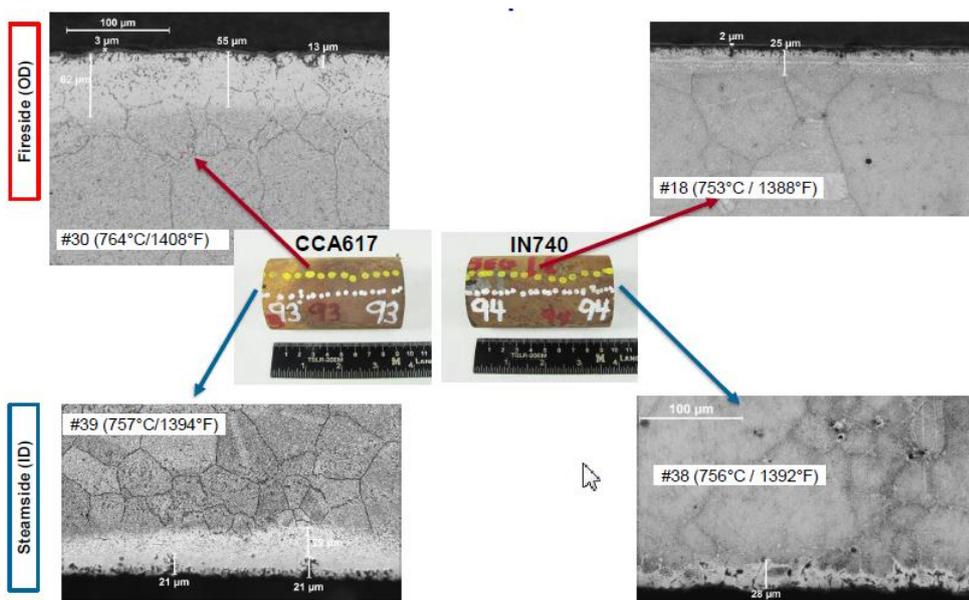


圖 2.3-9 美國 A-USC 研究計畫材料高溫腐蝕試驗情形

三、感想與建議

1. **Grade 91** 為目前發電廠廣泛用於過熱器或再熱器之集管或爐管之材料，依據 **EPRI** 研究結果，其應用極限溫度宜依照熱傳狀態而區分，鍋爐傳熱應用時應設定為 **550-580°C**，且應注意運轉約 **40k** 小時後內壁氧化層剝離問題，另證實合金雜質組成如 **N**、**Al**、**Sn**、**As**、**Sb**、**Pb** 等合金元素，對於潛變壽命及延性有重大影響，更建議 **N/Al** 比值宜設定為大於 **4**，**EPRI** 已新訂組成規範及爭取 **ASME** 採認中，本公司新購材質時可參酌辦理，本所亦已建構分析能量，可協助品質管理及提昇工作。
2. **Grade 92** 為性能高於 **Grade 91** 之潛變強度增強型肥粒鐵系鋼材(**CSEF**)，**EPRI** 研究發現除同樣有雜質組成影響潛變性能現象外，認為既有 **Grade 92** 規範組成有本質性生成 **BN** 之脆性裂斷疑慮，目前研究適當固溶熱處理作業參數，而先進各國為改善 **9CR** 級合金性能及因應 **A-USC** 時代來臨，已開發如 **Low-C 9Cr**、**MARBN**、**SAVE12AD** 等 **9Cr** 級，或如 **HR6W**、**Inconel 740** 等各式鎳基合金，初期試驗結果頗具可行性，值得追蹤關注。
3. 已知潛變強度增強型肥粒鐵系(**CSEF**)鋼材之新焊、焊補、焊後熱處理(**PWHT**)等作業攸關其應用性能；建議新鐸作業可依據 **EPRI** 提供程序，值得注意的是如閥件與管件之異形接合，其焊後熱處理作業應先經充份模擬而後實施為宜，至於焊補作業部份，目前 **EPRI** 廣泛研試階梯式工件，及以 **B8**(低於 **550°C**)或 **Inco 82**(高於 **550°C**)焊後不再 **PWHT** 之可行性等，結果除值得再追蹤關注外，初步徵得 **P87** 計畫主持人同意參與工作及學習之方式，建議公司可予考量。

四、參考文獻

1. “Grade 91 Temperature Limits” , John Shingledecker(EPRI) , 6-15-2016 , EPRI P87 Technology Transfer meeting
2. “Review of Fabrication and In-Service Performance of a Grade 91 Header” , 2013 , EPRI 3002001831 report
3. “Grade 91 Recommended Revised Chemistry Review” , Megan Slater(B&W) , 6-15-2016 , EPRI P87 Technology Transfer meeting
4. ” Fifth meeting of the CSEF Interest Group” , Jonathan Parker , 6-14-2016 , EPRI P63 CSEF meeting
5. “An Informed Perspective on the Use of Hardness Testing in an Integrated Approach to the Life Management of Grade 91 Steel Components” , 2016 , EPRI 3002007320 report
6. ” Ferritic to Austenitic Dissimilar Metal Welds” , John A. Siefert , 6-15-2016 , EPRI P87 Technology Transfer meeting
7. ” Ferritic to Austenitic Dissimilar Metal Welds” , John A. Siefert , 6-15-2016 , EPRI P87 Technology Transfer meeting
8. ” Update on PWHT Modeling and Technology Transfer” , Daniel Purdy t , 6-15-2016 , EPRI P87 Technology Transfer meeting
9. ” Grade 91 Steel Metallurgical Risk Factors” , John A. Siefert , 6-15-2016 , EPRI P87 Technology Transfer meeting
10. ” Development of Materials for Use in A-USC Boilers” , NOBUHIKO SAITO , Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 52 No. 4 (December 2015)
11. ” Progress in Creep-Resistant Steels for High Efficiency Coal-Fired Power Plants” , Fujio Abe , Journal of Pressure Vessel Technology , AUGUST 2016, Vol. 138
12. “Update on U.S. DOE/OCDO Advanced Ultrasupercritical (A-USC) Steam Boiler and Turbine ConsortiumDE” , Bob Purgert, et. Al. , DOE-FE Cross-Cutting Review Meeting , April 29, 2015 , Pittsburg, PA USA
13. Seventh International Conference October 22–25, 2013, Waikoloa, Hawaii, USA