

出國報告（出國類別：開會）

超超臨界先進材料國際會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：高全盛；機械工程師

派赴國家：新加坡

出國期間：102年7月7日至7月11日

報告日期：102年9月6日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：超超臨界先進材料國際會議

頁數 34 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：

高全盛/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：102 年 7 月 7 日至 7 月 11 日 出國地區：新加坡

報告日期：102 年 9 月 6 日

分類號/目

關鍵詞：超臨界機組、麻田散鐵系鋼、T/P92、Super304H、銲接

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國至新加坡參加第七屆亞太區 IIW 國際會議，共為期三天的議程，介紹最新材料銲接技術發展與應用，作為公司未來超臨界機組維護與檢測之規劃。

在大會中對於本公司新超臨界機組需採用之高抗潛變鋼（CSEF Steel）均有相關論文發表，如一、提出麻田散鐵系鋼 P/T92 銲接/銲後熱處理程序，並建議適用填料；P/T92 中 Mn+Ni 元素含量對 A_{c1} 溫度與 CVN 的影響；二、分析 Super304H 不鏽鋼銲件之潛變性能與機制，說明顯微組織改變的特徵，與其火側腐蝕特性；三、收集相關超臨界機組材料之銲接程序與適用填料，探討相關銲件破損分析案例，可提供公司參考。

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、 第七屆亞太區 IIW 國際會議研討會.....	3
(一) 大會內容.....	3
(二) 麻田散鐵系鋼 P92 銲接與銲後熱處理程序.....	5
(三) 麻田散鐵系鋼 P92 之 Mn+Ni 元素含量的影響.....	9
(四) Super304H 不鏽鋼銲件之潛變性能.....	10
(五) Super304H 不鏽鋼銲件之火側腐蝕特性.....	14
(六) 低合金鋼 T/P23 與 T/P24 鋼銲接特性.....	15
(七) 破損分析.....	20
三、 感想與建議.....	26
四、 參考文獻.....	27

表目錄

表 1.	ASTM A213 中 P91 與 P92 成分與 P92 鐳道成分	5
表 2.	P92 鐳件室溫下機械性質（經 PWHT760°C/2H）	6
表 3.	P92 之 Mn+Ni 元素含量對 A c1 溫度影響	10
表 4.	不同 Mn+Ni 元素含量的 P92 填料鐳道之機械性質.....	10
表 5.	ASTM A213 中 TP304、TP304H 與 Super304H 成分.....	11
表 6.	活化能	12
表 7.	Super304H 材質在不同溫度的腐蝕率.....	15
表 8.	SA213T22、T23、T24 與 T24 填料化學成分	16
表 9.	T/P24 機械性質	19

圖目錄

圖 1.	大會會場.....	4
圖 2.	陣列式超音波探傷儀展示檢測大型管件缺陷.....	4
圖 3.	T/P92 鋼之 CCT 曲線	6
圖 4.	銲後熱處理溫度對 P92 銲道硬度的影響.....	7
圖 5.	P92 鋼銲接與 PWHT 流程	8
圖 6.	T/P23、T/P24、T/P91、T/P92 與 Super304H 材質所適用填料	8
圖 7.	P92 之 Mn+Ni 元素含量對 A c1 溫度的影響	9
圖 8.	SSCR 結果	12
圖 9.	Super304H 鋼之潛變實驗前金相（500x）	13
圖 10.	Super304H 鋼之潛變實驗後母材金相（500x）	13
圖 11.	Super304H 鋼之潛變實驗後銲道金相（200x）	14
圖 12.	Super304H 鋼之潛變實驗後母材空孔之 SEM 影像	14
圖 13.	Super304H 母材與銲道的重量損失.....	15
圖 14.	P24 母材顯微組織.....	17
圖 15.	P24 之 CCT 曲線	18
圖 16.	T24 銲道硬度（無 PWHT）	18
圖 17.	P24 鋼銲道裂紋.....	19
圖 18.	疲勞紋	20
圖 19.	銲件斷面	21

圖 20. 彎管前端法蘭	21
圖 21. 銲道根部破壞示意	22
圖 22. 噴嘴破壞外觀。	22
圖 23. 破斷面 SEM 影像.....	23
圖 24. 噴嘴銲接處巨觀（箭頭所指處為裂縫）	23
圖 25. 在銲道內氫擴散的行為	25
圖 26. AC 與 DC+極性對氫擴散的影響.....	25

一、出國緣由、行程及主要任務

出國緣由：

超臨界機組為公司未來發電主流，如興建中之林口、大林等電廠，但超臨界機組設備材料所需承受溫度與壓力比傳統次臨界機組高，就材料之耐高溫潛變能力、焊接性與抗火側腐蝕能力之要求，需選用先進之 2.25% 與 9~12%Cr 合金含量鋼材料，或是 TP347HFG、Super304H 系不銹鋼材料，方可滿足超臨界機組之壓力與溫度要求；由於這些超超臨界先進材料之合金元素眾多，在銲接高溫熱循環作用與銲前預熱/層間溫度/銲後熱處理程序中，銲接接合程序與碳化物變化上之銲接冶金技術困難度高，加上公司內電廠大多無此類材料銲接相關使用經驗，將可能導致未來銲接管件之銲接失效事故頻傳，故為收集最新銲接之設計、分析與檢驗等相關資訊，規劃此次出國參加亞太區銲接研討會，此次出國研習之重點如下：

- a.超超臨界先進材料銲件之銲接設計、分析與製造技術。
- b.銲件破損分析與銲補技術之經驗。
- c.銲件性能檢驗/評估(顯微組織與機械性能)。
- d.最新銲材與銲條之選配性/設計。

本次出國案件係應用 102 年度出國計畫第 118 號，出國核定書為 EE102064 號，電人字第 1028058502 號函。

出國行程及主要任務：

本次出國期間自 102 年 7 月 7 日至 7 月 11 日，主要的任務為參加第七屆亞太區 IIW 國際會議（The 7th Asia Pacific IIW International Congress），收集最新材料銲接技術發展，作為公司未來超臨界機組維護與檢測之規劃。行程及工作內容概要說明於下表：

項次	起始日	迄止日	地點	工作內容概況
1	1020707	1020707	台北-新加坡	路程
2	1020708	1020710	新加坡	參加新加坡銲接協會舉辦的第七屆亞太區 IIW 國際會議，瞭解最新材料銲接技術與分析之資訊。
3	1020711	1020711	新加坡-台北	路程

二、第七屆亞太區 IIW 國際會議研討會

(一) 大會內容

新加坡銲接協會 (SWS, Singapore Welding Society) 於新加坡管理大學 (Singapore Management University) 舉行為期三天的第七屆亞太區 IIW (International Institute of Welding) 國際會議，如圖 1，與會人士除涵蓋亞太區新加坡、日本、大陸、南韓、馬來西亞、印尼、印度等各國學者以外，並有加拿大、法國、德國、澳大利亞、芬蘭、美國等各國學者參與，共發表一百多篇相關論文，會議內容涵蓋：

1. 微結構與機械性質 (Microstructure and Mechanical)
2. 雷射銲接 (Laser Welding)
3. 電弧銲接 (Arc Welding)
4. 教育&訓練 (Education & Training)
5. 摩擦攪拌銲接 (Friction Stir Welding)
6. 銲接設計&製造 (Weld Design & Fabrication)
7. 硬銲&軟銲 (Brazing & Soldering)
8. 材料與可焊性 (Materials and Weldability)
9. 壓力容器 (Pressure Equipment)
10. 表面工程 (Surface Engineering)
11. 銲接模式&模擬 (Welding Modelling & Simulation)
12. 破損分析&修復 (Failure Analysis & Repair)
13. 電子束&複合銲接 (EB & Hybrid Welding)

在此研討會期間舉行期間，並有廠商 Bohler Welding、TUV、A star Training & Consultancy、Lincoln Electric、Jiuli 鋼管廠等等公司展示其產品並說明其服務內容，如圖 2 為 A star Training & Consultancy 展示的陣列式超音波探傷儀，檢測集管缺陷示意。



圖1. 大會會場



圖2. 陣列式超音波探傷儀展示檢測大型管件缺陷

(二) 麻田散鐵系鋼 P92 銲接與銲後熱處理程序

麻田散鐵系鋼 (Martensitic Steel) P92 其合金成分如表 1 所示，與 P91 材質比較，降低 Mo 元素含量，添加 1.5~2%的 W 元素，及微量的 B 元素，而使 P92 材質抗潛變能力比 P91 材質強，P92 銲道建議的合金成分與銲件的機械性質如表 1 與表 2。

表1. ASTM A213⁽¹⁾中 P91 與 P92 成分與 P92 銲道成分

材質	P91	P92	P92 銲道
UNS	K90901	K92460	—
C	0.08~0.12	0.07~0.13	0.08~0.15
Mn	0.30~0.60	0.30~0.60	≤1.2
P	≤0.020	≤0.020	≤0.02
S	≤0.010	≤0.010	≤0.01
Si	0.20~0.50	≤0.5	≤0.60
Cr	8.0~9.5	8.5~9.0	8.0~10.0
Mo	0.85~1.05	0.30~0.60	0.30~0.70
V	0.18~0.25	0.15~0.25	0.15~0.30
Ni	≤0.40	≤0.40	≤1.0
Al	≤0.04	≤0.04	≤0.04
N	0.03~0.07	0.03~0.07	0.03~0.08
Nb	0.06~0.10	0.04~0.09	0.02~0.08
W	—	1.50~2.00	1.50~2.00
B	—	0.001~0.006	≤0.006

註：P92 銲道之 Mn+Ni<1.50%

表2. P92 銲件室溫下機械性質 (經 PWHT760°C/2H)

YS (MPa)	TS (MPa)	Elongation (%)	CVN (J)
≥440	≥620	≥17	≥41

P92 鋼因添加了 C、V、Nb、N、B 與 W 等元素，故要特別留意在銲接時之熱量的控制，因銲接中與銲後熱處理 (PWHT, Post Weld Heat Treatment) 過程的溫度處於麻田散鐵相變溫度範圍內 (250°C~350°C)，如圖 3 為其連續冷卻相變化圖 (CCT, Continuous Cooling Transformation) 所示，故會影響麻田散鐵組織的改變程度；在熱處理之前，為確保得到完整的回火麻田散鐵，銲後銲道是可以冷卻至低於麻田散鐵相變化完成溫度 (M_f , 150°C)，一般是建議低於 100°C。

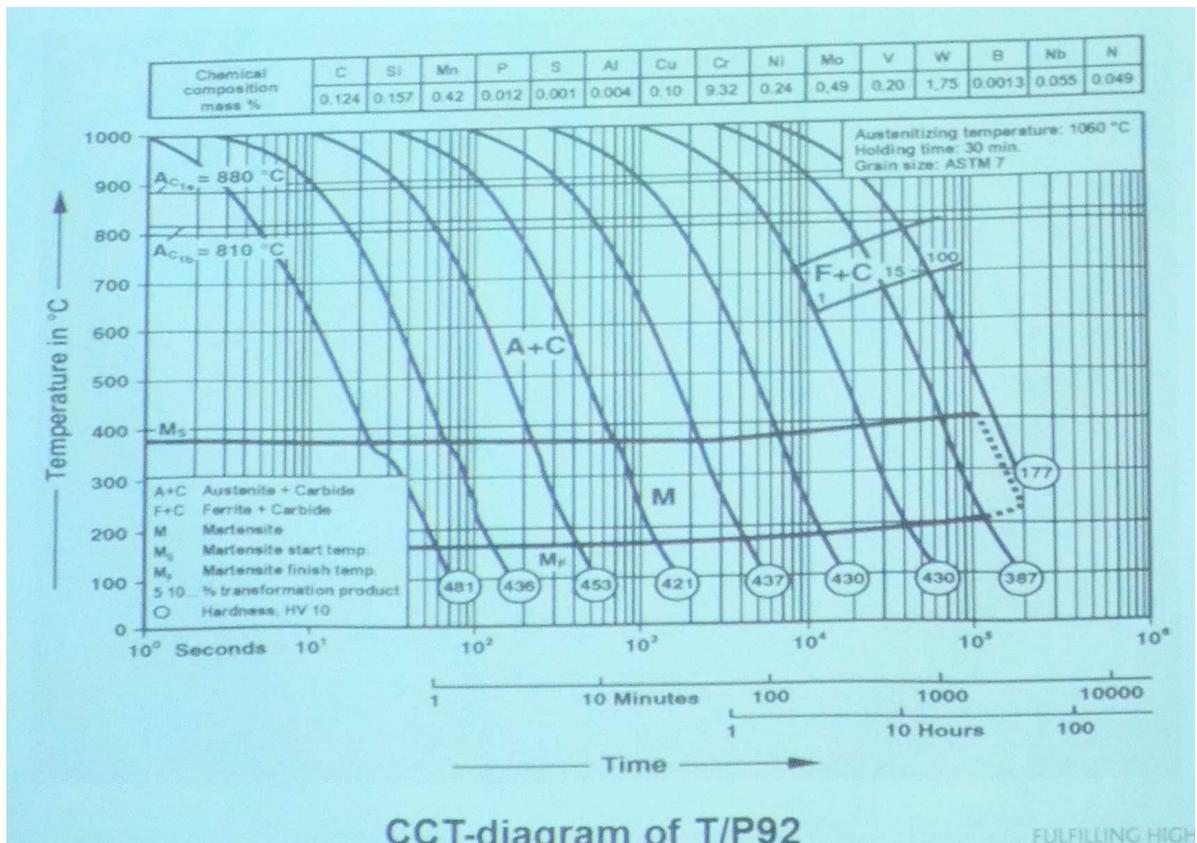


圖3. T/P92 鋼之 CCT 曲線

銲接後銲道的硬度值約為 400HV10，若經 760°C 的銲後熱處理，銲道硬度值將下降到 250HV10，其銲後熱處理恆溫時間需考量管壁厚度與銲接程序，由於其銲道硬度值較低，故銲後冷裂（Cold Cracking）的風險也降低。

大部分文獻指出 P92 鋼之銲後熱處理溫度在 730°C ~780°C，但須考量銲道之特性，若選擇低熱處理溫度（如 750°C），銲道硬度為 390HV（如圖 4），韌性將減少，則可改延長熱處理時間，得到較佳銲道韌性；反之選擇高熱處理溫度（如 790°C），銲道硬度為 230HV，注意溫度不能高於 A_{clb} 溫度（810°C），Herbert⁽²⁾學者建議銲後熱處理溫度為 760°C，恆溫 2~4 小時，可確保銲道優良韌性與節省時間，詳如圖 5，並提出 T/P23、T/P24、T/P91、T/P92 與 Super304H 材質，所建議採用的填料，如圖 6。

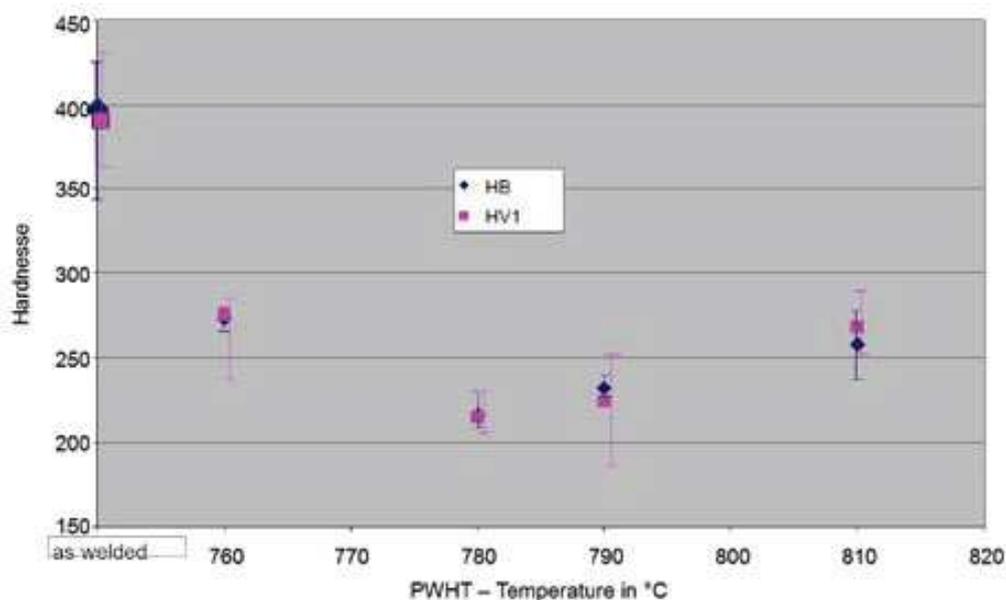


圖4. 銲後熱處理溫度對 P92 銲道硬度的影響

（填料：Thermanit MTS616；Mn+Ni=1.43%）

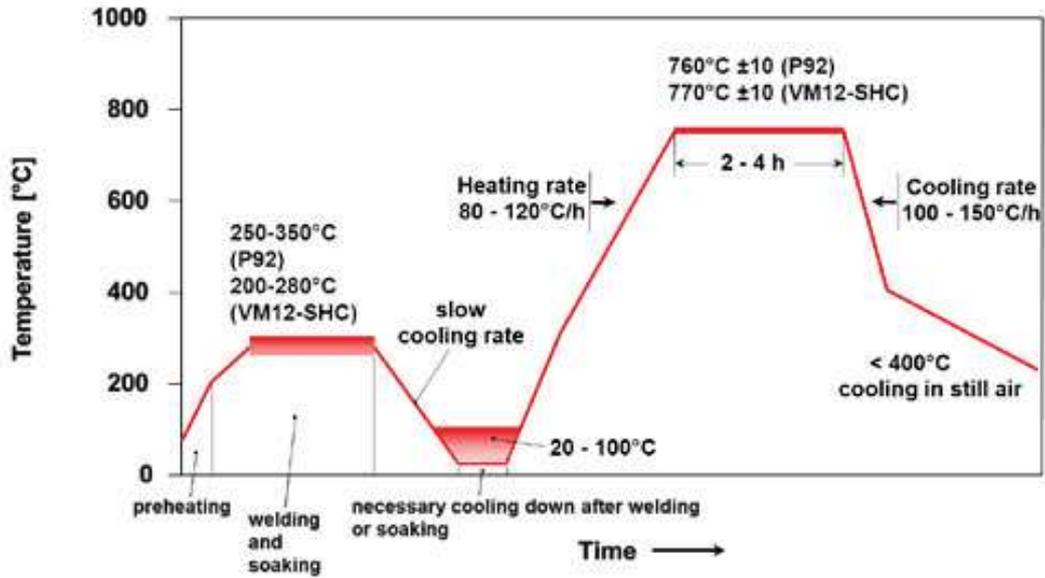


圖5. P92 鋼銲接與 PWHT 流程

Comparison of matching Filler Metals
BÖHLER-Brand / T-PUT-Brand

	Base Metal					
	T/P23	T/P24	T/P91	T/P92	VM12-SHC	Super 304 H
BÖHLER-Brand						
GTAW	BÖHLER P 23-IG	BÖHLER P 24-IG	BÖHLER C 9 MV-IG	BÖHLER P 92-IG	BÖHLER C 12 CoW-IG	BÖHLER ER 304 H Cu-IG
SMAW	BÖHLER FOX P 23	BÖHLER FOX P 24	BÖHLER FOX C 9 MV	BÖHLER FOX P 92	BÖHLER FOX C 12 CoW	BÖHLER FOX E 304 H-Cu
SAW-Wire	BÖHLER P 23-UP	BÖHLER P 24-UP	BÖHLER C 9 MV-UP	BÖHLER P 92-UP		
SAW-Flux	BÖHLER BB 430*		BÖHLER BB 910			
T-PUT-Brand						
GTAW	Union I P23	Union I P24	Thermanit MTS 3	Thermanit MTS 616	Thermanit MTS 5 CoT	Thermanit 304 H Cu
SMAW	Thermanit P23	Thermanit P24	Thermanit Chromo 9 V			
SAW-Wire	Union S P23	Union S P24	Thermanit MTS 3			
SAW-Flux	UV P23 / 24*		Marathon 543			

* for welding membrane walls Böhler BB 305 or UV 305

FW Congress, Singapore July 09th 2013

FULFILLING HIGH DEMANDS

圖6. T/P23、T/P24、T/P91、T/P92 與 Super304H 材質所適用填料

(三) 麻田散鐵系鋼 P92 之 Mn+Ni 元素含量的影響

在電廠已使用多年的 P91 材質，已有許多文獻討論 Mn+Ni 的元素含量對潛變強度的影響，說明當增加 Ni 含量會降低 P91 材料潛變強度，故在 AWS 規範對 P91 填料訂定 Mn+Ni 元素含量上限為 1.5%。但是在 P92 填料尚未有國際公認標準，一般產業界多是建議 Mn+Ni 含量上限為 1.2%。Mn+Ni 元素含量會影響 A_{c1} 溫度如圖 7 與表 3，當 Mn+Ni 元素含量為 $0.81+0.65=1.46\%$ ，其 A_{c1} 溫度為 776°C ，當 Mn+Ni 元素含量為 $0.36+0.41=0.77\%$ ，其 A_{c1} 溫度為 818°C ，故當 Mn+Ni 元素含量為 1.46%，進行銲後熱處理 760°C ，離 A_{c1} 溫度僅有 16°C 差距，需注意熱處理的溫度控制。但若選擇低 Mn+Ni 元素含量為 0.77%，其銲道機械性值比高 Mn+Ni 含量（1.46%）銲道差，尤其是 CVN 值僅 22J，遠低於高 Mn+Ni 元素含量銲道的 50J，如表 4。

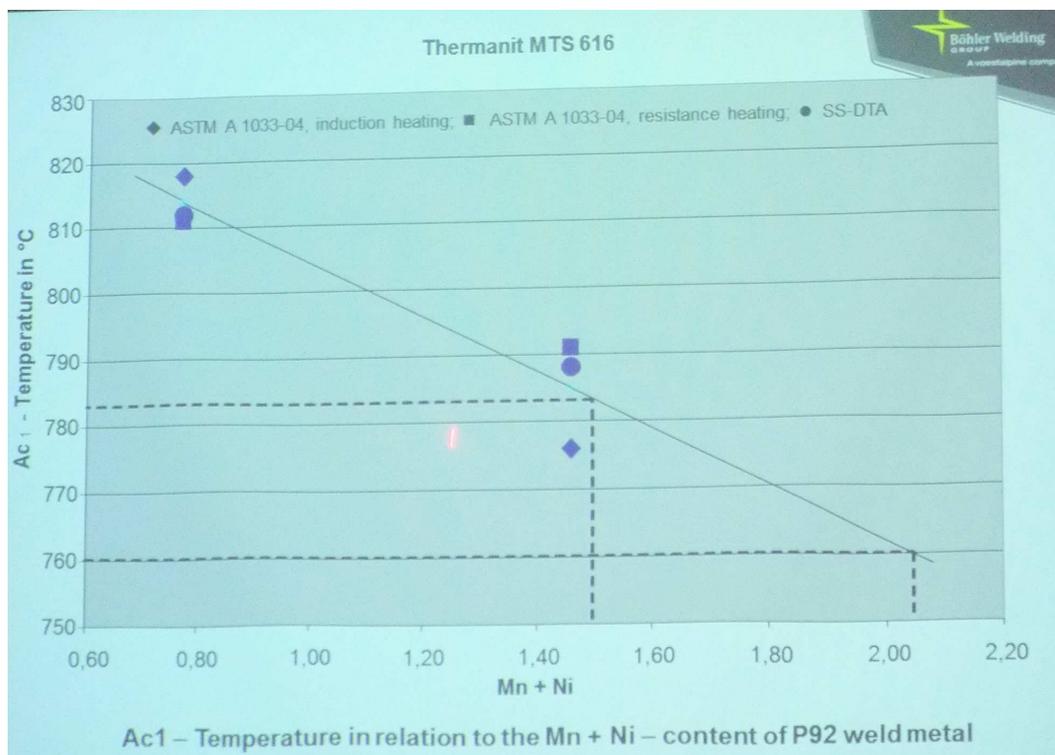


圖7. P92 之 Mn+Ni 元素含量對 A_{c1} 溫度的影響

表3. P92 之 Mn+Ni 元素含量對 A_{c1} 溫度影響 (ASTM 1033-04)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Nb	W	N	Mn+Ni	A _{c1}
0.10	0.3	0.81	8.5	0.5	0.65	0.2	0.04	1.6	0.04	1.46	776°C
0.09	0.3	0.36	8.4	0.5	0.41	0.2	0.04	1.6	0.04	0.77	818°C

註：為wt%

表4. 不同 Mn+Ni 元素含量的 P92 填料銲道之機械性質

Mn+Ni	YS	TS	Elongation	CVN
Wt%	MPa	MPa	%	J
Max. 1.5	Min. 440	Min. 620	Min. 15	Min. 41
0.81+0.65=1.46	633	761	16.5	50
0.36+0.41=0.77	613	744	16.1	22

(四) Super304H 不鏽鋼銲件之潛變性能

Super304H 不鏽鋼因具有優異高溫強度、高抗氧化性、高抗蒸汽腐蝕能力，廣泛使用到超臨界鍋爐的過熱器與再熱器管，其合金成分如表 5，與 TP304H 材質比較，Super304H 材質添加強化合金元素 Cu、Nb、N 和 B，減少 Mn 與 Si 元素，形成富 Cu 相之細小析出物與 NbC、NbN、NbCrN、M₂₃C₆ 產生強化效果，可在高溫 600°C ~650°C 高溫強度比 TP304H 材質高約 30%。

鍋爐管材連接必須使用銲接技術，故銲件本身特性是佔有關鍵地位，從銲接幾何設計、微結構的變化、合金元素與應力分佈等等均會影響潛變性能或導致銲件損害。Anas⁽³⁾學者應用 Spranktronics Indentation Creep Testing 分析 Super304H 不鏽鋼銲道 (GTAW) 與母

材之潛變特性，分析結果指出在 600°C、700°C、800°C 下，分別施壓 15kg 與 20kg，其銲道穩態潛變率（SSCR，Steady State Creep Rate）均低於母材，如圖 8，說明銲道抗潛變能力比母材好，並計算出兩者活化能（Activation Energy）結果如表 6，並依據文獻指出 5kJ/Mol 為差排潛變（Dislocation Creep），若活化能大於 11kJ/Mol 則為晶界滑移（Grain Boundary sliding）潛變，說明此 Super304H 母材活化能為 4.7~5.3kJ/Mol，屬差排潛變行為，而銲道是晶界滑移潛變行為。

表5. ASTM A213⁽¹⁾中 TP304、TP304H 與 Super304H 成分

材質	TP304	TP304H	Super304H
UNS	S30400	S30409	S30432
C	≤0.08	0.04~0.10	0.07~0.13
Mn	≤2.0	≤2.0	≤1.0
P	≤0.045	≤0.045	≤0.040
S	≤0.030	≤0.030	≤0.010
Si	≤1.00	≤1.00	≤0.30
Cr	18~20	18~20	17~19
Ni	8.00~11.00	8.00~11.00	7.50~10.50
N	—	—	0.05~0.12
Nb	—	—	0.30~0.6
Al	—	—	0.003~0.030
B	—	—	0.001~0.010
Cu	—	—	2.5~3.5

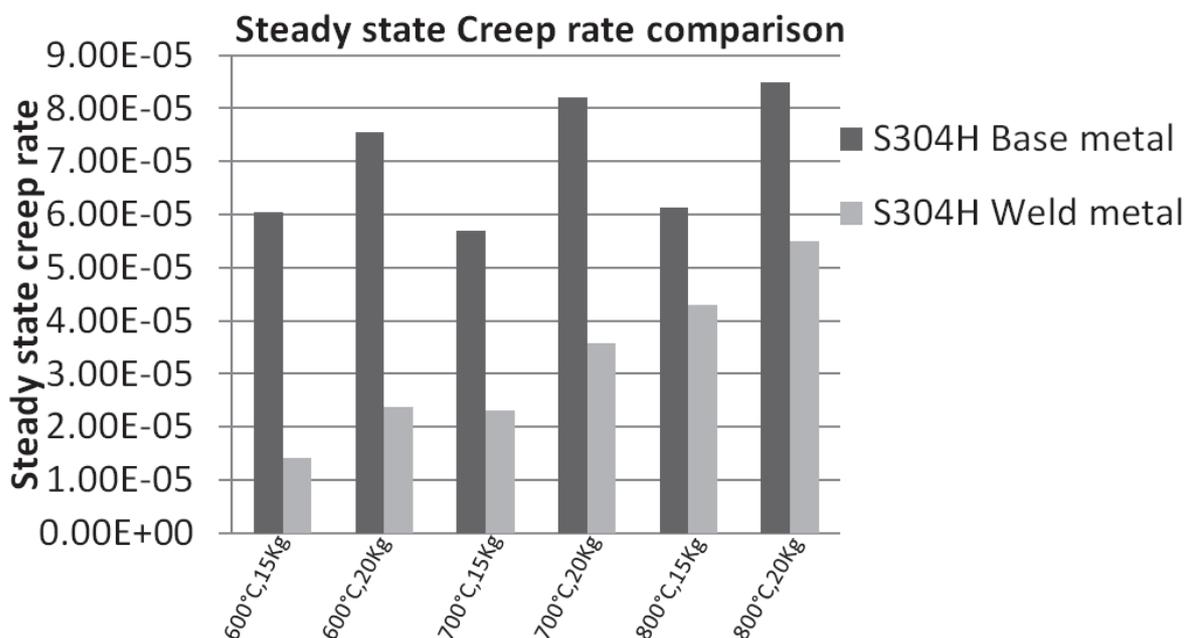


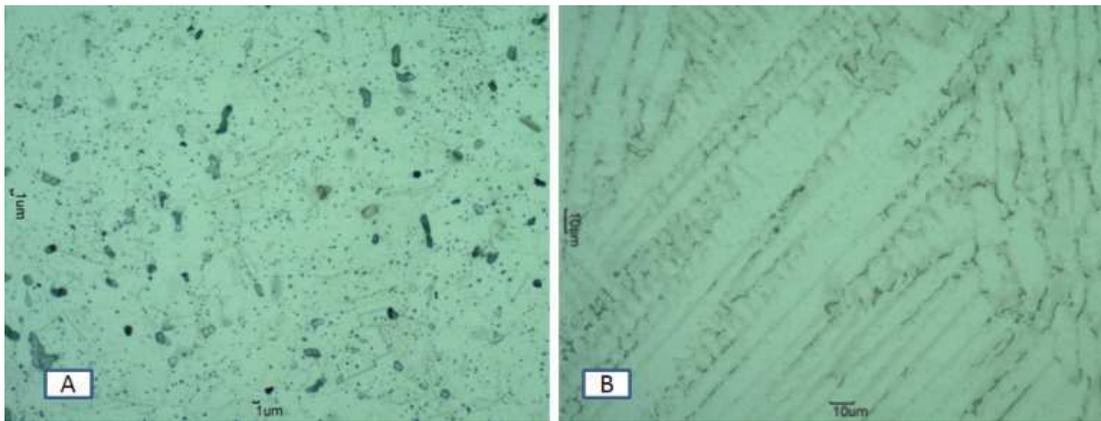
圖8. SSCR 結果

表6. 活化能

Super304H Base metal		Super304H Weld metal	
Load (kg)	Q (kJ/Mol)	Load (kg)	Q (kJ/Mol)
15	5.3	15	42.66
20	4.7	20	32.37

觀察實驗前 Super304H 不鏽鋼母材與銲道之金相組織，如圖 9，Super304H 母材為沃斯田鐵基礎上，均勻散佈 Nb (C, N) 與富 Cu 相之細小析出物，此富 Cu 相析出物主要提供高抗潛變能力。銲道則是典型樹狀晶形貌，並散佈 Nb (C, N) 與富 Cu 相之細小析出物與像蟲狀 (Worm-Like) 析出物。試驗後 Super304H 不鏽鋼母材與銲道之金相組織如圖 10 與 11 所示，顯示當溫度從 600°C 提升到 800°C，基地內細小析出物之數量也減少，圖 12 顯示母材區經 800°C/20kg

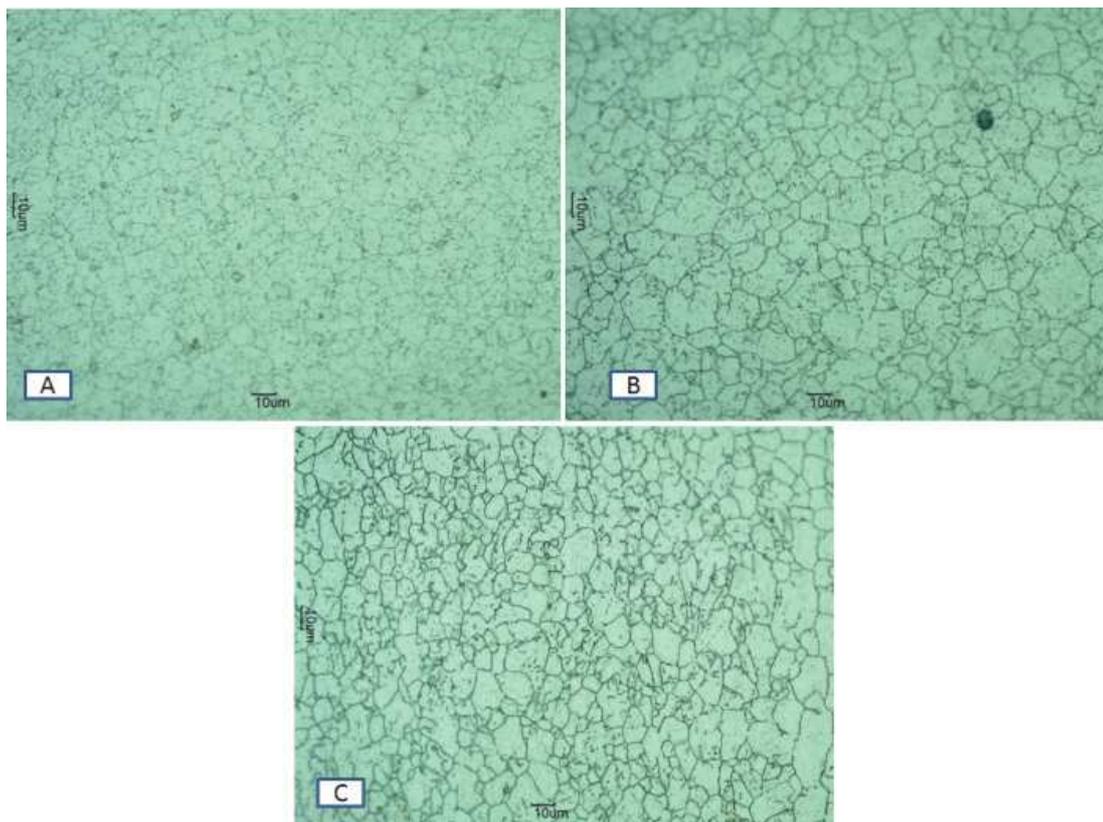
潛變試驗後之顯微組織內空孔影像。



(a) 母材

(b) 銲道

圖9. Super304H 鋼之潛變實驗前金相 (500x)



(a) 600°C

(b) 700°C

(c) 800°C

圖10. Super304H 鋼之潛變實驗後母材金相 (500x)

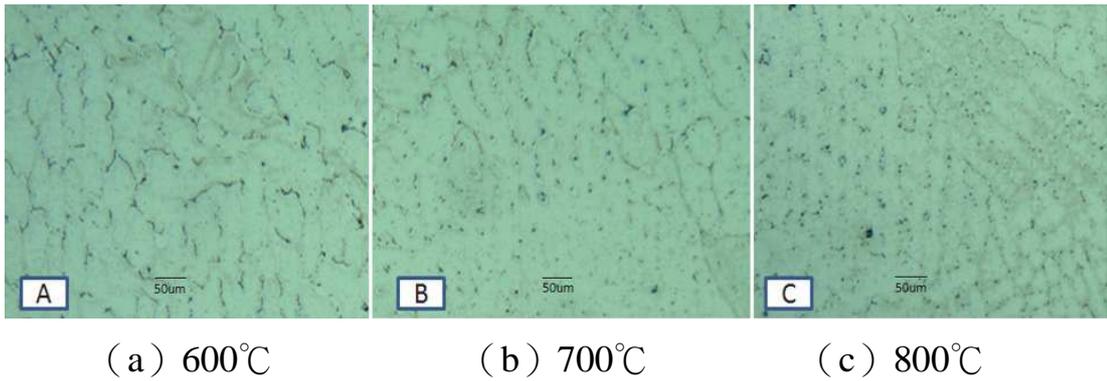


圖11. Super304H 鋼之潛變實驗後銲道金相 (200x)

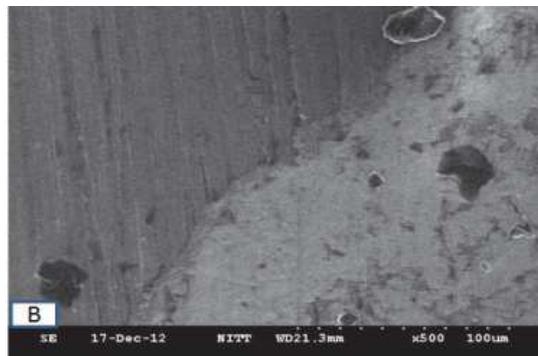


圖12. Super304H 鋼之潛變實驗後母材空孔之 SEM 影像

(五) Super304H 不鏽鋼銲件之火側腐蝕特性

鍋爐爐管火側常面臨著灰、硫酸鹽、氯化鈉等等腐蝕性元素，其腐蝕率與溫度、環境與時間相關，常導致爐管金屬損失，最常見的機制是氧化，當燃氣與爐管表面接觸時，爐管表面形成一保護性的氧化鐵或氧化鉻保護層，此保護層會阻礙氧原子的擴散，進而降低氧化率。硫化腐蝕亦常見於爐管表面，當燃料中的硫與氧結合成 SO_2 ，如果氧供應量足夠的話，將形成 SO_3 ，造成硫化腐蝕。燃料中若存在氯元素，如生物燃料或高氯煤，在低溫時氯化物將形成熔融態，將誘發氯腐蝕。Jitendra⁽⁴⁾學者研究 Super304H 鋼在 $600^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 的火側腐蝕行為，指出在 750°C 以上，保護性的氧化層開始剝落，導

致腐蝕性的 NaCl 攻擊材料表面，造成腐蝕速率提高，如表 7，銲道的重量損失與腐蝕率均低於母材，如圖 13。

表7. Super304H 材質在不同溫度的腐蝕率

溫度	腐蝕率 (mm/year)	腐蝕率 (mils/year)
600°C	0.026	1.0236
650°C	0.0928	3.6535
750°C	1.1566	45.5354
800°C	17.9624	707.1811

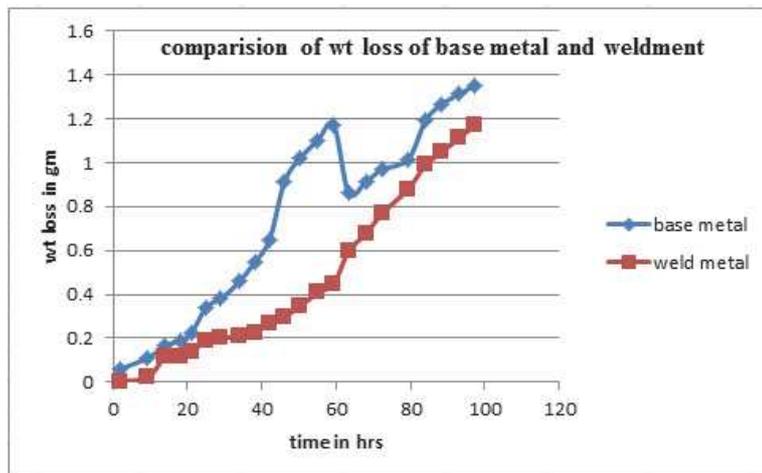


圖13. Super304H 母材與銲道的重量損失

(六) 低合金鋼 T/P23 與 T/P24 鋼銲接特性

T23 鋼之化學成分如表 8 所示，藉由添加 W 元素產生固溶強化作用，添加 V、Nb 與 B 元素產生析出硬化作用，添加 B 元素應加硬化能，組織為回火變韌鐵（Bainitic）組織。T24 鋼是在 T22 鋼基礎上進行改良，減少含碳量，添加微量 V、Ti、B 等元素，降低 P、S 等雜質元素含量，使 T24 鋼銲接性能比 T22 鋼高；與 T23 鋼相比，

T24 鋼不含 W 元素，仍採用 Mo 元素的固溶強化機制，組織同為回火變韌鐵 (Bainitic) 組織 (如圖 14)，T24 鋼之化學成分如表 8 所示。

表8. SA213T22 (10CrMo9-10)、T23 (HCM2S)、T24 (7CrMoVTiB10-10) 與 T24 填料 (Unionl P24) 化學成分

材質	T22	T23	T24	T24 填料
C	max0.15	0.04~0.10	0.05~0.10	0.08
Mn	0.30~0.60	0.10~0.60	0.30~0.70	0.49
P	max0.030	max0.030	max0.020	—
S	max0.030	max0.010	max0.010	—
Si	0.25~1.00	max0.50	0.15~0.45	0.23
Cr	1.9~2.6	1.9~2.6	2.2~2.6	2.29
Mo	0.87~1.13	0.05~0.30	0.90~1.10	1.00
Ti	—	—	0.05~0.10	0.034
V	—	0.20~0.30	0.20~0.30	0.24
W	—	1.45~1.75	—	—
Nb	—	0.02~0.08	—	0.007
B	—	0.005~0.0060	0.0015~0.0070	0.002
N	—	max0.030	max0.012	0.014
Al	—	max0.030	max0.020	—

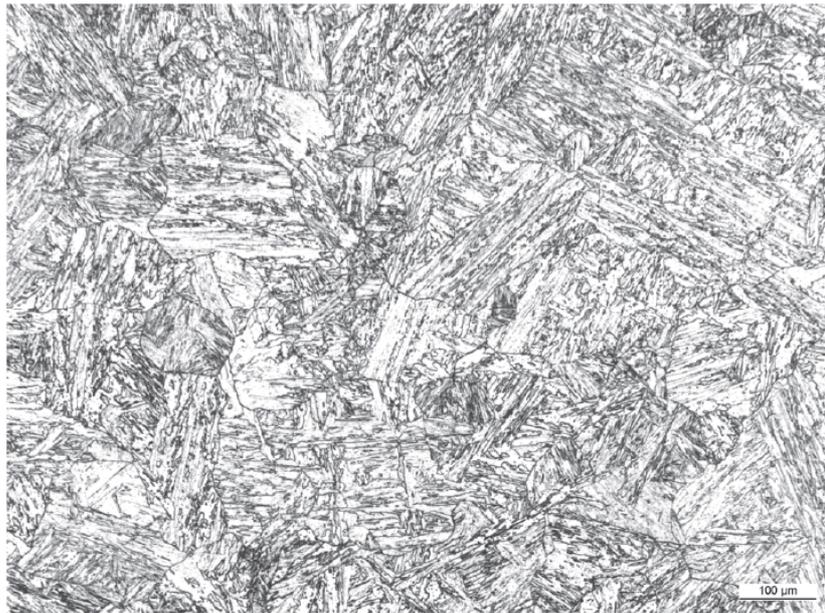


圖14. P24 母材顯微組織

圖 15 為 P24 鋼的 CCT 曲線，一般銲後的冷卻速率下，銲道硬度約為 340HV10~360HV10，Herbert⁽²⁾學者研究結果顯示，若 T24 鋼的厚度<10mm，有經預熱 100°C~150°C，層間溫度為 200°C~250°C，且銲後硬度<350HV10，如圖 16，銲件是可不用進行 PWHT。表 9 是典型的 T24 鋼銲件的機械性質，銲件經 740°C/2h 的 PWHT 處理，銲道硬度是可降低到 250HV10，但是否有經 PWHT 處理的銲件 CVN 值並無顯著增加，主要原因是銲道在多道次銲接時，銲道就處於接受退火處理程序，故 CVN 值差異不大。

T/P24 鋼大多用在水牆管或過熱器，但在大型蒸汽管線尚未有使用 P24 鋼製造，Auerkari⁽⁵⁾學者指出此因銲道之潛變延性不佳，常在銲道產生裂紋，如圖 17 所示，在 P24 銲道晶界處觀察到裂紋。

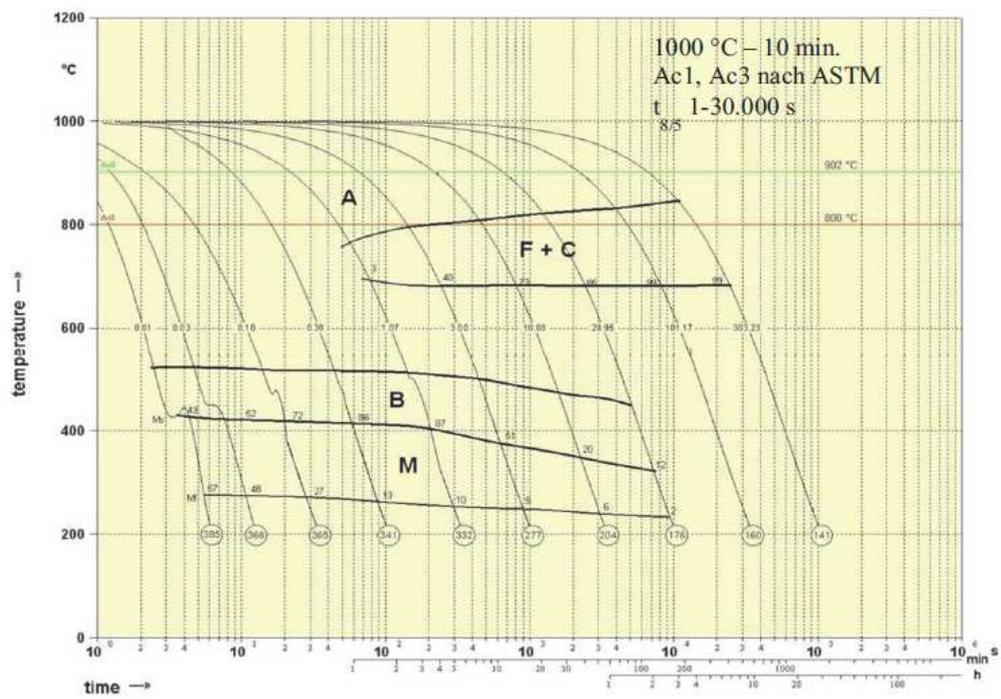


圖15. P24 之 CCT 曲線

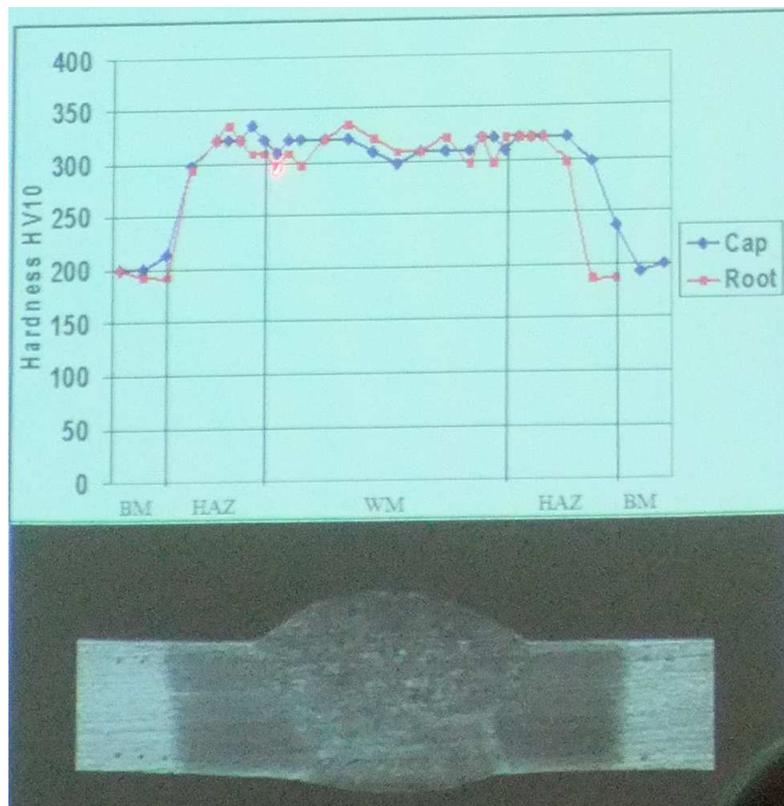
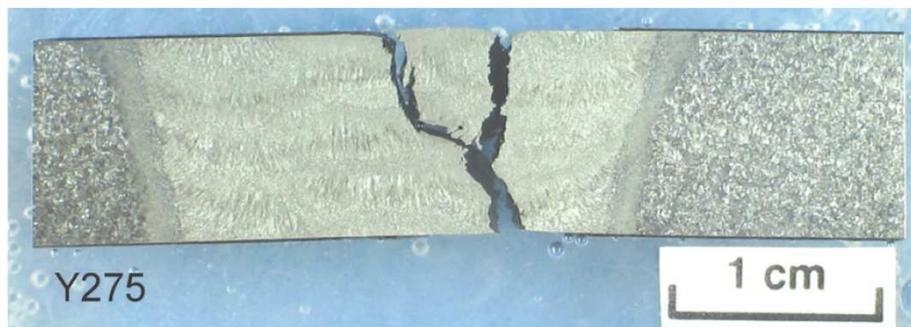


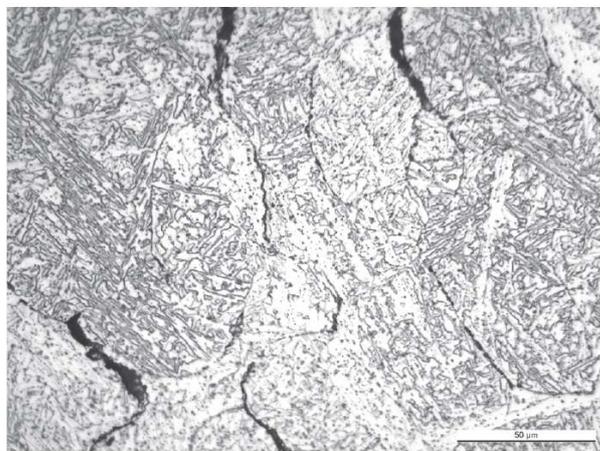
圖16. T24 銲道硬度 (無 PWHT)

表9. T/P24 機械性質

Weld process	Test Temp.	PWHT	YS	TS	Elongation	CVN	Hardness
	°C	°C/h	MPa	MPa	%	J	HV10
Base metal requirements		730 – 760	≥450	585 – 840	≥17	≥27	≤250
GTAW	20	---	664	803	19.2	>250	≤350
Ø 2.4 mm	20	740/2	595	699	20.3	>250	≤230
SMAW	20	740/2	577	689	18.1	150	≤250
Ø 4.0 mm							



(a) 巨觀銲道裂紋



(b) 銲道裂紋

圖17. P24 鋼銲道裂紋

(七) 破損分析

破損分析是指當材料發生破壞時，利用下列步驟，推斷破壞機制，藉此尋求肇因，以便提出對策，避免重蹈覆轍。

- A. 收集破損組件的運轉環境資料。
- B. 目視觀察破損組件外觀。
- C. 利用實驗室的分析儀器與方法，如破斷面分析、金相試驗、硬度試驗、電子顯微鏡分析（SEM-EDX）等等。
- D. 推斷破損機制與確切形成原因，提出改善對策。

在大會中，有學者提出案例分享：

1. 疲勞破壞案例：Lim⁽⁶⁾學者介紹此破損案例的組件是鐵環，鐵環連接管子與聚合物反應槽之間，內部流體為高溫聚合物，在破斷面觀察到疲勞紋（圖 18），並觀察到銲件有過度熔透與高低差（Misalignment）情形，如圖 19，且圖中箭頭所指處存在裂紋，指出鐵環在熱循環作用與銲接不良情形，於圖 19 箭頭處，形成疲勞破壞。

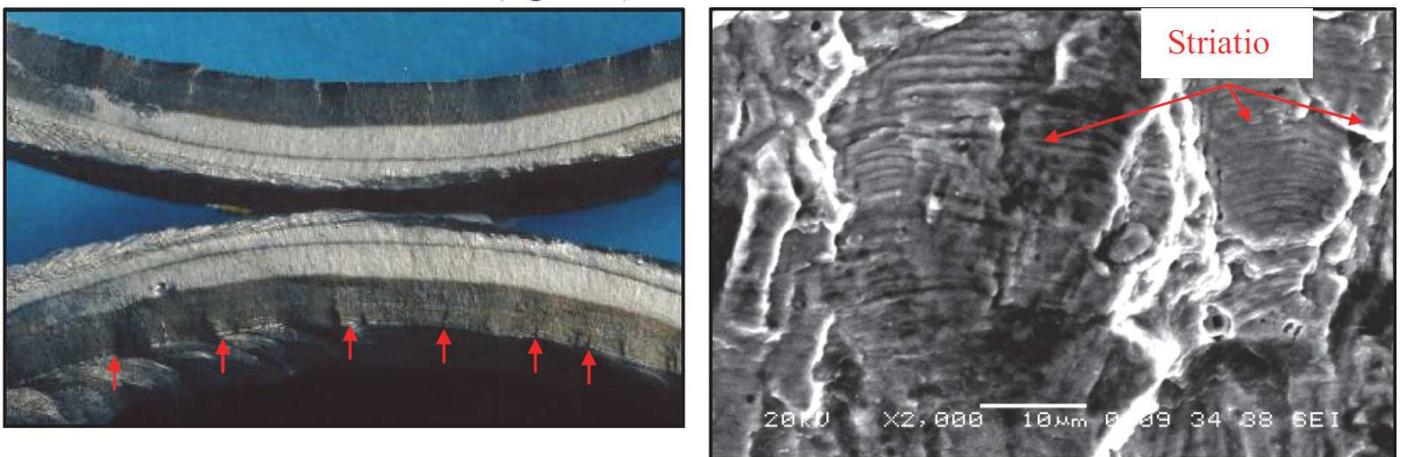


圖18. 疲勞紋

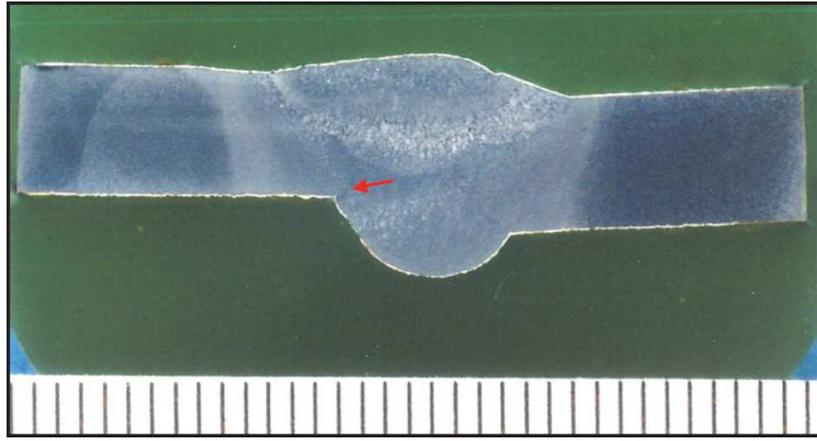


圖19. 銲件斷面

2. 銲道優先腐蝕（PWC，Preferential Weld Corrosion）案例：
Spowage⁽⁷⁾學者分析彎管前端法蘭（圖 20）毀損原因，因銲道顯微組織非層狀碳化物，無法緊密抓住保護性之氧化層，加上彎管幾何形狀與外在流體沖刷，導致流體加速腐蝕（FAC，Flow Assisted Corrosion）產生，如圖 21 所示，造成裸露的銲道（小面積陽極）與周遭母材氧化層（大面積陰極）形成加凡尼（Galvanic）效應，形成銲道優先腐蝕破壞。



圖20. 彎管前端法蘭

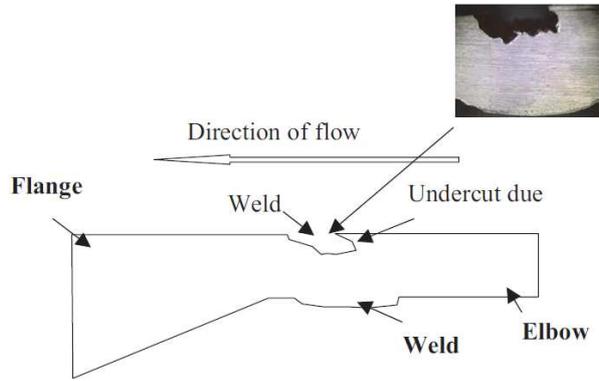


圖21. 銲道根部破壞示意

3. 應力腐蝕破壞案例：此次故障的是熱交換器內的噴嘴側銲道⁽⁶⁾，外觀如圖 22 所示，破損件經液滲檢測顯示有大量分支的的裂紋，觀察其破斷面以沿晶（**Intergranular**）裂紋居多，少量的穿晶（**Transcrystalline**）裂紋，如圖 23，破斷面上的氧化物，以 Na 元素居多，其截面巨觀金相（圖 24）中，銲道有大量分支的穿晶裂紋，故研判為應力腐蝕破壞。

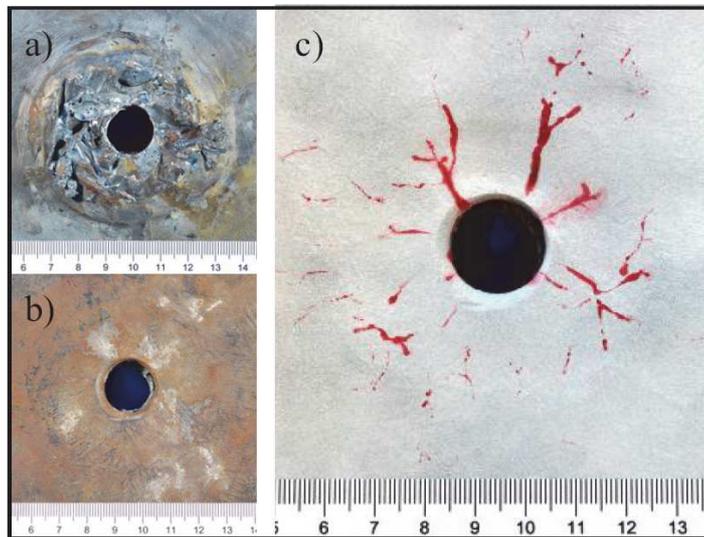


圖22. 噴嘴破壞外觀。

(a) 外側。(b) 內側。(c) PT 檢測內側

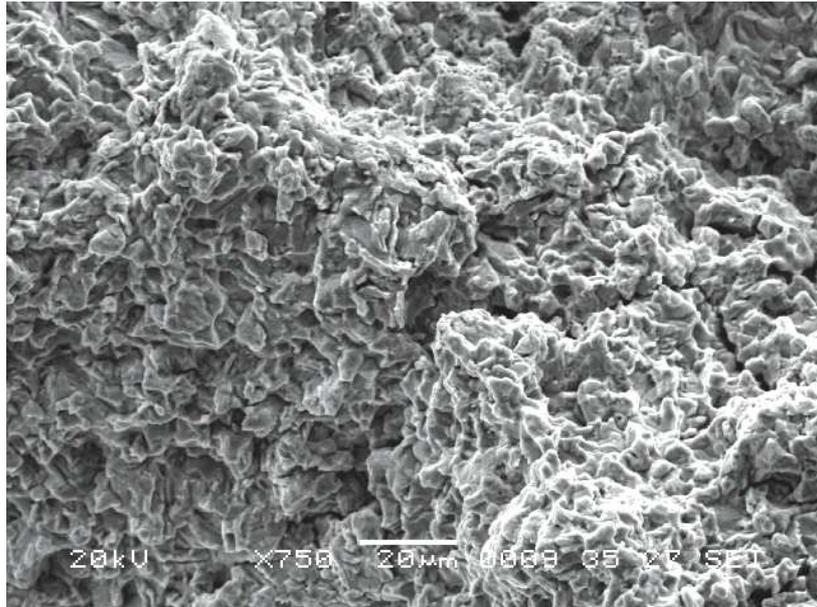


圖23. 破斷面 SEM 影像

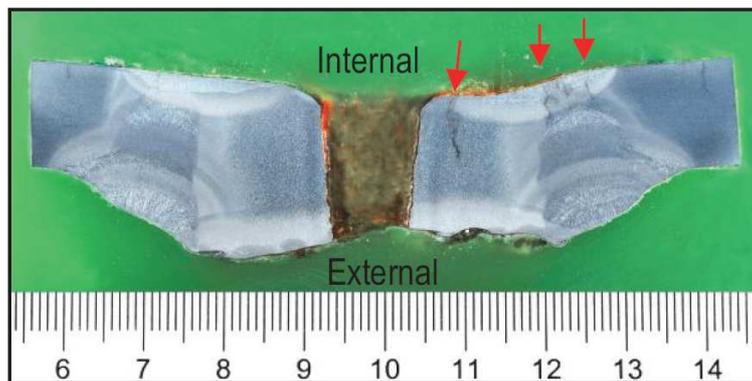


圖24. 噴嘴銲接處巨觀（箭頭所指處為裂縫）

4. 氫延遲裂紋（Hydrogen Delayed Cracking）：在現代為了要增加銲接的產能，常增加銲接道次，並減少銲接時間，這導致增加氫擴散距離與縮短氫擴散時間，間接使得氫延遲裂紋（又稱冷裂 Cold Cracking）產生的風險大增。Teresa⁽⁸⁾學者研究相關減少產生氫延遲裂紋的方法，如圖 25 說明銲道在室溫（如 50°C）下經 20 小時後，氫擴散的距離約 3mm，溫度越高，氫擴散的距離越遠，形成裂紋機率越低。不同銲接電流極性也會影響氫的擴散量，如圖 26。Teresa 在會議提出下列

建議，減少此氫延遲裂紋危害產生：

Base Material

- Choose heats of base metal with the lowest acceptable yield strength.

Welding Consumable Selection

- Choose consumables with the lowest acceptable yield strength.
- Choose consumables with low diffusible hydrogen potential.
- Choose consumables with low moisture pickup. For MMAW, choose those with an “H4R” designation.
- Specify low moisture shielding gas. Use ISO or AWS welding gas specifications as a guideline.
- Store and handle consumables in accordance with manufacturer’s recommendations for low hydrogen processes.
- Protect consumables from condensation when moving between low and higher temperature areas or during temperature swings between day and night time.

Material Preparation

- Remove rust and scale from the weld joint area.
- Remove cutting fluids, grease, organic and water based cleaners from the weld joint area.
- Preheat the weld area thoroughly. Measure temperature on the opposite side of heating or soak for 1 hour per inch of thickness.

Welding and Post Welding Process

- Sequence welding to minimize stress whenever possible.
- Minimize shrinkage stresses by not over-welding.
- Weld the most rigid components first, or use subassemblies.
- Avoid areas of significant stress concentration by minimizing sharp transitions between weld and base metal.
- Increase preheat and interpass temperatures.
- Weld continuously or maintain interpass temperature during breaks in welding.
- Use oil-free and water-free air for vacuuming and transporting submerged arc welding flux.
- Reduce cooling rates whenever possible.
- Reduce the thickness of individual passes.
- Reduce cooling rate after welding with thermal insulation or by maintaining heat on the joint.

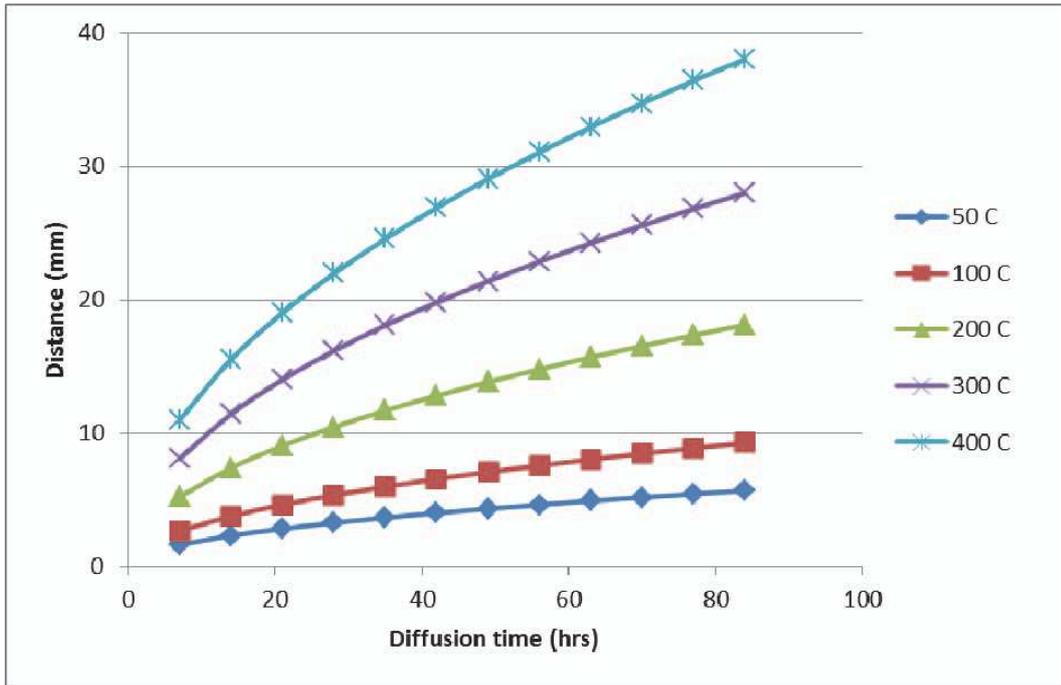


圖25. 在銲道內氫擴散的行為

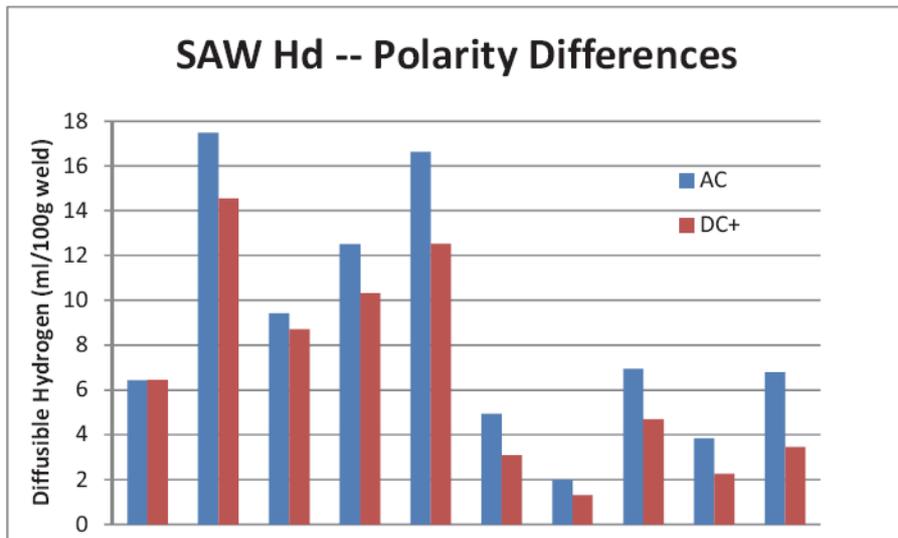


圖26. AC 與 DC+極性對氫擴散的影響

三、感想與建議

1. 國際銲接協會此次請新加坡銲接協會籌辦此次亞太區銲接會議，讓職瞭解現今材料銲接技術發展與公司超臨界機組材料之銲接特性；國際銲接協會並有舉辦全球性銲接會議，未來若有機會參加全球性銲接會議，將可更深入瞭解歐美學者之最新銲接研究成果。
2. 此次會議中，學者提出 T/P92 銲接流程，說明考慮 A_{c1} 溫度與 CVN 的影響，故建議 T/P92 銲後熱處理為 $760^{\circ}\text{C}/2\sim 4\text{h}$ 。
3. Super304H 不鏽鋼銲件之銲道潛變性能與耐火側腐蝕特性，均較母材優良，材料經 800°C 潛變試驗後，基地內 Nb (C, N) 與富 Cu 相之細小析出物數量大幅減少，說明顯微組織老化的特徵，此特徵可供本所後續維護 Super304H 不鏽鋼參考用。
4. 學者在此會議中發表相關超臨界機組材料之銲接程序與適用填料，分享相關銲件破損分析案例，值得本公司借鏡。

四、參考文獻

1. ASTM A213.
2. Dr. Herbert Heuser and Dr. Kwan-Gyu Tak, "New Steels Fulfil Requirements for New High Efficient Power Plants – Welding of T24, P92 and VM12-SHC", 2013.
3. Anas Maliyeka1, Dr.S.P.Kumaresh Babu, Dr.R.Nagalakshmi, "Evaluation Of Creep Properties Of Super304H Boiler Material And Its Weldments Using Indentation Creep Test Method And Their Comparison", 2013.
4. Jitendra Kumar Tirpude, S. P. Kumaresh Babu and R. Nagalaksmi, "Fireside Corrosion Studies of Super 304h USC Boiler Grade Weldments", 2013.
5. P. Auerkari, S. Holmstrom, P. Nevasmaa and J. Salonen, "Performance of welded low-alloy steels T/P23 and T/P24 for power plant applications", 2013.
6. Lim Huei Ling Jennifer, Goh Zhu Di and Ken Sidharta, "Weld Failures: Investigation Process, Techniques And Characterization", 2013.
7. A. C. Spowage and N. Brewitt, "Preferential weld corrosion of carbon steel pipes– An offshore elbow case study". 2013.
8. Teresa Melfi and Ben Schaeffer, "Best Practices to Prevent Delayed Cracking in Heavy Offshore Weldments", 2013