

出國報告（出國類別：實習）

# 研習超臨界鍋爐材料 焊接工程管理技術

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：黃彥霖 / 機械工程師

派赴國家：美國

出國期間：102 年 6 月 15 日至 102 年 6 月 24 日

報告日期：102 年 8 月 16 日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱： 研習超臨界鍋爐材料焊接工程管理技術

頁數 43 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

黃彥霖/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/(02)26815424

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 6 月 15 日~102 年 6 月 24 日 出國地區：美

國

報告日期：102 年 8 月 16 日

分類號/目

關鍵詞：超臨界鍋爐材料

內容摘要：

由於火力發電為台灣電力供應之主力，現今於林口、大林等地進行超臨界火力發電機組之興建作業，因超臨界發電條件（如運轉溫度、壓力等）比目前亞臨界火力發電條件更為嚴格，因此必須選擇更耐溫、耐壓之材料；且依國外已運轉之超臨界機組鍋爐高溫高壓管件損壞發生位置統計，以焊接接頭之失效比率最高。本次出國計劃走訪 ORNL

與 EPRI 實驗室，除針對超臨界機組鍋爐高溫高壓管件所使用之 CSEF 鋼材性能加以瞭解以外，再對於國外目前對於 CSEF 鋼材之焊接性能與異種金屬焊接之研究成果進行探討。對於焊接程序，部份鋼材未有規範存在，僅有生產材料之廠家提供之條件程序可供參考，然而各廠家之條件並不一致，因此進行 CSEF 鋼材安裝施工時，使用之焊接條件與作業流程須紀錄。對於焊接程序，國外已開發出智慧型手機 APP，可供國內研究發展借鏡參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

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

# 目 錄

出國報告審核表-----	1
出國報告提要-----	2
目錄-----	4
一、 前言-----	5
1.1 任務起源-----	5
1.2 任務目標-----	6
1.3 任務行程-----	6
二、 實習過程-----	8
2.1 CSEF 鋼材-----	8
2.2 CSEF 鋼材焊接技術-----	12
2.3 異種金屬焊接-----	24
2.4 焊接資料庫與 APP 應用程式-----	30
2.5 參訪 ORNL 以及 EPRI 實驗室-----	32
三、 心得感想與建議-----	41
四、 參考資料-----	42

# 一、前言

## 1.1 任務起源

以 102 年 1~6 月發電結構來看，火力發電為台灣電力供應之主力，追求低燃料消耗量、高機組運轉效能、低營運成本且低環境污染之火力發電技術，為本公司研究發展之目標。目前本公司在林口、大林等地進行超臨界火力發電機組之興建作業，由於超臨界火力發電條件（如運轉溫度、壓力等）比目前亞臨界火力發電條件更為嚴格，傳統亞臨界鍋爐使用之材料勢必無法應付此一嚴苛之運轉條件，因此必須選擇更耐溫、耐壓之材料，如麻田散鐵系合金鋼材料 P91、P92、E911、P122，或是沃斯田鐵系不銹鋼材料 TP347HFG、SUPER304H 等合金鋼，方可滿足超臨界機組鍋爐工作環境；然而在工程設計與成本考量之下，鍋爐管件同時使用合金鋼、碳鋼及不銹鋼之情況極為頻繁，因此增加組裝焊接之困難度。

依國外文獻統計，國外已運轉之超臨界機組鍋爐高溫高壓管件損壞發生位置，以焊接接頭之失效比率最高。歐、美、日等國超臨界火力發電機組運轉發電已有一段時間，對於超臨界鍋爐材料缺失改善、材料焊接技術、新材料研發技術與測試等，皆具有相當經驗，值得本公司學習。為針對本公司即將面臨之超臨界機組鍋爐材料可能發生之

問題預作準備，故提出本計劃出國研習。

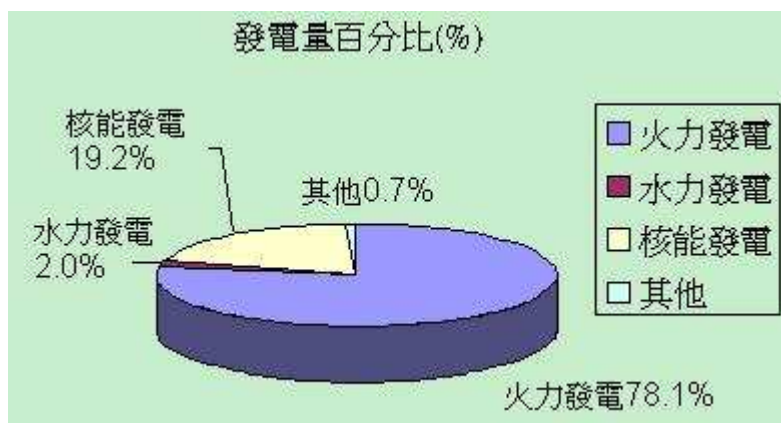


圖 1 台灣 102 年 1~6 月發電結構圖

## 1.2 任務目標

本次出國實習「超臨界鍋爐材料焊接工程管理技術」目標有：A. 材料之冶金特性與焊接性。B. 異種金屬焊接製程。C. 元件幾何設計。D. 焊接填料選用及品質驗證等四項，以瞭解國際當今研究成果及動向

## 1.3 任務行程

本次赴美國實習自 102 年 6 月 15 日到 6 月 24 日，總計 10 天，行程如表 1 所示：

表 1 本次公務出國行程表

日期	地點	內容
6/15~16	台北→洛杉磯 →橡樹嶺	去程
6/17~19	橡樹嶺	拜訪 Oak Ridge National Laboratory 與考察其焊接技術
6/20	橡樹嶺→夏洛特	路程
6/21	夏洛特	拜訪 EPRI Laboratory 與考察其焊接技術
6/22~24	夏洛特→洛杉磯 →台北	返程



## 二、實習過程

### 2.1 CSEF (Creep Strength Enhanced Ferritic) 鋼材

此次參訪夏洛特 EPRI，由其資深工程師丹尼爾 (Daniel Purdy) 與伊莉莎白 (Elizabeth Owensby) 接待，介紹增強潛變強度肥粒鐵系 (Creep Strength Enhanced Ferritic, CSEF) 合金鋼材與 EPRI 最近之焊接研究成果。Grade 91 材料為高鉻 (Cr)、肥粒鐵系耐熱鋼之優選材料，於 1974 年美國橡樹嶺國家實驗室 (ORNL) 與美國燃燒工程協會 (USCE) 成功開發，因著眼於其優異耐高溫能力、抗潛變特性與低熱膨脹係數，Grade 91 材料自開發以來廣泛運用於先進電廠內之高溫結構組件(如集管箱等)，並於 1983 年被 ASTM 與 ASME 列入 SA213 規範內。

之後在 Grade 91 合金鋼成份 (9Cr1MoVNb) 之基礎上，添加微量稀有合金 (如 W、B、N、Ti 等元素) 並控制合金添加量，後續又開發出 Grade 911、Grade 92 等新型 CSEF 鋼材；同樣地，在傳統亞臨界常使用之 Grade 22 合金鋼成份 (2.25Cr1Mo) 的化學成份基礎上，同樣添加微量稀有合金並控制合金添加量，後續又開發出 Grade 23、Grade 24 等新型 CSEF 鋼材。這些新型 CSEF 鋼材之設計名稱與規格及化學成份分別如表 2~3 所示。

表 2 CSEF 鋼材設計名稱與規格表

Grade	Common Specifications			Common Designations			
	ASME (USA)	EN10216-2 (Europe)	METI (Japan)	UNS	Material Number	VdTÜV	Other
T23	SA213T23	7CrWVMoNB91-6	KA-STBA24J1	K40712	1.8201	--	HCM2S
P23	SA335P23		KA-STPA24J1				
T24	SA213T24	7CrMoVTiB10-10	--	K30736	1.7378	533	--
T91	SA213T91	X10CrMoVNB91-1	KA-STBA28	K90901	1.4903	511/2	--
P91	SA335P91		KA-STPA28				
T911	SA213T911	X11CrMoWVNB91-1-1	--	K91061	1.4905	522/2	E911
P911	SA335P911						
T92	SA213T92	X10CrWMoVNB91-2	KA-STBA29	K92460	1.4901	552/2	NF616
P92	SA335P92		KA-STPA29				

表 3 CSEF 鋼材化學成份表

Grade	T23	T24	T91	T911	T92
Code case	CC2199	CC2540	SA213	CC2327	CC2179
Element					
C	0.04-0.10	0.05-0.10	0.07-0.14	0.09-0.13	0.07-0.13
Mn	0.10-0.60	0.30-0.70	0.30-0.60	0.30-0.60	0.30-0.60
Si	0.50 max	0.15-0.45	0.20-0.50	0.10-0.50	0.50 max
S	0.010 max	0.010 max	0.010 max	0.010 max	0.010 max
P	0.030 max	0.020 max	0.020 max	0.020 max	0.020 max
Cr	1.90-2.60	2.20-2.60	8.0-9.5	8.5-9.5	8.5-9.5
Ni	--	--	0.40 max	0.40 max	0.40 max
Mo	0.05-0.30	0.90-1.10	0.85-1.05	0.90-1.10	0.30-0.60
W	1.45-1.75	--	--	0.90-1.10	1.5-2.0
V	0.20-0.30	0.20-0.30	0.18-0.25	0.18-0.25	0.15-0.25
Nb	0.02-0.08	--	0.06-0.10	0.06-0.10	0.04-0.09
N	0.030 max	0.0120 max	0.030-0.070	0.040-0.090	0.030-0.070
B	5-60ppm	15-70ppm	--	3-60ppm	10-60ppm
Al	0.030 max	0.020 max	0.020 max	0.020 max	0.020 max
Ti	0.005-0.060	0.06-0.10	0.010 max	0.010 max	0.010 max
Zr	--	--	0.010 max	0.010 max	0.010 max

Grade 23 材料起源於日本，在 Grade 22 之化學成份基礎上，添加了鎢 (W) 約 1.6 wt% 以及其他微量合金元素如 Nb、V、B 等而成。此材料優點在於當溫度提升至 593°C (1100°F) 時，材料仍然擁有優良的潛變強度，且可降低或免去焊接時預熱與焊後熱處理 (PWHT) 之條件，某些國家使用此材料作為 Grade 91 之低成本替代材料；然而依國外現場經驗顯示，使用此材料時，仍須符合相關之焊接預熱與熱處理條件要求，且因材料化學成份裡鉻 (Cr) 元素含量僅約 2.4 wt%，因此對於高溫氧化之抵抗能力幾乎與 Grade 22 材料相同，造成使用上之限制。

Grade 24 材料過去數年主要用於歐洲地區，為 Grade 22 材料之再改良版，2010 年時 ASME 給予此材料列為規範案例 Code Case 2540，依其性能實驗結果顯示，溫度在 538°C (1000°F) 以下時，Grade 24 材料比 Grade 23 材料擁有更佳的潛變強度，但在此溫度 (538°C) 以上時，潛變強度將明顯滑落，因此在 Code Case 2540 裡 Grade 24 材料規定使用溫度上限為 575°C (1067°F)。

最近幾年，關於 Grade 23 與 Grade 24 材料用做於水牆管 (waterwall tubes) 或是蒸發器管 (evaporator tubes) 時，產生龜裂 (cracking) 狀況屢見不鮮。統計結果顯示，Grade 24 材料龜裂問題多數屬於應力腐蝕破裂 (stress corrosion cracks, SCC)，而 Grade

23 材料龜裂問題除以 SCC 為大宗之外，其餘亦有氫誘發破裂（hydrogen induced cracking, HIC）與再熱破裂（reheat cracking, RHC），引發龜裂之原因眾說紛云，目前使用的焊後熱處理程序複雜且所費不貲，EPRI 也正在對此議題加以研究，尙未有定論；也因此截至當下，EPRI 強調以 T23/24 材料作為水牆管使用時，須審慎考慮（EPRI strongly cautions users to reconsider the use T23 or T24 in waterwall construction）。

若使用 T23/24 材料用作水牆管面板或螺旋式設計時，須注意下列五點：

- A. T24 水牆管面板毋須酸洗。
- B. 氧含量須低於 20 ppb，直到 3000 運轉小時以後，氧含量可調整成低於 150 ppb。
- C. 嚴格水質控制以避免雜質（尤其須避免銅存在）。
- D. 在材料敏感溫度區間（150 ~ 280°C）內，加速升溫速率以避免產生組織變異。
- E. 若應用於燃油鍋爐，須進行 500°C（932°F）之熱處理作業 48 小時以上，以釋放內部應力，降低材料對 SCC 之敏感性。

Grade 92 材料為 Nippon Steel 開發出來，在 Grade 91 材料基礎上將鉬（Mo）元素略為減少（降至約 0.5 wt%）並添加了鎢（W）

元素（約 1.7 wt%）以及微量之硼（B）元素（約 10~60 ppm），硼不僅可提升硬化能以外，亦可降低碳化物之粗糙程度。與 Grade 91 材料相比之下，在同樣運轉溫度與應力允許值之內，Grade 92 材料管壁厚度可降低 20%，因此在美國逐漸獲得廣泛使用。為預防本材料於使用中產生過熱情形，最近之論文已研究出 Grade 92 材料之化學成份與 A<sub>1</sub> 溫度關係方程式，供使用者預測材料在焊接或是使用時是否存在過熱情形。此方程式如表 4 所示。

表 4 Grade 92 材料之 A<sub>1</sub> 溫度方程式

元素	Cr	Mo	W	Si	V	Nb	C	N	Mn	Ni
化學成份 (wt%)	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
$A_1 = 778 + 4.9a + 22.6b + 10.8c + 22.9d + 43.6e + 20.2f - 80.6g - 150.7h - 55.1i - 68j$										

## 2.2 CSEF 鋼材焊接技術

### 2.2.1 填充金屬選擇

在 Grade 91 材料之焊接填充料，依不同之焊接方式，已有 SFA / AWS 規範可供查循，如表 5 所示；另外，EPRI 亦針對 Grade 91 材料之填充金屬之化學成份做出研究，建議之填充成份與 SFA / AWS 填充金屬化學成份規範如表 6 所示。

表 5 Grade 91 材料之焊接填料規範

焊接方式	SMAW	SAW	GTAW	FCAW
規範	SFA 5.5 E901X-B91	SFA 5.23 EB91	SFA 5.28 ER90S-B91	SFA 5.29 E9XT1-B91

表 6 SFA / AWS 填料金屬化學成份規範與 EPRI 建議之 Grade 91  
材料之焊接填料化學成份

規範 元素 (wt%)	SFA 5.5 E901X-B91	SFA 5.23 EB91	SFA 5.28 ER90S-B91	SFA 5.29 E9XT1-B91	EPRI 建議值
C	0.08-0.13	0.07-0.13	0.08-0.13	0.08-0.13	--
Mn	1.20	1.20	1.20	1.20	0.70-1.20
Si	0.30	0.15-0.50	0.08	0.50	--
P	0.010	0.010	0.010	0.020	0.10
S	0.010	0.010	0.010	0.015	--
Ni	0.80	0.80	0.80	0.80	--
Cr	8.0-10.5	8.0	8.0-10.5	8.0-10.5	8.5-9.5
Mo	0.85-1.20	0.85-1.20	0.85-1.20	0.85-1.20	--
V	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.25	0.15-0.30	--
Cu	0.25	0.20	0.25	0.25	--
Al	0.040	0.040	0.040	0.040	0.020
Cb	0.020-0.10	0.020-0.10	0.020-0.10	0.020-0.10	--
N	0.020-0.070	0.030-0.070	0.020-0.070	0.020-0.070	0.040-0.070
Ni + Mn	1.50	1.50	1.50	1.50	1.0
Ti	--	--	--	--	0.010
Co	--	--	--	--	0.050
B	--	--	--	--	0.0010
W	--	--	--	--	0.20
As	--	--	--	--	0.010
Sn	--	--	--	--	0.0050
Sb	--	--	--	--	0.0030

### 2.2.2 預熱 (Preheat)

為降低 CSEF 鋼材對於 HIC 之敏感性，在焊接時進行預熱是必要的，預熱可減低焊接時冷卻速率與熱影響區 (HAZ) 硬度值，尤其在未採取焊後熱處理 (PWHT) 之情況下，研究理論與實際應用結果均顯示，焊前預熱更顯得其必要性。對於 CSEF 鋼材而言，因焊接方法、焊件厚度、焊件化學微量成份與焊件結構等種種因素的限制，預熱溫度無法訂定一個確切之值，僅能依個別焊接實驗結果去推論適用值。大多數材料製造商建議，對於 CSEF 鋼材，尤其是 T23/24 材料，薄、厚工件預熱溫度分別須達到 150°C (300°F) 與 200 ~ 250°C (390 ~ 480°F) 以避免 HIC 或 SCC 之發生。圖 2 為 T24 管對焊之硬度值變化情形，由圖中可看到，當預熱溫度愈接近建議值 200 ~ 250°C (390 ~ 480°F)，材料軟化程度愈明顯。不過，在觀察材料之連續冷卻變化 (Continuous Cooling Transformation, CCT) 圖時，可發現 Grades 91/ 911/ 92 材料硬度下降值不大，EPRI 解釋說，這是因為這些材料焊接時組織變化由純麻田散鐵相變化為變韌鐵與麻田散鐵相混合，這些相本身硬度高，無論預熱溫度多少，材料硬度值不會有太大改變。

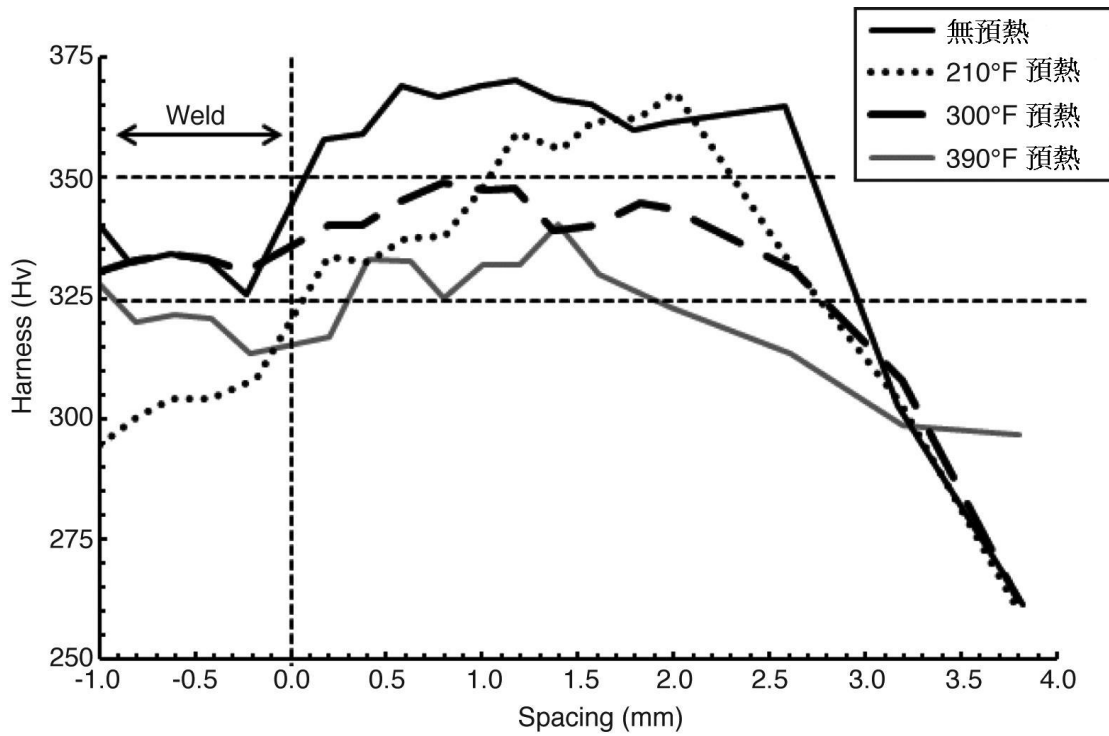


圖 2 T24 管對焊之硬度值變化

另外，部份研究針對於關於 **Grade 91** 材料焊接時，預熱溫度提升至  $250 \sim 350^{\circ}\text{C}$  ( $480 \sim 660^{\circ}\text{F}$ ) 將可增加焊接之潛變強度；然而經 EPRI 之多次實驗結果，這提升效果影響極微（幾乎沒有影響），EPRI 亦提供關於各種焊接方法之建議（非規範）預熱溫度值供參考之，如表 7 所示。



表 7 EPRI 建議之焊接預熱溫度值

合金種類	焊接方法	應用	最低預熱溫度 (°C)	最大層間溫度 (°C)
Grade 23 Grade 91 Grade 92	GTAW	Any	150	315
	SMAW SAW FCAW GMAW	Tubing	150	
		Highly Restrained	175~200	
Grade 24	GTAW	Any	200	315
	SMAW SAW FCAW GMAW	Tubing		
		Highly Restrained		

對於 CSEF 鋼材而言，最大層間溫度 (Interpass Temperature) 是 315°C (600°F)，這是因 CSEF 鋼材中添加了許多微量合金元素產生特殊形碳化物作強化作用，若過高的溫度將容易導致微量合金元素從強化相中析出，使強化相崩解而喪失強化作用，因此必須嚴格控制焊珠形狀以防止熱龜裂 (hot cracking) 產生。

### 2.2.3 回火焊珠焊接技術 (Temper Bead Welding Technique)

回火焊珠焊接技術自 1960 年代起開始使用，優點在於可避免複雜且高花費之 PWHT，回火焊珠焊接過程如圖 3 所示，首先是一般單次焊道 (圖 3-A)，黑色焊道下青藍色為粗晶區 (晶粒尺寸大於  $50 \mu\text{m}$ )、紫色為細晶區 (晶粒尺寸小於  $50 \mu\text{m}$ )，由於粗晶區易降低韌性 (toughness)，為增強熱影響區 (HAZ) 之韌性，必須減少粗晶區的區域大小，因此再加以施焊第 2 個焊道與第 3 焊道 (圖 3-B)，此後續施加之焊道熔珠使用較低之熱輸入量以確保熔珠可緊密滲入母材作接合，焊珠重疊比例約以 50/50 為主，最後熱影響區焊道之粗晶區尺寸在多次回火焊珠焊接之下將變得細小，從而也提升了母材之韌性。

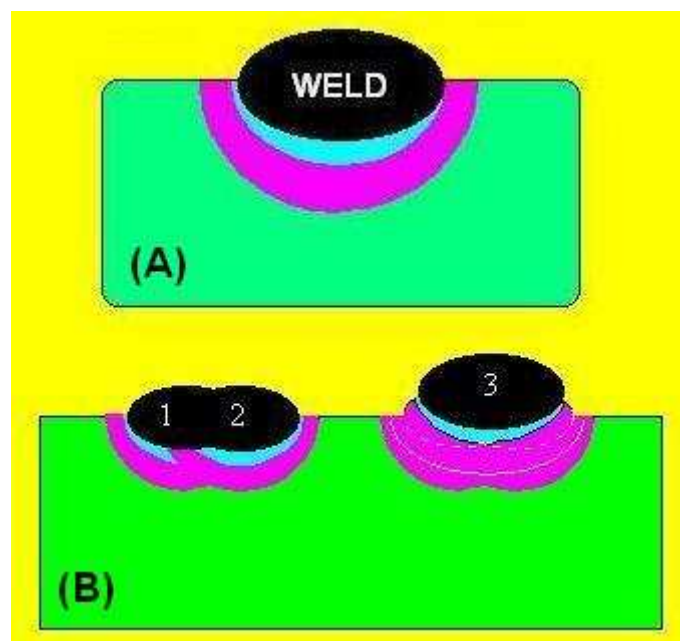


圖 3 回火焊珠焊接示意圖

雖說回火焊珠焊接技術原理不難理解，然而在實際上應用時卻不易達成，如焊接點位置、電極角度調整等等都必須有具備相當之焊接工藝技巧方可達到；尤其如 CSEF 擁有多種微量合金元素之鋼材進行回火焊珠焊接，除須填料金屬成份之外，亦須注意現場焊接作業品質，不良之焊接品質容易引發熱脆裂與缺陷殘留。

以本次 EPRI 展示之範例為例，兩 Grade 91 板使用 0.035 吋之填料金屬進行焊接，其測得之化學成份如表 8 所示，使用 GTAW 焊接，工件之開槽尺寸分別為 30 度斜角（圖 4 左）與 90 度角（圖 4 右），如圖 4 所示，方法分別採用焊縫控制法（Controlled Deposition Technique）與一致性層狀法（Consistent Layer Technique）等兩種方法進行焊接，其焊接過程分別如圖 5~6 所示。

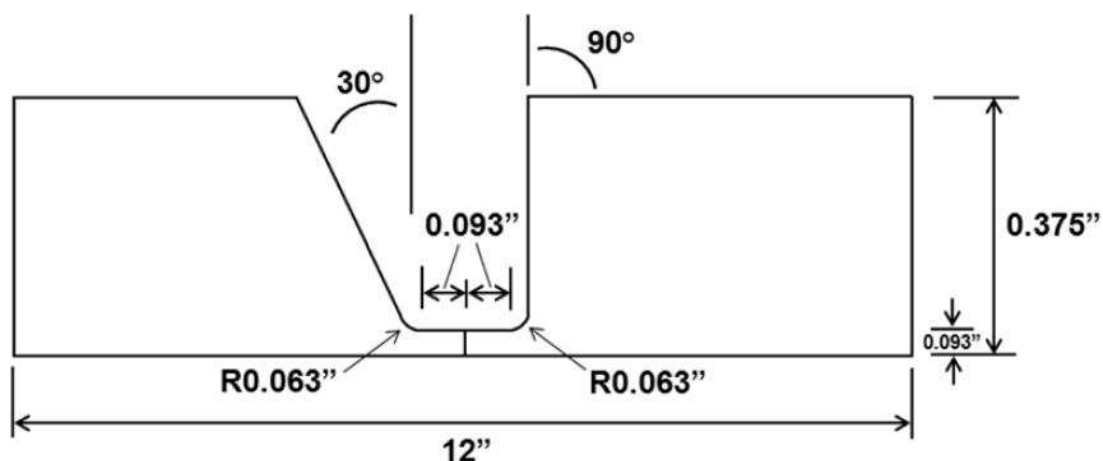


圖 4 焊接工件開槽尺寸

表 8 回火焊珠焊接範例基材與填料金屬化學成份表 (單位: wt%)

元素	Grade 91 板	填料金屬
C	0.08	0.11
Mn	0.46	1.55
P	0.009	0.008
S	0.004	0.003
Si	0.35	0.16
Ni	0.09	Bal.
Cr	8.59	8.52
Mo	0.89	2.02
V	0.207	--
Cu	0.06	--
Ti	0.002	--
Al	0.009	--
Zr	0.001	--
Cb	0.078	1.09
N	0.0476	--
N/Al ratio	5.3	--

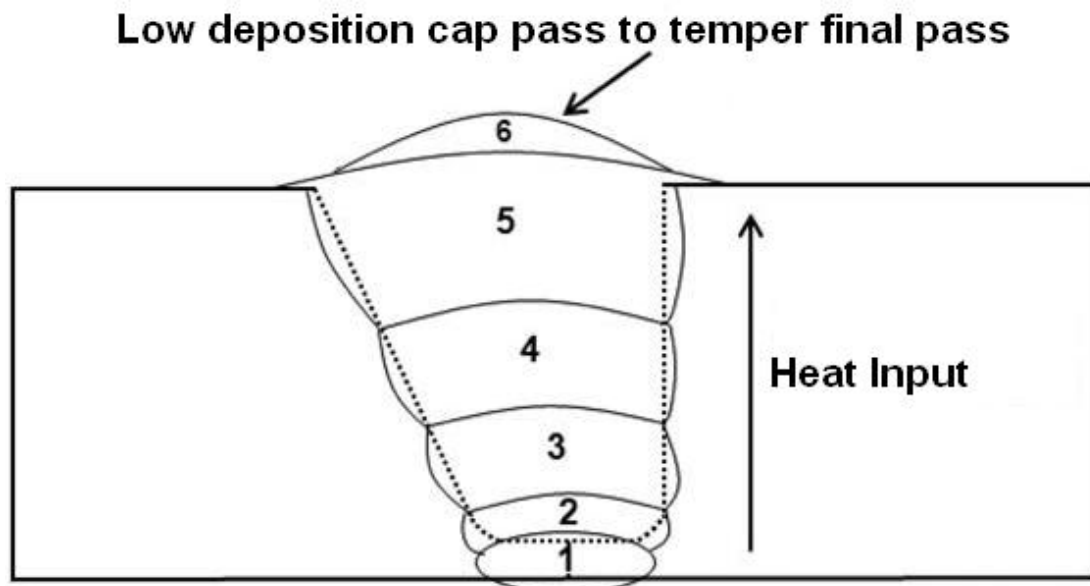


圖 5 焊縫控制法焊接過程

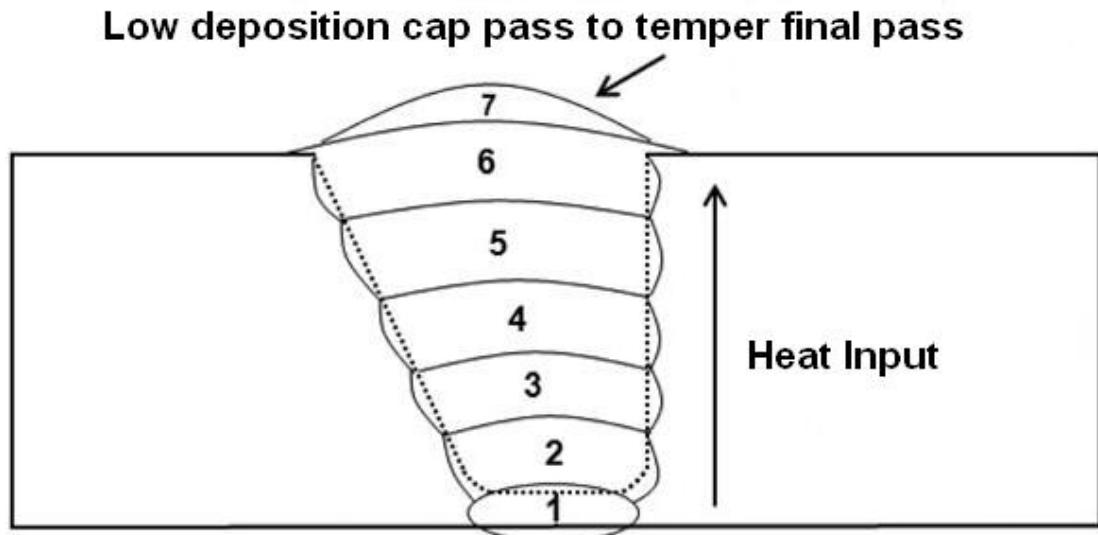


圖 6 一致性層狀法焊接過程

焊接完成後之工件如圖 7 所示，切取部份區域在室溫下進行破壞性分析，如圖 8 所示，方法採用橫截面微硬度分布測試與拉伸試驗法，測試之硬度分布結果與統計數據圖如圖 9~12 所示；拉伸試樣與結果如表 9 所示。

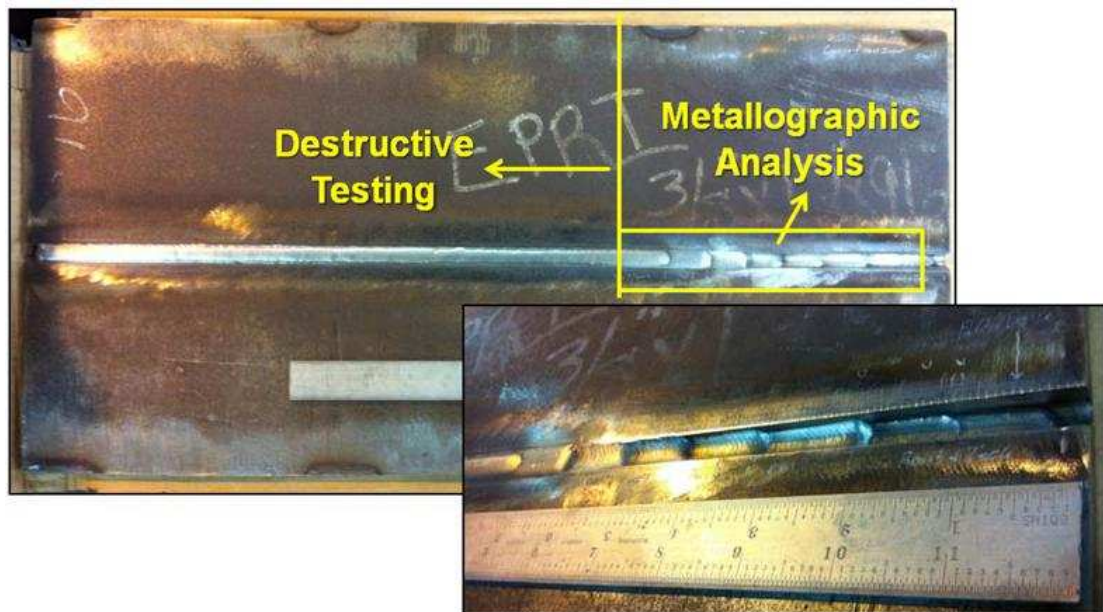


圖 7 焊接完成後之工件

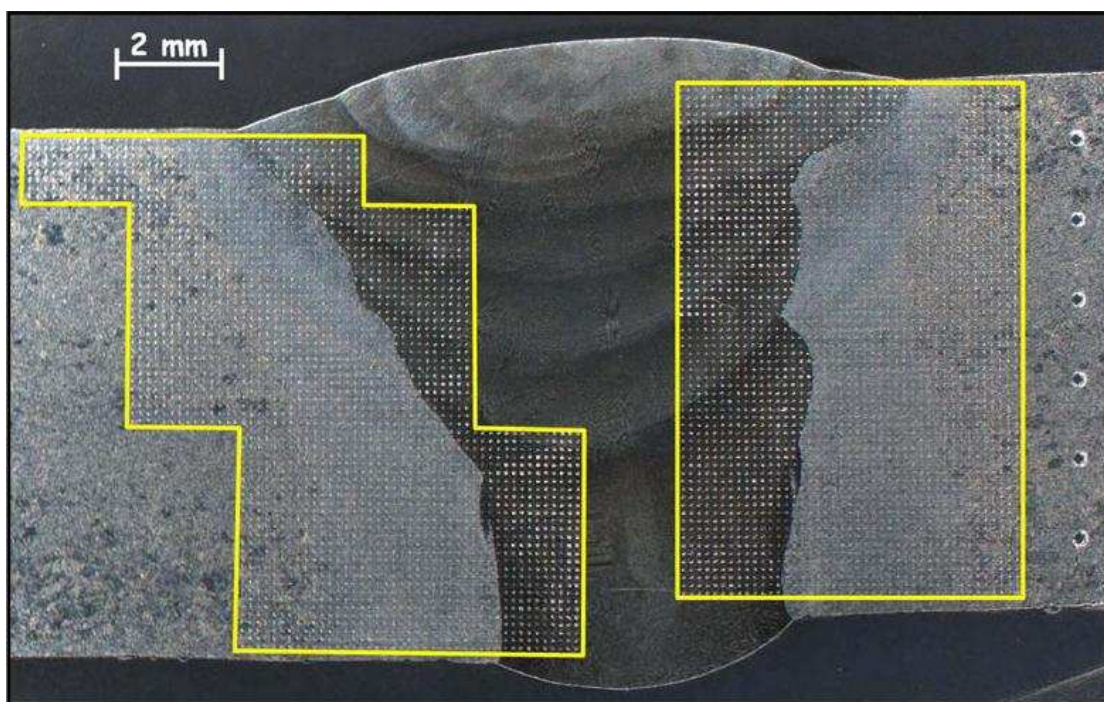


圖 8 橫截面微硬度分布測試

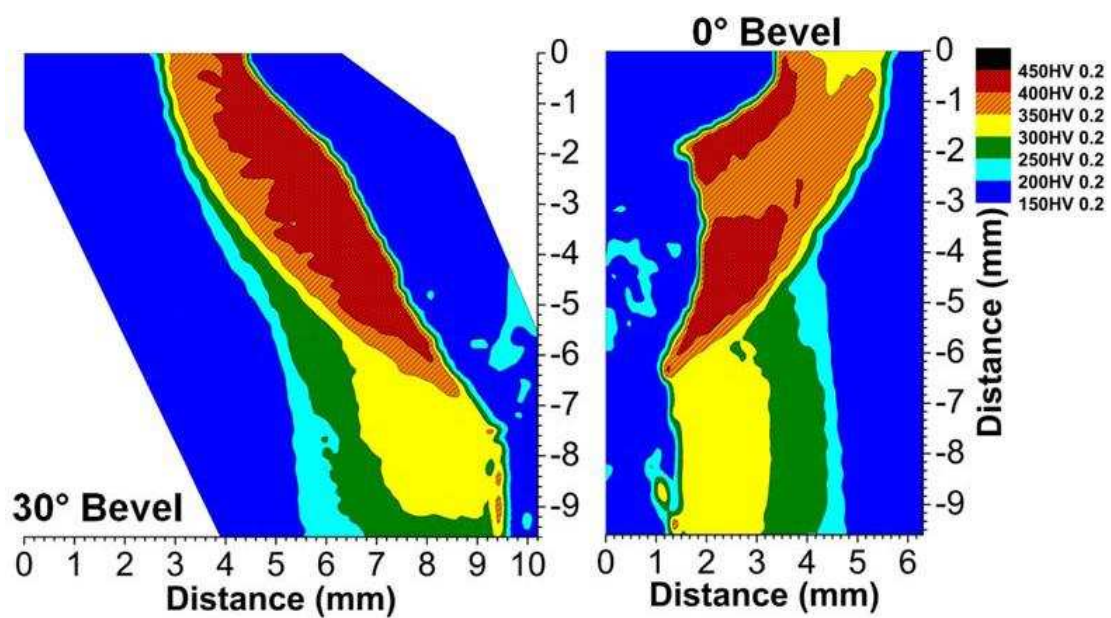


圖 9 焊縫控制法工件橫截面微硬度分布測試結果(1)



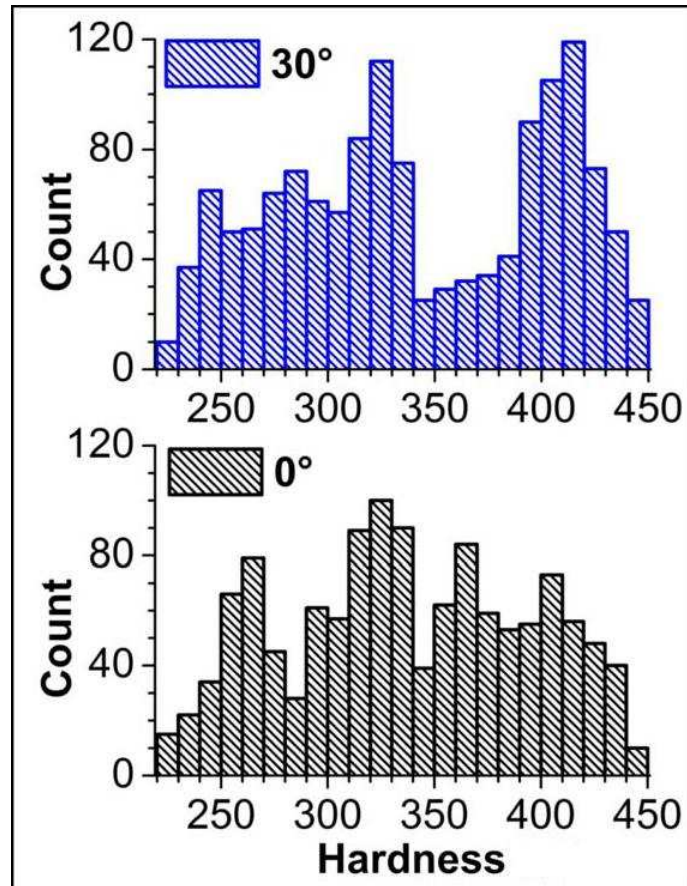


圖 10 焊縫控制法工件橫截面微硬度分布測試結果(2)

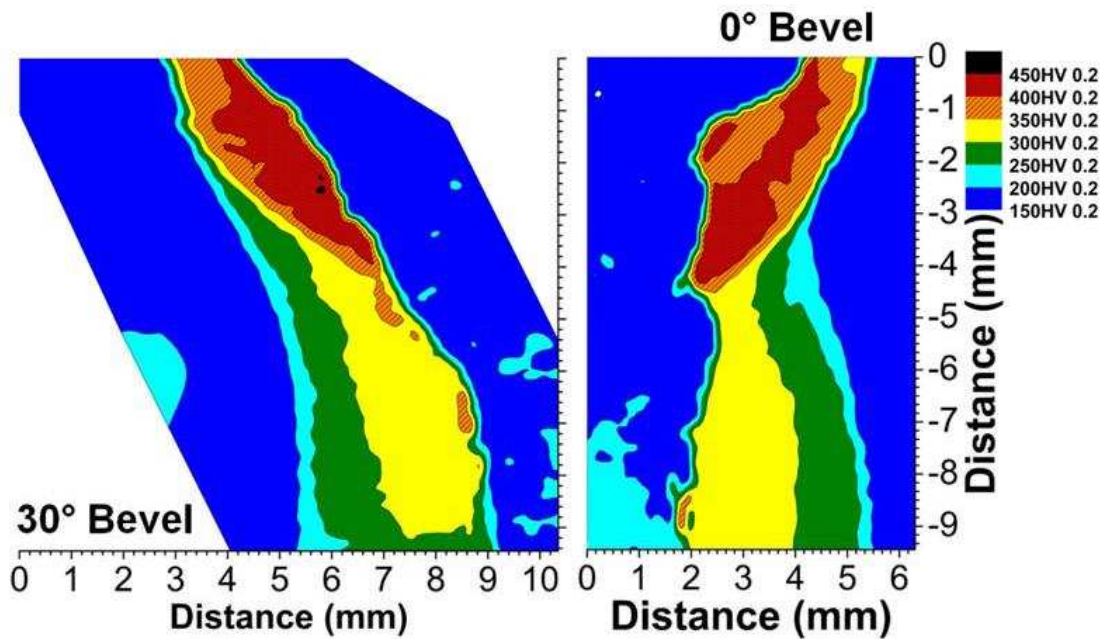


圖 11 一致性層狀法工件橫截面微硬度分布測試結果(1)

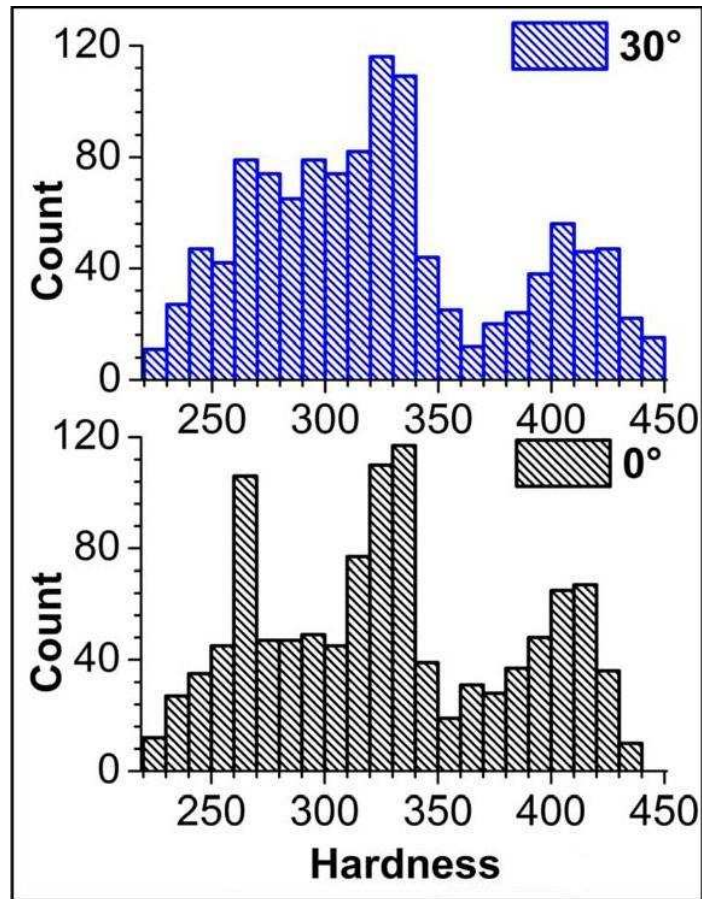
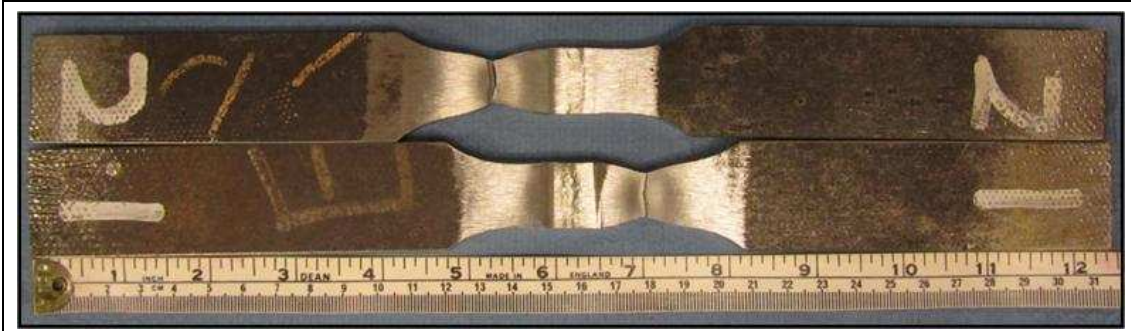


圖 12 一致性層狀法工件橫截面微硬度分布測試結果(2)

表 9 拉伸試樣與結果

編號	焊接法	拉伸測試結果 (MPa)
1	焊縫控制法	593
2	一致性層狀法	597





經上述在室溫下進行之實驗後，焊縫控制法與一致性層狀法焊接兩者之機械性質（抗拉強度與微硬度分布）測試結果比較之下相差不多，皆符合 ASME BPVC Section 6 之要求，而焊接填料選用鎳基金屬在焊接過程中提供良好的焊接效果。

### 2.3 異種金屬焊接（Dissimilar Metal Welding, DMW）

美國橡樹嶺國家實驗室（ORNL）位於田納西州橡樹嶺，為美國能源部所屬科學與能源研究實驗室之一，原先以核能研究為主，在 1970 年起開始將研究領域擴張至能源產出、運輸與保存領域，著名之 Grade 91 材料即為 ORNL 於 1974 年所開發出來，且焊接之 Type IV 龜裂情形亦為 ORNL 所發現。此次參訪美國橡樹嶺國家實驗室（ORNL）之焊接工作組（Processing and Joining Group），由該組組長馮博士（Zhili Feng）與其助理于博士（Zhenzhen Yu）接待，並介紹該實驗室與近期研究之概況。

在進行 CSEF 鋼材異種金屬焊接時，自焊道、熱影響區至基材可分為數個區域，如圖 13 所示，每一區域依其受溫度高低影響情形不同，顯微組織與晶粒大小亦不相同，其中 Type IV 龜裂容易發生於 FGHAZ 與 ICHAZ 區域，而至目前為止研究之看法，Type IV 龜裂與 HAZ 中碳化物之溶解、析出與成長有關，如圖 14 所示。

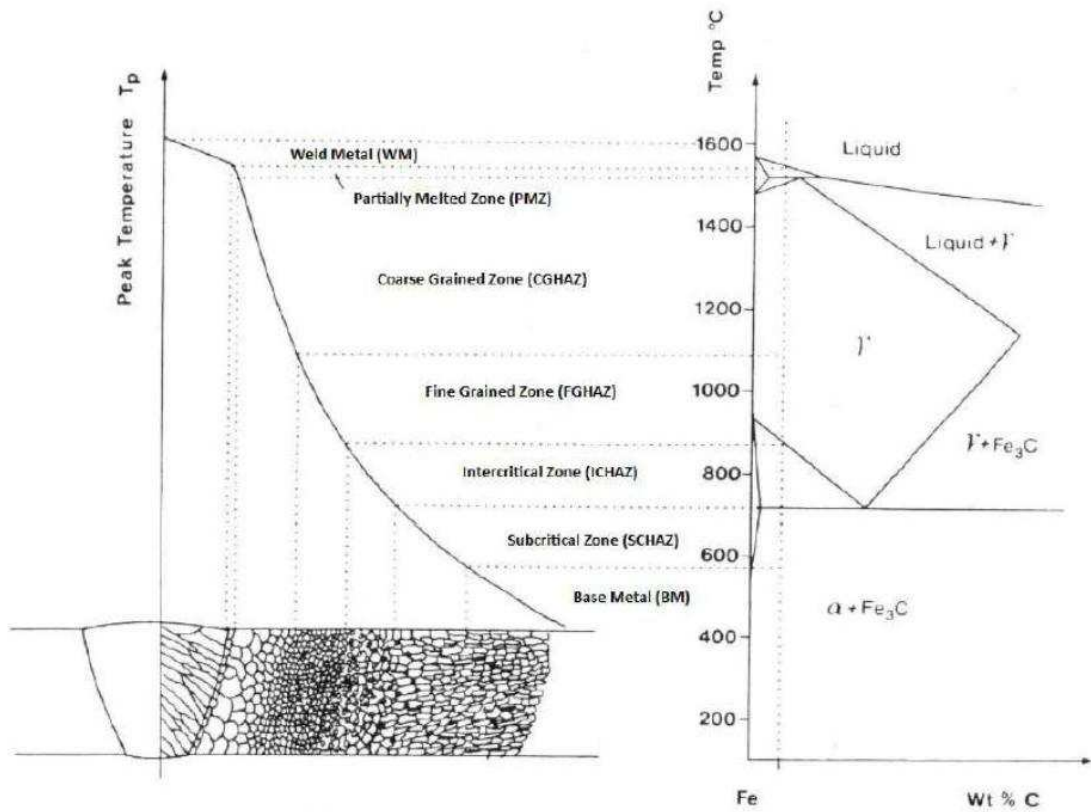


圖 13 焊道、熱影響區、基材和溫度、顯微組織變化區域關係圖

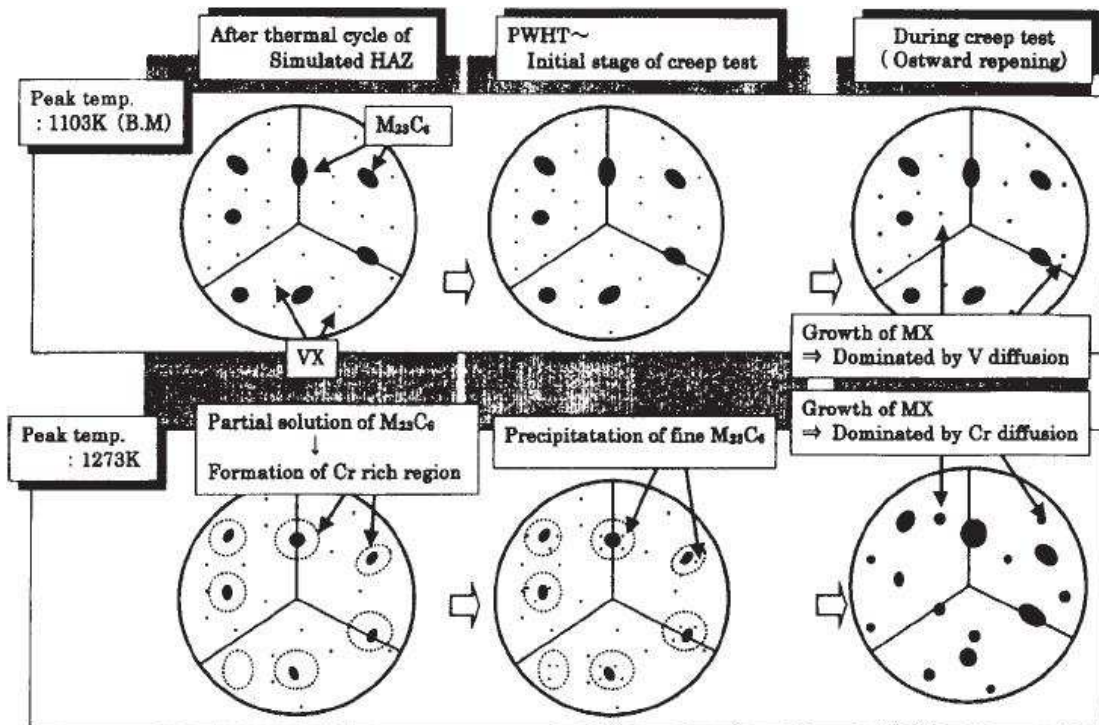


圖 14 HAZ 中碳化物之溶解、析出與成長示意圖

除了 HAZ 之 Type IV 龜裂之形成原因，軟化（softening）機制亦是考量的重點，ORNL 展示硬化硼鋼（Hardened Boron Steel）焊接分析結果，如圖 15~18 所示，將硼鋼焊道、熱影響區依受不同溫度影響之 Supercritical ( $T > T_{A3}$ )、Intercritical ( $T_{A3} > T > T_{A1}$ ) 與 Subcritical ( $T_{A1} > T$ ) 三區域之微硬度分布試驗結果與其顯微組織和相圖作比對，之後進行靜態拉伸測試與即時觀察，可發現斷裂點即為 HAZ 之軟化區域（Softening Region），而這現象與焊接條件與基材之化學成份有相當之關聯性，另外亦與基材顯微組織與微硬度、焊接時熱循環次數有關。

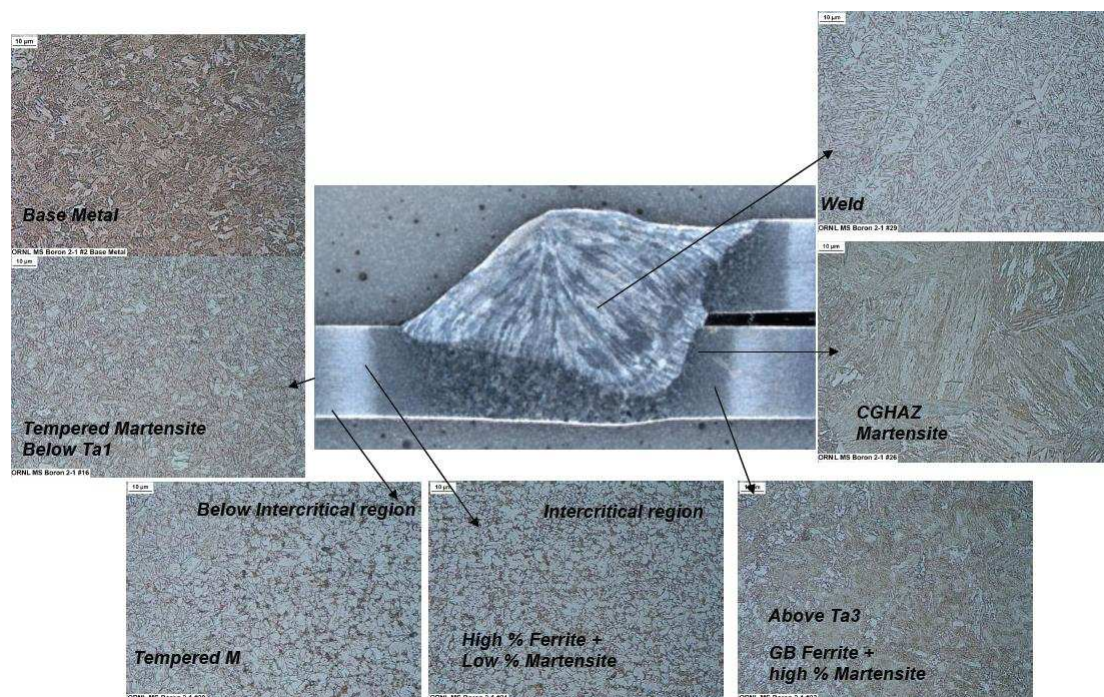


圖 15 硬化硼鋼焊道與熱影響區之顯微組織圖



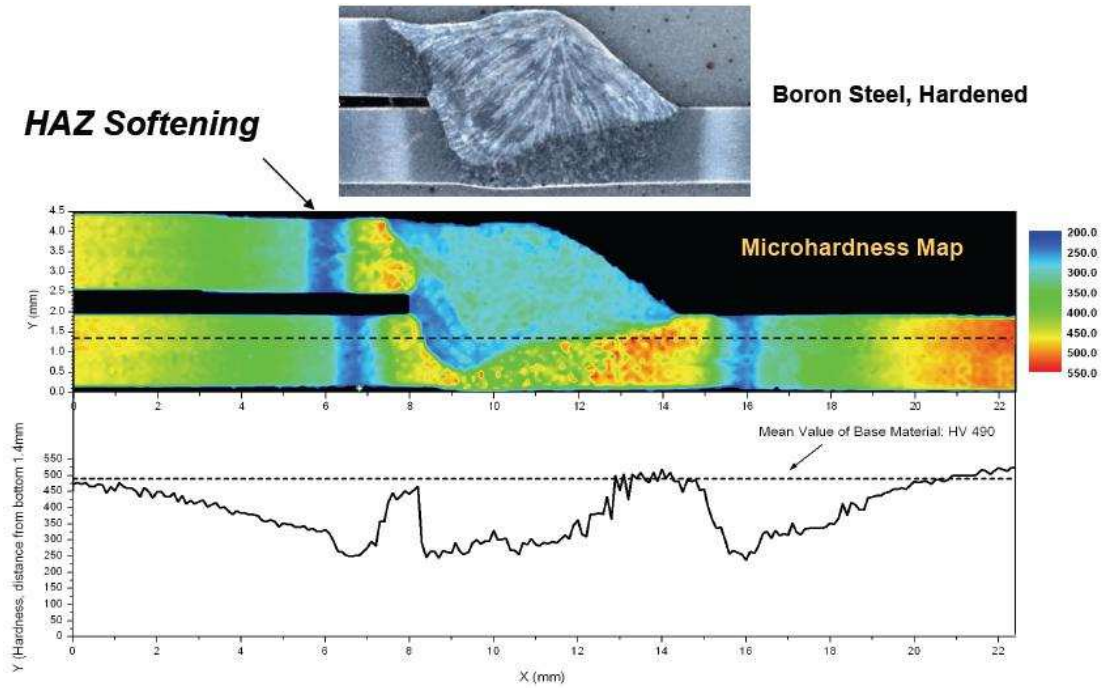


圖 16 硬化硼鋼焊道、熱影響區與基材之微硬度分布圖

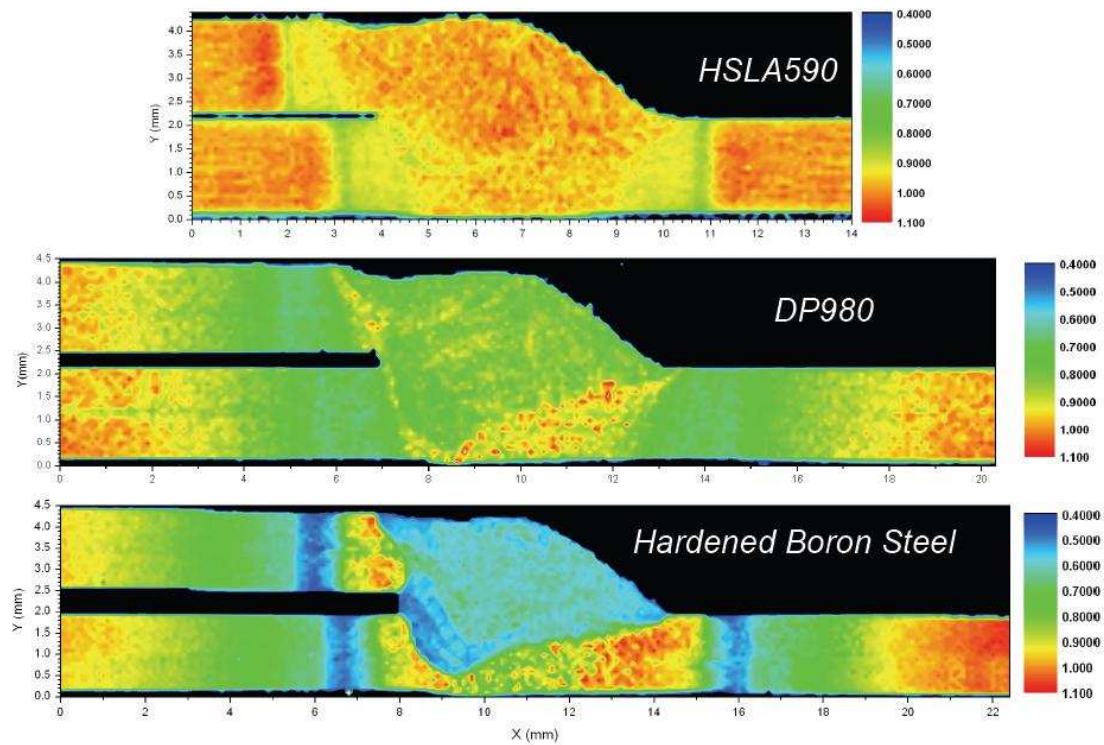


圖 17 硬化硼鋼與增強型高強度鋼之焊道、熱影響區與基材微硬度分布圖

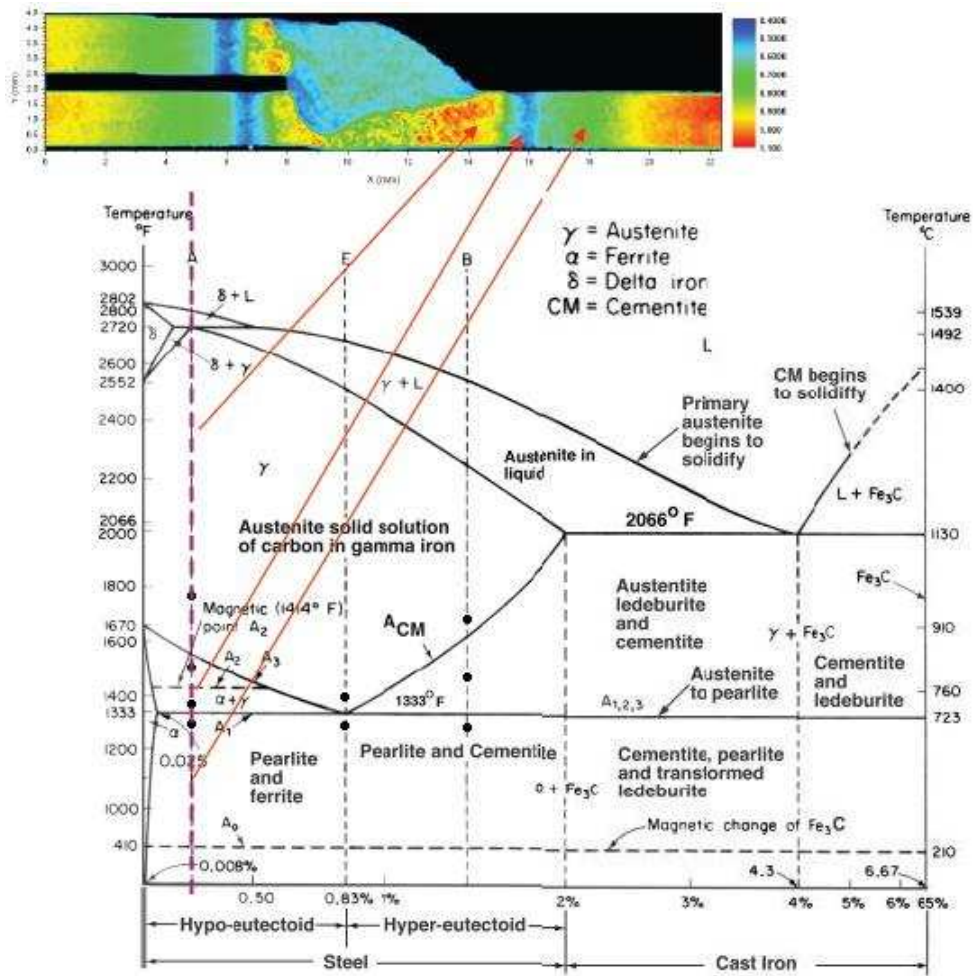


圖 18 三區域之微硬度分布試驗結果與顯微組織和相圖關係圖

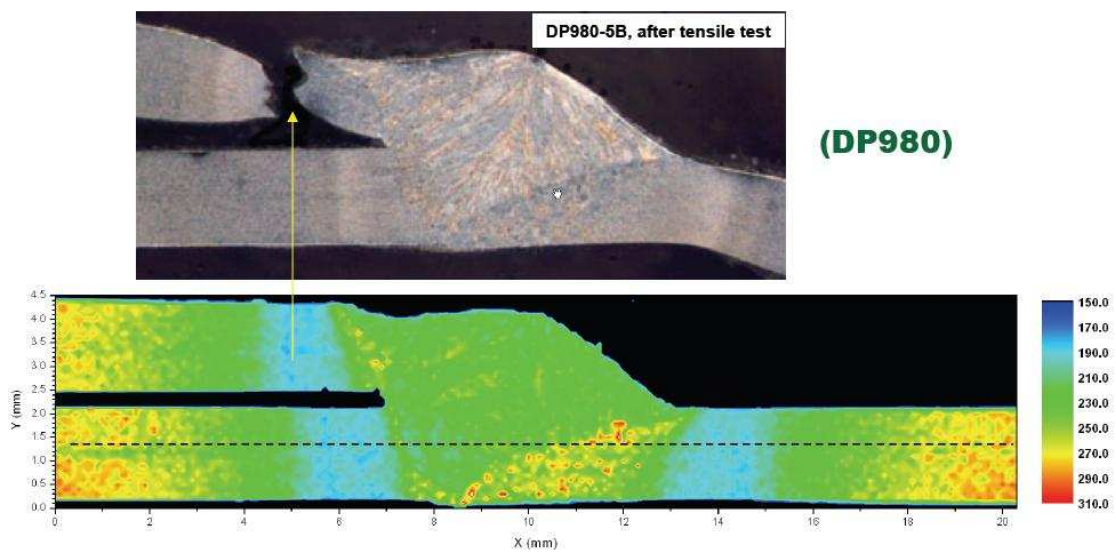


圖 19 斷裂處由 HAZ 之軟化區域斷裂

另外亦考量焊道之焊帽 (cap) 形狀對於疲勞壽命 (Fatigue Life) 之影響，如圖 20，改良後之焊帽可降低在焊接過程中材料之殘餘應力以及應力集中現象，提升疲勞壽命，如圖 21 所示。

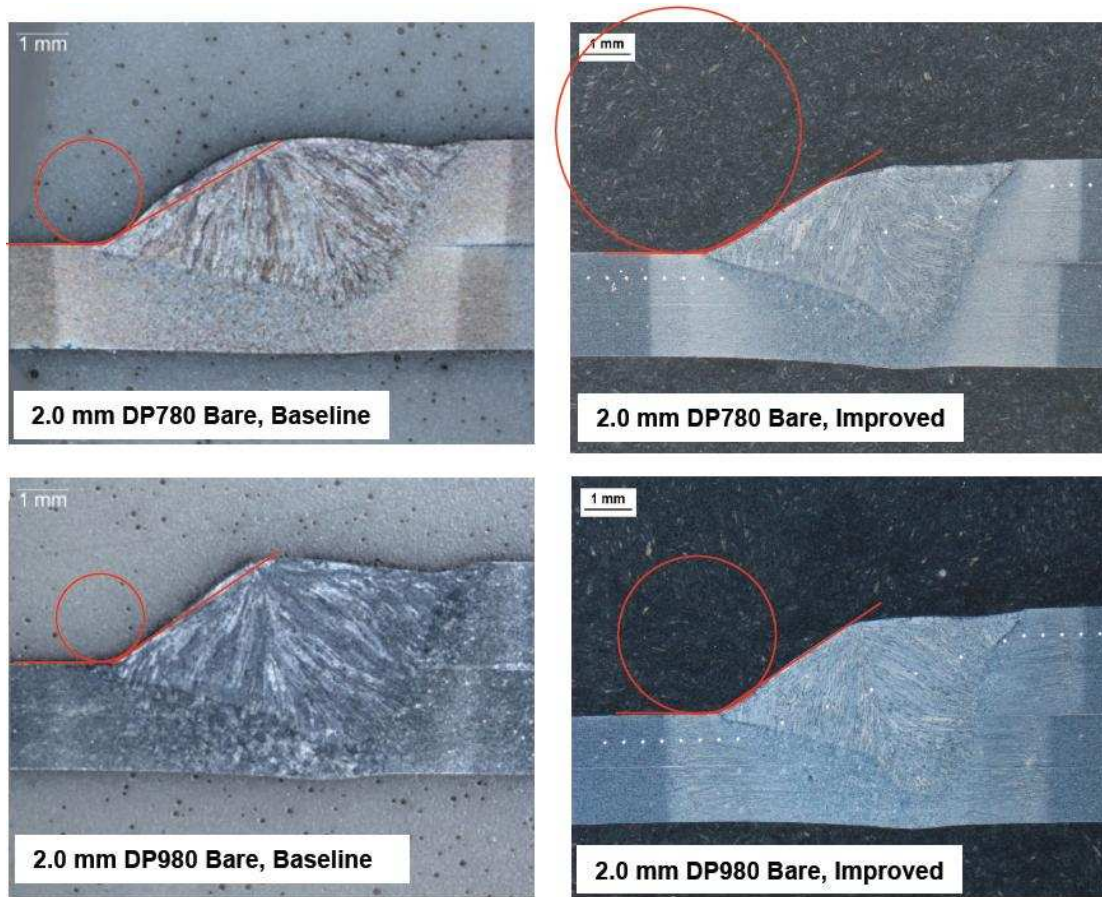


圖 20 焊帽形狀改良圖



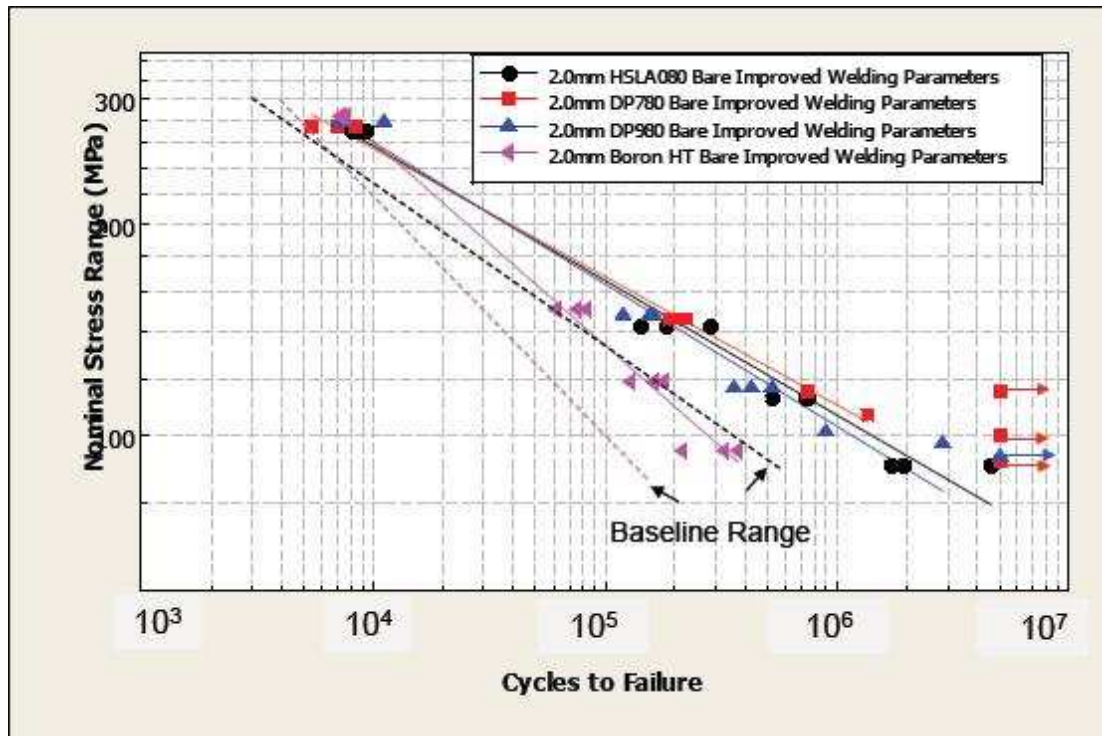


圖 21 改良後焊帽之疲勞壽命曲線圖

## 2.4 焊接資料庫與 APP 應用程式

本次參訪 EPRI 過程中，EPRI 展示出一款以智慧型手機應用程式為架構，新開發出來之 CSEF 焊接程序資料庫應用程式 (Welding Guide App)，以圖 22 美國某知名品牌智慧型手機畫面為例，該 APP 可選擇基材 (base metal 1 & 2)、焊接程序 (Welding Process)、產品型式 (Produce Form) 以及其他選項如尺寸 (Size) 等，選擇完畢後將提供焊接步驟、焊接溫度、填料金屬選擇、焊後熱處理溫度與持溫時間等等資訊，對於進行焊接現場作業人員可快速提供相關資料，十分方便。

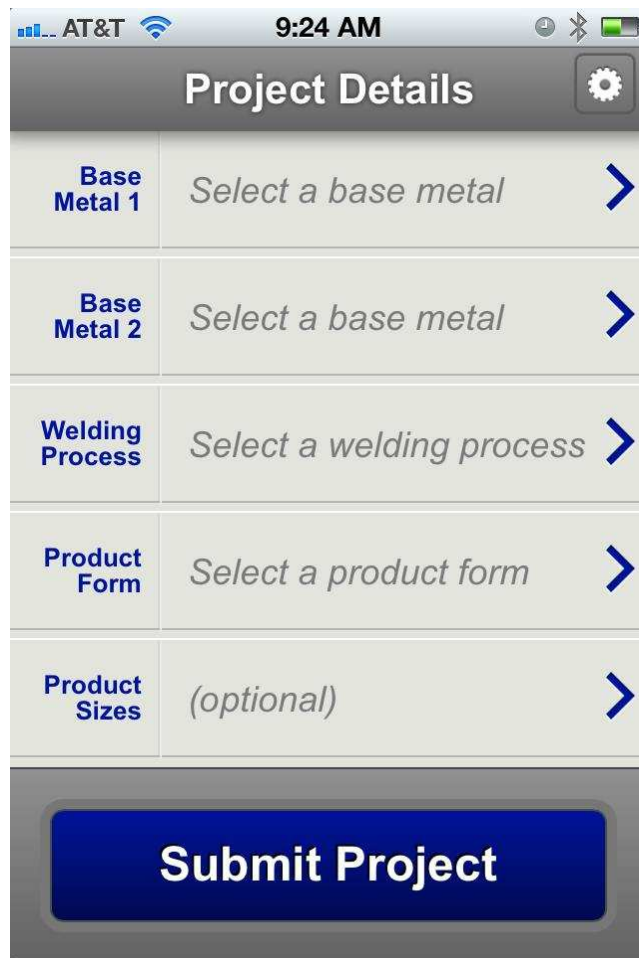


圖 22 EPRI 開發出之焊接程序資料庫應用程式主畫面

在此焊接 APP 以外，EPRI 亦在開發各式口袋書金屬手冊應用程式(Pocket-Handbook APP)、材料顯微組織資料庫應用程式與和 P87 計劃相關之應用程式等，皆為本公司日後可與 EPRI 關於 Fossil Materials 方面加強交流之重點。



## 2.5 參訪 ORNL 以及 EPRI 實驗室

本次參訪 ORNL (圖 23) 焊接工作組 (Processing and Joining Group) 及 EPRI (圖 24) P87 團隊之焊接實驗室 GMAW、GTAW、SAW、SMAW 等設備及焊接試樣 (圖 25~31)，另外還拜訪 ORNL 腐蝕科學與科技組 (Corrosion Science and Technology Group) 與腐蝕實驗室之高溫腐蝕、高溫氧化等實驗及觀察設備 (圖 32~35)，實驗室皆具備多樣化之先進、高精密度之實驗設備，以及可應用於現場工作之先進型攜帶式設備等，值得本公司借鏡，並可深入研究未來合作之可能性。



圖 23 美國橡樹嶺國家實驗室



圖 24 夏洛特 EPRI 第 2 館



圖 25 覆焊設備





圖 26 GMAW

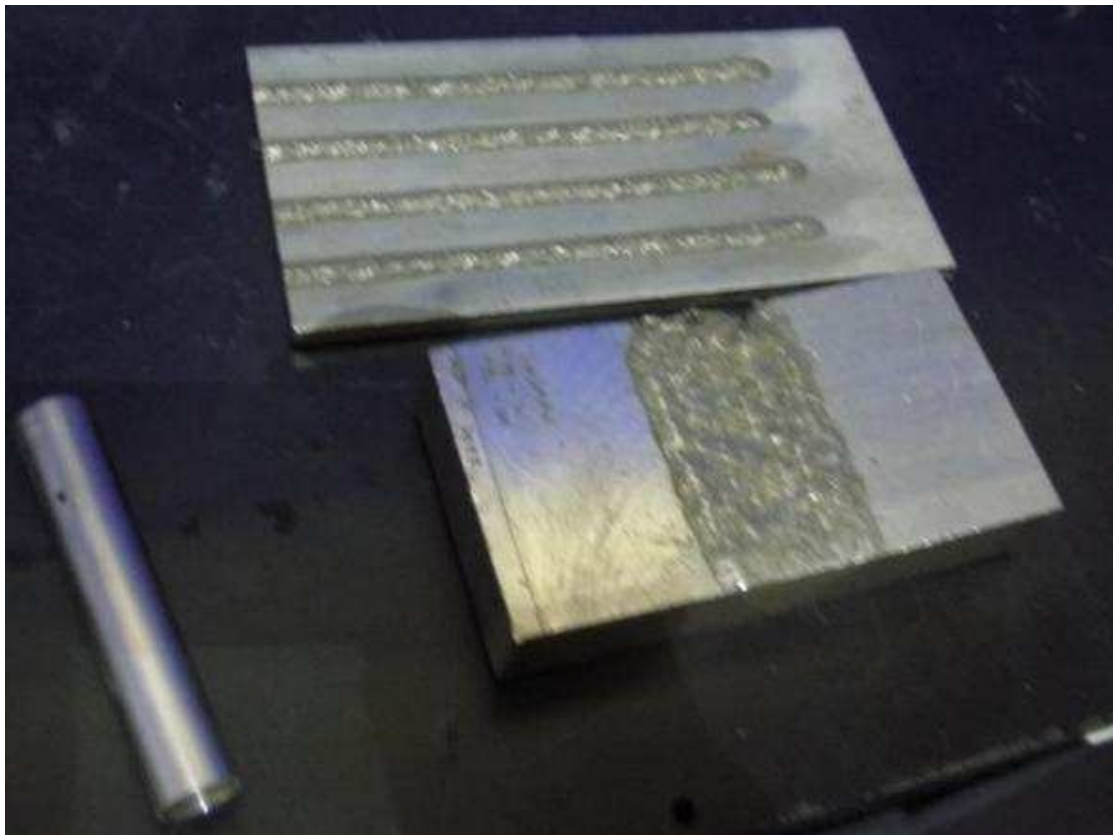


圖 27 摩擦焊接樣品



圖 28 自動焊接測試設備

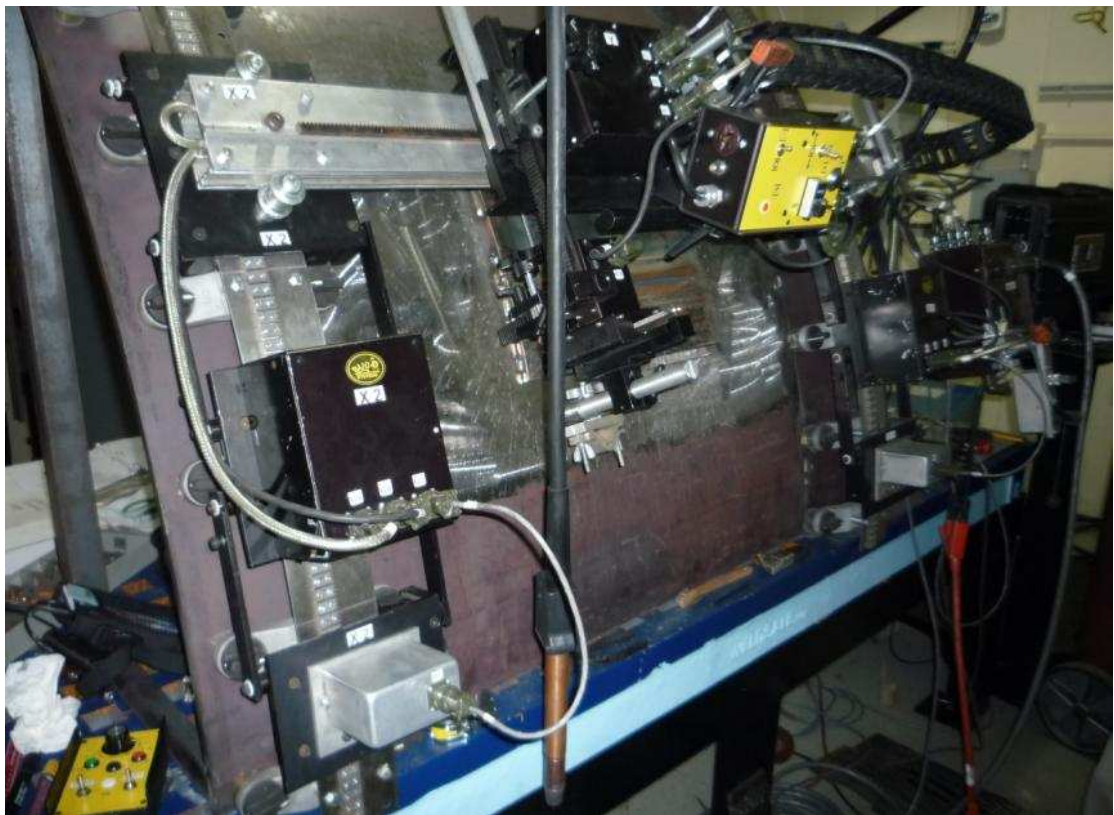


圖 29 自動焊接設備





圖 30 焊接拉伸試樣

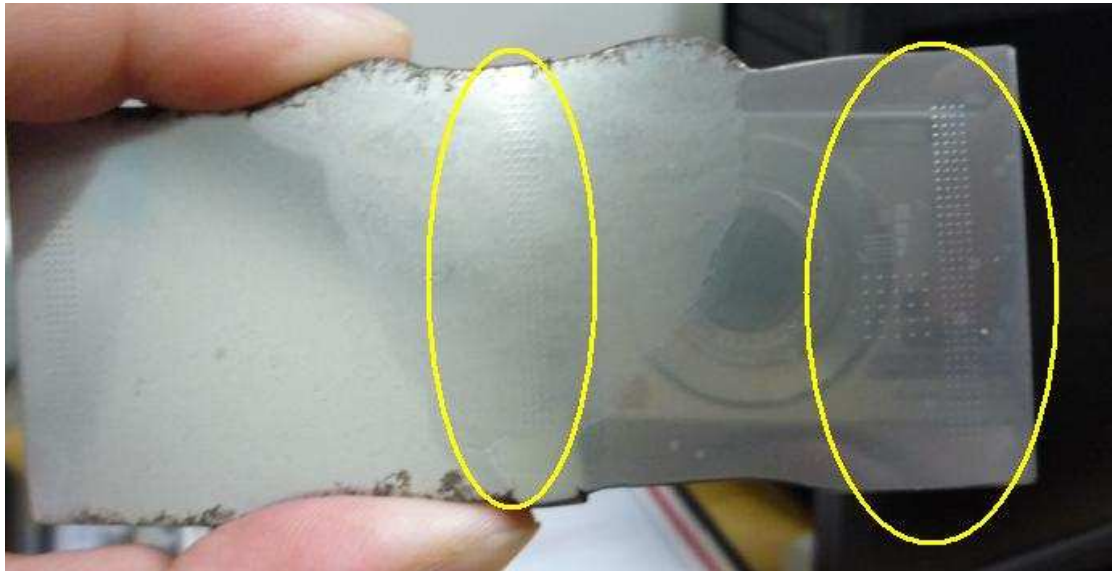


圖 31 焊接微硬度測試試樣

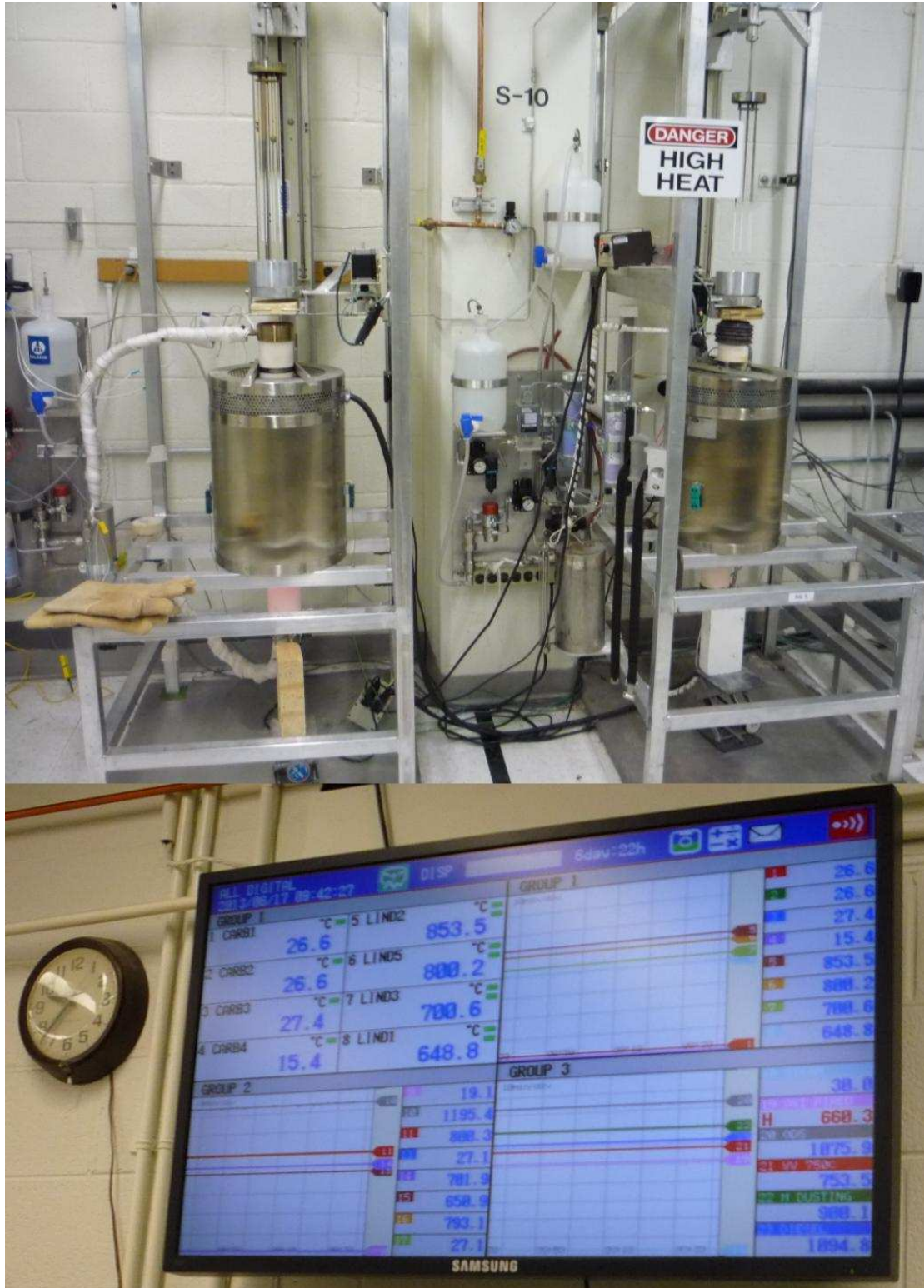


圖 32 蒸汽側高溫氧化測試與監控設備



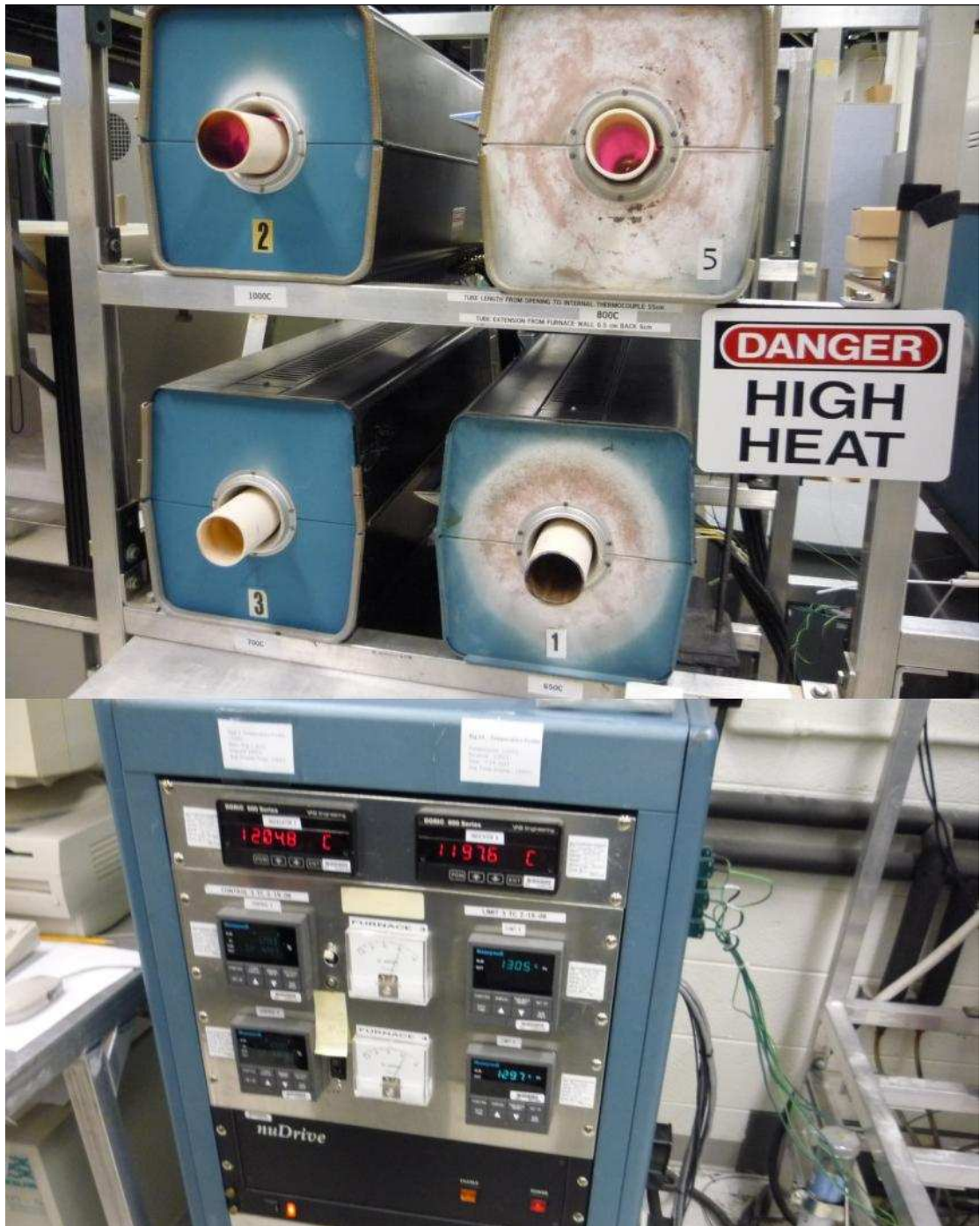


圖 33 管狀爐高溫氧化測試與監控設備



圖 34 高溫硫化測試設備

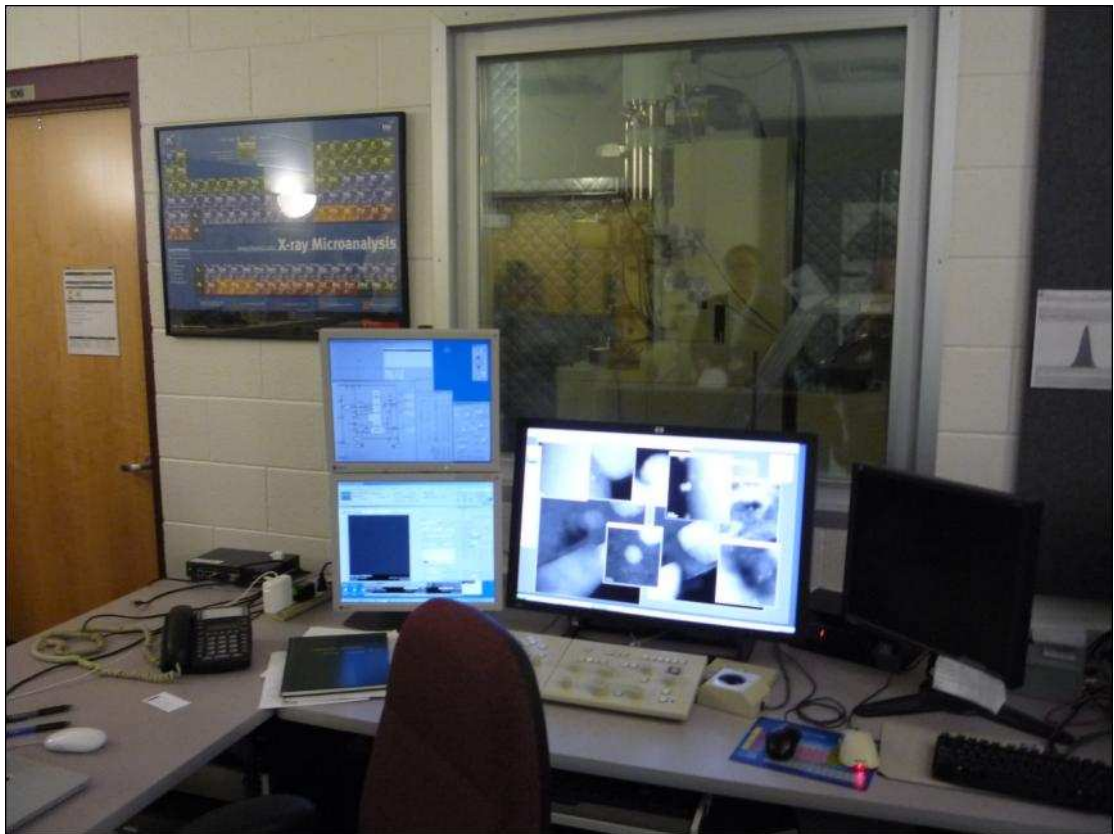


圖 35 腐蝕表面觀察設備 (TEM 與 FIB)





圖 36 與 ORNL 之焊接工作組組長馮博士 (Dr. Zhili Feng, 圖左) 與腐蝕科學與科技組組長品特博士 (Dr. Bruce A. Pint, 圖右) 合照



圖 37 與 ORNL 之資深工程師丹尼爾 (Daniel Purdy, 圖左二) 與伊莉莎白 (Elizabeth Owensby, 圖左三) 合照

### 三、心得感想與建議

1. 因 CSEF 部份鋼材未有規範存在，僅有生產材料之廠家提供之焊接程序可供參考，因此進行 CSEF 鋼材安裝施工時，使用之焊接條件與作業流程須詳實紀錄以備日後查考；另外，施工人員必須擁有特定之焊接證照（如焊工、熱處理等），或經本公司指定機構焊接訓練與實際試做，以確認其焊接工藝品質。
2. EPRI 已研發出焊接資料庫之智慧型手機 APP，涵蓋鍋爐、汽機等材料，可供現場施工人員或研究人員使用，其概念可供本公司參考；日後可藉由本公司自主、本土之資料，與 EPRI 或 ORNL 進行雙邊交流，以掌握最新國際研究成果。
3. 由於 CSEF 鋼材添加微量稀有合金元素作加強之基礎，與傳統碳鋼改變碳含量之行爲不同，故無論非破壞檢測或破壞性檢測法，檢測條件與方法與傳統檢測方法亦不完全相同，現今各大電力研究機構皆將 CSEF 鋼材檢測技術列爲重點研究領域，如 ORNL 已利用核能檢測方法應用 CSEF 鋼材檢測分析，建議本公司日後可針對此項目進行情資蒐集與技術交流。

#### 四、參考資料

1. J. Shingledecker and D. Prudy, 2012 Update version of Description of Past Research: Fossil Materials and Repair (Program 87), April 2013.
2. J. Shingledecker and J. Siefert, Creep Strength–Enhanced Ferritic (CSEF) Steel Welding Guide, 1024713 Final Report, December 2011.
3. Literature Review of Temperbead Welding Techniques and Considerations for Grade 91 Components, 1026505 Technical Report, October 2012.
4. J. Siefert and J. Shingledecker, Temper Bead Repair of T91 Using EPRI P87 Filler Metal, 1024022 Final Report, September 2012.
5. J. Parker, Investigation of the Creep Fatigue Behavior of P91 Steel, 1024718 Technical Report, January 2012.
6. Keely A. Wilson and J. Shingledecker, Effect of Chemistry Variations on the Microstructure and Mechanical Properties of Creep Strength Enhanced Ferritic Steels, Michigan Technology University and ORNL, 2012.
7. Keely A. Wilson and M. Santella, Study of Solid-State Phase Transformations in 9% Chromium Steels Under Dynamic Heating Conditions Using synchrotron Diffraction, Michigan Technology University and ORNL, 2012.
8. Zhenzhen Yu, Rozaliya Barbarbash, Oleg Barbarbash, Wenjun Liu and Zhili Feng, In-situ Probing of Microscopic Deformation Kinetics in Advanced High-Strength Steels, University of Tennessee, ORNL and ANL, March 2013.
9. Zhili Feng, Zhenzhen Yu, Xunli Wang, Ke An, Wei Zhang and Roger E. Stoller, Material Degradation Phenomena and Mitigation For Nuclear Energy Systems, ORNL, August 2012.