

主題視察報告

核四廠二號機反應器基座第一層 安裝銲接作業視察報告

報告人：曹松楠

原子能委員會 核能管制處

中華民國九十五年二月十日

目 錄

壹、前言	1
貳、工程及施工過程概況	2
參、視察作業執行情形	4
肆、結論	21
附圖	22
附件	

核四廠二號機反應器基座第一層

安裝銲接作業視察

壹、前言

核四廠一號機反應器基座廠製及工地安裝過程中，為避免類似錯用銲條品之質問題事件再次發生，並督促台電公司落實其改善措施與承諾，本會前曾兩次派遣視察團隊赴中船高雄廠，視察新亞公司及中船公司於反應器基座品質管制作業改善之實施情形，以及台電公司品保改善措施之執行狀況，並將工地安裝作業列為駐廠視察之重要工作項目之一。由駐廠人員配合工程進展持續性地了解工程現況、視察施工與品質管制執行情形，並於可能影響設備品質之施工項目或修理作業執行時，以及異常之施工品質出現時，派遣專人或視察小組至現場進行查核，或要求施工處擬定改善方案等之管制方式，達到確保施工及改善作業品質與設備安全之目的。對於一號機反應器基座工地安裝作業過程中發生之各項作業缺失及本會之視察發現，為避免類似之問題於二號機再次出現，並提升其施工品質及效率，本會曾多次於一號機相關缺失改善完成後，要求台電公司應持續針對曾進行過之安裝施工程序與設計變更等施工項目，進行作業內容之檢討，並將相關經驗回饋至二號機基座之廠製及工地安裝作業中。

依據 93 年 5 月本會視察團隊赴中船高雄廠視察二號機基座廠製作業狀況之結果顯示，台電公司及中船公司已將至當時為止之一號機基座廠製及工地安裝改善經驗，大部分反映於二號機基座廠製作業中。惟考量當時之廠製作業仍在進行中，除部分廠製改善措施尚未實施外，工地安裝製程亦未展開。因此為確認後續之廠製及工地安裝作業，台電公司已確依改善承諾落實執行，並促使其記取一號機工地安裝過程之失敗與改善經驗，並確實落實二號機之工地安裝製程。本會乃針對二號機基座工地安裝作業，參考一號機工地安裝作業之缺失及失敗經驗，選定重要及曾出現高缺陷率

之施工項目，配合基座工地安裝施工進程進行視察，以階段性了解其有關作業規劃及實際執行情形，期提升二號機基座之整體工程品質及施工效率。

依據前述視察規劃構想及一號機工地安裝視察經驗，二號機基座工地安裝工程，預計將針對下列：基座第一層外板垂直縱向鐸道(WN273~276)、基板與基座第一層水平鐸道(WN289~292)、基座第一層及第二層外板水平鐸道(WN 23)、基座第三層反應器 SKIRT SUPPORT FLANGE 熱處理、RPV SKIRT ANCHOR BOLT 螺孔鑽孔、RPV SKIRT SUPPORT FLANGE 平面加工及基座第四與五層間鐸道等之施工作業項目進行視察。原視察計畫規劃時考量二號機基座於今(94)年 5 月才開始進行工地安裝作業、一號機施工時程進展經驗及預定之完成時間(約 95 年第四季)後，本(94)年度將主要針對前述第一層部分之施工作業項目執行視察，至於其他階段施工項目之視察，則將於第一層安裝作業完成後，另依工程進展情形於今(94)年底或明年(95)年初開始陸續執行。

然由於施工作業持續受天候及第一層混凝土灌漿作業之影響，第一層及第二層外板水平鐸道(WN 23)至本報告完成之時仍無法進行，因此本報告將僅針對不包含第一層及第二層水平鐸道在內之基座第一層安裝作業之執行過程及本會視察之發現與管制情形進行說明。

貳、工程及施工過程概況

核四廠反應器基座為安全相關且須符合安全停機地震要求之結構，依龍門初期安全分析報告(PSAR)之規定其建造規範為 AWS D1.1。反應器基座主要功用係提供反應爐壓力容器、反應爐生物屏蔽牆、下乾井人員及設備進出通道、隔膜地板(Diaphragm Floor)、抑壓池水平逸氣管、爐底工作平台以及下乾井維修平台等之支撐。基座之外形為環形鋼結構物，其高 20.5 米，內環直徑 10.6 米(底部)，外環直徑 14 米(底部)，兩鋼環間之夾艙除抑壓池排氣管內之空間外，均灌置混凝土。基座之主要材料

為碳鋼(ASTM A572G50&G65)，因第一層外板與抑壓池接觸，基於防蝕考量，另選用 ASTM A533 Type B Class2 外覆 ASTM A240 Type 304L 不銹鋼之複合式鋼材。

反應爐基座屬核四廠核島區廠房結構工程之一部份，其製造及安裝工作亦屬核四廠土木結構主要承包商新亞建設公司承攬之範圍。由於新亞建設公司並無充分之大型鋼結構體銲接製造及安裝施工之經驗及能量，因此，另委由中船公司負責實際之製造及安裝工作。考量基座之尺寸量體龐大，整個施工過程係區分成廠製及工地安裝兩個階段。廠製作業於中船高雄廠進行，而為便於製造及日後之運輸作業，又再將基座分成五層(各層高度分別為：12.7 米、2.2 米、2.02 米、2.38 米、1.2 米)，每層又再區分為四等分(區塊)之方式分別進行製造。

核四廠二號機基座第一層於中船公司完成製造及假組立後，於 94 年 4 月 17 日出廠，並於 4 月 19 日經海運抵核四重件碼頭後，隨即再陸運移置於一、二機間之工地暫存場，並進行本會要求之第三者非破壞檢測抽檢作業。由台電修護處執行之抽測作業完成並合格後，隨即進行吊裝前整理準備作業，而後陸續於 5 月 5 日吊入反應器廠房中完成粗定位，並至 5 月 20 日完成最終之定位點銲作業。

定位完成後，施工處即正式展開二號機基座第一層之銲接作業準備作業，除依序進行內板垂直銲道、外板垂直銲道、隔板與基礎水平銲道、內板與基礎水平銲道、外板與基礎水平銲道及 309L 不銹鋼防蝕覆層等基座本體與附屬之人員、設備通道(外板部分)之銲接作業外，亦分別於 9 月下旬及 10 月中旬，於工地現場分別針對完成 309L 不銹鋼防蝕覆層後之外板垂直銲道及人員、設備通道等與基座外板有關銲道之銲後應力消除熱處理作業。

基座第一層於完成銲接及銲後應力消除熱處理作業後之非破壞檢測作業後，為配合施工處規劃之基座混凝土澆置計劃第一階段時程(依一號機之經驗其將分三個階段進行澆置)，第一、二層間之 WN23 銲道遂暫停進行銲接作業，待第一階段基座混凝土澆置完成後再進行。而為配合日後 WN23 銲道

銲接加熱及持溫之需要，第一階段基座混凝土澆置高程將僅澆置至 EL3500，而非基座第一層頂部之 EL4500，以預留加熱設備設置及避免混凝土過度受熱之作業與緩衝空間。

參、視察作業執行情形

二號機 RPV 基座第一層安裝自 94 年 5 月開始吊裝至 10 月底完成混凝土澆置作業，其間約歷時 5 個月之久，為便於說明整個安裝視察作業過程及執行情形，以下區分為：安裝前準備作業與吊裝階段、基座第一層垂直縱向銲道(WN273~280)、基座第一層與基板銲道(WN289~292)及基座第一層混凝土澆置等三個主要之施工與視察階段，逐一說明各階段視察作業執行過程、視察發現缺失與管制要求等之情形。

一、基座第一層安裝前準備作業與吊裝階段

二號機反應器基座第一層於 4 月 19 日自中船高雄廠經海運運抵核四工地後，施工處首先即依本會要求展開第三者銲道抽測準備作業。本項抽測作業係由施工處非破壞檢測股主導，並負責抽測計畫之擬定，而實際檢測作業之執行則由台電電力修護處負責實施。

依施工處非破壞檢測股所擬抽測計畫，其抽測比例為：UT 抽測 10%；MT 抽測 5%，符合本會至少 3%之抽測要求。此外為使抽測對象能涵蓋各類型與功能之銲道及兼顧滿足銲道數量及長度抽測比例之要求，再依下列原則選定抽測之銲道與檢測之數量及長度：

- (一) 應執行 UT 檢測之銲道，依組件銲道類型、銲道長度及銲道口數訂定，原則如下：若銲道長度大於 3 公尺（含），則每一條銲道均抽測 10%之銲道長度；若銲道長度小於 3 公尺（不含），則依組件銲道類型實施分類，同類型組件銲道抽測 10%口數之銲道。
- (二) 應執行 MT 檢測之銲道，依組件銲道類型實施分類(含加勁板及補強板銲道)，每類型組件銲道抽測 5%口數之銲道。

抽測作業自 4 月 25 日開始歷經 6 天完成，視察人員查核台電修護處檢測人員當時所提以抽測結果初稿，以及施工處非破壞檢測股所提供之廠製檢測紀錄，除均符合規範之檢測標準要求，亦與出廠之檢測結果相符。

於修護處抽測作業執行同時，施工處亦同時於二號機反應器廠房溼井區進行清潔與抽排水之作業，以及 750 噸吊車組立等之第一層吊裝作業準備。根據一號機之安裝經驗，因溼井區長期積水所導致之 SRV 管節設備與基座第一層泡水情形一直是個令人困擾而無法有效改善之問題，除影響施工作業之進行，並因泡水及銲渣飛濺等情形令設備器材品質有劣化之疑慮。所幸目前二號機之 SRV 管節與設備，施工處已決定於溼井封頂前才吊入，如此應能改善 SRV 管節與設備可能之品質疑慮。惟於視察人員至現場了解吊裝作業準備情形時，發現反應器廠房溼井內區域仍有因當時工地不斷之大雨，而有相當深之積水情形。令人對日後基座基礎銲道銲接作業之進行，以及將長期浸泡水中之基座不銹鋼覆層之耐蝕性均有所疑慮。經進一步詢問施工處人員有關溼井區積水清除與基座防水措施，了解溼井未來將會設置集水坑(需鑿開溼井底部，並由新亞執行)，在此之前積水仍需以人工進行清除。至於基座之防水措施，則將於距基座外板外側約 1M 處設置約 10 公分高之圍堰，並配合上方安置之晴雨棚，期減少雨水直接與基座底部接觸的機會。

吊裝作業於施工處完成溼井區積水清除，以及 750 噸吊車組立與勞委會檢查作業合格後，即於 5 月 5 日上午開始進行吊裝、定位之作業。視察人員至現場觀察 E11 區塊起吊及移入 RB 廠房定位等情形，發現現場施工處與施工廠商等均有派遣工作及工安人員在場監督吊裝作業之進行，且現場作業情形大致順暢，因此全部共 4 只之基座第一層區塊，順利地於當日晚間 6 時左右完成吊裝。

惟為避免吊裝作業進行時影響各基座區塊之移動，現場施工工作架並未事先搭設，因此當時僅能進行粗定位，而無法進行進一步之細部定位調整

作業，致無法立即將基座各區塊彼此點銲使之成為一體，以增加其穩定性。由於工作架之搭設及最終定位完成，據工作人員之估計約需三週，因此在此之前，各區塊間均僅各藉由兩支角鋼桿與 RCCV WALL 內之鋼架(Shoring) 連接之方式予以固定，以增加之穩固性。惟由角鋼桿之大小與基座第一層龐大之體積相較，當時視察人員對於基座第一層於地震狀態下之穩定性與安全性，有相當之疑慮，所幸至 5 月 20 日定位點銲完成之時並無意外發生。

二、第一層垂直縱向銲道銲接作業執行階段

基座第一層定位完成後，施工處即開始展開第一層垂直縱向銲道銲接作業之準備及銲前檢驗作業。經了解二號機第一層垂直縱向亦將依一號機基座相同之施工順序執行安裝作業，其順序依序為：內鈹銲道(E8016G)、外鈹銲道(E9016G)、外鈹銲道 309L 不銹鋼覆層及外鈹銲道銲後殘留應力消除熱處理等四項主要之施工程序。其中外鈹銲道 309L 不銹鋼覆層銲接及外鈹銲道銲後熱處理作業，原則上將待其他銲道執行類似作業時才一併進行。

於 6 月 2 日展開內鈹垂直銲道之施銲作業後，施工人員亦同時於 6 月 6 日展開外鈹垂直銲道銲接作業，而在本項施工作業期間，本會亦於 6 月 13 日依視察計畫派遣專案視察團隊，赴核四工地現場除針對台電公司品質稽查作業、廠製品質文件、後續廠製作業改善執行情形、垂直銲道現場施銲作業等之執行情形進行查核了解外，亦預為了解基座第一層與基板水平銲道施工規劃之狀況。以下摘述視察之發現及後續處理情形：

(一) 台電公司品質稽查作業

依台電公司之基座製造品質查證及改善規劃報告之承諾，台電核安處每季應至少執行一次，龍門施工處則每月應不定期查中船公司核四基座鋼構製造品管作業狀況至少一次。

經查台電核安處自 91 年 8 月至 94 年 2 月止，共計針對中船公司基座製造作業執行 15 次之稽查作業，其稽查頻率符合改善規劃報告之承諾。此外查閱台電公司之稽查報告，顯示其稽查作業內容亦符合改善承諾，針對中船

公司所承諾之改善事項進行查核。此外為了解與基座第一層有關之稽查改正通知之現況，視察人員亦再向台電核安處調閱其稽查改正通知之後續處理管制紀錄並進行查核，結果顯示，截止當時為止之所有稽查改正通知均已完成改善及澄清答覆在案。

至於施工處應執行之品質查核作業，依其紀錄顯示，自 93 年 7 月後，其已針對本會 93 年 5 月赴中船高雄廠視察，所發現之稽查頻率不足之缺失進行改善，每月均會派員至中船高雄廠針對基座製造作業進行品質查核一次。此外每次查核作業執行前，均會依所定查核範圍項目，擬定品質查核查對表並執行，顯示查核計劃作業落實。

針對品質查核發現所開立之矯正行動通知處理情形進行查核，當時雖僅有 7 件已完成結案，但對於未結案之案件，均會定期改善情形之追蹤與管控作業。

(二) 廠製品質文件查核

本項視察作業主要針對廠製品質文件中之銲接作業檢驗表、熱處理作業紀錄及非破壞檢測紀錄等進行查核，查核情形簡述如下：

1. 二號機反應器基座廠製銲接作業檢驗表

分別查核中船公司及台電公司之銲接作業檢驗表，除查對其使用銲材、接頭形式、所用銲接程序等基本資料與圖面是否一致，以及現場查證項目，如接頭裝配、預熱溫度、層間溫度、銲道施銲完成度、外觀目視檢測等是否均執行完成外，亦將各銲道是否均完成其應執行之非破壞檢測與銲後熱處理，以及有修補之銲道檢驗作業情形是否完整等，列為查核之重點，因此查核執行時，亦針對查核所及銲道之非破壞檢測紀錄與熱處理紀錄進行延續性之查核，以了解品管檢驗作業是否完整執行。本項查核項目共計抽查 19 條銲道，結果除發現在 94 年以前之銲接作業檢驗表上之銲冠檢查項目，有再檢討改善需要之情形外，並未發現有其他不符合及異常之狀況。

對於銲接作業檢驗表上銲冠檢查項目，有兩個檢驗標準(即(Max) 3/32" 及 1/8" 兩項)，但因 AWS 3.6.2 節規定對接銲道的銲冠最大為 1/8"，因此多

數時候檢驗人員均未勾選合格標準應為 1/8”，而任其空白之情形，雖然施工處人員告知，此缺失已在 94 年經修改檢驗表而予改善，但對 94 年以前未據實填寫的紀錄表則未進行清查改正，對此當時即請施工處人員針對此一瑕疵進行改善。

2. 熱處理紀錄文件

對於熱處理紀錄，視察人員主要針對外鈹有關鐸道是否均以完成鐸後熱處理，以及熱處理之溫度、時間與熱電耦佈置與校驗等是否符合法規要求等進行查核，主要查核結果敘述如下：

- (1)查閱包含外鈹周向鐸道、上下兩端鐸道(即 WN23 及 WN289~292) 絕熱覆層及安全釋壓閥洩壓管 (SRVDL) 支撐板鐸道等之熱處理紀錄，其熱處理之升、降與持溫溫度及時間均符合 AWS D1.1 之要求。
- (2)各熱處理紀錄均附有測溫熱電耦之佈置圖，再參考其溫度記錄紙帶上之溫度紀錄，顯示熱處理時工件之溫度均勻情形，符合 4.6 米間距內之溫差不得大於 140°C 之法規限值要求。
- (3)發現部分熱處理紀錄係以總表之方式將接受熱處理之鐸道予以紀錄顯示，而未於個別熱處理紀錄中明確記載該次熱處理作業之對象鐸道為何。例如熱處理報告編號「機械 PWHT-93-13、14、15、16」等四份，均附同一份「附件#2 RS-11 熱處理鐸道編號」，該份熱處理鐸道編號表包括 RS-11 的 1P01、2P01、3P01、4P01 等四塊鋼鈹上所有的鐸道(如附件一)。針對此一情形，經視察人員討論後，認為為避免混淆之可能及提高報告之易讀性，建議應分別列出鐸道編號，不要將無關的鐸道亦填寫在一起。

3. 非破壞檢測紀錄

針對非破壞檢測紀錄的查核結果顯示，鐸道應受檢測之項目及抽測數量均符合規範之要求。而針對其中之覆層鐸道超音波檢測，視察人員有以下討論建議：於查核 WN001~3 及 WN292 鐸道之 E309L 覆層鐸道超音波檢測紀錄(報告編號：GWLM-U-0941-20&9302-04)時，發現其使用之檢

測探頭為 5MHz 之雙晶直束探頭，由於其檢測程序(QTP-2C)係依據 ASME 法規所編寫，而 ASME 法規中卻有超音波檢測之探頭頻率應為 2.25MHz，如要使用其他頻率之探頭時應證明該探頭具有相當或更好之解析力之規定，因此視察人員建議宜依 ASME 法規之要求進行探頭之能力驗證，以避免爭議。對於此項建議，施工處已予以採用並執行能力驗證作業完成。

(三) 後續廠製作業改善執行查證

本項視察作業主要針對一號機基座工地安裝作業執行期間，因後續設計變更、實際施工限制與需要、以及本會視察發現等因素，導致需進行製程變更，以利二號機基座工地安裝作業執行之項目進行視察。相關之視察項目，除前述之外鈹上下兩端鐸道(即 WN23 及 WN289~292) 絕熱覆層及安全釋壓閥洩壓管 (SRVDL) 支撐板鐸道外，尚有各區塊水平貼鈹鐸道、基座廠製及工地組裝鐸道相關文件轉換機制，以及基座第一層 Dwg. No. C237B-244-A026 的 Section-Q 混凝土澆置之需求之鋼構設計配合改善現況等。依查核結果顯示其相關作業除基礎鐸道之修補程序仍未執行外，其餘各項廠製作業改善作業均已依承諾執行完畢。

(四) 現場巡視

針對垂直鐸道之鐸接作業施工處係以 6 名鐸工分兩組同時對對向鐸道進行施鐸之方式進行，視察人員至現場巡視時，施工作業已完成內鈹之背鏟作業，正進行外鈹之正面鐸接作業。視察人員於分別查核鐸工人員資格、鐸材使用及鐸接預熱持溫等之情形均符合要求後，亦針對現場作業環境進行巡視，結果有以下發現：

1. 底部之擋水圍堰已依規劃位置及高度設置。
2. 在鐸接防火保護方面，發現多數逸氣管(VENT PIPE)之水平歧管均未以防火毯包覆保護，以及外鈹不銹鋼覆層保護塗料因泡水脫落，致現場不時可見有鐸渣直接掉落其上，損害器材品質之情形出現。本項缺失經告知施工處後，其已對水平逸氣管部分之缺失進行改善，至於外鈹不銹鋼覆層保護塗料脫落，則未見有所改善。

3. 於巡視過程中發現於基座 RS13 及 RS14 區塊頂部外鈹相接處，有一相當明顯之階段狀落差出現，此一落差之高度經量測約在 1 公分以上。由於懷疑此一情形可能應是吊裝定位出現誤差所致，而非基座有變形所造成，視察人員遂再進一步針對底部之情形進行檢視及量測，發現基座底部相應位置處亦有約略相同之懸空量，因此初步確認原有之看法。針對此一情形與施工人員討論，其認為仍在可處理調整之範圍內應不會對施工及最後之品質有所影響，只是處理費時些。惟視察人員鑑於底部因而產生之大量空隙，恐不利於銲接作業之施行，仍請注意並能進行適當之處理。

(五) 基座第一層與基板水平銲道施工規劃

由於基座第一層外鈹材質為 A533，依基座製造法規 AWS D1.1 之規定，其於銲接後需執行銲後熱處理，以消除因銲接作業而產生之內部殘留應力，此一銲後熱處理之溫度依法規約為 566~593°C (1050~1100°F)。然至一號機基座第一層垂直銲道現場施工作業完成後，施工處與奇異公司才於基座基礎銲道安裝施工程序之再檢討確認過程中，發現 ASME SEC. III DIV. 2 CC-3440 規定混凝土圍阻體在非正常狀態、短期間其所承受溫度有不得超過 177°C (350.6°F) 之限制，因此原訂於基板與基座第一層外鈹銲後，直接針對該銲道進行熱處理之施工程序設計將不可行，需重新進行規劃。

因當時第一層基座之垂直主銲道均已施銲完成，原分散成 4 個區塊之基座，已結合成一體，考量重量及搬運之安全之現實狀況，已不容許再將其吊出並回廠進行修改加工，因此本會視察人員雖然在修改後之一號機基座基礎銲道安裝施工程序完成後，評估其有幾乎不容許任何施工作業缺失，而若出現需進行熱處理之缺陷修補作業時，將形成十分棘手之工程難題，然施工處並未事先研擬可行之補救措施等之工程施工風險及疑慮等問題，然在考量當時工地現場環境及作業限制等狀況，並基於尊重施工權責與工程技術專業判斷等因素下，在確認有關施工程序均能符合法規及安全要後，視察人員僅以建議方式，提醒施工處注意前述工程施工風險及疑慮等之可能影響。而在後續一號機基座安裝施工之執行過程中，亦曾多次就現場視察發現所得提出改

善建議。

針對本會所提建議，依施工處所提二號機基座第一層底部與基板銲接順序(如附件二)，其已採納：參考核二廠反應器基座施銲方式，以多銲工同時對稱施銲、於銲接過程中持續加熱，以維持適當之銲接持溫與溫降速率，以及設置檢測基準線，以提供檢測瑕疵更準確之定位依據等製程改善措施建議，惟其仍未針對銲接缺陷之修補程序進行研擬。

三、基座第一層與基板銲道(WN289~292)銲接作業執行階段

於本會視察團隊完成基座廠製品質文件，以及包括安全釋壓閘洩壓管(SRVDL)支撐板、第一層外鈹底部絕熱覆層等在內之廠製改善作業執行結果與外鈹垂直銲道銲接作業情形之現場查核視察作業後，施工處即於完成外鈹垂直銲道銲接作業後，自6月21日開始，依二號機基座第一層與基板水平銲道施工規劃與銲接順序，陸續展開隔鈹、內鈹與基礎水平銲道之銲接作業。而鑑於基座第一層外鈹與基鈹銲道之重要性及對現行施工程序風險之疑慮，於基座第一層安裝視察計畫中即將外鈹與基板基礎銲道列為視察之管制之重點，因此於7月12日第一層外鈹與基鈹基礎銲道現場施銲作業展開之前，本會亦第二次派遣視察團隊赴工地，針對作業準備、施銲作業與順序及現場管制作業等進行現場查核，期確保相關作業執行程序及品質符合所訂順序與法規規定要求。

於赴施工現場進行作業查核前，為確認施工處最後定案之施銲作業程序及作業準備情形，視察人員曾先請施工人員針對施銲作業程序及預計之施工時程進行說明，結果在施銲作業程序方面，發現除因銲工人員不足及考量銲工體力負荷等原因，原訂以8名銲工分兩班，同時持續對稱施銲至完成之施工方式，將改為6名銲工同時對稱施銲且每日最多施銲12小時外，並無再改變之情形，惟整個施工將拉長為8天以上。而為使參與本項作業之銲工更明確了解施銲時之作業順序及要求重點，施工處及中船公司亦曾於7月11日召集所有參與之銲工進行再教育，分別由施工處及中船公司工程管理人

員，再次說明基礎鐸道作業完善之重要性及作業之順序與重點(如附件三)。

於確認有關施工順序及時程後，視察人員即會同施工及品質檢驗人員赴現場，針對鐸接準備及鐸前檢查執行情形進行視察，視察結果說明如下：

- (一) 抽查發現基礎鐸道在約 20° 左右各 75mm，總長度 150mm 之區域，其背襯板與底板間的間隙大於 5mm(約可插入一支石筆之高度)。於 180° 左右各約 300mm，總長度約 600mm 之區域，背襯板與底板之間隙大於 3.2mm，(約可插入一支鐸條)。此間隙產生之原因，依日前 R13 與 R14 區塊間出現高低階梯差之情形判斷可能是第一層基座安裝時有高低差或底板不平所產生。雖然背襯板與底板間之間隙，依圖面應為零，惟考量與基座龐大之體積與高度，前述發現之間隙誤差情形應是在可接受之工程誤差內，此外雖然這些位置之間隙情形已無法於鐸前改善，使其符合圖面要求(因部分隔艙已無法進入且此時已不可能再將基座吊起，以進行背襯板之整修)，惟所幸可利用較細之鐸條深入間隙內，使熔填之金屬得以將間隙予以填充以權充作背襯，因此建議施工處於進行第一道熔填鐸接時，應使用 3.2mm 鐸條並儘可能深入間隙內並小心鐸接，以將此道鐸道用作後續鐸接熔填金屬之背襯。
- (二) 發現部份鐸道的根部有鐸渣或金屬塞入鐸根及背襯板與底板間間隙之情形，懷疑是鐸道開槽進行研磨清潔前及進行時，未事先及隨時將其中之鐸渣或金屬清理乾淨，致將鐸渣或金屬卡入間隙中。本項缺失經告知施工人員後，再檢查時發現塞在間隙中的鐸渣或金屬已遭清除。
- (三) 垂直鐸道和底板的水平鐸道相交處，於垂直鐸道的下方有口小內大之凹洞，如未將其磨開，鐸接水平鐸道時可能無法將該凹洞填補。此一情形經告知現場人員，再檢查時工作人員已將該凹洞附近的鐸接熔填金屬磨除，將該凹洞打開。
- (四) RS13 區塊不銹鋼覆面上發現有一道弧擊產生的疤痕(長度約

50mm)，乃當場告知現場人員，應將該疤痕磨除並進行PT檢測。

(五) 針對 RS13 和 RS14 區塊因安裝時對準不精確，致使與基鈹外鈹鄰接部位高低差太大之情形，施工人員已派鉚工進行補鉚、研磨後，已較為平順。

(六) 規劃之檢測基準線，已依規劃方式於鉚道上方 10 公分處劃線繪製完成。

(七) 整體而言除鉚接開槽面仍可見有銹蝕外，鉚道附近之區域亦可見有髒物及積水之情形，顯示鉚道之清潔度及鉚接環境仍未完成。

由前述各項之現察發現顯示鉚前之準備作業仍未儘完善，並符合規範要求之水準，因此，施工處品質課人員當即要求施工人員再進行改善，並於改善完成後再重新檢驗。

針對第一次鉚前檢驗之缺失，施工人員經一日之努力，將其改善完成，並通過品質人員之檢驗後，鉚接施工作業隨即展開。自鉚接作業開始後，視察人員即持續至作業現場查核鉚工施鉚作業情形及施工檢驗人員檢驗作業執行情形，此時之查核重點主要針對鉚接預熱及層間溫度等鉚接溫度之控制情形及鉚材使用情形等，相關查核結果摘述如下：

(一) 由於鉚工係以每 40~50 公分長為一段鉚道長度之方式，逐段進行鉚接作業，因此為確認鉚工是否依要求，於進行底部第一道熔填鉚接時均使用 3.2mm 直徑之鉚條進行作業，視察人員於視察期間曾多次針對底部第一道熔填鉚接時之鉚材使用情形進行查核，查核之結果顯示鉚工均能依要求執行。

(二) 施鉚時使用瓦斯噴燈作為鉚接預熱之熱源，由於鉚道附近未進行保溫，因外鈹鋼鈹之面積大，散熱迅速，致預熱溫度達到後，鉚工除需儘速進行鉚接外，同時亦需以小火加熱鄰接鉚道，以減少熱損及溫降速率，並隨時測量施鉚鉚道區域之溫度，以於溫度過高或不足時，停止電鉚或再加熱至層間溫度範圍(150°C~177°C)後，再繼續鉚接。由於這此動作，明顯將會導致鉚工鉚接效率之降低，因此視察

人員除於發現鐸工有未落實此一作業要求之情形時，即要求施工處督促改善外，並建議鐸工應自行攜帶測溫設備以便量測作業之隨時進行。另，對於無測溫設備之施工處現場檢驗人員則要求其應配備，並進行一定頻率之查核，以督促中船公司及鐸工落實此一作業要求。對此一作業缺失，稍後施工處已要求中船公司現場檢驗人員每小時至少需查驗層間溫度一次並留下紀錄。

後續施鐸作業至7月16日時，由於受海棠颱風來襲大雨影響，原應持續進行鐸接並保持加熱持溫之作業程序無法持續，因此宣告暫停。而於7月25日完成現場復原作業後，才又恢復施鐸，並於7月29日完成外板基礎鐸道本體 E7018 填料部分之施鐸作業。

由於反應器基座所在之乾、溼井區域尚未封頂且未設置抽排水設施，致海棠颱風來襲期間有大量之雨水進入並積存其中，考量浸泡其中之第一層外板與基板鐸道恐亦難避免生銹之結果，原已完成之檢驗作業應視為無效，而需於鐸接作業重新開始前，再重新執行檢驗作業，以確認是否有損害之狀況或已移除。對此一情形，本會駐廠視察人員曾於7月22日至工地巡視時，要求施工處在進行二號機基座外板基礎鐸道後續鐸接前，應再重新執行鐸前檢查作業，以確保鐸接面之狀況符合清潔、無銹之要求。惟視察人員於基座第一層外板與基板鐸道之後續鐸接作業再開始後，再至工地現場查核其鐸工人員資格情形(此時鐸工已有異動)、鐸條使用及鐸接溫度管控等之執行情形後，於查核檢驗紀錄時，發現7月25日進行後續鐸接作業前，雖中船公司已有再執行鐸前(鐸接面)檢驗作業(如附件四)，然施工處工程主辦單位人員及品質課檢驗人員，均未於重行鐸接前進行此項之再檢驗作業。對此視察人員除當即請施工檢驗人員改善，並請其日後於有類似情形時，應主動通知品質課檢驗人員到場執行再檢驗外，亦向品質課檢驗人員表達有關之品質疑慮請其日後能對長施工期之鐸道施鐸過程中，至少能於有可能影響其施鐸品質之狀況發生後再進行複查，

以確保作業品質。

7月29日完成外板基礎鐸道 E7018 鐸材部分之鐸接作業後，施工人員即開始進行此部分鐸道表面之研磨作業，以備後續非破壞檢測及 309L 不銹鋼防蝕覆層施鐸所需。於研磨作業開始後之隔日，視察人員即至現場巡視作業情形，結果發現研磨作業人員操作研磨砂輪機時，砂輪片時有碰觸損及溼井不銹鋼覆層，以及垂直插入 E7018 鐸道將其切除之情形，為避免減損不銹鋼防蝕覆層及外板基礎鐸道本體(即 E7018 填料部分)之厚度，當時即告知恰好到場巡視之施工處主辦單位主管請其注意改善。

外板基礎鐸道 E7018 鐸材部分完成研磨作業後，施工處即開始針對外板垂直及基礎鐸道之鐸道本體部分進行非破壞檢測之作業(UT&PT)。在檢測過程中視察人員曾多次赴現場視察檢測作業情形，結果大致良好。惟在觀察檢測作業之執行過程中，視察人員首先發現外板基礎鐸道本體(即 E7018 部分)有明顯過低於外板 304L 不銹鋼覆層之情形，因而懷疑其厚度可能不足，對此視察人員仍決定進行抽測，抽測結果發現鐸道本體普遍有低於 304L 不銹鋼覆層約 8~11mm，大於依圖面計算所得之 4.2mm 限值。此外在檢視圖面查證鐸道尺寸之過程中，又發現於廠製階段施作之外板下部 309L 不銹鋼防蝕覆層有遭磨平之狀況，致使其厚度由 6.1mm 降為 4.2mm。

針對所發現之前述 E7018 填料厚度小於外板板厚及不銹鋼防蝕覆層遭錯誤磨除致覆層厚度等尺寸不足問題，視察人員即向施工處工程主辦人員反映並討論澄清疑慮之處。有關討論與疑慮情形及改善修補措施敘述如下：

- (一) 針對 E7018 填料厚度小於外板板厚之情形，施工人員說明此為其有意如此者，其目的在於確保 309L 不銹鋼防蝕覆層之厚度能大於 6.1mm 之最小設計值。此外施工人員亦提出數份之鐸接程序檢定紀錄(PQR)，說明 309L 不銹鋼填料之材料強度並不低於 E7018 填料之強度，如此最終之鐸道整體強度應不致有不足之疑慮。對此視察人

員表示，由於施工圖面有關此防蝕覆層之英文註記為”Clad”（詳附件二），而依一般之工程技術知識認知其是不具強度、無法承受應力之材料，設計分析時通常不將其納入分析計算之考量內，因此原則上不被認為是結構材料厚度之一部分。

- (二) 由施工處所提供做為支持變更後銲接程序之數份 PQR 紀錄，經視察人員共同討論後，雖不否認 309L 不銹鋼填料之材料強度並不低於 E7018 填料之說法，惟視察人員認為以施銲目的而言，已有導致目前之銲接程序是否適用之疑慮，其中最需加以澄清者為，原 PQR 紀錄中測試試片之取樣方位，是否足以做為支持變更施銲目的後之銲接程序可用性之證明。
- (三) 針對前述兩項討論後之疑慮，為進一步了解設計者之設計考量及明確有關之技術邏輯，視察人員曾陸續要求施工處，請設計人員進一步提供 Clad 之設計功能之澄清說明，以及所提 PQR 紀錄可做為將進行銲接程序可用性證明之技術邏輯，並在與設計者討論後，提供正式之澄清說明文件供本會參考。
- (四) 經持續與施工處人員討論及提出有關之疑慮後，對外鈹基礎銲道 E7018 填料尺寸不足問題，施工處決定回歸施工圖面之要求，針對不足之處進行補銲。
- (五) 至於有關外鈹不銹鋼防蝕覆層遭磨除疑慮問題，經再清查紀錄及現場檢視，確認此該不銹鋼防蝕覆層確已遭不慎磨除後，施工人員即表示將進行補銲。惟為避免銲後熱處理之困擾，視察人員建議應注意補銲使用之銲條尺寸，避免銲接熱影響層深及外鈹 A533 材料部分。

於確定處理對策後，施工處除即暫緩 309L 不銹鋼覆層之施銲，並針對上述兩項銲道尺寸不足問題擬定修補程序，其要點如下：

- (一) 以直徑 2.6mm 之 309L 不銹鋼材質銲條，針對外鈹 309L 不銹鋼覆層

進行補鐸至要求之厚度。

- (二) 以直徑 4.0mm 之 E7018 鐸條，針對基礎鐸道 E7018 填料尺寸不足之部分，補鐸至要求之厚度尺寸。
- (三) 補鐸完成後重新針對前述補鐸之部分，執行規範要求之非破壞檢測項目。

由於考量基礎鐸道施工處已稍早前完成 E7018 填料部分之鐸接檢驗作業，以及為確保包含外鈹 309L 不銹鋼覆層施工在內之品質文件完整，並做為日後基礎鐸道 309L 不銹鋼覆層厚度之量測評估基準，視察人員於了解補鐸程序後，除曾要求施工人員應對各鐸補程序依品管要求進行管制檢驗作業外，對於這兩項鐸補後鐸道之最終尺寸亦曾特別要求施工人員需進行檢測並留下紀錄。對於這些要求，施工人員亦承諾會於完成鐸補作業後，將相關文件整理並提送本會。

9 月 7 日基礎鐸道 E7018 填料及外鈹 309L 不銹鋼覆層之補鐸鐸道完成後，視察人員於 9 月 12 日至現場巡視基礎鐸道 309L 不銹鋼覆層施鐸作業之時，亦同時針對已完成之基礎鐸道 E7018 填料及外鈹 309L 不銹鋼覆層之補鐸鐸道進行檢視，並向現場中船監工人員詢問施鐸作業之過程，了解是否與日前提出之修補程序一致。

根據現場中船監工人員之說明，E7018 之補鐸鐸道係使用 $\Phi 4.0\text{mm}$ 之鐸條針對厚度不足之處補鐸 5 道 3 層，根據鐸接程序書之資料， $\Phi 4.0\text{mm}$ 鐸條施鐸之鐸道厚度約在 3mm 左右，由於日前抽測之結果顯示鐸道厚度不足之尺寸約在 2~6mm 之間，因此即使加計研磨所需之厚度(約在 1mm 左右)，目前補鐸之厚度應已足夠。至於 309L 不銹鋼耐蝕覆層，根據中船人員之說明，發現其僅以 $\Phi 2.6\text{mm}$ 之鐸條補鐸一層且尚未研磨，由於 $\Phi 2.6\text{mm}$ 之鐸條其一層之鐸道厚度大約在 2mm 左右，考量其十分接近所需補鐸之 1.9mm 厚度，遂疑慮其在研磨後其厚度可能會不足，而需重新再進行鐸補。此外中船監工人員似乎並不了解鐸補後之量測情形，無法明確說明鐸道之尺寸狀況。因此視察

人員遂再向施工處主辦人員反映外鈹 309L 不銹鋼耐蝕覆層補鈹厚度可能不足之疑慮，並了解鈹道鈹補後之尺寸狀況。

針對外鈹 309L 不銹鋼耐蝕覆層補鈹厚度可能不足問題之情形，施工處主辦股長似有些不解中船公司做法之反應，其並表示已將需再補鈹之厚度要求告之中船公司，由於該厚度要求為施工完成後之厚度要求，因此中船公司本即應將所需之研磨加工裕度加入鈹補之厚度中，對此其表示將會要求中船公司改善，並重申會於補鈹作業完成後，依承諾提送有關之鈹接檢驗及量測紀錄等文件給本會。另於巡視時，所發現之現場施鈹工有未依規定攜帶鈹材領用及工作指派單(W3)表至現場備查之情形，亦一併告之，請其同時要求中船公司改善。

在得知垂直鈹道即將進行鈹後熱處理之訊息後，視察人員為確保基礎混凝土於熱處理過程中其溫度不會超過法規之限值，仍要求施工處需於熱處理過程中針對基鈹之溫度進行監測。對於此項要求，施工處人員表示如熱處理之測溫設備容量允許，將會於基鈹設置感測器，如不足將會以人工方式定時進行量測。

四、基座第一層混凝土澆置前階段

自 10 月初完成基座第一層垂直鈹道鈹後熱處理後，完全屬基座第一層之安裝作業主要為：基礎鈹道 309L 不銹鋼覆層鈹後之非破壞檢測作業，以及位於基座第一層之下乾井人員與設備通道安裝作業中之 E9016G 鈹道鈹接、E9016G 鈹道之 309L 不銹鋼覆層鈹接與 E9016G 鈹道鈹後熱處理等之作業。雖然基座第二層已於 10 月上旬吊裝至第一層上，第一、二層間之鈹接作業亦於吊裝定位後陸續展開，但由於施工處決定儘早進行混凝土澆置作業，以便於澆置作業之進行，致第一、二層間之鈹接作業於 10 月中旬完成內鈹及隔鈹鈹道後即暫時中止，待澆置作業完成後，再進行所剩之外鈹 WN23 鈹道。

配合二號機反應器基座第一層混凝土澆置作業之進行，考量部分施工項目於混凝土澆置後將無法進行或改善，因此在混凝土澆置前有關應完成之安裝、檢驗及銲接與熱處理等施工作業是否均已完成並符合要求，需加以確認，因此乃於 10 月 20 日派遣視察人員至核四工地，除針對現場安裝與銲接等品質檢驗文件進行查核外，並追蹤本會重要視察發現施工處改善及執行情形。查核情況及結果說明如下：

- (一) 查核包括基座真圓度及垂直度在內之安裝檢驗紀錄，均已完成並符合規範要求。
- (二) 查核 Main Steam Vent Pipe 及 Drain Pipe 等基座內埋件之壓力試驗紀錄，均已完成。其持壓壓力、時間及試驗結果均符合規範要求(如附件五)。
- (三) 查核銲道熱處理作業執行情形，第一層之 4 條垂直銲道已於 9 月 28 日至 10 月 1 日完成。另兩條應執行銲道熱處理作業之人員與設備通道基座端銲道，則已於 10 月 18 日完成熱處理作業。查核第一層垂直銲道之熱處理紀錄，其設備校驗、升降溫速率、持溫時間與溫度等均符合要求，但於查核時發現缺少溫度感測器(或熱電耦)之配置圖，無法確知工件溫差情形是否符合法規要求，雖施工人員已以口頭說明，惟為使文件完整，乃請工程主辦課人員予以補齊。另依對基座溫度監測之紀錄顯示，在整個熱處理過程其溫度約在 30~60°C，遠低於法規對混凝土溫度之安全限值。
- (四) 查核外鈹 309L 防蝕覆層與基礎銲道 E7018 填料補銲，以及基礎銲道 (WN289~292)309L 防蝕覆層等之執行及檢驗紀錄，發現有關作業雖均已執行，然不僅外鈹與基礎銲道之 309L 防蝕覆層無銲後之厚度檢測紀錄，無法得知補銲及施銲後之厚度是否滿足設計之要求。對於遭誤磨除之 309L 防蝕覆層，施工處亦未依承諾正式經施工處主辦與品質部門進行，並留下修理檢驗紀錄文件，而僅由中船公司自行進行修補補銲作業，以及部分之檢驗作業。由於此兩項覆層涉及基座

施工及日後長期使用之品質，因此在先前之視察過程中視察人員除於發現缺失後即要求改善外，並曾持續性地要求施工處主辦與品質人員加強管制並留下檢測文件，施工處主辦人員亦承諾將進行改善並建立檢驗紀錄文件。惟由結果顯示，其執行結果並不夠完整，不僅主辦課未督促中船公司改善並執行檢測，品質課亦未追蹤後續執行結果(如附件六)。

- (五) 目前人員與設備通道基座端鐸道熱處理後 NDE 檢測作業仍在進行，預計可於 10 月 21 日完成，如無發現缺陷應不致影響預定於 10 月 24 日進行之基座第一層混凝土澆置作業。

針對外鈹及基礎鐸道 309L 防蝕覆層未執行厚度量測問題，為明確防蝕覆層之厚度是否符合設計要求，視察人員乃於發生此一問題後，立即要求施工處應於混凝土澆置作業前完成防蝕覆層厚度之澄清。對於此項要求施工處工程主辦課首先於 10 月 21 日，提出於 8 月 30 日由施工處、新亞及中船公司三方會同，針對基礎鐸道 E7018 填料不足補鐸完成後之量測資料。依所提資料，基礎鐸道 E7018 部分之厚度於補鐸後約低於 304L 覆層表面 3.5~5.0mm，接近依圖面計算所得之 4.1mm。

至於 309L 防蝕覆層厚度方面，依 10 月 24 日施工處、新亞及中船公司三方人員再赴現場量測之結果顯示，外鈹 309L 防蝕覆層補鐸後約高於 304L 覆層表面 2~3mm，依此推估外鈹 309L 防蝕覆層厚度約為 6.1~7.1mm，符合圖面 6.1mm 之最低要求；而在基礎鐸道 309L 防蝕覆層方面，雖然由其高於 304L 覆層表面 5~7mm 之量測結果，配合 8 月 30 日之 E7018 鐸道低於基座外鈹 304L 覆層表面之量測結果推估，其厚度約為 9.1~11.1mm，亦大於 6.1mm 之要求。然由於 8 月 30 日之量測作業僅針對靠基座外鈹端之 E7018 填料進行測量，因此在缺乏靠基鈹端之 E7018 鐸道外形尺寸量測紀錄情形下，靠基鈹端部位之 309L 防蝕覆層厚度是否可依此一併推估，可能仍需再澄清。在考量基鈹與基礎鐸道在鐸後並無熱處理之需要，因此即

便混凝土澆置後仍可進行補鐸之情形下，復以現場因雨積水已達 10 公分無法立即進行再澄清之量測，視察人員遂在提出此一疑慮並請其再做補充後，初步接受上述之量測結果(如附件七)。

至此雖然人員與設備通道基座端鐸道熱處理後之非破壞檢測作業，已於 10 月 21 日完成且無需重新補鐸之缺陷，然因工地持續陰雨不斷，致原訂 10 月 24 日進行之第一層混凝土澆置作業至 26 日方得以作業，並於 27 日凌晨左右完成。

目前對於基座第一、二層間之 WN23 鐸道，依施工處規劃將於 11 月上、中旬進行鐸接作業，其作業方式原則上將依一號機之改善經驗，將採取整圈鐸道同時以加熱片預熱、持溫及控制溫降($<100^{\circ}\text{C/hr}$)之方式，由 10 名鐸工同時進行鐸接，並於 3 天內施鐸完成。依基座視察計畫，屆時將會同核研所核四支援小組人員，進行專案視察。

肆、結論

雖然與一號機反應器基座第一層相較二號機反應器基座第一層之安裝作業過程，顯然相當程度受益於一號機安裝與改善之施工經驗，使其不僅時程縮短許多，原近一年之施工時程縮短至 5 個月，同時其鐸接品質，依非破壞檢測之結果來看，亦能令人滿意，特別是原來頗令視察人員擔心之外鈹基礎鐸道鐸接作業，其非破壞檢測之結果顯示其僅有三個不需修補之鐸接瑕疵(Flaw)。然由外鈹基礎鐸道鐸接作業過程中所陸續發生之外鈹防蝕覆層之誤磨除修補管制程序與防蝕覆層厚度未檢驗等之品管缺失，以及其衍生之品質疑慮問題，顯示施工處雖在施工技術方面已有明顯之提升，但在落實品管作業程序及要求方面，仍有相當之改善空間，擬請其針對有關之品管及檢驗程序缺失情形進行改正，期能在已有之良好施工技術基礎上，符合核能工程之品保要求，以消除不必要之品質疑慮困擾。

註：本報告限於篇幅，附件部分並未附上，如有任何疑問，請洽本會賴尚煜科長，
Tel：02-2232-2140

視察照片



照片一：基座吊裝情形



照片二：基座吊裝粗定位後情形



照片三：基礎鐸道背襯鈑與基鈑間隙過大情形(一)



照片四：基礎鐸道背襯鈑與基鈑間隙過大情形(二)



照片五：基礎鐳道根部遭金屬屑及鐳渣塞入情形



照片六：垂直鐳道和基板相交處凹洞磨開後情形



照片七：RS13 區塊不銹鋼覆面遭電弧擊傷情形



照片八：檢測基準線



照片九：基礎鉚道預熱情形



照片十：基礎鉚道預熱溫度量測情形



照片十一：基礎鉚道鉚接並同時持續預熱情形



照片十二：基礎鉚道鉚後情形



照片十三：基礎銲道研磨情形



照片十四：基礎銲道研磨後情形



照片十五：基礎銲道 E7018 填料及 309L 防蝕覆層補銲後情形



照片十六：基礎銲道&外鈹 309L 防蝕覆層量測情形