

# 主題視察報告

## 核四廠二號機反應器基座第二至五層 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

中華民國九十五年七月三日

# 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
視察照片 .....	22
附件	

# 核四廠二號機反應器基座第二至五層 安裝銲接作業視察

## 壹、前言

核四廠一號機反應器(RPV)基座廠製及工地安裝過程中，為避免類似錯用銲條之品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反應器基座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反應器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反應器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反應器基座廠製及工地安裝改善經驗，大部分反映於二號機反應器基座廠製作業中。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，並確實落實二號機反應器基座之工地安裝製程。本會乃

針對二號機反應器基座工地安裝作業，參考一號機反應器基座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，以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反應器基座工地安裝視察經驗，二號機反應器基座工地安裝工程，預計將針對下列：基座第一層外板垂直縱向銲道(WN273~276)、基板與基座第一層水平銲道(WN289~292)、基座第一層及第二層外板水平銲道(WN 23)、基座第三層反應器 Support Skirt Flange 加強板銲接與熱處理作業、第三層反應器 Support Skirt Flange 反應器基礎螺栓(Anchor Bolt)孔鑽孔及基座第四與五層間銲道等之施工作業項目進行視察。

本報告主要針對反應器基座第一層以外之安裝銲接作業(含第一層及第二層外板水平銲道(WN 23)之執行過程及本會視察之發現與管制情形進行說明。有關基座第一層部分之安裝作業與本會管制情形，請另行參閱本會 AN-LM-95-01 核四廠二號機反應器基座第一層安裝銲接作業視察報告。

## 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結構。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)，兩鋼環間之夾層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 A572 Gr.50&Gr.65)，然因第一層外板與抑壓池水接觸，基於防蝕考量，第一層外板另選用 ASTM A533 Type B Class2 外覆 ASTM

A240 Type 304L 不銹鋼之複合式鋼材。

反應器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。

核四廠二號機反應器基座第一層於 94 年 10 月 24 日完成第一階段之基座混凝土澆置(依澆置計劃基座將分三個階段進行澆置)後，經多日之等待及現場清理後，第一、二層間之 WN23 銲道之銲接作業於 94 年 11 月 4 日展開至 12 日完成，在 WN23 銲道 NDE 檢測執行過程中，基座第三層亦已於 94 年 11 月 14 日進行吊裝與銲接作業。而由於基座第三層具有反應器 Support Skirt Flange 為基座直接接觸並承載反應器壓力容器本體之部分，其設計結構十分複雜，除施工程序相對複雜並更嚴謹外，因受作業空間限制，施銲作業工作面並無法增加，以縮短施工時間，因此為減少對施工進程之影響，施工處在完成第三層基座本體部分之銲接作業，並持續進行第三層 Support Skirt Flange 有關封板安裝作業之同時，亦又再接再續進行第四、五層之吊、安裝銲接作業。雖然同時以兩個工作面同時進行施工作業，然至今(95)年 3 月下旬，基座第四、五層之安裝銲接作業，均已完成並陸續開始進行非破壞檢測作業，但基座第三層仍因反應器 Support Skirt Flange 加強鈹部分之銲接、NDE 檢測與熱處理作業程序執行耗時，以及受反應器 Support Skirt Flange 鑽孔機具空間需求限制，致通風管道無法施做影響，仍未完全完成其施工銲接作業，並又再延至 4 月下旬時，方完成第三層全部之施工與檢驗作業，至此基座鋼結構本體部分之安裝施工作業方告完成。而其延宕多時之第 2&3 次之混凝土澆置作業則又在持續天雨之影響下，於今(95)年 5

月 3、4 日才順利執行完成。

### 參、視察作業執行情形

二號機 RPV 基座第二至五層安裝作業自 94 年 11 月初開始第一、二層間之 WN23 鐸道之鐸接準備作業至 95 年 5 月初完成整個基座本體之混凝土澆置作業，其間約歷時 6 個月之久，由於部分相關施工及視察作業繁瑣，為便於說明整個安裝作業過程中視察作業之執行情形，以下僅依施工作業之順序，分別針對下列之主要施工作業階段：第一、二層間外鈹水平 WN23 鐸道、第二、三、四&五層水平組合鐸道、第三層之反應器 Support Skirt Flange 鐸接與熱處理等及第三層反應器基礎螺栓安裝等，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、二層間外鈹水平 WN23 鐸道鐸接作業階段

因鑑於一號機第一&二層 WN23 鐸道曾歷經近 6 個月共五次修補作業之失敗經驗，施工處在與承包商規劃二號機 WN23 鐸道鐸接作業時，除採納本會建議參考核二廠反應器基座鐸接施工方式，整條鐸道同時施鐸，並全程持續加熱鐸道，使其維持一定之層間溫度，期減少鐸接之熱應力循環與鐸接殘留應力之產生；並依據修補經驗，於鐸接完成後控制溫降速率，使其緩慢冷卻，期減少冷卻過程中鐸道不均勻收縮之情形與鐸道氫脆之可能。依上述規劃原則，二號機反應器基座第一&二層 WN23 鐸道之施鐸作業程序重點如下：

- (一)為減少乃至免除事後背剝之需要，於鐸道背部使用陶瓷背襯片。
- (二)施鐸前於鐸道外側設置電熱片，以於鐸接過程持續加熱鐸道，維持 150~250 層間溫度之要求。另為控制鐸後降溫速率，鐸道內外側均以保溫毯包覆，僅於鐸道鐸接面處留約 10 公分寬之開口，以供鐸接之進行。
- (三)由 10 名鐸工同時進行施鐸，每名鐸工負責兩個隔艙(約 4.4M)長度之鐸道，且施鐸時每道(PASS)均需從頭接續鐸接至尾端後，再回到起始端進

行下一道之施鐸，不得分段進行施鐸，以避免層間溫度超過 250 之限值。

(四)底道(ROOT PASS)需以 3.2MM 之鐸條進行施鐸，以後方可以 4.0MM 之鐸條進行施鐸。

(五)正面鐸道完成後，仍持溫於層間溫度範圍內，並立即進行背面鐸道之整理及目視檢驗，並視需要進行背剷及補鐸(滲透不足時)。背剷作業需以研磨方式為之。

(六)鐸接作業完成後，鐸道覆蓋保溫毯升溫至 250~300 ，持溫兩小時後，以每小時 50 之降溫速率降至室溫。

WN23 鐸道鐸接作業，自完成基座第一階段混凝土澆置後之清理作業後，施工處汽源課即於 11 月 4 日開始進行現場加熱片及保溫毯之設置作業，至 11 月 8 日凌晨 2 時完成後，即開始進行通電加熱升溫作業。此外為使工作人員對整個作業流程及施工要求有更明確之了解，施工處汽源課與中船公司曾於 11 月 7 日，召集現場作業人員及鐸工至中船公司工地辦公室進行施工作業說明，針對整個施工程序及作業要求進行解說。

由於鐸前預熱作業開始時間較預定時間來得晚，以及可能因基座體積過於龐大，保溫包覆不足致散熱速率大於預期，而加熱作業人員為避免熱輸入及升溫速率過大可能引起基座之變形，不敢任意調升升溫速率，仍依原定之升溫速率(每小時約 25 )設定進行加熱。致視察人員於 11 月 8 日上午至現場巡視時，預熱溫度仍僅達約 130~140 ，距 150~200 之目標仍有些距離。

由於現場鐸接作業無法進行，視察人員遂先針對鐸前準備作業及預熱作業情形進行現場巡查。巡查情形及結果如下，

1. 查核加熱設備及測溫記錄器熱電耦校正時間，仍在一年內符合要求。由於此一加熱及持溫作業，並非熱處理作業，因此視察人員並未針對其人員資格進行查核。

2. 視察人員實際以紅外線測溫儀量測鐸道旁母材溫度情形發現,其溫度有約低於測溫記錄器顯示溫度 20 左右之情形。經工作人員說明,為便於鐸接進行,電熱片安裝位置需稍為遠離鐸道,此外為利於溫度控制及加熱之均勻性,測溫熱電耦之位置亦需靠近電熱片,致有所發現之情形。對此工作人員表示其已有發現,除將會加以注意外,實際鐸接作業時亦會以紅外線測溫儀進行現場量測之結果作為溫度管制之主要依據。
3. 檢視鐸道鐸接面時,發現第二層外鈹在有肋鈹之區域均有稍高於第一層外鈹之高低差情形(約 5mm)。經與工作人員討論,其認為應與第二層之熱膨脹自由度大及熱膨脹量大有關,因此其決定將第二層之預熱溫度降低以減少高低差之狀況。
4. 針對電熱片及測溫熱電耦配置情形進行了解時,發現第一、二層各設置有 6 支測溫熱電耦,每支測溫熱電耦控制約 2~3 組電熱片之溫度。由於測溫熱電耦之間距(約 7M)有大於 AWS D1.1 要求之情形,因此視察人員遂再檢視溫度記錄器之紀錄紙帶,了解升溫過程之溫度分佈情形是否符合 4.6M 間距內溫差不得大於 140 之法規限制要求。檢視結果顯示在升溫過程中,同一層之測溫熱電耦溫差並未有超過 50 之情形,判斷其溫度分佈斜率應不會超過前述法規之限值。

由於預熱溫度未達要求,以及為調整第一、二層之高低差情形,使預熱作業在同時需針對第一層進行升溫與第二層進行降溫之影響下,至 11 月 8 日中午左右才達到作業溫度範圍。因此鐸接作業延至 11 月 8 日下午 2 時 30 分,於施工處品質課與汽源課檢驗人員,會同中船公司工作人員全面檢測(視)鐸道溫度與鐸接面後,才由 10 名鐸工同時展開施鐸作業

鐸接作業過程中,由於現場工作鷹架走道狹小,人員行走其上易影響鐸工之作業執行,因此施工處汽源課於鐸接進行過程中禁止人員進入施工現場,以避免影響鐸接作業之進行。因此施鐸作業過程中,視察人員主



要藉由持續性地查核位於第二層頂部工作平台上之溫度記錄器記錄情形，以及於第二層頂部工作平台與 RCCV LINER 工作平台等處，觀察銲工作業情形之方式進行視察作業，其間僅利用施工處檢驗人員進行銲接現場查核之機會，配合進行了數次之現地查核作業。有關銲接作業過程之重要視察查核情形如下：

1. 查核溫度記錄器資料，顯示每日銲接作業結束後銲道母材溫度仍持續維持在 150~200 之間，符合規劃程序及層間溫度要求(第一層 150~250，第二層 66 以上)。
2. 在後續作業過程曾於現場測量時，發現第一、二層銲道層間溫度十分接近，以及第一、二層間仍有明顯高低差之情形。由於與銲前降低第一、二層間高低差之層間溫度控制改善作法說明有所出入，因此視察人員即與工作人員討論，發現第一、二層之銲道層間溫度於完成兩層銲道之銲接後，工作人員即將之分別調整為 200 (第一層)、150 (第二層)。雖然視察人員疑慮此一作法可能增加銲後銲道之收縮應力，惟考量當時情況已不可逆，僅能期望最終銲道之強度仍具有足夠之強度。
3. 為了解背面銲道之情況是否如預估在使用陶瓷背襯後，僅需進行表面研磨及針對熔滲不足之部分進行補銲，視察人員曾於銲接過程中及結束時，查核兩個隔艙之銲道背面情形，發現銲道背面情形大致與預期接近，應僅有少數之部位需再進行背剝補銲。

11 月 11 日上午銲接作業完成後，為避免銲道若需進行背剝補銲作業而需再次進行預熱作業之問題，在依規劃接續進行銲道背面研磨及目視檢驗之過程中，現場層間溫度持溫加熱作業仍持續進行。而於目視檢驗確認銲接溶滲情形良好，無需再進行背剝補銲後，即將銲道再加熱升溫至 250~300，並於持溫 2 小時後，以每小時 50 之降溫速率進行降溫，至 11 月 12 日中午降至室溫。

由於在一號機基座 WN23 銲道之銲補過程曾發現位於 WN23 銲道對角下方(外鈹內側)之 WN6 銲道有疑似受 WN23 銲道銲接(補)影響而產生龜裂

之情形。因此視察人員在非破壞檢測(NDT)作業執行前曾建議施工處汽源課與 NDT 股，將 WN6 鐸道亦納入檢測範圍。對此項建議施工處有關人員已同意予以採納。此外考量 A533 材料強度頗高，為避免延遲龜裂之情形發生，視察人員亦於了解 NDE 檢測程序及時程過程中，一併建議將此項因素納入檢測時程之考量，並至少於鐸道完成後，48~72 小時後才開始進行 NDT 檢測作業。對於此項建議，施工處 NDT 股人員表示，由於配合加熱設施拆除、鐸道研磨及第三層吊裝作業之進行，NDT 作業估計最快將於 11 月 16 日以後才會開始進行，由於距鐸道完成時間已超過 3 天，因此此項建議已能自動達到。

因配合基座第三層於 11 月 16 日進行吊裝，WN23 鐸道之施工架被移除，至 11 月 18 日基座第三層定位完成後才又復原，並於 11 月 19 日開始 NDT 檢測作業(UT&PT)至 11 月 23 日全部完成，檢測結果僅發現 2 處經研判主要鐸工鐸接操作疏失有關之熔合不良缺陷(位置、長度各為 5 度 30 mm&180 度 140 mm)。此一改善後之施工作業之檢測結果與一號機發生之大量裂縫結果相比，不僅在品質上有明顯之改善，就以成本及施工期來說，二號機亦節省了約近半之成本與至少 4~5 個月之施工與修補工期。另考量背面鐸道原應進行背剷鐸接作業並進行 NDT 檢測，現雖因施工處以陶瓷背襯及良好之施工操作完成符合要求之鐸道外形型態，而可省去進行背剷鐸接作業之需要，然原應進行之 NDT 檢測是否可一併省略，恐需再做斟酌。對此視察人員在得知背面鐸道未如正面鐸道於 UT 外亦進行 PT 檢測作業後，將考量疑慮向施工處汽源課人員反映並與之討論，經討論並考量檢測效率及效果後，施工處汽源課人員改以 MT 取代 PT 針對背面鐸道再補行檢測，由此 MT&PT 均為表面性之檢測方法，其檢測效果相當，因此亦為視察人員接受，此一 MT 檢測作業於 11 月 28 日完成且結果良好。

由於第一層之材料為 A533 材質其鐸接作業後法規要求需進行鐸後熱處理，而為免除於現場執行鐸後熱處理之需要，廠製作業階段時曾於第一層上緣處預先以 E7018 鐸材覆鐸一層約 10 mm 左右之過渡覆層，以隔絕鐸

接時之對 A533 材質之熱影響。因此為避免前述缺陷修補作業過程中不慎將該過渡覆層移除而不知,因此視察人員針對缺陷修補作業除將上述疑慮告之施工處人員外,亦建議其於仔細定位後以機械研磨方式進行缺陷之移除作業,並要求將缺陷移除後之 NDT 檢測作業列為管制點,以便了解缺陷移除後過渡覆層厚度仍足夠。

11 月 30 日缺陷移除作業完成後,視察人員至現場實地檢視了解鐸道缺陷磨除後鐸槽之狀況,並參考基座施工圖面初步量測 A533 外覆之 304L 不銹鋼層頂緣與缺陷移除鐸槽下緣之距離,估計過渡覆層厚度應仍大於所需之 6 mm,因此鐸補作業應不致對第一層之 A533 材料有不利之影響,使其需重行熱處理作業。鐸補作業隨即於 12 月 1 日執行,視察人員於過程中赴現場巡視,因考量鐸補區域相當小且因僅需於單面施行鐸接,鐸補熔填量並不多,因此施工處於考量後,在鐸補之預熱作業方面,雖仍於鐸補面覆蓋保溫棉進行保溫,但於背面改以瓦斯噴燈進行預熱之加熱,而未採用電熱加熱板進行加熱,並於鐸補完成後,覆蓋保溫棉,仍以瓦斯噴燈進行 1 小時之持溫加熱,待持溫時間到達後,保溫降溫至室溫。12 月 5 日視察人員於現場查核鐸補後 NDT 檢測作業時,發現其僅進行 UT 檢測,與原檢測項目內容不一致(原為 UT&PT),已請汽源課再補行 PT 之檢測。至 12 月 9 日時,已補行 PT 檢測完成且結果良好。

## 二、第二、三、四&五層水平組合鐸道鐸接作業執行階段

由於本階段施工作業期較長,並依據一號機基座第二&三層及第三&四層水平組合鐸道鐸接作業經驗顯示,有關安裝鐸接作業情形良好,無明顯品質異常情形,顯示此階段之施工品質疑慮及管制需要相對較低,因此在第二~四層安裝作業期間本會並未特別組成專案視察團隊針對施工作業進行專案性之查核,而採取由駐廠人員依施工作業進程隨機進行不定時之現場查核鐸工人員資格、鐸材使用、鐸接作業參數維持及吊裝定位與鐸接檢驗作業執行等情形與結果。依視察人員持續之現場查核之結果顯示,僅發

現有少數如：現場施鐸時，鐸材未依規定存放於保溫筒，以及現場風雨防護不佳，仍勉強進行鐸接作業等現場管理不佳之狀況。而 NDE 檢測之結果(含由台電公司修護處執行之第三者查驗)，其缺陷率亦相當之低(約在 1~2%以下)。

至於第四&五層部分，由於一號機時曾出現大量異常之鐸接龜裂(以鐸道長度計約超過 50%)，因此此階段之視察作業主要以第四&五層部分之鐸接作業為主，除於施做時進行現場查核外，亦於施工前針對其鐸接施工規劃情形，向施工處人員進行了解，以了解其是否吸取一號機之失敗與改善經驗。

依據對一號機基座第四&五層之鐸接施工視察之發現與了解，以及施工處針對大量鐸接缺陷發生之檢討結果，一號機第四&五層大量鐸接缺陷之發生或與下列情事有關：

- (一)基座第四&五層材料(A572 Grad 50&65)之鐸接作業性能雖較第一層外鈹之 ASTM A533 Type B Class2 易於施鐸，然因受鐸位均為 6G 鐸位，以及作業空間與環境通風均亦較其他幾層更差等之影響，除可使用之合格鐸工較少與較難施工外，由於因環境過於惡劣，使部分鐸工在鐸接作業過程中，陸續出現不適無法持續配合出工施鐸之情形。此一情形如在有良好之現場管理及適時機動調整鐸工施鐸隔艙位置及部位之配合下，其整體之施鐸程序應仍能維持對稱鐸之程序要求，而減低鐸接殘留應力產生之程度。惟依當時視察之結果發現，因受限作業責任區域分配之要求及部分鐸工無法持續配合整體施鐸程序依時出工之影響下，各鐸工之施鐸作業情形，已呈各自進行與完成施鐸作業之狀況。
- (二) 第四&五層之鐸作業屬作業除屬難度高之 6G 作業外，其鐸道之接頭型式主要為 T 型接頭(T JOINT)，與一至四層以對接接頭為主之情形有所不同，現場人員在此方面之施工經驗較少，致對基座結構與鐸

接殘留應力間效應問題之考慮有欠周全之處。

(三)依 NDT 檢測之結果顯示，多數之銲接缺陷為 Toe Crack 屬冷裂之缺陷，考量基座之結構性質及所使用之材料與銲材檢討後，肇因應與銲接之殘留應力及所受拘束度過大有關。針對檢討所得之肇因，施工處當時針對銲接施工製程之改善作為有：提高預熱溫度由 66 至 80 以上、採用分層逐次銲接以減少銲接應力(變)之增加速率，以及檢討減少銲材之熔填量以減少入熱量等措施。

針對施工處所提改善對策本會視察人員雖亦認為應有其效用，但考量其所提改善措施僅止於技術性之改善，對於現場施工管理作為之強化方面則並未有改善之作為。雖當時即曾立即反映請其仍需注意並採取改善作業，除期做為落實所提技術改善措施之基礎外，亦可督促中船公司負起現場施工作業管理之職責。針對此一改善建議施工處當時即針對尚未進行銲接之 WN210(外鈹)及 213~232(外隔鈹)等銲道規劃其銲接順序，並應用所提銲接技術改善措施。經後續現場查證 WN210-5,10,15,20 & WN218,223,228,213 等銲道之銲接作業，係同時有銲工正在進行背剝作業，符合施工處所提銲接順序。而依據後續 NDT 檢測之結果顯示外鈹與外隔鈹周向銲道之銲接缺陷率約在 8~9%，遠較內鈹與內隔鈹之 50~60%為少，顯示其改善成效良好。

雖然一號機第四&五層安裝銲接作業改善後之成效不錯，然進一步與一號機基座二至四層之銲接缺陷率(約在 3%以下)比較後，視察人員認為應仍有可再改善之空間，並在評估後推論一號機第四&五層安裝銲接作業改善後之成效無法達到二至四層之水準，應是與改善措施開始時，近半之銲道均已施銲，對基座之結構拘束度已有所影響與增加，使改善措施對降低銲接殘留應力之效能減少有關，因此如能於施工作業之始即落實一號機之改善經驗，乃致比照二號機第一&二層 WN23 銲道之整體性施銲作法，應能再降低銲接不良率發生之可能。

因此基於再提升二號機基座第四&五層間水平銲道銲接品質之考量，視察人員即曾多次建議施工處對二號機基座第四&五層間水平銲道之施工能比照二號機第一&二層 WN23 銲道之整體性施銲作法。惟至第五層將進行吊裝與銲接作業前，施工處工程主辦人員仍以基於考量結構複雜性、材料性質較易銲接、作業量與作業時間，以及一號機改善之經驗回饋，乃至成本等之整體考量下，對於二號機基座第四&五層間水平銲道之銲接作業，無法依本會建議比照第一&二層之 WN23 銲道方式，以整體一次性之方式進行施銲作業，但承諾將依一號機改善經驗，除在銲接技術上進行修正外，亦會要求中船公司做好現場施工程序之管理，以落實對稱銲接程序，減少銲接殘留應力發生之程度。考量施工處若能確實督促施工廠商落實現場管理與施銲順序之管制，則銲接殘留應力問題應亦能控制在合理之程度內，因此視察人員乃未再有進一步之建議與要求，惟將有關改善措施及現場管理與施銲順序之管制列為管制視察之重點。

95 年 1 月 27 日施工處於完成吊裝定位後，因適逢農曆春節假期，現場除進行銲前清理及檢驗作業外，至 2 月 9 日方正式展開內鈹及內隔鈹之銲接作業，銲接作業開始時，本會駐廠視察人員即曾赴現場視察銲前預熱、銲後預熱、銲材使用及人員資格等。2 月 15 日下午視察人員赴作業現場查核銲接作業情形時，因於查核銲接人員資格、銲材使用及預熱溫度過程中，由當時之銲接作業人數情形發現似有未符原承諾之對稱銲接程序之狀況。經進一步查核其銲工派遣及管理紀錄情形，結果確認當時施銲情形並不符對稱銲之要求，並由查核過程中，了解中船公司雖有依規劃之對稱銲接順序原則，進行銲工派工及銲接位置之施銲，惟因其未做好對其下包廠商及銲工管理，致屢有銲工自行中止銲接作業及離去之情形(當日下午即有兩名銲工於中船人員未知之情形下，即自行離開工地返家之情形)。由於此一現場管理作業不良及施銲作業情形，已違反其改善承諾及規劃，遂當即要求施工處及中船公司人員至現場了解情形並進行改正。所

幸當時正進行中及已完成銲接之周向銲道仍屬少數,初步判斷對於整體銲接殘留應力之影響應並不大,因此視察人員僅於告知現場管制及施銲程序,不符其承諾之規劃要求之缺失情形,並要求改善不可再重複發生,及將隨時再進行改正複查外,未再有其他之管制要求。而為確認管制缺失是否已確實改正,視察人員亦曾於2月21日至3月10日間,多次赴現場持續進行銲接與現場管理作業情形之查核,並確認前述缺失情形均已進行改正。

基座第四&五層水平銲道3月中旬大致完成銲接作業於後,至4月3日才開始全面執行NDT檢測作業(UT&MT)。4月6日視察人員曾赴現場了解UT檢測作業情形,並現場查核正進行中內、中外隔艙部分銲道檢測之兩名大世界檢測公司檢測人員資格、儀器檢驗,以及檢測掃描程序情形等,均符合規定要求。至4月10日檢測作業完成為止僅發現有6處缺陷,顯示整體銲接作業品質大致維持二至四層之水準。

惟於4月14日二號機基座第四&五層水平銲道NDE檢測作業完成後,視察人員於再赴基座施工現場巡視第三層通風管之銲接作業情形時,因發現第五層仍有銲工進行銲接作業,乃對該銲作業進行查核,結發現銲工作業對象與其銲材領用派工單所載不符之情形。經立即通知現場管理人員要求停止繼續作業,並進行了解發生原因後,發現係因現場施工廠商管理人員,發現基座第五層母材處有臨時支架銲道經移除之缺陷需進行修補,因此逕自請剛完成第三層通風管銲接作業之銲工協助進行補銲。

經與稍後來到現場之施工處人員反映討論,前述情形除違反銲接管制之銲工派工與銲材領用管制規定要求外,考量基座第五層結構銲道已於日前由施工處完成NDT檢測作業,此時基座已係由施工處完成初步之結構完整性驗收,因此設備施工承包商應不得在未經施工處同意或知悉之情形下,再進行任何加工行為,使設備之品質狀態有又再回復未經NDT檢測前之不確定狀態。因此當時除請施工處人員要求廠商改善外,亦請其查明再

遭補鐸之區域，再重新補做鐸接修補區域之 NDT 檢測作業。由於再遭鐸接作業之區域，經施工處人員再進一步查核確均為臨時性工作支架之鐸道，因此後續之改正處理作業將依臨時性工作鐸道記錄 移除及檢測等之管制要求進行。

### 三、基座第三層反應器 Support Skirt Flange 加強鈹鐸接及熱處理作業

基座第三層之 Support Skirt Flange 為基座直接承載反應器之部位 (EL8200)，而為能負荷反應器重量及其運轉載荷，基座第三層之設計結構除遠較其他各層更為複雜，除使用加強肋鈹以形成較密集之多層隔艙結構，以強化基座結構之強度及剛性外，其 Support Skirt Flange 水平主結構鈹材之設計厚度亦高達 70 mm，較其他各層鈹厚不超 38 mm 之情形要厚上許多。這除使第三層之鐸接工作量遠大於其他各層外(估計約佔整體基座鐸接量之 1/3 左右)，亦因其鈹厚超過 38 mm 使其鐸接作業完成後，亦與 Support Skirt Flange 水平主結構鈹材有關之鐸道，於鐸後需再執行法規要求之鐸後熱處理作業。而為減少現場鐸接及鐸後熱處理之作業量，在設計上將基座第三層之分層位置設計於 EL6700~8710 而非 Support Skirt Flange 水平主結構鈹分別所在之 EL7000~8210。另基於現場進行 Support Skirt Flange 水平主結構鈹徑向鐸接作業之需要，於各內、外及隔鈹之四象限位置處預留少量之開口，使現場徑向鐸道鐸接作業完成，僅需進行少量之基座本體與 Support Skirt Flange 部位之封鈹與加強鈹之鐸接及鐸後熱處理作業。

施工處在規劃現場四象限位置處之鐸接、NDE 檢測及熱處理作業執行順序時，為減低隔艙作業空間狹小限制，無法多個作業面或鐸工同時進行施鐸作業，以及多層隔艙結構封鈹與加強鈹施工程序，對施工作業速度低落之影響，考量內層(鈹)鐸道 NDE 檢測作業雖無法於外層(鈹)鐸道完成後進行，但鐸後熱處理作業仍可進行之結果下，決定將全部之鐸後熱處理作業移至所有鐸接作業完成後再統一執行。雖然此一作法與其以往較為保守之施工順序方式有所不同，然考量法規並未限制 NDE 檢測與鐸後熱處理作業



施作順序，以及如仍在維持原有施工順序規劃情形下，除施工工期之增加無法估計外，其施工規劃與管理之難度恐亦十分不易，而其作業品質是否將因此而有所提升，亦恐在未定之數，因此視察人員對此一施工順序在了解及與施工處人員討論後，未有進一步之意見，但為確保在此狀況下，不致因不正確之鐸後熱處理作業程序而對鐸道之品質有所影響而不知曉，因此仍將鐸後熱處理作業列為此一施工作業階段之視察重點，並通知施工處將之列為停留管制點，於作業前通知視察人員至現場了解。

在封鈹與加強鈹鐸接之視察方面，視察人員主要針對其鐸接與 NDE 檢測執行時機間之狀況進行了解與查核，以確認各層隔艙內之鐸道之施作順序正確並均完成規定之檢驗與 NDE 檢測作業。考量施鐸作業期長，因此視察作業主要由視察人員及駐廠人員於三~五層水平鐸道鐸接作業期間，共同以隨機性之視察方式進行現場巡視及檢驗文件與 NDE 檢測紀錄之核對。依有關作業執行之情形及結果顯示，在鐸接與 NDE 檢測施工順序執行方面並無不符要求之情形發生。

2 月中旬第三層本體部分與 Support Skirt Flange 水平主結構厚鈹有關之鐸道均完成鐸接作業後，施工處即著手規劃鐸後熱處理之作業。由於需執行熱處理之鐸道(共 139 口)分散於基座的四個象限處之 24 個隔艙區域，基於加熱板與溫度控制記錄器等設備數量、現場供電能力及空間等限制與考量，熱處理作業規劃以 4 次，每次 6 個隔艙區域之進度進行熱處理作業。

依 Support Skirt Flange 水平主結構鈹厚(上鈹：80 mm及下鈹 70 mm)，其製造法規 AWS D1.1 之鐸後熱處理作業之參數要求，如表一所示。此外為避免熱處理作業過程中加熱、冷卻控制之不當，造成工件過度之不均勻熱應變應力而致損傷及品質降低之疑慮，除法規有對在熱處理期間之工件溫度分布梯度情形有所限制之要求可初步加以預防外(加熱期間：每 4.6m 長度溫差 < 140 °C，持溫：整體加熱區域溫差 < 84 °C)，亦可藉由事後執行之 NDE 檢測予以進一步之釐清排除，然由於本次之熱處理作業後已無法再執行 NDE 檢測

作業，因此為確保工件之品質，熱處理期間工件溫度分佈梯度情形之管制就顯得十分重要，故視察人員於視察熱處理作業之初，即對用以控制升(降)溫速率及溫度監測之測溫熱電耦配置情形進行了解。

表一 基座第三層 Support Skirt Flange 厚鈹銲後熱處理參數

	加熱速率 ( /hr) (572 /300 以上時)	持溫(hr) 2”以上	冷卻率( /hr) (572 /300 以上時)
法規要求	Max:400/ t (in) 上鈹(80 mm)= 127 下鈹(70 mm)=145 Min:100/t (in) 上鈹(80 mm)=32 下鈹(70 mm)=36	1100~1200 (590~650 ) Min:2+(t-2(in))/4 上鈹(80 mm)=2.29 下鈹(70 mm)=2.19	Max:500/ t (in)= 上鈹(80 mm)= 159 下鈹(70 mm)=181.5 Min:100/ t (in) 上鈹(80 mm)=32 下鈹(70 mm)=36
作業規劃參數	127	1100~1200 (590~650 ) 2.5	159

2月24日第一次熱處理作業之現場前置準備作業完成後，視察人員即會同施工處人員至現場，除實際查核設備校驗及人員經歷資格外，亦至基座熱處理部位查核熱電耦與加熱片裝置位置情形。基於溫控設備容量每一隔艙僅能設置兩支熱電耦之限制，以及每一隔艙中多僅有兩條銲道需執行熱處理之考量，作業人員遂採取將熱電耦裝置於每一需熱處理銲道中間部位之方式佈置，然此一情形配合每一銲道僅放置一片加熱片及保溫棉包覆僅向銲道外端延伸約 10 cm左右之情形，視察人員發現可能有以下疑慮：

- (一)因銲道兩端之散熱率通常較大，考量現場加熱片數量及保溫棉包覆延伸長度情形，靠近銲道端部之熱處理溫度是否能達到規定要求，恐有疑慮。
- (二)測溫熱電耦裝置均位於為加熱片中間部位，為加熱測溫之最有利之位置，除與一般設於較不利位置之保守做法不符外，上述熱處理溫度不足之情形亦可能無法被監測發現。
- (三)由整體加熱區域之角度觀察每一隔艙，除前述熱電耦均裝置於溫度較有利位置外，亦因其裝置之相對距離顯然較小，未盡可能地橫跨整個加熱

區域，此恐不利於熱處理過程中，對整體加熱區域溫差情形之監控。

雖然視察人員在發現熱電耦及保溫裝置位置可能引起上述品質疑慮後，即於現場與施工處及施作廠商人員針對發現及疑慮情形進行討論，並從規範要求觀點提醒施工處人員注意並建議進行改善，惟在反覆之討論及多次之建議施工處改善之過程中，施作廠商人員持續堅持其技術經驗判斷，認為在現場空間環境限制下，特別是加熱片除已無空間可供再增外，若勉強增設恐難避免過熱情形發生之可能，當時各項設施裝置之情形應已是最佳之狀態，並認為視察人員疑慮之情形應不致發生，而不願對各項設施之裝置依建議進行修正。

為避免此一技術與經驗上之認知差異情形，在缺乏實物驗證佐證陷入僵局之狀況下，視察人員仍再提出由施工處人員以紅外線測溫計，定期對鐸道端部溫度情形進行監測之方式，解決視察人員對熱處理及工件品質之疑慮，並驗證實際之狀況為何？此外亦要求如加熱過程中發現有溫差超過規範限值(約 70~80 左右)及鐸道端部溫度無法達到規範要求之情形時，熱處理作業即立即停止並全部重新執行，此期間視察人員將不定時至現進行驗證。此項建議在施工處人員同意接受並執行後，熱處理作業即立即展開。

考量規範對持溫期間溫差之限制較嚴格，因此視察人員在熱處理加熱作業達到熱處理持溫溫度前，即至作業現場會同施工處人員進行工件溫度之確認及驗證。根據由隔艙外側處量測之結果顯示(隔艙內溫度當時已達 400 多無法進入，致紅外線測溫計無法於合宜之距離及角度下進行量測)，鐸道端部當時溫度約在 500 左右，但中間區域已近 570 左右，此時之溫差情形雖已近限值但仍在可接受範圍內，然考量溫度分佈情形、持溫期間溫差限制及溫度越高散熱率越高情形，視察人員判斷整個鐸道之熱處理持溫狀況，應確實無法達到規定要求，而施工處人員在確認此一情形後，隨即要求廠商停止熱處理作業，並於檢討調整熱電耦設置位置及保溫毯鋪設範圍。至 2 月 26 日完成檢討及現場準備作業後，整個熱處理作業再由原第二次熱處理區域

重新開始，並於 3 月 4 日方完成全部之熱處理作業。此期間視察人員亦曾再針對第三及四次(即原第一次重做)有關 Support Skirt Flange 部位之熱處理作業情形進行現場查證，視察結果熱電耦位置已依建議調整，並於其中一條鐸道之端部設置熱電耦(第一、二次熱處理作業部分亦同)。另查閱第一、二次熱處理作業溫度紀錄，發現除升降溫速率及持溫溫度均符合法規規範限制要求外，其持溫時間 3hr 亦大於 2.5hr 之最低要求。惟於 3 月 8 日最後查核完整之熱處理作業紀錄文件時發現，中船公司未依一般熱處理作業紀錄之文件提送習慣，將熱電耦佈置圖附於熱處理作業紀錄中，建議施工處要求中船公司補正。

#### 四 第三層反應器 Support Skirt Flange 反應器基礎螺栓(Anchor Bolt)孔鑽孔作業

為確保反應器安裝及日後運轉時位置之正確與穩定，核四廠反應器支撐裙(Skirt)係藉由 120 支之基礎螺栓固定於基座第三層之 Support Skirt Flange 上。由於反應器之體積重量龐大吊裝後再進行位置微調十分地困難，因此一般係採取精確裝置基礎螺栓位置，吊裝反應器以就基礎螺栓之方式，使反應器吊裝後直接到達設計之目標位置，並不再需進行位置之微調。為達成此一目標，設計施工時，利用以參照廠製完成後之反應器支撐裙螺孔實際位置製造，且精度要求較高之螺孔位置樣板(Template)來確保 Support Skirt Flange 上螺孔位置之正確性，並再藉 Support Skirt Flange 內部澆置之混凝土，進一步確保基礎螺栓位置之穩固。

此部分之施工作業台電公司將之交由中船公司(基礎螺栓孔鑽孔)及中鼎公司(基礎螺栓安裝)兩家施工廠商分別施作。依據一號機之施工結果發現，因 Template 安裝後發現部分之 Template 螺栓孔與基座 Support Skirt Flange 之螺栓孔有明顯之偏心情形，致進行基礎螺栓位置定位調整時，中鼎公司無法以原定之程序及做法進行作業，而改以由工作人員依其經驗進行個別性之修正做法，除導致安裝情形與程序書要求有明顯不符之情形外，

亦使整個安裝工期耗時延誤甚久，並險些影響一號機反應器吊裝之時程。此一狀況根據問題處理過程中之了解及事後之檢討發現，除中鼎公司本身製作 Template 有所誤差外，施工處本身在此項作業過程中，未能做好工程規劃管理，並主動進行工程協調及資訊傳達，以統一若干共同作業點與介面之要求(如中心、零點與高程測點基準、第一孔位置及檢驗量測方法與精確度等)，致中鼎公司多不了解中船公司之規劃及作業情形，致未能適時因應調整其配合作業情形亦有所關係。

針對缺失發生之情形及原因檢討之結果，為避免再於二號機基座安裝過程中再次發生，甚至影響反應器吊裝之時程及品質，本會除要求應檢討 Template 廠製過程施工處均未設置檢驗點進行查驗之缺失外，亦要求施工處及經辦部門應確實負起並落實工程介面管理及協調之責，特別是對於共同作業點之作業方式、結果及要求，建議雙方於執行前均能進行工作協調會議或參與見證彼此之作業，以一致作業之要求及品質，並減少事後責任爭議之可能。

由於二號機之 Template 製造及基礎螺栓固定之方式，在施工處與中鼎公司檢討後，決定將基礎螺栓定位及在混凝土澆置時之固定之方式，由原來僅利用 Bush 之方式，修改為 Bush 加可調整環之方式，並利用一號機之 Template 直接進行修改，使得 Template 廠製作業之複雜性及難度已大為降低，加以此部分之作業主要係屬反應器壓力容器吊裝施工之範疇，非屬基座安裝作業之一部分，本報告將不再予以詳述。以下將僅就 Support Skirt Flange 之基礎螺栓孔鑽孔作業前後，有關協調、見證及檢測作業執行之情形進行簡要之說明：

(一)由於在一號機 Template 及基礎螺栓安裝過程中，中鼎公司方面曾持續對由中船公司現場定位及檢驗量測之準確性有所疑慮，致後來雙方均改以由施工處量測股之重新量測結果，將所有疑慮予以解決釐清。而為避免雙方再對此發生爭議，本會曾建議施工處對於各量測基準點及涉及

兩廠商施工作業結果之量測作業，宜由施工處量測股或由雙方協調量測方法後會同執行，以減少日後爭議之可能。對於此一建議，視察人員曾查證基座中心及正北基準控制點之量測會驗紀錄情形，發現中鼎公司並未參與會同作業，據施工處主辦人員之說明，作業前其已曾口頭告知中鼎公司及施工處負責此部分作業之人員請其參與，對此一狀況考量施工處量測股已有派人參與，已有相當客觀性，因此除建議仍以書面通知方式為佳外，並要求將基礎螺栓孔放樣結果之量測作業列為本會管制點，於作業前通知駐廠人員。

- (二)前項基礎螺栓孔鑽孔前，放樣位置三方(台電、中船及中鼎公司)會驗及本會管制點要求，因於 3 月 15 日鑽孔作業已展開後，由施工處反應器股及本會駐廠人員發現，施工處包封容器股其除三方會驗作業結果未作成紀錄外亦未通知駐廠人員到場會同，因此當即暫停鑽孔作業，重行進行三方會驗作業。至 3 月 16 日下午重行完成放樣位置會驗作業與紀錄，以及已鑽孔之 13 孔位置再確認後，再重行展開鑽孔作業。
- (三)依據一號機之作業經驗，為減低鑽孔過熱加速磨損鈍化之情形，一號機係採取每鑽 5 孔後，上下鈹交替鑽孔之程序進行鑽孔作業，以維持較佳之螺栓孔表面狀況。然二號機為加速鑽孔作業之效率，施工處決定改採上下鈹分別鑽孔之程序進行鑽孔作業，期節省換裝鑽頭之時間，而由螺栓孔表面多有刀痕情形顯示，其表面狀況確實不佳。
- (四)鑽孔作業於 4 月 2 日完成後，因內部清理作業困難，至 4 月 15 日下午方由汽源課召集中船及中鼎公司協調雙方對於鑽孔後螺栓孔之量測方式及要求。其中雙方對於量測工具採用鋼捲尺及經緯儀並無爭議，但中鼎公司要求需會同現場確認 4 象限及第 1 孔量測基準點之位置，以確保其日後量測基準之一致性，並將 10%之抽測作法，增加為 100%量測。當時由於下乾井 EL3500 鋼架平台即將施工，遂立即於會後立即由施工處量測股、中船及中鼎公司人員共同至現場，並由施工處量測股人員執行量測，其後於完成中鼎公司要求之 4 象限及量測基

準點位置測定後，中鼎公司人員即先離去，其餘之作業則僅由施工處及中船人員繼續執行，並於 4 月 16 日方完成整個作業。

## 肆、結論

雖然整體而言核四廠二號機反應器基座之安裝作業過程及品質相較一號機而言，不僅過程較為順暢使工期縮短許多，其品質從非破壞檢測之結果來看，亦有相當程度之提升，此自有受益於施工作業技術提升，以及能確實記取一號機安裝施工缺失經驗與落實改善作業執行之處，然檢討整體作業過程及其中所發現之視察缺失，主要仍與現場施工管理、品管與檢驗作業程序管理等有關之情形，顯示台電公司在此方面仍有相當之改善空間。相信也惟有在確實提升整體施工管理之能力後，台電公司方有可能在已有之良好施工技術基礎上，再進一步提升核四工程施工品質及作業效率之可能。

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、基座第一、二層間 WN23 鐳道電熱片及保溫毯裝置完成後情形



照片二、WN23 鐳道施鐳作業情形(一)





照片三、WN23 鐸道施鐸作業情形(二)



照片四、WN23 鐸道施鐸完成情形



照片五、視察人員檢視 WN23 鐸道背面情形



照片六、WN23 鐸道背面情形



照片七、WN23 鐸道鐸接缺陷移除後情形



照片八、WN23 鐸道鐸接缺陷修補後持溫情形



照片九、基座第二、三層間外板水平銲道施銲作業情形(一)



照片十、基座第二、三層間外板水平銲道施銲作業情形(二)



照片十一、基座第四層吊裝後情形



照片十二、基座第三、四層間內鈹水平鐸道施鐸作業情形



照片十三、基座第五層吊裝後情形



照片十四、基座第四、五層間內鈹水平鐸道施鐸作業情形



照片十五、基座第三層 Support Skirt Flange 內加強肋鈹結構



照片十六、基座第三層內鈹現場預留封鈹施鐸後情形(通風口下方)



照片十七、基座第三層 Support Skirt Flange 外封鈹施鐸情形



照片十八、基座第三層 Support Skirt Flange 第一次熱處理熱電耦佈置情形





照片十九、基座第三層 Support Skirt Flange 第一次熱處理保溫毯耦佈置情形



照片二十、視察人員以紅外線測溫計執行 Support Skirt Flange 第一次熱處理溫度量測情形(紅點處為測溫點)



照片二十一、視察基座第三層 Support Skirt Flange 第三次熱處理熱情形



照片二十二、基座第三層 Support Skirt Flange 上反應器基礎螺栓孔鑽孔情形



照片二十三、Support Skirt Flange 上反應器基礎螺栓孔鑽孔後孔位量測情形(一)



照片二十四、Support Skirt Flange 上反應器基礎螺栓孔鑽孔後孔位量測情形(二)



照片二十五、Support Skirt Flange 上反應器基礎螺栓安裝後量測情形(一)



照片二十六、Support Skirt Flange 上反應器基礎螺栓安裝後量測情形(二)