

核四廠駐廠主題視察報告
核四廠一號機反應器基座第一層
WN23 銲道修補作業查證

行政院原子能委員會
核能管制處
視察員：曹松楠

中華民國九十三年十月二十二日

目 錄

壹、前言	1
貳、視察之工程概況	1
參、銲補及視察作業執行情形	2
肆、結論	15
附圖	18
附件	24

核四廠一號機反應器基座第一層 WN23 鐸道 修補作業查證

壹、前言

WN 23 鐸道為基座第一、二層間之水平鐸道，於 92 年 11 月間開始現場組裝施鐸作業，並於 92 年 12 月間完成鐸接作業。然因 93 年 4 月施工處執行鐸道 NDE 檢測時於基座第一層母材側熱影響區處發現多處缺陷，且長度經累計後接近鐸道長度之 80%。此一情形經評估後，認為其肇因應不單純，加以在後續之修補過程中，類似之鐸接缺陷有一再反覆出現之情形，並有誘發鄰近鐸道(WN6)出現缺陷之狀況，由於基座為反應爐壓力容器（RPV）之下部支撐設施其安全重要性並不容輕忽，因此本會除在發現反覆之鐸接缺陷的第一時間即去函要求台電公司檢討改善外，為督促施工處慎重執行各項修補作業，減低鐸接缺陷反覆出現的情形，並有效掌握作業進行之情況與結果，自修復作業開始本會駐廠視察人員即將之列為重要之視察項目。

本報告即針對此一鐸補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、視察之工程概況

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)，兩鋼環間之夾艙除設置有抑壓池排氣管外，均

灌置混凝土。基座之主要材料為碳鋼(ASTM A572G50&G65)。此外，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。惟由於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。由於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之方式分別進行製造。

核四廠一號機基座第一層於中船公司完成製造及假組立後，即於 91 年 3 月 28 日運至核四工地，惟因發生中船公司錯用銲條與輔助板龜裂事件，其現場安裝作業延至銲條錯用疑慮獲得澄清及輔助板設計變更改善作業完成，並於 91 年 11 月間經本會同意後方得以展開。

基座第一層安裝作業開始後，在施工處及中船公司工作人員之努力下，歷經基板銲道施工變更及安全釋壓閥洩壓管（SRVDL）支撐板設計變更與施工等作業後，於 92 年 10 月間進行第二層之吊裝並於定位檢驗作業完成後，即於 92 年 11 月初開始第一、二層間水平銲道之銲接作業。銲接作業執行時，於完成部分之肋板銲道銲接後即同時開始進行內板銲道(WN44)之銲接作業，外板銲道(WN23)則於 92 年 11 月底開始銲接作業，並於 92 年 12 月中旬完成銲接作業。

參、銲補及視察作業執行情形

一號機 RPV 基座 WN23 銲道銲接及修補作業之過程，共歷經 9 個月之久(92 年 11 月至 93 年 8 月)，為便於說明整個銲道銲接及修補作業之

過程及視察作業執行之情形，以下將整個修補作業過程區分為：鐸接作業執行、鐸補作業程序之改善與測試、鐸補作業執行、鐸後熱處理作業及再檢驗與修補作業等五階段，逐一說明施工處修補作業執行過程、視察發現缺失與管制要求之執行情形。

一、鐸接作業執行階段

92 年 12 月初，WN23 鐸接執行背剷作業後，視察員曾赴作業現場實地查核施工處執行背剷檢驗作業(12 月 2 日至 5 日執行完成)、人員資格、鐸條及層間溫度(151~209°C)檢測等檢驗及管制作業情形。經實際檢視鐸道現況及鐸接管制與檢驗等記錄，其記錄情形與現況相符，均符合規定要求並能依規定時間進行查核。另於查對鐸接程序書(C237-程-62-1217)內容時，發現因 WN23 鐸道母材為 A533B2 依規定鐸後需再進行消除殘留應力之熱處理，而為避免於安裝現場進行此一熱處理作業，增加施工作業之難度與複雜性，因此 WN23 鐸道引用之鐸接程序書規定應在對接槽鐸前，於 A533B2 材料開槽端口上覆鐸(BUTTERING)至少兩層(5MM 以上)之 E8016G 鐸材並再進行熱處理。由於現場使用之鐸接檢驗紀錄並未附有或記載相關訊息，乃詢問在場之台電及中船公司人員，經告之前述 BUTTERING 鐸接及熱處理作業已先於廠製時執行完成，有關資料並已由汽源課完成查驗及收存。由於當時資料保管人員並未上班，因此至駐廠作業結束時，僅調閱到該鐸道 BUTTERING 之鐸接檢驗表，其上並有執行 UT 檢測合格之註記。

93 年 1 月中旬，執行駐廠視察作業時，赴基座安裝現場發現 WN23 鐸道有執行液滲檢測(PT)之情形(滲透劑及顯像劑尚未清除)，同時大世界檢測公司人員亦在現場，經洽詢後得知前述 WN23 鐸道之 PT 檢測情況，係中船公司執行自檢之結果，而非大世界檢測公司代表施工

處執行非破壞檢測(NDE)作業之結果。經實地檢視鐸道外觀及 PT 檢測之結果，發現鐸道下緣有疑似龜裂之線性指示(如圖一)，而由於鐸道表面研磨之情形並不十分理想，因此是否確為缺陷仍需再研磨、檢測後方能確定。考量如前述疑似龜裂之指示確為需加以剷修補鐸之缺陷，其鐸後需再實施熱處理，則整個修補過程可能較為費時，加上當時施工處已有進行基座混凝土灌漿之時程規劃，有需要儘早釐清前述疑似缺陷之狀況，以儘早進行處置。因此，針對此一狀況，即於現場告之汽源課在場之主辦人員，請其注意並要求中船公司儘速處理。

依台電與新亞公司之基座製造安裝合約，鐸道 NDE(超音波檢測及磁粒檢測,UT&MT)檢測作業係由台電公司自行派員執行，並為驗收作業之一部分，如台電驗收作業有不合格情形時，中船公司需於修補後再提出檢驗申請，且再檢測之成本由中船公司負擔，因此中船公司為縮短驗收時程並減少再檢測成本之支出，其通常均會執行自檢作業。因此 WN23 鐸道鐸接完成後中船公司曾於 93 年 1 月初執行 PT 自檢時，當時本會視察人員即曾發現鐸道表面下方靠第一層母材側有斷續長度不等之裂痕，由於中船公司對於自檢作業並不會留下任何作業紀錄，因此 WN23 鐸道之後續處理作業情形並無法明確了解。

二、鐸補作業程序之改善及測試階段

93 年 4 月 1 日施工處委請大世界檢測公司進行 WN23 之 NDE(PT&UT)檢測，即首先在 PT 抽檢(抽測 10%鐸道長度)時發現有大量缺陷，缺陷經研磨處理並再額外加測 20%鐸道長度，確認均無瑕疵後，施工處 NDE 股即於 93 年 4 月 9 日開始進行 100%之 UT 檢測。然而 UT 檢測結果卻顯示 WN23 鐸道母材熱影響區內部有大量間斷性之細微裂紋(長度約為鐸道長度之 70%左右)。

由於發現之數量龐大施工處 NDE 股除再請 NDE 承包商大世界

檢測公司再另派一組人員進行再確認外，另再選擇部分可進行射線照相檢測(RT)之區域執行 RT 驗證檢測，以求審慎。經兩次之 UT 及 RT 再驗證檢測後，施工處 NDE 股即以報告初稿非正式通知汽源課及中船公司。當時中船公司即依據檢驗結果，初步選擇部分缺陷位置進行剷除，雖然在剷除過程中目視並未發現缺陷，但是經由 PT 檢測後即可發現確存在有細微裂縫，至此中船公司開始進行全面性之缺陷剷除作業。本階段視察作業之執行情形摘述如下：

(一) 於確認 WN23 鐸道之缺陷狀況後，發現此一情形之本會駐廠視察人員楊慶威先生，考量缺陷之數量及分布位置狀態均顯示此現象並非鐸工個人因素(WN23 鐸道係由至少 4 名以上之鐸工所施鐸)或特殊鐸接位置等較單純之個案性問題。鑒於基座對於電廠安全運轉之重要性，當即以電話聯繫建議本會能儘速派員至施工處了解狀況，並與施工處有關人員進行討論，以決定本會應採取之適當管制作為。

(二) 於接獲通知趕赴施工處後，在與施工處人員討論前，先與核研所核四專案同仁吳毓秀及楊慶威先生，依據現況及汽源課提供施工圖面與相關鐸接程序書（C237-程-62-1217）共同研商並有以下發現：

1.根據 WN23 鐸道之鐸接程序書（C237-程-62-1217），WN23 鐸道之鐸接設計類似第一層外鈹與基鈹鐸道之鐸接設計，其設計及施作特點有：

- (1) 先在 A533B2 端口以 E8016-G 覆鐸(Buttering) 至少 5mm 厚度之鐸道作為隔熱緩衝層(Thermal Buffer)
- (2) 執行鐸後熱處理
- (3) 再與開槽之 A572 Gr65 對接鐸接

惟由施工圖面之標示，發現 WN23 鐸道為於核四工地現場鐸接之鐸道。但實際上前述（1）、（2）兩項之鐸接作業程序已於中船公司高雄廠廠製作業時即執行完成，僅餘（3）項部分才是於核四工地現場施做之鐸接作業。由於鐸接缺陷分佈之區域與 E8016-G 覆鐸層之範圍似有一定程度上重疊之處，因此為釐清工地現場鐸接前之母材狀況，需請施工處提供 E8016-G 覆鐸層 NDT 檢驗報告，以確認母材之完整性及覆鐸層之結合(BONDING)狀況。

2.由於 WN23 鐸道原有之 E8016-G 覆鐸層，極可能於修補過程中遭去除或失去原有之功能，因此鐸補後應再重新施行鐸後熱處理。而依據基座施工規範 AWS D1.1 5.5.2.1(12)之規定，增加或取消鐸後熱處理均為遮蔽金屬電弧鐸接（SMAW）之主要變數(Essential Variable)，因此鐸道原使用之鐸接程序書，應不容許於鐸補中使用，而需重新製作。

(三) 於完成初步之文件法規及現況之了解後，即會同研所核四專案同仁至汽源課與許勝豐股長、主辦游清帆先生等人，針對 WN23 鐸道施工處預計之處理方式進行廣泛之意見交換及討論。討論之主要內容及結果重點如下：

1.施工處與中船公司判斷 WN23 鐸道主要瑕疵之成因為冷裂 (Cold Crack)，因此提出之施工改善方案，為在鐸補過程中於鐸道預熱及鐸後持溫時全程利用加熱墊(Thermal Pad)，取代原先使用之排管加熱方式，以避免預熱加熱時不均勻並有效減緩鐸道升降溫速率，如此應可緩和鐸道熔池凝固過程中之縮收熱應力，進而有效避免鐸道熱影響區龜裂之形成。

2.對於 WN23 鐸道瑕疵成因之評估及將採行之對策，本會原則

上尊重施工處與中船公司之專業判斷，惟仍請施工處能將其他可能肇因再納入考量，如母材之完整性、銲接工件拘束力 (Restraint)及 BUTTERING 之結合度不良等之可能性，以期能確實確定肇因並改善，以避免銲道有一再修補，致使銲道完整性及銲接品質出現疑慮之情形。

- 3.原銲接程序書已不再適用於補銲程序，雖已可經由即有銲接程序檢定紀錄 (PQR) 之引用來加以解決，但施工處仍應督促中船公司完成應有之審查發程序，並確實依據新銲補程序執行銲補作業。
- 4.經實際查閱 NDE 檢測紀錄，發現 WN23 銲道之廠製覆層銲檢驗表之 NDE 紀錄，實際上為廠製圖上另一 WN23 銲道之 NDE 紀錄，而非目前現場組裝圖上之 WN23 銲道，對此施工處除應改正有關紀錄外，並應針對仍在廠製中之二號機基座，其覆銲層是否有執行結合度檢測之情形進行確認。
- 5.由於覆層銲後未執行完整性之檢驗，對欲在工地免除執行銲後熱處理之對接槽銲的銲道母材而言，其母材之完整性並無法確保，且亟有可能工地銲接後出現銲接瑕疵，如此原欲以此免除於工地執行銲後熱處理之目的即無法達成。由於已往奇異公司對於覆層銲後並未要求進行 UT 檢測，而係在後來施工作業中才將之加入做為覆層銲後之檢測項目，因此施工處有需要針對核四其他工程及設備等之施工製造作業中，有執行覆層銲接之情況時是否有進行完整性檢測進行清查。
- 6.請施工處將後續銲補作業執行情形適時知會原能會駐廠同仁，以便於駐廠人員能即時掌握最新情況。

(四)中船公司及施工處於再考量後，雖仍維持原有對 WN23 銲道缺陷

肇因及改善對策之看法，但為保守起見施工處及中船公司決定先進行局部之鐸補作業待確認所研擬之鐸補作業程序確實有效恰當後，方進行全面性之鐸補作業。

對於缺陷之剷除，由於考量檢測顯示之缺陷位置相當深(部分深度已接近板厚)，加以剷除範圍涵括鐸道本身及原覆鐸層在內之熱影響區，因此需去除之材料數量並不在少數。為加速剷除作業之進行，先採用碳棒剷除(Carbon Gouging)大部之材料後，再配合砂輪機逐步研磨與 PT 檢測之方式，進行缺陷移除、確認及整修鐸補鐸槽之工作。以下為缺陷剷除及第一次試鐸過程中之視察發現：

- (一) 至現場巡視缺陷之剷除磨修作業情形時，發現多處之鐸道其缺陷剷除後之深度，一如預期相當地深(近板厚 35.2mm)，同時發現鐸補鐸槽之底部寬度有不足之情形，經與汽源課人員討論後，其決定不再將鐸補鐸槽擴大，但使用較小直徑之鐸條，以確保鐸條前端能有效接近鐸槽底部，以避免鐸槽底部因距離鐸條前端過遠，鐸接電流(熱量)下降不足，而使鐸道有熔融不良之風險，並減少補鐸時之熔填量。
- (二) 第一次之試鐸作業於 4 月 21 日進行，選擇鐸補之位置為編號第 21 號處之缺陷，其長度約為 1200mm。鐸接作業人員由中船本廠之人員擔任，至現場了解作業情形時汽源課及品質課電鐸股人員均在場監督，並已完成鐸前之檢驗。此外為了解由施工處是否已依要求督促中船公司完成鐸補程序書之修正，遂再查核所使用之鐸接程序書是否已依要求備妥，結果發現作業現場並未將應有經正式施工處認可之程序書可供查閱，對此汽源課主辦人員表示有關資料實際上已備妥，因考量此次鐸補作業係一測試作業，遂未先將之依程序完成審查並攜帶至現場備用，惟

承諾會儘速將相關資料備齊提送。另再詢問現場中船人員有關層間溫度及鐸後持溫程序等重要之鐸接管制參數，均與日前洽詢汽源課所獲之數值一致(預熱溫度和鐸後持溫 150°C~250°C，溫度保持約二小時之後在保溫棉包裹之狀態下緩冷至室溫)，又再觀察此次測試之加熱及持溫設施之設置情形，亦與規劃之方式一致，以電氣加熱墊(Thermal Pad)作為加熱的熱源，以取代加熱排管，並以熱電偶作為溫度感測元件，以自動控制鐸道及鄰近母材之溫度。考量相關人員已熟知作業要求及設施之設置亦已符合規劃方式，因此，在施工處承諾限期完成改正，並於確認預熱溫度到達後，並未要求中止此次鐸補測試作業之進行。

(三) 此次鐸補測試作業完成後，依規劃應於研磨後即進行 PT 及 UT 檢測作業以確認改善後之鐸接程序是否可行，惟於研磨前中船公司之人員即目視發現鐸補區域表面有一長約 600mm 之裂紋，因此宣告目前所擬之鐸接改善程序失敗。而剩餘之 600mm 鐸補鐸道，經研磨及 PT 檢測後亦發現仍有龜裂。針對此一鐸補再裂情形的出現，當即要求施工處：

- 1.重新擬定鐸補程序並應再送奇異公司審核。
- 2.重新擬定之鐸補程序於實物進行鐸補作業前應進行模擬測試驗證，以避免反覆之補鐸作業引起降低材料性質之情形及疑慮。此外，針對此次施工處於鐸補作業過程所呈現之管理缺失及覆鐸檢測問題等事項，除當即口頭告知要求改善外，部分內容亦於 93 年 04 月 23 日以視察備忘錄：LM-會核-93-12-0 正式函請其進行改善。

根據本會視察之要求，施工處與中船公司檢討程序上之缺失，認為裂紋應是冷卻速率仍過快所致，因此其規劃再擴大保溫棉包覆範圍，將

鐸道內面之肋板部分亦加以涵蓋，並改自然降溫為 $0.3F/mim$ 之控制性溫降，以更進一步緩和收縮及殘留應力之作用。並立即於高雄總廠製作模擬試體進行模擬測試驗證，測試之結果顯示沒有裂紋發生後，施工處旋即送請奇異公司審核。

對此一程序奇異公司主要之審核意見係在鐸後熱處理之進行方式，其認為應整圈一次均勻加熱方式進行較佳以儘量降低熱膨脹負荷可能造成之過度應力現象。如施工處要以分段之方式進行鐸後熱處理，其認為有需要再進行計算或分析證明區段鐸後熱處理將不至於因材料各方向上不均勻變化而產生過度負荷或過度應力。施工處考量奇異公司之評估意見及整圈一次熱處理之可行性後，決定採行奇異公司意見整圈同時一次進行鐸後熱處理，並修正鐸補計畫之內容，再送奇異公司審查同意及經施工處發行程序後，中船公司隨即在工地試行一小段鐸道之修補鐸接，以驗證修補鐸接技術之可行性。

第二次之試鐸作業於 93 年 5 月 26 日上午開始進行，鐸補位置選擇前次試鐸位置(第 21 號缺陷)180 度對角處之第 59 號缺陷，試鐸之長度約 1M，為更加緩和殘留應力之作用，保溫棉之長度較程序書之要求再增加一 M，鐸後依程序書規定不立即進行鐸後熱處理。鐸補作業進行前，曾赴現場實地查證鐸接檢驗表、預熱、持溫溫度(規定 $150^{\circ}C \sim 250^{\circ}C$ ，實際 $200^{\circ}C \sim 250^{\circ}C$)及加(持)溫措施設置情形等是否與鐸補作業指引規定相符。由於預熱升溫及鐸後持溫降溫甚慢，因此全部鐸補作業時間共約耗時十五小時(作業當時由上午十時開始至隔日凌晨一時左右方結束)。鐸補作業完成後再調閱檢視其升、持溫溫度記錄紙帶，其升溫及鐸後持溫降溫速率均合於規定要求。鐸接完成後經 NDE 檢測(PT&UT)發現一處長約 30mm 深 20mm 之瑕疵，經檢測人員評估其為熔合不良。雖依 AWS D1.1 之規定此種瑕疵亦為不可接受之缺陷，需將之剷除並進行鐸補。惟

由熔合不良產生之可能原因(開槽情形、鐸材尺寸及鐸接電流等)推論，現在之鐸補程序應已可解決原鐸接裂痕發生之問題。因此施工處即決定以兩組人員同時進行鐸補之方式，進行修補之作業。

三、鐸補作業執行階段

一號機基座 WN23 鐸道於鐸補程序測試成功後即展開全面性之第一次鐸補(R1)作業，由於鐸補作業係分段進行，因此 UT 檢測作業亦依鐸補階段逐段進行，並於 93 年 7 月中旬完成所有 R1 鐸補之 NDE 檢測作業。由於考量加熱、持溫設施安裝費時，於檢測過程中再發現之缺陷，並不立即進行第二次鐸補(R2)作業，而於整圈 R1 鐸補作業完成後才一併進行 R2 之鐸補。

檢測結果顯示於在 R1 鐸補過程中，除 WN23 鐸道鐸補區域亦再有缺陷產生外，WN23 鐸道原無缺陷之區域亦有缺陷出現。此外位於 WN23 對角處之 WN6 鐸道亦發現有缺陷(33 處)出現。此外依 R1 後缺陷之分佈情形發現，RS13&RS14 區塊之缺陷較少，且評估後認為多數應可於研磨後去除，而多數缺陷集中於 RS11&RS12 區塊有高低落差(3~6 mm 不等)部分之鐸道熱影響區內。

針對 WN6 鐸道缺陷的出現，本會於發生時即以視察備忘錄：LM-會核-93-12-1 正式函請施工處要求評估發生原因並進行改善處置。根據施工處之說明，WN6 缺陷之形態多為鐸趾處之表面性裂紋(Toe Crack)，並多位於肋板附近，廠製時之檢測結果亦並未發現有瑕疵，再觀察發生缺陷區域之鐸道表面，其平順度並不十分理想。因此，判斷這些缺陷應是受肋板拘束度大，致鐸接時於附近產生之應力較大，再加上鐸道形狀不理想而產生之應力集中效應等因素而誘發產生。因此可藉由對鐸道形狀之磨修，消除幾何形狀之不連續狀態而獲得改善。

在 R1 鐸補檢測作業結束後，汽源課及中船公司曾再分析 WN23 鐸

道之缺陷 R1 鐸補之結果，發現 WN 23 鐸道之缺陷數量由 61 個減為 19 個，長度則由 8 成減少至 2 成以下。因此認為現有鐸補程序之成效不錯，應可無需再修正，至於 WN 6 鐸道缺陷之再產生則可以前述方法加以防止。故汽源課及中船公司仍決定 WN 23 R1 缺陷之鐸補(即 R2 鐸補作業)將依原有之程序進行，同時並執行 WN 6 部分缺陷之 R1 鐸補作業。而為減少鐸補時之鐸材熔填量，將以小量研磨、檢測之方式，進行 R1 缺陷之移除作業。

至現場巡視 WN 23 鐸道 R1 缺陷移除作業情形，汽源課正會同中船公司人員進行缺陷位置標示，而中船公司下包礁鋼人員亦在中船人員會同下進行 WN23 及 WN6 鐸道缺陷之磨除作業。經檢視 WN 23 現況發現多處之鐸道外形及與第一層鄰接區域之凹陷情形有不符合要求及遭過度研磨之情形，依 AWS 規範之要求鐸道鄰近區域之凹陷情形於基座此一板厚條件下，應小於 1.6mm 方符合規定。而在會同汽源課人員共同檢視時，汽源課人員解釋部分遭過度研磨之區域，係 NDE 檢測缺陷於研磨後，卻於再確認檢測後遭排除之結果。

為了解實際凹陷之尺寸及鐸道外形狀況，視察人員全面抽測 WN 23 鐸道與母材凹陷之情形，結果發現許多部位之凹陷深度均超過法規 1.6mm 之限值(約在 1.8~4.8mm 之間)，依規定必須進行補鐸，除將抽測結果提供汽源課參考外，並請其要求中船公司進行較詳細之量測，以便於 WN 23 鐸道 R2 修補作業時一併進行補鐸。

此外因部分 R1 鐸補後產生之缺陷係位於原無缺陷之鐸道區域，為避免在進行 R2 鐸補時又在原無缺陷之區域誘生缺陷而不知，在 R2 鐸補前之視察過程中曾提醒施工處注意此一問題，除請施工處將鐸補後 NDE 檢測之範圍增長，最好能使每一段之檢測範圍能有一定程度之重疊外，亦請其能於熱處理前後均再執行一次整圈之 NDE 檢測作業。經汽源課

評估後，決定加大加熱範圍減少應力及拘束度發生之程度，並於檢測進行時亦將無缺陷之區域包括其中，使無缺陷之區域在相鄰之缺陷區域的鐸補前後均會再被檢測一次，並於熱處理後再執行一次整圈之 NDE 檢測作業。而在第三次(R3)鐸補作業時對相隔較近之缺陷則亦採取類似作法，而在相隔較遠之情形時，則僅以延伸加熱及檢測範圍為之。(加熱及檢測延伸之範圍因考量鐸補長度之不同及肋板位置，係依現場狀況決定並無法予以明確量化，惟應至少向外延兩倍之鐸補長度。)

WN 23 鐸道 R2 及 WN6 鐸道 R1 之鐸補作業亦是採取分段逐一鐸補及檢測之方式進行，並於 93 年 7 月 28 日執行完成。而根據 NDE 檢測之結果顯示 WN 23 及 WN6 鐸道仍有缺陷指示(WN 23：5 處，WN 6：18 處)，而缺陷之位置多集中肋板附近。雖然 WN 6 鐸道之鐸缺陷仍舊不少，但依檢測指示之情形判斷其應多是表面性之瑕疵，多數可能稍加研磨後即可除去，因此情況應不嚴重。

WN 23 鐸道 R3 及 WN6 鐸道 R2 鐸補作業在歷經三天之趕工後完成，而 NDE 之檢測結果顯示，在 WN23 鐸部分曾發現有數處位於表面下 1 mm 左右之夾渣（Slag Inclusion）及熔合不良（Incomplete Fusion）之指示，惟經研磨後再檢測已無缺陷顯示。而 WN 6 鐸道亦仍發現 5 處位於表面下 1~2 mm、長 10~30 mm 不等之近表面缺陷指示，但在反覆之研磨檢測後，亦順利於 93 年 8 月 6 日完成缺陷移除作業。

四、鐸後熱處理作業階段

鐸後熱處理作業自 8 月 8 日下午 16：30 開始執行，在鐸後熱處理作業進行之前，視察人員除針對熱處理電源規劃與設備校驗情形進行了解及查證外，熱處理作業結束後，則針對熱處理溫度紀錄內容進行查核，以確認熱處理之升(降)溫速率、持溫時間與溫度以及鐸道任兩點間溫差等之熱處理參數，均符合法規要求。上述視察作業執行情形

如下述：

- (一) 銲後熱處理作業依奇異公司之要求，需整圈銲道一次進行完成，由於涵蓋範圍包含 WN23、WN6 之 A533B2 母材及其熱影響區，因此需以 8 組加熱片進行作業。由於基座施工現場所能提供之電源電流僅 450A，一般最多僅能提供 4 組加熱片之需要，而依了解此 8 組加熱片加上適當裕度後之電流需求量約為 1200A(8× 150A)，因考量不足之 750A 電流不可能調用現場市電來提供(除需再拉配線外，在熱處理進行中的 12~24 小時內，工地所有吊車亦需暫停使用，以穩定電力之供應)。針對此一電力供應上之限制，經洽詢中船公司已再另行調用三台柴油發電機，做為另外 750A 電流之供應來源。依中船公司之規劃 8 組加熱片區分為 4 個用電迴路，其中工地市電負責供應 2 條用電迴路，另 2 條用電迴路由 2 台大型柴油發電機負責供應，至於第 3 台大型柴油發電機則做為備用電源，依此規劃整體熱處理供電規劃尚稱完善，且留有相當之備援餘裕。
- (二) 查證溫度紀錄器儀器校驗之情形，2 台記錄器分別於 93 年 5 月 28 日及 93 年 7 月 28 日由工研院量測技術發展中心執行校驗，符合規定。
- (三) 依據 AWS D1.1 及熱處理溫控程序之各項要求條件，逐一與熱處理溫度紀錄內容比對後之結果顯示，此次執行之 WN6 及 WN23 銲道修補後銲後熱處理作業，滿足 AWS D1.1-90 4.4 節及熱處理溫控程序等之規定。

五、銲後熱處理後再檢驗及修補作業階段

8 月 13 日施工處完成銲後熱處理後，立即委請大世界公司再針對 WN23 及 WN6 兩銲道執行非破壞檢驗作業(UT 及 PT)。檢測之結

果顯示 WN23 鐸道有三處表面及近表面之缺陷。針對這三處缺陷施工處原計劃引用 ASME Sec III NC-4622.9 中對小於特定鐸修範圍及深度之缺陷補鐸(Limited Weld Repair), 容許免除補鐸後需再執行鐸後熱處理之條款, 作為可免除鐸後熱處理之依據。然因該條款對於所使用之鐸接程序書有特別規定要求, 在考量基座灌漿時程急迫, 前述規定要求恐不易立即達到, 加以施工處認為 AWS D1.1-90 並未禁止以局部方式進行鐸後熱處理, 其遂決定於此以分段局部方式執行此次之補鐸後熱處理作業。

肆、結論

在歷經近 5 個月的不斷反覆試驗及鐸接作業後 WN23 鐸道缺陷之修補作業雖終宣告完成, 且在作業過程中所發生之管制及品質方面的缺失及不足之處, 施工處在後續之作業中亦多能依據或參考本會之要求及建議, 於正式施作前完成必要之改善及強化工作。然縱觀整體之作業過程, 認為施工處仍應針對下列事項再做檢討改善或進行再評估。

- 一、針對修補過程所呈現出之各項管制缺失及疑慮, 例如：原鐸接程序書中之重要參數已變, 仍然用來作為鐸補工作執行之依據, 以及在承包商自檢作業階段, 遭鐸修之鐸道其所遭受到之處置施工處並無法知悉等。歸納來說這些均是導因於未對鐸補作業過程建立適當之管制機制, 因此施工處除需針對各項缺失再加檢討外, 其品保部門亦應建立一鐸補作業管制制度, 以有效管制包含廠商自檢鐸補作業在內之鐸補作業過程及品質。對鐸補作業管制制度

建立之必要性及落實要求，經不斷之溝通及以視察備忘錄要求後，施工處電鍍股已在規劃中。

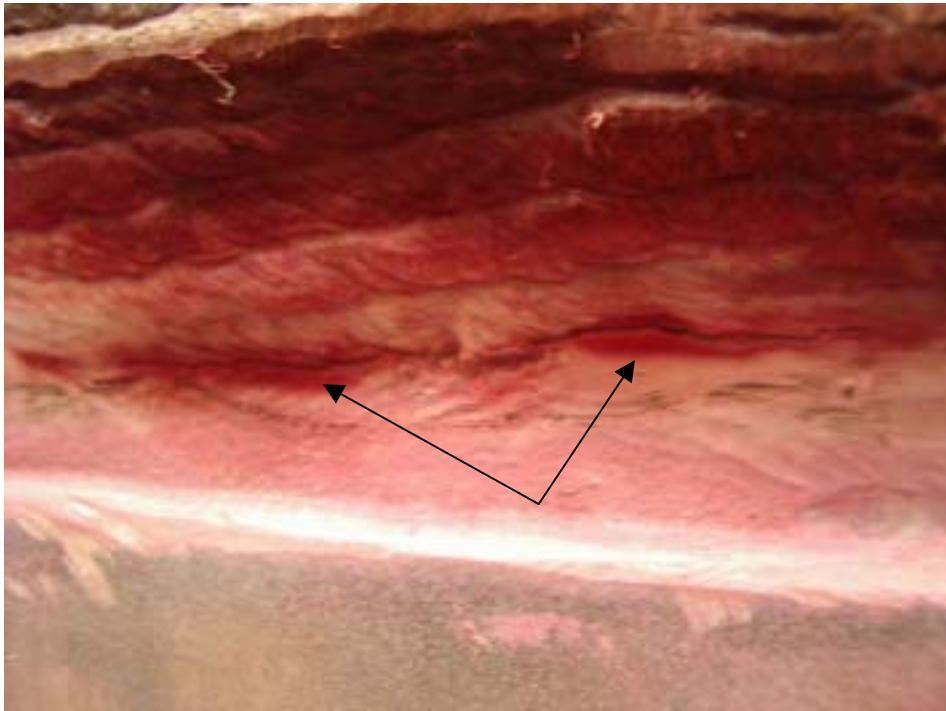
二、比較核二廠基座類似鍍道之施工方式時，發現其鍍接作業係以整圈同時加熱至預熱溫度，並以四組鍍工連續不停施鍍之方式一次完成，與核四目前分段進行之方式相較，其可降低材料受熱應力(變)不均勻或熱循環次數過多，引發材質損傷之機會。由於核四基座第一層所用之 A533 材料其屬 Q&T 鋼材，其材質特性，可能因熱循環次數太多受熱過度，而使其材質有發生劣化之疑慮。為避免此一疑慮之發生，曾在鍍補過程及結束後，數度建議施工處能考慮參考核二廠基座之施工方式，修改核四廠二號機基座之施工方式。

三、針對鍍後熱處理後再檢測缺陷採取分段方式進行鍍後熱處理之作法，雖在法規及技術層面上容或有可接受的空間，但由鍍補作業指引最後係依據奇異公司之意見，對鍍後熱處理採取整條鍍道全部同時熱處理之方式來進行。顯然施工處在當時是認同並接受奇異公司所顧慮的情形係有可能發生的，加以奇異公司亦曾說明若以分段之方式進行熱處理，應進行影響評估作業，所以就程序之合理性來說，施工處如要另採分段方式進行熱處理，自應再依奇異公司之要求執行評估作業。因此施工處在作業時程之壓力下，

未經適當評估程序即進行局部性熱處理之作法，除違反既有之作業程序要求並可能影響設備品質外，亦令人對施工處品管部門執行有關作業時之落實性有所疑慮。

四、由於材料性能是否發生劣化，受到很多內外因素的影響，因此在評斷材料劣化與否通常需依個案情況進行研究評估或分析已有之使用經驗。所以各銲接法規(AWS D1.1 及 ASME SEC IX)均未對銲道可重覆修補之次數有任何之規定。從材料及銲接理論甚或實務上之經驗來看，此次 WN23 銲道的銲補過程，對於部分銲道區域之材料於歷經多達 3~5 次之銲接與熱處理之熱循環後，其性能發生劣化應是可以預期的，但因缺乏對 A533 材料或 Q&T 鋼材銲接特性之研究資料與實務上之了解，致無從確知其真實之劣化情形。因此為明確了解材質之劣化情形，以及早規劃因應改善對策，宜針對 Q&T Steel 材料與銲接特性及銲後熱處理與方法可能產生之影響等問題進行研討。

註：本報告限於篇幅附件部份並未附上，如有任何疑問，請洽本會黃智宗科長，Tel：02-2232-2140



圖一：WN23 鐸道下緣疑似龜裂之線性指示



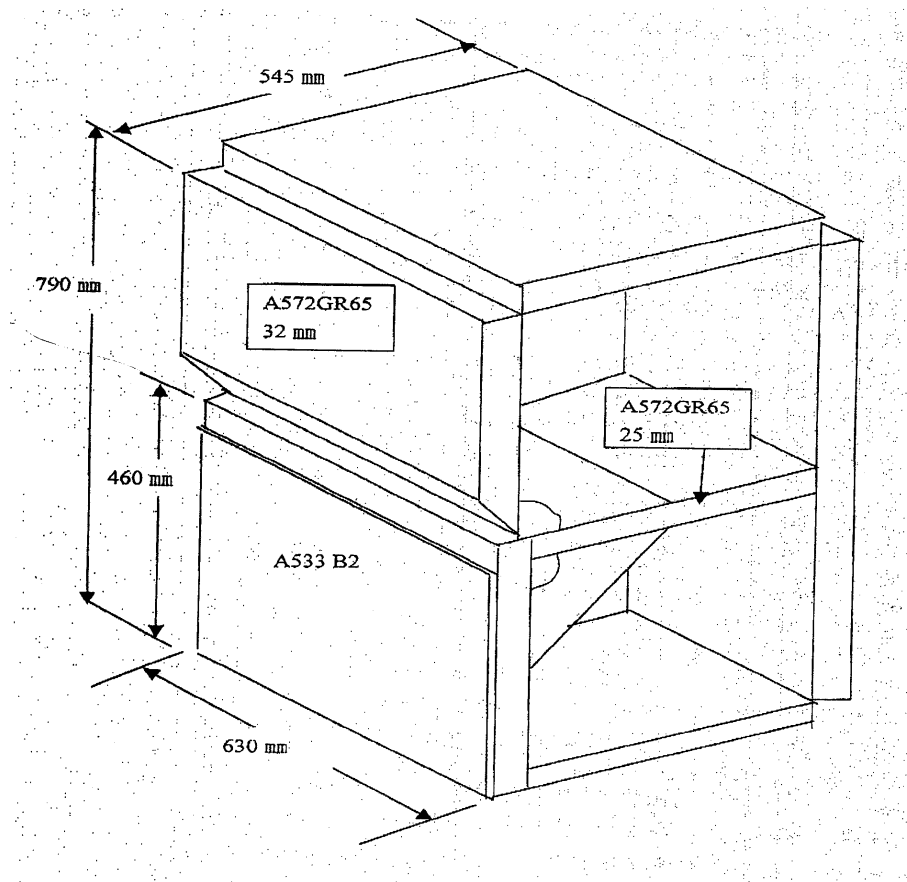
圖二：WN23 鐸道缺陷(第 45 號)磨除後情形



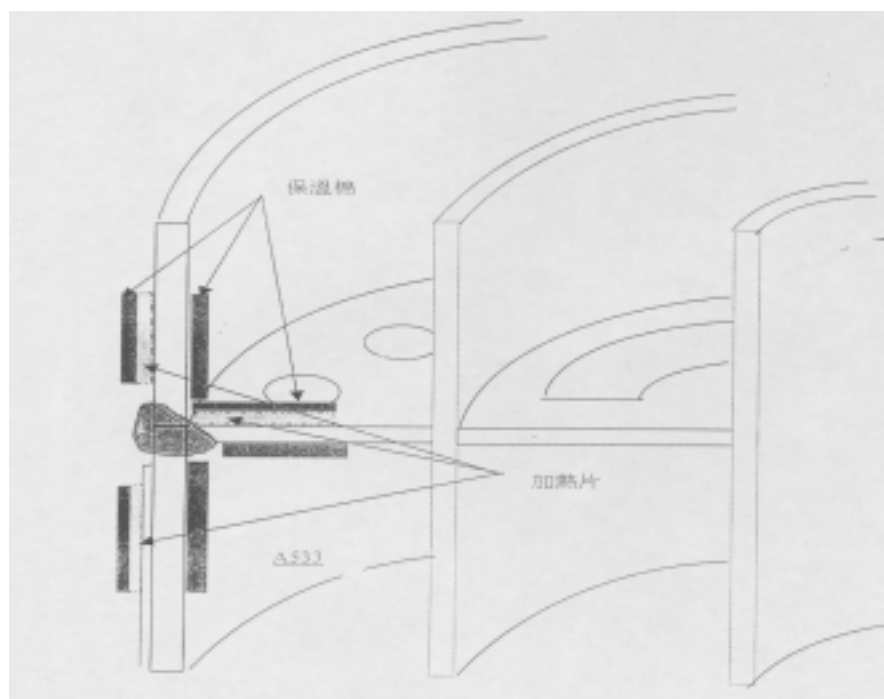
圖三：第一次試鐸作業情形(第 21 號缺陷)



圖四：第一次試鐸補鐸後龜裂位置(紅色線條)



圖五：改善後鐸補程序模擬試片結構圖



圖六：改善後鐸補程序鐸道加熱保溫設施佈置圖



圖七：第二次試鐸前 WN23 鐸道(缺陷#59 位置)情形



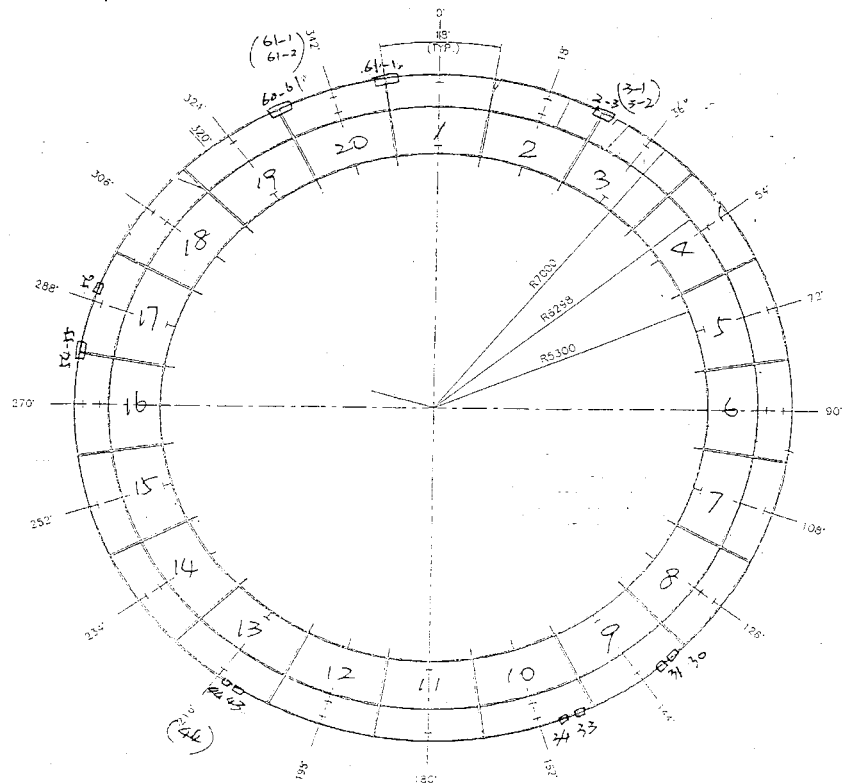
圖八：第二次試鐸後 WN23 鐸道(第 59 號缺陷位置)情形



圖九：第二次試鐸後 WN23 鐸道 PT 檢測給果(第 59 號缺陷)



圖十：WN23 鐸道高低落差情形



圖十一：WN23 鐸道第二次(R2)鐸補後缺陷位置圖



圖十二：整圈鐸道同時執行鐸後熱處理作業情形