

核四廠二號機反應器壓力容槽安裝
視察報告

行政院子能委員核能管制處
中華民國九十六年五月二十五日

目 錄

壹、前言.....	1
貳、視察說明.....	2
參、視察經過.....	10
肆、結論.....	31
伍、視察照片.....	33
附件.....	42

壹、前言

自 94 年核四廠一號機反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)吊裝完成後，台電公司即持續籌劃二號機 RPV 吊裝工作；期間除建廠冗忙的工作外，也面臨核四建廠執照至 94 年底屆期之問題，故同時準備延照之申請。當時台電公司管理階層亦警覺到核四建廠工程延宕及建廠經費拮据之困，因此在順利取得原能會同意建廠執照展期後，基於建廠工程管理協調性，遂在 95 年初逐步進行核四工程管理階層調整，將原先無橫向管理機制的單位集中在同一管理體系，由同一主管統籌建廠及將來營運等之準備工作，以減少工程介面干擾引發之負面影響。

前（94）年，台電公司曾針對核四建廠計畫延誤及經費，向行政院提出調整商轉日期及增加投資總額要求。在調整商轉日期方面，對延後及工期影響原因提出：施工及設計介面管理、核四停工影響及廠商配合等諸多因素；並且也評估商轉延後，對供電、投資總額及核安之影響等。在投資總額方面，則考量匯率、利率及反映物價變動之合理性等。綜合前述原因，經跨部會開會研商後，由經建會審議歸納各種因素主要有：核四計畫核島區自統包改為分包、機組擴大致相關設計量及用料大增，以及採取設計與施工同時進行致加深管理介面複雜度等問題，同時要求台電公司釐清相關責任。該提案已於 95 年 8 月獲得行政院同意辦理。

在整個核四建廠過程中，雖或曾面臨停建及規範更迭等諸多不利因素影響，但在從業人員一致努力下，繼 94 年 3 月下旬順利完成安裝一號機之反應器壓力槽作業後，95 年 10 月初也完成二號機之反應器壓

力槽安裝作業，這應也是核四廠建廠另一個階段的開始。行政院於 95 年 8 月 21 日以院台經字第 0950039485 號函核定核四計畫商轉日期(第 1、2 號機分別調整為 98 年 7 月 15 日、99 年 7 月 15 日)，根據資料顯示，截至 96 年 4 月底之核四建廠工程總進度已達到 64.37%，實體施工部分之進度則在 54.05%，已達一半以上。由於核四建廠實體施工部分，目前已步入高峰期，期待未來，若台電公司能順利排除商務糾葛、解決勞工短缺及迅速改善介面障礙等問題，核四商轉以改善國內電力短缺窘境，當指日可待。

本著核能管制之職責及對核四建廠期間的重點查證措施，原能會在本次二號機 RPV 安裝過程與一號機相同，籌組專案視察小組，執行此項作業視察工作。RPV 安裝作業涉及各種不同的工程領域，專業分工及介面協調均為關鍵，由於 RPV 在放置於基座前係儲放在倉庫中，之間的運輸及吊運等介面作業均須透過專業人員執行，因此準備工作緊接一號機 RPV 安裝後即著手進行。根據一號機 RPV 安裝所發現的缺失，台電公司汲取經驗改善，對各項作業所須引用之程序書在各承包廠家的合作下修改或撰寫完成，俾便遵循。本視察即針對此次的 RPV 安裝規劃及執行過程進行查核工作，確保機組將來運轉安全無虞。

貳、視察說明

本次視察工作，實際上自 94 年第 4 季即已開始準備，根據早先本會核研所同仁所撰寫的「RPV 安裝視察導則」及一號機 RPV 安裝時所發現之缺失，自 95 年初已安排視察工作並陸續展開，根據工作性質及施工順序同樣也分為六大項目，分別是：

1. 地錨螺栓安裝(Anchor Bolt Installation)

2. 承載板安裝(Bearing Plate Installation)
3. RPV 運輸及吊運(RPV Transportation and Lifting)
4. RPV 安裝及定位(RPV Installation and Alignment)
5. 穩定器安裝(Stabilizer Installation)
6. RPV 儲存及維護(RPV Storage and Environment Control)

上列第 1、2 項是 RPV 基座現場進行地錨螺栓及承載板放置作業，屬安裝工作之先期作業，第 3 項是 RPV 自倉庫運吊至安裝現場之作業，接著是第 4 項的 RPV 安裝定位及鎖磅，是本次作業之主體性工作，第 5 項是防止 RPV 受側向力影響的工作，至於第 6 項則是 RPV 放置於基座後之儲存維護，須持續執行至建廠完成之項目。至於作業程序方面，各項作業均備有程序書可供遵循，其中第 1、2 及 5 等三項之程序書與 RPV 安裝有直接關係，主要是由顧問公司(中鼎)根據 GE 公司文件-反應器壓力槽安裝規範(Reactor Vessel Installation Specification, 編號 26A5273)，同時參酌一號機吊裝時所使用之程序書編寫而成；另有一部分則是顧問公司經檢討改善後所研擬。有關本次視察主體 RPV 之各項設計功能及參數，如核四廠反應器結構及反應器基座等之簡要介紹如下，期能對 RPV 安裝工程有較完整的輪廓。

一、ABWR 反應器結構功能簡介

核四廠為進步型沸水式核能電廠(Advanced Boiling Water Reactor, ABWR)，共安裝兩部機組，每部機組有一座反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)為奇異公司設計，額定熱功率輸出為 3926MWt，與一號機反應器壓力槽製造商（日本的日立公司(HITACHI)子公司 Babcock-Hitachi K.K.(BHK)製造）不同，二號機反應器壓力槽為日本的

東芝公司 (TOSHIBA) 下包商石川島播磨重工業株式會社(IHI)製造，反應器壓力槽主要的功用是用來包封爐心、內部組件和反應器冷卻水，做為完整性的屏蔽，以防止壓力槽內放射性物質外洩到乾井，並提供可產生高乾度飽和蒸汽之空間。在壓力槽發生一次系統破管，造成冷卻水流失事故時，可以供給一個足夠冷卻爐心的淹沒水容量空間。核反應加熱爐水，產生成蒸汽，經過汽水分離器及乾燥器，導出反應器壓力槽外驅動汽輪發電機組作功，產生電力。汽輪發電機組由日本三菱公司(MITSUBISHI)製造提供，額定出力為 1356MWe。

(一)反應器壓力槽設計基準考量分為安全功能及發電功能分敘如下：

1.安全功能：

- (1)反應器壓力槽與內部組件提供爐心灌水所需的容積，在發生壓力邊界破裂的情況下，能確保爐心有足夠的冷卻。壓力槽有穿越管能提供數種壓力槽灌水的方法。
- (2)防止內部組件變形，保證控制棒及緊急爐心冷卻系統都能發揮其安全功能。
- (3)反應器壓力槽是反應器冷卻水壓力邊界(Reactor Coolant Pressure Boundary, RCPB)的主要部份。
- (4)反應器壓力槽要能支持控制爐心反應度的系統。
- (5)反應器壓力槽系統在控制棒驅動系統外殼(Control Rod Driver Housing)故障的事故，也要能包容控制棒與驅動機構，以防控制棒射出。
- (6)反應器壓力槽系統在結構體故障的事故中，也要能包容爐內循環水泵(Reactor Internal Pump, RIP)，以免其損害在爐槽下方的

控制棒驅動液壓管與其它組件。

2.發電功能：

- (1)任何預期正常運轉情況下，提供適當的冷卻水分佈，使爐心功率運轉而不損壞燃料。
- (2)燃料填換時，爐蓋、乾燥器、汽水分離器與同一組件之側板蓋等能方便拆除，內部循環水泵方便檢查。
- (3)蒸汽在進入汽機前，水份要能由蒸汽中移除。
- (4)使返回爐心的飼水與由汽水分離器分離出來的循環飽和水充分混合，使降流區的水成為溫度均勻的過冷水，提高內部循環水泵的淨正壓吸水頭(Net Positive Suction Head, NPSH)。
- (5)能提供數種停機熱移除的方式。

(二)反應器壓力槽主要組件簡介

反應器壓力槽是依照美國機械工程師學會第三篇(ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Div I)鍋爐與壓力容器規範來設計、製造、測試與檢驗，壓力槽與支持系統的設計要符合第一類耐震的要求。於日本組裝製造的反應器壓力槽並不包括內部的主要組件，如乾燥器、汽水分離器、燃料棒、控制棒、功率偵檢器、內部循環水泵等，此等組件需待反應器壓力槽安裝定位之後組裝。核四廠二號機RPV係於93年7月7日14時運抵核四RPV儲存倉庫，反應器壓力槽與爐蓋分成兩大組件運送，內部充填氮氣以防止銹蝕。

運抵核四RPV儲存倉庫的反應器壓力槽主要結構組件包括爐蓋(Closure Head)、殼環(Shell Ring)、球形底蓋(Spherical Shell)、壓力槽支持裙板(Support Skirt)、噴嘴(Nozzle)、爐心側板支撐及支撐環(Core

Shroud Leg and Ring)以及內部循環水泵馬達殼(Internal Motor Casing)等。

1. 爐蓋

反應器壓力槽是由一個有凸緣法蘭的半球形的爐蓋鎖在壓力槽上法蘭(Top Flange)所組成，爐蓋總重量約 103 公噸。爐蓋材料為(SA-533 Type B Class 1)，爐蓋內徑 3353 mm，公稱厚度有 110 mm。爐蓋凸緣材料為(SA-508 Class 3)，爐蓋內部表面處於蒸汽環境不易腐蝕，故未予不銹鋼覆鍍。凸緣法蘭覆鍍 1/8”厚英高鎳，有兩同心圓槽，為安裝鍍銀英高鎳 O 型封環位置，二環之間設有測漏裝置，可以偵測反應器壓力槽凸緣密封是否有洩漏。

2. 殼環與球形底蓋

反應器壓力槽主體是由四層殼環銲接而成，上方有凸緣法蘭與爐蓋凸緣法蘭以螺栓連結組成，下方與球形底蓋銲接而成，總重量約 780 公噸。第一、二層殼環材質(SA-508 Class 3)為一體鍛造，第三、四層材質(SA-533 Type B Class 1)為淬火回火(Quenched and Tempered)材料，滾壓製成兩半圓後銲接，內部表面覆鍍 1/8”不銹鋼。

球形底蓋材質為(SA-508 Class 3)，內部覆鍍 1/8”英高鎳，有 10 支內部循環水泵(Reactor Internal Pump, RIP)、205 支控制棒殼、52 支局部功率階偵檢器、10 支起動階中子偵檢器、1 支底部洩水管、4 支爐心底鈹差壓儀器管、4 支內部循環水泵差壓儀器管等貫穿短管(Stub Tube)。

3. 壓力槽支持裙鈹

壓力槽支持裙鈹由壓力槽向外延伸成錐形，壓力槽安裝時支持裙鈹法蘭將座落在反應器基座承載架(Reactor Pedestal Bracket)上方的承載鈹。錐形的支持裙鈹與圓筒狀的 BWR 壓力槽支持裙鈹不相同，如此在 ABWR 爐底下方才有足夠的空間安裝內部循環水泵。壓力槽支持裙鈹材質為(SA-533 Type B Class 1)。

4. 噴嘴(Nozzles)

反應器壓力槽上有 4 支主蒸汽管噴嘴、6 支飼水進口管噴嘴、2 支低壓爐心灌水/停機冷卻系統回水管(LPCF/SDC)噴嘴、3 支停機冷卻系統取水管(SDC)噴嘴、2 支高壓爐心灌水(HPCF)噴嘴及 12 支水位儀器管噴嘴，噴嘴材料為(SA-508 Class 3)，內部表面覆鍍 1/8”不銹鋼。

5. 爐心側鈹支撐及支撐環

有 10 支爐心側鈹支撐(材質 SB-168)銲接在球形底蓋，上接支撐環(材質 SB-168)，其上再接爐心側鈹(Core Shroud)，此項尚未安裝。RIP 甲鈹(Pump Deck)銲接於爐心側鈹和壓力槽內壁，作為內部循環水泵之擴散管的橫向與垂直的支撐。

6. 內部循環水泵馬達殼

10 支內部循環水泵馬達殼銲接於球形底蓋的貫穿孔，為 ABWR 與 BWR 最主要不同之處，以內部循環水泵代替外部的再循環水管及循環水泵，新設計可免除再循環水管的晶粒間應力腐蝕(Inter Granular Stress Corrosion Crack, IGSCC)產生的破管問題。

二、反應器基座簡介

核四廠反應器基座(Pedestal)係承載核能電廠最重要的反應器，依據核四廠初期安全分析報告(PSAR)第三章，反應器基座之鋼構銲接作業應遵循 1990 年版美國銲接協會(American Welding Society, AWS)鋼鐵銲接規範(Steel Welding Code D1.1)，簡稱 AWS D1.1-90。反應器基座分成五層製造，第一層是反應器承載的基礎，為一雙圓柱型鋼構，分內、外兩圈鋼板，中間以肋板徑向連接，於中國造船廠分塊(Block)組裝銲接，運送至核四工地後安裝、組立銲接成一體，基座座落在反應器廠房地錨環型鋼板(Upper RPV Pedestal Anchorage Ring Plate)，該鋼板下為鋼筋混凝土，共厚達 5.5 公尺的圍阻體基礎層(Foundation Mat)，反應器基座安裝檢查完成後，基座內部安裝有十支乾井銜接逸氣管(Drywell Connecting Vents, DCVs)、上乾井洩水管、主蒸汽洩壓閘閥罩排氣管、導線管等管路，基座內部更以混凝土填充，作為輻射屏蔽之用。

反應器基座第一層(Shell 1)，高 12.70 公尺，外徑 14 公尺，內徑 10.6 公尺之雙圓柱狀鋼構，重約 480 公噸，因體積龐大，為因應運輸之便利性與可行性，於工廠製造時分成四塊各涵蓋 90⁰ 圓弧之扇型鋼構，運送至核四工地後再將四塊鋼構依設計位置定位，並加以組立銲接而形成完整之第一層基座鋼構，內板(Inner Shell)為 A572 Gr 65 厚 32 mm 之碳鋼板，外板(Outer Shell)為 A533 Type B Class 2 低合金淬火回火鋼，其厚度亦為 32 mm，但外板外側另被覆以 3.2 mm 之 A240 Type 304L 不銹鋼，內、外板間以厚 38 mm 之 A572 Gr 50 碳鋼徑向銲接接合，稱之為肋板(Rib Plate)，共有 20 塊肋板，隔成 20 艙。每間隔一艙安裝一支外徑 1213 mm 不銹鋼乾井銜接逸氣管共 10 支，

其上方有通道連接上、下乾井區，乾井銜接逸氣管向下延伸與三支外徑 700 mm之水平向逸氣出口管，進入抑壓池(Suppression Pool)，同時裝有一支水平通水管，管內裝設可熔性灌水閥，作為嚴重事故時，高溫會將之熔解而使抑壓池水能進入下乾井區，以提供冷卻水保護基礎(Base Mat)。

第一層基座外鈹銲接，依照施工規範要求，所有之淬火回火鋼銲後均要執行銲後熱處理(Post Weld Heat Treatment, PWHT)，以減少銲後的收縮應力。濕井的正常水位是 7.05 公尺，第一層基座鋼構外鈹被覆不銹鋼祇作為防銹蝕之用，基座強度計算並不包括不銹鋼的厚度，所有在外鈹銲接的支撐架不可直接銲在被覆不銹鋼上，而應將被覆不銹鋼磨除，再以不銹鋼 E309L 堆疊銲接(Build Up)一塊厚 6 mm 以上的不銹鋼支撐墊鈹(Spacer Plate)並執行銲後熱處理，以作為主蒸汽洩壓閥排汽管支撐架、主蒸汽洩壓閥閥罩排氣管支撐架、濕井溫度元件支撐架及導線管支撐架銲接時的熱緩衝(Thermal Buffer)用，如此可免除因銲接支撐架的熱影響區(Heat Affected Zone, HAZ)到達 A533 Type B Class 2 材料，而再執行一次銲後熱處理。

反應器基座第二層(Shell 2)，高 2.200 公尺，外徑 14 公尺，內徑 10.6 公尺之雙圓柱狀鋼構，重約 102 公噸，於中國造船公司預組成四塊鋼構，運送至核四工地，依設計位置定位，並加以組立銲接而形成完整之第二層基座鋼構，內鈹(Inner Shell)為 A572 Gr 65 厚 32 mm 之碳鋼鈹，外鈹為 A572 Gr 65 厚 32 mm 之碳鋼鈹，肋鈹 A572 Gr 50 厚 38 mm，第三、四、五層材料規範皆與第二層相同，第二層安裝八支真空破除器(Vacuum Breaker)連接濕井和下乾井。

反應器基座第三層(Shell 3)，高 2.010 公尺，外徑 14 公尺，內徑 8.2 公尺之雙圓柱狀鋼構，重約 191.7 公噸，於中國造船公司預組成四塊鋼構，運送至核四工地，並加以組立銲接而形成完整之第三層基座鋼構，反應器將座落在此層內部的支撐架上，安裝反應器支撐架(RPV Support Bracket)材料為 A572 Gr 65 厚度 80 mm，使用大型平面銑床將安裝面銑平，該支撐架之下方為下乾井，以 120 支的地錨螺栓(Anchor Bolt)將反應器連結在一起。

反應器基座第四層(Shell 4)，高 2.365 公尺，外徑 14 公尺，內徑 10.6 公尺之雙圓柱狀鋼構，重約 120 公噸，於中國造船公司預組成四塊鋼構，運送至核四工地，並加以組立定位銲接而形成完整之第四層基座鋼構。

反應器基座第五層(Shell 5)，高 1.200 公尺，外徑 12.6 公尺，內徑 9.4 公尺之圓柱狀鋼構，重約 58.2 公噸，於中國造船公司預組成四塊鋼構，在核四工地的工廠組裝銲接成一塊第五層，直接吊放安裝，第五層的外圈銲接一塊凸緣外徑 7.100 公尺。並用一塊 A516 Gr 70 厚 16 mm 之碳鋼封板(Seal Plate)與鋼筋強化混凝土包封容器(Reinforced Concrete Containment Vessel, RCCV)的襯板銲接，其上再澆置 1.2 公尺厚的混凝土，形成隔膜地板(Diaphragm Floor)，將一次圍阻體分隔成上乾井和濕井。

參、視察經過

一、地錨螺栓安裝

地錨螺栓安裝工程依施工順序包含反應器基座支撐托架地錨螺栓

孔鑽孔、反應器基座支撐托架平面加工、模鈹安裝與地錨螺栓安裝、地錨螺栓混凝土澆置等重要工作項目，重點視察結果分項彙整於下：

1. 基座支撐托架鑽孔

前文曾介紹 RPV 支撐裙鈹將坐落於此結構上，RPV 支撐裙鈹(RPV Skirt Flange)上設計有 120 個螺栓孔，支撐托架上下鈹須配合 RPV 支撐裙鈹上螺栓孔之 Hole Pattern 鑽孔。依據 GE 公司施工規範「Reactor Interface Control Drawing (ICD)」，支撐托架上下鈹各 120 個螺栓孔直徑尺寸為 $74 \pm 0.1 \text{ mm}$ ，螺栓孔中心點位於以基座中心為圓心，直徑 8810 mm 之圓周上，鄰近孔洞中心以基座中心為圓心，每 3° 等距離分布，上下鈹各 120 個孔洞需垂直相對應，孔洞中心位置容許誤差為 $\pm 0.9 \text{ mm}$ 。

此項工程屬於反應器基座安裝的一部分，承包商為中船公司。中船公司採用孔洞中心點劃線再以中心衝定位後，移動式鑽床逐一於支撐托架上鈹鑽孔加工，下鈹則利用加長鑽頭以類似方式施工。孔洞中心點角度之測量，中船公司係採用光學經緯儀，孔洞中心點半徑是以校正過之鋼捲尺測量。後續作業承包商中鼎公司需驗收確認支撐托架上下鈹各 120 個螺栓孔尺寸及位置，中鼎公司採行之測量方式與中船公司雷同，孔洞中心點半徑之測量方式亦以校正過之鋼捲尺測量，測量結果符合 GE 施工規範設計值。

2. 基座支撐托架上鈹平面加工

基座支撐托架鑽孔加工完成後，中鼎公司接續執行支撐托架上鈹平面加工，以作為日後 RPV 安裝之承載基準平面。機械加

工後，支撐托架上鈹平面須符合施工規範「Reactor Vessel Installation Specification」反應器界面控制圖 Note 21 之要求，其規定為加工面水平(Level) ≤ 0.8 mm；平整度(Flat) ≤ 0.4 mm；表面粗糙度 ≤ 6.3 μ m；上鈹平面高程：8232 \pm 3 mm。

中鼎公司將此大型工件平面機械加工同樣委託國外專業公司執行，將平面加工機 CSLM(Circular Self Leveling Mill machine) 架設在反應器基座內部，調整 CSLM 水平後，執行支撐托架上鈹平面加工。查證其加工後測量檢驗紀錄，符合施工規範要求。

基座支撐托架鑽孔以及基座支撐托架上鈹平面加工兩項工程，也分別由中船公司及中鼎公司負責施工，上次本會曾建議施工處改善其間之工程介面，使承包廠家之事權統一，並採行較精密之加工方法與較高精度之測量技術，應可減少施工介面衝突與爭議，更能有效掌握施工品質與時程。另外，也建議施工處應督促核四承包廠家，採用更精準測量技術，盡量降低人員操作因素(Human Factor)可能誤差，才能更有信心確認工程介面條件已完全符合原設計規範。

3. 模鈹安裝與地錨螺栓安裝

基座支撐托架上鈹平面加工完成後，後續工程為地錨螺栓安裝，依據「Reactor Vessel Installation Specification」，施工者須依據 RPV 原製造廠家提供之工程圖面，製備模鈹(Template)並組合安裝以供地錨螺栓(Anchor Bolt)安裝時使用。原設計之安裝基本概念為要求施工者利用模鈹模擬 RPV Skirt Flange Hole Pattern 之精度要求，先將模鈹安裝於支撐托架上鈹平面，藉由模鈹精度要

求來確保 120 支地錨螺栓安裝後，能符合工程界面條件要求。套管屬於模鈹重要零件，主要功能除可更精準限制地錨螺栓安裝位置之外，在地錨螺栓預力鎖磅時，鎖磅扭力藉旋轉螺帽，將鎖磅力經由套管垂直傳至模鈹，達到固定模鈹與地錨螺栓及地錨螺栓預力之目的。如果 Pedestal Bracket Plate 上孔洞中心位置符合施工圖面誤差範圍，而且 Template 上 Hole Pattern 之精度尺寸亦符合設計要求，地錨螺栓應可順利安裝進入 Bush、Template 與 Pedestal Bracket Plate 孔洞中。

依據「Reactor Vessel Installation Specification」及螺栓安裝程序書（2902-71P-2056），地錨螺栓安裝合格標準為伸出量 275 ± 5 mm；中心位置半徑 4405 ± 1 mm；垂直傾斜度 ≤ 0.5 mm/200 mm，方位角度誤差 ≤ 46.8 秒；中心間距 230.6 ± 1.0 mm，此外 120 支地錨螺栓安裝後需依據程序書規定執行鎖磅作業，磅數為 372~500N-m。

中鼎公司依規範及程序書規定分別於地錨螺栓鎖磅前、後逐一測量 120 支地錨螺栓安裝精度，中鼎公司除利用全測站經緯儀、分度計(Protractor)等經校驗之精密測量儀具之外，地錨螺栓中心點半徑之測量方式，仍以校正過之鋼捲尺測量。查證中鼎公司「反應器地錨螺栓高程及位置檢驗紀錄表」，120 支地錨螺栓高程及位置符合施工規範接受標準，且鎖磅作業依規定順序以扭力扳手(Torque Wrench)執行。

4.地錨螺栓混凝土澆置

120 支地錨螺栓在 RPV 安裝工程中扮演結構組件與設備固定之功能，前文安裝位置精準度要求，目的為符合後續 RPV 安

裝介面條件；基座支撐托架內部混凝土澆置，目的則為永久固定地錨螺栓，使其成為結構之一部分。依據 GE 公司「Reactor Vessel Installation Specification」5.7 Template Removal 規定，地錨螺栓混凝土強度須達到設計抗壓強度（4000psi）或更高，才能將 Template 移除。

綜合本項視察結果均有改善，當時一號機現場視察時，發現有部分地錨螺栓安裝位置超過容許誤差，經調整 Template 位置後，仍有超過半數之 Bush 需要加工擴大誤差容許度後，地錨螺栓方能順利進入 Pedestal Bracket Plate 上孔洞內，Template 已經喪失其原設計目的之情況。曾建議二號機 RPV 地錨螺栓安裝仍應回歸施工規範與程序書規定，若承包廠家仍採行一號機施工方式，則應修改施工規範與程序書，以期符合品保體制並確實反應現場施工實況。此次二號機在支撐托架上鈹平面鑽孔時，已安排不同單位人員會驗確認。本次施工時，台電會同中船、新亞及中鼎執行鑽孔前放樣點檢查，之後由台電會同中船、新亞執行鑽孔後檢查。鑽孔時之量測工具，則由在中船先製作特殊量規，作為確認量測孔距之依據，再輔以經緯儀量測孔位，以重複驗證鑽孔正確位置。精度上大有改善，安裝地錨螺栓時未再發現類似缺失，順利安裝完。

另外，上次視察發現，地錨螺栓混凝土澆置後，Template 拆除時之混凝土養護時間僅 15 天，並無證明 Template 拆除前混凝土強度已達到設計抗壓強度之佐證文件。此次地錨螺栓混凝土是在 95 年 6 月 14 日澆置，根據資料顯示，95 年 6 月 26 日之混

土抗壓強度試驗報告已超過 4000psi，兩組試體已分別達到 4318psi/4558psi，混凝土抗壓強度至 95 年 7 月 12 日已達 5795psi/5603psi，Template 則於 95 年 7 月 11 日拆除。

二、承載板安裝

地錨螺栓安裝完成且混凝土強度須達到設計抗壓強度，移除已完成階段性功能的 Template 後，後續工程為承載板(Bearing Plate)安裝作業。二號機承載板材料也是 SA-36，與一號機（二個半圓組合）不同之處，是外形類似土星環為單一金屬環狀組件，其尺寸為外徑 9028 mm、內徑 8260mm、厚度 50mm、重量約為 3859Kg。原廠家日本石川島播磨重工業株式會社(IHI)設計工程圖面（012k162）顯示，承載板並非 ASME Code 規範之設備。

承載板將安裝於基座支撐托架加工面上，RPV 支撐裙板直接坐落其上。承載板由 RPV 原製造廠家設計、製造，其主要功能有二，除能提供 RPV 與結構間全平面承載條件之外，另一功能為容許施工者配合現場施工現況與 RPV 支撐裙板施工精確度，利用墊片(Shim)插入承載板與基座支撐托架之間，微調承載板平面水平，以確保 RPV 安裝後爐體垂直度。依據「Reactor Vessel Installation Specification」，若 RPV 支撐裙板平面相對於爐體中心線之垂直度(Perpendicularity)不大於 0.8mm，則承載板安裝之合格標準需依原製造廠規範要求。根據原廠家工程圖面及中鼎公司程序書「RPV Unit2 Bearing Plate Installation and Inspection Procedure」規定，安裝合格標準為承載板上表面 16 個位置內外共 32 個測量點之最大水平傾斜量(Inclination of Elevation)≤ 0.4mm。

中鼎公司於 95 年 9 月 8 日開始承載鈹吊裝作業，9 月 15 日施工處完成安裝後會驗，查證一號機時曾發現中鼎公司因地制宜，採用逐一將單片承載鈹吊運入基座內部再行組合安裝之施工方式，明顯與程序書規定不符，經完成作業程序書變更後，中鼎公司再依據修改後之程序書繼續進行後續安裝工程。雖然二號機承載鈹為單一工件，不至於再出現類似狀況，曾建議施工處督促承包廠家預先掌握，先期徵詢原設計廠家意見，預先配合工程現況修正相關程序書；確實遵守程序書及施工規範要求，應是落實核四工程品管最重要之品保原則。

根據檢驗資料，承載鈹安裝主要檢驗事項有：承載面及承載鈹是否清潔、依圖組立、量測安裝後高程、地錨螺栓扭力值、安裝後方位、基座與承載鈹之間隙、保護措施，量具校驗等項目，本次查證結果均符合規定，最大水平傾斜量為 0.5 mm，經中鼎公司以墊片調整後，施工處會驗結果，最大水平傾斜量為 0.4 mm，符合最大水平傾斜量 ≤ 0.4 mm 之施工規範要求。

三、RPV 運輸及吊運作業

本項作業共分為兩階段進行，分別由不同承包商承攬專業性工作，一為運輸作業，另一為吊裝工作。第一階段是 RPV 自儲存倉庫搬運至待吊裝之等待區，接著先在等待區拆卸裝於支持裙鈹之儲運架、及 RPV 之前因儲運架包封未處理之底部保養工作後，再由該區域吊運至 RPV 基座之安裝位上，進行安裝對位等工作，整體作業及查證經過說明如下。

(一) RPV 自儲存區至待吊區之運輸作業

台電公司龍門施工處為使得二號機 RPV 之搬運能安全順利，並且

對提供重件通行之運輸道路，能及早發現其缺失以謀補救，已事先規劃出道路運輸路徑。因有一號機之經驗，本次輸送前僅作道路探勘及補強，以符合 RPV 實際運輸所需之條件，未再進行配重試運。

此次承攬二號機 RPV 運輸作業之承包商是陸海運輸公司(Sea & Land)，主要運輸工具是運輸專用之自走式油壓特種板車，其運輸平台尺寸(L×W×H)為 30000 mm×8100 mm×1175 mm，最大荷重約 1407 噸，承載 RPV 及支架部分重量約 1118 噸，另運輸架為 87 噸。95 年 10 月 2 日直接由儲存區運輸至待吊裝位置，進行 RPV 安裝前檢查。其運輸情形查證結果如下：

- 1.查證一號機 RPV 試運作業施工計畫書及中鼎公司 RPV 試運堆高機自主檢查表(QC-07-060)、RPV 試運設備器材裝(卸)車作業自主檢查表(QC-09-060)、RPV 試運自走式油壓特種板車自主檢查表(QC-09-060)、RPV 試運移動式輪胎／履帶起重機自主檢表(QC-17-060)、反應器壓力容器試運自主檢查表(QC-14-060)之結果，確認檢驗內容、檢驗標準及檢驗方式均符合程序書規定，中鼎公司自主檢驗結果均符合檢驗標準之規定。
- 2.查證 RPV 試運堆高機檢驗表(TG-07-060)、設備器材裝(卸)車作業檢驗表(TG-09-060)、自走式油壓特種板車輪胎裝車檢驗表(TG-13-060)、移動式輪胎／履帶起動機檢驗表(TG-17-060)及反應器壓力容器試運作業檢驗表(TG-14-060)之結果，確認檢驗內容、檢驗標準及檢驗方式符合程序書規定，各項檢驗結果均符合檢驗標準之規定。
- 3.查證 RPV 搬運及裝(卸)車作業檢驗表(龍門源 004-M-053-003)之

結果，確認 RPV 吊裝檢驗作業前均依施工計畫書執行查驗，另查證 RPV 裝運位置、RPV 固定方式、檢驗人員及機具車輛等之查驗均符合施工計畫規定。

- 4.查證 RPV 運輸指揮系統，運輸道路補強及運輸道路障礙物排除情形，結果均符合計畫書規定。此次搬運道路補強及障礙物排除之主要項目也是針對路燈暫移除、水溝及地下電纜人孔平鋪鐵板等項。

(二)RPV 吊裝作業

本次 RPV 之吊裝作業，與上次一號機使用之吊裝機具同樣機型，最大吊升能力達 3000 噸左右外，仍須多輛起重機具協助配合相關作業才能順利完成；為使 RPV 吊裝作業能在審慎且安全的情況下順利進行，本次視察係將吊裝機具之可用性列為重點查證項目，包括：維護保養情形、操作人員之證照、機具之使用期限等。經查證結果，本次吊裝所預定使用之機具有(1)固定式起重機(MSG-50)，(2)120 噸卡車式起重機，(3)吊卡車(框式附加吊桿)，(4)23 噸堆高機，(5)7 噸堆高機，以上之起重機其使用有效期均在規定日期內，操作員亦均取得操作執照。包括荷蘭籍 MAMMOET 公司提供之 MSG-50 主吊車，其外籍操作員均須完成我國安全衛生教育訓練，符合國內法規之規定後，方始操作該機具。

RPV 於試吊過程中，龍門施工處施工及品管人員已依程序書 LMP-TGD-010 設備器材搬運及吊裝檢驗作業規定之檢驗內容，查對主吊車之相關機構之完整性、安全性，檢查結果均符合檢驗標準，因此確認本次 RPV 吊裝作業中所使用之吊裝機具符合安全性。

綜合本項視察結果，除個別查證上述項目外，也針對吊運過程之整體性進行瞭解。本次二號機 RPV 之吊運工作，依時程原定 95 年 9 月 14 日開始啟運，因 MSG-50 試吊時曾發生基礎沉陷，待補強及測試後，再由勞委會北部勞檢所核准檢查合格證（95 年 9 月 29 日），以致延後至 95 年 10 月 2 日，並於同年 10 月 5 日才自等待區開始吊裝。由於承包作業之公司及人員均深具專業能力，且經事前的詳細規劃，因此運輸及吊運過程並未發生延誤，使得本項工作順利完成。惟其中仍有部分缺失值得改善，主要是 MSG-50 基礎沉陷問題，相對沉陷約 9 cm，超過容許值（4 cm），經多日的改善才於 95 年 9 月 27 日進行試吊，較預定時程延後近 2 週。

1. 整體性工作協調方面，上次搬運及吊裝計畫書分別由海陸運輸公司及 MAMMOET 公司各自規劃編寫，為因應突發事件，在防範吊運意外上，對於遇緊急狀況時之人員疏散等規劃相當嚴謹，屬各公司規劃之個案，但實際上若發生時，勢將影響整體吊運工作。作為整體吊運工作之一環，理應在作業展開前透過協調會充分規劃，並視狀況事先安排人員訓練或講習。上次經查證得知作業全程除對防火及醫護外，對於足以影響共通性問題之狀況，如可能導致作業中止之負面環境等，並未詳細規劃或訓練，確保面對問題時能協調一致；建議審查各承辦單位之計畫書時，對涉及影響整體性工作之應變措施宜加以整合，以保障人員及設備安全。本次查證有關搬運及吊裝計畫，針對自儲存倉庫至現場及現場吊運期間，可能遭遇之問題或臨時故障時，所應採取之應變措施，中鼎公司已編寫 RPV 搬運及吊裝緊急處理計畫書(2920-71P-2105)

因應。

2.上次吊運期間，對於作業期間，面臨不符作業程序書之步驟，依品質保證規定執行方面，在待吊區拆卸支撐裙板之儲運架時，基於工安規定，部分作業因事先未考慮到，致有須臨時製作工具、臨時增加步驟等；查證結果，得知作業並未依規定處理，過程不夠嚴謹且亦不符合品保規定，曾建議對於作業期間，面臨不符作業程序之步驟，應依品質保證規定修改程序書。本次視查結果，未再發現類似問題。

四、RPV 安裝後垂直度測量與地錨螺栓鎖磅

同一號機 RPV 安裝規定一樣，依據施工規範「Reactor Vessel Installation Specification」，RPV 安裝後需執行爐心側板支撐平面(Shroud Support Level)及上法蘭(Top Flange)二個高程位置垂直度測量(附件一之 CB 點及 CC 點)。施工者必須於 RPV 爐底中心控制棒穿越管(Center CRD Bottom Head Penetration)(附件一之 CA 點)建立 RPV 爐體中心鉛垂線參考點，並於爐心側板支撐平面及上法蘭二個高程位置上，依據原廠建立之方位角標示，利用 0.25 mm 以下之細鋼絲(Fine Wire)並於後方懸吊 2~3 公斤重物，分別在 0° — 180° 以及 90° — 270° 建立二條緊繃的軸線，細鋼絲交會點即為 RPV 爐體於上述二個高程位置上之中心點。RPV 安裝後爐體垂直度合格標準在爐心側板支撐平面高程位置為 ≤ 0.6 mm，上法蘭高程位置為 ≤ 7.5 mm。

施工規範「Reactor Vessel Installation Specification」另有規定，每一處高程位置垂直度測量必須由兩組測量人員獨立執行，取其平均值作為結果。RPV 垂直度測量時機至少須在定位後地錨螺栓鎖磅前、及

地錨螺栓鎖磅完成後各需執行一次。RPV 定位後即需依序執行爐心側鈹支撐平面及上法蘭二個高程位置垂直度測量，二個高程位置垂直度均合格後，再依規範要求依序、對稱執行地錨螺栓鎖磅作業，地錨螺栓鎖磅完成後需再度執行二個高程位置垂直度測量。任何一次測量結果超過合格標準，則須執行爐體垂直度調整，再重複上述測量及地錨螺栓鎖磅作業。施工規範要求地錨螺栓需依其規範要求鎖磅順序，依序、對稱執行螺栓鎖磅，鎖磅扭力值為 $470\pm 98\text{N}\cdot\text{m}$ 。

依程序書「RPV Installation, Alignment & Inspection Procedure」規定，中鼎公司於爐心側鈹支撐平面及上法蘭二個高程位置上建立細鋼絲交會之垂直度測量點後，必須分三階段進行反應爐壓力槽垂直度測量。第一階段為鎖磅前，第二階段為相對位置 40 支地錨螺栓鎖磅後(扭力值為 $245\pm 29\text{N}\cdot\text{m}$)，第三階段亦即最後階段則為 120 支地錨螺栓鎖磅後。使用測量儀具為校驗合格之垂直儀，測量儀具安裝固定於下乾井並盡可能接近 RPV 爐底中心控制棒穿越管。垂直儀目的在於建立假想爐體鉛垂線，測量人員得以經由垂直儀之光學鏡頭，目視判斷假想鉛垂線與爐心側鈹支撐平面及上法蘭二個高程位置上已建立之細鋼絲交會點之距離，距離之判斷則仰賴事先放置之校驗過鋼尺上之刻度。

三階段測量全都在 95 年 10 月 6 日完成，第一次測量結果，中鼎公司兩位測量人員及龍門施工處兩位測量人員在 CB 點所測量之數據分別整理如下：(單位：mm，合格標準 $\leq 0.6\text{ mm}$)

中鼎：No.1	X=0.25	Y=0	；	$R(X^2 + Y^2)^{1/2} = 0.25$
No.2	X=0.25	Y=0	；	$R(X^2 + Y^2)^{1/2} = 0.25$
平均值	X=0.25	Y=0	；	$R(X^2 + Y^2)^{1/2} = 0.25$

$$\text{台電：No.1} \quad X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{No.2} \quad X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{平均值} \quad X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

中鼎公司兩位測量人員及龍門施工處兩位測量人員在 CC 點所測量之數據分別如下：(單位：mm，合格標準 ≤ 7.5 mm)

$$\text{中鼎：No.1} \quad X=2 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 2$$

$$\text{No.2} \quad X=2 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 2$$

$$\text{平均值} \quad X=2 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 2$$

$$\text{台電：No.1} \quad X=2 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 2$$

$$\text{No.2} \quad X=2 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 2$$

$$\text{平均值} \quad X=2 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 2$$

第一階段為鎖磅前，中鼎公司在 CB 點之垂直度測量值均小於 0.6 mm 之合格標準，而在 CC 點之測量值均遠小於 7.5 mm 之合格標準，台電龍門施工處會驗結果也符合規範。第一次反應爐壓力槽垂直度測量合格後，隨即由二組操作人員進行第一階段 40 支地錨螺栓對稱鎖磅，此階段鎖磅扭力值為 245 ± 29 N-m。在鎖磅前中鼎公司已先清潔螺栓之螺帽、墊片及螺牙並塗抹 DAG-156 潤滑油，40 支地錨螺栓對稱鎖磅完成後，由龍門施工處檢驗人員會驗合格，再進行第二次反應爐壓力槽垂直度測量。龍門施工處兩位測量人員經過會驗後，確認 CB 點及 CC 點均在誤差容許範圍之內，並未產生偏移現象，第二階段測量數據與第一階段完全相同。

第二階段完成後，另外 80 支地錨螺栓與 RPV 裙板法蘭螺孔間超過 4mm 間隙者，中鼎公司依規定必須以破鋼片填塞後再灌滿 Devcon

F2，之後才可執行後續螺栓鎖磅；本次間隙均在 4 mm 以內，並未填塞碳鋼片，直接灌滿 Devcon F2。第三階段地錨螺栓鎖磅依程序書規定扭力值為 $470 \pm 98 \text{N}\cdot\text{m}$ ，中鼎公司之鎖磅機具採用油壓鎖磅機，扭力值設定為 $475 \text{N}\cdot\text{m}$ 。80 支在鎖磅前已先清潔螺栓之螺帽、墊片及螺牙並塗抹 DAG-156 潤滑油，經檢查合格後，中鼎公司二組操作人員隨即進行第二階段 40 支地錨螺栓對稱順時鐘方向鎖磅，確認 40 支地錨螺栓鎖磅完成後，再行拆卸第二階段之 40 支地錨螺栓螺帽，灌滿 Devcon F2。之後清潔螺栓之螺帽、墊片及螺牙並塗抹 DAG-156 潤滑油，然後再使用油壓鎖磅機進行最後之對稱鎖磅，扭力值設定為 $472 \text{N}\cdot\text{m}$ 。120 支地錨螺栓全部鎖磅完成後，台電龍門施工處兩名檢驗員進行 120 支地錨螺栓 100% 複驗，而複驗之方式則採用兩支人工扭力扳手，扭力值設定為 $472 \text{N}\cdot\text{m}$ 對稱依序進行最後之鎖磅複驗，鎖磅複驗經台電龍門施工處兩名檢驗員確認核可後，隨即進行第三次反應爐壓力槽垂直度測量。第三次亦即最後一次反應爐壓力槽垂直度測量，測量之儀具、程序皆與第一、二次相同。

95 年 10 月 6 日第三次測量結果，中鼎公司兩位測量人員及龍門施工處兩位測量人員在 CB 點所測量之數據分別整理如下：

$$\text{中鼎：No.1 } X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{No.2 } X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{平均值 } X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{台電：No.1 } X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{No.2 } X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

$$\text{平均值 } X=0.25 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 0.25$$

中鼎公司兩位測量人員及龍門施工處兩位測量人員在 CC 點所測量之數據分別如下：

$$\begin{aligned} \text{中鼎：No.1 } & X=4 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 4 \\ & \text{No.2 } & X=5 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 5 \\ & \text{平均值 } & X=4.5 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 4.5 \\ \text{台電：No.1 } & X=4 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 4 \\ & \text{No.2 } & X=5 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 5 \\ & \text{平均值 } & X=4.5 \quad Y=0 \quad ; \quad R(X^2+Y^2)^{1/2} = 4.5 \end{aligned}$$

兩組人員在 CB 點之測量值均小於 0.6mm，而在 CC 點之測量值亦遠小於 7.5mm 之合格標準。

此次 RPV 爐體垂直度測量，於三階段中分別由中鼎公司、台電龍門施工處各兩組測量人員獨立執行，查證其測量結果數據均低於接受標準，而且承載鈹最大水平傾斜量符合施工規範要求，RPV 爐體安裝之垂直度符合設計要求。

五、穩定器安裝

1. 穩定器功能

反應器壓力槽的穩定器(Stabilizer)原製造廠家為日本東芝公司，依據原廠圖面穩定器為 Class 1 支撐組件，製造與檢驗必須依照 ASME Section III, Subsection NF 相關規定。廠房高層 EL.18440mm 位置，屏蔽牆內部支撐架(RSW Support Bracket)上，須安裝 8 組反應器壓力槽穩定器，主要目的在承受地震、破管或其他反應器廠房振動事故時之橫向振動負載，限制反應器壓力槽之振動，並進而保護微調控制棒驅動機構(Fine Motion Control

Rod Drive, FMCRD)及爐內儀器管與其他組件。

2. 穩定器施工介面

穩定器安裝在屏蔽牆支撐架，屏蔽牆支撐架由中船公司負責施工，完成後交由中鼎公司進行穩定器安裝作業。屏蔽牆支撐架安裝圖由 GE 公司設計，圖號 105E2576，根據 Detail-A 剖面圖可知在屏蔽牆支撐架和穩定器之間有一塊 19mm 墊板，但未標示尺寸。在 31113-1U71-58284(Reactor Building RPV Shield Wall Sections and Detail)的 DETAIL -1 設計有一塊(19x270x1730mm)墊板，其目的為增加穩定器高層。

中船公司依照 GE 設計圖，規劃細部製造圖，圖號 Dwg. No. C237B-144-A055-5/7 的 Detail-1 和 Section-1，在屏蔽牆支撐架上設計有一塊墊板(厚 x 寬 x 長:19x270x1730mm)，中船公司於廠製時已將墊板銲接在屏蔽牆支撐架上。

穩定器的外觀框架尺寸(長 x 寬 x 高: 1677x432x586 mm)，共有 8 組方位在(00、45⁰、90⁰、135⁰、180⁰、225⁰、270⁰、315⁰)，安裝高層 EL.+18440mm，由於穩定器的寬 432mm 大於墊板的寬 270mm，安裝時靠屏蔽牆的墊板將在穩定器下方而無法銲接，經施工處提出反映後，GE 公司提出 FDDR (Field Deviation Disposition Request ,編號 LT1-00252)，提出兩項處理方案供台電公司選擇，方案一為將墊板加寬 155mm，使墊板突出穩定器，以利填角銲接，方案二為將銲好的墊板除掉，而把整組的屏蔽牆支撐架往上提升 19mm，施工處汽源課選擇方案一。

3. 屏蔽牆支撐架施工

屏蔽牆支撐架吊運路線的選擇，因反應器的膨脹器(RPV Refueling Bellow)接頭外徑 4195 mm 與屏蔽牆外徑 4830 mm 之間隙只有 635 mm，小於屏蔽牆支撐架寬 850 mm，因此無法以吊車直接吊放安裝。施工處於安裝前規劃，要求中船公司用木板製作 1 比 1 的實體木模，實地演練吊裝運送路線，由高層 EL.+18800mm 的人員開口(Personnel Access)吊入，該開口在 160°及 340°方位角位置上各有一個，利用實體木模實際吊裝運送至安裝位置，以預先確定吊裝運送動線之可行性。

屏蔽牆支撐架吊至開口後，尚需使用吊掛(Chain Block)轉換運送至定位，該動線必須銲接臨時人員支架及吊掛支架，工作辛苦艱難，人員及設備安全必須十分小心。95 年 10 月底開始吊裝及將屏蔽牆支撐架點銲在屏蔽牆上。屏蔽牆支撐架銲接與其後續磁粒檢測 (MT)非破壞檢驗作業於 95 年 11 月中旬順利完成，非破壞檢測結果符合施工規範要求。

4.穩定器安裝

根據設計，穩定器安裝在屏蔽牆支撐架上方，以全周填角銲與屏蔽牆支撐架墊板銜接，銲後須執行之非破壞檢驗作業為液滲檢測 (PT)。視察發現，反應器外徑至屏蔽牆支撐架的最窄間隙約為 113 mm，在屏蔽牆支撐架的兩邊約有 231 mm 間隙，銲工須在寬度僅有 113 mm 至 231 mm 的間隙，900 mm 遠的下方位置，利用遮護氣體銲弧銲接(Shield Metal Arc Welding, SMAW)法，採仰銲之銲姿，以左、右手分別於穩定器下方二端施銲填角銲道。由於狹窄空間施銲之施工困難度相當，為確保作業品質，核四廠初

期安全分析報告要求，銲接施工人員除具備施工法規要求之銲接人員資格外，亦須參照美國核管會法規指引 RG 1.71 要求之精神，證明其具有於此類特殊環境下施銲符合品質要求銲道之技術能力。因此原能會要求台電公司於實際施作前，其銲工須完成並通過於相同施工空間條件之模擬環境中進行模擬銲接測試，以證實銲工具備於特殊環境下施工之技術能力及足夠之品質水準。

95 年 11 月 2 日模擬銲接測試完成，測試銲道試件並分別經規定之非破壞檢測及機械性能測試合格後，8 只穩定器即於 95 年 11 月 26 日陸續開始進行吊裝定位作業，然在吊裝定位後發現穩定器其銲接間隙有超過銲接程序書(WPS)標準(1.6mm)之情形，且其中 45 度之穩定器(編號：IN 4501)更超過安裝施工規範之限制(3.2mm)，受此影響原定將接續進行之現場施銲作業，並未依計畫進行。

針對銲接間隙過大問題，龍門施工處經檢討施工法規、規範及現況，並與設計者奇異公司及施工廠商中鼎公司討論後，認為 IN 4501 穩定器銲接間隙超過 3.2mm，應是屏蔽牆支撐架墊板變形所致，決定以修訂程序書銲接間隙限值但維持應有銲道腳長之方式處理銲接該只間隙介於 1.6~3.2mm 穩定器之施銲問題，以先展開穩定器現場施銲作業，並於七只穩定器施銲作業過程中同時處理調整 IN 4501 穩定器屏蔽牆支撐架墊板變形之問題。此一處理方式決定後，穩定器現場施銲作業即於 95 年 12 月 10 日展開，並於 96 年 1 月 3 日完成七只銲接間隙小於 3.2mm 之穩定器現場施銲作業。惟由於 IN 4501 穩定器之支撐架墊板於調整過程中，

發現有反覆作業及未能接續完成現場安裝施鉸等情形，且經視察人員了解後，再發現有不符品保及檢驗作業要求之情形。

IN 4501 穩定器吊裝定位發現鉸接間隙超過 3.2mm 限值後，依中鼎公司當時之判斷認為與穩定器支撐架墊板變形有關，龍門施工處以此要求穩定器支撐架施工廠商中船公司改善。中船公司即依龍門施工處與中鼎公司之要求，將原 19mm 之墊板拆除並更換為 20mm 之墊板，並於墊板下端加裝 3mm Thin Plate。惟 IN 4501 穩定器再吊裝定位後，再量測發現其高程反而過高，顯示原先之判斷有誤，龍門施工處與中鼎公司遂暫停接續之墊板及 IN 4501 穩定器施鉸作業，待再確認穩定器安裝相關參數後，再決定後續處理方式及作業，並將原已第二次吊裝定位之 IN 4501 穩定器再度吊離現場。因穩定器吊裝定位之量測方式與要求不同於支撐架之量測方式與要求，以及中鼎公司出現量測錯誤，誤判定鉸接間隙超過鉸接程序書及穩定器安裝規範之要求，以致中船公司執行上述錯誤之處置，經台電公司與中鼎公司再重新檢討精算後，確認應是將支撐架原 19mm 之墊板改為 16mm 墊板即可符合 IN 4501 穩定器安裝高程之需求。於確認上述方案正確後，現場施工作業隨即展開，並於 96 年 4 月 13 日經台電公司施工處驗收。

本案雖導因於中鼎公司穩定器吊裝後量測錯誤，但穩定器支撐架安裝完成後，龍門施工處並未依反應器屏蔽牆組裝檢驗表執行驗收檢驗，即將該設備交由中鼎公司進行後續之穩定器安裝，以及發現穩定器鉸接間隙不符合鉸接程序書與穩定器安裝規範之要求，龍門施工處在未依 LMP-QLD-001 「不符合狀況及通報管

制作業程序書」開立不符合報告(NCR)，即由中船公司逕予進行穩定器支撐架墊板之更換，亦是導致後續錯誤處置行為無法即時察覺之原因。針對上述違反作業程序書要求之情形，本會除於發現時立即口頭告知施工處改善外，亦於後續安裝作業完成後開立注意改進事項請台電公司加強相關人員之品質管制觀念，落實各項品保制度作為之執行。

5.穩定器間隙調整

依照 GE 公司「Installation Drawing Stabilizer, Reactor Vessel, 105E2576」安裝圖規定，穩定器之軛 (Yoke) 與反應器支撐架中心線公差，應在 1 mm 以內，彈簧預力為 1000KN，穩定器間隙調整如下：

(1)反應器在第一次加熱前(Heat Up)，測量銅線(Copper Wire)直徑，並記錄直徑值 (R1)，組裝墊片(Shim)和銅線鎖在 RPV Bracket 螺絲處。調整墊片厚度使銅線、RPV Bracket、軛 (兩組)與墊片密合接觸。

(2)第一次加熱後，取下銅線，測量被壓縮後的直徑，並記錄直徑值 (R2)。

(3)調整墊片，使墊片和軛(兩組)的間隙等於 $(R1-R2+0.25)$ mm。

由於穩定器間隙調整是在試運轉之後，此時廠房結構等都已完成，查閱已知的資料得知，屏蔽牆上端高程為 EL +21200mm，其上方之一次圍阻體頂層樓版 (RCCV Top Slab) 高程為 EL+21300mm，空間只有 100 mm 之縫隙，人員無法由此進入，因此穩定器間隙調整只能由 EL+18600mm 的人員開口進入，雖每隔 45° 有一屏蔽牆支撐架，但兩者

之間尚相隔有一大段距離，且屏蔽牆內壁並無其他通道或爬梯等設備通往穩定器，工作人員如何接近穩定器並調整間隙，且如果燃料棒已經產生核分裂反應，該區域應是高輻射區域。穩定器間隙調整工作必須同時兼顧現場施工狀況及工作人員輻射防護作業，建議台電公司務必事先規劃妥善研擬方案以因應。

六、RPV 儲存與環境控制

RPV 吊裝作業為核四建廠工程重要項目之一，吊裝作業期間之安全性固為重要，而 RPV 吊裝後之設備組件安裝工作，則是邁入建廠工程新階段的開始，自 95 年 10 月 5 日 RPV 安裝後至將來建廠完工尚有一段時日，建廠過程仍有諸多事項仍須逐一克服，除土建及機電工程外，設備的儲存維護工作，也將嚴重影響日後施工品質良窳及核能安全。以 RPV 儲存環境為例，RPV 材質深受儲存環境影響，因此攸關核能機組壽命之課題，如何做好儲存環境及管理，達到所承諾的工程品質，是不可忽視的重要事項。

台電公司龍門施工處承諾，RPV 吊裝後之儲存環境將根據 ASME NQA-2 有關核設施品保要求進行管制。在 RPV 吊裝後，於 95 年 10 月下旬設置人員管制站進行人員及機具之管制，並參照一號機之 RPV 吊裝後之儲存環境管理作業程序書。視察 RPV 現場儲存環境之管制作業，其結果分述如下：

1. 依 ASME NQA-2 之規範，RPV 區域已進行 2 級(RPV 內部)及 3 級(RPV 外部)管制，經查證結果，其管制作業參照一號機管制作業，大致符合要求。
2. 工作人員安全部分，RPV 自 95 年 10 月 7 日開始進行現場充氮

儲存，至於 95 年 10 月 14 日充氮壓力達 0.28kg/cm^2 ，惟與一號機相同均發生洩漏情形，經承包商(中鼎公司)迅速處理後已止漏。但由於 RPV 下方之工作人員，每一時刻均須承受氮氣洩漏之潛在危險，施工單位於 95 年 11 月初裝置連續洩漏偵測預警裝置，以維護工作人員安全。

- 3.目前執行之各項管制作業似乎缺乏完整之執行計畫，如 RPV 安裝後之頂部遮雨棚經五個月(配合穩定器安裝)，至 96 年 3 月 6 日才安置完成，稍嫌落後。施工單位應依現場狀況事先擬定有關 RPV 安裝後之維護保養及儲存環境維持等作業計畫，以利執行。

肆、結論

本會曾根據視察一號機 RPV 安裝所發現之缺失，開立注意改進事項要求台電公司龍門施工處改善；台電公司對於該次 RPV 安裝過程也立即檢討，部分屬澄清性質者，如螺栓鎖磅扭力值等，都有明確的答覆，其它各項問題已藉此經驗回饋到二號機，並在二號機 RPV 吊裝前改善完成。惟從 RPV 安裝前置作業，吊車基礎沉陷導致時程略有延誤而言，似又發生先前未曾面臨之問題，從諸多原因研判有：回填期間天候不佳，回填作業仍在趕工，致未依程序回填；基礎工程結構計算，承包商未詳加採驗，直接用碎石級配參數，與現況不符，以致未收及時改善之效；且本案開立之 NCR 追蹤案，直到 RPV 試吊前，仍以消極態度處置等均是。其中以開挖區未依規定確實回填又未積極改正是主要癥結，本會 95 年 9 月中旬已發備忘錄要求改善。

綜合此次二號機 RPV 主體安裝工作，整體而言，大致尚稱迅速順

利。在制度面上，雖有前述缺失尚待落實改進，若能秉持積極的態度，並藉此經驗回饋到其它施工相關工作，縱然核四建廠期間難免遭遇波折，還是肯定全體工作人員的付出。展望未來諸多建廠相關工作，仍有一段長遠之路，有待從業人員智能的發揮，戮力完成。

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



照片一：承载板 (Bearing Plate) 整理



照片二：基座支撑支架研磨 (一)



照片三：基座支撐支架研磨（二）



照片四：反應爐壓力容器（RPV）試吊作業（一）



照片五：反應爐壓力容器 (RPV) 試吊作業 (二)



照片六：反應爐壓力容器 (RPV) 運輸作業 (一)



照片七：反應爐壓力容器 (RPV) 運輸作業 (二)



照片八：反應爐壓力容器 (RPV) 運輸作業 (三)



照片九：反應爐壓力容器 (RPV) 吊裝作業 (一)



照片十：反應爐壓力容器 (RPV) 吊裝作業 (二)



照片十一：反應爐壓力容器（RPV）吊裝作業（三）



照片十二：反應爐壓力容器（RPV）吊裝作業（四）



照片十三：反應爐壓力容器 (RPV) 吊裝作業 (五)



照片十四：反應爐壓力容器 (RPV) 吊裝作業 (六)



照片十五：反應爐壓力容器（RPV）吊裝後現況



照片十六：穩定器安裝作業（一）



照片十七：穩定器（IN 4501）支撐架墊鉸銲道第二次遭移除後情形



照片十八：反應爐壓力容器（RPV）安裝後現況

