

行政院及所屬各機關出國報告

( 出國類別：實習 )

實習國外核電廠反應器爐心噴灑系統組件  
焊道龜裂之修復計劃報告

服務機關：台灣電力公司  
第一核能發電廠

出國人 職 稱：核能工程師  
姓 名：王重章

出國地區：西班牙

出國期間：90.03.12 ~ 90.03.21

報告日期：90.05.18

目	錄	頁次
一、出國目的	-----	2
二、出國行程	-----	2
三、實習內容	-----	2~7
四、結論與建議	-----	7~10
五、附圖	-----	11

## 一、出國目的：

1. 核一廠反應器爐心噴灑系統組件以超音波檢測結果，兩部機皆發現有龜裂現象，此為原能會極度關切之核管案件；本公司已承諾原能會於九十年十二月底前研提改善對策。
2. 西班牙紐克連諾(Nuclenor)核電廠在本年三月間即執行與本廠類似問題之修復計劃；該修復方式為國外首次經驗，此為難得之現場施工技術觀摩機會，遂派員前往瞭解其執行狀況，對於未來本公司執行改善對策應有極大助益。

## 二、出國行程：

90.03.12~90.03.13  往程（台北—阿姆斯特丹—伯哥斯）

90.03.14~90.03.19  爐心噴灑管路整體更換工作實地研習

90.03.20~90.03.21  返程（伯哥斯—阿姆斯特丹—台北）

註：以上行程均按原核定計畫執行

## 三、實習內容：爐心噴灑管路更換工作

### 1. 摘要

西班牙 Nuclenor 核電廠之爐心噴灑管路更換工作，範圍係自反應爐 Nozzle 安全接頭到爐心噴灑噴嘴之間的管路全部更換，另外於爐心噴灑噴嘴之 T-BOX 處安裝管夾，以免如果 S-2 焊道裂穿而有限制管路脫斷之作用，此項工作包括訓練、工具檢定、有效率地動員到電廠及施工前準備，使得實際安裝工期為 10.14 天完成，係奇異公司與 Nuclenor 核電廠合作團隊完美表現之一例。

### 2. 在美國聖荷西之訓練及工具檢定

奇異公司在美國加州聖荷西沸水式核能反應爐技術訓練中心製作一座一對一尺寸含蓋 220°爐心範圍之模型，包括之設施有反應爐槽、爐心側板、燃料架上導板及二組上下層爐心噴灑噴嘴管段等，此模型用來測試與檢定爐心噴灑管路更換工

作所使用之工具。而且，燃料架上導板屏蔽工作台模型之製作、結構及安裝皆與實際屏蔽相同。將此屏蔽模型置入水中約 42 呎(12.8 米)，以模擬 Nuclenor 電廠實際潛水人員工作現場之深度，此一深度係以潛水人員能夠站在屏蔽工作台上潛水工作達 200 分鐘為基準，這一個措施讓奇異公司減少使用 4 個潛水人員，明顯地降低了集體人員劑量。水上作業人員在燃料吊車上操作，潛水人員潛入屏蔽台上以及爐穴地板工作，完全模擬現場狀況，在此地研擬密集測試程序書及執行工具檢定測試，以確保爐心噴灑管路更換工作使用之工具及步驟符合本案技術與品保規範之要求，依據此一測試程序書編訂電廠實際作業程序書。

放電切割工具初步測試係在聖荷西奇異公司舉行，以確保工具符合功能要求。由於模型之形狀特殊，所有檢定測試皆在訓練中心依照位置深度要求模擬，尤其如小型噴嘴管段及反應爐 nozzle 模型是無法置入奇異放電切割實驗室之壓力槽內的，因此放電切割之操作與檢定是在訓練中心進行，這項訓練亦包括模擬實際現場狀況的切割屑收集系統之使用。

Nuclenor 電廠爐心噴灑管路更換之專用工具設計製造為多項功能，如可量測尺寸並用於加工及硬體安裝，這批工具在訓練中心於乾式組裝測試時、工具檢定中、訓練過程中經過多次修改及改善以增進可靠度及方便使用。

依照訓練計劃，將所有工作人員訓練成熟悉自己的工作領域，訓練為期兩週，唯大多數奇異工作人員仍需參與檢定與測試過程，因此前後需進行四週左右，事後看來，此一訓練對於這大型更換作業之成功非常有利，包括教室及現場密集操作演練。

西班牙 Nuclenor 核電廠人員亦參與一週的訓練，以熟悉工具使用及步驟進行，此一參與証實對日後實際現場作業很有助益。

### 3. 動員到現場

當工具與設備運達 Nuclenor 核電廠以後，即刻進行準備工作，在電廠修配工廠安置一個區域做為奇異工作區，在那裡整理工具、組裝硬體、鑽孔加定位梢等。由奇異具經驗之機械技術員密切指導電廠人員做硬體最後加工，這段重要準備過程中，奇異公司儘力協助電廠，兩者在最佳合作之情況下，為水中作業能夠快速展開之重要因素。

奇異動員到現場，工作前準備包括到廠 EDM 設備之校正、量具與安裝工具之準備與測試以確認從聖荷西運送之過程中沒有損壞、搬運設備及消耗品至燃料填換樓並設置各工作區域。由於奇異公司之設備使用電壓與電廠不同，因此奇異安裝人員由美國帶來兩個變壓器接到電廠 400 伏特輸出端，以供應本工作大部份之電源。

依工作所需而設置一些不同作業之區域，將 EDM 電源控制盤置放區佈置為清潔區，使儘量避免污染以便於工作完成時能夠順利攜出。潛水作業則另外設置工作區域配合潛水人員由爐穴進出，包括可由爐穴進出之工作台。設置一個高污染區，在該區做剛開始的工具安裝準備、工作中保養、修理及事後拆卸工具。在乾井蓋底下佈置為工具初步整理及消耗品、工具備品等臨時存放區。設置品質檢驗區以暫置新更換硬體，在此區域執行組裝硬體組件、最後檢驗及硬體於爐內安裝前之準備。當設備及工具已置妥在燃料填換樓，即作最後準備以開始緊要時程作業。

### 4. 水中作業

爐心作業開始首先安裝屏蔽工作台，此工作台由 2.36 in (60.0 mm) 厚之鉛板內置於 0.078 in (2 mm) 厚之不銹鋼皮間製成，以期潛水人員接受之輻射劑量能降低為 1/10。此工作台設有窗口由液壓操作，開啟時供遙控操作進到 sparger T-boxes 工作範圍，關閉時則供潛水人員在該區域工作。

爐心噴灑管路更換工作之水中作業包括三個階段；舊硬體移除、表面處理、新硬體安裝。緊要時程爐心噴灑管路更換部份非常成功，包括新的 T-boxes 及 thermal sleeve 組件、水平管路、垂直管及下彎頭部份、爐槽托架管夾、sparger T-box restraints 等硬體之安裝，現場新硬體安裝完全不需要電焊。

西班牙電廠提供爐心輔助工作台、燃料吊車延伸工作台、屏蔽工作台、管路吊掛夾具、T-box 吊掛具等。這些項目對於工期之執行非常重要，站在燃料吊車延伸工作台上，使工作人員能增加活動範圍以操作工具安裝 sparger restraint clamps，使用爐心輔助工作台則使多項工作作業得以平行進行。

執行初步檢查以觀察有無任何潛在干擾或異常。潛水人員則針對四根垂直管安裝位置之每一處量測垂直管原有長度尺寸。

由於放置屏蔽工作台妨礙爐心 170° 及 189° 位置之垂直管量測，於是將垂直管量具附加一延伸桿以便量測，依所量測的尺寸將垂直管加工到適當長度。

接著量測下部 T-box 表面與側板間距及噴嘴安全接頭內側相關尺寸。sparger T-box 與爐心側板間之距離量測係作為 sparger restraint clamp anchor plates 加工之參考。最後一次量測噴嘴及安全接頭之相關尺寸係用來加工 T-box spacer pads 及提供 T-box thermal sleeve 組裝時之依據。

在初步檢查及垂直管相關尺寸量測以後，位於爐心 90° 及 270° 之 T-box 蓋板以 EDM 切割移除。

然後使用管內切割刀具(roll cutter)將 thermal sleeves 切斷，此刀具係由潛水人員所安裝，接著由潛水人員以傳統研磨工具切割並拆除爐槽托架管夾及水平管段，隨即將水平管段吊至爐穴地板邊暫放，並置於由奇異設計電廠自製之固定架上，潛水人員利用非緊要時程內將這些舊管子切成小段後暫置

於臨時容器中，日後再將這些容器吊移出裝入廢料桶處理。

在表面處理過程中，現場人員遇到一些困難。以 GO / NO-GO 量具探測結果，發現爐心噴灑管安全接頭內側與 Thermal Sleeve 原有焊道較預期凸出許多，使得某些工具無法安裝妥當，由此必須再量測一些其他尺寸並製造 EDM 切割電極片，以便切除凸出之焊道，潛水人員亦需增加工作時間及接受額外之劑量。

接著由潛水人員安裝 EDM 驅動器將安全接頭內側表面再加工，以達到安裝新 T-box 及 thermal sleeve 組件所需配合之尺寸。完成 EDM 切割後再進行噴嘴最後相關尺寸量測。

由於下部彎頭之區域輻射劑量很高，潛水人員無法接近，此部份之切割是以遙控方式來操作 EDM 驅動器。

當下部彎頭段移除以後，爐心側板外側再用 EDM 加工，以製作新下部彎頭之座落面，其他工具亦利用此一“spotface”作定位。

完成 spotface 以後，在 sparger T-box 中心以 EDM 鑽一個孔，並安裝對心工具(datum tool)。T-box 鑽孔之 EDM 驅動器及對心工具皆座落在側板之 spotface 上。對心工具(datum tool)提供 sparger T-box 與側板間距離量具及 SPARGERS 管鑽止推螺栓孔之 EDM 驅動器的定位基準。

當下部彎頭以 EDM 切除以後，在側板穿越管又遇到另外一個問題，即切口端面內徑有較凸的殘留焊道，使得側板 Spotface EDM 驅動器中心軸裝不進去，四個位置皆同樣情況，需再用 EDM 切除過凸的焊道，這項作業係修改既有的驅動器來完成。

完成最後尺寸量測，把新 T-box 組件間隔片加工以後，將 T-box thermal sleeve 組裝好。此一裝配需要在新 T-box / thermal sleeve 內裝入 Spider 並鑽孔及打樁，使配件穩固並保持需要的長度。sparger restraint clamp anchor plates

亦需加工至最後需求尺寸。經過奇異與電廠間最佳合作及協調的結果，這一個重要的最後加工作業能夠即時完成並準確無誤。

當最後加工完成以後即開始新硬體安裝，十字形支架 (cruciform)、拉桿、噴嘴安全接頭內之 T-box / thermal sleeve 組件由潛水人員安裝妥，然後將拉桿拉伸並鎖磅。

接著潛水人員協助放置垂直管段並以機械方式固定，而噴嘴抑制 S2 管夾及下彎頭拉桿則以搖控方式安裝。

當噴嘴抑制管夾裝妥以後，潛水人員將水平管放到定位並以靈活聯接器與垂直管段及 nozzle T-box 連接，這種聯接器係以球面座接合並以螺栓連接，使在安裝時能夠靈活定位。接著裝妥新爐槽托架管夾，當這些裝配完成以後，將聯接器之螺栓鎖磅。

水平管路安裝以後，將 T-box 拉桿固定螺帽壓扁，裝上 T-box 蓋板並鎖磅，確定 T-box 上之固鎖夾子將蓋板固定妥，隨後將聯接器之螺栓固定螺帽壓扁，使不再鬆脫，如此完成整個工作，至於前提到的潛水人員屏蔽工作台因 Nuclenor 電廠委託下包製造時明定不使用後加以去污，將可用材料由承包商回收，如此也省下一些廢料處理。

#### 5. ALARA 計劃

依爐心噴灑管路更換作業 ALARA 計劃預估總累積劑量為 14.935 rem (149.35 mSv)，而實際接受總累積劑量為 6.037 rem (60.37mSv)，較原目標值降低 8.898 rem (89.98 mSv)，接受劑量較預估值低有許多因素造成，即良好的工作前計劃與工作執行順利及工作區域之來源劑量較預期為低。

#### 四、結論與建議：

西班牙 Nuclenor 核電廠屬於 Central Nuclear de Santa Maria de Garona (NN) 公司管轄，位於西班牙北部中區



Burgos 市，離 Bilbao 機場約 1 小時 40 分鐘之車程，延著 Ebro 河流域，此河亦是電廠冷卻水之來源，電廠週圍約三十公里內大部份是山區幾乎沒有人煙，為 BWR-3 型反應器，僅建一部機組，發電量 466 Mwe，目前燃料週期為 24 個月，已實施約十年矣，反應爐直徑為 188 英吋，爐心燃料有 400 根，1971 年商業運轉，Nuclenor 時常保持高的 Capacity Factor，於 1994~1996 已有超過 500 天連續運轉之記錄，顯示運轉與維護做的不錯，實令人欽佩，該電廠與奇異公司訂有多次大修爐心檢查之長期合約一直到 2005 年，本次大修工期規劃為 30 天，包括執行爐心噴灑管路更換，亦是 full core discharge，燃料移動 497 步，執行一些爐心作業及少部份 IVVI 項目，如 CRB 脫接 18 支、更換 LPRM 3 支、爐心側板 V7 / V8 焊道檢查、50%的 Vessel Wall Inspection、CRD STUB TUBE UT 抽檢測 7 支，另有 1 支 STUB TUBE 因過去有 Indication 已裝 Seal，本次大修重新檢查並更換 Seal，趁此機會執行少部份 RPV Bottom Inspection，Removed 22 個 Cell，該廠 20 年前 (1980 年)第一次發現 1 支 CRD STUB TUBE 漏，即開始與廠家 Combustion 公司合作研究改善方案，後來裝置 Seal Cover 並獲得管制單位同意此一處理方式，第二次發現另 1 支 Stub Tube 漏是 1985 年，至目前為止已發現 2/3 數量之 Stub Tube 有 UT Indication 但尚未漏，亦皆以裝置 Seal Cover 處理，可謂處理這一問題之專家，UT 及裝 Seal 皆自己來，計劃 20 年內做 400 次 UT 檢測，即每支 Stub Tube 檢測 4 次，對每支已裝置 Seal Cover 者，配合檢測拆除 Seal 並更換新 Seal。

經觀察 Nuclenor 核電廠燃料填換樓之良好典範值得參考如下：

1. 將常用手工具吊掛牆上，節省借用工具往返時間。
2. HATCH 區域設置額外固定式之設備升降台車，從一樓直通燃料填換樓，以減少主吊車之負荷。

3. 反應爐開封蓋作業時，爐穴安置臨時升降台車以供設備或人員使用，增加效率。
4. 以 1/4 數量之馬達操作式拉伸機將 RX STUD 全數拆卸，吊至二樓清潔整理，效率好又結省空間。
5. 利用乾井蓋下方空間設置工具整理區。
6. 將 DRYER/SEP. PIT 池子覆蓋做為 EDM 設備操作區（清潔區），以利用空間。
7. 靠東西兩側將高污染工具置於工具架，並以屏蔽門遮蔽，降低空間劑量，門上貼工具照片，以利辨識。
8. 使用 Hoseless 主蒸汽管塞，免除爐心作業及最後 Cavity 除污之干擾。
9. 設置固定式臨時爐水過濾系統(含管路)，以減少臨時置放之空間，且節省安裝拆卸之時間。
10. 爐心工作區設有輔助工作台車，同類別不同 LOOP 或不同類別之工作可以平行作業，縮短緊要時程。
11. 燃料吊車欄杆上吊掛鉛氈作屏蔽，以降低人員劑量。

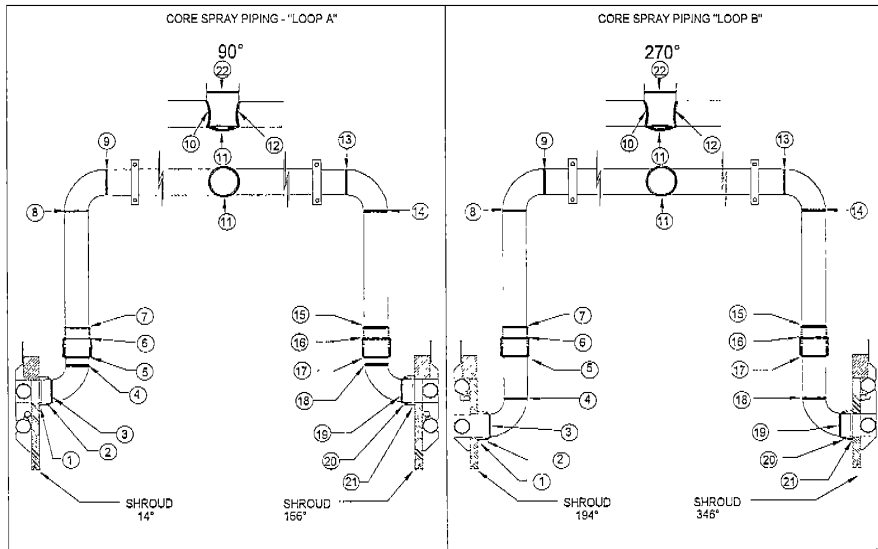
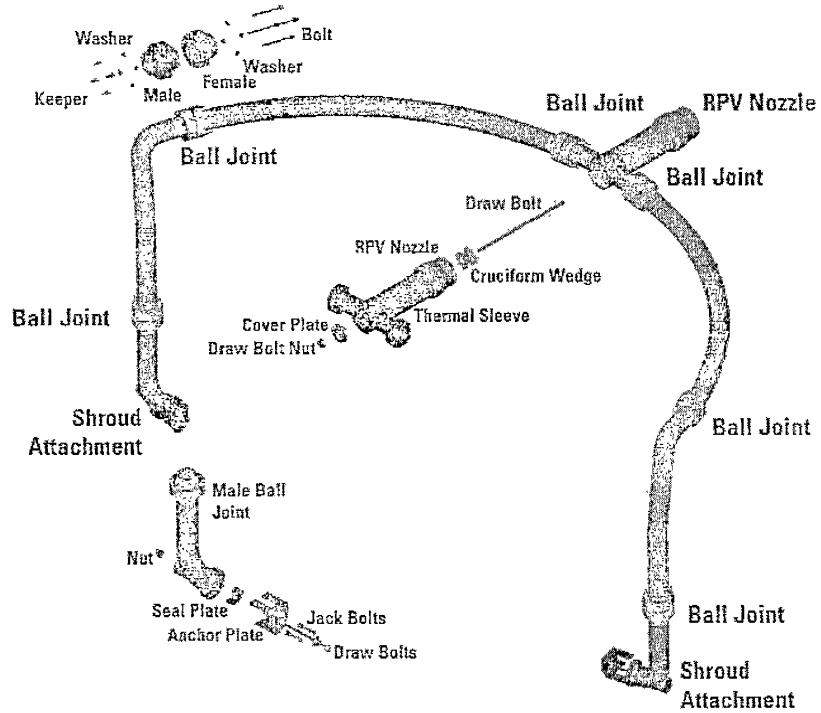
Nuclenor 核電廠之爐心噴灑管路未曾執行 UT 檢測，唯對 Accessible 焊道有定期執行 VT 檢測，未發現有 Indication，但考量並非所有焊道皆可檢測到，且有些重要部位焊道無法經由可靠之 UT 來檢測，這些部位之焊道皆有明顯 Cold Work 之記錄，另有一些部位之焊道結構是 Creviced 且具 IGSCC 高潛在危險，而飼水加氫無法有效含蓋爐心噴灑管路區段，因國外陸續發現 Indication 案例，考量將來萬一發現龜裂，將受核能管制單位嚴密管制，並且亦避免強制停機檢修之 Risk 或期中檢查降低 Performance Factor，及影響燃料填換之時程以及為電廠延壽著想，為免困擾，遂決定整體換管一勞永逸解決棘手問題，雖費用很貴但仍是值得的，實際工期為 10.14 天，原即預定 10 天完成，整體劑量 60.37mSv，比預期 149.35mSv 降低許多。

據了解國外電廠修補經驗，BROWNS FERRY 電廠三號機於 1998 年 9 月有安裝 LSR，爐心噴灑噴嘴 T-BOX CLAMP 自 1977 至 1999 年間分別有以下電廠曾安裝，即 OYSTER CREEK (1977)，VERMONT YANKEE (1980)，PEACH BOTTOM-2 (1982)，BRUNSWICK-2 (1984)，HATCH-1 (1984)，JAPANESE BWR/4 (1999)，同時涵蓋 LSR 及爐心噴灑噴嘴 T-BOX CLAMP 目前則僅西班牙 NUCLENOR 電廠執行完成，而且是由 RPV NOZZLE 至爐心噴灑噴嘴 T-BOX 間之爐心噴灑管路整體更換。

本廠一號機爐心噴灑管路龜裂最新現況，計有 A1, B1, A21, B21 等四處爐心側板上之 UT 裂痕及 166 度爐心噴灑噴嘴 T-BOX 之 VT 裂痕一處，UT 龜裂問題本廠目前已備有 Lower Sectional Replacement 硬體之 CONTINGENCY PLAN 因應，相關施工依據為 DCR - C1 - 2009，唯因 VT 裂痕之修復方式與 Lower Sectional Replacement 有交集介面，因此已另簽發 FCR-2009-01 以 Sparger T-BOX Clamp 來修復爐心噴灑噴嘴 T-BOX 之 VT 裂痕，修復方式已洽原廠 GE 公司設計中，於 EOC-18 UT 追蹤檢測後，經評估 A1, B1, A21, B21 焊道之龜裂再運轉一個燃料週期至 EOC-19 無安全虞慮，唯如預為 JCO 至 EOC-20 (93 年)，則保守考量可能 Safety Margin 稍微不足，由於觀摩承包商奇異公司在 Nuclenor 電廠施工爐心噴灑管路整體更換大致上還算順利，因此建議本廠一號機下次大修(EOC-19)即執行四處 Lower Elbow 與側板焊道及 166 度爐心噴灑噴嘴 T-BOX 龜裂處之修復，至於另三處沒有 VT 裂痕之噴嘴 T-BOX 則視大修工期情況可順便同時預為加上 Clamp。

二號機之爐心噴灑管路龜裂問題因龜裂尚屬微小，仍在接受之範圍內，計劃爾後每次大修仍繼續以 UT 追蹤檢測，視龜裂情況再決定是否進一步採取改善對策。

# Nuclenor Full Replacement



核一廠一號機 EOC-18 UT 檢測發現龜裂位置示意圖