

行政院及所屬各機關出國報告  
(出國類別：洽公)

設計與製程審查及設計變更之驗證

服務機關：台灣電力公司  
出國人職稱：燃料處採購師  
姓名：蔣光聲(117414)  
出國地區：日本、美國  
出國期間：103年9月15日至103年9月24日  
報告日期：103年11月14日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：核燃料元件設計與製程審查及設計變更之驗證

頁數：30 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

蔣光聲/台灣電力公司/燃料處/採購師/23666758

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他：洽公

出國期間：103年9月15日至103年9月24日 出國地區：日本、美國

報告日期：103年11月14日

分類號/目

關鍵詞：核燃料、製造廠、製程

內容摘要：（二百至三百字）

核燃料製造品質之良窳，直接影響核能電廠運轉之實績與安全，本公司依照核燃料製造服務合約及本公司核能營運品質保證方案之規定，須審查核燃料製造廠家在合約下所提供之核燃料元件設計及其變更，以驗證其符合各電廠核心設計及運轉安全之要求。為確實掌握製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)核燃料元件設計變更之控管，並對於核燃料之製程、品保作業與合約執行等進行驗證，須定期每年派員執行設計變更之實地驗證及製程審查，以確保本公司所採購核燃料之設計及品質符合採購規範要求，進而提升核能電廠運轉之可靠性與安全性。

本次任務主要針對 Kobe Steel Ltd.、GNF-A Nuclear Fuel Plant 與 WestingHouse Fuel Fabrication Plant 等共計 3 家之本公司核燃料或主要組件製造廠家，進行製程、品保作業與合約執行等實地驗證及審查。在實際查訪該等廠家之製程與品質保證執行方法後，除了解該等廠家之製程與管控程序外，並確認符合本公司製造服務合約之要求。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

## 目 錄

圖目錄 .....	ii
壹、 出國緣起與任務 .....	1
貳、 出國行程紀要 .....	2
參、 工作內容 .....	3
一、 查證本公司核燃料匣於神鋼集團(Kobe Steel Ltd.)之製程 .....	3
二、 查證本公司核燃料製造廠商 GNF-A Nuclear Fuel Plant 之製程 .....	13
三、 查證本公司核燃料製造廠商 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之製程，並洽談合約相關執行事宜 .....	20
肆、 心得與建議事項 .....	26

## 圖目錄

圖 1、完成品質接收檢查之鋁板材 .....	8
圖 2、完成整型之凹字型材料 .....	8
圖 3、完成焊接之核燃料匣 .....	9
圖 4、完成尺寸裁剪進行表面清潔之核燃料匣 .....	9
圖 5、部份完成表面處理之核燃料匣 .....	10
圖 6、完成鑽孔與零件焊接之核燃料匣 .....	10
圖 7、完成鎖緊裝置鑽孔之核燃料匣 .....	11
圖 8、工作人員進行最後之表面清潔 .....	11
圖 9、等待最後 spacer 焊接之核燃料匣 .....	12
圖 10、製造完成等待包裝之核燃料匣 .....	12

## 壹、出國緣起與任務

核燃料製造品質之良窳，直接影響核能電廠運轉之實績與安全，本公司依照核燃料製造服務合約及本公司核能營運品質保證方案之規定，須審查核燃料製造廠家在合約下所提供之核燃料元件設計及其變更，以驗證其符合各電廠核心設計及運轉安全之要求。

為確實掌握製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)核燃料元件設計變更之控管，並對於核燃料之製程、品保作業與合約執行等進行驗證，以及滿足原能會對於加強核燃料製造廠家製程查核之要求，同時，避免核燃料運抵國內開箱檢驗才發現品質缺陷再行善後補救，故須定期每年派員執行設計變更之實地驗證及製程審查，以確保本公司所採購核燃料之設計及品質符合採購規範要求，進而提升核能電廠運轉之可靠性與安全性。

透過派員前往核燃料製造廠家執行查核與驗證作業，以驗證其製造之核燃料符合核心設計及運轉安全之要求，並於核燃料各項組件製造期間對於製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)之製程、設計(含變更)、品保作業與合約執行等進行實地之驗證與查核，以確保核燃料製造之品質及使用之安全。

所以，本次出國最主要之任務期望達成下列目標：

- 一、對於製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)核燃料與相關元件之製程、品保作業與合約執行等進行驗證。
- 二、掌握製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)核燃料與相關元件設計變更之控管。
- 三、確保本公司所採購核燃料之設計及品質符合採購規範要求。

## 貳、出國行程紀要

時間	工作紀要
9/15(一)~9/15(一)	往程：台北—日本神戶
9/16(二)~9/16(二)	查證本公司核燃料匣於 Kobe Steel Ltd.之製程
9/17(三)~9/17(三)	行程：日本神戶—威明頓(Wilmington)
9/18(四)~9/18(四)	查證核燃料製造廠商 GNF-A Nuclear Fuel Plant 之製程
9/19(五)~9/19(五)	行程：威明頓—哥倫比亞(Columbia)
9/20(六)~9/22(一)	洽談合約執行相關事宜以及查證核燃料製造廠 商 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之製程
9/23(二)~9/24(三)	返程

## 參、工作內容

### 一、查證本公司核燃料匣於神鋼集團(Kobe Steel Ltd.)之製程

#### (一)、神鋼集團簡介

神鋼集團為日本著名之鋼鐵產業集團，主要生產項目涵蓋鋼鐵、鋁銅、建築機械、焊接、機械以及工程技術服務等各項事業領域。神鋼集團自 1905 年創建迄今已有 100 餘年之歷史，總部設置於神戶與東京，散布於全球各地之據點共 88 處，集團旗下擁有 200 家子公司、11 座製造工廠及近 70 家關係企業。

神鋼集團有關核能領域之產品與服務主要散布於各相關產品事業領域，涵蓋核能相關所需之金屬元件製品，包括核燃料元件材料，如燃料棒銜管(cladding tubes)、核燃料匣(fuel channel)等；反應爐壓力槽或蒸汽產生器組件；BOP 廠房設備，如冷凝器與飼水加熱器組件；用過燃料貯存與運送設備，如貯存罐(canister)、貯存或傳送護箱(cask)等；以及再處理廠所需之相關設備等，主要供應渠國內核能機組使用。製造廠依其各設定之產能負責各項不同產品之製造，本次主要參訪負責製造本公司核燃料匣之製造廠，係隸屬於渠工程技術服務事業領域，負責核能相關設備之製造，製造工廠則為渠旗下位於之兵庫縣高砂市之高砂製作所(Takasago manufacturing complex)。

#### (二)、高砂製作所簡介

高砂製作所成立於 1953 年，地處瀨戶內海(Seto Inland Sea)之高砂港旁，佔地約 142 公頃。目前該製造廠內員工約 2,000 人，主要負責神鋼集團大型鑄件，如船用曲軸(crankshaft)；鐵粉原料，並應用於粉末冶金之領域；鈦金屬產品；機械工具母機；壓縮機；煉油設備；以及核能產品中，核燃料匣與用過燃料貯存與運送設備等產品之製造服務。因此，涵蓋神鋼集團鋼鐵、鋁銅、焊接、機械以及工程技術服務等事業領域之產品。

#### (三)、神鋼集團之核燃料匣製程介紹

神鋼集團之核燃料匣製程係將銜板彎成對稱之凹字型後，再以焊接方式，組合成正方長柱形之核燃料匣，再經過一連串之加工處理後完成成品，以下將簡單介紹渠核燃料匣製造流程：

### 1. 整型(modeling)

由 Cezus 所進口之鋁板材料，在接收通過檢驗後，如圖 1，先以沖壓機進行整型之工作，將板材製成凹字型，以做為後續焊接組合成成品之外型。在形成外型之雛型後必須先進行裁剪，以確定要進行焊接方向之高度尺寸正確，否則完成兩支凹字型材料焊接組合後之高度尺寸，若有不合將無法再進行調整。此外，經過裁剪之表面也有利於後續焊接工作之進行，並可以較清潔之表面進行焊接，提升焊接之品質。完成整型後之凹字型材料如圖 2 所示。

### 2. 焊接(welding)

完成整型後之凹字型材料，兩兩為一組，置於模具上後，送至焊接站，將以電漿弧焊(Plasma Welding)方式進行兩片凹字型材料之焊接，利用電漿弧焊高效能之優點，可穩定控制焊接受影響區域大小，並可減少焊接所需要之時間，以盡量降低對材料之影響。完成焊接後之凹字型材料如圖 3 所示。

### 3. 退火(annealing)

焊接完成後，即已完成核燃料匣之外型，但必須將焊道進行初步之平整研磨處理後，再進行焊道退火(annealing)之處理，以維持焊道與材料本身之相關金屬特性。

### 4. 檢測(inspection)

完成退火程序之核燃料匣將進行初步之檢測工作，除了曲直度量測外，也會送至超音波檢測站進行焊道與邊角之檢查，以確保焊道與材料之品質。

### 5. 尺寸控制(sizing)

檢測完成後會做長度尺寸控制，裁切多餘物料，並將焊道與表面進行拋光表面處理，以及底端倒角(chamfer)、編號印製等工作。如圖 4 所示為渠工作人員進行裁切後表面處理之工作照片，圖 5 則為部份完成表面清潔之核燃料匣。

### 6. 零組件處理(drilling)

在核燃料匣完成初步整體外型後，尚必須安裝相關附屬零組件，而這些零組件有用焊接方式，亦有利用鑽孔後使用組合焊



接，故下一步必須進行鑽孔與 clip 焊接安裝以利後續加工，如圖 6 與圖 7 為完成鑽孔與零件焊接之核燃料匣。

#### 7. 拋光清潔工作(polishing)

待零組件安裝前之處理完成後，高砂製作所之核燃料匣製程會送至清洗站，進行表面拋光之處理以及 3 道水洗與清潔工作，以準備進行最後之焊接工作，如圖 8 為清洗後之核燃料匣，由工作人員進行最後之清潔工作。

#### 8. 完成焊接與包裝(packaging)

最後將 spacer 焊上後，核燃料匣將送到檢查站做所有尺寸量測與檢查，通過檢測後，將完成包裝入庫，準備出貨。如圖 9 為準備進行最後焊接之核燃料匣，圖 10 則為完成製造工作等待包裝之核燃料匣。

### (四)、本次參訪查證過程

本次主要任務係以實地了解廠商製程與品質管控之方式，確認核燃料匣之製程是否符合合約之要求。職於查證中一一詢問渠製程中品質控制之重要步驟，如焊道檢測等，神鋼集團之相關陪同人員亦提供詳細之說明。以下將介紹神鋼集團負責核燃料業務之相關人員，以及查證過程相關問題之說明：

#### 1. 核燃料匣業務相關負責人

本次參訪係隨同本公司核燃料製造商 Areva Inc.公司之亞太客戶中心專案經理 Kris Mitchell 前往查證渠核燃料匣下包商之製造工作，日方主要係由神鋼集團負責核燃料匣行銷業務之人員陪同所有參訪行程，包括負責海外業務之室長 Kyosuke Fujisawa、經理 Yoshikuni Tsukahara 與專員 Takahiro Nagno。至於高砂製作所主要係由室長 Masao Endo 接見討論後，再由核燃料匣製作場主任 Masayuki Nodaka 與 Toshihiko Shinya 博士負責核燃料匣製程之查證與說明。此外，負責品質保證之 Yoshiko Otani 與負責出口港業務之 Shinji Matsuoka 亦陪同討論說明相關品保作業之進行。

#### 2. 查證過程

在抵達高砂製作所並聽取簡報後，隨即由主任 Masayuki Nodaka 與 Toshihiko Shinya 博士陪同前往製造核燃料匣工廠，日方人員

除提供必要之安全裝備外，並不斷重申工安相關要求與規定，可見日方工作人員對工安之重視程度與我國相當。

本次查證製造批次係為核二廠之 KS2R24 批次，預計製造 200 支核燃料匣，預定交貨日為 2014/12/15，查證當日正進行該批次 47 支核燃料匣之製造作業，日方人員表示渠正常產量每一工作日可完成約 12 支核燃料匣，年產量可達 3,000 支核燃料匣，故可符合交貨時程。

職亦於查證過程中，詢問渠如何確保產品之品質方式，日方人員答覆每支核燃料匣皆有其編號，因此，每支核燃料匣之製造過程皆會留下完整之紀錄以供追蹤，且因製程自動化提高品質後，渠目前最大之管控點設於產品完成後，相關尺寸與曲直度之檢測。至於，對於職所詢問檢測不通過產品之處置，日方人員表示皆將直接進行廢棄處置，不會回收再使用。

此外，由於 spacer 之組件係由渠下包商所提供，職依此洽詢如何管控 spacer 之品質，以及 spacer 焊接程序置於最後一站之原因，日方人員說明 spacer 之品質於接收檢查時亦訂有相關規範，由渠品保人員確認符合後入庫，至於焊接程序係考量 spacer 焊接位置在核燃料匣表面，故需於表面清潔程序完全結束後才能夠進行焊接，以確實焊接之品質。

### 3. 核燃料匣出口文件安排議題之討論

由於核燃料匣係屬核燃料之相關組件，Areva Inc.公司在自日本出口至台灣之前，必須依規定完成相關出口文件之申請，以使核燃料匣能夠出口至台灣。然而，在台美民用原子能合作協定於 2014 年重新簽訂之後，將進口至台灣之核燃料匣增列為須接受保防之組件，此一改變對於日方與美方政府針對出口核燃料匣至台灣之保防作法，是否有調整之必要正由日、美雙方政府間討論中，故日方人員藉此機會亦與 Areva Inc.公司進行相關之意見交換。日方人員表示相關安排目前正由日、美雙方政府高層進行討論中，渠將持續密切追蹤相關時程，預計應不致影響核燃料匣交貨時程。Areva Inc.專案經理表示目前之影響僅止於渠與日方之文件申請作業，與本公司無涉。職亦藉此機會澄清依合約規定出口文件之取得係屬 Areva Inc.之責任，本公司可配

合提供相關佐證文件予 Areva Inc.，供渠申請出口文件之用。Areva Inc.公司表示已充份了解合約要求，日方人員則表示以往所須提供之兩種佐證資料已可簡化為一種即可，未來本公司僅需協助提供最終使用者證明(End User Certificate)予 Areva Inc.公司，由 Areva Inc.公司轉交日方做為申請出口文件之用，時間則約於每批次運務出口船舶啟運前 3 個月提供。

圖 1、完成品質接收檢查之鋁板材

圖 2、完成整型之凹字型材料

圖 3、完成焊接之核燃料匣

圖 4、完成尺寸裁剪進行表面清潔之核燃料匣

圖 5、部份完成表面處理之核燃料匣

圖 6、完成鑽孔與零件焊接之核燃料匣

圖 7、完成鎖緊裝置鑽孔之核燃料匣

圖 8、工作人員進行最後之表面清潔

圖 9、等待最後 spacer 焊接之核燃料匣

圖 10、製造完成等待包裝之核燃料匣



## 二、查證本公司核燃料製造廠商 GNF-A Nuclear Fuel Plant 之製程

### (一)、Global Nuclear Fuel-America LLC.公司簡介

美國 GE 集團為一跨國性大企業，產品和服務範圍從航空發動機引擎、發電系統、金融服務、能源與水處理到醫療影像及媒體。Global Nuclear Fuel-America LLC.(GNF-A)公司隸屬於集團下能源與水處理事業部下之核能部門。GNF-A 公司主要業務範圍則包括反應器之設計與興建、核燃料之設計製造至核能設施之相關專業技術服務等。GNF-A 之核燃料設計與製造與其反應器之設計一致，皆針對沸水式反應器提供相關之產品，在全球沸水式核燃料製造市場上，目前居領先地位，約佔 45%之供應量。而目前其核燃料設計與製造，除了以往之 GE-14(核四廠目前使用之燃料型式)外，目前以 GNF-2 Advantage 為主要生產之產品，同時更進一步開發更新型式之 GNF-3，以朝向高燃耗效率與更高強度之設計，目前 GNF-3 已進入先導型測試階段。

### (二)、GNF-A Nuclear Fuel Plant 簡介

位於美國北卡羅萊納州(North Carolina)威明頓市(Wilmington)之 GNF-A Nuclear Plant 為 GE 集團旗下之複合生產中心，主要負責航空動力零件、核燃料等相關產品之製造，分別位於廠區內各個主要之廠房設施內。此外，GLE 公司所投資設立之濃縮廠預定地亦設立於此，據 GNF-A 人員表示，目前該濃縮廠尚未有正式廠房，僅暫時使用一合格之廠房內進行相關之先導測試。核燃料之相關產品則包括銼管(cladding)、水棒(water rod)、燃料匣(channel)與核燃料等。核燃料相關組件所在廠房各有不同，銼管與水棒製程類似，且需求量較大，故位於同一廠房內生產；核燃料匣則位於另一生產中心；核燃料因包括燃料丸製程，故以整合生產中心進行，以利控制區域之管控以及後續流程運送之管理。

### (三)、GNF-A Nuclear Fuel Plant 之核燃料相關組件製程介紹

GNF-A 所製造生產之核燃料係為沸水式反應器(BWR)所使用，目前所製造生產之相關零組件除供自己後續製造核燃料使用外，亦有出口至西班牙或日本，供其他製造廠，如 ENUSA、GNF-J 等製造使用。以下茲分別簡單介紹 GNF-A 核燃料相關組件之製造流程：

### 1. 鋁管(cladding)

GNF-A 之鋁管製程係將接收並通過品質檢驗後之原始圓管材料，經過 3 次拉伸方式，將材料塑型至所需尺寸。由於鋁金屬性質易燃，因此，加工過程皆以冷作方式，此外亦可避免影響熱影響區域之材料性質，亦可減少後續尚需進行其餘材料品質熱處理之程序。製成之鋁管再以雷射方式印製條碼(barcode)後，再進行超音波檢測，將檢測結果完整紀錄，以利後續加工製程中，每根鋁管之紀錄追蹤。除此之外，依客戶之需求，還可以對鋁管進行表面特殊加工處理，如鍍膜抗腐蝕等。目前鋁管製造中心正進行設備汰舊換新，利用更新之機會同步進行自動化之升級處理，以提升產量符合產品之品質以及客戶之訂單時程所需。

### 2. 水棒(water rod)

GNF-A 目前核燃料水棒設計，GE-14 有 2 支水棒，GNF-2 則沿襲 GE-14 設計，亦採用 2 支水棒，而正進行開發與先導型測試之 GNF-3，則改採 1 支水棒之設計，並在長度上修改為非全長，以提升中子緩和效果，增進燃料使用效率。水棒之材料同樣係使用鋁金屬，亦使用冷作加工製程，透過拉伸將原始材料製成成品後，再進行水孔鑽孔加工之工作，最後同樣進行表面清潔拋光等加工處理。

### 3. 核燃料匣(channel)

GNF-A 亦有生產核燃料匣之產品，核燃料匣鎖緊裝置則透過下游廠商供應。GNF-A 之核燃料匣製程與 KSL 類似，係採兩片凹字型組合焊接方式製程，原始鋁板係由 Western 或 Cezus 進口，接收通過品質檢驗之鋁板先利用沖壓方式製成凹字型，惟與 KSL 不同之處係在沖壓過程即採兩片為一組方式進行，因此，在焊接前可以減少後續尚須進一步尺寸控制之加工，然而，相對而言，完成之材料只要有一片未通過檢驗，則配合的另一片材料必須一同拋棄，否則無法找到與之搭配之另一片原料，惟 GNF-A 人員表示因渠製造經驗豐富，沖壓後之產品品質非常高，發生上述材料浪費之情形趨近於零。

完成整型之各組材料再送至下一站使用 MIG(Metal Inert Gas)焊接方式進行自動焊接，完成焊接之後即完成初步之外型，此時再送至下一站進行焊道退火熱處理與超音波檢測之工作。完成後同樣必須進行核燃料匣尺寸控制之裁剪，以及相關零組件之處理，包括鑽孔、clip 焊接、鎖緊裝置鑽孔以及 spacer 焊接等。最後完成清潔工作之核燃料匣會送至檢測站，進行尺寸檢驗後，將符合品質規範之核燃料匣套袋入庫準備出貨。

#### 4. 核燃料(Nuclear Fuel)-

由於核燃料之製程包括燃料丸與後續組裝作業，故涉及汙染控制區與一般區之作業，而為了讓職了解燃料丸之製程，專案經理特地申請輻射工作許可證(RWP)，領取劑量配章，陪同進入控制區查證燃料丸之製程。以下將分別就核燃料之製程做一簡單之說明。

##### (1) 燃料丸(pellet)

二氧化鈾燃料丸從濃縮鈾之接收開始，接收後之濃縮鈾先進行轉化之工作以製成二氧化鈾粉末，廠方人員表示以往 GNF-A 製造廠係採濕式轉化製程，但為了降低廢液之產生量，故已改採乾式轉化製程，同時亦將不再使用之廢液儲存場改建成新的辦公大樓。而由於 GNF-A 亦有出口二氧化鈾粉末至其他製造商，故其粉末生產中心有別於其他生產中心採三班制，以應付客戶訂單與自己生產之需求。

在完成二氧化鈾粉末後會依據不同目的混入相關添加物，再送至沖壓站以進行壓丸成型，然後送至高溫燒結爐做成陶瓷化之燃料丸。完成後之燃料丸會由訓練過之檢驗員將有缺陷之燃料丸挑出回收再製造，只有通過檢驗之燃料丸會依不同濃縮度送至下一站準備裝填。

##### (2) 燃料棒

完成製造並通過檢驗之燃料丸將依燃料晶格設計，按不同濃縮度整齊排放，然後填入已完成下端塞焊接之鋁管內，在完成彈簧安裝充入惰性氣體與上端塞焊接後，通過測試檢驗並進行掃瞄確認濃縮度分佈後，完成單根燃料棒之製造。每一根完成之

燃料棒會再送入控制區外的燃料棒暫存庫暫存，等待後續燃料組裝作業。

### (3) 核燃料骨架(Skeleton)

在核燃料組裝前，會先將燃料間隔板(spacer)與水棒組合成核燃料骨架，以利後續組裝燃料棒作業。對於間隔板之製造，GNF-A 係委由下游廠商所提供，並於渠製造廠完成核燃料骨架之組裝作業。

### (4) 核燃料組裝(Fuel Assembly)

完成組裝之骨架置於組裝台後，工作人員先依據燃料束設計輸入自動化設備中，由機器抓取所須燃料棒型式，再送至組裝台進行組裝作業。完成組裝之核燃料則在通過檢驗後套袋置於暫存區，準備包裝裝入運送箱後出貨。

## (四)、本次參訪查證過程

本次主要任務係透過實地查證方式，了解廠商在核燃料及其相關組件製程與品質管控之方式，以及目前核燃料製程是否有任何設計變更需加以特別注意之處，以確認渠生產之產品符合本公司合約之要求。以下將分別說明本次查證過程：

### 1. 陪同參訪人員

本次參訪係由 GNF-A 負責台灣區合約之專案經理 Michael(Mike) E. Fitzpatrick 與 GE 公司核四專案計畫執行經理 Adrian James，陪同前往查證包括銼管、水棒、核燃料匣以及核燃料之製程，並於製程查證完畢後，由前述人員與客戶專案主任 J. Michael Downs 以及負責核燃料設計分析之蘇進旺專案經理，就參訪過程之問題以及核四廠目前狀況與相關技術問題進行意見交換。

### 2. 查證過程

在抵達 GNF-A Nuclear Fuel Plant 並經過換證手續通過保安檢查後，隨即由 Mike 與 Adrian 陪同前往各廠房，由於參訪時正值 GNF-A 慶祝渠 ESBWR(Economic Simplified Boiling Water Reactor)反應器設計通過 NRC 之審查，故整個製造廠顯得相當忙碌且士氣高昂。Mike 表示此為渠一重要之里程碑，除表現渠在未來市場上之重要技術之推展外，更證明渠一貫維持品質與領先之地位。

職於查證過程中，詢問渠對於下包商提供之產品，該如何確保產品之品質符合規範，Mike 答覆除了一般接收品質之檢驗外，渠亦定期派稽查員至下包商之製造廠進行製造產品品質之稽查作業，以確保產品品質之要求。而至於各廠房之製程品質之管控皆有專責品保人員負責稽核與查證作業。

此外，Mike 亦表示目前廠房內之生產機具皆已有年限，故 GNF-A 已開始逐步進行設備汰舊換新，或是設備升級之動作，以維持並提升產品之品質，職亦提醒未來若有機會開始核四廠之製造前，必須依合約完成相關必須之設計變更審查程序，才能進行後續之製造作業。渠亦表示清楚合約之規定，更希望有機會可以進行核四廠之製造作業。

除此之外，Mike 亦表示由於渠目前正計畫將所有 GE-14 型之核燃料合約更換為 GNF-2，以整合渠製造生產線之製造作業，目前除本公司之外，剩餘之 GE-14 型核燃料合約所剩不多。職則表達對本公司而言，要更換燃料設計有其一定之困難處，因此，請渠務必保留 GE-14 型核燃料之生產線，以便於將來若真有機會執行製造作業，盡量排除相關作業執行上之困難。

在最後核燃料出貨包裝的工作區域，Mike 亦帶職前往觀看其核燃料裝入 RAJ-II 型運輸箱之作業，並表示由於此運輸箱是屬於新型設計，且內外箱皆使用金屬材質，因此，造價昂貴所費不貲，目前所投資製造之數量不多，在運輸箱之調度上就必須特別注意。同時，Mike 亦表示若核四封存後，置入燃料水池之 1 號機核燃料，若有考慮移出置入運輸箱存放，可能必須考慮採購運輸箱之成本將會非常高。

### 3. 相關議題之討論

在職赴美執行任務之時，政府已宣佈「核四一號機不施工、只安檢，安檢後封存，並待公投結果認定是否重啟運轉；核四二號機全部停工」之政策，在政府政策多次之變化之下，對於核四廠製造合約之執行，實有需要與廠家保持密切聯繫與溝通，使雙方皆能掌握最新狀況以為之因應。除此之外，原擔任核四廠製造合約聯絡窗口之 GNF-A 專案經理 Charles J. Paone 亦已退休，故職藉本次機會與 GNF-A 人員面對面溝通，除確保未來

後續之聯絡管道及方式外，亦與 GNF-A 人員對目前核四廠之現況與相關合約執行之內容進行意見交換。GNF-A 人員也持相同之看法，並表示非常期待核四廠能有順利商轉的一天，惟不管最後之發展為何，渠皆樂於依本公司之需求適時提供相關之支援。本次任務雙方對於相關議題之意見，茲摘錄如下：

#### (1) 核四廠之現況

首先，職向 GNF-A 人員說明目前核四廠之現況，並表達目前本公司已依政府之政策正執行核四廠安檢後封存之工作，並待公投結果認定是否重啟運轉；核四廠二號機則全部停工。GNF-A 人員亦表達渠對核四廠之進度關切之意，並詢問封存之時間長短、封存期間電廠維護狀態，以及初始核心燃料之處置。

職則進一步說明目前計畫之封存時間為 3 年，封存期間電廠將維持必要的人力，至於人力與系統運作之方式，須視封存計畫之細節與規劃之方式而定。至於初始核心燃料之保存，電廠正進行相關之規劃安排工作，GNF-A 人員則表示初始核心燃料之儲存應不致有太多問題，僅需注意避免異物入侵之問題，如儲存空間是否有加蓋保護等。雙方亦對於核四廠未來可能之方案與相關配合措施進行多次討論與意見交換。同時，GNF-A 人員亦表達若有任何可提供協助之處，請本公司儘管提出，渠將盡全力配合。

#### (2) 多週期分析通知日期

依核四廠填換核燃料製造合約之規定，對於填換核燃料之交貨通知，本公司只需於交貨前 12 個月通知 GNF-A 即可，惟由於核四廠工期不斷延宕，是否商轉仍處於非常不確定之狀況，因此，針對未來之相關作業時程，經與 GNF-A 人員討論後，渠表示先前專案經理 Charles 與本公司協商之內容，皆能掌握並充份了解，故執行上不致有太大問題，職亦表達因商轉時程之不確定性甚高，建議雙方持續保持密切之聯繫，以隨時交換任何最新之訊息。

#### (3) 初始核心燃料保固期限

有關目前已實體交貨並運抵核四廠暫存之初始核心燃料，其燃料設計、製程及零組件材料等之工藝(workmanship)保證，在核四廠商轉日期不確定之狀況下，本公司已與 GNF-A 人員洽談保固期限即將屆滿之問題。職藉此次參訪機會與 GNF-A 人員確認先前雙方洽談之內容，渠專案經理 Mike 表示已了解先前雙方所洽談之事項，並表示本公司若後續有需要延長保固期限，渠可考慮派員至核四廠檢視暫存於輔助燃料廠房之 2 號機燃料狀態，至於因核四廠商轉日期不確定，導致未來保固期限無法確定需延長多久，致使遲遲無法進行下一步洽談之內容，渠表示可配合本公司之需求隨時配合辦理。

#### (4) 緊急應變採購方案

未來若核四廠有可能商轉之情況下，為避免核四廠初始核心燃料於新燃料檢查及燃料裝填等過程中，因意外碰撞而導致燃料受損，而影響機組之商轉時程，本公司已與 GNF-A 洽談相關可能之緊急應變方案。職本次參訪除向 GNF-A 人員說明該方案之必要性，並與 GNF-A 人員確認先前洽談之商務條款內容及其有效性。GNF-A 人員則表示已完全掌握該緊急應變方案之需求，也充份了解在目前核四廠商轉極度不確定之情況下，該緊急應變方案須暫停之緣由。至於未來若本公司真有需求重新啟動該緊急應變方案之採購事宜，渠表示屆時因時空已改變，相關商務條款部份有可能需要重新協商討論，惟渠仍抱持著支持的立場，盡可能以符合本公司之需求為前提，完成該方案。

### 三、查證本公司核燃料製造廠商 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之製程，並洽談合約相關執行事宜

#### (一)、Westinghouse 公司簡介

美國 Westinghouse Electric Corp. 集團為一跨國性大企業，產品和服務範圍從家用電器、電子產品、照明燈具到能源事業。Westinghouse Electric LLC. 公司則隸屬於集團下能源事業部下之核能部門。Westinghouse Electric LLC. 公司主要業務範圍則包括反應器之設計與興建、核燃料與相關材料之設計製造、核能設施之相關專業技術服務到核後端廢料之處理等。Westinghouse Electric LLC. 公司之反應器設計與興建，以及核燃料設計與製造，涵蓋輕水式反應器設計之壓水式反應器(PWR)、沸水式反應器(BWR)、AGR 與 VVER 等核燃料相關之產品，製造廠分佈於全球各地，包括：Columbia(USA); Springfields(UK); Westinghouse Sweden AB (Sweden); the European Fuel Group(ENUSA partnership); 以及 Nuclear Fuel Industries (NFI) (Japan)。目前在全球壓水式核燃料製造市場上居領先地位，約佔 27% 之供應量；沸水式核燃料製造市場上，則屬於全球前 3 大製造廠之一，約佔 23% 之供應量。

#### (二)、Westinghouse Fuel Fabrication Plant 簡介

位於美國南卡羅萊納州(South Carolina)哥倫比亞市(Columbia)之 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 為 Westinghouse Electric LLC. 公司旗下之核燃料生產中心，主要負責壓水式反應器(PWR)與沸水式反應器(BWR)核燃料與相關組件之製造作業。核燃料之相關產品除了壓水式反應器(PWR)與沸水式反應器(BWR)核燃料之組裝作業外，尚包括頂部管嘴(top nozzle)、底部管嘴(bottom nozzle)、燃料格架(grid)等。核燃料相關組件所在廠房各有不同，核燃料因包括燃料丸製程，故以整合生產中心進行，以利控制區域之管控以及後續流程運送之管理。

#### (三)、Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之核燃料相關組件製程介紹

Westinghouse Fuel Fabrication Plant 所製造生產之核燃料包括壓水式反應器(PWR)與沸水式反應器(BWR)核燃料之組裝作業，亦包含部分之核燃料組件。以下茲就本次查證作業所見之相關組件製造流程做一簡單介紹：



## 1. 燃料格架(grid)

由於燃料格架為整個燃料束與燃料棒之重要支撐結構，並且擔負固定燃料棒之作用，避免在壓水式反應器全液態水之環境中，在強大的水流循環下，因振動(fretting)造成燃料棒與格架之磨損，而形成格架-燃料棒磨損(Grid-to-rod fretting)之燃料破損。因此，燃料格架之設計與製造，對壓水式反應器之燃料可靠度之提升，扮演非常重要之角色。Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之燃料格架製程係先由人工將一片片之材料組合成所需之外型，組合完成後，由於需要之焊接點繁多，故由兩台機械手臂自動化焊接機進行各焊接點之焊接工作，除可提升產出之速度之外，更可確保焊接之品質。完成製造之燃料格架在完成品質檢驗後，再集中放置於暫存庫以待後續核燃料之組裝作業之用。

## 2. 核燃料(Nuclear Fuel)-

相同地，核燃料之製程包括燃料丸與後續組裝作業，故涉及汙染控制區與一般區之作業，以下將分別就核燃料之製程做一簡單之說明。

### (1) 燃料丸(pellet)

Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之燃料丸製程與各製造廠類似，亦從濃縮鈾之接收開始，接收後之濃縮鈾先進行轉化之工作以製成二氧化鈾粉末，Westinghouse Fuel Fabrication Plant 製造廠係採濕式轉化製程。

在完成二氧化鈾粉末後會依據不同目的混入相關添加物，再送至沖壓站以進行壓丸成型，然後送至高溫燒結爐做成陶瓷化之燃料丸。完成後之燃料丸會由訓練過之檢驗員將有缺陷之燃料丸挑出回收再製造，只有通過檢驗之燃料丸會依不同濃縮度送至下一站準備裝填。

### (2) 燃料棒

完成製造並通過檢驗之燃料丸再依燃料晶格設計，按不同濃縮度整齊排放，然後以振動方式填入已完成下端塞焊接之銑管內，以避免造成燃料丸填入時受損。在完成彈簧安裝充入惰性氣體與上端塞焊接後，通過測試檢驗並進行掃描確認濃縮度分

佈後，完成單根燃料棒之製造。每一根完成之燃料棒再送入控制區外的燃料棒暫存庫暫存，等待後續燃料組裝作業。

### (3) 核燃料骨架(Skeleton)

在核燃料組裝前，會先將燃料格架(grid)與主要支撐結構組合在一起以完成核燃料骨架，以利後續組裝燃料棒作業。與沸水式反應器不同之處，在於壓水式反應器運轉時處於全液態水之環境，故核燃料之設計中並無水棒提供緩和效果之設計。

### (4) 核燃料組裝(Fuel Assembly)

完成組裝之骨架置於組裝台後，工作人員先依據燃料束設計，由機器抓取所須燃料棒型式，再送至組裝台先預先完成其相對位置之擺放，再由機器對準格架後緩慢地將所有燃料棒一次送入通過各個格架到位。完成組裝之核燃料則在通過檢驗後套袋置於暫存區，準備包裝裝入運送箱後出貨。

## (四)、本次參訪查證過程

本次主要任務係透過實地查證方式，了解廠商在核燃料及其相關組件製程與品質管控之方式，以及目前核燃料製程是否有任何設計變更需加以特別注意之處，以確認渠生產之產品符合本公司合約之要求。由於 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 係負責本公司核三廠(壓水式反應器)之核燃料製造之工作，故本次查證作業以壓水式反應器核燃料與相關組件為主，以下將分別說明本次查證過程：

### 1. 陪同參訪人員

本次參訪係由 Westinghouse 公司負責亞洲區之專案經理 Stephen M. Nance 與負責客戶合約管理之專業工程師 Masayoshi Higashi，陪同前往查證包括核燃料與相關組件之製程，並於製程查證完畢後，就參訪過程之問題以及目前合約執行狀況進行意見交換。

### 2. 查證過程

在抵達 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 並經過換證手續通過保安檢查後，首先 Stephen 安排渠負責燃料丸製造之經理與 Masayoshi Higashi 先行陪同職前往燃料丸生產中心，進行相關之查證作業，待完成燃料丸之查證作業後，再由 Stephen 與

Masayoshi Higashi 陪同職查證其餘之生產流程。由於燃料丸之生產中心屬於控制區域，故在更換相關必要之裝備後，如工安眼鏡、鞋套等，隨即前往燃料丸生產之第一站-濃縮鈾之接收，送至製造廠之濃縮鈾依不同濃縮度與其製造之排程，會在接收站送入整個製程之起點，職亦藉此機會詢問渠經理，是否有接收天然轉化鈾之需求，以了解其天然轉化鈾使用之運輸箱型式，渠則表示在燃料設計上仍有用到天然轉化鈾之需求，至於濃縮度則係依渠之設計，將天然轉化鈾與較低濃縮度之轉化鈾互混而成，不論是天然轉化鈾或是濃縮鈾使用之運輸箱只有 30B 一種。而由於目前之轉化製程在 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 仍使用濕式製程，職亦詢問有關廢液處理之問題，渠則表示廢液對濕式製程確為其缺點，惟濕式製程對渠製造廠仍有其優點，故目前並無更換成乾式製程之考量。

在燃料格架之人工組裝檯，Westinghouse Fuel Fabrication Plant 係採用雙重確認之方式進行，即一人負責格架之組裝，另一人負責查證組裝過程是否有誤置或方向錯誤之問題，渠表示由於燃料格架係為重要的組件，且組裝之片數較多，完成人工組裝後隨即需送至自動焊接機進行焊接，因為完成焊接之格架若品質不符合，必須完全棄置不用，故若在送至焊接機後才發現有問題，此時已無機會再修正，而造成浪費之情事。

Westinghouse 公司前曾通知本公司對於燃料丸之檢驗方式，渠正進行自動化之設計更新，未來若能成功發展則將可降低人工檢驗之次數，並且提升燃料丸之產能。因此，職亦詢問渠目前此自動檢驗系統之發展狀況，Stephen 則表示此燃料丸自動檢驗系統目前僅安裝於一條生產線上，除可以進行測試工作外，亦可與人工檢驗方式進行對照，暫無擴增至所有生產線之考量，必須待技術發展之成熟度到某一階段後，才會考慮應用至所有之生產線，惟將來即便完全應用自動化後，仍將保留部份人工檢驗之程序，以控制產出燃料丸之品質。

### 3. 相關議題之討論

在製程查證完成後，再由 Stephen 與 Masayoshi Higashi 與職對目前合約執行事宜進行相關意見交換。本次任務雙方對於相關議題之意見，茲摘錄如下：

(1) Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之現況

首先由 Stephen 對於目前之現況做一簡短之介紹，併同更新渠目前製造廠發展之現況，渠表示目前 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之產量仍處於全滿之狀態，現有沸水式核燃料之產線將考慮撤除，將來可能有多餘的產線可以再投入壓水式核燃料之製造作業，以應付客戶之訂單需求。惟渠亦表示這些變化絕對不會影響到本公司合約交貨之時程，以及核燃料之品質。

(2) 我國核能之現況

由於 Westinghouse 公司對於我國核能發展之現況亦非常關心，因此，職亦表達依目前我國政府之政策，現有機組將於正常 40 年運轉年限後除役，核四廠一號機安檢後封存，待公投結果認定是否重啟運轉；核四廠二號機則全部停工。在此情勢下，核三廠之製造合約暫時將以逐批執行之方式，執行合約下之選擇性批次製造作業，在情勢未有改變之情形下，不致於有太大之改變。職亦向 Westinghouse 公司表達感謝之意，並請渠繼續支持本公司，持續維持雙方良好之合作關係。

(3) 換用整合式頂部管嘴(WIN)及標準型爐屑過濾底部管嘴(SDFBN)

本公司在執行 MS2R23 選擇性批次時，西屋公司提供本公司自 MS2R23 批次起，燃料可免費換用整合式頂部管嘴(Westinghouse Integral Nozzle；WIN nozzle)及標準型爐屑過濾底部管嘴(Standard Debris Filter Bottom Nozzle)等新型燃料組件，故職亦藉此次查證機會了解 WIN nozzle 之製程與傳統式製程不同之差異。Stephen 亦特別安排 WIN nozzle 現場製造負責人向職實地解說其設計上之差異。渠表示主要的差異與改善在於頂部管嘴之彈簧(clamp)設計，傳統式之頂部管嘴彈簧係以組合式方式，利用螺栓將彈簧鎖在頂部管嘴上。提升後

之設計則不再使用組合之方式，而改採整體鑄件製造之方式，再將彈簧以內嵌方式裝入頂部管嘴至定位後，以焊接方式固定其需固定之位置，如此一來提升了核燃料在運轉過程之強度表現，也改善了螺栓零件之問題。職則進一步詢問在製程管控與品質管制上是否有其不同之處，渠表示因為在原始材料與尺寸上完全相同，僅止於組裝加工方式不同，甚至在改採一體成形之鑄造方式後，品質更能提升。至於鑄件係由渠下包商所提供，因此，除了接收檢查之品質查驗之外，渠亦派員至下包商執行相關之稽查作業。

## 肆、心得與建議事項

本次出國任務除實地了解廠商對於核燃料與相關組件之製造與品質管控作業外，更透過與廠商面對面溝通之機會進一步熟知渠相關作業流程與技術上之細節，驗證其製造之核燃料符合相關要求，並對製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)之製程、設計(含變更)、品保作業與合約執行等已進行實地之驗證與查核，確保核燃料製造之品質及使用之安全。已達成下列目標：

### 一、驗證製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)核燃料與相關元件之製程、品保作業與合約執行

本次任務對於神鋼集團(Kobe Steel Ltd.)之核燃料匣製程、核燃料製造廠商 GNF-A Nuclear Fuel Plant 之製程以及核燃料製造廠商 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之製程，皆已透過實地驗證之方式，確認渠相關製程皆符合相關品保作業與合約之要求。除此之外，各個製造廠對品質管控之方式雖有所差異，但其最終之成果皆相同，確保其所生產之產品達其所要求。對製造廠而言，產品不良率之控制為一非常重要之管理要點，因為不只是對客戶之合約執行問題，對於製造廠之成本控制也是一項必須嚴格管控之因素。因此，不難發現各製造廠對於產品品質皆非常要求。

### 二、掌握製造廠家(含其主要組件之下包供應廠家)核燃料與相關元件設計變更之控管

由於本次查證過程神鋼集團(Kobe Steel Ltd.)之核燃料匣製程並無相關設計變更之情事；GNF-A Nuclear Fuel Plant 之製程則因已進行多數之升級與更新，惟因目前合約尚未執行，故職已向 GNF-A 專案經理表示未來若有需要開始進行製造之前，必須將與合約相關之升級與更新部份，依合約之要求送本公司進行設計變更之審查，以確保品質並符合合約之要求；至於 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之製程主要是換用整合式頂部管嘴(Westinghouse Integral Nozzle；WIN nozzle)及標準型爐屑過濾底部管嘴(Standard Debris Filter Bottom Nozzle)等新型燃料

組件，職亦已藉此機會查證廠家對於設計變更案之管控作業，確認其符合品質保證之相關要求。

### 三、確保本公司所採購核燃料之設計及品質符合採購規範要求

本次之實地查證作業已確實了解神鋼集團(Kobe Steel Ltd.)之核燃料匣、核燃料製造廠商 GNF-A Nuclear Fuel Plant 之核燃料與相關組件以及核燃料製造廠商 Westinghouse Fuel Fabrication Plant 之核燃料與相關組件，能夠符合採購規範品質之要求。此外，在查證過程中亦發現，為了對產品之品質進行一致之規範與要求，各製造廠皆建立渠各自之作業程序書，並透過嚴格之訓練要求第一線之生產員確實遵守。同時，為了因應各個客戶不同之要求，相關之設計圖面或是特殊之要求，亦在製造過程中置於所需各站明顯之處，藉以提醒生產員能夠確實辨別產品所需，避免造成產出之產品不符所需。

至於品保員之作業更是採取多重互相確認之方式，透過一層層之管控作業使產品在生產線上之品質一致，發現問題也能迅速做出反應，並進行相關改善方案。

除了達成出國之任務之外，本次任務期間亦見證到核能工業界對自我之要求與期許，尤其是在此市場低迷之際，相關核能從業人員仍謹守相關之本份與要求，持續追求最高品質而努力，此點與我國核能從業人員不斷要求重視之核安文化相同。同時，該製造廠亦不斷透過客戶或是生產過程之經驗回饋方式，對於相關產品之設計更新，以及效能提升增加可靠度上，持續進行相關之改善工作。

由於核能相關產品係屬於高科技產業，在查證過程中，廠商也提及渠專業技術能力之培養重要性，而且人力傳承斷層之現象，似乎對業界來說是一普遍之現象，對於此課題，廠商除不斷加強相關之教育訓練之外，也採取續聘有豐富經驗之退休人員為顧問之方式，讓技術經驗之完成不中斷，避免退休人員離職後，在新一代接班人尚未累積足夠經驗之前，已無前輩可帶領之困境，此點或許可做為我國目前面臨相同之困境之借鏡。