

出國報告(出國類別：研習)

赴美國研習用過核子燃料乾式貯存技術

服務機關：行政院原子能委員會放射性物料管理局

姓名職稱：鄭武昆 簡任技正

派赴國家：美國

出國期間：94年9月26日至94年10月10日

報告日期：94年12月10日

摘 要

原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)，為精進用過核子燃料乾式貯存之安全審查與管制技術，決定派員參加美國 NAC 公司 9 月 26 日至 10 月 10 日之用過核子燃料乾式貯存技術移轉訓練，以熟悉國內即將引進之 NAC-UMS 貯存護箱之系統設計、製造、運轉及品保等安全管制事項。

本次技術移轉訓練由國內核能研究所主辦，參加單位有清華大學、台電公司及物管局，是結合產官學研共襄盛舉的國外技轉訓練。主要的訓練內容包括：屏蔽、熱傳、臨界及結構之設計分析，密封鋼筒、傳送護箱及混凝土護箱之製造，系統測試、人員訓練、燃料裝載、廠內傳送、運轉限制及品質保證與運轉經驗回饋等項課程講習，另外特別安排混凝土護箱之建造與貯存設施之安全管理的實地參訪，以見証所學。

負責訓練的 NAC 公司除了準備必要的訓練教材，亦提供許多寶貴的技術資料，NAC 之訓練講員均為學經俱豐之專家及相關部門主管，經由授課與討論，解決了國內學員諸多疑難問題，進而也掌握許多關鍵技術及需加強之研究之議題，對於我國用過核子燃料乾式貯存設施之安全管制有莫大助益。

目 次

| | |
|---------|----|
| 摘要 | 1 |
| 一、 目的 | 3 |
| 二、 行程 | 6 |
| 三、 心得 | 7 |
| 四、 建議事項 | 25 |

一、目的：

世界各國對於用過核子燃料的管理分成再處理、直接處置及延後決定三種方案。再處理受到國際公約的嚴格限制，而目前又無最終處置場完工啓用，因此核能電廠於用過核子燃料池逐漸貯滿之際，許多電廠採取中期貯存以貯放用過核子燃料，俾利電廠能繼續運轉。

國內核能一、二廠運轉迄今已近 30 年，用過核子燃料池歷經數次格架重整作業(re-racking)以增加貯存量，仍然面臨即將貯滿困境。台電公司經由評估技術可行性、貯存安全性、社會、經濟與環境之影響等考量，認為廠內乾式貯存方式最妥適，旋後辦理公開招標，經多次流標後，核能研究所受託研究並於 94 年 4 月提送核一廠用過核子燃料乾式貯存設施技術服務建議書，同時展開國外技轉之規劃，期望藉由引進國外廠家之技術與經驗，結合既有之能力，並考量本土環境條件等之特別需求，以解決國內核能電廠之困境，並建立用過核子燃料乾式貯存本土化技術。核能研究所經由審慎評估後選出美國 NAC 公司為技轉廠家，要求 NAC 公司提供成熟產品之技術授權與必要文件，也需提供人員訓練並於規劃與作業期間抵達現場指導，俾利達成技術引進並深植本土化技術之目標。

原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)，為確保國內用過核子燃料乾式貯存設施之設計、建造與運轉安全，已邀集國內專家學者組成審查小組，進行技術探討與國內外法規之研究，更於本次技轉訓練邀請審查委員清華大學施純寬教授率同兩位資深同仁參加美國 NAC 公司用過核子燃料乾式貯存技術移轉訓練，以熟悉該公司之 NAC-UMS 系統之設計、製造、運轉與品保等安全管制事項，藉由講習、

授課與討論，深入掌握管制關鍵且經由實地參訪設施見證所學。

NAC 總公司位於美國亞特蘭大，已有超過 35 年之用過核子燃料運送經驗，是國際上知名廠商，該公司擁有多項美國核能管制委員會 (NRC) 核發的證照，其用過核核子燃料貯存及傳送系統 NAC-UMS(Universal Multiple-Purpose System)已取得核管會通用執照 (CoC, Certificate of Compliance) 並被 Maine Yankee, Palo Verde、McGuire、Catawba 等家核能電廠選用。截至 2004 年底，NAC-UMS 之實績，共完成了 137 個密封鋼筒 (TSC, Transportable Storage Canister) 之製造，及 98 個混凝土護箱 (VCC, Vertical Concrete Cask) 之建造。本次技轉訓練課程內容如下：

- 1 · 乾式護箱貯存系統 (D S C C) 之屏蔽分析；
- 2 · 乾式護箱貯存系統之結構分析；
- 3 · 乾式護箱貯存系統之熱傳分析；
- 4 · 乾式護箱貯存系統之臨界分析；
- 5 · 乾式護箱貯存系統意外事故分析；
- 6 · 密封鋼筒 (Canister) 之製造；
- 7 · 傳送護箱 (Transfer Cask) 之製造及設計變更；
- 8 · 混凝土貯存護箱 (VCC) 之製造；
- 9 · 乾式護箱貯存系統之操作與運轉；
- 10 · 乾式護箱貯存系統之運轉限制條件；

11. 乾式護箱貯存系統之測試及試運轉；
12. 乾式護箱貯存系統品質保證；
13. 乾式護箱貯存系統經驗回饋；
14. 實地參訪貯存護箱之製造及設施安全管理。

二、行程

| 日期 | 行程 | 工作內容 |
|--------|---------------------------|--------------------|
| 9月26日 | 台北→舊金山 | 去程 |
| 9月27日 | 舊金山→亞特蘭大 | 去程及討論會 |
| 9月28日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 9月29日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 9月30日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 10月1日 | 亞特蘭大 | 資料整理 |
| 10月2日 | 亞特蘭大 | 資料整理及討論會 |
| 10月3日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 10月4日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 10月5日 | 亞特蘭大⇔ Catawba, McGuire | 參訪用過核子燃料 乾式貯存設施 |
| 10月6日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 10月7日 | 亞特蘭大 | 技術訓練課程 |
| 10月8日 | 亞特蘭大→舊金山 | 資料整理及回程 |
| 10月9日 | 舊金山→台北 | 回程 |
| 10月10日 | 台北 | 回程 |

三、心得：

本次參與美國 NAC 乾式貯存護箱系統技術轉移訓練，訓練方式包括課程講解、討論分析及現場參觀活動等，課程內容涵蓋設計安全分析、設備製造說明、系統之運轉與操作限制、品質保證、經驗回饋及電廠參觀等，摘要說明如下：

(一) 設計安全分析

設計安全評估包括屏蔽分析、熱傳分析、結構安全、臨界安全及意外事件分析，分別說明如下：

1. 屏蔽分析：NAC-UMS 貯存護箱系統設計準則，貯存護箱側壁之平均表面劑量率不得超過 50 毫侖目/小時(mrem/hr)，貯存護箱頂蓋處之劑量率低於 50 mrem/hr，而貯存護箱空氣進出口處則須低於 100 mrem/hr。NAC-UMS 貯存護箱系統可貯放的燃料有五種類別，計有三種 PWR 及兩種 BWR 用過核燃料。密封鋼筒(TSC)最多可貯存 24 個 PWR 或 56 個 BWR 用過核燃料元件。依照 NAC 所進行的評估，PWR 用過核燃料設計基準是西屋(Westinghouse)公司設計的標準元件，裝填 17x17 根燃料棒，燃耗是 40,000 百萬瓦天/噸(MWD/MTU)，初始的鈾濃縮度為 3.7 重量百分比，且經過 5 年的冷卻期。BWR 的設計基準則是奇異(GE)公司 9x9 的燃料元件，40,000 MWD/MTU 燃耗，初始鈾濃縮度為 3.25 重量百分比，亦經過 5 年的冷卻期。輻射屏蔽為用過核子燃料乾式護箱貯存最關鍵之安全分析要項，NAC-UMS 系統的屏蔽設計特包括密封鋼筒、傳送護箱、貯存護箱、射源及計算模式，再分述如下：

- (1)密封鋼筒屏蔽：密封鋼筒的圓筒由厚度 1.59cm 不銹鋼所製

造，底部平板是 4.45cm 304L 不銹鋼，而貯存護箱屏蔽蓋與結構蓋分別是 17.78cm 及 7.62cm 304L 型不銹鋼。

(2) 傳送護箱屏蔽：傳送護箱是在裝載燃料的過程中用來容納密封鋼筒，以及將密封鋼筒送到貯存護箱內時所使用的護箱。傳送護箱的徑向屏蔽分別是 1.91cm 碳鋼、8.89cm 鉛、5.08cm 固態硼聚合物 (NS-4-FR)，以及 3.18cm 碳鋼外殼。另密封鋼筒 1.6cm 不銹鋼外殼亦具有屏蔽作用。光子屏蔽主要由鋼及鉛磚所提供，而 NS-4-FR 是做為中子屏蔽材料。傳送護箱底層屏蔽門是由 19.05cm 的碳鋼及 3.81cm 的 NS-4-FR 組成。傳送護箱頂部是開啓的，該處屏蔽由密封鋼筒之 17.78cm 不銹鋼屏蔽蓋及 7.62cm 結構蓋提供。此外，在焊接、洩水、乾燥及氬氣灌注的過程中，另有 12.70cm 碳鋼做為暫時性的屏蔽。傳送護箱之濕式密封鋼筒的劑量，是來自於燃料內的光子以及其他物質被活化所產生的光子，濕筒時傳送護箱側壁的劑量率峰值分別是 259 mrem/hr(PWR)或 189 mrem/hr(BWR)。當傳送護箱內含乾筒時，主要劑量是來自燃料的中子、光子以及燃料元件頂部構件產生的光子輻射，根據 NAC 的計算結果，傳送護箱側邊的劑量率峰值是 410 mrem/hr (PWR)或 325 mrem/hr (BWR)。

(3) 貯存護箱屏蔽：NAC-UMS 貯存護箱的設計可同時提供中子及光子屏蔽，其主要屏蔽設計如下：

- A. 用厚鋼板及水泥壁減低貯存護箱側邊的表面劑量率。
- B. 採用曲折狀之冷卻氣體流動路徑，將貯存護箱之空氣進出口位置處的輻射滲流降至最低。

C. 選用的材料及表面處理有利於除役作業。

貯存護箱是密封鋼筒的外部包裝，貯存護箱為 71.76cm 應力水泥結構體，水泥採波特蘭二型水泥，內含 6.35cm 碳鋼內襯。貯存護箱盛裝設計基準燃料時，水泥及碳鋼內襯可將劑量率降低至 50mrem/hr 以下。此外，密封鋼筒本身 1.6cm 不銹鋼之鋼筒外殼在徑向方面提供了額外的屏蔽。貯存護箱頂部屏蔽，從密封鋼筒頂蓋開始算起，首先是密封鋼筒的 25.4cm 不銹鋼桶屏蔽蓋及結構蓋，貯存護箱部份則有一個屏蔽栓塞，內含 2.54cm NS-4-FR 中子屏蔽和 10.48cm 碳鋼，以及一個 3.81cm 碳鋼貯存護箱頂蓋。貯存護箱底部屏蔽，由密封鋼筒底層平板往下，依序是 4.45cm 不銹鋼、5.08cm 碳鋼以及 2.54cm 碳鋼基座板。整個貯存護箱座落在一混凝土基座上。貯存護箱裝填 PWR 用過核燃料時，軸向最大劑量率是 66 mrem/hr；貯存護箱裝填 BWR 用過核燃料時，最大劑量率是 51 mrem/hr。兩者發生的位置皆是貯存護箱的出氣口，由於進氣通道頂部是由 2.5 英吋厚的護箱底座鋼板做成，因此進氣孔處的劑量率較出氣孔處低很多。

- (4) 輻射源定義： NAC-UMS1 採用美國橡樹嶺國家實驗室發展的 SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) 4.3 /SAS (Shielding Analysis Sequence) 2H 模組輻射源計算程式，用來產生光子以及中子射源。27 組能群中子以及 18 組能群光子 ENDF/B-IV 截面資料庫，用來決定 PWR 及 BWR 用過核燃料設計基準的射源項。射源項包含有燃料中子、燃料加馬光子以及活化加馬光子三種。燃料元件物質

的加馬光子射源項，是以 SAS2H 運算所得之中子通率來計算輕元素活化所得。燃料元件物質假定是 304 型不銹鋼，內含 1.2 g/kg 的 ^{59}Co 和一些較輕微的 ^{59}Ni 及 ^{58}Fe 雜質。

(5) 屏蔽計算模式：NAC 使用一維 SCALE 之 SAS1 及三維 SAS4 程式進行 NAC-UMS 的屏蔽計算。SAS1 程式用來執行貯存及傳送護箱之側面、頂部與底部的一維徑向及軸向屏蔽分析。SAS4 三維模型用來計算貯存護箱表面、湍流路徑(如貯存護箱的氣體進出口)以及密封鋼筒的氣孔和排水孔的劑量分佈。SAS4 使用伴隨角分格及蒙地卡羅法對屏蔽問題求解。SAS4 要求計算模型的幾何形狀必須對襯，因此對每種護箱都建立兩種模型，一個頂部模型以及一個底部模型，並用徑向偏差(radial biasing)估計護箱側面的劑量率，護箱頂部與底部的表面劑量率由軸向偏差(axial biasing)進行評估。貯存設施之邊界劑量計算係模擬 2x10 個護箱排列所形成的用過核燃料獨立貯存設施，NAC 使用 SKYSHINE-III 程式 5.0.1 版本計算其邊界劑量。SKYSHINE-III 可同時計算直接以及經空氣散射的輻射所造成的劑量率。該計算程式的驗證，經由模擬美國堪薩斯州立大學所建立的一組 ^{60}Co 天空散射以及兩個標準中子實驗，進行程式的比較驗證。

(6) 廠界劑量：NAC 採用 SKYSHINE-III 5.0.1 版進行廠外劑量率計算，並確認低於 10 CFR 72.104(a)中規定管制區邊界每年 25 mrem 位置的最短距離。典型 2x10 貯存護箱設施的陣列佈局，約距離貯存設施 200 m 處之劑量分別為 22 mrem/yr(PWR) 及 19 mrem/yr(BWR)，符合廠界劑量 25 mrem/yr 之限值；在

300 m 處之劑量分別為 5.8 mrem/yr(PWR)及 4.9 mrem/yr(BWR) 方可達到台電公司在環境評估書所承諾之 5 mrem/yr 之標準，因此核一廠之貯存護箱將採加厚屏蔽之設計。

2. 熱傳分析： UMS 貯存系統於正常貯存時所採用之年平均溫度值計算方法，係由每日每小時之溫度值，先計算出每日平均溫度，再以每年每日之平均溫度值計算每年平均溫度。NAC 提供用過核子燃料之等效熱傳導係數計算參考文件及實驗數據，以利執行熱傳分析模式之驗證。關於密封鋼筒中燃料最佳化佈局，如相鄰燃料束採用熱值相差懸殊之設計，經討論認為應再評估熱應力分析，以確認其影響。
3. 結構安全：傳送護箱結構分析採用 ANSI 14.6，負載條件依據 ANSI/ASME N45.2.15-1981 為 1.1 倍，其負載為傳送護箱加上燃料，水及屏蔽蓋 (shield lid)。對於吊昇之評估重點為吊索或吊軛 (hook/yoke)、吊耳、傳送護箱外殼接點之應力 (stress in the adjacent transfer cask shells)、蓋板螺栓 (lid bolts)、蓋板焊道及門軌 (rails)。
4. 臨界安全：主要應用於傳送護箱之作業，需確認傳送護箱內注水及洩水作業之臨界安全。臨界管制以有效增殖因子 $k_{eff} < 0.95$ 為管制基準，核臨界受到燃料幾何分布、組成及緩和劑之影響，臨界分析使用分析程式需要驗證比對 (Verification & Validation)，並應建立三維 MCNP 模式來確認，驗證分析結果應納入安全分析報告。
5. 意外事件分析：意外事件之分析分成兩大類，依照乾式護箱貯存系統於設計年限中預估可能發生之頻次分為異常事作

(off-normal events) 及意外事件 (accident events)。

(1) 異常事件：異常事件係指每年發次一次者，其分析項目有嚴苛之環境溫度條件 (106°F ~ -40°F)、空氣入口一半被堵塞、異常之密封鋼筒操作裝載 (off-normal canister handling loading)、儀器失效 (failure of instrumentation)、由密封鋼筒外部 (canister exterior) 釋出少量之放射性物質等事件。

(2) 意外事件：意外事件係指設計年限會發生一次及天然現象造成者，意外事件分析項目包括燃料破損、燃料棒失效、誤裝新燃料、混凝土護箱墜落、爆炸、火災事故、天災 (如地震、洪水、閃電、颶風、飛射物) 所造成的破壞及所有空氣出入口皆被密封堵住等項目。主要執行熱傳及結構分析，每個事故必須探討事故形成原因，分析方法之假設，補救措施及對輻射安全之影響評估。

(二) 設備製造

設備製造分成密封鋼筒、混凝土護箱內襯、傳送護箱及混凝土護箱之建造分別說明如下：

1. 密封鋼筒 (TSC, transportable storage canister)：密封鋼筒係由外殼、燃料格架 (fuel basket assembly)、支撐環結構 (supporting structure)、屏蔽蓋及結構蓋所組成 (如圖 1)。

(1) 密封鋼筒外殼之製造 (如圖 2)，先由外殼內徑之接點往外焊接，以利材料受熱膨脹往外延伸，密封鋼筒外殼採用縫焊 (seam)，並於縱向及環向焊接處執行 PT/RT 檢測，密封鋼筒外殼環向縫

焊（角邊接點），外殼與底板使用 PT/UT 檢測，並使用 UT 檢視鋼板的厚度，有關尺寸英製轉換成公製時，日立造船公司有受託製造之經驗，其處理方法應可參考學習。

(2)料格架係由 40 個支撐圓盤（材料為 0.65" 不銹鋼板）、17 個導熱圓盤（0.5" 鋁板）、燃料導管（fuel tubes）、繫棒（tie rods）、螺帽隔離器（spacers）及墊圈（washers）所組成（如圖 3）。圓盤切割時之作業方法，鋁製圓盤使用水刀（water jet process），鋼製圓盤則使用熱加工法或雷射加工法。

(3)燃料導管（fuel tube）使用無焊材法加工（autogenous coeld），並於密封鋼筒組裝完成後，使用全尺寸之啞棒燃料（dummy fuel）元件進行插入與抽出測試，每一個燃料導管均須執行測試（如圖 4）。

2. 混凝土護箱內襯：混凝土護箱內襯與密封鋼筒係由外殼之製造程序與流程雷同，包括縱向焊接及環向焊接，材料為碳鋼。
3. 傳送護箱：傳送護箱之主要結構物有本體（body）、門板（doors）、吊環（retaining ring），其相關配件為吊軛（lift yoke）及吊卸配件（adapter）（如圖 5）。有關輕型傳送護箱（100 Ton）係採用鑄鉛做為加馬屏蔽（cast lead），改採可灌注/洩放的水取代固著之樹脂做為中子屏蔽以減輕重量。傳送護箱頂端之保護環（retaining ring），係將密封鋼筒固定於傳送護箱內，以防止密封鋼筒於傳送期間彈落至傳送護箱外，保護環材質為 ASTM588 鋼板，使用 32 根 ASTM A193 Grade B6 螺栓固定。製作時所有尺寸、公差皆須準確，焊接程序完備，焊道檢查確實。門板軌道（door rails）之焊接，可能會造成底板（base plate）母材之受熱變形，

需要暫時固定物件 (temporary attachments) 以維持兩者之幾何形狀。傳送護箱本體之焊後檢查使用 UT 及 MT 檢查，洩水管 (drain line) 焊接使用 PT 檢測。傳送護箱之中子屏蔽材料若採樹脂，其裝填需要專門技術，並使用真空混合機 (vacuum mixer) 及油壓泵 (hydraulic pump)，操作時並需注意減少產生空泡 (voids)，每次置入 (placement) 作業以 110cm 為限以利收縮 (shrinkage)，全部作業時間需要 5 天以上。傳送護箱之門板及本體均需鍍上防蝕漆料，然後再進行組裝作業。吊耳、門板及軌道均需執行負載測試 (load testing)，負載時使用載重之三倍，且至少維持 10 分鐘以上。

4. 混凝土護箱：混凝土護箱建造時必須注意品保作業，做好規劃並與權責單位保持密切連繫，且需完整記錄。首先審閱製作圖面、建造規範及製作程序，使其能符合安全分析報告 (SAR)、安全評估報告 (SER) 及符合證書 (CoC) 之要求，經由現場品保人員檢查以達到品質要求。混凝土護箱之製造程序有護箱底板與內襯 (Liner) 對位契合 (如圖 6)、綁鋼筋、架設模具、混凝土灌漿澆置、振動夯實、養護及拆模等項程序 (如圖 7 及圖 8)。

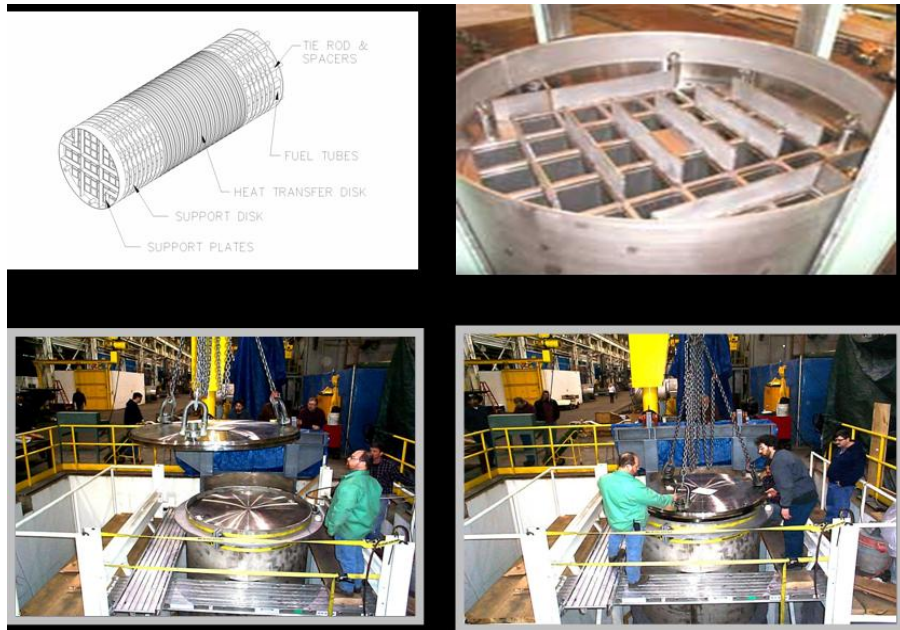


圖 1 密封鋼筒的組成（燃料格架、外殼與支撐環結構、屏蔽蓋及結構蓋）



圖 2 密封鋼筒外殼之製造



圖 3 燃料格架的組成（燃料導管、繫棒、隔離器與墊圈、圓盤）



圖 4. 燃料導管之加工與測試



圖 5 傳送護箱之組成（吊軌、加馬屏蔽、軌道與門板及鍍漆後之傳送護箱）



圖 6 護箱底板與內襯對位契合測試

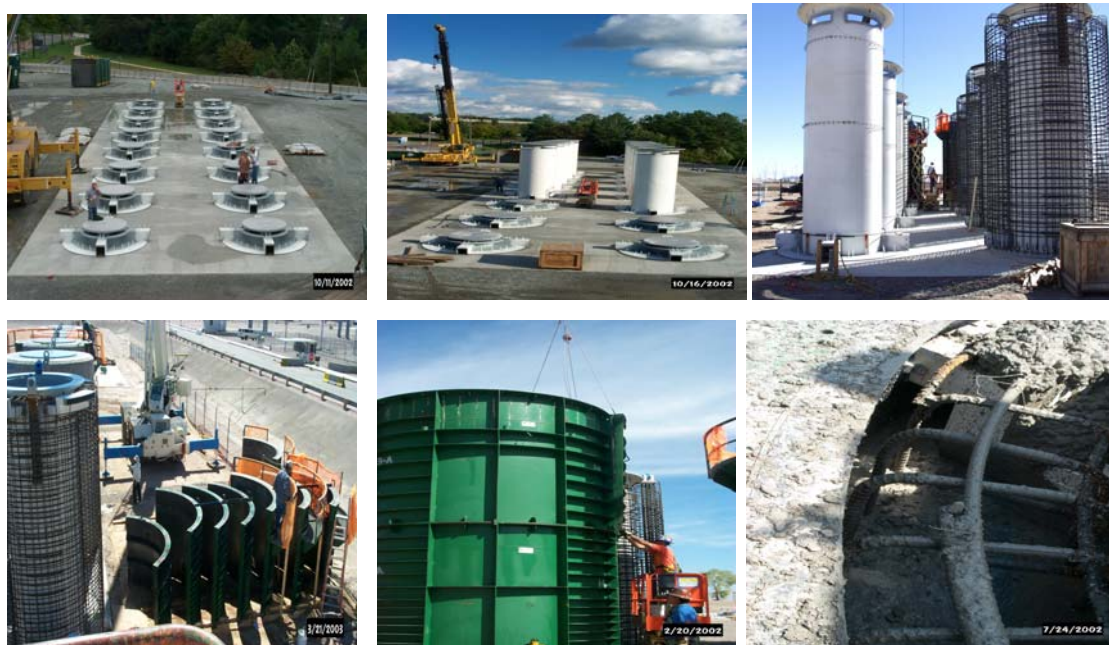


圖 7 混凝土護箱建造（對位契合、綁鋼筋、架設模具、灌漿澆置）



圖 8 混凝土護箱完工圖

（三）運轉與操作限制

運轉與操作限制包括燃料裝載、廠內傳送、運轉限制條件及系統測試與人員訓練等項目，茲分別說明如下：

1. 燃料裝載：燃料裝載操作包括燃料吊卸、密封焊接、乾燥、測試及傳送作業等要項，其標準之作業程序有系統組件之接收檢查、密封鋼筒現場之接合檢查、燃料裝載前系統之準備、燃料裝載及確認、屏蔽蓋之安裝、從燃料池移出傳送護箱、屏蔽蓋之焊接、密封鋼筒操作前準備、密封鋼筒運送至混凝土護箱等。燃料裝載之注意事項有密封鋼筒置入於傳送護箱後，其間隔可置放防止異物掉入之掛網，燃料裝載須做好位於格架的紀錄，安裝屏蔽蓋時須注意其方向性，事前規劃並做好記號，以利對準。吊具通常有兩套，一套於水池內作業（有污染）另一套於池外作業時使用，以防止污染擴大。密封鋼筒之屏蔽蓋、結構蓋之焊接必須平整，以防止後續作業造成困擾，屏蔽蓋之作業需於規定時間內完成；時間如果太久，可能造成水沸騰，此時必需度量水溫或採取冷卻作業，焊後使用之 PT 為特殊熱液滲檢測材料，其作業溫度可達 200⁰F。密封鋼筒於洩水時，格架之圓盤（discs）會滯留水份不易乾燥，此時可使用加壓氣體吹除，此項作業有時需要重複 4-5 次，才能達到要求。
2. 廠內傳送：廠內傳送係指將混凝土護箱搬運至乾式貯存場，其搬運方式有使用重型拖車（HHT，heavy haul trailer）、及直立護箱搬運車（VCT，vertical cask transporter）。為了確保安全，運搬道路之傾斜度應小於 5% 以利拖運，另外也可避免護箱傾倒造成搬運意外。而搬運之搭配工具有液壓千斤頂（hydraulic jacking

system)、氣墊系統(air pad system)及空壓機(air compressor)均應備齊。使用氣墊系統執行移動作業，通常在基座(pad)上之移動路徑舖上不銹鋼薄板(stainless steel sheet)或油毛氈(linoleum)以減少氣墊之磨擦損耗。護箱傳送作業時，一般都會另外配合使用巨砲型(JCB-BOOM type)運送器，將混凝土護箱推或拉至拖車上或於基座上定位。



圖 9. 廠內傳送載具（重型拖車、直立搬運車及 JCB）

3. 運轉限制條件(LCOs, limiting conditions of operation): 運轉條件之限制通常指在某一段期間內必須完成幾項作業，例如密封鋼筒(canister)之乾燥，抽真空及灌入氮氣之條件限制。UMS系統對於BWR裝載之主要運轉限制條件如下：

- (1) 密封鋼筒真空乾燥之最長時間；
- (2) 密封鋼筒真空乾燥之壓力；
- (3) 密封鋼筒回填氮氣之壓力；
- (4) 密封鋼筒在搬運護箱之最長時間；
- (5) 密封鋼筒氮氣洩漏率；
- (6) 混凝土護箱之除熱系統；

(7)密封鋼筒之表面污染；

(8)混凝土護箱之平均表面劑量率等。

4.系統測試與人員訓練：系統測試之主要目的為檢視操作人員訓練成果，並確認運轉作業設備與程序之完整性，同時亦檢討運轉作業程序書之合理性，俾便燃料裝載及貯存，並藉由人員訓練及模擬（mock ups）演練，檢討人員組織架構、督導體系及測試計畫之周延。其中人員訓練計畫之項目包括系統化之訓練計畫（SAT, Systematic Approach to Training），系統之操作與維修及運轉前測試與測試演練。訓練內容有申請資料與主管機關核定結果之介紹、作業規定、燃料裝載、傳送與卸載之程序與規定等。訓練之執行方式採課程（classroom）及實作（On-the-job）兩種方式分別進行，訓練之規劃、執行及結果均應保留，以利檢討。所有之計畫之人員含作業人員，支援人員均需接受適當層級之訓練。

（四）品質保證

品質保證應建立品保方案包括品保手冊、程序書，以上資料均須經常檢討修定以符合實際需要。其中程序書需足夠詳細，以利依照程序書執行作業，程序書須符合品保手冊規定，經由各功能經理審核，再由最高之品質管理階層核定。乾貯設施之設備與材料品質分級，依 R.G. 7.10 分成 A、B、C 三級，於採購前先制訂品質清單(Q-List) 並提出品質分類評估(QCA)報告，A 與 B 級之品保要求嚴格，C 級可直接由商品目錄選取，現貨採購使用。NAC 採用 EPRI NP-5652 之導則執行下包商商業級檢證(CGI)，經 QA 執行檢驗與核准後發出合格廠家

清單(qualified vendor list)，其後每三年作一次廠商稽查作業。NAC 也執行計畫之績效查證，由品保小組根據製造／建造時程決定巡查作業，然後選定停留點與查證點，再執行人員與設備之查驗，並應撰寫檢查報告，提出改善措施。

(五) 經驗回饋

分成 UMS 系統營運經驗、NAC-MPC 之營運經驗及其他乾貯設施營運經驗分別檢討，以利執行預防管理措施。

1. UMS 系統營運經驗方面：有 Maine Yankee, Palo Verde, McGuire 三家核電廠曾發生過作業疏失，說明如下：

(1) Maine Yankee 營運經驗方面：

- A. 屏蔽蓋焊接造成排氣及排水孔接管之扭矩鬆脫，真空乾燥發生困難；
- B. 傳送護箱保持環 (retaining ring) 與起吊環 (hoist ring) 尺寸不對造成無法安裝密封鋼筒起吊環 (hoist ring)；
- C. 密封鋼筒於運送時產生變形；
- D. 屏蔽蓋焊接時密封鋼筒外殼過度收縮，無法繼續執行結構蓋焊接。

(2) Palo Verde 營運經驗方面：

- A. 燃料裝載時溫度過高，於抽真空時採取超出程序書規定外多次之冷卻循環降溫作業；
- B. 金屬氣墊無法達成密封效果，造成氦氣洩漏測試困難。

(3) McGuire 營運經驗方面：氦氣洩漏測試抽氣 Pump 能力不足，

抽氣時間過久及排水孔接管太短，無法於時限內達到排水量 (70 加崙) 需求。

2. NAC-MPC 之營運經驗：

- (1) Yankee Rowe 及 Connecticut Yankee 核電廠之經驗，如錯誤安置套接閥管 (Snap-tite valve) 造成無法抽真空；傳送護箱相對於燃料池位置過高，產生毛細孔現象；
- (2) 密封鋼筒製造者未將異物清除乾淨缺失及不適切之燃料裝載程序，抽真空作業超出時間限制，抽真空次數超出原設定值等。

3. 其他乾貯設施營運經驗：

- (1) 有許多核電廠分別發生未審查之安全狀況 (如吊運未固定蓋板)；未精算傳送護箱重量，使吊車互鎖；
- (2) 不當之排氣與未檢測氫氣濃度，焊接時發生氫爆事件；
- (3) 傳送護箱使用不當電鍍材料，造成池水混濁；傳送護箱於燃料池內置放傾斜，無法使用吊勾起吊；
- (4) 試運轉時焊接板錯置及於抽真空作業時，誤判讀值或抽真空作業時間太久，影響材料以及燃料卸載程序 (unloading procedure) 不實等缺失。

(六) 電廠參觀

本次訓練特別安排規劃參訪 Duke 公司 Catawba 及 McGuire 核電廠之乾式貯存設施，瞭解混凝土護箱之製造與貯存設施之安全管理。

1. Catawba 電廠目前正進行貯存護箱混凝土灌漿，預計明年年中以後開始裝載用過核子燃料。貯存護箱直接在貯存設施基座上 (PAD) 施

工，基座厚度為 3 英尺，其混凝土強度約 4500 psi。灌漿時需進行四項試驗，坍度試驗、密度試驗、空氣含量測試及抗壓試驗，每一樣品製作四個圓柱試體以執行抗壓測試，一個第 7 天，兩個第 28 天，另一個備用作為校正用。混凝土護箱之製造程序如下：護箱底板與內襯(Liner)對位契合、綁鋼筋、架設模具、混凝土灌漿澆置、振動夯實、養護及拆模。混凝土灌漿澆置每次 3-4 小時，兩個護箱可同時澆置，澆置時須注意水溫控制，並於必要時考量加入冰水。對於已完成之混凝土表面如有小蜂窩則傾向不處理，至於大蜂窩（長、寬、深超過 1 吋者）則要修補。鋼模之設計施工圖與計算方法，係由施工承包商負責。

2. McGuire 電廠：主要參觀貯存設施之安全管理並討論操作程序。目前該廠共貯放 8 個 TN-32 金屬護箱及 6 個 NAC 公司 UMS 混凝土護箱，預計於 2006 年再安裝 18 個 NAC 之 UMS 護箱，McGuire 及 Catawba 電廠共用貯存護箱之運送載具(VCT)，以符合經濟原則。乾貯設施基座以外有兩層圍籬，高約 1.8~2m，兩圍籬間設置保安監測設施，如雷射或紅外線監視系統，圍籬內有攝影機、照明設備、紐澤西護欄及消防栓，外圍籬則再佈置 TLD 以執行環境輻射監測。貯存中之混凝土護箱，兩混凝土護箱中心間距約 16 英尺，護箱上裝置溫度感測器以度量通風出口以及週遭環境溫度差，通風進出口均設置金屬篩網（screen）防止異物入侵。

四、建議事項

職等本次得以順利參加美國 NAC 公司用過核子燃料乾式貯存技術移轉訓練，首先感謝物管局陳煥東局長，為提升用過核子燃料乾式貯存安全審查能力，積極爭取同仁參與技術移轉訓練機會，更感謝審查委員清華大學施純寬教授之全程參與並及時提供必要之諮詢及指導；也感謝核研所施建樑組長及黃毓浩博士在行程安排及生活上之協助。

本次技術移轉訓練，NAC 公司除準備必要的訓練教材，亦提供許多寶貴的細部技術資料，所投入講員均為經驗豐富的專家及相關部門主管，準備充分並誠懇回答疑難或提供建議，謹以學習心得提出下列建議供國內發展參考：

- (一)NAC-UMS 貯存護箱業經美國核管會核准並已有使用經驗，成功的營運績效是設施設計周延及安全的保障，由 NAC-UMS 之營運時機顯現，國內引進該系統應可符合安全要求。然而本土特定環境之需求及作業限制，需要執行部份之設計變更，變更或修改項目及其影響與回應措施將是未來審查的重點。
- (二)美國核能管制委員會(NRC)對於用過核子燃料乾式貯存設施核照所需之時間一般而言約三年左右，即使是設計的變更也需一年左右的審查時程。物管局為確保國內用過核子燃料乾式貯存設施的安全並提昇審查能力與效能，可先針對 NAC-UMS 貯存護箱進行預擬審查作業，如先期審閱安全分析報告、安全評估報告及相關運轉作業之報導，並會整提出關切項目、審查重點及需要特別注意事宜，事先提請申請機構注意準備齊全，俾能減

少審查之質疑與回應時程，加速業者取得執照，以達成政府服務便民之施政措施。

(三)因應本土化策略，國內將自行執行貯存護箱之設計修改、評估、製造、測試及營運，因此品質保證作業非常重要，本案執行時將採取高標準要求業者執行品保作業，對於關鍵技術部份，也應邀請國外有經驗之專家協助查核。

(四)依國內法令規定，核發乾式貯存設施建造執照需要辦理聽證會，因此與民眾溝通順暢將有助於聽證會之辦理成功。為使民眾瞭解設施之安全，國外相關設施之安全營運績效是實際佐證資訊。另外藉由縮小尺寸之設施系統模型之展示與操作，以及動畫影片之撥放，亦是增進民眾之認知的方法；建議申請單位製作縮小模型實體，並進行展示與說明。

(五)國內相關單位應蒐集分析乾式貯存相關資訊，進行編譯並公告，以利民眾查詢；對於國外所發生之缺失案例，也應深入了解詳細分析，探究發生原因，提出因應對策與防範措施，以確保國內乾式貯存設施之設計、製造及運轉安全。