

出國報告（出國類別：考察）

國外核能電廠除役作業觀摩研討及 核廢處理貯存設施參訪

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：洪國鈞主管

張凱翔主管

派赴國家/地區：美國

出國期間：111年11月7日至11月16日

報告日期：111年12月6日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：國外核能電廠除役作業觀摩研討及核廢處理貯存設施參訪

頁數 21 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

張凱翔/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程監/02-23657210 ext: 12231

洪國鈞/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程監/02-23657210 ext: 12224

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：2022/11/07-2022/11/16 出國地區：美國

報告日期：2022/12/6

分類號/目

關鍵詞：用過核子燃料乾式貯存

內容摘要：(二百至三百字)

本公司目前辦理中之「核一、二及三廠用過核子燃料乾式貯存設施興建計畫」，前往美國考察 Indian Point、Oyster Creek 及 San Onofre 三座除役中核能電廠之乾貯設施，透過現場勘查與觀摩，以及藉由與相關人員討論問答了解乾貯設施與乾貯系統運轉經驗、運貯規劃、日常維護、再取出單元之看法、耐震設計、民眾溝通及老化管理等議題，汲取美國乾貯設施之重點技術與經驗，此行有助於本公司推動乾貯設施興建計畫外，亦對規劃未來運營、維護、老化管理相關工作有相當助益。

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

目次

壹、 目的	1
貳、 過程	2
參、 考察紀要	3
一、 前言	3
二、 乾式貯存	3
三、 氯鹽誘發應力腐蝕龜裂	3
四、 電廠乾式貯存設施考察	5
(一) 美國 Indian Point 電廠	5
(二) 美國 Oyster Creek 電廠	10
(三) 美國 San Onofre 電廠	13
肆、 心得及建議	20
一、 心得	20
二、 建議	21

壹、目的

- 一、 本公司執行核能一、二及三廠用過核子燃料乾式貯存設施興建計畫，因本國三座核電廠皆鄰近海岸、係屬高鹽份、氯含量充沛環境，易於產生氯鹽沉積物，誘發氯鹽誘發應力腐蝕龜裂 (Chloride Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC) 係銲接式密封鋼筒乾貯系統之潛在劣化機制。當具氯離子環境、不銹鋼材質及殘留張應力三項條件同時存在時，即有機會誘發應力腐蝕劣化，若發生於已貯存用過核子燃料之密封鋼筒時，若發生劣化將可能喪失其密封性而影響核能安全。
- 二、 San Onofre 電廠採雷射珠擊(Laser Peening)方式消除張應力減少 CISCC 發生機率；Oyster Creek 電廠吊車與核一廠同為荷重限制 100 美噸，卻仍採用裝載 89 束的乾貯護箱，且在 21 週完成 33 個乾貯護箱運貯，為世界紀錄、及 Indian Point 電廠正在執行運貯作業，可了解該廠運貯作業規劃及安排。
- 三、 借鑒三座美國電廠可供本公司參考水平式及直立式系統（包含地下型及地面站立型）實際使用及運維經驗，以汲取美國乾貯設施相關使用經驗，俾利本公司辦理乾貯興建計畫案之參考及日後運維之規劃。

貳、過程

自 111 年 11 月 7 日出發，迄 11 月 16 日返國（共計 10 天），考察美國乾貯設施，時程表如下：

日期	地點與行程	工作內容
11 月 07 日（一）	台北→紐約	往程
11 月 08 日（二）	Indian Point	乾貯設施考察
11 月 09 日（三）	電廠參訪	
11 月 10 日（四）	Oyster Creek	乾貯設施考察
11 月 11 日（五）	電廠參訪	
11 月 12 日（六）	費城	資料整理
11 月 13 日（日）	費城→洛杉磯	
11 月 14 日（一）	San Onofre 電廠參訪	乾貯設施考察（公畢後搭機返台）
11 月 15 日（二）	洛杉磯→台北	返程
11 月 16 日（三）		

參、考察紀要

一、前言

本次考察借鑒 Indian Point、Oyster Creek 以及 San Onofre 核能電廠運營乾式貯存設施之經驗，以了解業主於乾式貯存設施規畫初期須考量之面向，並提供相關之運轉經驗，對於後續長期貯存之管理與監測，構建一整體性策略。並針對乾貯設施關切之關鍵議題討論：如避免氯鹽誘發應力腐蝕龜裂、密封能力劣化發生之採取措施、老化管理與長期監測之作法與計畫、用過核子燃料再取出之作法與可行性，以及耐震能力等。藉由已進入除役階段之 Indian Point、Oyster Creek 以及 San Onofre 核能電廠運轉乾貯設施的經驗，及考量本國相關面向後，因地制宜制定本土性乾貯設施的整體策略。

二、乾式貯存

用過核子燃料退出反應爐後，近期策略為存放於核電廠用過核子燃料池，中期策略為置於乾式貯存。將用過核子燃料置於金屬容器內並填充惰性氣體後加以密封，藉由空氣的自然對流，常溫空氣經由護箱底部的進氣口流入，而熱空氣則由護箱頂部的出氣口流出，即可移除用過核子燃料所產生的熱量，此種方式稱為乾式貯存。因運轉維護容易、操作成本較低、燃料不易腐蝕也不會產生二次廢棄物及發生放射性物質外洩等因素，已廣為世界各國所採用。

乾式貯存較常見的有混凝土模組、混凝土屏蔽護箱及金屬屏蔽護箱，本次考察三座電廠中使用混凝土模組及混凝土屏蔽護箱二種系統。

三、氯鹽誘發應力腐蝕龜裂 (Chloride Induced Stress Corrossion Cracking, CISCC)

用過核子燃料密封存不銹鋼密封鋼筒內，不銹鋼密封鋼筒具障壁阻絕之功能，能確保放射性物質不外洩污染環境。然而，不銹鋼長期貯存用過核子燃料，若發生應力腐蝕造成材料發生破損，喪失密封阻絕功能，導致放射性物質無法有效包封於不銹鋼桶內。因此，須有效管理不銹鋼應力腐蝕之肇因，方能確保用過核子燃料長期安全貯存之目標。

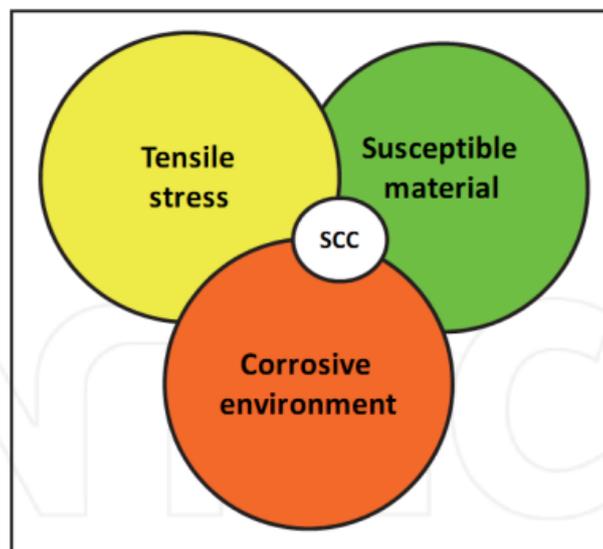
當具氯離子環境、不銹鋼材質及殘留張應力三項條件同時存在時，即有機會誘發應力腐蝕劣化，若發生於已貯存用過核子燃料之密封鋼筒時，若發生劣化將可能喪失其密封性而影響核能安全。雖然目前國外用過核子燃料乾式貯存設施尚未發生不銹鋼應力腐蝕導致放射性物質洩漏之案例。但是基於有效管理這些因素對不銹鋼筒因氯鹽誘發應力腐蝕龜裂破壞之可能效應及影響，國際間已針對乾式貯存密封鋼筒應力腐蝕進行諸多研究，並透過乾式貯存之運轉經驗與老化管理檢查確保這些因素可被有效管理，確保氯鹽誘發應力腐蝕龜裂

不致造成鋼桶不銹鋼筒密封能力劣化。

目前美國主要將研究重心移往乾式貯存系統之檢查與維護，並致力於發展各式可進入乾式貯存系統中進行非破壞檢測或修復工作之小型機械載具，以了解業者將如何管理，以避免氯鹽誘發應力腐蝕機制之產生，以及劣化發生後續之補救措施。

乾式貯存運轉經驗尚無不銹鋼銲接製造之密封鋼筒發生老化或局部腐蝕經驗，並著重於密封鋼筒之非破壞檢測，諸如對於局部孔蝕、裂隙腐蝕之目視檢查。美國目前針對氯鹽誘發應力腐蝕龜裂問題，基本上已有共識，並不認為此機制對於乾貯系統有立即性危害，並結合老化管理計畫進行長期監控，以早期發現腐蝕發生並採行相應之處理，進行後續的緩解或修復。

因美國能源部尚未有最終處置規畫，乾式貯存未來將朝超過 60 年甚至 100 年的延長貯存邁進，故對於老化管理方面的研究亦持續進行，美國管制機關在申請貯存執照延長時，需鑑別可能的老化劣化機制並提出限時老化分析 (Time limited aging analyses) 及老化管理計畫，經審查通過後才能取得執照更新。



Conditions necessary for SCC occur.

圖一 (一) 1、氯鹽誘發應力腐蝕龜裂發生機制圖

四、電廠乾式貯存設施考察

(一) 美國 Indian Point 電廠

1. Indian Point 電廠簡介

Indian Point 電廠位於紐約市北方約 35 英里(58 公里)、緊鄰哈德遜河(Hudson River)。原隸屬 Entergy 電力公司所有，進入除役階段後，2021 年後將執照轉移給 Holtec Decommissioning International(HDI)公司。該電廠原有 3 部機組，一號機為 Babcock & Wilcox 型式，發電量 275MWe 壓水式反應器；二與三號機為西屋四迴路 (Westinghouse 4-loop) 型式，發電量 1,020 MWe 壓水式反應器。一號機於 1962 年 10 月 1 日商業運轉至 1974 年 10 月 31 日永久停機、二號機於 1974 年 8 月 1 日商業運轉至 2020 年 4 月 30 日永久停機、三號機於 1976 年 8 月 30 日商業運轉至 2021 年 4 月 30 日永久停機；圖三、(一)、1 中由左至右為二號機、一號機及三號機。

一號機係因美國三哩島 (Three Mile Island) 事件而停機，二、三號機則因距離紐約都會區較近，長期以來飽受民眾抗議，紐約州長 Andrew Cuomo 曾於 2017 年宣布“個人過去 15 年已努力將 Indian Point 核電廠關閉，該電廠關閉後紐約人可因而睡的更好”，州政府與 Entergy 公司協商後，Entergy 公司決定將二、三號機永久停機。



圖三 (一) 1、Indian Point 電廠鳥瞰圖 圖三 (一) 2、筆者 Indian Point 電廠合影

2. 乾式貯存設施

由 Indian Point 廠長 Richard Burrone 先生及保安官帶領筆者先填寫個人資料、拍照製作識別證後，刷卡及掌紋辨識，並經爆裂物偵檢後進入保護區參訪，因該廠已進入除役階段，目前關鍵要徑工作為將用過核子燃料運貯至乾貯設施及反應爐壓力槽切割作業，正在進行二號機用過核子燃料之運貯作業，預計完成二號機用過核子燃料運貯後，2023 年開始三號機用過核子燃料運貯，將於 2023 年第 1 季完成所有運貯作業。

該廠乾貯設施係自 2004 年開始營運，選用 HOLTEC 之 HI-STORM 100 直立式乾式貯存系統，

一筒可裝載 32 束用過核子燃料。乾貯場上已貯存用過核子燃料來自一號機 5 組、二號機 39 組及三號機 18 組，共計 62 組 HI-STORM 100 乾貯系統。

工程改善

為因應除役需求，已建置了第二個乾貯場，可容納 75 組，預計全數運貯完畢，總計將有 125 組貯存用過核子燃料及 12 組貯存超 C 類 (Greater-Than-Class-C, GTCC) 放射性廢棄物，共計 137 組。因建廠時西屋公司承攬係 turnkey 專案，當時未考量日後乾貯運貯作業需求，吊車荷重僅有 40 噸且非防止單一失靈，故於 2004 年時參照 NUREG-0554 及 NUREG-0612 於二號機燃料廠房安裝防止單一失靈門型吊車，荷重為 110 噸，才可順利將傳送護箱 HI-TRAC 100 及密封鋼筒吊入、吊出用過燃料池。



圖三（一）3、 Indian Point 乾貯設施鳥瞰圖

三號機燃料廠房吊車荷重亦為 40 噸，惟因空間限制因素，無法比照二號機安裝防止單一失靈門型吊車，為乾貯運貯需求，先前作業方式係將用過核子燃料分裝至運輸容器內，不將運輸容器內水抽乾運送至二號機燃料廠房用過燃料池，俟運送 3 趟才可裝滿 1 組乾貯筒，再使用二號機之荷重 110 噸吊車完成後續運貯作業。

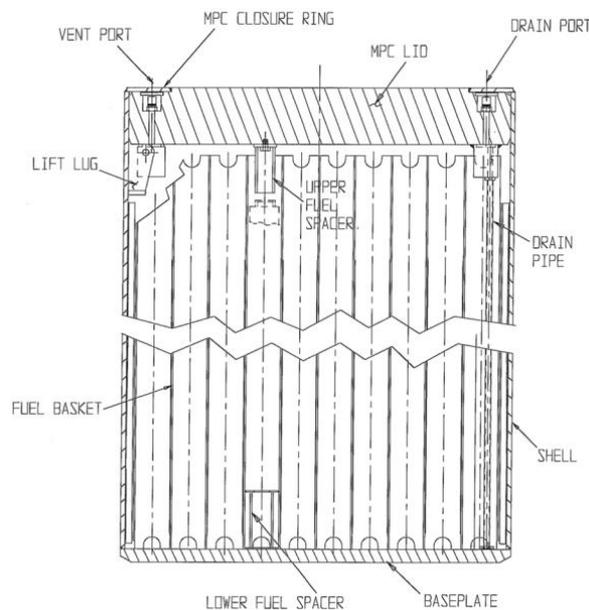
該廠為儘速將用過核子燃料移出，於三號機燃料廠房已設計可吊運傳送護箱及密封鋼筒之防止單一失靈吊車 HI-Lift，荷重為 100 噸，未來已不必再將用過核子燃料運至二號機即可執行運貯，預計運用 HI-Lift 可縮短運貯時間 12 年及集體輻射劑量抑減 5 命日。



圖三（一）4、三號機燃料廠房 HI-LIFT 防止單一失靈吊車

運貯作業規劃

運貯作業人力安排採輪班制，1 天工作 12 小時、一周 7 天，1 周可裝載 2 組乾貯護箱。另外，亦將爪型控制棒（Rod Cluster Control Assembly, RCCA）等內插物併同貯存於乾貯筒內，裝載後因高度不一致，需於密封鋼筒上蓋（Lid）安裝墊片（Spacer），再關閉上蓋後銲接密封，因需銲接 3 道銲道，以自動銲接機作業需要 8-12 小時；乾燥方式使用強制氦氣乾燥系統（Forced Helium Dehydration, FHD），係將氦氣加熱至 260°C 持續吹入密封鋼筒去除剩餘水氣，乾燥所需時間與用過核子燃料衰變熱相關，乾燥時間約需 6-8 小時。



圖三（一）5、密封鋼筒上蓋墊片（Spacer）示意圖

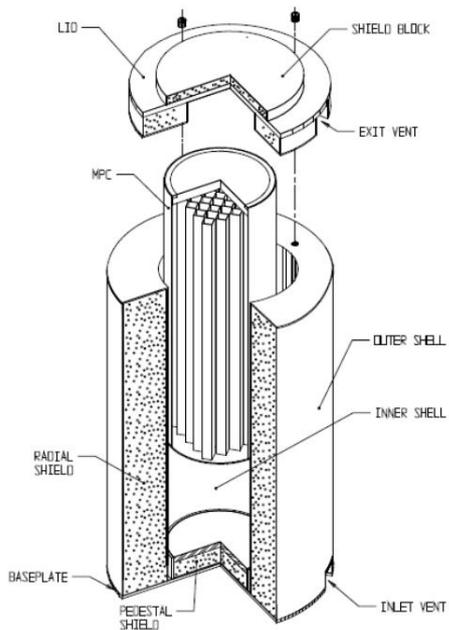
在燃料廠房內，傳送至混凝土護箱內，以低底盤(Low profile)拖板車運至燃料廠房外後，再由垂直護箱搬運車（Vertical Cask Transporter, VCT）接棒，經過電纜下方後，再由吊車將護箱上蓋關上，運送至乾貯場定位貯存。運送路徑上，為防止 VCT 之履帶損傷地面，

皆刻意撒上沙土避免之。



圖三（一）6 及 7、二號機燃料廠房運貯作業

密封鋼筒及混凝土護箱係於美國本土製造，製造完成後送至該廠，考察時正於乾貯場上澆製混凝土至護箱中，其設計不需綁紮鋼筋，為鋼板-混凝土-鋼板（Steel-Concrete-Steel）之三明治結構組成，不需再使用輻射源執行密實度測試為其特點。



圖三（一）8、混凝土護箱示意圖



圖三（一）9、混凝土護箱澆製

經驗回饋：

運貯完成後前 20 年不需老化管理，每日檢查 1 次進出風口，因該廠於 2004 年完成第 1 組運貯，故 2024 年才需執行老化管理計畫（Aging Management Program, AMP）。若檢查時，發現密封鋼筒洩漏時，可裝至 HI-STAR 100 傳送護箱內，可維持密封性，再運送至其他可處理之設施將其修復，依據 10CFR72 之再取出之定義有三，一為將用過核子燃料取出、

二為將密封鋼筒自乾貯護箱內取出、三為將該乾貯系統運走，故已滿足其一之能力，在廠內並未規劃建置再取出單元。

該廠人力亦從尖峰時達 1,000 人，除役後分階段減至 750 人到目前 250 人（另有 300 名協力商）的正職員工，目前約有 100 人為保安人力，因除役工作完成後，保安人力縮減為 30 多名，乾貯設施仍會留下直至美國能源部之政策或運往集中式貯存場，乾貯設施存在期間，皆需保安人力，故建議本公司規劃時，盡可能考量保安人員工作空間友善性。

選用可放 32 束用過核子燃料 HI-STORM 100 型而非 37 束之 FW 型，係因該廠採通用執照，在乾貯設施建置初期已選用 HI-STORM 100 型，故為運維方便沿用同型，且乾貯設施之經費由能源部支付。

民眾溝通：

經詢廠長 Richard Burroni 先生關於民眾溝通議題，表示雖該廠不受政府、民眾支持，但陳抗活動尚可，除定期向外界簡報說明外，在該公司官網放置除役動態訊息令民眾查詢，亦不必像美國有些陳抗嚴重的電廠需額外植樹或其他遮避物阻擋一般民眾可直接看到乾貯設施。



圖三（一）8、筆者及廠長於乾貯場合影



圖三（一）9、筆者與電廠討論乾貯議題

(二) 美國 Oyster Creek 電廠

1. Oyster Creek 電廠簡介

Oyster Creek 電廠位於紐澤西州 (New Jersey) 海洋縣 (Ocean County)，原隸屬 Exelon 公司所有，進入除役階段後，2019 年後將執照轉移給 Holtec Decommissioning International (HDI) 公司，該廠最初建廠規劃為 3 部反應器配置，惟因三哩島事件影響，最終僅建置 1 部反應器，為 GE 公司 BWR-2 型式，發電量為 619MWe 之沸水式反應器，是美國相當早期之核電廠，自 1969 年 12 月 23 日商業運轉至 2018 年 12 月 23 日。



圖三 (二) 1、Oyster Creek 電廠鳥瞰圖

2. 乾式貯存設施

Oyster Creek 電廠已邁入除役階段，並已將全數用過核子燃料運貯完成及拆除大多數廠房，保安措施已不若運轉中電廠嚴格，不需拍攝參訪者照片、生物特徵建檔亦無爆裂物偵檢。由廠長 Jeff Dostal 先生帶領我們進入電廠考察，在進入該廠前從停車場即可一覽無遺地看到乾貯設施及乾貯護箱。

該廠乾貯設施使用兩大系統：為 Orano TN 公司之 NUHOMS 水平式乾貯系統，使用 8 組 NUHOMS 61BT 及 26 組 61BTH 型式；與 HOLTEC 公司之直立式乾貯系統，使用 33 組 HI-STORM FW 型及 4 組專門貯存超 C 類 (GTCC) 放射性廢棄物 HI-SAFE 型。

NUHOMS 系統之數字係代表可貯存用過核子燃料之數量、B 代表為沸水式反應器；61BT 與 61BTH 之差異係在提籃 (Basket) 設計不同。

HI-STORM FW 型為 HOLTEC 公司主力產品，FW 指的是 Flood and Wind，可貯存 89 束用過核子燃料；而 HI-SAFE 則為使用乾貯筒貯存 GTCC 放射性廢棄物，與裝載用過核子燃料之乾貯筒的差異是，因 GTCC 放射性廢棄物並無用過核子燃料一般具有相當程度的衰變熱，故無須進出氣風道的冷卻設計，可由混凝土護箱之風道開口辨識兩者。另，其混凝土屏蔽護箱進風口設置較高，係優化改良設計，較不易因落葉等異物造成阻塞。

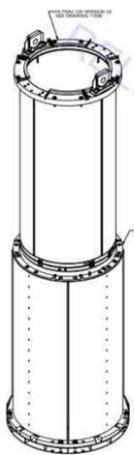


圖三（二）2、Oyster Creek 電廠乾貯設施

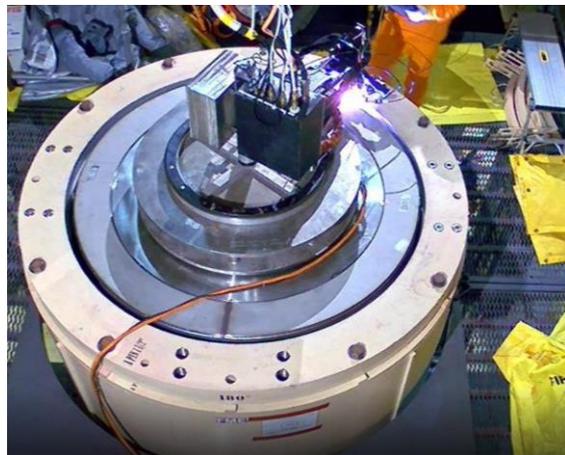
該廠乾貯設施皆為通用執照，NUHOMS 系統係自 2016 年 5 月啟用，而係自 2020 年 12 月至 2021 年 5 月間完成 33 組 HI-STORM FW 之運貯作業，而 4 組 HI-SAFE 則於 2021 年夏季完成運貯。

運貯作業規劃

其吊車與本公司核一廠荷重相同，為 100 美噸，卻使用可裝載 89 束用過核子燃料之 HI-STORM FW 護箱，經了解係因該廠運用兩層式傳送護箱（two-part HI-TRAC），先將內層傳送護箱與密封鋼筒併同吊入裝載池，完成用過核子燃料裝載後吊舉至一半時，先將殘水抽離減輕重量，吊起時再套入外層傳送護箱，以作為工作人員之輻射屏蔽之用。完成排水、封銲密封等後續作業後，再吊至低底盤(Low profile)拖板車運至燃料廠房外，於戶外使用密封鋼筒轉換坑（Cask Transfer Pit, CTP）再傳送至混凝土護箱內，並蓋上護箱上蓋。交由垂直護箱搬運車（Vertical Cask Transporter, VCT）接棒運至乾貯場。因沿用原 NUHOMS 建置乾貯場之空間，部分較局限之空間因垂直護箱搬運車無法到達，改由氣墊（Air Caster）運至定位。運貯作業係採輪班作業，一天工作 24 小時、一周 7 天，創下 21 周完成 33 組乾貯護箱之紀錄。



圖三（二）3、兩層式傳送護箱示意圖



圖三（二）4、自動銲接作業



圖三（二）5、運貯作業



圖三（二）6、密封鋼筒轉換坑內作業



圖三（二）7、筆者與乾貯設施合影



圖三（二）8、筆者與反應器廠房合影

經驗回饋：

該廠將用過核子燃料全數運貯完畢外，目前已拆除大多數廠房，將保護區（Protected Area）自 150 英畝縮減至 6 英畝、正職員工也只剩 14 人（其餘為協力廠商）。拆除廢棄物亦盡可能回收再利用，以減少放射性廢棄物產生，廢棄物回收率為 25%，以水泥塊為例，可回收利用鋪設於海岸上，成為消波塊，以保護海岸不受大海侵蝕，或打碎作為路面鋪料，物盡其用。

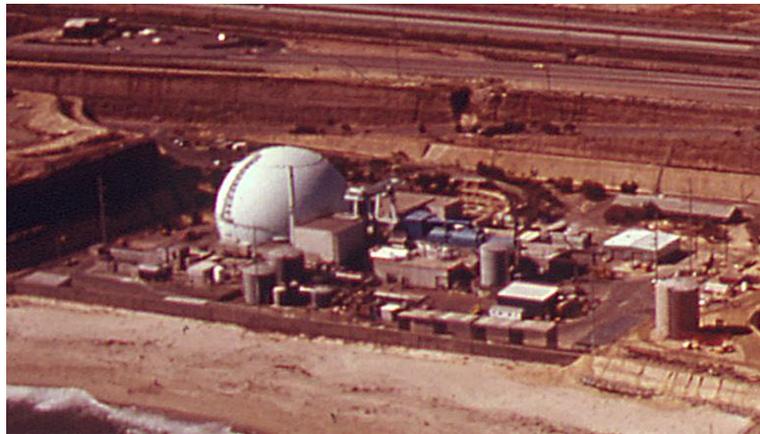
此外，其經驗超 C 類放射性廢棄物產量相當有限，接近爐心中子通率高處才屬超 C 類，該廠分享僅反應器壓力槽頂部導板(Upper guide plate) 與部分爐心側板 (Core shroud) 屬之，透過切割及裝載計畫 (Cut and pack plan) 取得幾何分布與重量分布，再透過最佳化堆疊模式，不需透過水泥或沙固定，就可以確保筒內重心分布，最終僅有 4 筒產量。該廠分享曾發現尚未裝載之 NUHOMS 乾貯系統密封鋼筒發生形變，故退回廠家整圓、修復後再運回使用。惟 Orano TN 公司，針對本事件之說法為，製造完成密封鋼筒出廠前已通過各種試驗，交運前在內部放置八卦 (Spider) 固定支架支撐，並檢附貯存、操作指引予業者，懷疑其肇因係未依操作指引，逕將固定支架移除，故整圓修復作業為該廠付費執行。

(三) 美國 San Onofre 電廠

1. San Onofre 電廠簡介

San Onofre 電廠位於洛杉磯(Los Angeles)南方約 75 英里處，隸屬 Southern California Edison (SCE) 電力公司所有，鄰近州際公路 5 號 (I-5)。該電廠原有 3 部反應器，一號機是西屋三迴路 (Westinghouse 3-loop) 型式，發電量 456MWe 壓水式反應器；二、三號機為燃燒工程雙迴路 (Combustion Engineering 2-loop) 型式，發電量為 1,127MWe 壓水式反應器。其中一號機於 1968 年 1 月 1 日商業運轉至 1992 年 11 月 30 日永久停機；二號機於 1983 年 8 月 8 日商業運轉至 2013 年 7 月 7 日永久停機；三號機則於 1984 年 4 月 1 日商業運轉至 2013 年 7 月 7 日永久停機。

該廠於 2013 年 7 月 18 日將 2、3 號機反應爐內移出至用過燃料池，並於同年 12 月 16 日將未照射過核子燃料運回燃料廠家。



圖三 (三) 1、 San Onofre 電廠一號機



圖三 (三) 2、 San Onofre 電廠二、三號機

2. 乾式貯存設施

San Onofre 電廠雖屬除役中電廠，但其保安工作仍然十分嚴格，除有持槍人員保安戒護外，進入保護區前透過多方查驗身分，同時進行生物特徵建檔，由電廠人員全程陪同。



圖三（三）3、 San Onofre 電廠兩大乾式貯存系統鳥瞰圖

該廠乾貯設施使用兩大系統：為 Orano TN 公司之 NUHOMS 水平式乾貯系統，使用 18 組 24PT1 型（其中 1 組貯存超 C 類放射性廢棄物）、33 組 24PT4 型、及 12 組 HSM 空位可供貯存超 C 類放射性廢棄物；與 HOLTEC 公司之直立式乾貯系統，使用 73 組地下化 HI-STORM UMAX 型。該廠在乾貯系統之應用經驗與研究，於美國處於領先地位。其中包含不銹鋼應力腐蝕之維護管理與長期監測，以及乾貯設施高耐震係數，可作為本公司借鏡。



圖三（三）4、 San Onofre 電廠 NUHOMS 乾貯系統



圖三（三）5、 San Onofre 電廠 HI-STORM UMAX 乾貯系統

該廠一號機 1992 年永久停機，先建置完成為 NUHOMS 系統，自 2003 年開始由該廠員工執行運貯作業，同年 10 月 3 日完成第 1 筒運貯，而 2012 年 7 月 8 日完成第 51 筒。

該廠自 2013 年進入除役後，2014 年辦理新乾貯設施採購案，係採 turnkey 專案，由 HOLTEC 公司得標，提供地下化 HI-STORM UMAX 型，自 2018 年 1 月開始運貯，於 2020 年 8 月 7 日完成全數運貯工作，已將所有用過核子燃料全數裝載至乾貯系統中，作業結束後未保留垂直護箱運送車於廠內。

此外，該廠超 C 類放射性廢棄物亦利用乾貯系統貯存，超 C 類放射性廢棄物係透過精細的切割計畫，確保能密實地安放於乾貯筒內，並未額外澆注混凝土固化維持重心。



圖三（三）6 及 7、 HI-STORM UMAX 運貯作業

考察過程中，San Onofre 電廠人員亦隨身攜帶輻射偵檢器，實際量測乾貯系統之輻射劑量率，NUHOMS 系統之進氣口可測得之最高劑量率為 0.4 mR/h (0.004mSv/h)，UMAX 系統則為 0.16mR/h (0.0016mSv/h)，其餘位置與背景劑量率 0.01 mR/h (0.0001mSv/h)，對環境、參訪人員或一般民眾造成的影響甚微。

老化管理：

該廠密封鋼筒選用 316L 不銹鋼外，亦針對其銲道進行雷射珠擊（Laser peening）之表面加工，將張應力轉為壓應力，以確保鹽害因子對於應力腐蝕機制的影響降到最低，據該廠說法貯存壽命可達 100 年以上。選用雷射珠擊技術係其作僅在表層，而不影響深部材質，目前業界投入大量資源研究冷噴塗（cold spray）技術，但因該廠採購當時冷噴塗技術尚未成熟，且主要將其用於緩解及修復（mitigation & repair）之用途，經詢認為此兩種技術並無優劣高低之區別。

密封鋼筒銲道雖已施做雷射珠擊，未來仍需老化管理，故該廠同時建置針對密封鋼筒之檢查、監測和維護技術，包含預期之非破壞檢測技術及遠端表面檢查所需之工具，以盡可能了解所有與密封鋼筒之狀態，及對劣化過程敏感性有關的證據。該廠資助 Orano TN 公司開發檢查環（Inspection ring），可用於 NUHOMS 系統之檢查與維修，檢查環檢查時若發現缺陷，檢查環上也配置冷噴塗（cold spray）功能，可施做後續維修，目前在南卡羅萊納州艾肯（Aiken）測試中。



圖三（三）8、於艾肯測試檢查環

意外抑緩：

如乾貯設施遭逢假想意外，可能造成密封鋼筒洩漏之虞，通常並不會直接考量立刻修復。而是先界定意外發生的肇始事件，如火災、飛射物撞擊等，並就實際情況進行後續分析或予以排除。倘如因老化管理檢驗發現，則考慮現地補銲，或以運輸護箱裝載重新填充氬氣包裝，送至實驗室或熱室（hot cell）修理，惟事實上美國第一次進行老化管理檢查，係於 2008 年於 Hope Creek 電廠進行，該次檢查沒有任何發現。該廠並不考慮興建再取出單元進行燃料再取出。

耐震分析：

美國乾貯設施均會依據地質資料進行地震分析，但核管會並未強制業者使用 SSHAC Level 3 的要求進行。

該廠之乾貯設施耐震達 1.5g，係因加州海岸協會（California Coastal Commission）假設海岸有盲斷層（Blind Thrust Fault）延伸至廠址下方，雖斯克里普斯海洋研究所之 Dr. Driscoll 團隊觀察離岸相關事證，並未發現有盲斷層證據，但該廠規劃乾貯設時，仍決定將原本該廠耐震要求 0.67g 乘以 2，並決策使用 1.5g 作為乾貯設施設計基準。

一般來說自立式乾貯系統可透過自重與平移消耗地震能量，會比依靠錨定螺栓抵抗地震能量更能有效的保護乾貯設施，因在地震當中，錨定螺栓雖用以固定乾貯系統位置，但是能量均傳遞至錨定螺栓上，可能造成錨定螺栓潛在金屬疲勞，近年來設計已傾向柔性設計，透過物體自重與運動消耗地震能量。此外降低重心，並利用大的接觸面積，透過接觸面積摩擦力的損耗，也能更有效地消耗地震能量並保護乾貯系統。因水平式具有比直立式乾貯系統有更大的接觸面積與更低的重心，因此其抗震能力將較直立式乾貯系統為佳。但直立式乾貯系統近年來亦有地下型設計，如 HI-STORM UMAX 系統，其重心更低且具有大質量容體，其耐震能力亦能與水平式乾貯系統抗衡。

該廠兼具此兩種系統，但其使用之 HI-STORM UMAX 系統並非完全地下化，而是部分地下化，經詢電廠人員了解，因為該乾貯設施用地係為原本一號機位置，其地下有仍存在相關地下結構物，因此經過評估與最佳化考量後，採用半地下化設計，但並不影響其乾貯系統之耐震能力。

全尺寸模擬監測：

該廠在加州政府要求下於 HI-STORM UMAX 系統建置 1 組全尺寸模擬器，透過內置 15kW 熱電偶進行加熱，盡可能以接近真實情況模擬氬離子誘發應力腐蝕的情況，並進行長時間監測，至裝置以來迄今尚未有觀察劣化現象外，在美國其他乾貯設施檢視情況亦未發現任何劣化情形。CISCC 管理與老化管理，已在許多國家並有許多計畫進行研究，此類應力腐蝕議題已有相關應對措施，相關研究方向轉為發展減緩與修復技術開發上。

民眾溝通：

該廠每 2 個月會開放周遭民眾參訪，並且歡迎自行攜帶合格的輻射偵檢儀器進廠偵測，此外，架設 SONGS 社群 (SONGS community) 網站供民眾查閱該廠除役、用過核子燃料管理及未來工作規劃等外，並且在社群平台上，如 facebook、twitter 或 youtube 上，有許多關於電廠的各種除役活動資訊、影片等，對取得民眾理解及信任有助益。

用過核子燃料未來規劃：

筆者自本公司訂閱之 Store Fuel 電子期刊得知 HOLTEC 公司正辦理執照增訂 (license amendment) 申請, 以 HI-STORM UMAX Amend. 3 擬將 NUHOMS 24PT1 之密封鋼筒置於 HI-STORM UMAX 系統, 目前仍在 NRC 審查階段, 經詢問該廠之用意準備未來將廠內用過核子燃料運送至新墨西哥州正在申照中之集中式貯存場 (consolidated interim storage facility, CISF)。



圖三 (三) 9 及 10、筆者與全尺寸模擬器上方 (左) 及斷路器 (右) 合影



圖三 (三) 11、筆者於已裝載用過核子燃料之乾貯系統上方留影 (左)

圖三 (三) 12、筆者於計畫裝載 GTCC 廢料乾貯系統前方留影 (右)



圖三（三）13、筆者於 NUHOMS 乾貯系統頂蓋實物前方留影

肆、心得及建議

一、心得

- (一) 美國能源部與業者簽定合約，收取業者用過核子燃料後端基金，用過核子燃料處置為能源部之職責，惟最終處置場尚未定案下，由能源部出資予業者之興建乾貯設施。美國用過核子燃料管理權責區分明確，且相關資源豐富、研究面向廣泛深入，業者僅需依循指引、準則完成乾貯工作，而不將所有責任皆加諸業者身上。
- (二) 美國電廠絕大多數皆採用乾貯通用執照，業者依 10CFR72.212 評估場址已符合該乾貯系統 CoC 內要求前置條件，並於首次將用過核子燃料貯存於乾貯護箱前 90 日前通知 NRC，且滿足放射性物質排放與直接輻射限值，較本國要取得乾貯設施運轉執照之流程簡單快速明瞭。
- (三) 因移出用過核子燃料係除役要徑工項之一，乾貯廠家透過設計優化的乾貯系統，減少銲接步驟、簡化製造流程及使用自動化設備，提高生產量能送至各電廠；電廠工程設計改善現場吊車、精進運貯工法，並輔以工作人員日以繼夜的運貯作業，普遍運貯速率每周可完成 2 至 2.5 筒，以擷節除役費用。
- (四) 本公司為 EPRI 之全會員，平時透過研讀其技術報告深化專業知識外，另訂閱 Store Fuel 電子期刊，其綜整相當詳盡各乾貯廠家、各電廠業者乾貯使用情形及現況，該期刊係辦理乾貯相關工作之重要參考資料，可取得美國即時乾貯相關資訊，可善加利用。

二、建議

- (一) 本國與美國加州環境相仿，皆處環太平洋地震帶、臨近海岸且民眾反核意識高漲，建議持續與位處加州之電廠，如 San Onofre、Diablo Canyon 維持溝通管道並關注動態，其乾貯辦理方式及對外民眾溝通等經驗可供本公司參考或借鏡。
- (二) 參與 EPRI-TPC 研討會、ESCP (Extended storage collaboration program) 等相關會議可得知潛在問題、研究方向、解決方案及電廠使用經驗回饋，建議本公司派員持續參與汲取相關資訊，可作對外溝通、運維規劃或換照申請參考。