

出國報告（出國類別：實習）

# 赴美國參與觀摩核管會執行用過核燃料乾式貯存設施視察作業及討論交流

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：張明倉 技正

派赴國家：美國

出國期間：113年7月27日至8月4日

報告日期：113年11月4日

# 摘要

本次出國計畫係依據 112 年台美民用核能合作會議合作項目(FC-IN-NR-G23 and AE-NR -J2 )所執行，工作內容為赴美國觀摩美國核能管制委員會執行 Diablo Canyon 核電廠用過核子燃料乾式貯存設施視察作業及討論交流，作業全程約需時一週執行完畢。本案為 NRC 三年一次的用過核燃料乾式貯存設施視察，NRC 及廠方都十分重視。

Diablo Canyon 核電廠位於加州舊金山市與洛杉磯市之間，由太平洋天然氣與電力公司 (PG&E) 營運，裝置有兩部西屋公司設計的壓水核反應器機組，一號機組於 1985 年開始運轉，二號機組於 1986 年開始運轉，每部機組裝置容量為 1100 MWe，每年約可以產生 18,000 GW·h 的電力。2004 年 3 月 NRC 核發 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施運轉執照，該設施使用 HOLTEC 公司開發的 HI-STORM 100 乾式貯存系統，重要組件包括多用途密封鋼筒(Multi-Purpose Canister, MPC)、HI-TRAC 傳送護箱 (Transfer Cask)、以及外包裝容器 (Overpack)，該執照允許貯存包含高燃耗燃料在內的用過核燃料，可以貯存 Diablo Canyon 核電廠運轉階段所產生的所有用過核燃料。

本次主要係觀摩用過核子燃料運貯作業及設施營運現況，並就用過核燃料乾式貯存設施耐震安全議題、設施換照及設施老化管理議題進行意見與經驗交流。觀摩先進國家之核能管制機關執行核能電廠用過核子燃料乾式貯存設施之例行檢查，獲取相關管制經驗，以提升我國放射性廢棄物管制量能，並做為精進乾式貯存設施之管制參考，提升相關設施營運安全。

# 目次

摘要.....	i
目次.....	ii
壹、 目的.....	- 1 -
貳、 出國行程.....	- 2 -
參、 過程紀要.....	- 3 -
肆、 心得與建議 .....	- 17 -
附件 美國核能管制委員會邀請函.....	- 19 -

# 壹、目的

因應國內三座核電廠逐步邁入除役階段，核電廠除役首要關鍵在於移出核反應器用過燃料池之用過核子燃料，接續進行核子反應器廠房除污及拆除作業，因此乾式貯存設施為核電廠除役的必要設施。台電公司目前正規劃辦理各核電廠乾式貯存計畫，俾能夠盡早移出反應爐及燃料池內的用過核子燃料，以順利接續後續的核電廠除役作業。

本次赴美國觀摩核能安全管理機關執行核能電廠用過核子燃料乾式貯存設施之例行檢查，獲取相關管制經驗，以提升我國放射性廢棄物管制量能，並做為未來用過核子燃料乾式貯存設施管制參考，確保相關設施營運安全。

核安會持續監督台電公司妥善建置符合國際用過核子燃料安全管理規定之「用過核子燃料乾式貯存設施」，並要求台電公司加強與地方溝通。本次出國計畫係依據 112 年台美民用核能合作會議合作項目(FC-IN-NR-G23 and AE-NR -J2 )之決議事項推動，也應美國核能管制委員會的邀請前往(邀請函如附件)，落實國際核能安全合作及精進放射性廢棄物安全管理。

## 貳、出國行程

本次出國行程自 113 年 7 月 27 日起至 113 年 8 月 4 日止，共計 9 天，出國行程如下：

日期	行程	摘要
113 年 7 月 27~28 日	台北→舊金山→聖路易斯奧比斯波 (San Luis Obispo)	啟程
113 年 7 月 29 日 ~ 8 月 1 日	聖路易斯奧比斯波 (San Luis Obispo)	參與觀摩美國核管會執行 Diablo Canyon 核電廠用過核燃料乾貯設施視察作業
113 年 8 月 2 日	聖路易斯奧比斯波 (San Luis Obispo) →舊金山	參與觀摩美國核管會執行 Diablo Canyon 核電廠用過核燃料乾貯設施視察作業及路程
113 年 8 月 3~4 日	舊金山→台北	回程

## 參、過程紀要

本次出國計畫行程規劃前往美國加州 Diablo Canyon 核電廠觀摩美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)執行用過核燃料乾式貯存設施視察作業，啟程由我國桃園國際機場先飛抵美國舊金山國際機場，再前往位於加州聖路易斯奧比斯波 (San Luis Obispo)的惡魔谷(Diablo Canyon)核電廠，位置座落如圖 1、電廠外觀如圖 2 所示。美國核能管制委員會本次執行核電廠用過核燃料乾式貯存設施視察作業人員，計有 NRC 華盛頓特區總部核物質安全及保防辦公室(Office of Nuclear Material Safety and Safeguards)資深視察員 Jeremy Tapp，及 NRC Region IV 視察員 Lee Brookhart 與 Jack Freeman 共同執行用過核燃料乾式貯存設施視察作業，同行還有 NRC 總部國際事務辦公室專員 Caroline Clough 一起共同參與。此外，我國駐美代表處科技組副組長羅彩月博士於觀摩交流首日亦參與於 Diablo Canyon 核電廠進行一日視察行程。



圖 1. 加州惡魔谷(Diablo Canyon)核電廠位置



圖 2. Diablo Canyon 核電廠外觀(世界新聞網)

Diablo Canyon 核電廠位於加州舊金山市與洛杉磯市之間的海岸線旁(如圖 1)，也是在加州聖路易斯奧比斯波 (San Luis Obispo)著名觀光風景區 Avila 海灘附近，由太平洋天然氣與電力公司 (PG&E) 營運。Diablo Canyon 核電廠(如圖 2)有兩部西屋公司設計的四迴路壓水核反應器機組，一號機組於 1985

年開始運轉，二號機組於 1986 年開始運轉，每部機組裝置容量為 1100 MWe，每年約可以產生 18,000 GWh 的電力，約佔加州發電總量的 8.6%，可以提供超過 300 萬人的電力需求，一號機組原執照許可運轉期限為 2024 年，二號機組原執照許可運轉期限為 2025 年。

## 一、Diablo Canyon 核電廠營運說明

2016 年 PG&E 公司宣布 Diablo Canyon 核電廠將在運轉執照到期後永久停止運轉，加州公用事業委員會(California Public Utilities Commission, CPUC)亦於 2018 年 1 月同意此項決定；但加州州長 2022 年 9 月簽署第 846 號法案，為 Diablo Canyon 核電廠延役提供適法性解決途徑。PG&E 公司後來經過整體綜合性考量，已於 2023 年 11 月 7 日向 NRC 提交了 Diablo Canyon 核電廠延役申請，規劃將 Diablo Canyon 核電廠 1 號機及 2 號機的運轉期限再延長 20 年，NRC 對此延役申請案審查內容包括核電廠的綜合性、環境性、及技術性資訊，審查程序將包括充分的公眾意見回饋和參與機會。NRC 於 2023 年 12 月 29 日通知 PG&E 公司，接受其延役申請並接續展開詳細實質審查，並於 2024 年 1 月 26 日發布 Diablo Canyon 核電廠延審查作業期程，規劃在 20 個月內完成審查作業。此申請如獲 NRC 等相關單位同意，該電廠 1 號機及 2 號機將在 2024 年及 2025 年運轉執照屆期後，仍能繼續運轉發電。

美國能源部(Department of Energy, DOE)在 2024 年 1 月 2 日《聯邦公報》上發布了一份決議記錄，表示將向 PG&E 公司提供融資，以支持 Diablo Canyon 核電廠延役運營，融資條件之一係要求 PG&E 公司必須於 2024 年至 2027 年間持續發電，不會因資金經濟因素而停止運轉，PG&E 公司也同意「盡商業上合理的最大努力」來生產雙方協議規定的發電量。

## 二、Diablo Canyon 核電廠用過核燃料乾式貯存設施

Diablo Canyon 核電廠的用過核燃料管理計畫的初期方案，規劃將核電廠營運期間產生的用過核燃料先貯存於各機組的用過核燃料池中，永久停止運轉後時，1 號機組用過核燃料池可以存放約 1,261 用過核燃料束，2 號機組用

過核燃料池約可存放 1,281 用過核燃料束。中期方案係將用過核燃料池中的用過核燃料，陸續置入用過核燃料乾式貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI)中，最終方案則是將用過核燃料安放於能源部建置完成的最終處置設施。

NRC 於 2004 年 3 月 22 日向 PG&E 公司核發 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施 20 年運轉期限的特定場址執照(SNM-2511)，Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施位於場址內，地面高程約為海平面上 310 英尺，使用 HOLTEC 公司 HI-STORM 100 乾式貯存系統，其中包括 HI-STORM 100SA 外包裝容器(Overpack)、HI-TRAC 125D 傳送護箱(Transfer Cask)、以及多用途密封鋼筒(Multi-Purpose Canister, MPC)，其執照允許貯存 Diablo Canyon 核電廠運轉階段所產生的所有用過核燃料。

Diablo Canyon 核電廠目前 ISFSI 設施執照於 2024 年 3 月屆期，PG&E 公司已於 2022 年 3 月 9 日向 NRC 申請 ISFSI 設施換照，規劃讓 ISFSI 設施再延長使用 40 年。

PG&E 公司於換照申請文件中提出了「六種老化管理方案(Aging Management Program, AMP)」，以管理既有 ISFSI 設施的老化效應，其老化管理方案包括：高燃耗燃料老化管理方案、MPC 密封鋼桶老化管理方案、傳送護箱老化管理方案、外包裝容器老化管理方案、鋼筋混凝土結構老化管理方案、及護箱運輸作業老化管理方案。

NRC 於 2022 年 9 月 8 日通知 PG&E 公司，接受 ISFSI 設施換照申請以進行詳細技術審查，並於 2023 年 7 月 25 日通知 PG&E 公司，要求 PG&E 公司 2024 年 1 月前完成答覆綜整性 RAI (comprehensive RAI)。PG&E 公司 2023 年 8 月 10 日提交了修訂版的換照申請書，該版本呈現了 Diablo Canyon 核電廠在運轉執照屆期後，進行延役營運的規劃情形。

NRC 於 2024 年 3 月 20 日發布本換照申請案的 RAI，並要求於文到後 45 個日曆天回覆，如果 RAI 的答覆及時且內容適當，NRC 將於 2024 年 11

月完成 ISFSI 設施技術方面的審查程序。

PG&E 公司目前的用過核燃料管理計畫是立基於能源部將於 2038 年開始，將核電廠用過核燃料從反應器場址移至聯邦設施，並於 2067 年完成用過核燃料和超 C 類廢棄物(GTCC)接收。因此，該計畫預計用過核燃料及 GTCC 廢棄物，將於 2067 年從 Diablo Canyon 核電廠之 ISFSI 設施中清除。

除了預計放置在 ISFSI 設施上的 138 個用過核燃料貯存護箱外，估計還需要 10 個 GTCC 廢棄物貯存護箱。然而，目前 ISFSI 設施的規模和執照許可範圍都不足以存放 GTCC 廢棄物，因此未來需要提交新的執照修正案，以便在現場建造一個額外的貯存基座，以容納 GTCC 廢棄物。

### 三、Diablo Canyon 核電廠低放射性廢棄物處理設施

Diablo Canyon 核電廠內設置有二套低放射性廢棄物處理設施，分別為低放射性廢液處理系統及固化系統，用以處理核電廠營運時產生之低放射性廢液，並將低放射性廢液經處理後產生之濃縮廢漿加以固化處理，合格固化體則與廠內產生的低放射性廢棄物，一起運往與廠方完成契約簽定之低放射性廢棄物最終處置場予以妥善處置。

美國境內設置有 NRC 核准之民營低放射性廢棄物最終處置場，可以安全處置核電廠產生的低放射性廢棄物，且已經正式營運多年，所以 Diablo Canyon 核電廠營運產生之低放射性廢棄物，經放入合格處置容器且符合最終處置場接收標準後，即可以運往低放射性廢棄物最終處置場存放。

所以在廠內產生的低放射性廢棄物有安全去處可往之情形之下，Diablo Canyon 核電廠並未設置多項的低放射性廢棄物處理設施對低放射性廢棄物進行減量及減容處理，來達到減少低放射性廢棄物貯存設施負荷之目的，也沒有建置高貯存容量的低放射性廢棄物貯存設施，以安全貯存核電廠自開始運轉後即產生之低放射性廢棄物，也能確保低放射性廢棄物獲得安全的管理措施。

### 四、ISFSI 設施視察觀摩交流

此行首日與 NRC 資深視察員 Jeremy Tapp、國際事務辦公室專員 Caroline Clough、及駐美代表處羅副組長，共同拜會 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施計畫負責人 Kyle 先生 (如圖 3)。



圖 3. 拜會人員合照

Kyle 先生當場熱心說明 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施目前使用 HOLTEC 公司開發的 HI-STORM 100 系統，相關重要組件包括 MPC 密封鋼筒、HI-TRAC 傳送護箱、及 HI-STORM 外包裝容器 (overpack) 三個部分，該系統已於 2000 年 5 月獲美國 NRC 核准，並當場用模型為我們示範解說 HI-STORM 100 系統的作業情形，謹列述如下。

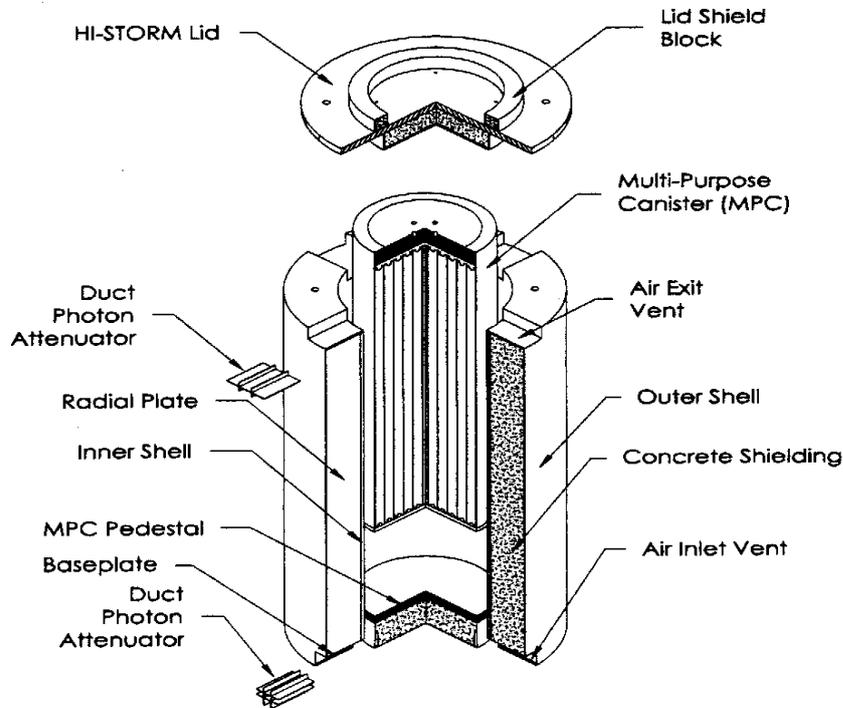
1. 運送 HI-STORM 100 外包裝容器、HI-TRAC 傳送護箱及 MPC 至電廠。
2. 先將 HI-STORM 100 外包裝容器安置於廠房外，並於殼部加入混凝土。
3. 將 HI-TRAC 傳送護箱及 MPC 密封鋼筒移入燃料廠房內。
4. 將 MPC 密封鋼筒裝入 HI-TRAC 傳送護箱內。
5. 將內置 MPC 密封鋼筒的 HI-TRAC 傳送護箱置入用過燃料池中。
6. 裝填用過燃料至 MPC 密封鋼筒中。

7. 完成燃料裝填後，安裝 MPC 密封鋼筒的屏蔽上蓋。
8. 從燃料池吊出 HI-TRAC 傳送護箱至廠房地面。
9. 進行 MPC 密封鋼筒密封操作程序
  - (1). MPC 密封鋼筒屏蔽上蓋進行焊接工作，執行液滲檢測確認焊道品質。
  - (2). MPC 密封鋼筒進行水壓測試後再執行液滲測試。
  - (3). MPC 密封鋼筒內部排水。
  - (4). MPC 密封鋼筒內部乾燥。
  - (5). 填充氦氣。
  - (6). 將排氣、排水孔覆蓋及密封焊接，完成後執行液滲檢測。
  - (7). 密封環 (Closure Ring) 安裝焊接，完成後執行液滲檢測。
10. 安裝及焊接 MPC 密封鋼筒結構上蓋，再安裝 HI-TRAC 傳送護箱上蓋，以低平台傳送車(Low Profile Transport, LPT )將 HI-TRAC 傳送護箱運出燃料廠房，再將 HI-TRAC 傳送護箱移至具有吊重功能的輸送車。
11. 吊重輸送車將 HI-TRAC 傳送護箱輸送至護箱轉移設施(Cask Transfer Facility, CTF)地點，此時 HI-STORM 100 外包裝容器已放入 CTF 中。
12. 將接合設備(Mating Device)置於 CTF 頂部，再將 HI-TRAC 傳送護箱內部的 MPC 密封鋼筒，轉移到 HI-STORM 100 外包裝容器內部。
13. 移出接合設備並安裝 HI-STORM 100 護箱。
14. 將 HI-STORM 100 貯存護箱移至乾式貯存場放置。
15. 貯存場 HI-STORM 100 貯存護箱安置於規劃位置後，以螺栓固定於基座。

## 五、HOLTEC 乾式貯存設施 HI-STORM 100 系統淺析

HOLTEC 公司開發用來貯存及運送用過核燃料系統，HI-STORM 100 (Holtec International Storage and Transfer Operation Reinforced Module) 用過核燃料乾式貯存系統，「100」是表示所需的負載重量超過 100 噸，採用「金屬-混凝土配合模組」，並採用內外護箱設計，其內箱 MPC 密封鋼筒則是採多功能及相同外圍尺寸設計，主體結構如圖 4 所示，關鍵組件包含 MPC 密封鋼筒、

HI-TRAC 傳送護箱、及 HI-STORM 外包裝容器 (overpack) 三個部分，採垂直方式建置，設計有空氣對流孔可促進空氣之對流冷卻，已於 2000 年 5 月獲美國 NRC 核准，CoC 編號為 72-1014。



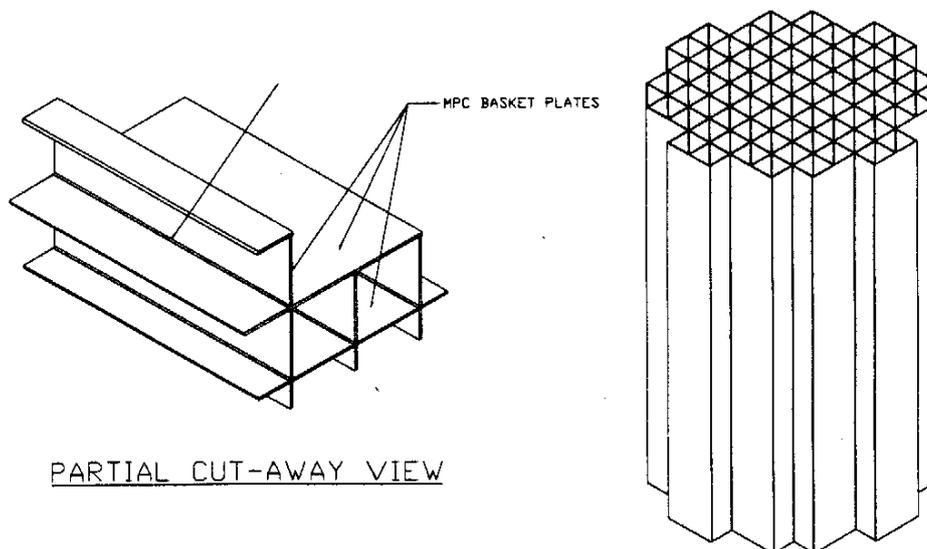
(圖 4) HI-STORM 系統主要結構及組件

MPC 密封鋼筒 (Multi-Purpose Canister) 是一圓柱形的壓力包封容器，內部安裝有放置用過核燃料用之格架，採用 ASME Section III Class 1 壓力容器之焊接規定，正常抗壓力為 100 psig，沒有使用任何法蘭 (Flange) 及螺栓。密封鋼筒內格架 (Basket) 之燃料採垂直存放，每一格放置一束燃料，格架內皆加入適當之中子吸收物質，可使整個燃料存放陣列即使在發生最不利的情形下，反應度仍可維持在次臨界狀態。雖然 MPC 密封鋼筒設計製造是不允許龜裂及洩漏情形發生，但核燃料之臨界分析仍以最嚴重之情形，即整個 MPC 密封鋼筒充滿水的情形下進行分析。

MPC 密封鋼筒格架之設計，採用蜂巢狀 (honeycomb) 結構設計 (圖 5)，所有貯存格是由片狀平板組合而成，連接處則採完全焊接連結，可使燃料所產生之衰變熱量完全傳遞到格架之外圍，蜂巢狀格架可提供強大結構強度、

熱傳導及輻射屏壁。燃料格架之設計強度，需考量在運送過程中發生意外掉落撞擊事件時，仍能維持其完整性，保有原有之設計功能，MPC 密封鋼筒內部有防撞護墊之設計，此方面是依 ASME Section III Subsection NG 結構設計要求進行設計。目前HOLTEC 公司已有多種型式MPC 密封鋼筒獲得美國NRC 執照，包括 MPC-68、MPC-32、及 MPC-24，其中 MPC-68 為 BWR 燃料所使用，MPC-24 及 MPC-32 為 PWR 燃料使用，Diablo Canyon 核電廠即多使用 MPC-32 型式。

MPC 密封鋼筒採用雙重 (Redundant) 包封設計，未使用螺絲或其它機械裝置來密封，頂端蓋為一圓盤直接焊接至 MPC 密封鋼筒殼側，蓋上有水及空氣之排放裝置用來移除 MPC 密封鋼筒內之空氣和水氣及回充惰性氣體（如氬氣）。蓋上再安裝一包封環，將包封環邊緣與 MPC 密封鋼筒殼側和圓盤蓋邊緣以焊接方式連接在一起，在包封環安裝前必需先將圓盤蓋上之排氣、排水孔覆蓋封焊。另外，MPC 密封鋼筒設計可提供熱虹吸(thermosiphon)功能，可讓填充之氬氣於格架間產生良好對流。



(圖 5) 蜂巢狀 (honeycomb) 格架

MPC 密封鋼筒具有 thermosiphon 功能設計，可以把較新之用過燃料放置於 MPC 密封鋼筒中央，再將較舊燃料放於 MPC 密封鋼筒外圍，如此可大幅降低護箱表面之輻射劑量。除了可貯存用過核燃料外，還可存放受損燃料、非燃料之硬體（如 C 類廢棄物）及 GTCC 放射性廢棄物等，但這部份仍需經過 NRC 安全審查後才能使用。

HI-TRAC 傳送護箱設計為 HI-STORM 100 系統的傳送護箱，因為 HI-STORM 100 系統體積太大無法直接於用過燃料池側來進行安裝，所以需要使用 HI-TRAC 傳送護箱先將 MPC 密封鋼筒運出燃料廠房，再運送到 HI-STORM 100 貯存護箱中並安置於用過核燃料乾式貯存場。

HI-TRAC 傳送護箱為一圓柱體容器，其上蓋及下蓋皆可移動，HI-TRAC 傳送護箱可與 HI-STORM 頂部相接合，將 MPC 密封鋼筒傳遞至 HI-STORM。HI-TRAC 傳送護箱容器壁以碳鋼為主要材料，再加入鉛屏蔽層，操作過程是以水及鉛做為輻射屏蔽，上端蓋中央開有一洞做為吊升降 MPC 密封鋼筒用，下端蓋可於接合後開啟使 MPC 密封鋼筒能直接傳送至 HI-STORM 本體內。

HI-STORM 外包裝容器（overpack）為一金屬-混凝土、厚壁圓柱體容器，其內外側是由碳鋼板構成，內外側鋼板間於安裝組合完成後灌入混凝土作為加強屏壁功能。頂部則以混凝土和金屬蓋用螺絲鎖緊。整體結構除了提供輻射線之生物屏壁，亦可保護內部貯存物不受天災而破壞。

護箱於底部及頂端分別設計有四個進氣和排氣孔及氣流導通管，可藉空氣自然對流方式將內部 MPC 密封鋼筒之熱量移除。在氣流導通管上裝有光子衰減器（photon attenuator）可阻止  $\gamma$  射線，並在所有的通氣孔處都裝有網狀濾網，以防止昆蟲進入護箱內。

乾式貯存設施興建之設計基準，以美國為例，須符合聯邦法規 10 CFR 72 要求，乾式貯存護箱系統承受地震、洪水等意外事件之能力，須比照核電廠反應器系統之設計規格。完成「乾式貯存」護箱細部設計與安全分析後，尚須進行實體模擬驗證其實測數據（如溫度、屏蔽）與模式數據之差異，經分

析評估可接受以後，美國聯邦核管會才會核發執照。以下為 HI-STORM 系統一些有關安全方面之考量：

1. 可抵抗地震強度。依 US NRC 於鹽湖城所做之測試，在 1.0g 的地震下仍可維持完整。
2. 無發生輻設外洩的風險。（MPC 密封鋼筒從 25 呎高掉落至硬水泥地也不會造成輻射外洩）。
3. 對外界造成之輻射劑量很低。

## 六、用過核燃料乾式貯存設施管制經驗交流

此行除參與觀摩核管會執行用過核燃料乾式貯存設施視察作業外，亦藉此機會與核管會乾式貯存設施專業資深官員及視察員，針就用過核燃料乾式貯存設施在管制面、實務面、及技術面，進行廣泛討論及交流。

### （一）電廠廠址風險考量與用過核子燃料乾式貯存設施耐震設計地震值

美國核管會於 2002 年頒布管制指引 1.165 (Regulatory Guide 1.165)，要求核能電廠的設計地震需納入地震危害度評估方法，依據美國聯邦法規有關乾式貯存設施的耐震設計要求主要規範在 10 CFR 72.102 及 10 CFR 72.103 中。10 CFR 72.102 適用於 2003 年 10 月 16 日前所提的申請案及乾式貯存模式以外的貯存設施，而 10 CFR 72.103 則針對 2003 年 10 月 16 日後的乾式貯存模式申請案。無論是 72.102 還是 72.103，兩者在地震反應頻譜加速度值的採用上均以落磯山（西經 104 度）為分界。分界以東的地區，如無特定不利因素，可採用錨定於 0.25g 之反應頻譜的標準化設計地震地表震動（standardized design earthquake ground motion, DE）。

這兩者的主要差異在於針對落磯山以西及以東已知地震特性地點的技術評估方法，10 CFR 72.102 要求遵循 10 CFR 100《反應器場址準則》附錄 A 進行評估；而 10 CFR 72.103 則依據 72.103(f)的規範進行地震特性評估。如果設施位於核電廠場址，則可延用該電廠的地質及耐震設計準則。另依照 10 CFR 72.102(f)，貯存設施的設計地震（DE）需等同於核電廠的安全停機地震

(SSE)，且水平方向的地表震動不得低於 0.10g 之反應頻譜。

從 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施安全分析報告(SAR)指出，該設施之地震設計基準為 0.4g，等同於核電廠的安全停機地震（SSE）。被設計為在此地震下，設施必須保持結構和屏蔽系統的完整性，以防止放射性物質的外洩或其他嚴重後果。

另安全分析報告指出，因電廠附近有霍斯格利斷層(Hosgri Fault)，該斷層最大地震規模可能達到 7.5，在電廠產生的最大地震動可達 0.75g，為評估該斷層帶來之影響，並確保乾式貯存設施之耐震安全，採地表水平加速度為 0.83g，垂直加速度為 0.7g，進行乾式貯存護箱受震行為分析，分析結果為乾式貯存護箱僅會發生滑動，不會受到結構損害。

透過與美方瞭解並與我國乾式貯存設施耐震設計做比較，我國於「用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則」要求，乾式貯存設施位於核能電廠場址內者，其設施耐震評估應採用與核能電廠終期安全分析報告一致之設計基準地震值。若位於核能電廠場址外者，其設施基座及貯存護箱之耐震設計基準，應參照核子反應器廠房耐震設計基準之評估方式辦理。另貯存護箱之耐震設計，在正常運作、異常狀況、意外事故及自然災害事件下，應維持用過核子燃料結構完整性，貯存護箱不得有傾倒或放射性物質外釋之情形。

綜合以上對美國和我國兩地在乾式貯存設施耐震設計的規範進行研析，我國之規定多參照美方 NRC 之相關標準及細部規範。另外，我國針對位於核能電廠場址內外之乾式貯存設施，分別設計不同之耐震標準，此與美國依地域差異設計之原則相似，可見我國對於乾式貯存設施之耐震設計準則，既能符合國際標準，又能因應本地特殊地質條件，以達到核能乾式貯存設施安全性之保障，顯示出對地震風險之充分考量及嚴謹應對。

Diablo Canyon 核電廠用過燃料貯存設施最終安全分析報告更新版(PG&E 2014)第 2 章「場址特性」，特別參考了 Diablo Canyon 核電廠最終安全分析

報告 (FSAR) 更新版，以掌握地震歷史和關聯與地質結構有關的地震。Diablo Canyon 核電廠 1 號和 2 號機組最終安全分析報告更新第 21 版 (PG&E, 2013 年) 第 2.5.3 節「振動地面運動」，也揭示包括有關現場地質條件和地震歷史的更新資訊。而對於未來新建乾式貯存設施的適用條件上，美方表示未來新建的乾式貯存設施，需要符合 10 CFR 72.103 或 10 CFR 72.212(b)(5)(ii) 的要求。

## (二) ISFSI 設施不同材料性質部位之老化管理措施

由於 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施使用三種 MPC 密封鋼筒材料類型，其中一些材料比其他材料更容易受到氯化物引起的應力腐蝕龜裂 (CISCC) 的影響。我方也請教美方，ISFSI 設施不同材料性質的老化管理。

美方表示持照者的老化管理審查、及獨立用過核燃料貯存設施 (ISFSI) 換照申請的老化管理方案 (AMP)，均須考量 MPC 密封鋼筒因氯化物引起應力腐蝕龜裂 (CISCC) 之不同材料敏感度差異性；對於特定執照而言，例如 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施，相關換照管制要求須符合 10 CFR 72.42「執照期限；換照」之規定。

Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施 (PG&E, 2022) 的換照申請，第 3.3 節「老化管理審查結果 - MPC 密封鋼筒」引用了 NUREG-2214 中不銹鋼 CISCC 的資訊，此外，Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施換照申請文件有關 MPC 密封鋼筒老化管理方案表 A-2，依據美國電力研究院 (EPRI)3002005371「氯化物引起的應力腐蝕龜裂(CISCC)之敏感性評估標準」中概述的 CISCC 敏感性評估用於乾式貯存系統的焊接不銹鋼密封鋼筒」(EPRI, 2015 年)，EPRI 指導文件包括 ISFSI 設施 場址及密封鋼筒 CISCC 敏感性標準。特別是 EPRI-3002005371 第 4.4 節「材料合金因素」，考慮了密封鋼筒不銹鋼合金規格及組成 (即材料類型)，並包括用於 Diablo Canyon 核電廠 MPC 密封鋼筒的不銹鋼合金。

NRC 的 NUREG-1927「用過核燃料乾式貯存特定執照及許可之換照符合

性標準審查計畫」(NRC, 2016 年), 為 ISFSI 設施執照和用過核燃料 (SNF) 乾式貯存系統提供換照符合度審查指引, NUREG-1927 第 3 章提供了換照審查範圍之結構、系統與組件 (SSC) 老化管理審查指引, 老化管理審查可以確認基於 SSC 材料結構、安全功能、及作業環境等條件的老化機制及影響。

NUREG-2214「管理貯存中的老化流程 (MAPS) 報告」(NRC, 2019 年) 為 NRC 核可的乾式貯存系統之老化機制及影響, 提供了額外的指引。NUREG-2214 第 3.2.2 節納入對老化機制的評估, 並將 CISCC 確定為焊接沃斯田鐵不銹鋼(austenitic stainless steel)乾式貯存密封鋼筒的老化機制, 例如 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施使用的三種類型密封鋼筒。NUREG-2214 第 6.5 節參考 EPRI-3002005371 之作法, 納入一個針對焊接不銹鋼乾式貯存密封鋼筒的局部腐蝕和應力腐蝕龜裂的老化管理方案 (AMP) 範例。

### (三) 高燃耗用過核子燃料貯存審查注意要項及其老化管理評估

我方也請教美方, Diablo Canyon 核電廠執照允許存放高燃耗用過核子燃料, 所以一般用過核子燃料與高燃耗用過核子燃料, 是否分別存放、還是混合貯存。

美方表示, 高燃耗燃料(定義為大於 45 GWd/MTU 的核燃料束)可以與低燃耗燃料放置在同一乾式貯存系統中。Diablo Canyon 核電廠執照證號 SNM-2511 的技術規範第 2.0 節規定了可裝載到 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施乾式貯存系統中的許可內容物, Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施執照之技術規範第 2.3 節(修訂 5 版)「替代 MPC-32 燃料選擇標準」(NRC 2016a; 2016b) 中描述了高燃耗燃料的貯存。

NRC 關於用過核燃料乾式貯存的指引, 說明在 NUREG-2215「用過燃料乾式貯存系統和設施之標準審查計畫」第 8.5.15 節「用過核燃料」(NRC, 2020 年), 對於高燃耗核燃料的乾式貯存, NUREG-2215 考慮了溫度對潛變破裂(creep failure)及燃料護套氫化物重新排列(cladding hydride reorientation)的可能性影響, 並包括乾燥過程與燃料護套峰值溫度(Peak Cladding Temperature,

PCT)的熱循環，以及裝載、乾燥、運送作業、一般、異常情形，以及貯存期間的意外事件。

另對於高燃耗用過燃料的老化管理評估方面，NRC 關於高燃耗核燃料老化管理的指引中，包含在 NUREG-2214 (NRC, 2019) 第 3.6 節「用過核燃料束」中，將鋯合金燃料護套氫化物重新排列及潛變破裂確定為高燃耗核燃料的老化機制。NUREG-2214 第 6.10 節「高燃耗燃料監測和評估」中，包含其他指引和高燃耗核燃料的老化管理方案範例。

Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施換照申請文件 (PG&E, 2022) 第 3.2 節「用過核燃料束老化管理審查結果」及附錄 A.1 節「Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施高燃耗燃料老化管理方案」，係參考 NUREG-2214 中的指引，並與 NUREG-2214 指引建議方法一致。

## 肆、心得與建議

- 一、NRC 於 2004 年 3 月 22 日核發 Diablo Canyon 核電廠 ISFSI 設施 20 年運轉期限的特定場址執照，至今已於 2024 年 3 月屆期，Diablo Canyon 核電廠也已於 2022 年 3 月向 NRC 申請 ISFSI 設施換照，使既有 ISFSI 設施再延長使用 40 年。顯示用過核燃料乾式貯存設施為美國等國際核能先進國家所廣為採用，目前在全球最終處置場都未完成建置與營運之際，乾式貯存設施誠為用過核燃料安全管理之作法。
- 二、我國「用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則」要求，用過核子燃料乾式貯存設施位於核能電廠場址內者，其設施耐震評估應採用與核能電廠終期安全分析報告一致之設計基準地震值；美國聯邦法規亦要求位於核電廠場址之用過核子燃料乾式貯存設施，可以延用該電廠之地質與耐震設計基準，用過核子燃料乾式貯存設施之耐震設計必須等同於核電廠之耐震安全停機標準。我國與美國核能管制機關要求用過核子燃料乾式貯存設施遵循之耐震設計原則相似，達到用過核燃料乾式貯存設施之安全保障，亦對區域地震風險充分考量及嚴謹應對。
- 三、現行核電廠營運發電後必然產生用過核燃料，將用過核燃料安置於乾式貯存設施，是高階核廢料運送至最終處置場完成前，對用過核燃料的安全運作管理方式。本次實地觀摩美國核電廠用過核燃料乾式貯存設施作業情形，及美國管制機關視察官員執行 Diablo Canyon 核電廠乾式貯存設施的管制視察作為，學習可參採之視察方式及管制行動，藉此檢視我國核電廠乾式貯存設施之管制作為。對於精進我國核能電廠乾式貯存設施管制作業而言，此類交流活動具有正面影響，建議應持續推展，並加深兩方的技術及經驗交流。
- 四、核能電廠放射性廢物是發電營運必然產生的物質，必須予以妥善管理，才能建立可永續發展的環境。用過核燃料管理與管制不僅牽涉技術面向，也涉及政治和社會層面，核能設施經營者需要時間和耐心、有計畫地持續與民眾溝通，建立公眾

共識，俾利推動相關設施發展。

附件

美國核能管制委員會邀請函

May 09, 2024

Ms. Tracy Tsai-Yueh Luo, PhD.  
Deputy Director, Science and Technology Division  
Taipei Economic and Cultural  
Representative Office in the United States  
4201 Wisconsin Avenue, N.W.  
Washington, D.C. 20016

Dear Ms. Luo:

On behalf of the American Institute in Taiwan, the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) invites Mr. Hung-Chun Kao and Mr. Min-Tsang Chang of the Nuclear Safety Commission to travel to the United States to observe an NRC-conducted site visit at the Diablo Canyon Power Plant. This visit will take place from July 29 to August 2, 2024, in San Luis Obispo County, California.

Please note, all expenses for travel and lodging will be self-funded.

If you or your staff have questions or need further assistance, please do not hesitate to contact me via telephone (+1-240-381-9495) or e-mail ([marline.dominic@nrc.gov](mailto:marline.dominic@nrc.gov)) and I will be pleased to assist you.

Sincerely,

**Marline A.  
Dominic**

Marline Dominic

Digitally signed by  
Marline A. Dominic  
Date: 2024.05.09 16:18:35  
-04'00'