

參加 2017 年用過燃料管理大會紀實

2017 年 6 月 1 日

前言

美國核能協進會(NEI)於 2017 年 5 月 2-4 日於喬治亞州之聖芬納市舉辦「用過核燃料管理大會」，這也是該協會自 2011 年開始由前身「乾式貯存資訊論壇」轉變成現有大會形式以來，連續第七年辦理此項年度會議，加上近年來美國已陸續有七部機組停止運轉，未來亦有多部機組規劃停機並開始除役工作，使得用過核子燃料之貯存及處理，成為核能界未來重要的工作。主辦單位 NEI 負責用過核燃料處理和除役之計畫經理 Kristopher Cummings 於開幕式之報告中¹，提出該協會統計之最新資訊，顯示到去年底為止全美共累計產生 78,600 公噸之用過核燃料，且每年以超出 2000 公噸的數量成長，這其中約有四成左右以乾式的方式來貯存，且已累計有 2463 個護箱模組，分散在 71 個用過核燃料貯存場，其中包括了商用核電廠及能源部所屬的設施。而 NEI 目前與美國核管會磋商與用過核燃料相關的規範包括：「NEI 14-03 乾式護箱老化管理運轉實施導則」、「NEI 12-04 乾式燃料貯存箱之修改及測試導則」、「NEI 16-03 用過燃料池中子吸收劑監視導則」、「NEI 12-06 用過燃料池臨界安全分析導則」等，這些議題也陸續在兩天半大會期間各專題分組中加以討論。Cummings 經理代表工業界提出對管制體系的期待，希望在乾式貯存箱之認證程序及執照更新的審查流程方面，能夠更為有效及快速，而具有運輸和貯存雙重功能之護箱將是未來運用的趨勢，因為在最終處置場尚未定案前，未來數年內可能是將散在各設施內的乾式貯存箱，運輸到集中式貯場暫存，等待未來再轉運到最終處置場。



圖 1: 用過核燃料處理大會及
美國核能協進會計畫經理
Kristopher Cummings 開幕致詞

近期法規修訂及管制重點

來自美國核能管制委員會(NRC)核子材料安全及保防署之 Michael Layton 處長，以核管會管理階層的角度來說明現今在用過核燃料方面的管制理念及重點²；他首先表示核管會目前不但面對工業界持續送來新申請案及修正案，也受到內部 AIM 計畫有關組織變革的衝擊，和各界要求核管會持續改進的審查流程和效率，在此情況下，核管會核心的重點放在四個面向：(1)安全和保安；(2)合理、可靠、及可預測性之管制；(3)將言語化為行動；(4)透明公開。Michael Layton 處長繼續舉例說明過去核管會一些管制成果及現今工作，包括：完成有關氟引發應力腐蝕之法規解決方案(CISCC RIRP)、WCS 公

司申請在新墨西哥州建置集中式乾式貯存場立案之補充問題審查、乾式貯存護箱符合認證之執照更新審照架構、用過燃料可取出性之中期視察導則等。除了 WCS 公司已於今年 1 月份正式立案外，核管會也已收到另一家 Holtec 公司在德州申請興建集中式乾式貯存場，目前正在進行是否接受立案的審查，唯應注意 WCS 因財務因素於 4 月份函請核管會暫停審查。至於與各界的互動，核管會人員利用包括辦理用過核燃料管制大會、風險管制架構公眾會議、參與年度核管資訊大會等方面來和民眾及工業界代表溝通討論，並隨時與同為政府部門之能源部進行多方面的協調。本次參加工業界(NEI)辦理的會議，核管會用過燃料管制部門也派出多位代表在分組中討論用過燃料池硼吸收劑退化評估、風險性導向管制應用於乾式護箱審照作業、及核能電廠除役法規之修訂等議題。



圖 2:美國核管會 Michael Layton 處長報告管制現

用過核燃料政策相關討論

美國能源部主管用過核子燃料處置辦公室主任 William Boyle 在有關政策的論壇中指出，美國川普總統於今年 1 月就任之後，迅速在兩個月之內提出一份名為「美國第一」的預算藍圖，其中與能源部相關的包括重新啟動亞卡山(Yucca Mountain)用過核燃料最終處置場之申照作業，以及強化有關集中式乾式貯存場之建置計畫，此與過去八年來歐巴馬總統政府的政策不相同，在本次大會討論期間尚未收到上述計畫之具體預算書和細項，Boyle 主任尚無法針對如何推動新政策來加以回應，不過表明將依據國會最後通過之預算來執行這兩項工作。而參加同一分組之美國核能協進會(NEI)代表 Rod McCullum 資深主任則回顧 1982 年以來亞卡山計畫經歷了選址、立法、申請執照、暫停審查、重啟審查等階段³，30 多年過去了，能源部累積收取了超過 360 億美元之核廢料基金(Nuclear Waste Fund)卻仍未執行其法定任務，亦即收取散在各核能設施內的用過核燃料，此項延誤對美國未來能否持續發展核能工業造成了不良的影響。工業界認為在現有的法規基礎推動用過核燃料的處理，尚需再透過立法方式來完成包括：獨立於能源部以外之專責處理機構、如何取得及使用已累積的核廢料基金、建置中期性貯存場來接收商用及能源部高放射性廢棄物、平行完成亞卡山計畫之審照作業及後續之建造及運轉、願意接收用過核燃料及亞卡山計畫所在之州和地方政府應享有優惠、持續有關進步及封閉型燃料循環的研發工作等。McCullum 主任最後也不諱言指出核能工業在美國已受到各種挑戰，包括電力需求成長遲緩、運轉維護成本增加、再生能源擴張、市場結構因素等，都對核能營運造成了壓力，近年來機組的永久停機歸因於經濟因素者居多，在此情況下，必須要基本解決用過核燃料的問題，才能確保美國國家核能策略之持續性和完整性。

用過核燃料貯存和運輸研發現況

在這個有關研發的專題討論中，首先是由能源部 William Boyle 主任說明該部在有關用過核燃料貯存和運輸相關的研究現況⁴，而其最主要的動機是因為乾式護箱系統的使用時間將比原先設想的久，而早期在愛得荷國家實驗室(INL)所進行的檢查和資料為低燃耗用過核燃料，現在各電廠則普遍使用高燃耗燃料，故需再建置此類型燃料之長期貯存效應及運輸期間之材料行為資料庫，另外就是收集和分析近年來營運上產生的問題以預做未來設施營運的考量。在材料強度方面要研究燃料護套、裝載套筒、貯存護箱之結構完整性，在可能受到應力則需考量來自貯存狀態，運輸、熱應力、放射線、及化學性質等來源。而根據目前研發得到的結論顯示，燃料護套內氫化物在重新定位並沒有安全疑慮、運輸乾式貯存箱時所之搖晃和震動並不會對內部燃料棒造成影響、實驗收集到的數據有助於驗證數值模擬計算的結果等。Boyle 主任簡報中也舉出能源部與美國核管會共同資助聖迪亞國家實驗室(SNL)進行一項模擬加熱器實驗，主要是用來收集沸水式核燃料在乾式貯狀態下之熱資料，這項計畫係由核管會主導，自 2015 年起在 SNL 進行電加熱實驗，此外也與美國電力綜合研究所(EPRI)電腦程式進行驗證和比對。能源部另外針對用過核燃料之貯存和運輸，每年提供給大學之研究經費也達到 2 千 7 百萬美元。同一專題分組中有來自 SNL 的專家代表 Sam Durbin，則進一步說明該實驗室執行核管會和能源部共同計畫的細節⁵，包括本項實驗之設計、以及所使用功率和壓力範圍等技術資料，其概念如圖 3 所示。而現階段與數值流體動力(CFD)模擬比對之結果，顯示相當的吻合性，未來這項模擬還將從地表上乾式貯存的狀態，進一步延伸到地底下之模擬，以因應部分廠商提出地下型貯存的設計。而來自電力綜合研究所(EPRI)的計畫經理 Jeremy Reshaw 是從開發新的檢測技術來說明 EPRI 進行之先導型作業⁶，主要是因應現在超過 2500 組乾式套桶護箱組，以及部分已放置超過 20 年，比原先預期之短期貯存更久，故定期檢測成為可否長期持照及運轉下去的關鍵因素。目前結合學術和工業界開發各式檢測技術包括機械人技術、非破壞性檢測(渦電流、超音波、聲波等)、及實驗室比對等多方面的合作。

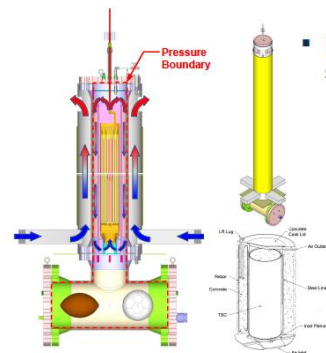


圖 3:SNL 熱值模擬實驗

亞卡山計畫過去現在與未來

針對亞卡山計畫這個主題，首先是來自設施所在內華達州奈依郡(Nye County)的 Joseph Ziegler 顧問之發言⁷，他回顧過去幾年來因為前歐巴馬總統主政下，能源部於 2010

年曾試圖抽回亞卡山最終處置場申照案，雖被核管會原子能安全及審照委員會(ASLB)拒絕，但能源部自此也不再編列預算，後來於 2012 年成立了藍帶委員會(BRC)，建議未來應以共識之選址方式，來尋找集中式貯存場及最終處置場，但能源部卻未考量將明文記載在核廢料政策法中之亞卡山，當做一個可行的方案。Ziegler 顧問總結時認為奈伊郡民眾深信只要亞卡山計畫是安全並可兼顧環境保護，他們可以接受成為最終處置場，並反問現在有其他更好的選擇嗎？第二位是原來在亞卡計畫擔任工程經理的 John Donnel 先生⁸，他在 7 年前(2011 年)參與了能源部中止計畫後之善後收尾工作，並將所有歷史記錄及軟體工作等歸入能源部歷史檔案管理，若新的川普總統政府要重啟本計畫，他預見首先是核管會的審查及辦理公聽會，因為在過去 7 年內，核管會在華府巡迴法庭要求下，必須使用已核撥的經費來審查亞卡山計畫，且已於 2016 年 5 月完成了環境衝擊報告，所以根據核廢料政策法，接下來的步驟便是辦理公聽會。當然，這必須先由國會在核廢料基金下，核撥能源部及核管會雙方適當的經費，以及內華達州政府和場址所在附近的 9 個郡配合辦理這項公聽會。至於以合約工作者的角度，Donnel 先生認為必須儘快回復所需之人力、工作所需之資料庫紀錄和軟體、工作流程管制、品保作業、及其他支援能源部的職責。他最後語重心長地表示過去已浪費了很多時間，也喪失了許多動能，但未來重新啟動而有意義的步驟是政府部門重新建置亞卡山計畫政策及專案，以及國會能於 2018 年及未來預算提撥足夠的經費。

美國集中乾式貯存場之研議及申照現況

美國橡樹嶺國家實驗室(ORNL)研發人員 Josh Jarrell 針對集中式乾式貯設施的議題⁹，首先指出 1982 年公布之核廢料政策法中已具有相關的修文根據，將這種設施視為「用過核燃料被監控且可再取出之設施」，亦即依法可以執行，而他也列舉集中乾式貯存系統的優缺點，好處方面包括：增加後端處理的彈性和可靠性、避免單一系統(方式)失敗而影響整體之處理、將電廠廠內貯存和最終處置加以脫鉤、永久停機電廠可以儘早開始拆除和復原及土地再使用、減輕美國聯邦政府(能源部)對廠內貯存之負擔等；至於缺點則是近期投資成本的增加、會增加運輸和相關移送之處理費用、減緩了推動最終處置場的動能等。在 Jarrell 研究員報告，也根據是否有集中式乾貯設施及使用時間，並考慮最終處置不同年間開放的不同假想條件下，進行成本分析，原則上具有集中乾貯設施比沒有此設施之處理費用較低，而愈晚

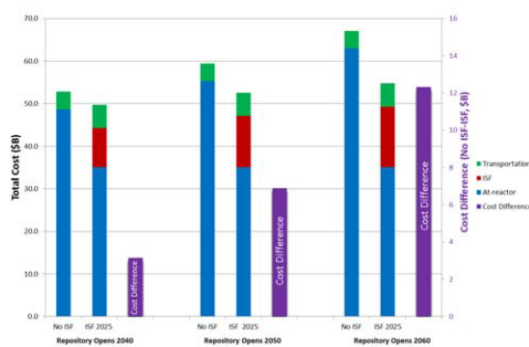


圖 4:集中式乾式貯及最終處置成本分析

開放最終處置場，兩者的差異就愈大。例如圖 4 假設在 2040、2050、2060 年開始使用最終處置來接收用過核燃料，而 2025 年先以乾式貯存場集中接收的費用比較，都比現在做法，亦即仍舊在電廠內置放用過核燃料的成本為低。

此外由 Holtec 公司副總裁 Joy Russell 介紹該公司之乾式貯存設計及實績¹⁰，其主要產品包含了地上型及地下型兩種設計，近期內在美國南加州 SONGS 電廠及密蘇里州 Callaway 電廠，均採用地下型(HI-STORM UMAX)之乾貯設施，其優點包括：操作便利性而減低貯存和移動的時間、地下化設計使得平面和空中保安達到最佳化、減少天然災害之環境衝擊、及降低人員劑量而達到最佳安全性等。Russell 副總裁也提及該公司集團於今年向美國核管會申請在德州興建集中式乾式貯存場乙事，認為是提供能源部一個前所未有的機會來解決承諾移出各電廠用過核子燃料的機會，也是在能源部整體後端規劃的一個補充方案，集中式的貯存方式除了技術上已有美國國內(如猶他州)和國際(如烏克蘭)之實績，政治上可以消除具有用過核子燃料所在州的挑戰，而預計移置到的德州地區則具有比較強的共識和支持。當然這個前提是美國核管會必須先核發執照，且必須解決跨州運輸的問題，才能開始接收美國境內的用過核子燃料。



圖 5:Callaway 電廠用過核燃料乾式貯存場

國際經驗交流

本次用過核子燃料管理大會的大部分講者來自美國各界，但也邀請了西班牙國家放射性廢料機構計畫經理 Miguel Martinez 來分享該國之經驗¹¹，西班牙自 1980 年代核能電廠開始運轉以來，現正有 7 個運轉中機組及 2 個除役中機組，也有 1 部機組因故沒有進入商業運轉，且自 1990 年開始執行燃料池格架更新以容納比原設計多的燃料束，該國亦規劃在 2000-2024 年間在各電廠設立乾式貯存設施，其最終仍計劃在 2068 年開始啟用地底深層之處置場。然而在此間隔期間，西班牙也計劃興建集中式中期貯存設施(ATC)，一方面可以提供較多的用過核燃料乾式貯存空間，也可以讓除役中設施提早移出用過核子燃料而降低其管制等級，此外亦可接收那些運到國外進

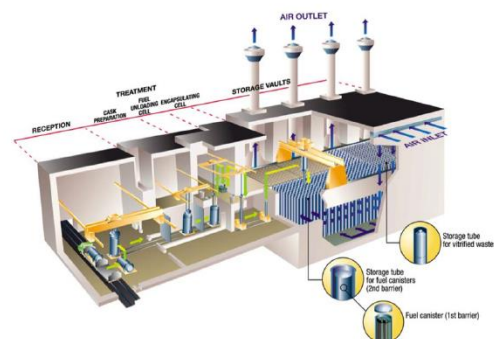


圖 6:西班牙集中式貯存場概念圖

行再處理後所產生的核放射性廢棄物，最後就是經濟的考量，具有集中式乾貯的整體經費是比較低的。此計畫在西班牙第 6 次放射性廢棄物計畫中被列為優先事項，並在 2004 年和 2006 年分別得到國會的支持，隨後於 2009 開始進行選址研究，於 2011 年選定 Villar de Canas 做為場址。本設施(ATC)已於 2014 年提出場址許可及建廠執照申請，且在 2015 取得管制單位(CSN)在場址方面之核准，但在建造及最後許可，預期 2017-2018 年間可分別取得 CSN 和主管部長的核准。此外在環境影響評估方面，目前由地方民眾提出本設施對候鳥不良影響的訴訟，故預期與法院間解決爭議的時間點也在 2017 年，在完成上述審核流程後，才會開始 ATC 之細部設計及工業分類等後續作業。

用過燃料池安全議題

在有關此項安全議題之分組中，四名講者為核管會資深工程師 Kent Wood、核能協進會專案經理 Kris Cummings、電力綜合研究所(EPRI)資深計畫經理 Hatice Akkurt、及田納西流域管理局(TVA)計畫經理 Zita Martin 等人，綜合他們的報告內容，基本上就是以三項管制導則及硼吸收劑(BORAL)的研究為架構。首先是核管會於 2016 年 4 月發出之一般信函(編號 GL 16-01)，要求動力及研究用反應器持照者，需向核管會報告並顯示在用過燃料池內之中子吸收材料，其功能足以符合執照之設計基準，以及如何能夠持續保持這種符合性。核管會人員 Wood 指出已於 2016 年 11 月收到各持照者的回應¹²，目前已有 46 個持照者結案，但仍有 4 個待進一步之評估，預計今年 5 月份可以完成所有與本通函的評估。第二項管制導則是由核能協進會制定而經核管會審查的 NEI 12-16「用過燃料池臨界安全分析導則」，此份導則係用於規範沸水式及壓水式燃料在池中置放架之儲存，並總結過去核管會審查認可的方法和 EPRI 有關耗損驗證分析方法，以便讓各持照者得以遵循辦理，目前核管會已完成此 NEI 12-16 第 2 版之初步審查，並公布審查報告請各界提供意見中。另外一份編號為 NEI 16-3 的導則是如何設置適當的中子吸收劑計畫，例如在燃料池不同位置放置試片(coupon)、偵測頻率、和評估測量結果等，目前核管會已出版此導則之安全評估報告，在經過公告及各界意見提供及最後整理後，才算正式完成本導則之審查。至於最後一項與硼吸收劑相關的評估，核管會與 EPRI 簽訂一項合作備忘錄來研究除役中 Zion 電廠的燃料格架特性，目的在於評估中子吸收劑在正常和異常燃料池環境下之長期和短期行為，其中最主要考量的因素為池水溫度和水化學性質，評估方法則包括金相檢驗、腐蝕測試、及硼-10 區域密度測量等，預計今年 7 月完成相關分析工作。旗下擁有 Browns Ferry、Sequoyah、Watts Bar 等電廠之田納西流域管理局(TVA)，因為各電廠之硼吸收劑監測計畫依其設計特性而不太一致，例如 Watts Bar 電廠就沒有放置試片，故 Martin 計畫經理就提出兩個選項¹³：從燃料格架材料中產生試

片，或者依 EPRI 收集全美電廠試片測試結果並建立資料庫，沒有試片的電廠則可以引用這些數據做為其評估結果，這兩個選項各有利弊，且都尚待工業界和核管會之討論。

除役期間用過燃料處理法規研議及實務

核管會(NRC)核子材料安全及保防署之 Michael Layton 處長除了在開幕介紹該會整體性之工作重點，在專題分組討論時也說明除役法規修訂研議的情形¹⁴，在 11 個不同領域中(包括：緊急應變、實體防護、網路安全、吊車操作訓練及測驗、除役基金、老化劣化管理等)，他特別著重說明在處理用過核子燃料之修訂重點。目前研議方向在於修訂聯辦法規第 50、52、72 部等章節內容，使得設施持照者在除役不同階段之規定更為明確，另將現行除役持照者已經使用之規範用語，加入新修訂的聯辦法規中，此外亦在法規中明訂民眾和利益相關者(stakeholders)參與在除役流程中，以擴大管制透明和公開性。至於未來除役法規修訂時程方面，2017 年將完成法規修訂基準，2018 年春天向核管會委員正式提出修訂建議，並於 2019 年完成並公布新修訂之除役法規。另外在除役實務方面，來自 Energy Solutions 公司 Gerry van Noordennen 先生報告了 Zion 電廠的除役現況¹⁵，此電廠自 1998 年停機以來，原採取長期安全儲存的除役方式，而用過燃料儲存於用過燃料池中。但自從 2010 年 Exelon 公司將 Zion 電廠的執照轉移給其子公司 Energy Solutions 並由其全權負責除役工作以來，已加速除役步伐，其中關鍵是 2014 年 1 月起，以 1 年的時間將高放射性燃料由水池中移轉到室外平地上，完成了 61 個乾式貯存護箱的安置工作，其中包括用過核子燃料及高於 C 等級之放射性廢棄物(GTCC)。這項作業事先有詳細的規劃和模擬訓練、作業中的嚴密掌控、最後創下在 52 個星期完成 61 個護箱安置的工業界紀錄，另外在期間也執行了受損燃料的修補，以因應能源部最終移除這些用過燃料之要求標準。



圖 7:Zion 電廠用過燃料乾式護箱

參考資料

1. Kristopher Cummings, Management Perspectives: Building on Progress , NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
2. Michael Layton, NRC Managment Perspective: What's Up?, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
3. Rod McCullum, Embrace the Target, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
4. William Boyle & Ned Larson, DOE R&D in Support of Spent Fuel Dry Storage and Transportation, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
5. Sam Durin et al, Dry Cask Simulator Experiments for CFD Validation, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
6. Jeremy Renshaw, EPRI NDE Activities Related to Dry Cask Inspection, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
7. Joseph Ziegler, Yucca Mountain Host County Perspective, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
8. John Donnell, High Level Waste Disposal Yucca Challenges Moving Forward, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
9. Josh Jarrell, Does Consolidated Interim Storage Make Sense in an Integrated Waste Management System?, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
10. Joy Russell, A Consolidated Interim Storage Facility for Used Nuclear Fuel and HLW, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
11. Miguel Martinez, The Spanish ATC, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
12. Kent Wood, Spent Fuel Pool 2017 A Regulatory Perspective, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
13. Zeta Martin, BoralTM Monitoring Utility Perspective, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
14. Michael Layton, Rulemaking of Regulatory Improvements for Power Reactors Transition to Decommissioning, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.
15. Gerry van Noordennen, Decommissioning: The Zion Experience, NEI Used Fuel Management Conference, May 2-4, 2017.