參加第 2 屆核能電廠除役及用過燃料管理策略高峰會紀實

2015 年 10 月 28 日

繼 2014 年第 1 屆核能電廠除役及用過核燃料管理策略高峰會之後，以英國倫敦為基地的主辦單位 Nuclear Energy Insider 復於 2015 年 10 月 5-6 日於美國北卡羅萊納州夏洛特市再度舉辦第 2 屆的研討會，專案經理 Siobhan O'Meara 於開幕致詞時指出，美國在過去兩年內已陸續有 Crystal River 3 號機、San Onofre 2&3 號機、Kawaunee、及 Vermont Yankee 等機組宣佈停機並進入除役的階段，且在各電力公司陸續完成法規要求之停機除役計畫報告(Post-Shutdown Decommissioning Activity Report, PSDAR)後，預計 2016 年起將陸續開始執行包括：移除反應爐內的用過核子燃料、與外部各利害相關群體的互動、管理除役工作的初始步驟等。由於上述機組中僅有 San Onofre 2&3 號機計畫以 20 年時間採取拆除及復原的工作(或稱 DECON 作業)，其餘機組之業主則以長期性安全貯存(SAFSTOR)為現階段的主要考量，依據美國法規整個除役期程(含貯存及拆除)可長達 60 年，故 O'Meara 經理也指出如何來有效管理及使用除役信託基金(Nuclear Decommissioning Trust Fund, NDT)便顯得很重要。此外由於安全貯存期甚長，恐怕會影響到後續對電廠狀況的掌握瞭解以及拆解技術的供應鏈，故有效的知識傳承轉移是未來能否成功地執行除污及除役(Decontamination and Decommissioning, D&D)的關鍵因素。

圖 1: 核能電廠除役及燃料處理策略高峰會計畫經理 Siobhan O'Meara 致詞

O'Meara 經理另外也說明，由於美國各界對於用過核子燃料之最終處置仍意見分歧，深層地質處置場完成之前，準備除役的電廠都規劃將用過核燃料置放於現有廠址內進行乾式貯存，目前這仍是唯一可行之方案；近年有人倡議在德州及新墨西哥州進行集中式的中期貯存設施，唯此需要通過國會立法程序及通過行政(管制)部門審照等步驟，此類倡議的進展速度仍然緩慢。她最後指出兩天會議的目的，在於各專家相互交流有關除役之知識及技能，以便各界能開始規劃、執行、及最終能完成龐大繁雜的除役工作及用過核子燃料管理計畫。

本次高峰會除了大會之專題演講座談後，主要分成核能電廠除役及用過核子燃料處理兩個分組，以下報告內容將各個電廠除役之重點為主，並且佐以除役法規、除役中電廠實務現況、未來計劃除役電廠之工作準備等面向，加以說明及整理。

除役法規之修訂

服務於美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)核材料安全及保防安全署代理署長 Andrew Persinko 向與會人員介紹該會進行中之除役法規修訂案[1]，他首先特別澄清 NRC 一直以來根據聯邦法規(Code of Federal Regulation, CFR)及該會制定的導則來審理永久停止運轉核能機組之除役計畫，且已完成數座核能電廠之除役審查及視察作業，目前也正在審查這兩年來電力公司或業主所新提出的除役計畫，其中最重要的文件當屬除役計畫報告(PSDAR)之審查，以及後續執行階的視察，圖 2 為 NRC 在電廠除役各階段與持照者與民眾之間的互動關係。不過由於目前法規並未要求核管會核准 PSDAR，而且業主依據各廠址除役不同的階段，會提出各式各樣的豁免申請(exemption)，例如縮小緊急計畫區的面積及降低保安要求等，因此核管會的委員們於 2014 年 8 月 7 日要求主管部門應發展一套完整之除役法規，整合現有的審查作業，其中重點方向包括：階段式處理緊急應變計畫、核管會應核准除役計畫(PSDAR)、維持現有除役方式選項及期程長短、增加有關與州和地方政府及非政府利害相關者的角色等。NRC 核材料安全及保防安全署則於 2015 年秋天公布了此整合性除役法規之先前通知(Advance Notice of Proposed Rulemaking, ANPR)，並歡迎各界提出建議，以做為後續制定法規草案以及最終法規之基礎，Persinko 代理署長預期 2019 年會公布最終版之法規及對應之法規導則。

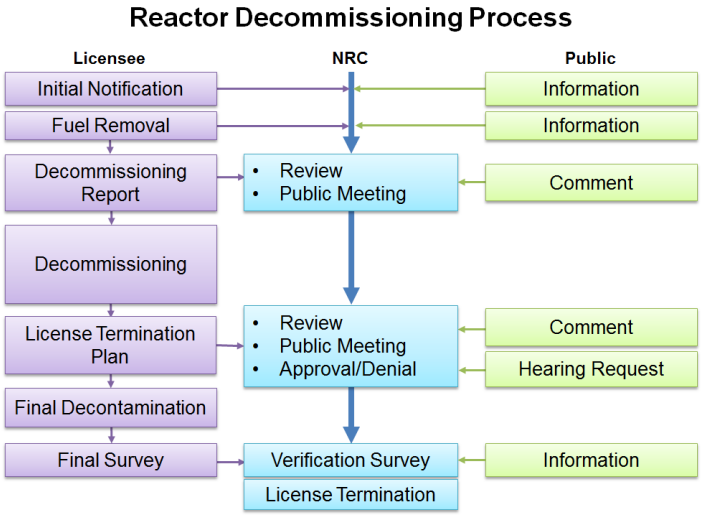

圖 2: 美國核管會審查核能電廠除役計畫流程及與持照者和民眾間之互動關係圖[1]

核能電廠除役計畫實施現況更新

今年參與高峰會的代表中，有來自 San Onofre 核能電廠(SONGS)、Kewaunee 電廠、Vermont Yankee 電廠、Zion 電廠、及 Humboldt Bay 電廠，每個電廠均處於不同的除役階段，以下分別說明各電廠的現況。

San Onofre 核能電廠(SONGS)

繼去年第 1 屆高峰會上南加州愛迪生電力公司(Southern California Edison, SCE)之副總裁兼核能主管 Thomas Palmisano 演講之後，今年由 San Onofre 核能電廠(SONGS)除役計畫主任 Ed Avella 報告過去一年來[2]，SONGS 2&3 號機的除役進度，其中完成事項包括：美國核管會接受了 SONGS 停機後除役計畫報告(PSDAR)、照射過燃料管理計畫(IMFP)、及除役經費預估(DCE)等，此外核管會也核准了停機後緊急計畫區及運轉技術規範的修訂申請。另外從 Avella 主任的簡報中得知，SONGS 已經決定擴建現有乾式貯存場，不同於現有 50 個水平式的 NUTHOMS 乾式貯存桶(共 1187 束用過核子燃料)，新的方式將採用 Holtec 公司 UMAZ 地下型的貯存系統，並預計自 2016 年起開始施工，於 2017-2019 年間陸續將現貯存於燃料池內的 2668 束核子燃料移置於 75 個乾式貯存桶中。而 SONGS 整廠除污及拆除工作則預計於 2017-2027 年間來執行；最後在廠區復原的工作方面，則期望於 2028- 2033 年間執行完畢。至於總計 3,855 束之用過核子燃料的最終處置，仍然等待能源部的接收及處理，在此之前仍需置放於廠區內。Avella 主任表示民眾漸漸理解及認知因為能源部的無法提供最終處置設施，使得用過核子燃料必須長時間置放在廠區的事實，然而對於外部各利害相關者而言，如何能夠儘早移出核子燃料是當務之先，這也包括了移至未來可能之集中式中期貯存設施。他也再次強調工業界要用較為淺顯語彙來溝通核能事務，並已在過去一年繼續辦理包括除役教育展、邀請民眾參觀 SONGS 電廠、建立 SONGS 網站及社群討論群組、發言室與與媒體間互動等活動。以上說明可看出 SONGS 電廠是採取 20 年拆除(DECON)的除役方式。

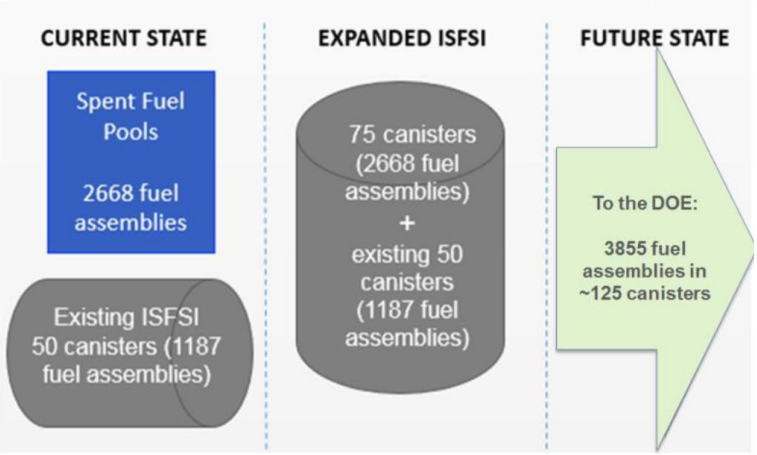

圖 3: San Onofre 2&3 號機用過核子燃料乾式貯存規劃[2]

Kewaunee 電廠

Kewaunee 電廠除役計畫經理 William Zipp 去年就曾在除役高峰會上報告該電廠的準備工作，今年則是更進一步說明過去一年的進展及未來的規劃。由於其母公司 Dominon 決定現階段以安全貯存(SAFSOR)的方式來執行除役，故現階段的任務是鋪

設一個新地基平面，以便未來能用來承接從用過燃料池移出的燃料。

圖 4 Kewaunee 電廠鋪設地基時的狀況(左)及地基完成後進行垂直式乾式貯存箱測試(右)

除上述硬體設施的興建，Zipp 經理也列舉了過去一年來向管制單位提出之申請案之進展[3]，包括以乾式貯存場為主體而修改之電廠技術規範、保安計畫、及緊急應計畫區等，未來一年仍要持續進行，另外要維繫用過燃料池之運作，在降低用電的考量下，仍然必須維持廠房系統適當的運轉，以防止結冰及生黴的狀況，廠區人力則會從剛停機時之 630 人降低到 50 人左右。最後在總結時，Zipp 經理以 Kewaunee 電廠的除役例子來看，各電廠至終都會走上除役一途，大家都必須及早有所規劃，而現有法規並沒有完整地規範整個除役過程，使得個案申請豁免造成持照者與管制者的負擔，故他也建議以過去管制經驗為基礎，來通盤檢討並制定整體性之法規架構及規範，此時正是一個起始點。

Vermont Yankee 電廠

Vermont Yankee 電廠自 2014 年 12 月 29 日起永久停止運轉，並於 2015 年 1 月 12 日將核燃料全部移出反應器至用過燃料池中，而自停機後的兩年內，主要就是為了進入安全貯存狀態(SAFSTOR)而準備，電廠除役主任 Paul Paradis 說明目前的工作重心[4]，在於除役準備活動、系統洩水封存、移除部分建物、修改保安範圍、持續環境監控、廠區進入睡眠狀態、完成第二個地基平面以供未來移轉用過燃料及乾式貯存之用。Paradis 主任表示根據該廠之除役計畫(PSDAR)，安全貯存狀態約有 40 年之久，真正的除污及拆除(D&D)作業要到 2068 年才開始，但電力公司與 Vermont 州政府間之協議，若除役信託基金的金額累積到足夠數量，此 D&D 作業可以提前實施。目前在燃料

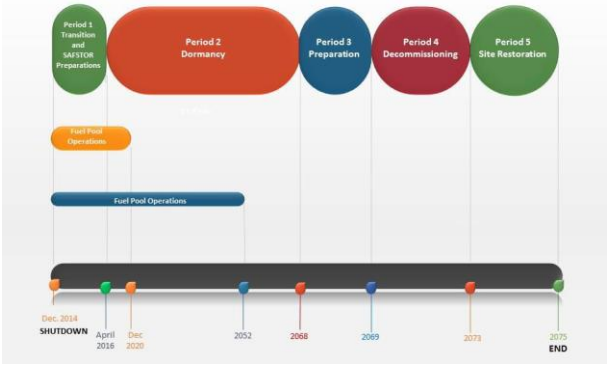

圖 5: Vermont Yankee 電廠 60 年除役時程預估[4]

池仍然運作的情況下，現場工作人員維持在 120 以上，但預計在 2020 年將所有用過核燃料移置乾式貯存場後，人數將低於 60 人。Paradis 主任最後分享到該廠自運轉到冬眠狀態時，整體工作文化上需要一段調適期，而用過燃料的處理必須儘早訂出方針，以便後續的除役規畫，另外電廠也需要顧問公司及協力廠商來協助執行工作等。

Zion 電廠

繼去年第一次除役高峰會後，Energy Solutions 經理 John Sauger 首先再次回顧 Zion 電廠的歷史[5]，自從原業主 CommEdi 公司於 1998 年停止運轉兩部 1080 MWe 的壓力式反應器後，接手的 Exelon 公司原規劃於 2015 年開始行除污及除役計畫，並預期至 2032 年完成廠區綠化復原。不過 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，並將利用 2010 年起 10 年內，完成拆除建物及復原廠區的工作。Sauger 經理這次主要係以一個 10 分鐘的短片來介紹現有除役的工作，包括已完成全部 61 個乾式貯存槽(ISFSI)之放置、完成切除反應器內部組件並移置乾式貯存場、完成廠區周邊大型槽之移除等，依目前作業進度預估，2020 年前可完成所有的拆除工作。Sauger 經理並說明到目前為止，在 Zion 電廠用過燃料移置乾式貯存場是除役歷史上數量最多而速度最快的，而整個作業的工作人員劑量累積低於原先預估值之 40%，這可歸功於先前在最低合理輻射量(ALARA)計畫中所投入的準備，此外在廢棄物運送及電廠執照終止之法規程序上，也未遭遇太多的挑戰，稱得上順利地執行除役的工作。

圖 6: Zion 電廠用過燃料全部移置廠區內乾式貯存場(資料來源 NAC International)

Humboldt Bay 電廠

位於加州 Euraka 郡的 Humboldt Bay 電廠具有混合型式的發電機組，其中 3 號機沸水式核能機組於 1963-1976 期間商業運轉，自 1976 停機後原訂進行耐震加強，但業主 PG&E 公司於 1983 年因經濟因素量決定將該機組進行除役。在 2008 年前將用過核子燃料移置乾式貯存場之前，本機組是屬於安全貯存(SAFSTOR)的狀態，等核子燃料移置後才開始進行除污及拆除工作。Humboldt Bay 電廠 3 號機除役經理 Kerry Rod 在今年會議中特別強調除役規劃及團隊合作的重要性[6]，他指出拆除工作之安全

是最優先的考量，而到 2015 年 7 月底之前，本除役工作已創造連續 1,000 天沒有任何工安事件的成績。目前的除役進度方面，除了燃料廠房(內含反應爐等設備)外，大部分的廠房皆已移除，原燃料池的水也已移至位於愛荷華州的貯存場，反應爐本體也進行分割處理(Segmentation)。接下來的重點就是如何規劃來燃料廠房之拆除，Rod 經理提到他們的團隊也曾到加拿大 Rocanville 礦區及洛磯山地鐵擴建案中，去觀摩其他工業界在處置混合土地壤切割(Cutter Soil Mixing, CSM)技術的應用，這項技術將來也將運用在 Humboldt Bay 電廠 3 號機的除役工作中。

另外有來自 US Ecology 公司的 Chad Hyslop 經理[7]，說明目前美國有 3 個進行除役中的核設施，其中 Zion 和 Humboldt Bay 為核能發電廠，另外則是西屋公司位為密蘇里州 Hematite 郡的燃料製造廠。US Ecology 公司在全美有 6 個廠址，可以接收放射性及一般性的廢棄物，2000-2014 年計接收 8 百萬噸，放射性及非放射性比例分為 45%和 55%。以 Humboldt Bay 3 號機產生的廢棄物為例，目前已運送 1,500 次的廢棄物到各低放貯存場，US Ecology 公司就接收了其中的 90%。圖 7 運送液體及固體放射性廢棄物到愛荷華州廠區的情形。

圖 7 Humboldt Bay 電廠液態(左)及固態(右)低放射性廢棄物運送至愛荷華州貯存場[7]

先期除役工作準備

除了前述已停機並開始進安全貯存(SAFTOR)或是拆除(DECON)階段的電廠之外，本次高峰會另有美加各一個運轉中電廠，已經開始規劃未來停機後之除役工作。

Oyster Creek 電廠

位於新澤西州之 Oyster Creek 沸式組機組預計於 2019 年停止運轉，其業主 Exelon 電力公司目前擁有全美最多之 23 部核能機組，分佈在 6 個州之 14 個廠址。因為其眾多的機組群未來遲早需面對除役工作，故 Exelon 電力公司也已有一套規劃除役之

標準工作流程。用過核子燃料及除役部門主管 Pam Cowan 今年係連續第二年參加高峰會，她以一張流程圖來說明該公司的做法[8]，原則上若某個機組將於 5 年內停機並開始除役，就必須啟動所謂「除役過渡方案」，尋找並確認公司總部及現場之除役負責人，並開始有關與外界溝通的工作。最後再進一步依法向管制單位提出除役計畫、執行現場過渡方案、執行人力資訊管理、系統分類過濾方案等。另因美國核管會目前正在研議建整合一套更為完整的除役法規，故 Exelon 公司也將積極配合核工業，像是核能協進會等組織，向管制單位提出具體可行的修法建議。

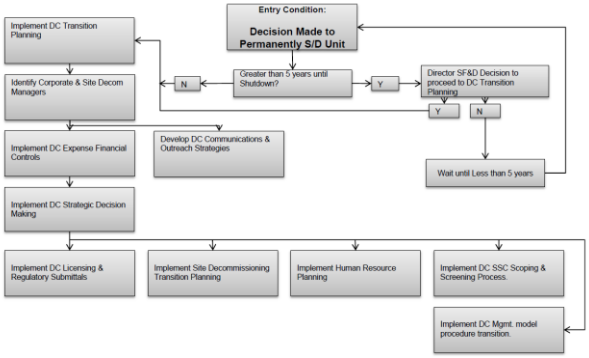

圖 8: Exelon 公司除役工作準備流程[8]

Pickering 電廠

位於加拿大安大略省之 Pickering 電廠擁有 8 部 CANDU 型重水式核能機組，其業主為安大略電力公司(OPG)，8 部機組中之 2&3 部機目前已停機並處於 SAFSTOR 狀態，至於其部 6 部機組，均已陸續完成翻修並運轉中，依目前規劃將運轉到 2020 年後停機， OPG 核能除役副總裁 Jerry Keto 在今年高峰會向與會人員報告目前已經預期會面臨的衝擊[9]，包括員工、公司、安大略省電力市場、社區、及 CANDU 重水式科技等，尤其因為這是第一次有此型重水式機組的除役，尚無先例可以參考。雖然如此，依其簡報內容可以看出與現有除役電廠相似做為，亦即在用過核子燃料完成移置乾式貯存場前，係採取 SAFSTOR 之安全貯存，預計 2040 年後才會準備並開始拆廠的作業。Keto 副總裁表示加拿大核能安全委員會(CNSC)要求各電廠需有完整的核能財務，而 OPG 公司本身即有用過核子燃料與除役等兩個分開的基金，來做為永久停機後處理所需費用。

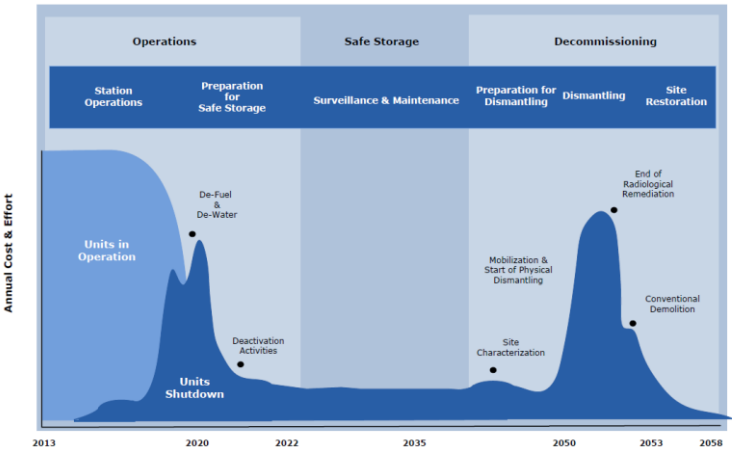

圖 9: OPG 所屬電廠除役各階段經費相對大小[9]

Keto 也簡報了 Pickering 電廠用過核子燃料及重水的後續處理規劃步驟，未來機組永久停機後，燃料束將移轉到燃料池中濕式置放 10 年，之後才能陸續移至乾式護箱內，並等待最終地底深層的貯藏。6 個運轉 CANDU 爐心之移除預估要 18 個月，用過燃料池完成移除則至少需要 10-13 年的時間。重水則在爐心移除後再陸續裝桶貯存，也需運往中長期的貯存設施，目前預估將有 75 萬加侖(約 15,000 桶)的重水量。Keto 副總裁最後提出目前有關除役經費的支出都呈現上升的趨勢，例如由 2012 預估之 36 億元上升到 50 億元，其增加的原因主要為維持電廠安全狀態所需的人員數、維持電廠暖房及明亮度、廢棄物的分類及裝箱、其他一些電廠設施的修改等，而這可能是該公司有史以來最複雜的費用估算。

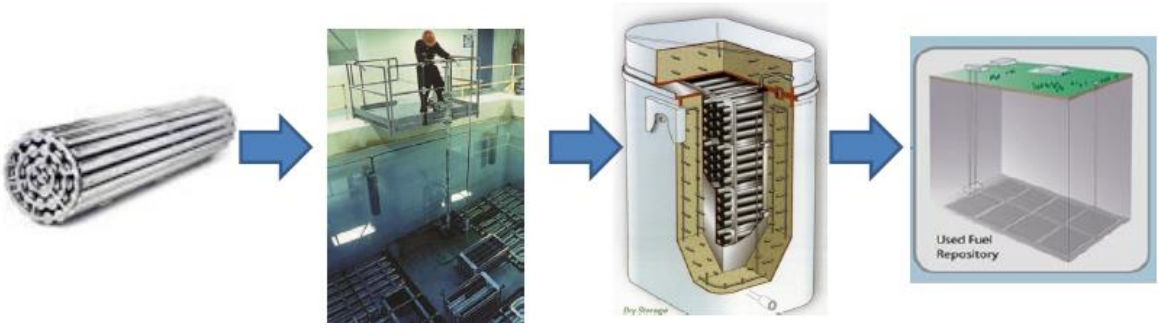

圖 10 CANDU 型反應爐燃料濕式、乾式、及最終處置示意圖 [9]

綜合以上各電廠除役規劃或執行的經驗來看，基本都要歷經安全貯存(SAFSTOR)的階段，只是時間上從 10 年到 40 年不等，而各電力公司或業主則利用此期間來建置乾式貯存場，以便將用過核子燃料由濕式貯存，移置成為乾式貯存，至於護箱的型式，無論地上或地下、垂直或水平式，都有電廠在使用中或計劃將要使用。另外，目前正在進行大規模拆廠作業電廠(Zion & Humboldt Bay)，均是在有乾式貯存場的狀況下，才得以順利進行拆除工作。而美國境內已經在使用中的放射性廢棄物處理場，可以接收及容納各核能電廠產生之中低放射性廢棄物，也是執行電廠除役工作不可或缺的條件。

參考資料

1. Andrew Persinko, New Decommissioning Rulemaking, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
2. Ed Avella, Decommissioning Update on San Onofre, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
3. William Zipp, Kewaunee Decommissioning Transition to SAFSTOR, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
4. Paul Paradis, The Vermont Yankee Experience, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
5. John Sauger, EnergySolotions Commercial Reactors Decommissioning Management Model, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
6. Kerry Rod, Humboldt Bay Power Plant Decommissioning Update, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
7. Chad Hyslop, Decommissioning LARW Transport & Disposal, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
8. Pam Cowan, Transition to Decommissioning, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.
9. Jerry Keto, Pickering SAFSROR and Decommissioning- A Challenging Project, 2nd Nuclear Decommissioning & Used Fuel Strategy Summit, Charlotte, North Carolina, October 5-6, 2015.