

出國報告(出國類別：考察)

## 美國核能設施及輻射分析實驗室 之除役實務作業考察

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：楊昌鵬 副主任

陳宏明 課長

王耀聰 專員

林烜孝 專員

派赴國家：美國

出國期間：107年6月12日至107年6月21日

報告日期：107年8月15日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

美國核能設施及輻射分析實驗室之除役實務作業考察

頁數 36 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/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

楊昌鵬/台灣電力公司/放射試驗室/副主任/(02)2638-1068#203

陳宏明/台灣電力公司/核能後端營運處/課長/(02)2635-7210#2246

王耀聰/台灣電力公司/放射試驗室/專員/(02)2638-1068#313

林烜孝/台灣電力公司/第一核能發電廠/專員/(02)2638-3501#3752

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：107.06.12 ~ 107.06.21 出國地區：美國

報告日期：107.08.15

分類號/目

關鍵詞：阿崗國家實驗室( Argonne National Laboratory, ANL )、Zion Nuclear Power Plant、GEL Laboratories、Barnwell Disposal Facility、Bear Creek Processing Facility

內容摘要：(二百至三百字)

核能電廠除役期間，台灣電力公司放射試驗室負責「環境輻射監測及相關試樣分析檢測」任務，並且肩負「場址復原推動小組」之工作。目前本公司面對核能電廠除役輻射特性調查有關廠區環境試樣與系統管路試樣之難測核種取樣方法、數量、分析項目及最低可測活度(MDA)等議題，急需參考國外除役電廠之實務作法與其法規要求，並與相關作業或研究單位建立交流合作管道，精進難測核種分析技術，因此在核一廠進入正式除役階段前，選派專業人員赴美國核能設施及輻射分析實驗室進行交流，帶回實務作業經驗及技術，其預期效應將對台電公司進行中之核電廠除役業務推展有即時的助益。

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

## 目 錄

行政院及所屬各機關出國報告提要 .....	i
目 錄 .....	ii
一. 出國目的 .....	1
二. 出國行程 .....	2
三. 考察內容摘要 .....	3
3.1 參訪阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL) .....	3
3.1.1 前言 .....	3
3.1.2 參訪阿岡國家實驗室環境科學部門 .....	4
3.2 參訪除役中核能電廠 Zion Nuclear Power Plant .....	10
3.2.1 前言 .....	10
3.2.2 Zion 電廠除役作業及廠址復原狀況 .....	11
3.2.3 Zion 電廠目前除役進度 .....	15
3.2.4 綜合討論 .....	16
3.3 參訪輻射分析實驗室 GEL Laboratories .....	18
3.3.1 前言 .....	18
3.3.2 GEL Laboratories 參訪 .....	19
3.3.3 綜合討論 .....	23
3.4 參訪低放射性廢棄物處置場 Barnwell Disposal Facility .....	25
3.4.1 前言 .....	25
3.4.2 巴恩韋爾處置設施 Barnwell Disposal Facility .....	25
3.4.3 廢棄物處置 .....	27
3.5 參訪熊溪廢棄物處理設施 Bear Creek Processing Facility .....	30
3.5.1 前言 .....	30
3.5.2 熊溪廢棄物處理設施 Bear Creek Processing Facility .....	30
四. 心得與建議 .....	34

## 一. 出國目的

核能電廠除役期間，台灣電力公司放射試驗室負責「環境輻射監測及相關試樣分析檢測」任務，並且肩負「場址復原推動小組」之工作。目前本公司面對核能電廠除役輻射特性調查有關廠區環境試樣與系統管路試樣之難測核種取樣方法、數量、分析項目及最低可測活度(MDA)等議題，急需參考國外除役電廠之實務作法與其法規要求，並與相關作業或研究單位建立交流合作管道，精進難測核種分析技術，因此在核一廠進入正式除役階段前，選派專業人員赴美國核能設施及輻射分析實驗室進行交流，帶回實務作業經驗及技術，其預期效應將對台電公司進行中之核電廠除役業務推展有即時的助益。

預定達成目標為：

- (一) 獲取國外核能電廠除役期間系統、管路，及環境取樣之難測核種分析及比例因數，以建立相關實務分析技術經驗。
- (二) 獲取國外除役核能電廠之 RESRAD code 選用合理參數與評估，建立各個關鍵核種之合理 DCGL，作為未來廠址土地再利用之依據。
- (三) 獲取廠區環境、建物之輻射特性調查及廠址最終輻射偵測的移動式高解析度加馬能譜分析系統實務應用經驗。
- (四) 獲取國外除役核能電廠之地下水及土壤汙染監測、整治及管理 etc 實務技術經驗。
- (五) 建立輻射分析實驗室相互合作交流管道，與國際組織或專家進行樣品分析技術交流。
- (六) 參訪放射性廢棄物最終處置場，以獲得該場對放射性廢棄物的接收準則與文件，及其最重處置。
- (七) 參訪放射性金屬廢棄物處理場，以獲得該場對金屬廢棄物的減容作業與外釋標準，及其最終處置。

## 二. 出國行程

本次出國考察行程，主要集中在美國核能設施及輻射分析實驗室之除役實務作業，共計參訪了美國阿岡國家實驗室(ANL)及 GEL 輻射分析實驗室、除役中 Zion 核能電廠及 Barnwell 和 Bear Creek 兩間廢棄物處置設施等。出國行程如表 2-1 所列，考察日期為民國 107 年 6 月 12 日至 6 月 21 日，共計 10 天。

表 2-1 出國行程表

日期	地點與行程	工作內容
6 月 12 日	台北→美國芝加哥	去程
6 月 13 日	美國芝加哥	前往 Argonne National Laboratory 參訪及進行除役技術交流
6 月 14 日	美國芝加哥→美國查爾斯頓	前往 Zion Nuclear Generating Station 參訪及進行除役技術交流；結束後自美國芝加哥前往美國查爾斯頓
6 月 15 日-16 日	美國查爾斯頓→美國巴恩韋爾	前往 GEL laboratory 參訪及進行除役技術交流；除役電廠相關資料整理
6 月 17 日-18 日	美國巴恩韋爾→美國諾克斯維爾 (因班機延誤造成無法順利轉機，晚上於轉機點美國亞特蘭大國際機場附近住宿，隔天前往預定目的地美國諾克斯維爾)	前往 Barnwell 廢棄物處置設施參訪；結束後自美國巴恩韋爾前往美國諾克斯維爾
6 月 19 日	美國諾克斯維爾→美國舊金山	前往 Bear Creek 廢棄物處置設施參訪；結束後自諾克斯維爾經達拉斯轉機至舊金山
6 月 20 日-21 日	美國舊金山→台北	回程

### 三. 考察內容摘要

#### 3.1 參訪阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)

##### 3.1.1 前言

Argonne 的出生源自芝加哥大學科學家 Enrico Fermi 的曼哈頓計劃 - 於 1942 年 12 月 2 日創造了世界上第一個自我維持的核反應。

1946 年 7 月 1 日，該實驗室被正式特許為 Argonne 國家實驗室，開展“核子學合作研究”。應美國原子能委員會的要求，它開始為國家的和平核能計劃開發核反應器。在 20 世紀 40 年代末和 50 年代初期，Argonne 實驗室搬到位於伊利諾州 Lemont 一個更大的地方，並在愛達荷州偏遠地區建立了一個名為“Argonne-West”的實驗室，以進行進一步的核研究。

緊接著，實驗室設計並建造了世界上第一座重水反應爐 - Chicago Pile 3，以及愛達荷州的實驗性增殖反應爐 1 號，這個反應爐點亮了四個燈泡，在 1951 年完成了世界上第一個的核能發電。而從 Argonne 實驗所獲得的知識也成為目前全球發電主要商用反應爐的設計基礎，還幫助設計了世界上第一艘核動力潛艇 Nautilus 號的核反應爐。

目前，Argonne 國家實驗室是美國能源部下在科學與工程研究方面最大的國家實驗室之一，其目標在解決潔淨能源、環境、技術、及國土保安方面之國家最重要的課題，其任務在研發世界級的科技應用到國家的社會需要。針對國家社會的課題挑戰，Argonne 國家實驗室也與相關大學、工業界、其他實驗室合作開發新的解決方法。



圖 3.1.1 阿崗國家實驗室

依據 2017 年的資料

- ANL 全年經費：\$750 million
- 人力部分：所有員工 - 3,200 人、博士後研究員 - 270 人、研究生和本科生 - 569 人、合聘教授 - 274 人；設施使用人員 - 8,300 人
- 研究部分：16 個研究組(divisions)、5 項國家級科學設施

### 3.1.2 參訪阿岡國家實驗室環境科學部門

本次參訪行程主要是拜訪阿岡國家實驗室環境科學部門的 RESRAD 程式研發者余家禮博士及鄭靜芝博士，討論國外除役核能電廠之 RESRAD code 合理參數的選用與評估，以建立我國核能電廠各個關注核種之合理 DCGL，作為未來廠址土地再利用之依據。另外也對於廠區環境、建物之輻射特性調查及廠址最終輻射偵測的移動式高解析度加馬能譜分析系統實務應用經驗進行討論，並且討論隔天一同參訪 Zion 電廠的行程。



圖 3.1.2 楊副主任說明本國核能電廠除役規畫

### 導出濃度指引水平 DCGL

依據核子反應器設施管制法施行細則第十七條規定，核子反應器設施之除役，其拆除後之廠址輻射劑量符合非限制性使用者，其對一般人造成之年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗。為確保除役後廠址之殘留輻射對一般人造成之年有效劑量不超過法規限值，需透過執行最終狀態輻射偵檢，確認個別污染核種之污染程度是否達法規外釋標準。

參照美國核電廠除役經驗，透過 RESRAD 劑量模擬程式，以劑量為基準的廠址外釋標準，轉換為所對應的放射性核種活度限值，稱為導出濃度指引水平(Derived Concentration Guidance Levels, DCGLs)，以供廠址執行最終狀態輻射偵檢之用，確認廠址殘留輻射是否符合法規之要求。

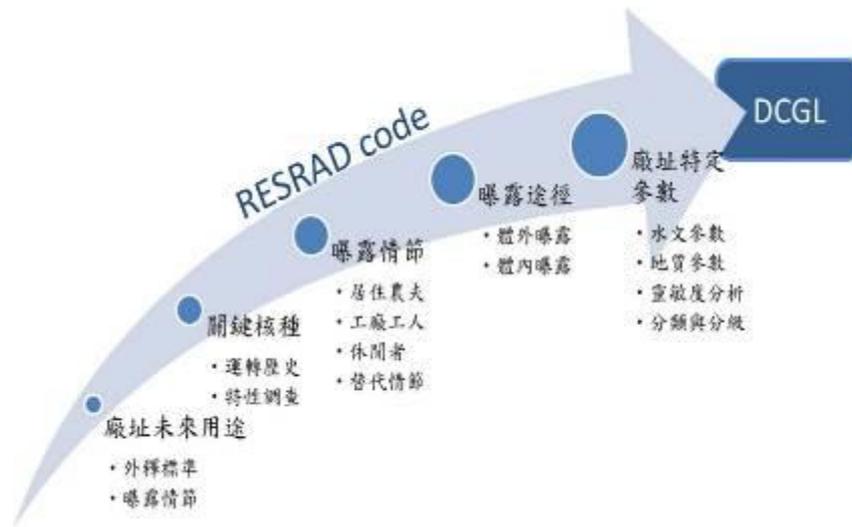


圖 3.1.3 RESRAD 程式推導 DCGL 之程序

### 關注核種

關注核種是指核能電廠除役外釋時，土地、建物殘留的重要核種，也是推導 DCGL 的重要參數。當選定除役廠址未來用途後，下一步驟即需確認關注核種的數量與種類，也是輻射特性調查主要項目之一。潛在的關注核種是從 NUREG/CR-3474《反應器材料被活化的長半化期核種》，及 NUREG/CR-4289《商用核能電廠內及週遭殘留之污染核種》以及廠址歷史評估獲得。由於各放射性核種之物理與化學性質不同，核種於環境介質中傳輸速度及對人體的危害也有差異，因此須逐一評估每個核種所對應之 DCGL。

核一廠參考歷年運轉出現核種、蘭嶼暫貯之核一廠放射性廢棄物核種以及美國洪堡灣電廠及 Connecticut Yankee 電廠，列出核一廠除役後殘留於廠址內的 20 個關注核種，如表 3.1.1 所示。

表 3.1.1 核一廠除役後的關注核種

核種類型(數量)	核種清單
易測核種(6)	Co-60、Cs-137、Sb-125、Cs-134、Eu-152、Eu-154
難測核種(14)	H-3、C-14、Fe-55、Ni-63、Sr-90、Tc-99、I-129、Cm-243、Cm-244、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241

## RESRAD 曝露途徑

RESRAD 推導 DCGL 的曝露途徑分為四大部份：

- (1) 射源分析：說明射源釋放至環境的速率。
- (2) 環境傳輸分析：說明核種由射源遷移至人員接受曝露位置的途徑，以及核種對應於途徑之遷移率。
- (3) 劑量/曝露分析：說明劑量轉換因子(dose conversion factor, DCF)，各曝露途徑皆有其對應之 DCF。
- (4) 情節分析：說明人類活動型態，用以決定核種釋放至環境的速率及人員在某位置接受曝露的持續時間。

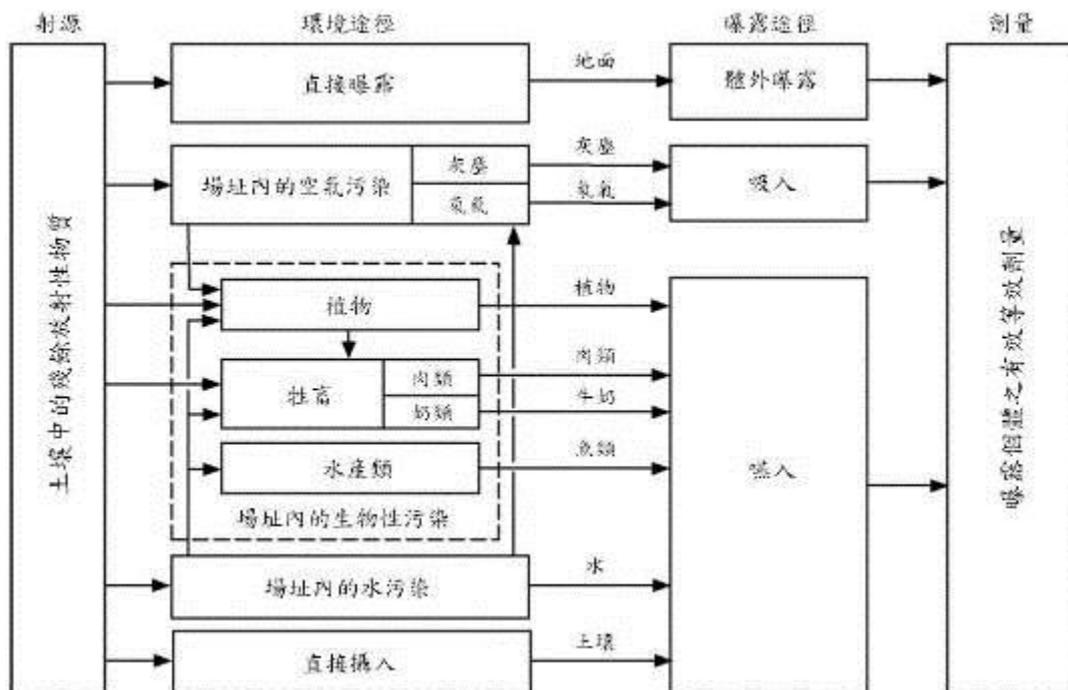


圖 3.1.4 暴露途徑說明

## RESRAD 參數說明

RESRAD 程式有 145 個參數，可細分為 89 個物理型參數、16 個行為型參數、10 個代謝型參數、27 個複合型參數，以及 3 個未分類參數。

- (1) 物理型參數：藉由廠址中射源、位置以及地理特性來決定，即不受曝露族群改變所影響的參數，如廠址中的水文地質學、地球化學，以及氣象學特性等參數。
- (2) 行為型參數：取決於輻射劑量接受者的行為及曝露情節假設相關的參數。
- (3) 代謝型參數：是指潛在接受者的代謝特性，因不同的人口年齡層而有不同的參數值。對一般人群而言，新陳代謝特性的參數可用一般人群的平均值來定義。

核一廠土地外釋區域採工業使用，故廠址暴露情節採用工業情節，使用 RESRAD 程式輸入參數為 26 個，主要分為地質、水文及天氣、其他三大類，其廠址輸入參數如表 3.1.2 所示：

表 3.1.2 核一廠址輸入參數

輸入參數	數值	輸入參數	數值
Cover depth (表土層厚度)	0m	Precipitation (降雨量)	2033.9mm
Density of cover material (表土密度)	N/A	Irrigation (灌溉量)	0
Cover erosion rate (表土侵蝕速率)	N/A	Runoff coefficient (逕流係數)	0.3
Area of contaminated zone (汙染帶面積)	29409.7m <sup>2</sup>	Inhalation rate (空氣吸入率)	8400m <sup>3</sup>
Thickness of contaminated zone (汙染帶土壤密度)	2m	Mass Loading for inhalation (空氣粒子濃度)	35 μg/m <sup>3</sup>
Density of contaminated zone (汙染帶土壤密度)	1.4546g/cm <sup>3</sup>	Exposure Duration (暴露期間)	30year
Contaminated Zone erosion rate (汙染帶土壤侵蝕速率)	0.00142 m/y	Indoor dust filtration factor (室內塵過濾係數)	0
Contaminated Zone total porosity (汙染帶土壤總孔隙率)	0.41	External gamma shielding factor (外部加馬屏蔽係數)	0
Contaminated Zone field capacity (汙染帶田間含水量)	0.064	Indoor time fraction (室內占用率)	0
Contaminated Zone hydraulic conductivity (導水度)	5.022m/yr	Outdoor time fraction (戶外占用率)	0.298
Contaminated Zone b parameter (特定土壤指數參數)	0.632	Soil ingestion (土壤嚥入量)	18.25g/yr
Evapotranspiration coefficient (蒸散係數)	0.625	Depth of soil mixing layer (土壤混合層)	0.23m
Wind speed (風速)	2.7634m/s	Humidity in air (空氣濕度)	20.645g/m <sup>3</sup>

在余博士及鄭博士初步的審視過核一廠址 RESRAD 使用參數後，對於逕流係數(Runoff coefficient)、室內塵過濾係數(Indoor dust filtration factor)、外部加馬屏蔽係數(External gamma shielding factor)以及室內佔用率(indoor time fraction)這四個係數應該再進行探討，並且建議參考《Data collection handbook to support modeling impacts of radioactive material in soil and building structures》內容後，再行修正。

### 移動式高解析度加馬能譜分析系統

在現場移動式高解析度加馬能譜分析系統經驗分享是由 Mr. LePoire 進行解說。首先針對土壤中放射性核種現場即時量測的個案作簡單的說明，包含橡樹嶺的 K-25 氣體擴散工廠、南卡羅萊納州的薩凡納河核能專用地(Savannah River Site)、阿什蘭的使用過廠區復原行動計畫廠區(Ashland FUSRAP Site)以及俄亥俄州的弗納爾德鈾加工設施(Fernald)。接著 Mr. LePoire 提出橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)針對手提式偵檢器對於土壤中耗乏鈾(depleted uranium)的即時偵檢能力評估分析經驗進行簡單的說明。

Mr. LePoire 也提到使用即時偵檢儀器的結果也可能會很大的差異，所以降低不確定性的管理策略對於除汙方案相當重要，Mr. LePoire 也建議參考美國環保署對於不確定性管理的三合一框架概念(The Triad Framework)，包含系統性的方案規畫、動態作業策略以及即時量測技術以降低即時量測時的不確定性，得到更好的除汙方案。

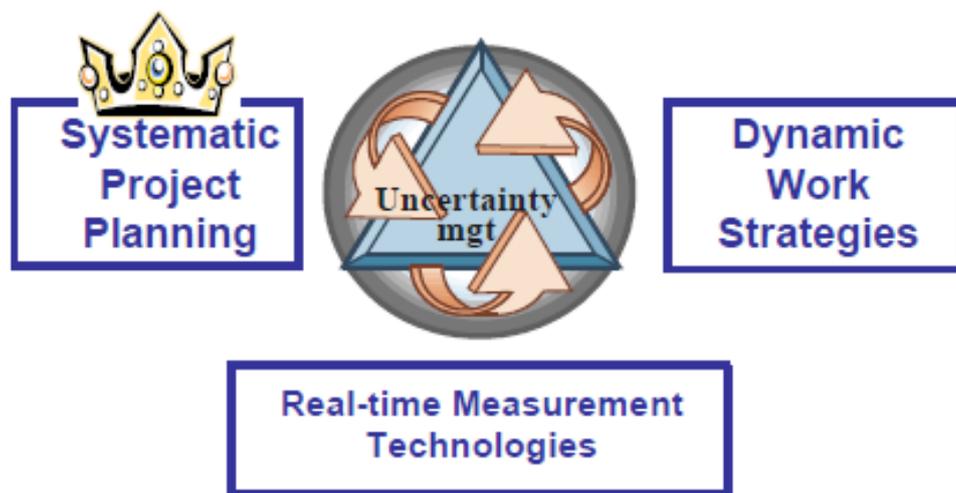


圖 3.1.5 三合一框架(The Triad Framework)

而最佳的決策品質則依靠數據品質鏈(Data Quality Chain)中最薄弱的環節。如圖 3.1.6 所示，每個環節即代表一個分析結果品質的變數，在所有的數據品質鏈中的所有環節都必

須擁有完整的數據，才能提高決策的品質。

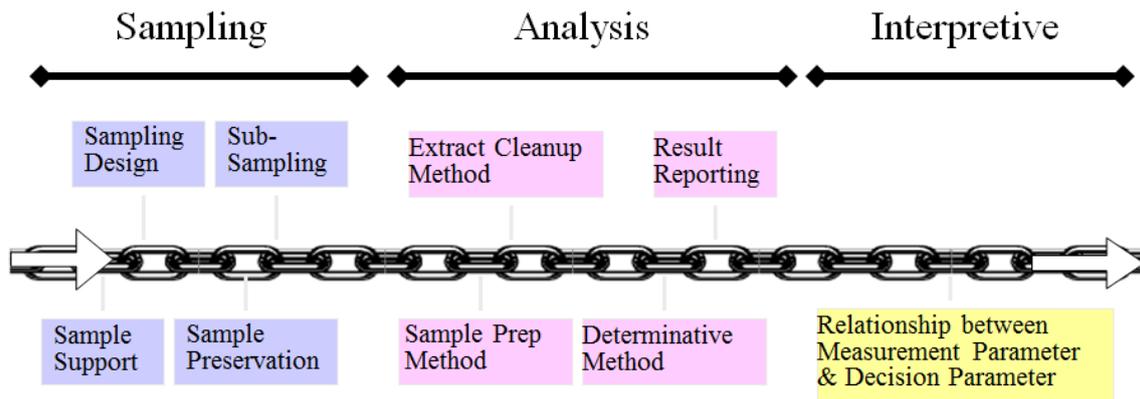


圖 3.1.6 數據品質鏈(Data Quality Chain)



圖 3.1.7 參訪團隊與阿岡國家實驗室主管合影

## 3.2 參訪除役中核能電廠 Zion Nuclear Power Plant

### 3.2.1 前言

Zion 核電廠建於 1973 年，屬於 Commonwealth Edison (ComEd) 公司旗下的財產，位於密西根湖畔，與伊利諾州海灘公立公園相鄰，主要為芝加哥及北伊利諾州的住宅和商業提供電力，其反應器型式與本公司核三廠同為壓水式反應器，機組裝置容量也相當(1,040 MW)。

Zion 電廠自 1997 年 2 月 21 日因操作意外事件停機後即未再起動，主要是經評估修復後再啟動已不具經濟效益。Exelon 公司 (ComEd 電力公司之母公司) 由於預算問題，決定該廠於 1998 年 2 月 13 日退役，所有的燃料在 1998 年 3 月 9 日永久移出反應爐並暫存於廠內的燃料池中，整體規劃是採設施長期安全儲存 (SAFSTOR) 直到 2 號機運轉執照於 2013 年 11 月 14 日過期為止，再進行除汙及拆除作業。Exelon 公司也在 2000 年 2 月 14 日提出停機後除役活動報告 (PSDAR)、廠區花費預估和燃料管理計畫。

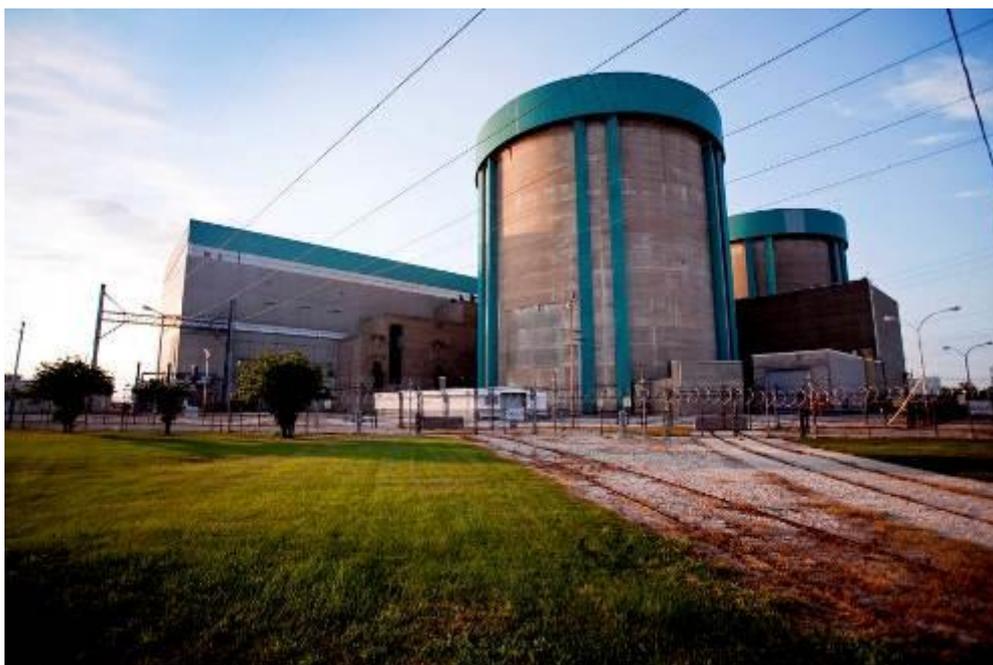


圖 3.2.1 美國 Zion 核能電廠(除役前)

2010 年 9 月，美國核管會批准 Exelon 公司將執照轉讓給鹽湖城的 EnergySolutions 以利加速 Zion 電廠的除役作業，該公司下又成立專門處理核廢料的公司 ZionSolutions，進行核電廠的除役工作，拆除後的廢棄物直接運送到位於猶他州的 EnergySolutions 處置廠區。

除汙及拆除作業於 2011 年開始執行，於 2015 年 1 月完成燃料轉移至用過核子燃料乾式儲存設施 (ISFSI)，ISFSI 的保全及監測在除役工作結束前都將由 ZionSolutions 負責，待

除役工作結束後，ISFSI 及燃料的相關執照將轉回給 Exelon 公司。在該核電廠除役和建築物拆除後，將執照再轉讓回 Exelon 公司，Exelon 屆時再決定將土地作為何種用途。

### 3.2.2 Zion 電廠除役作業及廠址復原狀況

#### 除役作業

核能電廠除役是一個必須謹慎規劃，並且依照條理執行的過程，必須耗時多年才能完成。除役意味著放射性組件和物質的移除和處置，而 Zion 電廠除役作業所產生的全部低放射性廢棄物將會移出伊利諾州以外，運送至 EnergySolutions 位於猶他州的低放射性廢棄物最終處置場進行處置。除役也包含廠址內所有具有汙染潛在可能區域的除汙作業，待除役作業完成後，廠址將進行最終輻射偵測以確保符合外釋標準。除役期間 ZionSolutions 將持有並且負責 Zion 電廠 NRC 相關執照。此外，NRC 會雇用一個獨立的驗證承包商以監督 ZionSolutions 的工作狀況並且確認廠址有達到 NRC 執照終止的標準。

法規的監督由 NRC 執行，但其他聯邦及州政府機構也在確保工作人員和大眾健康與安全的監督上扮演相當重要的角色，包含美國職業安全衛生署 (Occupational Safety and Health Administration, OSHA)、美國交通運輸部 (Department of Transportation, DOT)、伊利諾州緊急事務管理署 (Illinois Emergency Management Agency, IEMA) 以及伊利諾州環保署 (Illinois Environmental Protection Agency, IEPA)。

當 Zion 電廠除役作業完成且廠址可以達程非限制性使用外釋標準後 (變電所及用過核子燃料乾式儲存設施除外)，相關執照及所有權將轉移回 Exelon 公司。

#### 用過核子燃料乾式儲存系統 (ISFSI)

Zion 電廠的用過核子燃料乾式儲存系統使採用美國 NAC 公司 MAGNASTOR 系統設計，此乾式儲存系統也在 NRC 廣泛的審查後正式核可，本公司核能二廠所使用的乾式儲存系統亦同為美國 NAC 公司 MAGNASTOR 系統。在美國能源署 (Department of Energy, DOE) 的用過核子燃料最終處置規劃確定前，Zion 電廠的用過核子燃料將繼續儲存於廠區內。

為了遵循當地用過燃料儲存的規定，Zion 電廠的用過核子燃料將會儲存於廠區內遠離密西根湖畔的位置，在接近廠界的輻射也都與背景輻射相當。保全及最先進的監視系統也將全天候的監控用過核子燃料乾式儲存設施的狀況。



圖 3.2.2 用過核子燃料乾式儲存系統

### 放射性廢棄物運輸

大部分 Zion 電廠除役作業拆除的設備、管路及建築物殘骸都經由鐵路運輸到 EnergySolutions 位於猶他州克萊夫的低放射性廢棄物最終處置設施。這些處置的廢棄物都是被歸類為 Class A 的低放射性廢棄物（low-level radioactive waste, LLRW）。



圖 3.2.3 大型組件廢棄物鐵路運輸

所有的廢棄物都被封裝以符合美國交通運輸部（DOT）商業運輸的要求，運輸及安全計畫必須在運輸前提交美國交通運輸部（DOT）並且獲得許可。大型組件如反應器（Reactor Vessel）和蒸汽產生器（Steam Generator）將會被封裝並且完整的裝置在平台貨車的支架上

進行運輸，這些組件也屬於低放射性廢棄物，將一同經由鐵路運輸到 EnergySolutions 位於猶他州克萊夫的低放射性廢棄物最終處置設施。

放射性廢棄物運輸將經由衛星或其他通訊設備進行追蹤。ZionSolutions 也要求物流專長人才規劃將廢棄物移出伊利諾州的鐵路或貨車運輸方式，內容包括各種不同的層面，如取得當地及聯邦的執照及許可、運輸裝載及固定，以及交通工具的輻射偵檢。

鐵路運輸是大型組件或大量元件運輸中最具有經濟效益的方式之一，這個方式高度符合 Zion 電廠 Class A 的低放射性廢棄物的運輸作業，因此 ZionSolutions 也直接在 Zion 電廠廠區內搭建鐵路以利放射性廢棄物的運輸作業，但考量本公司核能電廠的位置，放射性廢棄物的鐵路運輸似乎較不可行。

### 放射性廢棄物處置

放射性廢棄物如管路、容器、閥和泵的移除，以及後續的偵檢作業可以確保 Zion 電廠的執照終止。Zion 電廠除役作業及場址復原作業所產生的大部分低放射性廢棄物都會送到 EnergySolutions 位於猶他州的最終處置設施，該設施目前處理美國境內超過 95% 的商業低放射性廢棄物處置容量。ZionSolutions 預估將會有數百萬立方英尺的低放射性廢棄物封裝並運輸到猶他州的最終處置設施。



圖 3.2.4 EnergySolutions 位於猶他州的克萊夫最終處置場

### 場址復原

場址復原包含在 Zion 電廠除役作業完成後，將無污染的設備、房屋及大型建築物的拆解及移除作業。ZionSolutions 將會把低於地面的開口或孔穴回填並穩固後，將廠區美化種

植植物以符合周圍環境的自然景觀。

在 ZionSolutions 的除役作業執行下，Zion 電廠的場址復原及後續有效利用將可以比原定計畫提前 12 年完成。

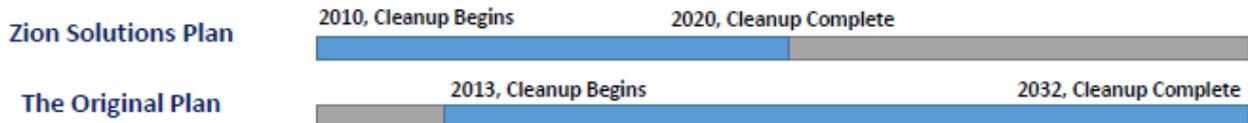


圖 3.2.5 ZionSolutions 和原定除役計畫期程比較

## 環境監測

下列幾項 Zion 電廠監測規畫在 NRC 及州政府的要求下已執行多年

### **Radiological Environmental Monitoring Program (REMP)**

此項監測規畫是由 NRC 所要求，規畫包括水生環境監測，這包含密西根湖的取樣分析，樣品分析 13 種放射性同位素，包含氬。許多魚樣及沉積物樣則是每半年取樣一次並分析 11 種放射性同位素。REMP 監測規畫結果於每年 Annual Radiological Environmental Operating Report (AREOR) 提報 NRC。

### **Radiological Groundwater Protection Program (RGPP)**

此項監測規畫也是由 NRC 所要求，規畫包含廠區內地下水監測井的取樣分析以及一處表層水（密西根湖）樣品。每季取樣一次並進行氬分析，另外要求每年進行難測核種的分析。RGPP 於每年 Annual Radiological Environmental Operating Report (AREOR) 中當作附件提報 NRC。

### **Radioactive Effluent Release Report**

最新提報 NRC 的報告是 2010 年的排放數據，顯示由 Zion 電廠排放的液體活度遠小於所有的規範限制。

### **National Pollution Discharge Elimination System (NPDES)**

此項規畫是由美國環保署 (EPA) 授權，包含延著密西根湖的 6 個取樣點。取樣頻度依照 NPDES 許可規定從一周 3 次到一季 3 次。樣品分析包含 pH 值、總懸浮固體、油和油脂、銅以及 PCBs。樣品分析結果依照 Discharge Monitoring Report (DMR) 要求每月及每季提報伊利諾州環保署。

### 3.2.3 Zion 電廠目前除役進度

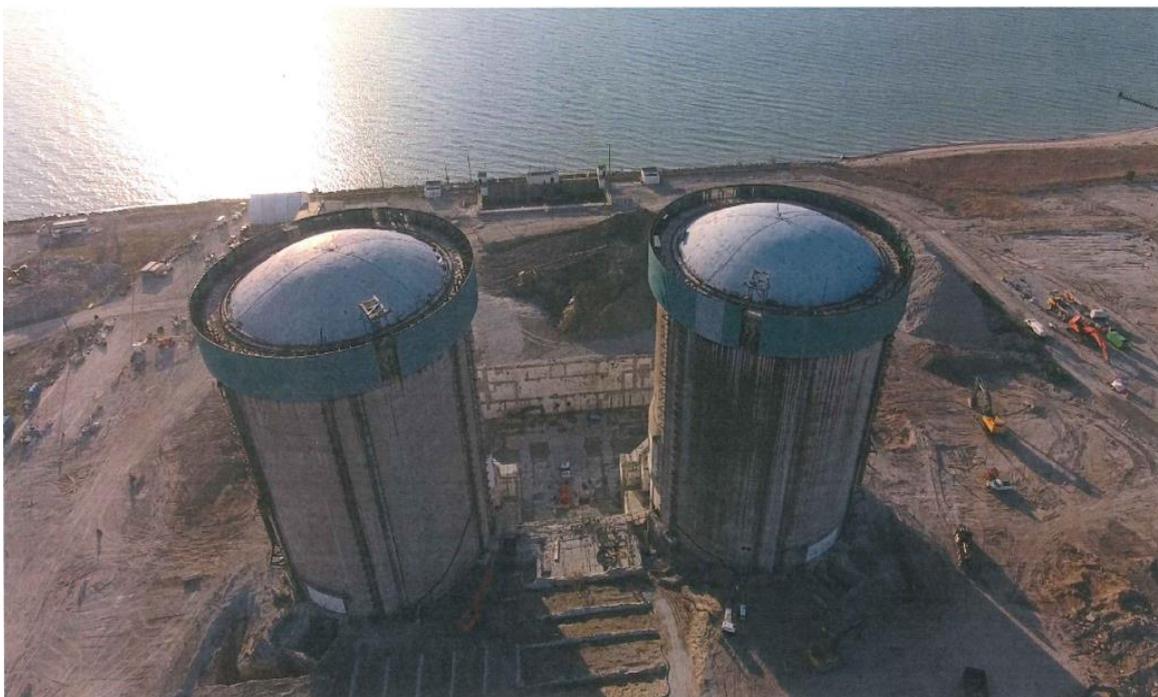


圖 3.2.6 美國 Zion 核能電廠目前除役進度

- 主要的設備/廠房之拆除/拆解均完成
- 待辦主要里程碑
  1. 廢水處理設施拆除作業
  2. 1 號機/2 號機拆除作業
  3. Class A 廢棄物移除 (Class B & Class C 廢棄物處置已完成)
  4. 場址復原作業
  5. 最終輻射偵測

#### **Zion 電廠污染整治規劃**

1. 於 2016 年 6 月與 IL EPA 進入自主輻射特性調查及污染整治規劃
2. 土壤與地下水取樣
3. 所有地下水樣品皆低於 screening criteria
4. 有 5 處確認必須進土壤整治的區域
5. 完成整治並將報告提交給 IL EPA
6. 於 2017 年 12 月收到 No Further Remediation(NFR)的通知信件
7. 未來廠址將為非限制性使用

## 主要花費項目

1. 乾式儲存的容器
2. 廢棄物處置
3. 用過核子燃料儲存的規劃及前置作業
4. 用過核子燃料乾式儲存設施場地設計及建置
5. 1&2 號機內部分割作業
6. 廠區維護及保全
7. 石棉整治作業
8. 汙染抑制準備及支援作業
9. 輻射防護
10. 燃料轉移作業
11. 1&2 號機反應器分割及處置
12. 輔助建築拆除及除役作業
13. 液態輻射廢棄物處理
14. 燃料架移除
15. 抑制建築的移除
16. 1&2 號機蒸氣產生器移除
17. 服務大樓拆除及回填
18. 計畫管理

### 3.2.4 綜合討論

Energy Solutions 期望透過完成 Zion 電廠的除役工作，來作為該公司在全球行銷除役產業之成功案例，目前除役工作已進入尾聲，預計今年向美國核管會申請後，於 2019 年將執照轉讓回 Exelon 公司。

Zion 電廠外圍空置土地的情境為 Resident Farmer，而廠區內的情境為 Basement Fill Model，未來對於大眾的唯一傳播途徑只剩地下水。另外因位於湖面下的管路拆除作業對環境影響衝擊過大，經過評估且主管機關也同意後，管路將保留不拆。

關於受影響區分類，依照 MARSISM 內容指引，Class 3 區域為沒有潛在汙染或汙染程度低微的區域，不超過顯著比例(10%-25%)之 DCGL 值；Class 2 區域為現在或過去具潛在汙染，活度是顯著比例之 DCGL<sub>w</sub> 值。但以 ZionSolutions 的分類方式，則是以 DCGL 值的

50%來作為 Class 2 和 Class 3 區域的分界點。而從因對環境衝擊過大而不拆除管路以及受污染區域的分類方是這兩個例子，可以了解到 EnergySolutions 的副總 Mr. Collin Austin 一在提醒我們執照者與管制者之間的良好溝通的重要性。

因 Zion 電廠已經進入除役作業最後階段，現場已經無法看到移動式高解析度加馬能譜分析系統的使用，僅剩檢測卡車裝載水泥碎塊的部分仍在使用。

美國目前已有低放射性廢棄物的最終處置設施，其低放射性廢棄物之處理或處置主要以成本為優先考量，如大型組件直接封裝進行處置。這一部分與國內情形較不相同，且國內最終處置場址尚未決定，在核能電廠除汙作業及廢棄物減容之需求皆高於美國。



圖 3.2.7 楊副主任代表致贈禮品予 ZionSolutions 主管

### 3.3 參訪輻射分析實驗室 GEL Laboratories

#### 3.3.1 前言

GEL 團隊(The GEL Group) 公司成立於 1981 年，總部位於南卡羅來納州的查爾斯頓，目前約有 325 名員工。在 1980 年代中期，為了符合顧客的需求，GEL 在分析服務項目中增加了環境評估及現場服務。經過幾次擴展，於 1988 年 GEL 增建設施並且移到了目前的所在位置。在美國能源部及國防部的協助支持之下，GEL 持續穩健地成長。於 1990 年代初期，GEL 發展了放射化學領域的量能，緊接著發展放射生物測定的量能。環境評估團隊在取樣、工業衛生及地球物理服務下也一同成長茁壯。



圖 3.3.1 The GELGroup 總部

GEL 團隊包含 3 家子公司和一家關係企業，3 間子公司分別為 GEL Laboratories、GEL Engineering 和 GEL Geophysics(現更名為 GEL Solutions)，以及一家關係企業 Cap Fear Analytical，分別服務的項目如下：

#### **GEL Laboratories**

環境化學 – 提供有機、非有機和特別分析

放射化學 – 於美國境內最大的放射化學實驗室之一，專門提供準確的分析數據

放射生物測定 – 檢測作業人員暴露劑量

分析支援及產品 – 提供各種軟體工具以協助樣品收集及數據的管理

#### **GEL Engineering**

環境評估及監測服務 – 解決環境顧慮、廠址復原及減少長期危機

土木及工業工程 – 協助工廠興建過程

調查服務 - 提供完整調查服務並維持最新的設備及製圖軟體

### **GEL Geophysics (現更名為 GEL Solutions )**

地下設施工程 – 準確及時解決地下製圖問題

地球科學服務 – 包含數位製圖、鑽井記錄、非破壞性測試及未爆彈偵測

調查服務 – 提供完整調查服務並維持最新的設備及製圖軟體

### **Cape Fear Analytical**

提供戴奧辛/呋喃和 PCBs 同系物的實驗室分析。

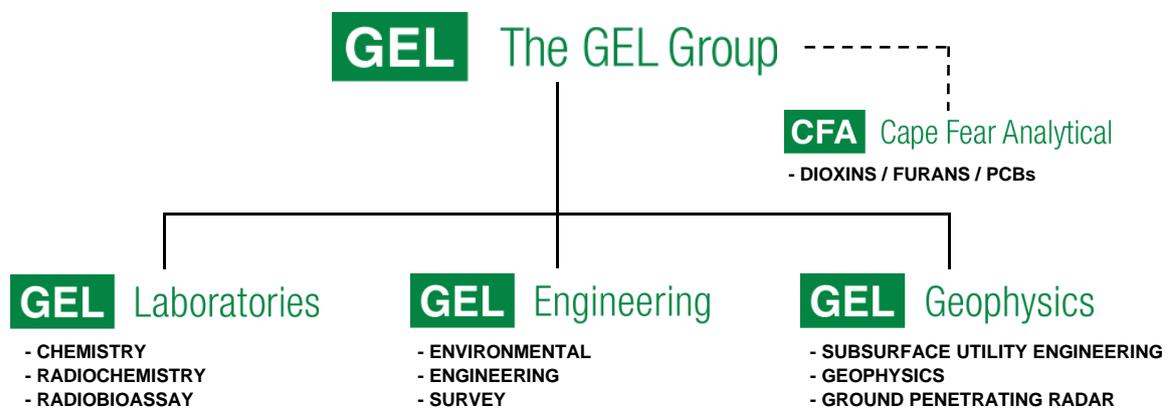


圖 3.3.2 The GEL Group 公司體系

### **3.3.2 GEL Laboratories 參訪**

本次主要參訪地點是與總部同樣位於南卡羅來納州查爾斯頓的 GEL Laboratories，該實驗室包含各式各樣的化學、放射化學及生物測定服務。在總員工數 325 人中，該實驗室就佔有 190 名專業分析人員，且該實驗室共有 4800 平方呎的空間，可容納相當大的量能。

GEL Laboratories 內有化學及放射化學兩大部門。化學部門可提供廣泛的有機、非有機和特別分析，該實驗室可以安全的處理各式各樣的物質，包含飲用水、廢水、地下水、土壤、油、汙泥、空氣微粒、濾紙、生物群、動物群、食物、危險混和物質、建築物殘骸、水泥等等。該實驗室持有高放射性活度物質證照以執行高活度樣品的有機及非有機分析，並且擁有各式各樣的檢測儀器以確保備援能力及高度量能。

GEL Laboratories 的放射化學部門被認為是美國最大、效率最高及設備最完善的商業放射化學實驗室之一，也是為數不多被認定有執行放射生物測定以檢測作業人員暴露劑量的實驗室。該實驗室所持有的放射物質證照及特殊設計的設施可以安全地接收、處理、分離層析所有樣品包含尿液、糞便等生物測定樣品到高活度的 D&D 樣品。而且該實驗室不僅

接收美國境內的檢測樣品，同樣也接收來自其他國家的檢測樣品。



圖 3.3.3 國際樣品接收

在進行放射性樣品接收時，即依照不同活度或污染程度進行分類，在分析與計測流程中分開處理，避免設備與樣品之間交叉污染的可能性，該實驗室放射性樣品接收處理分類如表 3.3.1 所示：

表 3.3.1 放射性樣品處理分類

放射性類別	活度	劑量率
Radioactive 1	< 37 kBq	< 5 uSv/hr
RAD 2	37 kBq – 3.7 mBq	5 uSv/hr -1mSv/hr
RAD 3	>3.7 mBq	>1 mSv/hr

The GEL Group 公司提供樣品管理從接收到數據讀取的硬體及軟體解決方案，包含報告、追蹤、分類及儲存。該實驗室於接收樣品時即使用 Barcode 系統，搭配自動數據轉移至 GEL Laboratories，可排除樣品描述錯誤及遺漏的風險，並確保與實驗室間有確實的通訊橋樑。實驗室也提供私有的顧客入口網頁，使顧客可以輕易並且安全的拿到所需的數據。

The GEL Group 公司在環境實驗室產業中屬於資訊科技的發展領導者，該公司自行發展的網路實驗室資訊管理系統(Laboratory Information Management System, LIMS)是當今產業中最新的科技。為了使顧客可以享受系統的便利性，GEL 提供顧客進入 GEL 線上

VPM(Virtual Project Manager)的途徑，使顧客可以快速的取得重要的分析數據、文件及資訊，對於樣品的前處理、分析、計測、及處置等流程進行追蹤管理。



圖 3.3.4 Barcode 系統及實驗室資訊管理系統(LIMS)

GEL Laboratories 在 2017 年完成了 300,000 次的測試量，除了相當多的專業實驗室人員外，實驗室也備有相當量能的儀器：

- Alpha spectrometers (384)
- Liquid scintillation counters (12)
- Gamma spectrometers (51)
- Gas flow proportional counters (96)
- LC-MS-MS (4)
- GC-MS (20) / GC-ECD/FID (12)
- X-Ray spectrometry (3)
- Radon emanation (24)
- Laser kinetic phosphorimetry (2)
- ICP-MS (5) / ICP-OES (4)
- Low Level Hg (2)
- HPLC (4)



圖 3.3.5 Gamma spectrometers 及 Alpha spectrometers

The GEL Group 公司擁有超過 41 個聯邦及州立的認證，包含美國國防部(DoD)、美國能源局(DOE)及國家環境實驗室認證計劃(NELAP)。在實驗室品質保證部分，亦花費相當大的心力維護，在參訪結束隔週將會有審核人員進行為期一週的認證作業，其認證頻度相當高，一年約有 25 次，相當於每兩週即有不同單位人員進行品質認證，其相關認證如下所示：

- ISO 17025:2005 accredited laboratory
- NQA-1 2008
- 10 CFR part 50 Appendix B
- Nuclear Procurement Issues Committee (NUPIC)
- DOECAP & DOELAP

GEL Laboratories 放射化學部門所提供的實驗室服務包含核能電廠除役作業輻射特性調查分析、放射性廢棄物特性調查分析、遠端實驗室支援、國際專案支援及放射生物測定，該實驗室於美國境內專案企劃經驗如下：

#### 核能電廠除役及廢棄物分析支援

- SONGS
- Maine Yankee
- Connecticut Yankee
- Big Rock Point
- Zion Power Plant
- Bruce Power (Canada)
- 40 active US nuclear plants

#### 除役作業/廢棄物處理分析支援

- UK Magnox
- Atkins/EnergySolutions
- Waste Control Specialists
- Permafix
- DOE & DOD
- Rocky Flats Closure Project
- Fernald Site Closure Project

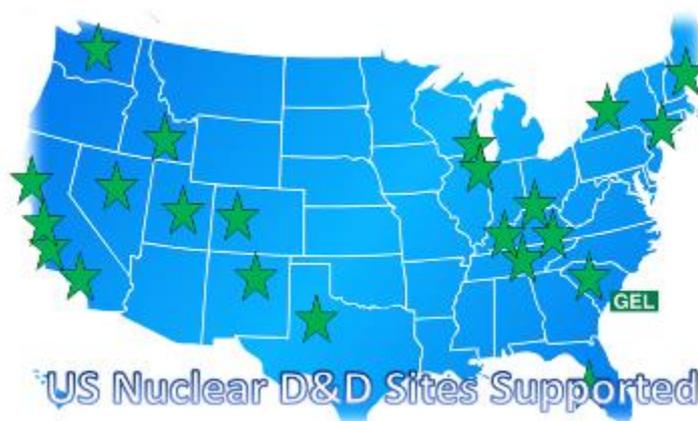


圖 3.3.6 美國境內核能電廠除役專案支援

除了美國境內的專案企劃經驗外，GEL Laboratories 也有國際專案企劃的經驗，包含英國、法國、加拿大、南美洲及日本。以日本為例，在福島事件之後，東京電力公司(TEPCO)尋求 EPRI 協助，EPRI 就與 GEL Laboratories 合作協助支援日本福島事故的實驗室檢測，也遠端支援 2 家食品公司的實驗室加馬計測系統。

### 3.3.3 綜合討論

由於本公司尚未有核能電廠除役相關經驗，因此藉由此次參訪向 The GEL Group 公司詢問其經驗，期望能給予一些實際的回饋。

依 The GEL Group 公司以其經驗說明，除役作業前期由於核能電廠主要及次要設備尚未拆除，前幾年的樣品數約在每年 50~150 件的範圍內，且樣品中約有 30% 是屬於 RAD 3 級，其餘樣品大部分屬於 RAD 2 級(放射性樣品處理分類請參考表 3.3.1)。且除役初期的樣品皆需要執行完整的輻射特性分析，所以作業量相當大；在進入除役作業中期，每年的樣品數會降低至每年 50~60 件；於拆除主要設備及建物時，將會有許多的水泥樣品需要進行分析；在進入最終輻射偵測階段時，則會需要分析許多的土壤樣品。

另外也討論到在許多除役作業中使用的 ISOCS 系統，雖然可以減少取樣的數量，但該系統仍然有許多限制，如土壤屏蔽、儀器敏感度和難測核種等因素，因此 GEL Laboratories 建議需要搭配鑽心取樣等其他技術以免在除役後期付出更高的成本。

再者，因核能一廠目前除役規劃中仍會有保留區，對於 MARSSIM 所提到的廠區外釋必須符合 0.25mSv/y 的限制，是否需要考量保留區的貢獻劑量也進行討論。對此 GEL Laboratories 也說明保留區的貢獻劑量並不包含在 0.25mSv/y 的限制內，這對於我們在後續評估方面也得到了很重要的解答。

GEL Laboratories 在完成樣品分析後，其樣品及分析液廢棄物處理，有專業合法的廢棄物處理公司可以進行處理。但目前本公司放射實驗室分析後樣品與分析液之廢棄物處理是送回核能一廠處理；未來在核能一、二、三廠廢料處理系統分別除役後，我們分析後樣品與分析液之廢棄物處理，也是必須預先考量的問題。



圖 3.3.7 參訪團隊與 The GEL Group 主管討論情形



圖 3.3.8 參訪團隊與 The GEL Group 主管合影

### 3.4 參訪低放射性廢棄物處置場 Barnwell Disposal Facility

#### 3.4.1 前言

##### (1) 美國低放射性廢棄物

1985 年的《低放射性廢棄物管理修正法案》(The Low-Level Radioactive Waste Policy Amendments Act of 1985, LLRWPA)中規定，在各州內產生的低放射性廢棄物，須由各州政府自行管理與處置。此法案並授權各州合組區域聯盟(Compact)，共同設置聯合處置設施，目前共有 10 個區域聯盟。



圖 3.4.1 美國低放處置區域聯盟及處置設施位置圖

##### (2) 美國低放射性廢棄物處置設施

目前美國共有 4 座持有執照且營運中的商用低放射性廢棄物處置設施(另有三座 DOE 營運的處置設施，用於國防或工業用途的廢棄物處置)，分別為 EnergySolutions 營運的 Barnwell 處置設施(南卡羅來納州)；Clive 處置設施(猶他州)(僅處置 A 類)；US Ecology 營運的 Richland 處置設施(華盛頓州)；Waste Control Specialists LLC 營運的 Andrew 處置設施(德克薩斯州)。

而有 4 座已關閉的處置設施：內華達州的 Beatty 處置設施(1993 年關閉)、肯塔基州的 Maxey Flats 處置設施(1977 年關閉)、伊利諾州的 Sheffield 處置設施(1978 年關閉)與紐約州的 West Valley 處置設施(1975 年關閉)。

#### 3.4.2 巴恩韋爾處置設施 Barnwell Disposal Facility

美國巴恩韋爾低放射性廢棄物最終處置場位於南卡羅來納州哥倫比亞市近郊，占地面積共 235 英畝，處置場由南卡羅來納州所有，目前由 EnergySolutions 公司根據 SC

DHEC(Department of Health & Environmental Control)放射性物質許可證 097 運營處置設施租借並負責營運，處理來自由南卡羅來納州、紐澤西州和康乃狄克州組成的大西洋聯盟 (Atlantic Compact) 的低放射性廢棄物。

為了促使其他州負起自行處置低放射性廢棄物的責任，2007 年起已不允許該處置設施處理非區域聯盟設施的低放射性廢棄物。



圖 3.4.2 巴恩韋爾處置設施 BDF(中上)以及巴恩韋爾處理設施 BPF(左下)

巴恩韋爾處置設施於 1971 年開始運轉，處置營運經驗超過 45 年，處置坑係以淺地表壕溝掩埋技術進行處置。該處置場接收各類(A/B/C，不含超 C 類)低放射性廢棄物，包含照射過硬體、大型組件、蒸汽產生器、樹脂和反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessels, RPV)等。

巴恩韋爾處理設施 (Barnwell Processing Facility) 負責處理樹脂脫水、廢棄物固化和蒸發過程。該處理設施也完成各式各樣 Savannah River Site (SRS) 和 EnergySolutions 的計畫。

目前巴恩韋爾處置設施已使用總面積 235 英畝土地的 95%，已處置 2,800 萬立方英尺的低放射性廢棄物，如圖 3.4.3 所示。而目前放射性廢棄物的總活度約 1,430 萬居里(截至 2017 年 1 月 1 日，因放射性衰變，活度尚有 310 萬居里)，目前剩餘約 100 萬立方英尺的處理能力，該處置設施近年來所處置的放射性廢棄物體積可參考表 3.4.1：



圖 3.4.3 巴恩韋爾處置設施已使用區域(黃色框)及未使用區域(藍色框)示意圖

表 3.4.1 巴恩韋爾處置設施近年來處置體積 (統計至 2017 年 4 月 6 日)

廢棄物類別	2012/2013 立方英尺	2013/2014 立方英尺	2014/2015 立方英尺	2015/2016 立方英尺	2016/2017 立方英尺
例行設施廢棄物	8,582	8,366	9,424,	8,124	2,730
非設施廢棄物	171	13	140	68	22
大型組件	0	0	0	0	0
受照射硬體	0	115	0	113	0
合計	8,753	8,494	9,564	8,305	8,752

### 3.4.3 廢棄物處置

運送至巴恩韋爾處置設施的所有廢棄物均為貨車運送(公路)，大部分採用高完整性容器(High Integrity Container, HIC)裝載運輸，待送至預先挖好的壕溝旁後，再以垂直起重升降機將內容物放置在預先規劃的處置窖(vault)中。



圖 3.4.4 廢棄物公路運送及廢棄物放至處置窖(vault)示意圖

而在巴恩韋爾的廢棄物處置，所有類別廢棄物(A、B、C類等)均放置於相同廢棄物壕溝(trench)中，僅將穩定及不穩定的廢棄物分別儲藏。且所有廢棄物均置於經 DHEC 認可的處置窖(vault)中。



圖 3.4.5 廢棄物處置壕溝(trench)示意圖

另外 EnergySolutions 也相當鼓勵受照射硬體及大型組件的運送處置，如蒸汽產生器和反應器壓力槽等，依照 Mr. Collin Austin 的說明，相較於將受照射硬體及大型組件切割放入處置窖中進行處置，直接的運送處置不但可以維持處置時的穩固性，也可大幅降低其切割及處置的成本。而此類的運送處置則是依據具體情況來定價。



圖 3.4.6 受照射硬體及大型組件的運送處置示意圖

在巴恩韋爾處置設施已使用的處置區域，其最終處置也是採取多重工程障壁的概念，以隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外，防護措施包括放射性廢棄物固化體盛裝容器、緩衝回填材料等工程及天然障壁等。

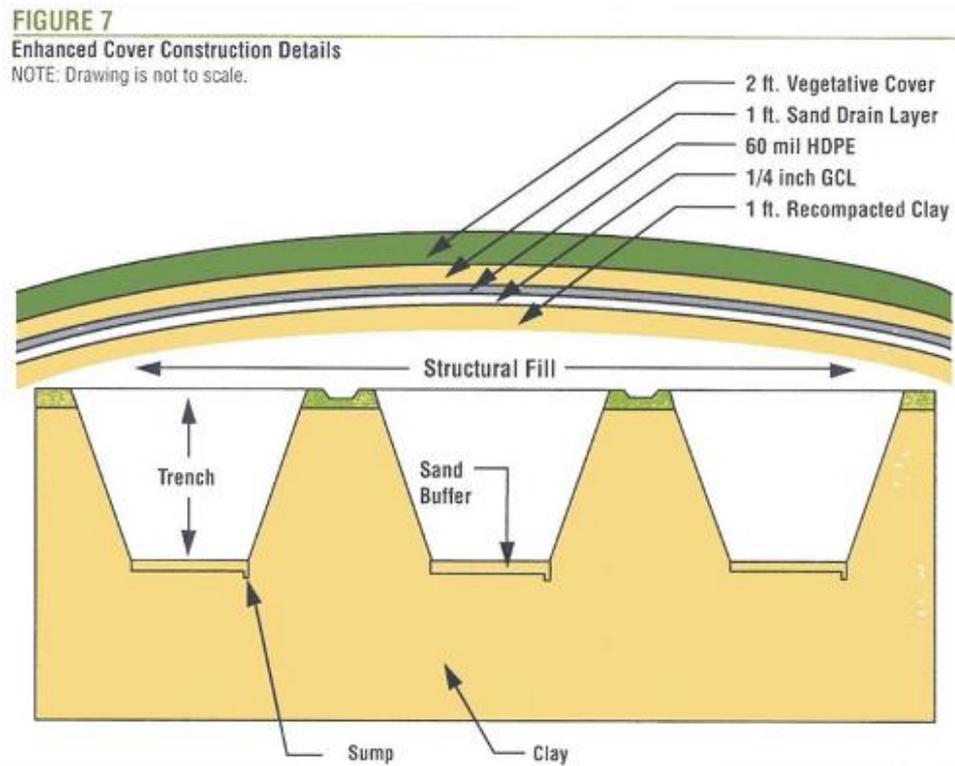


圖 3.4.7 巴恩韋爾處置場採用-多重工程障壁示意圖



圖 3.4.8 參訪團隊與巴恩韋爾處置場主管合影

### 3.5 參訪熊溪廢棄物處理設施 Bear Creek Processing Facility

#### 3.5.1 前言

EnergySolutions 的 Bear Creek 處理設施位於田納西州的橡樹嶺近郊。該設施主要功能是将放射性物質安全的處理及包裝以利永久處置的作業。放射性物質減容及再包裝是該設施的主要目標，包含大型廢棄物化驗、除汙、回收、壓縮、焚化、金屬鑄造以及許多特殊廢棄物處理選項。該設施在田納西州環境與保護（Tennessee Department of Environment and Conservation, TDEC）的放射衛生部門（Division of Radiological Health, DRH）與 NRC 同意的法規主關機關下運作。

#### 3.5.2 熊溪廢棄物處理設施 Bear Creek Processing Facility

熊溪廢棄物處理設施室內面積約為 15,800 平方公尺，每年處理超過 13,000 噸的放射性廢棄物，該處理設施內有焚化爐、壓縮機及金屬熔爐等設備，並持有兩項放射性物質使用執照以及混合廢棄物處理執照。

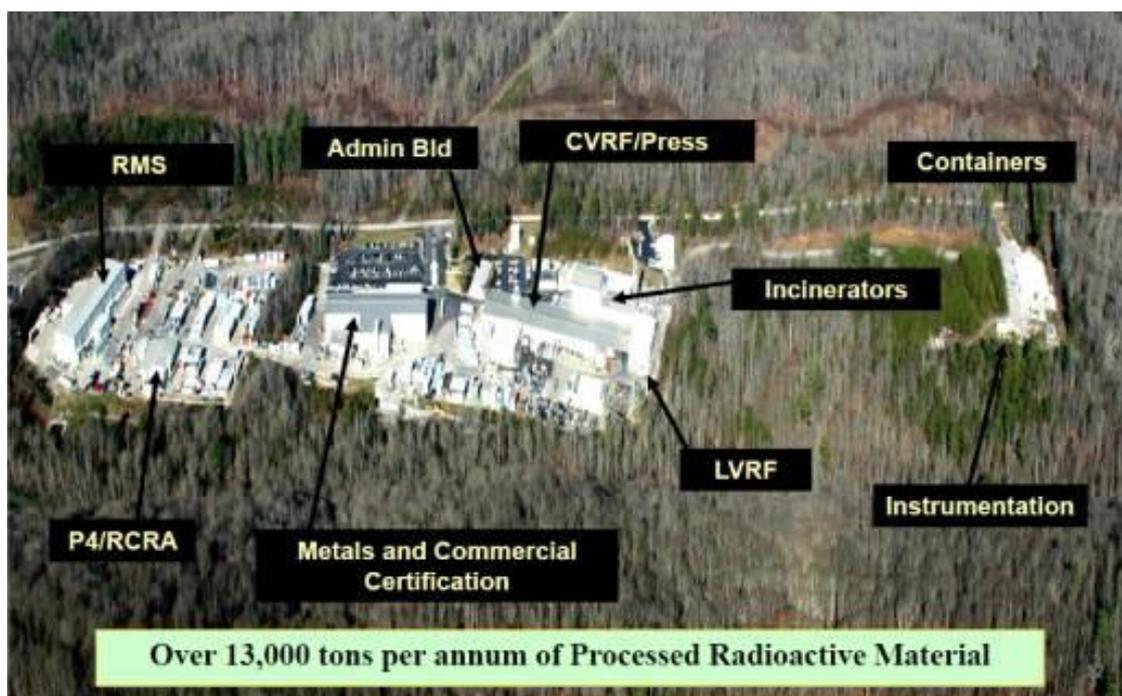


圖 3.5.1 熊溪廢棄物處理設施鳥瞰圖

#### 分類與隔離

在廢棄物運送至熊溪廢棄物處理設施後，即進行廢棄物的分類與隔離，可以在下個步驟「減容」前隔離特定的金屬以作回收，其他的金屬則進行壓縮、焚化或再包裝以利運送及處置。

## 金屬回收設施

金屬回收設施建置於 1991 年，該設施之金屬熔爐為使用焦耳加熱熔爐進行低微污染金屬回收作業，一般而言，每次熔融作業約可產生 600~900 噸金屬塊，該設施裝置容量每年約可產生 6000 噸金屬塊。

一年中有相當多次鎔爐會運作以進行金屬鎔化與回收，鎔化後的金屬會倒入模具中成形為 10 噸重的屏蔽金屬塊。為維護環境及預算方面考量，該設施所產生之屏蔽金屬塊提供高能物理實驗室、加速器以及盛裝容器業者使用，使用屏蔽金屬塊的設施均持有放射性物質使用執照。

該設施回收之金屬除了來自美國境內，亦包含歐洲國家(比利時、德國、西班牙及英國等)利用船運方式運送至美國，以及加拿大利用陸路運送至該處理設施，並且未產生二次廢棄物返還原廢金屬持有者。



圖 3.5.2 回收金屬熔融及屏蔽金屬塊製成過程

## 焚化爐及壓縮機

焚化屬於相當新的技術，可以將廢棄物減容至 200 分之一的大小。該設施具有 2 座焚化爐，A 機組建造於 1989 年，B 機組建造於 1995 年。可焚化放射性固體及液體廢棄物、廢油及污泥。每單位時間處理量約每小時 720 公斤；每日 17,400 公斤，年處理量約為 3,200,000 公斤。該處理過程所排放的氣體也低於田納西州的管制標準。



圖 3.5.3 焚化爐控制室

該設施具有美國最大的壓縮機，建造於 1985 年，壓縮壓力約 10M 磅，每日運轉處理量約可進行 80 次作業，壓縮比約為 2 : 1~5 : 1。



圖 3.5.4 壓縮機及壓縮後廢棄物

本次參訪金屬回收設施可進行低微污染金屬熔融，而產生的屏蔽金屬塊則由持有放射性物質使用執照者再利用，在放射性物質管理方面能進行較好管理。在預算及技術等考量下，將廢金屬運送至國外處理且不會產生二次廢棄物，可作為本公司廢棄物減量的考量之一。



圖 3.5.5 參訪團隊與熊溪廢棄物處理設施主管合影

## 四. 心得與建議

### (一) 行程規劃

1. 放射試驗室因應除役業務需要爭取而來的出國員額與預算，得來不易。建議今後後端處、核發處及核一廠在考量除役工作時之出國員額，也同時考量放射試驗室除役任務小組的業務需求。
2. 奉派出國人員，是一項榮譽，更是自我成長的最好機會。建議奉派出國人員，除感謝長官給予機會之外，更要調整心態並體認達成出國任務的職責，欣然接受出國新增工作的額外付出與團隊合作。
3. 工欲善其事，必先利其器。建議奉派出國人員在出國前做好專業相關資料的準備與預備交流的提問，並建議主管給予奉派出國人員參與相關議題的研討會議。
4. 放射室參與核電廠除役計畫審查及除役相關業務推動，已五年多，才有第一次機會派員出國取經，與國際除役業務接軌。在核電廠除役過程中，放射室負責核電廠除役計畫之環境監測、放射性樣品分析、場址最終輻射偵測、及場址復原等業務，建議保持本案已與 ANL、GEL、EPRI、及 Energy Solution 公司交流溝通的管道，有助未來除役業務資訊的取得與派員出國行程的安排。

### (二) Argonne National Laboratory

5. 有關核一輻射特性調查之 20 個關注核種 DCGL 初步推導，使用 RESRAD-onsite 程式輸入 26 個廠址地質、水文、曝露等參數的部分，余家禮博士初步審視，認為逕流係數、室內塵過濾係數、外部加馬屏蔽係數及室內佔用率係數等應再探討，並建議我們可以參考 Data collection handbook to support modeling impacts of radioactive material in soil and building structures 內容後，再行修正。

### (三) GEL Laboratory

6. 樣品與流程分類，依不同活度或污染程度進行分類，在分析與計測流程中即分開處理，避免設備與樣品之間的交叉污染可能性。建議放射室借鏡並做為未來業務

精進標竿。

7. 樣品的接收即使用 **Bar code** 系統，配合自行開發的實驗室資訊管理系統〈**LIMS**〉，對於樣品的前處理、分析、計測、及處置等流程進行追蹤管理。放射室與 **SGS** 合作之分析樣品已使用 **Bar code** 系統追蹤管理，也可為未來其他相關業務精進的標竿。
8. **GEL** 分析後樣品與分析液廢棄物處理，有專業合法的廢棄物處理公司處理。現在我們分析後樣品與分析液之廢棄物處理是送回核一廠處理；未來在核一、核二、核三廢料處理系統分別除役後，我們分析後樣品與分析液之廢棄物處理，建議未雨綢繆。
9. **GEL** 一年分析約 300,000 個樣品，市場在全美與國際，業務仍在快速成長，值得我們借鏡效法或策略聯盟合作。放射室在核電廠除役期間，有許多樣品之分析計測需求，業務與人力在成長，但在除役後的轉型該怎麼走？目前新增食品、食材、建材之檢測、劑量評定、與輻儀校修之業務量，其相關市場仍有待觀察，或許我們可以與 **GEL** 合作，拓展國際市場相關業務。

#### **(四) Zion Nuclear Power Station**

10. 依 **Exelon** 公司經驗，負責營運的核能電力業者，並不一定善於除役拆廠作業，將除役工作交給專業公司處理，有可能是較經濟的選項。**Zion solutions** 的除役工作進度比原本預計期程快 12 年，應節省許多成本。
11. 美國已有低放廢棄物的最終處置設施，其低放廢棄物之處理或處置係以經濟性為優先考量，這一部分與國內情形較不相同，國內因最終處置場址尚未決定，在除汙及減容之需求皆高於美國。
12. 執照者與管制者之間的溝通很重要，如 **Zion** 電廠部分除役作業因對環境影響衝擊過大，經評估且上級同意後保留不拆除就是很好的例子。

## (五) Barnwell Disposal Facility

13. 巴恩韋爾處置場針對 A 類、B 類及 C 類放射性廢棄物挖坑掩埋，目前處置場接收放射性廢棄物已佔監管區域 95%，但整體處置場環境輻射劑量與外界並無差異，未來貯存場達設計容量後，則進入封閉監管階段，並待放射性衰變至一定程度再免除監管。依該處置場及美國其他處置之經驗，低放射性廢棄物經處置後與一般民眾生活圈的隔離，在實務上沒有任何問題。
14. 美國已有低放處置場可以接收區域內之核電廠低放廢棄物，如巴恩韋爾處置場只接收大西洋聯盟(Atlantic Compact，由南卡羅來納州、紐澤西州和康乃狄克州組成)的低放廢棄物。除役電廠大多以陸運方式運送低放廢棄物，甚至直接興建鐵路運送；本公司在無既有處置場前提下，未來除役須另規劃/興建廠內暫貯之低放貯存設施，引用美國除役經驗時，如成本分析或排程規劃等均需注意本部分之差異。
15. 美國電廠在除役期間，針對低放廢棄物是否進行除汙、減容或直接送最終處置，主要是成本考量，本公司則因暫貯位置環評問題，必須盡量減少低放廢棄物產量，對於除汙或減容需求大於美國除役電廠。
16. 巴恩韋爾處置場在大型組件如 S/G 之處置收費上採個案考量，可針對個案設計不同的處置窖(鼓勵)，實務上有整個 S/G 未經切割直接運送至處置場處置之實例，足可證明此方式可行且為較經濟之作法，處置方式可供未來我國低放最終處置場及核三廠除役參考。

## (六) Bear Creek Processing Facility

17. 依美國經驗低微污染廢金屬是可回收再利用，本公司可藉此經驗應用在溝通上。另在預算、技術及可行性等考量下，將廢金屬送至國外處理或許也能作為一種處理管道。

(七) 承上總結，有關未來核能電廠除役之問題，如環境取樣點位置及數量、難測核種之

分析及比例因數、RESRAD code 參數之選用以建立關注核種之合理 DCGL 等，建議依照專業知識與技術判斷，及與主管機關保持緊密地溝通協調以達成共識。