

出國報告（出國類別：開會）

## 參加放射性廢棄物管理科學 國際研討會

服務機關：行政院原子能委員會放射性物料管理局

姓名職稱：嚴國城薦任技士

派赴國家：澳大利亞

出國時間：106年10月27日至106年11月5日

報告時間：107年1月19日



# 摘要

本次奉派赴澳大利亞雪梨參加「第 40 屆放射性廢棄物管理科學國際研討會」(Scientific Basis for Nuclear Waste Management symposium 2017, SBNWM)，研討會係由澳大利亞核能科學與技術組織(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)主辦。本研討會係源自於 1978 年的材料研究學會(MRS)會議，並且以一年在美國境內(MRS 會議)一年在國際間具有放射性廢棄物管理研究計畫的國家輪流辦理。放射性廢棄物主要來自於商用核子反應器設施運轉、醫用同位素生產及用過核子燃料再處理作業所產生之低中高階放射性廢棄物。本次研討會重點主要有放射性廢棄物中長期貯存技術、廢棄物減量與固化體的發展、以及放射性廢棄物最終處置。本報告內容主要介紹主辦國澳大利亞的核能活動與放射性廢棄物管理計畫及摘錄國際間核能先進國家(美國、加拿大、英國)放射性廢棄物處理貯存及處置之發展現況。藉由研討會可瞭解國際間核能國家放射性廢棄物管理策略的發展現況，作為我國精進放射性廢棄物安全管制作業之重要參考。

# 目 次

一、目的	1
二、行程	2
三、研討會心得	4
四、建議事項	23
五、參考資料	24

## 一、 目的

核能發電在台灣將屆 40 年，在 2025 非核家園的政策目標下，我國三座核能電廠將分別於運轉執照期限屆滿，於民國 107 年底起陸續進行除役。依 106 年 1 月立法院通過之電業法修正案第 95 條：核能發電設備應於 114 年以前，全部停止運轉。原能會作為全民的原能會，責無旁貸貫徹政府非核家園的政策，在守護安全的職責下，以「如期廢核」及「核廢處理」的安全監督做為施政主軸，積極面對核能電廠除役及核廢料的問題，監督台電公司如期執行核能電廠除役作業。

放射性廢棄物的處理貯存及處置作業為一項漫長的巨大工程，國際間各核能國家都正致力於精進其安全管制技術，我國隨著核能電廠逐步除役，將面臨放射性廢棄物的處理問題，如何妥善進行安全管制，將是原能會最重要的任務。因此，有必要隨時掌握國際間核能國家放射性廢棄物管理計畫及管制策略發展現況，以精進我國放射性廢棄物之安全管制技術。

本次研討會於澳大利亞舉辦，討論重點主要有放射性廢棄物中長期貯存技術、廢棄物減量與固化體的發展、以及放射性廢棄物最終處置。本報告內容主要介紹主辦國澳大利亞的核能活動與放射性廢棄物管理計畫及摘錄國際間核能先進國家（美國、加拿大、英國）放射性廢棄物管理策略之發展現況。藉由研討會汲取國際發展新知，作為我國放射性廢棄物安全管制作業之參考。

## 二、行程

日期	行程	工作內容
10月27日	台北→雪梨	去程
10月28日	台北→雪梨	去程
10月29日	雪梨	報到
10月30日	雪梨	SBNWM 會議
10月31日	雪梨	SBNWM 會議
11月1日	雪梨	SBNWM 會議
11月2日	雪梨	SBNWM 會議
11月3日	雪梨	SBNWM 會議
11月4日	雪梨→台北	回程
11月5日	雪梨→台北	回程

第 40 屆放射性廢棄物管理科學國際研討會(Scientific Basis for Nuclear Waste Management symposium 2017, SBNWM)，係由澳大利亞核能科學與技術組織(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)主辦，10月29日至11月3日於雪梨鉑爾曼海德公園酒店(Pullman Sydney Hyde Park Hotel)舉行。職於10月28日抵達雪梨後，10月29日前往研討會會場辦理報到手續，自10月30日起全程參加會議。

開幕典禮於10月30日上午舉行，由ANSTO核能科學與技術發展部執行長Simone Richter女士擔任主席，並進行開幕致詞，主席表示本次會議共有來自18個國家93位從事核能領域研究及管制作業的人員出席參加，包含了國際原子能總署(IAEA)、美國桑迪亞國家實驗室(Sandia Labs)、日本電力中央研究所(CRIEPI)、英國雪菲爾大學(University of Sheffield)等單位，總計有92篇論文發表。主席希望透過所有與會人員的經驗分享與技術交流，能夠對全球放射性廢棄物處理貯存及處置技術發展有正面影響。

開幕典禮後，隨即開始進行專題演講，內容包含國際間廢棄物管理資訊、用過核子燃料及鋳合金護套研究、核子保防、除污及除役活動、廢棄物型態、地質處置

等。本次研討會之活動紀要如圖 1~2。



圖 1 本次研討會與會人員團體照。



圖 2 研討會活動-論文口頭發表。

### 三、 研討會心得

本次研討會係由澳大利亞核能科學與技術組織(ANSTO)主辦，有關 ANSTO 的背景資料說明如下：

1. ANSTO 是澳大利亞國家核能研究與開發組織(圖 3)，也是澳大利亞核能專業技術中心。主要負責向政府，工業界，學術界和其他研究機構提供專業諮詢，進行科學研究和產品研發。該組織之核心任務主要有：
  - (1) 進行有關核能科學技術的研究和開發。
  - (2) 生產用於醫學、科學技術、工業、商業和農業應用之放射性同位素。
  - (3) 鼓勵及促進研究和開發成果的應用及使用。
  - (4) 管理各種核能活動產生的放射性物質和放射性廢棄物。
  - (5) 提供與核能應用相關的商品和服務。
  - (6) 向政府提供諮詢意見，並就核能相關事宜進行國際聯絡。
  - (7) 提供用於核能科學技術研究的設施，設備和專業知識。
  - (8) 發布科技報告，期刊和論文，提供公共信息和諮詢。



圖 3 澳大利亞核能科學與技術組織(ANSTO)。

2. 我國於 94 年與澳大利亞簽訂了台澳中子束應用研究合作協議。依據此項合作協議科技部委託國立中央大學在 ANSTO 興建一部冷中子三軸散射儀- SIKA，澳方可使用我國冷中子三軸式光譜儀，而我國學術界亦可使用 ANSTO 斥資 3 億 3000 萬澳幣興建之新一代中子研究設施，提升台灣中子研究團隊的成長。



3. ANSTO 的核能設施包括研究用核子反應器、粒子加速器、放射性藥物生產設施以及其他研究設施。高通量澳大利亞反應器(High Flux Australian Reactor, HIFAR)是澳大利亞的研究用核子反應器(圖 4)，其主要用途為生產醫療用和工業用的放射性同位素、半導體工業矽晶體轉化、生產用於滅菌、癌症治療及工業用的伽瑪射源、作為科學研究用的中子束來源以及礦業的中子活化分析等。HIFAR 是 ANSTO 的核心設施，1958 年 1 月啟用，1960 年首次以 10 兆瓦的熱功率滿載運轉，2007 年 1 月退役，預計到 2025 年可以完成除役。



圖 4 高通量澳大利亞反應器(HIFAR)。

4. 隨著 HIFAR 的退役，取而代之的是開放式池水澳大利亞輕水反應器(Open Pool Australian Lightwater reactor, OPAL)(圖 5)，OPAL 為一具備 20 兆瓦熱功率之多用途反應器，使用低濃縮鈾燃料，主要用於核子醫學藥物研發、科學研究及工業發展等。OPAL 於 2006 年 8 月開始試運轉，並於 2007 年 4 月正式取代 HIFAR 成為澳洲唯一一部運轉中的研究用核子反應器。OPAL 承接了 HIFAR 的核心任務，生產製造具有醫療，工業和環境應用的放射性同位素。

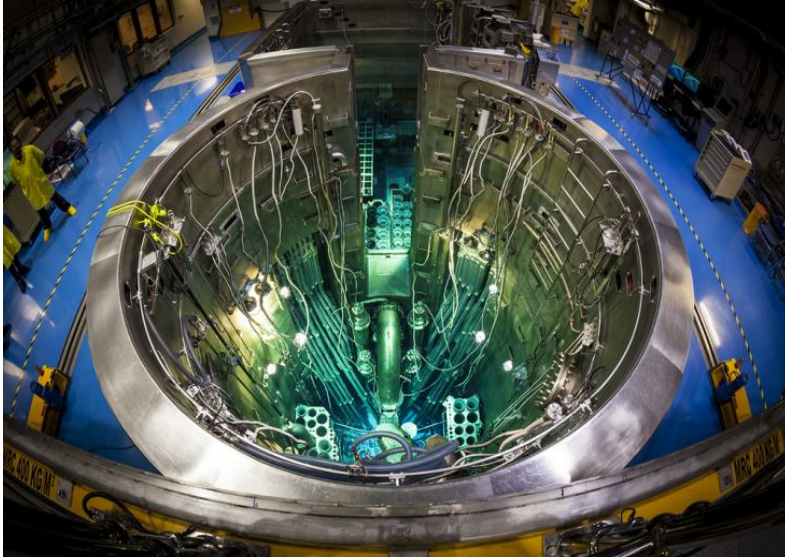


圖 5 開放式池水澳大利亞輕水反應器(OPAL)。

5. OPAL 是世界上第一個使用低濃縮鈾作為生產 Mo-99 的研究用反應器，其每年能夠生產 55 萬劑的 Tc-99m，提供澳大利亞國內需求。澳大利亞 80% 以上的核子醫學診斷程序使用 Tc-99m，它附著在特定的分子上並注入患者體內，搭配影像設備進而達到醫學診斷目的。OPAL 本身有能力生產世界上 Tc-99m 需求量的一半，但需要能生產更多 Mo-99 的設施來實現。因此，澳大利亞政府於 2012 年宣布一項 1.688 億美元的投資計畫(ANSTO Nuclear Medicine Project, ANM)，目標將澳大利亞打造為全球核子醫學藥物生產的領導者。該計畫將使 ANSTO 的 Mo-99 產量提高三倍，除了能夠滿足澳大利亞國內需求，並能夠提供全球 25-30 % 的需求。其所生產的放射性同位素將主要出口到美國，日本，中國和韓國。
6. 為了因應大量生產核子醫學藥物所產生的放射性廢棄物，ANSTO 目前正在建設一個 Synroc 廢棄物處理設施，該設施為 ANM Project 的一部份，主要用以處理新擴建的 Mo-99 生產設施的放射性廢棄物，以及過去相關核能活動所產生的廢棄物。Synroc 是 ANSTO 的廢棄物處理技術，能夠處理各種型態的放射性廢棄物（不僅僅只是 Mo-99 生產設施所帶來的中階放射性廢棄物）使其滿足長期處置的國際要求。放射性廢棄物的型態是固化過程的關鍵要素，它決定了廢棄物可以固化的類型，被壓縮的程度以及最終處置時所需的廢棄物裝載罐的數量。Synroc 技術的發展最主要的優點為能減少廢棄物體積、增加固化體的耐久性、減少固化體的生命週期成本、降低對環

境的衝擊，為最終貯存的一項安全解決方案。(圖 6)



圖 6 Synroc 廢棄物處理技術。一個薄壁容器(左後)填充有顆粒狀廢棄物粉末，隨後通過熱等靜壓(hot isostatic pressing, HIP)將其壓縮成固體物質。該罐被設計折疊成圓柱形容器(右前)以供儲存。中心圖像顯示了封裝在薄壁容器內的緻密固體廢物的橫截面。

五天研討會期間，主辦單位安排 83 場次簡報以及海報展覽(共計 92 論文)，範圍甚廣，個人挑選與澳大利亞放射性廢棄物管理計畫及核能先進國家(美國、加拿大、英國)放射性廢棄物管制資訊相關之議題，摘要說明各項議題之重點，供本局瞭解其他核能國家放射性廢棄物管制策略的研究發展，作為精進我國安全管理技術之參考。

#### 1. 澳大利亞放射性廢棄物管理(Nuclear Waste Management update in Australia)

本議題係由 ANSTO 的 Hefin Griffiths 先生簡報，內容摘述如下：

- (1)澳大利亞目前正在規畫建立國家放射性廢物管理設施，以及尋求適當的設施場址。本項議題主要說明澳大利亞放射性廢棄物生產歷史，對各種廢棄物產生的管理，特別是 ANSTO 對於廢棄物管理的策略。

- (2) 澳大利亞沒有商用核能發電設施，與核能相關的活動及設施包含：
- A. 鈾礦業發展
  - B. 7 部用於生產放射藥物的回旋加速器(Cyclotron)
  - C. 開放式池水澳大利亞輕水反應器(OPAL)
- (3) 澳大利亞的輻射安全及核廢管理法規管轄權：
- A. 輻射安全、放射性廢棄物管理及處置由聯邦政府、州政府及地區政府依其權責管理。
  - B. 州政府及地區政府負責規範放射性物質的使用、製造、運輸及處置，使其符合州及地區的法令和規定。
  - C. 管轄權之區域劃分及管制機關如圖 7。
- (4) 澳大利亞放射性廢棄物主要來源為透過科學研究、工業、農業和醫療使用放射性物質以及製造放射性藥物產生。目前大部分的放射性廢棄物主要來自 ANSTO。
- (5) 低階放射性廢棄物(Low level waste, LLW)主要來自醫療、工業、核設施運轉所產生，包括紙張、手套、衣服、過濾器。目前所有的 LLW 累積約 4500 立方公尺的，並且以年產量 40 立方公尺持續累積。由於澳大利亞目前並沒有低階放射性廢棄物處置設施，因此，目前 LLW 廣泛分佈在許多地點貯放。由於 LLW 放射性活度低，因此，在貯存或運輸過程中不需要屏蔽來保護工作人員。(圖 8)
- (6) 澳大利亞的中階放射性廢棄物(Intermediated level waste, ILW)主要來自放射性藥物生產、ANSTO 的研究用反應器營運以及這些反應器產生之用過燃料再處理作業的廢棄物。目前所有的 ILW 累積約 650 立方公尺，並且以年產量 5 立方公尺持續累積。ILW 具有長半衰期核種及一定的放射性活度，因此，在進行處理、貯存及運送的過程中，需要屏蔽來限制工作人員的輻射暴露，通常使用混凝土、不銹鋼或鉛。

- (7) 澳大利亞沒有產生任何被歸類為高放射性廢棄物(High level waste, HLW)的用過燃料。發電用核反應器比起研究用反應器其燃料會產生更多的輻射衰變熱。依據「Commonwealth Radioactive Waste Management Act 2005」將“高放射性物質”定義為熱能輸出每立方公尺至少 2 千瓦的物質。過往澳大利亞 HIFAR 和 MOATA 研究用反應器用過燃料再處理產生的放射性廢棄物並不符合這個標準。(註：MOATA 是 ANSTO 第一部研究用反應器，現已完成除役)
- (8) 自 1963 年起，ANSTO 的研究用反應器(HIFAR 和 MOATA)所產生的用過燃料陸續運往海外其他國家進行再處理及貯存，包含法國、英國及美國，澳大利亞本身不保留這些用過燃料。這些用過燃料再處理後所產生的殘餘放射性廢棄物暫時貯放在海外，然而自 2015 年起，在國際協定下，已陸續運回澳大利亞貯存，待未來進行地質處置。(圖 9)
- (9) 現階段澳大利亞的用過燃料主要來自 OPAL，ANSTO 目前規劃仍然以運往法國進行再處理為主，首批用過燃料預計 2018 年運送至再處理廠。
- (10) 目前在澳大利亞有超過 100 多個地點貯放放射性廢棄物。這些地點的放射性廢棄物通常是來自各種醫療，工業和研究應用所產生，因澳大利亞沒有處置或長期貯存設施，因此，業者必須自行貯存管理這些放射性廢棄物，目前的貯存方式雖然安全，但並不理想，因為這些貯存設施並非是用來長期貯存放射性廢棄物。為了解決這些問題，以及支撐未來澳大利亞核能發展所產生的廢棄物(特別是生產放射藥物及 Mo-99 發生器所產生的廢棄物)，澳大利亞目前正在籌劃建設國家放射性廢棄物處理設施，用來處置或貯存其國內所產生的放射性廢棄物。



圖 7 澳大利亞輻射安全及核廢管理法規管轄權劃分及其主管機關。



圖 8 澳大利亞低階放射性廢棄物貯存管理。



圖 9 ANSTO 用過燃料再處理後產生的 IWL，先以玻璃固化處理，再放入 500 公斤中的不銹鋼罐內(圖左)，最後再裝入 100 噸重的 AREVA TN-81 護箱內(圖右，護箱具備貯存和運輸功能)，每只護箱能夠存貯存 28 罐不銹鋼罐。

## 2. 用於 Mo-99 生產的 Synroc 廢棄物處理廠(Synroc Waste Treatment Plant for fission-based Molybdenum-99 Production)

本議題係由 ANSTO 的 Gerry Triani 先生簡報，內容摘述如下：

(1) ANSTO Nuclear Medicine Project (ANM Project)正在建造一個新的核子醫學生產設施，以提升 Mo-99 發生器的產量，同時 ANSTO 也在建設一個廢棄物處理設施(Synroc Waste Treatment Plant)，用來處理生產 Mo-99 所產生的中階液體廢棄物(Intermediated Liquid Level Waste, ILLW)以及 ANSTO 先前累積的 ILW。這是一個創新的處理設施，透過 Synroc 技術來進行廢棄物固化，轉化為較耐用的固化體，以利將來最終處置。

(2) 澳大利亞政府於 2012 年宣布 ANM Project，2013 年 ANSTO 從澳大利亞輻射防護和核能安全局(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, ARPANSA)取得授予選址許可，2014 年 Synroc Waste Treatment Plant 取得建造執照並開始興建，2015 年核子醫學生產設施完成建造，2016 年 Synroc Waste Treatment Plant 設施完工，2017 年 Mo-99 生產設施完工。

- (3) ANSTO Synroc 的核心技術是依據不同廢棄物型態添加適當的化學添加劑，進行廢棄物固化體的優化，再搭配熱等靜壓技術(hot isostatic pressing, HIP)，來減低固化體體積。HIP 技術由包含電加熱爐的壓力容器組成。將組件置於爐內的密封罐內，用氬氣等靜壓至最大密度，以減少廢棄物的體積。HIP 的優點包含：
- A. 沒有廢氣排放：廢棄物被密封並與加壓設備隔離，可消除廢氣排放
  - B. 更高的廢棄物裝載量：不受廢棄物形式的電氣特性或粘度限制
  - C. 靈活的技術：適用於廣泛的廢棄物型態處理並且可生產各種新的廢棄物固化體
- (4) 生產核醫藥物產生的 ILLW 在經過 2 年的放射活度衰變後，才會開始進行廢棄物處理。其處理方式先將 ILLW 以鹼性化學藥品處理，進行廢棄物固化體優化，然後在透過 HIP 技術進行減容。未來 Synroc Waste Treatment Plant 開始營運後，估計每年約可處理 4500 公升的 ILLW。
- (5) Synroc Waste Treatment Plant 為一項創新的廢棄物管理策略，它可以：
- A. 固化來自 Mo-99 生產所產生的大量液體廢棄物
  - B. 透過 HIP 技術產生一個耐久性好的固化體，可直接處置。
  - C. 顯著地達到廢棄物減容成效，並且可降低生命週期成本。
- (6) Synroc 技術的應用不僅僅用於澳大利亞放射性廢棄物處理，更已推廣至其他國家高放射性廢棄物的處理，案例包含：
- A. 美國愛達荷州高階放射性廢棄物 (HLW)：為了節省數十億美元的生命週期成本，美國能源部已選擇 ANSTO 的 Synroc 作為其首選的處理技術。大約 4400 立方公尺的再處理 HLW 是非常不均勻的，且廢棄物的組成限制了玻璃固化的廢棄物裝載量。ANSTO 開發了量身制訂的玻璃陶瓷廢棄物固化體，克服了這些限制，大大提高了廢棄物裝載量，並提升固化體的耐久



性，美國能源部保守評估此一技術的應用可為雅卡山處置成本節省 50 億美元。

B. 英國鈾廢棄物：英國核能除役管理局已選擇 ANSTO 的 Synroc 作為鈾廢棄物的處理技術。高度不純且不均勻的鈾廢棄物，使得其處理面臨巨大的挑戰。這些廢棄物主要來自早期的燃料開發活動，並已經存放了 50 多年，沒有處置途徑。ANSTO 開發了玻璃陶瓷和陶瓷廢棄物固化體，增強化學耐久性和抗擴散性，可節省生命週期成本。

### 3. 澳大利亞國家放射性廢棄物處理設施發展現況(The status of the National Radioactive Waste Management Facility in Australia)

本議題係由 ANSTO 的 Hefin Griffiths 先生簡報，內容摘述如下：

- (1) 澳大利亞國家放射性廢棄物處理設施主要係用來處理其國內之低階放射性廢棄物(LLW)及中階放射性廢棄物(ILW)，包含自境外運回之再處理廢棄物(屬 ILW)。
- (2) 設施場址的選擇應該在一個低人口密度、未來發展前景非常低以及降雨量有限的地區。
- (3) 過往曾經討論過將處理設施設置該 ANSTO 所在地。但該地點不符合「澳大利亞近地表處置放射性廢物的實踐準則(Code of Practice for the near-surface disposal of radioactive waste in Australia)」中概述的處理設施的地理和地質標準。並且根據 1987 年頒布之澳大利亞核能科學和技術組織法，已排除非聯邦產生之放射性廢棄物被移入 ANSTO，此外，ANSTO 的廢棄物貯存容量也不足以貯存澳大利亞所有的放射性廢棄物。
- (4) 澳大利亞政府決定尋找自願的場址來發展廢棄物處理設施。經過公開徵選後，有 28 個有興趣的土地所有者提出申請。這些地區必須先經過一系列的經濟、環境及其他潛在技術評估，同時也必須調查該地區團體對於選址過程的支持度。

(5) 經過初步篩選後，目前有三個地點進入下一階段評估，

A. 2017 年 6 月 27 日資源及北澳大利亞部(Minister for Resources and Northern Australia)宣佈 2 個位於南澳大利亞州 Kimba 地區的自願場址進入下一階段評估。地名為 Napandee 和 Lyndhurst。(圖 10)

B. 2016 年 4 月 29 日資源及北澳大利亞部(Minister for Resources and Northern Australia)宣佈 1 個位於南澳大利亞州 wallerberdina 地區的自願場址進入下一階段評估。地名為 Barndioota。(圖 11)

(6) 目前這些場址都還再評估階段還沒選定，未來經過多方評估後，將選擇支持度最高的場址興建國家放射性廢棄物處理設施。

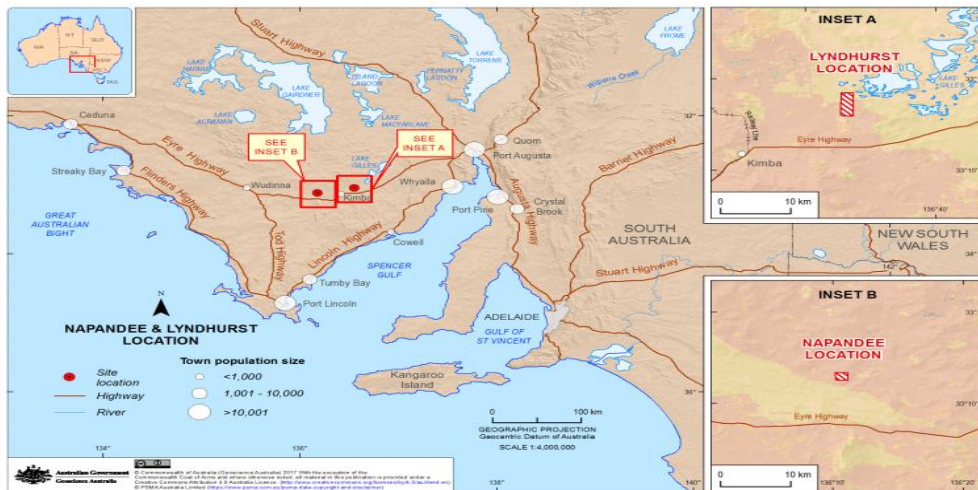


圖 10 南澳大利亞州 Kimba 地區的自願場址，Napandee 和 Lyndhurst。

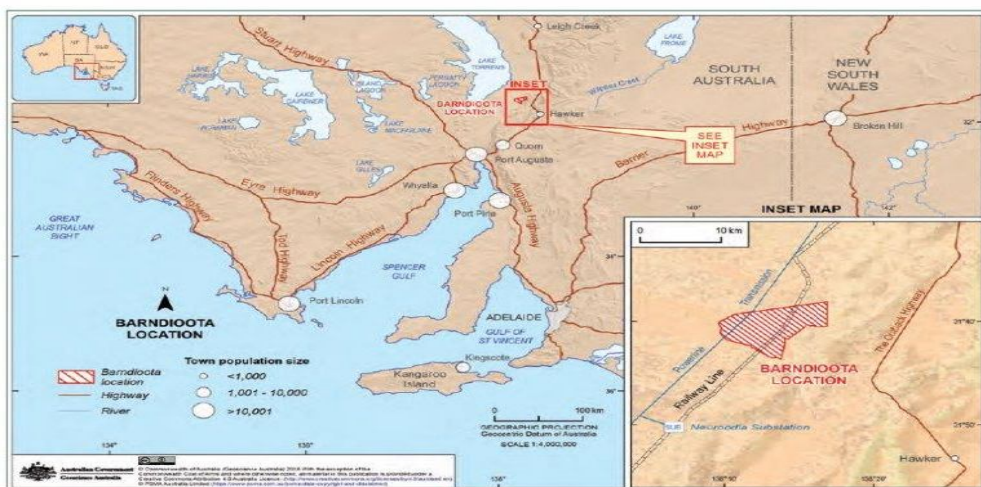


圖 11 南澳大利亞州 wallerberdina 地區的自願場址 Barndioota。

#### 4. 多國廢棄物處置:南澳倡議(Multinational Waste Repositories: A South Australian Initiative)

本報告係由南澳大利亞州環境保護局的 Massey De Los Reyes 博士簡報，內容摘述如下：

- (1)根據統計分析，目前國際間核能工業大國累計產生的用過核子燃料有 89,979 公噸，中階放射性廢棄物有 269,471 立方公尺，並且持續增加中。這些廢棄物的貯存及處置會是一個龐大的市場，若是在南澳大利亞州建置最終處置場，將可能為南澳大利亞州帶來 4,450 億美元的商機。
- (2)2015 年 3 月，南澳大利亞州政府成立核燃料循環皇家委員會 (Nuclear Fuel Cycle Royal Commission, NFCRC)，針對南澳大利亞州擴大參與核燃料循環的潛力，進行獨立且全面性的研究，並於 2016 年 5 月 9 日發布最終報告，提出 12 項建議及 145 項研究結論，其中一項關鍵建議為南澳大利亞州政府得建置國際高階放射性及中階放射性廢棄物貯存及處置設施
- (3)為了讓南澳大利亞州社會大眾了解 NFCRC 的主要建議事項及政府回應委員會的觀點，NFCRC 建立了廣大的公眾交流，如：
  - A. 自 2016 年 7 月到 11 月，有高達 17 萬人次的面對面溝通，以及在臉書及推特有超過 300,000 則訊息公告。
  - B. 97 場次社區交流會議，每場次可提供 7-3,000 人次面對面溝通的機會。
  - C. 35 場公眾活動，包含至學校對 8-17 歲的學生進行宣導。
  - D. 與超過 50,000 位民眾透過電話及網路進行溝通
- (4)最終報告發布後，南澳大利亞州政府隨即展開四個階段的公眾參與程序。2016 年 10 月展開第三階段的程序，隨機選定 350 名公民組成第二公民審議團，針對「在什麼情況下，如果有的話，南澳大利亞州可以尋求機會貯存和處置來自其他國家的放射性廢棄物？」的主題進行討論。討論的議題則包含

四個面向：安全；信任、問責與透明度；社會與社區同意；經濟與利益/風險。

(5)2016年11月6日，第二公民審議團提出意見報告，該報告指出，三分之二代表不希望在任何情況下尋求貯存及處置核子廢棄物的機會，而三分之一的代表則支持在 NFCRC 最終報告所承諾情況下尋求機會。2016年11月15日，南澳大利亞州政府參考第二公民審議團的報告，對 NFCRC 最終報告的 12 項建議做出回應。其中對於尋求在南澳大利亞州設立高階放射性及中階放射性廢棄物貯存及處置設施機會之建議，表示支持繼續調查，但對於配合修訂相關法規之建議，則表示不支持(即州政府將不尋求改變當前之政策或法令)。

(6)根據調查目前仍有 41%的南澳大利亞州民眾支持政府繼續調查，而其支持的理由有 49%是因為發展最終處置場帶來的經濟效益。

## 5. 加拿大用過核燃料和放射性廢棄物長期管理計劃的現況(Status of Used Nuclear Fuel and Radioactive Waste Long-term Management Programs in Canada)

本報告係由加拿大放射性廢棄物管理組織(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)的 Miklos Garamszeghy 先生簡報，內容摘述如下：

(1)加拿大的放射性廢棄物及用過核子燃料來自多元的核能活動，包含鈾礦開採、核子燃料製造、研究用核子反應器、核能電廠、放射性同位素生產與使用以及核設施除役活動等。雖然許多政府部門、機構、醫院、大學等都參與了放射性廢物的短期管理，但只有少數組織參與長期管理(圖 12)，其中，有關用過核子燃料的長期管理即是由 NWMO 來負責。

(2)加拿大用過核子燃料(主要為 Used Canada Deuterium Uranium (CANDU))，主要來自 22 個核能電廠，截至 2016 年 6 月，加拿大用過核子燃料約有 270 萬束，並且在加拿大現有核子反應器達運轉年限時，估計用過核子燃料的總

數可能達到約 540 萬。這些用過核子燃料會在核子反應器旁的用過燃料池貯存 7-10 年後，移至核能電廠內的乾式貯存設施貯存。

(3) 乾式貯存容器的最小設計壽命為 50 年。透過持續的維護監測和檢查，這些貯存容器可以安全使用更長的時間。貯存容器的使用年限 50 年到期後是否還要再延長，或者選擇將用過核子燃料重新包裝再貯存，這些決定將取決於許多因素，包括實施適應性分階段管理的時間(Adaptive Phased Management, AMP)。

(4) 2002 年 11 月，加拿大議會通過了核燃料廢棄物法(Nuclear Fuel Waste Act, NFWA)。要求加拿大放射性廢棄物主要持有者建立放射性廢棄物管理組織(NWMO)。

NWMO 的首要任務針對用過核子燃料長期安全管理的適當方法進行為期三年的研究，並向加拿大政府提出一個建議方法。NWMO 於 2005 年 11 月向政府提交了建議報告。2007 年 6 月，加拿大政府批准該報告書中的建議，採用適應性分階段管理(APM)方法來進行用過核子燃料長期管理。這與其他具有核電計劃的國家採用的長期管理做法是一致的。NWMO 被政府授權執行 APM。

(5) APM 既是一種技術方法，也是一種管理系統。APM 還涉及一種運輸系統的開發，用來將用過核子燃料從目前貯存的設施移至新的場址。管理系統涉及現實可管理的階段，每個階段都有明確的決策點，使執行的速度和方式具有靈活性，促使利害關係人在過程中持續參與。APM 也被設計為在其設計和實施的所有方面都能滿足嚴格的安全標準。根據這種方法，用過核子燃料將被隔離並貯放在深層地質處置場(Deep Geological Repository, DGR)，處置場所位置必須具有合適的地質結構，如位於穩定的結晶或沉積岩層中，標稱深度為地表以下 500 公尺。DGR 概念包含多個工程屏障，以安全貯存和隔離用過核子燃料。此外，處置場址也必須要有知情且願意接納的在地社區。

- (6) 雖然用過核子燃料的放射性活度會隨時間衰減，但化學毒性仍然存在。使其仍將保持數十萬年的潛在健康風險，基於這個原因，用過核子燃料需要嚴密的管理。加拿大用過核子燃料目前在中期貯存設施中貯存管理。這些設施位於安大略省(Ontario)，魁北克省(Quebec)和新布倫瑞克省(New Brunswick)的核能電廠，以及加拿大原子能有限公司在馬尼托巴省(Manitoba)的Whiteshell 實驗室的場址和安大略省 Chalk River 實驗室的場址。(圖 13)
- (7) 除了用過核子燃料的長期管理外，本篇專題演講還簡要介紹了放射性廢棄物長期管理活動的現況，即安大略電力公司的深層地質處置場(OPG DGR)。該處置場主要用來貯存安大略電力公司所產生的低階與中階放射性廢棄物(LLW 及 ILW)，處置場之參考深度 680 公尺，400 億年的石灰岩地質。貯存容量為 20 萬立方公尺，廠址位於布魯斯核電廠旁，與安大略公司的放射性廢棄物管理設施相鄰。該場址為一經地區民眾同意的自願場址，預計 2020-2030 年中後期開始營運。本案目前正在環境評估及申照文件審查。
- (8) 整體而言，目前加拿大的放射性廢棄物皆安全的管理，放射性廢棄物的長期管理計畫也在穩定發展中，在最終處置場完成以前，暫時由廢棄物的生產單位負責長期貯存管理。

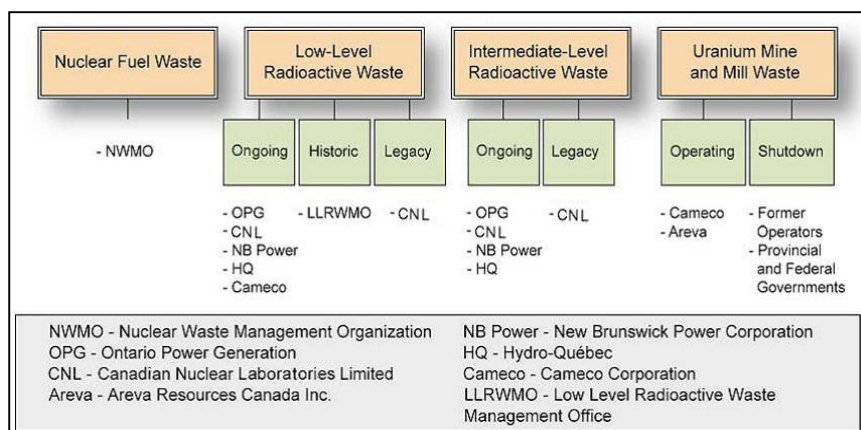


圖 12 加拿大用過核子燃料及放射性廢棄物長期管理組織。



圖 13 加拿大用過核子燃料中期貯存設施分佈。

## 6. 整合核燃料循環後端的需要(The Need for Integrating the Back End of the Nuclear Fuel Cycle)

本報告係由美國 Sandia 國家實驗室的 Evaristo Bonano 博士簡報，內容摘述如下：

- (1) 深層地質處置計畫自 1950 年代開始推展，被認為是用過核子燃料及高放射性廢棄物處理的最終途徑。2001 年美國國家研究委員會(National Research Council)即說明透過地質隔離來處置用過核子燃料及高放射性廢棄物已是國際間的共識，並為長期處置放射性廢棄物唯一可行的方法
- (2) 為使現行之用過核子燃料管理方式將來能順利銜接地質處置，必須就現行之管理策略進行整體考量。廢棄物處置的形式(包括廢棄物體積，放射性核種含量，熱能，廢棄物包裝尺寸以及一系列地質環境中的廢棄物形態和包裝壽命)與處置場設計和性能相關。因此，現階段所選擇的用過核子燃料管理方式將可能會影響未來處置場在選址和設計的靈活性。
- (3) 由於美國雅卡山計畫中止，使得美國核能電廠營運所產生的用過核子燃料以及國防活動所產生的高放射性廢棄物沒有處置場址得以進行最終處置。目前美國的核燃料循環後端，係由各種不同法規及不同責任機關的獨立體組成，

為使未來能與最終處置順利銜接，美國考量處置成本、技術、營運及法規監管因素，正在積極發展核燃料循環後端的整合技術。

(4) 目前用過核子燃料暫時貯存在乾式貯存設施。用於裝填用過核子燃料的貯存罐大多為雙用途貯存罐(Dual purpose Canister, DPC)，係為經核准可以作為運送及貯存用過核子燃料兩種用途的貯存罐。經統計，至 2017 年 8 月，美國有 78 座乾式貯存設施，共計有 2720 個貯存護箱，貯存 113,797 束用過核子燃料。(圖 14-16)

(5) 觀察現行的貯存管理方式，有三項特點：

- A. 貯存管理方式是安全可靠的，但若是進行延長貯存，則需要進行進一步評估，包含護箱完整性、燃料完整性及老化管理措施。
- B. 貯存管方式最適合在核電廠實施，但須考量職業劑量、核反應器運轉效率以及場址安全的成本效益。
- C. 貯存管理方式並未對運送或處置進行優化，如熱負載、包裝大小及包裝設計。

(6) 核燃料循環後端整合的可能選項：

- A. 選擇一個標準化運輸、老化及處置的貯存罐系統(standardized transportation, aging and disposal(STAD)canister system)，裝載在核子反應器旁，使用過核子燃料可以直接自燃料池裝入貯存罐。惟這個方法至少要到 2030 年左右才能夠實現，而且也缺乏讓業者願意使用的誘因。
- B. 在集中式貯存設施進行用過核子燃料再包裝，由 DPC canister 移至 STAD canister。這個方法需要投入成本及時間規劃，而且必需處理因換罐所產生的低放射性廢棄物。
- C. 處置場設計成可處理多個包裝系統，目前計畫處置一些 DPC canister，其他的部份則需先進行再包裝。



(7)核燃料循環後端整合必須對所有的系統進行成本考量，包含操作數量，包裝數量，處置場設計以及核照許可的複雜性。目前美國能源部(Department of energy, DOE)正在針對各種整合方法進行評估中。

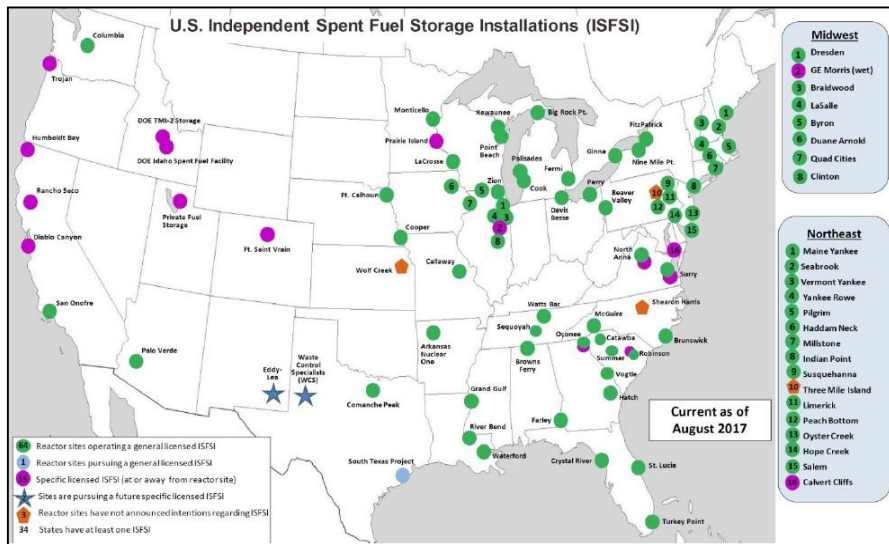


圖 14 美國用過核子燃料乾式貯存設施分佈。

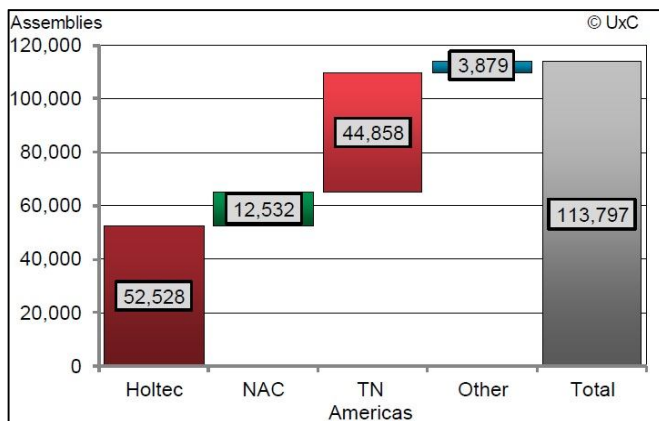


圖 15 美國乾式貯存設施貯存的用過核子燃料數量。

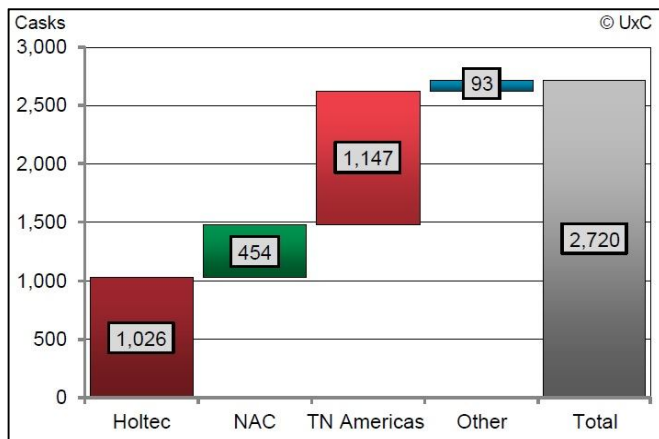


圖 16 美國乾式貯存設施護箱數量。

## 7. 英國鈾廢棄物管理(Plutonium Waste Management in the UK)

本報告係由 Michael Slater 先生簡報，內容摘述如下：

(1) 英國的鈾廢棄物係由過去數十年來大規模的用過核子燃料再處理作業所產生。估計整個再處理作業將會產生約 140tHM(tons heavy metal)的鈾廢棄物，其中約 120tHM 屬英國持有，約 20tHM 為境外國家持有。鈾廢棄物的形式為二氧化鈾粉末，由 Magnox 及 Thorp 再處理廠製造。目前英國的政策是將這些廢棄物以安全可靠的方式進行長期貯存，等待最終處置方式確認。

(2) 除了長期貯存，英國政府正在評估其他處理鈾廢棄物的可行方案，包含：

- A. 作為輕水式反應器 MOX(Mixed Oxide) fuel 再利用。
- B. 放入 Candu EC6 reactors 再利用。
- C. 放入 GEH prism Fast reactors 再利用。
- D. 研究利用熱等靜壓(HIP)搭配其他技術來進行固化處理。

(3) 固化處理的時程規劃：

- A. 2017-2018，設計及建置 HIP 處理設備。
- B. 2019，將 HIP 處理設備裝置在國家核能實驗室(NNL)。
- C. 2020，完成小量(30g Pu)試驗，以確定所選定的廢棄物型態可以生產出來並符合接受標準。
- D. 2030，尋找工業夥伴已驗證固化方式可以達到工業規模。

(4) 整體而言，目前英國的鈾廢棄物管理政策為長期貯存，其他可行的方案正在研究發展中，不管是再利用或是固化處理，依據目前的評估至少要到 2030 年才有可能實現，在此之前，英國政府會先就技術成熟度、經濟、附加優勢（如英國 R&D 技術培養）等要素進行通盤考量後，才會選定後續處理策略。

## 四、 建議事項

1. 澳大利亞 ANSTO 發展的 Synroc 廢棄物處理技術，能減少廢棄物體積、增加固化體的耐久性、減少固化體的生命週期成本及降低對環境的衝擊，有利於放射性廢棄物長期貯存及銜接最終處置。目前除了用以處理澳大利亞境內之中階放射性廢棄物，更推廣至美國及英國的高階放射性廢棄物處理，其核心技術值得我國相關研究機構及台電公司進一步探討，以精進放射性廢棄物處理技術。
2. 南澳大利亞州政府成立核燃料循環皇家委員會，針對南澳大利亞州參與核燃料循環的潛力，進行全面性的研究，並建議南澳大利亞州政府得建置國際高階及中階放射性廢棄物貯存及處置設施。雖然未得到公民審議團的過半數支持，州政府表示仍將持續進行調查，透過多元的溝通平台(包含社群網站(Facebook、Twitter)、地方說明會、校園宣導等)凝聚社會共識，以爭取成案的可能性。我國在最終處置場選址議題上，可參考南澳公眾溝通經驗，以多元溝通方式增進民眾對放射性廢棄物處理的認知，逐步累積共識使最終處置計畫能順利推展。
3. 美國及加拿大在用過核子燃料進入最終處置前，現階段係貯放在乾式貯存設施，並朝向中長期貯存之管制規劃。美國能源部正就處置成本、技術、營運及法規監管等因素，積極發展核燃料循環後端的整合技術，以利最終處置能順利執行。我國核能電廠除役計畫規劃將用過核子燃料移至廠內乾式貯存設施貯存，等待集中式貯存設施或是最終處置場完成興建，再移出核能電廠進行貯存管理。此管理策略應是符合世界潮流，惟我們仍需隨時掌握國際間核能先進國家的管制策略發展，作為精進我國管制技術的重要參考。
4. 「放射性廢棄物管理的科學基礎國際研討會」每兩年定期於美國以外之核能國家舉辦，除了可以獲取國際間放射性廢棄物處理技術發展新知，亦可瞭解主辦國的核能發展資訊。我國核能電廠即將步入除役階段，放射性廢棄物處理為除役作業的重點項目，對於國際間相關之管理動態及策略走向應即時掌握，建議編列足夠經費參與國際研討會，俾利國內除役作業的進行。

## 五、 參考資料

1. 報告中引用之圖片及資料來自下列參考網站：

<http://www.ansto.gov.au/index.htm>

<http://www.radioactivewaste.gov.au/site-selection-process>

<https://www.nwmo.ca/>

2. 美國乾式貯存統計資料及圖片來自 StoreFUEL and Decommissioning Report (2018.1.9)