

出國報告（出國類別：其他）

參加第2屆深層地質處置關鍵議題  
國際研討會及參訪經濟合作暨發展  
組織核能署(OECD/NEA)

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：萬明憲技士

派赴地區：德國、法國

公差期間：105 年 9 月 24 日至 10 月 2 日

報告日期：105 年 11 月 23 日

## 摘要

本次於德國科隆舉辦之第 2 屆深層地質處置關鍵議題國際研討會(Key Topics on Deep Geological Disposal–Challenges of a Site Selection Process: Society-Procedures-Safety)，由德國處置研究協會(DAEF)所主辦。研討會主要探討國際間在放射性廢棄物處置場址選址方面技術研究成果、選址實務經驗以及選址策略與規劃，範圍包括(1)選址過程設計經驗或成果；(2)國際間選址過程的實務經驗或設計；(3)以科學為基準的選址準則應用發展情形；(4)廢棄物處置安全論證(safety case)的科學觀點。與會講者分享目前技術研究成果或實務經驗，亦或基於現況而提出未來發展規劃情形。

研討會結束後，前往法國巴黎參訪經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)，拜會我國原能會派駐於該署放射性廢棄物管理委員會(RWMC)林繼統副組長，並就 NEA 之主要任務、公眾溝通研究經驗以及現階段法國放射性廢棄物管理之發展資訊進行意見交換與討論。

## 目 錄

|           |    |
|-----------|----|
| 一、目的..... | 1  |
| 二、過程..... | 2  |
| 三、心得..... | 20 |
| 四、建議..... | 22 |

## 一、目的

本次參加於德國科隆舉辦之第2屆深層地質處置關鍵議題國際研討會(Key Topics on Deep Geological Disposal—Challenges of a Site Selection Process: Society-Procedures-Safety)，會議探討國際間在放射性廢棄物處置場址選址方面技術研究成果、選址實務經驗或是選址策略與規劃。由於高放射性廢棄物採深地層處置已逐漸成為全球共識，所以如何產生適當的處置場選址程序，是使用核能國家必須面臨的挑戰。選址過程應考慮重點多為社會經濟條件、提升安全所採之科學與技術、處置場安全性、完善的管理、土地使用與區域規劃、法規及政策現況等等。而上述諸多面向之間的調和、規畫作法與期程、執行方式乃至整體策略的擬定，各國不盡相同，然最終目標均是希望建立一個在處置時間尺度內對人類及生物圈安全的處置環境。本次研討會主要探討範圍包括(1)選址過程設計經驗或成果；(2)國際間選址過程的實務經驗或設計；(3)以科學為基準的選址準則應用發展情形；(4)廢棄物處置安全論證(safety case)的科學觀點。與會講者分享該國之技術研究成果或實務經驗，亦或基於現況而提出未來發展者。我國用過核子燃料處置目前處於初期階段，可作為國內未來推動處置計畫工作及安全管制作業的重要參考。

研討會結束後，前往法國巴黎參訪經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)，拜會我國原能會派駐於該署放射性廢棄物管理委員會(RWMC)林繼統副組長，就 NEA 之主要任務、公眾溝通研究經驗以及現階段法國放射性廢棄物管理之發展資訊進行交流討論。其中法國高放處置計畫 Cigeo 目前採用”技術完備性等級 TRL(Technology Readiness Level)”評估工具，將技術成熟度予以量化，提供選址作業者評估整體計畫構成要項的技術進展情形，其實務分析作法，亦可提供國內未來選址作業完備性評估之考量。

## 二、過程

### (一) 行程

| 日期           | 行程                         |
|--------------|----------------------------|
| 9 月 24 日 (六) | 台北→科隆 (去程)                 |
| 9 月 25 日 (日) | 台北→科隆 (去程)                 |
| 9 月 26 日 (一) | 研討會資料準備                    |
| 9 月 27 日 (二) | 參加「參加第 2 屆深層地質處置關鍵議題國際研討會」 |
| 9 月 28 日 (三) | 參加「參加第 2 屆深層地質處置關鍵議題國際研討會」 |
| 9 月 29 日 (四) | 科隆→巴黎 (路程) 及參訪資料準備         |
| 9 月 30 日 (五) | 參訪經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)   |
| 10 月 1 日 (六) | 巴黎→台北 (返程)                 |
| 10 月 2 日 (日) | 巴黎→台北 (返程)                 |

### (二) 參加第 2 屆深層地質處置關鍵議題國際研討會(Key Topics on Deep Geological Disposal–Challenges of a Site Selection Process: Society-Procedures-Safety)

本次研討會於德國科隆舉辦 (如圖 1、2)，主要探討於深層地質處置的選址過程中，來自社會經濟、過程合理性及安全技術方面的挑戰，會中來自八個國家不同人員共計發表 32 篇論文及進行研究討論。選址過程的考慮重點，主要包括社會經濟條件、為提升安全所採用之科學與技術、處置場安全性、完善的管理、土地使用與區域規劃、法規及政策現況等方面，會中針對相關議題簡報研究成果及分享經驗。個人就本次研討會簡報內容，選擇代表性議題進行重點紀要，說明如下：



圖 1、研討會舉辦地點 Gürzenich Köln



圖 2、研討會場情形

1. 「經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)安全論證整合小組扮演之角色」(主講人：Lucy Bailey)

主講人Bailey女士擔任OECD/NEA(經濟合作暨發展組織核能署)安全論證整合小組(Integration Group for the Safety Case, IGSC)主席。IGSC於2000年由NEA放射性廢棄物管理委員會(Radioactive Waste Management Committee, RWMC)成立，主要任務為協助成員國發展選址作業各個階段的安全論證技術，並提供國際性的策略與政策溝通平台，IGSC同時也是RWMC的諮詢單位，協助提出評估成果作為決策參考。

簡報首先介紹IGSC最近辦理之年度專題研討會議所討論的重點事項，主要從地球科學觀點，探討於選址過程中其所扮演角色及相關應用，包括：

- (1) 邀集成員國共同探討處置設施在選址過程中，有關地球科學論證方面之計畫內容或目前進展。
- (2) 就地球科學論證方法論目前的應用情形，進行資料整合與彙編。
- (3) 對於特定地球科學論證方法論的相關資訊，探討提供選址當地的利害關係人(stakeholders)(不論是技術或非技術人員)的機制。
- (4) 從管制的角度與經驗，評估地球科學論證方法論的應用性。

從管制要求來看，各國於選址過程中，對地球科學論證方法論的使用程度有很大的差異。舉例而言，瑞士的選址計畫高度著重地球科學論證方法論的應用，然而瑞典則並未特別強調此方法論，而是認為處置系統的整體安全功能才是重點。美國方面要求處置系統至少應包含一項天然障壁及一項工程障壁，對於子系統則沒有管制要求；英國部分，則是優先辦理地質調查篩選工作，以提供大眾參考並作為建立共識之依循。

會議中亦討論到穩定的地質系統所具備之優點與處置母岩之水文地質特性，以及選址過程中社會經濟因素所扮演的角色。選址的成功，必須同時滿足地球科學(地質安全)及社會方面準則(社會經濟因素)。

IGSC目前進行中以及參與的計畫，包含：

- (1) OECD-NEA FEP(Features, Events, Processes-特徵，事件及作用)資料庫的發展與維護-以提供國際執行安全論證作業之參考。
- (2) 關鍵核種之化學熱力學資料庫的維護。

- (3) 黏土論壇-主題為黏土處置母岩的專題討論，提供彼此分享專業知識及探討發展現況之技術平台。
  - (4) 鹽性論壇-探討處置設施設置於鹽性環境相關議題。
  - (5) 結晶岩論壇。
  - (6) 處置運轉安全-為一專家小組，研究地質處置設施之運轉安全性。
  - (7) RepMet-NEA放射性廢棄物處置之元數據(metadata)管理計畫，將協助國際以管理處置作業各項資料、資訊及紀錄。
  - (8) 安全論證溝通-探討如何將具技術性及複雜性的安全論證資訊，向非技術人員溝通說明。
2. 「高放射性廢棄物及用過核子燃料深層地質處置場址選址過程的設計考量」(主講人：Daniel Metlay)

Metlay先生為美國核廢料技術審查委員會(Nuclear Waste Technical Review Board, NWTRB)高級工程師。NWTRB於1987年成立，屬於獨立聯邦機構，其主要任務為針對高放射性廢棄物與用過核子燃料的管理與處置相關議題，進行科學性及技術層面研究與評估，以向美國國會及能源部(DOE)提出獨立專業意見，同時協助DOE依核廢料政策法(Nuclear Waste Policy Act, NWPA)，執行高放射性廢棄物與用過核子燃料管理與處置工作的同儕審查工作，並向國會及DOE提出審查發現及建議。NWTRB同時亦負有向政府、非政府組織(NGO)及社會大眾公開資訊之責。

本次簡報主要說明高放射性廢棄物與用過核子燃料之最終處置場，在選址過程中的考量要素，主要包括四項概念架構：

第一、處置場址的選址過程，應同時考量處置技術的適宜性及社會公眾接受程度。而公眾接受程度經參照法律及相關規定，可再定出各項“篩選因子”以利明確地描述可接受度（篩選因子概念如圖3）。對選址作業而言，部分的工作不僅是階段性概念，更有可能須要反覆迭代地重複進行，而各潛在場址也不見得只會被篩選過一次。於選址作業的前期階段，這些篩選因子的應用通常較偏向非正式且以啟發性質為主，而於中後期，篩選因子的應用則漸趨嚴謹並將偏向參照法規層面來執行。

第二、「處置技術適宜性」及「社會公眾接受度」並非彼此獨立不相干，反而是互相牽動影響的兩項因子（如圖4）。亦即社會接受度將會影響技術適宜性之評估結果，反

之亦然。舉例而言，公眾對核能應用所持態度將影響潛在場址之安全評估；而技術成果的發展情形，也將影響公眾的接受程度。

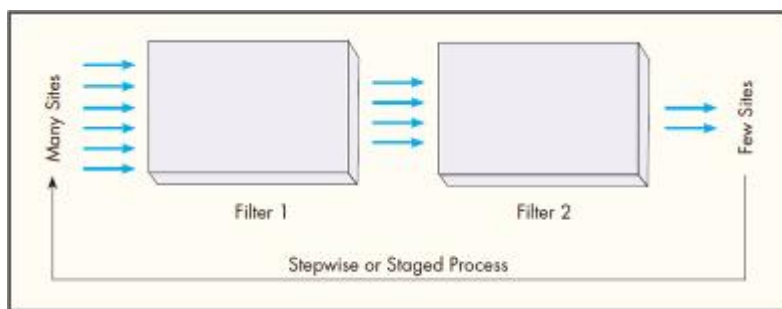


圖3、處置場址篩選因子概念

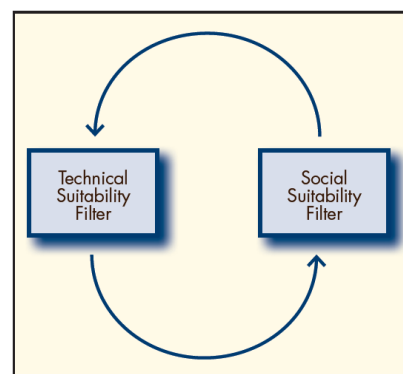


圖4、篩選因子相互牽動

第三、評定場址適宜性之準則，可大致區分為三類。第一類為排除性準則，這類準則係將不適宜處置的地點先行排除，這些地點包括斷層帶、火山附近或具資源開採潛能處等。第二類為特定母岩準則，係經過初步研究後，預定於特定岩層(鹽岩、黏土岩、結晶岩)進行處置，並於這些岩層進一步調查或研究。第三類為一般性準則，提供不同岩性場址作為評估基準。

第四、推動深層地質處置選址，於場址選定後，將對處置場所在當地造成若干衝擊，包括一般性及特殊性影響。一般性影響部分，諸如對當地稅收、勞動力情形、交通現況造成改變。特殊性影響，則來自於大眾對"核能"的認知差異所致，如處置場所接收的核物料是否會造成當地農產品遭受污染或是阻礙觀光發展等。選址執行者應盡力尋求那些對一般性影響有高度的正面提升，以及對特殊性影響有低度的負面影響的場址。

### 3. 「對在結晶母岩進行的高放處置作業之橫坑回填設計研究以強化 CRZ-研究調查現況」(主講人：Nina Müller-Hoeppel)

2013年，德國聯邦政府基於選址法(Site Selection Act(StandAG, 2013))，進行一項關於產熱放射性廢棄物處置場選址的新程序，目標是以健全及透明的科學技術資訊為基礎，確保處置期程的安全性。奠基於「產熱放射性廢棄物最終處置之安全要求指導(對照2010/9/30)」(BMU, 2010)，早年所發展的Gorleben場址處置概念亦應包含封閉系統部分。參考安全方面要求，放射性廢棄物是被侷限在所謂"具圍阻功能岩體區"(containment providing rock zone, CRZ)中，僅允許極微量的核種釋出。對某些處置場的設計而言，岩鹽障壁完整性與封閉系統功能同等重要，後者係為補CRZ之不足，然而岩鹽障壁完整性會受到通道開挖影響而降低，相對而言CRZ極為重要(故其定義僅允許容許值以下的核種釋出(GRS, 2013))，因此，只要岩鹽結構情形類似於Gorleben場址者，應可符合

安全的要求。依據StandAG 2013，為達成最高程度的安全性，先期安全分析認為Gorleben為可供作為處置母岩選項之一，而在鹽質場址中此亦為符合實務的分析結果。

諸如瑞典、芬蘭、加拿大、捷克等許多國家，均以結晶岩作為高放處置母岩，處置設計時應考量結晶岩之破裂面以及裂縫含水等問題。為符合劑量及風險限值等輻射防護要求，利用盛裝廢料之容器、膨潤土、緩衝材、回填材料等構成主要工程障壁。因此，結晶岩中的橫坑、豎井封填方面設計前提，將不同於前述以CRZ為主的封填設計。結晶岩中橫坑、豎井封填方面設計前提是經指定的，且已透過現場或室內實驗初步獲得若干研究成果（如圖5、6）。參考DBETEC 2016，在德國一個假設的花崗岩處置場，即使處置對象像是MOX高產熱廢棄物，容器表面溫度也可符合低於100°C的要求。由於花崗岩質地緊密，目前也被討論是否可將花崗岩認定為CRZ的一種(Jobmann et al. 2016)。

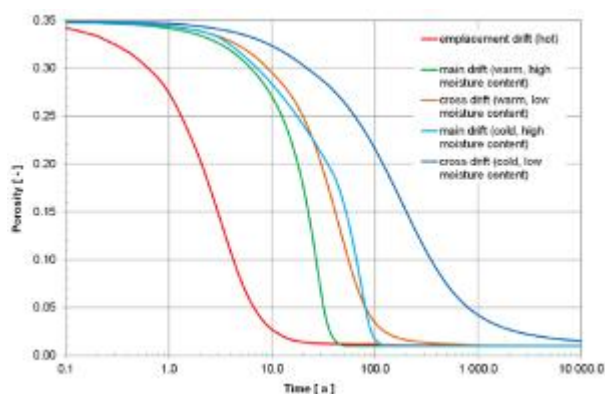


圖5、橫坑回填中的孔隙演進情形比較

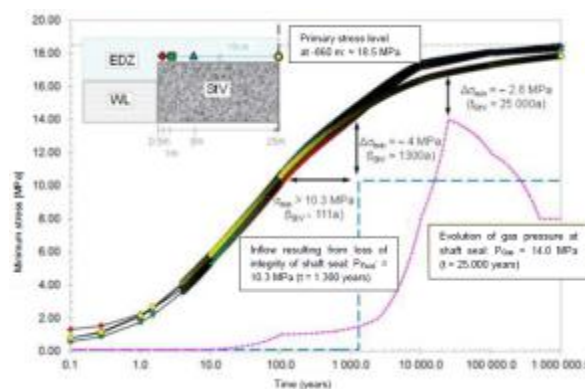


圖6、虛擬橫坑回填之開挖損傷區(EDZ)應力之比較

依據芬蘭地下實驗室ONKALO的調查結果，結晶岩中亦存有未受擾動的乾燥區，然而在岩鹽中，開挖通道的封填則是重要的一環。對瑞典、芬蘭、加拿大、捷克等國而言，封填目的主要是限制核種釋出及水分入侵，以利符合劑量與風險限值標準。目前對於結晶岩中的CRZ及封填所具有之功能性方面，也有相關的研究進行中。

#### 4. 「對於高放射性廢棄物及用過核子燃料最終處置場再取出與相關要求之關聯性」(主講人：Philipp Herold)

德國的高放與用過核子燃料處置策略，長久以來一直受到廣泛討論，而類似的討論時常演變為探討決策可逆的必要性與討論廢棄物再取出的要求。廢棄物再取出是決策可逆概念中的一環，也屬於整體處置策略的一項應用工具。

不論是從社會面、道德、經濟、安全性及技術層面來看，再取出的優、缺點尚有廣泛的討論空間，然而，近來再取出觀念則有逐漸形成的趨勢，這種情形也呼應了高

放射性物料貯存委員會的任務。StandAG §3指出，廢棄物最終處置搭配再取出選擇性，是較為適當的處置策略(Kom, 2016)。此外，「產熱放射性廢棄物最終處置之安全要求指導」(BMU, 2010)也訂出安全要求，將再取出納入申照的規定中，對應的安全要求並體現了德國原子能法「...避免因系統建造及運轉產生危害...」 (§7 II Nr. 3 AtG)的精神，包括應提出合理技術，確保再取出符合科學技術的標準。

再取出的概念與發展，受以下補充設計要求所影響：為確保進行場址恢復或再取出時的安全性，所採取的各項作為不得妨害障壁功能及長期安全性，並應儘可能將開挖之開口數量與對處置母岩影響降至最低，此外，處置作業的置放區域範圍應保持最小限度並即時完成置放，隨後進行回填及封填工作(BMU, 2010)。德國的處置概念大抵包含三個主要運作過程，即置放、回填及封閉，此三個過程同樣重要且將並行實現，同時確保廢棄物包件能即時地運送至處置場之被動安全系統，此策略並符合安全方面要求。

廢棄物包件的再取出，其實就是將廢棄物從被動的安全環境中，重新取回到一般的環境並以人為方式進行管理。適當的再取出方式應配合考量前述三個過程，並有對應的技術為之（如圖7）。對再取出基本要求而言，”重新開挖”是適當的方法，並於執行安置作業時即應納入考量，調整設計方法與技術以降低再取出時的擾動，亦可提高再取出期間作業環境的有利性。然有關再取出的要求，將大幅影響處置場設計及地下設施的運轉，亦即由於考量再取出，影響了處置場(包含地面設施)的整體設計。

簡報中簡要說明了德國現行法令對再取出的定義與制定情形，另說明衍生的技術議題及執行策略，並概要指出對地下、地表及各設施之影響。

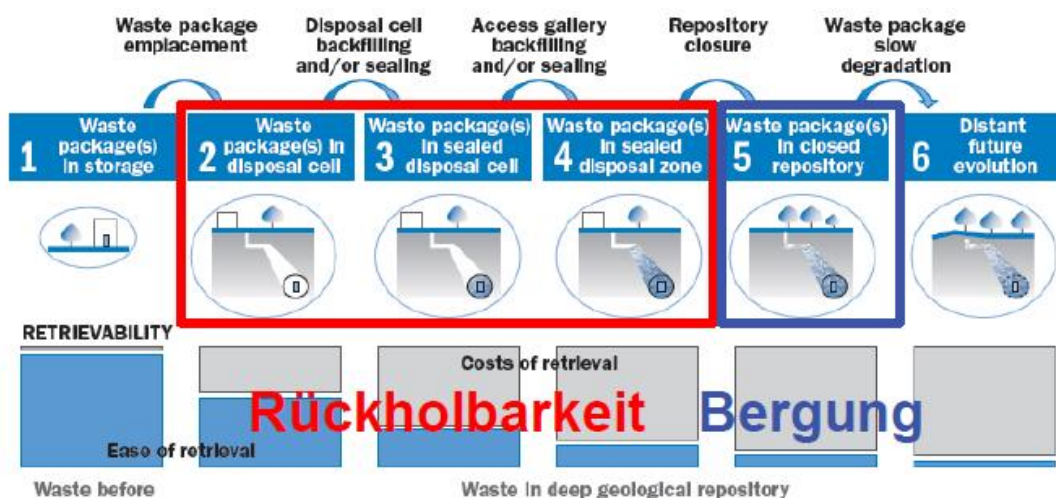


圖7、放射性廢棄物再取出及場地復原

5. 「於深地層處置系統中技術準備情況評估(Technology Readiness Assessment, TRA)方法之應用」(主講人：S. David Sevougian)

Sevougian先生服務於美國Sandia國家實驗室，Sandia國家實驗室為一受聯邦資助多重任務屬性之研究發展中心(FFRDC)，以提升國土安全及強化國家競爭優勢為目標，進行研究任務及計畫執行，其中並包含核子工程、核物料管理、放射性物質檢測技術、核子保防、保安等與核能應用有關項目。

所謂技術準備情況評估(TRA)方法，是屬於研發工作(R&D)中的一項正規程序，用以提升技術成熟性或設施運轉所需技術之完備性(DOE, 2013)。TRA並對系統中的關鍵要素定出技術完備性等級(technology readiness level, TRL)，稱之為關鍵技術要素(Critical Technology Elements, CTEs)。TRA的採用，不僅是為了降低系統及技術於調度與應用執行上的風險，並且將資本與人力作邏輯性的安排並提出計畫。資源分配最佳化即為一例。

由於處置場包含工程及天然(地質)障壁，此亦可運用TRA概念，尤其雖就工程障壁系統(Engineering Barrier System, EBS)而言，理應先就工程技術(如隧道建造、廢棄物置放)與實體構成要素(如緩衝材料/設計及廢棄物包件材料/設計)進行完善的評估，然而本質上，卻是需對天然障壁系統(natural barrier system, NBS)的初始及擾動(如岩石擾動區)狀態進行完善評估，此時則可利用TRA概念進行評估工作。為執行相關作業，長期以來係採用安全論證(Repository Safety Case)以彙整資訊及建立信心基礎，提出對於系統安全及配置完備性的決策評估，惟本次簡報所提的TRA修正程序，主要是針對處置子系統技術層面之應用，此與地質處置系統具有密切關聯性。

此處簡單說明兩個關於地質處置方面觀點，或可協助瞭解TRA是如何應用到各子系統及相關技術層面上：

- (1) 進行地質處置場的技術發展及RD&D作業時，應瞭解在處置場封閉前作業及探討封閉後系統演化之技術方面，均包含有”時間”因子。
- (2) 在探討處置場封閉後性能的技术及RD&D作業時，應瞭解於兩個關鍵子系統(工程障壁及天然障壁)中，均具有”空間”或實體因子。

大部分的封閉前技術(如處置場建造、開挖、試驗技術)都可作為TRA的候選評估項目之一，依據完善TRA建立機制，定義出明確與適用的CTEs，以應用於設施或其他人為技術之評估。

對於提升封閉後處置場相關技術的成熟度而言，簡報中建議以正規的TRA程序，結合傳統的特徵、事件及作用(features, events, and processes, FEPs)評估方法，以評估封閉後處置場子系統及技術方面成熟度。尤其應保留TRA程序中的主要步驟，如CTEs定義、TRLs或類似技術評估、以及為改善系統TRL而提出之RD&D技術發展計畫等。然CTEs的選擇係參考FEPs，對於選定處置場的CTEs而言，TRL主要的考量對象，還是那些在封閉後受自然因素影響為主的子系統。

#### 6. 「Kd-吸附過程於實務上的描述概念」(主講人：V. Brendler)

對於化學性毒物及放射性廢棄物處置的安全評估中，礦物表面吸附是一個重要的阻滯概念，最傳統常見的方式是採用具有時間與空間恆定分配概念的「分配係數Kd」加以描述。吸附過程中，使用具空間與時間變因的分配係數Kd進行相關計算為實務的作法，概念係基於物質在特定的礦物表面溶解，產生「競爭性」吸附現象，並結合離子交換與以準熱力學方式(quasi-thermodynamic manner)預估沉積的一項評估方式。於反應傳輸代碼(此處所指的是r3t)運行前，將先執行多維矩陣的個別運算，代碼運行過程中各自呼叫矩陣中適當的平均傳送參數(averaging deliver parameter)。運算工具並結合三項電腦代碼(PHREEQC、UCODE及SIMLAB)，其優點為：

- (1) 可結合環境參數，計算合理的Kd值。
- (2) 基於Kd矩陣概念展示不確定度及敏感度分析。
- (3) 分析方式對化學反應及環境情況具高度彈性。
- (4) 時間計算方面，本分析工具相較於直接耦合地球化學代碼及反應傳輸代碼作法較具效率。

分析工具可顯示處置場的砂質含水層中，鈾(U)、銩(Am)、鏷(Np)等元素的吸附情形並提供吸附行為的概念驗證，分析結果並常與利用文獻Kd分析所得來進行比較。Gorleben蓋岩含水層中Am(III)的Kd柱狀圖如圖8所示。

核種之敏感度及不確定度分析，可說明三元交互作用效應(ternary interaction effects)、目前常用一般性分配係數的非保守性、以及輸入參數關聯效應的重要性，此外，環境參數在敏感度的排序方面，通常將pH值、溶解無機碳與基質陽離子(matrix cations)含量排在首位，至於有機質影響，考量模式的設計與參數化具有一定挑戰性，將會在未來的計畫進行研究，而過程機制及誤差分佈函數也是重點研究項目。

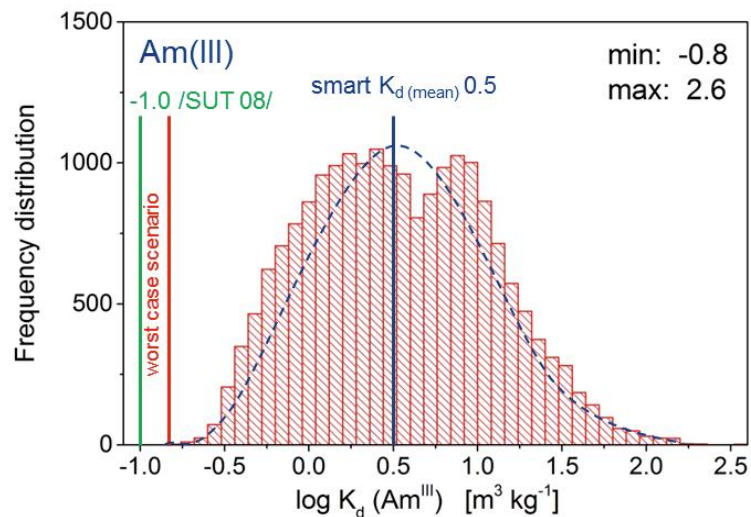


圖8、Gorleben蓋岩(cap rock)上部含水層中Am(III)的Kd柱狀圖

#### 7. 「低鹼性水泥的長期耐久性：天然及歷史類比資料之比較」（主講人：W. Russell Alexander）

對於多樣的處置概念，膨潤土(bentonite)在工程障壁系統(EBS)的性能表現上均扮演重要的角色。之所以選擇膨潤土，大致因為膨潤土可提供廢棄物隔絕與圍阻的功能，以及其處於地質環境中的穩定性。然而膨潤土中具膨脹性質的成分-蒙脫石在高酸鹼值(pH>11)的情況下，性質將變得不穩定，因此處置場使用膨潤土作為回填或封填材料時，對於利用低鹼水泥（滲濾液酸鹼值介於9-11之間）方面的研究有日益增多趨勢。雖然目前對低鹼水泥長期穩定性的研究資料不多，但可透過對低鹼水泥的歷史與天然類比資料併同調查以供理解及研究參考。

在公元前3世紀，羅馬人開始利用火山灰水泥(pozzolanic cements)，作為防止水份滲漏及防潮之用，另外也常應用於海洋結構物上。由以往案例顯示，低鹼水泥在本質上與此火山灰水泥相似，因此為與天然水泥進行比較，將另外呈現羅馬火山灰水泥的近年研究資料以利說明。整體而言，本研究的目標包含：

- (1) 進行混凝土模型分析，以瞭解骨材於微觀與宏觀下之尺寸、材質及比例。
- (2) 比較不同的天然及歷史混凝土的相對抗壓強度及密度。
- (3) 確認判定混凝土滲漏及一般性劣化之指標。

當然，獲得原始水泥特性資料非常困難，以致難以深入探究其溶濾或其他反應，所以不同的羅馬水泥模擬製造方式，將造成其與現代低鹼水泥之比較結果有所差異。可用兩個簡單的方法比較其差異性：

(1) 利用羅馬人的方法製造現代的低鹼水泥。

(2) 利用現代的方法製造羅馬水泥。

其後，比較其物理及力學方面特性，再從這些特性中扣除那些因製程不同而造成的差異，以利快速的評估。

從天然類比資料來看，推測這些因碳酸鈣飽和地下水通過火山灰滲出而形成的天然水泥，有可能就是羅馬工程師所使用水泥砂漿的成份。目前正進行研究以還原製造上述天然水泥，另將著重於測試其耐久性。對使用於處置場的低鹼性水泥而言，有關其長期耐久性方面安全論證，則可利用研究資料與羅馬水泥資料的綜合評估成果來進一步說明。

#### 8. 「英國地質處置場的選址經驗」(主講人：Natalyn Ala)

地質處置設施(geological disposal facility, GDF)是一項高度工程性的設施，主要是利用多重具備防護功能的障壁以及位於地下深處的特性，將放射性廢棄物隔離，以確保有害物質不會對地表環境造成影響。為了找尋GDF的潛在場址，英國政府傾向於採用”以共識為基礎”的方法，即和有意願參與選址作業的社區共同合作。在英國，選址的工作主要是由放射性廢棄物管理局(Radioactive Waste Management, RWM)來負責。

英國在2014年，透過發布政府白皮書”執行深層地質處置工作：高活度放射性廢棄物的長期管理架構”(DECC 2014)，明定處置工作的政策架構。白皮書中提出數項以共識為基礎的作業原則，以供RWM進行選址作業之依循。預計2017年啟動選址計畫，期間RWM將投入更多心力在資訊要求與公開上，並向地方與社區說明，處置場將會為所在地社區帶來哪些正面效益。在取得公眾支持工作完成之前，對於是否與RWM合作以同時獲知資訊與設施效益、是否持續參與接下來的過程、以及是否同意作為最終處置場所在地，決定權將取決於當地社區，社區並有隨時撤回的權利。就長期投資及公共建設發展層面而言，最終處置場的設置將為當地社區帶來可觀的經濟效益，政府並承諾向積極參與選址過程社區，提供短期的額外投資資金。

此外，RWM基於長期地質安全論證資訊，進行了全國地質篩選工作以期順利啟動選址計畫，政府也訂定相關政策以利於有興趣社區能夠參與，包含社區推派代表、與RWM合作交流方式、提供投資效益資訊、以及建立管道以輔助社區在各個過程尋求獨立第三方提供諮詢意見等。

英國之所以傾向採用”以共識為基礎”的選址方式，可追溯至九十年代，當時由於

岩體特徵研究設施的計畫申請遭到當地拒絕，導致尋找中階放射性廢棄物最終處置場計畫隨之被迫中止。為向大眾提供資訊公開及提供未來政策發展資訊，政府成立獨立諮詢委員會（即：放射性廢棄物管理委員會），要求其審視高放射性廢棄物管理之可能選項並提出相關建議，委員會於2006年提出包含數項建議的報告書(CoRWM 2006)並獲得政府採納。提出「依據過往經驗顯示，非採以共識為基礎的選址方式終將失敗，未來選址政策應致力奠基於選址推動者與具有意願社區兩者間的合作夥伴關係之下」觀點並受到政府同意(DECC 006)。政府並同意對於提高社區參與意願，於效益說明上也應有所規範，除短期方面可促進社區參與意願外，長期方面亦可確保放射性廢棄物被當地社區所接受(亦即確保加強社區福祉以提升參與度)。

上述原則反映於2008年白皮書內(DECC 2008)，當時雖有兩個自治市議會和相關的郡議會表示感到興趣，然而在RWM推動地質調查以求進一步瞭解現地地質情形時，受到郡議會的反對並拒絕下一階段的作業。從相關經驗得知，如能適時提供全國性地質資訊概要予社區或利害關係人，作為潛在處置設施適當性的評估參考，將有助於增進社區的信心。

2014年，RWM蒐集彙整全國地質資料並進行初步篩選工作，以作為地質處置長期安全性評估用途，並公開資訊以利民眾獲得。RWM並向獨立性的審查小組倫敦地質學會(Geological Society of London)徵詢專家建議，協助訂定導則以定義地質屬性的考量範疇及產出方式。各界均理解於前述工作中，取得公眾信任是非常重要的，故除了舉辦會議提供公眾與獨立審查小組討論溝通平台外，該導則於最終確定前將接受公眾諮詢。導則於2016年四月完成(RWM 2016)，依內容將可進行初步的篩選及成果產出等工作。全國性的地質篩選結果將提供蘇格蘭，威爾斯及北愛爾蘭具權威性的資訊內容，並將用來向社區說明地質處置場之潛在性。全國性的地質篩選預計於2017年會有初步成果，並可作為未來選址過程重要參考資料。

#### 9. 「先期安全評估在選址過程中扮演之角色」(主講人：Nicole Schubarth-Engelschall)

在德國，選址將依據德國最終處置場選址法(StandAG)來進行，目的是找到一個在處置期間最有可能提供足夠安全性的場址。因此，選址期間的安全評估將扮演舉足輕重的角色，以於選址過程的各個階段提供必要的資訊以利進行決策(如：場址內哪些區域或地點應進一步深入調查)。此外，在選址準則應用方面，安全評估結果可作為補充資訊，確保作法是以科學為本且透明的。安全評估概念也可提供場址進行決策比較，檢視所採方法是否符合先進的科學及技術方法的相關要求。安全評估成果亦有利於確

定最終處置場的興建地點。

依據StandAG進行選址，過程主要區分三個階段，各階段評估結論將以安全評估成果為參考依據，即以安全評估為階段決策重要依據。所為之各項決定即為執行下一階段工作的考量前提。第一階段包含三個子步驟，目的是確認地表調查區域範圍，安全評估方法則於第一階段第三步驟開始應用。選址過程階段性先期安全評估工作如圖9。



圖9、選址過程分階段先期安全評估工作

選址執行者的任務，主要是探索、評估及比較不同的區域及地點，所採方法將與執行安全評估相關並可資相互比較。因此，選址執行者所使用的作業工具必須齊備，而這些應用工具則是奠基於研究發展(R&D)的成果。

選址過程各階段安全評估方法，是從可比較資料庫(comparable data base)發展而來，在選址進行期間，資料庫內容必須進行調整、改善以至完成。資料庫內容則包括：地球科學資料庫、廢棄物清單、處置母岩之具體概念（安全性、證據證明）、處置場概念、廢棄物罐概念等。

如使用現有資料庫對區域或場址進行評估時，於第一階段應採用較通用性的安全評估方式，直到進入到後續階段，安全評估的參考資料將越詳細也越具有特定性，故也越具有代表性。當然，即便依StandAG建議之安全評估法與依原子能法提出申照程序中長期安全評估（安全論證）法兩者頗為相似，然選址過程的先期安全評估與長期安全性評估仍為不同。因此選址過程中，執行安全評估工作將花費相當的時間。

根據”高放射性廢棄物貯存委員會(Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe)”建議，所有先期安全評估工作，應採用先進的科學及技術方式來執行，相關科學與技術方法的修正與發展情形亦應有所考量，另安全分析方法應每十年進行更

新。上述要求致使先期安全評估結果須進行再評估，並重新檢視先期的決策及承諾事項。在選址過程中這是一項受挑戰的部分，所以需搭配具體明確的規定，以避免可能造成的不穩定性。此外尚應考量先進方式在何種情況下的修正與更動，始需對先期安全評估進行對應的再評估，以及再評估的執行深度等等，都是需要思考的問題，畢竟目前為止選址程序是沒有先例可循的。

因此，明確界定各種安全評估方法及其決策助益是很重要的，重點在於執行各種評估方法時，界定出方法之目標及意義，以及瞭解各階段評估結果之彈性與可信賴性。

安全評估最重要的目標大致為：

- (1) 進行特定地點處置場之可行性驗證。
- (2) 檢查並驗證基礎資料庫。
- (3) 確認不確定性與不確定性的處理方式。
- (4) 確認地球科學探索工作及資料庫調整之相關需求。
- (5) 確認RD&D工作需求。

另外，追求上述目標的同時，執行者尚需證明其符合輻射防護的規定。

於特定場址中，考量先期安全評估之基本要求時，除了地質條件外，定義各類岩體之安全導向目標以及廢棄物數量與特性，都是對處置場安全性與概念發展極為重要的，必須及早確定。

隨著對特定情形的關注範圍逐漸縮小，資料庫數量逐漸增加，基本概念的延續與逐步發展，安全評估的重要性及代表意義將隨選址過程的推進日益增加，有必要在各階段對於各安全評估及工作項目均定義清楚，以確認其扮演角色為何（例如：safety evaluation、safety assessment、safety analyses等）。另使用特定安全評估方法以獲具有彈性以及可信賴性之可供比較資料時，通常使用具安全指標的準則，而在第二、三階段，這些指標亦可用來評估輻射結果。

針對安全評估的目標及意義與利害關係人進行溝通也是必要的，如此可減少誤解及避免降低期望。於各階段之初（甚至是在選址過程開始時），即須確定相關定義。於此同時，安全評估亦應符合「產熱廢棄物最終處置的安全要求(Safety Requirements Governing the Final Disposal of Heat-Generating Radioactive Waste)」。

10. 「日本高放射性廢棄物最終處置場址選址過程之修正-科學上的優選地區」(主講人：Hiromitsu Saegusa)

日本對於高放射性廢棄物最終處置選址已建立一套法制系統，不過十多年來進展有限，日本政府遂決定透過2014年4月發布的「戰略能源計畫(Strategic Energy Plan)」，徹底強化執行措施，期能在不對未來的執行措施造成延遲前提下，取得推動高放廢棄物的最終處置工作的解決方案。2015年5月針對處置場選址方面增加一項新的程序，亦即，在啟動正式的法定選址過程前，政府將先就全國地區，區分為「優選區域」、「適合區域」及「不適合區域」三種範圍，其後並採逐步漸進方式，分別進行文獻調查、概要調查及精密調查工作。日本處置計畫發展時程階段性選址作業，分別如圖10、11所示。

為區分上述三種範圍，於2015年9月，考量地質特性與長期穩定性、處置場封閉前安全性及廢棄物運輸安全性後，定出科學判定因子，而未來將進一步納入社會科學等觀點。

從地質特性及其長期穩定性觀點來看，應考慮下列風險：

- (1) 岩漿侵入地下處置設施與爆發。
- (2) 地下處置設施因斷層移動直接受到損害，同時改變斷層內部或斷層周圍的水力特性。
- (3) 因隆起及侵蝕，造成地質障壁厚度的明顯減少。
- (4) 地熱造成的緩衝材料特性改變。
- (5) 火山高溫熱水和/或深層流體入侵處置設施，改變地下水情況，造成廢棄物包件的侵蝕率上升。

目前使用既有的全國性地質資訊來進行評估工作，在對應排除準則的情況下劃分出「不適合區域」範圍，說明如下：

- (1) 場址附近有火山/活動斷層存在。
- (2) 場址附近有顯著隆起/侵蝕、高地熱、火山高溫熱水、深層流體存在情形。
- (3) 場址所在地之地表設施未來有遭遇火山碎屑流之風險。
- (4) 建造階段場址所在之岩盤未壓密層厚度大，以致無法確保地下設施穩定性。

進行第一次篩選後，未被視為”不適合區域”的範圍均為”適合區域”，而距離海岸夠近的區域則被視為”優選區域”。是以沿海地區（包括離岸）是處置場潛在場址的重要調查地區。政府預計於2016年底提出”科學上的優選區域”的初步研究成果。

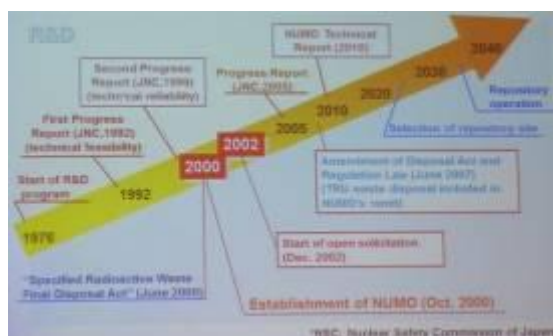


圖10、日本處置計畫時程發展

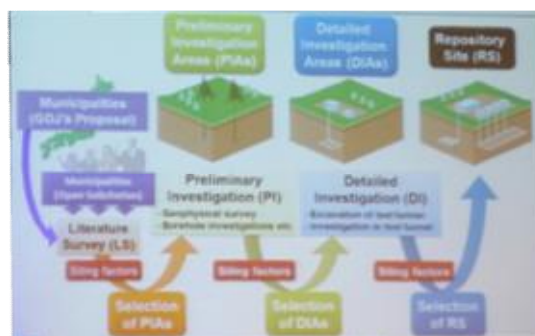


圖11、處置場階段性選址

### （三）參訪經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)

本次行程於德國科隆研討會結束後，順道前往經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)參訪，並拜會原能會駐核能署(NEA)林繼統副組長，就 NEA 之主要任務、國際合作研究計畫展現、公眾溝通研究經驗以及現階段法國放射性廢棄物管理之發展資訊進行交流討論。討論重點以下擇要說明。

#### 1. NEA 概要介紹及說明

經濟合作暨發展組織(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)為一國際性合作組織，由34個會員國所組成，主要針對全球經濟問題，諸如經濟資訊研析、組織管理改善、能源（如核能）發展、氣候變遷、政府支出及稅收、人口老齡化等議題進行研究探討，提供會員國一個政策參考與經驗交換的溝通平台。其中對核能部分並設置核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)，NEA主要任務係於職權領域範圍內積極促進國際合作，推展核能使用安全、核能技術交流及法令規範精進工作。該署透過專業知識的匯集，提供會員國一個資訊與技術合作共享、議題研析及經驗交換的平台。NEA總部設於法國巴黎。

另外，針對核能活動安全和管制規範、放射性廢棄物管理、輻射防護、核子科學、核燃料循環經濟和技術分析、核能相關法律和責任等方面，NEA亦執行許多國際合作研究計畫，目前約有20項進行中國際研究計畫，另不定期公開或更新核能技術刊物，以供各國進行比較與參考。

#### 2. 公眾溝通研究經驗

針對提升民眾信心，建議可能採取的措施包括：

- (1) 採取循序漸進並具有彈性的決策方法，並保留反向決策的可能性。
- (2) 應針對基本原則，取得社會大眾、管制機關及有關單位的共識。
- (3) 透過國際或國內的同儕審查，以進行評估、論證及改善。
- (4) 落實審計以確保組織架構及管理工作的合適性、法律架構及管制、審查過程的充分性，並適時公開資訊。
- (5) 維持決策的開放性，確保並持續每一階段各方的溝通與對話。

另放射性廢管理方式是否為公眾所接受的關鍵因素，亦包含政治層面支持、社會信任、信任主要基本原則、能源政策、發展公共驗收作法等等。

由於各個國家於放射性廢棄物管理方面的影響環境不盡相同，影響層面往往與文化、地區傳統與社會因素息息相關，而這些因素同時也會對趨勢發展有長期的影響，故無法以固定模式或制式的作法套用於每一個國家。各國需以國內文化及社會情形為依歸，尋求符合自身的方式，建立一套最適當的廢棄物管理計畫。執行的過程中，也必須不斷透過國際交流與相互審視，以助於拓寬視野並增進技術能力，同時亦能避免產生偏執的立場。

### 3. 法國放射性廢棄物管理發展

對於高放處置，法國處置專責機構ANDRA提出高放射性廢棄物深層地質處置計畫Cigeo，設施包含(1)地表設施-分為兩個分區，一為接收與檢查高放廢棄物(HLW)與中階長半化期廢棄物(ILW-LL)區，並進行處置前準備工作；另一為地表下工作之輔助作業區。(2)地下設施-地表地下連絡結構、廢棄物處置區(處置單元及連絡橫坑)、物流支援區。法國處置計畫發展情形如圖12所示。

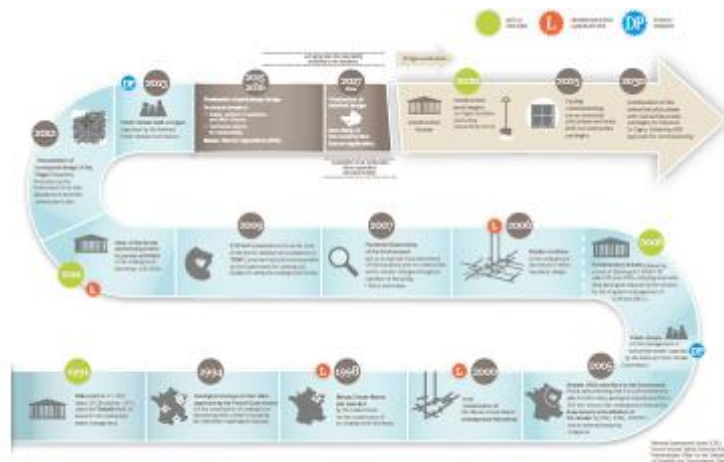


圖12、法國處置計畫發展情形

計畫執行期間為瞭解技術成熟度或完備性，ANDRA採用”技術完備性等級TRL(Technology Readiness Level)”，評估Cigeo構成要項的技術進展情形。TRL主要以分級的方式，來量化某一要項(如設備、組件、系統等)的技術成熟度，原先是為了評估空間系統應運而生，然而亦可調換以供作為評估其他技術發展情形的工具。TRL共分為9個等級，最基本等級(等級1)為在學術研究背景下(如1896年發現放射線)對物理現象的發現、理解進而加以應用。最高等級(等級9)則為已具備一系列完整的可再現過程(reproducible processes)(包括製造、測試及運轉)，以充分定義該評估要項，並能夠符合真實運轉環境中的性能要求。截至2016年1月，Cigeo執行情形符合TRL等級5，意指評估要項的可行性，已經在代表性環境中獲得驗證。為了最終能獲得具備預期功能的處置設施，Cigeo下一階段的發展重點在於設施相關項目製造與測試(項目包括容器、操作設備、封填等)，以期在尺寸、使用材料、生產與安裝方法、操作條件等方面，均能夠符合設計要求。TRL之分級情形及評估流程如圖13所示。

由於地質處置的時間尺度極長，現今世代有責任建置安全的處置設施，並留給未來世代選項，以利未來世代依照目的需求或屆時情況，去修正、改善或採用其他方式來取代目前的設施(如：因技術上的進展突破)，所以法國對於處置設施本身，亦要求具有”可逆性”(reversibility)。實務上，”可逆性”的操作係基於管制系統(governance systems)與計畫管理系統，管制系統包含放廢管理知識的持續精進、資訊與知識的透明化與傳遞、核能安全主管機關ASN(French Nuclear Safety Authority)的管制、公眾參與、以及議會的評估與監督等；計畫管理系統則含括Cigeo設施、運轉操作彈性、設施適應性及包件再取出性的漸次發展與建設等方面之管理。

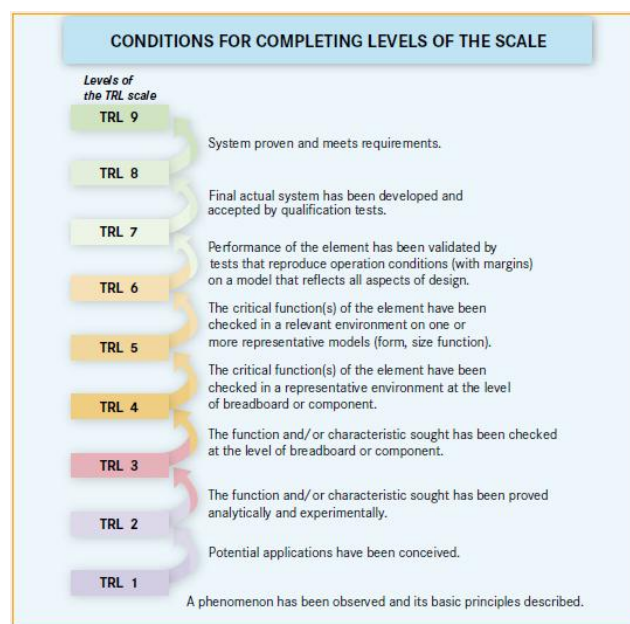


圖13、TRL評估流程圖

於2016年，ANDRA為促進公眾參與並推動資訊透明化，提出總體行動計畫(Master Plan for Operations, PDE)展現Cigeo相關資訊，諸如參考進度(物料清單、預計建造進度、封閉里程碑)、先導試驗階段試運轉情形、執行可逆性時的可能修正。另PDE將會進行諮詢及商議，參考進度或許也會定期接受審視，以便與Cigeo執行過程之階段決策結果相互整合。

### 三、心得

#### (一) 參酌國外經驗提升本國處置技術

高放處置技術發展與選址作業為目前核能使用國家待處理的重要議題，參考各國面對選址問題之作法，考量國情及社會經濟層面，包括探討地質研究成果及安全評估特性，設置專責機構執行選址及公眾溝通工作等作法。經驗顯示溝通成效是決定選址程序是否能順利推進的主要關鍵，然而有效溝通需奠基於成熟的技術建置，才能讓公眾了解。各國國情及地質環境雖不盡相同，然解決處置選址問題所採作法，仍可作為我國重要之參考。

#### (二) 以共識為基礎的選址程序

英國基於早年失敗經驗，瞭解惟有採”以共識為基礎”的選址方式始有可能成功，並將此基本原則納入政府白皮書，確保選址過程各階段之資訊透明公開及溝通管道的暢通，同時彙整全國性地質調查篩選資訊，作為向民眾溝通說明重要資訊。參照英國”以共識為基礎”的選址概念，已逐漸成為全球核能國家欲順利推動選址作業的主要趨勢，惟有透過充分的資訊公開以及持續地溝通對話，方有進一步與地方合作之可能。

#### (三) 落實選址程序各階段之安全分析

參考核能先進國家作法，選址作業的各個階段均應執行符合各該階段需求的安全分析工作，以提供必要的資訊利於階段性決策判斷，並作為執行下一階段工作的參考依循。我國高放處置計畫目前處潛在處置母岩特性調查與評估階段，參照國際作法及經驗，仍應落實初期階段的技術可行性評估調查工作，以利銜接未來候選場址調查、場址詳細調查與處置設施設計等階段工作的進行。

#### (四) 能源主管機關領導積極推動選址工作

日本為推動高放射性廢棄物處置，於 2000 年公布「特定放射性廢棄物最終處置有關法律」，並於 2015 年修訂基本方針，將選址工作原來由 NUMO(原子力發電環境整備機構)及電力公司執行之情形，改為由經濟產業省站在第一線來領導推動選址工作，積極強化民眾溝通及宣導。我國與日本同處選址初期階段，日本經驗可供作為我國選址主辦機關之參考。

#### (五) 積極參與國際組織汲取技術經驗

NEA 為國際性合作組織，提供會員國一個資訊與技術合作共享及經驗交換平台，並提供權威性評估作為各國政策參考。各國為提升核能技術，積極參與核能國際合作組織

已成為共同趨勢。透過技術經驗交換及資訊共享，可有效提升我國技術能力，以利提升公眾信心並凝聚社會共識，促進處置業務之推動。

#### 四、建議

- (一) 高放處置選址為核能使用國家面臨問題，各國亦針對技術及社會經濟層面持續研究，並提出實務經驗以供參考。我國目前處於選址作業初期階段，宜對各國發展經驗與應用技術有所了解，建議於經費許可前提下，可多方參與國際處置研討會或相關討論會議，汲取各國經驗，並瞭解其最新發展或技術應用現況，提升我國技術水準。
- (二) 核能先進國家為推動處置選址，多設置專責機構以負責處置設施之選址、建造、營運及管理等工作，過程並負責民眾溝通與宣導工作。依據國際經驗，設置獨立專責機構執行放廢後端管理的方式已獲得具體成效。我國行政院甫於 2016 年 11 月 17 日通過「行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例」草案，後續將由立法院審議。建議國內宜儘速完成專責機構立法作業，以利核廢料管理作法與國際接軌。
- (三) 處置選址是否能夠成功，最主要關鍵取決於社會大眾支持度，必須提供完善資訊與充分溝通，各階段工作方能往前邁進。然而溝通必須不斷嘗試學習非一蹴可及。參考各國作法，建議國內處置設施選址作業者應秉持開誠布公原則，提供充分資訊供民眾瞭解，並與地方充分溝通協調。真誠與善意將是取得信任的第一步。
- (四) 為提供全國(民眾、利害關係人及政府等)瞭解，並作為選址後續階段參考依據，各國多於選址初期階段進行全國地質調查或初步篩選工作，提出初步評估及調查成果建議。建議台電公司於處置選址初期階段，應建置處置技術能力並就潛在處質母岩進行廣泛資料蒐集及研究評估工作。
- (五) NEA 參考其業務組織任務與因研究屬性為目的成立之任務小組相關研究結果，針對核能議題或會員國所提問題，舉辦具建設性之討論會議並提出研析成果。建議國內相關單位可加強與 NEA 交流，俾獲取寶貴經驗與資訊。