

公差報告(公差類別：其他)

參加2015兩岸放射性廢棄物地質處 置技術研討會並參訪甘肅北山高放 處置場預選場址

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、高弘俊技士、李惠珍技士

派赴地區：大陸地區 北京、甘肅、湖南

公差期間：104年11月8日至11月14日

報告日期：104年12月28日

摘 要

對於高放射性廢棄物最終處置方式，國際間一致規劃採行深層地質處置，將高放射性廢棄物或用過核子燃料埋藏於地下數百公尺穩定地層中，因此最終處置場址之選擇成為首要任務。中國大陸已選定六大預選區，作為其高放廢棄物最終處置候選場址，目前正進行選址前之調查研究工作。另外，於處置場建造前，為深入了解地質特性及驗證功能與技術，一般將透過興建「地下實驗室」以落實此一目標，中國大陸之首座地下實驗室目前正進行選址調查工作，預計於 2020 年興建完成。

本次參加 2015 年兩岸放射性廢棄物地質處置技術研討會，主辦單位並安排參訪核工業北京地質研究院及高放處置場六大預選區之一的甘肅省北山地區，或湖南長沙馬王堆(李惠珍技士)。藉由本次參訪，交換兩岸對於放射性廢棄物處置之技術發展及執行情形，並了解中國大陸目前進行處置場及地下實驗室選址前置作業，及天然類比對於處置安全評估說明之初步概念。為解決高放廢棄物處置問題，中國大陸開發研究調查技術及進行國際交流合作，規劃處置設施研究發展要項及進行場址安全評估，以尋求最為合適之處置地點。對於高放射性廢棄物最終處置技術開發要項及規劃內容，可供我國未來執行相關處置計畫之參考。

目 次

摘 要	i
目 次	ii
壹、目的	1
貳、出國行程	2
參、考察紀要	3
肆、心得	19
伍、建議事項	19

壹、目的

放射性廢棄物最終處置為使用核能必須面臨之問題，我國用過核子燃料管理方案，採行「近程以核電廠內水池式貯存，中程推動廠內乾式貯存，長程發展最終處置技術」，對於「用過核子燃料最終處置計畫」之管制，規劃分為五個階段，目前處於第一階段(2005~2017 年)「潛在處置母岩特性調查與評估」階段，預計於 2017 年提出技術可行性評估報告，2055 年完成處置場建造。

對於高放射性廢棄物最終處置方式，國際間一致規劃採行深層地質處置，將高放射性廢棄物或用過核子燃料埋藏於地下數百公尺穩定地層中，是以最終處置場址之選擇成為首要任務。中國大陸目前已選定六大預選區，作為其高放廢棄物最終處置候選場址，目前則進行選址前之調查研究工作。另外，於處置場建造前，為深入了解地質特性及驗證功能與技術，一般將透過興建「地下實驗室」以落實此一目標，中國大陸之首座地下實驗室目前正進行選址調查工作，預計於 2020 年興建完成。

本次參加 2015 年兩岸放射性廢棄物地質處置技術研討會，主辦單位並安排參訪核工業北京地質研究院及高放處置場六大預選區之一的甘肅省北山地區，或湖南長沙馬王堆(李惠珍技士)。藉由本次參訪，交換兩岸對於放射性廢棄物處置之技術發展及執行情形，並了解中國大陸目前進行處置場及地下實驗室選址前置作業，及天然類比對於處置安全評估說明之初步概念。為解決高放廢棄物處置問題，中國大陸開發研究調查技術及進行國際交流合作，規劃處置設施研究發展要項及進行場址安全評估，以尋求最為合適之處置地點。對於高放射性廢棄物最終處置技術開發要項及規劃內容，可供我國未來執行相關處置計畫之參考。

貳、出國行程

本次赴中國大陸行程，研討會部分由主辦單位安排於北京地質研究院舉辦，研討會結束後主辦單位安排前往甘肅北山及湖南長沙進行現地參訪，行程概要如下表。

日期	地點與行程	工作內容
2015/11/08(日)	台北→北京	去程
2015/11/09(一)	北京地質研究院	<ul style="list-style-type: none">研討會論文發表北京地質研究院處置實驗設施參訪
2015/11/10(二)	北京地質研究院	<ul style="list-style-type: none">研討會論文發表北京地質研究院處置實驗設施參訪
2015/11/11(三)	行程 1、北京→甘肅 行程 2、北京→湖南	交通路程
2015/11/12(四)	行程 1、甘肅北山 行程 2、湖南長沙	技術參訪 路線 1：嘉峪關→北山處置預選場址 (萬明憲技士、高弘俊技士) 路線 2：長沙馬王堆(李惠珍技士)
2015/11/13(五)	行程 1、甘肅→北京 行程 2、湖南→北京	搭機返回北京
2015/11/14(六)	北京→台北	回程



圖 1、2015 兩岸放射性廢棄物地質處置技術研討會與會人員合影

參、考察紀要

主辦單位安排於 2015 年 11 月 9-10 日於北京核工業北京地質研究院辦理「2015 兩岸放射性廢棄物地質處置技術研討會」，研討會後參觀北京地質研究院地質標本陳列館與相關試驗設備，另分赴甘肅及湖南進行現地參訪。公差情形說明如下。

一、北京地質研究院簡介

核工業北京地質研究院成立於 1959 年，隸屬於中國核工業集團公司(中核集團)，主要辦理全國性核能地質調查研究工作，包括鈾礦地質研究、核廢料地質處置研究與環境影響評估、航測及遙感探測、礦產資源預測、石油及天然氣探勘等，座落於北京市北三環與北四環之間，地鐵 5 號線與 10 號線交會處。

北京地質研究院下分設 7 個研究單位(研究所)、3 個開發機構及 12 個管理機構，組織架構如圖 2，所屬的環境工程研究所，負責放射性廢棄物處置研究及環境影響評估工作，本次參訪之甘肅北山地區，即由環境工程研究所進行場址評估、水文地質條件評估、場址對比及處置技術研究作業，另外，亦參與中國大陸中低放射性廢棄物處置場選址工作。

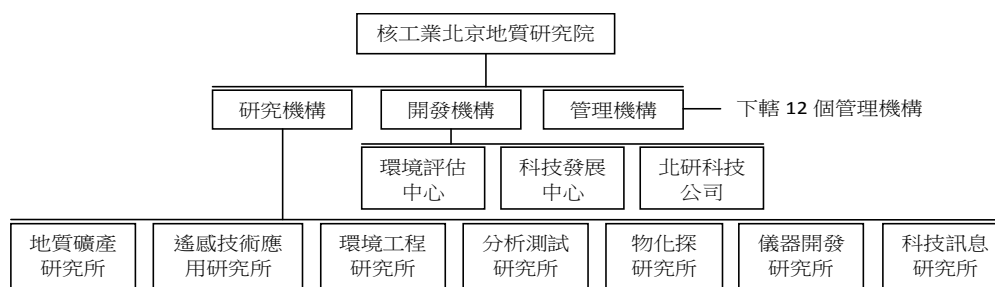


圖 2、北京地質研究院組織架構圖

二、兩岸放射性廢棄物地質處置技術研討會

為期兩日之兩岸放射性廢棄物地質處置技術研討會，共安排 17 場次演講，分別由雙方人員進行主講，本次交流重點為高放射性廢棄物地質處置進程介紹及處置相關技術探討，擇要敘述如下。

11 月 9 日之會議，由中國大陸地質研究院王駒副院長，進行高放廢棄物地質處置研究進展及地下實驗室的規劃簡報，中國大陸目前有二十七座核能機組進行運轉，興建中有二十三組。一座最大通過量 400 kgMH/d 的再處理中間試驗工廠已經完成，目前等待與法國合作興建一大型商用再處理廠；對於用過核燃料再處理所產生之高放射性液體廢棄物，則先行玻璃固化後再進行最終處置。中國大陸規劃於 2020 年完成高放廢棄物地下實驗室(Underground Research Laboratory, URL)，王駒副院長說明中國大陸 2010~2015 的主要研究內容及具體成果，包括確認了甘肅北山為中國大陸地區首選的高放處置預選區，並完成北山地區 25 個鑽孔獲得重要地質參數，建立完整的場址評估技術體系。確定使用膨潤土作為處置場的回填材料，並對膨潤土相關特性及 THMC 耦合條件下的行為進行研究。在地下實驗室方面，於 2015 年 6 月啟動“北山坑探設施”的動土工程，截至本次

參訪已將近完成地下 146 公尺長的花崗岩坑道開挖工程(如圖 3)。

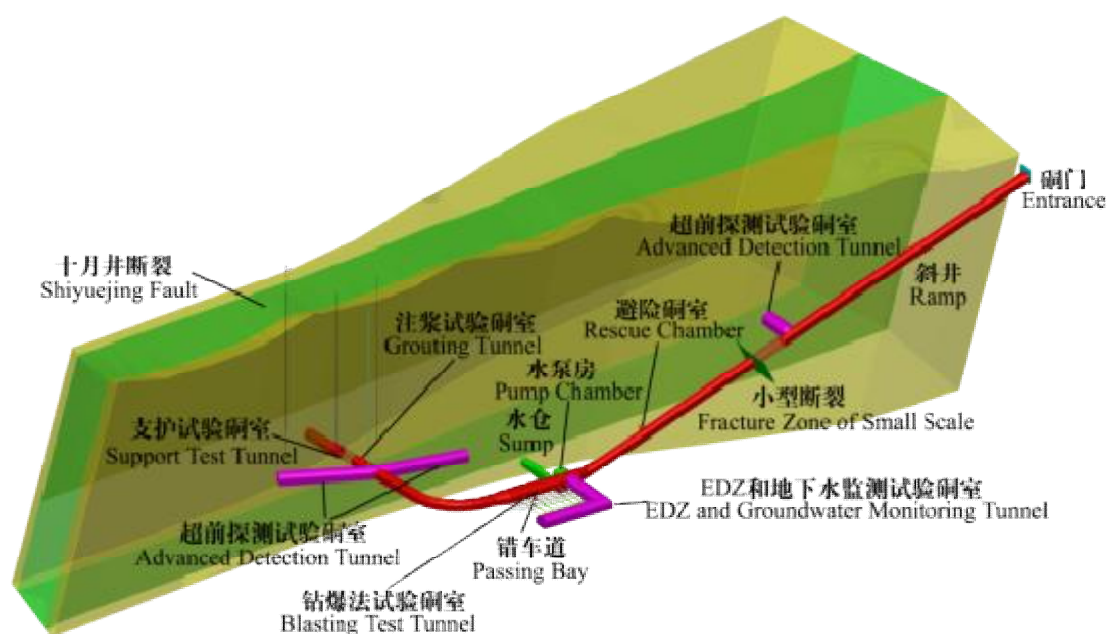


圖 3、北山坑探設施開挖工程

台灣淡江大學楊長義教授在研討會中強調在地下深處的地底實驗室(URL)因位於地下數百公尺的母岩中，許多岩石特性是地表調查及表層岩盤研究所無法取代的，必須深入地下在真實的環境中進行實際或全尺寸的試驗才有可能一窺全貌。楊教授對其蒐集芬蘭、瑞典等主要核能先進國家 URL 所歸納出的岩盤力學經驗，並根據台電公司現階段對地質處置場配置之規劃概念，及調查區域既有岩力試驗與調查資料，嘗試從岩盤力學觀點，建議未來在最終處置場配置所需注意的問題，與研討會與會專家進行交流及分享。

中國大陸趙星光博士針對應力問題對於 URL 以及處置場的影響進行報告，根據在北山鑽孔所進行調查，進行了 136 段壓裂試驗，並在 39 個測試段進行印模定向試驗，成功取得大地應力值與最大水平應力方向數據。

中國大陸陳亮博士針對大陸高放廢棄物處置地下實驗室工程研究進展及進一步計畫進行會報。對於高放處置，中國大陸採場址評選、地下實驗室研究和處置場建設的策略。根據規劃 2020 年中國大陸將於北山完成首座地下實驗室。根據此一目標，研發團隊制定了基礎研究、工程選址到工程建造各階段的實施計畫和組織方案。陳博士系統性的介紹中國大陸在上述領域的研究進展和下一步工作計畫。

台灣核研所蔡翠玲博士進行台灣在高放處置核種遷移實驗的現況與規劃，介紹透過已發展的批次實驗與穿透擴散技術，獲得重要核種在工程與天然障壁中的黏土材質以及花崗母岩中的吸附係數以及擴散係數，以提供安全評估所需之重要數據。

北山預選區占地約八萬平方公里，年降雨量平均為 50~120mm，於每年 6、7、8 三個月集中降雨，是中國大陸典型的乾旱地區。中國大陸蘇銳博士指出，

預選區地下水流可分為：額濟納盆地、北山山區以及河西走廊平原，三個水流區關係密切，空間水量及分布不均，明顯受到地形及地貌影響。研究指出，預選區地下水的主流向是自西向東流動，排泄區為黑河流域，從區內地下水的化學特徵分析，地下水對岩石的溶濾作用、地下水的蒸發濃縮、降水和洪流滲入的混合淡化，是預選區地下水化學成分形成的主要因素。溶濾作用主要發生在地形較高的區域或地下水補給區，蒸發濃縮作用主要發生在地形較低的排洩區。

11月10日之會議，主要討論中國大陸高放處置之緩衝回填材料選擇與辦理情形，及廢料罐材質初步研究成果，彙整重點分別敘述如下。

1. 中國大陸高放處置緩衝材料研究

緩衝及回填材料於高放處置場工程障壁中扮演重要角色，具備(1)工程屏障作用-維持處置場之結構穩定；(2)水力學屏障作用-延緩地下水入滲；(3)化學緩衝屏障作用-阻滯核種遷移；及(4)導體作用-對輻射熱傳導和擴散作用等功能。中國大陸緩衝材料的研究自1986年開始，主要分為三個階段：

- (1) 1986-1996緩衝材料與膨潤土礦床選擇-初步選擇適當材料，進行礦物穩定性、吸附性及工程特性研究及參照相關國際成果，確定採用膨潤土作為高放處置之緩衝及回填材料，經考量礦床規模、礦石質量、開採條件及成本、交通運輸等因素後，選定位於內蒙古興和縣之高廟子礦床，作為緩衝回填材料供應基地(高廟子膨潤土如圖4)，該礦床儲存量約1.6億噸，四分之三為鈉基膨潤土，分類屬大型礦床。

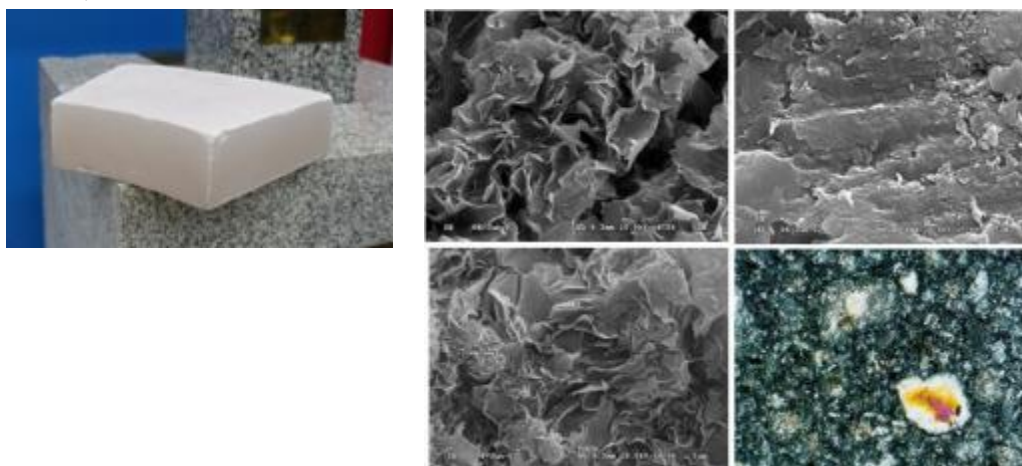


圖4、高廟子膨潤土(左：壓實膨潤土塊。右：微觀結構)

- (2) 1996-2000進行高廟子鈣基膨潤土性能研究，重點於化學成分與礦物組成、熱傳性質、滲透性、力學性質、化學緩衝特性等方面研究。
- (3) 2000-迄今進行高廟子鈉基膨潤土長期性能研究，重點於核種遷移、添加劑、多場耦合特性試驗及數值模型研究、緩衝材料準備等方面研究，於2011年7月正式開始其自行設計之首座緩衝材料大型試驗台架(China-Mock-up)運作(如圖5)，進行緩衝材料熱-水力-力學-化學耦合試驗，以及建立力學、膨脹性、滲透性相關方面之研究系統，提供作為工程障壁設計建造之基礎。

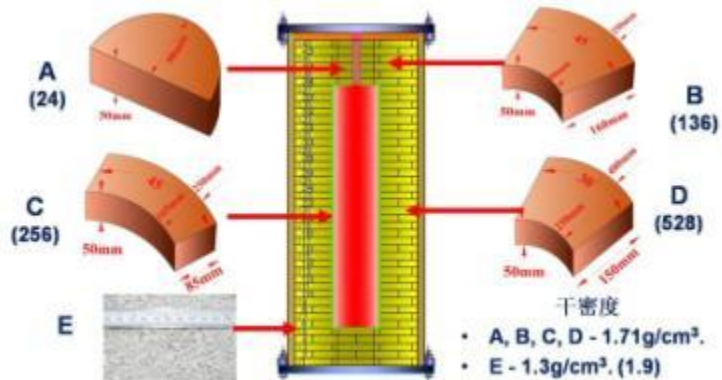


圖5、緩衝材料大型試驗台架(China-Mock-up)

針對熱-水力-力學-化學耦合性能大型試驗台架之研究，為模擬於處置場條件下之廢料罐內之緩衝材料行為，建立試驗台架緩衝材料安裝與試驗方法，以求取膨潤土與模擬條件下之溫度、濕度及力學變化等參數。

2. 除進行緩衝/回填材料研究及選用外，針對高放廢棄物之處置容器材質研究方面，中國大陸對低碳鋼進行分析，並提出初步研究結論：

- (1) 低碳鋼在熱-水力-力學-化學耦合作用下填充膨潤土環境中，可提供進行原位電化學測量，可即時反應電極表面乾溼程度，而且能夠對腐蝕速率進行測量，對於長期監測具有可行性。
- (2) 隨時間延長，地下水逐漸穿透膨潤土層與電化學感應器接觸，低碳鋼開始發生腐蝕。延橫向布置方向，靠近加熱器之感應器溫度較高，相對乾燥，腐蝕速率較緩慢；位於最外層之感應器，溫度較低，電極表面率先與地下水接觸發生腐蝕。延縱向布置方向，位於最頂層之感應器明顯高於其他位置，對高放射性廢棄物處置之長期安全造成影響
- (3) 針對北山之地下水環境處置廢料罐之材質選擇，低碳鋼適用性可能較低，仍待進一步研究確認

三、參觀北京地質院及實驗室

1. 參觀中國核地質標本陳列館

中國核地質標本陳列館陳列中國大陸地區至今所有已探勘具有開採價值的花崗岩型、火山岩型、碳酸泥岩型和砂岩型四大類型的鈾礦床礦區地層特性及其礦石標本(如圖 6)，並可觀摩到高放處置研究發展規劃、處置概念模型與甘肅省北山預選區新場地段開採之單裂隙花崗岩。

甘肅北山地區具有非常完整及穩定之緻密花崗岩，自北山花崗岩鑽取的岩心非常地緻密幾乎無任何裂縫，而且人煙稀少所以非常適合高放廢棄物地質處置。現場展示北山預選區六號鑽孔取得之完整花崗岩心，採集深度左至右分別為 225 m、425 m、565 m，每一管岩心皆完整且幾乎無裂隙(如圖 7)。



圖 6、核地質標本陳列館地質礦物標本



圖 7、北山預選區岩心取樣

2. 參觀中國高放廢物處置緩衝材料大型試驗台架及其他設備

緩衝/回填材料作為高放廢棄物處置設施中主要障壁材料，填充在廢棄物罐和母岩之間，肩負工程障壁、水力學障壁、化學障壁和導熱的任務。藉由對膨潤土的礦物學、水力學和岩石力學性質的研究，以及膨潤土對核種的吸附和擴散特性的研究，中國大陸初步選定內蒙古高廟子膨潤土作為首選的緩衝/回填材料。

為了解掌握高廟子膨潤土的熱－水－力－化(THMC)耦合作用，核工業北京地質研究院設立一個大型台架的模擬實驗設施，稱為中國高放廢物處置緩衝材料大型試驗台架(China-Mock-Up)。其主要目標是要達成下列事項：(1)了解熱－水－力－化耦合作用時的高廟子膨潤土行為；(2)研究熱－水－力－化耦合情況下緩衝材料與容器的交互反應；(3)模擬高放處置容器置放；(4)監測北山處置場場址高溫與地下水情況下高廟子膨潤土行為；(5)建立大型設備安裝測試流程；(6)提供工程障壁設計所需資料。裝置如圖 8。

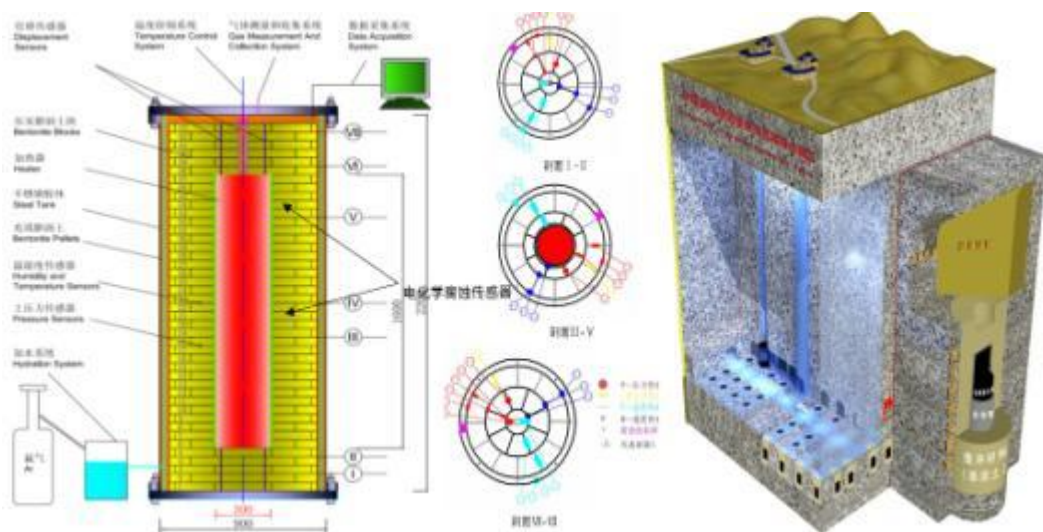


圖 8、大型試驗台架(China-Mock-Up)示意圖

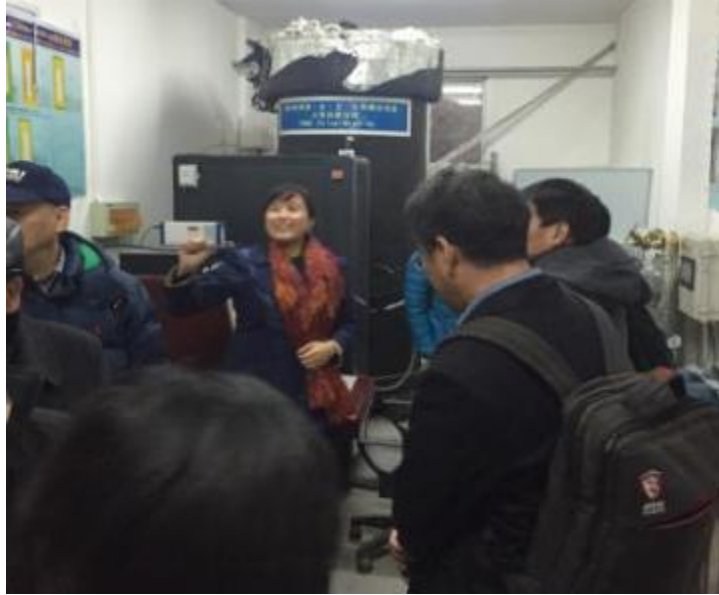


圖 9、中國大陸劉月妙博士介紹緩衝材料試驗台架情形

四、技術參訪

行程 1-參訪甘肅北山最終處置場預選場址

本次主辦單位於研討會後，安排前往甘肅省參訪中國大陸高放射性廢棄物最終處置場預選場址。

中國大陸高放射性廢棄物之處置方式，依其 2003 年發布之放射性污染防治法第 43 條規定：「高水平放射性固體廢物實行集中的深地質處置」，採深地層地質處置，與世界各國所採用的處置方式相同，目前正進行高放射性廢棄物最終處置設施的選址工作，並提出包括新疆、甘肅、內蒙古、西南、華東、華南等六大預選區，作為高放處置場候選場址(如圖 10)。中國大陸的十二五國民經濟發展計畫，在高放射性廢棄物最終處置工作方面，主要進行處置整體工作與執行期程規劃、處置場選址及場址適宜性評估、核種遷移研究、安全評估、工程設計、工程障壁研究等項目。

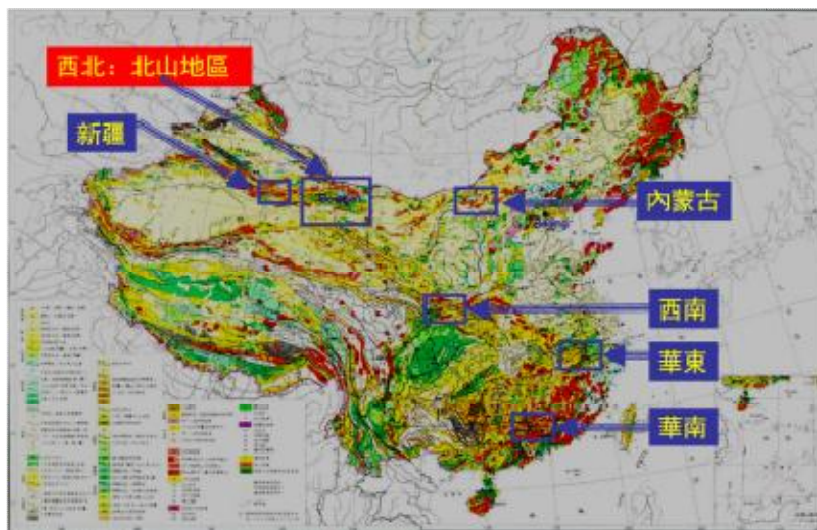


圖 10、中國大陸高放射性廢棄物最終處置場預選區示意圖

針對本次參訪甘肅北山預選區，就其處置研究的執行成果及參訪摘要說明如下。

(一) 中國大陸十二五甘肅預選區處置工作研究成果

1. 於 2011 年 7 月確定甘肅北山地區為中國大陸高放射性廢棄物地質處置之首選預選區。
2. 於甘肅北山鑽孔數量累積已達 25 孔，除獲得場址特性參數、樣品及數據外，並篩選出北山地區主要的候選場址。候選場址共有五處(如圖 11)，分別為舊井地段、新場地段、野馬泉地段、算井子地段及沙棗園地段。
3. 持續進行研究，於本階段發展花崗岩場址特性安全評估技術及建立評估系統，如岩石特性評估(斷層活動、裂隙測量方法研究、地球物理探測、節理評估)、深地層環境(水文、水化、地應力)評估、鑽孔施工方法、原狀樣品採集方法等。
4. 建立甘肅北山預選區地質資料庫(如圖 12)，彙整北山地區目前地質研究成果，並提供研究單位查詢。
5. 提出處置場場址適當的定量化評估方法及對比指標系統，評估方法中提出高放處置場選址重大考量因素及權重因子，其中地質條件、未來自然變化、水文地質條件、地球化學、社會經濟和人文條件列為前 5 大權重因子。



圖 11、北山地區候選場址五處預選地段

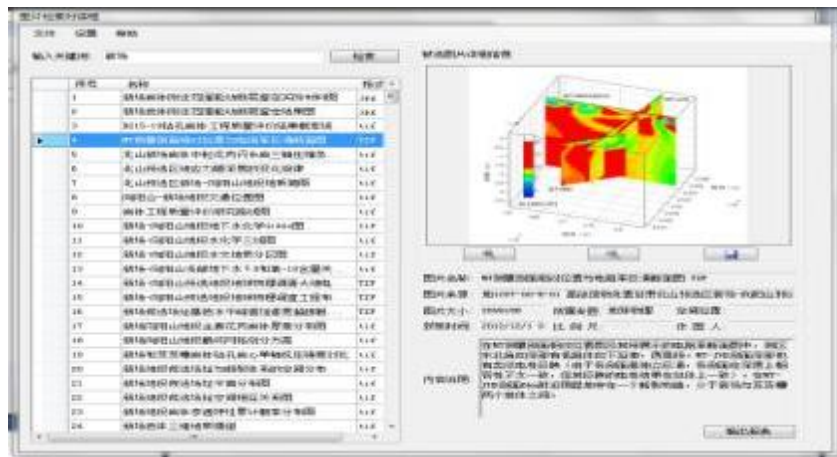


圖 12、北山預選區地質資料庫系統

(二) 北山預選區參訪

1. 高放地質處置玉門基地參訪

主辦單位將高放地質處置玉門基地相關研究設施及前置作業規劃為參訪要

項，本次預選場址參訪行程，由核工業北京地質研究院環境工程研究所陳亮副所長負責介紹。研討會出席人員於前往北山預選場址參訪前，先赴高放地質處置玉門基地聽取陳副所長簡要說明，並參觀其岩心試樣及存放設施。目前調查區域已進行 25 孔鑽孔，基地集中存放北山鑽孔岩心試樣，置放於貯存倉庫中，並對每批次岩心之孔號、岩心箱編號、回次及對應之鑽孔深度進行詳細記錄。高放地質處置玉門基地相關參訪照片如圖 13-16。



圖 13、高放地質處置玉門基地



圖 14、陳亮副所長介紹北山環境



圖 15、岩心箱存放於基地倉庫情形



圖 16、鑽探獲致岩心外觀

2. 北山預選區

甘肅省北山地區之地理位置，位於甘肅河西走廊西段、祁連山以北戈壁荒漠地區，南鄰玉門、嘉峪關、酒泉等城市，總面積約 8 萬餘平方公里。研究區域中，地勢高程最高處約 2500 公尺以上，最低處約為 900 公尺，一般位於 2000 公尺以上。地區環境具有以下特性：

- (1) 位於中國大陸西北地戈壁荒漠地區，人口稀少，對公眾影響程度相對低。
- (2) 年降雨量相對較低(60-80 mm/年)。
- (3) 年蒸發量相對較高(2900-3200 mm/年)。
- (4) 農作物種植或礦物開採價值低。
- (5) 地質穩定。
- (6) 地下水文條件利於形成處置環境。
- (7) 圍岩組成以花崗岩體為主，強度及完整性高。

北山預選區相關參訪照片如圖 17-19。



圖 17、北山預選區地貌



圖 18、現地辦公處所情形



圖 19、北山坑探設施現場指揮部

3. 地下實驗室

由於地質條件與自然環境特性，使得北山成為中國大陸目前高放處置場之首選預選區，地區各項研究及試驗分別由相關單位進行中。

高放處置場尚處選址階段，最終處置場完成前最重要的工作，即為地下實驗室(URL)之選址及興建。由於中國大陸考量其國內現況、處置時程及整體可行性，目前較為傾向於興建特定場址地下實驗室(site-specific URL)作為其首座地下實驗室，亦即於高放處置場預選區中選擇具代表性之地點興建地下實驗室。目前選址標的，將自新疆、甘肅、內蒙古預選地段中，篩選出推薦及備選場址各一，並以2020年完成建造為目標。辦理期程如圖20。

中國大陸將其首座地下實驗室之功能及特性，定位為(1)建造於處置場預選區內；(2)建造於花崗岩體中；(3)具備功能延續性及設施擴展功能；(4)位置約位於地表下500公尺深度；(5)作為與國際處置溝通平台及研發之橋梁，且具備開放性。地下實驗室之規劃工作，依據「大陸高放廢物地質處置地下實驗室的幾個戰略問題」(2014年7月)及「大陸高放廢物地質處置地下實驗室戰略規劃及實施方案」(2014年12月)兩份報告書，提出地下實驗室的興建目標及功能，並將地下實驗室定位為「三廢專項的標誌性工程」及「中國大陸環保的標誌性工程」。

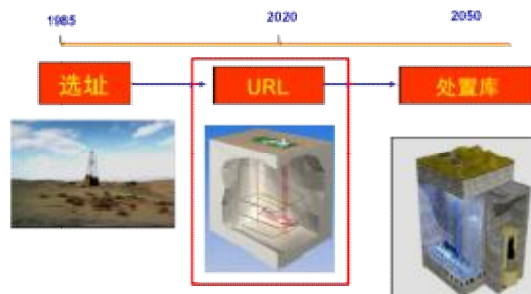


圖20、地下實驗室及最終處置場辦理期程

依據高放處置工作之執行現況及地質條件，於北山地區興建地下實驗室較具可行性，目前於北山之舊井、新場、野馬泉、算井子及沙棗園等五個地段，進行可行性調查及評估工作後，提交申請文件辦理審查。本次所參訪之“舊井地段”，正進行「北山坑探設施」導坑開挖施工作業，設施緊鄰“十月井”斷層帶，其主要目的之一即為將此斷層列為重點調查對象。目前透過試驗及鑽孔資料，對舊井地段進行地質構造、地球物理探測、水文條件模擬，建立三維地質模型，初步獲致三維地質建模可有效進行場址安全評估之結論，並可顯示斷層及岩體之空間分布情形，同時對地下流體與核種遷移進行模擬及計算。

由於地下實驗室進行選址中，除由鑽孔獲得資料外，為進一步瞭解本地區之地質構造(裂隙、斷層、節理、力學強度、水文特性、大地材料組成等)，安排同時進行現地與室內試驗，並進行成果研究及提出反饋，作為地下實驗室選址、工程設計、施工、安全評估及研究發展(R&D)前置作業參考依據，故進行前述坑探設施施作。

4. 北山坑探設施(圖 21-24)

(1) 坑探設施分工概述

參與北山預選處置場址先期調查工作之主要單位，除本次參訪之核工業北京地質研究院外，尚包含中核第四研究設計工程有限公司(隸屬於中國核工業集團公司)、四川大學、中國礦業大學(北京)及中國科學院武漢岩土力學研究所等。主要工作之負責單位及重點，核工業北京地質研究院主要負責統籌規畫作業，另技術項目部分，為利於堅硬岩體中開挖推進同時考量開挖擾動區(EDZ)擾動降低，隧道開挖所採鑽炸法之研究需加以探討，另進行動態數據管理與三維裂隙模式建立。中核第四研究設計工程有限公司負責工程設計部分，另因開挖初期需配合地質研究調查(地體構造及組成初步判釋)，故岩壁穩定性及灌漿技術研究亦為其工作項目。學界參與部分，分別針對動力災害特徵監測及預測、不良地質體超前探測、圍岩變形監測、EDZ 評估、圍岩支撐保護工法及地下水監測等重要議題進行研究。

(2) 坑探設施及辦理情形說明

目前北山預選區現場，主要為作業準備及地下實驗室建造前置調查工作。為確實瞭解地質構造及地下水文分布，正於舊井地段進行「北山坑探設施」導坑開挖施工作業，此亦為北山預選區目前主要工作。坑探設施於 2015 年 6 月 26 日開工(預計 2016 年 9 月 30 日完工)，本設施主要目的為地下實驗室之前導工程，坑探設施之目標主要為：

- i. 為地下實驗室開挖、監測、支撐保護和不良地質體超前探測等工程安全技術研究，提供試驗及溝通平台。
- ii. 推動地下實驗室研究發展，並開發數據蒐集之動態管理技術。
- iii. 建構地下實驗室工程建設和科技研究管理模式。



圖 21、人員進入坑探設施前安全講習



圖 22、坑探設施坑道入口處之入井須知



圖 23、坑探設施入口(左為抽風設備，中央為軌道輸送台車)



圖 24、坑道內工程人員進行解說

工程主體結構部分，包括硇門(隧道入口)、斜坡道、水平坑道、集水坑(sump)、試驗坑室、避難坑道、通風豎井、供水、供電及通風系統。結構配置及試驗位置則如圖 25、26 所示。

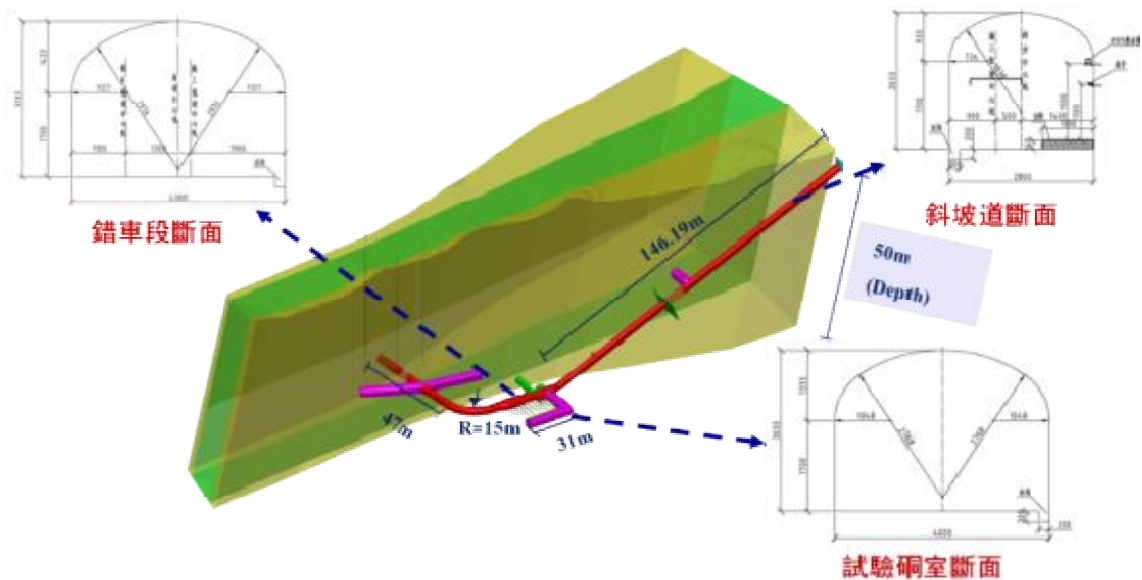


圖 25、北山坑探設施結構配置圖

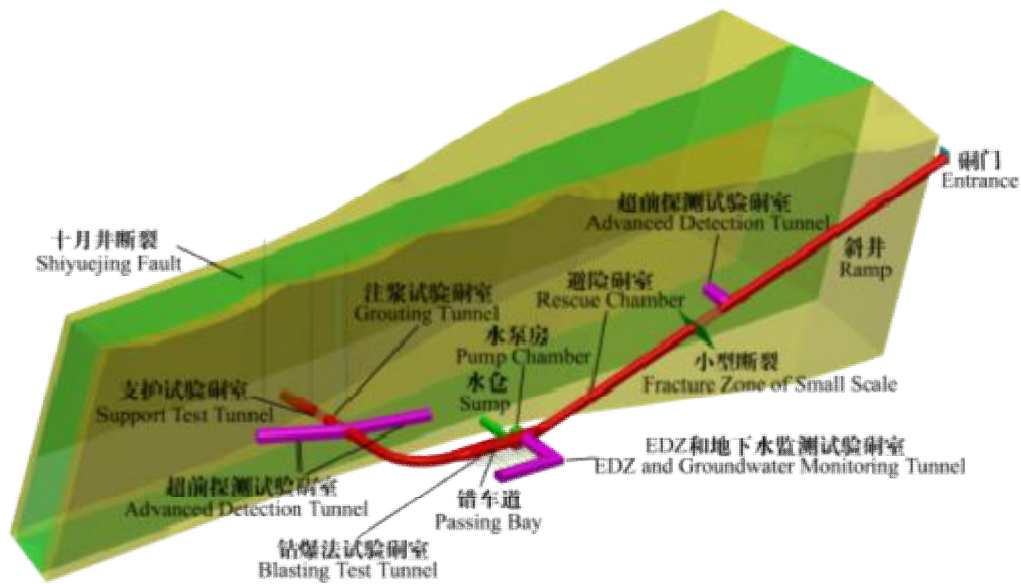


圖 26、試驗配置及對應位置示意

5. 坑探設施研究要項(如圖 27-30)

(1) 不良地質體超前探測試驗方案：

其試驗目的將建立以使用透地雷達為主之導水裂隙帶和小斷層等不良地質構造之高精度探測組合技術，提升地下實驗室隧道開挖設計與施工安全性。

(2) 現場灌漿技術之研究：

主要針對現地地質構造及應力分布特性，進行灌漿技術之研發。搭配考量灌漿材料之擴散及充填效果，進行注漿之配比、灌注範圍、壓力及時機，提出研究條件及成果後，以做為後續灌漿設計之參考。

(3) 圍岩變形監測方法研究：

評估各種圍岩的變形監測方法合適性後，進行監測方法之選擇及現地佈置，並安排人工及自動監測，建立施工過程中之圍岩變形監測技術。

(4) 鑽炸法及EDZ評估方法之研究：

結合現地鑽炸試驗，開挖前、後進行鑽孔取樣及室內岩心力學試驗，現場進行超音波、監測儀器監控及透過鑽孔雷達進行探測與收集數據；另針對開挖前、後的微震和聲發射進行監測。

(5) 硿室開挖動力災害監測現場試驗：

研究微震和聲發射監測技術，據以監測分析北山坑探設施開挖導致的岩體破裂過程，提出反映北山花崗岩圍岩破裂特徵的監測參考。過程開發完整和破碎地段之圍岩聲發射和微震監測技術，並提出初步的岩石動力災害傾向性評估方法。

(6) 三圍裂隙網路模式建立和硿室可視化：

通過地表露頭調查和硿室裂隙紀錄，並藉由三維激光掃描與實時攝影等技術，以提升三維裂隙網路建模方法，並實現坑探設施之三維可視化。

(7) 動態數據管理平台研究：

以北山坑探設施探勘及工程所獲之訊息，制定試驗數據自產生乃至儲存、交

換的標準化方案，建立北山坑探設施的動態數據管理系統，為地下實驗室數據管理提供研究基礎。



圖 27、現場灌漿技術之研究

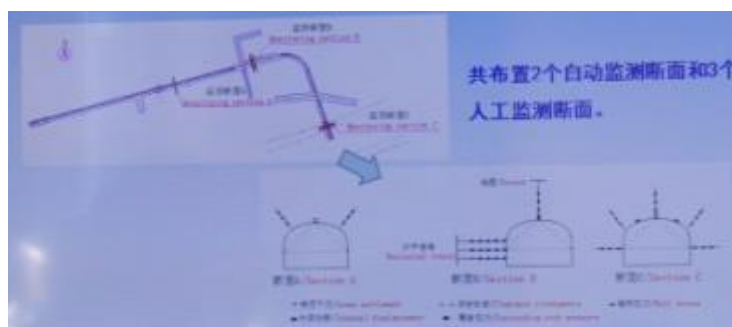


圖 28、圍岩變形監測方法之研究

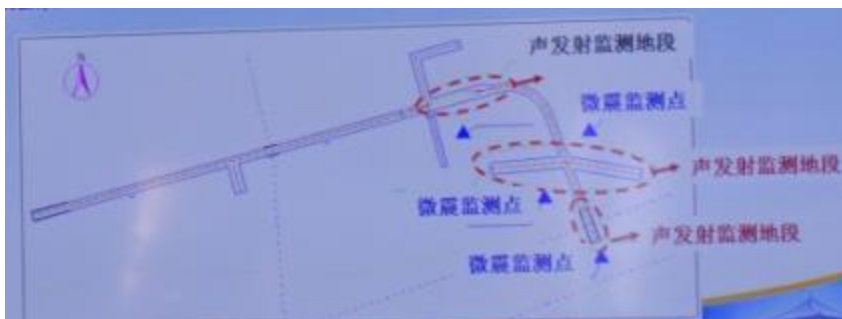


圖 29、硯室開挖動力災害監測現場試驗示意

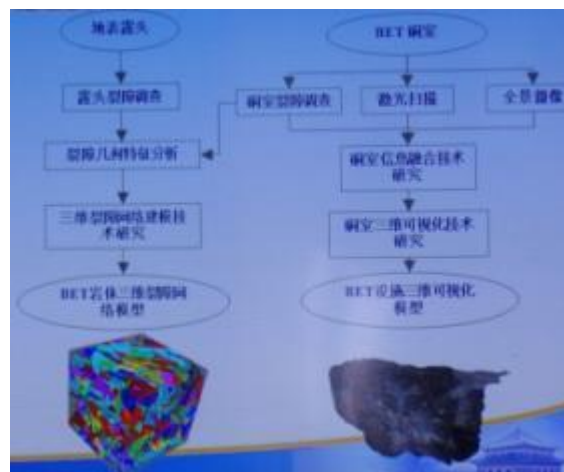


圖 30、三圍裂隙網路模式建立和硯室可視化執行步驟

行程 2-參訪湖南長沙馬王堆

中國大陸考古工作者於1972至1974年相繼在湖南長沙馬王堆發掘了三座漢墓，出土的三千餘件珍貴文物和保存完整的女屍，震驚了全世界(如圖31)。特別是一號墓的女屍，能在炎熱潮濕的南中國地下保存了兩千一百多年而完好無損，更是舉世罕見的奇蹟。西漢楚人發展出來的墓葬保存技術，和我們今天要安全處置的放射性廢棄物，所欲採行的地層處置方式，有諸多相似之處，因此，馬王堆漢墓也提供了「放射性廢棄物地層處置」一個絕佳的天然類比機會。

根據田野考古挖掘的資料看來，馬王堆古墓採取「深埋密封」的方式，而保存情況的良窳則取決於密封的程度。「深埋」保持了墓室的恆溫、恆濕，隔絕了外界氣候變化的影響；「密閉」則造成了缺氧、無菌的狀態，使得屍體、服飾、漆木竹器，以及農畜產品等極易腐朽的物質能完好的保存下來。

馬王堆的三座漢墓的保存情況有很大的差別。一號墓的保存情況極好，屍體、服飾、漆木竹器、農畜產品等極易腐朽的物質都完好地保存下來。三號墓的保存情況也相當的好；然而二號墓棺槨已經朽塌，僅存板底，漆器只存漆皮，服飾和屍體連一點痕跡也未留下(古湘，1991)。



圖31、湖南長沙馬王堆墓室情形

圖32為馬王堆一、三號墓的剖面圖(熊傳薪等人，1994)，墓室的溫度常年在18°C左右，有利於有機物質的保存。槨室裡放置有漆封的四層木棺，層層套合，均封閉緊密，棺外又有兩層巨大的木槨。棺槨之外，填塞了5000公斤左右的木炭，這些木炭具有吸水防潮的作用。木炭外面用白膏泥把整個木槨包裹在裏面，形成了一個密閉的整體(古湘，1991)。白膏泥是一種細粒高嶺土(Kaoline)，親水性強，黏性大、密度大，是防滲隔氣性能良好的材質，因而能有效地防止地面水和地下水的滲入。

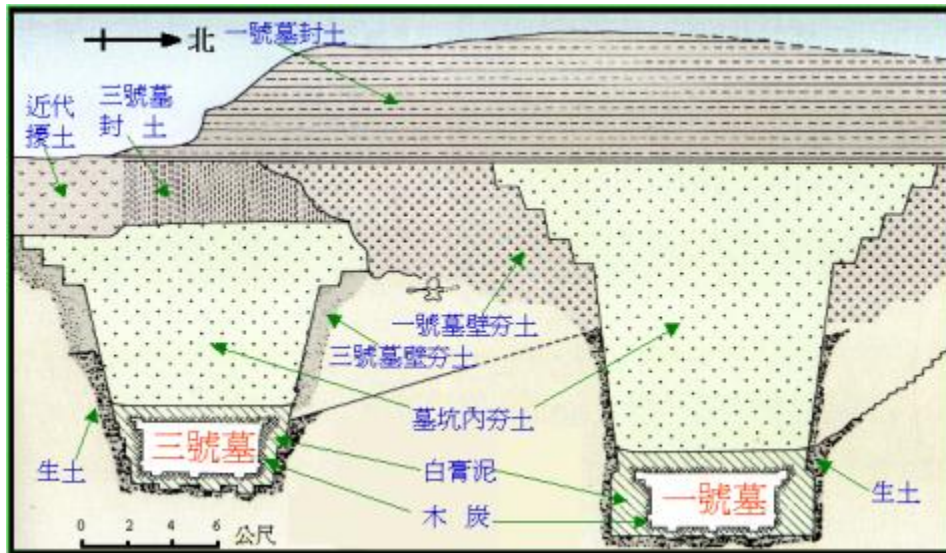


圖32、馬王堆墓室使用材料配置情形

以現代觀點來看，白膏泥就是一層厚達100公分夯實後的黏土，發揮遇水膨脹的膨潤特性，有效隔絕地下水與氧氣入侵，而低放射性廢棄物處置場的回填材料也扮演相同角色。根據分析，相同夯實密度下的膨潤土其水力傳導係數是黏土的1/100以下。因此理論上，與黏土相較，膨潤土或日興土可使地下水傳導所需時間延長100倍，以100公分的白膏泥就可以防止地下水入侵馬王堆漢墓達2000年，如果低放射性廢棄物處置場回填材料以膨潤土來設計，其防止地下水入侵之時間至少也可達2000年以上，這對封存放射性廢棄物是相當有利的。

馬王堆漢墓和廢棄物淺地掩埋處置有諸多類似之處，前者目的是保存屍體和隨葬物，後者則是防止核種遷移；兩者對系統的要求也相近：墓地各項措施是為密封以隔絕空氣、抑制細菌滋生以及防水，而放射性廢棄物處置系統則必須發揮隔水、防腐蝕和滯留核種的功能；針對上述目的和要求，古墓和處置場的設計依據又同為「多重障壁」的概念，兩個系統的結構、材料和作用的類比對照如表1所示。

表1 馬王堆漢墓和放射性廢棄物淺地掩埋處置之類比對照表

馬王堆漢墓			放射性廢棄物處置		
目的	防止屍體和隨葬物腐蝕		目的	防止核種遷移	
要求	密封、隔絕空氣、抑菌、防水		要求	隔水、防腐蝕、滯留核種	
設計依據	多重障壁		設計依據	多重障壁	
結構	材料	作用	結構	材料	作用
處理過的屍體	防腐劑、多層織物包裹	防腐	固化體	水泥	阻滯核種遷移
內外棺	木材	密封	包封容器	金屬或混凝土	密封、阻滯核種遷移
木槨	木材	密封	處置構造物	混凝土	阻滯核種遷移
回填材料	五花土、白膏泥、木炭	隔水、防滲、吸潮	回填材料	黏土	密封、防滲、阻滯核種遷移
墓頂	五花土等	防水、防盜等	頂蓋	各種土及礫石	防生物侵擾、防水
場址地形	依山為陵，積土	排水、防滲	場址地形	利於排水、疏	排水、防腐蝕

	為墳			水	
地層介質	黏土地質介質	隔離空氣、防滲	地層介質	黏土地質介質	滯留

馬王堆三座古墓可說是在同一時期、同一地點埋葬的，墓葬方式相同，墓址特性相同，所經歷的環境變遷也應無二致，但它們保存情況卻有所差異的事實，值得我們深思。二、三號墓的保存情況遠差於一號墓，主要的原因在前兩者槨室的密封有所缺失，這說明了施工品質的重要性。將來國內在進行放射性廢棄物最終處置時，一定要嚴格做好品質管制。

肆、心得

1. 中國大陸目前有 27 個核電機組進行運轉，另外還有 23 座機組正建構中，可以感受到中國大陸對核電需求的熱度，對照北京空污的嚴重程度，可以理解中國大陸發展核電作為低碳能源及解決空氣汙染的決心，近來全球各地也不乏興建或重啟核能電廠及興建的消息，特別是英國早期也曾承受相同的空污問題，顯見在現階段的技術條件下，國際間仍將核能發電視為低碳能源的重要選項。
2. 中國大陸規定高放射性廢棄物實施深地質處置。有關地質方面客觀考量因素，包括地質年代及穩定性、母岩特性、強度與完整性、地下水文條件、核種吸附、遲滯能力、耦合效應影響等面向，除須結合各方領域專家長期進行研究外，現地調查及試驗工作亦有必要持續推動，以將研究內容與實地調查結果比對驗證，進行成果反饋後，以求取適合現地之研究成果。
3. 地質條件各個國家不同，中國大陸地區幅員廣闊，北山地區面積將近是台灣的 3 倍左右。本次研討會陸方學者對北山的地質情形所獲取的各項資料相當詳盡，確實值得我們參考學習。
4. 中國大陸提出高放處置場六處預選區，目前進行現地取樣及試驗，所獲資訊供研發及決策之用，特點係將研究開發工作與實地結合。目前重點為地下實驗室選址及設計，預計將於 2020 年建成。台灣目前處潛在母岩特性調查與評估階段，研發重點聚焦於全國性一般調查與技術可行性評估研究，尚未進入地下實驗室或處置場之選址階段。關於中國大陸目前技術研發工作項目，可提供作為台灣未來設置地下實驗室之參考。
5. 作為核廢棄物的最終處置場，甘肅北山地區在地質、氣候、人文及經濟活動各方均展現其優越的條件，但或許是處於初步發展階段，相關基礎建設以及運送高階核廢料的交通仍然尚待開發，中國大陸之核電廠均設於沿海地區，惟沿海人口密集。地處甘肅之北山地區，地質條件依初步結論適合進行高放處置。
6. 中國大陸許多的研究機構均可獨立招收博士生並提供學位證書，這對一些專門領域的人才培養上提供了一個精進的途徑，實務與理論的結合節省了許多摸索的時間，養成的人才也能確實用於工作所需，可提供台灣人才培育的參考模式。

伍、建議事項

1. 台灣地質研究領域的專家學者雖礙於環境僅能進行虛擬研究、資料蒐集及問題探討，但從本次研討會中可見，所提出的研究討論均能引起中國大陸同樣領域學者交流的熱烈迴響，同時，中國大陸近幾年在工程實務上獲得了相當多的發展經驗，建議兩岸在放射性廢棄物管理的技術研究發展上可持續交流，增加兩岸合作的空間。
2. 從技術層面，處置母岩性質及所在地質條件，為決定處置安全與否之重要影

響因素之一。大多數國家為充分了解地質構造，於處置場建造前進行地下實驗室興建，作為深入調查工作、安全評估、分析驗證及成果回饋之需。目前中國大陸評估於北山建造首座地下實驗室具有可行性，故於確認地下實驗室場址前先行進行前導性質之坑探設施，進行研究分析，同時進行地質構造及水文調查工作，提供未來地下實驗室及最終處置場選址決策之參考依據。建議台電公司發展最終處置計畫，能參酌國際間的共通作法，嘗試設置或參與國際地下實驗室，以利最終處置計畫之推展。

3. 國際核能先進國家，對於深層處置設施運轉期間之輔助設施與公用設施，如消防系統設計、作業環境電力、通風、通訊與監控系統方面有相關考量。北山地區目前係進行坑探設施開挖施工，施工區域附近無明顯之人口聚集城鎮，其資源(基本設施需求、電力、用水)均仰賴他處陸運補給。對於整體計畫之目標功能要求、管理、應變計畫，以及施工期間輔助公用設施注意要項方面，建議台電公司未來執行高放最終處置計畫時，可參考中國大陸預選區域調查期間之計劃執行之規劃，作為規劃相關設施之參考。
4. 為降低處置場或其相關設施對一般民眾可能危害風險，其地點設置考量大多位於遠離人口密集之偏遠地區，以進行調查及施工作業。除考量設施運轉對民眾影響外，前置作業之現場人員作業安全，亦應有完善規劃。建議台電公司未來在規劃執行最終處置設施之設計建造時，應落實功能要求外，工作期間並應提升工安文化及強化作業現場安排，以順利達成興建目標。