

出國報告（出國類別：其他）

赴大陸甘肅與北京參加第六屆廢物地下處置學術研討會暨參訪研究單位

服務機關：核能研究所

姓名職稱：邱筠捷 技術員

張淑君 副研究員

施建樑 副所長

派赴國家：中國大陸

出國期間：105年8月21日~105年8月30日

報告日期：105年9月28日

摘要

本次赴中國大陸參加第六屆廢物地下處置學術研討會，會議主要圍繞廢物地下處置的理論、實踐探索、工程實例、新技術與新方法及國際進展等主題，與來自各學術及科研單位之專家學者進行專業學術交流與討論；並於高放廢棄物地質處置庫北山預選區進行技術考察，參觀地下實驗室坑探設施之相關建設與研究進展。本次行程另亦安排至中國核電工程有限公司與核工業北京地質研究院，進行放射性廢棄物處置技術交流，研討放射性廢棄物處置概念、場址調查、工程設計、障壁材料交互作用機制研究及安全評估技術之成果與進展；透過此次機會與各研究單位之專家學者進行交流討論，瞭解大陸於高放處置地質調查、選址與場址評估、核種遷移、工程障壁特性與安全評估等研究之進展，也獲得處置設計與工程障壁研發技術等相關經驗，有助於強化未來研究與技術之發展及應用。

目 次

摘 要.....	i
目 次.....	ii
圖目錄.....	iii
表目錄.....	iv
一、 目 的.....	1
二、 過 程.....	2
(一) 第六屆廢物地下處置學術研討會.....	3
1. 大會特邀報告與專題學術報告.....	3
2. 北山預選區技術考查.....	14
(二) 參觀訪問中國核電工程有限公司.....	22
(三) 參觀訪問核工業北京地質研究院.....	26
三、 心 得.....	29
四、 建 議 事 項.....	30

圖目錄

圖 1：第六屆廢物地下處置學術研討會開幕式.....	4
圖 2：捷克放射性廢物管理局局長 Jiri Slovak 報告捷克地下實驗室場址篩選及相關進展.....	4
圖 3：大會特邀報告.....	9
圖 4：處置工程相關研究專題報告.....	11
圖 5：China-Mock-Up 實驗設計圖.....	11
圖 6：壓實膨潤土塊模具與切割方法.....	12
圖 7：壓實膨潤土塊道熱系數量測分布與結果.....	12
圖 8：北山預選區技術考查合影.....	14
圖 9：參與單位與分工.....	15
圖 10：坑探設施工程方位.....	15
圖 11：探坑設施現場試驗布局.....	16
圖 12：現場注漿技術研究.....	17
圖 13：圍岩變形監測方法研究.....	18
圖 14：採用不同掏槽之鑽爆法震動影響研究.....	18
圖 15：EDZ 評估方法研究.....	19
圖 16：三維裂隙網路建模和硯室視覺化.....	19
圖 17：探坑試驗設備：圍岩變形監測試驗區(左)、地下水監測試驗鑽孔(右).....	20
圖 18：動態數據管理平台研究.....	21
圖 20：王旭宏主任介紹中國核電工程有限公司.....	22
圖 21：中國核電工程有限公司主要業務領域.....	23
圖 22：深鑽孔處置示意圖.....	24
圖 22：玻璃固化體廢棄物罐設計規格.....	25
圖 25：China-Mock-Up 試驗裝置(實驗室整修，暫時放置於庫房).....	26
圖 26：試驗使用之感測器.....	27
圖 27：試驗架設與傳感器埋設過程.....	27
圖 28：試驗裝置底部及中段之溫度隨時間變化.....	28

表目錄

表 1：工作行程表.....	2
表 2：大會特邀報告.....	5
表 3：專題學術報告.....	6

一、 目 的

中國岩石力學與工程學會廢物地下處置專業委員會、中國核學會輻射防護分會、中國環境科學學會核安全與輻射環境安全專業委員會、中國核學會核化學與放射化學分會環境放射化學專業委員會及中國土木工程學會土力學及岩土工程分會環境土工專業委員會，聯合於 105 年 8 月 22 日至 26 日，在甘肅敦煌舉辦第六屆廢物地下處置學術研討會。本次會議圍繞在廢物地下處置的理論、實踐探索、工程實例、新技術與新方法及國際進展等方面進行廣泛的學術交流，並於高放廢物地質處置庫北山預選區進行技術考察；透過此次參與第六屆廢物地下處置學術研討會，與來自大陸各學術及科研單位之專家學者進行專業學術交流與討論，期可獲得處置設計與工程障壁研發技術等經驗。

中核集團所屬之中國核電工程有限公司與核工業北京地質研究院，於放射性廢棄物處置地質調查、工程設計與安全評估研究範疇有豐富之研究經驗與成果貢獻，本次行程於 105 年 8 月 29 及 30 日，分別至上述研究單位進行學術與技術交流，研討放射性廢棄物處置概念、場址調查、工程設計、障壁材料交互作用機制研究及安全評估技術建立與發展等關鍵議題，藉此掌握大陸於放射性廢棄物處置之整體研發方向，增進對最新研究動態與議題之瞭解，強化高放處置研究與技術之發展。

二、 過 程

本次出國自 105 年 8 月 21 日出發，迄 105 年 8 月 30 日返國(共計 10 日)，先至甘肅參加第六屆廢物地下處置學術研討會，而後至北京訪問放射性廢棄物處置研究單位，詳細行程如表 1 所示。此行出國人員共 3 名，包含本所施建樑副所長、張淑君副組長及邱筠捷。

表 1：工作行程表

日期	活動地點/單位	交流/活動內容
第一天 8/21(日)	台北(桃園)→ 北京	去程，抵達北京
第二天 8/22(一)	北京→ 敦煌	1.路程，由北京轉赴敦煌 2.第六屆廢物處置學術研討會大會報到
第三天 8/23(二)	敦煌	參加第六屆廢物處置學術研討會： 1.高放廢物地質處置 2.中低放廢物地下處置 3.城市及工業廢棄物填埋處置 4.CO2 地質處置 5.污染場址修復
第四天 8/24(三)	敦煌	參加第六屆廢物處置學術研討會： 1.高放廢物地質處置 2.中低放廢物地下處置 3.城市及工業廢棄物填埋處置 4.CO2 地質處置 5.污染場址修復
第五天 8/25(四)	北山預選區	參加第六屆廢物處置學術研討會，進行高放廢物地質處置庫北山預選區技術考察
第六天 8/26(五)	嘉峪關→經蘭州→北京	路程，由嘉峪關轉赴北京
第七天 8/27(六)	北京	研討會資料整理與討論(假日)
第八天 8/28(日)	北京	赴研究單位交流之行前討論及會議資料整理(假日)
第九天 8/29(一)	北京	參觀訪問中國核電工程有限公司進行高放處置技術與安全評估研究發展交流。
第十天 8/30(二)	北京→台北(桃園)	參訪核工業北京地質研究院進行高放處置耦合程序研究交流。 回程，抵達桃園

(一) 第六屆廢物地下處置學術研討會

此次行程於 105 年 8 月 21 日晚間飛抵北京，於 8 月 22 日轉赴甘肅省敦煌市參與第六屆廢物處置學術研討會，至會場辦理研討會註冊與報到手續。

第六屆廢物處置學術研討會於 105 年 8 月 22 日至 8 月 26 日在大陸甘肅敦煌太陽大酒店舉行(如圖 1)，此次會議由中國岩石力學與工程學會廢物地下處置專業委員會、中國核學會輻射防護分會、中國環境科學學會核安全與輻射環境安全專業委員會、中國核學會核化學與放射化學分會環境放射化學專業委員會、中國土木工程學會土力學及岩土工程分會環境土工專業委員會及中國土木工程學會土力學及岩土工程分會非飽和土與特殊土專業委員會聯合主辦；由中科院武漢岩土力學研究所、南京大學、核工業北京地質研究院及中核高放廢物地質處置評價技術重點實驗室承辦。會議主要圍繞廢棄物地下處置的理論、實踐探索、工程實例、新技術與新方法、國際進展等方面進行廣泛的學術交流，參與人員包含大陸、台灣及捷克之放射性廢棄物處置專家學者。

1. 大會特邀報告與專題學術報告

此次會議之大會特邀報告共 16 篇，專題學術報告 12 篇，報告依主題整理如表 2、表 3；特邀報告著重於大陸高放射性廢棄物地質處置之進展、地下實驗室之選址與場址調查評估相關研究，捷克放射性廢物管理局局長 Jiri Slovak，亦進行捷克地下實驗室場址篩選及相關進展報告(如圖 2)；此外，會議中各與會單位與專家學者分別針對廢棄物體與核種遷移行為、地下實驗室設計、圍岩裂隙模擬分析、緩衝回填材料製備技術、緩衝材料熱水力耦合研究、氣體滲透試驗成果及 CO₂ 地質處置等專題，進行簡報與交流討論。

開幕式由核工業北京地質研究院王駒副院長主持，介紹出席單位與會議籌備狀況；由環境保護部核安全總工程師劉華致詞，其認為放射性廢棄物處置之安全管理，是對民眾作出之安全承諾；因此，對於高放處置研究提出了相關建議，尤其地下實驗室之建設應做好協調與統籌，並憑藉國外現有技術，發展高放處置研究工作，同時應落實民眾溝通與資訊公開，以資訊公開透明之方式提高民眾接受度；此論點正呼應了國際間開始關注之安全論證概念，也顯示了大陸對放射性廢棄物處置安全議題之重視。

後續由中國核學會副理事長、中核集團總工程師電增光致詞，介紹大陸現階段放射性廢棄物處置進展，而北山預選區之確立，使大陸高放處置出現突破性進展，亦對下一步工作提供了建議，由於高放處置為必行之路，且為需要大量人力、專業與時間之長期工作，透過一代代努力的傳承，並匯集各方力量，方能達成高放處置之整體目標，故應做好規劃與研究工作，無論工程如何進行與發展，唯有研究不能停止。



圖 1：第六屆廢物地下處置學術研討會開幕式



圖 2：捷克放射性廢物管理局局長 Jiri Slovak 報告捷克地下實驗室場址篩選及相關進展

表 2：大會特邀報告

主題	報告題目	報告人	單位
放射性廢棄物處置 總論	放射性廢物處置—核發中急待開拓的新的科技領域	潘自強	中核集團
	中等深度處置規劃和研究的若干思考	陳寶軍	中核集團
	高放廢物地質處置地下實驗室設計研究進展	榮峰	中核集團第四研究設計院
	含長壽命核素中放廢物中等深度處置發展展望	范仲	中核清原公司
	Current DGR development and DGR site selection in the Czech Republic and underground research in new facility URF Bukov	Jiri Slovak	捷克放射性廢棄物管理局
選址與場址評估	高放廢物地質處置地下實驗室選址及場址評價	王駒	核工業北京地質研究院
	高放廢物地質處置選址要素與北山候選場址	常向東	環保部核與輻射安全中心
	北山預選區新生代構造動力學背景	郭召杰	北京大學
	高放廢物處置岩體適宜性定量評價方法(Q _{HLW})及其應用研究	陳亮	核工業北京地質研究院
處置工程	圍岩裂隙系統的識別評價	李曉昭	南京大學
	化學影響下高廟子膨潤土體變特徵研究	葉為民	同濟大學
	高放廢物地質處置環境中金屬腐蝕行為研究進展	董俊華	中國科學院金屬研究所
	緩衝材料回填材料砌塊制備技術研究進展	劉月妙	核工業北京地質研究院
	台灣潛現場址 THM 試驗之概念模型配置	楊長義 李宏輝	淡江大學
核種遷移	北京大學高放廢物地質處置核素遷移研究十年進展回顧與展望	劉春立	北京大學
	高放廢物鐵基容器材料和亞鐵礦物對多價態核素的還原性的沉澱	崔大慶	中國原子能科學研究院

表 3：專題學術報告

主題	報告題目	報告人	單位
選址與場址評估	高放廢物地質處置地下實驗室候選場址三維地質建模研究	羅輝	核工業北京地質研究院
	北山預選區新生代構造動力學背景	郭召杰	北京大學
	高放廢物處置岩體適宜性定量評價方法(Q _{HLW})及其應用研究	陳亮	核工業北京地質研究院
	北山坑探設施介紹	劉健/ 陳亮	核工業北京地質研究院
處置工程	圍岩裂隙系統的識別評價	李曉昭	南京大學
	化學影響下高廟子膨潤土體變特徵研究	葉為民	同濟大學
	高放廢物地質處置環境中金屬腐蝕行為研究進展	董俊華	中國科學院金屬研究所
	高圍壓岩石滲透率/孔隙率量測儀	戴秉倫/ 董家鈞	中央大學
	三維離散裂隙網絡流動及傳輸不確定性分析	李奕賢	中央大學
	高放廢物處置花崗岩三維裂隙網絡建模技術研究	劉健	核工業北京地質研究院
	高放廢物地質處置地下實驗室 TBM 開挖可行性初步分析	馬洪素	核工業北京地質研究院
安全評估	高放廢物地質處置數據資源集成開發最新進展	劉原麟/ 高敏	核工業北京地質研究院

大會報告由核工業王駒副院長與中華核能學會放射性廢棄物管理學術委員會負責人黃慶村共同主持，為了解大陸於高放處置研究及技術之進展，以下整理並探討具代表性之報告內容。

(1) 放射性廢棄物處置總論

大會報告開始，由潘自強院士進行「放射性廢物處置—核能開發中急待開拓的新的科技領域」報告(如圖 3)，此報告建立於安全處置高放廢棄物重要性之基礎上，通過分析大陸高放廢物地質處置進展和存在之問題，提出高放廢棄物地質處置規劃設想，設立 2020 年建成地下實驗室及 2050 年建成高處置場之目標。大陸高放處置研究起步於 1980 年代中期，經過二十多年之發展，在選址、場址評估、核種遷移、處置程和安全評估方面取得了不同程度之進展。核工業北京地質研究院等單位開展了高放處置場址預選研究，在對華東、華南、西南、內蒙

古和西北 5 個預選區進行初步比較後，將研究重點移往西北甘肅北山地區；在地質調查和水文及工程地質條件、地震地質特徵等研究基礎上，施工了 4 口深鑽孔，獲得深部岩樣、水樣和相關資料，初步掌握了場址特性評估方法；在工程方面，以內蒙古高廟子膨潤土作為緩衝回填材料，以實驗及模擬方式研究其性能，以及低碳鋼、鈦及鈦鋁合金等材料在模擬條件下之腐蝕行為；核種遷移方面則建立了模擬研究試驗裝置及分析方法，研究鐳、鈾、鐳在特定條件下之特定行為；安全評估方面則處於相對初步之研究階段。

然而，大陸目前高放廢棄物地質處置研究也面臨一些問題，包含「沒有國家級高放廢物地質處置專項規劃」、「政府法規和標準基本上仍是空白」、「尚無明確實施高放廢物地質處置工程的責任主體」、「決策機制不健全」、「經費投入極少，核電廢物處置之籌資機制空缺」及「研究開發力量薄弱，缺乏研究平台」等。而潘院士也就此提出了相關建議：

A. 建立高放廢物地處置法規和標準體系

制定之條例應包括地質處置的要求、技術路線、進度、審管和主管單位職責、經費來源與實施主體等。

B. 開展頂層設計

為更有地組織當前高放廢棄物地質處置科研工作，建議制定「高放廢物處置科研項目指南」，全面開展頂層設計，包括法規體系、管理模式、技術路線、規劃目標和籌資機制等，對工作進度進行回顧性安全審評。

C. 盡快展開對現已進行之選址工作進行回顧性安全審評

研究單位針對已完成之工作向主管部門和審管部門提出報告，以鑒明現有工作成果，明確定出下一步工作方向。

D. 建立國家高放廢棄物地質處置研究平台

在 2020 年前建立以地下實驗室為核心的國家高放廢物地質處置研究平台，包括處置工程、場址評估、核素遷移和安全評估等實驗研究平台；在積極推動地質研究的同時，要特別注意加強處置工程和安全評估的研究工作，於制定計畫時應注意各方面的協調發展和相互聯繫。

E. 增加研究費用強度和渠道

高放廢棄物地質處置研究開發和工程建造需要相當多的經費，中央應增加經費的投入。

F. 加強國際合作

高放廢棄物處置研究於國際上屬透明且公開的，未來在爭取國際原子能機構支持的同時，有必要開拓或加強雙邊合作。

另外，大陸高放處置較特別之處，為特別強調「可取出」之概念，除了乏燃料再使用之考量外，也不可排除現階段認知有限之可能性，可能因技術能力之侷限而有未考慮周全之安全問題；因此，伴隨未來技術發展與研究精進，不可排除回取再處理之可能性。

(2) 選址與場址評估

核工業北京地質研究院王駒副院長報告「高放廢物地質處置地下實驗室選址及場址評價」，大陸之高放廢棄物地質處置選址工作始於 1985 年，共經歷 3 個階段，分別為「全國篩選」、「地區篩選」及「地段篩選」。在全國篩選階段(1985-1986 年)，根據有關選址標準，於全國範圍篩選出六大預選區，初步收集各區域之社會經濟資料與地質資料，進行綜合比對。地區篩選階段(1986-1989 年)，則於前述之 6 大預選區中又進一步挑選出 21 個地段供進一步調查，於西南地區選擇了 3 個地段，岩性為頁岩和花崗岩，廣東北部地區選擇了 2 個地段，佛崗花崗岩和九峰花崗岩體；在內蒙古地區選擇了帕爾江海子和大寶力兔兩個地段，皆為花崗岩；在西已地區選擇了甘肅北山地區的 6 個地段，岩性為花崗岩和泥岩；而後又選出了野馬泉和新場一向陽山地段。在地段篩選階段(1989 年至今)，選址工作集中於西北地區進行，具體研究甘肅北山及其鄰區的地殼定性、構造格架、地震地質特徵、水文地質條件與工程地質條件等，運用地球物理測量方法及遙感地質方法研究了該區域之地殼穩定性；從 1999 年起，展開了甘肅北山地區重點地段(舊井地段、野馬迫地段及新場一向陽山地段)之平行性評估工作，包括 1：50,000 地質填圖和鑽探工作等；初步評估了該地區的適宜性，建立了一系列場址評估方法，並初步驗證其有效性，為今後的類似工作及制定相關作業標準供了借鑒。

而為了符合法規於 2020 年完成地下實驗室可行性評估，大陸現階段已完成了選址準則與方案，並於今年初提出了選址報告書。大陸之地下實驗室屬於「特定場區型」實驗室，即建設在未來處置場址附近區域，或具有與潛在處置場址相似特征，同時具備方法學研究性質與場址評估性質之地下實驗室；故此地下實驗室屬大型、功能較完備並具擴展功能之深度實驗室，擁有與國際同步之研究水平，為完全開放透明供國內外參觀審視之科研平台。

此外，環保部核與輻射安全中心常向東博士於「高放廢物地質處置選址要素與北山候選場址」報告中提及，高放處置與其它中低放處置設施之安全功能要求有所不同，因時間尺度極長，為維持處置設施之長期穩定性，相較於處置設施工程手段造就之安全功能，場址固有之防護功能更為重要，故詳細的場址調查與評估為十分重要的一環；而目前大陸之研究多著重於技術論證，於安全管理面向較無法相互配合，如何利用合適之安全管理技術配合技術論證，達成全面而可信之選址結果，為相當重要的課題。



潘自強院士報告「放射性廢物處置—核能開發中急待開拓的新的科技領域」



王駒院長報告「高放廢物地質處置地下實驗室選址及場址評價」



陳寶軍報告「中等深度處置規劃和研究的若干思考」



常向東報告高「放廢物地質處置場選址要素與北山候選場址」

圖 3：大會特邀報告

(3) 處置工程

南京大學李曉昭教授進行了圍岩裂隙系統的識別評估報告，著重於圍岩裂隙對於處置場內導水度之影響分析，透過離散裂隙網絡模擬之方式，分析高放廢棄物處置甘肅北山預選區3號鑽孔近裂隙岩體之滲流特性，確定了該區域裂隙岩體之滲流表徵單元體(REV)尺寸及主滲透系數與滲透主方向。另利用校正之隨機裂隙網絡模型描述了岩體的空間結構，但由於隙寬的難測量性，造成了模型中裂隙之導水係數取值困難，欲利用上述模型分析場區滲流性質也同樣面臨困境；此研究使用模擬水試驗之方法，對離散裂隙網絡模型中裂隙導水系數進行標定，從而避免了由於野外測量造成的計算誤差，較科學且合理的確定了該區域裂隙岩體之滲透性質。

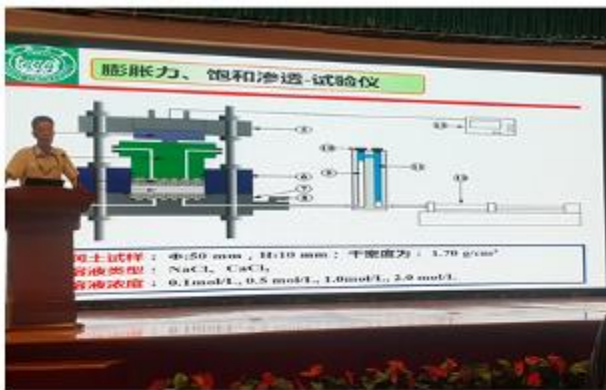
另有其它數篇研究報告亦針對岩層裂隙進行現場及模擬試驗，核工業北京地質研究院劉健與中央大學李奕賢等人，對於圍岩之三圍裂隙網絡建模技術皆提出相關研究討論，圍岩裂隙發展會連帶影響岩體之演化，改變其結構特性進而影響導水度及吸附能力，故岩體裂隙與水資源、CO₂ 封存及地質處置安全功能等面相息息相關；為使模擬結果更加符合現地狀況，北京地質研究院引入三維掃描技術，以取得現地之詳細參數，並自行編寫合適之計算方式，

取得更加可信之現地三維裂隙網路模型，足見各方對高放處置圍岩裂隙調查研究之重視。

緩衝材料研究部分，同濟大學葉為民教授報告化學影響下高廟子膨潤土體變特征研究(如圖 4)，以不同濃度之鈉鹽與鈣鹽溶液，進行反覆鹽化與淡化，觀察過程中膨潤土回脹壓力之變化。核工業北京地質研究院高玉峰博士則報告了壓實膨潤土氣體滲透特性研究，對不同壓實乾密度之高廟子膨潤土試體，進行不同加載氣壓圍壓條件下的氣體滲透試驗研究，而結果發現氣體滲透系數與壓實乾密度存在非線性關係，隨乾密度增大，氣體滲透系數明顯變小，由 10^{-15}m^2 逐漸減小至 10^{-17}m^2 數量級；氣體滲透性與加載氣壓圍壓也存在一定關係，氣體滲透系數隨加載圍壓增大而逐漸減小至不變，隨加載氣壓增大而略有減少，得到之試驗結果為高放廢物地質處置之建設提供參考依據。

由核工業北京地質研究院劉月妙博士為首建立之 China-Mock-Up 實驗(如圖 5)，則為國際上相當具有研究價值之大型熱水力耦合實驗，包含實驗腔體、溫度控制系統、滲流系統和數據採集系統等四大部份，用以掌握並了解高壓實膨潤土在模擬處置庫條件下之長期行為特徵，同時驗證在可控邊界條件和加載條件下所建立的數值模型正確性與合理性，為緩衝材料多場耦合長期性能提供參考。整體研究從探討半圓形高壓實膨潤土密度均勻性、膨潤土組合砌塊界面特性及其阻隔性能研究、傳感器之測試與改良、至高放廢物地質處置緩衝材料試驗台架研究進展，結合了大量不同課題之實驗經驗與結果，藉由各單元間細節之掌握與驗證，建立進似於現地情況且可信之大尺寸熱水力耦合實驗。

高放廢棄物深層地質處置設施中需要大量壓實緩衝材料作為重要之工程障壁，包覆於廢棄物罐與圍岩之間，達到水力、化學、核種傳輸……等緩衝與屏障效果；國際間於 1990 年開始製備大型壓密膨潤土塊，用以探討工程可行性及工程障壁長期穩定性，而許多大型試驗結果也揭露壓密膨潤土塊體本身之均勻性、砌塊組合之方式與間隙，對地下水入侵、氣體傳輸及核種遷移等緩衝效果有著極大影響；劉月妙博士也針對壓製技術及塊體均勻性量測進行了研究，採用特制半圓形壓實模具，嚴格控制壓製的位移與荷載速度，使用壓力一次壓製成型高密度壓實潤土，同時採用固定切割方式將塊體分割成 27 個區塊(如圖 6)，分別量測每一塊之密度，探討壓製時採用之壓力、速度、時間與模具形式對膨潤土塊均勻性之影響，而結果顯示採用此壓製方法之塊體乾密度差小於 0.2g/cm^3 ；此外，緩衝材料之導熱性質對了解緩衝材料中溫度場之形成、特徵、熱應力分布等議題至關重要，許多研究表明，黏土材料之道熱性能與其含水量、乾密度、礦物組成和溫度等條件息息相關，為詳細了解壓實膨潤土塊的密度均勻性，分別測定了每塊壓實膨潤土塊不同位置的導熱系數(如圖 7)，結果顯示壓實膨潤土塊之壓實密度與導熱系數密切相關，可採用不同位置之導熱系數測量作為壓實膨潤土塊無損檢測的一種方法。因此，劉月妙博士於此研究中提出了具有技術可行性之緩衝材料膨潤土塊壓製方法，並提出可行之無損檢測方法，未來將朝向更大尺寸之塊體壓製進行研究與驗證。



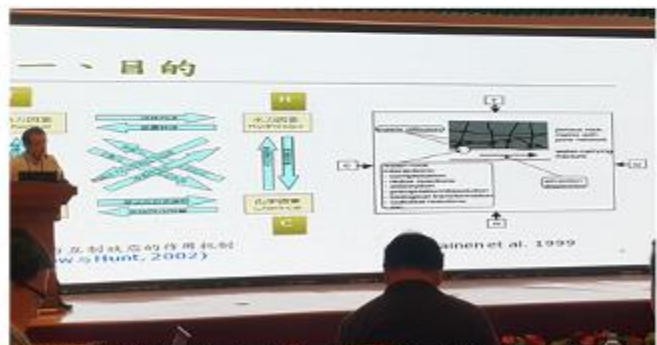
葉為民教授報告「化學影響下高廟子膨潤土體變特徵研究」



高玉峰報告「壓實膨潤土氣體滲透特性研究」



劉月妙報告「緩衝材料砌塊制備技術研究進展」



林文勝報告「高放廢物處置設施受熱-水力-化學耦合作用模分析之當議」

圖 4：處置工程相關研究專題報告

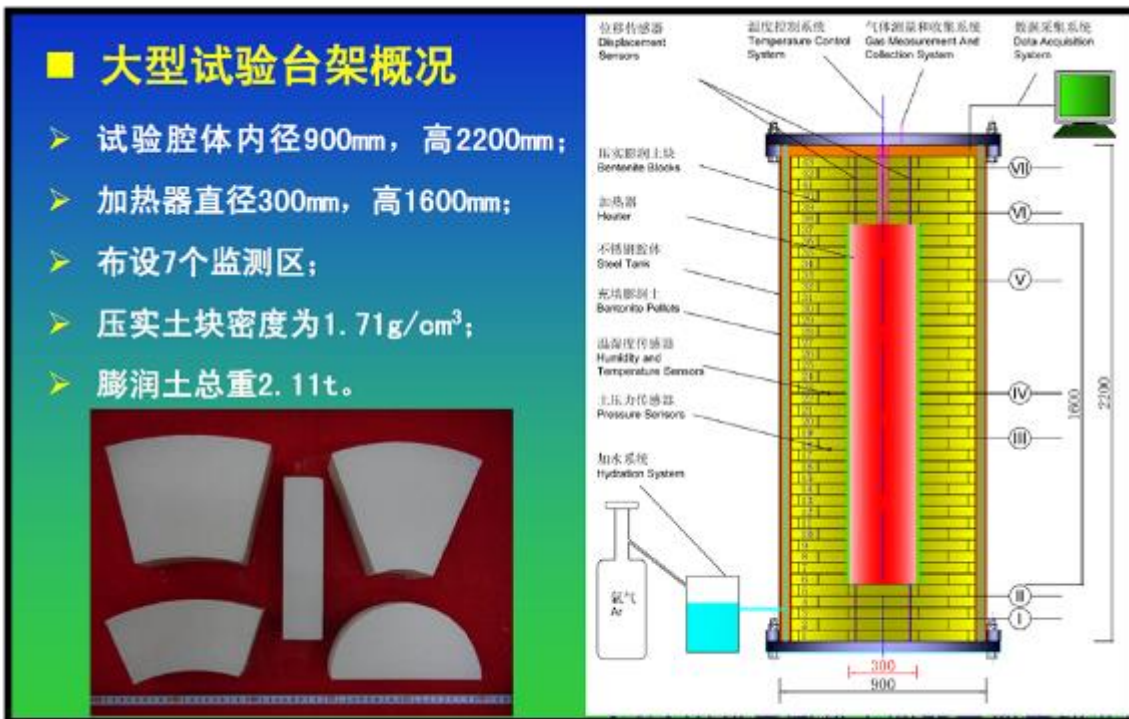


圖 5：China-Mock-Up 實驗設計圖

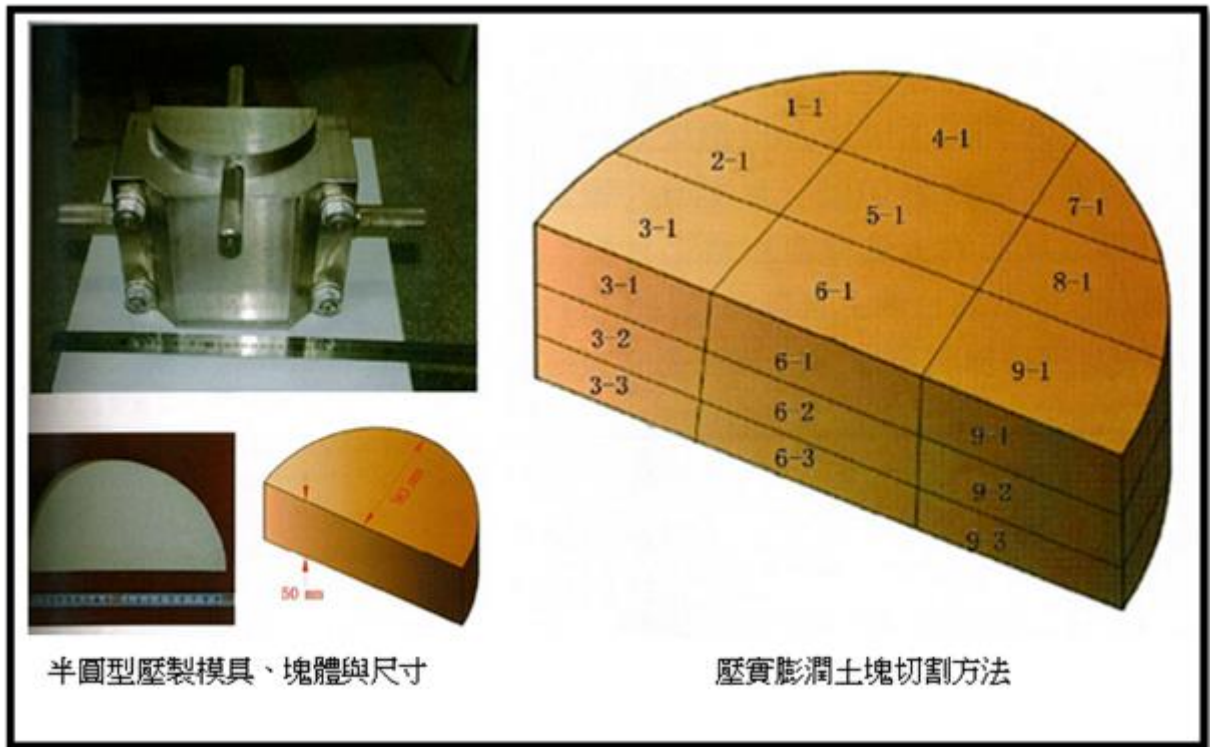


圖 6：壓實膨潤土塊模具與切割方法

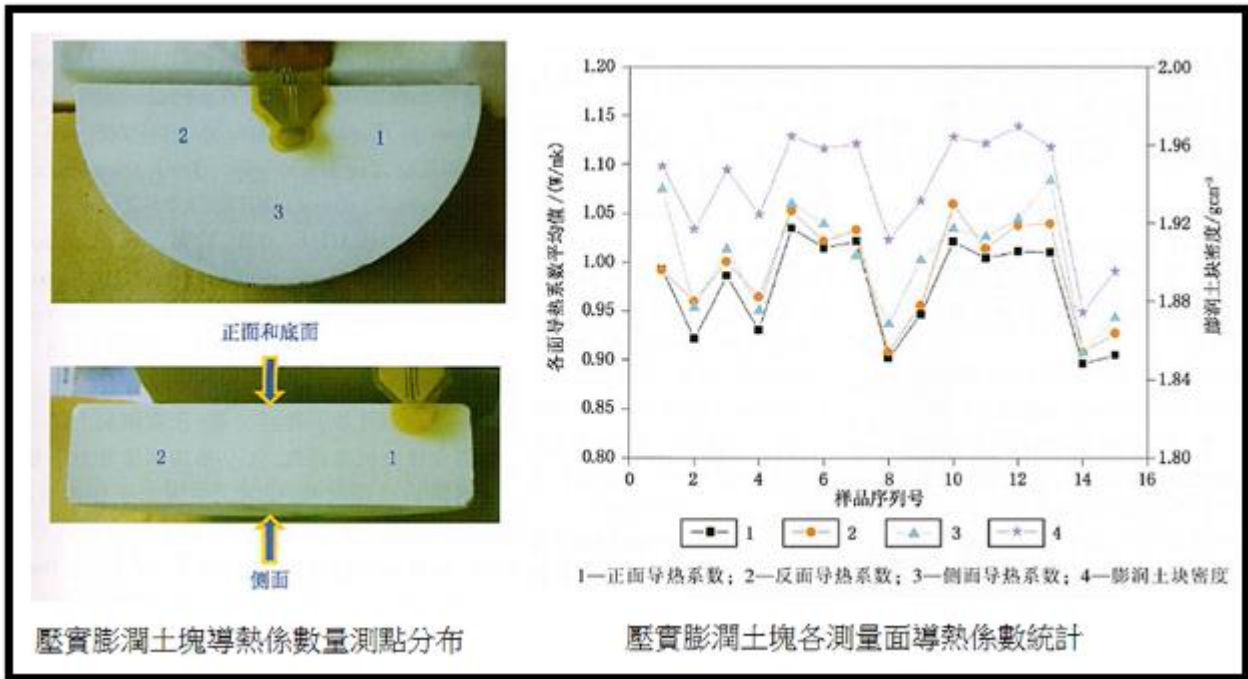


圖 7：壓實膨潤土塊導熱係數量測分布與結果

(4) 安全評估

值得一提的是，核工業北京地質研究院高敏進行高放廢物地質處置數據資源集成開發新進展，利用大數據之概念將工程設計與現地調查之參數進行統整與記錄，有助於整體研究成果之交叉比對及提高數據利用效率及可信度，數據庫資訊可代入各模型進行分析，進而串聯統整；此管理策略對於長期且龐大之高放處置計畫有正向助益，近似於我國安全評估採用之評估模式流程圖，利用工程設計或現地調查之參數代入串聯模式鍊進行安全評估，而大數據概念可用以加強數據管理，使品質保證更上一層。

將研討議題回饋至台灣，台灣目前處於潛在母岩特性調查階段，以離島結晶岩測試區作為技術建立之標的，而場址調查與評估研究對於處置設施之安全功能有著不可忽視之影響，故對於即將邁入下階段之台灣而言，藉由測試區累積之經驗，如何有效應用於後續後選場址之調查與評估，並配合安全評估進行反覆驗證，有系統性的完成合適之處置設施場址選定及處置設施設計為重要議題。

2. 北山預選區技術考查

研討會於專題報告告一段落後，安排至甘肅北山預選區進行技術參訪(如圖 8)。

大陸高放廢棄物處置定有「三步走」戰略，即 1985 年須完成初步選址，2020 年建成地下實驗室，而 2050 年完成處置設施的建立。為達成 2020 年建立地下實驗室之目標，其又將科研工作進行了總體部署，2015 年以前進行地下實驗室基本理論和方法研究，包含設計與建造技術、現場試驗方法、安全控制技術及長期穩定性評估方法研究；2015 年至 2017 年進行地下實驗室前期工程科研工作，包括選址、總體試驗方案制定、工程結構設計、安全控制體系設計與動態數據管理平台研發；至 2020 年應完成地下實驗室建設，除了地表設施、豎井和斜坡道、試驗巷道外，也須完成其他輔助系統之建設。

而北山坑探設施之建立，為地下實驗室開挖、監測、支護和不良地質體超前探測等工程安全技術研究提供了試驗平台，同時研發地下實驗室科研數據動態管理技術，並建構地下實驗室工程建設和科研管理模式，為未來處置設施之建設與運行提供技術的建立；此坑探設施為相當浩大且繁鎖之工程，須透過不同專業領之單位合作，投入大量人力物力與技術方能完成，參與工程與研究之單位分工如圖 9。

此次參觀之坑探設施位於甘肅北山預選區舊井岩體十月井斷裂附近(如圖 10)，工程結構主要由斜坡導(146 公尺長，傾角 20°)，平巷(132 公尺長)、試驗巷道(92 公尺長)、水倉和通風鑽孔等部分組成，而現場依據不同試驗需求配置專屬試驗硐室(如圖 11)，目前已建設之試驗包含注漿試驗、超前探測試驗、超前探測試驗、鑽爆法試驗、EDZ 和地下水監測試驗及支護試驗……等，以下將針對各試驗之概念及特點分別進行描述。



圖 8：北山預選區坑探設施

单位名称	任务分工
核工业北京地质研究院	总负责；钻爆法研究、动态数据管理、三维裂隙建模
中核第四研究设计工程有限公司	工程设计；注浆技术研究
四川大学	动力灾害特征参量监测及预测
中国矿业大学（北京）	不良地质体超前探测
中国人民解放军理工大学	围岩变形监测方法
中国科学院武汉岩土力学研究所	EDZ评价、围岩支护方法和地下水监测

圖 9：參與單位與分工



圖 10：坑探設施工程方位

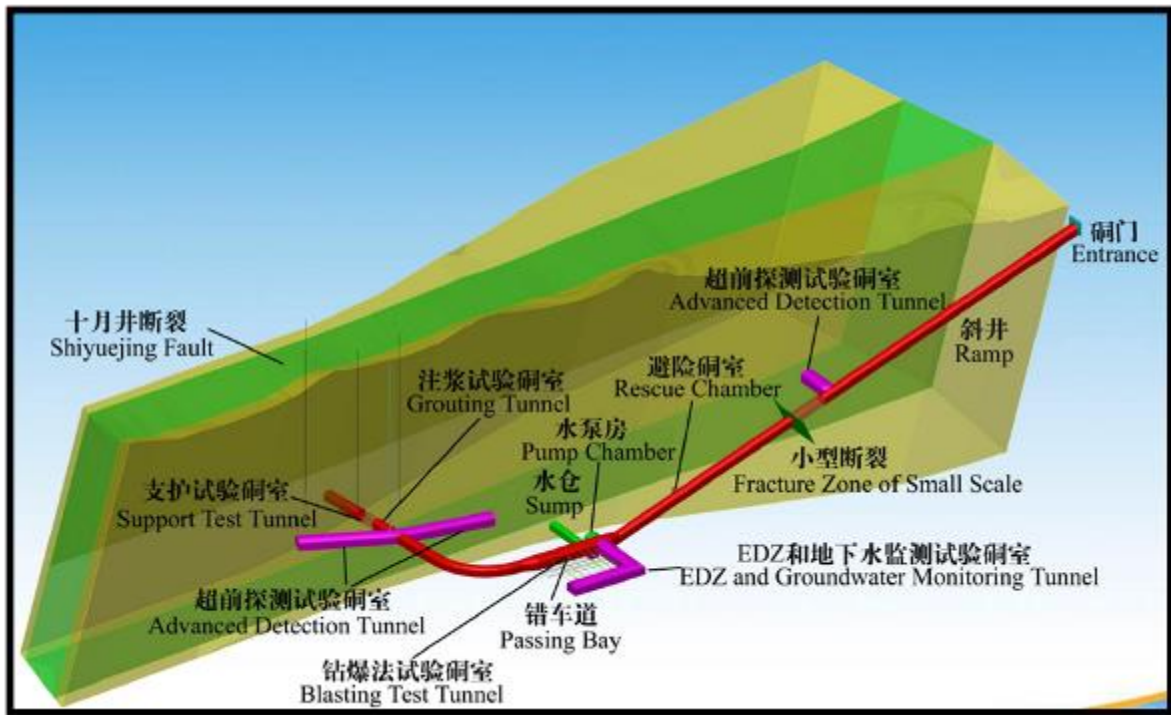


圖 11：探坑設施現場試驗布局

(1) 現場注漿技術研究

現場注漿技術研究建立於坑道尾段之洞室，垂直穿越十月井斷裂，利用現地裂隙進行試驗與結果評估；過程中使用不同材料配比、注漿壓力及注漿時間進行試驗，觀察注漿材料與工法對於裂隙之擴散與充填效果，用以評估其適宜性，強化現場注漿之工程參數，為後續地下實驗室注漿設計提供參考(如圖 12)。

(2) 圍岩變形監測方法研究

圍岩變形監測方法研究則設置於三處坑道斷面，共布設兩組自動監測斷面與三組人工監測斷面，其目的為分析不同圍岩變形監測方法之適宜性，提出圍岩變形之人工監測和自動監測方法，作為建立地下實驗室施工過程中圍岩變形監測技術體系之依據(如圖 13)。

(3) 鑽爆法和 EDZ 評估方法研究

開挖擾動帶為深層地質處置必須面臨之重要議題之一，處置設施之開挖與建設不可避免產生人為破壞，而北山坑探設施內之相關研究，結合北山花崗岩地質條件，探討採用直眼掏槽、楔形掏槽與雙楔形掏槽鑽爆法之洞室爆破效果(如圖 14)；同時探討破岩機理及圍岩損傷機理，結合 EDZ 監測洞室之數據，評估每次爆破對周邊圍岩的損傷破壞；依據每個測點測得之水平、徑向及垂直方向之震速，透過迴歸分析每次炸藥量與爆破距離之合適數值，並探討測量範圍與精度等對比分析，進而優化鑽爆參數，建立符合北山預選區地下實驗室需求的 EDZ 評價方法體系(如圖 15)。

試驗主要包含了開挖前、後之鑽芯取樣、岩芯編錄和岩芯室內物理力學試驗，開挖前和開挖後的超聲波、鑽孔電視與鑽孔雷達探測，以及開挖期間與開挖後的微震和聲發射線上監測。其中超聲波鑽孔電視測量為一種直接獲取鑽孔內圖像之地球物理測井方法，其特點為可

獲得鑽孔孔壁高解析度圖像，用以確認鑽孔所得之結構面特徵。而鑽孔雷達探測為利用反射原理探查岩石結構之方法，依據使用方式不同可區分為單孔量測及跨孔量測，單孔量測可獲取鑽孔孔壁外圍一定距離(探測半徑)內之岩石結構資訊，包含裂隙或孔洞；跨孔量測則可獲得一定距離內兩鑽孔之間的岩石結構訊息。

(4) 三維裂隙網路建模和硯室視覺化

此研究是透過地表露頭調查與硯室裂隙編錄，分析裂隙之幾何特徵，調整改進裂隙調查之方法，進而優化三維裂隙網路建模技術；同時融合硯室裂隙調查、三維鐳射掃描及全景攝影等技術，實現北山坑探設施三維視覺化(如圖 16)。

(5) 動態數據管理平台研究

以高效、規範化管理北山坑探設施勘探資訊、工程資訊和試驗資料為目標，制訂試驗資料從產生到存儲、交換的標準化方案，建立北山坑探設施動態資料管理系統，其中工作包含軟體系統設計、硬體系統設計及數據標準化建議研究，期可作為地下實驗室資料管理之研究基礎。

(6) 近場圍岩導水斷裂帶探測現場試驗

其目的為建立以探地雷達為主的導水裂隙帶與小斷層等不良地質之高精度組合探測技術(如圖 17)，預期研究並開發低頻組合天線探地雷達儀器，開發三分量數字地震檢波；試驗將透過斷層破碎帶追蹤探測，於掌子面布設十字測線，每隔 5 公尺跟蹤探測一次，另於側幫中部布置測線，按照方法不同，探測點距為 0.01 至 0.1 公尺，並進行硯室精細探測，於硯室側壁布置測線，探測點距為 0.02 公尺與 0.05 公尺。藉由此試驗過程，分別開發出可有效探測 60 公尺深度範圍內之斷裂破碎帶、探測精度為 2 公尺，有效探測 20 公尺範圍的破碎區，探測精度 1 公尺，及有效探測 5 公尺範圍的破碎區、探測精度 0.5 公尺之地震檢波器。

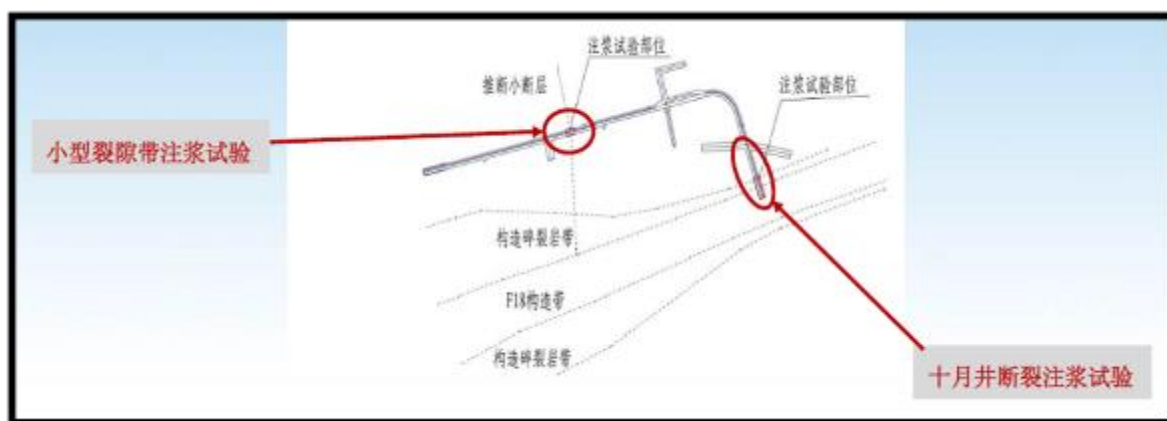


圖 12：現場注漿技術研究

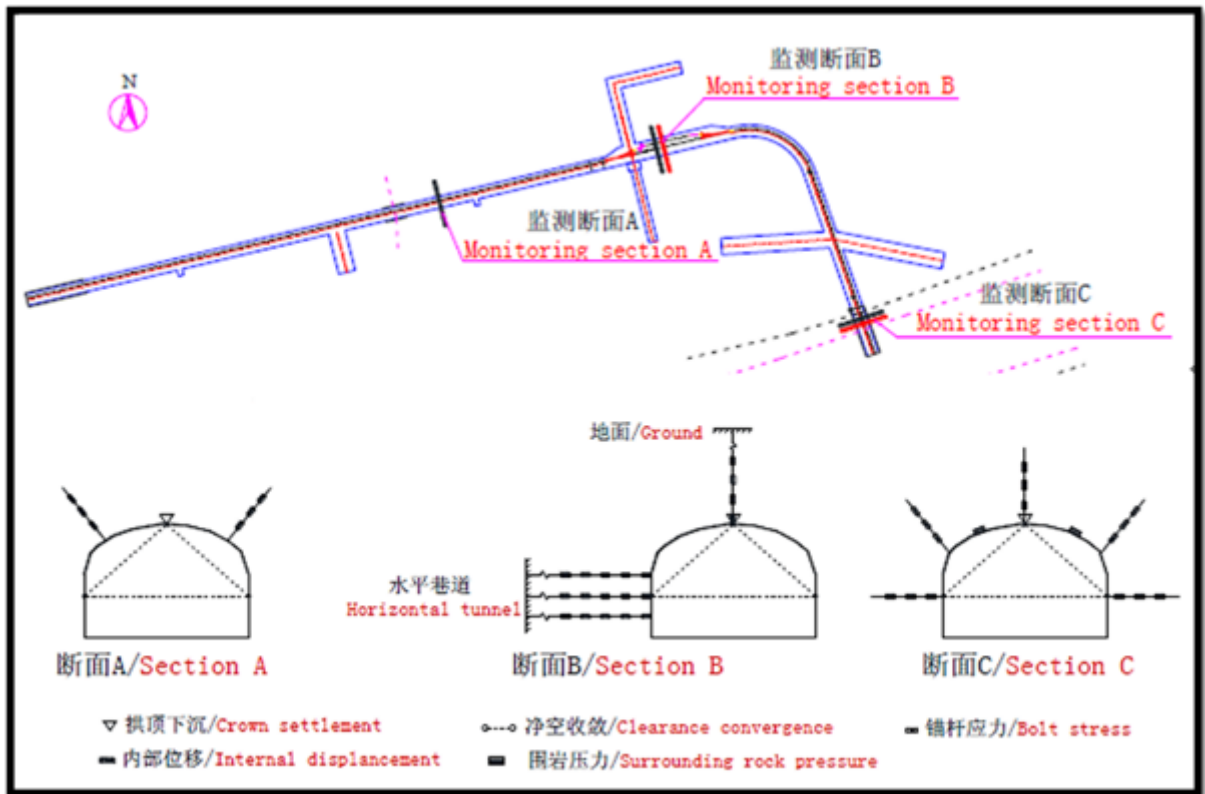


圖 13：圍岩變形監測方法研究

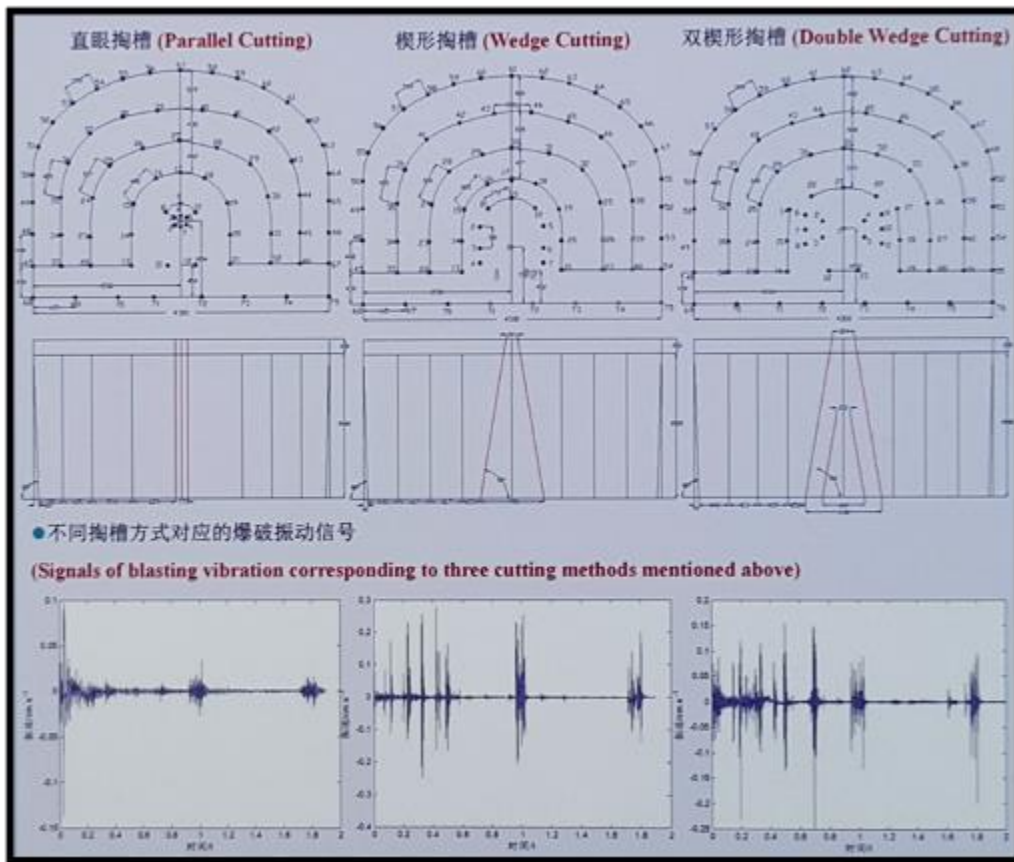


圖 14：採用不同掏槽之鑽爆法震動影響研究

此行參訪之北山坑探設施平行於十月井斷裂而建，藉由天然之斷層與裂隙結構，作為現地地質調查、試驗、模擬與工程設計……等技術建立之標的，也提供了技術可行性驗證的平台；於坑道中可見上述試驗相關之監測設備(如圖 17)，包含採用鑽孔電視與鑽孔雷達之 EDZ 監測試驗鑽孔、圍岩變形監測試驗及地下水監測試驗鑽孔……等；其中圍岩變形監測試驗設置了數組貫穿兩平行坑道之鑽孔，長達 15 公尺，可用以量測圍岩變形之情況，而目前該試驗處於分析圍岩變形監測方法之適宜性之階段，綜合比較不同監測方法之所得之結果，提出合適之圍岩變形人工監測和自動監測方法，作為建立地下實驗室施工過程中圍岩變形監測技術體系之基礎。

除了各種地質調查試驗外，北山坑探設施也帶入了數據管理與整合的概念，研發動態數據管理平台(如圖 18)，以北山坑探設施勘探資訊、工程資訊和試驗資料的高效和規範化管理為目標，制訂試驗資料從產生到儲存、交換的標準化方案，建立北山坑探設施動態資料管理系統，為地下實驗室資料管理提供研究基礎，而如何確定執行品質管理，保留數據可追溯性，將是數據管理研究之重要課題。

坑探設施之開挖與建立，使大陸高放地質處置研究出現突破性進展，而目前尚處於地下實驗室建立之初始階段，相關研究仍在持續拓展，研究單位近期將於坑道底部進行微震監測與圍岩變形監測等試驗，期望藉由實質性的工程技術探索與現地試驗，掌握更多現地資訊與數據，作為處置設施地質調查、工程設計與長期安全性評估之依據。



圖 17：探坑試驗設備：圍岩變形監測試驗區(左)、地下水監測試驗鑽孔(右)

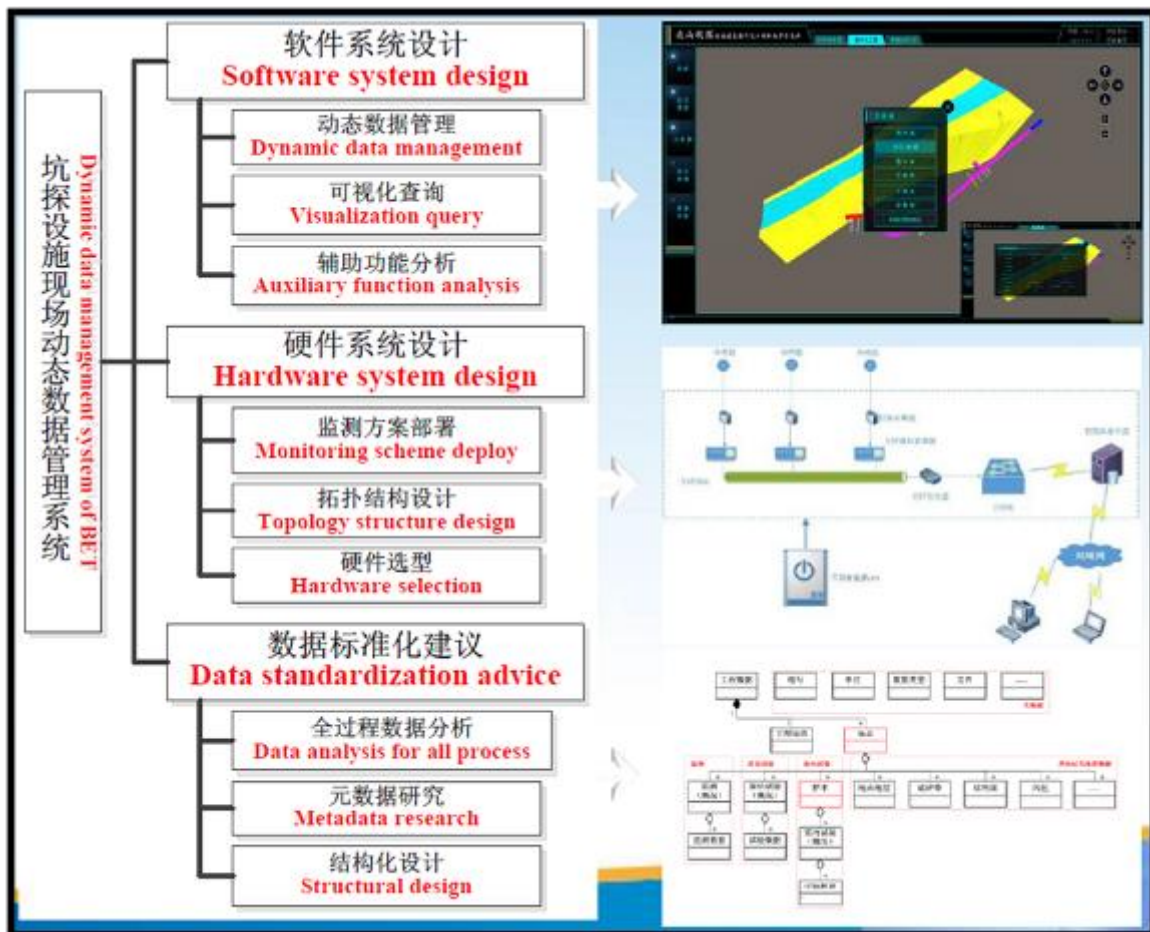


圖 18：動態數據管理平台研究

(二) 參觀訪問中國核電工程有限公司

隨著第六屆廢物地下處置學術研討會的落幕，同行三人從嘉裕關經蘭州抵達北京，並於 105 年 8 月 29 日至中國核電工程有限公司(簡稱核電公司)進行放射性廢棄物處置學術研討交流(如圖 19)。核電公司為中核集團之核工業第二研究設計院、核工業第四研究設計院第核工業第五研究設計院重組改制而成，成立於 2007 年 12 月，是大陸唯一具備核電、核化工、核燃料研發設計能力之工程公司；除了核電廠選址、工程設計等前期論證工作外，尤其對於乏燃料後處理、放射性廢物處理與核設施退役等方面之科研工作尤有心得，詳細工作領域如圖 20 所示。

本次交流由核電公司放射性廢物地質處置中心王旭宏主任主持，該方與會人員包含李廷君主任、呂濤副主任、米愛軍博士、楊球玉博士與王東博博士等人；會議著重於放射性廢棄物分類與管理、運送、處置技術發展與安全評估研究現況交流，進行學術研究方面之經驗與成果交流討論，進而探討各項研究之研發方向與實際執行狀況之體現。

核電公司王雅霄博士與李卓然博士介紹了壓水堆核電廠放射性固體廢棄物分類標準及管理現狀，無論是廢棄物之再處理、中期貯存或最終處置，都須建立於明確的分類標準之上，透過清楚的來源、種類與活度……等分門別類，有助於研發最適當之處理或處置方法，也能將潛在風險與危害降至最低，確保放射性廢棄物處置之安全性。

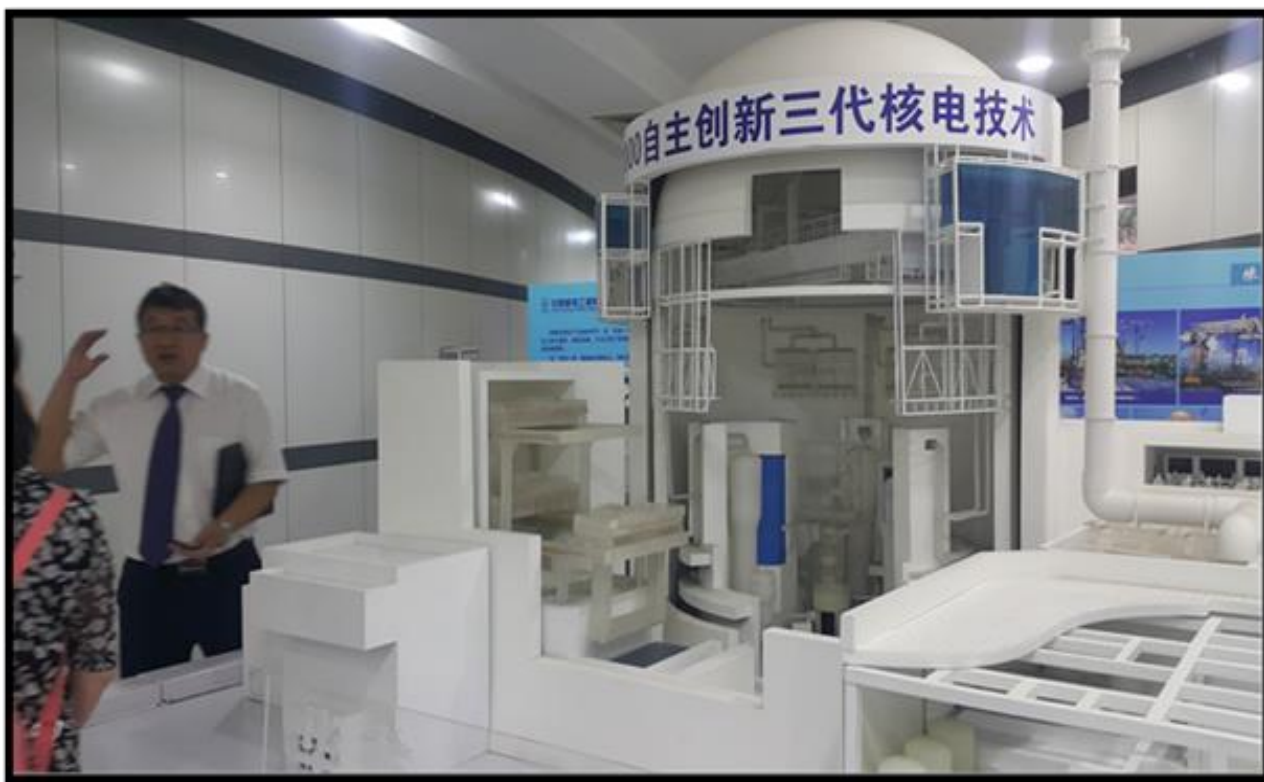


圖 19：王旭宏主任介紹中國核電工程有限公司

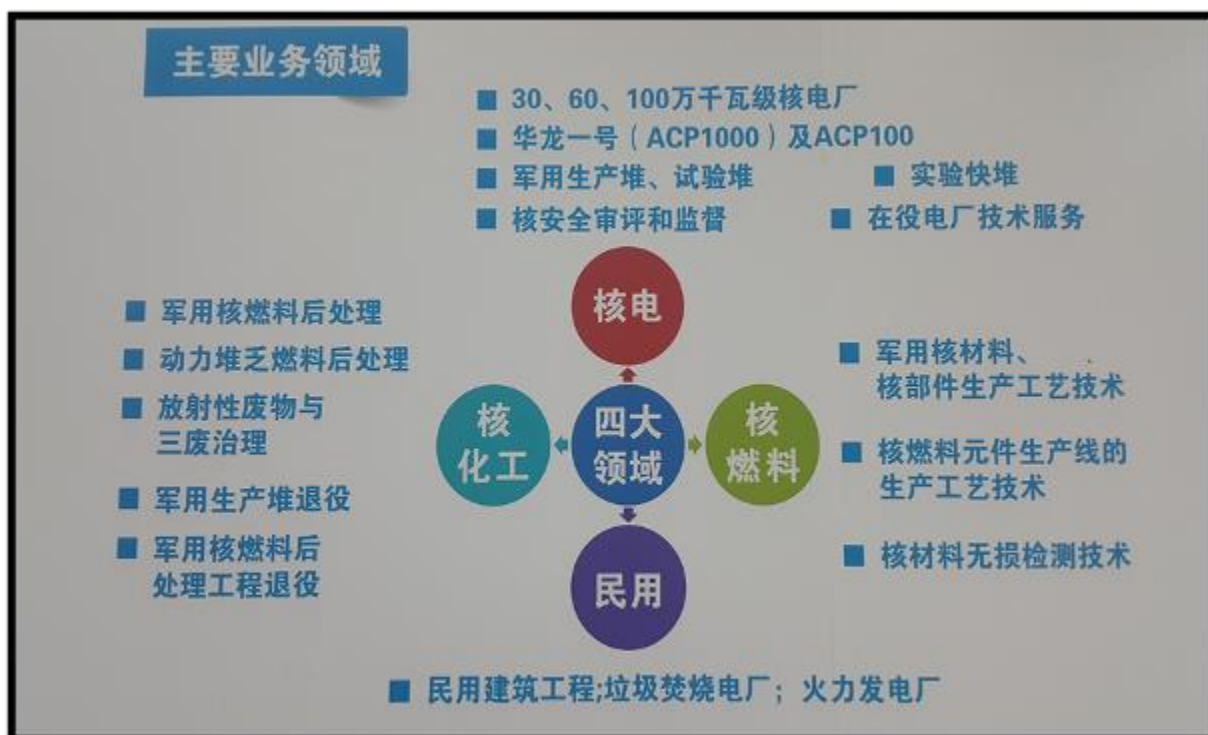


圖 20：中國核電工程有限公司主要業務領域

此外，劉翔宇博士針對低中放廢棄物岩洞處置安全評估方法進行簡報，岩洞型處置係將廢棄物埋設於深數十米的地下硯室，利用上覆地層作為障壁起到阻隔作用，同時能節省地表空間，設計作為其他用途；在安全評估方面，其將處置之空間尺度劃分為運行階段、運行後行政管理控制階段(300~500年)與運行後不需管理階段(10萬年)，將三階段分別建立可能導致污染釋出的「景象」，可能包含廢棄物運輸時發生掉落、廢棄物罐瑕疵、未來人類鑽探使核種外釋……等，基本上等同於台灣安全評估概念中的「情節」；此研究採用 Ecolego 軟體，依據各別景象分別透過模式計算推演可能之劑量與風險，與法規進行比較，與台灣高放處置安全評估概念基本上是一致的。而核電公司王旭宏主任認為，大陸在高放處置研究之統整性仍待加強，如何系統化安全評估概念，為未來雙方可進行技術交流之處。

核電公司除了對中低放廢棄物處置與安全評估技術擁有豐富經驗外，於高放處置部分則對深鑽孔處置進行了詳細的研究與規劃；深鑽孔處置係指將放射性廢棄物埋設於深度 5,000 公尺之深鑽孔中，其中 3,000~5,000 公尺深處為處置區域，廢棄物罐之間以水泥、膨潤土、瀝青作為回填材料，層層阻隔；據調查結果顯示，5,000 深之地下水流速為 30 公尺/100,000 年，儘管廢棄物罐失效使核種釋出，也幾乎無法遷移至生物圈造成相關風險，故此工法有隔離距離更大、水流動性更弱、岩體滲透性更低等高安全性特徵(如圖 21)，惟有不易回取的缺點；目前 美國、瑞典、英國、丹麥及瑞士等國皆有進行相關研究，尤其瑞士於 1989 年在 Silijan 結晶岩地區鑽設達 6,600 公尺深的鑽孔，以了解深鑽孔處置之技術可行性與經濟合理性，同時也將礦山處置(KBS-3)、長坑道處置(VLH)、中長坑道處置(MLH)與深鑽孔處置(VDH)，依

據技術性能、長期性能與安全性、成本三項指標進行綜合評比，而當時的結果使瑞典選擇採用 KBS-3 處置概念，但仍持續研究其他處置工法。而大陸天然資源豐沛，其於鑽井技術成熟度與經濟成本上擁有相對優勢，目前已有 8,408 公尺深之鑽井實例，故深鑽孔處置確實為其高放射性廢棄物處置概念的良好選項之一。

大陸之高放廢棄物為再處理後之玻璃固化體，型式與台灣略有不同，核電公司也依此設計以不鏽鋼製作之玻璃固化體處置容器(如圖 22)，容器頂端設計有突出螺紋，而底端為凹槽式螺紋卡榫，罐與罐之間可以互相銜接，有利於處置時一邊接合廢棄物罐，一邊將其放製於鑽孔之內。核電公司規劃於今年 9 月分開鑽勘探孔，2017 年進行試驗孔鑽探並完成場址測試工作，2018 年完成鑽孔及各項指標測試作業，同時進行廢棄物放置試驗，最後於 2019 年完成放置測試，並完成最終分析與概念設計評估報告。

藉由此次中國核電工程有限公司學術交流討論，可見大陸於高中低放廢棄物處置相關領域前後開展了許多研究，包含低放射性廢棄物高性能混凝土處置容器研發、中低放廢棄物岩洞處置、乏燃料處理及深鑽孔處置……等，尤其高放深鑽孔處置研究提供我們了不同面向的思考，也獲得許多研究經驗值得學習與借鏡。

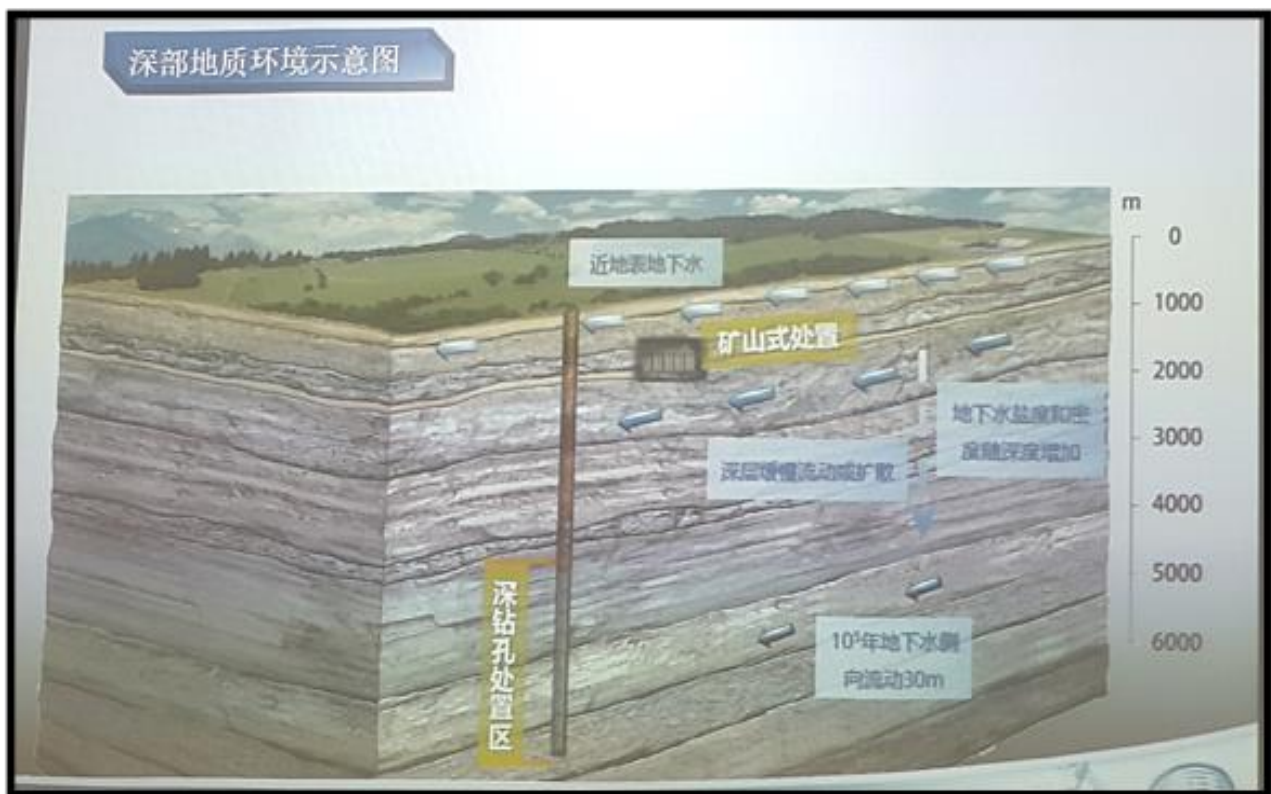


圖 21：深鑽孔處置示意圖

材料	奥氏体不锈钢 Austenite stainless steel	
外部直径	430mm	
外部高度	1340 mm	
壁厚	5mm	
有效容积	150 L	
重量	100 kg	
	500 kg (盛装废物)	

圖 22：玻璃固化體廢棄物罐設計規格

(三) 參觀訪問核工業北京地質研究院

105 年 8 月 30 日下午由北京返回台灣，上午時段先前往核工業北京地質研究院(簡稱核地院)拜訪，除了對核地院於第六屆廢物地下處置學術研討會之付出表達感激之情，並針對研討會中之研究議題進行細節上的交流與討論，同時，藉此機會前往參觀研討會中劉月妙博士介紹之緩衝材料熱-水-力-化學耦合性能大型試驗台架設備。當日交流會議由王駒副院長主持，除了我方代表三人外，與會人員包括蘇銳處長、陳亮所長、高敏博士、趙星光博士與曹勝飛博士等人，會議主要圍繞雙方於高放處置技術與研究之發展，雙方針對放射性廢棄物管理、處置技術、地質調查、場址評估與工程障壁研究與安全評估技術之建立與發展進行交流；隨著北山坑探設施之建立，相關鑽探、岩體裂隙調查、水文地質調查與模型建立等技術有了實質性的進展，相關實驗與工程手段得以實踐並應用於現地，也提供難能可貴的驗證平台。

此外，於曹勝飛博士帶領下，參觀緩衝材料熱-水-力-化學耦合性能大型試驗台架設備 China-Mock-Up(如圖 23)，即為第六屆廢物地下處置學術研討會中劉月妙博士所介紹之試驗設備，依大陸處置概念之 1/2 尺寸建成，外層為不鏽鋼腔體，內徑 90 公分、高度 220 公分，中間設置與實際廢棄物罐等重之模擬發熱體，直徑 30 公分、高度 160 公分，外圍填裝包覆膨潤土塊與填料顆粒，膨潤土總重約 2.11 噸；從腔體周圍注入北山地區所取得之地下水，模擬處置孔內受地下水入侵時之影響。整體區分為 7 個監測區，共設置 10 種感測器，擷取不同試驗數據，內部裝設 113 個，外部裝設 52 個，共計有 165 個感測器，包含溫度感測器、濕度感測器、應力感測器、孔隙水感測器、應變計、測微器及流量計、LVDT 位移感測器、電化學腐蝕感測器、光纖光柵應變感測器等(如圖 24、25)，利用數據擷取系統蒐集各感測器資訊，以瞭解緩衝材料受廢棄物罐重量而沉陷之程度，以及廢棄物放熱作用與地下水入侵對緩衝材料之影響。



圖 23：China-Mock-Up 試驗裝置(實驗室整修，暫時放置於庫房)

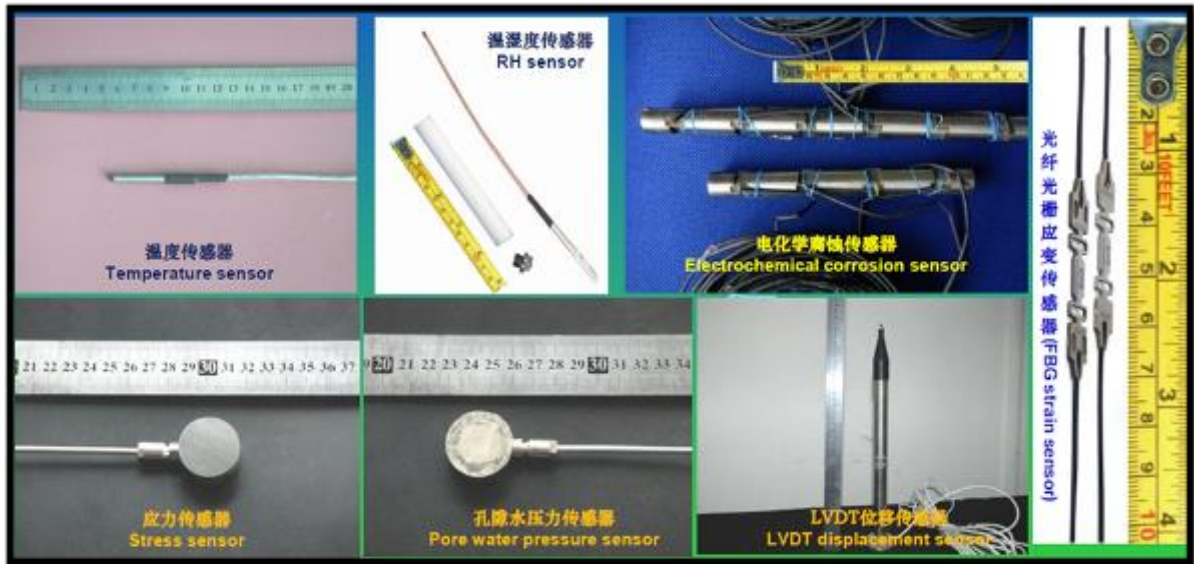


圖 24：試驗使用之感測器

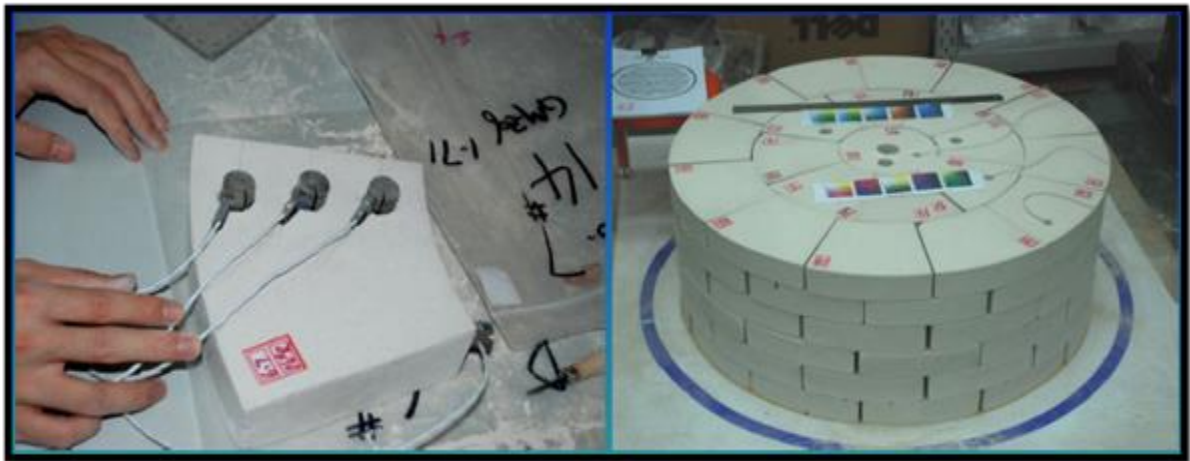


圖 25：試驗架設與傳感器埋設過程

China-Mock-Up 試驗於 2010 年完成建置，以加熱棒供以定溫 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 開始進行試驗，從 2011 年 7 月開始將溫度階段性調升，於同年 12 月到達 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 後維持定溫至今；而北山地下水從 2011 年 7 月開始以 $400\sim 1500\text{ g/day}$ 之控制水量注入，模擬地下水滲流入侵處置設施之情形，待試體達飽和後，於 2013 年 8 月起改以 $0.1\sim 0.7\text{ MPa}$ 之控制水壓注水，過程中持續監測記錄前述之各項參數，而監測數值皆能作為建立數值模型之論證依據。

試驗過程隨著加熱器溫度的增加，膨潤土的溫度逐漸升高，可觀察到距離加熱器越近偵測到之溫度越高，由於試驗設備外未設置恆溫探制系統，因此定溫階段測得之溫度也隨著室溫的變化而變動(如圖 26)。但隨著膨潤土的濕度增大，熱傳導係數隨之上升，距離加熱器不同位置的膨潤土的溫差逐漸降低；膨潤土塊中的相對濕度是在加熱器的熱效應和外部供水的濕效應共同作用下發生變化的，膨潤土不同位置的飽和過程受乾燥作用和滲透作用雙重影響表現出不同的趨勢。

而本所目前正進行小型緩衝材料熱-水-力耦合試驗之架設，包含膨潤土塊體製作、塊體堆砌、感測器製作與埋設、進水方式、設備配置及數值模型等項目；在與劉月妙博士進行交流討論時，她也提及長時間耦合試驗之關鍵點在於感測器的製作與測試，如何在熱-水-力-化多重交互作用機制下，保持感測器之完整性、靈敏度及可信度為一大學問；在 China-Mock-Up 試驗進行前，核地院已進行了長期的緩衝材料中小型試驗，用以了解材料基本性質、塊體壓製工法、熱源與水源之供給方式與感測器之合適性等議題，藉由經驗的累積得以建構完成大型之緩衝材料長期穩定研究設備。建議本所未來能與核地院進行交流與合作，包含膨潤土塊堆砌、感測器之製作與埋設及數值模型等項目，結合台灣地域特性與處置概念，強化工程障壁長期穩定性試驗研究。

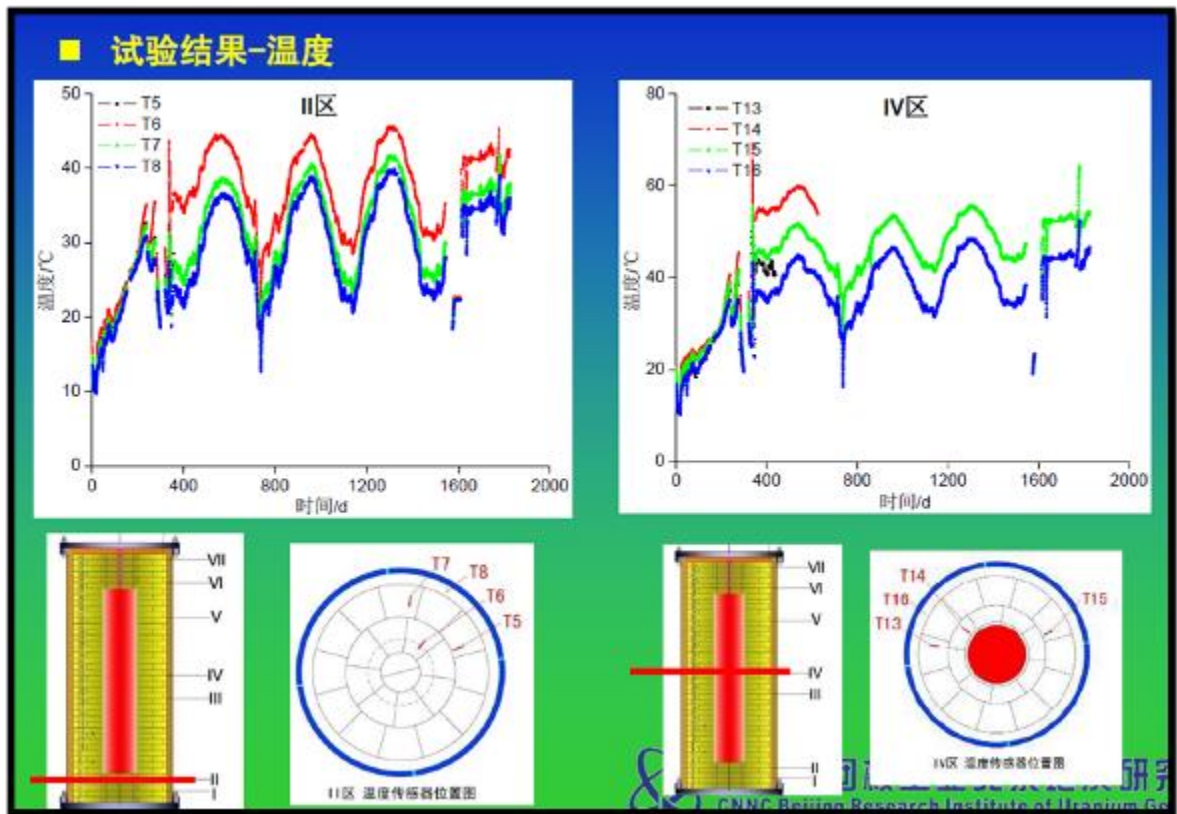


圖 26：試驗裝置底部及中段之溫度隨時間變化

三、心得

- (一) 用過核子燃料最終處置為全球性之重大議題，各國也深感其重要性，致力長期研究發展，且深知必須集結多項技術領域，透過國際間之相互合作與資訊公開交流，建立長期安全、穩定且可信之高放最終處置。大陸從 1985 年起開展了高放廢物地質處置研究工作，於法律規範、技術標準、整體規劃、選址與場址評估、工程障壁研究、處置設施與地下實驗室概念設計、核種遷移和安全評價研究等方面取得不同程度的進展。
- (二) 大陸在今年通過的十三五規劃中，推動地下實驗室為其主要目標，大陸近年積極拓展相關研究，透過甘肅北山預選區之確選，建立場址評價之方法技術體系，確定了首選緩衝回填材料，開展初步安全評估，正式啟動了地下實驗室工程建設的前期工作，以達成 2020 年建成地下實驗室之目標；而地下實驗室功能將著重進行安全技術研究、開挖安全、工程前期科研以及相關工程建設，作為達成 2050 年建成高放廢物處置庫之基石。
- (三) 透過此次參與第六屆廢物地下處置學術研究討、至北山探坑設施現地考查、與中國核電工程有限公司及核工業北京地質研究院進行技術交流，確實可見大陸於高放處置研究方面，隨著北山坑探設施的建立，相關鑽探、岩體裂隙調查、水文地質調查及開挖工法等現地工程與研究技術有了實質性的進展，相關實驗與工程手段得以實踐並應用於現地，而相關大型或現地研究，如金屬罐腐蝕行為研究、地質行為學研究、地下實驗室安全設計技術驗證研究與地質處置庫工程長期穩定性研究，地下實驗室也為實驗建立及數值模擬提供難能可貴的驗證平台；此外，地下實驗室也能提供深層地質相關參數，作為工程設計和安全評估之重要依據。
- (四) 大陸相關研究單位對於台灣發展的高放處置安全評估研究進展亦有高度關注；在本次技術交流中，亦表示相關地質調查、工程技術等資料是可分享交流的，建議雙方可就相關研究議題增進交流與合作，此契機可助於建立完整之場址安全評估案例，達成台灣高放處置安全評估技術之可行性驗證。

四、建議事項

- (一) 本所於安全評估技術發展已奠定了良好基礎，也初步完成安全評估方法技術論證，惟台灣目前尚無明確之候選場址，本土地質調查數據與近場參數取得不易，較缺乏整體性之案例分析；大陸隨著甘肅北山坑探設施之建立，已取得豐富地質調查資訊，建議雙方可進行功能及安全評估技術與資訊交流與合作，此契機將有助於建立完整之場址案例，達成台灣高放處置安全評估技術驗證。
- (二) 此次研討會也展現各研究單位對三維地質模型發展之重視，建議國內各研究與學術機構持續關注國際相關研究之進展，增進對地質模型技術建立與研究方向的掌握。
- (三) 核工業北京地質研究院於材料特性研究擁有豐富經驗，除了中小型技術驗證試驗外，更於 2010 年起建立緩衝材料熱-水-力-化學耦合性能大型試驗 China-Mock-Up，相關試驗及模式驗證皆展現了一定成果；建議本所未來能與核地院進行交流與合作，包含膨潤土塊堆砌、感測器之製作與埋設及數值模型等項目，結合台灣地域特性與處置概念，強化工程障壁長期穩定性試驗研究。
- (四) 建議持續與國際進行放射性廢棄物處置地質調查、工程設計與安全評估等技術交流，掌握國際最新技術發展與脈動，強化高放處置研究與技術之發展。