

出國報告（出國類別：其他）

參加第六屆廢物地下處置學術研討會

服務機關：行政院原子能委員會¹

行政院原子能委員會放射性物料管理局²

行政院原子能委員會輻射偵測中心³

姓名職稱：林崑士技士¹、郭明傳技正²、李博修技士²、
劉任哲技士³

派赴國家：大陸地區

出國期間：105年8月21日至8月27日

報告日期：105年11月3日

摘 要

「第六屆廢物地下處置學術研討會」於 2016 年 8 月 22 至 26 日，在大陸地區甘肅省召開。本次會議邀請兩岸及捷克有關核廢料處置學者、專家進行報告，主要研討放射性廢棄物地質處置理論、實施方式、工程實例、新技術及國際趨勢與進展等議題。此外，會議亦安排至甘肅北山的地質坑探設施進行技術參訪，以了解陸方在地下實驗室進行先導試驗之一系列成果。

大陸方面對於高放射性廢棄物最終處置，與國際相同，採多重障壁之深地層處置方式，現階段選定北山新場為首選候選場址，內蒙古高廟子膨潤土為首選之緩衝材料。依據階段性規劃，預計於 2020 年完成地下實驗室，2050 年完成最終處置場；另對於長壽命核種之中低放射性廢棄物最終處置，採取中等深度之地質處置方式，預計於 2025 年完成最終處置場。大陸方面，近年亦強化處置調查過程及研究結果之資訊公開，如建立系統化之歷年研究成果資料庫，舉辦研發成果資訊交流研討會等，以建構完整且公開的資訊，讓民眾能充分瞭解執行現況。此外，因應國際趨勢與民意高漲，陸方也提出眾多明確的科學調查數據及場址合適性評估策略，期藉由科學化的選址流程，獲得民眾支持與認同。

研討會另邀請捷克放射性廢棄物管理局局長 Jiří Slovák，就該國深地層處置經驗及作法進行簡報，捷克為實現 2025 年前確定放射性廢棄物最終處置場之目標，將推動選址程序法制化作業。由該局、地方政府及參議院就技術層面、公眾溝通及解決方案分 3 階段進行分工及協調，藉由反覆的民意傾聽及議題討論，尋求共識及解決方案。

本次奉派出席會議，藉由各界研究成果、經驗分享及現地參訪，獲得諸多地下實驗室建造、最終處置場設計及安全評估的資訊及經驗，可供我國後續推展放射性廢棄物處置之研究規劃、安全管制及環境監測之借鏡，藉由掌握國際趨勢及進展，俾利強化國內相關技術研發與安全管制作為。

目 次

壹、目的.....	3
貳、過程.....	4
一、專家學術研討會簡報摘記	4
二、陸方地下實驗室與最終處置場設計及安全評估經驗	22
三、北山坑探設施現勘	29
參、心得及建議.....	35

壹、目的

大陸地區近年因能源需求及減碳壓力而急速發展核電，依據世界核能協會 (<http://www.world-nuclear.org>) 所公布統計資料 (2016 年 9 月 1 日)，目前大陸地區核能電廠運轉中機組計 34 座，興建中機組計 20 座，規劃中機組計 42 座。面對日益增加之核廢料問題，陸方已著手就地質處置之選址評估、工程障壁、地下實驗室及深地層處置等議題進行廣泛而深入研究。尤其是在高放射性廢棄物處置場址評選和地下實驗室規劃研究工作，近期更是有顯著進展。

本次會議邀請兩岸及捷克有關核廢料處置學者、專家進行簡報，就放射性廢棄物地質處置概念、實施規劃、工程實例、新技術及國際進展…等相關地質處置的議題，進行交流及討論。藉由了解國際及大陸在地質處置研發現況與實地參訪地下實驗室，除可充分掌握大陸地區之地質處置計畫規劃與進展外，相關工程實務與研發經驗，亦可作為安全管制機關強化管制措施的參酌依據。

貳、過程

第六屆廢物地下處置學術研討會會議內容，分為「專家學術研討會」及「北山坑探設施技術參訪」兩部分。專家學術研討會於 8 月 22 日至 8 月 24 日在大陸甘肅省敦煌市召開，會議邀請捷克及兩岸 3 方專家學者計 28 人，進行大會特邀報告及專題學術報告，內容涵蓋放射性廢棄物最終處置之場址評選、地下處置、岩石力學、緩衝及回填材料、核種遷移等議題。8 月 25 日至 8 月 26 日赴北山預選場址就其坑探設施之現地鑽炸試驗、裂隙灌漿、母岩變形監測…等進行技術參訪與研討，相關出國行程如表 1。

表 1：出國行程表

日期	地點	工作事項
105 年 8 月 21 日	桃園-北京	去程及轉機
105 年 8 月 22 日	北京-敦煌	報到及參加研討會
105 年 8 月 23 日	敦煌	
105 年 8 月 24 日	敦煌	
105 年 8 月 25 日	敦煌-玉門	技術參訪及 回程轉機
105 年 8 月 26 日	玉門(北山)-北京	
105 年 8 月 27 日	北京-桃園	回程

本次參加學術研討會及參訪地下實驗室之過程內容，說明如以下各節。

一、專家學術研討會簡報內容摘紀

專家學術研討會由海峽兩岸及捷克 3 方人員共同參加（如圖 1），開幕式先後由陸方環境保護部核安全總工程師劉華及（如圖 2）中核集團總工程師雷增光，說明大陸近年放射性廢棄物處置之政策依據、規範標準、科研工作、科普溝通及國際交流等成果，除表示肯定外，並說明未來陸方「十三五規劃」中，核電及核廢料處置仍為發展重點。



圖 1：研討會現場



圖 2：陸方環境保護部核安全總工程師劉華開幕致詞

隨後依大會特邀報告（16 項）及專題學術報告（12 項）議程，依序由所邀請之學者專家進行簡報，大會特邀報告及內容，主要內容摘錄如下：

潘自強(中核集團)—放射性廢物處置核能發展中急待開拓的新的科技領域

潘院士指出（如圖 3），因核能發展中後端（核廢料處理及核電廠除役）容易被忽視，大陸地區對於高放射性廢棄物處理及處置議題仍處於起步階段，除需對工程障壁、評估模型及參數、可靠度分析及風險指引等積極開發新的技術外，並依國際原子能總署「SSR-5 放射性廢棄物處置特定要求」導則，所列政府、監管機構及營運業者 3 方職責，以及參考美、法、俄 3 國法規，提出加強管理建議如下：

1. 建立國家放射性廢棄物管理機構。
2. 設立國家放射性廢棄物管理公司統一管理放射性廢棄物處置。

3. 加速放射性廢棄物相關法規和導則之制訂。
4. 制定國家層級放射性廢棄物管理科研規劃。
5. 建立以地下實驗室為核心的國家高放射性廢棄物地質處置研究平台。
6. 盡快啟動中等深度處置場的建設。
7. 在國家科研基金設置高放射性廢棄物地質處置專項。



圖 3：潘自強院士簡報放射性廢棄物急待開拓之科技領域

陳寶軍(中核集團)—含長壽命低中放廢物中等深度處置規劃及科研的若干思考

針對低放射性廢棄物之最終處置方式，相較於近地表處置方式之高障壁要求及深地層處置方式之高成本問題，國際原子能總署於 2009 年所發布安全導則「GSG-1 放射性廢棄物的分類」中，提出之中等深度地質處置為較適宜之解決方案。惟此方案仍面臨規劃起步中、分類標準、科研基礎薄弱及公眾支持等問題，未來將以科技研發引領工程建設的方式，逐步實現 2025 年建置中低放射性廢棄物最終處置場的目標。

王駒(中核集團)—高放廢物地質處置地下實驗室場址篩選

依場址評選、地下實驗室及最終處置場之三步驟規劃，陸方預計於 2020 年完成地下實驗室及 2050 年完成最終處置場之建置，以解決高放射性廢棄物最終處置的問題。在 2016 年 3 月人大會議「國家十三五規劃」中更是明確提出建設高放射性廢棄物處置地下實驗室的目標任務。

高放射性廢棄物最終處置場場址規劃，共有西北（甘肅北山）、新疆、西南、內蒙古、華東及華南 6 大預選區（如圖 4），而甘肅北山於 2011 年 7 月確定為首選場址。陸方接續由西北、新疆、內蒙古預選區中的 9 個場址篩選出新場（北山）、沙棗園（北山）、雅滿蘇（新疆）及諾日公（內蒙古）4 個場址做為地下實驗室之候選場址（如圖 5）。因甘肅北山具備處置場首選、地理優勢及有利的水文及地質條件等，經 2016 年 1 月 12 日於北京召開之「地下實驗室選址專家諮詢會議」中，各界專家討論及投票結果，決議新場為推薦場址（評分最高），沙棗園為備選場址。

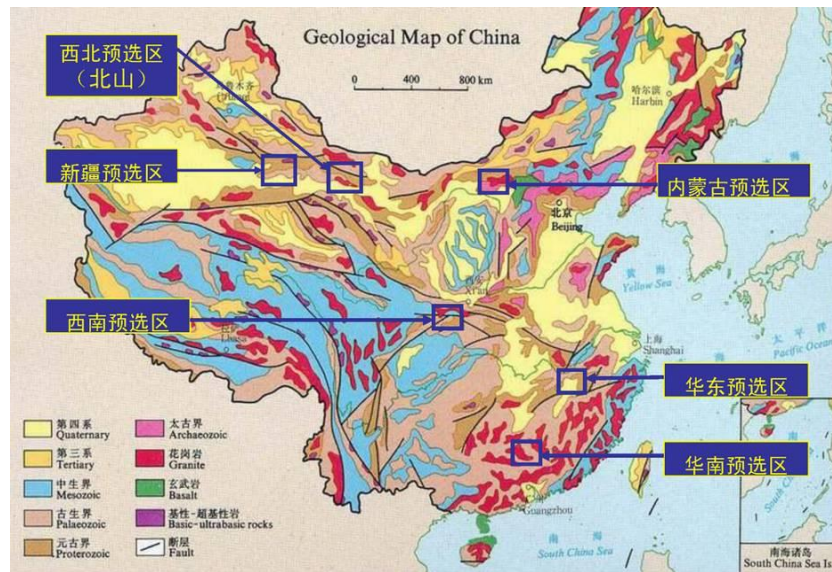


圖 4：大陸高放射性廢棄物最終處置場 6 大預選區（引用自會議簡報）



圖 5：陸方地下實驗室候選場址初步篩選結果（引用自會議簡報）

榮峰(中核集團)—高放廢物地質處置地下實驗室設計研究進展

設置地下實驗室的目的，在於研究相似之深地層處置場的地質環境及條件，以評估處置高放射性廢棄物處置之可行性，並做為後續最終處置場施工、處置、回填及封閉技術之開發及驗證。目前陸方已透過北山坑探設施施工，進行地下實驗室建置條件的蒐集及研析，以利將來建置新場地下實驗室可避開地層中大型斷裂帶及導水裂隙帶。

研究進展部分，除已進行地下實驗室之深度、定位、洞室規劃、與處置場相容性、開挖方式等評估外，並提出地下實驗室的初步主體結構方案，由於北山新場地勢起伏較小(高差值落於 100m 以內)，受地表地形條件限制，地下實驗室設計主要規劃採用「斜坡道+多豎井+平巷」型式和「多豎井+平巷」型式，並就技術及經濟成本進行評估。

各項研究成果顯示將地下實驗室視為處置場的一部分設計(即特定場址地下實驗室)，有利未來處置場設計的靈活性及拓展性，另設置螺旋斜坡道以順時針方向往下延伸，可使運輸方式更加靈活並提升車輛行進安全性，再者，設置相近的進風豎井、排風豎井及人員豎井可提高通風系統可靠性及設施消防安全性，且不影響總湧水量及長期安全性。

Jiří Slovák (捷克放射性廢棄物管理局)—捷克深地層處置的進展

捷克對於用過核子燃料(高放射性廢棄物)採取深層地質處置方式，並規劃於 2020 年選出 2 個候選場址，2025 年決定最終處置場場址，2065 年完成最終處置場啟用營運。

捷克放射性廢棄物管理局局長 Jiří Slovák 指出，為確實達成 2025 年決定最終處置場場址之目標，除積極推動資訊公開透明及工作小組公眾參與外，亦將推動選址程序法制化作業，由該局、地方政府及參議院就技術層面、公眾溝通及解決方案分 3 階段進行分工及協調，藉由反覆的民意傾聽及議題討論，尋求共識及解決方案。

常向東(陸方環境保護部核與輻射安全中心)—高放廢物地質處置場選址要素與北山候選場址

相較核電安全著重電廠設施設計，核廢料處置安全著重場址固有安全，且需長久及穩定，因此處置場選址需考慮以下幾點因素：

1. 地質條件：具備良好地質隔離、穩定和足夠大的地質體。
2. 未來變化：板塊運動穩定、斷裂構造不活動及地震活動弱。
3. 水文地質：地下水位低、流速慢、流程長，能限制放射性核種遷移。
4. 地球化學：阻滯及吸附能力強，可限制放射性核種外釋。
5. 人類活動：處於人類活動無法影響處置系統隔離能力的地區。
6. 建造條件：岩體的地質、水文、力學等特性有利建造和施工。
7. 廢料運輸：方便廢料運輸，對環境和民眾影響小。
8. 環境保護：技術、經濟、社會影響盡量小，有利於環保。
9. 土地利用：盡量選在土地利用價值低的場址。
10. 經濟人文：遠離經濟發達和人口密集區，並為大眾可接受。

研究及調查結果顯示甘肅北山地殼穩定，地震活動頻率低且規模小（場址 5 公里範圍內無 2 級以上地震紀錄），地下花崗岩體規模大而完整且裂隙少，地下水為弱含水、低滲透、低流速及還原性，其水位呈現下降趨勢。此外，因北山人煙稀少、氣候乾旱、土地利用價值差但交通運輸便利，做為高放射性廢棄物最終處置場場址，具有極大之優勢。

郭召杰(北京大學)—北山候選區新生代構造動力學背景—阿爾金斷裂帶及青藏高原北緣生長定量分析

北山候選區地處阿爾金大型走滑斷裂帶的延長線上，亦處青康藏高原邊緣的地震活動帶上，然而北山地區幾乎保持了中生代以來的夷平地貌。形成北山地區地殼穩定的主因，為阿爾金斷裂帶的活動量被青康藏高原北緣的祁連山所吸收（由斷裂的走滑作用所調節，如圖 6），僅微量在北山地區轉換成側向擴展式的走滑斷層，其開放式彌散狀構造，不易形成應力集中而造成大規模破壞性地震，使北山地區成為「穩定的地質活動區」。

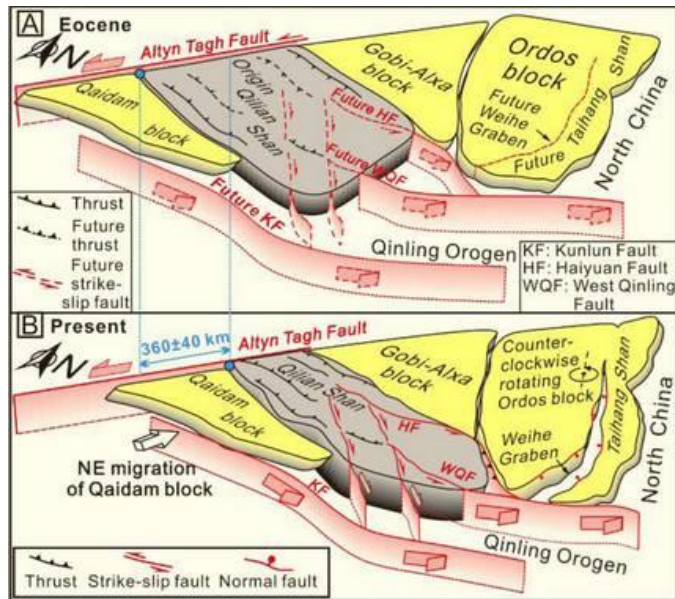


圖 6：始新世迄今阿爾金走滑斷裂帶活動量由祁連山走滑斷裂所調節
(引用自會議簡報)

楊長義(淡江大學)－台灣潛在場址 THM 試驗之概念模型配置

在核廢料深層地質處置過程，由於核廢料熱衰變引發之熱力(Thermo)、水力(Hydro)、力學(Mechanical)三者複雜耦合效應，可能改變原來岩盤的穩定性，並導致核種外釋，因此，以臺灣離島地區潛在場址母岩的裂隙調查現地資料，並參考日本 Kamaishi 礦坑熱力－水力－力學(THM)試驗方式，提出 2 組進行 THM 試驗概念模型的監測儀器配置 (如圖 7、8)。



圖 7：淡江大學楊長義教授簡報

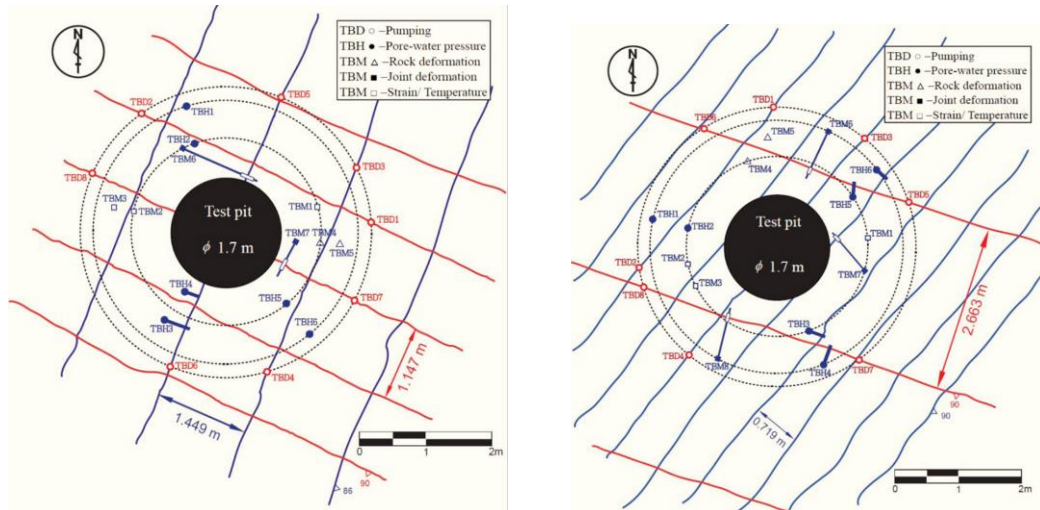


圖 8：THM 試驗與各類監測儀器配置（左為地表，右為深層）
（引用自會議簡報）

崔大慶(中國原子能科學研究院)—高放廢物鐵基容器材料和亞鐵礦物對多價態核種的還原性沉積

瑞典 KBS-3 處置概念（如圖 9），係將用過核子燃料放置於純銅之處置容器中，處置於工程障壁及地下岩盤之天然障壁環境。藉由工程障壁及天然障壁阻滯放射性核種遷移，避免核種外釋影響生物圈。研究結果顯示在銅容器破損後，地下水侵入所浸出的多價態核種可被鑄鐵材料還原並沉積，對於用過核子燃料的進一步氧化腐蝕有明顯的抑制作用，證實了 KBS-3 處置概念以銅質外殼、鑄鐵襯裡材質，做為用過核子燃料之處置容器，對於還原性地質處置環境確有其助益。

KBS-3 concept

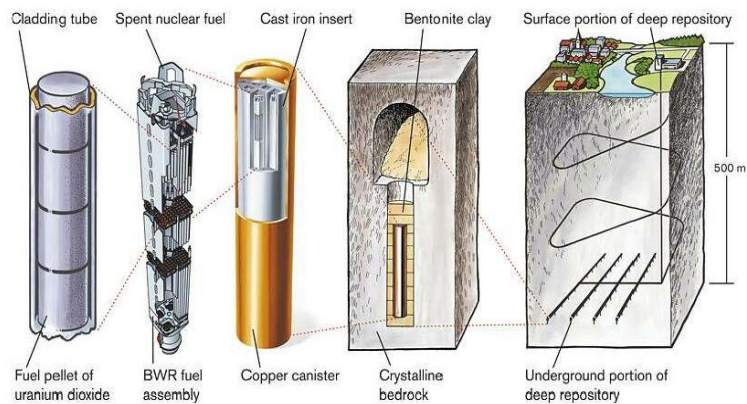


圖 9：KBS-3 處置概念（引用自會議簡報）

范仲(中核清原公司)—含長壽命核種中放廢物中等深度處置發展展望

中等深度處置適用於中低放射性廢棄物處置，相較於近地表處置有更好的生物圈隔離及核種阻滯，亦比深地層處置有更好的經濟優勢，國際上如瑞典、芬蘭及韓國等已有諸多成功經驗（如圖 10），亦是解決當前中低放射性廢棄物處置議題的優先選項。

国外中等深度处置设施一览表

处置设施	废物类型	废物体积	处置形式	处置深度	围岩	现状
瑞典SFR	短寿命低中放废物	63,000m ³	巷道、筒仓	海底下约50m	片麻岩和花岗岩	已运行
瑞典SFL	长寿命低中放废物	16,000m ³	巷道	比SFR深, >60m	结晶岩	概念设计
芬兰处置库 Olkiluoto	低中放废物	100,000m ³	筒仓	60m~95m	闪长岩	已运行
芬兰的Lovisa 处置库	低中放废物		巷道	110m	花岗岩	已运行
韩国月城处置库	核电厂产生的低中放废物为主	20,000m ³	筒仓	80~130m	沉积岩	已运行
美国GCD	低放废物和少量超铀废物		大钻孔	36m	凝灰岩	已关闭
日本中等深度处置设施	核电站相对高水平低放废物、低活度TRU、铀废物	20,000m ³	巷道	50~100m		选址阶段
法国中等深度处置	长寿命低放废物	210,000m ³	巷道	200m	粘土岩	选址阶段
南非小钻孔	废放射源		小钻孔	45m~100m		概念设计

圖 10：中等深度處置國際經驗（引用自會議簡報）

陳亮(中核集團)—高放廢物地質處置岩體適宜性評價方法及應用研究

傳統岩體適宜性評估方法著重於可建造性，對於長期安全性要求（地質條件、未來自然變化、水文地質、地球化學等）較無充分考慮，因此不適宜做為高放射性廢棄物最終處置場場址之評估方式。

陳亮研究提出一種場址適宜性評價量化方法，在可建造性的評估基礎上，並考量斷裂分布、地球化學、溫度影響、強度/應力比、滲透特性等因素，用以評價 9 個高放射性廢棄物候選場址。結果顯示（如圖 11），所有場址均為適宜（新場、沙棗園、算井子、雅滿蘇、阿奇山、諾日公）及基本適宜（舊井、天湖、塔木素）級別。其中，以新場候選場址之適宜性為最高。

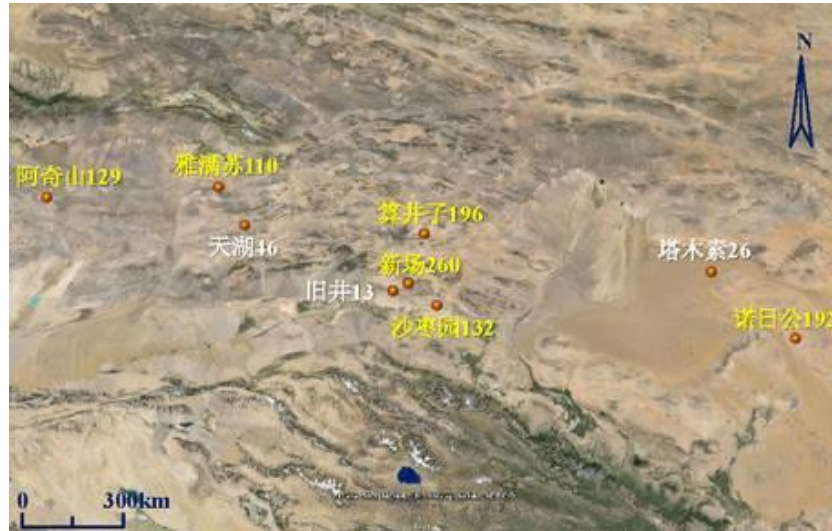


圖 11：候選場址評價結果（引用自會議簡報）

劉春立(北京大學)—北京大學核種遷移研究 10 年進展

環境放射化學研究主要應用於核設施除役及放射性廢棄物處置相關之障壁安全評估，議題包含放射性核種在環境中的吸附、擴散、遷移、氧化還原效應等，涵蓋地球化學、海洋化學、放射生態學、動植物學、輻射化學等學科領域。

北京大學近 10 年環境放射化學研究，除完成低吸附性之放射性核種在花崗岩和膨潤土中擴散的評估技術（可獲得核種的擴散係數、吸附分配比、花崗岩和膨潤土的形成因子等參數）外，亦開發了核種種態計算軟體 CHEMSPEC（可計算關鍵核種在北山地下水體系中的種態分布以及在礦物上的吸附），並建立了核種在礦物孔隙水中擴散和吸附的分子動力學模擬方法（可以初步算出核種不同種態的相對擴散速率和吸附位點），據此掌握放射性核種在處置場母岩、地下水體系中的擴散速率隨酸鹼度、含氧濃度、離子強度等的變化規律，可作為高放射性廢棄物處置場址安全評估之參數依據。

李曉昭(南京大學)—圍岩裂隙系統的識別評價

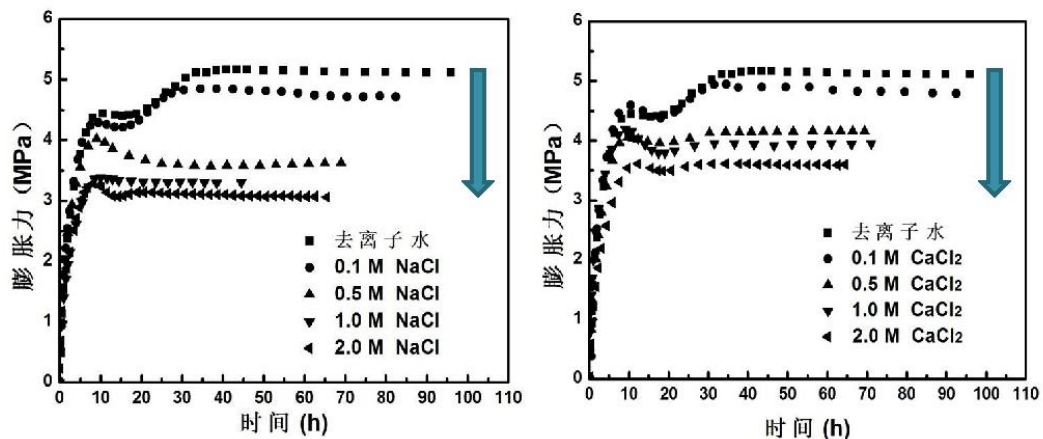
鑑於花崗岩體不連續面是影響地下水流動與核種遷移最重要因素，對於處置場址篩選所要求的花崗岩體（堅硬、完整、岩體應力適中），其變形及不穩定更是受不連續面所影響。研究針對北山候選場址岩體，以不同尺度之破裂內在結構、導水模式及影響範圍進行評估，建立裂隙系統模型並進行裂

隙岩體滲透試驗，以大型試驗平台及數值模擬分析不連續面與機械開挖對圍岩（母岩）損傷破裂的影響。

葉為民(同濟大學)—化學（鹽）影響下高廟子膨潤土體變性能研究

內蒙古之高廟子膨潤土為陸方高放處置場首選之緩衝材料，北山新場則為首選處置候選場址，其花崗岩區之地下水鹽度會影響膨潤土之滲透係數及膨脹性，因此探究鹽溶液濃度對膨潤土膨脹力與滲透性影響，以及鹽化-淡化循環下壓實膨潤土變形特徵等，有其必要性與重要性。

實驗結果顯示膨脹力隨著鹽溶液離子 Na^+ 及 Ca^{2+} 濃度增加而減少， Na^+ 及 Ca^{2+} 對膨脹力的影響存在差異性，但差值隨濃度增加而減少（如圖 12），另外鹽化-淡化循環中，膨脹應變隨循環次數增加而增加，隨 Ca^{2+} 濃度增加而增加，但隨 Na^+ 濃度增加而減少。



溶液浓度对膨胀力的影响 (NaCl) 溶液浓度对膨胀力的影响 (CaCl₂)

圖 12：溶液濃度對膨脹力的試驗結果（引用自會議簡報）

董俊華(中國科學院金屬研究所)—低碳鋼在模擬高放廢物地質處置環境中的腐蝕特征及其演化規律

探討以低碳鋼做為高放射性廢棄物廢料罐材料，經地下水與其所含離子 (SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^-) 侵蝕後，依腐蝕特性分為活化及鈍化模式，在活化模式上，廢料罐發生均勻腐蝕，預計能達到設計的安全服務年限；在鈍化模式上，廢料罐發生孔蝕，誘發應力腐蝕導致廢料罐穿孔破裂。

經研究低碳鋼在含有 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的去氧重碳酸鹽溶液 (HCO_3^-) 中的活化/鈍化趨勢結果顯示，在 0.01M 低濃度 HCO_3^- 溶液中低碳鋼腐蝕傾向活化模

式，腐蝕率約 $100\mu\text{m/a}$ ，應可符合深層地質處置的抗腐蝕要求，而在 0.05M 高濃度 HCO_3^- 溶液中低碳鋼腐蝕傾向鈍化模式，腐蝕率約 $1000\mu\text{m/a}$ ，如果處置安全年限要求為 1000 年(a)，低碳鋼廢料罐厚度需超過 1 公尺(m)，此將大幅增加低碳鋼廢料罐之設計難度及製造成本，實務上也不可行。

劉月妙(中核集團)—緩衝回填材料砌塊製備技術研究進展

國際上對作為緩衝材料之膨潤土的物理、化學和力學等特性，已作了相當多的試驗研究，也進行了熱-水-力-化學耦合性能的模式試驗和數值模擬研究，但對緩衝材料砌塊之間的界面特性、工程佈置方式及砌塊組合後的整體性能仍處於初始研究階段。

目前大陸已選定內蒙古高廟子膨潤土，為高放射性廢棄物處置場緩衝材料之首選礦材，陸方於 2011 年 7 月 8 日完成建置緩衝材料之熱-水-力-化耦合性能大型試驗平台（預計運作 10 年），並在基本特性的試驗研究取得許多重要成果，為因應 2020 年地下實驗室建成後現場試驗需求，刻就緩衝材料砌塊的製備、完整性與均勻性檢測、性質評估、砌塊界面特性測試及分析等關鍵技術進一步研究及開發（如圖 13）。



圖 13：緩衝材料砌塊 Mock-up 模型（引用自會議簡報）

專題學術報告重點內容，摘錄如下：

羅輝(中核集團)—高放廢物地質處置地下實驗室候選場址三維地質模型建模研究

研究建立高放射性廢棄物最終處置候選場址的三維地質模型，藉由地質結構及特徵的視覺化顯現，有助後續評估確認地下實驗室建置位址及施工方式的規劃設計。研究透過北山新場地表地形、地質剖面、鑽井、電磁測勘及地物井測法等資料，建置出包含斷裂及岩體界面的三維地質圖。結果顯示新場岩體完整並呈現東西走向，岩體處於南北兩側區域大斷裂帶中間，並被數條北東向的次級斷裂分割開，形成多個「構造安全島」(如圖 14)，該構造格局非常適合作為地下實驗室候選場址。

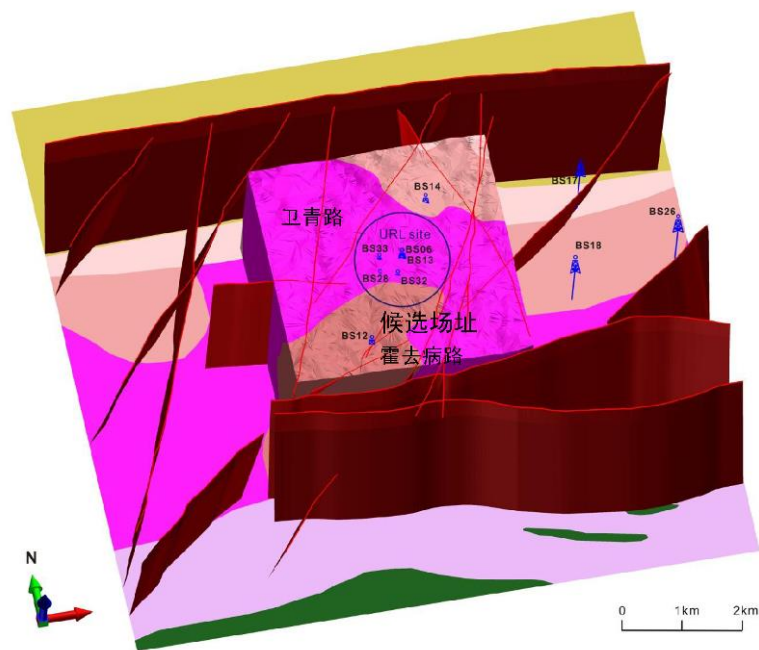


圖 14：候選場址中心(4km x 4km)切割體與斷裂帶交叉之三維地質模型
(引用自會議簡報)

戴秉倫(中央大學)—發展脈衝衰減技術之岩石孔隙率滲透率量測儀

研究將脈衝衰減法應用於日本學者鳩本利彥(Toshihiko Shimamoto)所設計的高圍壓孔隙率/滲透率儀 (YOKO2)，可於受壓條件下，同步量測岩石之孔隙率與滲透率，避免樣本變異性可能對實驗結果的影響。(YOKO2 儀器受限量測原理，無法同時取得樣本之孔隙率與滲透率)

劉健(中核集團)—高放廢物地質處置設施圍岩三維裂隙網絡建模技術研究

岩層裂隙分布特徵分析有助評估高放射性廢棄物深層地質處置，所可能涉及岩體破壞、地震影響及核種遷移等議題，本研究透過三維雷射掃描，改進裂隙調查方式（如圖 15）、改善初始主控項產狀之有效性、統計分析及直徑推算法改善、力學屬性測試等方式，開發三維裂隙網絡軟體，並改善演算法，可充分提高模擬結果可靠度。

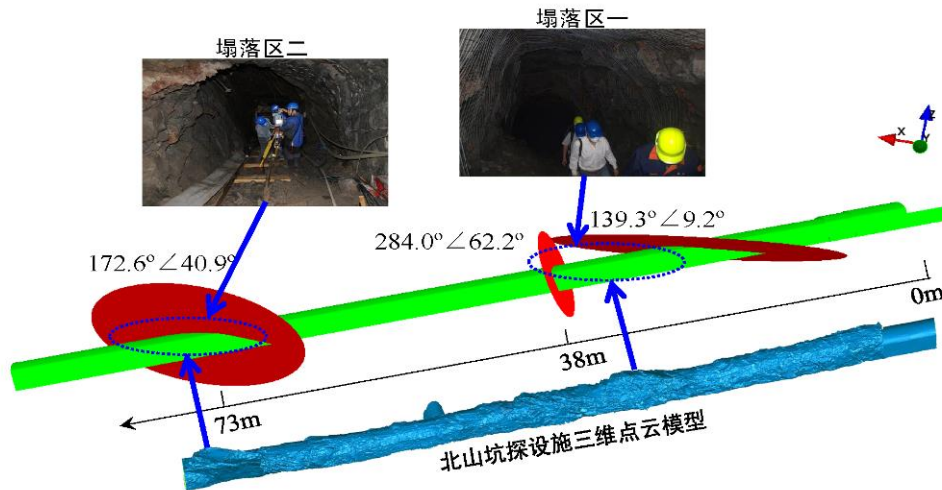


圖 15：三維雷射掃描技術改進關鍵裂隙之定位及測量（引用自會議簡報）

李奕賢(中央大學)—三維離散裂隙網絡流動及傳輸不確定性分析

研究開發三維離散裂隙網路生成模式、穩態水流模式與溶質傳輸模式，用以評估核種透過地下水水流在岩層裂隙傳輸行為，由不同組裂隙分布情形，分析核種傳輸結果顯示，核種傳輸速度在不同裂隙分布下存在極大差異（如圖 16 及 17）。



圖 16：中央大學李奕賢博士簡報

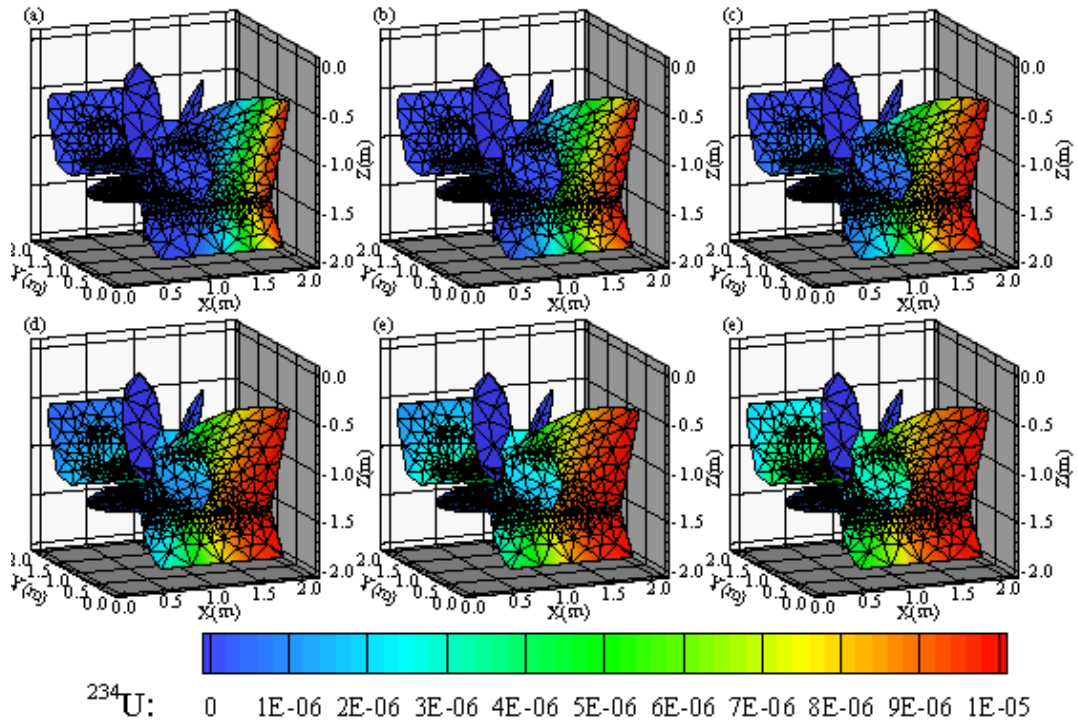


圖 17：三維模擬核種在岩層裂隙網絡傳輸行為（引用自會議簡報）

劉原麟(中核集團)－高放廢物地質處置數據資源集成開發進展

因應高放射性廢棄物處置所需數萬年以上之安全要求，此類長期且複雜的系統工程，需明確且完整的科學數據所支持，對於陸方高放射性廢棄物選址導則 10 大要件（如圖 18）所需數據資源，應以建立高放射性廢棄物地質處置大數據平臺作為解決方案。現階段刻已完成預選場址地學信息數據模型的設計創新、地質處置系統數據實體分類編碼體系、應用系統開發整合、數據管理與應用等，後續十三五規劃將進一步進行「高放廢物地質處置系統大數據集成與分析應用技術」研究。

自然条件		社会经济条件:	
地质条件:	有足够大的地质体	人类活动:	尽量少
未来自然变化:	稳定无地质灾害等	废物运输:	有利
水文地质:	地下水径流长	环境保护:	有利
地球化学:	还原性	土地使用:	无可用耕地
建设和工程条件:	地下工程稳定	社会影响及公众参与:	有利

圖 18：陸方選址導則 10 大要件（引用自會議簡報）

馬洪素(中核集團)—高放廢物地質處置地下實驗室工程-TBM 開挖技術可行性初步分析

參考瑞典 Äspö、瑞士 GTS 等地下實驗室之開挖方法，從岩體可挖掘性、岩石高摩擦性、小轉彎半徑、轉彎下降適應性、排渣方式、反坡排水、長距離物料運輸、精確掘進導向等方面探討了隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine; TBM)開挖地下實驗室的可行性，結果顯示，現有的 TBM 設備性能和施工技术能力，可有效解決以上關鍵技術可能遭遇的問題。

李瑩(中核集團)—飽和度與晶體粒徑對北山花崗岩斷裂韌度的影響研究

使用 MTS815 Flex Test GT 岩石力學試驗機，對於乾燥及飽和狀態下的北山花崗岩採樣進行三點彎曲試驗。試驗結果顯示飽和狀態下的樣本在張力破壞下有起裂強度下降、峰值荷載較低（如圖 19），以及低應力下裂紋擴展較快的特點。顯示地下水的存在及浸蝕會弱化花崗岩的斷裂韌性，對處置工程安全性及長期穩定性將產生一定程度的影響。

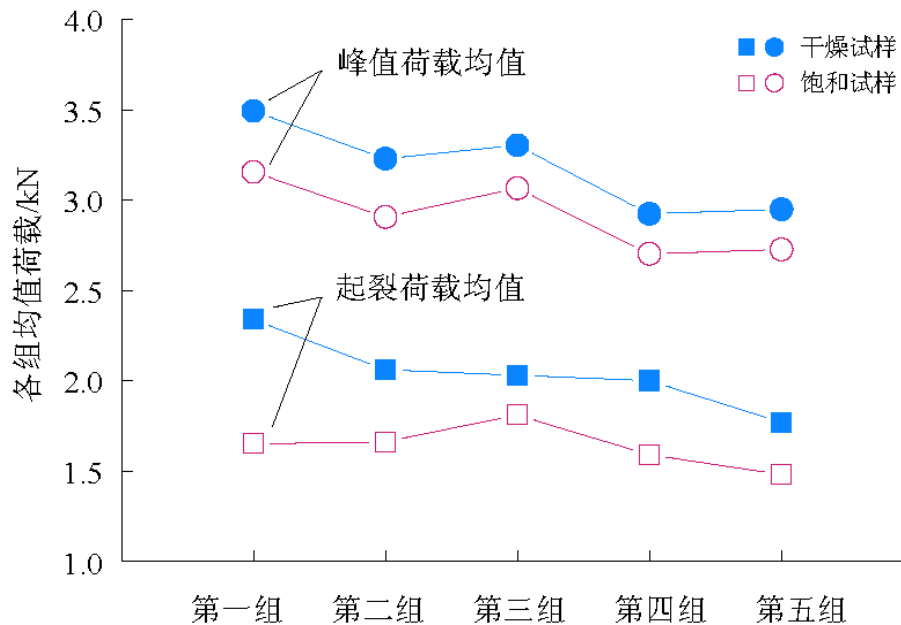


圖 19：乾燥及飽和北山花崗岩樣本之荷載均值比較（引用自會議簡報）

林文勝(臺灣大學)—高放廢物處置設施受熱-水-力-化學耦合作用模式分析之芻議

高放射性廢棄物深層地質處置場，因多重障壁及地層形成複雜的環境影響作用，爰需安全評估模式以進行整體性分析與模擬，並評估處置系統的合

適性與安全性。

研究參考用過核子燃料處置設施所受熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合作用與評估技術之國際發展，利用 COMSOL Multiphysics 地下水模組 (Subsurface Flow Module)，包含流體流動、熱力傳導和溶解物質傳輸模式及 PHREEQC 地化模式，發展 THMC 耦合評估模式，以進行耦合作用之研析。結果顯示（如圖 20），無論 1 萬年或是 10 萬年的傳輸案例，放射性物質並不會快速往邊界移動，而是緩慢的增加濃度，在緩衝材料與回填材料中主要以濃度擴散機制，進行核種傳輸。

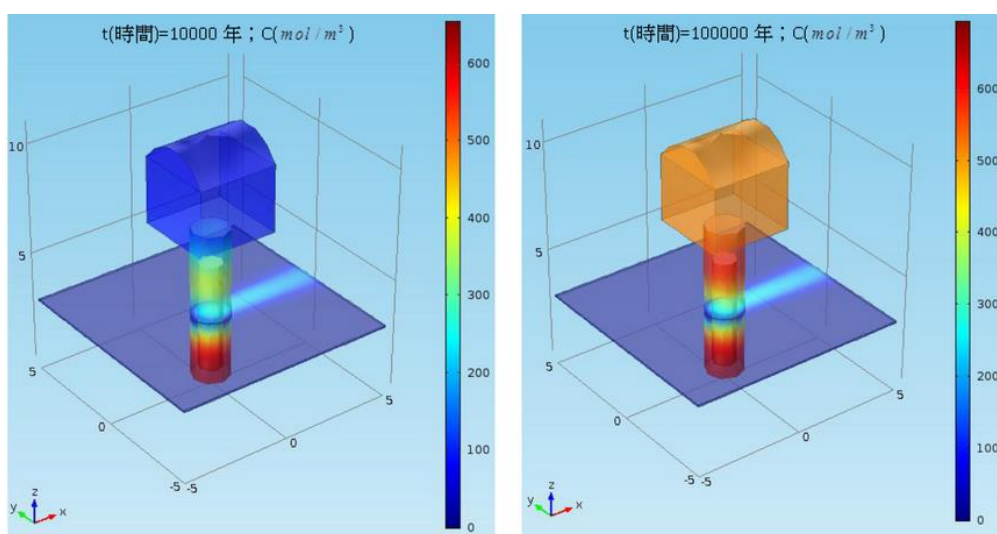


圖 20：高放射性廢棄物處置 THMC 耦合分析模式傳輸情形（引用自會議簡報）

曹勝飛(中核集團)－緩衝材料多場耦合大型試驗台架(China-Mock-up)研究

以緩衝材料之熱-水-力-化學耦合性能大型試驗平台（如圖 21），進行膨潤土加熱及浸水控制，以模擬高放射性廢棄物深層地質處置，膨潤土受地下水入侵及放射性核種衰變熱之影響。結果顯示在加熱器（模擬廢料罐）作用下，初期在熱膨脹和膨潤土遇水產生的膨脹力作用下逐漸向上移動，加熱器位移的變化趨勢與膨潤土中溫濕度的變化呈現出明顯的階梯式線性關係。

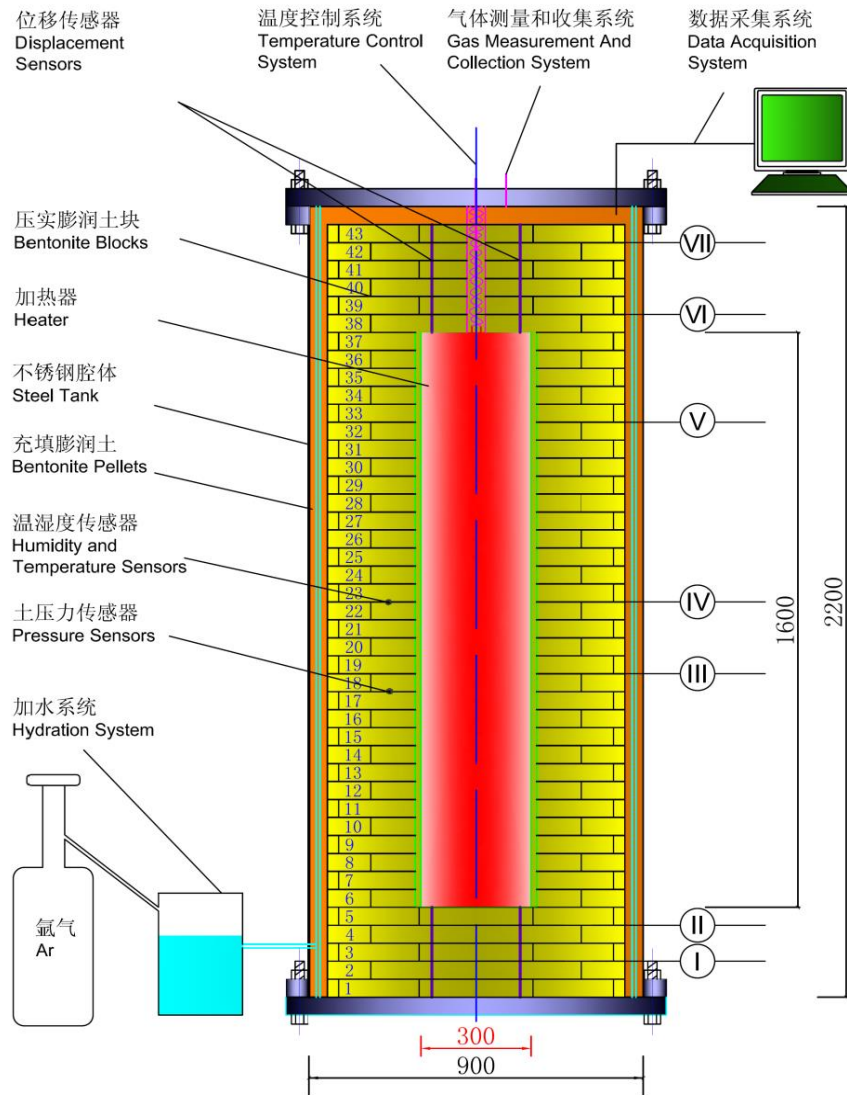


圖 21：緩衝回填材料熱-水-力-化學耦合性能大型試驗平台（引用自會議簡報）

吳尚謙(新竹清華大學)——以燃耗額度計算沸水式反應器用過核子燃料臨界安全分析之參數研究

為節省用過核子燃料貯存空間，研究以燃耗度方法建立了沸水式反應器用過核子燃料臨界安全分析模型，並將參數分為四種類型類進行探討，分別為照射或衰變時間、初始燃料組成、中子能譜、燃料組成的空間分佈等影響，各項參數探討均盡量以保守假設方式進行。

高玉峰(中核集團)——壓實膨潤土氣體滲透特性研究

對於地質處置中地下水滲入腐蝕廢料罐、有機物遭受輻射及微生物代謝或變質所產生氣體，均會對處置環境的長期穩定造成影響，因此針對緩衝/

回填材料之氣體滲透性探討有其必要性。

研究針對壓實膨潤土以不同乾密度、加載氣壓及圍壓對氣體滲透特性的影響進行試驗。結果顯示膨潤土壓實乾密度越大，顆粒排列越緊密，孔隙度越小，氣體滲透性越差，氣體滲透係數越小（如圖 22）；加載圍壓增大，膨潤土內部微裂隙閉合，氣體滲透性也會變差。

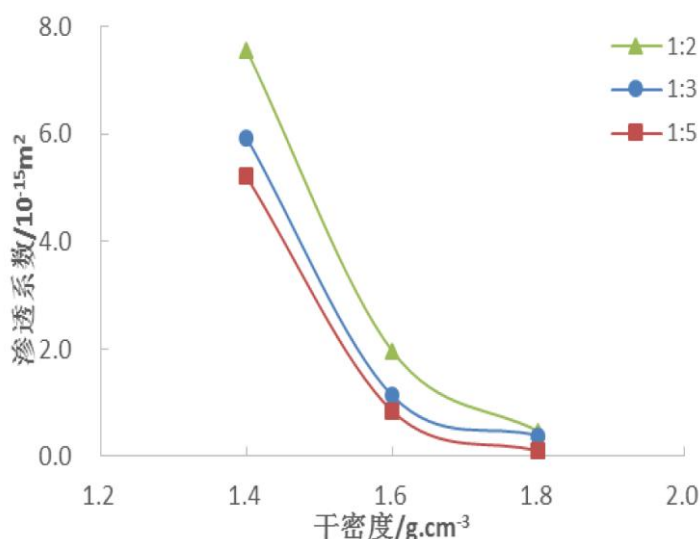


圖 22：不同乾密度對氣體滲透性的影響（引用自會議簡報）

劉健(中核集團)－北山坑探設施工程介紹

簡介北山坑探設施之工程主體結構設計、現場試驗配置、現場動態數據管理系統、最新工程進展及安全管理等，俾使後續至現地技術參訪之與會人員，得以對於北山坑探設施有全盤了解。

二、陸方地下實驗室與最終處置場設計及安全評估經驗

透過本次學術研討會及北山技術參訪，得知陸方對於高放射性廢棄物處置方面的研究，無論地質調查、選址評估、回填材料、核種遷移、工程障壁、開挖方式、坑道設計、國際合作…等，均已投入大量資源及人力，進行全面性且完整的規劃與研究，並已取得許多重要成果與進展，足資國內後續推展最終處置計畫之借鏡參考：

(一) 地下實驗室結構設計經驗：

地下實驗室是為了研究與深地層處置場相似條件下處置放射性廢棄

物的技術可行性，而在特定種類岩體深處建造的地下處置之研究設施；由出入隧道、通風豎井、實驗坑道及輔助坑道等設施組成，這些設施的排列組合即形成地下實驗室的結構主體。目前世界上主要的核電使用國家中，已相繼設置 20 多座地下實驗室，其主體結構形式有「斜坡道+多豎井+平巷」、「多豎井+平巷」及「斜坡道+平巷」三類型，深度介於地下 500 至 1000 公尺之間，如**錯誤! 找不到參照來源。**。

表 2：國際上之地下實驗室差異比較

序號	名稱	地點	圍岩	深度	主體結構
1	WIPP	美國	岩鹽層	655M	廢棄物與岩體運輸隧道+通風豎井+單層實驗坑道
2	ESF	美國	凝灰層	300M	U 型斜坡道
3	MIZUNAMI	日本	花崗岩	1000 M	主豎井(直徑 6.5M)+通風井+鑽爆法掘進+兩層實驗中段
4	HORONOBE	日本	黏土岩	500M	2 個主豎井+1 個通風井+單層實驗中段
5	HAUTE MARNE	法國	泥岩	500M	主井+輔井+兩層水平坑道
6	GORLEBEN	德國	鹽丘	900M	通風豎井+單層實驗坑道
7	ÄSPÖ	瑞典	花崗岩	450M	主豎井(直徑 3.8M)+ 2 個通風井(直徑 1.5M)+螺旋斜坡道(半徑 150M,內徑 5M,鑽爆法+ TBM 掘進)+單層實驗中段
8	ONKALO	芬蘭	花崗岩	500M	人員豎井(直徑 4.5M)+入風井(直徑 3.5M)+排風井(直徑 3.5M)+螺旋斜坡道(鑽爆法 5.5M 寬,坡度 1 比 10)+單層平巷
9	HADES	比利時	塑性黏土	224M	雙主豎井+單層實驗平巷
10	WHITESHELL	加拿大	花崗岩	420M	主豎井(鑽爆法)+通風井+兩層實驗平巷

主體結構形式考量實驗需求、建造費用、地質及地形條件、運轉與安全等因素，目前陸方經過多年評估已選定甘肅省北山新場地區為地下實驗室候選場址。決定主結構型式過程中，藉由場址評估、開發技術、數據收集、處置技術驗證、處置場場址確認、放射性廢棄物處置工程技術及方案驗證等 6 項可行性功能，釐清地下實驗室的屬性與任務。

因大陸新場地區為戈壁低山區，海拔 1600 至 1700 公尺，地勢相對平坦，水平高低差在 100 公尺內，基岩裸露，無長年流水沖刷；施工區距 312 陸國道和蘭新鐵路約 80 至 120 公里，區內車輛無法通行，需修建臨時便道；區內無通訊電纜通過，無法使用有線電話，僅能於較高山丘使用行動電話，通訊品質較差。再考量地質調查工作安排的靈活性、地質調查工作受湧水干擾、設備儀器運輸方便性、井下作業環境、井下作業安全性、工期長短及經費等 7 項因素。

斜坡道方案勘查覆蓋面較廣，可進行更大面積的岩體、水文地球化學及地質勘察，且對各種運輸類型較具靈活性，但斜坡道方案將穿過更多的地質構造、灌漿需求與總湧水量及地下水位降低等因素，導致對水文地質及水文地球化學的擾動均高於豎井方案。綜上所述，加上考量工程造價及工期長短，陸方最終選擇「斜坡道+三豎井+平巷」型式，豎井包含 1 個人員井、1 個入風豎井及 1 個排風豎井，人員井及斜坡道為主要進出通道與安全出口，如圖 23 所示。

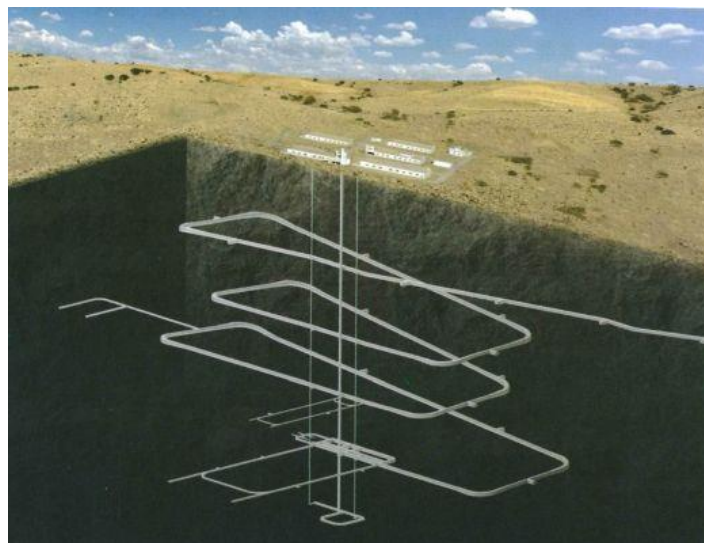


圖 23：斜坡道+三豎井+平巷型式（引用自會議資料）

陸方規劃地下實驗室設置，主要為水平實驗坑道和輔助水平坑道各 1 區，主要實驗水平坑道設置於地下深度 500 公尺處，輔助實驗水平坑道設置在 500 公尺附近。此外，為了獲得地質參數與深度的關係，分別在豎井深度 100、200 及 300 公尺設置實驗坑室。在主要實驗水平坑道設置設施設備間、輔助房間、特性巷道與展示巷道；在輔助實驗水平坑道設置沉澱池、泵房、電器室、消防噴淋中心、通訊間與停車場，主要輔助系統包含供配電、加熱、供排水、通風、自動化、壓縮空氣及加油系統等。

陸方建設高放射性廢棄物最終處置設施之整體時程，依規劃主要分為三個階段，第一階段執行地下實驗室研究開發與地下處置設施選址，第二階段執行地下現場實驗，第三階段建設地下處置設施。此三階段預計耗時 35 年、20 年及 10 年。目前正執行建置地下實驗室階段，預計於 2050 年啟用地下處置設施。

由此次研討會得知，陸方亦逐步參照國際經驗與趨勢，重視資訊公開及科學性選址流程。依其近期經驗，放射性廢棄物地下處置設施場址篩選需考慮地質條件、未來自然變化、水文地質條件、人類活動、工程條件、環境保護、土地利用、社會經濟與人文等條件。相關成果也應用在地下實驗室之場址評選過程。

(二) 處置場概念設計經驗：

陸方初步規劃設計的處置場概念模型，深度為地下 500 公尺，容量含 82,630 個廢棄物罐，廢棄物罐垂直置放於水平處置坑道的處置坑中。處置區域共分為 4 區，每區含 300 對處置坑道，每對處置坑道長度為 900 公尺，含 800 個廢棄物罐，預計處置的廢棄物類型為經再處理後的高廢射性廢棄物(玻璃固化體)，概念模型如圖 24 所示。

目前規劃廢棄物罐之材料為低碳鋼，低碳鋼外部有 1 公分的空氣間隙，空氣間隙外為 50 公分的緩衝材料塊體，膨潤土塊體和母岩岩體間為 4 公分間隙。此間隙在廢棄物罐初期置放後可能為空氣填充，一段時間後將為地下水所填充，因為工程障壁系統組成元件各部分間不可能完全緊密結合，因此需要此種內部空氣間隙及外部含水間隙的設計，概念模型如圖 25 所示。

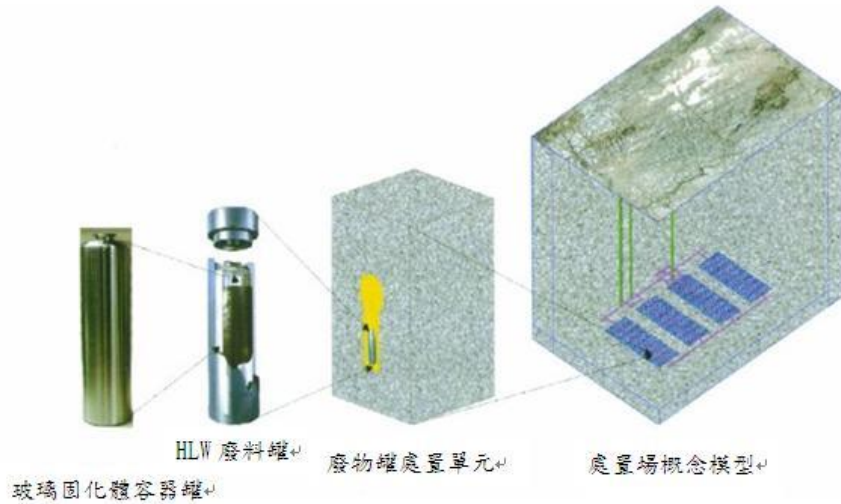


圖 24：高放射性廢棄物處置之多重障壁概念（引用自會議資料）

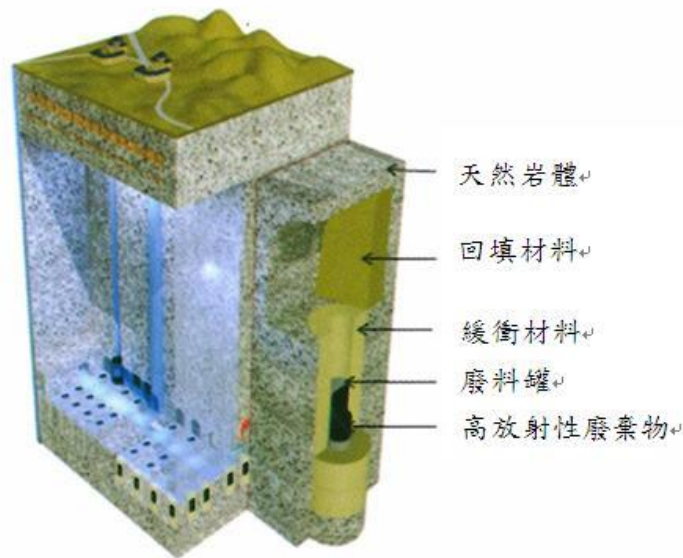


圖 1 高放射性廢棄物最終處置概念模型（引用自會議資料）

放射性廢棄物因有殘餘衰變熱，各廢棄物罐於處置後將持續散發熱能，衰變熱將傳導到工程障壁系統及周圍岩體中。因工程障壁系統中間隙的溫度差異，及膨潤土和岩石之比熱較低，廢棄物罐周圍會形成非常大的溫度梯度，即廢棄物罐表面將產生較高的溫度。陸方參照國際經驗，規劃廢棄物罐表面最高溫度不超過攝氏 100 度，以避免影響緩衝材料性質。

經處置坑道之間距分析及處置場熱傳導性能研究，結果發現影響廢棄物罐表面最高溫度的主要因素是初始處置時的剩餘衰變熱。廢棄物罐同時處置

區域之表面最高溫度，將比每年處置 20 個廢棄物罐的逐步處置方式溫度高攝氏 4 至 5 度。經評估結果，廢棄物罐垂直處置方式，最合理的處置隧道設計間距為 9.5 公尺，處置坑間之間距 9.5 公尺，如圖 26 所示。

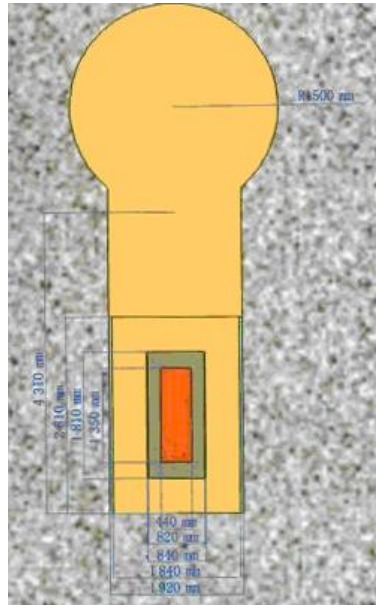


圖 26：陸方之處置坑設計尺寸（引用自會議資料）

（三）處置安全評估經驗

陸方目前已完成高放射性廢棄物地質處置規劃選址工作，其進行安全評估的過程及經驗可供國內借鏡學習。在不同的階段，例如場址選擇階段、概念設計階段及地下實驗室研究階段，安全評估技術的目的和具體方法有所不同。現階段安全評估的主要目的為建立完整的評估技術體系，簡述其步驟，首先需選擇參考環境情節，其次建立保守的功能與安全評估模式，採用確定性方法，並對假設的廢棄物射源項、初步概念設計及預選場址進行試評估，識別影響處置場長期安全的關鍵因素，繼而對處置場之概念設計及選址工作的深入開展，提供評估的可信基礎。

陸方以前述地質處置的概念設計模型和北山預選場址調查現況，利用 GoldSim 計算評估模式，建立處置場封閉後之核種外釋、遷移和輻射劑量估算模型。其中，參考情節之假設如下：

1. 工程屏障滿足相關的安全要求。
2. 未來的氣候條件與當前的氣候條件相同。
3. 地下水的化學性質及流速保持不變。

4. 場址的岩石力學特徵恆定，也不考慮其他地質變動，例如地震、斷層及地層變動等事件。
5. 未來人類活動與參考關鍵群體的生活方式相同。

為了解高放射性廢棄物處置場系統中，各障壁組成對放射性核種的阻滯及隔離能力，在上述參考情節之基本假設基礎下，評估計算以下幾種放射性核種外釋遷移及其對環境影響的基本案例，這些情況包含：

1. 無溶解度限制：放射性核種釋放出來後，假設其均能完全溶解於地下水中，不受其自身溶解度的影響，並隨地下水遷移。
2. 緩衝材料流失：假設緩衝材料，例如膨潤土等流失，即放射性核種在緩衝材料中的分配係數為零，而且其中有地下水流動。
3. 主導水裂隙貫穿處置場：假設從場內釋放出的放射性核種直接進入主導水裂隙中，並隨其中地下水遷移。

基本情節假設及主要評估結果：

1. 近場核種外釋率：

處置場之近場環境，包含玻璃固化體、處置容器、固化體與容器間空隙、緩衝材料、回填材料與開挖擾動帶。依據假設情節，處置場封閉後，處置容器喪失功能後，地下水與玻璃固化體接觸，再隨著玻璃固化體的溶解，其中放射性核種將逐步遷移釋放至空隙中，然後再經由擴散作用遷移至緩衝材料，此過程必須考慮沉澱、溶解、衰變等機制。

評估結果顯示，處置場關閉後 1,000 年至 500,000 年之間，銻-135 為外釋關鍵核種，外釋率峰值為 1.69×10^4 貝克/年，出現在 1.5×10^5 年。隨後，銻-93m 為外釋關鍵核種，外釋率峰值為 1.24×10^4 貝克/年，出現在 1.5×10^6 年。其他核種，例如銻-237 及鎘-99，在玻璃固化體中含量較多，但水中溶解度很小，在介質中處於沉澱溶解之動態平衡狀態，因而外釋率較低；如銻-240 及銻-241，因半化期較短且介質之吸附係數較大，遷移過程中大部分被緩衝材料吸附，因此外釋率較低。

2. 遠場核種釋放率：

遠場主要由兩部分組成，從近場外釋的核種進入處置單元周圍含有大量微小裂隙花崗岩組成的圍岩，與穿過圍岩進入岩石圈主導水裂隙的

放射性核種。放射性核種在裂隙遷移過程中需考慮七項機制：裂隙中地下水憑瀉、沿裂隙的物理擴散、沿裂隙的分子擴散、由裂隙向孔隙骨架的分子擴散、裂隙壁上的吸附、岩體內基質的吸附及放射性衰變等作用。最終獲得放射性核種從單一個廢棄物罐傳輸至圍岩的外釋率。

處置場關閉後數萬年之後，碲 Se-79 為遠場外釋關鍵核種，外釋率峰值為 4.17×10^1 貝克/年，出現在 4.5×10^4 年。隨後，錫-126 為關鍵核種，外釋率峰值為 3.67×10^1 貝克/年，出現在 1.04×10^5 年。次之，銫-135 為關鍵核種，外釋率峰值為 3.57×10^2 貝克/年，出現在 3.38×10^5 年。放射性核種從主導水裂隙的外釋率，與放射性核種穿越母岩的外釋率相似，碲-79 為關鍵核種，隨後為錫-126 及銫-135，外釋率峰值分別為 2.76×10^2 ， 3.5×10^1 ， 3.82×10^1 貝克/年，分別出現在 5.1×10^4 ， 1.1×10^5 ， 7.22×10^5 年。評估結果說明這三種核種在裂隙中的遷移時間遠小於其半衰期，但對於在花崗岩體吸附係數較大的核種，例如鉬-243 及銻-239，其外釋率最大值出現的時間明顯延後，最大值降低 10 至 100 倍。

評估結果，估計人類受到的每年最大有效劑量為 3.95×10^2 微西弗/年人，主要劑量貢獻核種為 Se-79、Sn-126 及 Cs-135，特殊狀況下，即無溶解度限制、緩衝材料流失及假設主導水裂隙穿越處置場，估計人類受到的每年最大有效劑量為 1.22、2.22 及 5.42 微西弗/年人。

三、北山坑探設施現地參訪

北山地區（如圖 27）鄰近甘肅省玉門市，因地勢平坦、降雨稀少、杳無人煙、土地利用性低，且具備地質穩定及花崗岩體完整…等特性，爰成為陸方高放射性廢棄物最終處置場及地下實驗室首選候選場址。北山候選場址 600 公尺深度範圍內最大現地應力為 25MPa，地應力整體處於中低水平，其所屬花崗岩岩體構造完整，並隨深度增加而完整性提昇。岩體節理主要沿北東向發展，與區域最大主應力方向一致，由室內岩爆結果顯示，在 400~600 公尺深度範圍內開挖，於正常母岩條件下不會發生岩爆現象。

此行，藉由技術參訪北山坑探設施（如圖 28、圖 29），可了解陸方相關地下實驗室先導作業諸如鑽炸試驗、開挖擾動帶(Excavation Damaged Zone; EDZ)及地下水監測、灌漿試驗等現況及成果，並可作為我方放射性廢棄物最終處置之管制及研究規劃之參考。



圖 27：甘肅北山地貌

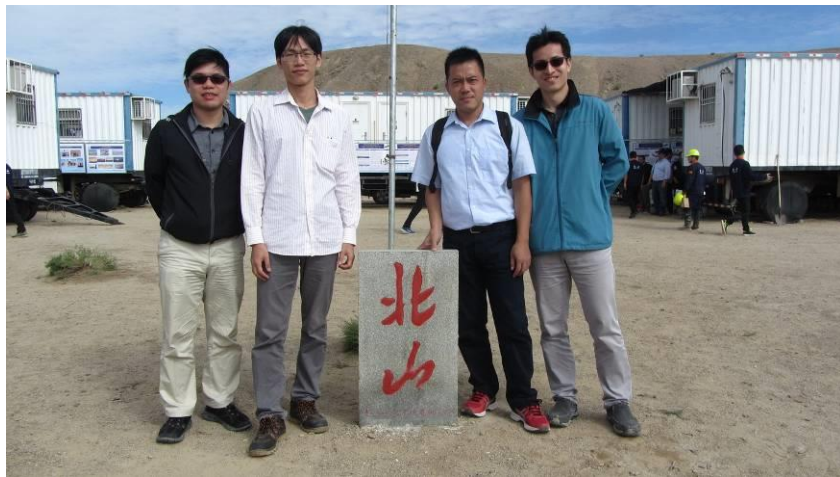


圖 28：本會同仁於甘肅北山現址合影



圖 29：本會同仁於北山坑探設施入口合影

北山坑探設施於 2015 年 6 月 26 日動工，最大埋深 50 公尺，主要由斜坡道（約 146 公尺，傾斜角度 20°）、水平坑道（約 132 公尺）、試驗坑道（約 92 公尺）、水池及通風孔等組成（如圖 30）。建置該先導設施主要目的係提供後續地下實驗室開挖、監測、支撐和不良地質體超前探測等工程技術試驗及研究，同時開發動態數據管理系統，作為地下實驗室工程建設和科研數據管理模式之基礎，相關建置，說明如后。

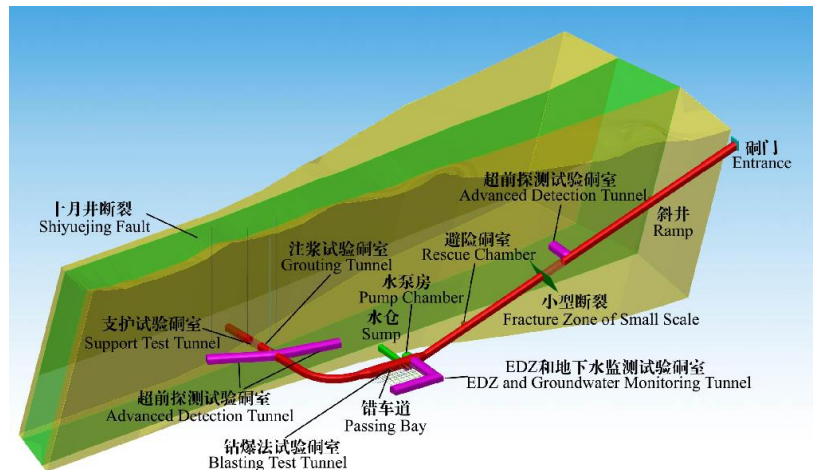


圖 30：北山坑探設施主體結構及試驗區配置（引用自現場資料）

在不良地質體超前探測部分：建立以透地雷達為主的導水裂隙帶和小斷層等高精度探測組合技術，藉由透地雷達的低頻天線組合，開發數位地聲探測器，可有效探測 60 公尺（探測精度 2 公尺）、20 公尺（探測精度 1 公尺）及 5 公尺（探測精度 0.5 公尺）深度範圍內的斷裂破碎帶，為地下實驗室隧道開挖和施工提供安全保障，如圖 31。

裂隙灌漿試驗部分：透過小型裂隙灌漿試驗（斜坡道區段推測裂隙發展處）及十月井斷裂處灌漿試驗（如圖 32），由灌漿材料之擴散及充填效果，改善灌漿工程相關之參數（如材料配比、灌漿壓力、灌漿時間），提供後續地下實驗室灌漿設計之參考依據。

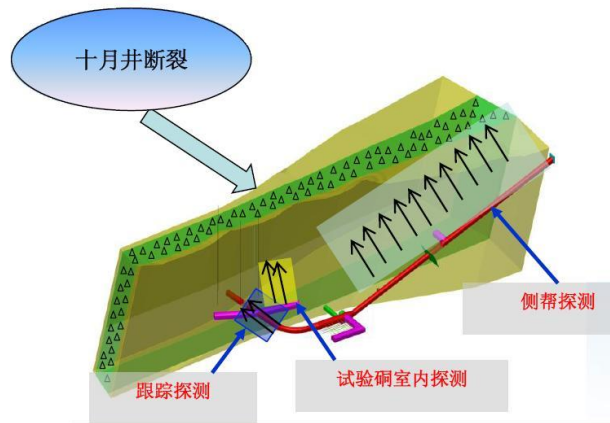


圖 31：不良地質岩體超前探测之試驗配置（引用自現場資料）

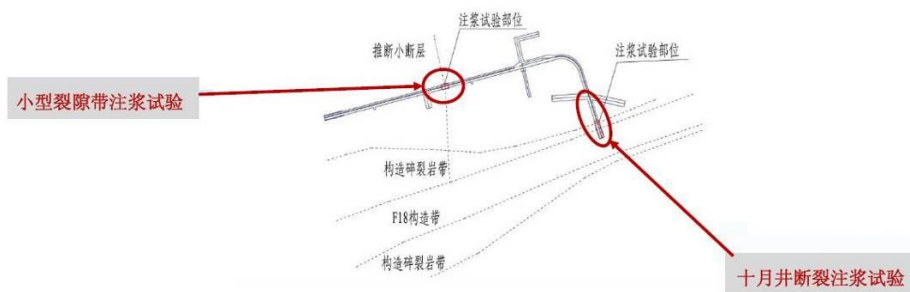


圖 32：灌浆技术試驗方案（引用自現場資料）

母岩變形監測部分：佈設 3 個人工監測區和 2 個自動監測區(如圖 33)，藉由母岩頂拱沉陷、內空收斂、內部位移等參數隨時間的規律變化，改善監測器埋設方法及精確度要求，並分析不同母岩變形監測方法的適用性，作為地下實驗室施工過程中母岩變形監測的依據。

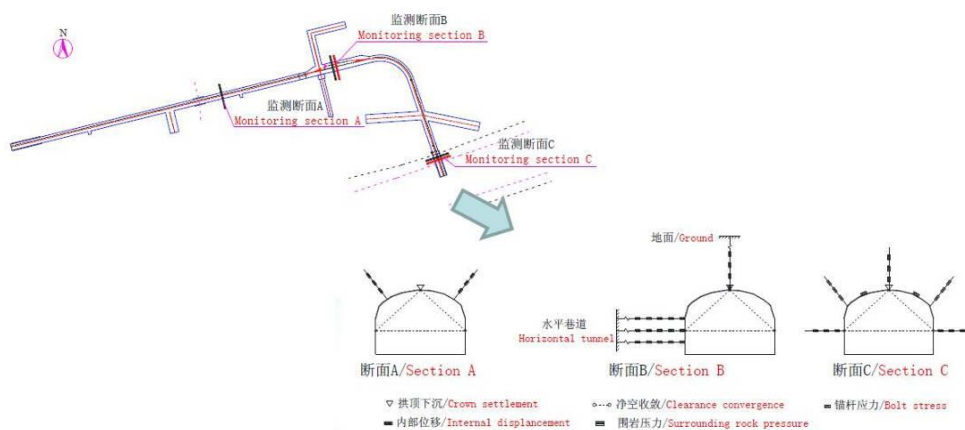


圖 33：母岩變形監測試驗方案（引用自現場資料）

鑽炸法和開挖擾動區(EDZ)評估部分：透過開挖前後的岩心取樣力學試驗，結合現場鑽炸試驗（爆破方式、火藥鑽孔間距、裝藥方式等）及超音波、鑽孔電視、鑽孔雷達、聲發射及微震監測，評估北山花崗岩體開挖對周遭母岩的擾動範圍及規律性，提供作為將來地下實驗室設計及施工之參酌依據。



圖 34：鑽炸試驗區



圖 35：EDZ 和地下水監測試驗區

動態數據管理部分：設立北山坑探設施數據管理中心並開發現場動態數據管理系統（如圖 36），用以整合坑探設施各項試驗數據資料，該系統具有輸入、輸出、查詢、視覺化呈現及網路交換等功能，為地下實驗室數據管理提供重要研究基礎。

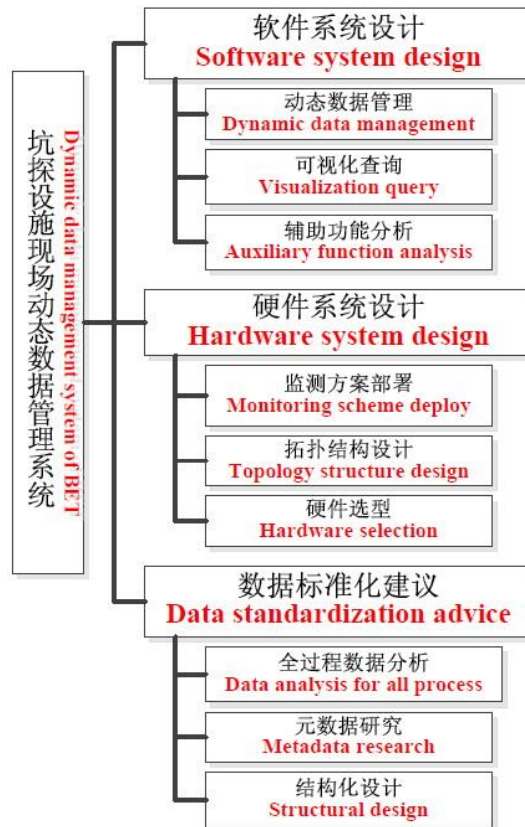


圖 36：北山坑探設施現場動態數據管理系統架構（引用自現場資料）

參、心得及建議

以下就本次參加學術研討會及地下實驗室參訪活動，提出之心得及建議，說明如下：

(一) 應強化資訊公開及採取科學性選址流程：

本次研討會的重點之一，即陸方特別著重於展現選址過程的資訊公開，及強調採用科學性之選址流程，以決定高放廢棄物最終處置設施的首選場址。陸方近年加強處置調查過程及研究結果之資訊公開，建立系統化之歷年研究成果資料庫，舉辦研究成果資訊交流研討會等，以建構完整且公開的資訊，讓民眾能充分瞭解計畫執行現況。

此外，因應國際趨勢與民意高漲，陸方也提出眾多明確的科學調查數據及場址合適性評估策略，期藉由科學化的選址流程，獲得民眾認同與支持。建議我國應持續參照國際趨勢，加強資訊公開透明；以科學化及合理化證據說服大眾，並充分落實政府與民眾之資訊交換與意見溝通，方能順利且有效的推動最終處置工作。

(二) 參酌國際趨勢與作法，以有效推動選址作業：

研討會另特邀捷克放射性廢棄物管理局局長 Jiří Slovák 就該國深地層處置經驗及作法進行簡報，報告提及捷克為實現 2025 年前確定放射性廢棄物最終處置場之目標，將推動選址程序法制化作業，由該局、地方政府及參議院就技術層面、公眾溝通及解決方案，分三階段進行分工及協調，藉由反覆的民意傾聽及議題討論，尋求共識及解決方案。我國目前亦面臨選址困難及居民高度反對之問題，建議持續追蹤該國及國際間的作法及成效，吸取國際間成功經驗，以作為我國解決放射性廢棄物最終處置場選址之借鏡及參考。

(三) 國內應持續加強國際技術合作與交流：

陸方目前在處置場選址量化評估和地下實驗室研究工作等方面均有明顯進展，並強調有信心能實現「2020 年完成地下實驗室，2050 年完成最終處置場」的目標。我方目前規劃於 2055 年完成高放最終處置場，兩岸規劃的最終處置場啟用時間點接近，建議我國未來應持續與國際間及陸方進行技術合作與交流，減少國內處置計畫研發摸索過程，確保研發成果的合理性，以提

升國內放射性廢棄物處置技術與能力，並得以徹底解決國內放射性廢棄物處置問題。

(四) 建議國內提前規劃地下實驗室之相關工作：

本次參訪北山坑探設施，該設施係作為未來地下實驗室開挖、監測、工程支撐和不良岩體超前探測等工程技術研究之試驗平台。包括該設施之鑽爆試驗、開挖擾動帶及水文監測試驗、圍岩監測變形試驗、岩體完整性和裂隙分布特性試驗、工程施工方法…等研究成果，均對於後續規劃地下實驗室及最終處置設施有極大的助益，研究成果之比對驗證及地下設施之建置技術，也可高度強化民眾信心。

我國地下實驗室預定於第二階段「候選場址評選與核定」(2018~2028 年)完成後，才會在第三階段「詳細場址與試驗」(2029~2038 年)，開始進行「地下試驗設施規劃與建構」，建議考量國際趨勢，提前規劃地下實驗室之相關工作，以助於處置計畫之順遂推展與執行。