

出國報告（出國類別：其他）

參加「**MIGRATION 2011**」國際研討
會並拜訪北京地質研究院

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：陳文泉技正

派赴國家：中國大陸

出國期間：100年9月17日至9月27日

報告日期：100年10月11日

摘要

MIGRATION 研討會定期提供高放射性廢棄物遷移行為的科學資訊的交流平台。MIGRATION 研討會討論內容主要為用過核子燃料及高放射性廢棄物(含鈾系元素與可分裂產物)核化學與核種遷移相關研究主題。MIGRATION 2011 研討會 100 年 9 月 18 日到 9 月 23 日於北京大學舉辦。目前國內正積極依據放射性物料管理法的規定，推展用過核子燃料最終處置計畫。對於國際間用過核子燃料及高放射性廢棄物處置的研究進展，以及國際合作研究計畫，有必要通盤了解，俾利掌握相關研究發展的方向，不會與國際發展造成方向上的偏差或斷軌，因此特別奉派參加本屆 MIGRATION 2011 研討會，廣泛蒐集了解國際發展趨勢與資訊。

個人藉由參加 MIGRATION 2011 研討會的時機，安排參訪中國大陸核工業北京地質研究所。該研究所主要任務是建立探採中國大陸的鈾礦資源及執行放射性廢棄物地質處置研究等研究發展領域，並負責大陸高放射性廢棄物最終處置計畫的場址選擇與工程障壁系統的研發。中國大陸規劃要在 2020 年完成地下試驗室之興建，相關工作主要由北京地質研究所負責。台電公司目前也在進行用過核子燃料最終處置計畫的潛在母岩特性調查與評估工作，並規劃設置地質實驗室，因此與中國大陸相關計畫執行單位的技術交流，有助於了解補實與強化國內計畫發展的內容，並增進安全管制作為。

目次

壹、目的.....	3
貳、出國行程.....	4
參、見習心得.....	7
肆、建議事項.....	23

壹、目的

MIGRATION 2011 研討會於 100 年 9 月 18 日到 9 月 23 日在中國大陸北京大學召開，研討會主要議題包含核種與分裂產物的水化學、核種遷移行為及地球化學與傳輸模式等。台灣目前正積極執行用過核子燃料最終處置計畫，對於國際間用過核子燃料及高放射性廢棄物處置的研究進展，以及國際合作研究計畫，有必要加強資訊蒐集。俾利掌握相關研究發展的方向，方不致造成研究發展方向上的偏差，因此特別奉派參加本屆 MIGRATION 2011 研討會，以便廣泛了解國際高放射性廢棄物最終處置相關研究發展趨勢。

藉由參加本屆 MIGRATION 2011 研討會的時機，安排參訪中國大陸核工業北京地質研究所。該研究所主要任務是建立探採中國大陸的鈾礦資源及執行放射性廢棄物地質處置研究等研究發展領域，並負責大陸高放射性廢棄物最終處置計畫的場址選擇與工程障壁系統的研發。北京地質研究院依據中國政府之規劃，將在 2020 年完成地下試驗室之興建。台電公司目前也在進行用過核子燃料最終處置計畫的潛在母岩特性調查與評估工作，並規劃設置地質實驗室，因此了解中國大陸相關計畫執行單位的技術發展動向，有助於了解促進國內計畫發展的內容，並提升相關管制作為。

貳、出國行程

一、行程概要

日期	地點與行程	工作內容
9月17日(六)	台北→北京	去程
9月18日(日)	北京	「Migration 2011」研討會
9月19日(一)	北京	「Migration 2011」研討會
9月20日(二)	北京	「Migration 2011」研討會
9月21日(三)	北京	「Migration 2011」研討會
9月22日(四)	北京	「Migration 2011」研討會
9月23日(五)	北京	「Migration 2011」研討會
9月24日(六)	北京	整理研討會報告
9月25日(日)	北京	整理研討會報告
9月26日(一)	北京	拜訪北京地質研究院
9月27日(二)	北京→台北	返程

二、Migration 研討會簡介

MIGRATION研討會(International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere)定期提供用過核子燃料及高放射性廢棄物核種遷移行為的科學資訊的交流平台。研討會討論內容主要為高放射性廢棄物(含錒系元素與可分裂產物)核種與分裂產物的水化學、核種遷移的實驗與模擬、地球化學與傳輸模式等最終處置相關議題。MIGRATION研討會從1987年開始每兩年舉辦一次，歷屆MIGRATION研討會之辦理國家與地點整理如下表。

屆別	舉辦國家	舉辦城市	年分
1	Germany	Munich	1987
2	USA	Monterey, California	1989
3	Spain	Jerez de la Frontera	1991
4	USA	Charleston, South Carolina	1993
5	France	Saint-Malo	1995
6	Japan	Sendai, Japan	1997
7	USA	Lake Tahoe, Nevada	1999
8	Austria	Bregenz	2001
9	Korea	Gyeongju	2003
10	France	Avignon	2005
11	Germany	Munich	2007
12	USA	Kennewick, Washington	2009

本屆MIGRATION研討會為第十三屆，舉辦地點為中國的北京大學，研討會時間為100年9月18日到9月23日，研討會主辦單位安排的討論議題可略為區分為下列三個領域：

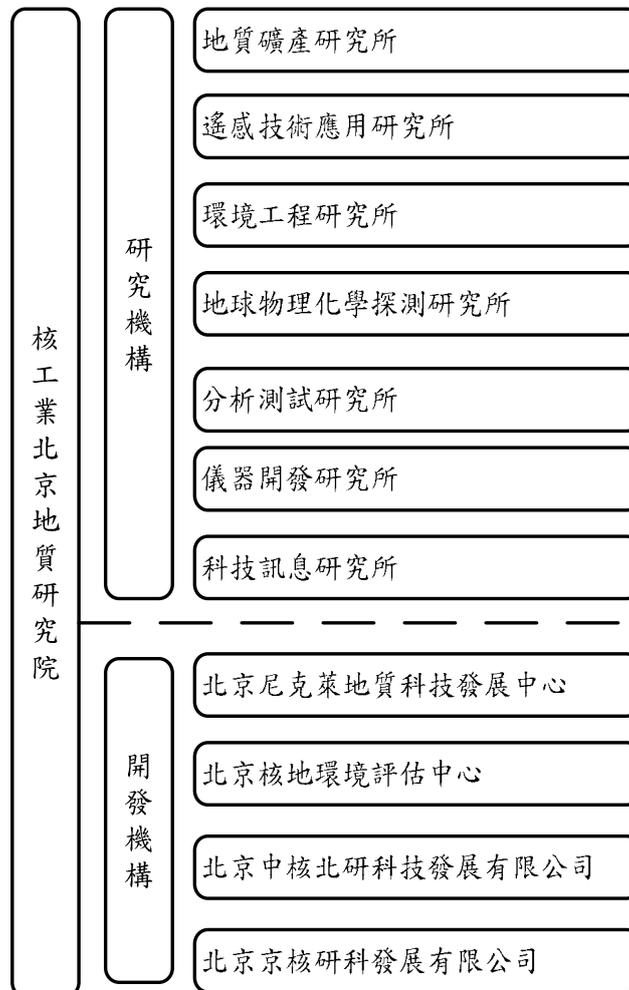
- 一、銻系核種與分裂產物的水化學
 - (1)溶解與溶解度
 - (2)固溶體與二次相形成
 - (3)無機物與有機物的複合(complexation)
 - (4)氧化還原反應與射解效應(radiolysis)
 - (5)固體與水界面反應
 - (6)膠體形成
 - (7)實驗方法
 - (8)計算化學研究
- 二、核種遷移行為
 - (1)吸附與脫附的動態系統
 - (2)擴散及其他遷移反應
 - (3)膠體遷移
 - (4)生物與有機物效應
 - (5)現場與大尺度試驗
 - (6)天然類比
- 三、地球化學與傳輸模式
 - (1)資料選擇與評估
 - (2)化學與傳輸的耦合(coupling)
 - (3)模式的發展與應用
 - (4)模試驗證

三、北京地質研究院簡介

北京地質研究院（中國大陸簡稱「核地研院」）位於北京市北三環與北四環之間，安定路與惠新西街段的北土城東路北側，建立於1959年，是目前中國大陸惟一以鈾礦地質研究為主的綜合性研究機構。北京地質研究院設有7個研究所、4個研發機構、11個管理處室，並建有遙感資訊圖像分析技術重點實驗室和核工業地質分析測試中心。其組織架構如附圖。

北京地質研究院之成立是為確保中國大陸核能發展對鈾礦資源的需求、安全處置放射性廢棄物之任務，建立鈾礦地質、遙測技術、放射性廢棄物地質處置研究三大研究發展領域。同時加強物理化學探測、分析測試、儀器研製等領域的研發，積極成為中國大陸鈾礦資源勘查技術聯合中心、放射性廢棄物處置技術之研究發展中心。對於高放射性廢棄物處置的技術研究發展，主要由該院的環境工程研究所負責。環境工程研究所目前有38位研究人員，主要進行高放射性廢棄物地

質處置研究，該所目前備有雙栓塞水文地質試驗系統、鑽孔超聲波偵測、鑽孔雷達系統、大型緩衝材料水-熱-力耦合實驗系統、高溫膨脹力實驗系統及資料處理軟體等設備與儀器。在處置場選址和場址評估、低滲透裂隙岩體特性評估、深部地質環境評估和數值模擬、緩衝回填材料特性試驗研究等方面，都完整規劃與執行。



北京地質研究院組織架構圖

參、見習心得

一、MIGRATION 2011 研討會

本屆MIGRATION 2011研討會在中國北京大學舉辦，研討會地點為北京大學英杰交流中心，大會安排於100年9月18日進行開幕儀式，並邀請歐盟聯合研究中心(Joint Research Centre)主任的Thomas博士及中國大陸中央北京大學副校長致開幕詞，隨即安排3場次的開幕專題演講，講題包括(1)中國放射化學的當前發展；(2)中國高放處置計畫；(3)美國能源部環境管理計畫的研究發展。

主辦單位於100年9月19日至100年9月23日期間，總計辦理19項議程的學術討論活動，分別為：

- 議程一：氧化還原反應與射解效應
- 議程二：固體－水界面反應(I)
- 議程三：現地與大規模試驗
- 議程四：模式的發展與應用
- 議程五：壁報發表(I)
- 議程六：計量化學
- 議程七：無機與有機配位基(ligand)複合反應(I)
- 議程八：膠體形成與膠體遷移
- 議程九：擴散與其他遷移反應
- 議程十：壁報發表(II)
- 議程十一：中國放射性廢棄物處置專題
- 議程十二：生物與有機物效應
- 議程十三：地球化學與傳輸模式
- 議程十四：固體－水界面反應(II)
- 議程十五：溶解度與固體溶液
- 議程十六：無機與有機配位基複合反應(II)
- 議程十七：實驗方法
- 議程十八：固體相與溶解度
- 議程十九：放廢處置替代策略

本屆MIGRATION 2011研討會總計安排60篇專題報告，每位簡報人員約有25分鐘報告時間，報告結束後開放提問。另外安排170篇相關研究報告的壁報文章。研討會主辦單位並於上述170篇壁報文章中，挑選出3篇優秀壁報文章於100年9月22日公開表揚。MIGRATION 2011研討會壁報文章的主題分類清楚且深入探討高放射性廢棄物最終處置技術發展相關議題。壁報文章討論主題包括：(1)溶解與溶解度；(2)無機與有機配位基複合反應；(3)氧化還原反應與射解效應；(4)膠體形成；(5)擴散與其他遷移反應；(7)生物與有機物效應；(8)天然類比；(9)資料選擇與評估；(10)模式的發展與應用；(11)模式驗證；(12)國際研究計畫；(13)固溶體與二次相形成；(14)固體－水界面反應；(15)實驗化學；(16)計量化學；(17)動

態系統的吸附與脫附現象；(18)膠體遷移；(19)現地與大規模試驗；(20)化學與傳輸的耦合。

研討會大會決定下一屆MIGRATION 2013研討會將於2013年9月8日到13日於英國倫敦近郊的Brighton城市舉辦。之後MIGRATION 2015研討會則由美國接續辦理。

個人參加本次第13屆MIGRATION研討會，聆聽各國專家在放射性廢棄物處置應用技術發展，整理與高放射性廢棄物處置相關的國外相關研究領域發展現況或發展趨勢，供國內相關處置計畫的發展參考。研討會中數位中國大陸學者簡報關於大陸高放處置計畫相關研究發展的部分，將與參訪北京地質研究院的技術交流的心得，一併彙整。

(一)大型試驗或現地試驗部分：

本次研討會報告有幾位學者專家提出放射性核種傳輸大型試驗與現地試驗計畫的報告，包括美國 Los Alamos 國家實驗室提出針對 Rocky Flats、Hanford、Nevada Test Site 等處污染場址，銻元素在其地下水傳輸的現地觀測；瑞士與卡斯魯技術研究院(Karlsruhe Institute of Technology; KIT)合作發表 Grimsel 地下實驗室膠體形成與核種遷移的試驗與遷移計畫階段性成果(CFM 計畫)；美國 Savannah River 國家實驗室提出該場址有機碳對地下水核種遷移的影響；日本長崎受原子彈爆炸後的鈾核種分裂產物追蹤等，上述的大型試驗與現地試驗研究都展現國際間對於核種傳輸的趨勢，不侷限於實驗室的模擬試驗，並且透過現有污染場址、或地下實驗室進行現地試驗，更能夠了解與掌握放射性核種遷移的區域異質性問題。

(二)國際合作研究發展部分：

MIGRATION研討會由卡斯魯技術研究院(KIT)歐盟(European Commission)透過ACTINET-13計畫贊助本研討會的辦理，因此研討會上有多篇上述兩機構所發表的國際合作相關研究。以下就歐洲原子能機構(EURATOM)所提的第七階段計畫(7th Framework Program: FP7)的各項大型國際合作計畫，說明如下：

- (1) RECOZY計畫：為Redox Phenomena Controlling Systems的簡稱，本計畫的主要目的是了解控制廢棄物處置系統傳輸的氧化還原(redox)現象，並提出試驗結果供功能評估或安全評估的計算基礎，包括分析工具精進、控制氧化還原現象的程序調查、獲取控制氧化還原程序的資料、及對於處置系統產生擾動現象的調查。RECOZY計畫從2008年4月起執行4年，本計畫下計有六項分項工作計畫(project work plan)，如發展氧化還原決定方法、對近場與天然系統的氧化還原作用、核種的氧化還原反應、核種傳輸的氧化還原程序、影響源項的氧化還原反應、知識管理與訓練、計畫管理等，目前包含13個EURATOM 簽屬國及俄羅斯等32個研究機構參與此國際合作計畫。
- (2) CROCK計畫：為Crystalline Rock Retention Processes的簡稱，該計畫的主要目的是針對結晶岩母岩遠場核種傳輸障壁行為的預測方式建立方法論，以降低不確定性。CROCK計畫將從2011年1月起執行2年半，本計畫下計有六項分項

工作計畫，包括實驗材料、核種傳輸與吸附、真實系統解析、概念化與模式化、安全案例的應用、文件化等，目前10個研究機構參與此國際合作計畫。

- (3) CATCLAY計畫：為Processes of Cation Migration in Clayrocks的簡稱，該計畫的主要目的是針對泥岩核種遷移與吸附行為進行研究分析，研究對象包括瑞士Opalinus泥岩、法國Callovo-Oxfordien泥岩及比利時Boom泥岩，以了解泥岩中代表性礦物的吸附平衡，以及核種擴散傳輸。CATCLAY計畫將從2010年6月起執行2年，目前6個研究機構參與此國際合作計畫。
- (4) SKIN計畫：為Slow Kinetics of Processes in Close-to-Equilibrium Conditions for Radionuclides in Water/Solid Systems of Relevance to Nuclear Waste Management的簡稱，該計畫的主要目的是針對地質處置近場與遠場各別系統程序的安全與功能評估。該計畫由2011年1月開始執行3年，目前10個研究機構參與此國際合作計畫。
- (5) FIRST-Nuclides計畫：為Fast/Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel的簡稱，該計畫的主要目的了解地質處置場從高燃耗用過二氧化鈾燃料的外釋核種，研究主題包括；(1)對於60GWd/t用過燃料的試驗調查；(2)建立可分裂外釋氣體與可分裂產物的關係，包括I-129、Se-79、Cs-135等；(3)降低關於I-129及C-14的不確定性；(4)討論尖峰劑量值(peak-dose)的效應。該計畫由2012年1月執行至2014年12月，目前10個研究機構參與此國際合作計畫。
- (6) INMAN 計畫：為A Comprehensive Information Management System for European Disposal R&D的簡稱，該計畫的主要目的增加Euratom高放射性廢棄物最終處置研究發展計畫的能見度與透明度，其執行方式包括(1)每年辦理計畫執行的研討會，以掌握計畫執行概況；(2)完成各項計畫進度報告摘要版，供與媒體或決策者的溝通之用；(3)建立專業網站報導各種相關活動。

上述的各項計畫都是開放國際間相關機構共同參與，本次研討會有位中國科學院廣州地球化學研究所的康博士，其研究就是申請CATCLAY計畫，赴法國與法國研究團隊一起執行Effect of pH and Reaction Progress on Se Reduced Form on Pyrite的研究。這類的研究模式有助於開展國際視野，建議國內學者或博士生也能尋求類似的國際合作研究機會。

此外OECD/NEA從1997年開始執行3期的吸附計畫(NEA Sorption Project)，第三期計畫已經從2007年11月開始執行，目前有11個國家參與，預期本階段結束時將提出一個熱力學吸附模式(thermodynamic sorption modeling)的導則。

(三)處置系統的傳輸行為部分：

MIGRATION研討會的主軸是討論高放射性廢棄物的鈾系核種與可分裂產物，在各種不同近場與遠場環境條件下的行為，包括氧化還原反應、固體與水的界面反應、膠體反應等。因此提出研發成果的學者很多，個人就研討會關於用過核子燃料最終處置相關報告，重點摘要說明如下，俾供國內相關研究發展之參考：
(1) 西班牙的Bruno博士受邀報告「用過核燃料處置系統氧化還原反應的整體回

顧」，總結說明過去對於用過核燃料處置系統可能造成氧化還原反應的因素、成因、與反應速率，包括用過核燃料在處置介質(母岩)的內在氧化還原不平衡的反應程序(inherent redox disequilibria processes)、處置系統近場存在液相時的水射解、及地下水系統中鐵的厭氧腐蝕等。

- (2) 瑞士的Grolimund博士受邀發表「傳輸反應的3D影像化觀察」，Grolimund博士以Opalinus Clay Rock的Cs核種傳輸現象分析為例，比較說明及其發展的3D影像分析。相較於過去採用X光斷層影像分析，在化學反應的空間與時間效果大為精進。
- (3) 法國Pipon博士研究天然鈾氧化物的氫氣的成因與傳輸行為，並藉由觀察加拿大17億年前的Mistamik沉積物，進行氫氣在天然鈾氧化物傳輸行為的天然類比研究。
- (4) 西班牙的Samper博士說明黏土障壁材料熱－熱力學－力學－地化耦合模式的報告，Samper博士依據黏土材料中水的型態(孔隙水、層間水)，以及黏土材料回脹行為產生的孔隙率變化，導致力學與地球化學耦合效應、以及以FEBEX膨潤土試驗結果為基礎，針對以往的分析模式加以改良，提出熱－熱力學－力學－地化耦合模式分析結果。

(四)擴散試驗部分

對於用過核子燃料最終處置系統而言，核種的擴散傳輸是最主要的傳輸機制，因此本屆MIGRATION研討會，有很多學者發表相關的研究成果。

- (1) 瑞士的Van Loon博士有鑑於多孔性介質的擴散係數量測有其必要性，但量測過程又相當耗時，因此針對孔隙度介於0.5到0.03之間黏土岩材料，發展一推求擴散係數的經驗公式。Van Loon博士針對不同陰離子、陽離子或中性物質的在沉積岩的擴散係數推估，發現與試驗偏差不超過1個數量級。
- (2) 大陸蘭州大學的吳教授(Liangsheng Wu)進行高廟子膨潤土中Eu(III)核種擴散行為的研究，探討不同外加溶液(NaClO₄)濃度的效應。試驗採through-diffusion的試驗法，試體尺寸採直徑2公分，厚度4毫米、乾密度1.6的試體。報告時，相關試驗仍在進行，尚未展現具體試驗結果。
- (3) 芬蘭的Ikonen博士發表瑞士Grimsel地下實驗室進行的現地長期擴散試驗成果，以主要研究核種包括氚水(tritiated water)及I-127核種，除現地試驗外，也搭配實驗室的浸出試驗，求取擴散剖面相關資訊。目前也將試驗成果與電腦模擬進行進一步比對。



MIGRATION 2011研討會具辦地點(左為清華大學鄧希平教授)



MIGRATION 2011研討會辦理情形



MIGRATION 2011研討會壁報文章展出情形

二、拜訪北京地質研究院

中國大陸北京地質研究院負責開發高放射性廢棄物最終處置場(中國大陸稱為處置庫)。個人藉由參加 MIGRATION 2011 國際研討會之時機，安排參訪北京地質研究院。本次參訪由該研究院負責研究發展及國際事務的王駒副院長接待。經相互說明台灣與大陸對於用過核子燃料及高放射性廢棄物的管理現況後，北京地質研究院安排參觀該院設置的鈾礦探採展示館，該展示館陳列大陸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，之後參訪緩衝材料的先導設施(mock-up facility)及高放射性廢棄物處置研究室，並於相關設施負責人員進行技術交流與討論。

經拜訪北京地質研究院，對於中國大陸的高放處置計畫有更深入的了解，可以作為國內用過核子燃料最終處置計畫的研究發展參考。藉由與中國大陸從業人員的技術對談與討論，並彙整北京地質研究院提供的相關技術資料，特別將中國大陸的高放射性廢棄物最終處置計畫相關資訊，整理如下。

(一)中國大陸用過核子燃料管理策略與架構

中國大陸的核能發電發展規劃，到 2020 年核能發電將佔中國大陸總發電量的 4%，屆時產生的用過核子燃料(中國大陸稱為乏燃料)累積將達 2,000 公噸，此後每年將產生 1,000 公噸用過核子燃料。預估至 2020 年的所有核能發電(5,800 萬 kW)全部生命週期將產生 83,000 公噸用過核子燃料。其數量超過台灣四座核能發電廠 40 年壽期用過核子燃料產量(7,350 公噸)的 10 倍以上。

中國大陸對於用過核子燃料的管理與台灣現行管理策略迥異，中國大陸採用封閉式的管理策略，規劃將用過核子燃料內可再利用的鈾與鈾回收使用。未來隨著用過核子燃料再處理時產生的高放射性廢棄物數量增加，將逐漸面臨高放射性廢棄物的問題需要解決，中國大陸從 1985 年開始進行高放射性廢棄物地質處置的研究發展工作。

高放射性廢棄物地質處置作業的主管機關是國家環保部和國家核安全局；專案控制和資金管理機關是國家原子能機構；中核集團為該專案實施機構，集團下屬的四個單位負責執行核心工作：(1)北京地質研究院負責選址和廠址評估；(2)工程障壁研究、功能評估等；(3)中國原子能科學研究院負責核種遷移等研究；中國輻射防護研究院負責安全評估；(4)中國核電工程公司和核工業第四研究設計院負責工程設計。此外，大陸中科院和一些大學院校也參與高放射性廢棄物地質處置計畫的研發，如北京大學、清華大學、南京大學、同濟大學等。

(二)法規與規定

中國大陸的放射性廢棄物分類係由環境保護局和中國核工業總公司所訂 GB 9133-1995 放射性廢棄物的分類標準，整理如下表：

中國大陸放射性廢棄物分類

型態	分類	標準
豁免	豁免廢棄物	對民眾年劑量小於 0.01mSv，對公眾集體劑量低於 1 man-Sv/y
氣體	低放廢棄物	濃度不超過 4×10^7 Bq/m ³
	中放廢棄物	濃度高於 4×10^7 Bq/m ³
液體	低放廢棄物	濃度不超過 4×10^6 Bq/L
	中放廢棄物	濃度介於 4×10^6 Bq/L 到 4×10^{10} Bq/L
	高放射性廢棄物	濃度高於 4×10^{10} Bq/L
固體	α 廢棄物	大於 30 年 α 核種： 單一包件： 4×10^6 Bq/kg 多個包件平均： 4×10^5 Bq/kg
	低放廢棄物	(1) 半化期 ≤ 60 天(含 I-125)：比活度不超過 4×10^6 Bq/kg (2) 60 天 ≤ 半化期 ≤ 5 年(含 Co-60)：比活度不超過 4×10^6 Bq/kg (3) 5 年 ≤ 半化期 ≤ 30 年(含 Cs-137)：比活度不超過 4×10^6 Bq/kg (4) 半化期 ≥ 30 年(不含 α 核種)：比活度不超過 4×10^6 Bq/kg
	中放廢棄物	(1) 半化期 ≤ 60 天(含 I-125)：比活度高於 4×10^6 Bq/kg (2) 60 天 ≤ 半化期 ≤ 5 年(含 Co-60)：比活度高於 4×10^6 Bq/kg (3) 5 年 ≤ 半化期 ≤ 30 年(含 Cs-137)：比活度介於 4×10^6 Bq/kg 到 4×10^{11} Bq/kg，熱功率不超過 2kW/m ³ (4) 半化期 ≥ 30 年(不含 α 核種)：比活度高於 4×10^6 Bq/kg 且比活度高於 4×10^6 Bq/kg
	高放射性廢棄物	(1) 5 年 ≤ 半化期 ≤ 30 年：比活度高於 4×10^{11} Bq/kg，熱功率超過 2kW/m ³ (2) 半化期 ≥ 30 年：比活度高於 4×10^{10} Bq/kg，熱功率超過 2kW/m ³

依據中國大陸 2003 年通過的「放射性污染防治法」第 43 條要求：「高水平放射性固體廢物實行集中的深地質處置」，放射性污染防治法是中國大陸第一次規定高放射性廢棄物地質處置的要求。2006 年中國國家原子能機構和科技部、環保部聯合發佈「高放廢物地質處置研究開發指南」，訂出「2020 年前建成高放射性廢棄物最終處置地下實驗室，完成高放射性廢棄物最終處置場規劃」的目標。

(三)中國大陸高放處置計畫

1. 早期規劃

依據北京地質研究院王駒副院長的說明，中國大陸高放射性廢棄物地質處置計畫從 1985 年開始，當時的核工業總公司提出「中國高放廢物深地質處置研究發展計畫(簡稱 DCG 計畫)」。該計畫於 1986 年 2 月開始執行。該計畫分 4 個階

段，即技術準備階段、地質研究階段、現場試驗階段和處置設施建造階段。處置對象為高放射性玻璃固化體、超鈾廢棄物及少量重水式反應器用過核子燃料。處置設施以花崗岩為處置母岩，採用深層地質處置方式，規劃在 2040 年左右完成處置設施的興建。DCG 計畫將整個高放處置計畫，劃分為 4 個階段，整理如下表：

	第一階段 選址和場址評估 階段	第二階段 場址確認和地下 實驗室建設階段	第三階段 現場實驗和示 範處置階段	第四階段 處置設施建設 階段
時間	2000 ~2010	2011~2020	2021~2030	2031~2040
階段 目標	掌握大部分場址 特性評估方法，完 成處置區域地段 預選和場址初步 評估，推薦出 1~2 處處置設施場址	確認處置設施場 址，完成詳細的場 址評估，完成地下 實驗室的可行性 研究，2015 年左 右開始建設特定 場址地下實驗室	完成地下實驗 室的建造，並進 行現地實驗，在 後期進行示範 處置，同時完成 處置設施的施 工圖設計	完成處置設施 興建，開始運 轉
處置 設施	完成地段預選、地 表工程及深鑽孔 調查	完成場址評估，確 認場址	場址評估和地 下實驗室開挖 及實驗所獲最 新資料，修改初 步設計，提交處 置設施施工設 計圖	完成處置設施 施工設計圖， 完成處置設施 地下結構開 挖，取得主管 機關運轉許可 後，開始處置
地下 實驗 室	調查研究外國地 下實驗室情況，完 成可行性評估及 概念設計	確定場址，完成可 行性研究，開始興 建	完成地下實驗 室的開挖、建 造，地下實驗室 中現場實驗，處 置施工技術開 發、示範和驗證	持續進行全尺 寸大型現場實 驗，並作為處 置坑室的監測 點
處置 設施 興建	外國處置設施調 查研究、概念設計	概念設計更新	初步設計、施工 圖設計	完成興建，進 行運轉
功能 評估	完成國外功能評 估方法整理，引進 相關電腦模式、建 立功能評估資料 庫、建立地質處置	建立功能評估方 法和電腦模式，根 據處置設施概念 設計，完成高放射 性廢棄物地質處	根據處置設施 初步設計完成 功能評估報告	提交處置設施 興建階段和運 轉階段兩個環 境影響評估報 告

	系統的功能評估 工作架構	置設施的第一期 功能評估工作		
基礎 研究	1.放廢管理和處置 法律法規研究 2.地質處置技術標 準研究 3.場址評估方法研 究 4.工程障壁功能研 究 5.核種遷移與水化 學行為研究 6.功能評估方法論 研究 7.天然類比研究	1. 地下實驗室設 計和施工標準 研究 2. 豎井和橫坑中 進行場址評估 方法研究 3. 開挖建造技術 研究 4. 地下坑室穩定 性研究及數值 模擬 5. 現場實驗技術 研究 6. 在地下實驗室 評估工程障壁 的功能 7. 現場核種遷移 研究 8. 功能評估方法 改進	在地下實驗室 中進行，全尺寸 現場實驗，提供 處置設施建造 和運轉的方法 和技術	處置設施施工 技術、封閉技 術和處置設施 關閉後功能評 估技術研究

2.近期規劃

2006 年中國大陸國家原子能機構和科技部、環保部聯合發佈「高放廢物地質處置研究開發指南」，進一步明確的對於處置設施的研究發展區分為三個階段，分別為試驗室研究與場址選擇階段、地下現場試驗階段、原型處置設施驗證實驗和處置設施建設階段，並敘明各階段的目標、任務，總體目標是在 2020 年左右建成地下實驗室，2050 年左右建成高放射性廢棄物地質處置設施。

階 段	試驗室研究與場址選擇階段	地下現場試驗階 段	原型處置設施驗證 實驗和處置設施建 設階段
時 間	2006-2020	2020-2040	2040-本世紀中期
發 展 重	1. 策略、規劃、法規、標準研究 2. 處置工程研究 (1) 廢棄物源項調查	地下試驗研究：執 行地下試驗研究 工作，對實驗室研	1. 原型處置設施驗 證實驗： (1) 研究地質處置設

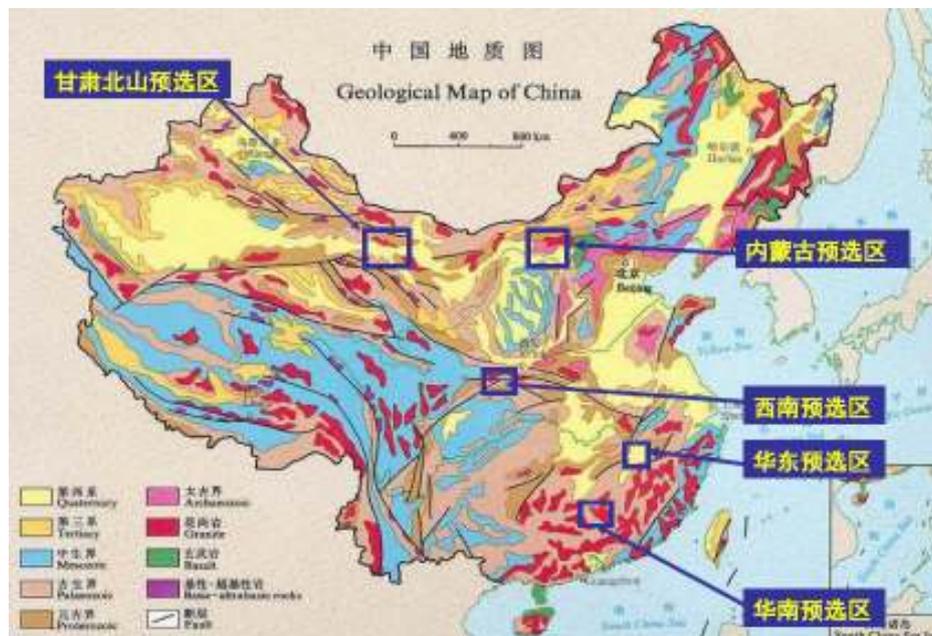
<p>點</p>	<p>(2)地下實驗室設計和處置設施概念設計 (3)工程障壁系統研究 (4)處置工程系統精進 (5)處置工程資料庫建立和三維設計模型開發</p> <p>3. 處置地質研究 (1)地質研究 (2)水文地質研究 (3)工程地質研究 (4)處置設施新預選地區的選擇和初步特性評估 (5)處置設施場址特性總體評估方法研究 (6)地質模型和處置設施預選場址地學資料庫的建立 (7)預選區未來氣候和地質變化趨勢研究</p> <p>4. 處置化學研究 (1)高放射性廢棄物及 α 廢棄物的性能研究 (2)包裝材料長期化學穩定性研究 (3)高放射性廢棄物處置水溶液化學研究 (4)膠體和界面化學研究 (5)地質處置環境中氣體釋放、微生物、有機質等作用的研究 (6)核種遷移中的物理、化學機制研究 (7)處置化學模型和資料庫建設</p> <p>5. 處置安全評估研究 (1)安全目標、安全與環境影響評估方法學研究 (2)高放射性廢棄物地質處置系統的功能評估研究 (3)安全與環境影響評估</p>	<p>究和處置設施選址階段在處置工程、地質、化學、環境安全等方面研究開發的單項或局部成果進行驗證，並進行現場驗證，提供建造處置設施所需的真實條件的工程、地質、化學、環境安全方面的資料</p> <p>(1) 處置工程技術研究 (2) 處置地質研究 (3) 處置化學研究 (4) 處置安全評估研究 (5) 綜合試驗研究、論證及評估工作</p>	<p>施建造施工技術； (2)執行現地高放射性廢棄物處置實驗 (3)最終確認處置設施場址 (4)完成處置設施可行性研究報告 (5)驗證高放射性廢棄物地質處置設施的初步設計</p> <p>2. 高放射性廢棄物地質處置設施建造研究 (1)高放射性廢棄物地質處置設施的施工設計 (2)執行設計和建造階段的安全和環境影響評估工作 (3)精進處置設施建造施工技術 (4)研究處置設施接收高放射性廢棄物期間的工程管理 (5)完成高放處置設施正式營運的申請和安全審查</p>
----------	--	---	---

(四)高放射性廢棄物地質處置研究工作進展

中國高放射性廢棄物最終處置研究從1985年開始以來，執行高放射性廢棄物處置設施場址篩選、重點預選區場址特性的初步評估、放射性核種遷移的實驗室研究，以及緩衝回填材料方面的研究等。中國已初步選定甘肅省北山地區作為高放射性廢棄物地質處置的重點預選區，內蒙古高廟子膨潤土作為中國高放射性廢棄物處置設施的首選緩衝回填材料。

1.選址工作的進展

中國大陸高放射性廢棄物地質處置設施選址工作始於1985年，主要由北京地質研究院負責。早期北京地質研究院根據初步擬定的選址標準，主要考慮早期核能工業佈局、放廢的來源、再處理廠的地點、人口分佈密度、各類資源及其潛在資源、經濟現狀和前景等因素，從全國區域篩選入手，藉由資料收集和綜合對比分析，初步篩選了下列預選區，包括甘肅(北山)預選區、華南預選區、內蒙古預選區、華東預選區和西南預選區。經過進一步資料收集、現場踏勘和對比分析，在前述幾個預選區中篩選21個地段供進一步工作。候選圍岩有花崗岩、凝灰岩、火山雜岩、花崗閃長岩、頁岩和泥岩等。



中國大陸高放射性廢棄物深層地質處置設施預選區示意圖(王駒博士提供)

經考慮社會和自然等各種因素，1990年以後中國的選址工作集中在西北地區進行，研究甘肅北山及其鄰近地區的地殼穩定性、地質構造、地震地質特徵、水文地質條件和工程地質條件等，運用地球物理測量方法和遙測方法研究該區的地

殼穩定性，完成「高放射性廢棄物處置庫甘肅北山預選區區域地殼穩定性研究」報告，篩選出了八個預選地段。初步研究結果顯示，甘肅北山地區地處戈壁，人煙稀少，地質條件和水文地質條件均較為有利，是理想的最終處置高放射性廢棄物的候選地區。北京地質研究院進一步說明北山地區作為目前中國高放射性廢棄物處置設施預選場地的具體理由，包括北山地區氣候乾旱，年降雨量僅為幾十毫米，地表水和地下水都十分貧乏。海拔標高約在1600公尺。北山處置場預定地之地表為典型的荒漠、戈壁景觀。預選場址區人煙稀少，沒有工業和農業活動，大面積分布的花崗岩岩體構成了良好的處置設施母岩，簡言之，北山地區具備建造處置設施得天獨厚的自然地理和經濟地理條件。下圖為北山處置場預選區第六號鑽井的岩心樣本，近三公尺的岩心皆保持完整，顯示該區域的岩體完整性。



北山處置場預選區第六號鑽井的岩心樣本

在諸多因素中，地質因素是一個重要的方面。依據目前取得的現場調查數據顯示北山地區為一地殼穩定區：(1)從區域大地構造特徵及其演化歷史觀之，北山位於塔里木板塊內，屬加里東—海西期褶皺帶，自中生代以來其地殼穩定上升，顯示現代之地殼運動微弱；(2)從區域地震活動性來看，歷史上區域內較強地震都發生在河西走廊及祁連山地區，依據現有資料記載，預選區歷史上最大震級小於4。據地震地質研究，預選區內也不存在明顯的發震構造。另外依據北京

地質研究院對於北山地區水文地質的研究成果，可以歸納下列初步結論：(1)地下水以降水為主要補給來源，但由於區內年平均降水量僅為60到80毫米，歸結北山地區為地下水貧乏區域；(2)主要含水介質是風化裂隙和構造裂隙，因此地下水的空間分佈是極不均勻的，是以水文地質條件相當複雜；(3)地下水流模擬結果顯示從預選場地到走廊地區，地下水的傳輸時間接近二萬年，證實含水介質屬低滲透，地下水流速十分緩慢；(4)蒸發是地下水主要傳輸途徑之一，加上流速緩慢，使地下水具有高礦化現象，礦化程度一般大於2 g/L。水文地球化學模擬顯示此類地下水在向深部或向地表傳輸過程中，會因為沉積各種粘土礦物而阻止核種進一步遷移。

2000年以來，針對甘肅北山預選區的3個重點預選地段(舊井、野馬泉和新場一向陽山預選地段)執行深部地質環境研究和選址及場址評估研究，目前已完成14口井(6口深500~700 m的鑽孔和8口深100~150 m的鑽孔)。拜訪北京地質研究院之時，該院正於北山處置場進行另外5口鑽井的開挖，同時也執行孔內各種試驗，取得3個預選地段的地質與水文環境的初步資料。

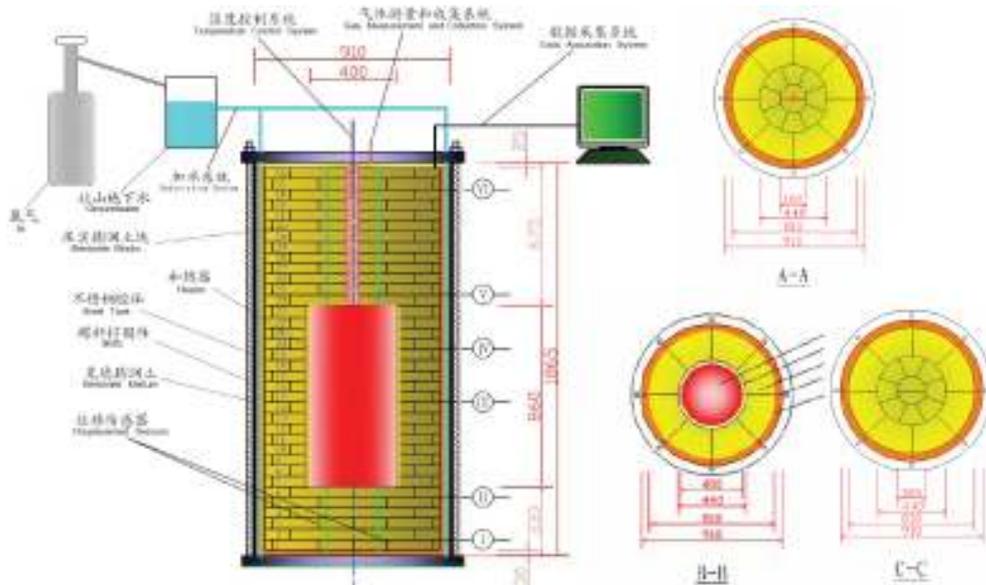
2. 緩衝/回填材料研究進展

緩衝/回填材料作為高放射性廢棄物處置設施中主要障壁材料，填充在廢棄物容器和母岩之間，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(Gaomiaozi)膨潤土作為首選的緩衝/回填材料。

國際間都選擇含高量蒙脫石(montmorillonite)成分的膨潤土(bentonite)作為高放射性廢棄物緩衝/回填材料。中國對於國境內的84處主要膨潤土礦藏區，挑選出高廟子礦區生產的膨潤土為候選緩衝/回填材料，並進行相關研究發展工作。高廟子礦區位於內蒙古自治區，距北京市西北300公里處，為侏羅紀晚期形成礦區，估計約有160百萬噸的礦藏量，其膨潤土型態為鈉型膨潤土。

就高廟子膨潤土的材料特性研究顯示，其含有超過70%的高量蒙脫石，且雜質含量低；可交換陽離子容量77.3 mmol/100g。夯實到乾密度1.8g/cm³的膨潤土試體(含水量8.6%)量測之工程性質結果，其熱傳導係數 1×10^{-13} W/m.K而且回脹壓力10MPa，相較於美國或北歐國家使用的MX-80膨潤土作為緩衝材料，並不遜色。

為了解掌握高廟子膨潤土的熱-水-力學-化學(THMC)耦合作用，北京地質研究院設立一個大型台架的模擬實驗設施，稱為China Mock-up。其主要目標是要達成下列事項：(1)了解熱-水-力學-化學耦合作用時的高廟子膨潤土行為；(2)研究了解熱-水-力學-化學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。目前China Mock-up已完成組裝，其裝置如下圖。



中國膨潤土緩衝材料大型試驗(China Mock-up)示意圖

壓實成塊狀的高廟子膨潤土緩衝材料擺置於腔體內，再以粉狀土將縫隙塞密使其整體密度達 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，腔體內設置溫度、溫濕度、土壓力、孔隙水壓力、位移、電化學腐蝕等感測器，腔體內設置光纖光柵應變(LVDT displacement sensor)、溫度、電阻應變、質量流量計(mass flowmeter)等感測器，共裝置180只。China Mock-up將以每天升溫 1°C 方式加溫到 90°C 後保持恆溫，進行熱－水－力學－化學耦合作用取得各項試驗數據。參訪當日(100年9月26日)的China Mock-up試驗溫度已升溫達 60°C 。

值得一提的是中國為自行建立此一大型研究設施，派員赴歐美日等已建立地下實驗室的國家參訪學習，之後再從小尺寸的試驗設備逐步建立後，最後才能建立此比例尺1:2規模的China Mock-up大型台架試驗設備。顯示用過核子燃料與高放射性廢棄物最終處置的研發工作不但跨國界而且跨領域，國內如果要在相關研發能與國際接軌，也可參考中國高放處置研究發展的作法，多與國際間的研發機構接觸了解與參與，才能達到事半功倍的效果。



中國膨潤土緩衝材料大型試驗(China Mock-up)設備外觀



中國膨潤土緩衝材料大型試驗(China Mock-up)資料擷取系統

(五) 未來研究發展規劃

中國大陸參考國外的高放處置發展歷程，規劃出 2000-2040 年的深地層處置場址研究發展整體規劃，分為區域與地區預選(regional and area pre-selection)、場址預選(site pre-selection)、場址特性評估(site characterization)、場址確認(site

confirmation)幾個階段執行，其階段目標與研發內容說明如下：

1.區域與地區預選(regional and area pre-selection)

階段目標：對兩個或兩個以上預選地區進行工作,完成地區的可行性報告、安全分析和環境評估報告,藉由論證對比，向官方提交一個場地預選地區，並獲取進入場地研究工作的許可證

研發內容：

- (1)完成編制場地預選規範和功能評估指導綱要；
- (2)進行衛星資料和航測的地質解譯；
- (3)地區地殼穩定性研究(包括地震烈度和新構造活動的研究)
- (4)完成 1：50000 的地質圖、斷裂構造圖和水文地質圖
- (5)利用地球物理探測方法瞭解岩體的產狀、深度、岩體的處置容量和破裂的形狀、規模及含水性
- (6)掌握地下水流速、流向、流量、成分、氧化還原性質以及有關水力學參數(如滲透率等)
- (7)確認處置岩體的工程地質穩定性、大地應力狀態、熱學性質、物質成分和同位素定年
- (8)完成預選地區花崗岩和高廟子膨潤土的岩土力學基本研究
- (9)完成回填/緩衝材料中添加劑研究
- (10)確認鈾系元素及其他長半化期核種在北山地下水中的化學形態以及核種與腐殖酸和膠體的關係
- (11)精進處置設施條件下核種遷移實驗的裝置和實驗方法，並取得實驗資料
- (12)完成處置設施條件下放射性核種在花崗岩和回填/緩衝材料中的遷移實驗研究
- (13)繼續進行天然類比的研究
- (14)執行處置設施系統的功能評估研究
- (15)精進預選區的地學資料庫
- (16)完成兩個預選地區的可行性研究報告，並推薦兩個作為今後預選場地的地段

2.場址預選(site pre-selection)

階段目標：是藉由系統的地表研究和少量深部工程,對在地區預選階段篩選出來的兩個預選地進行可行性研究，藉由對比研究,向國家提交一個作為場地特性評估的場地

研發內容：預選場地的研究工作是預選地區研究工作的繼續和深入

(1)地質

- (i)利用鑽探工作進一步確認處置岩體的深度和容量
- (ii)進行 1：2000—1：10000 的地質、構造地質和水文地質圖
- (iii)完成處置設施設計所需的各種岩石力學參數測定工作
- (iv)確定處置設施和地下實驗室的空間位置

- (v) 確認場址的應力狀態
- (2) 水文地質
 - (i) 穩態和非穩態壓力測定
 - (ii) 滲透率測定
 - (iii) pH-Eh 和水溫、鹽度測定
 - (iv) 地下水定深取樣和成分分析
- (3) 地球物理探勘：進行航空地球物理探測、地面地球物理探測和鑽孔探測工作，以獲得較詳細的地表和深部的地質和水文地質資料
 - (i) 航磁測量
 - (ii) 重力測量
 - (iii) 放射性航測
 - (iv) 電法測量
 - (v) 鑽孔地球物理探測
 - (vi) 岩石物性測定
- (4) 地球化學
 - (i) 土壤和地下水中的微生物及其與放射性核種遷移的關係
 - (ii) 高放射性廢棄物玻璃固化體的溶解度實驗
 - (iii) 廢棄物容器的腐蝕試驗
 - (iv) 緩衝材料/廢物容器/地下水/岩石的相互反應實驗
 - (v) 回填/緩衝材料的熱穩定性、抗輻射穩定性和化學穩定性研究
 - (vi) 放射性核種在不同氧化還原條件下的存在形式
 - (vii) 放射性核種在人工障壁材料中的遷移特性研究
 - (viii) 放射性核種在含裂隙花崗岩中的遷移特性及其遷移模式
 - (ix) 回填/緩衝材料和花崗岩的加熱試驗
 - (x) 在現地環境下實驗研究蒙脫石的相變化及其相變產物對放射性核種遷移的影響
- (5) 工程設計：對處置設施及地下實驗室提出工程設計
- (6) 安全分析及環評：建立安全分析和環境評估的模式，並收集相關參數，提報安全分析和環境評估報告

3. 場址特性評估(site characterization)

階段目標：藉由場址特性評估確定此場址作為處置設施場址適宜性

研發內容：對處置設施附近深部地質和水文地質的資料收集上，俾便處置設施深部工程的進行

- (1) 深部鑽探：藉由深部鑽探，獲取深部地質和水文地質資料，並確定處置設施的位置、處置設施深度以及 4 個豎井的位置
- (2) 地下實驗室：地下實驗室開發研究階段的工作與處置設施場地開發研究階段的工作相似

4. 場址確認(site confirmation)

階段目標：藉由主管機構的審查，以便確認該場地的合適性

研發內容：對於各階段研發工作繼續進

(五)計畫挑戰

目前中國大陸已於北山處置場進行大規模的鑽探工作，至今已進行 19 口觀測井的開挖與測試。但該計畫在大陸相關領域學界的討論時，仍面臨許多挑戰與難題需要克服。依據北京地質研究院王駒副院長於 MIGRATION 2011 研討會時表示，中國大陸高放處置計畫目前面臨主要技術挑戰包括(1)處置場址演化的精準預測；(2)深層地質環境的特性化作業；(3)深層岩體的岩體材料、地下水、緩衝材料耦合條件下的行為；(4)低濃度超鈾核種地化行為及其傳輸分析；(5)處置系統的安全評估。

北京大學劉教授(Chunli Liu)表示大陸相關領域學界對於高放處置計畫的建議，包括要求應於本階段(2020 年)結束前完成下列事項：(1)更多處候選場址進行地質調查；(2)至少兩處以上的場址進行詳細調查；(3)北山處置場應進行更詳細調查作業；(4)除北山處置場花崗岩母岩外，應另尋一處泥岩潛在處置母岩之場址進行調查。

除上述技術議題的挑戰外，大陸核安全管制局(NNSA)馬博士(Ma Chenghui)表示，中國大陸執行高放處置計畫未來面臨的挑戰尚包括：(1)如何讓更高階領導階層認知到處置計畫的重要性；(2)如何依據能源發展計畫、國防工業及再處理廠容量精確預估處置計畫要求；(3)管理高放射性廢棄物的立法工作；(4)處置場選址計畫的建立與核准；(5)處置系統功能的評估方法論建立；(6)公聽會等公眾參與議題。

四、建議事項

個人奉派赴中國大陸參加本屆MIGRATION 2011研討會，首先感謝原能會物管局長官，提供增廣見聞與國際專業人士交流機會。另外參訪行程安排上，感謝北京地質研究院王駒副院長的協助，得以順利參訪該院並進行技術交流與討論。謹以參加MIGRATION 2011研討會及與北京地質研究院人員交流心得提出下列建議供國內發展參考：

- 一、MIGRATION 2011 年研討會主要是探討用過核子燃料及高放射性廢棄物最終處置的核化學及核種遷移行為的國際研討會，每兩年舉辦一次，討論議題幾乎涵蓋所有處置系統的核種傳輸研究。國內正值推動用過核子燃料最終處置計畫，參與相關研討會以了解國際發展趨勢有其必要性，建議國內相關產官學研注意本研討會動態，並派員參加與掌握國際發展趨勢。
- 二、中國大陸高放射性廢棄物處置計畫從 1985 年開始執行，與台灣用過核子燃料處置計畫相近。但中國大陸因為面積遼闊，較其它國家容易選擇合適的處置潛在母岩區域進行調查。建議未來相關研究發展執行單位可加強與大陸處

置計畫執行單位的技術或資訊交流，截長補短，俾利相關計畫的執行。

- 三、中國大陸高放射性廢棄物處置計畫的發展，與國際放廢處置相關機構交流頻繁。相關研究發展設施或設備的設置前，都曾派員前往已有地下實驗室國家參觀學習後，加以改良，藉此逐步縮減與其他國家的差距。建議國內用過核子燃料最終處置研發機構爭取機會多參訪學習其他國家的地下實驗室發展經驗，作為國內相關研究設施的設置基礎。
- 四、中國大陸對於緩衝材料研究，以高廟子膨潤土為研究對象。初步結果顯示該緩衝材料性質與其他國家緩衝材料性質相當，並不遜色。國內膨潤土材料礦源並不豐沛，材料品質也有待進一步檢驗，用於放射性廢棄物最終處置緩衝材料的特性目前也尚未充分探討。建議國內處置計畫關於緩衝材料的研究發展，可將包含高廟子膨潤土及其他國家常見的緩衝材料列為研究對象，不但可取得研究比較基礎，未來實際應用時可較具有材料選擇性。