

出國報告（出國類別：其他）

參加放射性廢棄物管理專家技術研討 暨參訪研究設施

服務機關：核能研究所

姓名職稱：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：104年8月26日~104年9月2日

報告日期：104年9月30日

摘要

本次赴中國大陸與中國核工業集團公司、中核清原工程環境公司及核工業北京地質研究院進行放射性廢棄物技術交流討論，以瞭解中國大陸對於高、低放射性廢棄物最終處置場址選擇條件、場址調查、場址設計、場址功能與環境影響評估...等相關技術並進行技術交流討論。亦安排參訪核工業北京地質研究院及西北處置場，觀摩中國大陸對於地質、地化與核種遷徙評估之技術並赴廢棄物處置場，參觀低放射性廢棄物固化技術、廢棄物處置設施及瞭解廢棄物運送、營運及接收作業。此行藉由吸收中國大陸處理核廢料之技術與推展經驗，可掌握大陸整體在放射性廢棄物管理等各方面的發展，以及其參與 IAEA、歐盟組織等國際原子能科技與環境的最新動態與議題之瞭解，以強化研發成果應用推廣。

目次

摘要	i
目次	ii
圖目錄	iii
表目錄	v
一、目的	1
二、過程	2
三、心得	31
四、建議事項	32

圖目錄

圖 1 飛鳳山處置	5
圖 2 大亞灣核電廠用過核子燃料運輸 (中核清原環境技術工程公司負責)	6
圖 3 放射性廢棄物運輸	6
圖 4 大陸中低放射性廢棄物處置場及用過核子燃料乾貯場	8
圖 5 中國大陸核能後端相關執行與研究單位進行技術交流	9
圖 6 北山地下實驗室概念圖	10
圖 7 高放廢棄物處置場興建階段	11
圖 8 中國大陸在北山進行之鑽探作業	12
圖 9 中國大陸高放廢棄物預選區示意圖	12
圖 10 西北處置場所堆置之中低放射性廢棄物混凝土桶	16
圖 11 中國大陸北龍最終處置場	16
圖 12 高放廢棄物處置方式	19
圖 13 高放廢物地質處置庫概念模型	19
圖 14 中國大陸地下實驗室場址三大重點預選區	20
圖 15 地面地質調查	21
圖 16 北山地下水流場模擬往西北流動	22
圖 17 北山新場花崗岩體安全評估結果	22
圖 18 十月井斷裂帶坑探設施的試驗配置圖	23
圖 19 十月井斷裂帶的坑探設施洞口	23
圖 20 參訪核工業北京地質研究院(1/3)	25
圖 21 參訪核工業北京地質研究院(2/3)	25
圖 22 參訪核工業北京地質研究院(3/3)	26
圖 23 參訪西北處置場留影	27
圖 24 西北處置場地質解說	27
圖 25 西北處置場、國家廢棄放射源集中貯存場	28

圖 26 西北處置場貯存單元示意圖29

表目錄

表 1 行程表.....	2
表 2 西北處置場核定的運轉條件.....	30
表 3 西北處置場允許處置的放射性核種總量.....	30

一、目的

本次赴中國大陸與中國核工業集團公司、中核清原工程環境公司及核工業北京地質研究院進行放射性廢棄物技術交流討論，瞭解中國大陸對於高、低放射性廢棄物最終處置場址選擇條件、場址調查、場址設計、場址功能與環境影響評估...等相關技術並進行技術交流討論。亦安排參訪核工業北京地質研究院及西北處置場，觀摩中國大陸對於地質、地化與核種遷徙評估之技術並赴廢棄物處置場，參觀低放廢棄物固化技術、廢棄物處置設施及瞭解廢棄物運送、營運及接收作業。此行藉由吸收中國大陸處理核廢料之技術與推展經驗，可掌握大陸整體在放射性廢棄物管理等各方面的發展，以及其參與 IAEA、歐盟組織等國際原子能科技與環境的最新動態與議題之瞭解，以強化研發成果應用推廣。

本次行程尚有台電公司核能部門林德福專業總工程師、核能後端處吳才基處長與黃秉修組長、工研院綠能所林蔚博士、中興工程公司余信遠協理與林伯聰經理，以及本所施建樑副所長與張淑君副組長，一共八人。

二、過程

(一) 行程：

自 104 年 8 月 26 日出發，迄 9 月 2 日返國(共計 8 天)，停留北京及嘉峪關。詳細訪問行程如表 1 行程表：

表1、行程表

放射性廢棄物管理專家技術研討暨參訪研究設施行程		
日期	活動地點/單位	交流/活動內容
第一天 8/26(三)	台北(桃園)→ 北京	抵達北京
第二天 8/27(四)	中國核工業集團公司 中核清原工程環境公司 核工業北京地質研究院 核電工程公司 輻射防護研究院 原子能研究院	進行放射性廢棄物技術交流
第三天 8/28(五)	核工業北京地質研究院	參觀訪問地質研究院
第四天 8/29(六)	北京	開會資料整理(假日)
第五天 8/30(日)	北京→蘭州→嘉峪關	路程(假日)
第六天 8/31(一)	中核清原工程環境公司 西北處置場	參觀訪問西北處置場
第七天 9/1(二)	嘉峪關→蘭州→北京	路程
第八天 9/2(三)	北京→台北	路程

國內籌組放射性廢棄物管理專家團隊，計有台電公司、工研院、中興工程公司及本所相關人員，並就本所專長之放射性廢棄物管理之核安工程設計與輻射防護進行「台灣用過核子燃料最終處置計畫工程設計與安全評估技術研發成果與未來發展」簡報與技術研討，另台電公司、工研院與中興工程公司代表，亦分別有一篇簡報。以強化兩岸核工業之輻射安全與成果應用推廣。

(二) 工作內容

2.2.1 研討會議行程及陸方出席人員名單

2015年8月27日，(地點:國賓酒店 2F 長江廳)

時間	議程內容	簡報單位
09:10~09:40	主席開場	雙方自我介紹
09:40~10:10	台灣電力公司核能後端營運介紹	台電公司
10:10~10:40	中核集團公司核能後端營運介紹(中核清原)	中核集團
10:40~11:00	問題與討論	
11:00~11:10	休息 10 分鐘	
11:10~12:00	台灣用過核子燃料最終處置計畫工程設計與安全評估技術研發成果與未來發展	核能研究所
12:00~13:30	午餐	
13:30~14:00	放射性廢物處置場選址與設計	核電工程公司
14:00~14:30	台灣低放射性廢棄物處置技術研發現況	中興公司
14:30~14:50	問題與討論	
14:50~15:00	休息 10 分鐘	
15:00~15:30	高放廢物處置場選址研究(北京地質研究院)	中核集團公司
15:30~16:00	放射性廢物處置場環境影響評估(中國輻射防護研究院)	
16:00~16:30	核種遷移(中國原子科學研究院)	
16:30~16:50	問題與討論	
16:50~17:00	總結	

2015年8月28日，核工業北京地質研究院

時間	活動內容	簡報單位
09:10~09:20	致歡迎詞，雙方自我介紹	雙方
09:20~09:40	核工業北京地質研究院情況介紹	核工業北京地質研究院
09:40~10:40	臺灣選址與調查技術	工業技術研究院
10:40~10:50	問題與討論	
10:50~11:20	大陸高放廢物地質處置選址和地下實驗室前期工作進展	核工業北京地質研究院
11:20~11:50	中國膨潤土研究進展	核工業北京地質研究院
11:50~12:10	問題與討論	
12:10~13:30	午餐	
13:30~14:00	參觀中國高放廢物處置緩衝材料大型試驗台架(China-Mock-up)	
14:00~14:30	參觀緩衝材料特性研究實驗室	
14:30~15:00	參觀分析測試研究所實驗室	
15:00~15:30	參觀中國核地質科技館	
15:30	離開核工業北京地質研究院	

陸方出席人員名單

姓名	單位	職稱
林森	中核集團公司港澳台辦公室	主任
朱吉才	中核集團公司港澳台辦公室	處長
劉振河	中國核燃料有限公司	副總經理
王海良	中核清原環境技術工程公司	總經理
范仲	中核清原環境技術工程公司	專家委員會主任
張英杰	中核清原環境技術工程公司	經理
潘燕晨	中核清原環境技術工程公司	主任
周兆宇	中核清原環境技術工程公司	副經理
王駒	核工業北京地質研究院	副院長
陳亮	核工業北京地質研究院	副所長
顧志杰	中國輻射防護研究院	所長
趙楊軍	中國輻射防護研究院	助理研究員
王旭宏	中國核電工程有限公司	副所長
呂濤	中國核電工程有限公司	室主任助理
周舵	中國原子能科學研究院	副研究員

2.2.2 放射性廢棄物技術交流研討會

2.2.2.1 主題一：「中核集團公司核能後端營運介紹」

I. 公司介紹

中核清原環境技術工程有限責任公司(簡稱“中核清原公司”)於 1995 年 1 月成立的中國核工業集團公司(歷經核工業部、中國核工業總公司)的直屬全資子公司，是中國大陸唯一授權的專業從事廢棄放射源處理、核能設施除役、放射性物質(含放射源、放射性廢棄物、用過核子燃料等)運輸、全國放射性廢棄物處置場的規劃興建與運轉、放射性廢棄物處理處置、廢放射源收貯、放射性物質包裝容器研發等業務之專業公司。

II. 放射性廢棄物處置規劃

由中國大陸政府授權，負責中國大陸放射性廢棄物區域處置場的規劃、興建與運營等工作，並已興建且安全運轉了中國大陸第一座中低放固體廢棄物處置場—西北處置場，擁有西北處置場建造許可證、試運轉和正式運轉經驗，完成廢棄物處置資訊管理，並安全運轉多年；擁有華南處置場—廣東北龍處置場建造許可證，並完成北龍處置場的興建工作；目前正進行西南處置場—飛鳳山處置場試運轉(如圖 1)，並部分完成華東處置場的前期選址工作。



圖 1 飛鳳山處置

III. 放射性廢棄物運輸

擁有放射性物品運輸能力，初步建立用過核子燃料、放射性廢棄物和廢放射源公路運輸為主、鐵路為輔之運輸系統，包括核能電廠和反應爐用過核子燃料運輸容器系統、廢棄物和廢源包裝運輸容器系統、公路運輸系統、輻射防護系統、因應緊急系統（包括衛星語音與圖像通訊系統等），以及安全和品質保證系統，建立一支具有廣泛專業技能的技術和管理隊伍，已成功完成數次大亞灣核能電廠用過核子燃料公路運輸、反應爐用過核子燃料及數萬枚廢棄放射源進行數十萬公里的安全運輸。

IV. 核能設施除役拆廠

目前在中國大陸有些早期的核能設施進行除役時所產生大量的高、中及低放射性廢棄物，有待進一步處理及處置。某些不當的放射性廢棄物運轉設施需進一步的改善及修護。部份受污染的場址亦需加以除污及恢復。



圖 2 大亞灣核電廠用過核子燃料運輸 (中核清原環境技術工程公司負責)



圖 3 放射性廢棄物運輸

目前計畫除役的反應器，燃料製造廠及同位素分離廠，則詳細說明均在中國大陸的除役計畫書內。由於待除役設施之間不論在設施、運轉環境及相關資料上均有極大的差異。因此，在該除役計畫書方面，則比較關注到以下各項議題：

- 放射核種的評估
- 除污

- 切割技術
- 遠端遙控技術
- 放射性廢棄物管理
- 保健物理及安全

在除役標準架構方面，目前採用國際原子能總署 IAEA 的安全要求及導則。當建立一個完整的架構之後，再針對某些場址訂定特定的安全導則。根據中國大陸於 2003 年 6 月 28 日由人大常委會所通過的「放射性污染防治法」第二十七條，核能設施的除役費用和放射性廢棄物處置費用應當預提，列入投資成本預估或者生產成本。核能設施的除役費用和放射性廢棄物處置費用的提取和管理辦法，由國務院財政部門、價格主管部門會同國務院環境保護行政主管部門、核能設施主管部門訂定。

2.2.2.2 主題二：「放射性廢棄物處置場選址與設計」

簡報由中國核電工程有限公司室主任助理呂濤先生進行簡報。簡報內容摘述如下：

中國核電工程有限公司業務範圍包含：核電領域(如核電廠設計、採購、興建與國際技術輸出)、核化工領域(如核化工領域之再處理流程、除役廢棄物處理等)與處置設計領域。處置設計領域包含本次簡介之中低處置工程設計領域，其主要流程可分為選址工作、初步可性研究、可行性研究，工程設計、興建、運轉與封閉作業等。目前處置設計作業除了中低放處置場之外，一些包含核種半化期較長或是初始活度較強之廢棄物也開始進行地下 100 m 左右之中等深度處置設計作業，不過這一部分目前處於研究階段。而在高放處置的部分，目前主要是著重於高放處置之地質試驗室，其中包含試驗坑道、通行坑道與通風鋼筋混泥土窖等相關地下設施工程之研究。

目前中國大陸有三個處置場，分別為西北、西南與華南處置場。西北處置場為第一座中低放處置場，主要存放核工業歷年所產生之中低放射性廢棄物，位於甘肅省戈壁區，由清原公司負責運轉，規劃處置容量為 20 萬 m^3 ，規劃面積 140 萬 m^2 ，目前已建立 6 個處置單元，處置容量已達到 6 萬 m^3 。至今大約已存放 9 千多 m^3 之放射性廢棄物。



圖 4 大陸中低放射性廢棄物處置場及用過核子燃料乾貯場

華南處置場位於廣東省，由廣核公司負責運轉，規劃主要接收核能發電場之放射性廢棄物，其接收來源分別為大亞灣核電廠與嶺澳核電廠，於 2000 年興建完成，規劃處置容量為 200,000 m³，規劃面積 2,050,000 m²，目前已建立 8 個處置單元，處置容量已達到 8,000 m³。至今大約已存放 1,500 m³以上之放射性廢棄物。

西南處置場位於四川省山區，由清原公司負責運轉，規劃處置容量為 180,000 m³，規劃接收核工業歷年所產生之中低放射性廢棄物，目前已建立 14 個處置單元，處置容量已達到 40,000 m³。

另說明核安全與放射性污染防治面臨挑戰包括早期核設施退役進程尚待進一步加快，歷史遺留放射性廢物需要妥善處置。鈾礦冶開發過程中環境問題依然存在。放射源和射線裝置量廣泛，安全管理任務重。所以在污染治理方面的規劃目標，建設與核工業發展水平相適應的、先進高效的放射性污染治理和廢棄物處理體系，基本建成與核工業發展配套的中、低放廢物處置場。

處置作業主要依循國家環境政策、放射性污染防治法，以及放射性廢棄物安全管理條例等，規範不同放射性廢棄物應遵循之處置型式，其下另有一系列之技術規範來指導各項工作進行。中低放廢棄物基本採用近地表處置，而高放則是需要採用集中式的深地層處置。



圖 5 中國大陸核能後端相關執行與研究單位進行技術交流

2.2.2.3 主題三：「高放廢棄物處置場選址研究」

簡報由核工業北京地質研究院副院長王駒先生進行簡報。簡報內容摘述如下：

為了確保高放射性廢棄物之處置安全，中國大陸之前核工業部在 1985 年即提出高放射性廢棄物深地質處置(Deep Geological Disposal (DGD))之長期研究發展計畫，該計畫主要分成四個階段，包括：

階段一：1985 年至 2025 年，場址選擇及特性調查

- (1) 1985~1986：全國場址篩選
- (2) 1986~1988：區域場址篩選
- (3) 1989~2010：地區場址篩選及初步場址調查
- (4) 2011~2015：初步選擇地區的初步可行性研究
- (5) 2015~2017：場址特性調查的執照申請
- (6) 2017~2023：場址特性調查及合適性研究
- (7) 2023~2025：場址執照申請

階段二：2025 年至 2029 年，處置場設計

階段三：2041 年至 2050 年，處置場施工

階段四：2051 年後，處置場運轉

而在階段二到階段三的 10 年之間，則將在靠近選定場址附近興建一座地下研究實驗室，其概念圖如圖 6。在 2034 年到 2040 年之間，將在此實驗室進行全尺寸的試驗及

處置的驗證。而最終處置場的設計將會依此最後研究結果來進行設計變更。

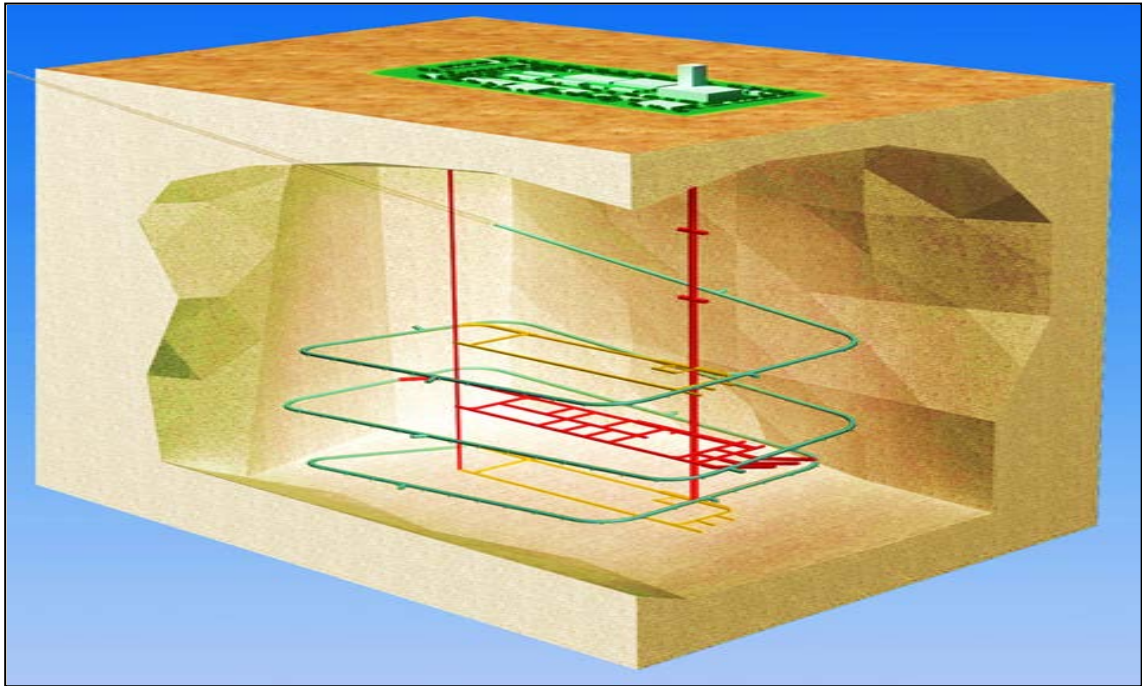


圖 6 北山地下實驗室概念圖

依據此 DGD 計畫，目前場址的選址作業正進行中。花崗岩則是被考慮的處置場母岩。整個選址過程主要分成四個階段：包括全國篩選、區域篩選、地區篩選及場址選定。

中國大陸曾針對 5 個潛在區域包括西南、廣東、內蒙、華東和西北進行評估。經評估結果認為西北地區具有適當的地質、氣候及經濟條件，因此，將其列為重點候選區。經過幾年的作業，已將其重點集中到北山。北山位於內蒙古高原西南邊緣，氣候乾燥，方圓百公里內荒蕪人煙且屬戈壁灘及沙漠地帶。中國大陸於 2000 年在該場址開始進行鑽探作業。

在場址選擇準則方面主要考量到以下因素：

- 社經因素
 - (1) 核能工業的分佈情況
 - (2) 動植物生態及資源，及潛在礦業資源
 - (3) 民眾及地方政府的態度
 - (4) 國家環保的法律要求
 - (5) 處置場施工及運轉的可行性
- 自然因素
 - (1) 地理條件，包括地形、氣候、水文等
 - (2) 地質，包括地層穩定性（地震、活動斷層）
 - (3) 地層應力，母岩形式等

此外，2003 年 6 月 28 日中國大陸通過的「放射性污染防治法」，規定高放射性廢棄物應採取集中的深地質處置。2006 年國家原子能機構、科技部和國家環保部聯合發布《高放射性廢棄物地質處置研究開發規劃指南》，明確指出深層地質處置開發的主要技術路線和開發的總體構想。2007 年批准《核電中長期發展規劃(2005-2020 年)》，提出 2020 年興建中國大陸高放射性廢棄物地質處置地下試驗室的目標，從而使高放射性廢棄物地質處置研究進入新的階段。中國大陸高放射性廢棄物深層地質處置規劃分為 3 個階段，如圖七。1.實驗室研究開發和處置場選址階段(2009－2020)，其目標是，完成各學科領域實驗室研究開發任務，初步選出處置場址並完成初步場址評估，確定地下實驗室場址，完成地下實驗室的可行性研究，並興建地下實驗室；2.地下現場試驗階段(2021－2040)，其目標是完成地下實驗室現場試驗，完成場址詳細評估，最終確認處置場址，掌握處置場興建技術，完成處置場設計和可行性研究；3.處置場興建階段(2041－2050)，其目標是 2050 年興建處置場，開展示範處置，並開始接受高放射性廢棄物。

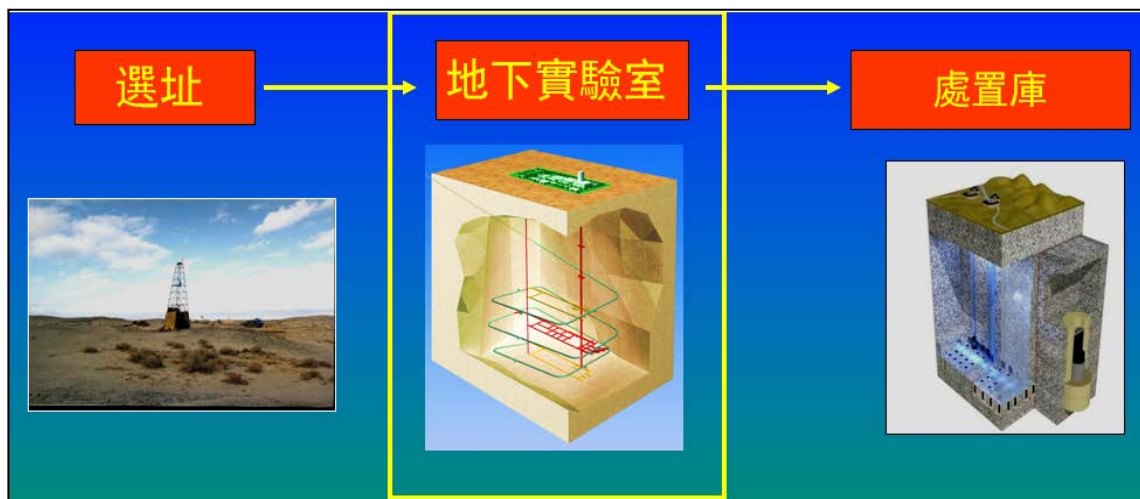


圖 7 高放廢棄物處置場興建階段

中國大陸計畫在 2020 年前，執行下列的高放射性廢棄物處置有關之研究計畫：

- (1) 在北山進行場址鑽探，將進行更多孔的鑽探以決定場址之合適性。
- (2) 在中國大陸西部進行選址，其目的是選出可與北山相匹配之第二場址。
- (3) 進行黏土為潛在母岩層之調查。
- (4) 地下研究實驗室之場址調查、可行性研究及興建。
- (5) 地下研究實驗室及地質處置設施之概念設計及細部工程設計。
- (6) 放射性核種遷移研究，以取得北山花崗岩及膨潤土吸附及擴散之更多數據。
- (7) 以北山為參考場址及以高廟子(Gaomiaozi, MGZ)膨潤土為參考緩衝物及回填材料進行安全評估。

(8) 進行岩石機械性、水文地質、地球化學、輻射化學、金屬腐蝕、數值模式、熱—水力—機械—化學模型等之基礎研究。

中國大陸在北山進行之鑽探作業如圖 8 所示。其中中國大陸高放廢棄物預選區示意圖 9。



圖 8 中國大陸在北山進行之鑽探作業

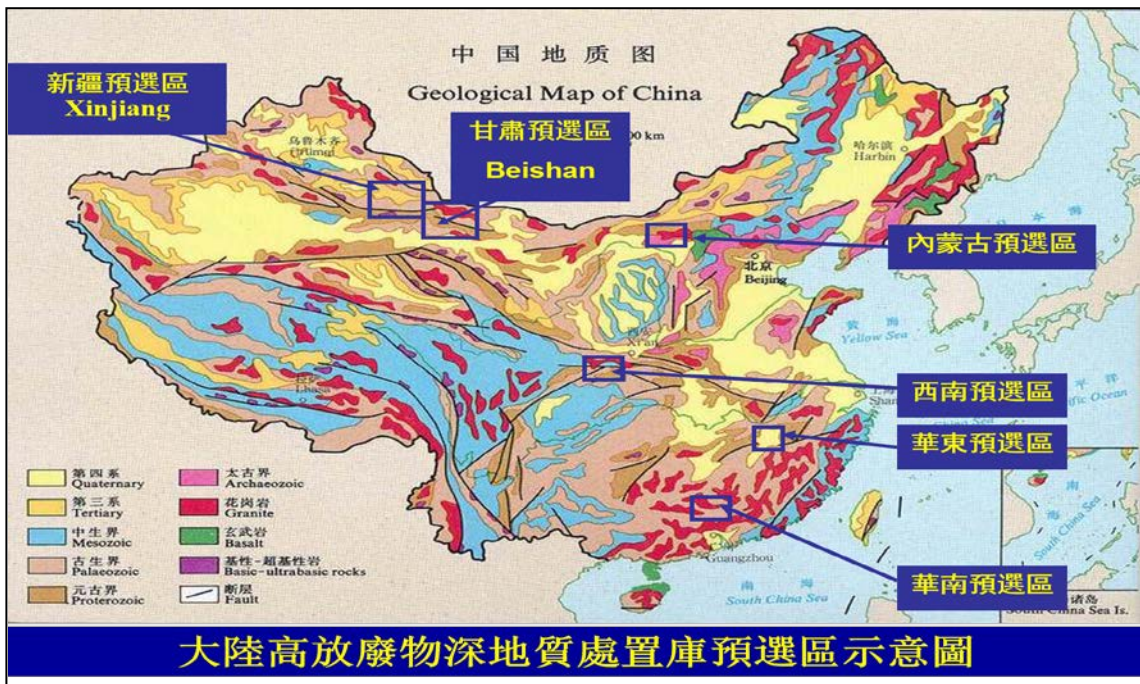


圖 9 中國大陸高放廢棄物預選區示意圖

台灣的用過核子燃料最終處置計畫分成五個階段進行：(1) 潛在處置母岩特性調查與評估階段(94~106 年)；(2) 候選場址評選與核定階段(107~117 年)；(3) 場址詳細調查與試驗階段(118~127 年)；(4) 處置場設計與安全分析評估階段(128~133 年)；(5) 處置場建造階段(134~144 年)。目前為第一階段，預定於 2017 年提出「報告」，將比照日本平成 12 年的第二階段報告(簡稱 H12 報告)，探討花崗岩現地數據為主建立的概念模式，以及自然影響因子(包括：大地構造、火山活動、斷層活動、抬升與沉陷作用、侵蝕與剝蝕作用、氣候與海平面變遷等)，並與瑞典 SKB 進行技術交流，完成以現地數據模擬、工程設計及安全評估之整合作業。

過去台電公司支持下，在大地構造上獲致了台灣地殼結構時空演變關係，並理解到南中國海板塊延伸至台灣東北部，在大南澳片岩帶之下，控制了地殼內部地震的分佈及無震區域。弧陸碰撞作用形成的造山作用，過去 5 百萬年來讓中央山脈從海下隆升成近 4 千 m 高山，但受到菲律賓海板塊過去 2 百萬年來對歐亞大陸隱沒作用的影響，台灣北部山脈廣泛發生張裂活動與沉陷作用，甚至形成台北盆地及蘭陽平原。台灣北部的火山活動均伴生在這些張裂構造中。過去 1 萬 8 千年來冰期環境，台灣海峽為沙漠環境，西部離島花崗岩區為平坦的地形，深層地下水可跟賀蘭山或北山相類似，當海平面從-120 米處快速上升，至 5 千年前開始淹沒台灣海峽，使離島四面環海。相較之下，台灣東部花崗岩並不受海平面變化而有明顯影響。

由於離島花崗岩經過空中、地表至地下，各種深層調查技術的演練，獲致代表性的地質概念模式，為工程設計及安全評估技術建立，奠定了模擬與評估的交流平台，目前與瑞典合作，採用 KBS-3 處置概念進行可行性評估技術的研究工作。

問題與回覆重點摘錄如下：

- 1、新疆、甘肅與內蒙古預選區均是花崗岩體，不過新疆與內蒙古預選區因為地方政府的因素，實施上將較為困難。
- 2、地質研究室投資金額很高，其預算來源主要來自於用過核子燃料基金，是有法源依據的基金。
- 3、地下試驗室由於在地下並不受地面溫度影響，坑內溫度應該是約 25 度的恆溫狀態，試驗設備不太需要考量氣溫的影響。
- 4、按照環保部的選址調查階段並不會進行現場調查工作，會在場址確定之後才會開始進行場址環境的現場調查與監測。因此，在這個階段主要是以蒐集附近的既有調查資料為主。
- 5、地下試驗研究室將由核工業北京地質研究院進行領頭規劃，由第四設計研究院進行工程設計，主要是需有專項的資質認證，也使分工較為明確。

2.2.2.4 主題四：放射性廢棄物處置場環境影響評估

簡報由中國輻射防護研究院趙楊軍助理研究員先生進行簡報。簡報內容摘述如下：

中低放射性廢棄物處置場環境影響評估主要是依據環保部的法規與審批流程來進行，最主要之法規為環境保護法與環境影響評估法、放污法與其相關法規。依法規規定，中低放處置場各階段工作均須進行環境影響評估，主要是民眾接收劑量為主要之定量標準，其評估範圍是以處置場為中心 10 km 半徑範圍為主。環境影響評估書在審查可研階段、申請興建階段與申請運轉階段均有所不同，可研階段主要是評估場址適宜性與方案比較，申請興建階段則是分析環境與設施設計是否符合安全要求，此階段需要場址參數與設計參數，申請運轉階段則是去檢核興建後之設施是否滿足安全要求，同時也要包含正常與異常現象之安全評估。

目前中國大陸中低放射性廢棄物之運轉主要依據 1992 年公布的“中低放射性廢棄物質的環境政策”來執行，其主要的運轉政策，包括：

- 儘快固化暫存的放射性廢液

要求其中國大陸境內 30 多年來所暫存的中低放射性廢液應儘快進行固化處理。且原則上不會核准在核電廠內長期暫存廢液，其所產生的中低放射性廢液應及時妥善固化。

- 限制中低放射性廢棄物固化體的暫存年限

核能電廠所產生的中低放射性廢棄物固化體，僅能在廠內貯存 5 年。

- 建造區域中、低放射性廢棄物處置場

於中低放射性廢棄物相對集中的地區，興建中低放射性廢棄物處置場，以處置該區域內或臨近區域內之中低放射性廢棄物。處置場的管理機構應相對獨立且財務上獨立核算。

中國大陸各核能電廠所產生之中低放射性廢棄物乃以水泥固化後暫存在廠內之貯存廠房內，然後再送去處置場進行處置。

中國大陸對於核能發電以外的放射性應用所產生之放射性廢棄物則是以省為基礎，在各省設立臨時貯存設施以貯存這些放射性廢棄物。至 2006 年 12 月底止，共已興建 28 座省級放射性廢棄物臨時貯存設施及一座貯存廢射源之集中式貯存設施。這些貯存設施共已接收 1,300,000 kg 放射性廢棄物。

目前中國大陸已有兩座中低放射性廢棄物最終處置場，第一座位於甘肅省之西北處置場(如圖 10)，第二座為北龍處置場(如圖 11)。

問題與回覆重點摘錄如下：

1、安全評估報告主要是以工作人員接收劑量分析為主，而環境影響評估報告主要是針對一般民眾之接收劑量分析為主。

2、大陸的環境評估報告在初期可研階段或是興建階段所關注的內容，與台灣的環境影響評估內容相似，主要在論述開發行為對於環境的影響，而放射性的影響評估主要是在後期。



圖 10 西北處置場所堆置之中低放射性廢棄物混凝土桶



圖 11 中國大陸北龍最終處置場

- 3、環境評估報告之鑽孔情節主要是發生在被動監護期，有人到處置場上方進行鑽孔，而取出了廢棄物體產生直接暴露的情節。
- 4、生物圈傳輸的資料庫主要是參考 IAEA 的報告，不過大陸也有放射性生態試驗室，也會去建立一些轉換因子。

2.2.2.5 主題五：核種遷移-北山地下水中銻的膠體行為研究

簡報由中國原子能科學研究院副研究員周舵先生進行簡報。簡報內容摘述如下：

伴隨核能事業發展，不可避免地產生大量高放射性核能廢棄物，其對環境和人類建商構成了潛在的威脅。因此，安全處置放射性核能廢棄物已越來越引起人們的關注。目前世界公認的較安全處置方法是深地質處置，以及選擇低滲透的堅硬結晶岩體作為處置場的地質障壁。然而，這種低滲透結晶岩體含有不規則的裂隙，它們構成溶解於地下水中的放射性核種的主要遷移途徑。因此，在評估處置場能否有效地長期隔阻放射性核種遷移的研究中，放射性核種隨地下水裂隙遷移行為的試驗與模擬研究結果極為重要。

1、核種遷移機理

放射性核種在岩石中隨地下水的遷移主要包含三種物理化學作用：

- A、由於水流運動與流體各別質點流速、流向差異而引起的機械彌散與分子擴散綜合作用而導致的核種遷移，稱為水動力彌散。
- B、核種隨地下水的宏觀遷移，稱為對流彌散。
- C、吸附作用，當放射性核種隨地下水流穿被水飽和的岩石孔隙時，由於溶液 pH 值不同，在固液介面上進行不同程度的離子交換，形成岩石孔隙表面對核種的吸附作用，從而減緩擴散進程。

這三種物化作用是研究放射性核種在隙縫岩石中的遷移規律時的主要方向。

2、核種遷移試驗

核種遷移試驗研究從規模和形式上大體可分為三種類型：

- A、岩石樣品示蹤試驗：專門設計的試驗裝置內對岩石樣品進行示蹤試驗，試件的尺寸從數厘米到數米不等，試驗裝置由試件主體部分、壓力傳導系統和數據採集系統三部分構成。
- B、鑽孔示蹤試驗：通過鑽孔對放射性核種在處置場岩中的遷移行為進行觀測，並用不同的觀念模型和數學模型對處置場中核種遷移時空分布規律進行模擬試驗研究。
- C、地下實驗研究：利用廢棄礦坑建立地下實驗室，對放射性核種在地質障壁中的遷移規律進行試驗和模擬研究。

3、裂隙介質中核種遷移模擬研究

- A、深地質處置系統概念模型的建立：研究表明，深地質處置系統一般由工程障壁系統(玻璃固化體、包裝容器、回填材料)、地質障壁系統和生物圈三部分構成，因此，從模擬對象上，高放廢棄物深地質處置系統中放射性核種遷移模擬應包

括工程障壁中核種分解和遷移行為模擬、地質障壁中核種遷移模擬和生物圈中核種遷移模擬。

- B、裂隙岩體核種遷移機理和遷移模型：裂隙岩體核種遷移機理研究主要包括核種在裂隙岩體中的對流、擴散、吸附和阻滯規律的研究，以及核種遷移過程中的水岩作用過程和核種存在、遷移形成研究；根據裂隙介質的特徵，裂隙岩體核種遷移模型可分為單裂隙核種遷移模型、連續或等效連續介質核種遷移模型、裂隙網絡介質核種遷移模型，其中，裂隙網絡介質核種遷移模型是高放廢棄物深地質處置系統中放射性核種遷移模擬研究的發展趨勢。
- C、多場耦合問題：由於高放廢棄物地質處置系統的復染性、核種溶解、遷移行為的模擬是一項復染的系統工程。
- D、數值模擬方法：高放廢棄物地質處置系統中核種遷移介質非均質性和核種遷移條件的復染性，決定了高放廢棄物深地質處置系統中放射性核種遷移的數學模型。

在處置場環境中產生膠體是無法避免的，由於膠體的表面積表較大，且對於銻系核種具有較佳吸附性。因此，天然膠體可能會吸附大量的銻系元素而形成大量假膠體，使核種傳輸量加大。同時，天然膠體一般是帶負電，由於負電的排斥作用，也會使得核種傳輸速率增大。所以，本研究主要關心膠體存在的可能性與穩定性。例如銻元素在實驗室的吸附特性研究中，在離子態具有良好的吸附能力，但是在核污染區現場量測的結果，其傳輸速率卻是遠大於實驗室估算的結果。因此，被認為真假膠體的存在而使得傳輸速率大幅提升。

分析方式是採用不對稱流場場流分離檢測系統，以及電感耦合等離子體質譜裝置，與貝他激光密度分析儀。分析的內容包含膠體顆粒密度、粒徑以及元素組成、貝他電位(表徵膠體年性的重要參數)與流體半徑、另外，也分析不同半徑內膠體吸附的狀況。

實驗結果顯示，由於地下水有較高的離子強度，所以銻是以假膠體的狀態存在。膨潤土膠體在地下水中比在去離子水中的穩定性要下降許多，顆粒密度下降約兩個級數。可以發現北山地下水較高的離子強度對於核種阻滯是有利的。另外，隨著酸鹼值增大也會提高膠體穩定性。

2.2.2.6 主題六：「中國大陸高放廢棄物地質處置選址和地下實驗室前期工作進展」

簡報由核工業北京地質研究院副院長王駒先生進行簡報。簡報內容摘述如下：

經聯合國經濟合作與發展組織/核能機構的研究調查(1999)顯示，宇宙處置、深海溝處置、冰蓋處置、岩石熔化等處置方式，針對費用和風險的考量，是不足取的，或者是

說，由於政策與立法方面的限制，是行不通的。依目前技術而言，最可行之安全處置方案為深地質處置。中國大陸之高放廢棄物地質處置場概念，為地下礦山式工程並將廢棄物埋葬在地下 500~1,000 m 的巨大完整岩石中。(如圖 12, 13)

國際上的共識，高放廢棄物選址階段至處置設施興建，其過程必須興建地下實驗室，地下實驗室有承上啟下的作用，是不可缺少的關鍵步驟。整個高放廢棄物地質處置地下實驗室須整體考量實驗室的功能、圍岩類型、總體定位、開發路線、場址篩選問題及最終興建目標。地下實驗室有下列六大功能：

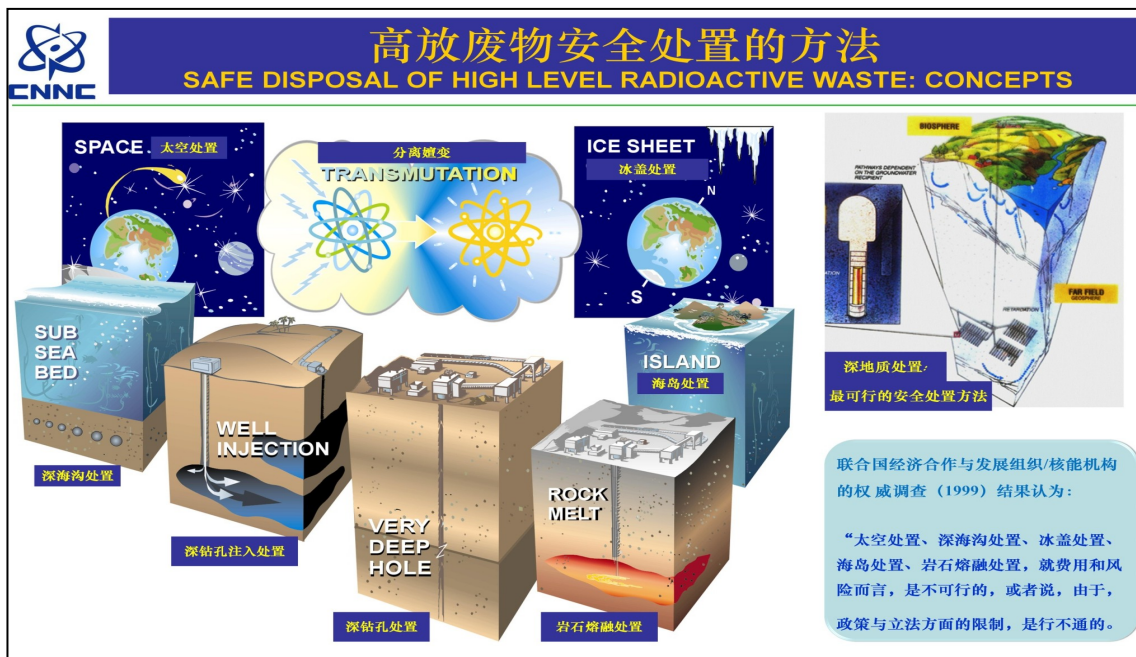


圖 12 高放廢棄物處置方式

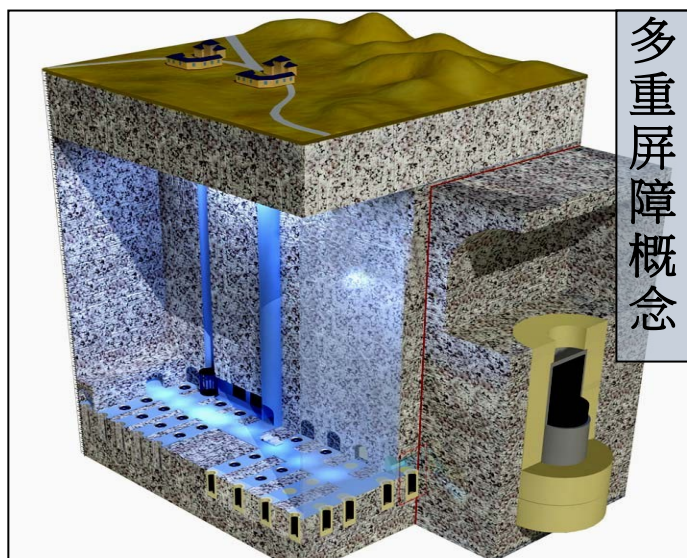


圖 13 高放廢棄物地質處置庫概念模型

- 評估場址深部環境
- 開展 1：1 工程尺度驗證實驗
- 開發處置庫施工、建造、回填和封閉技術
- 全面掌握處置技術
- 為地下現場實驗提供深部實驗巷道、水、電、通風、通訊、安全和應急等後勤保障
- 公眾參觀和培訓人員

地下實驗室圍岩類型，經過大量的研究和工程實踐結果顯示，花崗岩和粘土岩都適合做為高放廢棄物處置場的圍岩類型，綜合考量認為中國大陸首座地下實驗室應當先興建於花崗岩中，之後再考慮在粘土岩中興建。中國大陸首座地下實驗室總體定位，擬興建於高放廢棄物處置場中，其預選區有代表性的岩石(花崗岩)，並位於 300 至 700 m 左右之深度(視現地地質特性而定)，其地下實驗室功能設計將較完備且可擴展，可有效進行高放廢棄物地質處置的研究開發與場址評估之服務，並作為國際先進的科研設施和平臺。

甘肅北山、新疆和內蒙古為地下實驗室三大重點預選區，其預選區之場址篩選和場址評估所獲得之成果，為開展中國大陸首座地下實驗室興建場址篩選之基礎，並依照中國大陸有關處置場的選址要求，選出地下實驗室推薦場址和備選場址(花崗岩場址)，之後由中國大陸國防科工局根據相關程式決策，確定首座地下實驗室最終場址。(如圖 14)

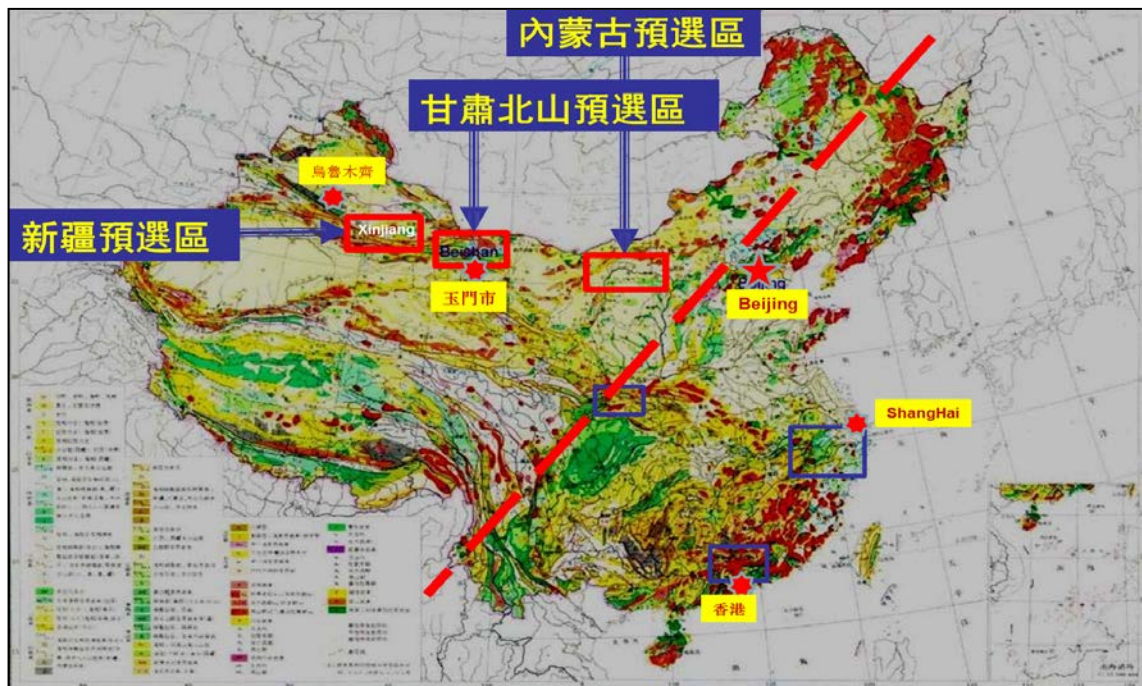


圖 14 中國大陸地下實驗室場址三大重點預選區

北山地理上為人煙稀少的荒漠(降雨量小，僅 70 mm；蒸發量大，達 3,000 mm)，鄰近核設施，具有有利的自然條件，包括：地形平坦，地殼穩定，地震微弱，GPS 監測為鄰近區域位移最小的地方，而且花崗岩體規模巨大、完整、裂隙較少，地下水位低，裂隙含水層少，具低滲透性、低流速及還原等特性，工程條件上為高強度、高密度，且大地應力條件適中。從 2000 年首次鑽孔，迄今已達 22 口鑽孔，總計長度達 6,200 m，最深達 780 m，目前進行第 22 口鑽探工程。(如圖



圖 15 地面地質調查

由深層鑽井的水文地質試驗，經過模擬獲致地下水流速 1 萬年僅遷移 3 m，且流向往西北屬於內流型，不會影響到河西走廊主要人類活動區域。經過以新場花崗岩體為例，假設 500 m 深處置場核種外釋的情節，所模擬得到安全評估的結果，顯示 1 百萬年內沒有核種外釋到生物圈裡。(如圖 16, 17)

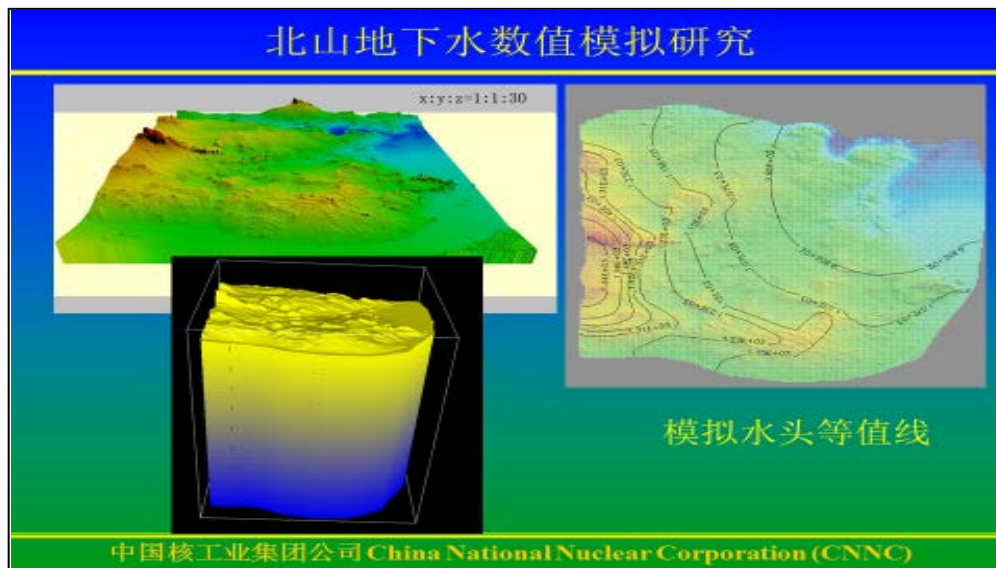


圖 16 北山地下水流場模擬往西北流動

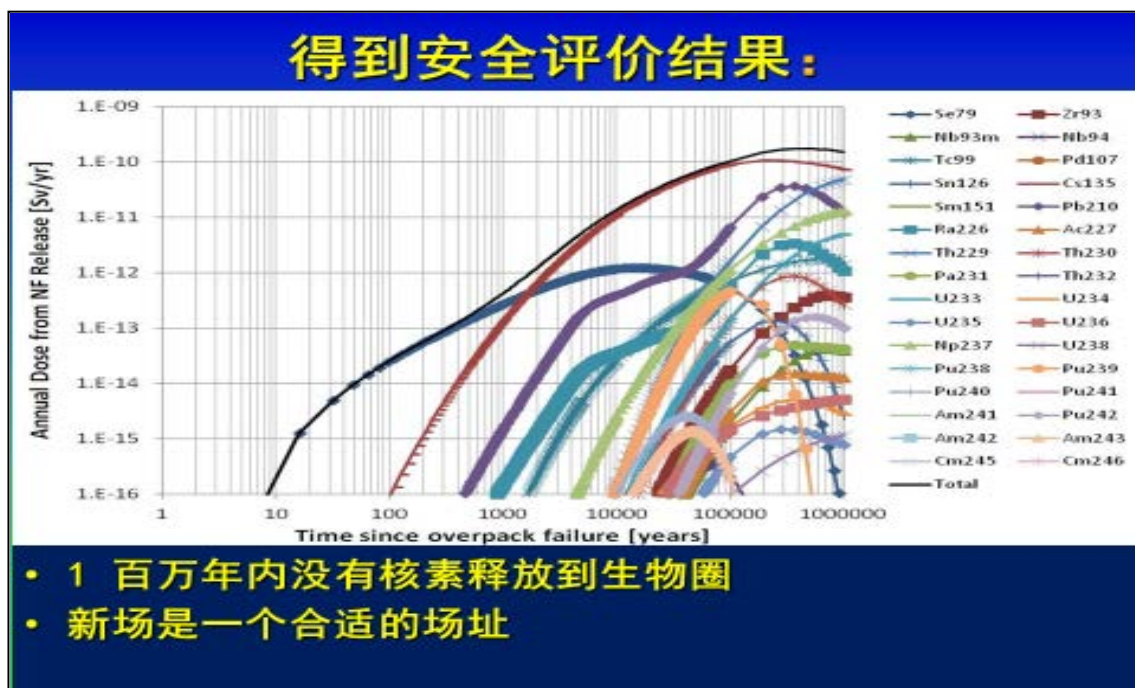


圖 17 北山新場花崗岩體安全評估結果

今年度針對北山十月井斷裂帶，進行北山坑探設施的建置，直徑 3 m、長 150 m，穿過斷層帶，以進行水文地質特性、開挖損傷帶及傳輸特性試驗。目前開挖至 46 m 深，相關試驗可用於設計地下實驗室，並累積工程經驗。過去在北山地區進行過的地質、構造、地球物理、水文地質、地球化學等探勘與試驗，均可用在地下實驗室選址及規劃上(如圖 18, 19)。目前設計特定區域型地下實驗室，為兩豎井及一斜坡道的設置，預計今年年底完成審查後，明年開始進行選址，地下實驗室工程設計則交由核工業第四研究設計

院進行。

高放廢棄物地質處置規劃經過選址、地下實驗室(2020)、處置庫(2050)三階段，選定北山預選區已符合 10 大處置庫選址準則，包括：地質條件有足夠大的地質體、未來自然變化穩定無地質災害、水文地質為地下水徑流長、地球化學具還原性、興建和工程條件具地下工程穩定、人類活動盡量少、廢棄物運輸有利、環境保護有利、土地使用上無可用耕地、社會影響及公眾參與有利等。不僅鄰近現有用過核子燃料暫存的核設施，以及現有再處理實驗場，未來可接收用過核子燃料及再處理後的高放射性廢棄物，進行最終處置。目前尚未選定再處理場位置，但規劃中未來再處理場所產生的高放射性廢棄物，將以專線送至北山地質處置場進行最終處置。

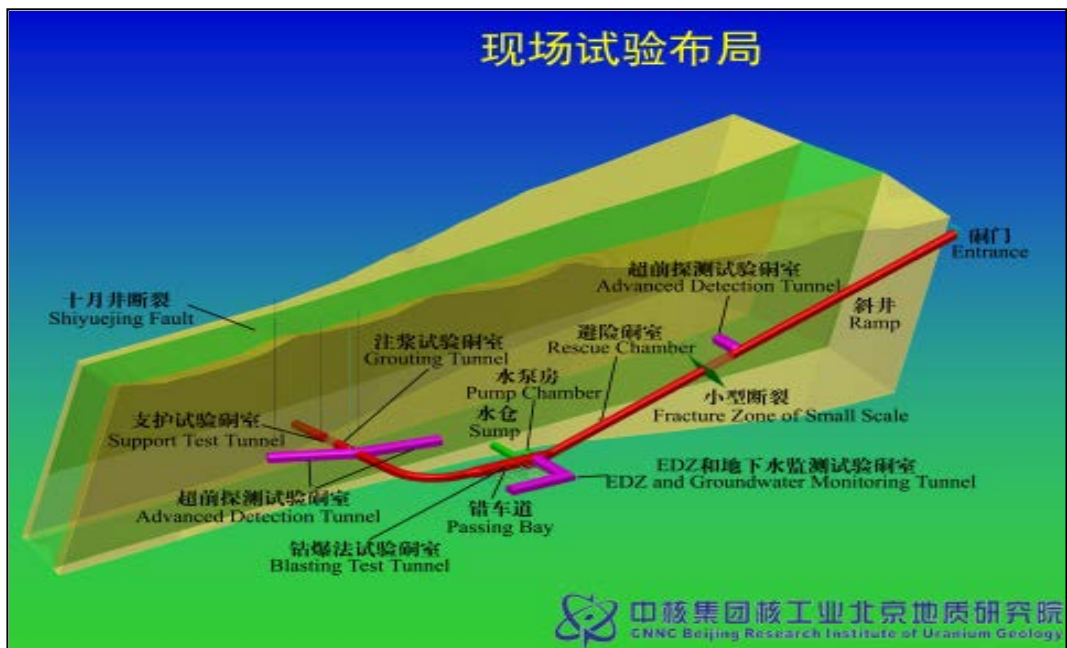


圖 18 十月井斷裂帶坑探設施的試驗配置圖



圖 19 十月井斷裂帶的坑探設施洞口

2.2.2.7 主題七：「中國大陸膨潤土研究進展」

簡報由核工業北京地質研究院副院長王駒先生進行簡報。簡報內容摘述如下：

緩衝/回填材料位於廢棄物罐和地質體之間，是高放廢棄物處置場多重障壁系統中最後一道人工障壁，因此，其材料的選擇和工程特性，對於整個高放廢棄物處置系統就顯得非常重要。其作用為：①工程障壁作用：緩衝圍岩壓力對廢棄物罐的影響，維護處置場結構的穩定性②水力學障壁作用：充填廢棄物容器與圍岩間的孔隙和近場岩石中的裂隙或孔隙，阻止地下水(可能含有腐蝕物質)流到廢棄物罐表面③化學障壁作用：阻滯核種遷移和阻止氧化劑到達廢棄物罐表面，以及阻止放射性氣體和水溶化合物滲漏到圍岩中④導熱作用：傳導核燃料殘餘能量。

膨潤土研究內容包括：①材料的物質成分和結構構造研究②工程物理基本特性(力學、膨脹性、滲透性、傳熱學等)測試技術與參數測定③化學緩衝性能研究(孔隙水化學，以及膨潤土與水反應過程機理、產物和過程動力學)④添加劑和最優配方研究⑤緩衝/回填材料穩定性研究(包括熱穩定性、化學穩定性、抗輻射穩定性和抗礦物相變等)⑥緩衝回填材料熱-水-力-化學耦合作用研究⑦濕熱誘導效應研究⑧高壓成型工程研究⑨回填和封閉技術研究⑩地下實驗室開展的全尺寸工程實驗技術等。國際上該領域的研究工作始於 70 年代中期，G.de Marsily 等首次提出了"在廢棄物周圍建立人工障壁，局部通過附加物理障壁來增強封閉"的觀點，到 80 年代，膨潤土被認為是處置庫緩衝/回填材料的最佳選擇。瑞典、加拿大、日本、瑞士，以及法國等相繼開展了該領域的研究工作，並已取得不少研究進展。核工業北京地質研究院自 1985 年以來開展緩衝/回填材料研究工作，主要科研活動分為(1)廣泛的文獻調研，跟隨國際同行的研究工作(2)1986~1990 參加 IAEA 研究課題"無機吸附劑作為處置庫緩衝/回填材料"研究(3)1990~1994 回填材料膨潤土性質及工程性質研究(4)1994~1996 對全國 94 個膨潤土礦床進行了篩選，確定內蒙古高廟子膨潤土礦床作為中國大陸緩衝/回填材料的供應基地(5)1996~2000 年度，高廟子鈣基膨潤土物質成分、基本物理、水理性能、工程成型性、力學性能、膨脹特性、滲透特性、熱學性能及核種遷移等方面的研究(6)2001 年起，高廟子鈉基膨潤土基本組成、水理特性、力學特性、滲透特性、膨脹特性測試方法研究與分析測試，國外同類研究工作追蹤和文獻研讀。在這一領域，多名科研人員利用 JNC 和 JAREI 的儀器設備進行了膨潤土工程物理特性和核種遷移方面的研究工作，對於緩衝材料的研究起到了極大的推動作用。近 20 年的發展，造就了一支高素質研究隊伍，掌握了研究思路和主要研究方法並腳踏實地作了許多具體的研究工作。在中國大陸充足經費的資助下，這一領域的研究工作完全有把握獲得國際一流的研究成果，確保高放廢棄物安全處置。

圖 20-22 為 8 月 28 日參訪團至和工業北京地質院參訪時，與地質院王駒院長等交流討論、參觀地質院緩衝材 THMC 實驗室與礦岩展覽室之照片。



圖 20 參訪核工業北京地質研究院(1/3)



圖 21 參訪核工業北京地質研究院(2/3)



圖 22 參訪核工業北京地質研究院(3/3)

2.2.3 參訪中核清原工程環境公司(西北處置場)

中國大陸目前有兩座營運中的中低放射性廢棄物處置場：北龍處置場及西北處置場。北龍處置場為民用處置場，是由廣東核電集團公司及齡澳核電公司投資興建，而由廣東大亞灣核電環保有限公司負責經營。西北處置為國防用處置場，是由中國核工業集團公司投資興建，而由中核清原環境技術工程有限責任公司負責經營。

該場位於甘肅省玉門、嘉峪關以北約 40 km（東經約 97 度、北緯約 40 度）的中核集團 404 廠區內。該廠為中國大陸早期軍事核工業重鎮，設有用過核子燃料再處理廠與原料鈾煉製廠，廠區遼闊且人煙稀少。

由於該場位於戈壁荒灘，腹地遼闊，可多次擴充貯存容量，故可配合中國大陸核電發展採分期興建。該場於 1994 年獲國家核安全局核准興建、1995 年動工、1999 年開始正式運轉。第一期工程設計容量為 200,000 m³ (100 萬桶)，首期容量為 60,000 m³ (30 萬桶)。目前完成的首期第一期容量為 20,000 m³ (10 萬桶)，占地 143,000 m²，許可接受總活度為 3.2×10^{16} Bq (86.5 萬 Ci)。(如圖 23-25)



圖 23 參訪西北處置場留影



圖 24 西北處置場地質解說



圖 25 西北處置場、國家廢棄放射源集中貯存場

場區共有 18 個處置單元，另有廢棄物接收站、工程車庫、分析實驗室、行政大樓與獨立之廢射源儲存庫(目前存放全國廢射源共 79,949 個)等設施。(如圖 26)

該場採近地表處置設計：

- (1) 處置單元建於地下深度 7 m 基坑內，每座單元尺寸 64 m (長) × 23 m (寬) × 5.3 – 5.7 m (深)。
- (2) 基底為夯實的礫石、細沙與粘土層，並沒有混凝土底板。牆壁為厚達 30 cm 的鋼筋混凝土結構，每一單元約可處置 15,000 桶。
- (3) 廢料桶間或與牆壁空隙用砂石或水泥漿填充。裝滿廢棄物的單元上部回填黏土，再覆蓋鋼筋混凝土澆製之頂蓋，覆蓋總厚度 2 m 之六層不同結構之砂、石與泥土後，復原地貌。

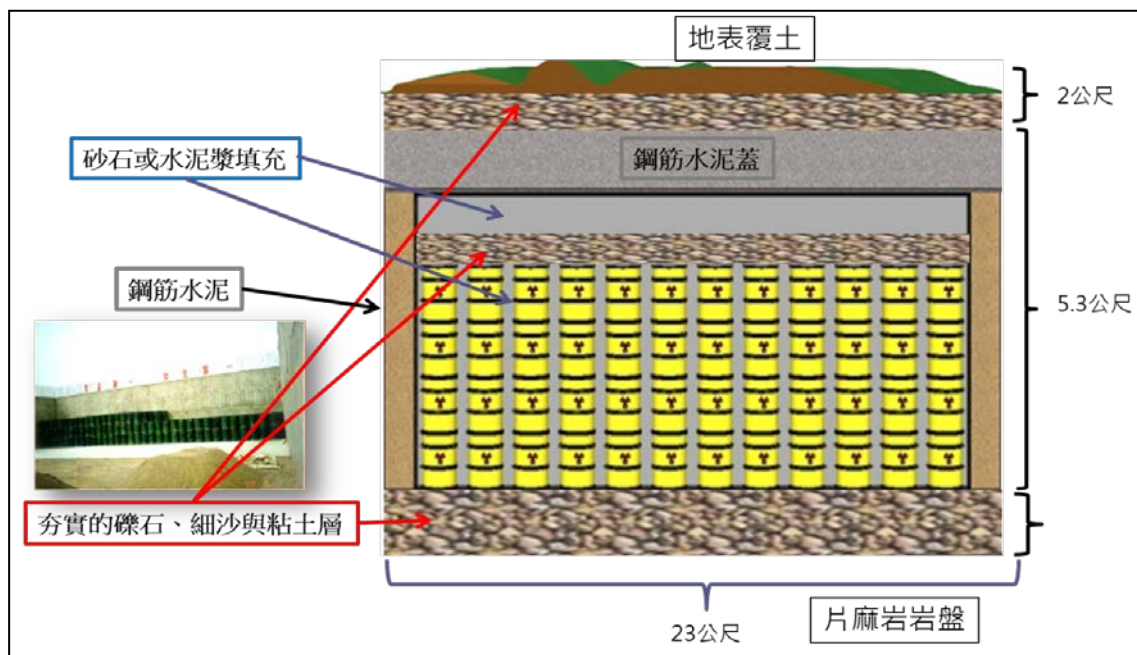


圖 26 西北處置場貯存單元示意圖

該場位於祁連山前傾斜平原前緣，介於飲馬場北山東側與寬灘山北側，屬典型戈壁荒灘地貌。當地雨量極少($62 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)、但蒸發量極大($3,577 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)，附近沒有固定地表水系，對於核種外釋具有極佳阻延效果。

場區岩盤屬於震旦系變質岩(片麻岩)，地質年齡約在侏羅紀早期(1.8 億年)，表層屬於第三系(6,500 萬–260 萬年)與第四系(260 萬年以內)沉積層，厚達 55 m，主要為黏土層，處置單元的基底也坐落於此。由於黏土對於絕大多數放射性核種有極佳吸附能力，是阻延核種最好的地質材質。

場區外圍受飲馬場北山–寬灘山環抱，係來自新疆阿爾金山支脈。寬灘山北緣屬重要的阿爾金斷層東段(走滑斷層)範圍。所幸這個重要的北-西向逆衝斷層，在場區附近屬於非活動斷層，從寬灘山的地質取樣分析，最新的構造活動發生在中更新世後(約 100 萬年)、全新世(約 1 萬年)前，算是附近地質最穩定的區域。

另一方面，由於當地地層滑動(北-西向)位移速度約為 $0.9 - 2.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，已經是阿爾金斷層帶最緩慢的地區。

甘肅河西走廊是中國大陸重要地震帶之一，根據甘肅西北部自 1970 年以來規模 4 以上地震震央與斷層位置統計，大部份地震震央因與寬灘山分屬不同斷層結構，對場區影響有限。

該場區因：(1) 蒸發量遠大於降雨量；(2) 場區外圍受飲馬場北山–寬灘山環抱，拘束地下水流向與深度，所以場區沒有常流的地表水系、表土未飽和滲透係數很低、且地

下水含水層很深，對於阻延核種外釋效果極佳：

- (a)場區沒有固定常流地表水系，使地表水接觸廢棄物機率大幅降低，也減少因表面逕流造成核種擴散的機會。
- (b)表土未飽和滲透係數極低，可大幅延後地表水接觸廢棄物時間。
- (c)根據地質調查資料，處置單元基底為厚達 13 - 20 m 的黏土層，地下水水位低於 30 m，且含水層深達 29 – 39 m。因此，大多數關鍵核種很可能在接觸地下水前即被黏土吸附而固定。
- (d)地下水主要走向為 NE18o，換言之即使地下水流攜走核種，也是帶向更杳無人跡的深山野嶺，有效降低環境衝擊。
- (e)處置單元基底屬深厚黏土層，對於核種吸附能力甚佳，可有效遲滯核種遷移。
- (f)場址人文地理條件良好：附近人口稀少，位於軍事工業廠區內，戒備森嚴且場區遼闊，可有效防止闖入事件。
- (g)初步評估結論：西北處置場址特性符合 IAEA 法規安全要求，且處置場設計合理。

西北低、中放固體廢棄物處置場是在今(2011)年 2 月獲得環保部運轉許可證。處置場核定的運轉條件和總量及活度限值如表 2 與表 3。

表 2 西北處置場核定的運轉條件

持證單位	中核清原環境技術工程有限責任公司
位置	甘肅省礦區
處置方式	採用近地表填埋
建造	1995
試運轉	1999
運轉許可	2011
總量及活度限值	核種的總活度為 3.2×10^{16} Bq，其中 α 核種的平均活度濃度不得超過 3.7×10^5 Bq/kg (已處置廢棄物 $3,310 \text{ m}^3$ ，總活度 8.69×10^{12} Bq)

表 3 西北處置場允許處置的放射性核種總量

序號	核種	總活度(Bq)
1	銻-90	1.5×10^{16}
2	銻-137	1.7×10^{16}
3	鎳-63	3.4×10^{12}
4	碳-14	6.3×10^{11}
5	鎔-99	1.3×10^{11}
6	碘-129	5.2×10^8
7	銻-239	8.4×10^{10}
總計		3.2×10^{16}

三、心得

- (一)中國大陸近年來陸續整備放射性廢棄物的管理政策、組織架構、低/中/高放射性廢棄物最終處置之法規、監督管理與技術研發，藉由這次技術交流，均有較完整性的瞭解。本次技術交流主題亦整合放射性廢棄物管理與技術發展、地質調查、核安工程、核種遷移與輻射防護等理論與應用，可掌握大陸整體在放射性廢棄物管理等各方面的發展，以及其參與 IAEA、歐盟組織等國際原子能科技與環境的最新動態與議題之瞭解。
- (二)中國大陸於高放廢棄物地質處置場址評價研究中，已篩選出 6 個預選區，並確定甘肅北山為首選預選區域，透過 22 個鑽孔(及 5 個正在施工鑽孔)之研究，建立完整的花崗岩場址定性與定量評價技術方法。擬於 2020 年完成地下實驗室建置，已於 2015 年 6 月 26 日召開北山坑探設施開工儀式及彈藥開挖第一砲，地下實驗室將提供深層地質數據，以及作為工程設計和安全評估之場址服務，其他重要研究亦可提供：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。中國大陸總負責研發單位為核工業北京地質研究院，表示願意分享相關北山地質資料，若可促成雙方在此合作契機，可為我方以往建置的工程設計與安全評估技術注入強心針，具體應用場址案例達到技術驗證。
- (三)本所於用過核子燃料最終處置之工程設計與安全評估技術研發，已長期奠定良好基礎，本次技術交流，中國大陸對於我方已建立一套系統性工程設計與安全評估流程具備高度關注，積極建議雙方可就此方面技術開發與輻射防護等理論與應用合作，共創兩岸於高放最終處置之安全。

四、建議事項

- (一) 建議國內持續與國際交流放射性廢棄物管理、地質調查、核安工程、核種遷移與輻射防護等理論與應用技術發展，強化研發成果應用推廣。
- (二) 中國大陸於高放技術發展總負責研發單位為核工業北京地質研究院表示願意分享相關北山地質資料，可促成雙方合作契機，助於我方工程設計與安全評估開發之技術驗證。
- (三) 中國大陸對於我方已建立一套系統性工程設計與安全評估流程具備高度關注，建議雙方可就此方面技術開發與輻射防護等理論與應用合作，共創兩岸於高放最終處置之安全。