

**出國報告（出國類別：實習）**

**赴美國核廢棄物管制分析中心實習  
放射性廢棄物處置管制技術**

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：曾漢湘 薦任技士

派赴國家：美國

出國期間：中華民國 93 年 7 月 15 日至 12 月 04 日

報告日期：中華民國 94 年 2 月 15 日

## 摘 要

放射性廢棄物處置一直是核能應用國家所重視的議題，技術先進國家對於處置方式的研究已具共識，即以地質處置方式將之從人類生活環境做永久的隔離。以管制者立場應審慎評估，未來的處置計畫執行結果是否能務實地達到長期安全功能的要求。尤其台灣地區位處板塊構造聚合地帶，地質作用複雜，且地形、水文及氣候條件特殊，對處置場功能與安全影響甚鉅。

美國在放射性廢棄物處置方面，即建立完整之管理架構足供借鏡。由能源部進行的雅卡山計畫，即將進入申照階段。核管會亦在核廢棄物管制分析中心的技術協助下，進行了嚴謹的申照前預審作業。期間對地質處置所涉領域，包含地質與地震、水文地質、地球化學、地工技術與材料科學及整合性的功能評估等，進行能源部與核管會之雙邊技術互動與審查評估，對處置技術關鍵議題逐項檢討與提出嚴謹的協議，以確保能源部於執照申請時能提出高品質的申請文件，整個處置計畫執行的管制作業經驗相當豐富。台灣地區的處置條件與美國可能有程度上的不同，但美國安全管制的架構與機制則值得學習。

此次赴美國核廢棄物管制分析中心實習，由美國高放射性廢棄物處置的發展與現況、雅卡山計畫、核廢棄物管制分析中心之組織與研發、高放處置管制審查作業及現地檢查、雅卡山場址野外地質及相關設施的參訪等進行為期約五個月的研習。對即將進行的國內處置申照前預審作業及未來執照申請的審查作業將能提供務實的管制經驗。

關鍵詞：放射性廢棄物、最終處置、雅卡山計畫

## 目 錄

第一章、目的	1
第二章、過程	2
第三章、心得	4
一、 美國高放射性廢棄物處置的發展與現況	5
二、 雅卡山計畫	12
三、 核廢棄物管制分析中心之組織與高放處置計畫	24
四、 高放處置管制之審查作業及現地檢查	41
五、 雅卡山場址野外地質及相關設施研習	54
第四章、建議事項	71
附件一：實習規劃	
附件二：核廢棄物管制分析中心簡介	
附件三：核管會第 154 次核廢棄物諮詢委員會議程表	

## 第一章 目的

為因應國內放射性廢棄物最終處置的推動，近年來放射性物管局積極進行相關之法制完備作業，並推動完成放射性物料管理法（以下簡稱物管法）的立法，使得管制作業在法制基礎下得以順利進行，後續更將積極進行相關處置管制規章及法規指引之制定，及管制技術的提升與執行，以達到放射性廢棄物處置安全管制的目標。據此，精進管制技能乃為當務之急。

台電公司依物管法的規定，將進行最終處置作業的執行，在原子能委員會核定低放處置計畫書後，目前進行低放處置場選址作業，另外用過核子燃料處置計畫書亦於審查中。無論低放射性廢棄物或用過核子燃料，在處置作業的推展上，都將歷經處置場選址、場址特性調查、處置場安全與功能分析評估之前置作業。本次實習規劃目的即在於提升上述處置作業歷程的安全管制技術，尤其地質處置所涉及許多領域之技術，包含地質與地震、水文地質、地球化學、地工技術、材料科學等，以及相關之品保作業。在整個處置系統中，各項技術環環相扣，須由管制者的角度，提昇整體處置管制技術的了解，以利未來處置場建造及運轉申請時，能達到安全審查之管制目標。

美國在放射性廢棄物處置方面，無論是低放射性廢棄物或是高放射性廢棄物均有長足經驗，對於立法機關、管制機關、執行處置單位、標準的建立及技術的支援，均已建立完整且足供借鏡的管理體系。美國核能管制委員會（以下簡稱核管會）職司核能安全管制，在放射性廢棄物處置管制作業方面，已建立嚴謹的制度。而針對處置技術，亦經由核廢棄物管制分析中心協助進行了一、二十年的研發與審查管制計畫。此次研習，藉由與美方管制單位的技術及經驗交流，將有助於對未來處置申照前預審作業及申照審查等管制工作，提升管制技能及順利推展管制業務。

## 第二章 過程

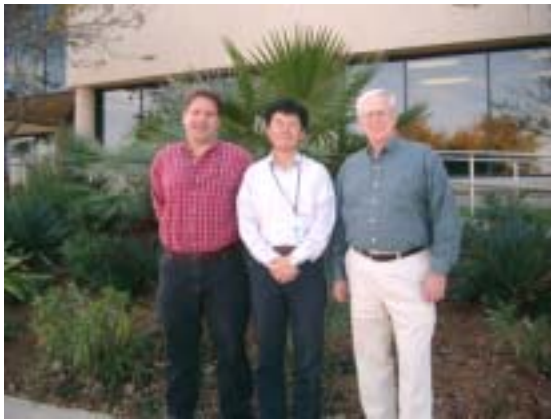
本次赴美國核廢棄物管制分析中心 (Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, CNWRA 照片一) 實習時間於 93.07.15 至 92.12.04, 期間約 5 個月, 屬台美民用核能合作會議所規劃之人員交流訓練合作項目, 基本規劃如附件一。此次在職訓練, 被安排在 CNWRA 地質及地球物理部門 (Geology and Geophysics Section), 由部門經理 Dr. H. Lawrence McKague 及資深研究員 Dr. John A. Stamatakos (照片二) 負責全程研習、訪問的安排與聯繫作業。期間亦安排了一次雅卡山預定地質處置場址之野外地質實習及設施參觀, 由 Dr. John A. Stamatakos 陪同進行現場介紹與討論。並赴核管會總部進行短期之高放處置管制計畫研習, 管制作業的研習由高放處置場安全管制處 (Division of High-Level Waste Repository Safety) 資深地質師 Dr. Philip Justus 負責規劃, 期間亦參觀核廢棄物諮詢委員會 (Advisory Committee on Nuclear Waste, ACNW) 會議的進行。本次出國行程如表一。

表一、在美行程表

時 間	地 點	內 容
93.07.15~10.08	核廢棄物管制分中心 CNWRA ( San Antonio, TX )	1. 管制技術及相關法規研習 2. 相關研發資訊研討
93.10.09~10.14	美國高放射性廢棄物預定處置 場址 ( Yucca Mountain site, NV )	1. 由 CNWRA 資深研究員 Dr. John A. Stamatakos 陪同進行 雅卡山地區野外地質實習 2. 處置場址設施參觀
93.10.15~10.16	核廢棄物管制分中心 CNWRA ( San Antonio, TX )	1. 管制技術及相關法規研習 2. 相關研發資訊研討
93.10.17~10.27	美國核管會高放處置場安全管 制處 ( Rockville, MD )	1. 參觀核廢棄物諮詢委員會議 2. 研習高放處置管制計畫 3. 研習雅卡山計畫
93.10.28~12.04	核廢棄物管制分中心 CNWRA ( San Antonio, TX )	1. 管制技術及相關法規研習 2. 相關研發資訊研討



照片一、  
美國德州西南研究所核廢棄物管制分析中心 (CNWRA)



照片二、  
研習期間攝於核廢棄物管制分析中心，右為 Dr. H. Lawrence McKague，左為 Dr. John A. Stamatakos

### 第三章 心得

本次奉派赴美國核廢棄物管制分析中心實習放射性廢棄物處置管制技術，為期約五個月，規劃目標包括用過核子燃料及高放射性廢棄物處置相關法規與管制技術的在職訓練，並參與核管會對能源部所提資料的審查評估作業，以及參訪包括預定處置場及其它相關設施。研習期間適值能源部準備提送雅卡山預定處置場執照申請，相關的調查及前置核照預審作業大致告一段落，同時因處置計畫多涉敏感問題，在能源部未正式提送申請文件之前，部分技術性資料的審查評估作業，基本上不便提供做為研習的材料。是故研習期間重點方向為瞭解美國高放射性廢棄物處置的發展與現況、雅卡山計畫的執行、核廢棄物管制分析中心之組織與計畫管制之協助角色、美國高放處置管制之審查作業及現地檢查經驗，並實地參訪高放處置預定場址，進行相關處置場安全與功能議題的研討。本次研習規劃在未來管制業務之執行有極大的助益，研習心得擬以下列各章節分別說明之。

- 一、 美國高放射性廢棄物處置的發展與現況
- 二、 雅卡山計畫
- 三、 核廢棄物管制分析中心之組織與高放處置計畫
- 四、 高放處置管制之審查作業及現地檢查
- 五、 雅卡山場址野外地質及相關設施研習

## 一、美國高放射性廢棄物處置的發展與現況

### 美國高放處置歷程

自 1940 年代中期，美國即開始產生高放射性廢棄物，包含反應器之用過核子燃料，及國防計畫所產生的高放射性廢棄物。前者主要貯放在電廠冷卻池以及 NRC 所核照的設施中，後者則貯放在政府的官方場址中，共計分部在 39 個州的 131 處暫時存放設施。這些貯放設施並非打算用來作為長期的核廢棄物隔離，而且許多設施已經存滿，其它的貯放空間也陸續達到飽和。

美國希望能有一個永久解決高放射性廢棄物的處置方法，因為這類放射性廢棄物，其半衰期長達數萬年之久，目前這些暫貯設施部份坐落於人口密集地區，及河流湖泊與海岸邊。這些地表上的結構物必須持續地維護，以及必要之安全防禦，以保持放射性廢棄物的安全隔離。若否，則將可能因設施的破壞毀損，致使放射性物質釋放到地下水及鄰近水體中，而影響附近的環境及居民的安全。

1950 至 1970 年代開始進入處置的初步研究階段，同時發展技術及建造民用核電廠。1957 年美國國家科學院(National Academies of Sciences)建議採取地質處置方式，並研究地質處置場之概念。

科學家研究了各種不同的方法，以進行用過核子燃料及高放射性廢棄物的處置，包含外太空處置、冰層處置、海底處置、再處理與轉化及遠距離島處置等方式。並在一世界性科學的共同看法下，認為最好的地方就是將此放射性廢棄物放置在一個深地層的工程設施中，亦即目前所稱之地質處置場(Geologic Repository)。

國際科學團體均認為地下處置對隔離放射性廢棄物是最佳的選擇，並且同意深地層處置是技術可行，能提供廢棄物處置，維持公眾安全，避免入侵，防止廢棄物轉移造成危害，並且可以達到短期及長期的環境保護。目前考慮以地質處置的國家除美國外，還包括比利時、加拿大、中國、芬蘭、法國、德國、日本、西班牙、瑞典、瑞士及英國等。他們依恃對核能的信心，已投入重大的資金在放射性廢棄物的管理計畫上。儘管在這些國家的計劃上有些許差異，他們均支持以深層地質處置為隔離高放射性及長半衰期廢棄物的最佳方法。



1970年代至1983年，進行國家場址的篩選，以確認潛在處置場址，自1978年起首次進行雅卡山(Yucca Mountain)地區的鑽探工作。美國在研究深地質處置的選擇方面，科學家考慮了許多不同的地層介質，即處置母岩(host rock)，包括岩鹽(Salt) 火山岩(Volcanic rock)如玄武岩(Basalt)及凝灰岩(Tuff) 結晶岩(Crystalline rock)如花岡岩(Granite)、沉積岩(Sedimentary rock)如黏土(Clay)及頁岩(Shale)。

1982年美國國會通過核廢棄物政策法(Nuclear Waste Policy Act of 1982)以期安全永久處置高放射性廢棄物，法案的制定乃基於「我們有社會責任來處置我們所產生的放射性廢棄物」這樣的一個原理。這個政策法建立了美國高放處置的程序，並且確認高放處置為國家責任，聯邦政府需負責推動永久處置，而電廠及核廢棄物持有者應承擔處置經費，此外亦建立了州政府及公眾的參與機制，明訂處置場選址建造及運轉時間表，以及設立核廢棄物基金，其來源為電廠及核廢棄物持有者所負擔，以確保執行處置作業之相關經費充足，並命令能源部應研究出一個適合的地質處置場址。

同時，能源部依核廢棄物政策法成立民用放射性廢棄物管理局(Office of Civilian Radioactive Waste Management, OCRWM)，負責用過核子燃料及高放射性廢棄物最終處置計畫。目前該機構主要計畫包含下列三項：

1. 計劃管理：負責品保、計畫規劃與行政作業、計畫管理與整合、對外溝通互動、人力資源及預算。
2. 雅卡山計劃：執行科學及工程調查以決定是否適合作為核廢棄物處置場。
3. 廢棄物接收與運輸：發展廢棄物接收、貯存及運輸系統，並包含與其它廢棄物持有者及電廠接洽，以及進行國際廢棄物管理計畫。

1983年美國能源部選擇了九個潛在處置場址(potential repository site)，如圖1-1，以作為第一個處置場：

1. Vacherie Dome, Louisiana (岩穹)
2. Richton Dome, Mississippi (岩穹)
3. Cyprus Creek Dome, Mississippi (岩穹)
4. Deaf Smith County, Texas (層狀岩鹽)

5. Swisher County, Texas (層狀岩鹽)
6. Davis Canyon, Utah (層狀岩鹽)
7. Lavender Canyon, Utah (層狀岩鹽)
8. Yucca Mountain, Nevada (凝灰岩)
9. Hanford, Washington (玄武岩)



圖 1-1 1983 年能源部選擇九個候選場址位置圖

1985 年，美國能源部公佈了當中的五個潛在場址的環境評估，1986 年確定此五處場址，認為適合進行研究，並進一步向總統建議其中三處為候選場址，包括 Deaf Smith County, Texas、Yucca Mountain, Nevada 及 Hanford, Washington。當時的美國總統雷根批准了這項建議案。

### 處置作業現況

由 1987 年美國國會通過的核廢棄物政策法修訂案(Nuclear Waste Policy Act of 1982, as Amended)，在美國高放射性廢棄物處置的發展進程中是為關鍵。此修訂為美國核廢棄物處置計劃作了很大的轉向，為考量多處候選場址同時進行場址特性調查，將需投入相當巨額的經費，並且可能繼續延誤處置作業的進展，國會在這個修訂法案中除了雅卡山候選場址外，所有場址的調查行動均在修定案生效

後九十天內停止，並且能源部只進行雅卡山候選場址的場址特性調查(site characterization)，而且內華達州有資格開始與能源部進行利益協定，同時亦成立核廢棄物技術審查委員會(Nuclear Waste Technical Review Board, NWTRB)，由十一位委員組成經由總統任命，對能源部用過核子燃料及高放射性廢棄物處置計畫，提出獨立及專家的技術審查。本法案有關高放射性廢棄物處置程序詳圖 1-2。在此程序下，雅卡山計畫之管理架構詳如圖 1-3。

參與場址適合性調查研究的單位包含美國地質調查所(USGS)，國家實驗室(National Laboratories)，及其它能源部技術承包機構(Contractors)。依該法案，能源部部長在經過場址特性調查及相關聽證程序後決定場址的建議，同時必須告知內華達州政府及議會，並且等候至少三十天，始得向總統提送場址建議。在此之前部長亦得因場址之不適合的決定，停止所有場址特性調查活動，並告知國會及內華達州政府與議會，進行場址恢復，並在六個月之內向國會報告進一步行動的建議。若部長做成場址建議的決定，並提送總統核定，總統必須在六十天內裁定，若總統同意此場址可進行建造許可申請，則向國會提送場址建議。內華達州政府及議會亦得參與決定，若有異議，得以在總統向國會提出建議後的六十天內，向國會提出不同意。依該法案，地方提出異議，即提升由國會決定，國會必須在九十天內做成場址選定同意的決定，否則即為不同意。若州政府及議會無異議，則能源部即可向核管會提出執照申請。

1988 年至 2002 年期間，繼核廢棄物政策法修定案明確指示進行雅卡山預定處置場址(proposed repository site)後，美國投入大量的科學家及工程人員進行場址特性調查。1988 年能源部公佈場址特性調查計畫(site characterization plan)，定義雅卡山預定處置場址之調查工作範圍，計畫包含了數百個地質鑽孔及科學調查。1990 年能源部向公眾開放雅卡山科學中心(Yucca Mountain Science Center)，1994 年開始進行雅卡山探測研究隧道(Exploratory Studies Facility Tunnel)的開挖，以隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)工法，經過三年的開挖完成了五哩的探測隧道。1995 年能源部公佈準備進行雅卡山場址環境影響說明書(Environmental Impact Statement)。1998 年至 2002 年能源部所屬的民用放射性廢棄物管理局(OCRWM)，主導雅卡山場址試驗設施各項研究，包含試驗坑道及地表現地試驗等，以了解雅卡山場址之天然與工程特性。

2002 年一月能源部部長史賓塞亞伯拉罕(Spencer Abraham),親臨雅卡山場址現場視察,二月 14 日即向布希總統提出雅卡山場址建議案,並獲得布希總統的支持提送國會。四月內華達州州長 Kenny Guinn 向國會陳遞不同意此場址建議案的官方決定,但眾議院(House of Representatives)仍支持這項建議,最後於七月 9 日由參議院(Senate)通過雅卡山場址之建議案。布希總統並於七月 23 日簽署同意雅卡山場址申請案。目前由能源部所屬民用放射性廢棄物管理局進行雅卡山處置場興建之執照申請,並預定於 2004 年十二月正式提出申請。

在筆者於十二月返國前,獲 CNWRA 同仁告知相關申請時程可能產生變化,例如聯辦法規所規訂處置管制的安全期限為 10,000 年,經州政府及相關團體提出質疑,認為廢棄物包件失敗並釋出放射性核種的尖峰期,並非在此 10,000 年的管制期限內,可能導致傳輸至人類可及環境的最大接受劑量將在 10,000 年後,要求重新評估。於是能源部的申請提送時間將因此延後,預計至少半年至一年以上。這將牽涉到法規的修訂決策,以及處置場設計與安全評估的執行內容。

後續俟能源部正式提送申請,核管會即進行核照審查(Licensing Review),依法(NWPA,1987 Subtitle A, sec.114(d)),核管會必須在三年內完成審查,並決定是否核發雅卡山預定處置場建造執照,視情況最長可再延 12 個月(需書面向能源部及國會說明)。預計 2008 年,若核管會核准,能源部即開始建造,並於 2009 年更新執照申請,以開始接收廢棄物,若順利取得運轉執照,將可依原規劃時程,於 2010 年開始進行廢棄物置放(Emplacement of Waste)處置作業。以美國處置計畫投入之人力與資源,以及申照前預審作業之審慎方式,是有可能依時間表開始進行處置運轉作業。現況進展甚受各國重視,高放射性廢棄物處置計畫並非只有科學研究及工程設計,其仍舊有民眾接受度,中期貯存與處置介面,長期功能安全評估,以及政治考量,在此完成處置場進行處置運轉前的尾聲階段,美國仍將持謹慎態度因應。未來的 2010 年至 2110 年是廢棄物處置運轉與功能確認期,預定於 2110 年預定之運轉執照進行修訂以開始封閉作業及長期監管(Monitoring in Perpetuity),此為假設置放作業開始後 100 年,亦可能長達 300 年。此期間廢棄物是可再取回的(retrievable),其彈性將由後代子孫來決定。

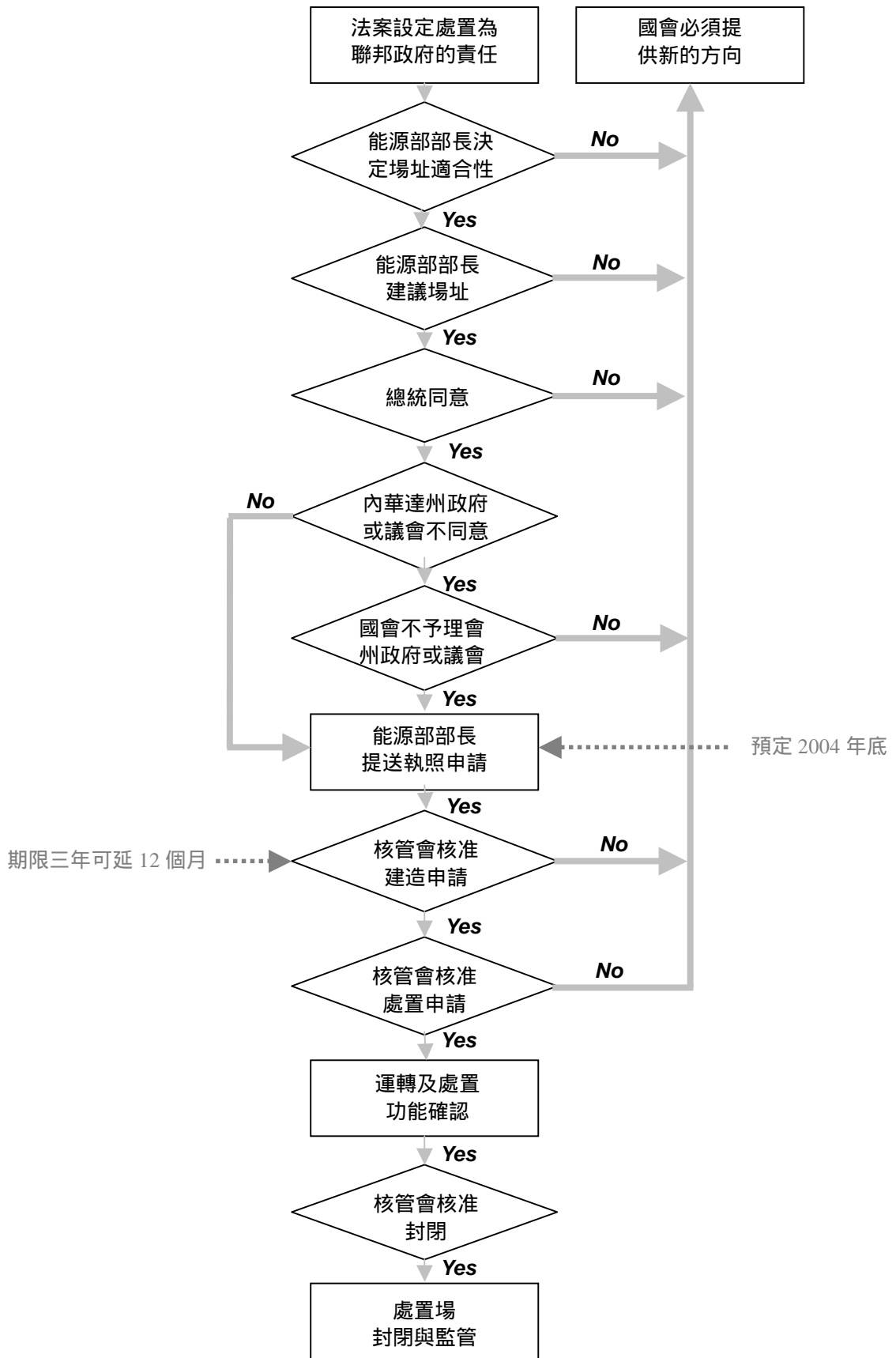


圖 1-2 核廢棄物政策修訂法案之高放處置程序

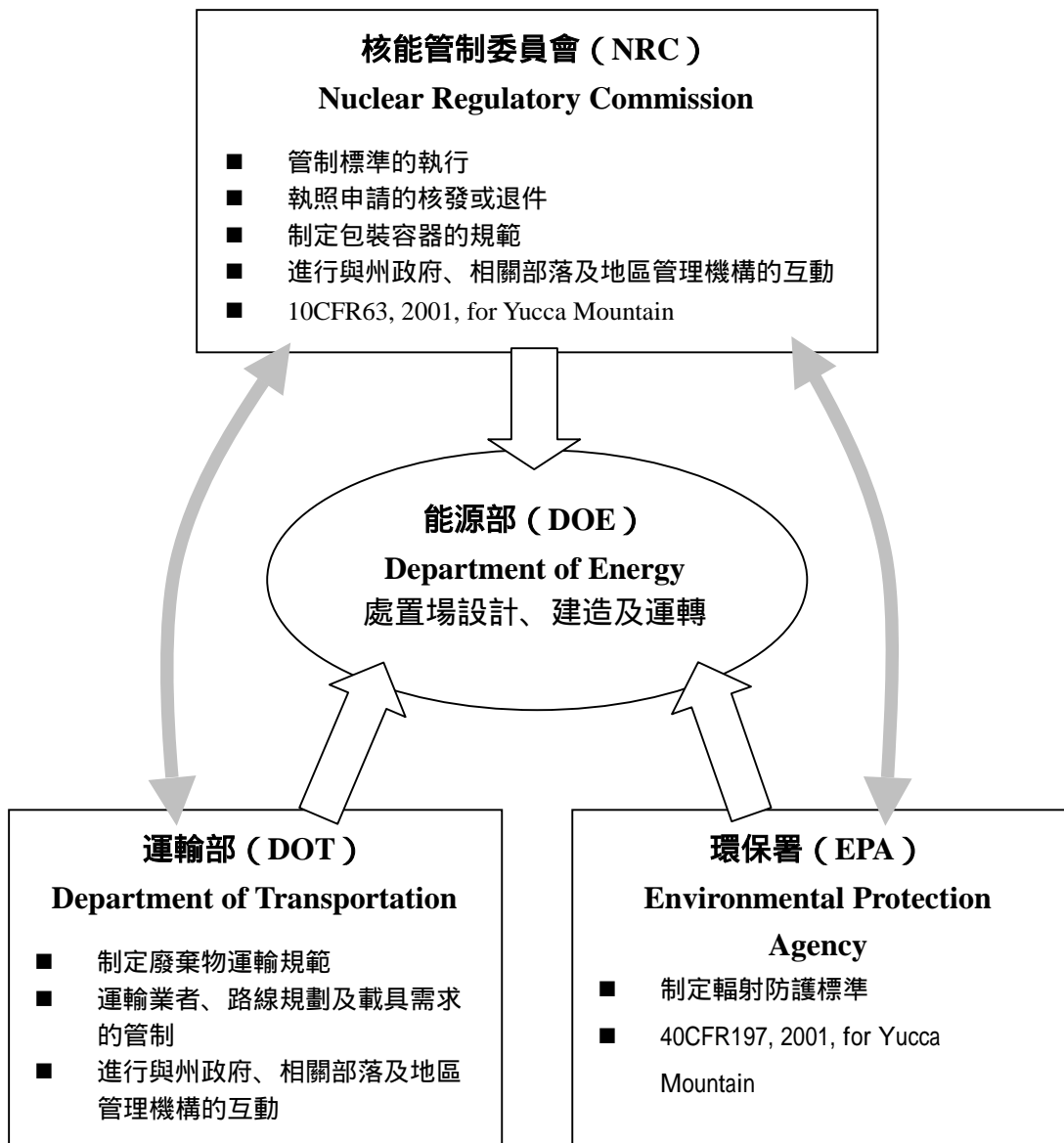


圖 1-3 美國雅卡山計畫管理架構

## 二、雅卡山計畫

### 計畫的決定

1986 年美國能源部部長向總統建議三處候選場址，包括 Deaf Smith County, Texas、Yucca Mountain, Nevada 及 Hanford, Washington。當時的美國總統雷根批准了這項建議案。而美國國會隨即於 1987 年通過了核廢棄物政策法修訂案 (Nuclear Waste Policy Act of 1982, as Amended)，指定能源部停止其它場址調查，只進行雅卡山候選場址的場址特性調查(site characterization)。

對於雅卡山場址的決策，在積極面的考慮應是此地區的幾個天然特徵 (Natural features)：乾燥的氣候(dry climate)、偏遠(remoteness)、穩定地質(stable geology)、深地下水面(deep watertable)及位於封閉集水盆地區域(closed water basin)，且該區為聯邦政府所擁有，並鄰近內華達測試場址(圖 2-1)，已歷經數十年屬於數個核子相關之計劃區。對於選址、調查、建造與運轉在天然及人為環境具有先天優良之篩選條件。

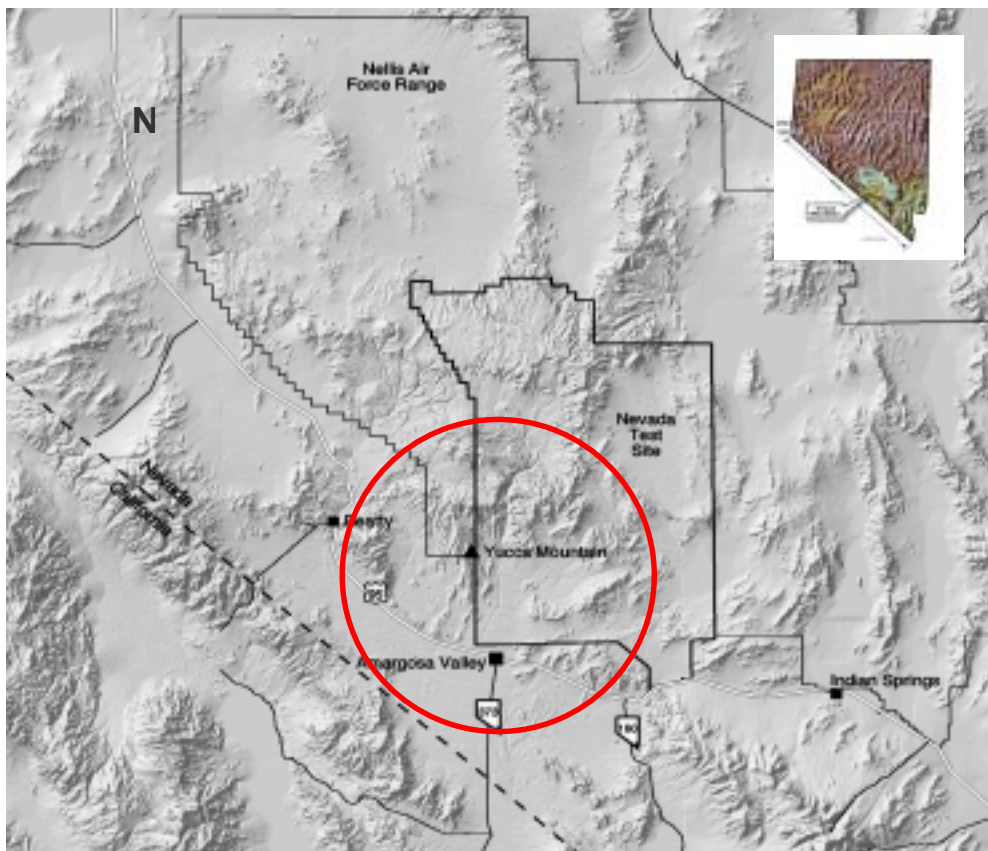


圖 2-1 雅卡山計畫之地理位置及地形

關於此計畫，追溯自美國能源部進行潛在場址篩選期間，於 1978 年即開始對內華達雅卡山地區進行研究，以決定其是否適於作為美國第一座地質處置場址，處置用過核子燃料及高放射性廢棄物。歷經約二十五年，於 2002 年七月 23 日布希總統簽署同意能源部進行以此場址建立安全處置場。

計畫的執行是由能源部於 1982 年依核廢棄物政策法案(Nuclear Waste Policy Act of 1982)成立之民用放射性廢棄物管理局(OCRWM)所主導進行，大致已完成所有調查評估與設計工作。2002 年至 2004 年是本計畫準備提送建造執照申請(License Application)之階段，原預定 2004 年十二月向核管會提出申請。該地區位於遙遠的內華達州沙漠地區 Nye County，距東南方的拉斯維加斯約 100 哩。

### 處置規劃概念

基本上，世界各國都採深層地質處置概念，以多重障壁方式進行高放射性廢棄物處置。而各國大多因天然地質條件的差異，在處置場址的篩選及處置場概念(Repository concept)上會做調整，並搭配以適當的工程障壁設計。

除前述雅卡山地區的天然特徵外，處置場的設計概念(圖 2-2)乃是即使有部份的破壞，仍能夠維持正常功能，並且在同一時間內，不可能有任何其它破壞。廢棄物將嚴密地封裝在耐久性的容器中，即廢棄物包件(Waste package)，然後再將此容器置放在深層凝灰岩的地下坑道中。並以抗腐蝕金屬所製作的水滴屏蔽(Drip shields)置於廢料包件的外圍。處置坑道上方大約有厚 300 公尺的完整岩盤，來限制可能到達坑道的入滲地下水。即使有水滴入坑道內，水滴屏蔽及抗腐蝕的包件仍將保護廢棄物達數萬年之久。

由於採多重障蔽處置方式，理想的天然特徵及審慎工程設計為長期安全處置的要素。以下為雅卡山場址天然特徵主要考慮的內容：

1. **表土層**：雅卡山場址位於沙漠地區且氣候乾燥，其表土與地形特徵有助於限制大量的水入滲地下，即使短暫降雨，亦將隨地形往斜坡下游排除，僅少部份在表層蓄積短暫時間隨即蒸發。



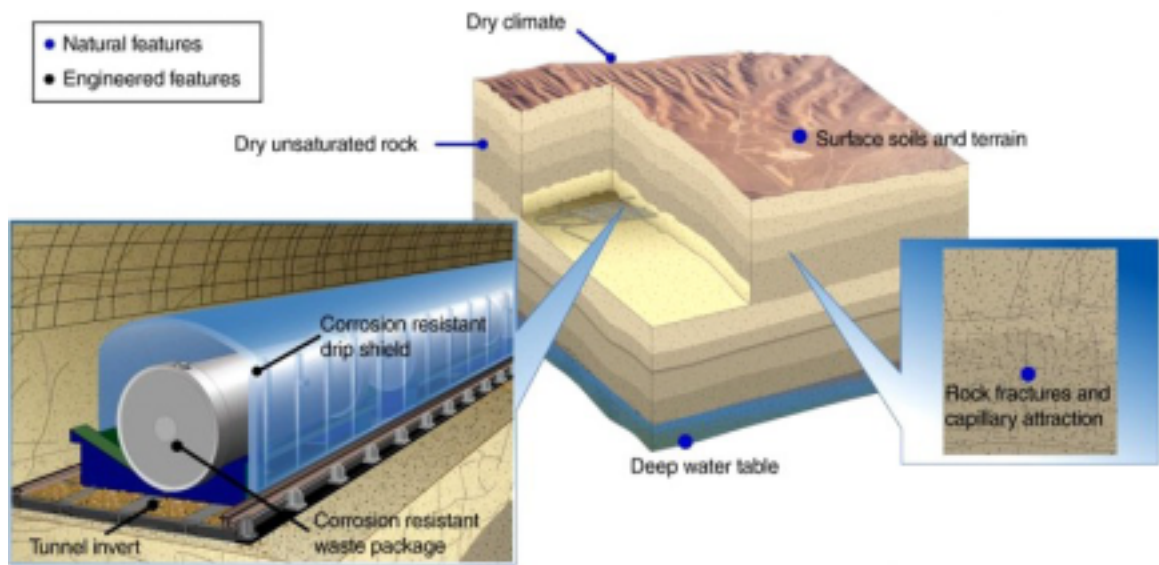


圖 2-2 雅卡山計劃之處置場概念圖

- 2.處置坑道上方岩盤：場址地層由凝灰岩構成，含熔接凝灰岩(welded tuff)及非熔接凝灰岩(unwelded tuff)兩種，且有不同之孔隙(porosity)及節理裂隙(joints)分布，由於地下水面(groundwater table)相當深，約達 600 公尺深，所以處置坑道(約 300 公尺深處)位於未飽和帶(Unsaturated zone)，處置坑道上方岩盤大致以多孔隙少節理之非熔接凝灰岩為主，其孔隙及裂隙未完全為水所充填，相對較具有減緩地下水入滲的功能。
- 3.處置坑道之岩盤節理裂隙：對於一般位於地下水飽和地層而言，地下施工開挖常因節理裂隙成為地下水通路，而造成滲流水甚至湧水的問題。在雅卡山處置場址的設計概念正好相反，由於處置坑道位於低孔隙多節理熔接凝灰岩之未飽和層，雖同樣可成為地下水通路的節理裂隙，則成為提供處置坑道地下水排除的途徑。又由於未飽和層中毛細現象的作用力，任何水接近較大的開口，如坑道，都將傾向於停留在孔隙或裂隙中，並不會匯集流入坑道內。這樣的一個特性基本上是較特殊的考慮條件，對處置場而言，目前的評估還是正面的。
- 4.處置坑道下方岩盤：條件與處置坑道上方岩盤相同，大致為多孔隙少節理之非熔接凝灰岩，並且坑道位於地下水面上方約 300 公尺，亦是未飽和層，其孔隙及裂隙未完全為水所充填，同樣具有減緩地下水流速的能力，將限制任

何藉由水傳輸的放射性核種移動到地下水以下。再者，存在於岩石中的一些礦物(如沸石, zeolite)將吸引且抓取許多類型的放射性核種，阻滯其遷移速率。

5.飽和岩盤中的地下水：地下水位於處置坑道下方約 300 公尺，由於孔隙及裂隙均為地下水所充填，地下水能流動於岩盤中。依過去的初步研究，地下水在飽和帶岩盤中的流動非常緩慢。實際上，從雅卡山下方飽和岩盤的地下水要移動到人們可達的井位，平均約需數百年,如此，飽和岩盤仍能減緩及限制放射性核種借地下水傳輸的移動。實務上，要考慮的問題是該地區之地下水模式，包含地形、降雨、地質構造及厚沖積層(Alluvium)與岩盤分布等都是影響因素。以該地區天然特徵而言，前段未飽和層的地下水移動是最緩慢的，俟進入地下水後，地下水移動將變為快速。

依能源部的研究，雅卡山場址地區之天然特徵，已足以提供公眾高度的保護。但為確保處置場的安全，聯辦法規要求(10CFR part63.113, part63.311)工程障壁的設計，將與天然環境結合，以確保廢棄物的安全隔離至少達一萬年之久。

處置區的設計包含一系列的處置隧道(此隧道有時稱為 emplacement tunnel, drift 或 emplacement drift)開挖至深地層的完整岩盤中，其工程設計的特徵即包含水滴屏蔽(drip shields)，廢棄物包件(waste packages)及隧道仰拱組件(tunnel invert)。以下為雅卡山場址工程障壁(圖 2-3)主要考慮的內容：

1.處置隧道的配置與設計：包含超過五十個以上放置廢棄物的水平隧道，這些隧道將開挖在地下 300 公尺處的完整岩盤，且平均大約在地下水面上方 300 公尺，隧道直徑為五公尺，長為 600 公尺，由鋼支保、岩栓及鋼線網支撐，以儘量避免發生岩石落盤時損壞主要之工程設施。基本上，地下處置隧道的位置及方位應考慮的因子包括：

- 上覆岩層及土層的厚度
- 岩盤本身的特性,如孔隙率等一般物理性質
- 岩盤中裂隙的位置
- 與地震斷層可能的距離
- 地下水面的深度
- 岩體中的應力

處置隧道的地下配置設計，目的在於管理廢棄物本身所產生的熱，此熱將會影響岩盤中的水氣，隧道中的溼度，以及處置場內的其它條件。再者，隧道設計也期使進入隧道內的水能藉由重力向下並從處置場圍岩裂隙排除。

## 2.工程特性的設計：主要工程特性包括：

- 廢棄物包件(Waste Package)：其壽命設計至少達數萬年之久。依能源部目前的研發設計，廢棄物包件將包含兩厚層金屬圓柱筒(cylinder)，一層包覆於另一層之內，內層圓柱筒由不銹鋼製作，提供結構的強度(structural strength)，外層圓柱筒由鎳合金製作,提供高度的抗腐蝕性。
- 水滴屏蔽(Drip Shield)：由抗腐蝕金屬製作，以保護廢棄物包件免於遭受入滲水滴的腐蝕及落盤岩塊的損壞。
- 仰拱組件(Invert)：功能主要在於支撐隧道內之廢棄物包件，包括兩部份，即廢棄物包件下方的鋼架及填充的碎屑火山岩，以減緩及限制放射性核種遷移至下方岩石中。

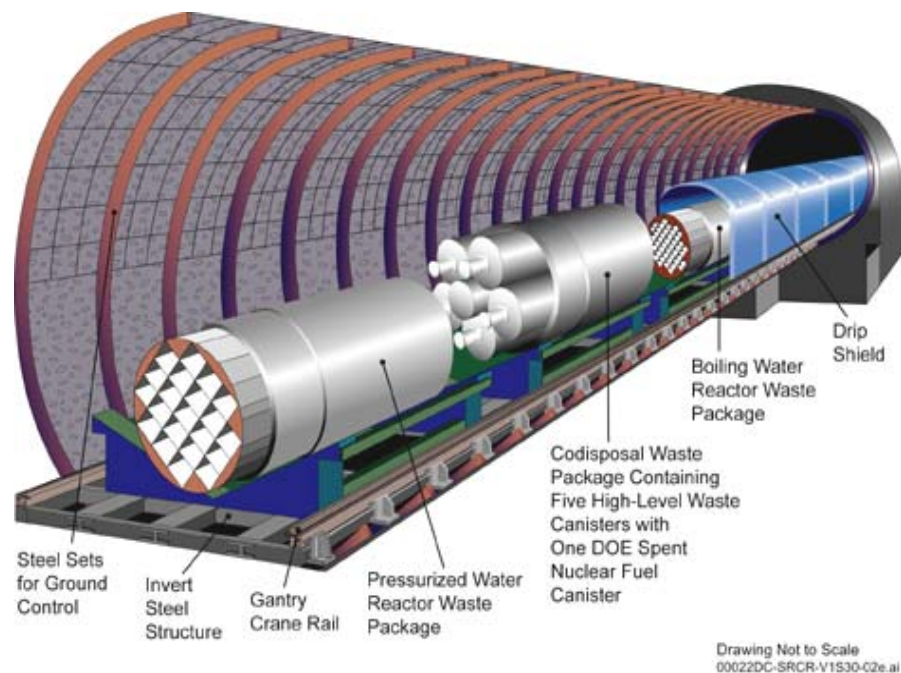


圖 2-3 主要工程障壁設計

在抗腐蝕材料(corrosion-resistant materials)的選擇方面，能源部建立分析及選擇材料的程序，對於腐蝕的長期影響因子，如熱(heat)、溼度(humidity)及水化學

(water chemistry)等條件，進行有條理的測試並選擇能夠承受處置隧道環境的材料。根據這些研究，擬出各種不同材料經過數萬年的腐蝕速率(corrosion rate)。再者，材料的選擇，亦將考慮應力的承受、操控置放作業的耐用性、可能的再取出要求，以及廢棄物產生高溫的耐受能力。

另一項重要設計的規劃因素，乃是這個處置設施未來將要處置的廢棄物有多少量。到 2003 年，美國從核反應器所累積的用過核子燃料大約為 49 仟噸，而且將有 22 仟罐(canisters)的固化高放射性廢棄物須於處置場進行處置。能源部的比喻是，將這些核廢棄物彼此緊靠頭尾相接的堆疊起來，所涵蓋的面積大約是一座足球場(football field)的大小，且高度達約 10 呎。到 2035 年這個數量將提升至 105 仟噸。依目前的法規(NWPA-1987, Subtitle A, SEC.114(d))，將有為數 70 仟噸的用過核子燃料及固化高放射性廢棄物置放於雅卡山處置場，這意味著美國未來可能須有第二座處置場，在能源部向核管會提送執照申請後至處置場開始運轉(2007-2010)期間，能源部部長將視需要，而再向總統及國會提出第二座處置場需求之報告。基本上環境影響說明書所考慮的廢棄物總量是以目前運轉中的核反應器所累積出來的量來規劃。

### 未來功能與安全的評估分析

對於雅卡山預定處置場址未來功能(Performance)的評估，負責執行的能源部先進行相關經驗與能力的建立，所採方法主要涉及四個步驟：

1. 透過廣泛的科學研究，並蒐集有關不同處置場特徵及作用的資料數據。
2. 利用前述資料運用電腦模式運算，了解不同條件如何影響個別的處置場特性。
3. 發展模式，就所有處置場的天然及工程特性，發展這些特性在數萬年間的行為模式。
4. 分析電腦模式的運算結果，以評估處置場的安全，以及提升各項處置場特性對安全貢獻的認知。

藉由上述步驟，能源部的科學家以持續不斷地循環執行，不斷更新蒐集之資料，分析不同條件的影響，再修正所發展的模式，如此以增進知識認知的深度，加強處置場的設計，以及提升其評估安全的信心。

由於國際上還未有任何一座高放射性廢棄物處置場達到運轉階段，並確認其

功能與安全的經驗。上述能源部的評估方式乃是以現有科技及認知，不斷反覆作業，以此來建立其對雅卡山預定處置場址安全分析的觀念與方法。在建立此分析邏輯的同時，亦積極進行雅卡山場址地區的特性調查，獲取預定處置場區域及場址的各項資料數據，以進行下列步驟，執行處置場未來安全的評估。

1. 調查與蒐集資料，建立雅卡山場址特性及作用的科學參數資料。
2. 依據上述資料，發展雅卡山處置場特性及作用的電腦運算模式。
3. 整合上述發展模式，成為處置場運作的全系統模式。
4. 執行能反映長期作用及功能之類比研究，範圍涵蓋美國境內與國際合作，並與電腦模式的結果進行比較。
5. 由研究了解所發展的模式如何反映關鍵資料的改變。
6. 研究的資料及結果亦透過科學的同業單位進行分析。

由上述步驟研究分析逐層建立理解的提升(圖 2-4)，直到對處置場安全的信心有足夠的程度。如此，才能進行下一階段的工作，而這樣的長程作業也才能建立一個正常運作的處置場。

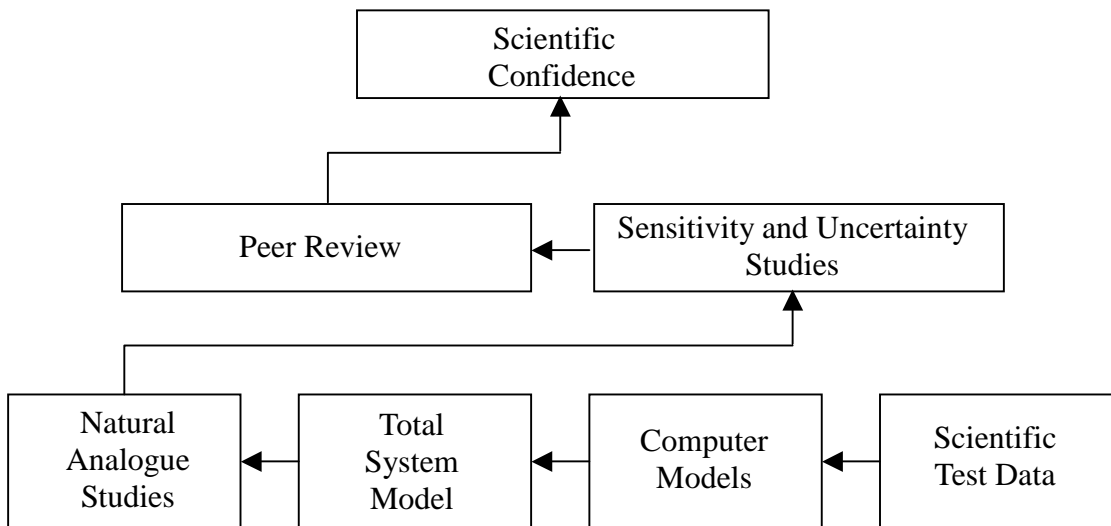


圖 2-4 處置場安全的評估步驟

專業人員廣泛地執行相關科學研究，包含氣候(Climate)、地質(Geology)、水文(Hydrology)及化學(Chemistry)等，利用這些研究的資料進行電腦模式分析，來顯示雅卡山天然環境的各種不同形貌，這些研究的資料也進一步用來設計天然系統的測試，以及評估對不同工程特性下，天然環境如何影響所使用的材料。

歷經二十幾年，專業人員依循著既定的步驟持續進行。所謂的「現有科技及認知」，實際上是不斷地改進與更新的結果，即使期間歷經了篩選程序、國會決議至目前抵定即將提送執照申請，執行者在研發的大方向是不變的。這也是專業人員信心建立之依據。

專家的知識認知隨著電腦分析設備的提升同時精進，他們利用科學的資料發展出數百種電腦模式，以模擬處置場不同的地質、水文、物理及化學作用。接者再合併這些分析模式成為更整合的模式，以分析處置場將面臨的主要作用，包括：

- 氣候變遷
- 雅卡山的表水下滲
- 處置場位置上方水的移動
- 處置場隧道中水的滲流
- 隧道環境
- 工程特性方面的影響
- 水本身的影響
- 經由隧道地面放射性核種的傳輸
- 經由處置場下方岩盤放射性核種的傳輸
- 地下水中放射性核種的傳輸
- 對人及環境的潛在影響

再者，各項作用過程的模式(process models)亦用以測試不同的擾亂事件(disruptive events)，如可能影響處置場安全的地震活動及火山作用等。

聯邦法規(10 CFR part 63.114)要求能源部需評估完整的處置場功能，為此所建立的電腦模式工具稱為「全系統功能評估」(Total System Performance Assessment, TSPA)，藉此模式評估處置場每一部份對安全的貢獻。能源部的專家由分析評估結果確認哪一部份進行改善，每一次模式的運算就增加一次更新的資料，以利於建立新的測試來改善其模式，同時也藉由核管會專家進行獨立分析提

出不同意見，經由技術互動討論做更適當之修正。這是一項重複持續的過程，藉此來增進處置場安全與功能的設計。

美國環保署(EPA)依法(NWPA, subtitle A, sec.121(a))對於雅卡山場址訂定了放射性廢棄物對人類及環境的輻防標準，限制個人年輻射劑量不得大於 15 毫侖目，這個限值是根據對社會可接受風險的考慮，在美國，一個人的平均背景輻射劑量大約是 360 毫侖目/年。在雅卡山處置場開始運轉及接收廢棄物之前，能源部應向核管會提出驗證(Demonstration)處置場能符合環保署的標準達一萬年的法規期限以上。

上述全系統功能評估，即計算人類生活在此區域所接受的輻射劑量，其考慮預期發生的狀況，包括輕微的地震即氣候變遷，也考慮不可能發生的危害事件，如主要地震及火山活動等。為評估處置場的安全，聯辦法規要求能源部計算損害事件的劑量及事件的可能性，所分析的發生事件稱為擾亂事件情節(disruptive event scenarios)，在正常條件的期望下，加入此擾亂事件情節的結果，計算其所接受的劑量，而這個結果與環保署規定之劑量及雅卡山地下水標準進行比較，應充分低於環保署的標準。

有關一般情節(normal case)，處置場之設計在預期發生事件之狀況及條件下，如氣候變遷及地震發生，以目前之分析，其平均年劑量對個人生活於接近處置場區，將低於 1 毫侖目/年。

有關擾亂事件情節(disruption event scenarios)，指非常不可能發生之事件，但有可能造成最不利的影響，這樣的情節有兩類，第一類分兩種，即火成作用入侵(igneous intrusion)，地下岩漿入侵處置場區，並破壞廢棄物包件。另一種是岩漿經由處置場區而發生火山的噴發。第二類為地震，指罕見的大規模地震。聯辦法規(10 CFR part 63.114)要求選擇破壞事件之合理過程，對於功能安全評估的事件，是只考慮大於萬分之一機會在一萬年內發生之機率事件(即發生機率大於  $10^{-8}$ /year)，而經過機率及其過程結果的分析，雅卡山場址之功能安全評估的事件應將火山作用及地震列入功能安全評估中。

對於人為入侵情節(此為假設情節:如發生有一個人在雅卡山鑽孔取水,並鑽至廢棄物包件)，分析結果是在一萬年內不可能發生此假設情節，即使可能亦將是在三萬年以後，且若發生，其所受劑量亦低於 1 毫侖目/年。

## 對不確定性的評估分析

前述有關所謂的「現有科技及認知」是由不斷改進與更新的結果，但對於未來仍是存在許多未知的狀況。基本上，能源部對於全系統功能評估，有信心能反映他們對於雅卡山處置場廣泛的認知，以及未來可能影響處置場安全的狀況。但無論如何，超過數萬年的所有狀況是否發生是難以預料的，甚至要評估目前可能發生的地震都有複雜的不確定性。所以仍需採用一些可靠的方法來確保未來處置場仍能保護人類及環境，即使是一些不可預知的事件發生亦然。這方面美國的做法是採取保守設計及長期監控方式,以下列幾種方法因應：

1. **多重障壁**：如前述處置規劃概念,放射性廢棄物處置場應包含至少一天然障壁及一工程障壁(10 CFR part 63.113(a))，以避免不可預知的狀況發生。並且在核照過程中，能源部應驗證確認這些障壁功能。從嚴格管制的角度來看，多重障壁對放射性廢棄物的隔離是非常重要的。
2. **保守假設**：對於一些事例，有些數據資料是不可能從確定的條件下獲得，所能利用的就是保守的假設。尤其是無法正確預測地下水如何接觸到廢棄物，及溶解出放射性核種，並從廢棄物包件中將其帶出，以及其途徑過程的各項作用等。所以在其分析的模式中便需採取較保守的考慮，即使能源部的評估結果及核管會的獨立分析結果都不見得正確，最後還是採最保守的模式分析結果。
3. **類比研究**：雖然電腦模式能快速及顯示處置場對於條件改變下最可能的回應，但還是沒有真正的方法去直接測試或去看見，事件如果發生，是否正如預期，是一項質疑及挑戰。美國在這方面投入了相當多的研究，包含國內及國際合作，由真實的環境提供許多範例，如氣候、地質、及水文等可以影響處置場的作用及過程的參考實例。研究人員稱此為實例類比(examples analogues)。地質名言：「The present is the key to the past」，藉由現今地質形貌及作用的研究可了解過去遙遠地質年代的狀況，所以說現今是過去之鑰，這樣的一個觀念其實也能應用在未來。對於大的時空規模(即使僅是數萬年)，無法在有限的時間或空間獲得驗證者，類比研究的成果不但可以提供評估分析及設計的最佳參考，也是提升公眾信心的佐證資料。
4. **物理實驗**：另一項確保電腦模式正確性的方式是利用物理實驗修正其計算。



例如在可能的處置場岩盤中進行地下加熱，以觀察熱的效應及水的移動，並且進行不同工程材料之物理試驗，於較長時間及較大的條件範圍，即現地大型試驗。藉以了解在雅卡山處置場的長期功能。

5. **敏感度研究**：該研究目的在了解哪些是關鍵數據資料，這些關鍵資料的改變如何影響電腦模式的結果，藉此，有助於決定哪些作用是最主要影響處置場的安全，並且利用此敏感度研究的結果使分析模式更理想，以改進處置場的相關設計，且得以選擇進一步的科學作為來加強對處置場安全的認知。

6. **外部審議**：所謂外部審議(external review panels)亦即進行獨立的專家審查及監督座談會議。能源部進行雅卡山計畫期間所邀請及提供之審查及會議包含：

- 邀請國際相關科學及工程背景之專家獨立進行不同計畫之審查，並舉行國際技術座談會。
- 於申照前作業(pre-licensing)階段與核管會人員進行技術互動，就關鍵技術議題進行溝通及初步審查。
- 提供專款予州及地方科學監督團體(NWPA, subtitle A, sec. 116(c))，進行相關研究調查，並進行公開討論會議。
- 由國會成立核廢棄物技術審查委員會(NWTRB)，為一獨立的技術審查團體，以評估雅卡山計畫的研究及結果在技術及科學上的有效性。委員會一年兩次向國會及能源部部長報告其結論及建議，並且指出外部團體的顧慮。

7. **功能確認及監控**：處置場的設計包含再取回(NWPA, subtitle A, sec.121(b)(iii) & 10 CFR part63.111(e)(1))，且為持續確保處置場安全，能源部對於處置場的監控從廢棄物置放開始至少五十年，而處置場的設計亦容許後代子孫決定是否封閉處置場，或持續監控至三百年以上，並且在處置場關閉並封填之後仍將有一個監控計畫。此封閉前的監控相關作為，將著重在提昇對處置場安全最重要作用的認知，例如滲漏作用及腐蝕作用等。同時也包含處置場環境的測試，例如岩石性質、化學等，及修正電腦模式預測結果的數據資料。在處置場關閉之後，監控的重點則落在環境監測取樣與分析。

雅卡山計畫執行至今，由相關人員的訪談認為美國能源部對未來處置場安全的評估相當自信，而且這個計畫仍在持續蒐集與分析新增加的資料當中。未來核管會若核發建造及運轉執照，能源部將持續運轉期間進行科學研究，對於蒐集新資料的規劃，將依循其內部評估，監督團體意見，反應當時的知識認知狀況，以及持續降低不確定性的最佳方法。

其整體信心建立的一個重要因素，乃在於整個處置場的發展過程中，有完整的管制架構，這個計畫經歷並依循了核管會的申照前作業階段的程序要求，在執行者與管制者之間形成了技術及責任的共同分擔模式，同時也在民主的機制下，即使地方有所意見，聯邦政府亦得經由國會的運作方式始能確定處置場址，爭取了最大多數的認同，並回饋予地方。

### 三、核廢棄物管制分析中心之組織與高放處置計畫

#### 機構的成立與組織

核廢棄物管制分析中心(Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, CNWRA)位於德州聖安東尼市(San Antonio, TX)西郊，為西南研究所(Southwest Research Institute, SwRI)所屬十一個主要技術研究單位中的一個。1987年，由核管會為解決高放射性廢棄物地質處置場相關技術與管制議題所成立。由最初僅為核廢棄物處置之管制分析的任務，至1992年起，其機構組織章程開放進行核管會以外之業務，現已多元性發展，包含各項具獨特之專業技術、電腦分析軟體、實驗室設備及野外調查研究設施，並以各領域專長整合之架構解決有關地球科學及工程方面的問題。目前該中心所執行的業務已包含來自一般商業委託、地方與州政府、國外的政府與一般機構。該中心目前的組織依專門技術領域分為六個組，參考如圖3-1，參與處置計畫之執行架構如圖3-2。

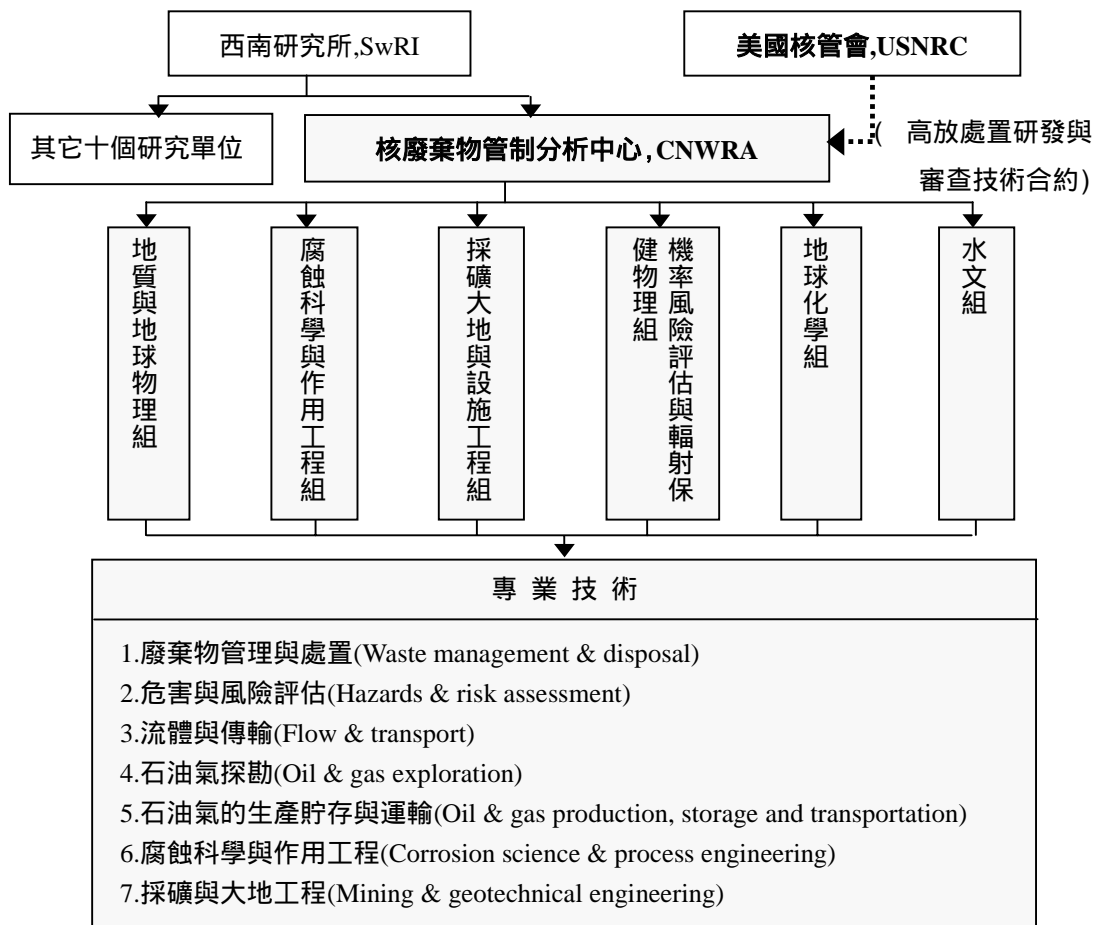


圖 3-1 CNWRA 之組織與專業技術

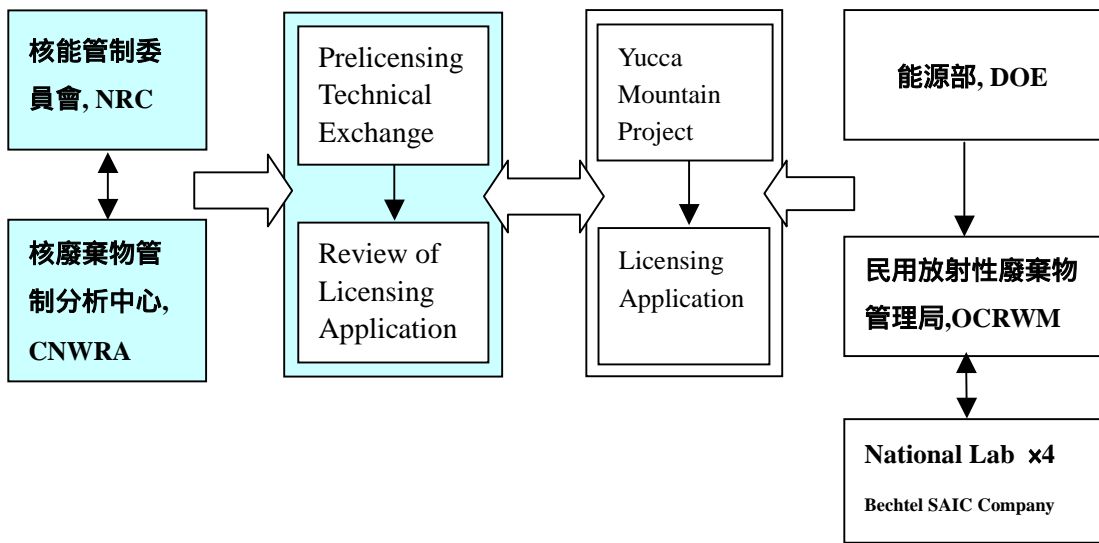


圖 3-2 CNWRA 與雅卡山計畫之執行架構

### 高放處置研發與審查技術計畫

該中心主要經費來源為核管會撥付之聯邦政府經費補助，如前所述以協助核管會高放射性廢棄物地質處置場相關技術與管制議題為主。近程計畫合約自 2002 年起，為期五年，每年依聯邦政府預算及工作項目內容調整年度合約經費，大致研發經費在 10 至 15 百萬美元/每年。近年來所執行相關用過核子燃料乾式貯存設施之審查業務為獨立之計畫，並不涵括於高放計畫中。專家及技術人員共計 67 人，依合約投入核管會高放處置計畫人員達 55 人。該中心對於核管會計畫的執行，為免除公眾疑慮，定位在技術獨立及審查獨立的角色，以提昇公眾對核管會審查及核照作業之信任與信心。對於高放射性廢棄物地質處置場相關技術與管制議題，該中心目前所投入之專業技術領域，亦即專家背景包含：

- 地球化學/放射化學
- 岩石力學
- 電腦科學
- 水文學/氣候學
- 隧道工程
- 功能與風險評估
- 構造地質學
- 機械工程
- 火山學
- 保健物理學
- 材料科學
- 核子工程

台灣未來可能的地質處置場，雖然與美國雅卡山處置場場址地質環境會有很大的差異，且環視世界各處置研發先進國家亦多如此，但是以地質處置場進行廢棄物之處置概念是不變的。如此，上述審查協同單位的專業技術領域的組合值得提供參考。

核廢棄物管制分析中心一方面進行處置審查技術研發，另一方面參與協助核管會進行申照前預審作業(pre-licensing activities)階段與能源部進行之技術管制會議。目前已協助完成之重要管制相關文件為「關鍵技術性議題協議整合報告」(Integrated Issue Resolution Status Report, NUREG-1762)，為申照前階段能源部與核管會雙方工作人員所進行關鍵技術議題之階段性協議內容，做整合性且公式化呈現的彙整，亦是未來能源部提送執照申請之重要依據文件。

另一項為研提「雅卡山計畫審查指引」(Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804)，該計畫書在於提供核管會工作人員核照的一個審查指引(guidance)，並且是針對未來能源部提送雅卡山地質處置場執照的申請，並不適用於其它地質處置場。同時該審查計畫並不是一項法規，也不在現有的法規以外增加其它規定，相關的申請要求與準則均已在法規(10CFR63)中明定。

## 相關研發近況

本次赴核廢棄物管制分析中心實習，主要由地質與地球物理組負責。期間亦對水文地質、地球化學、材料科學等組及功能評估相關現行研究工作，在工作人員權責能力許可範圍，提供介紹及討論。僅就各主要研究主題簡述如下：

### ■ 地質與地球物理

在此技術領域包含一般地質、野外地球物理、地震、構造地質、火山作用、地理地形、遙測等。工作內容包含室內實驗、野外調查及模式分析，以及發展地質構造分析程式、野外地球物理調查技術與設備。

為評估地質構造模式，已研發完成 3DStress 電腦分析程式，其功能在於評估斷層及裂隙等地質構造之狀態與作用趨勢。另一功能用於解釋斷層作用在某時期的應力場所造成的滑動趨勢及運動方向。亦可用來鑑別一已知應力場地區的斷層是否可能是活動斷層或者是非活動斷層。除此，該程式亦發展應用於預測斷層或裂隙相關的運動趨勢、斷層封閉性、碳氫化合物遷移途徑、評估節理岩體中節理

控制的潛在滲透性等。

在地球物理方面，為雅卡山場址調查所進行之獨立研究，主要是提昇磁測技術，即研發高解析度磁測調查方法，使調查及設計人員亦於進行淺地表下較詳細的地質測繪。此技術亦應用全球定位系統（GPS）做為輔助工具，並且裝置特別的行動工具（如附錄二，附錄-12 頁），以提昇施測速度與效能及降低成本。

## ■ 水文地質

發展之相關重點技術包含地下水資源之評估與管理、喀斯特地形含水層之動力學、地下水流及物質傳輸模式分析、污染物的膠體傳輸、土壤及地下水改善技術之量化可行性分析、地下水流及傳輸作用之數學模式分析、破碎及非破碎岩體中不飽和帶流體的數值模擬、水力試驗及逆向模式分析之含水層參數評估。

雅卡山地區之水文地質模式特殊（參考圖 3-3），地表水入滲後進入約 600 公尺深的未飽和帶，再由飽和帶向南移動。為獨立驗算此水文地質模式及分析結果，以 MODFLOW code 進行建立雅卡山地區 28.5km×43km 範圍及垂直深 1200m 的三維地下水流模式，並以 MODPATH code 運算，以及利用衛星影像顯示校正的水頭壓力分布及流向等結果（參考圖 3-4）。

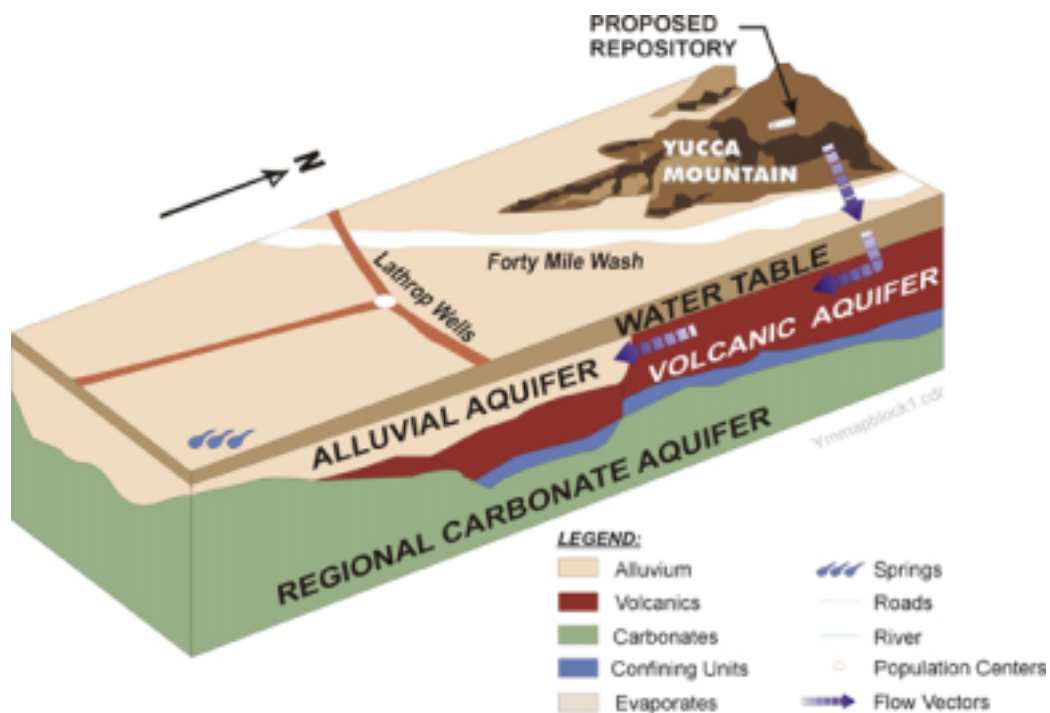


圖 3-3 簡化區域地下水文模式(DOE 資料)



有關水文地質調查、分析及評估作業，內容包含繁雜的野外調查工作、鑽孔探查、現地及實驗室試驗，藉以獲取重要的地質構造、地層分布及水文地質參數等資料。基本上經費及時間的耗費甚鉅，核廢棄物管制分析中心經由核管會與能源部進行技術溝通及現地檢查，由能源部提供所有資料，並另行現地複核，獨立分析建立水文地質模式，再與能源部的成果進行比較。

圖 3-4 雅卡山地區水文地質模式分析結果(Jim Winterle, CNWRA 提供)，淡藍色區域為未來放射性核種釋出至地下飽和帶後之傳輸途徑。

## ■ 地球化學

目前進行的研究項目包含核種遷移相關研究及天然類比等，前者以模擬雅卡山地層特性及地下水化學特性進行。由於雅卡山地區水文地質模式特殊（參考圖 3-3），水文地質單元在飽和帶（SZ）範圍內包含沖積層、火山凝灰岩及基盤碳酸鹽岩（變質石灰岩或大理岩）等。前兩者為過去的研究方向，目前研究基盤岩部份，以碳酸鈣（方解石）為主要核種遷移的地層介質進行試驗。在實驗室方面，進行銻（Sr）、鎝（Tc）及鈾（U）的放射性同位素進行吸附批次實驗，以及管柱實驗。另亦曾在現地藉由鑽孔，進行跨孔式之吸附及擴散實驗。由獲得之地球化學特性包含溶解度、錯合作用、膠體（colloid）的形成、傳輸、吸附、共沉澱、離子交換及熱力學的與動態的交互作用等資料，進行電腦模式分析。

天然類比方面的研究所需之經費相當龐大，基本上，與能源部所進行部份為資料共享，但亦在經費許可及特殊條件下，進行各項研究。例如在墨西哥一處 Pena Blanca 採礦區之 Nopal I 鈾礦床的地球化學天然類比研究，該調查研究發現有關鈾（uranium）、釷（thorium）、鐳（radium）及鏷（protactinium）在此礦床的分

布，以及這些元素在岩體及其節理裂隙中的分布特性可做為放射性核種從處置場釋出及遷移現象之天然類比。

## ■ 材料腐蝕

核廢棄物管制分析中心在材料腐蝕科學及作用方面以建立審查技術為主，並就現有處置關鍵技術議題中具爭議性之議題進行相關研究。目前主要研究工作重點在抗蝕材料方面，包含焊道耐蝕性、微生物之影響、腐蝕試驗設計（部份已申請專利）及環境模擬等。研發技術著重於瞭解並獨立分析能源部預定採用之材料特性，以多種方法分析其耐腐蝕特性，並非著重於材料之研發。分析方法藉由各項場址條件的模擬及可能事件之發生狀況進行分析，包含現場環境之氧化還原條件、地下水酸鹼條件、生物作用、溫度、溼度及時間等。

目前能源部所採用之核廢棄物包件材料，採外層以 Alloy22 鎳合金包覆抗腐蝕，外層以不鏽鋼提供結構強度。

對腐蝕作用而言，顧慮的並非整體表面之氧化作用的發生，而是局部的表面鏽蝕，甚至產生穿孔。腐蝕作用產生之腐蝕產物，長期的累積對金屬的完整性極為不利。金屬材料易於產生腐蝕之處即是表面有變化之處，最明顯的就是受力點及製作過程的焊道部份，這是材料本身有關腐蝕特性的部份。外在因素則包含溫度、溼度、壓力、環境的氧化還原電位、地下水酸鹼值及包件表面的礦物累積狀況。一般而言，在鹼性環境下較為穩定，而相對較酸性之環境下易產生腐蝕。

雅卡山計畫的處置概念與大部份國家不同，其處置方式並不採用回填，是在一個開放空間存放。雖然位於未飽和帶，地下水化學特性易於控制，但是受熱效應影響（未來處置包件之表面溫度將達沸點以上），若有地下水入滲並滴在包件表面，將會立即蒸發，當歷久累積並冷凝回流，帶回之鹽分或其它不利之化學組成成分，將隨之沉積在包件表面，而形成腐蝕的條件。

Alloy22 合金相較於其它合金貴，而少被業界使用，相對之研究就少，能引用之參考資料文獻不多，所以必須進行更大量之試驗分析予以驗證。由於腐蝕試驗進行不易，為能達到合理且連續的模擬，核廢棄物管制分析中心研發獨特設備以進行線上連續試驗（on-line tests），該項分析設備已取得專利（圖 3-5）。相關溫、溼度的控制，採用校正級的儀器進行，使誤差控制在 0.1% 以下。由於實驗作業強調品保管制，所有試體均有備份保存，作業過程均予完整紀錄。





圖 3-5 申請專利之腐蝕試驗設備（照片由 CNWRA 提供）

#### ■ 功能評估

處置場長期的功能安全是最重要的議題，無論是在地質與地球物理、地球化學、水文地質、大地與設施工程、腐蝕與材料科學、機率風險評估與輻射防護等領域的調查、分析與評估，其最終要獲得的結論是處置場在未來長期的功能安全是否能達到法規要求，是否能擔負起放射性廢棄物永久隔離於人類生活圈之外的重任。因此，對於處置業務的推動，無論是處置的執行或是管制，所有參與之技術人員，在個人的專業背景外，亦應對整體處置系統建立完整之概念，亦即任何專業人員在全系統功能評估概念的建立下，形成一共同橋樑，瞭解功能安全相關的要件，進而將各類專業連結的成果，貢獻於此全系統之長期功能安全評估。

核廢棄物管制分析中心，長期以來配合管制研發及申照前預審作業，在各項專業領域蒐集及建立整體之場址資料與評估工具，對於美國預定之高放射性廢棄物處置場址長期功能的評估，已完成初步的審查技術，並於未來能源部正式提出申請時，即可展開嚴謹的審核工作。針對此處置場評估工作，以下就實習期間所進行功能評估資料之蒐集與討論結果，分別由功能安全評估計畫的緣起、預定處置的放射性廢棄物、處置設施的規劃、功能評估工具的建立與執行方式、概念模式的假設與討論、不確定性的評估、次系統與系統階層的評估、敏感度分析、管制意義等幾方面整理敘述如下：

#### 1. 功能安全評估計畫的緣起

從時間的尺度來看，埃及金字塔約建於 5000 年前，屬於世界上最老的人造結構物中之一。而美國能源部所計劃建立的一座類似安全與堅固的處置場，須隔離高放射性廢棄物與人類活動環境的時間達兩倍於埃及金字塔的時間。此處置場為於隱蔽且遙遠的內華達州沙漠，預定處置設施將設計於地下中，廢棄物包件設計為具長壽命之功能，未來即使發生放射性核種的外釋也必須非常少量，其散布速度也須非常緩慢。

2002 年白宮公布雅卡山場址，隨後由國會依核廢棄物政策法決議通過雅卡山

做為美國用過核子燃料及高放射性廢棄物地質處置場場址，以及命令能源部向核管會申請建造的許可。隨著國會歷年決議的法令規定，雅卡山場址也已經歷了約 20 年的研究，所涉及的包含了一系列的科學與技術的建立，將藉此確認場址的長期安全與完整。

核管會為負責發展法規及提出技術需求與準則，以符合環保署對於處置場核照標準，於 1987 年在西南研究所成立了 CNWRA，目的在於提供技術協助及研究。對於雅卡山場址的適合性核管會並未採任何預設之確認立場。

## **2. 預定處置的放射性廢棄物**

能源部將在預定的雅卡山處置場處置的核廢棄物達 70,000 公噸，包含用過核子燃料、再處理所產生之副產物、國防用途衍生的高放射性廢棄物，以及研究用途產生的廢棄物。

在不當操作下，這些高放射性廢棄物是可以致命的。在嚴重暴露狀況下，全身劑量大約是 5 西弗(Sv)、典型的用過核子燃料束的表面劑量率超過每小時 100 西弗(即反應器移出後 10 年之狀況)。這些放射性同位素最後將衰變成為無害的物質，部分放射性同位素衰變非常緩慢，部分同位素則在數分鐘、數小時或數天即可衰變耗盡。衰變緩慢的同位素例如鈾-234，其半衰期為 24.1 天，而鈾-238，卻長達 45 億年，所以這些廢棄物必需適當地處置於一個場址，以將其與人類做非常長時間的隔離。

## **3. 處置設施的規劃**

能源部對於雅卡山處置場的設計，是透過天然及工程障壁系統提供雙層的保護。天然障壁系統乃是利用其場址之地質特性及沙漠氣候型式與稀少的植被特性。再者，雅卡山的周圍地區人口密度相對極低。此天然系統主要的作用在於其周圍的岩層特性，能夠減緩地下水的移動，並將放射性粒子從污染的地下水移除而滯留在原地。即使這些放射性粒子到達人們可能的用水區域，也必須經過一段很長距離的遷移(約 14km 到 18km)

在工程方面，人為的工程設施將埋置在地表及地下水面間(深度約 600 公尺)的中間位置，在天然障壁外加以第二層的工程障壁，防止放射性物質的釋出及遷移。此工程系統主要包含抗腐蝕的廢棄物包件，並以金屬屏蔽(metal shield)遮蓋以避免水及化學物質滴在包件上，進而滲入包件中。此包件同時亦將貯放在坑道

中的檯架上，以防止處置坑道中若發生積水時，避免與水接觸。

#### 4.功能評估工具的建立與執行方式

核廢棄物管制分析中心(依核管會合約)所發展之工具系統，稱為全系統功能評估工具(Total-System Performance Assessment tools)，以做為處置場功能的獨立分析。核管會將利用此成果來審查能源部預定處置場址的執照申請。這個分析工具的主要部份 ( TPA code ) 其提供了一個系統階層的架構，對工程系統退化的關鍵因子、處置場放射性核種的釋出、不同環境途徑之放射性核種的傳輸，以及可能的人類曝露等建立量化的評估。TPA code 的研發是由核廢棄物管制分析中心主導，協同核管會人員組成的專家群所發展出來。其專業領域的整合包含了風險評估、水文、材料科學、機械工程、岩石力學、地質、火山學、地球化學、保健物理及電腦科學。

整個全系統功能評估方式的發展架構呈現金字塔型，參考圖 3-6，並且展現其反覆進行的程序，及各系統評估階層資料的彙集及發展目標。

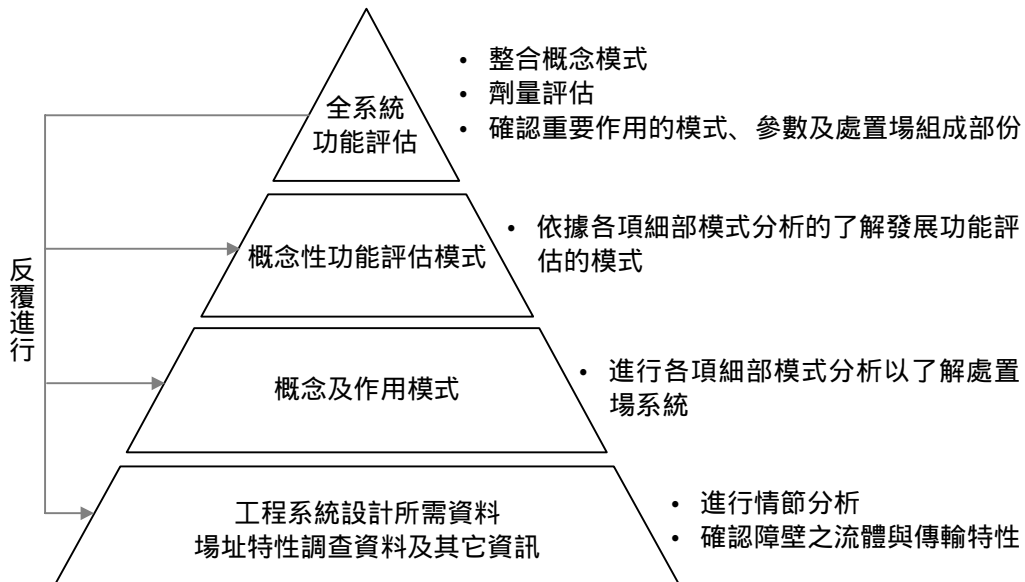


圖 3-6 金字塔型的全系統功能評估方式

處置場的功能評估是一項複雜而帶有許多不確定性的演練，所要分析的時間範圍相當長，需符合美國法規 10,000 年期間的規定。評估中，所謂的不確定性主要是因為對天然系統特性的知識不完整，且在如此長期的人為結構條件下，處置場功能是具有部分的不確定性。

任何細部電腦模式分析必須考慮可靠的情節，例如地震及火山作用，熱力(Thermal)、水力(hydrological)、化學(chemical)及機械(mechanical)作用的偶合效應，作用過程中的不確定性，不同的概念模式，及未來可能發生事件真正發生的可能性。關鍵的策略乃是將問題簡化，得以容易處理，足以產生一個可信的分析。

由細部過程作用的模式所獲取的資料訊息(次系統階層)、天然類比的研究、實驗室及野外工作是執行功能評估所必須的，為說明如此長期之大且複雜的系統在其特性的描述所賦有的不確定性，必須要用到機率式的模擬(probabilistic simulations)。

## 5. 概念模式的假設與討論

對於放射性物質的釋出，假設有一些農場鄰近於雅卡山，且放射性物質產生對假想人接受輻射劑量的一個假設情節敘述如下：

這個情節假設工程障壁系統退化，容許水從山上下滲，進入廢棄物包件並且溶出放射性核種，當水流進入處置場下方未飽和層及飽和層地質介質，便開始傳輸放射性核種到遠處的灌溉及飲水井。

有許多因子會影響這些作用的嚴重程度：

(1) **氣候變遷**：氣候將可能隨時間而變化，並影響地表水的下滲速率。以目前研究，約為期四萬年期間，地表水的下滲速率將相較於現今之速率逐漸提升。雅卡山地形、植被、覆土層厚度、存在的裂隙、斷層、洞穴、未飽和層水文地質的異質性等因素將影響雨水下滲並流經岩層當中。由於表水下滲，將可能導向坑道，並影響到廢棄物包件以及將溶解用過核子燃料，氣候變遷及表水下滲對未來處置場長期功能將可能有重大影響。

(2) **衰變熱**：由放射性廢棄物衰變所產生的熱將導致熱 - 水 - 化學的耦合作用，而影響此長期的環境，在這段期間，滴水屏蔽及廢棄物包件等材料極易受影響，產生加速腐蝕作用，並且使廢棄物體 ( waste form ) 產生相對的加速溶解。

(3) **水的汽化**：傳導(conduction)、對流(convection)及輻射熱的轉移等因素將

控制處置場、近場(near field)、坑壁(drift wall)、廢棄物包件及廢棄物體的溫度及相對溼度。另一現象是因為溫度高於沸點而使地層中的水產生汽化，而這將可能造成水汽離開廢棄物包件範圍，並且在冷凝之後暫時棲止於近場範圍的上方，後續將可能再回移到處置場位置的裂隙中，亦即產生逆流，即使仍處於沸點以上的溫度亦然。

(4) **誘發性落盤**：地震及火山作用在雅卡山地區的發生機率雖然相當低，但並未被排除其發生的可能。於是在這樣的情節發生時，可能誘發處置坑道或貯存區域之落盤(rock falls)，並且使滴水屏蔽及廢棄物包件在此不回填的處置場中造成破壞。

(5) **工程障壁的潛在瑕疵**：對於外釋的發生，必須是廢棄物包件有破壞以及水接觸到放射性廢棄物體。由於廢棄物包件及滴水屏蔽可能因潛在的瑕疵(hidden defects)而破壞，依據有限的文獻研究，約有 0.1%到 1%的比例，廢棄物包件假設會提前或預期的初期破壞，其原因乃是工廠製程中的瑕疵以及置放作業中的意外碰撞或毀損。

(6) **地下水化學的改變**：高放射性廢棄物進行置放後，處置場環境的溫度因輻射熱而開始提昇。地下水的化學組成也將隨著溫度變化而改變，並且影響工程障壁的特性以及其功能的退化。在未來廢棄物包件發生失敗時，此地下水化學性質的改變亦影響放射性核種的釋出速率。

(7) **核種釋出的速率**：大部份的廢棄物包件預期在最後將產生腐蝕，並導致廢棄物包件破裂而致使放射性核種的釋出。這種使廢棄物包件失敗的腐蝕作用能夠發生於很少水的條件下(例如潮溼空氣中的腐蝕)或在水環境中(例如包覆於薄層的水膜狀況下)。腐蝕造成破壞的大小及形狀、近場環境的條件、地下水滲入坑道的速率、廢棄物體滲瀝或溶出速率、放射性核種的溶解度等因素都將決定放射性核種從廢棄物包件釋出的速率。放射性核種釋出的進行，視廢棄物包件破壞的位置而定。如果破壞的位置發生於上半部，則包件就如形成一個澡盆形狀的容器，水必須充填到破壞的高度，否則放射性核種無法隨水溢流而外釋。如果破壞發生於頂部或底部，則水滴在廢棄物體上，不需任何累積即可使放射性核種釋出。放射性核種離開廢棄物包件可能是藉由緩慢地擴散通過廢棄物包件週圍介質，或者較快速地流經週圍相互聯接的裂隙。

還有其它工程系統破壞的情節，雖然相對發生機率較低，但可能會有較嚴重的過程結果，這類情節包括：

(1) **斷層作用的錯移**：在處置場區發生未知斷層的位移，此位移作用將使廢棄物包件產生剪動，使放射性物質外釋進入地下水。

(2) **岩漿入侵的破壞**：岩漿入侵處置場區的處置坑道將破壞廢棄物包件，其藉由伴隨之高溫、腐蝕狀況及大的作用力，使放射性核種曝露並釋出到地下水。更甚者隨後又發生火山作用之噴發。

(3) **火山作用的噴發**：發生於處置場區的火山作用，將破壞廢棄物包件，並帶出放射性廢棄物，使放射性物質隨火山灰噴向空中。這種現象將會使火山灰帶有用過核子燃料物質的雲霧順著風向飄移一段很長的距離。在此火山作用的結果下，感受體(receptor)可能的曝露情形如下：

- 曝露於含有放射性核種之地下水或大氣之中。
- 鄰近的農場將可能飲用到受污染的水，或使用此受污染的水作為園藝等其它生活起居目的之用途。
- 造成地區性生產的食品受到污染，並且為人們所攝食。
- 曝露於地表污染，例如吸入含有放射活性的污染粉塵。
- 直接曝露於放射線之狀況

上述三項情節可能機率雖然很低，但對於這些現象等，在概念模式的討論假設中也對一假設感受體進行計算其可能的曝露程度，範圍包含從處置場到 20km 遠可能存在的灌溉水井。

## 6.不確定性評估

在法規所訂一萬年的時間尺度下，處置及評估技術隱含了一些作用的不確定性，於是對於處置場的功能要具有完整的認知與瞭解是不可能的。但決策者仍應對這些影響預定處置場安全的不確定性進行評估，做出合理且具風險告知的(risk-informed)決策。

對於參數及模式的不確定性、時空的變異性及設計的選擇性，在可能的情況下，需要考慮大量的潛在情節。

不確定性及變異性涵蓋了廣泛的潛在情節，核廢棄物管制分析中心在 TPA tools 的分析中，應用 Latin Hypercube Sampling (LHS)，為一種分層次的蒙地卡羅

取樣法(Monte Carlo Sampling approach)來衍生上述分析情節。在這個分析評估中，關鍵模式的不確定性以輸入相關參數賦以機率分佈而予以量化。

一些情節事件，源於處置場外部者，如火山作用及斷層作用可能有較嚴重的作用結果(consequence)，但其發生機率則非常低。這些極低發生機率之事件，常常在機率分析中產生挑戰性的質疑。核廢棄物管制分析中心所研發應用之 TPA tools 即在於處理這些缺點。

## 7.次系統與系統階層的評估

(1) **氣候變化之影響**：目前雅卡山地區的氣候是乾燥的，但依氣候的歷史變化分析，預測未來將趨向潮溼以及寒冷的變化，且為期延伸約 4 萬年到 6 萬年，並約於 9 萬年再轉為較乾燥的狀況。以目前的氣候條件下，在法規管制期內(10,000 年)，雅卡山表水下滲大致為 31mm/yr，但將會隨著後續演變趨向於隨之而來的潮溼期而逐漸增高，而且隨著較高的地下水流速也將使放射性核種潛在釋放量逐漸提昇，而由工程系統釋出到天然系統。

(2) **場區昇溫之影響**：尖峰處置場溫度將可能達到 165 的平均值，此溫度的提昇可能增加用過核子燃料的溶解速率，並形成有破壞性的化學條件，改變地下水速率以及提昇廢棄物包件與滴水屏蔽的腐蝕速率。

(3) **腐蝕的發生時間**：這個評估前提是在其它對廢棄物包件產生破壞的機械作用未發生的狀況，核廢棄物管制分析中心估計腐蝕作用對包件的破壞影響，將會是在 3 萬 8 仟年至 13 萬 1 仟年之間發生，但此影響則已超過管制期限的一萬年。

(4) **區域的降雨**：對年降雨量而言，僅只一小部份地表水會下滲到地表下而到達處置場，以及接觸到廢棄物包件。能接觸到廢棄物體的入滲地表水則相當少，多於 99 % 以上的降雨在雅卡山處置場地區估計是無法進入到廢棄物包件位置的。

(5) **擾亂事件的影響**：雖然坑道落盤(rock fall)的衝擊仍在調查研究中，但核廢棄物管制分析中心目前的估算建議，認為地震所誘發的坑道落盤或崩垮(collapse)，在超過 10,000 年的管制期間將不會破壞到廢棄物包件。而少量百分比的廢棄物包件是有可能因斷層錯移或火成活動的入侵(如岩流入坑道中)而造成破壞，但在此條件下的破壞，其機率相當低，且即使如此，其破壞作用的結果影響

亦不高。因此，在 10,000 年期間內，放射性核種由地下水釋出的發生，便受廢棄物包件少量百分比的初始瑕疵破壞所主控。另由於火成作用的噴出，如火山作用，造成處置區廢棄物包件的破壞，可能僅是非常小的百分比例，但是即使如此低程度的破壞，且非常微小的發生機率，依作用之後果乘上此為小的機率，所得的風險仍是不可忽視的。因為如此所造成的破壞，其後果是較為嚴重的。而根據這些擾亂事件(disruptive events)，評估約接近 98 % 的廢棄物包件，至少 10,000 年是可以保持完整的。

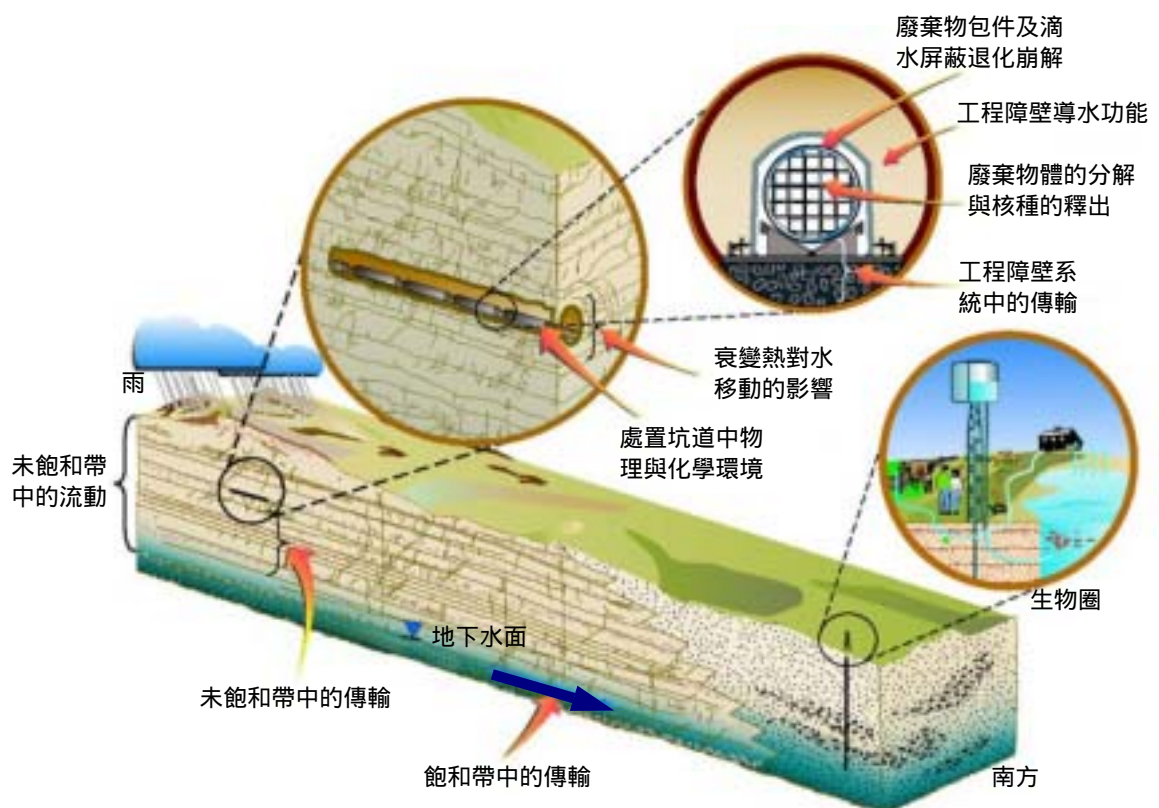


圖 3-7 全系統功能評估工程障壁及核種傳輸作用模式的描繪

由全系統功能評估分析(TPA analyses)，有關地下水放射性核種的濃度從廢棄物包件初始瑕疵破壞至到達感受體位置，在介於 3,700 年到 32,000 年間將逐漸增高，並在 41,000 年與 100,000 年間因腐蝕破壞的發生而達到尖峰濃度。放射性核種在結合高的溶解度(high solubility)、長的半衰期(long half-life)及大的初始量



(large initial inventory)而顯現出最大的釋出速率。儘管是沒有被阻滯的(在岩石中無化學吸附條件下)放射性核種行經於地下水含水層仍平均需時 640 年，其相較於處置場下方未飽和層需時 280 年、有較長流徑(flow path)、結合在沖積層中有較大的阻滯作用(retardation)，充份地延緩了這些放射性核種傳輸至抽水井(pumping well)。

基本上，上述的內容並不是核廢棄物管制分析中心對雅卡山場址所做完整之系統階層的功能評估，僅止於對將來能源部申照時進行評估的重要方向，而且核管會所作的功能評估計算也只是初步地對能源部的計算進行檢核。

### 8. 敏感度分析的結果

除了解釋說明有多少廢棄物包件損壞，或者有多少量的放射性核種隨時間從工程及天然系統釋出，而影響感受體的劑量風險外，TPA tools 也有助於參數(parameters)、處置場系統組件(repository system components)及替代性的概念模式之敏感度分析(sensitivity analyses 或不確定性重要性)的進行，以決定處置場功能不確定性的重要性。

在作法上，敏感度分析的重要性不應過度誇張，因為在發展作用模式(process models)的相關資料將可能有所限制。例如反映系統模式中不確定性的分布函數(distribution functions)。由計算顯示一些參數之分布函數的均值(mean)有 10 % 的變化，此變化將可導致劑量風險估算(dose risk estimate)達 150 % 的變化。同樣的，也有利用一個替代的用過核子燃料溶解模式，進行概念模式之敏感度分析，其劑量風險評估降低約 100 %。

在處置場構成要素階層(Repository component-level)的敏感度分析，其結果所展現的是處置場功能在廢棄物包件、未飽和帶及飽和帶等構成要素是相對較敏感的。核廢棄物管制分析中心在研發 TPA tools 於敏感度分析的應用上，藉由分析結果顯示出影響處置場構成要素(component)之重要性的比重，以協助核管會決定其高放計畫的管制重點，以及應該如何執行與能源部進行審照前之互動(pre-licensing interactions)。

圖 3-8 為核廢棄物分析中心對雅卡山預定處置場構成要素的初步敏感度分析，即利用 TPA tools 運算的結果範例。所顯示為一假設之處置場系統進行其構成要素累積附加下運算結果，每一柱狀圖組成表示一次增加一個組件之累加的蒙

地卡羅分析運算結果。最左邊所代表的是僅有所有受抑制(無影響的構成要素)組合，向右邊漸增加(一次一項)，最右邊代表所有基本構成要件(base case)均存在之狀況。各柱狀圖的的差值可顯示所增加之構成要素之敏感度(重要性)

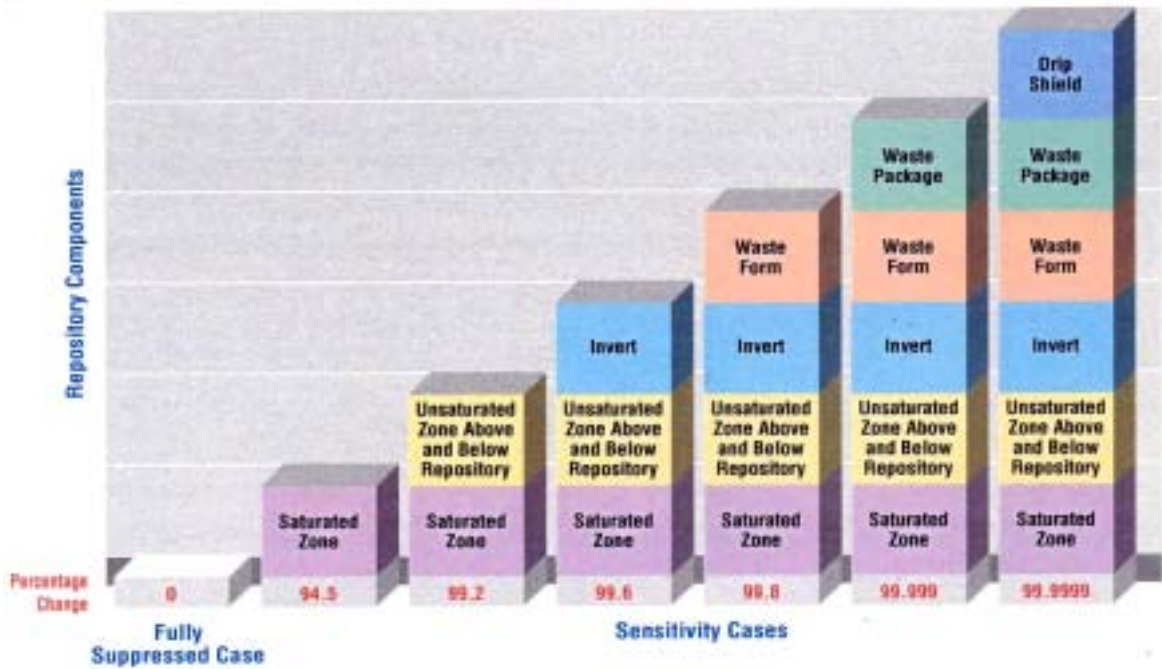


圖 3-8 敏感度分析利用 TPA tools 運算的初步結果

## 9. 管制意義

核管會在技術支援上，委由核廢棄物分析中心進行此機率式全系統功能評估工具(Probabilistic TPA tools)的研發。在實務上，此功能評估工具協助了核管會及核廢棄物分析中心進行獨立評估雅卡山預定處置場的功能。並且初步鑑別影響處置場的構成要素(components)、模式(models)及參數(parameters)，使管制技術及重要關鍵議題能達到核心重點。

此分析評估的結果也協助核管會鑑別出那些附加重點的領域可能需要降低其不確定性，而且 TPA tools 的功能也有助於核管會發展了具風險告知及功能基礎的管制法規。在處置技術上，也使核管會及核廢棄物分析中心提昇他們對各種不同關鍵特徵(features)、作用(processes)及事件(events)在一個整體系統模式中如何影響風險估算的瞭解。這樣的研發成果，對未來能源部預定提送之執照申請案件而言相當重要，能夠使審查業務人員妥善準備並正確地進行審查作業。

以功能評估模式之內涵而言，分析的結果是基於很多簡化的假設，而且分析模式所用之資料數據，是以目前所能執行而取得的現地調查資料、實驗室資料以及設計。然而藉由不同概念模式、使用不確定性範圍內數據及範圍外數據，對執行系統階層的功能評估都已能有效地進行。

#### 四、高放處置管制之審查作業及現地檢查

依據前述美國高放射性廢棄物最終處置規劃流程，高放射性廢棄物處置場歷場址特性調查、場址建議與核准、提送執照申請、核照審查、建照許可與處置場興建、運轉執照申請與審查核照、處置運轉、監測與監管、封閉與除役。

目前之管制重點階段即處置場建造許可申請與核照審查，能源部依處置計畫時程應於 2004 年底前提出申請。這個審查業務依 10CFR part 63 的內容，涵蓋了申照前預審（Pre-licensing Process）及核照審查（Licensing Process）。

##### 申照前預審階段

申照前預審階段，核管會的重點任務包含以下三項：

- 1.場址特性調查及推薦過程的審查：這個審查作業包含能源部於場址特性調查所執行之探查鑽孔與隧道開挖，及品保計畫。並且在核管會與能源部的申照前預審會議及技術溝通之互動也適度開放內華達州政府、印地安部落及地方政府的參加。
- 2.能源部所提雅卡山環境影響說明書的審查。
- 3.高放射性廢棄物處置相關管制規章與管制指引的訂定：核管會之高放處置管制法規為 10CFR60 及 10CFR63,前者為針對一般性高放射性廢棄物處置所研訂，後者為針對國會所制定核廢棄物政策法案指定雅卡山預定處置場址所研訂，也是目前美國高放射性廢棄物處置管制法規。發布的主要指引文件為 Yucca Mountain Review Plan (NUREG-1804)，並對此審查規劃草案於 2002 年五月在內華達州舉行三場說明會( public meeting )，及接受公眾意見至 2002 年八月。此法規指引乃依 10CFR63 對雅卡山預定處置場址之處置關鍵技術議題的審查，提供核管會工作人員未來之審查指引。

依美國 1982 年核廢棄物政策法案及 1987 年之修正案，國會指定能源部應諮詢核管會於申照前商議有關場址特性調查作業之計畫，而且也限制核管會必須在有限之時間內（三年）完成執照申請的評估審查。因此，申照前商議程序便使地質處置場之複雜的技術議題得以盡早呈現出來，而核管會工作人員也依此商議結

果表列，以供後續進行技術議題之溝通互動，並逐項註記及解決狀態。可以說，核管會的申照前預審程序（pre-licensing program）主要是建構於關鍵技術議題（Key Technical Issues，KTIs）的發展與決議，其方式乃藉由對能源部所進行場址特性調查、分析模式報告、各項相關議題的審查，以及進行獨立的技術評估工作，並據以將議題處理的決議狀態於予文件化。

2001 年以前大致就個別議題進行雙邊技術溝通，之後便開始進行所有議題的整合及提出議題整合狀態報告，內容也包含了處置場封閉前的主題、功能確認及品保作業。至 2003 年中，核管會彙整出共計 293 項關鍵技術議題的雙邊協議內容，並依風險重要性等級（risk-significance ranking）區分為高度、中度及低度風險重要性三類，各占數量分別為 41 項、92 項及 160 項。至 2004 年 12 月所有關鍵技術議題整合為九大項，詳見表 4-1，均已達到 Closed-pending 程度的協議，至於各項議題之細項次議題，詳列於表 4-2。核廢棄物管制分析中心人員對於上述關鍵技術議題協助審查之研究，大致區分為火山作用、地震與地質、水文、隧道與大地工程、近場與地球化學、材料、功能評估、核種傳輸、熱效應及品保等十項，提供審查因應之技術。

前述議題之階段性技術文件為 Integrated Issue Resolutions Status Report（NUREG-1762, 2002），為核管會與能源部技術溝通之正式協議與紀錄，內容重點有關處置場功能重要的關鍵技術議題。對於這種申照前階段之技術互動值得參考與應用，藉此，管制機制的建立是根植於技術層面，真正對於未來文件程序審查與安全評估審查都能有正面的幫助。

表 4-1 影響處置場功能重要之關鍵技術議題（KTIs）

KTI No.	項目名稱	內容	議題現況
1	火山活動 Igneous Activity	火山活動的可能性及其造成影響的評估	Closed-Pending
2	地質構造變形與地震活動性 Structural Deformation and Seismicity	地震及斷層活動性的評估	Closed-Pending
3	近場環境的演變 Evolution of Near Field Environment	在廢棄物包件環境中地球化學所將歷經的改變	Closed-Pending

4	容器壽命與源項 Container Life and Source Term	廢棄物包件容器壽命的預測，包含估算由毀壞的廢棄物包件釋出的放射性	Closed-Pending
5	熱效應對流體的影響 Thermal Effects on Flow	瞭解廢棄物所產生的熱效應對處置場周圍濕氣流動的影響	Closed-Pending
6	處置場設計與熱及力學影響 Repository Design and Thermal-Mechanical Effects	評估廢棄物的熱如何影響地質處置場設計的力學性質	Closed-Pending
7	等溫條件下未飽和帶及飽和帶地下水的流動 Unsaturated and Saturated Flow Under Isothermal Conditions	處置場近場地下水流動特性	Closed-Pending
8	放射性核種的傳輸 Radionuclide Transport	可能控制放射性核種在雅卡山地區傳輸之關鍵地球化學作用的鑑別	Closed-Pending
9	全系統功能評估與整合 Total System Performance Assessment and Integration	執行及審查全系統功能評估之能力的發展	Closed-Pending

註：Closed-Pending 意指該關鍵技術議題之現有調查評估分析的資料、方法及成果大致為核管會人員所接受，但仍需提供進一步佐證資訊。至於若註記為 Closed 者，則表示已能達到初步之執照申請之管制決策要求。若為 Open，則表示核管會對該議題之質疑，能源部未能提出可接受之說明或同意提供必須之進一步資料。

表 4-2 封閉後關鍵技術次議題項目內容

KTI No.	次議題內容					
1	IA-1 火山活動的機率	IA-2 火山活動的影響結果	-	-	-	-
2	SDS-1 斷層作用  雅卡山地區斷層及斷層位移的可行模式?	SDS-2 地震作用  雅卡山地區地震源頭與地震地表運動的可行模式?	SDS-3 地質環境之破裂與構造架構  雅卡山地區流體之列隙與構造控制的可行模式?	SDS-4 地質環境之大地構造架構  雅卡山地區可行的大地構造模式與地殼條件?	-	-

3	ENFE-1 熱-水力-化學 偶合作用在滲 流與流體方面 的影響	ENFE-2 熱-水力-化學 偶合作用在廢 棄物包件化學 環境方面的影 響	ENFE-3 熱-水力-化學 偶合作用在放 射性核種釋出 之化學環境方 面的影響	ENFE-4 熱-水力-化學 偶合作用在放 射性核種經由 工程與天然障 壁傳輸方面的 影響	ENFE-5 熱-水力-化學 偶合作用在近 場潛在核臨界 方面的影響	-
4	CLST-1 腐蝕作用在容 器壽命方面的 影響	CLST-2 材料不穩定性 與初始缺陷在 機械破壞與容 器壽命的影響	CLST-3 用過核子燃料 中放射性核種 從工程障壁次 系統釋出速率	CLST-4 高放射性廢棄 物玻璃中放射 性核種從工程 障壁次系統滲 瀝及釋出速率	CLST-5 包件中臨界作 用在廢棄物包 件及工程障壁 次系統功能的 影響	CLST-6 替代工程障壁 次系統設計構 造物在容器壽 命與放射性核 種釋出方面的 影響
5	TEF-1 相關的特徵、 事件及作用	TEF-2 溫度、溼度飽 和度及通量方 面的影響	-	-	-	-
6	RDTME-1 設計控制作用  整體品管計畫 中有效設計控 制作用的實施	RDTME-2 地震設計方法  對地震事件及 斷層擾動影響 之地質處置場 運轉區的設計	RDTME-3 熱及力學影響  熱及力學效應 在地下設施設 計與功能的考 慮	RDTME-4 密封之設計與 長期貢獻  符合處置場封 閉後功能目標 之密封的設計 與長期貢獻	-	-
7	USFIC-1 氣候變遷  雅卡山地區未 來氣候可能變 化的範圍	USFIC-2 氣候變遷之水 文效應  氣候變遷可能 的效應	USFIC-3 表水淺層入滲  目前的估計量 與空間分佈	USFIC-4 深層滲流  處置區水平滲 流估計量及空 間分佈	USFIC-5 飽和帶  飽和帶周圍流 體條件及可能 的稀釋機制	USFIC-6 岩體中的擴散  未飽和帶與飽 和帶中擴散發 生的程度
8	RT-1 經由多孔質岩 體中放射性核 種的傳輸	RT-2 經由沖積層中 放射性核種的 傳輸	RT-3 經由裂隙岩體 中放射性核種 的傳輸	RT-4 遠場環境之核 臨界	-	-
9	TSPAI-1 系統描述及多 重障壁的驗證	TSPAI-2 情節分析與事 件機率	TSPAI-3 模式選取	TSPAI-4 符合封閉後公 眾健康及環境 標準的驗證	-	-

註：有關核管會相關雅卡山管制法規的發展，能源部所需進行之相關活動的議題，也列入為封閉後關鍵技術議題的重點。

在管制實務上，核管會於申照前預審階段與能源部所進行之管制作為大致採現場檢查工作、技術交流互動與管制會議方式。業務的推展，除了核管會工作人員外，核廢棄物管制分析中心的研究人員亦提供了大比例的技術支援。針對處置相關法規、技術關鍵議題、調查研究及分析成果，進行下列管制作業：

1. **現地訪查**：此階層的會議頻次較高，約一至二個月訪查一次，並視需要及能源部計畫執行量的增加而增加。核管會管制人員或技術支援的核廢棄物管制分析中心的研究人員，依場址特性、分析評估及重要議題等研發及審查所需，經由核管會與能源部所屬相關執行單位聯繫，排定日期及主題進行檢查、研討、資料蒐集及必要之研究取樣，亦視需要可到現場或實驗室進行相關議題之討論。屬一般性會議，不開放給公眾參與，無關決策，人員僅做必要之資料蒐集。
2. **技術討論會議**：約兩個月舉行一次，經排定議程及特定主題，會議中雙方可就各方意見或問題進行研討。會議目的僅作雙邊技術研討交流，無關決策亦無正式紀錄。屬一般協商會議，雙方可盡情發揮，即便可能有所爭論，但在技術方面可作深入之討論。此會議適度開放公眾參與。
3. **關鍵議題之技術交流會議**：約二年辦理一次，進行一系列的為正式會議，針對各項技術議題及研究分析成果進行討論。能源部人員在這個會議中需提出確切的資料進行報告與探討，其結果幾乎大部份都可以達到做決策的程度，會議會有正式紀錄，並且依討論議題內容作為協議（agreements）。
4. **計畫管理會議**：約每年四次會議，內容以處置業務大方向之決策為主，少涉及個別細項技術議題，如決策、財務預算、計畫執行、時程安排及變更等。可適度開放公眾參與。

高放處置計畫執行的同時，由核廢棄物政策法案於 1987 年成立的核廢棄物技術審議委員會（NWTRB）每年亦有兩次會議，就處置的各項議題進行審議，在將成果向能源部長及國會報告該技術審議委員會的建議。

核管會於 1988 年所成立的核廢棄物諮詢委員會（Advisory Committee on Nuclear Waste，ACNW）亦每 1~2 個月舉行一次重要議題諮詢會議，並適度開放公眾參與。委員會成員對核廢棄物相關主題聽取工作人員的報告，進行相關機構執行工作狀況、計畫執行現況、法規及安全處置相關之關鍵技術議題之獨立的技術審議，並做成諮詢委員會之決議，以書面提送核管會作為重要決策的參考。筆者於核管會研習期間，參加了第 154 次核廢棄物諮詢委員會會議之部份公開會議，對於會議的進行有深刻的印象。議程中核管會工作人員向委員進行專題簡



報，並就相關結果及疑慮進行詢答，相關參與研究調查或審查之管制人員，包含核廢棄物管制分析中心人員，得協助研討提供詳實資料。藉由重要的審查議題諮詢，做獨立的專家研判，並進一步做成結論與建議。會議的議程參考附件三第 154 次會議議程。

## 核照審查階段

美國國會 1987 年之核廢棄物政策法修訂案指定進行調查雅卡山場址。針對雅卡山處置場特性，核管會在 10CFR60 以外，另制定了 10CFR63 為現行高放處置重要管制法規。雅卡山審查計畫（Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804）即針對該法規（10CFR63.21）之管制需求而研擬。核管會對於能源部所提送執照申請之審查與決策，參考圖 4-1。

依處置計畫時程之規劃，預定期限為 2004 年 12 月底前，能源部應進行申照文件提送，但至目前仍有部份法規內容具有爭議，例如處置所應評估之時間，法規規定為一萬年之爭議，所以申照時間將做延後調整。在正式提送後，即進入核照審查階段，核管會將依雅卡山審查計畫進行一般資料說明（general information）及安全分析報告（Safety Analysis Report, SAR）的審查。對於安全分析報告的審查，摘要其項目如下：

- 1.永久封閉前的處置場安全
  - 封閉前安全的分析
  - 再取出及放射性廢棄物的替代貯存規劃
  - 永久封閉與除污或地表設施的除污與拆除規劃
- 2.永久封閉後的處置場安全 - 功能評估
  - 系統描述及多重障壁的驗證
  - 情節分析及事件機率
  - 模式選取（14 項）
  - 符合封閉後公眾健康及環境標準的驗證
- 3.解決安全問題的研發計畫
- 4.處置場功能確認計畫
- 5.行政管理及規劃的需求

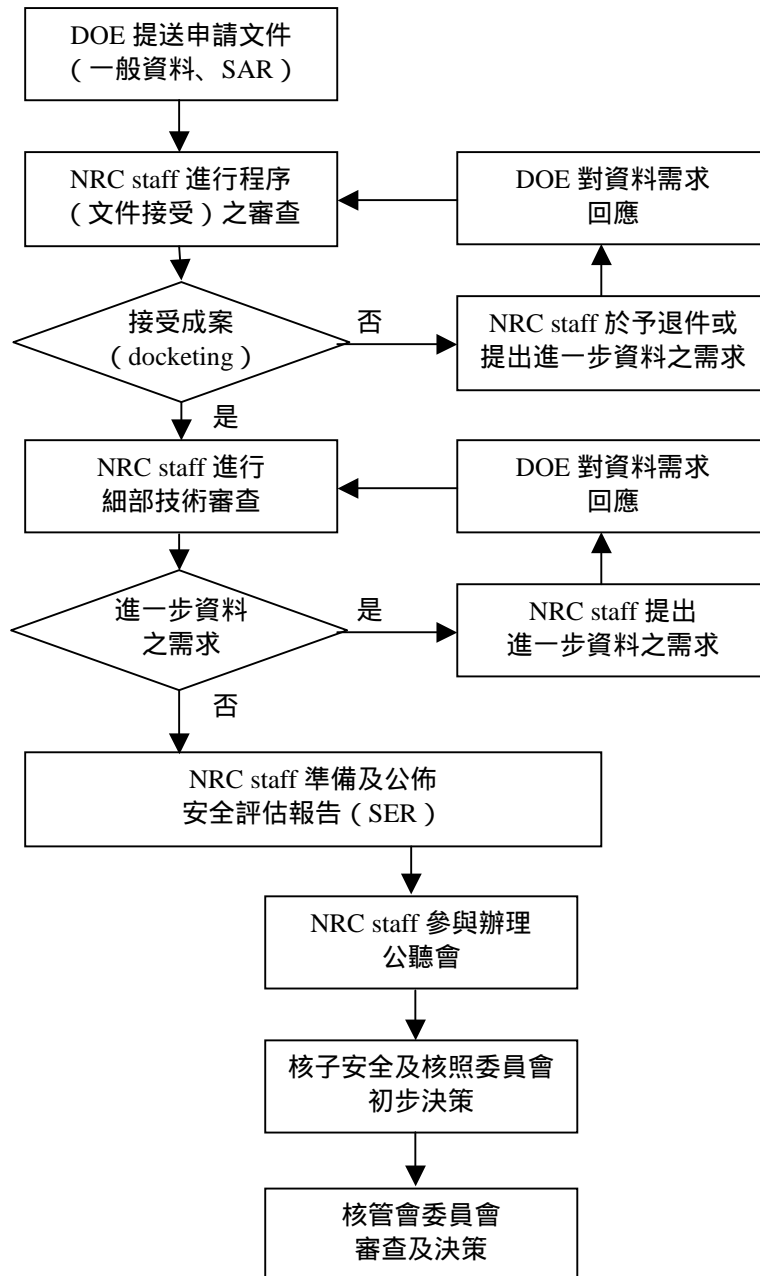


圖 4-1 執照申請之審查決策流程 ( Licensing Process )

有關前兩項對處置場封閉前與封閉後的安全審查，一個地質處置場系統必須使用工程及天然障壁設施，以符合封閉前後處置場安全的目標。而數學模式分析及電腦模擬便是能源部對處置場多重障壁設施安全目標驗證的重要部份。其它的證據，如封閉後處置場功能的天然類比與其它核子或非核子設施封閉前之經驗觀察，也將是能源部做為安全案例的一部分。依據 NUREG-1762，對處置場封閉前後的安全審查提出審查方法的五項準則，簡述如下：

#### 1.系統描述及模式整合：

- 審查安全分析報告是否具符合且適當之假設及初始與邊界條件，以符合能源部所建立的模式及其計算。
- 其條件及假設是否符合封閉前後安全分析的條件與假設。
- 是否已包括重要設計設施在模式與計算上設定初始與邊界條件。
- 是否考慮適當之時空分布。
- 是否包括重要物理現象及偶合作用在封閉前後的安全分析。
- 對任何排除的偶合作用，是否以提供足夠的判斷。

#### 2.對模式正當性具有充分的數據：

- 在模式與計算中，是否具足夠數據來支持其概念模式及定義相關的參數。
- 主要數據來源（含野外、實驗室或天然類比）是否經由品管做適當之合格管控。
- 概念模式及參數值是否符合 NUREG-1563 規定。
- 是否以執行敏感度及不確定性分析，以測試額外數據之需求。
- 在其概念模式中，是否已提供觀察現象的內涵與排除的合理基準。

#### 3.經由模式選取使數據之不確定性特性化與增殖：

- 使用於模式及計算之參數值，是否合理根據雅卡山地區的數據資料、實驗室試驗、設計文件、天然類比及應用的工業標準。
- 假設的參數值範圍及其機率分佈是否就不確定性及變異性合理地計算。
- 任何邊界假設是否可經得起技術性地辯論。
- 數據是否符合設計特性與概念模式的假設。
- 任何參數值之間的相互關係是否已適當考慮。
- 如何將參數值與既有發表文獻或核管會人員獨立分析所得資料互相比較。
- 確認系統參數的敏感度。

#### 4.經由模式選取使模式之不確定性特性化與增殖：

- 能源部是否已考慮適合的替代模式。
- 能源部是否已對用於安全案例之概念模式提供支持的資料。
- 工程及天然系統模式之中間階段的輸出，是否與所選的概念模式一致。

#### 5.模式選取的輸出結果具客觀對比的支持：

- 能源部是否已驗證有合理的物理基準，來解釋模式輸出或其它計算結果。
- 能源部是否已彙整其它足夠證據，來支持模式的結果。

### 場址特性調查作業之審查

此調查作業之審查係指進入審照階段之審查，與申照前預審階段之審查不同。申照前預審階段依 10CFR63B 所規定包含兩項主要內容：

- (1) 規定能源部負責本項場址調查工作之執行，以獲取雅卡山處置場長期功能所需之數據資料。
- (2) 場址特性調查前及調查活動期間的審查包含能源部調查計畫、能源部定期報告進展、核管會人員得進行現場之檢查、且核管會業務主管得隨時以書面對能源部提出意見，及邀請公眾提出意見。核管會業務主管對於所有意見文件傳送州政府、議會及印第安部落之管理團體。核管會於場址調查期間對能源部定期提報資料及核管會之審查內容應公開予民眾。前述各項活動內容將由能源部與核管會人員進行非正式的會議(參考 10 CFR 2.101(a)(1))，並且此階段核管會業務主管的意見表達並不構成對任何授權或發照的承諾。

完成申照前預審階段後能源部正式提出申請，其中一般資料審查需包含場址特性調查工作說明的審查。有關提送之一般資料文件，若涉及機密不可對公眾公開之資料，或有關國家安全之資料，必須與其他不須保密的資料分開來。依據 10CFR63.21(a)申請的資料必須儘可能完整且清楚易懂，經審查判定為詳實充分，始得接受成案(docketing)。對此部份之審查，核管會人員將依雅卡山審查計畫內容之場址特性調查作業描述 (Description of site characterization work) 之要求執行。內容簡述如下：

#### 1. 審查範圍 Area of Review

審查將評估 10CFR63.21(b)(5)所規定的資料。核管會審查人員利用後續所述之審查方法及接受準則審查場址特性調查工作的結果與說明，範圍包含如下六項：

- (1) 地質
- (2) 水文

- (3) 地球化學
- (4) 地工特性與母岩條件
- (5) 氣候、氣象及其他環境科學
- (6) 生物圈

## 2. 審查方法 Review Methods

審查方法 1：對場址特性調查活動的敘述，審查其項目是否完整。確認符合場址特性調查範圍（至少包含前述六項）需對應的項目均已完備。

審查方法 2：審查場址特性調查的結果摘要。確認場址特性調查活動的結果已敘述於執照申請書的一般資料說明文件，內容並應包含下列各項之可接受的摘要敘述：

(1) 地質概述，包含如下：

- 敘述場址天然環境，包含主要地形及地質特徵的說明。
- 敘述地表及地下主要岩石單位，及其地層層序相關性。
- 敘述潛在重要地層及構造特徵及位置，如斷層、裂隙及節理系統。
- 敘述涉及預定處置場運轉及安全之地層單位的地工特性。
- 描述用於評估預定處置場功能之地質系統。
- 摘述區域地形、構造、地震及火山模式(如概念、技術基準及數據解釋)並強調可影響處置場運轉及安全之特徵、事件及作用。
- 鑑別需利用複雜工程量測之潛在地質危害。
- 地震活動性評估的摘要。
- 火山活動性評估的摘要。

(2) 水文概述，包含如下：

- 水文地質(含水層及侷限水層單元)特徵之敘述，包含已知或推測之重要特徵，並包括水力傳導(hydraulic conductivity)、傳導性(transmissivity)、孔隙率(porosities)、滲透率(permeability)及其他主要水文地層單位的水文地質參數。
- 說明區域地下水流系統，包含討論主要特徵及影響局部及區域地下水補注之控制因素。
- 描述用於評估預定處置場的功能的水文地質系統（飽和與非飽和）。

- 描述與討論局部地區的氣候，包含降雨、溫度及地表逕流。
  - 地下水質的討論。
  - 用水型態的討論，包含地下含水層之抽取。
  - 個別含水層系統的水量估算。
  - 確認地表水文特徵，包含壩等設施所圍水體、連續或間歇性的河道、或其它地貌，能對地質處置場運轉區之操作或安全具潛在影響者。
- (3) 地球化學概述，包含如下：
- 描述估算處置場安全的地球化學環境。
  - 地下水特徵的評估，包含水化學、放射性核種之溶解度及放射性核種吸附能力。
  - 敘述置放廢棄物包件區鄰近的地球化學環境。
- (4) 地工特性及條件之概要，包含如下：
- 討論場址土壤工程性質，描述所需之場址調查結果。
  - 討論場址岩石工程性質，描述所需之場址調查結果，特別是針對地質處置場之地下開挖，應加強母岩及其臨接周圍岩石之地工特性。
  - 討論及敘述其它場址特性調查工作，以清楚顯示地表及地下設施之相關地工特性與預期的反應及功能。
- (5) 有關場址氣候、氣象及其它環境資料之概述。並包含古氣候特徵、事件及作用的敘述。
- (6) 有關於生物圈的概述，此生物圈途徑的選擇，在於進行劑量評估，其必須與中緯度沙漠的乾燥或半乾燥條件一致，其位置、代表地區食物種類及可能最大曝露個體的生活型態，都應於申請文件中說明。有關可能大曝露個體特徵的細部資料，應列在安全分析報告中。

### 3.接受準則 Acceptance Criteria

接受準則乃是依據法規 10CFR63.21(b)(5)的要求，對於執照申請的一般資料文件說明章節，提供場址特性調查工作的相關說明。大致上，這部分的細部技術審查將另列於安全分析報告中。

接受準則 1：必須適當描述場址特性調查的活動。諸如：地質、水文、地球化學、大地工程性質及母岩條件、氣候、氣象及其它環境科學與生物圈等，

均要提供一適當整體說明。

接受準則 2：必須適當描述場址特性調查的成果。

- (1) 對雅卡山地區目前的特性與作用應有充份的瞭解。
- (2) 對於可能影響雅卡山處置場安全的未來事件與作用的演變應提供適當資料。
- (3) 以目前天然作用的知識敘述雅卡山場址及附近區域，並包含可能最大曝露個體的位置，提供其所參考生物圈的成果說明。

#### **4.評估結果 Evaluation Findings**

對於核照審查程序，核管會審查人員於審查後必須提出評估結果。如果執照申請文件涵括詳盡的資料，且適當滿足管制之接受準則內容，則可決定此場址特性調查作業之報告文件是可以接受的。審查者將撰寫安全評估報告中有關適合的結論。此包含審查作業及為何審查者認為可接受的原因之摘要陳述，內容可以下列方式陳述：

「有關一般資料及其他補充執照申請文件，核管會審查人員已完成場址特性調查作業之審查，並且合理確認其內容滿足 10CFR63.219(6)(5) 的要求。文件內容已適當摘要說明雅卡山場址特性調查作業及其工作之成果，並且能夠使核管會審查人員進行整體執照申請的評估。」

#### **核管會高放處置管制及現地檢查作業編制**

核管會對於高放處置管制之編制，目前在核物料安全及保防署 ( Office of Nuclear Material Safety and Safeguards ) 下設置高放處置場安全管制處( Division of High-Level Waste Repository Safety )，現任處長 C. William Reamer, Division Director 負責綜理高放處置場安全管制，設兩位副處長分別掌管核照與檢查 ( Licensing and Inspection ) 業務及技術審查 ( Technical Review ) 業務。前者核照與檢查業務方面下設兩個計畫管理組 A 與 B，人員共計二十名；後者技術審查業務方面下設三個組：工程 ( Engineering ) 組、處置場場址 ( Repository Site ) 組及功能評估 ( Performance Assessment ) 組，人員共計三十一名。本次實習期間，至核管會進行短期研習，即被安排至處置場場址 ( Repository Site ) 組，由該組資深

地質師 Dr. Philip Justus 負責協調研習進度。Dr. Justus 在核照前預審作業階段亦負責場址地質調查相關審查與聯繫協調業務。

有關現地檢查作業，在申照前預審階段核管會僅設置一駐地代表辦公室（On-site Representatives Office）於內華達州拉斯維加斯，且只維持少數工作人員進行例行現場檢查與聯繫工作，也包含場址特性調查作業之例行資料蒐集，以及定期提送雙月工作紀要。此工作編組將於能源部取得處置場建造許可後，核管會將擴大設置檢查作業人員於雅卡山場址，以進行能源部建造期間之駐場檢查作業。



## 五、雅卡山場址野外地質及相關設施研習

### 前言

本次赴核廢棄物管制分析中心(CNWRA)實習，主要由地質與地球物理部門負責。期間安排了一次雅卡山預定地質處置場址之野外地質實習及相關設施參觀。由該部門資深研究員 Dr. John A. Stamatakos 陪同，進行區域地形、區域地質、區域水文地質、場址地質、地質構造、火山作用等主題之現場介紹與討論。

時間自十月九日至十四日，由德州聖安東尼市出發，前往內華達州拉斯維加斯，往返位於 Nye County 的雅卡山地區，行程結束後返回德州聖安東尼市。期間原預定參加能源部(DOE)於拉斯維加斯舉行開放公眾參與之技術討論會議，主題為雅卡山處置場址在功能評估方面有關火山作用之安全議題，惟適值聖海倫斯火山(Mount St. Helens)活動，該技術討論會議為避免引起敏感之爭議，只進行內部檢討，暫時關閉未開放公眾參與。所以此行除參觀雅卡山預定處置場址設施外，均以野外現場地質特徵觀察及討論為主。以下僅就野外地質實習整體心得介紹如后：

### 地質調查程序

地質調查的步驟乃是由大範圍逐漸縮小，由普查逐漸進入精查，所採用方法及儀器也有所不同。整體而言，必須先進行區域地質調查，掌握區域之地層分佈及地質構造特性，後續所進行的場址精查計畫才能配合工程設計及評估所需予以順利推展。

整體場址特性調查所要包含的範圍大致可分為下列幾項：

- 地質(地層分佈及地質構造特性)
- 水文地質(地表及地下水文特性)
- 地球化學(地層物質化學組成與特性,地下水化學組成與特性)
- 母岩的土工特性與條件(強度,變形性,滲透性及一般物理性質)
- 氣候氣象與環境條件(含古氣候特徵,事件及作用)
- 生物圈特性(代表地區食物種類及可能最大之曝露個體)

前四項於地質調查工作中以地表地質調查、地質鑽探、地球物理探查、取樣（土、岩及地下水）現場及實驗室試驗分析，建立調查及分析成果資料。除例行的地層層序與其延伸性，及地質構造如斷層與節理分佈及特性，也須紀錄地形，地表地質作用，及水文特徵如河川湖泊湧泉等。同時在野外地質調查期間，也配合進行地球物理探查及地質鑽探。依室內先期航照判釋及規劃，對可疑線型等構造特徵，予以進行地球物理普查，方法包含震波探測，重力及磁力探測。以求得地下地質訊息，供作地質剖面參考依據，以及建立區域地下水文觀測資料。因為僅就場址的調查，並無法顯露全部地質訊息，並且局部地區的地質構造，乃受區域地質構造特性所控制，先期的區域資料有助於場址地質構造趨勢的了解。

雅卡山場址特性調查期間，除了 DOE 進行一系列地質調查外，NRC 及 CNWRA 工作人員亦同時進行重點調查，就 DOE 所提資料進行現場覆核，以及其他重要訊息的察覺，並在技術討論會議中進行相關重要議題之意見交換，以期使未來執照的申請及審查對雙方都能有幫助。

### **雅卡山場址相關之重要地質特徵**

在雅卡山場址相關重要之地質特徵介紹前，先簡單說明雅卡山場址的區域位置，詳如圖 5-1，及區域地質概況，如圖 5-2(引用 John A. Stamatakos, 1997, The Journal of Geology, Vol.105, p.320, 雅卡山區域簡化地質圖)，由左至右大致分為四區，Bare Mountain 為古老地層區塊；Crater Flat 為第四紀(Quaternary)之沖積層平原區且含一系列新期火山；Yucca Mountain 為由一系列斷層切割之山嶺地區，地層由凝灰岩構成，也是預定處置場場址所在位置；Jackass Flat 為第四紀沖積層平原區。其中以 Bare Mountain Fault 向東滑移之正斷層作用，使右邊三區相對向下位移，而呈現地層相對較 Bare Mountain 區塊年輕。由北向南則進入 Amargosa Desert，西南側山區為內華達州與加州邊界，越過此座山即為 Death Valley，這是一個走向斷層形成的構造盆地。全區地勢除山區之起伏外，平原沙漠由北向南緩降。本區域之斷層構造仍持續緩慢作用中。

由於現場工作時間限制及部份地區之管制，僅彙整主要觀察區域或設施，以及場址地質特徵介紹如下(部份地區位於雅卡山場址及軍事管制區，因攝影限制，引用既有圖片)：



圖 5-1 雅卡山區域衛星影像圖(John A. Stamatakos 提供)

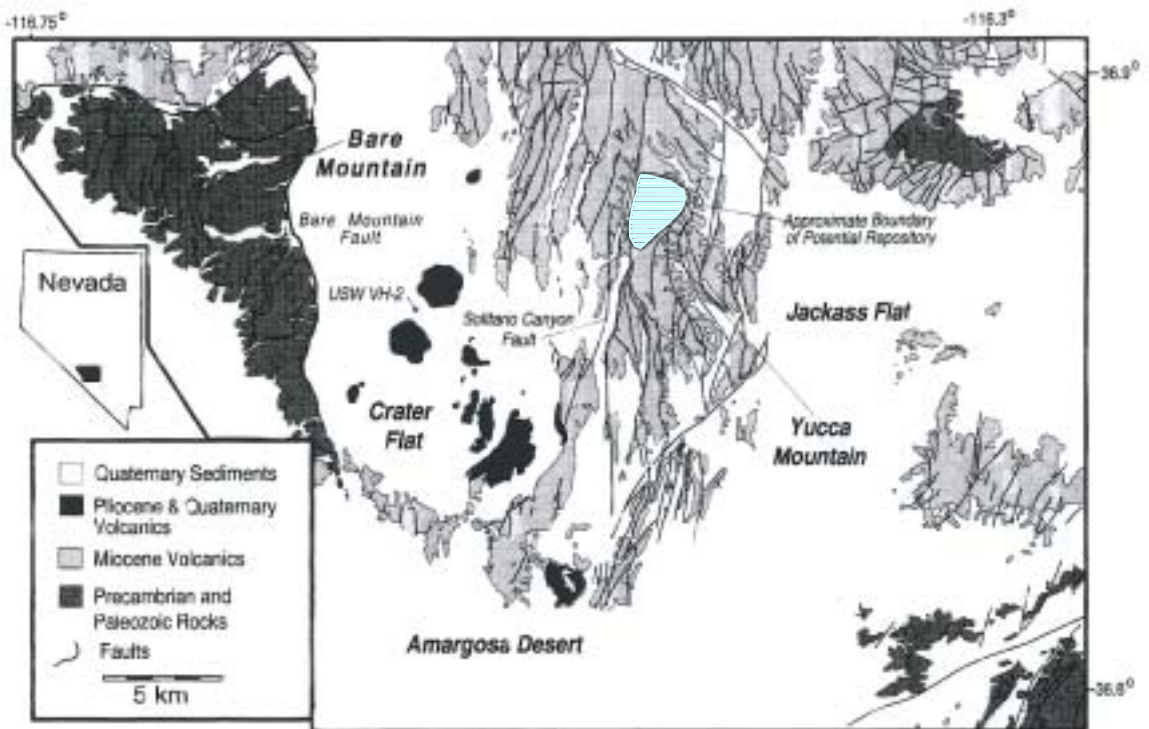


圖 5-2 雅卡山區域簡化地質圖(John A. Stamatakos 提供)

## ■ Gold Ace Mine Fault

此斷層位於 Bare Mountain 區塊，如圖 5-3 所示為一系列正斷層之分佈(由 95 公路向東北方向之 Bare Mountain 拍攝)，照片左(西北)及右(東南)兩側地層分別為先寒武紀(Precambrian)地層及古生代寒武紀(Cambrian)地層，以變質石灰岩(或大理岩)為主。這個地層的分佈也顯示出東邊雅卡山區域的基盤岩層，亦即沖積層及凝灰岩層下方之基盤岩層。基本上，這個地區與處置場的安全與功能應無直接影響，但可視為基盤岩層的出露，對於此區域地質相關特性調查，有助於了解場址之地質演變。

此地區稱為 Gold Ace Mine 乃是因為曾經有金礦開採，據指出曾有其成礦的研究，顯示為熱液作用(Hydrothermal process)所形成。因此，熱液作用是否仍持續作用或是否對此區域有不利的影響就必須釐清。而後續之研究已認為該作用已停止，惟一系列大區域的走向斷層及正斷層作用仍持續著。



圖 5-3 Bare Mountain 區塊的 Gold Ace Mine Fault

## ■ U.S. Ecology low-level waste site

此低放射性廢棄物處置場位於 Nye County 的 Beatty 鎮南方距離約數哩的沙漠區，亦即 Amargosa Desert 地區。目前由 US Ecology, Inc., 所經營負責。自 1962 年至 1992 年底止，此場址接收並掩埋商業性低放射性廢棄物共約五百萬立方呎，並且據估計這些放射性廢棄物總活度達 641,000 居里，此場址雖已停止接收放射性廢棄物，但仍持續運轉中。目前用以進行有害廢棄物的處置。由於其處置方式採簡單之地表壕溝掩埋，所以是否會因入滲地下水系統而污染並擴散至鄰近地區，如西南方最近的 Amargosa Valley 地區，為州政府當局所相當重視。

美國內政部(DOI)所屬之地質調查所(USGS)在該低放射性廢棄物處置場址邊界外建立了一處研究用水文監測站(Amargosa Desert Research Site)用以進行毒性物質水文調查計畫(Toxic Substance Hydrology Program)，目的在於調查該沙漠區水文特性及污染傳輸作用在乾燥區域行為的了解，以發展水文科學並提供有關廢棄物隔離的決策資訊，以及沙漠環境之水資源管理。



圖 5-4 位於西南方沙漠地帶的低放處置場

除了地質調查所進行的計畫有直接與間接地對該低放處置場監測外，州政府亦執行處置場封閉後相關作業，包含持續性的檢查及監視封閉後場址工作人員相關之作業。並進行環境樣本的蒐集，並分析對此關閉場址的影響。



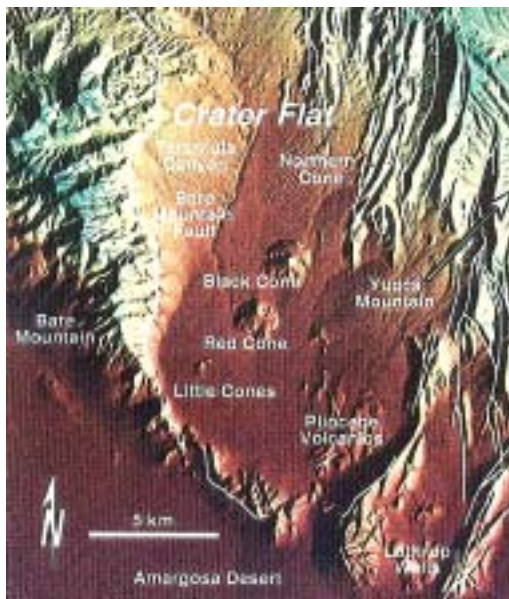
圖 5-5 美國地質調查所建立之監測站

#### ■ Steven's Pass – over look of Crater Flat

此處位於 Bare Mountain 南緣,為由南向北進入 Crater Flat 的一個關卡，由此處可遠眺整個平原區，左側為古老地盤之 Bare Mountain,遠處至右側較平順的嶺脊為雅卡山區域，中間幾處土丘狀的位置為玄武岩質火山。



圖 5-6 由 Steven's Pass 向北遠眺 Crater Flat



CNWRA 對於該地區地質特徵的特殊性，如斷層活動性及火山作用潛能等，認為必須深入研究以獲得整體評估有用的資訊，就區域地質的了解，該區域沖積層下方應是古老基盤及火成岩質地層。

圖 5-7 Crater Flat 地區數值地形

對於火山作用的調查，於該地區採取了地球物理方法，如空中磁測及地表高解析度磁力探測進行調查，並進行相關地質鑽探。同時也對這些玄武岩質火山進行地質定年(約十萬年內)，除幾處可見的玄武岩質火山錐，由磁測探得幾處異常位置，認為地下有潛在熱原並無出露，如鄰近的 Little Cone 附近地下約十幾公尺處，有未出露的熔岩流(Buried Lava Flow,圖 5-1)。

#### ■ Black Cone

Black Cone 為 Crater Flat 地區分佈的小火山錐之一，為玄武岩質具高孔隙的火山渣，由方大鏡觀察仍可見輝石及長石之斑晶，這些火山錐在 Crater Flat 地區呈現一線型排列的特徵。

就過去火山事件的分析，認為是一次事件或是個別獨立事件，在未來功能安全評估是有很大的差異，並且以傳統單存的機率事件分析作為未來評估

亦有爭議，CNWRA 認為仍應考慮區域地質構造特性，如斷層分佈形式及新期構造應力特性。因為火山作用的危害評估，也存在著時間及範圍的不確定性，CNWRA 慎重的獨立進行評估，雖然可能的機率會是非常低，但只要其發生，所產生的後果重要性卻非常大，這也是 DOE 及 NRC 所共同認為的重點。對於火山作用潛能的地質構造評估，CNWRA 以其研發的 3DStress 分析程式進行趨勢分析。



圖 5-8 Black Cone(左)及其多孔隙玄武岩質火山渣岩塊 (右)

#### ■ Drill hole usw-vh-1 & 2

為進行水文地質調查，DOE 在 Crater Flat 區域亦鑽設數孔地質探查孔，其中編號 Drill hole usw-vh1 及 usw-vh2 所測得孔內水溫達攝氏一百度以上，而 usw-vh1 之地下水深度約 600 呎。由鑽孔內高溫特徵顯示附近應有熱源，此熱源所造成的效應是否會附加於鄰近雅卡山區域處置坑道系統的問題，應該釐清，但後續研究，評估認為這個事件是在雅卡山處置場址系統之外，因為就地質構造而言，有許多縱向分佈的斷層，例如 Solitario Canyon Fault 等，



圖 5-9 Crater Flat 之抽水井及蓄水池

區隔了 Crater Flat 及雅卡山區域。但若考慮更深層之熱源問題，例如是否存在潛在之岩漿庫問題，則是另一項火山作用的部份，無法單從鑽孔地溫來評估。

#### ■ West Approach to Solitario Canyon (SC)

由 Steven's Pass 向北進入 Crater Flat,經過數座火山錐後，向東接近到雅

卡山西側的山谷 Solitario Canyon (SC), 這是由管制區外所能接近處置場址區域最近的一點(圖 5-10 星號位置), 惟據提示不宜於此拍照。這地區之山谷與山嶺形成一系列縱向平行的排列, 主要是受地質構造所控制, 如地質圖所示該峽谷乃是由 Solitario Canyon Fault (SCF)發育而成。此斷層為向西滑移之正斷層, 致西側 Crater Flat 地層相對東側雅卡山地層下降。

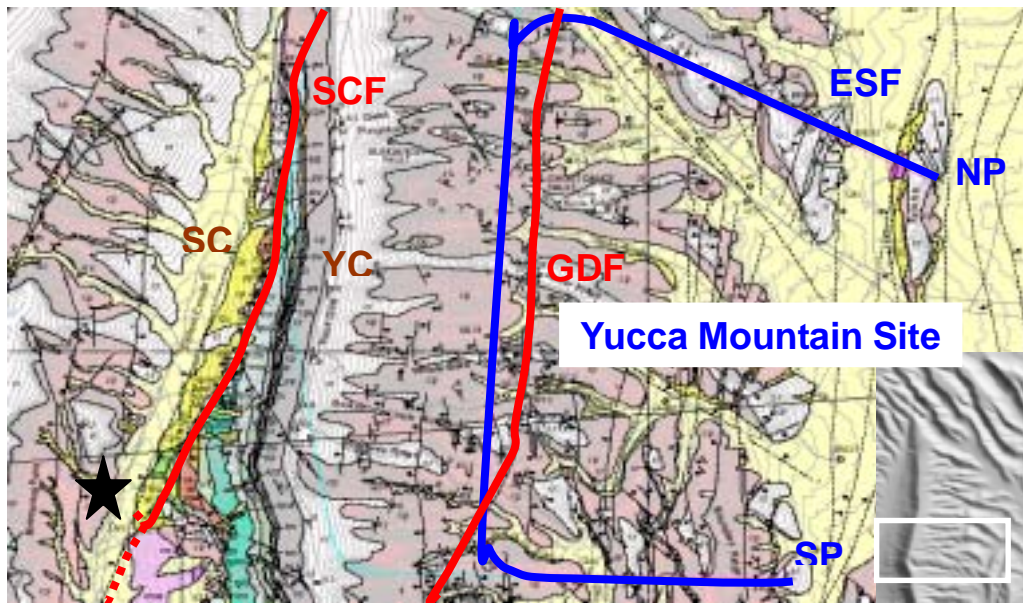


圖 5-10 雅卡山地質圖(改繪自 USGS,1998)

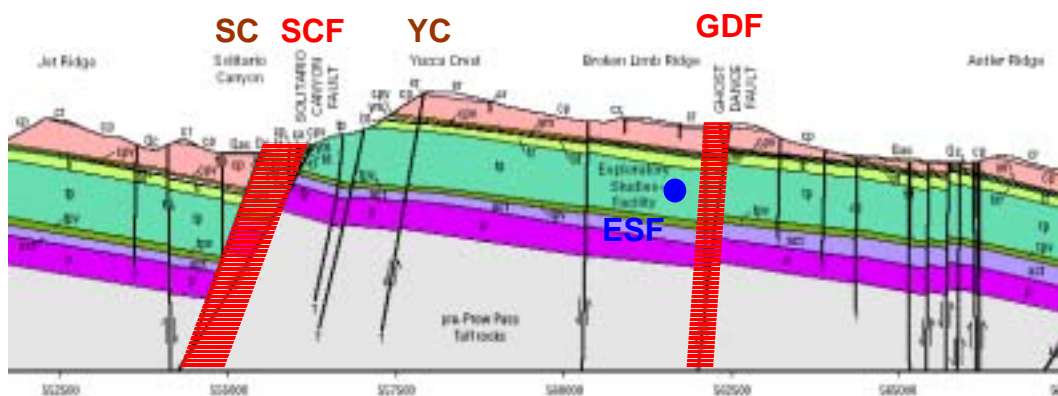


圖 5-11 雅卡山地質剖面圖(改繪自 USGS,1998)

區域性的地質構造實際上仍在活動當中, 也就是雅卡山地區鄰近的主要斷層仍是活動斷層。對於這一地質特徵, 所能接受的考慮是因為它的活動性非常的低。相對於台灣, 對於活動斷層的敏感度顯然是有較大的彈性, 這在於處置系統是建立於具風險考量的評估, 而並非是由絕對的排除因子選項之考



慮所產生。相關的選址準則，是作為篩選的依據，如果此準則是一種排除因子，則幾乎很難找到所謂的穩定地質帶，所以場址的適合性是依據整體的評估，而非訂定繁雜的排除因子，所謂的排除因子必須是有相當的定義，而不是一系列的不確定性(Uncertainty)，其中所隱含的意義是必須有相當的專業基礎來進行各項因子的評估。

#### ■ Pleistocene Spring Deposits

在雅卡山地區南方進 95 號公路附近，圖 5-1，有一處湧泉遺址，見圖 5-12，目前地表已無泉水跡象，但此區域呈現一片白色的地表覆蓋層，質地相當輕，為以前湧泉時將地層介質中的鈣質溶解而隨地下水攜帶出來，最後累積在此地表區域。據判斷，其成因是沖積地帶上游區的水源由地表下沿著斷層與沖積層的途徑流動，形成如喀斯特地形之地下洞穴的伏流情形，經過一段地下竄流後再流出地表。此現象並不易確定出其流通途徑位置。對於地下水位變化，在評估過程中應當被列入考慮。



圖 5-12 雅卡山地區南方的湧泉遺址

#### ■ Sink Hole

水文地質模式的建立，除了地表水文調查及鑽井測得地下水文特性外，地層特性及地質構造之影響亦非常大。由於地層的異向性，例如節理岩體或斷層分佈，使得分析模式相較於均質性的土層水文模式複雜得多，所以詳細的資料對模式的分析是必須的。而即使較傾向於均質的土層(未固結岩層)，其沉積物特性、組成、沉積排列及特殊地質作用亦影響其是否可以均質之模式分析。



在場址區域南方，所發現的一處沖積層陷落坑洞，如圖 5-13，其規模於地表影響範圍約五十公尺直徑(目測)。而此陷落坑洞所反映的是早期地下水流行為的線索，正如前項湧泉遺址之喀斯特地形特性，對於其發現及評估有助於分析模式之修正。

圖 5-13 雅卡山場址區域南方之陷落坑洞

#### ■ Ash Meadows / Devil's Hole

如前項所言水文地質模式的建立有賴地表水文調查資料之建立，尤其於分析區域中應特別詳細調查河川湖泊及永權之資料紀錄。在 Amargosa Valley 南方有一處 Ash Meadows 泉水(圖 5-14 左)，位於一野生動物棲息公園內，本次到訪時雖大部份已乾涸，仍可見到綠草茂盛處有小面積之沼澤帶。另一為 Devil's Hole 天然水池(圖 5-14 右)，此顯示地下水面於此區域出露地面，與處置場區域之既有鑽井水文資料分析之水力坡降相當符合，參考圖 3-3 簡化區域地下水文模式。由上述各項水文資料，進一步評估分析區域之地下水體流向(圖 5-15)及流速。

核管會在進行相關之獨立分析時，其結果常會與能源部的結果有所不同，主要關鍵在於其所建立之模式，因為地表水文特徵、節理岩體中地質構造之控制特性、分析之邊界條件設定的內容等有不同的看法，如果顯現的差異很大，則須要求能源部做重新檢討與修正。另一方面，核管會工作人員對於新的事證發現時，都需進行評估做進一步的修正比較，同時也審視能源部之分析結果，判斷是否應要求能源部進行檢討，基本上，核管會的要求是能源部應採更保守之分析模式的結果。



圖 5-14 Ash Meadows 泉水(左)及 Devil's Hole 天然水池(右)

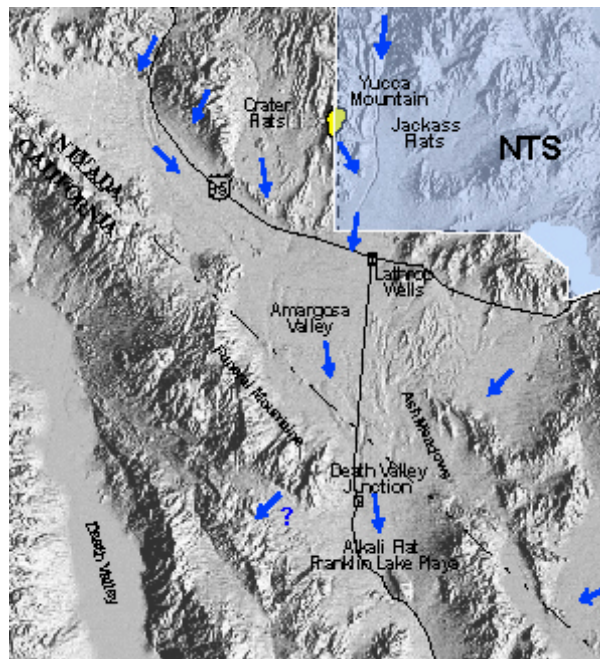


圖 5-15 雅卡山區域地下水流向示意圖(DOE 資料)

■ **North portal (NP) to Yucca Mountain ESF and South portal (SP)**

雅卡山探測研究隧道(Exploratory Studies Facility Tunnel, ESF tunnel)的開挖於 1994 年開始進行，以隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)工法，經過三年的開挖而完成，此研究設施之隧道長約五哩，成 U 字型，參見圖 5-10。北口 (NP) 鄰近施工管制的 25 區，也是此鑽掘隧道的起點。TBM 於

任務完成後，目前停放在隧道南口（SP），工區照片參見圖 5-16。其開挖之渣料堆置於於北口 25 區旁，未來處置場採不回填方式達 10,000 年以上，所以這些渣料將不需在用到。

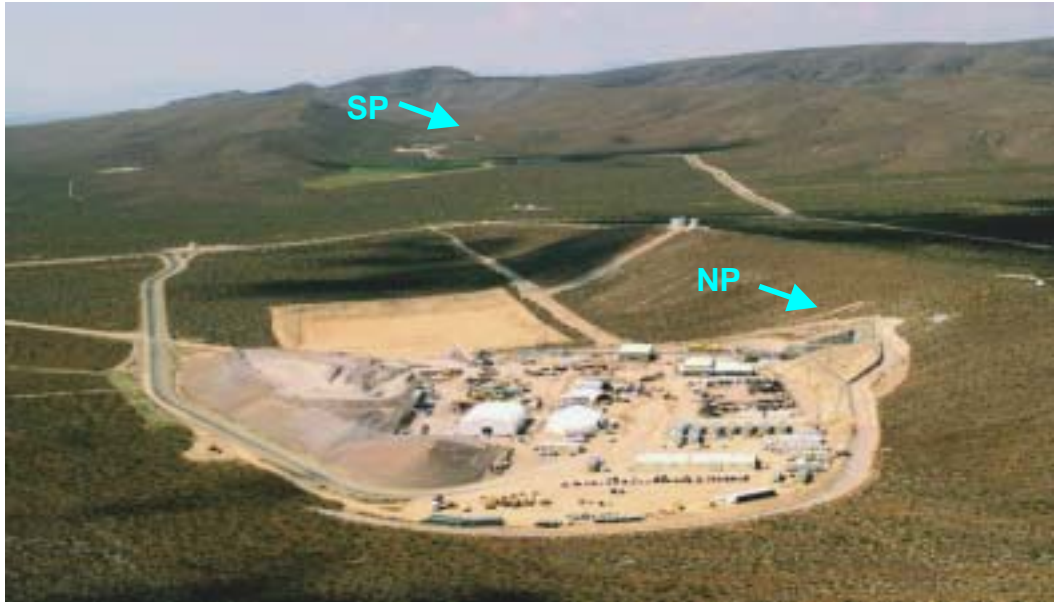


圖 5-16 雅卡山處置場址 ESF 隧道施工區照片（DOE 資料照片）

洞口形式簡單，採分階開挖，均為凝灰岩岩盤，具多孔質之特性，非常穩定且幾無地表沖刷，亦無崩積層，並無需特別之洞口支撐及邊坡保護，僅於邊坡上開挖一道馬蹄形排水溝以備不時之需。隧道內之開挖支撐，目前為臨時性之鋼之保、岩釘、噴凝土（僅視需要），仰拱採預鑄方式，少採用混凝土（因可能改變地下水化學組成）。處置隧道位於熔接凝灰岩之範圍，其上下為非熔接凝灰岩，目前隧道以封閉，僅留少部分試驗持續進行資料紀錄。

探測研究設施隧道，即地下實驗室，目的在於瞭解處置場現地水文地質特性、處置區熱效應、斷層帶及地層特性、及岩石隧道開挖之地工特性。共計於此隧道橫向開挖了八處試驗橫坑。

由地表注水並追蹤其滲流，注流速率以高於預期的降雨之入滲速率，做保守之試驗。大約於地表注水後 58 天，滲流之水到達試驗橫坑，同時試驗所收集到之入滲水僅達約 10%，其它大致為地表蒸發或流經其它開挖面。儘管入滲比例低，由碳 14 定年研究收集到的地下水顯示此區地下水年輕，並指出具有相對較高的滲透性。

由開挖岩性紀錄界定該區之熔接凝灰岩（處置區主要岩性）及非熔接凝灰岩邊界及其滲透性，前者節理裂隙多，而後者滲透度低且具扮演屏蔽處置場之特性。基本上，處置區所要考慮的是以地質條件為主，以工程條件的考慮為輔。熔接凝灰岩緻密、孔隙率低，但節理裂隙多，雖為地下水流通途徑，但也提供快速之排水功能。

試驗橫坑亦進行有關高放射性廢棄物置放後的熱傳效應，試驗中岩石與容器距離為 20 公尺。昇溫階段，坑道內側壁達到 200 約需耗時 900 天，但冷卻則快很多。這個試驗區所獲得之資料將做為電腦模式的修正與驗證。

#### ■ Drill Pad UZ7A – Ghost Dance Fault (GDF)



圖 5-17 Ghost Dance Fault(上)及露頭近照(左)



此斷層（參考圖 5-10、17）位於 ESF 隧道上方，呈南北向延伸且為高角度之正斷層。由能源部進行調查時發現，並於與核管會人員進行成果技術討論，及研討此斷層對處置隧道配置之影響。至於未來坑道配置及安全設計，亦應做更確切的調查及特性調查分析，以獲得共識。

由於此斷層的存在，若有降雨時，地表水將可迅速沿此斷層帶入滲至處置區，似乎不利且斷層帶寬約百公尺以上，對於整個處置區的劃分，必須做

最適化的分配及安全退縮距離。

由於雅卡山地區所在之地質構造區屬於張力作用的正斷層區域，所形成的斷層帶多為鬆散破碎，地表水入滲後將可迅速向下流動。雖為入滲水提供通道，但因為處置場區位於未飽和帶，這個通道相對亦提供處置區滲水迅速排除的流動通道，避免處置區長時間受入滲水影響。

#### ■ Yucca Crest (YC)

雅卡山區域因地質構造產生地層側傾，形成一系列單斜構造。雅卡山嶺脊如圖 5-10、18，為探測研究設施隧道之豎井開挖處，亦為處置場址最高點。西側陡急，鄰近 Solitario Canyon Fault。由此處向西眺望，可觀察 Crater Flat 平原區之地質特徵。

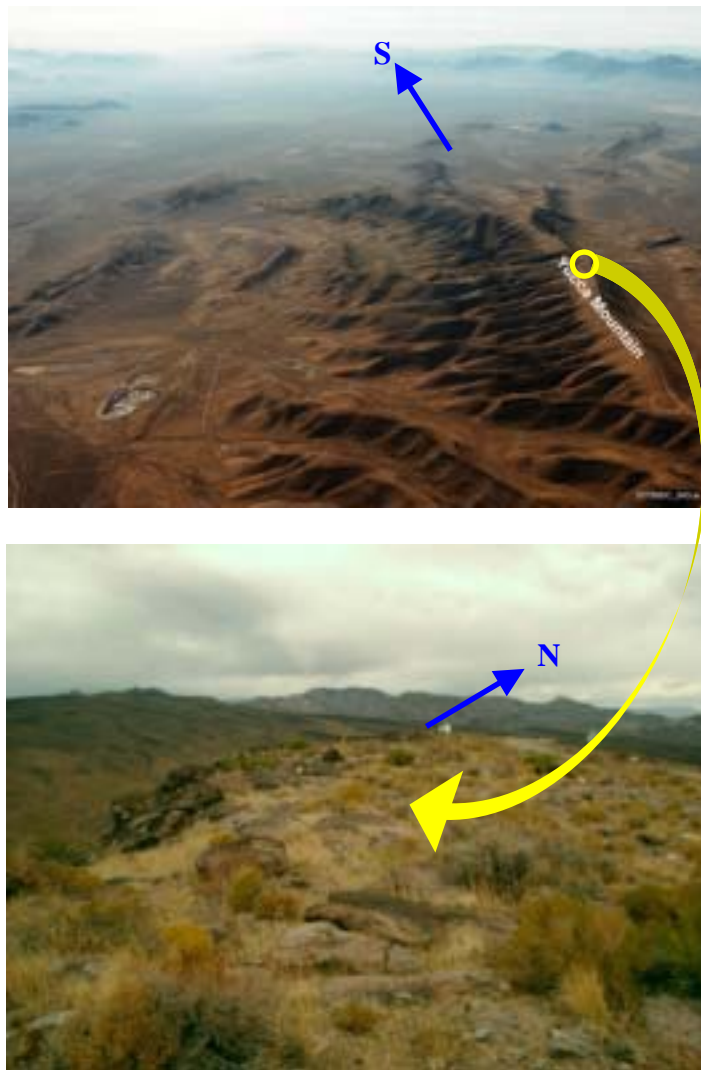


圖 5-18 場址區域（上，DOE 資料）及雅卡山嶺脊（下，西側陡急東側緩斜）

### ■ Fran Ridge Heater Block Test

此處位於處置場區東南方之斜坡上，為相鄰之兩處試驗場，如圖 5-19，分別進行原比例開挖之岩石品質調查，及原型岩石加熱試驗。前者之開挖試驗乃以圓形豎井開挖並逐項紀錄分析及照相，包含岩石種類、強度、節理分佈、方位、內含物及粗糙度等，用以評估未來豎井開挖之岩體品質。另一試驗，進行現地岩石加熱，模擬處置區於放射性廢棄物處置後，因輻射之衰變熱而逐漸昇溫。此試驗以現地開挖一獨立岩體，並置入加熱器與感應器，以連續試驗及紀錄。本試驗於試驗隧道區亦進行另一組，試驗隧道目前雖關閉中，但試驗仍持續進行紀錄中。由於試驗室僅能進行完整岩材之條件的試驗，對於具有節理裂隙之岩體則難以模擬。此現地試驗所獲得之參數及經驗相當具有實用意義。



圖 5-19 開挖測繪（左）及現地原型加熱試驗（右）

### ■ Forty-mile Wash Alluvium Outcrop

由水文地質模式分析，位於處置場址東南側，向南延伸之四十哩沖刷區沖積層區域為未來放射性核種自處置場釋出後主要之傳輸途徑。該區域地下水水面（water table）以下即為飽和帶，主要之水文地質單元包含沖積層、火山凝灰岩及基盤變質石灰岩，地下水流之傳輸模式不盡相同。地下水在堅實岩層中的流動主要途徑為節理裂隙；未膠結之沖積層沉積物中，主要途徑為顆粒間之孔隙，一般視為均質之介質，惟該區域沉積物顆粒特性變化大，小至黏土層，大至礫石層。四十哩沖刷區沖積層剖面露頭，如圖 5-20，及顯示出該沉積構造循環特性。礫石層具相大之孔隙率，並且可能存在較大空洞，而泥質部份的層次則相對緻密。地下水的流動特性將受此顆粒組成及孔隙率影響，該區沖積層並不能視為均質且等向性之介質。據此，水文地質模式應

予修正，做保守的考慮。

對於沖積層與基盤的界線，能源部亦施作了兩處深孔鑽探，以提供進行模式分析所需之條件，為取樣不易，細顆粒砂土易於流失，而出顆粒之礫石則無法提取，對於沖積層材料特性不易掌握，仍得就第表露頭觀察做保守分析。



圖 5-20 四十哩沖刷區沖積層剖面露頭

#### ■ Sample management facility

標本管理設施於 1989 年開放，用於雅卡山計畫場址特性調查期間鑽探取樣等標本之存放。其標本來源包含能源部在雅卡山地區之鑽探取樣，也涵蓋地方政府所進行之鑽探取樣的保存，隨時可提供檢視紀錄。



圖 5-21 標本管理設施 (DOE 資料)



此行野外研習重點並非研究雅卡山處置場之地質特性,而是在於瞭解以雅卡山處置場址之處置概念下,對地質等條件之思考,以及並非僅於資料之建立,重點也在如何釐清相關問題及應用於未來處置場運轉之封閉前安全分析及封閉後之功能評估.

## 第四章 建議事項

放射性廢棄物處置一直是核能應用國家所重視的議題，而處置技術先進國家對於處置方式的研究已有共同的想法，即以地質處置方式將放射性廢棄物從人類生活環境做永久的隔離。低放射性廢棄物處置技術方面，國際上已普遍應用與執行運轉。高放射性廢棄物的處置技術，雖然世界各國仍未有運轉的實務經驗，但深層地質處置已被公認安全可行。儘管如此，以管制者立場仍應審慎評估，未來的處置計畫執行結果是否能務實地達到長期安全功能的要求。尤其台灣地區位處板塊構造聚合地帶，地質作用複雜，且地形、水文及氣候條件特殊，對於處置之功能與安全影響甚鉅。

美國在放射性廢棄物處置方面，已建立完整之管理架構足供借鏡。其高放處置計畫，即雅卡山計畫，亦已進入申照預審階段。整個處置計畫執行的管制作業經驗相當豐富，即使台灣地區的處置條件與美國可能有程度上的不同，但安全管制的架構與機制則值得學習。

此次赴美國核廢棄物管制分析中心實習，由美國高放射性廢棄物處置的發展與現況、雅卡山計畫、核廢棄物管制分析中心之組織與研發、高放處置管制審查作業及現地檢查、雅卡山場址野外地質及相關設施的參訪等，進行為期約五個月的研習。對即將進行的國內處置申照前預審作業及未來執照申請的審查作業將提供務實的管制經驗。同時對於推動放射性廢棄物處置作業及未來管制作為的建議，擬定如下幾點：

### 1. 加強放射性廢棄物最終處置之法制作業：

依「放射性物料管理法」之授權，目前已公布施行「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」。除此，亦將積極研訂「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」，以及相關之選址條例、技術導則及作業要點，以利管制作業及處置作業經營者之依循。

### 2. 安全審核用過核子燃料乾試貯存：

對於用過核子燃料現況，民眾並不熟悉，藉由此階段的作業，要求台電公司做好場址設施的安全，並積極宣導以及讓民眾看得到也體會得到它是安全的，而且在未來有數十年，會被妥善的貯存。使得民眾在中程(二十至四十

年)的安全期望上能獲得肯定。如此，高放處置相關前置作業應可降低負面效應。

### 3. 推動建立高放試驗場址(Test site)：

幾乎國際上所有高放處置技術先進國家，對於處置研發工作，無不倚重試驗場址(或地下實驗室)的研究工作成果。CNWRA 的研究人員亦有相同看法：第一，它提供技術人員經驗的提昇；第二，藉由實際之現地實驗獲取實用的參數資料；第三，進行務實的模式分析，由現場實際取得參數替代推論值來進行測試分析；第四，有助於進行研發成果的整合計畫；第五，建立民眾信心。

主管機關可以在法規研擬（如高放選址條例）方面配合，明白宣示試驗場址不得作為處置場址。如此，始能推動其建立，研發的瓶頸才能打開。試驗場址並無須在地質條件上作嚴格要求，只要選定適當的處置母岩再考慮地表設施的安全，在環境的衝擊上應可被大眾所接受。

過去在國際技術合作上有許多困難，而且處置執行單位及協助之技術單位所能參與的技術層次不高。藉由試驗場址的建立，要獲得國際技術交流較為容易，畢竟也是一種國際技術的回饋。由幾乎國際上各試驗場址的研發計畫都是多國合作的情形可見一斑，而且不需由全套研發技術重來，由國外經驗及本土技術所需來考量，建立重點計畫執行，並且可以是一長期且具延續性的計畫，相信它的成效一定是正面而且積極的，也可給民眾直接的訊息，而非抽象的概念。

### 4. 強化處置計畫之督導機制：

基於安全管制的理由，主管機關應積極介入處置計畫的執行，尤其是場址調查、試驗分析、設計規劃、功能安全評估及品保。以最小干擾及最大安全考量為原則，進行規劃檢查作業及技術交流互動之申照前預審作業。

在用過核子燃料處置計畫提報審核後，除例行的年度計畫及成果報告外，應針對未來場址初步處置概念擬定處置場封閉前安全及封閉後功能技術性議題，就其各項議題及研發調查階段性成果，訂定例行技術交換討論會議，會議內容及結論應有正式文件，作為未來申照及審核的依據。此互動審查之機制在於提供一個重要的訊息，即處置之主辦機關的安全分析報告等資

料是否完整，能否是一份高品質的申請，而且未來主管機關將要在有限時間內進行申照成案與否之決定。但不意味在此機制下所完成提送之申請就等同主管機關將通過執照的核發。

#### 5. 設立技術審查支援單位：

原能會物管局為核照主管機關，應定位於技術行政，負責審查技術同仁除個人基本之專業背景外，對處置場整體之全系統功能評估應有概念，並且熟悉管制程序。除負責之審查同仁外，亦應有支援審查之專家團體。未來政府組織再造的結果，必然不易增加專業人員，也不可能行政機關提供研究設施，所以長期配合之專業單位應予設立。主管機關很難只要求業者提昇處置技術，而自身的審查技術資源卻很匱乏。它不同於處置諮詢組，它的業務建立在研究及審查技術之建立上。主管機關不可能等到業者要提出執照申請時才以任務編組方式成立專案審查小組，即使是資深專家所臨時組成之審查小組也難以勝任。建議設置如 CNWRA 這樣的一個專職機構輔助此一長期之審查工作，所要考慮的是如何針對未來國內放射性廢棄物最終處置的長期管理政策，維持一最適化的規模及人力。

這個單位也不同于專責執行機構之設立，它純粹是官方資助成立的研發及審查團隊，任務比專責機構單純。核研所部份技術人員長期擔任處置研發工作應是最佳的人力資源，並且可吸收各大學具相關專長之研究人員參與，使核廢棄物處置技術，能在學術界佔有一席之地。

附件一：實習規劃	附錄- 2
附件二：核廢棄物管制分析中心簡介	附錄- 4
附件三：核管會第 154 次核廢棄物諮詢委員會議程表	附錄-13

December 23, 2003

### Work Plan for Mr. Han-Hsiang Tseng

The American Institute in Taiwan (AIT) Taipei Economic and Cultural Representative Office (TECRO) has proposed temporary assignment of a staff member to the Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses (CNWRA). This assignment would be conducted under the auspices of the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Mr. Han-Hsiang Tseng has been identified for this assignment. He is currently employed by the Fuel Cycle and Materials Administration (FCMA) of the Atomic Energy Council (AEC) of Taiwan.

The proposed assignment would take place over a period of about 6 months, tentatively from July to December 2004. Most activities of the assignee would take place at the CNWRA offices in San Antonio, Texas. Brief visits will take place to the NRC Headquarters in Rockville, Maryland; the NRC On-Site Representative (OR) Office in Las Vegas, Nevada; the U.S. proposed geologic repository site at Yucca Mountain, Nevada; and other locations, as appropriate.

#### I. Objectives

The objectives of the proposed staff exchange of Mr. Tseng are:

1. To obtain on-the-job training related to regulation of the proposed disposal of spent nuclear fuel and high-level waste (hereafter collectively referred to as HLW).
2. To contribute to pre-licensing reviews and evaluations of U.S. Department of Energy (DOE) and DOE contractor documents.
3. To visit the proposed repository and other sites and DOE research centers (to the extent permissible), as well as the NRC OR Office, to obtain first-hand technical and regulatory information on the proposed repository.

#### II. Assignments/Activities

To achieve the objectives outlined in Section I, Mr. Tseng will conduct or participate in conducting the following assignments and activities.

- a. Engage in a self-instruction prior to coming to the CNWRA. As outlined in Section IV.1, the assignee will complete a series of readings of important background documents before he departs for the U.S.
- b. Obtain a general orientation to the activities of the CNWRA and the NRC, as outlined in Section IV.2.

- c. Become familiar with the review plan, procedures, and review tools used by the CNWRA and NRC to conduct pre-licensing and license-application reviews, as outlined in Section IV.3.
- d. Review assigned portions of DOE Technical Basis Documents on selected topics, as outlined in Section IV.4.
- e. Visit the proposed repository site at Yucca Mountain, Nevada, as well as selected DOE contractor laboratories and research sites, as outlined in Section IV.5.
- f. Attend one or more technical conferences, as outlined in Section IV.6.
- g. Provide other support to CNWRA activities related to the HLW repository program, as outlined in Section IV.7, including but not limited to on-site quality assurance audits and technical evaluations, public meetings, briefings to NRC senior managers, and meetings of appropriate Federal Advisory Committees.

### III. Mentors

Mr. Tseng will be assigned a primary mentor, who will be the primary interface with and trainer for Mr. Tseng. Other individuals will be identified to provide specific elements of training, accompany him on trips, and provide project management of particular assignments.

Dr. John A. Stamatakos will serve as primary mentor. He will provide guidance on daily activities, conduct various aspects of training, coordinate the availability of other staff (subject matter experts) who will interface with and train Mr. Tseng, etc., as outlined in Section IV. The mentor or someone designated by him will sign/initial the pages in this work plan as Mr. Tseng completes the training and other assignments.

### IV. Training and Technical Activities

The training and technical activities that constitute the substance of this work plan are organized in the following seven categories. The subsequent subsections of Section IV provide detailed descriptions of the anticipated training and technical activities in each.

- Section 1: Self-Instruction
- Section 2: General Orientation
- Section 3: Review Plan, Procedure, and Review Tool Training
- Section 4: Technical and Regulatory Reviews
- Section 5: Yucca Mountain Site Visit/Inspection
- Section 6: Technical Conference Participation
- Section 7: Project Management Activities

## 核廢棄物管制分析中心 (CNWRA)

S O U T H W E S T R E S E A R C H I N S T I T U T E

# Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses

The CNWRA was established in 1987 as a federally funded research and development center sponsored by the U.S. Nuclear Regulatory Commission to resolve technical and regulatory issues related to a geologic repository for high-level waste. Evolving from and expanding on its initial mission, CNWRA has developed a unique and powerful range of technical expertise, computer software, laboratory facilities, and field research sites for addressing complex earth sciences and engineering problems within a multidisciplinary, integrated framework. CNWRA now performs work for commercial clients as well as local, state, and foreign governments and agencies.

The CNWRA provides a significant, single resource for earth sciences and engineering services to government regulatory agencies, multinational corporations, and small service companies. A multidisciplinary, integrated approach is used to solve a wide range of problems. The Center offers comprehensive services in technology areas such as:

- Waste management and disposal
- Hazards and risk assessment
- Flow and transport
- Oil and gas exploration
- Oil and gas production, storage, and transportation



- Corrosion science and process engineering
- Mining and geotechnical engineering

## **Waste Management and Disposal**



The Center is assisting the U.S. Nuclear Regulatory Commission in assessing site characterization and long-term safety for the nation's first underground high-level radioactive waste repository by providing scientific testing and engineering design. The tunnel boring machine is shown prior to entering the starter tunnel.

The CNWRA offers safe and economical solutions within regulatory constraints for problems involving management and disposal of hazardous nuclear and chemical wastes. The Center's world-renowned scientists and engineers support organizations and agencies within the United States, Canada, France, Sweden, and the United Kingdom, providing expertise in:

- Integrated system safety analysis
- Regulation analysis and development
- Mathematical modeling of fluid flow

CNWRA waste management and disposal services include:

- Laboratory testing
- Field investigations
- Site inspections for regulatory compliance

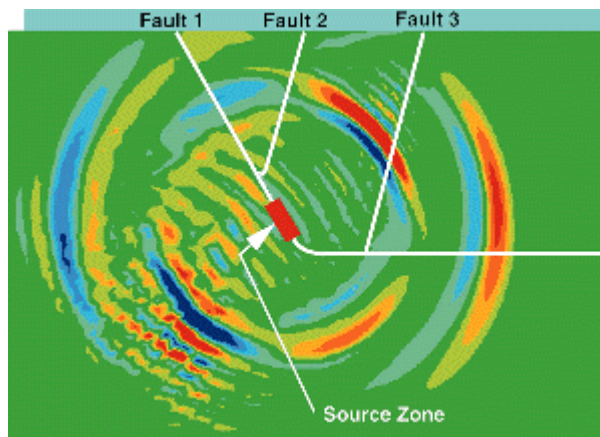
## **Hazards and Risk Assessment**

The CNWRA supplies sophisticated analyses and cost-effective services for the assessment and mitigation of geologic hazards around the world. CNWRA staff members, with their extensive expertise in site characterization, volcanology, seismology, rock mechanics, and

hydrology, evaluate potential geologic hazards and develop methods to minimize their effect on the surrounding environment and population.

CNWRA expertise is used to:

- Perform geological and geophysical site characterization
- Evaluate and mitigate volcanic and seismic hazards
- Conduct numerical modeling for quantitative hazard assessment
- Assess total system performance



Numerical modeling of seismic wave propagation provides realistic estimates of ground motion during earthquakes. CNWRA scientists have developed models that reflect complex source zone geometry and wave propagation through faulted geologic terrain, information essential for modern site characterization.

Experienced staff members observed the 1995 eruption of Cerro Negro, Nicaragua, to monitor the development of the eruption and evaluate possible effects on nearby populations.

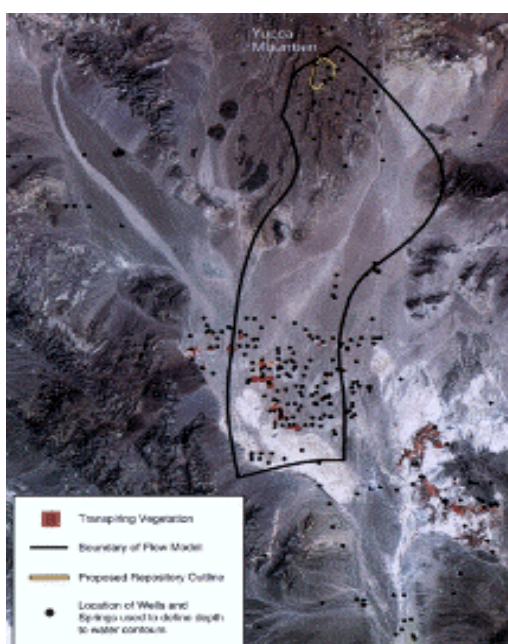


### **Flow and Transport**

CNWRA staff members have extensive expertise in flow and transport principles, enabling them to solve environmental contaminant transport problems that affect aquifer storage and recharge, in situ leach mining, pit lake chemistry, and acid mine drainage.

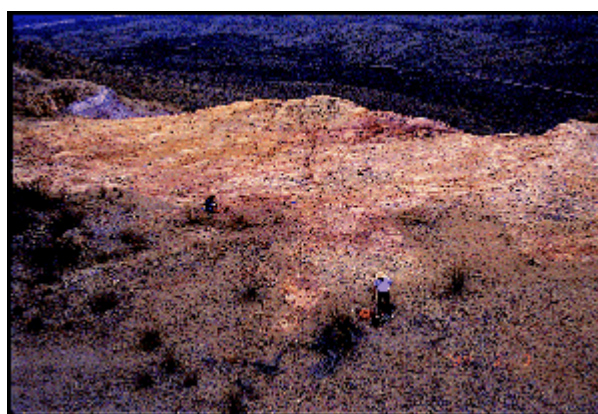
The CNWRA applies its field, laboratory, and modeling expertise to support programs involving:

- Reactive transport and coupled mass and energy transport
- Steam remediation of contaminated soil, rock, and water
- Geostatistical evaluation of aquifer and reservoir heterogeneity
- Geochemical ion-exchange and sorption processes
- Environmental impact assessment



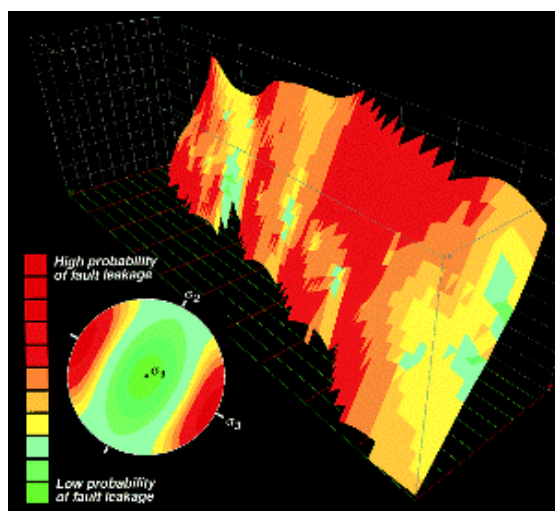
Geological, hydrological, and biological data are converted to numerical form and merged with information on man-made features to allow site characteristics analysis. High-precision data integration supports robust CNWRA flow and transport interpretations.

Geoscientists study natural systems, such as the Nopal uranium-mining district in Mexico, to extrapolate possible transport of contaminants from engineered waste disposal sites.



## Oil and Gas Exploration

The CNWRA applies its extensive field and modeling expertise to provide innovative solutions to exploration problems in geologically complex settings. The Center's unique laboratories are supported by state-of-the-art computer modeling and visualization techniques, providing integrated, multidisciplinary problem-solving capabilities.



The 3DStress™ program calculates slip tendency and direction, dilation tendency, and leakage potential of faults and fractures, permitting two- and three-dimensional analyses of stress effects on faults and fractures. This CNWRA-developed program received an R&D 100 award from R&D Magazine, designating it as one of the world 撥 100 most significant technical accomplishments of 1998.

Experienced staff members offer exploration services that include:

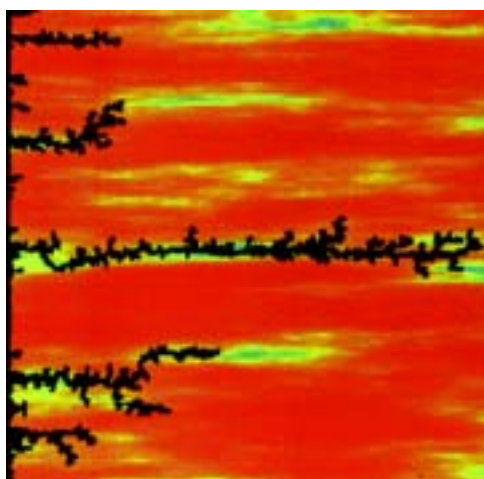
- 3-D geometric and kinematic modeling, balancing, and restoration
- Stress analysis
- Physical analog modeling
- 3-D and 2-D finite-element modeling of deformation
- Deformation geothermometry
- Fission track geochronometry
- Diagenetic modeling
- Remote sensing
- Structural geology training

The CNWRA also provides paleo-magnetic and potential field geophysics studies and prepares geographic information systems as required.

## **Oil and Gas Production, Storage, and Transportation**

As an integral component of SwRI, the Center draws on the Institute 撥 multidisciplinary skills and state-of-the-art laboratories and facilities to supplement its extensive capabilities to perform experimental studies involving:

- Petrophysics
- Deep acid penetration during well stimulation
- Secondary and tertiary oil and gas recovery
- Pipeline corrosion from highly corrosive fluids



CNWRA staff members have developed numerical models for discrete studies of unstable fluid displacement, such as the growth of wormholes and high-mobility ratio flow in porous media.

Sophisticated simulation and modeling capabilities permit the CNWRA to provide a wide range of technical services, including:

- High-speed, high-resolution geomagnetic surveys of gas distribution pipelines
- Risk analysis of oil and gas transportation
- Diagenesis modeling
- Mechanical analysis of underground storage networks

## **Corrosion Science and Process Engineering**

The CNWRA offers real-world solutions to corrosion problems by devising effective methods of monitoring and mitigating corrosion. Using

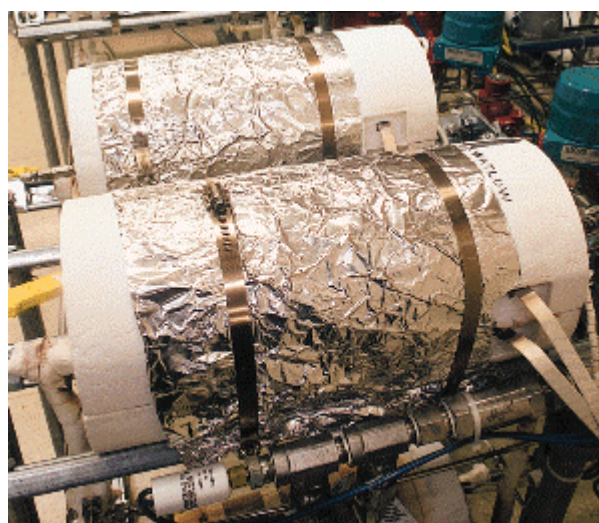
their extensive expertise in corrosion sciences, CNWRA and SwRI staff members provide services that include:

- Life prediction of nuclear waste container materials
- Corrosion and corrosion fatigue sensor development
- Numerical model development to predict gas transmission pipeline corrosion
- Materials performance evaluations in nuclear power plants, chemical process industries, and glass manufacturing
- Numerical modeling of processes leading to corrosion
- Failure analyses and corrosion testing



Using laser Raman spectroscopy, CNWRA scientists study the fundamental mechanisms of corrosion under varying conditions.

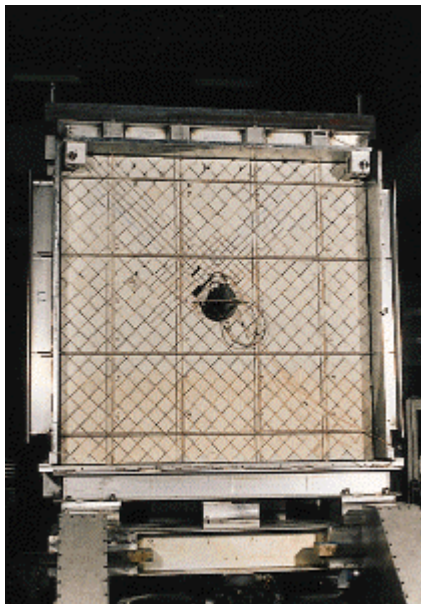
High-temperature, high-pressure corrosion reactions of interest to the nuclear, oil and gas, and chemical industries are conducted in the SwRI-developed pipe flow loop system.



## **Mining and Geotechnical Engineering**

Using numerical modeling techniques, field investigations, and laboratory experiments, CNWRA engineers provide effective solutions to a broad range of mining and geotechnical engineering problems. Center staff members have extensive expertise in:

- Conducting conventional and specialized laboratory investigations
- Performing field investigations and site characterization
- Modeling the stability of underground openings in rock, soil, and salt
- Performing seismic, rockburst, and dynamic studies of underground mines and openings
- Predicting slope stability, caving, and dam collapse
- Assessing design methodology and design of underground facilities



CNWRA engineers use laboratory-determined joint properties to develop small-scale model experiments to investigate tunnel stability under repeated simulated earthquake motions.

## **Specialized Technology and Equipment**

The CNWRA uses a wide variety of specialized laboratory and field equipment to evaluate and solve problems involving chemistry, geology, mineralogy, hydrology, and corrosion. The sophisticated equipment and laboratories at SwRI enable the Center to develop new technologies or applications based on existing capabilities.



Among the Center's advanced radioanalytical instruments is a liquid scintillation analyzer, which has wide application to analysis of low-concentration radioactive elements.

Using advanced numerical modeling and design principles, CNWRA engineers evaluate design methodology that enables surface facilities to withstand natural phenomena such as earthquakes, tornadoes, and wind loads.



The all-terrain bicycle geomagnetic mapping system is lightweight, rugged, and free of ferrous parts that interfere with the magnetometer. In suitable areas, data are acquired up to five times faster than with a foot survey.

Data collected around active volcanoes improve understanding of the dynamics of volcanic eruption, enabling scientists to evaluate the probability of volcanic eruptions and their possible consequences to populated areas.





## 核管會第 154 次核廢棄物諮詢委員會議程表



**UNITED STATES  
NUCLEAR REGULATORY COMMISSION  
ADVISORY COMMITTEE ON NUCLEAR WASTE  
WASHINGTON, DC 20555 - 0001**

October 7, 2004

**AGENDA  
154<sup>th</sup> ACNW MEETING  
OCTOBER 19-21, 2004**

**TUESDAY, OCTOBER 19, 2004, NRC AUDITORIUM, TWO WHITE FLINT NORTH,  
ROCKVILLE, MARYLAND**

**WORKING GROUP REVIEW OF THE INTERNATIONAL COUNCIL ON RADIATION  
PROTECTION (ICRP) JUNE 2004 RECOMMENDATIONS**

- 1) 8:30 - 8:40 A.M. Opening Statement (Open) (MTR/JTL)  
The ACNW Chairman will open the meeting with brief opening remarks.

The Working Group Chairman will state the Working Group Meeting (WGM) objectives and provide a technical session overview. Invited experts will also be introduced at this time.

**WGM Purposes**

The purposes of the WGM are: (1) to develop the information necessary to provide a letter report to the Commission; (2) to understand the technical bases for the draft June 2004 ICRP recommendations; (3) to review these recommendations against current NRC regulations and practice; and (4) to identify aspects of the ICRP recommendations that may warrant further study.

- 2) 8:40 - 9:10 A.M. NRC Staff Overview of June 2004 ICRP Recommendations (Open)

2.1) Don Cool, NRC, will provide an overview of the June 2004 draft ICRP recommendations.

2.2) Discussion

- 3) 9:10 - 10:00 A.M. Biological Aspects of Radiation Protection (Open)

3.1) Presentation by an expert familiar with the radiation biology foundations of the ICRP recommendations. The emphasis of this presentation is on the extension of previous knowledge based on ongoing studies of radiation exposure cohorts.

**10:00 - 10:15 A.M. \*\*\*BREAK\*\*\***

- 4) 10:15 - 11:15 A.M. Update on ICRP Recommendations regarding Quantities Used in Radiation Protection (Open)
- 4.1) Presentation by Keith Eckerman, ORNL, an expert familiar with the ICRP recommendations regarding radiation and tissue weighting factors and applications of factors for external exposure. The focus of this presentation will be on the new values derived and what has changed significantly since 1990.
- 4.2) Discussion
- 5) 11:15 - 11:45 A.M. Public Comments (Open)  
Attendees to be provided an opportunity to make comments relevant to the purposes and objectives of the Working Group.
- 11:45 - 1:00 P.M. \*\*\*LUNCH\*\*\***
- 6) 1:00 - 3:30 P.M. Individual Protection (Selection of Constraints) (Open)  
Individual presentations or panel discussions with focus on the draft ICRP recommendations regarding limits and constraints. This technical session will focus on selection of constraints and limits and how such selections have been implemented and developed in the radiation protection practices in the United States. The thrust of this panel will be a discussion as to whether the 2004 draft recommendations imply significant change.
- 1:00 - 1:30 P.M. 6.1) Overview on major issues regarding limits and constraints; differences between 10 CFR Part 20 and the draft ICRP recommendations - Vince Holahan, NRC
- 1:30 - 2:00 P.M. 6.2) Presentation on EPA's Views on the New ICRP Recommendations - Michael Boyd (EPA)
- 2:00 - 2:30 P.M. 6.3) Presentation by Edgar Bailey (CRCPD)
- 2:30 - 3:00 P.M. 6.4) Presentation by Richard Vetter (Mayo Clinic)
- 7) 3:00 - 3:30 P.M. Public Comments (Open)  
Attendees to be provided an opportunity to make relevant comments consistent with the purposes and objectives of the Working Group.
- 3:30 - 3:45 P.M. \*\*\*BREAK\*\*\***
- 8) 3:45 - 5:00 P.M. Optimization of Protection (Open)  
This technical session will examine the principles of optimization of protection in the June 2004 draft ICRP recommendations and how these principles are related to the current practices of ALARA in NRC regulated activities.
- 3:45 - 4:15 P.M. 8.1) Presentation by Don Cool, NRC
- 4:15 - 4:45 P.M. 8.2) Presentation by Dana Powers, a member of the Advisory Committee on Reactor Safeguards (ACRS)

- 9) 4:45 - 5:15 P.M. Public Comments
- 10) 5:15 - 5:30 P.M. Discussion of items for a possible letter report
- 11) 5:30 - 5:45 P.M. Closing Comments (Open) (MTR/NMC)  
The Working Group Chairman will summarize the results of the Working Group and discuss possible follow-up activities.
- 5:45 P.M. Adjourn**

**WEDNESDAY, OCTOBER 20, 2004, CONFERENCE ROOM 2B3, TWO WHITE FLINT NORTH, ROCKVILLE, MARYLAND**

- 12) 10:00 - 10:05 A.M. Opening Statement (Open) (MTR/JTL)  
The Chairman will make opening remarks regarding the conduct of today's sessions.
- 13) 10:05 - 11:30 A.M. Update on the Status of the License Termination Rule (LTR) (Open) (MTR/RKM)  
The Committee will receive an update by a representative of the NRC staff on the status of activities involving the LTR.
- 11:30 - 1:00 P.M. \*\*\*LUNCH\*\*\***
- 14) 1:00 - 2:30 P.M. Consolidated Issue Resolution Status Report (Open) (MTR/MPL)  
The Committee will receive an update from a representative of the NRC staff on the current status of the Consolidated Issue Resolution Status Report.
- 15) 2:30 - 4:30 P.M. ACNW 2005 Action Plan (Open) (MTR/JTL)  
The ACNW Committee will continue its discussion of potential topics for inclusion in the 2005 Action Plan.

**THURSDAY, OCTOBER 21, 2004, CONFERENCE ROOM 2B3, TWO WHITE FLINT NORTH, ROCKVILLE, MARYLAND**

- 16) 8:30 - 8:35 A.M. Opening Statement by the ACNW Chairman (Open) (MTR/JTL)  
The Chairman will make opening remarks regarding the conduct of today's session.
- 17) 8:35 - 11:45 A.M. Preparation of ACNW Reports (Open) (All)  
The Committee will discuss potential reports on:  
17.1) UO<sub>2</sub> Dissolution (RFW/RPS)  
17.2) Report on September 2004 Igneous Activity Working Group (MTR/MPL)

- 17.3) Draft ICRP Standard (MTR/NMC)
- 17.4) Report on License Termination Rule Update (MTR/RKM)
- 17.5) Consolidated Issue Resolution Status Report (MTR/MPL)

- 18) 11:45 - 12:00 Noon Miscellaneous (Open)  
The Committee will discuss matters related to the conduct of Committee activities and matters and specific issues that were not completed during previous meetings, as time and availability of information permit.

12:00 Noon Adjourn 154<sup>th</sup> ACNW Meeting

---

**NOTE:**

- **Presentation time should not exceed 50 percent of the total time allocated for a specific item. The remaining 50 percent of the time is reserved for discussion.**
- **Thirty-five (35) hard copies and (1) electronic copy of the presentation materials should be provided to the ACNW.**
- **ACNW meeting schedules are subject to change. Presentations may be canceled or rescheduled to another day. If such a change would result in significant inconvenience or hardship, be sure to verify the schedule with Mr. Howard Larson at 301-415-6805 between 8:00 a.m. and 4:00 p.m., several days prior to the meeting.**