

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書
(出國類別：實習)

赴美國桑地亞國家實驗室等地實習

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

出國人 職 稱：簡任副研究員

姓 名：張瑟稀

出國地區：美國

出國期間：九十年六月三十日至九十年八月十三日

報告日期：九十年十月十一日

摘 要

美國桑地亞國家實驗室(SNL)多年來協助新墨西哥州廢料隔離先導設施(WIPP)完成放射性廢料深層處置之功能評估研發工作，使其成為全世界第一個實際運轉的放射性廢料深層處置設施；另一方面，SNL 亦正協助美國雅卡山深層處置計畫(YMP)進行功能評估相關工作，近年來也一直是最受全世界注目的深層處置研究計畫。SNL 在放射性廢料深層處置研究領域之成就與經驗，值得吾人借鏡與學習。

美國三大國家實驗室，除了前述之桑地亞國家實驗室外，尚有洛薩拉摩國家實驗室(LANL)及羅倫斯立佛摩國家實驗室(LLNL)，此三者加上歷史最久的羅倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)，是目前美國能源部中支援 YMP 深層處置計畫最重要的四個國家實驗室。各個實驗室之專長及任務各有不同，大體而言，LANL 主要任務為飽和層流動及飽和層與非飽和層核種傳輸之評估；LBNL 主要為非飽和層流動及現地測試；LLNL 主要為近場環境之熱傳與水流試驗、岩石力學研究及廢料包件之相關測試；SNL 主要為全系統功能評估、工程障壁傳輸、飽和層與非飽和層模式研發、現地試驗及執照申請之技術支援等。

YMP 計畫自今年初開始由新成立的 BSC 公司負責管理與運作，各項工作之進展井然有序。一個大規模放射性廢料深層處置研究計畫的管理作業、分工合作及介面整合實務，頗值得作為本所執行相關研究計畫之參考。

關鍵字：用過核燃料最終處置、功能評估、國家實驗室

目 錄

	頁碼
一、目 的.....	1
二、過 程.....	2
三、心 得.....	3
四、建 議.....	35
五、參考文獻.....	36

圖 表 目 錄

	頁碼
圖 3.1 TSPA 發展過程之主要資訊來源.....	5
圖 3.2 桑地亞國家實驗室全系統功能評估模式發展歷程.	7
圖 3.3 桑地亞國家實驗室之組織與管理架構.....	10
圖 3.4 桑地亞國家實驗室核廢料管理計畫中心組織架構.	11
圖 3.5 WIPP 處置設施位置及超鈾廢料運輸路線圖	20
圖 3.6 WIPP 設施超鈾廢料運送實況(1).....	21
圖 3.7 WIPP 設施超鈾廢料運送實況(2).....	21
圖 3.8 YMP 計畫場址外觀(1).....	26
圖 3.9 YMP 計畫場址外觀(2).....	27
圖 3.10 YMP 計畫場址外觀(3).....	27
圖 3.11 YMP 計畫之隧道南側入口.....	28
圖 3.12 與功成身退的 TBM 隧道鑽掘機合影	28
圖 3.13 YMP 計畫 5 號凹室之熱傳試驗(1).....	29
圖 3.14 YMP 計畫 5 號凹室之熱傳試驗(2).....	29
圖 3.15 YMP 計畫熱傳試驗氣液二相在岩層裂隙中之流 動變化情形	30
圖 3.16 YMP 計畫管理系統及組織架構	31

圖 3.17 BSC 公司 YMP 計畫組織及管理架構.....	32
圖 3.18 BSC 公司 YMP 計畫科學與分析計畫研究架構....	33
圖 3.19 BSC 公司 YMP 計畫全系統功能評估分計畫研究 架構	34
表 3.1 美國三大國家實驗室現況.....	16
表 3.2 支援 YMP 計畫之主要國家實驗室任務區分概況 .	17
表 3.3 WIPP 處置設施之發展歷程	19

一、目的

本所目前正積極進行用過核燃料最終處置功能安全評估之研究，先進國家廢料處置與安全評估之研發技術成果，可以作為本所相關計畫執行之重要參考。而近年來美國 WIPP 處置設施開始運轉並接收廢料之重要成就，以及 YMP 處置計畫積極推動並即將進入最後決定性時程之情況下，使得美國無疑地成為世界上放射性廢料最終處置研發成果最完整、實務經驗最豐富的國家。派員前往美國實地瞭解其研發成果、蒐集最新資訊並研習相關技術經驗，對於本所放射性廢料最終處置計畫之推展與執行當具有正面之助益。

放射性廢料深層處置之研究，以功能/安全評估技術之建立最具有代表性及重要性。上述 WIPP 處置計畫全系統功能/安全評估之研發工作，多年來係由美國桑地亞國家實驗室 (SNL) 所擔綱。而目前進行中的 YMP 處置計畫，除了全系統功能評估研究亦由 SNL 領銜執行外，計畫相關之各項配合性研究則分別由 LANL、LBNL、LLNL 等國家實驗室在能源部監督之下共同協力支援。因此，赴美實習之行程亦包括了上述各個主要的國家實驗室等機構，同時並順道參訪相關之處置設施。行程之主要目的，除了觀摩處置計畫之技術發展經驗外，並可瞭解計畫執行之組織架構與管理實務，作為本所放射性廢料最終處置計畫規劃執行與管理運作之借鏡及參考。

二、過程

本次實習行程如下：

時 間		地 點	工 作 概 要
月	日		
6	30	台北 → 阿布奎基	旅程
7	1-31	阿布奎基	參訪 SNL 桑地亞國家實驗室，研習放射性廢料最終處置研發技術及管理經驗。期間並經由桑地亞國家實驗室安排，參訪下列研究單位及設施： (1) WIPP 處置設施(7/18-19) (2) LANL 洛薩拉摩國家實驗室(7/25)
8	1-2	雅卡山計畫	參訪 YMP 地下試驗設施
8	3-5	拉斯維加斯	參訪 BSC 公司
8	6-8	柏克萊	參訪 LLBL 羅倫斯柏克萊國家實驗室
8	9-11	立佛摩	參訪 LLNL 羅倫斯立佛摩國家實驗室
8	12-13		返回台北

三、心得

(一)桑地亞國家實驗室(SNL)

1.功能評估概念

功能評估(performance assessment)是對於一個包含放射性廢料在內的系統在未來某一時間座標點的可能行為之預測，主要目的在瞭解此一系統是否能符合既定的功能需求。對於處置設施全系統功能評估結果之描述，是屬於一種預測(forecast)，而非預言或預告(predict)，二者主要的不同點在於預測所描述的是一種可能的狀況，屬於不確定性之或然(probabilities)而非必然(certainties)。

美國核能管制委員會(NRC)認為功能評估是一種或然性的分析，其中包含：

- (1)確認可能影響處置設施之各種特徵、事件及作用，
- (2)檢視這些特徵、事件及作用對於處置設施功能之影響，
- (3)評估處置設施核種外釋對於人員造成之年平均劑量。

功能評估之過程與安全評估(safety assessment)或機率式風險評估(probabilistic risk assessment)略有不同。安全評估是對於整個系統進行較為保守的、極限性的評估，而功能評估則是針對系統或其組件的最大認知進行分析。進行安全評估時，係假定某一事件將會發生，而不論其發生的可能性有多高，功能評估則採用了更多的資訊，從而假設某一事件較其他事件更可能發生，並進一步利用數學模式加以描述。在放射性廢料管理的領域中，安全評估與功能評估之界限常常模糊不清，以致於二者經常被互換使用。然而，吾人必須瞭解，二者基本概念之不同，在於前者係以保守的界限值為依據，而後者則是考慮最可能的實際模式。為安全起見(例如涉及執照之核發等)，評估工作可以

包括安全評估及功能評估二者在內。

機率式風險評估通常係應用於核能電廠或其他工程系統之安全研究，然亦可應用於其他任何系統。雖然二者都是針對或然率的變化，但所考慮的系統及時間尺度卻有很大的不同。機率式風險評估通常是針對某一工程系統及其組件在有限的時間尺度內所發生的個別事件進行分析，若干天然事件(例如地震或火山爆發等)雖可能對整個系統之行為造成影響，但卻非系統的一部分。由於系統或其組件之各項需求或規格可以很容易地在運轉期間內加以確認或獲得，因此機率式風險評估的分析結果可以和已有的準則進行比較、測試或驗證。

相對而言，功能評估所考慮的範圍則包括了工程系統及天然系統二者。雖然在某種程度上工程系統應該可以控制，但天然系統則否，因此整個系統的分析常需跨越已有的(或是可以獲得的)各項數據資訊之範圍。

全系統功能評估程序之組成結構猶如一個金字塔(如圖 3.1)，其中，底層的各项資訊(包括設計數據、現地或實驗室資訊等)為構成全系統模式之技術基礎。底部第二層顯示此等數據資料如何發展成為處置設施所需之各項概念或程序模式。再上一層可顯示由下方各層資訊整合而成計算模式，此時各次系統之行為可藉由這些模式的聯結來代表，而功能評估模式於焉開始成形。金字塔的最頂層代表的是經由各個模式的聯結而形成之全系統，此即為全系統功能評估模式，可用以預測整個系統之可能行為及評估此種行為與法規之關係，從而確認整體系統之長期安全性。

全系統功能評估模式之發展過程，往往使用較為保守的假設。採用此種保守假設的理由，包括數據的缺乏性、對於某一特徵之認知不足所導致的不確定性、以及由資訊之來源或時間之範圍來辯護分析結果之困難性等。

2.功能評估之研發歷程

桑地亞國家實驗室在放射性廢料最終處置全系統功能評估方面，已累積了將近二十年的研發經驗。自一九九一年起，開始彙整研究成果並陸續出版全系統功能評估 (Total System Performance Assessment, 簡稱 TSPA) 年度報告，至一九九九年為止，先後共出版了 TSPA-1991、TSPA-1993、TSPA-1995 及 TSPA-VA(1999) 等四個版本。

一九九一年間出版的 TSPA-1991 報告，係彙整初期研究開始進行以來的各項成果並記錄其進展過程，可以看出功能評估研發初期並未有充足的實驗數據或現地資訊，各項分析過程乃是立基於許多合理性的假設，即便如此，仍然可以進行處置設施(依據假設性處置概念所建構的虛擬處置設施)之全系統功能評估工作，並針對評估或預測結果進行分析與研判，以進行原有處置概念之修正，此乃當年度所進行的全系統功能評估初期分析之情況(如圖 3.2)。

由一九九三年出版的 TSPA-1993 報告，可知若干資訊已較前略微充實，可以取代部分原有的假設數據，並據以修正分析結果，使其評估或預測值更接近正確情況。然而，TSPA-1993 報告中仍然必須繼續使用若干假設性資訊或數據，使得評估結果仍然包含了許多的不確定性。

一九九五年出版的 TSPA-1995 報告，此種情況有了進一步的改善，更多的實驗數據或現地調查結果陸續出爐，繼續取代原有的假設性資訊，使得評估或預測結果之可信度進一步獲得提昇。然而，正如同 TSPA-1993 報告一般，不可避免地依然必須依賴一部分假設性資訊，使得評估結果仍然包含了若干不確定性。

直到一九九九年出版的 TSPA-VA 報告，更進一步充實了原先「虛懸」的若干假設狀況，使得評估結果之可靠度更加提昇，圖 3.2 清楚地反映了此種發展過程。

3.組織與管理架構

桑地亞國家實驗室為美國三大國家實驗室之一(另二者為 LANL 洛薩拉摩國家實驗室及 LLNL 羅倫斯立佛摩國家實驗室)，目前員工約七千多人(不含簽訂契約之承包商工作人員)。其中，六千多人集中在新墨西哥州第一大城阿布奎基市的總辦公區，另約八百多人駐在加州立佛摩市(Livermore)之辦公區，配合羅倫斯立佛摩國家實驗室進行相關研發工作，其餘約有五、六十人派赴設在新墨西哥州卡爾斯貝市(Carlsbad)的辦公室，協助 WIPP 處置設施從事運轉期間功能評估驗證等相關工作。

桑地亞國家實驗室之運作，係由美國能源部委託民間之洛克希德馬丁(Lockheed Martin，簡稱 LM)公司負責管理，成為 LM 旗下的眾多子公司之一，但與其他子公司的主要不同點在於桑地亞之經費係由能源部提供，不需仰賴母公司 LM 提撥或支應，因此桑地亞在其母公司內享有較為特殊的地位。本年度能源部所提供的總預算金額約為美金十三億五千萬，相當於新台幣四百七十億元，包括軍事相關研發及非軍事研發二部分。

桑地亞國家實驗室的最高主管為總經理(President)包

圖 3.2 桑地亞國家實驗室全系統功能評估模式發展歷程
管制、製造系統、科技合作、能源與資訊、一般試驗支援、特殊計畫、地區辦公室、以及業務與人事管理等，分別由不同的副總經理所管轄。與放射性廢料管理有關的單位，係屬能源與資訊部門所管轄的五大管理中心之一，這五大管理中心如下：

- (1)地球科學與環境
- (2)能源與運輸安全
- (3)核子與風險技術

(4)基礎設施與資訊系統

(5)核廢料管理計畫

以上各個管理中心分別由一位中心主任負責監督及管理，核廢料管理計畫中心主任多年來均由出生於台灣的華裔專家嚴斯台博士(Dr. Margaret Chu)擔任。該中心約有一百六、七十人(不含承包商)，分為十個組(Department)，各由一位經理(Manager)負責管理(如圖 3.4)。與本所目前進行中的放射性廢料最終處置功能評估研發工作有密切關係的，包括全系統功能評估(Total System Performance Assessment)及次系統功能評估(Subsystems Performance Assessment)二個組。其中，次系統功能評估組係由華裔卓鴻年博士(Dr. Hong-Nian Jow)擔任經理，此次赴美實習參訪之各項內容即係由卓博士所協助安排。

桑地亞國家實驗室的核廢料管理計畫中心，多年來負責新墨西哥州卡爾斯貝市廢料隔離先導設施(WIPP)之功能評估研發工作，完成能源部及環境部所要求的各項評估分析與現地試驗，並提供完整的評估結果作為執照申請審查之佐證依據，協助 WIPP 通過能源部、環境部、地方政府、州政府、地方民眾及國會等之審查或聽證程序，而於一九九九年三月間獲得運轉執照，獲准開始接收全美各地研究實驗室、軍事設施、製造部門等相關單位所產生的超鈾廢料，進行深層地質處置工作。此項運轉執照之審核過程，係歷經多年的努力，通過層層考驗與評估，最後終能獲准核發，其間桑地亞國家實驗室的核廢料管理計畫中心功能評估研發工作人員的努力，扮演了極為關鍵的重要角色，此乃由於功能評估結果是一個處置設施能否順利設置的最重要依據，功能評估之重要性由此可獲得驗證。

在 WIPP 順利運轉之後，桑地亞國家實驗室除了繼續協助 WIPP 進行運轉期間的功能評估驗證之外，原有功能評估相關專業人力中的大部分隨即投入另一個同樣具有高度重要性的國家型放射性廢料深層處置研發計畫--雅卡山計畫(Yucca Mountain Project, 簡稱 YMP), 持續提供功能評估方面的專業技術支援。此項技術支援工作仍然由核廢料管理中心之全系統功能評估及次系統功能評估二個組負責，所提供之技術及人力則配屬在 YMP 計畫的總管理部門之下統一運作。

在桑地亞國家實驗室，國防研發與非國防研發的工作區域有明顯的區隔，二者之間設有圍籬，非屬特定安全等級者不得任意進入國防研發區域。上述能源與資訊部門及所轄的核廢料管理中心等均屬非國防研發工作範疇，因此其辦公大樓位在圍籬之外。雖然如此，為了安全起見，無論是參訪國防研發區域或非國防研發區域，任何訪客除了必須事先提出申請(一般須在四十五天之前)獲准外，到訪時還必須在特定的證章辦公室(Badge Office)照相及檢驗證件，取得合法的識別名牌後方能進入工作場所。

(二)洛薩拉摩國家實驗室(LANL)

洛薩拉摩(Los Alamos)國家實驗室位於新墨西哥州阿布奎基市東北方大約一百英哩的洛薩拉摩市近旁，於二次大戰之前成立，成立時之主要任務即為針對國防軍事武器之研發用以結束二次世界大戰的原子彈即為當時洛薩拉摩國家實驗室與羅倫斯立佛摩國家實驗室所共同研發而成。其後由於實驗室規模不斷擴展，乃由洛薩拉摩國家實驗室中分出一部分設施，在阿布奎基市另行成立桑地亞國家實驗室，因此洛薩拉摩國家實驗室可以說是桑地亞國家實驗室的母機構。

不同於桑地亞國家實驗室，洛薩拉摩國家實驗室之管理係委由加州大學代為運作，所需經費則仍由能源部全數提供。目前工作人員約七千五百人(不含承包商)，分屬國防研發與非國防研發二類，人數比例約為 40:60。本年度總預算為美金十三億五千萬，約合新台幣四百七十億元。國防研發與非國防研發二者之預算比例約 80:20。參與國防研發之人數雖然較少，但經費卻佔了大部分，可見國防研發需要較高的經費。不同於桑地亞國家實驗室之區隔做法，洛薩拉摩國家實驗室之工作場所並未依是否屬國防研發工作而有所區分，整個實驗室範圍混合為一區。因此外來訪客永遠不得單獨行動，一旦進入國家實驗室工作場所，就必須隨時隨地由專人陪同，以策安全。

洛薩拉摩國家實驗室之非國防研究項目，主要包括地球科學、模式、環境、化學、生物等部門。目前積極參與及支援中的 YMP 計畫即屬地科部門，設有專案計畫管理組負責進行相關之研發工作。各部門之間採取矩陣式管理及交叉式機動支援，共同為目標之達成而努力。對 YMP 計畫之主要支援項目，包括飽和層流動模式研發、核種傳輸之工程試驗、意外破壞模式評估等。其中，在飽和層評估模式方面，開發出了 FEHM (Finite Element Heat & Mass Transfer) 模式，係一種利用有限元素法進行熱傳與質傳分析之評估模式，運跑效率良好，可適用於飽和層之流動、核種傳輸、熱傳等之評估分析。洛薩拉摩國家實驗室所研發的 FEHM 模式與羅倫斯柏克萊國家實驗室所研發的 TOUGH2 模式及羅倫斯立佛摩國家實驗室所研發的 NUFT 模式，並稱為流動及熱傳之三大程序評估模式，三者各有所長，在放射性廢料最終處置之功能評估方面各具有一定的應用價值，值得吾人加以研究學習。

(三)羅倫斯立佛摩國家實驗室(LLNL)

羅倫斯立佛摩(Lawrence Livermore)國家實驗室位於加利福尼亞州舊金山灣區附近的立佛摩市內，與洛薩拉摩國家實驗室及羅倫斯柏克萊國家實驗室等同屬加州大學負責運作及管理，所需經費則由能源部提供。不含承包商之工作人員約七千五百人，本年度研發經費為美金十二億，約合新台幣四百二十億元。由於人數、經費及研發規模等各方面均與前述之桑地亞國家實驗室及洛薩拉摩國家實驗室相當，在美國眾多國家實驗室中共同居於領先之地位，故三者並稱為美國三大國家實驗室(如表 3.1)。

二次大戰期間，羅倫斯立佛摩國家實驗室與洛薩拉摩國家實驗室因共同研發並製造完成原子彈而名噪一時。近年來，羅倫斯立佛摩國家實驗室所進行的國防研發項目略微減少，因此由能源部所提供之研發經費亦稍稍降低，在前述三大中之排名暫時落後。由於仍有許多與國防相關之研發項目在此持續進行中，因此對於前來參訪之外賓所採取的安全措施亦相當嚴格，不僅證章部門的把關工作一絲不苟，訪客進入場區範圍後亦須全程指派專人陪同，不可稍有片刻單獨行動之機會。

羅倫斯立佛摩國家實驗室在 YMP 計畫之主要支援工作，包括近場環境試驗、廢料包件特性及腐蝕試驗、熱-水-機-化(Thermal-Hydraulic-Mechanic-Chemical)複合功能現地試驗、水流及熱傳模式研發及地化模式研發等。其中，羅倫斯立佛摩國家實驗室所開發完成的 NUFT 水流及熱傳程式，係以羅倫斯柏克萊國家實驗室之 TOUGH2 程式為基礎加以改良，使其更快速、有效，且應用範圍更廣。另外，羅倫斯立佛摩國家實驗室在地化研究方面亦開發完成 EQ3/EQ6 程式，可用以評估及分析地下水中之化學狀況，目前已被廣泛應用在地化相關研究中。除此之外，羅

倫斯立佛摩國家實驗室對於廢料包件特性及材料腐蝕試驗方面亦有相當豐富的經驗，值得吾人參考與學習。

(四)羅倫斯柏克萊國家實驗室(LLBL)

除了前述三大國家實驗室外，主要支援 YMP 計畫的國家實驗室尚有位於舊金山灣區附近柏克萊市區的羅倫斯柏克萊(Lawrence Berkeley)國家實驗室。與羅倫斯立佛摩國家實驗室及洛薩拉摩國家實驗室同屬加州大學負責管理運作，所需經費仍由能源部提供。由於地理位置恰在柏克萊分校近旁，因此實驗室範圍與柏克萊分校之校區部分混合重疊，對於加州大學師生之研究工作及資源利用提供了極大的方便。主要的四個國家實驗室在 YMP 計畫之任務區分如表 3.2。

羅倫斯柏克萊國家實驗室的工作人員約有四千人，本年度預算為美金四億，約合新台幣一百四十億元。由於並不從事國防相關研發工作，因此相對於前述三大國家實驗室而言，預算少了很多。也因為並無國防相關研究項目，在場區安全方面的要求並不高，訪客不需經過層層關卡的檢查作業，就可以很容易的在實驗室範圍內參訪或與工作人員進行討論，也唯有如此，加州大學師生才能夠很方便地利用實驗室的資源。

雖然在人力、經費、研究規模等方面均不如前述三大國家實驗室，但羅倫斯柏克萊國家實驗室卻是美國眾多國家實驗室中歷史最悠久的。在發展過程中，曾配合任務需要，分出一部分研發項目另行成立研究實驗室，後來發展成為羅倫斯立佛摩國家實驗室。因此可以說，羅倫斯柏克萊國家實驗室是羅倫斯立佛摩國家實驗室的母機構。

對 YMP 計畫的支援方面，主要在於非飽和層流動模式研發、近場水文及熱傳試驗、現地試驗及模式技術支

名稱	地點	人員	年度經費 (美金)	備註
洛薩拉摩 (LANL)	新墨西哥州 洛薩拉摩市	~7,500	~13.5 億	1.國防與非國防人 力 4:6, 經費 8:2 2.人數不含合約商
桑地亞 (SNL)	新墨西哥州 阿布奎基市	~7,000	~13.5 億	1.國防與非國防人 力約各半 2.人數不含合約商
羅倫斯立佛摩 (LLNL)	加利福尼亞州 立佛摩市	~7,500	~12.0 億	1.國防研發項目漸 減 2.人數不含合約商

表 3.1 美國三大國家實驗室現況

名稱	地點	主要任務
桑地亞 (SNL)	新墨西哥州 阿布奎基市	全系統功能評估、廢料包件分解模式、工程障壁系統傳輸模式、飽和層與非飽和層模式技術支援、現地試驗及執照技術支援
洛薩拉摩 (LANL)	新墨西哥州 洛薩拉摩市	飽和層流動模式研發、飽和層與非飽和層核種傳輸試驗、飽和層與地質調查介面協調、意外破壞模式評估
羅倫斯立佛摩 (LLNL)	加利福尼亞州 立佛摩市	近場環境試驗、熱水機化複合功能現地試驗、廢料包件特性及腐蝕試驗、水流及熱傳模式研發、地化模式研發
羅倫斯柏克萊 (LLBL)	加利福尼亞州 柏克萊市	非飽和層流動模式研發、近場水文及熱傳試驗、現地試驗及模式技術支援、天然類比研究

表 3.2 支援 YMP 計畫之主要國家實驗室任務區分概況

援、以及天然類比相關研究等，其中最著名的是 TOUGH2 程式之開發，提供了研究人員在不飽和層水流與熱傳分析方面之應用研究，對於 YMP 計畫之實際狀況也很適合。另外，羅倫斯柏克萊國家實驗室在天然類比的相關研究方面也有很豐富的經驗，在眾多國家實驗室中可說是居於執牛耳的地位。

(五)廢料隔離先導設施(WIPP)

位於新墨西哥州卡爾斯貝市附近的廢料隔離先導設施(Waste Isolation Pilot Plant, 簡稱 WIPP), 是世界上第一個實際運轉的放射性廢料深層處置設施，於一九九九年三月間獲准開始接收廢料以來，頓時成為全球核能界注目的焦點。在民眾意識日益高漲及核能與環境相關法令日趨嚴格的今日，WIPP 能夠成功地獲准營運，實際上並非僥倖。自從一九七四年卡爾斯貝市近郊被選定為放射性廢料處置之研究場址以來，從政府到民間各學術團體及研究人員都投注了難以計數的心力，以確認 WIPP 處置設施符合安全需求。WIPP 設施的主要發展歷程如表 3.3，設施位置及超鈾廢料運輸路線如圖 3.5，廢料運送實況如圖 3.6 及 3.7。

WIPP 處置設施之地下岩床，是一個數百萬年前形成的大型天然鹽礦，礦區範圍跨越美國南部數個州。處置坑道深度約在地下六百公尺處，於大塊鹽床中開挖而成。天然鹽礦提供放射性廢料一個絕佳的永久存放處所，主要原因如下：

- (1)穩定地質結構，鮮少有地震活動
- (2)無流動之水分，不致將廢料帶出
- (3)易於開挖
- (4)塑性佳，可自行癒合裂隙並封閉廢料，使其與外界環境隔絕

時間	重要內容
1956年	美國國家科學院(NAS)建議以鹽礦為處置母岩
1974年	AEC選定卡爾斯貝市東南方之鹽礦進行研究
1979年	國會授權進行國防用放射性廢料安全處置方法之研究
1980年	能源部發布環境影響說明書及初期安全分析報告書
1981年	開始鑽掘第一個豎井
1982年	進行地下開挖
1989年	地下設施完成
1990年	環保署同意能源部所提之五年試驗計畫
1996年	完成地下設施各項試驗
1998年	能源部完成接收廢料之一切準備工作並通知國會
1999年	3月26日第一批TRU廢料由LANL運抵WIPP

表 3.3 WIPP 處置設施之發展歷程

(六)雅卡山研究計畫

雅卡山計畫(Yucca Mountain Project, 簡稱 YMP)之場址位在內華達州拉斯維加斯市西北方約一百英哩處,係由能源部所推動之國家級研究計畫。主要目的在針對未來高放射性廢料實施地質處置時所可能牽涉之各項問題進行先期研究。研究項目包括地下水流動、核種遷移、岩層結構、地化特性、熱傳與水文地質特性、地震及火山之影響等。研究結果將作為確定雅卡山地區是否適合作為處置場址之依據。

YMP 所在之位置,附近人口稀少,氣候乾燥,年平均雨量低於 15 公分。擬議中的處置地點,在地面以下約 300 公尺,而在地下水位以上約 240 公尺處,且其上方及下方地層的含水量均甚低。由於雨量稀少,除了植物吸收及部分蒸發外,雨水能夠到達位在數百公尺下方的處置設施之可能性微乎其微,因此對於處置位置之廢料容器可能造成之腐蝕效應亦相對降低。

雅卡山附近曾有火山活動,火山爆發產生大量既厚重又黏稠的塵灰與岩漿。這些物質在高溫及高壓下結合,並經長期擠壓沈積後,形成一種多孔質碳酸石灰之沈澱物,稱為凝灰岩(tuff)。雅卡山所以能被考慮為處置場址,此種凝灰岩扮演了極為重要的角色。凝灰岩的厚度大約在三千公尺以上,若將廢料容器置於其中,即使經過很長的時間,核種亦很難外釋到很遠的範圍。岩層中所含的沸石礦(zeolite)具有吸附或延滯放射性核種遷移之功效,此種特性使得凝灰岩成為雅卡山場址的重要資產,是各項天然障壁中極具關鍵性的一道防線。圖 3.8~3.10 為雅卡山計畫場址之外觀圖。

在雅卡山場址進行中的研究項目,以結構、機械、化學、熱傳及水文特性為主,另外尚有地下水流動以及潛在

的地震、火山與氣候變化等。此外，雅卡山地區尚有一群研究人員，就處置場之建立對於附近社區居民之社經、文化、交通等生活品質之影響進行研究及追蹤觀察，提供作為處置場評估之參考。

雅卡山計畫最重要的設施是位於地下約 300 公尺、長度約 8 公里的主要試驗坑道。坑道直徑 7.6 公尺，可供通風及人員與車輛之出入。除了南、北二個主要出入口外，另有二個出入口可通往位置更低之另一組坑道。

坑道之建造工程始於一九九三年初，至一九九四年九月間引進隧道鑽掘機(TBM)，由預定隧道之北口開始，進行 7.6 公尺直徑的主坑道鑽掘工作。全部坑道之鑽掘工程已於一九九七年底告一段落，整個試驗區域之地上設施所佔面積約達 28 公頃，而地下坑道及斜坡之總長度則約為 16 公里。目前 TBM 隧道鑽掘機已功成身退，暫厝於南口之外供人參觀。鑽掘機全長共約 140 公尺，總重 860 噸，功率 3,800 馬力，設備外形極為龐大壯觀。經由隧道鑽掘機之應用，雅卡山計畫順利完成了地下試驗設施之開挖工程，為後續各項試驗研究奠定了成功的基礎。圖 3.11 為雅卡山計畫南側入口圖，3.12 為已經功成身退的 TBM 隧道鑽掘機，停放在南口附近展示。

坑道中共有 7 個試驗凹室(alcove)，可方便人員從坑道內部到達斷層帶及岩石之接觸面，以進行地質、水文、機械、地工、地化、及各種不同深度岩層之特性試驗，從而提供處置設施進行設計及建造時所需要之各項數據。以斷層帶為例，研究之目的係為瞭解液態或氣態水分是否通過斷層帶向外移動，以及該等斷層帶是否具有阻隔水分擴散之作用。試驗凹室中最重要的第 5 號凹室是由羅倫斯立佛摩國家實驗室之研究人員負責，進行岩層加熱試驗，以觀察及模擬用過核燃料進行處置時所可能產生之熱效應，並

探討熱傳導、水流傳輸、機械應力及地化狀況等複合效應之影響。圖 3.13~3.14 為熱傳試驗情形，圖 3.15 為進行熱傳試驗時岩層裂隙中氣液二相流動變化情形之理論預測與分析示意圖。

美國能源部將於二〇〇一年底之前配合公聽會之舉辦，提出 YMP 計畫場址建議考量報告，內容包括預定處置場、廢料體與包件、工程障壁系統、場址封閉後安全性資料、設施功能確認、處置系統概念與數學模式、初期封閉前與封閉後場址適宜性評估等。除了公聽會之外，尚有其他各個不同層次的審查或監督，包括國會、國家預算管理局、核能管制委員會、內華達州政府、NWTRB 核廢料技術審查會議、國家科學院所組成的委員會、以及其他公眾團體與技術監督小組等。其中，核能管制委員會負有核發執照的最後決定權，而眾多科學家、工程師、及各類專家學者均將投身其中提供協助。

(七)BSC 公司

雅卡山計畫是美國能源部負責的大型重要計畫，多年來一直委由 TRW 公司代為管理運作，能源部則居於監督協調的地位。直到二〇〇一年秋，TRW 公司與能源部之合約結束，改由 Bechtel SAIC Company (BSC)公司自本年二月起接手管理。BSC 公司是由貝泰(Bechtel)與 SAIC 二家公司所籌組而成的新公司，全權負責 YMP 計畫的研發試驗、計畫管理、工程建造、設施維護、執照申請、民眾溝通及運轉作業等。

BSC 公司的經費由能源部提供，本年度預算約美金四億，相當於新台幣一百四十億元。BSC 公司之成員除了部分管理人員由二家母公司提供，及一部分技術人員由其他顧問公司提供外，其餘大部分專業技術人員多由桑地亞、

洛薩拉摩、羅倫斯立佛摩、羅倫斯柏克萊等四個國家實驗室依照個別技術經驗及專長提供支援，主要任務分工詳見表 3.2。所提供的技術人力係歸屬在 BSC 旗下統一指揮管理，並由 BSC 公司負責人員考核及支薪，各個母公司則提供協調聯絡中心或辦公室，另行指派中、高階主管人員兼任各相關分項之協同主持人，以配合 BSC 公司主管人員之指揮及調度工作。此種矩陣式管理指揮系統，在彼此互相尊重的原則下運行相當順暢，有助於各項計畫工作之推展。值得吾人學習與參考。

圖 3.16 為 YMP 計畫管理系統及組織架構，由此可看出能源部、BSC、其他顧問公司、國家實驗室等各個單位間之關係。圖 3.17 為 BSC 公司之組織架構，在總經理及副總經理之下，設有總計畫之主持經理，及技術支援部門、業務與運轉支援部門等。在總計畫之下又分為場址建議、處置場設計、科學與分析、及執照申請等四個計畫。與處置場功能評估研發工作有關之部門係屬於科學與分析計畫之下，圖 3.18 即為科學與分析計畫之組織及研發架構。由圖 3.18 可知，在科學與分析計畫之下，包含十二個分計畫，分別由不同的支援單位人員負責領導，其中全系統功能評估(TSPA)分計畫之下共有六個組，包括全系統功能評估模式組、全系統功能評估分析及文件組、特徵事件作用(FEPs)組、程序組、不確定性及敏感度分析組、以及環境與安全整合組等(如圖 3.19)。此一分計畫雖係由杜克(Duke)公司負責，但係由桑地亞國家實驗室的能源與資訊部門所屬的二個組之經理擔任本分計畫之協同主持人，正如前段所描述地，形成一個堅強而有效的矩陣管理架構。

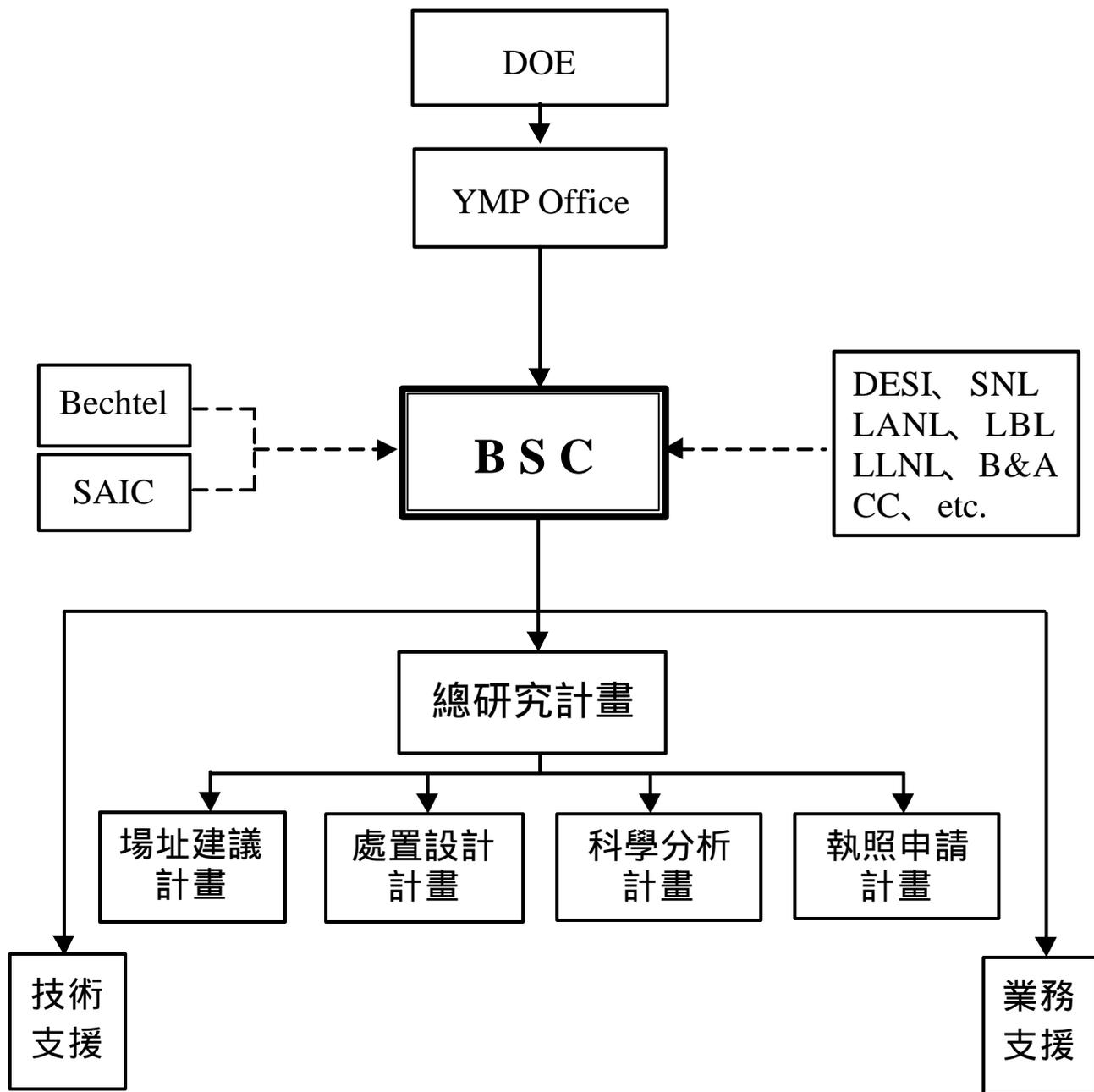


圖 3.16 YMP 計畫管理系統及組織架構

四、建議

1. 美國能源部動員各重要之國家實驗室提供人力、經費及技術支援，全力推動國家型放射性廢料最終處置研發工作，對於處置計畫之成功提供了最有力的保證。我國亦宜加強放射性廢料最終處置研發體系及組織架構之整合，以提昇研發之成效。
2. 美國桑地亞等國家實驗室在用過核燃料深層處置功能評估方面之研發經驗及其所建立之模式概念，對於本所執行中的功能評估研究工作頗具參考價值，未來可與相關單位保持聯繫及加強合作，引進深層處置研發經驗，並推動功能評估模式概念之訓練與宣導，以協助建立放射性廢料最終處置之本土化研發能力。

五、參考文獻

1. “TSPA-SR Rev. 00 ICN 01”, Sandia National Laboratories, Dec. 2000.
2. “Analysis/Model Report: Total System Performance Assessment (TSPA) Model for Site Recommendation (MDL-WIS-PA-000002 Rev. 00), 2000.
3. “WIPP Milestones”, WIPP Project Bulletin, 2000.
4. “Improving Operations and Long-Term Safety of the Waste Isolation Pilot Plant”, National Research Council, 2001.
5. “Executive Summary Yucca Mountain Science and Engineering Report ”, OCRWM/USDOE, May 2001.