

出國報告（出國類別：實習）

## 赴美國太平洋西北國家實驗室學習土壤復育及放射性廢液處理技術

服務機關：核能研究所

姓名職稱：林忠永 助理研究員

派赴國家：美國

出國期間：101年7月17日~101年9月14日

報告日期：101年10月12日



## 摘要

本次公差赴美國「太平洋西北國家實驗室 (Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)」學習土壤復育及放射性廢液處理技術，係透過台美民用核能合作會議與美國能源部取得聯繫，並經太平洋西北國家實驗室同意接待公差人，該國家實驗室位於華盛頓州里奇蘭(Richland)市鄰近美國能源部轄下核設施場址 Hanford site，並有協助核設施場址清理之承包廠商執行除役清理之寶貴經驗，可供本所對土壤復育及放射性廢液處理技術之參考與學習。公差人簡報說明本所及臺灣目前關注之土壤復育等清理議題，充分與 PNNL 研究人員討論及交換土壤復育及放射性廢棄物處理經驗，瞭解廢棄物處理技術最新發展重點，增進認識 PNNL 的組織特性與研究方向，並瞭解其在美國能源部 Hanford site 清理計畫上扮演的角色與研發成果。

此行主要成果包含可與 PNNL 研究人員與計畫主持人深入研討土壤復育的經驗，瞭解 Hanford site 清理設施的廢液處理流程與廢棄物檢整分類貯存，參訪環境分子科學實驗室(EMSL)之實驗儀器設施，及參訪世界第一座運轉級核子反應器-B 反應器，瞭解其運轉原理及除役清理後現地安全貯存方式，並擴展人脈，以利未來本所與 PNNL 之合作。

# 目 次

	(頁碼)
摘要.....	i
一、目的.....	1
二、過程.....	2
(一)行程摘要 .....	2
(二) PNNL 簡介.....	7
(三)支援清理計畫之角色 .....	9
(四) Hanford site 緣由及清理現況 .....	11
三、心得.....	22
(一)土壤復育技術 .....	22
(二)深層含水層 (Deep Vadose zone)之整治.....	25
(三)含水層之復育技術-泡沫傳送技術.....	30
(四)廢液地下貯坑工程障壁 .....	33
(五)Hanford site 廢液處理設施及流程 .....	35
(六)超鈾元素(Transuranic)廢棄物檢整及確認作業 .....	46
(七)玻璃化(Vitrification)技術.....	47
(八)參訪 B 反應器.....	51
(九)參訪環境分子科學實驗室(EMSL).....	55
(十)學術會議及拓展人脈 .....	56
四、建議事項.....	58
五、附件.....	60
(一) PNNL 同意函 .....	60
(二)「核研所土壤復育現況及展望」為題之簡報內容.....	61
(三) PNNL 針對土壤及地下水復育之建議 .....	64

# 圖目錄

圖 1：PNNL 行政區正門-----	5
圖 2：Research Technology Laboratory RTL 館-----	5
圖 3：公差人與 PNNL 主要接待人 (a) Dawn Wellman 及(b)Elsa Cordova 合影--	6
圖 4：PNNL 組織架構-----	8
圖 5：PNNL 能源與環境部門之組織架構-----	9
圖 6：PNNL 於 Hanford site 清理工作之角色-----	10
圖 7：PNNL 參與 Hanford site 清理之重要設施及任務-----	10
圖 8：Hanford Site 區域簡圖-----	12
圖 9：Hanford Site 放射性廢棄物來源及貯存方式-----	18
圖 10：Hanford Site 設施配置圖-----	19
圖 11：雙壁貯槽剖面圖-----	20
圖 12：公差人(a)進行簡報及(b)與會人員問題討論-----	24
圖 13：PNNL 開發之 PHOENIX 工具。-----	25
圖 14：(a)廢液洩漏至含水層與(b) 廢液貯坑工程障壁及含水層復育示意圖---	26
圖 15：公差人員及本技術主要負責人 Dr Zhong Lirong 合影-----	31
圖 16：泡沫作用之示意圖-----	31
圖 17：泡沫傳送實驗示意圖-----	32
圖 18：泡沫傳送技術應用於含水層之示意圖-----	32
圖 19：公差人員及本技術主要負責人 Dr Fred Zhang 合影-----	33
圖 20：實驗型 Hanford 工程障壁鳥瞰圖-----	34
圖 21：實驗型 Hanford 工程障壁剖面圖-----	34
圖 22：實驗型 Hanford 工程障壁剖面局部放大圖-----	35
圖 23：廢液貯槽區(Tank Farm)廢液處理流程示意圖-----	39
圖 24：固體廢棄物處理流程示意圖-----	40
圖 25：廢液處理設備流程圖-----	40
圖 26：242-蒸發器流程圖-----	41
圖 27：紫外線/氧化單元流程圖-----	42
圖 28：逆滲透薄膜處理設備流程圖-----	43

圖 29：逆滲透薄膜處理系統照片	43
圖 30：薄膜（thin film）乾燥器	44
圖 31：廢液處理設施蒸發器流程圖	45
圖 32：人員檢整及確認作業情形	47
圖 33：水泥固化處理先導設施（Grout Treatment Facility）處理流程圖	48
圖 34：玻璃固化流程圖	49
圖 35：玻璃固化法前處理流程圖	50
圖 36：玻璃固化設備示意圖	51
圖 37：B 反應器設施配置圖	54
圖 38：鈾燃料充填設備及鉛管細部照片	54
圖 39：簡易反應器操作示意圖	55
圖 40：公差人與 Karl Mueller（中）及 Yan Shi（左）合影	56

## 表 目 錄

表 1：公差行程簡表-----	3
表 2：訪問 PNNL 專業人員名單-----	4
表 3：Hanford Site 核反應器運轉摘要表-----	14
表 4：Hanford Site 運轉設施承包商一覽表-----	15
表 5：清理工作完成現況-----	21
表 6：土壤復育技術一覽表-----	27
表 7：Hanford site 目前運轉及建造中廢棄物處理設施-----	37
表 8：B 反應器重要里程一覽表-----	53
表 9：公差期間參加學術活動-----	57
表 10：PNNL 之臺籍科學家-----	58

## 一、目的

公差人係奉派至美國能源部太平洋西北國家實驗室(Pacific Northwest National Laboratory, 以下簡稱為 PNNL, )實習 60 日，時間為 2012 年 7 月 17 至 2012 年 9 月 14 日，本次實習之目的如下：

- (一) 與 PNNL 研究人員建立直接聯繫管道，以利後續人員赴美國國家實驗室實習，及未來建立合作關係。
- (二) PNNL 鄰近能源部核設施場址 Hanford site，蒐集關於土壤復育及廢棄物處理之經驗及建議處理方式，將有助於本所土壤復育及廢棄物處理的研發與實務工作。公差人簡報說明本所及臺灣目前關注之土壤復育等清理議題，可充分與 PNNL 研究人員討論交換放射性廢棄物處理經驗，了解技術發展重點，並可提昇本所能見度。
- (三) 參訪環境分子科學實驗室(EMSL)，瞭解其實驗儀器設施之資源及申請使用方式。
- (四) 參訪世界第一套運轉級核子反應器-B 反應器 ( B Reactor )，瞭解 Hanford site 之背景及運轉原理，蒐集清理現況及除役後現地安全貯存方式。



## 二、過 程

### (一)行程摘要

感謝趙衛武副組長(Taiwan Atomic Energy Council Representative in DC, Deputy Director of Science and Technology Division, TECRO) 透過台美民用核能合作會議，與美國國務院聯繫，並經國務院 Christine Martin 之協助，促成此行，同意函如附件（一），行前依美國能源部相關規定回傳相關資料及自傳，並填寫「 PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY RESIDENT NON-EMPLOYEE ACCESS AGREEMENT」確認此行期間專利財產權，經能源部同意核准後，完成 Foreign National Visit Assignment (FNVA) 之申請作業程序，並依 PNNL 相關規定，完成 PNNL 環境介紹、工安輻安線上教育訓練課程(PNNL Laboratory Orientation: <http://orientation.pnl.gov>) 及資訊安全線上教育訓練課程 (Cyber Security Awareness: <http://online-training.pnl.gov/default.asp>)。

由 Science & Engineering Education 部門 Joanie Walker 女士協助辦理報到，領取識別證 (Badge) 及館舍通行證 (Credentials)，行政區正門如圖 1，公差人之辦公室位於 Research Technology Laboratory (RTL)館如圖 2，此次主要負責接待人是 Dr. Dawn Wellman 及 Elsa Cordova (圖 3)，協助聯繫 PNNL 執行土壤復育清理計畫的專業人員，公差行程如表 1 所列，本次行程的分為三個部份，分別為：

1. 公差人以台灣土壤復育現況及展望為題進行簡報及意見交流。
2. PNNL 執行土壤復育計畫及相關清理計畫的專業人員之訪談，名單如表 2 所列。
3. 參訪 B 反應器及 EMSL 實驗儀器設施。

設施參訪主要係瞭解 EMSL 實驗儀器設施之資源及申請使用方式，並瞭解美國能源部轄下世界第一套運轉級核子反應器-B 反應器之清理後現地安全貯存方式，轉型為紀念博物館；而訪談重點包含取得執行過程之簡報、研究及技術報告，執行細節說明與經驗回饋分享。

表 1：公差行程簡表

月/日(星期)	工作內容重點
7/17(二)~7/18(三)	由桃園機場出發飛抵西雅圖，並轉赴里奇蘭。
7/19(四)	九點於 ROB 大廳報到，領取識別證及館舍通行證手續。
7/20(五)~7/29(四)	Hanford site 緣由及清理現況
7/30(五)~8/1(三)	含水層(Vadose zone)土壤復育技術介紹
8/2(四)	於 RTL 館 Parker Room，以台灣土壤復育現況及展望為題進行簡報，與會人員意見交流。
8/3(五)~8/14(二)	含水層土壤復育技術介紹，參訪 Sigma V 及 Research Technology Laboratory (RTL) 館相關實驗室。
8/15(三)~8/22(三)	介紹廢液貯坑(Crib) 工程障壁技術。
8/23(四)~8/31(三)	Hanford site 廢液處理設施技術討論及報告研討。
9/4(二)	B 反應器設施參訪
9/5(三)	環境分子科學實驗室 EMSL 館參訪綜合討論
9/6(三)~9/9(日)	Hanford site 玻璃固化報告閱讀及技術討論。
9/10(一)	與 Group manger Tyler Gilmore 及 Host Dawn Wellman 座談。
9/11(二)	辦理離所手續。
9/12(三)~9/14(五)	返台

表 2：訪問 PNNL 專業人員名單

姓名	領域	頭銜
Tyler Gilmore /Ph.D.	Groundwater and soil remediation	Group manger
Dawn Wellman/ Ph.D	Contaminant Migration Modeling	Project manger
Elsa Cordova	Aqueous geochemistry	Scientist
Lirong Zhong/ Ph.D	Aquifer and vadose zone remediation	Senior research scientist
Fred Zhang/ Ph.D	Multiphase flow modeling	Scientist
Jim Szecsody/ Ph.D	Aquifer and vadose zone remediation	Senior research scientist
Wooyong Um/Ph.D	Radionuclides and metal sorption/desorption	Senior research scientist
Karl Mueller/ Ph.D	NMR	Laboratory fellow
Yan Shi / Ph.D	Data intensive Science computing	Scientist
Diane Traeger	-	Administrator

本次接待實習的 Dawn Wellman 博士為 Research Technology Laboratory (RTL)環境系統研究群之資深科學家，主要研究題目是地下水及土壤復育技術，近年特別著重於含水層復育技術(vadose zone remediation)，為 Hanford site 含水層復育專案之專案計畫經理(Project manger)，負責撰寫含水層復育計畫及爭取預算，已有 10 年的研發經驗與成果，為公差人於 PNNL 實習期間之接待人(Host)。公差人於 RTL 館 Parker Room 以台灣土壤復育現況及展望為題進行簡報，並與 PNNL 與會人員意見交流。Dr. Tyler Gilmore 是環境系統研究群的經理，協助公差人於 PNNL 實習期間，聯繫各研究部門之專業人員，以利後續進行訪談。Elsa Cordova 說明 Hanford site 緣由及廢棄物清理現況，提供 Hanford site 處理設施相關資料，及說明廢液處理設施、玻璃固化技術等設施之處理流程。Dr. Lirong Zhong 及 Dr. Jim Szecsody 帶領公差人參觀土壤復育實驗室，提供相關資料並說明泡沫

傳送(foam delivery)修復劑之含水層復育技術特點及現況，此外，亦說明該實驗室之最新研發方向，如超臨界二氧化碳去除深含水層之污染物。Dr. Fred Zhang 提供實驗型 Hanford 工程障壁(prototype hanford barrier)之相關資料，並說明其特點及解決廢液貯坑(Crib)洩漏至土壤之問題。



圖 1：PNNL 行政區正門



圖 2：Research Technology Laboratory RTL 館



圖 3：公差人與 PNNL 主要接待人 (a) Dawn Wellman 及(b)Elsa Cordova 合影

## (二) PNNL 簡介

PNNL 為美國能源部實驗室與科技中心所屬的國家實驗室之一，主要園區位於華盛頓州的里奇蘭市(Richland, WA)，佔地 600 英畝，鄰近 Hanford Site。1965 年 Battelle Memorial Institute(創立於 1929 年以紀念鋼鐵鉅子 Gordon Battelle，以創新為目的之非營利機構，為影印機、CD 等產品之主要發明單位，自詡為 The business of innovation，<http://www.battelle.org/>)，取得為 Hanford Site 執行研究與發展的合約，創立太平洋西北實驗室(Pacific Northwest Laboratory)，並以獨立研發單位的角色為 Hanford Site 的營運機構服務。其首要任務是研發核能及核物料非破壞用途相關的技術，並設計快速通量測試設施(Fast Flux Test Facility)用於美國原子能委員會的商用核能電廠計畫中液態金屬快滋生反應器的燃料及材料測試。這些國家實驗室的研究人員除了參與官方計畫之外，也會與民間企業合作或在能源局許可下進行跨國合作。

目前約有 4700 位全職員工，約 375 位學生參與各科學研究計畫，有超過 2000 名科學設施的使用者。PNNL 研究範圍包括基礎科學研究，應用科學與技術發展等，主要目標為：

1. 強化具創意之基礎科學。
2. 提高自主能源比例，降低依賴進口化石燃料。
3. 預防及打擊恐怖主義及防止大規模毀滅武器擴散。
4. 降低人為環境影響衝擊及建立永續發展系統。

主要的核心研究技術包括：

1. 化學與分子科學
2. 氣候變遷科學
3. 生物系統科學
4. 近地表科學
5. 應用核子科學與技術
6. 先進計算機科技
7. 化學工程

8. 系統工程與整合技術
9. 應用材料科學與工程
10. 大型科學設施與先進儀器分析

PNNL 主要計畫經費來源為能源部所屬國家核能安全署、科學處、以及國土安全部及其他合作計畫等。目前 PNNL 的主要研究部門分為基礎及計算機科學部門(Fundamental and computational science directorate)、國家安全 (National security)、能源及環境部門(Energy and Environment directorate)、環境分子科學實驗室(Environmental molecular science laboratory)，組織架構如圖 4，本次實習的單位係屬於環境與能源部門之地球系統科學組 (Earth system science division) 環境系統群(Environmental system group)，其中環境與能源部門包括地球系統科學組、海岸科學組、電力設施及館舍組、能源程序及材料組、及輻射核子科學與工程組，環境與能源部門之組織架構如圖 5。

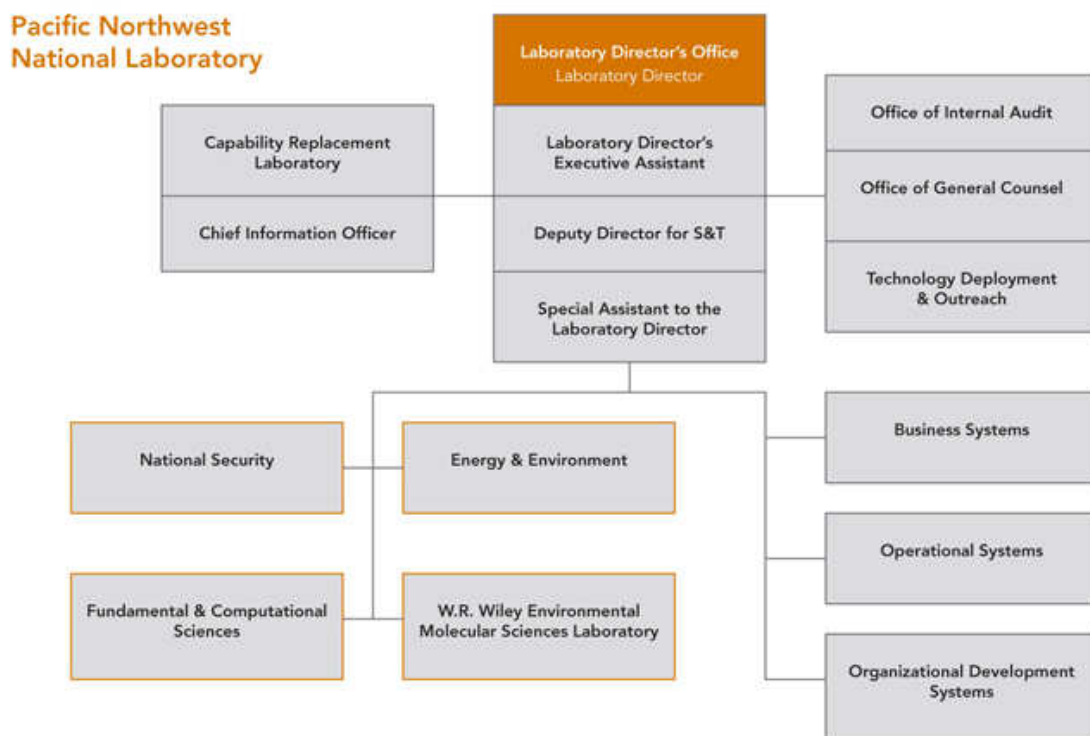


圖 4：PNNL 組織架構

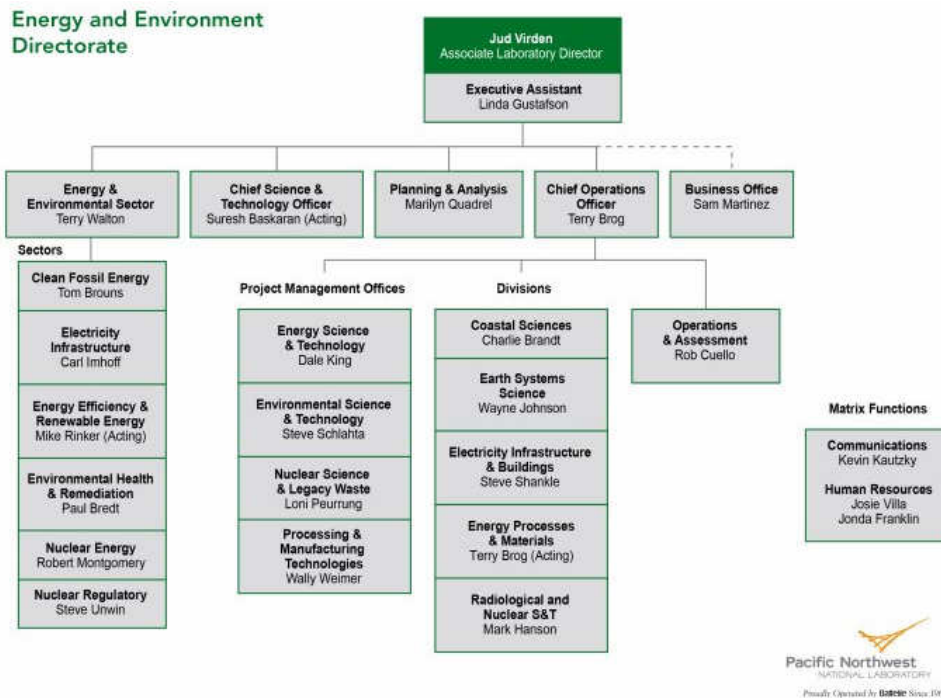


圖 5：PNNL 能源與環境部門之組織架構

### (三)支援清理計畫之角色

Hanford Site 係屬美國能源部所有，期間歷經建置、運轉、停機及除役清理等階段，PNNL 由於和 Hanford Site 的地緣關係，參與過許多能源部所需求的計畫，主要計畫的性質屬於工作規劃等管理層面，其他計畫如污染目標物調查、放射性樣品委託分析、小型實驗與模擬測試等亦有參與。國家實驗室在 Hanford Site 清理計畫之主要角色為以實驗室研究等方式界定問題，進而開發處理程序及技術，由實驗室規模逐漸放大至現地規模，並由能源部發包至承包商，由承包商負責商業規模處理設施之設計、建造及操作，承包商並將處理設施之運轉問題委由國家實驗室研究解決方案，如圖 6。PNNL 館舍很多，如圖 7，其中 EMSL 館負責基礎科學、RPL 館負責輻射及核子科學研究、RTL 館負責復育解決方案、LSL 館負責生命科學研究、Sigma V 館負責近地表土壤研究及復育解決方案、APEL 館及 PDL 館負責設備規模放大技術。公差人可進入館舍為 RTL 及 Sigma V。



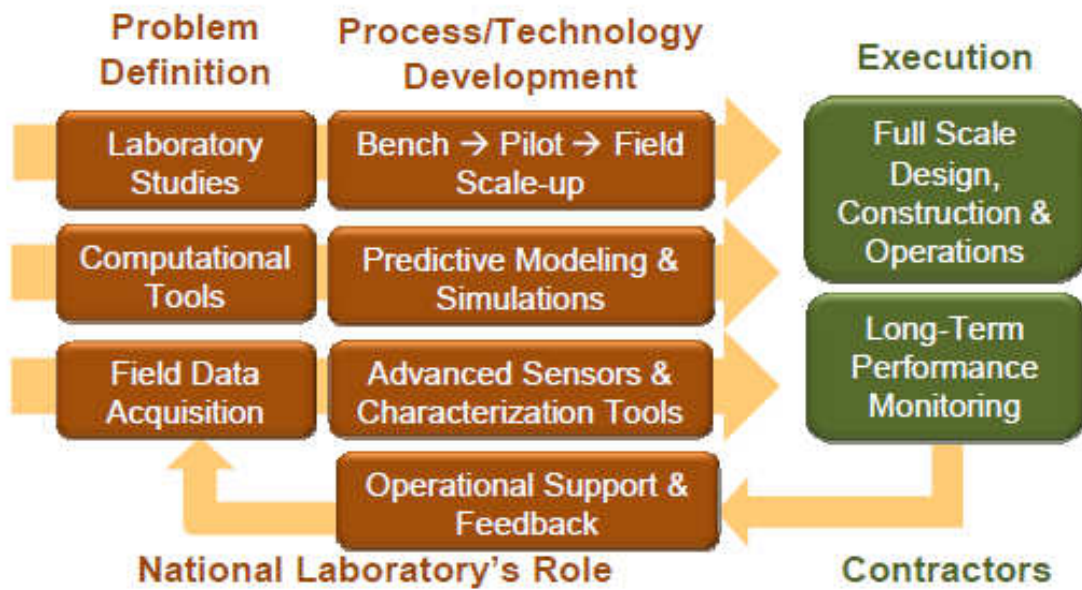


圖 6：PNNL 於 Hanford site 清理工作之角色

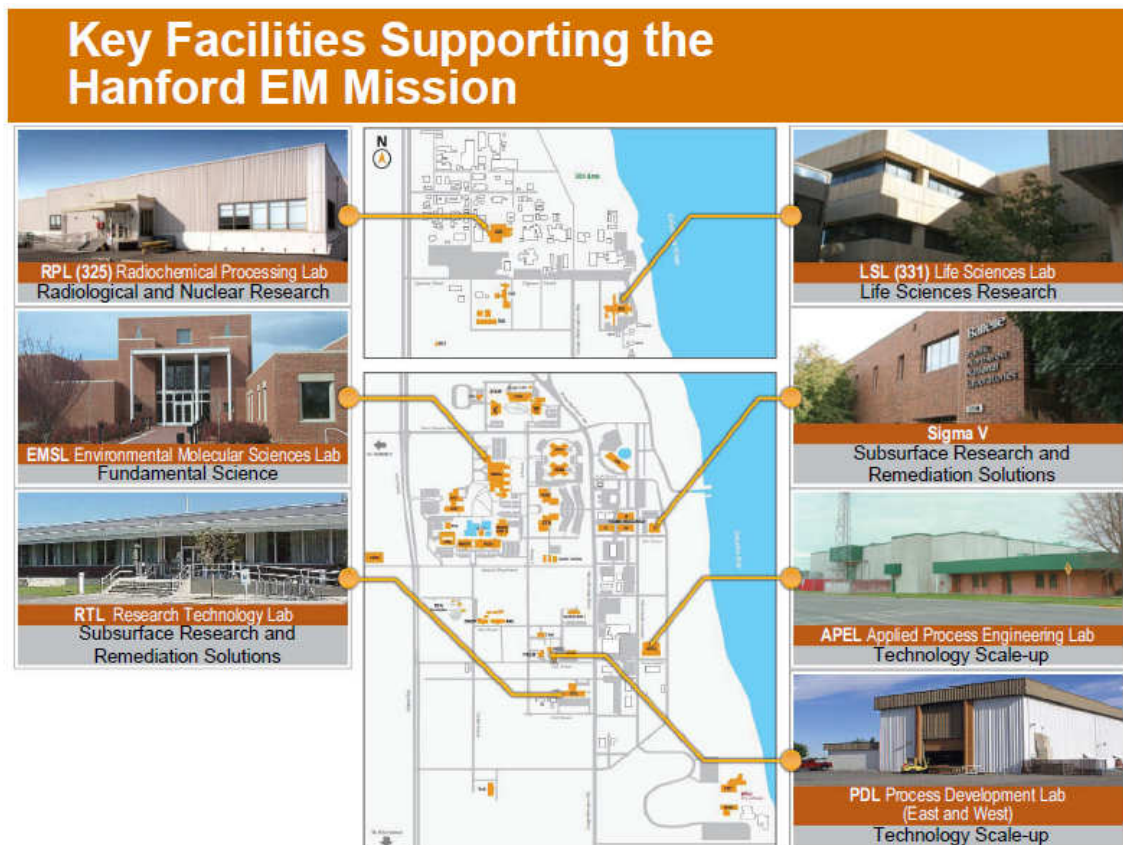


圖 7：PNNL 參與 Hanford site 清理之重要設施及任務

#### (四) Hanford site 緣由及清理現況

Hanford Site 的核子反應設施位於美國華盛頓州哥倫比亞河沿岸，為 1943 年 Manhattan Project 的其中一部份，負責生產鈾原料。總面積達 1518 平方公里，目前本區域無人居住且不對外開放，周圍主要環境是沙漠。核反應器沿著哥倫比亞河河岸建置稱為 100 Area，而化學分離鈾程序則是位於中央高原的區域稱為 200 Area，其他支援輔助設施則建置在南隅稱為 300 Area，區域簡圖如圖 8。緊鄰在最南端的位置是 Tri-Cities，包含了 Richland、Kennewick 和 Pasco 三個城市。

冷戰期間，包含九座核子反應器及五座大型鈾加工廠隨著計畫擴建，約製造 60,000 件核子武器，這個時期核子科技急速發展，許多在 Hanford site 的科學家得到很多技術上的突破與成就。B Reactor 是全世界第一座全規模鈾生產反應器，反應器是以石墨作為緩速劑 並利用水冷卻；D Reactor 和 F Reactor 分別建置於 1944 年 12 月與 1945 年 2 月。1945 年 4 月送第一批鈾至 Los Alamos。大部分的反應器都在 1964 與 1971 年停止運轉，平均的運轉壽命為 22 年。然而，N Reactor 的運轉有雙重目的：其一是透過 Washington Public Power Supply System (WPPSS)電網供應民生用電；另一則是生產作為武器的鈾，因此 N Reactor 持續運轉到 1987 年，Hanford Site 核反應器運轉摘要表如表 3。

早期對於安全程序的要求及廢棄物的處置策略失當，從官方的文件也顯示 Hanford 的運轉使得大量的放射性物質釋放到空氣及哥倫比亞河中，威脅到居民及該區的生態系統。隨著冷戰的結束，用來生產武器的核子反應器相繼除役，但十幾年的運轉產生了 200,000 立方米的高放射性廢棄物(Tank Waste)；710,000 立方米的固體放射性廢棄物（大部分進行掩埋）；場址下方約 520 平方公里的地下水遭受污染，且有滲入哥倫比亞河的風險。Hanford site 為生產核武所產生的高放射性廢棄物量佔全美的三分之二，迄今 Hanford 仍是美國污染範圍最大的核設施場址，目前該場址主要執行美國最大的環境清理（Environmental Cleanup）計畫。而 Hanford 也有一座商用核能電廠（Columbia Generating Station）以及其他科學研發中心，如 PNNL 與 LIGO Hanford Observation。

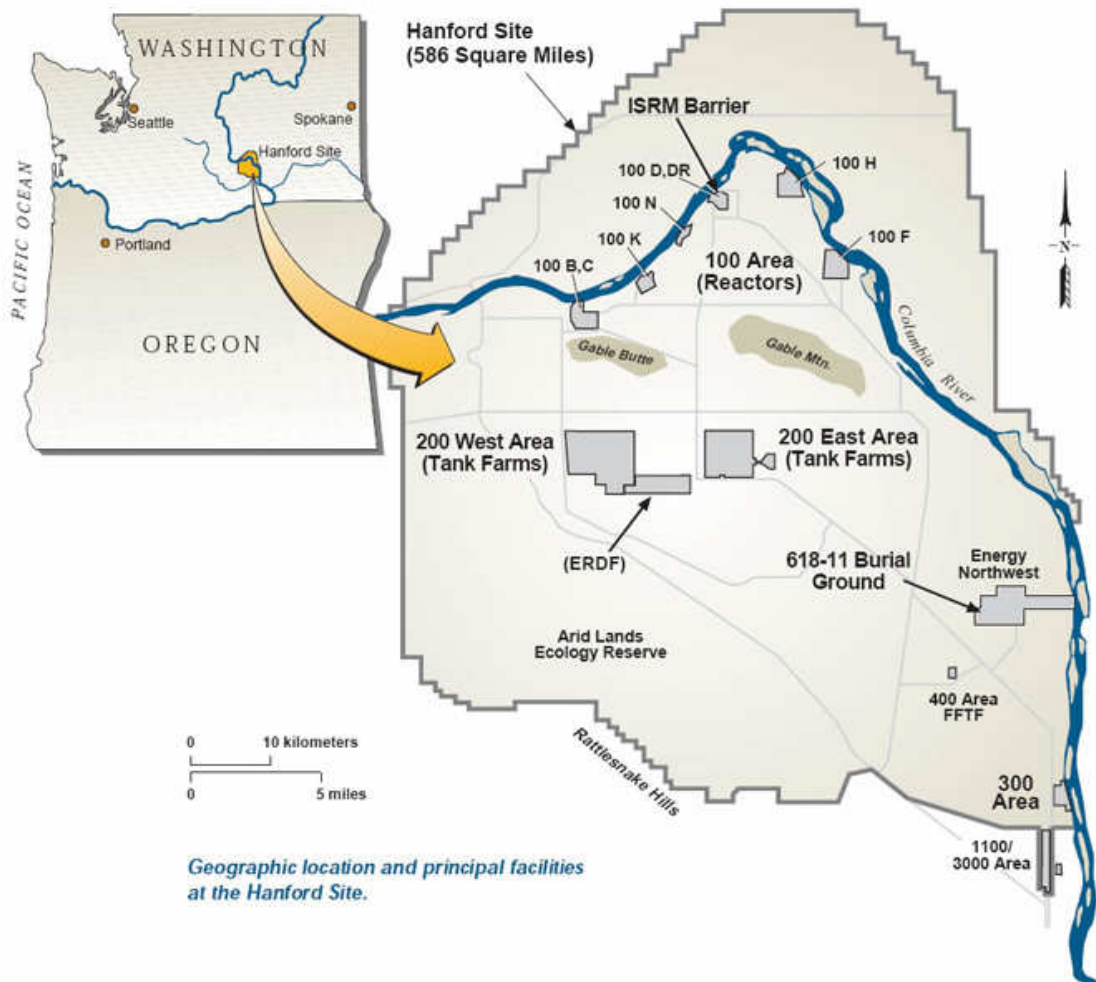


圖 8：Hanford Site 區域簡圖

國務院能源部制定環境復育整治架構，並將美國聯邦及州政府法規納入 Hanford Site 清理計畫，清理行動的重點成果為回復哥倫比亞河流域作為其他使用及將廢棄物的處理與貯存轉移至 200 Area 中央高原地。在其他兩個機關的監管之下能源部負責管理整個清理工作。目前 Hanford 的反應器都已關閉，主要的放射性物質也不再經由運轉的核反應器釋出，但是部份的 Hanford Site 仍然有嚴重的污染問題，最大的威脅是這些污染物逸散至地下水並朝哥倫比亞河擴散。Hanford Site 的清理最大的難題是如何清理存放於 177 個大型地下貯槽 (tank farm) 的高放射性廢棄物 (約 204,000 立方米) 及安定化程序。其中有三分之一

的貯槽發生洩漏而污染到土壤及地下水。2008 年起大部分的液體廢棄物被輸送至相對安全的雙層壁貯槽內，但仍有 10,600 立方米的液體廢棄物及 100,000 立方米的固狀物與污泥存放在單層壁的貯槽內，原計畫在 2018 年移除，目前已經重訂到 2040 年達成。估計另有遭貯槽洩漏污染的 10 億立方米的地下含水層與地下水須進行整治。在 2008 年估計有 4000 立方米的放射性廢棄物藉由地下水流向哥倫比亞河；若不加以移除，估計約 12 至 50 年內會遷移到哥倫比亞河。場址還有 710,000 立方米的固體放射性廢棄物。

在三方協議下，低放射危害的廢棄物將掩埋到大型有內襯加強的貯窖內，且加以密封並使用精密儀器監控數年。對於鈾和其他高放射性廢棄物的處置是棘手的問題，迄今仍然是激烈爭論的議題。目前 Hanford 的營運是美國能源部專責指導，主要的營運模式是由政府發包給一些民營公司執行除役清理計畫，表 4 所列為 Hanford Site 主要運轉設施承包商如 Advanced Technologies and Laboratories (ATL)、Bechtel、Washington River Protection Solutions(WRPS)、CSC Hanford、CH2M HILL Plateau Remediation Company、Mission Support Alliance (MSA)、Washington Closure Hanford (WCH)。

Hanford Site 在早期運轉時對於放射性廢棄物的管理並不妥善，以致環境、土壤與地下水遭受嚴重污染。其中清理難度最高且最應優先清理的是貯槽廢棄物 Tank Waste 的化學物質；另有固體廢棄物及遭污染的土壤及地下水，而核子物料亦是相當受到重視的清理目標，Hanford Site 放射性廢棄物總類為貯槽廢棄物 200,000 立方米(1.95 億居里)、固體廢棄物 700,000 立方米(6 百萬居里)、土壤及地下水 10 億立方米(<1 百萬居里)、設施 5.5 百萬立方米(1 百萬居里)及核子物料 700 立方米(1.5 億居里)。和其他美國核子武器單位相比，Hanford Site 所佔比例如下：

1. 廢棄物貯存與釋出的場址佔 25% (1200 處)
2. 總放射性活度佔 35% (約 3.5 億居里~10 億居里)
3. 貯槽廢棄物佔 60% (200,000 立方米)
4. 掩埋的超鈾固體廢棄物佔 60% (76,000 立方米)
5. 用過燃料佔 80% (2100 公噸)

表 3：Hanford Site 核反應器運轉摘要表

<b>Reactor name</b>	<b>Start-up date</b>	<b>Shutdown date</b>	<b>Initial power (MWt)</b>	<b>Final power (MWt)</b>
<b>B Reactor</b>	Sep 1944	Feb 1968	250	2210
<b>D Reactor</b>	Dec 1944	Jun 1967	250	2165
<b>F Reactor</b>	Feb 1945	Jun 1965	250	2040
<b>H Reactor</b>	Oct 1949	Apr 1965	400	2140
<b>DR ("D Replacement") Reactor</b>	Oct 1950	Dec 1964	250	2015
<b>C Reactor</b>	Nov 1952	Apr 1969	650	2500
<b>KW ("K West") Reactor</b>	Jan 1955	Feb 1970	1800	4400
<b>KE ("K East") Reactor</b>	Apr 1955	Jan 1971	1800	4400
<b>N Reactor</b>	Dec 1963	Jan 1987	4000	4000

表 4：Hanford Site 運轉設施承包商一覽表








Contractor	Responsibility	Remarks
	<p><i>ATL</i> operates the 222-S Laboratory complex, the primary on-site lab for analysis of highly radioactive samples in support of all Hanford projects.</p>	<p>ATL 總裁為臺裔 Dr. Jou Hwang</p>
	<p><i>Bechtel</i> is coordinating the construction of Hanford’s Waste Treatment Plant, also known as the Vitrification Plant.</p>	
	<p><i>WRPS</i> carries out the work associated with monitoring and managing the 177 underground storage liquid tanks at Hanford.</p>	

表 4：Hanford Site 運轉設施承包商一覽表（續）

Contractor	Responsibility	Remarks
	<p><i>CSC Hanford</i> provides occupational medical services to DOE and the Site contractors.</p>	
	<p>The <i>CH2M HILL Plateau Remediation Company</i> 's responsibility includes the solid and liquid waste treatment and disposal, soil and groundwater remediation, facility and canyon disposition, and closure of the Plutonium Finishing Plant, as well as treatment of highly radioactive sludge</p>	
	<p>The <i>Mission Support Alliance (MSA)</i> team oversees security, site infrastructure and utilities, information management, fire services, and business management.</p>	
	<p><i>Washington Closure Hanford (WCH)</i> is the prime contractor for environmental restoration of the Hanford Site, which includes cleaning up waste sites, decontaminating and decommissioning former plutonium reactors, and disposing of contaminated waste.</p>	

300 Area 為核子燃料製造場，有 2 千萬只核子燃料塊，80%是未濃縮的天然鈾，20%經輕度濃縮 (<1.2% U-235) 及鋁或鉛的外套管。100 Area 中九座核子反應器中的其中兩座 (K-East 與 K-West) 鄰近哥倫比亞河岸，其中兩座燃料貯存槽，曾存放大量的用過金屬鈾燃料，目前已全數從該區移出。200 Area 中央高原區五座用過核子燃料再加工場，也是貯槽廢棄物的所在地，未來規劃所有未安定化或超鈾核種濃度超過 WIPP( Waste Isolation Pilot Plant )接收標準之 Hanford Site 放射性廢棄物，存放於此區並安全監控。Hanford Site 放射性廢棄物來源及貯存方式如圖 9，過去 Hanford Site 的核子燃料製造場、核反應器運轉及核子燃料再加工所產出未作分類之高放射性廢棄物放入貯槽內 (及現今的 Tanks Wastes)，較低活度的液體廢棄物流入地下，固體廢棄物直接掩埋，核子物料貯存或運送離廠，氣體直接排放到大氣中，反應器冷卻水直接注回哥倫比亞河。

Hanford Site 設施配置圖如圖 10，操作中設施為雙壁貯槽(double-shell tank)、242-蒸發器(242-A Evaporator)、餾出液貯存設施(LERF, Liquid Effluent Retention Facility)、廢液處理設施(ETF, Effluent Treatment Facility)、環境整治處置設施(ERDF, Environmental Restoration Disposal Facility)、整體式處置設施(IDF, Integrated Disposal Facility)等，封閉(closure)設施如單壁貯槽 (single-shell tank)。Hanford Site 高放射性廢棄物貯存至單壁及雙壁貯槽內，共 177 桶，前者共計 149 桶 (容量約 210 至 3800 立方米) 建置於 1943 到 1964 年間，後者有 28 桶 (容量 3800 至 4200 立方米) 建置於 1968 到 1986 年間。單壁貯槽破損洩漏 (或疑似) 有 67 桶約 5700 立方米，雙壁貯槽沒有洩漏，雙壁貯槽剖面圖如圖 11。1944 至 1988 年共計產生了 2,000,000 立方米的貯槽廢棄物，其內有 190,000 立方米 (10%) 進行再加工處理，455,000 立方米 (23%) 將核種捕捉後進行地下處置，約 3800 立方米 (1%) 廢液滲入地下，利用 242-蒸發器處理 1,100,000 立方米 (57%)，貯槽內廢棄物體積剩原有的 200,000 立方米 (10%)。此類高放射性廢棄物計畫利用玻璃固化的技術將其安定化，並且將大部分的液體從單壁貯槽內傳送至雙壁貯槽，減少液體洩漏，目前能源部已委請 Bechtel 公司設計建置全世界第一套玻璃固化(vitrification)廠處理貯槽內廢棄物，玻璃化程序係將高危險性的廢棄物與玻璃混合後將其封存在玻璃固體內達安定化目的，估計建造成本約 122 億美元，原先計畫在 2011 年開始運轉，2028 年完成玻璃固化程序，但在經過某些原



因的延期後目前重新擬定運轉時間為 2019 年，並到 2047 年完成所有玻璃固化程序，惟所有水溶液、有機液體、金屬與非金屬等廢棄物全部混合，造成玻璃化程序中的連續熔融進料及固化體的完整性有相當大的技術難度。 Hanford Site 之土壤與地下水也已有污染調查，地下水以抽取及處理方式(pump-and-treat)，污染土壤刨除後處置，並著手進行深含水層(deep vadose zone) 整治復育的研究計畫，Hanford Site 清理工作完成現況如表 5。

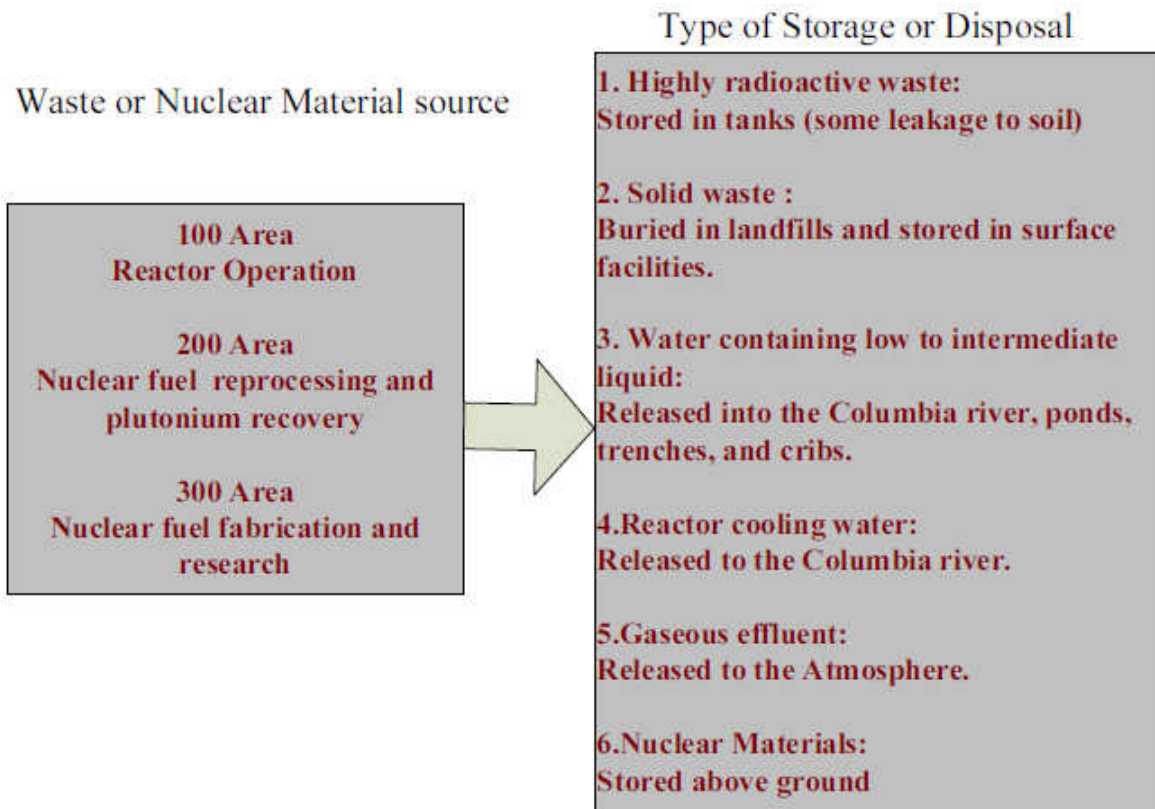


圖 9：Hanford Site 放射性廢棄物來源及貯存方式

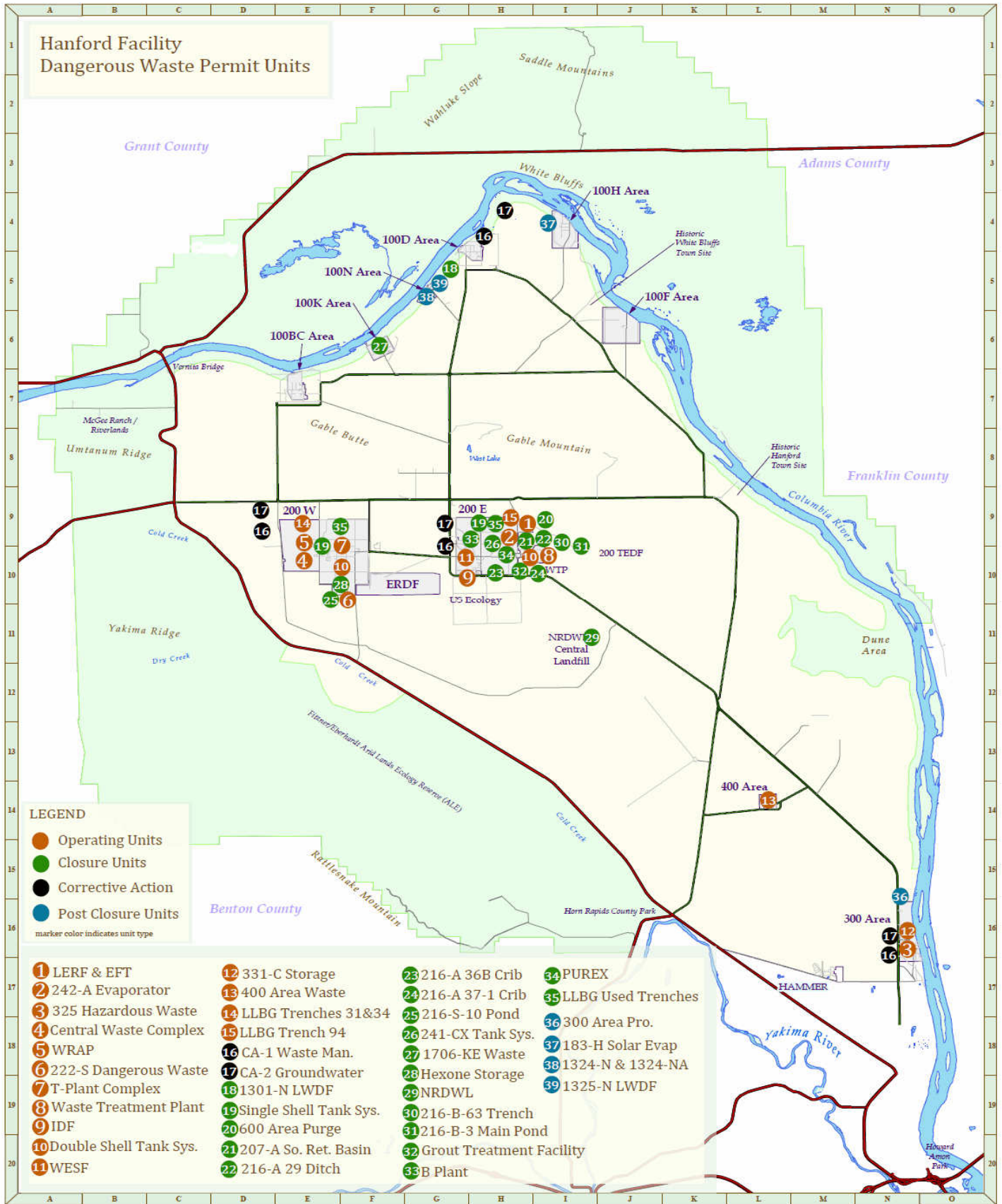


圖 10 : Hanford Site 設施配置圖

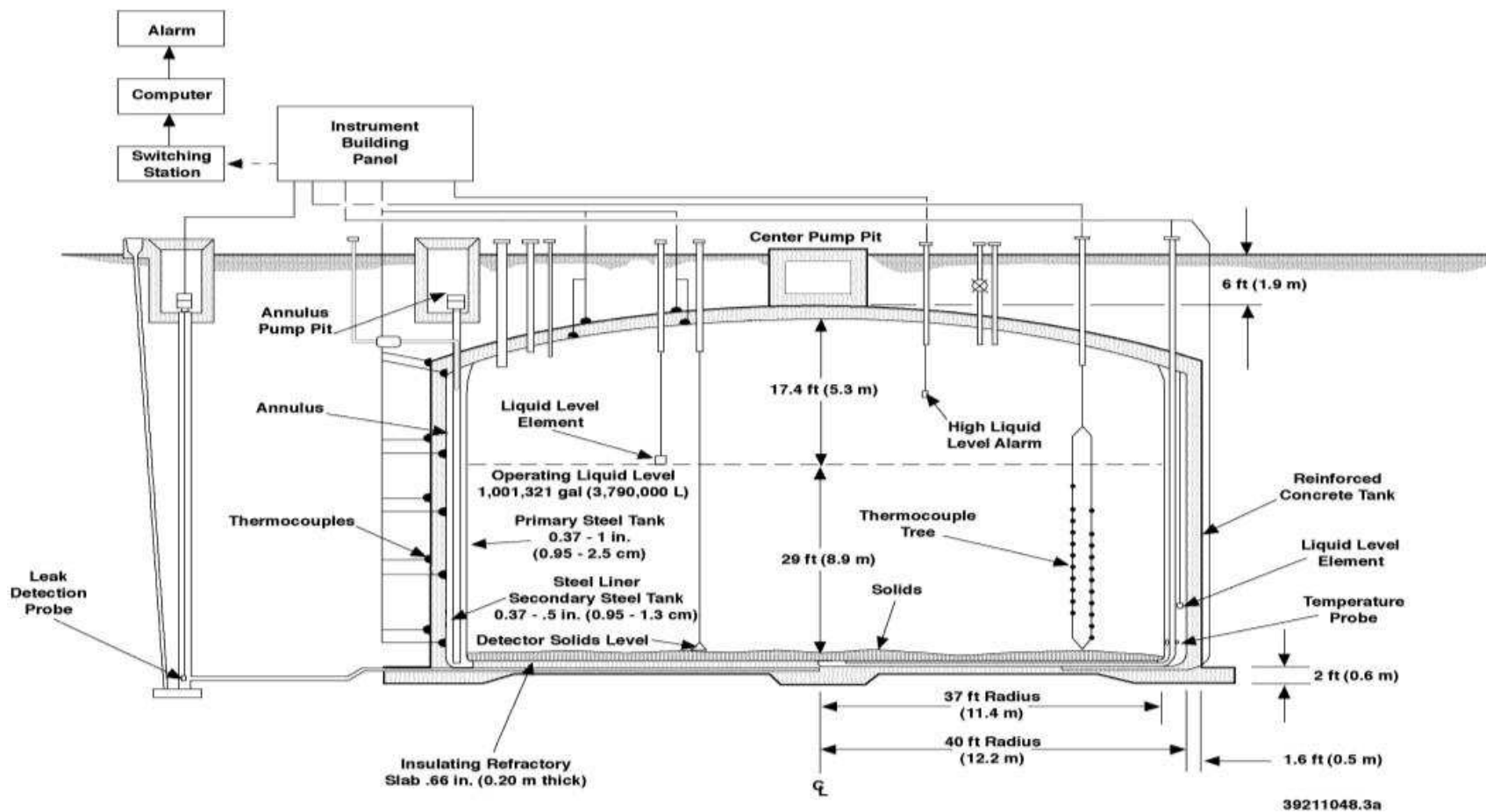


圖 11：雙壁貯槽剖面圖

表 5：清理工作完成現況

Hanford 清理工作	
清理前（1989）	完成清理工作（2011）
177 只地下貯槽(tank farm)內貯存 53 百萬加侖之廢棄物，其中 66 只會發生洩漏。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 移貯液態廢棄物</li> <li>● 清空 7 只貯槽</li> </ul>
靠近河邊之燃料池水內置 2,300 噸用過核子燃料。	移貯至乾式貯存場。
鈾加工廠殘留 20 噸鈾原料。	皆已穩定化及包裝後，送 WIP 處置場。
地下水污染面積達 80 平方哩。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 抽取並處理 3.6 billion 加侖地下水</li> <li>● 已發展土壤復育新技術。</li> </ul>
無處理地下貯槽(tank farm)廢棄物設施。	WTP 玻璃固化場完成 64% 工作。
800 座廢棄場址及 496 座廢棄設施靠近 Columbia 河邊，亟待清理。	清理超過半數之廢棄場址及三分之一廢棄設施，已清理 8 百萬噸廢棄物。
相當 70,000 桶之含鈾廢棄物暫貯於 Hanford。	已檢整分類出相當 45,000 桶含鈾廢棄物，並運送至 WIP 處置場。
9 座退役反應器亟待維護及監測。	已清理 5 座退役反應器進行現地安全貯存，另 2 座退役反應器拆除中。
850 座廢棄場址及 970 座廢棄設施靠近中央高原處，亟待清理。	已清理 39 座廢棄場址及 260 座廢棄設施。

## 三、心得

### (一)土壤復育技術

此行之主要任務為瞭解 PNNL 之土壤復育技術，故 PNNL 安排於 RTL 館 Parker Room，以「核研所土壤復育現況及展望(Status and Outlook of Contaminated Soils Treatment at INER)」為題進行簡報，如圖 12，說明本所研發方向及研發能量、本所既存污染土壤數量種類、實驗室建立之處理流程及實驗設備、評估說明典型土壤復育技術之特點，此外並說明臺灣核能電廠除役後土壤復育之問題，會中 PNNL 與會人員對臺灣核能政策、放射性廢棄物處置場設置進度會、替代現有核能發電方案、土壤外釋法規及污染土壤除污技術等問題進行討論及進行意見交流。簡報內容如附件（二），簡報摘要如下，：

#### **Status and Outlook of Contaminated Soils Treatment at INER**

There are 15000 cubic meters of contaminated soils stored at Institute of Nuclear Energy Research (INER). The contaminated soil is a mixture of sands and gravels. The major chemical composition is  $\text{SiO}_2$ , and the water content is below 40 wt.%. The dose rate of the soil is 0.26-8.15  $\mu\text{Sv/h}$ . The radioactivities in contaminated soils are approximately 20,000~740 Bq/kg for Cs-137 and 12,600~740 Bq/kg for Sr-90, respectively.

To evaluate the feasibility the chemical washing treatment for contaminated soils at INER, weak acid solution was used to wash a small amount of soil, 500~1000 g. Test result shows the removing rates of Cs-137 and Co-60 in contaminated soils were significant. Besides, the laboratory-scale experiments of electrokinetic soil remediation, thermal desorption, and surfactant washing processes were also studied at INER. However, those techniques are not yet implemented at INER, due to the lack of proven results of appropriate plant-scale process. Before developing an appropriate methodology, contaminated soils are still stored at the underground storage facility of INER.

Other than above-mentioned soil treatment, sorting process will be a pre-treatment to reduce soil volume. INER is interested in the techniques and experiences of sorting process at PNNL. The expected capacity and efficiency of contaminated soil with the process are 30 cubic meters per day and 90%, respectively. After the sorting process, the screened contaminated soils should be treated by chemical or physical methods to remove the radionuclides to meet the regulatory limit, 740 Bq/kg for disposal at INER and 100 Bq/kg for release to the environment.

All of the three existing nuclear-power plants (NPPs) in Taiwan will go offline, once their licenses expire. In the wake of existing NPPs' decommissioning, the soil remediation will be a very important issue. With the PNNL's experiences dealing with soil remediation, the appropriate methodology and treatment techniques will be applied to Taiwan's facilities.

會中 Dr. Wellman 說明 PNNL 之土壤復育現況，著重於含水層 (Vadose zone) 之整治，近地表區域的土壤刨除後，永久性貯存至 Hanford site 環境復育處置設施(Environmental restoration disposal facility)，該設施貯存容量為 16.4 百萬噸，目前已貯存 11 百萬噸廢土等低放射性廢棄物。此外並說明提供 PNNL 對於土壤及地下水復育之建議(PNNL-SA-20847, PNNL Recommendations for Soil and Groundwater Cleanup)，全文如附件 (三)，主要復育步驟為

1. 建立概念式模式以確定問題及復育必要決策之行動。
2. 建立地理資訊系統(Geographic Information System , GIS) ，以整合環境資料。PNNL 開發之 Hanford 線上環境資訊軟體-PHOENIX ，網頁連結 <http://rdsx.pnl.gov/hanford/index.html> 。畫面如圖 13 所示。
3. 確定污染物之性質及範圍，污染途徑等場址特性。
4. 考量民眾接受度及土地使用計畫，確定長期有效的復育方法。
5. 復育行動之選擇及評估。
6. 長期監測場址。
7. 確定廢棄物管理方案：依美國的復育經驗顯示，福島第一核電廠廠址復育所移出之廢棄物需封閉數百年，其中低放射性物貯存於約 30 公尺深近地表處置場。



圖 12：公差人(a)進行簡報及(b)與會人員問題討論

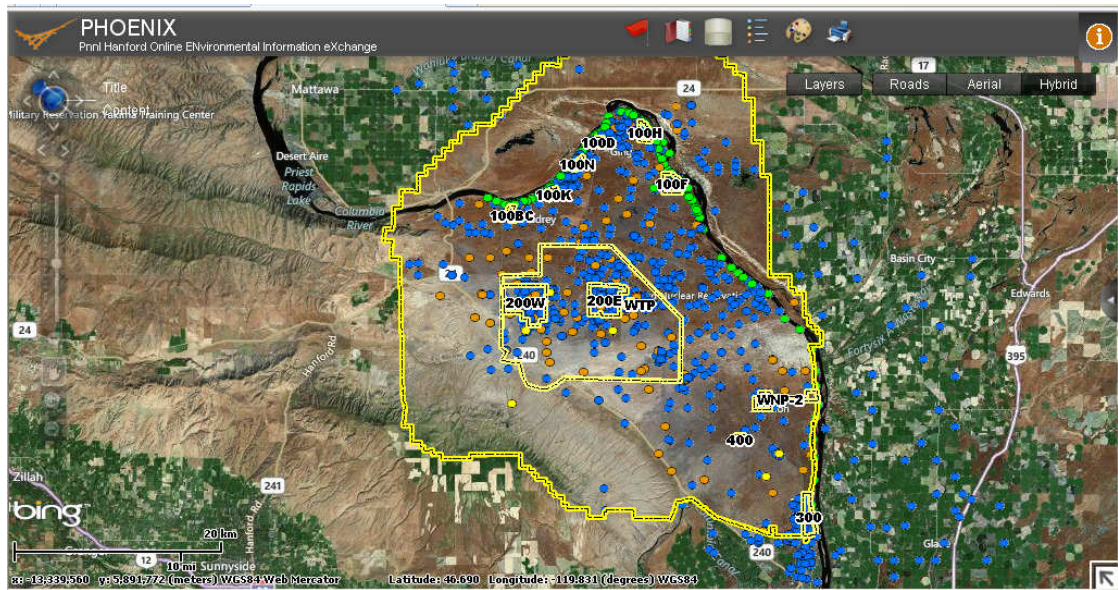


圖 13：PNNL 開發之 PHOENIX 工具。

## (二)深層含水層 (Deep Vadose zone)之整治

Hanford Site 在早期運轉時對於放射性廢棄物的管理並不妥善，單壁貯槽及廢液貯坑 (crib) 之液體廢棄物洩漏，廢廢直接排入地表，造成土壤與地下水遭受嚴重污染，地表表面約 40 英尺深之污染土壤可直接刨除，並移至位於 200 area 之環境復育處置設施(Environmental restoration disposal facility)永久貯存，但深層含水層 (Deep Vadose zone)之污染土壤仍會持續污染地下水，復育相當困難，主要原因為：

1. 深層含水層位於地底深處無法刨除，無法以傳統復育技術有效處理。
2. 深層含水層之地質水文及地質化學成份複雜。
3. 深層含水層沉積物之含水率低。

如圖 14 (a) 所示，地下廢液貯槽及廢液坑貯(crib)洩漏污染土壤，經擴散滲透等作用，由近地表區域，逐漸遷移至深層含水層，近地表區域的土壤刨除後貯存至 Hanford site 環境復育處置設施(Environmental restoration disposal facility)，深層含水層的污染物雖不會直接影響民眾，但污染物遷移



會長時間持續污染地下水，因此深層含水層土壤復育問題極為棘手，美國能源部目前委託 PNNL 之土壤復育研發工作為深層含水層之整治。此外廢液坑貯地下(crib)上方採用工程障壁，以阻絕雨水滲入並進行工程障壁，避免造成污染物遷移擴散，如圖 14 (b) 所示。

依 PNNL PE Dresel 等人報告(PNNL-18114, 2008)彙整具潛力之土壤復育技術策略及發展現況及如表 6，此資訊可供本所研究開發之參考，PNNL 據此確定土壤復育開發之優先技術，處理技術可分為污染物遷移及回收、沈澱法、氧化還原法、生物性隔離法、水文控制、化學傳送等 6 大項，各有其特點，經 PNNL 評估，目前主要發展重點為含水層 (Vadose zone)之整治技術-泡沫傳送技術。

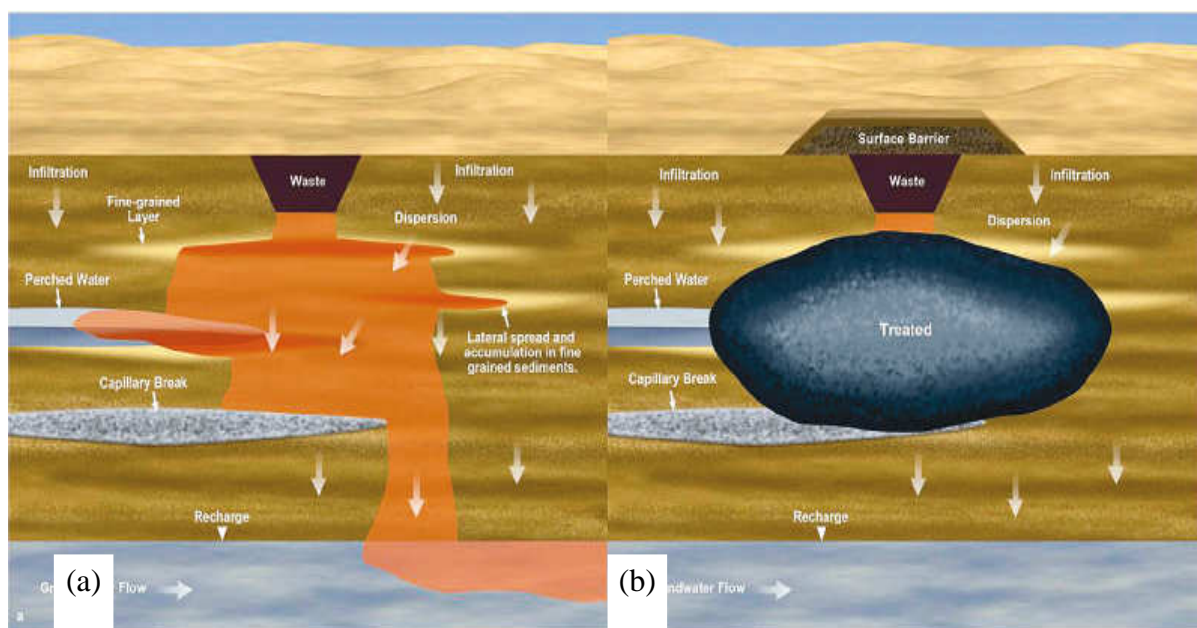


圖 14：(a)廢液洩漏至含水層與(b) 廢液貯坑工程障壁及含水層復育示意圖

表 6：土壤復育技術一覽表

	技術	發展現況	研發路徑
<p>污染物遷移及回收</p>	<p>以水或複合物沖洗法</p>	<p>成熟技術，已被應用於淺層含水層現地。</p>	<p>需考慮現地地質水文特性及污染物遷移。</p>
	<p>以生物可分解界面活性劑沖洗法</p>	<p>為概念性探討，研究資料少，且有處理上尚有均勻性及回收等問題。</p>	<p>污染物遷移法之生物性程序應用對其他復育策略之影響仍需進一步研究。效能不如固定法。</p>
	<p>界面活性劑沖洗法</p>	<p>為概念性探討及實驗室規模之探討，大部分研究僅針對飽和狀態之研究</p>	<p>效能不如固定法</p>
	<p>電動遷移及回收</p>	<p>已被應用於淺層含水層之污染區域。大面積及深層區域之效率為其主要問題。可適用於低滲透沉積物區。</p>	<p>如施作於現地，仍需確定污染物之化學性增強作用。</p>
	<p>處理化學污染物之混合電動傳遞法</p>	<p>測試研究實驗室規模之銻還原。近地表化學物成份之控制為其關鍵。</p>	<p>為高優先研發之復育技術。建議可進一步研發應用於低滲透沉積物區之化學污染物固定化法。</p>

表 6：土壤復育技術一覽表（續）

技術		發展現況	研發路徑
沈澱法	磷酸鹽相沈澱法	以磷酸鹽化法沈澱隔離鈾，已於 Hanford site 現地測試中；已進行測試 hydroxyapatite 沈澱隔離 Sr-90 之可行性。	為高優先研發之復育技術。
	碳酸鹽相沈澱法	以碳酸鹽化法沈澱隔離鋇、鈾、銻尚待研究其可行	為高優先研發之復育技術。 可評估研究污染物與碳酸鈣或碳酸鐵置換反應。
氧化還原法	零價鐵	在飽和系統中，已被驗證可有效地隔絕大多數的金屬離子及放射性核種，含水層之成效尚待驗證。	為第二優先研發之復育技術。
	次硫酸鈉(Sodium dithionate)	應用於含水層之成效尚待驗證。	不列入優先研發之復育技術。
	硫化鹽 Sulfide salts	已應用於六價銻之復育。	不列入優先研發之復育技術。
	二價鐵	0.2M 二價鐵溶液可有效應用於在飽和層之復育	不列入優先研發之復育技術。
	氣態還原	可有效應用於含水層六價銻之復育。	為高優先研發之復育技術。

表 6：土壤復育技術一覽表（續）

技術		發展現況	研發路徑
生物性隔離法	直接生物還原	針對一些污染物之現地規模復育已有應用實績。	為高優先研發之復育技術。
	間接生物還原	針對一些污染物之現地規模復育已有應用實績。	為高優先研發之復育技術。
	共沈澱	生物程序與礦物質之沈澱反應機構。	為高優先研發之復育技術。
	生物性吸附強化	針對一些污染物之現地規模復育已有應用實績。	列為第二優先研發之復育技術。
水文控制	帽蓋法 Caps and covers	特定場址已應用。	不列入優先研發之復育技術。
	熱處理	高溫環境下，土壤產生玻璃固化使污染物隔離於玻璃固化體。	不列入優先研發之復育技術。
	土壤乾燥 Soil desiccation	已計畫於 Hanford site 現地測試。	為高優先研發之復育技術。
	滲透率控制	水泥及深層土壤混合已被應用。	為高優先研發之復育技術。
化學傳送	氣相傳送	注入 H <sub>2</sub> S 氣體，已應用於六價鉻之復育。	為高優先研發之復育技術。
	泡沫傳送	應用於含水層之研究尚待進行。	為高優先研發之復育技術。

### (三)含水層之復育技術-泡沫傳送技術

含水層殘留的污染物為核設施場址之地下水主要污染來源，其中有機污染物可用傳統之有機蒸氣脫除法去除(vapor stripping)，放射性污染物較難以其他傳統方法復育，此外考慮經濟性及技術可行性，當污染土壤位於 40~60 英尺下時，刨除後處置方式已不可行，因此 PNNL 著重研究發展泡沫傳送技術 (foam delivery)，此計畫主要負責人為美籍華裔科學家 Dr Zhong Lirong(鍾立榮，如圖 15)及 Dr. Jim Szecsody，泡沫傳送技術主要能將復育修補劑 (Remedial amendments) 均勻分佈地傳送至異相的含水層，作用機制示意圖如圖 16，復育修補劑與沉積物 (sediment) 有效結合形成瓣狀 (Lamella) 區域，泡沫作用效能愈佳，則瓣狀區域面積愈大。泡沫傳送技術實驗室位於 PNNL 之 Sigma V 館，其實驗流程示意圖如圖 17，生物分解性界面活性劑 sodium lauryl ether sulfate 0.5 wt%、250 mmol/L sodium phosphate( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )復育修補劑與氮氣混合產生泡沫，調節壓力後，進入填充塔，含水層之模擬沉積物及污染物 Tc-99 置於填充塔內，進行氣體-泡沫前緣分離試驗(Gas Front-Foam Front Separation Test)、壓力分佈試驗 (Pressure Distribution Test)、泡沫品質-注入壓力試驗 (Foam Quality-Injection Pressure Tests)、沉積物滲透率-泡沫注入壓力試驗(Sediment Permeability-Foam Injection Pressure Tests)、液體吸取及分佈試驗(Liquid Uptake and Distribution Tests)等，可測試氣體、液體、復育修補劑分佈，以確認各參數對泡沫傳送技術效能之影響。泡沫傳送技術未來應用於現地含水層復育之示意圖如圖 18，於 Hanford site 中央高原深含水層可試驗性測試計畫下(Deep Vadose Zone Treatability Test activities for the Hanford Central Plateau)，美國能源部預計委請 CH2M HILL Plateau Remediation company 於 100 area 執行泡沫傳送技術現地測試。

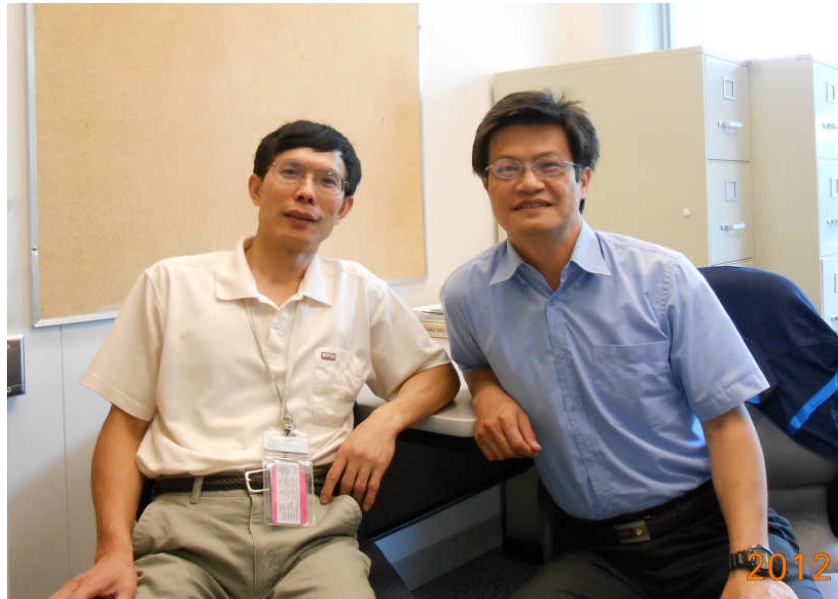


圖 15：公差人員及本技術主要負責人 Dr Zhong Lirong 合影

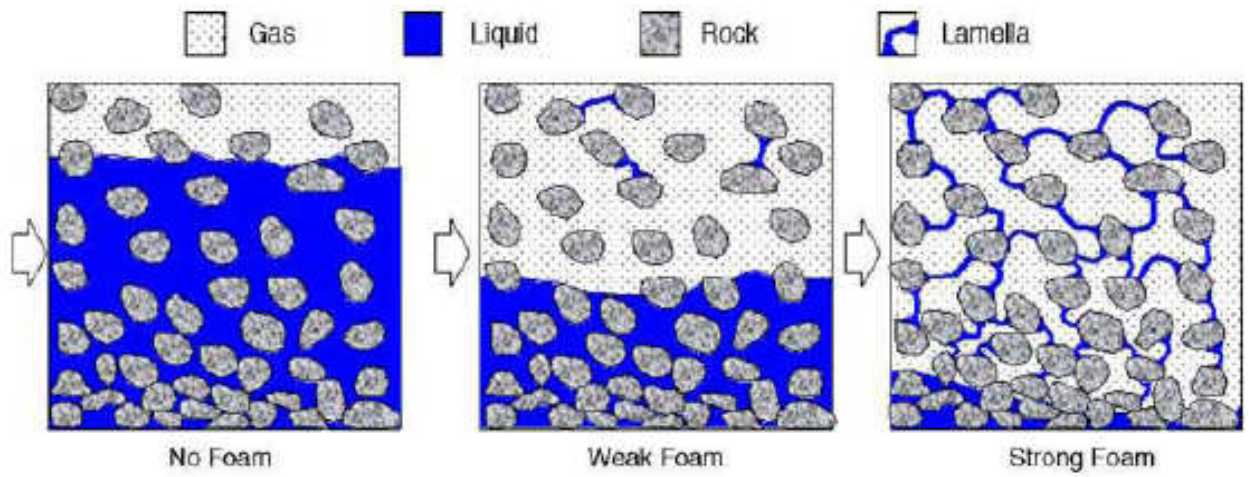


圖 16：泡沫作用之示意圖

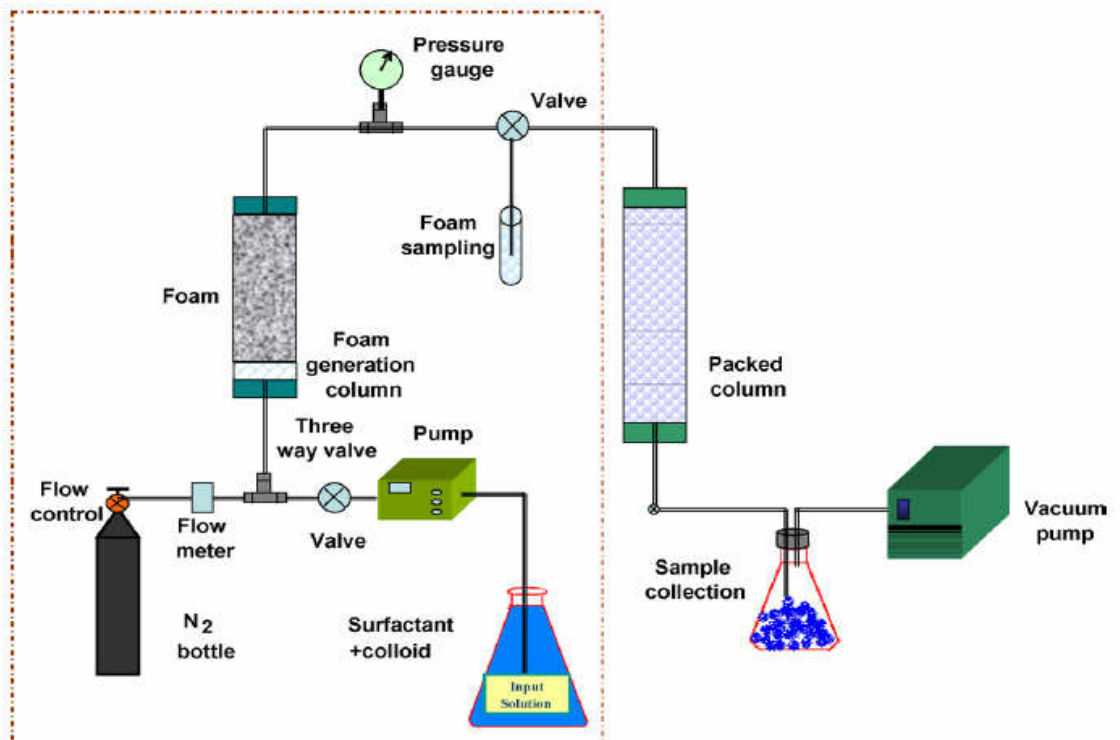


圖 17：泡沫傳送實驗示意圖

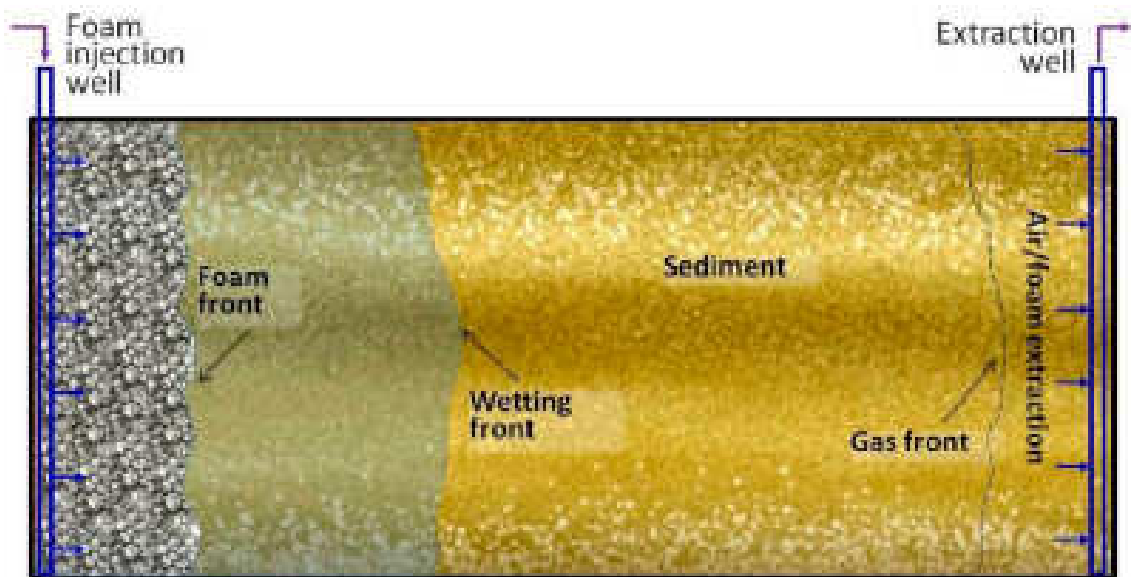


圖 18：泡沫傳送技術應用於含水層之示意圖

#### (四)廢液地下貯坑工程障壁

有鑑於地下廢液貯槽及廢液坑貯(crib)洩漏污染土壤，Hanford site 建置實驗型 Hanford 工程障壁(prototype barrier)，以確保降雨不會造成廢液坑貯 (waste crib) 擴散污染土壤，設計年限為 1000 年，係由 Fred Zhang (張轉放 加拿大籍，照片如圖 19) 負責說明，

工程障壁之興建如下：

1. 1985 年 成立 Hanford site 永久封閉隔絕地面工程障壁發展計畫。
2. 1990 年 開始進行實驗型 Hanford 工程障壁之設計。
3. 1992 年完成設計工作，設計基準為 1000 年。
4. 1994 年完成興建工作。
5. 1994 年起植被植物及進行監測。

Hanford 工程障壁鳥瞰圖如圖 20 所示，其實驗型 Hanford 工程障壁剖面圖如圖 21 所示，東側之玄武岩(basalt)拋石狀(riprap)斜坡度  $37^\circ$ ，坑坡碎石 (pit run gravel) 西側斜坡度  $5.7^\circ$ ，工程障壁表面斜坡度  $0.57^\circ$ ，工程障壁四周圍為碎石路。東側剖面局部放大圖如圖 22 所示，由不同粒徑大小之砂、碎石、玄武岩及瀝青等構成。



圖 19：公差人員及本技術主要負責人 Dr Fred Zhang 合影





圖 20：實驗型 Hanford 工程障壁鳥瞰圖

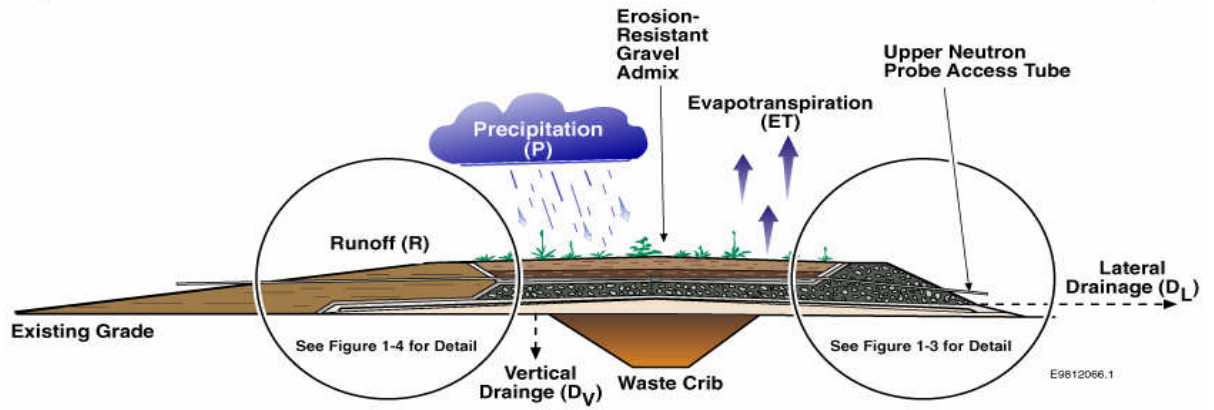


圖 21：實驗型 Hanford 工程障壁剖面圖

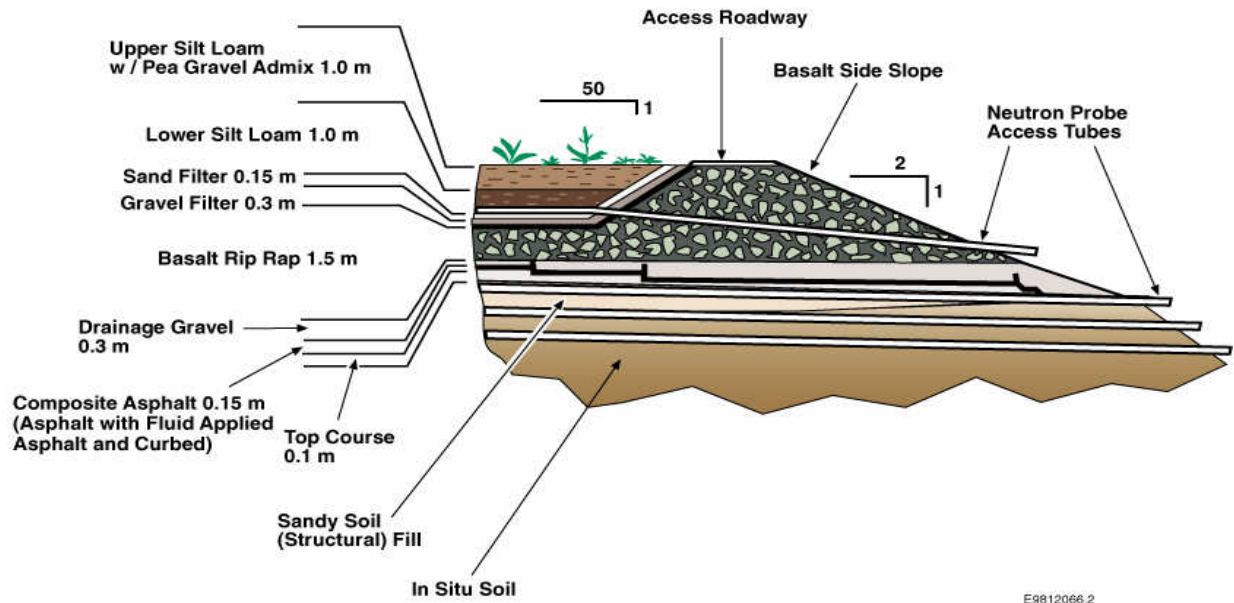


圖 22：實驗型 Hanford 工程障壁剖面局部放大圖

## (五) Hanford site 廢液處理設施及流程

Hanford site 進行中之清理工作包括：設施拆除，反應器清理後現地安全貯存方式 (interim safe storage)，用過燃料及核子物料安定化及貯存，近地表土壤去除及處置，地下水抽出及處理，水力控制及工程障壁，廢液處理，固體廢棄物處置作業，貯槽內廢液貯存作業及封閉作業。未來將執行作業：貯槽內廢液處理及玻璃固化，深層地下含水層復育，長時期間測及封閉廠址以控管人員進入。Hanford site 目前運轉及建造中廢棄物處理設施如表 7。

本次公差任務之一是瞭解 Hanford site 廢液處理設施及流程。與 PNNL 的專家訪談與研討對於廢液處理設施內處理流程作業有更詳細的認識，Hanford site 之主要廢液處理設施，主要有廢液貯槽區 (Tank Farm)、242-蒸發器 (242-A Evaporator)、餾出液貯存設施 (Liquid Effluent Retention Facility)、廢液處理設施 (Effluent Treatment Facility)，目前 Hanford site 之廢液處理流程為廢液貯槽區之高放射性廢液經蒸發器濃縮處理後，濃縮液再餉入廢液貯槽，達到減容作用，蒸發器之餾出液則送入餾出液貯存設施 (Liquid Effluent Retention Facility) 貯存，餾

出液再經廢液處理設施(Effluent Treatment Facility)處理後，經檢測合格後排放；復育地下水所抽取之地下水亦送至廢液處理設施(Effluent Treatment Facility)處理；最後廢液貯槽之濃縮放射性廢液，以玻璃固化之冷試車設施(Cold Test Facility)模擬取出濃縮放射性廢液，再經設計建造中之玻璃固化廠安定化(Vitrification Plant)，其中高放射性玻璃固化體送 WIPP 處置，較低放射性玻璃固化體及固體廢棄物送 Hanford site 之整體式處置設施(Integrated Disposal Facility)永久處置，彙整其廢液貯槽區(Tank Farm)廢液及復育地下水主要處理流程如圖 23。

低放射性廢棄物地下掩埋貯坑(Low-Level Burial Grounds Trenches)中之超鈾元素(Transuranic, TRU)廢棄物經廢棄物檢整設施(Waste Receiving and Processing Facility)分類及分析確認，屬於 TRU 廢棄物送至 WIPP，一般低放射性廢棄物送至環境整治處置設施(Environmental Restoration Disposal Facility)貯存，污染土壤亦送至環境整治處置設施貯存，主要固體廢棄物處理流程示意圖如圖 24。

廢液處理設施(Effluent Treatment Facility)內之流程如圖 25，242-蒸發器(242-A Evaporator，流程如圖 26)之餾出液送入廢液處理設施(Effluent Treatment Facility)處理，首先經粗過濾後，進入紫外線/氧化單元（流程如圖 27）去除有機物，調整 pH 值，去除過氧化物及經細過濾，去除氣體後，進入 2 階段螺旋纏繞式逆滲透薄膜處理設備（流程如圖 28，現場照片如圖 29），滲透液經離子交換樹脂及 pH 調整後，送入放流水監測槽，測量合格後排放，逆滲透薄膜處理設備濃縮液及過濾反洗液等二次廢液，經蒸發器（流程如圖 30）濃縮處理，及薄膜乾燥器(Thin film dryer，流程如圖 31)安定化濃縮液後，二次固體廢棄物送環境整治處置設施(Environmental Restoration Disposal Facility)貯存。

表 7：Hanford site 目前運轉及建造中廢棄物處理設施

設施名稱	說明
Tank Farm	149 of these single shell tanks were built at Hanford. 67 of these tanks to leak some of their contents into the ground. Hanford built another 28 “double shell tanks” , these tanks have not leaked any of their waste.
Liquid Effluent Retention Facility (LERF)	Storage capacity is 88.5 million liters.
242-A Evaporator	This unit accepts waste from the double-shell tanks and boils it to extract water and concentrate the waste, which goes back to the double-shell tanks. Each evaporator campaign makes about 500,000 gallons of tank space available. The condensate goes to LERF-ETF for treatment.
Effluent Treatment Facility (ETF)	A number of treatment processes at ETF remove radioactive and hazardous contaminants from waste water. For discharge to a state-approved disposal site in 200 Area. ETF treats up to 28-million gallons of waste water each year.
Treated Effluent Disposal Facility:	Treated non-hazardous and non-radioactive liquid wastes are collected and then disposed of through the systems at the Treated Effluent Disposal Facility (TEDF).
Hazardous Waste Treatment Units	This unit consists of six rooms in the 325 Building, three of which are in the Shielded Analytical Laboratory. The unit stores and treats a variety and small volumes of dangerous and mixed wastes from lab operations in the 300 Area.
Central Waste Complex	This unit is a storage area for solid wastes that started operating in 1988. It has 19 storage buildings, 27 storage modules for low-flashpoint wastes, and 6 outdoor storage areas that hold a wide variety of wastes. Its capacity is the equivalent of 64,000 drums, with 300,000 square feet of total storage space.
Waste Receiving and Processing Facility	It handles mostly transuranic (plutonium- contaminated) and mixed transuranic waste. It receives, examines, and treats waste from Hanford’s burial grounds. Treatment is done through a variety of methods, such as compacting, repackaging, and encapsulating. This is also the point from which transuranic wastes leave Hanford to be disposed of in the Waste Isolation Pilot Plant.

表 7：Hanford site 目前運轉及建造中廢棄物處理設施（續）

設施名稱	說明
Vitrification Plant	Vitrification Plant is under construction, and has a legal deadline to start operating in 2019. It will treat the 56 million gallons of waste in Hanford's 177 underground tanks to convert it to a stable glass form in a process called vitrification. It consists of four main facilities: pretreatment, low-activity waste vitrification, high-activity waste vitrification, and a laboratory to support this work.
Integrated Disposal Facility(IDF)	This facility is a disposal site for the low-activity waste glass canisters. Its capacity is 450,000 cubic meters of waste. The landfill has two sections, one for mixed (radioactive and chemically hazardous) waste and one for radioactive waste the permit doesn't regulate.
Waste Encapsulating and Storage Facility	WESF began operating in 1974. This facility stores 1,902 capsules of cesium-137 and strontium-90 underwater. The capsules are about 21 inches long. The waste came from Hanford's underground storage tanks in a campaign in the 1970s to remove the extremely radioactive materials.
Low-Level Burial Grounds Trenches	Trenches store, treat, and dispose of radioactive and chemically dangerous waste from Hanford work. The trenches are lined to collect any liquids leaching from the waste for removal and treatment. The waste includes waste in drums and spent equipment.
Transuranic Waste Retrieval and Certification	More than 70,000 containers of TRU waste were stored under a layer of dirt. Crews often work in protective clothing and breathing equipment before they can put the containers into overpacks for safe removal from the trench. The process involves x-raying of the container to determine if any prohibited items such as liquids are inside.

表 7：Hanford site 目前運轉及建造中廢棄物處理設施（續）

設施名稱	說明
Environmental Restoration Disposal Facility(ERDF)	ERDF capacity is 16.4 million tons. To date, nearly 11 million tons of contaminated material has been disposed in the facility. ERDF accepts low-level radioactive, hazardous, and mixed wastes.
Cold Vacuum Drying Facility(CVDF)	Crews loaded fuel rods into water-filled containers called Multi-Canister Overpacks (MCO's) in the basins. Inside the CVDF, the 150 to 190 gallons of bulk water inside every Overpack had to be removed without any contamination being released. As the water inside the MCO was being removed and evaporated, an atmosphere of greater than 99.97% pure helium was maintained in the Overpack.
Waste Sampling and Characterization Facility:	WSCF conducts analyses on air, water, soil, vapor, sludge, and other miscellaneous samples.

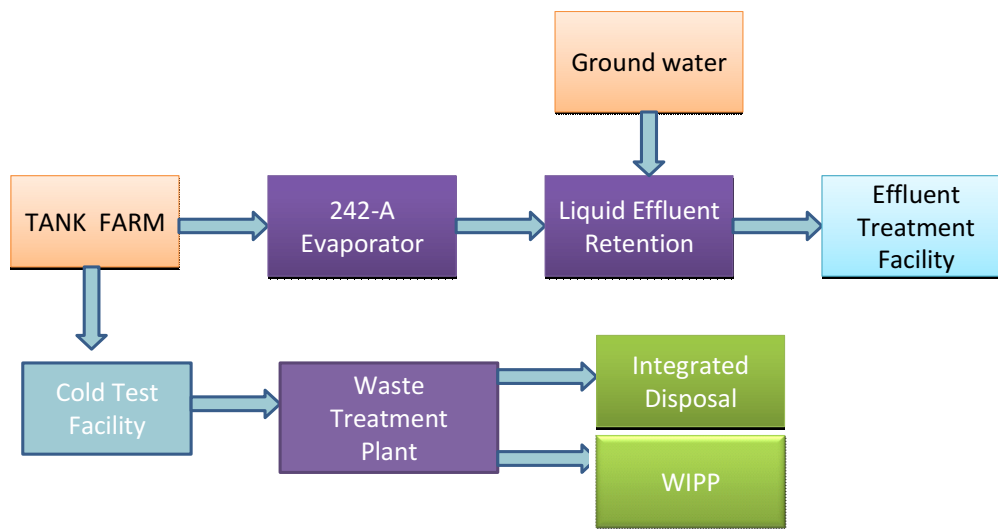


圖 23：廢液貯槽區(Tank Farm)廢液處理流程示意圖

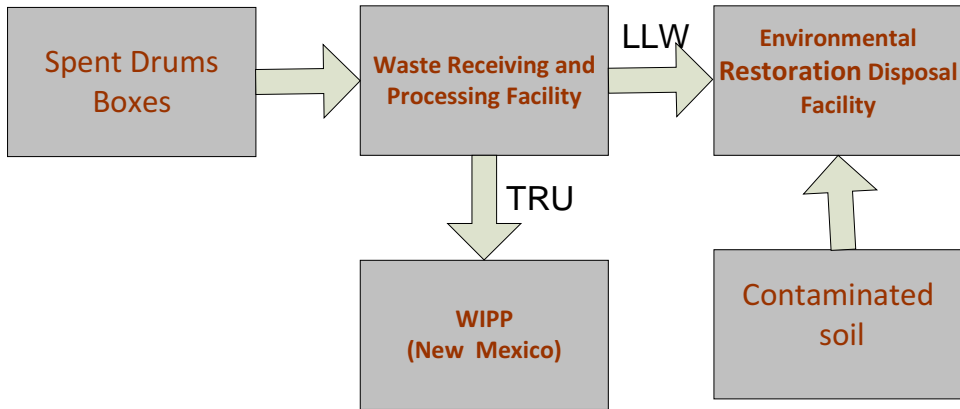


圖 24：固體廢棄物處理流程示意圖

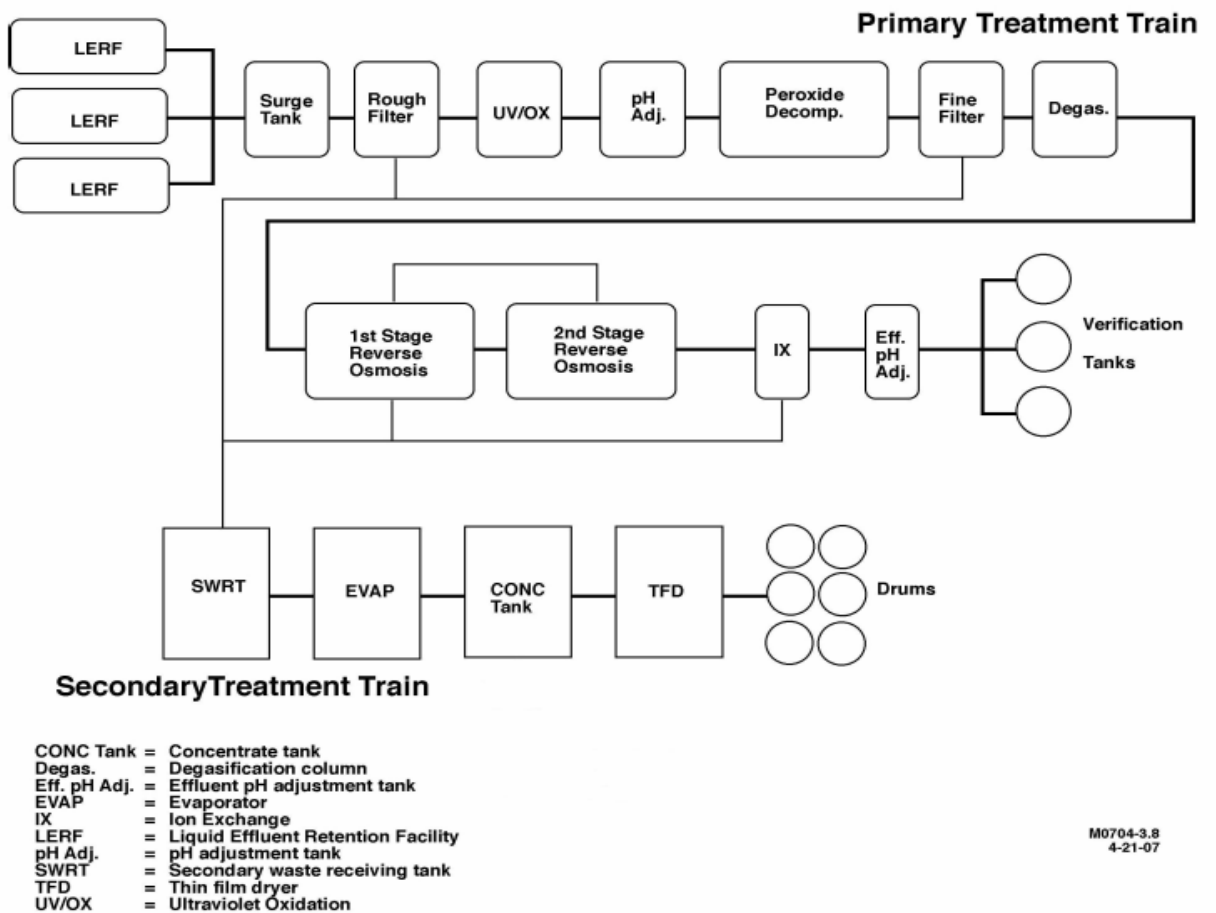


圖 25：廢液處理設備流程圖

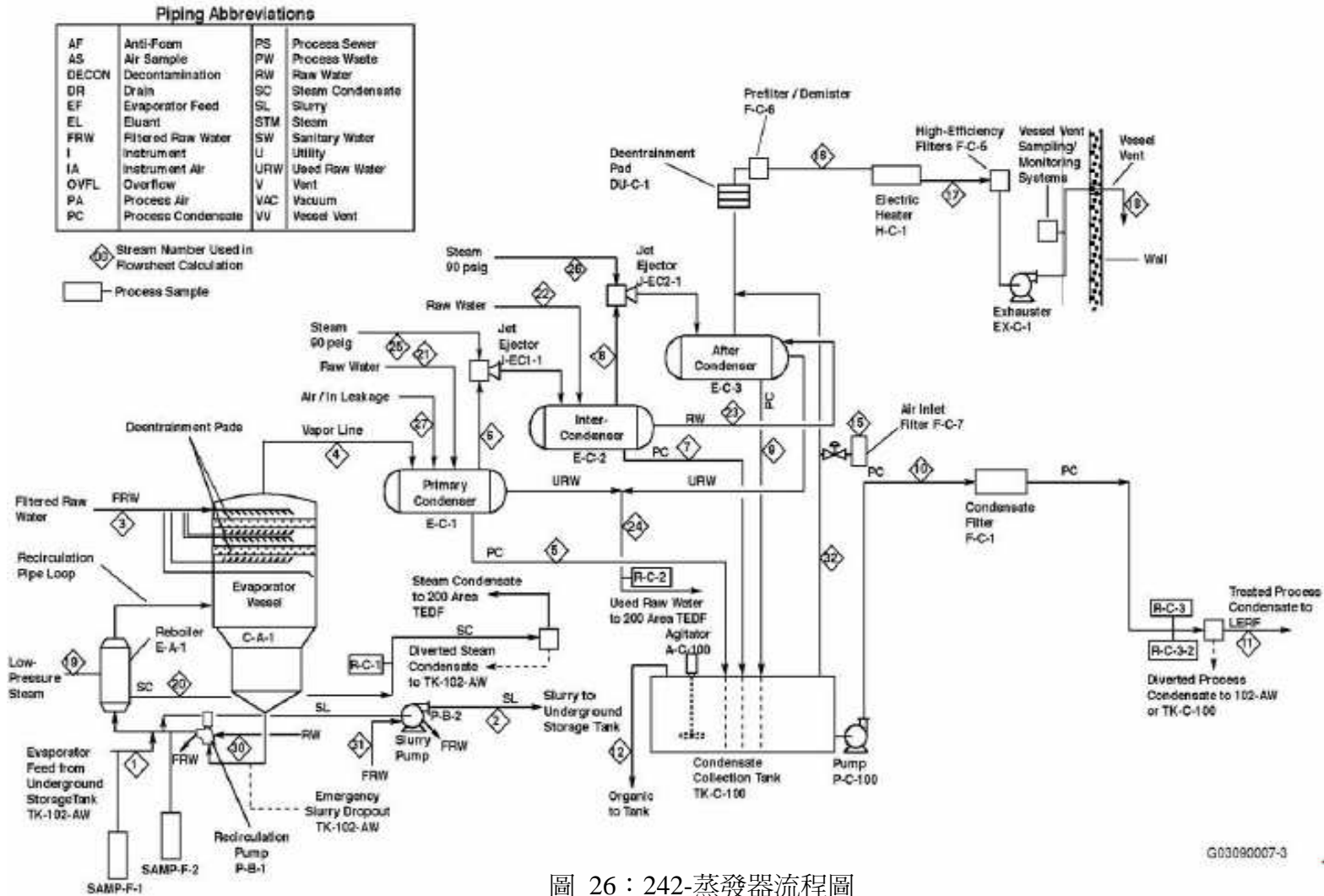


圖 26：242-蒸發器流程圖



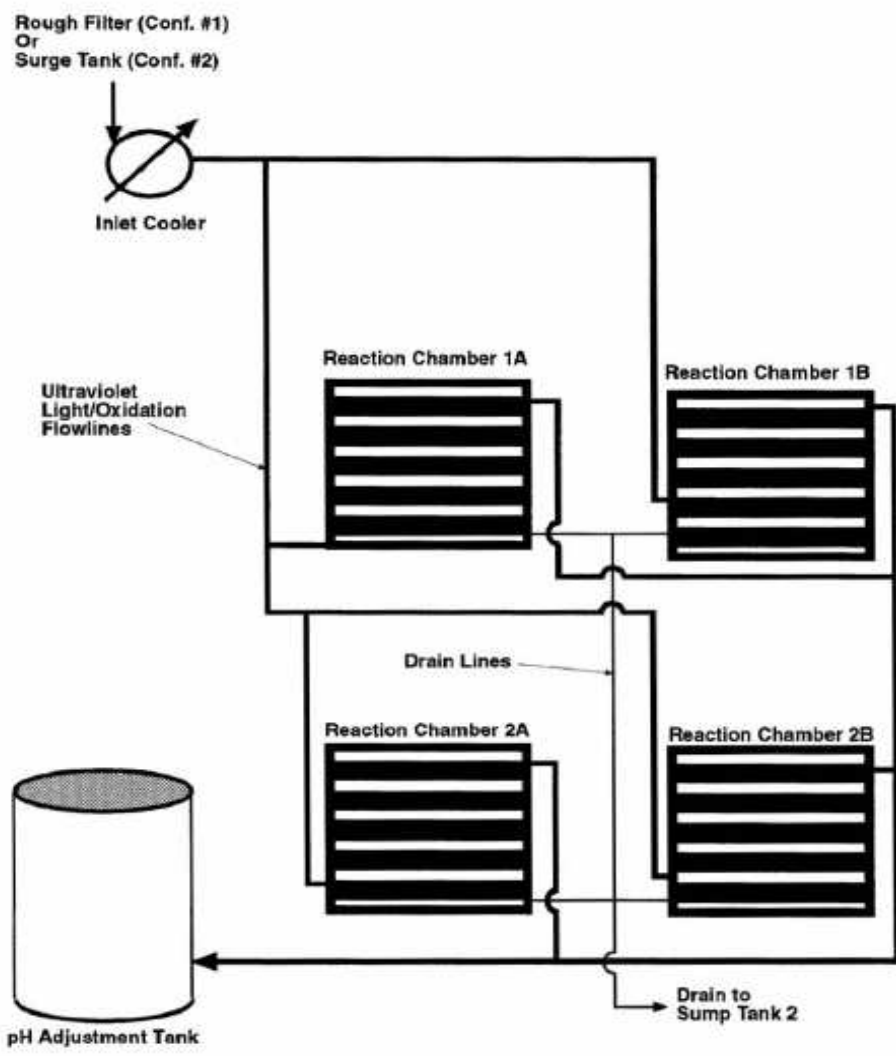


圖 27：紫外線/氧化單元流程圖

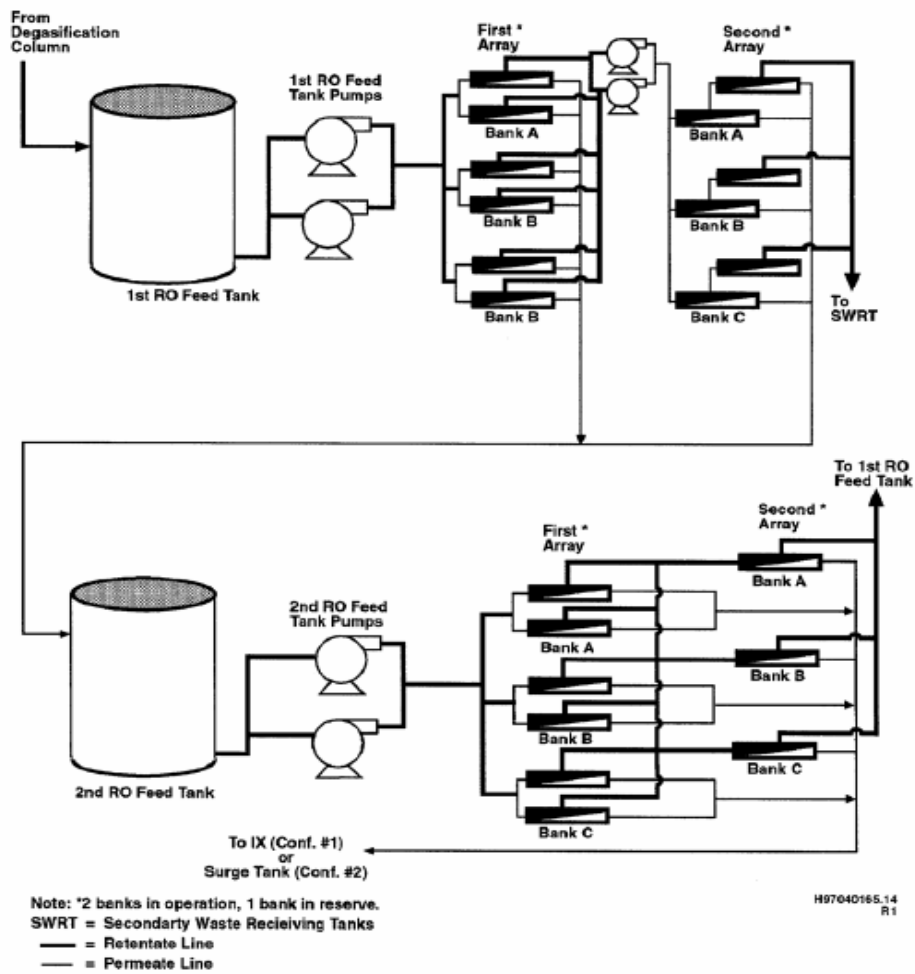


圖 28：逆滲透薄膜處理設備流程圖



圖 29：逆滲透薄膜處理系統照片

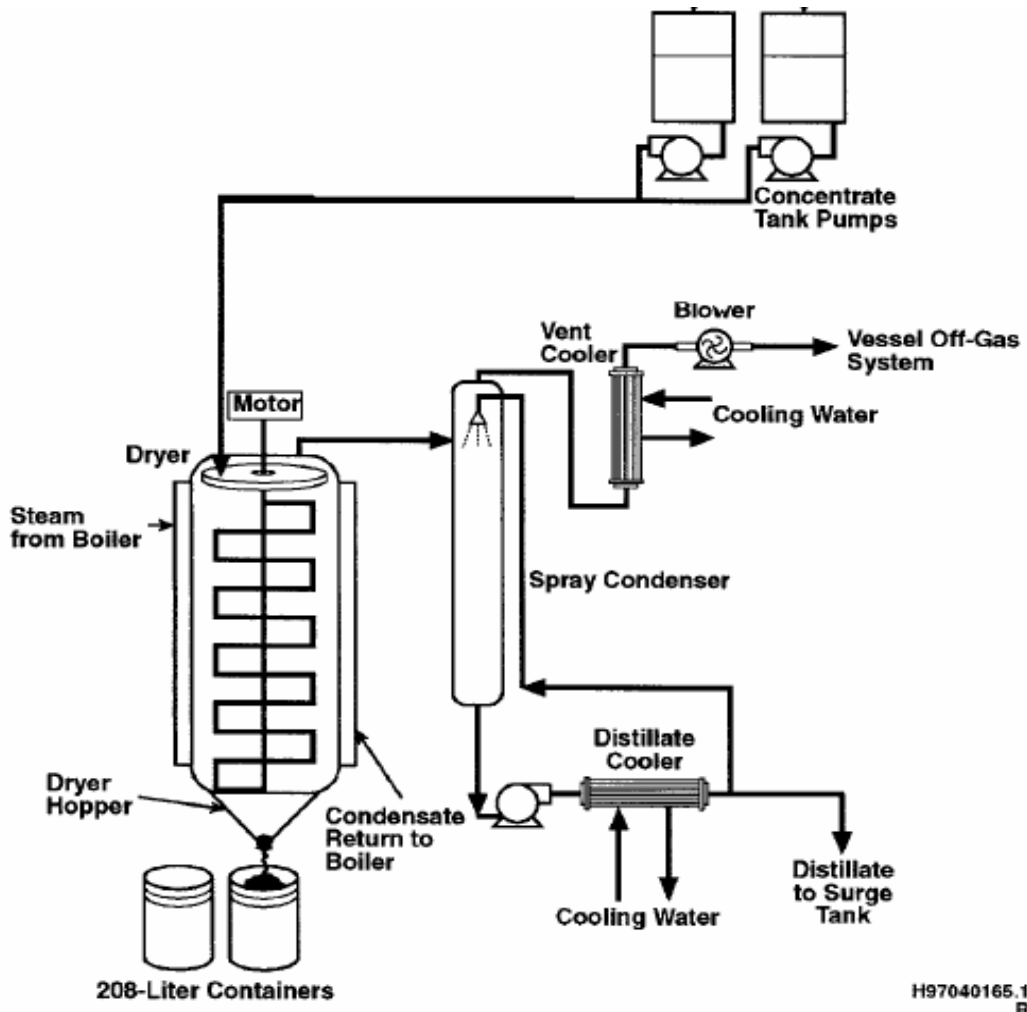


圖 30：薄膜（thin film）乾燥器

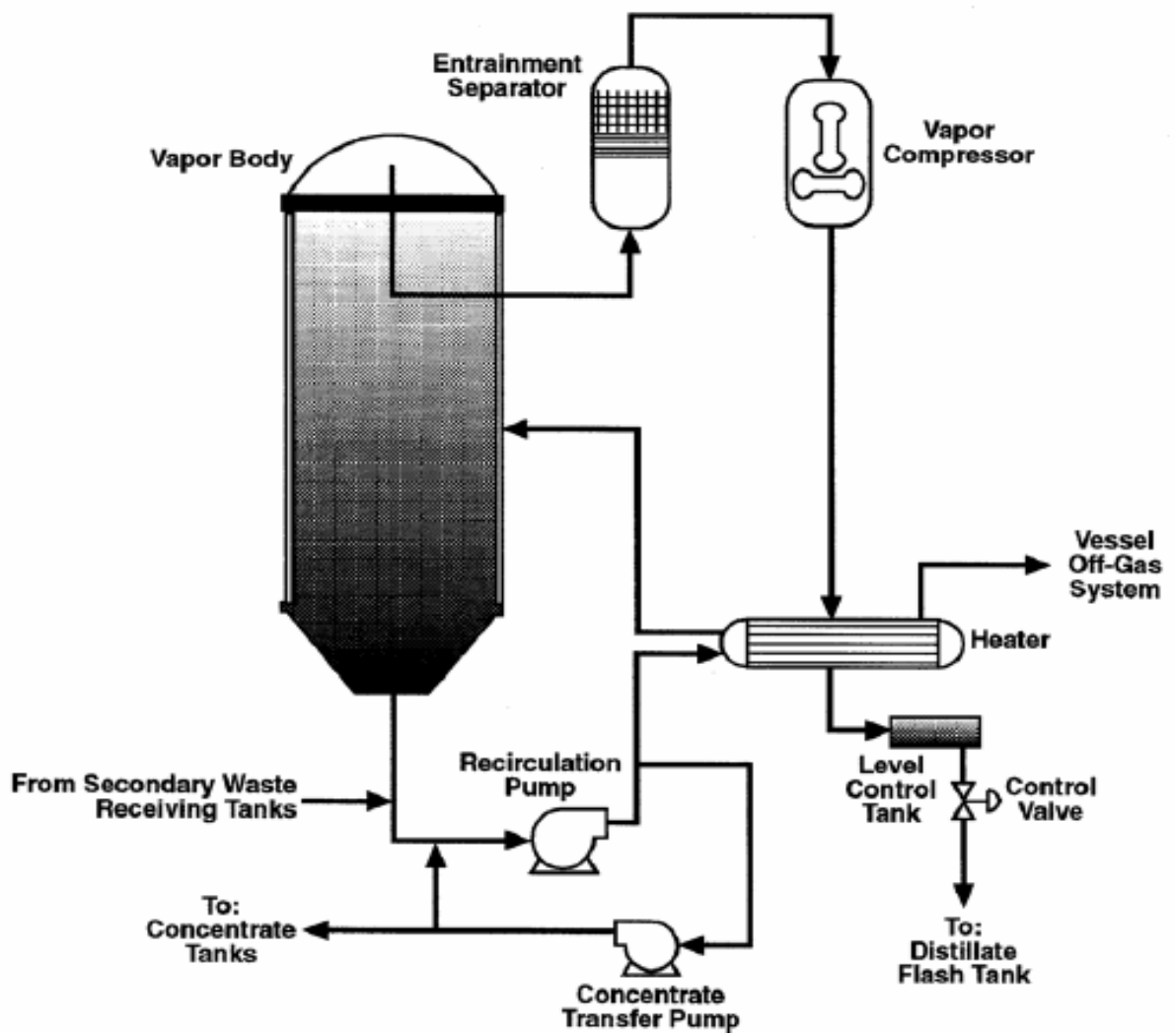


圖 31：廢液處理設施蒸發器流程圖

## (六) 超鈾元素(Transuranic)廢棄物檢整及確認作業

經與 Dr Wellman 討論提出本所亟需發展及瞭解超鈾元素(Transuranic 簡稱 TRU)廢棄物之檢整作業，Dr Wellman 提供 Hanford site 已完成檢整量測作業(Retrieval and Certification)之相關資料及經驗。Hanford site TRU 廢棄物於 1970 至 1980 年代暫貯於 200 Area 低放射性廢棄物處置廠 (Burial grounds)，數量約為 70,000 桶，約為 15000m<sup>3</sup>，主要為工具衣服等其他材料，1999 年起為因應新墨西哥州之高放射性 TRU 廢棄物處置廠 Waste isolation pilot plan (WIPP) 啓用，配合其接收標準，開始規劃 TRU 廢棄物之檢整作業，至 2009 年，已完成所有檢整，分類確認數量約為 46,000 桶為 TRU，運送至 WIPP，此人工直接檢整分類作業廢棄物 (Contact-handled retrievably stored waste, CH-RSW) 約為原總量之一半，人員檢整及確認作業情形如圖 32。

檢整作業實施步驟為：

1. 現存廢棄物紀錄資料之檢視及確認。
2. 以重型機器設備搭配人工方式取出。
3. 於現地 (in place) 偵測檢整容器完整性。
4. 工作人員著防護設備及呼吸系統進行檢整，以移動式容器通風過濾系統 (mobile drum venting system) 去除有毒物質，以 drum assay system 偵測分析 gamma 射線。
5. 容器中之人工直接檢整分類作業廢棄物 CH-RSW 取出後，送至工作區 (process area) 進行分類、貯存、運送等程序。



圖 32：人員檢整及確認作業情形

## (七)玻璃化(Vitrification)技術

美國能源部原先規劃採用技術較成熟且成本較低之水泥固化技術進行 Hanford site 高放射性濃縮廢液之安定化，並於 200 area 建置水泥固化處理設施（Grout Treatment Facility）進行先導測試，處理流程如圖 33，但考量水泥固化體之安全性，決定採用玻璃固化程序，此計畫及水泥固化處理設施已於 1990 年代廢止。

玻璃化技術發展用來處理核子燃料再處理所產生的高放射性廢棄物已經大約有 60 年的歷史，迄今最主要研發的目標是解決不同型式廢棄物所遭遇的困難，最終的目標是希望可以有效率及安全處理高放射性廢棄物，並應用於核能發電所產生的高放射性廢棄物，使在安定化高放射性廢棄物處置時達到安全及經濟的效益。PNNL 投入在高放射性廢棄物玻璃固化技術的研發上已經超過 30 年，累積豐富之研發成果及工程經驗，美國能源部已發包 Bechtel 公司進行設計及建造世界第一個運轉工廠，所需預算達 125 億美金，預計於 2019 年運轉，本所應持續收集相關資料，並關注此項技術發展，以瞭解高放射性廢棄物處理技術之最新發展。

玻璃固化程序有三個主單元，分別是前處理進料系統、熔融系統及廢氣處理系統，玻璃固化流程圖如圖 34，前處理進料系統如圖 35 所示。前處理進料系統主要設備為蒸發器，蒸發之餾出液經冷卻後，送入較低活度廢棄物玻璃固化廠

(LAW vitrification plant) 之熔爐 (melter) 進行玻璃化，蒸發後之濃縮液及固體物送入高度廢棄物玻璃固化廠 (HAW vitrification plant)，放射性廢棄物玻璃固化過程所產生二次廢棄物，目前規劃採用水泥固化技術，PNNL 已進行水泥固化可行性研究。

由於玻璃化過程添加的化學品約有 15 種成份，因此添加比例配方都是研究的重點；此外，進料的熔融技術也是關鍵，實驗型批次進料較為單純，但要實現實廠規模必須採用連續進料的方式，因此加熱程序及熔融流體的流變現象均是相當複雜的行為。由於高溫操作的風險性高，一旦管路發生破損高溫的熔融流體可能造成嚴重的危害，因此各項單元操作的模擬及系統測試亦是一門技術。除了進料槽與熔爐外，高溫操作下放射性銫與碘都會造成空氣污染，因此必須有處理設施加以解決，然而廢氣處理單元約佔用整套系統空間的 1/2 至 2/3，玻璃化技術處理效率的限制主要在於廢棄物組成型態的限制，以及處理量大小。由 EnergySolutions 所設計之 Joule-heated, ceramic-lined melter (JHCM) 熔爐目前正安裝在 Hanford Tank Waste 玻璃固化廠，示意圖如圖 36 所示，使用快速氣泡攪拌法可以使得吞吐量達未攪拌的四倍之大。此外，感應式熔爐也有很大的改良，AREVA 近期在法國的 LaHague 再處理廠(UP2-800)裝設一組 cold-crucible induction melter (CCIM)，目前 PNNL 認為進步型 JHCMs 及 CCIMs 兩種熔爐最適合用來作為 Hanford site 高放射性廢液的水泥固化處理。

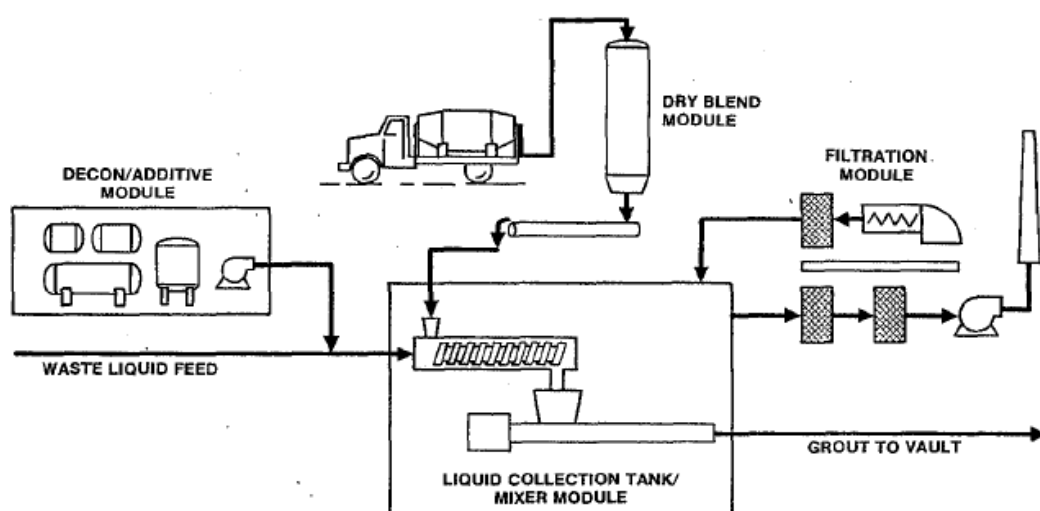


圖 33：水泥固化處理先導設施 (Grout Treatment Facility) 處理流程圖

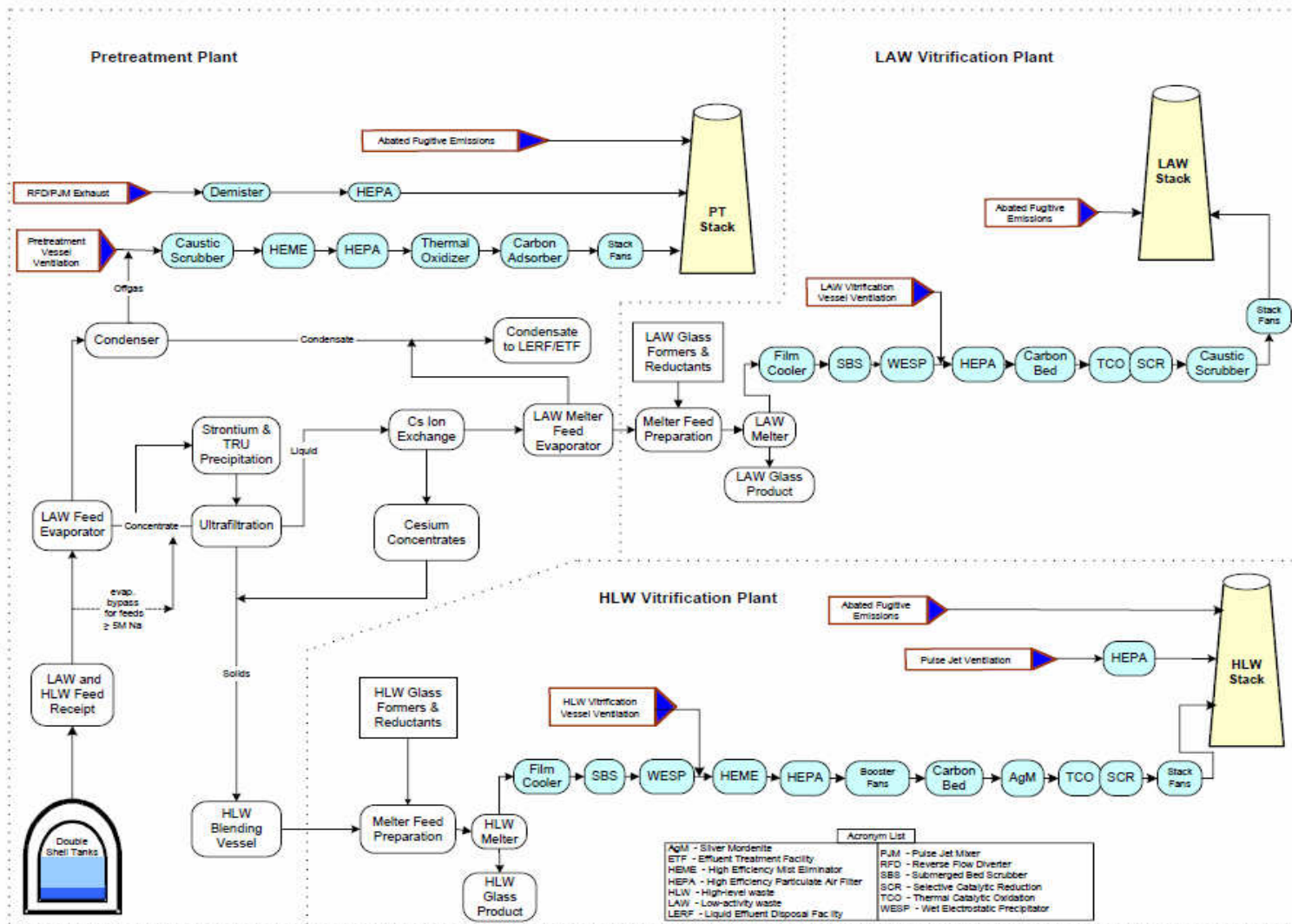


圖 34：玻璃固化流程圖



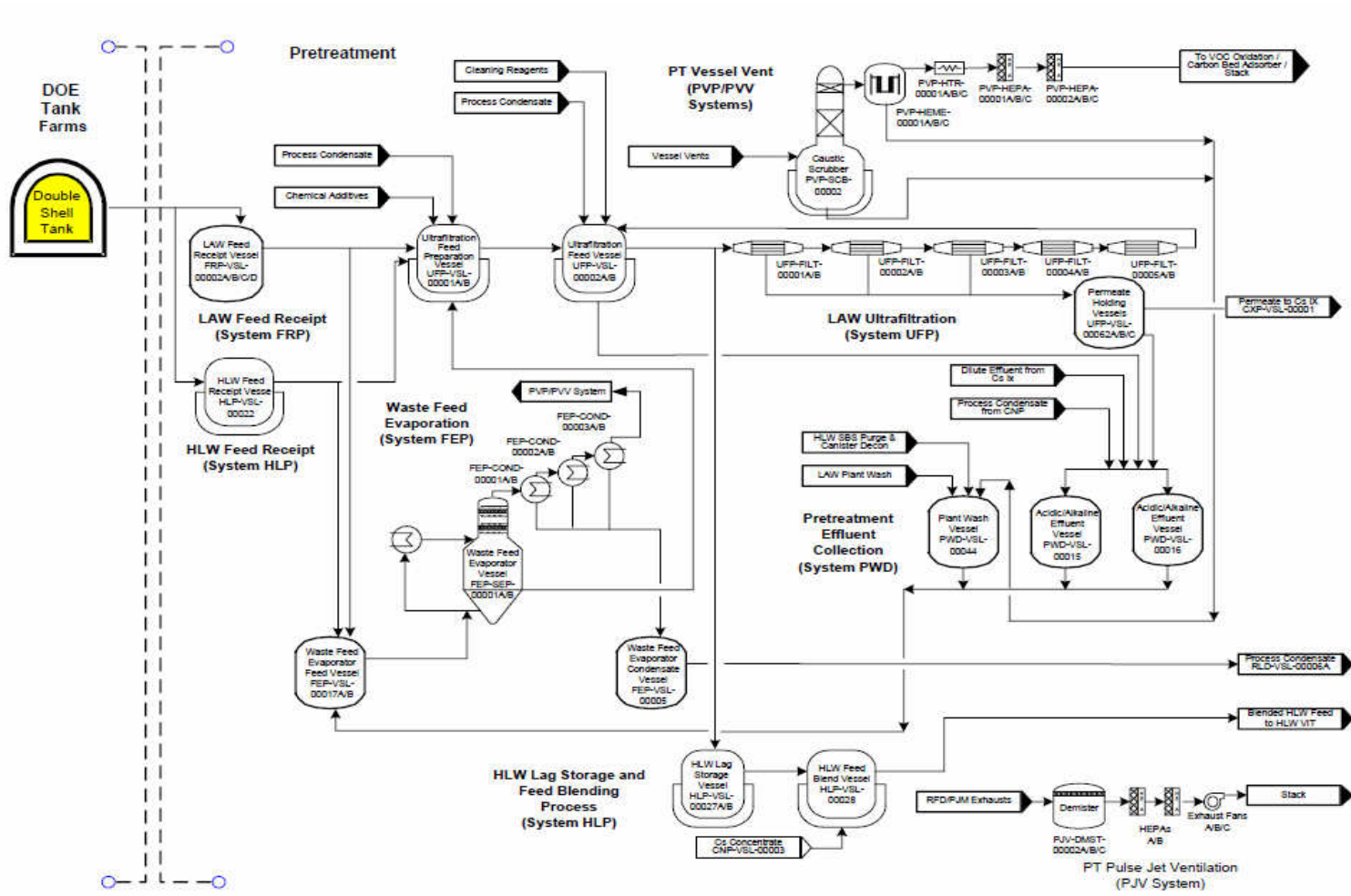


圖 35：玻璃固化法前處理流程圖

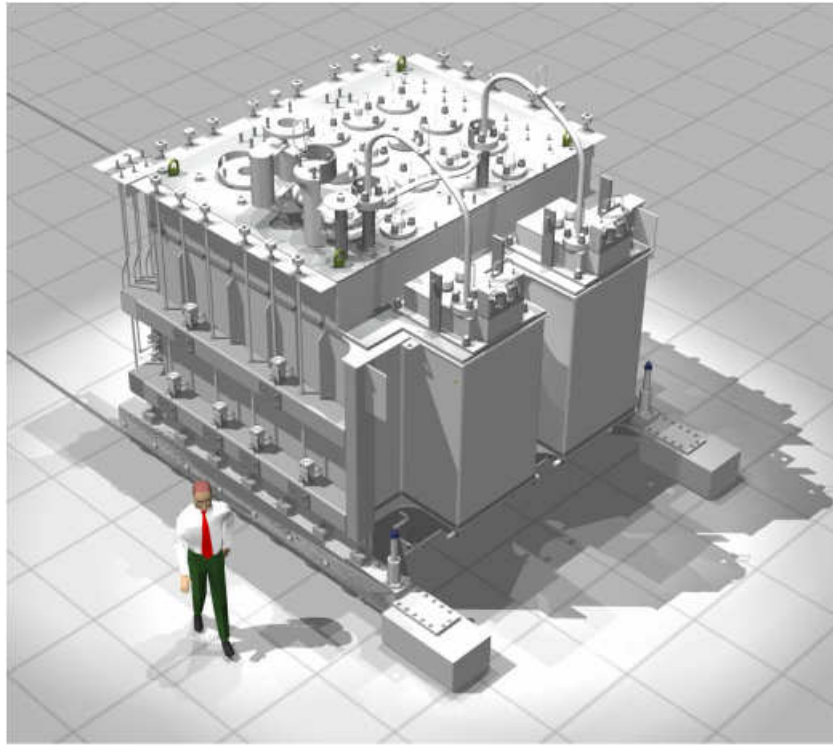


圖 36：玻璃固化設備示意圖

## (八)參訪 B 反應器

B 反應器係位於 Hanford site，為世界上第一個建置運轉級核子反應器，此計畫為 Manhattan 計畫一部分，以中子活化方式生產鈾-239，作為原子彈原料。重要里程如表 8 所示，1944 年 9 月 26 日臨界生產鈾-239，其原料用以試爆世界上第一顆原子彈及用於投擲長崎之原子彈，1949 年 3 月開始生產氬，以供世界上第一次氫彈試爆，1968 年 1 月 29 日關閉停止運轉，經除役及清理後，美國機械工程協會宣佈為國家紀念之機械工程重要里程設施，美國內政部宣佈為國家重要歷史紀念里程設施，B 反應器經考量，採現地除役後貯存（entombment）之清理程序，經拆除反應核心四周鑄鐵等屏蔽材料，更新屋頂，密封任何開孔，目前為現地安全貯存狀態，2009 年起美國能源部宣佈供一般民眾參觀，為美國之國家重

要歷史紀念里程碑設施，保留為歷史重要遺跡之博物館。B 反應器導覽及解說人員均由 Hanford site 退休人員擔任，每年 4~9 月期間開放預約參訪，2009 年至今已有 50 餘國家民眾參觀，公差人有幸為第一位持臺灣護照參觀 B 反應器。目前本所內亦進行核子設除役清理作業，可參考 B 反應器作法，採清理後現地安全貯存方式，轉型為紀念博物館，以供瞭解過去本所之貢獻，並可解決固體廢棄物貯存空間不足之問題。

B 反應器以天然鈾為原料，石墨為中子減速劑，並以河水冷卻核反應，係以費米於芝加哥大學之實驗室級反應堆而設計，並由杜邦公司負責建置，設施配置圖如圖如圖 37 所示，主要有石墨反應器、冷卻系統、廢氣處理系統、控制室及燃料池。反應器佔地約為 14 m×12m，高約為 12m（約為 5 層樓高），總體積約為 3,020m<sup>3</sup>，總功率為 250 MW，反應器核心本身包括 11m 高 8.5m 寬 11m 長，總體積 1,027m<sup>3</sup>，總重 1,100 噸石墨堆，上方有垂直方向控制棒，另 2,004 支鋁管水平貫穿石墨堆，細部如圖 38 所示，鈾燃料棒 (slug) 尺寸為 25 mm 直徑 70 mm 長，密封於鋁殼罐 (can) 內裝填入鋁管，共 2,004 支，總重 180 公噸，反應核心四周由 20~25 cm 厚鑄鐵，重 90 公噸作為熱屏蔽，Masonite(商標'索奈特，一種絕緣或隔間用硬質纖維板)及不銹鋼包覆鑄鐵，作為及生物屏蔽；底部由 7.0cm 厚水泥及鑄鐵磚所構成，以作為熱屏蔽。由鄰近哥倫比亞河抽取 280m<sup>3</sup>/min 河水飼入鋁管，冷卻鋁管內鈾燃料棒，避免溫度過高，造成反應器核心之熔毀，使用過之冷卻水飼入沈降池 (settling basin)，沈降去除懸浮顆粒以降低冷卻水之活度濃度，再排放回哥倫比亞河。簡易反應器操作示意圖如圖 39，鈾燃料棒由反應器正面充填，於反應核心，鈾燃料經核反應產生鈾，核反應後燃料棒經由反應器背面排入燃料池水中，裝填入屏蔽桶送入鈾分離廠，純化鈾原料。

表 8：B 反應器重要里程一覽表

年份	日期	事件
1943	October	破土興建。
1944	September 13	鈾燃料棒裝填。
1944	September 26	達到臨界狀態。
1945	February 3	生產鈾運送至 Los Alamos。
1945	July 16	生產鈾使用於新墨西州 Trinity Test Site 試爆第一顆原子彈。
1945	August 9	所生產鈾使用於投擲長崎之原子彈。
1946	March	停止運轉。
1948	June	恢復運轉。
1949	March	生產氘，以供氫彈使用。
1952	November 1	第一次氫彈試爆。
1968	January 29	停止運轉。
1976	-	美國機械工程協會宣佈為國家紀念之機械工程重要里程設施。
2008	-	美國內政部宣佈為國家重要歷史紀念里程設施。
2009	-	美國能源部宣佈供大眾參觀。
2011	July	Manhattan Project 國家歷史紀念園區包括 B 反應器。

## Facility Layout

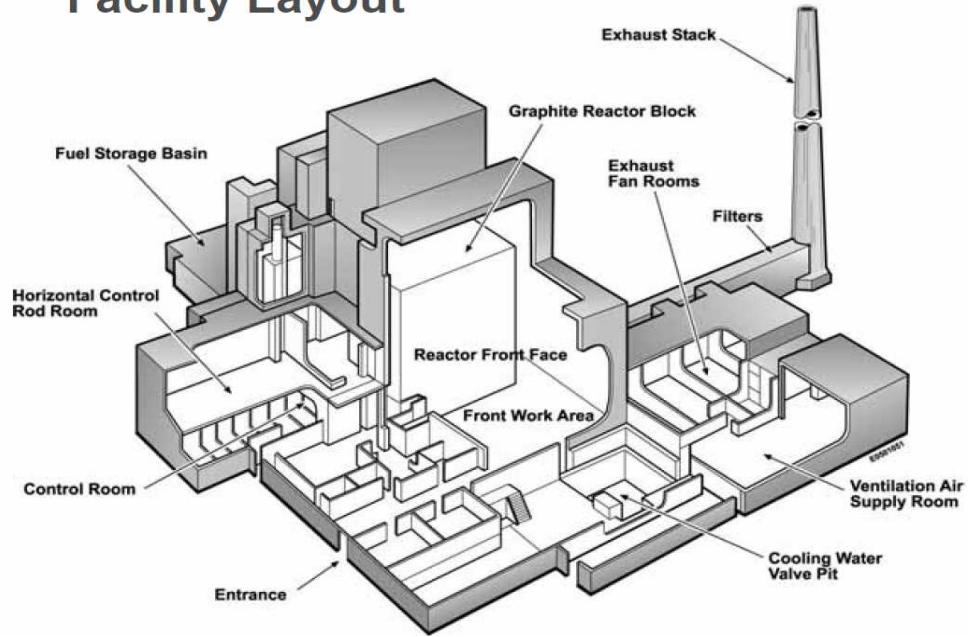


圖 37：B 反應器設施配置圖

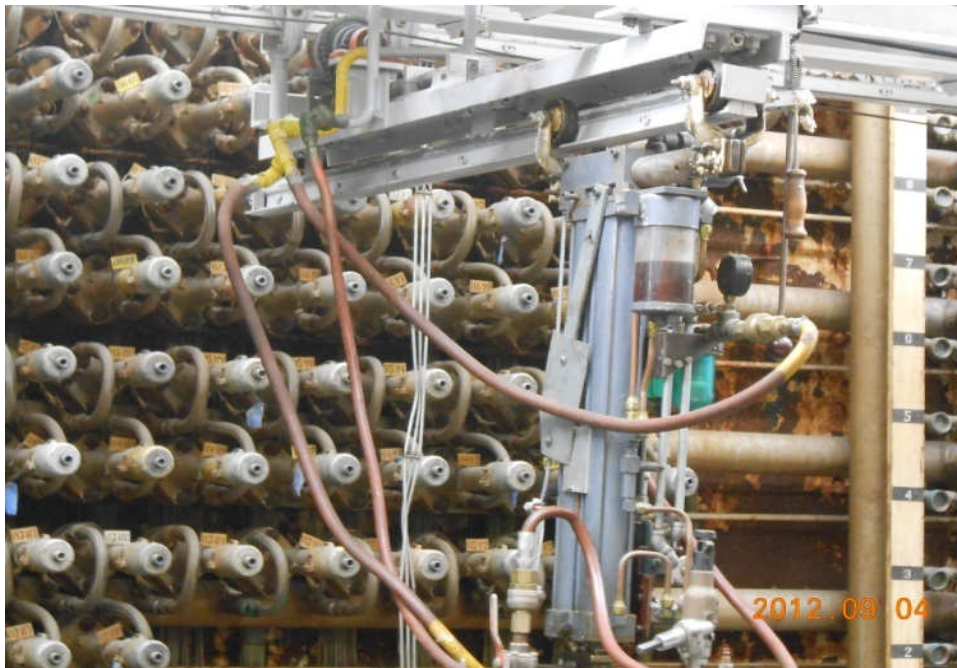


圖 38：鈾燃料充填設備及鋁管細部照片

## Simplified Reactor Operation

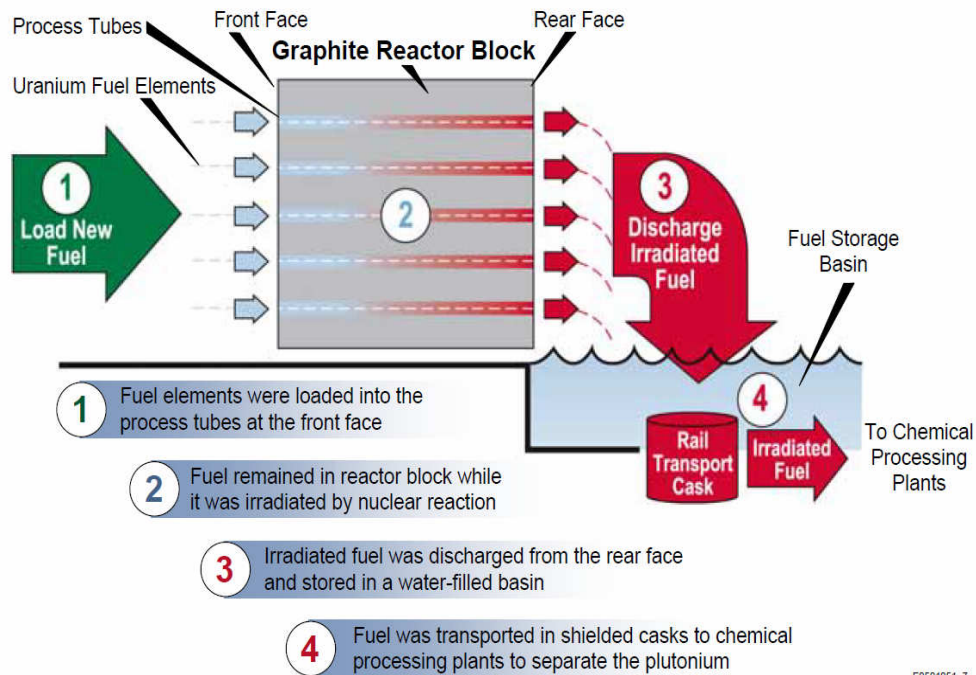


圖 39：簡易反應器操作示意圖

### (九)參訪環境分子科學實驗室(EMSL)

1986 年 PNNL 實驗室主任 W. R. Wiley 即有成立環境分子科學實驗室 (Environmental Molecular Sciences Laboratory, EMSL) 之想法，撰寫「化學之機會」為題之文章，指出國家實驗室的任務轉型及集中資源的方向，提出結合分子程序之理論計算模擬及昂貴先進儀器之實驗方式，並著重分子層次之科學，以解決能源效率及環境清理問題及人體健康等重要議題。經由能源部提供經費成立 EMSL，為一國家級科學儀器中心，類似國家科學委員會轄下之貴重儀器中心，惟 EMSL 可供來自全世界的大學、工業界、政府研究單位的科學家，免費使用儀器設施從事具挑戰性研究項目，可共享資源，免除投注資源再建置同樣設備。

Dr. Karl Mueller (如圖 40) 為 EMSL 僅有 6 位 lab fellow 之一，與 Dr. Yan Shi 負責接待說明核磁共振儀 (NMR) 及高速電腦中心之發展及現況，並說明使用 EMSL 儀器之提案程序為：

1. 聯絡 EMSL 職員，或可直接與 Karl Mueller 聯繫撰寫提案。
2. 經由 EMSL 使用者入口網址傳遞提案([www.emsl.pnnl.gov/access](http://www.emsl.pnnl.gov/access))。
3. 作業時間約數天至數週。
4. 親自至 EMSL 使用儀器或安排遠距離使用。
5. 結案。

EMSL 設備很多參閱 [www.emsl.pnnl.gov/capabilities/instrumentList.jsp](http://www.emsl.pnnl.gov/capabilities/instrumentList.jsp)，如 MS、GC、ICP-MS 等，主要參觀最先進之 900-MHz (21.1 Tesla) 核磁共振光譜儀(NMR Spectrometer)、高速電腦 (Chinook, HP 2310-Node Linux Cluster) 及 XPS Imaging 影像技術。



圖 40：公差人與 Karl Mueller（中）及 Yan Shi（左）合影

## (十)學術會議及拓展人脈

本次公差除學習土壤復育及放射性廢液處理等技術，亦能藉由參加學術活動，瞭解 PNNL 研究發展重點及現況，各國優秀科學家之研發心得，彙整如表 9，如 University of Illinois at Urbana – Champaign 之 Pro. Ian Robertson 材料系系主任展示並說明穿透式電子顯微鏡 (TEM) 之不同時間原位 (in-situ time-resolved) 之

觀察試樣影像之最新應用技術；來自 PNNL 不同單位之傑出博士後研究人員，分享研究心得、兼顧家庭生活、申請及執行計畫及如何拓展研究方向等，並最終能成爲 PNNL 之專職科學家之心歷路程；來自印度 Dr. Ajay Karakoti 榮獲 EMSL 實驗室之 2011 年博士後研究傑出成就獎，並說明其氧化鈾奈米顆粒之研發成果與應用；此外，Dr. Anthony Parsons 說明電池之最新法規規範，來自國土安全委員會(Homeland Security Council)Dr. Robert Kadlec 於 911 恐怖分子攻擊世貿大樓紀念日當天，說明恐怖性生物攻擊之危機及研發方向。此行，亦認識很多當地華裔科學家及工程師，交換研究心得及 PNNL 現況，其中臺籍科學家如表 10。

表 9：公差期間參加學術活動

日期	題目	演講者
2012.8.10	Frontiers in Chemical Imaging Seminar – Coupling time-resolved in-situ experiment with electron tomography- a new approach to defect evolution studies	Pro. Ian Robertson (University of Illinois at Urbana - Champaign, Division Director, Division of Materials Research)
2012.8.19	Looking Beyond the Postdoc: Research Goals Panel	Postdoc scientist from EED, NSD and EMSL.
2012.8.29	2011 M.T. Thomas Award for Outstanding Postdoctoral Achievement at EMSL.	Dr. Ajay Karakoti (EMSL)
2012.9.6	The Evolution of DC in NFPA 70E and the Advancement of DC System Technology	Dr. Anthony Parsons (Technical Consultant in Schneider Electric’s Power Systems Engineering group)
2012.9.11	Gaps and Challenges in Biodefense and Necessary Next Steps	Dr. Robert Kadlec(director for biodefense of Homeland Security Council)



表 10：PNNL 之臺籍科學家

姓名	館舍	專長
蘇瑛鋒 Su Yin-Fong	RTL	化學純化及分析
周永祥 Chuo, Matt	PSL (Physical Science Lab)	燃料電池
李素珍 Lee, Suh-Jane	BESL	觸媒
黃彥晴 Huang, Eric	EMSL	分子生物

#### 四、建議事項

- (一) 由於美國地理環境及處理量與臺灣有極大差異，美國的土壤復育技術主要是使用地表污染土壤剷除及掩埋處置的方式處理大量的放射性土壤，目前美國能源部太平洋西北國家實驗室 PNNL 著重地表下極深之含水層之整治，採用泡沫傳送修復劑之現地復育技術，本所可參考其發展經驗及建議，進行本所研發中之少量污染土壤之清洗分選技術。
- (二) 美國能源部轄下世界運轉級核子反應器-B 反應器，採用除役清理後現地安全貯存方式，轉型為紀念博物館，供大眾參觀，目前本所內亦進行核子設施除役清理作業，可參考及評估其可行性，並可解決固體廢棄物貯存空間不足之問題。
- (三) Hanford site 廢液處理設施之處理流程及寶貴經驗，可供本所研究發展參考，如紫外光/過氧化氫應用於分解廢液中有機物成份，取代活性碳之作用；薄膜乾燥器應用於濃縮廢液之安定化。
- (四) PNNL 對於各種基礎科學研究和技術發展都投入龐大的經費與研究人力，也開放許多合作計畫予非其單位研究人員，目前有為數眾多的各國學生、大學教授與研究人員申請研究補助至 PNNL 的各單位內進行各項學術研究或技術實習，並非常歡迎本所人員至後續 PNNL 短期 2 個月實習及較長期如 6 個月或 1 年之研究，本所應持續派同仁赴 PNNL 實習或短期研究，以拓展本所同仁之國際視野，提昇本所的研發能量，持續與

PNNL 建立良好的交流關係。

- (五) PNNL 投入在高放射性廢棄物玻璃固化技術的研發上已經超過 30 年，累積豐富之研發成果及工程經驗，已由 Bechtel 公司承包進行設計及建造世界第一個運轉工廠，所需預算達 125 億美金，本所應持續收集相關資料，並關注此項技術發展，以瞭解高放射性廢棄物處理技術之最新發展。
- (六) 本次參訪能有機會和多位放射性廢棄物處理及管理之專業人員直接對談，能瞭解 PNNL 最新研發方向，如超臨界二氧化碳去除深含水層之污染物，高放射性廢棄物玻璃固化產生二次廢棄物之水泥固化技術，可供本所及後續人員交流之參考。

## 五、附件

### (一) PNNL 同意函

#### FELLOWSHIP TERMS AND CONDITIONS

The terms and conditions of this award as prescribed by SEE are:

<b>Start/End Dates:</b>	7/19/2012 through 9/11/2012
<b>Research Description:</b>	State-of-the-art treatment techniques of soil remediation

Travel and other allowances are contingent upon receipt of the signed acceptance of this award by SEE. This agreement may be terminated immediately after the receipt of your written notice to SEE, or upon five (5) calendar days by written notice from SEE to you. Violations of PNNL's written policies may result in immediate termination of your appointment. In addition, termination of appointments and allowances may be at the request of SEE, the host, or the appointee. Amendments to this award consistent with program guidelines will depend upon the mutual agreement among you, SEE and your PNNL host. Any changes to this agreement require the prior written approval of SEE. All fellowships are contingent upon DOE site access approval and verification of availability of funds. As a condition of this award, you must continue to receive funding from your home institution throughout the duration of your fellowship.

**Fellowship Status.** Battelle's fellowships are awarded in recognition of your academic and/or scientific achievements and allow you to pursue educational and professional development opportunities at PNNL. Fellows sponsored by SEE's ASF program are not employees of Battelle, PNNL, or DOE. Accordingly, additional benefits will not be provided with this award.

**Insurance.** You will not receive any type of benefits nor will you be covered under PNNL's Worker's Compensation Policy throughout the duration of your research appointment; therefore, you must show proof of medical insurance coverage during your appointment by providing SEE with a copy of your insurance card. If you do not have medical insurance, you must purchase insurance and provide proof prior to your arrival. You are also required to have a current and valid driver license if you drive a Battelle, U.S. Government, or rented vehicle during your appointment.

**Supplemental Travel.** Supplemental travel may be provided for your participation in professional meetings, conferences, or field research. Written authorization from your host and verification of availability of funds are required prior to making travel arrangements. Reimbursements for round-trip travel, conference/meeting fees, and meal and lodging per diem will be consistent with PNNL travel policies. Please contact the SEE office to assist you in your supplemental travel arrangements.

**Housing.** The Guest House at PNNL is conveniently located on the PNNL campus, <http://www.pnl.gov/guesthouse/>. Please note: It is your responsibility to directly contact the Guest House or other landlords to make housing arrangements. You will find information on the "Housing and General Info" document included with your paperwork.

Sign below and return to:  
Science & Engineering Education  
Attention: Joanie Walker, MS K1-01  
P.O. Box 999, Richland, WA 99354  
Fax: 509-375-3882

I understand and ACCEPT the terms and conditions of this award

I DECLINE this award

Signature: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

(二)「核研所土壤復育現況及展望」為題之簡報內容


## Status and Outlook of Contaminated Soils Treatment at INER

Chung-Yung Lin(Jeff)  
Institute of Nuclear Energy Research(INER), Taiwan  
August 2, 2012



### Outline

- ◆ Introduction
- ◆ Status of Contaminated Soils Treatment at INER
- ◆ Outlook of Contaminated Soils Treatment at INER
- ◆ Expected outcomes



### The Location of INER & TAIWAN's NPPs



Nuclear power plants worldwide

CHINA

TAIWAN



INER

Taipei

Nuclear Power Plant

### Introduction of INER

- ◆ Founded in 1968, INER is the sole national research institute to promote peaceful applications of nuclear science in Taiwan.
- ◆ INER has expanded researches to renewable and new energy territories.
- ◆ INER simultaneously takes care of energy safety, economic development and environmental protection topics.
- ◆ INER collects all radwastes from labs and hospitals around Taiwan except Nuclear Power Plant.

### Research Fields of INER

- ◆ Nuclear Safety Technology
- ◆ Environmental and Energy Technology
- ◆ Radiation Application Technology



For more information, please visit [www.iner.gov.tw/en/](http://www.iner.gov.tw/en/).



### Participated Projects at INER

My participated projects at INER since 2008 are as follows:

1. Liquid Radwaste Treatment (including Reverse Osmosis, Ion Exchange, Evaporation, and Membrane Distillation Process etc.)
2. Solidification of Liquid Radwaste
3. Application of Solar Evaporation
4. Contaminated Soil Treatment and Sorting



Reverse Osmosis

Solidification filter

Storm vacuum tube

### Top view of Underground Storage Facility of INER

- ◆ There are 15,000 m<sup>3</sup> contaminated soils stored in INER's Underground Storage Facility (USF).
- ◆ There are 44 cases at this site.



### Contaminated soil characteristic at INER

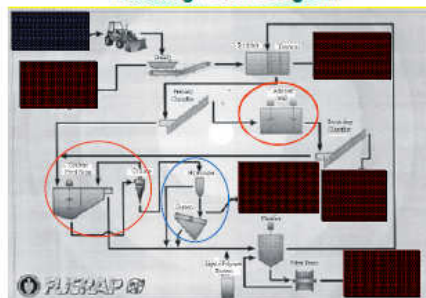
- ◆ The major composition is SiO<sub>2</sub>, and the water content is below 40 wt. %.
- ◆ The dose rate of soil is 0.28-8.15 μSv/h.
- ◆ The 10-20wt% fine clay (< 2 μm) contributed the 80-40% of total activity in soils.
- ◆ Following table shows the specific activities in contaminated soils, which are 20-0.74 Bq/g for Cs-137, 12.6-0.74 Bq/g for Sr-90.

Radionuclides	Cs-137	Sr-90	Co-60
Specific activity Bq/g	20-0.74	12.6-0.74	<1.0

### Summary of Contaminated Soil Treatment

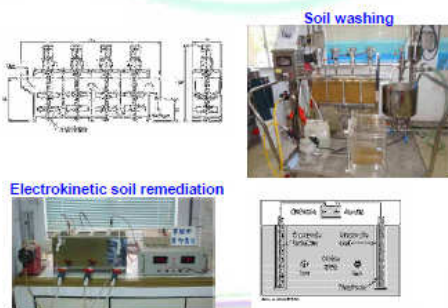
Techniques	Description /Characteristic
Soil Washing	-A very sustainable, cost-effective and viable alternative to landfill disposal. -Successfully used in mining industries.
Thermal desorption	-Vaporization of low boiling-point contaminant, such as Cesium-137. -Recovery waste heat from existing incinerator.
Electrokinetic separation	-Application of an electric field in the soil to induce contaminant mobilization.
Soil flushing	-Mobilization of contaminant with water or aqueous solution or surfactant.
Thermal treatment	-In situ vitrification and sub-melting thermal fixation to sequester contaminant.
Other treatments	-Foam delivery, Bioremediation, Oxidation/Reduction etc.

### Volume Reduction/Chemical extraction(VORCE) Soil Washing Flow Diagram

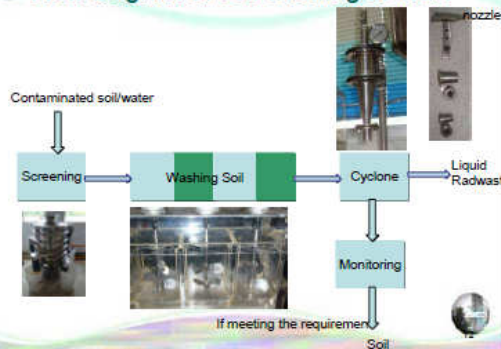


Source: R. Anderson etc, Particle size separation via soil washing to obtain volume reduction, Journal of Hazardous Materials 65 1999: 85-98

### Lab-scale Equipment at INER



### Flow diagram of soil washing at INER



### Summary of INER's soil washing process

■ Mixing



■ Wet screening



■ Soil washing/  
cyclone separation

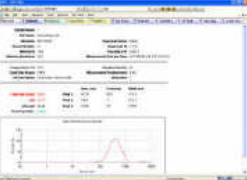


a. Stimulated soil : 2kg  
 b. Water: 10 kg  
 c. Mixing time: 48hr

5 Mesh sieve: soil 0 g (0wt%)  
 18 Mesh sieve: 25.3 g (2wt%)  
 24 Mesh sieve: 208 g (10wt%)  
 200 Mesh sieve: 286.6 g (13wt%)  
 400 Mesh sieve: 1500.2g (75wt%)

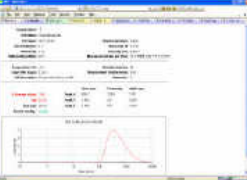
### The particle size of liquid fluid after cyclone separating

Sampling #1



Average Particle size :  
0.424 μm

Sampling #2



Average Particle size :  
0.396 μm

### Goals of soil remediation at INER

- ◆ Sorting process, such as the wet screening, will be a pre-treatment to reduce soil volume.
- ◆ The expected capacity and efficiency of contaminated soil with the process are 30m<sup>3</sup> per day and 90%, respectively.
- ◆ The screened contaminated soils should be treated by chemical or physical methods to remove the radionuclides to meet the regulatory limits, 740 Bq/kg for disposal at INER and 100 Bq/kg for release to environment.





Commercial-scale equipments


- ◆ After the Fukushima nuclear-power plant (NPP) disaster in Japan in 2011, all of the three existing NPPs in Taiwan will go offline, once their licenses expire.
- ◆ In the wake of existing three NPPs' decommissioning, the soil remediation will be a very important issue.
- ◆ With the PNNL's experiences dealing with soil remediation, the appropriate treatment techniques will be applied to Taiwan's facilities.





### The scheduled decommissioning of Taiwan's NPPs

NPP	Reactor	Type	Capacity MWe	Start	Offline
NO.1	2	BWR	636x2	1978	2018
NO.2	2	BWR	985x2	1981	2021
NO.3	2	PWR	951x2	1984	2024
NO.4	2	ABWR	1350x2	2017	-

Anti-nuclear protesters plan nationwide marches





◆ Electricity generated from NPP represented 20% of Taiwan's total electricity output.

### Expected outcomes

- ◆ A report about this visit.
- ◆ A feasible soil treatment process will be introduced to INER.
- ◆ Building up the relationship with PNNL.

### (三) PNNL 針對土壤及地下水復育之建議

#### **PNNL Recommendations for Soil and Groundwater Cleanup**

This paper describes the major elements of a strategy to address terrestrial contamination outside the reactor facility uses a framework for information gathering, evaluation, and remediation decisions based on established protocols for environmental remediation 1,2,3 and nuclear incident response 4. The framework can be structured to facilitate efficient and flexible decision making to achieve cleanup objectives.

Key components that support this framework include:

- (1) Conceptual models to define the issues and focus activities on the necessary remediation decisions. Conceptual models are used to define key impacted areas and identify questions that need to be answered for assessing impacts to plants, animals, and people, and also developing remediation actions. They are developed to an appropriate level of detail, qualitatively and quantitatively defining the release and dispersal of the contaminant(s), relevant properties of the environment and how contaminants interact, contaminant fate and transport processes, and potential impacts of the contamination to plants, animals, and people. The conceptual model compiles this information in a structured format designed to support subsequent analyses, evaluations, and decisions.
- (2) Geographic Information System (GIS) tools for integration of environmental data into a framework that organizes data. This framework provides input for quantification of relevant fate and transport processes into models and to address the response/remediation decision process.
- (3) Site characterization to determine the nature and extent of contamination, identify receptors and pathways for dose and risk assessments, and establish a baseline to evaluate and select remediation technologies. For widely dispersed contaminants, such as the Fukushima Daiichi site, scoping field surveys are conducted first (e.g., aerial surveys) to define general radiation levels and gross levels of contamination, followed by surface scanning, surface-activity measurements, exposure-rate measurements, and sample collection and laboratory analysis. These data are used to focus subsequent characterization surveys and provide detailed assessments of radiological conditions to support subsequent evaluations, response actions, and remediation decisions.
- (4) Assuring the long-term effectiveness of remedial measures relies on public acceptance of the actions and land-use planning. In particular, the presence of contamination in groundwater may not become apparent for some time and appear at some distance from the source of the contamination. Such considerations should be documented in the land-use plan. There are several possible end points for land use in the remediation process, ranging from unrestricted use, partial restriction, or limited access. Some or all parts of an area may need to be restricted through planning and public consent. In all cases, long-term monitoring is required to confirm the long-term effectiveness of the remediation actions and controls may be changed (increased or decreased) on the basis of monitoring results and residual risk of the contamination.

- (5) Evaluation and selection of remediation actions, in the context of meeting cleanup goals, includes considering factors such as the size and location of contaminated areas relative to populations; other hazards present; human health risk; public welfare; ecological risks; projected land uses; preservation or destruction of places of historical, national, or regional significance; and intergenerational equity. Remediation actions to clean up or mitigate contamination are based on site characterization data, exposure pathways and scenarios, relevant regulations, and stakeholder preferences. Prompt action with soil contamination will mitigate impacts to watershed and marine environment. In addition, efforts to control and treat other radioactive releases, such as water at the plant facility, will also mitigate risks to the local subsurface and marine environments.
- (6) Long-term monitoring (LTM) will be necessary to verify that management decisions regarding remediation of contamination deposited on lands surrounding the reactor source area are appropriate and that the predicted behaviors of the contaminants are accurate. LTM focuses on those site and contaminant characteristics that result in land-use restrictions, such as contaminant concentrations in specific media at critical locations in the exposure pathway. The purpose of LTM is to ensure that the residual contamination is behaving as predicted over time and remedial action goals or cleanup levels are achieved and remain protective of human health and the environment.
- (7) A waste management program for classification, removal, and burial of large quantities of contaminated soil and other media will be needed as a result of cleanup activities outside of the Fukushima site. The majority of this material will likely be considered low-level waste (LLW) and may be considered very low-level waste (VLLW). Experience in the United States has shown that much of the waste materials expected from remediation of the Fukushima Daiichi site may require isolation for periods of up to a few hundred years and will be suitable for disposal in near-surface facilities (down to 30 meters). A waste management plan should be developed considering the type of waste to be disposed (expected to range from spent fuel to fission products), the amount (expected to be large in the event of contaminated soil removal), transportation to disposal sites, and the siting and availability of waste management facilities and their capacity.

### **Relevant National Laboratory Capabilities**

U.S. Department of Energy (DOE) national laboratories, such as Pacific Northwest National Laboratory, have conducted extensive research for solving complex environmental challenges and protecting natural resources. Much of this research has been focused on nuclear sites in the United States and remediation of legacy wastes in the environment. DOE national laboratories provide expertise and tools to address complex environmental management, restoration, and monitoring of contaminated sites. Areas of emphasis include examining the mobility and fate of contaminants in the environment, determining stability and release to other environmental media, performing site characterization, radiation dosimetry, and developing remediation approaches using sustainable methods and strategies. The DOE national laboratories have considerable expertise performing site characterization (Lawrence Berkeley National Laboratory and Lawrence Livermore National Laboratory) and evaluations of conceptual models and alternatives for contaminated legacy waste sites (Pacific Northwest National Laboratory). These conceptual model formulations and analysis methods form the basis for selecting appropriate remediation approaches



Site characterization and long-term monitoring are key components of evaluating and remediating contaminated waste sites. DOE national laboratories have developed a number of innovative approaches for site characterization and monitoring, including the use of geophysics, sensors, and methods for sample optimization. Significant radiation detection capabilities exist within the DOE national laboratories.

- (1) Novel data management approaches have been developed by DOE national laboratories, in particular Pacific Northwest National Laboratory, linked to common geographical information systems such as Google Earth.
- (2) The DOE national laboratories are leaders in development of innovative remediation approaches, many of which have been applied to legacy waste sites in the U.S. They have developed in-situ remediation methods such as bioremediation and sequestration, as well as methods based on contaminant removal. Innovative sensors can help guide contaminant removal methods to effectively target high concentration zones.
- (3) Waste management will be a key component of remediating contaminated lands. DOE national laboratories have been leaders in waste disposal facility location and design and have direct experience with low-level radioactive waste disposal at Rokkasho, Japan.
- (4) DOE national laboratories with expertise in all of the above categories of soil and groundwater cleanup include Lawrence Berkeley National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Savannah River National Laboratory, Idaho National Laboratory, and Pacific Northwest National Laboratory. These labs conduct extensive research for the DOE Office of Science as well as the Office of Environmental Management, responsible for remediation of legacy wastes at sites across the U.S.

Other national laboratories with expertise in soil and groundwater remediation include Los Alamos National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory, and Sandia National Laboratory. These laboratories report to the DOE National Nuclear Security Administration.