

出國報告（出國類別：其他）

赴美國太平洋西北國家實驗室參訪環境 整治復育出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：張明發 研究助理

派赴國家：美國

出國期間：105 年 3 月 14 日~105 年 3 月 28 日

報告日期：105 年 4 月 28 日

摘 要

本次公差係透過台美民用核能合作會議與美國能源部取得聯繫，依據 TECRO-AIT 協議同意進行本次科技交流。本所研究助理張明發於 105 年 03 月 14 日至 03 月 28 日，共計 15 天，公差赴美國太平洋西北國家實驗室（Pacific Northwest National Laboratory, PNNL），進行環境復育及放射性廢棄物處理技術參訪。公差目的是與 PNNL 在土壤地下水整治及環境復育、廢棄物處理程序、美國相關核設施除役及除污等相關議題，進行資訊交流。

PNNL 國家實驗室隸屬美國能源部，本部位於華盛頓州里奇蘭(Richland)市，鄰近該部轄下之 Hanford site 核設施場址，該實驗室因有協助清理及復育該場址的豐富經驗，值得本所環境復育及放射性廢棄物處理技術上向其學習借鏡及經驗參考。

本次公差成果主要有了解該場址之相關環境復育策略及經驗、放射性廢棄物處理流程技術研究、並進入 Hanford 場址內，參觀多個實驗室設備與相關設施。藉由參訪，與 PNNL 研究人員交流環境整治復育及放射性廢棄物處理經驗，瞭解該實驗室目前廢棄物處理技術之進度及最近研究計畫，同時蒐集 PNNL 組織架構與研究領域範圍等相關資訊，以及後續研究發展的主要方向。

目次

	(頁碼)
一、目的	1
二、過程	2
三、心得	88
四、建議事項.....	90
五、附錄	91

附圖目錄

圖 1：邀請函.....	4
圖 2：PNNL 實驗室相關位置圖.....	5
圖 3：公差人與 PNNL 主要接待人 DR. DAWN WELLMAN 及 MR. FRED ZHANG 合影.....	6
圖 4：識別證及館舍通行證	7
圖 5：PNNL 行政區大門.....	7
圖 6：ETB 及 331 館	8
圖 7、美國國家實驗室之相關位置圖.....	16
圖 8、PNNL 實驗室美國分佈圖.....	17
圖 9、PNNL 實驗室經費來源比例圖.....	17
圖 10、PNNL 董事會組織及負責人圖.....	18
圖 11、能源與環境董事會組織及負責人圖	18
圖 12、PNNL 實驗室配置圖.....	19
圖 13、PNNL 空照鳥瞰圖.....	20
圖 14、HANFORD SITE 核反應器運轉時程圖.....	23
圖 15、HANFORD SITE 區域簡圖	23
圖 16、HANFORD SITE 鈾生產流程圖	24
圖 17、HANFORD SITE 放射性廢棄物總表	24
圖 18、HANFORD SITE 最新清理計畫時程	25
圖 19、HANFORD SITE 清理計畫策略	25
圖 20、核反應器現地安全貯存	29
圖 21、用過金屬燃料之清理計畫流程	29
圖 22、K-EAST STORAGE BASIN 清理前照片	30
圖 23、177 個放射性廢棄物貯槽位置圖	31
圖 24、單壁及雙壁貯槽剖面圖	31
圖 25、200AREA 相關處置設施建置歷程圖	32
圖 26、環境恢復處置設施(ERDF)	32
圖 27、ERDF 底部襯墊構造圖.....	33
圖 28、建造中玻璃固化工廠及相關處理設施	33
圖 29、1967 年 300 AREA 上空照圖.....	34
圖 30、2015 年 300 AREA 清理後上空照圖.....	34
圖 31、土壤及地下水污染途徑圖	37
圖 32、HANFORD SITE 地下水污染分布圖.....	37
圖 33、100 及 300 區地下水污染分布圖	38
圖 34、200 區地下水污染分布圖	38

圖 35、200 區主要設施洩漏及排放廢棄物圖	39
圖 36、廢棄物於土壤中擴散滲透至地下水面示意圖	39
圖 37、污染團行為(PLUME BEHAVIOR)圖	40
圖 38、場址概念模式(CSM).....	40
圖 39、整治復育流程圖	47
圖 40、線上環境資訊軟體-PHOENIX	47
圖 41、污染團整治技術	48
圖 42、土壤氣體抽取法式意圖	48
圖 44、透水性反應牆示意圖	52
圖 45、100-N 地下水表面銍-90 污染團分布等值圖	52
圖 47、100-N 區域整治實驗圖	53
圖 48、100-N 透水性反應牆注入示意圖	54
圖 49、100-N 銍-90 污染物之透水性反應牆處理示意圖	54
圖 50、磷灰石與銍-90 反應生成機制	55
圖 51、100-N 銍-90 經 PRB 整治後結果	55
圖 52、氣體抽取法整治 HANFORD SITE Z9 壕溝結果圖	59
圖 53、土壤氣體抽取法 3 階段	59
圖 54、土壤乾燥法實場測試示意圖	60
圖 55、土壤乾燥法之體積含水量圖	60
圖 56、示範型地表屏障鳥瞰圖	61
圖 57、示範型地表屏障剖面圖	61
圖 58、主體屏障及玄武岩斜坡詳細結構圖	62
圖 59、降雨時屏障內水含量變化圖	62
圖 60、鈾元素在不同 pH 下地質化學反應.....	63
圖 61、氨氣固定鈾流程	63
圖 62、氨氣注入土壤中概念示意圖	64
圖 63、氨氣處理後結果圖	64
圖 64、氨氣注入後以空氣及 CO ₂ 清洗結果圖	65
圖 65、氨氣搭配 H ₂ S 處理銻-99 結果圖	65
圖 66、300 區地下水鈾污染團分布曲線圖	68
圖 67、高河流水位鈾再移動圖	68
圖 68、6 月及 12 月地下水鈾濃度圖	69
圖 69、300 區地下水位 ERT 圖.....	69
圖 70、磷酸鹽類水解反應示意圖	70
圖 71、注入聚磷酸鹽整治示意圖	70
圖 72、聚磷酸鹽測試整治結果圖	71

圖 73、觀測井 1-17A 鈾濃度、地下水面及整治歷程圖	71
圖 74、連續注入聚磷酸鹽 9 天及 ERT 設置圖	72
圖 75、聚磷酸鹽注入 ERT 圖.....	72
圖 76、HANFORD SITE 空氣監測位置圖	75
圖 77、I-129 空氣監測結果圖.....	75
圖 78、2005~2009 年場址至城鎮核種監測圖	76
圖 79、2006~2010 年土壤監測圖	76
圖 80、哥倫比亞河上下游監測點	77
圖 81、2004~2014 哥倫比亞河上下游氚的監測結果	77
圖 82、2004~2009 哥倫比亞河上下游總 A 總 B 監測結果	78
圖 83、2004~2009 哥倫比亞河上下游銻-90 及總鈾監測結果	78
圖 84、HANFORD SITE 參訪路線圖.....	80
圖 85、參訪公務車	81
圖 86、FRED ZHANG、公差人及 MARK FRESHLEY 於場址入口合影	81
圖 87、HANFORD SITE 管制站.....	82
圖 88、300 區外圍	82
圖 89、HANFORD 高中遺址	83
圖 90、F REACTOR 現地安全貯存	83
圖 91、D、DR REACTOR 現地安全貯存	84
圖 92、N REACTOR 現地安全貯存.....	84
圖 93、200 WEST PUMP AND TREAT 工廠.....	85
圖 94、TANK FARM 一隅	85
圖 95、BY TANK FARM	86
圖 96、示範型地表屏障	86
圖 97、西北能源公司核電廠	87
圖 98、管制區內麋鹿蹤跡	87

一、目的

本所研究助理張明發於 105 年 03 月 14 至 03 月 28 日赴美國能源部太平洋西北國家實驗室(PNNL)參訪。本次參訪係透過台美民用核能合作會議與美國能源部取得聯繫，太平洋西北國家實驗室依據 TECRO-AIT 的協議，同意本次科技交流參訪，藉以了解目前 PNNL 在土壤地下水及環境復育、廢棄物處理程序、美國相關核設施除役及除污等相關最新資訊。

藉此拜訪多位研究人員與計畫主持人，這些專家主要的經歷是參與Hanford Site核反應器與附屬設施除役清理計畫及環境整治復育計畫執行，參訪期間公差人透過技術報告研討及設施參訪了解美方技術重點。本次參訪公差之目的如下：

- (一) 了解目前Hanford site場址之相關環境復育經驗。
- (二) 放射性廢棄物處理流程最新研究技術。
- (三) 參訪多個實驗室設備，了解實驗儀器設施應用範圍。
- (四) 獲得相關技術研究人員聯絡方式，以利未來繼續派員赴美國國家實驗室進行科技交流並提升本所能見度。

二、過程

(一) 行程及工作摘要

經由原能會派駐美國趙衛武副組長與美國能源部取得聯繫，並與 PNNL 相關人員確認後，完成此次參訪規畫。其後，PNNL 發送邀請函如圖 1，由公差人行前依 PNNL 相關規定網傳自傳及相關資料，完成 Foreign National Visit Assignment (FNVA) 之申請作業程序，並填寫 Strictly private (Radiological Area Form Visitor and Privacy Act Statement)，以確認個人基本資料及在本所相關的輻射曝露歷史，以供美方評估核准參訪 PNNL 輻射作業區域，檢送本次行程參訪計畫如下：

1. Continue the cooperative relationship with PNNL.
2. Transfer the experiences and lessons learned for waste management, including D&D, waste processing, and soil and groundwater remediation, to INER. Specific interests include:
 - o Geological repository sciences and remediation of contaminated soil – Learn processes and techniques for long-term disposition/stabilization of radionuclides in subsurface environments and characterization, remediation and monitoring approaches for soil and groundwater contamination, specifically, ^{90}Sr , ^{137}Cs .
 - o Radioactive waste disposal and TRU waste management – Learn techniques and experiences of PNNL in waste characterization, treatment of Cs and Sr, vitrification and handling, package, storage and transportation of contacted-handled and remote-handled TRU wastes.
 - o Decontamination and decommission - Learn about experience in decontamination and decommissioning of K Basins including underwater sludge collection and separation..

3. Waste treatment

- a. Waste Characterization
- b. Cs/Tc Ion Exchange
- c. Sr/TRU Precipitation
- d. Ultra Filtration
- e. Low-Activity Waste Vitrification
- f. High-Level Waste Vitrification

PNNL 實驗室之地理位置如圖 2 所示，美方負責接待聯絡人是 Dr. Dawn Wellman 及 Mr. Fred Zhang (圖 3)。公差人到達 PNNL 時，即由 Environmental Health & Remediation (EH&R)部門資深研究員 Fred Zhang 協助辦理報到程序，完成 PNNL Laboratory Orientation (<http://orientation.pnl.gov>)，包括環境介紹、工安、輻安及資訊安全等線上教育訓練課程後，領取識別證(Badge, 圖 4)及館舍通行證(proximity card)。PNNL 實驗室之行政區見圖 5，公差人主要學習之辦公室位於 Environmental Technology Building (ETB)館及 Life Science Laboratory 331 館，見圖 6，另公差行程請參考表 1。本次參訪行程目的主要有 3 個部份，分別為：

1. 與 PNNL 執行環境復育及相關計畫專業人員進行訪談，名單如表 2 所列。
2. 了解 PNNL 目前相關放射性廢棄物處理技術。
3. 參訪 Hanford site 場址目前相關設施狀況。

December 18, 2015

Mr. Ming-Fa Chang
Institute of Nuclear Energy Research
1000 Wenhua Rd. Jiaan Village, Longtan District,
Taoyuan City 32546, Taiwan (R.O.C)

Dear Dr. Chang:

Thank you for your interest in visiting Pacific Northwest National Laboratory. We are excited at this opportunity to continue our cooperative relationship with DNER through sharing experiences and lessons learned for waste management.

Please accept this invitation to visit PNNL on March 16-25, 2016. We have planned eight days of activities, which will include presentations and discussions featuring PNNL experts in groundwater and soil remediation, waste processing, and decontamination and decommissioning. We've also planned tours of the Hanford Site and several facilities, including our Radiochemical Processing Laboratory and Applied Engineering Processing Laboratory.

My colleagues and I look forward to this opportunity to collaborate and share knowledge with you. I am confident that this will be a valuable experience for both our organizations. Please contact me if you have questions or need additional information.

Sincerely,



Dawn Wellman
Manager, Environmental Health and Remediation Market Sector
Energy and Environment Directorate
Pacific Northwest National Laboratory
DMW/jah

圖 1：邀請函

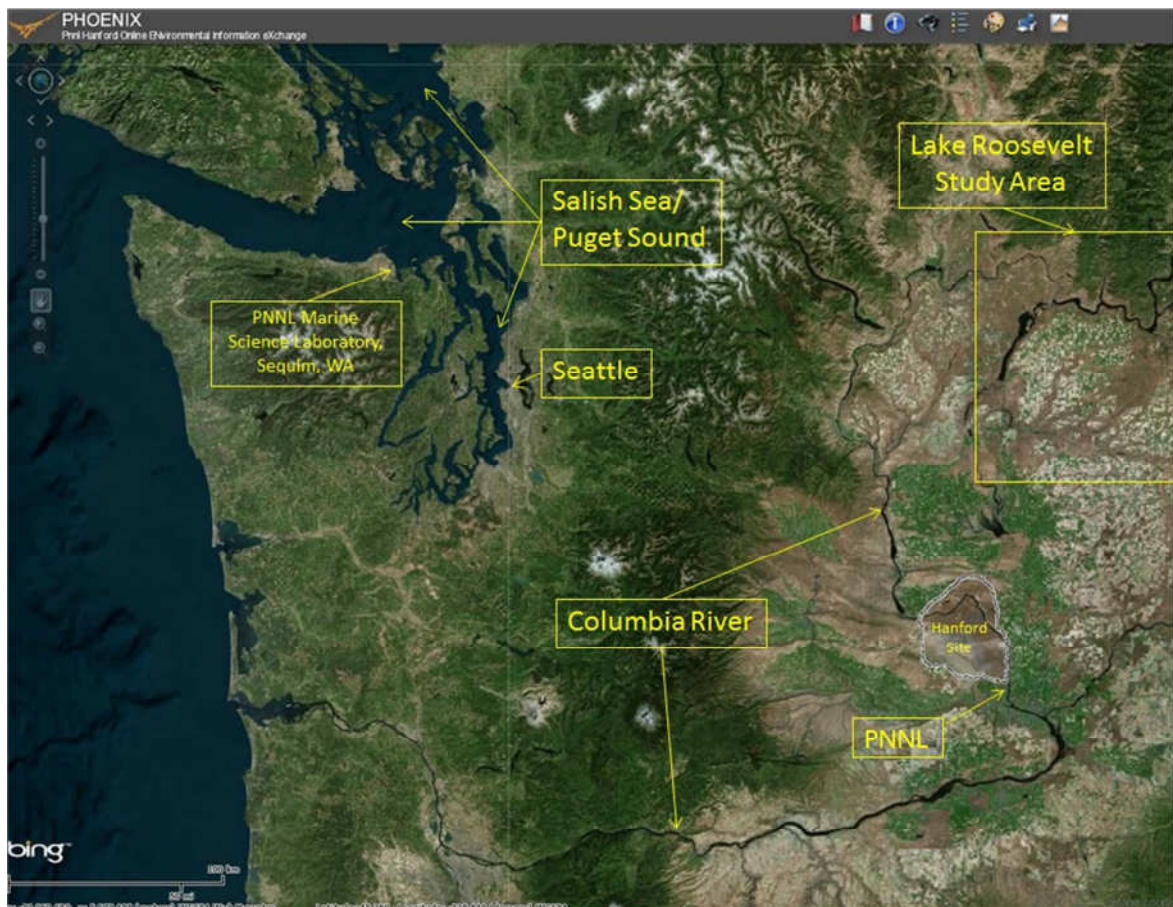
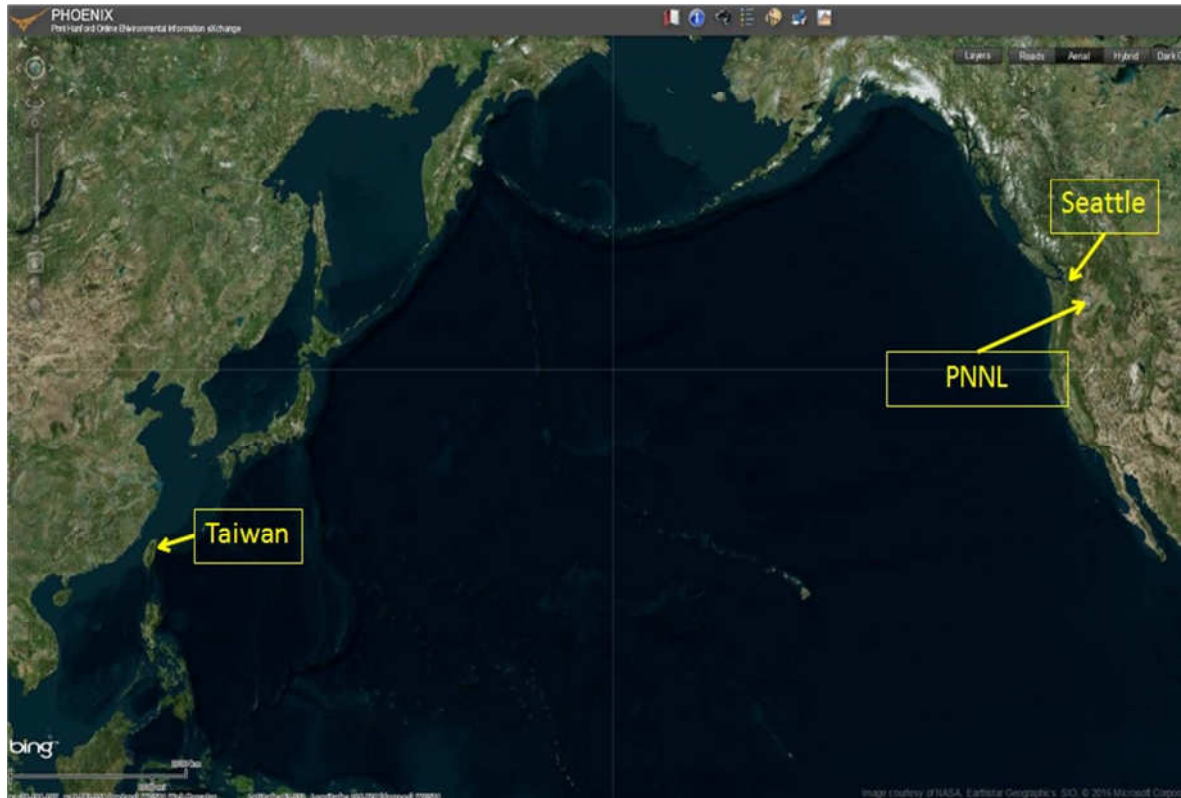


圖 2：PNNL 實驗室相關位置圖



圖 3：公差人與 PNNL 主要接待人 Dr. Dawn Wellman 及 Mr. Fred Zhang 合影



圖 4：識別證及館舍通行證



圖 5：PNNL 行政區大門

ETB



331 館



圖 6：ETB 及 331 館

表 1、公差行程簡表

月/日(星期)	工作內容重點
3/14(一)~3/15(二)	桃園機場→西雅圖→Pasco, Tri-Cities→里奇蘭市。
3/16(三)	ETB 大廳報到、新進人員教育訓練課程、領取識別證及館舍通行證手續。
3/17(四)	Hanford site 歷史及除污除役簡介。
3/18(五)	Hanford site 放射性廢棄物處理程序簡介、RPL 實驗室參訪、玻璃固化簡介及 APEL 實驗室參訪。
3/19(六)~3/20(日)	資料彙整。
3/21(一)	Hanford site 地表水復育簡介，參訪 Aquatics Research Lab 實驗室。
3/22 (二)	Hanford site 地下水模型模擬研究簡介、相關復育政策評估及選擇。
3/23(三)	Hanford site 地下水復育案例及土壤復育介紹、331 實驗室參訪。
3/24(四)	參觀 Hanford site、與 Host Dawn Wellman 座談。
3/25(五)	參訪環境分子科學實驗室 EMSL 館。
3/26(六)~3/28(一)	Pasco Tri-Cities→Seattle 機場→桃園

表 2：參訪 PNNL 專業人員名單

姓名	領域	頭銜
Wayne Johnson	Earth system science division	Division director
Paul Bredt	Nuclear sciences division	Division director
Dawn Wellman	Environmental health & remediation	Sector manager
Hope Lee	Soil & groundwater remediation program	Program manager
Fred Zhang	Hydrology group	Senior scientist
Mike Truex	Vadose zone remediation and monitoring	Program manager
Jim Szecsody	Geochemical and microbial mechanisms	Senior scientist
Vicky Freedman	Hydrology group	Senior scientist
Mark Triplett	Risk & decision sciences	Senior advisor
Tim Johnson	Geophysical characterization	Senior scientist
Amoret Bunn	Environmental assessment	Senior scientist
Lara Aston	Coastal Ecosystem Research group	Scientist
Tim Linley	Fish physiology	Senior scientist
Sandra Fiskum	Nuclear chemistry	Senior scientist
Andy Schmidt	Separations hydrothermal processing	Program manager
Reid Peterson	Wastewater treatment	Senior scientist
Phil Schonewill	Experimental fluid mechanics	Scientist
Mark Freshley	Hydrology group	Senior scientist

表 2：參訪 PNNL 專業人員名單(續)

姓名	領域	頭銜
Carl W. Enderlin	Fluid and computational	Senior engineer
Michael Minette	Experimental fluid mechanics	Senior proect manager
Khris B.Olsen	Environmental systems	Staff scientist
Brady D. Lee	Biological treatment	Senior scientist

本次參訪目的為了解 Hanford 場址之相關環境復育策略及經驗、放射性廢棄物處理流程技術研究、參訪多個實驗室設備、進入場址內參訪相關設施現狀，及獲得相關技術研究人員聯絡方式，以利未來繼續派員赴美國國家實驗室進行科技交流並提升本所能見度。本次參訪美方接待參訪的 Dawn Wellman 博士，是為 Market sectors 下 EH&R 的經理，主要負責有關環境整治復育相關技術，目前以 Hanford site 地下土壤復育技術為主，已有 10 餘年的研發經驗與成果；Ms. Jamie Hejimens 負責安排公差人於參訪 PNNL 期間，聯繫各研究部門之專業人員，並安排會面行程；Mr. Fred Zhang 負責則帶領公差人至各館區與各專業研究人員會面，並協助日常生活相關所需之事項。

前述與各專業研究人員交流有：Mr. Wayne Johnson 說明 PNNL 目前組織現況及 Hanford site 緣由及清理現況、提供設施相關簡介，及說明低放射性廢棄物處置場、未來相關設施所面臨的挑戰；Mr. Paul Bredt、Mr. Andy Schmidt、Ms. Sandra Fiskum 說明用過燃料及污泥處理方法、取樣方式與結果，並提供相關資料及說明核反應器處置情形；Mr. Michael Minette、Mr. Carl W. Enderlin 介紹除污化學藥劑及注意事項、說明 tank farm 取樣方式及相關輸送管路之研究；；Ms. Amoret Bunn 說明目前 Hanford site 有關地表水及空氣中輻射監測結果，並且將相關結果向大眾公開，而此場址之哥倫比亞河下游監測數據皆符合飲用水標準；Ms. Lara Aston 說明目前在西雅圖海岸邊復育水草之過程及相關結果。

Dr. Dawn Wellman、Hope Lee、Fred Zhang、Mike Truex、Jim Szecsody、Vicky Freedman、Tim Johnson、Brady D. Lee 等人為 EH&R 部門內負責 Hanford site 環境復育相關之專家，說明有關污染場址相關整治策略及計畫，介紹使用氨氣可延緩放射性核種遷移至地下水、使用磷酸鹽類來固定吸附銻 90 核種、於污染場址注入聚磷酸鹽類來減少鈾核種遷移及擴散、研究場址微生物處理地下污染物、使用示範型地表屏障來避免雨水滲入污染場址後造成擴散，並作為後續相關設施除役後使用此屏障之設計參考；Mr. Tim Linley 簡介哥倫比亞河鮭魚之相關研究，說明放射性核種及有機污染物會如何影響魚類的生存發展及易

受變異的器官，並藉由研究魚耳內骨頭放射性同位素之研究來判斷魚類的出生地及遷徙過程；Mr. Mark Triplett 介紹 PNNL 線上環境資訊軟體 PHOENIX 與過程操作，可即時監控並呈現目前場址內之相關數據 (<http://phoenix.pnnl.gov/apps/gallery/index.htm>)。

Mr. Mark Freshley 帶領公差人至 Hanford site 內實地參訪 100 area、200 area、300 area、central plateau、F reactor 現地安全貯存、H reactor 現地安全貯存、D reactor 現地安全貯存、N reactor 現地安全貯存及磷酸鹽類屏障、示範型地表屏障 (prototype barrier)、環境整治處置設施 (ERDF, Environmental Restoration Disposal Facility)，藉由在 Hanford site 內實地參觀，對場址內之設施及環境復育有更深刻的了解。

(二) 美國太平洋西北國家實驗室 簡介

美國太平洋西北國家實驗室(PNNL)，是美國能源部所屬的 17 個國家實驗室之一，(如圖 7 所示)，PNNL 本部位於華盛頓州里奇蘭市(Richland, WA)，佔地 600 英畝，其他有少部分位於 Seattle、Sequim 及 Portland，如圖 8 所示。PNNL 創建於 1965 年，位處華盛頓州東部哥倫比亞河和亞基馬河交界的沙漠地帶，最初的任務是從事原子彈核材料生產的研究，1987 年，Hanford site 最後一個核反應爐 N-reactor 停止運轉後，美國能源部每年投入 20 億美元，進行 Hanford site 的環境清理，也因此 PNNL 的工作重點從原本核原料的研製轉移到環境科學，包括核廢料的處理、貯存與處理置等。

PNNL 於 1980 開始轉型基礎科學研究，目前員工約有 4400 位，每年經費約 10 億美元，除了參與官方計畫之外，也會與民間企業合作或進行跨國合作，其費用來源主要是由科學、能源、環境、國家安全、國土安全、其他機關及私募計畫提供(如圖 9)。

PNNL 擁有 78 項美國與國外授權專利，超過 1000 件授權使用，曾經獲得 2 次 The Federal Laboratory Consortium for Technology Transfer (FLC)技術轉移獎，在化學、環境科學及數據分析等方面特別出色，是過去幾年 DOE 最亮麗的實驗室。其最有名的產品是在 1969 年，藉由從分析第一次阿波羅任務到月球收集材料時發明的技術，進而導致光碟產品問世；另開發了把農業廢料轉化為有用的甲烷燃料等研究。

PNNL 研究範圍包括基礎科學、國際安全任務、能源與環境任務與應用技術發展等。組織上目前主要是分為四大董事會：物理及計算機科學、地球與生物科學、能源與環境、國家安全等，及其他後勤支援單位如人力、業務、溝通與訊息、計劃管理、稽核、法律及反間諜等部門，詳細組織圖如圖 10。

其中能源與環境董事會組織圖架構及負責人如圖 11，主要分為研究部門及市場部門。研究部門分為 5 部門：

1. 地球系統科學(earth systems science)
2. 電力基礎建設及建物(electricity infrastructure & buildings)
3. 能源程序及物質(energy processes & materials)
4. 核子科學(Nuclear sciences)
5. 海岸科學(coastal sciences)等；

市場部門分成 6 部門，分別為：

1. 潔淨石化能源(clean fossil energy)
2. 電力基礎建設(electricity infrastructure)
3. 能源效率及再生能源(energy efficiency & renewable energy)
4. 環境健康與復育(environmental health & remediation)
5. 核能(nuclear)
6. 國家安全之能源與環境(energy & environmental for national security)

PNNL 主要使命是發現有效率的可再生能源、提供科學的防禦措施來解決遺留的核廢棄物、執行污染場址的環境復育。本次參訪的單位係屬於能源與環境董事會之地球環境健康與復育(EH&R)部門，負責之管理人為此次接待人 Dr. Dawn Wellman。該部門目標是面對核廢棄物複雜的挑戰，在廢棄物處理上，以專業知識採綜合環境整治，以促進公眾對於核廢棄物處理的信心，實現環境保護目的；作為上以預測及管理監視目前貯槽內廢棄物，及進行廢棄物處理、安定化和處置、環境復育及管理來執行場址復育；並提供科學和技術知識來告知風險、加強政府和民眾的互動關係，期能做到環境保護。該部門的重點研究領域包括：化學和核

子處理程序，地下水科學與工程，能源與水關係，輻射測量，氣候變化模擬與決策科學，景觀規模管理和迅速恢復的海岸系統。

PNNL 實驗室配置圖如圖 12，空照鳥瞰圖如圖 13。

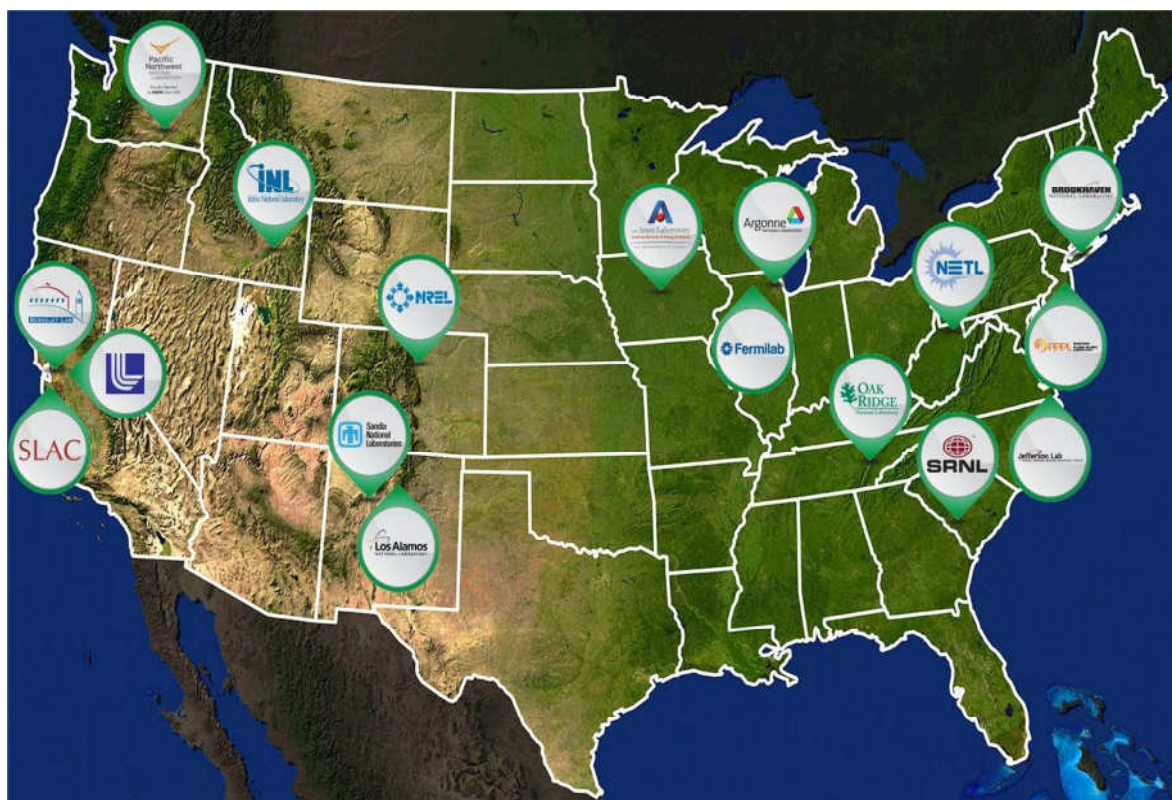


圖 7、美國國家實驗室之相關位置圖



圖 8、PNNL 實驗室美國分佈圖

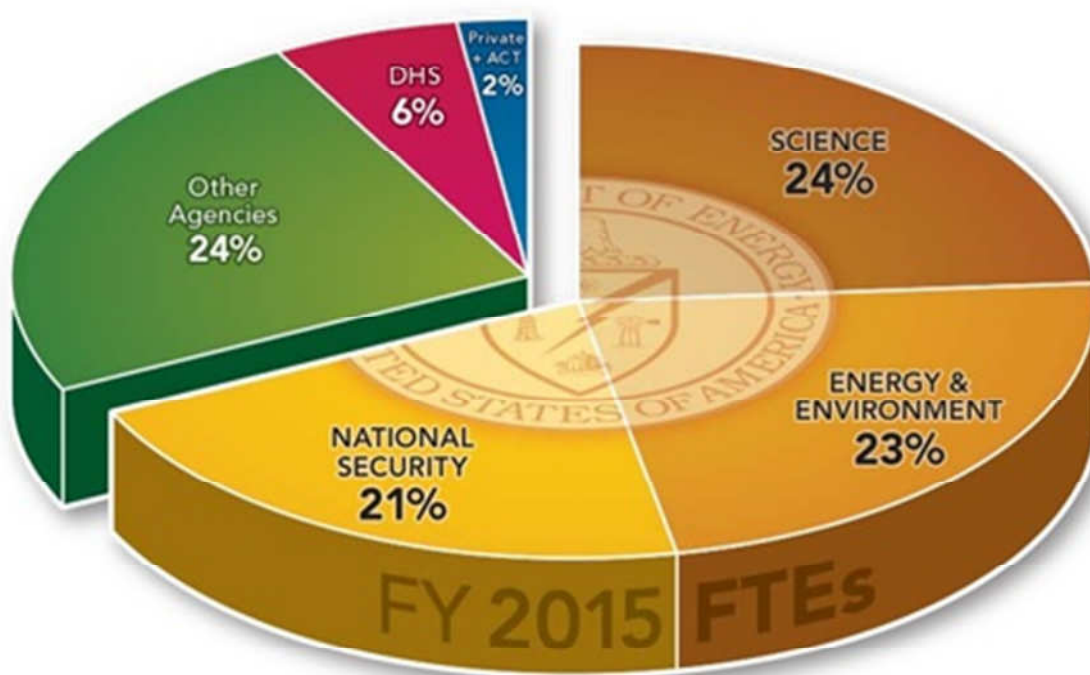


圖 9、PNNL 實驗室經費來源比例圖



圖 10、PNNL 董事會組織及負責人圖

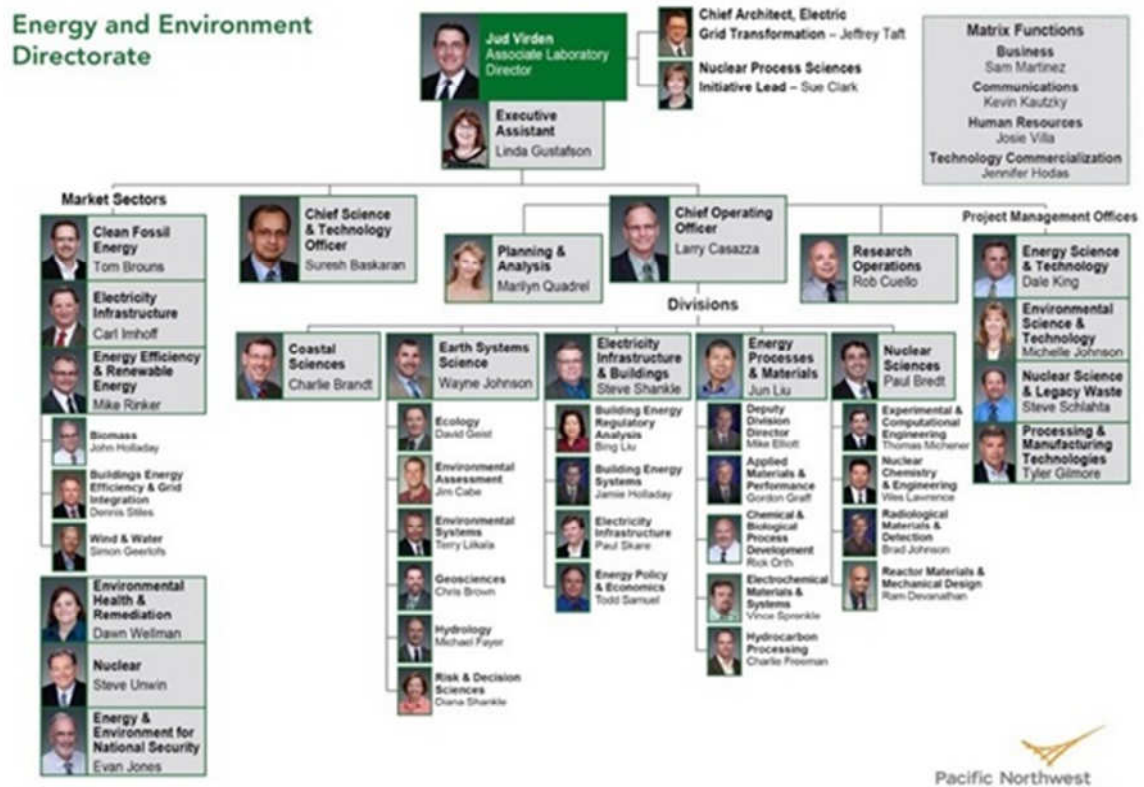


圖 11、能源與環境董事會組織及負責人圖



圖 12、PNNL 實驗室配置圖



圖 13、PNNL 空照鳥瞰圖

(三) Hanford site 簡介

Hanford site 位於華盛頓州東南部，屬於 1943 年原子彈開發之曼哈頓計劃的一部分，主要是為研發生產製造鈾原料，並提供第一顆鈾原子彈所需之核原料。場址總面積達 1518 km^2 (對照新竹縣市 1531 km^2 ，桃園市 1220 km^2)。該區域目前隸屬美國聯邦政府能源部管理及整治，區域內無人居住且不對外開放，周圍環境主要是沙漠，哥倫比亞河流經本區的總長度約 80 公里。在該區域南端 Tri-Cities 包含了 Richland、Kennewick 和 Pasco 三個小城鎮，居民人數約 20 萬人，主要經濟基礎是靠清理 Hanford site 之相關計畫來維持。

Hanford Site 於 1944 年至 1963 沿哥倫比亞河共設置九座核反應器，1964 年至 1987 年陸續停止運轉，時程如圖 14。B 反應爐 (B Reactor) 為世界上第一個以鈾為原料的核反應爐。美國於冷戰期間在此場址建造核子武器，冷戰結束後成為核廢料貯存地區，經過 70 多年發展，如今該區域已成為美國污染最嚴重的核場址之一。

其中 100 Area 是指沿著該區北方之河岸核反應器建置區域，200 Area 為中央高原區，主要是化學分離程序設施；300 Area 在南邊角落，為反應器鈾燃料製造設施及其他支援輔助設施，區域簡圖如圖 15。除了 9 座核反應器，該場址於 1944 至 1989 期間，還建造了 5 座鈾再處理廠、數個核燃料製造工廠、177 個高放射性廢棄物貯槽、固體廢棄物處置設施等，生產流程圖如圖 16。

由於早期對於廢棄物的處置策略失當，幾十年的運轉產生了 $200,000 \text{ m}^3$ 的高放射性廢棄物(Tank Waste)、 $700,000 \text{ m}^3$ 固體放射性廢棄物；場址下方約 520 km^2 的土壤與約 10^9 m^3 的地下水遭到污染； $5,500,000 \text{ m}^3$ 的核子設施需處理，還有 700 m^3 的核物料(如圖 17)。該場址所產生的高放射性廢棄物量佔全美的三分之二，迄今仍是美國污染範圍最大的核設施場址，持續進行美國最大的環境清理計畫。

場址清理始於 1989 年，當時是由美國能源部，美國環境保護署和華盛頓州政府之間達成了協定，稱為三方協議，該協議建立了數百個目標(milestone)，最主要 2 個重點成果為：回復哥倫比亞河流域轉為其他用途使用；將廢棄物長期的處理與貯存轉移至中央高原(200 area)。為使 Hanford Site 符合聯邦和州的環保法規，聯邦政府每年約花費 20 億美金執行清理計畫，投入 11,000 名工作人員進行清理與移除廢棄物及遭污染的建築和土壤。該場址被分為四個國家優先列表（NPL）的處理區域，分別是 100、200、300 和 1100 區域。經過二十多年的清理後，目前 1100 區域已完成清理，整體場址已有極大的改善，減少了對人員健康和安全隐患，並改善公眾和環境污染的風險。目前最新清理計畫時程如圖 18，清理策略主要是將 100 area 及 300 area 之相關放射性廢棄物移往 200 area 集中處理及長期貯存處置，包含了建立固體廢棄物處置場、廢棄物處理及安定化工廠、拆除污染建築、核反應器進行現地安全貯存，及相關環境復育措施(如圖 19)。以下將對 100、200、300 area 及其他重要設施清理做重點摘錄。

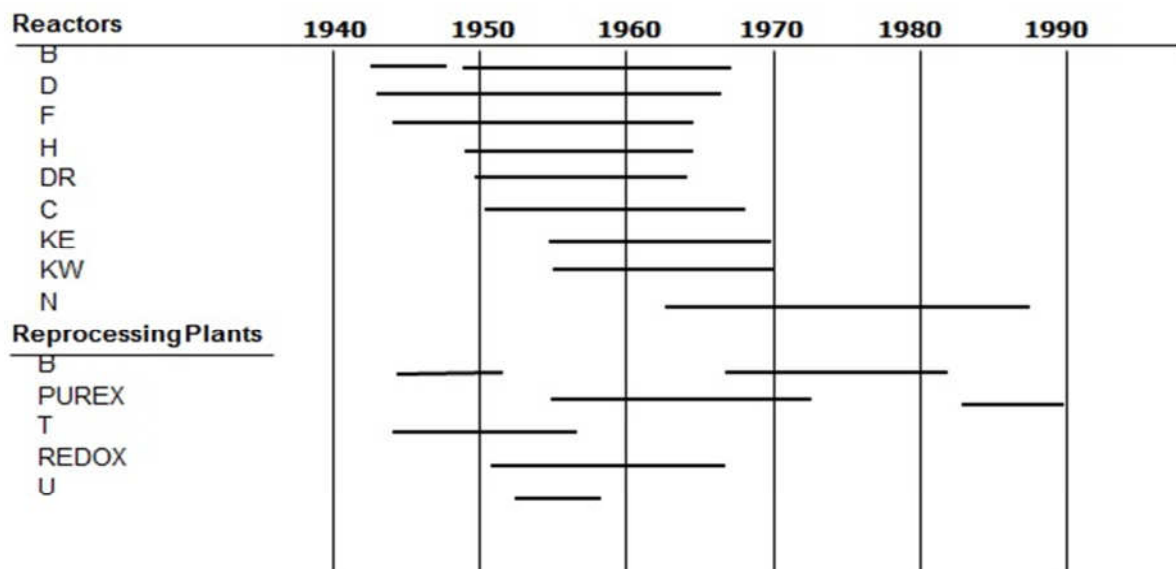


圖 14、Hanford Site 核反應器運轉時程圖

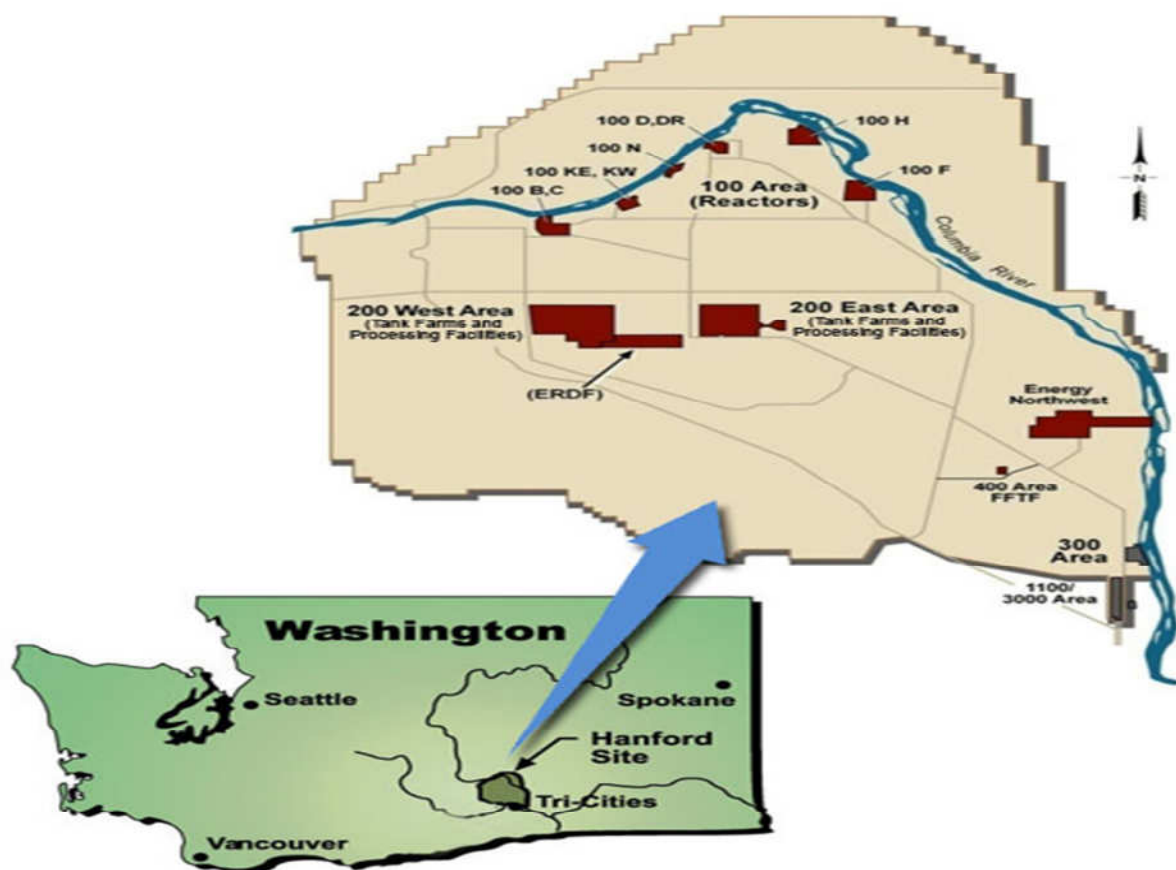


圖 15、Hanford Site 區域簡圖

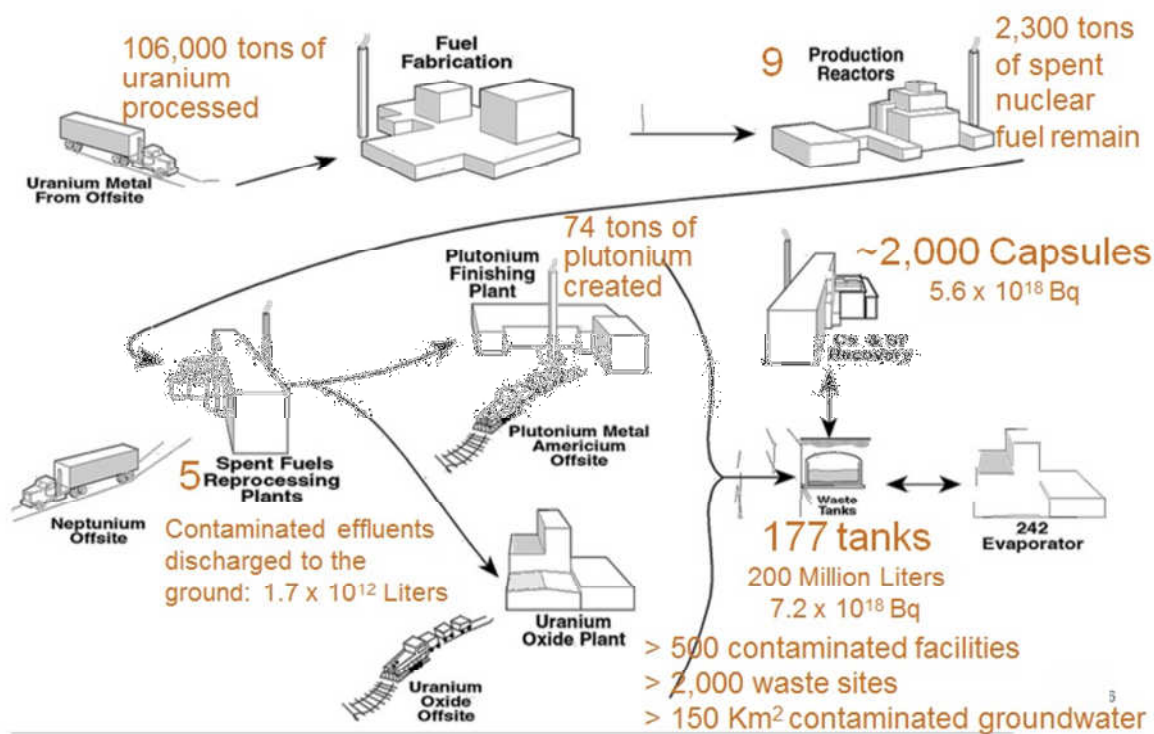


圖 16、Hanford Site 鈾生產流程圖

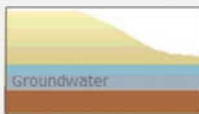
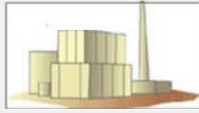
	Volume	Curies ¹	Chemicals ²
 Tank Waste	200,000 m ³	195 million	170,000 MT
 Solid Waste	700,000 m ³	6 million	65,000 MT
 Soil and Groundwater	1 billion m ³	<1 million	150,000 MT
 Facilities	5.5 million m ³	1 million	----
 Nuclear Material	700 m ³	150 million	----
Total		~350M Curies	~385K MT

圖 17、Hanford Site 放射性廢棄物總表

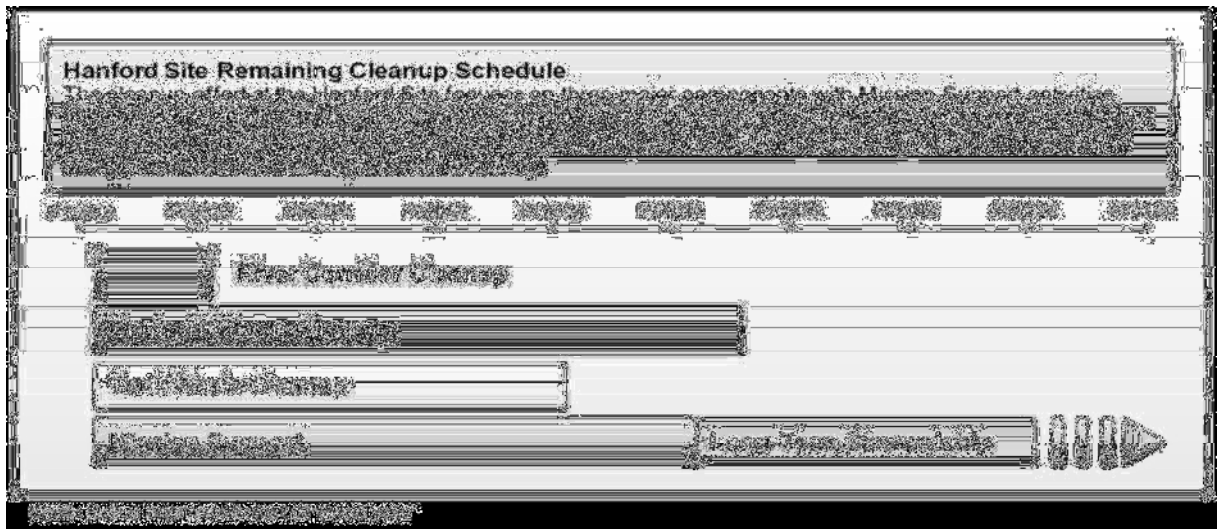


圖 18、Hanford Site 最新清理計畫時程

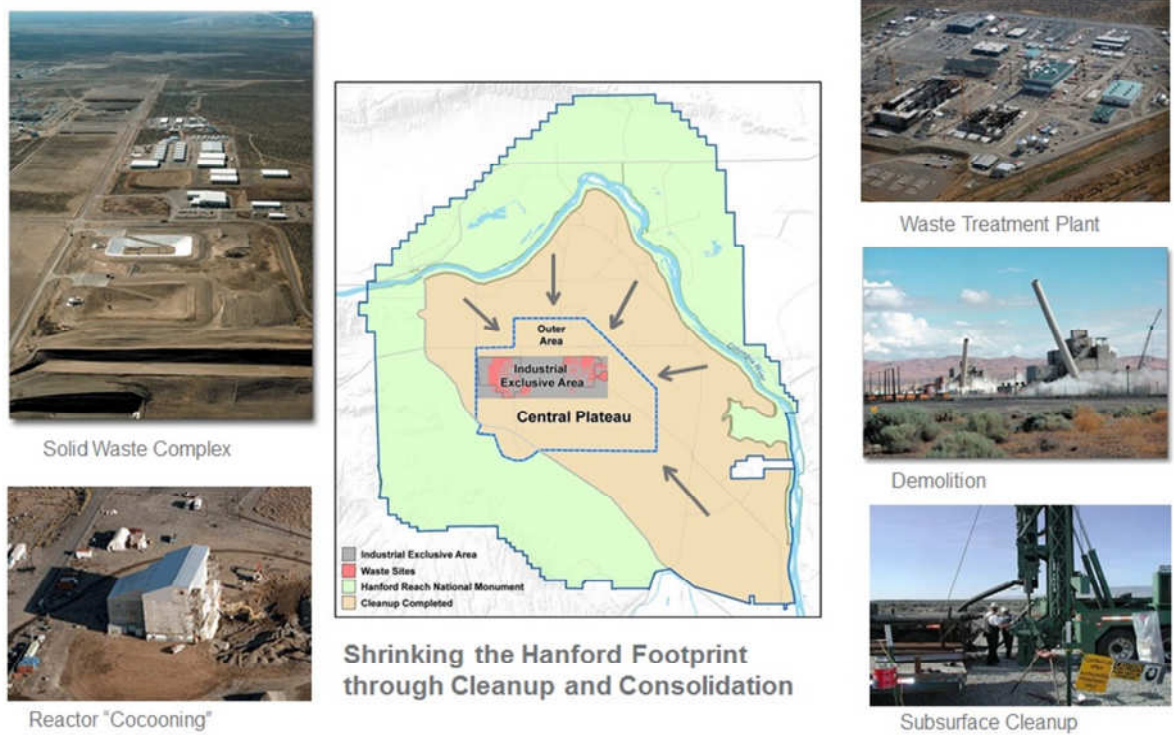


圖 19、Hanford Site 清理計畫策略

(四) 100、200及300 area現況簡介

100 area 之 9 座核反應器，目前已將全數用過核燃料移往 200 area 之燃料罐貯存庫(Canister Storage Building)貯存。6 座核反應器已完成現地安全貯存，預估可長期貯存 75 年，1 座進行中(K East Reactor)，1 座(K West Reactor)待進行處理，預計 2019 年完成現地安全貯存(如圖 20)，B Reactor 保留為歷史重要遺跡之博物館。K-East basin 用過金屬燃料之清理計畫流程如圖 21，K-East storage basin 清理前後照片如圖 22，池內主要污染物有四類，污泥將進行中期貯存或部分進行處理處置，廢液及碎片亦進行相關處理，核燃料則經過清洗與污泥分離後，裝入提籃內再放入多重式金屬容器 (Multi-Canister Overpack, MCO) 與護箱內，再送至低溫真空乾燥廠 (Cold Vacuum Drying Facility) 進行燃料乾燥後，最後再運送到燃料罐貯存庫 (Canister Storage Building, CSB) 內貯存。

200 area 主要有鈾再加工及分離純化廠、177 個高放射性廢棄物貯槽(Tank farm，位置如圖 23)、Plutonium Finishing Plant(已清理拆除)、蒸發處理設備、廢液處理設施 (Effluent Treatment Facility)、建造中之玻璃固化工廠(Vitrification Plant)、綜合式處置設施(Integrated Disposal Facility)、燃料罐貯存庫、廢棄物隔離試驗工廠(Waste Isolation Pilot Plant, WIPP)、環境恢復處置設施(Environmental Restoration Disposal Facility) 等較為重要的設施。

前述 177 個高放射性廢棄物貯槽中有 149 個單壁貯槽，容量約 $210 \sim 3800 \text{ m}^3$ ，建置於 1943 到 1964 年間；另外有 28 個雙壁貯槽，容量約 $3800 \sim 4200 \text{ m}^3$ ，建置於 1968 到 1986 年間。單壁貯槽洩漏（或疑似）有 67 桶約 5700 m^3 ，雙壁貯槽尚未有洩漏，單壁及雙壁貯槽剖面圖如圖 24。目前高放射性廢棄物貯槽區之廢液處理流程為將高放射性廢液經蒸發器濃縮處理後，濃縮液再打回廢液貯槽，達到減

容效果。放射性濃縮廢液後續將以目前正設計建造中之玻璃固化廠安定化，其中高放射性玻璃固化體送往新墨西哥州 WIPP 處置，較低放射性玻璃固化體及固體廢棄物送 Hanford site 之綜合式處置設施永久處置。餾出液後續則送至餾出液貯存設施(Liquid Effluent Retention Facility)貯存，再經過廢液處理設施處理，並經檢測合格後排放，復育地下水所抽取之地下水亦送至廢液處理設施處理。

200area 相關處置設施建置歷程如圖 25，其中位在 Hanford site 中心之環境恢復處置設施占地約 107 英畝(如圖 26)，該處置設施主要是隔離、封裝、掩埋清理活動時產生的放射性或受污染等混合廢棄物，主要是固體廢物、受污染的土壤和建築碎片，目前的容量為 $16,400,000 \text{ m}^3$ （未來可再擴展 $8,000,000 \text{ m}^3$ ），1996 年開始運作至 2011 年 3 月間共處理 11,000,000 Ton 廢棄物。每個掩埋區底部構造皆有襯墊(如圖 27)，包括多層塑料布、不滲透材質、排水砂礫混和層等，另外當有雨水穿過廢棄物貯存區時，有一專門收集液體之系統並將之排除；另外當處置場關閉之後，會再設施上建造永久性覆蓋措施，以防止任何水、植物或動物侵擾。另建造中玻璃固化工廠及相關處理設施照片如圖 28。

300 Area 面積為約 0.52 acre (1.35km^2)，位於 Richland 北部，距離最近城鎮約 1mile (1.6 km)。當時有兩個主要功能：製造核反應器鈾燃料及進行改善產品相關程序研究。第二次世界大戰和冷戰期間，美國藉由許多實驗室研究來擴大和改善武器生產，政府及其承包商過去產生約有 2 千萬個核子燃料塊(八成是未濃縮的天然鈾，二成是 $<1.2\%$ 輕度濃縮鈾)及鋁或鉛外套管。該地區也是 Hanford site 的放射性研究的中心，圖 29 為 1967 年時 300 area 上空照圖，當時將相關放射性廢棄物排至南北池及壕溝直接棄置排放，其中北池運轉時間為 1948 至 1975 年，南池運轉時間為 1943 至 1975 年，壕溝運轉時間為 1975 至 1985 年，兩池總面積為 18 acre (7.29 km^2)，每天排放 410K 至 2M 加侖(1552 至 7570 m^3)至池內，PH 從 1.8 至 11.4，並且含有鈾、

鋅、鎳、銅、硝酸鹽類、鋁酸鈉沉澱物等污染物，因而造成下方土壤及地下水高度污染。

300Area 經過 40 多年的運營，建造了許多設施，期間因廢棄物棄置致放射性廢棄物和有害物質污染了地下水及土壤。後續依據三方協議，美國能源部及其承包商 Washington Closure Hanford (WCH) 已經在過去的 10 年清理 Hanford site 沿哥倫比亞河的區域，完成了極大的進展，尤其在 300 area 更完成了大部份的清理；截至 2015 年為止，能源部及其承包商拆除 300 區 209 個設施和復原 312 處廢棄物場所，拆除設施包括六個研究用反應器、燃料製造設施和研究實驗室；另自 2005 年以來，拆除 108 處污染建築物及刨除土壤，並全部從哥倫比亞河附近區域載運到 200area 中央高原的環境恢復處置設施(ERDF)掩埋。

2015 年 9 月再將 300 area 刨除的 51 arec 區域回填土壤，並加入重建原生植被的種子，做好場址表面的環境復育工作。未來幾年，該場址仍有兩個重大的清理挑戰，一個挑戰是舊有實驗室待拆除(實驗室編號為 324 大樓/化工材料工程實驗室)，是最後一個待拆除的建築，因該建築物下方有高度污染，必須進行整治修復後再進行拆除；另一挑戰是整個 300 area 因製造處理鈾核燃料時，任意排放造成鈾污染之土壤及地下水，因其靠近哥倫比亞河，後續須透過隔離或固定鈾核種的遷移，以進一步減少污染物擴散至地下水及進而遷移至哥倫比亞河的風險。圖 30 為 2015 年清理完成的 300 area 上空照圖。

Nuclear Facility D&D Options

Cocoon or In-Situ Disposition (ISD)

Partial D&D Hanford "C" Reactor Cocoon

Partial D&D Hanford "U" Canyon In-Situ Disposition (ISD) Option

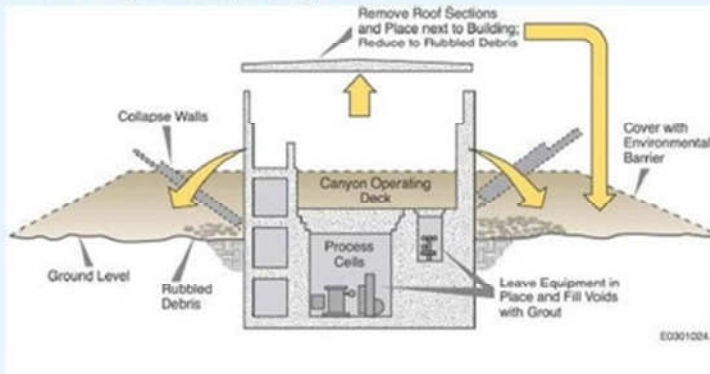


圖 20、核反應器現地安全貯存

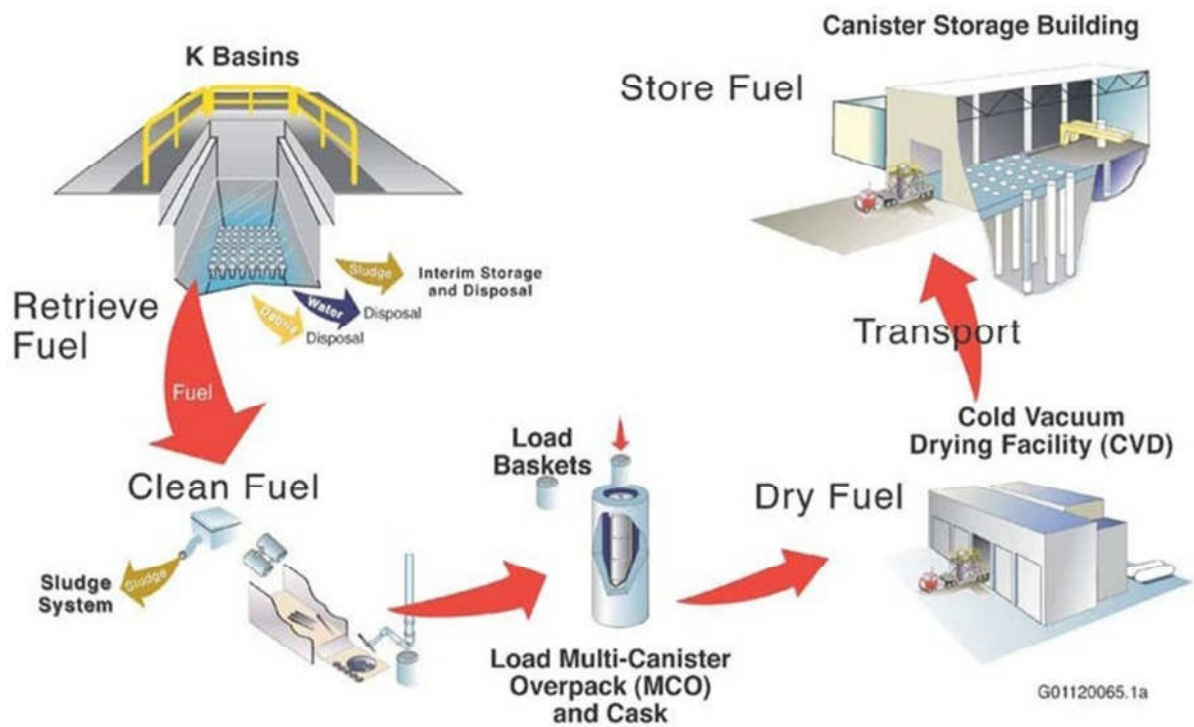


圖 21、用過金屬燃料之清理計畫流程

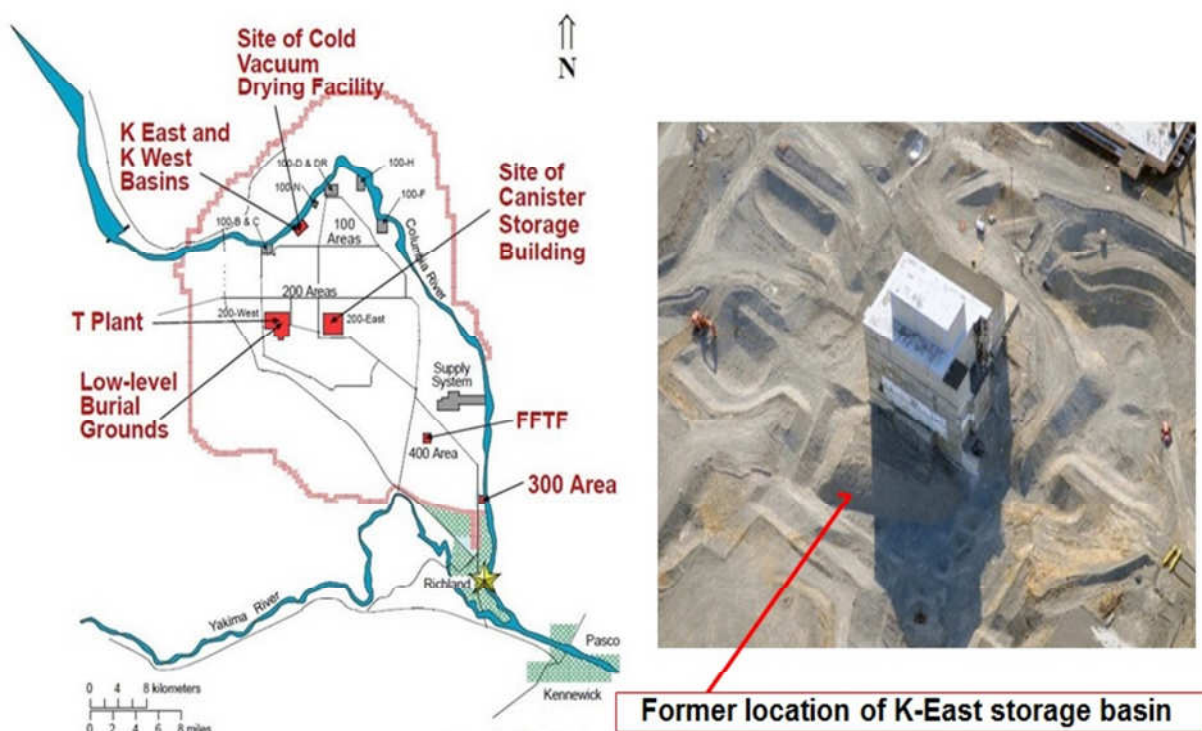


圖 22、K-East storage basin 清理前照片



圖 22、K-East storage basin 清理後照片

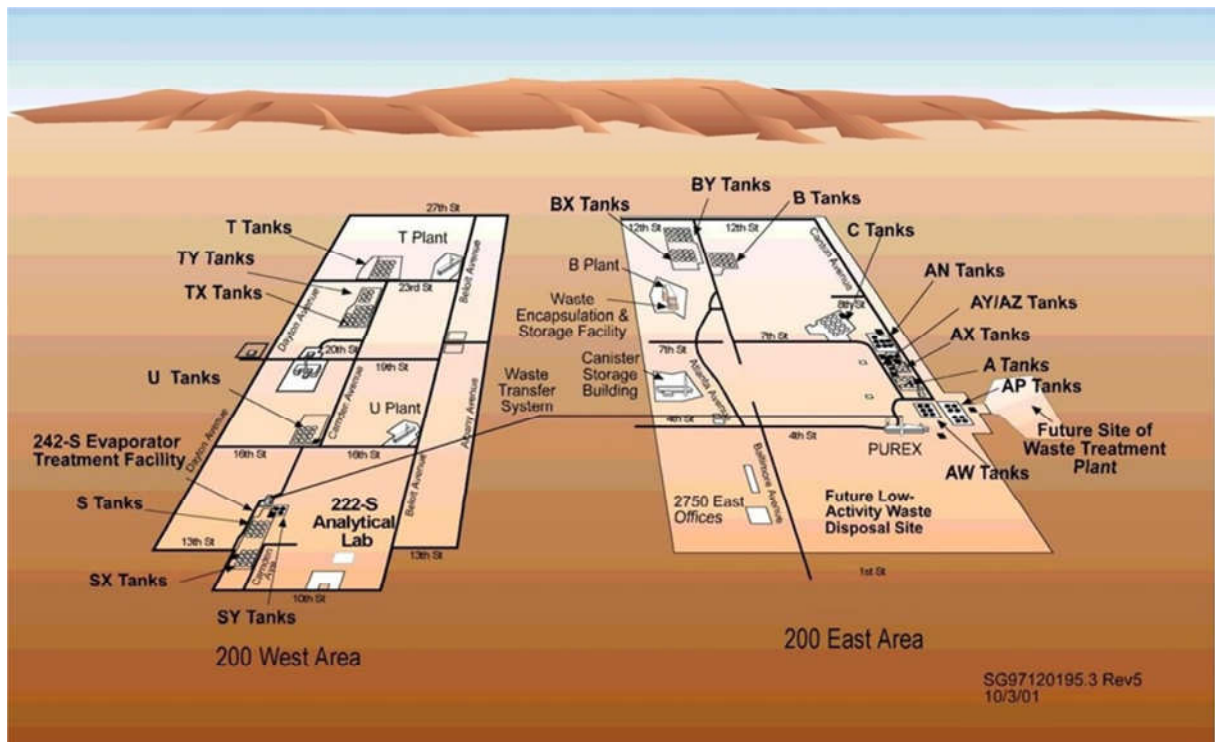


圖 23、177 個放射性廢棄物貯槽位置圖

No Two Tanks are the Same

- Waste temperatures range from 60 to 160°F
- Highly caustic
- Moderate-to-high radioactivity
- No two tanks have the same waste contents
- Most waste produces some hydrogen

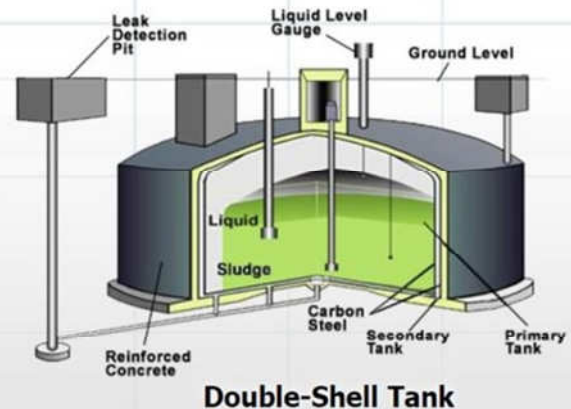
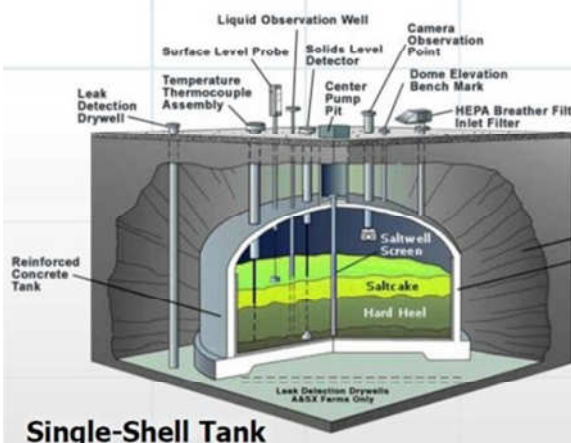
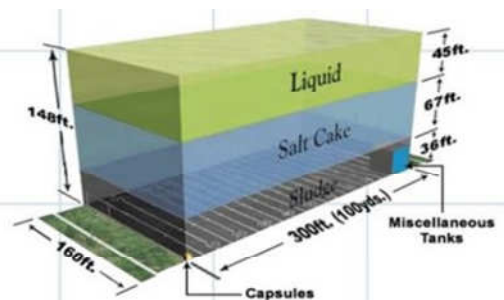


圖 24、單壁及雙壁貯槽剖面圖

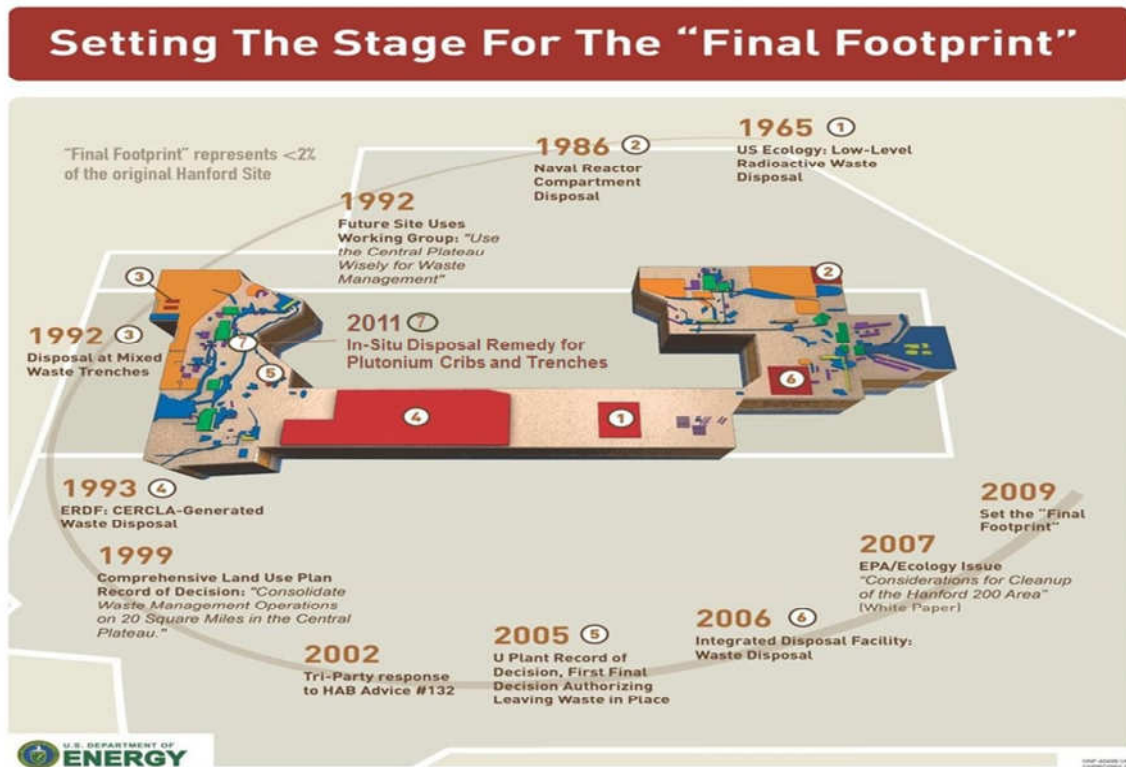


圖 25、200area 相關處置設施建置歷程圖



圖 26、環境恢復處置設施(ERDF)

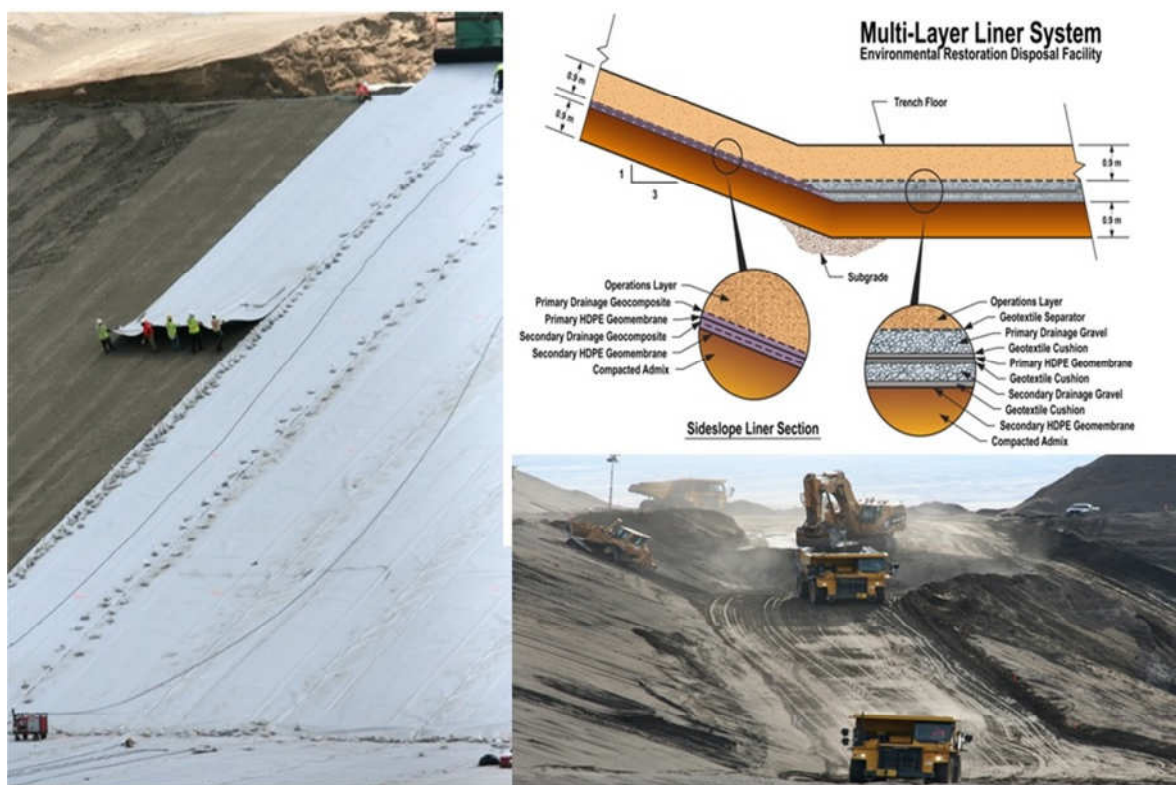


圖 27、ERDF 底部襯墊構造圖



圖 28、建造中玻璃固化工廠及相關處理設施



圖 29、1967 年 300 area 上空照圖



圖 30、2015 年 300 area 清理後上空照圖

(五) Hanford site 土壤地下水污染概述

由上述介紹可知，Hanford site 主要運轉區域集中在 100、200、300 area。其中 100 區主要是核反應器運轉及操作，200 區主要是化學分離程序區域，300 區則主要為鈾核燃料製造，故各區所造成之污染物不盡相同。又當初處置廢棄物策略失當，造成土壤及地下水有放射性核種污染及有毒化學物質滲入，究其主要污染途徑為廢棄物貯坑、壕溝、池水、管線、排水設施、監測井、貯槽及反應器運轉時洩漏或排至地面(如圖 31)，進而污染了地面下的土壤，其中最主要的污染物有：氙、鎔-99、碘-129、鈾、鋇-90、銻-137、銻-239/240 等放射性核種。這些核種對於人體及生物圈環境有極大的危害及健康風險，尤其是碘-129 可在環境中具有極大的遷移性，而銻-239/240 則具有極長半衰期 (2.41 萬年)；另有機污染主要有四氯化碳，會對環境生態造成極大的傷害，重金屬六價鉻及硝酸鹽類等之污染則由於六價鉻常以陰離子形式存在，在大範圍的 pH 值情況下均為可溶性，在土壤及地下水中具高度移動性威脅。這些是目前 Hanford site 土壤地下水污染最為棘手的污染物。

2010 年 DOE、承包商及 PNNL 經由 Hanford site 內之 1311 個監測井及 145 個含水土層取樣分析，得知目前 Hanford site 地下水污染概略分布如圖 32。由圖中可知氙的污染區域已經擴散至哥倫比亞河邊緣，碘-129 也已從 200 區逐漸往哥倫比亞河遷移；圖 33 為 2013 年 100 及 300 區污染詳細分布圖，100 區先前主要為核反應器運轉，300 區為製造核燃料。100 區主要污染物為鋇-90 放射性核種、重金屬六價鉻，100-F 區尚有硝酸鹽類及三氯乙烯等污染物。300 區主要污染物為鈾及重金屬六價鉻；200 區因為有化學分離程序、廢棄物處理處置程序及 177 個放射性廢棄物貯槽區等重大設施，故其所造成的污染也最為複雜，圖 34 為 2013 年 200 區污染詳細分布圖，由圖中可知主要污染物包含了氙、鎔-99、碘-129、鈾等放射性核種、四氯化碳及硝酸鹽類等。

圖 35 為 200 區內部中心主要設施洩漏及排放放射性廢棄物圖，其中大部分放射性核種為鎔-99、鈾等，目前大部分仍停留在深層滲流帶或充氣帶或非飽和帶土壤區域(deep vadose zone，地下水在地面以下可以分為上下兩帶，上帶名為滲流帶 (Vadose Zone) 或充氣帶 (Zone of Aeration)，下帶名為飽和帶 (Zone of Saturation) 或潛水帶 (Phreatic Zone)，這兩帶的分界面名為潛水面或地下水面 (Water Table))，但仍有少部分超過標準值 100 倍污染物擴散滲流至地下水。

圖 36 為廢棄物排放至土壤中擴散滲透至地下水面示意圖，貯坑廢液排放到土壤中，經由縱向及橫向擴散、土壤吸附、溶解度反應、衰減及異質反應後，會逐漸滲流至地下水面，此時污染物會藉由地下水傳輸產生污染團行為(plume behavior)如圖 37：污染物由污染源區(source zone)往某方向擴散成為污染團中心區(plume core zone)，並在其外圍產生污染團邊緣區(plume Distal Zone)，其濃度及強度為污染源最高，污染團中心區次之，污染團邊緣區最小，並逐漸擴散至哥倫比亞河中。

Hanford site 早期運轉時，對於放射性廢棄物的管理失策，將廢液直接排入地表或貯槽液體洩漏至土壤內，造成土壤與地下水遭受嚴重污染。雖然地表表面約 40 英尺深之污染土壤可直接刨除，並移至環境復育處置設施(ERDF)永久貯存，但深層滲流帶污染土壤仍會持續污染地下水，故須針對此這些污染物進行整治處理，以達成環境復育目的。而依據場址概念模式(conceptual site model 圖 38)，在開始清理或監測策略之前，須對場址做特徵調查，再詳細規劃相關復育作業程序並據以實行，同時監測處理結果成效是否有達成目的，若無法達到設定目標，則持續進行復育措施修正精進並執行之，如此反覆迴圈以達成場址整治及復育的目的。後續章節將針對 Hanford site 土壤地下水整治作一概略摘要簡介，了解目前相關復育策略及技術，期能對我國污染整治復育有所助益。

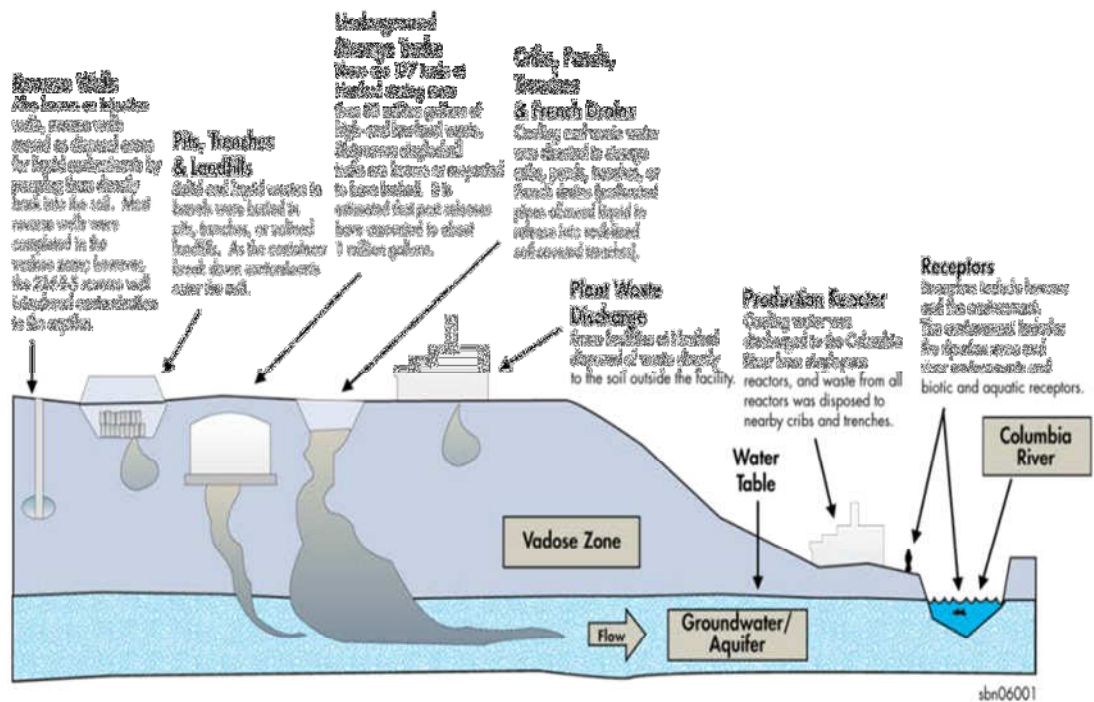


圖 31、土壤及地下水污染途徑圖

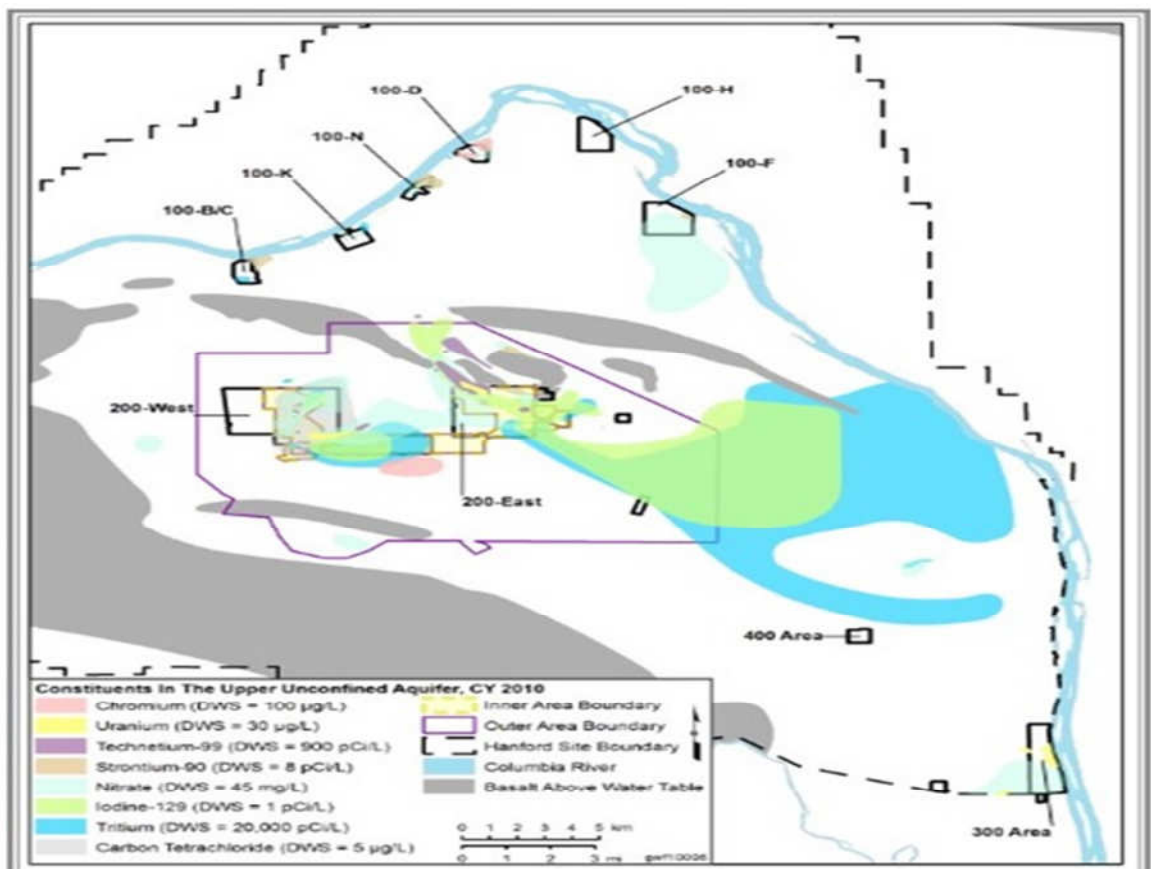


圖 32、Hanford site 地下水污染分布圖

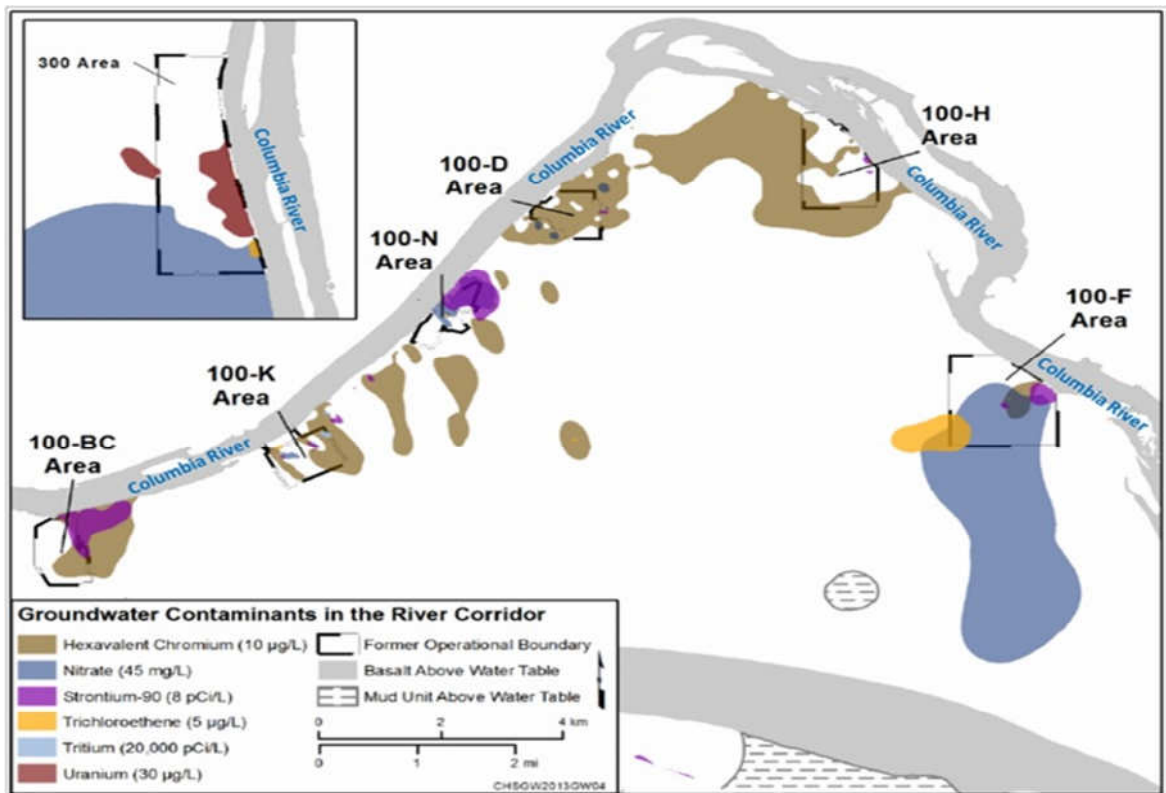


圖 33、100 及 300 區地下水污染分布圖

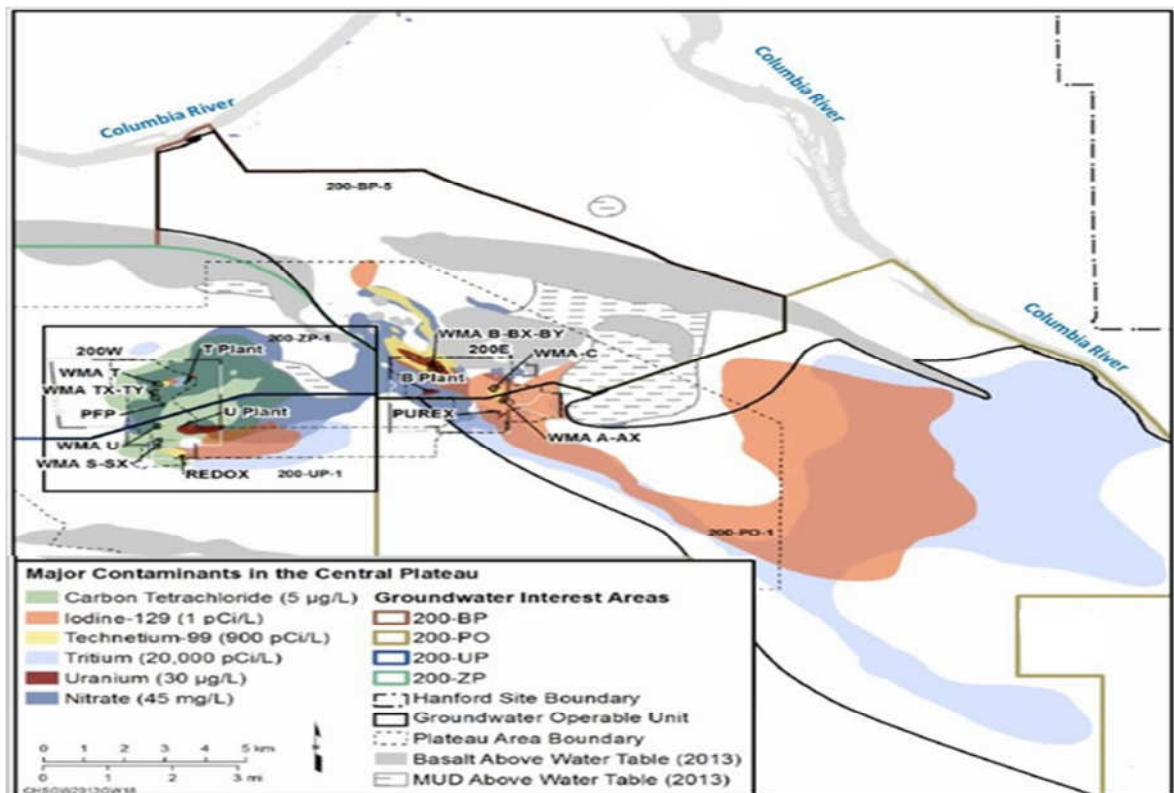


圖 34、200 區地下水污染分布圖

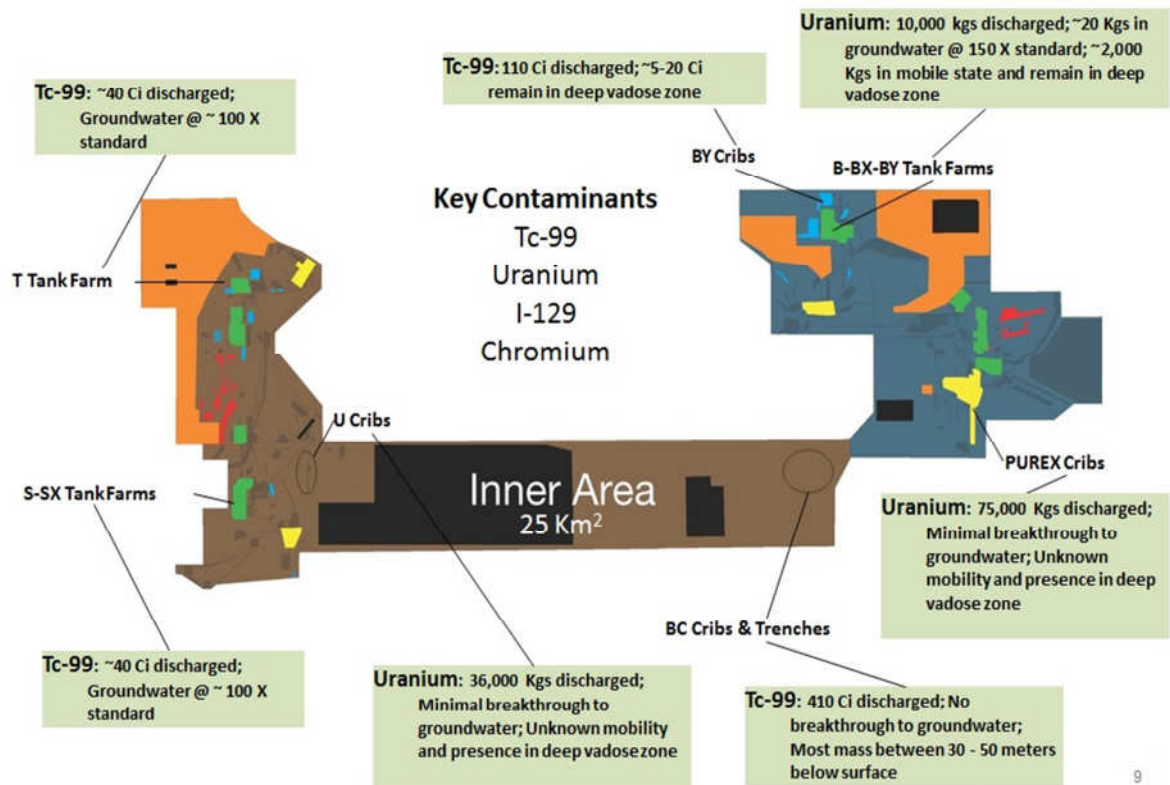


圖 35、200 區主要設施洩漏及排放廢棄物圖

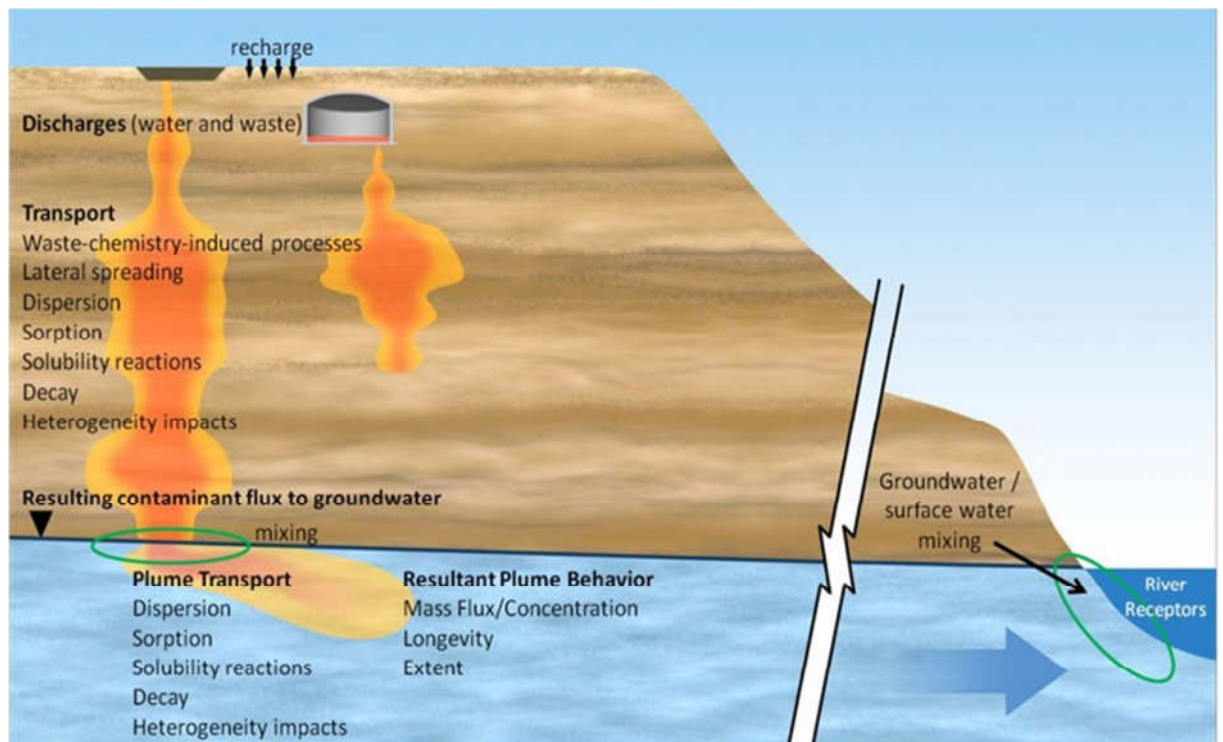


圖 36、廢棄物於土壤中擴散滲透至地下水面示意圖

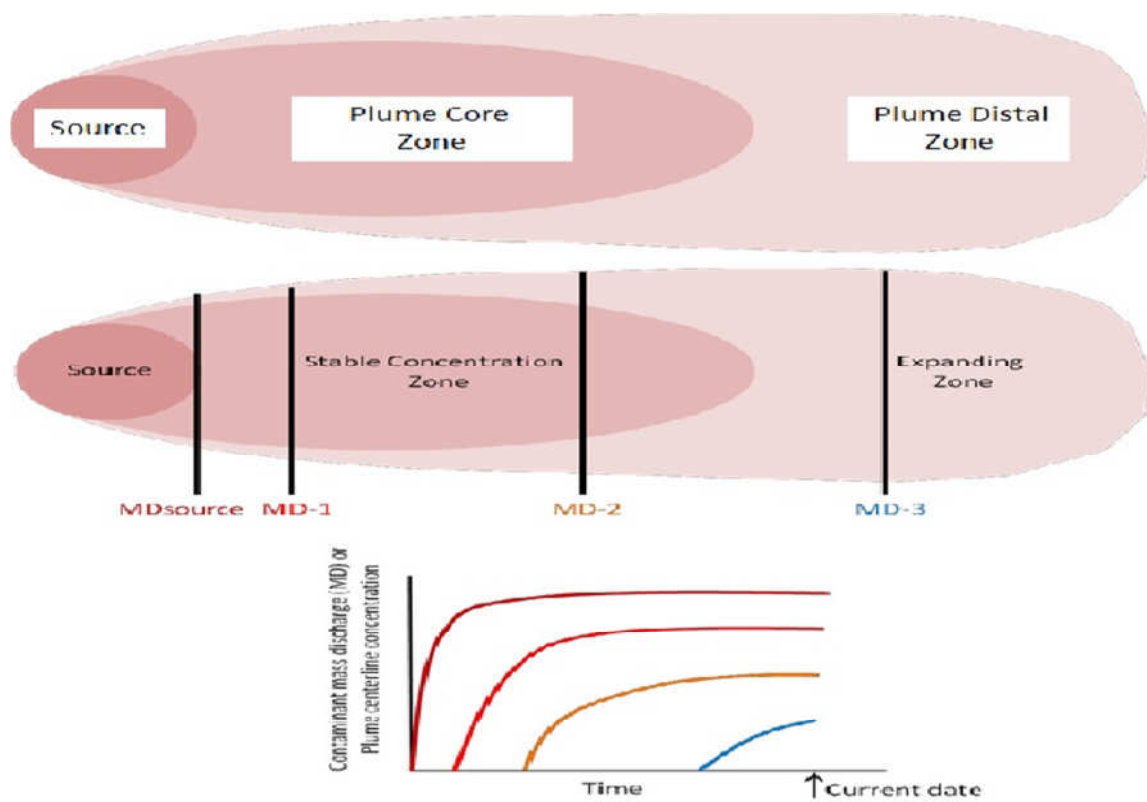


圖 37、污染團行為(plume behavior)圖

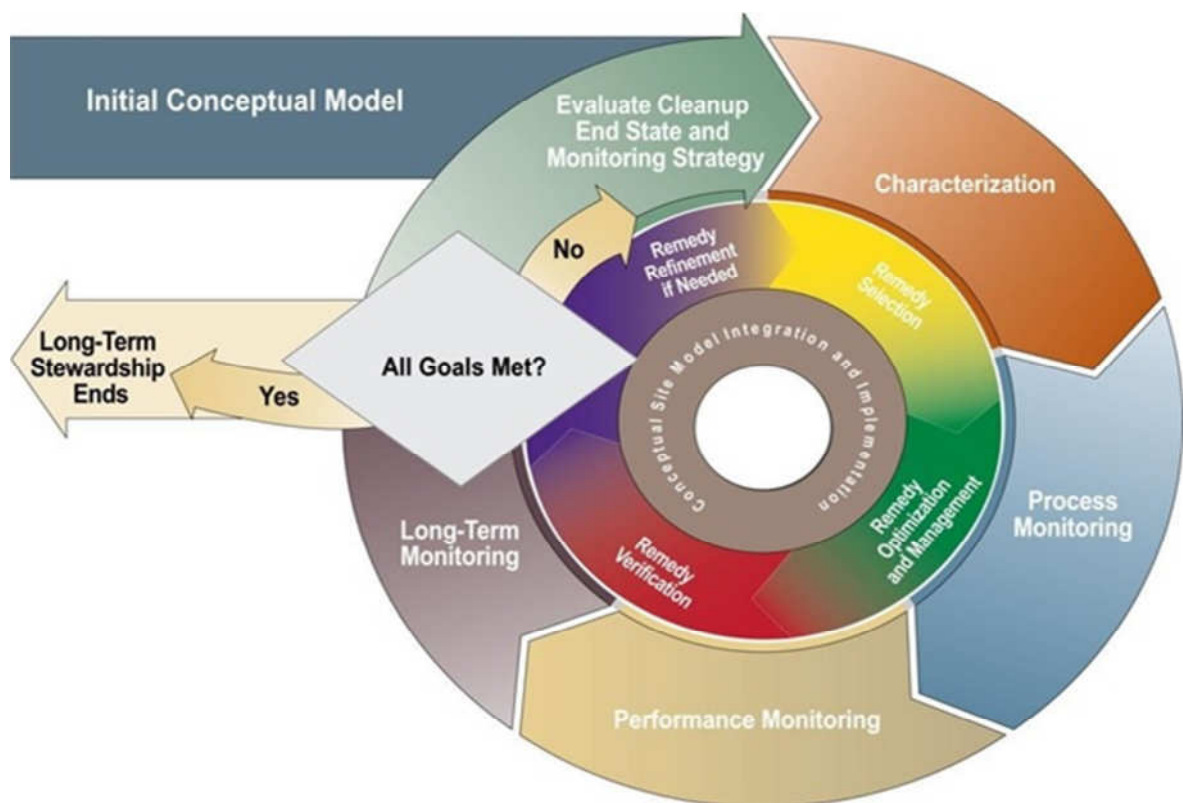


圖 38、場址概念模式(CSM)

(六) Hanford site土壤地下水污染整治策略及技術簡介

在進行整治復育前，須利用場址概念模式(CSM)來妥善規劃設計一個有效的綜合系統方法，先由掌握場址污染情形與範圍、確實調查瞭解場址水文地質條件後，依據可行性技術來進行場址整治復育相關策略，並監測整治處理後場址相關污染程度是否已改善，並藉由不斷修正 CSM 和實施補救措施，以規劃完善 CSM。由圖 39 整治復育流程圖可知有三個查核點分別為 CSM 持續改善、中程查核點、達成整治目標，整治完成後則進入環境監測等最後階段。

PNNL 在 Hanford site 場址污染調查已進行多年且資料漸趨完善，目前已將相關數據及設施資料建置於地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)，並自行開發線上環境資訊軟體-PHOENIX(網址 <http://phoenix.pnnl.gov>)如圖 40，以整合環境相關數據資料，可供同步查詢及顯示土壤、地下水、設施場址、氣象變化、觀測井及廢棄物貯槽相關即時資訊。另外 PNNL 藉由 STOMP 及 eSTOMP 程式來模擬地面下放射性核種及有機污染物的遷移過程外，尚可用於整治前的模擬，用以評估及設計相關整治方案；此模擬所需之電腦是使用環境分子科學實驗室(Environmental Molecular Sciences Laboratory, EMSL)內的超級電腦(Chinook, HP 2310-Node Linux Cluster)，該電腦排名為全世界 20 名以內。

綜上觀之，環境整治策略的訂定需要考慮處理有效性及持久性、污染毒性及體積減少程度、可行性、成本、社會大眾接受度等因素。整治技術選擇需視污染物種類、污染場址地質狀況及水文特性來決定，通常場址之透水透氣性好、陽離子與有機質交換容量低、均勻性佳，污染物水溶性高、揮發性高、容易生物生解者，場址較容易整治。另整治方式依受污染土壤或地下水是否取出處理處置，可分為離地(Ex-situ)與現地(In-situ)整治；依污染物處理方法可分為固定化或不移動化、破壞性

技術、分離濃縮及毒性降低技術；依污染物濃度與中心位置則可分為污染源區、污染團中心區、污染團邊緣區整治技術。

由於在滲流帶未飽和區(vadose zone)有大量放射性污染物，若不加以處理整治，未來極有可能會穿越滲流帶直達飽和地下水體，並逐漸擴散至哥倫比亞河，尤其是鈾及鎔-99 具有移動性及污染濃度高。另外像是碘-129、重金屬六價鉻及硝酸鹽類等也具有高度移動性，故需對其進行處理整治，避免進入生物圈中。目前 Hanford site 整治策略主要是以自然衰減、移除及降低污染物遷移性，藉以減少污染物進入地下水體中傳遞。表 2 為土壤及地下水污染常用整治技術，PNNL 主要土壤整治復育技術為透水性反應牆或滲透性反應牆(Permeable Reactive Barriers)、沈澱法、氧化還原法、生物法、表面屏障圍阻法、空氣注入氣提法等研究技術開發，再將開發研究之技術轉由能源部承包商執行相關作業。下面針對部分整治技術做一說明。

土壤氣體抽取法(Soil vapor extraction，如圖 42)，為針對現地不飽和層土壤中揮發性高污染物之整治方法。使用真空抽取，使土壤中揮發性較高之污染物氣體被抽出，進行回收或處理後再排放，達到整治的目的。操作時，常在表面上曝蓋一層不透水布，可避免污染物氣體跑至大氣中，並增加作業半徑及處理效率。有時也配合地下水抽水井，以降低水位提供不飽和層空間。本法常配合空氣注入方法(air sparging)使用，以回收深層或地下水中之污染物，但使用本法時，常須較長時間才能達到整治效果。主要去除之污染物為揮發性有機物及部分的燃料油，無法去除重金屬、重油、多氯連苯或戴奧辛，但可能可以增進生物分解效率。

抽取處理法(Pump and Treatment, P&T)，為針對飽和層地下水中溶解度大污染物之整治方法。場址條件須水力傳導係數高(>10-5cm/sec)、場址均勻、有機質含量低之砂質含水層，屬圍容技術的一種，可控制污染團之擴散。主要包括抽取井及地面處理設備兩部分，抽取井的設計視場址特性而定，而地面處理設備則視污染物特

性而定，通常地下水一旦抽出後，其處理方法與廢水處理差異不大。該方法整治期程一般很長，且往往在停止抽水後會有濃度回升(rebound)之現象，因此常有抽取一段時間後，停止一段時間後再抽水之操作。

空氣注入法(air sparging)，為一種現地整治技術。藉由在地下水中注入空氣產生氣泡，將水中污染物氣浮提出至不飽和層中，再藉由空氣抽取設備將氣體抽至地面處理。由於注入空氣之緣故，因此可以增加地下水中及不飽和層中氧氣濃度，可提昇污染物之生物降解作用，主要去除之污染物為揮發性有機物及部分的燃料油，低揮發性有機污染物較不適用。處理低滲透性地層或其他特殊地質侷限之污染團較困難，在操作不佳的情況下，氣體分布不均勻可能會造成污染團擴大。此方法通常需要數年的時間才能達到整治之效果。

現地化學氧化法(In-situ chemical oxidation)，係在不移動受污染土壤或污染物之情況下，將氧化劑(主要有過硫酸鹽、過氧化氫、臭氧、過錳酸鹽等)導入地表下，經由氧化作用使目標污染物降解礦化或轉化成較無害，或降低濃度、移動性或毒性之整治法。可減少處理時間且應用範圍廣、成本較抽取處理法低、具處理污染區但不影響地面結構物的能力，並可減少開挖與處理土壤的費用、可處理不易被生物降解之有機污染物。

生物復育法(Bioremediation)，係以生物性處理方法來整治污染土壤。土壤污染可分為有機污染和無機污染，對於有機污染的土壤復育，主要是利用微生物將污染物分解，其原理是藉由改善土壤環境條件，如添加微生物、營養鹽、電子供給者及電子接受者，以促進微生物的生長，進而增進微生物分解污染物的效率，另亦可植種經馴養或篩選適當菌種（生物製劑），以加速污染物之分解速率；對於無機污染則是利用一些能吸收重金屬植物的栽種，而將重金屬從土壤中移除，達到土壤復育的目的。微生物轉化有機物的程序大致可分為降解（Degradation）、

礦化 (Mineralization)、去毒 (Detoxification) 及活化 (Activation)，添加方法可採用直接注入系統、地下水循環系統、滲透牆處理系統、生物通氣法等技術。

由於污染物在土壤及地下水中會產生污染團行為(plume behavior)，主要有污染源區(source zone)、污染團中心區(plume core zone)、污染團邊緣區(plume Distal Zone)。Hanford Site 土壤整治將優先以控制污染源區擴散為首要目標，並在污染團邊緣區建立相關攔阻設施處理，以防止污染物擴散至哥倫比亞河。圖 41 為污染團整治技術，污染源區主要是以界面活性劑沖洗回收、蒸氣注入回收、熱回收、化學氧化法為主；污染團中心區主要是以注入空氣及氣提法、現地化學氧化還原法、生物整治法為主；污染團邊緣區主要是以現地化學氧化還原法、生物整治法及滲透性反應牆為主。

PNNL 研究人員在土壤地下水整治方面開發了許多研究技術，在移除技術方面主要有蒸汽氣提(Brusseau et al. 2013)、土壤沖洗(Truex et al. 2010)、降解處理(Dresel et al., 2008, 2011)等研究，在降低遷移性方面有表面滲透屏蔽(Zhang et al. 2015)、土壤乾燥(Truex et al. 2012, 2013)、物理安定化(Truex et al. 2011)、現地滲透性反應柵欄(Szecsody et al. 2010a,b, 2012,2014; Zhong et al. 2014)等研究技術。另外再進行整治測試時，PNNL 研究人員 Tim Johnson 藉由地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Tomography ERT)來偵測整治區域相關電阻變化，並利用超級電腦將數據模擬成三維圖面，以利研究人員了解整治時地面下所發生之相關變化，進而精進改善後續整治復育措施。以下將針對 100 區、200 區、300 區目前整治技術做一簡單介紹。

表 3、土壤及地下水污染常用整治技術

現地/離地	方法	技術名稱	原理
現地	化學	固化、穩定化	固化劑直接注入現地土壤，使污染物被緊密包圍，或直接加入穩定劑與土壤中污染物發生化學作用而降低其移動性。
	物理化學	淋洗	將水、介面活性劑、螯合劑注入土壤，將污染物淋至地下水中。
	熱處理	現址玻璃化	在土壤中插入電極並通入高壓電流產生高溫使土壤融化(600~2000)°C，使金屬污染物被固定(土壤或玻璃狀物質)，而有機污染物則被無氧熱分解。
	物理	地表屏障	污染土壤表面建造一工程障壁屏障，用以阻絕水分滲入，減少污染物的遷移。
	物理	圍容法	將低透水/低透氣性材料置於地下，使污染物被包圍在污染區內，達到阻止污染擴散的目的。
	物理	空氣注入氣提	注入空氣至土壤地下水，將污染物氣提出到不飽和層中，再藉由空氣抽取設備(SVE)將氣體抽至地面處理。
	物理化學	透水性反應牆	場址地下建造一個永久性、半永久性或可替代反應牆單元或障壁，令受污染地下水，流經此處理單元，會將目標污染物處理，處理過地下水再沿原水流方向

			行進。
	化學	沉澱法	添加磷酸鹽類零價鐵、亞二硫磺酸鹽、石灰或石灰石沈澱污染物。
	化學	氧化還原	將氧化還原劑導入地表下，使目標污染物降解礦化或轉化成較無害之物質。
	電化學	電動力法	在土壤中插入電極通電，使帶正電的污染物往陰極移動，帶負電的污染物往陽極移動而分離污染物。最後再利用沉澱法、抽水/抽氣法或離子交換法收集移除集中於電極附近的污染物。
	生物	植物復育	利用植物吸收、固定及轉化分解土壤中污染物，此法主要針對植物根域範圍的淺層土壤，污染物濃度太高可能會對植物造成毒害。
離地	搬移	開挖掩埋	挖出污染土壤送至掩埋場，再回填乾淨土壤，此種技術簡單直接且已商業化。
	熱處理	熱脫附	將附著於固體物質之重金屬汞或有機污染物揮發，脫附後的汞或有機物需要利用其他系統再處理。
	物理化學	固化、穩定化	如現地固化穩定化原理。
	物理化學	酸洗法	污染土壤與萃取液混合攪拌使污染溶解，再以固液分離將兩者分開，受污染的萃取劑經處理後在循環使用。

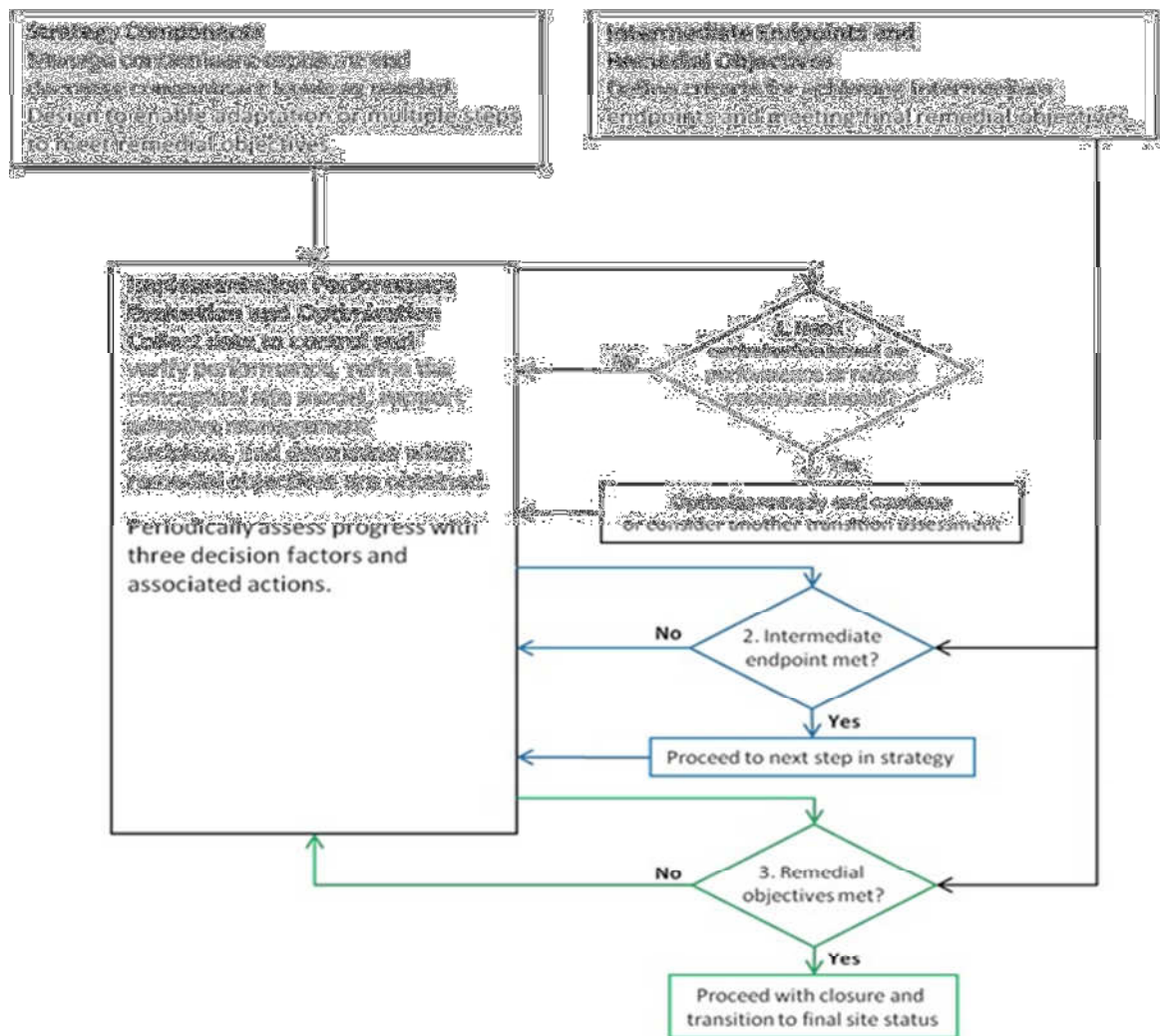


圖 39、整治復育流程圖

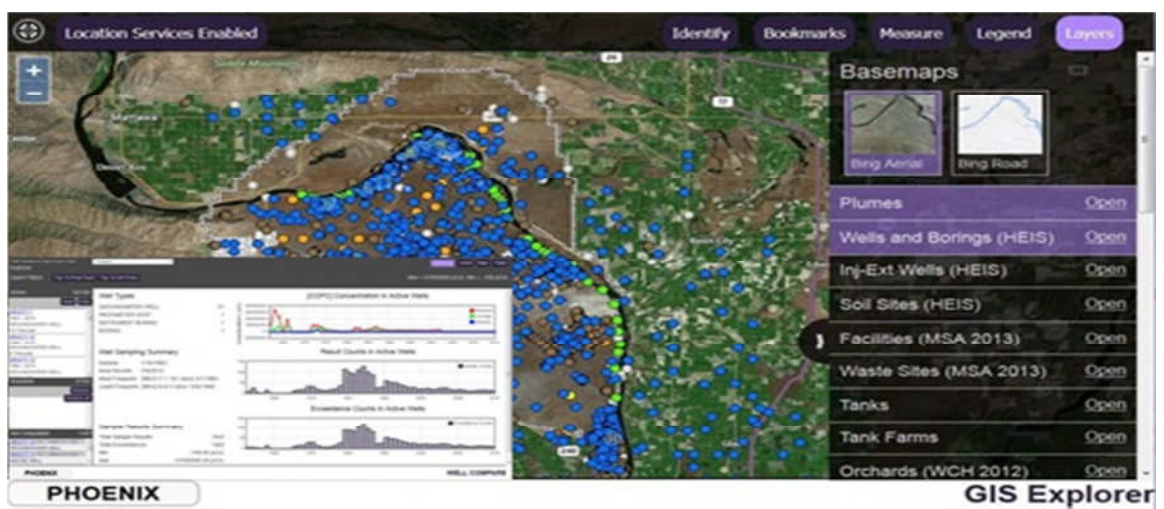


圖 40、線上環境資訊軟體-PHOENIX

污染源區 (source zone)	污染團中心區 (plume core zone)	污染團邊緣區 (plume distal zone)
油液回收 界面活性劑或共溶劑沖洗 回收 蒸氣注入回收 熱加強回收 化學氧化法 抽取及處理法	空氣注入 現地化學氧化法 現地化學還原法 土壤氣體抽取法 工程生物整治法 抽取及處理法	現地化學氧化法 現地化學還原法 監測式生物整治法 工程生物整治法 滲透性反應牆 抽取及處理法

圖 41、污染團整治技術

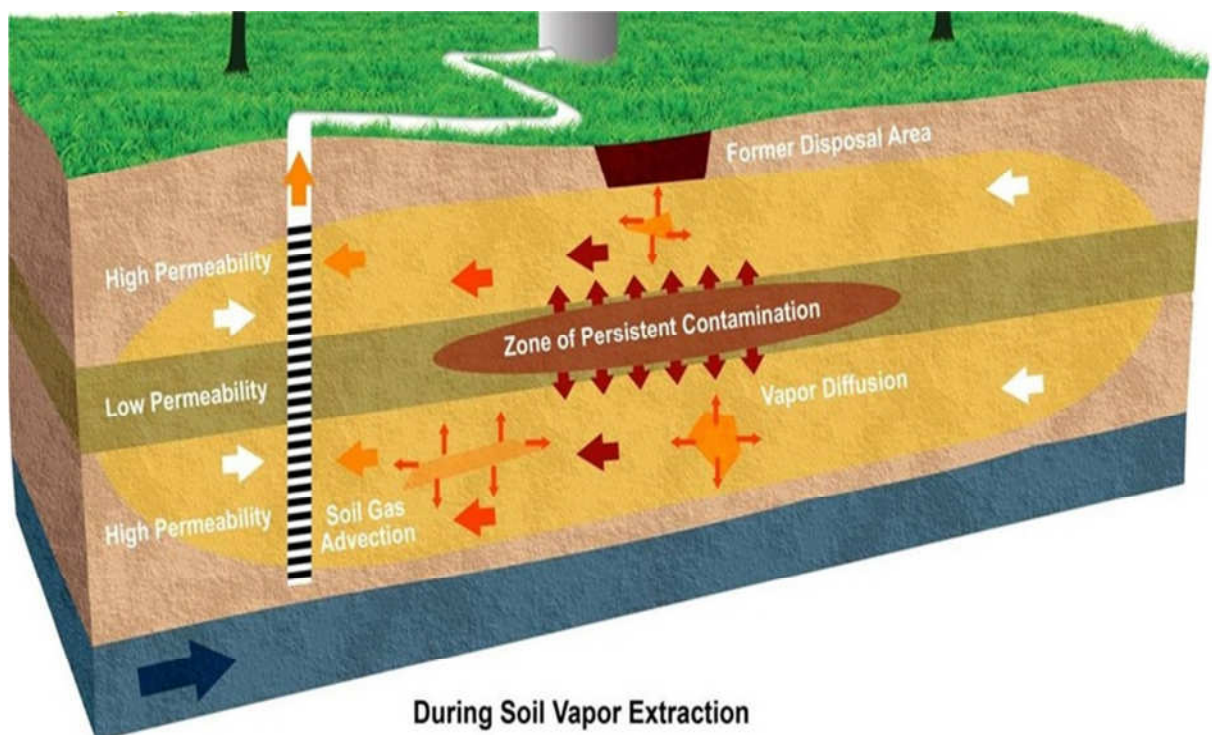


圖 42、土壤氣體抽取法式意圖

(七)100區環境整治復育簡介

100area 先前主要是為 9 座核反應器，其中 6 座核反應器已完成現地安全貯存，1 座進行中(K East Reactor)，1 座(K West Reactor)待進行處理預計 2019 年完成現地安全貯存，B Reactor 則保留為歷史重要遺跡之博物館。100 區主要污染物為銻-90 放射性核種、重金屬六價鉻，100-F 區尚有硝酸鹽類及三氯乙烯等污染物，因鄰近哥倫比亞河，為避免放射性核種溶出至地下水後流至河水中，故以優先整治該區域，銻-90 為主要計劃目標。由圖 33 之 100 及 300 區地下水污染分布圖可知，銻-90 主要以 100-N 區域及 100-BC 區域為主，PNNL 實驗室擇定 100-N 區域來進行整治實驗，下面將針對該區實驗做一簡介。

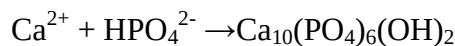
100-N reactor 於 1958 至 1963 年建造完成，於 1964 至 1987 年間運轉操作(當初運轉主要目的為提供民用電力和核武器鈾的生產製造)，1991 年後開始進行清理計畫。此處因地下土壤及地下水有銻-90 污染，於 1995 年至 2005 年間係以 pump and treat 每分鐘 244 公升進行地下水處理，期能將銻-90 捕抓並避免進入河水中。但處理後效果並不理想(如圖 43)，主要原因是因為土壤對於銻-90 有非常好的吸附力，會緩慢釋出至地下水中，無法長期經由 pump and treat 有效處理。故 PNNL 另設計利用透水性反應牆或滲透性反應牆(Permeable Reactive Barriers)來使銻-90 沉澱，由於銻-90 半衰期為 29.1 年，在注入反應物捕抓住銻-90 後，藉由自然衰減及降低遷移性，以減少污染物進入地下水體中傳遞。

所謂透水性反應牆是指於地下水污染團下游設置一永久性、半永久性或可替代之不透水障壁，藉由此不透水障壁將污染團引導至位於其內之滲透性、半滲透性或可置換的柵欄，在此處理柵欄中，會進行目標污染物之處理，常見的反應牆可分成吸附/吸收、沉澱及降解性。處理過後之地下水流出柵欄後，再沿著其自然水流方向行進，圖 44 為透水性反應牆示意圖，針對放射性元素(鈾、鐳、銻、銻、鎢)，可

利用氫氧基磷灰石(hydroxyapatite)、零價鐵、亞二硫磺酸鹽、石灰或石灰石等反應物質來形成透水性反應牆，進而與其產生沉澱。

圖 45 為 100-N 區域地下水表面銍-90 污染團分布等值圖，主要分佈是由壕溝為中心向外擴散，靠近河邊地下水已超出標準值(8 pCi/L)，另外再由圖 46 之 100-N 地面下深度與銍-90 活度圖可知：銍-90 主要存在於地面下 2.4 公尺至 10.6 公尺間，越靠近壕溝活度也越高。故為了避免銍-90 遷移擴散至河水中，PNNL 在河邊設計了透水性反應牆，其實驗區域如圖 47 之 100-N 區域整治實驗位置圖，總長約 92 公尺，注入反應物形成反應牆如圖 48。

前述方法為先配製反應溶液，檸檬酸鈣複合物及磷酸氫二鈉(Na_2HPO_4)，並維持 pH 7.7(可穩定且 36 小時內不會產生沉澱物)，之後注入此反應溶液，待檸檬酸分解，鈣離子與磷酸氫根離子反應後，產生主要生成物磷灰石(apatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)，反應式如下：



此沉澱物會維持非結晶形態約 1 週，在 3-4 週後變成結晶態。此反應牆或柵欄可藉由磷灰石(apatite)內之鈣離子與放射性核種銍-90 置換，因銍-apatite 熱動力學較鈣-apatite 穩定，且銍-apatite 的 K_{SP} 較高，進而將銍-90 沉澱固定在磷灰石內。反應式如右：

$$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}_{(10-x)}\text{Sr}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$$

圖 49 為 100-N 區域銍-90 污染物從地表擴散至地下水後，再由透水性反應牆攔阻進行沉澱處理示意圖，當銍-90 污染物遷移至地下水表面時，會隨者水流向河邊移動，且主要是在地面下 2.4 公尺至 10.6 公尺間。故 PNNL 設計在此區間產生磷灰石類來使銍-90 沉澱，其主要反應生成機制如圖 50 所示，銍-90 會在數分鐘內吸附在磷灰石表面，形成 5-30 μm 多孔性聚集顆粒，數月內後會與磷灰石結合變成 20nm

鋇-apatite 結晶物，經過適當半衰期時間(300 年)後，會衰變成 Zr^{90} 以完成相關環境整治復育措施。

圖 51 為 100-N 鋇-90 經 PRB 整治後結果，在這 92 公尺長的多個注入觀測井，整治前後鋇-90 活度可以從 1000~100000 pCi/L 降至 10~1000 pCi/L，有效避免高活度鋇-90 直接進入哥倫比亞河中。故可藉由檸檬酸鈣及磷酸氫二鈉溶液注入地下水表面來形成磷灰石，可減少固體磷灰石難以置入地下的困難，同時可依據鋇-90 活度及流通量來控制所需磷灰石透水性反應牆的量，就至目前為止，該整治方法仍能維持良好的攔阻效果。後續將依據此 92 公尺的透水性反應牆，陸續於上下游擴充至 700 公尺長的河邊整治長度。

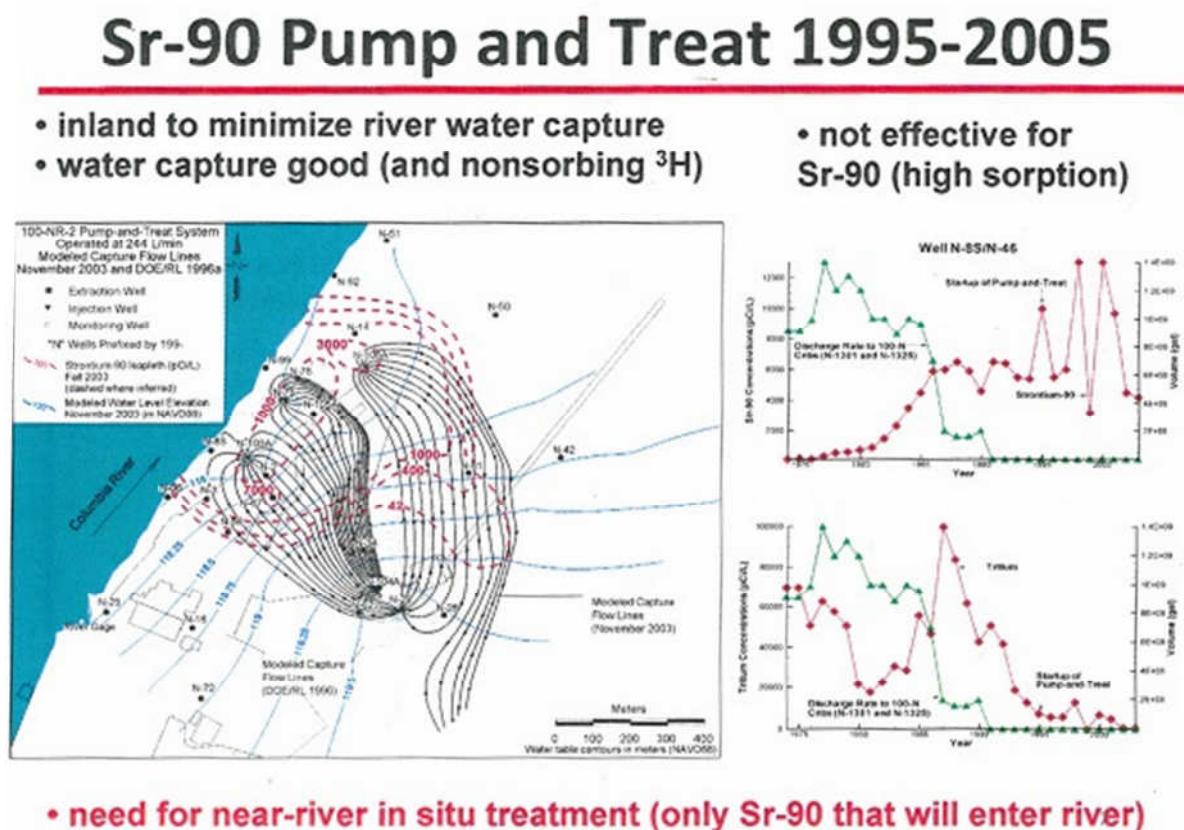


圖 43、100-N pump and treat 結果

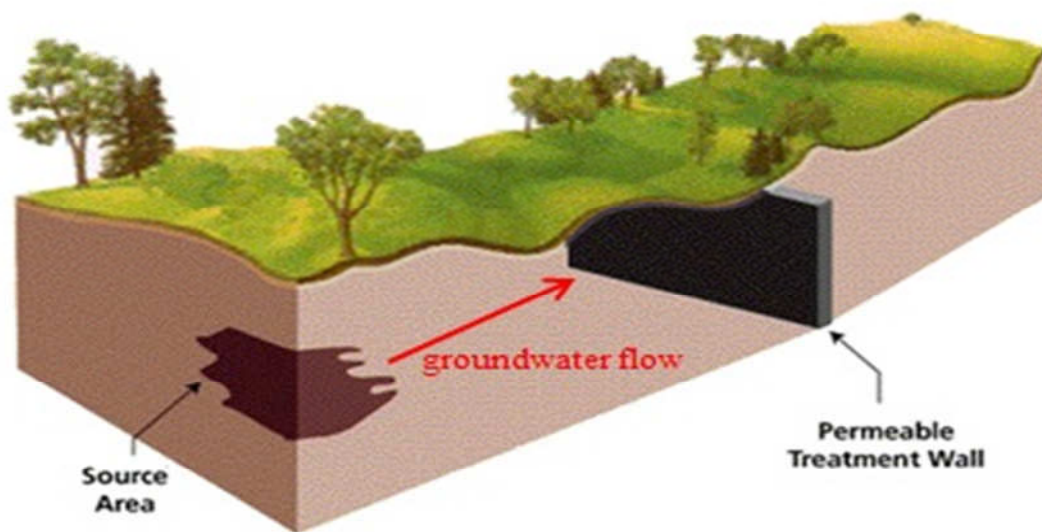


圖 44、透水性反應牆示意圖

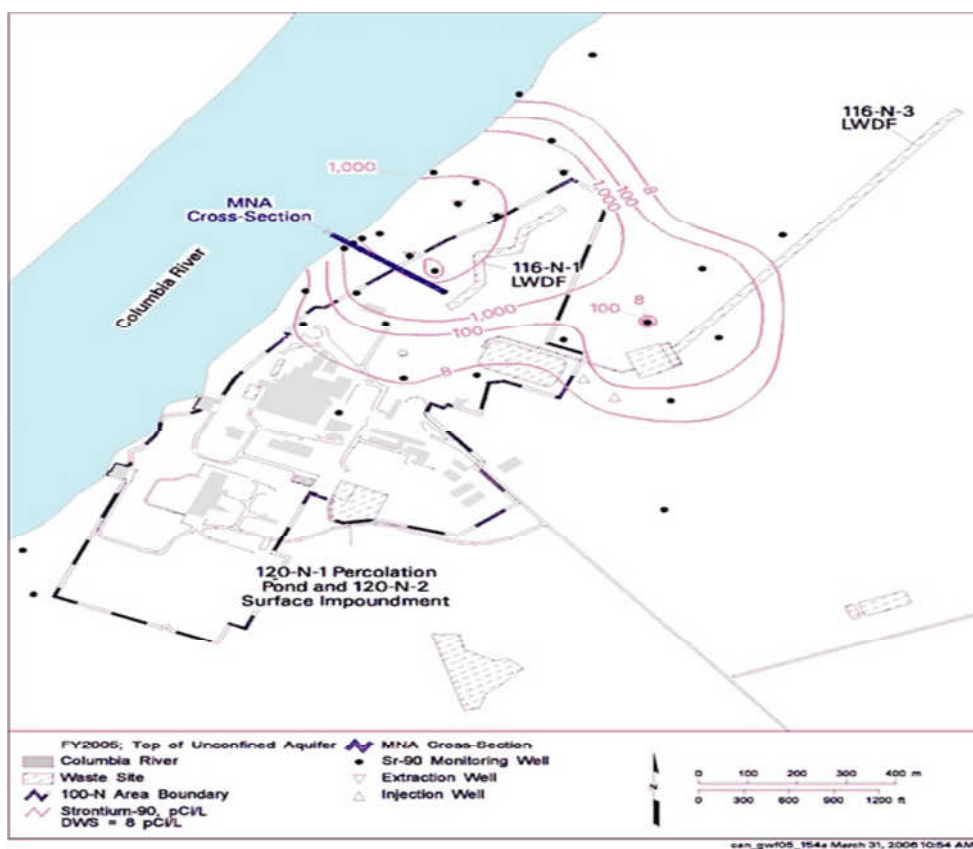


圖 45、100-N 地下水表面銻-90 污染團分布等值圖

^{90}Sr in 100N River Shoreline

- Sr-90 in aquifer tubes, clams, and wells show high conc. location
- Sr-90 in zone of water table fluctuation and shallow aquifer (8 - 35' depth)
- Sr-90 profile across two formations:
Hanford Fm. (shallow, high flow)
Ringold Fm. (deep, 3x low flow)
which requires differing treatment

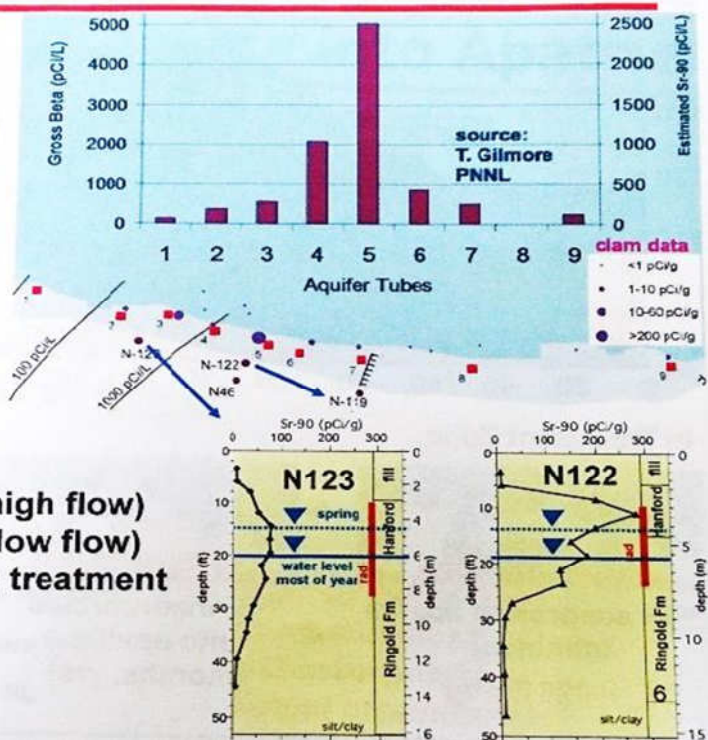


圖 46、100-N 地面下深度與銻-90 活度圖



圖 47、100-N 區域整治實驗圖

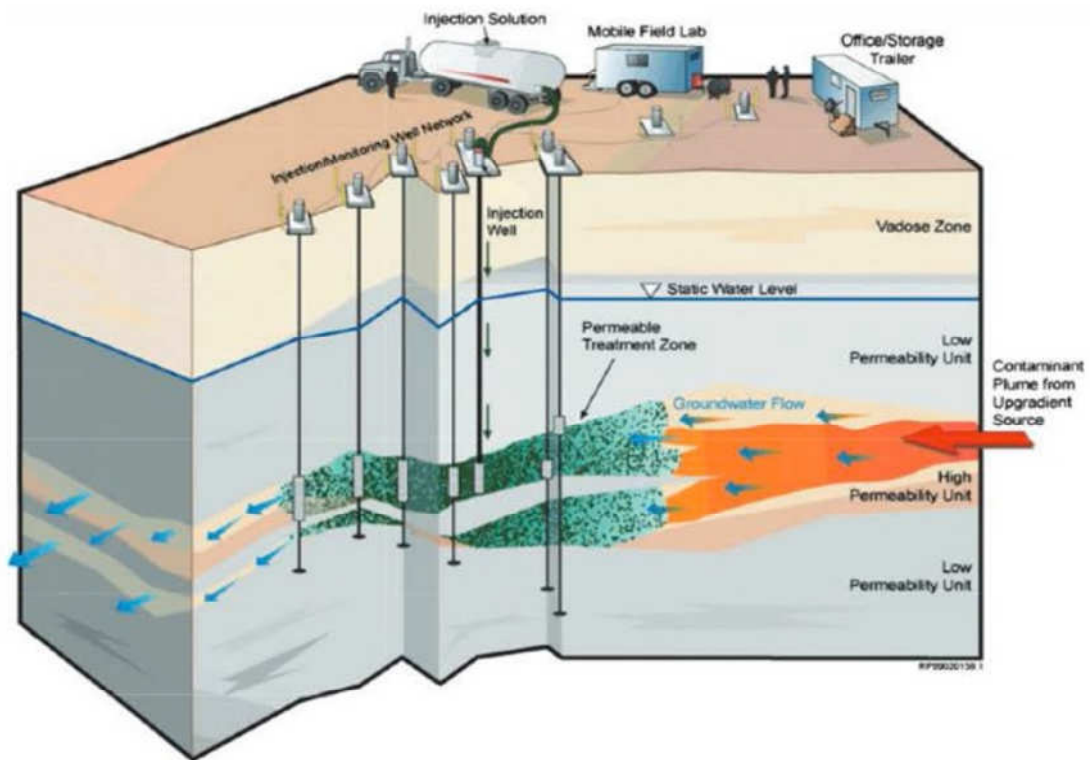


圖 48、100-N 透水性反應牆注入示意圖

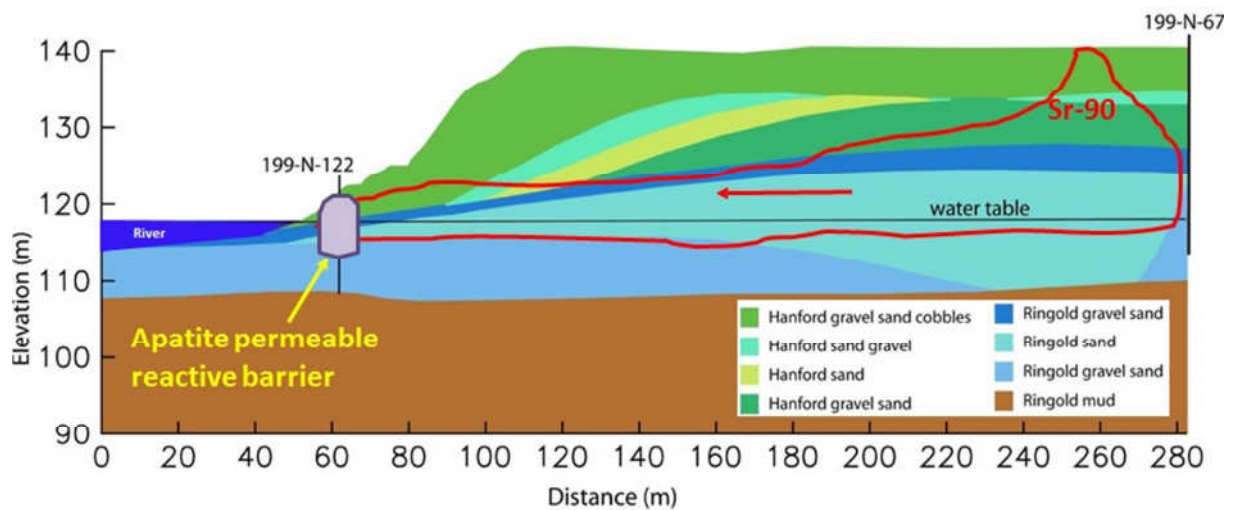
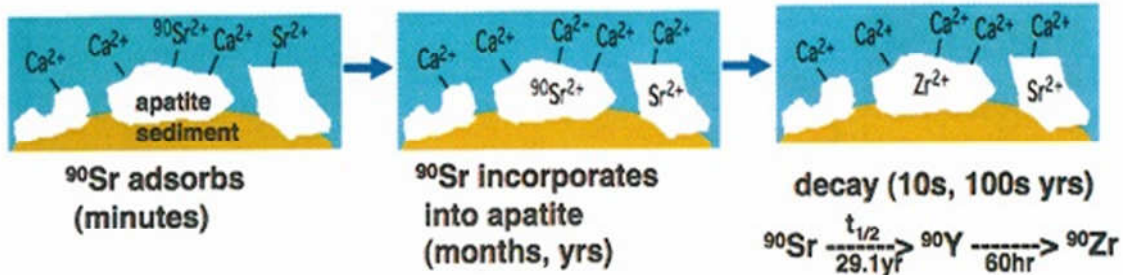
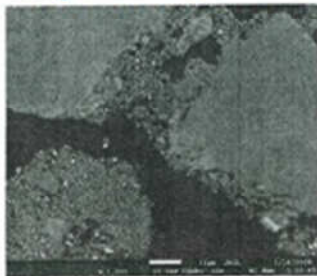


圖 49、100-N 銻-90 污染物之透水性反應牆處理示意圖

- Sr-90 adsorbs (hrs) to apatite; over months/years incorporates into apatite crystal structure, then over 100s of years decays



5-30 um apatite: porous conglomerate particles



close up: 20 nm apatite rods



12% Sr substitution (by 1.3 yr)

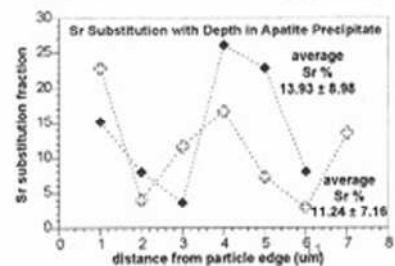
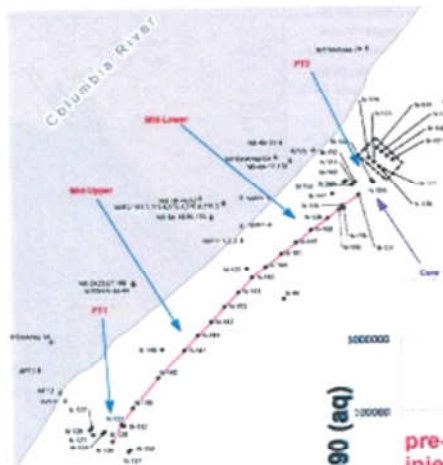


圖 50、磷灰石與銨-90 反應生成機制



Field Scale Performance

- 15 wells installed along a 300 ft section of high Sr-90 conc.
- current barrier expansion: additional 600 ft
- 10 years after injections: all wells 85-98% lower aqueous Sr-90

High Sr-90 Concentration Portion of PRB

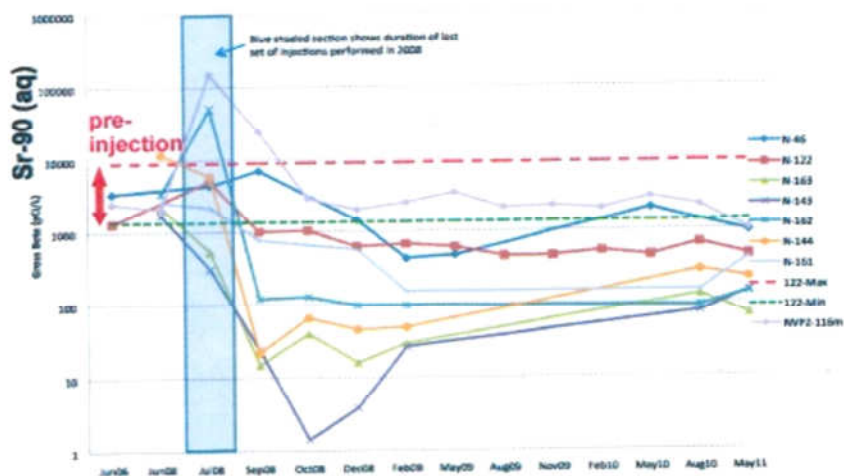


圖 51、100-N 銨-90 經 PRB 整治後結果

(八)200區環境整治復育簡介

200 區因為有化學分離程序、廢棄物處理處置程序及 177 個放射性廢棄物貯槽區等重大設施，故其所造成的污染也最為複雜，主要污染物包含了氚、鎔-99、碘-129、鈾等放射性核種、四氯化碳及硝酸鹽類等，大部分仍停留在非飽和帶土壤區域(deep vadose zone)，但仍有少部分擴散滲流至地下水。由於污染物位在深層土壤，不適用土壤移除回填方法，PNNL 已研究許多現地整治復育技術，如土壤氣體抽取法、土壤沖洗、降解處理、土壤乾燥、物理安定化、氣體注入法及地表屏障(surface barrier)等研究技術用於 200 區非飽和帶土壤區域之整治，針對不同污染物，採用效果較佳的技術來處理，以下將針對土壤氣體抽取法、氣體注入法及地表屏障等作一簡單介紹。

土壤氣體抽取法早在 1980 年代，即已應用於非飽和帶土壤區域之有機揮發污染物的移除，因其設備及設置較容易、對場址擾動小且成本較低。200 區利用此法來抽取四氯化碳等有機物，藉以降低其流入地下水的濃度並減少其污染物。其處理示意圖如圖 42 所示，圖 52 為 Hanford Site Z9 壕溝以土壤氣體抽取法整治結果圖，開始抽取的四年內，可以發現有大量的四氯化碳被抽取出來，每天大約有 10-580 公斤的污染物被抽出處理，在這期間污染物極容易被抽出，這四年期間抽取量大幅增加後，之後每年所抽出的污染物就較為平緩，此流程符合土壤氣體抽取法的初期、熟成、末期等階段如圖 53 所示。

土壤乾燥法亦利用於 Hanford Site 土壤整治，主要是蒸發乾燥土壤中的水分濕度，藉此減少污染物於土壤中的移動遷徙能力，PNNL 利用此法進行實場測試如圖 54 所示，將液態氮加熱乾燥後將其注入測試井，並在其周圍設立 ERT 電極及中子水分儀偵測相關數據已建立模擬地下體積含水量圖。測試結果如圖 55 所示，隨著乾燥時間增加，可發現該區域的體積含水量(volumetric moisture content)會隨之減少，

此技術雖可明顯減少土壤含水量，惟其仍須搭配其他處理技術才得以達到更好的整治效果。

除了土壤乾燥法減少土壤水分之外，亦可用建立地表屏障(surface barrier)來防止雨水滲入，減少污染物在土壤中的移動。目前該屏障主要由 Fred Zhang 等人負責維護檢測相關數據，主要是在廢液貯坑 216-B-57 上面建置示範型地表屏障(prototype barrier)，以確保降雨不會造成廢液貯坑擴散污染土壤及地下水，並可用於隔離植物、動物或人類潛在污染物，其設計年限為 1000 年，後續可作為相關核設施除役後，建置地表屏障的示範原型。該屏障於 1992 年完成設計工作，並於 1994 年完成建置後開始進行相關監測，鳥瞰圖如圖 56 所示，剖面圖如圖 57 所示，東側是玄武岩小碎石組成 2:1 斜坡度，西側是天然坑礫石組成 10:1 斜坡度，中間主體屏障是由壤土、小石子、玄武岩小碎石、柏油瀝青及砂石土壤等層層堆疊而成，主體屏障及玄武岩斜坡詳細結構如圖 58 所示。該區降雨量主要是集中在冬天，1994 年 11 月至 1997 年 10 月於屏障北區進行模擬 3 倍降雨量，圖 59 為降雨時屏障內水含量變化圖，雨水經由屏障導引無法滲入廢液貯坑，且可由排水地窖排出，在夏天時由屏障上植物可將土壤中水分消耗，此表面屏障可以有效確保污染物不會隨著水分遷移至地下水中。

由於 200 區非飽和帶土壤區域(deep vadose zone)深度有 100 公尺，因地質水文、地質化學成份複雜、含水率不高及深度過深，造成其注入液體溶液處理整治效果不彰，因而研發了注入反應性氣體、水霧或泡沫傳送技術來進行整治。圖 60 為鈾元素在不同 pH 下地質化學反應，當 pH 為 2-9 之間時，除了 pH 在 5 附近會產生磷酸鹽及碳酸鹽類沉澱外，大部分鈾元素極易在土壤中移動。當 pH 達 13 時，會產生矽酸鹽沉澱物將鈾固定在土壤中，降低其移動性。本次參訪 PNNL 主要是介紹注入氨氣來固定鈾元素，氨氣注入已在該區完成現場測試(Szecsody 等 2010，2012)，圖 61

描繪了氨氣固定鈾三個主要步驟，由於氨的低亨利定律常數，當含有氨氣體注入到不飽和多孔介質中的土壤孔隙水，如 5%體積的氨氣產生約 3.2M 氨孔隙水濃度。研究顯示原孔隙水 pH 值為 8，經過注入氨氣會上升到大約 pH 11.5，如圖中步驟 1(Szecsody 等 2010A, B, 2012)，之後由於在鹼性 pH 值會產生離子交換和礦物溶解等反應(圖中步驟 2)。此時有高的總溶解固體，而當 pH 值返回中性或氨氣消耗殆盡時，沉澱物開始形成，可將鈾沉澱成鈉矽鉀鈾礦(sodium boltwoodite)，或者附著吸附在石英、蛇紋石、方解石、硬水鋁石等沉澱物表面，如圖中步驟 3。藉由溶解沉澱物後和再沉澱過程可以使鈾沉澱或附著在其他沉澱物上，以減少鈾在土壤中移動性。

圖 62 為氨氣注入土壤中概念示意圖，將 5%體積的氨氣注入後，使土壤中 pH 至 11.5 藉以產生溶解及沉澱反應將鈾固定住，圖 63 為比較污染土壤注入氨氣後之結果圖，圖中可知若經氨氣處理，其會溶出的鈾累積量會比未處理過的土壤要低。另外土壤再經過連續萃取程序後可知，氨氣處理的土壤較難移動的鈾佔了將近八成(綠色不溶出，黃色釋出緩慢)，故氨氣處理可有效將鈾固定在土壤中，避免其釋出至地下水中。使用此技術需使 pH 回到中性後才得以產生矽酸鹽類或相關沉澱物。PNNL 人員有研究注入氨氣後再注入空氣或二氧化碳 6 週至 3 年，並做溶出累積量如圖 64，可知再注入二氧化碳會提高鈾的溶出，不利固定鈾，提高氨氣注入量可以降低鈾的釋出及溶出擴散。經由氨氣注入整治相關研究，由於氨氣搭配其他氣體如 H₂S 亦可減少銻-99 核種的遷移及擴散(結果如圖 65)，後續會再 200 區實際注入氨氣來進行相關環境復育整治工作。

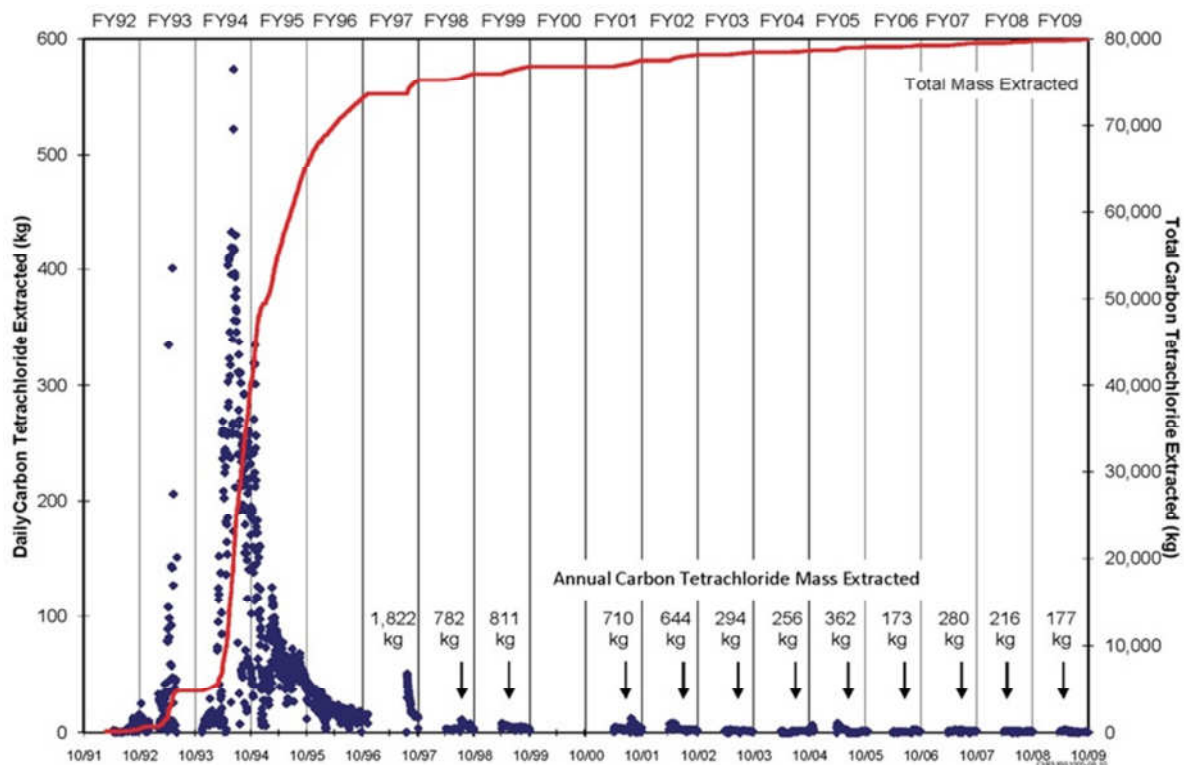


圖 52、氣體抽取法整治 Hanford Site Z9 壕溝結果圖

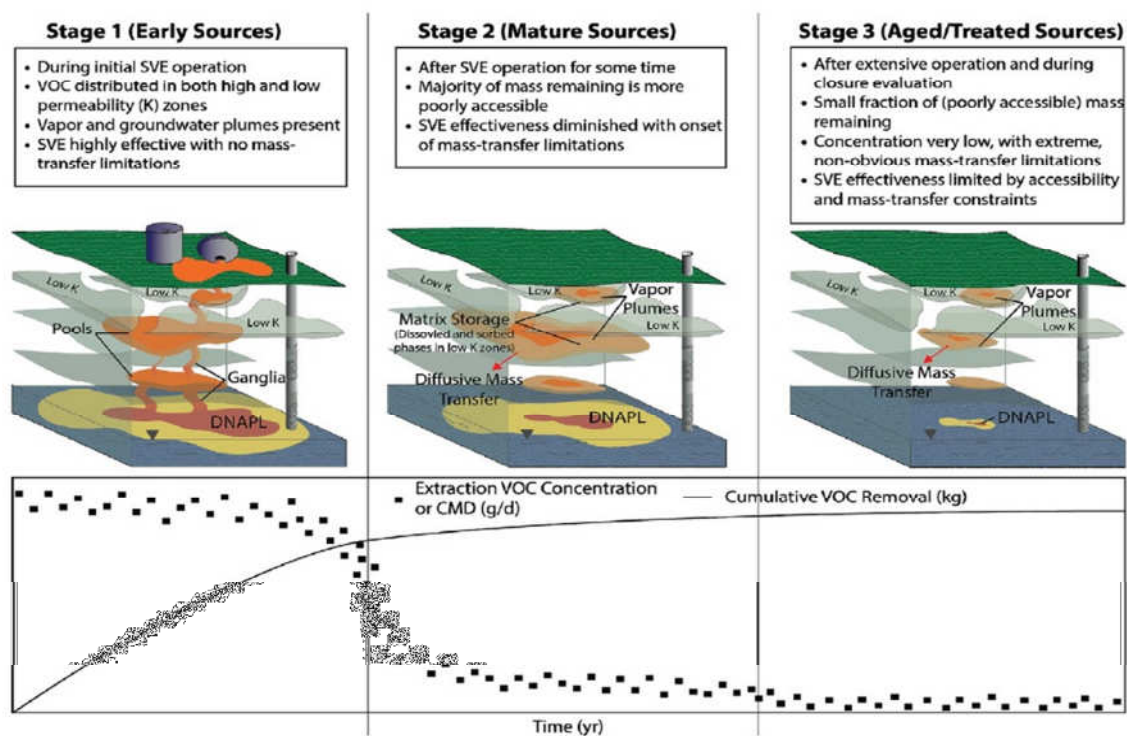


圖 53、土壤氣體抽取法 3 階段

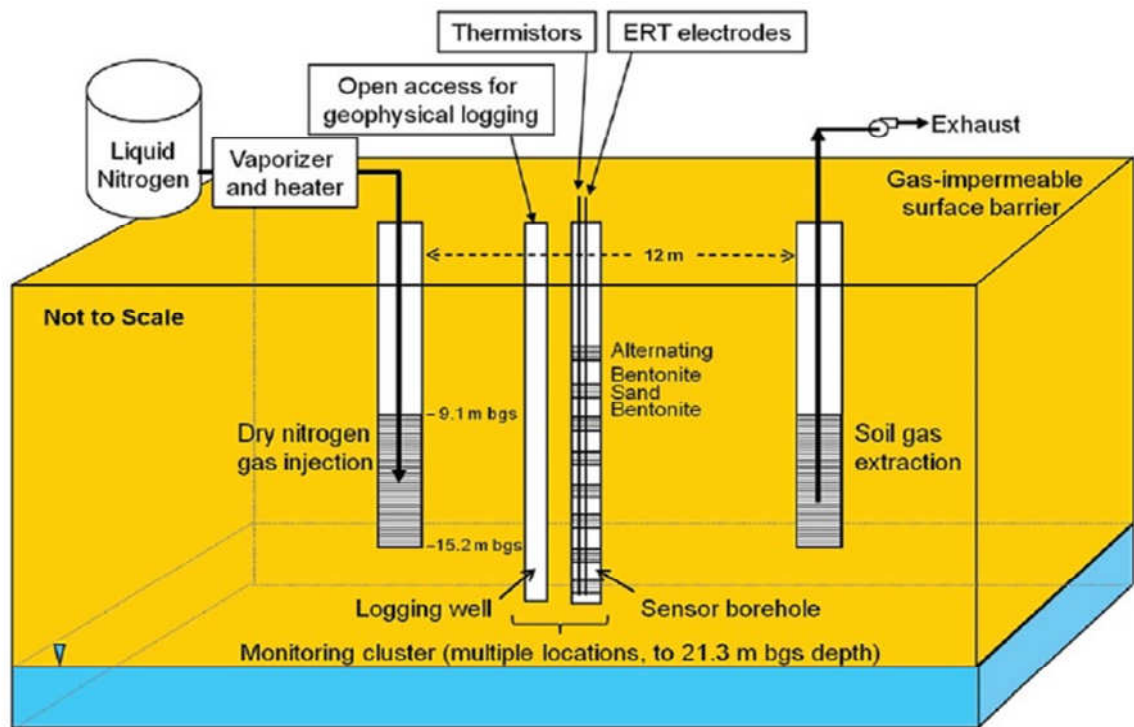


圖 54、土壤乾燥法實場測試示意圖

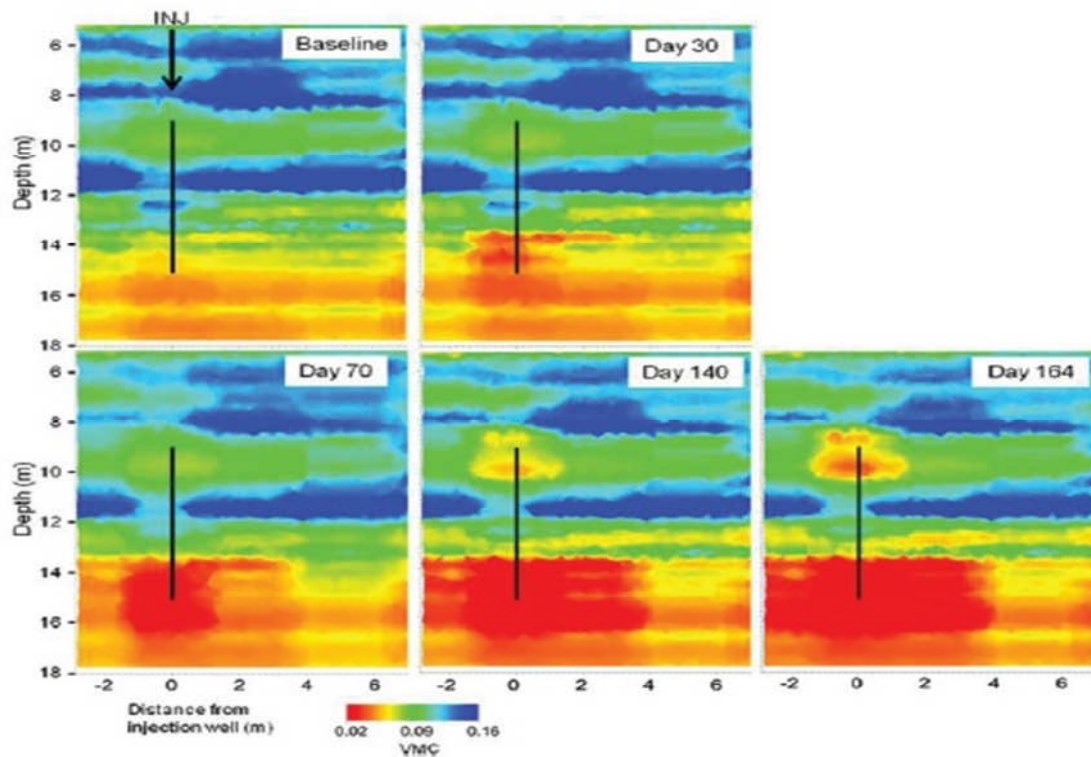


圖 55、土壤乾燥法之體積含水量圖

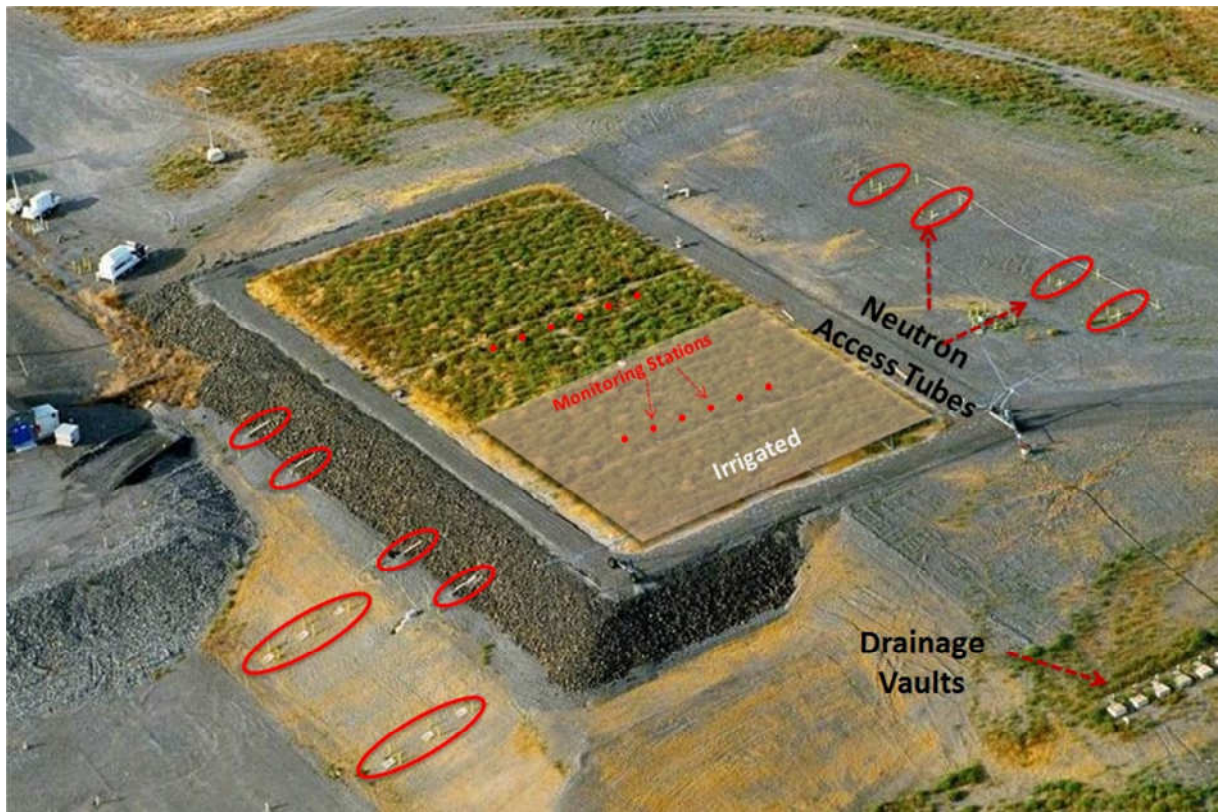


圖 56、示範型地表屏障鳥瞰圖

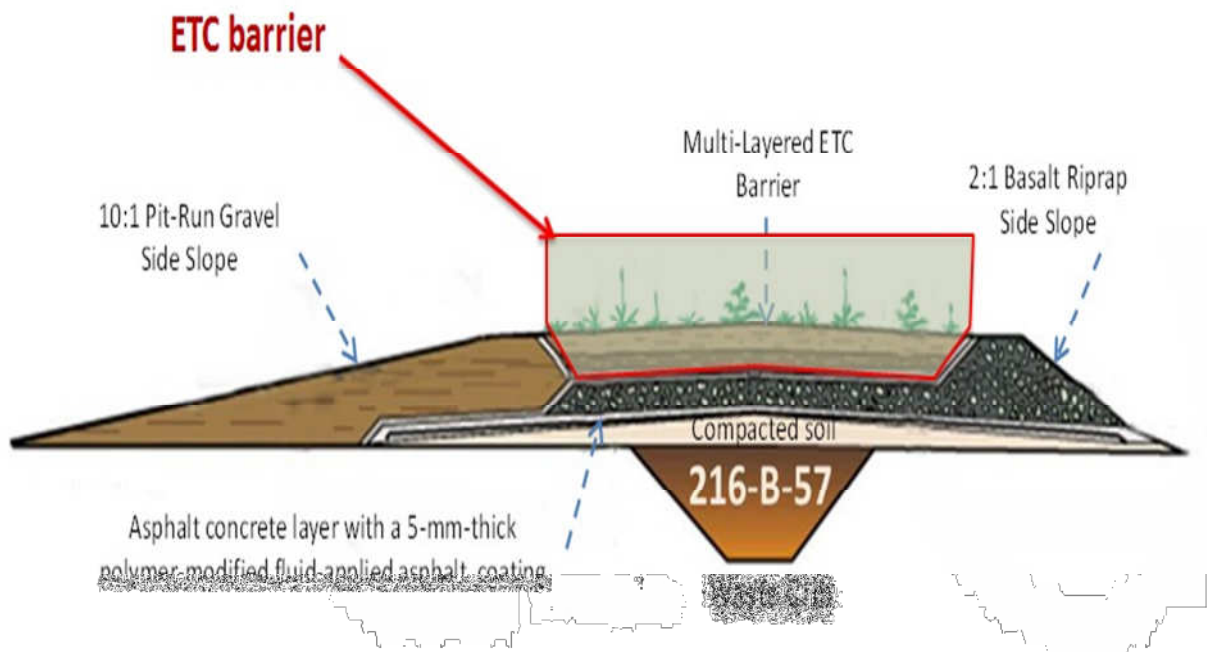


圖 57、示範型地表屏障剖面圖

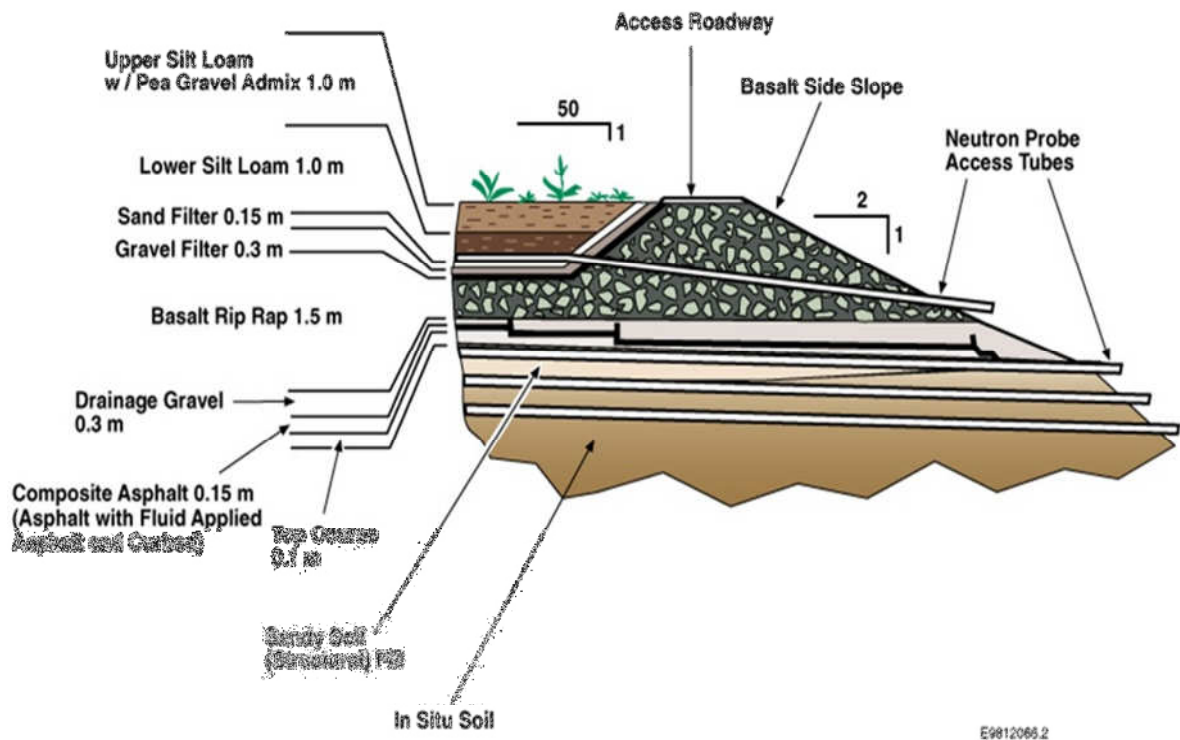


圖 58、主體屏障及玄武岩斜坡詳細結構圖

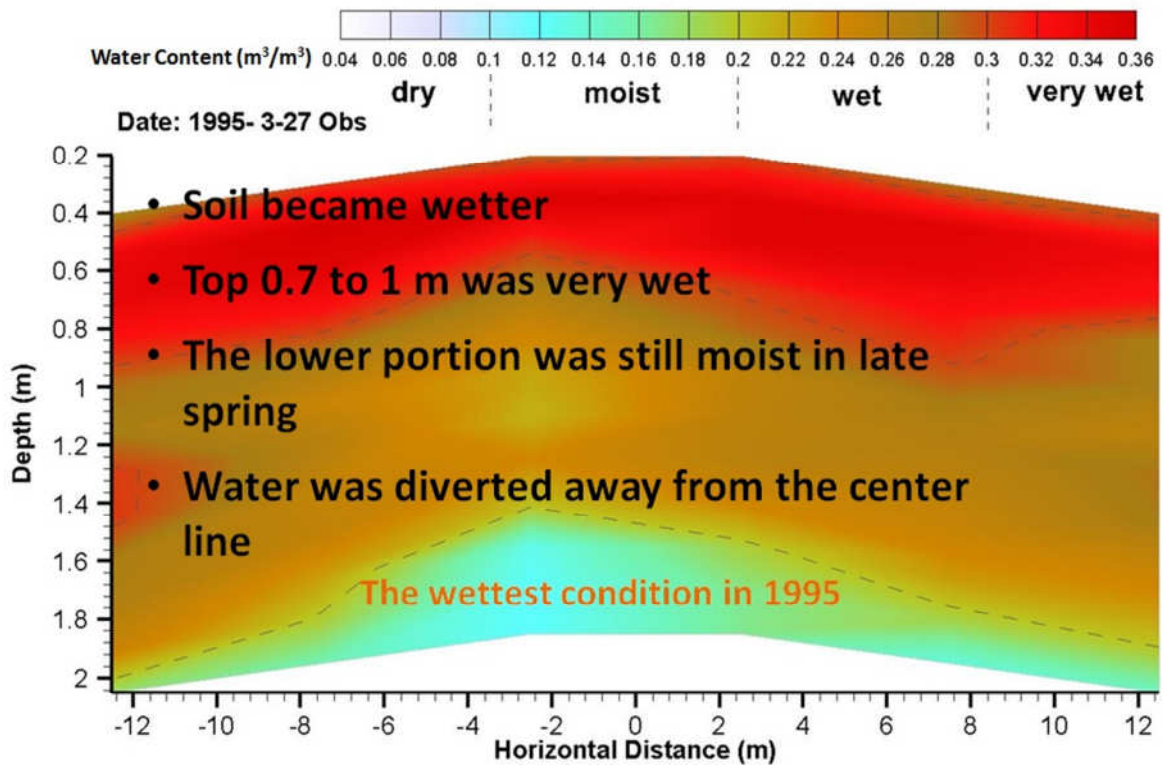


圖 59、降雨時屏障內水含量變化圖

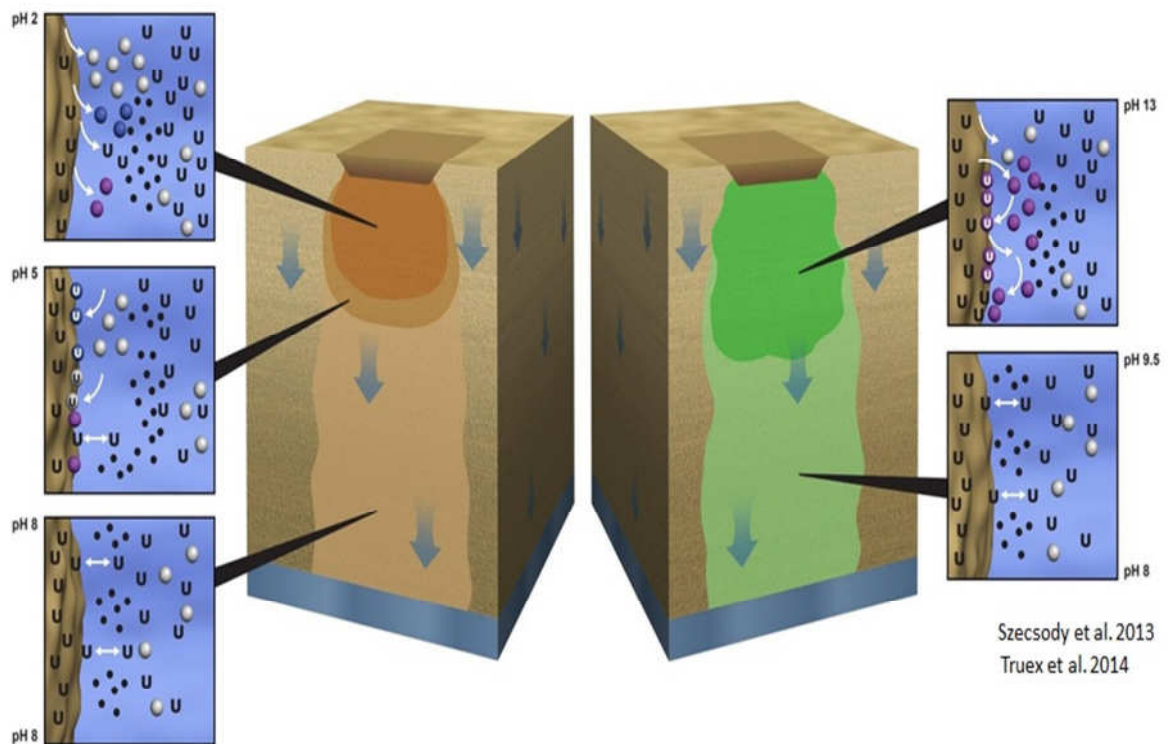


圖 60、鈾元素在不同 pH 下地質化學反應

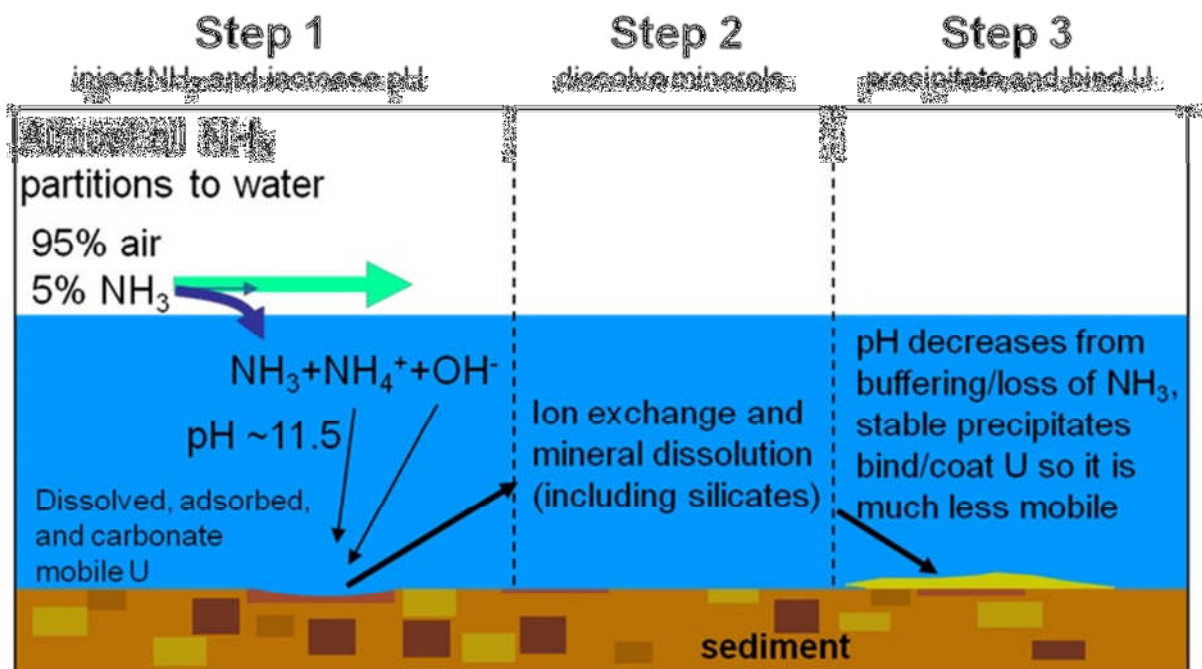


圖 61、氨氣固定鈾流程

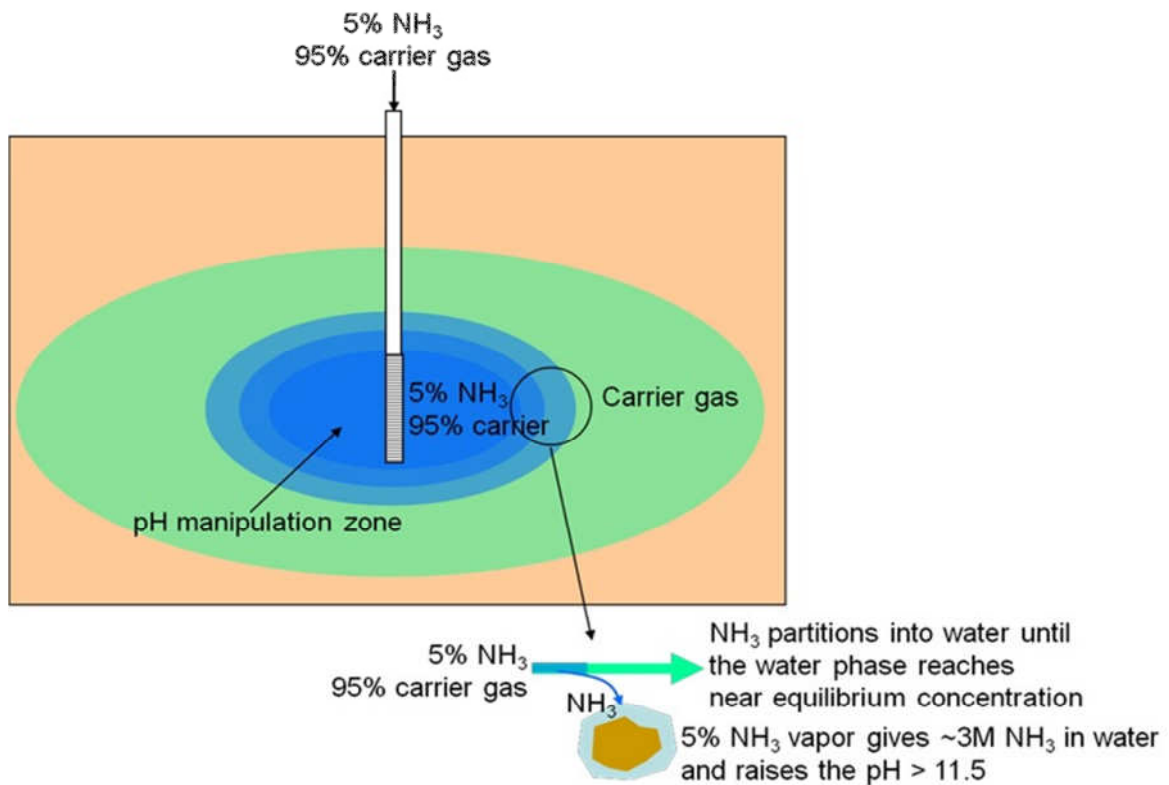


圖 62、氨氣注入土壤中概念示意圖

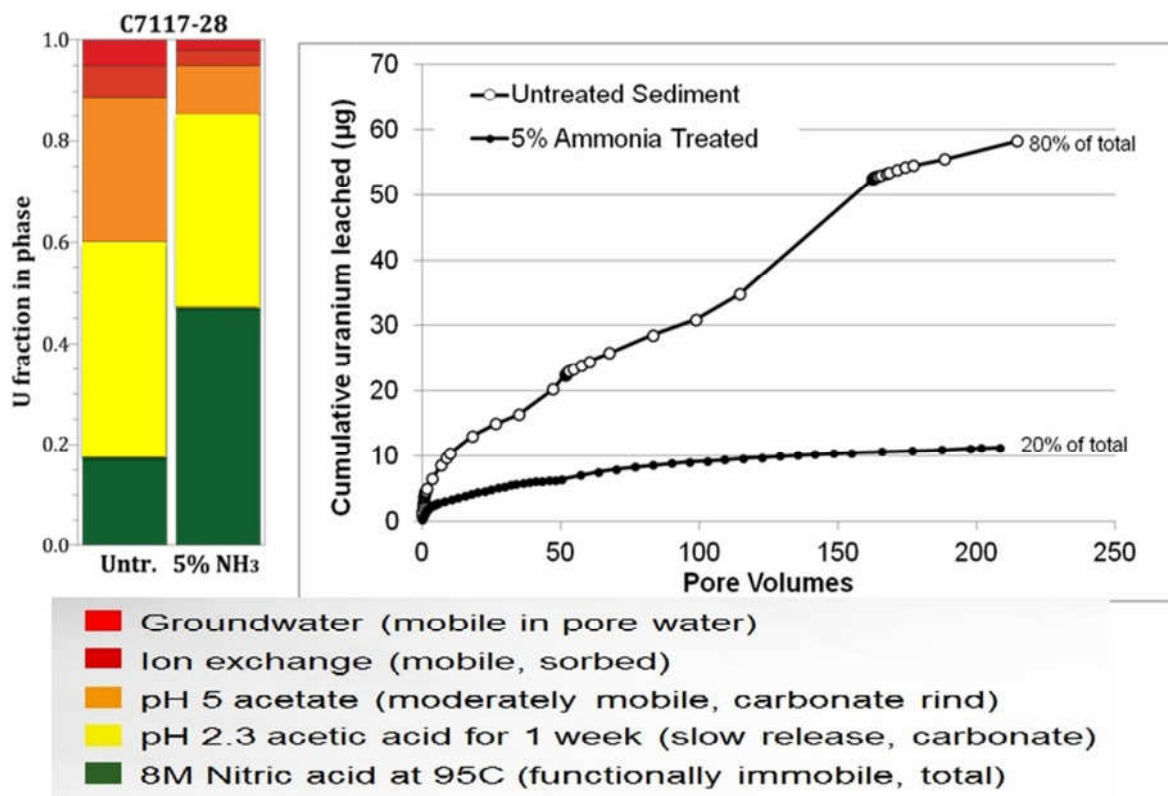
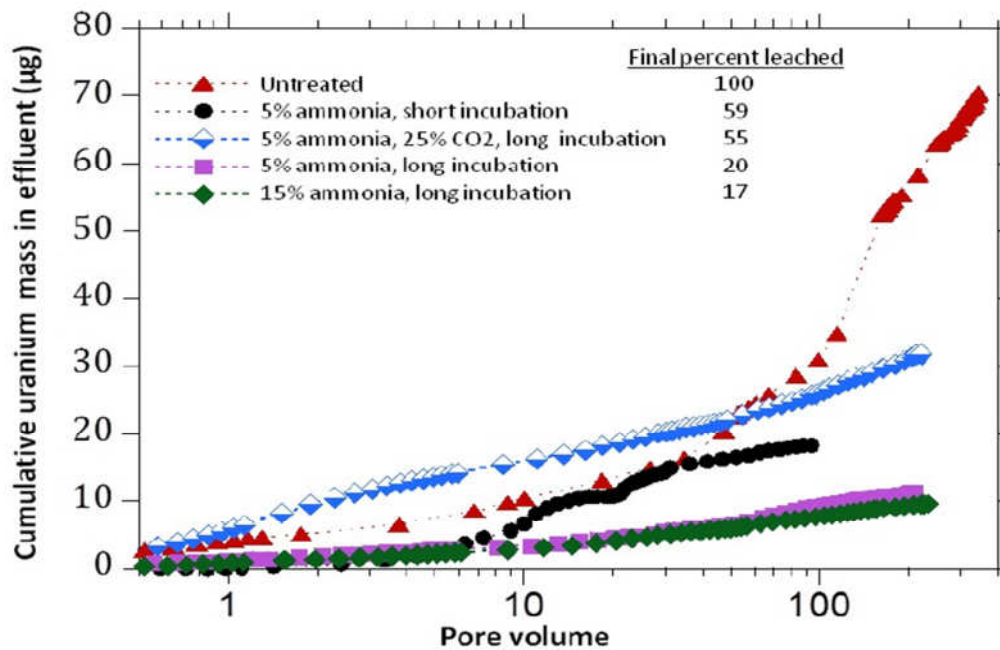


圖 63、氨氣處理後結果圖



Results of soil-column leaching studies for ammonia-treated sediments and different types of post-treatment exposure gas (air or carbon dioxide) and time 6 weeks (short incubation) to 3 years (long incubation) prior to leaching with groundwater (adapted from Zhong et al. 2014).

圖 64、氨氣注入後以空氣及 CO₂ 清洗結果圖

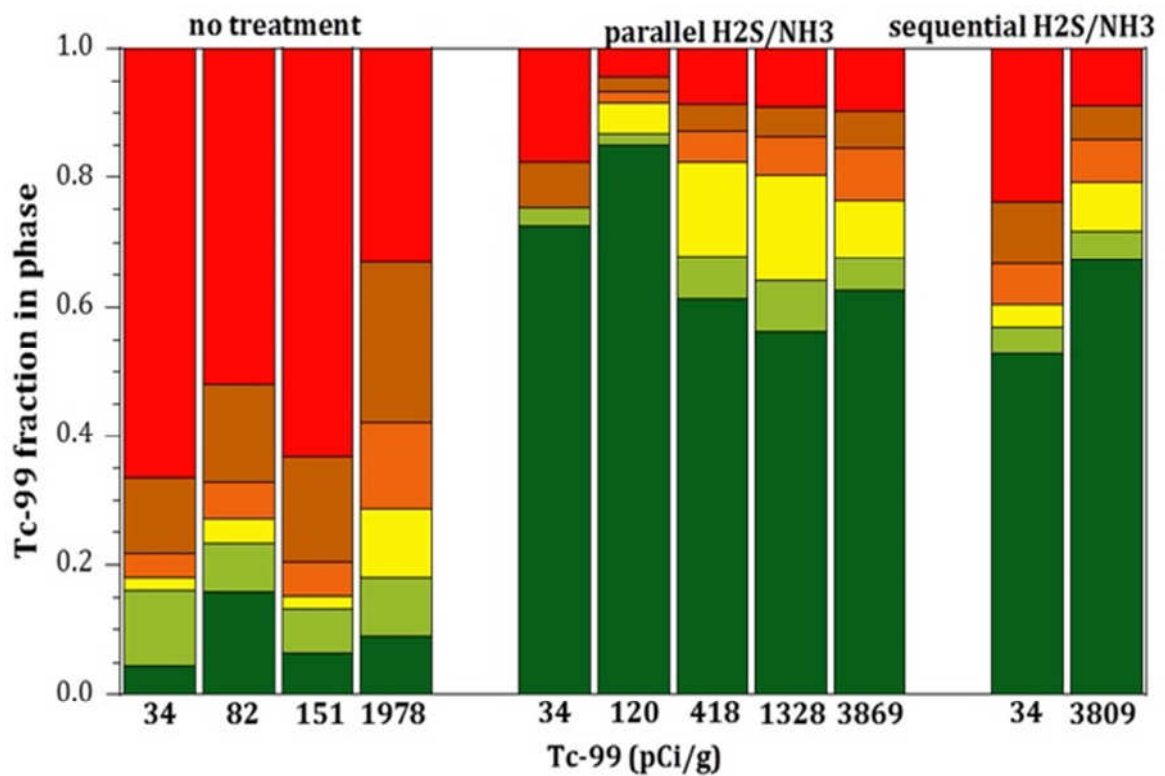


圖 65、氨氣搭配 H₂S 處理鎝-99 結果圖

(九)300區環境整治復育簡介

300 區主要是鈾核燃料製造，當時放射性廢棄物排至南北池及壕溝直接棄置排放，因而造成下方土壤及地下水含有鈾的高度污染。圖 66 為 1994 及 2004 年地下水鈾污染團分布曲線圖，由圖中可知其已慢慢向河邊遷移擴散，且皆超出美國飲用水標準，整治進度已刻不容緩。由於該區地表距地下水面僅 15 公尺(即非飽和帶土壤僅 15 公尺)，又靠近河邊，極易受到河水高低水位影響，在河水高水位時(通常為夏季)，將週期性再潤濕區的鈾反覆溶出，使其具有再遷移性。當河水再次低水時(通常為冬季)，這些溶出的鈾將隨著地下水移動到河水中，因而增加了處理難度，圖 67 為高河流水位鈾再移動圖。圖 68 為 6 月及 12 月地下水鈾濃度圖，由圖中可知再 6 月時因河流高水位，導致鈾因水力平衡尚未移動到河邊，當到 12 月河流低水位時，再潤濕區的鈾溶出後隨著地下水流向，朝著河邊移動，進而污染哥倫比亞河。

PNNL 實驗室在進行環境整治前，先就地下水位受河流水位高低之影響，利用地球物理科學技術來做地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Tomography (ERT))，藉以獲得該區相關地下水文資訊。圖 69 為 300 區地下水位 ERT 圖，於該區已回填土壤之原排放池，設置 3 條埋地之電阻線來探測，並定期偵測電阻，經過計算模擬後可知在 2011.05.20 時僅第一條線部分有藍色(表示河水)電阻顯示，當在 2011.06.29 時，2 條靠近河邊的電阻線已有明顯的藍色標示，表示河水水位上升進入非飽和帶土壤，在 2011.08.08 時，可觀察到水位開始下降，藉由 ERT 模擬觀測可以證實河流水位高低確實會造成週期性再潤濕區的產生。

該區整治復育策略目前有化學氧化還原處理及磷酸處理，PNNL 選擇以磷酸鹽類來整治復育，其主要原因有即使鈾的濃度低，也極易產生磷酸鈾類的沉澱物，而此沉澱物在大部分的地球化學條件下，具有極佳的安定性，後續維護操作較不

需要，不會對操作人員產生健康危害及對土壤產生毒害性，同時在操作成本上也較低廉。另外所產生的磷酸鈾類的沉澱物，其結構類似鈾灰礦(Autunite)，該礦物為鈾類礦物中最為穩定的礦物之一，因而選擇磷酸來整治該區。

PNNL 經測試後以長鏈磷酸鹽類(Polyphosphates)進行土壤地下水整治，可以控制其產生沉澱物的速率及避免在水相中快速減少，圖 70 為所使用長鏈磷酸鹽類水解反應示意圖。圖 71 為注入聚磷酸鹽整治示意圖，在注入聚磷酸鹽後，鈾再注入點後會以磷灰石(apatite)型態固定住，待過段距離後另形成鈾灰礦(autunite)來穩定隔離鈾的擴散遷移。PNNL 以此模式來擇定測試整治觀測井，測試結果如圖 72，其連續注入一個觀測井 4 天後，以圓周方式向外監測其他觀測井內地下水鈾的濃度，在半徑 75 英尺內觀測井的鈾濃度大部分皆有小於最大污染限值 30 ug/L (Maximum Contaminant Level (MCL))，與其他未注入觀測井相比，確實有明顯的改善結果。

圖 73 為觀測井編號 399-1-17A 之鈾濃度與地下水面變化歷程圖，由途中可知當水位高時，確實會造成地下水鈾濃度增加，1998 至 2000 年後在經過表面土壤刨除及回填後，鈾濃度確實有下降，但週期性再潤濕區的鈾無法刨除，隨著時間增加及河水反覆再濕潤，使得鈾在 2006 年開始升高，隨後注入長鏈磷酸鹽類後才又緩慢下降，後續將持續分析觀察相關觀測井數據，以確保河川不受污染。

經由以上介紹可知 PNNL 是將長鏈磷酸鹽類注入觀測井以減少及固定鈾的遷移，惟週期性再潤濕區的鈾不適合用刨除處理，又無法全面從觀測井注入磷酸鹽類來整治，故該實驗室於 2015 年時，於地面 9 個注入井，將聚磷酸鹽類直接連續注入 9 天(如圖 74)，並於注入區設置十字架的地電阻影像探測法(ERT)來觀測注入時的情形。ERT 共取得 35 天的數據，其模擬示意圖如圖 75。

300 Area Uranium Plume Exceeding Current Drinking Water Standard 1994 & 2004

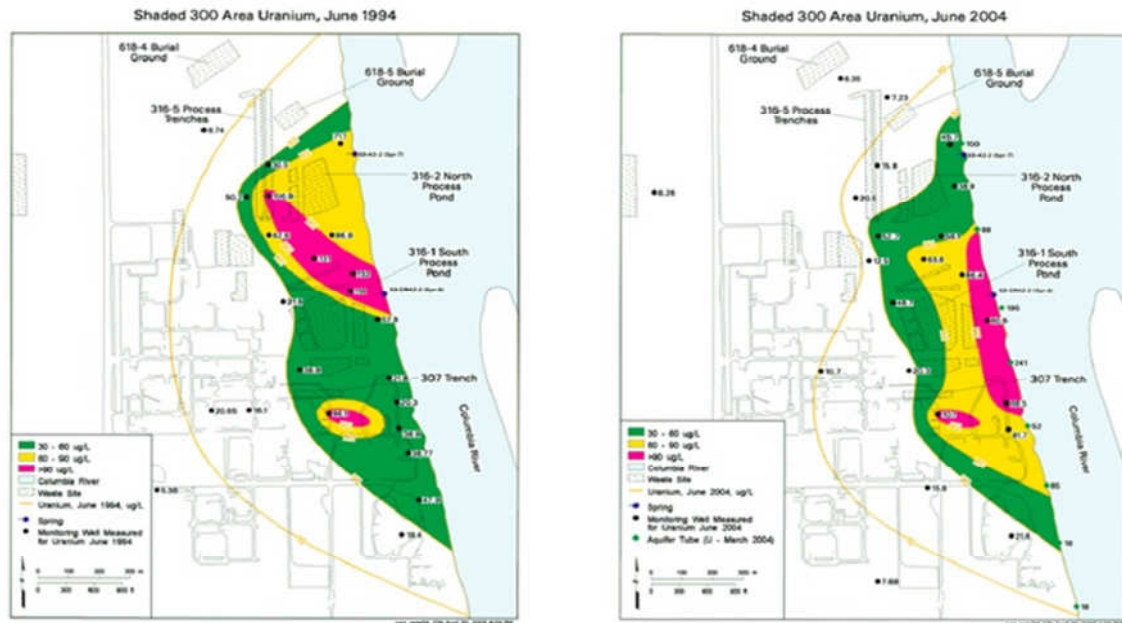


圖 66、300 區地下水鉍污染團分布曲線圖

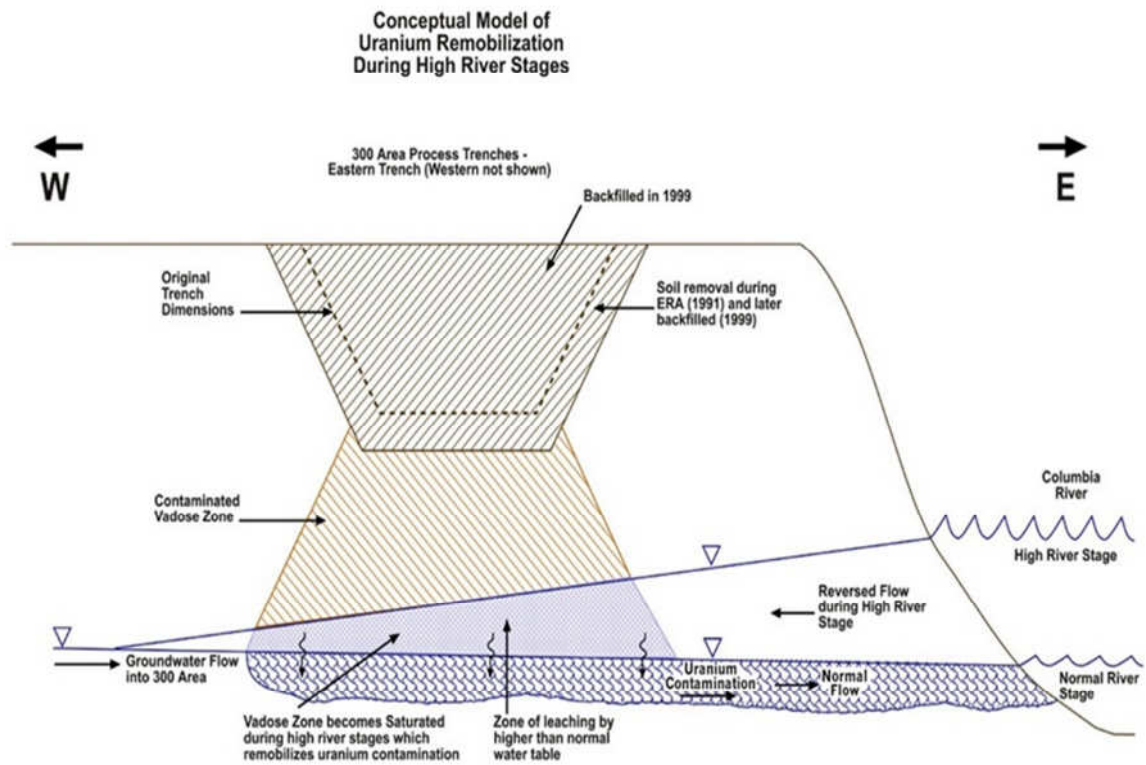


圖 67、高河流水位鉍再移動圖



June



December

圖 68、6 月及 12 月地下水鉀濃度圖

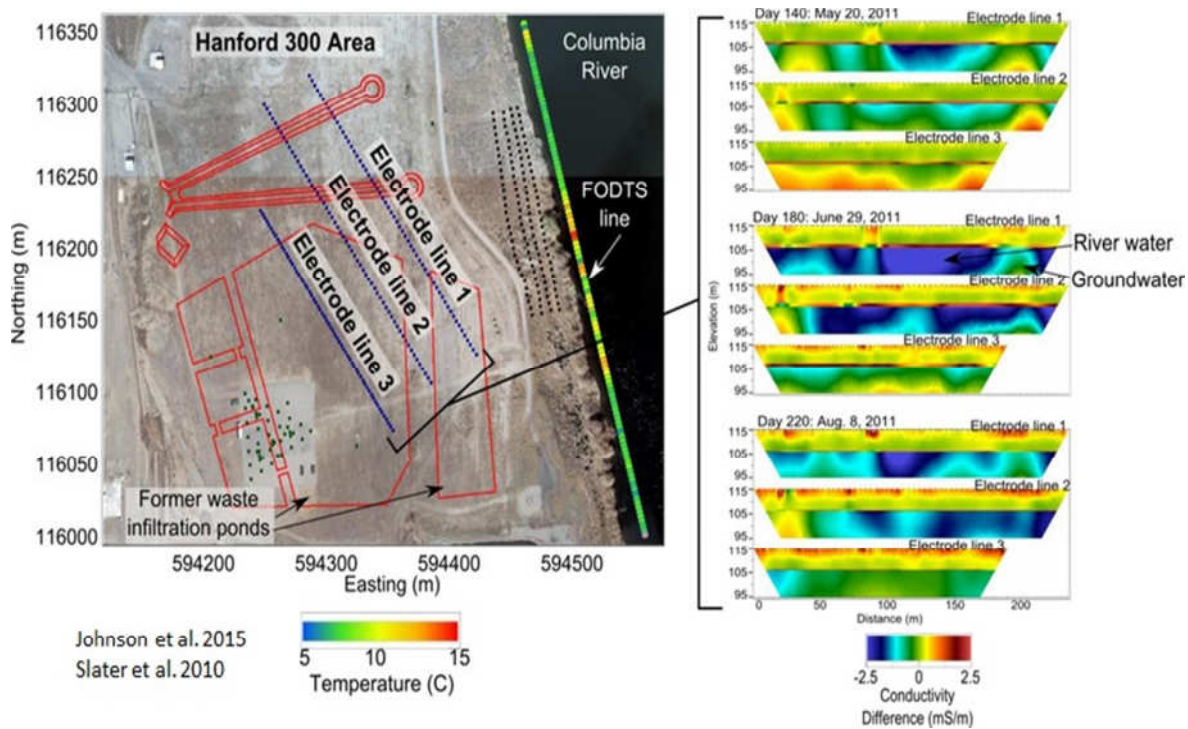
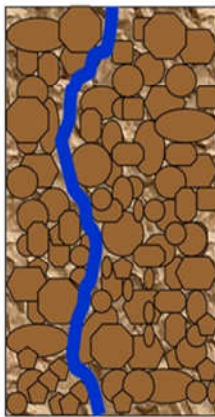
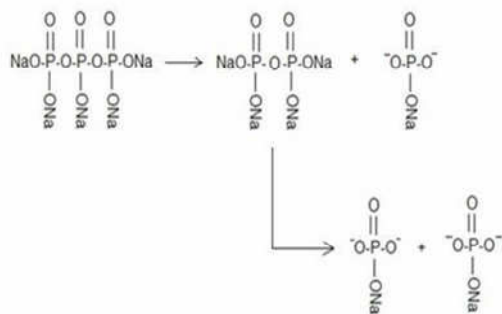


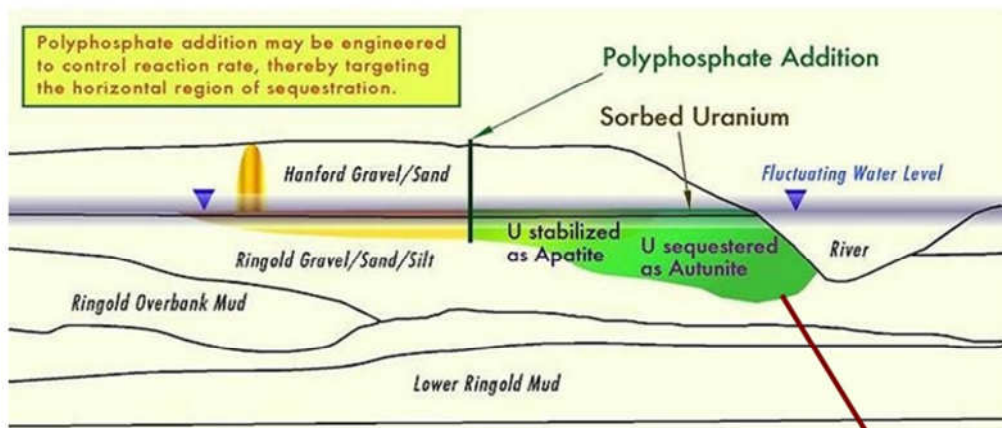
圖 69、300 區地下水位 ERT 圖



Polyphosphate serves as time-delayed source of phosphate for precipitation of phosphate minerals.

- ▶ Rate of hydrolysis is related to chain length
 - Time release - Controllable kinetics based on polymer length to yield orthophosphate
 - Precludes rapid precipitation
 - No measurable decrease in hydraulic conductivity
- ▶ Rate of phosphate mineral formation is directly related to the rate of polyphosphate hydrolysis.
 - Direct treatment of uranium
 - Provides immediate and long-term control of aqueous uranium

圖 70、磷酸鹽類水解反應示意圖



- ▶ Injection of soluble polyphosphate
- ▶ Lateral plume treatment
- ▶ Uranyl phosphate mineral (autunite) formation
 - Immediate sequestration
 - Not subject to reversible processes such as reoxidation or desorption
- ▶ Apatite formation
 - Sorbent for uranium
 - Conversion to autunite
- ▶ Enhancement of MNA

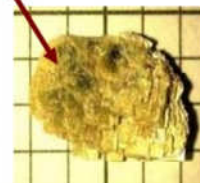


圖 71、注入聚磷酸鹽整治示意圖

(baseline vs. post-treatment)

Downgradient Wells
(no treatment)

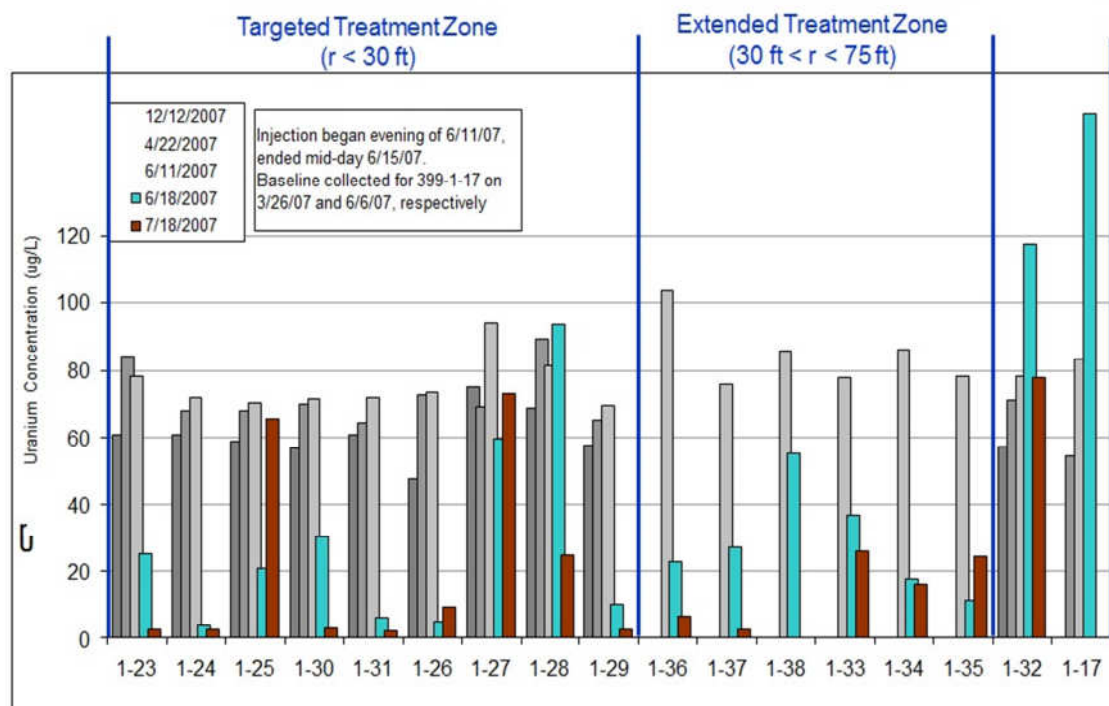


圖 72、聚磷酸鹽測試整治結果圖

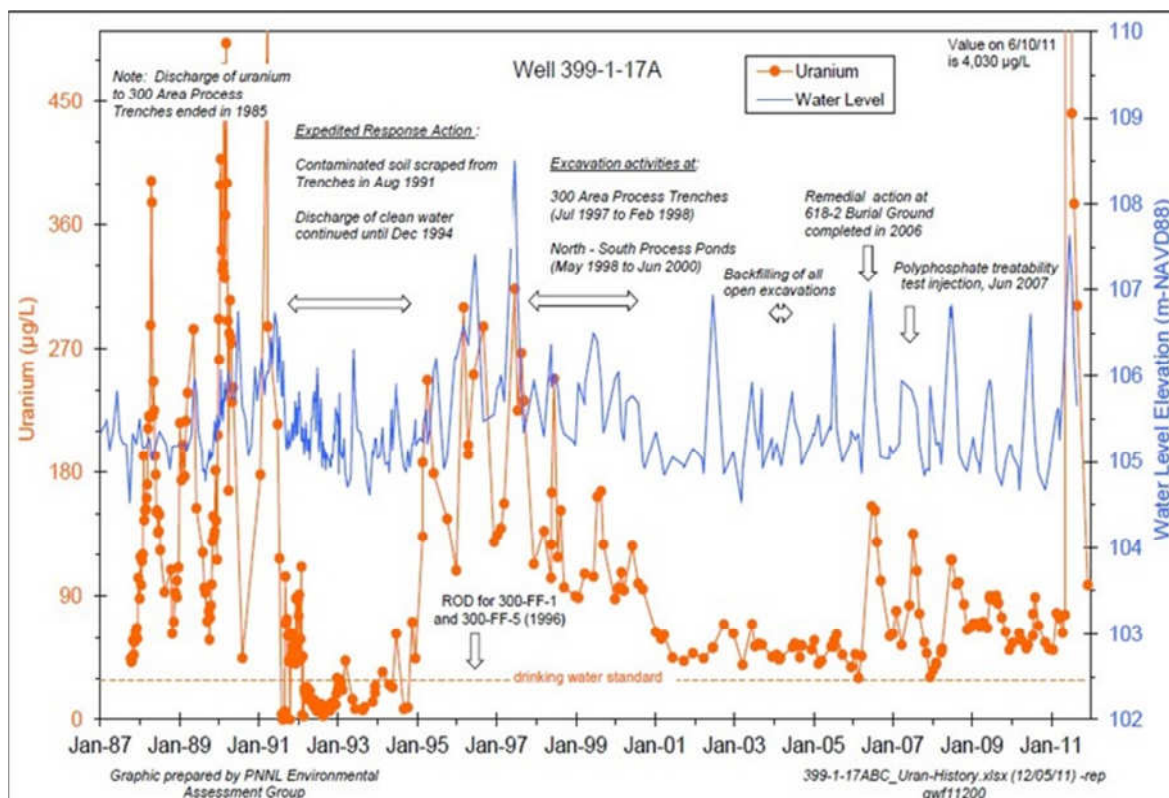
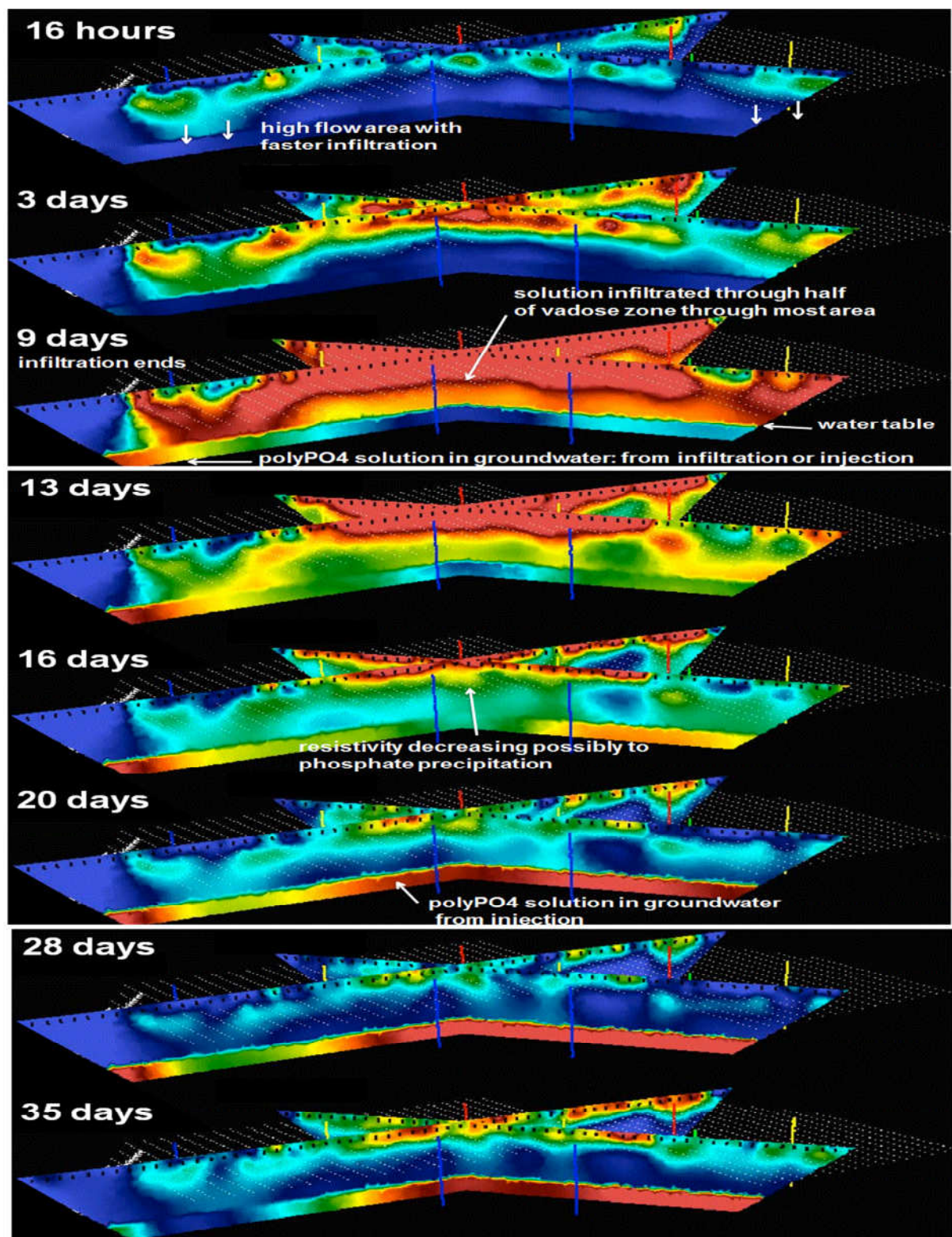


圖 73、觀測井 1-17A 鈾濃度、地下水面及整治歷程圖



- ▶ polyPO4 solution infiltrated half of vadose zone, entering groundwater only in southwestern portion (and possibly southeast portion)
- ▶ additional poly PO4 injected in groundwater (9 wells) – ERT shows apparent good coverage (i.e., general even distribution between wells)
- ▶ coring needed to evaluate mass of PO4 in sediment and effect on uranium
- ▶ downgradient aquifer monitoring to evaluate U, PO4, and other ion changes

圖 75、聚磷酸鹽注入 ERT 圖(續)

(十) Hanford site環境監測

Hanford site 環境監測計劃的主要內容包括排放監測方案，公共安全和資源保護(PSRP)計劃，土壤和地下水修復項目，與華盛頓州健康部門(WDOH)的獨立監督活動。每年 DOE 皆會出版 Hanford site 環境監測報告，在排放監測方面，按照批准的監督程序進行，並公布於環境報告。監測地點包含：(1)設施的污水和廢氣點，(2)具有潛在排放或已經排出污染物設施附近，貯存或處置放射性和有害物質設施附近；而公共安全和資源保護則包含了環境監測、氣象資訊、生態調查以及自然和文化資源保護活動。該 PSRP 提供 Hanford site 承包商獲得相關環境信息，及監督人員對於 Hanford site 環境監控提供保證，並參照法規以確保市民和操作人員的安全、生態和文化資源的保護。

Hanford site 進行相關環境監測前，採先確認污染物來源、污染物特性、污染傳遞路徑、接受者定義及位置，以建立完整的監測計畫。監測對象主要為空氣、水、土壤、食物、農作物、動物等項目，圖 76 為 Hanford site 空氣監測位置圖，圖 77 為 I-129 空氣監測結果圖。隨著 Hanford site 停止運轉後及距離污染源越遠，監測值越小，且都符合 I-129 在空氣中的標準，圖 78 為 2005~2009 年場址至城鎮核種監測圖。土壤監測發現仍有達到 1000 Bq/Kg 之銻-137 如圖 79；哥倫比亞河上下游監測點如圖 80，2004~2014 年哥倫比亞河上下游氚的監測結果如圖 81，在經過 Hanford site 後的下游 Richland，取樣氚分析結果會些微上升，但仍符合水質標準 740 Bq/L。總 α 總 β 監測結果如圖 82，銥-90 及總鈾監測結果如圖 83。由監測結果可知哥倫比亞河下游環境監測尚符合美國標準。

Air Monitoring Locations

Wind patterns used to cite air monitoring locations

- ▶ Onsite
- ▶ Site perimeter
- ▶ Distant
- ▶ Community

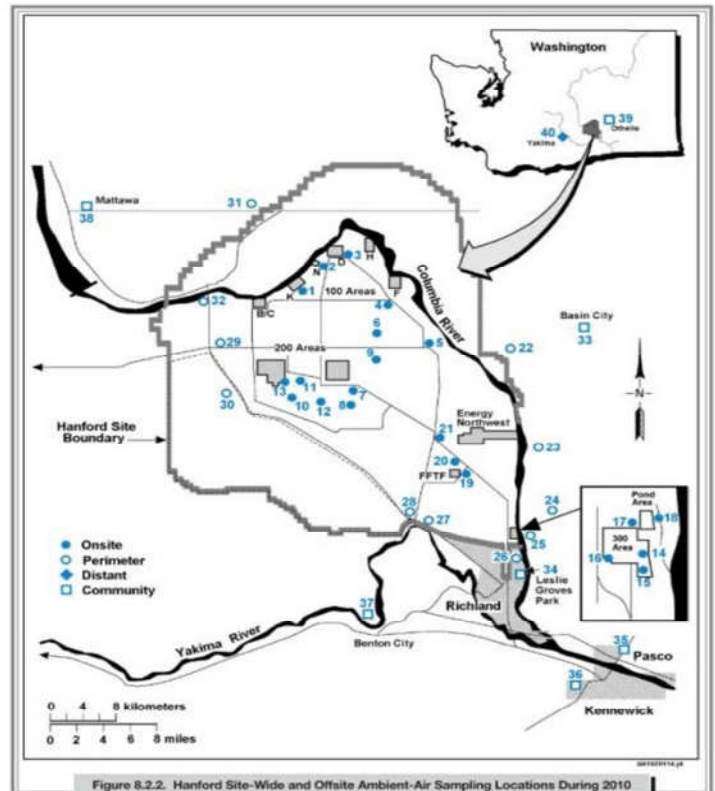


圖 76、Hanford site 空氣監測位置圖

- ▶ Decrease with distance from source
- ▶ Decrease with reduction in site operations
- ▶ $aCi = 10^{-18}$ Curies
= 3.7×10^{-8} Bq
- ▶ Standard for ^{129}I in air is 70 pCi/m³ (0.037 Bq)

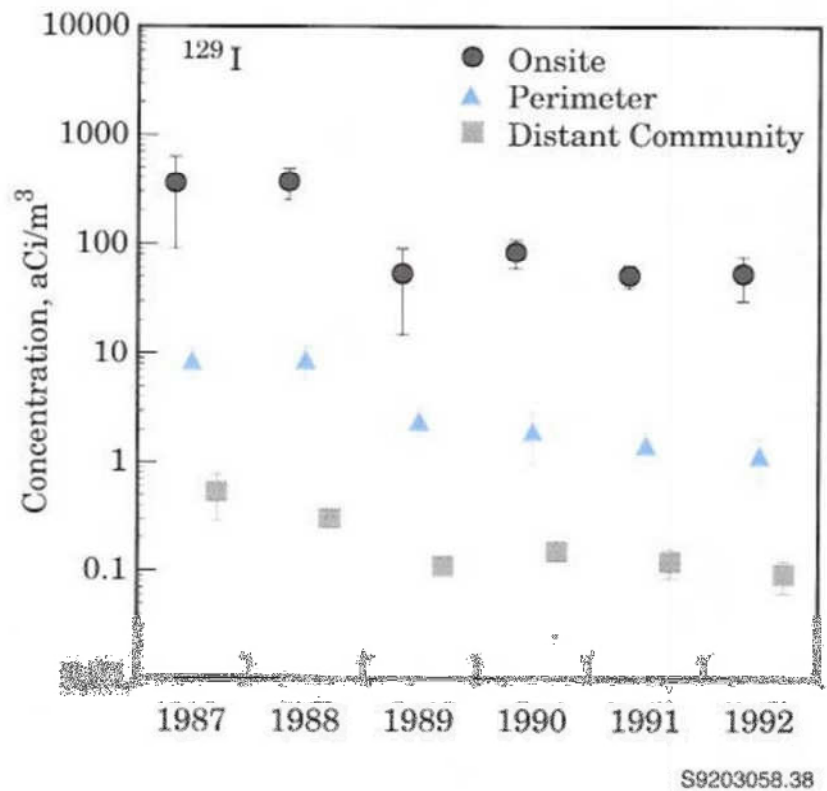


圖 77、I-129 空氣監測結果圖

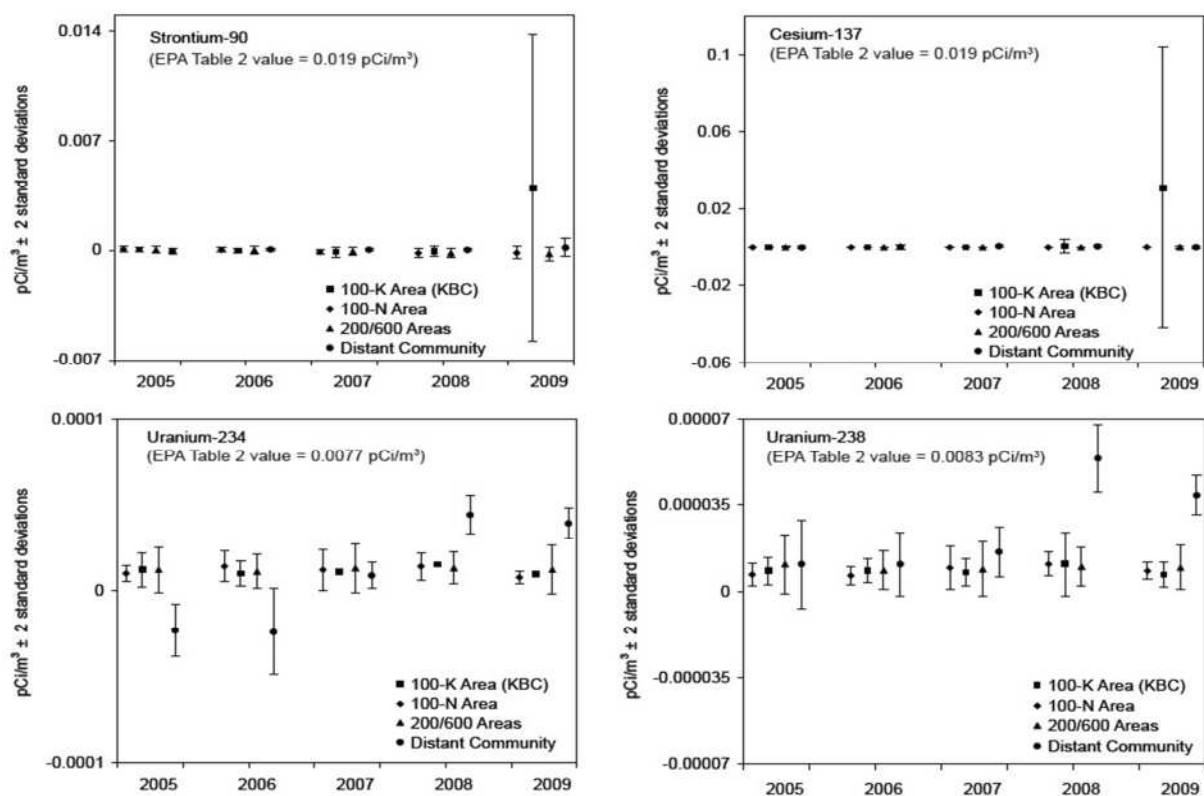


圖 78、2005~2009 年場址至城鎮核種監測圖

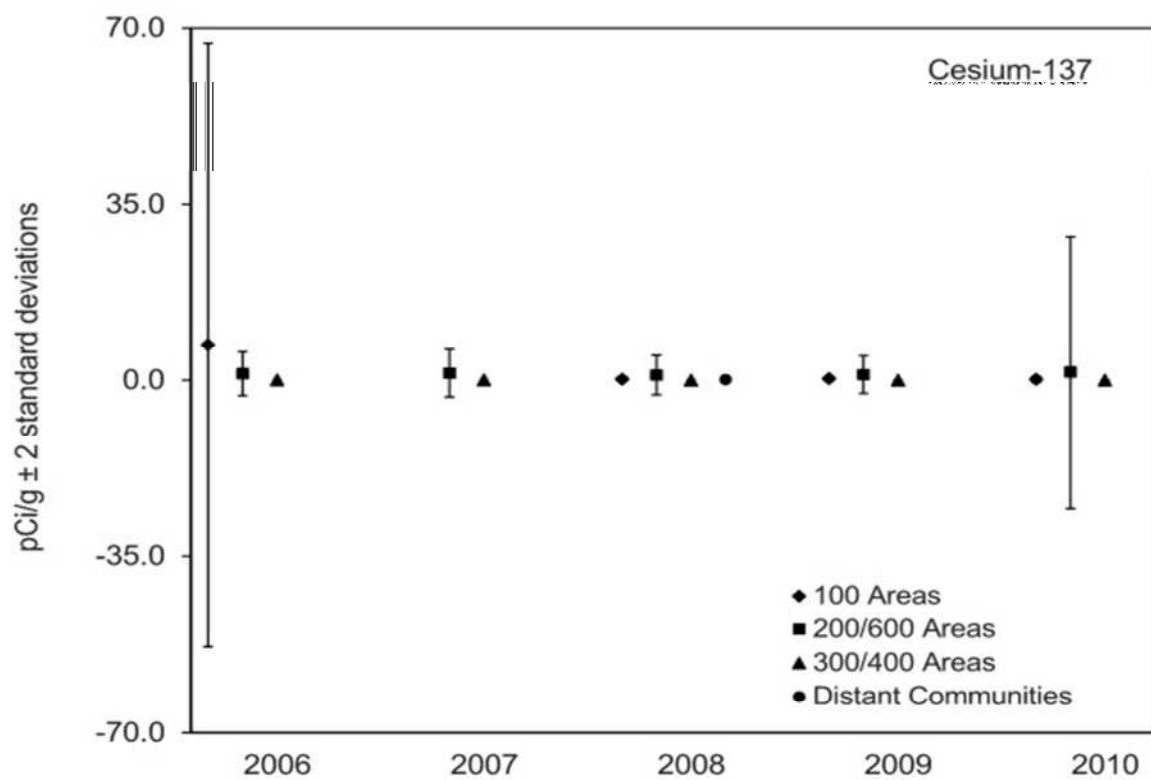


圖 79、2006~2010 年土壤監測圖

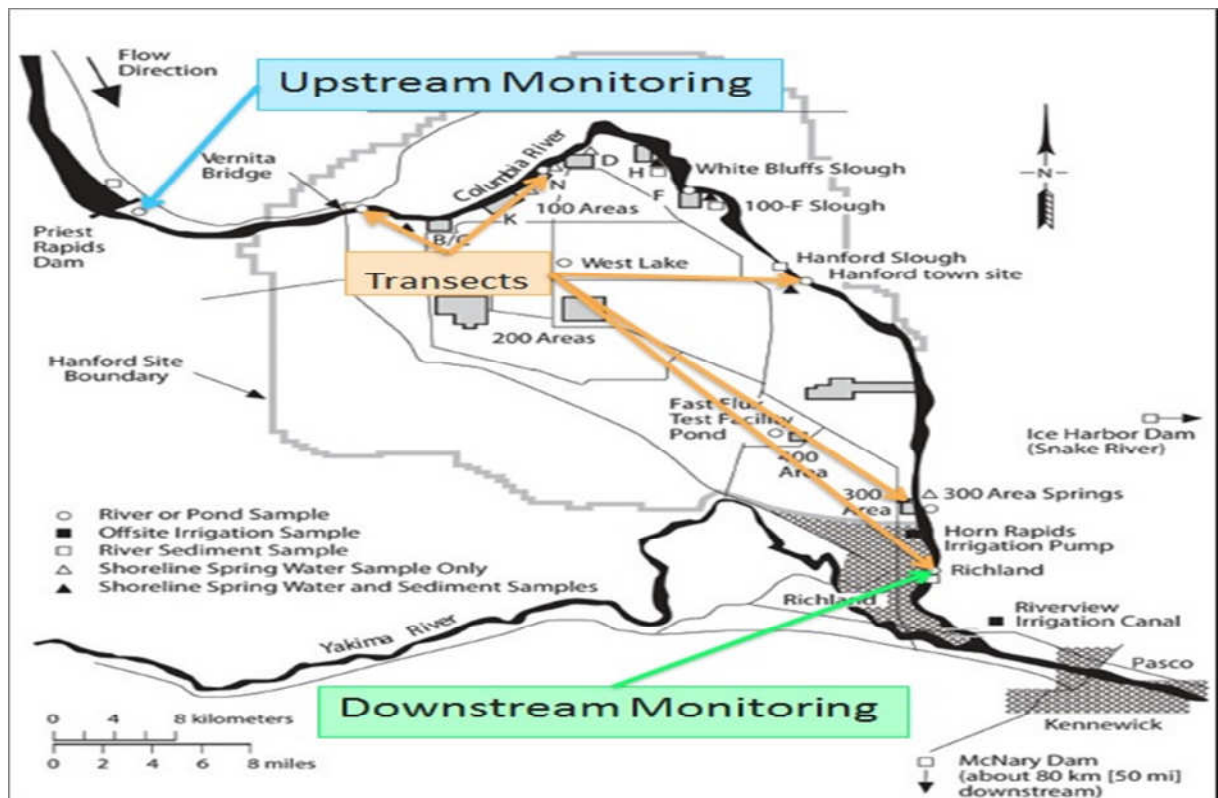


圖 80、哥倫比亞河上下游監測點

Priest Rapids Dam –
upstream (background)
Richland – downstream
No significant difference in
concentrations over 10
years

Figure 7.5. Tritium Annual Average Concentrations in Columbia River Water
Upstream and Downstream of Hanford Site
($\pm X$ standard deviations, AWQS = ambient water quality standard)
Washington State ambient water quality standard for tritium is 20,000 pCi/L (740 Bq/L)

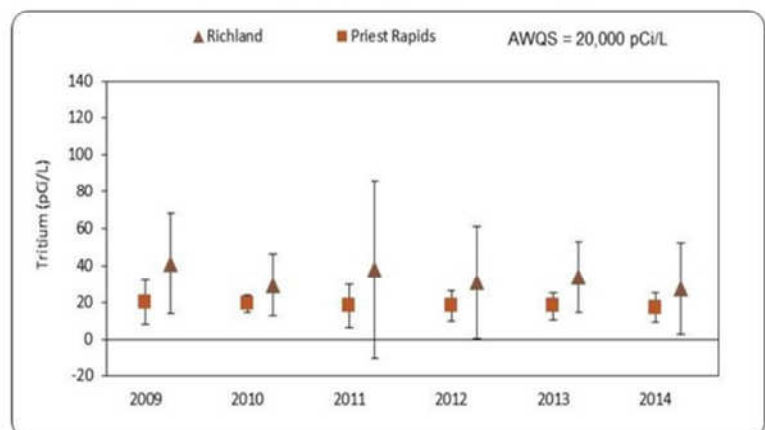
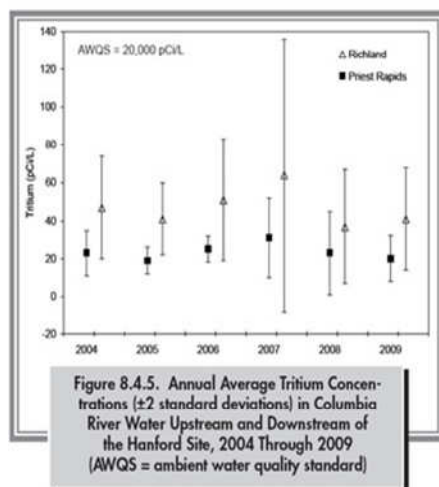


圖 81、2004~2014 哥倫比亞河上下游氚的監測結果

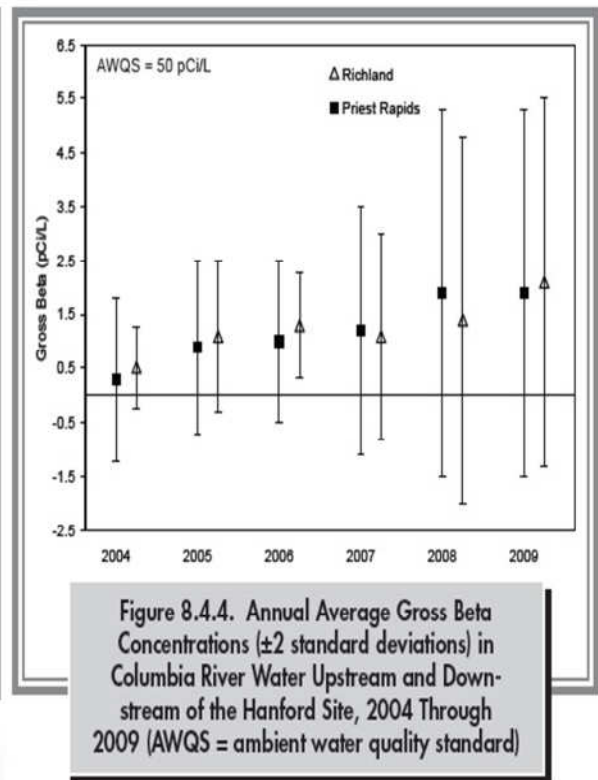
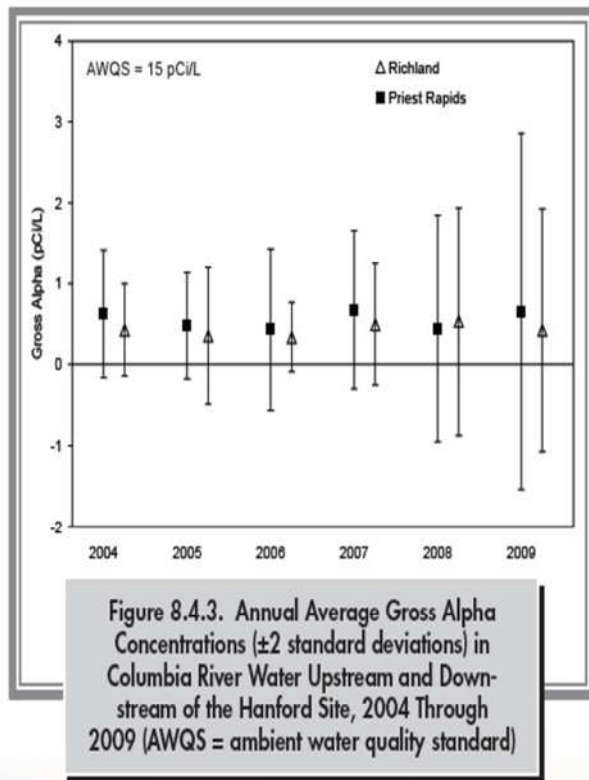


圖 82、2004~2009 哥倫比亞河上下游總 α 總 β 監測結果

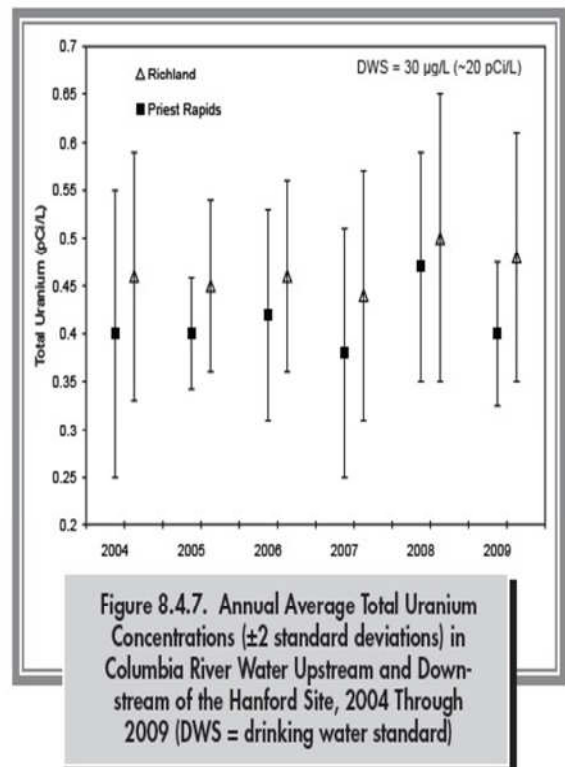
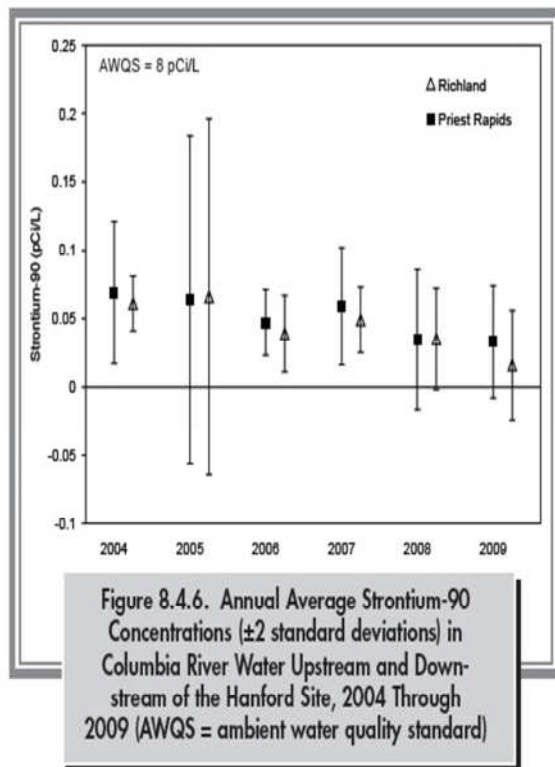


圖 83、2004~2009 哥倫比亞河上下游銻-90 及總鈾監測結果

(十一) Hanford site 實地參訪

PNNL 安排公差人實地至 Hanford site 內部參訪，由 Mark Freshley 駕駛公務車並帶領公差人參訪 100 area、200 area、300 area、central plateau、100-F reactor 現地安全貯存、H reactor 現地安全貯存、D reactor 現地安全貯存、N reactor 現地安全貯存及磷酸鹽類屏障、示範型地表屏障(prototype barrier)、環境整治處置設施 (ERDF, Environmental Restoration Disposal Facility)，其行程路線如下(圖 84 綠色螢光路線)：

8:30 am – Depart PNNL ETB Building

8:45 am – Travel north on Route 4 South, discussing the 300 Area en route

9:30 am – Continue north on Route 2 South and Route 2 North past 100-F, 100-H, and 100-D, discussing ISRM barrier. Turn south on Route 4 North and drive past 100-N Area, discussing 100-N apatite barrier

10:00 am – Continue south on Route 4 North, Route 11A, and Route 3 into 200-West Area. Enter 200-West Area on 20th Street and continue north on Beloit Avenue to the 200-West Pump and Treat

10:45 am – Exit 200-West Area and head east on Route 3, discussing ERDF en route

11:15 am – Enter 200-East Area on 4th Street and continue north on Baltimore Avenue to the Hanford Prototype Barrier (HPB) near 12th Street

11:30 am – Exit 200-East Area on Baltimore Avenue and return to PNNL campus on Route 4 South

因該場址規定僅工作人員可以下車，其他參訪人員未經申請不得下車，主要是保護人員安全，避免遭受輻射污染或踩到輻射土壤，另又於示範型地表屏障有

採集到兔子糞便遭受輻射污染，除非有適當的安全防護措施，該區已禁止人員進入，故公差人全程皆於車上，僅由車窗拍攝相關照片及車上進行相關解說。

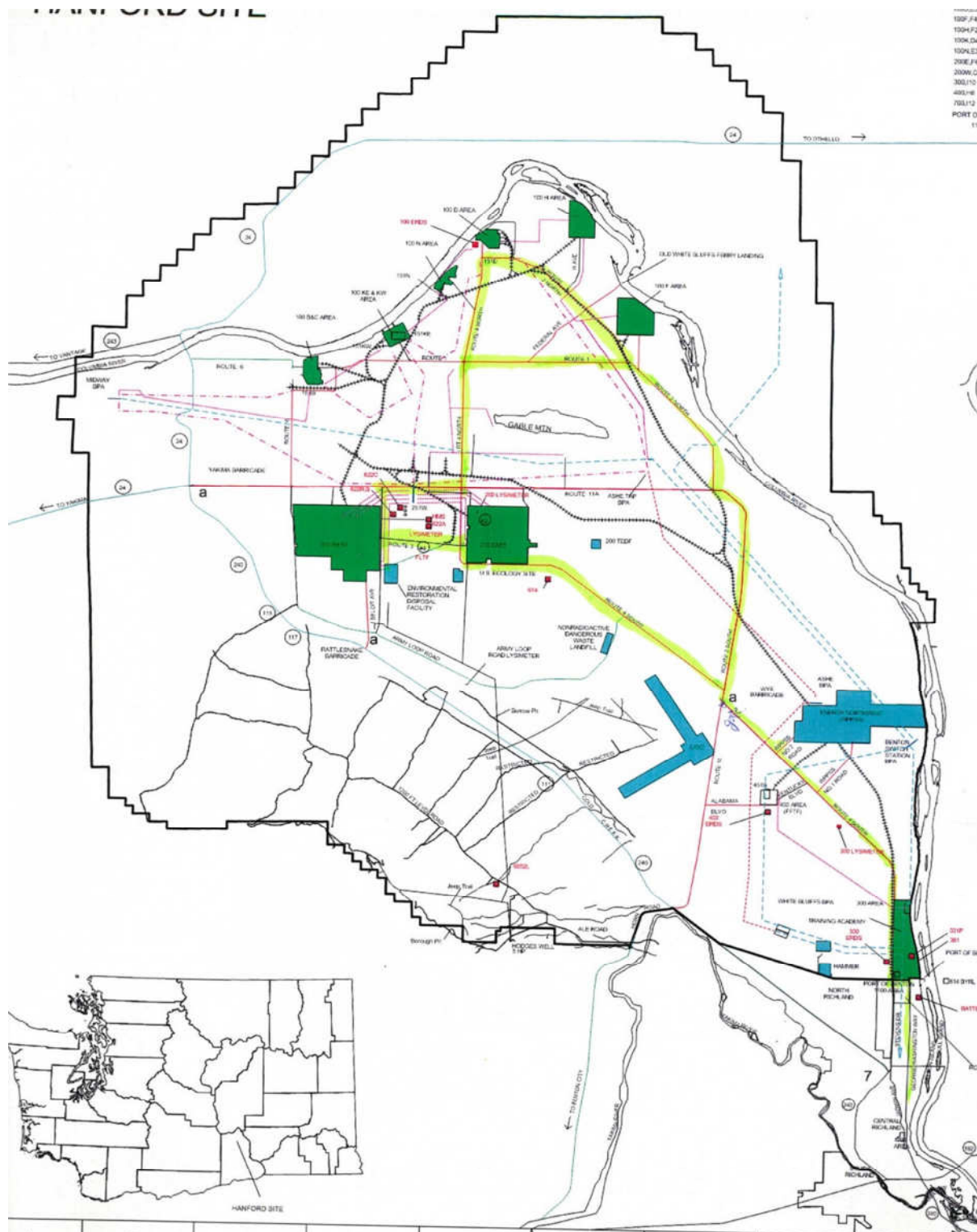


圖 84、Hanford site 參訪路線圖



圖 85、參訪公務車



圖 86、Fred Zhang、公差人及 Mark Freshley 於場址入口合影



圖 87、Hanford site 管制站



圖 88、300 區外圍



圖 89、Hanford 高中遺址



圖 90、F reactor 現地安全貯存



圖 91、D、DR reactor 現地安全貯存



圖 92、N reactor 現地安全貯存

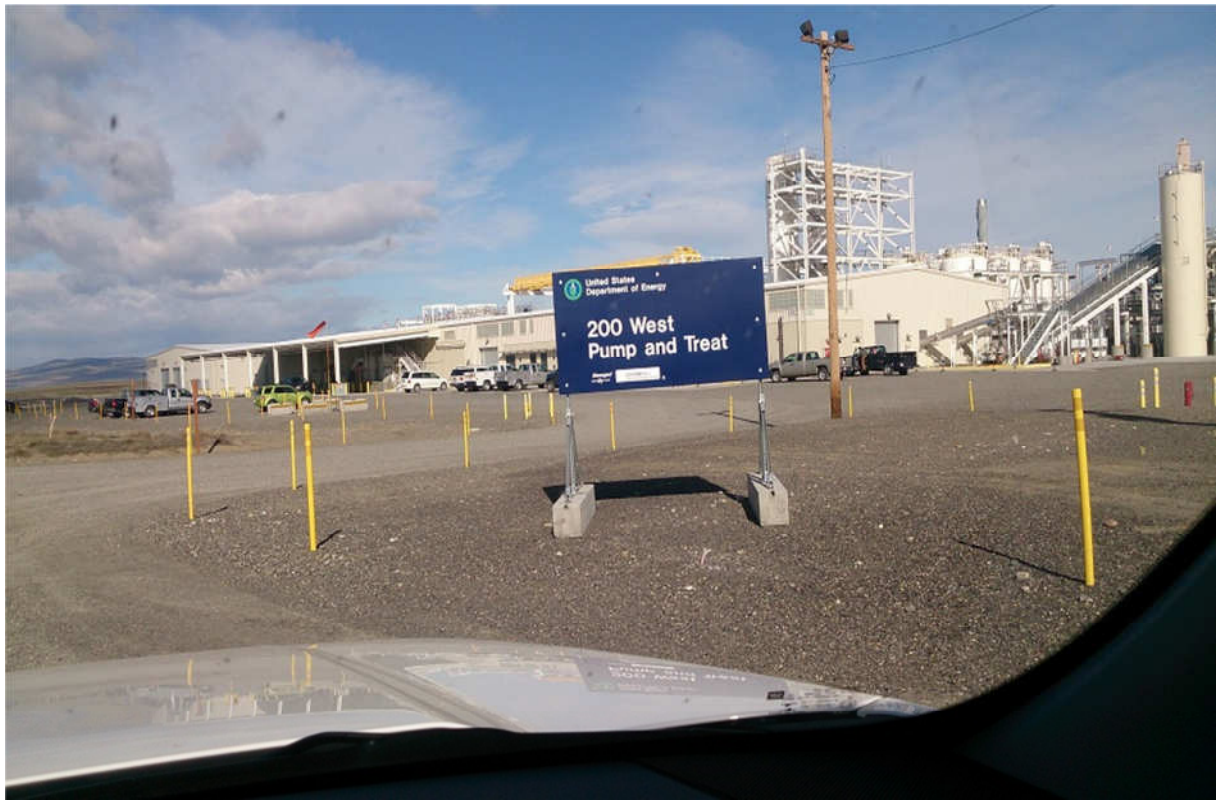


圖 93、200 west pump and treat 工廠



圖 94、Tank farm 一隅



圖 95、BY Tank farm



圖 96、示範型地表屏障



圖 97、西北能源公司核電廠



圖 98、管制區內麋鹿蹤跡

三、心得

- (一). 本次國外公差旨在參訪美國如何進行污染場址環境復育及土壤整治，負責接待之 Dr. Dawn Wellman 十分盡心的安排相關議題外，還安排與許多專家學者見面，並提供相當多文獻供公差人研讀及參考。期間若有任何疑問之處，Dr. Dawn Wellman 及 Fred Zhang 也盡量向公差人解釋清楚；其他專家學者亦製作簡單明瞭且內容豐富的簡報，每天皆有排滿課程讓公差人學習有關技術及知識，讓公差人對美方如此盡心負責安排此次行程，及美方辦事如此有條不紊留下深刻記憶。
- (二). 本次參訪太平洋西北國家實驗室能有機會和多位環境整治復育專業人員直接溝通對談，並取得相關聯繫方式。PNNL 人員對於未來可能和本所進行相關資訊交流也抱持歡迎與正面的態度，後續若本國有舉辦相關環境整治復育研討會，可邀請 PNNL 研究人員參加，以提升雙方合作交流。
- (三). 藉由 Hanford Site 清理計畫流程，將哥倫比亞河域核反應器清理及現地安全貯存、300 區大部分設施拆除及土壤地下水整治過程、200 區中央高原處理處置設施及環境整治計畫等，整個計畫是以場址邊緣開始進行清理，並將相關廢棄物逐漸往中央高原清運處置，如此可將場址地面做一有順序且有效率的整治，以利未來場址環境復育的進行。
- (四). 目前土壤整治技術應用在 Hanford Site 主要有土壤氣體抽取法、抽取處理法、現地滲透性反應柵欄、沈澱法、氧化還原法、生物法、表面屏障圍阻法等。主要用來處理土壤地下水之放射性污染物及有機物，其中又以現地滲透性反應柵欄及磷酸鹽類注入整治來攔阻核種進入河水最為有效，後續該區整治將以此技術為優先實施。雖然其與我國地理環境及污染數量有極大差距，

但針對其他未飽和土壤帶的重金屬污染可以參考其技術發展及最佳化處理方式。

(五). 地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Tomography (ERT)可用來偵測整治區域相關電阻變化，並利用超級電腦將數據模擬成三維圖面，以利研究人員了解整治時地面下所發生之相關變化，進而精進改善後續整治復育措施，此技術可應用在我國相關土壤整治區域，應可提升我國整治復育技術，並了解整治時土壤下方發生的相關變化。

(六). 本次可實際至 Hanford site 參訪，經由反應器現地安全貯存及其他設施處置，深刻體認到處理相關放射性廢棄物時，如若能考慮的越謹慎與周密，相對的意外事故災害的發生及造成環境污染就能降至最低，減少對當地環境生態的衝擊，並做好環境復育，以使土地能再利用。本次在放射性污染面積廣大的 Hanford site 內能實地看到麋鹿，可謂三生有幸，相信隨著清理計畫的進行，該區生態會恢復原有生機。

(七). 國內即將面臨核電廠除役清理計畫，需汲取國外的環境整治復育技術及經驗，蒐集國際資訊，強化我國環境整治復育技術能力，以推動及規劃除役後環境復育，俾便未來能順利執行環境復育工作，讓土地資源能再利用。台美民用核能合作會議可提供非常良好的平台，透過參與相關之國際交流，彼此之經驗得以直接溝通與交流，並可以吸取國外最新之經驗與資訊，使參與人員皆有實質之收穫。

四、建議事項

- (一). PNNL 經常開放許多合作計畫供其他研究單位人員參與，有極多的各國學生、大學教授與研究人員，申請至 PNNL 各單位內進行各項學術研究或技術實習。PNNL 非常歡迎短期 1 個禮拜的參訪或 1 年加入研究團隊進行研究，惟因其有計畫經費壓力，對於參與長期研究，需提供部份經費支持。建議同仁申請前往參訪實習，持續與 PNNL 保持良好的交流管道，以拓展同仁之國際觀，有助本所研發能力提昇。
- (二). PNNL 土壤整治技術除了處理土壤地下水之放射性污染物外，尚可處理相關有機污染物。由於我國有許多土壤地下水有重金屬及有機物污染，可引進 PNNL 相關技術進行整治復育，使土壤地下水能恢復原狀，進而令土地資源再利用。
- (三). 本所核能經驗豐富專業技術人員陸續退休，造成人才產生斷層，除了培養具國際觀之年輕研發人力外，尚應加強與國外學術及科研單位的交流、參與相關研究計畫、提升研發實力與投入人才培育，以確保國內核能安全與研究的品質。建議本所應積極鼓勵同仁參與各項國際活動並發表最新成果來提升我國的學術地位，以提高核能研究所的國際名聲。

五、附錄

參訪行程細節：

March 16-18

DAY	TOPIC	Location
March 16, Wed.	Badging/Orientation/Introductions – Dawn Wellman, Fred Zhang	ETB/2521
March 17, Thur. 8:30 am – 12 pm	D&D Overview – Wayne Johnson, Paul Bredt, and Mike Minette	ETB Wenatchee
	K- Basin Overview – Paul Bredt, Andy Schmidt, Sandy Fiskum	
1 pm – 5 pm	Review Hanford D&D and K-Basin Literature	ETB Methow 2435
March 18, Fri. 8 am – 12 pm	Waste Processing Overview – Reid Peterson • Waste Characterization- Reid Peterson • Cs/Sr Removal & Filtration – Phil Schonewill • Waste Processing Tour – Reid Peterson • RPL – Reid Peterson	RPL Plutonium Rm
	• APEL – ○ Vitrification – John Vienna ○ Glass Lab- John Vienna ○ Fluid Dynamics (High Bay) – Harold Adkins, Carl Enderlin, & Mike Minette	APEL 67
1 pm – 5 pm	Review Hanford Waste Processing and K-Basin Literature	ETB Methow 2435

March 21-25

DAY	TOPIC	Location
March 21, Mon. 8 am – 12 pm	Surface Water Remediation – Lara Aston • Integrated systems-based monitoring- Amoret Bunn • Aquatics Research Lab tour– Tim Linley & Amoret Bunn • Restoration and Recovery – Lara Aston	331 Conf Rm 2
1 pm – 5 pm	Review Surface Water Restoration Literature	ETB Tieton (2610)
March 22, Tue. 8 am – 12 pm	Overview - Mark Triplett, Mike Truex, Hope Lee • Hanford Overview- Mark Triplett • Land Use Strategy – Mark Triplett • Site Investigation – Mike Truex, Hope Lee ◦ Conceptual Site Model Development – Modeling – Vicky Freedman – Geochemical Investigation – Jim Szecsody – Geophysical Characterization – Tim Johnson • Remediation Strategy Development – Mike Truex, Hope Lee • Remedy Evaluation – Mike Truex, Hope Lee • Remedy Selection – Mike Truex, Hope Lee • Remedial Action – Mike Truex, Hope Lee • Long-Term Management – Mark Triplett	331 Conf Rm 2
1 pm – 5 pm	Review Hanford and Remediation Guidance Document Literature	TBD
March 23, Wed. 8 am – 12 pm	Groundwater Remediation – Hope Lee, Mike Truex • Case Study: 100 Area - Jim Szecsody • Case Study: 300 Area – Dawn Wellman/Jim Szecsody • Bioremediation - Hope Lee Soil Remediation – Hope Lee, Mike Truex • Central Plateau Remediation ◦ Mass Reduction Techniques ◦ Flux Reduction Techniques Monitoring - Mike Truex & Tim Johnson	331 Conf Rm 2

DAY	TOPIC	Location
1 pm – 5 pm	331 Tour – Hope Lee, Mike Truex, Erik Krogstad	331
	Review Groundwater & Soil Remediation Literature	331 room 2
March 24, Thur.		
8 am – 12 pm	Hanford Site Tour – Mark Freshley, Hope Lee, Fred Zhang	
12:30 – 1:30 pm	Working lunch- Closeout with EH&R Sector	ETB/2521
1 pm – 5 pm	Follow up Discussions and Closeout	ETB Methow Rm
March 25, Fri.		
9 am – 10 am	EMSL Tour	EMSL Tour
	Follow up Discussions and Closeout	ETB Methow Rm