

出國報告（出國類別：其他）

參訪美國能源部太平洋西北國家實驗室 出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：黃君平 副工程師

派赴國家：美國

出國期間：101年7月17日~101年7月29日

報告日期：101年8月14日

摘要

本次公差赴美國參訪「能源部太平洋西北國家實驗室 (Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)」係透過台美民用核能合作平台協商後獲得太平洋西北國家實驗室同意接待。本所首次有機會派員前往 PNNL 參訪，由於該國家實驗室位於華盛頓州里奇蘭市鄰近能源部核設施場址 Hanford site，並有執行 K-Basin 的除役清理之寶貴經驗，可供 TRR 燃料池執行除役清理計畫之參考與學習。本次公差預期可以認識 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。本行主要成果包含可與數位 PNNL 研究人員與計畫主持人深入研討執行 K-Basin 清理的成果，深入瞭解關於超鈾污泥之收集、處理、包裝與貯存等策略；並取得雙邊研究人員的聯繫管道以利未來推動合作之可能。

目 次

摘 要

(頁碼)

摘 要.....	i
一、目 的.....	1
二、過 程.....	2
(一) 行程摘要	2
(二) PNNL 組織簡介.....	5
(三) Hanford Site 背景與清理簡介.....	8
三、心 得.....	17
(一) Hanford Site 廢棄物管理歷史.....	17
(二) K-Basin 污泥清理與除役參訪.....	20
(三) Vitrification 玻璃化技術	38
四、建 議 事 項.....	43

圖目錄

圖 一 PNNL 行政區正門.....	4
圖 二 參訪 PNNL 時辦公室位址—APEL.....	4
圖 三 與 PNNL 訪談專家後合影.....	5
圖 四 美國能源部各處室組織簡圖.....	7
圖 五 2009 年 PNNL 計畫預算圓餅圖.....	7
圖 六 PNNL 組織架構.....	8
圖 七 PNNL 能源與環境研究群之組織架構.....	8
圖 八 Hanford Site 區域簡圖.....	10
圖 九 Hanford Site 反應器及再處理廠之運轉歷程.....	13
圖 十 Hanford Site 放射性廢棄物總類盤存.....	18
圖 十一 300 Area 燃料製造場（1953 年攝）.....	19
圖 十二 100 Area K-East 和 K-West 反應器與附屬設施.....	19
圖 十三 200 Area 中央高原區五座用過核子燃料再加工場.....	20
圖 十四 (a) K-East 與(b) K-West 用過燃料貯存情形.....	21
圖 十五 K-East 內之用過金屬鈾燃料毀損與腐蝕情形.....	21
圖 十六 K Basins 燃料移除計畫流程圖.....	22
圖 十七 K-Basins 燃料處理設施：(左) 低溫真空乾燥廠與 (右) 燃料貯存庫.....	22
圖 十八 Intergrated Water Treatment System (IWTS) 示意圖.....	24
圖 十九 K-East 內用過燃料取出過程影像.....	26
圖 二十 K-Basin 內用過燃料取出後裝載於密閉盛裝容器.....	26
圖 二十一 燃料樣品於熱室內進行切割.....	27
圖 二十二 K-Basins 取出之用過燃料清洗器.....	27
圖 二十三 Schilling Robitic Systems — CONAN 機械臂水下裝填燃料.....	28
圖 二十四 多道式重裝罐 (Multi-Canister Overpack, MCO).....	28
圖 二十五 多道式重裝罐 MCO 進行真空乾燥程序.....	29
圖 二十六 Canister Storage Building (a) 立體示意圖與(b) 廠內操作設備.....	30
圖 二十七 燃料罐內污泥取樣系統.....	33

圖 二十八 燃料罐內污泥取樣裝置.....	33
圖 二十九 池底污泥取樣系統.....	34
圖 三十 池底污泥取樣系統裝置.....	34
圖 三十一 污泥包裝運送至 PNNL 熱室 325 館.....	35
圖 三十二 K-East Basin 取出之污泥.....	35
圖 三十三 KE 與 KW 燃料罐內污泥沈降試驗觀察.....	36
圖 三十四 KE 與 KW 燃料罐內污泥產氫情形.....	36
圖 三十五 House-in-House 污泥傳送系統.....	37
圖 三十六 K-West Basin 內盛裝污泥之工程容器.....	37
圖 三十七 K-East Basin 完成清理與拆除.....	38
圖 三十八 West Valley Demonstration Project 熔爐型式 (W.F. Hamel, et al. Radiowaste Magazine, 27-40, 1988).....	39
圖 三十九 LaHague Hot-walled induction melter 影像.....	40
圖 四十 Waste Treatment and Immobilization Plant, WTP 示意圖.....	41
圖 四十一 直徑5公分、高60公分的CCICM (CEA Industrial Scale Demonstration Platform in Marcoule, AREVA).....	41

表目錄

表 1 Hanford Site 核反應器運轉摘要表	13
表 2 政府 Hanford Site 運轉合約民營包商摘要表	14
表 3 商用核子燃料再處理廠附屬玻璃化技術摘錄.....	42

一、目的

本次國外出差係奉派參訪美國能源部太平洋西北國家實驗室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL),時間為 2012 年 7 月 17 至 29 日共計 13 日。PNNL 位於華盛頓州里奇蘭市,鄰近能源部核設施場址 Hanford site。本次參訪預計拜訪數位研究人員與工程師,這些專家主要的經歷是實際參與 Hanford site 包含 K-Basin、Tank Wastes、核反應器與附屬設施等除役清理計畫;並透過設施參訪與技術報告研討將可充分了解技術重點,將有助於 TRR 燃料池除役清理的研發與實務工作。本次參訪公差之目的如下:

- (一) 建立聯繫關係以利未來合作進行。
- (二) 瞭解 PNNL 組織與重點研究方向。
- (三) 瞭解 Hanford site 之背景、清理現況及技術。
- (四) 蒐集關於 K-Basin 之除役清理及廢棄物處理之經驗。

二、過程

(一) 行程摘要

此次前往參訪 PNNL 的接待人是 Dr. John Vienna，主要協助聯繫 K-Basin 清理計畫執行的專業人員，並安排參訪行程如表一所示。本次行程的分為兩個部份，分別為：

1. Hanford site 400 Area Maintenance and Storage Facility (MASF) 與 PNNL 既有設施參訪。
2. 訪談 K-Basin 清理計畫執行的核心人員，名單如表二所列。

設施參訪主要係瞭解針對 K-Basin 水下污泥之收集、取樣、放化分析、裝桶與運貯等技術及程序。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。

表一 公差行程簡表

月/日(星期)	工作內容重點
7/17(二)~7/18(三)	去程，由桃園機場出發飛抵西雅圖，蒞日轉赴里奇蘭。
7/19(四)	九點於 ROB 大廳報到，領取識別證及區內通行手續。 PNNL 背景與計畫執行簡介
7/20(五)	TRU 處理與處置技術，Hanford site 歷史與廢棄物管理參訪
7/21(六)~7/22(日)	資料彙整
7/23(一)	技術報告研討及 APEL (Applied Process Engineering Laboratory) 參訪
7/24(二)	參訪 RPL (Radiochemical Process Laboratory) 桶槽污泥之特性分析經驗
7/25(三)	K-Basin 歷史簡介與 Hanford site 400 Area Maintenance and Storage Facility (MASF) 參訪。
7/26(四)	K-Basin 處理設施參訪與技術報告研討
7/27(五)	綜合討論
7/28(六)~7/29(日)	返台

表二 訪問 PNNL 專業人員名單

姓名/學位	領域	頭銜
John Vienna/Ph.D.	Radiological Materials & Tech. Development Group	Chief Scientist
Brady D. Hanson/Ph.D.	Used Fuel Project Manager	Staff Scientist
Sandra Fiskum	Separation & Radiochemistry	Senior Research Scientist
Ronald P. Omberg/Ph.D.	Nuclear Materials & Engineering Analysis	Senior Technical Advisor
Calvin Delegard/Ph.D.	Chemical and Biological Process Development	--
Andrew J. Schmidt	Chemical and Biological Process Development	Senior Engineer Project Manager
Bradley R. Johnson/Ph.D.	Radiological Materials & Tech. Development Group	Scientist & Manager
Paul Bredt/Ph.D.	Environmental Health and Remediation	Sector Manager

本次接待參訪的 John Vienna 博士為 Applied Process Engineering Laboratory (APEL) 下放射性物質與技術發展研究群之首席科學家，主要研究題目是玻璃化技術，已有近 20 年的研發經驗與成果。Bradley R. Johnson 是放射性物質與技術發展研究群的經理，帶領吾人參觀玻璃材料合成實驗室，玻璃物性與化性分析室，連續式玻璃固化設施與玻璃固化程序測試設施。Brady D. Hanson 和 Sandra Fiskum 在 Radiochemical Process Laboratory (RPL) 任職，RPL 為 PNNL 的熱室所在單位，也是放射性化學分析的主要實驗室，目前執行由 K-Basin 與 Tank Wastes 取出的污泥分析（包括產氣特性、放射性化學分析、放射性液體分析與處理測試等）。Calvin Delegard 與 Andrew J. Schmidt 主要是針對 K-Basin 污泥產氣與運貯程序進行規劃與評估研究。1993 年西屋公司發起在 K-Basin 的 Spent Nuclear Fuel Project (SNFP) 時由 Dr. Ronald P. Omberg 擔任計畫主持人，主要負責用過燃料的特性研究，及建置低溫真空乾燥設施（Cold Vacuum Drying Facility, CVDF）與容器貯存廠房（Canister Storage Building, CSB）的核子安全分析。Paul Bredt 是 Environmental Health and Remediation 的主任，主要任務是在技術推廣與商務合作

建立，曾經於 2011 年 10 月前往日本向東電簡報 K-Basin 用過燃料和污泥的清理經驗。



圖一 PNNL 行政區正門



圖二 參訪 PNNL 時辦公室位址—APEL

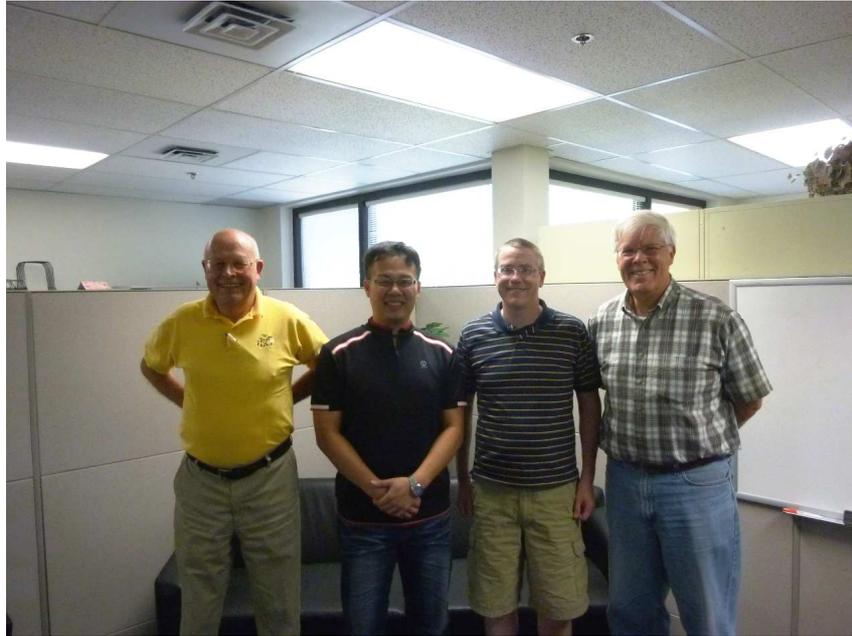


圖 三 與 PNNL 訪談專家後合影
(左至右順序為：Dr. Omberg、公差人員、Dr. Vienna、Dr. Delegard)

(二) PNNL 組織簡介

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（圖 四），主要園區位於華盛頓州的里奇蘭市(Richland, WA)，佔地 600 英畝。1965 年 Battelle 取得為 Hanford Site 執行研究與發展的合約，有超過 2200 位 GE 前身的員工和 Battelle 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速滋生反應器(Liquid Metal Fast Breeder Reactor)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。以下列舉其歷史沿革簡介：

1960s：研究人員率先發展出光碟技術；

1969：太平洋西北實驗室獲太空總署(NASA)選派為阿波羅計畫中的太陽與銀河射線所產生的放射性物質；

1970s：發展玻璃固化技術用來將危害物質鎖定在玻璃物質中；

1980s：年中太平洋西北實驗室成為美國能源部複合計畫實驗室之一；

1995：改名為太平洋西北國家實驗室(Pacific Northwest National Laboratory)

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. 應用核子科學與技術
5. 先進計算機科技
6. 化學工程
7. 系統工程與整合技術
8. 應用材料科學與工程
9. 大型科學設施與先進儀器分析

2009 年度 PNNL 總預算 918 百萬美元，主要計畫經費來源為能源部所屬國家核能安全署、科學處、能源技術等以及國土安全部和其他合作計畫等，如圖 五所示。目前 PNNL 的組織架構如圖 六，本次公差參訪的單位與專家係直屬於環境與能源研究群下（如圖 七）。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，而參與計畫的包商相當多。PNNL 由於和 Hanford Site 的地緣關係，從過去至今也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服務。

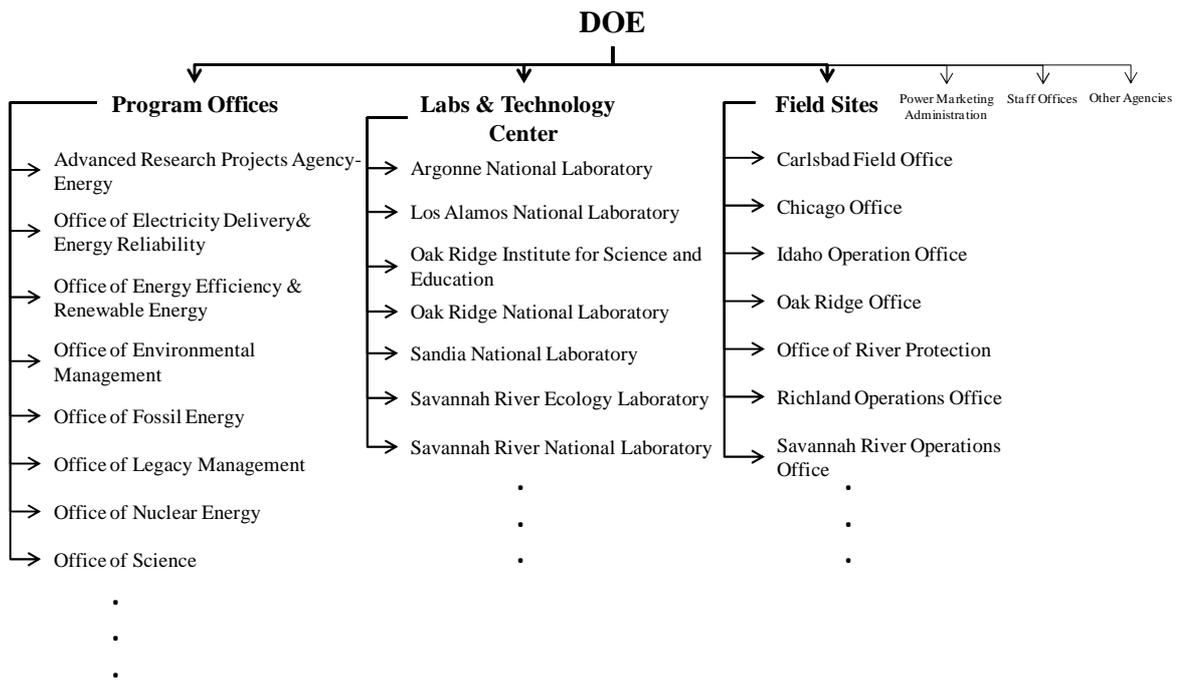


圖 四 美國能源部各處室組織簡圖

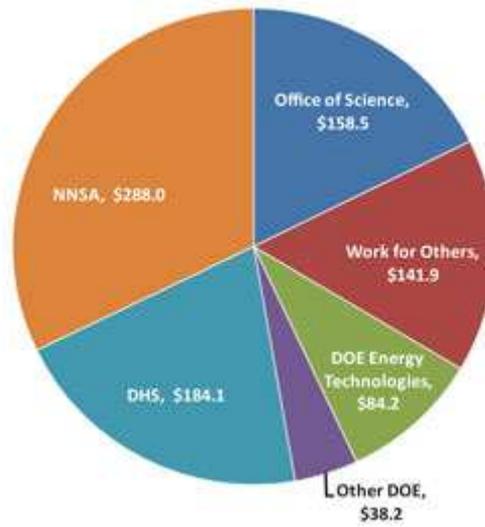
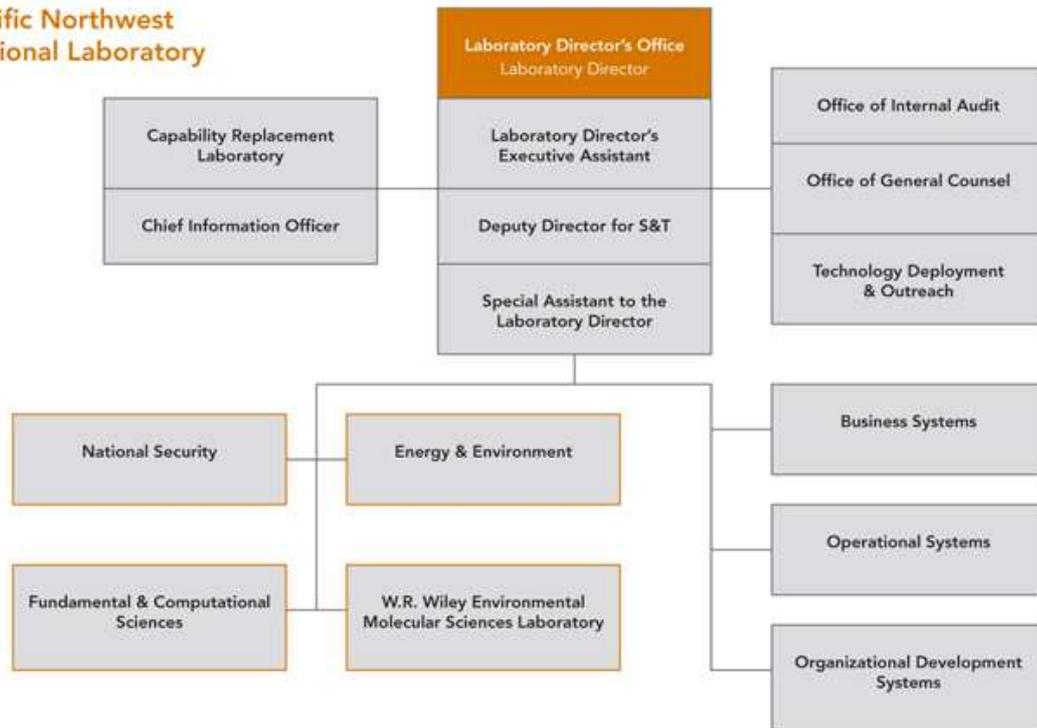


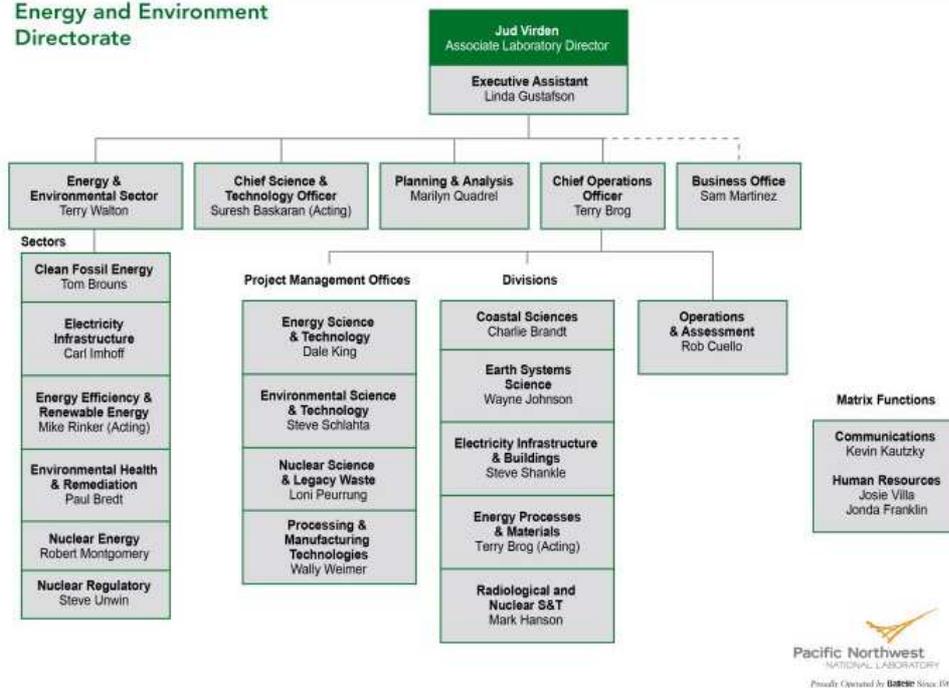
圖 五 2009 年 PNNL 計畫預算圓餅圖

Pacific Northwest National Laboratory



圖六 PNNL 組織架構

Energy and Environment Directorate



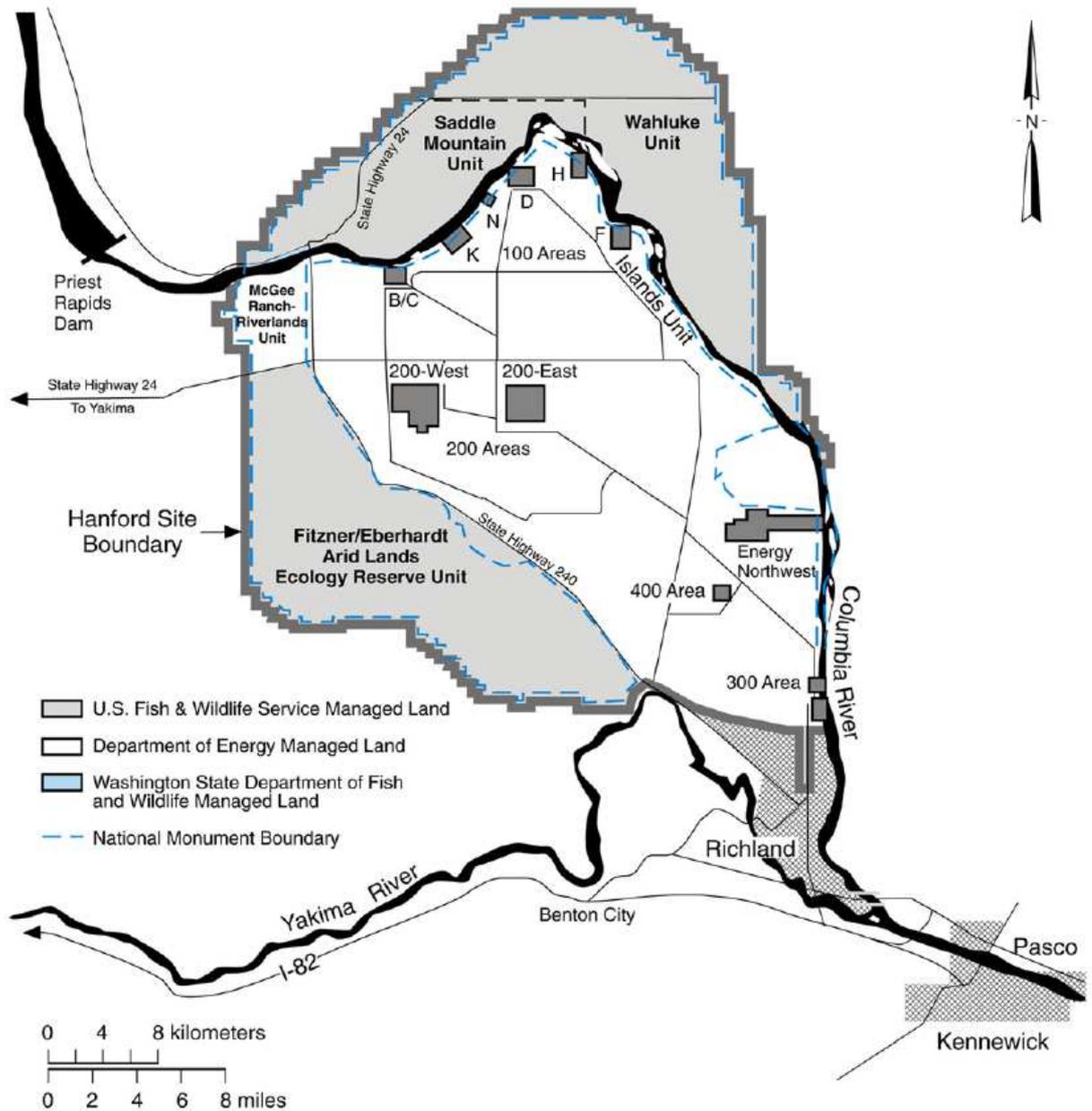
圖七 PNNL 能源與環境研究群之組織架構

(三) Hanford Site 背景與清理簡介

Hanford Site 的核子反應器位於美國華盛頓州哥倫比亞河沿岸，過去曾有數

個名稱，包括 Hanford Works、Hanford Engineer Works (HEW)、Hanford Nuclear Reservation (HNR)及 Hanford Project，1943 年 Manhattan Project 的其中一部份。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。哥倫比亞河流經本區的總長度約 80 公里，核反應器沿著河岸建置稱為 100 Area，而化學分離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（如圖 八）。緊鄰在最南端的位置是 Tri-Cities，包含了 Richland、Kennewick 和 Pasco 三個城市與其他小的社區，總居民人口達 23 萬人，主要經濟基礎是依附著 Hanford Site 相關計畫。

在冷戰期間，包含九座核子反應器（表 1）及五座大型鈾加工廠隨著計畫擴建，位置與運轉歷程分別如圖 八與圖 九所示，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 的科學家得到很多技術上的突破與成就。1943 年八月開始建造 B Reactor (105-B)，1944 年九月 13 日完工，是全世界第一座全規模鈾生產反應器，是由杜邦（DuPont）依 Enrico Fermi 實驗設計基礎建造而成。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 年十二月與 1945 年二月。1945 年四月起每五年送一批鈾至 Los Alamos。大部分的反应器都在 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。



圖八 Hanford Site 區域簡圖

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）以及多的科學研發中心，如 PNNL 與 LIGO Hanford Observation。

Hanford 的所有核反應器需要從哥倫比亞河抽取大量的水來散熱，從 1944 年至 1971 年間，泵水系統直接從河中抽取冷水至核反應器內，然後再回流至河中。在這些用過的水輸送回河流之前僅會在大型的水池（滯留池）內停留約 6 小時，不經其他處理即排放至河中。對於長半衰期的核種而言，這樣的滯留時間沒有任何影響，因此每天有數兆貝克活度的核種進入河中，這些行為被聯邦政府視為秘密行動。隨後，在華盛頓州西岸下游與 Oregon 海岸量測到輻射。

鈾分離程序也相同的釋放許多放射性核種到大氣中，並且隨著風擴散到華盛頓州的東南邊如部份的 Idaho、Montana、Oregon 及 British Columbia。1945 年至 1951 年間下風處暴露的放射性核種最嚴重，其中最多的核種是 I-131。這些放射性核種經由污染區域放牧的乳牛進入食物鏈中，居民也因為引用牛奶而遭到危害物質的影響。絕大部分的空浮物質在 Hanford 的例行運轉中都會釋放，然而有時會因為意外事件而造成大量的釋出。1949 年 Green Run 事件在兩天內釋出 8,000 居里的 I-131。另外一個嚴重污染的食物則是哥倫比亞河中的魚，因當地居民有些會捕撈河中的鮭魚等作為食物，因此也遭受污染危害。

1988 年 6 月 25 日，Hanford Site 被分為四大區域並且提議納入國家優先解決事項。1989 年 5 月 15 日，華盛頓生態署、聯邦環保署及能源部共同組成三方協議，擬定 Hanford Site 的法定環境復育整治架構。而這些機關現今以從事全球最大的環境清理計畫，這些計畫面臨到技術、政治、法規與文化利益等相互糾葛的難題等待解決。清理行動的三個重點成果為：1) 回復哥倫比亞河流域作為其他使用；2) 將長期廢棄物的處理與貯存轉移至中央高原地；3) 為將來作準備。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。最近幾年，聯邦政府每年約花費 20 億美金在 Hanford 的整治計畫。約計有 11,000 工作人員進駐進行清理與移除廢棄物、遭污染的建築和土壤。原訂計劃 30 年內至 2008 年完成至少一半的清理，但從 1989 年 10 月 4 日列於 Superfund sites 上的四個區域迄今只有一個完成清理。

儘管 1970 年期間 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 個大型地下桶槽內的高放射性廢棄物（約 204,000 立方米）及安定化程序。其中有三分之一的桶槽發生洩漏而污染到土壤及地下水。2008 年，大部分的液體廢棄物被輸送至相對安全的雙層壁桶槽內，但仍有 10,600 立方米的液體廢棄物及 100,000 立方米的鹽餅塊與污泥存放在單層壁的桶槽內，原計畫在 2018 年移除，目前已經重訂到 2040 年達成。估計另有遭桶槽洩漏污染的 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桶窖內，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。能源部最近正在 Hanford Site 建置一座玻璃化(vitrification)廠；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。Bechtel（San Francisco 基礎建設與工程公司）受雇來建造此玻璃固化工廠，估計建造成本約 120 億美元。2001 年開始建造，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。

Hanford Site 的運轉是由美國陸軍工程兵部隊（U.S. Army Corps of Engineer）開始，再移交給原子能委員會，隨後移撥到能源研究與發展管理局（Energy Research and Development Administration）。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 2 所列為 Hanford Site 運轉承包商的摘錄表。

表 1 Hanford Site 核反應器運轉摘要表

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

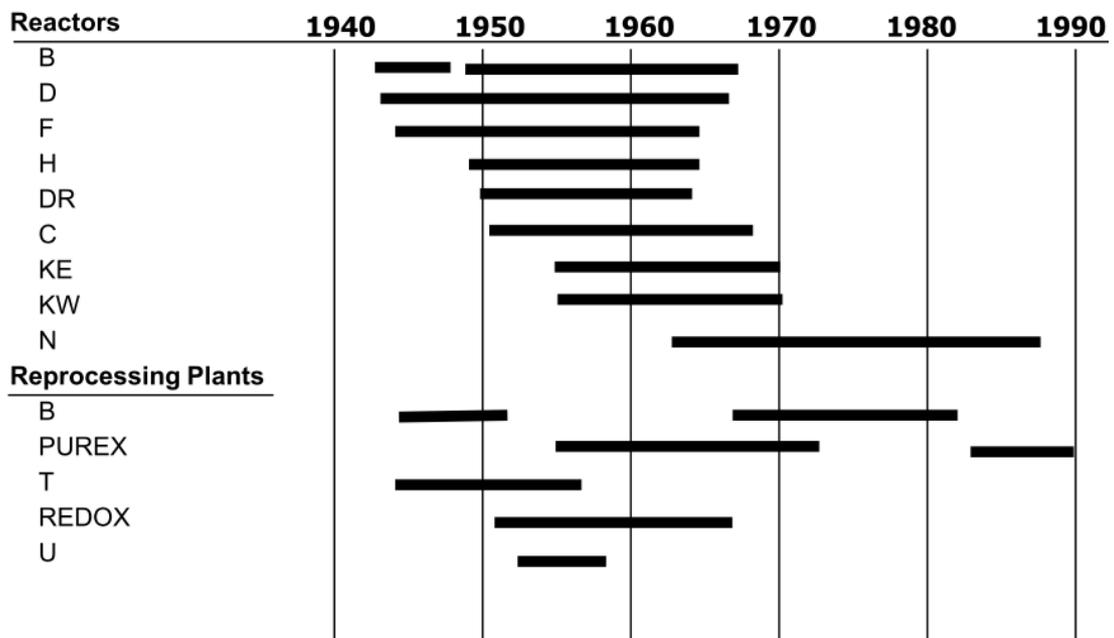


圖 九 Hanford Site 反應器及再處理廠之運轉歷程

表 2 政府 Hanford Site 運轉合約民營包商摘要表

Year Begun	Month	Organization	Responsibility	Remarks
1942	December 12	U.S. Army Corps of Engineers	Lead U.S. Government entity	Held role until January 1, 1947
1942	December 12	E.I. DuPont de Nemours & Company (DuPont)	All site activities	Initial Hanford site contractor
1946	September 1	General Electric Company (GE)	All site activities	Replaced DuPont
1947	January 1	Atomic Energy Commission	Lead U.S. Government entity	Replaced U.S. Army Corps of Engineers
1953	May 15	Vitro Engineers	Hanford Engineering Services	Assumed GE's new facility design role
1953	June 1	J.A. Jones Construction	Hanford Construction Services	Assumed GE's construction role
1965	January 1	U.S. Testing	Environmental & bioassay testing	Assumed GE's environmental and bioassay testing role
1965	January 4	Battelle Memorial Institute	Pacific Northwest Laboratory (PNL)	Assumed GE's laboratory operations - subsequently renamed Pacific Northwest National Laboratory
1965	July 1	Computer Sciences Corporation (CSC)	Computer services	New scope
1965	August 1	Hanford Occupational Health Foundation	Industrial Medicine	Assumed GE's industrial medicine role

1965	September 10	Douglas United Nuclear	Single pass reactor operations & fuel fabrication	Assumed part of GE's reactor operations
1966	January 1	Isochem	Chemical processing	Assumed GE's chemical processing operations
1966	March 1	ITT Federal Support Services, Inc.	Support services	Assumed
1967	July 1	Douglas United Nuclear	N Reactor operation	Assumed remainder of GE's reactor operations
1967	September 4	Atlantic Richfield Hanford Company	Chemical Processing	Replaced Isochem
1967	August 8	Hanford Environmental Health Foundation	Industrial Medicine	Name change only
1970	February 1	Westinghouse Hanford Company	Hanford Engineering Development Laboratory	Spun off from PNL with mission to build the Fast Flux Test Facility
1971	September	ARHCO	Support Services	Replaces ITT/PSS
1973	April	United Nuclear Industries, Inc.	All production reactor operations	Name change from Douglas United Nuclear only
1975	January 1	Energy Research and Development Administration (ERDA)	Lead U.S. Government entity	Replaced AEC - managed site until October 1, 1977
1975	October 1	Boeing Computer Services (BCS)	Computer services	Replaced CSC
1977	October 1	U.S. Department of Energy (DOE)	Lead U.S. Government Agency	Replaced ERDA - manages site presently
1977	October 1	Rockwell Hanford Operations	Chemical Processing &	Replaces ARCHO

		(RHO)	Support Services	
1981	June	Braun Hanford Company (BHC)	Architect & Engineering Services	Replaces Vitro
1982	March	Kaiser Engineering Hanford (KEH)	Architect & Engineering Services	Replaces BHC
1987	March 1	KEH	Construction	Consolidated contract includes former J.A. Jones work
1987	June 29	WHC	Site management & operations	Consolidated contract includes former RHO, UNC & KEH work.
1996	October 1	Fluor Daniel Hanford, Inc. (FDH)	Site management & operations	FDH is integrating contractor with 13 subcontracted companies
2000	February 7	Fluor Hanford	Site cleanup operations	Transition to site cleanup (13 Fluor subcontractors held various roles)
2009	October 1	Washington River Protection Solutions	Tank Farm cleanup operations	Transition to multi contractor roles (Mission Support Alliance MSA)

三、心得

(一) Hanford Site 廢棄物管理歷史

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桶槽廢棄物 Tank Waste 共計有 200,000 立方米 170,000 公噸的化學物質；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（圖十）。將 Hanford 的廢棄物及核子物料和其他美國核子武器單位相比，Hanford Site 所佔比例如下：

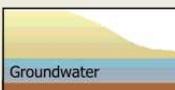
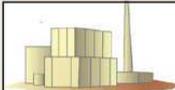
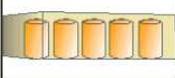
1. 廢棄物貯存與釋出的場址佔 25%（1200 處）
2. 總放射性活度佔 35%（約 3.5 億居里～10 億居里）
3. 桶槽廢棄物佔 60%（200,000 立方米）
4. 掩埋的超鈾固體廢棄物佔 60%（76,000 立方米）
5. 用過燃料佔 80%（2100 公噸）

300 Area 為核子燃料製造場（圖十一），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（圖十二），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（圖十三），也是桶槽廢棄物的所在地，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。

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桶槽內（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 高放射性廢棄物管輸至桶槽內，而這些桶槽有兩種型式分別為單壁（single-shell）和雙壁（double-shell），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。單壁桶槽破損洩漏 (或疑似) 有 67 桶約 5700 立方米，雙壁桶槽沒有洩漏。1944 至 1988 年共計產生了 2,000,000 立方米的桶槽廢棄物，其內有 10% (190,000 立方米) 進行再加工處理，23% (455,000 立方米) 將核種捕捉後進行地下處置，小於 1% (3800 立方米) 廢棄物滲入地下，利用蒸發法去除 57% (1,100,000)，至 2009 年桶槽內廢棄物體積剩原有的 10% (200,000 立方米)。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桶槽內傳送至雙壁桶槽，減少液體洩漏。Hanford Site 之土壤與地下水也已有污染調查並著手進行整治復育的計畫。然而玻璃固化這些廢棄物面臨到相當大的困境，因為過去未曾對於廢棄物進行分類，所有水溶液、有機液體、金屬與非金屬等廢棄物全部混合，這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。

	Volume	Curies¹	Chemicals²
 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	100,000 to 300,000 MT
 Facilities	5.5 million m ³	1 million	----
 Nuclear Material	700 m ³	150 million	----

(1) Nuclear materials include SF from K-Basins and Cs/Sr capsules. **Total** ~350M Curies ~330K to 530K MT

(2) Examples: NO₃, PO₄, Na, CCl₄, TCE, Na₂Cr₂O₇

Numbers approximate and rounded; after Gephart 2003

圖 十 Hanford Site 放射性廢棄物總類盤存

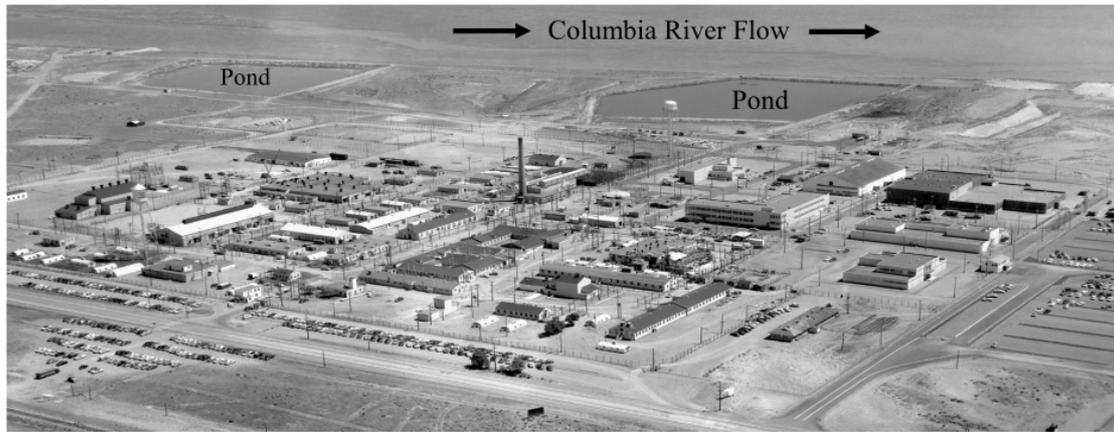


圖 十一 300 Area 燃料製造場（1953 年攝）



圖 十二 100 Area K-East 和 K-West 反應器與附屬設施

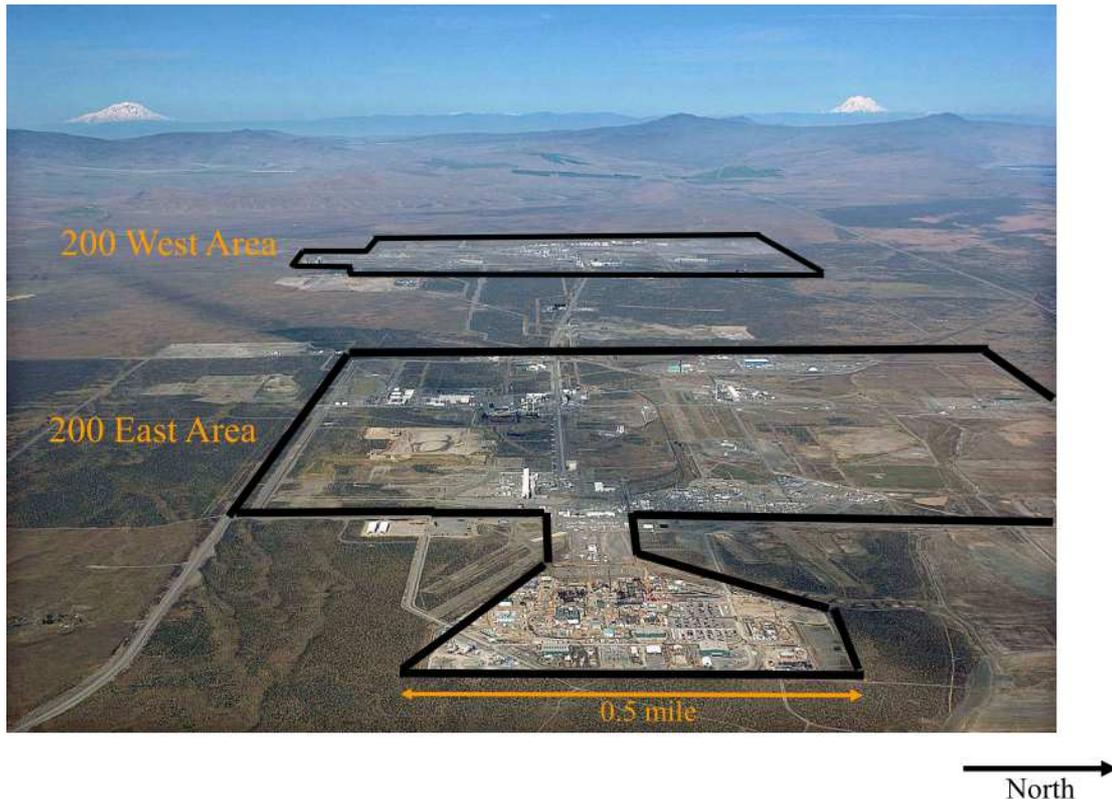


圖 十三 200 Area 中央高原區五座用過核子燃料再加工場

(二) K-Basins 污泥清理與除役參訪

本次公差任務之一是瞭解 K-Basin 的水下污泥清理情形與除役進展。透過與 PNNL 的專家訪談與研討對於 Hanford Site K-Basins 內所有用過燃料移出的成果，對於 K-Basins 的清理作業有更詳細的認識。

由於 N Reactor 持續運作很長一段時間，因此所產生的用過金屬鈾燃料量相當可觀（2100 公噸），這些燃料被運送到 K-Basins 進行水下貯存，原先計畫送到 T-Plant 進行再處理，然而美國宣佈停止用過核燃料的再處理計畫，因此這些存放的燃料一時之間沒去處。但金屬鈾燃料有氧化腐蝕以及和水反應產生大量的氫氣的特性，增加了貯存的風險。K-Basins 是所有核設施中最靠近哥倫比亞河的設施，當地有居民捕魚的行為，對岸也有不少的居民住戶，一旦發生爆炸或意外將是相當嚴重的事故，對環境與民眾造成的危害也將難以估計，因此 K-Basins 清理的重點就是將這些燃料移除。

因為 PUREX 的關閉，用過燃料分別存放於 K-East 和 K-West 兩個 Basins 內，

兩者貯存不同的地方在於 K-East 內的燃料貯存罐沒有上蓋，而 K-West 有上蓋；因此 K-East 所存放的用過燃料罐內與池底地板有相當大量的污泥，K-West 內的則相當少。由此可知，K-East 的清理難度遠較 K-West 高；K-East 池內的污泥估計約有 27 立方米，主要是燃料的腐蝕產物、金屬鈾、沙塵、氧化鐵、氫氧化鋁、石墨密封液（Grafoil^(R)）、離子交換媒（有機樹脂與沸石）、多氯聯苯、混雜碎片等，粒徑小於 0.634 公分。由於過去燃料是水平式進入爐心，退料時由反應爐後端水平推出，直接掉落高度約 15 公尺的池水內不鏽鋼表面，造成燃料表面毀損也加劇了後續腐蝕的情形，如圖 十五所示。

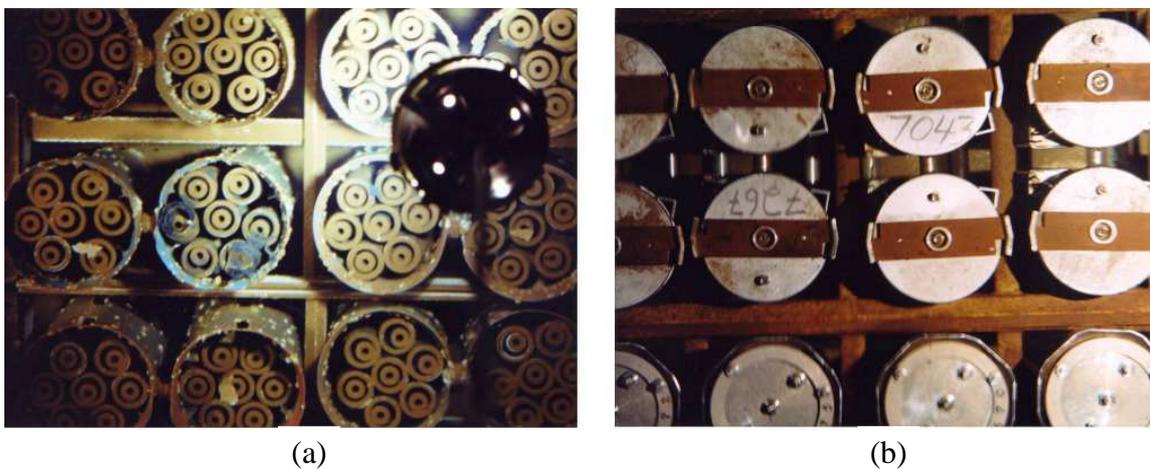


圖 十四 (a) K-East 與(b) K-West 用過燃料貯存情形



圖 十五 K-East 內之用過金屬鈾燃料毀損與腐蝕情形

為解除 K Basins 內存放之用過金屬燃料對環境與民眾之威脅，所擬定的清理計畫流程如圖 十六所示。池內主要污染物有四類，污泥將進行中期貯存而其中一部份會進行處置，水在處理後進行處置，碎片進行處置，燃料則先透過清洗將污泥分離後裝入提籃內再放入多道式重裝罐（Multi-Canister Overpack, MCO）與護箱內，再送至低溫真空乾燥廠（Cold Vacuum Drying Facility）進行燃料乾燥作業，最後再運送到燃料罐貯存庫（Canister Storage Building, CSB）內貯存。故新增兩座設施（圖 十七）分別是 CVD 在 100 Area K-Basin 附近，CSB 建於 200 Area。

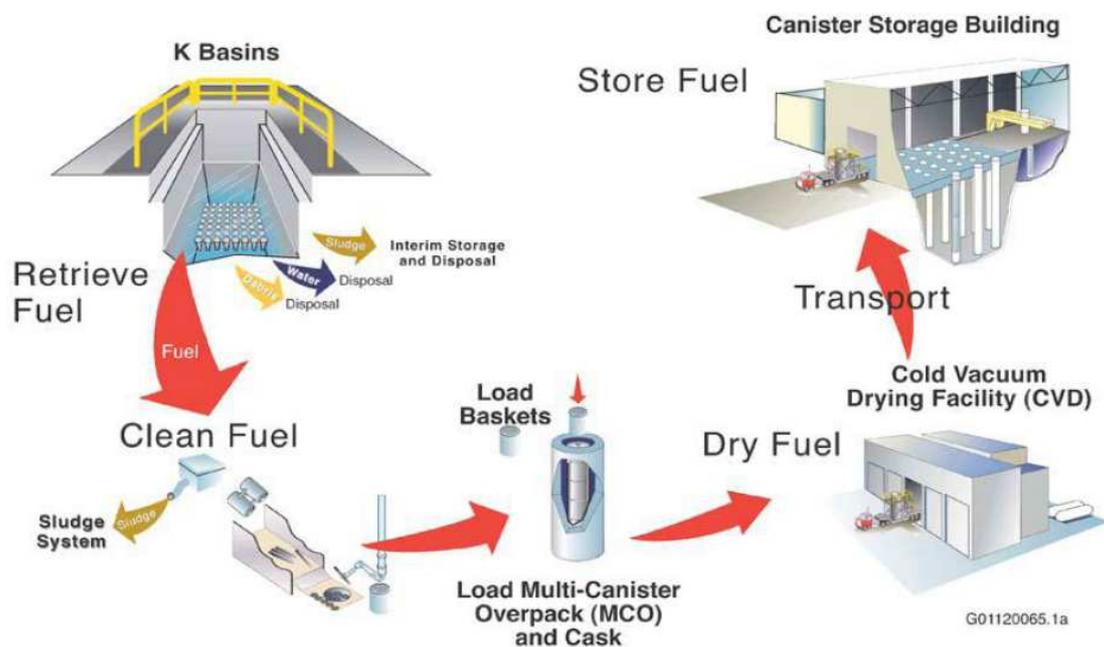


圖 十六 K Basins 燃料移除計畫流程圖



Cold Vacuum Drying Facility



Canister Storage Building

圖 十七 K-Basins 燃料處理設施：（左）低溫真空乾燥廠與（右）燃料貯存庫

清理 K-Basins 過程中池水的可見度不良嚴重影響燃料和污泥的操作；添加入水中的化學品和生物的滋生也導致燃料與池壁結構的腐蝕。懸浮固體增加了輻射劑量率以及空浮污染；沈澱物則被覆在池底和燃料表面。透過監測離子交換器中 ^{137}Cs 發現燃料的腐蝕情形是由於 Al/Zr 套管發生電流效應(Galvanic)；在 1970 ~1980 年代由於池內發現生物的滋生，在水中加氯導致鋁罐表面嚴重腐蝕，後來改用雙氧水抑制生物的成長，但過氧化物導致金屬鈾的腐蝕，1983 年改利用冷卻法（10~15 °C）才成功抑制生物的成長，並且淨化水質至導電度為 1~2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。2004 年由於退出燃料的滑道孔進行灌漿作業，使得水中的 pH 和導電度增加，池內金屬和矽氧化物膠體發生沈澱，再次使池水的可見度變差，並增加空浮放射性濃度。

為淨化與持續維護水質，建置每分鐘處理量達 1200 公升的 Intergrated Water Treatment System (IWTS)，如圖 十八所示，在燃料清洗期間繼續維持 K-West Basin 的池水澄清；主要單元組件包含用來移除大碎片（6350~600 μm ）的篩網（Knockout Pot），去除細碎片（<600 μm ）的沈澱管（Settler Tubes），去除所有 Basin 作業中所產生微粒（~35~5 μm ）的砂濾器（Basin Sand Filter），最後再利用離子交換器移除放射性核種。

鑑定燃料與污泥的特性是後續處理、貯存或處置的關鍵步驟。由於金屬鈾燃料腐蝕過程中會產生大量的氫氣，對於安全運送與貯存是相當關鍵的變因，因此 K-Basin 內的燃料及污泥會運送至 PNNL 的熱室內進行前處理與分析。用過燃料分析的目標是量測含水率，並測試低溫真空乾燥的參數；污泥由於成份相當混雜，需要檢驗的項目包含：

- 放射性核種
- 有機物質
- 礦物相態
- 特定核子物料的含量
- 物理特性：密度、沈降速率、粒徑分佈、流變現象、熱傳導係數
- 反應性：熱重分析（thermal gravimetric analysis）、熱量測定（calorimetry）、氣體產生率
- 剩餘樣品則用來作為各種處理程序的測試

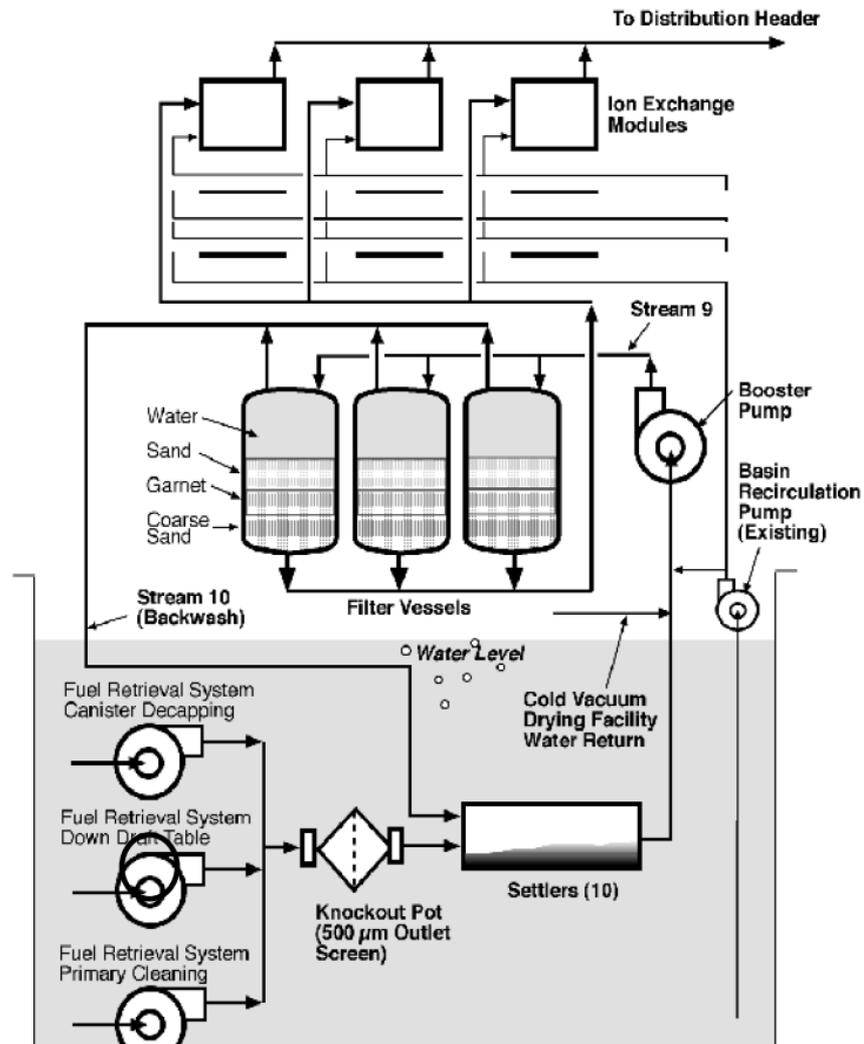


圖 十八 Intergrated Water Treatment System (IWTS)示意圖

1. K-Basins 內用過燃料的取樣與處理

從 K-East 水下取出燃料組件時，可明顯觀察到有大量污泥逸散（圖 十九），這些燃料組件可能含有結合水(bound water)與裂隙水(crevice water)，所取得的燃料元件送至 PNNL 的熱室（327 館）進行低溫真空乾燥的測試，而金屬鈾的反應速率數據是燃料乾燥時的安全基礎參數。從水中取出燃料樣品後裝入完全密閉的盛裝容器內（圖 二十）再運送至熱室進行切割，以量測內部孔隙體積並估算活性內部表面積。

除了送至熱室分析的用過燃料樣品外，從水底的燃料罐內取出的燃料會先在水下裝入清洗器（如圖 二十二所示）的桶內，清洗器會旋轉並搭配高壓水進行

清洗，將燃料表面的污泥、覆蓋物、金屬鈾及外套管碎片等脫除，這些雜質再進入 IWTS 進行處理。

清洗過後的燃料再利用 Schilling Robitic Systems 之 CONAN 機械臂（圖二十三）操作，步驟如下：

- (1) 將內外部的元件分離
- (2) 燃料進行分類檢整
- (3) 將燃料、碎片與細粒裝載到 MCO 提籃內
- (4) 貯存燃料後進行第二次清洗。

CONAN 機械臂的特性：

- (1) 伺服閥與連結控制電子元件在水上移動
- (2) 利用 6 個自由度最大可達 2 米長
- (3) 全部伸展時最大提舉重量達 170 公斤
- (4) 操作壓力為表壓 204 大氣壓
- (5) 主體為陰極處理鋁合金
- (6) 表面拋光處理減少後續除污問題

運送用過金屬鈾燃料的主要容器為多道式重裝罐（Multi-Canister Overpack, MCO），其內部可容納五至六只裝載燃料的提籃，有些提籃會特別設計成裝載破損燃料的碎片及殘骸，這個容器符合 ASME Section III 的壓力容器規範，且具有 N stamp，是主要安全級的防護措施。裝載入 MCO 的燃料為濕的狀態，運送至 CVD 進行乾燥程序（圖二十五）：排水、抽真空、回灌氬氣。乾燥步驟對於後續的貯存是必要的程序，因為可以盡量減少金屬鈾燃料和水發生反應並且降低水經輻射裂解產生氫氣造成 MCO 在貯存期間累積壓力。而低溫真空乾燥的程序面臨：容器內的水因為抽真空致溫度驟降而結冰，曾經透過輕微加溫的方式改善但效果有限，容器內部確實的含水率無法得知。目前 K-Basins 所有燃料已全數裝載入 MCO 並完成乾燥程序，CVD 已不再運轉。經乾燥程序後，將裝載燃料的 MCO 運送至 200 Area 增建的 Canister Storage Building (CSB) 作中期貯存。CSB 的立體示意圖及內部設施影像如圖二十六所示，該廠房的建置共花費 52,000,000 美元。廠房內利用自然對流的方式冷卻，總共有 220 個貯存孔位，共 400 只 MCO

貯存於內，每兩桶 MCO 以堆疊方式放入貯存孔內，每六桶 MCO 為一組監控其氫氣累積的情形。



圖 十九 K-East 內用過燃料取出過程影像



圖 二十 K-Basin 內用過燃料取出後裝載於密閉盛裝容器

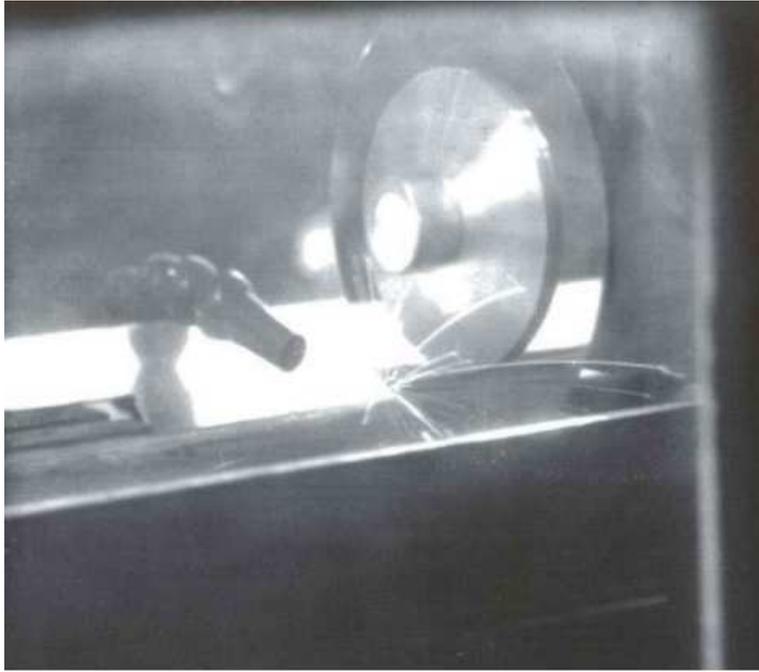


圖 二十一 燃料樣品於熱室內進行切割

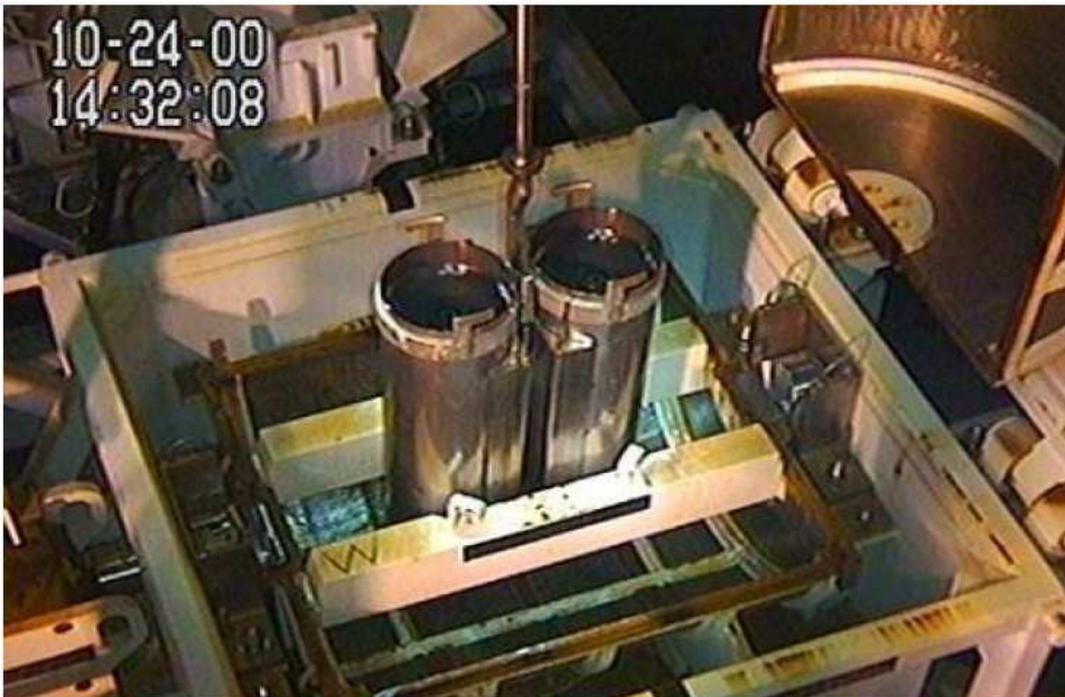


圖 二十二 K-Basins 取出之用過燃料清洗器



圖 二十三 Schilling Robotic Systems — CONAN 機械臂水下裝填燃料



圖 二十四 多道式重裝罐 (Multi-Canister Overpack, MCO)



圖 二十五 多道式重裝罐 MCO 進行真空乾燥程序

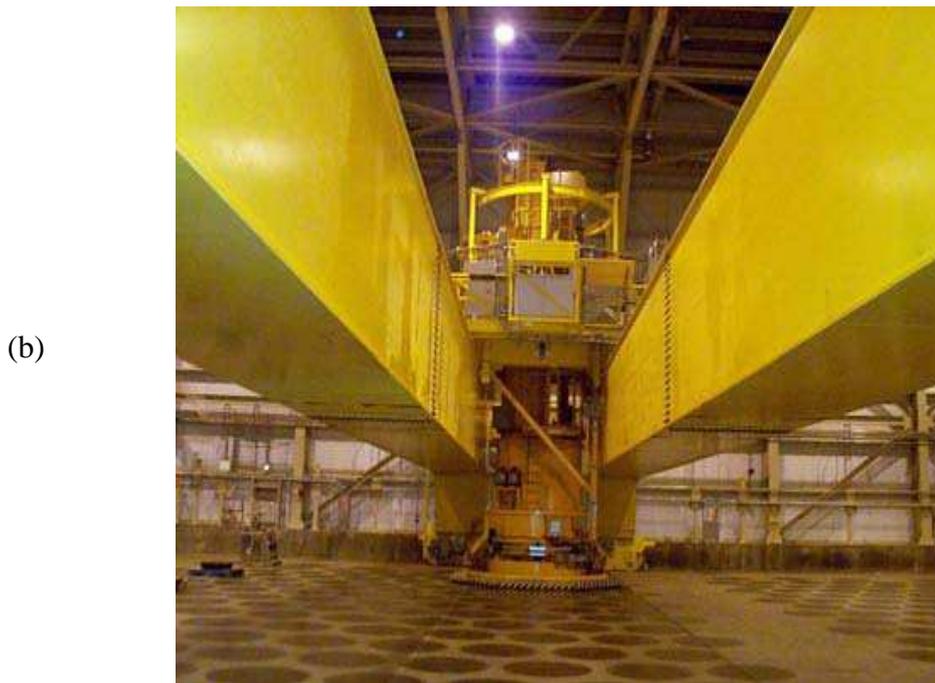
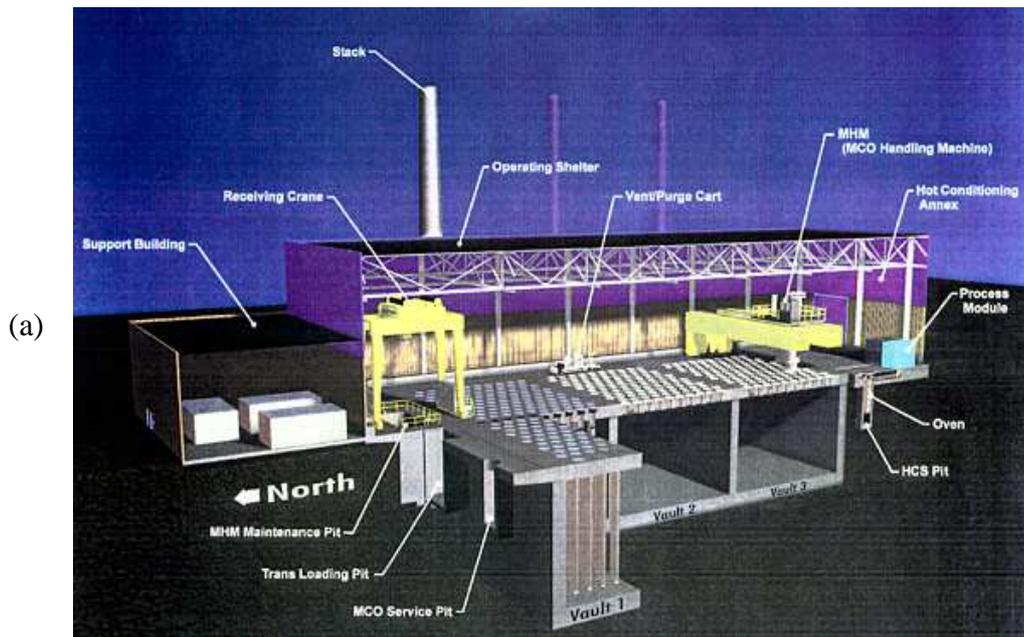


圖 二十六 Canister Storage Building (a)立體示意圖與(b)廠內操作設備

2. K-Basins 污泥的取樣與處理

燃料罐內的污泥取樣系統及裝置如圖 二十七與圖 二十八所示，由於罐內的空間小，因此利用可撓式軟管深入罐內，再將抽取出的污泥收集於盛裝罐內；而

池底污泥的收集系統與裝置如圖二十九與圖三十所示；不論是罐內或池底的污泥成份複雜，從比重最輕的沙塵到最重的金屬鈾都有，其中金屬鈾比重高達 17 以上，造成管輸與取樣上的難題，尤其是量最大的池底污泥。

爲要更清楚瞭解污泥的主要成份以擬定處理策略，將這些收集到的污泥以多重屏蔽的盛裝容器運送至 PNNL 熱室 325 館（圖三十一）進行處理與分析由於 Hanford Site 在秋冬季常有強風，因此廠房內部會有大量砂石，從 K-East Basin 內取樣的污泥外觀發現砂礫很多（圖三十二），另外可以觀察到一些離子交換樹脂，這是在一次操作意外使得離子交換器內的樹脂洩入池內。分析結果最多的放射性核種包括：鈾、鈾、銻-137 與銻-90，亦分析到含量不少的鐵氧化物，但仍有許多成份不明，但這些污泥的活度和反應性都很高。爲了量測這些污泥在水中的沈降速率，工作人員取了部份污泥（包含 K-East 及 K-West）放入 2 公升的量筒內（圖三十三），曝氣攪拌後靜置攝影觀察變化，後來發現這些污泥一開始會沈降，但後來因爲產生大量的氫氣，使量筒中的污泥浮起（圖三十四），透過量測其產氫速率可以提供設施安全防護設計的重要參數。

研究人員在 PNNL 熱室內曾經嘗試數種處理或分類這些污泥的方式，例如，高溫氧化、添加過氧化物氧化、加酸溶解與淘洗分離等手段；但從實驗結果顯示不論高溫或过氧化物的氧化方式對於金屬鈾的反應速率均不高，而且過程中仍然會產生大量的氫氣；加酸溶解所的問題是：用過燃料溶解後生成大量的分裂產物（銻與銻）及超鈾元素，會直接被不溶於酸的樹脂吸附形成超鈾有機廢棄物。因此，目前仍未有妥善安定化這些污泥的有效程序，未來這些污泥可能利用玻璃固化的程序處理，但如此複雜的成份造成進料不均勻、熔融不穩定及玻璃固化體分離的棘手問題。目前 K-East 所有的污泥已經利用 House-in-House 傳輸系統（圖三十五）將其輸送至 750 公尺遠的 K-West 水下工程容器（Engineered Container）內貯存（圖三十六）。這些大型的工程容器長 3.6 米、寬 1.5 米、高 4 米，K-East 池底的污泥抽至 K-West 內三座大型的工程容器內，沈降器內的污泥也使用一座，K-West 本身池底的污泥也利用真空吸引的方式置入兩座。這些工程容器除設計可也接收污泥外，也有未來在取出的設計，六作全部位於 K-West Basin 內 17 英尺深的水下。

在輸送這些 K-Basin 污泥的程序獲得經驗回饋：

- (1) 若要有效率的輸送這些污泥就要盡量提高污泥的濃度；
- (2) 進料系統：從底部抽取污泥效率非常差，後來新系統改從上方抽取；
- (3) 輸送儀器：原本使用超音波流量計但會受到管壁內氣泡的干擾，後來發展其他新的發法取代；
- (4) 舊系統使用離心式泵然而葉片磨損的狀況相當嚴重，新系統改用蠕動泵克服磨損與堵塞問題；
- (5) 凝集劑：一開始選用錯誤的型式導致砂濾系統堵塞，後來更改其他凝集劑才克服此問題（非離子型 Clarifloc^(R) N-3300P）；
- (6) 原始泥漿比例僅 0.1 vol.% 的固體含量，改善後的新系統增加為 10 vol.%。

為清理 K-Basin 污泥曾建置四套不同處理程序，但後來因為衍生出其他無法克服的問題無法順利運轉故全部廢棄，由這些失敗程序得到的經驗回饋：

- (1) 應該更清楚的瞭解要解決的問題；
- (2) 在程序階段及早與監管單位和利益關係者協議發展的最終狀態；
- (3) 選擇一條可以達成的途徑而非完美得途徑（Pick an achievable path as opposed to perfect pathe）；
- (4) 不要低估成本；
- (5) 發展一套強大的物理模擬機構，不可能僅用一種模擬達到需求；
- (6) 以實際的廢棄物進程序驗證。

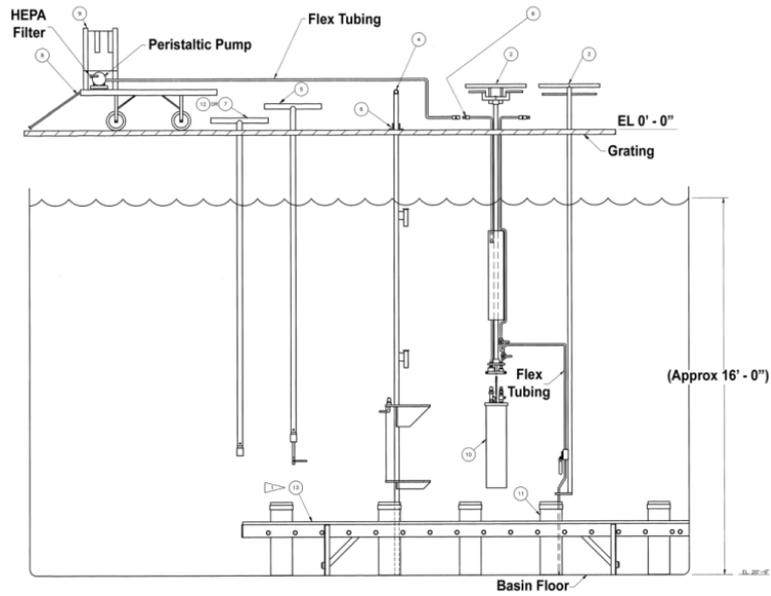


圖 二十七 燃料罐內污泥取樣系統

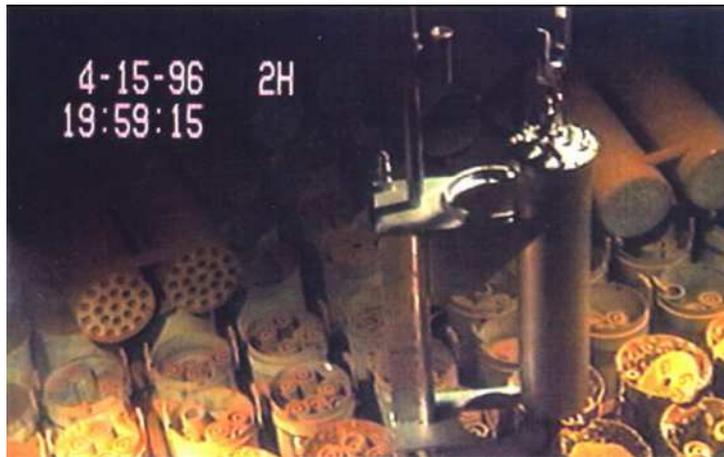


圖 二十八 燃料罐內污泥取樣裝置

“Wye” Mounted to U Brackets
on Side of Containment Box

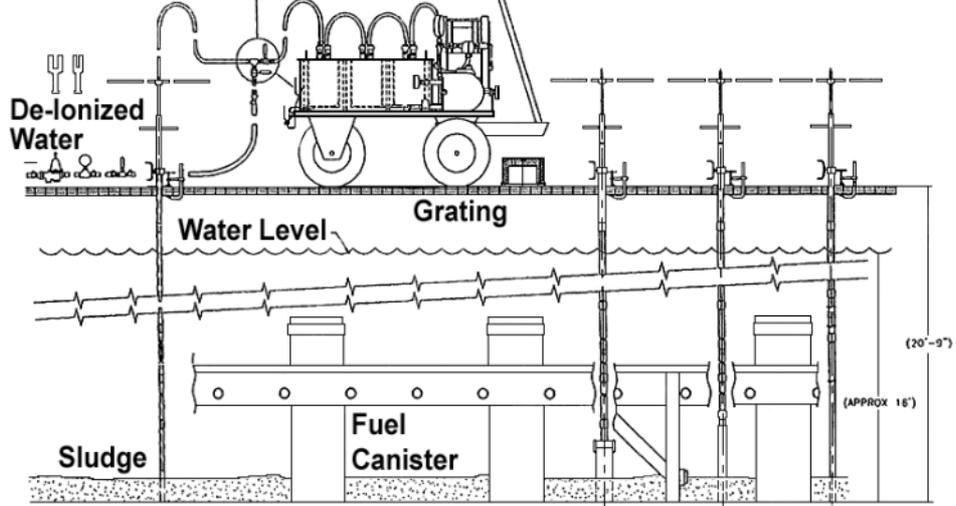


圖 二十九 池底污泥取樣系統



圖 三十 池底污泥取樣系統裝置



圖 三十一 污泥包裝運送至 PNNL 熱室 325 館

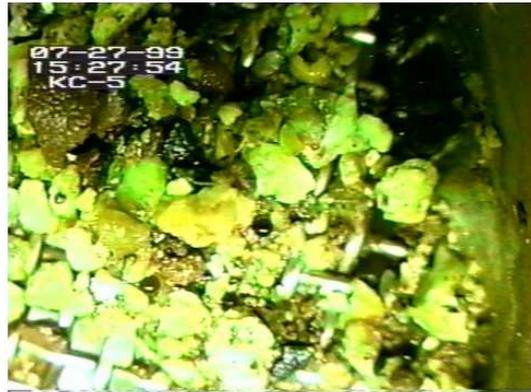
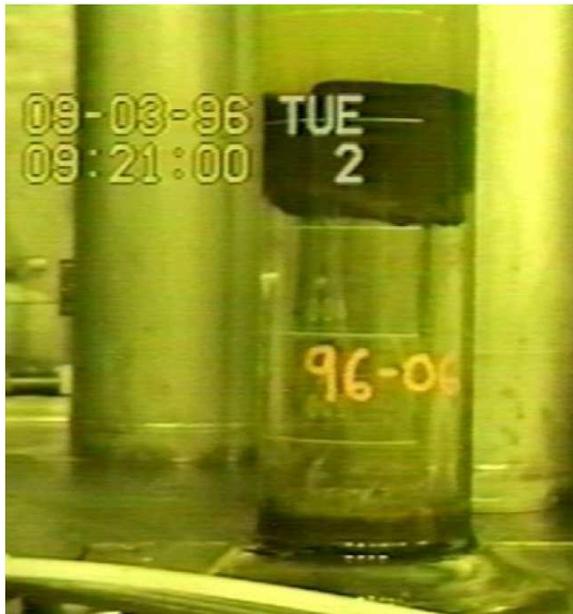


圖 三十二 K-East Basin 取出之污泥



圖 三十三 KE 與 KW 燃料罐內污泥沉降試驗觀察



KE Canister Sludge 96-06



KW Canister Sludge 96-17

圖 三十四 KE 與 KW 燃料罐內污泥產氫情形

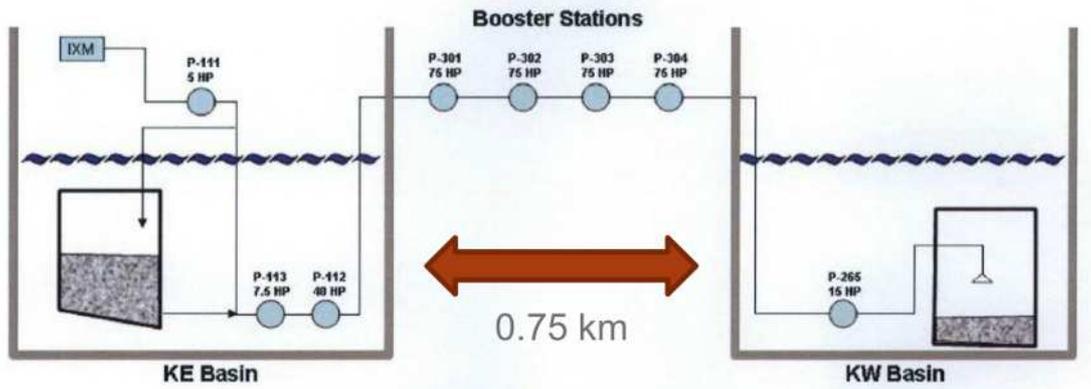


圖 三十五 House-in-House 污泥傳送系統

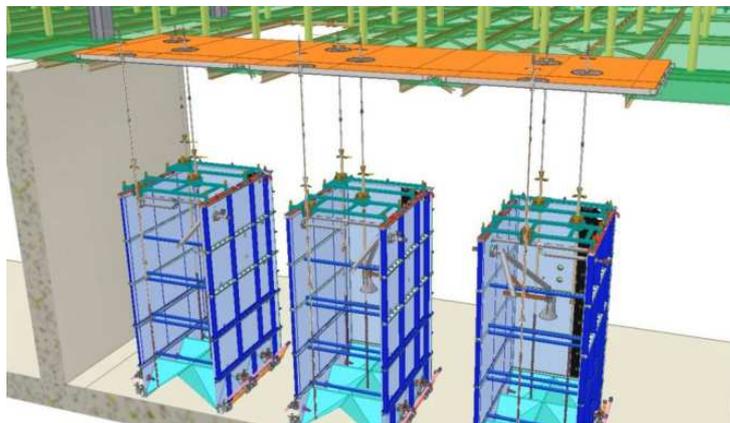


圖 三十六 K-West Basin 內盛裝污泥之工程容器

從 1995 年迄今 K-Basin 的清理已花費約 11 億至 20 億美元，主要的成就包括：所有在燃料已經移至 CSB 遠離哥倫比亞河，池內的污泥全數收集到工程容器內存放於 K-West Basin 中，K-East Basin 已經完成拆除（圖 三十七）。未來處理污泥的策略為：將貯存容器裝運到 T-Plant 作中期貯存，經處理包裝後送至 WIPP 處置。



圖 三十七 K-East Basin 完成清理與拆除

(三) Vitrification 玻璃化技術

本次由於接待者 Dr. Vienna 本身是玻璃化技術的專家，因此有幸可以初探這一門領域的學問與技術。玻璃化程序有三個主單元，分別是進料系統、熔融系統及廢氣處理系統。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。除了進料桶槽與熔爐外，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。

Dr. Vienna 於 2010 年發表於 *International Journal of Applied Glass Science* 探討關於美國核廢料的玻璃化發展現況與未來展望。文中指出先進的燃料循環技術已經可以有效的將用過核子燃料中的放射毒性高、長半衰期的超鈾元素移除，這過程中會產生含有分裂產物、無活性化學品及微量超鈾元素的廢棄物，這些廢料可以有效的利用核廢料玻璃化技術加以固化，使廢料玻璃體可以安全的貯存、運送與處置。玻璃化技術也已經應用到用過核子燃料分離後的高放射性副產物處

理。近期玻璃化程序的主要進步是應用到國防再處理產生的高放射性廢料（如桶槽廢棄物）及商用核燃料的循環。

生產廢棄物玻璃的熔爐技術主要有兩種型態：

1. Joule-heated, ceramic-lined melter (JHCM)，是 1973 年美國研發並且用在 West Valley Demonstration Project (WVDP, 1995~2003)、Savannah River Site (1995~1999 : M-Area Vitrification Facility 及 1996 迄今的 Defense Waste Processing Facility, DWPF)、日本的 Tokai Plant (1994 迄今) ; Mayak Chemical Combine (MCC, 1994 至今)、印度 Tarapur 和 Trombay 的 Bhabha 原子研究中心及德國 Karlsruhe 的 German Vitrification Plant (VEK, 2009 迄今)等，熔爐型式如圖 三十八所示。

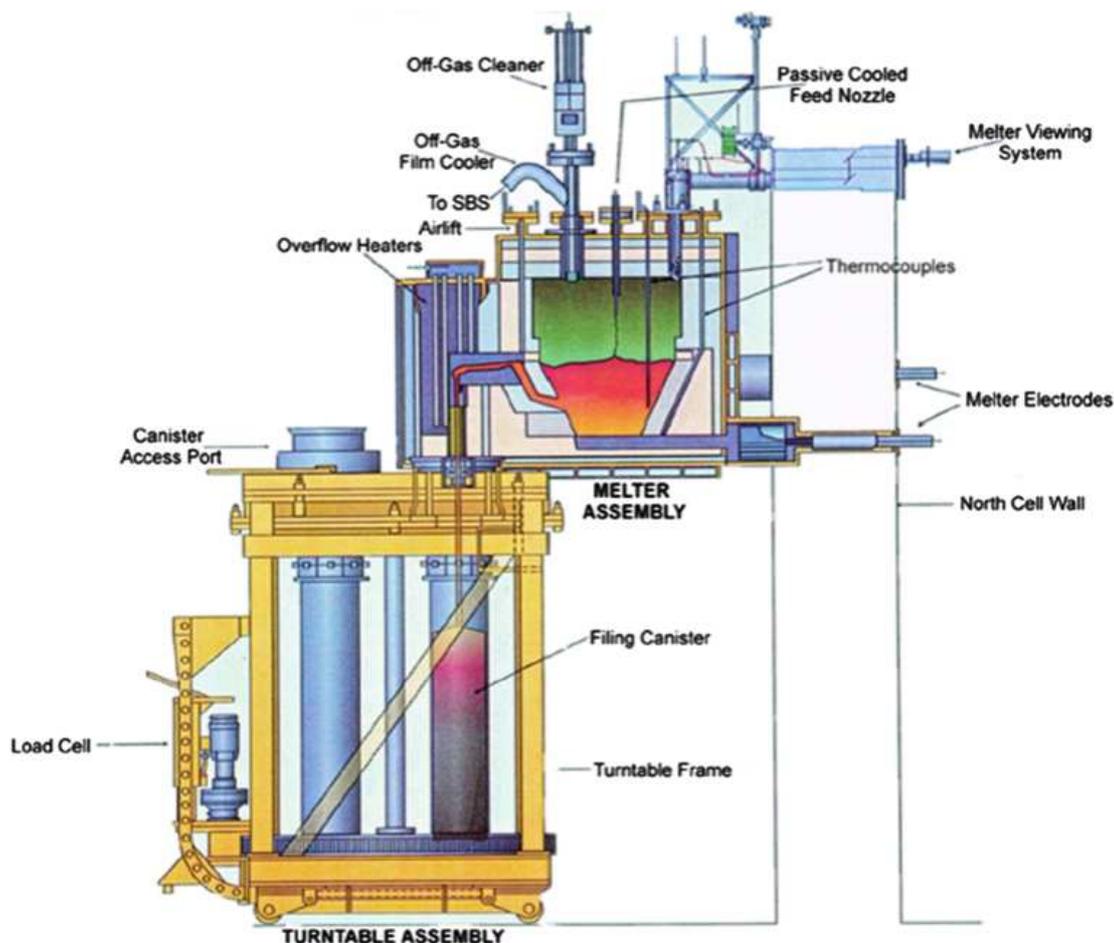


圖 三十八 West Valley Demonstration Project 熔爐型式 (W.F. Hamel, et al. Radiowaste Magazine, 27-40, 1988)

2. Hot-walled induction melter，1962 年法國所發展的熔爐，用於 Marcoule (1978~2009)、Lahague (1989 迄今)，Sellafield 的 Windscale Vitrification Plant (WVP, 1991 迄今)，熔爐型式如示。



圖 三十九 LaHague Hot-walled induction melter 影像

以上兩大技術處理效率的限制主要在於廢棄物組成型態的限制，以及吞吐量大小。近期因為這兩個技術的突破，使得對於廢棄物型式的接收更具彈性，且吞吐量更大。新一代的 JHCMS 目前正安裝在 Hanford Tank Waste Treatment and Immobilization Plant (WTP)，由 EnergySolutions (Salt Lake City, UT)所設計，如圖四十所示。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)，如圖四十一所示。此種型式的熔爐並非新型，2009 年 9 月第一次用來處理燃料再處理後的高放射性廢棄物。墨西哥的 Scientific and Industrial Association Radon 及韓國 Ulchin 的 Hydro & Nuclear Power 都使用同一型的熔爐。

經 John Vienna 的審視評估後認為進步型 JHCMS 及 CCIMs 兩種熔爐最適合用來作為美國 legacy tank wastes 的玻璃化處理。

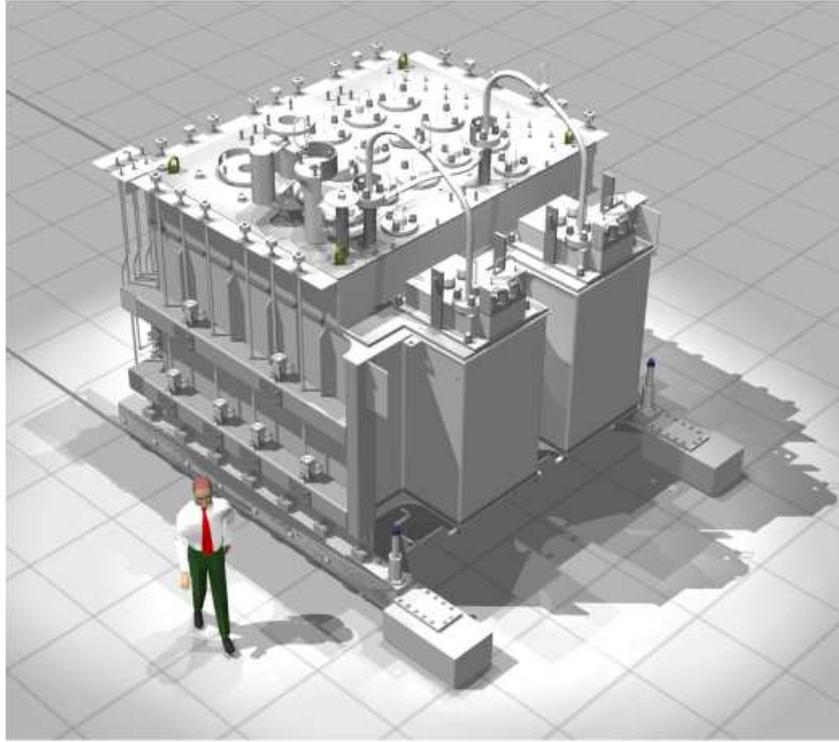


圖 四十 Waste Treatment and Immobilization Plant, WTP 示意圖



圖 四十一 直徑5公分、高60公分的CCICM（CEA Industrial Scale Demonstration Platform in Marcoule, AREVA）

由於 hot-walled induction melters、Joule-heated ceramic melters 及 CCIMs 這些熔爐技術的改良，使得高放廢棄物的玻璃化計畫在各地開始施行，如表 3 所列。

表 3 商用核子燃料再處理廠附屬玻璃化技術摘錄

Site	Nation	HLW vitrification technology	Glass produced, MT (to date)	Comments
Kalpakkam	India	HWIM	Under startup	
LaHague	France	HWIM	5950 (December 2009)	One CCIM installed in 2009
Lanzhou	China	JHCM	Under Construction	
Mayak	Russia	JHCM	5700 (October 2009)	Alkali-alumino-phosphate glass
Sellafield	United Kingdom	HWIM	1950 (May 2009)	
Rokkasho	Japan	JHCM	Under Startup	
Tarapur	India	HWIM	WIP- not available	
		JHCM	AVS-12 (May 2010)	
Tokai	Japan	JHCM	124 (May 2008)	
Trombay	India	HWIM	9.1 (May 2009)	

HLW, high-level waste; JHCM, Joule-heated, ceramic-lined melter; HWIM, hot-walled induction melter; CCIM; cold-crucible induction melter.

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讓核廢料的處理更有效率，且能使核能發電所產生的廢棄物在處置時達到安全及經濟的效益。

四、建議事項

- (一) 本次參訪美國能源部太平洋西北國家實驗室能有機會和多位放射性廢棄物管理專業人員直接溝通對談，並已取得聯繫方式。PNNL 研究人員對於未來可能和本所進行合作也抱持歡迎與正面的態度，後續若本所舉辦核能相關的研討會可邀請 PNNL 研究人員參加，除經驗的交流外或有機會雙方進一步合作。
- (二) Hanford Site K-Basins 內的燃料已經移除，污泥也妥善收集存放於 K-West Basin 內，相關除役清理的資訊、文件與報告可以透過網站下載：
 1. <http://www.pnnl.gov/publications/>
 2. <http://www.osti.gov/bridge/>第 1 個網站為 PNNL 之論著系統，可透過關鍵字、題目、作者與報告編號搜尋；第 2 個網站為美國能源部所屬的科學與技術資訊，可查詢能源部所屬單位、場址與國家實驗室等各領域資料文件。K-Basins 的清理過程影像亦可至 <http://www.youtube.com/watch?v=ISm9sZ6Vi5U> 觀看。
- (三) PNNL 參與 K-Basins 內的燃料特性研究與移除計畫，其中對於用過金屬鈾燃料的特性與氧化（安定化）有相當多的研究數據與結果；然而，對於用過金屬鈾燃料的氧化仍無法得到有效率的程序，相關研究人員也表達希望可以提供本所經驗，或有機會進一步合作。
- (四) 由於美國地大物博，相對於放射性廢棄物的管理策略與資源極為有限的台灣差異極大，但美國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，PNNL 本身也開放許多合作計畫予非職員，尤其在暑假期間有為數相當多的學生、教師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，未來若能透過研究人員的交流或實習，將可孕育並提昇本所的研發能量。
- (五) PNNL 所屬 APEL 投入在玻璃化技術的研發上已經超過 30 年，所累積的經驗及成果極為寶貴，未來國內若要進行相關的研究計畫，將有很大的機會需要與其合作，因此建立持續的聯繫平台將有助於推動合作。