

出國報告（出國類別：實習）

赴美國愛達荷國家實驗室實習

服務機關：核能研究所

姓名職稱：黃尚峯 助理研究員

派赴國家：美國

出國期間：106年7月14日~106年8月27日

報告日期：106年10月19日



# 摘要

為提升本所熱室營運與改善管理及環境維護與廢棄物處理之能力，並增加熱室關於照射過核子燃料與核材料檢驗與分析之技術能力，本次實習公差前往位於美國愛達荷州愛達荷福爾斯市之愛達荷國家實驗室 (Idaho National Laboratory, 以下簡稱 INL)，學習該實驗室熱室管理、廢棄物處理及照射過核子燃料與核材料檢驗與分析之相關技術。

本次實習主要地點位在 INL 之核材料及燃料研究園區 (Materials and Fuels Complex, MFC) 之分析實驗室 (Analytical Laboratory, AL)，AL 內有 6 座連接但獨立的熱室，還有放射性化學、濕式樣品製備及未照射核燃料處理等特殊用途的手套箱，分析儀器則有氣體質譜儀 (Gas Mass Spectrometer)、液體分析質譜儀等。實習過程中曾經學習如何使用 Gamma Spectroscopy 進行放射性廢棄物之分類，及使用氧氮氫分析儀 (ONH Analyzer) 分析樣品內的氫含量，而為了提升樣品品質，也學習到如何使用 Gas Pressurized Extraction Chromatography 及 Radiostrontium Separation 技術製備更獨特的樣品，以獲得更精準的分析結果。

分析實驗室在 INL 的角色重點放在用過核燃料及放射性廢棄物的分析，這次學習到的四種技術均與這兩項重點相關，這也是本所熱室實驗室所要積極更新的技術能力，例如氧氮氫分析儀可用來分析鋳合金護套內的氫含量，根據此結果可分析燃料度對燃料運行的影響，而 Gamma 能譜儀更是可先將熱室內的放射性廢棄物進行分類，減輕倉儲壓力。本文將實習時所學習到的技術重點記錄下來，並從 INL 帶回這些技術執行時的標準作業程序作為本文附件，希望可以在本所熱室技術能力更新時提供幫助。

# 目 次

(頁碼)

摘 要 . . . . .	i
一、目 的 . . . . .	1
二、過 程 . . . . .	2
三、心 得 . . . . .	45
四、建 議 事 項 . . . . .	47

# 一、目的

本次公差實習的地點為美國愛達荷國家實驗室(Idaho National Laboratory, 以下簡稱 INL), 主要實習內容是觀摩及學習 INL 之熱室營運與改善管理及環境維護與廢棄物處理, 及研習 INL 熱室關於照射過核子燃料與核材料檢驗與分析技術。

INL 是美國能源部所監管的許多國家實驗室其中之一, 主要任務是協助美國能源部執行政策及完成目標, 包括能源政策、國家安全、科學及環境, INL 並且也是美國在核能領域研究及開發的領導者, 總共設計及建立過 52 個核反應器, 對於核燃料檢驗、熱室管理及廢棄物處理等議題, 具有相當豐富的經驗。

用過核子燃料長期貯存安全管理是國內外核能電廠與國家關注的重要課題, 本所熱室為國內用過核子燃料長期貯存行為研究實驗之重要設施, 為觀摩學習國外熱室之檢驗技術、營運管理、環境維護與廢棄物處理, 以提升本所熱室之研發與管理技術, 協助達成國內用過核子燃料安全貯存之任務, 特安排此次前往 INL 的實習機會, 可提升所內熱室營運與改善管理及環境維護與廢棄物處理之能力, 並增加熱室關於照射過核子燃料與核材料檢驗與分析之技術能力。

## 二、過程

### (一)行前準備

INL 為美國能源部所監管的國家實驗室，具有相當的規模，制度也相當完整，所有新進員工、博士後研究及實習人員，均需進行專業訓練，而這次前往 INL 之前，實習人員也透過線上學習的方式進行訓練。訓練的主題共有五大項，分別是(1)INITIAL SECURITY COUNTERINTELLIGENCE BRIEFING ； (2)CONTROLLED UNCLASSIFIED INFORMATION (CUI) ； (3)GENERAL EMPLOYEE RADIOLOGICAL TRAINING ； (4)BEA SITE ACCESS TRAINING ； (5)INL GENERAL EMPLOYEE TRAINING，各訓練主題之內容簡單敘述如下：

The screenshot displays the 'Training Menu' interface for the Idaho National Laboratory. At the top, there is a blue header with 'Training Menu' on the left and 'e-Learning' on the right. Below the header is a navigation bar with 'Comments', 'IDAHO NATIONAL LABORATORY', and a 'Log Out' button. The main content area is divided into two columns. The left column contains a login status box showing 'Logged in as: Shang Feng Huang' with a 'Change Password' link, and instructions for starting and commenting on courses. The right column contains a list of five training modules, each with a checkbox: 'INITIAL SECURITY AND COUNTERINTELLIGENCE BRIEFING', 'CONTROLLED UNCLASSIFIED INFORMATION (CUI)', 'GENERAL EMPLOYEE RADIOLOGICAL TRAINING', 'BEA SITE ACCESS TRAINING', and 'INL GENERAL EMPLOYEE TRAINING'.

圖 1：INL 新進人員專業訓練主題

1. INITIAL SECURITY COUNTERINTELLIGENCE BRIEFING，此項介紹 INL 的實驗室安全，包括進入 INL 必須要配戴合格的識別證，並且依照不同的身分會接受到不同顏色的識別證，可進入的區域也會有所不同，例如本人之身分為外國人，所領取到的識別證為藍色，則部分區域無法進入，部分區域則需實驗室人員陪同，以及有哪些違禁品是被禁止攜入 INL，同時因為核子保防計畫，部分區域是嚴禁相關人等進入甚至接近；

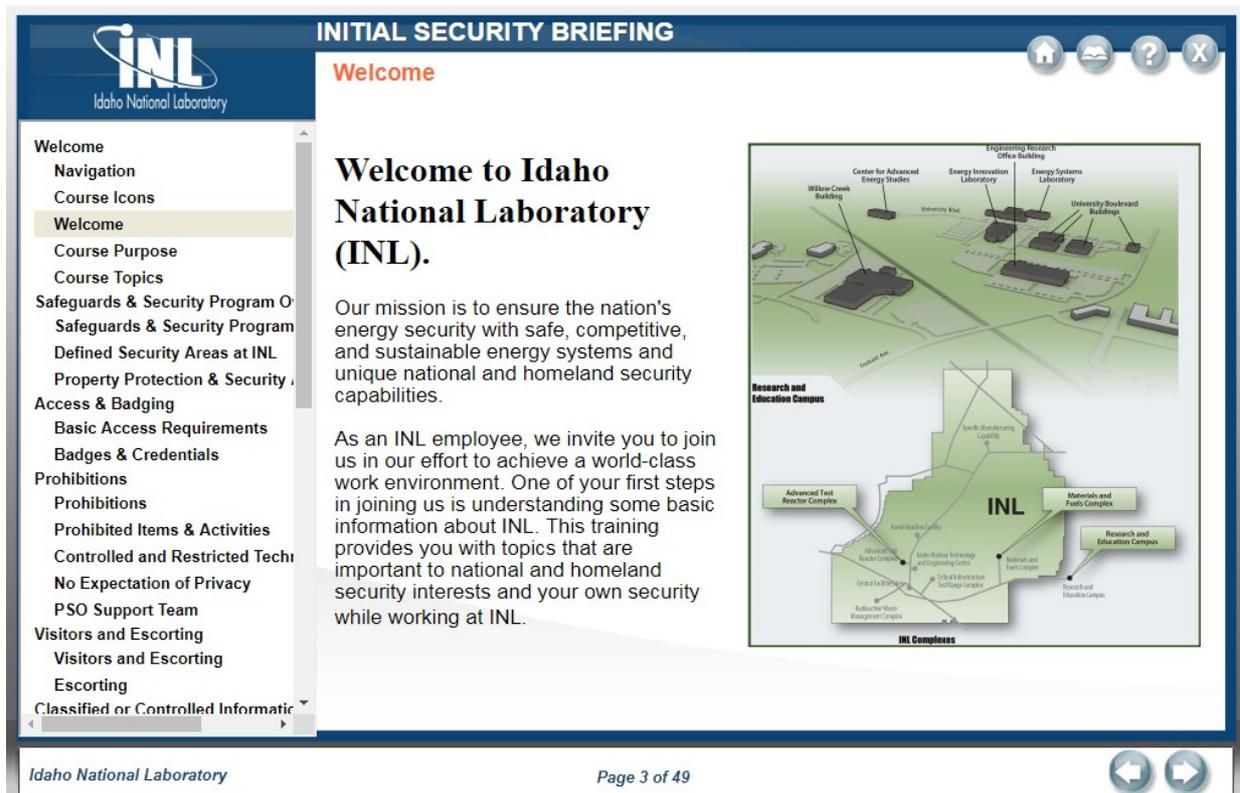


圖 2：INITIAL SECURITY BRIEFING 主題訓練內容

2. CONTROLLED UNCLASSIFIED INFORMATION (CUI) ，此項最主要是要向新進員工宣導資訊安全的重要，因為國家實驗室內的部分文件可能涉及國家安全，因此在處分實驗室內文件時，必須要特別留意是否會造成機密外洩；

Controlled Unclassified Information (CUI)
INL

**→ INDEX**

- Welcome
- ✓ Welcome
- CUI Awareness
- ✓ SUI to CUI
- [What is CUI?](#)
- [Potential Damage](#)
- [Need-to-Know](#)
- [Discussions](#)
- ✓ Reviewing & Releasing
- [Emailing](#)
- [Mailing](#)
- [Electronics](#)
- [Storage](#)
- [Emergencies & Travel](#)
- [Destruction](#)
- [Consequences](#)
- Receive Credit
- ✓ [Receive Credit](#)

### SUI to CUI

As we strive to be the premier research and development laboratory, our ideas, discoveries, processes and concepts even in their rough stages are vulnerable to theft. This type of crime costs the world's 1,000 largest companies in excess of \$45 billion every year and can create undue security risks.

Until recently, we have called these items that are sensitive and **unclassified**, Sensitive Unclassified Information (SUI). The term "Sensitive" will now be replaced with "Controlled" due to new DOE requirements.

It will take time for the old term to be replaced in the various plans, procedures, training documents, and forms. During this transition, all uses and meanings are the same. From this date forward, it is required to use the new **Controlled Unclassified Information (CUI)** program when creating new or revising existing documents/material.

Could any of the information you deal with be CUI? To answer this question, you need to understand:

- What CUI is.
- Why we protect it.
- How to protect CUI.

READ
?
GLOSSARY

⏪
⏩
2 of 15
⏪
⏩

圖 3：Controlled Unclassified Information (CUI)主題訓練內容

3. GENERAL EMPLOYEE RADIOLOGICAL TRAINING，因 INL 是美國核能研究的領導者，實驗室內有許多區域都被歸類為輻射區域，也有許多的輻射作業，因此輻射安全教育訓練也是新進員工等必須接受的項目之一，此訓練的內容與本所執行的輻射安全教育訓練大同小異；

**General Employee Radiological Training**

**INDEX**

- Introduction
  - ✓ [Welcome](#)
  - ✓ [Introduction](#)
  - ✓ [Objectives](#)
  - [Test Out Option](#)
- Basic Fundamentals
  - [Atoms](#)
  - [Radiation](#)
  - [Non-Ionizing Radiation](#)
  - [Ionizing Radiation](#)
  - [Contamination](#)
  - [Dose](#)
  - [Sources of Radiation](#)
  - [Interactive Exercise](#)
- Relative Risks
  - [Risks in Perspective](#)
  - [Dose Comparison](#)
  - [Acute Exposure](#)
  - [Chronic Exposure](#)
  - [Prenatal Exposure](#)
  - [Interactive Exercise](#)

**Introduction**

Welcome to General Employee Radiological Training (GERT). GERT is provided to employees who require unescorted access to controlled areas. These individuals routinely enter controlled areas and encounter radiological barriers, postings, radiation producing devices, or radioactive materials. For this reason, this training emphasizes employee responsibilities for observing and obeying radiological postings and procedures. Additional training beyond GERT is required for employees who are identified as radiological workers and are required to enter radiological areas.

2 of 29

圖 4：General Employee Radiological Training 主題訓練內容

4. BEA SITE ACCESS TRAINING, BEA 指的是 Battelle Energy Alliance, 是一家替美國能源部管理國家實驗室的公司, 旗下的國家實驗室包括 Brookhaven National Laboratory、Idaho National Laboratory、Lawrence Livermore National Laboratory、National Biodefense Analysis & Countermeasures Center、National Renewable Energy Laboratory、Oak Ridge National Laboratory 及 Pacific Northwest National Laboratory, 所以此項是介紹 INL 內由 BEA 所管理的區域, 包括 MFC(Materials and Fuels Complex)、ATR(Advanced Test Reactor)及 TAN/SMC(Test Area North/Specific Manufacturing Capability) ;

**BEA Site Access Training**  
8/24/2017 | 0:39

Index    Caption    Glossary    Comments

**Index**

- BEA Site Access Training
- ✓ Introduction
- Learning Objectives
- INL Security Area
- General Access
- Exits and Limited Access
- Safety Signs and Barriers
- Construction and Maintenance Activities
- Safety Equipment and Devices
- Safety Glasses or Ear Plugs
- Criticality Accidents
- Criticality Alarm System (CAS)
- What are your responsibilities when you hear a criticality alarm?
- Review Question
- Common Facility Hazards
- Facility Tour
- Overview of Materials and Fuels Complex

**Introduction**

This course is required for anyone who needs unescorted access to administrative buildings at the site. If you require unescorted access to controlled areas at Idaho National Laboratory (INL) you must have the required facility-specific training.

This course will familiarize you with the access and security requirements at the Materials and Fuels Complex (MFC), the Advanced Test Reactor Complex (ATR Complex), and the Test Area North/Specific Manufacturing Capability (TAN/SMC), including the primary facilities located at each of these sites. You will also learn about other unique INL facility hazards.

As mentioned, some facilities may require facility-specific training before you are allowed access. Be sure to ask one of the protective force officers stationed at the entrances to the facilities if you have access or security questions.

**NOTE: Please read the signs on ALL doors BEFORE entering any area at the site facilities and obey the posted requirements.**

**MFC**      **ATR**      **TAN/SMC**

圖 5 : BEA Site Access Training 主題訓練內容

5. INL GENERAL EMPLOYEE TRAINING，此項是 INL 之一般員工訓練，包括(i)Safety Values, Programs, and Worker Rights；(ii)Safety and Health Hazards；(iii)Reducing Risks and Reinforcing Safe Behaviors；(iv)Chemical and Hazardous Energy Safety；(v)Emergency Actions, Responses, and Reporting。以上五項訓練主題中，第 3 及第 5 項與人員安全相關的主題還需要通過訓練後測驗才算合格，可見 INL 希望員工對於工作上的安全要特別重視。

**General Employee Radiological Training**

→ INDEX

**Introduction**

- ✓ [Welcome](#)
- ✓ [Introduction](#)
- ✓ [Objectives](#)
- [Test Out Option](#)
- [Objectives](#)

**Basic Fundamentals**

- [Atoms](#)
- [Radiation](#)
- [Non-Ionizing Radiation](#)
- [Ionizing Radiation](#)
- [Contamination](#)
- [Dose](#)
- [Sources of Radiation](#)
- [Interactive Exercise](#)

**Relative Risks**

- [Risks in Perspective](#)
- [Dose Comparison](#)
- [Acute Exposure](#)
- [Chronic Exposure](#)
- [Prenatal Exposure](#)
- [Interactive Exercise](#)

**Objectives**

At the completion of this training, you will be able to:

1. Identify basic radiological fundamentals, including biological effects.
2. Identify the relative risks of exposure to radiation and radioactive materials.
3. Identify measures implemented at the facility to control exposure.
4. State individual rights and responsibilities related to the radiation protection program.
5. List actions implemented to minimize exposure under emergency conditions.

READ ? GLOSSARY

3 of 29

圖 6：INL General Employee Training 主題訓練內容

(二)行程

本次前往美國愛達荷國家實驗室(Idaho National Laboratory, 以下簡稱 INL)的詳細行程如下：

日期	地點	內容
7月14日	台北→舊金山	去程
7月14日	舊金山→丹佛	去程
7月14日	丹佛→愛達荷福爾斯	去程
7月15日~8月25日	愛達荷福爾斯	愛達荷國家實驗室實習
8月26日	愛達荷福爾斯→丹佛	返程
8月26日	丹佛→舊金山	返程
8月26日~8月27日	舊金山→台北	返程

去回程皆搭乘美國聯合航空。

### (三)實習內容

INL 位於美國愛達荷州之東部，總面積為 889 平方英里，在這幅員遼闊的實驗室內，大致可以劃分成三個區域：(i)研究教育園區(Research and Education Campus)；(ii)先進試驗型反應器園區(Advanced Test Reactor Complex, ATR complex)；(iii)核材料及燃料研究園區(Materials and Fuels Complex, MFC)。

研究教育園區是 INL 在愛達荷福爾斯市區內，專門負責管理、教育、技術支援及電腦設施之集合設施，在此園區內同時也進行部分的研究工作，包括先端的科學研究及發展計畫，此園區之名稱也反應出該實驗室與大學及能源研究之連結。

ATR 園區致力於反應器之研究，以支援來自能源部的各項任務，其焦點在於設計、測試及驗證各項新興技術，此設施內之工作範疇相當廣闊，所發展之技術是為達到或環繞著下世代核能反應器所必須面臨的多重技術選項。



圖 7：INL ATR 園區內之先進型測試反應器(Advanced Test Reactor, ATR)

核材料及燃料研究園區(MFC)，也是本次實習的實驗室所在園區，位於整個 INL 範圍

之東南方，大約距離愛達荷福爾斯市 35 英里。MFC 園區範圍約 60 英畝，成立於 1950 年代中期，成立之初隸屬於美國阿崗國家實驗室(Argonne National Laboratory)，簡稱為 ANL-West，後於 2005 年併入 INL。早期 MFC 之主要任務是執行各種研究型反應器之測試，但是近年來，其任務已經偏向於著重在核能技術的研究與發展，核能環境管理及太空放射性動力源發展，除此之外，MFC 也是 INL 方面負責執行新世代反應器相關燃料及材料的發展，以及核子保防技術開發。目前，MFC 內共有 55 座建築物，其中與核能相關較重要的設施包括：

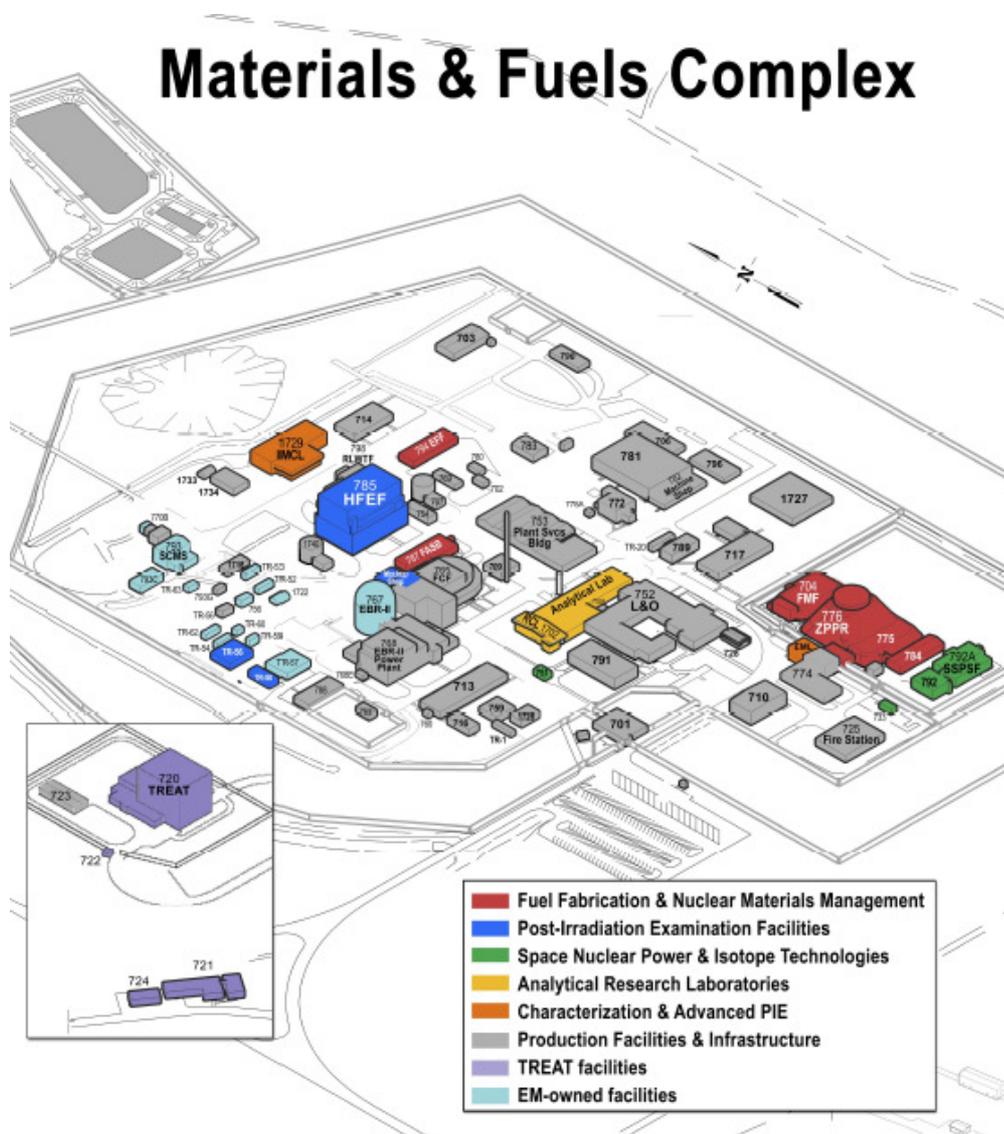


圖 8：核材料及燃料研究園區之平面圖

- ✧ 核燃料製造設施(Fuel Manufacturing Facility, FMF)：FMF(MFC-704)原為 EBR-II 的燃料製造設施，但目前的任務是燃料處理、新型燃料製造之研發及核物料之貯存。



圖 9：核燃料製造設施外觀圖

- ✧ 核燃料處理設施(Fuel Conditioning Facility, FCF)：FCF(MFC-709)內有兩座熱室，可供核材料之作業、操作、貯存，及組裝或拆解放射性元件。除了熱室之外，FCF 還規劃有儀器模擬區域及儀器除汙與維修區域。



圖 10：實習人員於 EBR-II 及核燃料處理設施外留影

- ✧ 暫態反應器測試設施(Transient Reactor Test Facility, TREAT)：TREAT(MFC-720-724)內之反應器為氣冷式，並使用  $\text{UO}_2$ -石墨燃料，操作原理是在非常短時間內產生暫態高能量，以測試反應器安全性。



圖 11：暫態反應器測試設施外觀圖

- ✧ 分析實驗室(Analytical Laboratory ,AL)：AL(MFC-752)內有屏蔽用之熱室、手套箱、澆鑄實驗室及用於核燃料及材料分析用之設備，環境取樣與分析，並執行各項檢驗。



圖 12：分析實驗室外觀圖



圖 13：實習人員於分析實驗室入口留影

- ◇ 實驗增殖型第二代反應器 (Experimental Breeder Reactor-II, EBR-II)：EBR-II(MFC-767, -768)使用液態金屬鈉作為冷卻介質，用於燃料及材料之照射，但已於 1994 年 9 月 30 日停機。EBR-II 內的燃料取出已經完成，目前設施正在進行除汙及除役作業 (decontamination and decommissioning, D&D)。



圖 14：實驗增殖型第二代反應器外觀圖

- ✧ 零功率物理反應器(Zero Power Physics Reactor, ZPPR)設施：ZPPR(MFC-774-776, 784, 及 792)包含一座大型的氣冷式快速反應器臨界組件，用以研究反應器之物理行為。反應器已於 2010 年移除，建築物內目前存放一座手套箱，用以進行氣體產生實驗。ZPPR 的拱頂和工作室(MFC-775)目前用來存放 MFC 內使用過之核材料，在此工作室之南為材料管制館(MFC-784)，舊為存放 ZPPR 實驗所用之金屬鈉及鋰的氰化物，此建築物內也設有清洗室及溶劑槽；材料管制館之南方則為模型設備館(MFC-792)，以前是用於存放部分核材料，及 ZPPR 之設備，目前已修建用於 SSPSF；MFC-775 工作室旁邊是 Support Wing (MFC-774)，館舍內有電子顯微鏡實驗室、工具清洗設施及辦公室。



圖 15：零功率物理反應器外觀圖

- ✧ 熱燃料檢驗設施(Hot Fuel Examination Facility, HFEF)：HFEF(MFC-785)包括一座兩隔間之熱室，及操作照射過反應器燃料及結構材料之屏蔽室。HFEF 原是設計用來檢驗在 EBR-II 內照射過之燃料及材料，但目前之任務是檢驗其他設施之照射過燃料及材料，及處理超鈾元素(transuranic, TRU)廢棄物。

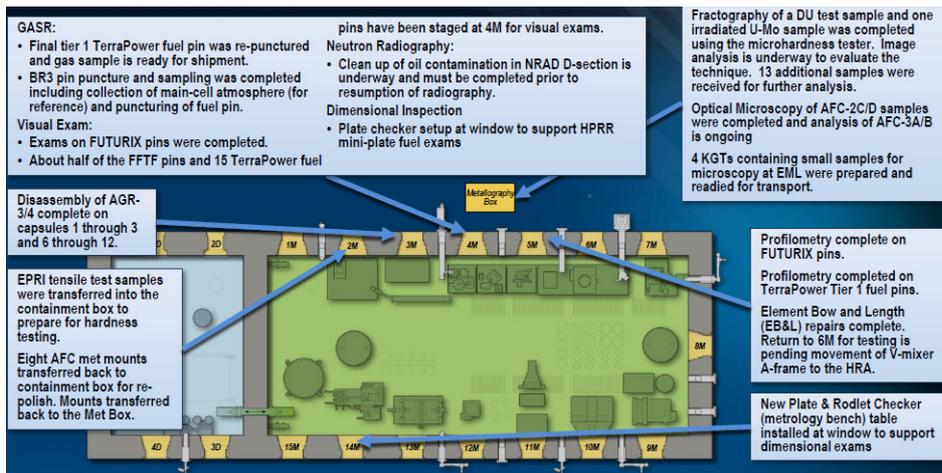


圖 16：熱燃料檢驗設施內熱室之配置圖



圖 17：實習人員於熱燃料檢驗設施入口留影

- ✧ 中子攝影反應器(Neutron Radiography Reactor, NRAD)設施：NRAD 是一座 250 kW TRIGA 反應器，位於 HFEF 熱室之地下室，是 MFC 內僅存仍在運行之反應器，NRAD 之主要任務是提供小型測試元件之中子輻射照射。
- ✧ 太空及安全動力系統設施(Space and Security Power Systems Facility, SSPSF)：SSPSF(MFC-792)是設計用於組裝及測試放射性同位素之動力源(電池)，以提供太空應用或偏遠地區所需之電力。
- ✧ 污染設備存放館(Contaminated Equipment Storage Building, CESB)：CESB(MFC-794)是由兩個大型空間所構成，主要用於儲存放射性汙染設備，以利於這些設備可在未來需要時使用，部分的放射性材料或廢棄物之封裝作業，也會利用此空間來進行作業。

本次實習的地點主要在 MFC 內的分析實驗室(Analytical Laboratory, AL)，負責接待之 INL 人員為 Dr. Matthew Jones，Dr. Jones 是愛達荷州立大學化學博士，就學期間即已在 INL

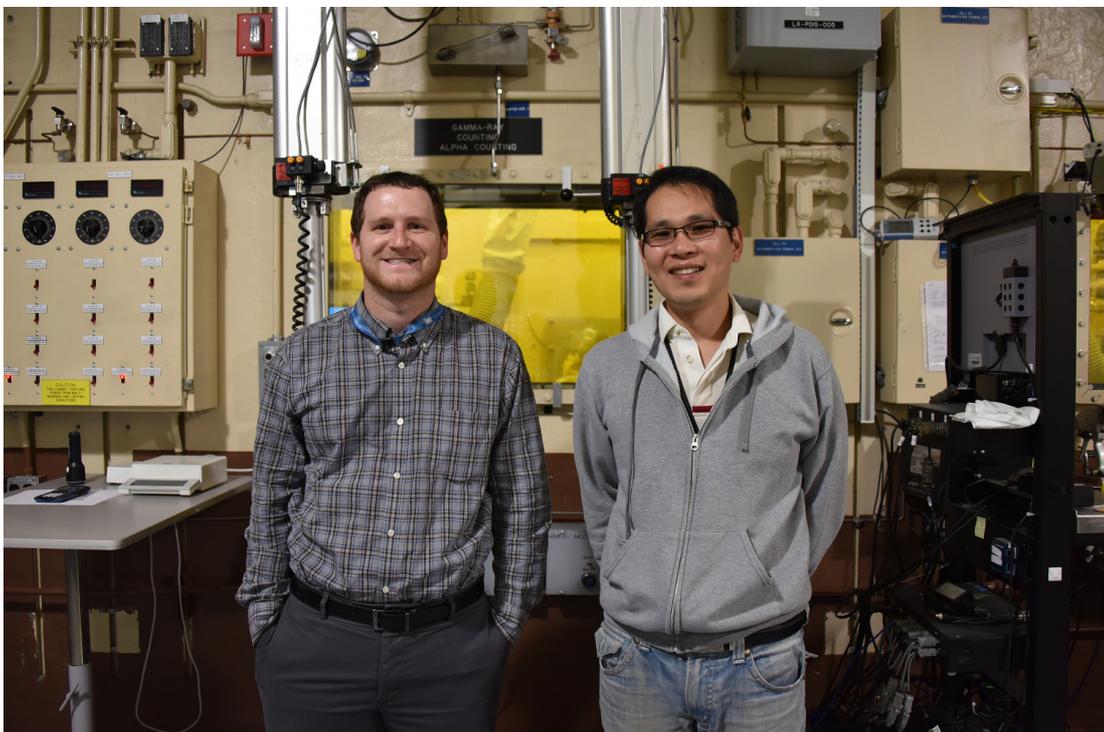


圖 18：實習人員(左)在分析實驗室熱室前與 Dr. Jones(右)合影

MFC 之分析實驗室內進行實驗，畢業後持續在 INL 進行博士後研究，最終並成為 INL 之正式員工，故其對分析實驗室之儀器設備及作業均相當了解，實習期間相當照顧本所實習人員，並協助安排 INL MFC 內其他相關實驗室之參訪行程。

目前分析實驗室的任務有三個：(i)執行化學、放射性化學及物理量測；(ii)提供非破壞分析量測；(iii)進行應用研究及工程，並發展相關作業以支援 MFC 及 INL 內與核燃料設計、廢棄物管理、環境保護等計畫。為達成這些計畫的目標，則必須保有廣大範圍的化學分析能力，因此，AL 內除收集 INL 的大量樣品，也接受其他單位的樣品，樣品的種類則包括液體、固體、照射過/未照射過核燃料，以達到研究與發展的目的。所以 AL 所具備的能力包括(i)分析及定性量測剛製備完成或照射過後的核燃料及反應器組件；(ii)毒性、混合或高放射性廢棄物之分析；(iii)核化學分析鑑定；(iv)無機同位素組成及放射性核種定義；(v)放射性同位素分離；(vi)工程材料及核燃料循環的專業定性分析。為了要保有以上幾種分析能力，AL 實驗室內配備許多相當專業的儀器及設備，包括 6 座連接但獨立的熱室，還有特殊

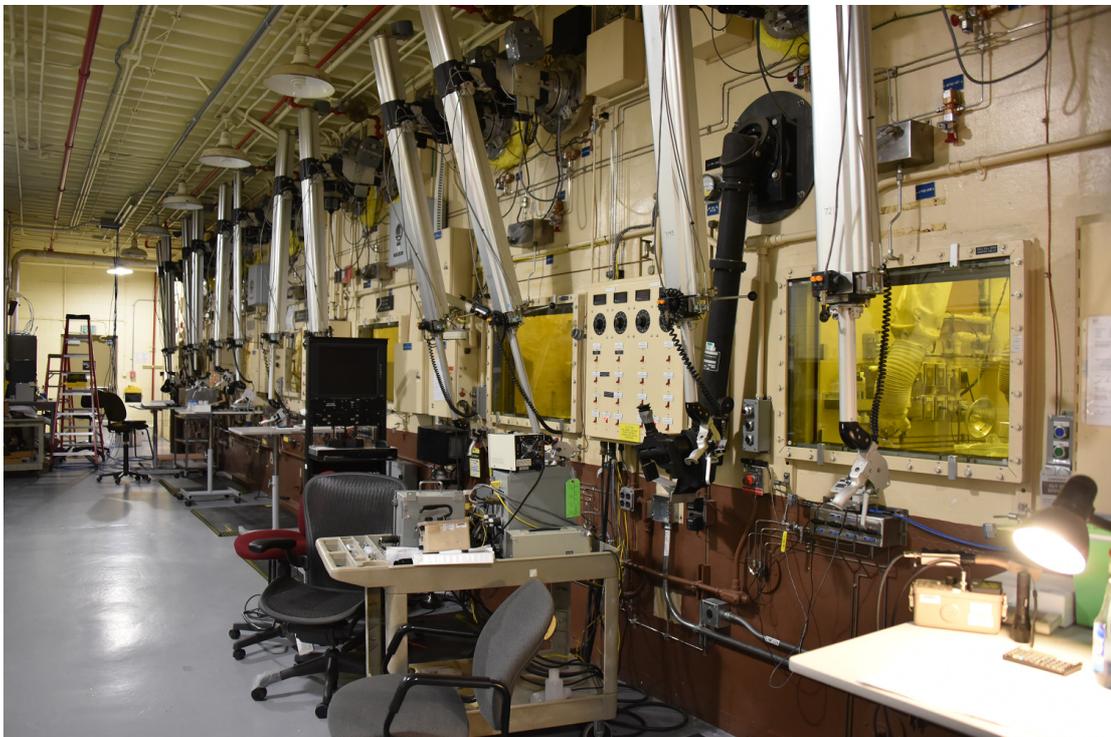


圖 19：分析實驗室之熱室

形式、放射性化學、廢棄物形式檢驗、鑄造實驗、濕式樣品製備及未照射核燃料處理、碳氮氧氫分析及 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy)等特殊用途的手套箱，也有煙櫃(Fume Hoods)可進行化學及放射性化學實驗，分析儀器則有氣體質譜儀(Gas Mass Spectrometer)、Inductively coupled plasma-mass(ICP-MS)、ICP-AES、Multi-collector – inductively coupled plasma mass (MC-ICP-MS)、Thermal ionization mass (TIMS)等質譜儀、X 光繞射儀(X-ray Diffractometers)，另外還有一個專業的輻射計數實驗室，配備比例計數器及閃爍計數器，可量測 Gamma 及 Alpha 能譜。

AL 內所擁有的量測及分析技術確實相當多元，種類也相當豐富，本次實習則選擇幾項本所熱室需積極建立之技術，以應付後續計畫執行上的需求。

## 1. Gamma Spectroscopy

### (1) Gamma 系統的操作

- A. 純鍺偵檢器: 對於半導體偵檢器，電子經由激發而越過能隙，進而在半導體內形成電子電洞對。這些帶電的載子在一施加電場的環境下而被驅動，電子及電洞的驅動速度約在  $10^7$  cm/s 的層級，半導體經常被摻入雜質，例如一 n-type 的半導體，就是在導帶內加入電子，因此可以在能隙內佔據能位，而此能位剛好位於導帶之下；p-type 的半導體則是價帶內加入電洞，或是俗稱的受體雜質(acceptor impurity)，這個受體雜質會在能隙內剛好位於價帶上的位置形成一個能位。這兩種類型的半導體分別對於電子或電洞在晶格上形成一鬆動的能位，使半導體的導電度增加，而對於金屬鍺偵檢器，這種加入雜質的方式有兩種，

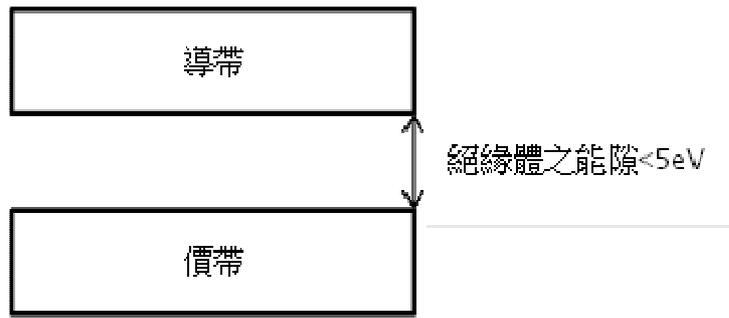


圖 20：導帶、價帶即能隙之關係

一種是同軸型，這種形式的偵檢器會有一端電子接點在晶體外側，另一端電子接點則在晶體中心，電子和電洞以漂流的方式進行內外傳輸；另一種偵檢器的形式是平面型，其電子接點在晶體的兩側，電子和電洞則以漂流的方式從兩邊傳輸。

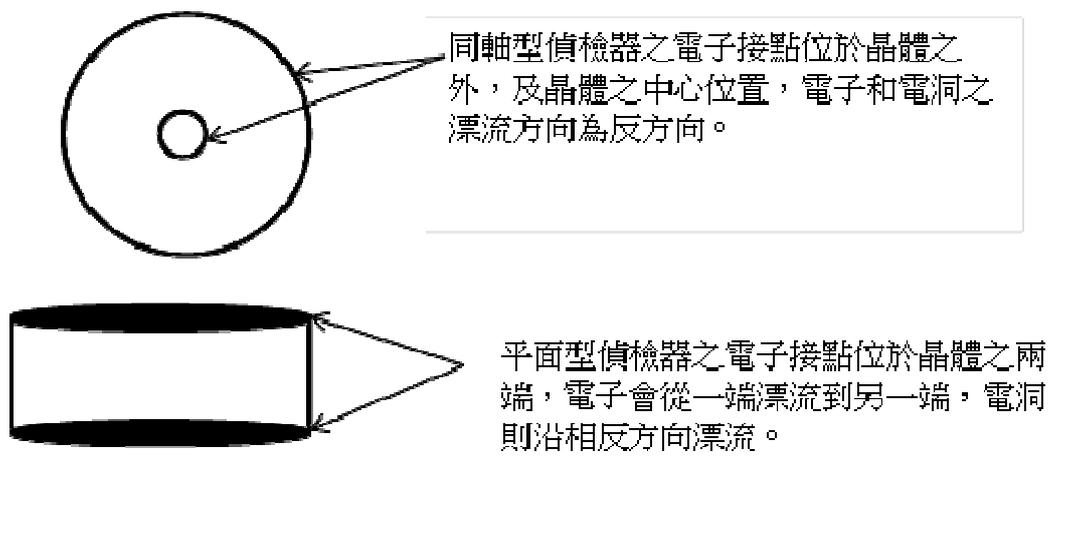


圖 21：同軸型及平面型之偵檢器比較

- B. 輻射偵測:所謂的電子接點，是放置於偵檢器的晶體上，用於收集某粒子在晶體內釋放能量而造成的電荷流。施加在金屬鍍偵檢器上的電壓約在幾百到幾千伏的範圍，雖然沒有游離輻射，偵檢器內仍會存在著有限的導電度，也因此造成漏電流的產生，當對金屬鍍偵檢器施加偏

壓時，必須要觀察漏電流的大小，因為當偵檢器發生損壞或有其他問題時，漏電流的大小會異常的增加。當對一鍺偵檢器施加偏壓時，電壓應該緩慢地逐漸上升，而不是一次就提升到工作電壓，且鍺偵檢器應在低於室溫下操作，通常使用液態氮或電子冷卻的方式降溫，而補充液態氮的頻率則與杜瓦瓶的大小有關。半導體偵檢器在晶體外緣有一層厚度不大的無感層(dead layer)，此無感層包含於電極內，其厚度隨施加的偏壓增加而變大。偵檢器的反應區域位於半導體的空乏區(depleted region)內，其寬度也和施加的偏壓成正比。當一粒子與半導體偵檢器反應時，會產生一個電壓的脈衝，基本上，鍺偵檢器的脈衝上升時間 $\leq 10$  ns，此上升時間與所有的電荷載子被收集的速度有關，因此，脈衝的高度則與粒子釋放在偵檢器內的能量總量有關。

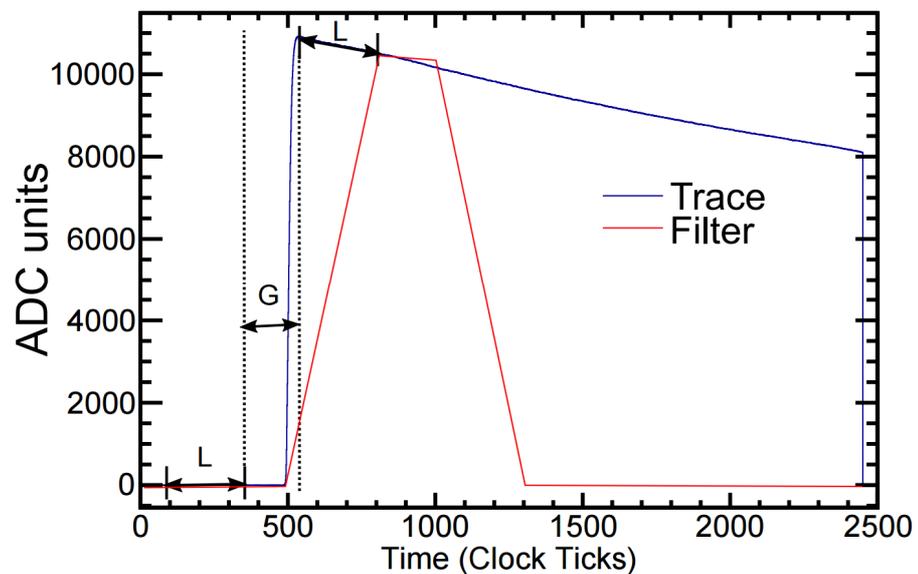


圖 22：金屬鍺偵檢器脈衝之範例

上圖中重疊的部分是能量汲取演算法的例子：梯形過濾器，而脈衝的高度正比於釋放在偵檢器上的能量。

- C. 偵測考量: 銻偵檢器的脈衝還有另一個參數稱為衰減時間，因為脈衝上升到最高點之後，並不會立即回復到基礎線，因此，無感時間(**dead time**)也是 **Gamma** 量測系統必須要考慮的另一參數。在記錄完一次的粒子能量釋放之後，偵檢器會進入所謂的無感狀態，而無法再與其他粒子反應。當脈衝產生的太相近，則稱之為「**Pile up**」，在理想上，無感時間應該設定為小於某次量測時間的十分之一，但對於某些應用，無感時間可容許達到更高的比例，但仍不應該高於量測時間的四分之一，一旦無感時間過長(依據不同系統所使用的不同處理 **pile up** 的方法)，能譜上的計數結果可能全部消失，或某次事件的能量可能被放置在能譜上的其他位置(如果兩次接連的脈衝之能量組成 **pile up** 事件而合併為一次脈衝，或部分能量組成一脈衝)，此時，訊號最高點的形狀可能因而扭曲變形，而形成一垂下的現象。要解決無感時間過長的方法，可以拉長偵檢器與待測物的距離，或減少待測物的大小，或稀釋其濃度。計數時間也可能因不同樣品而有所差異，例如低階的樣品可能需要量測一個晚上，而高活度的樣品則可能只需量測半小時，每個樣品都可以重複量測多次，特別是一些未知或量測前分析資訊太少的樣品。許多偵檢器需要外加屏蔽以減少背景天然放射性物質之 **Gamma** 射線影響量測結果，基本上，鉛是最常用來作為 **Gamma** 偵檢器屏蔽的材料，但是鉛可能也會因受到 **Gamma** 射線照射而產生 **X-ray**，此時可以在屏蔽內在放上一層鎳、銅或錫的襯墊，以降低背景的影響。圖 23 中第二個脈衝發生在第一個脈衝回到基線之前，在此情況下，所產生的非一般形狀的脈衝，會造成能量汲取演算法會汲取到不正確的能量。

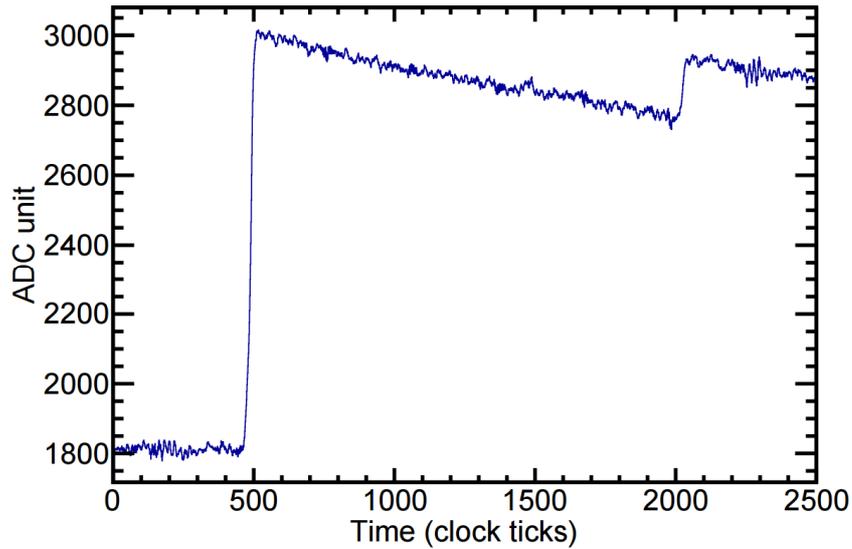


圖 23：兩個在時序上接連發生的脈衝之範例

- D. 能量及效率的校正: **Gamma** 能譜量測時的脈衝高度必須要轉換成能量，在此介紹廣泛周知用於 **Gamma** 能譜量的脈衝高度轉換能量方法。基本上，銻的能量校正是一個二次方程式，其形式如下：

$$E(\text{keV}) = \text{square} * E(\text{ADC units})^2 + \text{slope} * E(\text{ADC units}) + \text{intercept}$$

另外一個重要的校正是偵檢器的效率校正，並非所有由樣品發出的 **Gamma** 射線都會被偵檢器偵測到，因為不同形狀的樣品，對應到不同形狀的偵檢器，結合出來的偵檢效率都會有所差異。射源所發出的 **Gamma** 射線是全面性的，稱之為  $4\pi$ ，而不是只有向著偵檢器的方向才會發出輻射，相同地，**Gamma** 射線(特別是高能量的)可能會穿過偵檢器而沒有產生任何反應。通常可以使用一個經過良好校正過的標準樣品來決定某個量測方式，所以不同的樣品分析位置，或是不同的樣品容器，都需要分別進行效率的校正。效率曲線的建立，通常需要依靠 3 階甚至是 4 階的多項式：

$$\ln(Eff) = A * \ln(\text{Energy})^4 + B * \ln(\text{Energy})^3 + C * \ln(\text{Energy})^2 + D * \ln(\text{Energy}) + E$$

在這個方法中，效率可由能量來決定，而不是使用其他的標準樣品來進行校正。

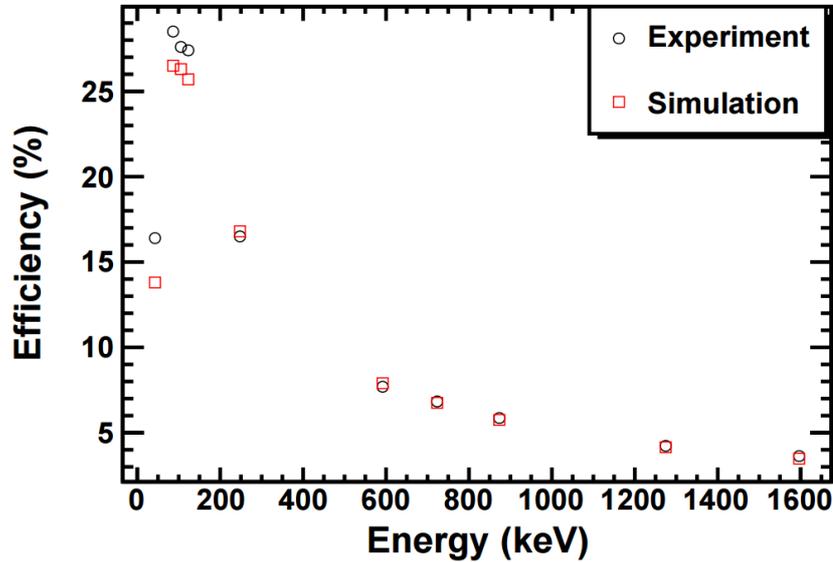


圖 24：校正曲線量測與模擬之比較

金屬鍺偵檢器的效率校正曲線又稱為“Clover”，上圖比較某個偵檢器針對同一個幾何，所量測到的效率與效率模擬的結果。

## (2) 結果分析

以下提供一範例是有關一種常見的核種活度分析方法：

- A. Gamma 射線的量測結果是一種高斯分布，所以可以利用趨近的方式，來決定偵檢器所偵測到的 Gamma 射線總數。
- B. 效率修正：由於偵檢器並無法偵測到所有的 Gamma 射線，所偵測的 Gamma 射線數量和實際的總數的比值即此偵檢系統的偵測效率，此效率和偵檢器及樣品的幾何有關，亦即 Gamma 射線為與偵檢器反應所需通過樣品本身即偵檢器內部的材料。

C. 為獲得核種衰變總數，需對絕對強度進行修正。

(A) 並非每次核種的衰變，所釋放出的 Gamma 射線能量都是已知或是常見的；

(B) 此修正值之計算可引入不確定度，接近穩定的核種具有已知的絕對輻射強度，但如果是外來核種，則可能具有不確定或未知的輻射強度。

D. 無感時間修正

E. 將計數之總數除以計數時間，則可以求得 dps(disintegration per second)，此計算結果可以再轉換成任何樣品處理上較常使用的任何輻射相關的單位。

分析範例：如何由計數求得活度？

$^{137}\text{Cs}$  會發出能量 662 keV 的 gamma-ray，其絕對強度為 85.1%，對於此量測實驗的偵檢器及樣品，在能量 662 keV 的效率為 6.914%，實際的計數時間(live time)為 7200 秒，而實際的量測時間(real time)則為 7263.13 秒。量測結果在 662 keV 位置處共有  $1.31 \times 10^5$  個計數，則此樣品之活度為何？

$$\text{Emitted Counts} = \frac{\text{Measured Counts}}{\text{Efficiency}} = \frac{131000}{0.06914} = 1900000$$

$$\text{AI Corrected Counts} = \frac{\text{Emitted Counts}}{\text{Absolute Intensity}} = \frac{1900000}{0.851} = 2230000$$

$$\text{Live Time Corrected Counts} = \frac{\text{AI Corrected Counts}}{\text{Live Time/Real Time}} = \frac{2230000}{7200/7263.13} = 2250000$$

$$\text{dps} = \frac{\text{total counts}}{\text{time}} = \frac{2250000}{7263.13} = 310 \text{ dps}$$

將結果轉換成  $\mu\text{Ci}$  之後，即可求得樣品的活度為  $8.4\text{e-}3 \mu\text{Ci}$ 。

## 2. GPEC

### (1) GPEC 系統之功能

GPEC 系統是 Gas Pressurized Extraction Chromatography 之簡稱。此系統可以分離溶液樣品內的元素成分，以消除在進行分析時，成分之間的干擾，改善量測的結果。GPEC 系統的設計相較於傳統的 Drip column，具有許多的優點，特別是，所有放入此系統進行處理的溶液，都可以逐量回收，因此可以提供更精準正確的溶液稀釋，及逐量從容器中移除樣品溶液，而獲得更精準的分離的分析實驗。由於 GPEC 系統使用小容量的容器，只需要非常小量的放射性溶液樣品，就可以完成元素成分的分離，所以產生的廢容量及工作人員所接受到的劑量都可以大大地降低。

### (2) GPEC 系統之結構

組成 GPEC 系統的主要結構包括鐵氟龍管、過濾篩板(Frits)、接環(Ferrules)、螺帽及聯結，所有的配件及相關的零件，都可以從 Chrom Tech 購得。裝載樣品的循環路徑為 75 公分長，離心柱的循環路徑則為 25 公分長，溶液樣品的裝載是透過加壓的惰性氣體，如氫氣、氮氣或氬氣，將溶液推升入循環路徑內。廢液的部分則使用 Masterflex CL 雙頻道蠕動幫浦，將廢液引入收集的玻璃瓶內。基本上，要用來進行元素分離的液體樣品體積不得大於 10 mL，加壓的惰性氣體壓力則小於 100 psig，以推進小容量的溶液，基本上小於 1 mL (0.033 oz)，進入小直徑的管路(基本上外徑為 1/16-吋及內徑 0.02 吋)，並到達一件兩邊為過濾層的樹脂內。溶液在管路內的流速基本上小於 10 mL/min，流速由蠕動幫浦控制，此系統也包括三個多端口的閥門開關。

元素分離是一種循環作業，會對每一樣品重複處理，整個作業包括四

個步驟：載入(Loading)、沖洗(Rinse)、剝離(Strip)及再生(Recondition)。在載入的步驟中，固定體積的管路會充填滿樣品的溶液，後續會被加壓氣體推入另一個固定體積的管路，此管路會包括一件兩邊為過濾層的樹脂材料，某些樣品內的元素成分會被分離並留存在樹脂內；沖洗的步驟是以乾淨的酸液沖洗管路，而此酸液必須和樣品的母體相同，此步驟之目的在於將管路內之殘餘元素成分，全部沖入分離柱內；在剝離的作業中，會使用不同種類及不同濃度的酸液沖洗管路，而此酸液流經分離柱後，會將原本留存在樹脂內的樣品元素成分剝離；在完成剝離的步驟之後，使用樣品母體的酸液充入管路，並流經分離柱，以對分離柱進行再生，隨後可以進行下一次的元素分離作業。GPEC 系統所使用的樣品溶液可能具有腐蝕性，及/或含有不同的放射性及非放射性元素，特殊的元素分離作業，例如  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{137}\text{Ba}$  之分離、鈾元素由其他雜質中分離等等，均可以使用此系統完成目的，而樣品溶液的製備可以使用含樣品的鹽化合物、金屬或陶瓷的廢棄物形式、廢棄物相關的材料、擦拭樣品以及照射過或為照射過核燃料或核燃料處理過程之樣品，但不包括未溶解的鈹金屬樣品、鈹化合物或任何含超過 0.1%鈹之合金，因這些樣品可能會造成空浮之來源。



圖 25：手動 GPEC 系統

### (3) 手動 Mini-GPEC 系統之操作方式

- A. 將氣瓶之調節器(gas regulator)設定為 20–60 psig.
- B. 使用 GMV1，氣體流速調整為約 10 ml/min.
- C. 將 GSV1 切換為 OFF.
- D. 將 IV1 切換為 LOAD.
- E. 將 DV1 切換為 NORMAL.
- F. 開啟蠕動幫浦。
- G. 將收集管入接 DV1 流出(Discharge)的閥門.
- H. 將攝取管路放入樣品溶液容器內，以將樣品充滿整個循環管路。(液體流速約為 1 mL/min 較為妥適。)
- I. 將 GSV1 切換到 ON.
- J. 將 IV1 切換到 INJECT.
- K. 將攝取管路從樣品容器移除，並放入淨空之管路。
- L. 觀察液體流速(液體應該從循環管路移動，並經過分離柱，最後進入 DV1 流出閥的收集管路)。
- M. 將溶液引流至樣品溶液收集瓶，並持續約 30 秒，以讓酸液淨空分離柱。
- N. 將 GSV1 切換為 OFF.
- O. 將 IV1 切換為 LOAD.
- P. 重複步驟 vii 到 xv，並改變攝取位置及收集瓶的樣品溶液，以完成元素分離作業。
- Q. 完成作業後關閉自動 GPEC 系統之幫浦及氣體鋼瓶。

### 3. CNOH 手套箱之操作

#### (1) 目的及應用

手套箱是用於防止在操作放置於手套箱內之兩台 ELTRA 固態樣品分

析儀器時，輻射污染之控制，其中一台儀器之型號為 ELTRA CS-800，可用於樣品內碳-硫之成分分析，此儀器配備有遠端控制之射頻(radio-frequency, rf)感應高溫爐；另一台儀器之型號為 ELTRA ONH-2000，可用於樣品內氧-氮-氫之成分分析，配備有遠端電極(Electrode)高溫爐。相關的偵檢器、儀表及控制等，都位於手套箱下方相應的分析櫃中。

CNOH 手套箱是一個單一手套箱系統， 配備有四個 8 吋大小的 CRL(Central Research Laboratory)形式手套連接端口，手套箱的南邊並有一個 12 吋大小的 CRL 形式袋出袖口及一個快速傳遞端口或可裝置 French can(一金屬密封罐，用以盛裝污染物，避免於非污染區傳遞污染物時造成污染擴散或空浮)；手套箱的北邊則設有一個 8 吋大小的 CRL 形式袖口，及擦拭計讀端口，當使用擦拭端口時，則必須小心不要損壞其上之 Mylar 視窗而造成污染擴散。CNOH 手套箱空間內之空氣進氣及排氣為單一通道，而排氣部分並以 HEPA(High Efficiency Particulate Air)進行過濾。



圖 26：CNOH 手套箱



圖 27：CRL 形式手套連接端口



圖 28：CRL 形式袋出袖口

## (2) ELTRA ONH-2000

此儀器使用脈衝式高溫爐，搭配惰性氣體熔融方法來分析樣品內的氧、氮及氫含量，其中高溫爐的部分，可提供超過 3,000°C 的高溫，針對某些特殊的樣品，還可以額外增加其他介質流，例如鎳或錫，以達到最適當的熔融效果，此儀器的工作功率最高可達 8 kW。

樣品內氮和氫的濃度是依靠儀器內一件高性能及敏感度的熱導元件，此熱導元件是由微機械矽晶片所構成，其作動獨立於一參考氣流。此晶片是整合於一不鏽鋼機架，晶片再測量通過此機架之氣流，此種設計可提供獨立於廣泛為之氣流及氣體壓力的穩定量測結果。

此儀器的量測原理可提供大範圍的量測，再測量樣品之前，樣品須先進行秤重，之後放入高溫爐內，利用載體氣流沖溢樣品，以避免大氣進入高溫爐，石墨坩鍋會在此脈衝式高溫爐內脫氣，以減少可能汙染(例如殘留的氫氣)。在達到一個穩定的階段之後，樣品會掉到坩鍋上並開始高溫熔



圖 29：ELTRA ONH-2000 正面圖

融，一氧化碳會經由石墨坩鍋與樣品內氧氣的反應形成，氮及氫則會以原子的形式被釋出。載體氣流(氮氣)及樣品的蒸氣在進入一個氧化銅晶體之前，會通過集塵過濾器，此處，一氧化碳會轉變成二氧化碳，二氧化碳再由紅外線元件測量，並計算出氧含量。CO<sub>2</sub> 和水氣以化學方式移除後，氮含量再於熱導元件內量測，如果要對氫作分析，則需使用氫氣作為載體氣流，並使其通過 Schuetze reagent(一種矽膠，上面附著 I<sub>2</sub>O<sub>5</sub>，用於在室溫下將 CO 轉換成 CO<sub>2</sub>)，而非氧化銅晶體。

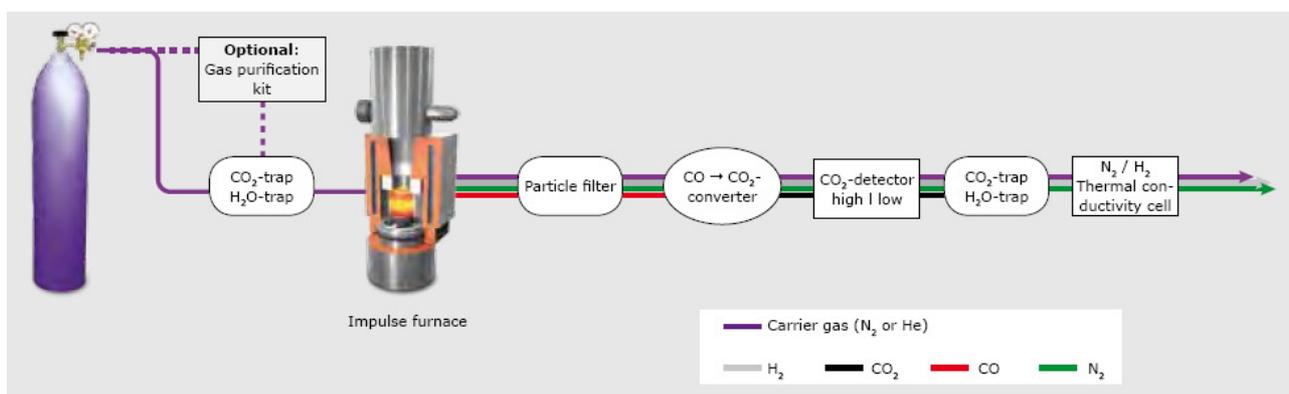


圖 30：ELTRA ONH-2000 之分析流程

### (3) CNOH 手套箱操作流程

- A. 檢查壓差計，確認過濾系統之負壓介於-0.50 to -1.0 英吋水柱。
- B. 如果壓差計之數值不是介於-0.50 to -1.0 英吋水柱之間，則停止作業，並立即通知管理人員。
- C. 確認手套箱上之手套是否每年更換、CRL 空白端口是否每 2 年更換，檢查方式可經由 CNOH 手套箱操作紀錄表，及/或手套環或 CRL blank 上之日期確認。

- D. 作業之前先對手套箱內之手套進行輻射劑量量測。
- E. 如果手套之輻射劑量超過 20 mrem/hr beta gamma，再繼續執行作業前，先通知設施管理人員及輻防人員，以評估手套是否需要除汗或更換。
- F. 使用之前先檢查手套箱上手套或空白端口的損壞情況。
- G. 假如發現任何損壞情況，將其記錄在操作紀錄表上，並通知管理
- H. 將損壞的手套或空白端口遮蓋住，以避免被誤操作。
- I. 將損壞的手套或空白端口標示為無法使用。
- J. 儘快地更換損壞的手套或空白端口。

#### (4) ELTRA ONH-2000 操作流程

- A. 確認壓縮空氣及載體氣體之管路已經接上系統後，將主電源打開，可以聽到幫浦開始運轉的聲音，系統並開始控制載體氣體，幾分鐘後，分析器才會就緒可以開始量測試片，此時，先在較低的電極觸放入空的坩鍋，再關上高溫爐。
- B. 先將約 1 克重的樣品秤重，再將天秤上此樣品所顯示之重量輸入操作軟體，再以乾淨的鉗子將樣品放入高溫爐上投入樣品用之樣品投入口。
- C. 樣品放入後，系統會自動開始進行分析；完成分析後，量測結果會顯示所有資料，並儲存在電腦內。
- D. 分析過程包括好幾個連續的階段，根據使用者的設定(高溫爐能量模式及樣品裝載模式)，每一階段的排序都會有所不同。以下以 ON-OFF-ON 高溫爐能量模式之步驟做為代表來做為說明。
- E. **ON-OFF-ON 高溫爐能量及自動樣品裝載:**
  - (A) 釋氣。石墨坩鍋本身也會在高溫爐內加熱，以去除坩鍋內原本即已存在之雜質，所以一開始充入高溫爐內的載體氣體是先處於除

氣模式，釋氣時間及高溫爐能量都是可以調整的。

- (B) 除氣。高溫爐內的除氣會在釋氣階段之後持續進行，包括高溫爐切斷開關之後，除氣的時間可以調整。
- (C) 平衡化。通入高溫爐內的載體氣體切換到分析模式，此階段需要讓 IR-cell 及 TC-cell 的基線平衡。
- (D) 樣品投入。樣品投入的機制是旋轉，以讓樣品掉落到坩鍋。
- (E) 分析。高溫爐開起開關後，樣品會因加熱到高溫而熔解，此時偵檢器開始處理收集到的訊號，當預設的加熱時間結束時，高溫爐會自動切斷開關，但是訊號分析會持續進行，直到達到比較器階級或分析時間結束。

#### 4. Radiostrontium Determination by Solid Phase Extraction and Gas-Flow Proportional Counting

##### (1) 實驗目的及應用

「Radiostrontium」特別用以指兩個銻的同位素：一為  $^{90}\text{Sr}$ ，是一種半衰期長達 28.8 年的放射性物質，其衰變時會放出最高能量 545.96 keV 的 Beta 粒子，並轉變為  $^{90}\text{Y}$ ；另一為  $^{89}\text{Sr}$ ，其半衰期僅 50.57 天，衰變時會發出最高能量為 1495.1 keV 的 Beta 粒子，並轉變為  $^{89}\text{Y}$ 。除以上兩種放射性同位素之外，銻還有其他的短半衰期 Beta 放射性同位素，例如  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Sr}$ ，但因其半衰期較短，所以對環境影響程度不如前述兩種同位素來得大。Radiostrontium 同位素主要來自核分裂反應，且其產率相較於其他分裂產物相對高，例如在  $^{235}\text{U}$  的熱中子碰撞反應中， $^{90}\text{Sr}$  的累積分裂產率為 5.88%。

在此實驗中，Radiostrontium 可以快速地從核燃料的分裂產物分離出來，讓此方法相當適合用於溶液樣品、保健物理擦拭樣品或過濾紙樣品等，

需要樣品收集後數小時內就得到結果之應用，固態樣品則需要先經過酸浸，或經過特別溶解的實驗，才可以使用此方法將 **Radiostromtium** 從樣品分離出來。

在此法中，鋇的分離是利用層析法(Extraction Chromatography)完成，在層析系統中，由三個主要的部份組成，包括惰性載體(Inert support)、固定相(Stationary phase)及流動相(Mobile phase)，此法中惰性載體使用惰性有機聚合物樹脂(Inert organic polymer resin)，**Sr** 樹脂則作為惰性載體，流動相則是使用硝酸及水。

## (2) **Sr** 樹脂

在層析系統中所使用的 **Sr** 樹脂其成分為 1.0M 4,4'(5')-di-t-butylcyclohexano 18-crown-6 冠狀醚(crown ether) 稀釋於正辛烷，進行實驗時，會以 40%的此溶液加入到惰性載體，最後的 **Sr** 樹脂密度約為 0.35 g/mL。數據顯示，此 **Sr** 樹脂擷取 **Sr** 的能力會隨著硝酸濃度的增加而增加，例如在使用濃度為 8M 的硝酸作為流動相時，**Sr** 樹脂的 **Sr** 擷取指數  $k'$  約為 90，但是當硝酸濃度小於 0.05M 時， $k'$  則會降到小於 1，其他鹼金族跟鹼土族金屬在同樣濃度範圍的硝酸環境下，與此樹脂的親和度均遠低於鋇，在所有鹼土族金屬中，鈣在此樹脂的擷取效果最差，所以可以很容易將鈣及鋇分離。樹脂內鋇的殘留量雖然偏高，但是其值會在硝酸濃度 3M 時達到最高點，再增加硝酸濃度則會開始下降，所以如果要確認鋇不會影響鋇的分析時，可以使用硝酸濃度 8M 的移動相，再搭配適當的沖洗，鋇可以完全被移除，僅留下鋇進行分析。

Acid dependency of  $k'$  for various ions at 23-25°C.

Sr Resin

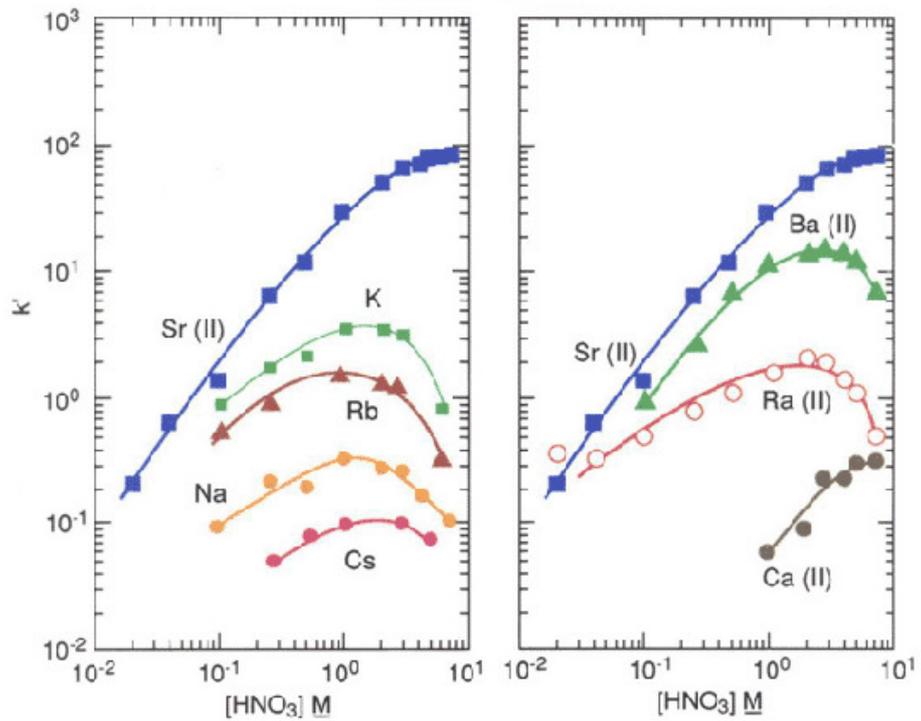


圖 31：Sr 樹脂與鹼金屬元素(左)及鹼土元素(右)在不同硝酸濃度環境下之親和力比較

Acid dependency of  $k'$  for various ions at 23-25°C.

Sr Resin

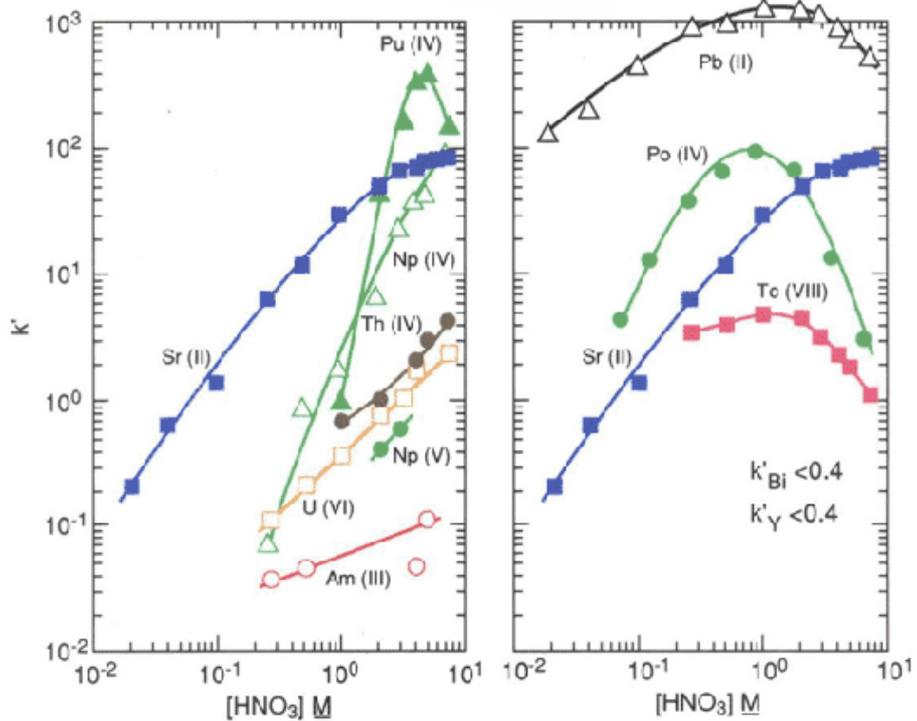


圖 32：Sr 樹脂與錒系元素(左)及陽離子(右)在不同硝酸濃度環境下之親和力比較

另外還可以發現銅系元素明顯殘留在 Sr 樹脂內，此時可以在溶液內加入一些草酸，形成複合物，避免銅系元素殘留在試柱內。

Sr 樹脂對於來自環境樣品或生物樣品內，所含有的多數陽離子干擾，展現相當的彈性，圖 32 說明不同的陽離子影響從 Sr 樹脂汲取銨的結果，樣品內鈣離子含量對 Sr-85 在 Sr 樹脂的回收率影響如圖，當樣品內鈣的重量達 320 mg 以上時，回收率會開始下降。

理論上，此樹脂收集 Sr 的最大容量約為每 2 毫升的試柱可收集 21 毫克的 Sr，但在實際操作時，廠商僅保守估計約為 8 毫克的 Sr。鉀的存在，也會造成 Sr 的回收率下降。除此之外，如果溶液內還存在著鉀 40，分析結果會產生偏向 Sr-90 的傾向，因此，可以在溶液內添加草酸鹽，以讓鉀離子析出而不會影響量測結果。此樹脂有不同粒徑大小的產品，粒徑越小會有較佳的層析結果，但液體流速較慢，分析時間也會較長，如是如果使用真空幫浦輔助增加流速，則可以改善這個問題。

### (3) 實驗流程

#### A. 固態樣品溶液製備

Sr 分析的樣品有許多種類，在此僅介紹固態樣品之製備方法：

(A) 將樣品依據活度及偵檢限值等分，再將其裝入適當的燒杯中，並確實記錄各等分之重量。

(B) 準備實驗室控制樣品(Laboratory Control Sample, LCS)溶液，使用用於儀器校正用之  $^{90}\text{Sr}$  硝酸溶液標準樣品，其活度濃度為 1-100 dps/ml，並用吸管吸取 1 ml 的 LCS 溶液，置入適當的燒杯中，再準備另一個燒杯，將其標示為實驗室空白樣品(Laboratory blank,

LB)。

- (C) 將 Sr 載體溶液 1.0 ml 及 50-100 ml 濃度 8M 的硝酸加入到各個樣品，並在燒杯內放入磁轉子。
- (D) 將燒杯利用加熱盤加熱，讓其稍微沸騰約 1-2 小時，並加以攪拌，以讓其溶液蒸發而將體積下降到低於預想的體積，必須確認減少過後的體積加上後續需要用以沖洗過濾層的硝酸體積，不會超過最後樣品所需的體積。
- (E) 將樣品停止加熱並冷卻，並準備連接一個 0.45  $\mu\text{m}$  分析過濾器的真空設備。
- (F) 將濃度 8M 的硝酸溶液傳送到真空設備，利用此硝酸溶液沖洗固體並通過過濾器，同時確認其體積量不會達到最後樣品所需的體積。
- (G) 將過濾過的產物利用 8M 硝酸溶液定量傳送到容量適當的燒瓶，並確認此溶液以冷卻到室溫，最後以 8M 硝酸溶液將樣品稀釋到所需要的體積。

## B. 層析法分離出 Sr

- (A) 利用 10 ml 的 8M 硝酸溶液平衡層析水匣內的 Sr 樹脂，並將廢液收集於燒杯中。
- (B) 將準備好的樣品放入水匣，此水匣會收集 Sr，90Y 及其他的分裂產物會與廢液一起流出。
- (C) 利用 15 ml 的 8M 硝酸沖洗水匣，以去除鋇及其他殘留的分裂產物。
- (D) 使用約 10 ml 的水，將水匣內的 Sr 沖洗進離心管，並加入飽和的  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  溶液與其混合。

- (E) 等待約 5 分鐘使其完全析出。
- (F) 準備玻璃纖維過濾器並測量其重量及紀錄後，放入過濾器載具，並與真空盒組合。
- (G) 開啟真空後，將樣品放入此過濾裝置內，讓樣品通過過濾器。
- (H) 利用約 10 ml 的清水沖洗離心管、過濾器載具及濾紙，以確認所有樣品均通過過濾器。
- (I) 小心地將濾紙從過濾裝置上移除，並將其放置在玻璃乾燥盤上，可使用加熱燈烘烤濾紙 5-10 分鐘，以加快濾紙乾燥的時間。
- (J) 測量濾紙的重量，並記錄其總重量。
- (K) 待濾紙乾燥後，將其固定在氣流式比例計數器專用之金屬板樣品載台上。

### C. 氣流式比例計數器計讀

#### (A) 量測樣品活度

$$A_{obs} = \frac{(cpm_s - cpm_{bkg})}{Y_t \times E \times S \times 60} \times DF$$

其中

$A_{obs}$  = 量測樣品之活度(所有放射性銿同位素之活度加總，並加上子核種  $^{90}\text{Y}$  之活度)

$cpm_s$  = 總樣品貝他計數率 (cpm)

$cpm_{bkg}$  = 背景貝他計數率 (cpm)

DF = 稀釋因子

$Y_t$  = 載子產率分率(如果產率分率 > 100，則  $Y_t = 1$ )

E = 偵檢器效率 (計數/偵檢)

S = 樣品大小 (固體：kg；液體：L；過濾器：1)

60 = 秒/分鐘

#### (B) 子核種 $^{90}\text{Y}$ 分率

$$FI = \frac{\lambda_Y \times A_{0Sr} \times (e^{-(\lambda_{Sr} \times t)} - e^{-(\lambda_Y \times t)})}{(\lambda_Y - \lambda_{Sr}) \times A_{0Sr}} = 1.0002494 \times (e^{-(0.0000027 \times t)} - e^{-(0.0108304 \times t)})$$

其中

FI =  $^{90}\text{Y}$  在分離實驗 t 小時之分率

$\lambda_{\text{Y}}$  =  $^{90}\text{Y}$  之衰變常數：0.0108304 hour<sup>-1</sup>

$\lambda_{\text{Sr}}$  =  $^{90}\text{Sr}$  之衰變常數：0.0000027 hour<sup>-1</sup>

t = 分離實驗所耗費之時間

(C) 放射性銫總活度

$$A_{\text{Sr}} = \frac{A_{\text{obs}}}{1 + FI}$$

其中

$A_{\text{Sr}}$  = 樣品內放射性銫總活度(dpm/mL, dpm/g 或 dpm/sample)

(D) 計數不確定度

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{C_g - C_{\text{bkg}}}}{C_n}$$

其中

$\sigma_a$  = 計數不確定度

$C_g$  = 總樣品計數

$C_{\text{bkg}}$  = 背景計數

$C_n$  = 淨樣品計數

(E) 載子產率

$$Y = \frac{W_g - W_t}{C \times V_c} = \frac{W_n}{W_a}$$

其中

$W_g$  = 過濾器及殘留物總重量(mg)

$W_t$  = 過濾器空重(mg)

$C$  = Sr 載子濃度(mg Sr/mL)

$V_c$  = 加入 Sr 載子之體積(mL)

$W_n$  = 分離實驗後，過濾器上吸出物之淨重

$W_a$  = 加入 Sr 載子之重量(mg)

(F) 最小可偵測活度(MDA)

$$MDA = \frac{3 + 4.66\sqrt{C_{\text{bkg}} \times T_c \times DF}}{T_c \times E \times Y \times S \times 60 \text{ sec/min}}$$

其中

MDA = 最小可偵測活度(dps/g, dps/L, dps/smpl)

$C_{bkg}$  = 背景計數率(cmp)

$T_C$  = 樣品技術時間(分鐘)

E = 偵檢效率(cpm/dpm)

Y = 化學產率分率(如果產率分率 $>1$ ，則  $Y=1$ )

S = 樣品大小 (固體：kg；液體：L；過濾器：1)

DF = 稀釋因子

#### (四)MFC 內其他重要設施

##### 1. 熱燃料檢驗設施(Hot Fuels Examination Facility, HFEF)

HFEF是一個多功能的熱室設施，處理作業，此設施內的氫氣氣氛熱室可以提供屏蔽，以對高放射性及含TRU元素材料執行遠端檢驗、處理及處置等作業。設施內還設有一座屏蔽冶金實驗室、非屏蔽熱維修區及廢棄物分類區。主要熱室之尺寸大小為70' L x 30' W x 25' H，並使用不鏽鋼內襯及通入純化氫氣，此熱室共有15個工作站，牆厚4呎，各工作站均有工作視窗，並有兩個快速入口。另外還有一個除汙用熱室，尺寸大小為20' L x 30' W，熱室內使用大氣，附有高壓水沖洗腔體，可用於設備除汙。

##### (1) 視窗玻璃更換

HFEF 及契約商的團隊曾經成功的完成 HFEF 視窗玻璃組更換作業，此視窗玻璃組是由 6 片單片玻璃所構成，總重量高達 14,000 磅，提供 HFEF 作業人員在執行輻射作業時的屏蔽及視野。在熱室側保護此視窗玻璃組的是 A-slab，緊接著是另一片厚度較厚的 B-slab，用以保護外層玻璃組，內有另外三片鉛玻璃 C、D 及 E 浸泡於礦物油內，以獲得最清晰的視野，更換此視窗組之動機也是由於礦物油已經洩漏到視窗外，因此才擬定此視窗玻璃更換計畫。

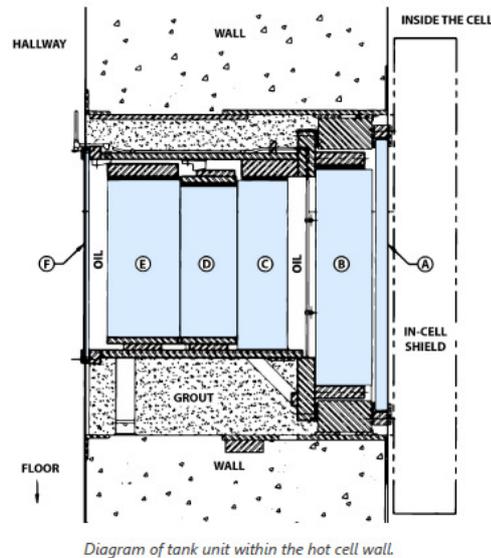


圖 33：HFEF 熱室視窗玻璃結構圖

為了更換熱室內的 A-Slab，團隊花費許多時間進行利用機械手臂將 A-Slab 移除及吊離時的模擬作業，所使用的是一個旋轉移動架及機械手臂專用、並搭配攝影機之氣動扳手。同時，團隊也設計一組全新的視窗玻璃組，提供更適合之視角及屏蔽需求。結構分析人員也依據其重量設計出適合搬運之拖車。



圖 34：機械手臂專用氣動扳手

在進行作業之前，經過輻防人員評估，所有人員所接受到的劑量必須符合 ALARA 精神，而為了滿足這個要求，MFC 的工程師也設計了一個不鏽鋼屏蔽，來阻擋因為視窗拆除所洩漏的輻射。除此之外，也在作業場外架設

一座包覆性的帳篷，以方便人員作業。整個視窗玻璃更換作業的流程包括：混凝土移除、視窗組移除、B-slab 移除、新製視窗玻璃安裝、混凝土替換、洩氣線及封口洩漏測試、電子元件組裝，過程中，輻防人員持續監控著環境劑量，以確認安全的工作環境。



圖 35：HFEF 熱室視窗更換作業中舊視窗玻璃組移除

## 2. 燃料處理設施(Fuels Conditioning Facility, FCF)

FCF的特色是處理含鈉的金屬燃料，其第二項特色是利用高溫處理的方法，進行用過核燃料之提煉。所謂的高溫處理，指的是關於利用高溫化學及電化學方法，將用過核燃料內的分裂產物進行分離、純化及回收。FCF總共有兩個熱室，其中大氣氣氛的熱室是核燃料組件分解為燃料元件的場所，另一個氬氣氣氛的熱室，則用於處理用過燃料元件，設施的地下室屬於熱維修區域，可對污染設備進行去污或維修。FCF也有一個工程級的儀器，可用於處理含鈉的金屬燃料、回收可分裂鈾、及分離固態廢棄物內的分裂與活化產物，以便於後續的最終處置。

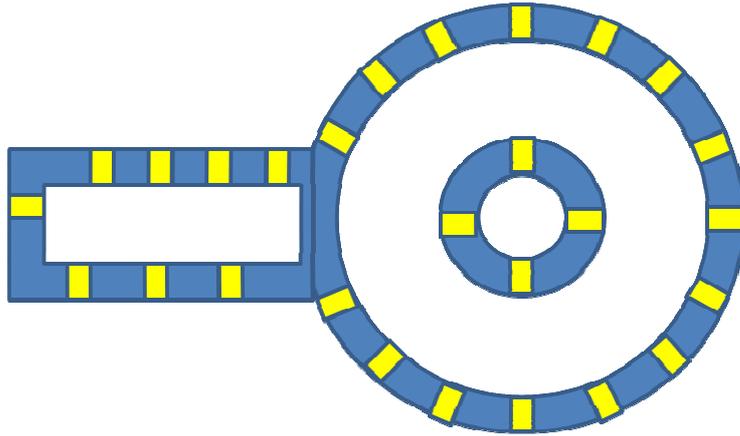


圖 36：FCF 內熱室示意圖，左為大氣氣氛熱室，右為氫氣氣氛熱室。

### 3. 照射過材料分析實驗室(Irradiated Materials Characterization Laboratory, IMCL)

IMCL在Hazard Category等級上屬第2級的核設施，專注於研究照射過核燃料及材料的微結構及機械性質分析。IMCL獨特的設計納入先進的特性分析儀器，對於震動、溫度、輻射電磁波干擾等影響，使用屏蔽之包覆系統進行改善。屏蔽過的儀器可以進行高放射性燃料及材料的特性分析，且因為儀器是經過模組化之設計，IMCL仍持續進行改進，以達到其40年的使用壽命目標。

IMCL內所建立的貴重分析儀器包括有：屏蔽式樣品準備設備(Shielded Sample Preparation Area, SSPA hot cell)、屏蔽式Cameca SX100R EPMA、屏蔽式FEI QUANTA 3G場發射雙束FIB、FEI Titan ChemiSTEM FEG-STEM、屏蔽式FEI Helios雙束SEM與電漿FIB及屏蔽式optical microscopy。



圖 37：屏蔽式樣品準備設備



圖 38：屏蔽式 FEI Helios 雙束 SEM 與電漿 FIB

### 三、心得

本次在 INL 實習的心得敘述如下：

(一) INL 早於西元 1949 年即已成立，且有關原子能之研究一直是其發展重心之一，因此從成立以來至今，所建設過的核子反應器，大大小小加起來共有 52 座之多，對於核能研究也累積相當多經驗及成果，特別是關於用過核燃料之檢驗、處理、貯存及處置，也一直是本所努力發展研究之重點，所以與 INL 之間建立長期合作關係，有利於本所未來推動執行核能相關計畫。

(二) 行前的線上訓練內容相當充實，除了解說在 INL 實驗室內工作的注意事項之外，從早上出發前往實驗室途中，到下午結束工作返回家中之間的安全注意事項，都事先向新進人員說明，也因此內容相當扎實，總共約有 260 個頁面左右，另外某些主題還必須參加測驗，滿分 100 分，需要達到 80 分以上才算通過測驗，通過測驗者才算完成訓練，測驗內容雖然不難，而且全部都是訓練內容，但是如果訓練途中不加以筆記，要通過測驗仍有一定的難度。依據這次參加的經驗，完成這次全部的線上訓練，花費超過 10 小時以上。

(三) 本次進行實習的材料與燃料研究園區分析實驗室，所分析的樣品均屬於放射性材料，執行的作業均屬於輻射作業，INL 為了保護員工安全，除訂定作業守則之外，還要求員工從新進開始，每年都需要接受一整天的輻射教育訓練，並且還有實務操作的單元，所以內部員工對於輻射均有一定的知識，對於輻射防護也謹守規定，任何作業均以防止輻射擴散優先，減少管理上的壓力。

(四) 為了提升分析結果的準確性，分析實驗室還自行發展出樣品純化技術『GPEC』，此技術可以將樣品內之所需要分析的元素成分單獨分離出來，避免在進行分析時，相同性質或是重量的元素干擾，而使分析結果產生偏差，進而影響後續實驗之進行，相信此

技術未來可以運用在許多計畫的樣品分析中。

(五) 本次前往 INL 實習的目的之一為放射性廢棄物分類，在這方面，INL 分析實驗室經驗相當豐富且作業完善，主要是因為 INL 內曾經或正在運轉的反應器共有 53 座，分析實驗室也會處理部分反應器所提供的樣品並進行分析，而每次作業所產生的廢棄物都會標記後分別存放，也因此實驗室內已建立各反應器的履歷，目前都是根據這份履歷來判定廢棄物內的核種組成，並依據結果對廢棄物之高低階加以分類。此行之另一目的是學習對用過核燃料之分析，也剛好遇到分析實驗室收到 FCF 的委託，要針對處理 EBR-II 用過燃料結果進行分析，過程中看到 INL 人員如何對此委託計畫的工作安排，包括前段先測量樣品輻射劑量，並計算在熱室內製作樣品溶液時的稀釋因子，再安排各種不同的分析方式，以對最後分析結果進行交叉比對，提高數據的可靠度，所有的作業都由不同的專業人員負責，每天早上舉行會議，共同討論計畫的執行結果，如此的作業方式，所得到的結果，不只讓客戶得到最正確的結果，所有參與的人員也都可以共同學習及成長。

## 四、建議事項

### (一) 輻射防護作業之精進：

INL 材料與燃料研究園區(MFC)內所執行的計畫均與核燃料相關，所進行的工作均為輻射作業，為避免作業造成輻射外洩，MFC 人員制定了許多有關輻防的作業程序書，裡面除了記載輻射作業前、中、後所必須執行的輻射監測，也記載了每日、每周、每月、每季、每半年及每年應該執行的輻射作業，雖然本所也有相當完備的輻防作業程序書，但仍可以參考 INL 之作法後進行修正。

### (二) 兩實驗室持續交流：

在實習期間，發現韓國 KAERI 已與 INL 發展成為相當密切之核能研究夥伴，KAERI 甚至派出多位研究人員經常駐於 INL，以隨時與 INL 研究人員使用設施進行實驗，或針對研究結果進行討論，而我國核能電廠目前已面臨延役或除役階段，相關技術 INL 已經發展多年，應積極規劃與 INL 建立學術研究計畫，以培訓人才，獲取相關技術及經驗。

### (三) 提升本所熱室技術能力：

INL 曾經建設過的核子反應器雖然有 52 座，但目前僅餘 3 座仍在運轉中，其餘 49 座均已停機或除役，為因應這些停機或除役核子反應器內用過核燃料的相關檢測工作，INL 相當倚重設施內大大小小的熱室，而本所營運之熱室是我國唯一的高放射性材料檢驗實驗室，對本國照射過核燃料之檢驗也具有相當豐富之經驗，唯該實驗室已使用超過 40 年，且部分技術人員離退，所以實驗室需要進行設備及技術能力翻新，以維持本所燃料檢測能力，並配合執行國家政策。