

出國報告（出國類別：實習）

北歐放射性難測核種分析研習

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：羅巧婷 / 生化分析專員

派赴國家：芬蘭、丹麥

出國期間：113年9月2日至113年9月15日

報告日期：113年10月29日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：北歐放射性難測核種分析研習

頁數 21 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力股份有限公司/翁玉靜/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

羅巧婷/台灣電力股份有限公司/放射試驗室/專員/02-26381068#503

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會6 其他

出國期間：113 年 9 月 2 日至 113 年 9 月 15 日

派赴國家/地區：芬蘭、丹麥

報告日期：113 年 10 月 29 日

關鍵詞：放射化學、氧化燃燒器、TDCR 液態閃爍偵檢器、ICP-

MS/MS、RadWorkshop 2024

內容摘要：(二百至三百字)

因應核能電廠進入除役階段，依據各電廠除役輻射特性調查計畫及主管機關指示，放射試驗室除執行運轉期間廢棄物例行核種之分析度量外，亦必須進行除役期間所關注之放射性難測

核種分析，並執行實驗室間分析能力比對。為精進分析技術，
本次分別於芬蘭 HIDEX 儀器公司及丹麥科技大學(Technical
University of Denmark, DTU)主辦的放射化學分析研習營兩方機構
實習，學習核種分析、燃燒器、液態閃爍偵檢器與其他分析儀
器的相關知識、分析操作與實務經驗應用，收穫良多，有助於
本公司難測核種分析技術的精進。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網

(<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 次

一、 出國目的.....	1
二、 過程與內容.....	1
(一)、 參訪背景說明與行程摘要.....	1
(二)、 芬蘭 HIDEX 儀器公司.....	3
(三)、 放射化學研習營(RadWorkshop 2024)	11
三、 心得與建議.....	19

一、 出國目的

因應核能電廠陸續進入除役階段，在電廠拆除前須進行輻射特性調查，以評估各廠房、設備之汙染情形，確保人員劑量及進行除役廢棄物管制作業，依各電廠除役輻射特性調查計畫及主管機關要求，放射試驗室(以下稱本室)必須進行除役放射性難測核種分析方法開發及實驗室間能力比對分析。

本室執行電廠廢棄物難測核種分析已有近 30 年之作業經驗，而針對除役期間應執行分析之新關注核種，已陸續於 111 年完成分析方法開發，並且除了與 國內實驗室(國原院、清大)進行比對驗證外，亦參與由北歐核子安全跨國研究組織 NKS(Nordic Nuclear Safety Research)所主辦之難測核種分析比對活動，了解許多實驗室所使用的先進液態閃爍偵檢技術(Triple-to-double coincidence ratio, TDCR)由芬蘭 HIDEX 儀器公司開發儀器設備。於該公司學習相關資訊並報名 NKS 於丹麥科技大學(Technical University of Denmark, DTU)舉辦的放射化學研習營(上屆為 2018 年因應疫情至今年再開辦)。期透過實習機會學習核種分析及儀器實務操作的技術細節，精進實驗室的核種分析能力與國際接軌，提升國內分析能力水平。

二、 過程與內容

(一)、 參訪背景說明與行程摘要

有感於近年來核能電廠陸續除役及環境放射性監測之難測核種需求日益增加，對於台灣電廠除役新增之關注核種，並非國際普遍量測之核種，部分核種之標準射源或標準品亦較難取得。本室 112 年曾派員參訪芬蘭國家技術研究中心(Technical Research Centre of Finland, VTT)，了解許多研究團隊所使用的液態閃爍偵檢技術 TDCR 透過參數修正，無須標準品便可定量。而電廠廢棄物分類與除役關注核種中包含的揮發性核種，如氫、碳-14，以氧化燃燒器可進行樣品分析，而 ICP-MS/MS 是近年國際間實驗室核種分析常見儀器。本室核

種分析作業雖已完成國內實驗室間比對驗證並獲 TAF 認證，然而為回應民眾對公司分析技術持續提升的期待，本室仍保持虛心學習與持續精進的態度，把握自我提升的機會，至核能化學分析領域機構進行實務經驗學習，期提升國內分析水準與國際接軌。

本次出國參訪行程自 113 年 9 月 2 日起至 113 年 9 月 15 日止，共計兩周 14 天，第一周前往 Hidex 公司所在地點 Turku，第二周前往丹麥 DTU Risø 校區所在地點 Roskilde，行程摘要如下：

日期	行程規劃
9/2-9/3 (一)~(二)	往程 【台北桃園機場(TPE)-法蘭克福機場(FRA)-赫爾辛基萬塔機場(HEL)】 → 芬蘭圖爾庫(Turku)
9/4-9/6 (三)~(五)	HIDEX 公司實習： 【Lemminkäisenkatu 6, Turku】 氧化燃燒器儀器介紹、碳-14 核種分析實驗操作與度量、液態閃爍偵檢器介紹、儀器使用操作與技術細節討論
9/7 (六)	移動【圖爾庫(TKU)-斯德哥爾摩阿蘭達(ARN)-哥本哈根機場(CPH)】 → 丹麥羅斯基勒(Roskilde)
9/8 (日)	資料整理
9/9-9/13 (一)~(五)	放射化學研習營(RadWorkshop 2024)： 【Frederiksborgvej 399, Building 122&204 (Risø DTU campus)】 核能分析領域專家座談、實驗室培訓：難測核種分析實驗及 ICP-MS 儀器操作與應用指導
9/14-9/15 (六)~(日)	返程 【哥本哈根機場(CPH)-法蘭克福(FRA)-台北桃園機場(TPE)】

(二)、芬蘭 HIDEX 儀器公司

HIDEX 係一家開發和製造用於生命科學研究、輻射測量和核子醫學的高性能分析設備儀器公司。HIDEX 集團由 Hidex Oy 以及兩家子公司組成，Hidex Chemicals 專門生產化學品如液態閃爍液，Hidex Deutschland Vertrieb GmbH 則是位於德國美因茨的銷售和服務單位，為德國和中歐其他國家的客戶提供支援。總部位於芬蘭圖爾庫，具備全球經銷商網路和專家研究團隊，提供客戶實驗室設備的使用培訓，並根據使用者回饋持續更新產品。

HIDEX 於 1993 年創立，於 1996 年推出了第一台便攜式液態閃爍偵檢器，該公司的產品從便攜式型液態閃爍偵檢器、和微量盤分析儀結合，並擴展了氧化燃燒器進行樣品製備、超低背景分析的液態閃爍偵檢器。

此次實習地點位於圖爾庫(Turku)的工業區中，此廠區主要為測試、調校與儀器出廠前最終的 QC(Quality Control)與 QA(Quality Assurance)，在這邊看到的儀器 9 成以上是成品，組裝工廠位於此廠區的對面。本次主要實習內容為了解 TDCR 液態閃爍偵檢器原理、儀器實際使用上之操作與限制，以及氧化燃燒器在難測核種 C-14 分析上的操作。本次參訪主要實習對象分別為管理液態閃爍偵檢器及氧化燃燒器部門的 2 位技術主管，特別感謝其詳盡親切地說明，且大方提供拍照許可。礙於雙方互信及尊重商業機密原則，本次交流許多實驗細節不便詳實公開，以下僅針對實習過程討論議題及部分最關注的主題做重點描述。

液態閃爍偵檢器(Liquid Scintillation Counter, LSC)的工作原理，係將放射性核種衰變之貝他粒子能量，直接或間接透過閃爍液轉換為接近可見光波段，藉由儀器內建之 1 支或 2 支光電倍增管(Photomultiplier tube, PMT)將接收到之光訊號轉成電流脈衝訊號，電流訊號經由放大器及類比-數字轉換器(ADC)等組成多頻道分析儀(MCA)而形成能譜。在計測過程會發生衰變能量轉換成光子，導致能量或光子損失的消光現象，稱為淬息效應，會影響效率，藉由儀器導入淬息指標(QIP)評估淬息效應對效率造成的影響。例如本室目前使用的液態閃爍偵檢

器是內建一個加馬射源，利用外加射源照射試樣瓶所產生的康普吞散射與讀值比率作淬息指標。

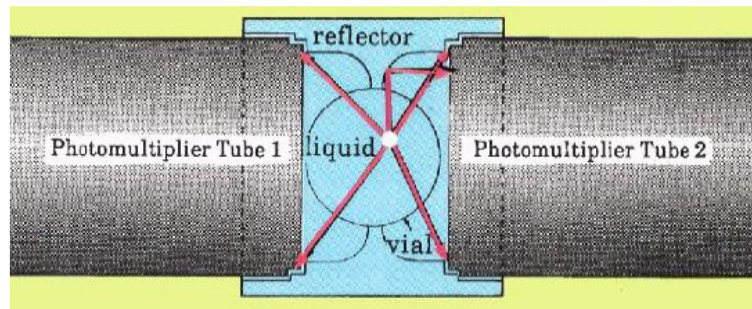
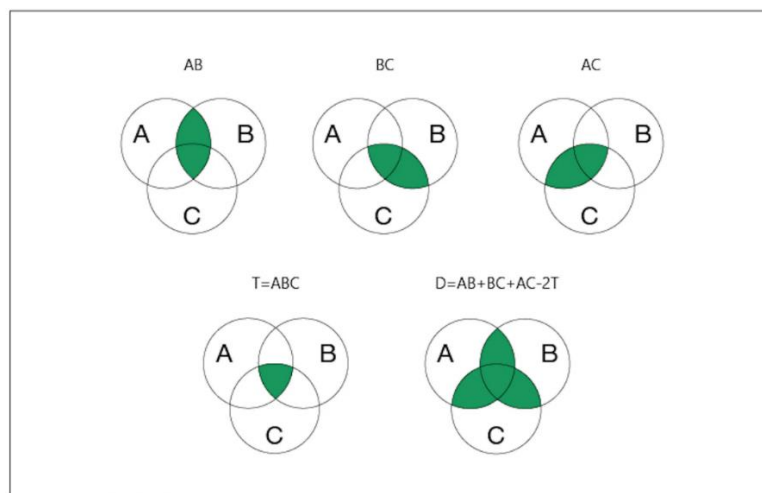


圖 1、液態閃爍偵檢器 PMT 示意圖

HIDEX 公司的液態閃爍偵檢器，內建 TDCR (triple-to-double coincidence ratio) 技術及參數修正。TDCR 理論係於 1979 年學界論文發表，使用三支光電倍增管，彼此成平面 120°，藉由 TDCR 技術進行自動淬息程度校正，以數學方式計算絕對活度，是近年來許多研究團隊所使用的液態閃爍偵檢技術。其理論為：決定三個雙重 PMT 合計數 AB、BC 和 CA 以及三重符合計數(T)ABC。三重符合計數與雙重符合計數的邏輯和(D)的比率，對應以下公式計算效率：



$$\text{TDCR} = \frac{T}{D} = \frac{\text{Triple counts}}{\text{All counts}} \approx \epsilon$$

圖 2、TDCR 計算式 (HIDEX 簡報介紹示意圖)

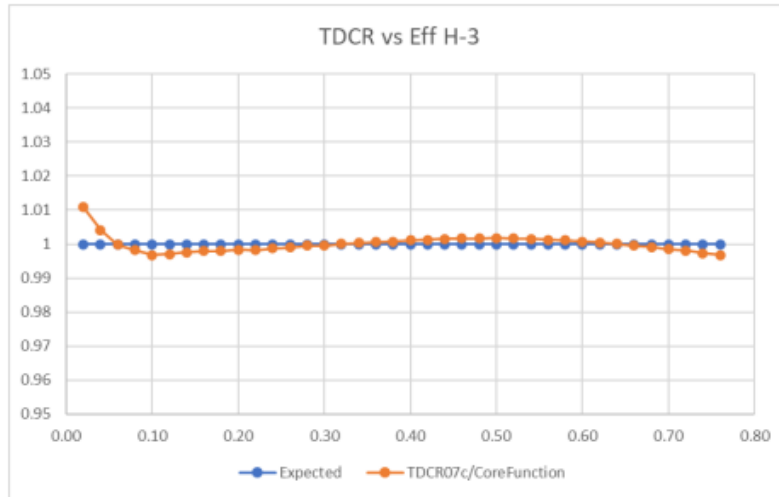


圖 3、TDCR 與 H-3 效率差異 (HIDEX 簡報介紹示意圖)

對於貝他核種，TDCR 接近於效率(ϵ)，此方法可測定低和中淬息程度樣品貝他核種的活度，針對化學淬息與顏色淬息無需進行淬息校正，而較高淬息程度的偏差可以透過校正功能消除。核心函數建模(CF)提出了以下改進的數學方程式，用於校正 TDCR 更加精準接近效率：

$$CF = [TDCR + a(1-TDCR)^b \times (9TDCR^2 / (1+2TDCR)^2 - TDCR)]^c$$

其中 a、b 和 c 是取決於所使用的放射性同位素和混合物的係數。TDCR 與效率誤差約 10%，在低能量貝他核種(氚最大能量 18.6 keV)尤其明顯，對於高能量的核種誤差較小，當能量越高 TDCR 越接近實際效率，HIDEX 表示像是 C-14(最大能量 156 keV)或 Sr-90(最大能量 546 keV)，TDCR 與效率的誤差降低至 3%。CF 校正因子係透過學界或實驗室實際量測數據所推導，目前僅有部分常見核種，比對本室目前分析核種包含 H-3、C-14、Fe-55、Ni-63、Sr-89、Y-90、Ru-106/Rh-106，以及其他如 P-32(核子醫學的放射追蹤劑)、K-40(天然同位素)，並未涵蓋全部台灣電廠除役關注核種清單。另外，三支 PMT 偵測器可實現高計數效率，同時將螢光干擾降低，有助於立即測量高螢光發射樣品(生物樣品)，無需對樣品進行陰暗處靜置，在犧牲部分效率的前提，節省將樣品靜置隔夜的時間。

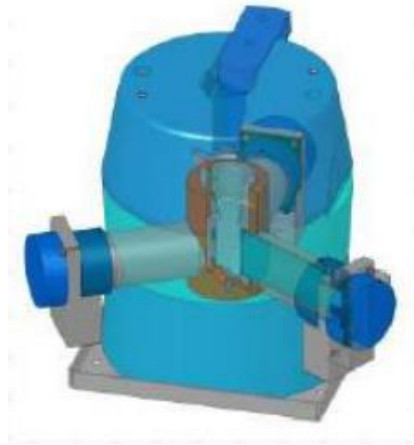


圖 4、TDCR 液態閃爍偵檢器內部結構 (HIDEX 簡報介紹示意圖)

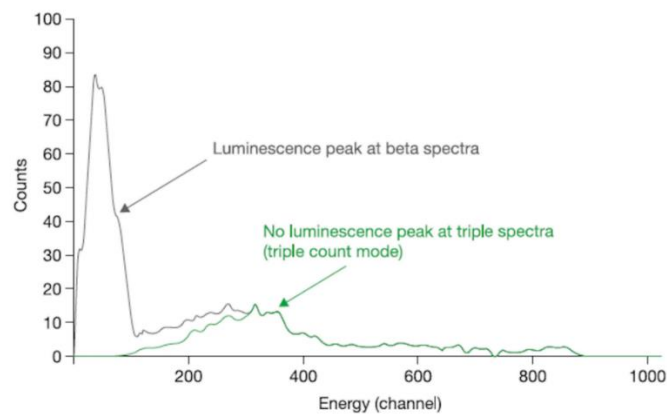


圖 5、TDCR 降低螢光干擾 (HIDEX 簡報介紹示意圖)

實習操作 TDCR 液態閃爍偵檢器的過程，能設定的參數類似本室目前使用的液態閃爍偵檢器，不同的地方是 TDCR 在操作時必須要開全能窗，才能正確計算 triple-to-double 的比例，所以不會設定能窗範圍。表格對應計測瓶的位置，點選方格可看到該格的計算公式，CPM、DPM、TDCR 等各項數據各成一個分頁，略顯凌亂，HIDEX 表示未來幾年可能進行軟體的改版優化。考量 TDCR 以數學模式計算，核種衰變模式或不同閃爍液間的作用是否影響誤差比例，HIDEX 技術人員表示只要已知衰變方式，TDCR 技術也可以擴展到單能電子，如 Fe-55 和 Ca-41 等電子捕獲核種，計算其對應的校正因子，依其經驗，不同閃爍液對 TDCR 計算上造成的誤差約 2-3%。

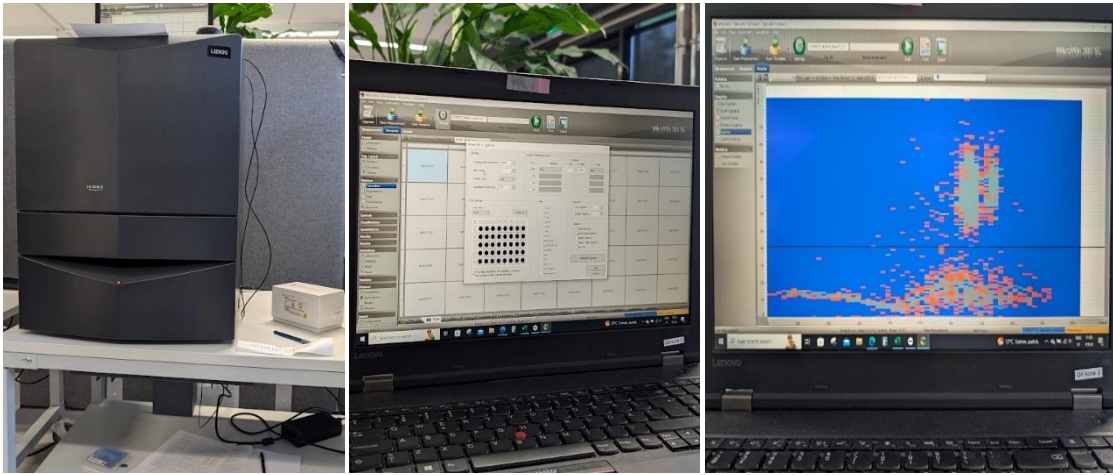


圖 6-8、TDCR 液態閃爍偵檢器操作

氧化燃燒器是自動化的樣品燃燒儀器，適用於揮發性核種 H-3 和 C-14 樣品製備，將固體有機樣品轉化為均勻、澄清的液體以進行 LSC 測量，適用多種樣品，如土壤、組織、植物、石油和混凝土等。燃燒器長 60 公分，寬 90 公分，高 60 公分，重 85 公斤，體積不大，H-3、C-14 回收率大於 90%、99%。原理為將固體有機樣品在高溫 900°C 和氧氣下燃燒成二氧化碳和水蒸氣，二氧化碳 (C-14) 直接被收集瓶中的閃爍液混合物吸收，水蒸氣 (H-3) 被冷凝到裝有閃爍液的收集瓶中。過去本室曾使用他牌氧化燃燒儀進行氫與碳自動化分離，然而經年累月使用，其管路容易累積汙染不易清理，產生記憶效應，且機械裝置動作越來越不穩，遂於近年改回以傳統燒瓶進行溼式氧化還原法。

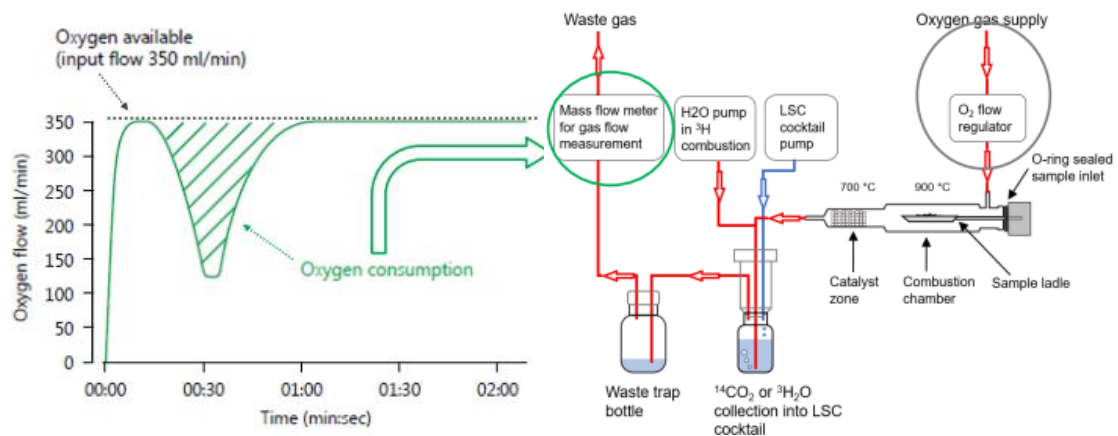


圖 9、氧化燃燒器內部結構 (HIDEX 簡報介紹示意圖)

氧化燃燒器自動導入閃爍液與吸附劑，有一個獨立的抽風管區域，儀器置

於可移動式檯面，下層放置藥品和備品，側面有一個收集管路中剩餘溶液的緩衝瓶。有六個樣品槽，每槽可放置樣品量 0.05-2.0 公克，一個樣品槽可分別對應一個收集瓶，或六個樣品槽對應至一個收集瓶以增加取樣量，每個樣品燃燒時間 2-5 分鐘。操作介面簡潔明快，可實時監控氧氣流量確認燃燒反應是否完全。

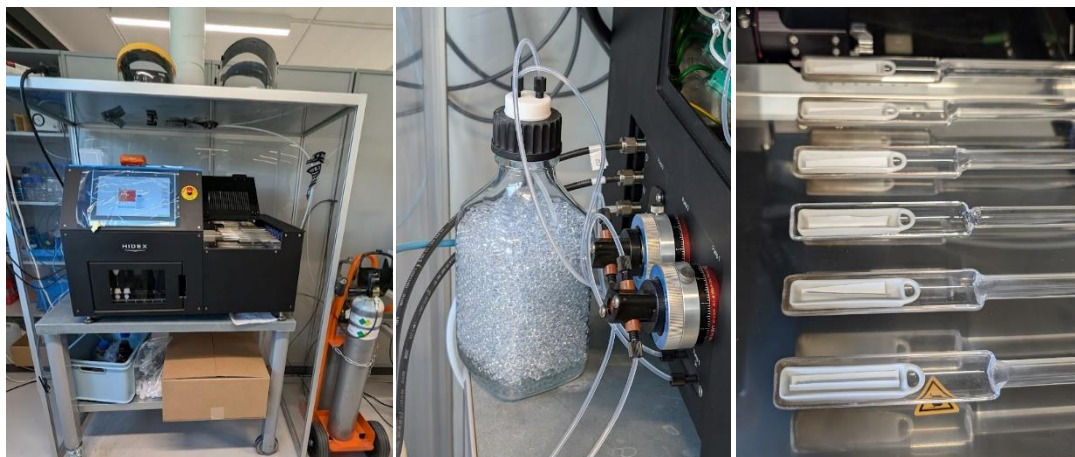


圖 10-12、氧化燃燒器設備

實習氧化燃燒器過程：將已知活度大於 5000 dpm C-14 液態射源滴於紙上，白紙放在白色細長陶瓷鉢中進行實驗，空白樣、空白樣、標準樣、空白樣(記憶效應)、標準樣、空白樣(記憶效應)的順序，記憶效應 0.3%。測試與 HIDEX 表示記憶效應小於 1%符合。仍需考慮樣品的有機物複雜程度，若實際樣品為活度較高且基質複雜如土壤或樹脂，HIDEX 建議為避免樣品槽汙染，會以由低至高活度的順序進樣將干擾減小，以及可將不同活度的樣品槽分類使用，或直接替換備品以避免儀器汙染。



圖 13-16、氧化燃燒器操作

此次實習儀器包含液態閃爍偵檢器 300 SL、300 SLL、ULLA 機型，300SL 為基礎機型，300SLL 儀器底部增加新式塑膠閃爍偵測器，偵測宇宙射線等背景值反偶合抵銷背景訊號將低背景值，ULLA 為透過增厚鉛屏蔽等主被動降噪達成超低背景訊號。HIDEX 亦具備閃爍液生產及銷售，本室近年面對環保署法規調整，例行使用閃爍液列管為毒化物，或國外原廠停產等因素，數次更換閃爍液，HIDEX 提供閃爍液成分及溶解度資訊，可作為備用參考。另外 Hidex Q-ARE 是一台自動萃取層析系統，管柱參數調整、樣品加載、清洗和洗脫步驟，無需手動操作或人力實時顧守。該儀器配有耐酸閥門、連接器和管道，與各種尺寸的預裝柱和自裝柱相容。在後續丹麥參加放射化學研習營，有研究團隊分享使用該儀器經驗，但價格不斐。



圖 17-18、Q-ARE 結構示意圖 (HIDEX 簡報介紹示意圖)

HIDEX 的辦公環境有二層樓，黑白設計風格極簡，空間整潔，辦公隔間與會議室通透明亮，人員親切友善，對於理論技術或使用上的疑問，答覆時大部分能提供數據資料，交流氣氛愉悅。



圖 19-22、HIDEX 辦公環境及與實驗室人員合影

(三)、 放射化學研習營(RadWorkshop 2024)

RadWorkshop 2024 係 NKS-B 為繼 2009 年、2013 年和 2018 年舉辦後的第四屆研討會。該研討會由丹麥技術大學(DTU)主辦，挪威生命科學大學(Norwegian Life Science University, NMBU)、赫爾辛基大學(University of Helsinki, UH)、瑞典食品局(Swedish Food Agency, SLV)、挪威輻射核能安全局(Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority, DSA)及芬蘭輻射與核能安全局(Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland, STUK)共同協辦，9/9~9/11 為專家座談研討會，來自世界各地專家學者關於環境監測、核設施除役經驗、緊急計畫、放射生態學和示踪劑研究等議題分享，9/12~9/13 為實驗室培訓 Sr 核種分析與 ICP-MS 儀器使用。

NKS-B 為北歐核子安全跨國研究組織 NKS 部門，NKS 由北歐五國(丹麥、瑞典、挪威、芬蘭、冰島)之政府核安相關機構所資助，致力於核子安全、除役工作及緊急應變等相關研究，並致力推廣至全世界，其組織又分為 NKS-R、NKS-B 兩部門，分屬於不同地點並負責不同領域之研究。

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">● NKS-R 負責領域：熱力學、嚴重事故反應器物理風險分析/概率評估組織核安文化除役及廢棄物、乏燃料管理反應器延役 | <ul style="list-style-type: none">● NKS-B 負責領域：輻射及核子事故緊急應變量測技術及定量分析永續發展及環境影響評估 |
|--|---|

NKS-B 研究的領域是關於輻射及核子事故緊急應變、放射生態學和環境影響評估，以及測量方法、技術和品質保證方案，提供有關環境中放射性核種的追蹤、流動和影響的資訊，確保遵守有關放射性物質的相關規定。因本次研討會議題繁多，以下僅針對與本室工作相關議題及部分感興趣的主題做重點描述。

瑞典食品局(SLV)與瑞典國防研究院提出建議在核子事故後使用 ICP-

MS/MS 快速分析 Sr-90 的方法。如果核電廠發生事故或核武爆炸後產生放射性沉降物，Sr-89 和 Sr-90 可能透過食物和水增加對人群的輻射劑量。Sr-90 的半衰期為 28.8 年，是造成長期潛在體內輻射劑量的放射性核種之一，Sr-90 是純貝他衰變核種，傳統上使用液體閃爍偵檢器進行分析，然而這種方法非常耗時，較不適合緊急情況下需要快速分析以滿足決策資料需求的情況，緊急情況可能需要在短時間內分析數百個樣本。牛奶分析為在微波中用硝酸消化牛奶、用專用樹脂分離和純化以及透過蒸發濃縮銫。水樣分析用硝酸酸化樣品，然後用專用樹脂分離和純化銫。而此研究指出無需純化步驟的快速篩選方法：雖然仍在驗證中，可篩選 Sr-90 含量最高的飲用水樣本，以樹脂分離牛奶和飲用水方法的檢測極限為 30 Bq/kg，快篩法的檢測極限估計為 60 Bq/kg。牛奶和飲用水從到達實驗室到得出最終結果之間的時間約為 7 小時，快篩法約為 1 小時。

分析方法	參數	消化前處理	樹脂分離	蒸餾濃縮	ICP-MS/MS 分析		分析時間 (樣品抵達實驗室至完成分析)
					Stable Sr	Sr-90	
牛奶	V	V	V	V	He-mode	He+O ₂ mode	7 小時
水樣(DW)	-	-	V	-	-	He+O ₂ mode	5 小時
快篩方法(DW)	-	-	-	-	-	He+O ₂ mode	1 小時

表 1. 使用 ICP-MS/MS 分析 Sr-90 方法概述

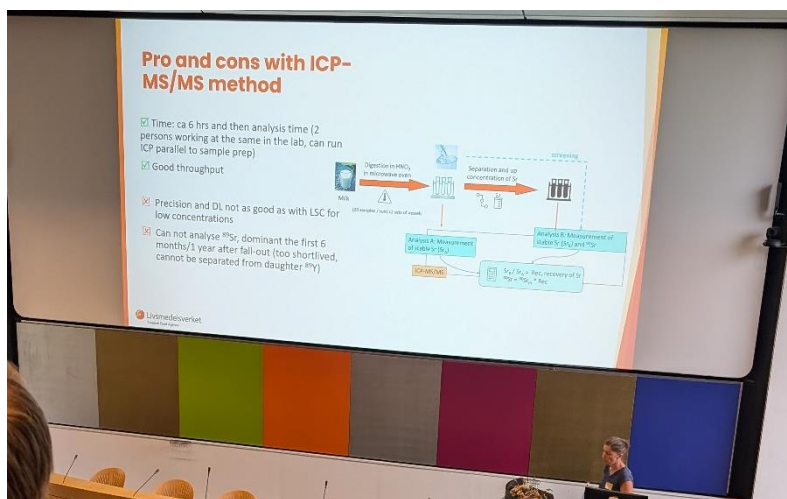


圖 23、使用 ICP-MS/MS 分析牛奶和飲用水中的 Sr-90 (RadWorkshop 2024)

芬蘭輻射與核能安全局(STUK)是芬蘭負責輻射和核能安全的政府機構，目的是促進和監督輻射和核能的安全使用、提供放射性與輻射安全的專業知識與服務給民眾，以確保社會的整體安全，具備測量和環境監測單位可進行現場和實驗室的輻射測量，也作為國家緊急事故實驗室，在可能發生的緊急情況下提供核種分析為決策提供基礎。該實驗室通過 ISO/IEC 17025:2017 測試實驗室，包括加馬能譜分析、放射化學分析(Pu、Am、Cu、Sr、³H、U、Pb、Po、Rn、總 α/β)、ICP-MS 分析、空氣中 Rn 測量和放射性環境監測採樣，主要監測項目包括芬蘭核電廠週邊環境輻射監測和芬蘭境內環境輻射監測，此外也為人民和工業產業(如建築材料、礦產)等提供放射性分析。為了順利運作，強調必須有能力及時與民眾溝通並向民眾發出指示，認為必須和民眾合作才能在緊急事件發生時有足夠的人力，令人印象深刻的是提供平時教育訓練，緊急事件發生時可支援、參加受訓的志工已超過 100 人，並持續增加中，芬蘭民眾自發性的高參與程度令人敬佩。



圖 24、STUK 放射分析和緊急事故應變 (RadWorkshop 2024)

DTU Risø 實驗室前身是 Risø 國家實驗室，成立於 1959 年，原隸屬於丹麥原子能委員會 Risø 研究部，由近代物理學界享譽盛名的波耳(Niels Bohr)協助創立，並擔任首任所長。2019 年起負責環境監測核種分析的實驗室現在則隸屬於 DTU 環境工程系。除了進行學術研究外，實驗室也接受其他歐洲國家的除役樣

品分析委託及環境監測計畫，每年執行超過 2000 件樣次分析，例行業務包含 Risø 廠區周邊、丹麥境內、格陵蘭島及冰島等地的環境樣品監測，參與多項北歐核設施的除役計畫委託分析，並發表過多項大規模的環境監測研究，包含福島事故 I-129 的海洋擴散情形監測，及白令海、挪威海、北極圈等地區的鈾核種與 I-129 分布擴散研究，還有 1968 年載有核武的美軍轟炸機在格陵蘭島失事後的環境輻射追蹤，都是需要大範圍取樣且長期追蹤的研究項目。此次研討會分享主題為非天然核種 U-233 和 U-236 作為新的示踪劑應用，由於在海洋環境中較長停留時間以及同位素比率的獨特指紋，近年來越來越多相關研究。在波羅的海、太平洋和北冰洋中 U-233 和 U-236 的一系列研究，證明該示踪劑在識別放射性核種來源、重建歷史記錄方面的前景，以及對核子活動、沉積物年代學中的年齡深度模型基準、追蹤海洋環流路徑和傳輸時間、量化水體成分並估計污染物或營養物動態之應用。

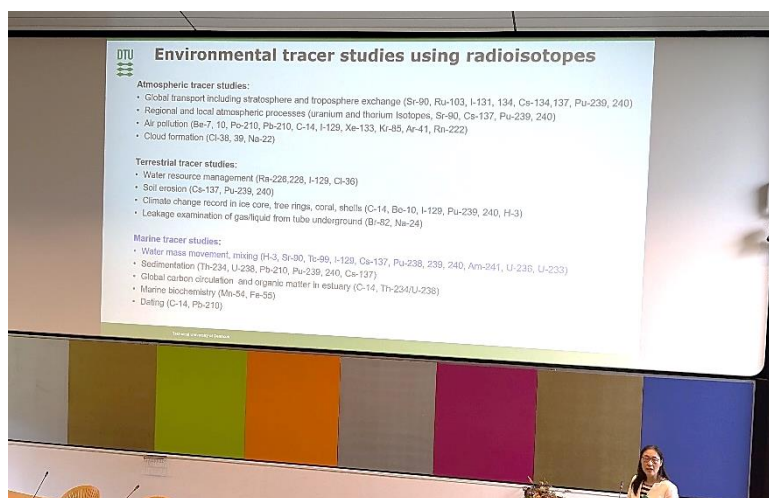


圖 25、在海洋使用 U-233 和 U-236 進行示踪劑應用 (RadWorkshop 2024)

韓國原子能研究所分享，關於放射化學分析的自動化具有許多優勢，包括透過減少人為錯誤來提高可靠性、提高安全性、縮短分析時間和提高通量。透過將質譜分析或輻射度量儀器與自動放射化學分離技術結合，從分離到測量的過程可以在一次運行中完成，線上監控進度。目前各種萃取色譜法用於環境樣品和放射性廢棄物的放射化學分析，萃取層析的一般順序包括調節、上樣、沖

洗和洗脫，傳統上使用重量分析或真空箱方法，儘管真空箱法提供了比重法更高的流速但仍然需要人工手動分析。韓國原子能研究所開發了一種自動化分離儀器，包括蠕動幫浦、多端口流量選擇閥、柱部件、樣品管、收集管和控制面板，自動化過程可根據電腦控制客製化方案執行，自動萃取系統目前應用於大量環境樣品，可在 4 小時內完成 60 L 海水樣品 Sr-90 的純化分析。

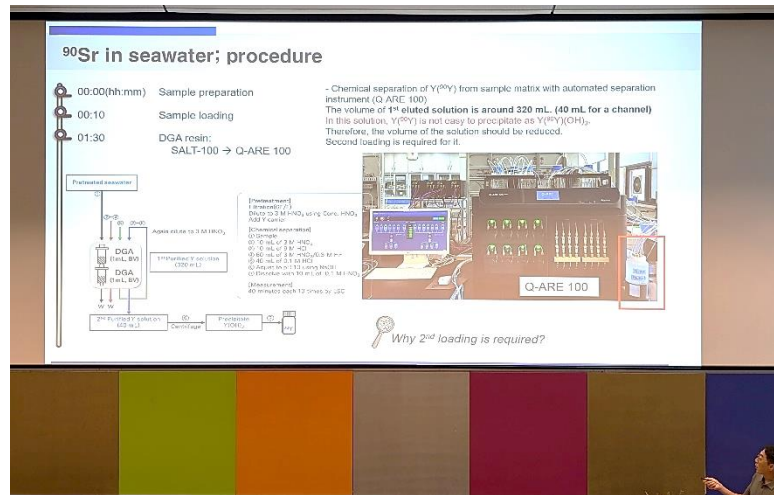


圖 26、用於放射性分析的自動萃取系統 (RadWorkshop 2024)



圖 27-28、RadWorkshop 2024 專家座談研討會



圖 29、RadWorkshop 2024 專家座談研討會合影

9/12~9/13 為實驗室培訓 Sr 核種分析與 ICP-MS 儀器使用。關於 Sr-90 核種分析實習，因本室已具備成熟程序書分析方法，與培訓課程提供分析方法相似，且培訓內容顧及時間簡化了程序，故對分析程序不多加贅述，僅討論現場與其他實驗室交流之心得。Sr 專用樹脂除了購買商品化、已完成填充的樹脂管柱，許多研究機構考量樣品數量眾多，會購買樹脂及管柱自行組裝以降低成本。另外有些研究機構或公司提到，當樣品種類眾多，基質會影響分析過程的流速、回收率，管柱下方配置真空箱可幫助調整流速，留意流速約隔 2-3 秒/液滴，尤其遇到基質複雜的原樣(生物樣品如骨頭)可有效加速實驗進程。本室面臨電廠除役，分析樣品種類增加，亦曾遇到管柱堵住、僅倚靠重力流速過慢延長分析時間，添購真空箱及幫浦可幫助解決問題。



圖 30-32、Sr 難測核種分析操作實習

ICP-MS 儀器培訓課程中，授課者具有二十年以上質譜儀使用經驗，感謝其無私的經驗分享。關於本室關心的不同基質造成影響有幾點建議事項：1.空白樣、標準樣、樣品和品管樣品，基質的酸(鹼或中性)濃度與種類需一致。2.可添加少量的有機溶液。3.使用內標準品(**Internal standard, IS**)作為校正。授課者強調內標準品的重要性：在所有樣品(樣品、標準品、空白樣)中添加一致的量，如果基質差異影響了分析物訊號(不論增強或抑制)，亦假設會對內標準品產生同等影響，以此校正分析物訊號；內標準品可校正霧化程度、氣溶膠傳輸過程、等離子體、空間電荷效應等物理上的基質效應，但需注意其無法校正光譜訊號產生的干擾。在選擇內標準品上的考慮因素有幾點：1.濃度不需太多。2.質量數接近分析物。3.游離能相近(例如對 Se 使用 Ge)。4.每個分析物對應一個內標準品，可使用 3-4 個內標準品。常見的內標準品選擇有： ${}^6\text{Li}$ 、Sc、Ge、Y、In、Rh、Tb、Ho、Lu、Bi 等元素。當使用分析物訊號/ISTD 訊號的比例，相對於分析物濃度繪製校正曲線，如果在前處理之前添加內標準品，可以校正樣品損失及稀釋的誤差。可使用 T 型閥和蠕動幫浦自動添加內標準品建立校正曲線。另外，添加少量有機溶液(1.5-2%的甲醇、乙醇、丙醇、2-丙醇等小分子醇類)可以增加電漿穩定性，增強訊號並減少電離干擾，亦可和內標準品混合使用。



圖 33-34、ICP-MS/MS 操作實習

此次接續 Sr-90 化學純化實驗，以 ICP-MS/MS 排除干擾物質並計測。經過化學步驟純化後的樣品，僅需消除 Zr-90 的干擾，無需去除所有 Zr，透過正確的反應氣體模式： $^{90}\text{Zr} + \text{H}_2$ 和 $\text{O}_2 \rightarrow ^{90}\text{Zr}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_2^+$ ，可將 Zr 進行質量轉移 (90→177 amu) 排除干擾。

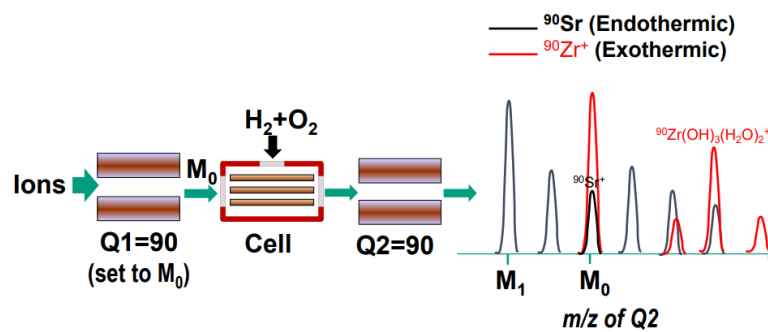


圖 35、Sr 和 Zr 在 ICP-MS/MS 反應模式 (RadWorkshop 2024 簡報示意圖)



圖 36、RadWorkshop 2024 實驗室培訓課程合影

三、 心得與建議

歐洲儀器公司儀器精巧細緻，不論是液態閃爍偵檢器、氧化燃燒器及自動萃取系統，感受到員工對於自身產品的喜愛與驕傲；北歐實驗室的环境整潔，與對技術上的追求相當令人印象深刻。此次於芬蘭 HIDEX 儀器公司與參加放射化學研習營，兩處不同單位實習。HIDEX 儀器公司在儀器方面精益求精，依據客戶端及市場需求持續更新儀器性能，與經驗豐富的技術人員探討儀器分析性能的應用，不同放射性核種估計的誤差範圍，了解期刊論文或報告中不會提到細節的參數調整。放射化學研習營前三天就專家學者分享中了解目前國際間對於放射性難測核種分析越來越多應用於環境樣品分析、追蹤海洋環流路徑模型等大範圍取樣且長期追蹤的大規模環境追蹤研究，核設施除役各國間會參考彼此的經驗。放射化學研習營最後兩天實習 Sr-90 核種分析與 ICP-MS/MS 儀器操作，ICP-MS/MS 係本室為電廠除役關注核種分析新購之儀器，將實習知識精進本室操作程序，精進傳承相關技術能力。放射化學研習營與會者來自世界各地，包含政府機構及學術研究單位，包括本室近年參加 NKS 難測核種分析比對活動之人員，能面對面深入了解一些比對活動報告中不會提到的細節，獲益良多。未來若能延續與國外合作交流，除了比對試驗以外，在費用許可且無利益衝突的情況下應可爭取前往實習，保持交流，學習精進相關技術。

參考國外專家經驗分享及國際趨勢，有以下幾點建議：

- (1) 氧化燃燒器應有助於因應大量 H-3、C-14 樣品分析需求，優點是有效縮短分析時間，因高溫下完全燃燒，回收率穩定，樣品種類造成的基質效應降低。惟需注意清潔保養程序與維護頻率，建議可準備多套備品依據活性高低分類，勤於更換，消除記憶效應影響、降低不確定度與檢測極限。本室今年購入一套 Raddec Pyrolyser 分析生物氫樣品，期善用國外專家保養經驗，能維持儀器設備使用年限。
- (2) 以往國內例行作法，對於核種分析輻射度量儀器皆以標準射源做效率及能量

校正，然而觀察國際趨勢，隨著部分核種射源或幾何形狀參考品取得不易，越來越多研究團隊改使用數學計算修正為基礎的校正方式，如加馬偵檢的 ISOCS 系統、LSC 的 TDCR 技術，都是透過參數設定免除標準品取得的困擾，雖仍有誤差疑慮，但許多研究也顯示仍在合理可接受的範圍內。比較目前市面上各廠牌 LSC 儀器，PerkinElmer GCT 6220 及 Hidex 300SLL 皆有優秀的穩定度，RSD 相對標準偏差較小。TDCR 液態閃爍偵檢器目前 CF 係數可校正核種清單有：H-3、C-14、Fe-55、Ni-63 等，使用 TDCR 為效率 CF 校正為輔，惟目前並未涵蓋全部國內電廠除役關注核種清單。越來越多研究機構或實驗室使用 TDCR 技術，未來趨勢此類校正公式勢必發展出更多可應用核種，無標準品且能量較高之核種依循使用 TDCR 技術，可幫助實驗室減少添購射源及其相關管理成本，因此持續了解學習國際間使用經驗或是進一步購買儀器，都是往後可參考的方向。

- (3) 國際趨勢使用 ICP-MS/MS 及 AMS 分析難測核種以追求降低檢測極限，AMS 建置與維護成本過高，ICP-MS/MS 的檢測極限雖不如 AMS，但針對部分難測核種，化學純化搭配使用正確的反應氣體模式可符合法規標準，可計測 Sr-90、Tc-99、I-129 核種，ICP-MS/MS 亦可提供核子事故時快速篩檢 Sr 活度較高之樣品。
- (4) 許多難測核種分析需要樹脂管柱流洗，可添購真空箱能調整管柱流速，縮短實驗時間，兼顧時間人力成本與實驗品質。考量空間、人力與設備維護因素，未來若有大量環境樣品分析需求，可將自動萃取系統納入考量。
- (5) ICP-MS/MS 操作上，建議選擇適用的內標準品納入操作程序，校正受基質效應影響的分析物訊號，亦可添加低濃度乙醇增加電漿穩定性，增強訊號並減少電離干擾，和內標準品混合使用，精進現行 ICP-MS/MS 操作程序，增進分析結果精確性。

在日常生活方面，芬蘭和丹麥人普遍英文程度都很好，能以英文進行流暢

的溝通，也都相當親切友善。可以在台灣兌換歐元，在芬蘭使用歐元，丹麥可以到當地兌換丹麥克朗，兩國的支付系統都很便利，所有消費甚至廣場的市集都可刷信用卡付款，交通方面，可透過 APP 查詢路線經由公車或鐵路等大眾交通運輸抵達目的地。本次實習行程芬蘭天氣晴朗，氣溫約 10-28 °C，體感舒適涼爽，早晚溫差大，傍晚後可帶件外套。而造訪丹麥時大部分時間陰雨綿綿，氣溫約 10-16 °C，校區湖邊的大馬路上寒風吹來，十分寒冷，得穿冬衣防風外套。緯度高需注意防曬及攜帶雨具，夏季日照時間較長大概晚上八九點後才天黑，可以把握時間參訪景點，北歐人親切友善的態度，帶著愉快的心情順利完成實習課程。