

出國報告（出國類別：考察）

參訪北歐放射性難測核種分析 實驗室

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：夏志中 / 組長

顧雨軒 / 課長

派赴國家：芬蘭、丹麥

出國期間：112年8月27日至112年9月9日

報告日期：112年10月17日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參訪北歐放射性難測核種分析實驗室

頁數 19 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

夏志中/台灣電力股份有限公司/放射試驗室/組長/02-26381068#501

顧雨軒/台灣電力股份有限公司/放射試驗室/課長/02-26381068#505

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：112 年 8 月 27 日至 112 年 9 月 9 日

派赴國家/地區：芬蘭、丹麥

報告日期：112 年 10 月 17 日

關鍵詞：放射化學、難測核種分析、化學分析實驗室、VTT

(Technical Research Centre of Finland)、DTU (Technical University of Denmark) Risø Campus

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方法開發，並執行實驗室間分析能力比對。為求分析技術精進，本次分別參訪芬蘭國家技術研究中心(VTT)及丹麥科技大學(DTU) 兩家研究機構之放射性核種分析實驗室，就雙方組織編制與業務內容、分析能力、分析技術細節、過去分析比對經驗及儀器相關議題進行實質意見交流與學習，收穫良多，有助於本公司核種分析作業規劃及實務上精進，並開啟往後合作交流之管道。

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 VTT 實驗室.....	3
(三)、 丹麥 DTU Risø 實驗室.....	11
三、 心得與建議.....	17

一、 出國目的

因應核能電廠進入除役階段，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(核研所、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，因此機緣而與北歐實驗室有所連繫，遂進一步向主辦實驗室芬蘭 VTT 及丹麥 DTU 表達參訪之意願，以進行相關技術實務交流及分享實驗室間比對分析之經驗，精進實驗室的綜合能力與國際接軌，提供本室未來實驗室發展方向與規畫參考，並期許能與國外實驗室建立長期的合作交流關係。

二、 過程與內容

(一)、 參訪背景說明與行程摘要

北歐核子安全跨國研究組織 NKS(Nordic Nuclear Safety Research)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。

- 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

- 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

有感於近年來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，自 2019 年起，NKS-B 開始委由芬蘭國家技術研究中心 VTT 之核種分析實驗室主辦難測核種比對分析活動，針對不同類型樣品(不鏽鋼、水泥、樹脂)進行部分核種分析。以 2021 年為例，含本室在內參與的實驗室共 9 間，參與者涵蓋政府機構、學術單位及私人公司：

1. Technical Research Centre of Finland (VTT)(芬蘭)
2. Department of Chemistry, Radiochemistry, Helsinki University (HU)(芬蘭)
3. Technical University of Denmark (DTU)(丹麥)
4. Norwegian University of Life Sciences (NMBU)(挪威)
5. Fortum Power and Heat Oy (Fortum)(北歐跨國公司)
6. Institute for Energy Technology (IFE Kjeller)(挪威)
7. Institute for Energy Technology (IFE Halden)(挪威)
8. French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA)(法國)
9. Taiwan Power Company Radiation Laboratory (TPC)(台灣)

截至 2023 年，NKS 已舉辦過 4 次比對活動，本室參與 2021、2022 兩次實驗室間比對分析，均顯示結果良好。然而因各實驗室分析能力有所差異，各單位所挑選可進行比對之核種，多為過去本室例行分析之核種，而對於台灣除役新增之關注核種，並非國際普遍量測之核種，因此具備完整分析能力之實驗室較少，亦無合適之樣品進行比對分析。有鑑於此，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，然而為回應各界對公司核安的期待，本室仍保持精益求精虛心學習的態度，把握自我提升的機會，遂向比對活動之其中兩間參與實驗室 VTT 及 DTU 提出交流參訪之意願，與核種分析領域專家進行深度實務交流及設施參觀，以期能提升國內分析水準並與國際接軌。

本次出國參訪行程自 112 年 8 月 27 日起至 112 年 9 月 9 日止，共計兩周 14 天，第一周前往芬蘭 VTT 所在地點 Espoo，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
8/27-8/28 (日)~(一)	往程 【桃園國際機場(TPE)-阿姆斯特丹史基浦機場(KLM)-赫爾辛基萬塔機場(HEL)】 → 芬蘭艾斯博(Espoo)
8/29-9/1 (二)~(五)	參訪 VTT 實驗室 Aalto 大學校區： 【Kivimiehentie 3, Espoo (Aalto 大學校區內)】 雙方業務簡報、加馬分析 ISOCS 系統介紹、核種分析能力與技術討論、實驗室參觀與儀器使用經驗交流、ICP-MS 使用經驗分享、能力比對試驗經驗交流
9/2 (六)	移動【赫爾辛基萬塔機場(HEL)-哥本哈根凱斯楚普機場(CPH)】 → 丹麥羅斯基勒(Roskilde)
9/3 (日)	簡報資料整理
9/4-9/8 (一)~(五)	參訪 DTU Risø 實驗室： 【Frederiksborgvej 399, Building 201 (Risø DTU campus)】 雙方業務簡報、核種分析能力討論、實驗室參觀與儀器使用經驗交流、環境放射性核種監測技術交流及前處理設備討論、難測核種分析技術細節探討、氧化燃燒儀與氚分析前處理設備探討
9/9-9/10 (六)~(日)	返程 【哥本哈根凱斯楚普機場(CPH)-倫敦希斯洛機場(LHR)-桃園國際機場(TPE)】

(二)、芬蘭 VTT 實驗室

芬蘭國家技術研究中心(Technical Research Centre of Finland, VTT)於 1942

年設立，係由國家資助之北歐最大綜合應用研究機構，類似我國工業技術研究院，其研究領域涵蓋材料科學、電子通訊、生物科技、機械、醫藥、化工、環境科學、能源...等各式各樣新穎技術之開發，總員工數約 2100 人，三分之一具有博士學位，2019 年營業額 2.45 億歐元，具有超過 400 項專利，致力於提供業界先進技術解決方案。

而 VTT 有關核能方面的研究，主要分為三個領域，第一部分是反應器安全分析及執照支援，包含燃料與反應器物理、瞬態和事故分析、嚴重事故管理、放射性外釋分析；第二部分是關於機組壽命管理和材料性能，內容包含反應器電路和結構的安全性和完整性、材料性能評估、壽命優化和老化管理、長期運作和除役；第三部分則是系統工程、人力和組織因素的研究，包含機率安全分析 (PSA)、自動化 (I&C) 驗證及確認、人因工程與控制室、組織安全文化與人為因素、遠端操作和虛擬實境(VR)、策略發展願景規劃。

VTT 核種分析實驗室位於艾斯博(Espoo)的阿爾託(Aalto)大學校區，此地員工約 200 人，本次參訪主要接待者具有十五年以上放射化學分析經驗，並且擔任 NKS 核種比對分析的主辦人員，特別感謝她在百忙之中仍安排此次參觀討論行程並邀請加馬分析與元素分析的專家為我們說明有關加馬 ISOCS 量測與質譜分析技術。礙於雙方互信及尊重商業機密原則，本次 VTT 交流許多實驗細節不便詳實公開，所有內部場所與儀器也被告知不許拍照，以下僅針對我方提問討論議題及部分最關注的主題做重點描述。

有關我們所關心之除役核種分析部分，VTT 先前曾參與過 Otakaari 3 的拆除計畫，今年(2023 年)春天起則開始進入 FiR1 研究型反應爐的拆除階段，因此具備實際除役樣品分析的經驗。Otakaari 3 是位於 Aalto 大學校區主要研究生醫工程與神經科學之醫學科技中心，當中許多曾處理過核醫藥物的設備在拆除後，須視為放射性廢棄物處置；而目前所執行拆除的 FiR1 研究型反應爐(1962-2015 年)，屬 TRIGA Mark II 小型反應爐，是芬蘭第一座核反應爐，主要作為訓

練及進行中子活化、同位素製造、中子捕獲療法等相關應用研究。兩處除役後所產生的放射性廢棄物，目前皆存放於洛維薩(Loviisa)核電廠中低活度廢棄物貯存庫。VTT 實驗室分析的除役放射性廢棄物具體樣品種類、分析核種及主要使用儀器如下表：

分析樣品種類	水泥、廢樹脂、石墨、不鏽鋼、鋁、濾紙、硼化物、中子緩速材料(Fluental)...等
分析核種	γ 核種
	β 核種： H-3, C-14, Cl-36, Fe-55, Ni-63 , Tc-99, Sr-90, Ca-41, Pu-241
	α 核種： U-234, U-235, U-238, Th-232, Th-230, Th-228, Pu-238, Pu-239,240, Am-241, Cm-242, Cm-234,244, Po-210
	分析方法開發中(因應 FiR1 除役)： Ni-59, Mo-93
使用儀器	γ 分析： Mirion HPGe gamma detector with ISOCS Calibration Software
	元素分析： Agilent ICP-OES SVDV 5100 Element 2 Thermo Scientific HR-ICP-MS Thermo Dionex ICS 6000 IC
	氧化燃燒儀： RADDEC Trio 2 pyrolyser
	β 分析： Hidex 300 SL LSC

	<p>α 分析：</p> <p>Ortec alpha spectrometer</p>
--	---

針對 γ 分析計測細部討論，我方向 VTT 詢問有關 HPGe 效率校正，是否使用單一射源或多射源進行校正，他們回覆因應除役工作 in-situ 的量測，目前使用的是 Mirion 公司(Mirion 公司於 2016 年合併 Canberra 公司) 所推出的以蒙地卡羅分析為基礎的 ISOCS(In Situ Object Counting System)程式進行效率校正，因此並未以標準射源進行例行校正。主要量測之關注核種是 Co-60(活化金屬、放射性汙染物)、Cs-137(樹脂、燃料相關汙染物)、Eu-152(石墨、生物屏蔽受活化水泥)，然而其他短半衰期加馬核種亦有機會量測到。使用 ISOCS 系統有幾項優點：1.不必頻繁採購各類幾何形狀射源，增進工作效率。2.可應用於大型機件設備，或特定具有複雜幾何形狀的物體量測。3.可用於 in-situ 除役現場量測作業。然而此項技術十分注重操作人員專業知識及經驗，須適時進行幾何參數調整，以符合整體度量的準確性。而在 2023 年 VTT 參與由芬蘭政府核管單位 STUK 所主辦的比較試驗中，顯示 VTT 的 γ 分析度量結果良好。在所有 9 組參與比對的數據中，僅有 2 組係以標準射源多點校正，其餘都已採用 ISOCS 程式校正，與本室近年所觀察到的國際趨勢相符，越來越多實驗室採用 ISOCS 做校正。另由圖表數據顯示，使用標準射源校正與使用 ISOCS 系統之分析結果互有高低，皆屬正常誤差範圍，並未有明顯系統性偏差產生，顯示 ISOCS 校正使用得當亦可為量測提供可信之結果，可作為本室未來升級設備之發展方向。

針對 C-14 及 H-3 分析，VTT 現行有兩種作法，一是傳統圓底燒瓶蒸餾分離法，另一種則是使用管型高溫燃燒儀。前者與我方目前方法類似，後者則是與我方過去所使用之儀器類似。過去我們曾使用氧化燃燒儀進行氬與碳自動化分離，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，且機械裝置作動越來越不穩，遂於近年改回以傳統燒瓶進行溼式氧化還原法。依據 VTT 經驗，若 5mL 樣品在 LSC 訊號大於 1000-1500 dpm，儀器管道便極有

可能產生記憶效應。因此其圓底燒瓶蒸餾法主要用來做較高活度之除役樣品，而管型燃燒儀只用來做幾乎無活度之環境樣品，且為避免管型燃燒儀管道污染，會以由低至高濃度的順序進樣將干擾減小，並於每次以加熱、氣流或酸洗清理管路，或直接替換備品以避免儀器污染。另一項管型燃燒儀使用上要注意的是兩次進樣需要冷卻時間，一般做完大約隔一晚自然降溫後才能做下一管，而一台儀器最多可擴充至同時做六管樣品。除此之外，管型燃燒儀最大的優點還是自動化流程的便利性，節省人力手動操作實驗的時間，以因應大量樣品委託或講究時效性之樣品。

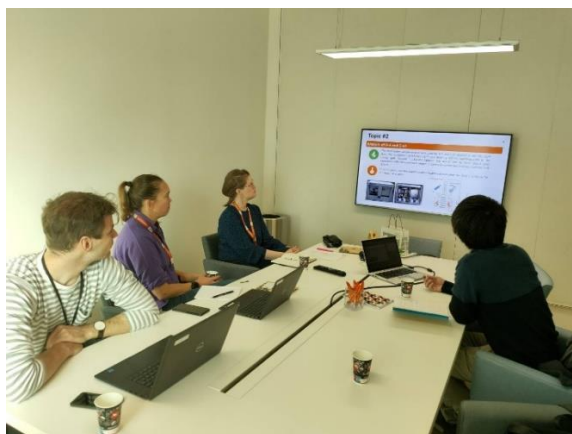


圖 1、與 VTT 實驗室人員討論核種分析相關議題



圖 2、管型高溫燃燒儀(Pyrolyser)

(www.raddec.com/hardware-pyrolyser.php 網站示意圖)

Ca-41 分析部分，其主要出現在生物屏蔽活化水泥樣品，而依據文獻酸洗或鹼熔前處理皆有團隊使用，一般以 ICP-OES 追蹤鈣穩定同位素含量以計算回收率。VTT 實驗室使用 Hidex 300 SL 計測度量，搭配內建 TDCR (triple-to-

double coincidence ratio，三重符合比) 技術及 CoreF 參數修正，可用以度量 Ca-41，而由於 Ca-41 與 Fe-55 同樣是電子捕獲衰變形式，因此套用度量 Fe-55 的程序參數做 Ca-41 計測。TDCR 使用三支光電倍增管測量同幅訊號，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。雖然儀器商號稱可達到無須標準品便可定量的可能性，但依據 VTT 分析經驗，Ca-41 仍須適度以參數修正以獲取較準確結果。在前次的 NKS 比對中曾做過 Ca-41 這項核種分析，然而針對前次樣品，三家實驗室測量結果皆小於最低可測值，而目前 Ca-41 也未列入 FiR1 除役的目標待測核種，因此對於本室提問是否可提供 Ca-41 相關樣品供比對驗證，VTT 表示仍須待未來出現合適樣品再行洽談合作分析。另一方面，針對 Be-10 及 Cd-113m，VTT 並未有相關分析經驗，不過從事化學微量分析的博士仍十分熱心為我們介紹以 SF-ICP-MS 分析 B-10/B-11 的經驗，並參觀相關實驗室和設備，也透露他們將在明年再添購一台 ICP-QQQ，且考慮發展 IC-ICP-MS 離子層析與質譜串聯技術。

有關實驗室認證部分，依據 VTT 引述芬蘭核管機關 STUK 的管理原則，核能執照持有者對於放射性物質分析必須具備有效且可驗證之化學純化方法，加馬計測須具備不同幾何形狀之校正參數，方法適用性由執照持有者做自我評估，認證部分要求則主要係針對核安管制方面的需求。而 VTT 作為承包商，針對 FiR1 除役特性調查分析主要須遵循芬蘭標準協會認證之 SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 國際標準；核管機關 STUK 則有自己所屬的認證實驗室，然而也未涵蓋所有除役難測核種分析。相比之下台灣主管機關要求除役所有核種分析皆須通過認證，是相對嚴格的作法。

隨著這幾年 NKS 比對分析活動所建立的公信力，主辦單位 VTT 也透露有幾家新的潛在參與機構和公司陸續在探詢下一次的比對活動，除了原有包含本室在內的 11 家實驗室，有越來越多的實驗室可能參與其中，參與者分布在芬蘭、瑞典、丹麥、挪威、英國、法國及台灣。然而此項活動係由政府資助，每

年皆須重新審核，亦有預算是否核撥之不確定性(2023 年便未舉辦)，比對核種亦須由參與者共同決定，VTT 也提到受限於大部分實驗室能力，或許部分較普遍之難測核種仍有機會反覆出現在未來比對活動的待測清單內，或是較冷門核種僅少數參與者執行的情況，這都是未來本室是否繼續參與比對活動的考量。

整體而言，VTT 的實驗室設備新穎、空間整潔、設備多元，甚至配有大型機械設備進行除役樣品接收及水下切割，配合 SEM、TEM 當場做材料微觀分析，核種分析作業則從前處理微波消化室、純化分離實驗室到各儀器計測室，總共不下十五間房間，且汙染管制規劃完善，搭配中央監控系統，進行不同等級無塵室之氣壓調控及輻防動線管制，完整體現北歐極簡卻不失機能性的設計風格，而其建物位於阿爾託大學的校區裡，綠樹環繞之餘更感受到年輕學子的活力，是十分理想的學術研究環境。



圖 3、位於阿爾託大學校區的 VTT 實驗室建物外觀



圖 4、VTT 實驗室熱室(Hot Cell) (www.vttresearch.com/en 網站介紹示意圖)



圖 5、VTT 無塵室管制規劃完善 (VTT 簡報介紹示意圖)



圖 6、與 VTT 實驗室人員合影

(三)、 丹麥 DTU Risø 實驗室

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，擁有 DR1-DR3 三座研究型反應爐。然而縱有一眾哥本哈根學派學者所打下的原子能基礎，丹麥仍於 80 年代便朝向無核家園的方向邁進，並於 2000 年開始陸續將位於 Risø 的核子設施除役，2007 年起 Risø 實驗室併入 DTU 丹麥理工大學，並且經過幾番組織調整更迭，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。

此次我們參訪的是執行環境樣品核種分析的實驗室，主要拜訪對象是核種分析領域十分著名的華裔教授，其待人親切且有問必答，經驗豐富，充滿學術研究熱忱，讓我們獲益良多。教授在放射化學、核種分析、環境輻射監測、質譜儀分析等領域發表超過 300 篇的論文著作，被引用次數超過 7000 次，擔任包含 Nature 在內多家學術期刊的編輯，並於 2019 年獲頒放射化學領域最高榮譽德赫維西獎(George de Hevesy Medal Award)，學術地位卓越。

DTU Risø 環境分析實驗室擁有 6 間化學純化分析室(22 個抽氣櫃)、1 間海水樣品濃縮處理室和 1 棟樣品前處理室，備有 32 組阿伐能譜分析儀、18 具加馬核種分析設備、35 組充氣式比例計數器、2 台液態閃爍計數器(Quantulus 與 PerkinElmer Tricap)、2 台 Agilent 的 ICP-MS、1 台 ICP-OES，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，並且有許多自己改良組裝的儀器，技術精良且研發能量驚人。主要分析執行項目如下表：

	環境監測研究	除役樣品
樣品種類、 基質	• 空氣(氣膠、氣態核種)、沉 降物(雨水、雪水)	• 水泥(石塊、沙、磚塊) • 金屬(不鏽鋼、碳鋼、銅、

	<ul style="list-style-type: none"> • 水樣(海水、湖水、地下水) • 土壤(底泥、泥炭、岩石) • 植物(海草、蔬菜、穀類) • 動物組織(魚、肉) 	<ul style="list-style-type: none"> 鋁、鉛、鋳合金、金屬氧化物) • 石墨、冷卻劑 • 廢樹脂、濃縮廢漿 • 油漆、塑料、PVC、廢油 • 土壤、底泥
主要難測核種項目	H-3、C-14、Fe-55、Ni-63、Sr-90、Tc-99、I-129、Cs-135、Pb-210、Po-210、Rn-222、Ra-226、Ra-228、U-233、U-234、U-235、U-236、U-238、Np-237、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241...等	H-3、C-14、Cl-36、Ca-41、Fe-55、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Mo-93、Tc-99、I-129、Cs-135、U-234、U-235、U-236、U-238、Np-237、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241、Cm-243、Cm-244...等
加馬核種	Be-7、Cs-134、Cs-137、I-131、Pb-210、Am-241...等	Mn-54、Fe-59、Co-58、Co-60、Ag-110m、Sb-125、Ba-133、Cs-134、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Eu-155...等

DTU Risø 分析實驗室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。

有關加馬能譜分析，DTU Risø 分析實驗室有 ISOCS 系統，也同樣搭配使用多核種標準品供偵檢頭做能量多點校正，並且視分析標的及所要求的準確程

度，可作特定核種的修正。然而教授也提醒針對特定能峰位置修正，也許其他位置整體上偏差反而變大，因此需謹慎作適度修正。射源標準品大概兩年便須重新採購，並定期每月進行儀器效率校正。

提到碳跟氬所使用的氧化燃燒儀，之前我們所使用的型號便是教授提出構想與廠商共同開發的，而現今他們也使用類似 VTT 使用的管型高溫燃燒儀，相較於原本的氧化燃燒儀一次僅能處理約 1g 樣品，管型燃燒儀可一次處理約 20g 的樣品量。對於 VTT 所提到冷卻時間過長的問題，現在新一代型號也有加裝風扇冷卻系統幫助散熱，不過記憶效應仍是必須謹慎處理的重點，原則上跟 VTT 所提示之重點一樣。另一方面，隨著日本 ALPS 處理水的排放，氬分析也成為國際間備受矚目的重點項目，為了從大量海水中測得低微濃度之氬，除了不斷蒸餾濃縮外，也有以電解濃縮來取得高純度氬的預處理方式。教授也分享曾使用某德國廠牌電解濃縮裝置，卻昂貴不耐用且售後服務極差的自身使用經驗，最後是使用上海廠商製造的設備，然而他也明白我國採購法相關限制，因此建議我們此類設備可往日本方面去洽詢。



圖 7、實驗室建物外與教授合影

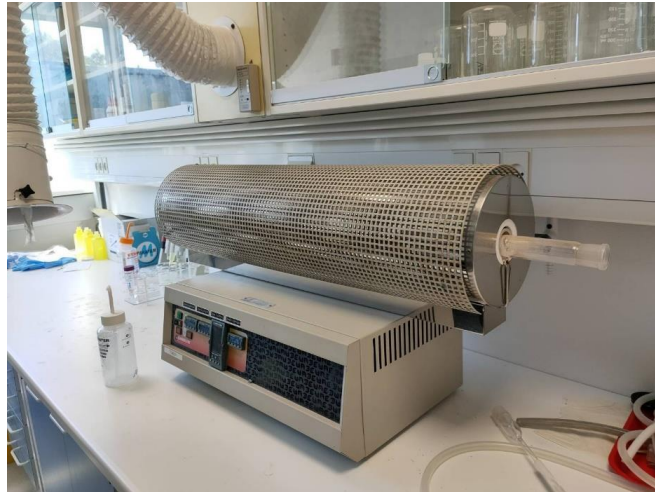


圖 8、管型高溫燃燒爐

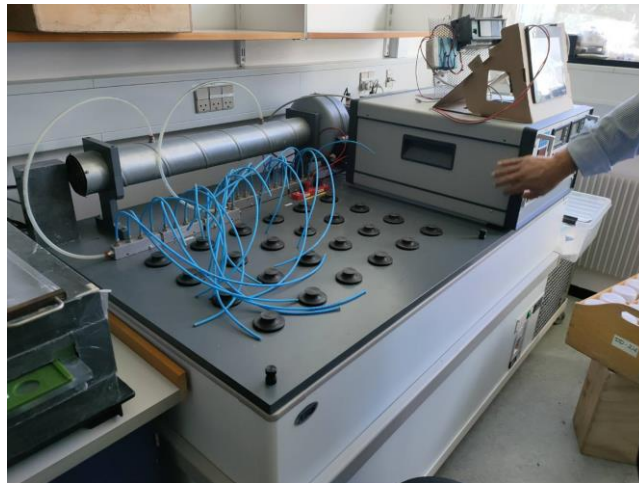


圖 9、電解濃縮裝置

關於 Ca-41 分析，依據教授經驗酸洗和鹼熔差別大概在 5% 以內，樣品量大約 2-5g 可不另加 Ca 載體，自身所含的鈣便足以沉澱及追蹤回收率。而關於 Fe-55 可否作為 Ca-41 的替代品作效率修正，因 Fe-55 淬息效應與 Ca-41 不盡相同，效率有所差距且須注意鐵離子的顏色影響淬息，教授另外建議可購買歐盟聯合研究中心所出產的 Ca-41/Ca-40 ERM 參考樣品。另外鈣與閃爍液互溶問題，主要是溶液中鹽類 CaCl_2 所造成，因此需控制 HCl 濃度，緩慢加入閃爍液並不宜超過 5mL，冷藏方式也有助於樣品與閃爍液互溶。若是以 ICP-QQQ 進行計測，可使用 N_2O 笑氣作為反應氣體進一步去除 K-41 的干擾，然而我國對

於笑氣的管制較嚴格，申請不易且申報作業繁雜，可能須另尋其他反應氣體。

提到 Be-10 及其他核種分析，現今最精確的方式仍是使用 AMS 加速器質譜儀來達成超高解析度的分離定量，DTU Risø 分析實驗室雖無 AMS，但經常與西安加速器質譜中心或其他歐洲加速器研究機構合作進行此類分析研究。Be-10 的分離純化最需注意的是硼的干擾，樹脂對硼的純化分離能力在質譜儀原子級的分析尺度下仍顯不足，若無 AMS 的分離能力，以 ICP-QQQ 分析仍需研究是否使用動態反應池做進一步的純化分離。依據教授經驗，很少除役樣品在進行 Be-10 的分析量測，在不使用 AMS、可能保守高估的情況下，結果仍可能小於最低可測值。

有關實驗室管理與排程的觀察，目前 DTU Risø 執行環境分析的實驗室成員大約 15 人，包含 6 位技術員、4 位工程師，還有研究員、教授及來來去去的博士後研究人員和學生。在人員分工部分，過去實驗室曾以不同核種分配個人負責工作，後來改以樣品種類區分，再後來也嘗試以流水線搭配群分離分工方式，有人負責前處理，有人負責中間純化步驟，有人負責計測。然而當地勞權意識高昂，後續有員工以工作量與待遇不均為由要求工作重新分配，因此又打亂原本規劃分明的分配方式，彼此需時常重新協調切分負責工作，優點是可藉此多元學習，接受不同挑戰，缺點則是犧牲效率與增加溝通協調時間，然而這也反映出北歐教育重視每個個體的民族性與民主協調的精神，令人印象深刻。

儀器方面，DTU Risø 分析實驗室使用自行組裝的充氣式比例計數器、阿伐計測分析儀以及加馬偵檢頭，搭配二戰前未受核污染的鉛屏蔽（老鉛），有效降低背景訊號達到更好的偵測極限；Quantulus 1220 閃爍計數器也比本室現行使用的 PerkinElmer(PE)儀器擁有更低的背景訊號，一般 PE 閃爍計數器背景大約 10-20cpm，Quantulus 的儀器背景則可小於 5cpm。然而教授也透露 Quantulus 被 PE 收購後，PE 即關閉了 Quantulus 1220 這型號的產線，改生產 PE 改良版儀器，因此目前 Quantulus 閃爍計數器已無法購得原有舊型低背景版本。整體而言，Risø

分析實驗室給人的感覺，一如過去求學期間聽來對歐洲學術研究的印象，歐洲不若美國追求新穎注目的儀器，而是追求將現有技術做到最精最好，這點完整體現在 Risø 分析實驗室中，他們儀器不見得最新穎，卻能在既有設備上改良強化，打造出最頂尖的工具，充滿匠人精神，是令人感佩值得學習的部分。Risø 環境分析實驗室環境及儀器均分配由專人進行清潔維持與每日 QC 測試與定期校正，此部分與本室狀況類似，但實驗室環境整體感覺清潔舒適值得借鑑。



圖 10、加馬偵檢系統

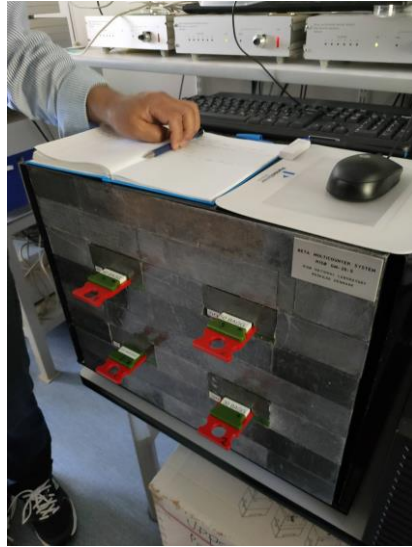


圖 11、充氣式比例計數器



圖 12、阿伐計測分析儀



圖 13、分析實驗室一隅

DTU Risø 分析實驗室通過 ISO/IEC 17025 認證，並且不定期參加核種分析比對活動，然而並非所有核種皆有辦法進行比對，出具報告時會對客戶說明哪些項目是有比對驗證哪些部分則無，供客戶自行運用。教授也建議我們可以洽詢英國 NPL 或是國際原子能總署 IAEA 所主辦的比對活動，關注是否有我們感興趣之核種。另外由於丹麥對有放射性疑慮的樣品管制較嚴厲，儘管可能只是一般環境試樣，教授較不建議我們由丹麥這裡取得交流比對樣品。

Risø 國家實驗室的成立雖有顯赫的歷史背景，然而在核能式微、全力發展再生能源的丹麥，不免受時代浪潮所影響，歷經多次組織整併及部門拆分，調整研究發展方向，逐漸除役廠內核子設施。儘管如此，憑藉優秀學術人才及多年累積原子能豐厚知識基礎，在環境輻射監測分析領域，DTU Risø 實驗室仍十分優異且活躍，在技術上是可以持續交流學習的對象。



圖 14、DTU Risø Campus DR2 反應爐建物外觀

三、心得與建議

北歐實驗室分析與計測儀器設備持續投資升級，舊有設備也勤於研究與維護保養，如氧化燃燒儀設備平時準備多套備品依據活性高低勤於更換，且能自行進行簡易維護，不但可消除記憶效應影響降低檢測極限與不確定度，也能維

持儀器設備可用性，此方面令人印象深刻。此次參訪芬蘭與丹麥兩處實驗室，並與經驗豐富的研究人員及學者暢談放射性核種分析技術及實驗室儀器設備使用心得，深入了解一些期刊論文或報告中不會提到的細節，且實際走訪觀察實驗室規劃及人員操作，獲益良多，未來若能延續合作交流，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，學習精進相關技術。

參考國外專家意見及國際趨勢，有以下幾點建議：

- (1) 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。而隨著儀器技術的精進，未來此類技術勢必仍會一再出現並且改良被廣泛應用，因此多做了解學習或是進一步購買儀器、建議認證規範的修訂，都是往後可努力的方向。
- (2) 針對 Ca-41 參考標準品的部分，已進一步詢問國內代理商進口歐盟聯合研究中心(European Commission's Joint Research Centre (JRC))的 ERM 標準參考藥品，以作分析方法測試與驗證，相關採購程序規劃執行中。
- (3) 管型高溫燃燒儀應有助於因應大量 C-14、H-3 樣品分析需求，惟清潔保養仍是必須費心的重點，建議可評估分析需求，使用於低汙染的一般環境樣品上。
- (4) 因俄烏戰爭後電價大漲，北歐國家各設施相關實驗室需自行籌措相關經費補足經費不足，相當重視對外拓展實質收益，往後若前往實習，對方高層希望我方能提供相關支持贊助經費，此部分編列出國實習計畫時須提前預估費用列入預算。

(5) 近年來歐洲與中國大陸關係日益緊張，北歐的實驗室對於相關參訪與實習要求已從以往歡迎轉變為有條件、有限度開放，避免該實驗室專利技術外流，故有些實驗室只能參觀不能攝影，該機構提供之資料也需篩選後提供，此次參訪也是因彼此間已有多年比對試驗合作經驗才得以成行，故建議本公司可持續參與歐美舉辦之比對驗證，除可提升中低活度放射性廢棄物難測核種自我分析能力，作為申請 TAF 認證與延展認證有利能力驗證基礎，也可了解國際中低活度放射性廢棄物難測核種分析發展趨勢，作為落實技術精進與持續創新基石。

在日常生活部分，芬蘭及丹麥人普遍英文程度都很好，因此皆能以英文跟當地人進行溝通；芬蘭使用歐元，丹麥則使用丹麥克朗，雖然台灣沒有兌換丹麥克朗的管道，但兩國的支付系統十分便利，從路邊攤商、寄物櫃到交通票券、餐廳、賣場等，所有消費都可刷信用卡，甚至可完全不帶現金出門。本次參訪行程芬蘭幾乎每天上午下雨下午放晴，氣溫約 12-18 °C，整體感覺十分乾燥舒爽，完全不覺寒冷，而丹麥適逢歐洲熱浪來襲，大部分時間天氣晴朗，白天甚至可達 26°C 以上，體感溫度適宜，夏季日照時間較長大約八九點後才天黑，需注意防曬。在丹麥期間晴朗天氣一掃對北歐陰冷的印象，也為雙方帶來愉悅的心情順利完成參訪討論。