

出國報告（出國類別：開會）

參加第 23 屆國際放射核種計量與應用 會議出國報告

服務機關：核能研究所
姓名職稱：鍾沛霖 技術員
蔡雨恬 研究助理
派赴國家/地區：羅馬尼亞/布加勒斯特
出國期間：112 年 3 月 25 日~112 年 4 月 2 日
報告日期：112 年 5 月 3 日

摘要

本次公差為參加第 23 屆 ICRM (International Conference on Radionuclide Metrology) 會議，收集最新的國際核種活度計量發展資訊，提供核能研究所(簡稱：本所) 國家游離輻射標準實驗室及迴旋加速器未來技術發展與相關合作之參考。本次 ICRM 會議由羅馬尼亞霍里亞胡魯貝國家物理與核子工程研究與發展研究所(Horia Hulubei National Institute of R&D in Physics and Nuclear Engineering, IFIN-HH) 主辦，會議地點位於羅馬尼亞首都—布加勒斯特，會議期程為 3 月 26 日至 31 日，總計 31 個國家參與，現場 132 位、線上 21 位專家學者與會。議程包括科學技術論文發表與會員大會。會議論文發表 95 篇，11 個主題為：國際計量概況、品質保證與能力試驗、生命科學之放射核種計量技術、阿伐與貝他粒子能譜、放射核種計量技術、加馬射線能譜、量測標準與參考物質、射源製備技術、液體閃爍量測技術、核子衰變數據、低階放射性活度量測技術。本所於品質保證與能力試驗主題發表壁報論文兩篇，題目分別為：Inter-laboratory comparison of radionuclide in food in Taiwan 及 Proficiency Test for Low and Intermediate Level Radio-assay Laboratories in Taiwan for one decade。

本次 ICRM 出國提出之建議為：1.本所承擔游離輻射領域技術發展與計量最高量測標準任務的權責，應積極參與此一會議，以作為我國檢測技術精進與發展規劃之參考。2.會議指出核儀模組後端數據數位化及三重對二重符合比率方法已普遍成為各國家實驗室必備的基礎技術能力，建議應投入適當人力物力建立相關技術，並持續關注其他國家實驗室的發展情況，以與國際技術相接軌。

目 次

摘 要	i
一、目 的	3
二、過 程	4
(一) 本次公差行程	4
(二) 國際放射性核種與應用會議	6
(三) IFIN-HH 與 ELI-NP	41
三、心 得	43
四、建 議 事 項	45
五、附 錄	46
(一) 本次會議相關照片	46
(二) 本次公差發表之壁報論文-1	51
(三) 本次公差發表致壁報論文-2	52

一、目的

本次公差為參加第 23 屆國際放射核種計量與應用會議（International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, ICRM），核能研究所（簡稱：本所）由保健物理組蔡雨恬研究助理與同位素組鍾沛霖技術員奉派參加。本次 ICRM 大會於羅馬尼亞首都布加勒斯特（Bucharest）舉辦，會議時間為 2023 年 3 月 27 日至 2023 年 3 月 31 日。公差目的為：

1. 參與第 23 屆 ICRM 國際會議及其會員大會，蒐集目前國際上最新的核種活度計量發展資訊，藉由經驗之分享強化國家游離輻射標準實驗室的相關能力、有利於規劃實驗室未來技術能力發展之方向。
2. 發表 Inter-laboratory comparison of radionuclide in food in Taiwan 及 Proficiency Test for Low and Intermediate Level Radio-assay Laboratories in Taiwan for one decade 等兩篇論文，提升我國技術在國際能見度。
3. 透過會議與各國家實驗室之專家交換發展資訊，以作為國家游離輻射標準實驗室及本所迴旋加速器未來技術發展與相關合作的參考。

二、過 程

(一) 本次公差行程

第 23 屆國際放射核種計量與應用會議於 2023 年 3 月 27 日至 2023 年 3 月 31 日，在羅馬尼亞布加勒斯特舉行。行程與主要工作內容如表 1 所示，會議議程如圖 1 所示。

表 1：本次參加第 23 屆 ICRM 會議行程

日期	行程	工作內容
3 月 25 日至 26 日 (六、日)	桃園經法國巴黎轉機至 羅馬尼亞布加勒斯特	去程
3 月 26 日至 31 日 (日~五)	羅馬尼亞布加勒斯特	參加第 23 屆國際放射 核種計量與應用會議 並發表論文
4 月 1 日至 2 日 (六、日)	羅馬尼亞布加勒斯特經 英國倫敦轉機至桃園	回程

Sunday 26	Monday 27	Tuesday 28	Wednesday 29	Thursday 30	Friday 31
	Opening session, I-01 9:00-9:30	Registration & poster mounting – 8:00-9:00 I-02, I-03 9:00 to 9:40	I-04 9:00-9:20		LL 9:00 to 10:15
	AIM 9:30-10:20	ABS 9:40 to 10:25 RMT 10:25-10:50	GS 9:20-10:25	LSC 9:00 to 10:25	Best Poster Award 10:15-10:25
	Coffee Break 10:20-10:50	Coffee Break 10:50-11:20	Coffee Break 10:25-10:55	Coffee Break 10:25-11:00	Coffee Break 10:25-11:00
	QA 10:50-12:10	RMT 11:20-12:40	GS 10:55-13:15	LSC 11:00-11:45	LL 11:00-12:20
	Lunch 12:10-13:30	Lunch 12:40-14:10	Lunch 13:15-14:30	I-05 11:45-12:05	ICMR 2023 Closing 12:20-12:30
	Visit to Romanian Athenaeum 13:30-14:00	Visit to IFIN-HH 13:30-17:00	RI 14:30-15:00	ND 12:05-12:50	Lunch 12:30-14:00
	RMLS 14:00-15:50	RMT 14:10-15:10	MSRM 15:00-15:30		
	ABS 15:50-16:30		SP 15:30-15:55		
	Coffee Break 16:30-16:50	Coffee Break 15:10-15:40	Coffee Break 15:55-16:25	Coffee Break 16:15-16:30	Coffee Break 16:00-16:20
City Tour 16:00-18:00	ABS 16:50-17:45	RMT 15:40-17:20	SP 16:25-16:45		ICRM GM Part 2 16:20-17:00
Registration 17:00-21:00			Conference Dinner 19:00-22:00	DDEP Meeting 16:30-18:30	Break 17:00-17:30
					ICRM EBM 17:30-19:30

AIM	Aspects of International metrology	MSRM	Measurements Standards and Reference Materials
QA	Quality Assurance and Proficiency Tests	SP	Source Preparation Techniques
RMLS	Radionuclide Metrology in Life Sciences	LSC	Liquid Scintillation Counting Techniques
ABS	Alpha- and Beta-particle Spectrometry	ND	Nuclear Decay Data
RMT	Radionuclide Metrology Techniques	DDEP	Decay Data Evaluation Project
GS	Gamma-ray Spectrometry	LL	Low Level Radioactivity Measurement Techniques
EBM	Executive Board Meeting	GM	General Meeting
I	Invited Talk	O	Oral Presentation
RI	Research in Industry presentation	P	Poster

圖 1：第 23 屆國際放射核種計量與應用會議開會議程

(二) 國際放射性核種與應用會議

國際放射性核種計量委員會 (The International Committee for Radionuclide Metrology, ICRM) 為一個放射性核種計量實驗室的國際協會，其成員由各國放射核種活度計量國家實驗室，以及對放射性量測與應用有貢獻的研究人員所組成。國際放射核種計量與應用會議 (International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications) 每兩年舉辦一次，舉辦目的為呈現各參加成員現階段在放射核種領域中的最新發展及相關應用情形，並分享各自的科學發現，以達到促進國際間知識交流及合作的目標。前一屆國際放射核種計量與應用會議為 2019 年於西班牙薩拉曼卡 (Salamanca, Spain)，由 ICRM 與薩拉曼卡大學的游離輻射實驗室 (Laboratorio de Radiaciones Ionizantes – Datación from Universidad de Salamanca) 主辦。後因 COVID-19 疫情關係，遲至 2023 年才舉辦第 23 屆之國際放射核種計量與應用會議。

本次國際放射性核種與應用會議，由 ICRM 與羅馬尼亞霍里亞胡魯貝國家物理與核子工程研究與發展研究所 (Horia Hulubei National Institute of R&D in Physics and Nuclear Engineering, IFIN-HH) 主辦，會議地點位於羅馬尼亞首都—布加勒斯特，會議期程為 3 月 26 日至 31 日，第一天為註冊報到及布加勒斯特城市導覽，正式會議五天，與會人員可選擇在第二天或第四天下午參訪 IFIN-HH，最後一天下午為會員大會。本屆會議採混和型式進行，與會者可親自前往布加勒斯特參與會議，或以視訊會議方式參與，但視訊參與無法提交論文。最終，會議總計 31 個國家參與，現場與會人數為 132 人，線上會議參與人數 21 人，其中以主辦國—羅馬尼亞參加人數最多 (21 位)、依次為法國 (17 位)、英國 (12 位)、美國 (11 位)、西班牙 (8 位) 和日本 (8 位) 和南韓 (8 位)；另亦有輻射偵檢儀器廠商 (CAEN 公司等) 參展。

本次會議中共計有 95 篇論文發表，口頭發表 39 篇、海報展示 56 篇，論文主題共分為國際計量概況、品質保證與能力試驗、生命科學之放射核種計量技術、阿伐與貝他粒子能譜、放射核種計量技術、加馬射線能譜、量測標準與參

考物質、射源製備技術、液體閃爍量測技術、核子衰變數據、低階放射性活度量測技術等 11 個主題進行，每天約有 2 到 3 個主題進行技術論文發表，並穿插壁報論文簡介、各主題工作小組的報告與討論，另外還有 5 場邀請演講與 2 篇廠商演講。每項主題發表之口頭報告與海報展示統計如表 2。

表 2：會議各項主題發表之口頭報告與海報展示統計

主題	英文	縮寫	口頭發表	海報展示	合計
國際計量概況	Aspects of International Metrology	AIM	2	3	5
品質保證與能力試驗	Quality Assurance and Proficiency Tests	QA	3	8	11
生命科學之放射核種計量技術	Radionuclide Metrology in Life Sciences	RMLS	2	8	10
阿伐與貝他粒子能譜	Alpha- and Beta-Particle Spectrometry	ABS	4	0	4
放射核種計量技術	Radionuclide Metrology Techniques	RMT	8	11	19
加馬射線能譜	Gamma-Ray Spectrometry	GS	5	10	15
量測標準與參考物質	Measurement Standards and Reference Materials	MSRM	1	5	6
射源製備技術	Source Preparation Techniques	SP	2	2	4
液體閃爍量測技術	Liquid Scintillation Counting Techniques	LSC	4	1	5
核子衰變數據	Nuclear Decay Data	ND	5	2	7
低階放射性活度量測技術	Low Level Radioactivity Measurement Techniques	LL	3	6	9
總計			39	56	95

各項主題之重點分述如下：

1. 國際計量概況 (Aspects of International Metrology)

- (1) 國際度量衡局 (Bureau international des poids et mesures, BIPM) 自 1976 年對於放射性核種使用之國際標準系統 (International Reference System, SIR), 比對上是以游離腔偵檢器為基礎, 亦即國際間 γ 發射核種之放射性活度標準比對, 不過, 此系統尚需對純 β 發射核種與電子捕獲核種進行優化與改善。BIPM 長期以來希望再加強該系統, 以進行純 β 發射、電子捕獲核種的標準比對, 因此自 2018 年便積極地建立延伸型標準系統 (Extended International Reference System, ESIR)。ESIR 是以液體閃爍計數 (Liquid Scintillation, LS) 為基礎並結合三重對二重符合比率 (Triple to Double Coincidence Ratio, TDCR) 技術之系統, 除了可以量測純 β 發射核種外, 還能量測一些電子捕獲核種以及 α 發射核種。

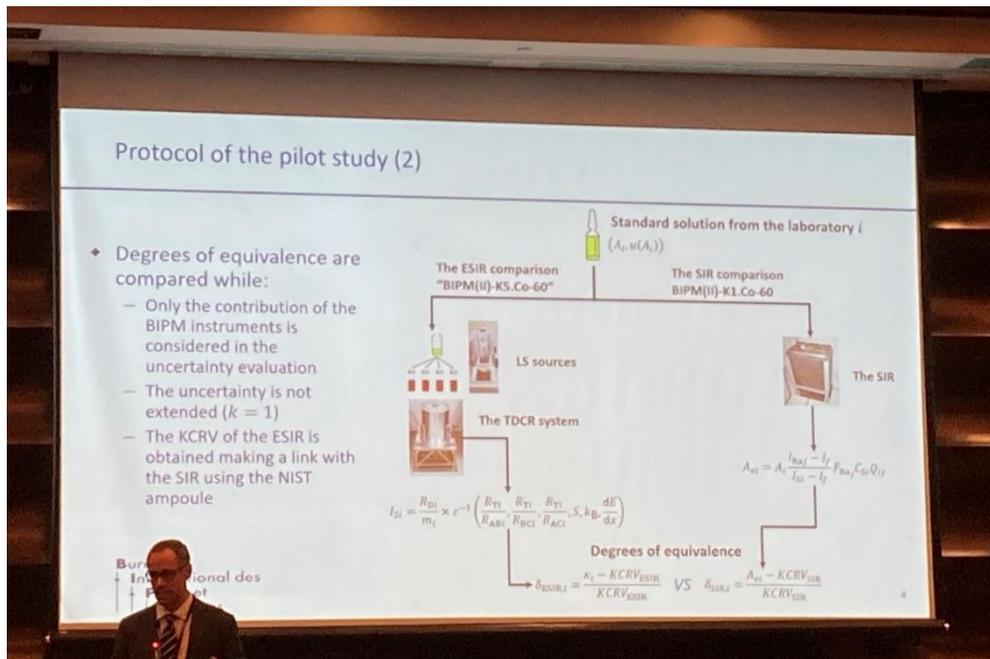


圖 2：CCRI (II) -P1.Co-60 研究流程

游離輻射諮詢委員會 (Consultative Committee for Ionizing Radiation, CCRI) 之 CCRI(II)-P1.Co-60 研究是以鈷-60 (Co-60) 為量測核種, 以進行 SIR 與 ESIR 之比對驗證, 選擇 Co-60 是因其衰變過程中 β 射線與 γ 射線均會釋出而被兩個系統量測到。全球總共有 13 個實驗室參與該研究,

研究結果顯示，幾乎所有參與實驗室都能在兩個系統中量測到 Co-60，兩個系統擁有良好一致性。部分比對出現些微差異，利用其他標準方法進行分析後，顯示差異可能來自於傳統 SIR 系統（游離腔偵檢器與比例計數器）無法檢測出的低能量放射性雜質，根據德國聯邦物理技術研究院（Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB）的分析，雜質來源可能為製備比例計數器量測原液時所出現的氘（H-3）。放射性雜質的問題是 ESIR 的一項待解決議題，不過最終比對結果，ESIR 與 SIR 之不確定度小於 0.5%，ESIR 被認為具有足夠的能力用於 BIPM(II)-K5 比對活動之建立。日後還會與游離輻射諮詢委員會（CCRI）進一步討論 ESIR 評估的放射性核種清單並規劃 ESIR 往後之發展策略。

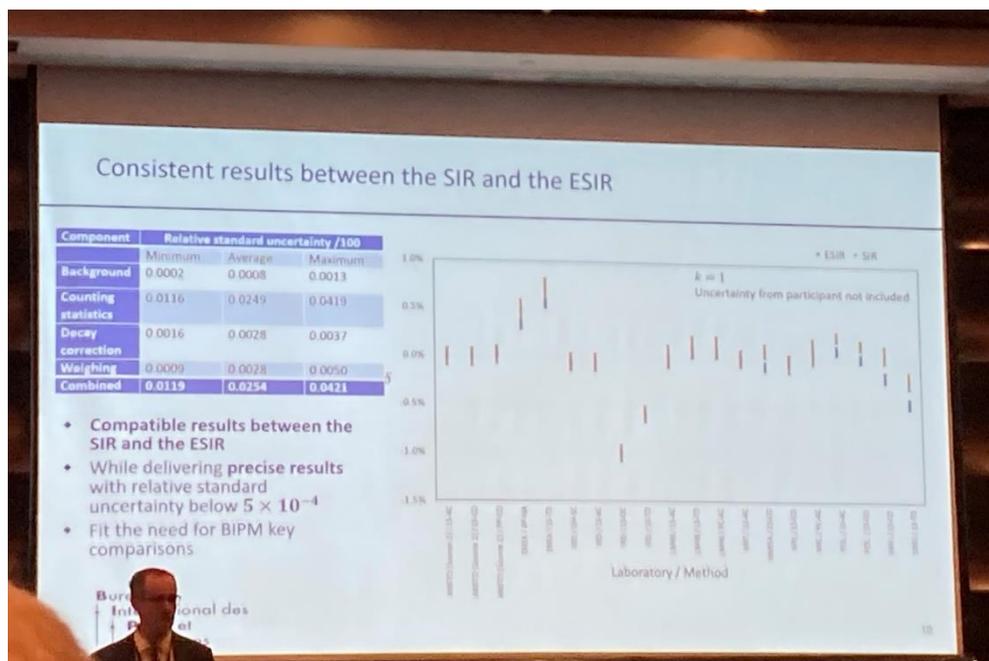


圖 3： SIR 與 ESIR 比對結果

- (2) 在測量放射性核種衰變時，可能會出現衰變不符合指數衰減定律的量測結果，過往學者常斷言該原因來自於太空天氣（Space Weather）現象，特別是太陽或暗物質釋出的微中子衰變，而非實驗室的環境條件。然而，由過去的一些實驗可以發現，衰變量測結果實際上與氣象網站的歷史資料呈現相關。除了溫度、氬氣等氣象因子以外，環境濕度是最常被

忽略、低估的影響因子，因環境濕度很容易進入通風的房間和溫控的實驗室，並影響空氣密度、偵檢器和其電子元件。來自比利時的 Stefaan Pommé 蒐集全球各實驗室之放射性活度量測數據、純指數衰減之殘差，並將指數衰減之殘差與實驗室 50 km 範圍內氣象站資料，如：溫度、濕度、壓力等進行比對。最後蒐集並比對共 12 間實驗室、超過 121 筆指數衰減的年平均偏差資料，並在會議中展現一些實驗室的比對結果，有些數據顯示其活度量測數據與附近氣象站的每日平均環境濕度數據顯著相關。在修正濕度之影響後，指數衰減定律之不確定度可低至 0.0003%，故 Stefaan Pommé 指出，在經過環境濕度的校正和適當的不確定性估計，便可獲得最精確的放射性活度量測結果。

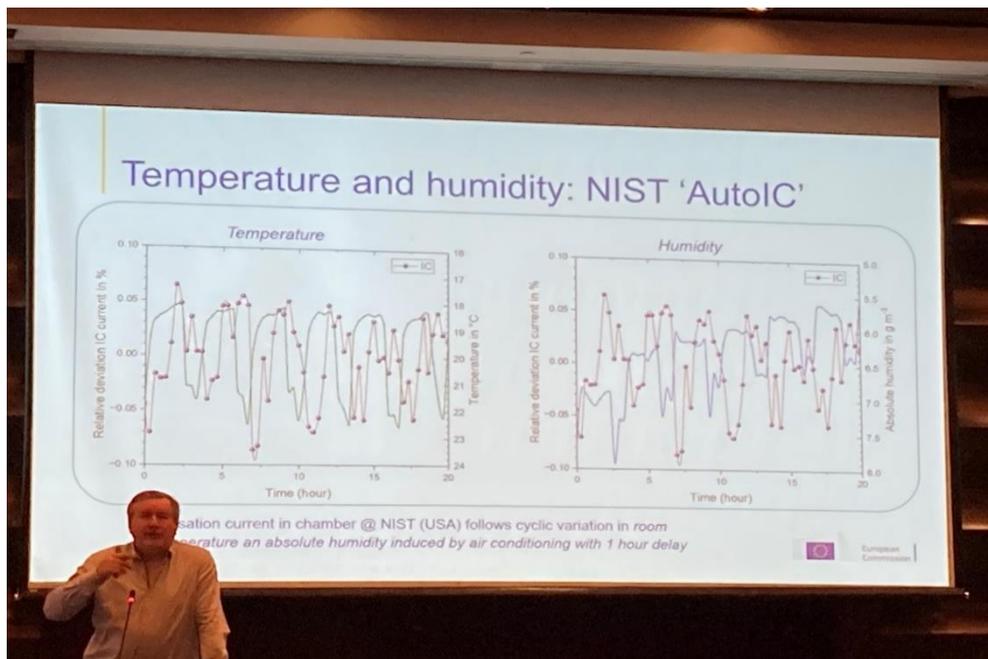


圖 4：游離腔偵檢器所量測的電流會與房間內溫度、濕度的循環變化呈現相關性（美國國家標準暨技術研究院 NIST 之數據）

- (3) 鋅-65 ($Zn-65$) 衰變過程中，分別以電子捕獲衰變至銅-65 ($Cu-65$) 激發態再釋出 1115 keV 的 γ 到 $Cu-65$ 基態，並以電子捕獲、正 β 衰變到 $Cu-65$ 基態。阿根廷國家原子能委員會之放射性同位素計量實驗室（Radioisotope Metrology Laboratory-National Atomic Energy Commission,

LMR-CNEA) 簡述為 CCRI(II)-K2.Zn-65 的比對計畫，使用三種絕對方法以進行 Zn-65 溶液的活度比對，方法分別為：4 π - γ 積分系統、KX-gamma 符合系統、總和能峰方法 (Sum-peak method)。4 π - γ 積分系統包含一 NaI (TI) 井型偵檢器，並以蒙地卡羅模擬程式 PENOLOPE 與幾何圓柱工具 PENCYL 計算 γ 偵檢效率。KX-gamma 符合系統包含兩個 NaI (TI) 偵檢器，需在射源和偵檢器之間放置一鋁吸收體以校正 γ 射線靈敏度。總和能峰方法透過擴展能量範圍的平面式高純鍺偵檢器 (HPGe)，可偵測 Zn-65 射源的兩個 8 keV X 光能峰、115 keV γ 能峰、總和能峰。

2. 品質保證與能力試驗 (Quality Assurance and Proficiency Tests)

- (1) 澳洲核子科技組織 (Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO) 在會議中說明他們在進行新設立的原級標準技術 (4 π (LS)- γ 反符合計數、4 π (HPPC)-4 π γ 符合計數) 與原有的原級標準技術 (4 π (LS)- γ 符合計數、4 π (PC)- γ 符合計數) 之 Co-60 交叉驗證時所遇到的問題與其解決方法。

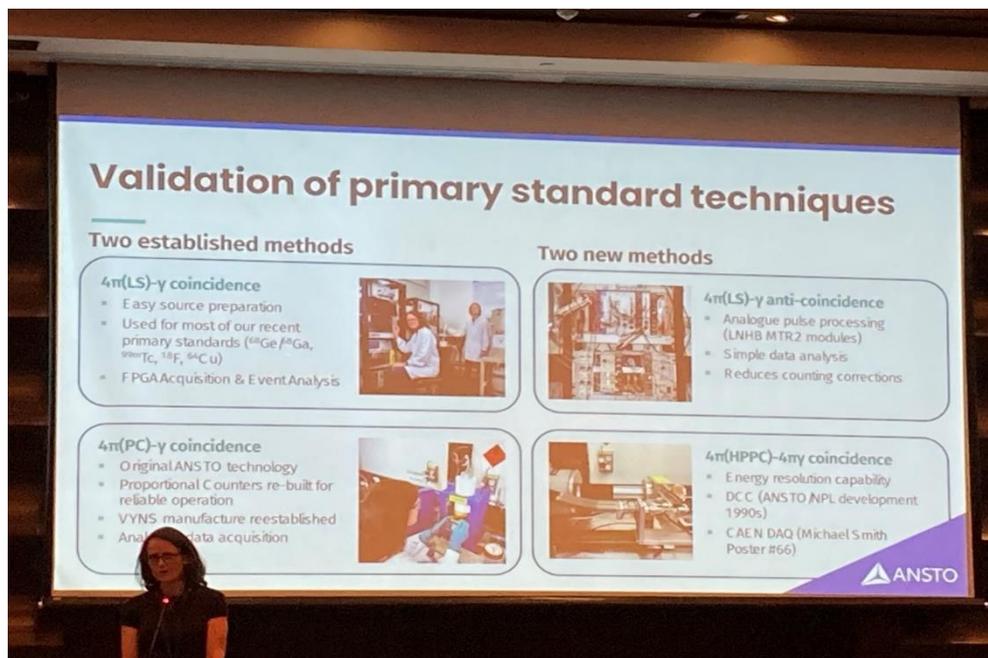


圖 5：ANSTO 四項標準技術概述

ANSTO 原先使用 2014 年的 Co-60 原液進行驗證，結果卻顯示，已完成校正的二級標準游離腔與原級標準技術之間出現了 2% 差異。由於 HPGe 能譜分析已顯示原本的 Co-60 溶液沒有其它釋放 γ 射線之雜質，於是推測差異來自於其它核種的低能量電子，此推測是因為游離腔偵檢器對於低能量輻射的靈敏度較低，而液體閃爍計數和比例計數器則較高；目前以電感耦合電漿體質譜法 (Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS) 分析，量化出的雜質有碳-14 (C-14)、鎝-99 (Tc-99) 等。除了雜質分析之外，ANSTO 以其 OPAL 反應爐重製備新的 Co-60 溶液：將純鈷金屬放入反應爐，使用氣動輻射照射設施進行 15 小時的中子活化後，再將照射後的金屬鈷依序溶解於濃硝酸 (HNO_3)、濃鹽酸 (HCl)。新製備的 Co-60 溶液經四個計數系統比對後，其結果在標準不確定性的範圍內為一致。該溶液也提交給 BIPM，用於 BIPM.RI(II)-K1.Co-60 比對與 CCRI(II)-P1.Co-60 研究。

Solution #1: produce ^{60}Co

- Produce ^{60}Co solution of known radionuclidic purity using ANSTO's OPAL research reactor
 $^{59}_{27}\text{Co} (n, \gamma) \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co}$
- 9.82 mg Cobalt metal (99.995% pure) placed into Titanium inner can, which went into an Aluminium outer can (both screw-top)
- Irradiated for 15 hours at a thermal neutron flux of $1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ using pneumatic irradiation facility LE3-2C
- Produced ~11 MBq ^{60}Co

Pneumatic irradiation facility LE3-2C

ANSTO

圖 6：ANSTO 透過 OPAL 反應爐之 Co-60 溶液製備概述

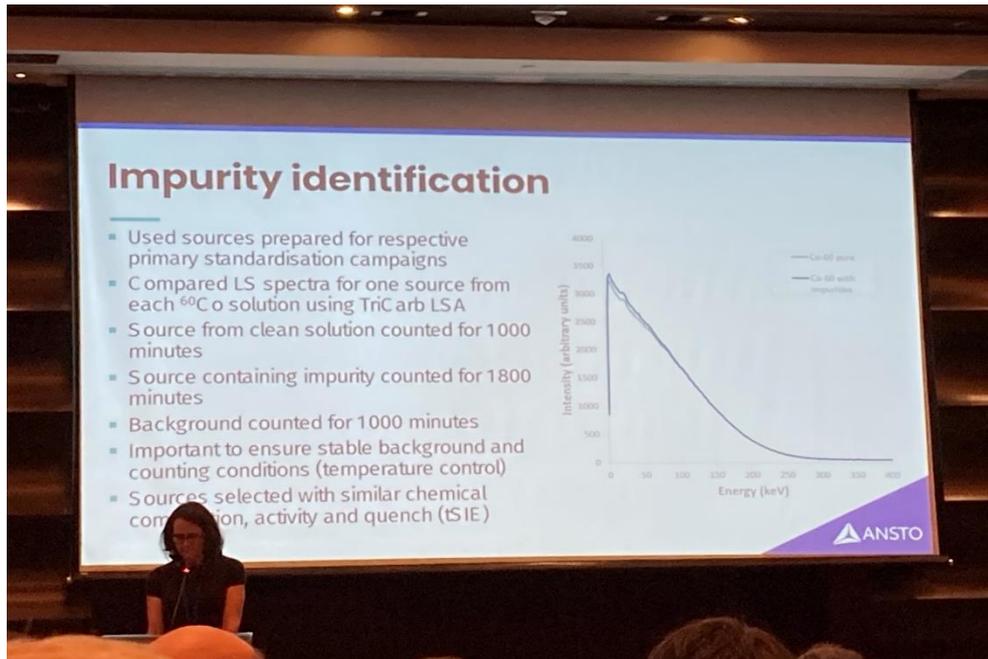


圖 7：ANSTO 之 Co-60 原液雜質分析步驟與能譜比較

- (2) 放射性氡氣 (Rn-222) 為造成公眾劑量的最大來源，若受到氡氣的曝露更是有罹患肺癌的風險，根據歐盟理事會指令 2013/59/EURATOM：歐盟成員國須遵守歐盟安全標準條例 (EU-BSS)，實施氡氣減量措施以防止曝露於游離輻射引起的危害，因此擁有精確且具品質保證的氡氣測量技術至關重要。雖然歐洲的氡氣活度濃度測量網路已逐漸擴大，在戶外級別上，仍然缺少可追溯至 SI 標準的技術。歐洲計量創新與研究計劃 (EMPIR) 中的 19ENV01 traceRadon 項目，其中一工作項目為開發新的 Rn-222 可追溯射源、開發室外低濃度 Rn-222 量測技術 (可測量活度範圍為 $1\text{Bq/m}^3 \sim 100\text{Bq/m}^3$)，以及開發環境級別 Rn-222 量測之校正基準與程序。在量測技術方面，此次會議介紹了德國 PTB 的 The Atmospheric Radon MONitor (ARMON)，主要為收集 Rn-222 與 Rn-220 的子核鈷-218 (Po-218)、鈷-216 (Po-216) 所產生的靜電，設計為 20 公升的便攜式；澳洲 ANSTO 的雙過濾器雙流量迴路氡-222 偵測器 (Two-filter Dual-flow-loop Rn-222 detector)，算是現有的雙迴路氡-222 偵檢器之改良版，設計成便攜式但可以進行 200 公升大容量的取樣。

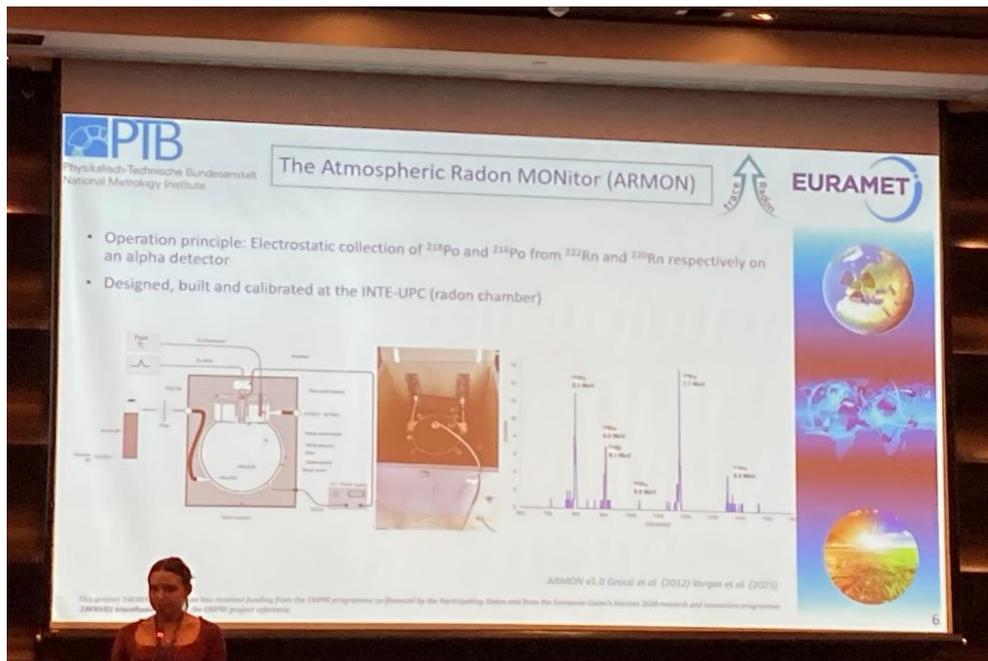


圖 8：德國 PTB 之 The Atmospheric Radon MONitor

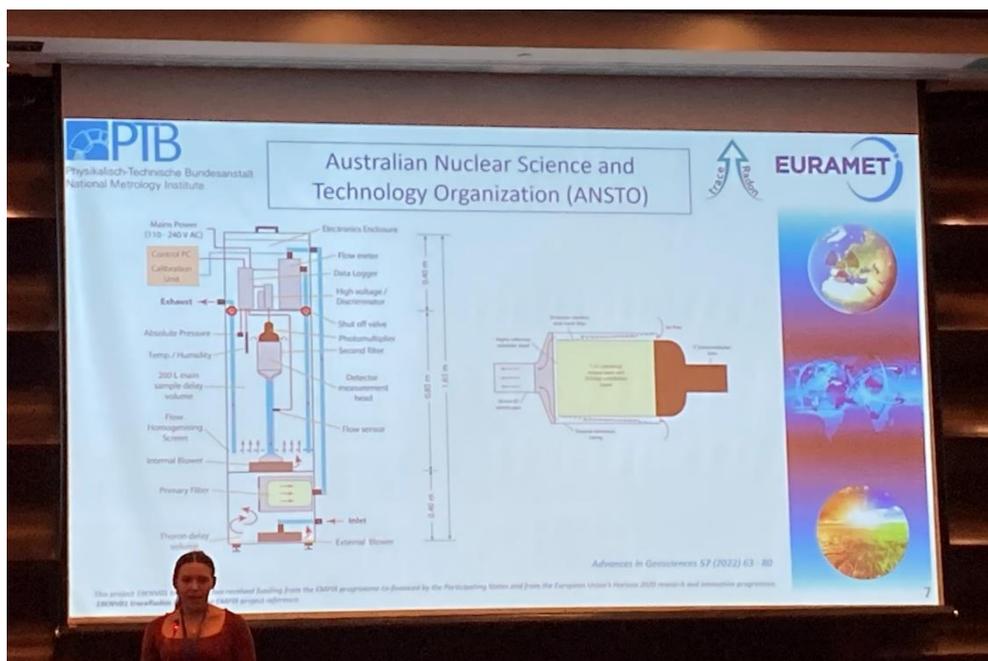


圖 9：澳洲 ANSTO 之 Two-filter Dual-flow-loop Rn-222 detector

(3) 因韓國製造的床墊所釋出的氡含量超過安全標準，近期氡氣（Rn-222）和釷射氣（Rn-220）為韓國國內一大議題，2012 年甚至有新聞報導出一間小學偵測出濃度高達 7210 Bq/m^3 的氡。韓國標準科技研究院（Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS）希望透過高靈敏度氡氣監測系統與通風換氣系統的結合，開發一個氡氣主動減量系統。目前，

KRISS 正在開發高靈敏度氦氣偵檢器：KRISS Rn-mini 和 KRISS Rn-trio，其採用靜電氦檢測原理(偵檢器的矽光電二極體會計算氦氣衰變子核所發射的 α 粒子)。偵檢器具有微控制器和 KRISS 自己研發的訊號處理電路，其電場使用了有限元素法 (Finite element method) 的電場計算優化。目前已由 3D 列印製出 KRISS Rn-mini 和 KRISS Rn-trio 模型。

3. 生命科學之放射核種計量技術 (Radionuclide Metrology in Life Sciences)

- (1) 核醫藥物在注射前，需要由劑量校正設備量測放射性活度，傳統的校正設備多半體積大又無法運輸，考慮到藥品運送、實驗室距離、輻射防護等問題，傳統的校正方式對於短半衰期放射性核種之校正並不便利，法國 Henri Becquerel 國家實驗室 (Laboratoire National Henri Becquerel, LNE-LNHB) 開發一種可攜式的小型校正儀器，目標是未來可以在迴旋加速器的輸出端進行活度量測。該可攜式校正儀器包含直徑 1 毫米的石英毛細管、70X 變焦相機以及微型 TDCR 測量裝置 (TDCR 由 3D 列印製成)，可以測量小至微升 (μL)、甚至只有一滴的溶液之活度與體積，並且可以遠端遙控，避免操作者接受到額外曝露。此儀器的首次量測在 Orsay 醫院進行 (圖 10)，僅需 5 分鐘的時間就能在 (碳-11) C-11、(氟-18) F-18 的單滴溶液上量到其體積活度，相對標準不確定度只有 2%；不確定度的主要來源為單滴溶液和毛細管的位置、大小、成分的不同。同時將單滴溶液以標準的 TDCR 裝置進行驗證，結果顯示兩個方法在標準不確定度範圍內是一致的。該儀器能夠有效的減低來自實驗室背景活度的影響 (例如放射性同位素的製備所產生會干擾的背景活度)，不過偵檢效率受單滴溶液蒸發的影響非常大，因此需要縮減測量時間才能減低來自蒸發的影響。儀器目前能夠量測至 MBq/mL 的體積活度，目前目標是持續改善該儀器，使其能夠量測其他放射性同位素、更小的體積、量測等級提高至 GBq/mL、可應用於能譜分析等。

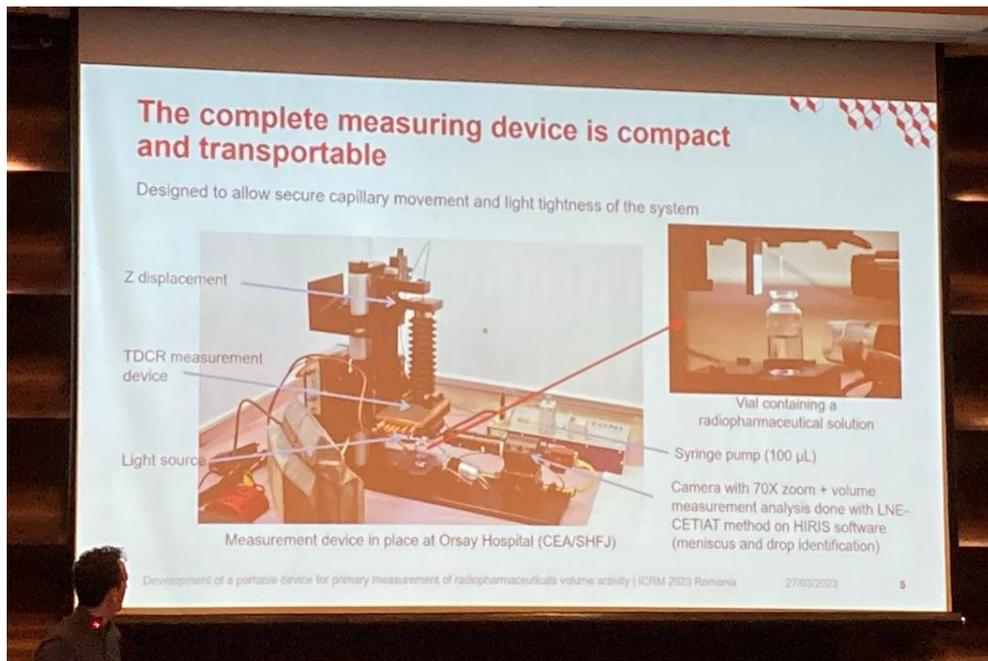


圖 10：法國 LNE-LNHB 置於 Orsay 醫院的可攜式校正儀器外貌

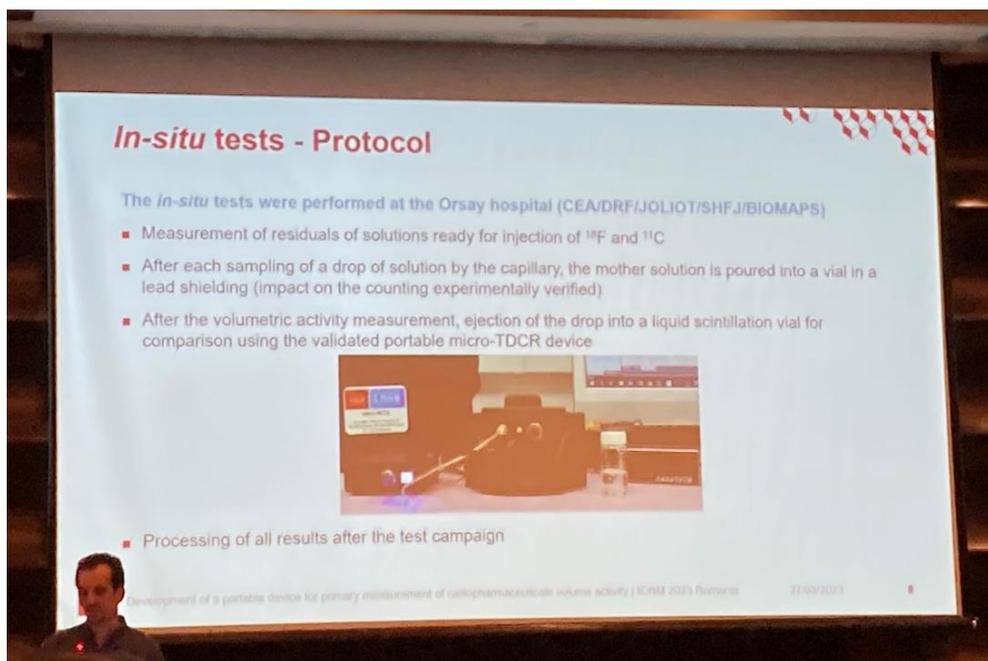


圖 11：法國 LNE-LNHB 於 Orsay 醫院進行首次量測

- (2) 近年來國際間正努力於制定鋯-89 (Zr-89) 等新型核醫藥物之標準，為了準確量化正子影像 (PET) 中的放射性分佈，需校正成像設備並進行驗證測量。英國國家物理實驗室 (National Physical Laboratory, NPL) 已建立了製作可追溯性影像假體的完整流程，此研究使用 Zr-89 在 NPL 和臨床系

統進行驗證，目前 PET 成像系統的活度定量準確性，是以 F-18 為校正標準。臨床前（Pre-clinical）系統驗證方法如圖 12，結果顯示使用 Zr-89 驗證，影像上平均活度會比 F-18 所得活度高 4%，推測是因為系統對 Zr-89 散射或隨機事件校正仍不完善（系統對 F-18 已經過專門校正）。另外使用兩個臨床系統進行驗證，系統概述與使用假體如圖 13；兩個臨床系統結果出現 20% 的偏差。由於臨床系統製造商尚未支持用 F-18 以外的核種進行定量成像，因此需要對 Zr-89 數據進行手動校正，兩者之轉換可能是出現偏差的原因。最後總結：臨床前和臨床系統中都能實現可追溯的成像測量，但在處理專有擷取和重建演算法的不確定性評估仍具挑戰。在此研究，NPL 還有處理 Zr-89 正子影像中的下散射（down scatter）、測量新型核種的正子分歧比、建立新型核種接機測試（commissioning tests）指南等未來工作。

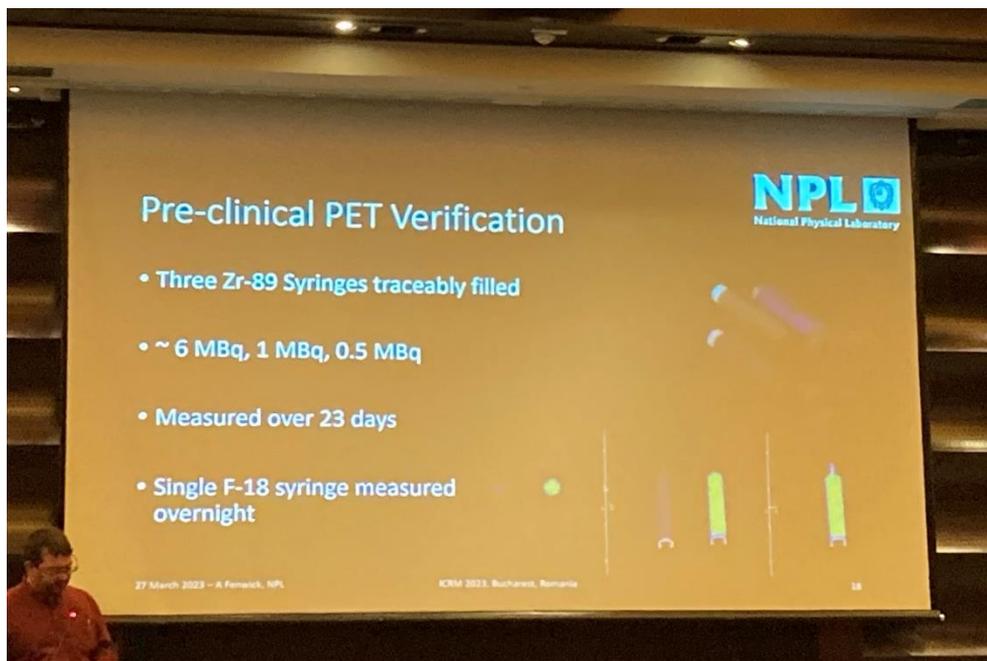


圖 12：英國 NPL 之 PET 臨床前系統驗證方法

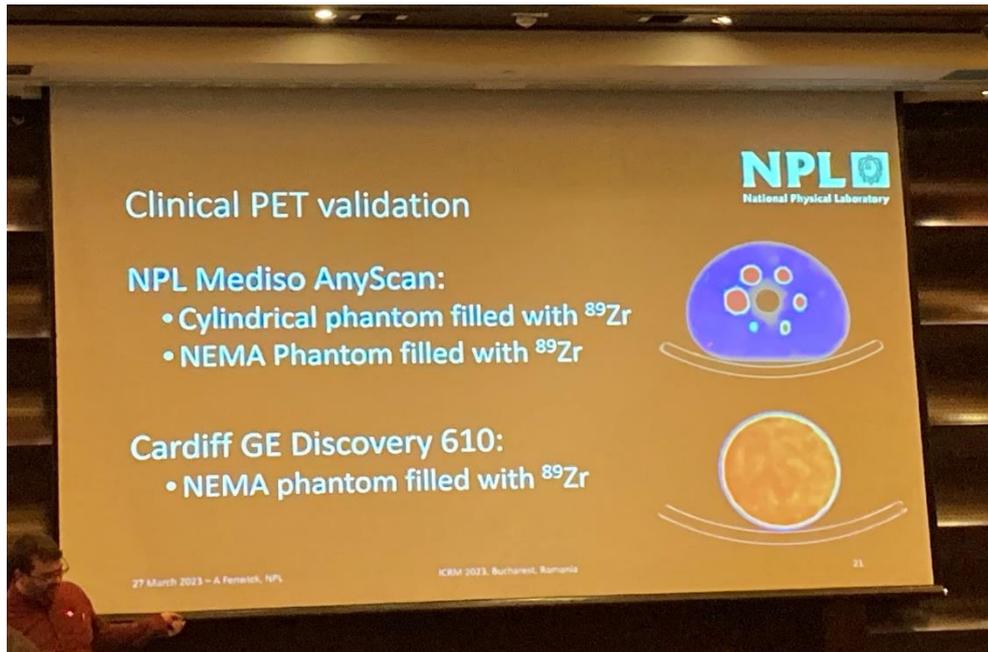


圖 13：英國 NPL 之 PET 臨床系統所使用之 Z-89 假體簡述

- (3) 鎳-177 (Lu-177) 是第一個被美國 FDA 批准用於胜肽受體放射核種治療的核種，可由迴旋加速器或反應爐生產，Lu-177 透過 4 個分支的 β -衰變衰減至鉛-177 (Hf-177)，制激過程中會釋出 6 條能量範圍在 71 keV~321 keV 之間的 γ 射線。西班牙能源環境與技術研究中心 (The Centre for Energy, Environmental and Technological Research, CIEMA) 以兩種系統測量 Lu-177 半衰期：第一為 IG11 井型游離腔，可記錄時間間隔長達 5 個半衰期的游離電流；第二為具有數位收集系統的擴展範圍同軸高純鍺偵檢器 (Extended-range Coaxial HPGe Detector)，可定期記錄 40~400 keV 能量的能譜訊息。初步得出半衰期為 6.643 ± 4 天，與衰變數據評估計畫 (Decay Data Evaluation Project, DDEP) 的建議值 6.647 ± 4 天相似。

4. 阿伐與貝他粒子能譜 (Alpha- and Beta-particle Spectrometry)

- (1) 核子設施若有人造核種的異常釋出，需先經過天然核種與人造核種的鑑別測量，然而目前的鑑別儀器仍有警報誤報的事件發生。日本弘前大學與

日本核燃料公司正在建立一些新的鑑別方法，並開發一個可將各方法結合、快速偵測人工核種異常釋放的系統。此次介紹兩種使用矽半導體氣溶膠監測器的方法，第一種方法是圈出 Po-218、Bi-212 的關鍵區域 (ROI)，在只有天然核種的情況下評估這些 ROI 的計數率，若之後量測的計數率超過只有天然核種情況下計數率之 3 個標準差，則判定有人工核種存在。第二種方法則利用過去的研究，獲得鈾-214 (Po-214) 與 α 總計數之間的正相關回歸方程式，透過方程式可計算來自 Po-214 的 α 計數，並將其從測量的總 α 計數結果中扣除，以減少天然核種的影響，若扣除後仍超過 3 個標準差，則判定有人工核種存在。

- (2) 由於 α 射線在空氣中的射程只有幾毫米，目前還未有大規模 α 污染的檢測系統，歐洲計量創新與研究計劃 (EMPIR) 中的 RemoteALPHA 項目，旨在克服傳統手持式 α 偵檢器的缺點，並開發能夠遠程偵測環境中 α 粒子的新技術。德國 PTB 介紹其開發的大直徑輻射致發光掃描系統 (Radioluminescence Scanning)，此系統並非直接偵測 α 粒子，而是偵測高能 α 粒子與周圍空氣介質作用所放出的光子，這些光子波長主要在紫外線波段，因此此系統包含了輻射致發光偵檢裝置與紫外線成像技術，工作距離可到 2 公尺、掃描解析度可達 2 毫米、像素積分時間 1 秒時的偵測限度為 4 kBq。此系統可應用於核子設施除役、核子燃料管理和其他 α 放射性核種相關之處理作業。

5. 放射核種計量技術 (Radionuclide Metrology Techniques)

- (1) 碘-125 (I-125) 是透過 100% 電子捕獲衰變的高原子序核種，因此 I-125 被視為難測核種，德國 PTB 與法國 LNHB 進行雙邊比較驗證以確立雙方的 I-125 校正能力。液體閃爍計數 (LSC) 近年的發展已經可以對 I-125 進行標準化，兩個實驗室分別使用自己訂製的 TDCR 計數器 (TDCR 為原級標準) 計測 LNHB 提供的相同 I-125 樣品。儘管數據分析、計數效率的計

算方式兩邊不同，但雙方測量活度濃度的比對結果一致，這些結果也和 LNHB 進行 $4\pi\text{-}\gamma$ 計數（ $4\pi\text{-}\gamma$ 為原級標準）的結果一致。兩個實驗室均另外以二級標準方法（例如一些游離腔偵檢器、商業用 LS 計數器等）進行量測，所有結果雖稍高於 TDCR 的結果，但仍呈一致。進行二級標準方法的測量可以使實驗結果與 2004 年的 CCRI(II)-K2.I-125 比對研究作出連結，並重新確認游離腔的校正因子。不過，I-125 仍需要被視為難測核種。

Comparison of TDCR uncertainty budgets

PTB (Micelle+asymmetry algorithm)		LNHB (SASINUC+Penelope)		LNHB (PENNUC+Geant4-TDCR)	
Uncertainty component	$u(a)/a$ in %	Uncertainty component	$u(a)/a$ in %	Uncertainty component	$u(a)/a$ in %
Counting statistics	0.14	Counting statistics	0.05	Variability on the measurements of 6 LS sources	0.22
Weighing	0.04	Dispersion (relative standard deviation of six LS samples)	0.25	Live time	0.02
Dead time	0.05	Live time	0.02	Weighing	0.05
Background	0.03	Decay correction	0.03	Decay correction	0.03
Adsorption	0.05	Nuclear data + Monte Carlo	0.60	TDCR model including nuclear data / Monte Carlo simulations	0.58
TDCR value	0.1	kB parameter	0.10	kB parameter (variability between 70 mm/MeV to 130 mm/MeV)	0.04
Sample (in)stability	0.15	Background	0.10	Background	0.10
Model	0.4	Accidental coincidences	0.01	Accidental coincidences	0.01
Impurities	0.03	Combined uncertainty	0.66	Combined uncertainty	0.63
Ionization quenching	0.2				
Decay data (fractional EC probabilities, ω_γ , etc.)	0.4				
PMT asymmetry	0.03				
Decay correction	0.03				
Combined uncertainty	0.65				

K. Kossert et al. LNHB-PTB bilateral ^{125}I comparison

圖 14：PTB 與 LNHB 進行 TDCR 實驗之不確定性評估

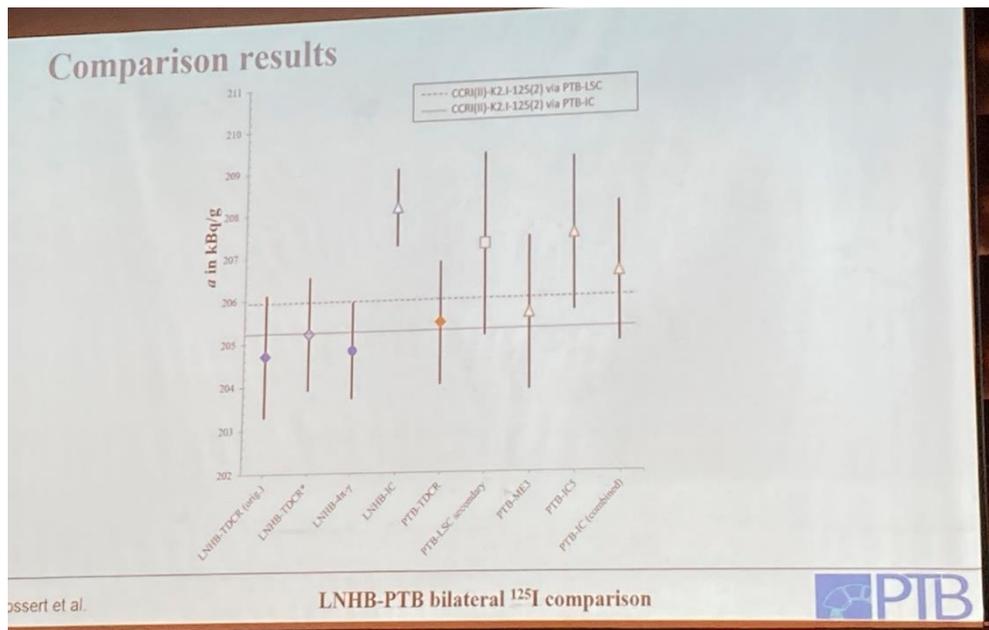


圖 15：PTB 與 LNHB 雙邊驗證比較結果

(2) 電感耦合電漿體質譜法 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS), 是一強大的計量工具, 已經被證明能夠改進核子設施除役、環境監測應用的試樣處理通量 (sample throughput)。而串聯 (tandem) 的 ICP 質譜儀 (即 ICP MS/MS), 與傳統 ICP-MS 不同之處在於其質譜儀的碰撞/反應核 (collision/reaction cell, CRC) 前端增加一四極子 (Quadrupole Q1) (圖 16), 可以更好地控制 CRC 中的反應。放射性核種的精確測量需要去除多種干擾, ICP-MS/MS 具有獨特地干擾去除能力, 因此能夠應用於難以測量的長半衰期核種之半衰期精確測量。英國 NPL 將 ICP-MS/MS 用於 Si-32、Cl-36、Zr-93、U-238、Pu-239 等核種分析, 每個核種都有一定比例的干擾需要考慮, 例如: 同重素 (Isobaric)、多原子 (Polyatomic)、峰值拖尾 (Tailing); 其中 U-238 的半衰期已經被重新測量 ($4.524 \pm 163 \times 10^{19}$ 年), 結果顯示與現在的建議值成一致, ICP MS/MS 未來可以應用在難以用化學分離方法去除干擾的放射性核種。另外, 由於歐洲綠色協議正推動零污染之目標, 需要高靈敏度和最先進的檢測技術以測量超低量污染, 歐洲國家計量組織聯盟 (European Association of National Metrology Institutes, EANMT) MetroPOEM 項目, 旨在輻射量測技術和質譜方法之間建立連結, 而 ICP-MS 正是 MetroPOEM 的關鍵技術。

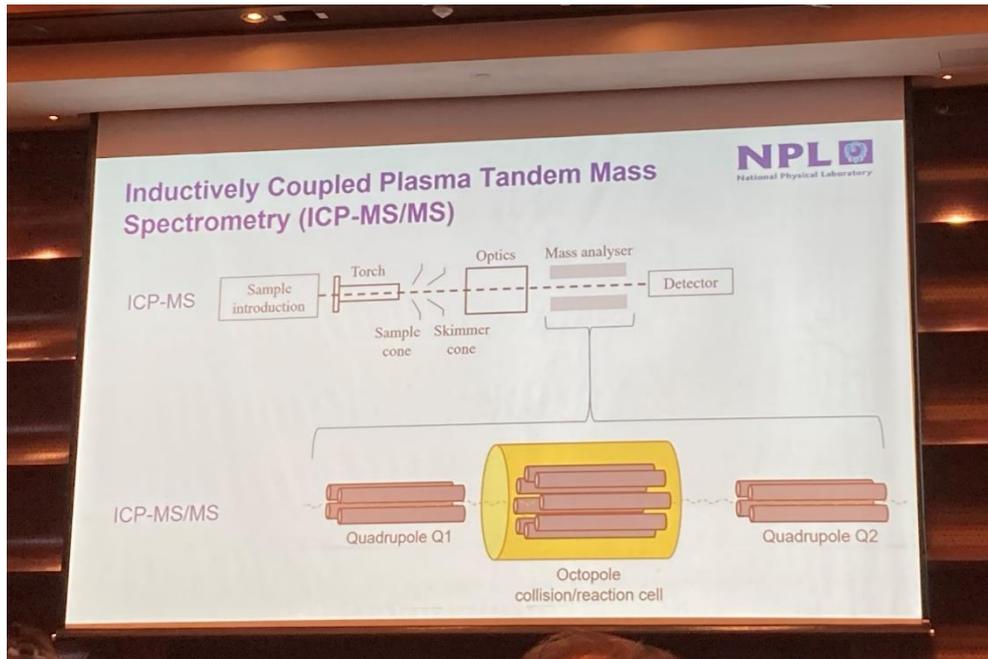


圖 16：英國 NPL 之 ICP-MS/MS 簡圖

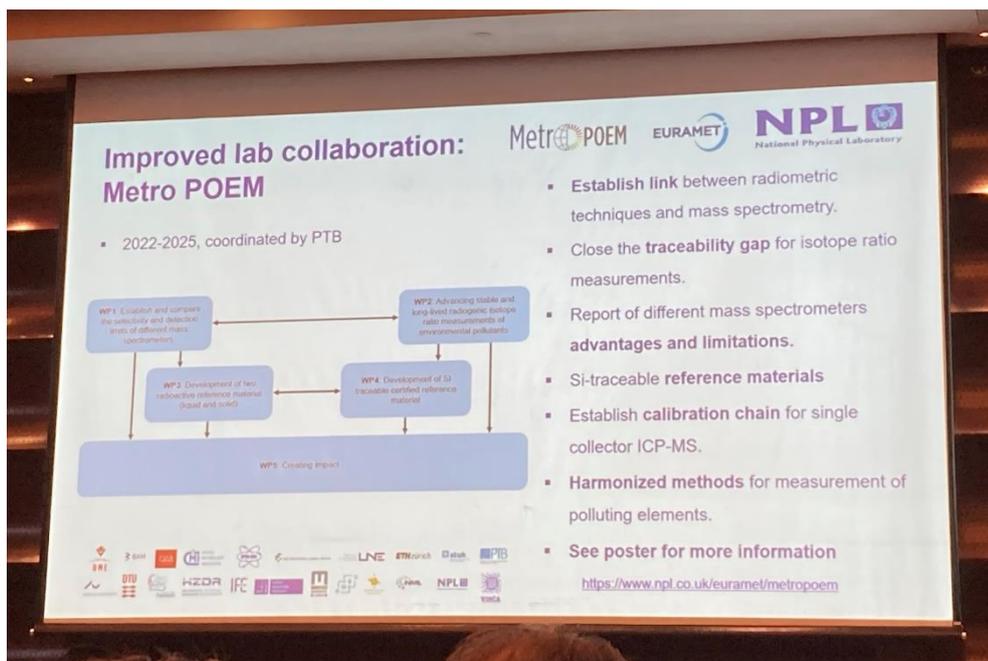


圖 17：英國 NPL 之 MetroPOEM 項目概述

(3) 銅-64 (Cu-64) 有 β^- (至 Zn-64)、 β^+ 、電子捕獲 (至 Ni-64) 三種衰變途徑，因此可應用於放射成像和放射治療；同時，多個衰變途徑使 Cu-64 活度標準化更具挑戰。韓國 KRISS 進行的 Cu-64 活度標準化使用 $4\pi\beta$ (LS) - γ 符合計數與 TDCR 計數法。研究顯示，使用 $4\pi\beta$ (LS) - γ 符合計數的

標準化結果在不確定度範圍內一致，而 TDCR 測量結果低於 3%以上，造成此差異的可能原因仍在研究中。

- (4) 由於錒-225 (Ac-225) 的 α 衰變鏈十分複雜，其活度定量難以用傳統的符合計數技術進行。使用液體閃爍技術 (如 TDCR、CIEMAT/NIST 方法。後項之 CIEMAT 為西班牙能源環境科技研究中心 (The Centre for Energy, Environmental and Technological Research)，NIST 為美國國家標準暨技術研究院 (National Institute of Standards and Technology) 測量 Ac-225 時，由於 Po-213 在其母核 Bi-213 的 β 射線偵檢所產生的無感時間內衰變，使 Po-213 的 α 射線偵檢效率顯著較低。日本近畿大學發現可以將 Ac-225 射源夾在兩個超薄塑膠閃爍片間，在 α 、 β 粒子同時存在的情況下，超薄塑膠閃爍片只能選擇 α 粒子訊號，可以用此方法提高 Po-213 釋出的 α 射線偵檢效率。
- (5) 放射核種計量技術近期的發展，包括:氫/氬/氙、碳-14、放射性氫等的量測、貝他-加馬系統的量測、低溫衰變能譜及使用低溫偵測器建立原級活度標準、NaNA 加馬陣列 (National Nuclear Gamma Array)、國際傳遞儀器參考系統 (International Reference System Transfer Instrument, SIRTl) 等。NaNA 加馬陣列為英國國家物理實驗室 (NPL)，以 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 晶體為基礎建立的加馬符合式能譜儀 (Coincidence Gamma-ray Spectrometer) (圖 18)，可用在鑑別複雜的多物質能譜中特定核種衰變之加馬射線。NaNA 加馬陣列搭配 CAEN V1751C 的數位化擷取系統，較一般相同尺寸之固態偵檢器有更佳的時間解析度，因此其核種衰變辨別能力亦更為優良。

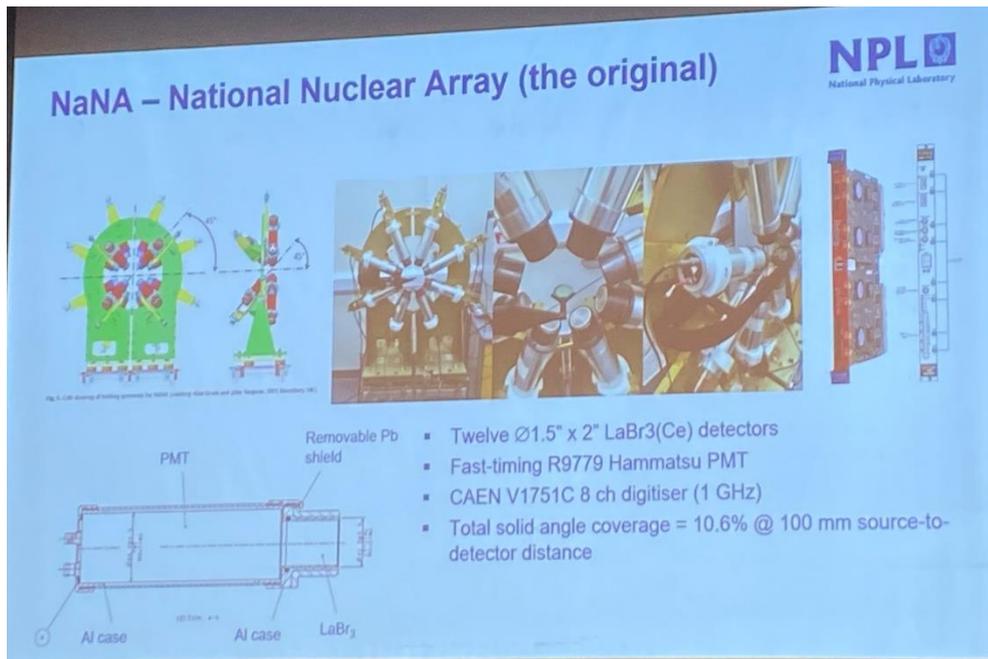


圖 18：英國國家物理實驗室之 NaNA 加馬陣列

為能更進一步提升核種衰變之鑑別能力，英國國家物理實驗室於近期採用 3D 列印系統架構及支撐設備的方法，重新進行了 NaNA 加馬陣列的更新計畫。新的 NaNA 加馬陣列將在更多角度配置偵檢器（圖 19 及圖 20），預期可再更進一步提升目前系統可達成的時間解析度。

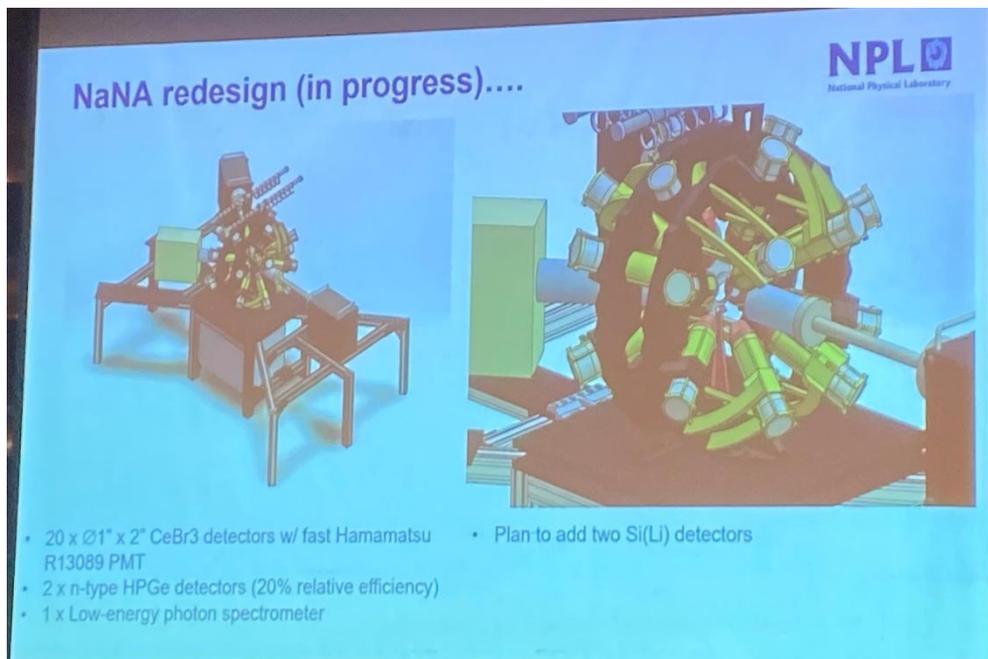


圖 19：英國國家物理實驗室之新一代 NaNA 加馬陣列

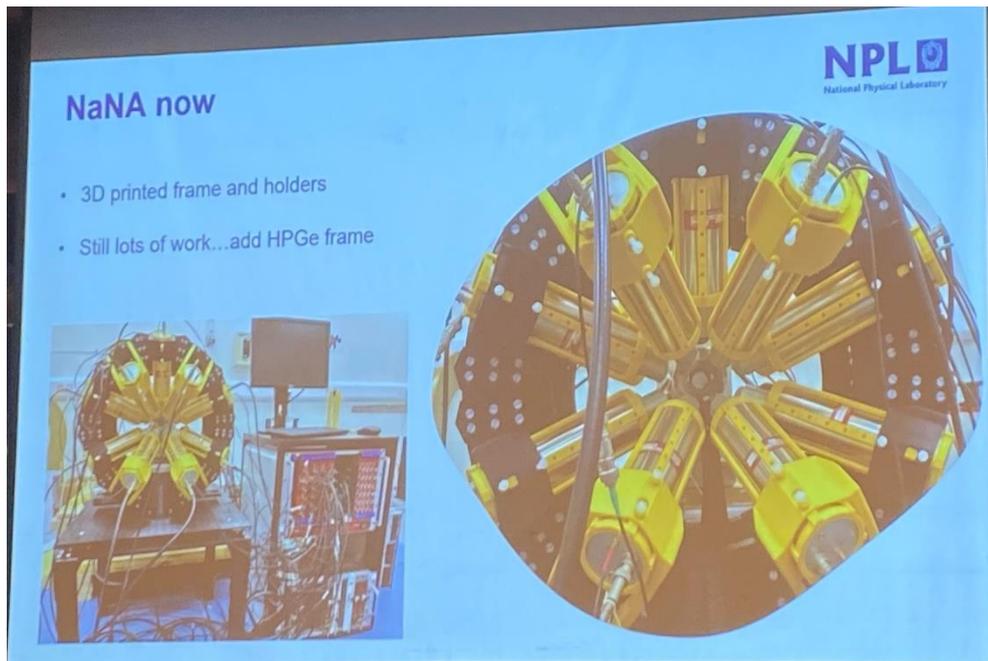


圖 20：英國國家物理實驗室之新一代 NaNA 加馬陣列

在標準傳遞的部分，國際上一般會以碘化鈉偵檢器作為基礎(圖 21)，針對無法送到國際度量衡局進行比對或校正的短半衰期核種，發展國際傳遞儀器參考系統。目前本所所處的亞太計量組織，總共有三個單位對開發國際傳遞儀器參考系統有興趣，或正在進行相關的開發中，包含日本的國家計量研究院國家計量研究院 (National Metrology Institute of Japan, NMIJ)，及澳洲的澳洲核子科技組織 (Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO) 等。基於人力考量，未來規劃各個區域組織中應由一個國際傳遞儀器參考系統作為代表，和國際度量衡局相互連結。

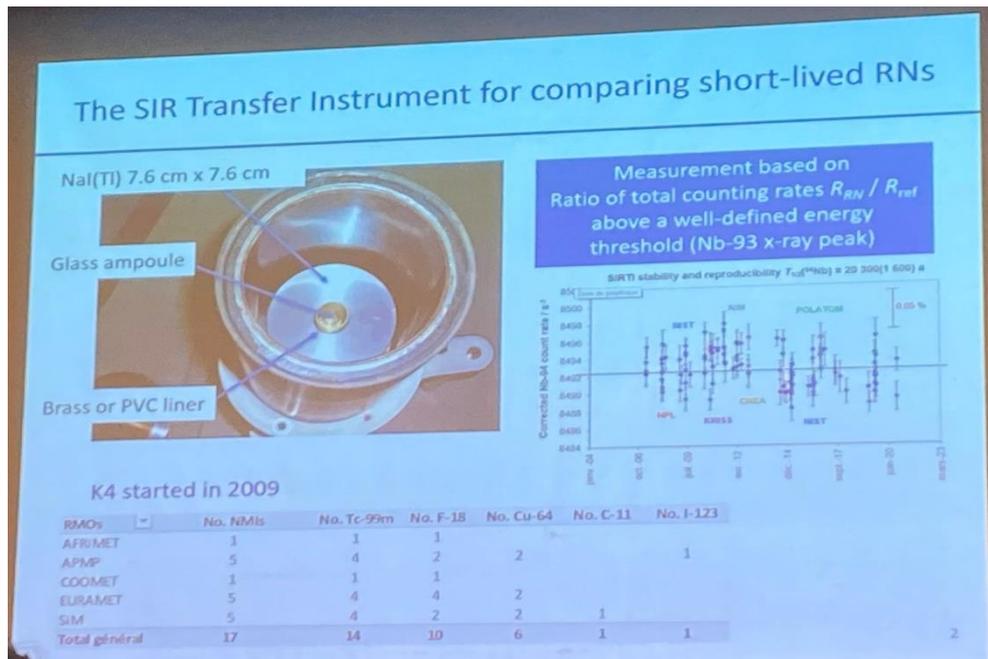


圖 21：以碘化鈉偵檢器為基礎之國際傳遞儀器參考系統

6. 伽馬射線能譜 (Gamma-ray Spectrometry)

- (1) 歐洲計量創新與研究計劃 (EMPIR) 中的歐盟聯合研究項目「核子事故或輻射事故後移動性游離輻射偵檢計量」旨在建立新的偵檢技術與可追溯的校正方法，以因應事故後大範圍的輻射偵檢。目前準備階段的主要成果之一是開發配有高純鍺 (HPGe) 能譜儀的無人直升機系統，該能譜儀能夠快速地辨識釋出的放射性核種，進而確定事故程度、緊急狀況與污染程度，無人直升機選擇負載高、飛行範圍長的直升機。HPGe 已經過改造為飛行適用，並用標準射源與蒙地卡羅方法測試其性能。此系統已在國際原子能總署 (IAEA) 「無人駕駛飛機輻射偵測與監視系統」技術會議等飛行演習中使用。
- (2) 計算中子射源等放射性物料中的核種殘量，特別是鈾、鈾，對 IAEA 的核子保防與核子保安工作為必要。羅馬尼亞 IFIN-HH 的 ELI-NP 近期以金、鎳金屬包圍鈾-鈹 (Pu-Be) 中子源及其他中子源 (Am-Be、Cf-252) 進行實驗，利用中子活化包圍中子源之金屬所產生的 γ 射線能譜來分析舊射

源所含核種，進而分析核種殘量。

- (3) 核電廠成功除役的一項重要任務是優化金屬放射性廢棄物（**Metallic Radioactive Waste, MRW**）的管理，為了減少最終處置的 MRW 數量，應採取有效的示性、去污、熔化措施。為了辨識非常低活化程度的金屬廢棄物，通常會透過簡單的非破壞 γ 能譜檢測。立陶宛物理科學與技術中心（**FTMC**）研究不同幾何屏蔽形狀下的 **Co-60**（代表活化）和 **Cs-137**（代表表面污染）之 γ 能譜，並用 **HPGe** 半導體偵檢器和 **CeBr₃** 閃爍偵檢器，分析 γ 能譜的形狀、強度、康普吞能峰比值以識別表面活度、體積活度，並與蒙地卡羅程式 **MCNP6** 的模擬結果比較。**HPGe** 偵檢器實驗和 **MCNP6** 模擬結果具良好一致性，差異不超過 3%，而 **CeBr₃** 偵檢器和 **MCNP6** 則差異高達 15%，推測是因為 **CeBr₃** 偵檢器能量依存性較高而未被 **MCNP6** 考慮在內。

7. 量測標準與參考物質（**Measurements Standards and Reference Materials**）

- (1) 水中氡（**Radon-in-water**）活度量測在輻射防護、地質學、火山學等領域都十分重要。目前有許多方法可測量水中氡，例如射氣測量法（**Emanometry**）、 γ 能譜法（**GS**）、液體閃爍計數（**LSC**）、徑跡蝕刻（**track-etch**）技術，卻還未有水中氡濃度量測的原級標準。法國 **LNHB** 正在建立非基於 **Ra-226** 標準的水中氡標準實驗室系統。**LNHB** 已建造一台專用儀器，可在控制條件下將界定立體角（**Defined Solid Angle method, DSA**）氡氣標準件以低溫傳輸，百分之百地轉移並與水混和，使 **Rn-222** 在水中均勻分佈，製備成可追溯 **Rn-222** 活度濃度的水中氡試樣；此儀器還能製造具有相似標準相對不確定度的 **GS**、**LSC** 水中氡試樣，進而建立 **DSA** 標準的追溯鏈。最後用 **DSA** 方法、**TDCR**、**LSC**、**HPGe** 測量試樣的活度濃度（圖 23），整體標準不確定度小於 1%。此發展將允許水中氡測量技術的直接比較，以及應用於絕對方法（如 **TDCR**）進行水中氡的標準化和單位傳遞。

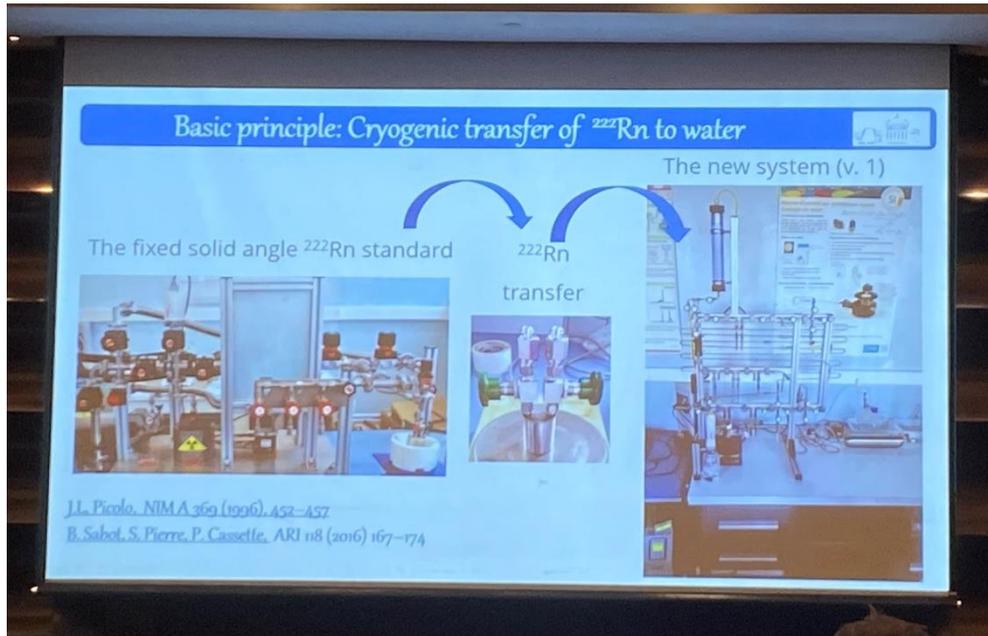


圖 22：法國 LNHB 之水中氡樣品製備原理

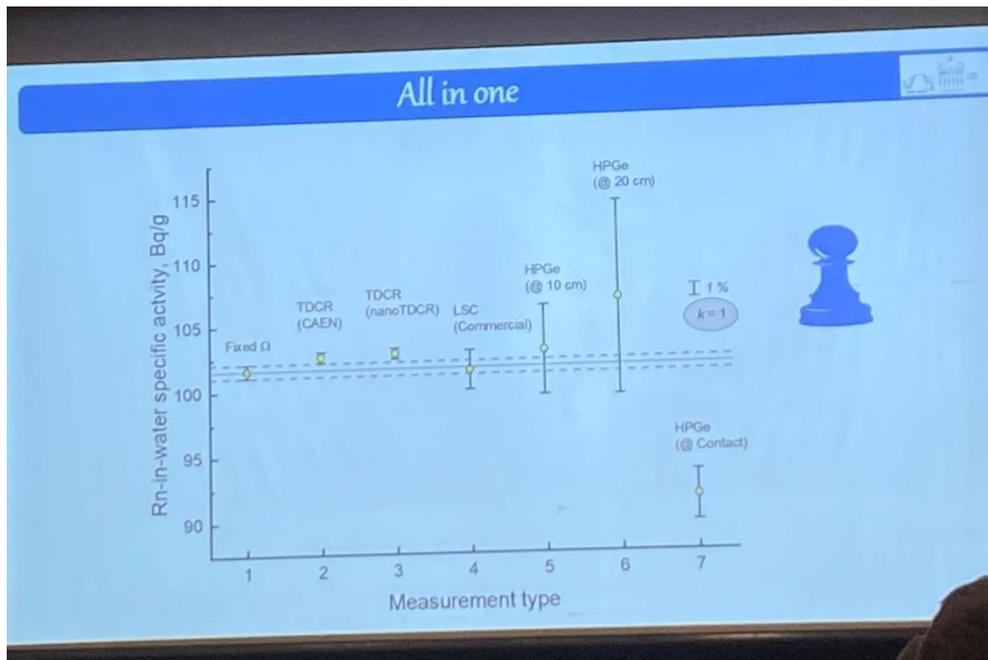


圖 23：法國 LNHB 使用 DSA、TDCR、LSC、HPGe 所有測得活度濃度之比較

- (2) 氚可以氣態(HT)、液態(HTO)或有機結合的氚(Organically Bound Tritium, OBT)等多種形式存在，並融入生物體（植物、動物、人類）中，測量各種形式的氚是環境風險評估的重要關鍵，目前多數國家有進行大氣、海水排放、河川排放的氚監測，卻仍很少有國家在量測 OBT。羅馬尼亞的

Cernavoda 核電廠，將 OBT 之分析納入補充監測計劃，此對對環境中的氬分佈和公眾劑量的評估非常重要。Cernavoda 核電廠的環境控制實驗室將持續參與 OBT 國際聯盟和 Candu Owners Group 的國際比對活動，以持續改進 OBT 分析方法。

8. 射源製備技術 (Source Preparation Techniques)

場址輻射特性評估為核設施除役的關鍵步驟，過程中使用的污染偵檢器須以適當的表面參考射源，根據射源的粒子通量或單位面積活度 (Bq/cm^2) 進行校正。目前市面上符合 ISO-8769 規範 (表面污染偵檢器參考射源) 的標準射源僅由鋁製成、表面積限制在 150 cm^2 以內，無法代表除役工作中實際會遇到的污染或活化表面，實際上 ISO-8769 規範與除役的應用並沒有很大的關聯。法國正研究比商業射源更大、低輻射自吸收、能夠靈活應用、接近退除役場址污染表面的可追溯 α 、 β 射源。現在的商業射源是由核種吸附在鋁表面上製造，法國研究目標是在受質 (Substrate) 表面進行嫁接、產生強化學鍵，亦即，以表面官能化物質 (Surface Functionalization) 連結受質與放射性核種。目前已研究出兩種受質：一為可塑形成複雜形狀的聚合物表面 (polymeric sources)、另一為能和 ISO-8769 比對的鋁箔。表面官能化化合物的一端可以和放射性核種結合，而另一端的自由官能基可以嫁接到鋁上，可嫁接到鋁基質的雙官能基化合物 (bi-functional compounds) 有三：氧化錳 (Manganese oxide)、氧化鉻 (Chromium oxide)、磺化 (Sulfonation Treatment)。最後使用銻-152 (Eu-152) 進行放射性核種結合，因為三價 Eu 是三價錒系 (例如 Am-241) 的優秀化學類似物。而液體閃爍計數與放射自顯影術 (Autoradiography) 可以檢查嫁接表面和射源的均勻性。

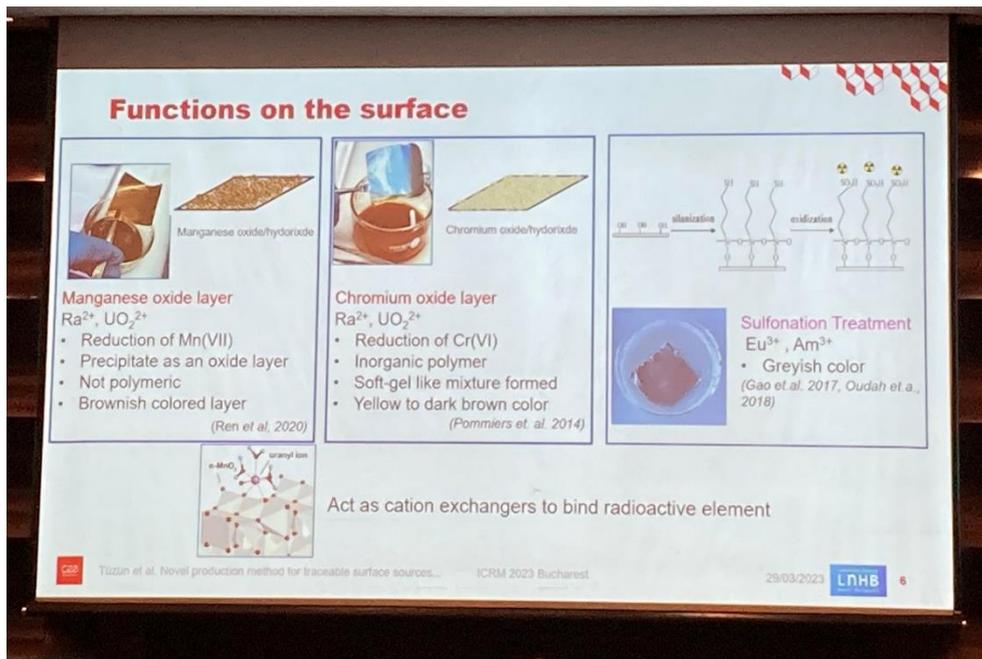


圖 24：可嫁接到鋁基質的雙官能基化合物

9. 液體閃爍量測技術 (Liquid Scintillation Counting Techniques)

- (1) Ac-225 是 α 標靶放射治療的新興核種，波蘭的 POLATOM 放射性同位素中心開發一基於 Kossert (2014) 等人之研究、使用 TDCR 計數器量測 Ac-225 絕對活度的方法，並於會議中詳細介紹如何用 Kossert 之方法(圖 25) 計算出 Ac-225 衰變鏈處於放射平衡時，每個衰變分支的計數效率及所有需要的參數。 β 衰變分支的理論計數效率使用自由參數模型計算、 β 能譜的形狀由 BetaShape 程式計算、在 T 與 D 符合頻道中的總計數效率 $\varepsilon_{T, total}(\lambda)$ 、 $\varepsilon_{D, total}(\lambda)$ 由 MICELLE2 和 MetroActivityLSC 程式計算。Ac-225 溶液的等效活度最終測量結果 (75080 ± 210 kBq 不確定度 0.28%) 被送至 BIPM 的 SIR 進行比對 (BIPM.RI(II)-K1.Ac-225)，量測不確定度與德國 PTB 於 2019 年所得之結果 (74520 ± 200 kBq，不確定度 0.27%) 一致。另外，POLATOM 使用 TDCRG 計數器 (配置了額外加馬偵檢器的 TDCR 計數器) 對 Ultima Gold 閃爍體中的一 Ac-225 射源進行半衰期測量，最終結果為 9.9150 ± 63 天，與 Pommé (2012) 等人： 9.920 ± 3 天、Kossert

(2020) 等人：9.9179±3 天之結果相似。

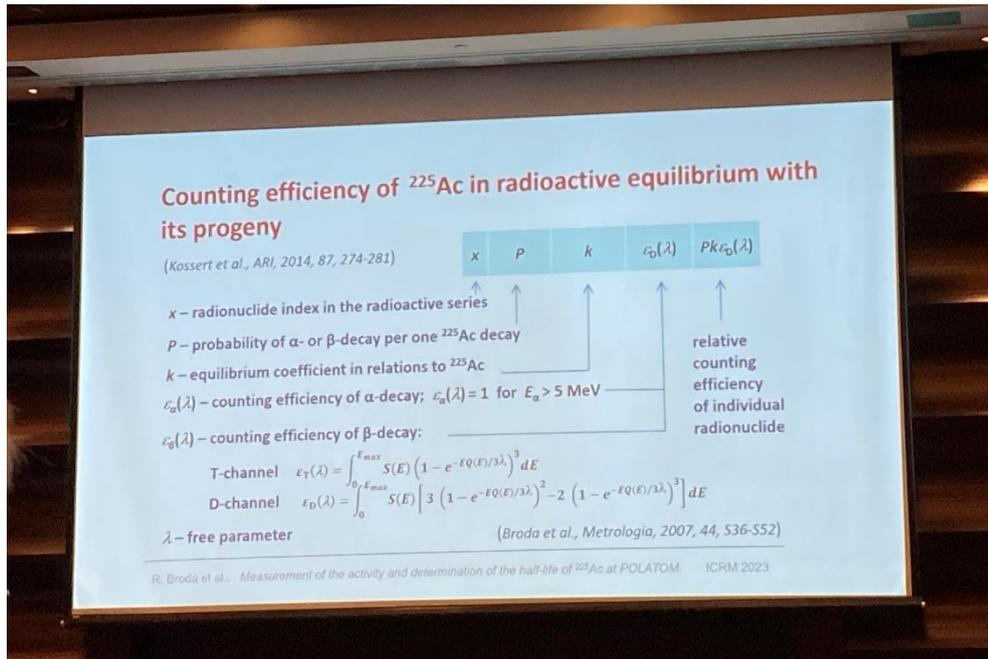


圖 25：以 Kossert 等人的方法所需計算的所有參數

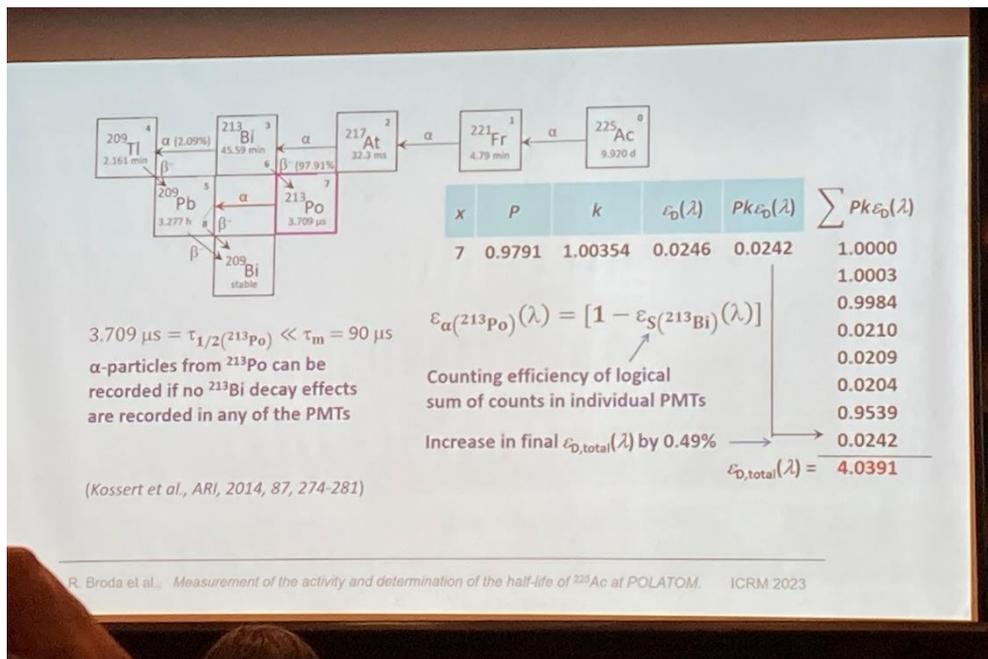


圖 26：計算 Ac-225 衰變其中一支的計數效率範例

- (2) 加拿大國家研究院 (National Research Council Canada, NRC) 使用其 TDCR 系統進行 Ac-225 之標準化。計數效率根據 Kossert (2020) 等人研究，假設 α 衰變的計數效率為 100%， β 衰變則使用 MICELLE2 蒙地卡羅計算、

計數效率約為 500%，活度濃度的相對不確定性為 0.25%，與二次標準的 γ 能譜測量、蒙地卡羅模擬的 Vinten 游離腔結果一致。另外，使用游離腔和液態閃爍技術進行 Ac-225 的半衰期測量，NRC 量測結果為 9.909 ± 6 天；由於德國 PTB 發表之半衰期約 9.918 天、歐洲聯合研究中心 (Joint Research Centre, JRC) 發表之半衰期約 9.92 天，DDEP 之半衰期建議值則為 10.0 ± 1 天，NRC 認為 DDEP 是時候該進行 Ac-225 之半衰期更新。

- (3) 液體閃爍量測技術下一階段的發展，主要還是持續在 CIEMAT / NIST 效率追蹤 (CIEMAT/NIST efficiency tracing) 及三重對二重符合比率 (TDCR) 相關之技術發展方面。目前歐洲透過 SPARTE 計畫 (Scintillating Porous Architectures for Radioactive gas Detection Project)，使用多孔式閃爍偵檢體及三重對二重符合比率方法為基礎，發展低活度濃度放射性氣體 (主要針對純貝他之放射性核種，例如 H-3、Kr-85 等) 的新偵測方式。SPARTE 計畫主要採用高產率的無機閃爍體 (inorganic scintillator) 進行偵檢，現階段候選的材質有金屬有機架構 (metal organic framework, MOF) 及無機氣凝膠閃爍體 (inorganic aerogel scintillator, IAS) 等兩種，其好處是較不會有吸收待測氣體的問題。其中金屬有機架構 (圖 27) 的通透性高、可容納較多氣體、型態較固定、且發光率高。以往研究過的兩種金屬有機架構：奈米粉末的 UNIMIB 及單晶體的 CEA，雖然可以偵測放射性氣體並具有多項優點，但其粉末太細使用上較為困難，經評估較不適合用在計量相關應用上，現改以研究無機氣凝膠閃爍體 (圖 28)，使用以 YAG:Ce 膠體溶液作為基底的閃爍體，來作為偵測放射性氣體的媒介。

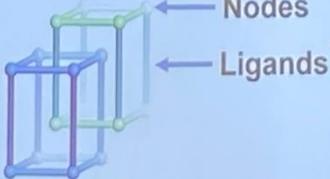
Current status and overview – MOF

MOF : Metal Organic Framework

Metal Nodes: heavy metal oxide clusters

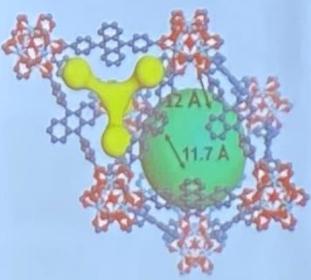
Ligands: conjugated scintillating organic chromophores

- High porosity
- High gas absorption capacity
- Controlled morphology
- High scintillation yield



Nodes

Ligands



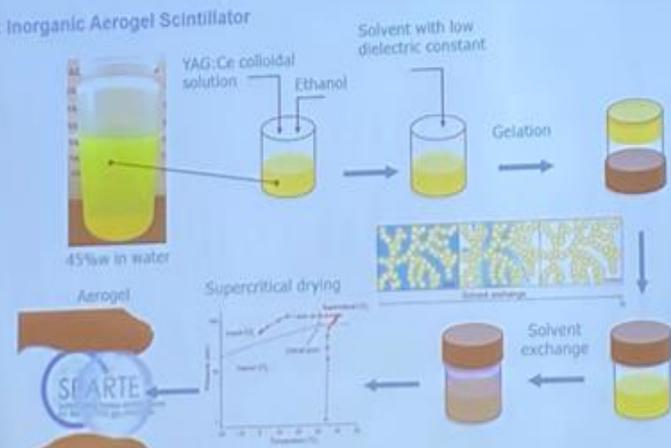
→ Both nodes and ligands are active elements

Development of a portable device for primary measurement of radiopharmaceuticals volume activity | ICRM 2023 Romania
27/03/2023
6

圖 27：金屬有機架構

Current status and overview – IAS

IAS : Inorganic Aerogel Scintillator



YAG:Ce colloidal solution (45%w in water)

Ethanol

Solvent with low dielectric constant

Gelation

Solvent exchange

Supercritical drying

Aerogel



Development of a portable device for primary measurement of radiopharmaceuticals volume activity | ICRM 2023 Romania
27/03/2023
8

圖 28：無機氣凝膠閃爍體

10. 核子衰變數據 (Nuclear Decay Data)

(1) 法國-LNHB 的 Sylvain Leblond 蒐集 Cs-137 衰變研究的所有文獻，並遵循 DDEP 之評估程序，對 Cs-137 的衰變模式全面重新評估。首先從所有文獻中，選擇結果最穩固的六篇（圖 29）進行 Cs-137 之半衰期分析，最終得半衰期建議值為 30.018 ± 0.022 年。另外也提出了經過文獻評估後修訂的 β 衰變分歧比、662 keV 的 γ 躍遷機率。所有數據與最新 2006 年的 DDEP、2007 年的評估核子數據架構文件 (Evaluate Nuclear Data Structure File, ENSDF) 之比較結果如圖 30，根據比較結果 Sylvain 認為需要用額外的測量來進行 Cs-137 的半衰期和分歧比更新。

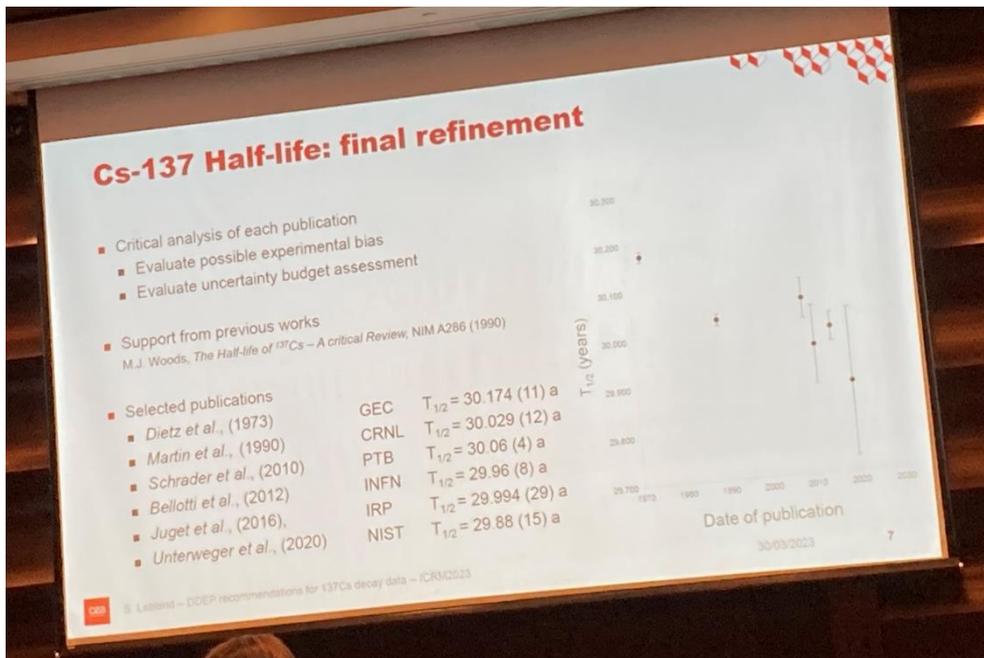


圖 29：法國 LNHB 之 Cs-137 半衰期評估所篩選出的文獻

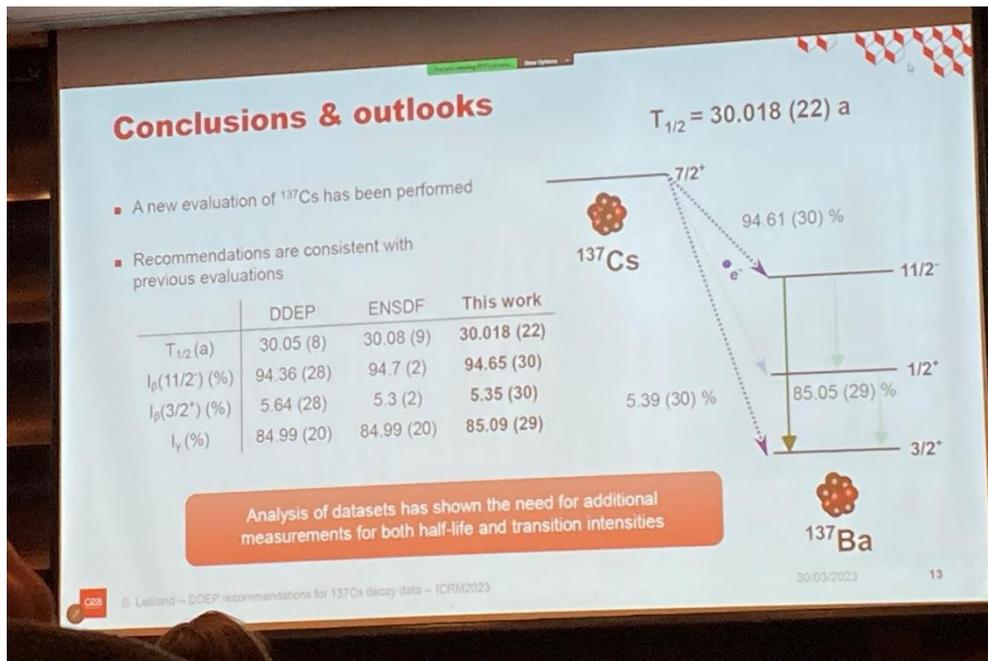


圖 30：法國 LNHB 之研究建議值與 DDEP、ENSDF 之比較

- (2) 由於過去關於鎂-68 (Ga-68) 的半衰期研究數據集差異高達 0.29%，為提高 Ga-68 半衰期的準確性和精確度，英國 NPL 進行新的半衰期測量，以兩個二級標準游離腔偵檢器和高純度鍍加馬能譜儀測量 Ga-68 樣品超過 15 個半衰期，最終得半衰期為 67.801 ± 43 分鐘，與 NPL 在 1971 年所得 67.80 ± 8 分鐘以及目前的評估半衰期 67.83 ± 20 分鐘呈一致。

11. 低階放射性活度量測技術 (Low Level Radioactivity Measurement Techniques)

- (1) 因應福島核災，國際原子能總署 (IAEA) 於摩洛哥的海洋環境實驗室 (Marine Environment Laboratories, MEL)，以提高大氣氣體溶膠放射性核種之檢測能力、實現更低的最低可測活度 (MDA) 為目標，計畫裝置一高流量率取樣器，以優化計數幾何 (counting geometric)，並作為 IAEA 低階加馬能譜實驗室的低背景高解析度偵檢器。2016 年，MEL 屋頂上裝置的高容積空氣取樣器 (Senya JL-900 Snow-White high-volume air sampler)

開始運行，進行長期不間斷地取樣，並從當地氣象站收集完整的氣象數據進行比較。空氣取樣器內有玻璃微纖維濾層（Glass microfiber filter Whatman GF/A），具有良好負載能力、高流速、可保留精細顆粒。空氣取樣器針對不同的應用優化取樣測量參數，6 年來偵測出天然核種 Be-7、Na-22、Pb-210，人工核種 Cs-137，偶爾測量到 Ru-106、I-131。未來計畫繼續以 Senya Snow-White 取樣，研究 Be-7 與 Na-22 比值以作為大氣示蹤劑。另外，IAEA 的環境放射性測量分析實驗室（Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity, ALMERA）2017~2022 年都有舉辦不同主題的能力試驗，2023 年也將持續辦理。

- (2) 低階放射性活度量測技術下一階段的發展，主要著重在質譜儀（Mass Spectrometry）於計量學上的應用，及應用低階放射性活度量測的相關技術，協助進行氣候變遷之研究等。在質譜儀於計量學的應用方面，國際度量衡局（BIPM）之游離輻射諮詢委員會（CCRI） section II，於 2015 年開始針對單原子計數（Single-atom Counting）的相關議題進行討論。由於單次衰變來自於單個原子，而每個原子皆搭配有一衰變的機率，使用單原子計數時可逐原子進行計數，以得到放射核種衰變的相關資訊。經由此一議題討論作為契機，游離輻射諮詢委員會 section II 開始與物量諮詢委員會（Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology, CCQM）合作，定期舉辦專題討論會，討論化學領域中經常使用的質譜儀相關技術，應用在量測放射核種衰變、決定核種半衰期及分支比（Branching ratio）的量測上可以有如何的貢獻；並討論如何將質譜儀量測獲得的質量資訊，和放射核種活度的量測資訊相連結（圖 31）。質譜儀的量測具有高精密度，且待測物不需具備高活度即可量測等優點；但其設備費用較為高昂，且亦需有具備相關專業知識的專業人員尚可進行操作。

How We Got Here (Long-Lived Isotopes)

The diagram illustrates the progression of long-lived isotope counting. On the left, a photograph of a detector is labeled 'Each decay counted'. A large blue arrow points from this image to a central question mark. Another large blue arrow points from the question mark to a photograph of a laboratory setup, labeled 'Every atom counted'.

- Applications in environmental measurements, nuclear forensics, site decommissioning, decay data, reference materials, etc., especially for long-lived isotopes
- Single-atom counting for radionuclide metrology presented at CCRI(II) meeting in 2015 (part of the CCRI strategy as medium-term action)
- Joint interest CCRI (Section II) and CCQM (Inorganic Analysis WG); “reintroduced” in CCRI(II) meeting 2021

圖 31：CCRI section II 與物量諮詢委員會之相互合作

最近一次游離輻射諮詢委員會 section II 與物質數量諮詢委員會專題討論會，於 2023 年 2 月 14 日至 16 日舉辦。討論內容包含目前各實驗室的發展狀況、質譜儀於放射核種計量學的應用、及可應用的領域探討等（圖 32）。相關議題及技術討論亦分享在國際度量衡局游離輻射諮詢委員會的網站中（CCRI Webinar “Use of Mass Spec in Radionuclide Metrology”）。

Workshop Scope (NIST logo)

Three Days

- Current activities (presentations from 6 institutions*)
- Enabling mass spec for radionuclide metrology and future
- Stakeholder needs and gaps

Dynamic Discussions

- Obvious interest, stakeholder driven
- Specificity, selectivity, speed
- High need for reference materials, but which?

Tutorials with background information to support discussions are found at <https://www.bipm.org/fr/committees/ccri/lwg/ccri-scqm-ws/2023-02-14>

*Neither NPL nor NIST

圖 32：CCRI section II 與物量諮詢委員會專題討論會討論內容

游離輻射諮詢委員會 section II 的成員中，目前具有質譜儀相關量測能力的包括捷克計量研究所 (Czech metrology institute, CMI)、羅馬尼亞 Horia Hulubei 國家物理與核子工程研究開發研究所 (IFIN-HH)、韓國標準科學研究院 (KRISS)、法國 Henri Becquerel 國家實驗室 (LNE-LNHB)、美國國家標準暨技術研究院 (NIST)、德國聯邦物理技術研究院 (PTB)、英國國家物理實驗室 (NPL)、及阿根廷國家原子能委員會 (CNEA) 等國家研究機構；此外，澳洲的核子科技組織 (ANSTO)、加拿大國家研究院 (NRC)、及芬蘭輻射與核子安全機構 (Radiation & Nuclear Safety Authority, STUK) 和斯洛維尼亞 Jožef Stefan 研究所 (Institut "Jožef Stefan", JSI) 等機構，皆對此領域表示參與之興趣 (圖 33)。

Laboratory	With MS Capability for RM	Potentially interested in MS for RM Capability
ANSTO		x
CMI	x	
IFIN-HH	x	
KRISS	x	
LNE-LNHB	x	
NIST	x	
PTB	x	
NPL	x	
CNEA	x	
NRC		x

Additional labs with potential interest

NMIs/DIs

- STUK (Finland)
- JSI (Slovenia)

Other institutions

- BAM (Germany)
- TÜBİTAK (Türkiye)
- LGC (UK)
- DoE labs (USA)
- Others?

圖 33：具質譜儀量測能力之游離輻射計量機構

- (3) 多數人聽到氡氣便聞之色變，從輻射防護的角度而言，放射性氡氣在室內累積確實有危害健康的風險，然而，環境中的氡氣實際上可以做為溫室氣體的示蹤劑，以研究大氣過程、改進大氣傳輸模型或間接探索溫室氣體通量。歐洲計量創新與研究計劃 (EMPIR) 的 traceRadon 致力於將

氣候研究與輻射防護兩大領域的結合，其四個工作項目目標簡述如下：
開發室外低階氡活度濃度量測之可溯性的標準方法、提高氡通量測量的
準確性、使用歐洲放射預警網路劑量學與能譜數據支持的氡活度通量，
來驗證目前之氡通量模型和數據、為氣候變化研究和輻射防護建立動態
室外氡濃度和氡通量圖。德國 PTB 在工作小組會議中展示了 traceRadon
目前的研究成果，例如：新的活度標準方法、新的室外水平校正方法、
將測量活度範圍從 MBq 擴展到小至數個 Bq、野外量測的新設備、野外
量測的比對活動、新的氡氣通量地圖等。

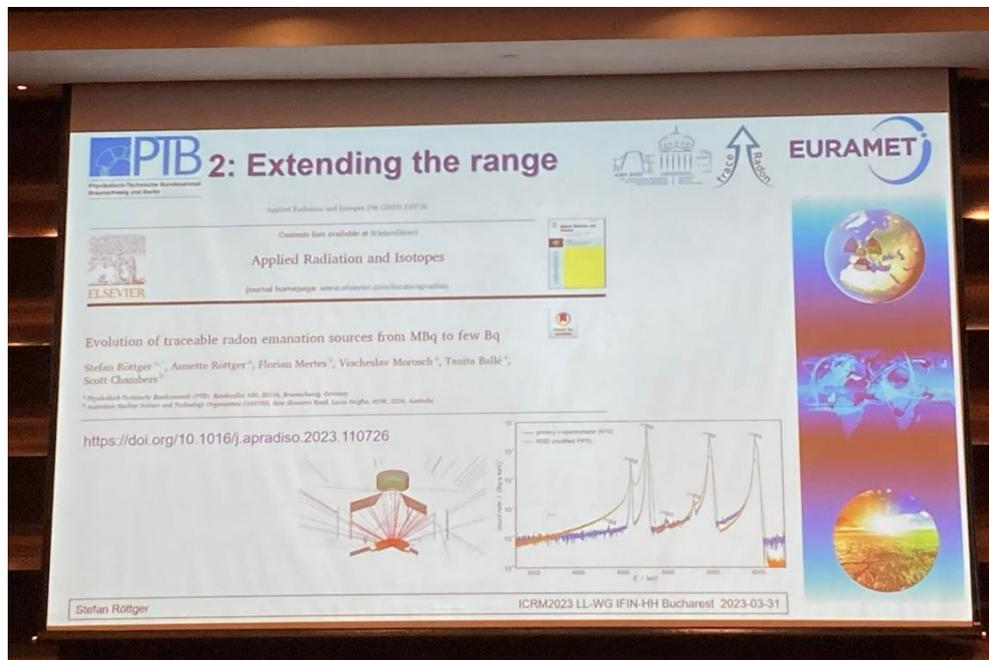


圖 34：traceRadon 研究成果—擴展活度量測範圍

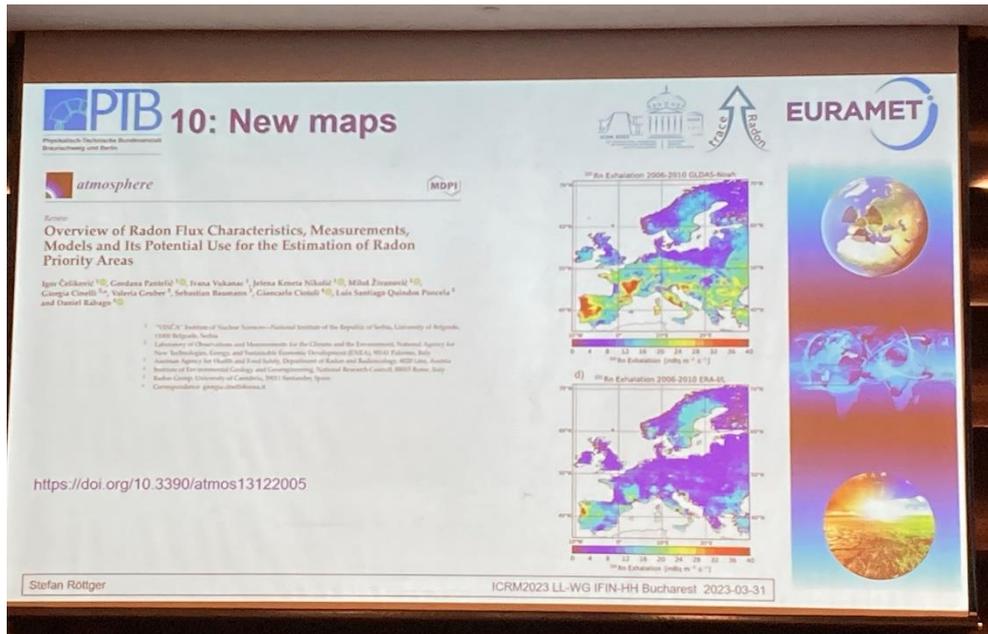


圖 35：traceRadon 研究成果—建立新氡氣通量地圖

（三） IFIN-HH 與 ELI-NP

羅馬尼亞國家物理與核子工程研究與發展研究院（IFIH）前身為數個不同領域的物理研究所，最初由羅馬尼亞著名的核子物理學家—霍里亞·胡魯貝（Horia Hulubei）於 1949 年領導成立，為羅馬尼亞最大的研究學院與歐洲最重要之科學中心之一個。IFIN-HH 所涉略的研究領域十分廣泛，包括：核子物理、粒子物理、天文物理學、放射性同位素之研究與應用、技術性輻射照射、核設施除役、核廢料處理、輻射防護等。該研究院擁有各種設施，例如：范德格拉夫加速器（Van de Graaff generator）、迴旋加速器、多用途輻射照射中心、放射性廢棄物處理場（以及國家放射性廢棄物處置場）等。

IFIN-HH 目前的核心設施為極限光源基礎設施暨核子物理設施（Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics facility, ELI-NP），由歐盟「極限光源基礎建設」跨國研究計畫支持，此項目自 2013 年正式啟動，至 2020 年開始進行實驗，首次將高功率雷射與核子物理兩大領域結合，為全球最先進的光核物理研究設施、規模最大的超高強度雷射系統之一，是為全球科學界服務的尖端基礎設施。



圖 36：ELI-NP 設施建築物外觀

（圖片取自 IFIN-HH 官網：<https://www.nipne.ro/>）

ELI-NP 包含一極高強度的超短脈衝雷射系統與一可調式加馬射束系統，雷射系統具有兩個 10 PW (10^{16} W) 的雷射手臂，而加馬射束系統目前還在建置中。在基礎研究上可進行雷射加速機制之研究、雷射與加馬射束相互作用的真空特性和所產生的粒子、核子結構與天文物理學研究、高功率雷射與不同型態（固態、液態、氣態、電漿）物質的相互作用等，民生應用方面可用於特殊材料的非破壞檢驗、工業層析成像、藝術品元素分析、加速器組件開發、醫學應用的放射性同位素等。過去兩年內，ELI-NP 已使用高達 1 PW 峰值功率的雷射脈衝，成功產生出高達 2 GeV 的電子射束、40 MeV 的質子射束和制動輻射。

此次參訪，IFIN-HH 工作人員分別帶我們參觀 ELI-NP 的能譜與偵檢器實驗室 (Spectroscopy and Detector Laboratory)、10 PW 實驗區域 (10 PW Experiment Area)、ELI-NP 之控制室、加馬驅動實驗部門的兩個實驗區域。能譜與偵檢器實驗室主要為高純鍺 (HPGe) 偵檢器、閃爍偵檢器等偵檢器之維護與各偵檢器的功能測試。10 PW 實驗區域可分為固體靶與氣體靶兩區，主要進行雷射-物質的相互作用特性、高功率雷射的粒子加速器、電漿核反應、核天文物理學與核融合、輕子與反輕子等研究。加馬驅動實驗部門的兩個實驗區域分別各有一座重要裝置，鍺偵檢器陣列 (ELI-NP Array of Germanium Detectors, ELIADE) 與高於中子閾值加馬 (ELI Gamma Above Neutron Threshold, ELIGANT)。ELIADE 主要由數個 HPGe 偵檢器和 LaBr₃ 偵檢器組成，用於核螢光共振 (Nuclear Resonance Fluorescence, NRF) 實驗；ELIGANT 可再分為 ELIGANT-GN (Gamma Neutron) 與 ELIGANT-TN (Thermal Neutrons)，用於中子閾值以上的核子結構和天體物理豐度、 (γ, n) 反應等研究。

三、心得

1. ICRM 會議是我國國家標準與國際接軌的重要會議，持續參與或注意此會議之動態，可以收集游離輻射計量標準發展的最新資訊與方向。

本所國家游離輻射標準實驗室於本次 ICRM 會議的品質保證與能力試驗主題發表壁報論文兩篇，題目為：Inter-laboratory comparison of radionuclide in food in Taiwan 及 Proficiency Test for Low and Intermediate Level Radio-assay Laboratories in Taiwan for one decade。第一篇是關於國內食品輻射實驗室之放射性食品檢驗比對活動、第二篇是關於國內放射實驗室的中低活度核種能力試驗。

ICRM 會議中與國家游離輻射標準實驗室發表主題相關的論文有一篇，是由國際原子參考物質機構（The International Atomic Reference Material Agency, IARMA）所發表，關於過去十年 IARMA 舉辦的能力試驗回顧，概述如下：IARMA 是一家小型的能力試驗供應商，成立於 2012 年，創立首十年所提供的能力試驗樣品可分為四個主題—環境放射性核種（Environmental RADnuclides, ERAD）、環境氚（Environmental TRITium, ETRIT）、環境總阿伐與貝他（Environmental GROSS alpha and beta, EGROSS）、環境碳-14（Environmental CARbon 14, ECARB），提供的樣品包括自來水、地下水、海水、土壤、乾草、海草、香菇等，樣品中會有的待測核種有 K-40、Co-57、Cs-134、Eu-152、Pb-210、Th-232、Am-241 等，評估指標有偏差、真實度、精確度、不確定性估計、z 值等，未來十年 IARMA 的願景為提供新的樣品與核種、舉辦培訓與會議、與其他能力試驗供應商合作等。

2. **本次會議指出氡氣是近年各國的研究重點，建議關注相關消息與國際接軌。**

本次會議與 Rn-222 相關的論文高達 10 篇，內容包括 Rn-222 的標準建立、偵檢器比對活動、高靈敏度檢測儀器提升靈敏度的方法或開發等，更不用說 traceRadon 此大項目相關的論文就有 3 篇，由此可見氡氣是近年各國的研究重點。

自 2018 年韓國爆發負離子床墊超標事件後，本所除了配合原能會進行含天然放射性物質商品之後市場調查以外，天然放射性物質檢測分析暨安全評估實驗室已參照美國國家標準暨技術研究院（NIST）氡氣原級標準量測系統架構，完成國內第一套可應用於標準氡氣射源活度標定以及氡氣量測儀器校正程序之氡氣標定與校正系統建置，並持續建立國內氡氣分析儀器之量測追溯鏈。

3. **本次會議顯示韓國、日本及澳洲等亞太地區各國之技術，值得我國參考借鏡。**

由本屆亞太區出席人員人數及投稿狀況可以發現，韓國不但是亞太區出席人數最多者，亦是發表數最多的國家，其次則為日本及澳洲。由此可見，韓國在放射核種的計量及應用上投注了相當之人力與資源，其技術發展已逐漸進入亞太區領先群，值得我們參考借鏡。

四、建議事項

1. 本所承擔游離輻射領域技術發展與計量最高量測標準任務的權責，應積極參與此一會議，以作為我國檢測技術精進與發展規劃之參考。

國際放射核種計量與應用會議為放射核種領域的一大盛事，國際上著名的國家計量機構，例如：法國國家 Henri Becquerel 實驗室 (LNHB)、英國國家物理實驗室 (NPL)、美國國家標準暨技術研究院 (NIST)、德國聯邦物理技術研究所 (PTB)、加拿大國家研究院 (NRC)、韓國標準科學研究院 (KRISS)、日本國家計量研究院 (NMIJ)、澳洲核子科技組織 (ANSTO) 等，皆派其成員參與此一盛會，發表論文進行技術交流，並互相更新實驗室發展現況。本所國家游離輻射標準實驗室身為我國游離輻射最高的計量機構，應積極參與此一會議，透過會議研討與實地參訪等，了解各國技術發展趨勢，以做為我國相關發展規劃之參考。

2. 會議指出核儀模組後端數據數位化及三重對二重符合比率方法已普遍成為各國家實驗室必備的基礎技術能力，建議應投入適當人力物力建立相關技術，並持續關注其他國家實驗室的發展情況，以與國際技術相接軌。

由本次會議發表之論文及相關技術交流可以發現，核儀模組後端數據數位化及三重對二重輻和比率方法已普遍成為各實驗室基本配備的技術能力。本所目前雖尚未具有前項技術能力，但本所國家游離輻射標準實驗室已購置一套應用三重對二重符合比率方法的商用量測系統，建議可根據實驗室規劃開發難測核種量測技術之進程，逐步投入相關資源建立並熟悉此一量測方法，並隨著此技術的發展，適時導入後端數據之數位化。此外，亦建議本所持續關注其他國家實驗室的相關發展，延伸未來技術能力之發展方向，以與國際技術相接軌。

五、附 錄

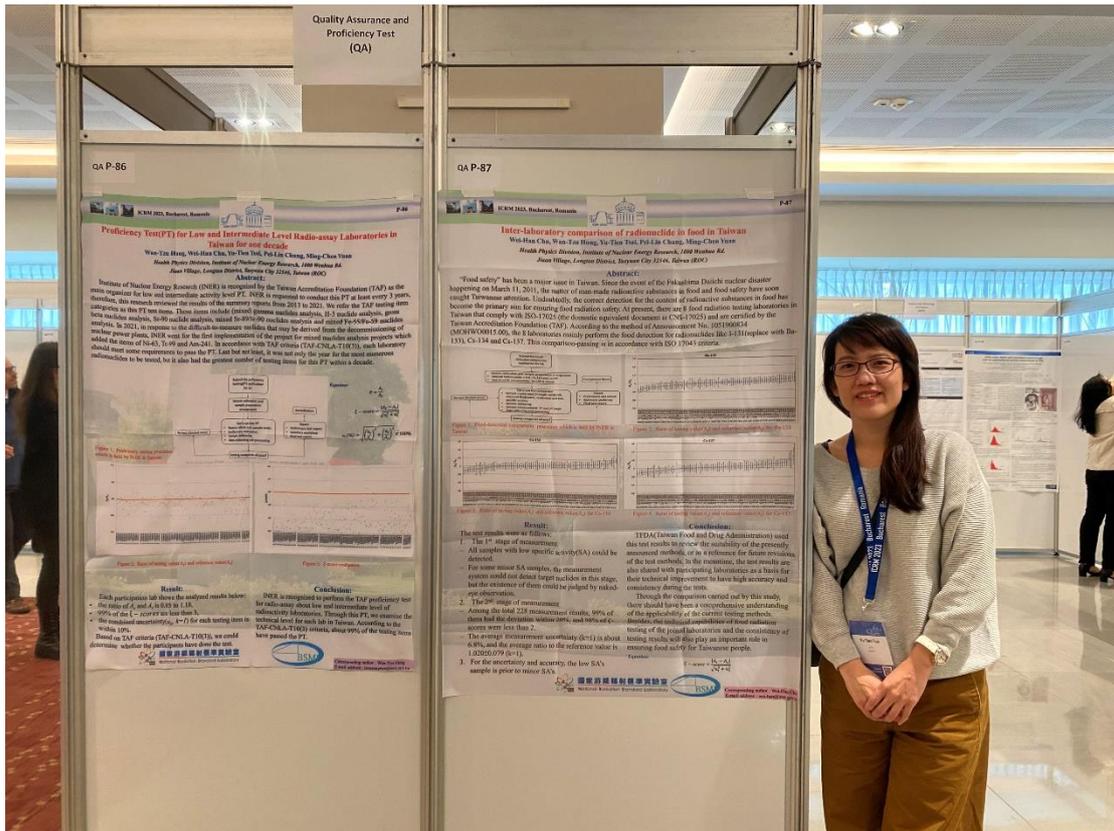
(一) 本次會議相關照片



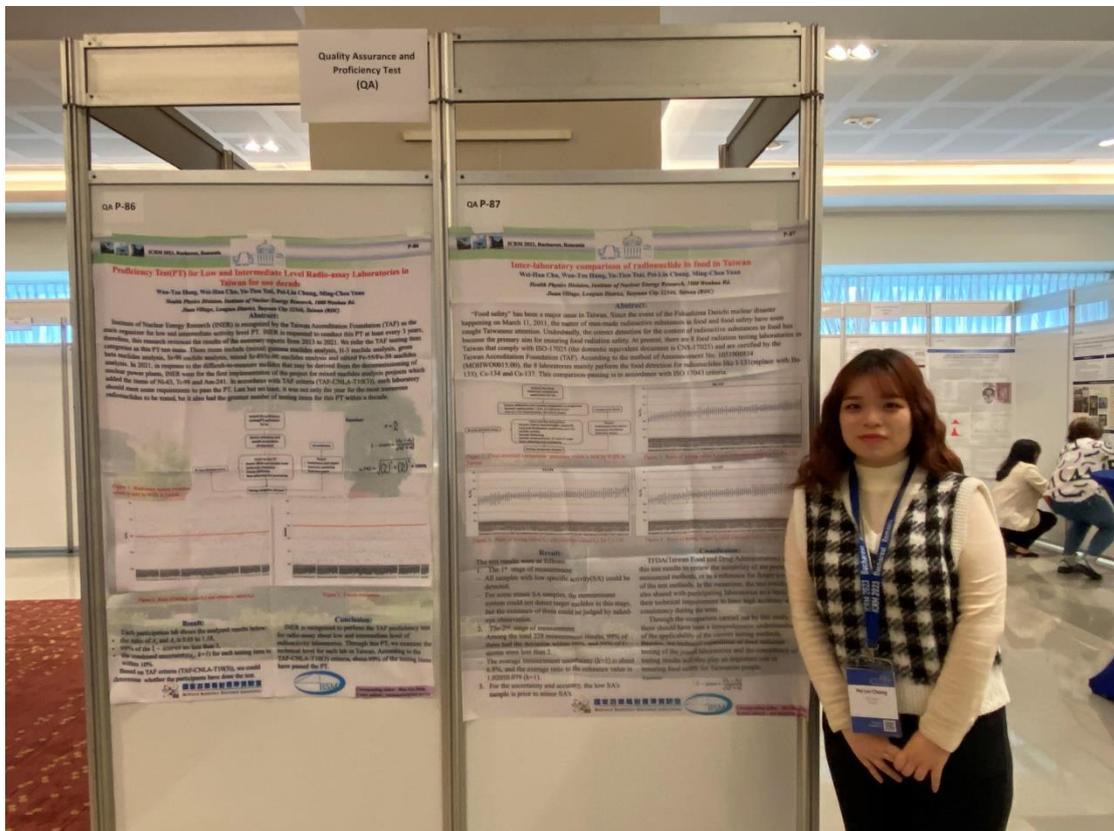
與會人員於 ICRM 會場團體合照



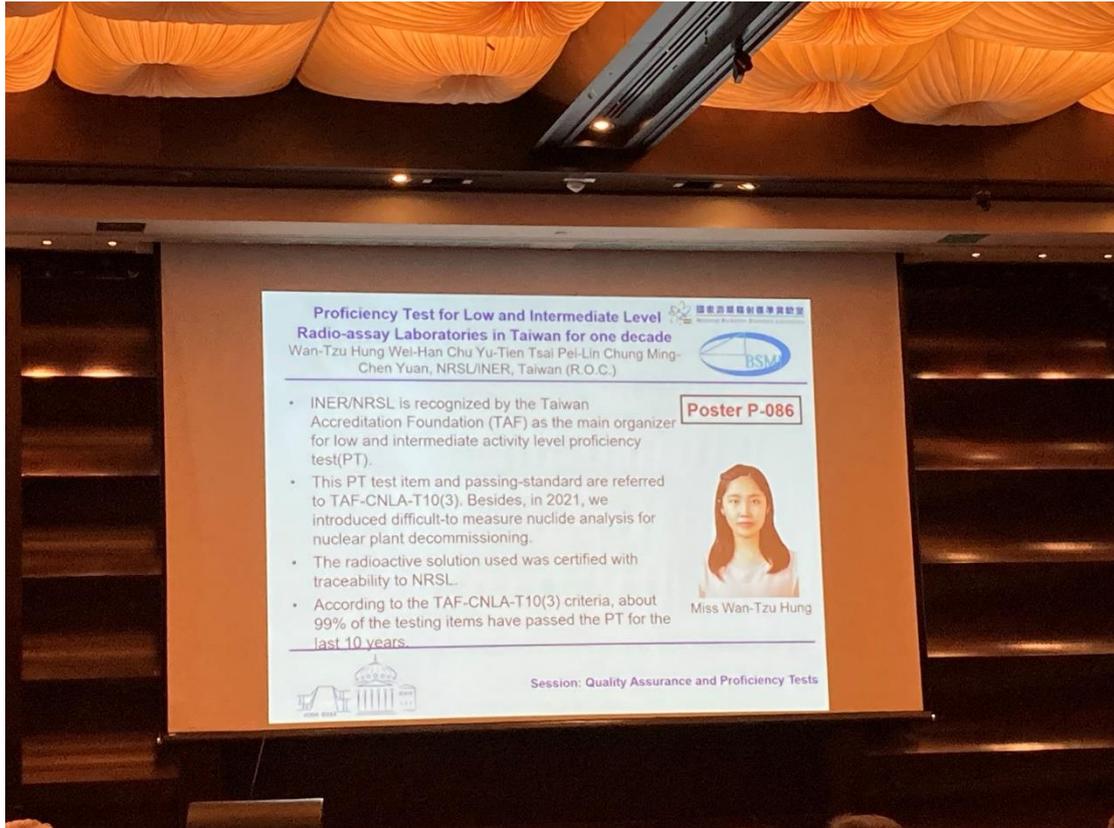
與會人員於羅馬尼亞雅典娜劇院前團體合照



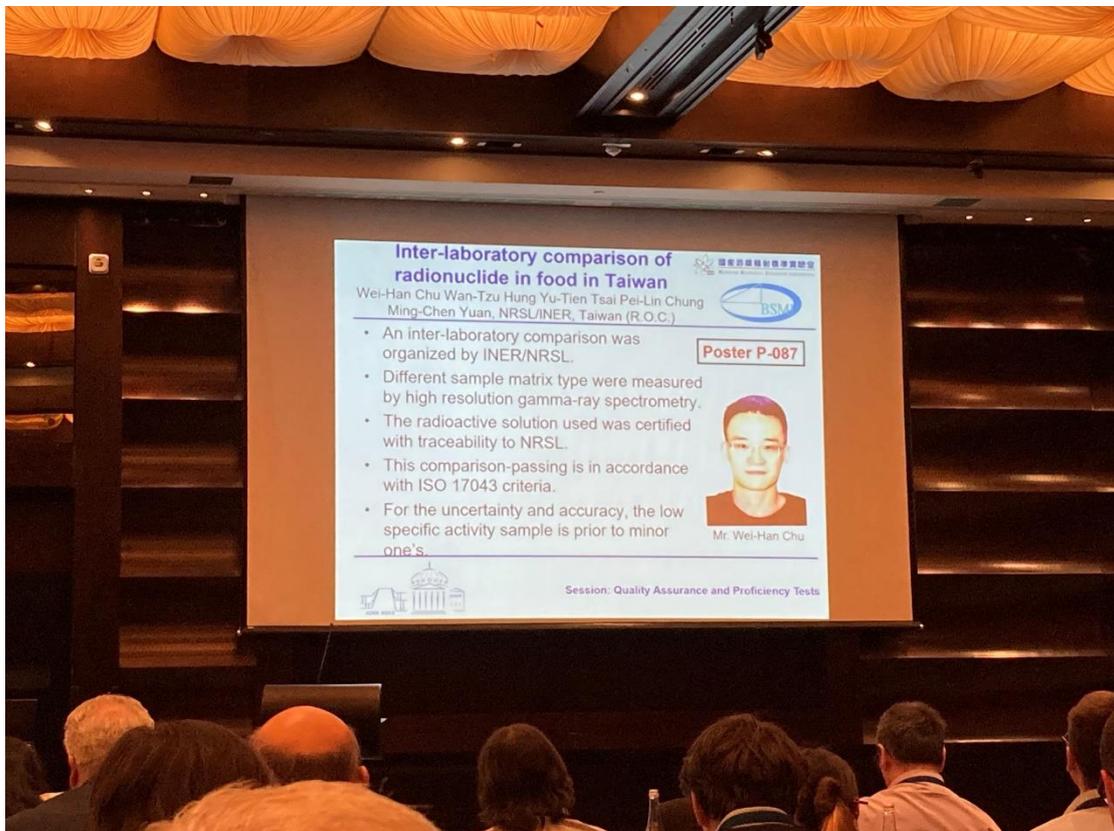
公差人員於壁報展示現場-1



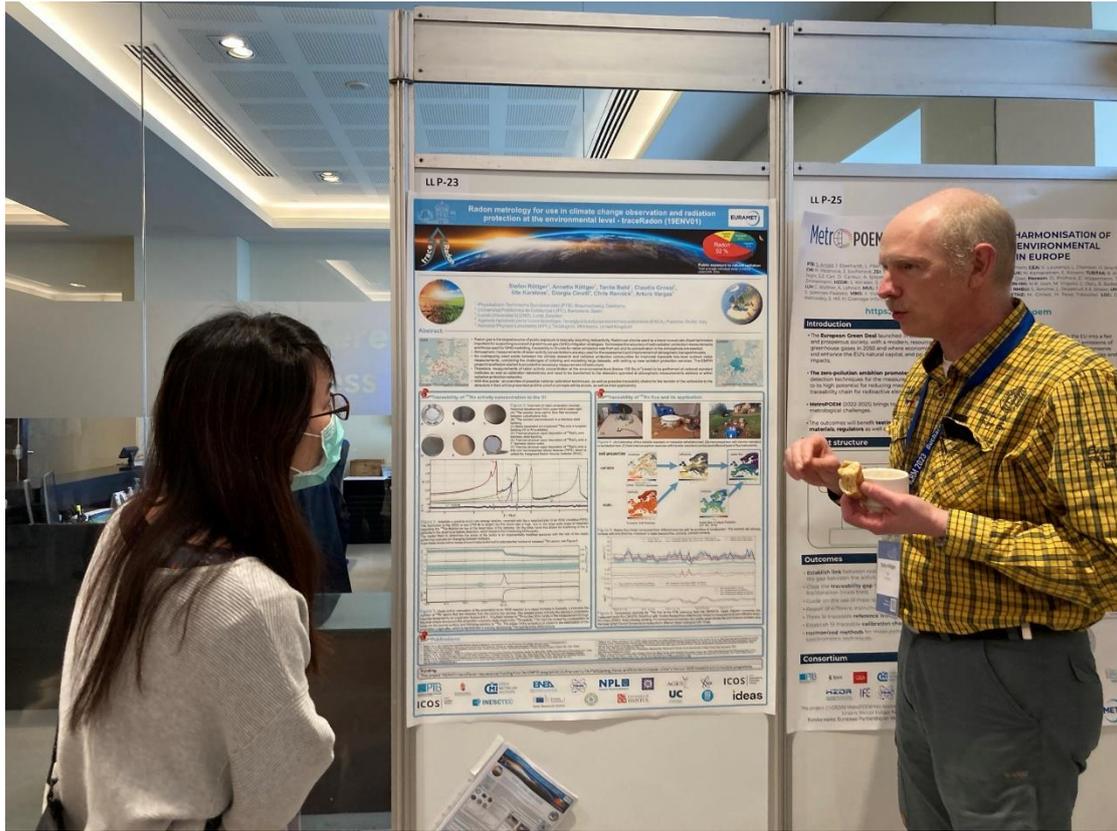
公差人員於壁報展示現場-2



會議上國家游離輻射標準實驗室發表之論文簡介-1



會議上國家游離輻射標準實驗室發表之論文簡介-2



於壁報展示會場和德國學者交流



輻射偵檢儀器廠商攤位



最佳壁報頒獎儀式（韓國 KRISS, Yoonhee Jung）



會議閉幕與 IFIN-HH 所有工作人員致謝

(二) 本次公差發表之壁報論文-1

Proficiency Test(PT) for Low and Intermediate Level Radio-assay Laboratories in Taiwan for one decade

Wan-Tzu Hung, Wei-Han Chu, Yu-Tien Tsai, Pei-Lin Chung, Ming-Chen Yuan

Health Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, 1000 Wenhua Rd.
Jiaan Village, Longtan District, Taoyuan City 32546, Taiwan (ROC)

Abstract:

Institute of Nuclear Energy Research (INER) is recognized by the Taiwan Accreditation Foundation (TAF) as the main organizer for low and intermediate activity level PT. INER is requested to conduct this PT at least every 3 years, therefore, this research reviewed the results of the summary reports from 2013 to 2021. We refer the TAF testing item categories as this PT test items. These items include (mixed) gamma nuclides analysis, H-3 nuclide analysis, gross beta nuclides analysis, Sr-90 nuclide analysis, mixed Sr-89/Sr-90 nuclides analysis and mixed Fe-55/Fe-59 nuclides analysis. In 2021, in response to the difficult-to-measure nuclides that may be derived from the decommissioning of nuclear power plants, INER went for the first implementation of the project for mixed nuclides analysis projects which added the items of Ni-63, Tc-99 and Am-241. In accordance with TAF criteria (TAF-CNLA-T10(3)), each laboratory should meet some requirements to pass the PT. Last but not least, it was not only the year for the most numerous radionuclides to be tested, but it also had the greatest number of testing items for this PT within a decade.

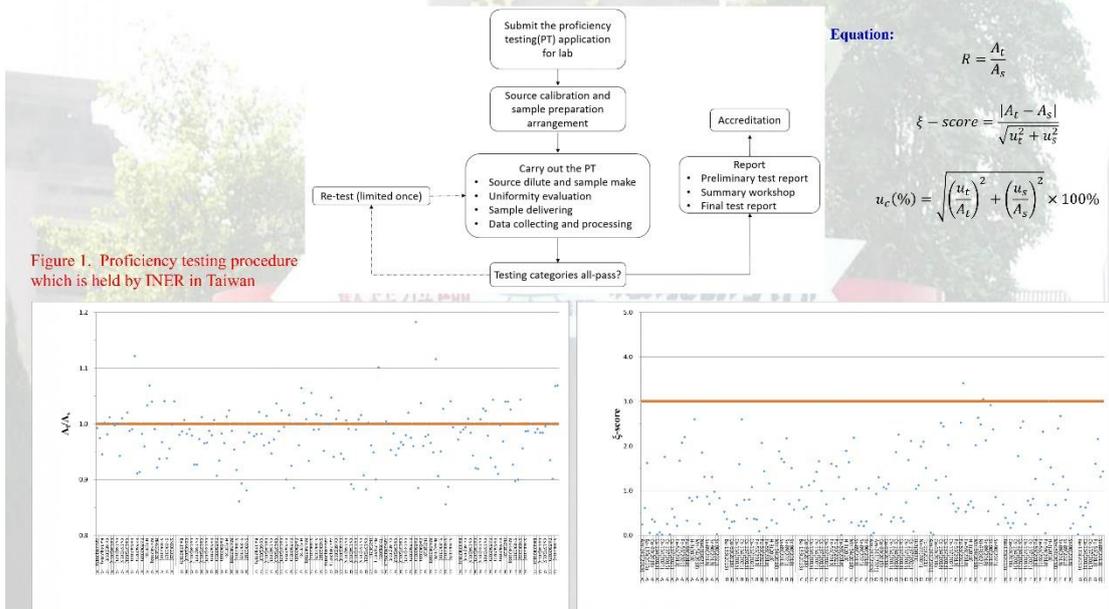


Figure 1. Proficiency testing procedure which is held by INER in Taiwan

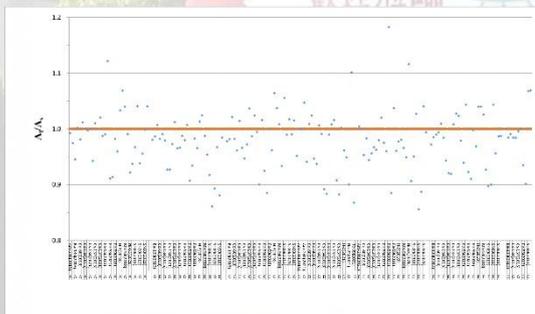


Figure 2. Ratio of testing value(A_t) and reference value(A_s)

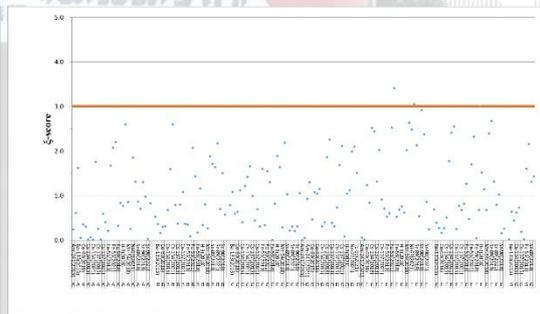


Figure 3. ξ -score evaluation

Result:

- Each participation lab shows the analyzed results below:
- the ratio of A_s and A_t is 0.85 to 1.18,
 - 99% of the ξ - scores are less than 3,
 - the combined uncertainty($u_c, k=1$) for each testing item is within 10%.
- Based on TAF criteria (TAF-CNLA-T10(3)), we could determine whether the participants have done the test.

Conclusion:

INER is recognized to perform the TAF proficiency test for radio-assay about low and intermediate level of radioactivity laboratories. Through this PT, we examine the technical level for each lab in Taiwan. According to the TAF-CNLA-T10(3) criteria, about 99% of the testing items have passed the PT.



Corresponding author : Wan-Tzu Hung
E-mail address : romanayaya@iner.gov.tw

Inter-laboratory comparison of radionuclide in food in Taiwan

Wei-Han Chu, Wan-Tzu Hung, Yu-Tien Tsai, Pei-Lin Chung, Ming-Chen Yuan

Health Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, 1000 Wenhua Rd.
Jiuan Village, Longtan District, Taoyuan City 32546, Taiwan (ROC)

Abstract:

“Food safety” has been a major issue in Taiwan. Since the event of the Fukushima Daiichi nuclear disaster happening on March 11, 2011, the matter of man-made radioactive substances in food and food safety have soon caught Taiwanese attention. Undoubtedly, the correct detection for the content of radioactive substances in food has become the primary aim for ensuring food radiation safety. At present, there are 8 food radiation testing laboratories in Taiwan that comply with ISO-17025 (the domestic equivalent document is CNS-17025) and are certified by the Taiwan Accreditation Foundation (TAF). According to the method of Announcement No. 1051900834 (MOHW0015.00), the 8 laboratories mainly perform the food detection for radionuclides like I-131(replace with Ba-133), Cs-134 and Cs-137. This comparison-passing is in accordance with ISO 17043 criteria.

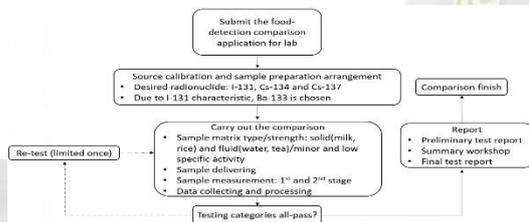


Figure 1. Food-detection comparison procedure which is held by INER in Taiwan

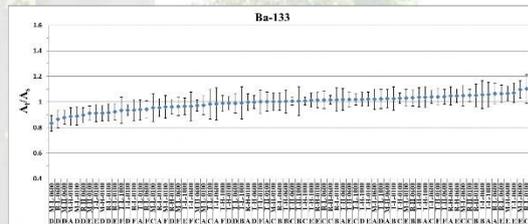


Figure 2. Ratio of testing value(A_t) and reference value(A_s) for Ba-133

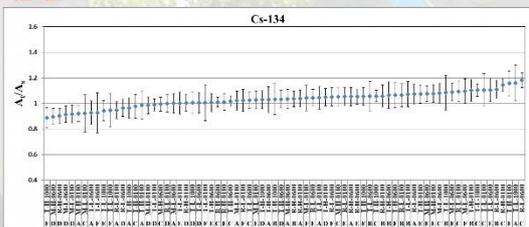


Figure 3. Ratio of testing value(A_t) and reference value(A_s) for Cs-134

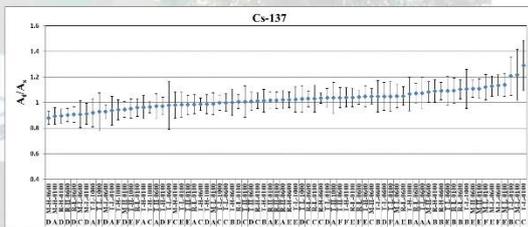


Figure 4. Ratio of testing value(A_t) and reference value(A_s) for Cs-137

Result:

The test results were as follows:

- The 1st stage of measurement
 - All samples with low specific activity(SA) could be detected.
 - For some minor SA samples, the measurement system could not detect target nuclides in this stage, but the existence of them could be judged by naked-eye observation.
- The 2nd stage of measurement
 - Among the total 228 measurement results, 99% of them had the deviation within 20%, and 98% of ζ -scores were less than 2.
 - The average measurement uncertainty (k=1) is about 6.8%, and the average ratio to the reference value is 1.020 ± 0.079 (k=1).
- For the uncertainty and accuracy, the low SA's sample is prior to minor SA's.

Conclusion:

TFDA(Taiwan Food and Drug Administration) used this test results to review the suitability of the presently announced methods, or as a reference for future revisions of the test methods. In the meantime, the test results are also shared with participating laboratories as a basis for their technical improvement to have high accuracy and consistency during the tests.

Through the comparison carried out by this study, there should have been a comprehensive understanding of the applicability of the current testing methods. Besides, the technical capabilities of food radiation testing of the joined laboratories and the consistency of testing results will also play an important role in ensuring food safety for Taiwanese people.

Equation:

$$\zeta - score = \frac{|A_t - A_s|}{\sqrt{u_t^2 + u_s^2}}$$



國家游離輻射標準實驗室
National Radiation Standard Laboratory



Corresponding author : Wei-Han Chu
E-mail address : wei-han@iner.gov.tw