

出國報告（類別：開會）

赴日本參加第七屆亞太放射化學研
討會議(7th Asia-Pacific Symposium
on Radiochemistry 2025)

服務機關：核能安全委員會輻射偵測中心

姓名職稱：尤建偉技正、陳俊豪技士

派赴國家/地區：日本

出國期間：114 年 9 月 13 日至 19 日

報告日期：114 年 12 月 11 日

摘要

本中心參加 2025 年亞太放射化學研討會 (Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, APSORC 2025)，討論包括放射性核種之化學分析技術、儀器分析及核種遷移行為等主題，係中心與國際放射化學領域交流與技術接軌之寶貴機會。國際趨勢顯示，放射性核種分析正朝向高靈敏度、快速化及自動化發展，應用範圍涵蓋海水監測、放射性廢液處理及核子事故後污染溯源等領域。在放射化學分析技術領域，以新型矽酸鋁吸附劑 (MAQ) 可顯著提升放射性銻 (銻) 之分離與測定效率，最低可偵測濃度達 0.001 Bq/L，頗具應用潛力；同時，SI 可追溯 (SI Traceability) 之銻-135 標準物質開發，使銻-135/銻-137 比值用於污染源鑑識依據；於放射性廢液處理技術上，聚矽酸鐵 (PSI) 混凝劑展現優良去污能力，有效移除放射性廢液中核燃料成分。儀器分析領域中，研究顯示加速器質譜 (AMS) 與多接收器感應耦合電漿質譜儀 (MC-ICP-MS) 在長半衰期核種分析上具備良好分析能力，而 β 能譜及自動化固相萃取技術則顯著提升短半衰期核種 (如：銻-90、氚-3) 監測效率。核種遷移領域，研究涵蓋放射性核種在多介質中具明顯交互作用與長期循環特性，如銻-137 在森林與水生環境中的再分佈、鈾 (Pu) 在沉積物中的穩定滯留、以及氚於海洋中的多介質遷移與食物鏈傳輸等。綜上，本次研討會顯示放射化學研究領域，已由單一核種分析邁向整合性遷移模擬與各種同位素比值示蹤，對本中心未來發展監測技術精進方向具高度參考價值。

目次

壹、 目的.....	1
貳、 行程.....	2
參、 出國紀要.....	3
一、 放射性核種之化學分析技術.....	3
二、 放射性核種之儀器分析技術.....	13
三、 放射性核種之核種遷移.....	21
肆、 心得.....	38
伍、 建議.....	40
陸、 附錄.....	41
柒、 參考資料.....	43
捌、 補充資料.....	47

壹、 目的

第七屆亞太放射化學研討會（The 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, APSORC 2025）於民國 114 年 9 月 14 日至 19 日假日本島根縣松江市 Kunibiki Messe 舉行。會議主題涵蓋放射化學基礎理論、核燃料循環、放射性廢棄物管理、環境放射化學、放射性核種測定技術、放射藥物應用、核分析技術及新興放射化學材料等多個領域，與會人員來自亞太地區及世界各國之研究團隊、專家學者與技術人員。

本中心派員參加本次研討會，藉由專題演講、論文發表及海報展示和與會人員交流，瞭解國際放射化學領域最新研究成果與技術發展趨勢，並掌握放射性核種分析方法、樣品前處理技術、核種分離純化程序及低背景量測等相關技術之應用現況與未來發展方向。會議中針對環境樣品中放射性核種行為、放射化學品質保證（QA/QC）及國際能力試驗（Proficiency Testing, PT）等主題進行研討，對本中心推動環境放射性監測與分析作業之技術精進具參考價值。

綜上，參加本次研討會有助於本中心掌握國際最新放射化學技術動向，強化分析能力與品質管理，並作為未來規劃及執行環境放射性監測與放射化學研究工作之重要依據。

貳、 行程

本次出國行程自 114 年 9 月 13 日至 19 日，時間如下表 1。

表 1 出國行程表

日期	行程	地點
114.9.13	去程：高雄小港機場 → 日本岡山市岡山機場 → 日本島根縣松江市	
114.9.14~19	第七屆亞太放射化學研討會議	日本島根縣松江市
114.9.19	回程：日本島根縣松江市 → 日本岡山市岡山機場 → 高雄小港機場	

參、出國紀要

本次研討會內容包括放射性核種之化學分析技術、儀器分析技術及核種遷移等相關主題，有助於增加本中心專業能力並與國際趨勢接軌。

一、放射性核種之化學分析技術

研討會討論放射性核種之化學分析技術包括使用吸附劑快速分析海水中鋇、開發銨-135 標準物質及優化感應耦合電漿質譜 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS) 測定福島超微量鈾 (Cm)。另探討混凝沉澱法在核廢液處理之應用。研究顯示放射性核種分析朝向高靈敏度、快速化與安全等方向發展，對本中心未來技術精進與監測方法頗具重要參考價值。

(一)、泰國清邁咖啡田土壤特性與放射化學綜合研究

該研究由日本弘前大學、日本環境科學研究所 (NIES)，與泰國清邁大學三方之跨國合作，以咖啡田為研究對象，探討土壤地球化學特性、養分儲備、微量元素及天然放射性核種分佈，旨在推廣阿拉比卡咖啡取代罌粟種植，改善當地居民收入並減少森林破壞。咖啡是全球最重要的飲品之一，其生產地土壤健康與污染問題攸關重大，特別關注化學肥料與殺蟲劑中重金屬的潛在污染，以及銅、鋅、鐵等微量元素在土壤與食物鏈中的遷移特性。研究地點為泰國清邁府美林縣弄懷高地農業研究站，屬熱帶氣候區，具有三個農業季節。

研究人員使用螺旋鑽於十個地點採樣，深度分為表土(0 – 30 公分)與底土 (30 – 60 公分)(表 1)。樣本經 800°C 高溫燃燒八小時，並以硼酸鹽助熔劑於 1,141°C 熔融製成玻璃熔珠，使用 X 射線螢光光譜儀 (X-ray Fluorescence, XRF) 進行主要元素定量。天然放射性核種(如：鉀-40)的測量以純鍺偵測器 (High purity germanium, HPGe)，同時利用醋酸銨萃取法測定土壤可交換鉀及可萃取磷。

研究結果顯示，該地土壤屬強烈風化的紅壤型 (Ferralsols)，二氧化矽含量 66 – 69%，氧化鋁 4.9 – 7.8%，氧化鈣與氧化鎂則較低。鉀-40 活度顯著升

高（1.2 – 2.0 kBq/kg），約為全球平均值（0.4 kBq/kg）的 3 – 5 倍。此鉀含量反映出母岩為富鉀花崗岩，且鉀於酸性環境中具抗淋溶特性。磷集中於表土層，顯示肥料積累且移動性有限。XRF 測得的氧化鉀含量與 HPGe 測得的鉀-40 活度高度一致（圖 1）。微量元素分析顯示，銅、鎳、鉛、鋅均低於日本土壤法規標準(銅 200ppm、鎳 20ppm、鉛 100ppm、鋅 300ppm)；而鈷、砷雖仍在日本土壤法規標準(鈷 10ppm、砷 10ppm)內，但已超過美國環保署（Environmental Protection Agency, EPA）標準(鈷 3ppm、砷 1.5ppm)，因此建議持續監測。

結論為該地咖啡田土壤具有高鉀潛力，可用於低肥料栽培；但部分微量元素(如鈷、鎳)偏低，應監測與補充，以維持作物健康與產量。

Sample name	Depth (cm)	Concentration per dried soil weight (%)									
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
A-30-I	30	66.14	0.33	14.86	4.29	0.13	0.35	0.27	0.31	7.81	0.26
B-30-I		68.78	0.32	14.67	3.97	0.14	0.30	0.17	0.30	7.39	0.22
C-30-I		67.82	0.31	14.84	3.98	0.13	0.29	0.07	0.31	7.56	0.13
D-30-I		66.15	0.35	15.45	4.44	0.16	0.34	0.17	0.31	7.64	0.17
E-30-I		66.94	0.39	15.91	4.66	0.21	0.31	0.28	0.28	6.21	0.16
F-30-I		68.29	0.31	14.17	3.76	0.14	0.28	0.15	0.29	7.05	0.14
G-30-I		68.78	0.36	14.75	3.92	0.15	0.28	0.07	0.29	7.18	0.12
H-30-I		66.66	0.35	15.32	3.63	0.16	0.25	0.25	0.31	6.54	0.14
I-30-I		79.70	0.33	16.55	3.70	0.17	0.34	0.13	0.17	5.56	0.12
J-30-I		72.79	0.35	16.41	3.93	0.18	0.38	0.11	0.18	5.66	0.13
Average		69.21	0.34	15.29	4.03	0.16	0.31	0.17	0.28	6.86	0.16
A-60-I	60	65.91	0.33	14.55	3.84	0.17	0.32	0.10	0.30	7.19	0.14
B-60-I		66.19	0.34	15.25	3.89	0.18	0.34	0.06	0.29	6.96	0.09
C-60-I		65.55	0.35	15.37	3.96	0.22	0.29	0.05	0.29	6.75	0.08
D-60-I		65.00	0.36	15.74	4.22	0.18	0.35	0.07	0.31	7.05	0.08
E-60-I		64.95	0.41	16.38	4.33	0.37	0.34	0.19	0.27	5.93	0.08
F-60-I		66.77	0.33	14.69	4.05	0.15	0.33	0.07	0.29	6.76	0.07
G-60-I		66.50	0.34	15.12	4.09	0.20	0.30	0.05	0.30	6.57	0.07
H-60-I		65.09	0.39	16.63	4.28	0.16	0.33	0.16	0.28	6.23	0.07
I-60-I		64.70	0.42	17.75	4.92	0.14	0.41	0.13	0.23	4.93	0.07
J-60-I		64.52	0.43	17.54	4.83	0.16	0.41	0.10	0.25	5.27	0.07
Average		65.52	0.37	15.90	4.24	0.19	0.34	0.10	0.28	6.36	0.08

表 1 ARID 咖啡種植區所採集 20 件土壤樣品之 XRF 量測結果

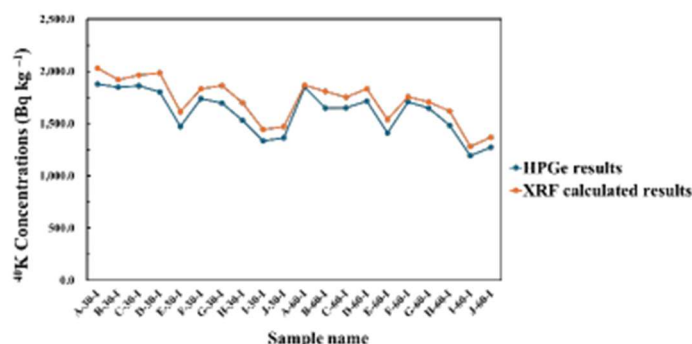


圖 1 鉀-40 分析結果及計算所得的結果

(二)、利用鋇吸附劑開發海水中低濃度放射性鋇分析方法研究

該研究由日本東京慈惠會醫科大學 (The Jikei University School of Medicine) 的 Haruka Minowa 研究發表，研究背景為放射性銻（包括銻-89 與銻-90）作為核裂變產物，因化學性質與鈣極為相似，易於累積於人體骨骼中，對健康造成長期威脅，因此是環境放射性核種監測的重要目標。然而，銻及其子核種釷-90 (Y-90) 皆為純 β 射線核種，測量前須經化學分離與純化。傳統分析在海水樣品中的應用面臨巨大挑戰，主要在於需將銻與海水中高濃度且化學性質相近的元素（如鎂與鈣）有效分離，同時排除天然放射性核種（如鐳與鉛）的干擾。傳統方法如離子交換法或發煙硝酸技術雖具可靠性，但耗時長、步驟繁瑣，且需使用強酸等有害試劑，增加了操作風險與誤差來源。(圖 2)。

因此，該研究的目標是開發一個快速、安全、簡單且低成本的新分析方法，並將最低可偵測濃度 (Minimum Detectable Concentration, MDC) 目標設定在極低的 0.001 Bq/L，以滿足嚴格的环境監測標準。新型吸附劑與分離策略研究的創新點是引入了一種名為新型矽酸鋇吸附劑 (Modified Barium Silicate Adsorbent, MAQ) 作為前處理材料。固液分配係數測試證實了其高效選擇性，銻的固液分配係數高達 4,200 mL/g，而海水中大量的鈉、鎂、鈣等主要元素的固液分配係數極低，僅約 20 mL/g，顯示該吸附劑能夠有效濃縮銻並排除大量鹽分干擾。此外，它還能透過沉澱機制去除天然放射性干擾物如鉛和鐳。分析流程結合了 MAQ 的高效濃縮與傳統的釷-90 分離測量技術。具體操作是將海水樣本酸化後與吸附劑攪拌濃縮，隨後將銻從吸附劑中脫附出來，再將溶液靜置超過兩週，以等待釷-90 達到放射性平衡。最後，通過沉澱法將新生成的釷-90 從銻溶液中分離出來，並使用比例計數器進行最終測量。

效能評估與應用潛力實驗結果顯示(表 2)，該分析流程的總體化學產率為 36%，其中銻吸附率為 90%、銻脫附率為 70%、釷回收率為 60%。在初步的 100 毫升樣品體積下，該方法的 MDC 為 0.23Bq/L。與需要八天操作的傳統方法相比，本方法的化學分離操作時間大幅縮短至兩天（不含兩週平衡等待期）。雖然目前的 MDC 尚待優化，但透過將樣品體積從 100 毫升增加到 10 公升，研究預計可以將 MDC 降低到目標值 0.001Bq/L，此一偵測極限將優於許多傳統

分析方法。

表 2 銥的吸附率與脫附率及鈮的回收率

Sample No.	Start solution		Radioactive Tracer	Sr sorption (%) <1>	Sr desorption (%) <2>	Sr yield in Y-milking (%)	Y yield in Y-milking (%) <3>	Total Y yield (%) <1 x 2 x 3>
	Simulated seawater (mL)	Pureceram MAq® (mg)						
J4J-23	98	155.1	⁸⁵ Sr, ⁹⁰ Y	91.2	-	-	-	-
J4J-33	100	148.6	⁸⁵ Sr	91.2	-	-	-	-
J4J-34	100	148.8	⁸⁵ Sr	92.5	-	-	-	-
A4K-23	98	150.0	⁸⁵ Sr	91.4	-	-	-	-
J4K-51	100	148.2	⁸⁵ Sr	90.6	-	-	-	-
J4K-52	100	149.1	⁸⁵ Sr	88.7	70.4	-	-	-
oxalate								
J5B-11	2M HCl, 100mL		⁸⁵ Sr, ⁹⁰ Y	-	-	0.5	67.9	-
J5B-12	2M HCl, 100mL		⁸⁵ Sr, ⁹⁰ Y	-	-	0.5	72.2	-
J5B-51	100	151.3	⁹⁰ Sr	83.4	70.5	0.3	61.2	36.0
J5B-52	100	150.9	⁹⁰ Sr	89.2	68.0	0.09	54.5	33.1
J5B-53	100	148.9	⁹⁰ Sr	88.4	66.0	0.08	56.9	33.2
J5B-54	100	149.5	⁹⁰ Sr	87.9	69.0	0.09	69.7	42.3

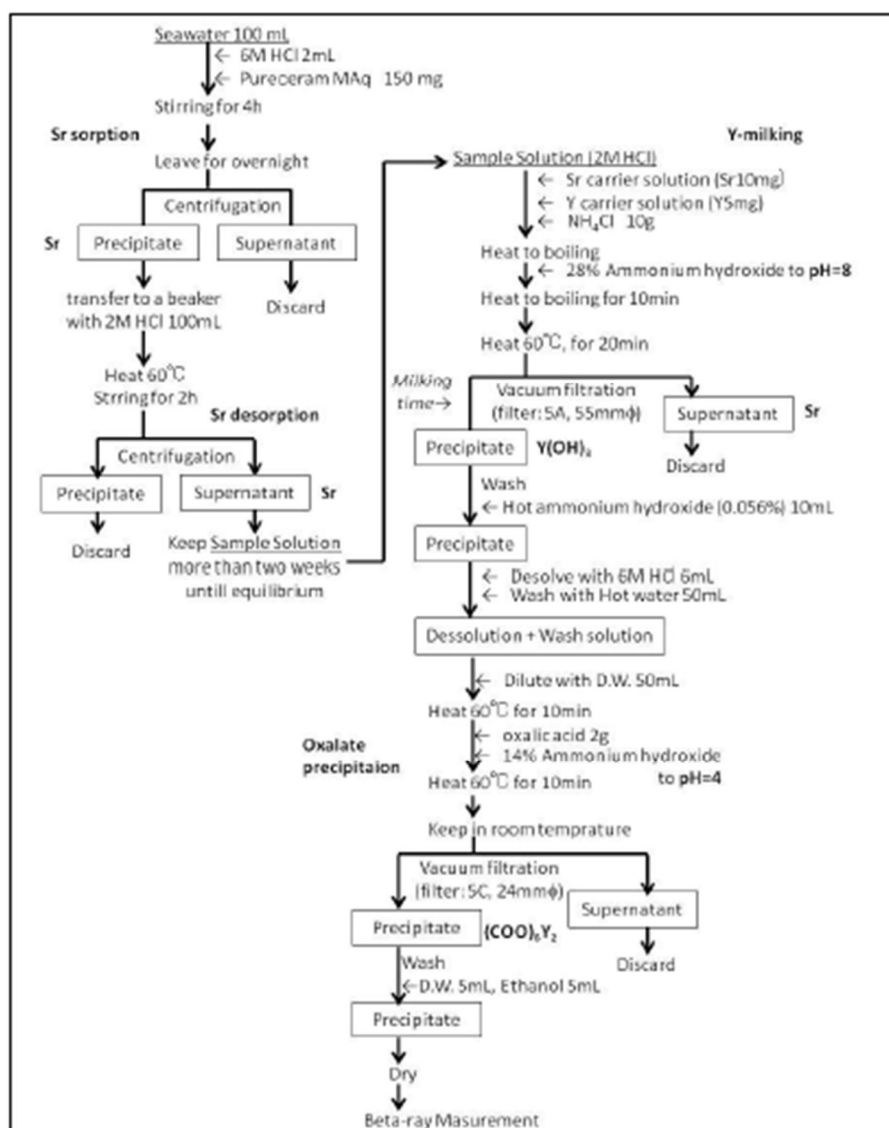


圖 2 海水中銥的化學分離程序

(三)、高靈敏度 ICP-MS 測量福島超微量銅(Cu)同位素

該研究由日本筑波大學理工學研究所 (Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba) 的 Yuya Kasuga 研究發表，研究背景為福島核子事故估計釋放了 $4.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ 的 銅-242、銅-243、銅-244 等銅系元素。在福島浪江町土壤表層 (0–4 公分) 採集的樣本中，銅-243 的活度極低，約為 $0.54 \text{ Bq/kg} \cdot \text{乾重}$ ，相當於 0.29 fg/g (femtogram, $\text{fg} = 10^{-15} \text{ g}$)。由於環境濃度極低，對超微量銅的分析需要極高的靈敏度。傳統的感應耦合電漿質譜儀 (ICP-MS) 傳輸效率低，只有約 10^{-7} 或更少的初始分析物最終能被檢測到，因此需要 30 克或更多的大樣本量才能進行分析。此外，傳統的 α 射線光譜法無法將 銅-243 和 銅-244 的峰值分離，使測量不可行。故本研究旨在通過質譜法來實現銅同位素的精確測量。

儀器靈敏度優化部分針對 ICP-MS 系統中效率最低的環節 (樣品導入、介面和離子光學) 進行了系統性優化。具體措施包括：將適用於高基質的 X 模式截取錐 (Skimmer Cone) 更換為適用於低基質的 S 模式截取錐 (高靈敏度：錐口設計通常更為緊湊或優化，能提供更高的離子傳輸效率，從而獲得更低的偵測極限 (LOD) 和更高的信號強度)，帶來約 1.3 倍的靈敏度提升；其次，使用 Aridus 3 去溶劑化裝置 (Desolvating Nebulizer System) 進行乾氣溶膠化，此舉減少了樣品在腔室中的損失並防止溶劑導致電漿溫度下降，從而使靈敏度提高了約 4.4 倍；再者，將自動調機質量數 (Auto-Tuning) 從釷、銻 (Ce)、鉍 (Tl) 改為更接近目標分析物的 鈾-209、鈾-232、鈾-238，以優化高質量數範圍的性能，帶來約 3.2 倍的靈敏度提升；最後，通過加裝旋轉泵 (Rotary Pump) 來降低介面壓力 (從 192 Pa 降至 137 Pa)，改善了離子傳輸速率，實現約 1.2 倍的靈敏度提升。

第二個主題旨在評估福島核子事故釋放的銅-242、銅-243、銅-244 等銅同位素。研究以鈾 (Cf) 中子源的衰變產物中分離出 銅-248 作為同位素稀釋法所需的內部標準物質 (Spike Creation)，如同 Tracer 的使用方式，將已知量的銅-248 加入待測樣本中，通過 ICP-MS 測量銅-248 與待測同位素的比例變化，

可以校正整個化學分離過程中可能發生的樣品損失或傳輸效率不均的問題。研究選擇釷 (Sm) 和釓 (Gd) 作為鈾(Cm) – 鈾(Cf)分離的類比實驗(Analog experiment)的選定元素，考量它們的離子半徑相似，化學行為亦相似，活度極低，適合大規模測試，故採鈾 – 鈾元素進行分離試驗的預測試，確認效果可接受，再進行目標核種鈾 – 鈾的分離測試。分離實驗採用 LnResin 樹脂 (Lanthanide Resin)，結果顯示在 0.4 M 硝酸和 50°C條件下，能有效實現鈾和鈾的分離 (圖 3a)，該條件被建議用於製備相當於示蹤劑 (Tracer) 的內部標準物質 鈾-248。

此外，研究也探討了次要鈾系元素釷 (Am) 與鈾 (Cm) 的分離，提出了使用 Bio-Rad AG50W-X8 樹脂與 α -HIBA (α -Hydroxyisobutyric Acid) 或 LnResin 與硝酸的層析方案 (圖 3b)。

通過對 ICP-MS 儀器進行系統性優化，相較於傳統設置，整體靈敏度成功提高了約 20 倍。這一顯著的提高使得定量極限(LOQ)降至極低的 0.112 ppq。最終，分析環境中超微量鈾所需的樣本量從 30 克大幅減少至約 4 克，證明了使用優化後的高靈敏度 ICP-MS 進行福島環境樣本中鈾同位素定量分析的實用性和可行性。

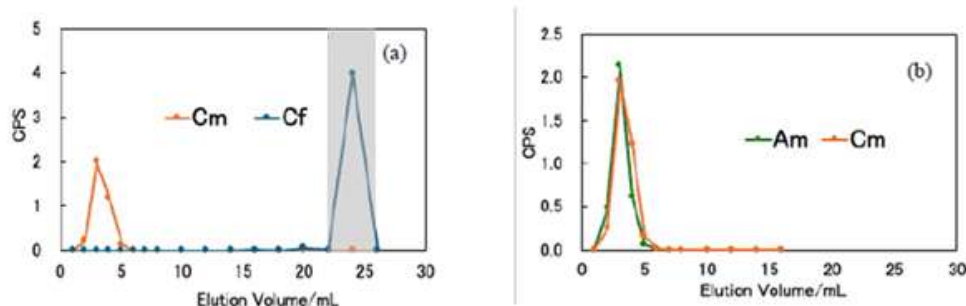


圖 3 在 0.4M HNO_3 、50°C條件下之洗脫曲線 (a) 鈾 (Cm) 與鈾 (Cf)；
(b) 釷 (Am) 與鈾 (Cm)。

(四)、使用 P-MAQ 鋇吸附劑進行環境水中放射性鋇的快速分析

該研究由日本愛知醫科大學 (Aichi Medical University) 的 Yoshimune Ogata 研究發表，研究水中放射性鋇的新方法，使用的 P-MAQ 是一種鋇矽酸鹽 (BaSi_2O_5) 粉末吸附劑，顆粒大小約為 4 至 300 μm ，不溶於水，對鋇 (Sr)

具有選擇性吸附能力。實驗結果證明，P-MAQ 能夠選擇性且高效地吸附 鋇、鐳(Ra)、鉛(Pb)和鋇(Ba)等核種，同時卻不吸附海水中大量存在的鈉(Na)、鉀(K)、鎂(Mg)、鈣(Ca)和銫(Cs)等主要離子(圖4)，實現了有效的分離。此外，鋇的吸附過程需要硫酸根離子的存在。

在實驗優化條件下，研究發現吸附 100 mL 海水樣品中的鋇-85 需要 130 mg 的 P-MAQ，建議攪拌時間為 4 小時(240 分鐘)(圖5)，此時約 90% 的鋇被吸附。鋇的吸附率會受到樣品水中鈣離子濃度的顯著影響，鈣濃度越高則吸附效率略有下降，兩者呈現強烈的線性負相關。雖然較低的鋇濃度有助於加快最初的吸附速度，但並不影響 4 小時攪拌後的最終吸附率。

為實現快速測量，研究嘗試將 P-MAQ 的吸附步驟與四種活度測量方法結合，包括塑膠閃爍瓶法(Plastic Scintillation Bottle Method, PSB)、低背景氣體流量計數器法(Low Background Counter, LBC)、乳化閃爍體法(Emulsion Scintillation Method, ES)和凝膠懸浮閃爍體法(Gel Suspension Scintillation Method, GSS)。在 60 分鐘的短時間測量下，乳化閃爍體法(ES)和凝膠懸浮閃爍體法(GSS)方法展現出最佳的性能。特別是採用大體積樣品(5 升水樣/7,500 mg 的 P-MAQ)時，最低可檢出濃度(MDC)可達到 0.02 Bq/L，遠優於許多國家的法定廢水濃度限值(如：日本為 30 Bq/L)。即使是相對較差的低背景氣體流量計數器法(LBC)，其 MDC(0.6 Bq/L)亦達到法定限值的 1/50。

綜上所述，此研究開發的 P-MAQ 分析方法將整個程序所需的時間從傳統的 2 至 3 週大幅縮短至不到 6 小時。這一突破性的方法操作簡單、不需熟練技術，且避免了對有害物質的需求。這充分證明了該方法可應用於環境水中放射性鋇的快速和安全分析，對於飲用水、食品等安全性的快速檢測具有重要意義。

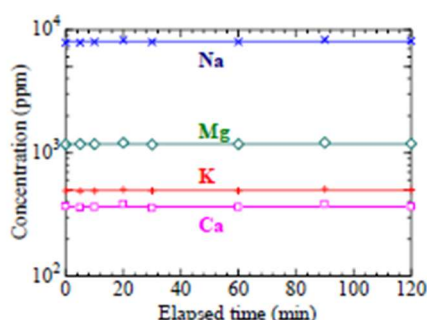


圖 4 溶液中四種元素(Na, Mg, K, Ca) 的濃度變化

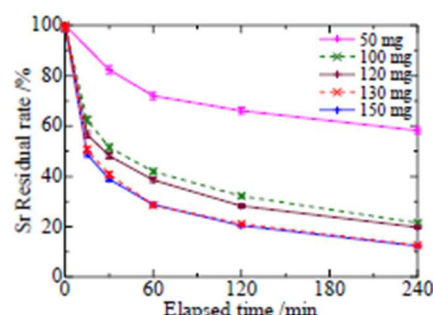


圖 5 濾液中 銥-85 的殘留率

(五)、關於銥-135 標準參考物質開發與計量學評估

該研究由日本產業技術綜合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST) 與國家計量標準研究部門 (National Metrology Institute of Japan, NMIJ) 的 Shiho Asai 研究發表。銥-135 與銥-137 的莫耳比是一種重要的「同位素指紋」，這個比值通常取決於它們的初始產量、中子俘獲截面以及半衰期，此比例會因生產途徑而異，能夠有效區分核子事故，例如車諾比核子事故、福島第一核電廠核子事故與核武試驗等不同來源的放射性污染。由於 銥-135 是一種純 β 射線核種，在傳統輻射測量中受到 銥-137 的嚴重干擾，且市場上缺乏銥-135 的標準參考物質 (Certified Reference Material, CRM)，使得精確測量極具挑戰性。建立 SI 可追溯 (SI Traceability) 的 銥-135 標準溶液及銥-135/銥-137 莫耳比標準，並利用 ICP-MS (感應耦合電漿質譜儀) 的質量區分能力來克服測量障礙。最初的銥-137 放射性標準溶液因為含有 50 mg/kg 的穩定銥-133 載體，不適用於 ICP-MS，因此必須使用不含載體的 銥-137 溶液作為候選溶液。

標準定值方法與不確定度評估為確保測量結果的國際可比性 (International Comparability)，定值程序嚴格遵循 ISO/IEC 17025 和 ISO 17034 等標準，並以建立 SI 可追溯性為核心。在缺乏銥-135 獨立標準的情況下，研究採用了間接校正方法。首先，利用 SI 可追溯的銥-137 和銥-133 數據建立參考莫耳比 R_{137} ；接著，計算 銥-137/銥-133 的質量區分校正因子 $K_{137/133}$ ；最終，透過線性模型將 $K_{137/133}$ 推導應用於目標同位素對銥-135/

銻-133，得出 $K_{135/133}$ ，從而計算出銻-135 的質量分數。不確定度評估遵循 ISO 標準，將標準參考物質（Certified Reference Material, CRM）的總不確定度分為特性鑒定、均勻性和長期穩定性三個主要分量。在特性鑒定中，研究採用「原始方法」，透過引入共變異數項，將銻-133 質量分數的不確定度與校正因子 $K_{135/133}$ 之間的共變異數納入計算。同時，研究利用替代同位素對如：碲（Te）的最大偏差，量化了 ICP-MS 質量區分效應中的非線性不確定度。

最終結果顯示，銻-135 質量分數的定值為 $21.62 \text{ pg/g} \pm 0.90 \text{ pg/g}$ ($k=2$)（picogram, $\text{pg} = 10^{-12} \text{ g}$ ）。其中，校正因子 $K_{135/133}$ 的計算是主導貢獻者，相對標準不確定度為 1.75%。（表 3 及表 4）。

均勻性與穩定性驗證採用單向變異數分析（One-Way Analysis of Variance, One-Way ANOVA），瓶間不均勻性不確定度的上限為 0.65%。在長期穩定性方面，對銻-135 質量分數和銻-135/銻-137 莫耳比進行了超過 1.5 年的監測。統計結果顯示，測量值在不確定度範圍內保持恆定，沒有觀察到不穩定性。最終，銻-135/銻-137 莫耳比的定值為 1.008 ± 0.053 ($k=2$)。這些結果證明了該溶液即使在 20 pg/g 的低質量分數下，仍具有足夠的穩定性。

綜上，透過對不確定度進行全面的評估，確保所開發的銻-135（銻-137）溶液有助於實現 SI 可追溯的銻-135 及銻-135/銻-137 比值的測量。這項成果對於環境放射化學領域精確識別和量化核種污染源具有重大意義。對本中心而言，該方法為未來銻-135/銻-137 比值相關研究提供了可靠的基準與分析支援，提升了核種監測和環境放射性研究的精準性與可追溯性。

表3 銻-135/銻-137莫耳比例的不確定度

Source of uncertainty	Relative standard uncertainty	Contribution rate
$^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ measured molar ratio	2.43 %	93.21 %
Homogeneity	< 0.01 %	< 0.01 %
Stability	0.58 %	5.36 %
Concentration factor	0.30 %	1.43 %
Relative combined standard uncertainty: 2.51 %		
$^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ molar ratio	1.008 ± 0.051 ($k=2$)	
* Reference time: 1200 JST, 31 January, 2024		

表4 銫-135 mass fraction 莫耳比例的不確定度

Source of uncertainty	Relative standard uncertainty	Contribution rate
¹³⁵ Cs measured mass fraction	1.75 %	70.55 %
Homogeneity	0.65 %	9.58 %
Stability	0.88 %	17.80 %
Concentration factor	0.30 %	2.06 %
Relative combined standard uncertainty: 2.09 %		
¹³⁵ Cs mass fraction 21.62 ± 0.90 pg/g (<i>k</i> =2)		
* Reference time: 1200 JST, 31 January, 2024		

(六)、使用絮凝和沉澱法從廢液中移除用過核子燃料物質(Nuclear Fuel Materials)研究

該研究由布拉格捷克理工大學核化學系 (Department of Nuclear Chemistry, CTU in Prague) 的 Lucie Sifnerova 研究發表，旨在解決核廢料管理中處理大量、低濃度放射性液體廢棄物的重大挑戰。傳統的溶劑萃取或離子交換等方法，耗時且會產生大量二次廢棄物，本研究提出並探索使用混凝沉降處理法作為穩定化低濃度液體核廢棄材料的有效途徑。最終目標是將放射性物質（如鈾）從液體廢棄物中分離並固化，以實現減少廢棄物管理工作量、降低洩漏風險並減輕整體風險。

研究評估了聚矽酸鐵（Poly-silicate Iron，以下簡稱 PSI）作為核廢液處理混凝劑的潛力。PSI 是一種由鐵（Fe）和二氧化矽（SiO₂）組成的混凝劑（圖 6），以其高效的混凝和沉降性能廣泛用於水處理領域，且相較於傳統混凝劑，具有較低的環境負擔。為了優化 PSI 對鈾系元素（如鈾）的混凝性能，研究先後進行了使用非放射性銻化合物（醋酸銻和硝酸銻水溶液）進行的無射源操作測試（cold test），以確定最佳的混凝條件，隨後將應用於鈾進行有射源操作測試（hot test）。

實驗使用了兩種不同鐵和二氧化矽含量的 PSI 混凝劑：PSI-010（4 wt% 鐵）和 PSI-025（6 wt% 鐵）。初步的冷測試結果顯示，PSI-025 表現出比 PSI-010 更高的銻去除能力。在形成的絮凝顆粒形態方面，PSI-010 傾向於形成較細的顆粒，而 PSI-025 形成的顆粒則較大。雖然 PSI-010 可能需要在重力沉降或濾紙過濾時較長的處理時間，但實驗證實兩種混凝劑，離心分離都能顯著

縮短分離時間。

此研究對本中心常使用的混凝沉降處理法提供了一個良好的示範，具有重要的參考價值，並可應用於多種核種的環境監測與分析流程中。

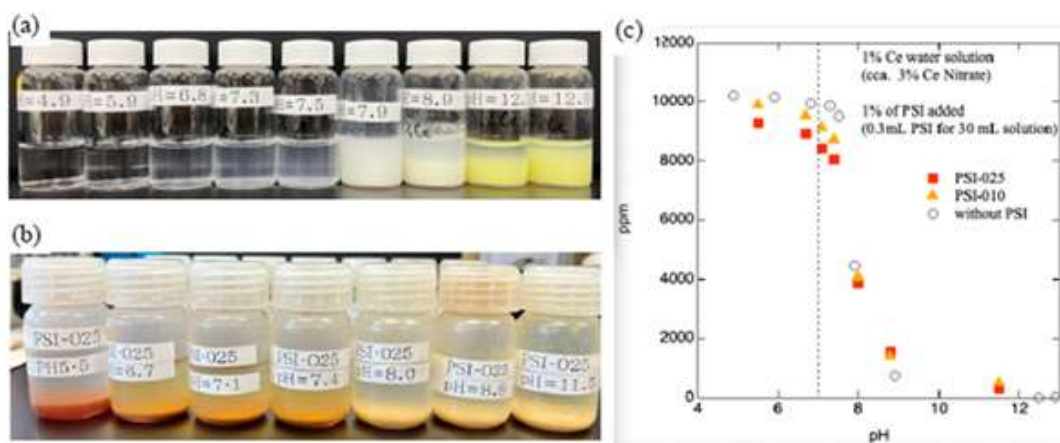


圖 6 硝酸鈰的沉澱過程透過調整 pH 進行：(a)未添加 PSI 的情況，(b)添加 PSI-025 的情況，以及(c)僅靠 pH 調整與添加 PSI 進行絮凝沉澱的鈰濃度比較

二、放射性核種之儀器分析技術

超高靈敏度質譜儀及輻射度量等設備可準確定量放射性核種，用於監測環境中放射性核種之分布及遷移等作用。本節綜整研討會研究成果，包括加速器質譜法 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)、多接收器感應耦合電漿質譜儀 (MC-ICP-MS)、液態閃爍偵檢器 (Liquid Scintillation Counter, LSC) 及 β 能譜分析技術在放射性核種分析領域的應用及發展趨勢。

(一)、加速器質譜法在環境放射性分析的應用

該項技術由日本東京大學應用加速器質譜儀法在環境放射性分析。放射性核種是海洋學、生態毒理學與氣候變遷研究 (例如海洋酸化) 中不可或缺的示蹤劑。透過加速器質譜法 (AMS) 等高靈敏度技術結合其他分析方法，可在極低活度 (濃度) 下偵測長半衰期放射性核種，如鈹-10、碳-14、鋁-26、氯-36 及碘-129。藉由分析鈾-236/鈾-238 與碘-129/碘-127 等同位素比值，可精確識別放射性污染來源 (如 La Hague 與 Sellafield 再處理設施)，並追蹤洋流運動與跨洋傳輸過程。同時，沉積物岩心的同位素分布亦可揭示過去數十年海洋環境變化與放射性事件之歷史紀錄。

此外，該技術應用於加速器設施除役及放射性廢棄物管理領域。研究特別針對供電電纜之聚合物護套進行分析，因其在長期中子照射下可能生成難以量測的長半衰期核種氯-36。為了準確評估其放射性活度，研究團隊開發了結合中子活化分析（NAA）與高靈敏度 AMS 的複合技術，可顯著提升氯-36 的定量精度，並為加速器除役廢棄物分類與輻射安全評估提供重要依據。

在應用面上，首先就核武試驗而言，1950 至 1960 年代期間進行之大氣核爆釋放大量長半衰期核種（如碘-129 及氯-36），在全球形成明顯濃度峰值；該峰值現已被學界普遍視為人類進入「核時代」的重要地層標誌，可作為重建歷史輻射事件與全球放射性落塵分布之基準。其次，關於再處理廠排放部分，英國 Sellafield 與法國 La Hague 等設施所排放之碘-129，經由洋流傳輸至北大西洋及北極海域（圖 7）。相關研究顯示，透過監測海水與沉積物中碘-129/碘-127 同位素比值，可有效掌握水團移動與物質傳輸情形，對於了解區域性海洋動態及污染來源判別，均具重要參考價值。

最後，在核子事故核種遷移之示蹤應用方面，長半衰期的 碘-129 因其半衰期長達 1,570 萬年，能夠長期保存核子事故初期之擴散訊息，故常被用以取代短半衰期的碘-131 製作放射性碘擴散分布圖；AMS 技術可協助建立核子事故傳輸模式與回溯分析依據，為核子事故監測與風險評估提供長期且穩定的資料來源，彙整如表 5。

表 5 加速器質譜法之應用彙整表

來源	應用內容	參考價值
核武試驗	1950 - 1960 年代大氣核爆所產生之長半衰期核種（如碘-129、氯-36）形成全球濃度峰值。	作為人類進入「核時代」之地層標誌，提供歷史放射事件重建依據
再處理廠排放	英國 Sellafield 與法國 La Hague 再處理設施排放之碘-129 隨洋流傳輸至北大西洋與北極海域。	作為區域性水團循環與污染來源判別之重要示蹤核種
核子事故後放射性核種示蹤	以長半衰期碘-129 取代短半衰期碘-131 製作放射性碘擴散分布圖。	用於核子事故傳輸模式回溯與環境擴散評估之依據

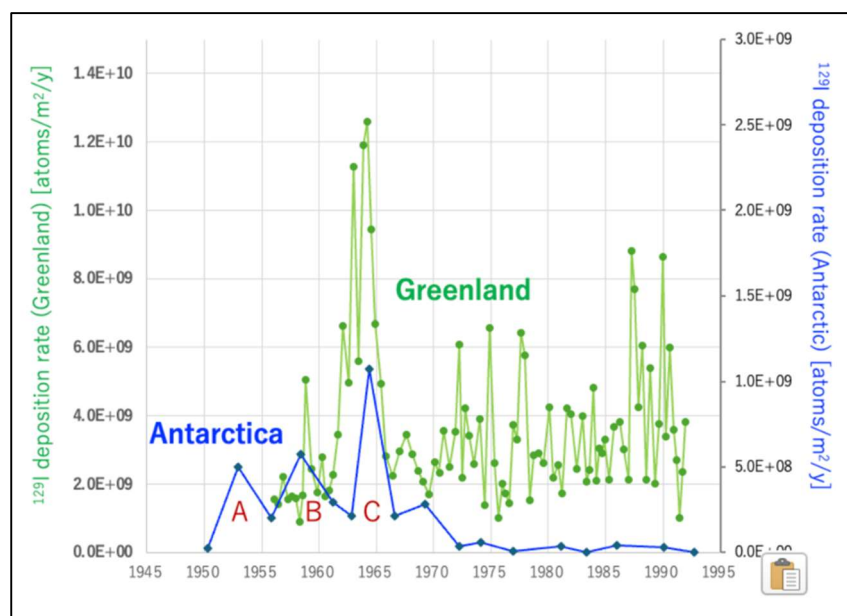


圖 7 格陵蘭/南極冰芯中碘-129 時序記錄

(二)、液體閃爍計數技術用於核電廠放射性廢液中氚之排放監測

此研究團隊共三個合作單位，來自克羅埃西亞與斯洛維尼亞兩國斯洛維

尼亞克爾什科核電廠（Krško Nuclear Power Plant, 以下簡稱 NEK 電廠）為壓水式反應爐型核能發電設施，位於薩瓦河沿岸內鄰近人口稠密地區，距薩格勒布市僅數十公里；該市逾百萬居民之飲用水源主要取自薩瓦河沿岸之地下水，因此，NEK 電廠之環境輻射監測具有高度重要性。

依據法規規定，NEK 電廠須持續執行放射性環境監測計畫，以確保電廠運轉對周遭環境與民眾之輻射曝露之影響維持在安全範圍內。該計畫的主要目的為鑑別及分析環境中放射性核種，評估運轉期間放射性活度值的變化趨勢，並建立放射性物質傳輸模型，確保處理系統之運作能力。監測機制可確保電廠排放之放射性物質符合「合理抑低原則（As Low As Reasonably Achievable, ALARA）」，並持續掌握長期變化趨勢，作為環境輻射劑量評估等之重要依據。

該研究主要目的在於評估 NEK 電廠對薩瓦河水體及周邊環境的潛在影響。為此，研究團隊針對多種環境介質進行取樣與分析，包括電廠液體排放物、薩瓦河河水、飲用水及地下水等。監測項目涵蓋加馬核種、氚（ ^3H ）、銻同位素（ ^{89}Sr 、 ^{90}Sr ）及鐵-55（ ^{55}Fe ）等放射性核種。

NEK 電廠在液態廢棄物處理過程中，少量放射性同位素經由廢棄物監測槽（Waste Monitor Tank, WMT）排放至薩瓦河。該研究彙整並分析自 1982 年至 2022 年間的監測資料，並與法定限值進行比較。結果顯示，各項核種排放量均遠低於允許標準，其中氚（ ^3H ）為最具代表性的監測指標（圖 8）。

為提升氚量測準確度，薩格勒布魯傑爾·博什科維奇研究所（RBI）與盧布爾雅那約瑟夫·斯特凡研究所（JSI）持續精進液體閃爍計數技術，顯著提升偵測極限與測量穩定性（圖 9），使氚濃度之長期變化得以準確追蹤並與排放趨勢對應。監測結果顯示，NEK 電廠放射性廢液排放對於薩瓦河水質及飲用水源之輻射影響極低，可視為可接受範圍內。

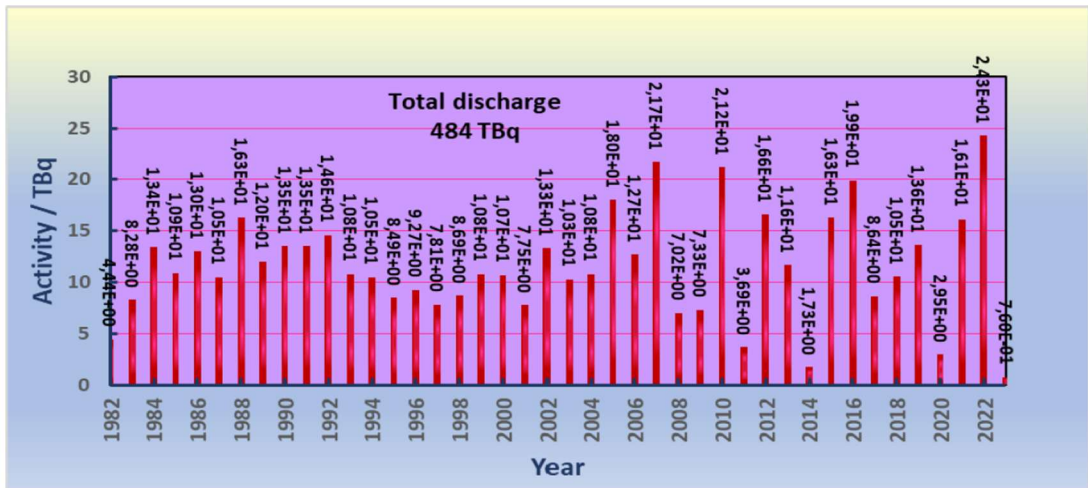


圖 8 1982 年至 2022 年 NEK 電廠放射性廢液排放至薩瓦河之氚-3 排放量

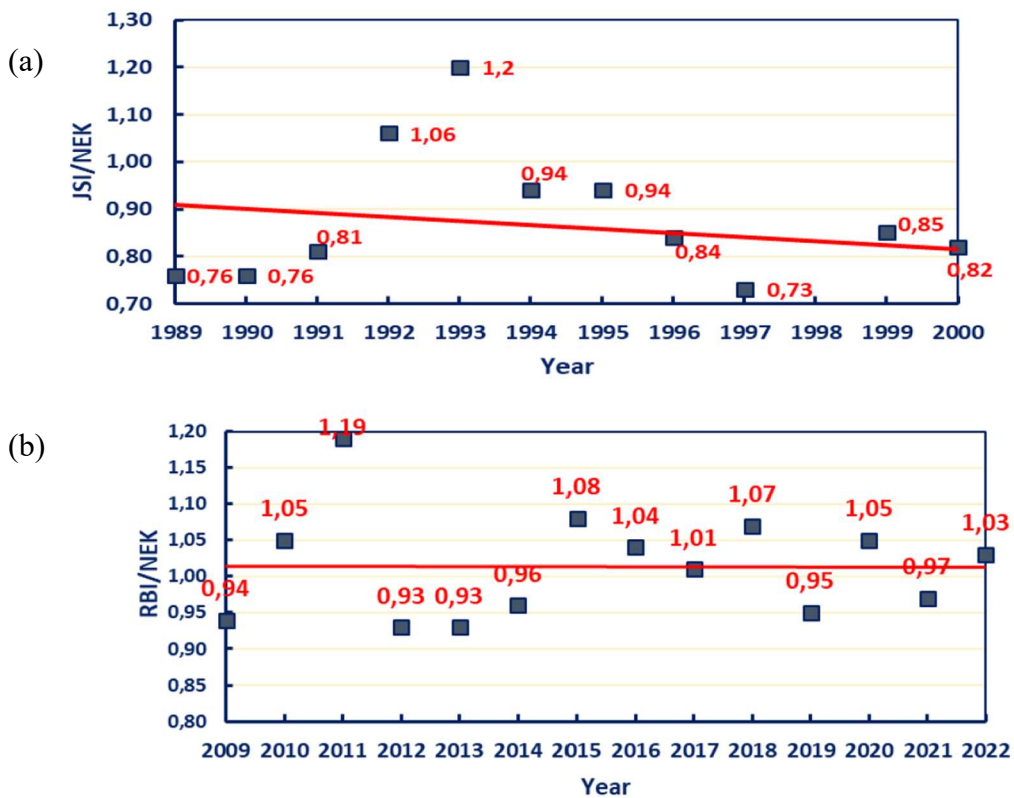


圖 9 NEK 電廠液體排放中氚活度的年度實驗室比對結果

(a) NEK 電廠與 RBI 研究所；(b) NEK 電廠與 JSI 研究所之量測值差異

(三)、多接受器感應耦合電漿質譜儀 (MC-ICP-MS)

多接受器感應耦合電漿質譜儀（MC-ICP-MS）是一種具高解析度與多接收器設計的先進儀器，可同時量測多種同位素訊號，降低干擾並提升量測準確度。由於具備高靈敏度與穩定性，該技術已廣泛應用於放射化學、地球化學及核鑑識等領域，用於精確測定長半衰期核種的同位素比值。近年來，該技術已逐漸取代部分加速器質譜（AMS）的應用，成為分析長半衰期核種的重要工具，特別適用於環境放射性示蹤及核燃料溯源研究。

依國際分析技術發展趨勢及實驗室品質保證等要求，長半衰期放射性核種之量測必須採用高靈敏度且具高準確性之分析技術。MC-ICP-MS 因其穩定性與比值重現能力優異，已被國際原子能總署（IAEA）、日本原子能研究開發機構（JAEA）及蘇黎世聯邦理工學院（ETH-Zurich）等多國核能監管與研究單位列為同位素比對與核鑑識分析的推薦方法。此技術不僅能提供精確的同位素比值，也可輔助建立放射性核種傳輸模式，作為核子事故之回溯與環境影響評估的重要依據。

台灣大學研究團隊利用 MC-ICP-MS 技術分析環境樣品中的鈾-236/鈾-238 比值，作為海洋水團與核事件示蹤的依據。研究採用具二次電子倍增器（SEM）的電漿質譜系統，並搭配遲滯電位四極場鏡（RPQ）以降低鈾-238 尾峰干擾，使偵測靈敏度提升至 10^{-10} 級，成功量測出極低濃度的人為鈾-236。結果經蘇黎世 ETH AMS 實驗室交叉比對，證實在鈾-236/鈾-238 比值 10^{-7} 至 10^{-9} 區間內具高度準確性。分析顯示，鈾-236 可於熱帶太平洋水體中穿透至約 600 公尺深度，證實其可作為追蹤海水質量交換與核活動殘留的長期示蹤核種。

此外，日本原子能研究機構（JAEA）Tomita 等人亦開發出以 MC-ICP-MS 測定單一鈾粒子同位素比值的新技术。研究以微操作方式自標準參考物 CRM 鈾 100 中挑選單顆鈾粒溶解後進行分析，比較不同載台材料對測值的影響。結果顯示，若使用黃銅載台，易引入鉛污染，使鈾-236 測值偏高；改用矽基載台後，污染量可降至 0.1 奈克（ng），所得鈾-236/鈾-238 比值與認證值一致。此成果證實 MC-ICP-MS 可在單粒尺度下進行高精度分析，展現其於核查、

核鑑識及保障監測等領域的應用潛力。

綜上，MC-ICP-MS 技術兼具高靈敏度與高準確度，能於極低濃度條件下測定長半衰期核種，其結果與 AMS 具一致性；MC-ICP-MS 技術不僅提升核燃料循環與環境輻射監測的分析能力，亦可作為未來監測項目之重要技術依據。

(四)、阿托克級鈾系元素 ICP-MS 分析的技術突破與放射生態學應用

日本量子科學技術研究開發機構放射線醫學綜合研究所（NIRS）之 Jian Zheng 等人利用扇形磁場感應耦合電漿質譜（Sector Field Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, SF-ICP-MS）技術（圖 10），執行環境樣品中鈾系元素超微量分析。長半衰期核種如銻-237、鈾同位素與釷-241 之比活度極低，傳統放射測量法靈敏度不足，而質譜技術可直接測定原子數，具高靈敏度與精確度。

為提升分析性能，研究結合 APEX 或 Aridus 去溶劑霧化系統與 SF-ICP-MS，使偵測極限（LOD）達 5 ag，鈾氫鍵結干擾降至 10^{-6} 。化學分離流程方面，土壤與沉積物樣品採低溫熔融與 UTEVA-DGA 樹脂去除鈾；海水樣品則以三氯化鈦還原與氫氧化鐵共沉澱，使去污因子（DF）達 10^7 級。針對釷-241 分析，結合 DGA-N 與 TEVA 樹脂有效排除稀土干擾，顯著提升信號穩定性。

研究亦建立以釷-242 為內標的銻—鈾（Np-Pu）同時定量技術，證實化學分離可忽略，並修正全球落塵（Global Fallout, GF）中鈾對釷活度比的低估問題。於福島核子事故樣品中，利用釷同位素指紋辨識污染源為反應爐燃料而非燃料池，其釋放量約為車諾比核子事故的萬分之一；海洋追蹤結果顯示釷濃度維持背景值，影響極微。

此外，針對 ALPS 處理水排放議題，團隊首次提供排放前後海水中銻-237 與釷同位素之數據，顯示濃度無明顯變化（圖 11）。此技術已廣泛應用於核種遷移與放射生態學研究。釷-241 與釷同位素極微量檢測技術之發展，可作為環境放射性監測與分析方法精進的重要參考。

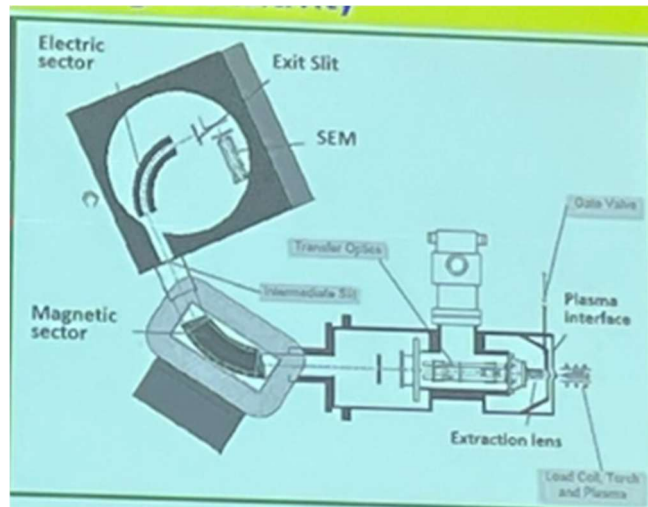


圖 10 扇形磁場電感耦合電漿質譜儀(SF-ICP-MS)組成

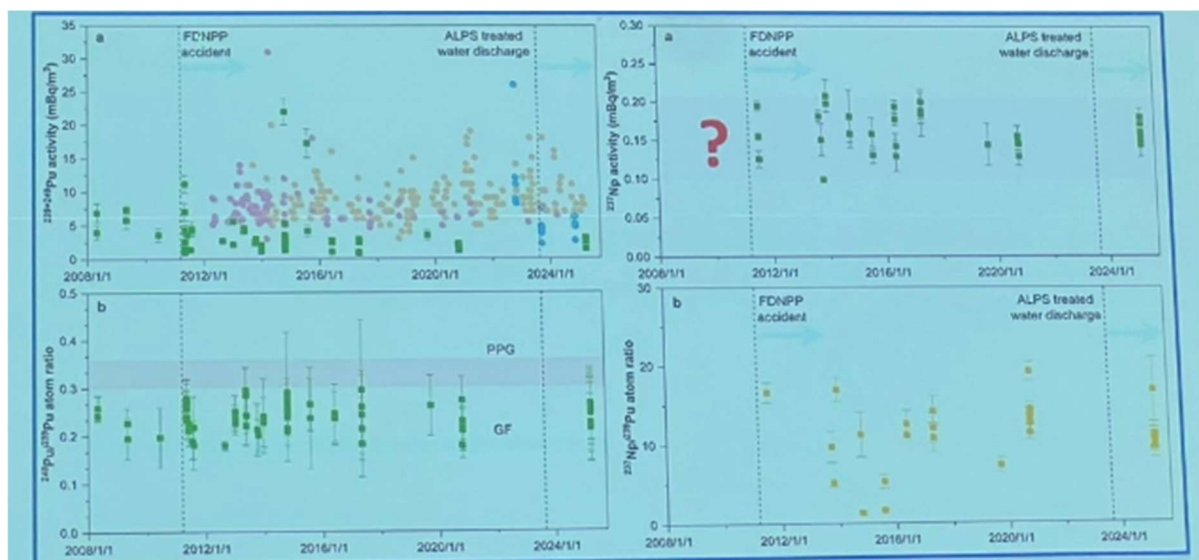


圖 11 排放前後表層海水中銈-237 和鈾同位素濃度維持在相同水平

(五)、 β 射線光譜法在快速核種比值測定的應用

日本原子能研究機構（JAEA）在福島第一核電廠反應爐建築內採集污染擦拭樣品，以分析放射性核種之分布情形。透過放射性核種定量結果，可以了解核子事故的時序進程、放射性物質之釋放類型及來源等特徵。由於銥-90 (^{90}Sr) 在還原氣態下容易揮發並釋放，故可作為評估爐心熔損階段條件之重要關鍵核種。

基於傳統銥-90 放射化學分析流程繁瑣且耗時，為提升分析效率，JAEA 開發以 β 能譜法為核心之快速定量分析技術，用於測定擦拭樣品中銥-90 之

放射活度。樣品首先以高純鍺半導體探測器量測加馬核種，以確認樣品中主要放射性核種來源，並使用混合標準源進行能量與效率校正。 β 射線測定則採用低背景 β 能譜法進行，同時以日本放射性同位素協會提供的銫-137 與銪-90 標準液製備校正樣品，確保分析靈敏性與準確性。

分析結果顯示，擦拭樣品中主要的加馬核種為銫-137 與銫-134，部分樣品檢出鈷-60 與銻-125，但其放射活度僅為銫-137 的千分之一至十萬分之一（圖 12）。利用 β 能譜法所得的銪-90/銫-137 莫耳比值分別為：1 號機 0.0017 ± 0.0013 ，2 號機 0.0077 ± 0.0044 。此結果與先前在反應爐內部瓦礫樣品中測得的比值一致，顯示所建立的快速測定法具有準確性與再現性。

本研究顯示，透過 β 能譜法可在不需繁複化學分離的情況下快速分析銪-90，並能提供現場污染樣品的放射性比值資訊。該技術可應用於核子事故現場的放射性污染評估，協助掌握輻射污染源及分布特徵，作為推估核子事故時序進程與放射性物質釋放等重要資訊。

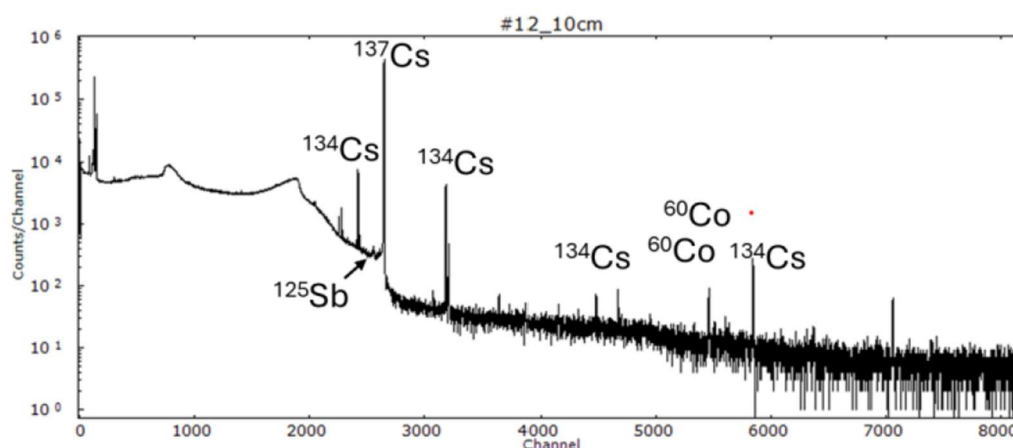


圖 12 福島第一核電廠反應爐建築內擦拭樣品之加馬能譜圖

三、放射性核種之核種遷移

放射性核種在環境中的遷移行為對核災影響評估與長期監測具關鍵意義。本節綜整多項研究成果，涵蓋核落塵微粒特性、長半衰期核種（如 碘-129、氯-36、銈-239、銈-240 與銈-237）之環境行為。結果顯示，放射性微粒可長期

穩定存在，其元素組成可反映核反應條件；銻-137 與銾-90 分別以有機質與溶解態形式遷移；珊瑚對不同碘化學形態具選擇性吸收，證實碘-129 可用作海洋環流示蹤劑。整體而言，放射性核種遷移受化學形態、氧化還原條件與生物過程共同控制，為建立環境中放射性物質曝露途徑模型及風險評估的重要依據。

(一)、環境中長半衰期放射性核種之行為特徵

澳洲核能科技組織（ANSTO）針對 1940 至 1950 年代核試驗所遺留的長半衰期放射性核種進行環境樣品特性研究。早期核試爆所釋放放射性物質在全球環境中仍存在，尤其於試驗區附近仍可觀察到活度濃度升高情形，對長期環境監測與安全管理具有挑戰。

研究團隊收集來自多種核事件的樣品，包括裂變與非裂變試驗，爆炸當量從低於 1 kt 至約 100 kt 不等，包含地面、塔架、空投及艦載爆炸等不同形式。樣品主要取自 1950 年代英國於澳洲進行的核試驗場址，另有部分來自西班牙帕洛馬雷斯（Palomares）核子事故區、長崎及福島等地。採樣後以傳統放射化學方法、各類顯微觀察技術及 ANSTO 的 VEGA 加速器質譜儀進行分析。

結果顯示，試驗場附近土壤至今仍維持高放射性活度，且含有大量具放射性的微粒。微粒大小與放射強度差異可達數個數量級，其結構形態亦各異，多數粒子表面呈玻璃質包覆層，能在一定程度上阻止風化與浸蝕。然而，大多數粒子表面具有裂隙，形成由內部延伸至外部的通道，可能促進放射性核種的浸出與遷移。研究發現，高鈣含量粒子裂解程度較大，而以矽為主的粒子較穩定，這可由鈣/鐵（Ca/Fe）與矽/鐵（Si/Fe）元素比值區分。

在大多數樣品中，長半衰期核種銻 239 與銾-240 的活度濃度明顯高於其他裂變或中子活化產物。其中，放射性最強的粒子主要來自西班牙帕洛馬雷斯核子事故區與澳洲馬拉林加（Maralinga）Taranaki 測試場的模擬試驗。早期裂變核爆事件具有明顯的同位素比特徵，例如澳洲核試與 1945 年長崎核爆的

銻-240/銻-239 比值介於 0.03 – 0.05，顯著低於後期熱核試驗或核電廠核子事故來源（如福島核子事故沉降物約 0.30）。福島樣品中銻-239 與銻-240 的總量極少，活度亦遠低於銻-137。

目前，澳洲與日本研究團隊正針對廣島地區採集的土壤與粒子進行進一步的銻與銻同位素比值比較分析，以深入探討早期核事件遺留物的特性與來源。

(二)、自動化固相萃取系統於土壤樣品中銻-90 監測之效率評估

該研究由泰國（Thailand Institute of Nuclear Technology）、朱拉隆功大學（Nuclear Engineering, Chulalongkorn University）與日本弘前大學放射線緊急醫學研究所（Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University）跨國合作研究，放射性核種銻-90 因化學性質類似鈣，易於在骨骼中累積，是環境監測中重要的長半衰期放射性核種。傳統分析方法如溶劑萃取與沉澱法雖具可靠性，但操作繁瑣且需處理強酸，增加人員曝露與誤差風險。近年以 DGA 樹脂為基礎的固相萃取（SPE）法可有效分離銻及其子核種銻-90，但人工操作仍需精準控制時間與酸濃度，限制例行化應用。本研究開發自動化 DGA 樹脂固相萃取（SPE）系統，以減少人為操作、提升再現性與分析效率，應用於長期土壤中放射性銻的監測。

該自動化系統採用耐酸蝕聚四氟乙烯（PTFE）材質，結合 12 通閥與蠕動幫浦，以 $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 流速進行樣品輸送，並以光學氣泡感測器防止中斷供液。分離柱內裝填 1 mL DGA 樹脂，在高濃度硝酸環境下選擇性吸附銻-90。整體操作透過遠端定時控制器同步調節幫浦與閥門，實現自動加酸、洗脫與分段收集，最多可連續處理八件土壤樣品，並有效降低實驗人員曝露風險。

以 IAEA 認證標準土壤（IAEA-375、IAEA-444）與多元素標準液驗證系統可靠性。結果顯示銻回收率平均達 93.7%，空白測試未發現交叉污染，連續操作 40 件樣品後系統性能穩定，無樹脂衰退或機械故障。銻-90 分析結果活度值為 $1120 \pm 12 \text{ mBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，與認證值 $1090 \text{ mBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相近，證實該系統具高

準確性與分析再現性，適用於例行監測與長期趨勢分析。

相較傳統人工操作，自動化系統具顯著優勢：可減少接觸強酸及放射性物質風險，避免人為誤差並提升樣品處理一致性；封閉式流體路徑降低污染機率，且多樣品連續處理提升整體效率。此技術不僅能應用於放射性監測、核災應變及廢棄物管理，也為放射化學分析邁向自動化與標準化的重要里程碑。

(三)、鈣施加對植物體內銫吸收和運送的效應

該研究由日本環境科學研究所放射生態學系 (Department of Radioecology, Institute for Environmental Sciences) 的 Masashi Kihana 研究發表，探討施用鈣對水稻品種為 *Oryza sativa* L. 吸收與運送銫的影響，旨在為福島核子事故後的農業污染防治提供新策略。放射性銫可經根部與葉面進入植物體內 (圖 13)，最終累積於糙米中。雖然鉀肥能有效抑制根部吸收，但對葉面與體內轉運的控制仍有限，故提出鈣可透過抑制陽離子通道以降低銫吸收之假說。

研究以穩定同位素銫-133 模擬放射性銫行為，並利用感應耦合電漿質譜儀 (ICP-MS) 進行定量分析。實驗分為三部分 (圖 14)：(1) 在水培條件下，增加鈣濃度可使地上部銫濃度下降約 50%；(2) 葉面同時噴灑鈣與銫溶液，可使糙米中銫濃度降低約 35%；(3) 於抽穗期對稻穗施鈣浸泡，仍可使糙米銫濃度再下降約 20%。

研究結果顯示，鈣在根部吸收、葉面吸收及體內轉運三個階段皆具明顯抑制作用 (圖 15)。放射自顯影 (Autoradiography) 亦證實提高鈣濃度能減少作物對放射性銫-137 的積累。未來將優化施鈣條件並探討分子機制，聚焦高親和力鉀轉運蛋白 (KUP/HAK/KT) 與電壓非依賴性陽離子通道 (VICC) 在抑制銫運輸中的角色。

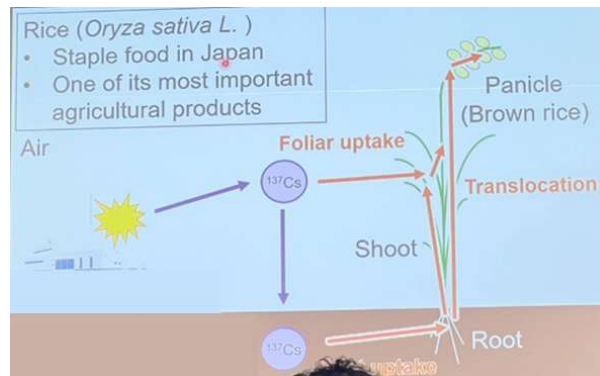


圖 13 銫作為放射性核種進入水稻的途徑

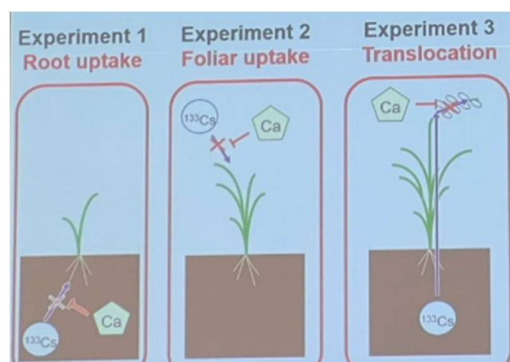


圖 14 模擬銫進入植物的三種途徑

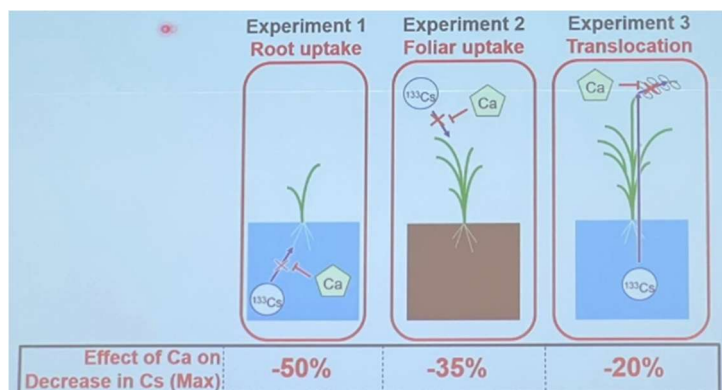


圖 15 施用鈣對銫在水稻的根部、葉面吸收和體內轉運具備顯著的抑制效果

(四)、珊瑚對碘化學形態的吸收偏好與碘-129 海洋示蹤研究

該研究由日本筑波大學環境研究科 (Univ of Tsukuba, Environmental Studies) 的 Zhiyuan Shi 研究發表，聚焦於人造放射性同位素 碘-129 在海洋環境中的行為及其作為海洋環流示蹤劑的潛力。碘-129 具長達 1,570 萬年的

半衰期、高水溶性與高遷移性，主要由核裂變產生。歷史珊瑚岩心數據顯示，日本壹岐島的珊瑚可有效記錄海水碘-129 的輸入歷史，其碘-129/碘-127 比值自 1940 年代以來隨人為活動顯著上升。

為探討珊瑚對碘化學形態的吸收特性，研究設計以短半衰期放射性碘-125 作為示蹤劑，並成功製備純度約 98% 的碘化物 (I^-) 與碘酸鹽 (IO_3^-) 形態示蹤溶液。碘在骨骼中之濃度極低，主要累積於軟組織與有機基質中；故實驗採用星光珊瑚 (*Galaxea fascicularis*) 建立穩定的微飼養系統，於 4 小時內進行吸收試驗 (圖 16)。結果顯示，珊瑚對碘化物 (I^-) 的吸收率 ($17.0 \pm 5.3\%$) 顯著高於碘酸鹽 (IO_3^-) ($9.2 \pm 3.6\%$)，且吸收趨勢隨時間達平衡。

此結果顯示，珊瑚對碘化物 (I^-) 具有明顯吸收偏好，若未考慮碘化物/碘酸鹽 (I^-/IO_3^-) 比值即直接推估環境碘-129 濃度，可能導致在碘化物 (I^-) 濃度較高的區域 (如福島，總碘與總碘酸鹽比值達 39.0–49.3) 被高估污染水平。研究建議重建碘-129 歷史時，應依據碘形態比例與珊瑚吸收偏好進行校正；本研究成果對本中心未來海洋碘核種監測與分析方法開發具有重要參考價值。

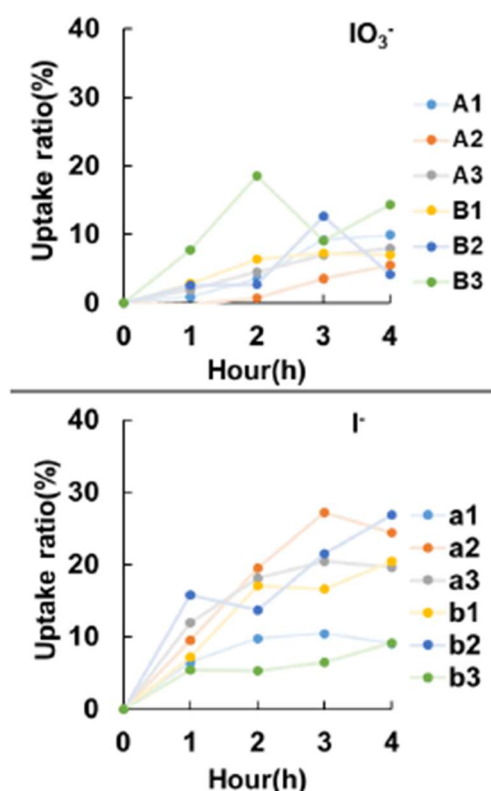


圖 16 珊瑚對不同碘化學物種的吸收比隨時間的變化

(五)、福島核子事故後日本水環境中長半衰期鈾系核種的超微量分析、遷移特性與健康風險評估

該研究由日本量子科學技術研究開發機構放射線醫學研究所 (Institute for Radiological Science, National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)) 的 Xiang Gu 研究發表，研究背景為 2011 年福島第一核電廠 (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, FDNPP) 核子事故釋放約 520 PBq ($1 \text{ PBq} = 10^{15} \text{ Bq}$) 的放射性核種，其中包括難熔元素如鈾 (Np) 與鈾 (Pu) 同位素。核子事故十年後，短半衰期核種鈾-134 與鈾-137 多低於 1 Bq/L 的檢測限，但半衰期極長的鈾-237 仍具潛在環境與健康風險。為此，本研究建立高靈敏度方法以測定水樣中微量鈾-237 與鈾同位素，並評估其在日本地表水與飲用水中的分布及健康影響。

研究共採集福島、東京、千葉等地之 27 件飲用水與 12 件地表水樣 (圖 17)，經多步化學分離流程包括：氫氧化鐵共沉澱、氟化鈣與氟化鏷共沉澱及陰離子交換層析自 20 L 水樣中濃縮目標核種；最終以扇形磁場感應耦合電漿質譜儀 (SF-ICP-MS) 分析，達到阿克級 (attogram, ag) 靈敏度，鈾-237 的方法偵測極限 (MDL) 僅 35 ag/L ($0.0009 \mu\text{Bq/L}$)，結果與 IAEA-443 參考物質高度一致，證實準確性。

鈾-237 在所有樣品中均可檢出，濃度介於 $0.004 - 0.116 \mu\text{Bq/L}$ ，遠低於世界衛生組織 (WHO) 指導值 1 Bq/L。鈾同位素比值顯示其來源主要為全球落塵 (Global Fallout)，且鈾-237 活度與土壤中鈾濃度呈顯著正相關，反映其由土壤徑流進入水體。由於鈾-237 具高溶解度與低分配係數，傳統水處理對其去除效果有限。健康風險評估指出，鈾-237 的年有效攝入劑量遠低於 0.1 mSv/yr 安全閾值，體內曝露風險可忽略。

綜上，鈾-237 雖普遍存在於日本水環境中，但濃度極低且來源以全球落塵為主，對公眾健康影響微小。本研究結果可作為本中心飲用水與環境監測之重要參考依據。

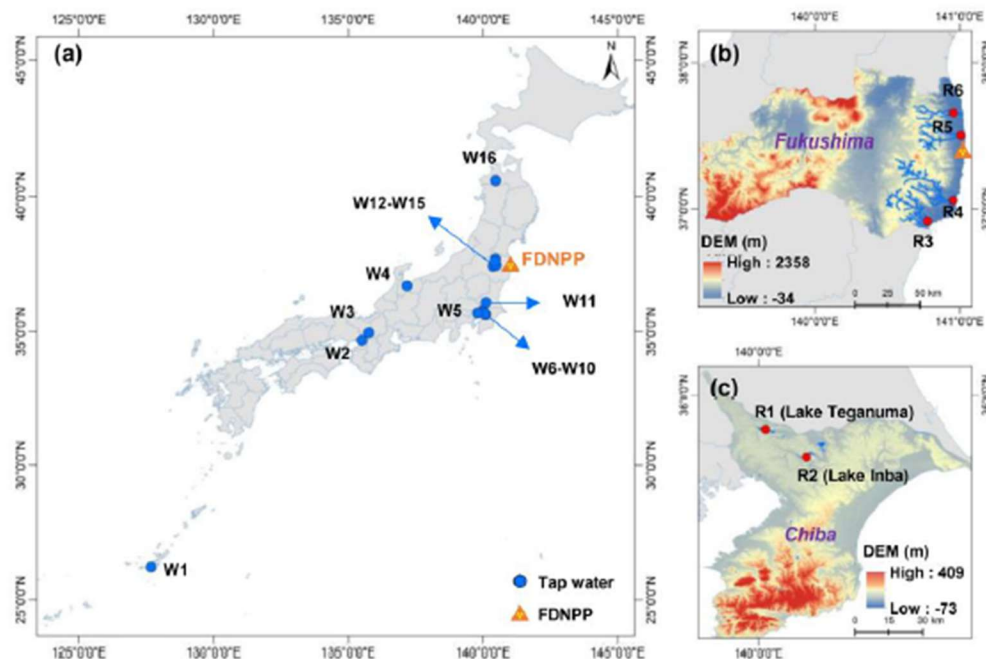


圖 17 福島事故後水環境研究採樣位置

(a)自來水樣品位置(b)福島河川水樣品位置(c)千葉湖泊水樣品位置

(六)、陽離子界面活性劑對粘土礦物中銫-137 去污效率的時效性影響

該研究由日本廣島大學（Hiroshima University）之自然科學基礎研究發展中心（Natural Science Center for Basic Research and Development）的 Akihito Matsushima 所發表，研究背景為福島第一核電廠核子事故之後，福島土壤中發現的放射性核種中，放射性銫因其長的半衰期以及對人類健康和周圍環境的長期影響，仍然是主要關注的問題。已知吸附到土壤中的銫-137 極難去污，這被認為是因為銫離子（ Cs^+ 離子）被土壤中含有的黏土礦物強烈吸附所致。本研究旨在調查四種吸附了銫-137 的黏土礦物（伊利石、高嶺石、鈉膨潤土、鈣膨潤土）在吸附處理後，其去污效率（使用兩種陽離子界面活性劑：溴化苯甲十二烷基二甲基銨〔Benzyl Dodecyl Dimethyl Ammonium Bromide, BDAB〕與溴化十二烷基三甲基銨〔Dodecyl Trimethyl Ammonium Bromide, DTAB〕）隨老化時間（Aging Time/Contact Time）的變化情況。

研究中使用的四種黏土礦物為伊利石、高嶺石、鈉膨潤土與鈣膨潤土。銫吸附樣品是在 25°C 下與含有銫-137 的 100 mM 氯化銫（ CsCl ）溶液平衡 24

小時後製備，吸附後的樣品於 80°C 下乾燥 24 小時。去吸附實驗中，吸附銫的樣品在室溫下老化 1、10、20、30 與 60 天 (圖 18)，再與 0 – 100 mM 的 BDAB 或 DTAB 溶液混合攪拌 24 小時。去污效率以乾燥後固相中殘留銫量計算。初始銫吸附量分別為：伊利石 0.0275、高嶺石 0.0148、鈉膨潤土 0.3479、鈣膨潤土 0.4425 mmol/g。為確保吸附穩定性，高嶺石與鈣膨潤土經清洗七次後均無檢出銫-137，而伊利石與鈉膨潤土則經清洗達十二次均無檢出，顯示銫吸附牢固。

結果顯示，對所有黏土礦物而言，BDAB 的去污效率均高於 DTAB，且效率隨界面活性劑濃度升高而提升。伊利石與鈉膨潤土在老化 30 天後去污效率下降，顯示具時效性；高嶺石與鈣膨潤土則幾乎不受老化影響。DTAB 的時效性更為明顯，其效率隨老化而顯著下降。此現象可由層電荷解釋：伊利石 (-0.8) 與鈉膨潤土 (-0.6) 之層電荷比鈣膨潤土 (-0.4) 與高嶺石 (0) 更負，使銫離子 (Cs^+) 易脫水成裸離子 (bare ion) 並深度吸附於層間。對伊利石而言，老化過程中銫離子 (Cs^+) 逐漸脫水並穿透邊緣磨損位點 (frayed-edge site)，進入活性劑難以達到的層間區域。對鈉膨潤土而言，層間水蒸發導致銫離子 (Cs^+) 吸附水溶液調整以補償水分，而鈣膨潤土因鈣離子 (Ca^{2+}) 具高水合能而保水性強，銫離子 (Cs^+) 易於去吸附。

綜上所述，伊利石與鈉膨潤土在銫的去吸附過程中具有明顯時效性，而高嶺石與鈣膨潤土則無。此結果可由層電荷與水合行為解釋，並說明了放射性銫在土壤中遷移與固定機制。本研究成果為銫在土壤中遷移行為提供科學依據，對於本中心後續研究土壤中核種遷移與環境放射性監測具重要參考價值。

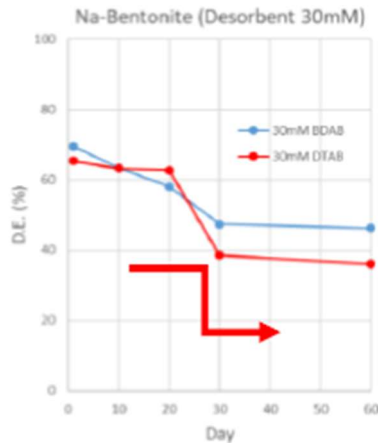


圖 18 使用 30mM 陽離子界面活性劑對鈉膨潤土隨時間的去污效率

(七)、福島森林集水區放射性銫遷移機制與生態影響

該研究由日本國立環境研究所 (National Institute for Environmental Studies) 的 Seiji Hayashi 所發表，該研究旨在分析福島核子事故後，放射性銫-137 在森林集水區的遷移機制及其對下游水體與生態系統的長期影響，聚焦於降雨徑流事件與基流條件下銫-137 行為的差異，並探討未來的復原方向。

由銫-137 傳輸機制的分析可知，在森林集水區內，其遷移呈現「雙軌制」特性：在基流條件下，溶解態銫-137 濃度與溶解有機碳 (DOC) 濃度具有明顯正相關 (線性關係斜率約 0.20)，且濃度於夏季達高峰，顯示銫的釋放主要受生物地球化學過程影響，例如高溫促進枯枝落葉分解，釋放 DOC 或競爭性鉀離子以促進銫的解吸。相對地，在降雨徑流事件期間，水文路徑快速導通，雖然總銫濃度上升，但銫與 DOC 的相關性明顯下降 (線性關係斜率降至 0.044)，顯示傳輸機制轉為水文沖刷主導。定量分析進一步指出，懸浮固體 (SS) 中有機物含量與銫-137 濃度之間具強烈正相關，尤其在 63 - 250 μm 的細顆粒有機物 (FPOM) 中，相關係數 R 約為 0.76 (圖 19)。細小顆粒有機質 (Fine Particulate Organic Matter, FPOM) 被確認為主要的顆粒態銫載體，其平均濃度 (約 3.72 Bq/g) 與森林枯枝落葉接近，佔降雨徑流期間銫總通量的 12% - 41%，證實枯枝落葉及其分解物是銫的長期供應源。

雖然從森林進入河川系統的核種總量有限，外部曝露風險不高，但持續的銫輸入對下游生態系統造成了長期影響；研究顯示，銫在淡水食物鏈中具有明

顯的生物放大效應，特別是在食物鏈頂端的魚食性魚類中濃度最高。由於未去污森林內部的銫仍持續循環，生物可利用性使得銫的供應並未中止，導致污染效應延長並影響地方經濟復原。綜上所述，該研究建議未來復原策略應著重於抑制銫在森林生態系統內的再循環，並結合森林再生與遷移抑制措施，以實現長期環境與社會復原的目標。

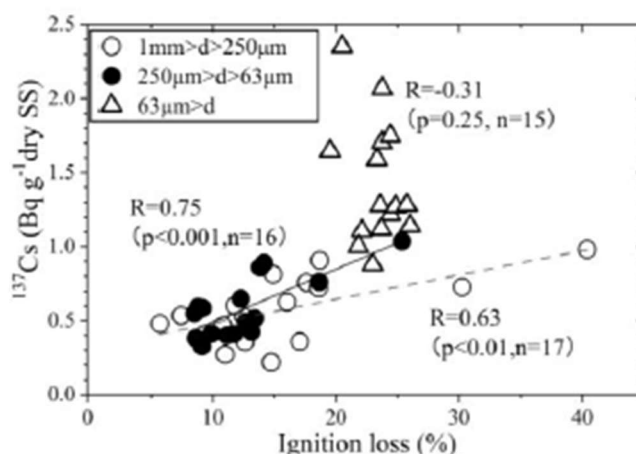


圖 19 各分級懸浮固體中銫-137 與有機質含量的關係

(八)、福島事故後銫-137 在東北地區環境及生物體系的長期分佈與遷移研究

該研究由日本石卷專修大學 (Ishinomaki Senshu University) 的 M. Fukushima 所發表，研究以 2011 年 3 月 11 日日本東北海岸發生的 9.0 級地震及其引發的福島核子事故為背景，主要研究地點位於福島第一核電廠東北方約 100 公里處的牡鹿半島，以及周邊的石卷與氣仙沼市（圖 20）。研究目的在於監測生活區域中主要放射性核種銫-134、銫-137 和 銥-90 的分佈與變化。自 2011 年 4 月起，研究團隊即開始採集海嘯帶來的地表沉積物，確認其主要來源為海洋沉積物而非陸地土壤；早期測量結果顯示，海嘯影響地區沉積物中銫-137 活度偏高，例如在氣仙沼市（海嘯高度約 20 公尺），2011 年 5 月的室外沉積物活度達 439 Bq/kg（乾重）。

在確立初期污染水準後，研究重點轉向銫-137 的長期生態行為。以牡鹿半島的日本冷杉為對象，透過對 2010 – 2013 年間不同年份發芽枝葉的加馬分析，發現 2010 年發芽的葉片因直接曝露於落塵中污染最重，而 2011 年發芽的新葉則因被苞片包覆而污染最低。年輪分析顯示，銫-137 最深可滲入樹齡約

39 年的年輪內，而天然核種鉀-40 濃度則維持穩定，顯示銻-137 被吸收後可在樹幹內部遷移與再分佈。

進一步分析結果顯示，2012 – 2015 年間新生葉與細枝中的 銻-137 平均濃度分別介於 20.3 – 30.9 Bq/kg 與 21.5 – 34.0 Bq/kg (圖 21)；即使至核子事故五年後 (2016 年)，濃度仍維持在 36.8 Bq/kg (葉) 與 69.8 Bq/kg (枝)。年輪樣品中 銻-137 濃度變化範圍為 1.7 ± 3.1 至 41.5 ± 7.6 Bq/kg，且在樹幹核心仍可觀測到高濃度累積。綜合結果顯示，冷杉樹體內存在 銻-137 的內部遷移系統，使其不僅持續出現在新生部位，亦能累積於樹幹深層；該研究對森林放射性去污與生態復原具有重要啟示。

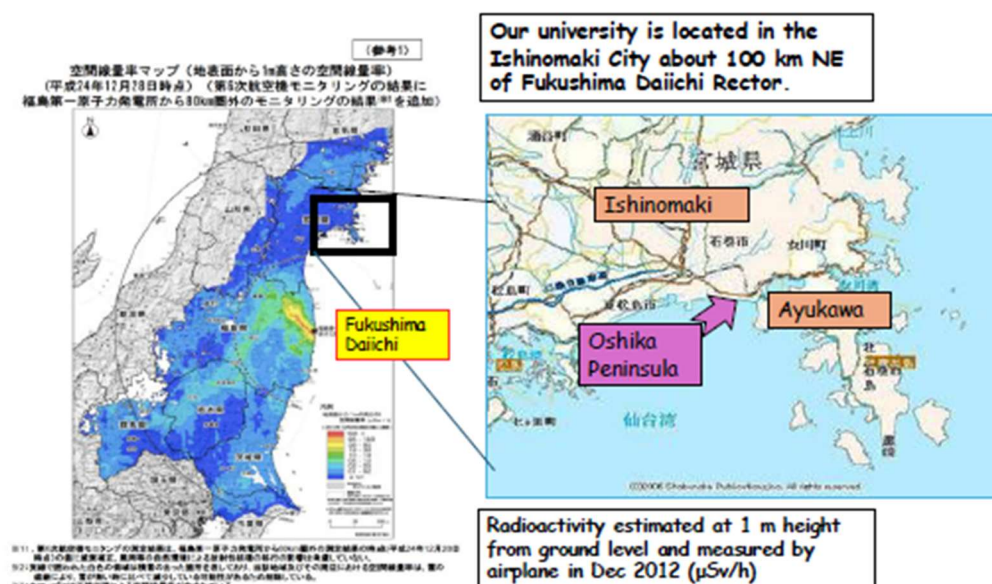


圖 20 福島第一核電廠及宮城縣牡鹿半島 200 公里範圍內的放射性分布地圖

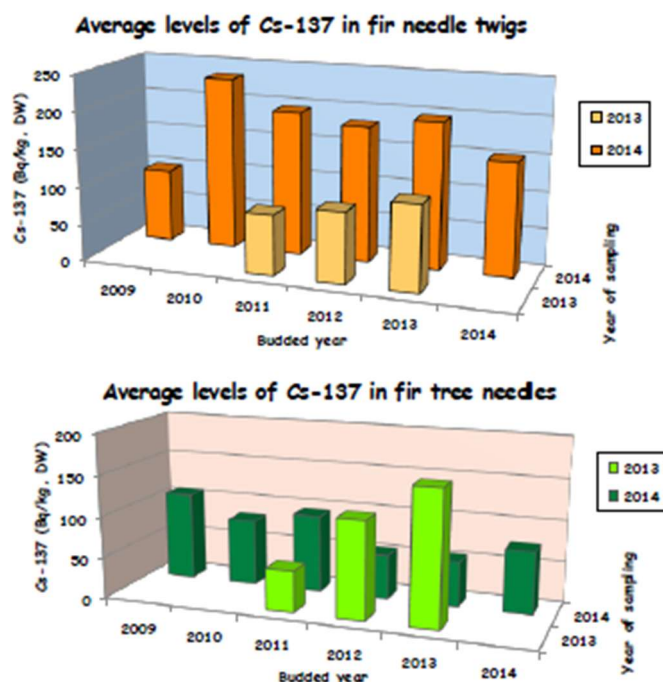


圖 21 2013 年及 2014 年樣品中銫-137 的平均含量

(九)、日本赤城小沼湖銫-137 動態研究

該研究由日本金澤大學（Kanazawa University）之自然與環境技術研究所（Institute of Nature and Environmental Technology）的 Seiya Nagao 所發表，該研究聚焦於日本群馬縣山區湖泊赤城小沼在夏季分層時底部水層中溶解態銫-137 濃度上升的現象，探討其控制機制及放射性銫在水生環境中的再分佈行為。研究動機在於關注銫-137 的遷移過程，因為它不同於一般認知中核種從高活度向低活度的擴散，而是經由水文過程，從整個流域分散的低濃度來源（例如土壤），移動並持續累積到特定的高濃度匯聚點，例如湖泊沉積物。赤城小沼因具半封閉結構、極低電導率（4–6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）及夏季易形成缺氧水團而被選為研究對象，研究於 2023 年 6 月與 2024 年 8 月進行採樣，現場測得水溫、電導率及溶解氧（圖 22），實驗室則分析營養鹽、銨根離子（ NH_4^+ ）、主要陽離子、亞鐵離子（ Fe^{2+} ）及總鐵濃度，以純鍺偵測器進行銫-137 活度分析。

結果顯示，2024 年 8 月期間湖水形成明顯溫躍層，7.5 m 深處溶解氧降至 0 mg/L，顯示底層呈還原狀態。此時銨根離子（ NH_4^+ ）與亞鐵離子（ Fe^{2+} ）

濃度顯著增加，分別對應於有機物分解及鐵氧化物還原；同時溶解態銫-137 濃度在底部水層明顯上升，而顆粒態銫-137 維持穩定。底部水層中的銨根離子 (NH_4^+)、鉀與穩定態銫-133 濃度同步增加 (圖 23)，顯示這些離子在控制 銫-137 釋放過程中扮演關鍵角色。

綜合分析結果指出，銨根離子 (NH_4^+) 為主要競爭離子，在還原環境下由有機物分解產生的大量銨根離子 (NH_4^+) 會透過離子交換作用，取代沉積物黏土礦物上吸附的銫-137，導致其釋放至底部水層。最終，研究建立了「夏季分層形成缺氧水團 → 有機物分解生成銨根離子 (NH_4^+) → 銨根離子 (NH_4^+) 競爭置換銫-137 → 溶解態銫-137 釋放」的遷移機制。沉積物核心分析亦顯示，赤城小沼 銫-137 含量與鄰近赤城大沼相近，為持續釋放提供物質基礎。此結果對理解湖泊系統中 銫-137 的二次污染與遷移機制具重要參考價值，揭示了溫躍層對銫-137 垂直遷移的關鍵控制作用。

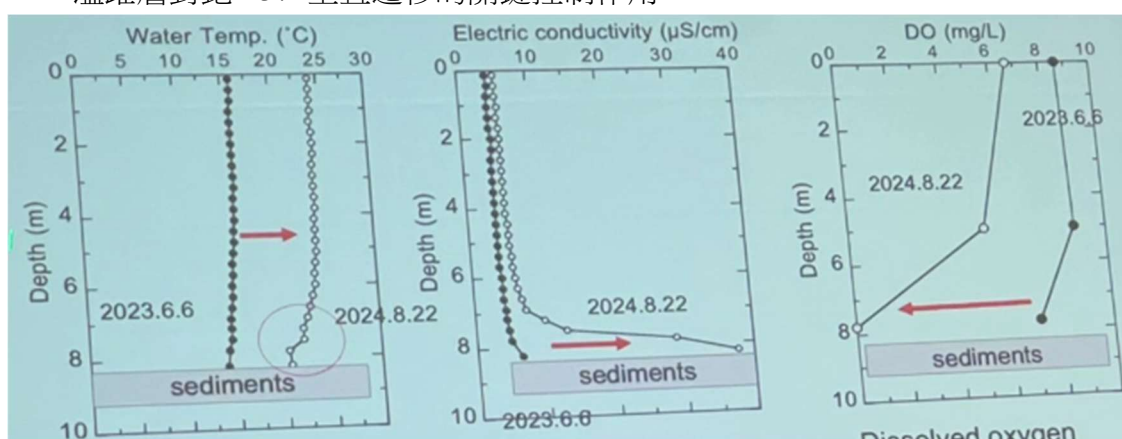


圖 22 湖水採樣測量水溫、電導率和溶解氧

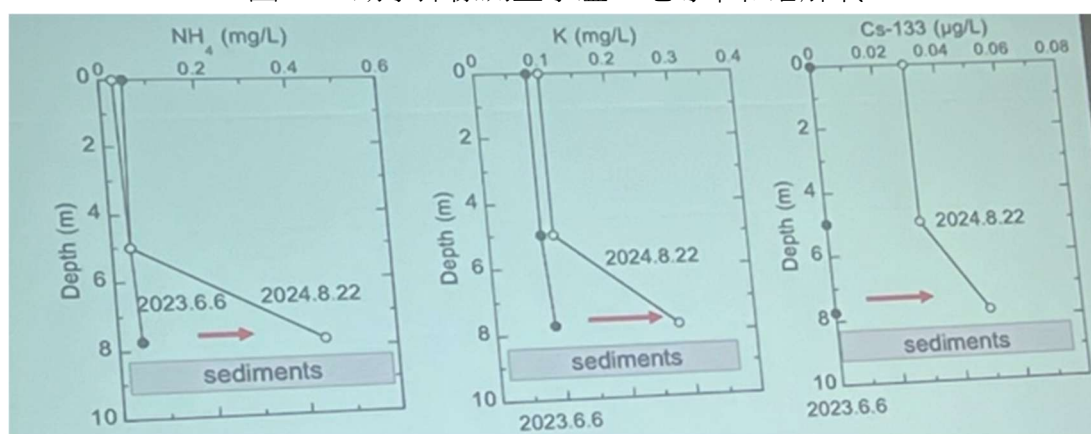


圖 23 底部水層中銨根離子、鉀和銫-133 濃度同步增加

(十)、福島禁區環境樣本中銥-90 與銫-137 活度比率與遷移模式研究

該研究由日本福島國際研究教育機構（Fukushima Institute for Research, Education and Innovation）之地域環境共創機構（Regional Environmental Co-Creation Unit）的 Norbert Kavasi 所發表，研究旨在評估福島核子事故後，禁區內不同環境介質中放射性核種銥-90 與銇-137 的濃度、活度比率與遷移行為，並區分其來源於福島釋放或全球落塵的貢獻，以評估潛在健康風險。樣本共 76 件，取自 2013 至 2018 年浪江與雙葉地區，包括表層土壤、枯枝落葉、雨水槽沉積物與路邊沉積物。分析流程採放射化學分離法：樣品以氫氟酸（HF）、硝酸（HNO₃）、鹽酸（HCl）等酸進行消解，利用 銥 萃取層析樹脂分離銥-90，並以液體閃爍計數器（TriCarb-3100 LSC）測定活度，ICP-MS 校正回收率；銇-137 則以純鍺偵檢器進行加馬核種分析，以確保定量準確。

結果顯示，銥-90 活度範圍為 3 – 1,050 Bq/kg（中位數 82 Bq/kg），而銇-137 範圍高達 0.7 – 6,770 kBq/kg（中位數 890 kBq/kg），突顯出銇-137 的整體污染水平比銥-90 高出三個數量級。路邊沉積物與枯枝落葉層為銥-90 與銇-137 的主要富集介質。核子事故後（2012 年）銥-90 平均濃度約 5.6 Bq/kg，明顯高於核子事故前（2005 年）之 3.0 Bq/kg。由於 銥-90 在水中具有較高溶解度，其在環境中移動性顯著高於 銇-137，表現在 銥-90/銇-137 比值上：在水樣本中比率高達 7.9（圖 24），因此在水樣本中銥-90 濃度比銇-137 高得多，而土壤僅為 0.17，且比值隨深度增加（0 – 5 cm：0.17；5 – 20 cm：0.27），證實銥-90 向下遷移的趨勢。

研究進一步區分污染來源，指出福島核子事故釋放的 銥-90/銇-137 活度比範圍介於 3.1×10^{-5} 和 4.3×10^{-3} 之間，平均值為 2.5×10^{-4} ，中位數約 1.2×10^{-4} ，顯著低於全球落塵的 10^{-1} 至 10^{-3} 範圍，可有效作為來源判別指標。由此推算，福島核子事故經大氣釋放的 銥-90 總量約 1–10 TBq，遠低於車諾比核子事故（約 10,000 TBq），顯示其輻射貢獻可忽略不計。整體而言，本研究採用標準化酸消解、銥 萃取層析與多儀器交叉驗證技術，為精密放射化學分析提供可靠範例，對本中心在銥-90 監測與品質保證方法的建立具有重要參考價值。

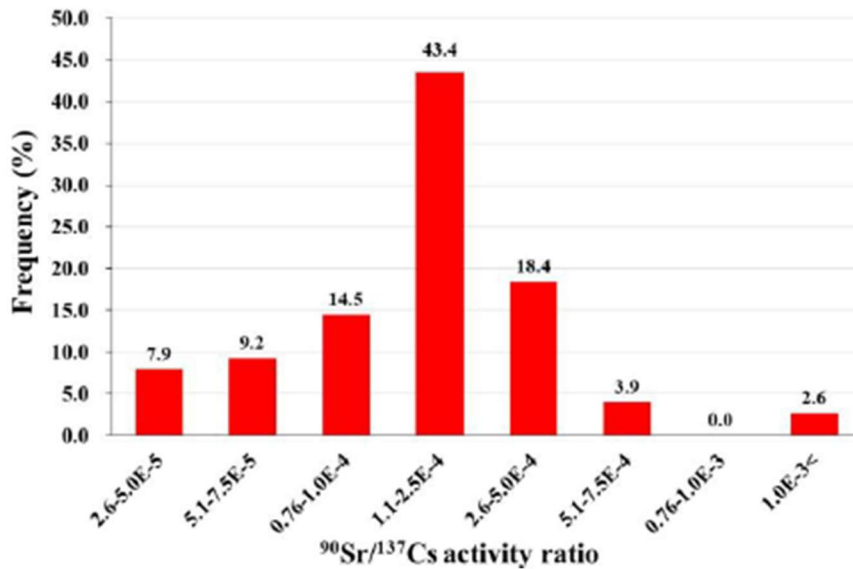


圖 24 福島禁區樣品中銨-90/銨-137 活度比值頻率分布
(參考日期：2011 年 3 月 15 日)

(十一) 、福島第一核電廠銨影響的十年研究報告

該研究由日本量子科學技術研究開發機構（National Institutes for Quantum Science and Technology, QST）之放射線醫學研究所（Institute for Radiological Sciences）的 Jian Zheng 所發表，研究綜整了福島第一核電廠（Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, FDNPP）核子事故後十年間關於銨在環境中行為的研究成果，目的在於透過高精度放射化學分析與同位素指紋技術，評估銨的來源、分佈、釋放機制及其輻射劑量貢獻。研究結果確認核子事故釋放的銨主要來自受損的反應爐爐心（Unit 1–3 reactors），而非用過核燃料池。其銨-240/銨-239 原子比為 0.323–0.330，銨-238/(銨-239+銨-240) 活度比高達 1.07–2.89，明顯異於全球落塵與車諾比核子事故的特徵，顯示福島具獨特的放射性指紋。銨-239+銨-240 的釋放量約為 $(1.0-2.4) \times 10^9$ Bq，僅占爐心庫存的約 10^{-5} ，比車諾比低四個數量級；銨為低揮發性元素，其釋放主要經由燃料碎屑或含銨微粒（Radiocesium-bearing Microparticles, CsMPs）攜帶，氫氣爆炸與通氣行為可能促成其微量釋放。

在環境分佈方面，銨污染主要集中於電廠西北方 50 km 內，但南側 20–30 km 區域亦有檢出，氣膠樣本分析顯示其可進行長距離大氣傳輸。海洋部分，在核子事故初期於近岸海水樣中觀測到具福島爐心指紋的高濃度銨，但於 5–

220 km 範圍的後續監測中並未偵測到顯著污染，估計福島對遠洋銻庫存的貢獻上限僅約 0.2%。長期監測結果亦指出，ALPS 處理水排放前後銻與銻-237 濃度變化不顯著，顯示對海洋環境影響可忽略不計（圖 25）。

輻射劑量評估顯示，雖地表銻濃度接近核子事故前背景值，但福島地區 銻-241/銻-240 活度比高於 100，推算居民 50 年間因銻-241 暴露所得劑量約 0.44 mSv，約為銻-239 與銻-240 總劑量（0.12 mSv）的四倍。整體而言，銻對總體輻射劑量的貢獻極低，但銻-241 為長期風險評估中不可忽視之因子。比較全球海洋資料顯示，福島近岸海水中銻濃度與北大西洋及北極海相近，明顯低於愛爾蘭海與地中海等受核活動影響區域，顯示福島核子事故對區域及全球環境輻射負荷之影響極微。

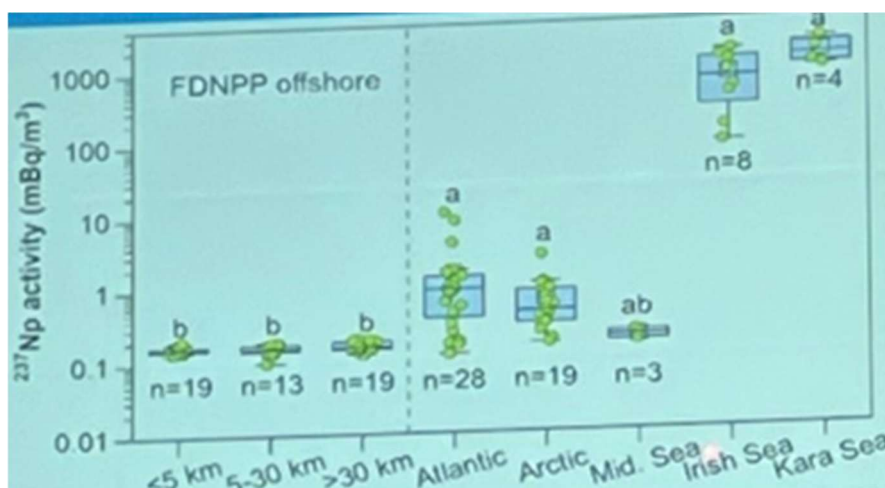


圖 25 ALPS 處理水排放前後銻和銻-237 之監測濃度

肆、心得

本中心參加 2025 年 APSORC 研討會，藉研討會與全球研究單位、學者之研究交流與技術討論，了解到放射性核種分析於化學分離、同位素比值及環境行為等領域之最新發展趨勢，對於未來放射化學分析技術之強化與研究等方向，提供具啟發與參考依據。

新型矽酸鋇吸附劑（MAQ）可用於放射性銥-90 之快速吸附與分離，能顯著縮短分析時間，最低可偵測濃度（MDC）可達 0.001 Bq/L，為提升海水中放射性核種檢測靈敏度的參考技術之一。在同位素比值分析方面，銇（銇-135）標準物質之 SI 可追溯定值方法，可支援 銇-135/銇-137 比值的精確判讀，應用於污染來源鑑別與排放水中核種行為研究。研究亦顯示，整合同位素比值資料（如 銥-90/銇-137、銇-135/銇-137）可作為環境放射性監測與污染溯源的關鍵依據。此外，聚矽酸鐵（PSI）混凝劑由鐵（Fe）與二氧化矽（SiO₂）組成，具高效絮凝與沉降性能，可有效去除廢液中用過核子燃料物質，展現其於核廢液處理及前處理程序中的應用潛力。

在放射性核種分析技術發展逐漸朝向高靈敏度與高效率發展，加速器質譜（AMS）與多接受器感應耦合電漿質譜儀（MC-ICP-MS）被廣泛應用於長半衰期核種（如鈾-236、碘-129、氯-36）之追蹤分析； β 射線光譜與自動化固相萃取系統則提升了短半衰期核種（如 銥-90、氚-3）之例行分析速度。

自研究結果顯示，放射性核種在環境中的行為具有明顯的多介質遷移特性。無論是氚在河川與海洋的擴散（如斯洛維尼亞 Krško 與中國南海模擬研究），或是銇-137 在植物根部的吸收行為、以及銈在核試驗場沉積物中的長期滯留，皆顯示環境條件、離子交換與生物作用對核種再分布影響重大。案例中提供未來進行土壤、水體與濾紙樣品監測時的參考依據，並提醒在評估異常濃度或來源時，應同時考慮氣候、水文與地化因素，而非僅依據放射性濃度值做單點判斷。

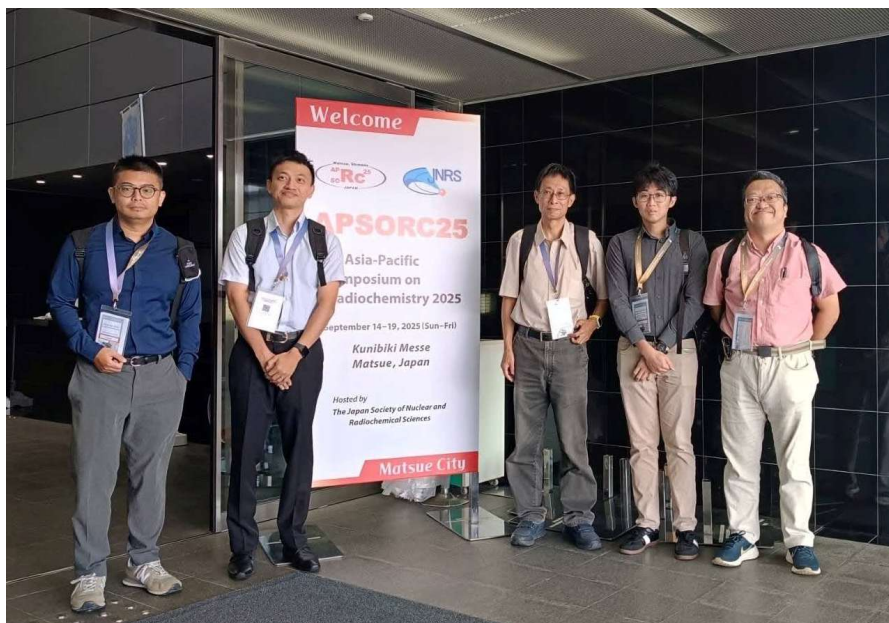
綜上，透過本次之研討會交流，了解全球放射性核種分析實驗室在化學分

析、儀器分析及核種遷移等項目，提供本中心在放射性核種分析技術精進之方向。

伍、 建議

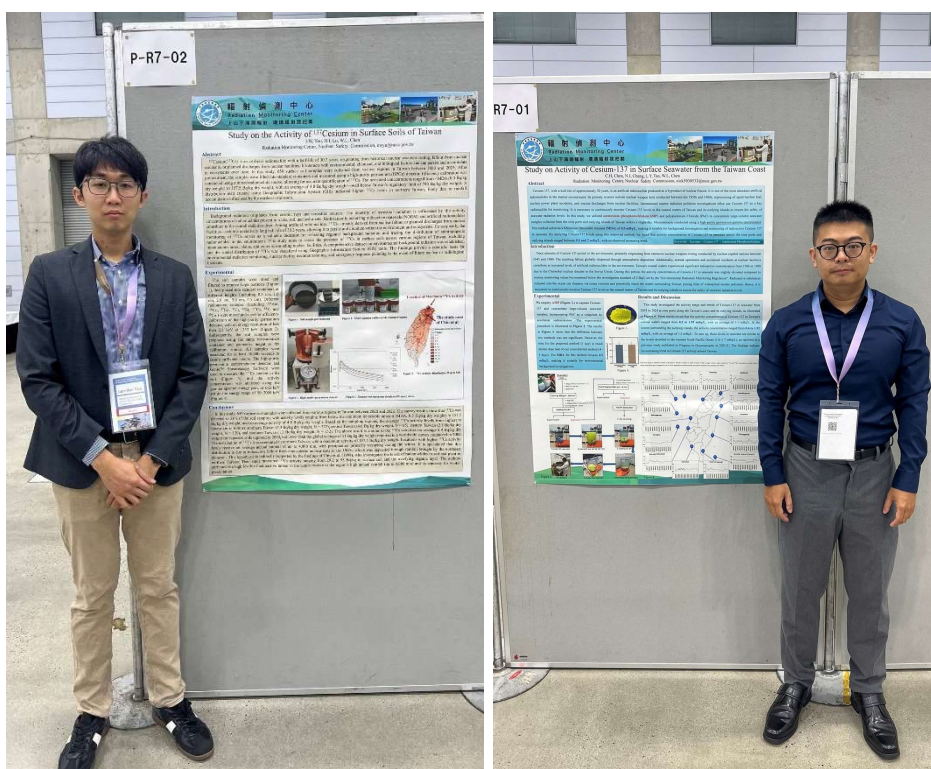
- 一、 可採用感應耦合電漿質譜儀（ICP-MS）搭配化學分離等方法，逐步建立核種同位素比值（如：銫-135/銫-137）之量測作業程序，作為核種來源辨識與趨勢追蹤等之重要核指紋依據。
- 二、 建議參考國際輻射實驗室逐步汰舊或更新儀器設備（如：前處理自動化設備、新一代輻射度量儀器等），可提升實驗室之品質管制及分析效能。同時，持續與國外輻射領域相關實驗室進行技術交流及經驗回饋，提升我國環境輻射監測與分析等作業達國際水準。
- 三、 新型鋇吸附劑比傳統方法大幅縮短的化學操作時間，建議可與國內相關學術單位合作，共同開發及應用新型鋇吸附劑，以建立一套高效能、快速且便利的低濃度放射性鋇分析標準作業流程，達成放射性鋇分析的最低可偵測濃度目標。

陸、 附錄



研討會與會同仁合照

(左二 輻防組林士軒技士 左三 中正大學謝奇文教授 右一 清華大學李傳斌博士)



本中心發表壁報論文



研討會參與者合影

(摘自：<https://pub.conf.it.atlas.jp/en/event/apsorc2025/content/photos>)

柒、 参考資料

1. **Asai, S.**, Tajima, T., Sakaguchi, A., Sato, Y., & Shirono, K. (2025, September). *Homogeneity and stability testing of carrier-free Cs-135 standard solution*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
2. **Bagramova, A.**, Sakaguchi, A., Sakata, K., Takahashi, J., Zhumalina, A., Endo, S., Kajimoto, T., Hoshi, M., & Zhumadilov, K. (2025, September). *Atmospheric Pb-210 activity concentrations in North Kazakhstan Uranium Mining Area*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
3. **Coha, I.**, Karanović, G., Štrok, M., Kožar Logar, J., Zorko, B., Volčanšek, A., Znidaršić, J., Novak, D., Tucaković, I., & Grahek, Ž. (2025). *Retrospective overview of the results of radionuclide measurements in the liquid radioactive discharges of the Krško Nuclear Power Plant and the Sava River water*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
4. **Fukushima, M.**, Matsutani, T., Nemoto, T., Yoda, K., & Chatt, A. (2025, September). *Trend of Cs-137 in leaves, branches, and tree rings of fir (Abies firma) in Ishinomaki area of Miyagi Prefecture, Japan*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
5. **Gu, X.**, Zheng, J., Yang, G., Tagami, K., Aono, T., & Wu, F. (2025, September). *Determination of ultra-trace Np-237 and Pu isotopes in drinking and surface waters by SF-ICP-MS*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
6. **Hayashi, S.**, & Tsuji, H. (2025, September). *How the forested areas have worked to radiocesium migration in a river system after the Fukushima nuclear accident*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
7. **Igarashi, Y.**, Endo, S., Takamiya, K., Inoue, J., Yashima, H., Ikegami, M., Inomata, Y., Fukutani, S., Mukai, T., Adachi, T., Fukuda, N., & Yokoyama, S. (2025). *Soil survey methodology to identify the “Black Rain” deposition*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
8. **Johansen, M. P.**, Child, D. P., Peterson, M., Young, E., & Hotchkis, M. A. C. (2025). *Characterizing environmental samples for long-lived radionuclides with emphasis on 1940–1950 nuclear events in Japan and Australia*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
9. **Kasuga, Y.**, Tsukada, K., Asai, M., Takaku, Y., Yamasaki, S., Shigekawa, Y., Sueki, K., & Sakaguchi, A. (2025, September). *Investigation of curium isotope*

- measurements by mass spectrometry. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*
10. **Kheamsiri, K.**, Akata, N., Kranrod, C., Tazoe, H., Thumwijit, T., Rosianna, I., Kuwata, H., Khetanun, K., Yimyam, N., Unno, Y., & Takeda, A. (2025, September). *Soil properties: The case study of the coffee field, AIRID Training Center, Chiang Mai University, Thailand. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*
 11. **Kihana, M.**, Yamagami, M., Ohtsuka, Y., Takaku, Y., Unno, Y., & Takeda, A. (2025, September). *Effects of calcium application on caesium uptake and translocation in plants. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*
 12. **Lin, H.-T.**, Shen, C. C., Chiang, H.-W., & Chen, J.-M. (2025). *Application and limitations of MC-ICPMS measured $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ as an ocean tracer. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.*
 13. **Matsushima, A.**, Wijayanto, H., & Nakashima, S. (2025, September). *Aging effect on the decontamination efficiency of Cs-137 from clay minerals using cationic surfactant. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*
 14. **Matsuzaki, H.** (2025). *Environmental analysis by accelerator mass spectrometry. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.*
 15. **Minowa, H.**, Ogata, Y., Kojima, S., Kato, Y., Sueki, K., Sugihara, S., & Arinobu, T. (2025, September). *Development of analytical method for low-level radiostrontium in seawater using strontium sorbent. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*
 16. **Mukai, T.**, Adachi, T., Ikegami, M., Yashima, H., Fukutani, S., Takamiya, K., Inoue, J., & Igarashi, Y. (2025). *The “Black Rain” generated by the Hiroshima atomic bomb was acid rain. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.*
 17. **Nagao, S.**, Otori, S., Shiozawa, K., Akutsu, T., Suzuki, K., & Ochiai, S. (2025, September). *Increase in dissolved Cs-137 concentration in bottom water layer at summer stratification from a mountainous lake, Lake Akagi-Konuma in Gunma Prefecture, Japan. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*
 18. **Ogata, Y.**, Minowa, H., Kojima, S., Kato, Y., Sueki, K., Sugihara, S., & Arinobu, T. (2025, September). *A rapid analysis of radiostrontium in environmental water using strontium sorbents. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.*

19. **Sato, H., & Ikeda, R.** (2025, September). *Effect analysis of I-129 to the environment generated due to the decay of Te-129 discharged by the Fukushima nuclear accident*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
20. **Satou, Y.,** Endo, S., Akaji, R., Shobu, T., Tominaga, A., & Sumita, T. (2025). *Synchrotron-based analysis of spherical iron oxide particles found in Hiroshima Bay*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
21. **Shi, Z.,** Takaku, Y., Yamasaki, S., Shigekawa, Y., Sasa, K., Sueki, K., & Sakaguchi, A. (2025, September). *Comparative uptake behavior of iodide and iodate by corals in seawater*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
22. **Shimada, A.,** Iida, Y., & Maruyama, Y. (2025). *Measurement of Sr-90/Cs-137 ratios of smear samples collected in reactor buildings of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using β -ray spectrometry*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
23. **Sifnerova, L.,** Matsuishi, T., Tachibana, Y., Hiyama, T., & Honda, F. (2025, September). *Study on removal of the nuclear fuel materials from waste liquid using flocculation and precipitation method*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
24. **Sola, P.,** Tazoe, H., Akata, N., Kranrod, C., & Kritsanuwat, R. (2025). *Efficiency evaluation of an automated solid-phase extraction system for monitoring radiostrontium (^{90}Sr) in soil samples*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
25. **Takamiya, K.,** Ikegami, M., Osada, N., & Igarashi, Y. (2025). *Analysis of fissile material using fission track method in nuclear fallout samples collected on Daigo Fukuryu Maru*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
26. **Tan, Q.,** Wei, X., Xu, Z., Pan, D., & Wu, W. (2025). *Study on colloid and radionuclide co-migration model in saturated porous system based on the interaction forces between colloids*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.
27. **Tomita, J.,** Tomita, R., Yomogida, T., Suzuki, D., & Yasuda, K. (2025). *Determination of uranium isotope ratios of single uranium particle by multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry*. Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Shimane, Japan.

28. **Yeon, J.-W.**, & Kim, M. (2025, September). *Effect of gamma dose and pH on methyl iodide formation in 2 mM NaI and 5 mM MEK aqueous solutions*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
29. **Zheng, J.**, Tagami, K., Gu, X., Yang, G., & Uchida, S. (2025, September). *Advances of ICP-MS analysis of actinides at atto-gram levels and its radioecological applications*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.
30. **Zheng, J.**, Wu, J., Tagami, K., Yang, G., & Aono, T. (2025, September). *Impact of plutonium originating from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in the environment: an overview of a decade studies*. 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Kunibiki Messe Shimane, Japan.

捌、 補充資料

1. 研討會壁報發表 Study on the Activity of $^{137}\text{Cesium}$ in Surface Soils of Taiwan



Study on the Activity of $^{137}\text{Cesium}$ in Surface Soils of Taiwan

J.W. You¹, H.I. Lo¹, W.L. Chen

¹ Radiation Monitoring Center: No.823, Cheng-Qing Rd., Kaohsiung City, Taiwan, 833, cwyu@nusc.gov.tw

Abstract

$^{137}\text{Cesium}$ (^{137}Cs) is an artificial radionuclide with a half-life of 30.2 years, originating from historical nuclear weapons testing, fallout from nuclear accidents, or planned discharges from nuclear facilities. It interacts with environmental, chemical, and biological factors and can persist and accumulate in ecosystems over time. In this study, 659 surface soil samples were collected from various regions in Taiwan between 2020 and 2023. After pretreatment, the samples were filled into standard containers and measured using a high-purity germanium (HPGe) detector. Efficiency calibration was conducted using a mixed radionuclide source, allowing for accurate quantification of ^{137}Cs . The measured concentrations ranged from <MDA (0.3 Bq/kg dry weight) to 157.5 Bq/kg dry weight, with an average of 4.8 Bq/kg dry weight—well below Taiwan's regulatory limit of 740 Bq/kg dry weight. A distribution map created using Geographic Information System (GIS) indicated higher ^{137}Cs levels in northern Taiwan, likely due to rainfall accumulation influenced by the northeast monsoon.

Introduction

Background radiation originates from cosmic rays and terrestrial sources. The intensity of terrestrial radiation is influenced by the activity concentrations of radionuclides present in rocks, soil, and sediments. Both naturally occurring radioactive materials (NORM) and artificial radionuclides contribute to the overall radiation dose. Among artificial radionuclides, ^{137}Cs —mainly derived from nuclear fallout or planned discharges from nuclear facilities—exhibits a relatively long half-life of 30.2 years, allowing it to persist and circulate within the environment and ecosystems. Consequently, the monitoring of ^{137}Cs serves as a valuable indicator for assessing regional background radiation and tracing the distribution of anthropogenic radionuclides in the environment. This study aims to assess the presence of ^{137}Cs in surface soils across various regions of Taiwan, including mountainous areas, plains, and zones surrounding nuclear facilities. A comprehensive dataset on environmental background radiation was established, and the spatial distribution of ^{137}Cs was visualized using Geographic Information System (GIS) tools. The findings provide a scientific basis for environmental radiation monitoring, nuclear facility decommissioning, and emergency response planning in the event of future nuclear or radiological incidents.

Experimental

The soil samples were dried and filtered to remove large particles (Figure 1), then placed into standard containers at different heights (including 0.5 cm, 1.0 cm, 2.0 cm, 3.0 cm, 4.5 cm). Different radioactive isotopes (including ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{51}Cr , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y , and ^{60}Co) were mixed and used for efficiency calibration of the high-purity germanium detector, with an energy resolution of less than 2.5 keV at 1332 keV (Figure 2). Subsequently, the soil samples were prepared using the same measurement container and geometric height as the calibration source. All samples were measured for at least 30,000 seconds to ensure sufficient counts. The high-purity germanium semiconductor detector and Genie™ Spectroscopy Software were used to measure the ^{137}Cs content in the soil (Figure 3), and the activity concentration was analyzed using the gamma spectral energy peak at 662 keV within the energy range of 50–2000 keV (Figure 4).



Figure 1. Soil sample pretreatment



Figure 2. Mixed gamma radionuclide standard source



Figure 3. High-purity germanium detector

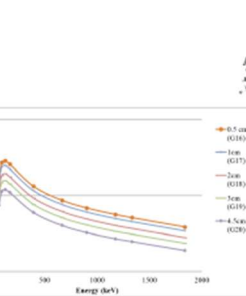


Figure 4. Gamma-ray spectrum absolute efficiency curve

Location of Maximum ^{137}Cs Activity

The study area of Chiu et al

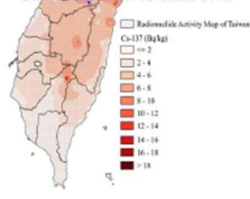


Figure 5. ^{137}Cs Activity Distribution Map in Soil

Conclusions

In this study, 659 surface soil samples were collected from various regions in Taiwan between 2020 and 2023. The survey results show that ^{137}Cs was detected in 51% of the soil samples, with activity levels ranging from below the minimum detectable amount (MDA, 0.3 Bq/kg dry weight) to 157.5 Bq/kg dry weight, and an average activity of 4.8 Bq/kg dry weight. Based on the sampling regions, the average ^{137}Cs activity levels from highest to lowest are as follows: northern Taiwan (7.3 Bq/kg dry weight, N = 322), central Taiwan (4.6 Bq/kg dry weight, N = 65), eastern Taiwan (2.8 Bq/kg dry weight, N = 120), and southern Taiwan (1.2 Bq/kg dry weight, N = 152). The above result is similar to the ^{137}Cs activities on average 4.9 Bq/kg dry weight for Japanese soils reported in 2000, but lower than the global average of 51 Bq/kg dry weight reported in a worldwide survey conducted in 2000. The distribution of ^{137}Cs is concentrated in northern Taiwan, with a maximum activity of 157.5 Bq/kg dry weight. Locations with higher ^{137}Cs activity levels receive an average annual rainfall of up to 4,000 mm, with precipitation primarily occurring during the winter. It is speculated that this distribution is due to radioactive fallout from atmospheric nuclear tests in the 1960s, which was deposited through rainfall brought by the northeast monsoon. This hypothesis is indirectly supported by the findings of Chiu et al. (1999), who investigated the levels of radionuclides in soil and plant in northern Taiwan. Their study measured ^{137}Cs activity ranging from 29.2 to 95 Bq/kg in surface soil and the overlying organic layer. The authors attributed the high levels of radioactive fallout in the nature reserve to the region's high annual rainfall (up to 4,000 mm) and its tendency for winter precipitation.

2. 研討會壁報發表 Study on Activity of Cesium-137 in Surface Seawater from the Taiwan Coast



Study on Activity of Cesium-137 in Surface Seawater from the Taiwan Coast

C.H. Chen, N.I. Cheng, L.Y. Tao, W.L. Chen

Radiation Monitoring Center, Nuclear Safety Commission, nick5030533@nusc.gov.tw

Abstract

Cesium-137, with a half-life of approximately 30 years, is an artificial radionuclide produced as a byproduct of nuclear fission. It is one of the most abundant artificial radionuclides in the marine environment. Its primary sources include nuclear weapon tests conducted between the 1950s and 1960s, reprocessing of spent nuclear fuel, nuclear power plant accidents, and routine discharges from nuclear facilities. International marine radiation pollution investigations often use Cesium-137 as a key radionuclide for monitoring. It is necessary to continuously monitor Cesium-137 levels in the coastal waters of Taiwan and its outlying islands to ensure the safety of seawater radiation levels. In this study, we utilized **ammonium phosphomolybdate (AMP)** and polyaluminum Chloride (PAC) to concentrate large-volume seawater samples collected from the nine ports and outlying islands of Taiwan within a single day. Measurements conducted using a **high-purity germanium gamma spectrometer**. This method achieves a Minimum Detectable Amount (MDA) of **0.5 mBq/L**, making it suitable for background investigation and monitoring of radioactive Cesium-137 in seawater. By analyzing Cesium-137 levels using this improved method, we found that activity concentration of Cesium-137 in seawater across the nine ports and outlying islands ranged between **0.5 and 2 mBq/L**, with no observed increasing trend.

Keywords : Seawater · Cesium-137 · Ammonium Phosphomolybdate

Introduction

Trace amounts of Cesium-137 persist in the environment, primarily originating from extensive nuclear weapons testing conducted by nuclear-capable nations between 1945 and 1980. The resulting fallout globally dispersed through atmospheric deposition. Additionally, normal operations and accidental incidents at nuclear facilities contribute to increased levels of artificial radionuclides in the environment. Taiwan's coastal waters experienced significant radioactive contamination from 1986 to 1988 due to the Chernobyl nuclear disaster in the Soviet Union. During this period, the activity concentration of Cesium-137 in seawater was slightly elevated compared to routine monitoring values but remained below the investigation standard of 2 Bq/L set by the "Environmental Radiation Monitoring Regulation". Radioactive substances released into the ocean can disperse via ocean currents and potentially reach the waters surrounding Taiwan, posing risks of widespread marine pollution. Hence, it is necessary to continuously monitor Cesium-137 levels in the coastal waters of Taiwan and its outlying islands to ensure the safety of seawater radiation levels.

Experimental

We employ **AMP** (Figure 1.) to capture Cesium-137 and concentrate large-volume seawater samples, incorporating PAC as a coagulant to accelerate sedimentation. The experimental procedure is illustrated in Figure 2. The results in Figure 3, show that the difference between two methods was not significant. However, the time for the proposed method (1 day) is much shorter than that of our conventional method (4–5 days). The MDA for this method remains **0.5 mBq/L**, making it suitable for environmental background investigations.



Figure 1.

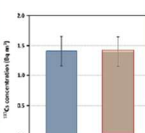


Figure 3.

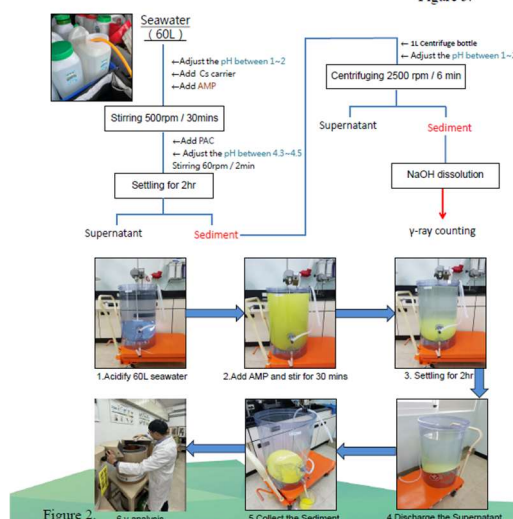


Figure 2.

Results and Discussion

This study investigated the activity range and trends of Cesium-137 in seawater from 2018 to 2024 at nine ports along the Taiwan's coast and its outlying islands, as illustrated in Figure 4. These results reveal that the activity concentration of Cesium-137 in Taiwan's coastal waters ranged from **0.5 to 1.95 mBq/L**, with an average of 1.1 mBq/L. In the waters surrounding the outlying islands, the activity concentration ranged from **0.6 to 1.92 mBq/L**, with an average of 1.2 mBq/L. To sum up, these levels in seawater are similar to the levels recorded in the western North Pacific Ocean (1.0–1.7 mBq/L), as reported in a previous study published in *Progress in Oceanography* in 2021[1]. The findings indicate no increasing trend in Cesium-137 activity around Taiwan.

[1]Inoue M, Hanaki S, Takehara R, Kofuji H, Matsunaka T, Kuroda H, Taniuchi Y, Kasai H, Morita T, Miki S, Nagao S (2021) Lateral variations of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs concentrations in surface waters in the western North Pacific and its marginal sea (2018–2019): implications for basin-scale and local current circulations. *Prog Oceanogr* 195:102587

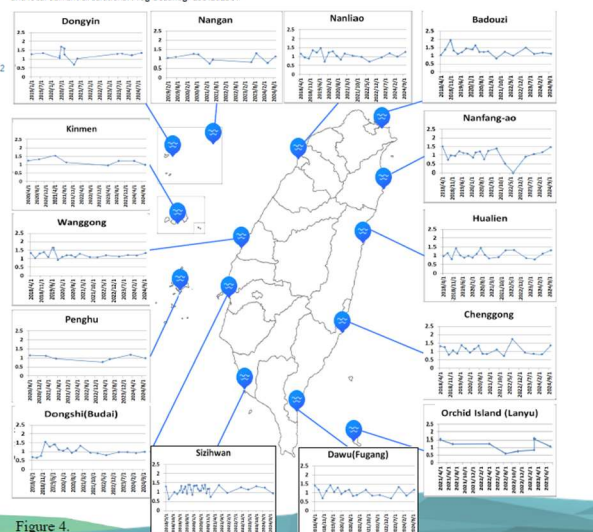


Figure 4.

3. APSROC25 大會議程

	Sept.14			Sept.15			Sept.16			
	Regist.	MP Hall		Int'l Hall	MP Hall	Small Hall	Int'l Hall	MP Hall	Small Hall	
8:30										8:30
8:40										8:40
8:50										8:50
9:00										9:00
9:10										9:10
9:20										9:20
9:30										9:30
9:40										9:40
9:50										9:50
10:00										10:00
10:10										10:10
10:20										10:20
10:30										10:30
10:40										10:40
10:50										10:50
11:00										11:00
11:10										11:10
11:20										11:20
11:30										11:30
11:40										11:40
11:50										11:50
12:00										12:00
12:10										12:10
12:20										12:20
12:30										12:30
12:40										12:40
12:50										12:50
13:00										13:00
13:10										13:10
13:20										13:20
13:30										13:30
13:40										13:40
13:50										13:50
14:00										14:00
14:10										14:10
14:20										14:20
14:30										14:30
14:40										14:40
14:50										14:50
15:00										15:00
15:10										15:10
15:20										15:20
15:30										15:30
15:40										15:40
15:50										15:50
16:00										16:00
16:10										16:10
16:20										16:20
16:30										16:30
16:40										16:40
16:50										16:50
17:00										17:00
17:10										17:10
17:20										17:20
17:30										17:30
17:40										17:40
17:50										17:50
18:00										18:00
18:10										18:10
18:20										18:20
18:30										18:30
18:40										18:40
18:50										18:50
19:00										19:00
19:10										19:10
19:20										19:20
19:30										19:30
19:40										19:40
19:50										19:50
20:00										20:00
20:10										20:10
20:20										20:20
20:30										20:30
20:40										20:40
20:50										20:50
21:00										21:00
21:10										21:10