

海域加馬輻射自動監測技術的建立與展望

王博賢^{1a} Christos Tsabaris² 傅科憲^{1a} 楊文昌^{1b*} 陳聖學^{3a} 施孟
憲^{3a} 李建明^{3a} 林昆毅^{1c} 李宜芳^{1d} 饒國清^{3b}

1 國家海洋研究院 海洋科學及資訊研究中心 (a 副研究員, b 主任, c 助理研究員, d 科員)

2 希臘海洋研究中心研究主任

3 國立成功大學近海水文中心 (a 工程師, b 督導)

摘要

為強化我國海域異常輻射預警能力，國家海洋研究院於 2022 年在宜蘭蜜月灣海域建置一座加馬輻射錨碇浮標站，用來偵測表層海水的加馬輻射值。我們已成功將海用輻射偵檢儀整合至資料浮標，透過浮標的供電系統、資料擷取系統和資料傳輸系統，達到輻射偵檢儀的現場連續自動監測和資料遠端即時傳輸。本系統利用海水固有的天然核種鉀-40 驗證儀器的正常運作和儀器的偵測穩定性。針對人造核種銻-137 的監測結果，區域海水的銻-137 活度濃度低於儀器偵測下限，顯示當地海水無銻-137 污染的安全疑慮。海水的加馬輻射值於降雨時期增高，則反映天然核種鉛-214 和鉍-214 活度濃度的增高。

關鍵詞：海洋放射性監測、加馬輻射、資料浮標

Development and Prospect of Automated Ocean Gamma Radiation Monitoring Technology

Bo-Shian Wang, Christos Tsabaris, Ke-Hsien Fu, Wen-Chang Yang*, Sheng-Hsueh Chen, Mong-Hsien Shih, Chien-Ming Lee, Yi-Fang Lee, Kun I Lin, Kuo-Ching Jao

* Director, Marine Science and Information Research Center, National Academy of Marine Research

ABSTRACT

To improve the early warning capability of abnormal radiation in the waters of Taiwan, National Academy of Marine Research built a buoy-based gamma radioactivity monitoring station at Honeymoon Bay off Yilan in 2022 to detect the gamma radioactivity of surface seawater. We have successfully integrated an underwater gamma-ray spectrometer into a data buoy. Through the power supply system, data acquisition system and data transmission system of the buoy, we are able to achieve automated and continuously in-situ monitoring of gamma radioactivity and remotely real-time data transmission. The system utilizes the natural radionuclide ⁴⁰K inherent in seawater to verify the operation and the detection stability of the instrument. The results of the artificial nuclide ¹³⁷Cs reveal its activity concentration in the regional seawater is lower than the (lower) instrumental detection limit, indicating that the local seawater has no concerns about the safety of ¹³⁷Cs contamination. The increase of gamma radioactivity of seawater during the rainfall period reflects the increase of the activity concentration of naturally produced radionuclides ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi.

Keywords: Marine radioactivity monitoring; Gamma radioactivity; Data buoy

一、前言

2011 年 3 月日本福島第一核電廠事故導致的海

洋核污染，再度引起國際對於海洋輻射物質監測、預警和預報的重要性。福島核災後，用於降溫核反

應堆所導入的淡水及流經核電廠的雨水和地下水，因含有高劑量放射性元素，而須以多核種去除設備（ALPS）進行前處理。此設備無法去除放射性元素氚，部分放射性元素亦有微量殘留，日本暫將此低輻射「含氚廢水」存於儲存槽。由於「含氚廢水」儲量已近 1.37 百萬噸滿儲（TEPCO, 2019），日本政府於 2022 年 4 月拍板擬以大量稀釋「含氚廢水」後海洋排放。環太平洋各國對此莫不高度重視，臺灣政府亦展開「含氚廢水」排放前的整備及排放後的應對計畫。

臺灣的海洋輻射監測職掌機關為行政院原子能委員會，目前其規劃的海域監測方案為每季一次、地毯式的海水、海生物和沉積物樣品採樣，再將樣品帶回實驗室處理和分析（行政院原子能委員會，2022），屬於較傳統的監測策略，但對於建立環境背景輻射卻是不可或缺的工作。然而，為了達到預警的實質效果，高頻率監測和近即時通報將是值得發展的方向。

自 1990 年代起，為因應核電廠日常排放的海洋監測以及核事故發生的緊急應變，研究人員逐步研發海洋輻射值的自動偵檢儀器，利用即時監測來達到預警進而迅速應變；其中，技術較成熟、成本效益較實用的當屬加馬（ γ ）輻射偵檢儀（Povinec et al., 2012），而以 NaI(Tl) 晶體作為探頭的船用加馬輻射偵檢儀因計測效率相對高、工作環境條件門檻相對低、造價相對低、體積相對陽春等優點，是目前國際上應用於實海加馬輻射監測的主流（Pensieri et al., 2018）。考量我國尚未有海域輻射自動即時監測之技術能量，國家海洋研究院透過國際合作引進船用加馬偵檢儀和技術，並結合國內成熟的浮標技術能量，初步於宜蘭海域建置加馬輻射錨碇浮標站，一方面進行海域加馬輻射監測的先期實驗，同時藉以強化我國於海域輻射監測和污染預警之能力。

二、研究方法

加馬輻射偵檢儀的工作原理為海水加馬粒子接觸閃爍晶體產生光電效應而激發出與加馬粒子能量呈正相關比例的光子，光子再擊中光電倍增管轉為電子訊號並倍比放大，透過電子訊號轉換為正比於加馬粒子能量的電壓脈衝訊號，最後再以多頻道能譜解析各特徵能量峰的積分面積獲得特定核種的能

量強度。本文比較 HPGe、NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)、CdZnTe 等閃爍半導體的特性（Kwak et al., 2017），選用發光效率相對高、檢測技術門檻相對低、造價相對實惠的 NaI(Tl) 晶體。

本文所用輻射偵檢儀為 HORST 公司之產品 KATERINA II 標準型加馬輻射偵檢儀（Pensieri et al., 2018）。該攜帶型偵檢儀係自主水下加馬射線能譜儀，可偵測加馬衰變的天然和人造放射性核種。其標配的 NaI(Tl) 閃爍晶體的尺寸為 7.62 × 7.62 cm，具有 1024 個能譜頻道用以解析加馬能譜範圍 50 至 2,800 KeV 的各核種。針對 ¹³⁷Cs（能峰約於 661 KeV），KATERINA II 的檢測分辨率約為 6.5%，系統之偵測下限約為 30 Bq/m³/24hr，最大工作深度可達水下 400 公尺。考慮系統的調校和試營運期間維護保養的便利性，本文之加馬輻射偵檢儀安置於直徑 1.8 公尺之海氣象浮標標體下近 2 公尺處，一旦有維護或更換儀器之需求，可委託專業潛水團隊協助水下更換作業。

浮標之與輻射偵檢儀之系統整合、布放和維運委託成功大學近海水文中心執行。浮標標體之艙內配有微型控制器（micro-controller）負責接收、儲存和發送（4G 或衛星）輻射偵檢儀及其他科儀設備即時記錄海域環境的資料、以及儀器狀態和浮標狀態的資訊。因此，微型控制器與各項科儀設備於系統整合的優劣是資料能否傳輸通暢的關鍵；而浮標系統各科儀單元健康狀況的資訊掌握，亦有助浮標系統的維運，尤其是異常狀況的排除。參考本研究條件，使用天然輻射核種鉀-40（主要能峰位於 1,460 KeV）作為評估船用加馬輻射偵檢儀的依據。試營運時期，為了確保資料傳輸品質，偵檢儀每 1 小時回傳資料一次連續計分的加馬輻射值，再從數據後台將累積 1 日（24 小時）的輻射積分值依據各核種的輻射特徵峰積分值換算為單日的活度濃度。以加馬輻射總計數值（gross count）和鉀-40 的輻射計數值正常無虞後，則可計算偵檢儀所測的能譜數據。以銻-137 為例，其活度濃度 A 可由下式求得，CPS 是銻-137 單位時間位於特徵峰的訊號強度積分值，I_γ 是加馬射線的發射概率，ε_m 是偵檢儀於海洋的效率（以 m³ 為單位）：

$$A (Bq/m^3) = \frac{CPS}{I_{\gamma} \times \epsilon_m}$$

船用輻射偵檢儀銻-137 最小可測量值（minimum

detectable amount, MDA) 評估方法係使用降雨期間的 24 小時測量值和非降雨時背景能譜(無降水事件) 依據下式算出：

$$MDA (Bq/m^3) = \frac{L_D}{\epsilon_m \times I_\gamma \times T}$$

其中, L_D 是偵測下限, T 是偵測時間, I_γ 是加馬射線的發射概率, ϵ_m 是偵檢儀於海洋的效率(以 m^3 為單位)。

三、結果討論

3.1 輻射偵檢儀與浮標系統整合

海用加馬輻射偵檢儀於 2022 年 6 月 17 日成功整合至浮標系統,儀器的供電來自浮標的標體內艙和浮標上的太陽能板,輻射檢測數據透過傳輸線經由微電腦處理,再透過 4G 通訊傳輸至陸上接收站。加馬輻射偵檢儀所接收海洋的輻射訊號為 3072 bytes 二進位格式,透過浮標的微電腦將其轉碼為十六進位格式使對應為 1,024 個加馬輻射能量頻道的計數(count)值,此計數值反映輻射偵檢儀 NaI(Tl) 晶體於單位時間在海水中接收的加馬輻射計數並透過光電倍增的結果,經由計算獲得能峰的於單位時間的積分活度濃度及最小可測量值。

系統整合期間,根據輻射偵檢儀在空氣和海水中的試驗結果,其能譜總計數於不同小時、不同日間皆顯示系統正常且穩定度高,而以碘化鉀(KCl)藥粉的鉀-40 作為天然加馬輻射的射源檢驗能峰頻道位置,亦顯示偵檢儀運作正常,故於本(2022)年 7 月 27 日將浮標系統布放於宜蘭蜜月灣海域進行試營運及系統調校(圖 1),每小時偵測之原始資料自動傳送至陸上接收站儲存和活度濃度計算。截至目前,每小時總計數如常且穩定、鉍-137 於累積 24 小時之總計數亦低於最小可測量值(圖 2),顯示宜蘭海域之海水核輻射符合安全。



圖 1 輻射偵檢浮標於布放前系統檢查

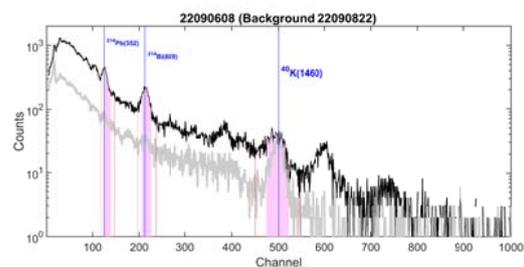


圖 2 浮標站傳送之能譜數據換算為活度濃度(Bq/m^3),能峰積分範圍以粉紅色標示

3.2 加馬輻射鉍碲浮標站試營運

加馬輻射鉍碲浮標站自 2022 年 7 月 27 日至今已試營運約 3 個月,統計加碼輻射偵檢儀在 24 小時內的每小時的總計數變化,得到總計數為 $33,316 \pm 509$ (2S.D.), 變化小於 2%,顯示儀器穩定性高,亦反映海水的輻射值在短時間內變異幅度微小,接近儀器的檢測誤差。

鉀在海水是主要元素之一,濃度為 390 ± 10 mg/L 屬於保守型原素。我們利用此特性計算宜蘭蜜月灣單日的鉀-40 活度濃度約為 $13,719 Bq/m^3$, 相符於文獻值範圍 12,000 至 $14,000 Bq/m^3$ 。此結果不僅顯示儀器 NaI(Tl) 和光電倍增管功能運作正常、儀器檢測的可靠性,也表示我們能正確地從能譜數據計算單一核種的能峰活度濃度。

3.3 海水鉍-137 偵測

宜蘭蜜月灣的加馬輻射能譜於 661 KeV 特徵能峰附近(圖 2),無論以 12 小時、24 小時、36 小時或 48 小時的積分計數,皆無法獲得鉍-137 能峰,顯示本海域的海水鉍-137 活度濃度低於儀器的偵測下限的 $30 Bq/m^3$,此下限值為康普敦邊緣(Compton edge) 拖尾的背景訊號。無法測得海水鉍-137 活度濃度的主因在於宜蘭海域、或延伸至臺灣東部黑潮(Kuroshio Current) 表層海水的鉍-137 常態值約為 $1 \pm 0.3 Bq/m^3$ (Wu et al., 2020; Huang et al., 2021), 遠低於儀器偵測下限。即使如此,本加馬輻射鉍碲浮標站設立之目的在於海域加馬輻射異常預警,日常偵測不到鉍-137 訊號反映宜蘭蜜月灣海水、或擴大解讀為黑潮表層水無加馬輻射污染疑慮。參考原子能委員會現行法規《環境輻射監測規範》,其調查基準針對鉍-137 為 $2,000 Bq/m^3$ 。

本文使用的輻射偵檢儀屬標準型、非高靈敏型,

其偵測下限雖然無法滿足我國海域銻-137 活度濃度的背景調查需求，但作為輻射異常事件（例如核電廠事故海洋外洩、核廢料海洋傾倒、海域核試爆等）仍具有相當的預警能力，相較於我國原子能委員會及所屬機關目前執行每季一次的海域輻射調查，本加馬輻射錨碇浮標站在我國首度建置別具意義，它代表著我國已具備海域的加馬輻射銻-137 現場自動、連續監測和即時遠端傳輸的能力。

3.4 降雨與海水銻-214 活度濃度的關係

2022 年 9 月上旬，軒蘭諾颱風掠過我國臺灣本島東北部外海域，縱然該颱風未直接入侵我國陸地，但位於臺灣東北部、宜蘭蜜月灣浮標站的加馬輻射能譜仍呈現與降雨有很好的關係，當降雨發生時，總輻射計數也隨之增高（圖 3）。

經過資料剖析，我們發現輻射計數增高的部分主要來自於天然放射核種鉛-214 和銻-214 的增高，其原因係為大氣中的氡氣因降雨而部分被帶至海表面，再藉由其子核種鉛-214 和銻-214 的衰變而增高海水的加馬輻射總計數（Tsabaris et al., 2021）。氡氣中的氡-222（半衰期 3.8 日）衰變至釷-218（半衰期 3.1 分鐘），接續衰變至鉛-214（半衰期 26.8 分鐘）、再衰變至銻-214（半衰期 19.8 分鐘）、再衰變至釷-214...最終衰變至穩定的鉛-206，整個衰變序列，鉛-214 和銻-214 的衰變皆伴隨加馬輻射的發生（鉛-214 衰變主能峰位於 295 和 352 KeV，銻-214 衰變主能峰位於 609 和 1,764 KeV）。

軒蘭諾颱風影響臺灣東北部時，蜜月灣浮標站回傳的加馬能譜資料顯示，位於能量 609 KeV 出現能峰及 352 KeV 的微小能峰（其部分能量受背向散射的背景所掩蓋）有明顯增高。考慮銻-214 能峰遠高於背景值，可利用銻-214 輻射值隨時間變化來驗證氡-222 的子核種銻-214 與降雨量之關係。初步結果顯示，銻-214 能峰於最大降雨時期明顯高於降雨初期；然而，本年 9 月 6 日、9 月 15 日最大降雨發生後 1 至 2 小時銻-214 仍持續增高，爾後再迅速降回背景值，此延遲現象尚需更多資訊探究原因，包括雨團的位置、河川（因降雨）的影響等。

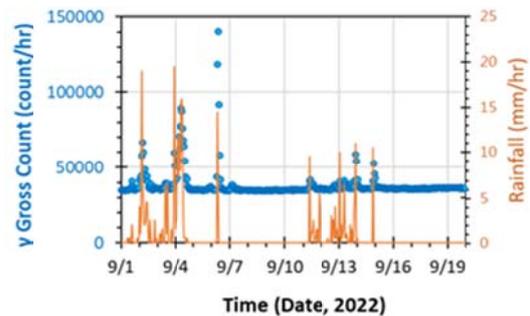


圖 3 加馬能譜總計數於降雨時期增高

四、結論

本研究初步於宜蘭蜜月灣海域成功建置一座加馬輻射錨碇浮標站，三個月來營運順利。透過連續自動偵測和資料即時傳輸，我們已知蜜月灣海域表層海水的人造核種銻-137 低於儀器偵測下限的 30 Bq/m³（文獻資料顯示約 1 Bq/m³），而降雨時則因天然放射核種鉛-214 和銻-214 活度濃度增加導致加馬輻射總計數升高；另外，海水固有的天然放射核種鉀-40 的活度濃度則常保恆定，未見降雨對其明顯影響。

本加馬輻射錨碇浮標站的建置，實現我國海洋現場加馬輻射自動、連續監測和即時遠端傳輸的目標，奠定發展多元化水下物聯網的基礎，也服務用海民眾更多的安全保障。本研究成功建立了我國首座海域加馬輻射監測站，也代表我國具備海洋加馬輻射自動監測技術的能力；初步階段達成後，下一步將嘗試強化浮標電力，使輻射偵檢儀能掛載於現行運作的海氣象及水文錨碇浮標。未來若能擴增於各關鍵海域、並搭配核輻射物質海洋傳輸之數值模式預報，可望完善我國對於海洋核污染監測和預警能力，保障民眾安全。

謝誌

本文係行政院科技發展基金資助之《國家海域放射性物質環境輻射監測及安全評估整備計畫》之相關成果，感謝中央政府補助經費，謹致謝忱。本文亦感謝國立成功大學近海水文中心系統組林清睿副組長及其團隊協助浮標錨碇前置和布放作業，也感謝日進環境科技有限公司無償提供輻射偵檢儀檢修、校正和相關技術服務。

參考文獻

1. TEPCO (2019) “Treated Water Portal Site”, <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>.
2. 行政院原子能委員會 (2022) “國家海域放射性物質擴散預警及安全評估應對計畫”。
3. Povinec, P.P., Eriksson, M., Scholten, J. and Betti, M. (2012) “Marine Radioactivity Analysis. In Handbook of Radioactivity Analysis”, In: Academic Press: Amsterdam, The Netherlands (3rd ed.), L’Annunziata, M.F., Ed., Chapter 12, pp. 769-832.
4. Kwak, S-W, Choi, J., Park, S.S., Ahn, S.H., Park, J.S. and Chung, H. (2017) Comparison of experimental results of a Quad-CZT array detector, a NaI(Tl), a LaBr3(Ce), and a HPGe for safeguards applications. *Journal of Instrumentation*, 12, C11011.
5. Pensieri, S, Patiris, D., Alexakis, S., Anagnostou, M.N., Prospathopoulos, A., Tsabaris, C. and Bozzano, R. (2018) “Integration of underwater radioactivity and acoustic sensors into an open sea near real-time multi-parametric observation system.” *Sensors*, 18, 2737.
6. Wu J., Xiao, X. and Sun, J. (2020) Distribution and budget of ¹³⁷Cs in the China Seas. *Scientific Reports*, 10, 8795.
7. Huang, W.J., Lee, M.T., Huang, K.C., Kao, K.J., Lee, M.A., Yang, Y.J., Jan, S. and Chen, C.T.A. (2021) Radiocesium in the Taiwan Strait and the Kuroshio east of Taiwan from 2018 to 2019. *Scientific Reports*, 11, 22467.
8. Tsabaris, C., Androulakaki, E.G., Ballas, D., Alexakis, S., Perivoliotis, L. and Iona, A. (2021) Radioactivity monitoring at north Aegean Sea integrating in-situ sensor in an ocean observing platform. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 77.