

科技部補助專題研究計畫報告

應用加馬能譜分析技術檢測飲用水中鐳同位素含量並評估國民 輻射劑量

報告類別：精簡報告
計畫類別：個別型計畫
計畫編號：MOST 110-2623-E-010-002-NU
執行期間：110年01月01日至110年12月31日
執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

計畫主持人：吳駿一
共同主持人：吳杰

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：張庭瑀
碩士班研究生-兼任助理：劉世恩

本研究具有政策應用參考價值：☒否 ☐是，建議提供機關
(勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關)
本研究具影響公共利益之重大發現：☐否 ☐是

中 華 民 國 111 年 03 月 22 日

中文摘要：在自然界中岩石與土壤存在鈾系與釷系的天然放射性核種，隨著鈾與釷元素的衰變會形成鐳-226、鐳-228與鐳-224等同位素，藉由雨水沖刷而進入飲用水源中，其活度濃度受到當地地質和氣候特徵的影響，分布範圍可從地表水的0.001 Bq/L到自然地下水的50 Bq/L。本研究計畫考量環境輻射度量技術的進步與國民飲用瓶裝水習慣的改變，協助主管機關針對水中所含鐳同位素建立檢測技術，並評估台灣十大水庫水源以及市售瓶裝水與礦泉水中鐳同位素含量數據，並依此評估攝取飲用水對於國民輻射劑量之貢獻。預期透過本計畫的成果，可提升低濃度環境水樣中鐳同位素的檢測分析能力，建立國內瓶裝水與水庫環境水源中鐳同位素與其他天然放射性核種的數據庫，提供主管機關作為評估環境中背景輻射對於國民有效劑量影響之參考依據。

本計畫已完成：鐳同位素之檢測技術與作業程序，包括：(1)水中鐳同位素的化學濃縮技術建立，(2)藉由加馬能譜分析定量國內水庫水源中鐳同位素的含量與分布，以及(3)瓶裝水與淨水廠水樣中鐳同位素活度濃度之定量。

中文關鍵詞：加馬能譜分析、鐳同位素、飲用水、國民輻射劑量

英文摘要：In nature, there are some natural radionuclides, especially those in a series of decays of uranium and thorium, in rocks and soils. As uranium and thorium, isotopes such as ^{224}Ra , ^{226}Ra , and ^{228}Ra would be produced and washed out to sources of drinking water. The radioactivity concentration is affected by local geological and climate characteristics, ranging from 1 mBq/L (surface water) to 50 Bq/L (groundwater). Regarding the progress of environmental radiation measurement and the changes in people's drinking habits in Taiwan, this research determined the regional distribution of radium nuclides in drinking water sources and bottled water to assist authorities in acquiring the updated data. We also estimated the contribution of drinking water to national radiation dose. In this study, we have established the standard detection protocol for water samples containing radium isotopes. The results could be a reference for authority to evaluate the influence of background radiation on an individual's effective dose. This study completed the following items: (1) The protocol for the chemical concentration of water containing radium. (2) Quantification of radium in reservoir water sources using gamma spectroscopy and (3) Quantification of radioactivity concentration of bottled water and the water sample in the water treatment plant.

英文關鍵詞：Gamma spectroscopy, radium isotopes, drinking water, national radiation dose

**110年應用加馬能譜分析技術檢測
飲用水中鐳同位素含量並評估國民
輻射劑量**

期末報告

**委託單位
行政院原子能委員會輻射偵測中心**

國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系

中華民國110年12月

110年應用加馬能譜分析技術檢測飲用水中鐳同位素含量並 評估國民輻射劑量

摘要

在自然界中岩石與土壤存在鈾系與釷系的天然放射性核種，隨著鈾與釷元素的衰變會形成鐳-226、鐳-228與鐳-224等同位素，藉由雨水沖刷而進入飲用水源中，其活度濃度受到當地地質和氣候特徵的影響，分布範圍可從地表水的0.001 Bq/L到自然地下水的50 Bq/L。本研究計畫考量環境輻射度量技術的進步與國民飲用瓶裝水習慣的改變，協助主管機關針對水中所含鐳同位素建立檢測技術，並評估台灣十大水庫水源以及市售瓶裝水與礦泉水中鐳同位素含量數據，並依此評估攝取飲用水對於國民輻射劑量之貢獻。預期透過本計畫的成果，可提升低濃度環境水樣中鐳同位素的檢測分析能力，建立國內瓶裝水與水庫環境水源中鐳同位素與其他天然放射性核種的數據庫，提供主管機關作為評估環境中背景輻射對於國民有效劑量影響之參考依據。

本計畫已完成：鐳同位素之檢測技術與作業程序，包括：(1)水中鐳同位素的化學濃縮技術建立，(2)藉由加馬能譜分析定量國內水庫水源中鐳同位素的含量與分布，以及(3)瓶裝水與淨水廠水樣中鐳同位素活度濃度之定量。

Abstract

In nature, there are some natural radionuclides, especially those in a series of decays of uranium and thorium, in rocks and soils. As uranium and thorium, isotopes such as ^{224}Ra , ^{226}Ra , and ^{228}Ra would be produced and washed out to sources of drinking water. The radioactivity concentration is affected by local geological and climate characteristics, ranging from 1 mBq/L (surface water) to 50 Bq/L (groundwater). Regarding the progress of environmental radiation measurement and the changes in people's drinking habits in Taiwan, this research determined the regional distribution of radium nuclides in drinking water sources and bottled water to assist authorities in acquiring the updated data. We also estimated the contribution of drinking water to national radiation dose. In this study, we have established the standard detection protocol for water samples containing radium isotopes. The results could be a reference for authority to evaluate the influence of background radiation on an individual's effective dose.

This study completed the following items: (1) The protocol for the chemical concentration of water containing radium. (2) Quantification of radium in reservoir water sources using gamma spectroscopy and (3) Quantification of radioactivity concentration of bottled water and the water sample in the water treatment plant.

1. 前言

國民輻射劑量的來源包含天然輻射與人造輻射，表一彙整了我國、美國與全球輻射劑量的評估結果，其中依據民國 87 年出版的「台灣地區國民輻射劑量評估」調查結果可知[1]，我國民眾的年平均有效劑量為 2.44 毫西弗/年，其中天然輻射劑量為 1.62 毫西弗/年(佔 66.4%)、人造輻射的貢獻為 0.82 毫西弗/年(佔 33.6%)；聯合國原子輻射效應科學委員會(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) UNSCEAR 2008 報告彙整提出了全球平均個人輻射劑量[2]，年平均有效劑量為 3.0 毫西弗/年，其中天然輻射劑量為 2.4 毫西弗/年、人造輻射為 0.6 毫西弗/年；美國輻射防護委員會(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)於 2009 年重新調查全美地區民眾輻射曝露劑量，並出版 NCRP 160 號報告[3]，該報告大幅提升人造輻射中醫療輻射的劑量達 3.1 毫西弗/年，而天然輻射的劑量貢獻為 3.11 毫西弗/年，平均美國國民的輻射劑量為 6.2 毫西弗/年。

深入探討天然輻射所造成的劑量貢獻，其來源主要分為四大部分，包括：

- (1) 來自太空中的宇宙輻射，其可透過計算空間曝露劑量，並引入住宅屏蔽因子以及室內與戶外時間佔比進行劑量評估；
- (2) 岩石或土壤中的天然放射性物質所釋出加馬射線造成的體外曝露劑量，主要為鈾系、釷系衰變系列之子核以及鉀-40；可透過岩石或土壤中的核種分析以評估活度濃度，據以推算空間曝露劑量，並引入住宅屏蔽因子以及室內與戶外時間佔比進行劑量評估；
- (3) 吸入由岩石或土壤中鈾系與釷系所釋出的氡氣與其子核，進而造成的體內曝露輻射劑量，由於衰變系列的子核常會釋出阿伐粒子，故常造成顯著的體內劑量貢獻，因此，這方面的劑量貢獻常以鐳同位素的活度濃度做為計算約定等效劑量的代表；
- (4) 日常飲水與飲食中含天然放射性核種而造成的體內輻射劑量，通常與土壤中的天然放射性物質相同，包含鈾系、釷系衰變系

列之子核種(例如：鐳同位素)以及鉀-40。這些天然放射性核種經雨水沖刷而累積於水源處，進而透過飲水與飲食進入體內，而鐳同位素具有趨骨性會造成紅骨髓顯著的約定等價劑量，需要謹慎評估其對於國民劑量的貢獻。

表一、國民輻射劑量評估比較

項目	台灣地區國民劑量 註1 平均有效劑量 (毫西弗/年)	全球平均國民劑量 平均有效劑量 (毫西弗/年)	美國平均國民劑量 平均有效劑量 (毫西弗/年)
天然輻射	1.62	2.4	3.11
宇宙射線	0.26	0.39	0.34
加馬射線	0.64	0.48	0.21
氡及其子核	0.44	1.26	2.28
體內放射核種	0.28	0.29	0.28
人造輻射	0.82	0.6	3.1
放射性落塵	6.0×10^{-3}	0.05	-
雜項射源	3.2×10^{-3}	2.0×10^{-4}	0.1 (主要為含放射性物質商品)
職業曝露	1.1×10^{-3}	0.005	0.005
核設施	8.5×10^{-7}	2.0×10^{-4}	0.003
醫療輻射	0.81	0.6	3.0
合 計	2.44	3.0	6.2

註 1：台灣地區國民劑量資料係出自民國 87 年出版「台灣地區國民輻射劑量評估」之表 7.3

另由 UNSCEAR 2008 報告中所統計的全球天然輻射劑量變動範圍得知(表二)，各地區天然輻射劑量的差異主要來自鈾系與釷系的子核所造成，全球變動範圍可達 0.2 至 10 毫西弗/年。其中，因攝入天然放射性核種造成體內輻射曝露的平均劑量維持在 0.29 毫西弗/年，變動範圍則為 0.2 至 1 毫西弗/年。近年來因為日本福島核電廠事故造成民眾對核災與核食的高度重視，行政院原子能委員會常年致力於台灣地區環境輻射監測[4]，其中亦包含飲用水與食品放射性含量偵測計畫，以先期作業評估環境中自然背景輻射對國民有效劑量的影響[5]。鑒於國內已有 20 年未重新評估國民輻射劑量，本計畫配合考量環境輻射度量

技術的進步與國民生活水平、飲食習慣的改變，透過計畫執行目標，協助主管機關獲取更多台灣各地區環境水樣與包裝飲用水中鐳同位素含量與國民劑量數據。

表二、UNSCEAR 2008報告統計全球平均個人輻射劑量與變動範圍

項目	平均有效劑量 (毫西弗/年)	變動範圍
天然輻射	2.4	1.0-13.0
宇宙射線	0.39	0.3-1.0
加馬射線	0.48	0.3-1.0
氡及其子核	1.26	0.2-10.0
體內放射核種	0.29	0.2-1.0
人造輻射	0.6	0-數十
放射性落塵	0.005	試驗地點附近較高
車諾比事故	0.002	0-0.04
職業曝露	0.005	0-20
核設施	0.0002	距離核設施1 km內可達2 mSv
醫療輻射	0.6	0-數十
合 計	3.0	100

1.1. 110年度計畫內容

本計畫一年度(110)之計畫目標為協助主管機關獲取更多台灣各地區環境水樣與包裝飲用水中鐳同位素含量與國民劑量數據，預期達成之成果如下：

- (1) 建立利用加馬能譜分析技術測量環境水源中鐳同位素(Ra-226、Ra-228、Ra-224)的活度濃度技術；
- (2) 建立以飲用水源為主的化學濃縮方法，以提高加馬能譜分析的偵測效率，同時降低核種分析的偵測低限；
- (3) 調查並採集台灣主要飲用水源(參考下方圖一)，包含：民生用水中淨水廠之水樣、水庫水與包裝水，進行鐳同位素含量分析，以瞭解台灣地區水中鐳同位素的濃度與分布；

- (4) 評估飲用水與環境水源中鐳同位素所造成的國民輻射劑量，比對鐳同位素的活度濃度是否符合「商品輻射限量標準」中的飲用水限值。



圖一、台灣十大水庫取樣地點示意圖

表十一、計畫執行甘特圖

項次	工作項目	工作時程（月）											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	國際最新鐳同位素度量資料蒐集												
2	建立鐳同位素的化學濃縮技術與檢測作業程序												
3	完成水庫水取樣與量測水中鐳同位素的含量												
4	完成礦泉水及淨水廠水樣取樣與量測水中鐳同位素的含量												

5	探討鐳同位素活度濃度與 國民劑量的關係												
6	結案報告撰寫												

2. 參考資料

1. 林培火、陳清江、林友明，國民輻射劑量之評估研究報告，原子能委員會輻射偵測中心，民國 87 年 6 月。
2. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2008, UNSCEAR Report.
3. NCRP. National Council on Radiation Protection and Measurements. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. 2009, NCRP Report No. 160.
4. 台灣地區環境輻射監測計畫書，原子能委員會輻射偵測中心，民國 108 年 3 月。
5. 國民輻射劑量評估先期研究執行報告，原子能委員會輻射偵測中心，民國 108。
6. Mosavi-Jarrahi A, Mohagheghi M, Akiba S, Yazdizadeh B, Motamedi N, Monfared AS. Mortality and morbidity from cancer in the population exposed to high level of natural radiation area in Ramsar, Iran. International Congress Series. 2005, 1276:106-109.
7. Hendry JH, Simon SL, Wojcik A, et al. Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks? J Radiol Prot. 2009, 29:A29.
8. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2000, UNSCEAR Report.
9. Fathabadi N, Salehi AA, Naddafi K, et al. Public ingestion exposure to ^{226}Ra in Ramsar, Iran. J Environ Radioactivity. 2019, 198:11-17.
10. Chen J, Cooke MW, Mercier JF. A review of natural radionuclides in Canadian drinking water (1975–16). Radiation Protection Dosimetry. 2018, 179(1):26-36.
11. Walsh M, Wallner G, Jennings P. Radioactivity in drinking water supplies in Western Australia. Journal of environmental radioactivity. 2014, 130:56-62.
12. Diab HM, Abdellah WM. Validation of ^{226}Ra and ^{228}Ra measurements in water samples using gamma spectrometric analysis. Journal of Water Resource and Protection. 2013, 5:53-57.
13. 陳清江、郭明錦，水中鐳同位素測量技術之探討，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，民國 100 年 03 月。

- 14.** Chalupnik, S., Hampe, D., Kim, C. K., Kleinschmidt, R., Martin, P., Sansone, U., Vajda, N., Analytical Methodology for the Determination of Radium Isotopes in Environmental Sample, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications No. IAEA/AQ/19 (2010).
- 15.** Guogang Jia, Jing Jia, Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology, Journal of Environmental Radioactivity 106 (2012), 98-119.
- 16.** Hanan M. Diab, Waleed M. Abdellah, Validation of ^{226}Ra and ^{228}Ra Measurements in Water Samples Using Gamma Spectrometric Analysis, Journal of Water Resource and Protection (2013), 5, 53-57.
- 17.** US EPA. Method 901.1: Gamma emitting radionuclides in drinking water. Prescribed procedures for measurement of radioactivity in drinking water. 1980, EPA/600/4/80/.

110年度專題研究計畫成果彙整表

計畫主持人：吳駿一			計畫編號：110-2623-E-010-002-NU		
計畫名稱：應用加馬能譜分析技術檢測飲用水中鐳同位素含量並評估國民輻射劑量					
成果項目			量化	單位	質化 (說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等)
國內	學術性論文	期刊論文	0	篇	
		研討會論文	0		
		專書	0	本	
		專書論文	0	章	
		技術報告	0	篇	
		其他	0	篇	
國外	學術性論文	期刊論文	0	篇	
		研討會論文	0		
		專書	0	本	
		專書論文	0	章	
		技術報告	0	篇	
		其他	0	篇	
參與計畫人力	本國籍	大專生	0	人次	參與計畫人員已獲得從基礎到專業的訓練，包含：放射化學、輻射度量、輻射防護與劑量評估等綜合性的練習，藉此拓展工作人員綜觀的科學思維，並融入原子能科普教育。
		碩士生	2		
		博士生	0		
		博士級研究人員	0		
		專任人員	0		
	非本國籍	大專生	0		
		碩士生	0		
		博士生	0		
		博士級研究人員	0		
		專任人員	0		
其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)			此本計畫已完成鐳同位素之檢測技術與作業程序，鑒於鐳於水中含量極其微量，建立標準測量方式實屬必要，本研究發展之技術相較過往文獻發表者具有相當優勢。由於當初於獲得研究樣品時，已簽署多份保密協定，研究結果將俟主管機關同意後發表。		