

國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告

不同地質之溫泉環境中氬氣濃度與泡溫泉所致之輻射劑量評估

報告類別：成果報告
計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSTC 113-2623-E-343-001-NU
執行期間：113年01月01日至113年12月31日
執行單位：南華大學自然生物科技學系

計畫主持人：林群智
共同主持人：丁健益

計畫參與人員：大專生-兼任助理：謝文瑄

本研究具有政策應用參考價值：☐否 ☒是，建議提供機關核能安全委員會, 衛生福利部, 環境部
(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 114 年 03 月 25 日

中文摘要：氡氣在自然界中主要來自地殼、土壤和水中鈾系和釷系天然放射性物質(Naturally Occurring Radioactive Materials; NORM)之衰變，為具放射性之惰性氣體，同位素中以 ^{222}Rn 半衰期最長也最重要，可釋出5.49 MeV之高LET的 α 射線，其衰變之後子核為金屬，其中， ^{214}Po 及 ^{218}Po 貢獻90%以上之劑量，在全球人口所受天然輻射劑量中，室內氡氣之貢獻占約一半，為僅次於吸菸的致肺癌環境因子，在非吸菸者群體中，氡是首位肺癌成因，地底之鈾系和釷系元素也可經由地殼中的裂隙進入溫泉水中，並衰變而產生氡氣。本研究探討國內不同地質之著名溫泉區空氣中之氡氣濃度，具有室內湯池者，將一併量測室內泡湯環境中之氡氣濃度。本研究所採樣之地質溫泉區包括：(1)火成岩溫泉區，採樣點擬含括北投（地熱谷）溫泉（屬酸性硫酸鹽氯化物泉質）、冷水坑溫泉（屬碳酸氫鹽泉質）、前山公園溫泉（屬硫酸鹽泉質）、朝日溫泉（屬酸性硫酸鹽氯化物泉質）；(2)變質岩溫泉區，採樣點擬含括烏來溫泉（屬碳酸氫鹽泉質）、東埔溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）、鳩之澤溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）；(3)沉積岩溫泉區，採樣點擬含括中崙溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）、四重溪溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）等，進而評估國人在該區域泡溫泉時，空氣中之氡氣可能貢獻之體內輻射劑量。結果顯示，本研究測量台灣不同地質溫泉區的氡氣濃度，結果均低於WHO建議的 100 Bq/m^3 標準，對人體影響微乎其微。所有劑量經換算評估值低於台灣國民輻射劑量0.9毫西弗，顯示溫泉輻射屬於背景範圍。研究採用NIST標準射源與累積法校正，確保數據準確性。結果顯示，溫泉氡氣濃度受環境影響，需進一步探討變化機制。整體而言，台灣溫泉安全無虞，未來可優化監測技術以提升評估精確度。

中文關鍵詞：氡氣、溫泉、天然放射性物質、肺癌

英文摘要：Radon in nature mainly originates from the decay of uranium and thorium natural radioactive materials (NORM) found in the Earth's crust, soil, and water. It is a radioactive noble gas, with the isotope ^{222}Rn being the most important due to its longest half-life. It can emit high-LET alpha particles with an energy of 5.49 MeV. Following its decay, the remaining nucleus is a metal, with ^{214}Po and ^{218}Po contributing over 90% of the radiation dose. Indoor radon contributes to approximately half of the natural radiation dose received by the global population and is the second leading environmental factor for lung cancer, following smoking. In non-smoking populations, radon is the primary cause of lung cancer. Uranium and thorium elements from underground can also enter hot spring water through cracks in the Earth's crust and decay to produce radon gas. This study investigates the radon concentration in the air of famous hot spring areas with different geological characteristics in the country. In locations with indoor hot springs, the radon concentration in the indoor bathing environment will also be measured. The geological hot

spring areas sampled in this study include: (1) Igneous rock hot spring areas, sampling sites will include Beitou (Geothermal Valley) hot spring (an acidic sulfate-chloride spring), Lengshuikeng hot spring (a bicarbonate spring), Qianshan-Park hot spring (a sulfate spring), and Asahi hot spring (an acidic sulfate-chloride spring); (2) Metamorphic rock hot spring areas, sampling sites will include Wulai hot spring (a bicarbonate spring), Dongpu hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring), and Jiuzi Zai hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring); (3) Sedimentary rock hot spring areas, sampling sites will include Zhonglun hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring) and Shizhong Creek hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring), to further evaluate the potential contribution of radon in the air to the internal radiation dose received by individuals visiting these hot springs. The results show that the radon concentrations measured in different geothermal hot spring areas in Taiwan were all below the WHO recommended limit of 100 Bq/m^3 , posing minimal health risks. All calculated dose assessments were lower than Taiwan's national radiation dose limit of 0.9 mSv , indicating that hot spring radiation remains within background levels. The study utilized NIST standard sources and the accumulation method for calibration, ensuring data accuracy. Results also showed that radon concentrations in hot springs are influenced by environmental factors, requiring further investigation. Overall, Taiwan's hot springs are safe, and future research should optimize monitoring techniques to enhance assessment accuracy.

英文關鍵詞： radon, hot spring, Naturally Occurring Radioactive Materials, lung cancer

國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告

不同地質之溫泉環境中氬氣濃度與泡溫泉所致之輻射劑量評估

報告類別：☐進度報告

■成果報告：☐完整報告/☐精簡報告

計畫類別：☐個別型計畫 ☐整合型計畫

計畫編號：NSTC 113-2623-E-343-001-NU

執行期間：2024 年 01 月 01 日至 2024 年 12 月 31 日

執行機構及系所：南華大學自然生物科技學系

計畫主持人：林群智

共同主持人：丁健益

計畫參與人員：謝文瑄

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 0 份：

☐執行國際合作與移地研究心得報告

☐出席國際學術會議心得報告

☐出國參訪及考察心得報告

本研究具有政策應用參考價值： ☐ 否 ☒ 是，建議提供機關 <u>核能安全委員會</u> (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 114 年 03 月 25 日

中文摘要

氡氣在自然界中主要來自地殼、土壤和水中鈾系和釷系天然放射性物質(Naturally Occurring Radioactive Materials; NORM)之衰變，為具放射性之惰性氣體，同位素中以 ^{222}Rn 半衰期最長也最重要，可釋出 5.49 MeV 之高 LET 的 α 射線，其衰變之後子核為金屬，其中， ^{214}Po 及 ^{218}Po 貢獻 90% 以上之劑量，在全球人口所受天然輻射劑量中，室內氡氣之貢獻占約一半，為僅次於吸菸的致肺癌環境因子，在非吸菸者群體中，氡是首位肺癌成因，地底之鈾系和釷系元素也可經由地殼中的裂隙進入溫泉水中，並衰變而產生氡氣。本研究探討國內不同地質之著名溫泉區空氣中之氡氣濃度，具有室內湯池者，將一併量測室內泡湯環境中之氡氣濃度。本研究所採樣之地質溫泉區包括：(1) 火成岩溫泉區，採樣點擬含括北投（地熱谷）溫泉（屬酸性硫酸鹽氯化物泉質）、冷水坑溫泉（屬碳酸氫鹽泉質）、前山公園溫泉（屬硫酸鹽泉質）、朝日溫泉（屬酸性硫酸鹽氯化物泉質）；(2) 變質岩溫泉區，採樣點擬含括烏來溫泉（屬碳酸氫鹽泉質）、東埔溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）、鳩之澤溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）；(3) 沉積岩溫泉區，採樣點擬含括中崙溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）、四重溪溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）等，進而評估國人在該區域泡溫泉時，空氣中之氡氣可能貢獻之體內輻射劑量。

結果顯示，本研究測量台灣不同地質溫泉區的氡氣濃度，結果均低於 WHO 建議的 100 Bq/m^3 標準，對人體影響微乎其微。所有劑量經換算評估值低於台灣國民輻射劑量 0.9 毫西弗，顯示溫泉輻射屬於背景範圍。研究採用 NIST 標準射源與累積法校正，確保數據準確性。結果顯示，溫泉氡氣濃度受環境影響，需進一步探討變化機制。整體而言，台灣溫泉安全無虞，未來可優化監測技術以提升評估精確度。

關鍵詞：氡氣、溫泉、天然放射性物質、肺癌

Abstract

Radon in nature mainly originates from the decay of uranium and thorium natural radioactive materials (NORM) found in the Earth's crust, soil, and water. It is a radioactive noble gas, with the isotope ^{222}Rn being the most important due to its longest half-life. It can emit high-LET alpha particles with an energy of 5.49 MeV. Following its decay, the remaining nucleus is a metal, with ^{214}Po and ^{218}Po contributing over 90% of the radiation dose. Indoor radon contributes to approximately half of the natural radiation dose received by the global population and is the second leading environmental factor for lung cancer, following smoking. In non-smoking populations, radon is the primary cause of lung cancer. Uranium and thorium elements from underground can also enter hot spring water through cracks in the Earth's crust and decay to produce radon gas. This study investigates the radon concentration in the air of famous hot spring areas with different geological characteristics in the country. In locations with indoor hot springs, the radon concentration in the indoor bathing environment will also be measured. The geological hot spring areas sampled in this study include: (1) Igneous rock hot spring areas, sampling sites will include Beitou (Geothermal Valley) hot spring (an acidic sulfate-chloride spring), Lengshuikeng hot spring (a bicarbonate spring), Qianshan-Park hot spring (a sulfate spring), and Asahi hot spring (an acidic sulfate-chloride spring); (2) Metamorphic rock hot spring areas, sampling sites will include Wulai hot spring (a bicarbonate spring), Dongpu hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring), and Jiuzi Zai hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring); (3) Sedimentary rock hot spring areas, sampling sites will include Zhonglun hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring) and Shizhong Creek hot spring (a weakly alkaline bicarbonate spring), to further evaluate the potential contribution of radon in the air to the internal radiation dose received by individuals visiting these hot springs. The results show that the radon concentrations measured in different geothermal hot spring areas in Taiwan were all below the WHO recommended limit of 100 Bq/m^3 , posing minimal health risks. All calculated dose assessments were lower than Taiwan's national radiation dose limit of 0.9 mSv , indicating that hot spring radiation remains within background levels. The study utilized NIST standard sources and the accumulation method for calibration, ensuring data accuracy. Results also showed that radon concentrations in hot springs are influenced by environmental factors, requiring further investigation. Overall, Taiwan's hot springs are safe, and future research should optimize monitoring techniques to enhance assessment accuracy.

Keywords: radon, hot spring, Naturally Occurring Radioactive Materials, lung cancer

一、前言

氡氣在自然界中主要來自地殼、土壤和水中鈾系和釷系天然放射性物質(Naturally Occurring Radioactive Materials; NORM)之衰變，為具放射性之惰性氣體，比重 9.96 kg/m^3 ，凝固點為 -113°C ，熔點 -71°C ，沸點 62°C 。主要之同位素為 ^{222}Rn [半衰期($T_{1/2}$) 3.8 d]、 ^{220}Rn ($T_{1/2}=55.6 \text{ s}$) 和 ^{219}Rn ($T_{1/2}=3.96 \text{ s}$)，同位素中以 ^{222}Rn 半衰期最長也最重要，可釋出 5.49 MeV 之高 LET α 射線，其衰變之後子核為金屬，其中， ^{214}Po 及 ^{218}Po 貢獻 90% 以上之劑量，皆能釋出 α 射線，因此，氡氣進入肺部後對組織之傷害甚大。在全球人口所受天然輻射劑量中，室內氡氣之貢獻占約一半，為僅次於吸菸的致肺癌環境因子，在一項大型歐洲研究中，對終身不吸煙者估計了達到 75 歲時的累積肺癌風險，對應 0、100 和 400 Bq/m^3 的氡濃度分別為 0.4%、0.5% 和 0.7%，而且與抽煙具有加乘作用，吸煙者的風險約高出 25 倍 (AGIR, 2009; ICRP, 2010; WHO, 2009)，而在非吸菸者群體中，氡是首位肺癌成因 (Darby et al., 2005; Darby et al., 2006) ICRP 115 號報告建議對於綜合成年人群中的肺癌，包括非吸煙者和吸煙者，應將調整後的標稱風險係數 (nominal risk coefficient) 增加到 $8 \times 10^{-10} / \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ (ICRP, 2010)。因此，2009 年 WHO 即於呼籲世界各國重視，並以 100 Bq/m^3 為室內氡活度改善目標之建議值，目前已陸續有國家及國際組織研擬下修室內氡氣標準以符合 WHO 的建議。

二、研究目的

地殼中產生之氡氣貢獻室內劑量外，地底之鈾系和釷系元素也可經由地殼中的裂隙進入溫泉水中，並衰變而產生氡氣。溫泉若以產生溫泉的地質特性可以分類為火成岩區溫泉、變質岩區溫泉與沉積岩區溫泉，若考量其泉質中之陰離子相對含量可分類為以氯離子為主的氯化物泉、以碳酸氫根離子為主的碳酸氫鹽泉和以硫酸根離子為主的硫酸鹽泉，而硫酸鹽泉可再細分為白磺、青磺、鐵磺三種。火成岩區溫泉溫度約 75°C - 96°C ，以台灣而言主要分布於北部的大屯火山群、宜蘭的龜山島和臺東綠島等地，著名者如：北投（地熱谷）溫泉(屬酸性硫酸鹽氯化物泉質)、冷水坑溫泉(屬碳酸氫鹽泉質)、陽明山溫泉(屬硫酸鹽泉質)、朝日溫泉(屬酸性硫酸鹽氯化物泉質)；變質岩區溫泉溫度約 50°C - 97°C ，主要分布於雪山山脈、中央山脈西翼和部分東南翼之低度變質岩板岩區、中央山脈南翼之中高度變質岩的大南片岩區，著名者如：

烏來溫泉(屬碳酸氫鹽泉質)、東埔溫泉(屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質)、鳩之澤溫泉(屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質)；沉積岩區之溫泉數量是台灣三種主要岩區中最少的，多為低溫溫泉或冷泉，溫度約於 25°C~49°C 間，著名者如：泰安溫泉(屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質)、中崙溫泉(屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質)、四重溪溫泉(屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質)、安通溫泉(屬弱鹼性氯化物硫酸鹽泉質) (陳肇夏, 1994；宋聖榮、劉佳玫, 2003；陳文福等, 2010；臺灣溫泉研究發展中心)。根據 Pressyanov 等人的研究，在保加利亞 Momin prohod 的泉水高達 1595 Bq/L (Pressyanov et al., 2007)，Pereira 等人的研究也發現葡萄牙 Nisa 的地下水則高達 3856 Bq/L (Pereira et al., 2015)，這些在水中的氡氣可能因逸出 (emanation) 而飄散在空氣中，造成潛在之健康風險。

三、文獻探討

Rößler 和 Villert (2019) 的研究顯示氡氣在水/空氣之分布係數(distribution coefficient) k 值隨水溫上升而下降(圖 1)，此外，根據本研究團隊先前對於溫泉水中氡氣量測技術之建立(MOST 109-2623-E-343 -001 -NU)的研究結果(Ting et al., 2022)顯示，溫泉水中氡氣之逸出率明顯受溫度和 pH 值條件影響，大致而言，溫度越高、pH 值越低之條件下溫泉水中氡氣之逸出率越高；由於不同地質區域之溫泉溫度與 pH 值亦有差異，特別是火成岩地質區所含來自鈾系和釷系之 NORM 較沉積岩地質高，其地下水或泉水中所含之氡氣也可能較高，且水中的氡氣移動速度較在空氣緩慢，而不同的地質結構(如：土壤、礫石或岩塊等)也會影響氡氣的移動(Hahn et al., 2015; Otton, 1992)。此外，根據本研究團隊 2022 年在「國內不同地區醫院地下室工作場所氡氣之量測及人員劑量評估」之原子能合作計畫(MOST 111-2623-E-343-001 -NU)所得之結果顯示，醫院地下室工作場所之氡氣濃度受通風之影響甚鉅；國內之溫泉湯池可分為室內及室外湯池兩類，通風狀況不同可能影響環境中之氡氣濃度，進而影響泡湯者之體內劑量。一般而言，室外空氣中之氡氣濃度約為 10 Bq/m³，有些區域可能高於 100 Bq/m³，室內空氣中之氡氣濃度約為 50 Bq/m³，有些區域可能高於 10000 Bq/m³ (UNIP, 2016)，然而，對於溫泉區空氣中氡氣濃度之相關研究甚少，探討國內不同地質區域溫泉區環境中之氡氣濃度及其所致泡湯者體內劑量之評估的相關研究亦付之闕如，由於泡湯已是國人的熱愛的休閒活動之一，從事者眾，但泡湯之環境不一，推算泡湯所致體內劑量以為泡湯環境改善之依據有其重要性。因此，本研究擬探討國內不同地質之著名溫泉區空氣中之氡氣濃度，進而評估國人在該區域泡溫泉時，空氣中之氡氣可能貢獻之體內輻射劑量，其成果有助於提供衛生及觀光公部門單位、溫泉業者及民眾關於泡湯環境氡氣安全資訊，並提供業者改善泡湯環境之

依據。

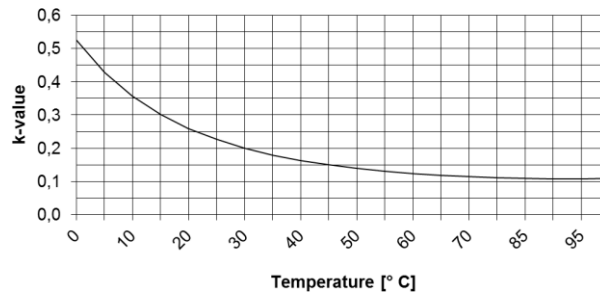


圖 1 氡氣在水/空氣之分布係數(distribution coefficient)
k 值隨水溫變化之情形 (Röbber & Villert, 2019)

Abdalla A.M., Ismail A.M., Al-Naggar T.I., 2017. Radon Calibration System. IntechOpen Chapter 8, 125-145. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69900>

Accessed from: <https://hot-spring.cnu.edu.tw/?p=HELY>. Retrieved 14 July 2023.

AGIR, 2009. Radon and Public Health, Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation, Doc HPA, RCE-11, 1–240. Available at www.hpa.org.uk

Airthings (n.d.). Corentium Pro Operating Instructions. EOI-GEN-20 Rev. 1.2. Accessed from: <https://www.airthings.com/hubfs/Website/Manuals/Pro/corentium-pro-operating-instructions.pdf>. Retrieved 7 July 2023.

Aït-Ziane M., ALLAB M., Lounis-Mokrani Z., 2019. Response verification of integrated device used for radon measurements in air. Brazilian Journal of Radiation Sciences 7(3), 1-12.

Chen J., Harley N.H., 2018. Health Physics 115(4):p 490-499. DOI: 10.1097/HP.0000000000000909

Corrêa J.N., Paschuk S.A., Kappke J., Perna A.F.N., França A.C., Schelin H.R., Denyak V., 2014. Measurements of ^{222}Rn activity in well water of the Curitiba metropolitan area (Brazil). Radiation Physics and Chemistry 104, 108–111.

Darby S., Hill D., Auvinen A., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W.,

Pershagen G, Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomásek L., Whitley E., Wichmann H.E., Doll R., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal* 330, 223–227.

Darby S., Hill D., Deo H., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H., Bochicchio F., Falk R., Farchi S., Figueiras A., Hakama M., Heid I., Hunter N., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruosteenoja E., Rosario A.S., Tirmarche M., Tomásek L., Whitley E., Wichmann H.E., Doll R., 2006. Residential radon and lung cancer— detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 32(1), 1-83. Erratum in: *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 33(1), 80. PMID: 16538937.

Durridge Company Inc., 2016. RAD H2O Manual. Accessed from: https://www.geotechnv.com/Manuals/Durridge_Manuals/Durridge_RAD_H2O_Manual.pdf.

Retrieved 7 July 2023.

EPA, 2019. Protocols for Measuring Radon and Radon Decay Products in Homes (MAH 2019). Accessed from: <https://standards.aarst.org/MAH-2019/10/#zoom=z>. Retrieved 7 July 2023.

四、研究方法

1.不同地質溫泉區空氣中氡氣濃度之實測研究

研究擬探討不同地質溫泉區空氣中之氡氣濃度，具有室內湯池者，將一併量測室內泡湯環境中之氡氣濃度。本研究所採樣之地質溫泉區包括：(1)火成岩溫泉區，採樣點擬含括北投（地熱谷）溫泉（屬酸性硫酸鹽氯化物泉質）、冷水坑溫泉（屬碳酸氫鹽泉質）、陽明山溫泉（如：前山公園；屬硫酸鹽泉質）、朝日溫泉（屬酸性硫酸鹽氯化物泉質）；(2)變質岩溫泉區，採樣點擬含括烏來溫泉（屬碳酸氫鹽泉質）、東埔溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）、鳩之澤溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）；(3)沉積岩溫泉區，採樣點擬含括中崙溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）、四重溪溫泉（屬弱鹼性碳酸氫鹽泉質）等。其量測及分析

流程如下：

1-1環境基本特性量測

- (1) 以GPS 定位採樣點之位置並記錄。
- (2) 室外湯池取水面下 30 cm 處之溫泉水樣品，室內湯池則取出水口之溫泉水樣品，加入 250 mL 燒杯後立即量測溫度及 pH 值。

1-2空氣中之氡氣濃度量測

- (1) 將偵檢器置於一具有進氣與出氣閥之密閉壓克力槽體中，開啟電源，以純氮氣通氣至槽體，5 min 後關閉閥門，測量偵檢器 24 h 內之背景值(C_b)及標準差(S_b)。
- (2) 將Airthings Corentium pro 偵檢器先前之實測數據儲存於外部硬體或雲端後，清除儀器內部記錄。
- (3) 依美國氡氣科學家與技術人員協會(American Association of Radon Scientists and Technologists; AARST)氡氣量測作業規範 MAH-2019，偵檢器擺放於湯池附近離地 50 cm 處，於室內湯池中離牆 30 cm、離門或窗 90 cm (圖2)。此外，氣流及溫度變化較大(如：陽光直射、暖爐、冷氣等設備旁，以及空調設備出風口等)的空間也會導致氡氣濃度變化過大而影響儀器量測，故應避免在這些地方設置儀器。
- (4) 開啟偵檢器電源，測量 24 h 內環境中之氡氣濃度(C_m)及標準差(S_m)。由測量值與背景值求

得氡氣濃度($C_{Rn} \pm S_{Rn}$)； $C_{Rn} = C_m - C_b$ ， $S_{Rn} = \sqrt{S_m^2 + S_b^2}$

- (5) 比較各採樣區域室內與室外湯池空氣中氡氣濃度之差異，並探討其可能原因。

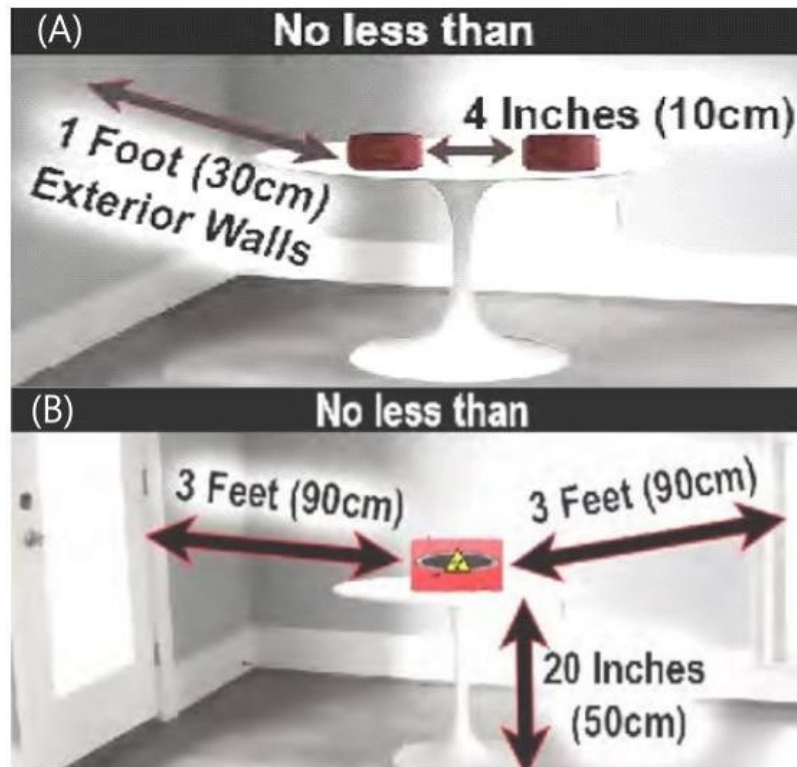


圖 2 氡氣量測作業規範 MAH-2019 之儀器擺置建議 (EPA, 2019)

- (1) 本研究採用用於短期單次量測的 MAH-2019 延伸協定(Extended protocol) 作業規範(圖 3)。該作業規範流程明訂當氡氣濃度高於 8 pCi/L (300 Bq/m³)時應立即進行一次短期量測，若
- 兩次量測之平均值高於行動基準 4 pCi/L (150 Bq/m³)時，應改善建物(如:採用通風設備)，若測量值介於 4~8 pCi/L (150-300 Bq/m³)時，應再進行一次短期量測或長期量測，若測量值高於 4 pCi/L (150 Bq/m³)時應改善建物，而介於 2~4 pCi/L 時應考慮改善建物。

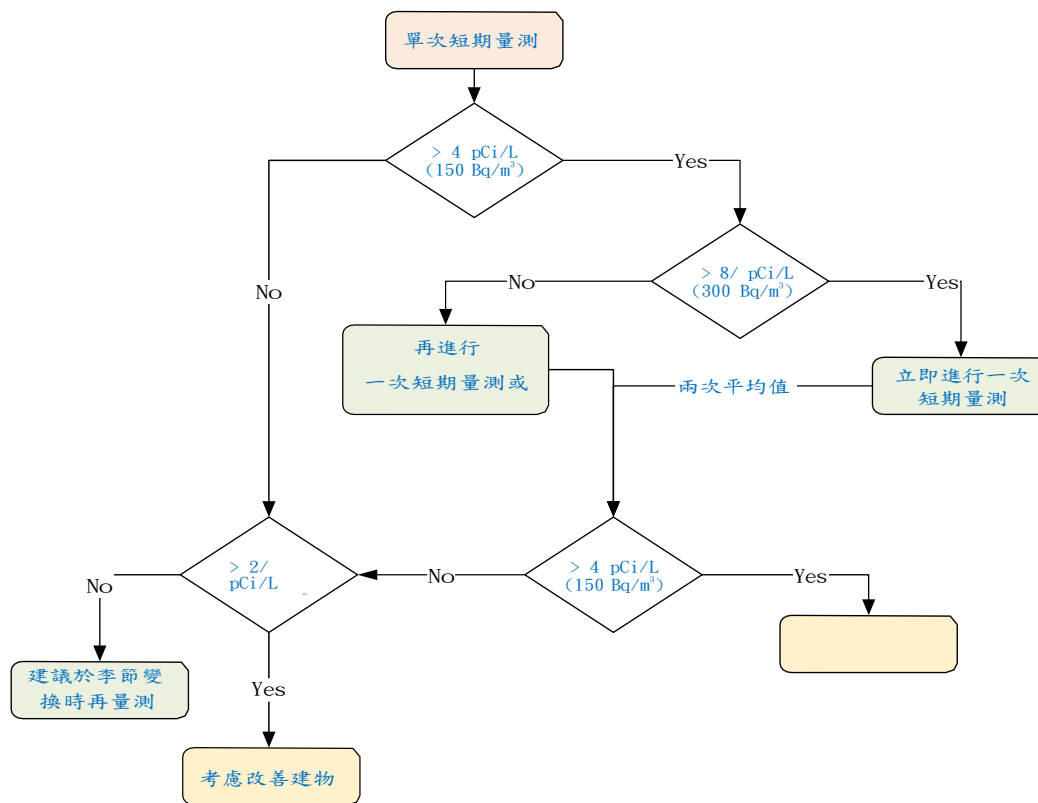


圖 3 MAH-2019 延伸協定(Extended protocol) 作業規範

2. 氡氣貢獻之體內輻射劑量評估

吸入氡氣後，所貢獻之有效劑量主要來自呼吸過程中沉積在呼吸系統中之氡子核所釋出的 α 粒子，氡氣本身的貢獻估計只占 2-5% 的有效劑量(Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire – IRSN, 2018)。單位體積空氣中所有氡氣之短壽命子核完全衰變至長半衰期 ^{210}Pb 所釋出的總 α 粒子能量(J/m^3 或 MeV/m^3)稱為 α 粒子潛能濃度(Potential alpha-energy concentration; PAEC)，氡氣的危害即與 PAEC 相關，在實用性上採用 PAEC 為其呈現在大氣中的集體量。氡母核與其子核間依地區性條件差異而以不同之長期平衡程度存在於大氣中。在給定之 PAEC 下，空氣中氡與其短壽命子核達長期平衡時，各子核之濃度(Bq/m^3)定義為平衡等效衰變產物濃度(Equilibrium-equivalent decay-product concentration; EEDC)，而平衡因子(Equilibrium factor; EF)定義為 EEDC 與氡濃度之比值；當氡與其短壽命子核達長期平衡時， $\text{EF}=1$ 。PAEC 之舊單位為工作水平(Working level; WL)，1 WL 相當於氡與其短壽命子核達長期平衡時，EEDC 為 $100 \text{ pCi}/\text{L}$ ，PAEC 為 $1.3 \times 10^5 \text{ MeV}/\text{L}$ ，即：1 WL =

$1.3 \times 10^5 \text{ MeV}/\text{L} = 0.0208 \text{ mJ}/\text{m}^3$ ；工作人員受氡子核之曝露常以工作水平(Working level

month; WLM)表示，一個工作月定義為 170 小時，故：

$$1 \text{ WLM} = 100 \text{ pCi/L} \times 170 \text{ h} = 17000 \text{ pCi} \cdot \text{h/L} = 6.29 \times 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h/m}^3 = 3.54 \text{ mJ} \cdot \text{h} / \text{m}^3;$$

$$\text{即：} 1 \text{ mJ} \cdot \text{h} / \text{m}^3 = 1.78 \times 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h/m}^3$$

因吸入氡氣所導致之有效劑量，根據 ICRP 137 號報告，可以式(4)表示。其中，E 為有效劑量(effective dose; mSv)， C_{Rn} 為氡氣濃度(radon level; Bq/m³)；t 為曝露時間(h)； f_c 為修正後之劑量係數(dose coefficient)，表示曝露於每單位體積 Rn-222 之活度(或能量)所導致之有效劑量，其值等於劑量係數(f)與 EF 之乘積[式(5)]。因此，由所測得之氡氣濃度、曝露時間，以及修正後之劑量係數即可得知其年吸收有效劑量(E)。

$$E = C_{\text{Rn}} \times t \times f_c \quad (\text{mSv}) \quad (4)$$

$$f_c = f \times \text{EF} \quad (5)$$

對於建築物和地底礦區而言，ICRP 137 號報告對於 f 的建議值為 3 mSv/(mJ·h·m⁻³)，約為 10 mSv/WLM (ICRP, 2018)，其他如 SPA 或抽水場所等類似環境亦採此建議值。由於劑量係數決定於 Rn-222 與其子核之平衡因子(EF)，而在室內，EF 受通風、蒸散作用、固體微粒濃度和氡子核之表面沉積的影響很大，對多數室內的狀況而言，標準通常假設為 EF = 0.4 (ICRP, 2018)；對室外的狀況而言，EF 受大氣混合、蒸散作用影響較大，但由於可供氡子核沉積之表面較室內少，其 EF 通常高於室內，在一些大型的量測研究中顯示其數值為 0.18-0.67，平均值為 0.54±0.13，中位數為 0.57 (Jing & Harley, 2018; Rozas, 2022)，UNSCEAR 一般給定之數值為 0.6 (UNSCEAR, 2000; UNSCEAR, 2006)。則由式(5) 可得知

經修正後之劑量係數(f_c)如下：

$$\begin{aligned} \text{室內湯池: } f_c &= 3 \text{ mSv}/(\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}) \times \frac{1}{1.78 \times 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3} \\ \text{室內湯池: } f_c &= 3 \text{ mSv}/(\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}) \times \frac{1}{1.78 \times 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3} \end{aligned}$$

五、結果與討論

研究結果顯示，台灣各溫泉區域的空氣中氡氣濃度均低於世界衛生組織（WHO）所建議的 100 Bq/m³ 標準。其中，火成岩區溫泉的氡氣濃度變異較大，如北投溫泉（19 Bq/m³）與朝日溫泉（2.68 Bq/m³），而變質岩區與沉積岩區的溫泉濃度則相對較低，如烏來溫泉（18.5 Bq/m³）與四重溪溫泉（4.83 Bq/m³）。進一步評估氡氣對人體的年有效劑量，結果顯示所有測量區域之輻射貢獻均低台灣國民劑量所評估隻的 0.9 mSv 上限。根據計算，北投溫泉的年有效劑量約為 0.611 mSv，而氡氣濃度較低的溫泉，如四重溪溫泉與中崙溫泉，其劑量分別為 0.155 mSv 及 0.157 mSv，皆遠低於安全標準。因此，本研究證實溫泉場域所產生的輻射屬於背景輻射範圍，對人體健康影響極小。此外，本研究採用 NIST 氡氣標準射源與累積法進行測量儀器的校正，確保數據的準確性與可靠性。研究亦顯示，溫泉氡氣濃度受環境因素（如溫度、濕度與壓力）影響，部分地區的測量值隨時間變動，顯示需進一步探討氡氣的時空變化機制。

綜合以上結果，台灣溫泉的氡氣輻射劑量均在安全範圍內，民眾可安心使用。本研究建議未來可進一步分析不同地質條件下的氡氣釋放機制，並優化監測技術，以提升環境安全評估的準確度。