

RMC-111-313Rev2

國人住宅氡氣輻射劑量評估
(112年8月修正版)



核能安全委員會輻射偵測中心

民國 112 年 8 月

國人住宅氡氣輻射劑量評估

摘要

氡氣(radon)是一種無色無味的惰性氣體，具放射性，主要是從土壤及岩石中的鈾系及釷系元素衰變後形成，因是氣態所以會逸散釋放在空氣中。

目前國際組織針對氡氣活度濃度標準僅作為建議，是否納入法令管制，仍須各國依據國情自行決定。聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)2008 報告，氡氣造成的個人年輻射劑量全球平均(E_{global})評估為 1.26 毫西弗(mSv)；美國輻射防護與度量委員會(NCRP)2009 年第 160 號報告，評估美國因氡氣造成的個人年輻射劑量(E_{US})為每年 2.28 毫西弗(mSv)。

依據行政院原子能委員會輻射偵測中心民國 104-110 年委託調查及自行量測之住宅氡氣數據，臺灣地區的室內氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.33 貝克，本研究採用 2017 年國際放射防護委員會(ICRP)第 137 號報告的劑量轉換因子，評估氡氣造成國人之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.90 毫西弗(mSv)，較全球及美國為低，應與臺灣釷、鈾系元素含量上並無特殊性，且臺灣建築物重視通風的結果。

Dose and Effects of Indoor Radon in Taiwan

Abstract

Radon-222 (or simply “radon”) produced from the uranium-238 decay series in soil and rock in and seeps into buildings. When radon is inhaled, some of its short-lived decay products are retained in the lungs and irradiate cells in the respiratory tract.

This study is based on the data of residential radon concentration investigation in Taiwan, executed by Radiation Detection Center (RMC) of the Atomic Energy Council (now restructuring for Nuclear Safety Commission, NSC) during 2015 to 2021. The average of indoor radon activity concentration in Taiwan is $19.33 \text{ m}^3/\text{Bq}$. The dose conversion factor is adapted the parameter in the ICRP Report No. 137 published in 2017, it was estimated that the annual effective dose of radon for Taiwanese due to radon inhalation is 0.90 millisieverts (mSv).

The annual effective dose of radon for Taiwanese is lower than those of the world (the global average annual effective dose of radon is 1.26 mSv on UNSCEAR Report 2008) and the United States (the average annual effective dose of radon in United State is 2.28 mSv on NCRP Report 160), which may be related to the fact that the content of thorium and uranium series elements in Taiwan is not special, in addition, the building of Taiwan emphasis on ventilation.

名詞定義

1. **S:集體有效劑量(Annual collective effective dose)**

指特定群體曝露於某輻射源，所受有效劑量之總和，亦即為該特定輻射源曝露之人數與該受曝露群組平均有效劑量之乘積，其單位為人-西弗(man-Sv)。

2. **E_{EXP}:個人年有效劑量(Average annual Effective dose)**

意指曝露族群之平均年有效劑量，又稱個人平均年有效劑量。此劑量為法規上所稱之約定有效劑量，指各組織或器官之約定等價劑量與組織加權因數乘積之和，其單位為西弗(Sv)或毫西弗(mSv)；對天然輻射而言，E_{EXP}與E_{Taiwan}相同。

3. **E_{population}:總族群之平均有效劑量(Effective dose per individual in the population)**

意指總族群之平均年有效劑量，計算方式為集體有效劑量除以總群體數，其單位為毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)。

4. **E_{global}:全球民眾之個人平均年有效劑量(Average annual effective dose per individual per year in global population)**

計算方式為全球每年之集體有效劑量除以全球人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示。

5. **E_{US}:美國全體國民之平均年有效劑量(Average annual effective dose per individual per year in United State)**

計算方式為美國每年之集體有效劑量除以美國人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示。

1. **E_{JP}:日本全體國民之平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in Japan)**

計算方式為日本每年之集體有效劑量除以日本人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示。

2. **E_{Taiwan}:台灣全體國民之平均年有效劑量(Average annual effective dose per individual per year in Taiwan)**

計算方式為台灣每年之集體有效劑量除以台灣人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示；亦即台灣之國民輻射劑量。對天然輻射而言，E_{Taiwan}與E_{EXP}相同。

目錄

摘要.....	i
名詞定義.....	ii
一、前言.....	1
二、文獻回顧.....	4
(一) 室內氬氣標準.....	4
(二) 氬氣劑量評估方式.....	7
(三) 各國之氬氣劑量評估結果.....	10
(四) 室內氬氣量測儀器及量測方法.....	13
三、室內氬氣劑量評估結果.....	16
(一) 量測儀器.....	16
(二) 住宅之室內氬氣量測.....	20
(三) 其他地點之氬氣量測.....	22
(四) 劑量評估結果.....	26
(五) 與國外之比較.....	27
四、結論與建議.....	29
五、參考文獻.....	30
附件、108 至 110 年民眾住宅執行氬氣量測服務數據.....	33
附錄、審查意見對照表.....	34

圖目錄

圖 1 鐳的衰變鏈(radium decay chain).....	1
圖 2 室內氡氣來源.....	4
圖 3 活性炭偵測器(activated charcoal detector ; ACD)	13
圖 4 阿伐軌跡偵測器(alpha-track detector ; ATD)	14
圖 5 氡氣量測儀器擺放建議.....	15
圖 6 Safety Siren Pro Series 3 氡氣偵檢器.....	16
圖 7 RTM-1688-2 氡氣偵檢器.....	17
圖 8 AIRTHINGS Corentium Plus 氡氣偵檢器.....	19
圖 9 國內住宅客廳之氡氣活度濃度分布圖.....	21
圖 10 國內住宅臥房之氡氣活度濃度分布圖.....	22
圖 11 蘭嶼傳統建築外觀.....	23
圖 12 蘭嶼傳統地下屋構造及氡氣量測.....	23

表目錄

表 1	各國國際組織的室內氡氣標準.....	6
表 2	ICRP 第 65 號報告之氡氣劑量評估.....	7
表 3	ICRP 氡氣劑量評估之比較.....	9
表 4	全球天然背景輻射劑量	10
表 5	美國天然背景輻射劑量	11
表 6	日本天然背景輻射劑量	12
表 7	偵檢器 Safety Siren Pro Series 3 之功能特性	17
表 8	偵檢器 RTM-1688-2 之功能特性	18
表 9	偵檢器 AIRTHINGS Corentium Plus 之功能特性	19
表 10	台灣住宅氡氣量測結果	20
表 11	蘭嶼一般住宅氡氣量測結果.....	24
表 12	地下營業空間氡氣量測結果.....	25
表 13	各國氡氣曝露之國民輻射劑量比較	28

國人住宅氡氣輻射劑量評估

一、前言

氡氣(radon)是一種無色無味的惰性氣體，具放射性，主要是從土壤及岩石中的鈾系及釷系元素衰變後形成，因是氣態所以會逸散釋放在空氣中。氡氣衰變伴隨阿伐(α)粒子，吸入肺部後對其組織造成不小輻射劑量。因阿伐粒子穿透力不強，皮膚即可阻擋，造成之體外輻射劑量通常可以忽略。但若藉由呼吸吸入體內，阿伐粒子會在短距離內具有大量能量沉積，對於肺部組織細胞造成嚴重傷害。從解剖學角度可以發現吸入體內後會集中在支氣管分叉處形成輻射熱點，導致肺部受到偏高的輻射劑量【1】。

氡氣是在 1900 年由德國化學家道恩(Friedrich Ernst Dorn)所發現【2】，他在執行鐳(radium)的相關研究時發現鐳化合物會釋放出具放射性的氣體，而這些放射性氣體就是氡氣。由鐳的衰變鏈(radium decay chain)可知氡氣是鐳的衰變產物，如圖 1。

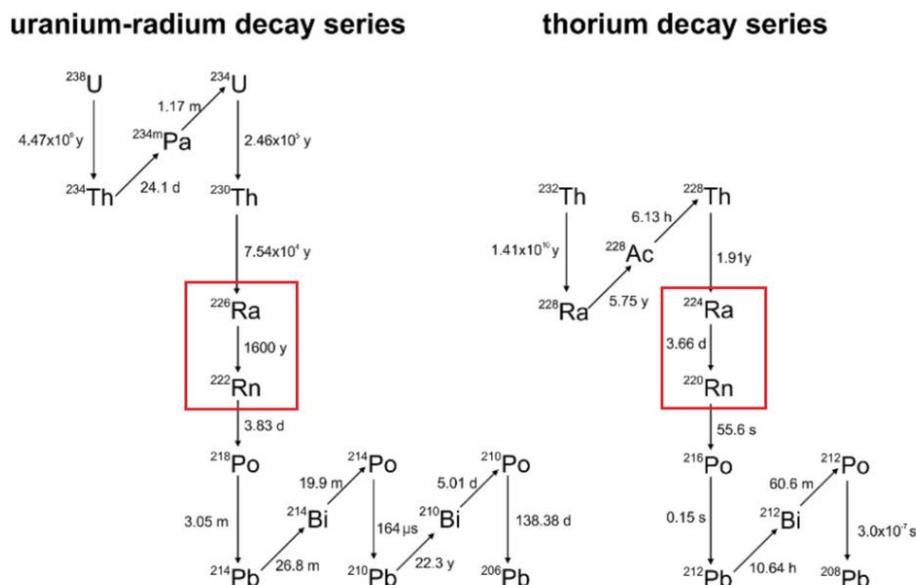


圖 1 鐳的衰變鏈(radium decay chain)

放射性氡氣主要分為氡-222(Rn-222)及氡-220(Rn-220)，氡-222 的半化期約 3.8 天，從鈾系元素衰變鏈中可知氡-222 是鈾-238、釷-226 的衰變產物；而氡-220 的半化期約 55.6 秒，是由釷系元素衰變而來，可知氡-220 是釷-232、釷-224 的衰變產物。其中因氡-222 半化期較長，較氡-220 更易在室內累積，故主要造成氡氣劑量的來源為氡-222。

氡氣是環境中釷衰變產生的氣體，在天然輻射劑量中，室內氡氣之貢獻占比很高。室內氡氣主要來自建築物地基層的土壤、岩石以及建築物內部使用的天然石材所含天然放射性物質。氡氣源自大自然，一般情況下空氣中的氡氣含量不高，不會影響健康。

開始關注氡氣對健康的影響是在第二次世界大戰後，美國有研究發現鈾礦開採者的肺癌比率異常偏高，進而推測是因吸入鈾礦釋放的氡氣後而增加罹患肺癌的風險。

1980 年代，美國賓州(Pennsylvania)東部的 Limerick 核電廠的建造過程中，工人意外發現家中也有氡氣活度濃度偏高的情況，並在開始量測周遭住宅房屋之氡氣活度濃度也一樣偏高。此次意外發現讓許多研究人員十分好奇，最後發現主要是當地被稱為 Reading Prong 的特殊地質結構，因這種地質結構之鈾含量較多，使氡氣釋放量也較多，因而在當地住宅測到的室內氡氣活度濃度較其他地方高上許多。

1986 年，美國環境保護署(Environmental Protection Agency，U.S. EPA)針對該區域 800 戶住宅進行室內氡氣調查，發現約有 12%的室內氡氣活度濃度高於 4 pCi/L，4 pCi/L 換算後即為每立

方公尺 150 貝克(Bq/m³)，而 4 pCi/L(150Bq/m³)為美國環境保護署的氡氣建議行動基準(EPA's recommended action level)。

2009 年，世界衛生組織(World Health Organization，WHO)提出警告，室內氡氣是僅次於香菸的肺癌致病因子，呼籲各國政府須注意室內氡氣的問題並建議制定氡氣行動計畫。

本報告係利用行政院原子能委員會輻射偵測中心(以下簡稱本中心)民國 104 至 106 年委託義守大學執行「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之研究成果【3】及本中心民國 108 至 110 年執行之民眾住宅室內氡氣量測服務之數據，彙整成國內室內氡氣調查結果，並引用國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection，ICRP)在 2017 年發行之第 137 號報告【4】的劑量轉換因子，完成國人因氡氣所造成之國民輻射劑量評估。

二、 文獻回顧

(一) 室內氡氣標準

根據流行病學研究(epidemiological studies),長時間吸入氡氣會增加罹患肺癌的風險。在戶外及空氣流通的地方,氡氣會擴散及稀釋,對人體健康較無影響。建築物內若通風不佳,由地板、牆壁、管路的縫隙(cracks)或建築結合處(construction joints)擴散到室內的氡氣會在室內累積,如圖 2 所示。室內氡氣使長期待在室內的人產生較大輻射劑量,因此,國際上對氡氣的關注主要在室內而非戶外。

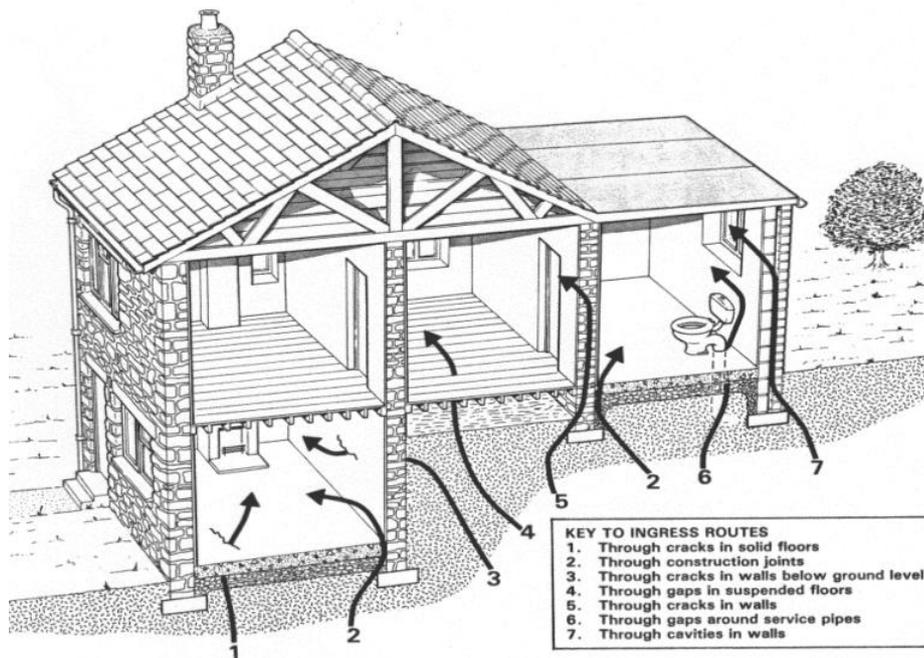


圖 2 室內氡氣來源

圖片來源：<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126>

為了保護民眾健康,國際上各環境衛生主管機關陸續針對室內氡氣活度濃度訂有安全標準。美國環境保護署(U.S. EPA)之室內氡氣風險評估(Assessment of Risks from Radon in Homes)【5】

中，訂定室內氡氣建議行動基準值(recommended action level)為 4 pCi/L，即為每立方公尺 150 貝克 (Bq/m³)；世界衛生組織(World Health Organization, WHO) 2009 年發佈之室內氡氣指引(WHO handbook on indoor radon: a public health perspective)【6】中，提出室內氡氣之參考基準(reference level)為每立方公尺 100 貝克 (Bq/m³)。

國際放射防護委員會(ICRP)在 2007 年發佈之第 103 號報告【7】中，以年有效劑量 10 毫西弗(mSv)作為參考基準，由有效劑量推導出住宅室內氡氣之參考基準為每立方公尺 600 貝克 (Bq/m³)、工作場所室內氡氣之參考基準為每立方公尺 1500 貝克 (Bq/m³)。ICRP 在 2010 年發佈之第 115 號報告【8】，主要是針對氡及其子核對肺癌的風險 (Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon)，報告中針對氡氣依流行病學調查結果，提升氡氣風險係數(risk coefficient)為原本 2 倍，因此在氡氣聲明(Statement on Radon)【9】中，將住宅室內氡氣之參考基準降為每立方公尺 300 貝克 (Bq/m³)、工作場所室內氡氣之參考基準降為每立方公尺 1000 貝克(Bq/m³)。ICRP 在 2014 年所發佈之第 126 號報告【10】，主要是針對氡氣曝露之輻射防護 (Radiological Protection against Radon Exposure)，報告中建議室內氡氣之參考基準為每立方公尺 100 貝克(Bq/m³)，最高不大於每立方公尺 300 貝克(Bq/m³)。

上述文件之室內氡氣標準彙整如表 1，以世界衛生組織 (WHO)之參考基準每立方公尺 100 貝克(Bq/m³)最保守；由 ICRP 歷年的報告，也可以由參考基準的變化看出氡氣的管制建議是逐

漸加嚴，各國會再參考上述標準依據國情制訂各別的国家標準。

表 1 各國國際組織的室內氡氣標準

國際組織	年份	名稱	數值
美國環境保護署 (U.S. EPA)	2003	建議行動基準 (recommended action level)	4 pCi/L (150 Bq/m ³)
世界衛生組織 (WHO)	2009	參考基準 (reference level)	100 Bq/m ³
國際放射防護委員會 (ICRP) 第 103 號報告	2007	參考基準 (reference level)	住宅：600 Bq/m ³ 工作場所：1500 Bq/m ³
國際放射防護委員會 (ICRP) 第 115 號報告	2010	參考基準 (reference level)	住宅：300 Bq/m ³ 工作場所：1000 Bq/m ³
國際放射防護委員會 (ICRP) 第 126 號報告	2014	參考基準 (reference level)	100~300 Bq/m ³

(二) 氡氣劑量評估方式

各國國際組織對於氡氣曝露的劑量轉換因子有不同的建議值，對於評估體內劑量而言，不同劑量轉換因子會換算出不同的年輻射劑量。

國際放射防護委員會(ICRP) 於 1993 年第 65 號報告「Protection Against Radon-222 at Home and at Work」【11】，報告根據人體呼吸道的模型評估氡氣劑量，分別評估住宅及工作場所的劑量，劑量評估結果如表 2。

表 2 ICRP 第 65 號報告之氡氣劑量評估

類型	氡氣活度濃度 貝克/ 立方公尺 (Bq/m ³)	個人年有效劑量 (E _{EXP}) 毫西弗 (mSv)	活動時間 小時/年 (hr/y)	平衡 因子
住宅	200	3	7000	0.4
	600	10		
工作 場所	500	3	2000	
	1500	10		

住宅氡氣劑量評估之部分，以住宅室內活動時間 7000 小時/年，平衡因子(equilibrium factor)為 0.4 換算，處於氡氣活度濃度每立方公尺 200~600 貝克 (Bq/m³)之空間，所受的年輻射劑量相當於 3~10 毫西弗(mSv)。工作場所氡氣劑量評估之部分，以工作活動時間 2000 小時/年，平衡因子(equilibrium factor)為 0.4 換算，處於氡氣活度濃度每立方公尺 500~1500 貝克 (Bq/m³)之空間，所受的年輻射劑量相當於 3~10 毫西弗(mSv)。

國際放射防護委員會(ICRP)於 2010 年公告之第 115 號報告「Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon」，報告中依流行病學調查結果，提升氡氣風險係數(risk coefficient)，由 2.8×10^{-4} 升至 5×10^{-4} /工作基準月(WLM)，約為原本 2 倍。

國際放射防護委員會(ICRP)另於 2014 年公告之第 126 號報告「Radiological Protection against Radon Exposure」，是根據第 115 號報告中所提出之氡氣風險，重新評估氡氣劑量。以住宅室內氡氣活度濃度每立方公尺 300 貝克進行估算，評估參數與 ICRP 第 65 號報告相同(住宅活動時間為每年 7000 小時、平衡因子為 0.4)，ICRP 第 126 號報告算出之氡氣個人年有效劑量(E_{EXP})相當於 10 毫西弗(mSv)。

ICRP 第 65 號報告及 ICRP 第 126 號報告之評估結果比較如表 3，主要係因風險係數之提高，氡氣活度濃度降至每立方公尺 300 貝克 (Bq/m^3)，個人年有效劑量(E_{EXP})就會達到 10 毫西弗(mSv)。

國際放射防護委員會(ICRP)於 2017 年公告之第 137 號報告「Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3」，報告主要是針對工作人員職業曝露提供攝入/吸入劑量轉換因子的建議值，並不是針對一般民眾。但 ICRP 第 126 號報告所建議的職業防護，應先考量設定與住宅相同的合理干預水平，故初步推斷後續發表有關一般民眾的體內劑量轉換因子也會參採同樣的風險值，故應同樣適用一般民眾。ICRP 第 137 號報告中更新氡氣對工作人員的體內劑量轉換因子，假設氡-222 與子核之間的平衡因子為 0.4，

標稱劑量轉換因子(nominal dose conversion coefficient)為 6.7×10^{-6} (mSv/h)/(Bq/m³)，如果是在洞穴工作或是室內進行體力活動的工作人員，則劑量轉換因子會提高至 1.3×10^{-5} (mSv/h)/(Bq/m³)。

由此重新評估住宅室內氡氣活度濃度每立方公尺 300 貝克之空間，所受的個人年有效劑量(E_{EXP})相當於 14 毫西弗(mSv)。以工作場所氡氣活度濃度每立方公尺 300 貝克 (Bq/m³)之空間，所受的個人年有效劑量(E_{EXP})相當於 4 毫西弗(mSv)。

表 3 ICRP 氡氣劑量評估之比較

參考文獻	類型	氡氣活度濃度 貝克/立方公尺(Bq/m ³)	個人年有效劑量 (E _{EXP}) 毫西弗(mSv)
ICRP 第 65 號報告	住宅	600	10
ICRP 第 126 號報告		300	10
ICRP 第 137 號報告		300	14
	工作場所	300	4

(三) 各國之氡氣劑量評估結果

1. 聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)

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)於 2008 年出版之「Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2008 Report to the General Assembly (以下簡稱 UNSCEAR 2008 報告)」【12】，該報告所公布之全球背景輻射造成之個人年有效劑量(Effective dose per individual per year in global population, E_{global})統計如表 4，包含宇宙輻射、地表輻射、氡氣吸入、攝食等 4 大來源之平均值及分布範圍。全球背景輻射整體之個人平均年有效劑量為每年 2.42 毫西弗，宇宙射線、地表輻射、氡氣吸入及攝食四個主要來源的個人平均年有效劑量(E_{global}) 平均值分別為每年 0.39 毫西弗、0.48 毫西弗、1.26 毫西弗及 0.29 毫西弗；以氡氣吸入造成的個人平均年有效劑量(E_{global})每年 1.26 毫西弗為最高，約占整體的 52.5%，是最主要的背景輻射來源。

表 4 全球天然背景輻射劑量

單位：毫西弗(mSv)

種類	全球民眾之個人平均年有效劑量(E_{global})
宇宙射線 (cosmic radiation)	0.39 (0.3-1)
地表輻射 (terrestrial radiation)	0.48 (0.3-1)
吸入 (inhalation exposure)	1.26 (0.2-10)
攝食 (ingestion exposure)	0.29 (0.2-1)
總計	2.42 (1-10)

※資料來源：UNSCEAR 2008 報告(2008) Volumn I ,表 1 (P.4)；本研究整理。

2. 美國

美國最新的國民輻射劑量評估報告是美國輻射防護與度量委員會(National Council on Radiation Protection, NCRP) 於 2009 年發表之第 160 號報告「Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States」報告(以下簡稱 NCRP 第 160 號報告)【13】，其中的第一章是有關背景輻射的評估。

NCRP 第 160 號報告所公布之美國背景輻射對民眾造成之平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in United State, E_{US}) 為每年 3.11 毫西弗(統計如表 5)，宇宙輻射、地表輻射、氬氣吸入、攝食等 4 個主要來源之個人平均年有效劑量(E_{US}) 分別為每年 0.33 毫西弗、0.21 毫西弗、2.28 毫西弗及 0.29 毫西弗；其中，氬氣吸入造成的個人平均年有效劑量(E_{US})每年 2.28 毫西弗為最高，也是最主要的背景輻射來源，約占整體天然背景輻射之 73.3%。

表 5 美國天然背景輻射劑量

單位：毫西弗(mSv)

種類	美國國民之平均年有效劑量(E_{US})
宇宙輻射 (cosmic radiation)	0.33
地表輻射 (terrestrial radiation)	0.21
吸入 (inhalation exposure)	2.28
攝食 (ingestion exposure)	0.29
總計	3.11

※資料來源：NCRP 第 160 號報告(2009)，表 1-1, (P.12)；本研究整理。

3. 日本

日本公益財團法人原子力安全研究協會所(Nuclear Safety Research Association, NSRA)接受日本環境省的委託執行日本國民輻射劑量評估作業，並出版「生活環境放射線(國民線量の算定)」；日本環境省引用其2020年進行之研究，在2022年出版了「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(令和3年度版)」報告【14】，是日本官方公布的最新國民輻射劑量評估數據；日本背景輻射造成之個人平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in Japan, E_{JP}) 合計為每年2.08毫西弗(統計如表6)，宇宙射線、地表輻射、氬氣吸入及攝食四個主要來源對日本民眾造成的個人平均年有效劑量(E_{JP})分別為每年0.30毫西弗、0.33毫西弗、0.46毫西弗及0.99毫西弗。日本背景輻射最主要的來源是攝食，氬氣吸入造成的個人平均年有效劑量(E_{JP})為0.46毫西弗，約占整體天然背景輻射之21.9%。

表6 日本天然背景輻射劑量

單位：毫西弗(mSv)

種類	日本國民之平均年有效劑量(E_{JP})
宇宙射線 (cosmic radiation)	0.30
地表輻射 (terrestrial radiation)	0.33
吸入 (inhalation exposure)	0.46
攝食 (ingestion exposure)	0.99
總計	2.08

※資料來源：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(令和3年度版)上卷, P.66；本研究整理。

(四) 室內氡氣量測儀器及量測方法

室內氡氣量測(indoor radon gas measurement)之儀器可分為主動式(active)與被動式(passive)量測儀器。主動式量測儀器需外加電源，可以連續監測並即時顯示記錄數據，以硫化鋅(銀) ZnS(Ag)閃爍體及半導體偵檢器較為常見。被動式量測儀器不需外加電源，以量測累積活度為主，置於量測地點一段時間後取回量測，並透過校正程序換算為平均活度，以活性炭偵測器(activated charcoal detector，如圖 3)、阿伐軌跡偵測器(alpha-track detector，如圖 4)為主。

活性炭偵測器(如圖 3)，是利用活性炭吸收空氣中的氡氣，放置 2~7 天後，送回實驗室執行能譜分析。阿伐軌跡偵測器(如圖 4)是利用偵測器內的塑膠片，當阿伐粒子撞擊塑膠片後留下損壞軌跡，進而推測平均室內氡氣活度濃度。本中心 87 年版之國民輻射劑量評估報告有關住宅氡氣之評估係使用硝酸纖維片的阿伐徑跡法進行住宅量測。



圖 3 活性炭偵測器(activated charcoal detector；ACD)

圖片來源：<https://rdsjk.com/products/specialized-radiation-safety/charcoal-canister.html>



圖 4 阿伐軌跡偵測器(alpha-track detector ; ATD)

圖片來源：<https://radoncorp.com/testing-shop/radtrak2>

一般而言，主動式的偵測設備較為昂貴，但可以立即判讀結果，適合於特定地點的定量量測與特性探討；被動式偵測設備較為便宜，適合做大範圍的普查之用，缺點是僅能得到時間加權平均值(time-weighted average)，沒有每小時讀數，無法提供時間變動趨勢，故不能使用於連續監測。

量測室內氡氣時，儀器的佈放則參考美國國家標準(ANSI)發布之量測室內氡氣及其衰變產物之建議「Protocols for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Product Measurements in Homes」執行量測氡氣時之儀器擺放建議如圖 7【15、16】，儀器擺放需距離門 90 公分以上、距離地板 50 公分以上、距離牆壁 30 公分以上，並距離其他儀器 10 公分以上，以避免互相干擾。儀器不宜擺放設置在浴室、廚房、櫥櫃、水槽旁、陽光直曬、高氣流、熱源、輻射源旁...等，避免儀器偵測失效。此外，若室內空間超過 189 平方公尺、不同通風系統之房間及獨立區域，則建議添加偵測儀器分別量測。

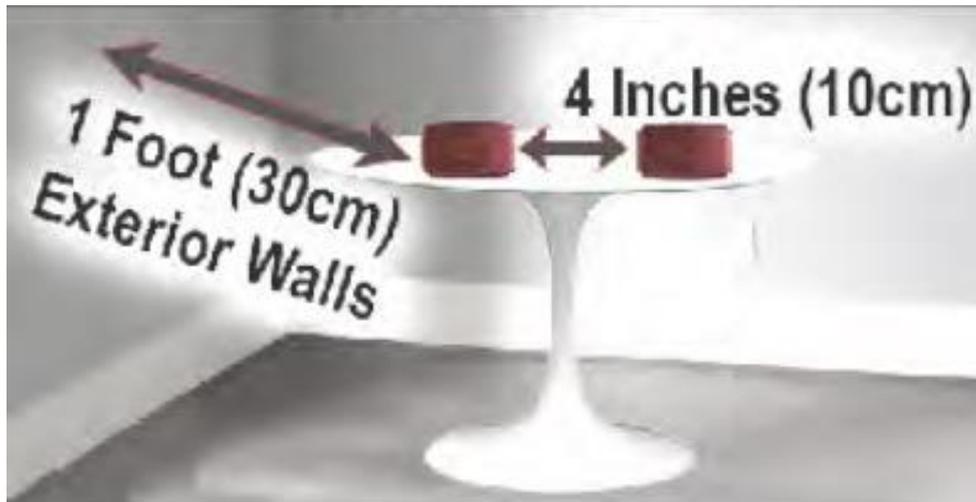
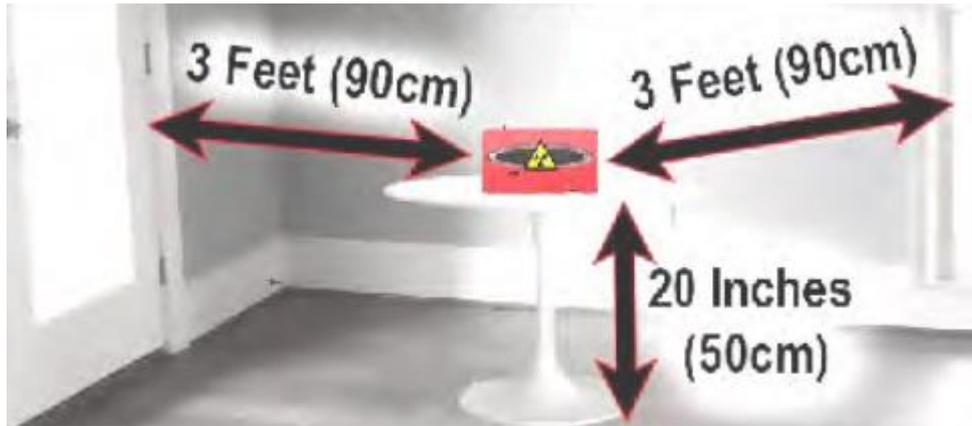


圖 5 氡氣量測儀器擺放建議

圖片來源：<https://standards.aarst.org/MAH-2019/>

三、 室內氡氣劑量評估結果

(一) 量測儀器

本研究評估氡氣吸入劑量之數據主要來自本中心民國 104 至 106 年，委託義守大學執行「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之研究成果，以及本中心民國 108 至 110 年執行之民眾住宅室內氡氣量測數據，以下分別說明量測所用儀器。

本中心民國 104 至 106 年之「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫及本中心執行住宅氡氣調查，主要是使用「RTM-1688-2」主動式氡氣偵檢器及「Safety Siren Pro Series 3」被動式氡氣偵檢器；本中心民國 108 至 110 年執行之民眾住宅室內氡氣量測數據所使用的是「RTM-1688-2」主動式氡氣偵檢器及「AIRTHINGS Corentium Plus」被動式氡氣偵檢器。

「Safety Siren Pro Series 3」氡氣偵檢器（如圖 5）屬被動式偵檢器，係使用游離腔偵檢器，雖然無法即時顯示數據，然輕巧方便、機動性強，適合大量住宅室內氡氣篩選性測量；其缺點是容易受電磁波和環境背景輻射影響，往往會有高估的現象。Safety Siren Pro Series 3 之功能特性如表 7。



圖 6 Safety Siren Pro Series 3 氡氣偵檢器

圖片來源：<https://www.amazon.com/Safety-Siren-Series3-Radon-Detector/dp/B000CEAY64>

表 7 偵檢器 Safety Siren Pro Series 3 之功能特性

Safety Siren Pro Series 3 氦氣偵檢器	
測量範圍	0~999.9 pCi/L
測量精準度 (Measurement accuracy)	20%
重量	0.454 公斤 (1 pound)
大小	1.9 公分×1.2 公分×1.4 公分 (4.7 in × 3.1 in × 2.1 in)

「RTM-1688-2」主動式氦氣偵檢器(如圖 7)是藉由靜電集塵原理收集氦子核在半導體偵檢器的表面，被收集的鈾-218(^{218}Po)離子和計測腔內的氦氣濃度成正比例，可以連續監測器記錄每小時氦濃度、氣溫、氣壓等的變化狀況，適合作為住宅氦活度之測量；RTM-1688-2 之功能特性如表 8。



圖 7 RTM-1688-2 氦氣偵檢器

圖片來源：https://www.sarad.de/product-detail.php?lang=en_US&cat_ID=&p_ID=20

表 8 偵檢器 RTM-1688-2 之功能特性

主動式偵檢器 RTM-1688-2	
測量範圍	1 Bq/m ³ ~10 MBq/m ³
反應時間 (Response time)	氡氣快速模式(Radon fast)：15 分鐘 氡氣緩慢模式(Radon slow)：120 分鐘
測量精準度 (Measurement accuracy)	5% (流量：1kbq/m ³ ；時間 1h)
重量	3.5 公斤
大小	23.2 公分×18.2 公分×13.5 公分

但由於「RTM-1688-2」氡氣偵檢器太過笨重，不方便郵寄到各地住家作測量；因此，104 至 106 年之「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究係使用「Safety Siren Pro Series 3」氡氣偵檢器進行住宅的量測與調查，但為了降低電磁波和環境背景輻射影響，會將該儀器先與校正過的主動式偵檢器「RTM-1688-2」數值作比對，求得校正因子後作修正以維持一致的量測品質。

本中心於民國 108 至 110 年執行之民眾住宅室內氡氣量測所使用的是「AIRTHINGS Corentium Plus」被動式氡氣偵檢器(如圖 8)。「AIRTHINGS Corentium Plus」被動式偵檢器的偵測原理是阿伐能譜法，該儀器輕巧方便且可即時顯示數據，相當適合用於住宅室內氡氣篩選性測量。



圖 8 AIRTHINGS Corentium Plus 氡氣偵檢器

圖片來源：<https://repure.io/products/airthings-corentium-plus>

表 9 偵檢器 AIRTHINGS Corentium Plus 之功能特性

Safety Siren Pro Series 3 氡氣偵檢器	
測量範圍	0~50000 Bq/m ³
測量精準度 (Measurement accuracy)	隨量測環境之氡氣濃度(C _{Rn})及量測時間而異。 C _{Rn} 在 50~350 Bq/m ³ 、量測時間 7 天:精準度<12%。 C _{Rn} ≥ 350 Bq/m ³ 、量測時間 7 天:精準度<8%。 C _{Rn} 在 90~220 Bq/m ³ 、量測時間 1 個月:精準度<9%。 C _{Rn} ≥ 220 Bq/m ³ 、量測時間 1 個月: 精準度<6%。
重量	0.13 公斤
大小	12 公分 x 6.9 公分 x 2.6 公分

(二) 住宅之室內氡氣量測

本中心為了瞭解臺灣室內氡氣情形，針對國內室內氡氣進行調查，量測方法主要參考美國國家標準(ANSI)發布之量測室內氡氣及其衰變產物之建議【15、16】。

民國 104 至 106 年委託義守大學執行「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之調查結果，共計完成 289 戶住宅氡氣活度濃度量測結果，評估台灣地區住宅氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.3 貝克；另本中心於民國 108 至 110 年間，因應民眾陳情派員赴民眾住宅執行氡氣量測服務，陸續完成 4 戶(已扣除未完整量測數據)之氡氣偵測，量測結果如附件；綜上，至今共計累積 293 戶之住宅氡氣活度濃度量測，共計 586 筆(含客廳及臥房各 293 筆)量測數據。表 10 為本中心彙整民國 104 至 106 年執行「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」計畫量測數據及本中心民國 108-110 年赴民眾住家執行氡氣量測服務之量測結果，顯示臥房之氡氣平均活度濃度(每立方公尺 20.09 貝克)略高於客廳(每立方公尺 18.90 貝克)，推測原因為臥房通風狀況通常較客廳差。

表 10 台灣住宅氡氣量測結果

	104-106 年 量測數據*		108-110 年 量測數據		合計	
	戶數 (戶)	平均 濃度 (Bq/m ³)	戶數 (戶)	平均 濃度 (Bq/m ³)	戶數 (戶)	平均 濃度 (Bq/m ³)
客廳	289	18.83	4	23.90	293	18.90
臥室	289	19.99	4	27.36	293	20.09

*資料來源:「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫期末報告，2017；本中心整理。

為了解國內住宅不同空間之室內氡氣活度濃度分配情形，分別比較客廳和臥房之室內氡氣活度濃度。國內住宅客廳之氡氣活度濃度分布如圖 8，客廳共計量測 293 戶，氡氣濃度介於每立方公尺 2.5 貝克到 63.3 貝克(Bq/m³)；多數住宅客廳之濃度分布在每立方公尺 35 貝克(Bq/m³)以下，共計有 269 點次，約佔 91.4%；以活度濃度每立方公尺 10~15 貝克(Bq/m³)最多，共有 76 戶，其次是每立方公尺 5~10 貝克(Bq/m³)，共有 61 戶；整體量測結果，客廳氡氣活度濃度之之平均值為每立方公尺 18.90 貝克(Bq/m³)，中位數落在每立方公尺 16.2 貝克(Bq/m³)。

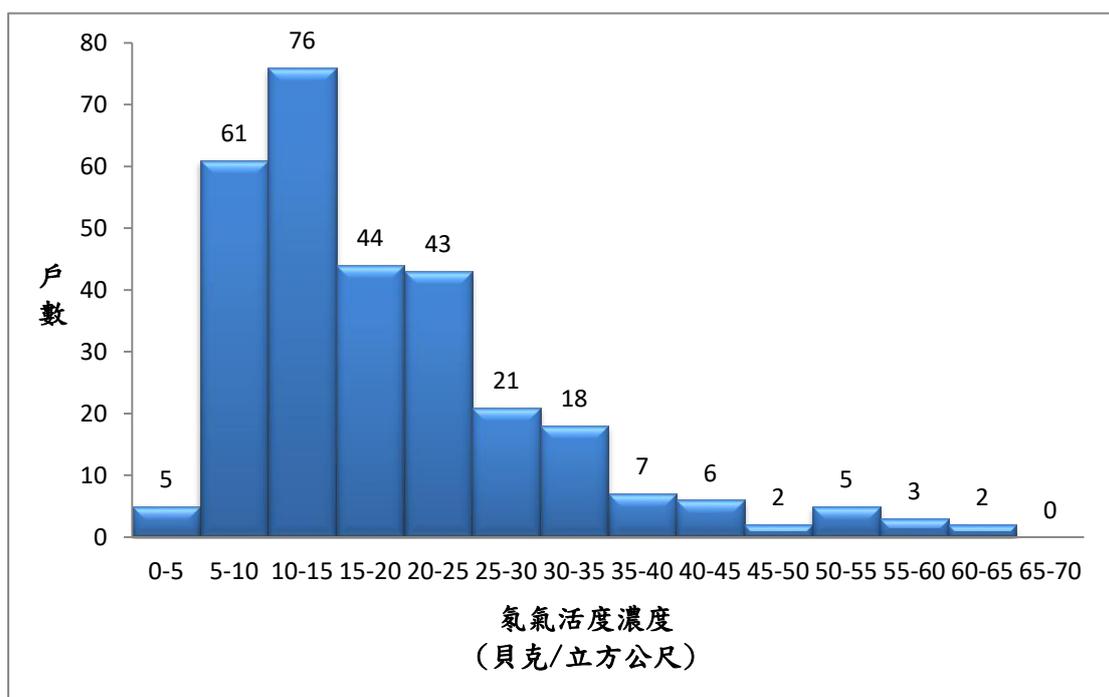


圖 9 國內住宅客廳之氡氣活度濃度分布圖

臥房之氡氣活度濃度分布如圖 9，臥房類型的空間共計量測 293 戶，氡氣濃度介於每立方公尺 2.5 貝克到 95.3 貝克(Bq/m³)；多數住宅客廳之濃度分布在每立方公尺 35 貝克(Bq/m³)以下，共計有 269 點次，約佔 90.2%；以活度濃度每立方公尺 10~15 貝克

(Bq/m³)最多，共有 71 戶，其次是每立方公尺 15~20 貝克(Bq/m³)，共有 55 戶；整體量測結果，臥室氡氣活度濃度之平均值為每立方公尺 20.09 貝克(Bq/m³)，中位數落在每立方公尺 17.5 貝克(Bq/m³)。

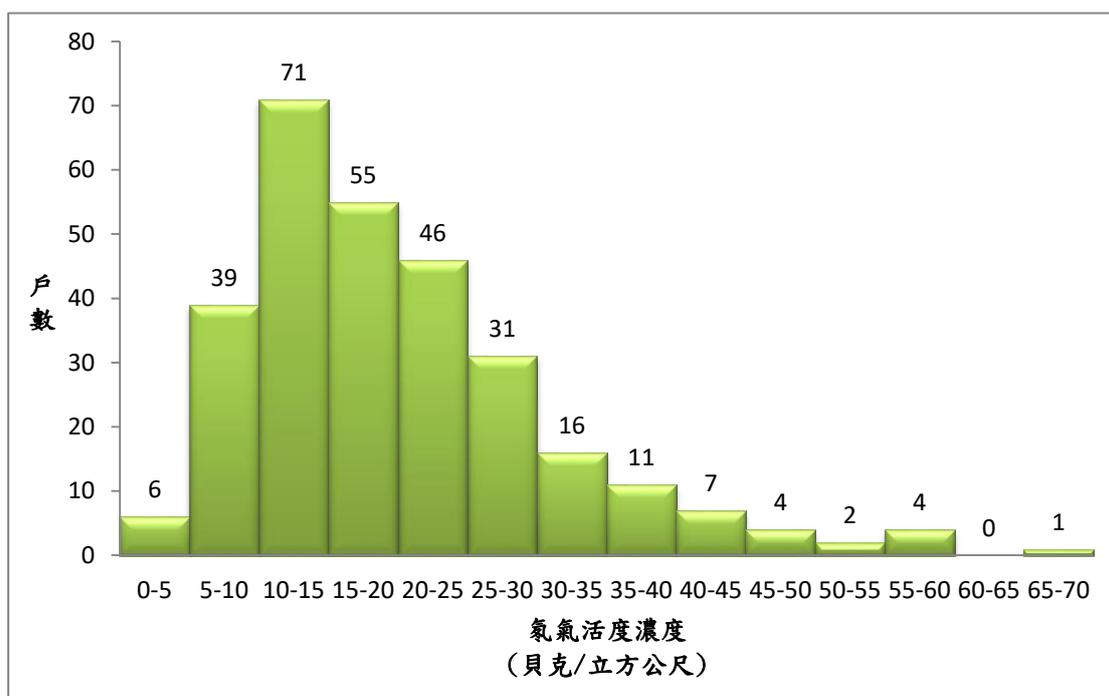


圖 10 國內住宅臥房之氡氣活度濃度分布圖

依據「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之調查結果，臺灣地區住宅室內氡氣濃度較歐美為低，主要係因臺灣地質條件在鈾、釷系元素含量上並無特殊性，非屬氡氣潛勢區(Radon-prone area)，且臺灣常用之建築材料多為鋼筋混凝土，使氡氣量測結果在島內並沒有地域性差別。

(三) 其他地點之氡氣量測

上述國內住宅調查量測結果，以住家客廳及臥室為主，並沒有地下室使用空間量測之案例；因為一般而言國人並無居住在地下空間的案例，但地下空間通風較差，容易造成氡氣累積的狀況，故本中心另有規劃進行量測使用地下空間(如蘭嶼傳統住屋以及

地下室營業場所等)之量測作業，以收集相關資訊，但相關數據不會納入國民輻射劑量氬氣吸入之評估中。

1. 蘭嶼地下屋量測

為了防避東北季風與夏天颱風的侵襲，蘭嶼達悟族人運用智慧將主屋的結構建築，以下凹式空間型態建造如圖 11，採下凹式建築結構，屋頂與地面同高，故稱為地下屋。屋子使用山上蒐集之木材搭建，屋頂使用傳統茅草搭建，因近年新式建材取得更為便利，目前已多改用浪板取代。房屋周圍以石頭堆砌出石牆與石階，以及屋旁的排水溝渠，讓下凹結構較為堅固，且不會有積水的問題。



圖 11 蘭嶼傳統建築外觀



(a) 屋簷下氣窗

(b) 氬氣量測位置

圖 12 蘭嶼傳統地下屋構造及氬氣量測

為了維持室內通風，屋簷下面有設置氣窗可維持室內通風，可以排除在屋內烹煮的油煙與屋內的熱氣，並維持屋內室溫穩定，如圖 12(a)。藉由屋簷與外面石板牆的遮蔽，氣窗的大小維持在不會導致雨水潑入的空間；地下屋之屋內空間不大且低矮，加上木構建築對於土壤溢出氬氣的阻隔能力不佳；雖然有氣窗設置，仍有氬氣累積的可能，因此，氬氣量測的位置會選擇置於屋內平時住戶睡覺的頭部附近空間，如圖 12(b)所示。量測結果如表 11 所示，除傳統住宅(地下屋)的量測外，也在蘭嶼地區進行一般混凝土住宅之量測，共計 4 處。由數據看來，傳統住屋的氬氣濃度略高於混凝土住宅，但都在台灣本島住宅氬氣調查結果的範圍內。相較於國際間的建議值，如美國環保署的改善標準每立方公尺 150 貝克，以及世界衛生組織(WHO)建議的改善目標每立方公尺 100 貝克低很多，無輻射安全之虞。

表 11 蘭嶼一般住宅氬氣量測結果

地點	氬氣濃度(貝克/立方公尺)
紅頭村	7
東清村	8
椰油村	11
朗島村	15
傳統住宅(地下屋)	17~23

2. 地下室營業空間量測

經聯繫國內地下空間營業場所，大多不願意配合本中心研究進行偵測，所以，本研究之地下營業空間調查對象多以醫院地下室為主，而該空間多為候診空間或檢查報到時病人與家屬等待的區域；共計完成 13 家醫院、2 處地下停車場以及 1 家地下室書局，合計 16 個地下室營業場所之氬氣量測作業，量測結果如表

12；量測結果顯示，地下空間氬氣濃度差異頗大，範圍為每立方公尺 6~118 貝克。氬氣濃度偏高的醫院，係因病患來源較少，所以地下室空間只有部分時間開放，而未開放期間該區域的空調系統會關閉，導致換氣不佳而累積偏高的氬氣濃度，雖超過每立方公尺 100 貝克，但尚未超過美國環保署建議改善濃度每立方公尺 150 貝克；其餘地點都低於每立方公尺 100 貝克。

表 12 地下營業空間氬氣量測結果

營業別(樓層)	地點(縣市)	氬氣平均濃度 (貝克/立方公尺)
醫院 1(地下 1 樓)	宜蘭	27
醫院 2(地下 1 樓)	宜蘭	78
醫院 3(地下 7 樓)	桃園	21
醫院 4(地下 1 樓)	桃園	10
醫院 5(地下 1 樓)	苗栗	41
醫院 6(地下 3 樓)	苗栗	59
醫院 7(地下 1 樓)	苗栗	6
醫院 8(地下 3、4 樓)	高雄	(33,35) 34
醫院 9(地下 2 樓)	高雄	118
醫院 10(地下 1 樓)	高雄	16
醫院 11(地下 1 樓)	高雄	43
醫院 12(地下 1、2 樓)	屏東	(9,22) 16
醫院 13(地下 1 樓)	屏東	28
書局(地下 1 樓)	嘉義	92
地下停車場(地下 1 樓)	桃園	14
地下停車場(地下 3 樓)	台南	63

計算以上 16 處之地下營業空間量測結果，氬氣平均濃度為每立方公尺 41.5 貝克，以工作場所每年 2000 小時估算，在該處長期工作的人員年劑量約 0.28 毫西弗。雖然地下空間的氬氣濃度比地上樓層平均值高，但由量測結果也可了解，只要建物換氣率足夠，維持在通風良好的狀況，室內氬氣的濃度還是能與地上樓層差不多，維持良好的室內空氣品質。

(四) 劑量評估結果

為評估國人因氡氣吸入所造成之個人平均年有效劑量，本研究沿用「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之評估方法，考量國民室內活動時間占 9 成以上，依此估計臥房之占用因子以每天 8 小時、其他房間(含辦公室)以每天 14 小時計、戶外活動以每天 2 小時計；承上，以加權平均方式推估出臺灣地區住宅氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.33 貝克；計算過程如下：

$$(18.90*14+20.09*8)/22 = 19.33 \text{ (單位: Bq/m}^3\text{)}$$

綜上，整體之量測結果，台灣地區所有住宅之氡氣活度濃度皆低於 WHO 建議的室內行動基準值每立方公尺 100 貝克。

本中心 2017 年之「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫，該計畫所用之評估係數係 ICRP 於 2014 年公告之第 126 號報告，住宅室內氡氣活度濃度每立方公尺 100 貝克(Bq/m³)之空間，所受的年輻射劑量為 3.3 毫西弗(mSv)，以該計畫評估之台灣地區住宅氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.3 貝克(Bq/m³)計算，我國室內氡氣造成的年輻射劑量約為 0.64 毫西弗(mSv)。因 ICRP 於 2017 年公告之第 137 號報告，本研究之評估係數改採用第 137 號報告之最新數據，以住宅室內活動時間 7000 小時/年，平衡因子為 0.4 評估，住宅室內氡氣活度濃度每立方公尺 300 貝克(Bq/m³)之空間，所受的年輻射劑量為 14 毫西弗(mSv)；依本研究之台灣地區住宅氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.33 貝克計算，推估出我國室內氡氣造成的年輻射劑量約為 0.90(19.33/300*14=0.902)毫西弗(mSv)。

本中心 87 年版之國民輻射劑量評估報告【17】，國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 2.44 毫西弗，背景輻射和其他來源輻射分別貢獻了 1.62 毫西弗和 0.82 毫西弗；其中住宅氡氣之評估係使用硝酸纖維片的阿伐徑跡法，對台灣地區之 250 戶住宅做量測，測得室內氡氣活度濃度為每立方公尺 10 ± 4 貝克 (Bq/m^3)，估算出台灣因氡氣曝露造成之平均年有效劑量，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.44 毫西弗，所貢獻的劑量佔整體國民輻射劑量之 18.0%，是僅次於地表輻射最主要的劑量來源。

依據本中心 111 年版之國民輻射劑量評估結果，台灣之國民輻射劑量(E_{Taiwan})合計為每年 3.95 毫西弗，以背景輻射為主，年有效劑量 2.38 毫西弗，約占整體的 60.25%。其中，氡氣吸入所貢獻的劑量佔整體國民輻射劑量之 22.78%，已成為最主要的劑量來源；氡氣吸入評估劑量的提高除了與量測結果有關，更重要的是氡氣吸入劑量轉換因子的調整，也凸顯未來氡氣在室內空氣品質管理上的重要性。

(五) 與國外之比較

與國外文獻之數據相比，聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 發表之 UNSCEAR 2008 報告，室內氡氣造成全球民眾之個人平均年有效劑量(E_{global})為 1.26 毫西弗；美國輻射防護與度量委員會 (NCRP) 第 160 號報告評估美國國民之平均年有效劑量(E_{US})為 2.28 毫西弗，日本原子力安全研究協會評估日本國民之平均年有效劑量(E_{JP})為 0.46 毫西弗。

比較各國氡氣吸入造成之個人年有效劑量($E_{\text{population}}$)，如表 13。

表 13 各國氬氣曝露之國民輻射劑量比較

單位：毫西弗(mSv)

種類	台灣 (E _{Taiwan})	日本 ^{*1} (E _{JP})	美國 ^{*2} (E _{US})	全球 ^{*3} (E _{global})
氬氣吸入	0.90	0.46	2.28	1.26

*資料來源：1.放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和3年度版）上巻(2021), P.66。

2.NCRP160 號報告(2009), 表 1-1, (P.12)。

3. UNSCEAR 2008 報告(2000) Volum I ,表 1 (P.4)。

四、 結論與建議

- (一)依據本中心民國 104-110 年之氡氣量測調查數據，臺灣地區一般住宅的室內氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.33 貝克，本報告參採 2017 年 ICRP 第 137 號報告的劑量轉換因子，推估氡氣吸入造成個人年有效劑量(E_{EXP})為 0.902 毫西弗，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.9 毫西弗。
- (二)我國氡氣活度濃度量測結果較國際上數值低，主要原因為臺灣位處亞熱帶潮濕、高溫，地質條件在鈾、鈾系元素含量上並無特殊性，且臺灣建築物主要為鋼筋混凝土造成，住宅室內重視通風所致。
- (三)國內目前並未針對室內氡氣之活度濃度訂定相關之管制規定，而國際組織針對氡氣活度濃度標準僅作為建議值，本報告之完成，可做為相關主管機關是否將氡氣活度濃度納入法令管制之主要參考依據。

五、 參考文獻

- 【1】 CROSS, F. T., Radioactivity in Cigarette Smoke Issue, Health Phys. 1984,46,205,**
- 【2】 J. R. Partington, “Discovery of Radon,” Nature, 1957,179, 912**
- 【3】 陳清江(2017)。「台灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」計畫成果。行政院原子能委員會輻射偵測中心。
https://www.aec.gov.tw/share/file/information/jtU96vO5Vn9my7md4~aEzw__.pdf**
- 【4】 International Commission on Radiological Protection. (2017), Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3 (ICRP Publication 137). ICRP Publishing.
https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_46_3-4**
- 【5】 Environmental Protection Agency. (2003), Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA Publishing.
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/402-r-03-003.pdf>**
- 【6】 World Health Organization. (2009), WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO Publishing.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>**
- 【7】 International Commission on Radiological Protection. (2007), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). ICRP Publishing.
https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_37_2-4**

- 【8】 International Commission on Radiological Protection. (2007), Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon (ICRP Publication 115). ICRP Publishing.
https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_40_1**
- 【9】 International Commission on Radiological Protection. (2009), Statement on Radon. ICRP Publishing.
[https://www.icrp.org/docs/ICRP_Statement_on_Radon\(November_2009\).pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Statement_on_Radon(November_2009).pdf)**
- 【10】 International Commission on Radiological Protection. (2014), Radiological Protection against Radon Exposure (ICRP Publication 126). ICRP Publishing.
https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_43_3**
- 【11】 International Commission on Radiological Protection. (1993), Protection against Radon-222 at Home and at Work (ICRP Publication 65). ICRP Publishing.
https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_23_2**
- 【12】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2008) , Sources and Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR 2008 Report).
https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html**
- 【13】 National Council on Radiation Protection and Measurements. (2009), Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States (NCRP Report No. 160) . NCRP Publishing.
<https://ncrponline.org/publications/reports/ncrp-report-160-2/>**
- 【14】 日本環境省(2022)。「放射線による健康影響等に関する統一**

的な基礎資料（令和3年度版）」。日本環境省

<https://www.env.go.jp/content/900410890.pdf>

【15】 American Association of Radon Scientists and Technologists. (2019), Protocol for conducting measurements of radon and radon decay products in homes (ANSI/AARST MAH-2019) AARST Publishing.

<https://standards.aarst.org/MAH-2019/2/>

【16】 American Association of Radon Scientists and Technologists. (2014), Protocol for conducting measurements of radon and radon decay products in homes (ANSI/AARST MAH-2014) AARST Publishing.

<https://standards.aarst.org/MAH-2014/2/>

【17】 行政院原子能委員會輻射偵測中心(1998)。國民輻射劑量之評估研究報告。行政院原子能委員會輻射偵測中心。

附件、108 至 110 年民眾住宅執行氡氣量測服務數據

編號	氡氣活度濃度量測結果 (Bq/m ³)		
	客廳	房間	
		量測值	平均
1	25.0	12.0	12.0
2	18.0	27.0	27.0
3	40.0	56.0	56.0
4	12.6	13.8	14.45
		15.1	

附錄、審查意見對照表

陳清江委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<u>表 3、4</u> 建議合併表 4 ICRP 137 號報告數值。	感謝委員意見，已在報告中合併表 3、4 內容 (P.12)。
2	<u>全文</u> UNSCEAR 報告建議更新為 2020 版。	感謝委員意見，未來將參考最新 UNSCEAR 報告。
3	<u>全文</u> 建議加計 106-110 偵測中心量測數據。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.6)。

尹學禮委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<u>P.1 摘要</u> 與臺灣建築物重視通風...，建議考量修正為...與臺灣地殼內鈾，鈾等放射性核種含量無特殊性、建築物重視通風...。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.20)。
2	<u>全文</u> 國際輻射防護委員會...，建議修正為...國際放射防護委員會...。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.8-11)。
3	<u>全文</u> 美國輻射防護學會...，建議修正為...美國輻射防護與度量委員會...。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.1-2、14、20)。
4	<u>全文</u> 半衰期...，建議修正為...半化期...。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.5)。
5	<u>P.6</u> 氬氣是室內僅次於...，建議修正為...室內氬氣是僅次於是...。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.6)。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
6	P.12 劑量轉換因子的單位 $mSv/Bq \cdot h \cdot m^3$ ，建議修正為 $(mSv/h)/(Bq/m^3)$ 。較為明確。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.11)。

邱志宏委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	綜合意見 若本報告可對外公開，則建議在報告中第一次出現「本中心」時，宜先寫出機關全銜，再括號(以下簡稱本中心)為宜。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.1)。
2	綜合意見 第一次出現民國的年數時，請加註”民國”兩字，之後才可酌以省略。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P.1、6、15、19-20)。
3	綜合意見 NCRP 第 160 號報告是 2010 年?亦或 2006 年(參考文獻第 2 號)?請釐清。	感謝委員意見，NCRP 第 160 號報告是 2009 年，已參採修正相關內容(P. 21)。

羅時麒委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	p.20 臺灣建築物重視通風 1 節，報告書內容並未介紹背景或說明原因，建議在第六點(PIP)或適當章節增加說明。	感謝委員意見，未來將查詢相關參考資料納入。
2	p.20 我國未並未針對氬氣訂定相關之管制規定，報告書內容並未說明各機關之現況，例如我國室內空氣品質之主管機關為環保署，目前在室內空氣品質標準並未訂定相關之管制規定。	感謝委員意見，我國其他機關皆未訂定相關之管制規定。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
3	p.15 室內氬氣量測儀器，建議說明使用量測儀器的精準度及適用量測用途。	感謝委員意見，已依建議增加現有量測儀器之規格(P. 17)。

許芳裕委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	p.10 表 2 中氬氣活度濃度由 200 (Bq/m ³)增至 600(Bq/m ³)，變為 3 倍，但年輻射劑量則由 3 (mSv/y) 增至 10 (mSv/y)，變為約 3.3 倍，似乎非線性比例關係，請說明可能原因。	感謝委員意見，該文獻為方便評估，取整數值進行劑量轉換，故非線性比例關係。
2	p.10 倒數第四行之”(Bq/m3)”請修正為”(Bq/m ³)”。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P. 10)。
3	全文 引用之 UNSCEAR 2000 Report 有較新版” UNSCEAR 2008 Report，建議亦列入討論及參考文獻。	感謝委員意見，已參採最新 UNSCEAR 報告(P. 10)。
4	p.19 第一段提及”...量測方法主要參考美國國家標準(ANSI)發布之...建議”請加註參考文獻。	感謝委員意見，已參採修正參考文獻(P. 19)。
5	p.19 第四段第一行提及”國人住家之氬氣平均活度濃度為每立方公尺 21.9 貝克。”在前段已有相同敘述，建議將此句文字刪除。	感謝委員意見，已參採修正相關內容(P. 19)。