

# 台灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估

期末報告

受委託單位：義守大學 ISU106-GOV-07

研究主持人：陳清江

協同主持人：

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 11 月

研究經費：新臺幣二十萬元

行政院原子能委員會輻射偵測中心  
委託研究 計畫編號:1060211

中華民國 106 年 11 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

## 目錄

1	中文摘要.....	3
2	英文摘要.....	5
3	計劃目的.....	7
4	計畫緣起.....	8
5	執行方法與進度說明.....	9
6	結果與討論.....	14
7.	結論與建議.....	27
8	參考文獻.....	30
	期中報告審查意見表:.....	36

## 1 中文摘要

根據 UNSCEAR 2008 年的報告顯示，室內氡氣造成之劑量佔全球人口天然輻射劑量之半，為僅次於吸菸的環境致肺癌因子，因此 WHO 於 2009 年建議世界各國加以重視，並建議設定室內氡活度改善目標值為 100 貝克每立方米，比目前原能會所建議的改善目標活度 150 貝克每立方米為低，因此目前陸續有國際組織及國家標準已研擬往下修訂以符合 WHO 的建議。

本年研究採用儀器測量方式進行室內氡活度抽樣調查，選擇 83 戶典型的台灣住宅為代表，以連續氡監測器記錄 2 天以上氡濃度的平均值。本年的調查加強花東地區與宜蘭地區住宅，涵蓋客廳、臥房、書房等活動空間，共測量 83 戶住宅的客廳、臥室或書房，取得 166 組數據。一方面篩選氡活度是否可能超過 WHO 建議的參考基準 100 貝克每立方米，另一方面求取室內氡活度平均值，以最新的劑量評估模式重新評估氡活度造成的國民輻射劑量，藉由本計畫之執行，擴大量測調查範圍更新台灣地區住家氡氣對國民所造成的輻射劑量樣本數及分析差異性，預期可以獲得比較客觀可靠的結果。

依規畫進度，10 月 30 日前已經完成 83 戶住宅室內氡活度的測量，在正常通風環境下，室內氡活度客廳與臥室平均值為 18.3 與 19.5 貝克/立方米，加權平均值為 19.1 貝克/立方米。

在文獻收集與研讀方面，本年度著重在影響室內氡活度的變因探討。溫帶國家的節能措施導致室內通風率下降氡濃度升高的現象，可以解釋台灣地區因為空調的普遍可能導致室內氡濃度升高。

本研究 4 年來合計測量台灣地區住宅室內氡活度有效戶數共 289 戶，加權平均值為 19.3 貝克/立方米，均小於 100 貝克/立方米。評估氡氣對台灣地區國民輻射劑量約為 0.64 毫西弗/年。比 25 年前的評估值 0.36 毫西弗/年高 78%，約為 UNSCEAR 公布世界平均值 1.2 毫西弗/年的 53%。

## 2 英文摘要

Study on Indoor Radon Measurement and Dose Reassessment in Taiwanese dwellings.

### ABSTRACT

According to the UNSCEAR report 2008, half of the world natural population dose came from indoor radon which is a natural radioactive gas. Epidemiological data have provided direct evidence linking exposure to radon at home and increased 7% of lung cancer risk. In 2009, WHO suggested that the indoor radon level should be below  $100 \text{ Bq/m}^3$  and with an action level not more than  $300 \text{ Bq/m}^3$ . That is lower than the current reference level of indoor radon in Taiwan which is  $150 \text{ Bq/m}^3$ . Thus many international organizations and countries have started to modify the action levels of indoor radon.

In this study, a sampling survey of indoor radon activity was conducted by means of instrumental measurement. In 2017, 83 typical Taiwanese dwellings were selected as representative, and the average radon concentration over 2 days was recorded by continuous radon monitor. This year's survey strengthened the residential areas in east Taiwan, covering the living space such as living room, bedroom and study rooms. We measured a total of 83 residential dwellings and obtained 166 sets of data. It is possible to choose whether the activity of radon exceeds  $100 \text{ Bq/m}^3$  as recommended by the WHO. On the other hand the average indoor radon activity will be applied to reassess the population radiation dose caused by using the latest dose assessment model. From the implementation of this project, we expect that more objective and reliable results will be

obtained.

According to the planned schedule, by October 30, the indoor radon activity measurement of 83 households has been completed. Under normal ventilation condition, the average indoor radon levels in living room and bedroom are 18.3 and 19.5 Bq / m<sup>3</sup>, and the weighted average is 19.1 Bq / m<sup>3</sup>.

In the paper collection and reading aspect, we focused on the impact parameters of indoor radon activity variation this year. Energy-saving measures in temperate countries lead to a radon concentration increase owing to decrease of indoor ventilation rate . That can explain the increased indoor radon concentration than 25 years ago owing to the popularization of air conditioner in Taiwan.

In this study, a total of 289 valid indoor radon data were measured over the past four years in Taiwan with a weighted average value of 19.3 Bq / m<sup>3</sup> and all less than 100 Bq / m<sup>3</sup>. Radon induced population radiation dose assessment to Taiwanese is about 0.64 mSv / y which is 78% higher than the 25-year-ago estimation of 0.36 mSv / y and is about 53% of the world average of 1.2 mSv / y by UNSCEAR report 2008.

### 3 計畫目的

本計畫之目的在於重新評估住家氡氣對國民所造成的輻射劑量，並參考先進國家對於氡氣活度的調查研究與立法管制經驗，最終目標以調查結果加以統計與評估，判定國內所建議的改善目標活度是否合宜。本研究擬採儀器測量方式進行室內氡氣活度抽樣調查，選擇 70 戶以上典型的台灣住宅為代表，以連續氡監測器記錄每小時氡濃度求得平均值。並採用最新的肺部劑量評估模式，重新評估住家氡氣對國民所造成的輻射劑量。

世界衛生組織(WHO)於 2009 年公佈 Handbook on Indoor Radon，建議各國制定國家型氡氣行動計畫，並建議住家氡氣參考基準為 100 貝克每立方米，比目前原能會所建議的改善目標活度 150 貝克每立方米為低，因此先進國家皆相當重視氡的議題。法國核能安全署(ASN)邀請我方專家參加 2014 年 9 月 30 日至 10 月 2 日舉辦的「氡氣風險行動計畫專家研討會(workshop)」，與會者以歐盟國家為主，內容主要涵蓋 4 大議題：

1. 全球策略以及國家型的氡氣行動計畫
2. 降低住宅氡曝露的方法
3. 降低公共場所和工作場所氡曝露的方法

#### 4. 公眾宣導溝通

本研究主題已經進行 3 年，度量近 200 戶住家氬活度，為增加抽樣之代表性，106 年度擬增加 70 戶以上典型的台灣住宅為代表，將加強花東地區與宜蘭地區住宅，以連續氬監測器記錄每小時氬濃度求得平均值。主要目的如下：

- (一) 蒐集分析先進國家對於氬氣活度的調查研究與立法管制資訊。
- (二) 實際量測台灣地區室內住家氬氣並評估對國民造成的輻射劑量。

#### 4 計畫緣起

2011 年本人針對南部地區公共地下場所環境氬氣度量時，也測量部分住家氬活度，結果發現一般住家室內平均氬活度多在 10-45 貝克每立方米之間，在通風不良的狀況下最大氬活度達 180 貝克每立方米，遠比 20 年前本人使用硝酸纖維片度量結果平均 10 貝克每立方米為高。檢討先前的調查僅針對通風較好的客廳為之，其數據遠低於 UNSCEAR 2008 年報告的平均值，很可能低估室內氬活度。近年來空調設備愈趨普遍，使得室內通風率下降；許多高級住宅引進國外建材如花崗石等，而且使用地下設施愈趨



普遍，對於通風不良的室內住家氡氣活度有必要重新加以調查與評估。

## 5 執行方法與進度說明

目前室內氡氣量測常用的方法可分為主動式與被動式兩類。主動式需外加電源，可以連續監測並即時顯示記錄數據，可做為氡氣活度評估、預警、改善效果評估之用，設計形式以硫化鋅閃爍體魯卡斯腔及脈衝模式半導體偵檢器較為常見。被動式不需外加電源，以偵測累積活度為主，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，設計上以活性炭、介電質與徑跡法為主。一般而言主動式的偵測設備較為昂貴，但立即可以判讀結果，適合於特定量測點的確認與特性探討。被動式偵測方法所需價格較為便宜，適合做大範圍的普查之用，1990年本人在原能會輻射偵測中心進行對國內住家室內氡氣活度抽樣調查為期2年半，所用的硝酸纖維片徑跡蝕刻法就是屬於被動式偵測方法。

德國 SARAD 公司所生產的主動式氡氣偵檢器 (RTM-1688-2) 是藉由靜電集塵原理收集氡子核在半導體偵檢器的表面，被收集的 Po-218 離子和計測腔內的氡氣濃度成正比例，可以連續監測器記錄每小時氡濃度、氣溫、氣壓等的變化狀況。最快每 30 分鐘可以取得一

組數據，可連續記錄 511 組數據，可同時測量鈾氣濃度 (Rn-220)，量測範圍：0-10 MBq/m<sup>3</sup>，經測試結果適合作為住宅氡活度之測量。由於 SARAD 公司所生產的氡氣偵檢器 (RTM-1688-2) 太過笨重且價格昂貴，不方便郵寄到各地住家作測量，因此本調查擬使用美國 Safety Siren Pro Series 3 Radon Gas Tester Detector，新型機器使用游離腔偵檢器，110-240V 電源且以 Bq/m<sup>3</sup> 為單位，體積輕巧，解析度達 1 Bq/m<sup>3</sup>，適合大量住宅室內氡的篩選性測量，但有高估的現象，且容易受電磁波和環境背景輻射影響。該儀器將先與 SARAD 氡氣偵檢器 (RTM-1688-2) 作比對，以求得校正因子後作修正，以維持一致的量測品質。

Safety Siren Pro Series 3 Radon Gas Tester Detector 氡氣偵檢器(如圖 5.1)規格如下:

- 氡氣數值 LED 數字顯示範圍 1 到 9999 Bq/m<sup>3</sup>。
- 短期顯示 S 過去七天的氡氣平均值。
- 長期顯示 L 從開機或重新設定起到現在五年內的氡氣平均值。
- 在最初的通電後，短期和長期的平均值將會在 48 小時後顯現。
- 若短期平均值大於等於 200 Bq/m<sup>3</sup>或長期平均數值連續 30 天大於 200 Bq/m<sup>3</sup>將會有警示鈴聲。

- 面板上的按鈕控制了四種功能。
- 短期和長期的顯示，是由一個綠色 LED 指示燈旁邊的 S 或 L 切換表示之。
- 進行手動的偵檢器測試。
- 如果偵檢器在警報狀態，可按靜音或重新啟動警報器。
- 偵檢器數值清除和重新設定都可以開始一個新的讀值。
- 每小時都會更新讀數。一年保固。
- 每 24 小時自動進行故障偵測，並會將結果顯示。
- 110 伏特-240 伏特電壓的電源，並使用該國的電源插座。



圖 5.1 Safety Siren Pro Series 3 氡氣偵檢器

由於氡氣是環境中鐳衰變產生的氣體，為了解一般住宅的平均氡活度，測量地點的選擇以典型的台灣主流住宅大樓、透天及公寓式住宅空間為主，室內房間選擇客廳、臥房或書房等分別測量。以 SARAD 公司所生產的氡氣偵檢器（RTM-1688-2）實測室內氡活度結果如(圖 5.2)，可以看出室內氡活度隨時間變動的最大值、最小值、平均值和溫度、氣壓，可以分析正常生活型態下的氡活度平均值，以便進行劑量評估用。

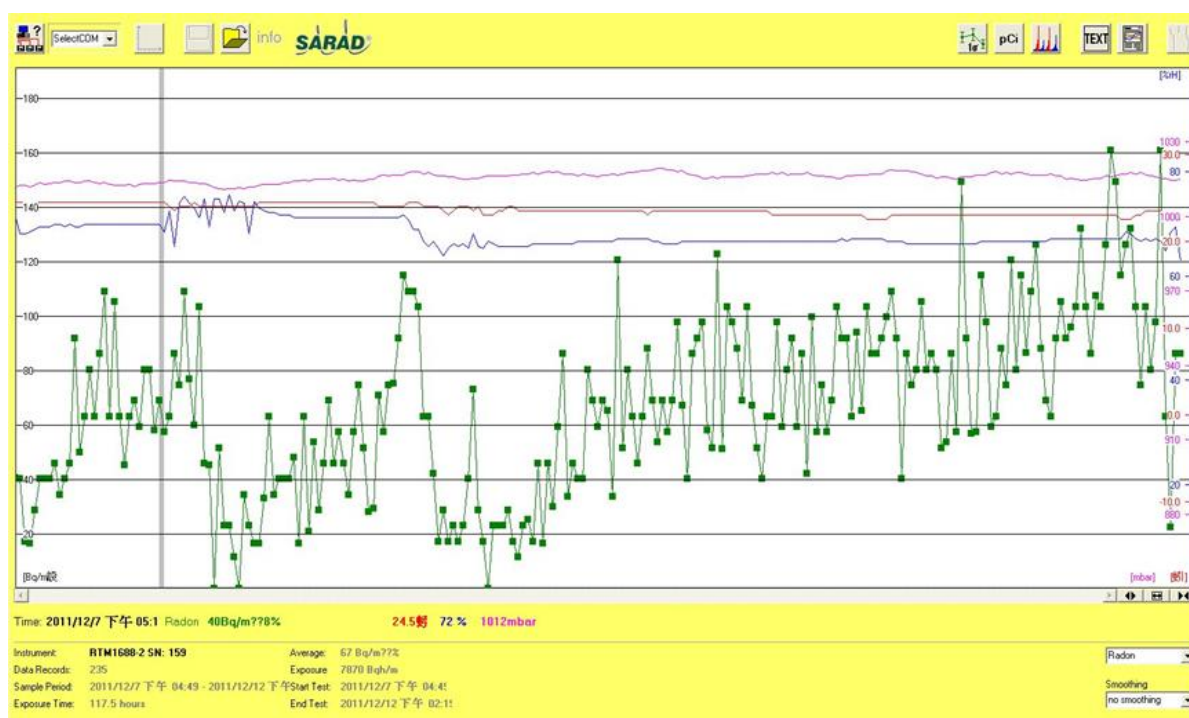


圖 5.2 以德國 SARAD 攜帶型氡/鈾氣體監測系統實測室內氡活度實例

Safety Siren Pro Series 3 氡氣偵檢器，會有高估的情況並容易受到電子用品的干擾，在調查期間有部分 Safety Siren Pro Series 3 機器出現錯誤造成測量失敗，或因高估需要複測。

量測結果高估的校正方法是與 SARAD 公司所生產的氬氣偵檢器 (RTM-1688-2) 作比較，選擇約 40 和 150 Bq/m<sup>3</sup>的室內氬活度作比較，求得兩儀器相關方程式(Y= a+bX)後作修正。修正係數(斜率 b)約等於 0.6，高估相當明顯。各 Safety Siren Pro Series 3 氬偵檢器的平均校正因子如圖 5.3 所示。

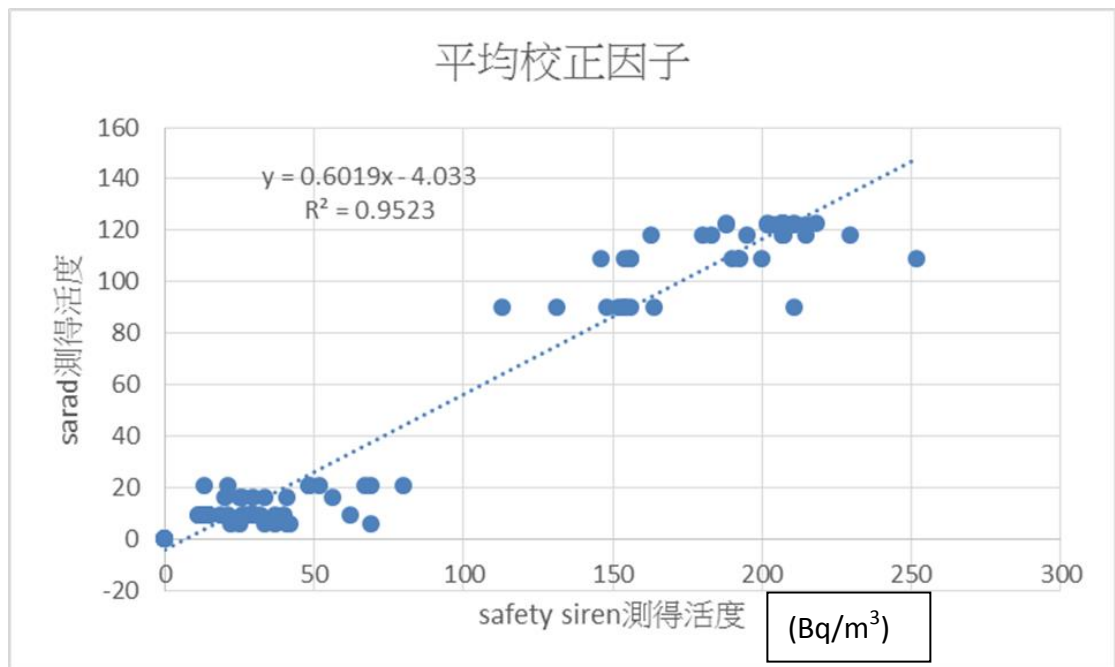


圖 5.3 Safety Siren Pro Series 3 氬偵檢器的校正因子

## 6 結果與討論

### 6.1 室內氡抽樣測量結果

本研究採用的 20 部 Safety Siren Pro Series 3 氡氣偵檢器，會有高估的情況並容易受到電子用品的干擾，其設計目的主要作篩選性度量。在調查期間有部分 Safety Siren Pro Series 3 機器出現錯誤造成測量期間機器不足。量測結果高估的校正方法是與 SARAD 公司所生產的氡氣偵檢器 (RTM-1688-2) 作比較，每一儀器均需單獨做一校正曲線，且活度愈低，變動愈大，為一大困擾。選擇約 40 和 150 Bq/m<sup>3</sup> 的室內氡活度作比較，求得相關方程式後作修正。有些外來干擾會造成數據顯著偏高，因此大於 70 貝克/立方米的住戶均經過複測確認。

本計畫於 106 年 3 月 1 日開始，依規畫進度，3 月底前已經完成住宅室內氡抽樣規劃與測量儀器之校正。現場測量與數據整理結果，截至 10 月 30 日為止，已經完成 83 戶住宅室內氡活度的測量，在正常通風的環境下，室內氡活度略低於之前的測量結果。其中初測有 8 戶大於 100 貝克/立方米，經複測結果均正常，研判為受干擾所致。有些測量結果會高達 3 百甚至 6 百多貝克/立方米，經複測結果均為干擾所致。另外發現將儀器放在地面上會比放桌上高估 10 倍左右，研判可能受地板加馬輻射

以及短半衰期的氬 220 干擾所致。

彙整今年所測 83 戶住宅結果室內客廳與臥房平均活度分別為 18.3 及 19.5 貝克/立方米，差異不大，經計算無母數 t-test<sup>1</sup> 之 p 值為 0.003，小於 0.05，結果顯示客廳與臥房有顯著差異。

以 SPSS 軟體做描述性統計分析結果彙整於表 6.1。

表 6.1 今年所測 83 戶住宅氬活度統計分析結果(貝克/立方米)

位置	樣本數	平均值	標準差	中位數	最小值	最大值
客廳	83	18.3	8.8	17.4	4.2	57.6
臥房	83	19.5	7.6	18.0	9	41.4
加權平均	83	18.7	8.2	16.9	5.9	51.9

若將今年所測 83 戶住宅氬活度分布作圖，比較接近帕松分布，詳如圖 6.1 及 6.2。其常態 Q-Q 圖如圖 6.3 及 6.4 所示，左右兩端偏離常態分布。

---

<sup>1</sup> 無母數 t-test 為 Mann-Whitney U 檢定，針對非常態分配之數據進行二組中位數之考驗。

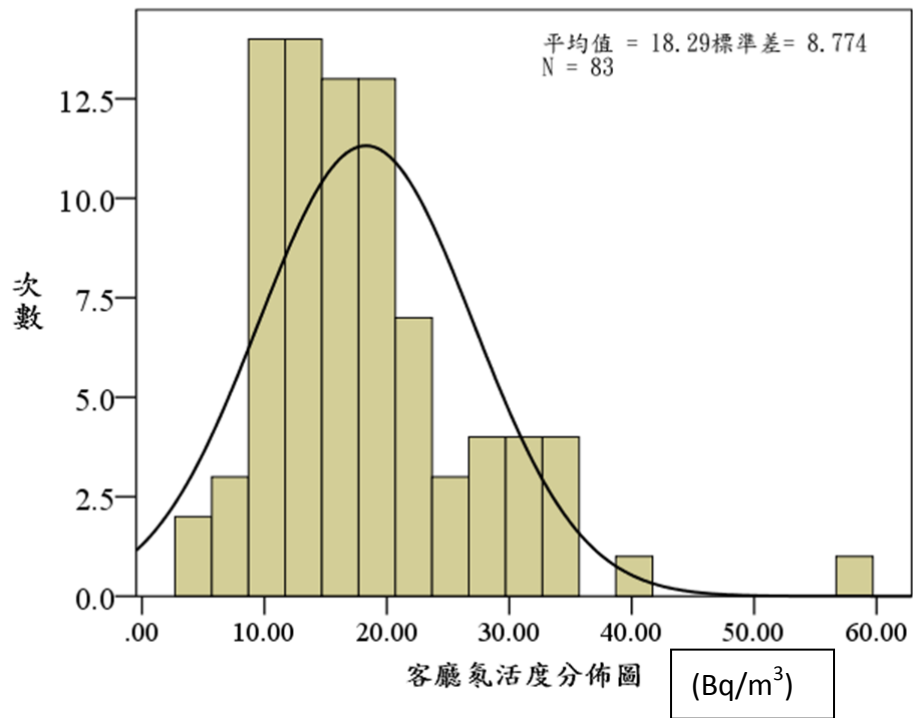


圖 6.1 今年所測 83 戶住宅客廳氡活度分佈圖

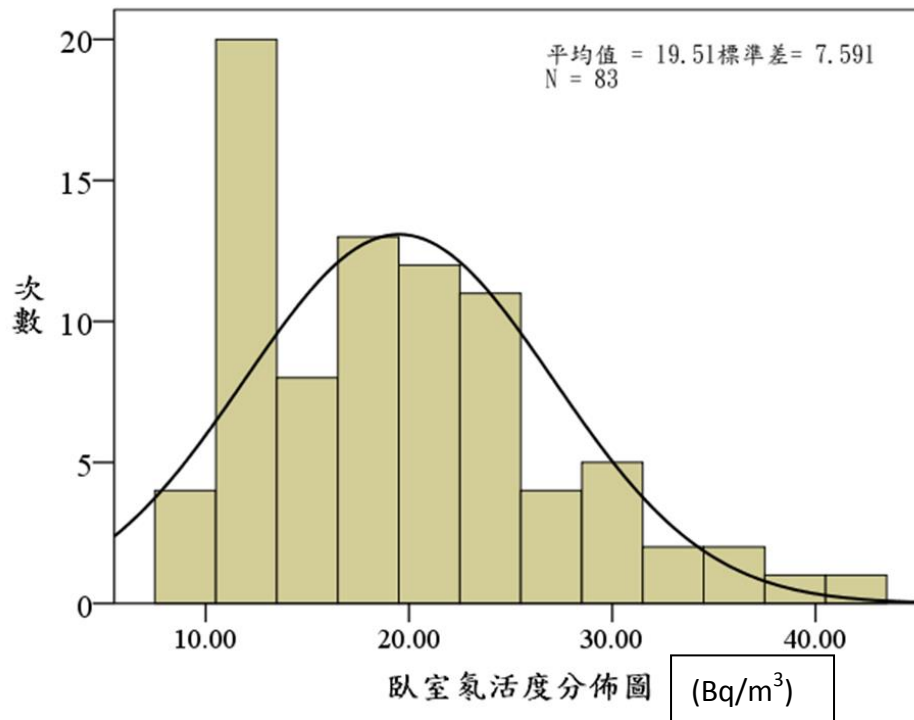


圖 6.2 今年所測 83 戶住宅臥室氡活度分佈圖



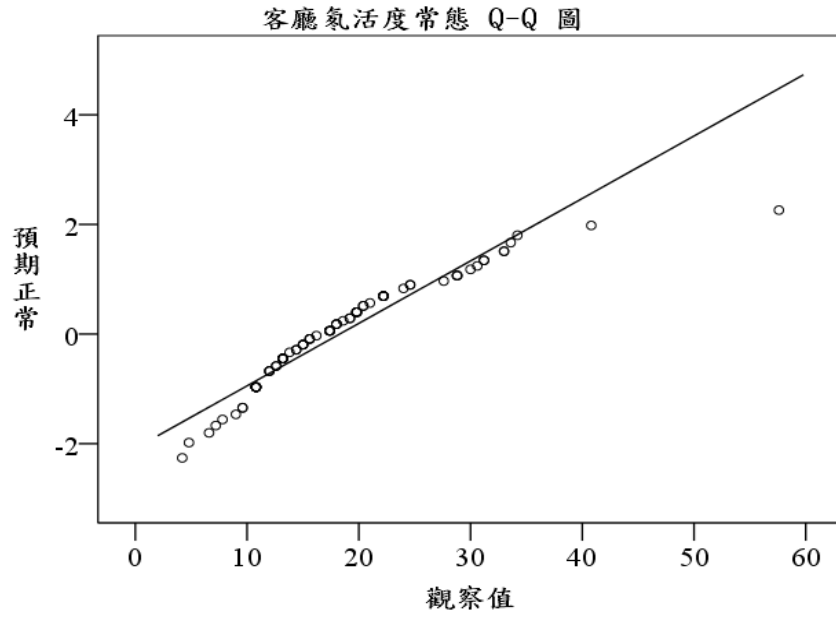


圖 6.3 今年所測 83 戶住宅客廳氡活度分布 Q-Q 圖

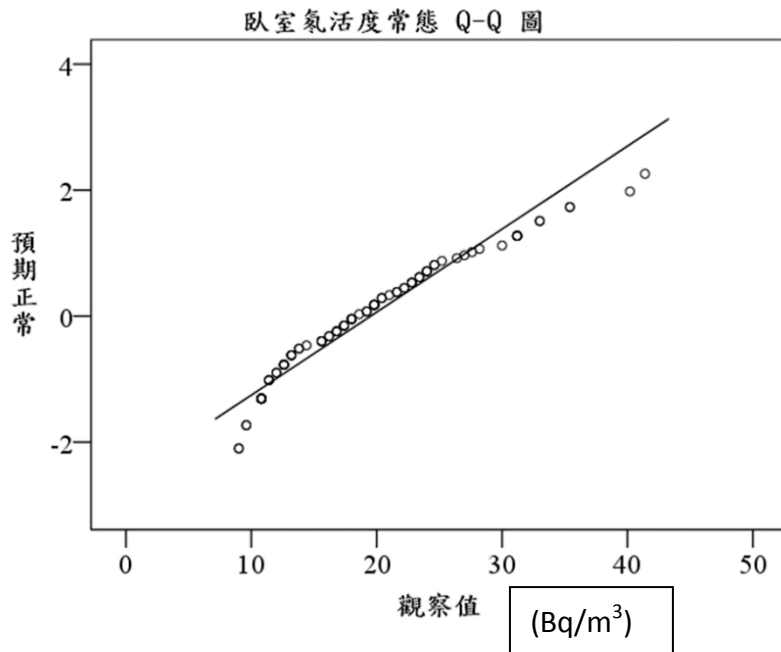


圖 6.4 今年所測 83 戶住宅臥室氡活度分布 Q-Q 圖

若將今年所測 83 戶住宅氡活度數據取自然對數再作分布圖，則比較接近常態分布，詳如圖 6.5 及 6.6。此一趨勢與國外之調查結果一致。

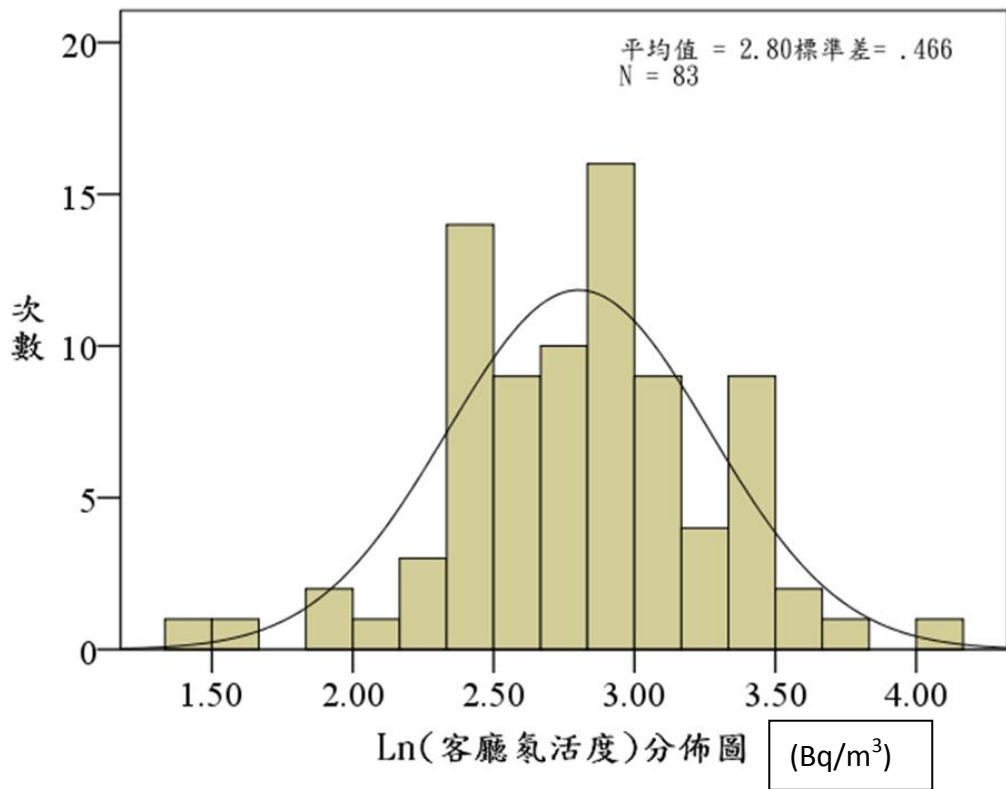


圖 6.5 今年所測 83 戶住宅客廳氡活度對數分布圖

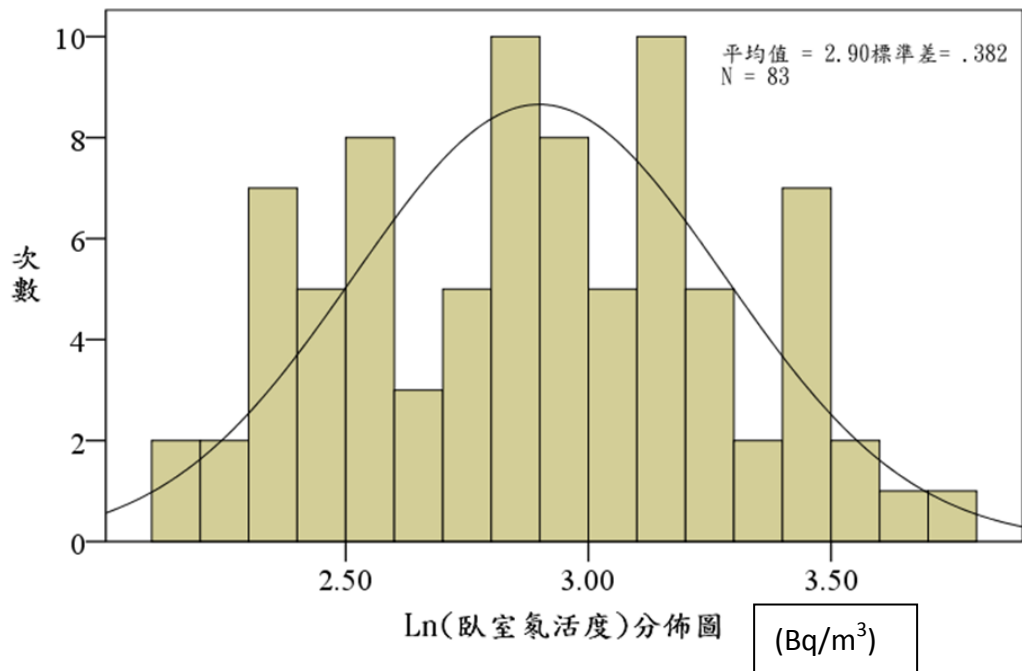


圖 6.6 今年所測 83 戶住宅臥房氡活度對數分布圖

## 6.2 最近 4 年結果彙整與劑量評估

依內政部的調查統計，台灣屬於高度工商業化社會，國民室內活動時間占 9 成以上，依此估計在臥房之占用因數以每天 8 小時計算，其他房間含辦公室以 14 小時計算，戶外活動每天 2 小時。本研究 4 年來合計測量有效戶數 289 戶住宅室內氬活度，室內加權平均值為 19.3 貝克/立方米，均小於 100 貝克/立方米，詳如表 6.2 所示。

表 6.2 本研究 4 年所測氬活度結果統計(貝克/立方米)

位置	樣本數	平均值	標準差	中位數
客廳	289	18.8	11.2	15.6
臥房	289	20.3	10.0	18.0
加權 平均	289	19.3	10.7	16.5

若將 4 年來合計測量 289 戶住宅氬活度分布作圖，比較接近帕松分布，詳如圖 6.7、6.8 及 6.9。其中位數均小於平均值，相差在 3 左右，顯示少部分數據偏高將平均值拉高，這是環境輻射偵測常見現象。

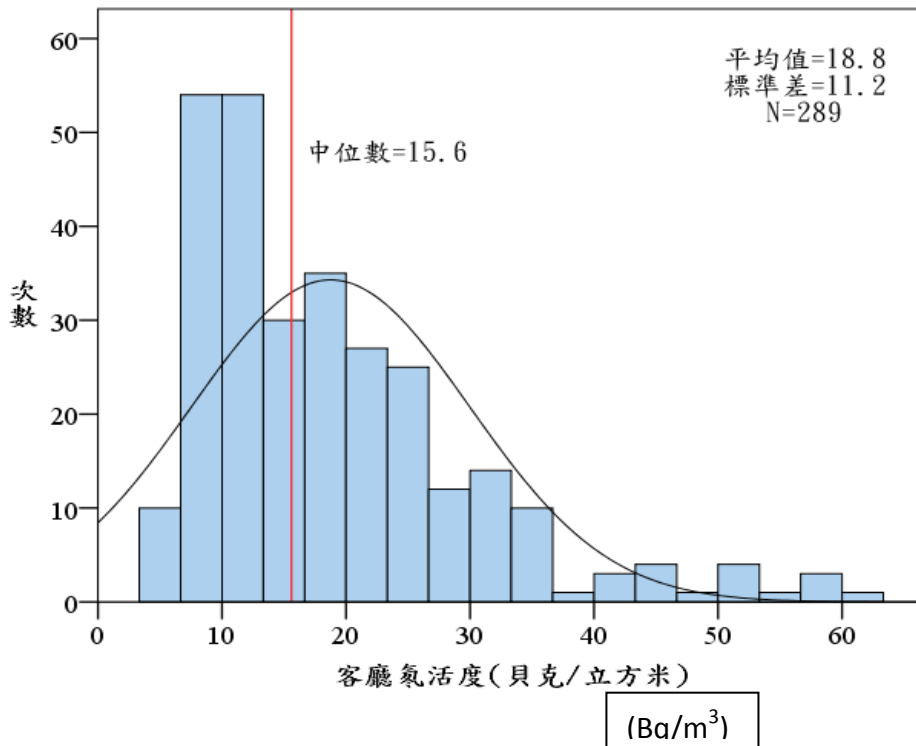


圖 6.7 本研究 4 年所測 289 戶住宅客廳氡活度分布圖

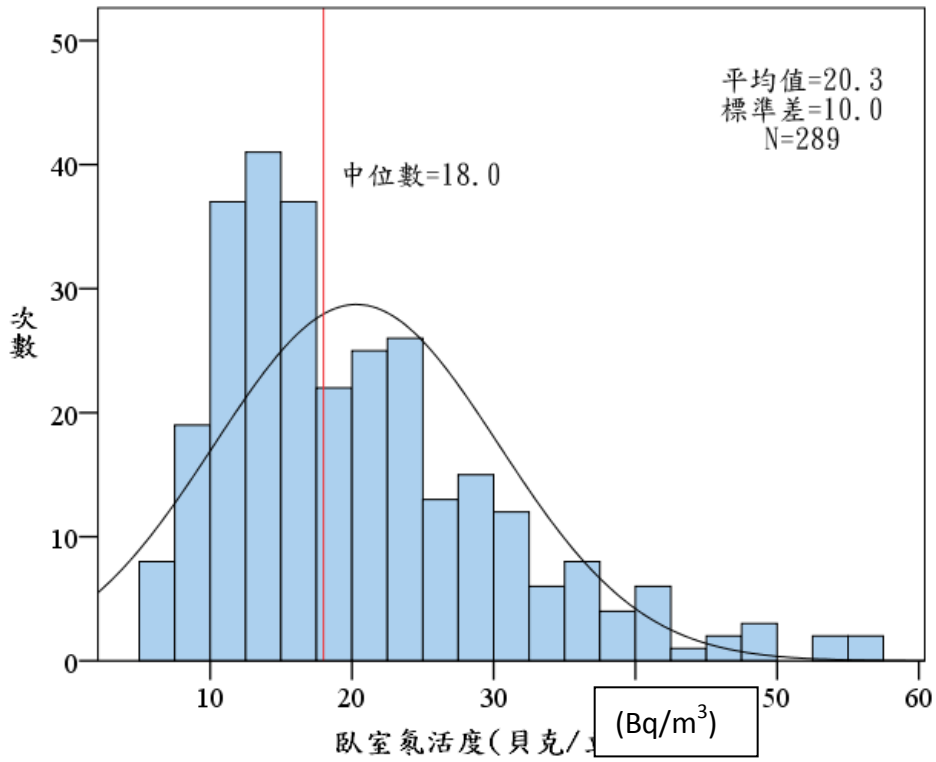


圖 6.8 本研究 4 年所測 289 戶住宅臥室氡活度分布圖

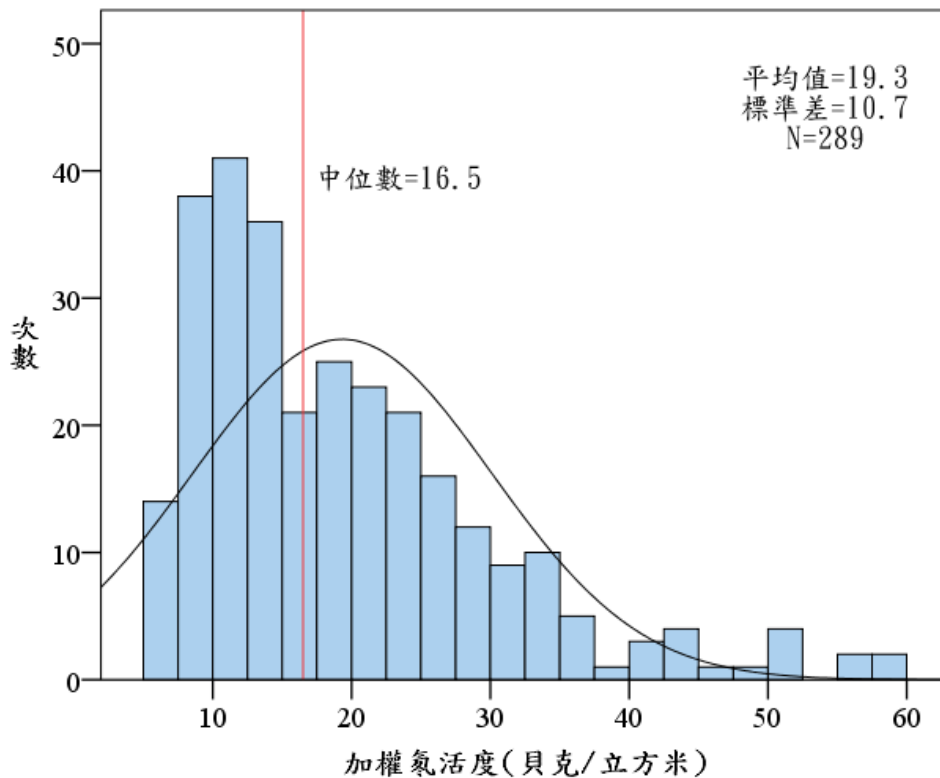


圖 6.9 本研究 4 年所測 289 戶住宅加權室內氡活度分布圖

氡氣對呼吸系統造成的劑量評估模式相當複雜，各國權威組織所發表的評估結果整理如表 6.3。以最新的 ICRP-126 號報告劑量評估參數每 100 貝克/立方米相當於 3.3 mSv/y，評估氡氣對台灣地區國民輻射劑量約為 0.64 毫西弗/年。比 25 年前的評估值 0.36 毫西弗/年高 78%，約為 UNSCEAR 公布世界平均值 1.2 毫西弗/年的 53%。活度比 25 年前高的原因研判係空調與氣密窗普遍使用，通風率降低所致，溫室效應導致空調開啟時間拉長也是原因之一。

表 6.3、採用不同劑量模式評估於室內年佔有 7000 小時，平衡因子為 0.4 時的劑量轉換因子

Radon concentration, Bq/m <sup>3</sup>	100	200	300
ICRP65 “risk equivalent” radon dose, mSv	1.7	3.4	5
UNSCEAR EP.recommended radon dose, mSv	2.5	5	7.5
UNSCEAR Radon effective dose (dosimetric), mSv	6	12	18
ICRP 126 Radon effective dose ,mSv	3.3	6.6	10

氡平衡因子平衡因數 F 定義為平衡等效氡濃度與空氣中母核氡放射性活度的比值。它代表用  $\alpha$  潛能表示的空氣中短壽命子核混合物與其母核之間的不平衡狀態。近年來，在氡水平調查中，有不再測量氡子核的趨勢，在劑量評估中採用 I C R P 及 U N S C E A R 推薦的平衡因數 F = 0.4。1984 年台灣曾經測量環境的平衡因子，期平均值為廚房 0.48，客廳 0.61，一樓臥室 0.45，二樓臥室 0.33，室外 0.57，由於台灣空氣中懸浮微粒濃度高，會影響平衡因子變大，平均約 0.5。

由於台灣地區天然背景輻射相當均勻，且各地區建築結構與材料類似，以鋼筋混凝土為主流，可以預估室內氡活度不會有地域性差別，去年刻意將度量對象偏重在新竹以北住宅，結果並沒有顯著的地域性差別。今年刻意將度量對象加強宜蘭與花東地區住宅，其中宜蘭 13 戶，花蓮 5 戶台東 11 戶，結果顯示也沒有地域性差別，台灣本島也未發現氡易發地區(Rn prone area)。

### 6.3 影響室內氡活度的變因探討

在文獻收集與研讀方面，本年度著重在影響室內氡活度的變因探討。在一份法國新發表的研究報告”室內氡濃度、熱改造和住宅特性之間的關係”文獻中說明，法國的布列塔尼地區在 2011 年至 2014 年，舉辦了一個超過 3,400 戶住宅樣本的監測活動，根據 NF ISO 11665e8 (2013) 標準，在使用暖氣的幾個月，每個住宅使用一個被動式氡劑量計測量兩個月，此外，使用問卷調查建築施工期、建築材料、地基類型、熱改造(thermal retrofit)等建物特點。最終數據由 3,233 棟房屋組成測量結果和問卷答案，應用多變量線性回歸模型，探討室內氡濃度與建築特性的關係，特別是熱改造的影響。室內氡濃度的幾何平均值為  $155 \text{ Bq m}^{-3}$  (幾何標準偏差為 3)，經過熱改造的房屋具有較高的平均氡濃度(增

加 21%)，這可能是由於通風率的降低，修復工作後的建築物沒有適當的通風管理，導致氬濃度升高。其他建築特性，主要是建築材料和地基類型與室內氬濃度有關，室內氬濃度較高多為用花崗岩或其他石頭建造的老房子，使用在泥土上的凝土地板 (slab-on-grade)，且沒有任何的通風系統。

本研究調查了位於氬容易發生地區的 3,233 個房屋的室內氬濃度，相對於施工特性，特別是熱改造，觀察到熱改造的影響，進行熱改造的房屋，室內氬濃度平均高於沒有改造的房屋。然而，建築材料是影響最大的因素，其次是地基類型，用花崗岩或其他石頭建造，具有凝土地板，且沒有任何通風系統的舊房子的室內氬濃度較高。總結來說，這些結果顯示，在節省能源的同時，應考慮室內空氣品質，以避免室內空氣品質惡化，導致影響居住者的健康。在未來幾年，節能改造仍將是建築行業的主流動力，這一考慮因素顯得更為重要。

另一篇捷克的研究論文則顯示，使用建築圍阻方式來減少熱量損失的任何措施，都會增加建築物外殼的氣密性，這樣的措施包括在外牆上安裝外部保溫複合系統 (ETICS)，增加屋頂結構中的隔熱厚度，在閣樓空間或閣樓上的天花板內添加隔熱材料，並更換現有的窗戶和入口，由於氣密性增加，房屋通風不那麼強烈，



這可能對室內環境的品質產生負面影響。本文透過家庭住宅氡氣濃度測量，證實了在安裝節能措施前後對室內環境換氣率顯著降低的不良影響。節能措施在很多情況下導致換氣率大幅下降，通風率可能下降 3 至 4 倍，因此氡氣濃度以相同的比例增加。原來的低室內氡氣濃度可以顯著地增加至高於 WHO、ICRP、IAEA 和國家監管機構建議的參考濃度值，這嚴重惡化了室內空氣的品質，直接影響了居民的健康，將現有建築轉為節能建築時，節能與室內空氣品質之間的平衡是必須考慮的一個因素。該論文總結的調查研究顯示，如果氡氣來自建築材料，選擇氡溢出率低的建材幾乎可以將建築的節能需求換氣率降低到相當低的程度，而不會增加室內氡氣濃度，目前已引入並討論合適的解決方案。個案研究一棟 2 層樓 5 房間的住宅，節能措施節省能源 2.8 倍，但是節能措施導致氡氣濃度增加 3.4 倍。

另一篇保加利亞的研究論文也證實，利用測量 16 棟 20 房間家中的 CD 或 DVD 片上所沾黏的氡子核活度，評估因節能措施導致住宅的氡活度上升 35%。

上述溫帶國家的節能措施導致通風率下降室內氡濃度升高現象，可以解釋亞熱帶的台灣地區因為冷氣空調的普遍可能導致室內氡濃度升高。表 6.4 為 2004 年 WHO 尚未公佈 Handbook on Indoor Radon

之前統計的溫帶國家室內氡活度水平與行動基準，相較之下，位處亞熱帶的台灣測量結果偏低。

表 6.4 為 2004 年統計的溫帶國家室內氡活度水平與行動基準

Table 1. Domestic radon concentrations and Action Levels in different countries

Country	Average radon concentration in homes (Bq/m <sup>3</sup> )	Action Level (Bq/m <sup>3</sup> )
Czech Republic	140	200
Finland	123	400
Germany	50	250
Ireland	60	200
Israel	*	200
Lithuania	37	100
Luxembourg	*	250
Norway	51-60	200
Poland	*	400
Russia	19-250	*
Sweden	108	400
Switzerland	75	400
United Kingdom	20	200
European Community	*	400
USA	46	150
Canada	*	800

\* not available at the moment

## 7. 結論與建議

綜合四年來對台灣地區室內氡活度的重新調查研究成果結論與建議彙整如下：

1. 目前各國新訂標準對既存建築室內氡活度多訂在 200 貝克/立方米上下，對新建住宅多訂在 100 貝克/立方米上下，以呼應 WHO, ICRP 和 IAEA 等權威國際組織的建議。
2. 輻射工作場所室內氡參考活度值 1000 貝克/立方米，相當於 20 mSv/y 的工作人員有效劑量，這已經是各國公認的工作場所氡的參考基準。至於一般工作場所及學校等公共場所，建議的室內氡參考活度值為 300 貝克/立方米
3. 本研究 4 年來合計測量台灣地區住宅室內氡活度有效戶數是 289 戶，加權平均值為 19.3 貝克/立方米，均小於 100 貝克/立方米。
4. 評估氡氣對台灣地區國民輻射劑量約為 0.64 毫西弗/年。比 25 年前的評估值 0.36 毫西弗/年高 78%，約為 UNSCEAR 公布世界平均值 1.2 毫西弗/年的 53%。比 25 年前測量活度升高原因研判係生活水準提高，空調與氣密窗普遍使用，通風率下降所致，溫室效應導致空調開啟時間拉長也是原因之一。
5. 由於台灣地區天然背景輻射相當均勻，且各地區建築結構與材料

類似，以鋼筋混凝土為主流，可以預估室內氬活度不會有顯著地域性差別，105 年刻意將度量對象偏重在新竹以北住宅，結果並沒有顯著的地域性差別。今年刻意將度量對象加強宜蘭與花東地區住宅，其結果顯示也沒有地域性差別，台灣本島也未發現氬易發地區(Rn prone area)。建議不需要做全國性普查。

6. 國外木造建築室內氬氣主要來自其下土壤，台灣現代住家室內氬氣主要來自建材，針對台灣式住宅預防氬曝露之方法，建議增加通風率和阻絕建材表面氬氣逸出率，其效果最佳。其次選擇鈾系列天然放射性較低的建材，也可降低室內氬的曝露。
7. 室內氬活度主要受通風率和建材影響，也受氣象因素影響，其活度基本上是不斷變動的。目前使用 Safety Siren Pro Series 3 氬氣偵檢器主要用於篩選性度量，原廠建議每次測量一週以上再取平均值，但因時間的壓力，本研究對每戶僅測量 2-3 天，代表性略嫌不足。室內的氬氣濃度會因為建築材料與通風而有所不同，甚至於每一個小時所測量出來的活度都不一樣。因此 WHO 建議年平均氬氣濃度至少需要測量 3 個月甚至是更長的時間。短期的氬氣濃度測量，只能提供一個粗略的年平均濃度。展望未來，可以選擇典型住宅做更長時間測量，每月取平均值，數據比較有代表性，且可以觀測整年隨季節的變化情形。

8. 金馬地區的花崗岩坑道眾多，有潛在的氡活度偏高問題，應予普查確認。至於金馬地區的住家與觀光景點可以進行抽樣測量，以研判有沒有氡活度偏高的問題。
9. 地下水中氡活度偏高，每升約 1000 貝克，抽取地下水的自來水廠之工作場所氡活度有必要加以了解。根據瑞士的經驗，有些抽取地下水的自來水廠之工作場所的氡活度偏高，台灣的狀況有必要加以了解。
10. 針對職業曝露，對於使用含較高鈾、鈾、鐳天然礦物(NORM)加工的工作場所應作室內氡活度調查。

## 8 參考文獻

George, A. C., (2015), THE HISTORY DEVELOPMENT AND THE PRESENT STATUS OF THE RADON MEASUREMENT PROGRAMME IN THE UNITED STATES OF AMERICA.

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](http://www.hpa.org.uk)

BRE (Building Research Establishment) (2007), Radon: guidance on protective measures for new buildings. Report BR211. London, CRC Ltd.

COMARE (Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment) (2007), COMARE recommendation regarding radon in homes, Letter to the Department of Health and the Department for Communities and Local Government, Reproduced in HPA Advice on Radon Protective Measures in New Buildings, Paper presented to HPA Board Meeting, May 2008. Radon in new buildings (B), Available at [www.hpa.org.uk](http://www.hpa.org.uk).

EC (1990), Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to

radon, 90/143/Euratom, Off J Eur Commun, L080, 27/03/1990.

Available at <http://eur-lex.europa.eu>.

GB Parliament (1999), The Ionising Radiations Regulations 1999, Statutory Instrument 1999 No. 3232. Available at [www.opsi.gov.uk](http://www.opsi.gov.uk).

HPA (2008a), HPA Advice on Radon Protective Measures in New Buildings, Paper presented to HPA Board Meeting, May 2008. Radon in new buildings (B), Available at [www.hpa.org.uk](http://www.hpa.org.uk).

HPA (2008b), Application of the 2007 Recommendations of the ICRP to the UK, Advice from the HPA, Doc HPA, RCE-12, 1 - 68. Available at [www.hpa.org.uk](http://www.hpa.org.uk).

HPA (2009), HPA Advice on the Limitation of Human Exposure to Radon, Consultation Document, Available at [www.hpa.org.uk](http://www.hpa.org.uk).

HPA (2010), Limitation of Human Exposure to Radon, Advice from the HPA, Doc HPA, RCE-15, Available at [www.hpa.org.uk](http://www.hpa.org.uk).

ICRP (1993), Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann ICRP, 23(2).

ICRP (2007), Recommendations of the International

Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103.

Ann ICRP, 37(2 - 4).

ICRP (2009), International Commission on Radiological

Protection Statement on Radon, ICRP Ref. 00/902/09,

Available at [www.icrp.org](http://www.icrp.org)

Marsh, James W.; Harrison, John D.; Laurier, Dominique;

Blanchardon, Eric; Paquet, François; Tirmarche,

Margot, 2010, Dose Conversion Factors for Radon: Recent

Developments, Health Physics: Volume 99 - Issue 4 - pp

511-516

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2009), Effects of Ionizing Radiation,

Volume II, Annex E: Sources-to-effects assessment of radon

in homes and workplaces. UNSCEAR 2006 Report, New York,

United Nations. Available at [www.unscear.org](http://www.unscear.org).

WHO (2009), WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health

Perspective. Geneva, World Health Organization. Available

at [www.who.int/en/](http://www.who.int/en/).

Ching-Jiang Chen, Pao-Shan Weng and Tiech-Chi Chu, 1992,



Radon Concentration in Two Largest Cities in Semitropical Taiwan. J. Radiat. Res, Vol. 33, pp. 133-140, Japan. 著作編號: 091493-09283014-X04

Ching- Jiang Chen, Chi-Chang Liu, and Yu-Ming Lin, 1996, "Diurnal Variation of Radon Progeny in Indoor and Outdoor Air of a Subtropical City", Environment International, Vol. 35, Supp. 1, pp. S723-S728 .

Ching-Jiang Chen, Chi-Chang Liu and Yu-Ming Lin, 1998, "Measurement of Equilibrium Factor and Unattached Fraction of Radon Progeny in Kaohsiung, Taiwan, Appl. Radiat. Isot. pp. 1-6.

Bernard Collignan, Eline Le Ponner, Corinne Mandin , 2016, Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics, Journal of Environmental Radioactivity, 165(2016) 124-130.

Dobromir Pressyanov , Dimitar Dimitrov , Ivelina Dimitrova , 2015, Energy-efficient reconstructions and indoor radon: the impact assessed by CDs/DVDs, Journal of Environmental Radioactivity , 143(2015)76-79.

Jiranek M. and V. Kacmarkova, 2014, DEALING WITH THE INCREASED RADON CONCENTRATION IN THERMALLY RETROFITTED BUILDINGS, Radiation Protection Dosimetry (2014), pp. 1 - 5.

Ching-Jiang Chen, Chi-Chang Liu and Yu-Ming Lin, Measurement of Equilibrium Factor and Unattached Fraction of Radon Progeny in Kaohsiung, Taiwan, Appl. Radiat. Isot. pp. 1-6, 1998.

Ching-Jiang Chen, Pao-Shan Weng and Tiech-Chi Chu, Radon Concentration in Two Largest Cities in Semitropical Taiwan. J. Radiat. Res, Vol. 33, pp. 133-140, 1992, Japan.

Ching-Jiang Chen, Chi-Chang Liu and Yu-Ming Lin, Measurement of Equilibrium Factor and Unattached Fraction of Radon Progeny in Kaohsiung, Taiwan, Appl. Radiat. Isot. pp. 1-6, 1998.

Ching- Jiang Chen, Chi-Chang Liu, and Yu-Ming Lin, Diurnal Variation of Radon Progeny in Indoor and Outdoor Air of a Subtropical City", Environment International, Vol. 22, Supp. 1, pp. S723-S728, 1996 ◦

WHO INFORMATION SHEET, RADON AND HEALTH, March 2004

陳清江，劉祺章，林友明，1994，台灣地區室內外氬活度之調查研究，核子科學，31 卷 (2)期，117-128，台北.

林友明，黃景鐘，林培火，陳清江，1986，02，台灣地區地表加馬輻射劑量率之調查，核子科學，23 卷 1 期，80-85.

林友明，林培火，黃景鐘，陳清江，朱鐵吉，1986，04，台灣地區岩石中天然放射核種濃度之調查，核子科學，23 卷 2 期，138-142.

陳清江，劉祺章，林友明，1995，煤礦坑氬活度的度量，核子科學，32 卷 4 期，台北市。

陳清江，林友明，參加亞澳地區氬比較實驗記要，台電核能月刊，81:73-77, 1989.

陳清江，林培火，黃禎財，室內氬濃度之度量，台電核能月刊，77:44-50, 1989.

期中報告審查意見表：

委員	審查意見	答覆說明
#1	建議本期中報告結果，加強說明已完成 45 戶住宅室內氬活度的量測結果，例如氬活度分布直方圖，偵檢器高估現象之修正，及最新肺部劑量評估模式重新評估上述 45 戶住家氬氣對民眾之輻射劑量。	1. 謝謝指正，上半年重點放在測量戶數的增加，量測結果的分析，例如氬活度分布直方圖，偵檢器高估現象之修正，及肺部劑量重新評估將於期末報告詳加分析。
#2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 英文摘要與中文摘要有差異，建議納入現在執行狀況。</li> <li>2. 「熱改照建築」是否加以說明？</li> <li>3. 「節能措施」不同區域不同方法住宅氬氣濃度影響如何？與通風性的相關性如何？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> <li>2. 熱改造(thermal retrofit):歐洲在石油危機後，為了住宅節能進行熱改造，指更換窗戶，增加隔熱層或改裝通風系統等措施。</li> <li>3. 節能措施通常會降低通風率。法國研究結果熱改造房屋的氬氣濃度高於沒有改裝的房屋，室內氬濃度平均增加了 21%。</li> </ol>
#3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Table 1(p. 18)的標的建物氬氣來源是否可解釋？</li> <li>2. 建築物氬氣來源可否判斷列出若非來自建築材料(而是來自土壤)，則高樓層(假設 20 樓以上)室內氬活度是否會普遍比低樓層顯著降低？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增加說明:表一為捷克在研究的房間裡採取節能措施前後，氬氣濃度的變化，因節能措施氬氣濃度升高 3.4 倍。</li> <li>2. 台灣建築物的氬主要來自建材,由於混</li> </ol>

		凝土的阻絕，室內氣與其下土壤幾乎無關。高、低樓層室內氣主要受建材和通風率影響。研判 20 樓以上室內氣活度並不會普遍比低樓層顯著降低。
--	--	---

期末報告審查意見表：

委員	審查意見	答覆說明
#1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 圖表請註明單位。</li> <li>2. 調查結果可否分類不同建材建物？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> <li>2. 調查住戶幾乎都是鋼筋混凝土建築地板為磁磚，不易分類。</li> </ol>
#2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 第 3 頁倒數第 2 行：室內氣活度客廳與臥房平均值為 18.3 與…… <u>多一個為，請刪除。</u></li> <li>2. 第 7 頁第 3 行：判定國內<u>所</u>的改善目標<u>請問</u>是否有誤。</li> <li>3. 第 14 頁第 2 段第 2~3 行：完成住宅室內氣抽樣規劃與測量儀器之校正，住宅室內氣抽樣規劃與現場測量與數據整理結果…… <u>請問是否有多餘的字句。</u></li> <li>4. 第 14 頁倒數第 4 行：其中初<u>側</u>有 8 戶…… <u>請更正為測。</u></li> <li>5. 第 22 頁 6.3 之第 3 行：住宅特性之間的關係文獻中說明…… <u>請更正為住宅特性之間的關係”文獻中說明……。</u></li> <li>6. 第 24 頁倒數第 7 行：<u>導致</u>氬氣濃度增加 3.4 倍 <u>請更正為導致。</u></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> <li>2. 謝謝指正，已依委員意見修訂為…建議的…。</li> <li>3. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> <li>4. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> <li>5. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> <li>6. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</li> </ol>

	<p>7. 第 26 頁 7. ……，也受氣項因素影響…… 請更正為氣象因素影響。</p> <p>8. 第 27 頁 10. 針對職業暴露，對於使用含較高…… <u>10. 後面的空格請刪除</u> <u>請更正為職業曝露。</u></p>	<p>7. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</p> <p>8. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</p>
#3	<p>1. 第 12 頁，圖 5.2 之左右縱軸座標軸應標明單位，方便明白圖內數據其代表意義。</p> <p>2. 第 13 頁，兩種儀器之修正係數測試方法，建議敘述應更詳細；此外，40 及 150Bq/m<sup>3</sup> 兩組，建議修正係數應分別計算。</p> <p>3. 第 15 頁，第 3 行所述 t-test 的統計分析方法通常用於常態分佈，但倒數第 3 行所述統計分佈卻是接近 Poisson 分佈，請解釋為何選用 t-test 分析。</p> <p>4. 第 21 頁，表 6.3 敘述之”平衡因子”，建議敘述應更詳細；此外，對於儀器本身的誤差範圍，建議應增加整體誤差分析，例如考慮包含第 13 頁所述修正係數的誤差範圍、與第 21 頁平衡因子的誤差範圍等。</p> <p>5. 第 26 頁，第 7 項：未來執行相關計畫，應如何克服困難，順利執行長時間測量及提升準確度，請提出建議。</p> <p>6. 錯別字勘誤： (1) 第 7 頁，倒數第 1 及 2 行：”暴”露，應為曝露。 (2) 第 8 頁，倒數第 3 行：UNSCEAR2009，應為</p>	<p>1. 謝謝指正，已依委員意見補上單位。</p> <p>2. 謝謝指正，已說明修正方式為求得兩儀器相關方程式(Y= a+bX)後作修正。</p> <p>3. 謝謝指正，已改為無母數 t-test(Mann-Whitney U 檢定)。</p> <p>4. 謝謝指正，已增加平衡因子資料於 22 頁。由於儀器特性，量測誤差僅能以比對方式求得兩儀器相關方程式 (Y= a+bX)後作修正。</p> <p>5. 謝謝指正，已補充說明，建議未來可以選擇典型住宅做更長時間測量，每月取平均值，數據比較有代表性，且可以觀測整年隨季節的變化情形。</p> <p>6. 謝謝指正，已依委員意見修訂。</p>

	<p>2008。</p> <p>(3) 第 26 頁，第 6 項第 2 及 4 行：“暴”露，應為曝露。</p> <p>1. (4) 第 26 頁，第 7 項第 1 行：“氣”項”，應為氣象。</p>	
--	--	--

#### 附錄一、影響室內氡活度的變因探討

在文獻收集與研讀方面，本年度著重在影響室內氡活度的變因探討。在一份法國新發表的研究報告”室內氡濃度、熱改造和住宅特性之間的關係(Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics)”文獻中說明，法國的布列塔尼地區在 2011 年至 2014 年，舉辦了一個超過 3,400 戶住宅樣本的監測活動，根據 NF ISO 11665e8 (2013) 標準，在使用暖氣的幾個月，每個住宅使用一個被動式氡劑量計測量兩個月，此外，使用問卷調查建築施工期、建築材料、地基類型、熱改造(thermal retrofit)等建築物特點。最終數據由 3,233 棟房屋組成測量結果和問卷答案，應用多變量線性回歸模型，探討室內氡濃度與建築特性的關係，特別是熱改造的影響。室內氡濃度的幾何平均值為  $155 \text{ Bq m}^3$  (幾何標準偏差為 3)，經過熱改造的房屋具有較高的平均氡濃度(增加 21%)，這可能是由於通風率的降低，修復工作後的建築物沒有

適當的通風管理，導致氡濃度升高。其他建築特性，主要是建築材料和地基類型與室內氡濃度有關，室內氡濃度較高多為用花崗岩或其他石頭建造的老房子，使用在泥土上的凝土地板 (slab-on-grade)，且沒有任何的通風系統。

氡氣是天然背景輻射曝露主要貢獻者 (UNSCEAR, 2006 年)。氡氣及其衰變產物曝露被認為是肺癌的第二大主要病因 (WHO, 2009)，室外氡濃度普遍較低，與氡氣曝露相關的健康風險主要發生在室內環境中，室內觀察到的氡濃度取決於許多參數，地面土壤是氡的主要貢獻者，這個來源的強度取決於地面的性質 (花崗岩、粘土等)，土壤透氣性和地面裂縫或主要斷層的存在，增強了氡氣進入建築物的機會，也觀察到土壤水分及季節變化對室內氡濃度的影響。此外，建築物的環境設置 (即農村或城市) 可能會影響室內的氡氣傳輸。一些建築特徵，如地基類型和空氣交換率也會影響室內氡濃度，全球正努力減少溫室氣體排放，因此，已經實施了各種政策以減少所有經濟部門的能源消耗，特別是在作為重要貢獻的建築部門，在這種情況下，房屋的熱改造是住宅部門的關鍵目標。然而，熱改造可以增強建築物外殼的氣密性，如果通風不正確的管理，則會降低空氣交換率，建築物氣密性的改善主要是指位於地板以上的部分住宅外殼，通常不包括與地面接



觸的地板，因此，室內和室外的壓差可能會增強，並增強通過地板進入住宅的氬氣通量，考慮到這一現象，隨著空氣交換率的降低，可以預期熱改造住宅使室內的氬濃度更高。英國的一項研究證明，住宅的熱恢復(thermal rehabilitation)增加了室內氬濃度的平均值，這被認為是由於提高氣密性而導致的通風系統空氣交換率降低。Jiranek 和 Karikova(2014 年),Pampuri 和 Goyette Pernot (2014 年),Fojtikova 和 Navr atilova Rovenska (2015 年) 和 Pressyanov 等人 (2015 年) 還顯示，建築物內發生的熱恢復隨著室內氬濃度的增加而可能導致通氣率的顯著降低，1990 年和 2011 年在捷克共和國的學校進行了兩次氬測量運動 (Fojtikova 和 Navratilov a Rovenska, 2014 年)，室內氬氣濃度在時間間隔內經歷了熱恢復的 264 座建築平均增加了 63%，而沒有熱恢復的 247 座建築物的平均增幅僅為 10%。由於很少有大型的監測研究，本研究的目的是根據在 3,233 戶住宅中進行的測量來評估熱改造等建築特性對室內氬濃度的影響，測得氬活度如附圖 1。

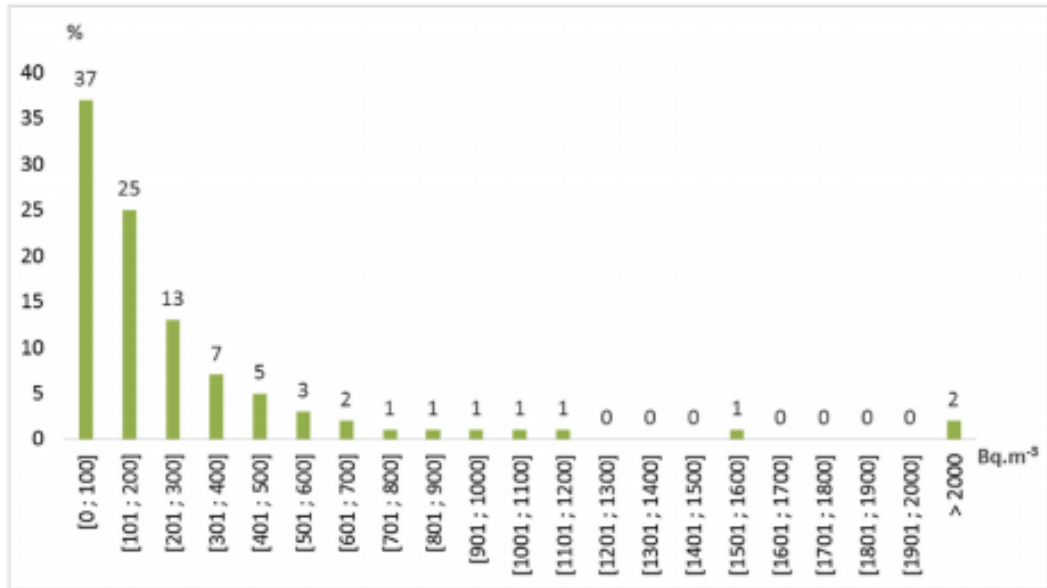


Fig. 1. Distribution of indoor radon concentrations (Bq m<sup>-3</sup>) in the 3233 houses.

附圖 1. 法國 3,233 戶住宅熱改造後室內氡濃度分布

本調查是自願參與的，最終樣本在人口和住宅方面並不代表全國領土，然而數據很龐大，其中包括 3,233 棟房屋，相當於本評估區域住宅的 15%，所有的住宅都具有相對均勻的氡土壤潛力和相同的海洋氣候(radon soil potential and the same oceanic climate)，這是影響室內氡濃度的兩個重要因素，從而可以確定建築特性差異的影響，結果顯示建築特性的相互關係顯著。例如，建設期對室內氡濃度的具體貢獻不能進行研究，因為它與地基類型（混凝土地板 slab-on-grade）、主要建築材料（花崗岩）和熱改造等因素密切相關。多變量分析(MCA)和階層式分群法(HAC)分析證實，1948 年之前建成的房屋主要是用混凝土地板 (slab-on-grade)地基建造，由花崗岩組成，沒有任何通風系統，

並進行了熱改造，所有這些變量都影響室內氬濃度，事實上 1948 年之前建成的房屋中有 68% 具有混泥土地板，9% 的房屋地板下具有爬行空間(crawl spaces)，相較之下，1982 年以後建成的房屋中只有 46% 具有混泥土地板，卻有 36% 的房屋擁有爬行空間。因此，關於氬氣進入室內最差的地基（平板式地基類型）在過去被大量使用，並且較少經常用於最近建造的住宅中，擁有爬行空間的地基，有利於更有效地阻止氬氣進入室內空間。此外，由於混泥土處於更好的狀態，最近蓋的的平板式地基氣密性比舊的平板式地基更有效的阻擋氬氣進入房間。

在 1948 年之前建造的房屋中，有 83% 進行了熱改造，1982 年以後建造的房屋僅 13% 進行了熱改造。不考慮施工期和注意均勻高氬濃度土壤的潛力，多元線性回歸模型示，影響最大的變因是花崗岩作為主要建築材料，其次是平板式地基類型的地基，該模型顯示，獨立於所有其他變量，單獨的熱改造對室內氬濃度具有顯著影響（增加 21%），為了管理變量依存關係，建議根據施工期和建築特性分層進行住宅設計，以便將來進行研究，回歸結果只解釋了室內氬濃度變化的 22%，室內氬濃度的最大變化可能是由於本研究中沒有考慮的變量，即氬土壤濃度以及土壤透氣性，已知土壤是建築物中氬氣存在的首要貢獻者（Demoury 等，2013；

Borgoni 等，2014)，即使所有的房屋位於相同的地區，假設在土壤中具有相對均勻的氬氣潛力，局部異質性總會存在，這可能會產生很大的影響 (Drolet and Martel, 2016)，儘管有這些限制，但對大型房屋樣本的統計分析產生了以前研究的結果，之前相關的研究也證實了在熱改造工作前後進行的氬氣測量的熱改造效果。室內氬濃度的增加可能是由於熱改造後，建築物通風率的降低，這並不包括任何或相關的通風管理。

關於通風類型，對比於沒有通風系統，具有自然通風系統的房屋氬濃度顯著低於平均濃度的 14%，熱改造房屋的氬氣濃度高於沒有熱改造的房屋，更確切地說，與沒有進行過熱改造的房屋相比，室內氬濃度平均增加了 21%。

此外，室內壓力場的修飾促進氬進入住宅，關於其他建築特性，結果與以前法國研究的結果一致 (Demoury 等，2013)，基於 1990 年代在法國進行超過 10,000 次室內氬測量，Demoury 等人還觀察了建築材料、施工年份和地基類型的影響，混凝土地板是眾所周知的，對氬氣進入有很大的影響 (Diallo et al.，2013)，關於建築材料，花崗岩可能是室內氬濃度的不可忽略的貢獻者，特別是在土壤不是主要氬來源的地區。

本研究調查了位於氬容易發生地區的 3,233 個房屋的室內氬

濃度，相對於施工特性，特別是熱改造，觀察到熱改造的影響：進行熱改造的房屋，室內氡氣濃度平均高於沒有改造的房屋。然而，建築材料是影響最大的因素，其次是地基類型，用花崗岩或其他石頭建造，具有混凝土地板，且沒有任何通風系統的舊房子的室內氡濃度較高。總結來說，這些結果顯示，在節省能源的同時，應考慮室內環境品質，以避免室內空氣品質惡化，導致影響居住者的健康。在未來幾年，節能改造仍將是建築行業的主流動力，這一考慮因素顯得更為重要。

另一篇捷克的研究論文：DEALING WITH THE INCREASED RADON CONCENTRATION IN THERMALLY RETROFITTED BUILDINGS 則顯示，使用建築圍阻方式來減少熱量損失的任何措施，都會增加建築物外殼的氣密性，這樣的措施包括在外牆上安裝外部保溫複合系統（ETICS），增加屋頂結構中的隔熱厚度，在閣樓空間或閣樓上的天花板內添加隔熱材料，並更換現有的窗戶和入口，由於氣密性增加，房屋通風不那麼強烈，這可能對室內環境的品質產生負面影響。本文透過家庭住宅氡氣濃度測量，證實了在安裝節能措施前後對室內環境換氣率顯著降低的不良影響。節能措施在很多情況下導致換氣率大幅下降，通風率可能下降 3 至 4 倍，因此氡氣濃度以相同的比例增加。原來的低室內氡氣濃度可以顯著地增加

至高於 WHO、ICRP、IAEA 和國家監管機構建議的參考濃度值，這嚴重惡化了室內空氣的品質，直接影響了居民的健康，將現有建築轉為節能建築時，節能與室內空氣品質之間的平衡是必須考慮的一個因素。該論文總結的調查研究顯示，如果氬氣來自建築材料，選擇低氬溢出率的建材幾乎可以將建築的節能需求換氣率降低到相當低的程度，而不會增加室內氬氣濃度，目前已引入並討論合適的解決方案。節能措施導致氬氣濃度增加如表 6.2 所示。

附表 1. 在研究的房間裡採取節能措施前後氬氣濃度的變化

房間	節能措施前量測 貝克/立方米	節能措施後量測 貝克/立方米
一樓客廳+廚房	302	753
二樓兒童房	296	1165
二樓主臥室	312	1524
二樓廚房	438	1025
平均值	337	1117
比值 $C_{後}/C_{前}$	3.4	

另一篇保加利亞的研究論文：Energy-efficient reconstructions and indoor radon: the impact assessed by CDs/DVDs 也證實，利用家中的 CD 或 DVD 片上所沾黏的氡子核活度測量評估因節能措施導致住宅的氡活度上升 35%。

上述溫帶國家的節能措施導致通風率下降室內氡濃度升高現象，可以解釋以熱帶的台灣地區因為冷氣空調的普遍可能導致室內氡濃度升高。