

RMC-110-306Rev2

燃煤電廠周圍環境土壤輻射強度調
查與居民劑量評估
(112年8月修正版)



核能安全委員會輻射偵測中心

112年8月

燃煤電廠周圍環境土壤輻射強度調查與居民劑量評估

摘要

國民輻射劑量由多面向所組成，本中心參考美國作法，將其分成背景輻射、醫療輻射、消費性產品、產業活動以及職業曝露等五大類進行評估。其中，石化燃料燃燒隸屬於消費性產品及其活動分類之子項，為補充國民輻射劑量消費性產品及其活動之調查研究，本中心針對國內燃煤電廠周邊土壤進行量測，並參考燃煤電廠周圍人口分布之情形，評估當地居民因燃煤電廠產生之煤灰所造成的輻射劑量。

本研究針對 3 座台灣大型燃煤電廠，分別為雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠，篩選周圍民眾常使用之公共空間的土壤輻射強度進行調查，共 10 個量測點。上述地點均位在電廠廠區為中心，距離約 5 公里範圍內，土壤之現場度量及採樣分析結果，鉀-40 所量測活度濃度範圍在每公斤 496 到 635 貝克，鈾系所量測活度濃度範圍在每公斤 18 到 39 貝克，鈾系所量測活度濃度範圍在每公斤 31 到 59 貝克；另外，參考國外相關文獻之結果，發現可透過天然放射性核種鈾系、鈾系與鉀-40 三者之活度濃度比例粗略確認土壤中是否含有飛灰沉降於土壤中，所量測之土壤輻射量測結果即為一般地表加馬輻射，顯示這些公共空間無飛灰沉降之影響。因上述三座燃煤電廠周圍土壤量測平均加馬劑量率為 0.054 微西弗/小時，與全台地表之平均加馬劑量率 0.051 微西弗/小時相近，可研判屬正常環境背景輻射變動範圍，故居住於燃煤電廠周圍的居民並不會因此獲得較高的輻射劑量。

Investigation of Environmental Soil Radiation Intensity around Coal-Fired Power Plants and Dose Assessment for Residents

Abstract

The population radiation dose is composed of multiple aspects, and RMC follows the U.S. approach by categorizing it into five main categories: background radiation, medical radiation, consumer products, industrial activities, and occupational exposure. Among these, the combustion of fossil fuels is classified as a subcategory of consumer products and activities. To supplement the investigation into the radiation dose from consumer products and related activities, RMC conducted measurements of soil surrounding coal-fired power plants in Taiwan. These measurements were combined with the population distribution near these plants to assess the radiation dose to local residents caused by coal ash from the power plants.

This study focused on three large coal-fired power plants in Taiwan: the Mailiao Power Plant in Yunlin, the Hsinta Power Plant in Kaohsiung, and the Taichung Power Plant. We conducted a radiation survey on soil in public spaces frequently used by nearby residents, with a total of 10 measurement points. These points were all located within approximately 5 kilometers of the power plants. The on-site measurements and analysis of soil samples revealed that the activity concentration of potassium-40 ranged from 496 to 635 Bq/kg, uranium-series from 18 to 39 Bq/kg, and

thorium-series from 31 to 59 Bq/kg. Additionally, referencing international studies, it was found that the activity concentration ratios of natural radionuclides, such as thorium-series, uranium-series, and potassium-40, can be used to roughly determine whether soil contains fly ash deposits. The measured soil radiation results reflect normal surface gamma radiation, indicating no impact from fly ash deposition in these public spaces. The average gamma dose rate of the soil around the three coal-fired power plants was 0.054 $\mu\text{Sv/h}$, which is close to the national average surface gamma dose rate of 0.051 $\mu\text{Sv/h}$. Thus, it can be concluded that residents living around these power plants are not exposed to higher radiation doses due to their proximity.

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)。

3. **$E_{\text{population}}$: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(μSv)。

4. **E_{Taiwan} :台灣全體國民之年平均有效劑量(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(μSv)表示；亦即台灣之國民輻射劑量。

目錄

一、 前言	1
二、 文獻回顧	4
(一) 曝露途徑	4
(二) 美國	4
三、 劑量評估方法	6
(一) 場址選擇	6
(二) 燃煤電廠周圍土壤環境輻射強度調查先期評估	9
(三) 現場量測設備與方法	16
四、 燃煤電廠周圍土壤量測結果分析	22
五、 燃煤電廠周圍土壤量測結果與地表輻射比較	28
六、 結論	30
七、 參考資料	31
附表	34
附錄、審查意見對照表	35

圖目錄

圖 1 全台火力發電廠分佈圖	1
圖 2 雲林麥寮燃煤電廠周圍現場度量相對位置圖	8
圖 3 高雄市興達電廠周圍現場度量相對位置圖	8
圖 4 台中市火力電廠周圍現場度量相對位置圖	9
圖 5 燃煤電廠周圍之土壤採樣與核種分析研究流程圖	10
圖 6 長庚雲林分院網格採樣規劃圖	11
圖 7 橋頭國小許厝分校現場採樣圖	11
圖 8 ORTEC 手持式純鍮偵檢器	16
圖 9 雲林麥寮電廠周邊現場度量情形	18
圖 10 高雄市興達發電廠周邊現場度量情形	19
圖 11 台中市火力發電廠周邊現場度量情形	21
圖 12 雲林麥寮、高雄市興達與台中市火力發電廠現場度量結果...	26
圖 13 台電公司歷年煤灰產量、利用量及利用率	27
圖 14 燃煤電廠周圍人口與全台人口總數占比	29

表目錄

表 1 台灣燃煤電廠概況	3
表 2 石化燃料燃燒造成周圍民眾輻射曝露結果	5
表 3 雲林麥寮、高雄興達與台中火力發電廠現場度量量測點	7
表 4 土壤試樣紀錄表	12
表 5 燃煤電廠周圍土壤採樣與核種分析結果	15
表 6 現場度量之活度濃度與加馬劑量率分析結果	23
表 7 天然放射性核種鈾系、鈾系與鉀-40 於不同樣品之活度比較...	24
表 8 各國煤炭中含放射性核種活度濃度差異比較	25
表 9 燃煤電廠座落行政區人口統計表	29

一、前言

我國電力主要由火力發電、水力發電、核能發電、風力與太陽光電發電等組成。隨著台灣經濟成長，民生工業用電需求增加，大型火力電廠陸續建設，作為基載電力來源之火力機組發電量維持一定的比例，依台電統計結果【1】顯示至民國 109 年台電系統火力發電量占比為 80.22 %，包含公營電廠(台電) 11 座，民營電廠 9 座，全台共 20 座火力發電廠，其電廠分佈如圖 1。

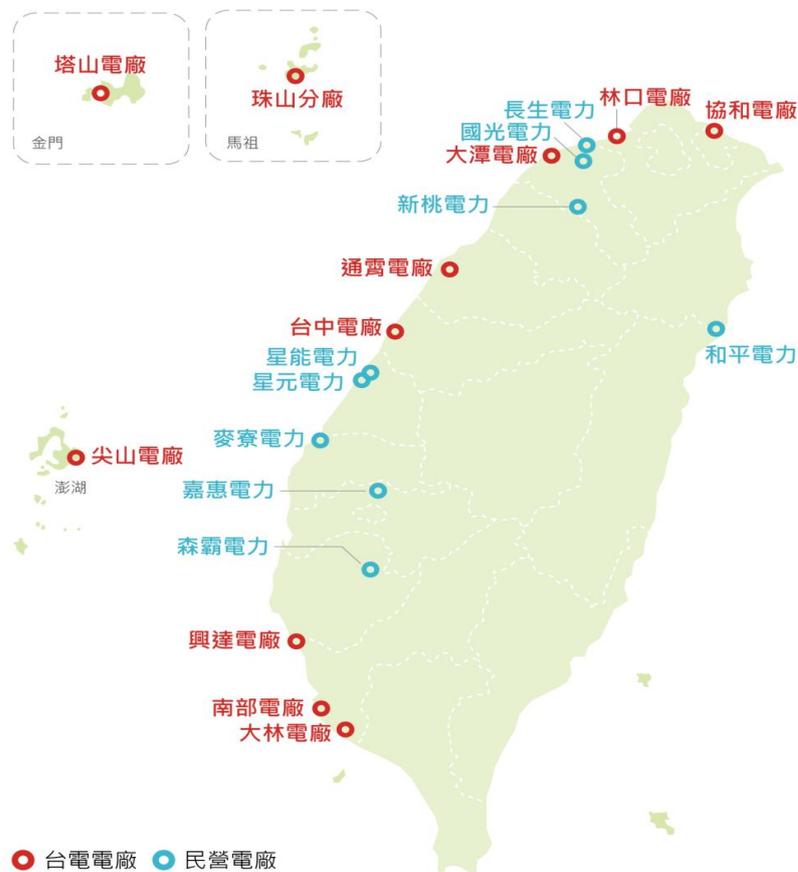


圖 1 全台火力發電廠分佈圖

(資料來源：

<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=202&cid=130&cchk=f8fb50ec-6465-4637-a2d6-97c05646ada6>)

火力發電廠採用之燃料為煤炭、重油及天然氣等，其中以燃煤發電的電廠包含林口電廠、台中電廠、興達電廠、大林電廠、麥寮電廠與和平電廠，全台共 6 座，電廠概況如表 1。依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)在 1993 年出版的 UNSCEAR 1993 報告【2】，指出燃煤電廠例行作業會產生飛灰與爐底灰等煤渣，因煤炭本身即含鈾與鈾系等天然放射性物質，煤炭燃燒過程會釋放出這些天然放射性物質，經大氣擴散及乾濕沉降後濃縮儲存在土壤等環境介質當中。另有國外研究內容指出【3】，燃煤於燃燒的過程將煤中的有機物去除，進而產生濃縮的情況，致煤灰中的放射性物質強度甚至可濃縮 10 倍以上氣粒狀污染物，經過大氣擴散及乾濕沉降後，部分燃煤電廠周圍土壤測得含有較高濃度之天然放射性物質，較其他地點天然背景輻射為高。

國民輻射劑量需考量民眾生活中可能輻射來源及我國特性，本中心參考美國輻射防護與度量委員會(National Council on Radiation Protection, NCRP)2009 年出版之美國 NCRP 第 160 報告【4】作法，將其分成背景輻射、醫療輻射、消費性產品、產業活動以及職業曝露等五大類；其中，石化燃料燃燒係與電力供應有關，於 NCRP 160 報告中分類上隸屬於消費性產品及其活動分類之子項。本中心於民國 87 年進行第一次國民輻射劑量評估【5】，與當時的狀況相比，現今已無電視映像管產品之流通與使用，為補充國民輻射劑量消費性產品及其活動之調查研究，本中心特將燃煤電廠納入本次國民輻射劑量評估之消費性產品之項目評估。本研究係針對國內燃煤電廠周邊土壤進行量測，採用美國能源部 HASL-300 現場度量技術，進行燃煤電廠周圍之土壤輻射強度調查，並參考燃煤電廠周圍人口分布之情形，評估當地居民因燃煤電廠產生之煤灰所造成的輻射劑量。

表 1 台灣燃煤電廠概況

燃煤電廠	機組	商轉日期	裝置容量(MW)
林口電廠	林一機	105.10.06	800
	林二機	106.03.24	800
	林三機	108.10.24	800
台中電廠	中一機	80.05.27	550
	中二機	80.08.25	550
	中三機	81.06.26	550
	中四機	81.10.04	550
	中五機	85.03.29	550
	中六機	85.05.04	550
	中七機	85.10.17	550
	中八機	86.06.27	550
	中九機	94.08.01	550
	中十機	95.06.30	550
興達電廠	興一機	71.09.28	550
	興二機	72.07.31	550
	興三機	74.06.19	550
	興四機	75.04.07	550
大林電廠	大一機	107.02.13	800
	大二機	108.10.24	800
麥寮電廠	一號機	88.06.01	600
	二號機	88.09.09	600
	三號機	88.09.23	600
和平電廠	一號機	91.06.01	660
	二號機	91.09.06	660

二、 文獻回顧

(一) 曝露途徑

煤炭經燃燒後所產生的煤灰含有較高濃度之天然放射性物質，因而造成設施內部的工作人員或居住於周圍的居民可能接受較高的輻射曝露，依文獻中【6】所提及的曝露途徑包含了：

1. 煤炭燃燒後的產物(如：飛灰、底灰)暫時存放的區域可能成為一外部射源，造成設施內之工作人員受到體外曝露。
2. 煤炭經燃燒後所形成的飛灰釋出並飄散到廠外，經大氣擴散及乾濕沉降移至土壤或是被植物所吸收，而導致民眾之體外曝露、吸入或嚥入。
3. 煤炭燃燒後的產物之廢水被輸送到飲用水供應系統，這可能會通過嚥入水和吸入氬氣使民眾受到曝露。
4. 煤炭燃燒後的產物再利用並增添於建築材料中，進而造成之民眾之體外曝露或氬氣之吸入。

而本研究方式將針對居住於燃煤電廠周圍的土地進行輻射強度調查，並評估其可能造成電廠附近居民(特殊群體)所受體外曝露輻射劑量來做探究。

(二) 美國

依據 2009 年出版的 NCRP 第 160 報告，其中第五章是有關石化燃料燃燒造成周圍環境輻射之劑量評估，石化燃料是一種碳氫化合物或其衍生物，包括煤炭、石油和天然氣等天然資源，在該報告中主要針對煤炭與天然氣兩個項目進行評估。煤炭含有多種自然產生的放射性核種包括鈾系和釷系，Ramme 等人 2004 年之研究【7】係針對美國 We Energies 工廠在 1993 年和 2003 年產生的煤灰進行分析後，發

現鐳-226 的活度濃度範圍為 37 至 111 貝克/公斤，與土壤中的粉塵濃度（7.4 至 111 Bq kg⁻¹）相當。劑量評估部分，NCRP 第 160 報告採用 1987 年 NCRP 第 93 號報告【8】當時的評估方法，燃煤電廠煙囪排放煤灰在 500 公尺內的人將獲得最大年劑量，並考量美國該區域關鍵群體曝露人數約 300 百萬人，所得之個人年有效劑量 (E_{EXP})為 1 微西弗，集體有效劑量(S)為 300 人-西弗，如表 2；另外，天然氣燃燒後將含有放射性元素氦氣體釋放至大氣中，可能導致居住在燃氣發電廠附近或使用天然氣在屋內做飯或取暖的民眾增加輻射曝露，有關該項目評估方法較少，故天然氣部分直接參採 NCRP 第 93 號報告數值，並以劑量轉換係數和加權因子進行評估，所得之個人年有效劑量為(E_{EXP}) 46 微西弗，集體有效劑量(S)為 620 人-西弗，如表 2。

表 2 石化燃料燃燒造成周圍民眾輻射曝露結果

石化燃料燃燒	煤炭	天然氣
關鍵群體曝露人數 (百萬人)	300	155
個人年有效劑量(E _{EXP}) (微西弗)	1	46
集體有效劑量(S) (人-西弗)	300	620

*資料來源：NCRP 160 號報告，2009。

依據 NCRP 第 160 報告之結果，天然氣使用造成之集體有效劑量 (S)及對關鍵群體之個人年有效劑量(E_{Exp})均高於煤炭使用；經了解，上述評估是針對家用天然氣 (如：暖爐)造成之曝露評估，與本研究探討大型燃煤電廠之案例並不相同，且台灣整體環境與生活習慣亦與美國有差異，故天然氣劑量評估結果僅參考之。

三、劑量評估方法

(一) 場址選擇

國外有關馬來西亞燃煤電廠文獻【9】指出，飛灰透過燃煤電廠煙囪排放後沉降，周圍環境之輻射劑量是同樣發電能力核電廠的 100 倍，但這個研究的採樣地點是電廠半徑 1.6 公里的區域。然而，經調查結果發現台灣電廠半徑 1.6 公里範圍仍屬電廠廠區，且台灣燃煤電廠周圍 2 至 3 公里範圍多屬工業區，並非一般民眾活動區域；因此，本研究規劃以電廠廠區為中心，將評估範圍擴大至 5 公里範圍，選擇民眾常使用之公共空間進行現場度量，其常見區域包含公園、國民小學與醫院等地。

全台共 6 座燃煤電廠，其中，台電運營之燃煤電廠為 4 座 19 部機組；民間運營之燃煤電廠為 2 座 5 部機組，詳如表 1，本研究將針對台電運營之燃煤電廠選擇 2 座，以機組較多之燃煤電廠優先；民營運營之燃煤電廠選擇 1 座，亦以機組較多之燃煤電廠優先，共篩選 3 座台灣大型燃煤火力電廠，分別為雲林麥寮發電廠(民營)、高雄市興達發電廠(台電)與台中市火力發電廠(台電)。選擇民眾常使用之公共空間進行現場度量，於雲林麥寮發電廠周邊之量測點為阿媽公園、橋頭國小許厝分校與長庚雲林分院，共 3 處；高雄市興達發電廠周邊量測點為五福宮附近空地、高雄市興達國民小學與興達港河堤邊，共 3 處；台中市火力發電廠周邊量測點為梧棲運動公園、台中港旅客服務中心旁草地、河濱公園槌球場與臺中市龍井國民小學，共 4 處。上述量測地點詳如表 3，其與電廠之相對位置圖如圖 2 至圖 4。

表 3 雲林麥寮、高雄興達與台中火力發電廠現場度量量測點

量測地點	與電廠間距離	地址
雲林麥寮發電廠(3 處)		
阿媽公園	2.52 km	雲林縣麥寮鄉中山高速公路
橋頭國小許厝分校	2.76 km	雲林縣麥寮鄉中興村 5 鄰仁德西路二段 589 號
長庚雲林分院	2.24 km	雲林縣麥寮鄉中興村工業路 1500 號
高雄市興達發電廠(3 處)		
五福宮附近空地	2.71 km	高雄市路竹區海安路 165 號
高雄興達國民小學	1.98 km	高雄市茄苳區崎漏里民治路 2 號
興達港河堤邊	1.25 km	高雄市茄苳區大發路 30 號
台中市火力發電廠(4 處)		
梧棲運動公園	2.42 km	臺中市梧棲區草湳里文化路一段
台中港旅客服務中心 旁草地	3.20 km	台中市梧棲區中二路一段 9 號
河濱公園槌球場	2.98 km	台中市龍井區西部濱海公路 345 號
臺中龍井國民小學	4.97 km	臺中市龍井區龍西里龍門路 51 號



圖 2 雲林麥寮燃煤電廠周圍現場度量相對位置圖



圖 3 高雄市興達電廠周圍現場度量相對位置圖



圖 4 台中市火力電廠周圍現場度量相對位置圖

(二) 燃煤電廠周圍土壤環境輻射強度調查先期評估

本評估係針對雲林麥寮電廠周圍 5 公里範圍內且常有民眾活動區域之土壤進行輻射強度調查，場址選擇包含附近公園、國民小學與醫院等地，現場除了規劃土壤採樣外，並搭配手持式純鍍偵檢器進行現場量測，以作為後續計測分析結果之參考比較，其研究設計流程如圖 5 所示。以下將針對該評估方法與結果進行簡介，相關內容擷取自本中心 RMC-110-303「燃煤電廠周圍之土壤採樣與核種分析作業技術先行評估報告」【10】。

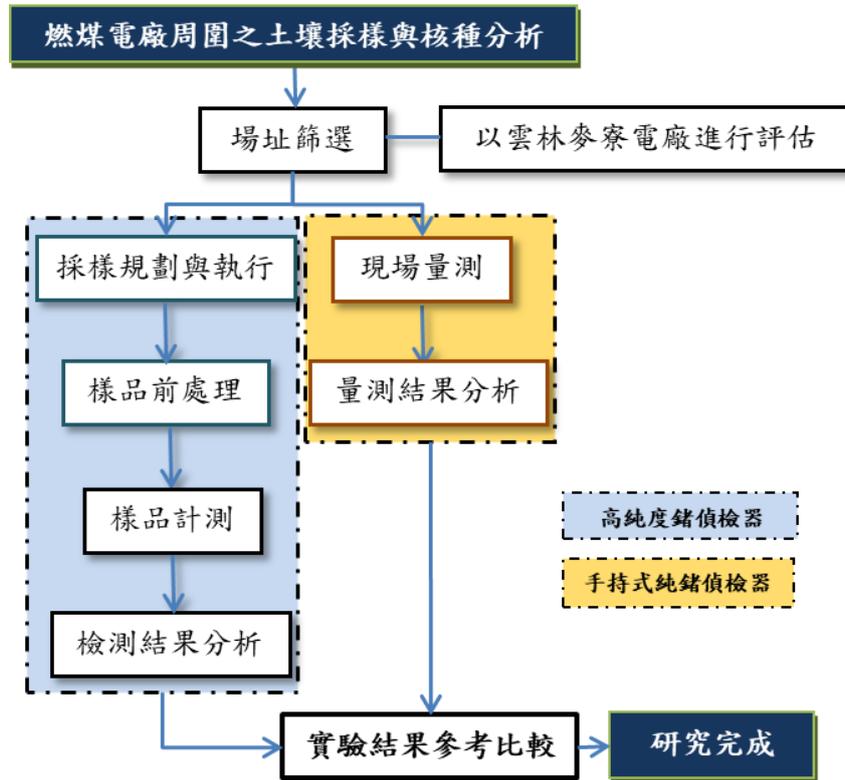


圖 5 燃煤電廠周圍之土壤採樣與核種分析研究流程圖

1. 實驗室分析

參考本中心環境試樣取樣作業程序(RMC-M-11(107))【11】進行土壤採樣作業規劃，以阿媽公園、橋頭國小許厝分校與長庚雲林分院三個區域選擇合適的空地，以單點採樣與網格採樣的方法進行規劃，三個區域規劃大小皆為 $18\text{ m} \times 18\text{ m}$ ，面積約為 324 m^2 ，再將匡列大小為 $18\text{ m} \times 18\text{ m}$ 的區域平均劃分成九宮格，每格大小為 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 。單點採樣方式為針對區域中之中心點進行採樣；而網格採樣則為針對每個網格中心進行採樣，共計採 9 個樣點。分別將 9 個樣點編碼為 A、B、C、D、E(中心點)、F、G、H 與 I，如圖 6、所示。取樣時以中心點(E)為標準，並放置小型三角椎作為採樣點標誌如圖 7，其他採樣樣點之相對位置利用伸縮量尺與 GPS 進行定位並記錄之。



圖 6 長庚雲林分院網格採樣規劃圖



圖 7 橋頭國小許厝分校現場採樣圖

現場採樣依上述標定之位置除去土表作物或雜草，依該採樣點之取樣深度表面 0~5 公分進行土壤採樣，挖取約 1 公斤土壤並秤重後裝袋。為減少採樣時所造成土壤分布不均的狀況，並了解單點採樣與均勻採樣時所造成之誤差，因而設計兩種採樣情境，一為於中心點(E)處挖取 1 公斤土壤，另一情境為將 9 個樣點之土壤皆秤 1 公斤放置於樣品容器內，並經充分攪拌後均勻混合，再於樣品容器內取 1 公斤之土壤裝袋。每個地區皆取 2 個樣品，樣品數共計為 6 個。

將長庚雲林分院、橋頭國小許厝分校與阿媽公園三個區域取回的 6 個樣品進行紀錄並做試樣編碼與名稱定義如表 4 所示，分別為土壤 1、土壤 2 (混)、土壤 3、土壤 4 (混)、土壤 5、土壤 6 (混)，(混)代表混合 9 個樣點之土壤。接著把樣品放於坩鍋內並置在溫度為 105°C，於乾燥機進行烘乾約 24 小時，以充分去除土壤內之水氣。完成乾燥後的試樣利用 10 meshes/in 篩網篩選試樣，過濾除去顆粒較大的石子，並使用勺子挖取過篩後的土壤放置於 4.5 cm 環狀計測皿中，最後秤重獲得試樣灰重並密封計測皿，即完成樣品前處理。

表 4 土壤試樣紀錄表

試樣編號	試樣名稱	計測乾重(克)	試樣地點
1	土壤 1	147.1	長庚雲林分院
2	土壤 2 (混)	154.5	
3	土壤 3	159.3	橋頭國小許厝分校
4	土壤 4 (混)	161.0	
5	土壤 5	148.1	阿媽公園
6	土壤 6 (混)	168.3	

註：(混)代表混合 9 個樣點之土壤

完成 6 個樣品之前處理後，即可送至計測室進行加馬核種分析，本實驗計測器使用相對效率 40 % 環境級之高純度鍺偵檢器(High Purity Germanium, HPGE)，為 P 型的純鍺偵檢器，其外觀直徑 62 mm、長度 58.2 mm，當解析度於能量 1332 keV 時，其半高全寬小於 2.0 keV。其偵檢器之工作溫度為-196°C，所以需在溫度(22°C)、溼度(40%)嚴加控管的狀況下進行量測。計測所使用的設備包含了高壓供應器(High Voltage Supply)、前置放大器(pre-AMP)及類比數位轉換器(ADC)等設備。本次土壤樣品依本中心 RMC-O-097 GENIE-2000 加馬能譜分析系統操作程序書(第 10 版)【12】之原則進行計測，每個試樣計測約 30000 秒的時間。

2. 現場量測

使用手持式純鍺偵檢器(廠牌：ORTEC，型號：Micro-detective)，針對長庚雲林分院、橋頭國小許厝分校與阿媽公園三個區域進行現場量測，以手持式純鍺偵檢器連接電腦，使用 Isotopic Operator 4.2 軟體，另搭配美國 DOE-EML-300 報告方法，即可獲得土壤中放射性核種比活度。架設方式係將手持式純鍺偵檢器置距地 1 公尺，偵檢器方向朝下，如圖 7 (E 點位置)。每個地區之量測時間約 3600 秒，作為實驗室分析結果之比較。

3. 量測結果與分析比較

經土壤採樣共計有 6 個試樣需進行計測，土壤 1 與土壤 2 (混)為長庚雲林分院的土壤樣品、土壤 3 與土壤 4 (混)為橋頭國小許厝分校的土壤樣品、土壤 5 與土壤 6 (混)為阿媽公園的土壤樣品，其計測與現場量測結果如表 5，土壤中常見的天然放射性核種主要為鈾系(鈾-238)、鈾系(鈾-235)與鉀-40，在平衡狀態下鈾-238 的衰變系列中，鐳-226 及其子核系列涵蓋 99.27% 母核種鈾-238 的加馬輻射，因此，國際間的研究文獻中，通常以鐳-226 代表鈾-238 系列的放射性核種活

度濃度【13】。鐳-226 活度濃度是從鈾-214 的 609.31 keV 能峰測量出的，沒有使用鐳-226 的 186 keV 光子峰，從鉍-208 的 583.19 keV 能峰估計鈾-232 的活度濃度，故針對上述三種天然放射性核種進行探討。經過 3 個區域的核種分析比較，發現單點式採樣與網格混合式採樣之數值都相當接近，故推斷長庚雲林分院、橋頭國小許厝分校與阿媽公園周圍土壤之天然放射性核種分布是均勻的。

另為作國民輻射劑量評估參考使用，且能更方便的做統計比較，故將計測分析的活度濃度結果透過 ICRU 第 53 號【14】報告轉換成加馬劑量率(微西弗/小時)，並將計算轉換的鈾系、鈾系與鉀-40 劑量率加總後即可獲得總加馬劑量率，詳如表 5。以長庚雲林分院、橋頭國小許厝分校與阿媽公園三個區域之混合土壤樣本為基礎，進行單點實驗室土壤計測，與現場度量結果進行差異比較，發現差異值範圍在 1%~26%。差異值屬儀器本身誤差範圍，符合預期結果。考量實驗室分析流程包含：採樣、樣品前處理、計測分析等，較複雜且費時，後續應可直接採用現場度量方式執行燃煤電廠周圍土壤環境輻射強度調查。

表 5 燃煤電廠周圍土壤採樣與核種分析結果

度量方式	試樣編號	測定場所	活度濃度(貝克/公斤)			加馬劑量率(微西弗/小時)			總加馬劑量率	差異值
			鉀-40	鈾系 (Bi-214)	鈾系 (Tl-208)	鉀-40	鈾系	鈾系		
實驗室計測	土壤 1	長庚 雲林 分院	557±17	23±2	32±2	0.0217± 0.0007	0.0121± 0.0011	0.0126± 0.0008	0.0463± 0.0015	-6%
	土壤 2 (混)		582±17	23±2	38±2	0.0227± 0.0007	0.0119± 0.0011	0.0147± 0.0008	0.0493± 0.0015	-
現場度量			572±17	27±4	44±5	0.0223± 0.0007	0.0140± 0.0021	0.0171± 0.0019	0.0534± 0.0029	8%
實驗室計測	土壤 3	橋頭 國小 許厝 分校	672±15	25±1	40±2	0.0262± 0.0006	0.0131± 0.0005	0.0156± 0.0008	0.0549± 0.0011	5%
	土壤 4 (混)		619±17	24±1	40±2	0.0241± 0.0007	0.0127± 0.0005	0.0156± 0.0008	0.0524± 0.0012	-
現場度量			603±17	38±4	57±6	0.0235± 0.0007	0.0202± 0.0021	0.0221± 0.0023	0.0658± 0.0032	26%
實驗室計測	土壤 3	阿媽 公園	541±16	20±2	20±1	0.0211± 0.0006	0.0104± 0.0011	0.0141± 0.0004	0.0456± 0.0013	-9%
	土壤 4 (混)		553±16	25±1	25±1	0.0216± 0.0006	0.0134± 0.0005	0.0150± 0.0004	0.050± 0.0009	-
現場度量			496±15	27±4	27±4	0.0193± 0.0006	0.0142± 0.0021	0.0172± 0.0016	0.0507± 0.0027	1%

註 1：差異值：(土壤-土壤(混))/土壤(混)；(現場度量-土壤(混))/土壤(混)

註 2：總加馬劑量率=(鉀-40+鈾系+鈾系)加馬劑量率；單位：微西弗/小時

(三) 現場量測設備與方法

本研究參考本中心 RMC-110-303「燃煤電廠周圍之土壤採樣與核種分析作業技術先行評估報告」【10】後，以現場量測的方式取代土壤採樣計測，進行土壤之輻射量測及劑量評估。現場量測係使用 ORTEC 手持式純鍺偵檢器(型號：Micro-detective，如圖 8)，其偵檢頭大小為直徑 50 mm、長度 30 mm 的純鍺(HPGe)偵檢器，採先進智慧型電冷式，可於常溫的狀態下進行量測，克服舊式液態氮冷卻之缺失，具輕巧且機動性高的特性，可直接攜於戶外量測來自地表放射性物質所造成之加馬輻射。ORTEC 儀器主要量測來自地表的加馬輻射，只有極低(幾乎微乎其微)的機率會量測到來自宇宙射線的加馬輻射，地表輻射主要偵測的核種與能峰為鈾系(609 keV)、釷系(583 keV)、鉀-40(1460 keV)，必須剛好在該能量範圍，且落在該量測時間(約 1 小時)，才可能被量測到。ORTEC 手持式純鍺偵檢器除了可以進行環境劑量率之偵測外，亦可提供加馬能譜分析的結果。手持式純鍺偵檢器之現場度量主要適用於開闊及平坦的區域，並假設於土壤分布均勻的情況下，針對 10 平方公尺面積的土壤進行量測。



圖 8 ORTEC 手持式純鍺偵檢器

進行土壤現場度量所需設備包含：ORTEC 手持式純鍺偵檢器、腳架、連接偵檢器用的電腦、電源供應器與其他相關等輔助設備。手

持式純鍺偵檢器需架設距地 1 公尺，偵檢器方向朝下並搭配 Isotopic Operator 4.2 軟體進行加馬能譜分析，每個地點之量測時間約 3600 秒。本研究針對雲林麥寮電廠、高雄興達電廠與台中火力發電廠周邊進行現場度量，共 10 個量測點，作業情形如圖 9 至圖 11。



(a) 阿媽公園



(b) 長庚雲林分院

圖 9 雲林麥寮電廠周邊現場度量情形



ORTEC 手持式純鍮偵檢器

(c) 雲林縣橋頭國小許厝分校

圖 9 雲林麥寮電廠周邊現場度量情形(續)



ORTEC 手持式純鍮偵檢器

(a) 五福宮附近空地

圖 10 高雄市興達發電廠周邊現場度量情形



(b) 高雄市興達國民小學



(c) 興達港河堤邊

圖 10 高雄市興達發電廠周邊現場度量情形(續)



(a) 梧棲運動公園



(b) 台中港旅客服務中心旁草地

圖 11 台中市火力發電廠周邊現場度量情形



ORTEC 手持式純鍍偵檢器

(c) 河濱公園槌球場



ORTEC 手持式純鍍偵檢器

(d) 臺中市龍井國民小學

圖 10 台中市火力發電廠周邊現場度量情形(續)

四、 燃煤電廠周圍土壤量測結果分析

雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠周邊土壤之現場量測結果(共 10 處)列於表 6。鉀-40 所量測活度濃度範圍在每公斤 496 到 635 貝克;鈾系所量測活度濃度範圍在每公斤 18 到 39 貝克;鈾系所量測活度濃度範圍在每公斤 31 到 59 貝克。為進行輻射劑量評估,本研究參考 ICRU 第 53 號報告【14】將現場度量之活度濃度(貝克/公斤)量測結果轉換成加馬劑量率(微西弗/小時),鉀-40、鈾系、鈾系轉換因子分別為 0.039、0.528、0.389 毫西弗-公斤/貝克-小時;經轉換之土壤量測結果,鉀-40 之加馬劑量率範圍為每小時 0.019 至 0.025 微西弗;鈾系之加馬劑量率範圍為每小時 0.001 至 0.021 微西弗;鈾系之加馬劑量率範圍為每小時 0.012 至 0.023 微西弗。將計算轉換的鈾系、鈾系與鉀-40 劑量率加總後即可獲得總加馬劑量率,總加馬劑量率之範圍落於 0.043 至 0.066 微西弗/小時;以個別電廠的量測結果來看,雲林麥寮電廠、高雄興達電廠與台中火力發電廠周圍公共空間之加馬劑量率平均值分別為 0.057、0.054 與 0.052 微西弗/小時。

表 6 現場度量之活度濃度與加馬劑量率分析結果

現場度量		活度濃度 (貝克/公斤)			加馬劑量率 (微西弗/小時)			總加馬劑量率 (微西弗/小時)	
電廠	編碼	測定場所	鉀-40	鈾系	鈾系	鉀-40	鈾系		鈾系
雲林麥寮 發電廠	A	長庚雲林分院	572±17	27±4	44±5	0.022 ±0.001	0.014 ±0.002	0.017 ±0.002	0.053 ±0.003
	B	橋頭國小許厝分校	603±17	38±4	57±6	0.024 ±0.001	0.020 ±0.002	0.022 ±0.002	0.066 ±0.003
	C	阿媽公園	496±15	27±4	44±5	0.019 ±0.001	0.014 ±0.002	0.017 ±0.002	0.051 ±0.003
高雄市興 達發電廠	D	五福宮附近空地	634±17	20±6	34±3	0.025 ±0.001	0.011 ±0.003	0.013 ±0.001	0.049 ±0.003
	E	高雄市興達國民小學	525±15	32±3	43±3	0.020 ±0.001	0.017 ±0.002	0.017 ±0.001	0.054 ±0.002
	F	興達港河堤邊	560±17	29±2	59±6	0.022 ±0.001	0.015 ±0.001	0.023 ±0.002	0.060 ±0.003
台中市火 力發電廠	G	梧棲運動公園	510±15	18±3	35±6	0.020 ±0.001	0.010 ±0.002	0.012 ±0.002	0.043 ±0.003
	H	台中港旅客服務中心 旁草地	539±16	19±3	31±5	0.021 ±0.001	0.010 ±0.002	0.012 ±0.002	0.043 ±0.003
	I	河濱公園槌球場	524±15	32±4	45±4	0.020 ±0.001	0.017 ±0.002	0.018 ±0.002	0.055 ±0.003
	J	臺中市龍井國民小學	635±17	39±3	53±6	0.025 ±0.001	0.021 ±0.002	0.021 ±0.002	0.066 ±0.003

燃煤電廠主要透過煤炭的燃燒來產生電力，煤炭本身即含鈾與釷系等天然放射性物質，煤炭燃燒過程會產生飛灰而釋放出這些天然放射性物質，再隨著大氣擴散沉降於附近土壤中。為確認土壤中是否含飛灰成分，參考國外相關文獻【15】，發現可透過天然放射性核種釷系、鈾系與鉀-40 三者之活度濃度比例粗略確認是否為純土壤或是含有飛灰沉降之土壤，該研究結果發現一般土壤的鉀-40 活度濃度會遠大於釷系(^{232}Th)與鈾系(^{238}U)，而釷系會略大於鈾系；而在有煤炭(coal)、飛灰(fly ash)或是底灰(bottom ash)的情況下，鉀-40 之活度濃度依然遠大於釷系與鈾系，但鈾系則會略大於釷系，差異如表 7 所示。另外，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)2003 年出版報告之 IAEA 419 號報告中【16】彙整了各國對煤炭的量測分析結果，如表 8，各國針對其電廠所使用的煤炭進行了檢測分析，提供了一個鈾和釷系列與鉀-40 活度濃度範圍的代表性數據，煤炭中天然存在的放射性物質的濃度雖然取決於其起源煤層的地質構造特徵，但各國的檢測結果仍呈現一致性，大多數國家的煤炭中，所測得的鈾系活度濃度是大於釷系的。

表 7 天然放射性核種釷系、鈾系與鉀-40 於不同樣品之活度比較

Sample type	Activity concentrations (Bq kg^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Coal	32.02	29.17	314.11
Fly ash	59.07	52.04	338.58
Bottom ash	50.63	42.05	311.01
Soil	45	51	423.21

(資料來源: Spatial distribution of radionuclides in agricultural soil in the vicinity of a coal-fired brick kiln 【15】)

表 8 各國煤炭中含放射性核種活度濃度量測差異比較

單位：貝克/公斤

國家	鈾-238	鐳-226	釷-232	鉀-40
澳洲	8.5-4.7	19-24	11-69	23-140
巴西	72	72	62	-
埃及	59	26	8	-
德國	-	10-145	10-63	10-700
希臘	117-390	44-206	-	-
匈牙利	20-480	-	12-97	30-384
義大利	23 ± 3	-	18 ± 4	218 ± 15
波蘭	18*	-	11*	-
羅馬	80*	126*	62*	-
英國	7-19	7.8-21.8	7-19	55-314
美國	6.3-73	8.9-59.2	3.7-21.1	-

*平均值

本研究進一步將雲林麥寮發電廠(編碼：A、B、C)、高雄市興達發電廠(編碼：D、E、F)與台中火力發電廠(編碼：G、H、I、J)之現場度量結果做綜合比較評估，如圖 12；由圖中可看到，三座電廠周圍公共空間之土壤中的鈾系、鈾系與鉀-40 之活度濃度，皆為鉀-40 遠大於鈾系與鈾系，鈾系則略為大於鈾系，表示三個區域之土壤可能皆沒有受飛灰沉降的影響。

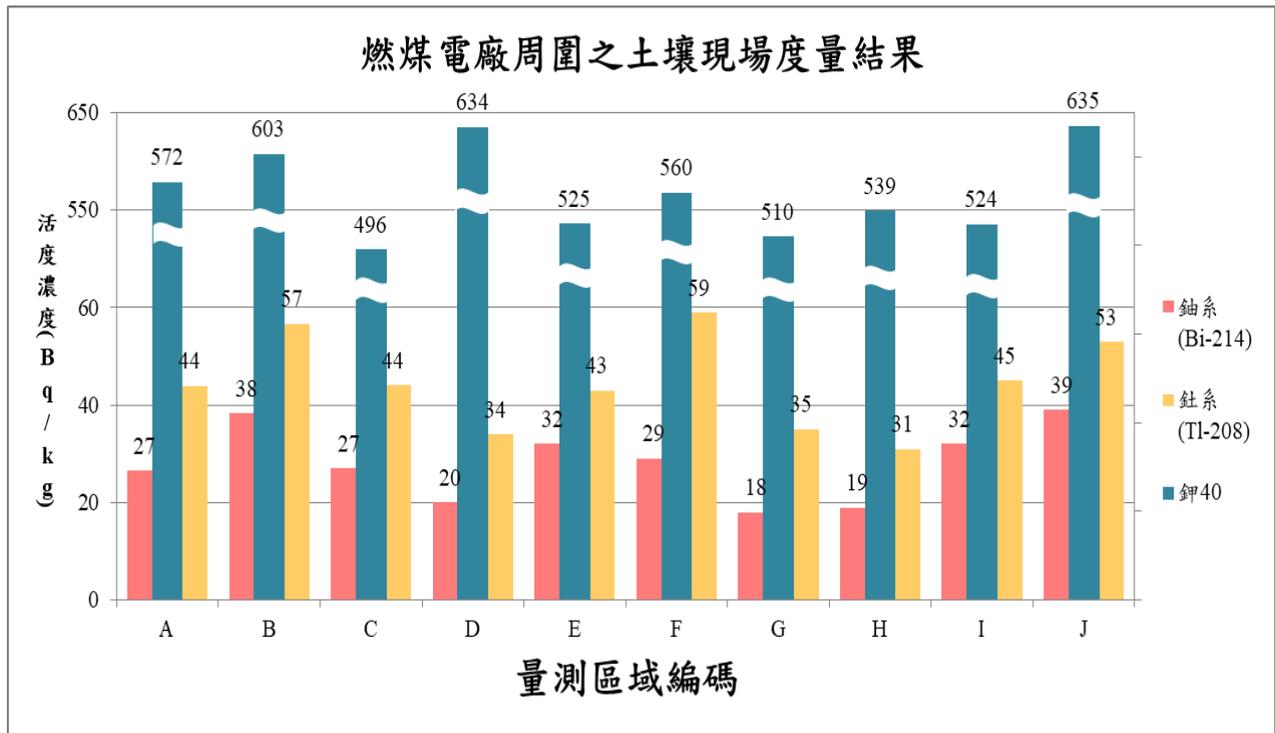


圖 12 雲林麥寮、高雄市興達與台中市火力發電廠現場度量結果

煤炭經鍋爐燃燒發電後，較重的塵粒會於鍋爐下方排出，此稱為底灰(約佔 10 - 20 %)，較輕的塵粒則會被煙氣攜帶至靜電集塵設備 (ESP)，藉由高壓直流電將其吸附於集塵板上以達煙氣淨化功能，因國內之環保要求，針對燃煤機組加嚴標準，要求靜電集塵設備對粒狀物之去除率需大於 99 %，因此，放射性物質附著之粒狀物大多被去除收集，經靜電集塵設備收集到的塵粒則為飛灰(約佔 75 - 85 %)。燃煤發電所產生的副產物(底灰與飛灰)是可經再利用的方式作為工程填地、製磚、人工骨材及建材等使用。依據台電公司歷年煤灰產量，利用量及飛灰利用率之統計結果【17】，可發現近幾年煤灰再利用率都相當高，在民國 109 年的飛灰利用率已達 89.7 % (如圖 13 所示)；因此，可知大部分飛灰都已被有效收集再利用，只有少量的飛灰被排放於大氣中。

由此可知，煙氣中的粒狀污染物經污染防治設備處理後，已大部分收集成飛灰並進入資源再利用途徑，實際排放到環境中的量是相當少的，即使有少量進入大氣，經擴散、稀釋後沉降至地表，含量已是微乎其微。另外，依據 Harold L. Beck 在 1989 年的研究【18】，大多數之燃煤發電廠所產生之輻射強度，在個人曝露途徑是不顯著的。就新型燃煤發電廠而言，需符合更嚴格的新設電廠污染排放標準，在煤炭品質的選用與污染防治設備系統上的精進，在煤灰去除效率可達 99.5 %；因此，符合本調查所推論的結果，3 個燃煤電廠鄰近地區土壤確實沒有飛灰的沉降所造成之劑量沉積。

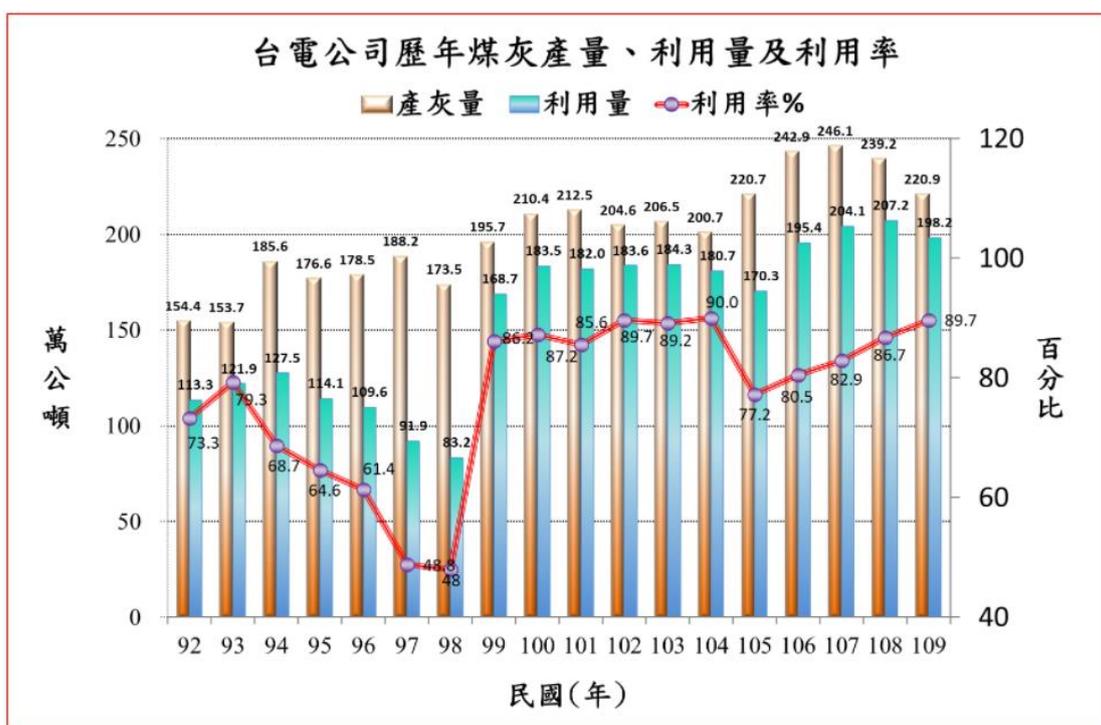


圖 11 台電公司歷年煤灰產量、利用量及利用率

(資料來源：

<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=216&cid=169&cchk=0e5c6c12-2e67-4350-980d-5cc312ce43da>)

五、 燃煤電廠周圍土壤量測結果與地表輻射比較

針對燃煤電廠周圍行政區人口做特殊群體的調查。全台共 6 座燃煤電廠，依行政區進行人口統計，分別為台中電廠(台中市龍井區)、林口電廠(新北市林口區)、興達電廠(高雄市茄苳區)、大林電廠(高雄市小港區)、麥寮電廠(雲林縣麥寮鄉)與和平電廠(花蓮縣秀林鄉)；依據內政部民國 108 年 1 月之人口統計資料【19】，燃煤電廠座落行政區總人口數約為 437,997 人(如表 9 所示)，佔全台人口比例約 1.86%，如圖 14。另外，依前述調查結果來看，台灣燃煤電廠周圍土壤未受飛灰沉降所造成之輻射影響，量測之土壤輻射劑量結果即為一般地表加馬輻射，故居住於該地區的特殊群體並不會因此獲得較高的輻射劑量。

雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠周邊量測數據之總加馬劑量率進行平均，可得到 3 座電廠周圍共 10 處土壤的地表輻射平均值，平均加馬劑量率為 0.054 微西弗/小時。另外，參考本中心「地表輻射國民輻射劑量評估(112 年修正版)」技術報告【20】，擷取戶外地表輻射數據進行比較，其量測點依國內行政區分布，至全國各鄉鎮縣市區執行戶外地表輻射的實測調查，橫跨全台 22 個縣市，共 497 個偵測點；加馬劑量率不同縣市量測結果落於 0.041 至 0.66 微西弗/小時，全部地點之地表輻射加馬劑量率平均值為 0.051 微西弗/小時。由兩部分數據可發現，3 座燃煤電廠周圍地表輻射之加馬劑量率皆落於全台地表輻射調查結果之範圍中。

針對雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠之加馬劑量率平均值分別為 0.057、0.054 與 0.052 微西弗/小時；而地表輻射量測結果，其雲林縣、高雄市與台中市之加馬劑量率平均值分別為 0.056、0.059 與 0.055 微西弗/小時；電廠周圍地表輻射加馬劑量率平均值(0.054 微西弗/小時)與上述三縣市之地表輻射加馬劑量率之平均

值(0.056 微西弗/小時)相近。依燃煤電廠周圍土壤量測結果與全台地表輻射調查結果，可推論這些特殊群體並沒有因為住在火力發電廠周圍而使其接收到額外的輻射劑量。

表 9 燃煤電廠座落行政區人口統計表

電廠	縣市	行政區	人口數
台中電廠	台中市	龍井區	77,975
林口電廠	新北市	林口區	110,081
興達電廠	高雄市	茄萣區	30,041
大林電廠	高雄市	小港區	157,742
麥寮電廠	雲林縣	麥寮鄉	46,219
和平電廠	花蓮縣	秀林鄉	15,939
總計			437,997

*資料來源：108 年 1 月人口統計資料，內政部。

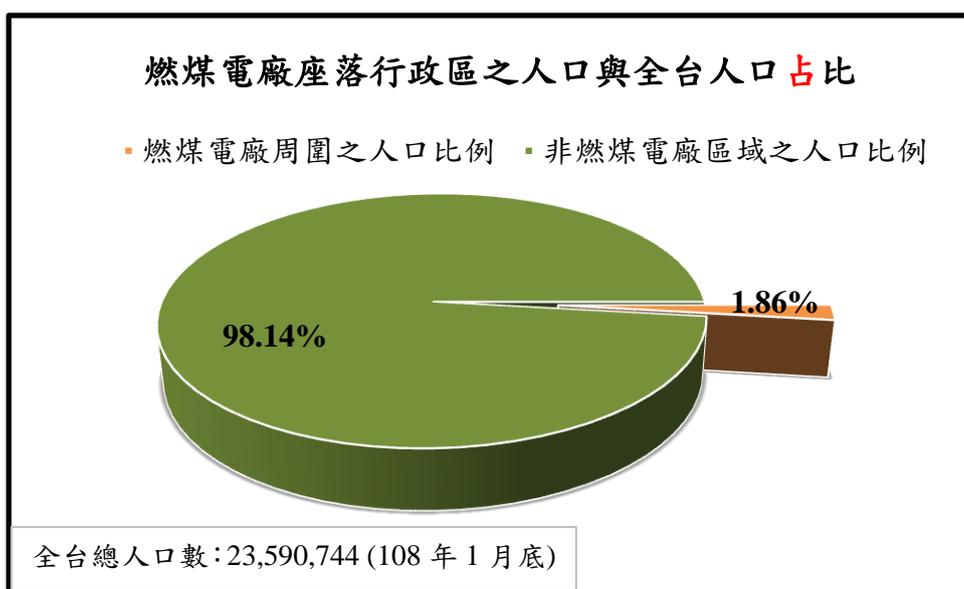


圖 12 燃煤電廠周圍人口與全台人口總數占比

六、 結論

- (一) 本次量測中，雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠三個地區周圍土壤加馬能譜分析結果，並無發現鈾系元素之活度比例高於鈾系元素之狀況，爰初步研判並未受飛灰沉降的影響，提高或改變土壤輻射活度濃度之狀況。
- (二) 本研究利用周圍土壤量測結果轉換所得之地表輻射加馬劑量率平均值為 0.054 微西弗/小時，與全台國土調查地表輻射之平均加馬劑量率 0.051 微西弗/小時相近，因此，也進一步佐證居住於燃煤電廠周圍的民眾不會因此獲得較高的體外輻射曝露劑量，與一般民眾無異，並未受到飛灰影響而增加輻射曝露。
- (三) 因量測結果推測三座燃煤電廠周圍可能未受到飛灰放射性影響而造成輻射曝露增加，其評估劑量應極低，趨近於 0，故不用再繼續推算可能造成之最大劑量值或年集體有效劑量。

七、參考資料

- 【1】 台灣電力公司火力發電簡介。
<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=202&cid=129&cchk=675cea43-9c45-4ae1-80c6-4f18b3b38d8e>
- 【2】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Publications, New York, 1993.
- 【3】 U.S. Geological Survey (USGS), Radioactive Elements in Coal and Fly Ash: Abundance, Forms, and Environmental Significance, Fact Sheet FS-163-97, <http://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/FS-163-97.html>., 1997.
- 【4】 National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP REPORT No.160., NCRP Publishing, 2009.
- 【5】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，國民輻射劑量之評估研究報告，87年6月。
- 【6】 Electric Power Research Institute (EPRI), Assessment of Radioactive Elements in Coal Combustion Products, Technical Report, 2014.
- 【7】 Ramme B., and Tharaniyil M., Coal Combustion Products Utilization Handbook, 2004.
- 【8】 National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), Ionizing Radiation Exposure of the Population of the

United States, NCRP REPORT No.93., NCRP Publishing, 1987.

- 【9】 Norasalwa Z., Rohyiza B. and Sivapalan K., Radiological Impact from Airborne Routine Discharges of Coal-Fired Power Plant, Journal of Environmental Radioactivity, Agensi Nuklear Malaysia 26 - 28, 2010.
- 【10】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，RMC-110-303 燃煤電廠周圍之土壤採樣與核種分析作業技術先行評估報告(內部報告)，110 年 1 月。
- 【11】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，RMC-M-11 取樣作業程序書，107 年 5 月。
- 【12】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，RMC-O-097 GENIE-2000 加馬能譜分析系統操作程序書，109 年 3 月。
- 【13】 Yasir M. S., Ab Majid A., and Yahaya R., Study of natural radionuclides and its radiation hazard index in Malaysian building materials, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **vol. 273**, no. 3, pp. 539–41, 2007.
- 【14】 International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, ICRU REPORT 53, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 1994.
- 【15】 Jainal Abedin Md., Rezaul Karim Md., Spatial distribution of radionuclides in agricultural soil in the vicinity of a coal-fired brick kiln. Arabian Journal of Geosciences, Article number : 236, 2019.

- 【16】 International Atomic Energy Agency (IAEA), Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. Technical Reports Series No. 419. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.
- 【17】 台灣電力公司副產物資源化再利用。
<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=216&cid=169&cchk=0e5c6c12-2e67-4350-980d-5cc312ce43da>
- 【18】 Beck H.L, Radiation Exposures due to fossil fuel combustion, radiation Physics and Chemistry, 342, 1989.
- 【19】 中華民國內政部戶政司全球資訊網人口統計資料。
<https://www.ris.gov.tw/app/portal/346>
- 【20】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，RMC-110-318Rev3 地表輻射國民輻射劑量評估(112 年修正版)，112 年 8 月。

附表

地表輻射量測結果

區域別	偵測點數	地表輻射劑量率 (微西弗/時)	地表輻射年有效劑量 (毫西弗/年)
新北市	32	0.057	0.499
臺北市	16	0.057	0.499
桃園市	18	0.054	0.473
臺中市	36	0.055	0.482
臺南市	46*	0.060	0.526
高雄市	45	0.059	0.517
宜蘭縣	12	0.055	0.482
新竹縣	13	0.051	0.447
苗栗縣	26	0.050	0.438
彰化縣	31	0.062	0.543
南投縣	18	0.064	0.561
雲林縣	20	0.056	0.491
嘉義縣	19	0.053	0.464
屏東縣	60	0.062	0.543
臺東縣	30	0.041	0.359
花蓮縣	20	0.045	0.394
澎湖縣	4	0.043	0.377
基隆市	7	0.059	0.517
新竹市	3	0.046	0.403
嘉義市	3	0.057	0.499
金門縣	16	0.058	0.508
連江縣	14	0.066	0.578
總計	489*	0.051	0.45

*：劑量率與年有效劑量計算不含臺南市特殊地質區 8 處

附錄、審查意見對照表

一、 施建樑委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<u>p. 2 一、</u> 請將 6 座燃煤電廠各有幾部機組及其發電容量，一併註明。	感謝委員意見；已新增。(p.3 表 1)
2	<u>p. 12 三、</u> 請問如何將利用手持式純鍍偵檢器現場量測到的結果，轉換為土壤比活度？	感謝委員意見；以手持式純鍍偵檢器連接電腦，使用 Isotopic Operator 4.2 軟體，另搭配美國 DOE-EML-300 報告方法，即可獲得土壤中放射性核種比活度。(文字內容補充至 p.13)
3	<u>p. 6 二、(二)</u> 本研究參考 RMC-110-303「燃煤電廠周圍之土壤採樣與核種分析作業技術先行評估報告」，建議於結果比較裡，加入兩項研究結果之比較。	感謝委員意見；已完成修正。(p.15 表 5)
4	<u>p. 3 二、</u> 依文獻中〔6〕所提及的曝露途徑包含了：...，共有四項，建議未來均予以考慮納入評估。	感謝委員意見；本中心納入未來業務規劃之參考。
5	<u>p. 18-19 四、</u> ...劑量率之平均值，其原因推估以下 3 點：...，請針對這三點再加於說明。	感謝委員意見；因地表輻射數據變動，其數值與電廠周圍評估結果相近，故刪除該文字說明。(p.29)
6	<u>p. 20 五、</u> 本報告係針對國民輻射劑量評估，建議在結論說明加於連結。	感謝委員意見；已修正。(p.30)

二、 尹學禮委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p>p.2 一、</p> <p>L#17, 報告中說明, "現今已無電視映像管、夜光錶、煙霧警報器...民生消費產品之流通與使用"。建議能再釐清是否確實目前已無再使用之情形, 亦或是目前有關產品已屬豁免類之民生消費品, 而不再予以管制。</p>	<p>感謝委員意見; 因將燃煤電廠周圍民眾輻射曝露分類改為產業活動, 故該段文字已刪除。</p>
2	<p>p. 3 二、</p> <p>L#4, 報告中說明, "可能接受較高的輻射暴露...提及的暴露途徑...", "建議修正為"可能接受較高的輻射曝露...提及的曝露途徑...", "。建議報告全文中, 請再檢視, 一併予以修正。</p>	<p>感謝委員意見; 已完成修正。(p.4)</p>
3	<p>p. 6 二、(二)</p> <p>報告中本章節是說明現場量測設備與方法, 文中說明使用 ORTEC 儀器, 量測來自地表放射性物質所造成之加馬輻射。建議能於文中補充說明, 此儀器是否僅量測地表放射性物質所造成之加馬輻射? 與宇宙射線之加馬輻射如何過濾區別?</p>	<p>感謝委員意見; 已補充說明。(p.16)</p> <p>ORTEC 儀器主要量測來自地表的加馬輻射, 只有極低(幾乎微乎其微)的機率會量測到來自宇宙射線的加馬輻射, 地表輻射主要偵測的核種與能峰為鈾系(609 keV)、鈾系(583 keV)、鉀-40(1460 keV), 必須剛好在該能量範圍, 且落在該量測時間(約 1 小時), 才可能被量測到。</p>
4	<p>p. 16 三</p> <p>報告圖 9 中說明鉀 40、鈾系、鈾系量測之結果, 雖然文中已有說明其相對之大小區別, 惟圖中鉀 40 與鈾系之標示相近或不易區別。建議考量鉀 40 能否再搜尋可用不同方式(例如網格方式)的條形圖來表示, 使表達能更明確。</p>	<p>感謝委員意見; 已完成修正。(p.26 圖 12)</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
5	<p>未來研究建議</p> <p>本報告針對燃煤電廠之核種排放，及其在附近土壤之強度有詳細的調查，甚具有價值。建議未來可再擴充研究領域，加以評估包括燃煤電廠之核種排放造成對附近居民體外與體內的輻射劑量影響，並可與核能電廠之相關數據作比對，則研究成果能更具有科普的效果。</p>	<p>感謝委員意見；本中心納入未來業務規劃之參考。</p>

三、李境和委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p>p. 3 二</p> <p>「2. 煤炭...民眾之體外曝露、吸入或攝入。」</p> <p>「3. 煤炭...可能會通過攝入水和吸入氬氣...。」</p> <p>意見：依游離輻射防護安全標準之內容，攝入(intake)包含了吸入(inhalation)與嚥入(ingestion)，所以上述兩段內容中「攝入」，宜改為「嚥入」。</p> <p>建議修正：「2. 煤炭...民眾之體外曝露、吸入或嚥入。」；「3. 煤炭...可能會通過嚥入水和吸入氬氣...。」</p>	<p>感謝委員意見；已完成修正。(p.4)</p>
2	<p>p. 14 表 2</p> <p>活度濃度及加馬劑量率的量測結果，是否能標示其標準差？</p>	<p>感謝委員意見；已完成修正。(p.15 表 5、p.23 表 6)</p>
3	<p>p. 16 三</p> <p>...燃煤發電所產生的副產物(底灰或飛灰)...作為工程填地、製磚、人工骨材及建材等使用。</p> <p>意見：底灰或飛灰會濃縮天然放射性核種(鈾系及鈾系)，可否請原能會要求台電公司，在執行底灰或飛灰的再使用之前，先進行取樣分析，並評估再使用之正當性(利須大弊)</p>	<p>感謝委員意見；本中心納入未來業務規劃之參考。</p>
4	<p>p. 18-19 四</p> <p>電廠周圍地表輻射加馬劑量率平均值低於全台...，其原因推估以下 3 點：(1)...現場度量技術適用於內陸的一般土壤地形；(2)...；(3)訪地區之土壤係由其他地方移置，非當地之原土。</p> <p>意見：</p> <p>1. 現場度量技術適用於內陸的一般土壤地形，可能較不適宜海邊地形。未來是否可增加土壤採樣，送回實驗室進行分析，並可加以比</p>	<p>感謝委員意見；</p> <p>(1)已補充文字說明並加入相關結果比較。(p.9-p.15)</p> <p>(2)本中心納入未來業務規劃之參考。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	<p>較。</p> <p>2. 測量地區之土壤係由其他地方移置，非當地之原土。也不知移置多久？將失掉偵測調查的目的，未來應注意不要在新覆土不久的地面偵測與採樣。</p>	

四、 陳清江委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p>P.2 L16</p> <p>現今已無..夜光錶..電銲熔接棒?</p>	<p>感謝委員意見；因將燃煤電廠周圍民眾輻射曝露分類改為產業活動，故該段文字已刪除。</p>
2	<p>P.15 表 3</p> <p>由表 3 數據顯示，煤炭經過燃燒後放射核種濃縮並不明顯，尤其 K-40 幾乎沒有濃縮，與 P2.L8 所言濃縮 10 倍以上差異很大，原因為何?</p>	<p>感謝委員意見；本研究僅引用文獻，分別為參考文獻【3】與【15】，依表 3 顯示確實煤炭經過燃燒後放射核種濃縮的現象，差異部分，推論可能與煤炭來源或燃燒方式有關。</p>
3	<p>P20.結論</p> <p>本研究選用現場度量的方法要區分煤灰對地表輻射的影響是不恰當的。雖然煤灰造成的輻射劑量可能是同功率核能電廠的 100 倍，那是舊型燃煤電廠。核能電廠在正常運轉下對周圍民眾造成的劑量是非常低的，約 0.1μSv/y 如附表。就算放大 100 倍也不過 10μSv/y，約 0.001μSv/h，無法直接度量。</p> <p>本研究方法跟用 HPIC 作連續監測核電廠例行運轉外釋氣態核種輻射劑量一樣，都是量不到的。因此可以電腦程式根據排放活度與氣象風花圖評估是比較可行的方法。過去曾經以電腦程式評估過，也曾經用高速抽氣機在關鍵地區取樣偵測，結果都很低。</p>	<p>感謝委員意見；本中心納入未來業務規劃之參考。</p>

五、 魯經邦委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p>綜合意見</p> <p>1.118-111 年國民輻射劑量調查評估報告按曝露類別分成多本報告，惟各份報告體例（章節及表格編碼）不甚一致，例如</p> <p>（1）章節有以壹、貳...，亦有以一、二...方式編碼者。</p> <p>（2）表格有以表一、表二 ...，亦有以表 1、表 2...方式編碼者。</p> <p>建議加以檢視後予以統一。</p> <p>2.在輻射防護領域，exposure 譯為「曝露」，有部分文字誤植為「暴露」（如第 3 頁第 3 行：「...輻射暴露，...暴露途徑...」），請校正後更正。</p>	<p>1. 感謝委員意見；相關報告均已修改，會採統一格式辦理。</p> <p>2. 已完成修正。(p.4)</p>
2	<p>P.3 二</p> <p>1.在第二節中提及煤灰對附近居民造成之輻射曝露途徑，包括設施（燃煤電廠）工作人員的體外曝露、因煤灰大氣擴散及沉降導致民眾之體外曝露及體內曝露（吸入或攝入）、煤炭燃燒產物之廢水進入飲用水供水系統導致攝入及氬氣之吸入之體內曝露及煤灰添加入建材中造成民眾之體外曝露或氬氣曝露等。而本報告似僅評估燃煤電廠周邊地表之輻射強度造成附近居民體外曝露之劑量。</p> <p>2.既然報告中引用文獻指出煤灰可能造成的曝露途徑是多元的且涵蓋體內外曝露，而本研究只針對單一的途徑評估，難免令人覺得不夠完整，雖然評估結果劑量很低，仍然會令人懷疑如果所有曝露途徑都納入考慮時，是否會使風險升高。</p> <p>3.因此建議審閱一下國際上的文獻中其他曝露途徑的貢獻，再報告中簡要說明為何只評估燃煤電廠周邊地表之輻射強度造成附近居民體外曝露之劑量而未將其他途徑曝露納入評估之理由（例如：以後會將其他途徑另行評估，或是從文獻觀察其他途徑之貢獻微不足道或...等）。</p>	<p>感謝委員意見；本次燃煤電廠調查評估項目僅針對空輻(體內曝露-吸入)與土壤(體外曝露)部分進行劑量評估；其餘項目可納入未來業務規劃之參考。</p>

六、原能會(輻射防護處)

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<u>全內容</u> 「煤炭」、「煤碳」請統一用語。	已完成文字修正。(p.2)
2	<u>p.2 摘要、一</u> 內文提及「...石化燃料燃燒隸屬於消費性產品及其活動分類之子項...」，惟此報告列為「產業活動」，且確認在國民輻射劑量評估所屬活動分類。	已完成修正。(p.2)
3	<u>p.3、摘要、二(一)</u> 摘要提及「...規劃以電廠廠區為中心，距離約3公里範圍進行現場度量...」，另第二(一)節要提及「...規劃以電廠廠區為中心，將評估範圍擴大至5公里範圍...」，請澄清本報告調查採樣之範圍。	已完成修正與補充。(p.6)
4	<u>p.3 二(一)</u> (1)「暴露途徑」請修訂為「曝露途徑」。 (2)該節提及依文獻中[6]提及4項曝露途徑，請說明本報告分析那些曝露途徑，本報告僅以電廠周邊土壤現場加馬量測分析來進行居民劑量評估之方法實屬少見，量測土壤的劑量率與居民間劑量關聯性應加強說明。	(1)已完成修正。(p.4) (2)本研究僅針對燃煤電廠周邊之土壤部分進行輻射強度調查，評估方法已補充說明。(p.9-p.15)
5	<u>p.4 二(一)</u> 請補充說明選擇此三座燃煤電廠及此10處量測點之之理由。	已完成補充與修正。(p.6)
6	<u>p.6 二(一)</u> 該節提及「...以進行環境室內劑量率之偵測外...」，請澄清是室內還是室外。	已完成文字修正。(p.16)

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
7	<p>p.13 三</p> <p>本報告係以國外文獻[9]之研究發現飛灰及土壤的鈾鈷鉀活度濃度比說明本次報告取樣應無飛灰沉降，惟土壤之鈾鈷鉀活度濃度比與各地之地質條件有關，以該國外單一研究來論證似嫌薄弱。建議應於電廠鄰近另選適當對照地點採樣分析結果論證。</p>	<p>本中心未來可加入該地地質條件相關資訊，如地質中鈾系、鈷系、鉀等成分比例，作為未來業務規劃之參考。</p>
8	<p>p.14 表 2</p> <p>請於文中補充有關鈾系、鈷系以量測 Tl-208、Bi-214 來代表之理由。</p>	<p>在平衡狀態下鈷-238 的衰變系列中，鐳-226 及其子核系列涵蓋 99.27% 母核種鈷-238 的加馬輻射，因此，國際間的研究文獻中，通常以鐳-226 代表鈷-238 系列的放射性核種活度濃度。鐳-226 活度濃度是從鉍-214 的 609.31 keV 能峰測量出的，沒有使用鐳-226 的 186 keV 光子峰，從鉍-208 的 583.19 keV 能峰估計鈾-232 的活度濃度。(p.13-14)</p>
9	<p>四</p> <p>(1)對於燃煤飛灰對環境影響之評估，可參考輻射偵測中心 1999 年專題研究計畫「飛灰中放射性含量造成劑量之研究」之評估方式辦理。</p> <p>(2)因本報告認為三座燃煤電廠周圍土壤可能皆沒有受飛灰沉降影響，請澄清是否意指電廠鄰近民眾與一般民眾無異，並未受飛灰放射性而增加輻射曝露。</p> <p>(3)本報告係為國民劑量評估，應提出所造成最大劑量值或年集體劑量值。</p>	<p>(1)以取得該專題研究文獻，本中心將納入未來業務規劃之參考。</p> <p>(2)已補充。(p.30)</p> <p>(3)已補充說明，因量測結果推測三座燃煤電廠周圍可能未受到飛灰放射性影響而造成輻射曝露增加，其評估劑量應極低，趨近於 0，故無法推算可能造成之最大劑量值或年集體劑量值。(p.30)</p>