

RMC-111-306Rev2

# 消費性產品(農業肥料)之國民輻射

## 劑量評估

(112年8月修正版)



核能安全委員會輻射偵測中心

112年8月

# 消費性產品(農業肥料)之國民輻射劑量評估

## 摘要

本研究探討評估國內市售肥料中放射性核種對農民造成之輻射劑量。使用高純度鍍輻射偵檢器測量國內生產的 13 件市售肥料，分析所含鐳-226、鈷-232 和鉀-40 的活度濃度。量測結果 9 件複合肥料樣品所含鉀-40 和鐳-226 的平均活度濃度分別為  $3339.4 \pm 22.9$ 、 $126.9 \pm 2.8$  貝克/公斤(Bq/kg)；2 件磷肥樣品所含鐳-226 平均活度濃度為  $552.3 \pm 3.3$  Bq/kg；2 件鉀肥樣品所含鉀-40 和鐳-226 平均活度濃度為  $3279.6 \pm 46.4$ 、 $141.7 \pm 11.8$  Bq/kg，均有相對較高的平均活度濃度，但所有樣品所含鐳-226、鈷-232 和鉀-40 核種活度濃度均小於天然放射性物質管理辦法的基準值。

評估結果，13 件肥料樣品施作於農地後所造成農民之鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、空間吸收劑量、年有效劑量及加馬射線係數，均遠低於歐盟委員會指導方針或聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR) 2000 年報告所提出的建議值。我國使用肥料於農地後，造成「農民」的年平均有效劑量為 0.616 微西弗，遠低於一般民眾每年 1 毫西弗之劑量限值，結果顯示國內正常施作肥料時不需進行輻射防護措施；此結果再採用全國總人口數計算，評估出農業肥料所造成「國民」之平均年有效劑量為 0.026 微西弗。

# **The Radiation Dose Assessment of Consumer Products -Agricultural Fertilizers in Taiwan**

## **Abstract**

The study aims to evaluate the radiation dose to farmers caused by domestic commercial fertilizers. A high-purity germanium radiation detector had been used to measure the radium-226, thorium-232 and potassium-40 radionuclides activity concentration of 13 domestically manufactured commercial fertilizers. Among them, the average activity concentrations of potassium-40 and radium-226 contained in nine compound fertilizer samples were  $3339.4 \pm 22.9$  and  $126.9 \pm 2.8$  Bq/kg, respectively. The average activity concentration of radium-226 in two phosphorus fertilizer samples was  $552.3 \pm 3.3$  Bq/kg. The average activity concentrations of potassium-40 and radium-226 in the two potash fertilizer samples are  $3279.6 \pm 46.4$  and  $141.7 \pm 11.8$  Bq/kg, respectively. Activity concentrations are relatively higher than other soil samples. The activity concentrations of radium-226, thorium-232 and potassium-40 in all samples were lower than the benchmark values of the Naturally Occurring Radioactive Materials Management Regulation.

The results of radium equivalent concentration, external hazard index, internal hazard index, absorbed dose, annual effective dose, and gamma index are calculated to simulate the situation after 13 fertilizer samples are applied to farmland respectively, then all values are far lower than the recommended values in the European Commission guidelines. The average annual effective dose caused by using fertilizers is 0.616 microsievert ( $\mu\text{Sv}/\text{y}$ ), which is far lower than the annual dose limit of 1 mSv/y. It shows that radiation protection operations measures were unnecessary during applying fertilizers. This result was divided by the total population of the country, and the average annual effective dose caused by agricultural fertilizers was estimated to be 0.026  $\mu\text{Sv}$ .

## 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. $E_{global}$ :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( $\mu$ Sv)表示。

### 4. $E_{US}$ :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( $\mu$ Sv)表示。

### 5. $E_{Taiwan}$ :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( $\mu$ 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、 量測設備與方法.....	2
三、 量測結果.....	3
四、 與其他國家之比較.....	7
五、 結論.....	8
六、 參考文獻.....	12
附錄、審查意見回復與修正說明.....	15

## 表目錄

表 1、13 件肥料樣品中所含鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度.....	9
表 2、肥料樣品施用於農地後的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量及加馬射線係數.....	10
表 3、本文肥料樣品(施用於農地前)的鐳當量濃度、加馬射線係數與其他國家之比較.....	11

# 消費性產品(農業肥料)之國民輻射劑量評估

## 一、前言

化學肥料可提高作物產量，在現代農業管理有其重要性，因此化肥工業遍布世界各地；台灣常使用的肥料主要分為複合肥料、磷肥料與鉀肥料，複合肥料是含有氮、磷與鉀三種元素的肥料，氮肥中的氮由氮產生，磷肥中的磷由磷酸鹽礦石獲得，鉀肥中的鉀則來自氫氧化鉀或全氧化鉀(化學式： $K_2O$ )，磷酸鹽礦石含有鈾系、釷系及其衰變系列核種，氮則不含鈾系與釷系天然核種，氫氧化鉀或全氧化鉀含有少量的鉀-40，天然存在的鉀-40 占整體鉀元素的比率約為 0.0117%[1]；肥料中含有多種天然放射性核種，其生產過程中作為原料的礦物以鈾-238 及其衰變系列(如鐳-226)和鉀-40 為主，還有少量釷-232 及其衰變系列[2,3]。

土壤中的天然放射性因地而異，肥料是農地土壤中除天然來源之外的主要放射性來源[4,5]。化肥的大量使用會增加土壤和地下水中放射性核種的含量，進而增加人類經飲用水和食物鏈等曝露途徑攝入的放射性核種，肥料中的鐳-226 一旦沉積在骨骼中，將可能造成生物損傷[6]。

農業活動中的肥料使用，會有鈾系、釷系和鉀 40 等放射性核種，會造成使用者的體外曝露(加馬輻射)，與吸入氫氣及其衰變產生阿伐粒子的體內輻射曝露，從輻射防護的角度來看，監測肥料中的天然放射性具有其意義[7]。

行政院原子能委員會輻射偵測中心自 108 年至 111 年執行國民輻射劑量調查評估計畫，評估項目分為背景輻射、產業活動、職業曝露、醫療輻射與消費性產品共五類，為瞭解民眾進行農業耕種時施作肥料行為所造成的輻射劑量，本研究調查國內常用 13 件市售肥料，採用加馬能譜分析方法，計算肥料樣品的鐳當量濃度、體外風險指數、體

內風險指數、加馬射線係數，並評估平均每位農民與國民因肥料樣品施作於農地後所造成的吸收劑量及年有效劑量；國民年有效劑量 ( $E_{\text{Taiwan}}$ ) 將納入消費性產品類之國民輻射劑量調查結果中。

## 二、量測設備與方法

### (一) 樣品製備：

從農會購買國內製造、使用頻率高的 13 件市售化學肥料，品項涵蓋：複合肥料、磷肥及鉀肥等類型，如表 1 所示，將這些樣品放置於 110°C 的烘烤箱中烘乾 24 小時，以確保完全去除水分，然後將樣品在乾燥器中冷卻至室溫，再以研磨機粉碎。將乾燥均質樣品裝入密封的聚乙烯計測容器（直徑 5.7cm，高 4.5cm）中，容器用黏性環氧樹脂膠帶密封以防止氦-222 和氦-220 逸出，製備後靜置 30 天，再送入高純鍍輻射偵檢器量測。

### (二) 分析儀器與加馬能譜分析：

鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的放射性核種活度濃度分析使用 CANBERRA 公司（現為 MIRION 公司）製造的 P 型同軸高純鍍輻射偵檢器測量，偵檢器之相對偵測效率為 40%，偵檢器在 1332.5 keV 處之能量解析度小於 2 keV，偵檢器連接到三合一數位核儀模組，再連接到個人電腦，透過多頻道分析軟體系統進行數據分析，該系統具有 4096 個頻道；偵檢器進行效率校正的射源是使用與待測樣品相同幾何形狀且裝填於馬林氏計測容器之標準射源。

為降低計測時之背景輻射干擾，高純鍍輻射偵檢器置於圓柱型屏蔽體內，主屏蔽之等效鉛當量大於 10 cm，內襯以原子序由外而內逐漸遞減的多層材料金屬屏蔽，屏蔽內計測能量範圍在 50 keV 至 2000 keV，背景值可小於 2.5 計數/秒。

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[8]。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，從鈾-208 的 583.19 keV 能峰估計鈾-232 的活度濃度；使用鉀-40 本身的 1460 keV 能峰估計鉀-40 活度濃度。肥料中放射性核種 i 由下列(1)式計算：

$$A_i = \frac{C_j}{p_{ji} \cdot w \cdot t \cdot e} \quad (1)$$

$A_i$  = 肥料中放射性核種 i 的活度濃度(Bq/kg)，包含鐳-226 活度濃度( $A_{Ra}$ )、鈾-232 活度濃度( $A_{Th}$ )、鉀-40 活度濃度( $A_K$ )；

$C_j$  = 計測核種 j 能峰的淨計數，計測核種 j 分別有鈾-214( $C_{Bi}$ )、鈾-208( $C_{Ti}$ )及鉀-40( $C_K$ ) (Counts)；

$p_{ji}$  = 計測核種 j 能峰對核種 i 的加馬射線發射機率(%)；

$w$  = 乾燥樣品淨重量(kg)；

$t$  = 測量時間(sec)；

$e$  = 偵測器的絕對效率(%)。

### 三、量測結果

本文所分析 13 件肥料樣品之鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度如表 1。編號 M1 至 M9 的樣品屬於複合肥料，鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為  $126.9 \pm 2.8$ 、 $3.9 \pm 0.6$ 、 $3339.4 \pm 22.9$  貝克/公斤(Bq/kg)；編號 P1 與 P2 的樣品屬於磷肥，鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為  $552.3 \pm 3.3$ 、 $4.0 \pm 0.7$ 、 $309.1 \pm 7.1$  Bq/kg；編號 K1 與 K2 的樣品屬於鉀肥，鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為  $141.7 \pm 11.8$ 、 $6.0 \pm 0.7$ 、 $3279.6 \pm 46.4$  Bq/kg。13 件肥料樣品所含核種活度濃度均小於天然放射性物質管理辦法基準值(鐳-226：1000 Bq/kg、鈾-232：1000 Bq/kg 和鉀-40：10000 Bq/kg) [9]。

### (一)鐳當量濃度( $R_{acq}$ )

國際文獻說明很難採用上述不同放射性核種的活度濃度直接進行比較，因此，聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR) 2008 年報告中提出鐳當量濃度 (Radium equivalent concentration,  $R_{acq}$ )作為比較的指標[10]。鐳當量濃度是比較樣品中所含放射性核種相當於鐳活度濃度之比較指標，可由下列(2)式計算[4]：

$$R_{aeq} = (A_{Ra} + 1.43 * A_{Th} + 0.077 * A_K) * Cf \quad (2)$$

$Cf$ = 肥料占農地土壤的比率(%)；

其中， $A_{Ra}$ 、 $A_{Th}$ 和  $A_K$  分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度(Bq/kg)，假設肥料與 0.5 公尺厚的土壤混合，乾燥土壤的平均密度為 1300 公斤／立方公尺；依據行政院農業委員會之農業統計資料[11]，於臺灣地區肥料產銷量值統計年報，109 年之複合肥料、氯化鉀、硫酸鉀、過磷酸鈣等化學肥料之施用總量為 737015.7 公噸，以及農耕土地面積統計年報中，109 年短期農耕土地面積為 479185.72 公頃數據，不列入長期農耕土地(為休耕或荒廢農地)，計算出肥料占農地土壤的比率

$Cf=737016 \times 10^3 / (479185.72 \times 10000 \times 0.5 \times 1300)$  為 0.0236%。因為施肥用量因人而異，本研究採保守估算，假設  $Cf$  為 0.236%，即施用 10 倍濃度肥料進行估算，本研究分析 13 件肥料樣品施作於農地後的鐳當量濃度如表 2，經稀釋施作於農地後之肥料其鐳當量濃度均未超過經濟合作暨發展組織(OECD)1979 年報告中提出鐳當量濃度的建議值(370 Bq/kg)，磷礦石或肥料中的  $R_{acq}$  值若達 370 Bq/kg，對應之加馬射線造成的有效劑量為 1.5 毫西弗/年(mSv/y) [12]。

### (二)體外風險指數( $H_{ex}$ )

農民在進行農耕活動時，會受到已經施作於農地肥料的體外曝露，體外風險指數(The external hazard index，簡稱  $H_{ex}$ )可由下列(3)式計算[16]：

$$H_{ex} = \left( \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) * Cf \quad (3)$$

其中  $A_{Ra}$ 、 $A_{Th}$  和  $A_K$  分別是各肥料樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度(Bq/Kg)，UNSCEAR 2000 年報告指出，若  $H_{ex}$  值小於 1，則加馬射線所造成之體外劑量可低於 1.5 mSv/y[13]，本研究分析 13 件肥料樣品施作於農地後的體外風險指數計算如表 2。

### (三)體內風險指數( $H_{in}$ )

除了體外曝露外，氦及其短壽命子核種對呼吸器官也有危害，常用於評估因地表天然放射性核種及後續曝露途徑造成的體內曝露風險，例如評估農作物、井水等，體內風險指數(The internal hazard index，簡稱  $H_{in}$ )可由下列(4)式計算[16]：

$$H_{in} = \left( \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) * Cf \quad (4)$$

其中  $A_{Ra}$ 、 $A_{Th}$  和  $A_K$  分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度；UNSCEAR 2000 年報告指出，若  $H_{in}$  值小於 1，則加馬射線所造成之體內劑量可低於 1.5 mSv/y[12]，本研究分析 13 件肥料樣品施作於農地後的體內風險指數結果計算如表 2。

### (四)空間吸收劑量(D)

從這些已經施作於農地的肥料中所含的放射性核種所發出的加馬射線，經過乾燥空氣離地表面 1 公尺處所造成的空間吸收劑量(Absorbed dose，簡稱 D)可由下列(5)式計算[16] [20]：

$$D\left(\frac{\text{nGy}}{\text{h}}\right) = (0.462 * A_{\text{Ra}} + 0.621 * A_{\text{Th}} + 0.042 * A_{\text{K}}) * C_f \quad (5)$$

其中  $A_{\text{Ra}}$ 、 $A_{\text{Th}}$  和  $A_{\text{K}}$  分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度；UNSCEAR 2000 年報告提到全球肥料樣品施作前的吸收劑量平均值為 59 奈格雷/時(nGy/h)[13]；本研究計算 13 件肥料樣品施作於農地後以  $C_f$  為 0.236%計算，離地表面 1 公尺處所造成的吸收劑量平均值為 0.502 nGy/h 如表 2，遠低於全球肥料樣品施作前之空間吸收劑量平均值，結果與國外同類型研究文獻接近[14]。

#### (五)年有效劑量(E)

施作於農地的肥料中所含鐳-226、釷-232 和鉀-40 放射性核種所發射的加馬射線造成的年有效劑量(The annual effective dose，簡稱 E)可由下列(6)式計算[16] [20]：

$$E\left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{y}}\right) = D\left(\frac{\text{nGy}}{\text{h}}\right) * 8760\left(\frac{\text{h}}{\text{y}}\right) * O * C\left(\frac{\text{mSv}}{\text{nGy}}\right) * 10^3\left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{mSv}}\right) \quad (6)$$

其中  $O$  是占用因子，考量農民受肥料所含天然放射性物質的每日平均曝露時間，定義  $O$  值為 0.2 [3]； $C$  是空間吸收劑量與有效劑量的轉換因子 ( $0.7 \times 10^{-6} \text{ mSv/nGy}$ )，考量農業活動在通風良好的戶外，正常施用肥料狀況下，肥料所含鐳-226 的子核種氬氣所造成的體內曝露忽略不計，13 件肥料樣品施作於農地後造成的年有效劑量計算如表 2，年有效劑量僅包括體外曝露，「農民」之平均年有效劑量( $E_{\text{Exp}}$ )為 0.616 微西弗( $\mu\text{Sv}$ )；參考行政院農業委員會公布 111 年 10 月農民健康保險投保人數 966,281 人，參考內政部戶政司 111 年 12 月戶口統計資料表中全國人口數 23,264,640 人，計算「國民」之平均年有效劑量( $E_{\text{Taiwan}}$ )為  $0.026\mu\text{Sv}$  ( $=0.616*966281/23264640$ )。肥料樣品施作於農地後造成農民或國民的年有效劑量皆遠低於我國及全球典型的背景輻射，且低於自然背景的變動範圍，對人體健康的風險微乎其微[15]。

#### (六)加馬射線係數( $I_\gamma$ )

本研究分析 13 件肥料樣品施作於農地後造成的體外射線輻射危害，可以透過加馬射線係數進行評估，加馬射線係數(Gamma Index，簡稱  $I_\gamma$ )可由下列(7)式計算[16]：

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} \quad (7)$$

其中  $A_{Ra}$ 、 $A_{Th}$  和  $A_K$  分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度；UNSCEAR 2000 年報告中敘述，若  $I_\gamma$  值小於 6，則加馬射線所造成之有效劑量會低於 1 mSv /y [13]；本研究分析之 13 件肥料樣品施作於農地後的加馬射線係數結果計算如表 2， $I_\gamma$  均低於 6。

#### 四、與其他國家之比較

本研究分析 13 件肥料樣品中有 9 件複合肥料、2 件磷肥、2 件鉀肥，為與其他國家肥料進行比較，將分析所得之鐳當量濃度、加馬射線係數並依類別進行平均，並不考量肥料占農地土壤之比例。9 件複合肥料之平均鐳當量濃度為 0.919(Bq/kg)，不考量肥料占農地土壤之比例回推鐳當量濃度為  $0.919/0.236\%=390$ (Bq/kg)。另 9 件複合肥料之平均加馬射線係數為 0.0037，不考量肥料占農地土壤之比例回推加馬射線係數為  $0.0037/0.236\%=1.56$ 。參考其他研究文獻並與其他國家肥料之比較結果詳如表 3，國內市售肥料之鐳當量濃度與加馬射線係數與日本較相近。

## 五、結論

本研究分析 13 件市售肥料中鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度，結果均低於天然放射性物質管理辦法的基準值。考量農業活動在通風良好的戶外，在正常施用肥料狀況下，肥料占土壤的比率，計算在正常情況下施用這些肥料所造成的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量及加馬射線係數，計算結果均遠低於歐盟委員會指導方針或 UNSCEAR 2000 年報告所提出建議值。這些建議值分別為 370 Bq/kg、小於 1、小於 1、59 nGy/h、480  $\mu$ Sv/y、小於 1，即肥料所造成的鐳當量濃度必須小於 370 Bq/kg，才能使年有效劑量(加馬輻射)保持在 1.5 mSv 以下。肥料所造成的體外風險指數必須小於 1，才能使年有效劑量(加馬輻射)保持在 1.5 mSv 以下。肥料所造成的體內風險指數必須小於 1，才能使年有效劑量(加馬輻射)保持在 1.5 mSv 以下。肥料所造成的吸收劑量建議必須小於 59 奈格雷/時。肥料所造成的年有效劑量建議必須小於 480 微西弗/年。肥料所造成的加馬射線係數建議必須小於 1。

綜上，肥料樣品施作於農地後，造成「農民」的年平均有效劑量( $E_{Exp}$ )為 0.616 $\mu$ Sv，遠低於一般民眾每年 1 毫西弗之劑量限值，結果顯示國內正常施作肥料時不需進行輻射防護措施；此結果再除以全國總人口數，評估出農業肥料所造成「國民」之平均年有效劑量( $E_{Taiwan}$ )為 0.026 $\mu$ Sv。

表 1、13 件肥料樣品中所含鐳-226、鈷-232 和鉀-40 的活度  
濃度

Table.1 Activity concentration of radium-226, thorium-232 and  
potassium-40 in 13 fertilizer samples

Code	Fertilizer Type	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
M1	Compound	85.7±0.9	1.3±0.4	2616.7±47.1
M2	Compound	151.6±8.3	3.8±1.4	3786.8±83.3
M3	Compound	184.2±9.8	9.2±3.3	3101.0±62
M4	Compound	114.7±5.3	1.6±0.5	2951.0±56.1
M5	Compound	89.8±5.8	1.5±0.4	4932.6±113.4
M6	Compound	148.7±9.4	1.1±0.4	2773.4±47.1
M7	Compound	106.2±8.7	6.7±2.3	3722.7±70.7
M8	Compound	120.5±9.0	1.8±0.6	2762.0±44.2
M9	Compound	140.5±12.5	8.0±2.9	3408.3±64.8
P1	Phosphate	537.0±4.8	4.6±1.2	258.3±8.5
P2	Phosphate	567.6±4.5	3.5±0.8	360.0±11.4
K1	Potash	150.4±19.6	2.9±1.0	3871.8±77.4
K2	Potash	132.9±13.3	9.2±1.0	2687.3±51.1

表 2、肥料樣品施用於農地後的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量(對農民)及加馬射線係數

Table.2  $R_{aeq}$ ,  $H_{ex}$ ,  $H_{in}$ , D, E, and  $I_{\gamma}$  Values After Fertilizer Samples Used to Farmland

Code	Fertilizer Type	Cf (%)	$R_{aeq}$ (Bq/kg)	$H_{ex}$	$H_{in}$	D (nGy/h)	E ( $\mu$ Sv/y)	$I_{\gamma}$
M1	Compound	0.236	0.682	0.0018	0.0024	0.3547	0.4350	0.0027
M2	Compound	0.236	1.059	0.0029	0.0038	0.5462	0.6699	0.0042
M3	Compound	0.236	1.029	0.0028	0.0040	0.5217	0.6398	0.0040
M4	Compound	0.236	0.812	0.0022	0.0029	0.4199	0.5150	0.0032
M5	Compound	0.236	1.113	0.0030	0.0036	0.5890	0.7223	0.0046
M6	Compound	0.236	0.859	0.0023	0.0033	0.4387	0.5380	0.0034
M7	Compound	0.236	0.950	0.0026	0.0032	0.4945	0.6065	0.0038
M8	Compound	0.236	0.792	0.0021	0.0029	0.4078	0.5001	0.0031
M9	Compound	0.236	0.978	0.0026	0.0035	0.5028	0.6166	0.0039
P1	Phosphate	0.236	1.330	0.0036	0.0070	0.6178	0.7577	0.0045
P2	Phosphate	0.236	1.417	0.0038	0.0074	0.6596	0.8090	0.0048
K1	Potash	0.236	1.068	0.0029	0.0038	0.5520	0.6770	0.0043
K2	Potash	0.236	0.833	0.0022	0.0031	0.4247	0.5208	0.0033
	Average					0.502	0.616	

表 3、本文肥料樣品(施用於農地前)的鐳當量濃度、加馬射線係數與其他國家之比較

Table.3 Comparison of  $R_{aeq}$  and  $I_{\gamma}$  Values of fertilizer samples (Before using to farmland) in this article with other countries

Country	Fertilizer Type	$R_{aeq}^*$ (Bq/kg)	$I_{\gamma}$	Literature source
Taiwan(M1-M9)	Compound	390 <sup>*</sup>	1.56	This study
Taiwan(P1-P2)	Phosphate	582 <sup>*</sup>	1.96	This study
Taiwan(K1-K2)	Potash	403 <sup>*</sup>	1.6	This study
Japan	Compound	454	1.63	[16]
Egypt	Compound	613	2.06	[17]
Brazil	Compound	1772	12.3	[18]
Saudi Arabia	Compound	275	Not calculated	[19]
Algeria	Compound	1168	9.6	[20]
Bengal	Phosphate	374	Not calculated	[21]

\*未乘上肥料占農地土壤的比率(Cf)之結果

## 六、參考文獻

- 【1】 The Lund/LBNL Nuclear Data Search Version 2.0, S.Y.F. Chu, L.P. Ekström and R.B. Firestone LBNL, Berkeley, USA, February (1999).
- 【2】 N. N. Jibiri and K. P. Fasae, “Activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in brands of fertilizers used in Nigeria,” *Radiation Protection Dosimetry*, **vol. 148**, no. 1, pp. 132–137(2012).
- 【3】 N. M. Hassan, N. A. Mansour, M. Fayed-Hassan, and E. Sedqy, “Assessment of natural radioactivity in fertilizers and phosphate ores in Egypt,” *Journal of Taibah University for Science*, **vol. 10**, no.2, pp.296–306(2016).
- 【4】 W. Boukhenfouf and A. Boucenna, “The radioactivity measurements in soils and fertilizers using gamma spectrometry technique,” *Journal of Environmental Radioactivity*, **vol. 102**, no. 4, pp. 336–339(2011).
- 【5】 S. Righi, P. Lucialli, and L. Bruzzi, “Health and environmental impacts of a fertilizer plant—Part I:assessment of radioactive pollution,” *Journal of Environmental Radioactivity*, **vol. 82**, no. 2, pp. 167–182(2005).
- 【6】 G. Marovic and J. Sencar, “ $^{226}\text{Ra}$  and possible water contamination due to phosphate fertilizer production,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters*, **vol. 200**, no. 1, pp. 9–18(1995).
- 【7】 N. M. Hassan, M. Hosoda, T. Ishikawa et al., “Radon migration process and its influence factors; review,” *Japanese Journal of Health Physics*, **vol. 44**, no. 2, pp. 218–231(2009).
- 【8】 M. S. Yasir, A. Ab Majid, and R. Yahaya, “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).

- 【9】 天然放射性物質管理辦法，民國 106 年 9 月 15 日修正，行政院原子能委員會。
- 【10】 UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, UNSCEAR, New York, 2008.
- 【11】 109 年臺灣地區肥料產銷量值年報與 109 年臺灣地區農耕土地面積年報，行政院農業委員會農糧署。
- 【12】 NEA-OECD (1979) Nuclear Energy Agency, Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials. Nuclear Energy Agency (NEA), Report by NEA Group of Experts, Organization for Economic Co-Operation and Development, OECD, Paris, France.
- 【13】 UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, UNSCEAR, New York, 2000.
- 【14】 R. Ugolini, E. Caldognetto and F. Trotti,” Use of Fertilizers in Agriculture: Individual Effective Dose Estimate”, *Environments*, vol.7, no. 7, pp. 1–8(2020).
- 【15】 游離輻射防護標準，民國 94 年 12 月 30 日修正，行政院原子能委員會。
- 【16】 N. M. Hassan, Byung-Uck Chang, and Shinji Tokonami,”Comparison of Natural Radioactivity of Commonly Used Fertilizer Materials in Egypt and Japan,” *Journal of Chemistry*, vol. 2017, pp.1–8(2017).
- 【17】 N. M. Hassan, N. A. Mansour, M. Fayez-Hassan, E. Sedqy,

“Assessment of natural radioactivity in fertilizers and phosphate ores in Egypt,” *Journal of Taibah University for Science*, **vol.10**, pp.296–306(2016).

- 【18】** V. A. Becegato, F. J. F. Ferreira, and W. C. P. Machado, “Concentration of radioactive elements (U, Th and K) derived from phosphatic fertilizers in cultivated soils,” *Brazilian Archives of Biology and Technology*, **vol. 51**, no. 6, pp. 1255–1266(2008).
- 【19】** W. R. Alharbi, “Natural radioactivity and dose assessment for brands of chemical and organic fertilizers used in Saudi Arabia,” *Journal of Modern Physics*, **vol. 4**, no. 3, pp. 344–348(2013).
- 【20】** A. Bramki., M. Ramdhane., F. Benrachi,”Natural radioelement concentrations in fertilizers and the soil of the Mila region of Algeria,” *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* ,**vol. 11**, Issue 1,pp. 49-55(2018)
- 【21】** M. N. Alam, M. I. Chowdhury, M. Kamal, S. Ghose, H. Banu, and D. Chakraborty, “Radioactivity in chemical fertilizers used in Bangladesh,” *Applied Radiation and Isotopes*, **vol. 48**, no. 8, pp. 1165–1168(1997).

## 附錄、審查意見回復與修正說明

### 一、 施建樑委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p><u>前版報告參、一(第 8 頁)</u>            1.請說明鐳當量濃度的定義?            2.式(2)應說明來源,以及其中的 1.43 與 0.077 是指什麼?</p>	<p>1.鐳當量是放出加馬輻射的輻射源之放射性活度單位,1 克鐳當量指這種輻射源在離 1 米遠處的照射量與 1 克鐳所產生的一樣。</p> <p>2.感謝委員意見;已補充說明於本修正報告第 4 頁第 6 行,或參考文獻[4]。1.43 與 0.077 分別是樣品中鈷-232 和鉀-40 的活度濃度(Bq/kg)轉換成鐳當量濃度的轉換因子。</p>
2	<p><u>前版報告參、二(第 9 頁)</u>            式(3)應說明來源,以及其中的 370, 259 與 4,810 是指什麼?</p>	<p>感謝委員意見;370、259 與 4810 分別是樣品中鐳-226、鈷-232 和鉀-40 的活度濃度轉換成體外風險指數(<math>H_{ex}</math>)的轉換因子。已補充說明於本修正報告第 5 頁第 2 行,或參考文獻[16]。</p>
3	<p><u>前版報告參、三(第 10 頁)</u>            式(4)應說明來源,以及其中的 185, 259 與 4,810 是指什麼?</p>	<p>1.感謝委員意見;已補充說明於本修正報告第 5 頁,(三)、第 4 行,或參考文獻[16]。</p> <p>2.185、259 與 4810 分別是樣品中鐳-226、鈷-232 和鉀-40 的活度濃度轉換成體內風險指數(<math>H_{in}</math>)的轉換因子。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
4	<p><u>前版報告參、四(第 10 頁)</u> 式(5)應說明來源，以及其中的 0.462, 0.621 與 0.042 是指什麼？</p>	<p>1.感謝委員意見；已補充說明於本修正報告第 5 頁，(四)、第 3 行，或參考文獻[16]、[20]。 2.0.462、0.621 與 0.042 分別是樣品中鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度轉換成在乾燥空氣環境下，離地表面 1 公尺處所造成吸收劑量的轉換因子。</p>
5	<p><u>前版報告參、六(第 11 頁)</u> 式(7)應說明來源，以及其中的 300, 200 與 3000 是指什麼？</p>	<p>1.感謝委員意見；已補充說明於本修正報告第 7 頁，(六)、第 3 行，或參考文獻[16]。 2.300、200 與 3000 分別是樣品中鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度轉換成加馬射線係數的轉換因子。</p>
6	<p><u>前版報告肆(第 13 頁)</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。</p>	<p>感謝委員意見；已補充說明於本修正報告第 8 頁結論，第 2 段。</p>

## 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><b>前版報告摘要</b></p> <p>文章中說明，…計算所得肥料使用之年有效劑量…，建議修正為…計算所得使用肥料造成農民之年有效劑量…。</p> <p>另外此處之有效劑量是否僅包括體外曝露部分？後續相關章節問題中，另行提出。</p>	<p>1.感謝委員意見；已修改說明於本修正報告摘要第2段第4行。此處之有效劑量僅包括體外曝露。</p> <p>2.已於後續章節補述，詳見本修正報告第6頁(五)，第2段第3-6行。</p>
2	<p><b>前版報告目錄</b></p> <p>目錄中結論之頁碼應為13，以下相關章節之頁碼請順延。</p>	<p>感謝委員意見；已修正頁碼順序。</p>
3	<p><b>前版報告貳、二(第7頁)</b></p> <p>公式(1)下方各參數之意義說明，其單位建議移至等號右方，例如…<math>C</math> (counts)=各核種能峰背景的淨計數…，建議修正為…<math>C =</math>各核種能峰背景的淨計數(counts)…。</p> <p>另外，其中能峰建議修正為能峰。</p>	<p>感謝委員意見；已更正於本修正報告第3頁。</p>
4	<p><b>前版報告參、一(第8頁)</b></p> <p>公式(2)下方建議能加入 <math>C_f</math> 之定義說明。</p>	<p>感謝委員意見；已補充說明於本修正報告第4頁，公式(2)下方一行。</p>
5	<p><b>前版報告參、二及三(第9頁)</b></p> <p>二、三節標題之外部危險指數與內部危險指數，建議修正為體外危險指數及體內危險指數，或體外風險指數與體內的風險指數，請參考。</p>	<p>感謝委員意見；已將前版報告「外部危險指數」及「內部危險指數」更正為「體外風險指數」及「體內風險指數」，如本修正報告摘要第2段第1-2行，文後其它處亦同樣更正。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
6	<p><b>前版報告參、二(第9頁)</b> 請於文中補充說明公式(3)之來源依據。L#11，報告中說明相關核種之活度濃度，建議能加註單位，(Bq/Kg?)。</p>	<p>感謝委員意見；公式(3)之來源依據已補充說明於本修正報告第5頁第2行，或參考文獻[16]。核種之活度濃度已加註單位，詳見第5頁第5行。</p>
7	<p><b>前版報告參、三(第10頁)</b> 1.請於文中補充說明公式(4)之來源依據。 2.公式(4)中 Cf 之定義與公式(3)中相同嗎?此式與公式(3)僅有鐳-226 分母之參數值不同，能否補充說明其計算體內劑量之方式與有關呼吸率等參數的採用數值? 3.此公式能否延伸作為體內劑量之評估公式? 即當 Hin 值為 1 時，則體內劑量可視為 1.5 mSv/y，而可以內外插至其他 Hin 數值，以評估其對應體內劑量的數值。若可行，則表二中應包括體內劑量之評估值，則有效劑量可完整包括體內體外兩部分，更臻完善。</p>	<p>感謝委員意見；</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已補充說明於本修正報告第5頁，(三)、第4行，或參考文獻[16]。</li> <li>2. 公式(4)中 Cf 之定義與公式(3)中相同。公式(4)係直接引用參考文獻[16]所述定義。有關「計算體內劑量之方式與有關呼吸率等參數的採用數值」，參考文獻[16]內文並無詳細說明。</li> <li>3. 表 2 所述有效劑量係由式(5)及式(6)所計算而得，計算過程中未採用體內風險指數(H<sub>in</sub>)；本文有效劑量僅包括體外曝露，已於後續章節補述，詳見本修正報告第6頁，(五)，第2段。</li> </ol>
8	<p><b>前版報告參、四(第10頁)</b> 1.請於文中補充說明公式(5)之來源依據。 2.公式(5)是用於評估鐳-226，鈾-232及鉀-40 造成之體外曝露劑量嗎? 3.公式(5)中 Cf 之定義與公式(3)中相同嗎?此式與公式(3)相比較，三個核種的係數比值例並不相同，請問何者估</p>	<p>感謝委員意見；</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已補充說明於本修正報告第5頁，(四)、第3行，或參考文獻[16]、參考文獻[20]。</li> <li>2. 公式(5)是用於評估鐳-226，鈾-232及鉀-40</li> </ol>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	計之體外劑量較為準確亦或是如何選擇?	造成之體外曝露劑量。 3. 公式(5)中 Cf 之定義與公式(3)中相同;公式(5)為空間吸收劑量,公式(3)為體外風險指數。
9	<u>前版報告參、五(第 11 頁)</u> 1. 公式(6)評估者是否為體外劑量? 2. 報告中說...若保守定義施肥農用活動屬於輻射作業...此說法與輻射作業之定義有所出入,建議刪除此句。	1. 公式(6)從公式(5)吸收劑量計算,僅包含體外劑量。 2. 已刪除此句。
10	<u>前版報告參、六(第 12 頁)</u> L#8, 9, ...站農地土壤之比例, ..., 建議修正為...占農地土壤之比例, ...。	感謝委員意見;已修正於本修正報告第 4 頁。
11	<u>綜合意見</u> 1. 報告中評估了外部危險指數與內部危險指數,並列於表二,但並未交代此二值與劑量之相關性與符合性,建議考量是否將列將此二參數之結果,列在另外一張表上,表二只列出最後評估之劑量結果,使能有聚焦的效果。 2. 公式(4)評估者是體內劑量亦或體外劑量,要再去詳細查一下原始公式的意義及使用條件,至少要將相關參數列在公式(4)的下方,例如呼吸率等參數之數值,如此評估之劑量就可與體外劑量合併計算,而使整個報告的輻射劑量結果更完整。	1. 評估國民輻射劑量時,主要採用吸收劑量,外部危險指數(已改為體外風險指數)及內部危險指數(已改為體內風險指數)主要用以直接評估體外曝露風險及體內曝露風險或與國外比較之用。 2. 公式(4)係直接引用參考文獻[16]所述定義。有關「計算體內劑量之方式與有關呼吸率等參數的採用數值」,參考文獻[16]內文並無詳細說明。

### 三、 魯經邦委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p><b>綜合意見</b></p> <p>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，惟個份報告體例（章節及表格編碼）不甚一致，建議加以檢視後予以統一。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>感謝委員意見；相關報告均已修改，會採統一格式辦理。</p>
2	<p><b>綜合意見</b></p> <p>本報告文中有些標註參考文獻號碼與第 14 頁參考文獻清單中對應之文獻編號不符，請核對校正。</p>	<p>感謝委員意見；已修正標註參考文獻號碼與內文對應。</p>
3	<p><b>綜合意見</b></p> <p>有關報告中 external hazard index 及 internal hazard index 的譯名，本報告分別譯為「外部危險指數」及「內部危險指數」，然查這兩個指數分別屬於體外曝露（external exposure）及體內曝露（internal exposure）的危害指標，external 及 internal 在我國輻射防護領域不論法規或學理，只要與曝露有關，都是譯為體外（external）及體內（internal）（形容詞）。故建議分別改以「體外危險指數」及「體內危險指數」稱之。</p>	<p>感謝委員意見；已將前版報告「外部危險指數」及「內部危險指數」更正為「體外風險指數」及「體內風險指數」，如本修正報告摘要第 2 段第 1-2 行，文後其它處亦同樣更正。</p>
4	<p><b>前版報告參、五(第 10-11 頁)</b></p> <p>有關「年有效劑量部分」： 「年有效劑量」在法規及學理上包括一年內因體外曝露接受之有效劑量（實務上採用度量或模式評估人體組織深度 10mm 處之個人等效劑量）及一年內攝入（含吸入及嚥入）放射性物質造成體內曝露接受之約定有效劑量相加之和。建請釐清下列事</p>	<p>感謝委員意見；公式(6)從公式(5)吸收劑量計算，僅包含體外劑量。詳見本修正報告第 6 頁(五)，第 2 段第 3-6 行。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	<p>項並於報告中補充說明：            本報告第 9-10 頁已提及體外及體內的危險指數，惟吸收劑量及年有效劑量（第 10-11 頁）則是將肥料中相關放射性核種濃度依公式（5）換算成距地表 1 公尺之加馬射線造成之吸收劑量，再依公式（6）換算成年有效劑量，請在報告中明確說明本報告所考慮及評估結果（年有效劑量）究竟有沒有涵蓋體內曝露之劑量？</p>	
5	<p><b>前版報告參、五(第 11 頁)</b>            報告提及「…若保守定義施肥農用活動屬於輻射作業，13 件肥料樣品施作於農地後所造成的平均年有效劑量為 0.606 微西弗，遠低於游離防護標準第 12 條「輻射作業造成一般人之年有效劑量不得超過一毫西弗」之標準。[14]」。</p> <p>1.按施肥的活動從法規意義上就不是輻射作業，不宜將其假設為輻射作業而用劑量限度來衡量。依據 ICRP 輻射防護系統的精神，施肥活動屬於既存曝露情境下曝露途徑之變化，是否應採取防護行動或應達成之防護目標，應依據防護最適化原則訂定參考基準及劑量約束來判斷及執行。並不適用劑量限度原則，故不宜用游離防護標準第 12 條作為比較的標竿。</p> <p>2.且若將此施肥活動視為輻射作業，雖然評估的劑量很低，形同可接受一般人個人接受施肥活動造成的年劑量上限為 1 毫西弗，顯然並不保守。且若此為輻射作業，則從事該項作業之輻射工作人員又是何人?這些問題都會形成邏輯上的矛盾且可能誤導大眾。</p> <p>3.建議修正表達方式，此一年有效劑量為 0.606 微西弗，不但遠低於我國及全球典型的自然背景輻射，且低於自然背景的變動範圍，對人體健康的風險微乎其微。(國內認定的一般背景輻射範圍為 0.2 微西弗/時以下，UNSCEAR 認定的全球)</p>	<p>1.2.感謝委員意見；已刪除。</p> <p>3.感謝委員意見；已修正內文敘述詳見本修正報告第 6 頁倒數第 1-3 行。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
6	<p><u>前版報告摘要(2)</u>  <u>前版報告參、一(9)</u>  <u>前版報告參、三(10)</u></p> <p>報告本文左列 3 頁均提及「歐盟委員會指導方針 (2013)」，惟均未標註參考文獻編號。</p> <p>惟查報告後附參考文獻，僅有一項歐盟執委會發行之文件，即編號 12：《COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013, Official Journal of the European Union》。</p> <p>1. 歐洲聯盟擁有自身之法律制度，即一般所謂之歐盟法 (EU Law)。歐盟法可區分為主要歐盟法 (Primary Union Law) 與次級聯盟法 (Secondary Legislation)，亦稱為派生歐盟法。主要歐盟法位居於歐盟法律體系之最高位階，對成員國具有優先適用性及直接適用性，由不同法源組成，包括了歐洲聯盟之基礎條約其附錄、附加於基礎條約的議定書、後續修訂條約、新成員國的加入條約、歐盟法院確認的一般法律原則及歐洲法院的判決。派生歐盟法係指為履行條約任務，由歐盟機關依據歐洲聯盟運作條約規定授權制定公布之法規。依據歐洲聯盟運作條約 (TFEU) 第 228 條之規定，派生法包括規章 (regulation)、準則 (directive，國內學界亦有譯為「指令」者)、決定 (decision)、建議 (recommendation) 及意見 (opinion)。其中準則 (directive) 對於其指涉的每個成員國，針對其所欲達成的目標，具有拘束力，惟由成員國機關自行選擇形式與方法 (A directive shall be binding, as to the result to be achieved, upon each Member State to which it is addressed, but shall leave to the national authorities the choice of form and methods.)。以我國法制比擬，「directive」相當於法規命令。</p> <p>2. COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 只</p>	<p>感謝委員意見；已修正為參考文獻[12]</p> <p>COUNCIL  DIRECTIVE  2013/59/EURATOM of  5 December 2013....，  詳見本修正報告第 13  頁。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	<p>是法規編號，，其正式法規全名為  《 COUNCIL DIRECTIVE  2013/59/EURATOM of 5 December 2013  laying down basic safety standards for  protection against the dangers arising from  exposure to ionising radiation, and repealing  Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom,  96/29/Euratom, 97/43/Euratom and  2003/122/Euratom》。觀其內容就是歐洲聯  盟的游離輻射防護安全標準。一般在國內  以中文表達時譯為歐洲聯盟（或簡稱歐盟）  游離輻射防護安全標準即可，以原文列參  考文獻時則全文表達。</p> <p>3.建請修正。</p> <p>有關歐盟法制參考文獻</p> <p>－王玉葉，《歐洲聯盟法研究》，元照出版公  司，2015。</p> <p>－王泰銓，《歐洲聯盟條約及歐洲共同體條  約譯文及重要參考文件》，瀚蘆圖書出版有  限公司，2006。</p> <p>－陳麗娟，《里斯本條約後歐洲聯盟新面  貌》，五南圖書出版公司，2018。</p> <p>－Klaus-Dieter Borchardt, 《The ABC of EU  law 》， European Commission,  Directorate-General for Communication,  2016.</p> <p>－王泰銓，〈關於歐盟法規範的名稱翻  譯、條款引用與適用上的問題〉，  <a href="https://www.eusa-taiwan.org.tw/europe_detail/65.htm">https://www.eusa-taiwan.org.tw/europe_</a>  <a href="https://www.eusa-taiwan.org.tw/europe_detail/65.htm">detail/65.htm</a></p>	

#### 四、 李境和委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p><b>前版報告壹、(4)</b></p> <p>1. 「肥料主要由氮、磷和鉀組成，」建議修正為「台灣常使用的肥料主要分為複合肥料、磷肥料與鉀肥料，複合肥料是含有氮、磷與鉀三種元素的肥料。」才能張顯樣品的名稱。</p> <p>2. 「氮由氮產生，磷由磷酸鹽礦石獲得，鉀則來自氫氧化鉀或全氧化鉀，」建議修正為「氮肥中的氮由氮產生，磷肥中的磷由磷酸鹽礦石獲得，鉀肥中的鉀則來自氫氧化鉀或全氧化鉀。」</p> <p>3. 什麼是「全氧化鉀」？請列出其化學符號。</p>	<p>1. 感謝委員意見；已修正，詳見第 1 頁第 2-3 行。</p> <p>2. 感謝委員意見；已修正，詳見第 1 頁第 3-5 行。</p> <p>3. 感謝委員意見；已加註，詳見第 1 頁第 5 行(化學式：K<sub>2</sub>O)。</p>
2	<p><b>前版報告壹、(4)</b></p> <p>1. 「氮與放射性的產生較無關，磷酸鹽礦石則含有鈾系、釷系及其衰變系列，鉀元素含有少量的鉀-40，天然存在的鉀-40 占整體鉀元素的比率約為 0.0117%」</p> <p>意見： 「氮」與「鉀元素」，不像「磷酸鹽礦石」是原始材料，不一致。</p> <p>建議修正： 「磷酸鹽礦石含有鈾系、釷系及其衰變系列核種，氮則不含鈾系與釷系天然核種，氫氧化鉀或全氧化鉀含有少量的鉀-40，天然存在的鉀-40 占整體鉀元素的比率約為 0.0117%。」</p> <p>2. 「天然存在的鉀-40 占整體鉀元素的比率約為 0.0117%」</p> <p>意見： 請列出參考資料。</p>	<p>1. 感謝委員意見；已修正，詳見第 1 頁第 7-8 行。</p> <p>2. 感謝委員意見；「天然存在的鉀-40 占整體鉀元素的比率約為 0.0117%」的資料來源為 The Lund/LBNL Nuclear Data Search Version 2.0, S.Y.F. Chu, L.P. Ekström and R.B. Firestone LBNL, Berkeley, USA, February 1999.，補列為參考文獻 [1]。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
3	<p><u>前版報告壹、(5)</u>            「農業活動中的肥料使用，會有…核種發出的體外曝露…」            意見：            體外曝露不是「發出」的。            建議修正：            「農業活動中的肥料使用，肥料中有…核種，會造成使用者的體外曝露…」。</p>	<p>感謝委員意見；已修正，詳見本修正報告第1頁第3段第2行。</p>
4	<p><u>前版報告貳、二(6)</u>            「…從鉈-208的583.19 keV能峰估計鈾-232的活度濃度(Ai)…」，            意見：            為何「鈾-232的活度濃度(Ai)」特別標示「Ai」？不一致。建議修正：            「…從鉈-208的583.19 keV能峰估計鈾-232的活度濃度…」。</p>	<p>感謝委員意見；已修正，詳見本修正報告第3頁第5行。</p>
5	<p><u>前版報告貳、二(7)</u>            「C(Counts)=各核種能峰背景的淨計數；」            意見：            1. 為何要加「背景」兩字？            2. 是不是鐳-226、鈾-232及鉀-40的相對應計測核種之能峰？如果是，建議如下：            建議修正：            「Cj(counts)=計測核種j能峰的淨計數，計測核種j分別有鈾-214(CBi)、鉈-208(CTI)及鉀-40(CK)；」</p>	<p>感謝委員意見；</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已刪除。</li> <li>2. 已修正，詳見本修正報告第3頁第11-12行。</li> </ol>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
6	<p><u>前版報告貳、二(7)</u>            「<math>p(\%)</math>=加馬射線衰變的絕對發射機率；」            意見：            1. 加馬射線衰變的絕對發射機率，語意不清？            2. 是不是計測核種 <math>j</math> 能峰的加馬射線發射機率？如果是，建議如下：            建議修正：            「<math>p_{ji}(\%)</math>=計測核種 <math>j</math> 能峰對核種 <math>i</math> 的加馬射線發射機率；」</p>	<p>感謝委員意見；已修正，詳見本修正報告第 3 頁第 13 行。</p>
7	<p><u>前版報告貳、二(7)</u>            如果前兩項建議正確，式(1)建議修正：  <math display="block">A_i = \frac{C_j}{p_{ji} \cdot w \cdot t \cdot e}。</math></p>	<p>感謝委員意見；已修正，詳見本修正報告第 3 頁，式(1)。</p>
8	<p><u>前版報告參、一(8)</u>            鐳當量濃度，若指的是「肥料」所含天然放射性核種的鐳當量濃度，則式(2)就不應該乘以土壤的稀釋因子 <math>C_f</math>。與國外的肥料相比，仍然不高，如表三。</p>	<p>感謝委員意見；表 2 彙整施用肥料至農地後，所造成的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量及加馬射線係數，需乘以土壤的稀釋因子 <math>C_f</math>；各國肥料的組成成分不同，表 3 為國內施用於農地前的肥料樣品與其他國家肥料樣品的鐳當量濃度、加馬射線係數之比較，未乘以土壤的稀釋因子 <math>C_f</math>。</p>
9	<p><u>前版報告參、二</u>  <u>前版報告參、三</u>            外部危險指數、內部危險指數，應該是施放「肥料」作業所造成，則式(3)與式(4)就不應該乘以土壤的稀釋因子 <math>C_f</math>。</p>	<p>感謝委員意見；本文評估現有農地中已存在肥料中的天然放射性物質所相當的鐳當量濃度、及加馬射線係數，與所造成的體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
		劑量，所以表 2 皆需乘以土壤的稀釋因子 Cf；若有足夠研究經費，本中心未來將會評估堆放在倉庫中肥料的天然放射性物質所相當的鐳當量濃度、及加馬射線係數，與所造成的體外風險指數、體內風險指數、空間吸收劑量、年有效劑量。
10	<p><u>前版報告參、四(10)</u> 吸收劑量(D) 意見：會被誤以為農民的吸收劑量，這應該是離農地 1 公尺高的空間吸收劑量率。 建議修正：空間吸收劑量率(D(nGy/h))</p>	感謝委員意見；已修正，詳見本修正報告摘要第 10 行，文後其他處同樣隨之修正。
11	<p><u>前版報告參、五(11)</u> 「…C 是吸收劑量與有效劑量的轉換因子(<math>0.7 \times 10^{-6}</math> Sv/Gy)」 意見： 1. 單位 Sv/Gy 不正確， 2. 應是空間吸收劑量。 建議修正： 「…C 是空間吸收劑量與有效劑量的轉換因子(<math>0.7 \times 10^{-6}</math> mSv/<math>\mu</math> Gy)」。</p>	感謝委員意見；已修正為「C 是空間吸收劑量與有效劑量的轉換因子 ( $0.7 \times 10^{-6}$ mSv/nGy)。」，詳見本修正報告第 6 頁，(五)第 3 段第 2-3 行。
12	<p><u>前版報告表二(17)</u> 表二最後一欄的 <math>I_{\gamma}</math> 不可能那麼低？可能多乘了 Cf。請修正。</p>	感謝委員意見；本文評估現有農地中已存在肥料中的天然放射性物質所相當的鐳當量濃度、及加馬射線係數，與所造成的體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量，所以表 2 皆需乘以土壤的稀釋因子 Cf。

## 五、 陳清江委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<u>前版報告 p.5 第 17 行</u> 樣品有密封一個月讓氦子核平衡嗎?	感謝委員意見；已增加敘述，詳見本修正報告第 2 頁，二、量測設備與方法、(一)樣品製備，第 2 段第 6 行。
2	<u>前版報告 p.6 第 12 行</u> 在「平衡狀態下」鈾-238	感謝委員意見；已增加敘述，詳見本修正報告第 3 頁第 1 行。
3	<u>前版報告 p.7 第 1 行</u> 公式分子 C 應該是: ...能峰的淨記數。	感謝委員意見；已修正，詳見本修正報告第 3 頁 $C_j =$ 計測核種 $j$ 能峰的淨計數。
4	<u>前版報告 p.8 第 19 行</u> 用 10 倍太過高估了，不同作物的施肥種類與數量不同，可否找到調查資料呢?  <a href="https://www.taifer.com.tw/ClassroomList/C003220.aspx?appname=ClassroomList">https://www.taifer.com.tw/ClassroomList/C003220.aspx?appname=ClassroomList</a> 肥料教室 <a href="https://www.tydares.gov.tw/upload/tydares/files/web_structure/4434/soill.pdf">https://www.tydares.gov.tw/upload/tydares/files/web_structure/4434/soill.pdf</a> 作物施肥手冊	感謝委員意見；在評估國民輻射劑量的過程中，偶而會有部分數據無法準確獲得的情況，屬於研究的侷限性，受限於有限的研究時間及無相關文獻的情形下，僅能清楚說明在那些假設條件下所計算出的評估結果，以本文為例，採較保守估算，原始 $C_f$ 為 0.236%，假設施用 10 倍濃度肥料進行估算，計算所得使用肥料造成農民之年有效劑量平均值為 0.616 微西弗 ( $\mu\text{Sv/y}$ )，在此假設條件下年有效劑量仍然不高。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
5	<p><u>前版報告 p.10 第 1 行</u>            若考慮氫的體內曝露，為何還要計入鈷-232 及鉀-40？</p>	<p>感謝委員意見；公式(4)係引用參考文獻[16]所述定義，常用於評估因地表天然放射性核種及後續曝露途徑造成的體內曝露風險，例如評估農作物、井水等，已補充說明於本修正報告第 5 頁，(三)第 2-3 行。</p>
6	<p><u>前版報告 p.16、表一</u>            K1.K2.應為鉀肥，為何還有那麼高的 Ra-226？</p>	<p>感謝委員意見；市售鉀肥成分並非只有含有鉀元素，只是相對比例較高，例如台肥寶粒鉀肥料組成成分為全氮：5%、全磷酐：5%、全氧化鉀：25%、有機質：5%。</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	<p><u>綜合意見</u> 文中所提參考文獻之編號請再校對。</p>	<p>感謝委員意見；已修正參考文獻之編號。</p>
2	<p><u>前版報告參、一第 8 頁</u> 文中提及「…乾燥土壤的平均密度為 1325 公斤／立方公尺…」，建議依「環境輻射監測規範」於評估地表土壤密度係採 1600 公斤／立方公尺或說明引用來源。</p>	<p>感謝委員意見；原 1325 為詢問農委會後，承辦人的口頭回復；現修正為 1300，文獻來源為 The GLOBE Program(Global Learning and Observations to Benefit the Environment) 之 Bulk Density Protocol 文件中敘述：「Typical bulk density values for soils average around 1.3 g/mL (g/cm<sup>3</sup>) for soils composed mostly of mineral particles.」，詳見本修正報告第 4 頁第 3 段行第 3 行。</p>
3	<p><u>前版報告貳、第 9 頁</u> <u>前版報告貳、第 10 頁</u> <u>前版報告肆、第 13 頁</u> 文中提及「…歐盟委員會 2013 年的指導方針中提出…」，請再確認，經查所列文獻[12]之歐盟委員會文件，未提及外/內部危險指數。</p>	<p>感謝委員意見；已修正為「均未超過經濟合作暨發展組織(OECD)1979 年報告中提出鐳當量濃度的建議值(370 Bq/kg)」，詳見本修正報告第 4 頁及參考文獻[12]。</p>
4	<p><u>前版報告貳、五</u> 公式(6) C(mSv/nGy)與文中提及「… C 是吸收劑量與有效劑量的轉換因子 (0.7 × 10<sup>-6</sup> Sv/Gy) …」，請再確認。</p>	<p>感謝委員意見；已修正為 0.7 × 10<sup>-6</sup> mSv/nGy，詳見本修正報告第 6 頁第 3 段第 3 行。</p>

5	<p><b>綜合意見</b></p> <p>本報告似僅考慮施作肥料於農地後對農民所造成之體外劑量，請補充說明不考慮其他曝露途徑之理由，如肥料堆置期間造成之體外曝露、肥料經農作物吸收後被食用而造成體內曝露。</p>	<p>感謝委員意見；本文評估現有農地中已存在肥料中的天然放射性物質所相當的鐳當量濃度、及加馬射線係數，與所造成的體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量(評估對象為全體國民)，未來若有足夠研究經費，本中心將會評估堆放在倉庫中肥料的天然放射性物質所相當的鐳當量濃度、及加馬射線係數，與所造成的體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量(評估對象為特定族群)。</p>
6	<p><b>前版報告肆、第 13 頁</b></p> <p>文中提及「…歐盟委員會指導方針所提出的建議值。這些建議值分別為 370 Bq/kg、小於 1、小於 1、59 nGy/h、480 <math>\mu</math> Sv/y、小於 1…」，請再確認。</p>	<p>感謝委員意見；已修正為「…計算結果均遠低於歐盟委員會指導方針或 UNSCEAR 2000 年報告所提出建議值…」，詳見本修正報告結論第 6 行。</p>