



財團法人 中華民國輻射防護協會

輻射防護簡訊

第 157 期

出刊日期 109 年 6 月 15 日

本期內容

CONTENT

ICRP 在 103 號報告發行後續發展-關於職業曝露評估的指引

1

作者將 ICRP103 號報告之後續發行的文獻，有關輻射防護上的生物效應，職業曝露輻射防護管制評估的輻射量與作業量，以及氫氣防護等主題有關陸續發行補充與指引等相關文獻共 12 份報告做彙整並摘述其內容要點。

淺談中子輻射與屏蔽分析

5

中子輻射的輻射防護是輻射作業有關人員感到興趣但卻是比較陌生的，不論是中子輻射源或是如何進行屏蔽的設計，因此作者以清晰的架構安排，從常見的中子輻射源談起，並對中子與物質作用的基本重要性質介紹說明，最後以蒙地卡羅方法建立屏蔽參數與驗證。

訓練班課程

10

公告本會各項訓練班開課時間

輻協新聞廣場

11

各項證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞 全球輻防新聞

ICRP-142 號報告簡介產業製程中天然放射性物質(NORM)的輻射防護指引

17

ICRP-142 號報告於 2019 年 7 月出版，主要目的是為放射學提供涉及天然放射性物質 (Naturally Occurring Radioactive Material, NORM) 產業的輻射防護指引，本文介紹報告內容的摘要與重點，並對報告內容做簡要說明。

目前國際機構及我國對 NORM 的管制介紹

24

國際趨勢對 NORM 的管理日益關注，近期媒體披露有些消費性產品，例如負離子面膜、涼被及床墊等含有天然放射性物質的成分，因此本篇作者針對天然放射性物質的管理收集一些資料進行彙整介紹，也對管制實務提供看法。

ICRP 在 103 號報告發行後續發展

-職業曝露防護與評估的指引

作者 魯經邦

台電公司退休保健物理從業人員

概述

ICRP 在 103 號報告發行後，持續對計算輻射防護量與作業量所需的數據資料，以及對輻射生物效應的看法，陸續發行補充或指引等相關文獻。例如：

1. 輻射防護上的生物效應-組織效應的劑量低限值(ICRP 118)·幹細胞生物學與輻射致癌作用的關係(ICRP 131)等。
2. 放射性核種的劑量係數-核種基本資料數據彙整(ICRP 107)以及用於體內曝露的動力學模式(ICRP 133)·供後續的體外、體內曝露有關報告使用·對職業曝露的放射性核種攝入進一步提出指引(ICRP 137)。

3. 氫氣的防護-總結修正目前為止氫與其子核種致肺癌的研究結果·根據此結果提供氫氣曝露的輻射防護指引(ICRP 115, 126)。

103 號報告後續文獻簡介

茲將 ICRP103 號報告之後續發行的文獻目前為止，關於輻射防護上的生物效應·輻射防護的輻防量與作業量，以及氫氣防護主題有關的報告依編號順序整理臚列其要如下。(註：文稿之摘述是參考各該報告的摘要改寫而成)

NO.107 Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. (供劑量學計算用之核衰變數據) (Ann. ICRP 38 (3). 2008)

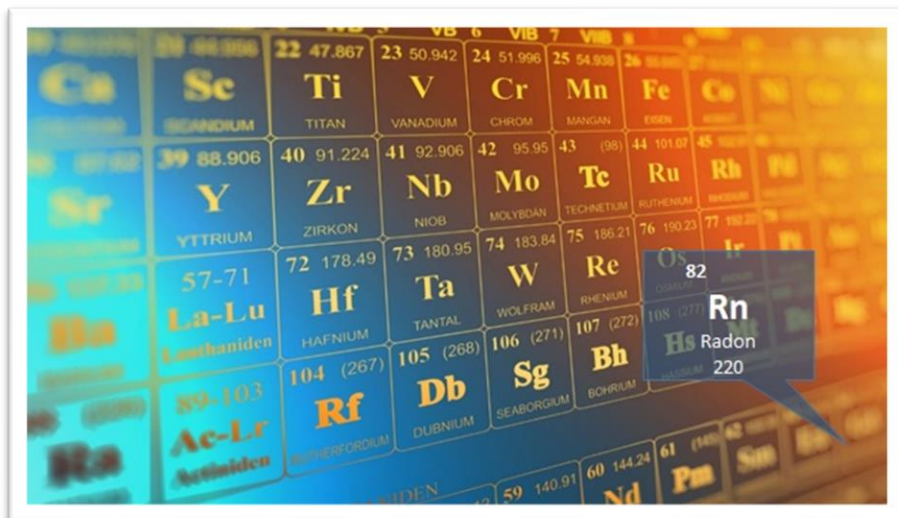
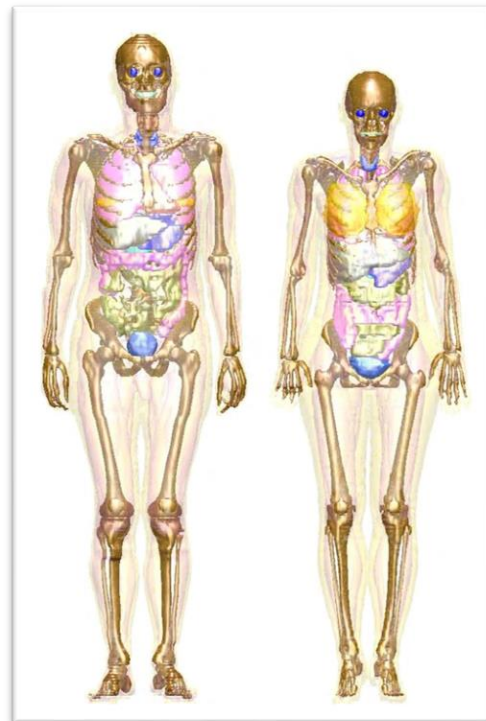


圖 1_氫元素(圖片引用 Pixaby by Elchinator)



ICRP 在本報告中提供了一個電子資料庫，內含為計算防護量和作業量所需的特定放射性核種之物理數據。這個資料庫取代了 ICRP 38 號報告 (1983) 的數據。本報告的內容將用於推導未來報告將提供的攝入或曝露於放射性核種的劑量係數。資料庫包含以及 97 個元素的 1252 個放射性核種有關半化期·衰變鏈及核轉變中發射各種輻射的產率和能量的資訊。本報告也附了一個電腦程式的 CD (下載網址：http://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB_38_3)，從其中也可獲得被釋放的輻射、貝他粒子、中子能譜的完整表格。這個資料庫也可讓用戶在自行設計相關軟體時取用所需的數據。本資料庫所建立的 Windows 應用程式可顯示指定放射性核種的摘要資訊，以及資料庫中包含核種的一般特性。此外，該程式還提供了一種方法，用戶可以通過該方法輸出指定放射性核種發射的輻射，以用於後續計算。

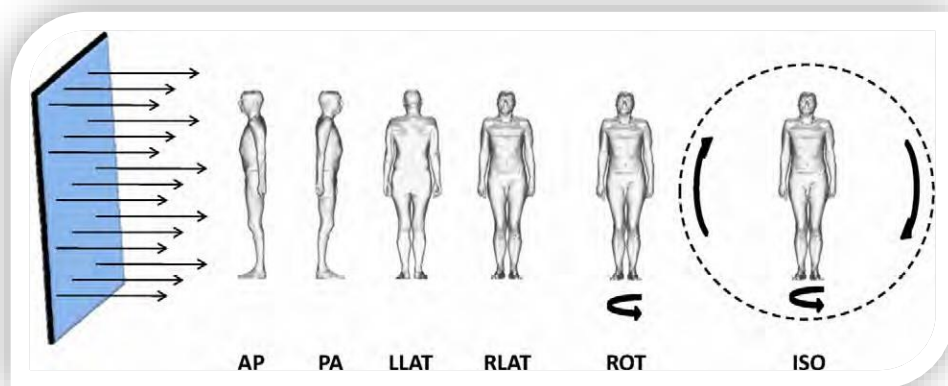


圖 2_理想幾何形狀的示意圖。AP·前後位；PA·後前位；LLAT·左側 RLAT·右側；ROT·旋轉；ISO·均向性(引用 ICRP116)

NO.115 Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. (氡氣及其子核曝露對肺部的致癌風險及關於氡的聲明) (Ann. ICRP 40(1), 2010)

本報告總結了近期關於氡及其子核致肺癌的流行病學研究結果，修正了 ICRP 65 號報告的結論與建議，重點如下：

1. 含氡氣住宅居民和礦工的流行病學研究提供了一致的肺癌風險估計值，分別在年平均濃度約為 200 Bq/立方米及累積職業水平約為 50 WLM 時觀察到肺癌與氡及其子核之曝露具有統計學意義的關聯。

2. 應將終身額外的絕對風險修正為 $5E-4/WLM$ (ICRP 65 號報告為 $2.8E-4/WLM$)。

3. ICRP 65 號出版報告建議，應根據流行病學數據，使用劑量換算法來計算氡及其子核的劑量；本報告則認為應以與 ICRP 防護系統內其他放射性核種相同的方式處理氡及其子核；換言之，應使用 ICRP 生物動力學和劑量學模型計算氡及其子核的劑量。ICRP 將針對

家庭和職業曝露的不同參考條件，提供具有特定平衡因數和氣溶膠特性的氡及其子核的每單位曝露的劑量係數。

NO.116 Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. (體外輻射曝露輻射防護量間的轉換係數) (Ann. ICRP 40(2-5), 2010)

本報告依據 ICRP 2007 的建議針對各種體外曝露提供了各類輻射防護上關心的輻射 (光子、電子與正電子、中子、質子、派介子、繃子及氦核) 主要能量範圍的通量與有效劑量和器官吸收劑量的轉換係數，這些係數是使用代表參考成年男性和參考成年女性的 ICRP / ICRU 官方模型及 EGSnrc · FLUKA · GEANT4 · MCNPX 和 PHITS 之類的輻射在人體中傳輸的蒙地卡羅程式推導出來的。本報告也使用關於眼睛的特定模型，進行了蒙地卡羅模擬，確定入射的光子，電子和中子對眼睛水晶體的吸收劑量間的關係；電子和 α 粒子對皮膚等價劑量轉換係數由蒙地卡羅計算得出。另也提供了光子

和中子的劑量回應函數，定義為每粒子通量的吸收劑量。

NO.118 ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. (ICRP 關於組織反應的聲明/正常組織與器官的早發與遲延效應-輻射防護上的組織反應之低限劑量) (Ann. ICRP 41(1/2).)

本報告分為兩部分：

1. ICRP 於 2011 年 4 月發布的「關於組織反應的聲明」，要點如下：

(1) 修正游離輻射引發白內障的低限劑量之建議值為 0.5 Gy ；

(2) 修正眼球水晶體等價劑量之職業劑量限度為 5 年週期平均每年 20 mSv ；每年最高 50 mSv.

(3) 雖存在不確定性，醫生必須瞭解，輻射造成心、腦血管疾病的劑量低限可能低至 0.5 Gy，接受某些複雜的介入性程式診療的病人很可能使心、腦血管系統受到此一劑量，因此，在這些情況下應特別強調最適化。

2. 關於輻射防護上的組織反應低限劑量之報告：

本報告是論述組織反應 (確定效應) 與輻射劑量關係 (低限劑量) 的專題報告，為 ICRP 41 號報告 (1984) 的更新版。本報告詳述了人體各個器官、組織或系統對游離輻射的早發反應和遲延反應及其劑量低限值，是對游離輻射的確定性效應 (組織反應) 二十多年的發展變化的更新、整合和總結。全文從組織器官的輻射反應、正常組織反應的修飾及組織器官與輻射敏感性相關的劑量低限值部分詳述了游離

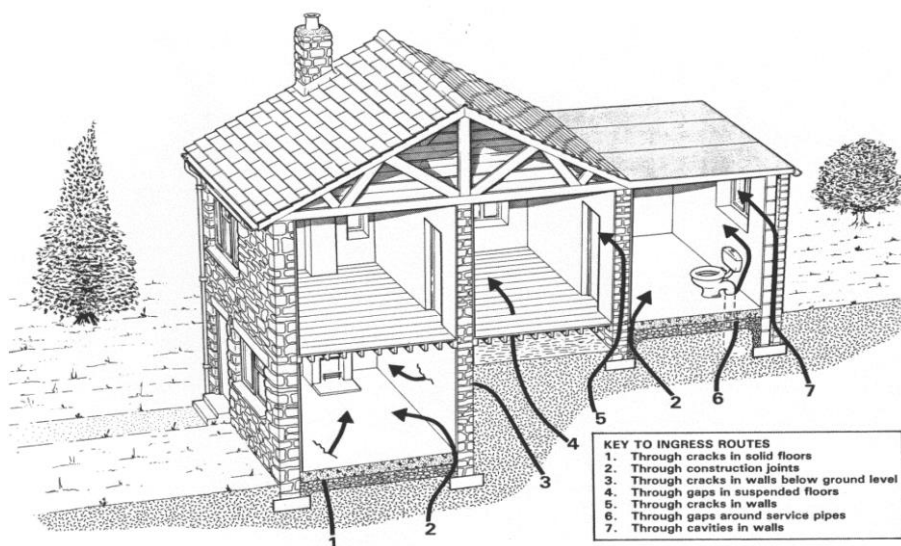


圖 3_室內氡暴露路徑(ICRP 126)

輻射生物作用機制的最新進展，同時提供了各器官組織低限劑量更新的依據和理由。特別對游離輻射導致心血管疾病和眼球水晶體白內障的劑量效應關係做了系統評估。本報告也探討了慢性放射病的劑量與效應的關係；也討論降低和提高輻射組織反應的藥物，包括抗氧化劑、自由基清除劑、抗炎藥、細胞因數、抗代謝物、烷化劑和抗血管生成藥等，便於輻射防護和輻射增敏的參考和應用。

NO.119 Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. (ICRP 60 劑量係數彙編) (Ann. ICRP 41(Suppl.))

本報告彙編了 68、72 號報告有關工作人員和公眾攝入的放射性核種的劑量係數以及 74 號報告用於職業輻射防護的體外輻射的轉換係數。它可視為是依據 60 號報告建議的主要輻射防護指引關於劑量係數之綜合參考資料。本報告中列出的係數將在適當時機被依據 103 號報告導出的值所取代。

NO.126 Radiological Protection against Radon Exposure. (氡暴露的輻射防護) ICRP Publication 126. (Ann. ICRP 43(3), 2014)

本報告依據 ICRP 對輻射防護系統的最新建議提供了針對氡暴露的輻射防護指引，主要內容有氡暴露的特性、針對氡暴露的輻射防護系統（氡的暴露情境與暴露分類、防護策略的正當性、防護最適化與劑量限度）及防護策略的執行等。

NO.130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. (放射性核種

之職業性攝入-第一部分) (Ann. ICRP 44(2), 2015)

ICRP 將依據 2007 年的建議，發行一系列的報告以取代 ICRP 30 號及 68 號報告，並修正職業性攝入和吸入放射性核種的劑量係數。本報告為第一部分主要包括生物動力學與劑量學方法及模型、體內職業暴露的監測與評估、個別人員監測與工作場所的監測方法、監測計畫、追溯劑量評估及驗證等。

NO.131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection. (幹細胞生物學與輻射致癌作用的關係) (Ann. ICRP 44(3/4), 2015)

限制工作人員及公眾成員輻射暴露背後主要的原因在於輻射誘發癌症的風險，輻射致癌被認為是機率事件，發生於單個轉化的靶細胞，這些靶細胞通常被認為是幹細胞 (stem cells) 或有些靶細胞具有組織特异性特徵，它們位於調節其增殖和分化微環境之“生態位 (niche)”中。有關幹細胞及其調控的知識可能有助於加強對不同組是個別組織中的一些子祖細胞 (daughter progenitor cells)，這組織和器官系統的外推風險估計，也可

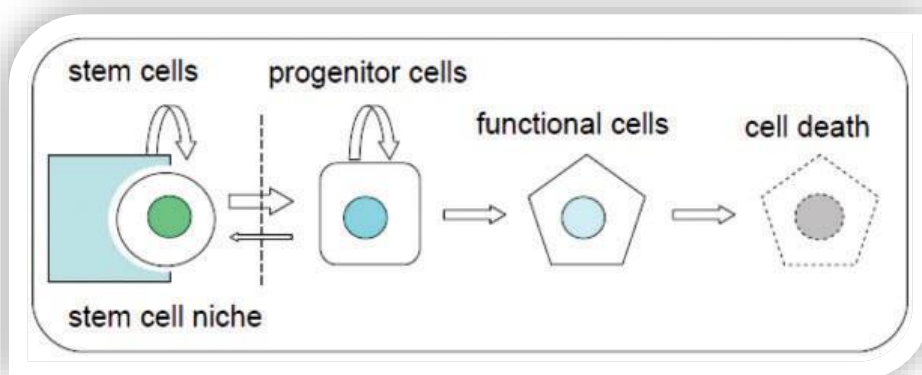


圖 4_幹細胞分裂的過程(ICRP 131)

能有助於理解不同曝露情節下的風險預測。這是 ICRP 出版本報告的目的，主要內容包括輻射致癌模型與幹細胞生物學、組織幹細胞的一般特徵、組織幹細胞在輻射致癌中的作用等，附錄 A 至 G 則是依據放射防護目的的重要性以及可獲得之輻射生物學知識針對造血系統、乳腺、甲狀腺、消化道、肺、皮膚和骨骼等組織之幹細胞的詳細討論。

NO.133 The ICRP Computational Framework for Internal Dose Assessment for Reference Adults: Specific Absorbed Fractions. (ICRP 關於參考成人體內劑量評估的計算架構：特定的吸收分數) (ICRP Publication 133. Ann. ICRP 45(2), 2016)

評估放射性核種體內曝露吸入和攝入的劑量係數需要使用生物動力學模型、放射性核種衰變圖解 (radionuclide decay scheme data) 的數據及模擬假體中的比吸收分率。 (specific absorbed fraction, SAF)。本報告提供了體內發射光子、電子、 α 粒子及自發裂變衰減產生之放射性核種伴隨的裂變能譜中子的 SAF 參考值及其理論基礎。主要內容包括 ICRP 體內劑量資料庫說明、全身器官的計算方法、骨骼組織的計算方法、呼吸道的計算方法、消化道的計算方法、電子與光子及 α 粒子的極限 SAF 值等。

NO.134 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. (放射性核種之職業性攝入-第二部分) (Ann. ICRP 45(3/4), 2016)

本報告為 ICRP 依據 2007 年建議發行放射性核種之職業性攝入

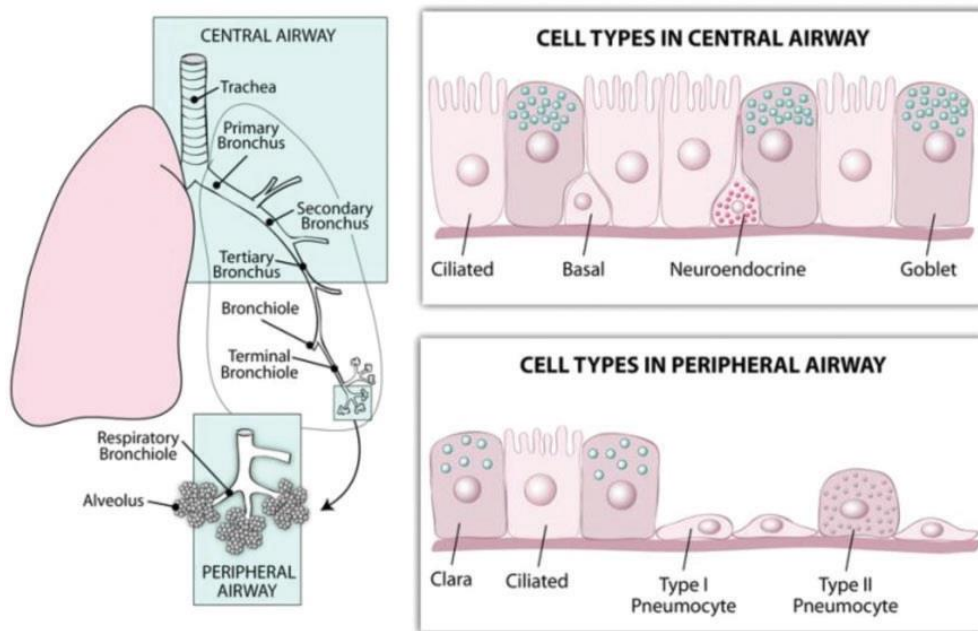


圖 5_肺的呼吸模式，支氣管（中央氣道）連接到氣體交換單元的細支氣管（周圍呼吸道）在肺中的主要轉變情形。（引用 ICRP 131）

(Occupational Intakes of Radionuclides, OIR) 系列報告的第二本，主要內容包括用於 OIR 系列報告的方法與數據呈現說明及氫(H)、碳(C)、磷(P)、硫(S)、鈣(Ca)、鐵(Fe)、鈷(Co)、鋅(Zn)、銻(Sr)、釷(Y)、鋯(Zr)、銱(Nb)、鉬(Mo)及鎝(Tc)等元素的相關數據，另外也提供了一些數據與資料的電子檔。

NO.137 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. (放射性核種之職業性攝入-第三部分) (Ann. ICRP 46(3/4), 2017)

本報告為 ICRP 依據 2007 年建議發行放射性核種之職業性攝入 (Occupational Intakes of Radionuclides, OIR) 系列報告的第三本，主要內容包括用於 OIR 系列報告的方法與數據呈現說明及鈷(Ru)、銻(Sb)、碲(Te)、碘(I)、銫(Cs)、鋇(Ba)、銱(Ir)、鉛(Pb)、鉍(Bi)、釷(Po)、

釷(Rn)、鐳(Ra)、釷(Th)和鈾(U)等元素的相關數據，另外也提供了一些數據與資料的電子檔。

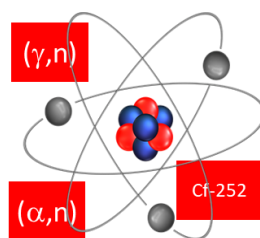
NO.141 Occupational intakes of radionuclides: Part 4. (放射性核種之職業性攝入-第四部分) (Ann. ICRP 48(2/3), 2019)

本報告為 ICRP 依據 2007 年建議發行放射性核種之職業性攝入 (Occupational Intakes of Radionuclides, OIR) 系列報告的第四本，主要內容包括用於 OIR 系列報告的方法與數據呈現說明、鐳系及錒系的生物動力學模型概述及鐳(La)、銻(Ce)、鐳(Pr)、釷(Nd)、鉍(Pm)、釷(Sm)、銻(Eu)、釷(Gd)、鉍(Tb)、鐳(Dy)、釷(Ho)、鉍(Er)、銻(Tm)、鐳(Yb)、鐳(Lu)、錒(Ac)、鐳(Pa)、銻(Np)、銻(Pu)、鉍(Am)、銻(Cm)、銻(Bk)、銻(Cf)、銻(Es)、and 鐳(Fm) 等元素的相關數據，另外也提供了一些數據與資料的電子檔。

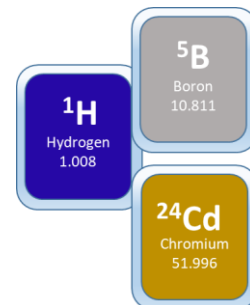
淺談中子輻射與屏蔽分析

作者 賴柏倫

財團法人中華民國輻射防護協會



Neutron radiation



前言

大家或許對輻射都不陌生，舉凡胸腔 X 光檢查到核能發電，都與輻射息息相關，但大家知道常見的輻射源有哪些嗎？如醫院胸腔 X 光檢查，就是光子 (Photon) 輻射的應用，而核能發電使用的輻射是中子 (Neutron)。雖然兩者都是不帶電的輻射，但是“性格”卻南轅北轍，今天要跟大家介紹的是中子輻射。

中子輻射的來源

中子的來源有很多種方式，有來自浩瀚的宇宙，亦可能來自你我腳下的大地。一般來說，中子的來源可分為自發性分裂 (Spontaneous Fission)、誘發性分裂 (Induced Fission)、延遲中子發射體 (Delayed Neutron Emission)、用過核燃料束 (Spent Fuel)、散裂射源 (Spallation Sources)、輕離子加速器 (Light Ion Accelerators)、 (α, n) 反應與 (γ, n) 反應，以下逐一介紹這些中子來源。自發性分裂的中子射源不少，最為大家所知道的中子射源是鈾-252 (Californium, ^{252}Cf)， ^{252}Cf 衰變釋出中子的機率約為 3%，中子產率平均為 3.7 顆，平均能量為 2.3 MeV。誘發性分裂最常見的反應是中子與鈾-

^{235}U 發生連鎖反應 (Chain Reaction)，中子產率平均為 2.5 顆，平均能量為 2 MeV。延遲中子發射體，這個大家可能比較陌生，就是原子核的能階處於激發態。此時，原子核會透過發射多餘的中子，讓自己的能階回到穩定的基態。常見的元素是 ^{87}Br ，它會衰變成氬-87 (Krypton, ^{87}Kr) 與一個 β -粒子，而 ^{87}Kr 再衰變成 ^{86}Kr 與一個中子。另一個常見的元素是鋰-11 (Lithium, ^{11}Li)，它會衰變成鈹-11 (Beryllium, ^{11}Be) 與一個 β -粒子，而 ^{11}Be 再衰變成 ^9Be 與 2 個中子。關於用過核燃料束中子射源，現在，要跟大家解釋的是為什麼用過的核燃料會產生中子。燃料束內的核燃料在反應器內燃燒他的生命為大家發電時，生成的產物之一是 ^{242}Cm 、 ^{244}Cm ，鈾 (Curium, Cm) 是一種具有放射性的超鈾元素，在週期表中被歸類為錒系元素，它是以研究放射性的科學家瑪麗·居禮 (Marie Curie) 和其丈夫皮埃爾·居禮命名。在每噸用過的核燃料中，可以秤出大約 20 克的鈾。 ^{242}Cm 與 ^{244}Cm 會自發性分裂產生中子，另外，它們亦會衰變釋出 α 粒子，這些 α 粒子容易與空氣中的氧氣發生 (α, n) 反應，因此中子就這麼產生了。散裂射源，就字面上的意思來解釋就

是將粒子加速至高能量後轟擊耗乏鈾、鎊、鈾，這麼一撞之下，撞出來的粒子就不會只有中子，亦會伴隨一些散裂的核碎片。有興趣的話，可以上網 Google 美國橡樹嶺國家實驗室，看看散裂中子源長甚麼樣子。輕離子加速器中子射源，這種產生中子射源的方式在業界中也是相當常見地，以水泥廠為例，透過加速氬氣管或氬氣管內的氬離子，讓被加速的氬離子與氬氣或氬氣發生反應產生中子，將產生的中子作為射源照射樣品，以進行品質管制。最後，基於 (α, n) 反應或 (γ, n) 反應產生之中子相當多，這裡各舉兩個比較常見的例子。常見的 (α, n) 反應中子射源有 $^{239/238}\text{PuBe}$ 與 $^{241}\text{AmBe}$ ，而常見的 (γ, n) 反應中子射源有 $^{88}\text{YBe}/\text{D}_2\text{O}$ 與 $^{124}\text{SbBe}$ 。其中，商用的 (α, n) 射源與 (γ, n) 射源的設計相當不一樣，理由應該很容易猜的到，就是 α 粒子與 γ 粒子的屬性差異造就的。一般而言，如果上網 Google 商用 (α, n) 射源，你會在商用射源的剖面圖中，看到 α 射源材料與靶材料會是粉末狀的並且兩者是均勻混和在一起；而在商用的 (γ, n) 射源中，你則會看到截然不同的設計，在 γ 射源材料的外層包覆靶材料。

中子輻射與物質作用

在輻射科學相關文章中，讀者可能常常讀到各式各樣的中子名稱，例如熱中子與快中子或是低能中子與高能中子等等，這可能會讓人困惑。明明是中子卻有這麼多暱稱，與光子相比可說是伯仲之間。以光子而言，讀者可能會讀到康普吞光子 (Compton Photons)、成對光子 (Pair Production Photons) 或是互毀光子 (Annihilation Photons) 等，這些光子的暱稱是依據光子與物質發生的作用定義的。對中子來說，它不僅有依據發生作用的暱稱，例如蒸發中子 (Evaporated Neutrons)、串級中子 (Cascade Neutrons) 等，亦有依據能量定義的暱稱，以硼中子捕獲治療採用的中子能量為例，能量小於 0.5 eV 時，稱熱中子 (Thermal Neutrons)、能量介於 0.5 eV 至 10 keV，稱為超熱中子 (Epithermal neutrons)、能量超過 10 keV 則稱為快中子 (Fast neutrons) 等。前者比較少見，大多會出現在高能物理這類的科普文章中，後者是比較常見的，有興趣的讀者可以 Google 清華大學硼中子捕獲治療一探究竟。既然說到中子與物質發生作用，就來講講中子會與物質發生那些作用吧！一般來說，中子與物質發生作用可以簡單的二分法劃分成散射與吸收兩種，其中，散射作用又分為彈性 (Elastic) 散射與非彈性 (Inelastic) 散射。那吸收作用又有哪些呢？一般來說，吸收作用大部分會依據產物的性質來劃分，若產物是質子 (p)、氘離子 (d) 或是 α 粒子等帶有電荷的粒子，科學家會分別以 (n,p)、(n,d)、(n, α) 方式表示；若產物是不帶電的粒子，例如加馬射線 (γ)，則會以 (n, γ) 表示，而這個反應又稱為

中子捕獲反應，是生活中相當常見的一種中子與物質發生作用的應用；若產物是核碎片，則會以 (n,f) 表示。那有沒有反應之產物是混合的呢？當然有，一般我們會以 (n,xn) 反應表示，其中，括弧中的 x 可以填入 γ 、p、 α 等。提到中子與物質發生作用，就不得不提到一個名詞，邦 (barn)，單位是 10^{-24} cm^2 ，這個單位是用來表示中子與物質發生作用的機率，又可以稱為截面 (Cross Section)。在科學上，科學家會以中子的能量以及截面的大小，判斷中子與物質發生作用的機率高不高。反應不同，作用機率亦不同，而在相同反應之下，作用機率的大小會與中子的能量有關，例如，以中子捕獲反應來說，其作用機率與中子的能量成反比。

哪些東西適合用來屏蔽中子輻射呢？以下將分別介紹。中子經過富含氫元素的材質時，中子的行為會發生甚麼事？沒錯，就是中子的速度變慢了，速度慢下來的中子會發生甚麼事呢？會發生捕獲反應，因為捕獲反應的截面與中子的速度成反比，中子的速度下降了，捕獲反應的機率就大幅提升了。因此，只要有正確的觀念就不用畏懼輻射。對中子的屏蔽還可以考慮添加硼，添加硼的好處是可以減少中子捕獲反應產生的加馬射線，理由是速度變慢的中子與硼 (3840 barns) 發生捕獲反應的機率比氫 (0.33 barns) 高太多了，若中子跟氫發生捕獲反應，要面對的是 2.2 MeV 的加馬射線，若換成硼，要面對就會是 α 粒子，是不是相對輕鬆許多呢！雖然添加了硼減少了加馬射線的強度，但是最終還是要面對它的金屬。接續我們介紹如何偵測中

子。常見的偵檢器有充氣式偵檢器、半導體偵檢器、閃爍式偵檢器、熱發光或是光激發光偵檢器、蝕刻或氣泡偵檢器等。若要偵測中子，我們只能偵測中子與物質發生作用之產物，產物再與物質發生游離作用，透過收集游離作用產生電流或脈衝訊號得到產物的量進而回推中子的數量。量測輻射場中的中子，最重要的就是你對輻射場的射源瞭解多少，這包含輻射場的能量範圍、方向性與強度，掌握這些資訊，並準備一台匹配之偵檢器，中子量測，你也可以做得到。有興趣的讀者可以上網 Google 一下 IAEA-TRS-403 號報告，這份報告收集來自世界各地加速器與核設施的相關資料，彙整超過 200 種中子能譜，以及各式各樣的中子偵檢器及其能量響應函數，報告亦介紹數種常見的中子校正射源能譜，是一本相當受用的報告書。

中子輻射屏蔽分析

最後，介紹 $^{241}\text{AmBe}$ 射源之屏蔽參數建立與驗證，筆者採用蒙地卡羅方法針對一個常見的中子射源， $^{241}\text{AmBe}$ 中子射源，與常見的中子屏蔽材料，如 PMMA 以及隨手可得的 水，產生兩個數字，7.43 公分、6.94 公分，這兩個數字分別是 水與聚乙烯對 $^{241}\text{AmBe}$ 中子射源的半值層。 $^{241}\text{AmBe}$ 射源是輻射在和平用途中常見的中子射源。聚乙烯或石蠟等富含氫原子的材料常用於屏蔽中子射源以達輻射安全並符合規範。另外，由於水有易取得與不差的中子屏蔽效果，因此，在某些情況下，水亦經常被使用於屏蔽中子輻射。在輻射安全的劑量評估中，使用者藉由查詢文獻得到射源項對應的屏蔽材料的屏蔽參數，如射源項、衰減

長度或半值層等數值，搭配簡單公式得以快速且保守地估計屏蔽外的劑量。前述的參數若以半值層為例，當屏蔽材料為石蠟且射源項為 $^{241}\text{AmBe}$ 中子射源時，Stuart Hunt 建議的數值為 6.6 公分。然而，在現有的文獻中，並沒有確切的數據顯示射源項為 $^{241}\text{AmBe}$ 中子射源時，水的屏蔽參數或半值層。因此，在實務上，使用者以近似的方式進行劑量的估算並搭配量測以確保在從事與輻射相關活動達到輻射安全。

有鑒於此，筆者採用蒙地卡羅法針對常用中子射源- $^{241}\text{AmBe}$ 進行屏蔽參數的製造，並且與準確的蒙地卡羅法一起進行簡單案例的劑量評估，採用蒙地卡羅法做為比較的標準，驗證屏蔽

參數的可靠性，以作為後續劑量評估的基礎。其中，MCNP6 為此次採用的蒙地卡羅法之輻射遷移程式，版本為 1.0，而屏蔽參數搭配的簡單公式如式(1)所示，在式(1)中， H_1 為屏蔽外的劑量，單位為 Sv， H_0 為射源項，單位為 $\text{Sv m}^2 \text{p}^{-1}$ ， r 為距離，單位為 m， λ 為衰減長度，單位為 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ， d 為屏蔽厚度，單位為 cm。構成式(1)的物理意義是非常直接的，包含距離平方反比的衰減以及輻射在物質中的指數衰減。

$$H_1 = \frac{H_0}{r^2} \cdot e^{-\lambda/d} \quad (1)$$

關於屏蔽參數的製造，筆者採用以連續能量截面資料庫為主的 MCNP6 蒙地卡羅程式作為輻射遷移計算的工具，模擬一系列射束/屏蔽組合之劑量

衰減曲線，採用式(1)與指數函數據此擬合以生成射源項與衰減長度之屏蔽參數，並透過單位轉換得到各個屏蔽材料對應的半值層。在輻射遷移的深穿透計算中，主射束為 IAEA 403 號報告提供的中子能譜以及能量為 4.8 MeV 的單能光子，其方向為均向性 (Isotropic)。在幾何與材料的設定中，筆者採用半徑為 9000 cm 的對稱空心球殼 (Spherical) 作為屏蔽的幾何，考慮的屏蔽材料包含石蠟 (Paraffin, $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$)、聚乙炔 (Polyethylene, C_2H_4) 與水 (Water, H_2O)，其密度分別是 0.93、0.93 與 1.00 g/cm^3 ，屏蔽的厚度均為 200 cm。在物理設定方面，除了追蹤主射束之外，也追蹤主射束與屏蔽作用產生的二次粒子，如光子和電子，其

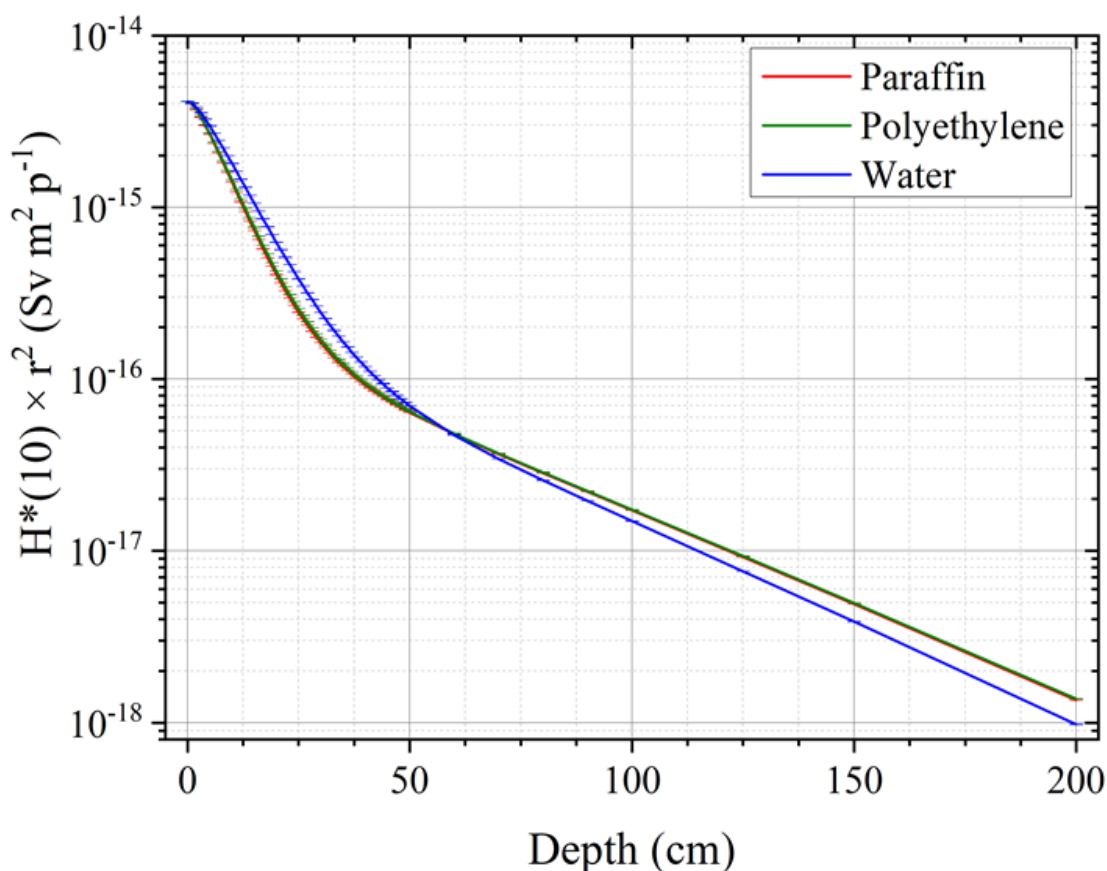


圖 1. $^{241}\text{AmBe}$ 射源在石蠟、聚乙炔與水等三種屏蔽的劑量衰減曲線

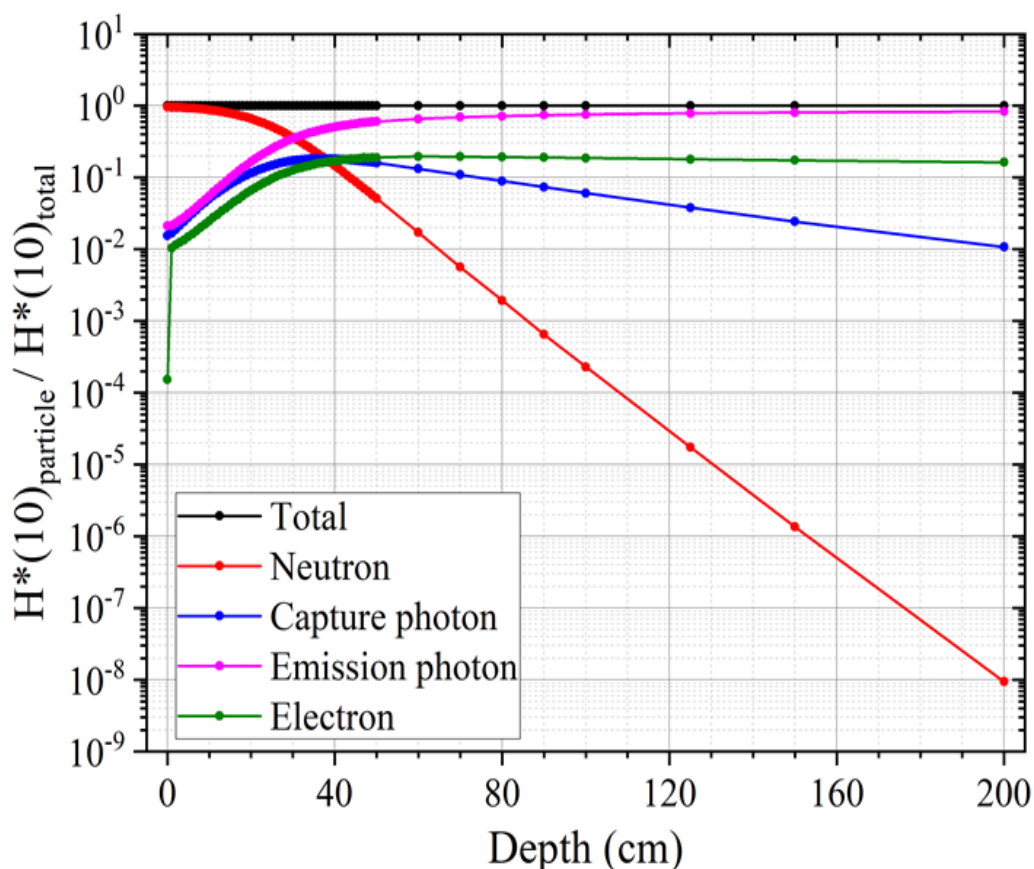


圖 2. $^{241}\text{AmBe}$ 射源在石蠟屏蔽的劑量貢獻

中，在粒子與物質作用採用 ENDF/B-VI 連續能量截面資料庫。光子和電子的遷移截止能量 (Cutoff Energy) 為 100 keV。在偵檢器方面，採用邊界穿越的 F2 偵檢器紀錄中子、光子與電子的通量 (Fluence)。此次工作採用周圍等效劑量 (Ambient Dose Equivalent, $H^*(10)$) 作為劑量指標，單位為西弗 (Sv)，在後續的計算中若無特別說明，則以周圍等效劑量作為劑量指標。在程式的劑量計算方面，透過 ICRP-74 報告提供的通量對周圍等效劑量轉換因子，將計算得到的通量轉換為周圍等效劑量。關於程式的其他設定，採用 MCNP 裡一種以幾何分裂與俄羅斯輪盤為基礎稱為 IMP 的變異數降低技術。在 IMP 的設定中，將 200 公分厚的屏蔽分成 59 層，其中 0-50 公分以

每 1 公分劃分一層，50-100 公分以 10 公分劃分一層，100-150 公分以 25 公分劃分一層，150-200 公分以 50 公分劃分一層；其分區重要性從 1 開始並以 2 或 4 的倍數逐層遞增，它的最大值為 1048576；在非屏蔽部分，如空心球的分區重要性為 1，在屏蔽最外層以及在它之外的區域的分區重要性為最大值。

經由 MCNP6 模擬一系列射束/屏蔽組合之後，圖 1 顯示 $^{241}\text{AmBe}$ 射源項在三種屏蔽材料的深度劑量分布或稱劑量衰減曲線。其中，劑量率單位的 p^{-1} 為 particle 表示主射束粒子，在後續的計算中若無特別說明，則均為此定義。在圖 1 中，發現劑量的衰減有兩段明顯不同的衰減斜率，第一段是厚度介於 0 到 50 公分之間，第二段是厚

度超過 50 公分，推斷造成斜率改變的原因可能是劑量貢獻的來源發生變化。為了確認這個推斷，筆者對深度劑量分布進行劑量貢獻的分析，結果顯示於圖 2。在圖 2 中，當球殼厚度為 0 公分時，劑量貢獻以中子輻射為主，中子輻射的劑量貢獻隨球殼厚度增加呈現指數衰減，當球殼厚度超過 50 公分之後，此時的劑量貢獻則以光子輻射為主。

基於圖 1 與圖 2 的結果，筆者將擬合範圍分為兩段，第一段為 5-50 公分，第二段為 50-200 公分，這也暗示第一段指數擬合的結果是闡述中子輻射的衰減，同理，第二段則是闡述光子輻射。表 1 顯示 $^{241}\text{AmBe}$ 射源在石蠟、聚乙烯與水等三種屏蔽的屏蔽參數。為了判斷屏蔽參數的合理性，此次工

表 1. $^{241}\text{AmBe}$ 射源在水、石蠟與聚乙烯等三種屏蔽的屏蔽參數

屏蔽材料	拟合範圍	H_0		λ		Statistics
		$\text{Sv m}^2 \text{p}^{-1}$	%	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	%	Adj. R-Square
水	5 to 50	4.41×10^{-15}	4.4%	10.71	3.4%	0.992
	50 to 200	2.44×10^{-16}	6.8%	36.09	3.1%	0.996
石蠟	5 to 50	3.69×10^{-15}	8.2%	10.01	6.5%	0.970
	50 to 200	2.19×10^{-16}	2.0%	39.33	1.0%	1.000
聚乙烯	5 to 50	3.67×10^{-15}	7.8%	10.27	6.2%	0.973
	50 to 200	2.19×10^{-16}	2.3%	39.54	1.2%	0.999

作以 Stuart Hunt 建議 $^{241}\text{AmBe}$ 中子射源在石蠟的半值層作為比較的標準，其值為 6.6 cm。筆者將經由第一段指數拟合得到的屏蔽參數轉換成屏蔽材料的半值層，結果顯示，水的半值層為 7.43 cm，而石蠟與聚乙烯的半值層幾乎相同，其值為 6.94 cm，與 Stuart Hunt 建議的是一致，兩者的比值為 1.05 (6.94/6.6)，表示生成屏蔽參數的過程是無顯著錯誤地，這也加深筆者對這些屏蔽參數的信心。為了驗證屏蔽參數的可靠性，筆者設計一個簡單的屏蔽案例，採用表 1 搭配式(1)與準確的蒙地卡羅法一起進行該案例的屏蔽外劑量評估，並以蒙地卡羅法做為比較的標準。其中，程式設定與屏蔽參數生成的設定一致。簡單屏蔽案例的幾何描述如圖 3 所示， $^{241}\text{AmBe}$ 射源置於矩形屏蔽的中心，射源與屏蔽的距離為 100 cm，屏蔽厚度(d)為 45 cm，屏蔽材料分別有石蠟、聚乙烯與水， $^{241}\text{AmBe}$ 射源與偵

檢器的距離(r)為 145 cm。其中，淺藍色為空氣，灰色為屏蔽、深藍色為計算位置。

在 MCNP6 的計算中，石蠟、聚乙烯與水的劑量分別是 1.44、1.46、1.61，單位為 $10^{-5} \text{pSv p}^{-1}$ 。

其中，在一個標準差(1 σ)下，3 種屏蔽材料的劑量值相對誤差約 10%。表 1 搭配式(1)的評估結果與 MCNP6 是一致的，且兩者的比值介於 1.2-2.1，符合筆者預期，表示參數是可靠並能提供快速且保守的估算結果。

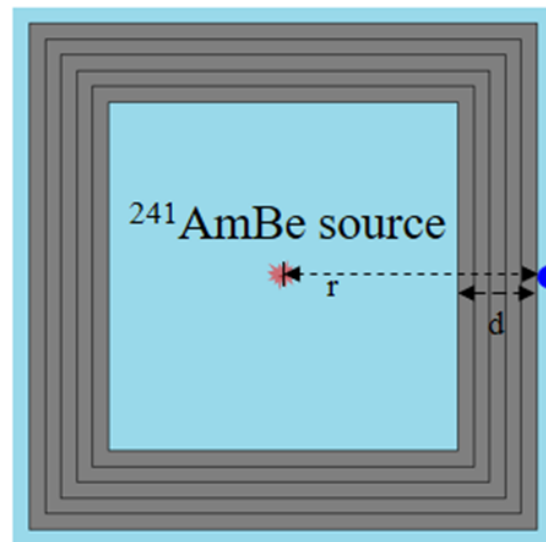


圖 3. 簡單案例之幾何描述



訓練班課程(109 年度)

放射性物質或可發生游離
輻射設備操作人員研習班

A 組 36 小時-許可類

A3 新竹 帝國經貿大樓

7 月 15 日~7 月 22 日

A4 高雄 文化大學推廣部

8 月 11 日~8 月 18 日

B 組 18 小時-登記類

B11 新竹 帝國經貿大樓

6 月 17 日~6 月 19 日

B12 台北 建國大樓

7 月 7 日~7 月 9 日

B13 台中 文化大學推廣部

7 月 21 日~7 月 23 日

B14 高雄 文化大學推廣部

7 月 28 日~7 月 30 日

B15 台北 建國大樓

8 月 18 日~8 月 20 日

B16 新竹 帝國經貿大樓

8 月 25 日~8 月 27 日

B17 台中 文化大學推廣部

9 月 8 日~9 月 10 日

B18 高雄 文化大學推廣部

9 月 15 日~9 月 17 日

輻射防護專業人員訓練班：
輻防員(108 小時) / 輻防師
(144 小時)

員 37 期

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

7 月 1 日~3 日

7 月 6 日~7 日

第二階段

7 月 8 日~10 日

7 月 13 日~14 日

第三階段

7 月 27 日~31 日

第四階段

8 月 3 日~8 月 6 日

進階 23

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

8 月 12 日~8 月 14 日

第二階段

8 月 17 日~8 月 19 日

輻射防護繼續教育訓練班
(3/6 小時)

台中 文化大學推廣部

7 月 16 日(上午&下午)

台北 建國大樓

8 月 4 日(上午&下午)

新竹 輻協訓練教室

8 月 11 日(上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

10 月 7 日(上午&下午)

台中 文化大學推廣部

10 月 27 日(上午&下午)

台北 建國大樓

11 月 10 日(上午&下午)

新竹 輻協訓練教室

11 月 17 日(上午&下午)

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班

鋼 3 新竹 帝國經貿大樓

9 月 23~9 月 24 日

鋼 4 高雄 文化大學推廣部

10 月 6~10 月 7 日

上課地點

台北

建國大樓：台北市館前路
28 號

新竹

帝國經貿大樓：新竹市光復
路二段 295 號 20 樓

台中

文化大學推廣部：台中市西
屯區台灣大道三段 658 號

高雄

國立科學工藝博物館-南館：
高雄市三民區九如一路
797 號

文化大學推廣部高雄教育
中心：高雄市前金區中正
四路 215 號 3 樓

課程安排問題，請聯絡本會，電話 (03) 572-2224
分機 313 李貞君 (繼續教育)；
314 林珽汶 (專業人員)；
315 邱靜宜 (鋼鐵建材、放射物質與游離輻射設備)
傳真 (03) 572-2521315



輻防新聞廣場

最新證照考試日期與榜單

- ➔ 行政院原子能委員會公布「109 年第 1 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗及格人員名單」。 [訊息連結](#)

「109 年第 1 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗及格人員名單」已公布於本會網站，請點選下方(附檔下載)即可下載瀏覽。

附檔下載

- 附檔下載(1):[109 年第 1 次輻射防護專業測驗及格人員名單 \(PDF 檔案\)](#)
- 附檔下載(2):[109 年第 1 次操作人員輻射安全證書測驗及格人員名單 \(PDF 檔案\)](#)

(發布日期 109 年 6 月 8 日)

國內新聞

- ➔ 行政院原子能委員會發布有關 109 年 4 月 17 日媒體報導美國國務院草擬年度武器管控報告，懷疑中國在羅布泊進行核試爆之回應說明。 [訊息連結](#)

有關 109 年 4 月 17 日媒體報導美國國務院草擬年度武器管控報告，懷疑中國在羅布泊進行低當量核試爆，可能違反「全面禁止核試驗條約」，原能會基於輻射安全主管機關職責，就境外核試爆輻射擴散部分，提出相關說明：

一、針對各國是否違反 1996 年於聯合國簽署通過之「全面禁止核試驗條約」，聯合國全面禁止核試驗條約組織 (CTBTO · Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization)，已在全球各地設置約 337 個監測站，透過地震震波監控、水中聲波偵測與環境微量輻射塵分析，以綜判得知世界各國是否有違反條約進行核試爆。有關美國國務院草擬年度武器管控報告，懷疑中國進行核試爆，目前 CTBTO 尚未有相關訊息發布，原能會將對此一情事後續發展，密切注意國際間監測結果與相關回應說明，進行資訊蒐集與了解。

二、為因應境外核試爆或核子事故所造成輻射塵擴散危害，原能會已建立完善監控機制與應變作為：原能會核安監管中心全年無休監控 57 處即時環境輻射監測站數據變化與蒐集國際輻安資訊，原能會所屬輻射偵測中心、核能研究所，均不斷精進研發各種輻射檢測技術、開發境外輻射塵擴散評估程式、建立空中輻射偵測技術、建置輻射偵測備援實驗室，以提升整體應變量能，一旦境內外核爆或核子事故輻射塵擴散外釋發生，均可即時掌握資訊與做好快速因應準備，也會將即時發布輻射監控結果，讓民眾掌握相關最新訊息，為國人的輻安把關。

(發布日期 109 年 4 月 18 日)

- 自由時報報導「殷鑑！車諾比核災 34 周年 環團：堅持非核家園」。(發布日期 109 年 4 月 26 日) 訊息連結。[訊息連結](#)

今天是車諾比核災滿 34 周年，環團接力發表省思，強調堅持「非核家園」，除呼籲政府落實發展再生能源、加強現有核電廠安全管制、制定處理核廢料相關法令外，也提醒社會明年將有「重啟核四」公投案，必須加強對民眾的環境教育。車諾比核災發生於 1986 年 4 月 26 日，前蘇聯的車諾比核電廠在今烏克蘭靠近白俄羅斯交界，第四號反應爐進行既定維修安檢作業時發生爆炸，輻射大規模外洩，造成 50 多人死亡，後續死亡人數因各研究不同，從數千至數十萬的估計都有。

全國廢核行動平台也引用相關數據呈現影響嚴重性，電廠周邊的 2600 平方公里因為不適合人居住，被劃為「強制隔離區」，超過 35 萬人被強制撤離。專家認為，車諾比要完全復原至少需要 2 萬 4000 年的時間；過去的 34 年來，各種善後行動還在持續中。

台灣環境保護聯盟表示，台灣的核能一、二、三廠共 6 部機組運轉迄今約 40 年，能安全運轉、如期除役，已是最大的期盼及與需電者妥協之策。各核電廠在運轉中的核輻射是否隨空浮微粒、廢水排入自然界？令人甚為擔心。

而且，日本福島核災迄今已 9 年了，在已爆裂反應爐內之高輻燃料棒碎片，仍無法清理；最近，日本產經省正在公聽社會各界意見，可能預定於明年把 1.19 百萬立方米的輻射廢水排入大海，顯見人類是完全無法應付核輻射災害。

台灣環境聯盟認為，由車諾比核災事件、福島第一核電廠的慘痛教訓、經驗，以及二戰時廣島、長崎的核彈傷亡，能認知到核武、核能電廠、核輻射的危害既深、且長遠、巨大，但台灣社會仍有一幫人聲言、提倡發展核能，認為核能是更經濟的、核能是安全的、輻射是安全的，真讓人不解、困惑。

台灣環境保護聯盟也建議政府，積極推動非核家園教育，提升民眾對再生能源、輻射防護、永續發展之認知；積極推動再生能源發展，加速能源轉型工作；加強核電廠安全管制措施；加強食品、民生用品、建材、醫療行為之輻射安全管理；爭取簽署「禁止核武器條約」；進行各空間更慎密的環境輻射強度及特性之量（監）測；制定或修定核廢料處理相關法令，妥適處理和處置核廢料。

全國廢核行動平台也疾呼，如果人類能從歷史中獲得任何一點教訓，那就是認識到科技有其侷限，核電的風險以及核廢料處理，至今無解。對抗氣候變遷是我們這一代迫切的任務，但昂貴、緩慢與危險的核電絕對不是選項。現在就可以選擇更好、更便宜與更快的方式達成低碳減煤，致力於能源效率的提升與再生能源發展，打造永續與安全的未來。(發布日期 109 年 4 月 26 日)

- 健康醫療網報導「放射治療殺死腫瘤？ 3 種治療法一次解讀」。(發布日期 109 年 5 月 12 日) 訊息連結。[訊息連結](#)

隨著腫瘤醫學的日新月異，追求癒後良好生活品質的治療方式紛紛順勢而生，治療設備也有多種選擇。放射線治療俗稱「電療」，是指使用產生放射性的儀器（如直線加速器）或利用本身具有放射性的物質來治療病人，運用較高能量的放射線來破壞癌細胞，抑制癌細胞的生長與分裂，達到治療的效果，或者減輕腫瘤壓迫所導致的疼痛，及受腫瘤侵犯導致的出血問題。

屬局部性治療 身體並不會殘留輻射

中山醫學大學附設醫院放射腫瘤科主治醫師李岳駿指出，放射線治療屬於局部性治療，只有照射到的地方才會產生副作用。接受放射線治療時，如胸部 X 光檢查一樣是看不到、聽不到、也感覺不到的，其治療的療效與反應，是每日的治療累積而產生；放射線治療必須等到幾乎所有的劑量都給了之後，才能期望達到預期的效果。而治療期間，不需擔心與他人接觸，因為身體不會殘留輻射。

放射線治療分 3 種 依個別狀況選擇適合方式

放射線治療的常見方式有三種：體外遠隔放射線治療、體內近接放射線治療與術中放射線治療。

一、體外遠隔放射線治療

治療之前，針對治療部位進行相關的影像檢查及癌症病情分析，製作個人化的固定身體模具或面具。藉由 3D 電腦斷層模擬攝影定位，取得腫瘤相對位置，治療一般約需要 30 分至 1 小時不等；每日固定時間治療及治療中每週定期門診，評估病情的變化、治療的反應及預防副作用的發生。

二、體內近接放射線治療

將高能量的放射線射源放入離腫瘤最近的地方，在短時間內給予高劑量的放射線來摧毀腫瘤，且降低放射線傷害到正常組織，常治療的癌症包括子宮頸癌、子宮內膜癌、肺癌、鼻咽癌及食道癌等；治療一般約需要 30 分至 2 小時不等。

三、術中放射線治療

常用於早期乳癌治療，經醫師評估若復發風險較低，可考慮只照射原先腫瘤生長的周邊位置(部分乳房照射)。乳癌手術中放射治療為部分乳房照射的一種選項。優點為：

- 1.一次性的治療，且於手術過程中同時完成，可以減少病患舟車勞頓。
- 2.皮膚相關副作用較少。
- 3.減少對非乳房組織的不必要照射劑量。

然而，適合選擇術中放射線治療的族群則為大於等於 45 歲的乳腺癌病患、腫瘤小於等於 3 公分、雌激素受體(ER)陽性者為佳。術中的冰凍切片必須沒有淋巴結轉移的證據，其他不符合上述條件者，若仍強烈希望接受手術中放射治療，可於術前與放射腫瘤專科醫師詳細討論後決定。。(發布日期 109 年 5 月 12 日)

HiNet 生活誌報導「「不要傷害台日情誼」 團體反對福島核污水排入海」。(發布日期 109 年 5 月 13 日)

[訊息連結](#)

多個團體今天到日本台灣交流協會門口表達訴求，表示日本政府計畫將輻射污水排入太平洋，而日本經濟產業省公告 5 月 15 日前開放各方提供意見，今年夏天要做出決定，因此民間團體發起連署提出共同聲明，今天到交流協會提交意見書，也會同步將意見書以電子郵件寄給日本經產省，呼籲日本政府不要讓鄰近國家再次面臨輻射威脅。

綠色公民行動聯盟秘書長崔愷欣說，福島核電廠事故到今年已滿 9 年，當年造成的輻射外洩，引發鄰近多國對輻射危害的擔憂，而日本政府現在卻計畫將輻射污水排入太平洋，將導致東亞各國再次面臨輻射威脅，這件事不只台灣的團體反對，全球有兩千多個團體反對，因此大家今天到交流協會前表達沉痛的呼籲。

台灣蠻野心足生態協會專職律師蔡雅濛說，日本應該要負起保護海洋的責任，現在要不負責任地把廢水排進海洋，這不但沒有盡到保護海洋的努力，還侵犯鄰近國家的權益，台灣大部分民眾都對日本友好，呼籲日本政府不要做出傷害兩國情感的事情。

地球公民基金會副執行長蔡中岳說，不只台灣的團體關心這個議題，連福島當地的漁民也大力反對，因為這會影響他們的生命安全，如果我們的人民過去用公投表達反對可能有輻射的日本食品進口台灣，「那我們怎麼能接受有輻射的污水流到台灣附近？」他說團體對日本來說是國外團體，無法干預日本的決策，但作為鄰居，他呼籲日本政府停止這個行為。

團體要給日本經產省的意見書中提到，1990 年代為了防止輻射物質汙染海洋，國際通過「倫敦公約」禁止核廢料傾倒到海中，這已經是國際共識，然而日本政府現在打算將 119 萬立方公尺具有輻射物質的汙水排到太平洋，不僅違背國際公約的理念，更將再次造成核汙染的跨境擴散，讓鄰近國家的環境生態、人民健康處於輻射汙染的威脅中。

團體聲明，把核汙水排到海裡絕對是最糟糕的選擇，不僅對日本無益，希望經產省種是來自台灣的聲音，不要因為成本考量，用短視近利的粗暴手法擅自排放輻射廢水。（發布日期 109 年 5 月 13 日）

自由時報報導「517 談核電除役與核廢難題」。（發布日期 109 年 5 月 17 日）[訊息連結](#)

五月十七日，是台灣最後一座運轉中「核三廠二號機」申請延役的最後時限，代表的是核三廠正式確定要除役關廠，這只是落實非核家園政策的基本一步，但台灣仍然必須承擔核電代價，核電除役的漫漫長路與核廢料未解難題，未來將是台灣社會必須共同面對的巨大挑戰。

核電除役的複雜性與困難度不亞於核電廠運轉，除役過程預計花上二十五年之久，期間必須處理停機作業、興建室內乾貯設施、拆除反應爐及汽機組件、拆除剩餘建物、廠址復原等，最終需要長期偵測。過程中最為重要的便是輻射的風險管理。因廠區內設備與工作區域多有輻射殘留，在解體過程若施工不當或有工安意外，可能使輻射排放到環境，讓核電廠附近居民及第一線工作人員暴露在輻射中。

核三廠是台灣唯一一座位於南部和國家公園內的核電廠，坐擁豐富的自然生態與深厚的人文歷史，如何能安全除役？還給國境之南一片無輻射風險的淨土，是恆春居民最為在意的重點，舉凡核廢料的貯存安全性及管理問題、輻射安全的環境與生態監測是否健全與資訊公開、除役所需的大型機具與廢棄物運輸的交通安全，再到除役工作人員面臨輻射的職業安全，都是未來台電在除役過程須重視的在地心聲，台電應吸取核一二除役環評之經驗，盡速提出完善的除役計畫交付原能會審查，以利除役流程進行。

然而，縱使除役進行順利，核廢料最終無處可去的困境，仍然是個困擾。在核電廠除役過程中，把受輻射污染的設備拆除後，將產生大量的中低放射性廢棄物，而存放在乾式貯存設施中的用過核燃料棒（高放射性廢棄物），其時限也僅能存放四十年，在核廢料最終處置場至今尋覓未果的台灣，持續將這些核廢料存於核電廠區成了不得不的選擇，但這非解決之道，只要核廢料一天不移出去，除役流程就算執行完畢也仍是禁制區，土地無法恢復原狀。

長久以來，台灣鮮少深究使用核電的後端需如何面對解決，許多人更以為只要停用核電，台灣便可免除任何核電危害，絲毫不知除役需耗時至少二十五年，更不知核廢料處置政策停滯不前！在三座核電廠陸續停止運轉後，台灣社會應挹注更多社會資源與關注，落實核電除役的監督，更需傾全國之力共同面對過去四十年來使用核電的歷史共業，一同思辨台灣的核廢料究竟該何去何從。

鉅亨新聞報導「質子治療 抗癌精銳武器」。（發布日期 109 年 5 月 19 日）[訊息連結](#)

癌症自一九八二年躍居國人十大死因之首迄今，已進入第三十八年，由於癌症死亡人數是第二大死因心臟疾病的二倍以上，預料未來相當時間，第一大殺手的地位不易動搖。

人類與癌症的百年戰爭

二〇一八年新增癌症患者超過十萬人，因為癌症死亡者四萬八七八四人，占所有死亡人數的二八·二%，換句話說，當年度死亡的一七萬二八五九人當中，平均每三·五五人就有一個癌症病人。即使衛福部國健署推動癌症篩檢不遺餘力，癌症死亡人數仍舊年年增加。

雙和醫院放射腫瘤科主任蔡若婷醫師說，癌症篩檢可以發現早期癌症，而愈早發現，治療效果愈好。而前二大奪命癌症肺癌、肝癌都不容易早期發現，男女十大癌症奪走的人命，肺癌與肝癌合計就占了三六%以上。

雖然癌症醫療科技不斷精進，不同的治療方式可以殲滅對某些治療敏感度特別高的癌細胞，但是對治療有抵抗力的癌細胞，在經過淬鍊則可能更強，這也是人類與癌症的戰爭無法休止的原因。

因此除了早期發現，仍舊需要靠更先進的醫療技術陸續加入抗癌行列，為人類在這場與癌症的百年戰爭補強戰力。

傳統放療 走過就留痕跡

臺北醫學大學附設醫院放射腫瘤科主任李欣倫醫師說，經過長期的發展，現代的癌症治療已經從過去所謂的抗癌鐵三角——手術、放療與化療，發展為手術、熱治療、放射治療、化學治療、標靶治療、免疫治療與細胞治療等七彩整合療法。其中的放射療法早在一八九〇年代就加入戰局，放療可以縮小或消滅腫瘤，因為不必摘除器官、不會破壞身體外觀，也不會有化療的不適，對病患日常生活影響很小，因此不只在某些癌症，例如喉癌、早期乳癌等單獨使用就可以發揮很好的戰力，在很多癌症也是與手術、化療等整合治療很重要的一環。

放射治療是利用光子產生的能量摧毀癌細胞，光子射束從接觸到體表就開始釋放出放射線直到腫瘤細胞，李欣倫說「凡走過的必留痕跡」，照射所經路徑會沉積大量劑量，破壞正常組織，而且為了使射束抵達目標區時的劑量足以消滅癌細胞，因此腫瘤周邊和後方的組織也會被破壞。

但是凡事都有優、缺點，「兩利相權取其重，兩害相權取其輕」是抉擇的原則。如何將放射療法對其他組織的傷害減到最低、並充份發揮放療優點，一直是醫療科技努力的方向，質子治療 (Proton Therapy) 因而開啟放射治療從光子到包括質子與重粒子的粒子治療的新紀元。

質子射束精準直達目標

李欣倫說，其實從文獻上可以看到一九五〇年代就有用質子治療癌症的記錄，但是當時因為質子的能量比較少，無法穿透到身體深部，且射束調控困難，只能治療表淺的腫瘤，因此臨床應用受限，且大多停留在實驗階段。近一、二十年來隨著醫療科技的進步，射束已經可以精準調控，質子治療適應症才逐漸開展。

與傳統光子放射線治療不同的是質子具有布拉格峰 (Bragg peak) 的物理特性，即射束在抵達腫瘤深度時會形成一個高峰，能量完全釋放，之後能量驟減，幾乎不會傷害到所經之處與腫瘤後方的正常組織。換句話說，質子治療就像抵達設定深度才爆炸的「深水炸彈」，透過縝密定位，精準地將能量集中於目標區，不僅能夠提高破壞率，也能降低對週遭區域的傷害。

此外，質子治療的機型也不斷精進，臺北醫學大學臺北癌症中心院長邱仲峯醫師說，最新質子機發展出筆型射束和即時導航影像系統，可以精準定位，解決過去

質子治療定位耗時的問題，病患可以獲得最快速的治療，且大幅減少正常組織的傷害，並提升治療中、治療後的生活品質。

不可能的任務到一般任務

蔡若婷說，這樣的特性不只讓質子治療成為局部治療主要方法的首選，也是整合療法中很重要的一環。除了血液腫瘤或瀰漫式擴散的腫瘤之外，在整個療程中，只須局部放射的都可以用質子治療。因為副作用少，質子治療也被很多先進國家廣泛用於兒童癌症，因為兒童來日方長，萬一罹癌，不要留下其他的傷害或太多副作用，是治療方法很重要的考量。

李欣倫說過去質子治療多被用來執行「不可能的任務」，例如眼、顱底等不宜重複照射的部位，但隨著治療個案增加累積更多經驗，現在質子治療也已用在執行一般任務。李欣倫說，過去化療若合併傳統光子放療，產生副作用的機率會大幅增加，但近期研究顯示，若化療合併質子放療，會大幅降低治療的副作用，包括產生嚴重急性的副作用的風險會降低七成，在生活質量上的副作用則可以降低五成，因此放療用質子來做的話，病人就更有完成整個療程。

九家大型醫院陸續上線

目前台灣共有九家大型醫院的質子中心獲得衛福部的設立許可，但大多還在建置中，所謂十年磨一劍，李欣倫說，質子中心從設立、建置、通過相關法規到上線耗時甚久，例如臺北醫學大學附設醫院建置中的質子中心，早在六、七年前就開始規劃，除了必須通過主管機關衛福部的審查、核准之外，還包括原能會、台北市衛生局等的層層檢驗，此外因為是醫學大學附設的醫院，還需要經過學校同意及教育部審核。其中輻射安全的考量尤其重要，必須符合輻射防護、輻射屏蔽的相關法規。尤其北醫的質子中心是唯一設在都會區的質子中心，且位在台北一〇一附近，又緊臨北醫，基於附近居民、逛街民眾、上班族與醫學院師生、病人的安全考量，輻射安全的控管更重要。

不過談到輻射，難免令人擔心，李欣倫說目前粒子治療中心最多的國家是日本，包括質子與重粒子共有二十一家，輻射防護法規最嚴格的也是日本，而台灣未來會有十一家，以台灣的面積與人口來看，質子中心的密度將高於日本。他說，台灣的防護法規堪稱最高規格，比日本還嚴格。

過去的質子中心佔地至少一個足球場，因此大多建置於荒郊野外，而最先進的超導型機型質子機迴旋半徑大幅縮小，大約一個網球場即可容納。因為質子治療和傳統放療一樣，病患需要連續多次到院治療，建置於都會區大幅提高民眾就醫的可近性，病患不需要舟車勞頓地長途往返。

質子中心的建置從整地開始到硬體建設、質子機設備的吊裝、組機與測試，都是重大工程，尤其北醫質子中心設在地下，難度更高。該中心預定今（二〇二〇）年底開始收治病患，將成為台灣繼林口長庚與高雄長庚之後第三個上線的質子中心。（發布日期 109 年 5 月 19 日）

ICRP-142 號報告簡介

產業製程中天然放射性物質 (NORM)的輻射防護指引



作者 陳清江

義守大學醫學影像暨放射科學系兼任副教授

一、前言

ICRP-142 號報告經委員會於 2019 年 7 月核准出版，報告內容分 4 章 141 段，本文共 49 頁，含附錄及參考文獻共 67 頁。主要目的是為放射學提供涉及天然放射性物質(NORM)產業的輻射防護指引。本文介紹報告摘要與重點，並對報告內容作簡要說明。

二、ICRP-142 號報告摘要

本報告目的是為放射學提供涉及天然放射性物質(NORM)產業的輻射防護指引。這些產業可能引起多重危害，放射線危害不一定占主要地位。這類產業是多樣的，涉及輻射防護的不只是人員，也必須考慮環境。在某些情況下，這些產業如果不採取適當的控管措施，可能會增加工作人員和公眾大量的潛在例行曝露；大量 NORM 的釋放，也可能會同時對環境造成輻射和非輻射有害的效應 (detrimental effects)。然而，有 NORM 問題的產

業，並不會因為輻射緊急曝露問題導致人體組織反應或立即的生命危險；因此涉及 NORM 的產業，其輻射防護作業依正當化(Justification)與最適化(Optimization)原則，可以使用參考水平(reference levels)作為輻射防護的基準。

建議採用一套整合的和分級的方法 (integrated and graded approach) 來保護工人、公眾和環境。並同時考慮非輻射危害與輻射危害的問題，最適化防護方法，以使輻防計畫的要素與各種危害(hazards)的最適化防護保持一致，同時不增加不必要的負擔。對工作人員的輻射防護首先考量曝露情境，必要時整合其他既有的工安危害防範措施，根據實際工作的曝露情境與危害的大小，採取合理的個人或集體行動參考水平來解決。

NORM 的問題通常會涉及到氡-222 和氡-220(Thoron)，其曝露也應採用分

級方法進行管理，首先應根據 ICRP 第 126 號報告中的建議，對建築物採行氡-222 和氡-220 的預防和緩解 (prevention and mitigation) 措施。對於公眾的防護措施，也可以在瞭解曝露情境特性後，採用透過排放物、廢料與殘留物的管制措施，採取類似工作人員的輻射防護措施。若要保障非人類物種，應考量週遭所有危害與衝擊，做適當的輻射曝露評估後做處理；這應包含環境中的曝露機制，並使用相關的導出參考水平作為管制輻射曝露的決策。

ICRP-142 號報告重點

1. 涉及天然放射性物質 (NORM) 的產業活動引起的曝露是可控制的，可以通過採取正當的防護行動(利大於弊)和最適化的防護措施 (ALARA)來實現。

2. 預期 NORM 不會導致人體組織發生緊急輻射曝露的情況或對生命的直接危險；保護工人和公眾的行動應考慮長期體外曝露、放射性物質的攝入以及吸入氫氣的風險。
3. 建議採用一套整合的和分級的方法來保護工人、公眾和環境，包括曝露情境的特徵描述，以及輻射防護措施的最適化，以補充已經制定或計劃管理其他危害的防護策略。
4. 用於保護工人的參考水平（不包括氫的曝露量）應反映曝露劑量的分佈，在大多數情況下，應低於每年幾毫西弗的有效劑量。預期每年的有效劑量超過 10 毫西弗的情境將很罕見。
5. 保護公眾的參考水平應反映出曝露劑量的分佈，並且一般應少於每年幾毫西弗的有效劑量。
6. 氫-222 和氫-220 的曝露應採用分級方法進行管理，首先應根據 ICRP-126 出版物（ICRP，2014b）對建築物中氫-222 和氫-220 的預防和緩解措施的建議。

三、報告內容簡要說明

1. 簡介

1.1 背景

回顧與 NORM 有關的 ICRP 以前曾經出版的報告，從 26、39、60、82、101、103、104、108、109、111 到最近出版的 124、126、132 等，與 NORM 有關的防護早就廣泛的被關注。

1.2 範圍

諸如採礦和礦物萃取之類的產業過程，或可能導致曝露於地質起源的 NORM

的其他產業活動，這些已被確定為需要考慮輻射防護。

(15) 由於涉及 NORM 的許多行業的歷史悠久，因此已將被過去產業活動的 NORM 殘留物和廢物污染的場址認定為舊場址（legacy sites）。2014 年，ICRP 成立了一個任務小組製定報告，說明如何將委員會的建議應用於污染的舊場址，因此本報告將不完全解決此一主題。

1.3 報告的架構

(20) 第 2 章介紹 NORM 曝露的特徵，概述了可能發生 NORM 曝露的行業和實踐，以及與 NORM 循環有關的要素。第 3 章介紹委員會用於 NORM 曝露的輻射防護系統，包括曝露情境的類型，相關的曝露類別以及要應用的基本輻射防護原則。第 4 章使用整合的和分級的方法，為各種曝露的工人、公眾和環境提供實施輻射防護系統的指引，結論在第 5 章中提供。附錄 A 提供了 13 項可能涉及 NORM 曝露製程活動的更多資訊。

2. NORM 的曝露特性

2.1 普遍性和可變性

(22) 許多組織已經對可能導致工人、公眾和環境與 NORM 相關的輻射曝露的行業進行了全面審查，例如（UNSCEAR，1982，2008；EC，1999a；IAEA，2006；EURATOM，2013）。此外，以前的產業場所可能涉及 NORM，因此這些舊場址可能需要加以注意。附錄 A 中提供了有關這些工作活動的詳細資訊。

可能產生 NORM 曝露的製程有下列 13 項：

1. 萃取稀土元素
2. 生產和使用金屬鈾及其化合物（即針對金屬鈾，而不是其易分裂或可
3. 孕的輻射性質）
4. 礦石的開採和加工（用於核燃料循環的鈾或鈾除外）。
5. 石油、天然氣回收過程
6. 生產二氧化鈦顏料
7. 磷酸鹽開採和加工產業
8. 鋯石和氧化鋯產業
9. 金屬的生產（錫、銅、鐵、鋼、鋁、鈦、鈹、鈾等）
10. 化石燃料（主要是煤炭）的燃燒
11. 水處理
12. 地熱能生產
13. 水泥生產和熟料爐的維護
14. 建築材料（包括由殘留物或副產品製造的建築材料）

導致工作場所輻射曝露的情境廣泛，包括 1.大量材料用作礦石或原材料、殘渣或廢物的儲備場，2.少量帶有濃縮放射性核種的物質，例如礦物精礦、水垢和污泥，3.在高溫過程中已揮發的材料，例如礦渣、沉澱劑粉塵和爐煙等。

表 2.1 顯示工人有效劑量評估結果大部分小於 1 毫西弗/年，不須列管，少部分作業在 1-10 毫西弗/年，唯一超過 10 毫西弗/年的是鈾化合物生產。

表 2.2 顯示，公眾有效劑量評估結果大部分小於 1 毫西弗/年，唯一超過 1 毫西弗/年的是牆壁、天花板、地板、使用實心磷石膏板所造成。

表 2.1 工人有效劑量評估的例子(外部和內部的粉塵，不包括氡暴露) 毫西弗/年

活動	最高活度核種	最小	平均	最大	分布
鈾濃縮加工	鈾-232 (原料、產品)	3.0		7.8	
鈾化合物生產	鈾-232			82	67%<1
稀土礦開採	鈾-238 鈾-232 (原料)		0.24-1		
稀土礦的選礦	鈾-238 鈾-232		0.28-0.61		
獨居石的處理	鈾-232			0.3	
稀土分離純化	鐳-228(殘渣)			0.3	
稀土工廠除役	鐳-228(殘渣)	0.2	7.2	8.94	
鈾礦以外的其他礦石的開採	鈾-238 鈾-232	1.3	3	5	
海上石油和天然氣生產	鐳-226(污垢/污泥)			0.5	
陸上石油和天然氣生產	鐳-226(污垢/污泥)			0.05	
採油、管道清潔	鐳-226(污垢/污泥)		0.6	3	80%<1
二氧化鈦顏料生產	鈾-232 (原料) 鐳-226 鐳-228 (污垢)			0.27	
磷酸鹽礦儲藏	鈾-238 (原料、產品)			0.28	
磷肥生產	鈾-238 (原料、產品) 鐳-226(殘渣)			0.5	
鋯石生產	鈾-238 (原料、產品)			0.4	
玄武岩(氧化鋯)生產	鈾-210 (在除塵器中)			0.4	
鋯石的製造和使用	鈾-238 (在氧化鋯/產品中)	0		2.3	87%<1
耐火陶瓷材料的製造和使用	鈾-238 (在氧化鋯/產品中)	~0.01		1.5	98%<1
鋯石/氧化鋯陶瓷的製造	鈾-238 (在氧化鋯/產品中)		可忽略		
錫、鋁、鈦和鈮礦石的加工	鈾-232 (原料、產品和爐渣) 鐳-226 (殘渣和爐渣)	0		3.2	69%<1
銅冶煉	鐳-226 (爐渣)			<1	
廢金屬回收	鈾-210 鉛-210 (除塵器灰塵)		可忽略		
煤礦開採	鈾-238 鐳-226 鐳-228		2.75		

活動	最高活度核種	最小	平均	最大	分布
煤燃燒	鈾-210(污垢)	0		0.4	
煤燃燒	鈾-210(污垢)			<1	
煤燃燒	鈾-210(污垢)			0.13	
飲用水處理	鐳-226 (污泥)			<1	
礦物絕緣體製造	NA	0.001		0.017	

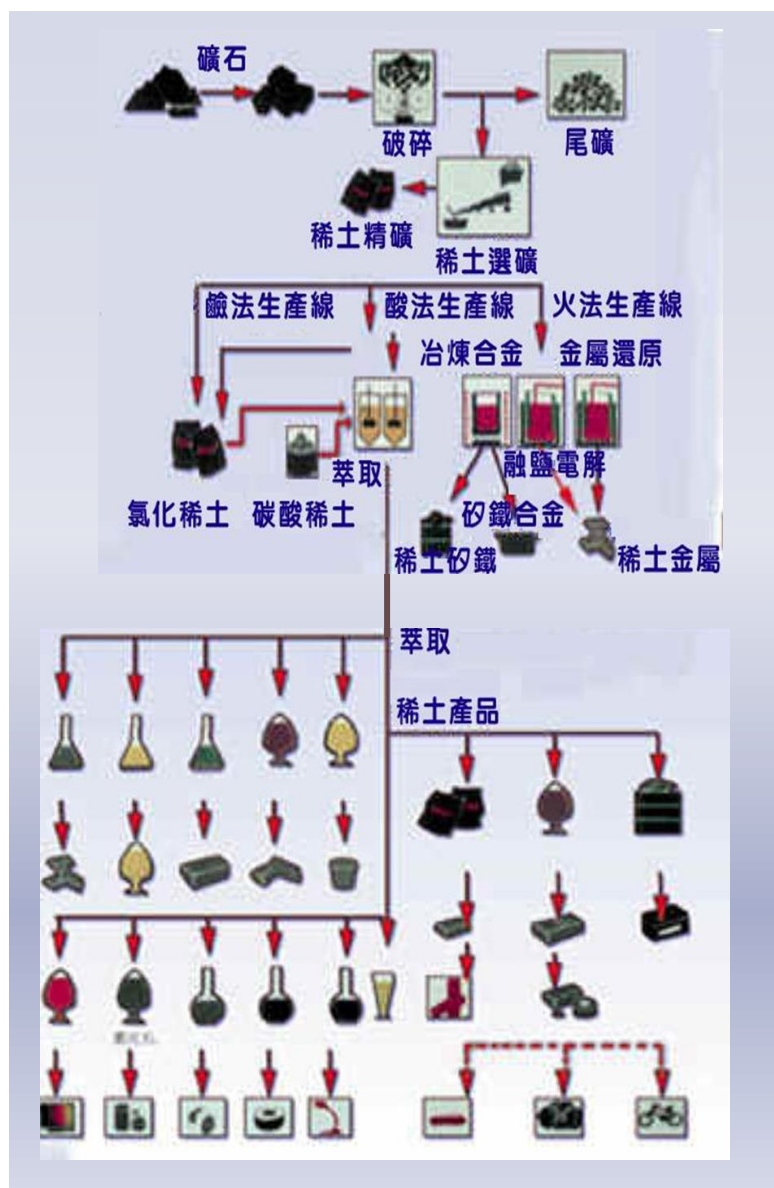


圖 1 稀土礦開採、生產與製造流程

表 2.2 公眾有效劑量評估的例子 (不包括氫曝露)

活動	最高活度核種	有效劑量(毫西弗/年)
稀土礦開採	鈾-238 釷-232 (污染的土壤)	0.044
稀土礦的選礦	鈾-238 釷-232 (污染的土壤)	0.043
稀土和鋼鐵生產的礦渣 在房屋磚中的使用	鐳-226 · 釷-232 (紅磚)	~0.2
鈾焊條的生產	NA	可忽略
鈾礦以外的礦石的開採		<1
大量礦渣殘留物 1Bq/ g U-238/Th	鈾-238 釷-232 系列	0.05-0.26
石油和天然氣生產	NA	<1
磷的生產		<0.04
磷酸二鈣動物飼料的用途	^{210}Po · ^{210}Pb (在雞肉中)	<0.02
磷石膏在農業的用途	^{226}Ra (在肥料中)	可忽略
使用磷石膏來建造房屋	^{226}Ra (建築材料中)	可忽略
牆壁、天花板和磷石膏面板	^{226}Ra (建築材料中)	0.02-0.2
牆壁、天花板、地板、空心磷石膏板	^{226}Ra (建築材料中)	0.46
牆壁、天花板、地板、實心磷石膏板	^{226}Ra (建築材料中)	4.5
牆壁、磷石膏板襯裡	^{226}Ra (建築材料中)	0.15
牆壁、磚和水泥中的磷石膏	^{226}Ra (建築材料中)	<1.4
鋁石/氧化鋁陶瓷的製造	^{226}Ra (建築材料中)	可忽略
鋼鐵生產	^{232}Th ^{228}Ra (在粉塵/氣體排放中)	<0.01
金屬回收殘渣用於道路建設	^{226}Ra (礦渣)	<1
煤燃燒	NA	可忽略
飲用水處理	NA	可忽略
處置垃圾掩埋場的水處理殘留	^{226}Ra (污泥)	0.01
污水處理、前鈾礦	NA	<1
普通房屋建築材料的使用	NA	<0.3-1

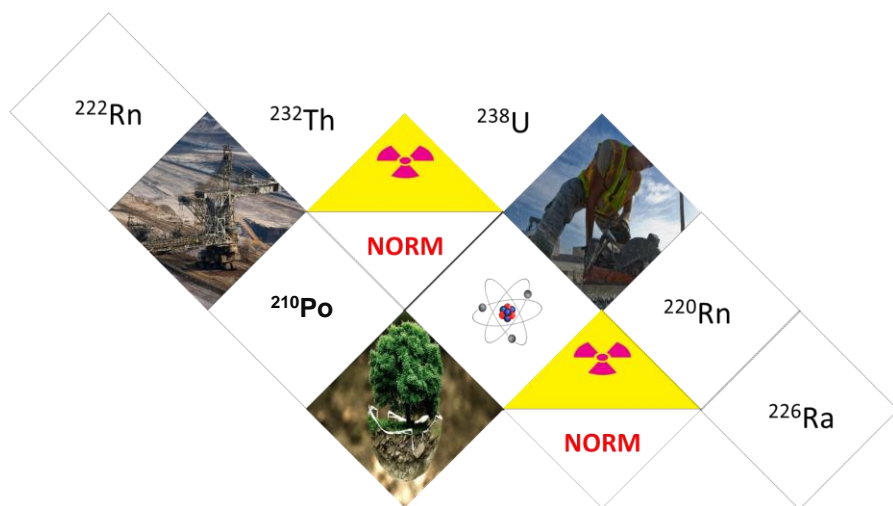


圖 2 NORM 產業的輻射防護系統，包括曝露情境、公眾與工人防護以及環境保護

2.2 從搖籃到墳墓的角度看 NORM

可以確定涉及 NORM 的幾個生產階段。一些行業可能涉及幾乎所有這些階段，而其他行業可能僅涉及其中一些包括：1. 礦物萃取，2. 礦物選礦和加工，3. 產品製造，4. 產品和副產品的使用，5. 殘留物的再利用和回收，6. 廢棄物管理，7. 拆除或修復與復原。因此，在礦物循環的所有階段都可能發生歸因於 NORM 的曝露增加。

第 (31) 段：涉及 NORM 行業的副產品和殘渣可以被其他行業用作原料（例如建築材料）。在這種情況下，NORM 浮出檯面後（或通過其他方式引入產業領域），進入了一個可能無限的再利用循環（即 NORM 可以在一個地方移動和/或重新處理）。

3. ICRP 委員會的放射防護系統在規範中的應用

3.1 曝露情境的類型和曝露類別

曝露情境的類型-委員會已將涉及 NORM 的許多行業產生的曝露，作為既存曝露情境的範例進行了審議。若

劑量太高，也可以歸類為計劃曝露情境，但不至於歸類為緊急曝露情境。

曝露類別-涉及 NORM 的行業可能同時引起職業和公眾曝露，但不會引起醫療曝露。

3.2 防護策略的正當性

3.3 防護的最適化

劑量標準-委員會建議在既存曝露情境下使用參考水平作為劑量標準。為了保護既存曝露條件下的人類，委員會建議設置參考水平，通常在 1-20 mSv/y 區段內，如出版物 103 的表 5 所示（ICRP，2007a）。最適化過程說明。

4. 輻射防護系統在涉及 NORM 產業過程的應用

4.1 工人的防護

對於工人防護的一般的考量，選擇工人的劑量參考水平，必備條件的選擇和實施，並進一步對有關的情境的描述、輻射防護專家的建議、預防或減少危害的初步措施、區域劃分、工程的控制、工作程序、以及資訊、指導

和培訓、個人防護設備、劑量評估、劑量記錄、健康監察等。

4.2 公眾的防護

對於公眾的防護有涉及 NORM 的行業排放、廢棄物、殘渣、建築材料與廢棄場址。

4.3 環境的保護

委員會再次強調其建議，即所有可能的危害皆應納入考量。

(140) 環境影響評估可以作為保護人類和非人類物種而採取的正當化行動的基礎，因為限制排放的決定將影響所有類型的曝露。建議利害關係人的參與，長期保護環境是社會關注的全球問題，放射防護倫理價值的應用可以對此做出有益的貢獻。

(141) 處理環境中的 NORM 排放時，應明訂有關的放射核種、分析的時間間隔、要分析的樣品、所關注的生物等，記錄、保存和監測計劃的特殊要求。應定期進行長期環境監測，以檢查是否仍滿足環境保護標準。

附錄 A. 提高正常曝露水平的活動

引起 NORM 風險的主要活動如 2.1 節所述，共有 13 項。礦物所含 NORM 活度隨產地和礦物種類而有很大的變動範圍，因煉礦活動造成副產品中放射性核種的濃度升高的範圍各異，常見大量副產品中放射性核種的濃度如附件表 A.1~A.3 所示。

由下述表 A.1~A.3 所示，不同產地的不同礦物所含 NORM 的活度變化很大，差異可以高達幾十萬倍。活度最高的是石油、天然氣和副產品中含鐳-226 高達 1 千 5 百萬貝克/公斤。

表 A.1 石油、天然氣和副產品中放射性核種的濃度範圍

核種	原油 (Bq/公斤)	天然氣 (Bqm ⁻³)	產生的水 (Bq/升)	硬污垢 (Bq/公斤)	污泥 (Bq/公斤)
U-238	0.0001-10	---	0.0003-0.1	1-500	5-10
Ra-226	0.1-40	---	0.02-1200	100-15,000,000	5-800,000
Po-210	0-10	0.002-0.08	---	20-1,500	4-160,000
Pb-210	---	0.005-0.02	0.05-190	20-75,000	100-1,300,000
Rn-222	3-17	5-200,000	---	---	---
Th-232	0.3-2	---	0.0003-0.001	1-2	2-10
Ra-228	3-17	---	0.3-180	50-2,800,000	500-50,000
Ra-224	---	---	0.5-40	---	---

表 A.2 煤灰和礦渣中放射核種的活度範圍 (Bq/kg)

放射核種	鉀-40	鈾系列	鈾系列
爐底灰 (礦渣)	240-1,200	44-560	48-3,900
飛灰 (已收集)	260-1,500	30-300	30-200
飛灰 (逃逸)	260	100-160	20-550

表 A.3 某些建築材料的放射活度範例 (單位為 Bq/kg)

材料	Ra-226	Th-232	K-40
混凝土	1-250	1-190	5-1,570
空心磚	11,000	1-220	180-1,600
黏土磚	1-200	1-200	60-2,000
砂石灰磚和砂岩	18,000	11,000	5-700
天然石膏	<1-70	<1-100	7-280
花崗岩	100	80	1,200
溶脂凝灰岩	130	120	1,500
浮石	130	130	1,100
水泥	7-180	7-240	24-850
瓷磚	30-200	20-200	160-1,410
磷石膏	4-700	19,000	25-120
高爐礦渣石和水泥	30-120	30-220	---

目前國際機構及我國對 NORM 的管制介紹

作者 陳清江

義守大學醫學影像暨放射科學系兼任副教授



前言

國際趨勢上對含天然放射性物質 (NORM) 的管理日益關注，歷年來，我國在設有熔煉爐的鋼鐵廠門框偵檢器發現許多含 NORM 的廢鐵原料，近期也從媒體看到有些消費性產品，例如負離子面膜、涼被及床墊等含有天然放射性物質的成分，因此本篇作者針對天然放射性物質的管理收集一些資料進行彙整介紹，也對管制實務問題提供看法。

NORM 相關產業介紹

民國 86-90 年曾經針對進口或加工製造可能含有放射性物質之廠商進行訪查，可能產生 NORM 的產業或產品應用主要包括如下幾類：

稀土(CeO_2 , CeCO_3F , misch metal)：稀土生產、玻璃、觸媒、永磁材料、電子陶瓷、拋光粉、煉鋼等

銦(ZrO_2 , ZrSiO_4)：陶瓷釉藥、色料、半導體、耐火材料、電子陶瓷等

鈦(TiO_2 , FeTiO_3)：顏料、焊材、電子陶瓷、鑄造、煙火等

鋁礬土($-\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)：耐火材料、研磨材料、氫氧化鋁等

磷礦砂($\text{Ca}_5\text{F}(\text{Po}_4)_3$)：磷酸、磷酸鹽、複合肥料等

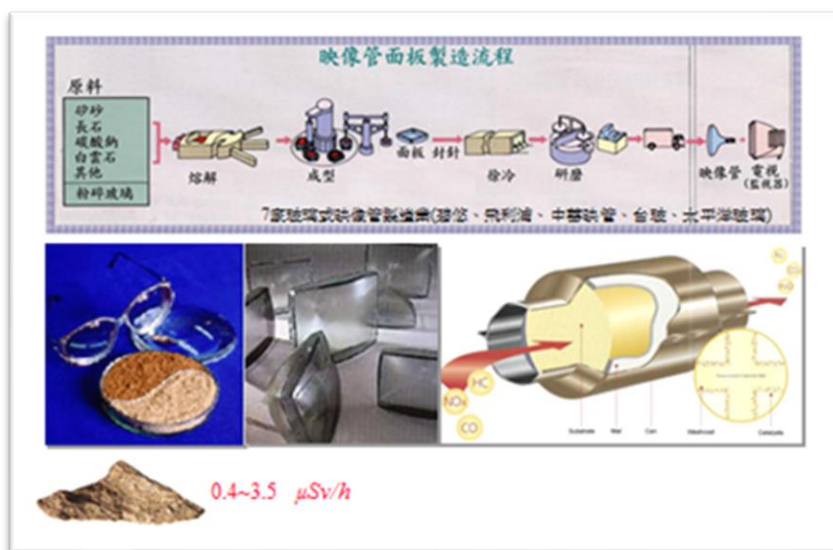
煤：火力發電、煉鋼爐石等

天然石材：大理石、花崗岩等石材加工

其他：天然氣井、地熱井、氣燈紗罩、造紙業、化工廠等

上述所列行業與應用，以使用稀土和銦砂原料礦物含 NORM 的活度比較高，其原料礦物產地、活度與製程如下圖一、圖二與表一、二所示。活度濃度以 Bq/g 為單位。表一、二紅字為其所含核種活度濃度大於天然放射性物質管理辦法附表四的基準值。

表三為使用 NORM 的產業造成的劑量簡單評估，從作業場所的輻射劑量率(原料礦石、製程、製品、廢棄物等)及作業時間，即使保守推定下對於作業人員造成的劑量在 0.13 至 0.40 mSv/y 之



圖一 氧化銻-玻璃拋光、玻璃成分(脫色)、觸媒轉化劑

表一 氧化鈾拋光粉之天然放射性核種濃度

來源及名稱	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁸ La	
美國	CERCA, #825-1	1.0±0.03	4.30±0.09	0.25±0.07	-
	CERCA, #825-2	0.12±0.01	0.34±0.02	-	-
	Molycrop-1	1.72±0.09	11.9±0.35	1.38±0.21	-
	Molycorp-2	-	-	-	-
	Rhodes	1.03±0.05	3.94±0.13	0.60±0.05	-
	Kinemax	1.18±0.04	6.98±0.12	0.67±0.11	-
	PhoDite#19A	0.49±0.01	7.28±0.06	0.60±0.05	-
	PhoDite#100	0.53±0.02	6.84±0.06	0.46±0.05	-
	Cs-7	0.04±0.01	0.26±0.01	0.12±0.02	-
	ABRFXPERT	1.53±0.06	11.7±0.16	0.86±0.13	-
英國	OST-1	1.06±0.03	6.66±0.10	0.42±0.08	-
	OST-2	0.74±0.02	4.18±0.07	0.64±0.19	-
日本	PCL-1	0.96±0.02	6.13±0.05	0.48±0.04	-
	PCL-2	1.01±0.02	6.39±0.06	0.41±0.05	-
中國	甘肅綏土	-	-	-	-
	乾羅天總清基	-	-	-	0.064-0.168

表二 含鉛原料礦物之天然放射性核種濃度用砂

分類名稱(產地)	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	
砂酸鉛	澳洲(5)	2.81~3.41	0.57~1.11	-
	日本(6)	2.73~5.38	0.51~1.09	-
	南非(1)	3.50±0.03	0.56±0.03	-
	馬來西亞(2)	12.2~14.0	1.38~2.73	-
	德國(1)	3.28±0.04	0.59±0.04	-
	印尼(1)	2.30±0.02	0.51±0.01	-
	法國(1)	1.44±0.05	0.42±0.02	-
氧化鉛	日本(4)	8.62~14.3	1.79~3.84	-
	英國(1)	6.80±0.06	1.60±0.08	-
	美國(2)	0.97~1.32	0.31~0.36	-
	澳洲(2)	4.34~14.6	0.79~1.75	-

(): 樣品數

1.0~8.1 μSv/h



表三、使用含 NORM 製品之曝露劑量評估結果

消費產品名稱	家庭用氣溫水器	襪襪	內衣	壁紙	鎢鈷電鍍條
射源模型	平板射源 11 cmx21 cm U-238系列 Th-232系列	平板射源 210 cmx150 cm (薄板) 210 cmx100 cm (基板)	圓筒射源 13.2cmφx65cmL U-238系列 Th-232系列	平板射源 壁面: 450cmx270 cm(單面) 壁材質: 泥凝土 10 cm厚 U-238系列 Th-232系列	點射源 Th-232系列
曝露時間	0.5 h/dx365 d 全身曝露	8 h/dx365 d 全身曝露	24 h/dx365 d 上半身曝露	8 h/dx365 d 全身曝露	8 h/dx200 d 全身曝露
與射源的距離	10 cm (實測 8 cm)	全身接觸	上半身接觸	30 cm	40 cm
評估結果 (mSv/年)	0.110 (實測 0.107)	0.090	0.220	0.010	9.0

*依據蒙特卡羅計算程式MCNP-4C評估

間，尚未達到需管制的 1 mSv/y。一般公眾使用表三所列含 NORM 製品的體外曝露有效劑量偏低，無輻射安全顧慮。比較值得注意的是電焊工人，在保守條件評估下有可能因使用鎢鈹焊條而造成超過 6 mSv/y 的有效劑量。

國際機構對 NORM 管制的建議

NORM 核種多具有長半衰期，且普遍存在自然環境中，因此雖有微量放射性，但一般多不列入管制範圍內。國際原子能總署 (IAEA) RSS-115 號報告，針對來自天然放射性核種造成之曝露，建議採取適當的干預 (Intervention)，報告中同時列出了不同核種的豁免管制值。

IAEA 第 115 號報告 1.4 條，制訂了排除管制 (Exclusion) 的標準。對體內的鉀 40，地表接受宇宙射線曝露，及原料中未經改變性質的放射核種，均定義在排除管制項目中。115 號報告 2.5 條中，考慮到天然放射性物質可能造成相當程度的曝露 (主要是針對氡氣)，因此在也提出了採取干預的措施，同時以年劑量 10 微西弗，制定不同放射性核種的豁免管制 (Exemption) 標準。

2016 年 IAEA SSG-36 Radiation Safety for Consumer Products 提出應採取何種方式，進行 NORM 的管制。歐盟於 1997 年至 2001 年，共發表了與天然放射性物質防護相關指引 3 份，包括 RP-88 (1997)、RP-95 (1999)、RP-122 (2001)；對建立管制架構提出技術指引。

RP-88 報告中，除列出相關產業及其中使用的天然放射性核種與活度外，並設定年劑量小於 1mSv、年劑量介於 1 mSv 至 6 mSv 之間、及年劑量大於 6 mSv 三種劑量限值，做為管制行動的基準。NORM 年劑量經評估小於 1mSv 時不需採取任何行動，年劑量介於 1 mSv 至 6 mSv 間時，需考量如何採取適當的行動以降低劑量。如果年劑量大於 6 mSv，則應比照輻射工作場所設置管制區，進行工作環境的管理。

RP-95 報告，提供簡易的計算導則，以提供各管制單位篩選必需進行管制的產業。

經由比較篩選標準及特定產業使用的 NORM 活度，以決定特定產業的管制階層 (Level)，並依管制階層採取適當的

防護行動，以降低工作人員與民眾的曝露。

RP-122 報告中，則以攝入，吸入及體外曝露等三種曝露途徑及年劑量 0.3 mSv 之劑量標準，訂定廢棄之岩石 (Waste Rock)、飛灰 (Ash)、砂 (Sand)、熔渣 (Slag) 與石油 / 天然氣開採產生的污泥 (Sludge) 的不同豁免 / 解除管制值。對低於豁免 / 解除管制的天然放射性物質，建議可免于管制，但管制機構應採彈性處理的原則，以符合各國的狀況。

ICRP-60 建議需要干預的天然背景輻射為宇宙射線與氡氣的曝露，對空服員的宇宙射線曝露，歐盟調查結果建議干預基準為 6 毫西弗/年。

對於住家空氣中氡氣，ICRP-126 號報告已經依 WHO 2009 的建議降為 100-300 貝克每立方米，相當於 3.3-10 mSv/y，各國可依國情選擇在 100-300 貝克每立方米制訂合宜的行動基準。並建議工作場所室內氡參考活度值為 1000 貝克每立方米，相當於 20 mSv/y 的工作人員有效劑量。

我國對天然放射性物質管制的作法

為了處理使用含 NORM 的異常輻射事件，原子能委員會於民國 92 年制訂之游離輻射防護法第四條中規定，天然放射性物質於有影響公眾安全之虞者，主管機關得經公告之程序納入管理，並於民國 96 年 3 月 8 日正式發布天然放射性物質管理辦法。管理辦法第 3 條敘明所謂天然放射性物質有影響公眾安全之虞者，為其所含核種活度濃度大於附表四的基準值且造成一般人之年有效劑量大於一毫西弗者。



圖二 矽酸鋁、氧化鋁-陶瓷釉藥、色料、耐火磚、鑄型

表四、天然放射性物質核種活度濃度基準值用砂

核種	活度濃度基準值 (貝克 / 克)
鉀-40	10
鈾系列核種	1
釷系列核種	1
其他非鉀或釷、鈾系列天然放射性核種	1

依此標準，前述使用含 NORM 製品產業，雖然其原料活度濃度可能大於我國上表之基準，但是從作業場所的輻射劑量評估結果顯示，除了電焊工人可能需要注意外，均未達到 RP-88 報告建議需要作輻射作業管制的 6 mSv/年。

天然放射性物質管制相關的輻防法規部份，在「商品輻射限量標準」中，對於飲水中天然放射性物質有設定限值。在「輻射源豁免管制標準」中，對放射性核種有建立豁免管制的標準。

涉及 NORM 行業的副產品和殘渣可以被其他行業用作原料（例如建築材料、鋪路級配等）。在這種情況下，NORM 可能進入了再利用循環過程，廢料的處理有潛在的輻射曝露風險，因此原子能委員會依放射性物料管理法第三十一條第二項規定，訂定“天然放射性物質衍生廢棄物管理辦法”，於民國 96 年 1 月 5 日發布。以規範依游離輻射防護法第四條公告納入管理之天然放射性物質，經非核能產業相關之技術加工而致活度濃度增強，所衍生之廢棄物或受其污染之廢棄物的處理方式。第 5 條：衍生廢棄物對一般人之個人年有效劑量不超過一毫西弗，或其活度濃度指數不超過 1 者，免依本辦法規定管理。

第 9 條：受衍生廢棄物污染之設備、機具及場所清理後，其表面劑量率大於每小時 0.12 微戈雷或對一般人所造成之個人年有效劑量大於一毫西弗者，不得外釋或轉作其他用途。

結論

ICRP 於 2019 年最新出版的 142 號報告，目的是為放射學提供涉及天然放射性物質(NORM)產業製程的輻射防護指引。其輻射防護邏輯與之前曾經出版的報告例如 60、103、124、126、132 等的立場是一致的，涉及 NORM 的許多行業產生的曝露，屬於既存曝露情境，若劑量太高，也可以歸類為計劃曝露情境，但不至於歸類為緊急曝露情境，建議採用整合的和分級的方法來保護工人、公眾和環境中的非人類物種。輻射防護作業依正當化與最適化原則，可以使用參考水平作為輻射防護的行動基準。

天然放射性物質管理辦法第 6 條：天然放射性物質經主管機關公告納管後，其輻射劑量評估結果造成工作人員之年有效劑量大於六毫西弗者，其所有人、持有人或管理人應對工作人員實施個別劑量監測，並提出輻射防護計畫，經主管機關核准後實施。

ICRP 142 號報告第 4 章內容為輻射防護系統在涉及 NORM 產業過程的應用，詳細說明對工人、公眾和環境輻射防護應考量的項目與做法，對於涉及 NORM 作業場所的輻射劑量評估方法，可以參考第 4 章內容，制訂一套劑量評估規範，供業者撰寫輻射防護計畫的依循。

對於通風不良的 NORM 產業工作場所的氫氣曝露，建議可進一步作氫氣的量測與劑量評估。我國有關 NORM 的規定自公告至今已 13 年，建議可以考慮過往管制經驗與參考 ICRP 142 號報告的建議，檢討是否需要作修訂。

對於 20 年前評估，電焊工人因使用鎢鈦焊條而造成高達 9 mSv/y 的有效劑量，建議可依目前使用情境作重新評估確認。

對於被過去 NORM 產業活動的殘留物和廢棄物污染的舊場址之清理，ICRP 於 2014 年成立了一個任務小組，研擬制定報告，說明如何將 ICRP 的輻防建議，應用於舊的污染場址之清理指引，該指引近期應該會出版，可以做為清理舊 NORM 污染場址之依循。

(以上言論屬個人研讀 ICRP 142 號報告後的心得，若有疏漏尚祈不吝指正。)

發行人

張似瓌

執行編輯

林珏汶

編輯委員

尹學禮

江祥輝

劉代欽

蔡惠予

魯經邦



出版單位

財團法人中華民國輻射防護協會

行政院新聞局 出版事業登記證

局版北市誌字 第柒伍零號

地址

30017 新竹市光復路二段 295 號 15 樓之 1

03-5722224 電話 | 03-5722521 傳真

01486683 統編

rpa.newsletter@gmail.com 電郵 | www.rpa.org.tw 網站