



# 輻射防護簡訊

第 167 期

出刊日期 111 年 2 月 15 日

## 本期內容

### CONTENT

#### 極低微放射性廢棄物的解除管制概念與必要性

1

國際上已逐漸有共識，考慮輻射源廢棄後造成之輻射影響，若對個人年有效劑量小於 10  $\mu\text{Sv}$  者，其輻射影響是可以忽略的。因為繼續採行管制，就減少個人劑量降低健康風險而言，無法得到有價值的回報，也不符合輻射作業的正當性與合理性。因此，透過嚴謹的輻射監測程序與做法後，對極低微放射性廢棄物採取解除管制措施實有其必要性。

#### 極低微放射性廢棄物解除管制活度濃度推導

4

解除管制的輻射基準是以個人年有效劑量低於 10 微西弗為主。但對於部分業者，若以核種活度濃度 (Bq/g) 來作基準，業者較易執行。因此 IAEA 於提出安全報告 No.44，考量各地可能遇到的各種情況及保守的曝露情節，計算大量物質的解除活度濃度基準供參考使用。本文就其活度濃度推導作法作介紹。

#### 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

#### 極低微放射性廢棄物解除管制的偵測

16

核能電廠除役將產生大量極低放射性污染的物質，且多數可免於管制。作者介紹 IAEA 的 SRS-67，讓營運者和技術支援組織可參考後規劃、執行和評估擬從管制中外釋物質的偵測結果，並驗證是否符合既定的標準，也提供偵測儀器與技術的建議。

# 極低微放射性廢棄物的解除管制 概念與必要性

作者 李境和  
義守大學助理教授(退休)



## 輻射源解除管制的概念

國際輻射防護相關組織及國家已有共識，認為輻射源的使用或廢棄之輻射影響，倘對個人年有效劑量小於  $10 \mu\text{Sv}$  者，還不到背景輻射劑量的百分之一，其輻射影響是可忽略的。若繼續執行法規管制，不但不會產生淨利益，且可能會浪費有限的資源，也會損害輻射防護的管制量能；就減少個人劑量或健康風險而言，沒有合理的管制措施可得到有價值的回報，不符合輻射作業的正當性與合理性，實在沒有在管制的必要。

可忽略的輻射源，其管理可分為三種概念，分別為排除 (exclusion)、豁免 (exemption) 及解除 (clearance)，如圖 1 所示。

排除：未經人為濃縮過之天然放射性物質，通常都已長期存在於自然環境中，係屬於既存曝露情境，無法管，故排除於游離輻射防護之管制。例如人體內的 40K、地球表面的宇宙射線、地球上既存的放射性物質且未經人為擾動過者，如圖二。所以在輻射防護法將它們歸為背景輻射，不受輻射防護法的管制。

豁免：非天然放射性物質，其使用或廢棄，係屬於計畫曝露情境，經評估後對個人年有效劑量小於  $10 \mu\text{Sv}$ ，年集體劑量小於 1 人西弗，無管制之必要，一開始即豁免於管制，不進入管制體系。所以在輻射防護法規中有「輻射源豁免管制標準」，其中規定放射性物質的活度濃度或活度不超過「豁免管制量」，電壓不超過三萬伏特之可發生游離輻射設備且在正常操作條件下，距其任何可接近之表面十分公分處之劑量率每小時不超過一微西弗者，都被豁免。所以豁免是射源或作業經管制機關先驗的決定(a-priori decision)，不進入輻射防護體系中。

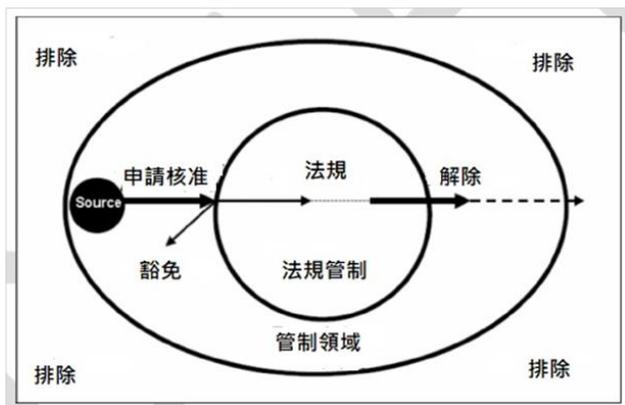
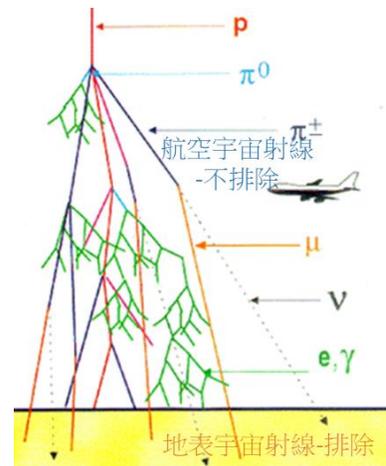


圖 1 排除、豁免和解除在法規管制上的關係



圖二 宇宙射線的排除與不排除例

解除：放射性物質或廢棄物，已在管制體系內，當其輻射衰減至可忽略程度，經確認個人年有效劑量小於 10  $\mu\text{Sv}$ 。若繼續執行法規管制，不會產生淨利益，實在沒有在管制的必要。但為確保其「輻射影響確實是可忽略的」，因此必須經過詳細偵測與驗證，並經管制機關的核准，才可解除管制。雖然豁免與解除的輻射標準是非常相似，但兩者的管制程序與概念是不同的。

輻射源解除管制基準之輻射安全基本原則，是以個人年有效劑量小於 10  $\mu\text{Sv}$  為主。對於部分業者，執行輻射劑量評估較為困擾，若改以核種濃度 (Bq/g) 或表面污染濃度 (Bq/cm<sup>2</sup>) 來作基準，業者較易執行。

從解除的概念，可以清楚地瞭解「解除基準」，不是用來判定該物質要不要進入管制體系；而是對已進入輻射管制體系之物質，確認其輻射影響可忽略時，得解除其管制。從豁免的概念，該物質

可能管制區內，因其計畫曝露年有效劑量小於 10  $\mu\text{Sv}$ ，無管制必要，豁免進入管制體系，即「放行」。

#### 極低微放射性廢棄物解除管制的必要性

核反應器和其他設施的除役，會產生大量的廢棄物，其中絕大部分可從法規管制中移除。例如，瑞典 Scandpower A/S 核電廠根據瑞典核電檢查局(SKI)的規定，編寫核電廠除役產生的廢棄物的技術報告(SKI TR92:17)。該報告中，800~1000 MWe 的輕水反應器完全拆除所產生的廢棄物總量估計約為 300,000 公噸，一半以上(>150,000 噸)的廢棄物是無放射性的，也約有 115,000 噸的廢棄物是可解除管制回收再使用的。

IAEA 於 2012 年出版安全系列報告 (SRS-67)中，述及德國 1000 MWe 輕水反應器的典型核能電廠之除役建築物將達到 150,000~200,000 公噸。

德國環境天然保護與核能安全聯邦部 (BMU)於 2021 年發布的核能電廠除役過程可解除管制的資訊中說明，在核電廠管制區內(包括建築物)，除役過程通常會產生約 200,000 公噸的廢棄物。經驗顯示這些廢棄物中約有 3%必須作為放射性廢棄物處理貯存與處置，大部分(約 97%)的廢棄物是沒有放射性或可回收/再循環，是可以解除管制。

2003 年美國核管會 (NRC) 出版 NUREG-1640 主報告中述及參考沸水式反應器(1,000 MWe)除役將產生約 355,000 公噸的混凝土，其中約有 73,600 公噸未受到輻射影響，還有約 281,000 公噸需要解除管制。參考壓水式反應器(1,000 MWe)除役將產生約 180,000 公噸混凝土，其中約有 36,900 公噸混凝土未受到輻射影響，還有約 143,000 公噸需要解除管制。

上述報告資料，整理如表 1，可顯示可解除管制廢棄物的比例。

表 1 核電廠除役廢棄物

相關報告	機組除役	除役廢棄物(公噸)(A)	未受輻射影響廢棄物(B)+ 可解除廢棄物(C)(公噸)	(B+C)/A
SKI TR92:17	800~1000MWe 輕水反應器	300,000	>150,000+115,000	>88%
IAEA SRS-67	德國 1000MWe 輕水反應器	建築物：150,000 ~200,000	未說明	
德國 BMU 發布核電廠 除役解除資訊	未說明	包括建築物約 200,000	未說明	97%
NUREG-1640	沸水式反應器(1,000 MWe)	混凝土：355,000	73,600+281,000	99.9%
	壓水式反應器(1,000 MWe)	混凝土：180,000	36,900+143,000	99.9%

國內核一廠 1、2 號機運轉執照已分別於 107 年 12 月 5 日與 108 年 7 月 15 日屆期，台電公司於 104 年 11 月，依核子反應器設施管制法第 23 條規定，提出核一廠除役許可申請，原能會已於 106 年 6 月完成審查。第一核能發電廠除役計畫第九章估計約產生廢棄物 32,000 公噸，其中可外釋(含管制區內確認無污染)廢棄物 18,435 公噸。核二廠 1、2 號機運轉執照將分別於 110 年 12 月 27 日與 112 年 3 月 14 日屆期，台電公司於 107 年 12 月，提出核二廠除役許可申請，原能會已於 109 年 10 月完成審查。第二核能發電廠除役計畫第九章估計約產生廢棄物 66,916 公噸，其中可外釋(含管制區內確認無污染)廢棄物 42,179 公噸。核三廠 1、2 號機運轉執照將分別於 113 年 7 月 27 日及 113 年 7 月 27 日屆期，台電公司於 110 年 7 月 26 日提出核三廠除役許可申請。原能會正進行實質審查。第三核能發電廠除役計畫第九章中估計約產生廢棄物 13,414 公噸、可外釋廢金屬 445 公噸(未預估混凝土)。國內三座核電廠除役廢棄

物與國外相關報告的比較如表 2，顯然國內預估廢棄物總量過低。

各國核設施將陸續除役，會產生大量的極低微放射性廢棄物，若無豁免及解除管制的措施，不但會浪費有限的資源，也會損害輻射防護的量能，不符合輻射作業的正當化與最佳化。IAEA 及各核能先進國家，都在研訂放射性廢棄物之解除管制基準，以解除其不必要之管制。

在國內可解除輻射防護管制的廢棄物，稱為「一定活度或比活度以下放射性廢棄物」。因此解除管制的規定，對核電廠除役產生的廢棄物管理至為重要，除可符合放射性廢棄物減量規定外，並可以減少後續處理、貯存、運送、最終處置所需費用。

#### 結論與建議

1.解除管制基準，不是用來判定該物質要不要進入管制體系；而是對在輻射管制體系之物質，確認其輻射衰減後，其影響達可忽略程度時，可解除其管制。大部份國家或國際組織，在綜合分析不

同情節後，取其較嚴格的數值，當作解除管制標準。

2.解除管制的輻射劑量標準，分為兩種情節：(a) 實際的曝露情節，對任何個人每年預期發生的有效劑量小於 10 $\mu$ Sv；(b) 低機率的曝露情節，每年的劑量不超過 1 mSv。

3.2014 年 GSR part 3 考慮到足夠低的輻射風險或持續法規管制的淨效益，集體劑量標準不再被視為解除概念的一部分，所以已不規範解除管制物質的總活度。

4.放射性廢棄物的活度濃度，若小於解除管制基準值，即可無條件解除管制，無須進行劑量評估分析。

5.若略高於解除管制基準值，但送至特定目的地並經特定的處理，評估造成個人之年有效劑量仍不會超過 10 微西弗，也可解除管制(有條件解除管制)，但必須進行年有效劑量的評估分析。有條件解除管制的活度濃度，不要超過豁免管制活度濃度限值。

表 2 核電廠除役廢棄物的比較(國外 1000MWe,單位：公噸)

廠別	核一廠 (2 機組)	核二廠 (2 機組)	N-1640 BWR	核三廠 (2 機組)	N-1640 PWR	SKI TR92	IAEA -65(德)
預估總量(A)	32,000	66,916	混凝土 355,000	13,414	混凝土 180,000	300,000	150,000~ 200,000
未受影響+ 可解除 (B)	18,435	42,179	73,600+ 281,000	445 (未預估混凝土)	36,900+ 143,000	>150,000+ 115,000	未說明
B/A	57.6%	63.0%	99.9%		99.9%	>88%	

# 極低微放射性廢棄物解除管制 活度濃度推導

作者 李境和

義守大學助理教授(退休)

## 前言

解除管制的輻射基準是以個人年有效劑量小於 10 微西弗為主。對於部分業者，執行輻射劑量評估較為困擾，若改以核種活度濃度 (Bq/g) 來作基準，業者較易執行。因此 IAEA 於 2005 年提出安全報告 No. 44，考量世界各地會員國可能遇到的各種情況，整理出保守的曝露情節，以計算出大量物質的解除活度濃度基準，供會員國參考使用。

IAEA SRS-44 推導出的核種解除活度濃度基準，適用於含人造核種或天然核種的所有類型固體物質，不適用於(1)食品、飲用水、動物飼料；(2)空氣中的氫氣；(3)人體內的  $^{40}\text{K}$ ；(4)運送物質。也不適用於液體與空浮的排放及環境中的放射性殘留物。

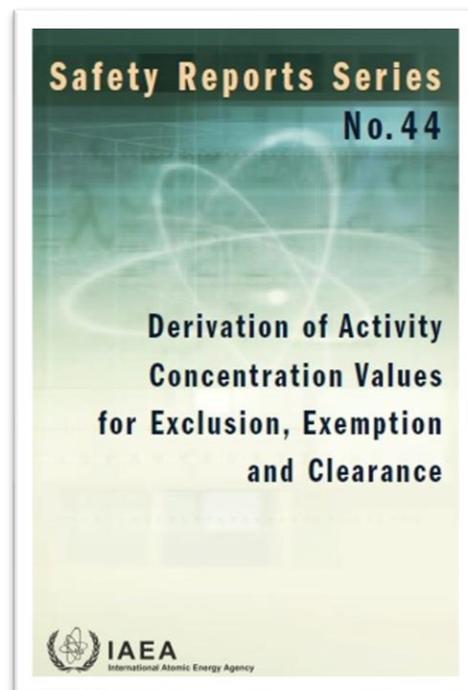
人造核種活度濃度推導的主要基礎是涵蓋了所有類型物質的所有典型曝露情節，考量了體外直接曝露、粉塵的吸入和吸入。推導的劑量基準：(1)實際參

數值的使用，年有效劑量的標準為  $10\mu\text{Sv}$ ；(2)低機率參數值的使用，年有效劑量的標準為  $1\text{mSv}$  且皮膚年等價劑量限值為  $50\text{mSv}$ 。若以上述的劑量標準，推導天然核種的活度濃度，可能會低於環境中的濃度。所以  $10\mu\text{Sv/y}$  對天然核種是不實用的，因此需考量全球的濃度分布。

## 活度濃度的推導

活度濃度推導的步驟為：(1)核種的選擇；(2)適當情節與參數值的決定；(3)核種  $1\text{Bq/g}$  的年劑量計算；(4)確認一組計算中最大年劑量的情節；(5)推導該核種的活度濃度值(以  $10\mu\text{Sv/y}$  除以  $1\text{Bq/g}$  的最大年劑量)；(6)四捨五入，取為 10 的倍數。

IAEA 整理世界上大量的情節，簡化為 8 種通用情節：(1)WL、(2)WF、(3)WO、(4)RL-C 與 RL-A、(5)RF、(6)RH、(7)RP、(8)RW。這些情節的輻



射曝露途徑：(1)體外曝露、(2)吸入曝露、(3)吸入曝露、(4)皮膚曝露。

WL：工人(worker)受到傾倒在掩埋場(landfill)污染物的曝露。曝露途徑有體外曝露、吸入污染粉塵、無意吸入污染物。

WF：工人(worker)在熔鑄廠(foundry)工作，如圖一，受到污染金屬的曝露。曝露途徑有體外曝露、吸入污染粉塵、無意吸入污染粉塵。

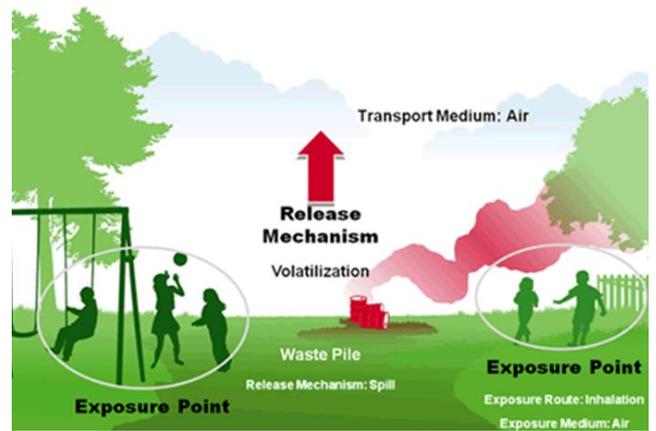
WO：工人(例如卡車司機)定期接觸污染的物質。包括受到工作場所內為處理與重複使用大型設備的曝露。曝露途徑有體外曝露。

RL-C 與 RL-A：生活在掩埋場或其他設施附近的個人，如圖二(C 代表小孩、A 代表成人)受到污染粉塵的曝露。曝露途徑有吸入污染粉塵、吸入污染土地上成長的食物。

RF：兒童受到熔鑄廠釋放出污染粉塵的吸入曝露。不考慮污染食物的消耗，因為已包括在 RL。



圖一 熔鑄廠曝露途徑考慮



圖二 生活在掩埋場附近的個人

RH：住民受到污染建物(建築瓦礫，礦渣，飛灰)的曝露。曝露途徑有體外曝露。

RP：污染物用於公共場所，居民受到曝露。曝露途徑有體外曝露、污染粉塵的吸入與嚥入。

RW：污染物的放射性核種遷移到含水層，會影響下流水井，污染地下水流入河流。造成污染飲用水、污染水的灌溉產生污染食物、污染河流中的魚類。曝露途徑有嚥入污染飲用水、污染食物、污染魚類。

若上述多種情節發生在同一人(如掩埋場的工人也住受污染的建物)，年劑量仍不必相加。因為原本劑量標準是 100 μSv/y，已除以 10 才成為 10 μSv/y。在特殊情況，可能同時發生高機率的曝露途徑(如掩埋場的工人直接處理污染物，其體外曝露、粉塵的吸入與嚥入，已加總計算)，其劑量已加總在同一情節中。

對上述每一情節，都會考慮的曝露情況：(1)曝露時間 $t_e$ 、(2)情節開始前污染物的衰減時間 $t_1$ 、(3)情節期間的衰減時間 $t_2$ 。設污染物的原始曝露率為 $\dot{x}_o$ ，進入情節的曝露率為 $\dot{x}_s = \dot{x}_o e^{-\lambda t_1}$ ，在情節期間的累積曝露

$$x = \int_0^{t_2} \dot{x}_s e^{-\lambda t} dt = \dot{x}_o e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda}$$

。累積劑量  $D = Cx = C\dot{x}_o e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda}$ ， $C$  為曝露-劑量轉換因子。考量污染物在情節期間的稀釋係數  $f_d$  及曝露時間  $t_e$ ，則年劑量。不同情節內  $t_e$ 、

$$E_{ext,C} = D f_d \frac{t_e}{t_2} = C \dot{x}_o t_e f_d e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}$$

$$= \dot{e}_{ext} t_e f_d e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}$$

$t_1$ 、 $t_2$  之參數，如表 1。

體外曝露的劑量：

$$E_{ext,C} = \dot{e}_{ext} t_e f_d e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}$$

。體外曝露情節的參數如表 2。

吸入曝露的劑量：

$$E_{inh,C} = e_{inh} t_e f_d f_c C_{dust} \dot{V} e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}$$

。吸入情節的參數如表 3。

粉塵越細，活度越高，故有濃縮因子  $f_c$ 。

嚥入曝露的劑量：

$$E_{ing,C} = e_{ing} q f_d f_c f_t e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}$$

。嚥入情節的參數如表 4。

年嚥入量( $q$ )細分的參數，係參考德國輻射防護法令提供的詳細參數，如表 5。

註：污染飲用水、污染蔬菜、污染魚的消耗分量在實際情節都假設佔 1/4；而低機率情節都假設 100%吃污染物，所以消耗分量假設為 1。

當雨水降至掩埋場，會將殘留污染帶到地下水層、地表水或井水。「污染井水」可能直接用來飲用，也可能用來灌溉；「污染表面水體」可能用來灌溉或造成魚的污染，則放射性核種可能進入人類食物鏈。這些被污染的飲用水、魚、蔬菜、水果及穀物都涉及放射性核種經水途徑的遷移。魚、蔬菜、水果及穀物內放射性核種的濃度，可經由污染水的濃度乘以轉移因子而得到。而污染水的濃度需考量掩埋場的特性而定，掩埋場的特性約可分為「污染區」、「不飽和區」、「地下含水層」。模擬污染水的遷移，係以 RESRAD 程式為基礎，開發為較簡單與保守的程式，用於估算殘留放射性物質引起的輻射劑量。所使用的水途徑場址參數如表 6。

皮膚污染的劑量：

$$E_{skin,C} = \dot{e}_{skin} t_e L_{dust} f_d f_c \rho e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}$$

。皮膚污染的參數如表 7。

表 1 不同情節內  $t_e$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  之參數值

	單位	情況	WL	WF	WO	RL	RF	RH	RP
			掩埋場工人	鑄造廠工人	其他工人	掩埋場居民	鑄造廠居民	房屋內居民	公共場所居民
曝露時間( $t_e$ )	時/年	實際	450	450	900	1000	1000	4500	400
		低機率	1800	1800	1800	8760	8760	8760	1000
情節前衰減時間( $t_1$ )	日	實際	30	30	30	30	30	100	100
		低機率	1	1	1	1	1		
情節期間衰減時間( $t_2$ )	日	實際	365	365	365	365	365	365	365
		低機率	0	0	0	0	0		

表 2 體外曝露情節的參數值

	單位	情況	WL	WF/WO	RH	RP
			掩埋場工人	鑄造廠或其他工人	屋內居民	公共場所居民
稀釋係數( $f_d$ )		實際	1	0.5	0.1	0.1
		低機率	1	1	0.5	0.5
物質密度	$\text{g/cm}^3$		1.5	1.5	1.5	1.5
幾何形狀			地面上 1m 高·半無限射源	離裝載物品 (5m×2m×1m) 1m 處·無屏蔽	天花板、兩道牆 (3m×4m、高 2.5m)·20cm 厚	地面上 1m 高·半無限射源
劑量率係數 ( $\dot{e}_{ext}$ )	$(\mu\text{Sv/h}) / (\text{Bq/g})$		成人	成人	成人	1~2 歲兒童
			依放射性核種及幾何形狀而定			

表 3 吸入情節的參數值

	單位	情況	WL	WF	RL-A	RL-C	RF	RP
			掩埋場工人	鑄造廠工人	掩埋場居民		鑄造廠居民	公共場所居民
稀釋係數( $f_d$ )		實際	0.1	0.02	0.01	0.01	0.002	0.1
		低機率	1	0.1	0.1	0.1	0.01	1
空氣粉塵濃度( $C_{dust}$ )	g/m <sup>3</sup>	實際	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
		低機率	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
濃縮因子( $f_c$ )			4	1~70	4	4	1~70	4
呼吸速率( $\dot{V}$ )	m <sup>3</sup> /h		1.2	1.2	1.2	0.22	0.22	0.22
劑量係數( $e_{inh}$ )	μSv/Bq		5μm 工人	5μm 工人	成人	兒童 1~2 歲	兒童 1~2 歲	兒童 1~2 歲

表 4 吸入情節的參數值

	單位	情況	WL/WF	RP	RL-A	RL-C
			掩埋場或鑄造廠工人	公共場所居民	掩埋場居民	
稀釋係數( $f_d$ )		實際	0.1	0.1	0.01	0.01
		低機率	1	1	0.1	0.1
濃縮因子( $f_c$ )			2	2	n.a.	n.a.
根部轉移因子( $f_r$ )			n.a.	n.a.	[12]	[12]
年吸入量(q)	g/y 或 kg/y	實際	10 g/y	25 g/y	88 kg/y	68kg/y
		低機率	50 g/y	50 g/y	264 kg/y	204 kg/y
劑量係數( $e_{ing}$ )			工人	兒童 1~2 歲	成人	兒童 1~2 歲

表 5 年吸入量(q)細分的參數值

	兒童消耗量(1~2 歲) (kg/y)		成人消耗量(> 17 歲) (kg/y)	
	實際	低機率	實際	低機率
葉菜類蔬菜	6	18	13	39
非葉菜類蔬菜	17	51	40	120
水果	45	135	35	105
全部蔬菜與水果	68	204	88	264
飲用水	100	200	350	700
魚	0.6	3	1.5	7.5

表 6 水途徑場址參數值

	單位	實際	低機率
<b>污染區(Contaminated zone)</b>			
情節開始前的衰減	年	1	1
污染區的面積	m <sup>2</sup>	5,000	20,000
污染區的厚度	m	5.00	5.00
污染區的密度	g/cm <sup>3</sup>	1.8	1.8
滲透率(infiltration rate)	m/y	0.2	0.2
灌溉率(irrigation rate)	m/y	0.2	0.2
經污染區的滲漏(Seepage through contaminated zone)(計算)	m <sup>3</sup> /y	1,000	4,000
污染區的總孔隙率		0.4	0.4
飽和水力傳導係數(Saturated hydraulic conductivity)	m/y	5,000	5,000
體積水含量(Volumetric water content)		0.16	0.16

	單位	實際	低機率
<b>不飽和區(Unsaturated zone)</b>			
不飽和區的厚度	m	2.00	0.00
不飽和區的密度	g/cm <sup>3</sup>	1.80	1.80
不飽和區的總孔隙率(Total porosity)		0.4	0.4
不飽和區的有效孔隙率(Effective porosity)		0.2	0.2
體積水含量		0.16	0.16
<b>地下水含水層(Groundwater aquifer)</b>			
含水層的厚度	m	5.00	5.00
污染區垂直於含水層的寬度(Width of contaminated zone perpendicular to aquifer)	m	100	100
地下水孔隙水流速(Groundwater porewater velocity)	m/y	1,000	500
含水層的有效孔隙率		0.25	0.25
含水層的流量率(Flow rate of aquifer) (計算)	m <sup>3</sup> /y	1.25E+05	6.25E+04
滲漏與地下水間的稀釋係數(Dilution factor between seepage and groundwater) (計算)		7.94E-03	6.02E-02

	單位	實際	低機率
<b>表面水(Surface water)</b>			
河流的流量率(Flow rate of river)	m <sup>3</sup> /s	5.00	5.00
滲漏與河流間的稀釋係數(Dilution factor between seepage and river) (計算)		6.34E-06	2.54E-05
<b>灌溉參數(Irrigation parameter)</b>			
非葉菜類蔬菜生長季節的長度	y	0.17	0.17
葉菜類蔬菜生長季節的長度	y	0.25	0.25
植被的風化去除常數(Weathering removal constant for vegetation)	1/y	20	20
留在植被上的放射性核種的分量(Fraction of radionuclides retained on vegetation)		0.25	0.25
非葉菜類蔬菜的葉到食物的轉移係數(Foliage to food transfer coefficient for non-leafy vegetables)		0.1	0.1
葉菜類蔬菜的葉到食物的轉移係數(Foliage to food transfer coefficient for leafy vegetables)		1	1
土壤的有效表密度(Effective surface density of soil)	kg/m <sup>2</sup>	225	225
非葉菜類蔬菜的濕重作物產量(Wet weight crop yield for non-leafy vegetables)	kg/m <sup>2</sup>	0.7	0.7
葉菜類蔬菜的濕重作物產量(Wet weight crop yield for leafy vegetables)	kg/m <sup>2</sup>	1.5	1.5

表 7 皮膚污染的參數值

	單位	皮膚情節
曝露時間( $t_e$ )	h/y	1800
灰塵層厚度( $L_{dust}$ )	cm	0.01
灰層密度( $\rho$ )	g/cm <sup>3</sup>	1.5
稀釋係數( $f_d$ )	無單位	1
濃縮係數( $f_c$ )	無單位	2
情節開始前的衰減時間( $t_1$ )	日	0
情節期間的衰減時間( $t_2$ )	日	0
劑量率係數( $\dot{e}_{skin}$ )	( $\mu$ Sv/h)/(Bq/cm <sup>2</sup> )	依核種而定

## 結論與建議

1. IAEA SRS-44 已保守考量具一般性、通用性的八種情節：(1)WL、(2)WF、(3)WO、(4)RL-C 與 RL-A、(5)RF、

(6)RH、(7)RP、(8)RW。這些情節的輻射曝露途徑：(1)體外曝露、(2)吸入曝露、(3)嚥入曝露、(4)皮膚曝露。推導出各核種的質量活度濃度解除管制基準。

2. 評估方法可參考 IAEA SRS-44 報告及 NUREG 1640 報告的曝露情節，但參數值必須引用國內的資料，若國內並無相關資料，可參考 IAEA SRS-44 報告內的參數值。



## 訓練班課程(111 年度)

放射性物質或可發生游離  
輻射設備操作人員研習班

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

輻射防護繼續教育訓練班  
(3/6 小時)

### A 組 36 小時-許可類

**A1 高雄** 文化大學推廣部

1 月 18 日~1 月 25 日

**A2 新竹** 帝國經貿大樓

2 月 15 日~2 月 22 日

### B 組 18 小時-登記類

**B1 台中** 文化大學推廣部

1 月 5 日~1 月 7 日

**B2 高雄** 文化大學推廣部

1 月 12 日~1 月 14 日

**B3 新竹** 帝國經貿大樓

2 月 9 日~2 月 11 日

**B4 台北** 建國大樓

2 月 16 日~2 月 18 日

**B5 台中** 文化大學推廣部

3 月 9 日~3 月 11 日

**B6 高雄** 文化大學推廣部

3 月 16 日~3 月 18 日

**B7 台北** 建國大樓

3 月 29 日~3 月 31 日

### 員 39 期

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

6 月 27 日~7 月 1 日

第二階段

7 月 4 日~8 日

第三階段

7 月 25 日~29 日

第四階段

8 月 1 日~4 日

### 進階 24 期

8 月 10 日~12 日

8 月 15 日~17 日

### 台北 進出口商業同業公會

3 月 4 日(上午&下午)

新竹 經濟部專研中心

3 月 17 日(上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

3 月 24 日(上午&下午)

台中 文化大學推廣部

4 月 21 日(上午&下午)

### 鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班

#### 鋼 1 高雄 文化大學推廣部

4 月 19~4 月 20 日

#### 鋼 2 新竹 帝國經貿大樓

9 月 15~9 月 16 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

經濟部專研中心：新竹市光復路二段 3 號

#### 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 林玗汶 (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 111 年第 1 次「輻射防護專業測驗」及「操作人員輻射安全證書測驗」公告及簡章。[訊息連結](#)

111 年第 1 次「輻射防護專業測驗」及「操作人員輻射安全證書測驗」，定於 111 年 4 月 30 日舉行，報名日期為 111 年 2 月 14 日至 3 月 4 日，相關事項請點選下方→(相關連結)詳閱簡章。

相關連結：[輻防及輻安測驗](#) (發布日期 111 年 1 月 14 日)

### 國內新聞

- ➔ 中央通訊社報導「中油探井射源棒卡地底 原能會：沒有輻射安全疑慮」。[訊息連結](#)

中油採油工程處 8 月執行探井電測作業時，內含低風險射源的探測器卡阻於地下約 2800 公尺，至今未能順利回收射源棒。原能會今天表示，探測器輻射源沒有安全疑慮，請民眾放心，中油預計明年 1 月初提交完整打撈計畫書。

原能會今天發布新聞稿表示，中油公司探採事業部採油工程處今年 8 月 6 日通報原能會，在苗栗執行天然氣探井電測作業時，發生探測器卡阻於地下約 2800 餘公尺處。

原能會說明，這個探測器內含 3 顆射源，2 顆銻-137 及 1 顆氦-3，是原能會列管登記備查密封射源，皆屬於國際原子能總署 (IAEA) 射源風險分級最低等級的第 5 類低風險射源。

原能會表示，接獲通報後，即要求中油要確保環境輻射安全，並應積極進行設備故障排除作業；經評估，卡阻地底的射源並無腐蝕洩漏或破裂之虞，應也沒有對民眾與環境造成輻射安全風險的疑慮。

原能會受訪時補充，此事件之所以沒有輻射安全疑慮，第一，以能量活度而言，銻-137 射源位在 2.8 公里深，已無地表輻射暴露問題；第二，深井屬於高壓密閉空間、氧氣少，因此不會造成腐蝕；第三，射源外頭仍有金屬等特殊包覆。

原能會也派員至現場監督故障排除作業，定期執行環境輻射偵測，確認作業場所周圍環境輻射均屬正常範圍。

原能會指出，採油工程處於故障發生至 12 月中旬期間，共執行 5 次電纜打撈的故障排除作業，但因技術問題，至今未能順利回收射源棒；依游離輻射防護法相關規定，放射性物質機具若未於 6 個月完成修復，應申請射源停止使用，中油也已完成射源停用申請。

原能會表示，後續仍持續要求中油應參考國際作法，採行更先進的鑽機打撈工法，進行射源打撈，並做好完善的打撈計畫；中油預計明年 1 月初之前，會將打撈時程規劃提交給原能會。（發布日期 110 年 12 月 22 日）

- ➡ 聯合新聞網報導「就醫放射線檢查照了多少輻射 健保行動快易通 App 可查」。[訊息連結](#)

因應醫療需求接受放射線檢查，民眾從未能得知自己暴露的輻射劑量有多少。衛福部健保署宣布，即起自「全民健保行動快易通」App 中，開放民眾查詢自己當年度暴露的檢查輻射量，也期待民眾在接受不同醫院，但相同疾病治療時，無須再做相同檢查，可多詢問必要性。不過醫改會指出，為節省健保費公布資訊，恐造成民眾不必要的恐慌。

國人最常檢查的前五名 X 光檢查項目，依序為胸腔檢查、下肢骨各處骨頭及關節檢查、脊椎檢查、上肢骨各處骨頭及關節檢查及腎臟、輸尿管、膀胱檢查。特殊造影檢查前五名，分別為電腦斷層造影、磁振造影、乳房造影術、X 光骨骼密度測定及單純性血管整形術。

健保署統計二〇一六至二〇二〇年，進行放射線檢查人數，每年平均為八〇七萬六千多人，每人平均檢查四點一四次，每人平均輻射劑量為三·三毫西弗。另，輻射曝露量逾一百毫西弗約有一千二百多人，多為癌症患者。

依原能會資料顯示，常見的 X 光檢查輻射量相對低，電腦斷層相對高，如胸部電腦斷層輻射劑量達四點六到六點九毫西弗，胸腔 X 光輻射劑量約〇點〇二毫西弗。輻射量最高仍以「癌症放療」曝露量最大，總劑量介於二萬到十萬毫西弗。

健保署醫務管理組專委林右鈞表示，美國醫學物理協會二〇一一年曾發表公開聲明，如單次放射線檢查輻射劑量小於五十毫西弗，即使一年內多次檢查，但總劑量小於一百毫西弗，輻射劑量的潛在風險可忽略，但若超過一百毫西弗就應多注意，只是癌症與輻射相比，癌症對於性命威脅更大。民眾不需擔心輻射劑量，拒絕接受放射線檢查。

健保署長李伯璋表示，開放輻射劑量查詢，是要讓民眾自我把關，若醫師要求重複上一家醫院的放射線檢查項目，患者可詢問必要性，避免重複檢查。

不過醫療改革基金會執行長林雅惠說，健保署公布放射線檢查輻射量，恐使民眾有更多擔憂，不願進行必要的檢查，健保署應提供民眾真正需要的資訊，如自費醫療、整合門診等，而不是公布輻射劑量引發民眾恐慌，此舉也不會遏止重複檢查的問題。（發布日期 110 年 12 月 24 日）

- ➡ 新浪新聞報導「稀土元素釷的新應用：核輻射防護材料有望迎來無鉛化時代」。[訊息連結](#)

科研人員設計了一種高性能無鉛的表面改性氧化釷/碳化硼/高密度聚乙烯復合屏蔽材料，其防護性能甚至優於我國大科學裝置——全超導托卡馬克科學實驗裝置中原有的摻硼聚乙烯准直屏蔽體。

通常在人們的印象里，核輻射防護材料往往離不開厚重的鉛。例如，醫院 X 射線檢查室所用的防護門就是由鉛材料製造的。然而鉛的生物學毒性對環境不友好，使其應用範圍受到限制。

日前，中國科學院合肥研究院等離子體物理研究所科研團隊取得了一項新進展，有望改變人們對核輻射防護材料的傳統認知。該團隊研製了一類高性能、無鉛化的中子及伽馬射線復合屏蔽材料，並圍繞材料的屏蔽性能與機制展開了實驗研究和模擬計算驗證，相關成果發表在核科學技術期刊《核材料與能源》上，並申請了發明專利。

### 傳統屏蔽材料難以滿足現代社會輻射防護需求

中子是電中性粒子，不受庫侖力作用，穿透性極強，且在碰撞過程中會產生次級伽馬射線，是現代核輻射防護的研究重點。而科學高效的中子屏蔽方案，會在選用高原子序數（原子序數是指元素在周期表中的序號）材料和低原子序數材料的同時，還選用上子吸收材料，以進行復合屏蔽。例如常用的由鉛、硼、聚乙烯組合而成的鉛硼聚乙烯板，就是這種復合屏蔽材料。

鉛硼聚乙烯是一種傳統的屏蔽材料，其中聚乙烯具有較高的含氫量，氫原子對快中子具有良好的慢化作用；硼原子能吸收熱中子；鉛原子除了對具有一定能量的快中子有屏蔽作用外，對伽馬射線的屏蔽也特別有效。相比其他核屏蔽材料，鉛硼聚乙烯除了具有高效的核屏蔽性能外，還具有質量輕、體積小的特點，已廣泛用於核電、核動力、軍工、航空、醫療等領域中的核防護。

但隨著原子能工業的發展，人們必須採取嚴密的防護措施來保障涉核人員的身體健康和環境安全。而鉛硼聚乙烯等傳統材料屏蔽功能單一、屏蔽性能有限，有的熱力學性能不佳，難以滿足現代社會對核輻射防護的要求，並且這些含鉛的防護材料，往往使用幾年就會失去防護效果，淘汰後流入環境中，會對周圍環境造成污染。

### 新防護材料具有優異的綜合屏蔽性能

而稀土元素釷在自然界中通常以無毒的氧化釷形式存在，且其平均熱中子吸收截面非常高，不但耐高溫，還具有良好的伽馬射線屏蔽性能。科研人員根據其材料特性，設計了一種高性能無鉛的表面改性氧化釷/碳化硼/高密度聚乙烯復合屏蔽方案。

首先，研究人員採用偶聯劑對氧化釷進行表面改性處理，提高了其在基體內部的界面相容性和彌散性，使輻射粒子更充分地與材料內部的功能組元相互作用從而迅速衰減。其次，研究人員設計的復合材料，採用了釷—氫—硼體系對中子進行慢化和吸收，利用輕、重核與中子的相互作用特性以及釷和硼的高熱中子吸收截面特性，使高能入射中子與釷產生非彈性碰撞，與氫、碳、氧發生彈性碰撞直至成為熱中子，最後被釷和硼吸收。其中釷作為重核元素還兼具吸收伽馬射線的功能。

科研人員通過進一步研究發現，改性納米氧化釷對復合材料的性能提升明顯優於改性微米氧化釷及未改性的納米和微米氧化釷，並且在 6 厘米以下較薄的材料厚度時，氧化釷的改性處理對復合材料輻射屏蔽性能的提升尤為明顯。

而後，科研人員將他們研製的新型無鉛核輻射防護材料送往北京市射線應用研究中心，進行樣品屏蔽實際測試。測試的結果令人滿意：在鏷-252 中子源輻照環境下，該復合材料在厚度為 15 厘米時達到了 98% 的中子屏蔽率；在銫-137 和鈷-60 伽馬源輻照環境下，復合材料在厚度為 15 厘米時分別達到了 72% 和 60% 的伽馬屏蔽率。

值得一提的是，這種新型無鉛核輻射防護材料綜合屏蔽性能，甚至優於我國大科學裝置——全超導托卡馬克科學實驗裝置中原有的摻硼聚乙烯准直屏蔽體。說明這種新型無鉛核輻射防護材料可作為改進型替代材料，也可作為其他中子—伽馬混合場的防護材料，在受控核聚變的科學攻關當中，提供更好的核輻射防護手段。（發布日期 111 年 1 月 5 日）

- ➡ 台灣產經新聞網報導「輻射之下半導體電子產品依然正常嗎？長庚大學、長庚醫院與 SGS 合作測試」。 [訊息連結](#)

應用在醫療、航太、軍事以及核能設備的半導體電子產品，經常受到來自太空輻射粒子包含質子、電子與重離子的干擾。因此須檢驗各種輻射環境之下，半導體相關電子產品是否依然可靠能用，才能讓人安心。

長庚大學、長庚醫院與 SGS 台灣檢驗科技股份有限公司於 2022 年 1 月 6 日上午簽訂三方合作意向書，針對半導體電子輻射測試議題，共同發展相關技術及實驗室合作。未來三方將合作在國內培育優秀研發人才、攜手研發關鍵技術，厚植台灣半導體電子產業的可靠度技術實力。

半導體電子產品的安全與可靠度要求日趨嚴格，因此「功能安全 Functional Safety」規範應運而生。功能安全是以標準量化評估並確保各式產品、設備及工業系統的安全功能，整個生命週期皆能達預期水準，並將可能的危害風險降到最低程度。在汽車電子與低軌衛星的功能安全標準中，輻射 Soft Error Rate (SER) 暫態失效率的評估是當今重要課題，台灣半導體製造公司極需建立相關測試與分析的能量。

此次三方的簽約聯盟由長庚大學可靠度科學技術研究中心、林口長庚醫院與 SGS 台灣檢驗科技公司攜手合作，湯明哲校長、林志鴻副院長與 SGS 邱志宏總裁代表簽訂合作意向書，將建立輻射測試可靠度驗證分析能量。同時，藉由理論與實務兼具的訓練課程，營造一個與產業界無縫接軌的學習環境。

長庚醫院質子中心具有先進的輻射測試設施，是國內首屈一指的輻射測試設備服務機構，長庚大學可靠度中心向來為全國最傑出可靠度研究中心，為加強專業人才培育及先進科技技術研發，藉由產學研發夥伴關係建立，結合產業界實務需求與學校研發能量，讓產業界需求與經驗回饋，成為教學的動力與發展泉源，達到產學資源整合，協助半導體產業技術提升。

長庚大學可靠度中心表示，三方將以臺灣半導體產業的明確研發標的，一起發展輻射測試與分析議題相關技術及實驗室合作。國內產學研各界，將可在此開放式研發中心與平台之上，深化技術交流，共同加入研究與推廣的行列，培植未來台灣可靠度教育的基礎體產業的輻射測試技術人才，共創臺灣產業技術提升。

長庚大學可靠度科學技術研究中心介紹：

可靠度中心成立於 2015 年，是亞洲唯一進行整體可靠度研究的研究中心。中心的使命是了解產品/材料衰退的科學，將科學知識轉化為可靠度設計技術，並有效地評估和預測產品的可靠度和壽命。陳始明主任是從新加坡南洋理工大學特聘，從 1984 年開始他就從事可靠度工作，包括 10 年在國際公司的經驗。他也是 IEEE 國際可靠度標準技術委員會的委員。自成立以來，中心已與十家公司合作，幫助他們提高產品可靠度，並解決國內外客戶的疑難投訴。中心也是第一個在可靠度工程之上引入可靠度科學，為工業可靠度設計提供建議的中心。中心是台灣唯一一所執行電子輻射可靠度的中心。

長庚醫院介紹：

長庚醫院具備最新的診療設備與技術，除了致力於促進全民健康與提升台灣醫療水準，近年更積極投入協助科技與創新產業之研發。「林口長庚質子暨放射治療中心」於 2015 年底開始正式服務病患。為提升質子領域之相關研究水平與協助國內高科技產業發展，於 2016 年與清華大學產學合作共同建置「粒子物理暨照射核心實驗室」，為目前台灣唯一能提供高能質子照射的實驗室。

實驗室所用的粒子射線可調控的彈性較高，用以模擬地面中子輻射環境情況，加速測試地面輻射環境對電子元件的影響。與長庚大學可靠度中心合作，將協助 SGS 對於自駕車用晶片、高精密之電子產品、通訊設備等電子元件，建立標準照射、可靠度驗證之流程，將協助提升台灣高科技產業之競爭力。

SGS 介紹：

SGS 集團在測試、驗證、檢驗服務是世界公認的領導者，服務範疇涵蓋你我日常生活的食衣住行育樂。拜科技所帶來的便利性，現今的人們已離不開電子產品，因此產品的「功能安全」議題越顯重要，有鑒於此，SGS 致力以「標準量化」評估並確保各式產品、設備及工業系統之安全功能，並由設計、製造、運轉、維護及除役等方面切入，預估其整個生命週期，將可能之危害風險降到最低程度。SGS 台灣團隊致力於在台本地之發展，除了每年在台投資、培育本土人才之外，另一重要使命為關注歐美先進國家之最新技術，以適時引進新技術，協助台灣產業提升競爭力。

( 發布日期 111 年 1 月 7 日 )

➡ 中央通訊社報導「遭質疑輻射檢驗能力 原能會強調落實食安邊境管制」。 [訊息連結](#)

行政院宣布有條件開放福島 5 縣食品，外界質疑原能會對輻射污染源銻 90 的檢驗能力。原能會今天表示，除核能研究所實驗室檢測能力通過國際試驗，國內還有台電放射試驗室等可進行檢測服務，強調會落實食安邊境管制措施。

聯合新聞網報導，前國健署長邱淑媿在國民黨立法院黨團舉行的核災地區食品進口對國人健康影響公聽會表示，福島核災核輻射污染源銻 90 與銻 137 半衰期都很長，5 歲孩童吃了到 65 歲體內還殘存 25%。

邱淑媿指出，目前要檢驗銻 90，委外一件須花新台幣 1 萬元、30 個工作天，質疑原能會是否有能力檢驗。

對此，原能會今天發布新聞稿表示，依核能研究所規費收費標準，銻 90 核種分析（使用改良式吸附樹脂法）每樣品 1 萬 2500 元；核研所已提供外界本項技術服務達數 10 年，作業時間約需 7 日，每月可提供 20 件檢測服務，且實驗室歷年通過國際原子能總署（IAEA）及財團法人全國認證基金會（TAF）能力試驗，證明核研所具有銻 90 檢測能力。

原能會說，國內還有其他提供銻 90 檢測服務的實驗室，例如原能會輻射偵測中心，作業時間約需 21 日，每月可提供 10 件檢測服務；台電放射試驗室，作業時間約需 25 日，每月可提供 24 件檢測服務。

原能會強調，會落實行政院食品安全邊境管制措施，於第一線為食品安全把關，並秉持比國際標準更嚴格的科學檢驗，為國人食品提供公正檢驗數據，讓國人安心享用安全無慮的食品。

( 發布日期 111 年 2 月 10 日 )

# 極低微放射性廢棄物解除管制的偵測

作者 李境和  
義守大學助理教授(退休)

## 解除管制的偵測

核能電廠除役將產生大量可免於管制的物質，須要經偵測和評估，才可外釋。IAEA 出版的 SRS-67 報告旨在協助營運者和技術支援組織，去規劃、執行和評估擬從管制中外釋物質的偵測結果，並隨後驗證是否符合既定的標準。也提供偵測儀器與技術的建議。

IAEA SRS-67 報告不涉及土地偵測，食物、飲用水、動物飼料的活度濃度，也不適用於空氣中的氫氣濃度、人體中的<sup>40</sup>K、及運送物質。偵測策略以物流描述，如圖 1。

含多種核種物質的解除管制標準：某物質含有多種放射性核種，其第 i 核種的活度濃度比例為  $f_i$ ，解除管制活度濃度為  $CL_i$ ，設該物質的總活度濃度為  $C$ ，該物質須滿足  $\sum_i \frac{C \times f_i}{CL_i} \leq 1$ ，才得以解除

管制。故有效解除管制活度濃度  $CL_{eff}$  滿足  $\sum_i \frac{CL_{eff} \times f_i}{CL_i} = 1 \rightarrow \frac{1}{CL_{eff}} = \sum_i \frac{f_i}{CL_i}$ 。

可解除物質的分類：(1)依物質的型態分群(設備、廢鐵、混凝土塊...)。(2)依輻射風險劃分為特定區域/類別。(3)改

善受偵測不同群組物質的均質性。(4)證明每物質群組均符合解除基準。

如果物質含有多種核種，選擇重要放射性核種  $\sum_{j=1}^{significant} \frac{C_j}{CL_j}$  之步驟：

- (1) 第一步，選擇關鍵放射性核種，具有相對較高的 C/CL 值，且易於測量，為  $(C/CL)_{key}$ 。
- (2) 依 C / CL 值排序，選擇  $(C_j/CL_j)/(C/CL)_{key} > 0.01$  的放射性核種，為顯著放射性核種。

$$(3) \text{ 計算 } F1 = \frac{\sum_{j=1}^{all} \frac{C_j}{CL_j} - \sum_{j=1}^{significant} \frac{C_j}{CL_j}}{\sum_{j=1}^{all} \frac{C_j}{CL_j}}$$

- (4) 如果  $F1 < 0.1$ ，則已選出要偵測的一組重要放射性核種；如果  $F1 > 0.1$ ，則再加入一個核種，直到  $F1 < 0.1$ 。

## 偵測儀器設備

測量儀器：可分為游離腔、比例計數器、蓋革偵檢器、閃爍偵檢器、固態偵檢器。其特點簡述如下：(1)游離腔：偵測效率低、價錢貴、體積大，不用在解除管制。(2)比例計數器：薄窗型用於偵測 $\alpha$ 或 $\beta$ ；厚窗充氬氣型用於偵測低能 X 光。(3)蓋革偵檢器：薄窗型用於 $\beta$ 表面污染偵測。

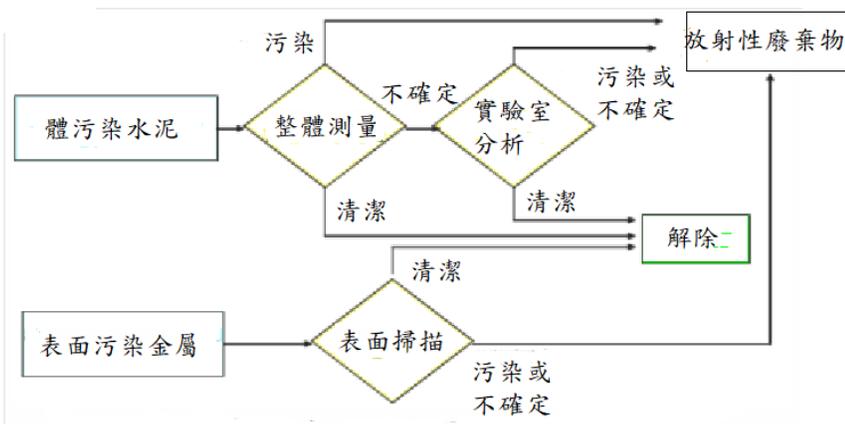
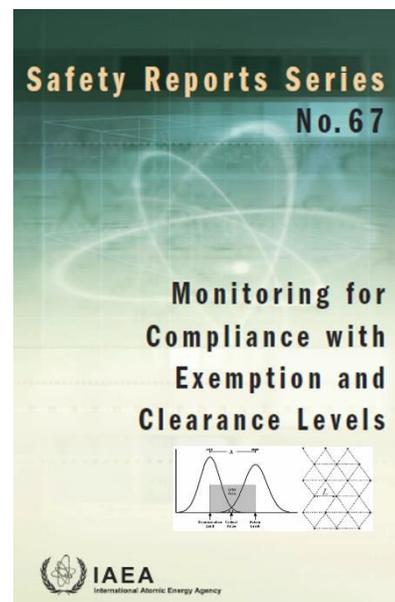


圖 1 偵測流程

(4)閃爍偵檢器：用於 $\alpha$ 、 $\beta$ 、低能 $\gamma$ 或 X 光偵測；體 $\gamma$ 測量，如箱型偵檢器。(5)固態偵檢器：用於體污染活度偵測。

箱型偵檢器：大面積閃爍偵檢器( $4\pi$ )，如圖 2。具準直儀現場 $\gamma$ 能譜儀：HPGe 固態偵檢器，以圓屏蔽元件圍繞成錐形狀，度量某面積的污染活度或活度濃度，會限制儀器的靈敏度。調整錐形角度，使度量面積約  $1\text{m}^2$ ，如圖 3。

儀器選擇一般要點與考量：先了解偵測的活度濃度、儀器性能及潛在污染物的特性。選擇適當的儀器及偵測技術。考量事項：(1)關心甚麼核種？(2)核種會射出 $\alpha$ 、 $\beta$ 或 $\gamma$ /X 輻射嗎？(3)射出輻射的能量？(4)物質污染是體污染或表面污染？(5)如果是表面污染：(a)表面是否光滑不易滲透？(b)是平坦的表面？(c)表面是否被塗過油漆？(d)表面是否乾淨？(6)可以使用相關因子嗎？(7)關鍵的放射性核種是什麼？特定儀器的選擇與考量：(1)該儀器足夠靈敏(是否可檢測到解除標準的 1/10)；(2)儀器對背景輻射的反應不受到限制；(3)在感興趣的能量範圍內；(4)偵測器堅固耐用並受到保護，使用中不易損壞；(5)偵測器對磁場和電磁場無響應；(6)偵測器對飽和過程(即在高輻射水平下)不敏感；(7)必要時，偵測器能夠區分出 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 輻射；(8)校正和測試程序可輕鬆實現；(9)儀器可以進入必要的區域(如管道內)，且可在適當距離內使用；(10)儀器易於操作、維護、有警報。

體污染與面污染之解除管制偵測：(1)推導表面污染值通常基於適當的模型和情節。若僅從假設物質的活度濃度  $A_m$  滲透某深度  $d$  和該物質密度  $\rho$ ，去推導表面污染值  $A_s = A_m \times \rho \times d$ ，會與從專用表面模型和情節推導出的表面特殊解除值不同。(2)受污染物質要從管制



圖 2 箱型偵檢器



圖 3 具準直儀 $\gamma$ 能譜儀

外釋，需要先進行除污，以達到適當的表面活度值，然後再進行解除檢查。儘管在直接偵測之前，需先對物品進行除污，但仍需要對非固著污染進行擦拭檢查，以驗證是否符合非固著污染限值。(3)如果物質是多孔性的或曝露於中子場，體活度可能是一個問題，但活度濃度也仍適用。(4)表面污染的物質必須證明符合質量比解除標準。

為解除管制物質，偵測物質的活度濃度是不夠的；還需說明偵測物質的質量、體積或面積，及可信度，同時要確認並非故意用乾淨的物質來稀釋以達到可解除的活度濃度值。

管制機關在以下情況下，可以允許更大的平均質量或面積：(1) 物質被均勻污染。最大濃度須小於解除標準的十倍；(2) 根據來源、污染的性質、材料的類型(如拆除的大型設備的碎片)；(3) 物質的活度濃度值遠低於解除標準；(4) 平均量，質量不超過 1 噸、體積不超過  $10\text{m}^3$ 、面積不超過  $1\text{m}^2$ 。

豁免或解除管制物質通常要分批處理。每批次外釋的物質，必須相同類型、

相同的放射性核種混合物、相同的放射性核種沉積歷史或被活化、相同的背景等。

選擇了偵測技術後，則應將建立的解除值轉換為適用於該偵測技術的測量單位。例如，儀器的讀取為計數率(cps)，而活度濃度常為  $\text{Bq/g}$ 。要求操作儀器的技術人員能夠將儀器讀數轉換為活度濃度，再進行比較，還應考慮測量的不確定度及背景計數率。

### 偵測採樣

解除管制物質的偵測，存在許多不確定性，包括：(1) 物質特性的含糊不清：包括物質體積或質量的不精確估計，及污染值和放射性核種混合物的不正確。(2) 偵測技術和測量結果的不確定性。(3) 難以量化的人為錯誤：例如記錄不當、樣品丟失、標籤不正確、樣品製備過程中的錯誤(例如交叉污染和測量設備污染)。

為符合豁免或解除管制的偵測，考慮天然背景的貢獻是重要的。天然背景取決於要外釋物質(天然或人造)的放射性核種含量及偵測的區域。

說明下列重要問題，以確保樣品可提供解除管制決策所需的信息：(1)採樣位置；(2)採樣數目；(3)最小樣品量；(4)樣品的收集、貯存與準備；(5)統計測試。

(1) 採樣位置：在已知或懷疑存在污染的地方取樣。如果已知污染僅在物體的表面上，則僅需要從表面本身取樣。通常，將採樣位置選擇為在採樣網格的交界處。圖 4 顯示了一個在表面上施加正方形和三角形網格的示例，其中需要 20 個表面樣本。

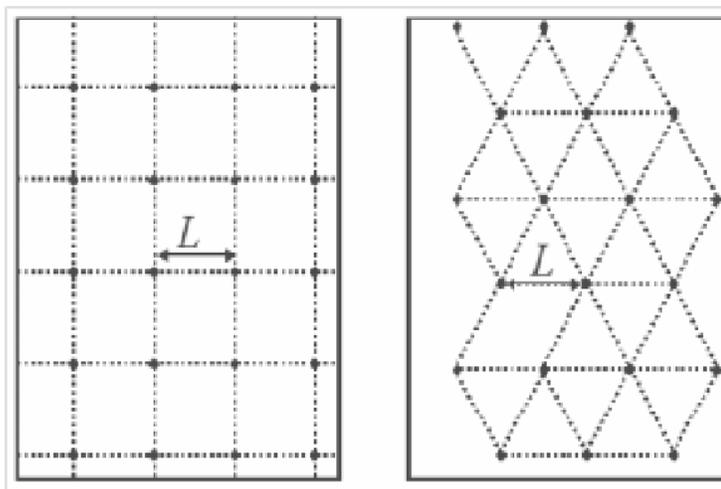


圖 4 正方形和三角形網格的採樣位置

設總採樣面積為 A、所需採樣數目為 N。兩個相鄰介面之距離為 L。

正方形： $N \times L^2 = A \rightarrow L = \sqrt{\frac{A}{N}}$

三角形： $N \times L \times \frac{\sqrt{3}}{2}L = A$

$\rightarrow L = \sqrt{\frac{2A}{\sqrt{3}N}} = \sqrt{\frac{1}{0.866} \frac{A}{N}}$

(2) 採樣數目：樣品數量的增加，可更精確地估計物質中活度值的中值和標準差。為統計一致性測試所需的最少樣本數量，取決於活度濃度的中位數(m)和標準差(σ)對解除基準(CL)的比值，如表 1。在某些情況下，如果為測量活度濃度的結果，而必須增加樣品數量：  
(a)從抽樣中獲得的中位數高於預期；  
(b)測得的活度濃度的標準差超過了統計測試決定的值。

初步測量：活度濃度中值為 0.08 Bq / g，標準差為 0.02 Bq / g，解除濃度為 0.1 Bq / g，且決策誤差α= 5%和β= 10%，則符號測試所需的樣本數量為 23。

(3) 最小樣品量：從將使用的分析方法中推斷出最小樣本量。如果樣品中的活度濃度是解除濃度的很大一部分 (>1/10)，則樣品須在檢測系統中能提

表 1 採樣數目

Normalized standard deviation (σ/CL)	Normalized median concentration (m/CL)						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
0.2	11	11	11	11	12	15	23
0.3	11	11	12	14	17	23	40
0.4	12	13	15	18	23	37	71
0.5	14	16	18	23	32	52	107
0.6	17	18	23	32	47	71	185
0.7	20	23	30	40	71	107	214

供遠高於檢測極限的信號。在此計算中，需要考慮樣品製備過程中的物質損失。

(4) 樣品的收集、貯存與準備：從樣品的收集到活度濃度的實際測量，要小心以確保樣品的活度濃度不發生變化(例如，由於交叉污染或樣品中活度的損失)。稱重每個樣品，給定 ID，並存儲在合適的容器中。如果測量需要等分試樣，則需要將樣本均質化。在測量之前，必須考慮準備樣品物質/或活度的任何損失。

(5) 統計測試：如果物質中活度濃度的分佈函數未知，則可使用非參數符號測試(non-parametric Sign test)，以決定採樣數目。

**MARSAME 的調查(survey)**

MARSAME 提供有關規劃、實施、評估和記錄調查的方法之技術資訊，以決定 M&E 的適當特性：外釋(包括解除)和禁止。MARSAME 可以應用到活度濃度(例如，Bq/m<sup>3</sup>)而沒有相關的劑量或風險值。MARSAME 不涉及 M&E 的管制狀態(例如，NRC 豁免或解除的物質)。

MARSSIM 與 MARSAME 的術語雖然不同，但其意義相似，如表 2。

部署(disposition)：物體的未來使用、歸宿或最終位置(例如，回收、再使用、處置)，部署選項範圍從外釋到禁止。

調查單元(survey unit)是對特定批次、數量或物件的 M&E 進行測量，以支持部署決策。

調查設計：僅掃描(scan-only)、現場(in situ)測量或 MARSSIM 類型的調查，它結合了所需的測量方法或測量技術和儀器的組合。

分類(classification)：將受影響的 M&E 或調查單元分為三個類別：第 1 類、第 2 類或第 3 類，是基於活度濃度的預估且與行動基準之比較，去決定適當調查工作的過程。MARSAME 中受輻射影響 M&E 的分類，如表 3。

MARSAME 用於解除管制，行動基準(AL) → 活度濃度解除基準(CL)；鑑別限值(DL) → 最低可測濃度(MDC)。Δ = AL - DL，相當於 Δ = CL - MDC。輻射測量標準差σ，Δ/σ稱為相對偏移，如圖 3。TAF 規定：MDC < 0.2 CL。

調查數據的總變異數(variance)是兩個分量的總和： $\sigma^2 = \sigma_M^2 + \sigma_S^2$ 。

放射性測量中的輸入量可能包括總計數、空白或背景計數、計數效率和測量面積或體積。數學模型測量過程指定輸出量 y 與可測量輸入量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之間的關係，其值取決於： $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。輸出的變異數： $\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2$ 。

決策判定：當原假設實際上為真而被拒絕時，就會發生第 I 類決策錯誤α，如圖 3。當原假設應該被拒絕而沒有被拒絕時，就會發生第 II 類決策錯誤β。5% 的決策錯誤率對於決策錯誤通常是可以接受的。

表 2 MARSSIM 與 MARSAME 的術語

MARSSIM	MARSAM
外釋標準(release criterion)	部署標準(disposition criterion)
導出濃度指導基準(derived concentration guideline level, DCGL)	行動基準(action level)
最終狀態調查(final status survey)	部署調查(disposition survey)

表 3 MARSAME 中受輻射影響 M&E 的分類

第 1 類	(1)高潛在或已知的活度濃度約在行動基準； (2)高潛在小區域有提高活度濃度； (3)沒有足夠的證據去支持重新分類為第 2 類或第 3 類 M&E。
第 2 類	(1)低潛在活度濃度高於行動基準；且 (2)低或無潛在小區域提高活度濃度。
第 3 類	(1)低或無潛在活度濃度高於背景； (2)沒有足夠的證據去支持將其歸類為不受影響。

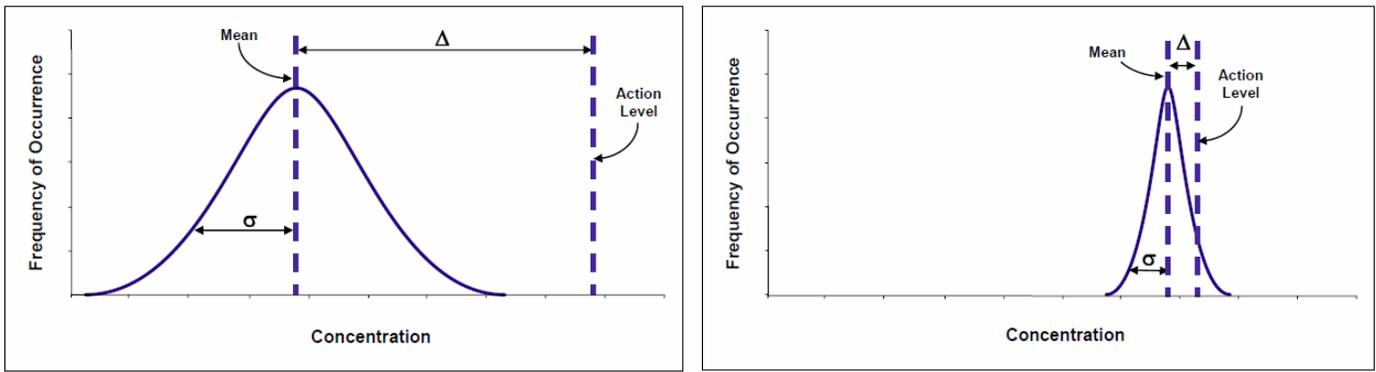


圖 3 MARSAME 中不同的  $\Delta$  與  $\sigma$

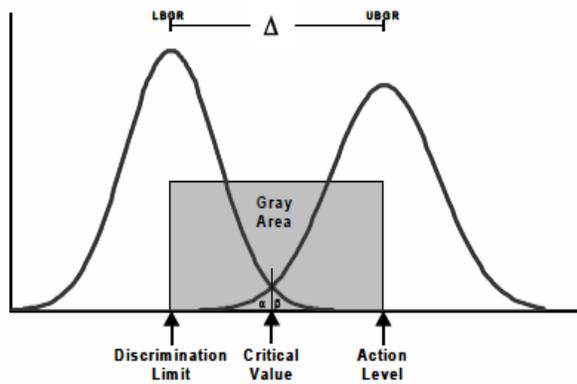


圖 4 第 I 類決策錯誤  $\alpha$  與第 II 類決策錯誤  $\beta$

表 18.3 高斯分布預期的  $f(\epsilon_0)$  值

$\epsilon_0$	$f(\epsilon_0)$
0	0
$0.674\sigma$	0.500
$1.0\sigma$	0.683
$1.64\sigma$	0.900
$1.96\sigma$	0.950
$2.58\sigma$	0.990
$3.00\sigma$	0.997

當決策是以單次測量與行動基準比較做出來時，數據的總變異數 (variance)  $\sigma_{total}^2$  等於測量的變異數  $\sigma_M^2$ ，且在大多數情況下數據分佈應該近似常態分佈，則滿足：

$$\sigma_M \leq \frac{\Delta}{z_{1-\alpha} + z_{1-\beta}} = \frac{\Delta}{z_{0.95} + z_{0.95}} = \frac{\Delta}{1.645 + 1.645} = \frac{\Delta}{3.29} \approx 0.3\Delta$$

MARSAME 建議要求  $\sigma_M \leq 0.3\Delta$ 。

**結論與建議**

1. 解除管制物質通常要分批處理。每批外釋的物質：(1)必須相同類型，(2)相同的放射性核種混合物，(3)相同的放射性核種沉積歷史或被活化，(4)相同的背景等，(4)故要做好擬可解除管制廢棄物的偵測、分類與貯存。

- 為確保能符合解除管制基準：(1)應做好輻射偵測的規劃與作業。(2)預估擬解除管制廢棄物的活度濃度。(3)預估可能的放射性核種。(4)預估廢棄物的物理化學特性。(5)選擇適當的偵測儀器與技術。(6)測量不準度的處理。(7)偵測儀器的最小可測量值須小於解除管制標準的 1/5，偵測結果要達到 95% 的可信度。(8)測量人員應充分訓練。(9)要有良好的品保作業。
- 擬解除管制的物質必須進行充分的監測，以證明符合法規的要求。
- 因放射性核種蛻變之測量，是一種波以松(Poisson)分布，建議蛻變計數必須大於 100。
- 為達到較低的最小可測量活度濃度 (MDC)，應妥善規劃空白樣品的計測時間

- 間及擬解除管制廢棄物的計測時間，以達到合理的時間內又能降低測量的標準差。
- 有些物體實在無法測量質量活度濃度，且可能只是表面污染。IAEA DS-500 建議由業者提出表面活度濃度的基準，並證明符合質量活度濃度解除管制基準，向管制機關申請核准。
- 因放射性核種蛻變之測量，是一種波以松(Poisson)分布，建議蛻變計數必須大於 100。
- 為達到較低的最小可測量活度濃度 (MDC)，應妥善規劃空白樣品的計測時間及擬解除管制廢棄物的計測時間，以達到合理的時間內又能降低測量的標準差。

發行人  
張似璵

主編  
劉代欽

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