

行政院原子能委員會 委託研究計畫研究報告

(含 放 射 性 物 質 商 品 活 度 限
值 及 對 民 眾 劑 量 影 響 之 研 究)

計畫編號：932001 INER 008
受委託機關(構)：國立清華大學
計畫主持人：董傳中 教授
報告日期：93年11月30號

目 錄

中文摘要.....	3
英文摘要.....	4
計畫目的.....	5
計畫緣起.....	6
執行方法及進行步驟.....	7
結論與建議.....	18
參考文獻.....	19
附錄一.....	20
附錄二.....	26

一、 中文摘要

我國游離輻射防護法第二十一條規定：商品非經主管機關許可，不得添加放射性物質；前項放射性物質之添加量，不得逾越主管機關核准之許可量。又該法第二十二條規定：商品對人體造成之輻射劑量，於有影響公眾健康之虞時，主管機關應會同有關機關實施輻射檢查或偵測；前項商品經檢查或偵測結果，如有違反標準或有危害公眾健康者，主管機關應公告各該商品品名及其相關資料，並命該商品之製造者、經銷者或持有者為一定之處理。為了具體落實此二條文之執行，本計畫研究含放射性物質商品之活度與濃度限值，以及評估這些商品造成之民眾輻射劑量。

游離輻射防護法第五條規定，主管機關應參考國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)最新標準訂定游離輻射防護安全標準，規範輻射防護作業基準及人員劑量限度等游離輻射防護事項。由於ICRP最新標準公布於其第60號出版物，而具體實施要項則公布於國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)安全系列第115號報告，因此本計畫採用之原理、方法、與標準，主要依據IAEA-115號報告之建議。又IAEA-115號報告之含放射性物質商品的活度與濃度限值，係根據歐盟(Commission of European Communities, CEC)之劑量評估模式計算求得，因此本計畫研究歐盟RP-65號報告之含放射性物質商品對工作人員之曝露情節(scenario)、曝露途徑(pathway)，以及體內、體外劑量評估參數(parameter)。此外，本計畫對於含放射性物質商品之民眾劑量評估，則採用英國國家放射防護委員會(National Radiological Protection Board, NRPB)之劑量評估模式，研究消費者在正常使用、正常廢棄、意外及誤用下之體外曝露及體內曝露的輻射劑量。本計畫使用我國本土化參數，評估我國民眾的個人劑量與集體劑量。

二、英文摘要

Article 21 of the Ionizing Radiation Protection Act states “No radioactive material shall be added to commercial products unless approved by the Competent Authority. The added amount of radioactive material shall not exceed the limits approved by the Competent Authority.” Article 22 states “When a commercial product exposes the human body to radiation of such a dose level that raises concern about a public health risk, the Competent Authority shall conduct radiation inspection or measurement in collaboration with relevant agencies. If the result from the inspection or measurement indicates a violation of standards or a public risk, the Competent Authority shall make public announcements of each product’s name and related information, and require the manufacturer, distributor or owner to take specific measures. The standards in Paragraph 22.2 are to be specified by the Competent Authority in consultation with relevant agencies.” To implement these Articles, it is required to study the radiation doses to the general public from exposure due to radioactive commercial products.

The Ionizing Radiation Protection Act and the Ionizing Radiation Protection Standards were established in reference to the International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 60 and the International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Series No. 115. These two documents were used in the present work as bases in the study of the radiation doses to the general public from radioactive commercial products. Since IAEA recommended exemption levels (activity and concentration) were derived by the Commission of European Communities (CEC) in the Radiation Protection 65, it is required to study the scenarios, pathways and parameters developed in CEC RP-65 for occupational exposure. For exposure of consumers, the National Radiological Protection Board (NRPB) model was used to investigate the local-specific parameters and to assess radiation doses to the general public from radioactive commercial products in Taiwan.

三、計畫目的

商品指消費市場中可以自由買賣的貨品。商品中如果含有放射性物質，將會造成製造工人與一般民眾的輻射劑量，故須加以管制。基於商品之國際貿易頻繁，為了避免引起國際間產生貿易糾紛，國際原子能總署(IAEA-115號報告)乃訂定含放射性物質商品之管制辦法，並且制定含放射性物質商品之活度與濃度限值。含放射性物質商品之活度與濃度限值，係根據年劑量10微西弗之豁免標準推導求得。

我國游離輻射防護法第二十一條規定，商品中放射性物質之添加量，不得逾越主管機關核准之許可量，此一條文即上述國際原子能總署建議之活度與濃度限值。又本法第二十二條規定，商品對人體造成之輻射劑量，於有影響公眾健康之虞時，主管機關應會同有關機關實施輻射檢查或偵測，此一條文即上述國際原子能總署有關民眾輻射劑量評估之規定。為了具體落實此二條文之執行，故有必要研究含放射性物質商品之活度與濃度限值，以及評估這些商品造成之民眾輻射劑量。

由於IAEA-115號報告之含放射性物質商品的活度與濃度限值，係根據歐盟(CEC-RP-65號報告)之劑量評估模式計算求得，因此本計畫研究歐盟RP-65號報告之含放射性物質商品對工作人員之曝露情節、曝露途徑，以及體內、體外劑量評估參數。此外，本計畫對於含放射性物質商品之民眾劑量評估，則採用英國國家放射防護委員會之劑量評估模式(NRPB-3-2號報告)，研究消費者在正常使用、正常廢棄、意外及誤用下之體外曝露及體內曝露的輻射劑量

由於NRPB之曝露情節與曝露途徑中使用的參數，有些並不適用於我國，因此本計畫針對國內常見之煙霧偵測器及夜光計時器，進行我國本土化的研究，然後利用這些本土化數據，評估我國民眾的個人劑量與集體劑量。本計畫之研究成果，除了可以提供有關單位作為法規管制參考使用之外，也可作為估算我國含放射性物質商品對國民劑量的貢獻。

四、計畫緣起

我國游離輻射防護法第二十一條及二十二條之規定，係有關含放射性物質商品之管制。為了具體落實此二條文之執行，有必要研究含放射性物質商品之活度與濃度限值，以及評估這些商品造成之民眾輻射劑量。

含放射性物質商品包括煙霧偵測器、夜光鐘錶、離子發生管等，這些商品之製造、組裝、輸入、供銷等均應申請登記備查。國際原子能總署第115號報告中建議了含放射性物質商品之活度與濃度限值，這些限值乃根據歐盟公布之RP-65號報告中的劑量評估模式，針對商品特有之曝露情節及曝露途徑，利用各種體內與體外劑量評估之活度與濃度劑量轉換參數，以每年10微西弗之豁免劑量標準為基礎計算求得。

本計畫針對歐盟發展之劑量評估模式、曝露情節與曝露途徑、體內與體外劑量評估參數等進行研究，以深入瞭解含放射性物質商品之活度與濃度在正常使用、異常使用、意外事故下，對工作人員造成之個人劑量。此外，本計畫採用了NRPB-3-2號報告中的劑量評估模式，研究煙霧偵測器、夜光計時器、含氬氣光源之計時設備、含氬氣光源之指南針等含放射性物質商品，在一般民眾消費者之曝露情節、曝露途徑、活度與濃度劑量轉換參數等。並且挑選國內常見之煙霧偵測器及夜光計時器兩種含放射性物質商品，進行我國本土化的參數研究，然後利用這些本土化參數，評估這兩種含放射性物質商品之我國民眾個人劑量與集體劑量。本計畫之研究成果，除了可以提供相關單位作為法規管制含放射性物質商品之參考外，尚可作為估算我國含放射性物質商品對國民劑量的貢獻。

五、執行方法與進度說明

5.1 含放射性物質商品的管制

我國游離輻射防護法第二十一條規定，商品中放射性物質之添加量，不得逾越主管機關核准之許可量，又本法第二十二條規定，商品對人體造成之輻射劑量，於有影響公眾健康之虞時，主管機關應會同有關機關實施輻射檢查或偵測。為了具體落實此二條文之執行，故有必要研究含放射性物質商品之活度與濃度限值，以及評估這些商品造成之民眾輻射劑量。此外，本法第五條規定，主管機關應參考國際放射防護委員會(ICRP)最新標準訂定游離輻射防護安全標準，規範輻射防護作業基準及人員劑量限度等游離輻射防護事項。由於ICRP最新標準公布於其第60號出版物，而具體實施要項則公布於國際原子能總署(IAEA)安全系列第115號報告，因此本研究採用之原理、方法、與標準主要依據IAEA-115號報告之建議。

由於商品之國際貿易頻繁，為了超免國際間之糾紛，因此IAEA-115號報告中乃制定含放射性物質商品之管制辦法及其活度與濃度之限值。IAEA建議之含放射性物質商品的管制辦法，詳列於表一中，其中之重要條款為：

- (一) 除了具有正當性(justification)之醫療曝露作業外，任何添加放射性物質或活化物質而導致商品活度增加之作業，均被視為沒有正當性。這些作業包括：
 - (a) 食品業、飲料業、化妝品業，或導致人體嚥入、吸入、皮膚吸收之商品或產品的作業。
 - (b) 在玩具、個人首飾、裝飾品中使用非必要之輻射或放射性物質的作業。
- (二) 除非符合以下條件之一，否則不得將會導致輻射曝露之含放射性物質商品提供給一般人：
 - (a) 屬於游離輻射防護安全標準中排除(exclusion)管制之曝露。
 - (b) 符合主管機關豁免(exemption)規定之產品
 - (c) 為一般社會大眾所接受使用之產品。

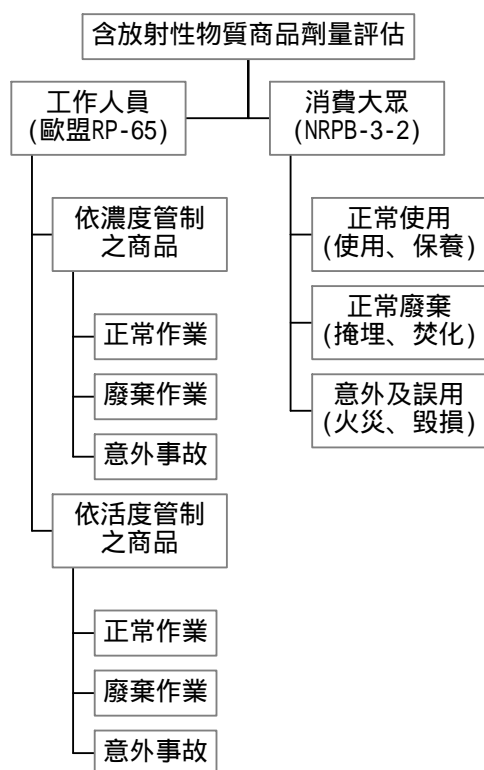
表一 IAEA-115 號報告對含放射性物質商品管制的建議

章節	條文
Glossary	含放射性物質商品：含有微量放射性物質之商品，包括煙霧偵測器、夜光鐘錶、離子發生管等。
2.2	輻射源：包括含放射性物質商品、密封射源、非密封射源、可發生游離輻射設備等。
2.10	應申請登記備查之含放射性物質商品作業，僅限於製造、組裝、輸入、供銷。
2.22	<p>除了具有正當性之醫療曝露作業外，任何添加放射性物質或活化物質而導致商品活度增加之作業，均被視為沒有正當性。這些作業包括：</p> <p>(a) 食品業、飲料業、化妝品業，或導致人體嚥入、吸入、皮膚吸收之商品或產品的作業。</p> <p>(b) 在玩具、個人首飾、裝飾品中使用非必要之輻射或放射性物質的作業。</p>
III-14	<p>除非符合以下條件之一，否則不得將會導致輻射曝露之含放射性物質商品提供給一般人：</p> <p>(a) 屬於游離輻射防護安全標準中排除管制之曝露。</p> <p>(b) 符合主管機關豁免規定之產品。(Table I-I)</p> <p>(c) 為一般社會大眾所接受使用之產品。</p>
III-17	<p>含放射性物質商品之供銷商應提供清楚、適切的資料與標示，包括：</p> <p>(a) 產品的正確安裝、使用與保養。</p> <p>(b) 服務與維修。</p> <p>(c) 所含放射性核種與特定日期之活度。</p> <p>(d) 正常操作下與服務維修時之劑量率。</p> <p>(e) 廢棄物處置方式之建議。</p>

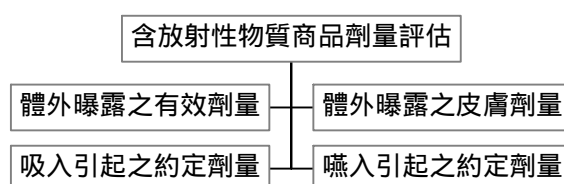
IAEA-115 號報告所建議之含放射性物質商品的活度與濃度限值 (IAEA-115 之 Table I-I)，乃根據個人年劑量 10 微西弗之標準，採用歐盟劑量評估模式(CEC-RP-65 號報告)推導求得。歐盟的評估模式，係依照表二左欄之曝露情節(scenarios)，將商品劃分為濃度管制及活度管制兩類，擇定工作人員為商品曝露之最大劑量者，然後利用表三之曝露途徑(pathways)，代入歐盟建

議之曝露途徑的參數值(parameters)，評估工作人員在正常作業、廢棄作業、意外事故下之體外曝露有效劑量、體外曝露皮膚劑量、體內曝露吸入引起之約定劑量、以及體內曝露嚥入引起之約定劑量。最後再依據上述評估結果，推導含放射性物質商品的活度與濃度限值。

表二 含放射性物質商品之劑量評估的曝露情節



表三 含放射性物質商品之劑量評估的曝露途徑



另外，英國國家放射防護委員會(NRPB)將含放射性物質商品，劃分為：「與安全有關」及「與安全無關」兩類。NRPB 建議(NRPB-3-2 號報告)與安全有關之含放射性物質商品(譬如煙霧偵測器)應予比較寬鬆的豁免管制限值，而與安全無關之含放射性物質商品，則予比較嚴格的豁免管制限值。表二右欄之 NRPB 評估模式，係針對一般民眾消費者之曝露情節，可利用表三之曝露途徑，評估一般人在正常使用、正常廢棄、意外及誤用下之體外曝露及體內曝露的輻射劑量。

由於本計畫研究之含放射性物質商品的劑量評估，重點在於消費者的社會大眾，因此有關工作人員劑量評估模式之討論係置於附錄，而有關消費者劑量

評估模式之討論則置於本文。

5.2 含放射性物質商品的劑量評估

國際上對於含放射性物質商品的管制日趨嚴格，除了與安全有關之煙霧偵測器與醫療器材之外(參見表一 IAEA-115 號報告之管制建議)，其他含放射性物質商品的應用已日漸減少。即以夜光鐘錶為例，從最早期的整個錶面均含放射性物質，到後來只有指針含有放射性物質，再到後來電子鐘錶甚行之後根本不含放射性物質；而放射性物質之核種也從最早期的鐳 226，演進到後來的鉅 147，再演進到近來的氬，這使得消費者的劑量愈來愈低乃至於零。

在我國，基於消防法的規定，煙霧偵測器的使用開始普遍。除了與安全有關之煙霧偵測器之外，還有一些遺留之夜光計時器。其他日常生活中接觸到之含放射性物質商品的機會非常少，因此本計畫對於含放射性物質商品之民眾劑量評估，在個人劑量部分將只討論 NRPB 提供之四種商品的評估模式與結果，這些商品是煙霧偵測器、夜光計時器、含氬氣光源之計時設備、含氬氣光源之指南針；在集體劑量部分則只研究煙霧偵測器及夜光計時器的本土化參數，以及利用這些參數進行我國民眾集體劑量之評估。其中煙霧偵測器及夜光計時器之劑量評估討論將置於本文，而含氬氣光源之計時器及含氬氣光源之指南針的劑量評估討論則置於附錄。

NRPB 建議的曝露情節為正常使用、正常廢棄、意外及誤用，這些情節對應之消費者個人劑量約束(dose constraint)為：

(1) 正常使用(含正常廢棄)

在正常使用含(正常廢棄)情況下，消費者的個人劑量約束為：與安全有關產品之年有效劑量不超過 0.03 毫西弗；與安全無關產品之年有效劑量不超過 0.003 毫西弗；皮膚年等價劑量不超過 5 毫西弗；水晶體年等價劑量不超過 1.5 毫西弗。這些劑量約束值，乃根據 UNSCEAR、BEIR、ICRP 之健

康效應風險評估結果所設定。

(2) 意外事故(含不當使用)

在意外事故(含不當使用)情況下，含放射性物質商品之個人劑量約束為：年有效劑量不超過 1 毫西弗；皮膚年等價劑量不超過 50 毫西弗；水晶體年等價劑量不超過 15 毫西弗。

在個人劑量合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)且不影響商品功能的原則下，NRPB 建議了上述含放射性物質商品的活度限值，結果列於表四，並且針對這些限值進行該商品對消費者的劑量評估。

表四 NRPB 建議之含放射性物質商品的活度限值

商品名稱	核種	產品型式	活度限值
煙霧偵測器	Am-241		40 kBq
夜光計時器	H-3	穿戴型	300 MBq
		非穿戴型	400 MBq
		特殊型	1 GBq
	Pm-147	穿戴型	6 MBq
		非穿戴型	8 MBq
		特殊型	20 MBq
含 GTLS 計時器	H-3		7.4 GBq
含 GTLS 指南針	H-3		10 GBq

5.2.1 煙霧偵測器的劑量評估

我國消防法規定新建大樓必須安裝煙霧偵測器，所以民眾曝露於煙霧偵測器的機會與人數也越來越高。煙霧偵測器對民眾的曝露情節有：正常使用、正常廢

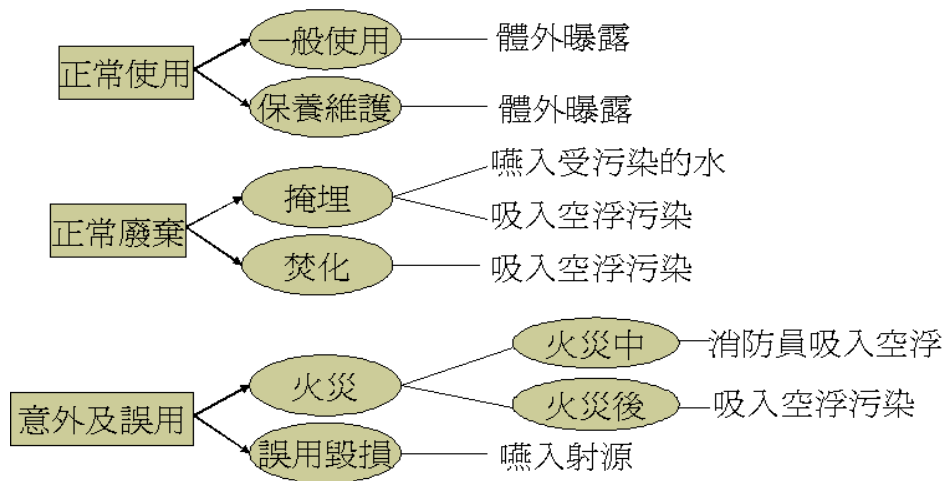
棄、意外及誤用三項，曝露途徑則示於圖一。以下針對煙霧偵測器之曝露情節及曝露途徑逐項討論。

(1) 正常使用

在正常使用情況下，煙霧偵測器造成之體外曝露，在距離煙霧警報器表面 d 公尺處的等價劑量率 D_a ，可由公式 $D_a = \frac{A}{d^2}$ 計算。其中 A 為距離 1 GBq 射源 1 公尺的等價劑量率。對於 Am-241 而言， $A = 2.4 \times 10^{-6}$ Sv/h， A 為射源活度 (以 GB 為單位)，以煙霧偵測器的活度限值 4×10^{-5} GBq 代入。

a. 一般使用

在台灣，辦公大樓安裝煙霧偵測器的比例比一般住家多，所以我們在計算集體劑量時，是以辦公室安裝煙霧警報器的上班族人口作為曝露人數，並做以下假設：(1) 煙霧警報器安裝在辦公室裡，對一上班族的照射時間為每年 2000 小時 (2) 射源距離人體的平均距離為 2.5 公尺。由這些假設可以計算出每人每年接受的有效劑量約為 30 nSv。若估計台灣上班族人口 960 萬人中有一半人曝露於煙霧偵測器之下，則集體年劑量為 0.14 人西弗。



圖一 煙霧偵測器對一般人之曝露情節與曝露途徑

b. 保養維護

在安裝、更換電池以及清潔時，人員需要拿取煙霧偵測器，此時會受到較近

距離的曝露。假設：(1)一年中拿取總時數為 3 小時 (2)拿取時，射源距離手部 0.01 公尺，距離身體平均 0.5 公尺。由這些假設，可以計算出每人每年接受的手部等價劑量約為 $3 \mu\text{Sv}$ ，有效劑量為 1 nSv 。

(2) 正常廢棄

煙霧偵測器廢棄時可能隨一般廢棄物丟棄，處理方式有掩埋及焚化兩種。

假設：(1)台灣共有 4 百萬個煙霧偵測器 (2)每年有 5%的煙霧偵測器被丟棄 (3) 30 %被廢棄的煙霧偵測器分布在 200 個掩埋場，所以每年每個掩埋場處理 300 個煙霧偵測器 (4) 70 %被廢棄的煙霧偵測器分布在 20 個焚化爐，所以每年每個焚化爐處理 7000 個煙霧偵測器。

a. 掩埋 (嚥入受污染的水)

放射性物質掩埋在掩埋場裡，可能會污染附近的水源，使民眾嚥入受污染的水而造成體內劑量。假設淺層掩埋 1 TBq 活度造成的飲水污染，每年對成年人的約定有效劑量為 1.2 nSv 。每年每個掩埋場有 300 個煙霧偵測器，而一個煙霧偵測器的活度為 40 kBq ，則每一成年人一年接受的約定有效劑量為 12 fSv 。

b. 掩埋 (吸入空浮污染)

假設：(1) 一年內掩埋場裡有 1 %的煙霧偵測器被火災波及 (2) 每一煙霧偵測器在火災中釋放出 200 Bq 的活度 (3) 一場火災持續 30 分鐘 (4) 最大曝露的民眾距離掩埋場 200 m (5) 正常天氣情況下掩埋場每釋出 1 Bq 活度，在距離掩埋場 200 公尺處的活度濃度積分為 $2.5 \times 10^{-4} \text{ Bq s/m}^3$ (6) 成年人呼吸速率為 $3.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (7) 成年人每吸入 1 Bq 活度，造成的約定有效劑量為 $1.2 \times 10^{-4} \text{ Sv}$ 。經由這些假設，可以計算出每一成年人一年接受的約定有效劑量為 6 nSv 。

c. 焚化 (吸入空浮污染)

假設：(1) 焚化時，一個煙霧偵測器釋出 1 %的活度，且活度均均的分配在一年中 (2) 掩埋場煙囪高度為 50m (3) 正常天氣情況下掩埋場每釋出 1 Bq 活度，在距離掩埋場 200 公尺處的活度濃度積分為 $3 \times 10^{-6} \text{ Bq s/m}^3$ (4) 成年人呼吸速率為 $3.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5) 成年人每吸入 1 Bq 活度，造成的約定有效劑量為

1.2×10^{-4} Sv。經由這些假設，可以計算出每一成年人一年接受的約定有效劑量為 340 nSv。

(3) 意外及誤用

a. 火災

i. 火災中

假設一個煙霧偵測器在火災中釋出 200 Bq 的活度，釋出活度的 10^{-5} 被消防員吸入，且消防員一年遇到 20 個有煙霧偵測器的火災，如此可算出一消防員的最大年約定有效劑量為 5 μ Sv。

ii. 火災後

火災後，假設：(1) 煙霧偵測器的活度分布在 30 平方公尺的面積上 (2) 活度混合在碎石和塵土中，且 1 % 的活度被再懸浮後吸入體內 (3) 再懸浮因數 (resuspension factor) 為 $2 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ (4) 清理火災費時 8 小時 (5) 成年人呼吸速率為 $3.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。由這些假設，可以計算出一成年人在火災發生後接受的年約定有效劑量為 30 nSv。

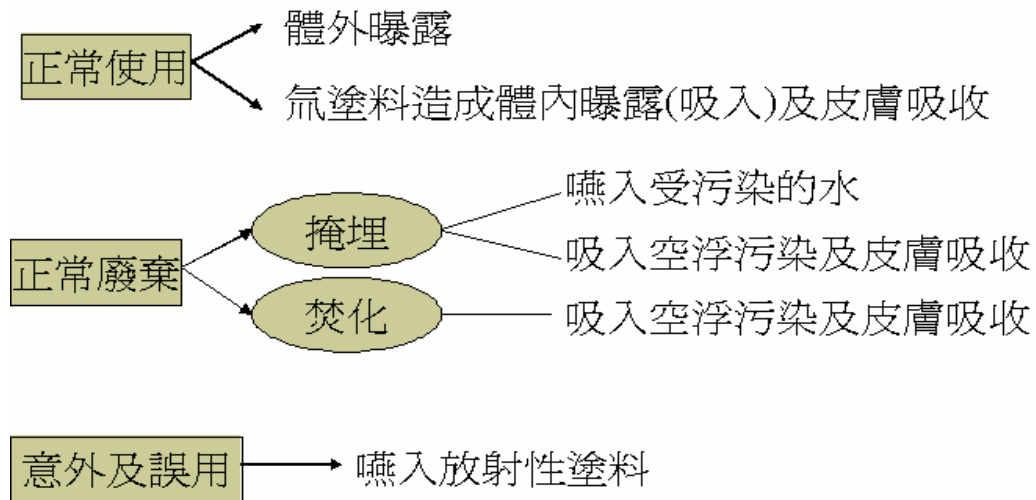
b. 毀損

假設一個嬰兒意外的打開了煙霧偵測器，破壞了其中的射源，並且有 1 % 的射源在破壞中被釋放出來，其中 10 % 經由手指被嬰兒嚥入，而嬰兒每嚥入 1 Bq 活度造成的約定有效劑量為 2.1×10^{-6} Sv。如此計算所得之嬰兒約定有效劑量為 80 μ Sv。

5.2.2 夜光計時器的劑量評估

夜光計時器的塗料有兩種放射性核種，即 H-3 以及 Pm-147。這兩種射源都是純貝他核種，無法穿出玻璃或金屬的表面，故只有貝他粒子和表面物質產生的制動輻射會對使用者造成體外劑量。NRPB 報告中除了規定各種型式夜光計時器的活度限值外，並且要求夜光計時器前方表面的等效劑量率不超過 2 μ Sv/h、背後表面不超過 0.2 μ Sv/h。假設射源位於玻璃表面下方 2 毫米深，且制動輻射的

劑量率和距離平方成反比，則可使用以下方法評估劑量。



圖二 夜光計時器之曝露情節與曝露途徑

(1) 正常使用

a. 體外曝露 (H-3)

使用氡作為塗料時，產生的低能量制動輻射，有效能量範圍約為 8~14 keV。因為 10 keV 光子在水中的半值層為 0.14 公分，所以皮膚表面組織會有效吸收制動輻射。又因為衣服能擋掉這些低能量制動輻射，所以穿戴型手錶造成之人體年有效劑量最大。假設：(1) 整年都帶著錶 (2) 每天看錶的時間為 10 分鐘，水晶體距離錶面 0.5 公尺 (3) 每天晚上睡覺時錶面和皮膚接觸的時間為 4 小時。使用這些假設，可求得每人每年接受的皮膚等價劑量約為 29 mSv，水晶體等價劑量約為 2 nSv。

b. 體外曝露(Pm-147)

使用 Pm-147 作為塗料時，產生的低能量制動輻射，有效能量範圍約為 200 keV。因為 200 keV 光子的質量衰減係數為 $0.137\text{cm}^2/\text{g}$ ，所以穿戴型的 pocket watch 造成之人體年有效劑量最大。假設：(1) pocket watch 每天放在臀部口袋內 16 小時 (2) 錶面距離皮膚的最小距離為 1 公分，錶面距離生殖腺的平均距離為 0.1 m 水等效厚度 (3) 每天看錶的時間為 10 分鐘，水晶體距離錶面為 0.5

公尺。使用這些假設，可以求得每人每年皮膚等價劑量約為 350 μSv ，水晶體等價劑量約為 2 nSv，生殖腺等價劑量約為 2 μSv 。

c. H-3 塗料造成的體內曝露(吸入)及皮膚吸收

H-3 塗料會釋出氙化合物，使得民眾吸入或經由皮膚吸收而造成體內曝露。假設：(1) 氙化合物從塗料釋出的速率為每天 3000 Bq (2) 釋出的氙是以氙水的形式出現 (3) 手錶被放置在體積為 30 m^3 的房間中，因房間中空氣每小時都更換，故氙水濃度保持在 4 Bq/ m^3 (4) 兒童呼吸速率為 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5) 兒童每吸入 1 Bq 活度的氙水，造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ (6) 考慮皮膚吸收造成的劑量時，約定有效劑量即加倍 (7) 兒童一年待在房間 7000 小時。使用這些假設，可以算出兒童的約定有效劑量一年約為 1 μSv 。

(2) 正常廢棄

夜光計時器廢棄時會隨一般廢棄物丟棄，處理方式有掩埋及焚化兩種。假設：(1) 台灣共有 5 萬個夜光計時器，其中 50 % 為 Pm-147 射源，50 % 為 H-3 射源 (2) 70 % 的夜光計時器為手錶，20 % 為時鐘，10 % 為特殊計時器 (3) 每年有 10 % 的夜光計時器被丟棄 (4) 30 % 被廢棄的夜光計時器送到 200 個掩埋場 (4) 70 % 被廢棄的夜光計時器送到 20 個焚化爐。

a. 掩埋 (嚥入受污染的水)

放射性物質掩埋時，可能會污染到附近水源，致使民眾嚥入受污染的水而造成體內劑量。假設淺層掩埋 1 TBq 活度的氙，造成之飲水污染每年對成年人的約定有效劑量為 4.6 nSv，因為 Pm-147 的半衰期很短，所以不考慮其對飲水的影響，則 H-3 一年經由飲水造成的約定有效劑量約為 7 pSv。

b. 掩埋 (吸入空浮污染)

假設：(1) 一年內掩埋場裡有 1 % 的夜光計時器被火災波及 (2) 夜光計時器在火災中釋出所有活度，且以氙水的形式釋出 (3) 一場火災持續 30 分鐘 (4) 最大曝露之民眾距離掩埋場為 200 m (5) 正常天氣情況下，掩埋場釋出 1 Bq 活度，且距掩埋場 200 公尺處的活度濃度積分為 $2.5 \times 10^{-4} \text{ Bq s/m}^3$ (6) 兒童呼吸速

率為 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (7) 兒童吸入 1 Bq 活度的 Pm-147，造成之約定有效劑量為 $1.8 \times 10^{-8} \text{ Sv}$ (8) 兒童吸入 1 Bq 活度的氡水，造成之約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ ，且考慮皮膚吸收時此劑量加倍。使用這些假設，可以求得 Pm-147 一年內造成之兒童約定有效劑量為 0.3 nSv，H-3 一年內造成之兒童約定有效劑量為 22 pSv。

c. 焚化 (吸入空浮污染)

假設：(1) 焚化時，夜光計時器釋出所有活度，且分配於一年中平均釋出 (2) 掩埋場煙囪高度為 50 m (3) 正常天氣情況下，掩埋場釋出 1 Bq 活度，且距掩埋場 200 公尺處的活度濃度積分為 $3 \times 10^{-6} \text{ Bq s/m}^3$ (4) 兒童呼吸速率為 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5) 兒童每吸入 1 Bq 活度的 Pm-147，造成之約定有效劑量為 $1.8 \times 10^{-8} \text{ Sv}$ (6) 兒童每吸入 1 Bq 活度的氡水，造成之約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ ，且考慮皮膚吸收時此劑量加倍。使用這些假設，可以求得 Pm-147 一年內造成之兒童約定有效劑量為 8 nSv，H-3 一年內造成之兒童約定有效劑量為 0.6 nSv。

(3) 意外及誤用

假設：(1) 一嬰兒意外破壞了夜光計時器，並且移除了其中一些塗料 (2) 夜光計時器含有最大許可活度，即 1 GBq 的 H-3 或 20 MBq 的 Pm-147 (3) 10 % 的活度被污染到手指上 (4) 手指上 10 % 的活度被嬰兒嚥入 (5) 嬰兒嚥入 1 Bq 活度的 Pm-147，造成之約定有效劑量為 $1.8 \times 10^{-9} \text{ Sv}$ (6) 嬰兒嚥入 1 Bq 活度的 H-3，造成之約定有效劑量為 $4.3 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ 。

六、結論與建議

評估含放射性物質商品之民眾輻射劑量並非易事。首先，含放射性物質商品的曝露情節與曝露途徑繁多，包括工作人員及消費大眾之正常、異常、廢棄、意外等曝露情節，以及體外、吸入、嚥入、皮膚吸收等曝露途徑。其次，含放射性物質商品之曝露情節與曝露途徑中所含的參數甚多，這些參數的變化範圍又大，包括容易掌握之與射源有關的參數，以及不易掌握之與地理、人口、習性有關的參數。本研究採用之 NRPB 劑量評估模式，在曝露情節與曝露途徑方面算是相當完整，但在參數值的選擇上則顯得有些保守，因此評估所得之民眾劑量應屬合理高估的上限。

本計畫針對煙霧偵測器及夜光計時器進行本土化參數的研究，並將這些本土化參數代入 NRPB 劑量評估模式之中，以評估我國民眾使用含放射性物質商品的個人劑量與集體劑量。個人劑量的評估結果顯示，這些含放射性物質商品造成之民眾劑量皆未超過劑量約束，惟在民國 92 年 01 月 29 日發布的「輻射源豁免管制標準」中所規範的總活度限值，部分較本篇報告之建議值為高，提供有關單位參考。另外，集體劑量之評估與含放射性物質商品之使用量間的關係密切，但本土化使用量資料的調查與蒐集不易，故只能參考 NRPB 資料再依我國環境加以推算。此一集體劑量之評估結果容或存有誤差，但可作為粗估我國含放射性物質商品對國民劑量貢獻的參考。

有關含放射性物質商品之工作人員的劑量評估，因曝露情節、曝露途徑、各項參數的變異性不大，且不受地理、人口、習性等因素的影響，故可直接引用歐盟 RP 65 號報告的結果。這一部分的原理、方法、結果等，請參考附錄二。至於其他含放射性物質商品(包括含氬氣光源之計時器及含氬氣光源之指南針)的民眾劑量評估，則因產品逐漸被淘汰，且台灣地區使用量極少，故僅討論 NRPB 的評估結果，請參考附錄一。

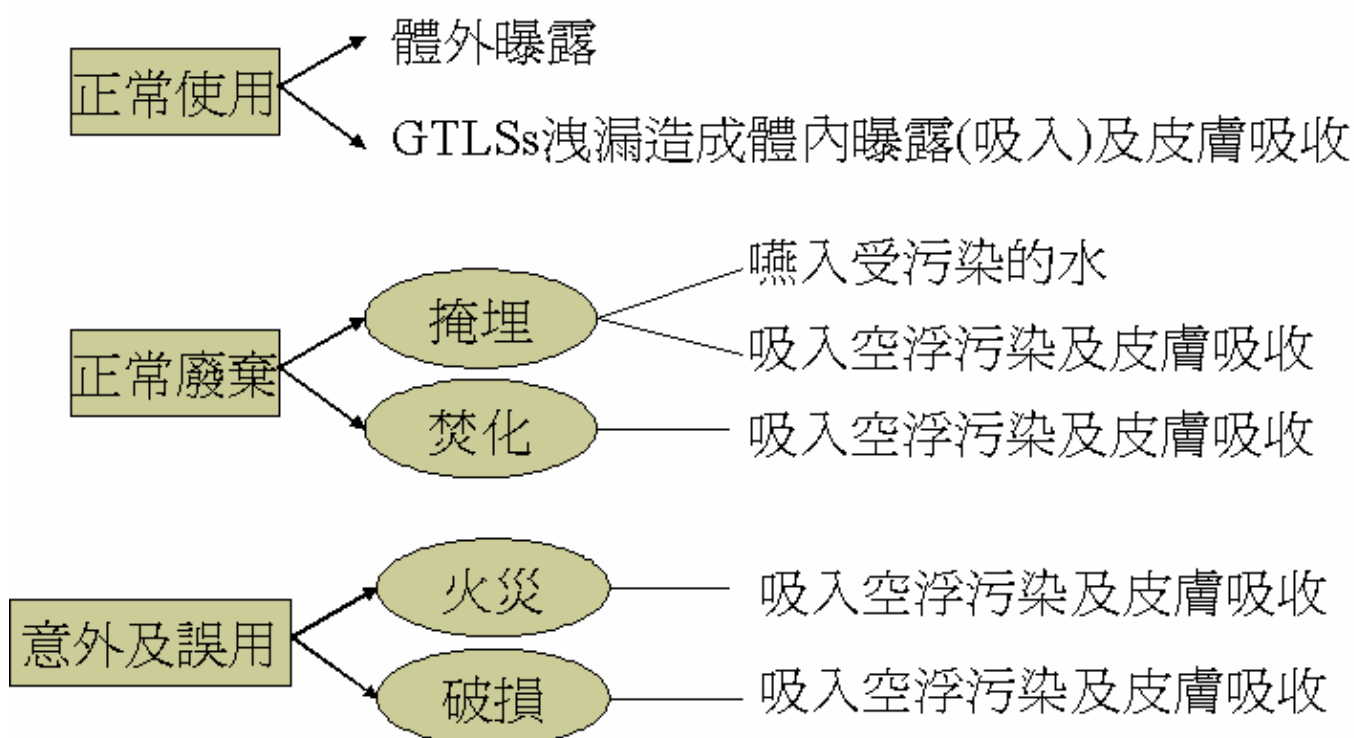
七、參考文獻

1. ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1991.
2. IAEA Safety Series No. 115, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Vienna, 1996.
3. CEC Radiation Protection 65, Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption Values) below which Reporting is not Required in the European Directive, Commission of the European Communities, 1993.
4. NRPB-R306, Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not included in the European Basic Safety Standards Directive, National Radiological Protection Board, 1999.
5. CEC Radiation Protection 122, Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption, Commission of the European Communities, 2000.
6. NRPB, Board Statement on Approval of Consumer Goods Containing Radioactive Substances, Documents of the NRPB, Volume 3, No. 2, National Radiological Protection Board, 1992.
7. 游離輻射防護法，中華民國九十一年一月三十日華總一義字第 九一
一九 號令發佈。
8. 江祥輝，民生用品的輻射防護()：一般建材天然放射性核種濃度測量，行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告，民國 90 年 12 月。
9. 陳清江，台灣建築物室內氡活度之評估，博士論文，國立清華大學原子科學研究所，1992。
10. 翁寶山，建築物活度限值的介紹，天然放射性物質及低劑量輻射效應研習會，財團法人中華民國輻射防護協會，民國 85 年 1 月。

附錄一 含氚氣光源計時器及指南針的民眾劑量評估

因為科技的進步，使用含氚氣光源(GTLSs)的計時設備或指南針，已經很少見了，大多已改用電池為能量來源。且台灣本土的製造量及使用量資料都無法獲得。所以本文不評估其對台灣民眾的劑量影響，只將報告中評估英國民眾劑量的方法及數據列於附錄中以供參考。

1. 含 GTLSs 計時設備的劑量評估



圖附 1-1. 含 GTLSs 計時設備曝露情節與途徑

(1) 正常使用

報告中除了規定射源的總活度限值不可超過 7.4GBq 外，還要求計時設備表面的等價劑量率不得超過 0.1 μ Sv/h，且氚由計時設備洩漏的洩漏率不得超過 2000Bq/day。

a. 體外曝露

H-3 和表面作用射出的低能制動輻射有效能量範圍約為 8~14keV，且 10keV 光子的半值層為 0.14cm-water，所以皮膚的表面組織能有效的吸收制動輻射。因為衣服就能擋掉這些低能制動輻射，所以穿戴型的手錶會對人體

造成最大的年有效劑量。假設(1) 整年都帶著錶，(2) 表面的等價劑量率為 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 。由這些假設可得每人每年接受的皮膚等價劑量約為 0.9 mSv 。

b. 氫洩漏造成的體內劑量

假設氫會由 GTLSs 洩漏，釋放出氫化合物，造成民眾吸入或經由皮膚吸收而造成體內曝露，假設(1) 氫的洩漏率為 $2000 \text{ Bq/day}=83.3 \text{ Bq/h}$ ，(2) 洩漏的氫是以氫水的形式出現，(3) 手錶被放置在體積為 30m^3 的房間中，房間中空氣每小時更換，所以氫水濃度保持約 3 Bq/m^3 ，(4) 兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ，(5) 兒童吸入 1Bq 活度的氫水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ ，(6) 考慮皮膚吸收造成的劑量時，約定有效劑量加倍，(7) 兒童一年待在該房間 7000 小時。由這些假設可以算出對兒童造成的約定有效劑量一年約為 $0.9\mu\text{Sv}$ 。

(2) 正常廢棄

含 GTLSs 計時設備廢棄時可能隨著一般廢棄物丟棄，處理方式有掩埋及廢棄兩種。假設(1)英國共有五萬個含 GTLSs 計時設備(2)每年有 20%的含 GTLSs 計時設備被丟棄，(3)80%被廢棄的含 GTLSs 計時設備分布在 500 個掩埋場，所以每年每掩埋場有 20 個含 GTLSs 計時設備，(4)20%被廢棄的含 GTLSs 計時設備分布在 200 個焚化爐，所以每年每焚化爐有 10 個含 GTLSs 計時設備。

a. 掩埋(嚥入受污染的水)

放射性物質掩埋在掩埋場裡，可能會污染到附近水源，使民眾嚥入受污染的水而造成體內劑量，假設淺層掩埋 1TBq 活度的氫造成的飲水污染每年對成年人的約定有效劑量為 4.6 nSv 。若每個含 GTLSs 計時設備皆有 7.4GBq 活度，則一個人一年接受的約定有效劑量為 0.7 nSv 。

b. 掩埋(吸入空浮污染)

假設(1)在一年內掩埋場裡 20 個含 GTLSs 計時設備皆破裂，且以氫水的形式釋放出全部活度，(2)每次釋放持續 30 分鐘，(3)受最多暴露的民眾距離掩埋場 200m，(4)正常天氣情況下掩埋場放出 1Bq 活度，在距掩埋場 200 公尺處的

時間積分活度濃度為 $2.5 \times 10^{-4} \text{ Bq s/m}^{-3}$, (5) 兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, (6) 兒童吸入 1Bq 活度的氙水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$, 考慮皮膚吸收氙造成的劑量時, 約定有效劑量加倍。經由計算可得一個兒童一年接受的約定有效劑量為 $0.4 \mu \text{ Sv}$ 。

c. 焚化(吸入空浮污染)

假設(1)焚化時, 含 GTLSs 計時設備會以氙水的形式釋放出全部活度, 且每次焚燒持續 30 分鐘, (2)掩埋場煙囪高 50m, (3) 正常天氣情況下掩埋場放出 1Bq 活度, 在距掩埋場 200 公尺處的時間積分活度濃度為 $9.5 \times 10^{-6} \text{ Bq s/m}^{-3}$, (4) 兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, (5) 兒童吸入 1Bq 活度的氙水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$, 考慮皮膚吸收氙造成的劑量時, 約定有效劑量加倍。經由計算可得一個兒童一年接受的約定有效劑量為 8 nSv 。

(3) 意外及誤用

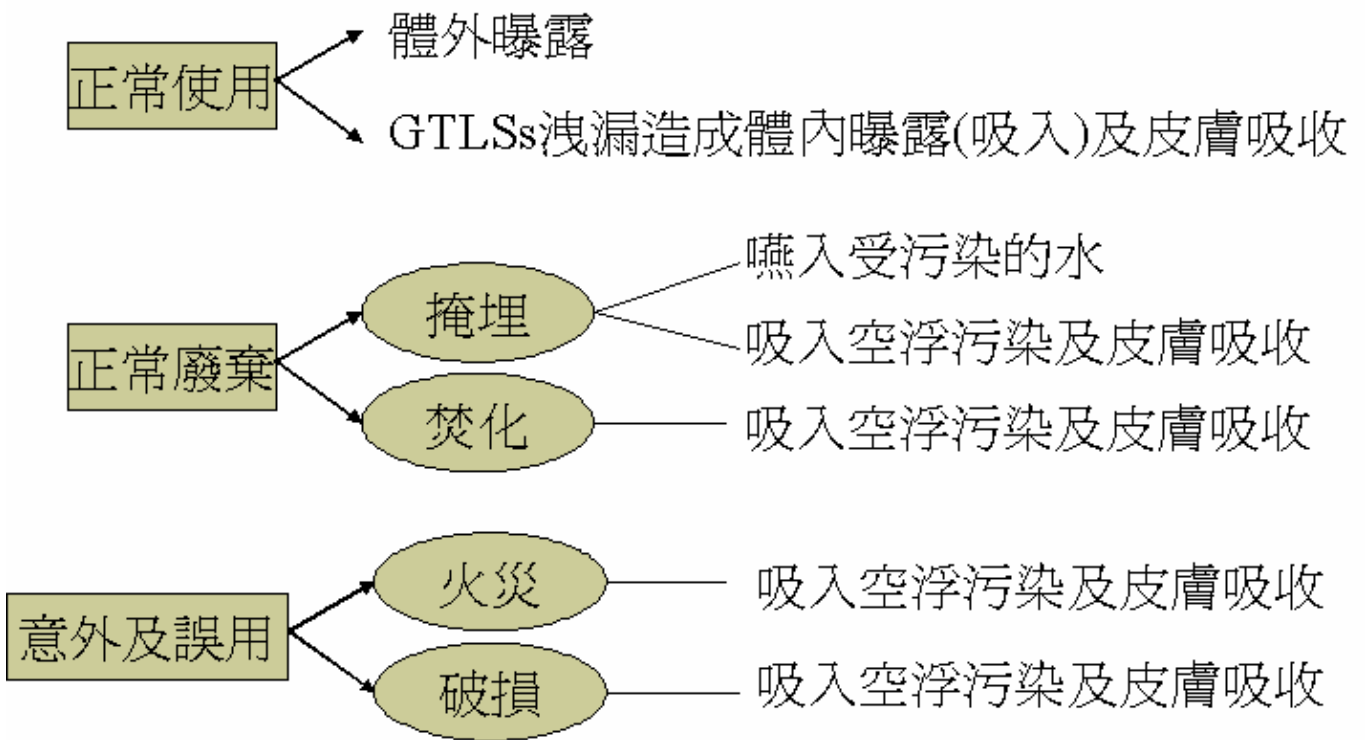
a. 火災

假設(1)火災時含 GTLS 計時設備破裂, 所有氙以氙水的形式放出, (2)若火災能夠使含 GTLS 計時設備破裂則火災也嚴重到能破壞房間結構, 以致於在氙水消散前無人能進入房間吸入明顯的量。(3)最嚴重的情形為 0.05%活度被嬰兒吸入, 0.05%活度經由嬰兒皮膚吸收。則嬰兒接受的約定有效劑量為 0.3 mSv 。

b. 破損

假設(1)破損時, 所有活度皆被釋放, (2)2%的活度為氙水的形式, (3)手錶被放置在體積為 30 m^3 的房間中, 房間中空氣每小時更換, 所以氙水濃度保持固定, (4)一個兒童在 GTLS 破損後留在房間裡一個小時, (5)兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, (6)兒童吸入 1Bq 活度的氙水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$, 考慮皮膚吸收造成的劑量時, 約定有效劑量加倍。則兒童接受的約定有效劑量為 0.1 mSv 。

2. 含 GTLSs 指南針的劑量評估



圖附 1-2. 含 GTLSs 指南針曝露情節與途徑

(1) 正常使用

報告中除了規定射源的總活度限值不可超過 10 GBq 外，還要求指南針表面的等價劑量率不得超過 0.1 μ Sv/h，且氙由指南針洩漏的洩漏率不得超過 2000Bq/day。

a. 體外曝露

H-3 和表面作用射出的低能制動輻射有效能量範圍約為 8~14keV，且 10keV 光子的半值層為 0.14cm-water，所以皮膚的表面組織能有效的吸收制動輻射。假設(1) 一個人一年中握著指南針的時間為 40 小時，(2) 表面的等價劑量率為 0.1 μ Sv/h。由這些假設可得每人每年接受的皮膚等價劑量約為 4 μ Sv。

b. 氙洩漏造成的體內劑量

假設氙會由 GTLSs 洩漏，釋放出氙化合物，造成民眾吸入或經由皮膚吸收而造成體內曝露，假設(1) 氙的洩漏率為 2000 Bq/day=83.3 Bq/h，(2) 洩

漏的氙是以氙水的形式出現，(3) 指南針被放置在體積為 30m^3 的房間中，房間中空氣每小時更換，所以氙水濃度保持約 $3\text{ Bq}/\text{m}^3$ ，(4) 兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$ ，(5) 兒童吸入 1Bq 活度的氙水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11}\text{ Sv}$ ，(6) 考慮皮膚吸收造成的劑量時，約定有效劑量加倍，(7) 兒童一年待在該房間 1200 小時。由這些假設可以算出對兒童造成的約定有效劑量一年約為 $0.1\mu\text{Sv}$ 。

(2) 正常廢棄

含 GTLSs 指南針廢棄時可能隨著一般廢棄物丟棄，處理方式有掩埋及廢棄兩種。假設(1)英國共有五萬個含 GTLSs 指南針(2)每年有 20%的含 GTLSs 指南針被丟棄，(3)80%被廢棄的含 GTLSs 指南針分布在 500 個掩埋場，所以每年每掩埋場有 20 個含 GTLSs 指南針，(4)20%被廢棄的夜光指南針分布在 200 個焚化爐，所以每年每焚化爐有 10 個含 GTLSs 指南針。

d. 掩埋(嚥入受污染的水)

放射性物質掩埋在掩埋場裡，可能會污染到附近水源，使民眾嚥入受污染的水而造成體內劑量，假設淺層掩埋 1TBq 活度的氙造成的飲水污染每年對成年人的約定有效劑量為 4.6 nSv 。若每個含 GTLSs 指南針皆有 10 GBq 活度，則一個人一年接受的約定有效劑量為 1 nSv 。

e. 掩埋(吸入空浮污染)

假設(1)在一年內掩埋場裡 20 個含 GTLSs 指南針皆破裂，且以氙水的形式釋放出全部活度，(2)每次釋放持續 30 分鐘，(3)受最多暴露的民眾距離掩埋場 200m ，(4)正常天氣情況下掩埋場放出 1Bq 活度，在距掩埋場 200公尺 處的時間積分活度濃度為 $2.5 \times 10^{-4}\text{ Bq s}/\text{m}^3$ ，(5) 兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$ ，(6) 兒童吸入 1Bq 活度的氙水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11}\text{ Sv}$ ，考慮皮膚吸收氙造成的劑量時，約定有效劑量加倍。經由計算可得一個兒童一年接受的約定有效劑量為 $0.6\mu\text{Sv}$ 。

f. 焚化(吸入空浮污染)

假設(1)焚化時，含 GTLSs 指南針會以氫水的形式釋放出全部活度，且每次焚燒持續 30 分鐘，(2)掩埋場煙囪高 50m，(3) 正常天氣情況下掩埋場放出 1Bq 活度，在距掩埋場 200 公尺處的時間積分活度濃度為 $9.5 \times 10^{-6} \text{ Bq s/m}^{-3}$ ，(4) 兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ，(5) 兒童吸入 1Bq 活度的氫水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ ，考慮皮膚吸收氫造成的劑量時，約定有效劑量加倍。經由計算可得一個兒童一年接受的約定有效劑量為 10 nSv。

(4) 意外及誤用

c. 火災

假設(1)火災時含 GTLS 指南針破裂，所有氫以氫水的形式放出，(2)若火災能夠使含 GTLS 指南針破裂則火災也嚴重到能破壞房間結構，以致於在氫水消散前無人能進入房間吸入明顯的量 (3)最嚴重的情形為 0.05% 活度被嬰兒吸入，0.05% 活度經由嬰兒皮膚吸收。則嬰兒接受的約定有效劑量為 0.5mSv。

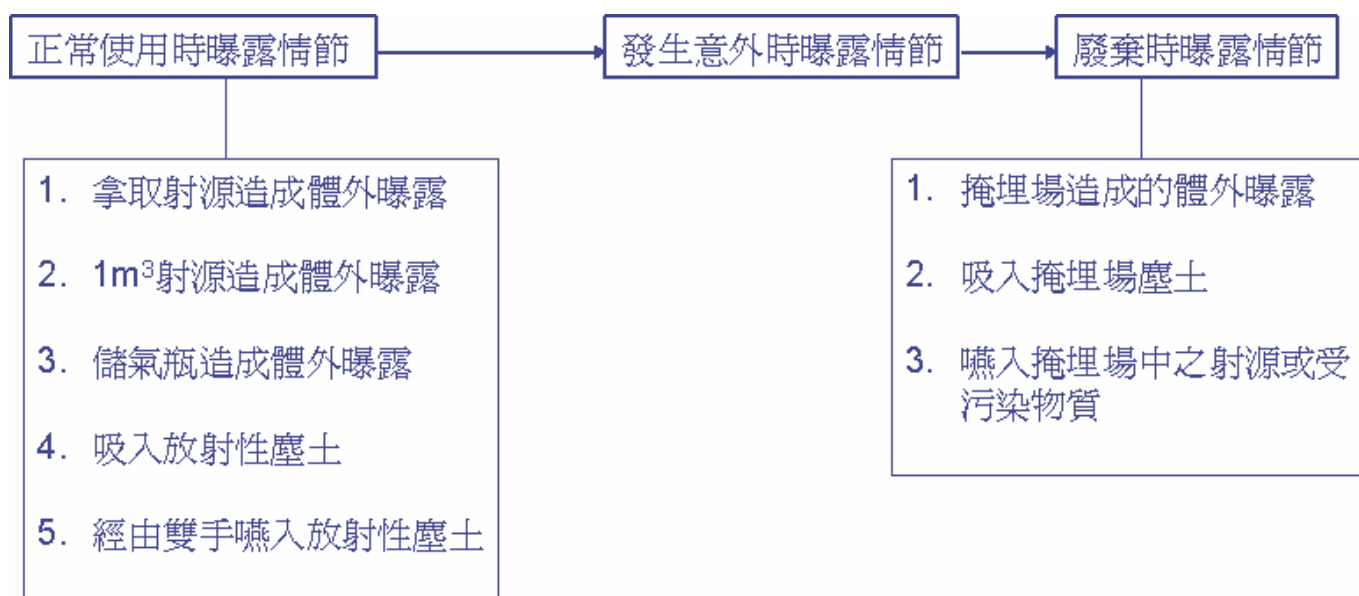
d. 破損

假設(1)破損時,所有活度皆被釋放，(2)2%的活度為氫水的形式，(3)指南針被放置在體積為 30m^3 的房間中,房間中空氣每小時更換，所以氫水濃度保持固定，(4)一個兒童在 GTLS 破損後留在房間裡一個小時，(5)兒童呼吸速率 $2.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ，(6)兒童吸入 1Bq 活度的氫水造成的約定有效劑量為 $2.7 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ ，考慮皮膚吸收造成的劑量時,約定有效劑量加倍。則兒童接受的約定有效劑量為 0.2mSv。

附錄二 含放射性物質商品之工作人員劑量評估

含放射性物質商品在製造過程中，會對工作人員造成劑量。在歐盟 RP-65 號報告中，對各種可能的曝露情節與途徑有提供劑量的評估方法。這邊將其簡略的敘述，詳細的背景以及計算時所需各參數還請自行查閱該報告。在報告中，分為濃度以及活度兩部分來討論，各部分的曝露情節有工作場所正常使用情節、工作場所意外情節、一般民眾廢棄物廢棄情節三種，以下分項敘述。

A. 濃度



A1. 正常使用情節

1. 拿取射源造成體外曝露

在一些工作情形下，工作人員必須拿取射源一段時間，例如包裝小射源、將射源安置在夾具上。這時工作人員會受到一定程度的體外曝露。假設工作人員是以手指或手掌拿取射源，該處皮膚厚度為 400 μ m。則皮膚等價劑量 H_{skin} 可由下面公式計算 $H_{skin}=As T (R_7+R_{24})$

其中 T: 曝露時間=2.5*10 h/y

R_7 : gamma 對皮膚基底層造成的等價劑量率(7mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

R_{24} : beta 對皮膚基底層造成的等價劑量率(40mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

As:單位面積的活度(Bq/cm²)= C M/ CONTACT

C: 射源單位質量的活度(Bq/g)

M:射源質量(g)

CONTACT:皮膚和射源接觸面積= $M / (\rho * t/2)$

= 射源密度(g/cm^3)

$t/2$ =射源厚度之半(cm)

最後以 $E = H_{\text{skin}} W_{\text{skin}} (\text{CONTACT}/\text{BODY})$ 算出有效劑量 E

其中 E=有效劑量(Sv/y)

$W_{\text{skin}} =$ 皮膚組織加權因數= $1 * 10^{-2}$

BODY=全身皮膚面積= $1 * 10^4 \text{ cm}^2$

2. 1m^3 射源造成體外暴露

在一些工作人員的工作場所附近，可能有一座含放射性物質的礦砂、或存放小射源的櫥櫃對工作人員造成曝露。假設射源距離工作人員 1m，且一年的曝露時間為 100 小時，則可由下面公式計算工作人員所受劑量。

$E = C T ((\text{GAM } R_1 \text{ GEOM}) + (\text{BETA SHIELD}))$

其中 E=有效劑量(Sv/y)

C: 射源單位質量的活度(Bq/g)

T :曝露時間= $1 * 10^2 \text{ h/y}$

GAM= 1 Bq/g 的無限大厚板狀 gamma 射源每一 MeV 能量在其上方 1m 處造成的有效劑量率 $3 * 10^{-7} (\text{Sv/h}) \text{ per} (\text{MeV Bq/g})$

R_1 =每次衰變的光子平均能量(MeV)

GEOM=從無限大到有限大的幾何因數($2 * 10^{-2}$)

BETA= 1 Bq/g 的半無限大厚板狀 beta 射源在其上方 1m 處造成的有效劑量率($\text{Sv/h}) \text{ per} (\text{Bq/g})$

SHIELD=屏蔽因數($1 * 10^{-1}$)

3. 儲氣鋼瓶造成體外曝露

在一些工作人員的工作場所附近，可能有存放放射性氣體的鋼瓶對工作人員造成曝露。假設鋼瓶距離工作人員 1m，且一年的曝露時間為 100 小時，則可由下面公式計算工作人員所受劑量。

$E = C T (\text{GAM } R_1) \text{ GEOM}$

其中 E=有效劑量(Sv/y)

C: 射源單位質量的活度(Bq/g)

T :曝露時間=1*10² h/y

GAM= 1 Bq/g 的無限大厚板狀 gamma 射源每一 MeV 在其上方 1m 處造成的有效劑量率 3*10⁻⁷ (Sv/h) per(MeV Bq/g)

R₁=每次衰變的光子平均能量(MeV)

GEMO=從無限大厚板狀到 0.1m³ 固體的幾何因數(3*10⁻³)

4.吸入放射性塵土

假設在工作人員工作的環境中，空氣裡放射性塵土的濃度為 0.04mg/m³，且有通風設備使塵土濃度保持一定，工作人員每年在這種環境下工作 2000 小時，則因為吸入放射性塵土造成的體內劑量可由下面公式計算。

E=C T INH R₁₀ Dust

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

C :射源單位質量的活度(1Bq/g)

T :曝露時間=2*10³ h/y

INH :呼吸速率=1m³/h

R₁₀:吸入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

Dust :放射性塵土濃度= 4*10⁻⁵g/m³

5.經由雙手嚥入放射性塵土

在工作人員工作的環境中，空氣裡放射性塵土的濃度為 0.04mg/m³，且房間體積為 32m³，假設沉積在房間表面的塵土量一天為 1.28mg，工作人員一天意外經由雙手嚥入的量為 10%，一年工作天數為 250 天，則一年的嚥入量為 32mg。經由此途徑得到的體內劑量可由下面公式計算。

E=C ING R₉

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

C :射源單位質量的活度(1Bq/g)

ING:一年嚥入污染物質的量(32mg/y)

R₉:嚥入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

A2. 發生意外情節

這部分是當意外發生時，造成的體外或體內劑量，但因為各種可能途徑所計算出的劑量，都比正常使用情節要來的低，所以就將這部分包含在正常使用情節下，而不另外加以考慮。

A3. 廢棄情節

1. 掩埋場造成的體外暴露

假設一般民眾一年走過掩埋場的時間相當於一般人一年作戶外休閒活動的時間，大約 300 小時。且不論射源到掩埋場後，會被其他廢棄物稀釋或保持獨立個體，所造成的劑量皆相同。

$$E = C_D T (GAM R_1) s$$

其中 E = 有效劑量 (Sv/y)

$$C_D = C M_1 / M_2 \text{ DECA Y}$$

C : 射源單位質量的活度 (1Bq/g)

M_1 : 射源質量 = 100g

M_2 : 垃圾場質量 = $1.5 * 10^{10}$ g

DECA Y : 經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率

T : 曝露時間 = 300 h/y

GAM = 1 Bq/g 的無限大厚板狀 gamma 射源每一 MeV 能量在其上方 1m 處造成的有效劑量率 = $3 * 10^{-7}$ (Sv/h) per (MeV Bq/g)

R_1 = 每次衰變的光子平均能量 (MeV)

s : 發生機率 = 10^{-2} /y

2. 吸入掩埋場塵土

在民眾走過掩埋場時，吸入了受污染塵土，一年內總時間一小時。所造成的體內劑量可由下列公式計算。

$$E = C_D T \text{ INH } R_{10} \text{ Dust } s$$

其中 E = 約定有效劑量 (Sv/y)

$$C_D = \text{稀釋後活度濃度 (Bq/g)} = C M_1 / M_2$$

C : 射源單位質量的活度 (1Bq/g)

M_1 : 射源質量 = 100g

M_2 : 垃圾場質量 = $1.5 * 10^{10}$ g

T : 曝露時間 = 1 h/y

INH : 呼吸速率 = $1 \text{ m}^3/\text{h}$

R_{10} : 吸入一貝克活度造成的約定有效劑量 (Sv/Bq)

Dust : 放射性塵土濃度 = $1 * 10^{-3} \text{ g}/\text{m}^3$

s : 發生機率 = 10^{-2} /y

3. 嚥入掩埋場中之射源或受污染物質

當民眾走過掩埋場時，可能會不幸嚥入射源，或是嚥入受溢出射源污染的物質、塵土，假設一年內嚥入的量為 1g，則因此所受的體內劑量可由下面公式計算。

$$E=C M1 f R_0 \text{ DECA Y}$$

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

C :射源單位質量的活度(1Bq/g)

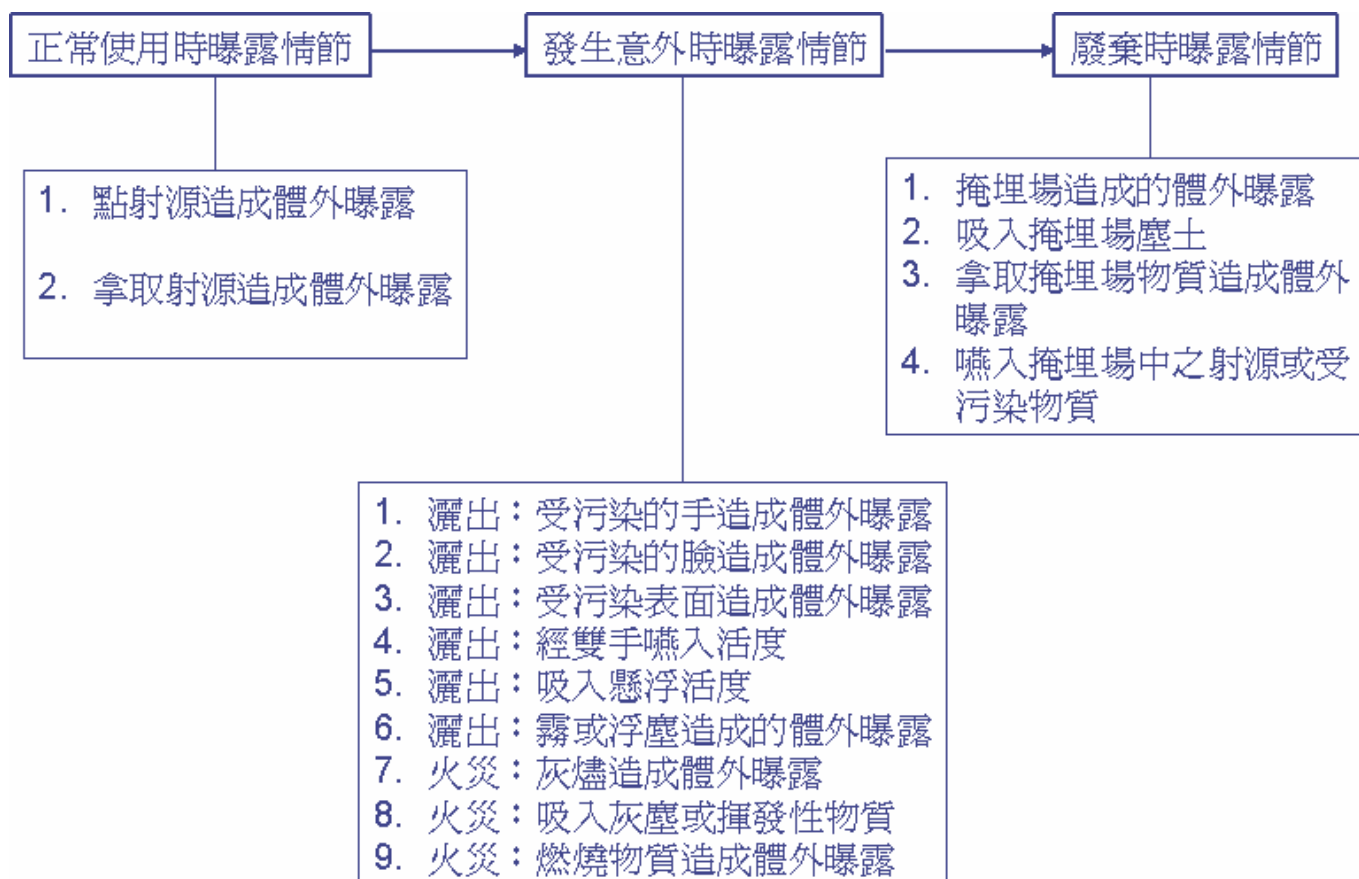
M1:射源質量=100g

f:一年中嚥入射源分率=0.01

R₀:嚥入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

DECA Y:經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率

B. 活度



B1. 正常使用情節

1. 點射源造成體外曝露

在一些工作情形下，工作人員必須要接近小射源一段時間，例如使用小射源進行設備檢測，或是將小射源安裝到設備上。這時工作人員會受到一定程度

的體外曝露。使用下面公式可以得到所受劑量。

$$E=A T (R_{19}+R_{20})$$

其中 E=有效劑量(Sv/y)

A=射源活度(1Bq)

T:曝露時間=1*10² h/y for 液體及可分散型固體

2*10²h/y for 不可分散型、固體、膠囊、箔

R₁₉:1 Bq 的 gamma 點射源在距離 1m 處造成的有效劑量率(Sv/h) per Bq

R₂₀:1 Bq 的 beta 點射源在距離 1m 處造成的有效劑量率(Sv/h) per Bq

2. 拿取射源造成體外曝露

在一些工作情形下，工作人員必須拿取射源一段時間，例如包裝小射源、將射源安置在夾具上。這時工作人員會受到一定程度的體外曝露。假設工作人員是以手指或手掌拿取射源，該處皮膚厚度為 400μm。假設用來裝液體射源的玻璃瓶厚度為 150mg/cm²。則皮膚等價劑量 H_{skin} 可由下面公式計算

$$H_{skin}=As T (R_7+R_{24}) \quad \text{可分散型固體、密封氣體射源、膠囊、箔}$$

$$H_{skin}=As T (R_7+R_{24}/SF) \quad \text{液體}$$

其中 As:單位面積的活度(Bq/cm²)= A / CONTACT

A=射源活度(1Bq)

CONTACT:皮膚和射源接觸面積=M/(*t/2)

M:射源質量(g)

$$= \text{射源密度(g/cm}^3)$$

t/2=射源厚度之半(cm)

T: 曝露時間=10 h/y

R₇:gamma 對皮膚基底層造成的等價劑量率(7mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

R₂₄: beta 對皮膚基底層造成的等價劑量率(40mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

SF=玻璃瓶對液體射源造成的屏蔽因數 =e^{μd}

$$\mu = 0.017 * E_{\max}^{-1.14}$$

$$d=150 \text{ mg/cm}^2$$

最後以 E=H_{skin} W_{skin} (CONTACT/BODY) 算出有效劑量 E

其中 E=有效劑量(Sv/y)

W_{skin}= 皮膚組織加權因數=1*10⁻²

BODY=全身皮膚面積=1*10⁴ cm²

B2. 發生意外情節

1. 灑出：受污染的手造成體外暴露

假設工作人員意外打翻了放射性溶液或粉末，並且有 10% 的放射性物質污染到手背及手臂，且未能在 10 分鐘之內清除乾淨。假設該處皮膚厚度為 40 μ m，則皮膚等價劑量 H_{skin} 可由下面公式計算。

$$H_{skin} = A_s T (R_7 + R_8) s$$

其中 A_s : 單位面積的活度 (Bq/cm^2) = $A f / CONTACT$

A : 射源活度 (1Bq)

f : 灑出物質轉移到手上的分率 = 0.1

$CONTACT$: 皮膚和射源接觸面積 = $M f / (\rho t)$

M : 射源灑出前質量

= 10 g 液體 or 30 g 可分散固體

ρ : 分布在手上時的密度

= 1 g/cm³ 液體 or 0.5 g/cm³ 可分散固體

t : 分布在手上的厚度 = 10⁻² cm

T : 曝露時間 = 0.16h 所有射源

R_7 : gamma 對皮膚基底層造成的等價劑量率 (7mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

R_8 : beta 對皮膚基底層造成的等價劑量率 (4mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

s : 發生機率 = 10⁻²/y

最後以 $E = H_{skin} W_{skin} (CONTACT/BODY)$ 算出有效劑量 E

其中 E = 有效劑量 (Sv/y)

W_{skin} = 皮膚組織加權因數 = 1 * 10⁻²

$BODY$ = 全身皮膚面積 = 1 * 10⁴ cm²

2. 灑出：受污染的臉造成體外暴露

假設工作人員意外打翻了放射性溶液或粉末，並且有 10% 的放射性物質污染到手背及手臂，這些手上的污染物質又有 10% 轉移到臉上，且未能在 10 分鐘之內清除乾淨。假設該處皮膚厚度為 40 μ m，則皮膚等價劑量 H_{skin} 可由下面公式計算。

$$H_{skin} = A_s T (R_7 + R_8) s$$

其中 A_s : 單位面積的活度 (Bq/cm^2) = $A f / CONTACT$

A : 射源活度 (1Bq)

f : 灑出物質轉移到手上的分率 = 0.01

CONTACT:皮膚和射源接觸面積= $M f / (\quad *t)$

M:射源灑出前質量

=10 g 液體 or 30 g 可分散固體

:分布在手上時的密度

=1 g/cm³ 液體 or 0.5 g/cm³ 可分散固體

t:分布在手上的厚度=10⁻³cm

T :曝露時間=0.16h 所有射源

R₇:gamma 對皮膚基底層造成的等價劑量率(7mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

R₈:beta 對皮膚基底層造成的等價劑量率(4mg/cm²) (Sv/h per Bq/cm²)

s:發生機率=10⁻²/y

最後以 $E=H_{skin} W_{skin} (CONTACT/BODY)$ 算出有效劑量 E

其中 E=有效劑量(Sv/y)

W_{skin} = 皮膚組織加權因數=1*10⁻²

BODY=全身皮膚面積=1*10⁴ cm²

3. 灑出：受污染的表面造成體外曝露

假設工作人員意外打翻了放射性溶液或粉末，總污染面積 7m²，且未被注意，而工作人員在距離 1m 處繼續工作了 10 分鐘。

$E=As T (R_5+R_6) GEOM s$

其中 E=有效劑量(Sv/y)

As:單位面積的活度(Bq/cm²)= A / AREA

A=射源活度(1Bq)

AREA:受污染面積=7 m²

T :曝露時間=0.16h

R₅+R₆: 無限大平面 gamma 及 beta 射源在其上方 1m 處造成的有效劑量率 (Sv/h)per(Bq/m²)

GEMO=從無限大平面到半徑為 1.5m 區域的幾何因數(1*10⁻¹)

s:發生機率=10⁻²/y

4. 灑出：經雙手嚥入活度

假設工作人員意外打翻了放射性溶液或粉末，而工作人員經由雙手嚥入了 1mg 的放射性物質。造成的約定有效劑量可由下列公式算出。

$E=A f R_9 s$

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

A=射源活度(1Bq)

f:吸入總活度的比例= 1×10^{-5}

R₉:吸入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

s:發生機率= $10^{-2}/y$

5.灑出：吸入懸浮活度

假設工作人員意外打翻了放射性溶液或粉末，而工作人員經吸入了塵土或霧狀活度，且濃度為 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。則造成的約定有效劑量可由下列公式算出。

$$E = A T \text{INH} R_{10} \text{Dust} s / M$$

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

A=射源活度(1Bq)

T:曝露時間=0.16 h/y

INH:呼吸速率= $1\text{m}^3/\text{h}$

R₁₀:吸入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

Dust:放射性塵土濃度= $5 \times 10^{-3}\text{g}/\text{m}^3$

s:發生機率= $10^{-2}/y$

M:灑出射源質量=100g

6.灑出：霧或浮塵造成的體外暴露

假設打翻了放射性溶液或粉末時，產生了霧或浮塵均勻的分布在 32m^3 的工作場所裡，並且持續了 10 分鐘以上。假設工作人員待在該房間中 10 分鐘，並造成體外劑量。

$$E = T [(R_1 \text{CF}1) + (R_2 \text{CF}2 W_{\text{skin}})] s / h$$

其中 E=有效劑量(Sv/y)

:灑出發生時單位體積空氣的活度= AfV / VOL for 液體

:灑出發生時單位體積空氣的活度= Af / VOL for 可分散固體

A=射源活度(1Bq)

f:射源分散到房間中的比率

=1 for 液體, 5.3×10^{-3} for 可分散固體

V:核種揮發性

VOL:房間體積= 32m^3

T:曝露時間=0.16 h/y

R₁=每次衰變的光子平均能量(MeV)

CF1: 1 Bq/m^3 的半無限大霧狀 gamma 射源每一 MeV 在其中造成的有效劑量率= $1.6 \times 10^{-6}(\text{Sv/y})$ per (Bq/g)

R_2 =每次衰變的 beta 粒子平均能量(MeV)

CF2: 1 Bq/m^3 的半無限大霧狀 beta 射源每一 MeV 在其中造成的皮膚等價劑量率= $2 \times 10^{-6}(\text{Sv/y})$ per (Bq/g)

W_{skin} = 皮膚組織加權因數= 1×10^{-2}

s:發生機率= $10^{-2}/\text{y}$

h:一年 8760 小時

7.火災：灰燼造成體外暴露

假設發生火災時，放射性物質著火，並且燒成灰燼。而工作人員皮膚遭這些灰燼污染，造成體外曝露。則皮膚等價劑量 H_{skin} 可由下面公式計算。

$$H_{\text{skin}} = A_s T (R_7 + R_8) s$$

其中 A_s :單位面積的活度(Bq/cm^2)= $A c / \text{AREA}$

A =燃燒前射源活度(1Bq)

c :射源被燃燒成灰或蒸氣的分率

=1 液體 = 0.01 其他

$$\text{AREA} = M c / t$$

M :燃燒前射源質量=100g

ρ :分布在表面時的密度= 0.5 g/cm^3

t :分布在手上的厚度= 10^{-2} cm

T :曝露時間=0.16h

R_7 :gamma 對皮膚基底層造成的等價劑量率(7mg/cm^2) (Sv/h per Bq/cm^2)

R_8 :beta 對皮膚基底層造成的等價劑量率(4mg/cm^2) (Sv/h per Bq/cm^2)

s:發生機率= $10^{-2}/\text{y}$

最後以 $E = H_{\text{skin}} W_{\text{skin}} (\text{CONTACT/BODY})$ 算出有效劑量 E

其中 E =有效劑量(Sv/y)

W_{skin} = 皮膚組織加權因數= 1×10^{-2}

BODY =全身皮膚面積= $1 \times 10^4 \text{ cm}^2$

8. 火災：吸入灰塵或揮發性物質

假設發生火災時，放射性物質著火，工作人員在燃燒時或燃燒後吸入燃燒產物長達 10 分鐘，造成體內曝露。則造成的約定有效劑量可由下列公式算出。

$$E = T \text{ INH } R_{10} s$$

其中 E =約定有效劑量(Sv/y)

:灑出發生時單位體積空氣的活度= $A c / VOL$

A =燃燒前射源活度(1Bq)

c :射源被燃燒成灰或蒸氣的分率

=1 液體 = 0.01 其他

VOL :房間體積= 32 m^3

T :曝露時間= 0.16 h/y

INH :呼吸速率= $1 \text{ m}^3/\text{h}$

R_{10} :吸入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

s :發生機率= $10^{-2}/\text{y}$

9. 火災：燃燒物質造成體外暴露

假設發生火災時，放射性物質著火，燃燒物質形成霧或浮塵均勻的分布在 32 m^3 的工作場所裡，並且持續了 10 分鐘以上。假設工作人員待在該房間中 10 分鐘，並造成體外劑量。

$E = T[(R_1 CF_1) + (R_2 CF_2 W_{\text{skin}})]s / h$

其中 E =有效劑量(Sv/y)

:灑出發生時單位體積空氣的活度= $A c / VOL$

A =燃燒前射源活度(1Bq)

c :射源被燃燒成灰或蒸氣的分率

=1 液體 = 0.01 其他

VOL :房間體積= 32 m^3

T :曝露時間= 0.16 h/y

R_1 =每次衰變的光子平均能量(MeV)

CF_1 : 1 Bq/m^3 的半無限大霧狀 gamma 射源每一 MeV 在其中造成的有效劑量率= $1.6 * 10^{-6} (\text{Sv/y}) \text{ per } (\text{Bq/g})$

R_2 =每次衰變的 beta 粒子平均能量(MeV)

CF_2 : 1 Bq/m^3 的半無限大霧狀 beta 射源每一 MeV 在其中造成的皮膚等價劑量率= $2 * 10^{-6} (\text{Sv/y}) \text{ per } (\text{Bq/g})$

W_{skin} = 皮膚組織加權因數= $1 * 10^{-2}$

s :發生機率= $10^{-2}/\text{y}$

h :一年 8760 小時

B3. 廢棄情節

1. 掩埋場造成的體外暴露

假設一般民眾一年走過掩埋場的時間相當於一般人一年作戶外休閒活動的時間，大約 300 小時。且不論射源到掩埋場後，會被其他廢棄物稀釋或保持獨立個體，所造成的劑量皆相同。

$$E = C_D T (GAM R_1) s$$

其中 E=有效劑量(Sv/y)

$C_D = A/M$ DECA Y

A=射源活度(1Bq)

M:垃圾場質量= 1.5×10^{10} g

DECA Y:經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率

T :曝露時間=300 h/y

GAM= 1 Bq/g 的無限大厚板狀 gamma 射源每一 MeV 能量在其上方 1m 處造成的有效劑量率= 3×10^{-7} (Sv/h) per(MeV Bq/g)

R_1 =每次衰變的光子平均能量(MeV)

s:發生機率= 10^{-2} /y

2.吸入掩埋場塵土

第一種情形為，在一般民眾走過掩埋場時，吸入了受污染塵土，一年內總時間一小時。所造成的體內劑量可由下列公式計算。

$$E = (A/M) T INH R_{10} Dust s DECA Y$$

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

A=射源活度(1Bq)

M:垃圾場質量= 1.5×10^{10} g

T :曝露時間=1 h/y

INH:呼吸速率= $1 \text{ m}^3/\text{h}$

R_{10} :吸入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

Dust:放射性塵土濃度= $1 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{m}^3$

s:發生機率= 10^{-2} /y

DECA Y:經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率

第二種情形為，在住在掩埋場附近的居民，吸入了受污染塵土，一年內總時間 5000 小時。所造成的體內劑量可由下列公式計算。

$$E = C_D T INH R_{10} Dust$$

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

$C_D = A/M$ DECA Y

A=射源活度(1Bq)

M:稀釋射源的物質質量= 1×10^5 g

DECAY:經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率

T :曝露時間=5000 h

INH:呼吸速率= $1\text{m}^3/\text{h}$

R₁₀:吸入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)

Dust:放射性塵土濃度= $1 \times 10^{-3}\text{g}/\text{m}^3$

3. 拿取掩埋場物質造成體外暴露

當民眾走過掩埋場時，可能會因為好奇而拿取了一個射源或受污染物質，並且拿在手上或放進口袋約 8 小時，造成體外曝露。

$$H_{\text{skin}} = A_s T (R_7 + R_{24})$$

其中 A_s:單位面積的活度(Bq/cm^2)= A DECAY / CONTACT

A=射源活度(1Bq)

DECAY:經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率

CONTACT:皮膚和射源接觸面積= $M / (t/2)$

M:射源質量(30g for 可分散型固體)

= 射源密度($=1.12 \text{g}/\text{cm}^3$)

t/2=射源厚度之半($=0.15 \text{cm}$)

T: 曝露時間=8 h

R₇:gamma 對皮膚基底層造成的等價劑量率($7\text{mg}/\text{cm}^2$) (Sv/h per Bq/cm^2)

R₂₄: beta 對皮膚基底層造成的等價劑量率($40\text{mg}/\text{cm}^2$) (Sv/h per Bq/cm^2)

最後以 $E = H_{\text{skin}} W_{\text{skin}} (\text{CONTACT}/\text{BODY})$ 算出有效劑量 E

其中 E=有效劑量(Sv/y)

$W_{\text{skin}} =$ 皮膚組織加權因數= 1×10^{-2}

BODY=全身皮膚面積= $1 \times 10^4 \text{cm}^2$

4. 吸入掩埋場中之射源或受污染物質

當民眾走過掩埋場時，可能會不幸吸入射源，或是吸入受溢出射源污染的物質、塵土，假設一年內吸入的量為射源活度的 0.1%，則因此所受的體內劑量可由下面公式計算。

$$E = A f R_9 \text{ DECAY}$$

其中 E=約定有效劑量(Sv/y)

A=射源活度(1Bq)

f:一年中吸入射源分率=0.001

R₉: 嚥入一貝克活度造成的約定有效劑量(Sv/Bq)
DECAY: 經過 24 小時衰減後,核種活度剩餘分率