

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫期末報告

放射性廢棄物解除管制劑量評估之  
輻射曝露情節分析

計畫編號：952006FCMA003

受委託機關(構)：行政院原子能委員會核能研究所

計畫主持人：武及蘭

報告日期：中華民國九十五年十月



## 放射性廢棄物解除管制劑量評估之輻射曝露情節分析

### 摘 要

放射性廢棄物的活度或比活度低於一定限值即可外釋，一般使用情節分析的方法推導解除管制標準。依據歐美的情節分析相關報告、程式，包括 IAEA 於 2005 年出版之 Safety Reports Series No.44 「Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance」、NUREG-1640、歐盟 RP 系列報告以及 RESRAD-RECYCLE 程式，除了瞭解歐美對金屬、混凝土廢棄物採取的再利用方式，並調整各情節成為適合台灣的本土情節，以供未來發展劑量評估工作。

關鍵字：情節分析、解除管制標準、本土情節

# Scenario Analysis for Dose Assessment of Residual Radioactive Materials

## Abstract

Radioactive waste can be released when the activity or activity concentration is lower than clearance levels. Scenario analysis is usually a good method to derive clearance levels. This work refers to many waste-reuse approaches handling metal scrap and concrete rubbles from documents including IAEA Safety Report Series No.44 “Derivation of Activity Concentration Value for Exclusion, Exemption and Clearance” published in 2005, NUREG-1640, Radiation Protection reports and RESRAD-RECYCLE code. This work also changes the scenarios suggested in the above reports into native scenarios that are suitable for Taiwan. The native scenarios could be an important reference in future dose assessment work.

Keywords: scenario analysis, clearance levels, native scenarios

# 目 錄

1. 前言 .....	1
1.1 計畫目的.....	1
1.2 計畫緣起.....	1
2. 文獻回顧與分析 .....	3
2.1 IAEA 44 號安全報告 .....	3
2.2 NUREG-1640 .....	5
2.2.1 鋼鐵廢棄物情節 .....	6
2.2.2 銅廢棄物情節 .....	12
2.2.3 鋁廢棄物情節 .....	15
2.2.4 混凝土廢棄物 .....	17
2.3 歐盟報告.....	19
2.3.1 RP 122 .....	19
2.3.2 RP 114 .....	21
2.3.3 RP 117 .....	23
2.4 RESRAD Family .....	28
2.4.1 RESRAD-RECYCLE.....	28
3. 建置本土輻射曝露情節與劑量評估程序.....	33
3.1 本土輻射曝露情節 .....	33
3.2 劑量評估程序 .....	36
3.2.1 核種之衰變系列.....	36
3.2.2 情節使用的時間參數.....	39
3.2.3 體外曝露.....	41
3.2.4 吸入途徑.....	45

3.2.5 嚥入途徑 .....	47
3.2.6 地下水情節 .....	49
3.2.7 場址條件設定 .....	60
3.2.8 核種的考量 .....	67
3.2.9 皮膚污染 .....	67
4. 結果與討論 .....	69
5. 結語 .....	78
參考文獻 .....	79

## 附 圖 目 錄

圖 2.1 IAEA 劑量評估曝露情節模式 .....	4
圖 2.2 NUREG-1640 劑量評估曝露情節模式.....	6
圖 2.3 台灣省輸配水管管材長度分佈圖 .....	13
圖 2.4 RP 122 劑量評估曝露情節模式 .....	19
圖 2.5 RP 114 劑量評估曝露情節模式 .....	21
圖 3.1 本土輻射曝露情節之架構.....	35
圖 3.2 $^{241}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$ 活度及劑量係數之時間關係圖.....	37
圖 3.3 子核與母核相對活度之時間關係圖 .....	37
圖 3.4 RH 情節幾何條件比較 .....	44
圖 3.5 地下水情節 .....	50
圖 3.6 $K_d$ 模式示意圖 .....	51
圖 3.7 滲透現象.....	53
圖 3.8 達西地下水流動模型 .....	58

## 附表目錄

表 2.1 曝露情節與相關曝露途徑.....	5
表 2.2 NUREG-1640 之鋼鐵情節.....	10
表 2.3 NUREG-1640 之銅廢棄物情節.....	14
表 2.4 NUREG-1640 之鋁廢棄物情節.....	16
表 2.5 NUREG-1640 之混凝土情節.....	18
表 2.6 RP 117 報告採用情節.....	24
表 2.7 RESRAD-RECYCLE 採用情節.....	31
表 3.1 母核與相關子核.....	38
表 3.2 曝露情節之時間參數.....	41
表 3.3 體外曝露情節參數.....	42
表 3.4 吸入情節參數.....	47
表 3.5 嚥入情節參數.....	49
表 3.6 土壤特性參數對應值.....	52
表 3.7 IAEA RS-G-1.7 號安全報告之分佈係數.....	56
表 3.8 食物消費量預設值.....	61
表 3.9 地下水模式的場址參數.....	62
表 3.10 國人飲食參數.....	64
表 3.11 高屏河流域之水文參數.....	65
表 3.12 本土地質水文參數.....	66
表 3.13 皮膚污染情節參數.....	68
表 4.1 劑量評估參數分析選定之核種及其外釋限值.....	70
表 4.2 選定之 25 個核種的分佈係數.....	71



表 4.3 IAEA 與屏東平原 WL 情節劑量比較.....	72
表 4.4 IAEA 與屏東平原 WF 情節劑量比較.....	73
表 4.5 IAEA 與屏東平原 WO、RF 及 RH 情節劑量比較.....	74
表 4.6 IAEA 與屏東平原 RP 情節劑量比較.....	75
表 4.7 IAEA 與屏東平原 RL-A(1)情節劑量比較.....	76
表 4.8 IAEA 與屏東平原地下水情節劑量比較.....	77



# 1. 前言

## 1.1 計畫目的

依據「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」<sup>(1)</sup>第六條，其中規定：放射性廢棄物依輻射劑量評估，一年內所造成個人之有效劑量不超過 0.01 毫西弗，且集體劑量不超過 1 人西弗者，經提出輻射劑量評估報告及外釋計畫，報請主管機關核准後，始得外釋。由此可知一定活度或比活度以下放射性廢棄物除以偵檢量測方式驗證符合解除管制標準外，亦可採用劑量評估方式申請外釋。故配合法規需求，發展本土適用之劑量評估模式實為刻不容緩。

本計畫分析彙整國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)及歐美等國使用之劑量評估模式與曝露情節，並參考國內現況，初步擬定保守之本土情節。為與世界潮流接軌，本計畫以 IAEA 44 號安全報告(IAEA Safety Report Series No.44)<sup>(2)</sup>提供之情節架構為主，配合參考其他文獻，同時考量國情飲食、居住習慣及環境參數，儘可能調整廢棄物處置方式成為台灣的本土情節，以供未來發展劑量評估工作。

## 1.2 計畫緣起

近年來面對核能設施陸續除役產生大量的放射性廢棄物，為免社會成本與經濟資源的浪費，IAEA 及各核能先進國家均致力於訂定固體放射性廢棄物之解除管制標準，以解除不必要之管制。IAEA 於 2004 年 8 月發布 RS-G-1.7 號安全導則<sup>(3)</sup>，提供天然及人造核種之活度濃度，供管制機關及核設施營運者應用於大量放射性物質之排除、豁免及解除管制。RS-G-1.7 號安全導則發展一定活度或比活度以下放射性廢棄物之活度或

比活度限值，其中所需之評估情節、曝露途徑及環境參數等詳述於 IAEA 44 號安全報告。

劑量評估模式為曝露情節分析。依最常採取的廢棄物處理方式，設定適當的情節，包括廢棄物的處置與回收再利用形式、場址參數、及考量關鍵群體與其曝露途徑等。藉由情節模式可計算放射性廢棄物經處理後，對關鍵群體造成的有效劑量，配合主管機關訂定的有效劑量限值，可推算廢棄物的比活度限值。

國際上有許多介紹劑量評估曝露情節的報告，除 IAEA 44 號安全報告外，尚有美國核能管制學會(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)出版的 NUREG-1640 報告<sup>(4)</sup>，其針對鐵、銅、鋁及混凝土四種廢棄物材質，按美國實際處理廢棄物的情形設計情節模式。

歐盟(European Commission)於 1999 年出版的 Radiation Protection 114 (RP 114)報告<sup>(5)</sup>，定義建築物的解除管制標準，同樣採用情節分析的方法推導之；RP 117 報告<sup>(6)</sup>，討論核設施拆除金屬的再利用及廢棄情節，拆除金屬亦分成鐵、銅及鋁三大類；RP 122 報告<sup>(7)</sup>則是對於一般廢棄物處置方式，依曝露途徑設計了簡要的情節模式。

美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory)設計了一系列劑量評估程式(RESRAD FAMILY)，其中，RESRAD-RECYCLE 程式<sup>(8)</sup>依據歐美相關文獻，設定了鋼鐵、鋁兩種金屬的回收再利用情節，亦可供做研擬本土情節的參考。

本計劃分析彙整 IAEA 及上述國際重要文獻報告之劑量評估模式與曝露情節，評估適合台灣之本土情節。同時收集或計算國情飲食、居住習慣及環境參數，建立劑量評估模式之程序。

## 2. 文獻回顧與分析

以下分析彙整國際重要文獻報告之輻射曝露情節。

### 2.1 IAEA 44 號安全報告

IAEA 於 2005 年出版之 44 號安全報告「Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance」，所採用的評估情節係以國際上現有與清潔標準、解除管制推導相關之研究為基礎，發展一套通用之架構，此架構包含不同的情況以及會員國所考量一定程度之保守理念。其認為可用 8 種評估情節來推導各核種的活度濃度，並適用於所有固體廢棄物，各情節描述如下：

- (1)WL 情節：工作人員曝露在污染的掩埋場，其曝露途徑為體外曝露、吸入或經由手、口嚥入污染塵土。
- (2)WF 情節：工作人員曝露於鑄造廠，為停留在污染的廢金屬堆附近或運送、熔煉過程中產生的飛灰所造成體外曝露，以及吸入或因怠忽嚥入飛灰等曝露途徑。
- (3)WO 情節：指工作人員常態性接觸污染物質，例如運送廢棄物的司機。此外，去污後大型設備的再使用也會造成工作人員體外曝露。
- (4)RL-C 與 RL-A 情節：指個人居住掩埋廠或其他設施附近，分別針對成人(RL-A)與小孩(RL-C)進行評估，曝露途徑有吸入灰塵及嚥入生長於污染土地的農作物。
- (5)RF 情節：指個人住在鑄造廠附近，鑄造廠熔煉廢金屬所產生的污染飛灰與掩埋廠不同，針對居住於鑄造廠附近的小孩進行評估。

(6)RH 情節：利用污染物質當作建材，對居住於其間的個人造成體外曝露。

(7)RP 情節：用污染物質覆蓋公共場合，其曝露途徑有體外曝露、吸入及  
嚥入飛灰等方式。

(8)RW 情節：污染物質可能污染地下水，其曝露途徑有飲用受污染的地下  
水、食用受污染地下水灌溉的農作物、或食用在污染河水生  
長的魚類等。

以上各情節的代號、簡述、曝露對象及曝露途徑整理於表 2.1，情節  
發展模式可用圖 2.1 表示。IAEA 的曝露情節雖然簡單，卻囊括各種遭受  
曝露的可能性，故研擬本土情節時，應考量 IAEA 提供的所有情節。

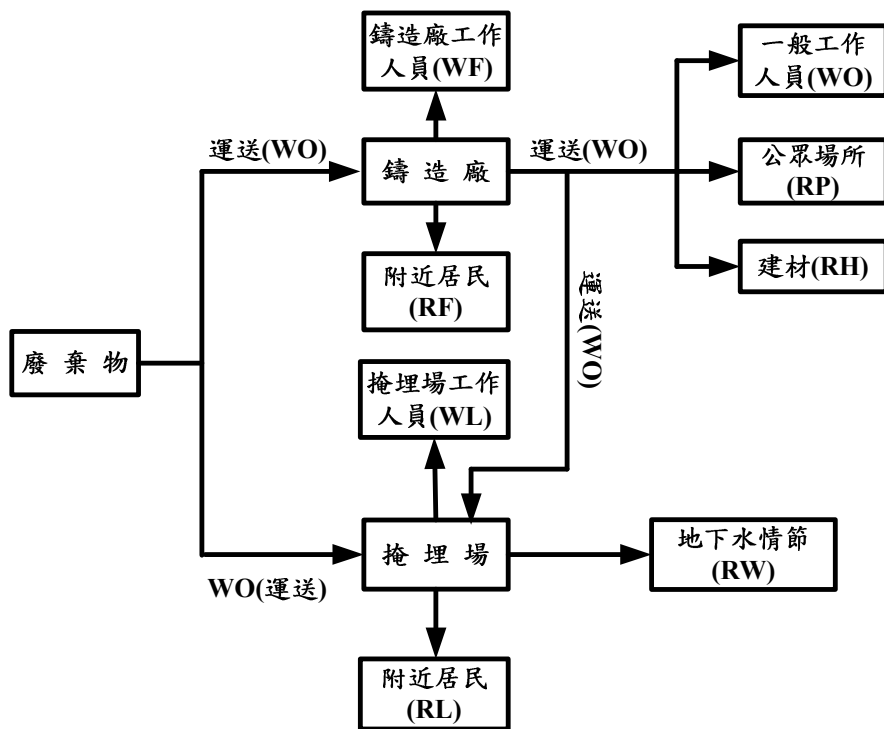


圖 2.1 IAEA 劑量評估曝露情節模式

表 2.1 曝露情節與相關曝露途徑

情節	描述	關鍵群體	曝露途徑
WL	掩埋場或其他設施的工作人員	工作人員	體外曝露於掩埋場 吸入懸浮粒子或灰塵 直接嚥入污染物質
WF	鑄造廠的工作人員	工作人員	體外曝露於鑄造廠的設備或廢金屬堆 吸入懸浮粒子或灰塵 直接嚥入污染物質
WO	其他工作人員 (如司機)	工作人員	體外曝露於設備或卡車載物
RL-C	掩埋場或其他設施附近的居民	兒童(1-2 歲)	吸入懸浮粒子或灰塵 嚥入由污染土地生長的農作物
RL-A		成人(> 17 歲)	吸入懸浮粒子或灰塵 嚥入由污染土地生長的農作物
RF	鑄造廠附近的居民	兒童(1-2 歲)	吸入懸浮粒子或灰塵
RH	居住在以污染物質建築的房子	成人(> 17 歲)	體外曝露於室內
RP	居住在以污染物質建築的公眾場所附近的居民	兒童(1-2 歲)	體外曝露於公共場所 吸入懸浮粒子或灰塵 直接嚥入污染物質
RW-C	居民使用私人井水或食用來自受污染河水中的魚類等	兒童(1-2 歲)	嚥入受污染的飲用水、農作物、魚

## 2.2 NUREG-1640

NUREG-1640 針對鋼鐵、銅、鋁及混凝土四種固體廢棄物的再利用與掩埋情形，建立了適合美國的情節，其收集工業處理程序與民眾習性相關資料，皆採用實際的數據，以減少不必要的保守假設。NUERG-1640 對關鍵群體評估不同情節，共 115 個核種的有效等效劑量(effective dose equivalent, EDE)及有效劑量(effective dose, ED)。情節設計主要依廢棄物處理程序發展(參見圖 2.2)，以下各節將做更詳細的介紹。

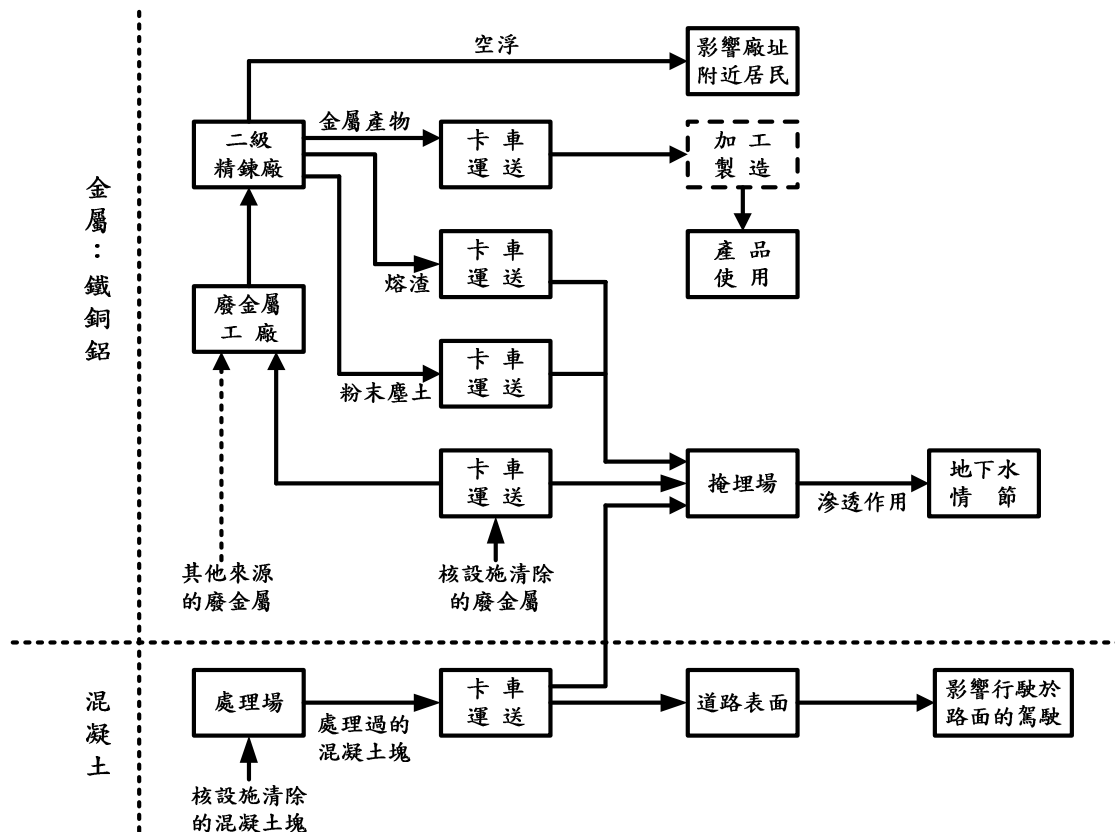


圖 2.2 NUREG-1640 劑量評估曝露情節模式

### 2.2.1 鋼鐵廢棄物情節

所有鋼鐵情節如表 2.2 所列。

#### 處理類別(Handling and Processing)

處理類別有 7 個情節，相當於 IAEA 的 WF 情節，但廢棄物的幾何設定較複雜，每個情節的廢棄物形狀設定都不同。此類別情節相當重要，計算 EDE 時有 41 個核種的最高劑量落於「在廢棄物堆放場處理鋼鐵廢棄物」情節；25 個核種最高情節落於「處理築路所需的鋼鐵熔渣」；13 個落於「在製鋼廠處理熔渣」；2 個落於「在製鋼廠搬動電弧熔爐



(electric arc furnace, EAF)灰渣」。115 個核種中有 81 個核種的最高劑量落此類別，比例高達 70%。

計算 ED 時有 56 個核種最高劑量在「在廢棄物堆放場處理鋼鐵廢棄物」情節；9 個在「在製鋼廠處理熔渣」；9 個在「處理築路所需的鋼鐵熔渣」；2 個在「在製鋼廠搬動電弧熔爐灰渣」。115 個核種中共有 76 個核種的最高劑量落此類別，比例高達 66%。

處理類別情節描述第一線接觸廢棄物人員遭受曝露的可能性，需納入本土情節考量當中，然而台灣的鋼鐵鑄造廠是否分類為一般鑄造廠與電弧鑄造廠，尚須進一步研究。

#### 大氣釋放類別(Atmospheric Release)

僅包含「鑄造廠釋放空浮微粒」情節，幾何為污染表土，考慮體外、吸入及嚥入三種曝露，嚥入物質有灰塵及遭受污染的食物(包含自家種植蔬果等)，類似 IAEA 居住在鑄造廠附近的情節(RF)，但 IAEA 僅考慮較為重要的吸入途徑。計算 EDE 與 ED 的結果，只有 I-125 的最高劑量情節落於此。

#### 運輸類別(Transportation)

運輸方面主要類似 IAEA 之常態性接觸污染物質的工作人員情節(WO)。計算 EDE 時有 7 個核種最高劑量情節為「卡車司機以傾倒式卡車運送電弧鑄造廠的灰渣」，計算 ED 時也是同樣 7 個核種的最高劑量情節落於此。

#### 產品使用類別(Product use)

「在戰區站崗的海軍」、「海軍士兵在甲板上執行勤務」及「海軍士兵的睡鋪接近船殼」，為士兵在戰艦上不同位置，遭受不同曝露狀況

的情節。由於台灣的戰艦大多購於國外，且士兵受曝露的時間亦採保守假設，倘若歐美評估此情節造成的劑量極低，則國內不需考慮這些狀況。針對 115 個核種計算 EDE 與 ED 的結果當中，沒有任何核種的最高劑量落於此情節，可見此情節較不具重要性，故最後建置本土情節時不予考慮。

「居住於以熔渣為水泥材料建造的地下室」相當於 IAEA 的 RH 情節；「居住在以鋼筋建造的房屋內」是採用鋼鐵骨架，相當於 RH 情節設定僅鋼筋含有射源的狀況。

「使用鋼鐵熔渣築路」情節的評估對象是築路工人，包含體內與體外曝露。體外曝露如同「在製鋼廠處理熔渣」情節，而曝露時間依工人工作內容有所差異，整體而言類似 IAEA 的 WF 情節。

「在以熔渣建造的路面上駕駛」為假設熔渣上方覆蓋堅硬物質，致使塵土不易揚起，故體內曝露的影響較小。本土情節需考慮此狀況造成的體外曝露。

「駕駛以鑄鐵製造引擎的汽車」與「駕駛以鑄鐵製造柴油引擎之卡車」為考慮引擎對司機造成體外曝露，可在 WO 情節中增加引擎對司機的曝露即可。引擎與被搬運物料相比，造成的曝露相對較小，故本土情節僅需考慮物料造成的曝露。

「大型鋼鐵造成體外曝露」指大型設備造成曝露；「小型鋼鐵造成體外曝露」代表中小型家庭設備；「身上的小型鋼鐵物件造成曝露」代表鈕釦、珠寶及口袋小刀等小型物件造成曝露。三種情節都只考慮體外曝露，類似 IAEA 的 WO 情節中司機接受污染貨物直接曝露，只是設備或物件造成的劑量應小於放射性貨物。

總結以上幾點，所有產品使用類別對於 115 個核種來說，都不是最高劑量情節。

#### 掩埋場處置類別(Landfill Disposal)

「在工業或一般行政區掩埋場處理鋼鐵廢棄物」情節的廢棄物未經切割，故無產生飛灰之情況；「在工業或一般行政區掩埋場處理基本耗氧鑄造廠(basic oxygen furnace, BOF)灰渣」情節的灰塵，被空氣污染控制設備收集成為泥狀物，所以只有體外曝露；「在危險廢棄物掩埋場處理電弧鑄造廠的灰渣」情節，使用灰塵過濾設備(baghouse)過濾灰渣，過濾設備用容器包覆後才掩埋，所以只造成體外曝露；「在工業或一般行政區掩埋場處理熔渣」情節則造成體內與體外曝露。

有 14 個核種計算 EDE 與 ED 時，最高劑量情節為「在工業掩埋場處理鋼鐵廢棄物」。

掩埋場處置類別相當於 IAEA 的 WL 情節。若更改參數設定，並且只考慮體內劑量的話，則可視為 RL 情節。

此類別情節需納入本土情節考量當中，為了保守起見，同時考量體外曝露、吸入及嚥入三種途徑。

#### 地下水類別(Groundwater infiltrated by leachate from landfills or storage piles)

此類別情節牽涉地下水循環，僅有嚥入途徑，相當於 IAEA 的 RW 情節。

計算 EDE 的結果顯示，有 8 個核種最大劑量情節是「放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出」，4 個核種最大劑量情節是「放射性核種由

熔渣儲存堆中濾出」。台灣部分地區仍有抽取地下水或是使用井水，所以需要考量此情節。

表 2.2 NUREG-1640 之鋼鐵情節

情 節	體外	吸入	嚥入
<b>處理類別(Handling and Processing)</b>			
在廢棄物堆放場(scrap yard)處理鋼鐵廢棄物	•	•	•
在製鋼廠處理熔渣(Handling slag)	•	•	•
在製鋼廠搬動電弧鑄造廠灰渣(Transferring EAF dust)	•	•	•
維護電弧鑄造廠的灰塵過濾設備(Baghouse maintenance)	•		
在製鋼廠或鑄造廠處理鋼鐵產物(Handling metal product)	•	•	•
處理電弧鑄造廠的灰渣(Processing EAF dust)	•	•	•
處理築路所需的鋼鐵熔渣(Processing steel slag)	•	•	•
<b>大氣釋放類別(Atmospheric Release)</b>			
鑄造廠釋放空浮微粒(Airborne emissions)	•	•	•
<b>運輸類別(Transportation)</b>			
貨車司機拖運除污後的鋼鐵廢棄物(Scrap truck driver )	•		
貨車司機拖運熔渣(Slag truck driver)	•	•	•
卡車司機以乾式貨櫃拖車拖運電弧鑄造廠的灰渣(EAF dust-bulk trailer)	•		
卡車司機以傾倒式卡車運送電弧鑄造廠的灰渣(EAF dust-dump trailer)	•	•	•
卡車司機拖運鋼鐵產品(Metal product-driver)	•		
<b>產品使用類別(Product use)</b>			
在戰區站崗的海軍(Sailer-operations )	•		
海軍士兵在甲板上執行勤務(Sailer-deck duty )	•		
使用鋼鐵熔渣築路(Building road with slag )	•	•	•
在以熔渣建造的路面上駕駛(Driving on slag road)	•		
居住於以熔渣為水泥材料建造的地下室(Slag basement )	•		
大型鋼鐵造成體外曝露(Exposure to large mass)	•		
小型鋼鐵造成體外曝露(Exposure to small mass)	•		

表 2.2 NUREG-1640 之鋼鐵情節(續)

情 節	體外	吸入	嚥入
<b>產品使用類別(Product use)</b>			
居住在以鋼筋建造的房屋內(Home with steel studs)	•		
駕駛以鑄鐵製造引擎的汽車(Driver-automobile )	•		
駕駛以鑄鐵製造柴油引擎之卡車(Driver-diesel engine )	•		
海軍士兵的睡舖接近船殼(Sailor-hull plate)	•		
<b>掩埋場處置類別(Landfill Disposal)</b>			
在工業掩埋場處理鋼鐵廢棄物(Scrap disposal-industrial)	•		
在一般行政區的掩埋場處理鋼鐵廢棄物(scrap disposal-municipal)	•		
在工業掩埋場處理基本耗氧鑄造廠灰渣(Dust disposal-industrial)	•		
在一般行政區掩埋場處理基本鑄造廠的灰渣(Dust disposal-municipal )	•		
在工業掩埋場處理熔渣(Slag disposal-industrial)	•	•	•
在一般行政區掩埋場處理熔渣(Slag disposal-municipal)	•	•	•
在危險廢棄物掩埋場處理電弧鑄造廠的灰渣(EAF dust disposal )	•		
<b>地下水類別(Groundwater infiltrated by leachate from landfills or storage piles)</b>			
放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出 (Leachate-industrial-scrap)			•
放射性核種由一般行政區掩埋場的鋼鐵廢棄物中濾出 (Leachate-municipal-scrap)			•
放射性核種由工業掩埋場的基本耗氧鑄造廠灰渣濾出 (Leachate-industrial-dust)			•
放射性核種由一般行政區掩埋場的基本耗氧鑄造廠灰塵濾出 (Leachate-municipal-dust)			•
放射性核種由熔渣儲存堆中濾出(Leachate-steel slag)			•

## 2.2.2 銅廢棄物情節

所有銅金屬廢棄物情節如表 2.3 所列。表 2.3 的對應情節若為「Fe」表示該情節與鋼鐵情形相同；「modified」表示與鋼鐵情節類似；「new」則為銅廢棄物特有情節。

### 處理類別

分類較鋼鐵處理情節簡單，僅包括四個情節，類似 IAEA 的 WF 情節。

EDE 計算結果顯示，90 個核種的最大劑量情節為「在精鍊廠處理銅產出的熔渣」；17 個核種的最大劑量情節在「在廢棄物堆放場處理銅廢棄物」。ED 計算結果顯示，86 個核種的最大劑量情節為「在精鍊廠處理銅產出的熔渣」；20 個核種的最大劑量情節為「在廢棄物堆放場處理銅廢棄物」。

### 大氣釋放類別

與鋼鐵情形相同，類似 IAEA 的 RF 情節。

EDE 與 ED 計算結果，只有 C-14 的最大劑量情節落於「鑄造廠釋放空浮微粒」。

### 運輸類別

相當於 IAEA 的 WO 情節，皆不在最大劑量情節之列。

### 產品使用類別

皆不在最大劑量情節之列。「小型精鍊銅塊造成體外曝露」及「身上帶的小型銅製物件造成體外曝露」情節可視為修正後之 IAEA WO 情節。

檢視「飲用來自銅製自來水管的水」情節，根據圖 2.2 為台灣自來水管的材質統計資料(截至 87 年 6 月底)<sup>(9)</sup>，可知台灣主要使用塑膠水管材質，故本土情節不需考慮此種情況。

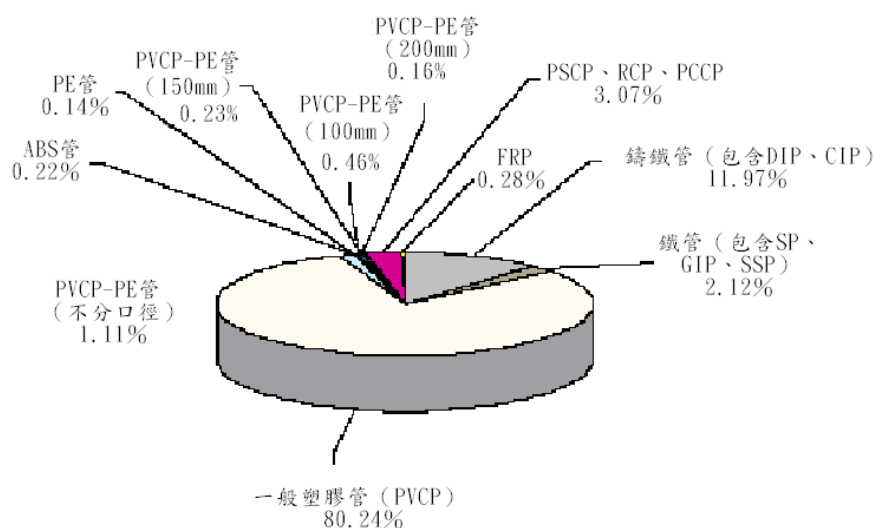


圖 2.3 台灣省輸配水管管材長度分佈圖

### 掩埋處置類別

相當於 IAEA 的 WL 情節。計算 EDE 與 ED 的結果顯示，只有核種 As-73 的最大劑量情節落於「在工業掩埋場處理銅廢棄物」。

### 地下水類別

放射性核種來源只有廢棄物與灰渣，相當於 IAEA 的 RW 情節。

計算 EDE 的結果顯示，有 6 個核種最大劑量情節在「放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出」。計算 ED 時，7 個核種的最大劑量情節同樣落於「放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出」。

表 2.3 NUREG-1640 之銅廢棄物情節

情 節	對應情節	體外	吸入	嚥入
<b>處理類別(Handling and Processing)</b>				
在廢棄物堆放場處理銅廢棄物(Scrap yard)	modified	•	•	•
處理精鍊的銅產物(Handling metal product)	Fe	•	•	•
在精鍊廠處理銅產出的熔渣(Handling slag)	Fe	•	•	•
維護反應爐內的過濾設備(Baghouse maintenance)	Fe	•		
<b>大氣釋放類別(Atmospheric Release)</b>				
鑄造廠釋放空浮微粒(Airborne emissions)	Fe	•	•	•
<b>運輸類別(Transportation)</b>				
貨車司機拖運除污後的銅廢棄物(Scrap truck driver)	modified	•		
卡車司機拖運精鍊的銅產物(Metal product-driver)	modified	•		
卡車司機拖運反應爐熔渣(Slag truck-driver)	Fe	•	•	•
卡車司機拖運反應爐產出的灰渣(Dust truck-driver)	Fe	•	•	•
<b>產品使用類別(Product use)</b>				
小型精鍊銅塊造成體外曝露(Exposure to small mass)	Fe	•		
身上帶的小型銅製物件造成體外曝露(Copper object on body)	Fe	•		
飲用來自銅製自來水管的水(Drinking-copper pipes)	new			•
<b>掩埋場處置類別(Landfill Disposal)</b>				
在工業掩埋場處理銅廢棄物(Scrap disposal-industrial)	Fe	•		
在一般行政區的掩埋場處理銅廢棄物(scrap disposal-municipal)	Fe	•		
在工業掩埋場處理銅熔渣(Slag disposal-industrial)	Fe	•	•	•
在一般行政區掩埋場處理銅熔渣(Slag disposal-municipal)	Fe	•	•	•
<b>地下水類別(Groundwater infiltrated by leachate from landfills or storage piles)</b>				
放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出 (Leachate-industrial-scrap)	Fe			•
放射性核種由一般行政區掩埋場的銅廢棄物中濾出 (Leachate-municipal-scrap)	Fe			•
放射性核種由工業掩埋場的灰渣濾出 (Leachate-industrial-dust)	modified			•
放射性核種由一般行政區掩埋場的灰塵濾出 (Leachate-municipal-dust)	modified			•



### 2.2.3 鋁廢棄物情節

鋁廢棄物的情節如表 2.4 所列，由對應情節欄位資料顯示，大部分情節都與鋼鐵或銅類似，只有一個新增的情節。

#### 處理類別

僅包含四個情節，類似 IAEA 的 WF 情節。鋁與其它金屬的差異在於產物為浮渣(dross)而非熔渣(slag)，處理廢棄物的場所為二級精煉廠。

計算 EDE 的結果顯示，78 個核種的最大劑量情節為「在廢棄物堆放場處理鋁廢棄物」。計算 ED 時，有 77 個核種的最大劑量情節為「在廢棄物堆放場處理鋁廢棄物」。

#### 大氣釋放類別

與鋼鐵情形相同，類似 IAEA 的 RF 情節。計算 ED 的結果顯示僅 I-125 的最大劑量情節落於此。

#### 運輸類別

類似 IAEA 的 WO 情節。皆不在最大劑量情節之列。

#### 產品使用類別

「大型金屬塊造成體外曝露」、「小型金屬塊造成體外曝露」及「計程車司機駕駛於配有鋁製引擎的汽車」皆可視為修正後的 IAEA WO 情節。

EDE 與 ED 計算結果顯示，有 24 個核種的最大劑量情節為「計程車司機駕駛於配有鋁製引擎的汽車」。

「使用鋁製廚具」情節於 EDE 與 ED 計算中，皆有 6 個核種最大劑量情節落於此。未來需調查台灣使用廚具材質種類，再判斷適用與否。

### 掩埋處置類別

相當於 IAEA 的 WL 情節。皆不在最高劑量情節之列。

### 地下水類別

浮渣與銅灰渣情節相類似。此類別因牽涉地下水循環，相當於 IAEA 的 RW 情節。

EDE 與 ED 計算結果皆有 7 個核種的最大劑量情節落於「放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出」。

表 2.4 NUREG-1640 之鋁廢棄物情節

情 節	對應情節	體外	吸入	嚥入
<b>處理類別(Handling and Processing)</b>				
在廢棄物堆放場處理鋁廢棄物(Scrap yard)	Cu	•	•	•
在二級精鍊廠處理金屬產物(Handling metal product)	Fe	•	•	•
在二級精鍊廠處理浮渣(Handling dross)	Fe-modified	•	•	•
維護二級精鍊場的灰塵過濾設備(Baghouse maintenance)	Fe	•		
<b>大氣釋放類別(Atmospheric Release)</b>				
精鍊廠釋放空浮微粒(Airborne emissions)	Fe	•	•	•
<b>運輸類別(Transportation)</b>				
卡車司機拖運已除污的鋁廢棄物(Scrap truck-driver)	Cu	•		
卡車司機拖運來自精鍊場的金屬產品(Metal product-driver)	Fe	•		
卡車司機拖運來自精鍊場的浮渣(Dross truck-driver)	Cu	•	•	•
卡車司機拖運來自精鍊場的灰渣(Dust truck-driver)	Cu	•	•	•
大型金屬塊造成體外曝露(Exposure to large mass)	Fe	•		
小型金屬塊造成體外曝露(Exposure to small mass)	Fe	•		
計程車司機駕駛於配有鋁製引擎的汽車(Driver-engine block)	Fe	•		
使用鋁製廚具(Aluminum cookware)	new	•		•

表 2.4 NUREG-1640 之鋁廢棄物情節(續)

情 節	對應情節	體外 吸入 嚥入
<b>掩埋場處置類別(Landfill Disposal)</b>		
在工業掩埋場處理鋁廢棄物(Scrap disposal-industrial)	Fe	•
在一般行政區的掩埋場處理鋁廢棄物(scrap disposal-municipal)	Fe	•
在工業掩埋場處理浮渣(Dross disposal-industrial)	Fe	• • •
在一般行政區掩埋場處理浮渣(Dross disposal-municipal)	Fe	• • •
<b>地下水類別(Groundwater infiltrated by leachate from landfills or storage piles)</b>		
放射性核種由工業掩埋場的廢棄物濾出 (Leachate-industrial-scrap)	Fe	•
放射性核種由一般行政區掩埋場的鋁廢棄物中濾出 (Leachate-municipal-scrap)	Fe	•
放射性核種由工業掩埋場的浮渣濾出 (Leachate-industrial-dross)	Cu	•
放射性核種由一般行政區掩埋場的浮渣濾出 (Leachate-municipal-dross)	Cu	•

### 2.2.4 混凝土廢棄物

所有混凝土廢棄物的情節如表 2.5 所列。

#### 處理類別

僅處理混凝土本身的單一過程，故不會產生熔渣，同時假設產生灰塵的劑量貢獻較不重要。類似 IAEA 的 WF 情節。

計算 EDE 結果顯示 52 個核種最大劑量情節落於此；計算 ED 則有 56 個核種的最大劑量情節落於此。

#### 運輸類別

類似 IAEA 的 WO 情節。計算 EDE 的結果顯示 Th-230、Th-232 及 U-232 的最大劑量情節落於此。

### 產品使用類別

「使用回收的混凝土建造道路」類似 IAEA 的 WF 情節，EDE 結果顯示有 43 個核種的最大劑量情節落於此；計算 ED 則有 40 個核種的最大劑量情節落於此。「駕駛於回收混凝土建造的路面」則類似 IAEA 的 WO 情節。

### 掩埋處置類別

類似 IAEA 的 WL 情節。

### 地下水類別

類似 IAEA 的 RW 情節。

混凝土為常見的放射性廢棄物，所以此處混凝土情節皆為研擬本土情節時的重要依據。

表 2.5 NUREG-1640 之混凝土情節

情節	體外	吸入	嚥入
<b>處理類別(Handling and Processing)</b>			
處理混凝土塊(Processing concrete)	•	•	•
<b>運輸類別(Transportation)</b>			
卡車司機拖運混凝土塊(Truck driver)	•	•	•
<b>產品使用類別(Product use)</b>			
使用回收的混凝土建造道路(Road building)	•	•	•
駕駛於回收混凝土建造的路面(Driving on road)	•		
<b>掩埋場處置類別(Landfill Disposal)</b>			
在工業掩埋場處理混凝土塊(Disposal-industrial)	•	•	•
在一般行政區掩埋場處理混凝土塊(Disposal-MSW)	•	•	•
<b>地下水類別(Groundwater infiltrated by leachate from landfills or storage piles)</b>			
放射性核種由工業掩埋場濾出(Leachate-industrial)			•
放射性核種由一般行政區掩埋場濾出(Leachate-MSW)			•

## 2.3 歐盟報告

近年來歐盟發表的報告中，RP 122(Radiation Protection 122)推導一般解除管制標準(general clearance)及其使用情節；RP 114 描述回收混凝土塊可能的使用方式、情節及解除管制標準；RP 117 則是介紹鋁、銅及鋼鐵三種金屬的回收使用及推導解除管制標準。

### 2.3.1 RP 122

主要依據三種曝露途徑(吸入、嚥入及體外曝露)與皮膚污染發展情節(參見圖 2.3)，敘述如下：

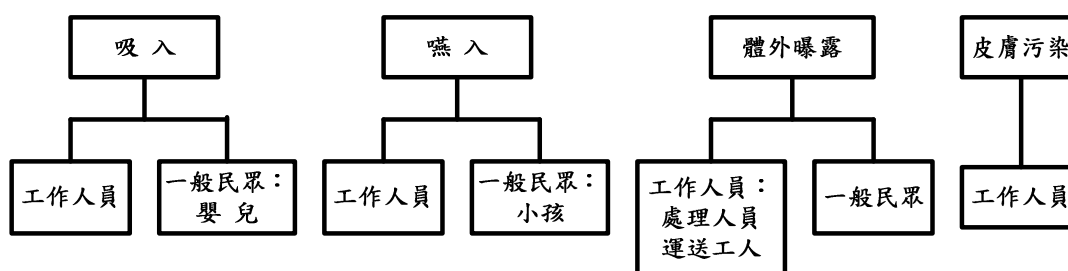


圖 2.4 RP 122 劑量評估曝露情節模式

#### 1. 吸入

(1)INH-A：工作人員於場址中吸入灰塵，類似 IAEA 的 WF 或 WL 情節，但僅考慮吸入途徑。

(2)INH-B：0-1 歲的嬰兒於一般環境中吸入灰塵，類似 IAEA 的 RF 或 RL-C 情節。

#### 2. 嚥入

(1)ING-A：工作人員於場址中誤食灰塵，類似 IAEA 的 WF 或 WL 情節。

(2)IHG-B：1-2 歲的小孩在地上玩耍過程中，誤食放射性物質(保守假設放射性物質無稀釋)，類似 IAEA 的 RP 情節。

### 3.體外曝露

(1)EXT-A：掩埋場之廢棄物對工作人員造成曝露，類似 IAEA 的 WL 情節。

(2)EXT-B：卡車司機運送貨物過程造成曝露，類似 IAEA 的 WO 情節。

(3)EXT-C：房屋建材含放射性物質而對屋內民眾造成曝露，類似 IAEA 的 RH 情節。

### 4.皮膚污染

(1)SKIN：工人於充滿灰塵的環境工作，假設手掌與前臂累積 0.01 公分厚的灰塵。

RP 122 計算 280 個核種的結果顯示，有 114 個核種的最高劑量情節在 EXT-A；54 個核種的最高劑量情節在 EXT-B；53 個核種的最高劑量情節在 ING-B；36 個核種的最高劑量情節在 INH-A；12 個核種的最高劑量情節在 EXT-C；10 個核種的最高劑量情節在 SKIN；1 個核種的最高劑量情節在 ING-A。

與 IAEA 報告比較，RP 122 認為在一般環境中吸入或嚥入灰塵造成劑量的情節，對小孩影響較大，所以沒有設定針對成人的嚥入情節。此外，此報告不含任何地下水相關情節，可能其認為地下水情節不具重要性。由於 RP 122 以曝露途徑為情節分類依據，也就是每個情節只有一種途徑導致劑量，理論上推導出的核種活度濃度限值應大於採用 IAEA

情節推算的數值。為了保守起見，評估本土情形不宜採用這種方式發展情節。

### 2.3.2 RP 114

RP 114 報告設定三種建築物情節，為預備再使用或整修的建築物 (building reuse or demolition)、預備敲除的建築物 (building for demolition only) 及敲除建築物得到的混凝土塊 (building rubble)，各情節包含不同的曝露途徑 (參見圖 2.4)，敘述如下：

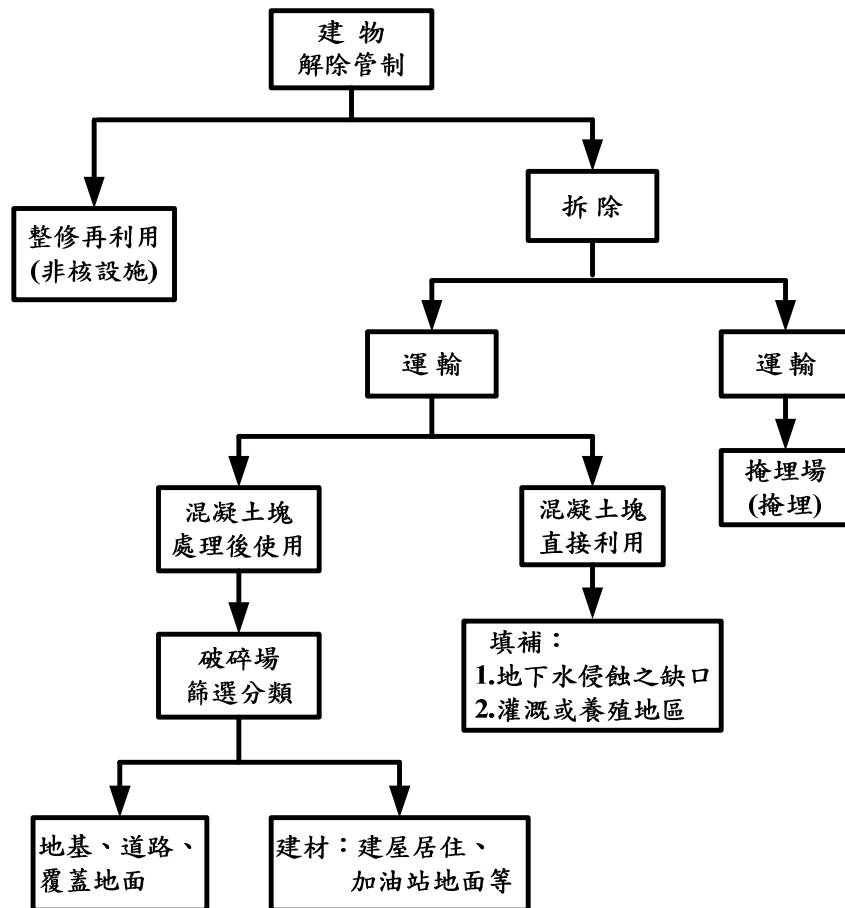


圖 2.5 RP 114 劑量評估曝露情節模式

1.預備再使用的建築物經過除污程序後，改以非核設施型態繼續使用。

此情節包含體外曝露、吸入及嚥入三種曝露途徑：

- (1)體外曝露：評估對象為在已除污建築物內的工廠工人，或停留於已除污實驗室內的研究人員。
- (2)吸入：工人進行房屋表面處理(例如鑽孔、移除表層等工程)時，吸入灰塵造成體內劑量。
- (3)嚥入：工人整修房屋時嚥入灰塵。
- (4)皮膚劑量：工人整修房屋時，皮膚上有灰塵沈積。
- (5)氬造成的曝露：含鐳同位素的房屋會釋出氬氣，居民因吸入途徑造成體內劑量。

情節(1)類似 IAEA 的 RH 情節；情節(2)、(3)則類似 IAEA 的 WL 情節，但僅考量灰塵造成工人體內劑量的狀況。

2.預備敲除的建築物與敲除的混凝土塊，此兩種情節發展類似。主要差異在於建築物採用表面活度限值，而混凝土塊採用比活度限值。

- (1)體外曝露：評估對象為搬運混凝土塊的工人、掩埋場工人、居住於混凝土塊建造房屋內的民眾、使用混凝土塊的築路工人、處理混凝土塊的工人及工廠內接受混凝土堆曝露的工人等。
- (2)吸入：處理混凝土塊的工人，因吸入灰塵造成體內劑量。
- (3)嚥入：包括直接嚥入放射性物質(例如工人誤食沉積於皮膚表面的灰塵，或孩童於混凝土覆蓋的地上玩耍而誤食灰塵)，以及飲用受污染的水(牽涉地下水遷移情節)。
- (4)皮膚劑量：處理混凝土塊的工人，其皮膚表面有灰塵沈積。



情節(1)類似 IAEA 的 WO、WL 及 RH 等情節，但僅考慮體外曝露途徑；情節(2)與 WF、WL 類似，考慮嚥入灰塵造成劑量；情節(3)對飲用污染水源的考量類似 RW 情節、工人誤食灰塵相當於 WL 或 WF 情節、孩童嚥入灰塵則如同 RP 情節。

RP 114 對於混凝土塊的處置情節依曝露途徑發展，故推導活度濃度限值時的潛在問題亦同於 RP 122，本土評估模式不宜採用之。

### 2.3.3 RP 117

RP 117 報告討論三種金屬的回收使用情節，各金屬的情節發展與曝露途徑如表 2.6 所列。

#### 鋼鐵

##### 1. 廢金屬堆場

- (1)體外曝露：運送過程指由解除管制場址收集廢棄物至堆放場，以及由堆放場運送廢棄物至鑄造廠兩段路程，廢棄物對運送者造成體外的曝露，類似 IAEA 的 WO 情節。
- (2)吸入：工人將廢棄物切割成小體積過程，因吸入粉末導致體內劑量，類似 IAEA 的 WL 情節。

##### 2. 鑄造廠

- (1)體外曝露：金屬堆造成工人體外曝露。
- (2)吸入與嚥入：金屬熔煉過程中產生煙塵，工人吸入以及誤食沈積於身體表面的灰塵。

鑄造廠情節類似 IAEA 的 WF 情節。

表 2.6 RP 117 報告採用情節

情節	鋼鐵	銅	鋁
廢金屬堆場	體外(運送過程) 吸入(切割金屬)	體外(運送過程)	體外(運送過程)
鑄造廠	體外(金屬堆) 吸入灰塵(熔融金屬) 嚥入灰塵(熔融金屬)	體外(金屬堆) 吸入灰塵(熔融金屬) 嚥入灰塵(熔融金屬)	體外(金屬堆) 吸入灰塵(熔融金屬) 嚥入灰塵(熔融金屬)
大氣排放	吸入 體外 嚥入	吸入 體外 嚥入	吸入 體外 嚥入
副產物處理及純化作業		體外(處理熔渣、電解精鍊) 吸入(壓實灰塵、鋅還原、處理熔渣)	體外(處理熔渣) 吸入(處理熔渣)
後處理- 精鍊	體外(製造成品) 吸入灰塵(處理金屬塊)	吸入(製造成品)	吸入(製造成品)
產品使用(職業)	體外(機具、廚房、處理管、船)	體外(實驗室設備、大型裝飾品、黃銅樂器)	體外(辦公室家具、漁船、辦公室天花板)
產品使用(家庭)	體外(強化鋼架、暖氣設備)	體外(黃銅設備) 嚥入(豬飼料)	體外(汽車、暖氣) 嚥入(平底鍋)
棄置及使用副產物	棄置： 掩埋場工人- 體外、吸入灰塵、嚥入灰塵  掩埋場居民- 體外、吸入灰塵、嚥入土壤或食物  使用： 吸入(足球員及觀眾)	棄置： 掩埋場工人- 皮膚污染、體外、吸入灰塵、嚥入灰塵  掩埋場居民- 體外、吸入灰塵、嚥入土壤或食物  使用： 吸入(足球員及觀眾)	棄置： 掩埋場工人- 皮膚污染、體外、吸入灰塵、嚥入灰塵  掩埋場居民- 體外、吸入灰塵、嚥入土壤或食物  使用： 體外(混凝土天花板)

### 3.大氣排放

居住在工廠附近的民眾，可能吸入由工廠排放的飛灰。當灰塵沈積於土地上會造成體外曝露，或者影響生長的農作物而造成嚥入劑量，相當於 IAEA 的 RF 或 RL 情節。

### 4.後處理

(1)體外曝露：指將金屬鑄塊切割處理為成品的過程，直接造成工人體外曝露。

(2)吸入：工人吸入切割過程產生的粉末，造成體內劑量。

後處理情節類似 IAEA 的 WL 情節。

### 5.產品使用(職業)

機具指不鏽鋼機具；廚房指專業級廚房之不鏽鋼烹煮器具及洗滌槽；處理管(process vessel)為化學工廠常用的設備；船指其鋼鐵結構。以上設備皆造成使用者體外曝露，類似 IAEA 的 WO 情節。

### 6.產品使用(家庭)

強化鋼架指建築物牆內的網狀鋼架，造成居住者體外曝露，類似 IAEA 的 RH 情節；暖氣設備考量裝置於臥室的情形，相當於 IAEA 的 WO 情節。

### 7.棄置副產物

(1)工人：運送廢棄物造成體外曝露；處理廢棄物時因吸入或誤食灰塵造成體內劑量。相當於 IAEA 的 WL 情節。

- (2)居民：假設掩埋場關閉後 10–30 年才可被再利用，掩埋的廢棄物造成體外曝露，居民亦由吸入或誤食土壤造成體內劑量。居民依年齡分為 1 歲嬰兒、10 歲小孩及成人。

此情節類似 IAEA 的 RL 情節。

## 8.使用廢棄物

使用熔渣作為足球場建材，球員訓練或比賽時可能揚起灰塵，使球員或觀眾吸入造成體內劑量。台灣可以考慮任何大面積的公共活動場地。此情節類似 IAEA 的 RP 情節。

## 銅

情節與鋼鐵類似，以下僅敘述相異之處。

### 1.副產物處理與純化

- (1)處理熔渣：工人收集精鍊過程產生的熔渣，造成體外曝露及吸入劑量。
- (2)壓實灰塵：工人將精鍊過程產生的灰塵，施壓使之成塊，造成吸入劑量。
- (3)鋅還原：精鍊產生的銅灰可用於還原鋅，處理工人因吸入灰塵造成體內劑量。
- (4)電解精鍊：電精煉廠的電解槽對操作工人造成體外曝露。

### 2.產品使用(職業)

實驗室設備指銅製洗滌槽；銅可製成大型裝飾(例如雕像)；黃銅樂器指法國號。

### 3.產品使用(家庭)

黃銅設備指廚房的銅製設備；銅元素常以不同型態出現在動物飼料中，最常添加於豬飼料。

### 4.棄置副產物

處理廢棄物時造成手掌或臉部被污染，相當於IAEA的WL情節。

副產物處理與純化下的所有細項皆屬於廢棄物處置情節，為本土情節考量要項，產品大都造成體外曝露。台灣常用洗滌槽的材質需要調查，而銅雕像與法國號數量多寡亦待評估，但與大型公共設備相比而言，劑量貢獻並不顯著，故本土情節並不特別考慮這類曝露狀況。本土情節預計考量吸入灰塵，以及使用污水灌溉農作物的狀況，所以也不需要特別增加銅元素添加於豬飼料的情節。

## 鋁

情節與鋼鐵類似，以下僅敘述相異之處。

### 1.產品使用(職業)

包括辦公室鋁製傢俱；漁船的船殼；辦公室天花板之建材。以上產品皆造成體外曝露，類似IAEA的WO情節。

### 2.產品使用(家庭)

使用平底鍋烹煮食物，鍋面腐蝕使鋁進入食物中。此情節與NUREG-1640的鋁製廚具情節相同，需探討台灣人習慣使用廚具的材質。

### 3.使用副產物

鋁熔渣與混凝土混合後，可作為房屋的牆面，相當於 IAEA 的 RH 情節。

## 2.4 RESRAD Family

RESRAD Family 指一系列由美國阿岡國家實驗室撰寫的軟體，其中與本文相關的有 RESRAD<sup>(10)</sup>、RESRAD-BUILD<sup>(11)</sup>及 RESRAD-RECYCLE。RESRAD 計算土壤含有放射性廢棄物時對人體造成的曝露；RESRAD-BUILD 計算房屋含有放射性污染時，對建築工人或居民造成的曝露；RESRAD-RECYCLE 則計算除污後的金屬於再利用時對人體造成的曝露。其中，RESRAD 與 RESRAD-BUILD 設計較為自由，可由使用者選擇曝露途徑搭配成不同的曝露情節，RESRAD-RECYCLE 則設定制式情節，由使用者選擇使用或關閉情節，其情節設定參考許多歐美重要文獻，以下介紹 RESRAD-RECYCLE 使用的情節模式。

### 2.4.1 RESRAD-RECYCLE

程式將回收方式分成四大類。

#### 1.直接再利用(direct reuse)

廢棄物維持原本型態，不經熔煉過程，例如機械、量測工具、辦公室傢俱及除役之建築物等。

#### 2.非限制性再利用(unrestricted reuse)

放射性廢棄物回收後，運送到商業精煉廠，用以製造一般消費性產品，例如汽車、煎鍋及飲料罐等。

### 3. 限制性再利用(restricted reuse)

放射性廢棄物運送至有執照許可的精煉廠，生產特殊性質產品(造成群眾最小曝露)，例如熔渣用於造路、鋼鐵用於造橋等。此類外釋行為牽涉短半衰期核種且大量的放射性物質，須等放射性核種活性衰減至一定程度後才能製成一般商品。

### 4. 控管再利用(controlled reuse)

可能含長半衰期核種的放射性廢棄物，回收後為避免一般民眾取得，所以將製成的金屬產品交給核設施使用。其設定兩個具代表性的情節，分別為使用回收金屬製成屏蔽體，或製成放射性廢棄物貯存容器。所有情節僅適用於鋼鐵廢棄物。

RESRAD-RECYCLE 依六個回收處理步驟發展情節，為廢棄物運送(scrap delivery)、廢棄物熔煉(scrap smelting)、鑄塊運送(ingot delivery)、產品生產(product fabrication)、產品分佈運送(product distribution)及使用最終產品(use of the finished products)。

主要曝露情節有兩種：(1)工人情節，針對處理回收放射性廢棄物的工人，評估其劑量及風險；(2)最終產品情節，針對產品的曝露對象分析其劑量及風險。工人情節依六個處理步驟發展，與 NUREG-1640 的發展主軸相同；最終產品情節則包含消費性產品、公共用物(例如人行道、橋及建築物等)、控管產品(例如屏蔽金屬塊、放射性廢棄物的盛裝容器等)及表面污染再利用產品(例如工具、除污後的建築物)。除了工人、最終產品使用情節外，運送放射性廢棄物的情節尚考慮運送途中對一般民眾的曝露。

RESRAD-RECYCLE 只評估鋼鐵與鋁兩種材質，可藉由調整參數值，以符合使用者想要的情節。程式既有情節如表 2.7 所示。

工人情節之可能接受輻射曝露的狀況，在 IAEA、NUREG-1640 及歐盟報告中都有提到，差別僅在於處理廢棄物與產品分類方式不同 (RESRAD-RECYCLE 訂定初產物的型態為線圈與薄片)；最終產品使用情節亦類似，只有產品分類方式及關鍵產品不同。



表 2.7 RESRAD-RECYCLE 採用情節

情節描述		適用金屬	
		鋼鐵	鋁
工人情節			
廢棄物運送	廢材切割人員	•	•
	廢材搬運人員	•	•
	載運廢材的司機	•	•
廢棄物精鍊	廢材處理人員	•	•
	精煉廠堆放場工人	•	•
	精煉廠搬運工人	•	•
	熔爐操作員	•	•
	灰塵收集器處理人員	•	•
	精鍊工人	•	•
	鑄塊鑄造工人	•	•
	小物件鑄造工人	•	•
	熔渣處理工人	•	•
鑄塊運送	鑄塊搬運工人	•	•
	載運鑄塊的司機	•	•
產品初製	貯存場工人	•	•
	金屬薄片製造者	•	•
	金屬線圈製造者	•	•
產品製作完成	金屬薄片處理者	•	•
	金屬線圈處理者	•	•
產品分配與銷售	產品搬運工人	•	•
	載送產品司機	•	•
	金屬薄片裝配工	•	•
	量販店倉庫工人	•	•

表 2.7 RESRAD-RECYCLE 採用情節(續)

情節描述		適用的金屬	
		鋼鐵	鋁
最終產品使用情節			
消費性產品	停車場	●	●
	房間、辦公室、房屋牆板	●	●
	設備、家電	●	●
	汽車	●	●
	船	×	●
	辦公室家俱	●	●
	一般家庭家俱	●	●
	煎鍋	●	●
	飲料罐	×	●
公共用物	人行道	●	●
	有鋼筋的建築物	●	×
	有測地線拱頂的房屋	×	●
	橋樑	●	●
控管產品	屏蔽金屬塊	●	×
	放射性廢棄物貯存容器	●	×
產品再利用情節			
再利用產品	工具再利用	●	●
	建物再使用	●	●
運送情節			
運送廢棄物	對一般大眾造成曝露	●	●

### 3. 建置本土輻射曝露情節與劑量評估程序

#### 3.1 本土輻射曝露情節

國外各重要文獻大多依廢棄物類型及處置程序發展曝露情節。以國內核電廠為例，放射性廢棄物主要為金屬與混凝土。為達到與國際觀念接軌之目的，本文以 IAEA 44 號安全報告提供之情節架構為主，參考其他文獻與報告(參見第二章)，並考量國人飲食、居住習慣及環境參數，儘可能調整成為適合本土之情節。由於職業曝露與一般曝露不同，所以評估對象分成工作人員與一般民眾。關於地下水情節，檢視歐盟報告以及 NUREG-1640 計算劑量的結果，可推測非屬關鍵情節，但台灣地區氣候潮濕且雨水豐沛，與歐美各國情形不同，為了保守起見，仍需考慮地下水情節。

參考圖 3.1，廢棄金屬首先運送至處理廠，在此進行所有金屬的處理程序，包含切割、熔融及精鍊等過程，直至製成成品才送出廠。如此可避免在不同地點進行相關處理工作，減少中途運輸對司機及周圍民眾造成曝露。由於台灣面積狹小，相對於幅員廣大的歐美地區而言，將金屬集中於單一處理廠的難度較低。

處理廠內堆放的金屬對工人造成體外曝露，處理過程中產生的灰塵對工人造成吸入、嚥入及皮膚污染，可視為 IAEA 之 WF 情節；處理廠附近居民(關鍵群體為 1-2 歲兒童與成人)將吸入排放煙塵，以及食用在污染土地生長的農作物，為 RL 情節；金屬產品製作完成後運送到使用地點，對搬運工人或司機造成體外曝露，為 WO 情節。

產品使用方面，一般小型消費性產品的種類繁多，例如汽車汽缸體、烹調器具及樂器等。考量個體生活習慣差異與參數收集不易，且國際各重

要報告亦顯示小型金屬產品的劑量貢獻微小，故在此僅假設金屬廢棄物(熔渣或廢鐵)用於公共建設(例如橋樑、路基及房屋建材等)，或回收做為大型金屬設備(例如辦公櫃、保險箱及一般傢俱等)。

金屬廢棄物用為房屋建材時，對其內居民(關鍵群體為成人)造成體外曝露，為 IAEA 之 RH 情節；用為公共用地(即人行道、公園及橋樑等)材料時，附近民眾(關鍵群體為 1-2 歲兒童)可能吸入、嚥入污染物質，且直接受體外曝露，為 RP 情節；大型金屬設備造成個體之體外曝露，為 WO 情節；建築工人遭受體外、體內曝露及皮膚污染，為 WL 情節。

無法回收再利用的金屬，或無實用價值的精煉副產物(例如熔渣)將直接運送至掩埋場，運送途中對搬運工人及司機造成體外曝露，為 IAEA 之 WO 情節；在掩埋場處理金屬廢棄物的工人需要考慮體外曝露、吸入及誤食灰塵三種曝露途徑與皮膚污染，為 WL 情節；雨水將掩埋場之廢棄物所含核種滲濾出污染區，經地下水循環遷移至附近井水或地表水中，附近居民(關鍵群體為 1-2 歲兒童與成人)飲水、食用灌溉農作物及河中魚類，間接造成體內劑量，為 RW 情節。

文獻上提供廢棄混凝土的再利用方式較少，通常用為路基或建造人行道。再利用之前，廢棄物先運送至處理廠，經過切割、碾碎成為石礫或粉末後，再運送至使用地點。處理廠的工人遭受混凝土塊的體外曝露，粉末藉著吸入與嚥入途徑造成工人體內劑量以及皮膚污染，為 IAEA 之 WL 情節。

混凝土塊於運送途中對司機造成體外曝露，若運送石礫粉末則需考慮飛灰藉吸入途徑造成體內劑量。一般而言，運送小顆粒物質時會加強防止灰塵散逸措施(例如將石礫裝桶後運送)，所以司機吸入粉塵數量應可忽略，為 IAEA 之 WO 情節。

運送混凝土至使用地點後，築路工人需考慮體外曝露、吸入與嚥入三種曝露途徑與皮膚污染，為 IAEA 之 WL 情節。道路完成後，評估行人接受曝露狀況較駕駛人保守(車殼具屏蔽效果)，可用 IAEA 之 RP 情節代表。

無法再利用的混凝土塊直接運送至掩埋場，運送途中對搬運工人及司機造成體外曝露，為 IAEA 之 WO 情節；掩埋場工人需要考慮體外曝露、吸入及誤食灰塵三種曝露途徑與皮膚污染，為 WL 情節；至於地下水情節(RW 情節)則與金屬相同。

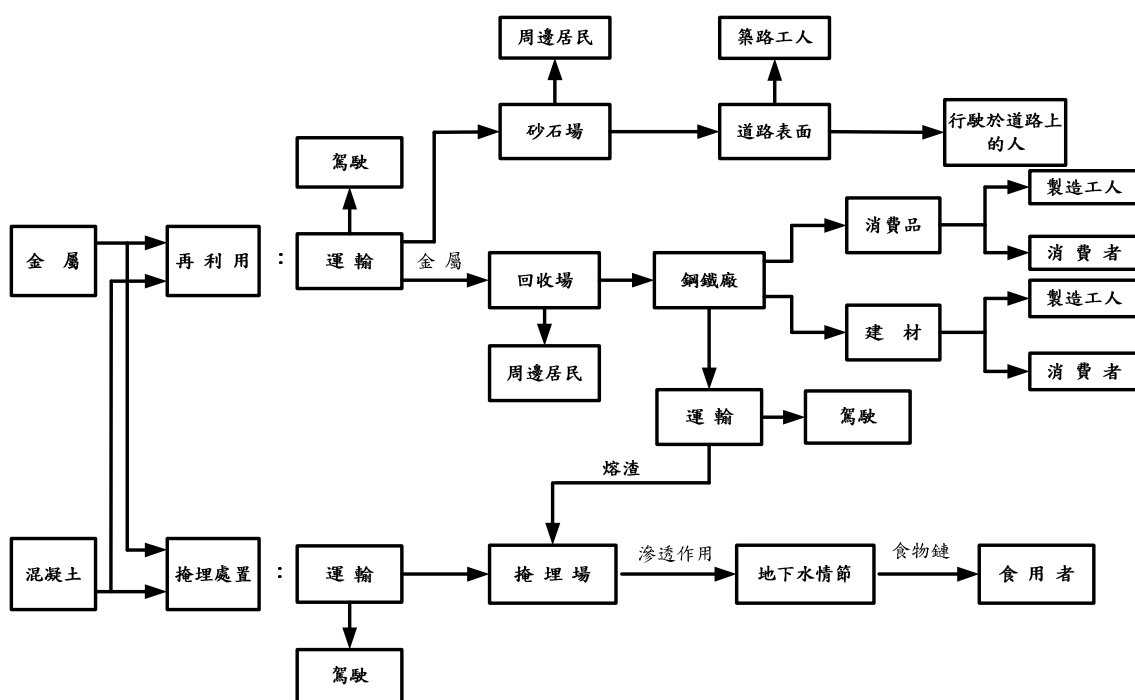


圖 3.1 本土輻射曝露情節之架構

## 3.2 劑量評估程序

IAEA RS-G-1.7 安全導則中認為大量放射性物質之豁免值及解除管制限值，其輻射安全基準為個人年有效劑量為 0.01 毫西弗及集體劑量為 1 人西弗(稱為一般狀況)，並考量低發生率(機率小於 1%)之事件，其個人年有效劑量不得超過 1 毫西弗，皮膚劑量標準為每年 50 毫西弗。

藉由情節模式可計算放射性廢棄物經處理後，對關鍵群體造成的有效劑量。本文建立劑量評估程序，主要參考 IAEA 44 號安全報告之情節架構與數值演算法，配合更新國情飲食、居住習慣及環境參數，以符合本土解除管制劑量評估目的。

### 3.2.1 核種之衰變系列

長半衰期之子核可能造成劑量貢獻。以  $^{241}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$  為例，如圖 3.2(a)，子核( $^{241}\text{Am}$ )活度於 70 年達最大值，但總活度已衰減至 0.1Bq 以下。反觀吸入劑量係數之變化，如圖 3.2(b)，子核隨時間增長，且於此時達最大值。此例說明若放射性廢棄物含有這些核種時，考量外釋多年後之情節，不應忽略子核的劑量貢獻。

IAEA 44 號安全報告採用加權總和(weighted sum)的方法，避免低估衰變系列之劑量。此法使用加權因子乘以子核之劑量係數，再加總至母核中，用以代表整個衰變系列之劑量係數。如圖 3.3，加權因子乃指衰變系列於 100 年間，子核相對活度之最大值。核種之加權因子可查閱 IAEA 44 號安全報告附錄 II。

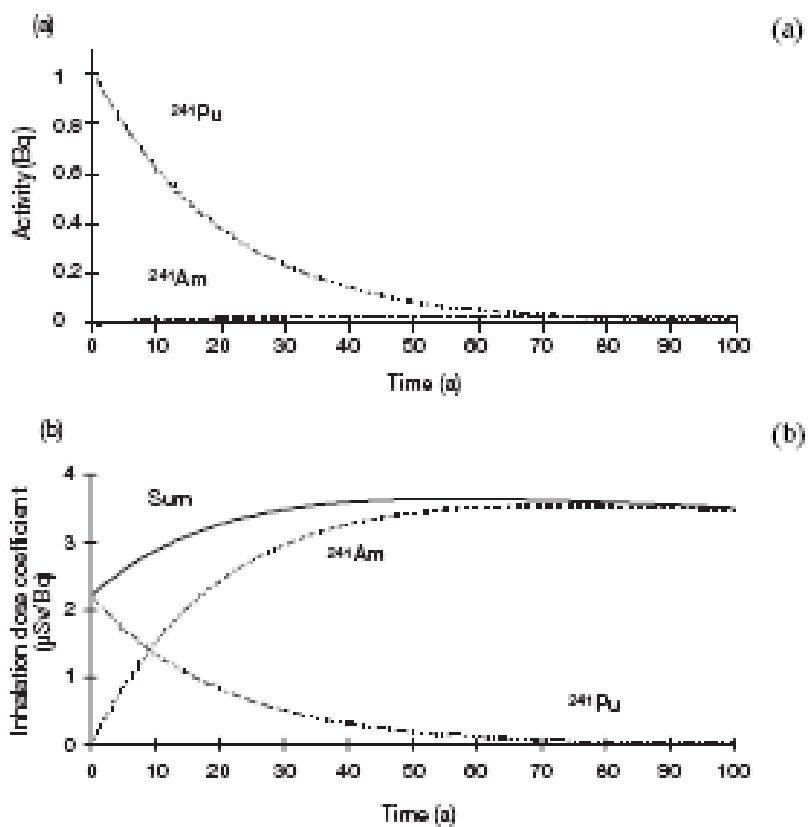


圖 3.2  $^{241}\text{Pu}$  /  $^{241}\text{Am}$  活度及劑量係數之時間關係圖

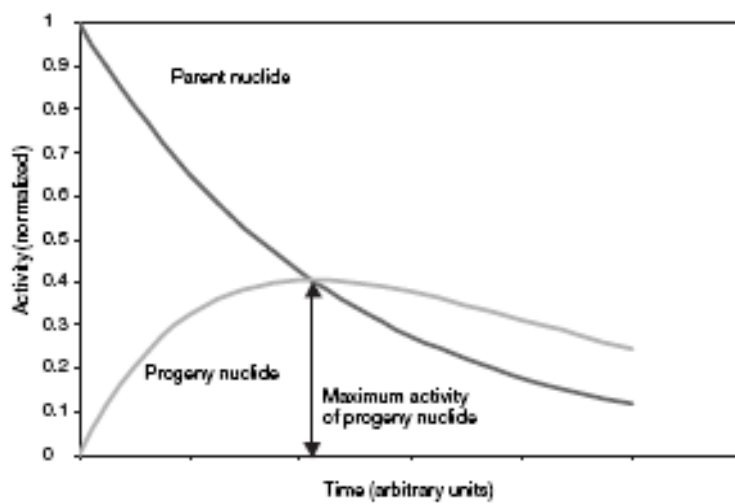


圖 3.3 子核與母核相對活度之時間關係圖

IAEA 44 號安全報告對上述子核生成的情況，列出三點條件：

(1)子核半衰期恆小於母核；

與

(2)子核半衰期小於 1 天；

或

(3)子核半衰期小於母核半衰期之 10%，且小於 10 年。

只要衰變系列滿足(1)與(2)、或(1)與(3)，就可使用加權總合的方法，以評估衰變系列之劑量。表 3.1 列出滿足條件的適用核種，(+)表示 IAEA 以之推導活度濃度限值。

表 3.1 母核與相關子核

母核	子核	母核	子核
Fe-52+	Mn-52m	Sn-113+	In-113m
Zn-69m+	Zn-69	Sn-121m	Sn-121
Sr-90+	Y-90	Sb-125+	Te-125m
Sr-91+	Y-91m	Te-127m+	Te-127
Zr-95+	Nb-95m	Te-129m+	Te-129
Zr-97+	Nb-97m, Nb-97	Te-131m+	Te-131
Nb-97+	Nb-97m	Te-132+	I-132
Mo-99+	Tc-99m	Cs-137+	Ba-137m
Mo-101+	Tc-101	Ce-144+	Pr-144, Pr-144m
Ru-103+	Rh-103m	Pm-146	Sm-146
Ru-105+	Rh-105m	U-232sec	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
Ru-106+	Rh-106	U-240+	Np-240m, Np-240
Pd-103+	Rh-103m	Np-237+	Pa-233
Pd-109+	Ag-109m	Pu-244+	U-240, Np-240m, Np-240
Ag-108m+	Ag-108	Am-242m+	Np-238
Ag-110m+	Ag-110	Am-243+	Np-239
Cd-109+	Ag-109m	Cm-247+	Pu-243
Cd-113m	In-113m, Cd-113	Es-254+	Bk-250
Cd-115+	In-115m	Es-254m+	Fm-254
Cd-115m+	In-115m		
In-114m+	In-114		



### 3.2.2 情節使用的時間參數

時間參數是用來描述各情節曝露的特性，主要有下列三種參數：

- (1)曝露時間；
- (2)情節開始前的衰減時間；
- (3)情節進行中的衰減時間。

情節開始前的衰減時間表示物質活度濃度開始度量到實際開始曝露之間的時段；情節進行中的衰減時間則表示物質被帶入處置場所或是用於建築的時間，如果只考慮單一年份內的各種曝露，則情節進行中的最大衰減時間為 365 天，即使物質的貯存只是單一事件、或者是建築物完成後完全沒有新的物質加入的事件也是如此。

正在成長中的農作物若生長於受污染的土地上，其衰減時間的計算比較特別，因為早在植物開始生長前，放射性物質就存在於土地當中。以下將說明一般狀況以及低發生機率情形所需的參數。

#### 曝露時間

- 1.針對所有工作場所(除了 WO 情節以外)，使用的時間由四分之一 個工作年度(一般狀況的假設)到一整個工作年度(低發生率情形 的假設)。而對 WO 曝露情節，工作人員的曝露時間為 900 個小 時(半個工作年度)，約為核設施或設備從除污到能再使用的時間。
- 2.核設施附近居民的曝露時間設定為 1000 小時。但由於假設建築物非常接近核設施，也會受其影響，對低發生機率情形假設一整 年的連續性曝露是需要的。

- 3.與上述論點相同，居住在含放射性物質的房屋內，也採用低機率 假設並為連續性的曝露，每年的曝露時間 8760 小時。如為一般 狀況，則假設曝露時間為 4500 小時。
- 4.孩童在覆蓋放射性物質的空地上玩耍，曝露時間約每年 400 ~ 1000 小時。

### 衰減時間

- 1.只要是放射性物質被帶到處置場所處理或貯存的所有情節，一律設定相同的時間。
  - (1)一般狀況  
假設：核設施接收放射性物質的次數很少，或者只有一次；  
設定：情節前的衰減時間為 30 天，情節進行中則為 365 天。
  - (2)低發生機率  
假設：核設施接收放射性物質的次數頻繁，為例行工作；  
設定：情節前的衰減時間為 1 天，情節進行中則為 0 天。
- 2.放射性物質被帶入建物中的情節，考量建材的準備時間以及建築工程實施階段，訂定情節前的衰減時間為 100 天，情節進行中則為 365 天。
- 3.假設沒有新物質加入情節當中，農作物生長於受污染的地區，情節前的衰減時間為 365 天，情節進行中則為 365 天。
- 4.對於地下水情節(RW)，衰減時間已被使用的模式所考慮，所以不需要時間參數。

表 3.2 為各曝露情節使用的時間參數彙整表。

表 3.2 曝露情節之時間參數

參數	單位	案例	情 節						
			WL	WF	WO	RL	RF	RH	RP
			掩埋場 工作人員	鑄造廠 工作人員	其他 工作人員	掩埋場 附近居民	鑄造廠 附近居民	室內 居民	公眾場所 居民
曝露時間	小時/年	一般狀況	450	450	900	1000	1000	4500	400
		低機率	1800	1800	1800	8760	8760	8760	1000
情節前之衰減時間	天	一般狀況	30	30	30	30	30	100	100
		低機率	1	1	1	1	1		
情節進行之衰減時間	天	一般狀況	365	365	365	365	365	365	365
		低機率	0	0	0	0	0		
食物情節前的衰減時間	天	一般狀況	N/A	N/A	N/A	365	N/A	N/A	N/A
食物情節中的衰減時間	天	一般狀況	N/A	N/A	N/A	365	N/A	N/A	N/A

### 3.2.3 體外曝露

體外曝露造成的有效劑量可由下式計算：

$$E_{ext,C} = C_i \cdot e_{ext} \cdot t_e \cdot f_d \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (1)$$

$E_{ext,C}$ ：核種自體外曝露途徑造成關鍵群體之年有效劑量( $\mu$  Sv/a)；

$C_i$ ：外釋核種之比活度(Bq/g)；

$e_{ext}$ ：有效劑量轉換係數 $[(\mu$  Sv/h)/(Bq/g)]，與物質的幾何形狀、距離、屏蔽等相關；

$t_e$ ：曝露時間(h/a)；

$f_d$ ：稀釋因子；

$\lambda$ ：衰減常數(1/a)；

$t_1$ ：情節開始前的衰減時間(a)；

$t_2$ ：情節進行中的衰減時間(a)。

共有 5 種曝露情節包含體外曝露途徑，相關參數值列於表 3.3。依據 ICRP 74 號報告<sup>(12)</sup>，成人與 1-2 歲兒童於相同體外曝露條件下，其劑量係數比值約為 1.2 (光子能量 > 100 keV)。此比值用於計算 1-2 歲兒童之情節劑量。

表 3.3 體外曝露情節參數

參數	單位	案例	WL	WF/WO	RH	RP
			掩埋場 工作人員	鑄鐵廠或其 他工作人員	室內居住	常駐地區
稀釋因子( $f_d$ )	[-]	一般狀況	1	0.1	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
幾何條件			離地表 1 m， 半無限大射 源(semi-infinte)	距貨車載物 1 m 或廢棄 物 5 m × 2 m × 1 m，無屏 蔽	天花板，2 面 牆，面積 3 m × 4 m，高度 2.5 m，牆厚 20 cm	離地表 1 m， 半無限大射 源(semi-infinte)
劑量係數( $e_{ext}$ )	$\mu\text{Sv/h}/(\text{Bq/g})$		成人	成人	成人	兒童(1-2 歲)
			視核種與幾何條件而定			

### 1. 稀釋因子

(1) 基於放射性核種各具不同的性質，以及方便公眾對於核種的認知，一般狀況中的稀釋因子採用保守值，其值為 1。也就是保守地假設存在於掩埋場(WL)或在工作人員附近的廢棄物，其活度濃度皆不被稀釋。同樣地，採用的保守值也適用於鑄鐵廠工作人員，以及搬運廢棄物的卡車司機。

- (2)RH 情節的一般狀況中，假設放射性廢棄物在混凝土中，會與其他物質以 1：10 的混合比例來建造房屋。考量其他技術條件，稀釋因子上限值為 0.5，適用於低發生機率情形。
- (3)在 RP 情節中，由於公園等公共區域，地表大多僅覆蓋一層相當薄的放射性廢棄物(如飛灰或熔渣)，且廢棄物也會和其他物質混合而稀釋。因此在一般狀況中的稀釋因子為 0.1；低發生機率情形則採用保守值的上限，為 0.5。

## 2.物質密度

物質密度對劑量計算的影響相對較小。因為高密度物質，其單位體積所含的活度雖然較高(比活度相同、密度不同的物質相比較)，但本身對於發射出的加馬射線，自吸收(self-absorption)的情況也較明顯，因此存有補償現象。根據上述理由，在所有的情節中，皆假設射源均勻分佈於物質中，且物質密度設為  $1.5 \text{ g/cm}^3$ 。

## 3.RH 情節幾何條件：

如圖 3.4(a)所示，IAEA 採用的幾何條件為  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  之房間，每面牆厚度為 20 cm，劑量計算點在於中心且離地板 1 m 處，假設射源均勻分佈於混凝土中。

探討國內實際建築物結構，特定核種(如鈷-60)可能發生污染鋼骨情事。在此假設相同的房屋空間與評估劑量點位置(參見圖 3.4(b))，射源均勻分佈於常用規格(直徑約 1 吋)的鋼筋中，僅考慮單向往屋內的加馬劑量貢獻，因此幾何條件為厚度 0.5 吋的鐵(密度  $7.8 \text{ g/cm}^3$ )平板，外覆一層由混凝土(密度  $1.5 \text{ g/cm}^3$ )組成的保護層。由於實際建屋

時，鋼筋大多採用格柵狀構造而非平板狀，因此鐵的密度必須加以稀釋(dilution)，估計約等於  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ；而保護層的厚度一般為  $3.5 \text{ cm}$ 。

本文將上述兩種幾何條件，使用 MicroShield v5.0<sup>(13)</sup> 計算劑量點之值。以鈷-60 污染單牆之劑量貢獻為例，IAEA 幾何條件之值為  $1.178 \times 10^{-2} \text{ mR/h}$ ，而鋼筋污染案例之值則為  $9.369 \times 10^{-4} \text{ mR/h}$ 。故以 IAEA 幾何條件推導核種活度濃度限值較為保守，值得採用。

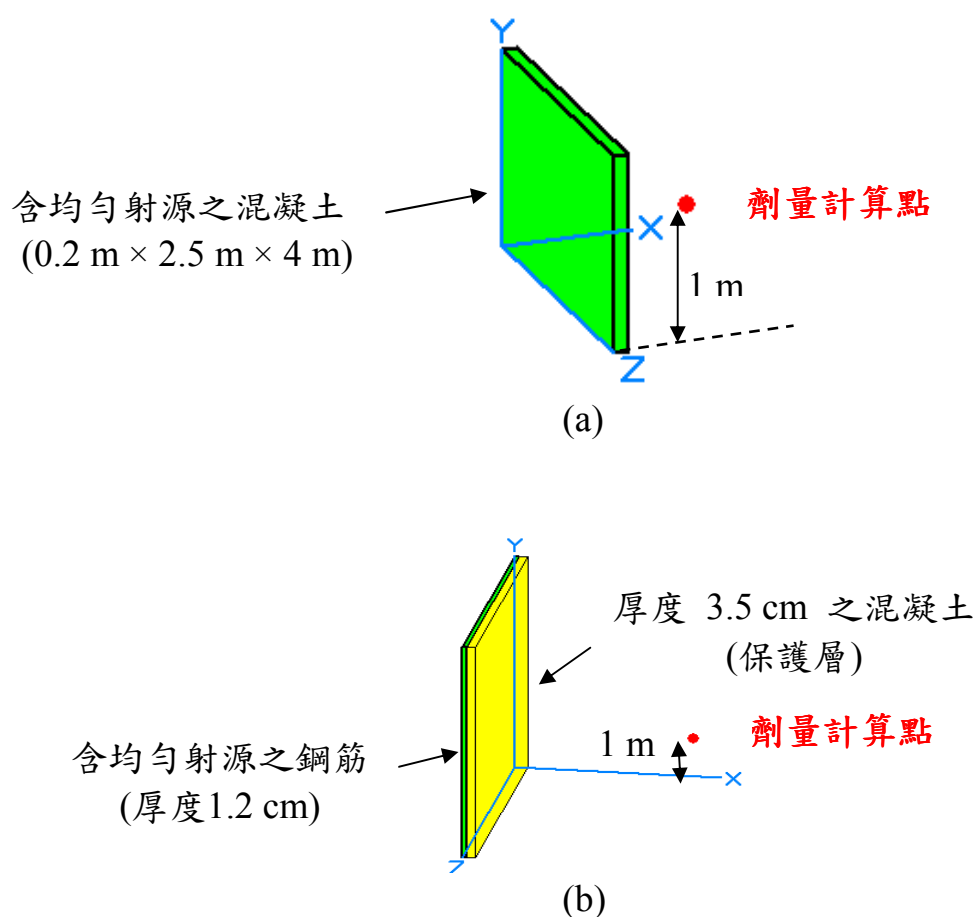


圖 3.4 RH 情節幾何條件比較

#### 4.劑量係數

參見 IAEA 44 號安全報告之表 I - III。

### 3.2.4 吸入途徑

吸入懸浮粒子或灰塵造成的劑量可由下式計算：

$$E_{inh,C} = C_i \cdot e_{inh} \cdot t_e \cdot f_d \cdot f_c \cdot C_{dust} \cdot V \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (2)$$

$E_{inh,C}$ ：核種自吸入途徑造成關鍵群體之年有效劑量( $\mu$  Sv/a)；

$C_i$ ：外釋核種之比活度(Bq/g)；

$e_{inh}$ ：有效劑量轉換係數( $\mu$  Sv/Bq)；

$t_e$ ：曝露時間(h/a)；

$f_d$ ：稀釋因子；

$f_c$ ：濃縮因子；

$C_{dust}$ ：空氣中有效塵埃濃度( $g/m^3$ )

$V$ ：呼吸率( $m^3/h$ )

$\lambda$ ：衰減常數(1/a)；

$t_1$ ：情節開始前的衰減時間(a)；

$t_2$ ：情節進行中的衰減時間(a)。

共有 5 種曝露情節包含吸入途徑，相關參數值列於表 3.4。以下描述吸入情節之功能參數。

#### 1. 稀釋因子

(1)WL 情節採用的稀釋因子，其值範圍和體外曝露相同(0.1~1)。

(2)WF 情節的一般狀況中，考量鑄鐵廠有大量處理廢金屬物質的業務，故稀釋比例偏高，其值採用 0.02；低機率案例則為 0.1。

(3)在 RL 與 RF 情節中，考量場址外之空氣中會有其他來源的懸浮粒子加以混合稀釋，所以稀釋因子之值比場址內小 10 倍。

(4)RP 情節的一般狀況中，其稀釋因子和體外曝露相同。而低發生機率情形中，必須保守考量灰塵完全由地表薄層產生的情況，因此假設不被稀釋，其值為 1。

## 2. 空氣中有效塵埃濃度

場址內的塵埃濃度，一般狀況為假設  $5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ ，低機率情形則是  $10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ；而場址外的空氣塵埃濃度，一般狀況為假設  $10^{-4} \text{ g/cm}^3$ ，低機率情形則是  $5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 。

## 3. 濃縮因子

活度濃度通常指物質之平均活度濃度，然而當物質中的細微(fine)粒子越多時，其活度濃度會有增加的現象，必須用濃縮因子加以修正。在吸入金屬物質(熔渣或煙團)的過程中，依據核種的化性和熔鐵技術，濃縮因子的範圍一般評估為 1-70；而吸入其他物質(非熔煉金屬情節)則為 4。

## 4. 呼吸率

工作人員和成人民眾的呼吸率為  $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ；1-2 歲小孩則為  $0.22 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

## 5. 劑量係數

參見 IAEA 44 號安全報告之表 I -IV。



表 3.4 吸入情節參數

參數	單位	案例	WL	WF	RL-A	RL-C	RF	RP
			掩埋場 工作人員	鑄造廠 工作人員	常駐掩埋場		常駐 鑄鐵廠	常駐 地區
稀釋因子( $f_d$ )	[-]	一般狀況	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
空氣中塵埃 濃度( $C_{dust}$ )	g/m <sup>3</sup>	一般狀況	5×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
		低機率	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>
濃縮因子( $f_c$ )	[-]		4	1-70	4	4	1-70	4
呼吸率( $V$ )	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		工作人員 (5μm)	工作人員 (5μm)	成人	兒童 (1-2 歲)	兒童 (1-2 歲)	兒童 (1-2 歲)

### 3.2.5 嚥入途徑

嚥入包含兩種途徑：

- (1) 疏忽嚥入放射性物質(例如手沾到灰塵，再經口接觸食入)。
- (2) 農作物生長於污染土地，人類食用而間接嚥入放射性物質。

嚥入放射性物質造成的劑量可由下式計算：

$$E_{ing,C} = C_i \cdot e_{ing} \cdot q \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_t \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (3)$$

$E_{ing,C}$ ：核種自嚥入途徑造成關鍵群體之年有效劑量(μ Sv/a)；

$C_i$ ：外釋核種之比活度(Bq/g)；

$e_{ing}$ ：有效劑量轉換係數(μ Sv/Bq)；

$q$ ：每年攝入灰塵或食物量(g/a)；

$f_d$ ：稀釋因子；

$f_c$ ：濃縮因子；

$f_t$ ：根轉移因子；

$\lambda$ ：衰減常數(1/a)；

$t_1$ ：情節開始前的衰減時間(a)；

$t_2$ ：情節進行中的衰減時間(a)。

共有 5 種曝露情節包含吸入途徑，相關參數值列於表 3.5。以下描述吸入情節之功能參數。

### 1.稀釋因子

WL 及 RP 情節採用的稀釋因子和吸入途徑相同。RL 情節考量僅有部份土壤受到污染，且生長其中的農作物僅佔年食用量的一部分，因此假設在一般狀況時的稀釋因子為 0.01，低機率情形則為 0.1。

### 2.濃縮因子

吸入情節的濃縮因子僅與直接吸入放射性物質途徑有關。吸入物質的粒子對吸入情節而言，粒徑顯得較大，故濃縮因子較小，其值假設為 2。

### 3.根轉移因子

吸入情節中的根轉移因子僅與吸入污染農作物途徑有關。根轉移因子是指放射性核種從污染土壤中被植物吸收比例，其大小與核種種類有關。

### 4.每年吸入量

(1)直接吸入放射性物質的工作人員，一般狀況評估為 10 g/a，低機率情形則為 50 g/a。

(2)在公園等公共設施遊玩的小孩，不小心嚥入放射性灰塵的量，一般狀況評估為 25 g/a，低機率情形則為 50 g/a。

(3)在嚥入污染農作物的途徑中，蔬菜和水果的年消費量對一般狀況而言，成人與小孩分別為 88 kg/a 以及 68 kg/a；低機率情形則分別為 264 kg/a 及 204 kg/a。這些年消費量已經考慮了其他來源的農作物所造成的稀釋因子。

### 5.劑量係數

參見 IAEA 44 號安全報告之表 I -V。

表 3.5 嚥入情節參數

參數	單位	案例	WL/WF	RP	RL-A	RL-C
			掩埋場或鑄鐵廠的工作人員	常駐地區	常駐掩埋場	
稀釋因子( $f_d$ )	[-]	一般狀況	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
根轉移因子( $f_r$ )	[-]		N/A	N/A	[12]	[12]
每年攝入灰塵或食物的量( $q$ )	g/a or kg/a	一般狀況	10 g/a	25 g/a	88 kg/a	68 kg/a
		低機率	50 g/a	50 g/a	264 kg/a	204 kg/a
劑量係數 ( $e_{ing}$ )	$\mu\text{Sv/Bq}$		工作人員	兒童 (1-2 歲)	成人	兒童 (1-2 歲)

### 3.2.6 地下水情節

大量固體放射性廢棄物自核設施外釋後，可能處置或貯存於特定區域(例如掩埋場)，雨水再將放射性核種瀝濾(leaching)出污染區，而進入地下水或地表水。此過程稱為地下水情節，必須進行放射性評估。IAEA

的地下水評估模式依據 RESRAD 程式加以修正。如圖 3.5，核種會進入人類的食物鏈，例如經飲用水或灌溉農作物途徑。最保守之情節為私井抽取地下水作為家庭用水。假如核種遷移至地表水中，得考慮食用污染魚類之曝露途徑。

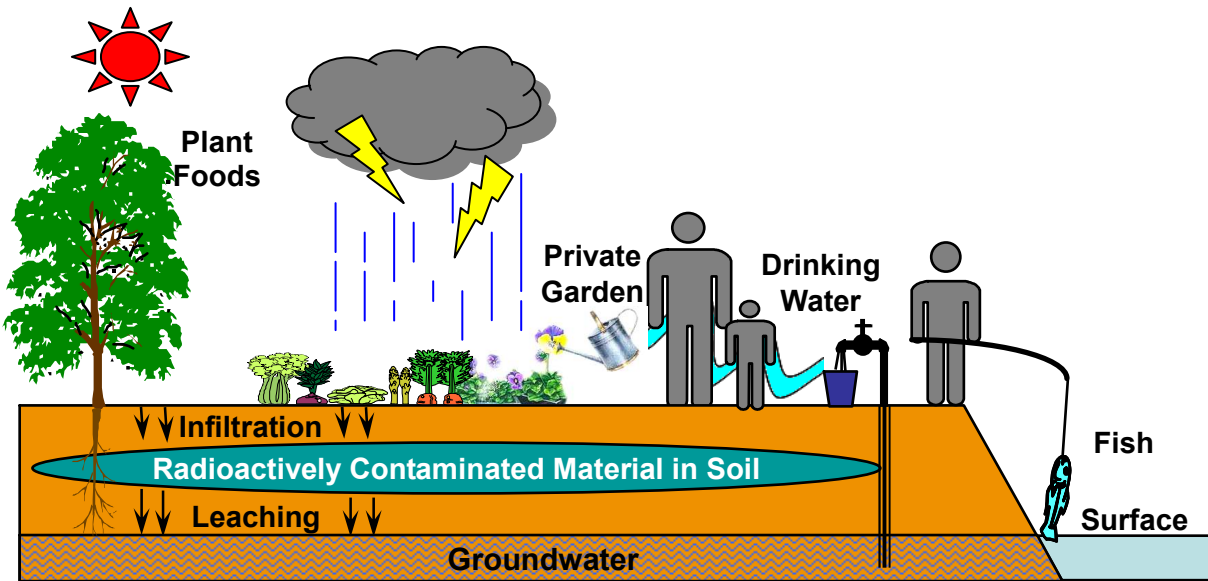


圖 3.5 地下水情節

### 1. 評估公式

假設殘餘放射性物質廣泛分佈於地下水的流域內，並保守地認為所有核種都可以遷移。核種釋放速率由  $K_d$  模式<sup>(10)</sup>決定，圖 3.6 為其示意圖。在此模式中，核種  $i$  的滲濾速率  $L_i$  可由公式(4)計算而得：

$$L_i = \frac{I}{\theta^{cz} \cdot z^{cz} \cdot R_i^{cz}} \quad (4)$$

$I$ ：滲透率(m/a)；

$\theta^{cz}$ ：污染區(contaminated zone)的水體容量；

$z^{cz}$ ：污染區的厚度(m)；

$R_i^{cz}$ ：核種  $i$  的遲滯因子，可由公式(5)計算而得。

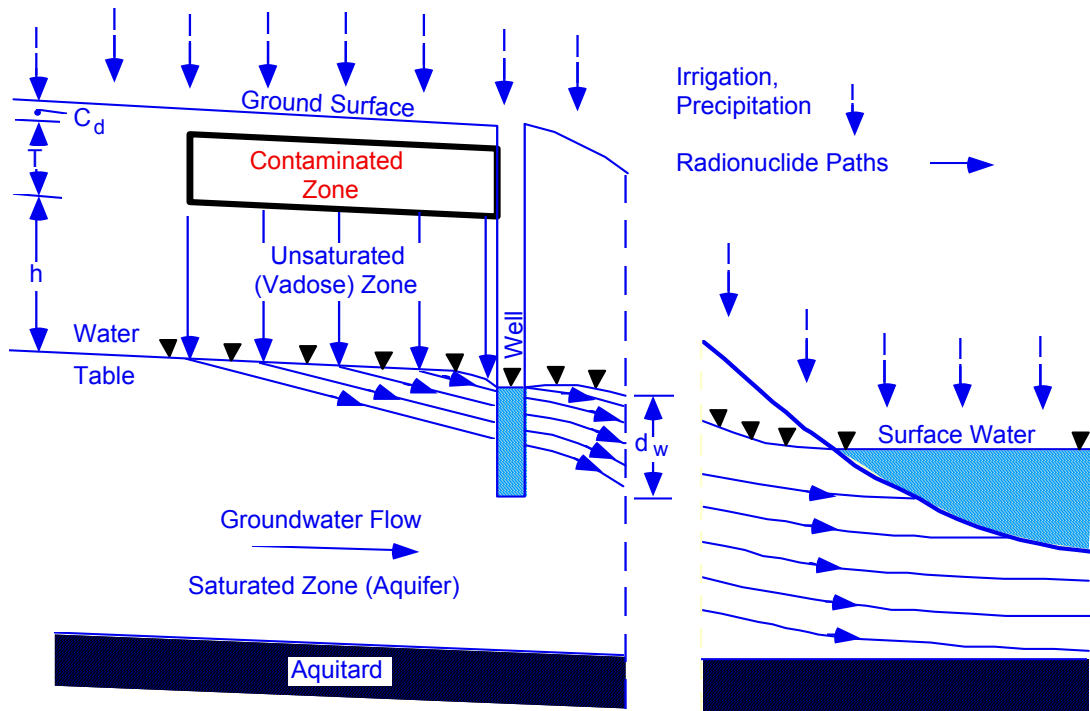


圖 3.6  $K_d$  模式示意圖

$$R_i^{cz} = 1 + \frac{\rho^{cz} \cdot K_{di}}{\theta^{cz}} \quad (5)$$

$\rho^{cz}$  : 污染區的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ;

$K_{di}$  : 核種  $i$  的分佈係數( $\text{cm}^3/\text{g}$ )。

水體容量( $\theta^{cz}$ )定義為：

$$\theta^{cz} = P_t \cdot R_s \quad (6)$$

$P_t$  : 土壤之總多孔性(total porosity) ;

$R_s$  : 飽和比例(saturation ratio)。

其中，飽和比例( $R_s$ )可用公式(7)評估其值：

$$R_s = \left( \frac{I}{K_{sat}} \right)^{\frac{1}{2b+3}} \quad (7)$$

$K_{sat}$ ：飽和水力傳導係數(m/a)；

b：土壤特性指數參數。

飽和水力傳導係數、總多孔性及特性指數參數依土壤種類而異，對應值列於表 3.6。

表 3.6 土壤特性參數對應值

土壤組成	水力傳導係數(m/a)	總多孔性	土壤特性指數參數
Clay	$4.05 \times 10^1$	0.482	11.40
Clay Loam	$7.73 \times 10^1$	0.476	8.52
Loam	$2.19 \times 10^2$	0.415	5.39
Loamy sand	$4.93 \times 10^3$	0.410	4.38
Sand	$5.55 \times 10^3$	0.395	4.05
Sandy clay	$6.84 \times 10^1$	0.426	10.40
Sandy clay loam	$1.99 \times 10^2$	0.420	7.12
Sandy loam	$1.09 \times 10^3$	0.435	4.90
Silty clay	$3.26 \times 10^1$	0.492	10.40
Silty clay loam	$5.36 \times 10^1$	0.477	7.75
Silty loam	$2.27 \times 10^2$	0.485	5.30

來源：Clapp and Hornberger<sup>(14)</sup>

如圖 3.7，RESRAD 認為滲透率(I)與蒸發、逕流、降雨及灌溉等物理現象有關，可用公式(8)計算其值。滲透率之相關參數具有場址特殊性，例如地區的地質水文狀況，故使用時需仔細評估。

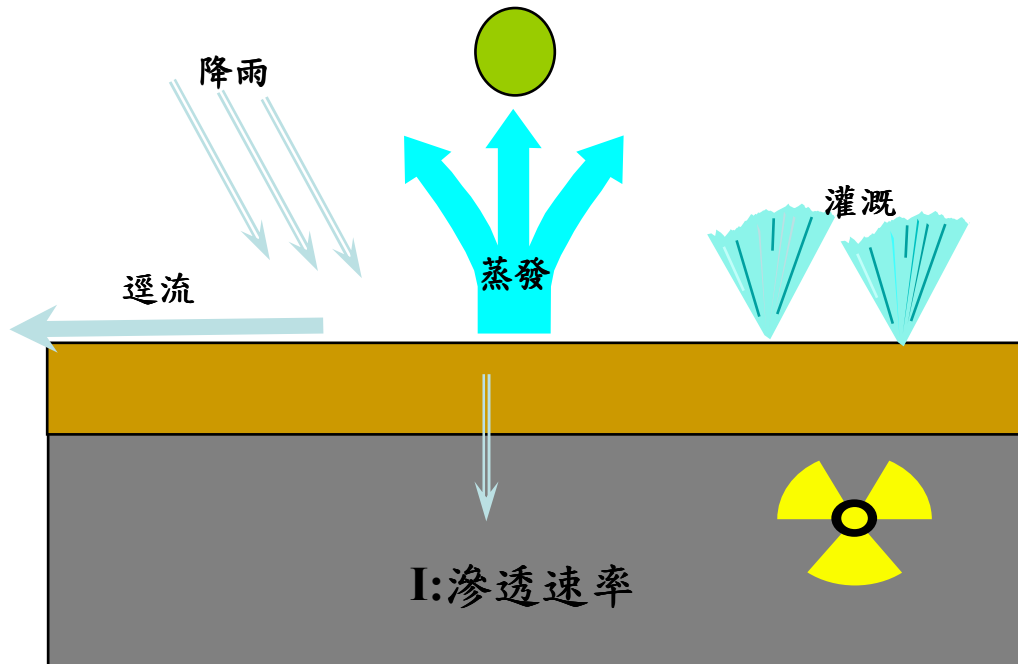


圖 3.7 滲透現象

$$I = (1 - C_e) [(1 - C_r) P_r + I_{rr}] \quad (8)$$

$C_e$ ：蒸發(evapotranspiration)係數；

$C_r$ ：逕流(runoff)係數；

$P_r$ ：降雨率(m/a)；

$I_{rr}$ ：灌溉率(m/a)。

其中，蒸發係數( $C_e$ )由公式(9)計算得到：

$$C_e = \frac{E_t}{[(1 - C_r) P_r + I_{rr}]} \quad (9)$$

$E_t$ ：蒸發率(m/a)

分佈係數(distribution coefficient)決定核種滲濾出污染區的速度，其數值的大小與核種的化學特性及土壤的地化(geochemical)性質有關。地

下水模式之分佈係數於一般狀況，採用 RESRAD 程式之預設值；低機率則採用 IAEA 19 號安全報告<sup>(15)</sup>之表 E.4 中的最小值。某些元素無法量測得到分佈係數，可用公式(10)估算之：

$$\ln K_{di} = a + b \cdot \ln f_{t,i} \quad (10)$$

a = 2.11 (砂土)，b = -0.56；

$f_{t,i}$ ：根轉移因子。

表 3.7 為 IAEA RS-G-1.7 號安全報告提供的分佈係數。

滲流(seepage)中核種 i 的濃度( $C_i^s$ )，可以由滲濾速率( $L_i$ )計算求得：

$$C_i^s = \frac{M \cdot c_i \cdot L_i}{U^s} \quad (11)$$

M：污染物質總質量(g)；

$c_i$ ：污染物質中核種 i 的比活度(Bq/g)；

$L_i$ ：核種 i 的滲濾速率(1/a)；

$U^s$ ：通過污染區的滲流體積( $m^3/a$ )，可由下式計算而得。

$$U^s = I \cdot A^{cz} \quad (12)$$

I：滲透速率(m/a)；

$A^{cz}$ ：污染區的表面積( $m^2$ )。

滲流由污染區進入地下含水層(aquifer)。一般狀況假設有一層未飽和區，其位於污染區與含水層之間。核種於未飽和區遷移時，會進行放射性衰變而使活度減少。滲流穿過未飽和區的遷移時間  $t_i$  可由公式(13)計算。



$$t_i = \left( \frac{z^{uz} \cdot R_i^{uz} \cdot p^{uz} \cdot R_s^{uz}}{I} \right) + 1 \quad (13)$$

$I$ ：滲透速率(m/a)；

$z^{uz}$ ：未飽和區的厚度(m)；

$p^{uz}$ ：未飽和區的有效多孔性(effective porosity)；

$R_s^{uz}$ ：未飽和區的飽和比例(saturation ratio)；

1：情節開始前的衰減時間(a)；

$R_i^{uz}$ ：核種  $i$  於未飽和區的遲滯因子，可由下式計算而得。

$$R_i^{uz} = 1 + \frac{\rho^{uz} \cdot K_{di}}{\theta^{uz}} \quad (14)$$

$\rho^{uz}$ ：未飽和區的密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$K_{di}$ ：核種  $i$  的分佈係數(cm<sup>3</sup>/g)，數值與污染區相同；

$\theta^{uz}$ ：未飽和區的水體容量。

公式(14)僅適用於滲流以  $K_d$  的概念遷移於多孔性介質之中，並非套用於所有狀況，例如若有裂縫流(fracture flow)或是膠體傳輸(colloidal transport)的情形，將導致滲流遷移於未飽和區的速率加快許多。故模式的低機率案例不考慮未飽和區的存在，以便包括此種快速遷移的情況。

表 3.7 IAEA RS-G-1.7 號安全報告之分佈係數

元素	一般狀況	低機率
Ag	0	0
Am	20	20
Ba	50	44*
Bi	0	0
Bk	213*	213*
C	0	0
Ca	50	5
Cd	0	0
Ce	1000	500
Cf	109*	109*
Cl	3*	3*
Cm	395*	395*
Co	1000	60
Cs	1000	270
Es	213*	213*
Eu	268*	240
Fe	1000	160
Gd	182*	182*
H	0	0
Ho	182*	182*
I	0.1	0.1
La	213*	213*
Mn	200	50
Mo	20*	10
Na	10	10

元素	一般狀況	低機率
Nb	0	0
Ni	1000	300
Np	50*	5
Pd	30*	30
Pm	268*	240
Pt	12*	12*
Pu	2000	550
Rb	20*	20*
Rh	44*	44*
Ru	0	0
Sb	0	0
Se	0	0
Sm	182*	182*
Sn	0	0
Sr	30	15
Tb	182*	182*
Tc	0	0
Te	0	0
Th	60000	1378
Tl	0	0
Tm	213*	213*
U	50	15
Zn	0	0
Zr	395*	280

\*該元素的分佈係數由公式(10)計算而得。

假設有一口私人用井位於污染區的下游，保守地認為水井非常接近射源，因此不被來自其他地方的地下水所稀釋。核種遷移於地下水的過程中，不考慮分散(dispersion)與擴散(diffusion)。

如上所述，井水中的核種濃度僅被來自污染區方向的地下水所稀釋。地下水流量( $U^{gw}$ )可由公式(15)計算而得：

$$U^{gw} = z^{gw} \cdot w^{gw} \cdot v^{gw} \cdot p^{gw} \quad (15)$$

$z^{gw}$ ：含水層的厚度(m)；

$w^{gw}$ ：污染區的寬度(m)，指垂直於地下水流的方向；

$v^{gw}$ ：地下水(指多孔性水)的流速(m/a)；

$p^{gw}$ ：含水層的有效多孔性。

建議使用達西定律(Darcy law)估計地下水流速( $v^{gw}$ )：

$$v^{gw} = \frac{K \cdot J}{p^{gw}} \quad (16)$$

$K$ ：水力傳導係數(m/a)；

$p^{gw}$ ：含水層的有效多孔性；

$J$ ：水力坡降(hydraulic gradient)。

如圖 3.8，達西定律說明水流經過透水物質時，流速與水頭損失(h)成正比，與流路之長度(l)成反比。由於地下各點的水壓不同，地下水因而不斷地自壓力高處流向低處，所以地下水不一定是自地勢高處往地勢低處流，而是自高水頭流往低水頭。地下水在孔隙中的流動是相當緩慢的，一般而言平均每天只有約 1-2 m，與地面水流速比較約有 8 萬到 10 萬倍之差。近年來有一些對地下水定年的研究，有助於瞭解地下水的流速，比如由濁水溪沖積扇的地下水放射性同位素定年研究<sup>(16)</sup>，發現

自西元 1953 年起大約 40 年間，地下水一共流動了 6 至 8 km，換句話說這些地區每天地下水大約是流動 50 cm 上下，真的是非常緩慢。許多深井汲取的地下水在數千年、甚至數萬年前就由補注區滲入至地下，它們是經很長的時間才流到現在的位置。

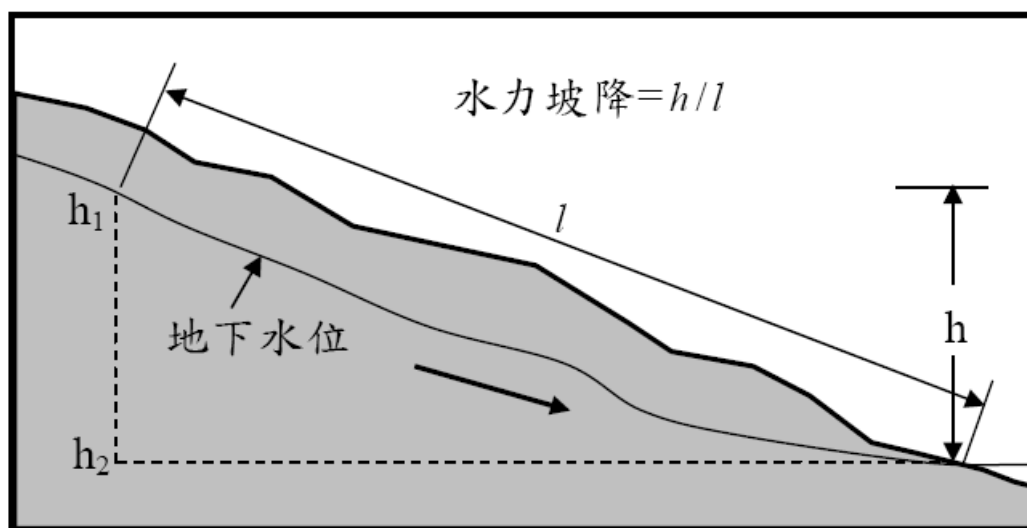


圖 3.8 達西地下水流動模型

由公式(11)、(12)、(13)及(15)，可得到井水中核種  $i$  的濃度( $c_i^w$ )：

$$c_i^w = \frac{U^s}{U^{gw} + U^s} \cdot C_i^s \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_i} \quad (17)$$

如此可計算一般民眾飲用井水造成的體內劑量。

評估井水作為灌溉用水時對生長中農作物的影響，需要瞭解核種由水遷移至植物中的情形。模式考慮的農作物為蔬菜與水果，不包括奶類、肉類與穀類等農產品，因其認為生產上述農產品需要相當大的土地面積，相對提高了稀釋因子，故劑量評估應取私人農圃種植蔬果之情節較為保守。當灌溉的方式為澆灌(overhead irrigation)時，遷移因子( $f_t$ )為：

$$f_i = \frac{I_{rr} \cdot f_r \cdot T_f \cdot (1 - e^{-\lambda_w t_e})}{Y_w \cdot \lambda_w} + \frac{I_{rr} \cdot (1 - f_r) \cdot f_{t,i} \cdot (1 - e^{-L_i t_e})}{\rho^e \cdot L_i} \quad (18)$$

$I_{rr}$ ：灌溉率(m/a)；

$f_r$ ：核種留存於蔬菜中的比例(0.25)；

$T_f$ ：葉子至食用部分的遷移係數，水果及非葉菜類為 0.1，葉菜類為 1；

$\lambda_w$ ：蔬菜的風化移除常數( $20 \text{ a}^{-1}$ )；

$t_e$ ：農作物成長中受曝露的時間(即生長季)，水果及非葉菜類為 0.17 a，葉菜類為 0.25 a；

$Y_w$ ：單位面積之農作物的產量(鮮重)，水果及非葉菜類為 0.7  $\text{kg/m}^2$ ，葉菜類為 1.5  $\text{kg/m}^2$ ；

$f_{t,i}$ ：核種 i 的根轉移因子；

$L_i$ ：核種 i 的瀝濾速率(1/a)，可由公式(4)計算求得；

$\rho^e$ ：土壤的有效面密度( $225 \text{ kg/m}^2$ )。

地下水循環成為地表水後，可能被飲用或是灌溉農作物。因稀釋作用影響，故造成的劑量應比使用井水之情節為小。地表水中的魚類被人類食用，則是需要考慮的曝露途徑。地表水中核種濃度( $c_i^r$ )由河川流量( $U^r$ )決定：

$$c_i^r = \frac{U^s}{U^r + U^s} \cdot C_i^s \cdot e^{-\lambda_i t_i} \quad (19)$$

配合使用 IAEA 19 號安全報告之表 D.5 所提供的魚類轉移因子，即可計算魚類中的核種濃度。

### 3.2.7 場址條件設定

以下敘述評估地下水情節的場址設定，包括 IAEA 的假設條件與本文選用之台灣區域。人文與地理環境為評估地下水情節的功能參數，具有相當的特異性。本文收集彙整國人飲食參數，以及屏東平原重要地質水文參數，可供本土劑量評估工作參考。

#### 1. IAEA 場址

IAEA 對含有殘餘放射性物質的處置或貯存區域(例如掩埋場)，使用下列假設：

- (1)一般狀況：污染物質的體積為  $25000 \text{ m}^3$ ，
- (2)低機率情形：污染物質的體積為  $100000 \text{ m}^3$ ，
- (3)一般狀況與低機率情形，污染區的厚度皆為  $5 \text{ m}$ 。

情節開始前的衰減時間設定為 1 年，情節進行中的衰減時間則取決於核種的遷移時間(參見公式(13))。當飲用井水或河水時，不需考慮衰減，因為代謝行為於 1 天之內即可完成。

滲透率設定為  $0.2 \text{ m/a}$ ，此數值適用於一般的天氣狀況。對於較潮濕的氣候與土壤區域，則可能有更高的滲透率，但由於這些區域的地下水或地表水的流速相對較快，因此整體而言，稀釋程度是保持一定的。

一般狀況假設未飽和區的厚度為  $2 \text{ m}$ ；低機率情形則假設污染區直接接觸含水層(即未飽和區不存在)。一般狀況假設地下水流速為  $1000 \text{ m/a}$ ；低機率情形則為  $500 \text{ m/a}$ 。井水用於飲用與灌溉私人農圃，灌溉率為  $0.2 \text{ m/a}$ 。河川的流量則設定為  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

評估模式考慮的食物種類包括飲用水、葉菜類、非葉菜類與水果、魚類等，相關消費量參見表 3.8。一般狀況假設污染食物(飲水與農作物)的年消費比例為 25%；低機率則假設消費食物全受到污染。地下水模式的場址參數列於表 3.9。

表 3.8 食物消費量預設值

	兒童消費量 (1-2 歲)		成人消費量 (>17 歲)	
	[kg/a]		[kg/a]	
	一般狀況	低機率	一般狀況	低機率
飲用水	100	200	350	700
葉菜類	6	18	13	39
非葉菜	17	51	40	120
水果	45	135	35	105
蔬果總量	68	204	88	264
魚類	0.6	3	1.5	7.5

表 3.9 地下水模式的場址參數

參數	單位	一般狀況	低機率
污染區			
情節開始前的衰減時間	a	1	1
面積	m <sup>2</sup>	5000	20000
厚度	m	5.00	5.00
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.80	1.80
滲透率	m/a	0.20	0.20
灌溉率	m/a	0.20	0.20
滲流體積 (計算值)	m <sup>3</sup> /a	1000	4000
總多孔性		0.40	0.40
飽和水力傳導性	m/a	5000	5000
水體容量		0.16	0.16
未飽和區			
厚度	m	2.00	0.00
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.80	1.80
總多孔性		0.40	0.40
有效多孔性		0.20	0.20
水體容量		0.16	0.16
含水層			
厚度	m	5.00	5.00
污染區寬度 (垂直於地下水流)	m	100	100
地下水流速	m/a	1000	500
有效多孔性		0.25	0.25
地下水流量 (計算值)	m <sup>3</sup> /a	1.25E+05	6.25E+04
滲流與地下水之間的稀釋因子 (計算值)		7.94E-03	6.02E-02
地表水			
河流流量	m <sup>3</sup> /s	5.00	5.00
滲流與河流間的稀釋因子 (計算值)		6.34E-06	2.54E-05
灌溉參數			
非葉菜類生長季	a	0.17	0.17



表 3.9 地下水模式的場址參數 (續)

參數	單位	一般狀況	低機率
葉菜類生長季	a	0.25	0.25
風化移除常數	1/a	20	20
核種留存於蔬菜中的比例		0.25	0.25
葉子至食用部分的遷移係數 (非葉菜類)		0.1	0.1
葉子至食用部分的遷移係數 (葉菜類)		1	1
土壤有效面密度	kg/m <sup>2</sup>	225	225
非葉菜類的產量 (未經乾燥處理)	kg/m <sup>2</sup>	0.7	0.7
葉菜類的產量 (未經乾燥處)	kg/m <sup>2</sup>	1.5	1.5
消費量			
飲水 (1-2 歲兒童)	kg/a	100	200
飲水 (17 歲以上的成人)	kg/a	350	700
非葉菜類 (1-2 歲兒童)	kg/a	17	51
非葉菜類 (17 歲以上的成人)	kg/a	40	120
葉菜類 (1-2 歲兒童)	kg/a	6	18
葉菜類 (17 歲以上的成人)	kg/a	13	39
魚類 (1-2 歲孩童)	kg/a	0.6	3
魚類 (17 歲以上的成人)	kg/a	1.5	7.5
污染飲水的年消費比例		0.25	1
污染蔬果的年消費比例		0.25	1
污染魚類的年消費比例		0.25	1

## 2. 本土飲食參數

參考行政院農業委員會統計室 93 年農業統計年報<sup>(17)</sup>，將國人食物消費參數列於表 3.10，數據為 89 至 93 年之平均值。其中，葉菜類包括大芥菜、甕菜、芹菜及其他葉菜類；非葉菜類包括蘿蔔、胡蘿蔔、其他根菜類及薑；水果包括香蕉、鳳梨、柑橘及瓜果類。

表 3.10 國人飲食參數

種類	食用量 (kg/a)	產量 (kg/m <sup>2</sup> )
飲用水	1095.0	—
葉菜類	37.5	8.5
非葉菜	46.2	12.0
水果	139.8	
蔬果總量	223.5	—
魚類	23.8	—

### 3.屏東平原

本文選擇屏東平原為評估場址的原因如下：

- (1)IAEA 地下水情節採用的地質水文參數，例如水力傳導係數、總多孔性及特性指數參數等，多為砂土(sand)的預設值。依據中央地質調查所與水利署共同執行的「台灣地區地下水觀測網整體計畫」<sup>(18)</sup>指出：第一含水層為屏東平原水文地質系統之表層，位於地表附近，其分佈從地表起至最深約 85 公尺，平均厚度約 47 公尺，本層之岩性以粗中砂層最發達，其次為礫石層和細砂層。由此可知屏東平原淺層地質以砂礫石為主，透水性甚優，適合地下水模式採用。
- (2)屏東平原係地下水資源蘊藏豐富之區域，無論灌溉、養殖、生活、工業等各標的用水均有利用地下水之情形。屏東平原 1995 年之地下水總出量估計約 13.51 億立方公尺<sup>(19)</sup>，取自地表水者計有 4.33 億立方公尺，佔總用水量的 24.27%，取自地下水者有 10.36 億立方公尺佔總用水量的 70.52%。且屏東平原位於北回歸線以南，為熱帶性氣候，受季風影響，平均年降雨量在 2300–3400 公厘之

間，雨量豐沛。故地下水情節對台灣本島區域之影響，應屬屏東平原最為關鍵。

(3)國內核設施未來亦將面臨除役問題，對產生的大量放射性廢棄進行解除管制工作，需配合適當之劑量評估模式。位於台灣南端恆春鎮之第三核能發電廠，其進行除役規劃時，考慮地緣關係，可選擇屏東平原作為放射性廢棄物處置場址，以便於運輸與集中管理，符合成本利益分析。

屏東平原之形成主要是由區域內之高屏溪、旗山溪、荖濃溪、林邊溪、隘寮溪及東港溪等河川，縱橫交流聯合沖積而成之聯合沖積扇群，形成地質良好之地下含水層，其所蘊藏之地下水量，提供屏東地區農工業發展穩定之水源。其中高屏溪為第一大河川，流域面積3256.85平方公里，年逕流量高達85億立方公尺，為台灣南部最重要之水源區。表3.11為高屏河流域之水文資料。

表 3.11 高屏河流域之水文參數

	平均降雨量 (m/a)	平均蒸發率 (m/a)	平均逕流量 (m/a)	逕流係數	平均流量 (m <sup>3</sup> /a)
高屏溪	3.11	0.69	2.41	0.77	268.11

來源：師範大學地理系<sup>(20)</sup>

「台灣地區地下水觀測網整體計畫」於屏東平原完成52站地質鑽探成果顯示，第一含水層位於地表附近，數十年前即已被廣泛地開發地下水資源，迄今仍然有為數眾多之民井及農田水利會淺井分佈於其中，抽取淺層地下水，供應灌溉及生活用水。含水層一為未受壓含水層(Unconfined aquifer)，水位以潮州斷層下各沖積扇頂區最深，深度可達45公尺左右，往西南則水位漸接近地表下數公尺處。近年來

由於大量抽取地下水，位於沿海之大庄、崎峰、大潭、東港、新園一帶地下水位已洩降至海拔零公尺以下。以位於高屏溪流域中心地帶之九曲鑽測井為例，將地下水模式所需的本土地質水文參數列於表 3.12，其中，水力傳導係數和水力坡降為沖積扇央之抽水試驗結果。

表 3.12 本土地質水文參數

參數	單位	高屏溪流域
污染區		
灌溉率	m/a	0.20
滲透率 (計算值)	m/a	0.23
飽和水力傳導係數	m/a	5.00E+03
土壤特性指數參數		4.05
總多孔性		0.40
水體容量		0.16
未飽和區		
厚度	m	20.00
飽和水力傳導係數	m/a	5.50E+03
土壤特性指數參數		4.05
總多孔性		0.40
有效多孔性		0.20
水體容量		0.16
含水層		
厚度	m	27.00
水力傳導係數	m/a	1.81E+04
水力坡降		1.64E-03
有效多孔性		0.25
地下水流速 (計算值)	m/a	118.54
地表水		
河流流量	m <sup>3</sup> /s	268.11

### 3.2.8 核種的考量

地下水模式僅評估半衰期大於 0.5 年的核種，因為短半衰期核種在地下水情節所造成的劑量微乎其微。如 3.2.1 節所述，衰變系列應考慮子核生成的情況。此外，在地下水情節中，子核的瀝濾性與水遷移性可能大於母核，故考量下列兩點以描述此現象：

1. 子核半衰期小於 0.05 年者，在水與食物途徑之中，母核與子核之濃度視為平衡。由於核種遷移與植物吸收過程緩慢，足以達到此平衡條件。
2. 若子核種為較長半衰期核種，則需另外獨立進行評估，其造成的劑量加總至母核。子核生成的考量類似 3.2.1 節。

### 3.2.9 皮膚污染

放射性懸浮粒子或灰塵可能造成工作人員皮膚污染，例如發生於切割金屬或傾置廢棄物的情節中(即 WF 與 WL 情節)。皮膚劑量可由下式評估：

$$E_{skin,C} = C_i \cdot e_{skin} \cdot t_e \cdot L_{dust} \cdot f_d \cdot f_c \cdot \rho \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (20)$$

$E_{skin,C}$ ：核種自皮膚污染途徑造成關鍵群體之皮膚等價劑量( $\mu$  Sv/a)；

$C_i$ ：外釋核種之比活度(Bq/g)；

$e_{skin}$ ：皮膚等價劑量轉換係數 $[(\mu \text{ Sv/h})/(\text{Bq/cm}^2)]$ ，其值為  $\beta$  核種(皮膚密度假設為  $4 \text{ mg/cm}^2$ )與  $\gamma$  核種<sup>(21)</sup>的貢獻總和，參見 IAEA 44 號安全報告之表 I -VI。；

$t_e$ ：曝露時間(h/a)；

$L_{dust}$ ：表皮上的塵埃厚度(cm)；

$f_d$ ：稀釋因子；

$f_c$ ：濃縮因子；

$\rho$ ：表皮上的塵埃密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\lambda$ ：衰減常數( $1/a$ )；

$t_1$ ：情節開始前的衰減時間(a)；

$t_2$ ：情節進行中的衰減時間(a)。

皮膚污染情節發生於整個工作年度(1800 h/a)。由於灰塵可就近清除，故情節前與情節中之衰減時間皆假設為 0 年。皮膚污染情節設定的參數值極為保守，應視為低機率發生情形。各參數值參見表 3.13。

表 3.13 皮膚污染情節參數

參數	單位	數值
曝露時間 ( $t_e$ )	h/a	1800
塵埃厚度 ( $L_{\text{dust}}$ )	cm	0.01
塵埃密度 ( $\rho$ )	$\text{g}/\text{cm}^3$	1.5
稀釋因子 ( $f_d$ )	-	1
濃縮因子 ( $f_c$ )	-	2
情節前衰減時間 ( $t_1$ )	d	0
情節中衰減時間 ( $t_2$ )	d	0
劑量轉換係數 ( $e_{\text{skin}}$ )	$(\mu \text{ Sv/h})/(\text{Bq}/\text{cm}^2)$	視核種而定

#### 4. 結果與討論

管理辦法所訂之各核種外釋限值有七個不同的值，分別為 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000 Bq/g，本報告即在此七個限值中每一限值各選數個核種，七個限值共選 25 個核種(參見表 4.1)，進行 IAEA 模式與本土劑量評估模式比較分析。劑量評估所需之各情節參數可在第 3 章中查詢，選定之 25 個核種的分佈係數及根轉移因子可由相關文獻查詢並依據公式(10)計算而得，表 4.2 即為選定之 25 個核種分佈係數與根轉移因子之彙總表。

台灣地區之地下水相關途徑為關鍵情節，其環境參數牽涉廣泛之水文地質調查，水文地質參數調查工作為耗時費力之長期工作；國內相關調查工作仍在進行中，尚無完成之數據；由於調查工作由南部開始，目前僅屏東平原的水文地質參數調查較完整，相關參數參見表 3.12。

屏東目前有核三廠且地質水文參數調查完整，故劑量評估比較以屏東平原與 IAEA 模式進行比較。計算各情節劑量時每一核種均以 1 Bq/g 計算，表 4.3 ~ 4.8 為各情節之屏東平原與 IAEA 模式計算之劑量結果比較表。

由表 4.3 ~ 4.8 數據顯示，由於 WF、WL、WO、RF、RH 及 RP 六個情節與水文地質及飲食參數無關，屏東平原與 IAEA 劑量值估算結果一致。RL 與地下水情節涉及水文地質及飲食參數，二者結果有顯著差異；由於國內飲食參數調查未針對年齡細分，故針對 RL 及地下水情節僅比較成人之曝露劑量。由表 4.7 數值顯示，針對 RL-A 情節，屏東平原之各核種劑量值約為 IAEA 的 1 ~ 2.5 倍，地下水情節，屏東平原之各核種劑量值約為 IAEA 的 5 ~ 14 倍，此差異主要原因為國人之飲食習性與歐美不同所致，例如國人平均年飲用水量為 1095 kg，IAEA 之年飲用水量為 350 或 700 kg。

放射性廢棄物類型與其處置程序，隨場址之特性、國情飲食、居住習慣及環境參數等差異性甚大。台灣地區之地下水相關途徑為關鍵情節，其環境參數牽涉廣泛之水文地質調查，為其能保守合理評估廢棄物外釋造成劑量值，台灣各地區之地質水文參數、各年齡群之飲食參數、國人之生活習性等參數蒐集為未來重要工作。

表 4.1 劑量評估參數分析選定之核種及其外釋限值

外釋限值 (Bq/g)	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
核種	I-129	Mn-54	Fe-59	In-114m	H-3	Fe-55	Ge-71
		Co-60	Co-58	Te-127m	Cr-51	Sr-89	Rh-103m
		Cs-137	Sr-90	Te-129m	Ni-59		
		Pu-239	Tc-99	Pu-241	Ni-63		
		Am-241	Ir-192		Ce-141		
			Cf-252				



表 4.2 選定之 25 個核種的分佈係數

核種	$K_{di}$ : 核種 i 的分佈係數 (cm <sup>3</sup> /g)		根轉移因子 $f_{t,i}$
	一般狀況	低機率	
H-3	3*	3*	4.8E+00
Cr-51	858*	858*	2.5E-04
Mn-54	200	50	3.0E-01
Fe-55	1000	160	1.0E-03
Fe-59	1000	160	1.0E-03
Co-58	1000	60	8.0E-02
Co-60	1000	60	8.0E-02
Ni-59	1000	300	5.0E-02
Ni-63	1000	300	5.0E-02
Ge-71	14*	14*	4.0E-01
Sr-89	30	15	3.0E-01
Sr-90	30	15	3.0E-01
Tc-99	3*	3*	5.0E+00
Rh-103m	44	44	1.3E-01
In-114m	213*	213*	3.0E-03
Te-127m	11*	11*	6.0E-01
Te-129m	11*	11*	6.0E-01
I-129	0.1	0.1	2.0E-02
Cs-137	1000	270	4.0E-02
Ce-141	1000	500	2.0E-03
Ir-192	59*	59*	3.0E-02
Pu-239	2000	550	1.0E-03
Pu-241	2000	550	1.0E-03
Am-241	20	20	1.0E-03
Cf-252	109	109	1.0E-03

註：\*採用 RESRAD 程式(第 6 版)使用手冊<sup>(10)</sup>表 D.3 的  $f_t$  值計算所得，其餘為 IAEA Safety Reports Series No. 44 報告的值。

表 4.3 IAEA 與屏東平原 WL 情節劑量比較

單位：μSv/a

IAEA					屏東平原				
核種	體外	吸入	嚥入	合計	核種	體外	吸入	嚥入	合計
H-3	0.00E+00	2.72E-04	8.12E-04	1.08E-03	H-3	0.00E+00	2.72E-04	8.12E-04	1.08E-03
CR-51	1.10E-01	2.02E-06	3.94E-05	1.10E-01	CR-51	1.10E-01	2.02E-06	3.94E-05	1.10E-01
MN-54	4.28E+01	8.32E-04	9.12E-03	4.28E+01	MN-54	4.28E+01	8.32E-04	9.12E-03	4.28E+01
FE-55	0.00E+00	3.08E-04	5.70E-03	6.01E-03	FE-55	0.00E+00	3.08E-04	5.70E-03	6.01E-03
CO-58	1.51E+01	2.98E-04	2.92E-03	1.51E+01	CO-58	1.51E+01	2.98E-04	2.92E-03	1.51E+01
NI-59	0.00E+00	1.02E-04	1.26E-03	1.36E-03	NI-59	0.00E+00	1.02E-04	1.26E-03	1.36E-03
FE-59	1.06E+01	3.72E-04	3.87E-03	1.06E+01	FE-59	1.06E+01	3.72E-04	3.87E-03	1.06E+01
CO-60	1.94E+02	7.11E-03	6.31E-02	1.94E+02	CO-60	1.94E+02	7.11E-03	6.31E-02	1.94E+02
NI-63	0.00E+00	3.33E-04	2.99E-03	3.32E-03	NI-63	0.00E+00	3.33E-04	2.99E-03	3.32E-03
GE-71	0.00E+00	9.20E-08	1.86E-06	1.95E-06	GE-71	0.00E+00	9.20E-08	1.86E-06	1.95E-06
SR-89	1.47E-03	8.07E-04	6.94E-03	9.22E-03	SR-89	1.47E-03	8.07E-04	6.94E-03	9.22E-03
SR-90	0.00E+00	8.38E-02	6.06E-01	6.89E-01	SR-90	0.00E+00	8.38E-02	6.06E-01	6.89E-01
TC-99	1.94E-05	3.46E-03	1.56E-02	1.91E-02	TC-99	1.94E-05	3.46E-03	1.56E-02	1.91E-02
RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IN-114m	1.13E+00	1.59E-03	1.09E-02	1.14E+00	IN-114m	1.13E+00	1.59E-03	1.09E-02	1.14E+00
TE-127m	1.12E-01	2.22E-03	1.59E-02	1.30E-01	TE-127m	1.12E-01	2.22E-03	1.59E-02	1.30E-01
TE-129m	3.53E-01	4.19E-04	4.34E-03	3.58E-01	TE-129m	3.53E-01	4.19E-04	4.34E-03	3.58E-01
I-129	3.22E-02	5.51E-02	2.20E+00	2.29E+00	I-129	3.22E-02	5.51E-02	2.20E+00	2.29E+00
CS-137	4.53E+01	7.14E-03	2.57E-01	4.56E+01	CS-137	4.53E+01	7.14E-03	2.57E-01	4.56E+01
CE-141	2.48E-01	1.97E-04	9.61E-04	2.49E-01	CE-141	2.48E-01	1.97E-04	9.61E-04	2.49E-01
IR-192	1.20E+01	1.11E-03	5.88E-03	1.20E+01	IR-192	1.20E+01	1.11E-03	5.88E-03	1.20E+01
PU-239	2.39E-03	3.46E+01	5.00E+00	3.96E+01	PU-239	2.39E-03	3.46E+01	5.00E+00	3.96E+01
PU-241	1.15E-02	1.45E+00	2.06E-01	1.67E+00	PU-241	1.15E-02	1.45E+00	2.06E-01	1.67E+00
AM-241	4.01E-01	2.91E+01	4.00E+00	3.35E+01	AM-241	4.01E-01	2.91E+01	4.00E+00	3.35E+01
CF-252	3.90E-04	1.21E+01	1.55E+00	1.36E+01	CF-252	3.90E-04	1.21E+01	1.55E+00	1.36E+01

表 4.4 IAEA 與屏東平原 WF 情節劑量比較

單位：μSv/a

IAEA					屏東平原				
核種	體外	吸入	嚥入	合計	核種	體外	吸入	嚥入	合計
H-3	0.00E+00	9.50E-05	8.12E-04	9.07E-04	H-3	0.00E+00	9.50E-05	8.12E-04	9.07E-04
CR-51	2.27E-03	1.01E-07	3.94E-05	2.31E-03	CR-51	2.27E-03	1.01E-07	3.94E-05	2.31E-03
MN-54	1.04E+00	1.46E-05	9.12E-03	1.05E+00	MN-54	1.04E+00	1.46E-05	9.12E-03	1.05E+00
FE-55	0.00E+00	1.54E-06	5.70E-03	5.70E-03	FE-55	0.00E+00	1.54E-06	5.70E-03	5.70E-03
CO-58	3.65E-01	1.49E-06	2.92E-03	3.68E-01	CO-58	3.65E-01	1.49E-06	2.92E-03	3.68E-01
NI-59	0.00E+00	5.08E-07	1.26E-03	1.26E-03	NI-59	0.00E+00	5.08E-07	1.26E-03	1.26E-03
FE-59	2.57E-01	1.86E-06	3.87E-03	2.61E-01	FE-59	2.57E-01	1.86E-06	3.87E-03	2.61E-01
CO-60	4.72E+00	3.56E-05	6.31E-02	4.78E+00	CO-60	4.72E+00	3.56E-05	6.31E-02	4.78E+00
NI-63	0.00E+00	1.67E-06	2.99E-03	2.99E-03	NI-63	0.00E+00	1.67E-06	2.99E-03	2.99E-03
GE-71	0.00E+00	4.60E-10	1.86E-06	1.86E-06	GE-71	0.00E+00	4.60E-10	1.86E-06	1.86E-06
SR-89	3.57E-05	4.04E-05	6.94E-03	7.02E-03	SR-89	3.57E-05	4.04E-05	6.94E-03	7.02E-03
SR-90	0.00E+00	4.19E-03	6.06E-01	6.10E-01	SR-90	0.00E+00	4.19E-03	6.06E-01	6.10E-01
TC-99	9.58E-09	1.73E-04	1.56E-02	1.58E-02	TC-99	9.58E-09	1.73E-04	1.56E-02	1.58E-02
RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IN-114m	2.45E-02	5.55E-04	1.09E-02	3.60E-02	IN-114m	2.45E-02	5.55E-04	1.09E-02	3.60E-02
TE-127m	2.38E-03	1.11E-04	1.59E-02	1.84E-02	TE-127m	2.38E-03	1.11E-04	1.59E-02	1.84E-02
TE-129m	8.29E-03	2.10E-05	4.34E-03	1.26E-02	TE-129m	8.29E-03	2.10E-05	4.34E-03	1.26E-02
I-129	0.00E+00	1.93E-02	2.20E+00	2.22E+00	I-129	0.00E+00	1.93E-02	2.20E+00	2.22E+00
CS-137	1.09E+00	2.50E-03	2.57E-01	1.35E+00	CS-137	1.09E+00	2.50E-03	2.57E-01	1.35E+00
CE-141	1.74E-03	9.86E-06	9.61E-04	2.71E-03	CE-141	1.74E-03	9.86E-06	9.61E-04	2.71E-03
IR-192	2.58E-01	5.56E-06	5.88E-03	2.64E-01	IR-192	2.58E-01	5.56E-06	5.88E-03	2.64E-01
PU-239	8.28E-06	1.73E+00	5.00E+00	6.73E+00	PU-239	8.28E-06	1.73E+00	5.00E+00	6.73E+00
PU-241	3.11E-09	7.24E-02	2.06E-01	2.78E-01	PU-241	3.11E-09	7.24E-02	2.06E-01	2.78E-01
AM-241	1.08E-07	1.46E+00	4.00E+00	5.45E+00	AM-241	1.08E-07	1.46E+00	4.00E+00	5.45E+00
CF-252	1.13E-08	6.03E-01	1.55E+00	2.15E+00	CF-252	1.13E-08	6.03E-01	1.55E+00	2.15E+00

表 4.5 IAEA 與屏東平原 WO、RF 及 RH 情節劑量比較

單位：μSv/a

IAEA				屏東平原			
核種	WO <sup>(1)</sup>	RF <sup>(2)</sup>	RH <sup>(1)</sup>	核種	WO	RF	RH
H-3	0.00E+00	8.04E-07	0.00E+00	H-3	0.00E+00	8.04E-07	0.00E+00
CR-51	4.54E-03	4.34E-09	3.77E-02	CR-51	4.54E-03	4.34E-09	3.77E-02
MN-54	2.07E+00	6.13E-07	6.68E+01	MN-54	2.07E+00	6.13E-07	6.68E+01
FE-55	0.00E+00	5.32E-08	0.00E+00	FE-55	0.00E+00	5.32E-08	0.00E+00
CO-58	7.29E-01	5.64E-08	1.38E+01	CO-58	7.29E-01	5.64E-08	1.38E+01
NI-59	0.00E+00	2.73E-08	0.00E+00	NI-59	0.00E+00	2.73E-08	0.00E+00
FE-59	5.14E-01	6.15E-08	6.05E+00	FE-59	5.14E-01	6.15E-08	6.05E+00
CO-60	9.43E+00	1.39E-06	3.23E+02	CO-60	9.43E+00	1.39E-06	3.23E+02
NI-63	0.00E+00	8.32E-08	0.00E+00	NI-63	0.00E+00	8.32E-08	0.00E+00
GE-71	0.00E+00	2.93E-11	0.00E+00	GE-71	0.00E+00	2.93E-11	0.00E+00
SR-89	7.15E-05	1.41E-06	1.03E-03	SR-89	7.15E-05	1.41E-06	1.03E-03
SR-90	0.00E+00	5.12E-05	0.00E+00	SR-90	0.00E+00	5.12E-05	0.00E+00
TC-99	1.92E-08	5.72E-06	3.87E-05	TC-99	1.92E-08	5.72E-06	3.87E-05
RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IN-114m	4.89E-02	3.17E-05	8.34E-01	IN-114m	4.89E-02	3.17E-05	8.34E-01
TE-127m	4.76E-03	3.79E-06	1.53E-01	TE-127m	4.76E-03	3.79E-06	1.53E-01
TE-129m	1.66E-02	8.20E-07	1.57E-01	TE-129m	1.66E-02	8.20E-07	1.57E-01
I-129	0.00E+00	2.65E-04	2.27E-01	I-129	0.00E+00	2.65E-04	2.27E-01
CS-137	2.18E+00	1.64E-05	8.44E+01	CS-137	2.18E+00	1.64E-05	8.44E+01
CE-141	3.47E-03	3.27E-07	1.11E-01	CE-141	3.47E-03	3.27E-07	1.11E-01
IR-192	5.16E-01	2.03E-07	1.20E+01	IR-192	5.16E-01	2.03E-07	1.20E+01
PU-239	1.66E-05	3.39E-02	4.77E-03	PU-239	1.66E-05	3.39E-02	4.77E-03
PU-241	6.22E-09	1.29E-03	2.86E-02	PU-241	6.22E-09	1.29E-03	2.86E-02
AM-241	2.16E-07	3.03E-02	1.00E+00	AM-241	2.16E-07	3.03E-02	1.00E+00
CF-252	0.00E+00	3.29E-02	8.15E-04	CF-252	2.26E-08	3.29E-02	8.15E-04

註：(1)RO 及 RH 情節的曝露途徑僅有體外曝露。

(2)RF 情節的曝露途徑僅有吸入。

表 4.6 IAEA 與屏東平原 RP 情節劑量比較

單位：μSv/a

IAEA					屏東平原				
核種	體外	吸入	嚥入	合計	核種	體外	吸入	嚥入	合計
H-3	0.00E+00	9.09E-07	5.74E-04	5.75E-04	H-3	0.00E+00	9.09E-07	5.74E-04	5.75E-04
CR-51	2.05E-03	6.04E-09	1.04E-05	2.06E-03	CR-51	2.05E-03	6.04E-09	1.04E-05	2.06E-03
MN-54	3.91E+00	1.20E-05	8.53E-03	3.92E+00	MN-54	3.91E+00	1.20E-05	8.53E-03	3.92E+00
FE-55	0.00E+00	4.05E-06	9.86E-03	9.87E-03	FE-55	0.00E+00	4.05E-06	9.86E-03	9.87E-03
CO-58	7.98E-01	2.24E-06	2.15E-03	8.00E-01	CO-58	7.98E-01	2.24E-06	2.15E-03	8.00E-01
NI-59	0.00E+00	2.18E-06	1.70E-03	1.70E-03	NI-59	0.00E+00	2.18E-06	1.70E-03	1.70E-03
FE-59	3.74E-01	1.63E-06	2.31E-03	3.76E-01	FE-59	3.74E-01	1.63E-06	2.31E-03	3.76E-01
CO-60	2.02E+01	1.08E-04	1.22E-01	2.03E+01	CO-60	2.02E+01	1.08E-04	1.22E-01	2.03E+01
NI-63	0.00E+00	6.65E-06	4.18E-03	4.18E-03	NI-63	0.00E+00	6.65E-06	4.18E-03	4.18E-03
GE-71	0.00E+00	3.66E-11	4.71E-08	4.71E-08	GE-71	0.00E+00	3.66E-11	4.71E-08	4.71E-08
SR-89	6.05E-05	4.36E-06	4.65E-03	4.71E-03	SR-89	6.05E-05	4.36E-06	4.65E-03	4.71E-03
SR-90	0.00E+00	4.08E-04	4.56E-01	4.57E-01	SR-90	0.00E+00	4.08E-04	4.56E-01	4.57E-01
TC-99	2.07E-06	4.58E-05	2.40E-02	2.40E-02	TC-99	2.07E-06	4.58E-05	2.40E-02	2.40E-02
RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IN-114m	4.66E-02	1.40E-05	8.01E-03	5.46E-02	IN-114m	4.66E-02	1.40E-05	8.01E-03	5.46E-02
TE-127m	7.66E-03	1.95E-05	1.99E-02	2.76E-02	TE-127m	7.66E-03	1.95E-05	1.99E-02	2.76E-02
TE-129m	8.88E-03	1.55E-06	2.04E-03	1.09E-02	TE-129m	8.88E-03	1.55E-06	2.04E-03	1.09E-02
I-129	3.43E-03	3.03E-04	1.10E+00	1.10E+00	I-129	3.43E-03	3.03E-04	1.10E+00	1.10E+00
CS-137	4.81E+00	1.87E-05	5.89E-02	4.87E+00	CS-137	4.81E+00	1.87E-05	5.89E-02	4.87E+00
CE-141	5.93E-03	5.88E-07	3.87E-04	6.32E-03	CE-141	5.93E-03	5.88E-07	3.87E-04	6.32E-03
IR-192	6.58E-01	8.36E-06	4.70E-03	6.63E-01	IR-192	6.58E-01	8.36E-06	4.70E-03	6.63E-01
PU-239	2.55E-04	2.71E-01	2.10E+00	2.37E+00	PU-239	2.55E-04	2.71E-01	2.10E+00	2.37E+00
PU-241	1.22E-03	1.02E-02	8.04E-02	9.18E-02	PU-241	1.22E-03	1.02E-02	8.04E-02	9.18E-02
AM-241	4.28E-02	2.43E-01	1.85E+00	2.13E+00	AM-241	4.28E-02	2.43E-01	1.85E+00	2.13E+00
CF-252	3.95E-05	2.50E-01	2.08E+00	2.33E+00	CF-252	3.95E-05	2.50E-01	2.08E+00	2.33E+00

表 4.7 IAEA 與屏東平原 RL-A(1)情節劑量比較

單位：μSv/a

IAEA				屏東平原			
核種	吸入	嚥入	合計	核種	吸入	嚥入	合計
H-3	2.09E-07	3.39E-02	3.39E-02	H-3	2.09E-07	8.59E-02	8.59E-02
CR-51	7.97E-09	4.04E-10	8.37E-09	CR-51	7.97E-09	1.02E-09	8.99E-09
MN-54	4.62E-06	5.74E-02	5.74E-02	MN-54	4.62E-06	1.45E-01	1.45E-01
FE-55	1.57E-06	1.98E-04	2.00E-04	FE-55	1.57E-06	5.02E-04	5.03E-04
CO-58	1.51E-06	3.58E-04	3.59E-04	CO-58	1.51E-06	9.06E-04	9.08E-04
NI-59	6.24E-07	1.66E-02	1.66E-02	NI-59	6.24E-07	4.21E-02	4.21E-02
FE-59	1.91E-06	8.53E-07	2.76E-06	FE-59	1.91E-06	2.16E-06	4.07E-06
CO-60	4.45E-05	1.97E-01	1.97E-01	CO-60	4.45E-05	4.99E-01	4.99E-01
NI-63	2.29E-06	3.92E-02	3.92E-02	NI-63	2.29E-06	9.93E-02	9.93E-02
GE-71	4.09E-10	1.10E-13	4.09E-10	GE-71	4.09E-10	2.80E-13	4.09E-10
SR-89	3.91E-06	9.74E-04	9.78E-04	SR-89	3.91E-06	2.47E-03	2.47E-03
SR-90	1.77E-04	7.82E+00	7.82E+00	SR-90	1.77E-04	1.98E+01	1.98E+01
TC-99	1.92E-05	2.82E+00	2.82E+00	TC-99	1.92E-05	7.14E+00	7.14E+00
RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	RH-103m	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IN-114m	5.96E-06	1.54E-05	2.13E-05	IN-114m	5.96E-06	3.89E-05	4.49E-05
TE-127m	1.17E-05	8.40E-02	8.40E-02	TE-127m	1.17E-05	2.13E-01	2.13E-01
TE-129m	2.27E-06	1.89E-04	1.91E-04	TE-129m	2.27E-06	4.79E-04	4.81E-04
I-129	1.73E-04	1.94E+00	1.94E+00	I-129	1.73E-04	4.91E+00	4.91E+00
CS-137	2.18E-05	4.42E-01	4.42E-01	CS-137	2.18E-05	1.12E+00	1.12E+00
CE-141	1.04E-06	1.66E-06	2.70E-06	CE-141	1.04E-06	4.21E-06	5.25E-06
IR-192	6.65E-06	1.61E-04	1.67E-04	IR-192	6.65E-06	4.07E-04	4.14E-04
PU-239	2.40E-01	2.20E-01	4.60E-01	PU-239	2.40E-01	5.57E-01	7.97E-01
PU-241	9.98E-03	8.74E-03	1.87E-02	PU-241	9.98E-03	2.22E-02	3.21E-02
AM-241	2.01E-01	3.51E-01	5.53E-01	AM-241	2.01E-01	8.90E-01	1.09E+00
CF-252	8.24E-02	5.32E-01	6.15E-01	CF-252	8.24E-02	1.35E+00	1.43E+00

註：(1)RL 情節之曝露途徑為吸入及嚥入，其劑量評估涉及食物攝取量；台灣食物攝取量調查並未區分成人與小孩，故僅就成人部分進行比較。

表 4.8 IAEA 與屏東平原地下水情節劑量比較

單位：μSv/a

IAEA						屏東					
核種	非葉菜	葉菜	井水	魚類	河水	核種	非葉菜	葉菜	井水	魚類	河水
H-3	1.54E-02	1.99E-02	2.95E-01	1.01E-06	2.35E-04	H-3	8.32E-02	5.89E-02	3.87E+00	8.31E-07	3.82E-05
MN-54	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	MN-54	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FE-55	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	FE-55	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
NI-59	1.74E-06	2.55E-06	4.03E-05	1.38E-08	3.22E-08	NI-59	5.15E-06	6.56E-06	5.60E-04	1.20E-08	5.53E-09
CO-60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	CO-60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
NI-63	2.64E-34	3.86E-34	6.09E-33	2.09E-36	4.87E-36	NI-63	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
TC-99	5.12E-01	4.56E-01	4.98E+00	3.41E-04	3.98E-03	TC-99	6.80E+00	2.61E+00	7.26E+01	3.11E-04	7.16E-04
I-129	1.60E+01	2.49E+01	4.04E+02	5.53E-02	3.23E-01	I-129	2.36E+01	6.30E+01	6.23E+03	5.35E-02	6.15E-02
CS-137	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	CS-137	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
PU-239	2.04E-03	3.17E-03	5.16E-02	5.30E-06	4.12E-05	PU-239	1.08E-03	3.14E-03	3.13E-01	2.02E-06	3.09E-06
AM-241	2.04E-01	3.17E-01	5.16E+00	5.30E-04	4.12E-03	AM-241	1.67E-01	4.84E-01	4.83E+01	3.11E-04	4.77E-04
CF-252	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	CF-252	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
SR-90	4.63E-05	6.77E-05	1.07E-03	2.20E-07	8.54E-07	SR-90	7.31E-10	9.32E-10	7.95E-08	1.02E-12	7.85E-13
PU-241	6.03E-03	9.39E-03	1.53E-01	1.57E-05	1.22E-04	PU-241	4.94E-03	1.43E-02	1.43E+00	9.20E-06	1.41E-05

註：FE-59、CO-58、IR-192、IN-114m、TE-127m、TE-129m、CR-51、CE-141、SR-89、GE-71、RH-103m 等核種，因其半衰期小於 0.5 年，不需計算地下水情節劑量。

## 5. 結語

「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」第六條規定：放射性廢棄物依輻射劑量評估，一年內所造成個人之有效劑量不超過 0.01 毫西弗，且集體劑量不超過 1 人西弗者，經提出輻射劑量評估報告及外釋計畫，報請主管機關核准後，始得外釋。由此可知一定活度或比活度以下放射性廢棄物除以偵檢量測方式驗證符合解除管制標準外，亦可採用劑量評估方式申請外釋。故配合法規需求，發展本土適用之劑量評估模式實為刻不容緩。

劑量評估模式為曝露情節分析，依最常採取的放射性廢棄物處理方式，設定適當的情節。本文分析彙整 IAEA 及歐美等國使用之劑量評估模式與情節分析資料，並參考國內現況，初步擬訂保守的本土情節與劑量評估程序。

放射性廢棄物類型與其處置程序，隨場址之特異性而顯繁複，情節假設須具保守理念與本土代表性，以顧及產、官、學、研各界及社會大眾之接受程度。經評估歐美重要文獻與符合國際趨勢前提下，本文以 IAEA 44 號安全報告之情節架構為主，考量國情飲食、居住習慣及環境參數，調整為本土情節。台灣地區之地下水相關途徑為關鍵情節，其環境參數牽涉廣泛之水文地質調查，本文初步以地下水資源豐富之屏東平原為代表場址，可供未來劑量評估工作參考。

本文建置本土輻射曝露情節架構，以發展劑量評估模式與程式，可應用於一定活度或比活度以下放射性廢棄物之外釋申請，期使「以評估劑量申請外釋」方式適切用於解除管制實務。



## 參考文獻

1. 一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法，中華民國 93 年 12 月 29 日會物字第 0930047668 號函發文實施。
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities, NUREG-1640, Vol. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (2003).
5. Deckert A, Thierfeldt S, Kugeler E, Neuhaus I, Definition of Clearance Levels for the Release of Radioactively Contaminated Buildings and Building Rubble, Radiation Protection No 114, European Commission, Final Report (1999).
6. European Commission, Methodology and models used to calculate individual and collective doses from the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations, Radiation Protection No 117, Luxembourg, Technical report (2000).
7. European Commission, Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption- Part I Guidance on the General Clearance Levels for Practices, Radiation Protection No 122, European Commission (2000).

8. J.-J. Cheng, B. Kassas, C. Yu, et al., RESRAD-RECYCLE: A Computer Model for Analyzing the Radiological Doses and Risks Resulting from the Recycling of Radioactive Scrap Metal and the Reuse of Surface-contaminated Material and Equipment, ANL/EAD-3 (2000).
9. 中華民國自來水協會會刊，第 18 捲，第二期，民國 88 年 5 月。
10. YU, C., et al., User's Manual for RESRAD Version 6, Argonne Natl Lab., IL (2001).
11. YU, C., et al., User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3, Argonne Natl Lab., IL (2003).
12. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, Publication 74, Pergamon Press, Oxford and New York (1996).
13. The MicroShield Team, MicroShield User's Manual, Version 5, Grove Engineering Inc., Rockville, Maryland (1996).
14. Clapp, R.B, and G.M. Hornberger, Empirical Equations For Some Soil Hydraulic Properties, Water Resources Research 14:601-604 (1978).
15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).
16. 曹以松，地下水，中國土木水利工程學會，1993。
17. 行政院農業委員會統計室，93 年農業統計年報，中華民國 93 年。

- 18.經濟部水利署，台灣地區地下水觀測網整體計畫，  
<http://www.wra.gov.tw/>，中華民國86年。
- 19.丁澈士，屏東平原地下水補注之研究現況及未來發展，  
<http://mpa.ngo.org.tw/why-no-dam/replace/replace3.html>，1998。
- 20.陳國彥，臺灣的河川流域之降水量與逕流量形式，師範大學地理系，地理研究報告，1988。
- 21.KOCHER, D.C., ECKERMANN, K.F., Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface, *Health Phys.* 53 2 (1987) 135–141.