

行政院原子能委員會
委託研究計畫 109 年度期末報告

109 至 110 年度鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業
人員之輻射劑量及風險評估研究
(勞務採購案)

2020-2021 Project: Study on the Radiation Dose and Risk Assessment of
Recycling and Smelting Workers Related to Radiation Anomalies in Steel

計畫編號： AEC10812046L

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：許芳裕

共同主持人：張似璫

聯絡電話：(03)5715131 分機 62096

計畫參與人員：賴柏倫、田能全、陳永泰、許皓翔、陳瑋、蔡雅涵、李
茜茹、陳邵壙

報 告 日 期 ： 1 0 9 年 1 2 月 1 5 日

目 錄

目 錄	ii
中文摘要.....	iv
英文摘要.....	v
壹、前言(計畫緣起).....	1
貳、研究目的.....	2
參、研究方法與過程.....	3
工作項目 1. 對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查	3
工作項目 2. 依天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析 探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境 與輻射異常物關係.....	5
工作項目 3. 蒐集、研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢 與處理程序.....	6
工作項目 4. 蒐集與建置國際相關輻射防護評估程式，並分 析比較其特性，建立輻射防護評估程式能力，分析比 較並找出最合適之輻射防護評估程式	6
工作項目 5. 以具代表性之訪查結果為案例，比較驗證各式 輻射防護評估程式之優劣，尋求最合適之評估程式	10
工作項目 6. 對國內鋼鐵業者各項工作單元、場所之從業人 員接觸不同強度天然輻射異常物情境模擬分析、天然 輻射異常物誤熔情境模擬評估.....	11
工作項目 7. 探討各種情境下接觸不同強度天然輻射異常物 從業人員之輻射劑量與風險評估	14
工作項目 8. 提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案).....	15
研究團隊說明	16
肆、主要發現與討論.....	17
一、對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查(工作項目 1).....	17
二、依天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼	

鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射 異常物關係 (工作項目 2).....	21
三、蒐集研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程 序 (工作項目 3).....	24
四、蒐集與建置國際相關輻射防護評估程式，並分析比較 其特性。建立輻射防護評估程式能力，分析比較並 找出最合適之輻射防護評估程式 (工作項目 4).....	32
五、以具代表性之訪查結果為案例，比較驗證各式輻射防 護評估程式之優劣，尋求最合適之評估程式 (工作 項目 5)	42
伍、結論	57
陸、參考文獻.....	59
附件一、輻射異常物案例：不同平面之輻射劑量分布曲線.....	61

中文摘要

國內每年皆有數十件鋼鐵輻射異常物之通報案件，究其輻射異常物原因，大多數屬於鋼鐵管路或組件等廢鋼材含有天然放射性物質沉積管垢；少數屬於人工放射性物質之廢棄射源。本計畫分二年期進行，內容包括研析適用於評估經手或處置鋼鐵輻射異常物之相關人員輻射影響之商業化輻射防護評估程式，並透過蒐集與研析國際鋼鐵輻射異常物之管制作法與偵檢與處理程序，及訪查與檢查鋼鐵業者偵檢與處理鋼鐵輻射異常物之現況，規劃相關評估模擬情境，以確認相關從業人員之輻射劑量與健康風險。此計畫並將提出與建立鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，供主管機關參考，以精進及強化國內發現鋼鐵輻射異常物後之輻射管制效能。

關鍵詞：鋼鐵輻射異常物、輻射安全、輻防管制、最適化、合理抑低、
輻射劑量

英文摘要

There are dozens of reported cases of iron and steel radiation anomalies in Taiwan every year. The reasons for the radiation anomalies are that most of the waste steel materials such as steel pipes or components contain natural radioactive material deposits, and a small number of scrap metal material containing waste radioactive sources which are artificial radioactive materials. This project is planned to carry out for two years. The content includes research and analysis of commercial computer codes on radiation protection assessment, which codes are suitable for assessing the radiation impact of persons involved in handling or disposing of steel radiation anomalies. Through the collection and analysis of the international control/management measures and detection/processing procedures of steel radiation anomaly, and comprehending current detect and dealing situation of steel radiation anomaly by means of visits and inspections of the steel industry. With the planned relevant simulation scenarios to evaluate and confirm the relevant workers' radiation doses and health risks. Besides, this project will propose and establish the optimal operation process planning and reasonable control measures for iron and steel radiation anomalies for reference by the competent authorities to improve and strengthen the effectiveness of radiation control after the discovery of iron and steel radiation anomalies in Taiwan.

keywords : Iron and steel radiation anomalies, radiation safety, radiation control, optimization, ALARA, radiation dose

壹、前言(計畫緣起)

我國自放射性污染建築物事件發生之後，原能會即積極輔導國內 18 家具熔煉爐之鋼鐵業者建立鋼鐵輻射偵檢制度，以確保有效防範放射性物質誤熔事件。基於國內每年皆有數十件鋼鐵輻射異常物之通報案件，究其輻射異常物原因，大多數屬於鋼鐵管路或組件等廢鋼材含有天然放射性物質沉積管垢；少數屬於人工放射性物質之廢棄射源[1]。又「放射性污染建築物事件防範及處理辦法」規範[2]，鋼鐵業者實施原料及產品輻射偵檢，如發現有異常情形，應儘速將輻射異常物檢測出，並隔離管制妥善保[3]，此對於接觸輻射異常物之工作人員，或是經手鋼鐵異常物之資源回收業者、運送司機等相關人員，其輻射劑量與健康風險需進一步確認與探討。

針對工作人員之輻射劑量與健康風險評估，國際間已發展出成熟之商業化輻射防護評估程式，如 MicroShield 程式主要應用於評估光子/ γ 射線等輻射源所造成輻射曝露所需之屏蔽及其輻射劑量之計算，是目前世界各國廣泛採用之輻射源評估程式[4,5]，而鋼鐵輻射異常物不管是天然或是人工輻射源，大多產生 γ 射線為主，故應用 MicroShield 程式即可有效評估相關從業人員所接受輻射劑量及其風險。而 RESRAD 程式是近年來國際上常用之輻射防護評估程式[6]，可應用於核能電廠營運及除役評估對環境造成輻射污染評估外，亦有國外研究學者曾用於評估埃及地區某家煉油廠所廢棄鋼鐵輻射異常物[7,8]，以瞭解相關人員所造成之輻射曝露。因此，藉由本計畫之推動，期希研析適用於評估經手或處置鋼鐵輻射異常物之相關人員輻射影響之商業化輻射防護評估程式，並透過蒐集國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序，及檢/訪查鋼鐵業者偵檢與處理鋼鐵輻射異常物之現況，規劃相關評估模擬情境，以確認相關從業人員之輻射劑量與健康風險。

此外，鋼鐵業者建立門式輻射偵檢儀、偵檢程序及後續相關處置，自 87 年起實施迄今已行之有年，亦可藉由本計畫蒐集與研析國際鋼鐵輻射異常物之管制與處置作法[9-16]，適度檢視我國相關偵檢標準、程序與管理作法[3]，並提出與建立鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，供主管機關參考，以精進及強化國內發現鋼鐵輻射異常物後之輻射管制效能。

貳、 研究目的

本計畫之研究目標如下：

- 一、 建立輻射防護評估程式能力，分析比較並找出最合適之輻射防護評估程式。
- 二、 逐年針對各項工作單元、場所之從業人員作業環境進行分析探討。
- 三、 模擬評估國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之輻射劑量與風險。
- 四、 最適化作業流程規劃與合理抑低措施擬訂。。

109 年預期完成之工作項目：

1. 對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查。(工作項目 1)
2. 依天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射異常物關係。(工作項目 2)
3. 蒐集、研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序。(工作項目 3)
4. 蒐集與建置國際相關輻射防護評估程式，並分析比較其特性。建立輻射防護評估程式能力，分析比較並找出最合適之輻射防護評估程式。(工作項目 4)
5. 以具代表性之訪查結果為案例，比較驗證各式輻射防護評估程式之優劣，尋求最合適之評估程式。(工作項目 5)

參、研究方法與過程

本計畫規劃逐年針對通報之輻射異常物發現後之各項工作單元、場所之從業人員作業環境進行分析探討。對於接觸輻射異常物相關工作人員(如資源回收業者、運送司機與鋼鐵廠保全、工安、分類裁切工作人員等)，因需偵檢或處理輻射異常物，其輻射劑量與健康風險需進一步評估與確認。本計畫亦將蒐集與研析國際鋼鐵輻射異常物之管制與處置作法^[9-16]，適度檢視我國相關偵檢標準、程序與管理作法[3]，並提出與建立含有天然放射性物質沉積鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施。此外，藉由建置現今發展成熟之商業化輻射防護評估程式，建立輻射防護評估程式能力，分析比較並找出最合適之輻射防護評估程式。並依天然、人工輻射異常物處理情境之從業人員作業環境與輻射異常物關係，模擬評估國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之輻射劑量與風險。本計畫規畫進行之工作項目分述如下：

工作項目 1. 對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查

國內已推動熔煉爐鋼鐵廠設置門框式輻射偵檢系統，惟每年通報之輻射異常物多達數十件，國內鋼鐵廠歷年發現輻射異常物之數量統計，列於表 3-1^[1]。自 1995 年統計至 2019 年，來自國內之輻射異常物有 458 件，來自國外之輻射異常物有 654 件，總計有 1,112 件，平均每年發現 45 件(近 10 年之平均為 52.4 件)；最多為 2007 年的 116 件，最少為 1996 年的 5 件。

表 3-1 鋼鐵廠歷年發現輻射異常物之數量統計

年份 來源	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
國內	8	4	5	3	13	15	7	14	16	22	20	33	51	20
國外	1	1	4	9	5	25	14	17	13	7	14	26	65	66
合計	9	5	9	12	18	40	21	31	29	29	34	59	116	86
年份 來源	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			
國內	22	31	21	17	20	29	32	16	19	11	9			
國外	68	20	33	31	48	41	21	27	33	42	23			
合計	90	51	54	48	68	70	53	43	52	53	32			
年份 來源	歷年合計													
國內	458													
國外	654													
合計	1,112													

依據鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則規定，鋼鐵業者測得距輻射異常物任一表面一公尺處之輻射劑量率每小時 $20 \mu\text{Sv/h}$ 以下時，應採行下列措施：

1. 先將該輻射異常物隔離，並於四周設置臨時圍籬及輻射警示標誌，防止無關人員接近。
2. 於四十八小時內以電話通報原能會，並填具鋼鐵業者異常輻射狀況報告表，及檢附該輻射異常物照片，以電子郵件傳送原能會。

本計畫研究團隊將於原能會通知鋼鐵業者通報發現輻射異常物後，即安排對該鋼鐵業者之現場檢/訪查，協助原能會人員針對其發現之輻射異常物進行研判、分析、調查與追蹤其後續之處理，並對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查。現場檢/訪查將參考原子能委員會鋼鐵業輻射偵檢作業檢查紀錄表(表 3-2)進行。

表 3-2 原子能委員會鋼鐵業輻射偵檢作業檢查紀錄表(空白表單)

鋼鐵廠名稱：		負責人：	聯絡人：
地 址：		電話：	
作業場所地址：			
偵檢作業負責人姓名：		輻射偵檢作業認可證明字號：	
設有熔煉爐 ☒ 是，熔煉爐規模 110 噸 ☐ 否			
項次	項 目	說 明	
一	基本資料		
二	輻射偵檢作業程序		
三	門框式輻射偵檢器之警報測試及功能		
四	增設其他型式輻射偵檢器之評估		
五	輻射異常物處理機制		
六	集塵設備功能		
七	副產品、事業廢棄物等之儲放及處理		
八	輻射偵檢及發現輻射異常物處理之紀錄		
九	其他		

日期：____年____月____日

檢查人員：_____

鋼鐵廠負責人或代理人：_____

陪同人員：_____

在進行現場檢/訪查時，本計畫以手持式偵檢器(塑膠閃爍偵檢器 AT1121)對輻射異常物進行輻射劑量偵檢，在其輻射劑量最大之貼近表面位置、30 公分與 1 公尺之不同平面，在每個平面之輻射劑量最大位置為中心的至少 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 之面積(視實際劑量率大小)中，各偵測至少 9 至 25 個位置點之劑量，以建立該平面之輻射劑量分布曲線。如圖 3-1 所示。

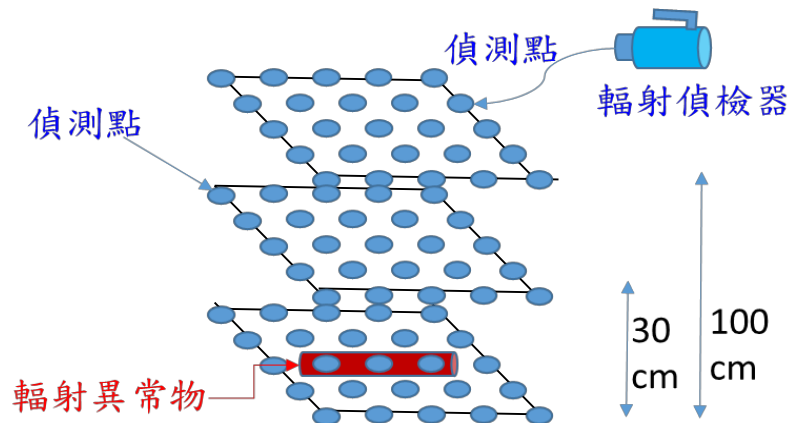


圖 3-1 以手持式偵檢器對輻射異常物附近之空間進行輻射劑量偵檢之偵測點示意圖

工作項目 2. 依天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射異常物關係

國內鋼鐵廠歷年發現輻射異常物依據其含有的是天然放射性物質沉積管垢或是含有屬於人工放射性物質之廢棄輻射源之數量分類統計，列於表 3-3^[1]。自 1995 年統計至 2019 年，含有天然放射性物質之輻射異常物有 864 件，含有人工放射性物質之輻射異常物有 248 件，總計有 1112 件，平均每年發現含有天然放射性物質之輻射異常物約有 34.6 件/年；平均每年發現含有人工放射性物質之輻射異常物約有 9.9 件/年。

鋼鐵廠發現輻射異常物之後續處理，依據「鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則」依其來源為國內或國外，如經確認來自國內供應商，則請業者通報原能會轉知核能研究所協助派員先行收回暫存保管；如經確認輻射異常物來自國外供應商，且其為密封放射性物質時，則應報經原能會核准後退回原出口國；如為天然放射性物質，以退回原出口國為原則，出口前應報經原能會核准。若無法確知國外供應來源，或天然放射性物質不退回原出口國時，得由鋼鐵業者向原能會申請協助處理。

表 3-3 鋼鐵廠歷年發現輻射異常物，之核種為天然或人工之分類統計

年份 來源	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
天然核種	3	2	4	10	11	21	18	21	24	22	30	18	66	79
人工核種	6	3	5	2	7	19	3	10	5	7	4	41	50	7
合計	9	5	9	12	18	40	21	31	29	29	34	59	116	86
年份 來源	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			
天然核種	84	36	41	35	58	69	48	40	50	45	29			
人工核種	6	15	13	13	10	1	5	3	2	8	3			
合計	90	51	54	48	68	70	53	43	52	53	32			
年份 來源	歷年合計													
天然核種	864													
人工核種	248													
合計	1,112													

本計畫依上述天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射異常物關係，並參考進行現場檢/訪查之實測(如圖 3-1)劑量資料，建立國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之實測輻射劑量評估模式。

工作項目 3. 蒐集、研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序

考量國內鋼鐵業者建立門式輻射偵檢儀、偵檢程序及後續相關處置，自 87 年起實施迄今已行之有年，本計畫規劃蒐集、研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序^[9,10,11,16]，並依據現場檢/訪查鋼鐵業者偵檢與處理鋼鐵輻射異常物之現況，規劃相關評估模擬情境。適度檢視我國現有之相關偵檢標準、程序與管理作法^[3]。

工作項目 4. 蒐集與建置國際相關輻射防護評估程式，並分析比較其特性，建立輻射防護評估程式能力，分析比較並找出最合適之輻射防護評估程式

本計畫規劃於第一年(109 年)針對國際相關輻射防護評估程式之進行資料蒐集，並建立相關程式的運跑能力，分析比較後找出最合適之輻射防護評

估程式。目前國際間針對鋼鐵輻射異常物相關回收作業人員之輻射劑量評估程式最常見的是 RESRAD-RECYCLE^[6-8]，其他如 MicroShield^[4,5]及 MCNP^[17]程式也均為輻射劑量評估常見程式，相關程式的內容與方法，分別敘述如下：

1. RESRAD-RECYCLE

RESRAD-RECYCLE 是由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory)開發的 RESRAD 系列程式之一，旨在評估除污(Decontamination)，除役(Decommissioning)和整治(Remediation)的劑量和風險。RESRAD-RECYCLE 是一種路徑分析工具，能夠計算由放射性廢金屬回收以及受污染材料和設備的再利用產生的潛在輻射劑量和風險。

RESRAD-RECYCLE 將污染物的再利用分為四類，如圖 3-2 所示：

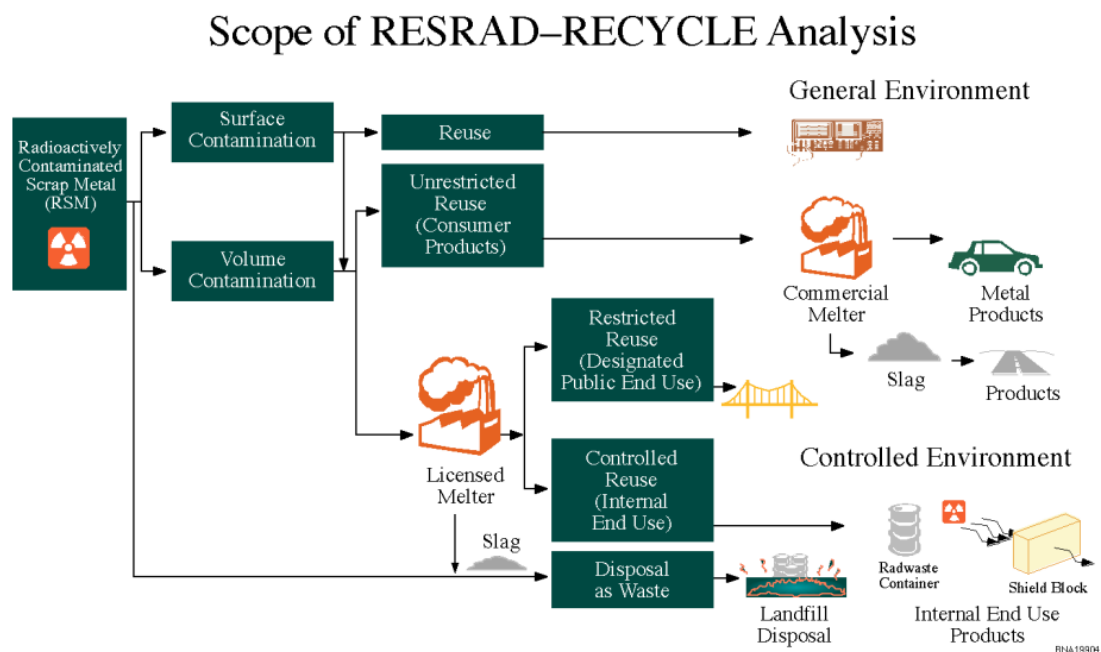


圖 3-2 RESRAD-RECYCLE 對污染物的再利用分類

- (1) 直接再利用(Direct reuse)：污染物以原始形式再利用，不經熔煉過程。可直接再利用的材料和設備通常包括機械和測量工具、辦公家具以及除役建物。
- (2) 非限制性再利用(Unrestricted reuse)：污染物回收後，運送到商業冶煉廠，用於生產諸如汽車，煎鍋和飲料罐等產品。
- (3) 限制性再利用(Restricted reuse)：污染物回收後，運送到許可的冶煉廠，用於生產特定的產品，以最大程度地減少公眾暴露，例如，用於道路的製造爐渣、施工中使用的路面或鋼材。此類別通常是數

量龐大且壽命短的污染物，因此，當其活度低於外釋標準時，即可作為公共產品再利用。

- (4) 管制再利用(Controlled reuse)：此類別通常是長壽命的污染物，回收後為避免公眾曝露，因此，歸類為管制再利用，具代表性的再利用情節為製成屏蔽塊或放射性廢棄物貯存容器，以供核設施使用。

為了進行劑量評估，RESRAD-RECYCLE 定義了污染物回收再利用的步驟：

- (1)廢料運送，(2)廢料冶煉，(3)鑄錠運送，(4)產品製造，(5)產品分銷和(6)成品的使用。

RESRAD-RECYCLE 考慮的曝露情境列於表 3-4，大致可分為三大類：

- (1) 工作人員情境：評估處理回收材料的人員劑量和風險。
 - a. 將放射性廢金屬從產地運送到冶煉廠(步驟 1，廢料運送)
 - b. 工業產品金屬錠的冶煉工藝和製造(步驟 2，廢料冶煉)
 - c. 將金屬錠運送到產品製造廠(步驟 3，鑄錠運送)
 - d. 產品製造(步驟 4，產品製造)
 - e. 產品分發(步驟 5，產品分銷)
- (2) 產品用途情境：評估使用或以其他方式接觸回收的放射性物質所製造產品的人員劑量和風險。
 - a. 消費產品
 - b. 公共產品(人行道，橋樑，和建築物)
 - c. 受控產品(屏蔽塊和放射性廢物容器)
 - d. 受表面污染的重複使用產品(工具和受污染的建築物)
- (3) 運送情境：評估運送放射性廢金屬對一般民眾的劑量和風險。

表 3-4 RESRAD-RECYCLE 曝露情境

說明	適用於金屬	
	鋼	鋁
(1)工作人員情境		
廢料運送：廢料切割	是	是
廢料運送：廢料裝載	是	是
廢料運送：司機	是	是
廢料冶煉：廢料處理	是	是
廢料冶煉：冶煉	是	是
廢料冶煉：冶煉廠裝載	是	是
廢料冶煉：熔爐操作員	是	是
廢料冶煉：袋式除塵器操作員	是	是
廢料冶煉：煉油廠	是	是
廢料冶煉：鑄錠	是	是

廢料冶煉：小物件鑄造	是	是
廢料冶煉：爐渣	是	是
鑄錠運送：鑄錠裝載	是	是
鑄錠運送：司機	是	是
初始製造：倉庫	是	是
初始製造：板材製造	是	是
初始製造：線材製造	是	是
最終製造：板材處理	是	是
最終製造：線材處理	是	是
產品分銷：產品裝載	是	是
產品分銷：司機	是	是
產品分銷：板材組裝	是	是
產品分銷：倉庫	是	是
(2)產品用途情境		
消費產品：停車場	是	是
消費產品：房間/辦公室和外牆	是	是
消費產品：家電	是	是
消費產品：汽車	是	是
消費產品：大船/小船	否	是
消費產品：辦公家具	是	是
消費產品：家用家具	是	是
消費產品：煎鍋	是	是
消費產品：飲料罐	否	是
公共產品：路面	是	是
公共產品：鋼筋建物	是	否
公共產品：具有測地線的圓頂建物	否	是
公共產品：橋樑	是	是
管制產品：屏蔽塊	是	否
管制產品：放射性廢棄物貯存容器	是	否
再利用產品情景		
再利用產品：工具	是	是
再利用產品：建物	是	是
(3)運送情境		
廢料運送：民眾曝露	是	是

2. MicroShield

MicroShield 程式是 Grove 軟體公司發展的程式，該程式具備

- (1) 16 種常見幾何結構，分析屏蔽並估計 γ 射線的曝露；
- (2) ICRP107 的核衰變資料(Nuclear decay data)，提供 97 種元素和 1252 種放射性同位素；
- (3) ANSI/ANS-6.4.3-1991 的衰減係數資料、美國核能學會(American Nuclear Society)提供 100 種元素及空氣、水、混凝土、工程材料的 γ 射線衰減係數和增建因子；

- (4) 提供 12 種內建材料並對每個區域允許添加八種使用者“自定義”的材料；
- (5) 經過 ANSI 及 ESIS(European Shielding Information Service)的驗證。

基於上述能力，程式能夠：設計輻射防護屏蔽和裝載容器；評估人員和物質的輻射曝露；為維護任務，選擇臨時屏蔽；從輻射偵測，推算放射性廢棄物的強度；降低人員曝露；教育輻射和屏蔽原理。因此，使用的領域相當廣泛，包含石油、天然氣業者以及其他欲評估受污染設備和材料的直接曝露的業者所採用。

3. MCNP

MCNP 程式是美國洛斯阿拉莫斯國家實驗室(Los Alamos National Laboratory)發展的三維通用性蒙地卡羅法計算機程式，該程式具備的能力與特色

- (1) 37 種輻射類型，最高能量達 TeV 水平；
- (2) ENDF (Evaluated Nuclear Data File)截面資料庫的連續能量截面，相較於多群截面，它能更精確地描述截面隨能量的變化並可靠的模擬輻射遷移行為；
- (3)使用者亦可選擇程式內建的核反應物理模型進行輻射遷移的模擬；
- (4)具有多種計分模式。

基於上述能力，程式應用的領域：輻射防護、輻射屏蔽、醫學物理學、核臨界安全、偵檢器的設計、油井探測、加速器設計、反應器(分裂與融合)設計、去污和除役等。

工作項目 5. 以具代表性之訪查結果為案例，比較驗證各式輻射防護評估程式之優劣，尋求最合適之評估程式

本計畫規劃於第一年(109 年)針對國際相關輻射防護評估程式之進行資料蒐集，並建立相關程式的運跑能力，分析比較後找出最合適之輻射防護評估程式。實際作法將依據現場檢/訪查實際對鋼鐵業發現輻射異常物進行劑量偵測(工作項目 1)之結果，建立國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之實測輻射劑量評估模式(工作項目 2)，再以現場檢/訪查中具代表性(選擇劑量率較高者)之結果為案例，比較實測之輻射劑量評估模式與工作項目 4 所建置之輻射防護評估程式之結果差異，進程式驗證，

尋求最合適之評估程式。

RESRAD-RECYCLE 是目前國際間針對核設施除役所拆除之廢棄鋼鐵所含輻射異常物所造成之輻射劑量常見的評估程式，其他如 MicroShield 及 MCNP 程式亦均為常見使用於相關鋼鐵輻射異常物回收作業人員輻射劑量評估之程式(圖 3-3)。

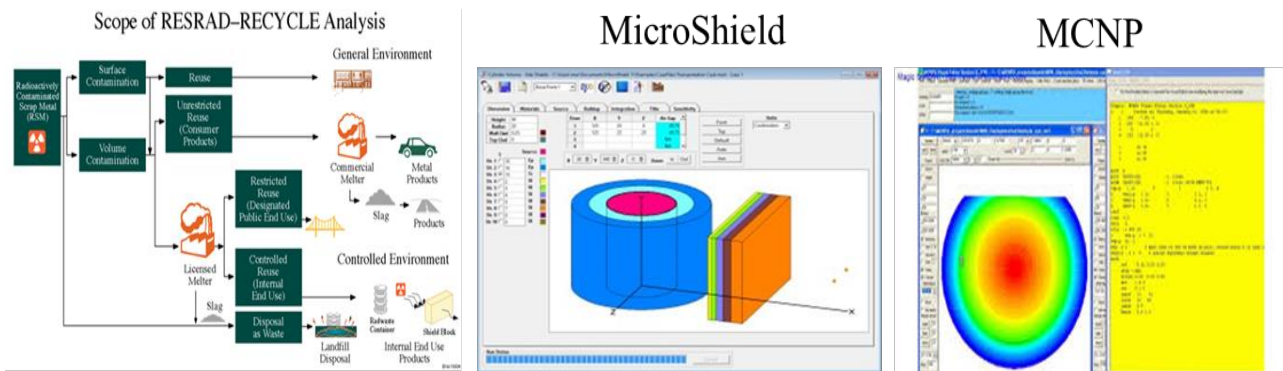


圖 3-3 RESRAD-RECYCLE(左)、MicroShield(中)及 MCNP (右)程式示意圖

工作項目 6. 對國內鋼鐵業者各項工作單元、場所之從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境模擬分析、天然輻射異常物誤熔情境模擬評估 (110 年)

針對國內鋼鐵從業各項工作單元、場所之從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境模擬分析以及天然輻射異常物誤熔情境模擬評估，將參考相關國際重要文獻報告之輻射曝露情節，初步摘錄重點如下：

1. IAEA44 號安全報告^[12]的曝露情節顯示於圖 3-4，曝露情節的代號、描述、曝露對象與曝露途徑整理於表 3-5。
2. NUREG-1640^[14]的金屬廢棄物之曝露情節顯示於圖 3-5。
3. NCRP REPORT No. 141^[15] 的金屬廢棄物處理流程顯示於圖 3-6，圖中亦列出各流程牽涉的相關人員。
4. Radiation protection 89^[16]的金屬廢棄物處理流程顯示於圖 3-7。

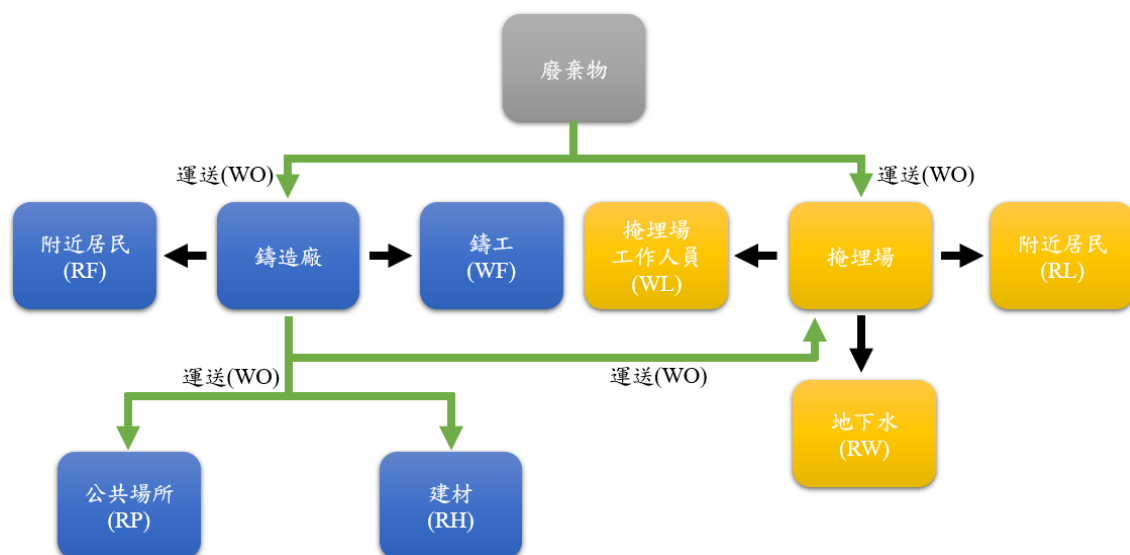


圖 3-4 IAEA 44 號安全報告的曝露情節

表 3-5 IAEA 44 號安全報告的曝露情節定義與描述

情景	描述	曝露個體	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
			吸入
			嚥入
WF	鑄造廠的鑄工	工作人員	體外曝露
			吸入
			嚥入
WO	其他工作人員(如司機)	工作人員	設備或貨物之體外曝露
RL-C	掩埋場或其他設施附近的居民	兒童 (1-2 歲)	吸入
			嚥入污染土地的農作物
RL-A		成人 (>17 歲)	吸入
			嚥入污染土地的農作物
RF	鑄造廠附近的居民	兒童 (1-2 歲)	吸入
RH	居住在污染物建造的房子	成人 (>17 歲)	體外曝露
RP	居住在污染物建造的公共場所附近的居民	兒童 (1-2 歲)	體外曝露
			吸入
			嚥入
RW-C	居民使用井水或食用來自受污染的魚貝類	兒童 (1-2 歲)	嚥入受污染的飲用水、農作物、魚貝類
RW-A		成人(>17 歲)	

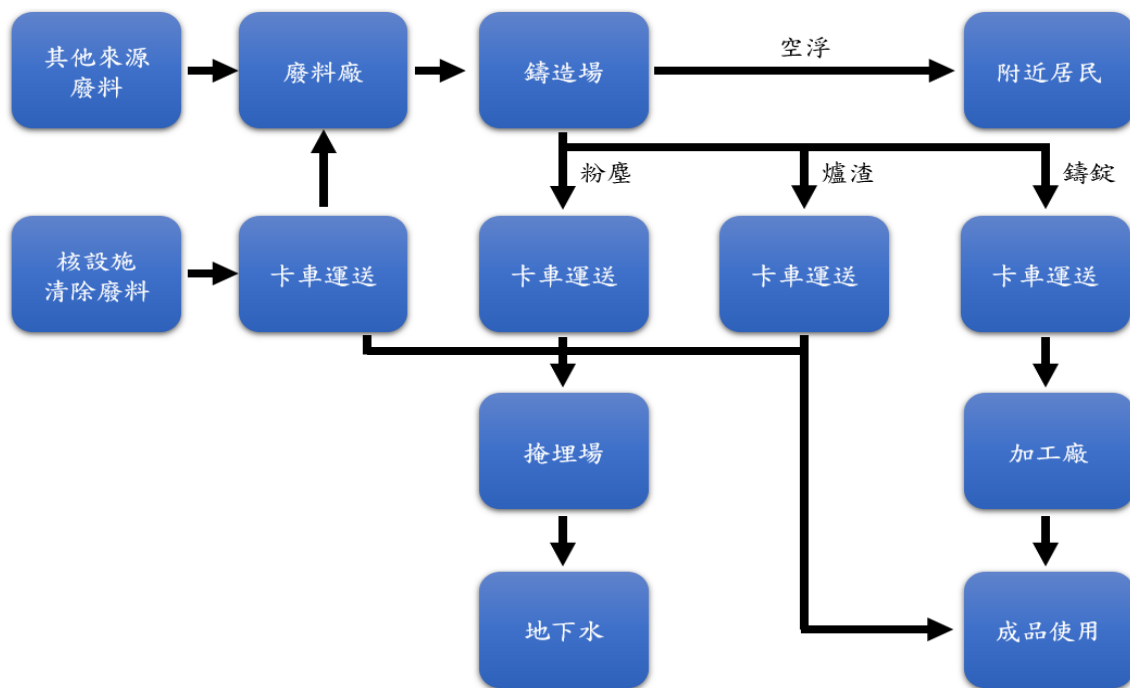


圖 3-5 NUREG-1640 的金屬廢棄物之曝露情節

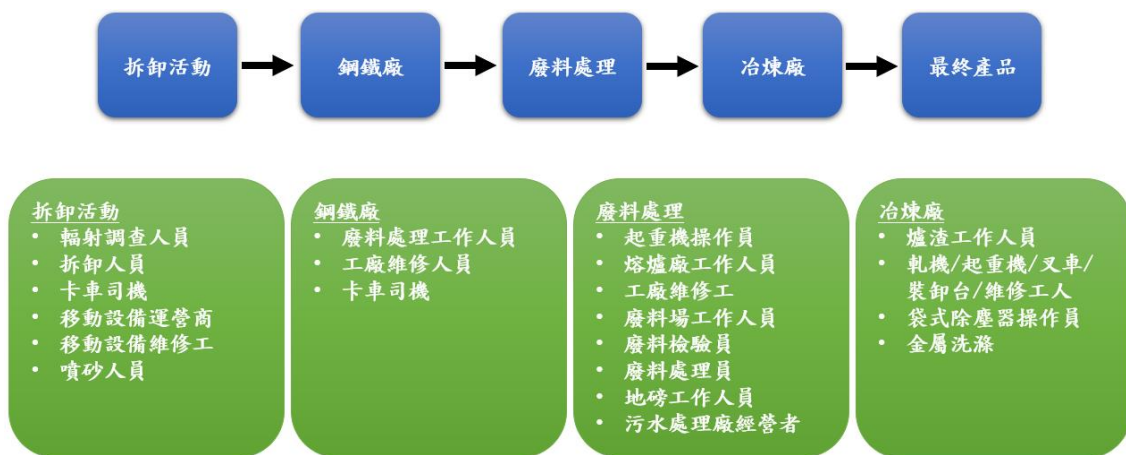


圖 3-6 NCRP 141 的廢棄物處理流程以及相關人員

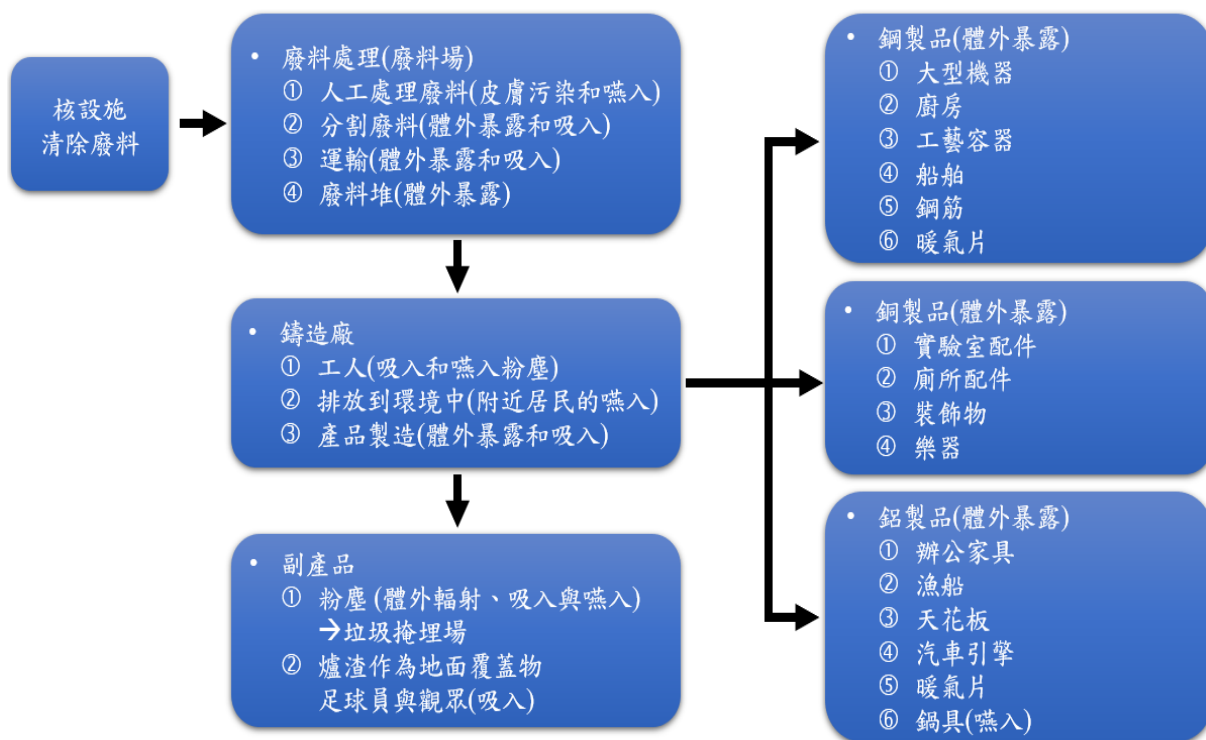


圖 3-7 從核設施清除的廢鐵在處理流程和曝露情境的示意圖

工作項目 7. 探討各種情境下接觸不同強度天然輻射異常物從業人員之輻射劑量與風險評估 (110 年)

關於不同接觸情境下接觸不同強度天然輻射異常物從業人員之輻射劑量與風險評估，本計畫將於第二年(110 年)，參考彙整之國際重要文獻報告之輻射曝露情節，以第一年所決定之最合適之評估程式及實測輻射劑量評估模式，對國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之輻射劑量與風險進行模擬計算與評估。

本計畫輻射風險評估方法概述如下：

以手持式輻射偵檢器測得之周圍等效劑量 $H^*(10)$ ，考量輻射異常物之評估有效能量後，依據相關轉換因子將手持式偵檢器測得之空間劑量(周圍等效劑量 $H^*(10)$)轉換為人員之有效劑量及手部四肢等價劑量。國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection，簡稱 ICRP)分別於 1996 年、2010 年發佈了體外曝露劑量轉換係數相關建議的 ICRP 74^[18]、ICRP 116^[19]報告，歐洲輻射劑量學組織(European Radiation Dosimetry Group, EURADOS)亦於 1999 年提出其第 106 號輻射防護報告(Radiation Protection 106)^[20]針對環境輻射監測中輻射偵檢器測得之劑量與人員有效劑量間之轉換因子進行分析討論。本計畫將以皮膚等價劑量與有效劑量的大小來量化

輻射健康效應之確定效應與機率效應的風險，並考量可能接觸或處理輻射異常物時之可能時間與劑量率，以合理且保守地評估出相關人員之年皮膚等價劑量與年有效劑量，並與現行法規之等價劑量與有效劑量的限度作比較分析。

在機率效應之風險評估上，本計畫對輻射工作人員採用 ICRP 建議之成年人危險度係數 $4.1 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-103)、 $4.8 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-60)；對非輻射工作人員採用一般公眾之危險度係數 $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-103)、 $6.0 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-60) (表 3-6)，分別評估工作人員與公眾之年有效劑量轉換為癌症標稱危險度之風險。在確定效應之風險評估上，可保守考量以 ICRP 60 及 103 之劑量限度建議(以等價劑量之劑量限度做規範)，以比較評估工作人員之手部年等價劑量是否超過 500 mSv 為依據，如未超過則視為不會發生確定效應。

表 3-6 ICRP-60 及 ICRP-103 建議使用之癌症標稱危險度係數^[21,22]

	ICRP-60	ICRP-103
輻射工作人員	$4.8 \times 10^{-2}/\text{Sv}$	$4.1 \times 10^{-2}/\text{Sv}$
非輻射工作人員	$6.0 \times 10^{-2}/\text{Sv}$	$5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$

工作項目 8. 提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案) (110 年)

本計畫將蒐集、研析與彙整如國際原子能總署(IAEA-TECDOC-1130 及 IAEA SSG-17)、美國及歐盟等國際組織對鋼鐵輻射異常物之管制與處置作法(USDOE ANL/EAD/TM- 50 及 EC Radiation Protection No 89 等報告) [11-16]，並持續蒐集其他國際組織對鋼鐵輻射異常物之管制與處置作法，以彙整鋼鐵輻射異常物相關之最適化作業流程規劃與合理抑低措施。

本期計畫預定於第二年(110 年) 考量鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)1 份(內容預計將包括廢鋼鐵中含天然輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，以及偵檢與處理程序與主管機關之管理與管制等建議事項，詳細內容將於計畫之第二年與主管機關討論後確定)供主管機關參考，以精進及強化國內發現鋼鐵輻射異常物後之輻射管制效能。

研究團隊說明：

本計畫之研究團隊由國立清華大學(工作團隊一)及財團法人中華民國輻射防護協會 (工作團隊二)所共同組成之合作團隊，團隊之分工方式如下：

工作項目 1：對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查 (由清華團隊執行)

工作項目 2：依天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射異常物關係 (由清華團隊執行)

工作項目 3：蒐集、研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序 (由清華團隊執行)

工作項目 4：蒐集與建置國際相關輻射防護評估程式，並分析比較其特性。建立輻射防護評估程式能力，分析比較並找出最合適之輻射防護評估程式 (由輻協團隊執行)

工作項目 5：以具代表性之訪查結果為案例，比較驗證各式輻射防護評估程式之優劣，尋求最合適之評估程式 (由清華與輻協團隊共同執行)

工作項目 6：對國內鋼鐵業者各項工作單元、場所之從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境模擬分析、天然輻射異常物誤熔情境模擬評估 (由清華與輻協團隊共同執行)

工作項目 7：探討各種情境下接觸不同強度天然輻射異常物從業人員之輻射劑量與風險評估 (由清華與輻協團隊共同執行)

工作項目 8：提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)(由清華團隊執行)

肆、 主要發現與討論

109 年進度說明：

一、對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查(工作項目 1)

1. 訪查人員檢/訪查訓練

109 年所通報之前 3 件輻射異常物案件，於 109 年 2 月 17 日、2 月 17 日及 3 月 17 日(如表 4-1)，由原能會人員進行現場檢/訪查工作，量測輻射異常物周遭之劑量率與核種之種類評估判斷，並協助進行現場檢/訪查工作訓練，確認現場檢/訪查之作業細節與注意事項。相關檢測與訓練之照片如圖 4-1 所示。



圖 4-1 前 3 件輻射異常物案件輻射異常物量現場劑量率與核種種類評估及人員訓練圖。

2. 鋼鐵業輻射異常物通報案件檢/訪查結果

109 年鋼鐵業輻射異常物通報案件截至 12 月 15 日，總計通報 34 起，本計畫研究團隊依業者狀況進行訪查情形列於表 4-1。

表 4-1 109 年鋼鐵業輻射異常物通報案件與訪查情形表

編號	發生日期	通報單位	訪查日期	異常物類別	表面 5 公分處最大劑量率 (μSv/h)	後續處理方式	備註
109-01	109/01/10	苗栗_東和鋼鐵	109/03/17				由原能會人員協助進行現場檢/訪查工作訓練；輻射異常物偵測報告由原能會人員撰寫
109-02	109/02/13	桃園_東和鋼鐵	109/02/17				由原能會人員協助進行現場檢/訪查工作訓練；輻射異常物偵測報告由原能會人員撰寫
109-03	109/02/18	台中_豐興鋼鐵	109/02/27				由原能會人員協助進行現場檢/訪查工作訓練；輻射異常物偵測報告由原能會人員撰寫
109-04	109/02/18~19	高雄_台灣益鉅金屬	109/04/07	天然：U-235, U-238, Ra-226, Th-232	27.50	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-05	109/03/12	桃園_東和鋼鐵	清華人員未參予				司機同意直接送回廠，之後由輻安科直接帶回核研所檢測；清華人員未參予
109-06	109/03/26	台中_豐興鋼鐵	109/06/01	天然：Ra-226, Th-232	9.70	出口退運	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-07	109/04/07	苗栗_東和鋼鐵	109/07/06	天然：Ra-226	0.49	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-08	109/04/08	台中_豐興鋼鐵	109/06/01	天然：Ra-226, Th-232	3.10	出口退運	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-09	109/04/27	桃園_東和鋼鐵	109/05/05	天然：Ra-226	3.40	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告，含鋼鐵業輻射偵檢作業檢查紀錄表
109-10	109/04/24	台南_威致鋼鐵	109/06/24	天然：U-238	50.0	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-11	109/05/09	台中_欣展環保	109/06/01	天然：Ra-226	5.20	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-12	109/06/17	高雄_焊聯鋼鐵	109/07/22	天然：Th-232	2.24	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-13	109/06/17	苗栗_東和鋼鐵	109/07/06	天然：Th-232	0.82	出口退運	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-14	109/06/18	苗栗_東和鋼鐵	109/07/06	天然：Ra-226	0.43	國內處理	由清華撰寫輻射異常物偵測報告
109-15	109/06/17	高雄_協勝發鋼鐵	109/07/22	天然：Ra-226	0.29	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告

表 4-1 109 年鋼鐵業輻射異常物通報案件與訪查情形表(續)

編號	發生日期	通報單位	訪查日期	異常物類別	表面 5 公分處最大劑量率 (μSv/h)	後續處理方式	備註
109-16	109/07/29	桃園_東和鋼鐵	由輻安科人員前往，清華未參予				核研所接收處理
109-17	109/08/01	台中_豐興鋼鐵	退回廢鐵供應商				廢鐵供應商提供輻防協會報告留存備查
109-18	109/08/11	桃園_東和鋼鐵	109/08/28	天然: Ra-226 人工: Ir-192	3.50	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-19	109/08/20	桃園_東和鋼鐵	109/08/28	天然: Ra-226	39.0	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-20	109/09/14	桃園_聯成鋼鐵	109/09/25	天然: Th-232	4.30	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-21	109/09/24	高雄_燁聯鋼鐵	109/10/29	天然: Ra-226,Th-232	0.62	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-22	109/10/08	高雄_協勝發鋼鐵	109/10/29	人工: Co-60	39.0	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-23	109/10/16	台中_豐興鋼鐵	109/11/25	天然: Ra-226	6.10	出口退運	由清華出輻射異常物偵測報告
109-24	109/07/20	台中_豐興鋼鐵					已自行退運
109-25	109/10	台中_豐興鋼鐵	109/11/25	人工: Cs-137	0.57	出口退運	由清華出輻射異常物偵測報告
109-26	109/10	台中_豐興鋼鐵	109/11/25	天然: Ra-226,Th-232	2.01	出口退運	由清華出輻射異常物偵測報告
109-27	109/11/10	台中_豐興鋼鐵	109/11/25	天然: Ra-226	2.65	待廠商確認中	由清華出輻射異常物偵測報告
109-28	109/11/12	桃園_東和鋼鐵	109/11/27	天然: Ra-226	27.0	出口退運	由清華出輻射異常物偵測報告
109-29	109/11/17	台南_興永益鋼鐵	109/12/08	天然: Th-232	15	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-30	109/11	台中_豐興鋼鐵	109/11/25	天然: Ra-226,Th-232	3.5	待廠商確認中	由清華出輻射異常物偵測報告
109-31	109/11/27	台南_興永益	109/12/08	天然: Ra-226,Th-232	2.74	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-32	109/12/02	台南_長頤	109/12/08	天然: Ra-226	74	國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-33	109/12/14	苗栗_東和鋼鐵	預計 109/12/23	天然: Th-232	待測	預計 國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告
109-34	109/12/15	高雄_燁聯鋼鐵	預計 109/12/25	未知 待測	待測	預計 國內處理	由清華出輻射異常物偵測報告

本計畫研究團隊依據輻射異常物通報及處理作業程序，對通報異物輻射狀況之鋼鐵業者，前往實施輻射異常物之檢測、分析、調查，並對每一

件通報輻射異常物狀況提出報告，供主管機關參考並協調核能研究所接收及處置輻射異常物。

109 年鋼鐵業輻射異常物通報案件截至 12 月 15 日，總計通報 34 起(如表 4-1)，前 3 起通報案件主要由原能會輻安科人員進行現場檢/訪查並協助對清華研究團人員進行偵測指導與訪查工作訓練，且輻射異常物偵測報告由原能會人員撰寫。第 5 起輻射異常物通報案件因於鋼鐵業者大門之門框偵檢器發現時，載貨司機同意直接送回廠，之後由輻安科直接帶回核研所檢測，因此清華人員未參與該案訪查。第 17 起輻射異常物通報後，異常物直接退回廢鐵供應商，原能會告知由廢鐵供應商提供輻防協會報告留存備查。第 24 起輻射異常物通報後，原能會告知已自行退運。其餘第 4 起、第 6 至 16 起、第 18 至 23 起、第 25 至 32 起輻射異常物通報案件，由本計畫研究團隊負責進行現場檢/訪查，並提出輻射異常物狀況調查報告，原能會輻安科人員則全程陪同訪查。目前尚有第 33 及 34 起輻射異常物通報案件(分別於 109/12/14 及 109/12/14 通報)尚未執行現場訪查，已規劃於 109/12/23 及 109/12/25 至現場進行訪查。

依據檢測結果統計，109 年通報之 34 件鋼鐵業輻射異常物中，本計畫已至現場訪查並出具偵測報告的計有 25 件，其中有 22 件為天然輻射異常物、2 件為人工輻射異常物，有 1 件中同時含有天然及人工輻射異常物。25 件中之後續處理方式，有 7 件為出口退運，有 16 件為國內處理(送核研所)；有 2 件待廠商確認。

針對國內 17 家(109 年為 17 家)鋼鐵熔爐業者之鋼鐵業(年度)輻射偵檢作業檢查亦已完成(訪查時間列於表 4-2)，檢查結果均為合格、均依規定辦理。本計畫 109 年完成訪查之輻射異常物(列於表 4-1)偵測報告與鋼鐵熔爐業者(列於表 4-2)之 109 年度輻射偵檢作業檢查紀錄表，相關檔案均已送原能會備查。

表 4-2 本計畫 109 年針對國內鋼鐵熔爐業者之年度輻射偵檢時間表

編號	鋼鐵熔爐業年度訪查(17 家)	年度訪查日期	備註
1	台中_豐興鋼鐵	109/06/01	
2	苗栗_東和鋼鐵	109/07/06	
3	桃園_東和鋼鐵	109/05/05	
4	台南_威致鋼鐵	109/06/24	
5	高雄_燁聯鋼鐵	109/07/22	
6	高雄_協勝發鋼鐵	109/07/22	
7	桃園_聯成鋼鐵	109/09/25	
8	苗栗_建順鋼鐵	109/10/15	
9	台中_中龍鋼鐵	109/10/15	

表 4-2 本計畫 109 年針對國內鋼鐵熔爐業者之年度輻射偵檢時間表(續)

10	彰化_慶欣欣鋼鐵	109/10/15	
11	高雄_中國鋼鐵	109/11/16	
12	高雄_龍慶鋼鐵	109/11/16	
13	高雄_海光企業	109/11/16	
14	高雄_唐榮鐵工廠	109/11/16	
15	宜蘭_羅東鋼鐵	109/11/20	
16	台南_易昇鋼鐵	109/11/23	
17	台南_華新麗華	109/11/23	

對所通報之輻射異常物進行現場輻射劑量偵檢貼近表面位置、30 公分與 1 公尺之不同平面所建立之平面輻射劑量分布曲線，列舉 3 件案例結果示於附件一。

二、依天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射異常物關係（工作項目 2）

本計畫規劃依上述天然、人工不同輻射異常物處理情境，解析探討鋼鐵業各項工作單元、場所之從業人員作業環境與輻射異常物關係，並參考進行現場檢/訪查之實測(如圖 3-1)劑量資料，建立國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之實測輻射劑量評估模式。

主要評估之接觸人員為運送司機、輻射異常物搜尋人員與搬運人員，根據通報之案例來模擬推估距離及接觸時間，將國內不同港口，如台北港、台中港及高雄港，設為運送司機的出發點。如目的地為中部鋼鐵廠來推估運送司機之接觸時間，貨車如來自台北港約 2 小時、台中港約 1 小時、高雄港約 3 小時；如目的地為南部鋼鐵廠，則貨車如來自台北港約 3.5 小時、台中港約 2.5 小時、高雄港約 1.5 小時。因無法得知貨物入關之港口，故將 3 處港口運送至目的地之時間均予一併評估；考量於鋼鐵場偵測出輻射異常訊號時，地磅或監視人員可能接觸時間約 0.1 小時(人員離射源約 100 cm)，鋼鐵雜料攤平後搜尋時間約 1-2 小時，取最大時間 2 小時做為評估搜尋人員之時間；尋得輻射異常物後，推估搬運人員徒手搬運單趟為 0.5 小時。運送司機與異常物之距離，以某車廠網站中貨櫃車尺寸圖，貨櫃掛載位置通常為車頭後方之輪胎上方處，則司機位置與貨櫃最前緣距離約為 186 cm 如圖 4-2 所示[23]；地磅或監視人員距離異常物以 100 cm 估計；搜尋人員生殖腺距離約地面 100 cm 如圖 4-3 (左) 所示；搬運人員徒手搬運距離身體約

30 cm 如圖4-3(右) 所示。彙整相關人員距離輻射異常物與可能接觸時間列於表 4-2。輻射異常物運送、發現、搜尋與搬運流程示於圖4-4。

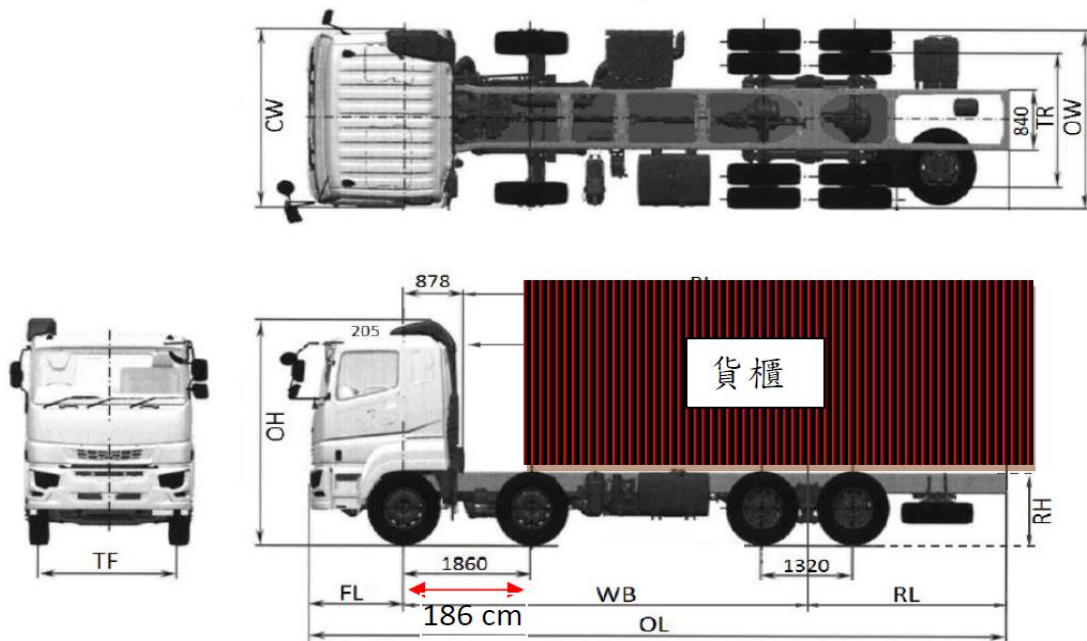


圖 4-2 貨櫃車尺寸圖[23]

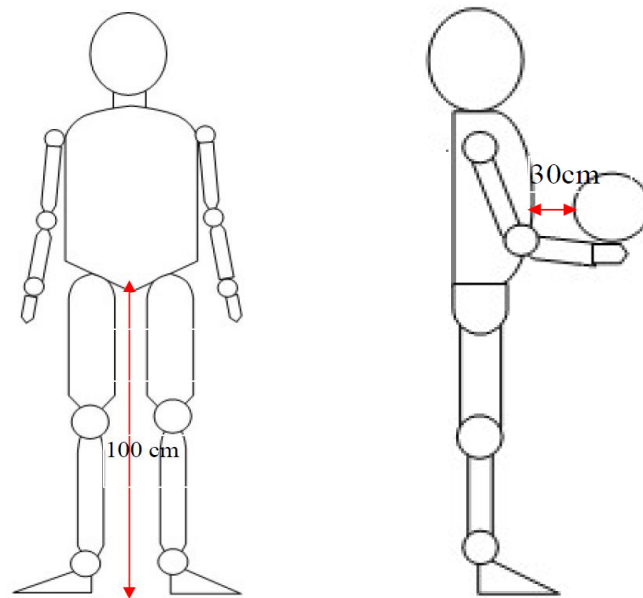


圖 4-3 搜尋人員與地面距離圖(左)與徒手搬運人員與異常物距離圖(右)

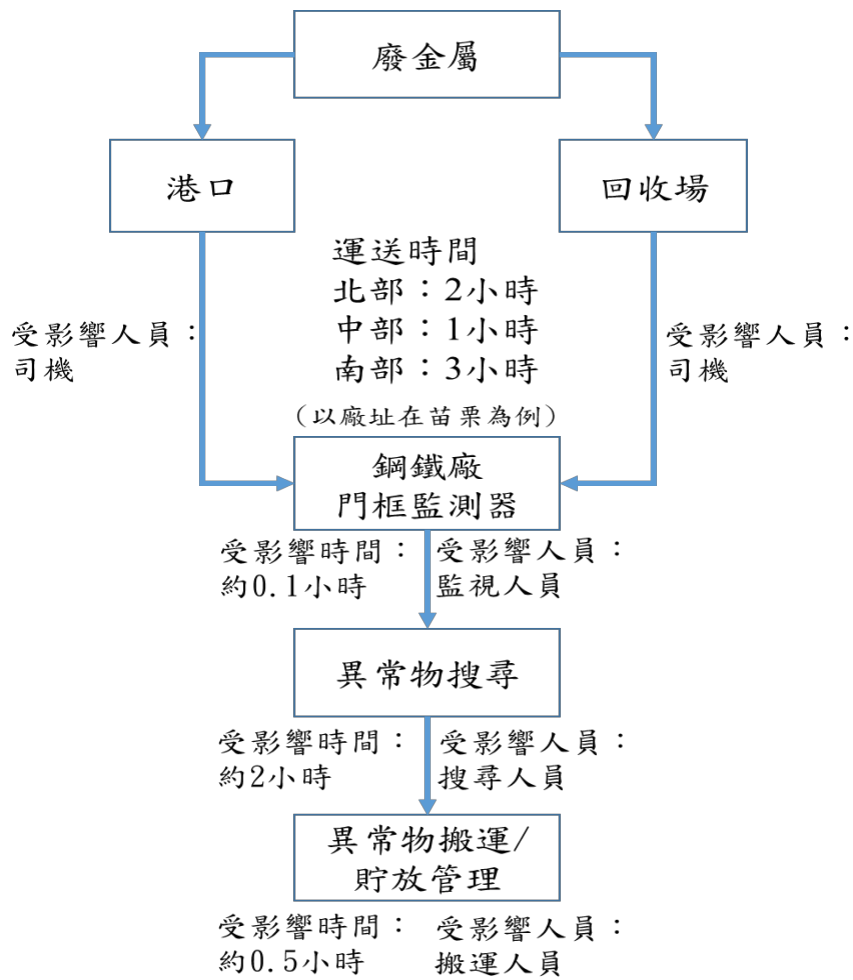


圖 4-4 輻射異常物運送、發現、搜尋與搬運流程圖

表 4-2 相關人員與輻射異常物距離與可能接觸時間

接觸人員	距離	時間/次	貨物入關港口
司機	186cm	2 h	台北港入關
		1 h	台中港入關
		3 h	高雄港入關
地磅或監視人員	100 cm	0.1h	
搜尋人員	100 cm	2h	
搬運人員	30 cm	0.5h	

依據上述所假設輻射異常物案件之處理情境，可進行鋼鐵業從業人員於發現輻射異常物後可能接受曝露之保守輻射劑量評估。

三、蒐集研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序（工作項目 3）

本計畫蒐集與研析國際間對放射性廢金屬回收(Radioactive Scrap Metal Recycling)的管理作法以及對輻射異常物之偵檢與處理等相關文獻，蒐集與研析之主要文獻包括：

1. 美國能源部(United States Department of Energy, USDOE)於 1995 年發表了 ANL/EAD/TM- 50 報告，此報告之內容針對含放射性廢金屬回收(Radioactive Scrap Metal Recycling)的作法及管理提出說明[9]。
2. 國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)於 2000 年提出 IAEA-TECDOC-1130 技術文件，探討核燃料循環設施廢物流中的材料和組件的回收和再利用(Recycle and reuse of materials and components from waste streams of nuclear fuel cycle facilities)[10]。
3. IAEA 於 2012 年提出 SSG-17 報告，探討與說明金屬回收和生產行業中的廢棄射源和其他放射性物質的管控作法(Control of Orphan Sources and Other Radioactive Material in the Metal Recycling and Production Industries)[11]。
4. 歐盟(European Commission, EC)也於 1998 年時發布了其輻射防護第 89 號報告(Radiation Protection No 89)，對於從拆除核子設施過程中回收金屬的輻射防護標準提出了建議(Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations)[16]。
5. 美國 NCRI (National Committee on Radiation Instrumentation)於 2006 年提出之 ANSI N42.43-2006：American National Standard Performance Criteria for Mobile and Transportable Radiation Monitors Used for Homeland Security, American National Standards Institute (ANSI)，對於鋼鐵輻射異常物之偵檢技術提出相關之要求與建議。

圖 4-5 為上述所蒐集之報告封面圖。

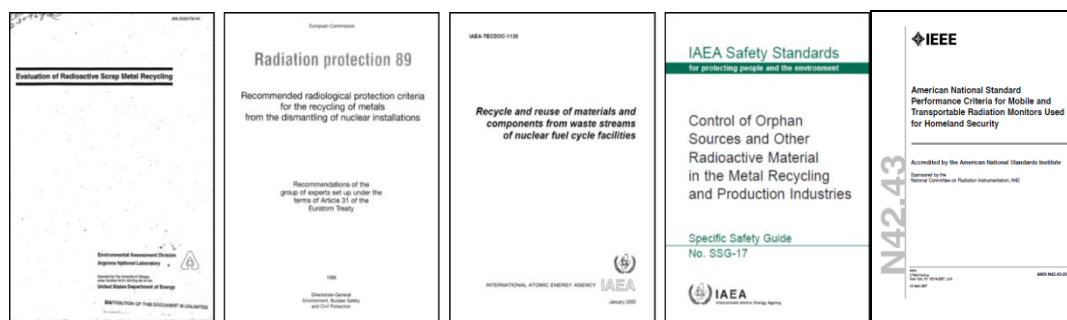


圖 4-5 本計畫所蒐集之 USDOE ANL/EAD/TM- 50、EC Radiation Protection No 89、IAEA-TECDOC-1130、IAEA SSG-17 及 ANSI N42.43-2006 報告報告封面圖^[9,10,11,16]

本計畫研析上述文獻，將對含放射性廢金屬回收(Radioactive Scrap Metal Recycling)的管理作法以及對輻射異常物之偵檢與處理程序之要點彙整如下：

放射性廢金屬（radioactive scrap metal, RSM）目前和潛在來源包括核電廠、核燃料循環設施、武器生產設施、研究用反應器、高能加速器、工業輻射滅菌設備、工業放射線照相設備、醫療設施和設備以及石油和磷礦等石礦挖採設備。隨著這些設施的因其使用期限或其他原因停產除役，未來可能會產生數百萬噸的廢鋼鐵、不銹鋼和銅，以及數量較少的鋁、鎳、鉛和鋅等廢金屬。

來自各種設施的相對少量RSM已被回收以供公眾使用，但在核工業中已回收了數千噸，潛在可用的供應量中大部分的放射性很低。

ICRP[21]建議在輻射防護系統範圍內，將回收作為放射性廢鋼鐵的管理選擇。其將回收的影響與處理和更換金屬相關的影響進行了比較，明確的結論是，再循環是合理的做法，可以通過實施分層的釋放標準體系來最適化輻射防護，並且可以將個體劑量控制在可接受的水平。

管理RSM的策略必須在對導致公眾輻射的做法進行規範的原則內進行評估。ICRP[21]建議了基於三項一般原則的輻射防護系統。首先是，在採取任何涉及增加輻射曝露的措施之前，必須先證明其提供的好處大於傷害。為了評估一種做法是否利大於弊，ICRP 建議考慮該做法的所有不利因素，而不僅考慮輻射方面的危害。其次，應最適化輻射防護，包括監管控制成本。在考慮經濟和社會因素的情況下，將個人和集體劑量保持在盡可能低的合理範圍內。第三，必須將個人風險控制在足夠低的水平。

對於 RSM 回收，評估適用於各種最終用途分層釋放，使 RSM 供應與需求相匹配，同時將公共風險控制在非常低的水平。控制輻射健康風險是通過根據廢料的輻射特性及其潛在最終用途，調整釋放水平來實現的。分層釋放概念包括以下選項：不受限制地釋放表面污染的金屬以其現有形式（例如，機器設備等）進行再利用或處置；在受控設施中熔化後從 RSM 鑄造的鑄錠回收，以及在核工業中的受控回收。

釋放 RSM 的替代方法是將其處置在低放廢物（low-level waste, LLW）處置設施中。此過程需要切割和包裝 RSM 以便運輸和處置，還可能涉及淨化過程以減少工人的曝露，融化以減少體積。處置將導致 RSM 從世界金屬庫存中撤出，這些金屬的大部分通常可以回收。在利益考量上，金屬庫存增加或被礦石新生產的金屬所代替，而金屬置換活動被認為是與 RSM 處置相關的有害因素；這些活動包括礦石開採、礦石濃縮或精煉、金屬冶煉、鑄造和製造以及這些活動所需的能源生產。

RSM 回收/再利用或處置和更換產生的輻射風險非常低(IAEA, 1988)。在此基礎上，回收 50,000 噸 RSM 對包括工業工人在內的公眾個人終生癌症致死風險將小於百萬分之一(10^{-6})。對於 RSM 處置替代方案，假定因 RSM 處置而導致的公眾曝露造成的輻射風險不超過美國法規規定的十萬分之一(10^{-5})。總體而言，由於嚴格的劑量限制，對公眾而言，個人風險水平可能會比對處置的風險略低。在回收或處置方面，核工作者的個人風險均受到法規(千分之一， 10^{-3})的限制

對於包含相對大量但可能是非放射性廢料的 RSM 部分，對公眾和金屬工人而言，輻射和非輻射風險在回收利用方面要比在更換方面要低，因為大多數放射性核種和污染物是自然產生的。礦石將在 RSM 的原始冶煉中被去除。總體而言，回收方案涉及輻射工人承擔的受控風險，以及商業金屬工人和公眾的風險略有增加。另一方面，處置和替換方案涉及輻射工作人員的受控風險，而礦工和公眾面臨的相對不受控制的風險則大大增加。處置/替換替代品的輻射健康風險至少是 RSM 回收替代品的風險水平的兩倍(IAEA, 1988)。

鋼鐵通常含有少量的天然放射性物質，這些放射性物質的來源是礦床或焦炭生產中使用的煤。在鋼鐵中測得的鈾和鈷等的背景活度約為 10^{-5} 至 10^{-4} Bq/g。除了天然放射性物質外，鋼鐵中還有其他幾種放射性物質，例如，冶煉中使用的測量設備中微量的鈷(Co-60)通常會出現在鋼鐵金屬中，

這些密封的輻射源與被熔化的金屬廢料結合在一起。

RSM 回收實際上與所有將放射性物質摻入消費品中的現有情況不同，因為它沒有直接好處。而回收 RSM 的主要好處是避免如果不回收金屬而進行更換金屬對環境和健康造成的影響。

由於缺乏無限制釋放該材料的公認國際標準，目前阻礙了 RSM 的回收。一些歐洲國家已經制定了釋放標準，但是通常根據特定項目評估和釋放受污染的金屬。美國目前有一種用於物質外釋的表面污染標準，即 Regulatory Guide 1.86 (U.S. Nuclear Regulatory Commission [USNRC] 1974)，但沒有針對外釋體積活度的標準。全球 RSM 回收的發展需要進一步的努力來確定適當的活度水平，以確保在可能的曝露條件下保護公眾健康。由於廢金屬和金屬產品的國際貿易非常廣泛，因此需要一套國際標準來指導釋放 RSM。不同的國家發布標準將對國際貿易產生不利影響。

由於國際間曾發生少數嚴重的核能事故災害，使得大多數公眾對相關核工業產生負面印象，亦使部分民眾對具有微量放射性物質回收概念的接受程度可能會成問題。而同時，在許多國家成功地進行了少量的 RSM 回收，含有低水平添加或天然放射性的產品被廣泛使用。在大多數國家，金屬置換活動的風險和影響要比輻射風險引起的關注相對較少，儘管其風險和影響要大得多且更為直接。

目前國際間對輻射異常物之相關偵檢技術彙整如下：

監測器依據使用狀況，偵測對象分類包括：行人、包裹（包含輸送帶）、車輛（包括汽車及裝入貨櫃之貨物）以及鐵路車輛(火車)等。對於鋼鐵業之檢測主要針對車輛檢測。

車輛監測器具有一個偵檢區域，對車輛通過期間進行監測。監測區域最低高度應從地面而至地面上 5 米或至偵檢裝置之最高頂端。監測區域寬度為偵檢裝置之寬度。監測器有通過限制高度時，偵檢區域高度應由地面至監測器之製造固定尺寸。監測器可為公路和鐵路車輛之監測，其設計可以為結合一個或幾個檢測裝置之量測裝置。監測裝置可以為一般含有連接量測裝置之一個或多個偵檢器。所謂的監測系統是於偵檢區域周圍設置幾個偵檢裝置之系統，偵檢裝置應通過環境之性能測試。

監測器應能傳達、保留和貯存隨時間變化的歷史監測數據，此數據包括發出警示之前和之後的輻射背景讀數，和包含時間和日期之警示信息。監測

器之傳達訊息之能力，可藉由錄影機或電腦提供輸出信息，或由量測裝置內建來達成。

偵檢器之性能係取決於監測標的物通過偵檢器之偵檢區域之速度。標的物之速度建議低於 8 公里/小時。偵檢器之設計應能防止從雨、冷凝水或高濕度而來之進水。

固定式門框偵檢器之測試評估：

偵檢器應在僅有天然輻射背景之環境中進行評估測試。天然輻射背景之正常範圍是從 $0.05\mu\text{Sv/h}$ 至 $0.20\mu\text{Sv/h}$ 。加馬輻射背景強度之量測，應由經校正之環境輻射測量裝置進行。如果配備了中子偵檢器，中子輻射背景建議是天然輻射背景。在測試期間中，天然輻射背景建議沒有人為修正。在測試期間中，輻射源應有配置屏蔽。各種型式之偵檢器進行測試時，應以一定速度(8 km/h)移動輻射源。評估偵檢器反應時，除了偵檢器設計之已有固定屏蔽外，不得針對天然輻射背景進行任何輻射屏蔽。

利用輻射源曝露偵檢器導致觸發警示，偵測到警示機率建議大於等於 0.9(具有 95 % 的可信度)。測試輻射源應可追溯到國家游離輻射標準，並應有適當的文件證明。

我國現有之鋼鐵業者發現輻射異常物之管理：

我國現有之鋼鐵業者發現輻射異常物之管理作法，主要為行政院原子能委員會於 2008 年 6 月發布的「鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則」，管制要點說明如下。

- 載運鋼鐵原料及產品之車輛進出廠時，如經輻射偵檢設備檢測發現輻射異常狀況，鋼鐵業者應採行下列措施確認異常輻射來源：
 - (1) 指示該載運鋼鐵原料及產品之車輛再經過輻射偵檢設備一次，以確認檢測結果。
 - (2) 如仍有輻射異常狀況，則詢問車輛駕駛人是否曾於近期內至醫療機構接受核子醫學檢查或治療。如駕駛人確曾於近期內至醫療機構接受核子醫學檢查或治療，則請其下車並離開車輛三十公尺以上，再對車輛進行檢測。如駕駛人未曾於近期內至醫療機構接受核子醫學檢查或治療，則將車輛移至適當場所，並進行輻射異常物搜尋作業。

- 鋼鐵業者測得距輻射異常物任一表面 1 公尺處之輻射劑量率每小時 20 $\mu\text{Sv/h}$ 以下時，應採行下列措施：
 - (1) 先將該輻射異常物隔離，並於四周設置臨時圍籬及輻射警示標誌，防止無關人員接近。
 - (2) 於 48 小時內以電話通報原能會，並填具鋼鐵業者異常輻射狀況報告表，及檢附該輻射異常物照片，以電子郵件傳送原能會。
- 鋼鐵業者測得距輻射異常物任一表面 1 公尺處之輻射劑量率超過每小時 20 微西弗($\mu\text{Sv/hr}$)時，應採行下列措施：
 - (1) 先將該輻射異常物隔離，並於其四周劑量率小於每小時 20 微西弗處設置臨時圍籬及輻射警示標誌，防止無關人員接近。
 - (2) 儘速於二小時內以電話通報原能會，並填具鋼鐵業者異常輻射狀況報告表，及檢附該輻射異常物照片，以電子郵件傳送原能會進行研判、分析及協助處理。
- 進廠之鋼鐵原料及產品在未能確認輻射異常物前，經偵測距其任一表面 1 公尺處之輻射劑量率已超過每小時 100 微西弗($\mu\text{Sv/hr}$)以上時，應採行下列措施：
 - (1) 先將該鋼鐵原料及產品隔離，並於其四周劑量率小於每小時二十微西弗處設置臨時圍籬及輻射警示標誌，防止無關人員接近。必要時得加置適當屏蔽，降低輻射劑量。
 - (2) 即時以電話通報原能會，並填具鋼鐵業者異常輻射狀況報告，以電子郵件傳送原能會進行研判、分析及協助處理。
 - (3) 無原能會人員或經原能會認可之輻射防護偵測業務業者人員在協助時，除為維護人員安全或有其他緊急必要情況時，不宜對前述鋼鐵原料及產品進行輻射異常物之搜尋或處理作業。
- 輻射異常物經鋼鐵業者確認來自國內供應商，應通報原能會轉知核能研究所協助派員先行收回暫存保管。
- 經確認輻射異常物來自國外供應商，且其為密封放射性物質時，應報經原能會核准後退回原出口國；如為天然放射性物質，以退回原出口國為原則，出口前應報經原能會核准。若無法確知國外供應來源，或天然放射性物質不退回原出口國時，得由鋼鐵業者

向原能會申請協助處理。

- 輻射異常物經確認為密封放射性物質者，其包裝、包件及運送請依「放射性物質安全運送規則」規定辦理。鋼鐵業者辦理密封放射性物質退運回原出口國時，應依「游離輻射防護法」相關規定向原能會申請出口許可。

國際與我國規範之異同：

針對相關鋼鐵輻射異常物之國際與國內目前相關偵檢標準、程序與管理作法，比較彙整如表 4-3。

表 4-3 比較國際與國內目前對鋼鐵輻射異常物之相關偵檢標準、程序與管理作法彙整表

項目		國際	國內
管理建議/法規		● 美國能源部(United States Department of Energy, USDOE)於 1995 年發表了 ANL/EAD/TM- 50 報告，此報告之內容針對含放射性廢金屬回收的作法及管理提出說明[9]。 ● 歐盟(EC)也於 1998 年時發布了其輻射防護第 89 號報告，對於從拆除核子設施過程中回收金屬的輻射防護標準提出了建議 [16]。 ● 國際原子能總署(IAEA)於 2000 年提出 IAEA-TECDOC-1130 技術文件，探討核燃料循環設施廢物流中的材料和組件的回收和再利用[10]。 ● IAEA 於 2012 年提出 SSG-17 報告，探討與說明金屬回收和生產行業中的廢棄射源和其他放射性物質的管控作法 [11]。	● 「鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則」：使鋼鐵業者在執行鋼鐵原料及產品輻射偵檢作業，於發現輻射異常物時，能採取適當之輻射防護管制措施及後續處理方式，並及時通報原能會，以掌握輻射異常物狀況。 ● 行政院原子能委員會處理鋼鐵業異常輻射通報作業程序書 ● 鋼鐵業輻射偵測作業之輔導與查驗
偵檢標準		美國：ANSI N42.43 (用於國土安全的移動和便攜式輻射監測器的美國國家標準)	目前尚未訂定標準，由業者提出鋼鐵業輻射偵測計畫，經主管機關核可後授權實施。
門框	偵檢區域	探測區域的高度至少應為 3 m，建議範圍為 0.5 m 至 4 m。	未明確訂定範圍範圍，授權業者自行評估適當範圍。
	動態監測時，建議監測標的通過速度	8 公里／小時 (2.2 m/s)	授權業者自行評估，均有進行動態監測，並要求記錄監測標的通過速度(大致為 8 公里/小時)
	儀器特性：顯示功能	監測器應能傳達、保留和貯存隨時間變化的歷史監測數據，此數據包括發出警示之前和之後的輻射背景讀數，	

偵檢器之主要測試 門框偵檢器之主要測試(續)	防濕功能 溫度範圍 量測能量	和包含時間和日期之警示信息。監測器之傳達訊息之能力，可藉由錄影機或電腦提供輸出信息，或由量測裝置內建來達成。	授權業者依輻射偵測計畫評估測試。
		監測器之設計應能防止從雨、冷凝水或高濕度而來之進水。	
		監測器應能於-30 °C 至 40 °C 之溫度範圍內進行操作。	
		應可量測 50 keV 至 3.0 MeV 能量之加馬輻射。	
	操作參數	製造商應提供建議的工作參數清單（例如警報閾值，檢測器電壓等）。這些參數應在整個測試中使用。	有進行儀器警報閾值、靈敏度、偵測低限、是否具故障顯示功能等調查，但未明確統一要求。
	背景測試	評估應在僅有天然背景輻射變化的區域中進行量測。(0.05 μSv/h to 0.25 μSv/h)	有要求進行天然背景輻射量測與記錄
	監測器偵測到警示機率	建議大於等於 0.90(具有 95 %的可信度)，即 60 次輻射源通過有 59 起警示。	授權業者依輻射偵測計畫評估測試。
	假警示測試	假警示係源自於計數統計變動、背景強度變化以及設備故障。在背景輻射水平不低於 5μSv/h 時，假警示機率應小於 0.001(即每 1000 次測試有 1 起警示)。	授權業者依輻射偵測計畫評估，測試檢視載運鐵材卡車十輛次通過，有無假信號現象(需無假信號發生)。
	過載測試	如果監視器在使用期間曝露在大於製造商聲明的最大值的輻射場中執行測量時，應啟動指示"高背景"或"高計數"的警報，並一直啟動，直到輻射場減少或使用者重置/確認報警。	授權業者依輻射偵測計畫評估測試。
	背景變化	當背景變化足夠大，足以導致報警概率發生重大變化時，監視器應提供警告指示。	儀器警報閾值、靈敏度、偵測低限、是否具故障顯示功能等調查，但未明確統一要求。
	偵檢器校正	測試輻射源應可追溯至國家標準。	偵檢器每年進行系統功能測試，替代之手持式偵檢器每年定期校正。
	測試光子參考輻射源	除非另有說明，涉及使用加馬輻射的測試建議使用參考放射性核種 ¹³⁷ Cs 進行。其他如 ²⁴¹ Am, ²³² Th, ¹³⁷ Cs, ¹³³ Ba, ⁶⁰ Co 和 ⁵⁷ Co 亦可。	授權業者依輻射偵測計畫評估測試。業者多使用 ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co。
	中子輻射對於偵檢器之反應	監測器曝露於中子發射率 20000 n/s 之 ²⁵² Cf 輻射源時，應引起警示。當 60 次有輻射源測試或通過時至少發生 59 次警報時，儀器的響應是可以接受的。	目前未要求鋼鐵業者設置中子輻射偵檢器。

目前國內對於鋼鐵業之輻射安全管制，原能會輻射防護處或輻射安全監管中心接獲鋼鐵業者通報「鋼鐵業異物輻射狀況報告表」時，即進行輻射異常物之研判及責成鋼鐵業者依「鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則」及輻射偵檢計畫執行輻防管理，並依權責派任相關人員前往實施檢測、分析、調查及接收，在此類輻防管制上已有一定之成效。然而，針對輻射異常物之偵檢程序上，目前則由原能會認可之偵檢業者自行

訂定程序由主管機關核可後實施，尚未有統一之標準偵檢技術規範，本期計畫預定於第二年(110 年) 考量鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案) 供主管機關參考，內容預計將包括廢鋼鐵中含天然輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，以及偵檢與處理程序與主管機關之管理與管制等建議事項，詳細內容將於 110 年與主管機關討論後確定，以精進及強化國內發現鋼鐵輻射異常物後之輻射管制效能。

四、蒐集與建置國際相關輻射防護評估程式，並分析比較其特性。建立輻射防護評估程式能力，分析比較並找出最合適之輻射防護評估程式 (工作項目 4)

1. RESRAD-RECYCLE

本計畫進行 RESRAD-RECYCLE v3.10 之程式建置。該版釋出時間為 2005 年 6 月，從阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)網頁中程式更新歷史說明中得知，該版已經為目前使用最後的更新版本。

(1) 程式安裝

程式安裝說明包含 Windows XP 與 Windows 10 二種作業系統。

Windows XP 安裝過程

STEP 1. 找到 RESRAD-RECYCLE v3.10 版本存放路徑，可存放於桌面或開啟存放之資料夾進行安裝，圖 4-6 為程式存放於桌面之畫面。

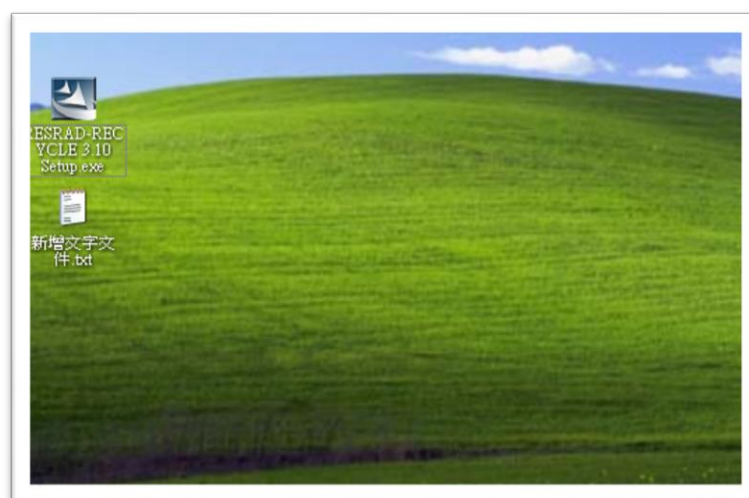


圖 4-6 安裝程式畫面 1 (Win XP 介面)

STEP 2. 在安裝軟體圖示按下滑鼠右鍵，並點選[開啟]選項(如圖 4-7)。



圖 4-7 安裝程式畫面 2 (Win XP 介面)

STEP 3. 程式顯示 Welcome 畫面，並按[NEXT]執行下一步(如圖 4-8)。

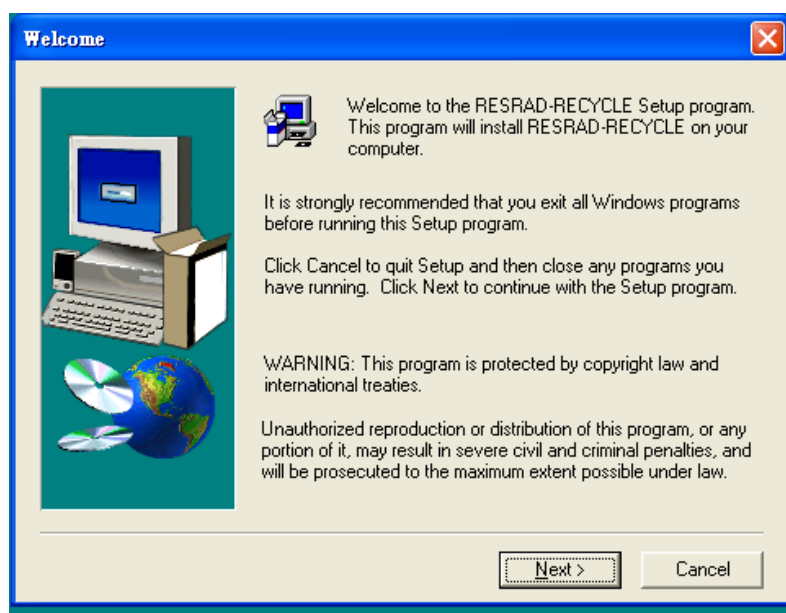


圖 4-8 安裝程式畫面 3 (Win XP 介面)

STEP 4. 選擇程式安裝位置資料夾，不建議自行設定路徑，採用預設名稱與途徑並按[NEXT]執行下一步(如圖 4-9)。

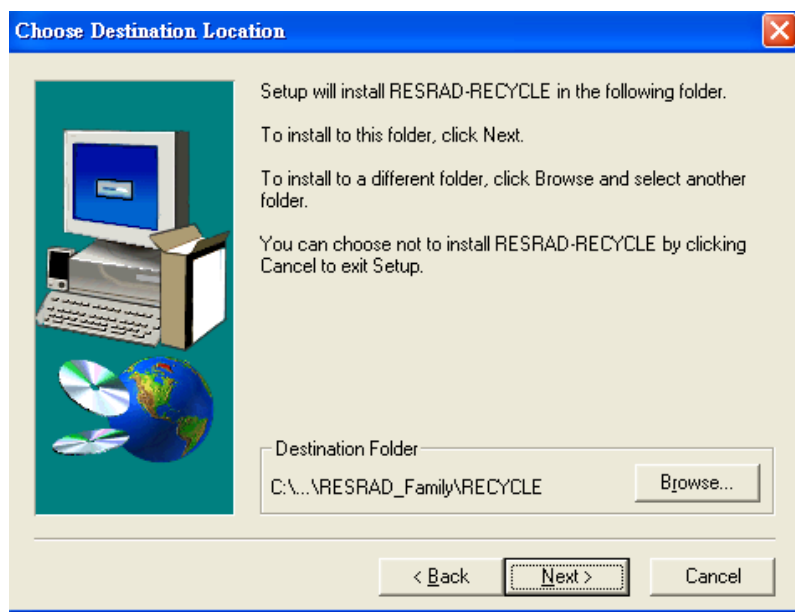


圖 4-9 安裝程式畫面 4 (Win XP 介面)

STEP 5. 程式捷徑圖示(Program icons)設定，建議採用預設名稱與途徑，並按[NEXT]執行下一步(如圖 4-10)。

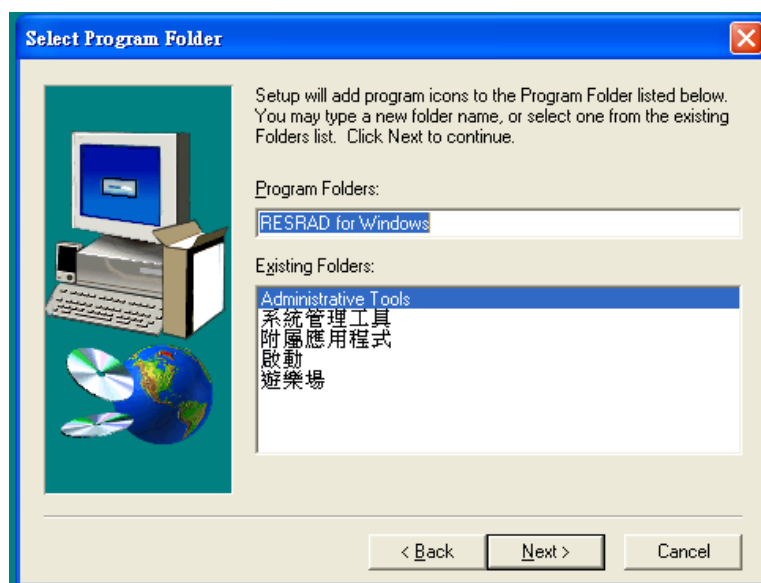


圖 4-10 安裝程式畫面 5 (Win XP 介面)

STEP 6. 當安裝完成後將顯示圖 4-11 畫面，點選[確定]鍵後即完成 RESRAD-RECYCLE 安裝程序。



圖 4-11 安裝程式畫面 6 (Win XP 介面)

Windows 10 安裝過程

STEP 1. 找到 RESRAD-RECYCLE v3.10 版本存放路徑。可存放於桌面或開啟存放之資料夾進行安裝，圖 4-12 顯示畫面為開啟存放資料夾畫面。

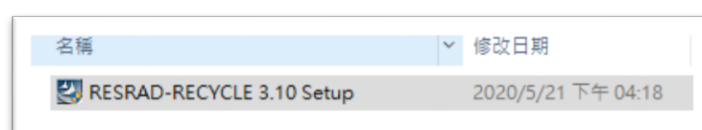


圖 4-12 安裝程式畫面 1 (Win 10 介面)

STEP 2. 在安裝軟體圖示按下滑鼠右鍵，並選擇[以系統管理員身分執行]進行程式安裝(如圖 4-13)。

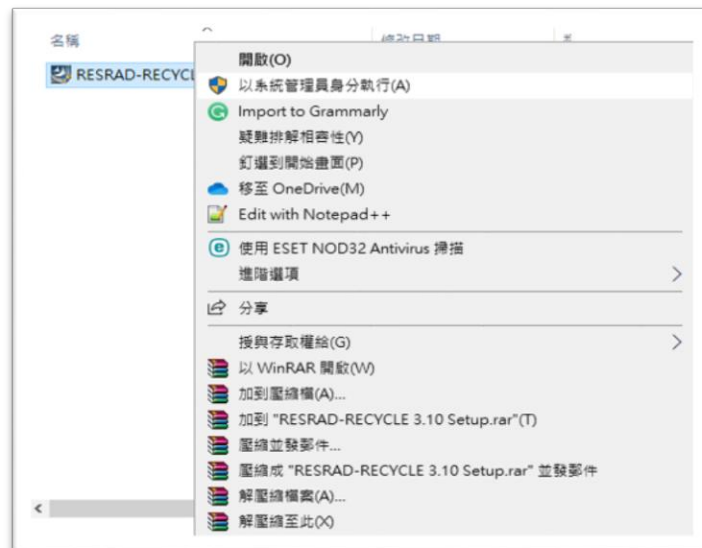


圖 4-13 安裝程式畫面 2 (Win 10 介面)

STEP 3. 程式顯示 Welcome 畫面，並按[NEXT]執行下一步(如圖 4-14)。

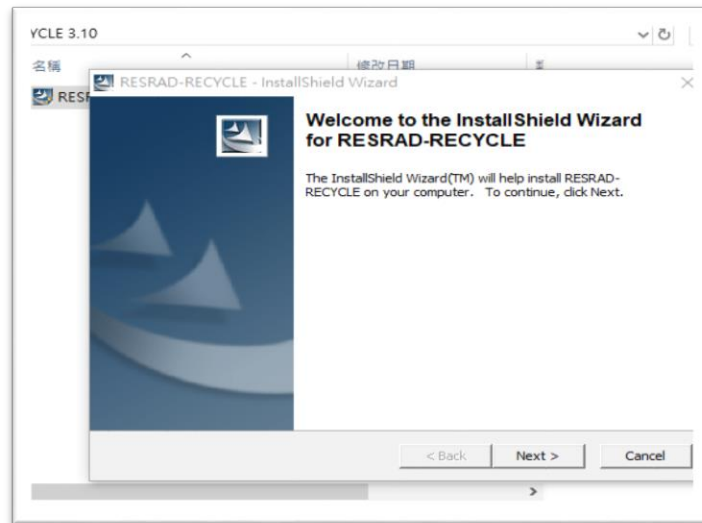


圖 4-14 安裝程式畫面 3 (Win 10 介面)

STEP 4.~ STEP 6 過程與顯示畫面如同上述 Win XP 安裝過程。不在此重複贅述。

小結：該程式在安裝過程並無特別繁複之處，但要記得以系統管理員身分進行安裝，其餘可全部接受預設，持續按下一步就可順利安裝完成。

(2) RESRAD-RECYCLE 操作心得

本計畫對於 RESRAD-RECYCLE 的操作使用建置乃是於安裝完成後，開啟程式後讀取程式安裝資料夾中的 Sample Case 輸入檔(檔名：SAMPLE1.RCY)並嘗試執行，再將執行結果與該資料夾中 Sample Case 輸出檔(檔名：SAMPLE1.REP)進行比對。藉此過程可熟悉 RESRAD-RECYCLE 的介面，並判定程式安裝正確與正常使用。

由於目前仍無法確認 RESRAD-RECYCLE 程式能完整安裝與正常執行的系統規格，因此分別在 Win XP 與 Win 10 兩種作業系統下進行執行測試，測試過程內容彙整如下。

- A. 執行計算後，程式當機，顯示“Run-time error 75”，程式隨之關閉。
- B. 執行計算後出現計算視窗，但出現時間短暫，視窗結束後，自動顯示程式並未執行內容。
- C. 執行計算後出現計算視窗，但出現時間短暫，視窗結束後，手動執行程式安裝資料夾中的 CALCRR.EXE (圖 4-15)。安裝資料夾中會生成

輸出檔，但非正確執行結果，因為其產生內容非選取分析核種與情節。

- D. 執行計算後出現計算視窗，但出現時間短暫，視窗結束後，手動執行程式安裝資料夾中的 CALCRR.EXE。視窗將會開啟總結文字檔，從其內容為選取分析核種與情節判定該次應為正確執执行程序。



圖 4-15 執行程式運算之應用程式

在 Win XP 作業系統下只能讀取與儲存輸入檔，但執行運算時，程式可能會當機；而在 Win 10 (64 位元)系統可以執行並得出結果，但困擾的是無法做輸入檔的讀取。另外，在輸入參數的過程中偶爾會出現說明視窗內容顯示“Run-time error 380: Invalid Property Value”，程式隨之關閉。上述為測試執行經驗，程式在使用上並不是很穩定。從目前數次安裝測試作業情形，能順利執行的作業系統有 Win XP (SP4)與 Win 10 (64 位元)兩種，但卻無法保證這在這兩種系統下一定能順利安裝與執行。

在前述使用程式可正常執行狀況下，嘗試讀取內建範例輸入檔(檔名：SAMPLE1.RCY)，並將結果與範例輸出檔案(檔名：SAMPLE1.REP)進行比對，以做為程式使用驗證。在讀取內建範例輸入檔後，首會先執行另存輸入檔的程序，目的在於將該檔案與範例輸入檔先進行比對以確保讀取的正确性。然而，如上述提及在 Win 10 (64 位元)系統中無法進行檔案讀取，因此了解輸入檔寫法與指令含意有助於協助確認建置參數是否正確輸入。

進行比較執行計算結果彙整如下：

- A. 計算工作人員情節劑量結果兩者一致。

- B. 終端使用(End-use)情節累積劑量(Cumulative dose)結果有些微差異(皆是 U-238 核種劑量值)。
- C. 直接使用 Reuse Product: Tool reuse 情節，整體計算結果值降低。
- D. 使用情節在 Individual、Collective、Cumulative 劑量結果排序有所更動。

讀取內建範例輸出檔內容顯示該計算結果為 RESRAD-RECYCLE 3.0 版本，另外從阿岡國家實驗室網頁中程式更新歷史說明目前使用的 v3.10 版已針對再使用(Reuse)情節攝入劑量(Ingestion rate)與體外劑量轉換因子進行兩處修正。由此可合理判斷比較結果差異主因是由版本不同所造成，而計算劑量結果不同也將造成不同使用情節排序上的差別。至於終端使用情節的累積劑量結果比較，其計算結果的數量級皆是相同的，且該數量級非常的小(範圍約從 $1\text{E-}14 \sim 1\text{E-}26$)，故認為能予以忽略差異性。整體而言，程式測試完成，可進行後續計算。

2. MicroShield

(1) 程式建置與測試

關於 MicroShield 的程式建置與測試，在建置方面，本計畫採用的程式為 MicroShield Pro，程式的版本為 v12.07，由於程式的安裝已經非常人性化採用圖形化介面安裝，不用輸入任何指令，即可安裝完畢，因此不再此詳述；在測試方面，本計畫基於手冊提供的驗證案例進行程式的測試，同時，展示本計畫對於 MicroShield 的操作能力。手冊採用的案例為 ANSI/ANS 6.6.1 Reference Problem I.1，描述如圖 4-16 與表 4-4 所示。在圖中，射源的形式為點射源，能量為 6.2 MeV，強度為 1 photon/sec，射源的屏蔽為空氣，密度為 0.00122 g/cm^3 ，偵檢器位於射源的右下方，X 方向與射源的距離有 200、1000、3000 與 5000 英尺，Y 方向與射源的距離為 57 英尺。

計算結果顯示於表 4-5，表中同時顯示其他程式的計算結果，這些程式包含 DOT、COHORT II、QADMOD 與 SKREEN。結果顯示，本計畫操作 MicroShield Pro 的計算結果與手冊提供的資訊是相符地，顯示本計畫在操作的過程沒有對案例有錯誤的理解與設定，由此結果足以展示本計畫操作該軟體是沒有問題地。

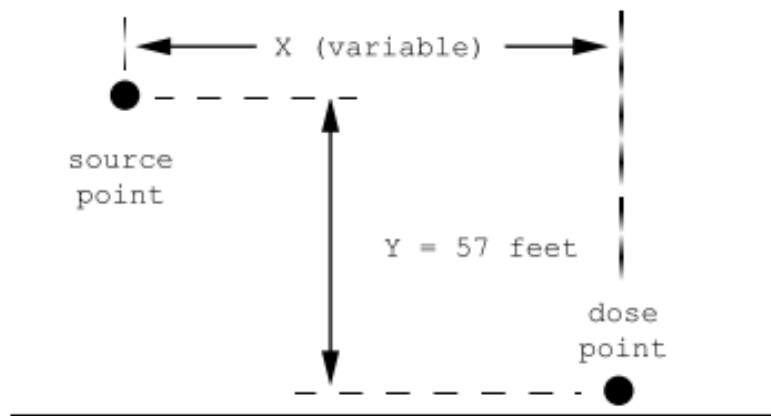


圖 4-16 ANSI/ANS 6.6.1 Reference Problem I.1 幾何描述

表 4-4 ANSI/ANS 6.6.1 Reference Problem I.1 輸入參數摘要

變數名稱	輸入參數
X Dose Point	200、1000、3000、5000 feet
Y Dose Point	57 feet
Air density (g/cm ³)	0.00122
Source energy	6.2 MeV
Source strength	1 photon/sec
Buildup material	Air

表 4-5 本計畫操作 MicroShield 計算結果與比較

距離	其他程式計算結果	MicroShield (手冊)	MicroShield (本計畫)
(英尺)	(rad/y)	(rad/y)	(rad/y)
200	8.00E-11 ~1.20E-10	9.10E-11	9.10E-11
1000	2.00E-12 ~3.00E-12	2.60E-12	2.60E-12
3000	4.50E-14 ~7.50E-14	7.00E-14	7.00E-14
5000	3.50E-15 ~5.80E-15	5.30E-15	5.30E-15

(2) 操作建議

MicroShield 是一款商業化的輻射劑量評估程式，圖形化介面的操作方式可說是目前商用軟體的標準配備，讓使用者可以快速地建立計算情節，

方便使用者進行輸入資訊的除錯(Debug)，該程式採用點核仁法，其優勢為可在短時間內得到保守合理的劑量評估，這也是這套程式的優點之一。然而，在本計畫操作的過程中，發現很多使用者可能會忽略的事項，即(1)增建因子的選擇與(2)評估結果是否收斂等兩項議題，兩者均需仰賴使用者具備輻射屏蔽的知識才能作出合理的選擇，這兩項參數的設定對於劑量評估具有重要影響力。

3. MCNP

(1) 程式建置與測試

關於 MCNP 的程式建置與測試，在建置方面，本計畫採用的程式為 MCNP6，程式的版本為 v6.2，程式包含 3 張 DVD，安裝步驟如下：

步驟 1－建立資料夾

步驟 2－複製 DVD 檔案至建立的資料夾

步驟 3－安裝，開啟 cmd，將路徑切換到以建立資料夾位置，輸入安裝指令 "INSTALL_windows"

步驟 4－執行測試，在同一個 cmd 視窗下，輸入測試指令 "INSTALL_windows test"

在安裝的過程需要，需要特別注意環境參數的設定是否正確。

在測試方面，由於在安裝的過程中已透過指令進行程式的測試，因此，本計畫透過簡單案例的計算以展示本計畫對於 MCNP 的操作能力，描述如圖 4-17 所示。在圖中，射源的形式為點射源，能量為 0.2 MeV 的光子，射源的屏蔽為 0.1 公分的鉛，密度為 11.35 g/cm³，偵檢器位於射源的右方，鉛屏蔽至於射源與偵檢器的中間，目標是計算光子的透射分率 (Transmitted fraction)。這個簡單案例同時可以採用解析法進行計算，解析法如式 1 所示。透過國家標準與技術研究所(NIST)可以得到 μ/ρ (0.9985 cm²/g at 0.2 MeV)與 ρ (11.35 g/cm³)， μ/ρ 乘上 ρ 即可得到 μ ，將其值為 11.333 cm⁻¹，帶入下式(1)即可得到透射分率，其值為 0.3220。

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad \text{式(1)}$$

MCNP 的計算結果顯示於表 4-6，表中同時顯示解析法與 MCNP 比較的結果。結果顯示，本計畫操作 MCNP 的計算結果與解析法是相符地，顯示在本計畫操作的過程沒有對案例有錯誤的理解與設定，由此結果足以展示本計畫操作該軟體是沒有問題地。

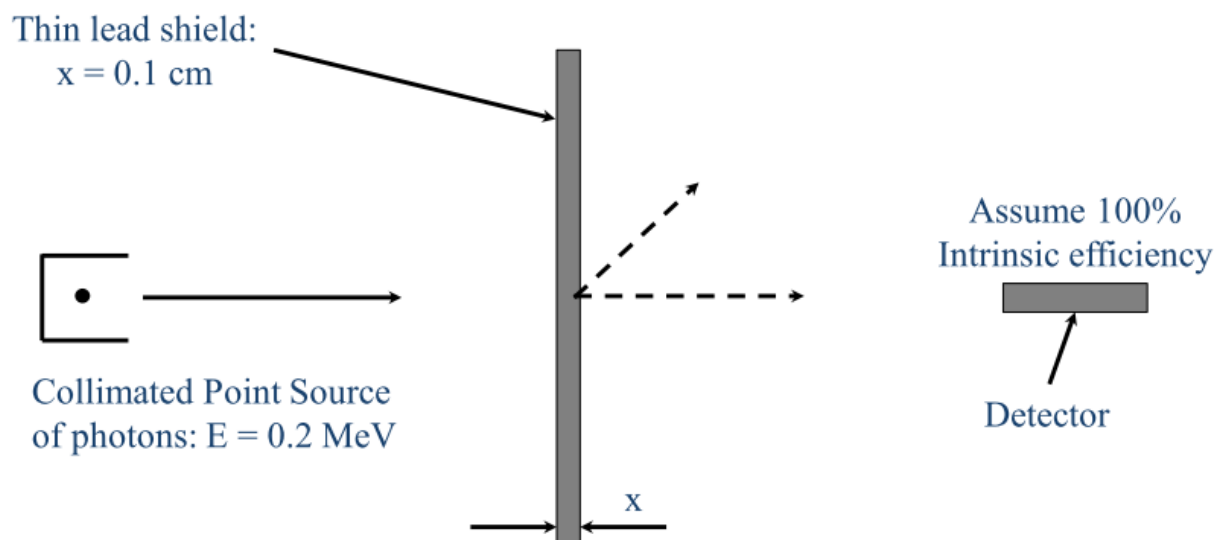


圖 4-17 簡單案例幾何描述

表 4-6 本計畫操作 MCNP 計算結果與解析法的比較

粒子數目	平均值	相對統計誤差*(%)	比值 (解析法/MCNP)
80	0.2500	0.1936 (77%)	1.288
160	0.2563	0.1347 (53%)	1.256
320	0.3063	0.0841 (27%)	1.051
1,000	0.2940	0.0490 (17%)	1.095
10.000	0.3229	0.0145 (4%)	0.997

(2) 操作建議

MCNP 是一款必須具備程式語言背景且對輻射科學需要有一定程度了解的輻射劑量評估程式，門檻相對於前述兩款程式是最高地。本計畫購買的是最新的版本，但該版本已沒有圖形化介面軟體(需額外購買)輔助，這使得使用者在沒有圖形化介面軟體輔助下，建立計算情節的輸入資料與除錯(Debug)是相當不便，尤其是對初學者而言，相當地不友善。但是，該程式的優勢是基於蒙地卡羅法與 ENDF 連續能譜截面，是三種程式中能得到最精確的結果。

五、以具代表性之訪查結果為案例，比較驗證各式輻射防護評估程式之優劣，尋求最合適之評估程式 (工作項目 5)

本計畫規劃於 109 年依據現場檢/訪查實際對鋼鐵業發現輻射異常物進行劑量偵測(工作項目 1)之結果，建立國內鋼鐵從業人員於不同接觸情境之實測輻射劑量評估模式(工作項目 2)，再以現場檢/訪查中具代表性(選擇劑量率較高者)之結果為案例，比較實測之輻射劑量評估模式與工作項目 4 所建置之輻射防護評估程式之結果差異，進程式驗證，尋求最合適之評估程式。

1. 案例描述

本案例評估標的如圖 4-18 所顯示，此輻射異常物於 109 年 6 月由鋼鐵廠通報，當時情況為載運進口廢鐵的 40 呎貨櫃車進入鋼鐵廠時，經廠區門框式偵檢器掃描，即被偵測出輻射異常，由廠區相關人員指引貨櫃車司機將載運含輻射污染物之廢鐵運至輻射異常廢鐵存放區卸貨，並於翌日上午 11 時找出輻射污染物，依規定將輻射污染物隔離暫貯。

輻射異常物的描述如下：重量為 490 克，形狀為圓柱形棒狀，尺寸為直徑 0.7 公分、長 50 公分，表面 5 公分劑量率經 AT1121 輻射偵檢器量測結果為 $1.23 \mu\text{Sv/h}$ ，量測當下的背景劑量率為 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，故淨劑量率為 $1.13 \mu\text{Sv/h}$ ，其中，AT1121 輻射偵檢器量測的劑量為周圍等效劑量， $H^*(10)$ 。輻射異常物經 RML-OS-02/純鍺加馬能譜分析儀分析，分析結果顯示於圖 4-19，輻射異常物所含的放射性元素為 Th-232，比活度為 49.7 Bq/g ，總活度為 24353 Bq 。Th-232 屬天然的放射性元素，衰變圖途徑如圖 4-20 所示，其子核包含具有放射性的 Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212，與穩定的 Pb-208。

鋼鐵廠對於輻射異常物的最後處置選擇退運處理，圖 4-21 顯示輻射異常物退運時的包件外觀，包件重量為 5.78 公斤，包件尺寸為長 67 公分、寬 19 公分、高 15 公分，包件表面 5 公分劑量率經 AT1121 輻射偵檢器量測結果為 $0.25 \mu\text{Sv/h}$ ，量測當下的背景劑量率為 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，故淨劑量率為 $0.15 \mu\text{Sv/h}$ 。



圖 4-18. 輻射異常物外觀

國立清華大學原子科學技術發展中心
放射性核種分析實驗室測試報告(2020B0704-1)

地 址：新竹市光復路二段 101 號
電 話：(03) 5715131 轉 35482；0972289121
e-mail：jhchao@mx.nthu.edu.tw
傳 真：(03) 5722660

委辦單位：財團法人中華民國輻射防護協會
地 址：新竹市光復路二段295號15樓之1
電 話：(03)5722224#323；0932116271
傳 真：(03)5722521
e-mail：jack@rpa.org.tw
聯 絡 人：徐明傑

(109.07.16)

- 一、採樣地點/日期：財團法人中華民國輻射防護協會委送 / 2020/07/15
- 二、試樣種類：鋼鐵棒狀物。
- 三、採樣程序與前處理：試樣直接計測。
- 四、測試程序/儀器：RML-OS-02/純鍺加馬能譜分析系統。
- 五、分析結果：如下表。

試樣編號	核種活度(貝克/公克)	
	^{40}K	^{232}Th 系
鋼鐵棒狀物	4.6 ± 0.4	49.7 ± 0.7

註： ^{232}Th 以其子核種 ^{228}Ac 定量。

承辦單位簽署：

[Handwritten signature]



圖 4-19 輻射異常物的檢測報告

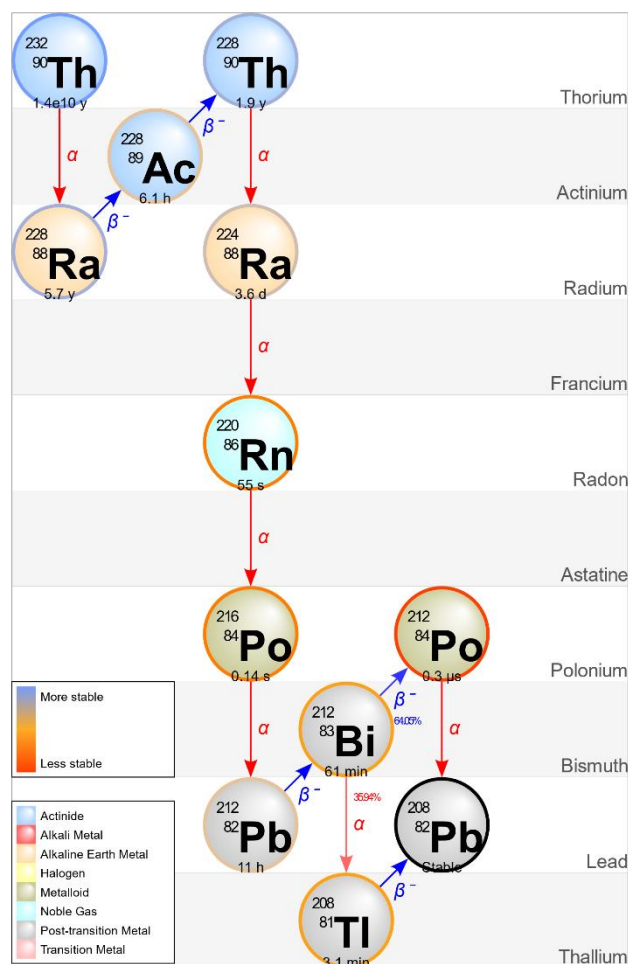


圖 4-20 鈾-232 衰變系列
(資料來源為 <https://upload.wikimedia.org>)



圖 4-21 輻射異常物包件外觀

2. 曝露情節

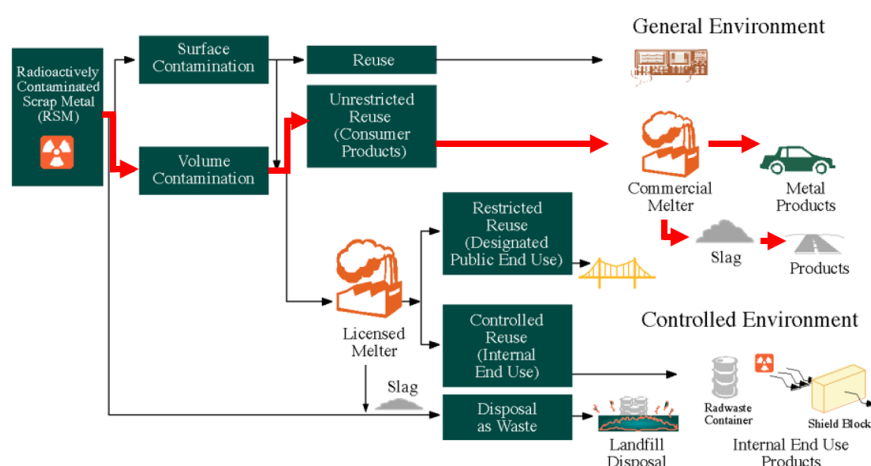


圖 4-22 假想情況的曝露情節規劃

關於輻射異常物的輻射劑量評估，本計畫評估的輻射曝露情節(以下簡稱曝露情節)包含實際情況與假想情況兩種。實際情況的曝露情節係依據事件發生後之各項處置流程，輻射異常物最後的處理方式有退運與報繳核能研究所(簡稱核研所)兩種，實際的處置情況是以退運的方式處理輻射異常物，但是，為了全面地評估輻射工作人員可能的曝露情節之體外輻射劑量，本計畫將所有可能之曝露情節納入輻射劑量的評估並彙整至表 4-7。假想情況則是假設輻射異常物進入鋼鐵廠的冶煉爐中鑄煉，其曝露情節會比實際情況複雜許多，依距輻射異常物的屬性以及表 3-4 的曝露情節，將假想情況的曝露途徑繪製於圖 4-22，而考慮的曝露情節則列於表 4-8。

表 4-7 實際情況的曝露情節與程式評估項目

工作人員情景	說明	RESRAD- RECYCLE (v3.10)	MicroShield Pro (v12.08)
廢料運送：廢料裝載	港口，將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛	V	V
廢料運送：司機	港口 --> 鋼鐵廠	V	V
廢料運送：公眾曝露		V	
廢料冶煉：廢料處理	鋼鐵廠，搜尋輻射異常物	V	V
廢料運送：廢料裝載	鋼鐵廠，將輻射異常物裝載至運輸車輛	V	V
廢料運送：司機		V	V
廢料運送：公眾曝露	路線 1. 鋼鐵廠 --> 港口	V	
廢料運送：司機		V	V
廢料運送：公眾曝露	路線 2. 鋼鐵廠 --> 核研所	V	

表 4-8 假想情況的曝露情節與程式評估項目

工作人員情景	說明	RESRAD- RECYCLE (v3.10)	MicroShield Pro (v12.08)	MCNP6 (v1.0)
廢料運送：廢料裝載	港口，將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛	V	V	
廢料運送：司機	港口 --> 鋼鐵廠	V	V	
廢料運送：公眾曝露		V		
廢料冶煉：冶煉廠工 作人員	鋼鐵廠，倉儲人員	V	V	
廢料冶煉：冶煉廠裝 載		V	V	
廢料冶煉：熔爐操作 員		V	V	
廢料冶煉：袋式除塵 器操作員		V	V	
廢料冶煉：爐渣工作 人員		V	V	
廢料運送：爐渣裝載	鋼鐵廠，將廢料裝載至運輸車輛	V	V	
廢料運送：司機	鋼鐵廠 --> 水泥廠	V	V	
廢料運送：公眾曝露		V		
消費產品：停車場		V	V	V
消費產品：房間/辦公 室及房屋 外牆		V	V	V
公共產品：鋪路		V	V	V

3. 體射源積分對體外劑量評估的影響

體外曝露的輻射劑量評估方法有很多種，本計畫選擇的輻射劑量評估程式採用的方法包含以點核仁法為基礎的 RESRAD-RECYCLE 與 MicroShield，以及採用蒙地卡羅法的 MCNP。不管是點核仁法或是蒙地卡羅法，使用者都要注意計算結果是否收斂。在點核仁法中，使用者可以透過體射源積分數目的設定，觀察結果是否收斂；然而，在 RESRAD-RECYCLE 的參數設定中，使用者無法設定體射源的積分數目，從而無法了解其對欲評估問題的適用性。為此，本計畫將對此議題進行敏感度測試，以體射源的厚度為變數，測試其對體外輻射劑量的影響，計算的參數與結果彙整至表 4-9，其中，對照組的均厚度為 201 公分，實驗組的厚度均為 100 公分，而對照組 1 與實驗組 1 的射源與偵檢器距離為 400 公分，對照組 2 與實驗組 2

的射源與偵檢器距離為 100 公分，敏感度測試使用的輻射劑量評估程式為 RESRAD-RECYCLE (v3.10)。

根據表 4-9 的計算結果，體外劑量因計算參數設置而異，進一步觀察差異來源，發現第一組的劑量差異來源是比活度，第二組的劑量差異來源除了比活度之外，程式也考慮射源與偵檢器距離這個參數。而測試結果應該會因為體射源的大小而不一樣，因此從輸出檔擷取 RESRAD-RECYCLE 劑量評估的體外劑量 DCF 之參數，發現對照組 1 與實驗組 1 的體外劑量 DCF 是一樣的，對照組 2 與實驗組 2 亦有相同的現象。

體射源尺寸改變但是體外劑量 DCF 不變的可能原因，推測是體射源切割方式過於粗造，即數目切的不夠多，這將是 RESRAD-RECYCLE 程式的限制。

表 4-9 體射源積分對體外劑量評估影響敏感度測試的計算參數與評估結果

項目	單位	對照組 1	實驗組 1	對照組 2	實驗組 2
重量	(Kg)	0.49	0.49	0.49	0.49
比活度	(Bq/g)	49.7	49.7	49.7	49.7
稀釋因子		2.45×10^{-05}	4.90×10^{-05}	2.45×10^{-05}	4.90×10^{-05}
卡車重量	(噸)	20	10	20	10
射源與偵檢器距離 (cm)		400	400	100	100
射源材料		Steel	Steel	Steel	Steel
射源材料密度	(g/cm ³)	3.93	3.93	3.93	3.93
射源幾何	Full Cylinder	Full Cylinder	Full Cylinder	Full Cylinder	Full Cylinder
射源半徑	(cm)	127	127	127	127
射源厚度	(cm)	201	100	201	100
體外劑量 DCF		3.51×10^{-14}	3.51×10^{-14}	3.08×10^{-13}	3.08×10^{-13}
體外劑量	μSv	6.83×10^{-11}	1.37×10^{-10}	6.01×10^{-10}	1.20×10^{-09}

4. 輻射劑量評估程式的參數設定

為客觀地討論 RESRAD-RECYCLE、MicroShield 與 MCNP 對於輻射異常物的體外輻射劑量評估，本計畫將三種程式的計算參數設置盡可能地一致化。考量各程式計算參數設置的彈性程度，RESRAD-RECYCLE 的彈性程度是三者之中最低的但速度是最快的，MCNP 是三者之中最高的但速度是最慢的，MicroShield 不論是在參數設置的彈性程度或計算速度都是較合理可接受的。考量程式對曝露情節的涵蓋程度，以 RESRAD-RECYCLE 的計算參數為基礎，並盡可能讓 MicroShield 與 MCNP 的參數設置與其一致。

關於 RESRAD-RECYCLE (以下簡稱 RR) 評估實際情況的曝露情節與假想情況的曝露情節的輻射劑量，表 4-10 給出各個情節的參數設置。在射源項設定方面，程式的使用手冊提及部份放射性元素有考慮子核(半化期小於等於 6 個月)的貢獻，並假設母核經過 1 年的衰變伴隨子核的成長，詳情可參閱手冊的表 3.1；本案例的放射性元素為 Th-232，其在列表中並無考慮子核，又該元素在冶煉後的產品分布主要集中在爐渣，占比約 99%，少部份會飄逸散布到空氣中被收集至集塵袋，此部份佔比僅 1%，故本研究後續其他程式的射源項設定與本節一致。在幾何設定方面，體射源與偵檢器之相對位置如圖 4-23 所示。

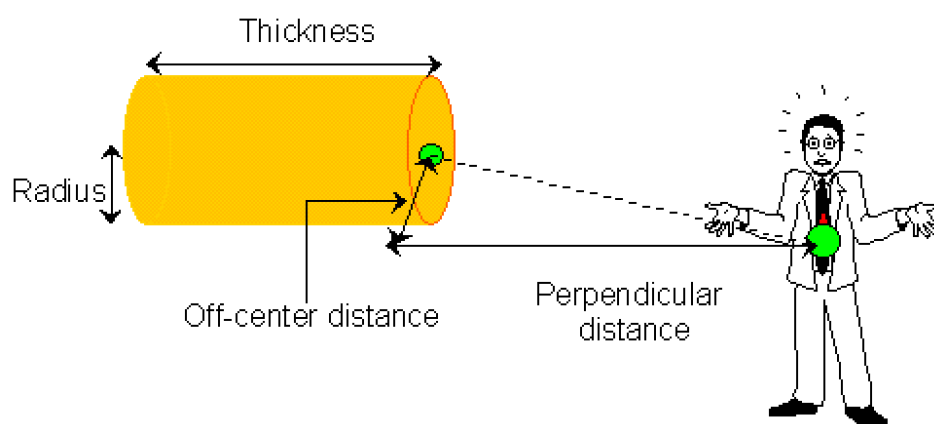


圖 4-23 體射源與偵檢器之相對位置

由程式的使用手冊，若射源項為體射源時，其幾何僅全圓柱(Full Cylinder, FC)與半圓柱(Half-Cylinder, HC)兩種，使用者可依問題調整射源與偵檢器的距離，可調參數有離軸(Off-center)距離與垂直(Perpendicular)距離，為求保守估計不考慮離軸距離。在運送相關參數設定方面，為了保守評估司機與民眾的輻射劑量，不考慮貨物以及車輛的屏蔽效應，運送路線參考 Google Map 提供的道路資訊，選擇路徑最長的方案作為運送路線，行車速度係依據 Google Map 提供的路徑長與行車時間等資訊作為計算參數；人口密度參考全國人口資料庫作為計算參數；車輛密度參考 109 年日交通量參考值(主線)與公路交通量調查統計表-108 年度_修作為計算參數。

關於 MicroShield Pro (以下簡稱 MS) 評估實際情況的曝露情節與假想情況的曝露情節的輻射劑量，表 4-11 為各項情節的參數設置，其中，RV 為 Rectangular Volume，CVES 為 Cylinder Volume - End shields。在表 4-11 中，MS 的幾何以體積等效的方式近似 RR 的設定；例如，在 RR 的計算中，若體射源的幾何為半圓柱，由於 MS 沒有半圓柱的幾何選項，因此，本計畫的作法是在厚度不變的前提下，讓 $\pi r^2 \times h = r^2 \times h$ 式中的 $\pi r^2 = r^2$ ，且面對偵檢器的射源面積為 r^2 。MS 的增建因子(Buildup factor)均為 Air gap。關

於 Integration 設定，對於所有的曝露情節，經過測試後，採用預設值的 10 倍可以得到收斂的數值；但是，消費性產品與公共產品的情節除外，其 Integration 的設定值為程式的最大值。

表 4-10 RESRAD-RECYCLE 計算資訊

工作人員情景		幾何	半徑 (cm)	厚 (cm)	材料	密度 (g/cm ³)	射源至偵檢 器距離 (cm)	曝露 時間 (h)	運送路 線距離 (km)	速度 (km/h)	人口密度 (Person/km ²)
實際情況	廢料運送：廢料裝載	HC	127	201	Steel	3.93	400	1.6			
	廢料運送：司機	港口 --> 鋼鐵廠	HC	60	900	Steel	3.93	200	1.38	78.8	57
	廢料運送：居民										
	廢料冶煉：廢料處理	鋼鐵廠搜尋 異常物	FC	0.35	50	Steel	25.46	200	4		
	廢料運送：廢料裝載	異常物裝載	HC	127	201	Steel	3.93	400	1.6		
	廢料運送：司機	路線 1.	HC	60	900	Steel	3.93	200	1.4	107.5	77
	廢料運送：居民	鋼鐵廠 --> 港口									
	廢料運送：司機	路線 2.	HC	60	900	Steel	3.93	200	1.15	87.1	76
	廢料運送：居民	鋼鐵廠 --> 核研所									
假想情況	廢料運送：廢料裝載	港口	HC	127	201	Steel	3.93	400	1.6		
	廢料運送：司機	港口 -->	HC	60	900	Steel	3.93	200	1.38	78.8	57
	廢料運送：居民	鋼鐵廠									
	廢料冶煉：冶煉廠工作 人員	鋼鐵廠， 倉儲人員	HC	175	351	Steel	5.9	10000	80		
	廢料冶煉：冶煉裝載		HC	139	279	Steel	5.9	400	4		
	廢料冶煉：熔爐操作員		FC	127	253	Steel	7.86	300	5		
	廢料冶煉：袋式除塵器 操作員		FC	40	100	Steel	2	200	1		
	廢料冶煉：爐渣工作人 員		HC	228	45. 5	Steel	2.7	150	25		
	廢料冶煉：爐渣裝載		HC	127	100	Steel	2.7	400	0.8		
	廢料運送：司機	鋼鐵廠 -->	HC	60	900	Steel	3.93	200	3.9	258	66
	廢料運送：居民	水泥廠									
	消費產品：停車場		FC	3433	10	Concr ete	2.7	100	62		
	消費產品： 房間/辦公室/房屋外牆		HC	300	0.2	Concr ete	2.7	250	2000		
	公共產品：鋪路		FC	3433	10	Concr ete	2.7	100	6		

表 4-11 MicroShield Pro 計算資訊

	工作人員情景	幾何	半徑/邊長 (cm)	邊長 (cm)	厚 (cm)	材料	密度 (g/cm ³)	射源至偵 檢器距離 cm
實際情況	廢料運送： 廢料裝載	RV	225	225	201	Steel	3.93	400
	廢料運送： 司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
	廢料冶煉： 廢料處理	CVES	0.35		50	Steel	25.4 6	200
	廢料運送： 廢料裝載	RV	225	225	201	Steel	3.93	400
	廢料運送： 司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
	廢料運送： 司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
	廢料運送： 司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
	廢料運送： 司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
假想情況	廢料運送： 廢料裝載	RV	225	225	201	Steel	3.93	400
	廢料運送： 司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
	廢料冶煉： 冶煉廠工作人員	RV	310	310	351	Steel	5.9	10000
	廢料冶煉： 冶煉裝載	RV	246	246	279	Steel	5.9	400
	廢料冶煉： 熔爐操作員	CVES	127		253	Steel	7.86	300
	廢料冶煉： 袋式除塵器操作 員	CVES	40		100	Steel	2	200
	廢料冶煉： 爐渣工作人員	RV	404	404	45.5	Steel	2.7	150
	廢料冶煉： 爐渣裝載	RV	225	225	100	Steel	3.93	400
	廢料運送：司機	RV	106	106	900	Steel	3.93	200
	消費產品： 停車場	CVES	3433		10	Concrete	2.7	100
	消費產品： 房間/辦公室/房 屋外牆	CVES	300 300 300		0.2 0.2 0.2	Concrete	2.7	100 200 250
	公共產品：鋪路	CVES	3433		10	Concrete	2.7	100

關於 MCNP6 (簡稱 MCNP)評估假想情況的曝露情節的輻射劑量，表 4-12 給出各項情節的參數設置。射源項的資訊取自 MS，計算中牽涉兩種材料，分別是 Ordinary concrete (NIST)與空氣，前者為射源項的材料，後者為射源至偵檢器之間的介質，上述兩種材料的組成與密度均來自於 Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling [18]。在輻射與物質作用的截面設定方面，光子輻射遷移計算選擇的截面資料為 MCPLIB04，電子則是 el03。在計分設定方面，本計畫採用有效劑量 (Effective dose)作為問題計分目標，其來源為 ICRP 74 號報告的表 A.1 與 A.17[24]。

表 4-12 MCNP 計算資訊

工作人員情景	核種	活度 (Bq)	幾何	半徑 (cm)	厚度 (cm)	射源至偵檢器距離 (cm)
消費產品：停車場	Th-232	24353	圓柱	3433	10	100
消費產品：房間/辦公室/ 房屋外牆	Th-232	5479		300	0.2	100
		5479	圓柱	300	0.2	200
		3288		300	0.2	250
公共產品：鋪路	Th-232	24353	圓柱	3433	10	100

5. 輻射劑量評估程式的計算結果

基於表 4-7 與表 4-8 的曝露情節之輻射劑量評估，表 4-13 與表 4-14 分別給出各程式的輻射劑量評估結果。一般來說，體外劑量因程式計算方式而異，但不會有顯著差異，而且計算方式相似的程式對於相同案例在參數設置一致下，其結果的差異預期會比不同計算方式的程式計算結果小。然而，在表 4-13 與表 4-14 中，本計畫觀察到的趨勢卻與此相反，比較計算方式相似的 RR 與 MS 的計算結果，不管是實際情況與假想情況的體外輻射劑量評估結果顯示，除了廢料冶煉：冶煉廠工作人員之情節之外，RR 在大部分的案例中均小於 MS，若把不同計算方式的 MCNP 納入比較的話，發現三者消費產品：停車場與公共產品：鋪路的曝露情節有著一致的結果，但是，RR 與 MS 和 MCNP 在消費產品：房間/辦公室及房屋外牆之曝露情節有顯著落差。

本計畫依據計算方式與程式的使用經驗，在參數設置一致性之下，MCNP 的計算結果將成為劑量評估準確度的依據，這是普遍的共識，MS 與 MCNP 有著一致的結果，顯示 MS 的數值是可信的，然而，計算方式相似的 RR 與 MS 在大部分的曝露情節有著顯著的差異，推測可能的原因是 RR 的計算結果尚未收斂，而造成計算結果沒有收斂的可能原因為體射源的積分數目不足所致。此外，RR 體外劑量轉換因子使用 FGR 12，而 MS 與 MCNP 均採用 ICRP 74，也可能是造成差異的來源。

表 4-13 RR、MS 評估實際情況曝露情節的體外輻射劑量

工作人員情景	說明	RESRAD- RECYCLE (v3.10)	MicroShield Pro (v12.08)	Ratio (RR/MS)
廢料運送：廢料 裝載	將裝有廢料的貨櫃裝 載至運輸車輛	6.83×10^{-11}	8.15×10^{-10}	0.08
廢料運送：司機 廢料運送：公眾 曝露	港口 --> 鋼鐵廠	5.60×10^{-11} 8.04×10^{-18}	6.31×10^{-10}	0.09
廢料冶煉：廢料 處理	鋼鐵廠，搜尋輻射異 常物	4.82×10^{-10}	3.56×10^{-08}	0.01
廢料運送：廢料 裝載	鋼鐵廠，將輻射異常 物裝載至運輸車輛	6.83×10^{-11}	8.15×10^{-10}	0.08
廢料運送：司機 廢料運送：公眾 曝露	路線 1. 鋼鐵廠 --> 港口	5.68×10^{-11} 2.08×10^{-17}	6.40×10^{-10}	0.09
廢料運送：司機 廢料運送：公眾 曝露	路線 2. 鋼鐵廠 --> 核研所	4.66×10^{-11} 1.31×10^{-17}	5.26×10^{-10}	0.09

備註：除公眾劑量單位為 man-Sv，其餘為體外輻射劑量，單位為 μSv 。

依據工作項目與計畫時程的規劃，本計畫已完成國際相關輻射防護評估程式的蒐集與建置以及輻射防護評估程式的特性與比較，結果顯示於表 4-15。由程式的測試結果，顯示本計畫已克服了 RESRAD-RECYCLE 的執行問題，但尚有 RESRAD-RECYCLE 操作穩定性的問題需要克服與解決。因此，未來除按照計畫時程之規劃執行工作之外，克服 RESRAD-RECYCLE 操作的穩定性是本計畫研究的重點。

表 4-14 RR、MS 與 MCNP 評估假想情況的曝露情節的體外輻射劑量

工作人員情景	說明	RESRAD- RECYCLE (v3.10)	MicroShield Pro (v12.08)	MCNP6 (v1.0)	Ratio (RR/MS)	Ratio (MS/MCNP)
廢料運送：廢料裝載	將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛	6.83E-11	8.15E-10		0.08	
廢料運送：司機	港口 --> 鋼鐵廠	5.60E-11	6.31E-10		0.09	
廢料運送：公眾曝露		8.04E-18				
廢料冶煉：冶煉廠工作人員	鋼鐵廠，倉儲人員	1.91E-10	1.45E-11		13.13	
廢料冶煉：冶煉廠裝載		4.03E-11	9.68E-10		0.04	
廢料冶煉：熔爐操作員		1.47E-10	1.73E-09		0.08	
廢料冶煉：袋式除塵器操作員		7.45E-12	8.37E-11		0.09	
廢料冶煉：爐渣工作人員		2.15E-08	2.44E-07		0.09	
廢料運送：爐渣裝載	鋼鐵廠，將廢料裝載至運輸車輛	6.76E-11	8.14E-10		0.08	
廢料運送：司機	鋼鐵廠 --> 水泥廠	3.13E-10	1.76E-09		0.18	
廢料運送：公眾曝露		1.39E-17				
消費產品：停車場		1.73E-08	6.48E-08	3.16E-08	0.27	2.05
消費產品：房間/辦公室及房屋外牆		2.16E-07	3.82E-04	2.73E-04	5.7E-04	1.40
公共產品：鋪路		1.68E-09	6.27E-09	3.06E-09	0.27	2.05

備註：

除公眾劑量單位為 man-Sv，其餘為體外輻射劑量，單位為 μSv 。

MCNP 計算結果之統計誤差在一個標準差之內均小於 1%。

表 4-15 輻射防護評估程式的特性與比較

程式名稱	操作門檻	劑量評估方式	計算速度	精準度	輻射異常物 誤熔評估
RESRAD- RECYCLE	易	半經驗公式	快	保守合理	有
MicroShield	中	點核仁法	中	保守合理	無
MCNP	難	蒙地卡羅法	慢	優	無

另外，本計畫在輻射異常物代表性案例的輻射劑量評估結果中，發現 RR 提供了完善的處置流程資訊與合理的曝露情節計算參數假設，不過，其計算結果因為計算方式的限制在部份情節有著顯著低估的現象。與 RR

一樣是基於點核仁法計算方式的 MS，在計算參數設置與 RR 一致的前提下，其在輻射異常物的輻射劑量評估中經與 MCNP 比較後認為其可提供可信的結果與合理的計算時間。與前述兩者有著不同計算方式的 MCNP，在計算參數設置與 RR 一致的前提下，其計算結果的準確度被公認是最好佳的，但計算時間卻是三者之中最高的。綜合考量所有因素之後，對於輻射異常物的體外劑量評估，本計畫建議採用 RR 的處置流程資訊與曝露情節計算參數假設，採用 MS 為計算引擎工具。

6. 以 MicroShield 程式計算輻射異常物案例與工作項目一之實測結果比較驗證分析

一般來說，在評估輻射劑量時，放射性元素的選擇被視為是關鍵參數之一，尤其是釷系或鈾系等半化期非常長且衰變鏈複雜的放射性元素。由圖 4-18 的輻射異常物分析結果顯示，輻射異常物的放射性元素為 Th-232，活度是由其子核 Ac-228 定量推估的。為了瞭解在劑量評估時，考慮母核與考慮母核及其子核對輻射劑量的影響有多少，以及這項參數是否為本案的關鍵參數，本計畫對此議題進行測試，計算的參數與結果彙整至表 4-16，其中，對照組的射源項僅考慮母核，實驗組的射源項則考慮母核及其達到平衡之子核，測試使用的輻射劑量評估程式為 MicroShield Pro (v12.08)。

表 4-16 放射性元素的選擇對劑量率影響測試的計算參數與評估結果

項目	對照組	實驗組
放射性元素	Th-232	Th-232 & daughters
活度	24353 Bq	24353 Bq
射源幾何	Cylinder Volume – End shields	Cylinder Volume – End shields
射源尺寸	半徑 3433 cm × 厚 10cm	半徑 3433 cm × 厚 10cm
射源材料	Concrete	Concrete
射源材料密度	2.7 g/cm ³	2.7 g/cm ³
射源與偵檢器距離	100 cm	100 cm
Buildup factor	Air gap	Air gap
Integration	MAX.	MAX.
Effective dose (ICRP 74 - 1997)	1.045×10 ⁻¹² mSv/h	1.429×10 ⁻⁸ mSv/h
Ratio (實驗組/對照組)	1.367×10 ⁴	

表 4-17 為測試的結果，僅計算母核 Th-232 之對照組結果與量測值相差 4 個數量級；而計算母核加平衡子核之實驗組結果與量測值數量級是一致的。此輻射異常物案例與工作項目一之實測結果相較，距輻射源 5 公分處之實測淨劑量率為 0.698 $\mu\text{Sv/h}$ ，而母核加平衡子核之實驗組計算結果為 0.852，程式計算值約為量測值之 1.22 倍；距輻射源 30 公分處之實測淨劑量率為 0.038 $\mu\text{Sv/h}$ ，而母核加平衡子核之實驗組計算結果為 0.077，程式計算值雖然約為量測值之 2.02 倍，但因其劑量以較低，實際劑量率差異僅約 0.04 $\mu\text{Sv/h}$ 。而在距輻射源更遠的 100 公分處之實測淨劑量率為 0.030 $\mu\text{Sv/h}$ ，而母核加平衡子核之實驗組計算結果為 0.008，因其劑量以較低，程式計算值較實際量測值之劑量率差異僅約 0.02 $\mu\text{Sv/h}$ 。此外，100 公分處之實驗組計算結果與量測值的差異，本研究推測是評估目標的劑量率與背景值(0.122 $\mu\text{Sv/h}$)在同一個水平，要準確的度量這麼小的淨劑量率是不容易的；上述的結果差異尚屬可接受，並且符合本計畫的預期。

因輻射異常物的放射性元素活度是透過子核定量的，這表示在計算時使用者亦需要考慮子核的貢獻。因此，本計畫認為放射性元素的選擇是影響劑量評估的關鍵參數並建議在輻射劑量評估時，應將其子核貢獻納入。而對照組(僅考慮母核 Th-232)之計算結果與量測值在三個量測距離的差異均是顯著低估的。

表 4-17 放射性元素的選擇對劑量率的影響之靈敏度測試的計算結果

射源與偵檢器 距離	AT1121 量測淨劑 量率($\mu\text{Sv/h}$)	計算 ($\mu\text{Sv/h}$)	
	清華團隊	對照組 (Th-232)	實驗組 (Th-232 & daughters)
5 cm	0.698	8.748×10^{-5}	0.852
30 cm	0.038	9.119×10^{-6}	0.077
100 cm	0.030	1.006×10^{-6}	0.008

7. 放射性元素對活度推估的影響

輻射異常物的放射性元素活度，可以直接進行核種分析而得知。由於準確的核種分析必須藉由取樣送回實驗室進行分析，而無法在發現輻射異常

物的現場進行分析。因此實務上必須建立由劑量率量測值推估放射性元素活度的方法。推估的原則是藉由量測的物理量與單位活度計算結果的比值而得到，其中，物理量可以是空氣吸收劑量或周圍等效劑量等。對於衰變鏈較複雜的放射性元素而言，如釷系或鈾系元素，從量測得到的物理量推估的活度與實際量測活度的差距有多少，此與輻射劑量的評估有著密不可分的關係。依據上一小節的結論，對於放射性元素的選擇考慮母核及其子核，即表 4-16 的實驗組，其活度由表 4-16 的 24,353 Bq 變更為 1Bq，測試使用的輻射劑量評估程式為 MicroShield Pro (v12.08)，計算出每單位活度造成的劑量率。

表 4-18 為利用單位活度的劑量推估可能的總活度值與量測活度值的比較，活度比值依序約為 0.8、0.5、3.6，評估結果與預期相符，且由 5 公分處推估而得的活度與實驗室分析結果差異約為 20%，此差異在本計畫研究中是可接受的。本計畫建議本案採用表面 5 公分處之劑量率量測值來推估可能活度較為準確，理由是 30 公分處與 100 公分處的劑量率小至背景波動範圍，推估的活度不確定度較高，不建議採用。

表 4-18 放射性元素的選擇對活度推估的影響測試的計算結果

射源與偵檢器 距離	量測活度 (Bq)	推估活度 (Bq)	比值
	RML-OS-02 純鍺加馬能譜 分析儀	Th-232 & daughters	(推估/量測)
5 cm	2.4109×10^4	1.995×10^4	0.82
30 cm	2.4353×10^4	1.195×10^4	0.49
100 cm	2.4353×10^4	8.792×10^4	3.61

伍、 結論

109 年鋼鐵業輻射異常物通報案件截至 12 月 15 日止，總計通報 34 起，其中第 4 起、第 6 至 16 起、第 18 至 23 起、第 25 至 32 起輻射異常物通報案件，由本計畫研究團隊負責進行現場檢/訪查，並提出輻射異常物狀況調查報告，原能會輻安科人員則全程陪同訪查。目前尚有第 33 及 34 起輻射異常物通報案件(109/12/14 及 109/12/15 通報)尚未執行現場訪查，已規劃於 109/12/23 及 109/12/25 二日分別至現場進行訪查。依據檢測結果統計，109 年通報之鋼鐵業輻射異常物中，本計畫現場訪查並出具偵測報告的計有 25 件，其中有 22 件為天然輻射異常物、2 件為人工輻射異常物，有 1 件中同時含有天然及人工輻射異常物。25 件中之後續處理方式，有 7 件為出口退運，有 16 件為國內處理(送核研所)；有 2 件尚待廠商確認。

依據所假設輻射異常物案件之處理情境，鋼鐵業之從業人員於發現輻射異常物後可能接受曝露之輻射劑量，將可藉由輻射異常物現場輻射偵測之計量率數據及設定之接觸情境，進行保守劑量評估。

本計畫於 109 年度已蒐集與研析 USDOE ANL/EAD/TM- 50、EC Radiation Protection No 89、IAEA-TECDOC-1130、IAEA SSG-17 及 NCRI ANSIN42.43 等相關國際文獻與報告，並已彙整出相關要點；並彙整國內現有之鋼鐵業者發現輻射異常物之管理作法「鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則」，進行分析比較。針對輻射異常物之偵檢程序上，目前由原能會認可之偵檢業者自行訂定程序經主管機關核可後實施，尚未有統一之標準偵檢技術規範，本期計畫預定於第二年(110 年) 考量鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案) 供主管機關參考，內容預計將包括廢鋼鐵中含天然輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，以及偵檢與處理程序與主管機關之管理與管制等建議事項，詳細內容將於 110 年與主管機關討論後確定，以精進及強化國內發現鋼鐵輻射異常物後之輻射管制效能。

本計畫已完成國際相關輻射防護評估程式的蒐集與建置以及輻射防護評估程式的特性與比較，由程式的測試結果，顯示本計畫已克服了 RESRAD-RECYCLE 的執行問題，但尚有 RESRAD-RECYCLE 操作穩定性的問題需要克服與解決。因此，未來除按照計畫時程之規劃執行工作之外，

克服 RESRAD-RECYCLE 操作的穩定性是本計畫研究的重點。

此外，在輻射異常物代表性案例的輻射劑量評估結果中，發現 RESRAD-RECYCLE 提供了完善的處置流程資訊與合理的曝露情節計算參數假設，但其計算結果因為計算方式的限制在部份情節有著顯著低估的現象。MicroShield 在計算參數設置與 RESRAD-RECYCLE 一致的前提下，其在輻射異常物的輻射劑量評估中經與 MCNP 比較後認為其可提供可信的結果與合理的計算時間。MCNP，在計算參數設置與 RESRAD-RECYCLE 一致的前提下，其計算結果的準確度被公認是最好佳的，但計算時間卻是三者之中最高的。綜合考量所有因素之後，對於輻射異常物的體外劑量評估，本計畫建議採用 RESRAD-RECYCLE 的處置流程資訊與曝露情節計算參數假設，採用 MicroShield 為計算引擎工具。

以 MicroShield 程式計算輻射異常物案例與工作項目一之實測結果比較驗證上，母核加平衡子核之實驗組計算結果與實際量測值數量級是一致的，距輻射源 5 公分處之實測淨劑量率為 0.698 $\mu\text{Sv/h}$ ，而母核加平衡子核之實驗組計算結果為 0.852，程式計算值約為量測值之 1.22 倍。在利用單位活度的劑量推估可能的總活度值與量測活度值的比較上，建議可採用表面 5 公分處之劑量率量測值來推估鋼鐵輻射異常物之可能活度較為準確。

綜合而言，本計畫依據契約書規訂之方法與要求進行，符合原規劃 109 年之進度。

陸、 參考文獻

1. 行政院原子能委員會，107 年游離輻射應用與管理統計，中華民國 108 年 08 月發布。
2. 行政院原子能委員會，放射性污染建築物事件防範及處理辦法，中華民國 83 年 6 月發布(107/08 修正)。
3. 行政院原子能委員會，鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則，中華民國 97 年 06 月發布。
4. The MicroShield Team, MicroShield User's Manual, Version 5, Grove Engineering Inc., Rockville, Maryland, 1996.
5. [HTTP://WWW.RADIATIONSOFTWARE.COM](http://www.radiationsoftware.com)
6. [HTTPS://resrad.evs.anl.gov/](https://resrad.evs.anl.gov/)
7. Bakr W.F., Assessment of the radiological impact of oil refining industry, J Environ Radioact. 2010 Mar;101(3):237-43. doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.11.005. Epub 2009.
8. Cheng J.J., Kassas B., Yu C., 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. United States Department of Energy, Radioactive Scrap Metal Recycling, ANL/EAD/TM-50, 1995.
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Recycle and reuse of materials and components from waste streams of nuclear fuel cycle facilities, IAEA-TECDOC-1130, IAEA, Vienna, 2000.
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Control of Orphan Sources and Other Radioactive Material in the Metal Recycling and Production Industries, IAEA SSG-17, 2012.
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).
13. 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).
14. 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).
15. Chen, S.Y. (Jan 2003). NCRP report 141: managing potentially radioactive scrap metal (ANL/EA/CP--109482). United States.

16. European Commission, Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations, Radiation Protection No 89, European Commission (1998).
17. Goorley T., James M., Booth T., et al., Initial MCNP6 release overview, Nucl. Technol. 180 (2012) 298–315.
18. International Commission on Radiological Protection , Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74 , 1996.
19. International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, 2010.
20. European Radiation Dosimetry Group (EURADOS), Technical recommendations on measurements of external environmental gamma radiation doses. Radiation Protection 106, 1999.
21. The 1991 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, 1991.
22. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.
23. <http://www.mitsubishi-fuso.com.hk/content/sea/hongkong/tc/products/trucks/fuso-super-great/dimension-and-drawings-1.html>

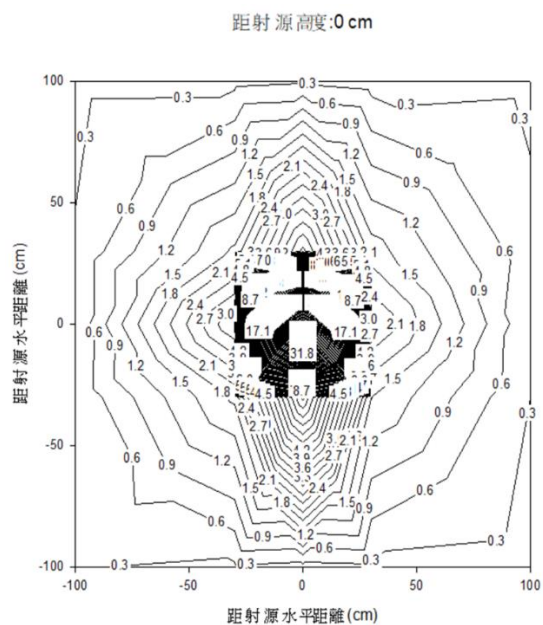
附件一

輻射異常物案例：

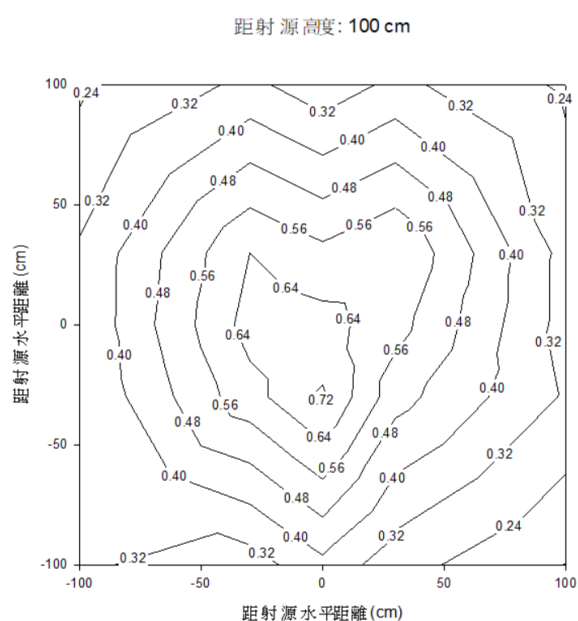
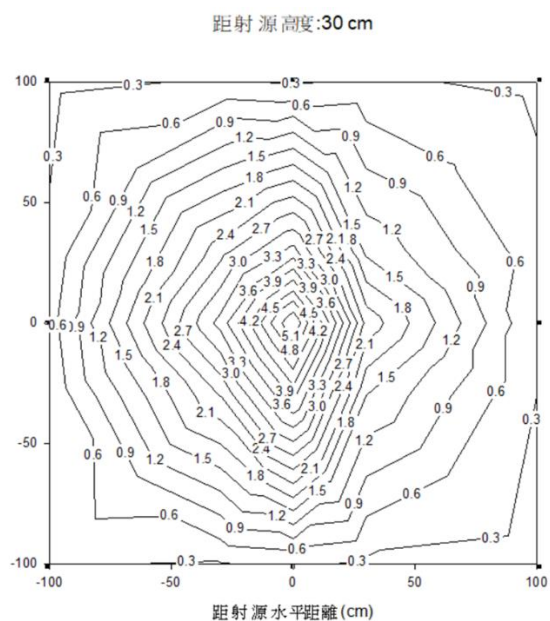
不同平面之輻射劑量分布曲線

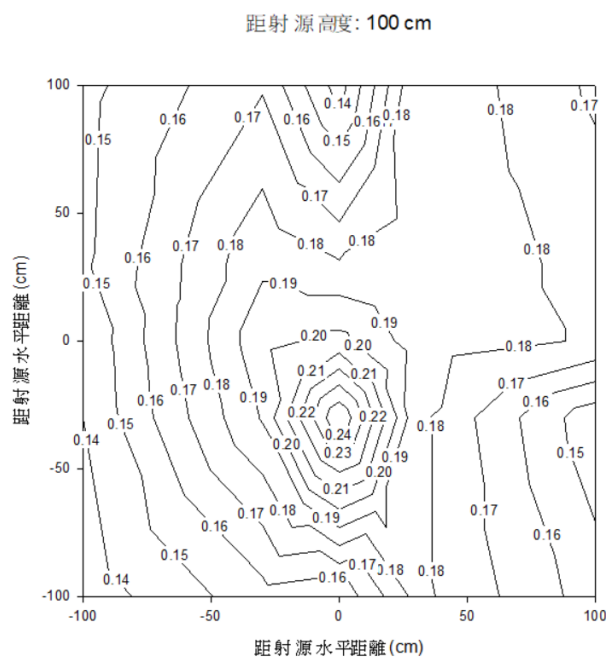
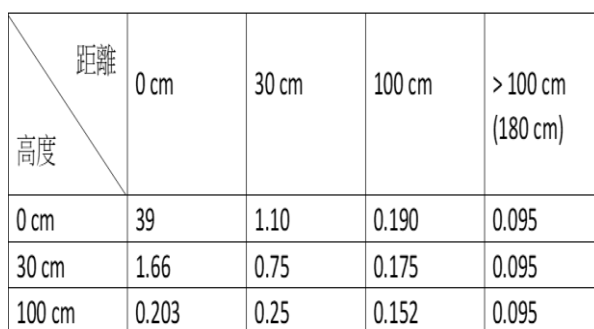
輻射異常物編號：109-10

劑量單位: $\mu\text{Sv/h}$



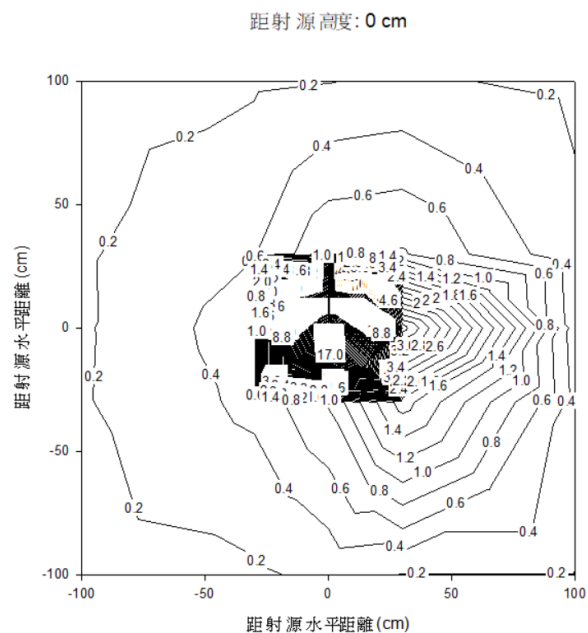
距離 高度	0 cm	30 cm	100 cm	> 100 cm (180 cm)
0 cm	50	6.1	0.187	0.097
30 cm	5.4	4.0	0.36	0.097
100 cm	0.67	0.73	0.38	0.097



劑量單位: $\mu\text{Sv/h}$ 

輻射異常物編號：109-28

劑量單位: $\mu\text{Sv/h}$



距離 \ 高度	0 cm	30 cm	100 cm	> 100 cm (180 cm)
0 cm	27	4.2	0.36	0.127
30 cm	0.82	1.42	0.3	0.127
100 cm	0.246	0.187	0.186	0.127

