

行政院原子能委員會
委託研究計畫 110 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：田能全、陳永泰、許皓翔、賴柏倫、陳瑋、林俊廷、
林立雅

報 告 日 期 ： 1 1 0 年 1 2 月 1 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	2
工作項目 1. 對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查	2
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	4
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	4
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	5
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	7
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	7
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	9
工作項目 8. 提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)	10
研究團隊說明	10
肆、主要發現與討論	12
一、對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查(工作項目 1)	12
二、對國內鋼鐵業者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 (工作項目 6).....	17
三、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 (工作項目 7).....	25
四、蒐集、研析與彙整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) (工作項目 8).....	40
五、110 年完成之具體成果.....	43
伍、結論	45
陸、參考文獻.....	46
附件一、天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案).....	48

中文摘要

本計畫為二年期計畫之第二年，工作內容包括對鋼鐵業者通報發現輻射異常物後之現場檢/訪查，對發現之輻射異常物進行研判、分析及調查其後續之處理方式，並對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查。亦對國內鋼鐵業者之從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境進行模擬分析，及對天然輻射異常物被誤熔後進行模擬評估，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。此外，本計畫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)。

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

This project is the second year of the two-year project. The work content includes on-site inspection after the iron and steel industry reports the discovery of radiation anomalies, and judgment, analysis and investigation of the discovery of radiation anomalies and their subsequent handling methods. And conduct inspections/visits on the status of domestic steel industry. This study also simulated and analyzed the situations in which the employees of the domestic iron and steel industry were exposed to natural radiation anomalies of different intensities, and conducted simulation assessments after the natural radiation anomalies were mistakenly melted, and explored the radiation doses of practitioners exposed to natural radiation anomalies of different intensities in various situations, and risk assessment. In addition, this project considers the optimal operation process planning and reasonable suppression measures for steel radiation anomalies, and proposes a draft of natural radiation anomaly detection and handling procedure.

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

壹、前言(計畫緣起)

國內每年皆有數十件鋼鐵輻射異常物之通報案件，探究其輻射異常物發生之原因，多數屬於天然放射性物質沉積於鋼鐵管路或組件等廢鋼材所含之管垢；少數則屬於人工放射性物質之廢棄射源[1]。鋼鐵業者實施原料及產品輻射偵檢，如發現有異常情形，依據「放射性污染建築物事件防範及處理辦法」規範[2]，應儘速將輻射異常物檢測出，並隔離管制妥善保[3]。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，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則需進一步確認與探討；國際間已發展出成熟之商業化輻射防護評估程式如 MicroShield、RESRAD 等，可對工作人員之輻射劑量與健康風險評估。

MicroShield 程式是目前世界各國廣泛採用之輻射源評估程式，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[4,5]。應用 MicroShield 程式即可有效評估產生 γ 射線為主之鋼鐵輻射異常物相關從業人員所接受之輻射劑量及其風險。RESRAD 程式則是近年來國際上常用之輻射防護評估程式[6]，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。本計畫規劃研析適用於評估接觸、經手或處置鋼鐵輻射異常物相關人員輻射影響之輻射防護評估程式，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。

此外，本計畫蒐集、研析與彙整國際鋼鐵輻射異常物之偵檢與處理程序，透過對檢/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。並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，藉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，有效降低相關鋼鐵從業人員之輻射劑量與健康風險，以確保其輻射作業之安全。

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。

參、110 年之研究方法

本計畫於 109 年度已蒐集、研析與彙整 USDOE ANL/EAD/TM- 50、EC Radiation Protection No 89、IAEA-TECDOC-1130、IAEA SSG-17 及 NCRI ANSI N42.43 等國際文獻與報告之相關要點，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。此完，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，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。

本計畫規劃於第二年(110 年)持續對於需接觸、偵檢或處理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)之輻射劑量與健康風險進行評估，並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。本計畫規畫進行之工作項目(包括 109-110 年)分述如下：

工作項目 1. 對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查(109-110 年)

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。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 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。

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/訪查將持續參考原子能委員會鋼鐵業輻射偵檢作業檢查紀錄表(表 1)進行。

表 1 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
一	基本資料		明
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表面位置、30 公分、1 公尺高之不同平面，在每個平面之輻射劑量最大位置為中心的至少 1m×1m 之面積(視實際劑量率大小)中，各偵測 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 1 所示。

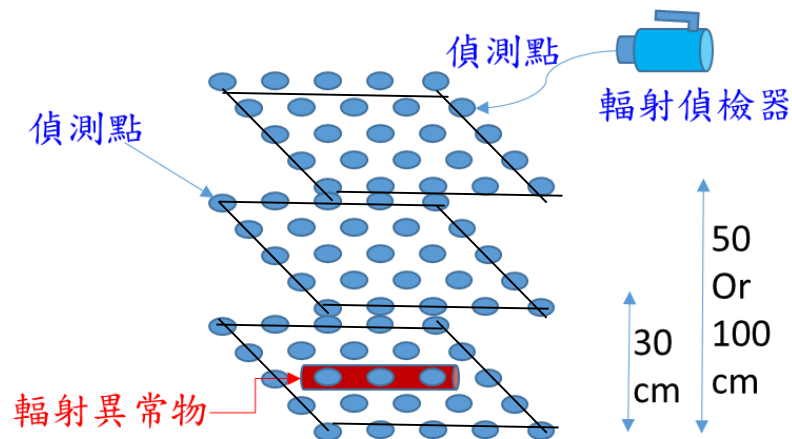


圖 1 以手持式偵檢器對輻射異常物附近之空間進行輻射劑量偵檢之偵測點示意圖

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 (109 年已完成)

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。

本計畫已於 109 年依上述天然、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 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 (109 年)

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，本計畫已於 109 年已蒐集、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，並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(109 年已完成)

本計畫已於 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 [19] 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 定義了汙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，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。

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包括：

- (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。

MCNP 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 (109 年已完成)

本計畫已於 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。

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. IAEA 44 號安全報告[12]的曝露情節顯示於圖 2。
2. NUREG-1640 [14]的金屬廢棄物之曝露情節顯示於圖 3。
3. NCRP REPORT No. 141[15] 的金屬廢棄物處理流程顯示於圖 4，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 5。

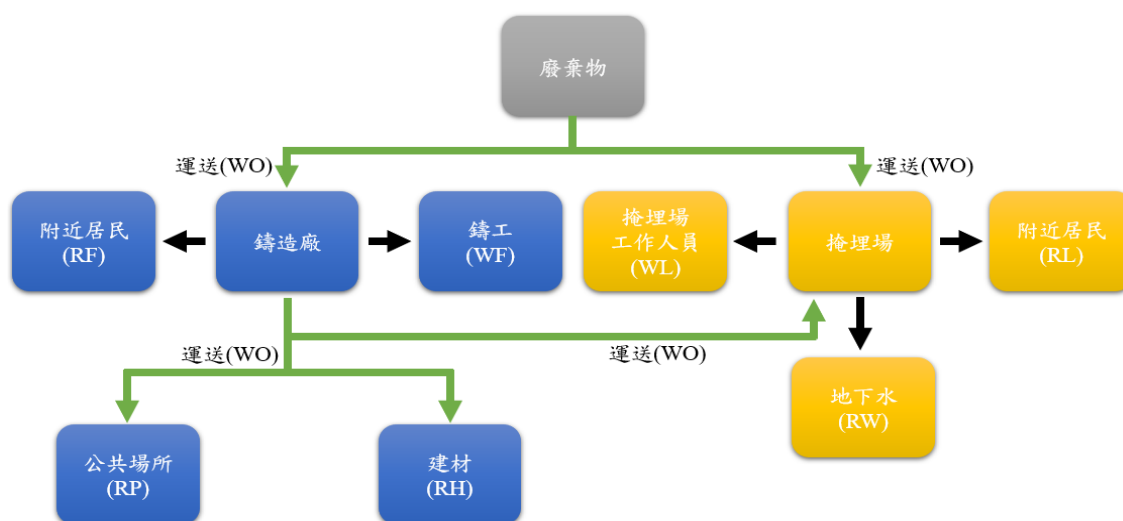


圖 2 IAEA 44 號安全報告的曝露情節

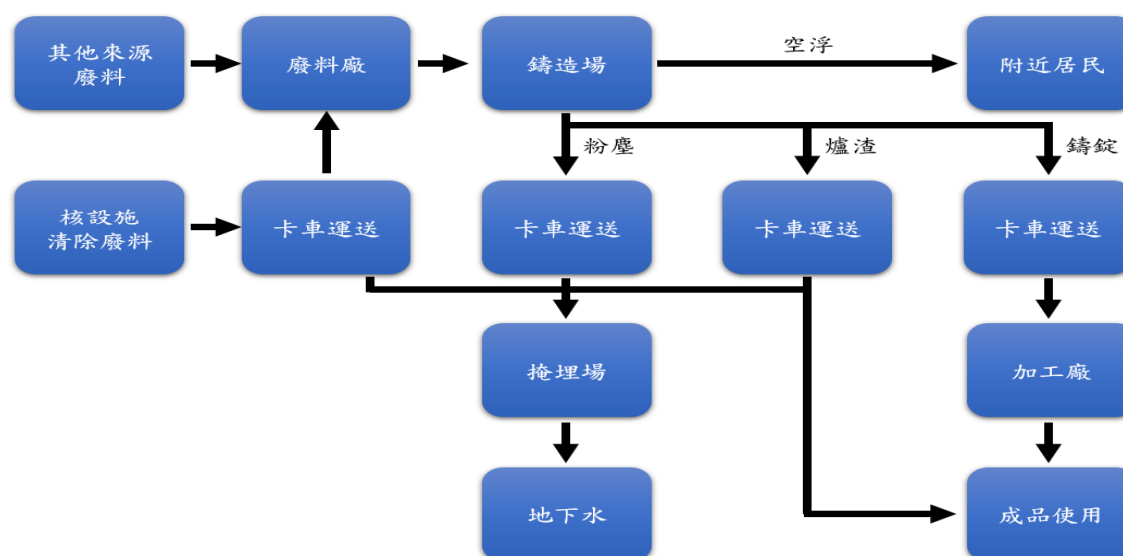


圖 3 NUREG-1640 的金屬廢棄物之曝露情節

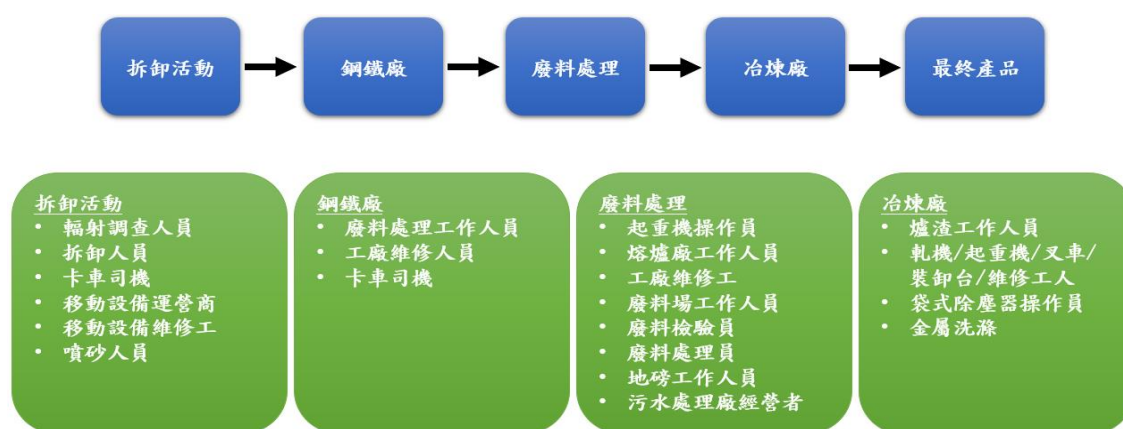


圖 4 NCRP 141 的廢棄物處理流程以及相關人員

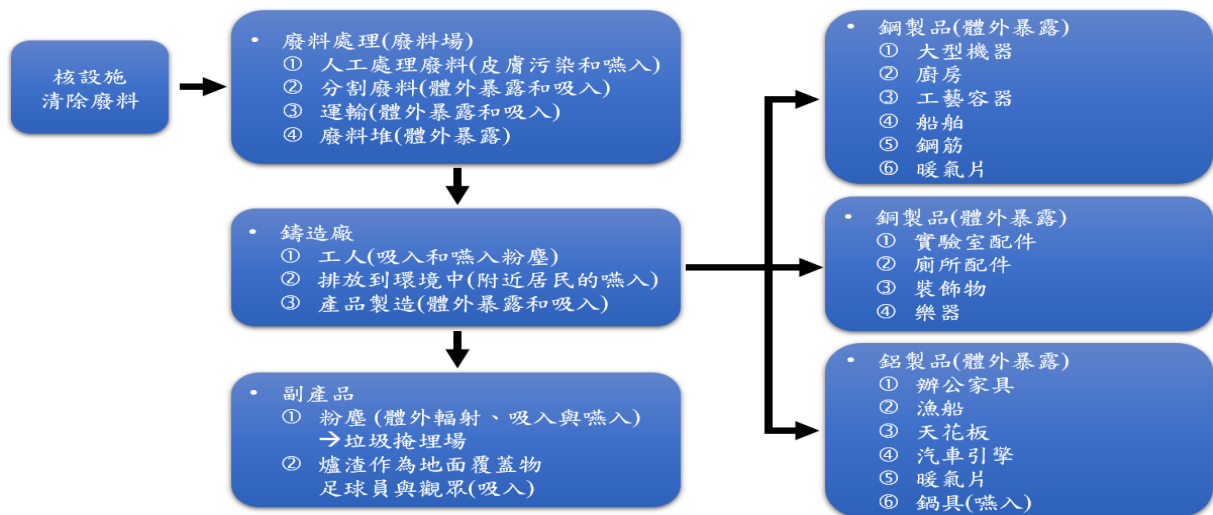


圖 5 從核設施清除的廢鐵在處理流程和曝露情境的示意圖

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 110 年參考彙整之國際重要文獻報告之輻射曝露情節，以前一年(109 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[20]、ICRP 116[21]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)[22]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 2)，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 2 ICRP-60 及 ICRP-103 建議使用之癌症標稱危險度係數[23,24]

	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。

本期計畫規劃於 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)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 (清華團隊執行)(109-110 年)
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 (清華團隊執行)(109 年，已完成)

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 (清華團隊執行)(109 年，已完成)

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)(109 年，已完成)

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)(109 年，已完成)

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)(110 年)

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)(110 年)

工作項目 8：蒐集、研析與彙整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 (由清華團隊執行)(110 年)

110 年規劃之工作彙整條列如下：

工作項目 1：對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查

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

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

工作項目 8：蒐集、研析與彙整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

肆、 主要發現與討論

110 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

本計畫參與現場檢/訪查之人員，已於 109 年 2 月 17 日、2 月 17 日及 3 月 17 日，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 6 所示。



圖 6 本計畫現場檢/訪查人員參與 109 年 2 月至 3 月之三件輻射異常物案件現場劑量率與核種評估之人員訓練照片

2. 110 年鋼鐵業輻射異常物通報案件與訪查情形

110 年鋼鐵業輻射異常物通報案件截至 12 月 13 日，總計通報 42 起，本計畫研究團隊均已完成現場檢/訪查，相關通報狀況及進行訪查情形列於表 3。

表 3 110 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	輻射源	表面 5 公分處最大劑量率($\mu\text{Sv/h}$)	後續處理方式	備註
110-01	110/01/04	台南_興固實業	110/01/15	天然:Th-232	12.7	國內處理	
110-02	110/01/11	台中_豐興鋼鐵	110/01/21	天然:Ra-226	36	國內處理	
110-03	110/01/11	高雄_燐聯鋼鐵	110/01/22	天然:Th-232	5.9	國內處理	
110-04	110/01/21	台中_豐興鋼鐵	110/02/05	天然: Ra-226 Th-232	0.93	國內處理	
110-05	110/01/21	台南_興固實業	110/02/04	天然: Th-232	12.7	國內處理	
110-06	110/02/17	高雄_燐聯鋼鐵	110/02/25	天然:Th-232	11.7	國內處理	
110-07	110/03	台中_豐興鋼鐵	110/04/01	天然: Ra-226 Th-232	4.9	出口退運	
110-08	110/03/03	高雄_燐聯鋼鐵	110/03/31	天然:Ra-226	19.3	國內處理	
110-09	110/03/03	苗栗_東和鋼鐵	110/03/12	天然:Ra-226	0.98	國內處理	
110-10	110/03/03	苗栗_東和鋼鐵	110/03/12	天然:Ra-226	4.9	國內處理	
110-11	110/03/11	苗栗_東和鋼鐵	110/04/15	天然:Ra-226	0.44	國內處理	
110-12	110/03/23	台南_興永益	110/05/10	天然:Th-232	2.83	國內處理	
110-13	110/03/29	台南_威致鋼鐵	110/04/16	人工: Co-60	9.6	國內處理	
110-14	110/04/02	苗栗_東和鋼鐵	110/04/15	天然:Ra-226 Th-232	2.3	國內處理	
110-15	110/04/23	苗栗_東和鋼鐵	110/07/29	天然:Ra-226	6.2	國內處理	
110-16	110/05/07	苗栗_東和鋼鐵	110/07/29	天然:Th-232	2.06	國內處理	
110-17	110/05/15	台中_豐興鋼鐵	110/08/13	天然:Ra-226	2.27	國內處理	
110-18	110/05/17	台南_長頌金屬	110/08/25	天然:Th-232	2.8	國內處理	
110-19	110/05/31	高雄_燐聯鋼鐵	110/08/26	天然:Th-232	5.5	國內處理	
110-20	110/05/31	高雄_協勝發鋼鐵	110/08/26	天然:Th-232	0.58	國內處理	
110-21	110/06/05	台南_威致鋼鐵	110/08/25	天然:Ra-226	4.0	國內處理	

表 3 110 年鋼鐵業輻射異常物通報案件與訪查情形表(續)

110-22	110/06/21	台南_威致鋼鐵	110/08/25	天然:Ra-226	0.32	國內處理	
110-23	110/07/07	高雄_協勝發鋼鐵	110/08/26	天然:Ra-226	4.7	國內處理	
110-24	110/07/12	高雄_燐聯鋼鐵	110/08/26	天然:Th-232	10.7	國內處理	
110-25	110/08/03	高雄_協勝發鋼鐵	110/08/26	天然:Ra-226	3.6	國內處理	
110-26	110/08/07	苗栗_東和鋼鐵	110/09/06	天然:Ra-226	5.3	國內處理	
110-27	110/08/18	宜蘭_羅東鋼鐵	110/08/31	天然:Th-232	6.7	國內處理	
110-28	110/08/26	高雄_燐聯鋼鐵	110/09/01	天然:Ra-226	0.48	國內處理	
110-29	110/08/31	台中_中龍鋼鐵	110/09/28	人工: F-18 天然: U-235	52	國內處理	
110-30	110/09/01	高雄_燐聯鋼鐵	110/09/16	天然:Th-232	4.3	國內處理	
110-31	110/09/07	高雄_燐聯鋼鐵	110/09/16	天然:Th-232	3.2	國內處理	
110-32	110/09/10	高雄_協勝發鋼鐵	110/09/24	天然:Ra-226 Th-232	1.37	國內處理	
110-33	107/11/02	台中_中龍鋼鐵	110/09/28	天然:Ra-226	4.6	國內處理	
110-34	110/09/16	高雄_協勝發鋼鐵	110/09/24	天然:Ra-226 Th-232	2.66	國內處理	
110-35	110/09/17	高雄_協勝發鋼鐵	110/09/24	人工:Cs-137	1200	出口退運	
110-36	110/09/22	台南_興永益	110/10/13	天然:Th-232	2.76	國內處理	
110-37	110/09/13	苗栗_東和鋼鐵	110/10/20	天然:Ra-226 Th-232	5.0	國內處理	
110-38	110/10/12	台中_合申	110/11/01	天然:Th-232	10.6	國內處理	
110-39	110/11/03	台南_威致鋼鐵	110/11/08	天然:U-238	55	國內處理	
110-40	110/11/06	台南_興永益	110/12/03	天然:Th-232	4.7	國內處理	
110-41	110/11/10	台南_威致鋼鐵	110/12/06	天然:Ra-226, Th-232	6.5	國內處理	
110-42	110/11/22	桃園_東和鋼鐵	110/12/02	天然:Ra-226, Th-232	3.4	國內處理	

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。110 年鋼鐵業輻射異常物通報案件情形列於表 3，總計通報 42 起，本計畫研究團隊均已完成起現場檢/訪查。

依據檢測結果統計，110 年通報之 42 件鋼鐵業輻射異常物中，其中有 39 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。42 件之後續處理方式，有 2 件為出口退運，有 40 件為國內處理(送核研所)。

針對國內 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)，檢查結果均為合格、均依規定辦理。本計畫 110 年完成訪查之輻射異常物偵測報告與鋼鐵熔爐業者之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 本計畫 110 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	豐興鋼鐵(台中)	110.10.06	
2	東和鋼鐵(苗栗)	110.10.20	
3	聯成鋼鐵(桃園)	110.10.25	
4	東和鋼鐵(桃園)	110.10.25	
5	慶欣欣鋼鐵(彰化)	110.11.01	
6	中龍鋼鐵(台中)	110.11.04	
7	建順煉鋼(苗栗)	110.11.04	
8	威致鋼鐵(台南)	110.11.08	
9	華新麗華鹽水廠(台南)	110.11.08	
10	燁聯鋼鐵(高雄)	110.11.10	
11	協勝發鋼鐵(高雄)	110.11.10	
12	易昇鋼鐵廠(台南)	110.11.11	
13	羅東鋼鐵廠(宜蘭)	110.11.12	
14	中國鋼鐵(高雄)	110.11.15	
15	龍慶鋼鐵(高雄)	110.11.15	
16	海光企業(高雄)	110.11.15	
17	唐榮鐵工廠(高雄)	110.11.15	

3. 輻射異常物附近之空間輻射劑量偵測結果

110 年鋼鐵業輻射異常物通報案件總計通報 42 起(列於表 3)，本計畫研究團隊均已完成現場檢/訪查，並完成對每件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，相關結果另行提供原能會參考。109 年至 110 年進行現場輻射劑量率偵檢之輻射異常物不同距離處之最大劑量率彙整如表 5：

表 5 109 至 110 年偵檢之輻射異常物於不同距離處之最大劑量率($\mu\text{Sv/h}$)

編號	表面位置	30 公分	1 公尺	編號	表面位置	30 公分	1 公尺
110-01	12.7	1.13	0.211	109-04-01	27.5	3.8	0.264
110-02	36	1.01	0.167	109-04-02	12.2	1.88	0.194
110-03	5.9	0.59	0.145	109-04-03	2.64	0.91	0.32
110-04	0.93	0.3	0.133	109-04-04	2.6	1.10	0.23
110-05	12.7	0.94	0.172	109-06	9.7	3.8	0.45
110-06	11.7	1.01	0.194	109-07	0.49	0.185	0.163
110-07	4.9	0.37	0.128	109-08-part I	1.75	0.75	0.29
110-08	19.3	0.41	0.141	109-08-part II	3.1	1.23	0.44
110-09	0.98	0.156	0.087	109-09	3.4	0.85	0.158
110-10	4.9	0.19	0.167	109-10	50	7.9	0.67
110-11	0.44	0.172	0.104	109-11	5.2	0.268	0.099
110-12	2.83	0.34	0.116	109-12	2.24	0.196	0.118
110-13	9.6	0.91	0.186	109-13	0.82	0.16	0.152
110-14	2.3	0.268	0.127	109-14	0.43	0.208	0.188
110-15	6.2	0.185	0.147	109-15	0.288	0.136	0.125
110-16	2.06	0.172	0.132	109-18	3.5	0.72	0.191
110-17	2.27	0.243	0.101	109-19	39	1.66	0.203
110-18	2.8	0.24	0.126	109-20	4.3	0.36	0.132
110-19	5.5	0.61	0.159	109-21	0.62	0.127	0.123
110-20	0.58	0.252	0.141	109-22	39	3.4	0.63
110-21	4.0	0.3	0.134	109-23	6.1	1.14	0.198
110-22	0.32	0.153	0.092	109-25	0.57	0.241	0.192
110-23	4.7	0.87	0.196	109-27	2.65	0.74	0.231
110-24	10.7	0.91	0.162	109-28	27	1.49	0.256
110-25	3.6	0.7	0.227	109-29	15	1.6	0.211
110-26	5.3	0.3	0.149	109-30	3.5	0.8	0.27
110-27	6.7	0.59	0.156	109-31	2.74	0.67	0.18
110-28	0.48	0.21	0.106	109-32	74	1.86	0.29
110-30	4.3	0.94	0.192	109-33	1.42	0.199	0.123
110-31	3.2	0.66	0.148	109-34(管)	18.3	0.78	0.177
110-32	1.37	0.49	0.219	109-34(塊)	1.58	0.39	0.125

表 5(續) 109 至 110 年偵檢之輻射異常物於不同距離處之最大劑量率($\mu\text{Sv/h}$)

編號	表面位置	30 公分	1 公尺	編號	表面位置	30 公分	1 公尺
110-33	4.6	0.7	0.222				
110-34	2.66	0.58	0.157				
110-35	1200	10.3	10.8				
110-36	2.76	0.29	0.12				
110-37	5.0	0.61	0.178				
110-38	10.6	0.87	0.191				
110-39	55	3.2	0.41				
110-40	4.7	0.41	0.122				
110-41	6.5	1.16	0.258				
110-42	3.4	1.11	0.31				
平均值 (109-110)	25.64	1.03	0.34				
最大值 (109-110)	1200 (110-35)	10.3 (110-35)	10.8 (110-35)				

109 年至 110 年現場輻射劑量率偵檢之輻射異常物不同距離處之最大劑量率平均劑量率：

表面位置：平均劑量率：25.64 $\mu\text{Sv/h}$ ；整體最大劑量率：1200 $\mu\text{Sv/h}$

30 公分：平均劑量率：1.03 $\mu\text{Sv/h}$ ；整體最大劑量率：10.3 $\mu\text{Sv/h}$

1 公尺：平均劑量率：0.34 $\mu\text{Sv/h}$ ；整體最大劑量率：10.8 $\mu\text{Sv/h}$

二、對國內鋼鐵業者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(工作項目 6)

本計畫參考鋼鐵異常物處理流程之文獻並結合我國實際訪查情形彙整出我國鋼鐵異常物處理的曝露情節。鋼鐵異常物處理的曝露情節可分為一般曝露情節與誤熔曝露情節。當載運有輻射鋼鐵原料及產品之車輛進出鋼鐵廠時，被門框偵檢器發現輻射異常物的存在，接著進行後續之處理流程稱之為一般曝露情節；反之，當所設定之偵檢程序沒有偵測到輻射異常物的存在時，該批輻射異常物便可能進到鋼鐵廠中，隨後進到熔煉製程所產生之相關流程稱為誤熔曝露情節。

(一) 一般曝露情節劑量評估

當載運有輻射鋼鐵原料及產品之車輛進出鋼鐵廠時，被門框偵檢器發現輻射異常物的存在，接著進行後續之處理流程稱之為一般曝露情節。

鋼鐵輻射異常物處理之一般曝露情節可以劃分為三個部分，分別是廢金屬運送、鋼鐵異常物搜尋與暫存、退運處理，圖 7 為鋼鐵異常物一般曝露情節流程。圖中方框內容代表各項工作單元或場所；橢圓框代表受影響之從業人員。

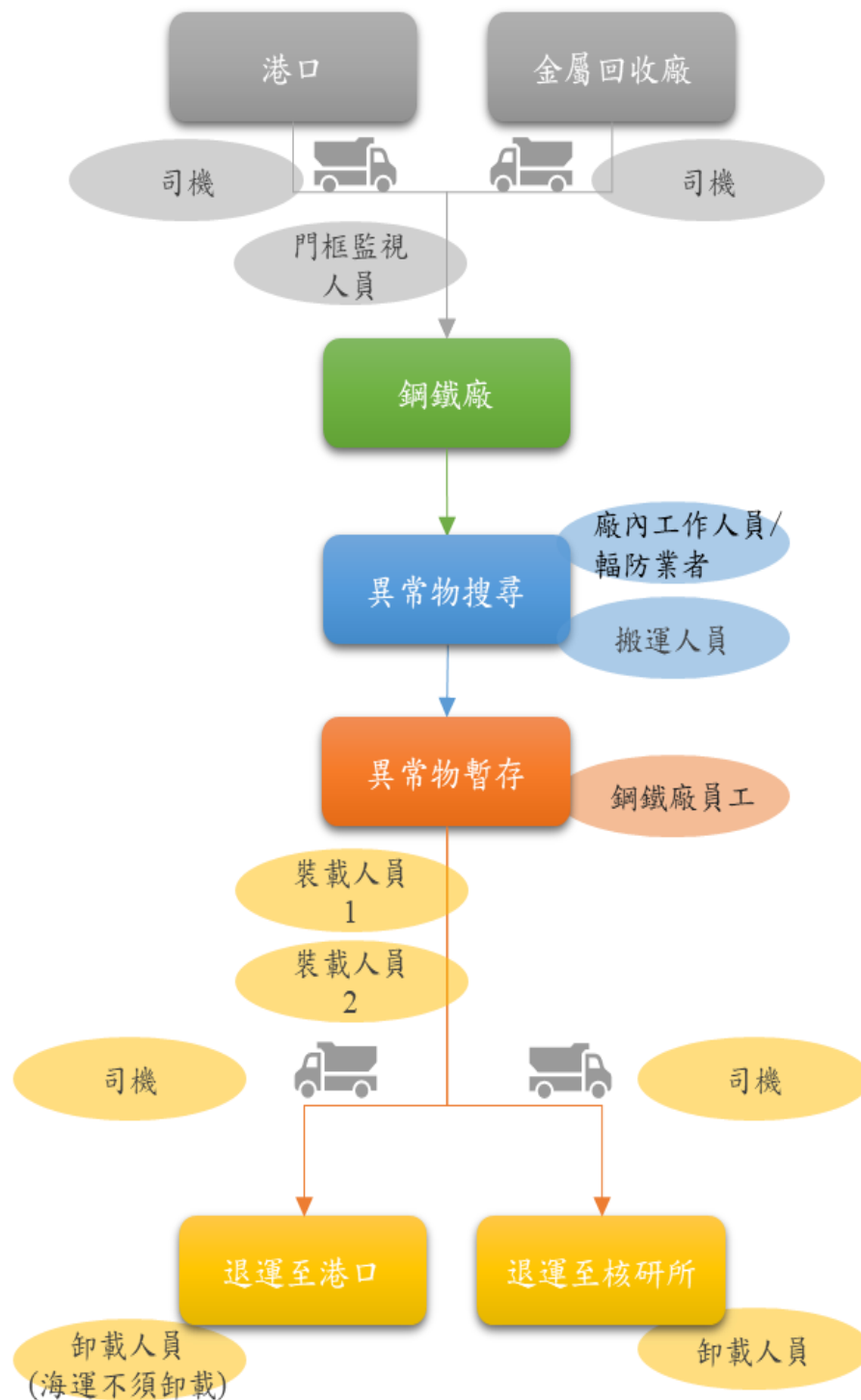


圖 7 鋼鐵異常物一般曝露情節流程圖

表 6 鋼鐵異常物一般曝露情節所使用之各項參數與假設狀況

曝露情節	曝露個體	說明	受曝露時間估算/方式	人數	曝露距離(公分)	假設狀況	曝露途徑	分析軟體	
							體外		
廢金屬運送	情況 1：司機	途徑：港口至鋼鐵廠	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150/780 ^{*a}	40 呎貨櫃	●	MS	
	情況 2：司機	途徑：回收場至鋼鐵廠	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150/780 ^{*a}	40 呎開蓋貨車	●	MS	
	監視人員	監視貨車過門框式偵檢器	0.1/0.2 小時	1	100/300 ^{*a}		●	MS	
輻射異常物搜尋	廠內工作人員或輻防業者	搜尋過門框偵檢器異常之貨車承載之輻射異常物	0.1/4 小時	1	100/200 ^{*a}	保守估計最遲需要 4 小時才能找到異常物 ^{*b}	●	MS	
	搬運人員	將異常物移至貯放區域管理	0.1/1 小時	1	30 ^{*b}		●	MS	
輻射異常物暫存	鋼鐵廠員工	路過輻射異常物暫存區			>20 米 ^{*b}			可略	
退運處理	裝載人員 1	異常物裝箱、裝櫃	1(小於 50kg)/2(50-200kg)/8(大於 200kg)小時 ^{*b}	1	30 ^{*b}		●	MS	
	裝載人員 2	將裝箱、裝櫃之異常物從貯放區裝載至貨車	0.5 小時	1	30 ^{*b}		●	MS	
	情況 1	司機	路徑：運送異常物至港口	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150(轎車)/300(小貨車)/500(20呎專櫃貨櫃) ^{*b}	海運才會使用貨櫃；物體在 50kg 內使用轎車；>50kg 使用小貨車運送 ^{*b}	●	MS
		卸載人員	路徑：在港口卸載異常物(貨櫃海運不須卸載)	0.5 小時	1	30 ^{*b}		●	MS
	情況 2	司機	路徑：運送異常物至核研所	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150(轎車)/300(小貨車) ^{*b}	物體在 50kg 內使用轎車；>50kg 使用小貨車運送 ^{*b}	●	MS
		卸載人員	路徑：在核研所卸載異常物	1 小時	1	30 ^{*b}		●	MS
Note：MS 代表 MicroShield 程式									

註：^{*a} 曝露距離：表示為最近/最遠距離，如 150/780 即表示最近距離 150 公分，最遠距離 780 公分。

^{*b} 受曝露時間乃依據諮詢輻防協會具現場檢查、裝箱裝櫃及搬運經驗之人員所推估。

1. 金屬運送

我國鋼鐵業者之鋼鐵原料及產品來源有二：一是從國外進口，二是從國內回收業者取得。此一廢金屬運送假設是由 40 呎(開蓋)貨車將物料從港口或是回收廠運送至鋼鐵廠，在進入鋼鐵廠前須經過門框式偵檢器。受輻射影響之從業人員有：司機、門框偵檢器的監視人員。

2. 鋼鐵異常物搜尋與暫存

此部分為當偵檢器偵測到鋼鐵異常物的存在並通報輻防業者進行異常物搜尋，再交由搬運人員將異常物移至貯放區管理之期間。受輻射影響之從業人員有：鋼鐵廠內工作人員或輻防業者、搬運人員、鋼鐵廠一般員工。輻射異常物經尋獲後一般會暫時存放在鋼鐵廠內，為了安全起見該物件都存放於廠內最角落區，以現場狀況評估一般員工途經該區域與其距離至少大於 20 米，故可以忽略對該人員的劑量評估計算。

3. 輻射異常物運送處理

所需運送之鋼鐵輻射異常物必須符合我國「放射性物質安全運送規則」規定辦法將之裝箱、裝櫃。國內鋼鐵輻射異常物目前最終處理方式可有二種，可以經海/空運將物料退運至原出口國，或是報繳至行政院原子能委員會核能研究所由國家進行保管貯存。退運車輛大小按照實際欲退運之鋼鐵異常物之尺寸可能為轎車、小貨車或是 20 呎專櫃貨車所裝載；退運至核能研究所之車輛僅採用轎車或小貨車。此部分受輻射影響之從業人員有：裝載人員、司機以及卸載人員。需要注意的是，如果是以貨櫃退運至海運港口則不需經由卸載人員處理，將不列入劑量評估計算。

鋼鐵異常物一般曝露情節所使用之各項參數與假設彙整於表 6 中。以下說明列表中各項標題內容之意義：

- 曝露情節：在該曝露情節中所屬之流程部分
- 曝露個體：指受輻射影響之從業人員
- 說明：描述該曝露個體進行該情節中之從業活動內容
- 受曝露時間估算/方式：該曝露個體進行情節中之從業活動受到輻射曝露之時間。在評估司機運送時係透過 Google map 進行路程耗時估算，包含預估一般正常與尖峰塞車時所需時程。部份從業活動則依照實際現場經驗給定一般所需完成時間來估算(可能有最短與最長時間)。退運處理時的裝箱、裝櫃活動係按照單次處理異常物之重量來估算所需作業時間。

另外，退運至核能研究所的卸載耗時比起退運至港口的處理時間要長，乃是因為退運至核能研究處理的程序與過程較為繁瑣所致。

- 人數：從業活動內容所需作業人數(用於集體劑量之計算)
- 曝露距離：指從業活動中，從業人員與輻射異常物之距離。部分從業活動按照實際作業情形給定最短及最遠距離以進行評估計算。
- 假設狀況：說明參數採用之假設狀況
- 曝露途徑：該情節在從業活動中可能受輻射影響之曝露途徑。在一般曝露情節中異常物不會進入冶煉過程，故假設所有從業人員活動僅有體外曝露途徑。
- 分析軟體：該情節進行劑量評估計算之使用之分析軟體、方法。

(二) 誤熔曝露情節劑量評估

誤熔曝露情節係指當載運有輻射鋼鐵原料及產品之車輛進出鋼鐵廠時沒有被輻射偵檢設備檢測到，致使該批輻射異常物進入鋼鐵廠並進到熔煉製程所產生之相關流程。

鋼鐵輻射異常物處理之誤熔曝露情節可分為三部分，分別是廢金屬運送、廢料冶煉以及爐渣運送。圖 8 為鋼鐵異常物誤熔曝露情節流程。圖中方框內容代表各項工作單元或場所；橢圓框代表受影響之從業人員。

1. 廢金屬運送

廢金屬來源運送至鋼鐵廠的過程與一般情節無異。我國鋼鐵業者之鋼鐵原料及產品來源有二：一是從國外進口，二是從國內回收業者取得。此一廢金屬運送假設是由 40 呎(開蓋)貨車將物料從港口或是回收廠運送至鋼鐵廠，在進入鋼鐵廠前須經過門框式偵檢器。受輻射影響之從業人員有：司機、門框偵檢器的監試人員。

2. 廢料冶煉

誤熔曝露情節為假設狀況，此一部分參考 RESRAD-RECYCLE 程式的廢金屬冶煉(Scrap Smelting)流程與我國鋼鐵廠廢料冶煉作業流程而得。大致描述了當輻射異常物沒有被門框偵檢器偵測到而進入鋼鐵冶煉製程時所涉及之過程與曝露個體。受輻射影響之從業人員有：倉儲工作人員、冶煉裝載員、熔爐操作員、袋式集塵室操作員以及爐渣作業員。

3. 爐渣運送

本年度計畫乃針對天然輻射異常物進行分析，從 RESRAD-RECYCLE 程式所使用之核種分配因子資料庫得知，當天然放射性核種(Th-232、U-238)進入到冶煉製程後有 99%的放射性核種會進入至冶煉副產物爐渣中，剩餘 1%進入粉塵經集塵室所蒐集。因此在鋼鐵經冶煉後之僅考慮與爐渣相關之途徑。在實際作業情形中，鋼鐵冶煉後所產生的爐渣副產物可能會運送至水泥廠被使用，或是直接送到掩埋場處置。受輻射影響之從業人員有：爐渣裝載員、運送司機。

鋼鐵異常物誤熔曝露情節所使用之各項參數與假設彙整於表 7 中，以下說明列表中各項標題內容之意義：

- 曝露情節：在該曝露情節中所屬之流程部分
- 曝露個體：指受輻射影響之從業人員
- 說明：描述該曝露個體進行該情節中之活動內容
- 受曝露時間估算/方式：該曝露個體進行情節中之從業活動受到輻射曝露之時間。在評估司機運送時係透過 Google map 進行路程耗時估算，包含預估一般正常與尖峰塞車時所需時程。部份從業活動則係依照實際現場經驗給定可能所需最短與最長耗時來進行估算。另外，在誤熔情節之廢料冶煉部分則是參考 RESRAD-RECYCLE Scarp smelting 的假設處理熔煉 100 噸之鋼鐵來進行曝露時間估算。爐渣運送之裝載情節亦是參考 RESRAD-RECYCLE 廢金屬裝載員(Scrap loader)情節之假設進行估算。
- 人數：從業活動內容所需作業人數(用於集體劑量之計算)
- 曝露距離：指從業活動中，從業人員與輻射異常物之距離。部分從業活動按照實際作業情形給定最短及最遠距離以進行評估計算。在廢料冶煉部分、爐渣運送之裝載情節亦係參考 RESRAD-RECYCLE 做為該等從業人員之曝露距離參數值。
- 假設狀況：說明參數採用之假設狀況
- 曝露途徑：該情節涉及之輻射曝露途徑。對於運送司機以及門框偵檢器的監視人員僅涉及體外曝露途徑。
- 分析軟體：曝露情節進行劑量評估之使用之分析軟體與方法。

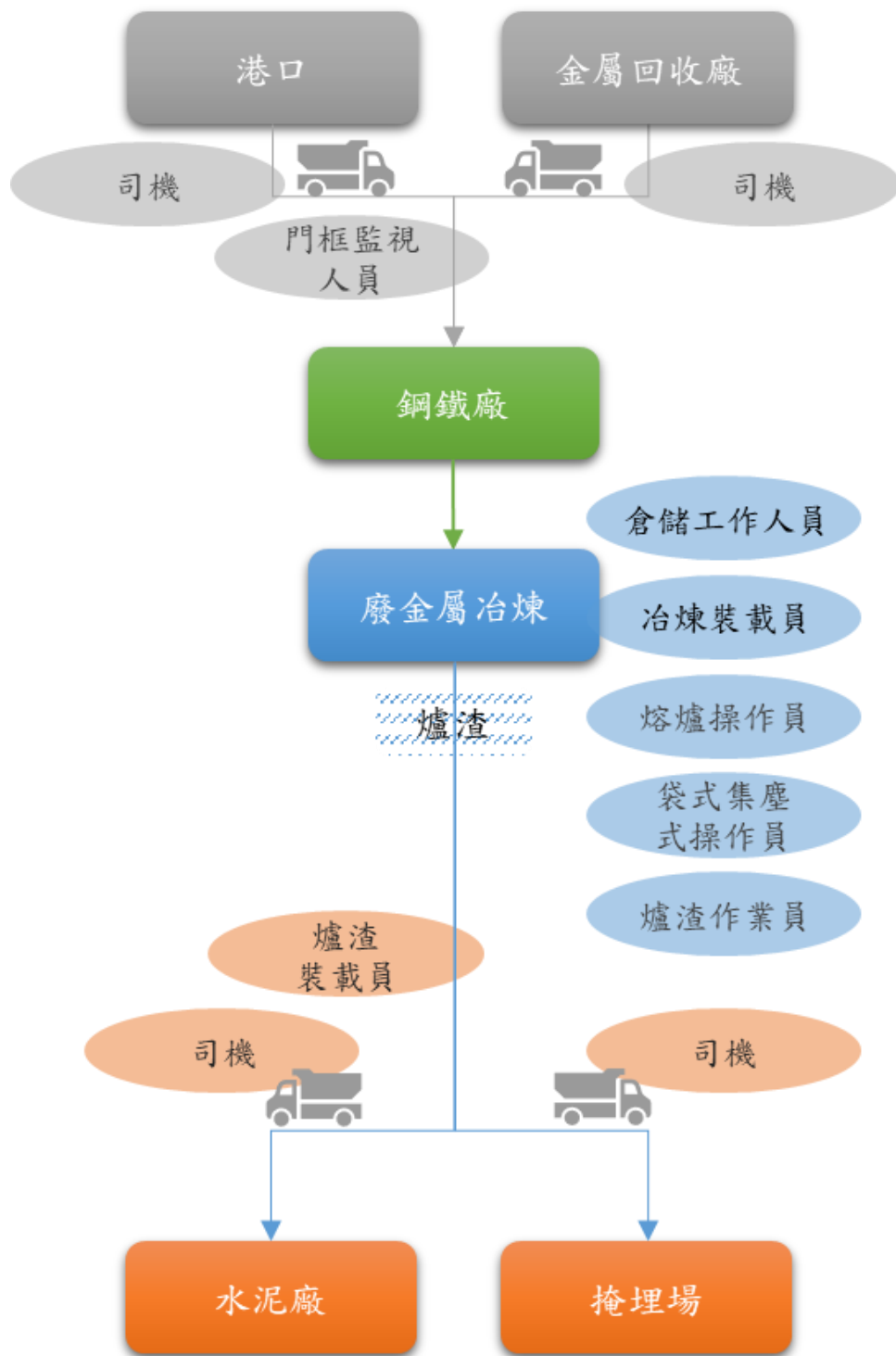


圖 8 鋼鐵異常物誤熔曝露情節流程圖

表 7 鋼鐵異常物誤熔曝露情節所使用之各項參數與假設狀況

曝露情節	曝露個體	說明	受曝露時間估算/方式	人數	曝露距離(公分)	假設狀況	曝露途徑			分析軟體
							體外	吸入	嚥入	
廢金屬運送	情況 1：司機	途徑：港口至鋼鐵廠	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150/780 ^{*a}	40 呎貨櫃	●			MS
	情況 2：司機	途徑：回收場至鋼鐵廠	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150/780 ^{*a}	40 呎開蓋貨車	●			MS
	監視人員	監視貨車過門框式偵檢器	0.1/0.2 小時	1	100/300 ^{*a}		●			MS
廢料冶煉	倉儲工作人員	在冶煉設施的儲存場工作	80	10	1000	10 名工作人員，每位工作人員必需要工作 80 個小時才能處理 100 噸廢金屬。(參考 RESRAD-RECYCLE, RR)	●	●	●	體外：MS 吸入：RECYCLE 公式搭配安全標準附表 3
	冶煉裝載人員	吊車將廢料裝載到爐中的起重機操作員的潛在劑量	4	5	400	5 名工作人員，每位工作人員必需要工作 4 個小時才能處理 100 噸廢鋼。(參考 RR)	●	●	●	嚥入：RECYCLE 公式搭配安全標準附表 3
	熔爐操作員	操作熔爐	5	3	300	3 名工作人員，每位工作人員必需要工作 5 個小時才能熔化 100 噸廢鋼(參考 RR)	●	●	●	體外：MS 吸入：RECYCLE 公式搭配安全標準附表 3
	袋式集塵室操作員	將集塵室的内容物裝入特殊的防塵袋	1	1	200	1 名工作人員，必需要工作 1 個小時來處理 100 噸廢鋼冶煉產生的集塵袋(參考 RR)	●	●	●	嚥入：RECYCLE 公式搭配安全標準附表 3
	爐渣作業員	使用標準裝卸設備在冶煉廠處理爐渣產品	25	1	150	1 名工作人員，需要工作 25 個小時才能從 100 噸廢鋼的冶煉中處理 10 噸爐渣(參考 RR)	●	●	●	公式搭配安全標準附表 3
爐渣運送	爐渣裝載員	將廢料裝載至運輸車輛	0.8	1	200 (操作怪手)	1 名工作人員，必須工作 1.6 個小時才能裝載 20 噸廢爐渣(參考 RR)	●	●	●	同廢料冶煉
	司機	將爐渣運送至水泥廠	以 Google map 估算正常/尖峰時刻所需時程	1	150/780	40 呎開蓋貨車	●			MS

註：^{*a} 曝露距離：表示為最近/最遠距離，如 150/780 即表示最近距離 150 公分，最遠距離 780 公分。

三、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(工作項目 7)

(一)以 MicroShield 程式評估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

依據本計畫實際查訪案例資料顯示，輻射異常物中主要的天然放射性核種為釷系與鈾系元素，現場分析結果顯示以 Th-232、Ra-226(即 U-238)佔多數。因此，為易於評估天然輻射異常物對從業人員造成之輻射劑量，本計畫就上述常見之典型天然核種建立不同曝露情節的體外/內劑量值資料庫。資料庫係以單位貝克(1 Bq)之 U-238(鈾系)與 Th-232(釷系)、以及單位時間(1 hr)進行計算。此典型核種資料庫的建立目標在於當發現輻射異常物時，僅須根據現場量測之輻射劑量率推估活度後，便能快速地對欲分析的各單元從業人員進行輻射劑量評估。其使用原則係將訪查取得的案例資訊，先以第 3.2 節中介紹的方法使用 MicroShield 程式進行活度推估，再將所得推估值(Bq)與活動曝露時間(hr)帶入本章節建立之資料庫中，以計算相關人員的體外/內劑量評估值。

1. 一般曝露情節典型核種資料庫

表 8 與表 9 分別為 U-238 與 Th-232 的一般曝露情節典型核種資料庫內容；此資料庫係按照工作項目 6 章節所假設之一般曝露情節進行模型建立、計算。在 109 年計畫成果中已說明 MicroShield 與 RESRAD-RECYCLE 一樣是基於點核仁法計算方式，在計算參數設置與 RESRAD-RECYCLE 一致的前提下，MS 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較為可靠的結果，且其計算時間合理。在大部分的曝露情節與 RESRAD-RECYCLE 則有著顯著的差異，推測可能的原因是 RESRAD-RECYCLE 的計算結果尚未收斂，以及採用的劑量轉換因子方式不同，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。故使用 MicroShield 程式作為計算引擎，其中參數則採用 RESRAD-RECYCLE 的處置流程資訊與曝露情節之設定。在計算上選擇的核種需同時考量母核與其子核對劑量的影響。在一般曝露情節中，皆以點射源進行劑量評估以達到保守評估，粗估劑量評估結果較以體射源計算之劑量大了一個數量級。

表 8 一般曝露情節典型核種資料庫(U-238)

曝露情節	曝露個體		曝露距離 (cm)	體外曝露劑量 (mSv/Bq-hr)	體內曝露劑量 (mSv/Bq-hr)	
				點射源計算	吸入	嚥入
廢金屬 運送	情況 1：司機 (港口-鋼鐵廠)		150	9.99E-11	x ^{*a}	x ^{*a}
			780	3.65E-12	x	x
	情況 2：司機 (回收場-鋼鐵廠)		150	9.99E-11	x	x
			780	3.65E-12	x	x
	監視人員		100	2.25E-10	x	x
			300	2.49E-11	x	x
輻射異常 物搜尋	廠內工作人員或 輻防業者		100	2.25E-10	x	x
			200	5.61E-11	x	x
	搬運人員		30	2.50E-09	x	x
輻射異常 物暫存	鋼鐵廠員工		大於 20 米	曝露距離太遠 可忽略不計算	x	x
退運處理	裝載人員 1		30	2.50E-09	x	x
	裝載人員 2		30	2.50E-09	x	x
	情況 1	司機 (至港口)	150(轎車)	9.99E-11	x	x
			300(小貨車)	2.49E-11	x	x
			500(20 呎專櫃 貨櫃)	8.92E-12	x	x
		卸載人員	30	2.50E-09	x	x
	情況 2	司機 (至 INER)	150(轎車)	9.99E-11	x	x
			300(小貨車)	2.49E-11	x	x
		卸載人員	30	2.50E-09	x	x

註：^{*a} 本表所述曝露情節均為體外曝露，無涉及體內曝露劑量問題，故以"x"表示不需評估。

表 9 一般曝露情節典型核種資料庫(Th-232)

曝露情節	曝露個體		曝露距離 (cm)	體外曝露劑量 (mSv/Bq-hr)	體內曝露劑量 (mSv/Bq-hr)	
				點射源計算	吸入	嚥入
廢金屬 運送	情況 1：司機 (港口-鋼鐵廠)		150	1.37E-10	x ^{*a}	x ^{*a}
			780	5.02E-12	x	x
	情況 2：司機 (回收場-鋼鐵廠)		150	1.37E-10	x	x
			780	5.02E-12	x	x
	監視人員		100	3.09E-10	x	x
			300	3.42E-11	x	x
輻射異常 物搜尋	廠內工作人員或 輻防業者		100	3.09E-10	x	x
			200	7.71E-11	x	x
	搬運人員		30	3.44E-09	x	x
輻射異常 物暫存	鋼鐵廠員工		大於 20 米	曝露距離太遠 可忽略不計算	x	x
退運處理	裝載人員 1		30	3.44E-09	x	x
	裝載人員 2		30	3.44E-09	x	x
	情況 1	司機 (至港口)	150(轎車)	1.37E-10	x	x
			300(小貨車)	3.42E-11	x	x
			500(20 呎專櫃 貨櫃)	1.23E-11	x	x
		卸載人員	30	3.44E-09	x	x
	情況 2	司機 (至 INER)	150(轎車)	1.37E-10	x	x
			300(小貨車)	3.42E-11	x	x
		卸載人員	30	3.44E-09	x	x

註：^{*a} 本表所述曝露情節均為體外曝露，無涉及體內曝露劑量問題，故以"x"表示不需評估。

2. 典型案例之一般曝露情節鋼鐵輻射異常物的劑量與風險評估

依據本計畫鋼鐵輻射異常物訪查資訊顯示單一物件重量概算為 10 kg，從本計畫成果報告估算案例的回推活度(Bq)皆落在 $1\text{E}+06$ 之數量級，故以 1 百萬貝克，10 公斤之物件當作典型案例進行一般曝露情節鋼鐵輻射異常物的劑量評估。在涉及司機運送時間的估算上以豐興鋼鐵廠作為參考地，使用 Google map 進行估算。回收廠至鋼鐵廠的運送時間則以港口運送至鋼鐵廠所需時間之一半來進行計算。

一般曝露情節 U-238 與 Th-232 核種的典型案例劑量評估結果分別呈現於表 10 與表 11。計算 U-238 核種造成最小個人有效劑量發生在廢料運送情況 2 的司機，曝露距離為 780 cm，從回收場運送廢金屬至鋼鐵廠時間估算為 0.375 hr，其有效劑量為 $1.37\text{E}-06$ mSv。最大個人有效劑量發生在輻射異常物搜尋的搬運人員、退運處理的裝載人員 1 以及退運處理的卸載人員等三種曝露情節的曝露個體，其曝露距離均為 30 cm，曝露時間均為 1 hr，造成有效劑量為 $2.50\text{E}-03$ mSv。而 Th-232 核種造成最小與最大個人有效劑量發生在相同的從業活動、曝露距離、曝露時間，其有效劑量值分別為 $1.88\text{E}-06$ 與 $3.44\text{E}-03$ mSv。一般曝露情節 U-238 典型案例造成之集體劑量最小與最大值分別為 $1.37\text{E}-09$ 與 $2.50\text{E}-06$ man-Sv；Th-232 典型案例造成之最小與最大集體劑量分別為 $1.88\text{E}-09$ 與 $3.44\text{E}-06$ man-Sv。其中，在退運處理計算中雖然列出了全部可能車種的結果，但因為典型案例之物件重量小於 50 kg，故集體劑量僅計算以轎車進行退運之處理方式。

若參考 109 年及 110 年統計資料，109 年國內計有 11 家鋼鐵業或回收業者，總計通報 34 件鋼鐵輻射異常物案件；110 年國內有 12 家鋼鐵業或回收業者，總計通報 42 件鋼鐵輻射異常物案件，其中 109 年通報數量最多的一家鋼鐵業者計有 10 件，110 年通報數量最多的鋼鐵業者計有 8 件(有 2 家)；在保守假設下，考量前述一般曝露情節典型案例，如以該鋼鐵業者一年總計發現 10 件天然輻射異常物來評估計算，則造成其工作人員(輻射異常物搜尋的搬運人員、退運處理的裝載人員 1 以及退運處理的卸載人員)的最大個人有效劑量約為 $2.50\text{E}-02$ mSv (即 0.025 mSv) (U-238 核種)與 $3.44\text{E}-02$ mSv (即 0.034 mSv) (Th-232 核種)，均遠小於我國規定的一般人年劑量限值 1 mSv。

表 10 典型案例之一般曝露情節劑量評估 (U-238)

曝露情節	曝露個體		人數	曝露距離 (cm)	曝露時間 (hr)	有效劑量 (mSv)	集體劑量 (man-Sv)
廢金屬 運送	情況 1：司機 (港口-鋼鐵廠)		1	150	0.75/ 1.25	7.49E-05/ 1.25E-04	7.49E-08/ 1.25E-07
			1	780	0.75/ 1.25	2.74E-06/ 4.56E-06	2.74E-09/ 4.56E-09
	情況 2：司機 (回收場-鋼鐵廠)		1	150	0.375/ 0.625	3.74E-05/ 6.24E-05	3.74E-08/ 6.24E-08
			1	780	0.375/ 0.625	1.37E-06/ 2.28E-06	1.37E-09/ 2.28E-09
	監視人員		1	100	0.1/ 0.2	2.25E-05/ 4.50E-05	2.25E-08/ 4.50E-08
			1	300	0.1/ 0.2	2.49E-06/ 4.98E-06	2.49E-09/ 4.98E-09
輻射異常物 搜尋	廠內工作人員或輻 防業者		1	100	0.1/ 4	5.61E-06/ 2.24E-04	5.61E-09/ 2.24E-07
			1	200	0.1/ 4	2.25E-05/ 9.00E-04	2.25E-08/ 9.00E-07
	搬運人員		1	30	0.1/ 1	2.50E-04/ 2.50E-03	2.50E-07/ 2.50E-06
輻射異常物 暫存	鋼鐵廠員工		1	大於 20 米	曝露距離太遠 可忽略不計算		
退運處理	裝載人員 1		1	30	1	2.50E-03	2.50E-06
	裝載人員 2		1	30	0.50	1.25E-03	1.25E-06
	情況 1	司機 (鋼鐵廠-港口)	1	150	0.75/ 1.25	7.49E-05/ 1.25E-04	7.49E-08/ 1.25E-07
			1	300	0.75/ 1.25	1.87E-05/ 3.11E-05	1.87E-08/ 3.11E-08
			1	500	0.75/ 1.25	6.69E-06/ 1.12E-05	6.69E-09/ 1.12E-08
		卸載人員	1	30	0.50	1.25E-03	1.25E-06
	情況 2	司機 (鋼鐵廠-INER)	1	150	1.08/ 1.83	1.08E-04/ 1.83E-04	1.08E-07/ 1.83E-07
			1	300	1.08/ 1.83	2.70E-05/ 4.56E-05	2.70E-08/ 4.56E-08
		卸載人員	1	30	1.00	2.50E-03	2.50E-06

表 11 典型案例之一般曝露情節劑量評估 (Th-232)

曝露情節	曝露個體		人數	曝露距離 (cm)	曝露時間 (hr)	有效劑量 (mSv)	集體劑量 (man-Sv)
廢金屬 運送	情況 1：司機 (港口-鋼鐵廠)		1	150	0.75/ 1.25	1.03E-04/ 1.71E-04	1.03E-07/ 1.71E-07
			1	780	0.75/ 1.25	3.77E-06/ 6.28E-06	3.77E-09/ 6.28E-09
	情況 2：司機 (回收場-鋼鐵廠)		1	150	0.375/ 0.625	5.14E-05/ 8.57E-05	5.14E-08/ 8.57E-08
			1	780	0.375/ 0.625	1.88E-06/ 3.14E-06	1.88E-09/ 3.14E-09
	監視人員		1	100	0.1/ 0.2	3.09E-05/ 6.18E-05	3.09E-08/ 6.18E-08
			1	300	0.1/ 0.2	3.42E-06/ 6.84E-06	3.42E-09/ 6.84E-09
輻射異常物 搜尋	廠內工作人員或輻 防業者		1	100	0.1/ 4	7.71E-06/ 3.08E-04	7.71E-09/ 3.08E-07
			1	200	0.1/ 4	3.09E-05/ 1.24E-03	3.09E-08/ 1.24E-06
	搬運人員		1	30	0.1/ 1	3.44E-04/ 3.44E-03	3.44E-07/ 3.44E-06
輻射異常物 暫存	鋼鐵廠員工		1	大於 20 米	曝露距離太遠 可忽略不計算		
退運處理	裝載人員 1		1	30	1	3.44E-03	3.44E-06
	裝載人員 2		1	30	0.50	1.72E-03	1.72E-06
	情況 1	司機 (鋼鐵廠-港口)	1	150	0.75/ 1.25	1.03E-04/ 1.71E-04	1.03E-07/ 1.71E-07
			1	300	0.75/ 1.25	2.56E-05/ 4.27E-05	2.56E-08/ 4.27E-08
			1	500	0.75/ 1.25	9.20E-06/ 1.53E-05	9.20E-09/ 1.53E-08
		卸載人員	1	30	0.50	1.72E-03	1.72E-06
	情況 2	司機 (鋼鐵廠-INER)	1	150	1.08/ 1.83	1.49E-04/ 2.51E-04	1.49E-07/ 2.51E-07
			1	300	1.08/ 1.83	3.7E-05/ 6.27E-05	3.7E-08/ 6.27E-08
		卸載人員	1	30	1.00	3.44E-03	3.44E-06

在一般曝露情節的風險評估上，本計畫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，如以前述所評估之工作人員(輻射異常物搜尋的搬運人員、退運處理的裝載人員 1 以及退運處理的卸載人員)的最大個人有效劑量約為 0.025 mSv (U-238 核種)與 0.034 mSv (Th-232 核種)，則在機率效應之風險評估上，如視搬運人員、退運處理的裝載人員以及卸載人員為非輻射工作人員，則採用 ICRP 建議之一般公眾危險度係數 $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-103)、 $6.0 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-60)，評估之癌症標稱危險度風險分別如下：

最大個人有效劑量	危險度風險(ICRP-60)	危險度風險(ICRP-103)
0.025 mSv (U-238 核種)	1.50×10^{-6}	1.38×10^{-6}
0.034 mSv (Th-232 核種)	2.04×10^{-6}	1.87×10^{-6}

如考量照一張胸腔 X 光之平均有效劑量約 0.02 mSv，其危險度風險為 1.2×10^{-6} (ICRP-60)與 1.1×10^{-6} (ICRP-103)，則前述一般曝露情節工作人員的最大個人有效劑量與風險，大約小於照 2 張胸腔 X 光片之劑量與風險。

在確定效應之風險評估上，如保守推估有效劑量均為皮膚劑量所貢獻，則上述 U-238 與 Th-232 核種造成人員之皮膚等價劑量分別為 2.5 mSv (U-238)與 3.4 mSv (Th-232) (ICRP 60 及 103 建議之皮膚組織加權因數均為 0.01)，均遠小於一般人員之皮膚與四肢年等價劑量 50 mSv 劑量限度，故可推論為不會發生確定效應。

綜合上述輻射劑量與風險評估結果，以一般曝露情節相關人員可能接受之最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於或相當於接受 1~2 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量與風險，參考國際放射防護委員會(ICRP)之建議(單次接受或年累積之有效劑量小於 100 mSv 者，其誘發之輻射健康效應風險可忽略)，此風險應可予以忽略。

3. 典型案例之誤熔曝露情節鋼鐵輻射異常物的劑量與風險評估

表 11 與表 12 分別為 U-238 與 Th-232 的誤熔曝露情節典型核種資料庫內容，此資料庫係按照工作項目 6 章節所假設之誤熔曝露情節進行模型建立、計算。

表 11 誤熔曝露情節典型核種資料庫(U-238)

曝露情節	曝露個體	曝露距離 (cm)	體外曝露劑量(mSv/Bq-hr)		體內曝露(mSv/Bq-hr)	
			點射源計算	體射源計算	吸入	嚥入
廢金屬運送	情況 1： 司機	150	9.99E-11	6.46E-09	x ^{*a}	x ^{*a}
		780	3.65E-12	3.70E-10	x	x
	情況 2： 司機	150	9.99E-11	6.46E-09	x	x
		780	3.65E-12	3.70E-10	x	x
	監視人員	100	2.25E-10	1.03E-08	x	x
		300	2.49E-11	2.22E-09	x	x
廢料冶煉	倉儲工作人員	1000	3.05E-12	3.93E-11	9.60E-16	2.86E-15
	冶煉廠裝載人員	400	1.40E-11	3.01E-10	9.70E-15	3.33E-15
	熔爐操作員	300	2.49E-11	4.11E-10	9.70E-15	3.33E-15
	袋式集塵室操作員	200	5.61E-11	9.12E-09	9.70E-15	3.33E-15
	爐渣作業員	150	9.99E-11	1.60E-08	9.60E-14	3.30E-14
爐渣運送	爐渣裝載	200	5.61E-11	4.33E-09	9.50E-13	3.27E-13
	司機	150	9.99E-11	6.46E-09	x	x
		780	3.65E-12	3.70E-10	x	x

註：*a 表示該曝露情節為體外曝露，無涉及體內曝露劑量問題，故以” x” 表示不需評估。

表 12 誤熔曝露情節典型核種資料庫(Th-232)

曝露情節	曝露個體	曝露距離 (cm)	體外曝露劑量(mSv/Bq-hr)		體內曝露(mSv/Bq-hr)	
			點射源計算	體射源計算	吸入	嚥入
廢金屬運送	情況 1： 司機	150	1.37E-10	9.21E-12	x ^{*a}	x ^{*a}
		780	5.02E-12	5.29E-13	x	x
	情況 2： 司機	150	1.37E-10	9.21E-12	x	x
		780	5.02E-12	5.29E-13	x	x
	監視人員	100	3.088E-10	1.47E-11	x	x
		300	3.419E-11	3.16E-12	x	x
廢料冶煉	倉儲工作人員	1000	2.21E-12	5.63E-14	1.32E-14	1.46E-14
	冶煉廠裝載人員	400	1.92E-11	4.30E-13	1.33E-13	1.70E-14
	熔爐操作員	300	3.42E-11	5.88E-13	1.33E-13	1.70E-14
	袋式集塵室操作員	200	7.71E-11	1.29E-11	1.33E-13	1.70E-14
	爐渣作業員	150	1.37E-10	2.28E-11	1.32E-12	1.69E-13
爐渣運送	爐渣裝載	200	7.71E-11	6.16E-12	1.31E-11	1.67E-12
	司機	150	1.37E-10	9.21E-12	x	x
		780	5.02E-12	5.29E-13	x	x

註：*a 表示該曝露情節為體外曝露，無涉及體內曝露劑量問題，故以”x”表示不需評估。

同樣以一般曝露情節所假設之 1 百萬貝克、10 公斤之鋼鐵輻射異常物件當作典型案例進行誤熔曝露情節鋼鐵輻射異常物的劑量評估。在涉及司機運送時間的估算上以豐興鋼鐵廠作為參考地，使用 Google map 進行估算。回收廠至鋼鐵廠的運送時間則以港口運送至鋼鐵廠所需時間之一半來進行計算。

誤熔曝露情節 U-238 與 Th-232 核種的典型案例劑量評估結果分別呈現於表 13 與表 14。為求保守估計誤熔曝露情節之劑量，體外曝露均採點射源的計算結果。

表 13 典型案例之誤熔曝露情節劑量評估 (U-238)

曝露情節	曝露個體	人數	曝露距離(cm)	曝露時間(hr)	曝露途徑	有效劑量 (mSv) MS 計算 R.R.公式		集體劑量 (man-Sv)
廢金屬運送	情況 1: 司機 (港口-鋼鐵廠) 台中港出發	1	150	0.75/ 1.25	體外 (點射源)	7.49E-05/ 1.25E-04		7.49E-08/ 1.25E-07
		1	780	0.75/ 1.25	體外 (點射源)	2.74E-06/ 4.56E-06		2.74E-09/ 4.56E-09
	情況 2: 司機 (回收廠-鋼鐵廠)	1	150/	0.375/ 0.625	體外 (點射源)	3.74E-05/ 6.24E-05		3.74E-08/ 6.24E-08
			780	0.375/ 0.625	體外 (點射源)	1.37E-06/ 2.28E-06		1.37E-09/ 2.28E-09
	監視人員	1	100	0.1/ 0.2	體外 (點射源)	2.25E-05/ 4.5E-05		2.25E-08/ 4.50E-08
		1	300	0.1/ 0.2	體外 (點射源)	2.49E-06/ 4.98E-06		2.49E-09/ 4.98E-09
廢料冶煉	倉儲 工作人員	10	1000	80	體外 (點射源)	2.44E-04		2.44E-06
					吸入		7.68E-08	
					嚥入		2.29E-07	
	冶煉廠 裝載人員	5	400	4	體外 (點射源)	5.59E-05		2.80E-07
					吸入		3.88E-08	
					嚥入		1.33E-08	
	熔爐 操作員	3	300	5	體外 (點射源)	1.24E-04		3.73E-07
					吸入		4.85E-08	
					嚥入		1.67E-08	
	袋式集塵室 操作員	1	200	1	體外 (點射源)	5.61E-05		5.61E-08
					吸入		9.70E-09	
					嚥入		3.33E-09	
	爐渣 作業員	1	150	25	體外 (點射源)	2.50E-03		2.50E-06
					吸入		2.40E-06	
					嚥入		8.25E-07	
爐渣運送	爐渣 裝載	1	200	0.8	體外 (點射源)	4.49E-05		4.59E-08
					吸入		7.60E-07	
					嚥入		2.61E-07	
	司機 (鋼鐵廠-水泥廠)	1	150	3.5/ 4.83	體外 (點射源)	3.49E-04/ 4.83E-04		3.49E-07/ 4.83E-07
			780	3.5/ 4.83	體外 (點射源)	1.28E-05/ 1.76E-05		1.28E-08/ 1.76E-08
Note: 集體劑量 =(體內攝入有效劑量+體外點射源有效劑量)*人數								

表 14 典型案例之誤熔曝露情節劑量評估 (Th-232)

曝露情節	曝露個體	人數	曝露距離 (cm)	曝露時間 (hr)	曝露途徑	有效劑量 (mSv) MS 計算 RR 公式		集體劑量 (man-Sv)
廢金屬運送	情節 1: 司機 (港口-鋼鐵廠)	1	150	0.75/ 1.25	體外 (點射源)	1.03E-04/ 1.71E-04		1.03E-07/ 1.71E-07
		1	780	0.75/ 1.25	體外 (點射源)	3.77E-06/ 6.28E-06		3.77E-09/ 6.28E-09
	情節 2: 司機 (回收廠-鋼鐵廠)	1	150/	0.375/ 0.625	體外 (點射源)	5.14E-05/ 8.57E-05		5.14E-08/ 8.57E-08
			780	0.375/ 0.625	體外 (點射源)	1.88E-06/ 3.14E-06		1.88E-09/ 3.14E-09
	監視人員	1	100	0.1/ 0.2	體外 (點射源)	3.09E-05/ 6.18E-05		3.09E-08/ 6.18E-08
		1	300	0.1/ 0.2	體外 (點射源)	3.42E-06/ 6.84E-06		3.42E-09/ 6.84E-09
廢料冶煉	倉儲 工作人員	10	1000	80	體外 (點射源)	1.77E-04		1.79E-06
					吸入		1.06E-06	
					嚥入		1.17E-06	
	冶煉廠 裝載人員	5	400	4	體外 (點射源)	7.68E-05		3.87E-07
					吸入		5.33E-07	
					嚥入		6.81E-08	
	熔爐 操作員	3	300	5	體外 (點射源)	1.71E-04		5.15E-07
					吸入		6.67E-07	
					嚥入		8.51E-08	
	袋式集塵 室操作員	1	200	1	體外 (點射源)	7.71E-05		7.72E-08
					吸入		1.33E-07	
					嚥入		1.70E-08	
	爐渣 作業員	1	150	25	體外 (點射源)	3.43E-03		3.46E-06
					吸入		3.30E-05	
					嚥入		4.21E-06	
爐渣運送	爐渣 裝載	1	200	0.8	體外 (點射源)	6.16E-05		7.34E-08
					吸入		1.05E-05	
					嚥入		1.34E-06	
	司機 (鋼鐵廠-水泥廠)	1	150	3.5/ 4.83	體外 (點射源)	4.80E-04/ 6.63E-04		4.80E-07/ 6.63E-07
			780	3.5/ 4.83	體外 (點射源)	1.76E-05/ 2.43E-05		1.76E-08/ 2.43E-08
Note: 集體劑量 =(體內攝入有效劑量+體外點射源有效劑量)*人數								

誤熔曝露情節典型 U-238 案例造成之最小個人總有效劑量發生在廢料運送情況 2 的司機(回收廠-鋼鐵廠)，曝露距離為 780 cm，從回收場運送廢金屬至鋼鐵廠時間估算為 0.375 hr，其總有效劑量為 1.37E-06 mSv。最大個人總有效劑量發生在廢料冶煉的爐渣作業員，其曝露距離為 150 cm，進行冶煉產生的爐渣處理作業 25 hr，造成總有效劑量為 2.50E-03 mSv。而 Th-232 核種造成最小與最大個人總有效劑量發生在相同的從業活動、曝露距離、曝露時間，其總有效劑量值分別為 1.88E-06 與 3.46E-03 mSv(吸入與嚥入造成之體內曝露有效劑量約為體外曝露之 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 倍，在有效劑量貢獻上並不明顯)。

從結果表中亦可計算出在整個誤熔曝露情節中由 U-238 造成之總集體劑量為 6.20E-06~6.44E-06 man-Sv；Th-232 造成之總集體劑量為 6.99E-06 ~ 7.32E-06 man-Sv。

若同樣參考 109 年統計資料，在保守假設下，考量前述誤熔曝露情節典型案例，如以該鋼鐵業者一年 10 件天然輻射異常物被誤熔來評估計算，則造成其工作人員(廢料冶煉的爐渣作業員)的最大個人有效劑量約為 2.50E-02 mSv (即 0.025 mSv) (U-238 核種)與 3.46E-02 mSv (即 0.035 mSv) (Th-232 核種)，亦均遠小於我國規定的一般人年劑量限值 1 mSv。

在誤熔曝露情節的風險評估上，本計畫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，如考慮前述所評估之工作人員(廢料冶煉的爐渣作業員)的最大個人有效劑量約為 0.025 mSv (U-238 核種)與 0.035 mSv (Th-232 核種)，則在機率效應之風險評估上，如視廢料冶煉的爐渣作業員為非輻射工作人員，則採用 ICRP 建議之一般公眾危險度係數 $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-103)、 $6.0 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-60)，評估之癌症標稱危險度風險分別如下：

最大個人有效劑量	危險度風險(ICRP-60)	危險度風險(ICRP-103)
0.025 mSv (U-238 核種)	1.50×10^{-6}	1.38×10^{-6}
0.035 mSv (Th-232 核種)	2.10×10^{-6}	1.93×10^{-6}

如考量照一張胸腔 X 光之平均有效劑量約 0.02 mSv，其危險度風險為 1.2×10^{-6} (ICRP-60)與 1.1×10^{-6} (ICRP-103)，則前述誤熔曝露情節工作人員的最大個人有效劑量與風險，仍小於照 2 張胸腔 X 光片之劑量與風險。

在確定效應之風險評估上，如保守推估有效劑量均為皮膚及軀所貢獻，則上述 U-238 與 Th-232 核種造成人員之皮膚等價劑量分別為 2.5 mSv (U-238)與 3.4 mSv (Th-232) (ICRP 60 及 103 建議之皮膚組織加權因數均為 0.01)，均遠小於一般人員之皮膚與四肢年等價劑量 50 mSv 劑量限度，故可推論為不會發生確定效應。

綜合上述輻射劑量與風險評估結果，以誤熔曝露情節相關人員可能接受之最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於或相當於接受 1~2 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量與風險，參考國際放射防護委員會(ICRP)之建議(單次接受或年累積之有效劑量小於 100 mSv 者，其誘發之輻射健康效應風險可忽略)，此風險應可予以忽略。

(二) 以鋼鐵輻射異常物現場檢測之空間劑量率，評估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

前述以 MicroShield 程式評估接觸不同強度天然輻射異常物從業人員之輻射劑量，需先估計可能之核種活度，再進一步評估劑量，然而目前發現鋼鐵輻射異常物時，僅要求初步確認含有之核種種類(定性分析)，也因異常物之材質、形狀與體積變異極大，通常無法精確測量或評估出真正之核種活度。對此，本計畫仍持續研究建立以測量之空間劑量推估較準確核種活度之方法；此外，本計畫亦進行直接以偵檢器現場實測得距鋼鐵輻射異常物不同距離之空間劑量率，考量工作項目 6 之曝露情境，評估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。以 109 年取回之 3 件(編號 109-9、109-10、109-29)進行核種活度濃度分析之鋼鐵輻射異常物，利用 Microshield 計算及直接以偵檢器現場實測得之空間劑量率二種方法之結果，進行詳細比較分析與驗證，二者之結果差異已屬相當吻合，表示以本計畫建立之程式模擬計算方法來評估接觸異常物案件的人員劑量之方法具有相當的可信度。惟程式模擬計算方法受到輻射源活度估計誤差的影響較大，對輻射源均勻分布之輻射異常物而言，其活度可較正確地以量測結果推估，但對於輻射源非均勻分布時，則模擬計算結果可能出效較大誤差；而實際上所發現之輻射異常物並無法確定其是否為均勻分布。每因此本計畫亦建立了以每件鋼鐵輻射異常物之空間劑量率實測結果評估異常物案件的人員可能接受曝露之輻射劑量與風險的方法，可針對每件通報案件進行人員劑量與風險評估。

表 15 以現場偵測 109-110 年鋼鐵輻射異常物不同距離之劑量率評估一般曝露情境之相關人員劑量彙整表

曝露情節	曝露個體		人數	曝露距離 (cm)	曝露時間(hr) 最小/最大	有效劑量 (mSv) 最小***/最大****
廢金屬 運送	情況 1：司機 (港口-鋼鐵廠)		1	150*	0.75/1.25	8.21E-05/3.31E-04
			1	780*	0.75/1.25	8.21E-05/3.31E-04
	情況 2**：司機 (回收場-鋼鐵廠)		-	-	-	-
	監視人員		1	100	0.1/0.2	4.15E-06/2.34E-05
			1	300*	0.1/0.2	4.15E-06/2.34E-05
輻射異常物 搜尋	廠內工作人員或輻 防業者		1	100	0.1/4	4.26E-06/4.70E-04
			1	200*	0.1/4	4.26E-06/4.70E-04
	搬運人員		1	30	0.1/1	7.85E-06/1.04E-03
輻射異常物 暫存	鋼鐵廠員工		1	大於 20 米	曝露距離太遠 可忽略不計算	
退運處理	裝載人員 1		1	30	1	6.46E-05
	裝載人員 2		1	30	0.50	3.23E-05
	情況 1	司機 (鋼鐵廠-港口)	1	150*	0.75/1.25	1.19E-04/3.41E-04
			1	300*	0.75/1.25	1.19E-04/3.41E-04
			1	500*	0.75/1.25	1.19E-04/3.41E-04
		卸載人員	1	30	0.50	3.32E-05
	情況 2	司機 (鋼鐵廠-INER)	1	150*	1.08/1.83	2.80E-05/1.66E-04
			1	300*	1.08/1.83	2.80E-05/1.66E-04
		卸載人員	1	30	1.00	3.40E-04

註：*現場偵測離輻射異常物最遠距離為 1 公尺(100 公分)，一般曝露情境中如距離超過 100 公分即保守以每件異常物距離 1 公尺處測得之最大劑量率進行估算。

**因通報案件均無確定來自回收場，故不予評估。

***以 109-110 年通報研究團隊之天然鋼鐵輻射異常物(61 件)每件之最小劑量的平均值。

****以 109-110 年通報研究團隊之天然鋼鐵輻射異常物(61 件)每件之最大劑量的平均值。

表 15 為以現場偵測 109-110 年鋼鐵輻射異常物不同距離之劑量率評估一般曝露情境之相關人員劑量彙整表，所評估之工作人員的最大個人有效劑量發生在輻射異常物搜尋的搬運人員，約為 1.04×10^{-3} mSv (約 0.00104 mSv)。在風險評估上，以有效劑量與皮膚等價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，則在機率效應之風險評估上，如視搬運人員、退運處理情況 1 的司機為非輻射工作人員，則採用 ICRP 建議之一般公眾危險度係數 $6.0 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-60) 、 $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (ICRP-103)，評估之癌症標稱危險度風險分別如下：

最大個人有效劑量	危險度風險(ICRP-60)	危險度風險(ICRP-103)
0.00104 mSv	6.24×10^{-8}	5.72×10^{-8}

如考量照一張胸腔 X 光之平均有效劑量約 0.02 mSv，其危險度風險為 1.2×10^{-6} (ICRP-60)與 1.1×10^{-6} (ICRP-103)，則前述以現場偵測輻射劑量率評估一般曝露情節工作人員的最大個人有效劑量與風險，小於照 1 張胸腔 X 光片之劑量與風險(大約為其 5.2%)。

在確定效應之風險評估上，如保守推估有效劑量均為皮膚及軀所貢獻，則上述評估造成人員之皮膚等價劑量約為 0.104 mSv (ICRP 60 及 103 建議之皮膚組織加權因數均為 0.01)，均遠小於一般人員之皮膚與四肢年等價劑量 50 mSv 劑量限度，故可推論為不會發生確定效應。

綜合上述輻射劑量與風險評估結果，以現場量測之輻射劑量率評估一般曝露情節相關人員可能接受之最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於或相當於接受 1 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量與風險，參考國際放射防護委員會(ICRP)之建議(單次接受或年累積之有效劑量小於 100 mSv 者，其誘發之輻射健康效應風險可忽略)，此風險應可予以忽略。

四、蒐集、研析與彙整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)(工作項目 8)

本計畫已於 109 年已蒐集、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，並檢視我國現有之相關偵檢標準、程序與管理作法[3]。110 年亦持續蒐集研析相關國際新資訊，包括美國 ANSI N42.43-2016：American National Standard Performance Criteria for Mobile and Transportable Radiation Monitors Used for Homeland Security [17]及國際電工學會(International Electrotechnical Commission, IEC)於 2019 年發布之 IEC 62244: Radiation protection instrumentation – Installed radiation portal monitors (RPMs) for the detection of illicit trafficking of radioactive and nuclear materials[18]等二份關於偵測輻射異常物門框偵檢器之偵檢技術要求等報告，相關要點彙整如下：(完整彙整資訊已發表於國內輻射防護簡訊(Issue 166, 2021)期刊雜誌[25])

國際原子能總署(IAEA)指出放射性物質的非法和非故意移動已成為日益重要的問題。不受監管控制的輻射源，即所謂的“孤立源(orphan sources)”，經常造成嚴重的輻射曝露和廣泛的污染。為響應 IAEA、世界海關組織(WCO)和國際刑警組織(Interpol)有關特殊核物料的檢測、識別和安全趨勢的技術政策，國際上已有多家核子儀器公司在開發和製造門框式輻射偵檢系統，以協助探測放射性和特殊核物料的非法移動，這種類型的儀器廣泛用於核設施、邊境檢查站以及國際海港和機場的安全目的。

美國 ANSI N42.43 標準規定了檢測和識別放射性核種的攜帶式和移動式輻射監測儀的性能要求和測試方法，便攜式輻射監測儀設計用於運輸到某個地點並用於特定任務或特定時間段；它們不需要永久性安裝平台；可安裝在拖車等車輛上；並且僅在車輛靜止時使用。移動輻射監測器通常在運動的平台上運行，但也可以在靜止時使用。ANSI N42.43 標準建立的操作要求包括輻射探測和放射性核種識別，以及與運輸過程中和部署時預期的電氣、機械和環境條件相關的要求，其所規定之輻射監測儀性能要求和測試方法可作為國內機場、港口及鋼鐵業、回收廠等設置門框輻射偵檢儀器之管制與測試要求參考。

國際電工委員會(IEC)是一個全球性的標準化組織，IEC 的目標是促進有關電氣和電子領域標準化的所有問題的國際合作。為了確保在不同國家地區進行的測量結果一致，必須根據國際標準中規定的性能要求，按照嚴格的規範設計輻射偵檢儀器。IEC 62244 即在規範用於檢測放射性物質和核物料的非法販運或非故意移動之門框式輻射偵檢儀器的標準。IEC 62244 定義了用於檢測加馬和中子輻射的門框輻射監測器的性能要求，這些門框輻射監測器常用於監控車輛、貨櫃、人員或行李包裹等，通常安裝於國內(如港口、鋼鐵廠大門等)和國際過境點。

美國 ANSI N42.43 (2016)及國際電工委員會 IEC 62244 (2019) 對門框式輻射偵檢儀器(監測儀)之主要測試標準摘要彙整如表 16。

本計畫彙整國外相關文獻之偵檢作法與建議，進行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)，規劃之偵檢與處理程序流程包括：

- (一) 偵檢儀器準備
- (二) 現場偵測及調查
- (三) 附件(包括異常輻射通報訪談紀錄範本及輻射異常物偵測報告範本)

在上述(二)現場偵測及調查程序中，敘明了執行現場偵測時之流程，並針對高劑量率與低劑量率輻射異常物之現場偵測做法，以確保偵測人員輻射安全；亦規劃對輻射異常物暫存隔離狀況進行調查，確保合理抑低措施的有效性。本計畫提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書草案內容列於附件一。

表 16 ANSI N42.43 與 IEC 62244 之門框型輻射偵檢儀器(監測儀)相關測試標準與要求

項目	偵檢標準	
	美國 ANSI N42.43	國際電工委員會 IEC 62244
偵檢區域	探測區域的高度建議範圍為 0.5 m 至 3.5 m。(車輛)	探測區域的高度建議範圍為 0.5 m 至 4.5 m。(車輛)
動態監測時，建議監測標的通過速度	移動車輛型：8 公里／小時 (2.2 m/s) 區域型：4.4 公里／小時 (1.2 m/s)	小型車 8 公里／小時 (2.2 m/s) 大型車 4.4 公里／小時 (1.2 m/s)
儀器特性：	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。	
顯示功能	監測器之設計應能防止從雨、冷凝水或高濕度而來之進水。	
防濕功能	監測器應能於-30℃至 55℃之溫度範圍內進行操作。(IEC 62706)	
溫度範圍	應可量測 ≥ 40 keV 能量之加馬輻射。	
量測能量		
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。	
背景測試	天然背景輻射(加馬) $\leq 10 \mu\text{R/h}$ 中子通量率小於 $200 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$	天然背景輻射劑量率(加馬) $\leq 0.15 \mu\text{Sv/h}$; 中子通量率小於 $200 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
監測器偵測到警示機率(光子與中子均適用)	動態測試：上、下二組檢測區域各測試 60 次，總計測試 120 次；建議 120 次輻射源通過應至少有 117 起警示。	動態測試：每個測試放射性核種的 60 次試驗中至少有 59 次出現警報時，門框輻射監測器響應被認為是可以接受的。
假警報測試	假警報係源自於計數統計變動、背景強度變化以及設備故障。假警示機率應小於 0.001(即每 1000 次測試有 1 起警示)。	穩定的背景區域（僅是自然背景波動）中，在 10 小時內，每次操作 35 秒，總計約 1028 次，其假警報次數（無論是加馬射線還是中子）應少於 2 次。
超出範圍測試	曝露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"超量"或"高計數"的警報。輻射場返回到背景水平後，監測儀返回到非警報狀態所需的時間不得超過 1 分鐘。	當曝露大於製造商定義的最大劑量率時，門框輻射監測器應指示"超量"狀況。並在劑量率恢復到曝露前水平後 1 分鐘內恢復到非報警狀態。
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，監測儀應提供警告指示。	
偵檢器校正	測試輻射源應可追溯至國家標準。	
測試光子參考輻射源	建議使用參考放射性核種 ^{137}Cs 、 ^{241}Am 和 ^{60}Co 進行測試。測試用輻射源建議應具有以下活度 ($\pm 20\%$)： $^{241}\text{Am} - 1.74 \text{ MBq}$ $^{137}\text{Cs} - 0.592 \text{ MBq}$ $^{60}\text{Co} - 0.259 \text{ MBq}$	使用 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 進行測試。測試用輻射源建議應具有以下活度 (-0% , $+20\%$)： $^{241}\text{Am} - 1.74 \text{ MBq}$ $^{137}\text{Cs} - 0.6 \text{ MBq}$ $^{60}\text{Co} - 0.26 \text{ MBq}$
測試中子參考輻射源	^{252}Cf 的中子發射速率為 $20,000 \text{ s}^{-1}$ ，輻射源被球形 4 公分厚之高密度聚乙烯緩速體包覆。	^{252}Cf 或 ^{244}Cm 的中子發射速率為 $20,000 \text{ s}^{-1}$ (-0% , $+20\%$) 以低於或等於 10% 的標準不確定性 ($k=1$)。中子源應由球形高密度聚乙烯緩速體包覆，壁厚為 4 公分，內腔直徑不超過 3 公分。

五、 110 年完成之具體成果

110 年規畫進行之工作項目包括工作項目 1、6、7 及 8，完成之具體成果彙整如下：

1. 工作項目 1：對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查

- (1) 總計完成 42 起鋼鐵業輻射異常物通報案件之現場檢/訪查；
- (2) 建立 42 起通報案件之不同平面輻射劑量分布曲線；
- (3) 完成 17 家鋼鐵熔爐業者之鋼鐵業年度輻射偵檢作業檢查。

2. 工作項目 6：對國內鋼鐵業者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

- (1) 參考彙整鋼鐵異常物處理流程之國際相關文獻並結合我國實際訪查情形，建立鋼鐵異常物處理的二種曝露情節：一般曝露情節與誤熔曝露情節。
- (2) 一般曝露情節又劃分為三個部分，分別是廢金屬運送、鋼鐵異常物搜尋與暫存、退運處理。
- (3) 誤熔曝露情節可分為三部分，分別是廢金屬運送、廢料冶煉以及爐渣運送。

3. 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

- (1) 建立以 1 百萬貝克、10 公斤之物件當作典型案例進行一般曝露情節鋼鐵輻射異常物的劑量評估。(依據訪查鋼鐵輻射異常物資訊，單一物件重量概算為 10 kg，且估算案例回推活度皆落在 1 百萬貝克之數量級)
- (2) 完成一般曝露情節之相關人員劑量評估：以鋼鐵業者一年總計發現 10 件天然輻射異常物來評估計算，則造成其工作人員(輻射異常物搜尋的搬運人員、退運處理的裝載人員 1 以及退運處理的卸載人員)的最大個人有效劑量約為 0.025 mSv (U-238 核種)與

0.034 mSv (Th-232 核種)，均遠小於我國規定的一般人年劑量限值 1 mSv。

(3) 完成誤熔情節之相關人員劑量評估：如以鋼鐵業者一年 10 件天然輻射異常物被誤熔來評估計算，則造成工作人員(廢料冶煉的爐渣作業員)的最大個人有效劑量約為 0.025 mSv (U-238 核種)與 0.035 mSv (Th-232 核種)，亦均遠小於我國規定的一般人年劑量限值 1 mSv。

(4) 完成 109-110 年通報研究團隊之天然鋼鐵輻射異常物，現場量測之輻射劑量率評估一般曝露情節相關人員可能接受之劑量與風險評估：工作人員最大個人有效劑量發生在輻射異常物搜尋的搬運人員，約為 1.04×10^{-3} mSv。以此最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於或相當於接受 1 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量與風險，此風險可予以忽略。

4. 工作項目 8：蒐集、研析與彙整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)完成最適化作業流程規劃與合理抑低措施擬訂，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)一份，如附件一。

伍、 結論

110 年規畫進行之工作項目，關於鋼鐵業輻射異常物通報案件情形列於表 3，截至 110 年 12 月總計通報 42 起，本計畫研究團隊均已完成現場檢/訪查。42 件鋼鐵業輻射異常物中，其中有 39 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。42 件之後續處理方式，有 2 件為出口退運，有 40 件為國內處理(送核研所)。110 年完成訪查之輻射異常物偵測報告與對國內 17 家鋼鐵熔爐業者之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。

本計畫亦已完成對國內鋼鐵業者從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境模擬分析、建立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之一般曝露情節與誤熔曝露情節，使用 MicroShield 程式作為計算工具，其中參數則採用 RESRAD-RECYCLE 的處置流程資訊與曝露情節之設定，模擬計算天然輻射異常一般曝露與誤熔情境可能造成之劑量與風險。

除了建立了程式模擬計算方法(惟此方法受到輻射源活度估計誤差的影響較大)，本計畫亦建立以每件鋼鐵輻射異常物之空間劑量率實測結果評估異常物案件的人員可能接受曝露之輻射劑量與風險的方法，可針對每件通報案件進行人員劑量與風險評估。

在輻射劑量與風險評估結果上，評估一般曝露情節與誤熔情節等相關人員可能接受之最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於或相當於接受 1~2 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量與風險，其誘發之輻射健康效應風險可忽略。

此外，本計畫於 110 年持續蒐集研析相關國際新資訊，包括 ANSI N42.43-2016 [17]、IEC 62244 (2019)[18]等二份關於偵測輻射異常物門框偵檢器之偵檢技術要求等報告，彙整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)。

綜合而言，本計畫依據契約書規訂之方法與要求進行，符合原規劃之進度並達成計畫目標。

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. National Committee on Radiation Instrumentation (NCRI), ANSI N42.43-2016 : American National Standard Performance Criteria for Mobile and Transportable Radiation Monitors Used for Homeland Security, American National Standards Institute (ANSI), 2016.
18. International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 62244: Radiation protection instrumentation – Installed radiation portal monitors (RPMs) for the detection of illicit trafficking of radioactive and nuclear materials, IEC, 2019.
19. Goorley T., James M., Booth T., et al., Initial MCNP6 release overview, Nucl. Technol. 180 (2012) 298–315.
20. International Commission on Radiological Protection , Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74 , 1996.
21. International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, 2010.
22. European Radiation Dosimetry Group (EURADOS), Technical recommendations on measurements of external environmental gamma radiation doses. Radiation Protection 106, 1999.
23. The 1991 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, 1991.
24. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.
25. 許芳裕，門框輻射偵檢儀器之國際測試標準介紹，輻防簡訊(Issue 166)，p3-p6、p11-p15，2021。

附件一

天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)

一、偵檢儀器準備

- 1.1 承辦人依書面資料進行初步研判：若疑似加馬射源，應攜帶手持式輻射偵檢器(如塑膠閃爍偵檢器)及攜帶式加馬能譜分析設備(如碘化鈉加馬能譜分析儀)。
- 1.2 若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，應加帶長桿型輻射劑量率偵檢器。
- 1.3 執行偵測人員之基本配備：
 - 1.3.1 法定個人輻射劑量計(佩章)。
 - 1.3.2 捲尺、安全帽、安全鞋、口罩、手套、記錄紙、筆、相機、鉛屏蔽(視任務需要)。
 - 1.3.3 手持式輻射偵檢器(經有效校正之塑膠閃爍型 ATOMTEX AT1121 或其他偵檢器)。
 - 1.3.4 攜帶式加馬能譜分析設備(碘化鈉型或高純鍺半導體型)。
 - 1.3.5 長桿型輻射劑量率偵檢器(如可架設於長桿之手持式輻射偵檢器)。

二、現場偵測及調查：

- 2.1 執行現場偵測時，應先以手持式輻射偵檢器量測不受異常物影響之環境背景劑量率，以確認儀器正常。環境背景劑量率總計測量三次，每次偵測時間至少 1 分鐘，以書面記錄量測值，並計算平均值及記錄平均環境背景輻射劑量率數值。
- 2.2 高劑量率輻射異常物之現場偵測：
 - 2.2.1 現場執行偵測時，若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($\mu\text{Sv/h}$)時，需測得距輻射異常物周圍劑量率為每小時 20 微西弗($\mu\text{Sv/h}$)之位置，將其標定並要求業者設置臨時圍籬及輻射警示標誌，防止無關人員接近。
 - 2.2.2 必要時得加置適當屏蔽，降低輻射劑量率，並以長桿型偵檢器偵測劑量率及紀錄距離，偵測時間至少 1 分鐘。
 - 2.2.3 於劑量率為每小時 10 微西弗($\mu\text{Sv/h}$)之位置進行加馬核種分析，辨

識輻射異常物之放射性核種，偵測結果應予記錄。

2.3 低劑量率輻射異常物之現場偵測：

2.3.1 現場執行偵測時，若輻射異常物任一表面 1 公尺處之輻射劑量率為每小時 20 微西弗($\mu\text{Sv/h}$)以下時，應先搜尋輻射異常物表面的最高輻射劑量率處，量測表面處(5 公分)、30 公分處及 1 公尺處之輻射劑量率，每處偵測時間至少 1 分鐘，記錄輻射劑量率量測結果。

2.3.2 於表面可能為最大劑量處，以攜帶式加馬能譜分析設備進行核種分析，辨識輻射異常物之放射性核種，偵測結果應予記錄。

2.4 輻射異常物暫存隔離狀況調查：

2.4.1 輻射異常物應保存在安全可靠的儲存地點，可遮蔽雨水、避免沖刷。

2.4.2 儲存地點應予管制，可避免一般人員接近，並有示警標誌警示。

2.5 輻射異常物來源之調查：

2.5.1 進行輻射異常物來源之調查工作，完成發現者之訪談及追查紀錄，並請其簽名。

2.5.2 訪談紀錄須確實，並比對發現者之偵測結果，是否有顯著差異，若有時須瞭解其原因並予記錄，訪談紀錄範本如附件 1。

2.5.3 後續處理方式為國內或其他方式，應於輻射異常物偵測報告中註明，輻射異常物偵測報告範本如附件 2。

三、 附件

3.1 異常輻射通報訪談紀錄範本，如附件 1-1。

3.2 輻射異常物偵測報告範本，如附件 1-2。

<附件 1-1>

異常輻射通報訪談紀錄（發現者）（範本）

一、訪談對象基本資料

（一）受訪人姓名：訪談地點：

（二）聯絡電話：

（三）服務公司名稱及負責人姓名、地址：

（四）擔任工作：

二、發現經過（含何人發現，發現時間、地點、物品、物品來源、處理經過及通報程序等項目。若於進廠物料中發現，增加供應商名稱、地址、物料品名、數量及車號等項目）

發現人：

發現時間： 年 月 日 時 分

地點：

物品： 重量： 直徑： 長度：

物品來源：

處理經過：

三、補充或建議事項

上述資料經受訪人確認無誤始簽名

受訪人：

訪談人（或記錄人）：

訪談日期：

<附件 1-2 輻射異常物偵測報告範本>

○○○○(公司)輻射異常物偵測報告(範本)

偵測單位：○○○○；日期：○○○ 年 ○○ 月 ○○ 日；案件編號：
110(年)-xx

一、依據：

依輻防處○○○ 年○○ 月○○ 日傳真/電話/書函，辦理○○ 地區/公司輻射異常物之偵測。

二、輻射異常物偵測情形：

1. 異常輻射調查表(包含異常物狀況、輻射劑量偵測結果、核種判斷等)及異常輻射訊號通報訪談記錄(發現業者)等資料如附件。

物件 名稱	形狀尺寸 (cm)	總重量 (kg)	輻射劑量率 ($\mu\text{Sv/h}$)			核種	偵測日期	備註
			表面	30 cm	100cm			

2. 輻射異常物外觀照片如下：



圖 廢金屬管(範例)

三、輻射異常物偵測結果分析：

本案輻射異常物共○件，以手提式加馬能譜分析儀分析其輻射

源皆為天然(或人造)放射性物質，其中第0件輻射異常物為含0(核種)之四方形(形狀)金屬(外觀材質)塊件。後續處理方式為國內(或其他方式，應予註明)處理。加馬能譜分析檢測結果如下：



圖 輻射異常物之加馬能譜分析檢測結果(範例)

四、偵測人員及儀器資訊：

1.偵測人員：

2.偵測儀器：

(1)輻射劑量率偵測：

廠牌： ， 型號： ， 序號： ，

校正日期：

背景值： $\mu\text{Sv/h}$ 。

(2)核種分析：

廠牌： ， 型號： ， 序號： ，

校正日期：