

臺北榮民總醫院
國家多目標迴旋加速器中心

放射性氣體排放擴散分析與劑量評估



中華民國一〇三年九月制

目錄

1. 前言	1
2. 輻射作業說明	2
3. 氣象及地理條件(場所外圍情況)	5
4. 防止環境污染之監測設備與處理程序及設計	10
5. 射源項 (Source Term)：計劃排放放射性廢氣之性質、種類、數量、核種及活度	14
6. 擴散模式	17
7. 放射性氣體排放劑量評估	24
7.1 吸入來自空氣中放射性核種年約定有效劑量	25
7.2 氣態瀰漫下放射性氣體直接對全身之體外照射暴露個人等效劑量	29
7.3 總有效劑量 E_T	30
7.4 排放濾層輻射劑量率偵檢器劑量率值警報設定	32
8. 結論	35
9. 參考文獻	36

圖次

圖 1 迴旋加速器中心設置區域位置圖 -----	2
圖 2 迴旋加速器中心平面圖(地下樓) -----	3
圖 3 迴旋加速器中心平面圖(一樓) -----	3
圖 4 迴旋加速器中心剖面圖 -----	4
圖 5 環保署承德檢測站所在位置及本院相對位置 -----	5
圖 6 風向十六方位圖 -----	7
圖 7 士林北投地區一〇三年年度風向風速頻率分布圖 -----	7
圖 8 臺北榮民總醫院地理位置圖 -----	8
圖 9 臺北榮民總醫院衛星空照圖 -----	9
圖 10 放射性廢氣排放口周圍環境圖 -----	9
圖 11 排放管路設置 HEPA 與活性炭濾層過濾系統 -----	11
圖 12 排放管路劑量率偵檢器設置位置圖 -----	11
圖 13 放射性廢氣排放處理過濾系統及現場檢測作業 -----	12
圖 14 5 月 2 日偵測器之計數率 vs.時間圖；(F-18) -----	15
圖 15 6 月 19 日偵測器之計數率 vs.時間圖；(C-11) -----	15
圖 16 6 月 25 日偵測器之計數率 vs.時間圖；(C-11) -----	16
圖 17 定平均風向擴散模式示意 -----	20
圖 18 橫風方向高斯擴散係數圖 -----	23
圖 19 垂直風方向高斯擴散係數圖 -----	23
圖 20 放射性氣體排放造成公眾劑量曝露途徑圖 -----	24

表次

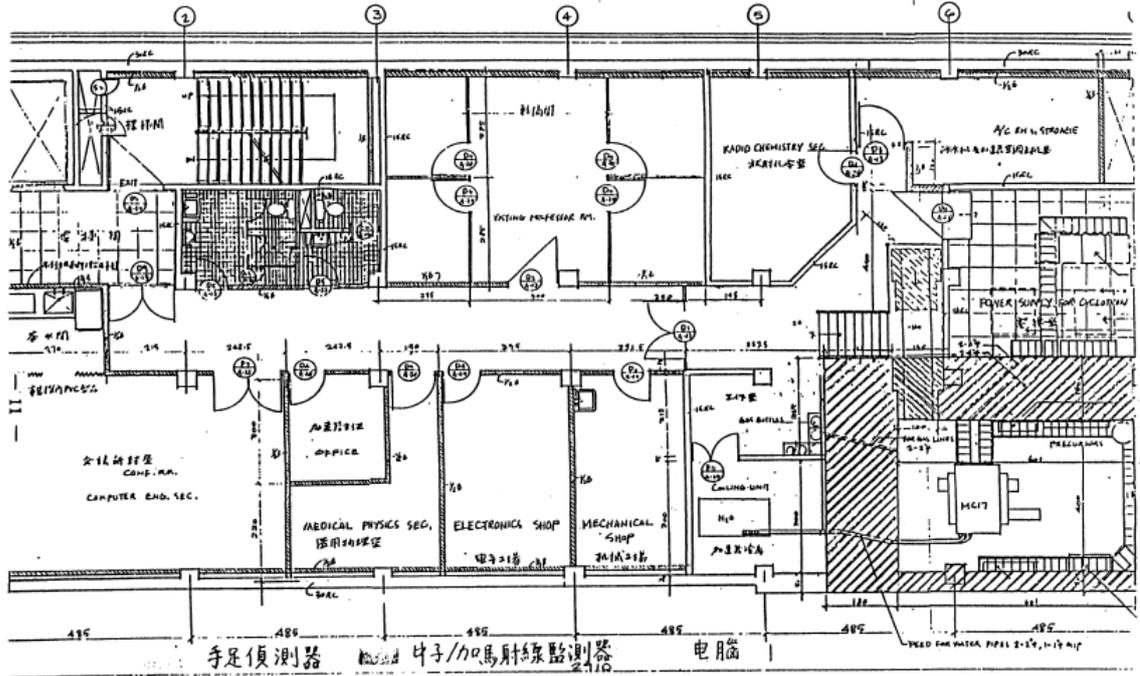
表 1 士林北投地區一〇三年年度風速(m/s)及風向分布表	6
表 2 空浮濾器系統濾除效率檢測結果表	12
表 3 生產過程中排氣煙道放射性氣體取樣分析與劑量評估檢測結果表	13
表 4 生產計劃	14
表 5 大氣穩定性分類表	21
表 6 大氣穩定性分類與垂直高度溫度變化及水平風向關係表	21
表 7 食物分布系統傳送時間	25

1. 前言

臺北榮民總醫院（以下簡稱本院）核子醫學部（以下簡稱本部）國家多目標醫用迴旋加速器中心（以下簡稱本中心）屬於放射性物質生產設施。本中心依據「游離輻射防護法」第九條規定：「輻射工作場所排放含放射性物質之廢氣或廢水者，設施經營者應實施輻射安全評估，並報請主管機關核准後，使得為之。」本部除迴旋加速器中心外，不從事煙櫥放射性作業，不會產生含放射性物質之廢氣排放。因此，本報告針對於迴旋加速器中心放射性廢氣排放進行輻射安全評估。

本輻射安全評估報告依據「游離輻射防護法施行細則」第三條之規定，載明：

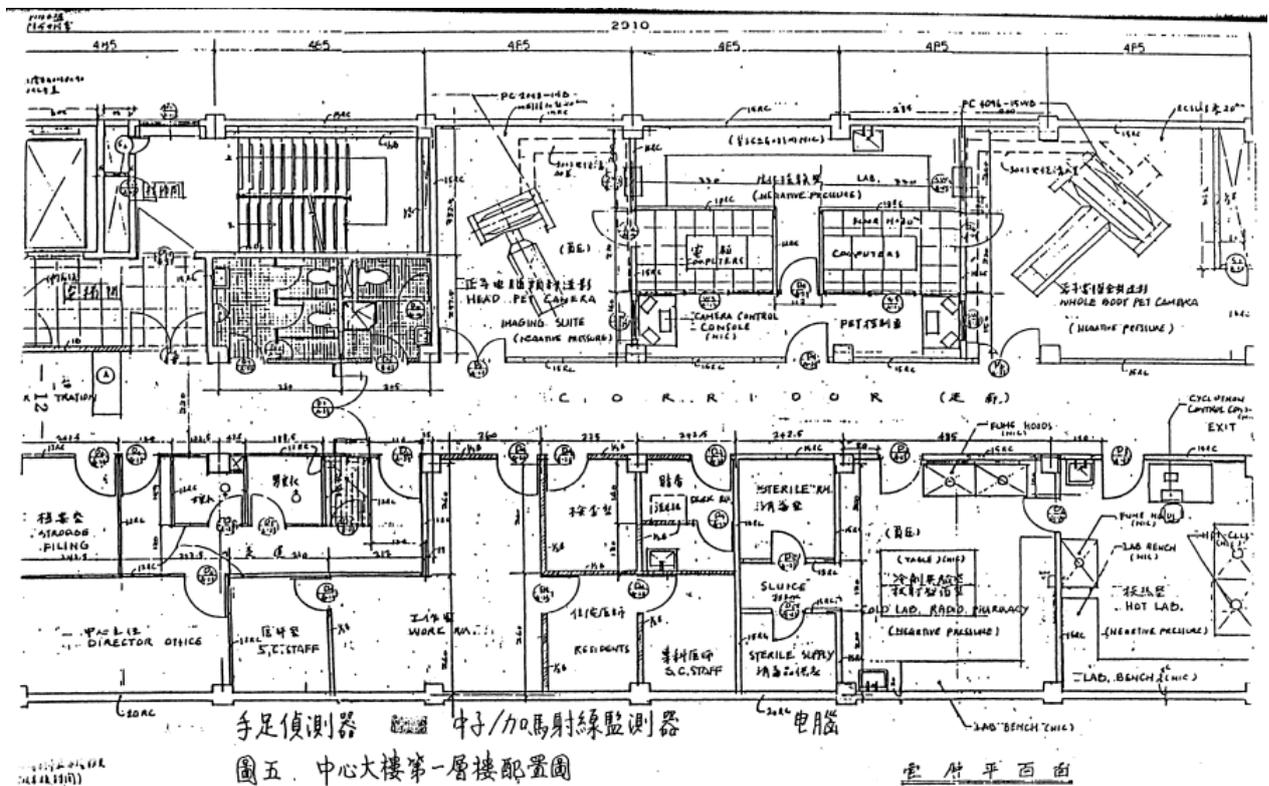
- (1) 輻射作業說明。
- (2) 計劃排放廢水、廢氣所含放射性物質之性質、種類、數量、核種及活度。
- (3) 場所外圍情況描述。
- (4) 防止環境污染之監測設備與處理程序及設計。
- (5) 其他主管機關指定之事項。



圖四. 中心大樓地下A層樓配置圖

BASEMENT "A"

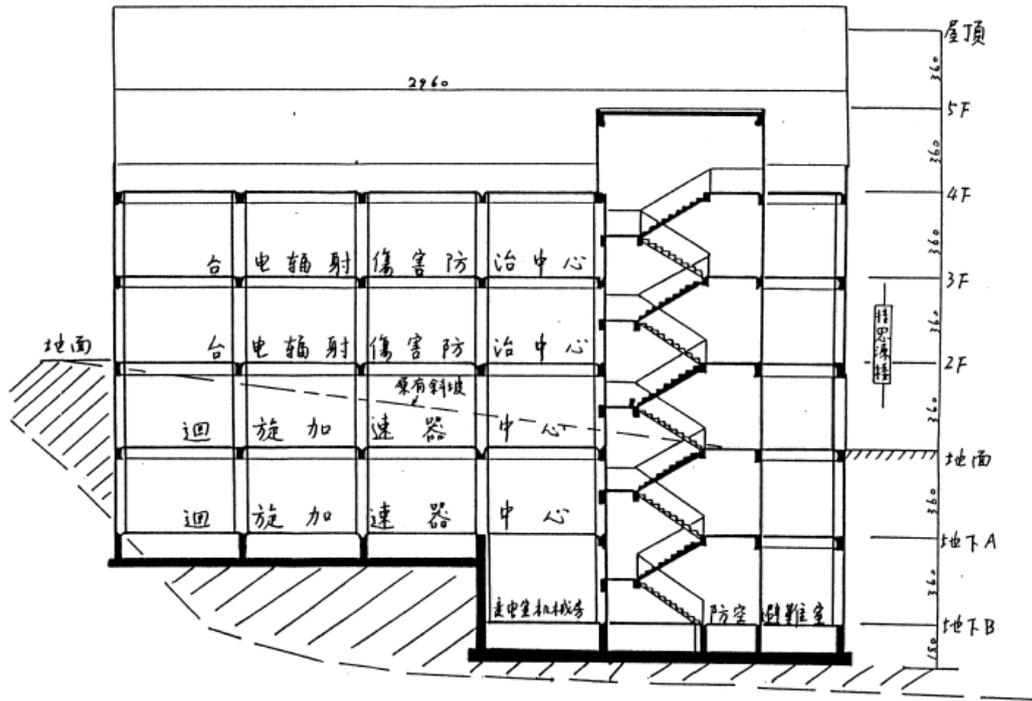
圖 2 迴旋加速器中心平面圖(地下樓)



圖五. 中心大樓第一層樓配置圖

樓層平面圖

圖 3 迴旋加速器中心平面圖(一樓)



圖三.中心大樓側視圖

圖4 回旋加速器中心剖面圖

3. 氣象及地理條件(場所外圍情況)

本中心位於臺北市北投區，氣象條件參考最鄰近之環保署承德檢測站一〇三年度紀錄，環保署承德檢測站所在位置及本院相對位置如下圖 5 所示：

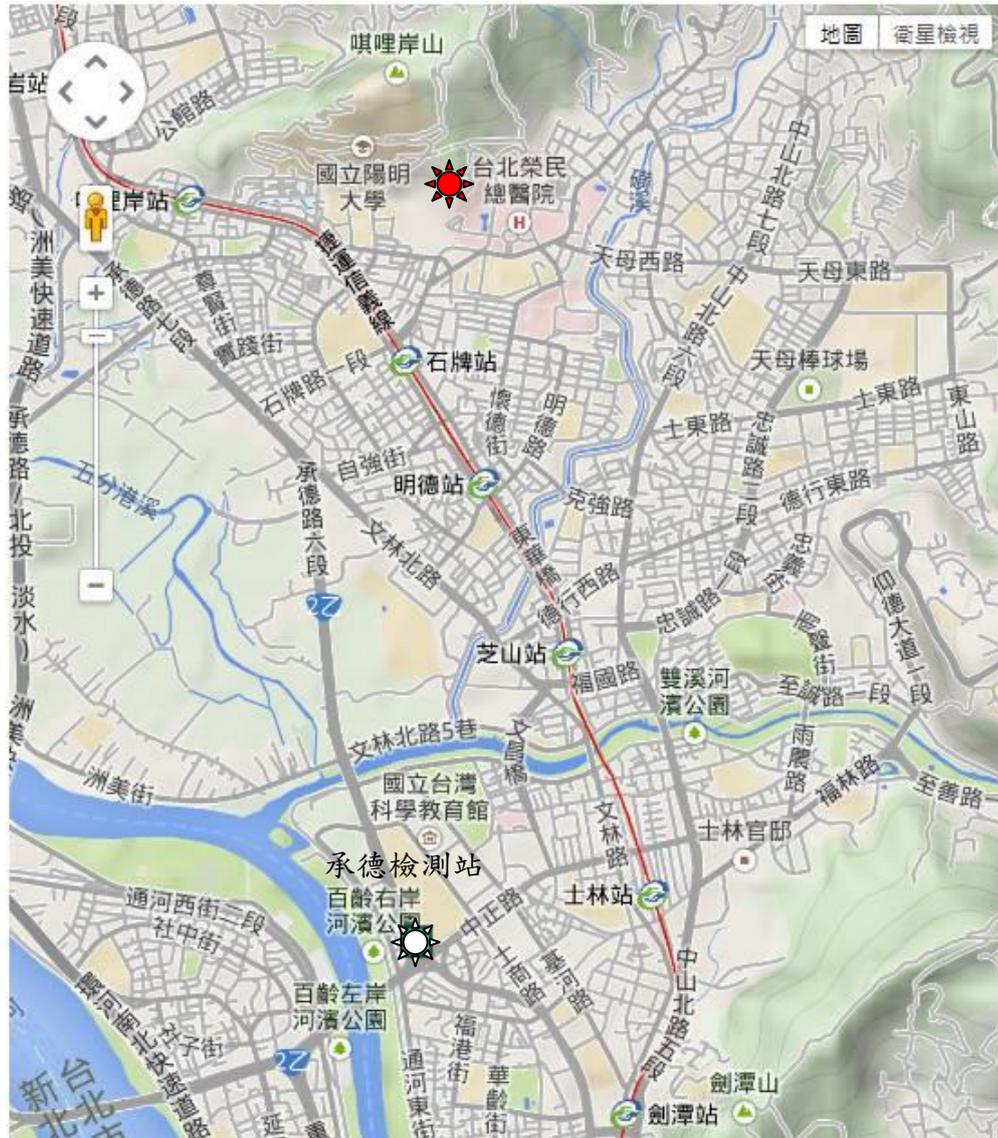


圖 5 環保署承德檢測站☀️所在位置及本院🌟相對位置

經彙整環保署承德檢測站往站提供之數據，統計士林北投地區一〇三年全年平均風速(m/s)及風向分布比例如下表 1 所示。

表 1 士林北投地區一〇三年年度風速(m/s)及風向分布表

2013 Wind Rose Map			
	< 1m/s	1 - 5m/s	> 5 m/s
0°	1.20 %	1.11 %	0.02 %
45°	1.34 %	6.28 %	0.15 %
90°	2.42 %	26.49 %	0.55 %
135°	3.83 %	17.25 %	0.24 %
180°	1.97 %	3.18 %	0.00 %
225°	2.31 %	4.34 %	0.05 %
270°	3.83 %	6.25 %	0.10 %
315°	3.73 %	12.96 %	0.39 %

風向是指風吹來的方向，一般是指離地約十公尺高空水平方向的風向，在氣象報告內是以十六方位來報導，如風從西南方向吹來，即稱為西南風，各方位的風向有一定的稱法，即北(N)：360°，北北東(NNE)：22.5°、東北(NE)：45°、東北東(ENE)：67.5°、東(E)：90°、東南東(ESE)：112.5°、東南(SE)：135°、南南東(SSE)：157.7°、南(S)：180°、南南西(SSW)：202.5°、西南(SW)：225°、西南西(WSW)：247.5°、西(W)：270°、西北西(WNW)：292.5°、西北(SW)：315°、北北西(NNW)：337.5°(如下圖 6)。另有三百六十方位，從 0°至 360°，風從那個度數吹來，如從 90°吹來即稱 90°風，一般無風時為 0°。風向不能採取平均，而是按各方位所出現風向頻率的多寡來處理，求出各月風向頻率分布的風花圖(Wind Rose)來表示，士林北投地區一〇三年年度風向頻率分布如下

圖 7 所示，全年東風最頻，約佔總頻率 29.46 %，東南風 21.32 %次之，西北風 17.08 %再次之，其他各方向之分布頻率均低於 10 %。

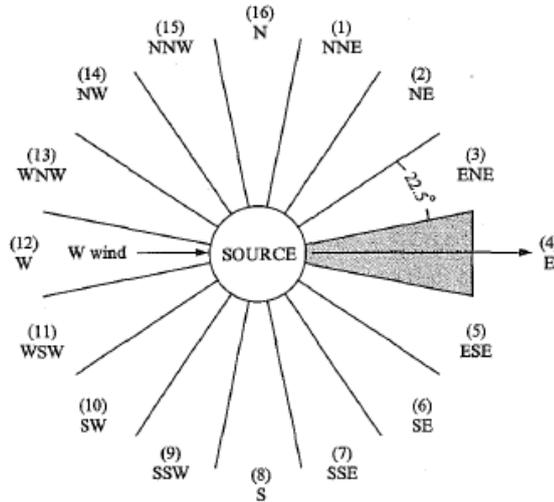


Figure 12-10. Schematic of a 16-sector wind rose for distributing wind direction data into downwind sectors of 22.5° each.

圖 6 風向十六方位圖

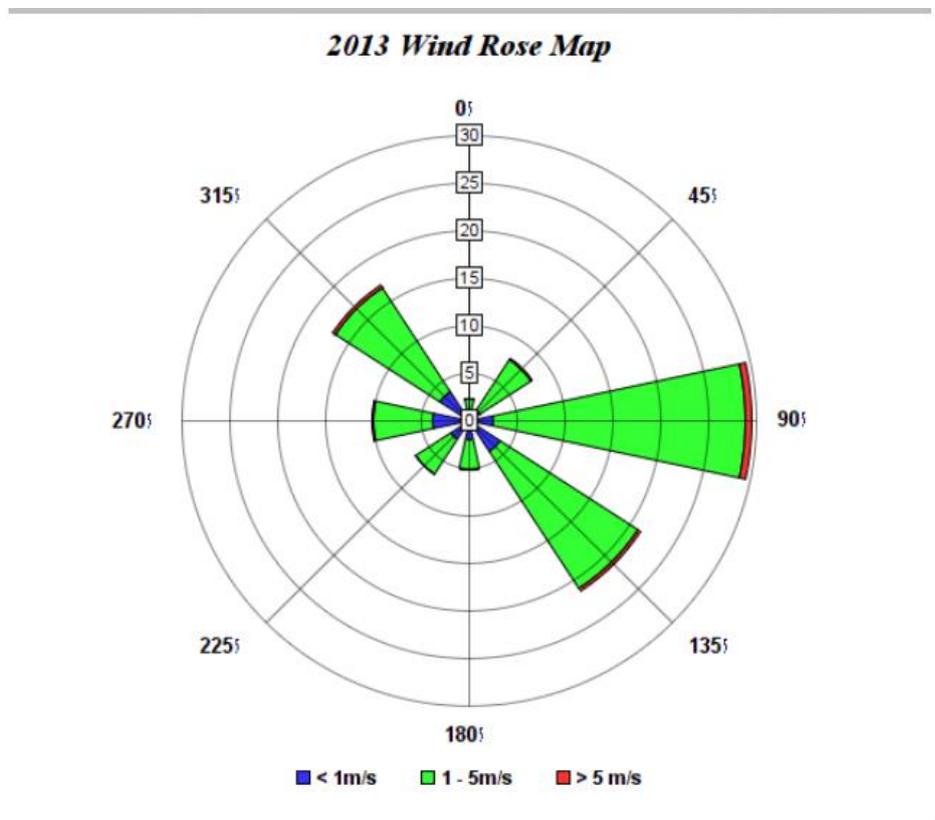


圖 7 士林北投地區一〇三年年度風向風速頻率分布圖

本院地理位置座落在臺北市北投區石牌路與天母西路交會口附近，排放口中心點方圓三百公尺內均位為本院院區。詳細地理位置圖如圖 8、衛星空照圖如圖 9、放射性廢氣排放口周圍環境如圖 10 所示。

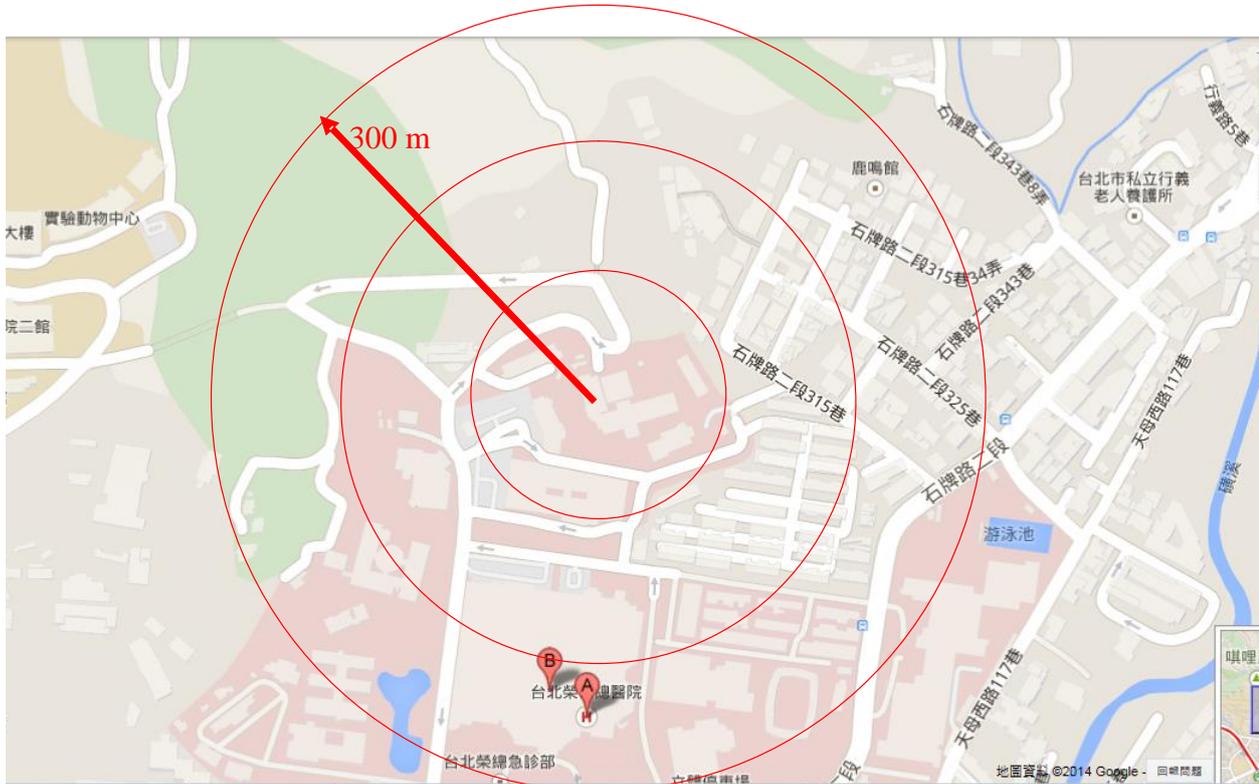


圖 8 臺北榮民總醫院地理位置圖(資料來源 <http://www.map.com.tw>)

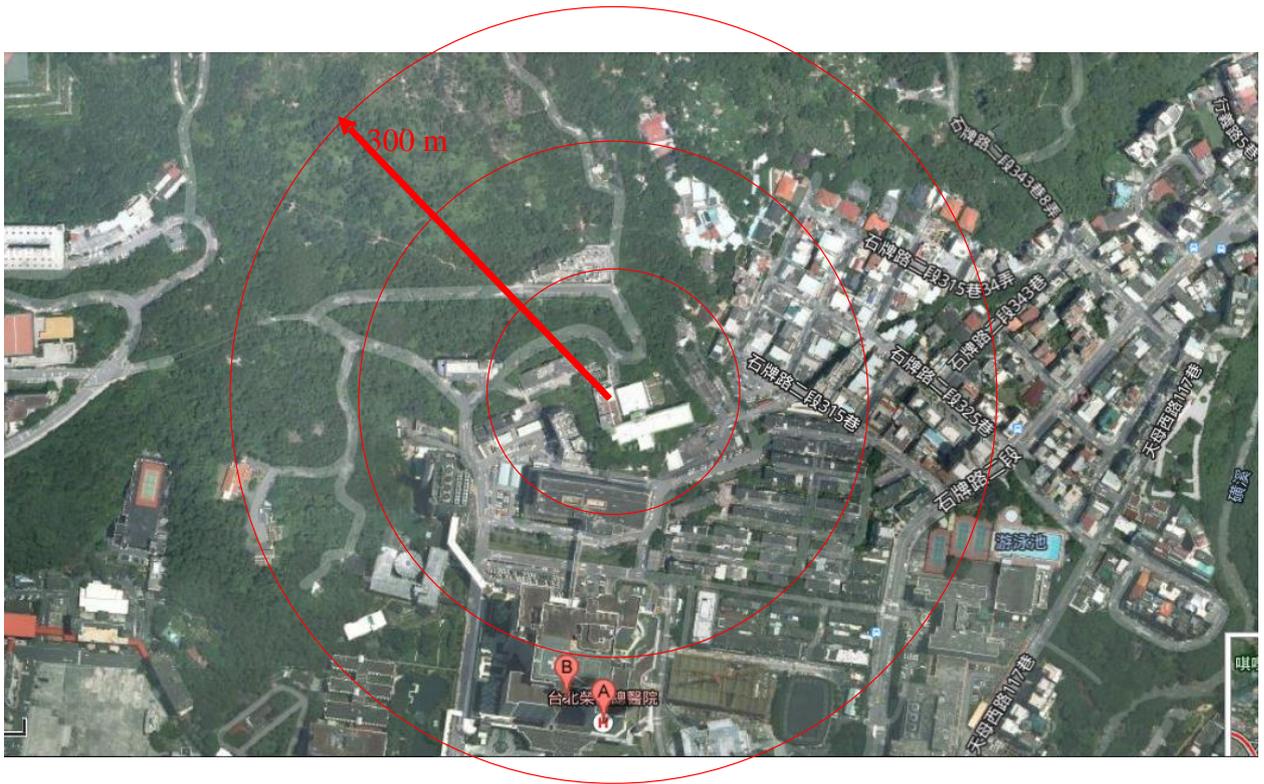


圖 9 臺北榮民總醫院衛星空照圖(資料來源 Google Earth, 2014.09.03)



圖 10 放射性廢氣排放口周圍環境圖

從地理位置圖及衛星空照圖可大致看出，本院排放點半徑四周三百公尺內主要涵蓋本院院區、唭哩岸山丘陵等低密度區。考量全年風向頻率分布，本院排放口位於三層樓高(約10 m)，排放距離受限於放射性物質短半衰期物理性質及地表建築物影響，排放距離不致太遠，因此本報告為以本院排放點為中心點，方圓三百公尺範圍之內作為評估區域，每一百公尺一個評估點。

4. 防止環境污染之監測設備與處理程序及設計

本中心控制空浮排放活度濃度之方法有二，其一為稀釋方式，將原有的二組排煙管(加速器室、熱核室)於出口端整合為一組排煙系統，使散逸環境之排放濃度降低至可接受之水平；其二為在排放管路設置 HEPA 與活性炭濾層過濾系統(圖 11)及排放管路劑量率偵檢器(圖 12)，二十四小時即時監測排放廢氣中之放射性劑量率，管制廢氣的排放，以確保所排放之廢氣不會影響到周遭的環境及人員。

排放管路劑量率偵檢器作業模式是將經國立清華大學校驗合格 LUDLUM 375 晶體式輻射偵檢器，安裝在頂樓加速器室及熱核室排放管路 HEPA 與活性炭濾層過濾系統後方排氣管內，所檢測的放射性氣體排放瞬間之劑量率資料送至區域監測器系統終端電腦控制系統。電腦系統則隨時接收終端顯示器送來的資料，並進行分析及提供即時之數據及圖像資料，一旦加速器室或熱核室外釋之放射性廢氣劑量率超過設定限值(Threshold)時，會發出警報提醒運轉人員以手動方式關閉該室之進排風系統停止運轉，避免廢氣外洩至周遭環境。



圖11 排放管路設置HEPA與活性炭濾層過濾系統



圖12 排放管路劑量率偵檢器設置位置圖

為確認放射性廢氣排放處理過濾系統中之空浮偵檢器及濾除過濾系統能夠確實達成設計上之功能，HEPA濾層、活性炭濾層與放射性氣體排氣系統於迴旋加速器換照前，委託核能研究所防護面具與空氣濾器檢測中心進行現場檢測作業。同時，在執行生產測試過程中，請核研所到本中心，於加速器生產最大運轉條件與合成製藥過程中執行排氣系統管路抽氣取樣活度測試，以確認本中心防止環境污染之監測設備與處理程序及設計之功能及效率，確實可達到法

規要求之排放標準以下，取樣活度測試如下圖13所示。空浮濾器系統濾除效率檢測結果及廢氣排放取樣分析紀錄檢測結果如下表2、3說明。



圖 13 放射性廢氣排放處理過濾系統及現場檢測作業

表 2 空浮濾器系統濾除效率檢測結果表

系統形式	吸附效率	檢測日期	檢測單位	備註
活性炭濾器	95.29%	103.04.25	核能研究所 防護面具與空氣濾器檢測中心	
絕對濾層	99.99%			

表 3 生產過程中排氣煙道放射性氣體取樣分析與劑量評估檢測結果表

測試內容	檢測放射性氣體	分析結果	檢測日期	檢測單位	備註
打靶、傳送、合成作業 (2626 秒)	^{11}C (β^+ , 20.48 分)	29.82 Bq/L	103.06.19	核能研究所 保物組	

本次迴旋加速器測試運轉，根據排氣煙道放射性氣體取樣分析與劑量評估結果，相關迴旋加速器運轉作業對環境造成之輻射劑量，可符合我國「游離輻射防護安全標準」之要求。詳細排放數據參考附件「臺北榮總放射性物質生產設施排放廢氣總量計算」報告。

5. 射源項 (Source Term)：計劃排放放射性廢氣之性質、種類、數量、核種及活度

本中心迴旋加速器生產運轉計畫中，生產 F-18、C-11、N-13 及 O-15 核種，目前本中心日常實際運轉靶電流為單靶 40 μA 。本中心奉原能會許可運轉最大運轉條件為單靶 40 μA 照射 H_2^{18}O (>95%) enriched water 2 小時。

本中心之生產計畫如下表 4：

表 4 生產計畫表

Tracer Products	Chemical Form	Production Yield (EOB)	Irradiation time	每週最高生產頻率	最高許可操作電流
		Typical	(min)	次	μA
^{18}F	^{18}F	1000 mCi	100	5	40
^{18}F	$^{18}\text{F-F}_2$	200 mCi	120	5	40
^{11}C	$^{11}\text{CO}_2$	1000 mCi	40	10	40
^{13}N	$^{13}\text{NH}_3$	100mCi	10	10	10
^{15}O	H_2^{15}O	400mCi	7	10	32

本中心迴旋加速器運轉中，經核能研究所實測經由 $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$ 反應生成之 ^{41}Ar 活度濃度低於檢測儀器MDA值。本報告中忽略 ^{41}Ar 之劑量貢獻。

本中心考量正常生產打靶、合成過程中，設備有可能產生排放放射性氣體，統計103年5月2日(F-18)、6月19日(C-11)、6月25日(C-11)運轉期間三次生產經本中心空浮偵檢器排放歷史紀錄(圖14-圖16)。

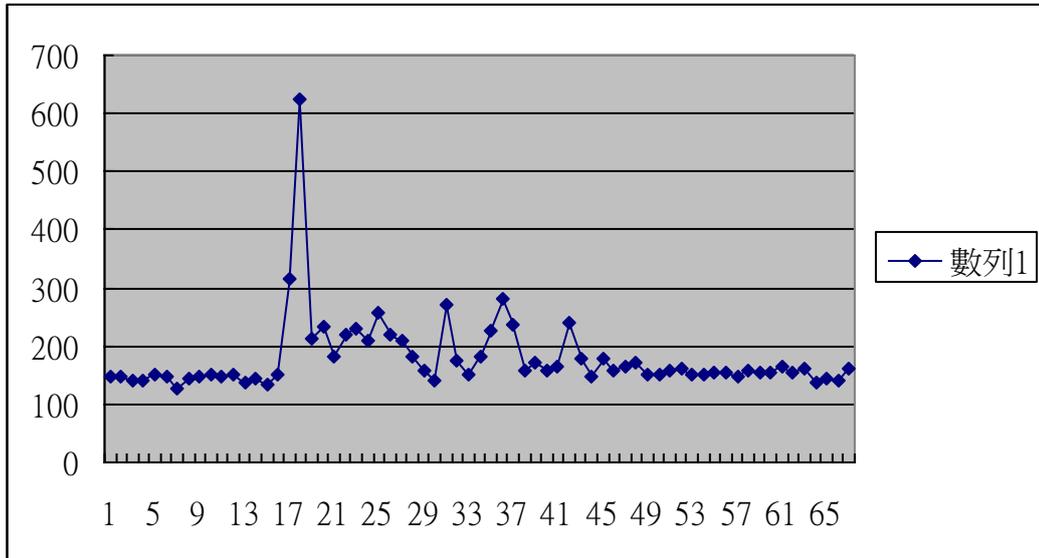


圖14 5月2日偵測器之計數率vs.時間圖；(F-18)

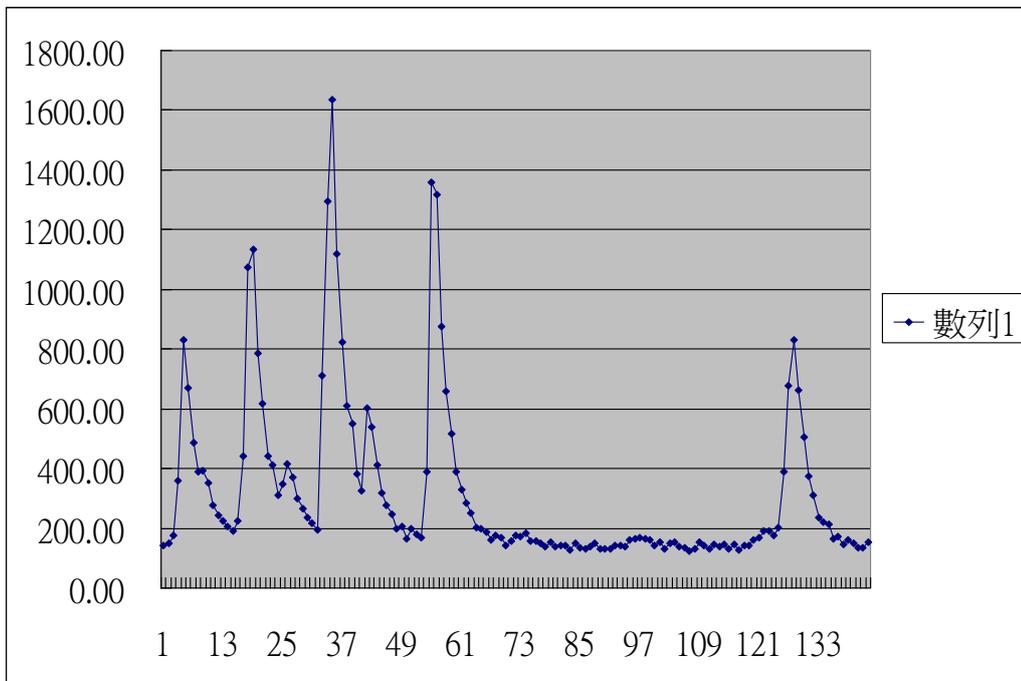


圖15 6月19日偵測器之計數率vs.時間圖；(C-11)

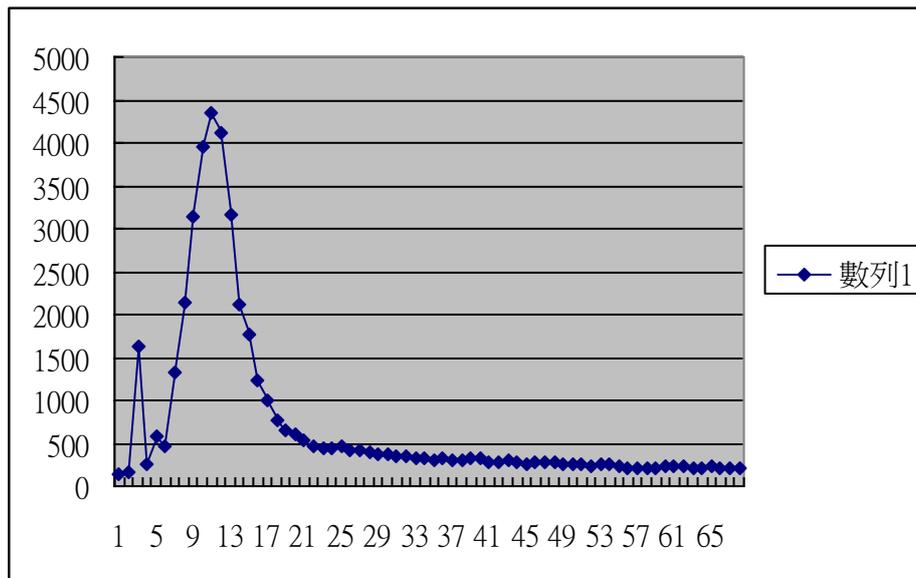


圖 16 6 月 25 日偵測器之計數率 vs.時間圖；(C-11)

本中心現有排放管路排放速度經空調維護廠商中興公司測量排氣速率為 9940CFM 或是 16905CMH。相當於每秒鐘排放 4.7 m^3 空氣，以 30cm 半徑管路而言，其平均排放風速為 $4.7 \text{ m}^3 / 0.3 \times 0.3 \times \pi = 16.6 \text{ m/s}$ 。年空浮排放總活度保守以「游離輻射防護安全標準」附表四之二第四欄：一般人放射性核種排放管制限度推估，對於本中心生產之 PET 核種，保守以 F-18 肺吸收類別 M 空氣中之排放物濃度管制限度 $2.2 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ 進行推估 (C-11 肺吸收類別 M 排放物濃度為 $6.86 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$)，單日最大總排放限度為： $2.2 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3 \times 4.7 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s/d} = 8.934 \times 10^8 \text{ Bq}$ ，年最大總排放限度為： $8.934 \times 10^8 \text{ Bq} \times 365 \text{ d/y} = 3.26 \times 10^{11} \text{ Bq}$ ，則一年總排放量不超過 $3.26 \times 10^{11} \text{ Bq}$ (8.81Ci) 時，符合「游離輻射防護安全標準」第十三條第二款之規定。

另為避免於爆靶或合成器洩漏等意外事故情形下，造成大量空浮放射性氣體排放，因此本中心設有空浮排放劑量率監測與連鎖系統，當空浮排放活度

濃度造成之安裝於排放管中輻射偵檢器劑量率高於0.5 μ Sv/h時，連鎖系統將發出警報提醒運轉人員以手動方式暫時關閉進排氣風機及風門，避免過高空浮活度排放至大氣。為評估本中心放射性核種排放至大氣最大釋放率，保守假設每年生產次數共500次(每日最多2次，一年生產250天)，每次外釋排放時間依運轉期間實測，一但超過劑量率設定值0.5 μ Sv/h時，其排放時間受到連鎖系統關閉排風系統動作之管制，不會超過3分鐘，並保守假設為連續以最大釋放率排放(真實排放情況為漸次升高至最大值後，再逐漸下降，如圖14-16所示)，則單次釋放率最大限度 Q_{\max} ： $3.26 \times 10^{11} \text{ Bq/y} \div 500 \text{ 次/y} \div 180 \text{ s/次} = 3.62 \text{ MBq/s}$ (或**3分鐘單次排放限度** $3.62 \text{ MBq/s} * 180 \text{ sec} = 651.6 \text{ MBq}$ 或**17.6mCi**)。在這假設中，未考慮 ^{18}F 109.8分鐘的半衰期在由產生至散佈到煙囪排放口所需要的輸送時間內之衰減。

6. 擴散模式

放射性氣體或蒸氣排放後隨著風的吹動，而散佈於大氣之中，其散佈範圍及方式受下列幾個因素影響：

- (1) 風的方向、速度及亂流程度。
- (2) 大氣的穩定性。
- (3) 排放源特徵：連續性、瞬間排放、點或面的排放等。
- (4) 氣體的比重。
- (5) 排放速度。

(6) 周圍地形及建築物。

(7) 煙囪或排放點高度。

煙羽形成後的移動方向主要是受風及重力的影響，而風速直接影響散佈的範圍，大氣穩定性則決定煙羽在垂直方向的運動，其主要是受風速及大氣中溫度梯度變化而定。排放方式可分為連續性及瞬間排放，連續性排放會形成連續的煙羽隨風漂浮，工業窯爐、鍋爐煙囪的煙氣即是明顯的例子；瞬間排放的氣體僅形成一團蒸氣雲(Puff)，而非連續性煙羽，其擴散隨時間而變，最顯明的例子為以蒸汽驅動的火車，於鳴號後的蒸汽排放，由於排放時間很短，因此僅形成一圈蒸氣雲在空中逐漸擴散而消失。排放的放射性物質的比重決定煙羽漂浮或下沉，如果比重遠較空氣為輕，煙羽受浮力影響而上升，如果比重與空氣相近，則隨風吹動在空中漂浮，比重遠超過空氣時，煙羽形成後首先會因重力的影響而下沉，其移動方式逐漸受周圍的亂流影響而改變。地表面的起伏程度決定風所造成的亂流程度，間接影響氣體的擴散；建築物或其他地形上的阻礙則可阻擋氣體的流動，導致氣體流速及壓力的變化。

放射性物質排放之擴散分析參考美國Regulatory Guide 1.111，例行連續性的煙囪點排放源(continuously emitting sources) 擴散，以定平均風向模式(Constant Mean Wind Direction) 表示，在不考慮評估區內附近建築物影響[理想自由空間(idealized free space with no barriers)]及時間變化條件下，假定放射性氣體是繞著煙羽的中心軸呈高斯常態分布，而且大氣溫度穩定度及風速決定污染物順風方向的大氣散佈特性。依Pasquill-Gifford方程式為：

$$X(x, y, z) / Q = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad \text{Eq-1}$$

其中：

x 、 y 、 z ：為距排放源的距離（ x ：順風方向， y ：橫風方向， z ：垂直方向）。

$X(x, y, z)$ ：距離排放點（ x, y, z ）位置，放射性核種於地面空氣中平均活度濃度，

單位為 Ci/m^3 或 Bq/m^3 。

Q_i ：放射性核種排放至大氣釋放率，單位為 Ci/sec 或 Bq/sec 。

$[X/Q](x, y, z)$ ：平均大氣擴散因子，包括沉積及煙羽放射性衰減，單位為 sec/m^3 。

H ：有效煙囪高度，為實際的煙囪高度（或排放源離地面的高度）與煙羽上升高度之和（ m ）。

σ_y, σ_z ：為水平橫風方向與垂直方向之擴散係數（ m ），主要受大氣穩定性影響決定，特別是垂直方向大氣中溫度梯度變化而定。

u ：煙羽中線上的平均風速（ m/s ）。

定平均風向擴散模式示意圖如下圖17所示

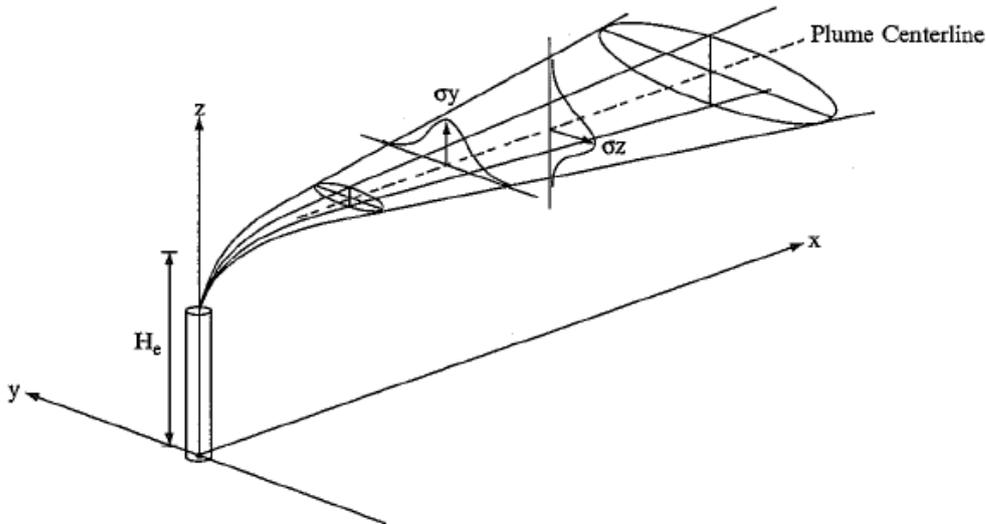


Figure 12-2. Atmospheric dispersion of material released from a point source of height H above the ground that produces Gaussian-distributed concentration profiles both horizontally and vertically. Reflection of the plume by the ground surface is accounted for by a “virtual” source located at $-H$.

圖17 定平均風向擴散模式示意

若在地表附近，煙羽中心線之值($y=0, z=0$)為

$$\frac{X(x,0,0,H)}{Q} = \frac{1}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad \text{Eq-2}$$

若為非高排放情形，煙羽中心線之值($y=0, z=0, H=0$)可簡化為

$$\frac{X(x,0,0,0)}{Q} = \frac{1}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \quad \text{Eq-3}$$

大氣穩定性依風速、日夜、陰晴日照狀況主要分為下列類別(表 5、6)：

Class A: Extremely Unstable Conditions (bright sun, daytime)

Class B: Moderately Unstable Conditions (sunny, daytime)

Class C: Slightly Unstable Conditions (light cloudiness, daytime)

Class D: Neutral Conditions (overcast sky, brisk wind, day or night)

Class E: Slightly Stable Conditions (early evening, light winds, relatively clear sky)

Class F: Moderately Stable Conditions (late night, light wind, clear sky)

Class G: Very Stable (predawn, very light wind, clear sky)

表5 大氣穩定性分類表

Table 12-1. Atmospheric Stability Class as a Function of Windspeed and Amount of Solar Insolation.

Windspeed (m/s @ 10 m)	Daytime Conditions			Nighttime Conditions	
	Strong Sun	Moderate Sun	Cloudy	> 4/8 Clouds	Clear Sky
< 2	A	A-B	B	E or F	F or G
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

表6 大氣穩定性分類與垂直高度溫度變化及水平風向關係表

Table 12-2. Stability Class (or Pasquill Category)^a vs Vertical Temperature Profiles ($\Delta T/\Delta z$) and the Standard Deviation in the Horizontal Wind Direction, σ_{θ} .

Stability Class	$\Delta T/\Delta z$ ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)	σ_{θ} (degrees) ^b
A	$< -1.9^{\circ}\text{C}$	$> 22.5^{\circ}$
B	$-1.9 \leq -1.7$	$17.5 \leq 22.5$
C	$-1.7 \leq -1.5$	$12.5 \leq 17.5$
D	$-1.5 \leq -0.5$	$7.5 \leq 12.5$
E	$-0.5 \leq +1.5$	$3.8 \leq 7.5$
F	$+1.5 \leq +4.0$	$2.1 \leq 3.8$
G	$> +4.0^{\circ}\text{C}$	$< 2.1^{\circ}$

^aFrom Regulatory Guide 1.23 US Nuclear Regulatory Commission, 1980.

^bMeasured at windspeeds $\geq 1.5\text{ m/s}$

σ_y , σ_z ：為橫風方向與垂直方向之擴散係數(m)，主要受大氣穩定性影響決定，特別是垂直方向大氣中溫度變化而定，對於每一穩定度種類，在通過煙羽中心線水平及垂直面上的標準差值 σ_y 與 σ_z 為順風距離的函數(圖 18、19)。

本中心日常生產製藥時間為清晨六~八時，氣象條件如前節所述平均風速 u 為 1.6 m/s ，排煙管約 10 m 高(三層樓)，視為非高排放情形，溫差變化 $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

依表 5、6 數據，保守採用大氣穩定性分類 **F** 條件，作為擴散模式分析。因此距離排放點(x, y, z)位置，放射性核種於地面空氣中平均活度濃度為

$$X(500,0,0,0) = \frac{Q_{\max}}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \quad \text{Eq-4}$$

查圖 17、18 得到距離排放點 300m 處

σ_y 橫風方向擴散係數(m)：10 m

σ_z 垂直方向擴散係數(m)：6m

平均活度濃度(Bq/m³)

$$X(500,0,0,0) = \frac{3.62 \text{ MBq/s}}{\pi \times 10 \times 6 \times 4.7 \text{ m}^3/\text{sec}} = 4088.6 \text{ Bq/m}^3 \quad \text{Eq-5}$$

對於其他之距離，利用 Eq-5 式計算結果如下表：

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
σ_y (m)	4	7	10	15	18
σ_z (m)	2.5	4	6	7	9
平均活度濃度 (Bq/m ³)	24531.6	8761.3	4088.6	2336.3	1514.3

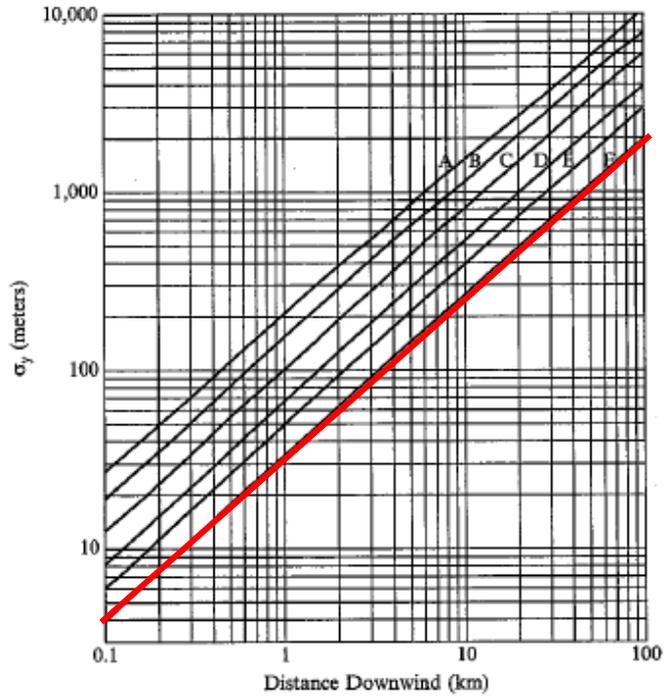


Figure 12-4. Values of the horizontal Gaussian dispersion coefficient, σ_y (m), vs distance and atmospheric stability class (A-F).

圖 18 橫風方向高斯擴散係數圖

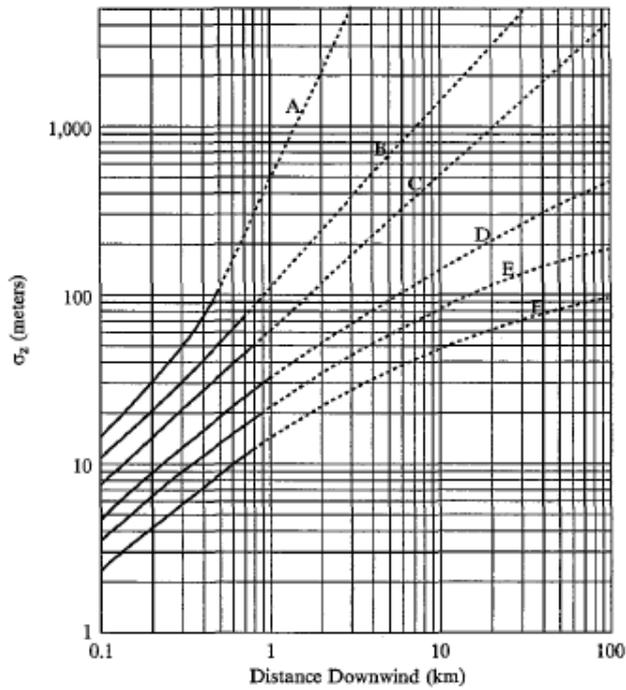


Figure 12-5. Values of the vertical Gaussian dispersion coefficient, σ_z (m), vs distance and atmospheric stability class (A-F).

圖 19 垂直風方向高斯擴散係數圖

7. 放射性氣體排放劑量評估

放射性氣體排放造成公眾劑量曝露之途徑如下圖20所示，參考美國Regulatory Guide 1.109 Appendix B & C，釋放至大氣中放射性惰性氣體、放射性碘及其他放射性核種微粒造成人員劑量的曝露途徑，包括經由呼吸、飲食產生之體內曝露及經地表沉積污染、氣態瀰漫下放射性氣體照射直接對全身及皮膚之體外曝露。

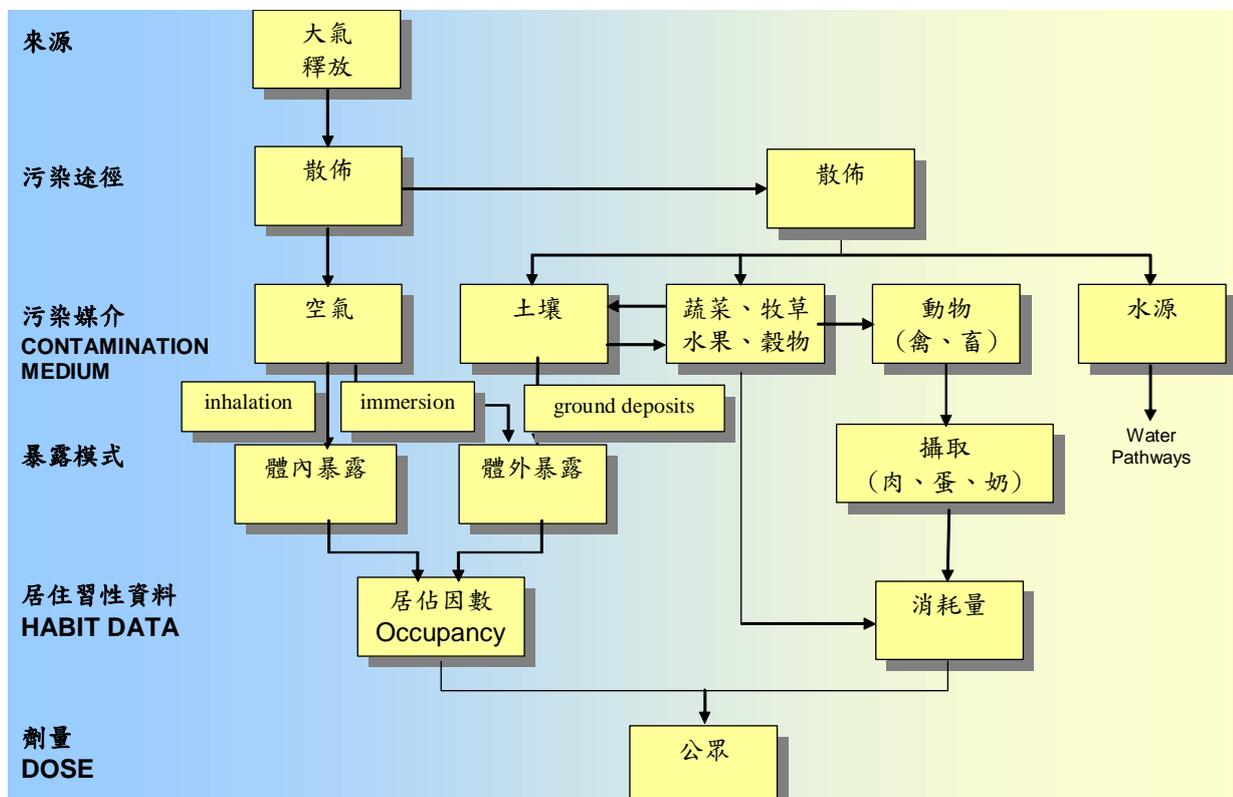


圖 20 放射性氣體排放造成公眾劑量曝露途徑圖

參考 Regulatory 1.109 Table D-1，放射性氣體經由植物、土壤，水源吸收傳輸至各種食物所需的時間如下表 7。本中心鄰近區域無水源、牧場、農場或魚塭養殖場，同時本中心僅生產短半衰期之正子放射同位素如 F-18、C-11，半衰期最長者為 109.8 分鐘，經食物鏈至人體消費吸收時已蛻變殆盡，因此不考

慮攝食吸入產生之體內曝露。在此僅考慮經由呼吸(Inhalation)產生之體內曝露及氣態瀰漫下(Immersion)放射性氣體直接對全身之體外照射曝露。

表 7 食物分布系統傳送時間

TABLE D-1
RECOMMENDED VALUES FOR THE TRANSPORT TIMES IN THE FOOD
DISTRIBUTION SYSTEM*

<u>FOOD MEDIUM</u>	<u>DISTRIBUTION TRANSPORT TIME (in days)</u>
Fruits, grains, and vegetables	14
Milk	4
Meat and poultry	20
Sport fish	7
Commercial fish	10
Drinking water	1

*To be used in lieu of site-specific data on food distribution.

7.1 吸入來自空氣中放射性核種年約定有效劑量

a. 相對於排放點(r, θ)位置，放射性核種 i 年平均空浮濃度用下式表示：

$$X_i(r, \theta) = 3.17 \times 10^4 Q_i [\chi/Q]^D(r, \theta) \quad \text{Eq-6}$$

式中：

$X_i(r, \theta)$ ：距離排放點 r，方位角 θ 位置，放射性核種 i 於地面空氣中年平均活度濃度，單位為 pCi/m³。

Q_i ：放射性核種 i 排放至大氣年釋放率，單位為 Ci/yr。

$[\chi/Q]^D(r, \theta)$ ：年平均大氣消散因子，包括沉積及煙羽放射性衰減，單位為 sec/m³。

3.17×10^4 ：換算因子，pCi/Ci /sec/yr。

b. 所有核種經由呼吸途徑造成人員體內曝露年劑量用下式表示：

$$D_{ja}^A(r, \theta) = R_A \sum_i x_i(r, \theta) DFA_{ija} \quad \text{Eq-7}$$

式中：

$D_{ja}^A(r, \theta)$ ：某年齡層 a 個人的器官 j，距離排放點 r，方位角 θ 位置，因呼吸造成之年等效劑量，單位為 mrem/yr。

R_A ：個人年吸入空氣量(依年齡層而定)，單位為 m^3/yr 。

DFA_{ija} ：為放射性核種 i 對器官 j、年齡層 a 之吸入劑量轉換因子，單位為 mrem/pCi。

$x_i(r, \theta)$ ：放射性核種 i 在 (r, θ) 年平均活度濃度，單位為 pCi/ m^3 。

經查 Regulatory Guide 1.109 Table E-5，青少年及一般成人呼吸量相同，於正常體力負荷下，每小時吸入 $1.2 m^3$ 空氣，保守假設本中心生產排放時，被評估之公眾群體均在評估區域內生活或活動，因此每年在此活度濃度下呼吸 25 小時(非連續性團蒸氣雲飄過時間 3 min/次 x 500 次/年=25 小時/年)，其經由呼吸所吸入之 F-18 活度值計算結果如下表：

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
平均活度濃度 (Bq/ m^3)	24531.6	8761.3	4088.6	2336.3	1514.3
每小時吸入空氣(m^3/h)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
每年呼吸放射性煙羽小時(h/y)	25	25	25	25	25
吸入活度 (Bq/y)	735948	262839	122658	70089	45429

上表所得到之吸入活度為假設全年固定方向排放所計算之結果，尚未考慮全年風向頻率分布之實際狀況，如圖 7 所示，全年東風最頻，約佔總頻率 29.46%，東南風 21.32 %次之，西北風 17.08 %再次之，其他各方向之分布頻率均低於 10 %。在考慮全年風向頻率分布之實際狀況之下，各方向呼吸所吸入之 F-18 活度值計算結果如下表：

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
平均活度濃度 (Bq/m ³)	24531.6	8761.3	4088.6	2336.3	1514.3
單一方向吸入活度(Bq/y)	735948	262839	122658	70089	45429
西方(29.46%)吸入活度(Bq/y)	216810.3	77432.4	36135.0	20648.2	13383.4
西北方(21.32%)吸入活度(Bq/y)	156904.1	56037.3	26150.7	14943.0	9685.5
東南方(17.08%)吸入活度(Bq/y)	125699.9	44892.9	20950.0	11971.2	7759.3
其他方位角(<10%)吸入活度(Bq/y)	73594.8	26283.9	12265.8	7008.9	4542.9

經查行政院原子能委員會頒布之「游離輻射防護安全標準」附表三之五，有關 ¹⁸F₉ 所造成之體內攝入劑量，考量吸入(Inhalation)所造成之約定有效劑量，¹⁸F₉ 生物半化期約 6 小時，長於十分鐘，短於一百四十天，肺吸收類別為 M 類(如下表)：

附表三之五 一般人之個人吸入每單位攝入量放射性核種產生之約定有效劑量， h (g)(西弗/貝克，Sv · Bq ⁻¹)										
核種	物理半化期	肺吸收類別	年齡 ≤ 1 歲		年齡	1-2 歲	2-7 歲	7-12 歲	12-17 歲	>17 歲
			f _i (g ≤ 1)	h (g)	f _i (g > 1)	h (g)	h (g)	h (g)	h (g)	h (g)
氟(Fluorine)										
F-18	1.83 時	F	1.000	2.6×10 ⁻¹⁰	1.000	1.9×10 ⁻¹⁰	9.1×10 ⁻¹¹	5.6×10 ⁻¹¹	3.4×10 ⁻¹¹	2.8×10 ⁻¹¹
		M	1.000	4.1×10 ⁻¹⁰	1.000	2.9×10 ⁻¹⁰	1.5×10 ⁻¹⁰	9.7×10⁻¹¹	6.9×10⁻¹¹	5.6×10⁻¹¹
		S	1.000	4.2×10 ⁻¹⁰	1.000	3.1×10 ⁻¹⁰	1.5×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹⁰	7.3×10 ⁻¹¹	5.9×10 ⁻¹¹

則在此評估區域內一般成人(>17 歲)、青少年(高中職學生 12-17 歲) 及兒

童(小學生 7-12 歲)經由呼吸途徑造成人員體內曝露年約定有效劑量為：

兒童(小學生 7-12 歲) (每小時吸入空氣為成人之 0.65 倍)

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
西方年約定有效劑量(mSv)	1.37E-02	4.88E-03	2.28E-03	1.30E-03	8.44E-04
西北方年約定有效劑量(mSv)	9.89E-03	3.53E-03	1.65E-03	9.42E-04	6.11E-04
東南方年約定有效劑量(mSv)	7.93E-03	2.83E-03	1.32E-03	7.55E-04	4.89E-04
其他方位角年約定有效劑量(mSv)	4.64E-03	1.66E-03	7.73E-04	4.42E-04	2.86E-04

青少年(中學生 12-17 歲)

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
西方年約定有效劑量(mSv)	1.50E-02	5.34E-03	2.49E-03	1.42E-03	9.23E-04
西北方年約定有效劑量(mSv)	1.08E-02	3.87E-03	1.80E-03	1.03E-03	6.68E-04
東南方年約定有效劑量(mSv)	8.67E-03	3.10E-03	1.45E-03	8.26E-04	5.35E-04
其他方位角年約定有效劑量(mSv)	5.08E-03	1.81E-03	8.46E-04	4.84E-04	3.13E-04

一般成人(>17 歲)

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
西方年約定有效劑量(mSv)	1.21E-02	4.34E-03	2.02E-03	1.16E-03	7.49E-04
西北方年約定有效劑量(mSv)	8.79E-03	3.14E-03	1.46E-03	8.37E-04	5.42E-04
東南方年約定有效劑量(mSv)	7.04E-03	2.51E-03	1.17E-03	6.70E-04	4.35E-04
其他方位角年約定有效劑量(mSv)	4.12E-03	1.47E-03	6.87E-04	3.92E-04	2.54E-04

7.2 氣態瀰漫下放射性氣體直接對全身之體外照射曝露個人等效劑量

氣態瀰漫下放射性氣體直接對全身之體外照射曝露劑量用下式表示：

$$D_{\infty}^T(r, \theta) = S_F \sum_i x_i(r, \theta) DFB_i \quad \text{Eq-8}$$

式中

DFB_i ：為放射性核種*i* 形成的半無限寬廣雲對全身之劑量轉換因子，包括 5 g/cm²組織單位的衰減。單位為mrem·m³/pCi·yr。

$D_{\infty}^T(r, \theta)$ ：為距離排放點(*r*, θ)，沉浸在半無限寬廣雲所造成之年度全身劑量，單位為 mrem/yr;

$x_i(r, \theta)$ ：放射性核種*i*在(*r*, θ)年平均地表活度濃度，單位為pCi/m³。

S_F ：建築物屏蔽造成的衰減係數(0.7)。

參考 Federal Guidance Report No. 12, page 58, Table III.1 Dose Coefficients for Air Submersion, F-18 的Effective Dose Coefficient h_T (Sv/Bq·s·m⁻³)為4.90E-14，則在此區域一般人經由氣態瀰漫下放射性氣體直接對全身之體外照射曝露年度個人有效劑量：

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
平均活度濃度 (Bq/m ³)	24531.6	8761.3	4088.6	2336.3	1514.3
Effective Dose Coefficient h _T (Sv/Bq.s.m ⁻³)	4.90E-14	4.90E-14	4.90E-14	4.90E-14	4.90E-14
曝露時間(hr)	25	25	25	25	25
建築物屏蔽衰減係數	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
西方年約定有效劑量(mSv)	6.20E-06	2.21E-06	1.03E-06	5.90E-07	3.83E-07
西北方年約定有效劑量(mSv)	4.48E-06	1.60E-06	7.47E-07	4.27E-07	2.77E-07
東南方年約定有效劑量(mSv)	3.59E-06	1.28E-06	5.99E-07	3.42E-07	2.22E-07
其他方位角年約定有效劑量 (mSv)	2.10E-06	7.51E-07	3.51E-07	2.00E-07	1.30E-07

7.3 總有效劑量E_T

依行政院原子能委員會頒布之「游離輻射防護安全標準」附表三：四、(一)

計算總有效劑量E_T公式，將7.1及7.2節計算所得結果相加，可以得到下列總有效劑量E_T：

兒童(小學生 7-12 歲) (每小時吸入空氣為成人之 0.65 倍)

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
西方年約定有效劑量(mSv)	1.37E-02	4.88E-03	2.28E-03	1.30E-03	8.44E-04
西北方年約定有效劑量(mSv)	9.90E-03	3.53E-03	1.65E-03	9.43E-04	6.11E-04
東南方年約定有效劑量(mSv)	7.93E-03	2.83E-03	1.32E-03	7.55E-04	4.89E-04
其他方位角年約定有效劑量(mSv)	4.64E-03	1.66E-03	7.74E-04	4.42E-04	2.87E-04

青少年(中學生 12-17 歲)

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
西方年約定有效劑量(mSv)	1.50E-02	5.35E-03	2.49E-03	1.43E-03	9.24E-04
西北方年約定有效劑量(mSv)	1.08E-02	3.87E-03	1.81E-03	1.03E-03	6.69E-04
東南方年約定有效劑量(mSv)	8.68E-03	3.10E-03	1.45E-03	8.26E-04	5.36E-04
其他方位角年約定有效劑量(mSv)	5.08E-03	1.81E-03	8.47E-04	4.84E-04	3.14E-04

一般成人(>17 歲)

距離	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
西方年約定有效劑量(mSv)	1.21E-02	4.34E-03	2.02E-03	1.16E-03	7.50E-04
西北方年約定有效劑量(mSv)	8.79E-03	3.14E-03	1.47E-03	8.37E-04	5.43E-04
東南方年約定有效劑量(mSv)	7.04E-03	2.52E-03	1.17E-03	6.71E-04	4.35E-04
其他方位角年約定有效劑量(mSv)	4.12E-03	1.47E-03	6.87E-04	3.93E-04	2.55E-04

由上表數據得知，在保守的假設條件下，本中心日常生產設定排放活度濃度造成附近評估區域一般民眾個人劑量遠低於法規劑量限度之要求(最大值小於 $15 \mu\text{Sv/y}$)。依本排放系統之設計，每年總排放活度在 $3.26 \times 10^{11} \text{ Bq}$ (8.81Ci) 之內(F-18 一般人放射性核種排放管制限度 $2.2\text{E}+3 \text{ Bq/m}^3 * 4.7 \text{ m}^3/\text{sec} * 86400 \text{ sec/day} * 365 \text{ day/y} = 3.26 \times 10^{11} \text{ Bq/y}$)，對評估區域一般民眾個人最大年總有效劑量，仍符合「游離輻射防護安全標準」第十三條第二款劑量限度之要求：

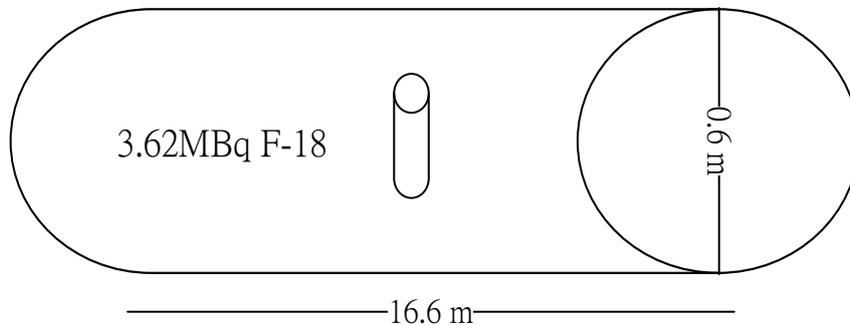
「輻射工作場所排放含放射性物質之廢氣或廢水，造成邊界之空氣中及水中之放射性核種年平均濃度不超過附表四之二規定，且對輻射工作場所外地區中一般人體外曝露造成之劑量，於一小時內不超過 0.02 毫西弗，一年內不超過 0.5 毫西弗。」

附表四之二 一般人放射性核種排放管制限度

第一欄	第二欄	第三欄	第四欄	第五欄	第六欄
原子序	放射性核種	肺吸收類別	排放物濃度(貝克/立方米)		污水下水道排放物 月平均濃度 (貝克/立方米)
			空氣中	水中	
9	氟(Fluorine)				
	F-18	F	4.41×10^3	1.86×10^7	1.86×10^8
		M	2.20×10^3		
		S	2.09×10^3		

7.4 排放濾層輻射劑量率偵檢器劑量率值警報設定

依第 5 節射源項分析，單次釋放率最大限度 Q_{\max} ： 3.26×10^{11} Bq/y \div 500 次/y \div 180s/次=3.62 MBq/s (或 3 分鐘單次排放限度 3.62 MBq/s*180sec=651.6MBq 或 17.6mCi)，其對於安裝於排放濾層後方管路內輻射劑量率偵檢器劑量率值經以 Microshield 5.05 版計算，其幾何假設條件為當第一秒鐘 3.62 MBq F-18 抵達偵檢器時，參考排風管流速每秒鐘 4.7 m^3 空氣，則 3.62 MBq F-18 平均分布在管徑 60cm 的排風管內，其分布長度為 16.6m，如下圖：



因 Microshield 無法計算沈浸在射源裡的劑量貢獻，所以將上述排風管內射源分成左右兩邊等圓柱體，分別計算各邊對中間劑量計之輻射劑量率，再將

劑量率相加，經計算後單邊劑量率值為 $0.3140 \mu\text{Sv/h}$ ，兩邊加總後為 $0.628 \mu\text{Sv/h}$ ，因此將排放濾層輻射劑量率偵檢器劑量率值警報值設定為 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ (含背景值)，尚屬保守。

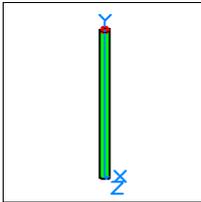
MicroShield v5.05 - [Case Summary of 北榮cyclotron]

MicroShield v5.05 (?????)
麥 納駐味沒誘能器

Page : 1
DOS File : Case1
Run Date : November 3, 2014
Run Time : 上午 10:29:32
Duration : 00:00:01

File Ref:
Date:
By:
Checked:

Case Title: 北榮cyclotron
Description: Case 1
Geometry: 8 - Cylinder Volume - End Shields



Source Dimensions

Height	880.0 cm	28 ft 10.5 in
Radius	30.0 cm	11.8 in

Dose Points

#	A	X	Y	Z
# 1	0 cm	881 cm	0 cm	0 cm
	0.0 in	28 ft 10.9 in	0.0 in	0.0 in

Shields

Shield Name	Dimension	Material	Density
Source	2.49e+06 cm	Air	0.00122
Air Gap		Air	0.00122

Source Input

Grouping Method : Actual Photon Energies

Nuclide	curies	becquerels	μCi/cm	Bq/cm
F-18	4.8919e-005	1.8100e+006	1.9661e-005	7.2745e-001

Buildup

The material reference is : Source

Integration Parameters

Radial	20
Circumferential	10
Y Direction (axial)	10

Results

Energy MeV	Activity photons/sec	Fluence Rate MeV/cm ² /sec No Buildup	Fluence Rate MeV/cm ² /sec With Buildup	Exposure Rate mR/hr No Buildup	Exposure Rate mR/hr With Buildup
0.0005	3.241e+02	1.331e-06	1.352e-06	7.770e-06	7.895e-06

MicroShield v5.05 - [北榮cyclotron - Conversion of calculated exposure in air to dose]

MicroShield v5.05 (?????)
麥 納駐味沒誘能器

Conversion of calculated exposure in air to dose
FILE: Case1
Case Title: 北榮cyclotron
This case was run on Monday, November 3, 2014 at 上午 10:29:32
Dose Point # 1 - (0,881,0) cm

Results (Summed over energies)	Units	Without Buildup	With Buildup
Photon Fluence Rate (flux)	Photons/cm ² /sec	2.948e+001	2.962e+001
Photon Energy Fluence Rate	MeV/cm ² /sec	1.507e+001	1.513e+001
Exposure and Dose Rates:			
Exposure Rate in Air	mR/hr	2.958e-002	2.971e-002
Absorbed Dose Rate in Air	mGy/hr	2.582e-004	2.594e-004
"	mrad/hr	2.582e-002	2.594e-002
Deep Dose Equivalent Rate (ICRP 51 - 1987)			
o Parallel Geometry	mSv/hr	3.126e-004	3.140e-004
o Opposed	"	2.420e-004	2.431e-004
o Rotational	"	2.420e-004	2.431e-004
o Isotropic	"	2.138e-004	2.148e-004
Shallow Dose Equivalent Rate (ICRP 51 - 1987)			
o Parallel Geometry	mSv/hr	3.292e-004	3.307e-004
o Opposed	"	3.109e-004	3.123e-004
o Rotational	"	3.109e-004	3.123e-004
o Isotropic	"	2.279e-004	2.290e-004
Effective Dose Equivalent Rate (ICRP 51 - 1987)			
o Anterior/Posterior Geometry	mSv/hr	2.750e-004	2.762e-004
o Posterior/Anterior	"	2.385e-004	2.396e-004
o Lateral	"	1.716e-004	1.724e-004
o Rotational	"	1.126e-004	1.136e-004
o Isotropic	"	1.780e-004	1.789e-004

另由本中心”臺北榮總放射性物質生產設施排放廢氣總量計算”報告中，推得本中心偵檢器與核研所偵檢器計讀單位之間換算為每 1cps 代表活度濃度為 62.7Bq/立方公尺，因此若以每秒鐘排氣活度限值 3.62MBq 除以每秒鐘排放氣體體積 4.7 m³ 空氣。

本中心排放活度濃度限度為 $3.62\text{MBq}/4.7\text{ m}^3=0.77\text{ MBq}/\text{ m}^3$ ，

所以設定值為 $0.77\text{ MBq}/\text{ m}^3/62.7\text{Bq}/\text{ m}^3=12280.7\text{ cps}$

8. 結論

- a. 本單位擬以空浮排放活度濃度造成之劑量率 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 作為 Alarm Threshold 值，控制排風系統的運轉與否，偵檢器偵測值達 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ ，立即啟動警報系統提醒運轉人員立即斷電，停止運轉，將放射性廢氣留滯於排風系統內，避免環境受到污染。
- b. 在保守的假設條件下，本中心日常生產設定最大瞬間排放活度(3.62M Bq/s)，考量大氣擴散因素後，造成附近評估區域一般民眾個人劑量遠低於「游離輻射防護安全標準」第十三條第二款劑量限度之要求。
- c. 依本中心設計，單日最大總排放活度限值為：
 $2.2 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3 \times 4.7 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s/d} = 1.863 \times 10^8 \text{ Bq}$ ，年總排放活度不超過：
 $1.863 \times 10^8 \text{ Bq} \times 365 \text{ d/y} = 3.26 \times 10^{11} \text{ Bq}$ ，可符合游離輻射防護安全標準第十三條第二款及附表四之二規定。(游離輻射防護安全標準附表四之二推算值 $3.26 \times 10^{11} \text{ Bq}$ (8.81Ci) (F-18 一般人放射性核種排放管制限度 $2.2\text{E}+3 \text{ Bq/m}^3 * 4.7 \text{ m}^3/\text{sec} * 86400 \text{ sec/day} * 365 \text{ day/y} = 3.26 \times 10^{11} \text{ Bq/y}$)。
- d. 本中心迴旋加速器運轉，根據排氣煙道放射性氣體取樣分析與劑量評估結果，相關迴旋加速器運轉作業對環境造成之輻射劑量，可符合我國「游離輻射防護安全標準」之要求。
- e. 若日後生產核種增加、生產計劃變更增加，應重新評估空浮排放活度與劑量。
- f. HEPA 與活性碳濾層應制訂壓差表檢查 SOP (包含巡視頻度、壓差正常

值、不正常因應措施等等)，定期巡視檢測壓差與效率，必要時應更換。

g. 排放活度濃度偵檢器警報設定值為 12280.7 cps。

9. 參考文獻

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.109 ” Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR PART 50, APPENDIX I”. Oct. 1977
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.111. ”Methods for estimating atmospheric transport and dispersion of gaseous effluents in routine releases from Light-Water-Cooled Reactor.” July, 1977
3. U.S. Environmental Protection Agency, Federal Guidance Report No. 12. “ External Exposure to Radionuclides in Air , Water and Soil. ”, September, 1993.
4. James E. Martin, “Principles of Radiological Health and Safety”, John Wiley Sons, Inc., New Jersey. 2003.
5. Herman Cember, “Introduction to Health Physics”, 3rd, McGraw-Hill. 1996.
6. 行政院原子能委員會, “游離輻射防護安全標準”, 中華民國94年12月30日修正發布。