

# 垃圾焚化廠排放戴奧辛/呔喃對鄰近淨水場水質影響評估

蘇仁偉<sup>1</sup>、林龍富<sup>2\*</sup>、李文智<sup>3</sup>、施明良<sup>4</sup>、王琳麒<sup>5</sup>、張簡國平<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學環境工程學系，碩士

<sup>2</sup> 崑山科技大學環境工程系，講師

<sup>3</sup> 國立成功大學環境工程學系，教授

<sup>4</sup> 嘉南藥理科技大學環境工程與科學系，副教授

<sup>5</sup> 正修科技大學化工與材料工程系，助理教授

<sup>6</sup> 正修科技大學化工與材料工程系，教授

## 摘要

本研究針對台灣中部 YL 地區某一興建中之垃圾焚化廠周界環境進行大氣、水體及底泥中戴奧辛/呔喃 (Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans, PCDD/Fs) 之檢測，期望能建立當地環境中 PCDD/Fs 之背景濃度。此外，並進一步以所測得之戴奧辛背景濃度及依照該焚化廠排放特性經擴散模擬所得之增量濃度，來評估未來焚化廠運轉後，附近居民經由大氣吸入與飲用水食入之戴奧辛暴露風險。研究結果顯示：1. YL 地區垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之濃度介於 0.0244-0.493 pg I-TEQ/Nm<sup>3</sup> 之間，平均值為 0.205 pg I-TEQ/Nm<sup>3</sup>。2. 大氣中 PCDD/Fs 濃度之氣固相分佈皆是以固相所佔之比例較高，固相比例介於 74%-93% 之間；總 PCDD/Fs I-TEQ 濃度固相所佔比例介於 31%-70% 之間。3. YL 地區垃圾焚化廠周界地面水體之 PCDD/Fs 濃度介於 0.00647-0.146 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.0307 pg I-TEQ/L；自來水原水之 PCDD/Fs 濃度介於 0.00647-0.0164 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.00974 pg I-TEQ/L；自來水之 PCDD/Fs 濃度介於 0.00141~0.00659 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.00370 pg I-TEQ/L。4. YL 地區垃圾焚化廠周界底泥之 PCDD/Fs 含量介於 0.0786-1.87 ng I-TEQ/kg 之間，平均值為 0.692 ng I-TEQ/kg。5. 經 ISCST3 模式模擬焚化廠運轉後周界大氣戴奧辛增量濃度介於 0.0148-1.59 fg I-TEQ/m<sup>3</sup> 之間，平均值為 0.180 fg

I-TEQ/m<sup>3</sup>，而總沈降率則介於  $2.73 \times 10^{-3}$ - $4.82 \text{ fg I-TEQ/m}^2 \text{ day}$  之間，平均值為  $0.527 \text{ fg I-TEQ/m}^2 \text{ day}$ 。6. 推估焚化廠運轉後淨水場水中戴奧辛之增量濃度為  $1.24 \times 10^{-8} \text{ pg I-TEQ/L}$ 。7. 附近居民經由大氣吸入與飲用水食入之戴奧辛終生平均每日暴露劑量為  $1.62 \times 10^{-2} \text{ pg I-TEQ/kg-day}$ ，其值低於世界衛生組織所公布之戴奧辛容許暴露劑量  $1-4 \text{ pg I-TEQ/kg-day}$ 。而戴奧辛致癌風險值為  $2.53 \times 10^{-6}$ ，其值仍低於風險管理的風險值上界  $1 \times 10^{-5}$ 。

## 1 前言

自從 1977 年戴奧辛與呔喃 (Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and polychlorinated dibenzofurans, PCDD/Fs，一般簡稱戴奧辛) 首次在都市垃圾焚化爐之煙道廢氣與飛灰被發現後 (Olie et al., 1977)，由於其對人體健康的危害，例如會增加致癌風險 (US EPA, 2003)，已經成為人類關心的課題。

在許多國家如美國 (US EPA, 2001)、英國 (Alcock et al., 1999)、義大利 (Caserini and Monguzzi, 2002) 與日本 (Japan ministry of the Environment, 2002) 之 PCDD/Fs 排放清單中，都市垃圾焚化爐皆為其國內 PCDD/Fs 最大來源。在國內，由於焚化爐的高興建率，已經引起國人對戴奧辛風險問題之疑慮。

本研究係針對一興建中之垃圾焚化廠 (LN 垃圾焚化廠) 周界環境大氣、水體及底泥中戴奧辛背景濃度進行調查，以了解焚化廠運轉前可能經由露天燃燒或其他燃燒排放源等原因所累積之濃度背景值。此外，更進一步以所測得之戴奧辛背景濃度及依照該焚化廠設計之排放特性，以擴散模式模擬來評估未來焚化廠運轉後，在符合垃圾焚化爐戴奧辛排放標準下，附近居民經由大氣吸入與飲用水食入之戴奧辛暴露風險。

本研究之目的為：1. 調查 LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之濃度。2. 調查 LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之氣固相分佈。3. 調查 LN 垃圾焚化廠周界水體中 PCDD/Fs 之濃度。4. 調查 LN 垃圾焚化廠周界水體之底泥中 PCDD/Fs 之濃度。5. 評估 LN 垃圾焚化廠運轉後當地大氣及飲用水之戴奧辛暴露風險。

## 2 研究方法

本研究針對台灣中部地區某一興建中之垃圾焚化廠周界環境進行大氣、水體及底泥中戴奧辛/呔喃 (Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans, PCDD/Fs) 之檢測，期望能建立當地環境中 PCDD/Fs 之背景濃度。此外，並進一步以所測得之戴奧辛背景濃度及依照該焚化廠排放特性經擴散模擬所得之增量濃度，來評估未來焚化廠運轉後，附近居民經由大氣吸入與飲用水食入之戴奧辛暴露風險。

根據 ISCST3 空氣污染擴散模式 (USEPA, 1995) 模擬之結果，於敏感區域選擇 4 個大氣採樣點，及三個水體及底泥採樣點，採樣點相對位置如圖 1 所示。其中一個大氣採樣點並且同步進行氣相及固相 PCDD/Fs 之採樣分析。大氣、水體及底泥 PCDD/Fs 之採樣分析於一年中分四季進行。大氣 PCDD/Fs 採樣依據 NIEA A809.10B，使用 PS-1 高流量空氣採樣器以 0.225 m<sup>3</sup>/min 的流量連續採集 72 小時。水體 PCDD/Fs 採樣，係使用泡棉採樣管以 0.4-0.6 L/min 的流量於一段時間內採取足夠量的水樣於玻璃纖維濾紙及泡棉 (Polyurethane foam, PUF) 上，並依樣品的種類不同，選擇適當之採樣體積，避免穿透現象。底泥採樣以手動式與重力式底泥採樣器進行採樣，採樣管使用不鏽鋼管，每個採樣點為求代表性及客觀性，於定點四周 1 米內採 3 個樣品，混合後的底泥樣品裝入 250 mL 褐色直口玻璃瓶，並以附鐵氟龍墊片的蓋子密封，冷藏帶回實驗室存於攝氏 4°C 冰箱，儘速冷凍乾燥並除去大顆粒後留作分析樣品。

大氣 PCDD/Fs 樣品之前處理依循環保署環檢所 NIEA A810.10B 之規範。PCDD/Fs 之儀器分析使用高解析度氣相層析儀 (HP 6970) 與高解析度質譜儀 (Micromass Autospec Ultimate) 作為 PCDD/Fs 樣品之分析。所採用之管柱型號為 DB-5 (J&W Scientific, CA, USA)，管長 60m，內徑 0.25mm，管壁厚度 0.25μm，管柱升溫條件則依循相關文獻之做法 (Wang et al., 2003)。

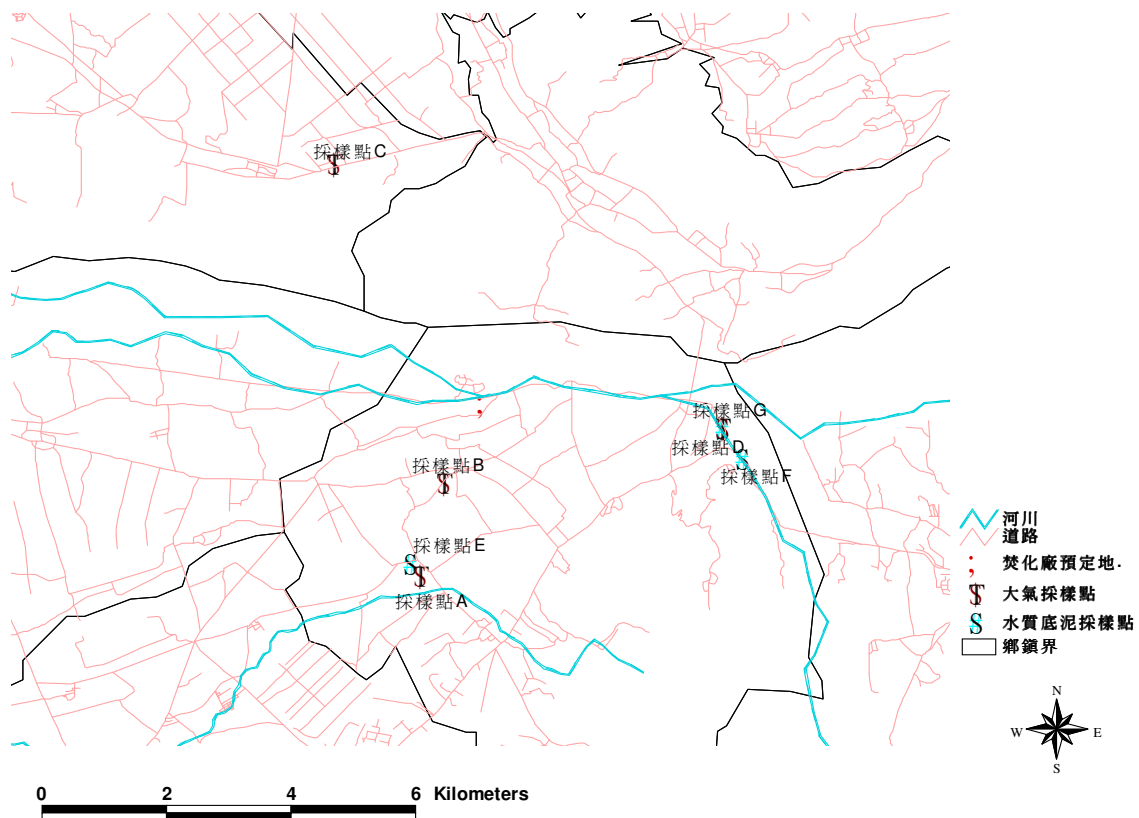


圖 1 垃圾焚化廠周界環境採樣點相對位置圖

本研究利用 ISCST3 擴散模式配合經內政部核定之五千分之一電子地圖，並依照 LN 垃圾焚化廠排放特性和所收集之焚化廠附近氣象資料，來推估 LN 垃圾焚化廠周界戴奧辛之濃度與沈降率。而模擬所需之污染源資料、受體點資料及氣象資料整理如下：

#### (1) 污染源資料

LN 垃圾焚化廠之焚化系統為連續混燒式機械爐床，具兩組焚化機組，處理量最大可達 660 公噸/日，其主要空氣污染防治設備有洗滌塔、袋式集塵器及活性炭噴入設備。其 ISC 模式所需之煙囪排放特性如表 1 所示。而戴奧辛排放濃度，則照環保署所訂定之焚化爐煙道戴奧辛排放標準  $0.1 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$ ，作為 LN 焚化廠煙道排放戴奧辛之模擬濃度。

表 1 LN 垃圾焚化爐煙囪排放特性

項目	煙囪排放設計值
煙囪高度	60 m
煙囪直徑	1.33m
煙道廢氣排放量	1500 Nm <sup>3</sup> /min
煙囪廢氣排放速度	18 m/sec
煙道廢氣排放溫度	135 °C

## (2)受體點資料

本研究以 LN 垃圾焚化廠廠煙道為中心，每 500m×500m 劃為一區塊，每一平方公里，分成 9 個受體點、4 個區塊。模擬範圍為 100 平方公里之面積，共分為 441 個受體點、400 個區塊。受體點之高程資料係由交通部出版之兩萬五千分之一之地形圖，以人工將高程與座標數化後鍵入 ISC 地形資料中。

## (3)氣象資料

空氣擴散模式所需之氣象資料，引用中央氣象局所屬最近之氣象站—嘉義測站之近一年氣象逐時資料。但由於嘉義測站與 LN 垃圾焚化廠廠址之距離較遠，故於當地架設一溫度、與風向風速計用以校正嘉義測站之氣象資料，以求得更準確之擴散模擬結果。此外並引用板橋測站高空探空氣球之數據推測混合層高度，並將其計算轉換為 ISC3 所需之氣象資料格式。

# 3 結果與討論

## 3.1 LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之濃度

LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/F 樣品分析結果如表 2 所示，LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之濃度介於 0.0244-0.493 pg I-TEQ/Nm<sup>3</sup> 之

間，平均值為 0.205 pg I-TEQ/Nm<sup>3</sup>。此一濃度在國內各地區之 PCDD/Fs 濃度中屬於較高者，可見有比都市垃圾焚化廠更重要的污染源存在。

### 3.2 LN 垃圾焚化廠周遭大氣中 PCDD/Fs 之氣固相分佈與特徵

LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之氣固相分佈如表 3 所示，由表 3 可知四季中總 PCDD/Fs 濃度之氣固相分佈皆以固相所佔比例較高，分別為 92.9%、74.1%、83.3%及 87.2%，比較四季之氣固相分佈，以夏季之固相比例為最低，其主要是因為夏季時氣溫較高，一般各個氣數 PCDD/Fs 蒸汽壓將隨著溫度升高而增加，因而造成夏季時固相比例較低氣相比例較高。以毒性觀點來看，四季總 PCDD/Fs I-TEQ 濃度固相所佔比例分別為 69.9%、30.9%、51.2%及 66.4%。春季及冬季毒性貢獻以固相為主，而夏季時則氣相對毒性貢獻有增加之趨勢，至於秋季氣固相貢獻相當。

### 3.3 LN 焚化廠周界水體中 PCDD/Fs 之濃度

LN 焚化廠周界水體中 PCDD/Fs 之濃度如表 4 所示。灌溉渠道 PCDD/Fs 之濃度介於 0.013-0.146 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.052 pg I-TEQ/L；淨水場取水口(亦為灌溉水取水口)之濃度介於 0.006-0.016 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.010 pg I-TEQ/L；淨水場內自來水之濃度介於 0.001-0.007 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.004 pg I-TEQ/L。各種不同水體中以灌溉渠道最高，淨水場取水口次之，淨水場內自來水之濃度最低。淨水場內自來水 PCDD/Fs 濃度比淨水場取水口低了 60%，顯見傳統混凝、沉澱、過濾程序藉由水中懸浮固體之去除可顯著降低水中 PCDD/Fs 之濃度。另外，灌溉渠道 PCDD/Fs 之濃度比取水口濃度高出 420%，可能受到農藥等之污染。以上三種水體中 PCDD/Fs 之濃度均低於日本環境水體水質標準 1 pg TEQ/L。

### 3.4 LN 焚化廠周界水體底泥中 PCDD/Fs 之濃度

LN 焚化廠周界水體底泥中 PCDD/Fs 之含量如表 5 所示。灌溉渠道底

泥 PCDD/Fs 之含量介於 0.757-1.87 pg I-TEQ/g 之間，平均值為 1.16 pg I-TEQ/g；淨水場取水口(亦為灌溉水取水口)底泥之 PCDD/Fs 含量介於 0.079-1.48 pg I-TEQ/g 之間，平均值為 0.586 pg I-TEQ/g；淨水場旁濁水溪底泥之含量介於 0.105-0.777 pg I-TEQ/g 之間，平均值為 0.329 pg I-TEQ/g。灌溉渠道底泥 PCDD/Fs 之含量比取水口含量高 98%，可能受到農藥等之污染。以上水體底泥中 PCDD/Fs 之含量均低於日本環境水體底泥標準 150 pg I-TEQ/g。

### 3.5 LN 焚化廠運轉後大氣及飲用水戴奧辛暴露風險評估

#### 3.5.1 空氣中戴奧辛濃度及沈降率空氣擴散模式模擬結果

依照 LN 垃圾焚化廠排放特性和所收集之焚化廠附近氣象資料，經 ISCST3 模式模擬 LN 焚化廠污染源所排出戴奧辛污染物擴散濃度及沈降率，可獲得以 LN 焚化廠煙道為中心，10km×10km 範圍內 441 個受體點之年平均濃度及年平均沈降率，其結果如表 6 所示，由表可知戴奧辛增量濃度介於 0.0148~1.59 fg I-TEQ/m<sup>3</sup> 之間，平均值為 0.180 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>；乾沈降率介於 1.15×10<sup>-4</sup>~1.35×10<sup>-2</sup> fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day 之間，平均值為 1.50×10<sup>-3</sup> fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day；濕沈降率介於 2.56×10<sup>-3</sup>~4.82 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day 之間，平均值為 0.525 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day，總沈降率介於 2.73×10<sup>-3</sup>~4.82 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day 之間，平均值為 0.527 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day。

模擬之最大濃度位置位於 LN 垃圾焚化廠西邊約 1 公里處。總沈降率之分佈主要以焚化廠周圍最高，因為總沈降率是考慮空氣中戴奧辛經由直接乾沈降及下雨時濕沈降之總和，由於當地雨季時之風速不大，因而當戴奧辛從焚化爐煙囪排出後，大多數直接經由雨水掃除，造成焚化廠周圍之沈降率較高。LN 焚化廠運作後，以其為中心 10km×10km 範圍內大氣中戴奧辛最大增量濃度為 1.59 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>，如與當地四季大氣 PCDD/Fs 之實測平均濃度(0.205 pg I-TEQ/m<sup>3</sup>)相比，可看出其對大氣中 PCDD/Fs 之增量極微。

### 3.5.2 LN 焚化廠排放戴奧辛對當地飲用水之影響

LN 垃圾焚化廠南側約 2 公里處，有一淨水廠提供當地之主要用水，其處理水量為 198,000CMD。本研究以 ISC 擴散模式模擬所得之大氣中戴奧辛總沈降率，來推算水廠附近大氣中戴奧辛之沈降量，以獲得其飲用水可能之戴奧辛增量濃度。

以 GIS 地理資訊系統將 ISC 擴散模式模擬所得之大氣戴奧辛平均總沈降率等位圖層，與 LN 淨水廠面積範圍圖層套疊，經空間分析運算，可獲得 LN 淨水廠上空戴奧辛之沈降率介於 0.610~0.790 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day，平均值為 0.700 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day。

Kim et al. (2002)對全日本 45 座淨水廠 PCDD/Fs 於處理前後濃度與特徵進行研究，發現水中之 PCDD/Fs 藉由傳統之混凝、沉澱、過濾處理，可得到 87% 以上去除率。據此，本研究假設淨水廠 PCDD/Fs 去除率為 87% 且以最大沈降率(0.790 fg I-TEQ/m<sup>2</sup> day)來推估淨水廠水中戴奧辛之增量濃度。

LN 淨水廠淨水處理設施未加頂蓋之面積共約 36830 m<sup>2</sup>，但其中只有調節池、混合池、膠羽池、沈澱池、快濾池和廢水池與水質淨化較為相關，此水質淨化相關設施之未加頂蓋之面積為 23840 m<sup>2</sup>，故假設淨水廠可接受之大氣戴奧辛沈降面積為 23840 m<sup>2</sup>。

以淨水場處理水量 198,000CMD、可接受沈降面積 23840 m<sup>2</sup>。並假設自來水廠淨水設施對戴奧辛之去除效率為 87%，可得水中戴奧辛之增量濃度為 1.24×10<sup>-8</sup> pg I-TEQ/L。將其與日本環境水體之標準 1 pg I-TEQ/L 相比，約小了 8 個因次，若與淨水場自來水中 PCDD/Fs 之實測平均濃度(3.70×10<sup>-3</sup> pg I-TEQ/L)相比，亦可看出其對水中 PCDD/Fs 之增量極微。

### 3.5.3 大氣及飲用水戴奧辛暴露風險

由模擬所得 LN 焚化廠運作後周界大氣戴奧辛之最大增量濃度(1.59 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>)，淨水場內自來水中 PCDD/Fs 最大增量濃度(1.24×10<sup>-8</sup> pg I-TEQ/L)，加上當地實測濃度值，可推估當地居民經由大氣及飲用水之戴奧

辛暴露量終生平均每日暴露劑量，以及評估焚化爐運作後當地居民可能之致癌風險(Cancer risk)。

本研究參照美國環保署戴奧辛暴露之推估方式(USEPA, 1992)，以計算當地居民經由大氣及飲用水之戴奧辛暴露量終生平均每日暴露劑量。

經由飲用水之終生平均每日暴露劑量推估如下：

$$LADD = \frac{C_{tw} \times IR \times ED \times EF \times AF}{BW \times AT} \times PF$$

其中

LADD：終生平均每日劑量(Lifetime average daily does)  
(pg-TEQ/kg/day)

$C_{tw}$ ：飲用水中 PCDD/Fs 之毒性當量濃度(pg I-TEQ/L)

IR：飲用水攝取量(L)，假設每人每日之飲用水攝取量為 2L

ED：暴露延時，假設連續暴露 25 年(即假設焚化廠運作 25 年)

EF：暴露頻率，假設當地居民有 95%的機會飲用當地之自來水

AF：吸收率，參考 USEPA 資料假設 50%

PF：運轉頻率，焚化爐一年實際運轉率，假設為 11/12(停爐歲修一個月)

BW：體重(kg)，假設國人平均體重為 65kg

AT：平均暴露時間，保守假設國人平均壽命為 70 歲

經由空氣介質之終生平均每日暴露劑量推估如下：

$$LADD = \frac{C_{tw} \times \left( \frac{8}{24} + \frac{16}{24} \times 0.7 \right) IR \times ED \times EF \times AF}{BW \times AT} \times PF$$

其中

LADD：終生平均每日劑量(Lifetime average daily does)(戴奧辛：  
pg-TEQ/kg/day)

$C_{tw}$ ：室外空氣 PCDD/Fs 之毒性當量濃度(pg I-TEQ/ m<sup>3</sup>)，室內濃度假  
設為室外之 0.7 倍，並假設每日 24 小時有 16 小時於室內，8 小  
時於室外

IR：空氣攝取率(m<sup>3</sup>/day)，參考 USEPA 資料假設 20 m<sup>3</sup>/day

ED：暴露延時，假設連續暴露 25 年(即假設焚化廠運作 25 年)

EF：暴露頻率，假設當地居民有 95%的時間生活於當地

AF：吸收率，參考 USEPA 資料假設 100%

PF：運轉頻率，焚化爐一年實際運轉率，假設為 11/12(停爐歲修一個  
月)

BW：體重(kg)，假設國人平均體重為 65kg

AT：平均暴露時間，保守假設國人平均壽命為 70 歲

在致癌風險方面，根據美國環保署(USEPA, 1996)公告的致癌物風險評估指導方針，假設所有的暴露劑量都會造成致癌風險，無論劑量多低，其劑量反應的關係為直線，亦即單位暴露劑量的增加與其致癌風險成正比。在此假設之下，根據流行病學或動物實驗的數據即可以推估出該物質之劑量反應關係的斜率，即致癌物質的斜率因子(slope factor)，而致癌風險的計算乃將暴露評估所得之暴露劑量乘以致癌斜率因子而得。其為一機率值，即人一生中因此而罹患癌症的機率，如1.00E-6表示在人的一生中一百萬人中會有一人因此而獲得癌症，一般而言，在風險管理的風險值上界為1E-6~1E-5，也就是說風險值最好不要超過1E-5。

致癌風險之推估如下：

$$R=1-e^{-qI^* \times LADD} \approx qI^* \times LADD \quad (\text{當 } R \text{ 小於 } 10^{-2})$$

R：致癌風險

ql\*：致癌潛勢斜率，美國環保署建議 2,3,7,8-TCDD 之 ql\* 值為  
 $1.56 \times 10^{-4} (\text{pg-TEQ/kgBW/day})^{-1}$

經由計算戴奧辛大氣及飲用水實測濃度與增量濃度之終生平均每日暴露劑量，參考美國環保署所提供之戴奧辛致癌物之斜率因子資料，進行戴奧辛之致癌風險計算，所得結果如表 7 所示。由表 7 可知，大氣戴奧辛實測與最大增量濃度所推得之 LADD 分別為  $1.61 \times 10^{-2}$  pg I-TEQ/kg/day 與  $1.25 \times 10^{-4}$  pg I-TEQ/kg/day，加總後可知經由大氣吸入之戴奧辛終生平均每日劑量為  $1.62 \times 10^{-2}$  pg I-TEQ/kg/day；而其致癌風險值則分別為  $2.51 \times 10^{-6}$  與  $1.94 \times 10^{-8}$ ，加總後可得經由大氣吸入戴奧辛之總致癌風險值為  $2.52 \times 10^{-6}$ 。

由飲用水戴奧辛實測與增量濃度所推得之 LADD 分別為  $1.77 \times 10^{-5}$  pg I-TEQ/kg/day 與  $5.93 \times 10^{-11}$  pg I-TEQ/kg/day，加總後可知經由飲用水食入之戴奧辛終生平均每日劑量為  $1.77 \times 10^{-5}$  pg I-TEQ/kg/day，而致癌風險值分別為  $2.76 \times 10^{-9}$  與  $9.26 \times 10^{-15}$ ，加總後可得經由飲用水食入戴奧辛之總致癌風險值為  $2.76 \times 10^{-9}$ 。

總體來看，經由大氣吸入及飲用水食入之總戴奧辛終生平均每日劑量為  $1.62 \times 10^{-2}$  pg I-TEQ/kg/day，其值低於世界衛生組織所公布之戴奧辛容許暴露劑量 1-4 pg I-TEQ/kg/day。而經由大氣吸入及飲用水食入之戴奧辛總致癌風險值為  $2.53 \times 10^{-6}$ ，風險值雖然偏高，但還在合理的範圍，其值仍低於風險管理的風險值上界  $1 \times 10^{-5}$ 。若以實測濃度與增量濃度之風險值來比較，可發現大氣加飲用水之實測濃度致癌風險值為  $2.51 \times 10^{-6}$ ，而大氣加飲用水之增量濃度致癌風險值為  $1.94 \times 10^{-8}$ ，也就是說 LN 垃圾焚化廠運轉後當地居民經由大氣吸入與飲用水食入戴奧辛所增加之致癌風險為值  $1.94 \times 10^{-8}$ ，相較於實測濃度致癌風險值而言，其所增加之致癌風險並不顯著。

表 2 LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 濃度

Congeners	春季	夏季	秋季	冬季	平均值	RSD
	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=16)	(%) (n=16)
2,3,7,8-TeCDD	0.00682	0.00215	0.00721	0.00923	0.006	54
1,2,3,7,8-PeCDD	0.0417	0.00627	0.0272	0.0443	0.030	69
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.0818	0.00618	0.0278	0.0427	0.040	98
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.175	0.0131	0.0581	0.0895	0.084	104
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.138	0.0103	0.0485	0.0734	0.068	101
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	2.75	0.0851	0.421	0.521	0.945	163
OCDD	11.2	0.225	0.757	0.909	3.28	188
2,3,7,8-TeCDF	0.0578	0.0238	0.0794	0.111	0.068	55
1,2,3,7,8-PeCDF	0.0943	0.0272	0.109	0.161	0.098	54
2,3,4,7,8-PeCDF	0.151	0.0403	0.161	0.274	0.156	63
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.221	0.0422	0.186	0.292	0.185	58
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.196	0.0364	0.181	0.278	0.173	59
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.0133	0.00339	0.00968	0.0190	0.011	60
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.192	0.0398	0.187	0.285	0.176	67
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.739	0.139	0.592	0.748	0.554	57
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.109	0.0309	0.0981	0.142	0.095	56
OCDF	0.719	0.173	0.444	0.533	0.468	73
PCDDs (pg/Nm <sup>3</sup> )	14.4	0.348	1.35	1.69	4.45	177
PCDFs (pg/Nm <sup>3</sup> )	2.49	0.555	2.05	2.84	1.98	57
PCDDs/PCDFs ratio	5.16	0.782	0.657	0.582	1.79	132
Total PCDD/Fs (pg/Nm <sup>3</sup> )	<b>16.9</b>	<b>0.903</b>	<b>3.39</b>	<b>4.53</b>	<b>6.42</b>	<b>132</b>
PCDDs (pg I-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	0.106	0.00932	0.0392	0.0580	0.053	96
PCDFs (pg I-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	0.157	0.0380	0.157	0.253	0.151	61
PCDDs/PCDFs (TEQ) ratio	0.630	0.256	0.249	0.224	0.34	70
Total TEQ (pg I-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	<b>0.263</b>	<b>0.0473</b>	<b>0.197</b>	<b>0.311</b>	<b>0.205</b>	<b>62</b>

表 3 LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之氣固相分佈

Congeners	春季		夏季		秋季		冬季	
	氣相 (%)	固相 (%)	氣相 (%)	固相 (%)	氣相 (%)	固相 (%)	氣相 (%)	固相 (%)
2,3,7,8-TeCDD	74.7	25.3	81.4	18.6	84.0	16.0	76.2	23.8
1,2,3,7,8-PeCDD	42.7	57.3	76.3	23.7	65.5	34.5	36.8	63.2
1,2,3,4,7,8-HxCDD	22.6	77.4	64.6	35.4	24.3	75.7	11.8	88.2
1,2,3,6,7,8-HxCDD	25.1	74.9	64.3	35.7	23.3	76.7	11.4	88.6
1,2,3,7,8,9-HxCDD	20.7	79.3	58.5	41.5	19.7	80.3	6.8	93.2
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	8.93	91.1	20.6	79.4	4.2	95.8	2.2	97.8
OCDD	1.80	98.2	7.14	92.9	1.62	98.4	2.02	98.0
2,3,7,8-TeCDF	82.1	17.9	89.0	11.0	89.5	10.5	76.0	24.0
1,2,3,7,8-PeCDF	54.5	45.5	80.4	19.6	79.3	20.7	61.7	38.3
2,3,4,7,8-PeCDF	39.3	60.7	77.0	23.0	61.8	38.2	42.3	57.7
1,2,3,4,7,8-HxCDF	18.2	81.8	66.5	33.5	38.9	61.1	22.2	77.8
1,2,3,6,7,8-HxCDF	17.5	82.5	65.3	34.7	38.3	61.7	21.5	78.5
1,2,3,7,8,9-HxCDF	14.9	85.1	36.3	63.7	18.1	81.9	10.3	89.7
2,3,4,6,7,8-HxCDF	14.0	86.0	54.2	45.8	20.5	79.5	10.1	89.9
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	8.92	91.1	37.9	62.1	9.6	90.4	4.5	95.5
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	6.06	93.9	15.9	84.1	6.0	94.0	2.7	97.3
OCDF	4.22	95.8	5.61	94.4	2.68	97.3	2.09	97.9
PCDDs	3.87	96.1	15.2	84.8	5.8	94.2	4.3	95.7
PCDFs	16.29	83.7	37.3	62.7	24.2	75.8	17.9	82.1
<b>Total PCDD/Fs</b>	<b>7.11</b>	<b>92.9</b>	<b>25.9</b>	<b>74.1</b>	<b>16.7</b>	<b>83.3</b>	<b>12.8</b>	<b>87.2</b>
PCDDs (I-TEQ)	28.7	71.3	64.6	35.4	42.7	57.3	29.8	70.2
PCDFs (I-TEQ)	30.6	69.4	70.7	29.3	50.2	49.8	34.5	65.5
<b>Total PCDD/Fs (I-TEQ)</b>	<b>30.1</b>	<b>69.9</b>	<b>69.1</b>	<b>30.9</b>	<b>48.8</b>	<b>51.2</b>	<b>33.6</b>	<b>66.4</b>

表 4 LN 垃圾焚化廠周界水體中 PCDD/Fs 之濃度

PCDD/Fs	灌溉溝渠		淨水場取水口 <sup>a</sup>		淨水場內自來水	
	平均值	RSD(%)	平均值	RSD(%)	平均值	RSD(%)
	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)
2,3,7,8-TeCDD	0.004	128	0.001	40.8	0.001	62.8
1,2,3,7,8-PeCDD	0.022	169	0.001	36.4	0.001	68.9
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.010	144	0.002	79.9	0.001	66.2
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.054	173	0.004	83.1	0.001	57.8
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.072	185	0.004	93.9	0.001	60.6
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.339	140	0.099	97.9	0.009	59.8
OCDD	4.09	117	1.87	75.9	0.042	78.1
2,3,7,8-TeCDF	0.010	48.2	0.002	22.0	0.002	58.4
1,2,3,7,8-PeCDF	0.010	52.4	0.002	31.5	0.002	65.6
2,3,4,7,8-PeCDF	0.017	49.6	0.004	27.3	0.003	57.2
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.014	49.4	0.004	43.2	0.003	55.5
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.013	50.6	0.003	33.8	0.002	88.9
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.002	68.8	0.001	57.4	0.000	93.7
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.014	49.7	0.004	48.6	0.002	88.6
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.060	39.0	0.028	27.6	0.007	58.5
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.009	63.3	0.004	42.6	0.002	61.0
OCDF	0.202	48.0	0.180	78.0	0.026	51.8
PCDDs (pg/L)	4.61	121	1.99	76.8	0.054	70.6
PCDFs (pg/L)	0.351	37.2	0.232	61.7	0.049	45.3
PCDDs/PCDFs ratio	11.5	103	10.8	106	1.08	56.6
Total PCDD/Fs (pg/L)	<b>4.95</b>	<b>114</b>	<b>2.22</b>	<b>68.8</b>	<b>0.103</b>	<b>52.0</b>
PCDDs (pg I-TEQ/L)	0.036	158	0.006	61.3	0.001	61.0
PCDFs (pg I-TEQ/L)	0.015	48.0	0.004	26.3	0.002	60.7
PCDDs/PCDFs (TEQ) ratio	1.76	129	1.26	32.5	0.496	52.2
Total TEQ (pg I-TEQ/L)	<b>0.052</b>	<b>123</b>	<b>0.010</b>	<b>46.3</b>	<b>0.004</b>	<b>58.2</b>

註：<sup>a</sup>淨水場取水口亦為灌溉水取水口

表 5 LN 垃圾焚化廠周界水體底泥中 PCDD/Fs 之濃度

PCDD/Fs	灌溉溝渠底泥		淨水場取水口 底泥 <sup>a</sup>		淨水場旁濁水溪 之底泥	
	平均值	RSD(%)	平均值	RSD(%)	平均值	RSD(%)
	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=4)
2,3,7,8-TeCDD	0.095	55.3	0.046	73.5	0.029	63.7
1,2,3,7,8-PeCDD	0.203	32.3	0.064	74.4	0.037	46.8
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.142	39.6	0.056	70.7	0.038	40.3
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.54	68.0	0.218	119	0.141	110
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.856	65.4	0.142	77.7	0.076	50.2
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	7.58	36.2	5.77	120	2.73	135
OCDD	68.65	24.0	150	161	68.0	174
2,3,7,8-TeCDF	0.734	48.8	0.131	85.9	0.081	49.1
1,2,3,7,8-PeCDF	0.360	45.4	0.111	100	0.077	45.7
2,3,4,7,8-PeCDF	0.520	45.8	0.162	95.4	0.125	56.2
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.502	40.6	0.189	93.2	0.154	67.8
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.485	41.2	0.173	84.6	0.135	61.4
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.039	62.6	0.044	123	0.029	116
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.550	45.9	0.241	85.7	0.176	66.9
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	4.12	37.7	5.929	109	2.07	139
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.366	39.7	0.370	118	0.200	119
OCDF	14.7	77.7	31.2	167	14.8	182
PCDDs (pg/g)	78.9	25.9	156	159	71.1	172
PCDFs (pg/g)	22.4	55.1	38.5	152	17.9	171
PCDDs/PCDFs ratio	4.2	46.6	3.91	34.7	4.02	11.5
Total PCDD/Fs (pg/g)	<b>101</b>	<b>23.5</b>	<b>194</b>	<b>158</b>	<b>88.8</b>	<b>171</b>
PCDDs (pg I-TEQ/g)	0.594	47.8	0.327	117	0.168	108
PCDFs (pg I-TEQ/g)	0.569	37.6	0.258	100	0.161	76.8
PCDDs/PCDFs (TEQ) ratio	1.03	24.3	1.17	26.2	0.941	33.6
Total TEQ (pg I-TEQ/g)	<b>1.16</b>	<b>41.9</b>	<b>0.586</b>	<b>109</b>	<b>0.329</b>	<b>92.4</b>

註：<sup>a</sup> 淨水場取水口亦為灌溉水取水口

表 6 LN 垃圾焚化廠運作後周界大氣戴奧辛之增量濃度與沈降率

	最小值	最大值	平均值	標準偏差
戴奧辛濃度 (fg I-TEQ/m <sup>3</sup> )	1.48×10 <sup>-2</sup>	1.59	0.1.80	0.224
戴奧辛乾沈降率 (fg I-TEQ/m <sup>2</sup> -day)	1.15×10 <sup>-4</sup>	1.35×10 <sup>-2</sup>	1.50×10 <sup>-3</sup>	1.89×10 <sup>-3</sup>
戴奧辛濕沈降率 (fg I-TEQ/m <sup>2</sup> -day)	2.56×10 <sup>-3</sup>	4.82	0.525	0.679
戴奧辛總沈降率 (fg I-TEQ/m <sup>2</sup> -day)	2.73×10 <sup>-3</sup>	4.82	0.527	0.680

表 7 大氣及飲用水戴奧辛致癌風險計算結果

	大氣		飲用水	
	實測	增量	實測	增量
戴奧辛濃度*	0.205	1.59×10 <sup>-3</sup>	3.70×10 <sup>-3</sup>	1.24×10 <sup>-8</sup>
LADD (pg I-TEQ/kg/day)	1.61×10 <sup>-2</sup>	1.25×10 <sup>-4</sup>	1.77×10 <sup>-5</sup>	5.93×10 <sup>-11</sup>
個別致癌風險	1.62×10 <sup>-2</sup>		1.77×10 <sup>-5</sup>	
	2.51×10 <sup>-6</sup>	1.94×10 <sup>-8</sup>	2.76×10 <sup>-9</sup>	9.26×10 <sup>-15</sup>
總致癌風險	2.52×10 <sup>-6</sup>		2.76×10 <sup>-9</sup>	
	2.53×10 <sup>-6</sup>			

\*戴奧辛濃度單位：大氣：pg I-TEQ/m<sup>3</sup>；水：pg I-TEQ/L

#### 4 結論與建議

本研究針對台灣中部地區某一興建中之垃圾焚化廠(LN 垃圾焚化廠)周界環境進行大氣、水體及底泥中戴奧辛/呔喃之檢測，期望能建立當地環境中 PCDD/Fs 之背景濃度。此外，並進一步以所測得之戴奧辛背景濃度及依

照該焚化廠排放特性經擴散模擬所得之增量濃度，來評估未來焚化廠運轉後，附近居民經由大氣吸入與飲用水食入之戴奧辛暴露風險。研究結果顯示：

1. LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 之濃度介於 0.0244-0.493 pg I-TEQ/Nm<sup>3</sup> 之間，平均值為 0.205 pg I-TEQ/Nm<sup>3</sup>。
2. LN 垃圾焚化廠周界大氣中 PCDD/Fs 濃度之氣固相分佈皆是以固相所佔之比例較高，固相比例介於 74%-93% 之間。
3. LN 垃圾焚化廠周界地面水體之 PCDD/Fs 濃度介於 0.00647-0.146 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.0307 pg I-TEQ/L；自來水原水之 PCDD/Fs 濃度介於 0.00647-0.0164 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.00974 pg I-TEQ/L；自來水之 PCDD/Fs 濃度介於 0.00141~0.00659 pg I-TEQ/L 之間，平均值為 0.00370 pg I-TEQ/L，均低於日本環境水體水質標準 1 pg TEQ/L。
4. LN 垃圾焚化廠周界水體底泥之 PCDD/Fs 含量介於 0.0786-1.87 ng I-TEQ/kg 之間，平均值為 0.692 ng I-TEQ/kg。
5. 經 ISCST3 模式模擬焚化廠運轉後周界大氣戴奧辛增量濃度介於 0.0148-1.59 fg I-TEQ/m<sup>3</sup> 之間，平均值為 0.180 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>，而總沉降率則介於 2.73×10<sup>-3</sup>-4.82 fg I-TEQ/m<sup>2</sup>day 之間，平均值為 0.527 fg I-TEQ/m<sup>2</sup>day。
6. 推估焚化廠運轉後淨水場水中戴奧辛之增量濃度為 1.24×10<sup>-8</sup> pg I-TEQ/L。
7. LN 垃圾焚化廠附近居民經由大氣吸入與飲用水食入之戴奧辛終生平均每日暴露劑量為 1.62×10<sup>-2</sup> pg I-TEQ/kg-day，其值低於世界衛生組織所公布之戴奧辛容許暴露劑量 1-4 pg I-TEQ/kg-day。而戴奧辛致癌風險值為 2.53×10<sup>-6</sup>，其值仍低於風險管理的風險值上界 1×10<sup>-5</sup>。

## 參考文獻

- Alcock, R. E., Gemmill, R., Jones, K. C. "Improvements to the UK PCDD/F and PCB Atmospheric Emission Inventory following an Emissions Measurement Programme," *Chemospher* 38, 759-770, 1999.
- Caserini, S., Monguzzi, A. M. "PCDD/Fs Emissions Inventory in the Lombardy Region: Results and Uncertainties." *Chemospher* 48, 779-786, 2002.
- Japan Ministry of the Environment, *The Environmental Monitoring Report on the Persistent Organic Pollutants (POPs) in Japan*, 2002.
- Kim, H. K., Masaki, H., Matsumura, T., Kamei, T., Magara, Y. "Removal Efficiency and Homologue Patterns of Dioxins in Drinking Water Treatment." *Water Research* 36, 4861-4869, 2002.
- Olie, K., Vermeulen, P. L., Hutzinger, O. "Chlorodibenzo-p-dioxins and Chlorodibenzofurans Are Trace Components of Fly Ash and Flue Gas of Some Municipal Incinerators in the Netherlands." *Chemosphere* 6, 455-459, 1977.
- USEPA, *Database of Sources of Environmental Releases of Dioxin like Compounds in the United States*, EPA/600/C-01/012, 2001.
- USEPA, *Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds: Drag*, EPA/600/6-88/005B, 1992.
- USEPA, *Technical Support Document for HWC MACT Standards*, Volume II, Miscellaneous Technical Issues, 1996.
- USEPA, *User's Guide for the Industrial Source Complex Dispersion Models*, EPA-454/B-95-003a, 1995.
- US EPA, *National primary drinking water standards*, EPA816-F-03-016, 2003.
- Wang, L. C., Lee, W. J., Lee, W. S., Chang-Chien, G. P., Tsai, P. J. "Characterizing the emission of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and

dibenzofurans from crematories and their impacts to the surrounding environment.” *Environ. Sci. Technol.* 37, 62-67, 2003.