

多環芳香烴類化合物於飛灰中影響戴奧辛類化合物生成之研究

林 傑，國立屏東科技大學環境工程與科學系副教授
王雅馨，國立屏東科技大學環境工程與科學系博士
劉鎮誠，國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士
邱莉祺，國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士

摘要

經由焚化過程所產生之細微粒飛灰，經後燃燒區並藉由空氣污染防制設備收集後，戴奧辛可能會在其飛灰表面形成。本研究利用填充床反應器設定與實際之空氣污染防制設備相同溫度以模擬活性碳吸附戴奧辛實驗。並添加 3% 活性碳及 10% 氯化鈣於飛灰中探討戴奧辛生成與破壞。研究結果顯示在相同反應時間下，未添加活性碳及添加 3% 活性碳於飛灰中之戴奧辛濃度分別為 206.3ng/min 及 245.3ng/min。添加 3% 活性碳後轉變了戴奧辛在排氣與殘餘相中之分佈，經毒性當量轉換後，PCDD/PCDF 比值由 1.84 提升至 4.55，顯示戴奧辛生成物種似乎有轉移之情形，以 PCDDs 為主要之優勢物種。添加 10% 氯化鈣探討氣源對戴奧辛生成影響結果顯示，添加 10% 氯化鈣對戴奧辛濃度並無太大之改變。顯示氯化鈣在催化及提升戴奧辛生成過程之貢獻程度較小。添加 0.1% Naphthalene 於飛灰中，總戴奧辛濃度為 157.2 ng/min，添加 0.5% Naphthalen 於飛灰中，總戴奧辛濃度為 211.3 ng/min，增加了 26%。添加 Pyrene 於飛灰生成戴奧辛實驗，在排氣相與添加 Naphthalene 呈現不同之結果，整體濃度雖然增加，但排氣相之戴奧辛濃度並無隨 Pyrene 增加而增加，反而有減少之趨勢。

關鍵字：飛灰、戴奧辛、多環芳香烴、氯化鈣

一、前言

1.1 研究緣起

由於廢棄物高溫燃燒會產生戴奧辛、多氯聯苯或其他含重金屬污染物，同時因廢棄物之成份複雜，焚化後可能產生不同之 PAHs。而許多研究也證實焚化爐排放的廢氣及灰渣皆含有具毒性的 PAHs 及 PCDD/Fs。戴奧辛形生原因主要包括高溫氣相合成、前驅物異相催化反應(Precursor formation)及低溫再合成(De novo synthesis)等機制。為防止此有害物質之形成與排放至大氣，研究其有害

致癌物之前趨物(Precursors)於焚化過程中之形成與破壞之消長情形，為一重要課題。因此考量戴奧辛減量技術，可從降低戴奧辛及其前趨物質的形成以及去除已生成之戴奧辛著手。由於廢氣中戴奧辛包含固相及氣相，固相戴奧辛通常伴隨粒狀物污染防制設備去除，因此排氣中粒狀物濃度高低也直接影響固相戴奧辛之濃度，而氣相戴奧辛的去除大多採用活性碳吸附移除，藉由活性碳表面微孔洞對戴奧辛進行吸附作用，活性碳再被濾袋所收集，除此之外，活性碳也會隨時間逐漸累積於濾袋表面，亦可形成可有效吸附戴奧辛之活性碳濾餅，活性碳則定期與集塵設備收集之粒狀物一同去除。因此在處理技術層面提升下，戴奧辛已從原本的氣相轉移至固相介質中，因此探討焚化煙道排氣及飛灰中戴奧辛及前趨物之氣固相分布，可有助於了解物種間之相互轉化特性及多重相性轉換反應。

1.2 研究目的

1. 模擬飛灰於實廠濾袋式集塵器濾餅對於戴奧辛或類戴奧辛化合物及多環芳香烴類化合物形成之貢獻。
2. 添加單一多環芳香烴化合物於飛灰中探討多環芳香烴對戴奧辛及類戴奧辛化合物間之轉化效應。
3. 添加活性碳於飛灰中，模擬濾袋式集塵器濾餅上碳源是否影響戴奧辛生成機制，並利用掃描式電子顯微鏡觀察其表面結構。

二、文獻回顧

廢棄物焚化處理為目前都市廢棄物處理之主要方式，因此焚化後所產生之 PAHs 不容忽視。Akio and Youki (1987) 指出某都市垃圾焚化爐之不完全燃燒現象為 PAHs 之主要來源，其排放量相當於為 1,700~3,000 輛汽機車之排放量，焚化爐在不同運作狀況下，所排放的 PAHs 亦不同，如在正常運作下是處於一個高溫穩定燃燒狀況，其所排放的 PAHs 量較少不會影響焚化爐周圍的環境；但相反地，當焚化爐停爐維修時，因其處於低溫不完全燃燒情況，有較多的 PAHs 被排放出來 (Jean et al., 2001; Yasuda et al., 1998)。

PAHs 最初形成時是以氣相存在為主，而存在之 PAHs 其分子量較低，較易於揮發，在常溫下之蒸氣壓大於 10^{-6} mmHg，故氣相 PAHs 只以蒸氣形態存在。PAHs 在固相存在的原因通常有凝結(Condensation)及吸附(Adsorption)兩種機制。而分子量較高之 PAHs (五環以上)，其蒸氣壓在常溫下小於 10^{-6} mmHg，因此容易被吸附於粒徑小於 $10\mu\text{m}$ 之粒狀物上。Li et al. (1994) 研究廢離子交換樹脂燃燒後總 PAHs 的排放量，研究結果指出，在煙道廢氣總 PAHs 濃度為 $1782 \mu\text{g Nm}^{-3}$ ，而飛灰中總 PAHs 之含量為 $6 \mu\text{g/g}$ ，且煙道廢氣中氣相 PAHs 佔 92% ($1640 \mu\text{g/m}^3$)。

2.1 多環芳香烴化合物(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)

多環芳香烴類化合物(PAHs)係指由兩個或兩個以上之苯環連接而成，大多數

具有高熔點及高沸點，在常溫常壓下，蒸氣壓不高，約介於 $10^{-2} \sim 10^{-11}$ atm 之間，屬於半揮發性有機化合物 (Semi-Volatile Organic Compounds, 即SVOCs)。而飽和蒸氣壓 10^{-8} atm 以下之化合物，在常溫下幾乎完全以顆粒相存在，若依此分類，分子量低於230 以下之 PAHs 其SVOCs 之特徵較明顯。因此，在常溫狀態下，PAHs 是以氣相及顆粒相共存。PAHs 除大量存在於石化原料及其產物外，工業製程、煉鋁及煉鋼廠、汽機車輛、及瀝青處理均可能排放PAHs。PAHs 及其衍生化合物，在分子結構上係以具有不飽和雙鍵之苯環或環戊二烯 (Cyclopentadiene) 等官能基 (function group) 相互加成或聚合而成，其間並以所謂 Kekule's 之共價鍵 (K region) 加以連繫，以形成整個PAHs 之結構。

2.2 多環芳香烴化合物形成機制

PAHs 主要由含碳及氫的有機物熱分解後產生，據Bjorseth等人指出【Bjorseth, 1985】，其有兩個主要形成機制：一為裂解(pyrolysis)或不完全燃燒，二為碳化過程(carbonization)。Manahan則將PAHs形成機制分為：熱合成與裂解，【Manahan, 1984& 1991】，如下說明：

(1) 熱合成(pyrosynthesis)

由低分子量碳氫化合物合成產生 PAHs 的過程，稱為熱合成。低分子量的碳氫化合物如：烷類、烯類等，在溫度超過 500°C 後，分子因吸收能量，造成碳氫鍵 (C-H) 與碳碳鍵 (C-C) 打開並形成自由基形式，再進行去氫反應 (dehydrogenation)，而聚合成芳香族環狀結構。

(2) 裂解(pyrolysis)

碳氫化合物不完全燃燒時及在缺氧條件下，部份物質會進行熱解反應。於高溫火焰下($>400^{\circ}\text{C}$)，高分子碳氫化合物的碳碳鍵及碳氫鍵斷裂，形成碳氫自由基，而碳氫自由基很快的與未燃燒之碳氫化合物反應形成 PAHs。

2.3 戴奧辛於焚化過程中之生成機制

戴奧辛形成機制相當複雜，許多學者以實驗方式並改變不同參數條件探討戴奧辛之形成機制，由Tuppurainen學者於1998指出戴奧辛的生成機制大致上可分為三類。I. 高溫熱合成(pyrosynthesis)，II. De Novo synthesis 反應，III. 前驅物異相催化反應(precursor formation)。其重要性大致為 (III) > (II) >> (I)，經由簡單的反應動力學模可以知道熱合成是佔較小的比重，而在爐外低溫再合成的反應機制(II)及前驅物異相催化反應機制(III)卻重要的多。

2.4 PAHs形成PCDD/F之研究

Iino et al. (1999a)研究指出某些 PCDF 形成是來自於 PAHs，實驗結果指出主要產物為 1,9 取代位置的PCDF類化合物。Iino et al., (1999b)也證明多種的PAH可以形成PCDF，並且單一的PAH比活性碳還有更高de novo反應速率。(1995)與Iino et al. (1999)所進行的熱處理研究指出，PAH的與相關化合物在飛灰上PCDD/F的生成上，扮演一個前趨物的角色。Hay et al., 1986; Wanke and Velow, 1996; Akimoto

et al., 1997 指出PAH濃度會比PCDF高 3-4 倍。Lahaye, (1990)和 Frenklach, (1996) 也指出PAH會從煤碳的碳核中生成，並於飛灰中呈現了未燃碳的結構組成。Wilhelm et al. (1999)利用三種不同飛灰進行模擬實驗，發現¹⁶O與¹⁸O有一特定相關，以CO/CO₂釋放並結合進入PCDF。

三、研究材料與方法

本研究以南部某一都市廢棄物焚化爐，經濾袋式集塵器單元之濾袋所採集之集塵灰作為飛灰樣品之研究對象，採樣示意圖如圖1所示。

3.1 參數設定

由於戴奧辛可能會經焚化系統中由相關化合物合成出現於排氣中或灰渣中，其生成機制主要為前驅物異相催化反應及爐外低溫再合成反應，在簡單的元素性物質如碳源與氯源供應下，如果提供一適宜反應之條件（如溫度）及反應場址（reaction site），則可能在燃燒室下游排氣中之細微塵粒高濃度區，催化形成戴奧辛或類似戴奧辛化合物。本實驗於160°C、10min以模擬濾袋式集塵器濾餅對於戴奧辛或類戴奧辛化合物及多環芳香烴類化合物形成之貢獻，在一般廢棄物焚化過程中常使用CaO及CaOH，其作用不僅可中和廢氣中的酸性物質，對戴奧辛而言，更可以去除形成戴奧辛所需的氯源，而產生之副產物即為CaCl₂，因此本實驗添加10% CaCl₂，以探討CaCl₂對戴奧辛及多環芳香烴形成之貢獻。活性碳再合成試驗部份，將飛灰基質加添加3%活性碳進行混合，探討碳源在飛灰表面反應後戴奧辛之再生成/抑制機制。實驗參數如表1所示。

3.2 實驗系統

3.2.1 混合預熱前驅物引進系統(Mix and Preheat Precursor System)

採用容量150ml圓柱形的不銹鋼筒，裡面填充2mm的玻璃球(Glass Beads)增加接觸表面積，使進流之燃料及空氣能充份混合，進而能穩定控制燃料與空氣之比率即空燃比。在鋼筒外以加熱帶纏繞，由變壓器(Variac)控制電壓，將預熱的溫度維持在150°C以上，可使前趨物在進入反應區前能完全氣化並與空氣完全混合。

3.2.2 觸媒填充床反應器(Catalytic Packed Bed Reactor)

此反應器為石英玻璃材質，其溫度可耐1000°C以上，實驗進行時將裝有過濾器的內套管，置於填充床反應器之中間區，用於裝載填充觸媒介質，使實驗更具有方便性包含置入與取出外套管時，且不會造成觸媒填充床反應器的記憶效應。

3.2.3 管狀程式控溫系統(Temperature Controller)

於實驗過程中可使反應器內部之溫度控制在一特定反應溫度範圍內，此一溫度範圍可促使前驅物在飛灰中進行轉化合成之反應，此升溫程式具有三段控溫之操作，以模擬多階段之升溫操作。實驗系統如圖2所示。

3.3 非線上採樣系統

本研究戴奧辛及多環芳香烴採樣及分析之採樣位置為觸媒填充床反應器後端，係以簡易煙道採樣裝置進行，煙道氣由下游之抽氣馬達抽引，經採樣管進入採樣系統，前端放置微粒過濾器(1.6 μ m)之玻璃纖維濾紙，阻隔實驗過程所產生之懸浮微粒及爐床介質粒子，吸收液在戴奧辛採樣以甲苯(Toluene)為吸收溶劑，多環芳香烴採樣則以二氯甲烷/正己烷(1:1)為吸收溶劑，以吸收煙道氣中戴奧辛及多環芳香烴類化合物，並將吸收瓶置於冰浴設備中(約0 $^{\circ}$ C)並將採樣管線盡可能縮短，避免所採集之樣品因溶劑揮發與樣品因凝結於採樣管線中所造成之樣品損失。

四、結果與討論

4.1 活性碳對戴奧辛生成之影響

碳源為戴奧辛生成之重要參數之一，因此本研究擬添加3%活性碳，探討對戴奧辛生成之影響，添加活性碳於飛灰介質所產生之戴奧辛濃度如表2所示。結果顯示未添加活性碳及添加活性碳於飛灰中之戴奧辛濃度分別為206.3 ng/min及245.26 ng/min，從此結果可發現添加活性碳於飛灰中不但對戴奧辛並無抑制效果，反而提高了戴奧辛之濃度，顯示添加活性碳對戴奧辛具有再合成效應。此外，添加活性碳後更轉變了戴奧辛在排氣與殘餘相中之分佈，雖然活性碳轉變了氣固相之分佈，但經毒性當量轉換後，總毒性貢獻則無太大之差別。但從PCDD/PCDF比值可知，比值由1.84提升至4.55，顯示戴奧辛生成物種似乎有轉移之情形。

4.2 添加CaCl₂對戴奧辛類化合物生成之影響

一般廢棄物焚化過程中常使用CaO及CaOH，最主要之功能為中和廢氣中之酸性物質(如HCl、Cl₂、SO₂、HF)，減少酸性物質之排放，就戴奧辛生成機制方面，HCl經Deacon Reaction生成Cl₂，鹼性物質中和氯氣後，可降低氯化反應，產生之副產物即為CaCl₂，因此本實驗添加10% CaCl₂，以探討CaCl₂對戴奧辛及多環芳香烴形成之貢獻。結果如表3所示，結果顯示添加氯化鈣於飛灰介質後在排氣相中之戴奧辛濃度由42.84 ng/min降至11.88 ng/min，PCDDs的濃度從41.39 ng/min改變為11.16 ng/min，下降了約73%，而PCDFs的濃度從1.45 ng/min改變為0.72 ng/min，下降了約50%，在殘餘相中之戴奧辛濃度則由163.46 ng/min提升至190.87，總濃度則無太大之差別，詹氏(2001)研究也指出CaCl₂再合成戴奧辛的毒性當量<0.015，倍率為1，顯示CaCl₂對形成戴奧辛並無太大之影響。

4.3 添加單一多環芳香烴於飛灰中之戴奧辛生成試驗

許多研究指出，PAH與其相關化合物在飛灰上PCDD/F的生成上，扮演一個前趨物的角色，因此本研究分別利用不同比例之多環芳香烴添加於飛灰中，探討

多環芳香烴對戴奧辛生成之影響。

4.3.1 添加Naphthalene於飛灰中之戴奧辛生成試驗

張正平(1998)研究以甲苯添加PVC進行流體化床燃燒實驗，結果指出不同採樣點均以Naphthalene為主要之優勢物種，因此本研究分別添加0.1%及0.5%之Naphthalene於飛灰介質中，探討多環芳香烴對戴奧辛生成之影響，結果如表4所示。從表可知當添加0.1% Nap.於飛灰中，總戴奧辛濃度為157.21 ng/min，當添加了0.5% Nap.於飛灰中，總戴奧辛濃度為211.32 ng/min，增加了26%。且無論是氣固相或是PCDDs&PCDFs均有增加之趨勢，這也證實PAHs於PCDD/Fs形成過程扮演一重要角色。

4.3.2 添加Pyrene於飛灰中之戴奧辛生成試驗

本研究除了添加Naphthalene外，另外添加Pyrene比較不同環數之PAHs對戴奧辛形成之影響。因此本研究分別添加0.1%及0.5%之Pyrene於飛灰介質中，比較不同環數之多環芳香烴對戴奧辛生成之影響，結果如表5所示。從表可知當添加0.1% Pyrene於飛灰中，總戴奧辛濃度為187.59 ng/min，當添加了0.5% Pyrene於飛灰中，總戴奧辛濃度為220.83 ng/min，增加了15%。若從排氣相來看，則與添加Naphthalene呈現不同之結果，整體濃度雖然增加，但排氣相之戴奧辛濃度並無隨著Pyrene之增加而增加，反而有減少之趨勢，從結果推論Pyrene在戴奧辛的形成過程可能扮演一個preprecursor之角色，Pyrene於形成戴奧辛過程，可能需先裂解成較低環數之Naphthalene才能進一步形成戴奧辛。

4.4 碳源、氯源及多環芳香烴對戴奧辛形成之貢獻比較

本研究將藉由上述實驗結果比較碳源、氯源及多環芳香烴何者為形成戴奧辛之主要生成因子。結果如表6所示，添加3%活性碳於飛灰中所產生之戴奧辛總濃度為245.26 ng/min，添加10%氯化鈣於飛灰中所生成之戴奧辛總濃度為202.96 ng/min，而添加0.1% Naphthalene於飛灰中所生成之戴奧辛總濃度為157.21 ng/min，由此結果可知以多環芳香烴對戴奧辛形成貢獻程度較大。

五、結論

1. 添加活性碳於飛灰介質結果顯示，未添加活性碳及添加活性碳於飛灰中之戴奧辛濃度分別為 206.3 ng/min 及 245.26 ng/min，發現添加活性碳於飛灰中反而提高了戴奧辛之濃度，顯示添加活性碳對戴奧辛具有再合成效應。
2. 添加 3%活性碳後轉變了戴奧辛在排氣與殘餘相中之分佈，經毒性當量轉換後，總毒性貢獻則無太大之差別。但 PCDD/PCDF 比值由 1.84 提升至 4.55，顯示戴奧辛生成物種似乎有轉移之情形，以 PCDDs 為主要之優勢物種。
3. 添加 10%氯化鈣於飛灰中進行戴奧辛生成實驗，結果顯示未添加氯化鈣之戴奧辛濃度為 206.3ng/min，添加氯化鈣後之戴奧辛濃度為 202.75ng/min，顯

示氯化鈣對戴奧辛生成無顯著之影響。

4. 添加單一多環芳香烴於飛灰中之戴奧辛生成試驗結果顯示添加 0.1% Naphthalene 於飛灰中，總戴奧辛濃度為 157.21 ng/min，添加 0.5% Naphthalene 於飛灰中，總戴奧辛濃度為 211.32 ng/min，增加了 26%。且無論是氣固相或是 PCDDs&PCDFs 均有增加之趨勢，由此結果可知 PAHs 於 PCDD/Fs 形成過程扮演一重要角色。
5. 添加 Pyrene 於飛灰生成戴奧辛實驗，在排氣相與添加 Naphthalene 呈現不同之結果，整體濃度雖然增加，但排氣相之戴奧辛濃度並無隨著 Pyrene 之增加而增加，反而有減少之趨勢，從這結果可知 Pyrene 與 Naphthalene 於戴奧辛形成過程扮演著不同前趨物角色。
6. 藉由添加碳源、氯源及多環芳香烴來探討何種因素，為形成戴奧辛之主要生成因子。結果顯示添加 3% 活性碳於飛灰中之戴奧辛總濃度為 245.26 ng/min，添加氯化鈣於飛灰中之戴奧辛總濃度為 202.96 ng/min，而添加 0.1% Naphthalene 於飛灰中之戴奧辛總濃度為 157.21 ng/min，以多環芳香烴對戴奧辛形成貢獻程度較大。

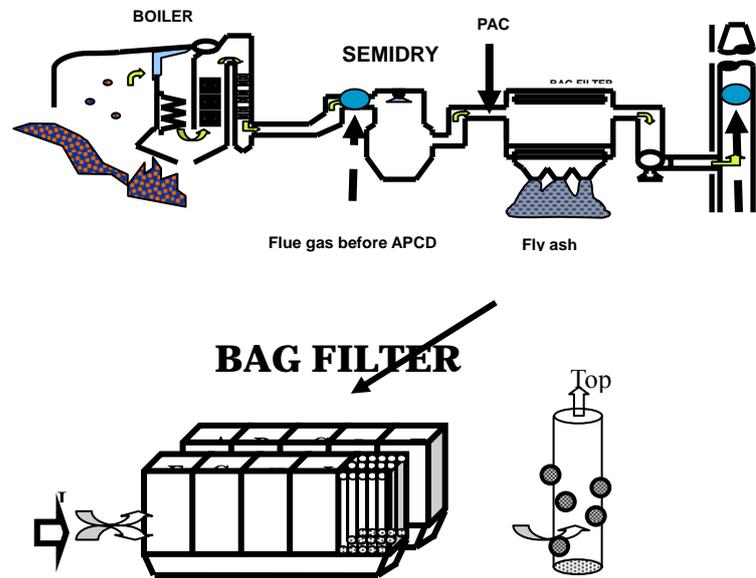


圖1 採樣示意圖

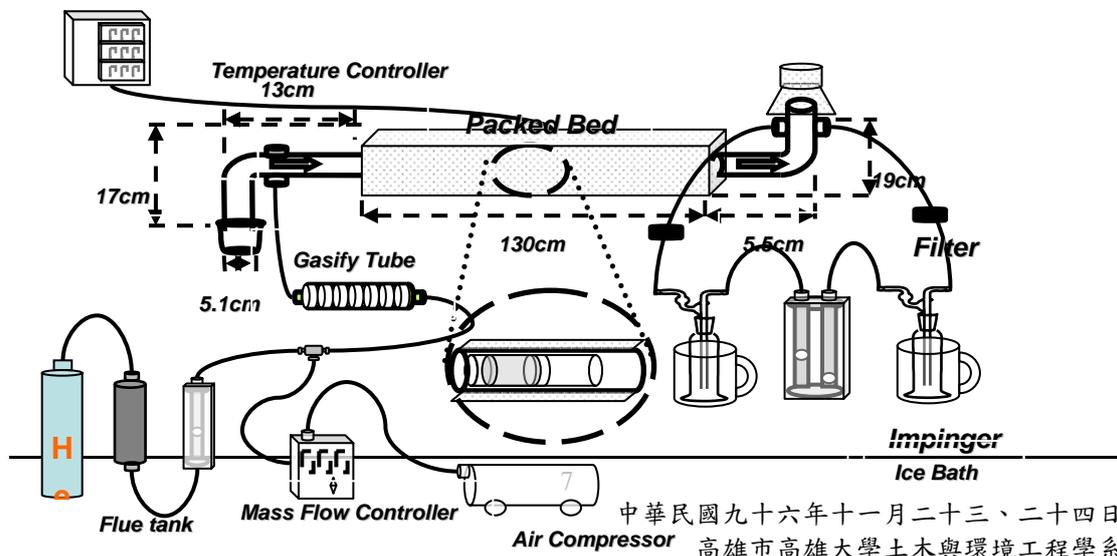


圖 2 實驗系統圖

表 1 戴奧辛生成實驗參數

Solid phase	Gas phase	Formation Temperature (°C)	Retention Time (min)	Concentration
FA	Air	160	10	
FA + PAC	Air	160	10	PAC / FA = 3 ¹
FA + CaCl ₂	Air	160	10	CaCl ₂ / FA = 10 ¹
FA + Nap.	Air	160	10	Nap. / FA = 0.1 ¹
FA + Pyr.	Air	160	10	Pyr. / FA = 0.1 ¹
FA + Pyr.	Air	160	10	Pyr. / FA = 0.1 ¹

FA: Fly Ash, PAC: Powdered Active Carbon, Nap: Napthalene, Pyr: Pyrene
¹ weight ratio (w/w), ² molar ratio

表 2 添加活性碳於飛灰介質所產生之戴奧辛濃度值

Matrix type	FA(Air)		FA+3%PAC(Air)	
	Flue gas	Residue	Flue gas	Residue
ng/min				
PCDD/Fs	42.84	163.46	176.71	68.55
PCDDs	41.39	150.40	173.95	63.59
PCDFs	1.45	13.06	2.77	4.96
PCDDS/PCDFs	28.53	11.51	62.90	12.82
teq-ng/min				
PCDD/Fs	0.33	1.15	0.88	0.62
PCDDs	0.31	0.65	0.85	0.38
PCDFs	0.02	0.50	0.03	0.24
PCDDS/PCDFs	14.29	1.30	28.34	1.61

表 3 添加氯化鈣於飛灰介質所產生之戴奧辛濃度值

Matrix type	FA(Air)		FA+10%CaCl ₂ (Air)	
	Flue gas	Residue	Flue gas	Residue
ng/min				
PCDD/Fs	42.84	163.46	11.88	190.87
PCDDs	41.39	150.40	11.16	177.42
PCDFs	1.45	13.06	0.72	13.45
PCDDS/PCDFs	28.53	11.51	15.44	13.19
teq-ng/min				
PCDD/Fs	0.33	1.15	0.14	1.22
PCDDs	0.31	0.65	0.10	0.69
PCDFs	0.02	0.50	0.04	0.52
PCDDS/PCDFs	14.29	1.30	2.67	1.32

註：甲苯濃度為(346ppm)

表 4 添加 Naphthalene 於飛灰中之戴奧辛生成濃度

Matrix type	FA+0.1%Nap.(Air)		FA+0.5%Nap.(Air)	
	Flue gas	Residue	Flue gas	Residue
ng/min				
PCDD/Fs	5.08	152.13	8.62	202.70
PCDDs	4.71	140.51	7.98	186.57
PCDFs	0.37	11.61	0.64	16.13
PCDDS/PCDFs	12.65	12.10	12.51	11.57
teq-ng/min				
PCDD/Fs	0.06	1.14	0.10	1.67
PCDDs	0.04	0.65	0.07	0.95
PCDFs	0.02	0.50	0.03	0.72
PCDDS/PCDFs	1.64	1.30	2.55	1.32

單位：ng/min

表 5 添加 Pyrene 於飛灰中之戴奧辛生成濃度

Matrix type	FA+0.1%Pyr.(Air)		FA+0.5%Pyr.(Air)	
	Flue gas	Residue	Flue gas	Residue
ng/min				
PCDD/Fs	5.69	181.90	3.69	217.14
PCDDs	5.51	166.58	3.55	204.25
PCDFs	0.18	15.33	0.14	12.89
PCDDS/PCDFs	30.89	10.87	25.19	15.84
teq-ng/min				
PCDD/Fs	0.04	1.42	0.03	1.25
PCDDs	0.03	0.81	0.02	0.72
PCDFs	0.01	0.62	0.01	0.53
PCDDS/PCDFs	2.96	1.30	3.48	1.35

單位：ng/min

表 6 碳源、氣源及多環芳香烴對戴奧辛形成之貢獻

Matrix type	FA+3%AC(Air)		FA+10%CaCl2(Air)		FA+0.1%Nap.(Air)	
	Flue gas	Residue	Flue gas	Residue	Flue gas	Residue
ng/min						
PCDD/Fs	176.71	68.55	11.88	190.87	5.69	181.90
PCDDs	173.95	63.59	11.16	177.42	5.51	166.58
PCDFs	2.77	4.96	0.72	13.45	0.18	15.33
PCDDS/PCDFs	62.90	12.82	15.44	13.19	30.89	10.87
teq-ng/min						
PCDD/Fs	0.88	0.62	0.14	1.22	0.04	1.42
PCDDs	0.85	0.38	0.10	0.69	0.03	0.81
PCDFs	0.03	0.24	0.04	0.52	0.01	0.62
PCDDS/PCDFs	28.34	1.61	2.67	1.32	2.55	1.32

單位：ng/min

七、參考文獻

1. Addink, R., Cnubben, P.A.J.P., Olie, K., "Formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans on fly ash from precursors and carbon model compounds." Carbon 33 (10), 1463-1471 (1995).

2. Akio, K. and Youki, O., "Mutagenic Activity and PAH Analysis in Municipal Incinerator," *the Science of Total Environment*, Vol. 61, pp. 37-49 (1987).
3. Bjørseth, A. and Ramdahl, T., *Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Volume 2 Emission Sources and Recent Progress in Analytical Chemistry*, Marcel Dekker, New York (1985).
4. Hay, D.J., Finkelstein, A., Klicius, R., "The national incinerator testing and evaluation program two-stage incinerator combustion tests." *Chemosphere*, vol.15, pp.1201-1212 (1986).
5. Iino, F., Imagawa, T., Takeuchi, M., Sadakata, M., "De novo synthesis mechanism of polychlorinated Dibenzofurans from polycyclic aromatic hydrocarbons and the characteristic isomers of polychlorinated naphthalenes." *Environ. Sci. Technol.*, 33, 1038-1043 (1999).
6. Iino, F., Imagawa, T., Takeuchi, M., Sadakata, M., 1999. De novo synthesis mechanism of polychlorinated Dibenzofurans from polycyclic aromatic hydrocarbons and the characteristic isomers of polychlorinated naphthalenes. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 1038-1043.
7. Jay, K., Stieglitz, L., "On the mechanism of formation of polychlorinated aromatic compounds with Copper (II) chloride." *Chemosphere* 22 (11), 987-996 (1991).
8. Jean-Lue Besombes, Anne Maitre, Olivier Patissier, Nicolas Marchand, Nathalie Chevron, Muriel Stoklov, Pierre Masclet.,2001 " Particulate PAHs observed in the surrounding of a municipal incinerator." *Atmospheric Environment* ,Vol.35, pp.6093-6104.
9. Li, C.T., Lee, W.J., Wu, C.H. and Wang, Y.T., "PAH Emission from Waste Ion-exchange Resin Incineration," *Science of the Total Environment*, Vol. 155, pp. 253-266 (1995).
10. Manahan, S. E., "Environmental chemistry" , Lewis Publisher Inc., Michigan(1991).
11. Manahan, S. E., "Environmental chemistry" , PWS Publisher Inc., Boston(1984).
12. Schoonenboom, M.H., Olie, K., "Formation of PCDDs and PCDFs from anthracene and chloroanthracene in a model fly ash system." *Environ. Sci. Technol.*, 29, 2005-2009 (1995).
13. Tuppurainen, K., Halonen, I., Ruokojärvi, P., Tarhanen, J., Ruuskanen, J., "Formation of PCDDs and PCDFs in Municipal Waste Incineration and Its Inhibition Mechanisms : A Review" , *Chemosphere*, Vol.36, No.7, p.1493-1511 (1998)
14. Wanke, T., Velow, J., "Simultaneous sampling of polychlorinated and polycyclic aromatic compounds upstream and downstream of the boiler of the Karlsruhe test incinerator TAMARA." *Organohalogen Comp*, vol.27, pp.403-408 (1996).
15. Wilhelm, J., Stieglitz, L., Dinjus, E., Zwick, G., "The determination of the role of gaseous oxygen in PCDD/F formation on fly ashes by the use of $^{18}O_2$." ,*Organohalogen Compd*. Vol.41, pp.83-86 (1999).
16. Yasuda, K., Takahashi, M., "The emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from municipal solid waste incinerators during the combustion cycle." *Journal of*

- the Air and Waste Management Association , vol.48, pp.441-447(1998).
- 17.張正平，「焚化含氯化合物過程中衍生之不完全燃燒產物」，碩士論文，國立屏東科技大學環境工程與科學系，屏東(1998)。