

## 小型固態廢棄物焚化爐之流場分析

### Simulating the Flow Field for Small Solid Incinerator

國立台灣大學農業機械工程學系教授

國立中山大學環境工程研究所教授兼所長

吳中興

陳康興

Chung-Hsing Wu

Kang-Shin Chen

#### 摘要

由於我國經濟發展之腳步快速，每日所產生之固態廢棄物亦大量增加。固態廢棄物中含有許多廚餘，水份含量甚高。利用焚化法來處理農業廢棄物已被認為是一可行的方式，因此使用焚化廠來處理固態廢棄物，已逐漸成為先進國家發展之趨勢。有鑑於焚化爐設計需要，本文將利用有限元素法的計算流體力學軟體 FIDAP，於個人電腦(PC)上，建立焚化爐二維紊流場的模擬程式。並以實際運作的小型固態廢棄物焚化爐為例，進行二維流場之分析模擬，並且於固定一次助燃空氣進氣量時，比較不同二次助燃空氣進氣量對於流場的影響。結果成功地於 PC 上建立模擬程式。對於不同二次助燃空氣進氣量的分析結果，顯示二次助燃空氣將使迴流區擴大而增進爐內之混合效果。但愈大的二次助燃空氣進氣量，將使二次燃燒室產生更大的衍生迴流區，而影響二次燃燒室的燃燒效果。因此小於 15% 的二次助燃空氣進氣量將是較佳的設計選擇。

**關鍵詞：**紊流，固態廢棄物，焚化爐，流場模擬。

#### ABSTRACT

Owing to the rapid growth in our national economy, each city produces a lot of waste that contains a large portion of food waste. Since thermal degradation is considered as a good method to handle the agricultural waste, using an incinerator to treat the solid waste has been becoming a tendency in some developed countries. To meet the requirement of incinerator design, a simulative program to predict the turbulent flow field using a CFD package, FIDAP, by means of the finite element method is established on PC. The two-dimensional flow field inside an existing incinerator is analyzed. Furthermore, when the primary air flow rate is fixed, the effects coming from the alternations in the secondary air flow rate are studied. Computational results show that the secondary air will extend the

recirculation zone to improve the mixing effect of the combustion chamber. On the other hand the derived recirculating region will be introduced in the secondary combustion chamber while further increasing the secondary air flow rate, and this will have contrary effects. Considering the design purpose, it can be concluded that the ratio of the secondary auxiliary air to total auxiliary air supplied should be lower than 15%.

**Keywords:** Turbulent flow, Solid waste, Waste paper, Incinerator, Flow-field simulation.

## 一、前言

過去十年間，全民戮力生產，導致經濟蓬勃發展，國民生產毛額及平均所得逐年增加，台幣激烈升值，國人經濟活動頻繁，消費習慣改變。所產生的固態廢棄物，數量龐大，而廚餘所佔比例很高為其特色。

爲了處理平均水份含量偏高之固態廢棄物，考慮類似都市廢棄物的處理方式，設置小型的焚化爐來處理這些廢棄物。由於專業設計的焚化爐可同時考慮焚化後熱能和灰渣的再利用以及空氣和水資源的維持，實不失爲一絕佳的方法。由於國內一般的鐵工廠建造的焚化爐，仍未能有專業化的設計規模，同時並未對於空氣污染防治做有系統的理論思量。所以當務之急乃是提供設計焚化爐的理論工具，以期能建立乾淨無污染的焚化爐，而每日有效地就地處理這些組成份具有特色的廢棄物。以有效地舒解掩埋場之負荷，並延長其有效的使用期限至最近各地方政府與當地居民協商決定之關場期限。

台灣目前的焚化爐設施，多半是援用國外之設計，以技術合作的方法在國內建立。因此對於設計的工作及理論分析於國內仍是有待加強。爲了能建立於個人電腦(PC)上執行的模擬程式，以提供設計所需的參考資訊。同時並不需龐大而昂貴的大型計算機，以期使眾多中小企業能多加利用此分析結果。因而本文將利用現有的程式於PC上建立機場農業廢棄物焚化爐的分析工具。一則可對焚化爐的設計提供簡便的參數分析工具；二則可對焚化爐內流場加以瞭解而探討流場特性對於焚化爐燃燒特性的影響。

影響廢棄物於焚化爐內銷毀的因素眾多，其

中當然是以廢棄物本身的可燃性影響最大，亦即廢棄物本身可燃與否及其含水率和熱值(heating value)。當初步設計焚化爐時，當然是要處理可燃的廢棄物，假設熱值及含水率是已知的。於實際操作時，熱值及含水率對於爐內之燃燒溫度的影響可藉高熱值的輔助燃料多寡而加以控制。因此於焚化爐設計之重要參數將是空燃比(air-fuel ratio)、爐溫、氣體之滯留時間(residence time)及紊流強度。但是一般在設計分析及實務操作中，均以熱力學定律質能平衡來加以分析(Theodore and Reynolds, 1987; Tillmam et al., 1989)，並未曾詳細考慮爐內的流場因素。當然這是在計算機未十分進步且普及最簡便的方式，隨著計算機科技的進步，PC已可處理較快速的運算工作，上述的簡易分析似顯不足，應可藉PC來做更詳細的分析。Dellinger et al. (1986)和 Dellinger et al. (1986)即曾指出爐內之溫度分布、迴流區的存在與否及混合狀況均是影響爐內燃燒狀況的重要因素，因此於PC上建立紊流場的分析程式以分析這些參數的影響是有必要的。

對於焚化爐的研究已有相當久的歷史，但早期多半是藉實驗而尋求整體效率的瞭解。至於用數值分析爐內流場者有 Macagno 及 Hung (1967)，Moon 及 Rudiwger (1977)，Kodres (1987a,b)，Khan (1993)。多數的學者或專注於迴流區的影響，或建立三維圓柱形焚化爐之速度場及溫度場分析模式，均以  $k-\epsilon$  紊流模式來模擬以期對於焚化爐內流場瞭解而進一步提昇焚化效果。但多數只考慮較簡單的幾何形狀而未曾考慮實際的焚化爐。

現今計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)的發展，多數的數值方法可歸於

表 1 焚化爐各邊界尺寸

名稱	尺寸(m)	
一次助燃空氣入口	fire1	0.416
	fire2	0.509
	fire3	0.992
	fire4	0.416
二次助燃空氣入口	0.0224	
焚化爐出口	0.632	
焚化爐爐深	1.4	

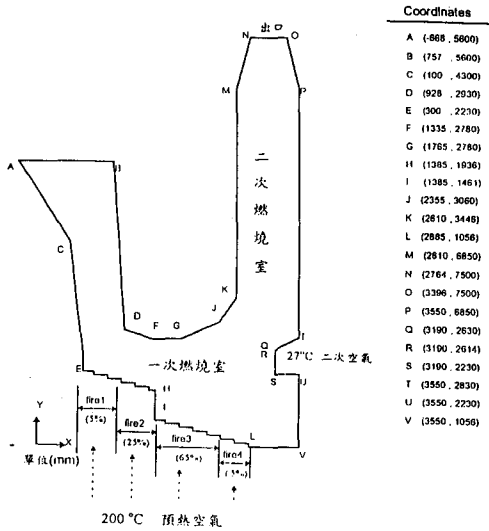


圖 1 焚化爐主體圖

下列兩種：有限差分法(finite difference method)和有限元素法(finite element method)。其中有限元素法有較為簡單且較少計算量之需求，但卻不易處理複雜的幾何外形；有限元素法可適用於隨意的幾何外形，同時其形狀函數(shape function)的引入，理論上可得較精確的解，但需龐大的計算量。隨著計算機的進步，大量計算的困難，已經被突破。因而其可運算複雜幾何形狀的優點，成爲一非常優秀的計算方法。

於現有計算流體力學套裝軟體中，一般所熟知的 FLUENT, FLOW3D, FIDAP, UNIC 等等，不勝枚舉。其中僅 FIDAP 採用有限元素法的計算方法。爲了考慮較複雜幾何形狀的實際焚化爐，本文將利用 PC 上有限元素法的數值流力(CFD)套裝軟體來模擬廢棄物焚化爐內之紊流場特性。初步以小港機場之小型垃圾焚化爐爲例，建立二維  $k-\epsilon$  紊流場模擬程式來模擬爐內冷流場。同時探討於固定一次助燃空氣進氣量時，不同二次助燃空氣進氣量對於流場的影響，且比較爐內紊流強度的分布以瞭解混合狀況。

## 二、數學分析

### (一) 統御方程式

本文所欲模擬的焚化爐是參考小港機場的小型垃圾焚化爐，乃一階梯式固定爐床採取兩段燃燒者。所模擬的二維幾何形狀如圖 1 所示，各部份詳細尺寸列於表 1。廢棄物由左側的投入口進入爐內，而由底部導入一次助燃空氣以行初步燃燒。初步燃燒後的氣流於二次燃燒室再與二次助燃空氣混合。爲了瞭解此焚化爐的流場特性以及不同一次與二次助燃空氣進氣量對於流場的影響。本文將假設不可壓縮恒溫紊流場，以有限元素法(finite element method)的計算流體力學軟體 FIDAP，利用標準  $k-\epsilon$  紊流模式(Launder and Spalding, 1974)加以模擬。因此整個流場的統御方程式爲典型雷諾平均後之連續方程式和納維爾—史托克(Navier-Stokes)方程式，亦即

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \dots\dots\dots(1)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_e \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \dots\dots(2)$$

及

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_e \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \dots\dots(3)$$

其中  $u, v, p$  分別爲雷諾平均後之  $x$  方向速度分量、 $y$  方向速度分量和壓力，而  $\mu_e$  是黏滯係數當量(effective viscosity)。於紊流模式中

$$\mu_e = \mu_t + \mu_l, \dots\dots\dots(4)$$

表 2  $k$ - $\epsilon$  紊流模式的經驗常數

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

其中  $\mu_l$  為層流之黏滯係數，為一流體性質； $\mu_t$  則是紊流黏滯係數，乃是流場的特性。本文將採用 Boussinesq 的渦流黏滯係數(eddy viscosity)的概念，以  $k$ - $\epsilon$  模式來模擬  $\mu_t$ 。其中若紊流動能  $k$  和紊流動能消散率  $\epsilon$  為已知，則由 Prandtl 及 Kolomogorov 的因次分析可得

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots(5)$$

其中  $C_\mu$  為實驗常數，於標準  $k$ - $\epsilon$  紊流模式中被選定為 0.09，本文  $k$ - $\epsilon$  紊流模式用到的實驗常數列於表 2 中。 $k$  及  $\epsilon$  於流場中之分布因此將直接影響流場中擴散速率的大小。於  $k$ - $\epsilon$  紊流模式中，為了獲得流場中  $k$  和  $\epsilon$  的分布狀況以便經方程式(5)得到紊流黏滯係數，將利用守恒律(conservation law)及模式化後推導得  $k$  和  $\epsilon$  方程式。因而使得統御方程式總數為一連續方程式、動量守恒律方程式(於本文之二維流場中有兩個動量守恒方程式，分別是  $x$  方向動量方程式和  $y$  方向動量方程式)以及  $k$  和  $\epsilon$  兩模式化後之方程式。若爾後多加考慮溫度變化則需有能量方程式；若模擬燃燒反應時，則物種守恒方程式(species conservation equations)以及狀態方程式亦必須包含在內。因此這將是十分龐大的計算工作。

(二) 邊界條件

在焚化爐各邊界名稱見圖 1，表 1 列出焚化爐各邊界的尺寸。茲將各邊界條件詳述如下。

1. 一次助燃空氣入口

Fire1 入口：進入的空氣質量占全部一次助燃空氣質量的 5%

Fire2 入口：進入的空氣質量占全部一次助燃空氣質量的 25%

Fire3 入口：進入的空氣質量占全部一次助燃空氣質量的 65%

Fire4 入口：進入的空氣質量占全部一次助燃空

氣質量的 5%

並假設入口的  $y$  方向速度分佈均勻(uniform)，在  $x$  方向速度為零。亦即  $u_x = 0$ ， $u_y = u_{in}$  以及紊流動能

$$k = 0.005U_{in}^2 \dots\dots\dots(6)$$

和紊流動能消散率

$$\epsilon = 0.09k^{3/2}/0.03D_h \dots\dots\dots(7)$$

上式中  $D_h$  為入口處的水力直徑(hydraulic diameter) [m]， $U$  為入口速度[m/s]。

2. 二次助燃空氣入口

假設二次空氣入口速度分佈均勻，僅在  $x$  方向有速度。亦即  $u_x = u_{in}$ ， $u_y = 0$  以及紊流動能

$$k = 0.005U^2 \dots\dots\dots(8)$$

和紊流動能消散率

$$\epsilon = 0.09k^{3/2}/0.03D_h \dots\dots\dots(9)$$

(三) 牆壁(wall)

由於標準  $k$ - $\epsilon$  紊流模式於近牆區並不適用，因此本文採用邊牆函數，以滿足動量守恒律。

(四) 焚化爐出口

假設出口具有單一流向特性，因此假設為完全發展流(fully developed flow)以簡化於此焚化爐出口邊界的設定。

三、有限元素法

在分析此一系統方程式時，由於焚化爐並非一簡單的幾何外型，若利用有限差分法將較不易將複雜的幾何形狀進行分析求解，因此本文採用有限元素法。有限元素法雖然將產生龐大的矩陣，但若提高 PC 記憶體容量且利用數值方法仍是可於 PC 上執行。時至今日 PC 的進展飛快，其 CPU 運算速率已可與低價的工作站比美，同時記憶體的價格亦隨著諸多廠家投入 DRAM 的製造而日益價廉物美。因而藉由 PC 進行這龐大的計算，其效果實不亞於利用工作站分析，但只需相當低廉的硬體設施。

有限元素法係將所計算的物理空間考慮成一連續體，利用格點產生法將連續體分割成許多小元素，這些元素可考慮成在特定點連結起來，此特定點通稱為節點(nodes or nodal point)，節點通常位於元素的邊界上(相鄰的元素在此連結)。由於物理空間內的場變數(如位移、應力、溫度、壓力或速度)為未知，故我們假設在有限元素內場變數的變化可用一簡單的近似函數(interpolation function)內插求得，而這些近似函數(亦稱內插函數)係以節點上場變數之值表示。假如整個物理空間的場方程式均被寫出，則在節點數值將是新的未知數，解這些場方程式(一般矩陣方程式的形式)，即可求得節點的場變數值。

令一廣義變數  $\Psi$  代表所欲求解的場變數，且統御方程式以一廣義形式

$$F(\Psi) = 0, \dots\dots\dots(10)$$

表示。由於只在節點上有數值，因此整個元素中的變數值分布可以

$$\Psi^{(e)}(x, y) = N(x, y)\psi^{(e)} \dots\dots\dots(11)$$

表示，其中  $N(x, y)$  為形狀函數(shape function)，亦即為內插函數，而  $\psi^{(e)}$  則為代表此元素中所有節點的向量。只要適當的選擇形狀函數，此形式應該可以得到恰當解(exact solution)。但由於選擇並不易，所以一般均採用正交函數(orthogonal function)來獲得合理的內插值。若將這內插的變數分布代入統御方程式中仍應滿足，但因為只是內插值，所以將會有殘餘量之產生。若令加上加權函數後統御方程式元素區域之積分為加權殘餘量，則此加權殘餘量趨近於零將是所希望的，亦即

$$\iint_s N_i [F(\Psi^{(e)})] ds = 0, i=1, 2, \dots\dots\dots, p \dots\dots(12)$$

其中  $N_i$  為加權函數，一般採用與形狀函數相同，而  $p$  代表元素中之節點數。再利用格林-高斯定理(Green-Gauss theorem)處理二階微分項，使成元素邊界的線積分。由於內差  $\Psi^{(e)}(x, y)$  分布時將空間變數包含在形狀函數中，因此組合所有元素

後方程式(12)可寫成

$$K\bar{\Psi} = \bar{P} \dots\dots\dots(13)$$

其中  $\bar{P}$  將代表源項，如同動量方程式中之剪應力和重力等， $K$  則是組合矩陣。加上適當的邊界條件後，即可求得  $\Psi$  於節點之分布，再加上形狀函數內差即得整個流場之分布。

為了節省計算空間，本文中將採用分離計算法(segregated method)。此法乃是分別計算各統御方程式，而後遞迴求解。於計算過程中，於 Pentium 133 CPU 之 PC 上，執行時間約為 6100 sec，遞迴次數 160 次，隨著計算邊界條件的不同，有大約加減 20 次的差異。而程式的收斂標準則為遞迴運算前後兩次的差值正規量(normal value)小於  $10^{-3}$ 。

#### 四、結果與討論

本文分析運用的元素單元分布如圖2所示。於所模擬的小型焚化爐中，固態廢棄物由左側置入口進料後，此一入口即封閉。助燃空氣即由底部階梯式的一次進氣口和爐體右側的二次空氣入口，分別以不同比例進氣。因此於計算模擬時於一次空氣和二次空氣入口附近將有較密集的元素分布。於左側廢棄物入口，則由於置入口的關閉而形成一封閉的滯流區域。於此區域中將預期也不希望有劇烈的燃燒反應發生，以減少進料時有回火發生的機會。由簡單的學理觀之，在此區域若發生燃燒反應，則燃燒廢氣將無處逸出，因而將使燃燒反應無法繼續，故於此區域將不是主要的燃燒區域。此外由於這封閉區域所造成的滯留現象，將使得流體呈現停滯現象而只有微小的流動，亦即流速將不大。所以在這一區域採用較稀疏的元素分布。一次燃燒室為助燃空氣主要引入的地方，因而有較密集的流場變化；但於二次燃燒室時，流場將變成發展狀況，因而可有較稀疏的元素配置。上述即為本文建構網格分布時之考量因素，一方面顧及流場的複性另一方面減少計算機資源的使用。

依此類型所建構的元素分佈情形，於不同疏密狀況下做元素的格點獨立測試。比較總網格數

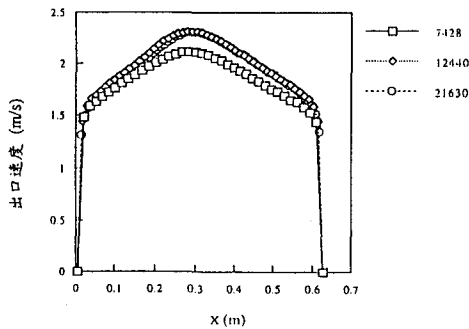


圖 2 格點獨立測試之焚化爐出口速度分布  
(其中 X 是距 N 點的水平距離)

分別為 7428，12440 和 21630，其結果於圖 2 顯示出口速度分布。明顯地於元素數 12440 時，元素數目再增加亦無法明顯的提昇準確度。因此本文中採用的元素數即如圖 3 所示之狀況，其總數為 12440。

在下例圖 4~圖 11 的計算結果中，乃是固定爐體底部一次空氣進量而改變二次空氣進量以比較其流場變化。將不同二次進氣量的流場狀況分述如下。

圖 4 是沒有二次進氣時的流線圖。由圖中可明顯地發覺在階梯式一次空氣入口的右側，亦即圖中的右下端有一大的迴流區。由流線分布的疏密可明顯發覺此一迴流區並未有大的流速發生。若隨著廢棄物的進入而考慮其所發生的反應時，由於廢棄物需要昇溫、熱解、混合才發生化學反應，同時廢棄物並未若流體易於流動。因而隨著流場的移動此一迴流區對於流場中燃燒或混合效果並不會有影響，但是於實際爐床中，此一區域為殘渣及飛灰的移出口，因而才遺留此一區域中的死點。值得注意的是於二次空氣入口上方之迴流區域，於本文中將稱之為二次迴流區，這個迴流區發生於一次空氣與廢棄物混合且燃燒以後，因此將有助於燃燒反應。此乃由於這迴流區易於形成熱點(hot spot)且延長部份混合氣的滯留時間。因而於二次空氣入口有了如此的幾何形狀。廢棄物熱解後的可燃氣與空氣混合且發生初步燃燒後，流到二次燃燒室。於此段區域流場呈現渠道流(channel flow)之發展狀態，並無劇

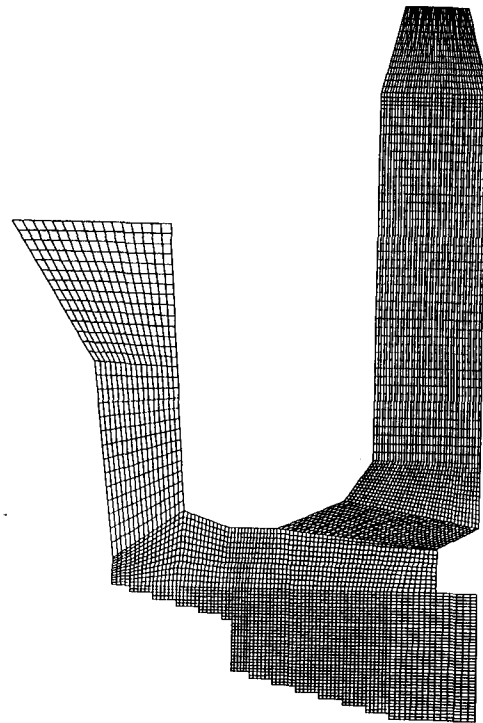


圖 3 焚化爐有限元素分布圖

烈的混合效應，同時流場並無顯現特殊特徵。可預期的燃燒反應在此區域將把殘餘未燃氣進行充分的反應以減少二次的空氣污染。如所預期的，於左側的固態廢棄物的置入口區域，流場並未顯現流動的發生，同時流入的空氣亦不會於這累積。至於紊流動能  $k$  的分布情形如圖 5 所示。由圖中可明顯的發覺紊流動能於近牆附近有較大的紊流強度，同時於二次迴流區有較明顯的強度。值得注意的是於二次進氣入口對面二次燃燒室牆上亦有較大的紊流動能分布，這將產生額外的衍生迴流區。

當引入二次空氣時，其流場特性的變化，於本文中將固定一次空氣進氣量，而改變二次空氣進氣量，使其分別佔總助燃空氣進氣量的 5%、10%、15%、20%、25%、30%來加以模擬、分析並比較之。

當二次空氣量佔進量 5%時，其流場特性如圖 6 所示。與無二次空氣的流場比較以後，可明

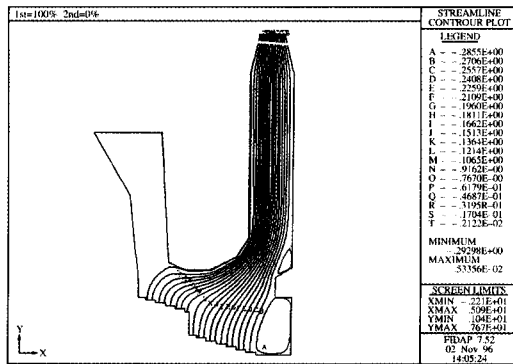


圖 4 二次助燃空氣佔總進氣量 0%之流線圖

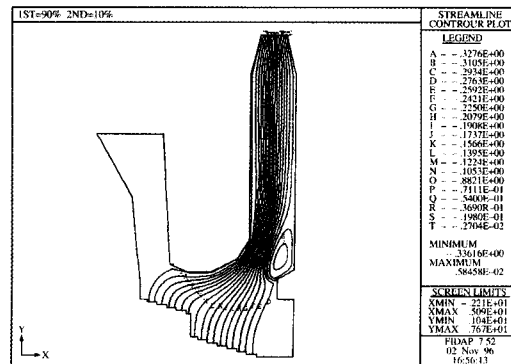


圖 7 二次助燃空氣佔總進氣量 10%之流線圖

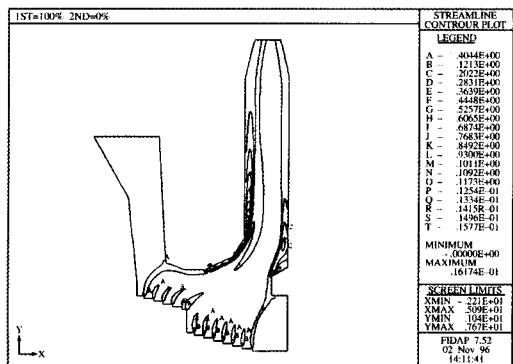


圖 5 二次助燃空氣佔總進氣量 0%之紊流動能分布

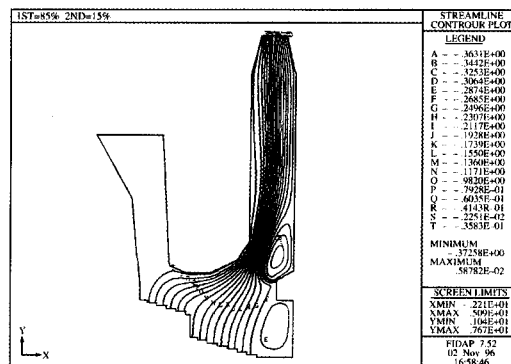


圖 8 二次助燃空氣佔總進氣量 15%之流線圖

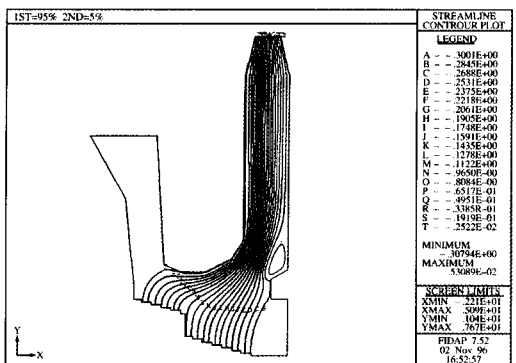


圖 6 二次助燃空氣佔總進氣量 5%之流線圖

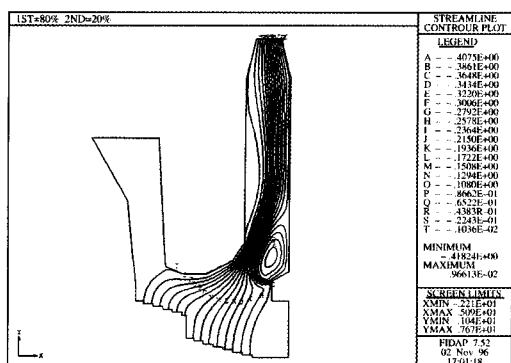


圖 9 二次助燃空氣佔總進氣量 20%之流線圖

顯地發覺二次空氣的引入有加大其入口側迴流區的趨勢。二次迴流區的迴流加大，如前所述的，將使燃燒的更加完全。但這仍有待進一步的驗證。

圖 7~圖 11 分別是二次空氣量佔總進氣量 10%、15%、20%、25%、30%的流場示意圖。由這些流線圖的比較，可明顯的看出隨著二次空氣量所佔總進氣量比重的增加，有愈來愈大的二次

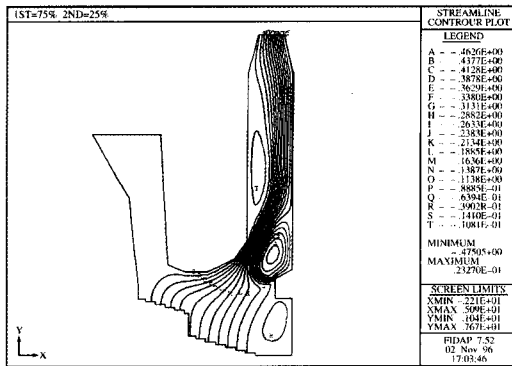


圖 10 二次助燃空氣佔總進氣量 25%之流線圖

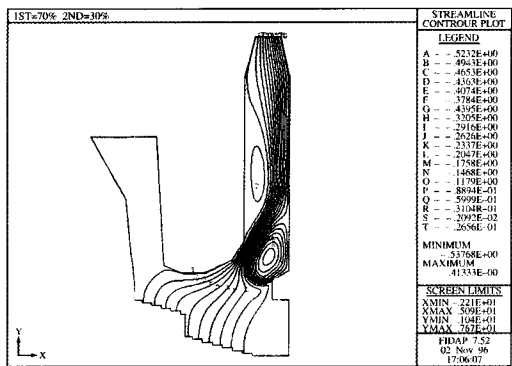


圖 11 二次助燃空氣佔總進氣量 30%之流線圖

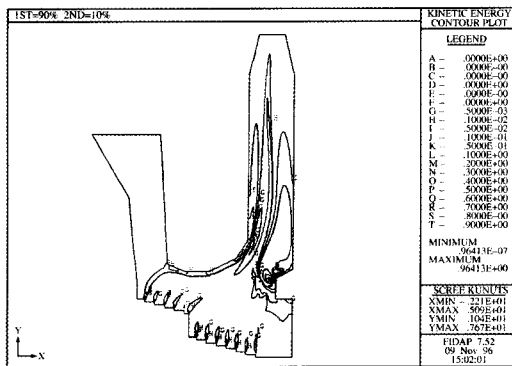


圖 12 二次助燃空氣佔總進氣量 10%之紊流動能分布

迴流區。由於這二次迴流區的擠壓效果，使整個流場將於二次空氣入口的瓶頸處形成噴流狀況。隨著爐體幾何形狀設計的影響，將使得流體

流向彎曲而於二次燃燒室中二次空氣入口對面牆上形成一迴流區(本文將稱其為衍生迴流區)。因此二次空氣所佔比例的增加將使爐體內產生較多增進混合且駐焰的流場機制。由各圖的比較可明顯的發覺隨著二次進氣比重的增加，於二次燃燒室的衍生迴流區有愈來愈大的趨勢。圖 12 是二次助燃空氣進氣量佔總助燃空氣量 10%時之紊流動能分布圖。於此圖中可看出隨著二次助燃空氣的引入，使得二次燃燒室內的流場有較大的紊流強度。亦即二次助燃空氣對於爐內混合效應有增強的效果。對於整個爐體而言，一次助燃空氣是必須的。一則可以提供固態廢棄物起啟燃燒時所需的空氣，二則將熱解後和初次燃燒後未充分反應的混合氣，送到二次燃燒室進行較完全的反應。於本文的分析比較顯示，在無二次空氣的時後，整個流場將平順的由二次燃燒室流出爐體；而當有二次空氣的引入時，將會使二次燃燒室的流場趨於複雜。一則擴大了二次空氣入口側的二次迴流區，再則於二次燃燒室內產生衍生迴流區。雖然這些迴流區使流場複雜化，但是其對於混合效應的提昇及滯留時間的延長將有不可忽略的影響。

當二次助燃空氣所佔總進氣量比重 $>20\%$ 時，於二次燃燒室的衍生迴流區漸趨於狹長，這將減少二次燃燒室中流體通道。由於迴流區的擠壓而使得燃燒室內流速變大。雖然迴流區有延長滯留時間及駐焰的效果，但於爐體頂端的二次燃燒室內反而增加了流體速度而降低滯留時間。因此其效果將需進一步燃燒模擬的探討。但由於爐體設計當初，僅留下狹小的二次入口開度。因此其原始設計的二次進氣流量即不應太大。但二次空氣的提供仍是必須的，可大大提昇燃燒效果。

於本文的計算程中，複雜的幾何形狀，可輕易地建構計算格點。同時龐大的計算亦僅需不到一日的計算時間。這將非常方便設計者建立更佳的焚化爐尺寸。若將燃燒模式加以考慮則將更完整，這將是爾後的工作目標。

## 五、結 論

本文的分析成功的利用 PC 上的有限元素法



分析軟體分析了小港機場的小型垃圾焚化爐之二維恆溫紊流場。如此的分析工具將可提供小型農業廢棄物焚化爐設計時之參考。一則可對爐體內的流場特性瞭解，二則可提供不同參數變化的影響。這將對於處理農產品廢棄物，如病死牲畜等之焚化爐提供良好的設計工具。

在文中對於不同二次空氣量所佔總進氣量比例的影響則明顯的發覺，二次空氣有助於二次空氣入口側的二次迴流區之擴大，這將有助於燃燒反應。但當二次空氣所佔比重大於 20%時，將使二次燃燒室內的衍生迴流區成長而影響了二次燃燒室的燃燒效果。

此外所模擬的爐體其二次空氣入口開度較一次空氣入口小(參照表 1)。因此其原始設計即未曾期望較大流量的二次進氣，這或許是其參酌二次進氣量的影響後所做的設計考量！

未來的工作，將把燃燒模式加以考慮。在農產品廢棄物中之焚化爐，與本文模擬之機場焚化爐，均是含水量相當高的可燃物，因而本文分析工具的建立，將可於建構農產廢物焚化爐之設計工具，計算結果亦可提供為參考資料。

## 六、參考文獻

1. 行政院環保署。1993。環境保護年鑑。台北市：行政院環保署。
2. Dellinger, B., M. D. Graham and D. A. Tirey. 1986. Predicting emissions from the thermal processing of hazardous wastes. *Hazardous Wastes & Hazardous Materials* 3(2): 293-307.
3. Dellinger, B., W. A. Rubbey, D. L. Hall and J. L. Graham. 1986. Incinerability of hazardous wastes. *Hazardous Wastes & Hazardous Materials* 3(2): 139-150.
4. Khan, J. A., D. Pal and J. S. Morse. 1993. Numerical modeling of a rotary kiln incinerator. *Hazardous Waste & Hazardous Materials* 10(1): 81-95.
5. Kodres, C. A. 1987a. Theoretical thermal evaluation of energy recovery incinerators-part I: modeling. *J. Energy Resources Technology* 109: 79 - 83.
6. Kodres, C. A. 1987b. Theoretical thermal evaluation of energy recovery incinerators-part II: parametric examination. *J. Energy Resources Technology* 109: 84 - 89.
7. Launder, B. E. and Spalding, D. B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3: 269-289.
8. Macagno, E. O. and T. K. Hung. 1967. Computational and experimental study of a captive annular eddy. *J. Fluid Mech.* 28: 43-64.
9. Magnussen, B. F. and B. H. Hjertager. 1976. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In "Sixteenth Symposium (International) on Combustion," 719-729. The Combustion Institute.
10. Moon, L. F. and G. Rudinger. 1977. Velocity distribution in an abruptly expanding circular duct. *J. Fluids Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp 226-230.
11. Theodore, L. and J. Reynolds. 1987. Introduction to Hazardous Waste Incineration. New York, NY: John Wiley & Sons.
12. Tillmam, D. A., A. J. Rossi and K. M. Vick. 1989. Incineration of Municipal and Hazardous Solid Wastes. New York, NY: Academic Press, Inc.

收稿日期：民國 85 年 11 月 21 日

修正日期：民國 86 年 1 月 16 日

接受日期：民國 86 年 3 月 7 日