

行政院及所屬各機關出國報告  
(出國類別：實習)

# 火力電廠氮氧化物排放與大氣中臭氧 濃度關聯性評估技術

服 務 機 關：台灣電力公司  
出國人職稱：十一等一般工程監  
姓 名：江宗元  
出 國 地 區：美國  
出 國 日 期：90 年 07 月 08 日至 07 月 23 日  
報 告 日 期：90 年 09 月 21 日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：「火力電廠氮氧化物排放與大氣中臭氧濃度關聯性評估技術」

頁數 26 含附件：☐是☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：江宗元/台灣電力公司/

環境保護處/一般工程監/02-23667209

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：90 年 07 月 08 日至 90 年 07 月 23 日

出國地區：美國

報告日期：90 年 09 月 21 日

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞：臭氧、光化反應、Models-3 空氣品質模式、環境影響評估

內容摘要：(二百至三百字)

近年來環境臭氧問題躍昇為南台灣地區首要之空氣污染問題，使南台灣地區空氣品質管制計畫正式進入以反應性污染物為主的新紀元。臭氧係經光化反應產生的二次污染物，主要與氮氧化物及碳氫化合物之排放有關，形成原因非常複雜，必須藉由精確的空氣品質模式作為評估工具，始能瞭解火力電廠排放之氮氧化物對環境臭氧的影響程度。

本實習報告係針對大氣光化反應、美國環保署歷代臭氧模式介紹、臭氧模式(Models-3)應用於電廠對環境臭氧影響評估技術、電力設施氮氧化物減量控制技術等提出說明與探討，冀藉此提昇本公司電廠環境影響評估技術，並增進本公司相關專業人員對光化產物臭氧之瞭解，有助於本公司與環保主管機關及民眾溝通電廠環境臭氧影響問題。

# 目 錄

頁次

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 壹、出國行程及工作紀要 .....                               | 1  |
| 貳、實習內容 .....                                    | 2  |
| 一、前言 .....                                      | 2  |
| 二、光化反應與臭氧形成之關聯性.....                            | 2  |
| 三、美國環保署研發之臭氧空氣品質模式回顧 .....                      | 5  |
| 四、臭氧空氣品質模式(Models-3)應用於電廠對環境臭氧<br>影響之評估技術 ..... | 7  |
| 五、電力設施氮氧化物減量控制技術 .....                          | 17 |
| 參、感想與建議 .....                                   | 21 |

## 壹、出國行程及工作紀要

- |               |                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| 一、七月八日        | 自台北至紐約                                                              |
| 二、七月九日至十六日    | 前往紐約 Washington Group International 公司研習火力電廠氮氧化物排放與臭氧濃度關聯性評估技術及減輕對策 |
| 三、七月十七日至二十一日  | 前往舊金山 PG&E 公司之火力發電廠研習減低氮氧化物排放技術及蒐集臭氧研發計畫研究動向                        |
| 四、七月二十二日至二十三日 | 自舊金山返回台北                                                            |

## 貳、實習內容

### 一、前言

近年來環境臭氧問題躍昇為南台灣地區首要的空氣污染問題，由於氮氧化物及碳氧化合物為形成臭氧的重要來源，而火力電廠為主要的氮氧化物來源之一，故各級環保主管機關均將矛頭指向本公司位於南台灣地區的興達、大林及南部三座火力電廠，本公司雖屢次說明電廠氮氧化物排放量雖大，但因採高煙囪排放，對環境臭氧濃度之影響應不大，然一直無法與環保主管機關獲得共識。

鑒於臭氧為經光化反應所產生之二次污染物，形成原因複雜，必須藉助精確的空氣品質模式，始能確切瞭解火力電廠高煙囪排放之氮氧化物對環境臭氧的影響程度，進而釐清電廠是否對環境臭氧造成影響。此次奉派赴美國研習「火力電廠氮氧化物排放對大氣中臭氧濃度關聯性評估技術」，經由 Washington Group International 公司及 PG&E 公司所安排之行程，對於光化反應、Models-3 模式之內容、特性與應用技術及氮氧化物排放管制技術有進一步之瞭解，獲益良多。

### 二、光化反應與臭氧形成之關聯性

對於臭氧的管制，不似管制二氧化硫等惰性污染物，祇要從污染源減少硫氧化物排放量著手，即可獲得顯著的成效，主要是因為臭氧的形成涉及大氣中複雜的光化反應。

在上層大氣中(50Km 以上)，高能光子( $\lambda < 0.2 \mu m$ )撞擊分子氧，有如下反應



結果於該區域氧氣幾乎僅以氧原子 O 存在。在較低高度的大氣中氧原子會引起許多反應，其中有二個主要的反應，一為  $\text{O}_2$  的重組成，另一個更為重要的反應，則是與  $\text{O}_2$  結合形成臭氧  $\text{O}_3$ ，根據下列反應：



其中 M 是任何可接受能量之第三物體，臭氧與波長  $0.2 \sim 0.29 \mu\text{m}$  的太陽輻射行光化作用可再解離成  $\text{O}_2$  及 O。



結果臭氧在地表上空形成，臭氧濃度最高之區域在平流層的較低層，離地面約 20 到 30 公里，是為臭氧層，臭氧層具有吸收太陽輻射中大部分紫外線，屏蔽地球表面生物不受紫外線傷害之功能。

靠近地面大氣中臭氧之合成並非經由反應(a)與(b)，由反應式(a)所為之  $\text{O}_2$  光分解需要  $0.2 \mu\text{m}$  範圍的太陽能。然而，小於  $0.29 \mu\text{m}$  之太陽輻射不會到達對流層頂(距地面 10 公里)，因其經同溫層時與臭氧反應而被大量地去除了，因此在較低大氣層的臭氧是由其他機制所生成，其形成通常認係二氧化氮光分解循環之故。

二氧化氮具有高度之光化反應性，對於小於  $0.38 \mu\text{m}$  之太陽輻射，其分解反應式為：



以上三個反應式反應均非常迅速，其全反應將維持光穩定狀

態(Photostationary State), 穩定態臭氧濃度為：

$$[\text{O}_3] = \frac{K1 [\text{NO}_2]}{K3 [\text{NO}]} \quad (\text{g})$$

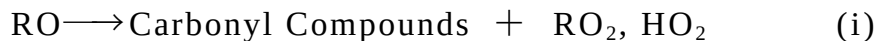
由上式可以看出，在理論上不考慮其它污染物作用時，臭氧平衡濃度將與 $[\text{NO}_2]/[\text{NO}]$ 之比例成正比。

實際大氣環境中則因碳氫化合物加入破壞了光解循環，而增加大氣光化反應的複雜性。由臭氧光解所產生的氫氧基(OH: Hydroxyl radical)因反應活性極強，會攻擊碳氫化合物產生許多烷基過氧基( $\text{RO}_2$ : Alkylperoxy radical)。

$$\lambda < 315\text{nm}$$



烷基過氧基將 NO 氧化成  $\text{NO}_2$ ，同時生成烷氧基( $\text{RO}$ : Alkoxy radical)，烷氧基再經由一系列反應形成碳醯基化合物(Carbonyl compounds)和其它的過氧基(Peroxy radical)：



而碳醯基化合物(如醛、酮)能進一步光解形成烷基過氧基



經由(h)式 (k)式所構成的連鎖反應不斷循環直到所有碳氫化合物均反應成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  為止，以上反應過程中的  $\text{RO}_2$  及  $\text{HO}_2$  均會

與  $O_3$  競爭  $NO$ ，並將  $NO$  氧化成  $NO_2$ ，而導致臭氧濃度的累積。

### 三、美國環保署研發之臭氧空氣品質模式回顧

美國環保署為有效管理臭氧空氣品質，贊助了一系列臭氧空氣品質模式研發工作，自第一代的 Lagrangian Box Models，到第二代 Eulerian Grid Models，以至新近發展推出的第三代 Air Quality Modeling System (Models-3)。茲將歷代臭氧模式說明如下：

#### (一)第一代 Lagrangian Box Models (1970s 1980s)

第一代臭氧模式為以 Lagrangian Approach 方式考量的箱模式(Box Model)，此類模式相當簡化，主要是假設污染物在箱中立即且均勻地混合，箱的體積是由都市表面積和混合層高度所決定，箱受水平風場推動，沿著箱行進軌跡，沿途有污染物排入、逸入、移除及氣象因素變化，配合移動座標系統，模擬氣團體積變化及其內部污染物之物理化學過程，理論架構如圖 1。

箱模式以 EKMA 為代表，在發展出具高執行力電腦平台之前的 1970 年代到 1980 年代，EKMA 模式使用相當廣泛。

#### (二)第二代 Eulerian Grid Models (1980s 1990s)

第二代臭氧模式是按 Eulerian Approach 方式，以場(field)的觀念來推估大氣中臭氧行為的網格模式(Grid Model)，此類模式乃依所需之時空解析度與初始值之分佈條件，將空間分割成許多二維或三維的網格，應用數值方法解基本擴散方程式所衍生之聯立方程組，以模擬大氣環境中污染物濃度之時空分佈情形，理論架構如圖 2。

網格模式主要使用於 1980 年代、1990 年代，以 UAM、ROM 及 RADM 模式為代表。



箱模式為最簡易的數值模式，其優點為模擬結果可與煙霧室(Smog chamber)實驗相驗證，有助於確定數值模擬光化反應的可信度，同時可瞭解整個區域內質量平衡關係，以決定污染物排放，初始濃度及傳入、流出之空氣污染物對一區域空氣品質的貢獻，作為評估光化煙霧污染管制策略之用，其缺點是缺乏空間解析度，不適於污染物排放變化型態重要的區域。隨著基本資料的擴張，箱模式再進展為軌跡模式，軌跡模式係依據箱模式的理念，並考慮污染物排放源分佈、風場特性及氣象因素變異等影響所發展的模式，軌跡模式具箱模式之優點，且具有較高的空間解析度，但因如立即且均勻地混合、空氣柱不變形等皆屬基本假設，故軌跡模式仍具許多缺點和限制。最複雜的模式是三維網格模式，可提供區域上三維濃度分佈預測，此種模式需大量的輸入數據，模式結構相當複雜，執行上得考慮可靠性與即時性等問題。第一代及第二次臭氧模式比較如表 1。

### (三)第三代 Air Quality Model (1990s – 2000s)

根據 UAM、ROM 及 RADM 模式使用經驗，美國環保署認為要達到環境立法及研究溝通兩項功能，必須發展出更具決策分析、更方便使用的模式系統，乃於 1998 年研發推出第三代的臭氧模式 Models-3。

Models-3 是具整體大氣(One Atmosphere)觀念的模式，能就環境整體考量，具經濟效益，亦是一種“Open Access Community Modeling”的模式，方便科學家與決策者連繫溝通，同時能與具高執行能力的軟硬體電腦技術相結合，使 Models-3 更具模組化、彈性化及擴充能力，充份滿足使用者從事環境研究議題的需求。

## 四、臭氧空氣品質模式(Models-3)應用於電廠對環境臭氧影響之評估技

## 術

評估電廠氮氧化物排放對環境臭氧影響，最常使用的工具就是臭氧空氣品質模式，茲謹就目前美國環保署所研發之第三代臭氧空氣品質模式 Models-3 之特性及模擬應用介紹如下：

### (一)Models-3 模式簡介

美國環保署為因應日趨嚴重的空氣污染問題，於 1998 年 6 月研發成 Models-3 三維空氣品質模式，Models-3 為 Thirrd-Generation Air Quality Modeling System 之通稱，係美國 EPA 為系統化各種模擬分析複雜之大氣物理，化學程序的模式，以應用於環評及決策分析而發展之系統。

Models-3 的核心稱為 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System，因而亦可通稱為 CMAQ 模式。CMAQ 最初設計的目的在於將複雜的空氣污染情況如對流層的臭氧、PM、毒化物、酸沈降及能見度等問題綜合處理。此外，CMAQ 亦設計為多層次網格模式。所謂多層次網格即是將模擬的區域分成大小不同的網格範圍來分別模擬，與 urban air quality 或 regional air quality 並不相同。Models-3 使用存取介面甚為快速並且不易造成資料誤判的 I/O API 介面進行資料存取，以使模式具有未來擴充性與資料準確性。另外，並以 cvs 模組進行程式開發，使得 Models-3 可以藉由不同使用者的參數設定來編譯執行檔，以符合使用者個人需求的 Models-3 版本。同時，Models-3 為三維空氣品質模式，並且藉由加掛特殊模組，可以同時處理氣態（諸如臭氧、PAN 等物種）與固態污染物（如酸性氣膠、銨鹽等物種）的問題。簡而言之，Models-3 具有下列特色：

- 具有未來擴充性與資料準確性，使用 NetCDF 或稱為 I/O API 介面：

為因應模式的未來性，美國環保署極力推動的第三版空氣品質模式（models-3）使用了 Models-3 Input/Output Application Program Interface (I/O API, 亦即所謂的 NetCDF 介面)的輸入輸出介面，此一介面的特色為可額外加入新的模組，並且可將各參數分別命名，在此介面下增加新的模組將不用重新改寫來源檔。例如為研究電廠排放對於環境中臭氧濃度的影響所使用的模組中並未加入衍生性氣膠的模組，而為了增加衍生性氣膠模組時，在 Models-3 中僅需使用 Models-3 的內建功能，於一系列的模組中增加一個氣膠模組，即可進行臭氧與氣膠同時模擬的模式核心，因而具備了未來新增新模組的擴充性。

➤ 適合多人使用的平台：

由於 Models-3 使用了目前極為盛行的 CVS (Concurrent Version System)程式進行模式的開發，CVS 可以在同一部機器上以同一組 source code 進行不同參數的可執行檔編譯，此一特色使得 Models-3 在工作站平台中，更加容易以個人化或者特殊計畫的需求來加以編譯模式。

➤ 多層次網格模擬 (Multi-scale)：

如前所述，Models-3 為一三維的空氣品質模式 (3-D Air Quality Model)，屬於網格模式 (Grid model) 的一種，此網格模式的特色為使用了多層次網格 (Multi-scale)，如圖 3 所示，圖 3 為 Models-3 預設的模擬區域，主要的模擬區域為最內層的 D4 區，其網格為 4\*4km，而 D3 網格則改為 12\*12km，至於 D4 區域的邊界濃度之取得則以 D3 模擬之結果代入，至於 D2 則網格大小為 36\*36km，D3 網格邊界濃度則以 D2 模擬之結果代入。基本上，多層次網格的大小，以 1:3 的方式配置，例如圖 3 中 D4 為 4 公里，則 D3 為 12 公里，D2 為 36 公里，而最大的 D1 為 108 公里，這也是 Models-3 的預設網格大小。

在傳統的模式模擬中，初始值與邊界值條件一直是模式準確度的重要限制因子之一，不過初始值與邊界值的訂定一直是具有相當困難與爭議的。然則使用多層次網格則可以避免此一困擾，由於主要的模擬區域為 D4 區，其範圍雖然不大，然而為求模式結果的準確性，常需要擴大模擬區間，不過若擴大的模擬區間中，網格仍以 4\*4km 大小進行模擬，則由於巨大的網格點將導致電腦計算時間的倍增，使模擬工作難以快速的完成，而缺乏模式的時效性。若使用多層次網格模式，則可將網格點簡化，以增加模式運算的速度，並且由於外層網格的邊界層與內層網格間，通常距離數百甚至數千公里以上，因而外層網格的邊界層設定對於內層網格的影響效應將降低，且由於外層網格經過兩三天模擬後的數據可作為內層網格的初始值，亦可增加模式的準確度，故可兼顧模擬時的 CPU 處理器時間及準確性。

➤ 僅適合 Sun 工作站進行模擬：

由於 Models-3 的主程式在 Sun 的工作站上進行開發，因此對於 Sun 具有最佳的支援度。在可自由下載的 Models-3 版本中，除非自行進行改版，否則該模式僅適合於 Sun 工作站主機上進行模擬之工作。

## 模式內容：

CMAQ 的模組中，主要可細分為三個模組，分別為：

- ✧ 氣象模組：MM5 → MCIP 轉換
- ✧ 排放源模組：預設為使用 MEPPS，亦可使用 SMOKE 模組
- ✧ 化學反應傳輸處理模組：CCTM

而各模組之間的相關性如圖 4 所示。

➤ MM5 氣象模組：

三維空氣品質模式中，最先需要模擬的為挑選之事件日的氣象資料，因而氣象資料的模擬為相當重要的一環。Models-3 所使用的

氣象資料為 MM5 氣象模式第二版所提供。舉凡模式所需要的網格經緯度資料、高層資料、垂直分層、土地利用型態、大氣壓力及雲霧資料等等，均由 MM5 模式所提供。不過需要特別留意的是，Models-3 本身並不提供 MM5 模擬的相關模組，亦即 MM5 為獨立於 Models-3 的一個模式，由於 Models-3 需要 MM5 來進行氣象資料的提供，因此在進行 Models-3 之前，需要先取得 MM5 的資料。在取得 MM5 資料後，以 Models-3 的 MCIP(Meteorology- Chemistry Interface Processor) 模組進行資料的格式轉換。

➤ **SOMKE 排放源模組：**

在 Models-3 的官方網站中，針對排放源的部分以 MEPPS(Models-3 Emission Processing and Projection System) 模組來進行，不過此一模組在 Sun 工作站上執行效率不彰，並需要昂貴的 SAS 及 Arc/Info 等軟體支援。最新版的排放量資料處理模組已於 2001 年 05 月釋出 (US-EPA 已於 2001 年 8 月釋出 SMOKE 的操作手冊)，稱為 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emission System)，這個排放量處理模組不但免費，並且已包含 SAS 與 Arc/Info 的功能在其中。

SMOKE 模式的特色為：此模式包含了固定源、移動源、面源及生物源的處理模組，可將排放源分成四種情況分別處理，此外，此模式支援 IDA (Inventory Data Analyzer) 格式，因而排放源前處理亦變的單純。由於臺灣地區使用的排放量資料庫 (TEDS4.2) 已將排放源分成點、線、面源，其中，移動源以面源的型態表示之，因此僅需以固定源、面源與生物源之資料型態進行排放量處理即可。

➤ **CCTM 模組：**

在氣象資料與排放庫資料模組處理完畢之後，便進入 Models-3 的核心 CMAQ 模組處理。CMAQ 中，主要包含下列數個模組：

1. 初始值 (Initial Condition: ICON) ;
2. 邊界值 (Boundary Condition: BCON) ;
3. 光解速率 (Photolysis module: JPROC) ;
4. 化學反應機制處理 (CMAQ Chemistry-Transport Module: CCTM)

初始值與邊界值條件因為模擬的狀況，可分為固定值與由外層網格提供的型態，通常固定值為最外層網格的輸入型態，至於內層網格則以外層的模擬結果帶入，以增加模式的準確度。

另外，在光解速率模組中，主要以緯度座標與季節進行乾淨天空的光解速率常數計算，至於雲程序則包含在 CCTM（化學反應機制）當中，亦即雲程序所造成的光解速率常數變化，將於 CCTM 進行時才開始計算。

在 CCTM 模組中，共包含有下列數種機制：

- ✧ 化學反應機制
- ✧ 傳輸機制
- ✧ 對流擴散機制
- ✧ 雲程序
- ✧ 氣膠模組
- ✧ Plume-in-grid 機制

因此，進行一次完整的 Models-3 模擬時，所需要的輸入資料計有：

- MM5 氣象資料
- 排放源資料 (TEDS4.2)
- 最外層網格之初始值與邊界值
- 光解速率常數 (由 Models-3 之 JPROC 模組提供)
- 模式編譯過程中，使用者設定參數

## 模式所需軟硬體設備

由於目前 stand alone 版本的 Models-3 僅適合在 Sun 的工作站上進行模式模擬，因而以下僅針對 Sun 工作站所需軟硬體設備進行說明：

### 硬體設備：

- System：Sun Ultra 60 Model 1360 system (or higher)；
- CPU：1X360-MHz UltraSPARC-II CPU (or higher, 最好是兩顆 CPU 以上較佳)；
- Hard Disk：18.2 GB of hard disk with SCSI interface X 2 (至少需要兩顆以上的硬碟，否則模式後續產生的資料將無法容納)；
- RAM：512 MB RAM (這是最低要求)；
- VGA：Creator 3D Graphics ；
- Others：tape device (一定要有一台磁帶機，不然資料一定沒辦法容納的下，因為一個 case 跑七天，含有三個 grid domain 就需要大概 10GB 的硬碟空間，所以一定要額外買這個設備！)。

### 軟體設備：

- OS (作業系統)：Sun 的 Solaris 2.7 或更高；
- Compiler：Sun 的 Fortran 90；
- 所需額外軟體：在 Models-3 執行過程當中，需要用到兩個軟體介面，分別為：(註：這兩個軟體是一定要安裝的)；
  1. NetCDF：Network Common Data Format 為一種高效率的存取介面，被廣泛的使用在科技資料處理上；
  2. CVS：Concurrent Versions System 主要使用於多人使用的工作平台上，可依照使用者不同的定義檔而編輯出適合個人的原始程式碼。
- 排放源處理軟體：Sparse Matrix Operator Kernel Emission

Modeling (SMOKE)是一套較為簡便的排放源處理軟體，透過加入污染源的日夜變化，而可得到較為合理的排放情況；

- Models-3 主程式：即是所謂的 Community Multi-scale Air Quality Model (CMAQ)，在主程式裡共包含了數個模組，大致上有：photolysis 模組(JPROC)、initial condition 模組(ICON)、boundary condition 模組(BCON)及 CMAQ Chemical-Transfer Model 模組(CCTM)；
- 圖形處理程式：US-EPA 提供多種圖形程式，較為簡便的為 Package for Analysis and Visualization of Environmental data (PAVE)。

上述的硬體需要自行採購，至於軟體部分，除 Sun 的 Solaris 作業系統與 fortran 90 編譯器之外，其餘 NetCDF、CVS、SMOKE、CMAQ 及 PAVE 均為共享軟體，可由網路上免費下載使用。

## (二)Models-3 模式之模擬應用

基本上，Models-3 可視為一個工具，主要用來作為環境污染的模擬工作的一項工具，因此，使用 Models-3 之前，使用者需要瞭解 Models-3 需要為環境作的模擬工作為何？以 Models-3 模式分析瞭解臭氧事件日中，電廠污染排放對於環境中臭氧的影響效應為何，首要的工作在於選出臭氧事件日；然後根據地理環境選出模式模擬的領域範圍，選出大致範圍之後，再以 MM5 模式進行所選擇範圍的氣象資料模擬，同時，並需要規劃出確切的網格資料（需要規劃出數層網格）；在取得氣象資料後，再來則是以 MM5 所界定的網格資料，將所需要模擬的領域內之細部排放源資料庫整合，藉由模式帶入網格化處理，以取得該領域範圍內的排放量資料庫；取得資料庫並轉化成為模式可視之檔案格式後，接下來則是經由計算光解速率常數與帶入最外層的初始值及邊界值條件後，實地進行網格模式的模擬。基本上，上述的



動作可依序分類如下：

#### 1. 篩選、分析事件日，並選出模擬範圍：

由於三維網格模式在運算上與資料量上，均甚為龐大，實在無法進行全年的分析，因而挑選適當的事件日則為必要的課題。目前在台灣地區較為嚴重的空氣污染可分為氣態的臭氧（光化進行中的產物）及固態的懸浮微粒（光化反應後的產物之一），這兩者在生成機制上與發生事件日的時間並不相同，由於需要研究電廠的排放對於周界空氣品質中臭氧濃度的影響，因而需要在高濃度臭氧的情況下進行模擬會較有意義。

決定所需要模擬的項目之後，再來則需要定義出模擬的領域範圍。挑選模擬領域時，最好包括模擬區域的下風處。並且由於需要知道加入電廠排放量之後，對於環境的衝擊，因此電廠上風處的領域範圍亦需要加大。

而在事件日時段的挑選上，事件日時段的挑選主要依據環保署在所需模擬區間的空氣品質測站監測資料，有一半以上的測站發生臭氧最大小時濃度超過 120 ppb 的法規標準，並且持續 3 天以上時，則可作為事件日。而由於在模式模擬中，通常需要讓模擬程式具有暖機的時間，因此決定的事件日可提前兩天左右進行氣象模擬，以增加模擬的準確度。此外，選擇的事件日期間必須有基礎的排放量資料庫才能進行模擬。

#### 2. 氣象模式模擬：

事件日與模擬領域決定後，接下來則需進行氣象模式 MM5 的模擬，由於氣象模擬是三維空氣品質模式的首要工作，因此需要較為嚴密的規劃，例如網格的切分、時間步階、高層資料分析等等。這些相關的資料在後續的處理當中均將使用到。而在氣象資料取得後，模式

的第一個工作即是將 MM5 資料以 MCIP 模組轉換成 I/O API 格式的資料檔案，這一個氣象資料檔案，將提供排放量資料庫中生物源的溫度函數計算、固定源的煙流效應計算、模式進行中的雲程序計算等等。

### 3. 排放量資料庫的取得：

Models-3 當中最重要的一部分即為氣象資料與排放量資料庫了，目前臺灣地區較為盛行的資料庫為 TEDS4.2 版，因此需要先取得這一版的資料，並進行初步的資料分析，以捨棄不合理的數據（以模式分析的方法）。排放量資料庫分析完畢後，需要將此資料庫轉化成為 Models-3 所需要的 I/O API 格式，但在轉化的過程中，由於不同的模擬機制將導致不同的 VOCs 物種，因而需要先選擇光化反應模擬機制（目前有 CBIV 及 RADM2 兩種機制可供選擇）。

### 4. 排放量資料庫轉化：

這是 Models-3 處理流程中最為複雜的部分，由於 TEDS 已經將排放量資料庫分類為：固定源、移動源與面源，另外，移動源呈現的方式為網格資料，因此所需要轉化的格式僅有固定源、面源及生物源。本計畫使用 SMOKE 作為排放源的轉化模式，在此模式中，所有的排放量原始資料需先轉化成 IDA 格式後，方能進行 I/O API 的轉化。另外，較為重要的地方在於生物源的處理，由於 SMOKE 生物源使用 Biogenic Emission Inventory System Version 2 (BEIS2.0) 作為生物源處理方法，在此方法下，每一種土地利用型態（或可說為植被型態）具有不同的排放因子，然則此排放因子量測均在國外，於臺灣的亞熱帶氣候是否相同則仍須評估，因此這一部分所需要進行的假設與比對就甚為重要。

在分別進行完不同的排放源之後，最後將所有的資料進行整合即可得到最終的三維排放料資料庫。

## 5. 模式前處理 (ICON、BCON、JPROC 等模組)

在取得了 MM5 資料，並轉換成為 I/O API 格式，並將排放量資料庫處理完畢後，再來就是模式的前處理。在這一階段的處理中，需要特別留意每一個模組所選用的機制，因為同一個案子中，所有模組的機制均需相同，若選擇錯誤的話，將導致模式無法執行的窘境。

另外，在選擇最外層網格的初始值與邊界值條件中，需要留意網格所在的地點為何，目前，通常最外層網格均座落於海面上，因此可以文獻中海面上的濃度值作為 BC 與 IC 值。

## 6. 模式機制選擇與實際模擬：

在設定完所有的前處理後，再來則是實地模擬的部分，在這一部分中，需要注意的是使用者介面的參數甚多。因為 Models-3 本身內建相當多的模組可供選擇，甚且亦提供使用者自動模組（前提之下是使用者必須先自訂模組內容），而由於不同的模組之間可能具有某些程度的誤差，因此需要慎選模組。

## 7. 資料解析：

在模式進行完畢之後，最重要的即是分析數據了。數據的分析可使用最簡便的 ncdump 來讀取，然而由於 Models-3 的資料量實在太大了，一般 PC 或人工根本無法負荷，因此最佳的方法即是以可支援 I/O API 檔案格式的圖形軟體來進行資料的解析。

基本上，整個 CMAQ 模式的運作過程可以圖 6 表示之，欲進行 CMAQ 時需要讀入氣象資料與排放庫資料，而在 CMAQ 中選擇化學機制、對流擴散傳送等機制、及氣膠機制等等。而在圖 7 中，可說明 BCON、ICON、JPROC 等等與 CMAQ 之相關性，其中 LUPROC 為土地利用型態，而 ECIP 為使用 MEPPS 排放庫處理模組所需要的中間處

理模組。

另外，在實際進行 Models-3 的模擬時，每一個模組均需要進行兩個主要的步驟，分別是（1）使用者設定參數後，以 Fortran 90 進行編譯；（2）將步驟 1 所產生的執行檔進行模擬。

## 五、電力設施氮氧化物減量控制技術

電力設施燃燒化石燃料排放的氮氧化物係形成臭氧的重要前驅物質，由於臭氧形成原因非常複雜，電廠高煙囪排放的氮氧化物對於當地環境臭氧濃度的影響程度，需視氣象、地形及污染源排放狀況而定，與氮氧化物排放量多寡並非呈線性關係，然而要降低電廠對環境臭氧影響(考量長程傳送臭氧潛勢)的最終手段，電廠方面仍是要從氮氧化物減量著手。

氮氧化物的生成可分為兩個機制，一是高溫轉化的氮氧化物(Thermal NO<sub>x</sub>)，另一是燃料轉化的氮氧化物(Fuel NO<sub>x</sub>)，在燃料轉化的氮氧化物中，有一部份是燃料結合氮在富燃料的環境下所氧化生成的，另稱為瞬間轉化的氮氧化物(Prompt NO<sub>x</sub>)。根據氮氧化物的形成機制，氮氧化物減量控制可由燃料選擇、燃燒控制及煙氣處理等三個途徑著手。

### 1. 燃料選擇

燃料中的氮不像燃煤中的硫可以很容易地先行去除一部份，所以最直接也是最經濟的方法，就是選擇含氮量最少的燃料。各種燃料之 FBN 值約為煤：1.5%，重油：0.8%，柴油：0.2%，一般垃圾：0.3%，木材：0.1%，天然氣：微量。

### 2. 燃燒控制

#### (1) 低氮氧化物燃燒器

此燃燒器即利用燃燒初期，降低燃料周圍有效的氧氣量來減少氮氧化物的生成，低氮氧化物燃燒器已由各製造廠商依據氧氣濃度的減低、火焰最高溫度的降低、氣體在高溫區域中滯留時間之短縮等原理，開發出各種不同的型式，目前已有相當多的使用實績。採用低氮氧化物燃燒器為目前最直接而有效以燃燒控制方式降低氮氧化物濃度之方法，在燃煤鍋爐可降低氮氧化物濃度達 40～60%左右，對於燃油或燃氣鍋爐而言，則可降低氮氧化物濃度達 40～85%。

#### (2)階段式燃燒法

此法係將大約 15～30%燃燒空氣從主燃燒器移至其上方的火上空氣口噴入爐內，即是利用低量燃燒空氣與燃料在主燃燒區燃燒，可限制有效的氧與燃料的氮產生氮氧化物，而從主燃燒區出來的煙氣與燃料流經第二燃燒區時，則由火上空氣口提供剩餘的燃燒空氣供完全燃燒之用，此法可降低氮氧化物排放量 30～50%。

#### (3)煙氣再循環法

煙氣再循環法係從主燃燒器分出一小部份燃料，經上部燃燒噴口混合部份鍋爐排出煙氣(約 10～30%之煙氣量)再噴入爐內，此係利用在缺氧狀況下燃燒達到高溫時，可自一氧化氮分子中脫去氧氣，此法約可減少氮氧化物排放量 30～50%。

#### (4)爐膛噴水或噴蒸汽法

此法係在燃燒火焰中注入水或蒸汽，利用水或蒸汽之潛熱增加熱容量，以降低火焰溫度，減少氮氧化物之生成；此法主要在抑制熱氮氧化物的產生，對控制燃料氮氧化物並無效果，其可降低氮氧化物濃度之最高效率為 70%，但卻會降低鍋爐之效率，就節省能源的觀點而言並不經濟，且所注入

水之水質要求嚴格，目前此法主要應用在降低氣渦輪機所產生之氮氧化物。

事實上，從改善燃燒方式來控制氮氧化物確為一實際可行的方法，且其設備費用便宜，操作及維護費用低，亦無廢棄物處置之困擾，惟其去除效率有一定的極限，且燃燒亦不易控制完全，一般其燃燒控制的濃度範圍在 220~240ppm，因此若要達到更嚴格的氮氧化物排放要求，則須再配合裝設適當的煙氣脫硝設備。

### 3.煙氣脫硝設備

#### (1)選擇性觸媒還原法(SCR)

SCR 為目前各種氮氧化物控制方法中，效率最高的一種方式，發展至今其技術已相當成熟，並有十多年的成功商轉經驗；此法係將氨注入煙道與煙氣混合，藉著觸媒將氮氧化物還原成氮氣及水蒸汽，其適用溫度在 250~400℃之間，溫度若低於 250℃，易形成亞硫酸銨，造成下游設備結垢與腐蝕，溫度若高於 400℃，則不利於觸媒之壽命，此法亦須避免處理高煙塵之煙氣。

目前 SCR 已有良好的運轉實績，其氮氧化物去除率可高達 90%以上，是一種高效率的脫硝設備，目前已被各先進國家所採用，然其主要缺點為設備造價昂貴，觸媒更換費用高，操作及維護費用亦高，一般觸媒之更換年限視煙氣成份而定，約為 2~5 年，此外亦有氨逸失之缺點。

#### (2)選擇性無觸媒還原法(SNCR)

此法又稱為高溫非觸媒還原法，原理上與選擇性觸媒還原法相同，亦藉氨(亦可使用尿素)與氮氧化物反應還原氮氣和水蒸汽，只是此法無觸媒作用，故須在高溫下反應，其理想溫度在 926~1038℃，在反應過程中反應劑必須與煙氣充

分混合，並需要有足夠反應時間，氨之注入通常是以氣態注入煙氣中，而尿素則是以液態噴霧方式注入，由於需要蒸發時間，因此尿素所需之反應時間較長。另外需控制氨之逸失量，以防止殘留未反應之氨與煙氣中之三氧化硫反應形成硫酸銨與硫酸氫銨，附著於下游之管路或設備上造成腐蝕，其中硫酸氫銨為一黏稠高腐蝕性之化合物，對設備傷害極大。SNCR 的氮氧化物去除效率可達 60%。

## 參、感想與建議

一般而言都會區形成臭氧的主要先驅物質為氮氧化物( $\text{NO}_x$ )及非甲烷碳氫化合物(NMHC)，而接近地面之 $\text{NO}_x$ 及NMHC主要係來自移動車輛及化工業的排放。至於位處海濱之火力發電廠其所排放之 $\text{NO}_x$ 經由高煙囪排放擴散，污染物於大氣中之傳送過程以及其與接近地面排放之VOC反應成臭氧的程度，迄今似未見完整之研究成果分析報告，惟根據文獻顯示近地污染源排放之 $\text{NO}_x$ 及VOC應為產生臭氧之主要來源。根據美國模式使用經驗，都會區臭氧濃度與氮氧化物／非甲烷碳氫化合物比例有關，且並非呈線性變化關係（如圖8），若僅單方面管制氮氧化物或非甲烷碳氫化合物，有可能反而對臭氧空氣品質造成負面效果。臭氧之影響程度與當地的氣象、地形與污染源排放特性密切相關，欲瞭解火力電廠高煙囪排放之 $\text{NO}_x$ 對環境臭氧之影響程度暨進而擬訂對策，必須藉由如Models-3三維高解析度空氣品質模式進行模擬分析。鑒於Models-3模式中最重要之氣象資料前處理及排放量資料庫轉化等作業至為複雜，本公司須投注相當之人力、時間及增添軟硬體設備，始得順利純熟的展開模式應用工作，如能結合國內學術研究機構或環保主管機關之研究人力及設備，除可減少本公司投注之人力經費外，或更有助於早日釐清火力電廠氮氧化物排放對環境臭氧的影響程度。



表 1、美國環保署第一代及第二代臭氧空氣品質模式

| Features of USEPA's first- and second-generation Air Quality Models |                                  |                                     |                               |                                   |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                     | ROM                              | RADM                                | UAM                           | OZIPM/EKMA                        |
| Model Structure                                                     | 3-D Eulerian Grid Model          | 3-D Eulerian Grid Model             | 3-D Eulerian Grid Model       | Lagrangian Trajectory (Box) Model |
| Simulation Objective                                                | Regional oxidants O <sub>3</sub> | Regional oxidants & acid deposition | Urban oxidants O <sub>3</sub> | Urban oxidants O <sub>3</sub>     |
| Grid Resolution                                                     | ~18 km                           | 20 ~ 80 km                          | 4 ~ 8 km                      | 1-D box                           |
| Vertical Structure                                                  | 3 layers                         | 6 ~ 15 layers<br>σ-coordinate       | 5 ~ 8 layers                  | Box height change with PBL        |
| Chemistry Mechanism                                                 | CB4                              | RADM2                               | CB4                           | CB4, RADM2                        |
| Meteorological Inputs                                               | Objective analysis               | MM4                                 | DWM, SAIMM                    | Local observation                 |
| Advection Scheme                                                    | Lagrangian polynomial scheme     | Smolarkiewicz scheme                | Smolarkiewicz scheme          | Advection along wind trajectory   |
| Family Models                                                       |                                  | SAQM, TAQM                          | UAM-V                         |                                   |

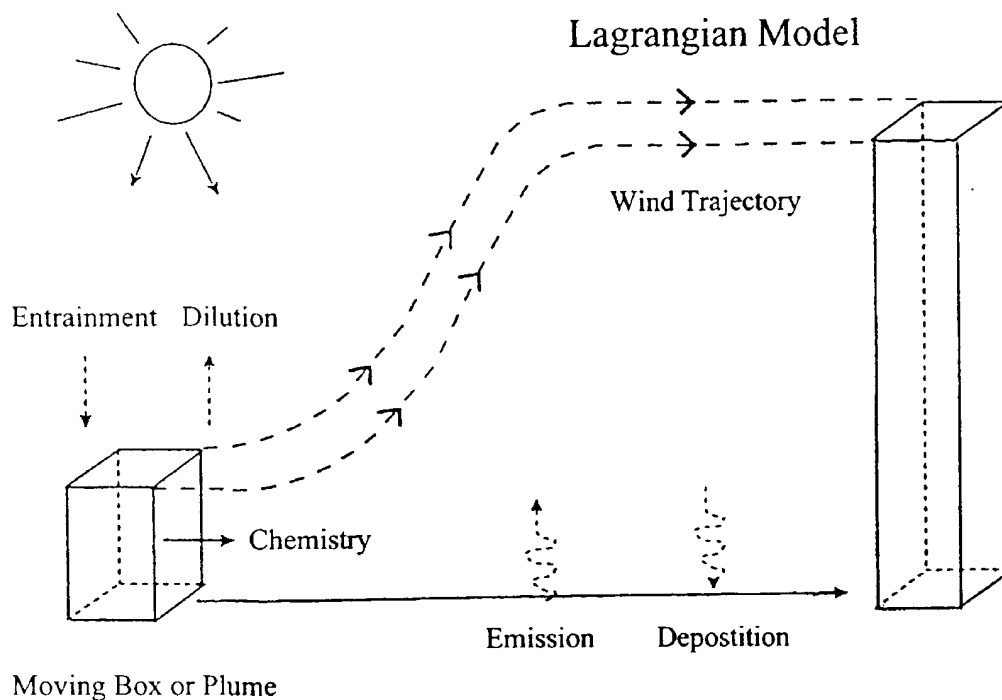


圖 1、Lagrangian Box Models 架構示意圖

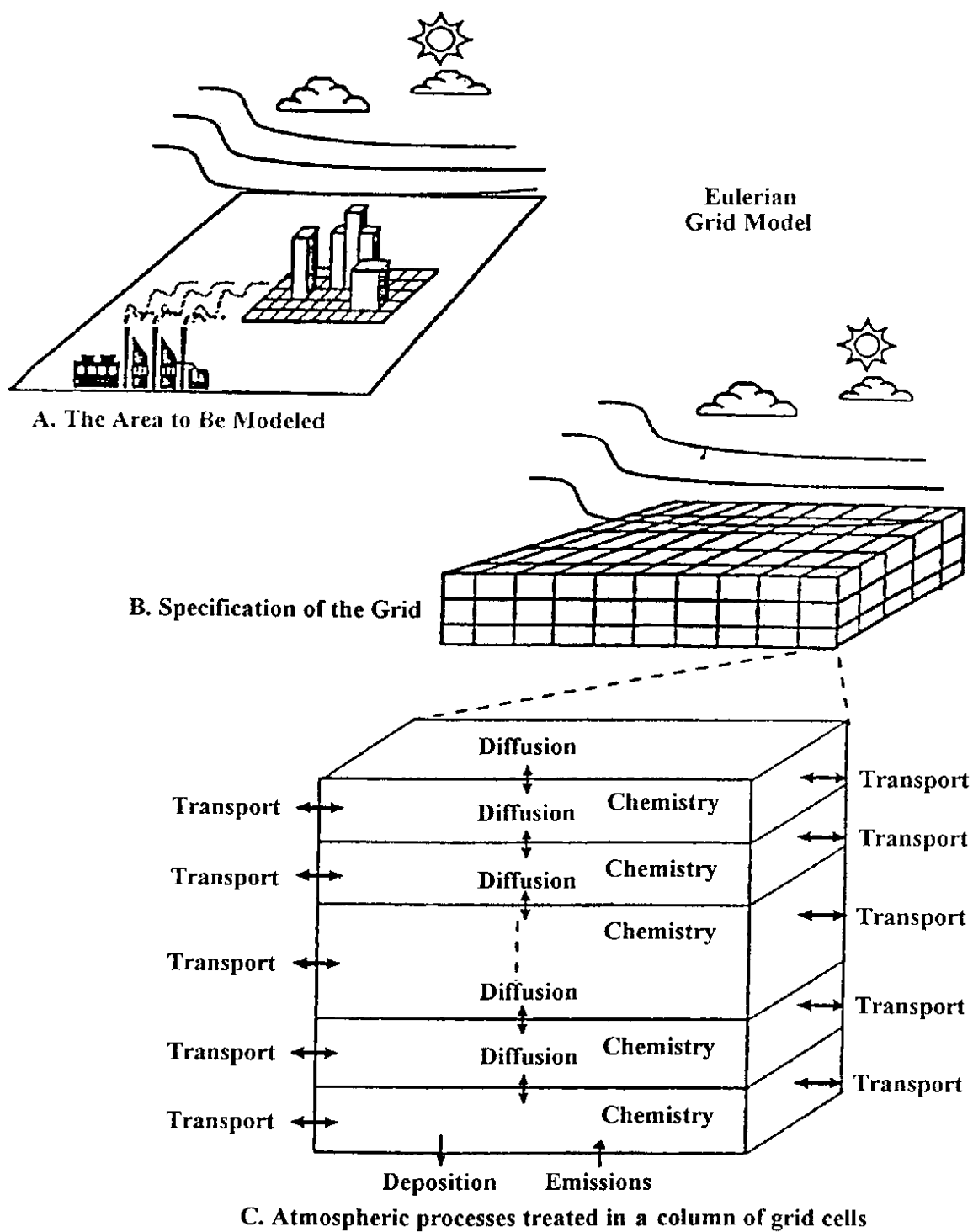
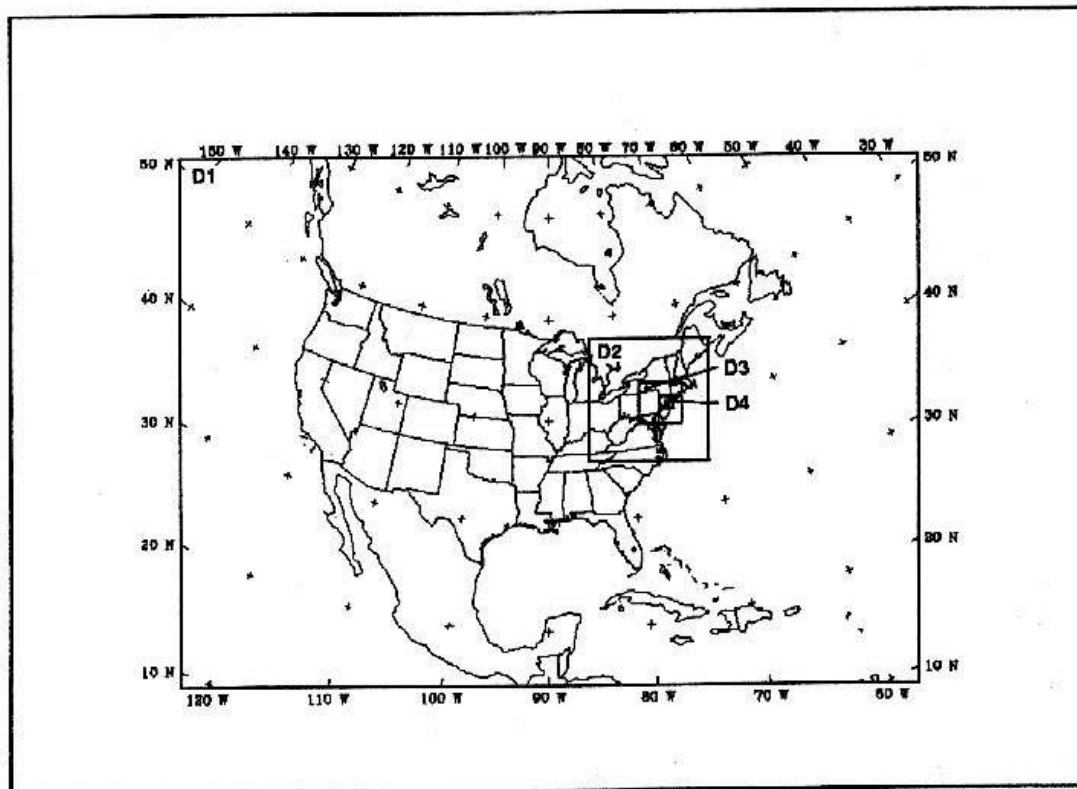


圖 2、Eulerian Grid Models 架構示意圖



All Four MM5 Domains

圖 3、Models-3 多層次網格化示意圖。

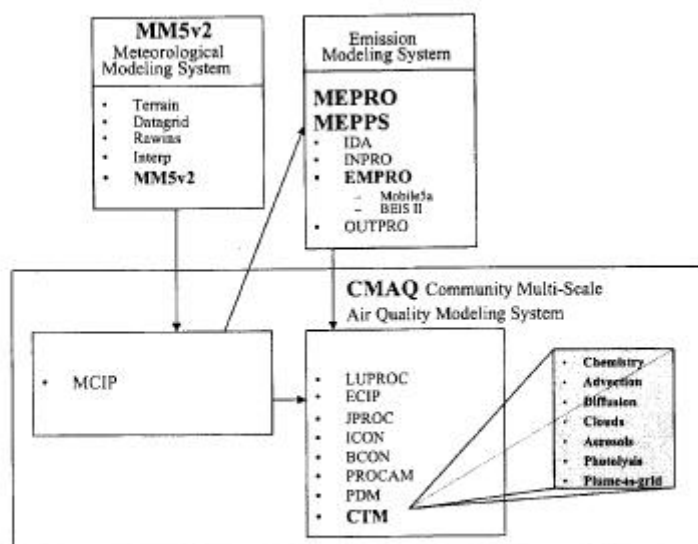


圖 4、Models-3 的主要模組相關性

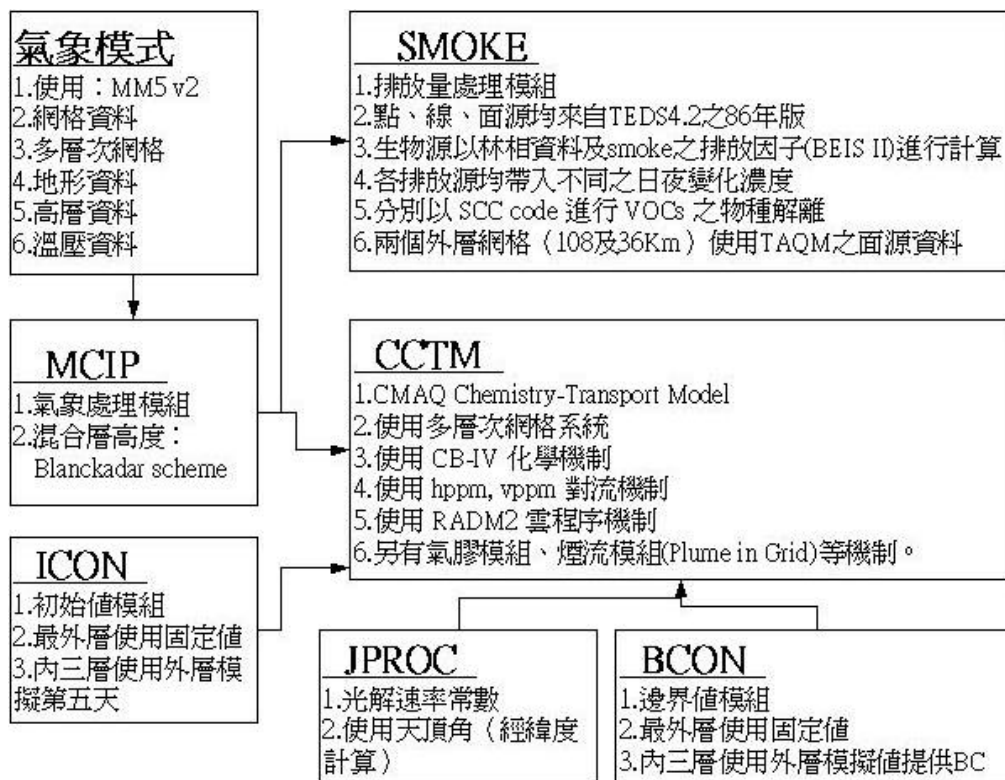


圖 5、Models-3 的處理模組相關性

### 模式規劃流程

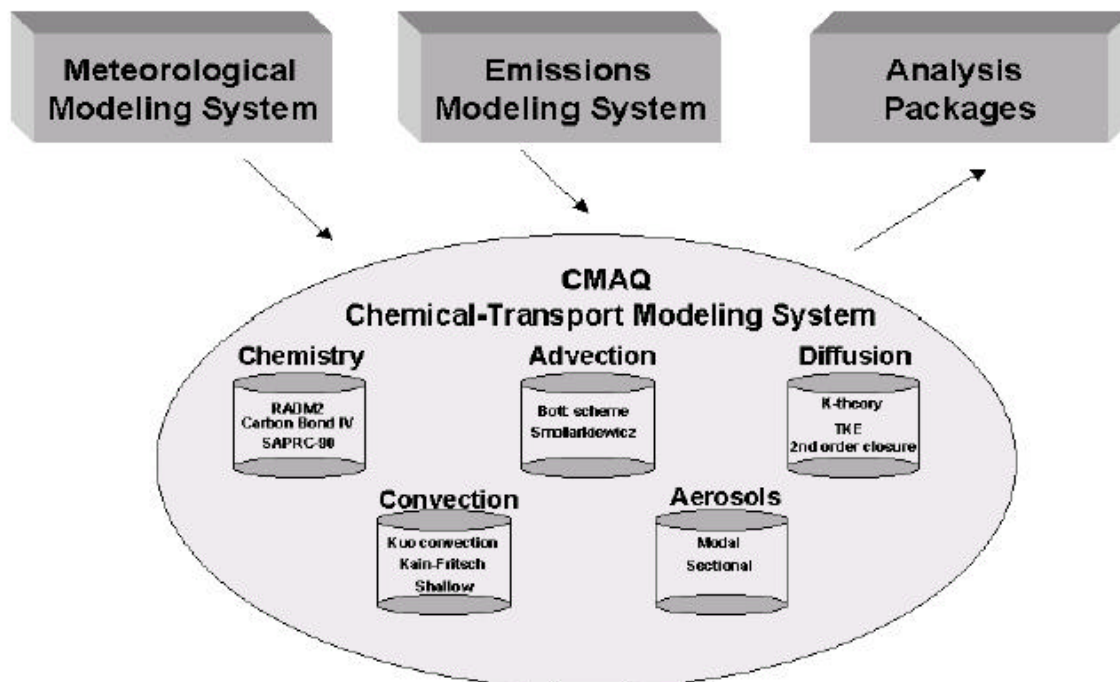


圖 6、CMAQ 模式的運作流程與模組之配置

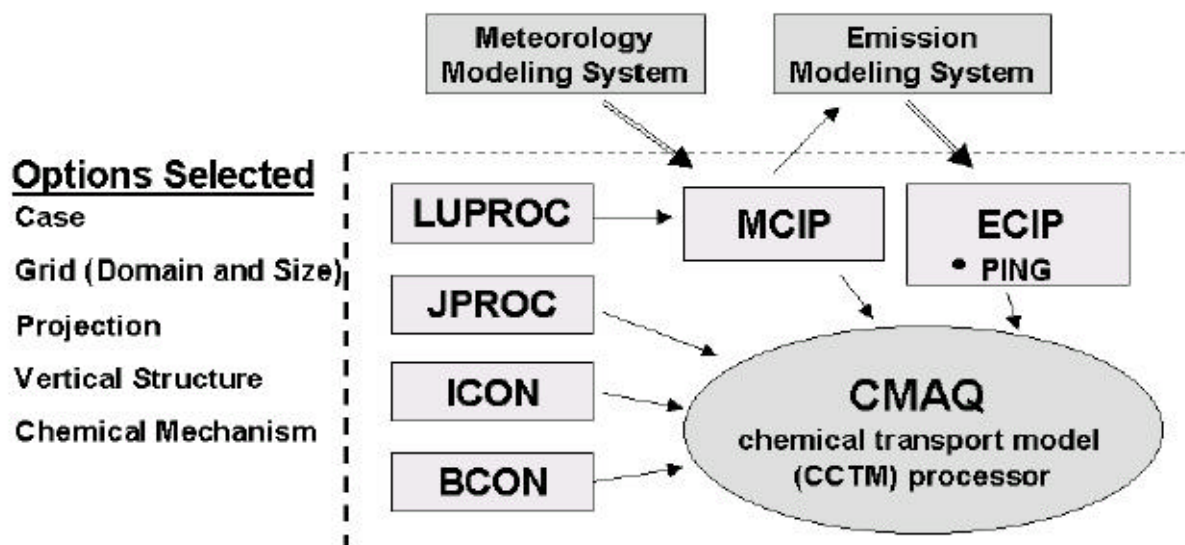


圖 7、各模組之間的相關性

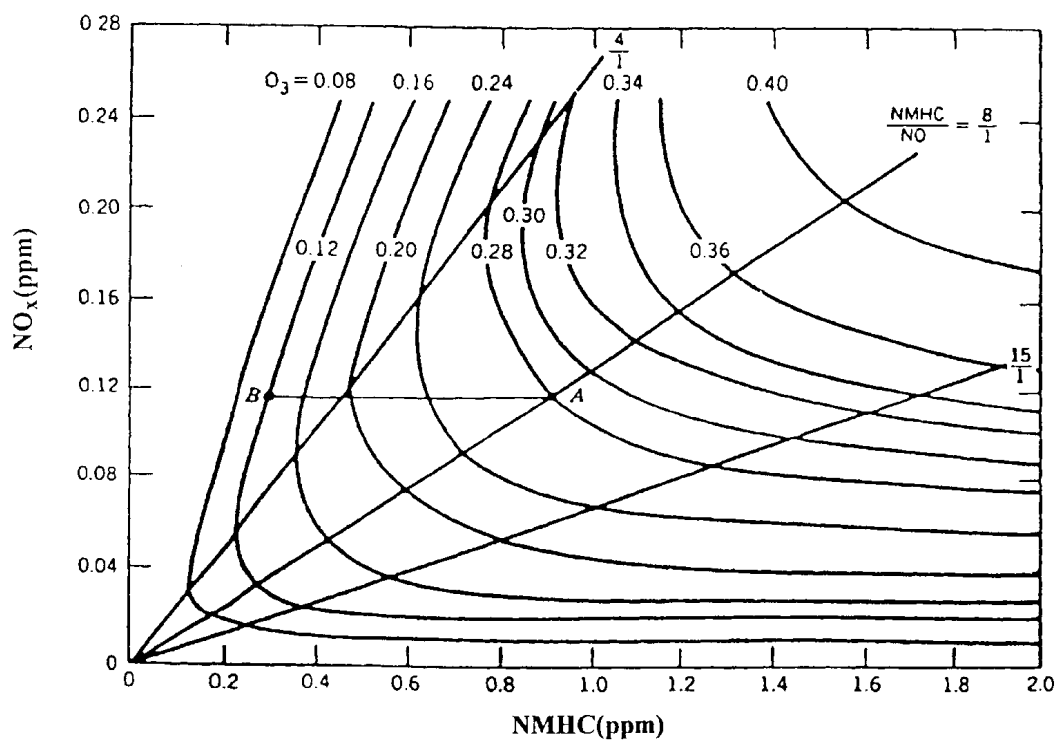


圖 8、EKMA/OZIPM 臭氧等濃度圖例