

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

半導體廠房無塵室煙控系統設計

The Study of the Smoke Control System Design for a Semiconductor  
Facility

研究生：陳詠翔

指導教授：陳俊勳 教授

中華民國一〇一年六月

## 摘要

本論文主要可分為兩個部份。第一部份為利用火災模擬軟體 FDS，針對無塵室內的煙控系統進行模擬分析，由於目前在最先進的十二吋晶圓廠因無塵室屋頂必須架設運送軌道來搬運晶圓，此軌道設計會穿過防煙垂壁使防煙垂壁效用受到破壞，且無塵室內部下吹式空調設計於火災發生時會影響煙流的流動，可能無法有效的阻止煙流，故本論文首先針對無防煙垂壁對於無塵室內煙流流場之影響進行探討。由於無塵室上方有廣大的區域（SAC 區）可用來蓄煙，以及 FFU 濾網於火災發生時會受到高溫的影響而燒破，使煙流往 SAC 區竄升，故本論文利用以上特性進行設計，利用 SAC 區蓄煙，並於該區增設排煙口進行排煙，以減緩煙流於主要工作區（FAB 區）的沉積與擴散。此外，為了於火災發生時，可以將煙流侷限於起火區域內，使煙流無法隨無塵室內部循環流場擴散，故本論文利用無塵室內部循環式空調設計造成起火點附近之高低壓力差，分別以將煙流所流至之區劃風機關閉、降載至 20% 與反轉進行設計，並利用不同大小之火載量進行模擬，分析該設計於大火及小火（不足以使濾網產生燒破現象）的情況下，煙流的控制效果。由模擬結果分析後發現以下結論：(1) 火災所產生之煙流將受無塵室內部循環流場及防煙垂壁之開口影響，而直接往四周擴散，故防煙垂壁無法發揮效用。(2) 將風機關閉與反轉之設計於大火及小火的情況下皆可將煙流侷限於起火點鄰近的區劃內，而將風速降載至 20% 之設計於大火的情況下無法抑制煙流的擴散。(3) 將風機關閉與反轉之煙控效果相近，但欲使煙流所流至之區劃風機可

以反轉，須將所有風機進行加工設定，故建議以關閉之設定進行煙控為較好的選擇。

第二部份為利用 Simulex、FDS+Evac 及建築物避難安全檢證技術手冊計算人員於無塵室火場中所需的避難時間進行比較，探討各計算方法之差異性，並與煙層下降的速度進行比較。由模擬結果分析後發現以下結論：(1) Simulex、FDS+Evac 及建築物避難安全檢證技術手冊計算結果分別為 176 秒、180 秒及 448 秒。(1) 建築物避難安全檢證技術手冊在計算人員抵達逃生口的時間中，僅利用移動距離除以人員移動速度，此方法無法估量人員於火場中可能因為恐慌而產生推擠的現象，或不熟悉環境而延長的逃生時間。且該技術手冊以樓地板面積估算人員避難開始時間，而由於無塵室內樓地板面積達  $11402\text{m}^2$ ，故人員開始避難時間為 394 秒，占總逃生時間（448 秒）的 88%，不符合實際狀況。(2) FDS+Evac 將逃生人員視為粒子，利用建立 outflow 的流場決定人員逃生的方向，在結構較為複雜的空間中，易發生寬度不足以通過的通道，仍被視為逃生路徑，使逃生人員於該通道入口卡住，大幅的拖延了逃生時間，也不符合實際狀況。(3) 利用 Simulex 模擬人員避難所需時間，並以偵測器探測時間 30 秒與人員反應時間 60 秒，共 90 秒做為人員開始避難時間，為較保守且符合實際狀況的方法。

關鍵字：火災模擬、FDS+Evac、無塵室、Simulex

The Study of the Smoke Control System Design for a  
Semiconductor Facility

Student : Yong-Siang Chen

Advisor : Chiun-Hsun Chen

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

## **ABSTRACT**

This study is divided into two parts. The simulation of smoke control system in clean room by FDS is provided in the first part. It is necessary to setup the automated guided vehicle to carry the wafer on the roof of the most advanced 12-inch wafer facility clean room. Such this design may not discourage the smoke flow effectively due to the destruction of the smoke screen. Besides, the vertical laminar air flow type design also has influences on the smoke flow while fire accident happened. The first work of this part supplies the influence on smoke screen in clean room. The smoke flow arises to supply air chamber (SAC) because the smoke storages in a large space and the filters are broken due to the high temperature during fire accident. The extra exhaust port are installed on SAC to reduce the effects of smoke flow in FAB. This study utilizes the design of FFU's air velocity and makes the pressure differences near the origin of fire in order to gather the smoke flow in the firing range. The simulation includes the 100%-off, 80%-off and reverse of FFU's air velocity under the big fire and small fire (FFU will not be damaged). The results show that: (1) The smoke screen cannot play a major role while the flow field, generated from the fire accident, diffuses to surroundings due to the effect of inner cyclic flow field and the opening of smoking screen. (2) The design of shut down and reverse the FFU in situation of big and small fire, can restrict smoke flow in the zones adjacent to origin

of fire. (3) The effect between shut down and reverse FFU is similar, but the FFU should be processed that it can reverse operate to guide the smoke flow to the zones. Therefore, we suggest shut down the FFU is better chose for smoke control.

In the second part, to compare and investigate the evacuation time, difference of calculation methodologies and descent velocity of smoke layer by Simulex, FDS+Evac and Handbook of Verification Method for Building Fire Egress Safety. The results show that: (1) The calculated results of Simulex, FDS+Evac and Handbook of Verification Method for Building Fire Egress Safety are 176, 180, 448 seconds respectively (2) Handbook of Verification Method for Building Fire Egress Safety only according to the ratio of staff moving distance and moving speed. This methodology cannot estimate the phenomenon of jostle which is due to frightened or unfamiliar to environment that postpone the evacuation time. Moreover, this manual utilizes the floor area to estimate the starting time of staff evacuation. However, the area of clean room is 11402 m<sup>2</sup>, so the starting time of staff evacuation is 394 seconds which occupied 88% of total evacuation time (448 seconds). The condition in this case is not close to the reality. (3) FDS+Evac recognize staff as particles and establish a flow field with outflow condition to decide staff evacuative direction. However, in some complicated spaces, the tunnel which is too small to pass through is still identified as evacuative route that cause staff accumulative in this tunnel and postpone the evacuation time. The condition in this case is not close to the reality (4) Utilize Simulex to simulate staff evacuation time and chose detecting time of detector 30 seconds with staff response time 60 seconds that totally 90 seconds for staff starting time of evacuation. This calculation methodology is more conservative and more close to the reality.

Key words: FDS+Evac,clean room,Simulex

## 致謝

很快的碩士兩年就這樣過去了，在這段日子裡，首先我要感謝我的恩師 陳俊勳教授，在兩年間對我耐心的指導與訓練，使我無論是在學業或處理各式各樣的難題皆有大幅的成長，讓我在碩士生涯中能夠一一克服面臨的難關，也感謝老師對我所做出的成果總是不厭其煩的指正與建議，在此致上最深的感謝。

同時也感謝事故調查及成災因素分析應用於風險評估和災害預防之整合研究計畫所提供的研究經費，使我能順利進行研究，也感謝中台技術學院 徐一量教授與台灣警察專科學校 邱晨瑋教授對我論文的指證與建議，使我的論文更加完善。

在這段日子裡，我要感謝實驗室彥成、成陽及金輝等已畢業學長無時無刻的對我提供協助，在各方面的事務都能依學長們的經驗而迅速的完成。同時要感謝塘源、家偉、世庸、抓抓、黃鈞這些三樓的學長，可以讓實驗室熱熱鬧鬧不沉悶，以及五樓的阿貴、昶安、宗翰、云婷、聖容，每個人都能找我上樓討論我的事情。再來要感謝的是同學凌宇、天洋、鈺鈞，恭喜一起畢業了。還要感謝學弟妹羿玗、秉楷、泰全、子博、奧斯汀幫我處理了很多的事務以及工作上的協助，還要感謝陳嘉勳大哥以及巨江的楊介雄、林小姐給我的一些建議。

最後我要感謝的是我的家人，在我的求學生涯中總是不斷的給我鼓勵，也天天陪我聊天以宣洩我的壓力，無論承受了多大的負擔總是在聽完家人的聲音後重新有了繼續努力的力量，這個學業如果沒有你們的支持我必定無法完成，在此對我的家人致上最深的感謝。

# 目錄

摘要.....	VI
ABSTRACT.....	VI
致謝.....	VI
目錄.....	VI
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VI
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究內容.....	6
第二章 國內外法規對無塵室之適用性與火災安全性能驗證模式.....	9
2.1 國內法規對無塵室之適用性 .....	9
2.1.1 無塵室簡介 .....	9
2.1.2 無塵室消防設備介紹 .....	11
2.1.3 無塵室空調循環系統 .....	14
2.1.4 法規適用性討論 .....	17
2.2 火災安全性能驗證模式 .....	20

2.2.1 性能式設計介紹 .....	20
2.2.2 性能驗證模式 .....	23
<b>第三章 火場煙流與人員避難行為特性 .....</b>	<b>30</b>
3.1 煙流特性.....	30
3.1.1 煙之定義 .....	30
3.1.2 煙產生之危害 .....	30
3.1.3 煙的流動特性 .....	32
3.2 人員避難行為特性 .....	35
<b>第四章 模擬軟體與計算方法介紹 .....</b>	<b>37</b>
4.1 建模軟體 PyroSim .....	37
4.2 火災模擬軟體 (FDS) .....	38
4.3 避難模擬軟體 .....	51
4.3.1 Simulex .....	51
4.3.2 FDS+Evac.....	54
4.3.3 建築物避難安全檢證技術手冊 .....	62
<b>第五章 結果與討論 .....</b>	<b>65</b>
5.1 火災煙流控制模擬分析 .....	65
5.1.1 火源設計、排煙設備及相關設定 .....	65
5.1.2 案例情境設定 .....	67

5.1.3 小結 .....	70
5.2 逃生避難模擬分析 .....	77
5.2.1 人員參數設定說明 .....	77
5.2.2 小結 .....	78
<b>第六章 結論與建議 .....</b>	<b>123</b>
<b>參考文獻.....</b>	<b>128</b>



# 表目錄

表 2-1 美國 FS 209E 空氣微粒潔淨度等級.....	9
表 2-2 無塵室氣流類型比較.....	15
表 2-3 與無塵室相關知消防安全設備設置標準.....	18
表 2-4 火災成長係數 $\alpha$ 值.....	25
表 2-5 建議人員逃生安全環境要求.....	29
表 3-1 減光係數與能見距離.....	32
表 4-1 不同人群模式之男女分布表.....	52
表 4-2 FDS+Evac 預設人體尺寸與移動速度.....	55
表 4-3 各場所用途之人員步行速度.....	64
表 5-1 格點測試.....	66
表 5-2 各項模擬參數列表.....	67
表 5-3 各情境設定比較表.....	69
表 5-4 排煙口開啟時間（情境一）.....	71
表 5-5 排煙口開啟時間（情境二）.....	71
表 5-6 排煙口開啟時間（情境三）.....	73
表 5-7 排煙口開啟時間（情境四）.....	73
表 5-8 排煙口開啟時間（情境五）.....	74
表 5-9 排煙口開啟時間（情境六）.....	75

表 5-10 排煙口開啟時間（情境七） .....	75
表 5-11 排煙口開啟時間（情境八） .....	75
表 5-12 綜合結果比較 .....	76
表 5-13 各計算方法比較表 .....	77
表 5-14 模擬避難時間表 .....	80
表 6-1 結果綜合比較表 .....	125



# 圖目錄

圖 1-1 晶圓廠無塵室示意圖 .....	8
圖 1-2 研究流程圖 .....	8
圖 2-1 亂流型、水平層流型與垂直層流型示意圖 .....	16
圖 2-2 無塵室空調循環示意圖 .....	17
圖 2-3 性能設計流程 .....	22
圖 2-4 建管法令之性能式設計途徑 .....	23
圖 2-5 火災發展過程圖 .....	26
圖 2-6 不同熱釋放率之火災成長曲線圖 .....	26
圖 2-7 T-Square 火災成長曲線圖 .....	27
圖 2-8 NFPA 92B 定義之煙層示意圖 .....	28
圖 4-1 FDS 分析流程圖 .....	50
圖 4-2 Simulex 模擬流程 .....	52
圖 4-3 模擬人體尺寸示意圖 .....	53
圖 4-4 人員間距離與步行速度之關係 .....	53
圖 4-5 FDS+Evac 模擬人體尺寸示意圖 .....	54
圖 4-6 樓層避難流程圖 .....	62
圖 5-1 模擬空間俯視圖 .....	81
圖 5-2 模擬空間剖面圖 .....	81

圖 5-3 防煙垂壁示意圖 .....	82
圖 5-4 防煙區劃示意圖 .....	83
圖 5-5 排煙風機涵蓋範圍及風量示意圖 .....	84
圖 5-6 格點配置示意圖 x-y 平面.....	85
圖 5-7 格點配置示意圖 x-z 平面.....	85
圖 5-8 格點配置示意圖 y-z 平面.....	86
圖 5-9 SAC 層排煙口位置示意圖 .....	86
圖 5-10 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境一) .....	87
圖 5-11 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境一) .....	88
圖 5-12 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境一) .....	89
圖 5-13 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境一) .....	90
圖 5-14 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境二) .....	91
圖 5-15 煙塵分佈圖 y-z 平面 (情境二) .....	92
圖 5-16 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面圖 (情境二) .....	93
圖 5-17 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境二) .....	94
圖 5-18 案例 1 煙層擴散範圍比較圖.....	95
圖 5-19 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境三) .....	96
圖 5-20 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境三) .....	97
圖 5-21 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境三) .....	98

圖 5-22 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境三) .....	99
圖 5-23 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境四) .....	100
圖 5-24 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境四) .....	101
圖 5-25 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境四) .....	102
圖 5-26 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境四) .....	103
圖 5-27 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境五) .....	104
圖 5-28 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境五) .....	105
圖 5-29 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境五) .....	106
圖 5-30 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境五) .....	107
圖 5-31 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境六) .....	108
圖 5-32 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境六) .....	109
圖 5-33 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境六) .....	110
圖 5-34 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境六) .....	111
圖 5-35 FFU 風機關閉形成負壓區示意圖.....	112
圖 5-36 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境七) .....	113
圖 5-37 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境七) .....	114
圖 5-38 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境七) .....	115
圖 5-39 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境七) .....	116
圖 5-40 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境七) .....	117

圖 5-41 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境七) .....	118
圖 5-42 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境七) .....	119
圖 5-43 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境七) .....	120
圖 5-44 逃生出口位置與人員分佈示意圖 .....	121
圖 5-45 人員擠於相同逃生路線示意圖 .....	122
圖 5-46 人與人距離相對之速度比較 .....	122
圖 6-1 煙流擴散面積隨時間變化圖 .....	126
圖 6-2 人與人距離相對之速度比較 .....	127



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

近年來國內經濟快速成長，高科技產業發展蓬勃，越來越多的半導體廠房隨著科學園區的創立而興建，因受限與土地資源，高科技產業往往只能在有限的土地空間內建造密閉性高、三明治式的無塵室廠房（如圖 1-1 所示），並於廠內設置許多精密且昂貴的設備，而無塵室於製程中往往使用許多高危險性之液體或氣體（如  $H_2$ 、 $SiH_4$ 、IPA、光阻劑等），為具有可燃性及易燃性之化學品，小小的火源即有可能造成重大的災害。

由許多國內外的火災研究可得知，大多於火場中造成傷亡的主因為由火焰燃燒所造成之有害氣體、濃煙、溫度等，而並非直接由火焰燒傷，且於火場中濃煙及有害氣體會造成逃生人員的視覺阻礙及呼吸困難，並嚴重影響人員心理狀況，甚至造成人體機能喪失，使逃生更加困難，除了人命安全之外，高科技廠房中火災往往會造成巨大的財產損失，因為除了最直接的火損之外，其由火災產生之濃煙會因為無塵室的內部流場而快速擴散，造成極大的煙損，故如何設置良好的煙控系統，能有效的降低煙流擴散程度及將煙流往室外排出，進而將事故損失降到最低，為相當值得探討之議題。

國內主要針對消防設備之法規為「各類場所消防安全設備設置標準」[1]，根據該法規第 12 條各類場所用途分類，半導體廠房屬於丁類場所，根據同法規第 28 條該場所應依法規設置排煙設備，但事實上，我國建築及消防法規主要適用於一般居室類的消防設計，對於如半導體無塵室、大型購物商場、戲院等具備特殊用途、挑高中庭或大空間等建築物而言，有適用上的困難。目前在最先進的十二吋晶圓廠因無塵室屋頂必須架設運送軌道（AGV; Automated Guided Vehicle）來搬運晶圓，此軌道設計會穿過防煙垂壁使防煙垂壁效用受到破壞，

可能無法有效的阻止煙流，但無塵室上方（見圖 1-1）有廣大的區域可用來蓄煙（SAC 區），故無塵室是否適合依照國內法規規定設置排煙設備，另是否可完全取消防煙垂壁設置，需要更深入的探討。

由內政部 89/4/10 發文（89）台內消字第八九八六四二二號函提案四決議，高科技電子廠房之無塵室應依「各類場所消防安全設備設置標準」規定設置排煙設備，若因場所用途、構造特殊，適用各類場所消防安全設備設置標準確有困難者，得依同標準第二條但書規定檢具具體證明經中央消防主管機關認可。因此為了確保建築物之消防設備能於火災時有效的發揮功能，確保人命安全及降低損失，利用性能式火災安全設計方法（performance-based fire safety design method）評估建築物消防設備之有效性為目前解決前述問題的趨勢。

本研究針對半導體無塵室之煙控系統在防煙垂壁失效進行探討，利用無塵室內部循環式空調設計造成起火點附近之高低壓力差，並根據美國環境保護局（U.S. Environmental Protection Agency）之空氣汙染控制技術概要說明（Air Pollution Control Technology Fact Sheet）[2]得知，HEPA&ULPA 濾網於 200°F（93.3°C）會產生燒破的現象，利用 FFU（Fan Filter Units）於火災發生時受高溫使得濾網燒破的特性，可使煙流往上蓄積，使用電腦軟體進行模擬分析，設計有效的煙控系統以減慢煙層下降的速度與煙流擴散的程度；另外，本研究利用不同方法計算人員於火場中所需的避難時間進行比較，探討各計算方法之差異性，並與煙層下降的速度進行比較，以確保火災發生時，人員生命安全能獲得保障並能降低因火災產生的財產損失。

## 1.2 文獻回顧

### 火災模擬

Cooper 等人[3]以全尺寸實驗的方式，討論煙層下降高度與溫度的關係，並推導出煙沉降率（N-percent rule），利用同一時間不同高度的溫度，計算該位置之煙層沉降高度，並建議對於初步煙層沉降高

度可以採  $N=10$  來做估算。

Heskestad 等人[4]對無塵室內的煙氣流動做縮小尺寸的模型實驗，利用甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 於模型內部燃燒，以模擬無塵室火災，探討送風速度對於溫度分佈的影響。

Cheng 等人[5]利用 STAR-CD 模擬軟體，控制 Sub-FAB 之高度及高架地板之開孔率，採用標準  $\kappa-\varepsilon$  紊流模型作為潔淨室內之流場，並以多孔性材質 (porous media) 作為高架地板材質，探討潔淨室中氣流均勻度。結果發現提高 Sub-FAB 高度、降低靠近回風區地板開孔率及根據不同位置設計 FFU 風速，可獲得較佳之氣流均勻度。

Soonil[6]利用數值方法模擬無塵室內因火災而產生之熱氣及煙流的流動，並將結果和 Heskestad et al.[3]的實驗數據比較，發現有極高的準確度。結果發現無塵室內的下吹式空調氣流會影響煙霧探測器的作動，因此為保險起見，在空調迴風管道中裝置煙霧探測器是必要的。

Nam[7]利用 CFD 軟體 REFLEQS，模擬無塵室內火災熱氣的流動，並以  $\text{CO}_2$  的濃度做為煙濃度的指標，研究在不同的 FFU 送風速度、火源大小及火源位置，對於煙層分布的影響，並探導自動灑水頭及針煙探測器於不同位置的作動情況。結果發現隨 FFU 送風速度的增加，受煙層污染之範圍隨之減小，且因向下空調氣流會影響偵煙器的作動時間，故建議於空調回風管道中裝設偵煙器。

邱晨璋[8]針對半導體產業無塵室的火災進行探討，參照國內外先進法規、基準、火災案例、消防評估系統與專家意見，考慮無塵室特殊的防火特性，討論其影響之因素並將其整合以提供一完整消防安全設備設計。

賴葦芸[9]利用 NIST 所發展的 FDS (Fire Dynamics Simulator) 模擬軟體進行無塵室內火災煙流場模擬。結果發現火災發生於無塵室的牆邊與牆角時，偵煙器不易偵測到煙流的產生，而無塵室內的空調系

統（垂直下吹層流氣流）會將火災所產生的濃煙向下推動，使煙流不受防煙垂壁的侷限而四處擴散。

林木榮[10]利用 FDS 模擬高火災風險製程單元與區域所造成之溫度、煙濃度與二氧化碳之危害。結果發現設有排煙系統與撒水之區域，其火災危害較其他區域低，而單獨設置排煙系統對煙濃度的控制最佳，但對溫度的影響有限，若增設撒水系統對於火場溫度有控制效果，但抑制效能則未能完全顯現。

陳朝慶[11]利用 Fluent 針對無塵室流場進行模擬，分析煙粒子運動軌跡，依此結果探討火警探測器最佳的設置位置以及早發現火災，並探討排煙口於不同位置之排煙能力。結果發現不同的火災位置對煙的流動軌跡影響最大，且煙粒子流入 RAP 層後與高架地板具有一段距離，故於回風道入口及可能產生高火載量之機台下方設置極早期偵煙器可以及早發現火災與確認火災位置，而排煙口的位置則於天花板處進行排煙，可以獲得最佳的效果。

Gunner[12]利用無防煙垂壁之縮小型無塵室進行實驗，來研究火災發生時空調向下氣流對煙流動的影響。結果發現煙的擴散面積，與火源熱釋放率以及火源到天花板的高度成正比關係，而與空調向下氣流的速度成反比關係，亦即在無防煙垂壁之無塵室，空調的向下氣流可抑制煙層的擴散程度。

邱奕雄[13]利用 FDS 針對無塵室特殊流場進行火災模擬，觀察 FFU 風速對火災流場的影響。結果發現將起火區域 FFU 風速降載，可以提供較安全的逃生環境需求。

邱晨瑋[14]利用 FDS 模擬無塵室火災煙流流動情形，使用上排煙及下排煙系統結合起火區與非起火區的空調系統設計，並針對 3MW 及 800KW 的火源進行模擬。結果發現下排煙系統於 3MW 的火源下，無法有效的將煙流侷限於起火區劃內，無法滿足財產安全標準，但仍可滿足生命安全標準。

Lin 等人[15]利用無塵室縮小化模型進行實驗，探討無塵室內發生火災時，其空調系統送風速度對火焰之影響，並推導出利用溫度計算煙流所到達之範圍。結果發現空調系統的送風速度越快會造成火焰大幅的震盪，若起火源附近具有其他易燃物，將使火災快速的延燒擴大。

Wu 等人[16]利用實驗研究濕式平台（wet bench）之建構材料，目的為降低火焰的蔓延程度及發煙量，共使用四種不同的材料進行實驗。結果發現符合 FM 4910 認證之 modified polyvinylidene fluoride（PVDF）及 modified chlorinated polyvinylchloride（CPVC）具有較佳之效果。

I 等人[17]利用 FLACS( Flame Acceleration Simulator)模擬軟體，模擬無塵室產生爆炸性之火災所產生之溫度場的分佈情形。結果發現配合適當的灑水系統（water spray system）設置及洩壓板（pressure relief panel）設置可有效降低因爆炸產生的溫度及壓力值。

Huo 等人[18]利用 FDS 模擬無塵室發生火災時，靠近天花板之溫度受火源之面積、熱釋放率及位置的影響，及模擬設置於天花板之偵煙器的作動情形。結果發現靠近天花板之溫度受火源面積影響極小，及因為下吹式氣流的作用，設置於天花板之偵煙器不易作動，故建議需多增設偵煙器於具有發生火災之風險的機台附近。

### 逃生避難

賴葦芸[9]以日本（DRES Model）、紐西蘭簡算模式（Fire Engineering Design Guide）與電腦動態避難程式 Simulex 來分析無塵室內人員之避難動線與避難所需時間。結果發現因無塵室內之人員密度低，因此避難過程中人員幾乎全程能以全速進行避難，故所得避難所需時間較日本與紐西蘭的簡算模式為短。

王俊傑[19]利用電腦動態避難程式 Simulex 及簡算公式（紐西蘭模式、日本 DRES 模式、2000 年版日本建築基準法第 129 條）評估

晶圓廠內人員避難所需時間。結果發現由於日本的簡算法主要運用樓地板面積進行運算，故時間遠大於紐西蘭的簡算法與 Simulex 計算結果，但總體避難時間皆可成功小於煙層下降時間。

TAN 等人[20]利用 FDS+Evac 模擬軟體模擬都市地下鐵車站發生火災，探討不同的火源位置所產生的煙流與不同的逃生口大小對總避難時間的影響。結果發現逃生口的寬度對總避難時間的影響最大。

黃莉芸[21]利用建築物防火避難安全性能驗證手冊以及電腦動態避難程式 Simulex 進行逃生時間計算與比較。發現在樓層逃生時間上，性能驗證手冊與 Simulex 避難模擬兩者結果相近；而在整棟逃生的部分，因 Simulex 模擬過程較為理想，故時間略短於性能驗證手冊所評估之時間，但結果相差並不多。此外，若出口集中於同一側易形成壅塞現象，將導致逃生時間的增加；且 Simulex 並未考慮人員完成一出口避難後，其餘人員會使用該出口路徑之情形，無法符合實際逃生的情況。

白坤鼎[22]利用 FDS+Evac 模擬軟體模擬大型展覽館的火災，探討人員的避難安全動線與整棟建築之避難安全評估。結果發現總避難時間會隨著逃生口寬度的增加而變快，但當寬度大於 2.5m 後，再增加寬度並無太大的效用。

Yang 等人[23]利用 FDS+Evac 模擬地下商場的火災，探討在單一逃生口的空間中火源與逃生口的距離對總逃生時間的影響。結果發現火源與逃生口的距離對總逃生時間影響極小。

Wei 等人[24]利用 FDS+Evac 針對醫院進行逃生模擬，探討針對實際醫院的人員組成所產生的速度差下，人員對出口的熟悉度對逃生所造成的影響。結果發現在速度差大的情況下對出口不熟悉的影響較大，而在速度差小的情況下可因羊群效應降低對出口不熟悉的影響。

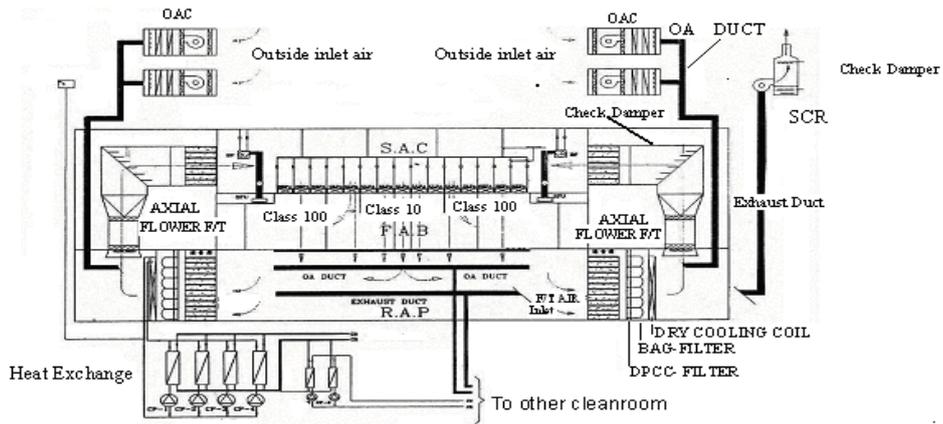
### 1.3 研究內容

本研究的主要目的為探討半導體廠房無塵室發生火災時，防煙垂

壁於火場中之效用及如何進行有效的煙控，以降低因煙流之擴散與蓄積所造成的危害與損失。首先以美國 NIST (National Institute of Standards and Technology) 所發展之火災模擬軟體 FDS[25] (Fire Dynamics Simulator) 模擬火災產生之煙層流動情形，觀察煙流擴散之程度，以探討防煙垂壁的設置與煙控系統之效用，並計算煙層及有害氣體下降至安全高度所需的時間，再以英國的 Fire Safety Group 所發展之動態模擬軟體 Simulex[26]、NIST 與芬蘭 VTT 技術研究中心 (VTT Technical Research Centre of Finland) 共同研發之避難附屬軟體 FDS+Evac [27] (Fire Dynamics Simulator with Evacuation) 及內政部建築研究所出版之「建築物防火避難安全性能驗證法」[28]三種方法計算無塵室發生火災時，內部工作人員疏散至安全地點所需的時間，探討三種計算方法對於火場中的人員逃生時間計算之差異性，最後將 FDS 所模擬之結果與計算之逃生所需時間進行比較，以驗證是否符合人命安全及財產保護的需求。本研究流程如圖 1-2 所示。

本研究主要重點有：

1. 針對無塵室的特殊流場與相關設備進行介紹，探討現有法規對無塵室之適用性。並參考國外相關法規及基準，嘗試找尋較適合無塵室應用之替代方法。
2. 利用實際無塵室之相關數據，於 FDS 中建立模型，針對不同的煙控系統進行電腦模擬，探討防煙垂壁的有無對煙流擴散的影響及比較不同系統間煙控之有效性，以達到財產保護的目的。並於利用不同的方法計算工作人員疏散至安全地點所需的時間，與煙層及有害氣體達危害程度之時間進行比較。
3. 以最有效之煙控系統進行不同火載量大小之模擬，以驗證該系統於不同火載量大小之火災的煙流危害防護能力。



Dimension 1 : 270

圖 1-1 晶圓廠無塵室示意圖

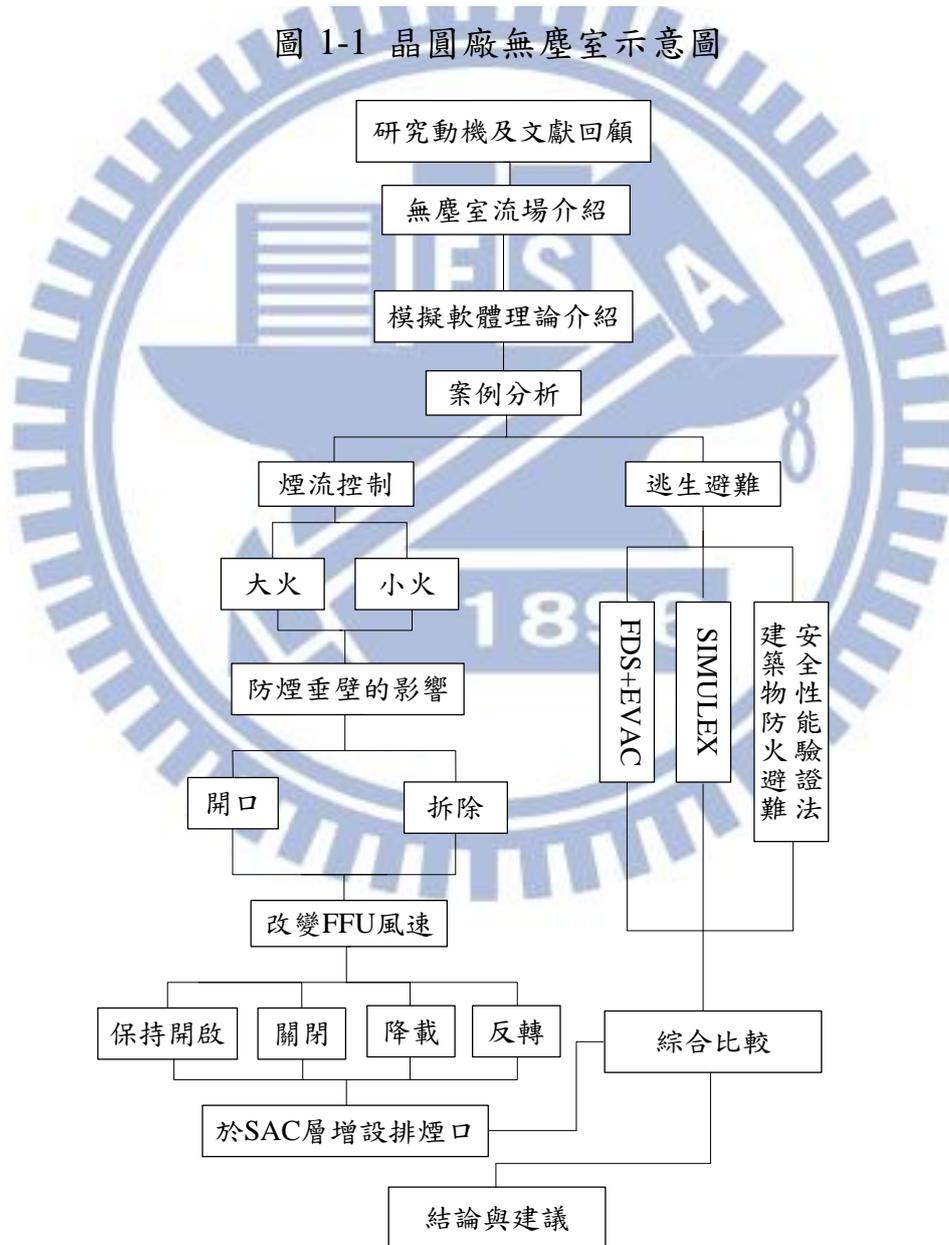


圖 1-2 研究流程圖

## 第二章 國內外法規對無塵室之適用性與火災安全性能驗證模式

### 2.1 國內法規對無塵室之適用性

#### 2.1.1 無塵室簡介

國際標準組織(International Organization for Standardization; ISO)於 ISO-14644-1[29]內容定義無塵室為「一可控制室內懸浮微粒濃度的空間,建構的目的是盡量減少空間內懸浮微粒的生成、引進與滯留,並依應用上之需求,對其他相關因素,如溫度、濕度與壓力等進行必要的控制」。現行無塵室多採用美國聯邦標準 FS209E[30] (Federal Standard 209E, 如表 1 所示),其潔淨度等級以「某粒徑粒子 Class 多少」作為分類依據,其代表意義為每一立方呎空間中可含該粒徑粒子最多數目,如 0.1  $\mu\text{m}$  Class10 及代表每一立方呎空間中最多可含 0.1  $\mu\text{m}$  粒徑之粒子數為 10 顆。

表 2-1 美國 FS 209E 空氣微粒潔淨度等級

等級		等級極限									
		0.1 $\mu\text{m}$		0.2 $\mu\text{m}$		0.3 $\mu\text{m}$		0.4 $\mu\text{m}$		0.5 $\mu\text{m}$	
		體積單位		體積單位		體積單位		體積單位		體積單位	
公制	英制	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>								
M1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10	0.283	--	--
M1.5	1	1240	35	265	7.5	106	3	35.3	1	--	--
M2		3500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	--	--
M2.5	10	12400	350	2650	75	1060	30	353	10	--	--
M3		35000	991	7570	214	3090	87.5	1000	28.3	--	--
M3.5	100	--	--	36500	750	10600	300	3530	100	--	--

M4		--	--	75700	2140	30900	875	10000	283	--	--
M4.5	1000	--	--	--	--	--	--	35300	1000	247	7
M5		--	--	--	--	--	--	100000	2830	618	17.5
M5.5	10000	--	--	--	--	--	--	353000	10000	2470	70
M6		--	--	--	--	--	--	1000000	28300	6180	175
M6.5	100000	--	--	--	--	--	--	3530000	100000	24700	700
M7		--	--	--	--	--	--	10000000	283000	61800	1750

半導體無塵室由於製程上的需要，其空間的構成與設計具有以下幾項特性：

1. 基於防止微塵粒子進入，以維持潔淨度的考量，無塵室為與外部完全隔絕的密閉空間。
2. 大量使用具高度危險性的化學物質，如  $\text{SiH}_4$ 、 $\text{HCN}$ 、 $\text{H}_2$  等。 $\text{SiH}_4$  在室溫下即有可能自燃、 $\text{HCN}$  是一種使人窒息甚至迅速致死的毒物、而靜電所產生的火花即可引燃  $\text{H}_2$ 。故無塵室若有火源的產生，容易發生極大火載量之火災。
3. 大量使用管線來輸送化學物質與製程廢棄物，因此空間內管線分佈非常複雜，這除了增加消防安全設計的困難度外，更可怕的是若有任何危險物質從管線中洩漏出來，都將會造成非常大的工安及環保問題。
4. 大量的作業機具充斥空間，使人員的作業空間狹窄，不但使機巨的危險性提高，逃生避難動線也受到極大的影響，且所有晶圓片或面板均採批次作業，必須採 24 小時不關機的連續作業方式，因此提高了因人員作業疏失而引起工安事件的可能性。
5. 無塵室採用大量空氣循環系統，空氣流動的方向與一般空間不同，係由天花板向下吹送氣流，若發生火災或有毒氣體外洩時，其煙流及有害氣體會受無塵室內

流場的影響，快速擴散蔓延，且擴散流動特性與一般建築物不同，很難早期發現並有效的撲滅。

由上述特性可見，半導體無塵室發生火災的風險很高，且無塵室內的製程機具與產物對煙和水都非常敏感，若發生火災，除了火焰燃燒所造成的損害外，其煙流與撒水皆會造成無塵室極大的損失，因此無塵室的消防安全系統設計時須考慮上述的無塵室特性，並嚴格執行作業人員於火災時的緊急應變訓練，兩者互相配合，才能有效的降低火災發生的危險及可能造成的損失。

### 2.1.2 無塵室消防設備介紹

無塵室設置消防防護系統時，一般依據國內消防法規定設置，但因其特殊環境需求與保險公司要求，也多會參考國外先進基準或設備，增設其防護系統。依現行所設置系統區別概分為，火警警報設備、消防水設備、二氧化碳滅火設備、極早期火警偵測系統、緊急排煙設備與被動式防火系統。

#### 1. 火警警報設備：

火警警報系統需具有偵測、監視、控制、連動等功能。一般於緊急應變中心設置智慧型火警受信總機來進行監控作業，當現場發生火災時，由現場火警探測器偵測後，將火警訊號傳回受信總機進行應變動作，如火警警鈴鳴動、緊急自動語音廣播、連動防火門、排煙閘門、啟動自動排煙風機等。無塵室內探測器多採用偵煙式探測器，主要安裝在生產區的天花板上層、各獨立房間及迴風道內，且依據「潔淨區消防安全設備設置指導綱領」[31]規定，須於矽烷供應區（包括矽烷供應系統、氣體鋼瓶櫃等）設置火焰式探測器。

#### 2. 消防水設備：

##### (1)室內消防栓系統：

在無塵室內部及四周，依國內消防法規需設置室內消防栓箱

，消防栓箱內部設有 1.5"水帶兩條、1.5"水瞄、2.5"出水口與火警發信機等。

### (2)自動撒水系統：

無塵室內之自動撒水系統基本上是依照 NFPA13[32]的規定來安裝，且採用濕式（Wet type）撒水方式。由於無塵室之氣流為向下流式（Down-Flow）設計，所以除天花板上層區域可使用一般型撒水頭外，其餘皆採用 FM 認證快速反應型（FRS）撒水頭，並外加防撞保護蓋。各撒水分區均設有獨立之警報逆止閥，撒水管路之管路防震固定多均依照 NFPA 318[33]之規定。自動撒水裝置在風險控制上是最後一道保護，當自動撒水裝置作動的同時，其周圍的機台設施等於是放棄的狀態，亦即該區劃內的機台設施將無法進行災後復原，其誤動機率必須低於百萬分之一。根據國內法規「潔淨區消防安全設備設置指導綱領」規定，在潔淨區與具可燃性或自然性氣體之氣瓶櫃處，撒水頭應為快速反應型，撒水密度須為每平方公尺每分鐘 8 公升以上，且具有持續放射 60 分鐘以上之水源容量，作動溫度須設置在 57°C 至 77°C（若該區可能有溫度較高之作業環境，得酌予提高）。國內廠商為了因應保險公司要求，無塵室之撒水系統設置均會參考國內外法規進行較為完善的設置。

### 3. 二氧化碳滅火系統：

因潔淨度需求，無塵室內部只能使用潔淨氣體進行滅火，其最常見為 CO<sub>2</sub> 滅火，其設置方式多依國內消防法規計算所需滅火效能值與規定距離設置，一般多設置 20lb 手提式 CO<sub>2</sub> 滅火器，但為了能提供較大滅火效能，會於高火災風險機台附近設置 100lb 輪架式 CO<sub>2</sub> 滅火器。因無塵室內設置許多容易發生火災的高風險機台，所以設備製造商大多會為此機台設置其附屬之自動 CO<sub>2</sub> 滅火器裝置，一旦機台發生火災，其內部偵測器偵測到火災

訊號時，立即可自動啟動其附屬自動 CO<sub>2</sub> 滅火器滅火。通常如 Wet Bench、Semi-tool、Wafer stock 等機台均會配有附屬的自動 CO<sub>2</sub> 滅火裝置。

#### 4. 極早期火警偵測系統：

在一般的建築物中，火災偵測器的放置處，通常都位於天花板下方，這是因為空氣因熱浮力效應而上升至天花板，使得偵測器得以感應；不過在無塵室中，因為持續下吹氣流的緣故，火源初期燃燒產生之熱氣會隨下吹氣流往下帶，若單純只裝設一般偵測器時，則感應器並無法迅速的探測到火災的發生，而等到天花板之偵測器感應到煙流時，有可能已經演變為無法控制的大火。因此在無塵室中主要多使用極早期探測器 VESDA (Very Early Smoke Detect Apparatus) 來偵測早期火警，此偵測設備主要是以定時主動抽氣取樣分析方式，分析空氣中煙霧粒子的濃度，以判定是否發生火災，其靈敏度至少 0.1% obs/m，若偵測到異常時，即馬上反應至中央控制系統，以偵測火焰在引燃初期階段中悶燒所產生的煙塵微粒，使無塵室內部人員能及時應變。由於極早期偵測器靈敏度極高，故偵測的準確度為重要關鍵，除了靈敏度需要比傳統偵測器更高外，最重要的還是需要決定一個既能提供早期預警能力又能降低誤報率的最佳（非最高）靈敏度值。極早期火警偵測系統多安裝於回風口（道）之新鮮空氣混合點前處、高架地板下、電力電盤內及 Wet Bench、Stepper、Stocker、Furnace、Ion Implants 等高風險機台內部或周圍。

#### 5. 緊急排煙系統：

其設計目的主要是為排出當火災發生時所產生的濃煙，以達延長人員逃生時間之目的。根據各類場所消防安全設備設置標準第 188 條第九款規定，排煙機的排煙量需在每分鐘一百二十立方公尺以上，且在一防煙區劃時，在該防煙區劃面積每平方公尺每

分鐘一立方公尺以上，在二區以上之防煙區劃時，在最大防煙區劃面積每平方公尺每分鐘二立方公尺以上。

## 6. 被動式防護系統：

### (1) 防火區劃：

現多將無塵室視為一大防火區劃，必須有一小時以上防火時效。無塵室對外連接通處須設置相同時效防火門或防火窗。另無塵室內部使用不可燃之次分隔牆將內部區隔分成不同區域，此分隔牆具有限制煙或其它污染物擴散。另高風險機台也會使用分隔牆與其它機台分隔。無塵室中穿透地板或牆面之公用設施（水、電、空調管與化學品供應管等等）的穿越處，應以具 1 小時防火時效等級之防火填塞材料密封。另無塵室內部各防火區劃間如有晶圓傳送系統穿越者，在穿越防火區劃處須設置自動關閉閘門，且此閘門須具有與該處牆壁同等級之防火時效。

### (2) 防煙區劃：

無塵室多使用不可燃材質做為防煙垂壁 (Smoke Curtain)、防煙柵欄 (Smoke Barrier)、或分隔牆做為防煙區劃的阻隔物。依據「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條第一款，每層樓地板面積每五百平方公尺內，以防煙壁區劃。

### (3) 不可燃材質使用：

無塵室內部所有鋼構材料於建廠時即進行防火塗佈使其具有防火時效。空調、排氣管路皆多使用金屬材質或 FM 認證之產品。濾網外框、百葉窗、天花板格子架皆是不可燃材質，或是符合 FMRC 之 Clean Room Materials Flammability Test Protocol 測試的材質製成。無塵室中使用的 HEPA 與 ULPA 過濾用模組須通過 FMRC 認可。

## 2.1.3 無塵室空調循環系統

無塵室內部氣流流場大致可分為三類，有亂流型 (Conventional

flow)、水平層流型 (Cross flow) 及垂直層流型 (Down flow) 三種類型 (如圖 2-1 所示)。亂流型多用於潔淨度較低的環境，潔淨等級約為 Class1000~Class100000，天花板並非百分之百覆蓋濾網，有時亦無高架地板，而由側壁牆角回風；水平層流型約為 Class1~1000 的潔淨等級，其流場於無塵室內以水平流動的形式進行循環，故設備的配置與人員的出入對該流場易產生影響；垂直層流型用於潔淨度要求較高的環境，潔淨等級約為 Class1~Class100，天花板幾乎百分之百覆蓋濾網，由高架地板下回風，其工作區內的氣流近乎平行。三種類型之比較如表 2-2 所示。

表 2-2 無塵室氣流類型比較

方式	亂流型 (Conventional flow)	水平層流型 (Cross flow)	垂直層流型 (Down flow)
潔淨等級	Class1000~Class100000	Class1~Class1000	Class1~Class100
風速 (m/s)	--	0.45~0.50	0.25~0.40
換氣次數 (次/hr)	30~60	Class1 : 200~600 Class1000 : 100~200	200~600
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 構造簡單</li> <li>● 設備費較低</li> <li>● 房室的擴充比較容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 運轉開始後即刻變成穩定狀態</li> <li>● 構造簡單</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 潔淨效果較高</li> <li>● 不易為作業人員及作業狀態所影響</li> <li>● 粉塵的堆積極在漂浮極少</li> <li>● 管理容易</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 由於氣流流場呈亂流，污染粒子有可能於室內循環</li> <li>● 到達穩定狀態須</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 氣流上游與下游流場潔淨度相差較大</li> <li>● 機器設備的配置與人員的出入易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 須注意天花板的無效空間</li> <li>● 換過濾器較為麻煩</li> <li>● 設備費用較高</li> <li>● 房室擴充較為困難</li> </ul>

	花一段時間 ● 人員及機器的配置與管理須注意	對流場造成影響 ● 設備費用較高 ● 房室擴充較為困難	
--	---------------------------	-----------------------------------	--

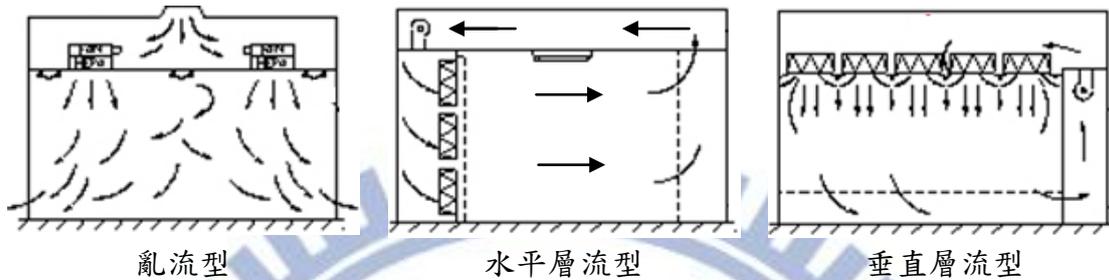


圖 2-1 亂流型、水平層流型與垂直層流型示意圖

目前半導體廠房多為三層式無塵室之結構組成(如圖 2-2 所示)，利用風機—濾網機組 (Fan-Filter Unit；FFU) 進行無塵室內部流場控制，三層式無塵室包括最上層之 SAC 區 (Supply Air Chamber)、中間作業層 Fab 區 (Fabrication Area) 及最下層回風層 RAP 區 (Return Air Plenum)。SAC 層內包含少數管路，如消防管、風管等，並於該層下方裝設風機—濾網機組將氣流由 SAC 層往 Fab 層輸送；Fab 層為主要生產工作區，此層多設置價值昂貴之機台，如化學清洗機、蝕刻機、離子植入器等；RAP 層則主要放置機台的附屬設備與氣體鋼瓶櫃等。

半導體廠房之空調循環方式多採用 FFU 進行通氣循環，利用 FFU 將 SAC 層之空氣吸入後以垂直層流的方式向下吹送到 Fab 層，經過有孔洞之高架地板進入 RAP 層，然後再經由回風道補充外氣，再回到 SAC 層，完成一循環。補充外氣，主要是用來補充無塵室製程廢氣排放所抽出的風量、供應作業人員新鮮的空氣、氣體外洩至建築物外及加強無塵室內部換氣，提供必要的空氣供應量，以維持無塵室內部環境正壓條件。

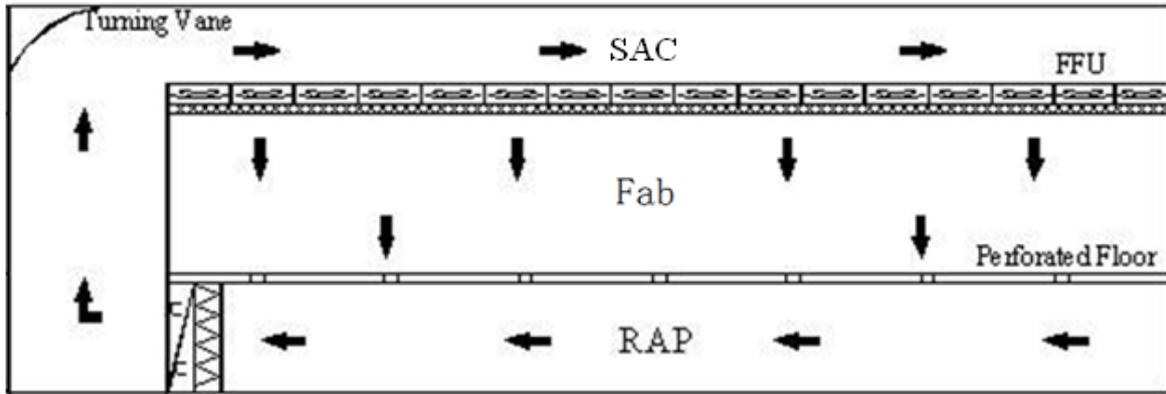


圖 2-2 無塵室空調循環示意圖

## 2.1.4 法規適用性討論

### 國內法規

依國內「各類場所消防安全設備設置標準」第 12 條之分類原則，半導體廠房被歸類為丁類場所中的「高度危險工作場所」，且為無開口樓層，依法需設置滅火器、室內消防栓設備、火警自動警報設備、手動警報設備、緊急廣播設備、緊急照明設備與排煙設備等。其相關之消防安全設備設置標準整理如表 2-3 所示。

由於無塵室具有前述之特殊流場循環，若依照「各類場所消防安全設備設置標準」設置消防設備，可能會有以下之問題：

#### 1. 第 115 條有關探測器之裝置位置規定

依規定天花板設排氣口或回風口時，偵煙式探測器應裝置於排氣口或回風口周圍一公尺範圍內。

由於無塵室之下吹氣流流場，於火災時易將火場之煙流往下帶，使天花板之探測器不易探測到煙流的產生，等到探測器探測到煙流時，火災可能已發展至無法控制的程度，為了彌補天花板之偵煙探測器的不足，無塵室多會根據其流場特性，設置極早期偵煙器，於火災發生初期及早發現火災，並進行緊急應變。

#### 2. 第 188 條有關排煙設備設置規定

依規定每層樓地板面積每五百平方公尺內，以防煙壁區劃，防煙壁指以不燃材料建造，自天花板下垂五十公分以上之垂壁或

具有同等以上阻止煙流動構造者。

由於無塵室內部的特殊流場，火災產生的煙層會受向下之氣流影響，可能會直接越過防煙垂壁而擴散至鄰近的區劃，防煙垂壁的功能無法彰顯，且由於現今高科技廠晶圓越做越大，必須架設運送軌道（AGV；Automated Guided Vehicle）來搬運晶圓，此軌道會穿過防煙垂壁使防煙垂壁受到破壞，於火災發生時煙流可由防煙垂壁之破壞口流至其他區劃內。

表 2-3 與無塵室相關知消防安全設備設置標準

法源依據		規定內容概要	
各類廠所消防安全設備設置標準	一般消防設計	第 14 條	設置滅火器
		第 15 條	設置室內消防栓
		第 16 條	設置室外消防栓設備
		第 19 條	設置火警自動警報設備
		第 20 條	設置手動警報設備
		第 22 條	設置緊急廣播設備
		第 23 條	設置標示設備
		第 24 條	設置緊急照明設備
		第 27 條	設置消防專用池蓄水池
		第 28 條	排煙設備裝設
	消防安全設計	第 31~38 條	滅火器及室內消防栓設備
		第 39~42 條	室外消防栓設備
		第 112~128 條	火警自動警報設備
		第 133~139 條	緊急廣播設備
	避難逃生設備	第 146~156 條	標示設備
		第 157~174 條	避難器具
		第 175~179 條	緊急照明設備

	消防搶救 必要設備	第 180~184 條	連結送水管
		第 185~187 條	消防專用蓄水池
		第 188 條	排煙區劃與裝設

## 國外法規

美國自 1980 年起，由於半導體產業的蓬勃發展，對於使用危險物品 (Hazardous materials) 的設施規範開始受到注意及重視，因此於 1982 年由 UBC(Uniform Building Code)和 UFC(Uniform Fire Code)的專家和半導體業者組成一委員會開始進行規劃，於 1985 年，UBC 和 UFC 分別建制初版的 Section 911(UBC 911)及 Article 51(UFC 51)來規範半導體廠房的建築結構與操作使用，UBC 主要為規範建築物的設計和施工；而 UFC 則主要限制廠房的使用、操作與維護。自 1985 年初版問世後，每隔三年會根據實際執行狀況進行檢討與修正，於 1988 年修改後對於半導體產業的規定更加清楚鮮明，但兩者的規範有許多重疊之處，直至 1991 年修改後才大幅的減少了重疊的部份。因此，UBC 與 UFC 並非相互獨立的法規，半導體廠房於設計與使用上必須同時參考此二法規。以下針對 UBC 及 UFC 的相關規定進行說明。

UBC 為根據其使用對象 (Occupancy Group) 進行分類 (Group)，而半導體廠房被歸類於 H (Hazardous) 類的第 6 項 (Division 6)，簡稱為 H-6。而 UBC 906 規定，在 H-6 中，整棟的三明治式結構可視為一個區劃，故其中間的樓地板無防火時效的要求，防火區劃面積的部份則依 UFC Article 51 (Semiconductor Fabrication Facilities Using Hazardous Production Materials) 所規定使用的危險物及有害物 (Hazardous Production Materials；簡稱 HPM) 的容許儲存量上限來訂定，若超過則需另外設儲存場所並利用及時補貨的方式或利用管線輸送的方式來供應製程所需的量，降低製程區單位面積危險物及有害物的儲存密度。故區劃面積並不是一個固定數字，而是利用單位面積

可能產生的火載量進行限制。UFC Article 51 規定所有廠區皆須裝設撒水設備，而排煙設備的部分 UBC 與 UFC 皆規定危險物及有害物的儲存區域必須裝設排煙設備，但對於製程區域則無裝設規定。

由以上的介紹比較後可以得知，在國外針對半導體廠房的規定，包含撒水設備、建築結構及使用限制等，具有較詳細的規定，但對於排煙設備則無裝設的要求；而台灣對於排煙設備的設置規定較為嚴謹，但由於其設置規定主要適用於一般居室類的空間，是否適用於無塵室這種具有特殊流場的空間，需要進一步的驗證探討。

## 2.2 火災安全性能驗證模式

### 2.2.1 性能式設計介紹

「性能式法規」(performance-based code) 是一個以嚴密且合乎邏輯的分層架構，具體描述出目標需求的法規。是一種當現行法規有所不足時，所提供的另一種較為有彈性的設計方法。(設計流程如圖 2-3 所示)

性能式法規的最主要目的有下列幾點：

一、技術要求的理由及目的合理化：

需明確地規定建築計劃中技術要求的理由或目的，讓缺乏建築專門技術者亦能了解法規規定的目的。

二、增大設計自由度：

對於建築物本來應具備的性能需求加以明確的敘述，並將達成這些要求之做法委任於設計者，使建築設計的自由度增加、建築成本降低及增加建築物創作之可能性。

三、促進技術革新：

法規在於制定時，並不能材料或技術的演進做一應變措施，若以「性能」來對具有工學依據之材料、施工方式加以評估的話，將可引進新材料及新技術。

依各類場所消防安全設備設置標準第 2 條規定：各類場所消防安

全設備之設置及維護應依本標準之規定。但因場所用途、構造特殊，或引用與本標準同等以上效能之消防技術、工法或設備，適用本標準確有困難者，於檢具具體證明經中央消防主管機關認可者，不在此限。

根據建築技術規則[34]總則篇第三條規定，建築物之設計、施工有三種驗證的模式(如圖 2-4 所示)，(1) Route A—依照現行法規進行設計。(2) Route B—依「建築物防火安全避難驗證技術手冊」提供之方式進行檢證。(3) Route C—性能檢證方法為高複雜度的檢證法(一般來說需為國際公認或相關論述認可的計算式)，並且由指定機關作性能認證者。詳細說明如下：

一般而言，對於非特殊之用途之建築，如一般集合住宅、電影院、百貨商場、學校及辦公大樓等，若是依照建築技術規則的相關要求，來設計與興建時，這種依照法規來設計的方法即所謂的 Route A。但須注意若建築物為以下三種時，即使依照規格式法規設計，還需額外檢附防火避難綜合檢討報告書，以作為避難安全確認，這三種建築物如下

1. 除住宅外，高度達二十五層或九十公尺以上之高層建築物。
2. 商場百貨之總樓地板面積達三萬平方公尺以上。
3. 與地下公共運輸系統相連接之地下街或地下商場。

Route B 是依照內政部營建署所訂定的「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」來作避難安全設計。建築物因特殊需求而需使用性能式設計來替代規格式法規時，在設計階段時，即可依據「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」所列之公式，進行相關的安全避難驗算，然後撰寫建築物防火避難性能設計計畫書，最後再交予內政部營建署防火性能聯合審查委員會審查。

但建築物防火避難安全性能驗證技術手冊並不適用範圍於醫院、養老院、幼稚園、托兒所等無自力避難能力人員集中場所及危險物工

廠、貯藏庫等高火載量及可能快速延燒之場所。而無塵室內因大量使用高度危險的化學藥品，因此不適合使用「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」，其性能式設計只能採取 Route C 的方式。

而 Route C 的送審方式，原則上是先利用 FDS、CFX、Star-CD 等計算流體力學軟體模擬火災，並預測煙的流動、火場溫度、CO 濃度、人員能見度與煙層沈降至安全高度所需時間等，之後再利用 Simulex、Exodus 等避難安全模擬軟體預估人員避難至安全場所所需時間，並將避難所需時間與煙層沈降所需時間互相比較，以確保人員於火災發生時，能安全順利地避難逃生。

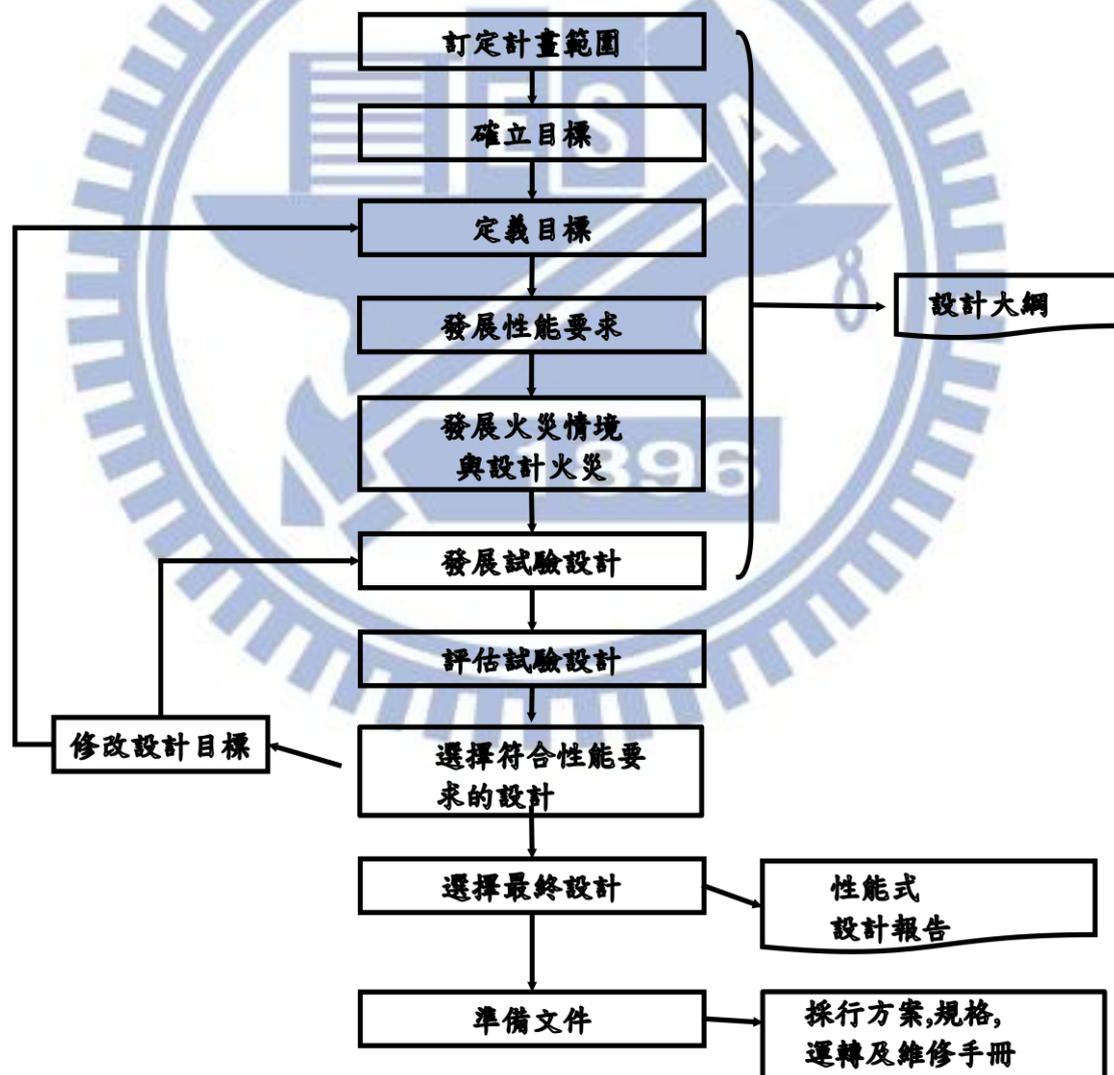


圖 2-3 性能設計流程

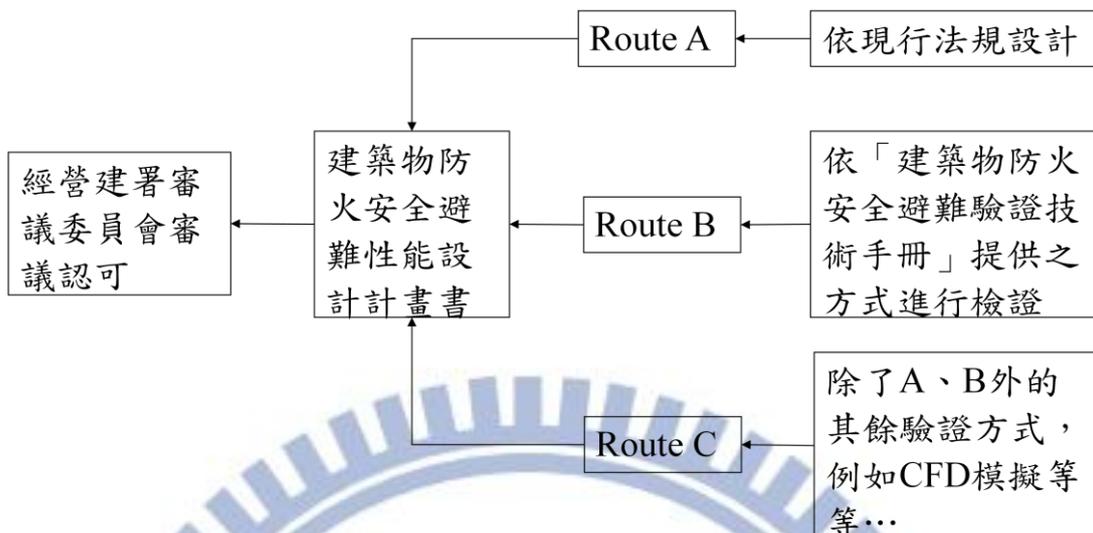


圖 2-4 建管法令之性能式設計途徑

## 2.2.2 性能驗證模式

在設計火災模式時，需先由火災發展的過程以探討，一般而言火災燃燒過程為規則性，隨著燃燒時間的增長，可分為五個發展階段描述燃燒過程：(1) 點火 (Ignition)、(2) 成長期 (Growth)、(3) 閃燃期 (Flashover)、(4) 完全發展期 (Fully Developed) 以及 (5) 衰退期 (Decay)，發展過程如圖 2-5 所示。各階段所代表的特徵與意義如下：

### (1) 點火 (Ignition)

當環境中具備可燃物、氧氣、熱能三要素時便可起火燃燒。並於燃燒放熱過程中，導致周圍環境溫度大幅升高，稱之為點火 (Ignition)，點火可開始於點燃性燃燒及自發性燃燒。

### (2) 火災成長期 (Growth)

生命安全的初始危害風險是在於火災成長期產生之熱量與煙。隨著有火焰之燃燒發生後，火災逐漸發展並延燒擴及到鄰近可燃物，此為火災成長期。火焰的成長速率受限於燃燒的型態以及種類、環境的交互作用和氧氣供應程度；在此時期由於火場溫度較低，且火焰的位置也多半還在火源附近的區域，因此火災成長期為逃生避難的黃金時

期。

### (3) 閃燃期 (Flashover)

於燃燒不完全的可燃物粒子散佈在空氣中達成一定量，再加上燃燒產生的熱與壓力，在瞬間將空氣中的可燃物粒子全部引燃，造成猛烈燃燒，此即為閃燃 (Flashover) 現象。一般而言，若空間內的上方溫度達到  $600^{\circ}\text{C}$  時，或地板表面之熱輻射約達  $20\text{kW}/\text{m}^2$ ，即有很高的機會發生閃燃。

### (4) 完全發展期 (Fully Developed)

當火災發展至閃燃後，火災進入擴展階段，此時火場具有相當高的溫度與熱釋放率，此階段火災為通風控制，火場燃燒的速率受到火場開口流進之空氣量所支配，而此時火場內的溫度將可高達  $1200^{\circ}\text{C}$  以上。

### (5) 衰退期 (Decay)

當可燃物逐漸耗盡，其能量釋出銳減，導致火場內氣體平均溫度陡降，此時燃燒情形由通風控制狀態轉為燃料控制狀態，若無法維持最大燃燒速率時，則燃燒會逐漸衰退。一般以燃燒消耗至 80% 的時間來定義。

## 1. 火源設計 (T-Squared Fires)

設定火源大小是火災危險評估 (fire hazard assessment) 中最重要的一部分，火災產生之濃煙的沈積與煙控系統 (smoke management system) 之設計均受火源的設定不同而受影響。

燃燒初期，當火源成長至一臨界點後，其熱釋放率會與時間的冪次方成正比，故假設火源熱釋放率如 (2.1) 式所示

$$Q = \alpha(t - t_0)^n \quad (2.1)$$

$Q$  : 火源的熱釋放率 (kW)

$\alpha$  : 火源的成長係數 ( $\text{kW}/\text{s}^2$ )

$t$  : 開始燃燒後的時間 (s)

$t_0$  : 有效的著火時間 (s)

$n$  : 1,2,3,4,.....

在 NFPA 92B[35]中，認為大多數的燃燒火源在發展期間的熱釋放率非常低，且其熱釋放率會隨時間變化，因此將火災成長狀況理想化，以拋物線方程式表示，也就是將式 (2.1) 中的  $n$  取 2 並且加入不同火源成長時間的觀念成為如式 (2.2) 所示。

$$Q = \alpha t_g^2 \quad (2.2)$$

$t_g$  : 有效的燃燒後的時間 (s)

此式稱為 "T-Squared Fires"，而 T-Squared Fires 依火源成長速率又可區分成 Ultra-fast、Fast、Medium 及 Slow 四種成長曲線，各種型的火源成長係數與成長時間如表 2-4 所示。因火源防護作用或燃燒空氣缺乏，其熱釋放率會成長至一臨界點後便會停滯，而後其熱釋放率可視為常數，如圖 2-6 所示。各種火源成長型式及其各類代表物質如圖 2-7 所示。

表 2-4 火災成長係數  $\alpha$  值

項目	成長係數	
	$\alpha$ (kW/s <sup>2</sup> )	$\alpha$ (Btu/s <sup>2</sup> )
T-Squared Fires		
緩慢 (Slow)	0.002931	0.002778
普通 (Medium)	0.01127	0.01111
快速 (Fast)	0.04689	0.04444
極快速 (Ultra Fast)	0.1878	0.1778

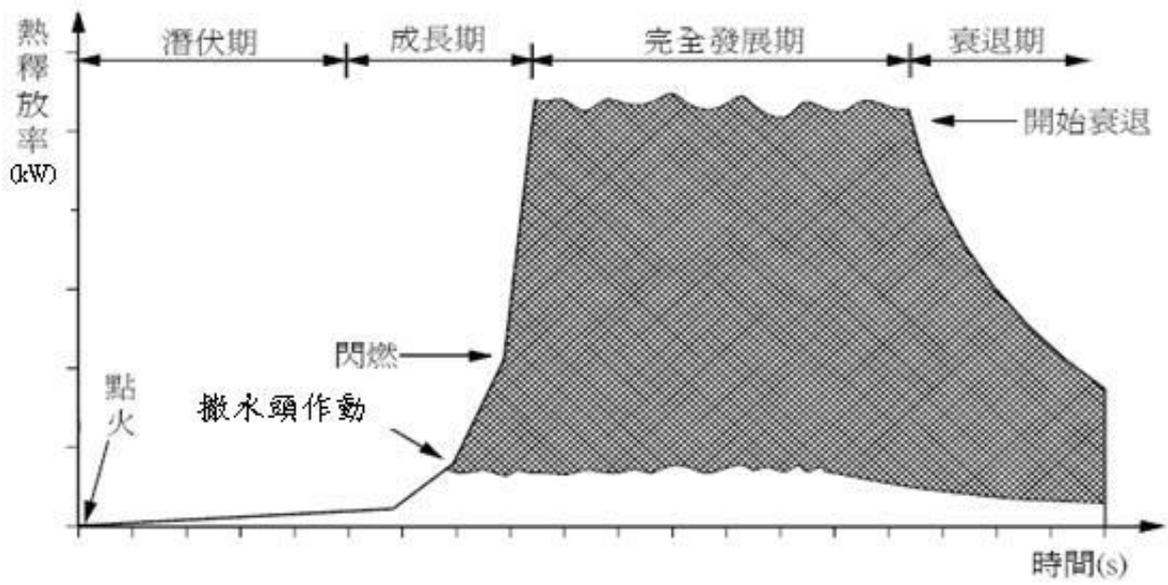


圖 2-5 火災發展過程圖

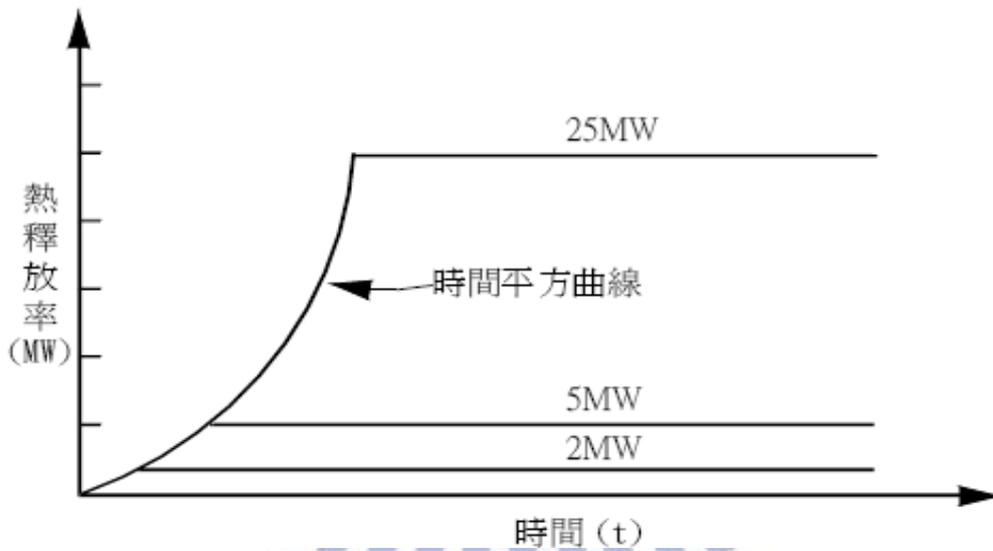


圖 2-6 不同熱釋放率之火災成長曲線圖

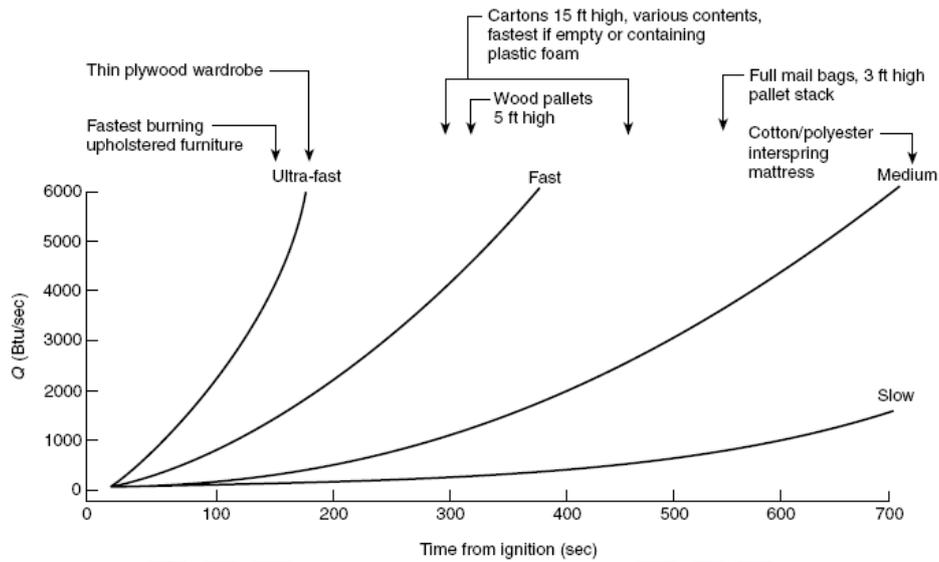


圖 2-7 T-Square 火災成長曲線圖

## 2. 煙沉降率 (N-percent Rule)

在煙層之判定方面，由於實際煙層在沈積時，會在高溫煙層與低溫空氣層之間存在一過渡區域 (Transition Zone)，而此過渡區域底部高度即被稱為初步煙層位置 (First Indication of Smoke)，如圖 2-8 所示。

由於模擬或實驗中無法直接獲得煙層的高度變化，故採用 Cooper 的 N-percent method 來探討煙層與溫度的關係，並利用火場中的溫度變化來推估煙層的沉降高度，其說明如下：

當火源點燃後任一時間，每一組熱電偶中量得溫度最高者減去該熱電偶的環境溫度

$$\Delta T_{ref}(t) = \max [T(z_{all}, t)] - T_{amb}(z_{all}) \quad (2.3)$$

$\Delta T_{ref}(t)$ ：煙層下降至測點的溫度與環境溫度的溫差 (°C)

$T(z_{all}, t)$ ：煙層至某測點的溫度 (°C)

$T_{amb}(z_{all})$ ：當時所在的环境溫度 (°C)

如熱電偶所測得在時間  $t=0$  時的溫度可假設為當時的環境溫度，則可假設  $T_{amb}(z_{all}) = T(z_{all}, t=0)$ ，式 (2.3) 可改寫為：

$$\Delta T_{ref}(t) = \max [T(z_{all}, t)] - T_{amb}(z_{all}, t = 0) \quad (2.4)$$

N-percent method 的理論在時間 t 下熱電偶中有一溫度差升高

$\frac{N}{100} \Delta T_{ref}(t)$  即：

$$T(z_t, t) - T_{amb}(z_i) = \frac{N}{100} \Delta T_{ref}(t) \quad (2.5)$$

一般而言 N 的假設值 (N=10、15、20...) 取的越小則對煙控設計與避難而言是較為保守與安全的，而 NFPA 92B 則建議採 N 值為 80~90 做為煙層高度判斷之依據。

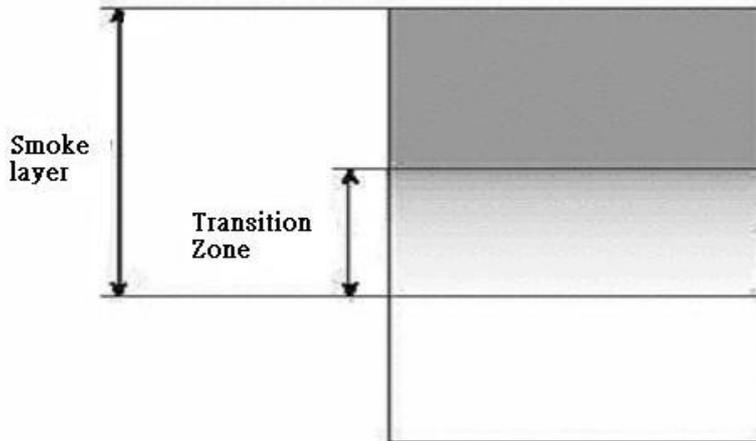


圖 2-8 NFPA 92B 定義之煙層示意圖

### 3. 避難安全界定標準

由於火場中所產生的有毒氣體含有相當多的刺激性與痲痺性成份，因此當濃度過高或暴露其中的時間過長，則容易導致人員吸入過多有毒氣體而昏迷、休克，嚴重的話甚至會導致死亡。此類有毒煙氣大多為有機煙粒及酸性氣體，如氯化氫、一氧化碳與氰化物等。氯化氫會快速引起眼睛、呼吸道與肺的疼痛，接著造成呼吸困難等症狀

火場中除了煙的毒性外，高溫煙流所也會經由對流效應與輻射效應造成人體的皮膚與呼吸道灼傷，而濃煙微粒也會使避難路線遭受封

阻，當避難人員因視線不良而無法辨識避難路線時，往往會因避難不及而造成嚴重傷亡。通常避難人員需有 10 公尺的可視距離才能行經煙區，此時大多數的火源將產生令人眼睛不舒適且刺激的感覺，但還不至於造成避難困難的昏厥現象。

根據上述煙層高度之判斷及大空間建築火災性能式煙控系統設計與應用手冊[36]中所建議並且針對 CO、溫度、能見度以及熱輻射量制訂出在人員全部完成逃生避難之前，建築物內之性質需維持一定的條件如表 2-5 所示。

表 2-5 建議人員逃生安全環境要求

項目	建議人員逃生安全環境要求 (1.8m 高度逃生路徑空間內)
1	逃生環境氣體溫度 < 60°C
2	CO 濃度 < 1500ppm
3	能見度 > 10m
4	熱輻射 < 2.5 kW/m <sup>2</sup>
5	煙層高度 > 1.8m

## 第三章 火場煙流與人員避難行為特性

### 3.1 煙流特性

#### 3.1.1 煙之定義

火災發生時，隨著火焰的燃燒會產生許多有害物質，如熱氣、有害氣體(CO、CO<sub>2</sub>等)、固體微粒及水蒸氣等，也就是一般統稱之煙(smoke)，顆粒大小約為0.01~10微米，於火場中，煙流的擴散速度往往遠大於火焰的延燒速度，它會受空氣的流動的影響，快速的於火場內擴散傳播。根據NFPA318中對煙的定義為，當物質與空氣進行高溫分解或燃燒所傳播於空氣中的固體或液體粒子和空氣的混合物。

在火場中，隨著火焰的擴大往往伴隨著大量的煙流產生，其煙流中的有毒氣體將造成建築物內部人員的呼吸困難，甚至直接致死，而煙流亦會遮蔽人員視線，造成逃生極大的困難，且所到達之處皆會對設備造成損害。故於火災發生時，除了火焰燃燒所造成的危害，煙流所造成的危害會更直接且嚴重。

#### 3.1.2 煙產生之危害

煙流對人員產生之危害主要有毒性氣體引起的窒息與對人體器官的刺激、高溫的氣體直接對人體產生燒燙傷、對人原視線造成阻礙使火場可見度降低等。對設備財產產生之危害主要為其煙流的污染與高溫可能造成的延燒。

##### 一、 毒性 (Toxicity)

一般的物質燃燒時會產生大量的有毒氣體，如一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氰化氫(HCN)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、氨氣(NH<sub>3</sub>)與氯化氫(HCl)等，這些毒性氣體達到一定濃度時，對人體會造成不同程度的危害。於火場中最危險也最普遍的狀況是一氧化碳中毒，因吸入之CO會阻礙人體血液運送氧氣的功能，而造成人體缺氧現象

即為一氧化碳中毒。當燃燒不完全時 CO 會大量產生，當產生之 CO 其濃度達 1% 左右，即會使人停止呼吸，1~2 分鐘就會死亡。當人體吸入含 3%~5% 濃度的 CO<sub>2</sub> 時，會引起頭暈、呼吸困難，當濃度達 10% 以上時會導致噁心及嘔吐，此時未及時補充新鮮空氣可能會導致昏迷甚至神經中樞系統出現麻痺，使人失去知覺而死亡。HCN 是一種迅速致死、窒息性的毒物。NO<sub>2</sub> 對肺刺激性強，吸入初期會導致咽部不適、乾咳等，嚴重能引起即刻死亡以及滯後性傷害。NH<sub>3</sub> 有刺激性，有難以忍受的氣味，對眼、鼻有強烈刺激作用；HCl 是呼吸道刺激劑，會對組織造成灼傷，吸附於顆粒上的氯化氫的潛在威脅性較之等量的氣體要大。所以現場產生之有毒性氣體，是人員最主要傷亡原因。

## 二、 高溫 (Temperature)

煙的高溫也會直接引起人體上呼吸道水腫現象，造成上呼吸道阻塞，而產生窒息現象，火場於燃燒時會釋放出大量的熱量，隨著火焰的擴張，室內溫度快速的升高，其溫度可達 800°C 以上。而人在高溫環境下生存的能力是有限的，於火場中人體可以忍受的程度，溫度 120°C 約為 15 分鐘左右；溫度 140°C 約為 5 分鐘左右；溫度 175°C 皮膚只要 1 分鐘後就會受到嚴重的傷害。而火場中人體可以忍受輻射的程度，在 0.12W/cm<sup>2</sup> 左右尚能長時間忍受，但超過後忍受程度將已大幅降低。

## 三、 遮蔽性 (Light Obscuration)

煙的產生會影響人員時逃生的可見度，使人員看不清周圍環境。在火場中，逃生人員的心裡已處於恐慌的狀態，再加上無法辨識有效的逃生路徑，尤其是對建築物內部環境陌生的人員，會更加的慌亂與不知所措，這是造成火災傷亡嚴重的主因之一。

所謂「煙濃度」係以單位容積之粒子含量或生成之煙灰質量表示，但一般採用煙透視度的光學濃度（亦即，減光係數）表示之，減光係

數與能見度（能見距離）呈反比關係，所以煙濃度愈小，減光係數亦愈小，而能見距離愈大，概如表 3-1 所示。

表 3-1 減光係數與能見距離

減光係數	能見距離	狀況說明
0.1	20~30m	煙霧初期產生的濃度，此時煙霧偵測器開始有反應，對不熟悉建築物動線的人員於此階段會有避難障礙。
0.3	5m	此階段對於熟悉建築物動線的人員亦會造成逃生障礙
0.5	3m	此階段能見度已極低，人員必須摸黑前進。
1.0	1~2m	此階段已幾乎看不見前方。
10	<1m	此階段為火災旺盛期的煙濃度，此時已無法看見前方，連避難誘導燈也幾乎看不見。
30		煙霧自起火室噴出時的濃度。

#### 四、污染性（Pollution）

無塵室中的設備多為高分子塑化材料，一經燃燒將會產生大量濃煙，並隨內部流場擴散至其他區域，將使煙霧瀰漫在整個無塵室密閉空間內，造成潔淨度破壞，使製程中斷，且無塵室內之產品與設備對煙粒子相當敏感，大量的濃煙將造成無塵室極大的損害。

#### 3.1.3 煙的流動特性

煙在建築物內的流動擴散所憑藉的驅使力主要分為兩大類，自然式（Passive）與強制式（Active），而自然式的驅使力包括：煙囪效應、浮力、熱膨脹、自然風等。強制式則區分為空調系統與電梯活塞效應兩種，其中浮力與熱膨脹是由煙流中的高溫所引起，而煙囪效應與自然風則是受當時的外在條件如溫度、風量及風向等影響，空調系統與活塞效應則為建築物的內在設施所引起。上述之驅使力會在火場空間中造成壓力差，進而影響煙的流動，以下將分別討論各驅使力的影響程度。

##### 1. 煙囪效應

當建築物室內空氣溫度高於室外時，由於室內外空氣密度的不同而產生浮力。當建築物內上部的壓力大於室外壓力，下部的壓力小於室外壓力，且當建築物上部外牆上有開口時，室內空氣將沿樓梯間、電梯井、管道井等豎井流動經由上部開口而流向室外，而外界的空氣將經由建築物下部的補氣口補氣，沿樓梯間、電梯井、管道井等豎井流動而流向室內，藉此形成持續向上流動的流場，這就是建築物的煙囪效應。它是由高層建築物內外空氣的密度差造成的，高層建築的外部溫度低於內部溫度而形成的壓力差將空氣從低處壓入，穿過建築物向上流動，然後從高處流出建築物，這種現象被稱為正煙囪效應

(Normal Stack Effect)。在低處外部壓力大於內部壓力，在高處則相反，在中間某一高度，內外壓力相同，稱為壓力中性帶，而壓力中性帶的高低將會大幅影響煙流的擴散情形，在火災發生在較低層時，壓力中性帶將處於較低的高度，此時煙從低層上升至高層內的潛力更大，煙囪效應對豎井和較高層的煙污染較為顯著。由煙囪效應造成的壓力差和氣流分佈，以及中性壓力面的位置，取決於建築物內分隔物的開口對氣體流動的限制程度。火災時，由於燃燒放出大量熱量，室內溫度快速升高，建築物的煙囪效應更加顯著，且因建築物外部持續提供空氣，使火災有足夠的媒介進行燃燒，可能加快其火災蔓延的速度。因此煙囪效應對建築物的空氣的流動起著重要作用。

## 2. 浮力 (Buoyancy)

火災產生之煙流伴隨著極大的熱量，而空氣受熱體積變大，使得密度變小，故會產生浮力，而煙流比周圍為的空氣密度小了許多，故火場中的煙流具有極大的浮力，而煙流流出後會漸漸與周圍空氣混合，降低溫度，其浮力也將隨火源距離越遠而越小。

## 3. 熱膨脹 (Expansion)

煙流內的熱量使氣體體積變大，進而驅使煙流流動，由於火場中氣體溫度快速升高，空氣膨脹過程亦相當迅速，並會造成相當大的壓力，這些壓力將迫使煙流往上及往下的流動，使煙流迅速的擴展。

## 4. 自然風效應 (Wind Effect)

外界風對煙的流動有顯著的效應，當建築物的窗戶、門被打開且直接連接外界時，外界的風向、風力、風速將大幅影響建築物內煙的

流動，且這種影響隨建築物的形狀、規模與對外開口的大小而變化。一般風力作用使得建築物迎風面的牆壁經受向內的壓力，而背風面和兩側的牆壁有朝外的壓力，平頂層上有向上的壓力，這兩種壓力，使外界風從迎風面流入建築物內，從背風面及頂層上開口流出建築物外，而建築物頂上的負壓力對內部的垂直通風管道有一種吸力的作用。同時正的水平風壓力將促使壓力中性面上升，負的水平風壓力將促使壓力中性面下降。

氣密較好的建築物而言，外界風的影響較不顯著。但是火場常發生窗戶玻璃受到火災現場的高溫而膨脹破裂，建築物的氣密性則遭破壞。外界的風可輕易影響內部煙的流動。

#### 5. 空調系統 (HVAC System)

建築物內部的空調系統，往往會在內部形成一流動較快速的流場，且通常空調系統的目的是為了調適工作人員的環境，或控制重要儀器設備的環境溫度與加強散熱效果，如此一來，當火災發生時，大量的煙流隨著內部流場進行擴散，空調系統所造成的流場將會把大量的煙流往工作人員或重要儀器設備輸送，造成危險或損失。且空調系統還可能送大量新鮮空氣到火場，助長燃燒，並可能將煙流於火場中吹散，使偵測系統不易偵測到火災的發生。

相反的，空調系統所造成的流場亦可依照建築物的內部空間進行設計，以控制火災發生時建築物內部的煙霧流動，如可在發生火災時空調系統亦可運用來做為強制排煙系統，則空調系統在緊急狀態時亦能發揮效用。

#### 6. 電梯活塞效應 (Elevator Piston Effect)

當電梯在一豎井中移動時，會在豎井內產生瞬間壓力 (Transient Pressure)，向下移動的電梯，將會迫使在電梯以下部分的空氣，因受擠壓而向豎井外流動，在電梯以上部分的空氣，會被吸入而向豎井內流動。換言之，電梯可視為一個活塞，在電梯上下的移動當中，會壓出與吸入上下方的空氣，形成氣流，造成壓力差。

## 3.2 人員避難行為特性

由於火場中的環境條件變化快速，對火焰及煙流的恐懼會使得人員無法於火場中冷靜的思考並進行應對，且火場中人員可以獲得的資訊有限，難以得到火災即時的發展狀況，故在逃生過程中往往或根據自身的本能反應進行避難動作。在火災發生初期，由於人員不適應火場環境，此時會以自身安全逃離火災為主，而忽略了協助或保護他人的行為，例如離開起火房間後沒有將門關閉，使得火焰穿過起火區劃而擴大延燒，造成其他人的危險。

隨著火勢的擴大，煙流大量的產生，嚴重的影響了逃生人員的生理與心理狀態，並遮蔽了火場中逃生人員的視線，此時人員容易進入恐慌狀態，對與現場的狀況已經難以進行思考，而產生以下特性 [37]：

### 1. 歸巢特性：

人員在遇到危險時，必須立刻選擇路徑進行逃生，此時無法思考最佳的避難路徑，會直接選擇原來進入該場所的路徑或較為熟悉的路徑進行逃生，導致多數人選擇同一出口進行逃生，使該出口產生堵塞的現象，而緊急逃生出口卻僅有少數人使用。

### 2. 推擠特性：

逃生過程中人員向各個逃生口聚集，使得建築物內人員密度開始區域性的變大，移動速度變慢，此時於人群後方的人員會因心理的恐懼而往前推擠，使得人員跌倒受傷甚至遭到後方人員踐踏，而大幅增加逃生的困難。

### 3. 從眾特性：

在危急的情況下，人員容易失去判斷力，此時容易受到他人暗示而行動，或跟隨其他逃生人員進行逃生，此特性易使多數人員由相同路徑進行逃生，但也可利用此特性，藉由工作人員的疏導、廣播或避難標示指引人員進行逃生。

4. 趨光特性：

在火場中，煙霧遮蔽了人員的視線，使得人員無法辨識逃生的方向，此時逃生人員容易朝有光的方向進行移動，故各逃生口與緊急避難標示須確定於火災發生時能保持明亮，以利人員辨別逃生口方向。

5. 左轉特性：

人員在無法辨別方向的交叉口容易選擇左轉路徑進行逃生，故在避難動線的設計上，在動線的交叉口考慮此特性進行設計，將能利於人員逃生。

6. 鴛鴦心態：

當身邊有危急狀況而無法即時進行應變時，人員容易找尋物品阻擋，或逃入較狹隘的空間進行躲避，如逃入廁所或陽台。

7. 躲避特性：

當已知有危險逼近時，人員會本能的往反方向進行逃避，這使得在逃生過程中，若前方人員發現有危險而無法前進，而後方不清楚前方的狀況時，此時會造成嚴重的推擠與堵塞的產生。

## 第四章 模擬軟體與計算方法介紹

### 4.1 建模軟體 PyroSim

本模擬將以建模軟體建構建築物構造及環境條件，以模擬上述之煙流特性。PyroSim 是一個互動式模型建立軟體，做為火災動力學計算軟體 (FDS) 的模組前端設計。此套軟體提供二維及三維的模型建立功能，利用基本的幾何形狀做為物件，並可使用旋轉、複製、移動、鏡射等功能進行模組的創建，並可將創建之模組匯出成 FDS 運行計算的文件格式。該軟體主要可將模組可視化，簡化了分析者建立模型之難度，分析者除了可以使用該軟體進行各種樣式的建築，並可同時設定空間之邊界條件，除了可降低建模之困難度，亦可減少分析者在空間建立及邊界條件設定發生錯誤之可能，或是在第一時間即可進行修正。

其模型建立的步驟如下：

#### 1. 建立網格 (Meshes)

透過 Meshes 可將所建之模型劃分網格，就網格建立的方法可分為單一網格 (Uniform Meshes) 及非單一網格 (Nonuniform Meshes)，由於網格的大小會影響模擬過程中產生誤差的程度，故在火場中氣流較為複雜的區域 (如火源附近) 必須使用較密之網格 (較小尺寸之網格)，而在較為龐大之模型內使用單一網格易造成網格數過多導致運算時間過長或是無法分析之情形，但放大網格大小又會導致計算結果誤差過大，故使用非單一網格，將模型切割為多個空間，根據各空間之流場複雜度以不同大小之網格進行劃分，一般以火源附近區域使用最小之網格，而向外區域則可略為放大。

#### 2. 建立幾何外觀 (Obstruction)

在 PyroSim 繪圖的介面中，可透過 3D、2D 及建入程式碼的方式繪製各樓層空間幾何，在 2D 的建構模式中，可匯入建

築平面圖做為參考，可大幅簡化建築物輪廓的繪製，複雜之建築空間以 2D 方式進行較為快速。

### 3. 表面性質設定 (Surface)

建立起外觀模型後，可針對模型內的各個物件 (Obstruction) 進行表面設定或增設平面 (vent) 設定性質，如設定該表面的材質或設定該表面可具有的功能 (火源、通風口、排煙口等)。

### 4. 消防設備設置與量測點設定 (Devices)

建模過程中可依建築設計建立撒水設備、火警探測器以及機械排煙設備，而於 Devices 設定中可設定灑水頭、偵煙器、溫度或 CO 濃度量測點等參數，並可設定該功能發動的條件與該條件達成後引發的效果，例如機械排煙設備以 vent 進行設定後，可與偵煙器或量測點等進行連動，當偵煙器偵測煙流減光率達 15% 或溫度量測點量測到溫度達到 100°C 時排煙機制啟動，此功能大為提升模擬之真實度。

### 5. 初始條件與邊界條件設定

模擬空間可依據實際建築物的環境條件於軟體中設定初始條件與邊界條件，如環境溫度、外界氣流或內部空調氣流等，而氣流的設定為利用表面性質設定 (Surface) 之功能進行模擬，故需於模擬初期進行該氣流場的模擬，待氣流場達穩態時，再進行火災模擬。

## 4.2 火災模擬軟體 (FDS)

FDS (Fire Dynamics Simulator)，是由美國國家標準與科技研究所 (National Institute of Standard and Technology；NIST) 發展之模擬火場計算軟體。於西元 2000 年 2 月公開發表第一版，現於西元 2010 年 10 月公開發表第五版 (5.5.3 版)。

FDS 是計算流體力學程式軟體 (Computational Fluid Dynamics；CFD)，全名為 Fire Dynamics Simulator，是一支由 NIST 發展在低馬

赫數的火災計算流體力學程式，可以計算三維空間火災行為，它的計算運作方式是先將整個空間分割成許多細小的格點，再以質量、動量、能量、燃燒與熱傳守恆等統御方程式下去求解。當計算完成後在利用後處理軟體 Smokeview 將流場可視化，後處理軟體 Smokeview 亦於西元 2010 年 10 月公開發表第五版（5.6 版）。FDS 軟體核心是 Navier-Stokes 方程組，利用有限元素方式以解析於低馬赫數之流場下的火場成長狀況，著重在煙霧流動與熱傳遞的現象，同時也可以模擬撒水頭動作時計算火場的變化。

使用 FDS 過程中，必須先將模擬之幾何形狀、材料特性、火源大小、排煙設備、補氣口、環境溫度、模擬時間以及其他邊界條件等，以固定之格式輸入至一文字檔(\*.data)，再由 FDS 軟體開始計算，由於 FDS 本身並沒有將流場可視化之功能，故需要再利用後處理軟體 Smokeview 來讀取 FDS 所計算出之數據來做進一步的分析與探討。FDS 之分析流程如圖 4.1 所示。

FDS 計算之主要的統御方程式如以下所介紹。

#### 1. 流體力學之統御方程式

##### (1) 質量守恆 (Conservation of Mass) 方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (4.1)$$

其中  $\rho$ ：流體密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$u$ ：流體速度 (m/s)

$t$ ：時間 (s)

##### (2) 動量守恆 (Conservation of Momentum) 方程式

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (4.2)$$

其中  $p$ ：壓力 (nt/m<sup>2</sup>)

$g$ ：重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$f$  : 外力 (nt/m<sup>3</sup>)

$\tau$  : 黏滯剪應力張量 (nt/m<sup>2</sup>)

(3) 能量守恆 (Conservation of Energy) 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{DP}{Dt} = Q - \nabla \cdot q'' + \nabla k \nabla T + \nabla \cdot \sum_{\ell} h_{\ell} (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} \quad (4.3)$$

其中  $\frac{DP}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla P$  (質量導數)

$h$  : 焓 (kJ/kg)

$Q$  : 熱釋放率 (kw)

$q''$  : 輻射熱通量 (kw/m<sup>2</sup>)

$k$  : 熱傳導係數 (kw/mk)

$T$  : 溫度 (°C)

$h_{\ell}$  :  $\ell$  物種之焓值 (kJ/kg)

$D$  : 擴散係數 (m<sup>2</sup>/s)

$Y_{\ell}$  :  $\ell$  物種之質量分率

(4) 物種守恆 (conservation of Species) 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\ell}) + \nabla \cdot \rho Y_{\ell} u = \nabla \cdot (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} + \dot{W}_{\ell}''' \quad (4.4)$$

其中  $\dot{W}_{\ell}'''$  :  $\ell$  物種單位體積生成率

(5) 狀態方程式

$$P = P_o - \rho_{\infty} g Z + \tilde{P} \quad (4.5)$$

對低馬赫數流而言

$$P_o = \rho T R \sum (Y_i / M_i) = \rho T R / M \quad (4.6)$$

其中  $P_o$  : 外界壓力 (nt/m<sup>2</sup>)

$\rho_{\infty} g Z$  : 靜壓 (nt/m<sup>2</sup>)

$\tilde{P}$  : 擾動壓力 (nt/m<sup>2</sup>)

(6) 擴散 LES(Large Eddy Simulation)模型

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 \left( 2(\text{def} \vec{u}) \cdot (\text{def} \vec{u}) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

其中  $C_s$  : 經驗常數

$\Delta$  : 格點長度

$$\begin{aligned} \Phi \equiv \tau \cdot \nabla \vec{u} &= \mu \left( 2(\text{def} \vec{u}) \cdot (\text{def} \vec{u}) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \right) \\ &= \left\{ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right\} \\ &\quad - \left\{ \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

定義  $(\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc}$

(4.9)

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} \quad (4.10)$$

其中  $Pr$  : 普朗特常數 (Prandtl number)

$Sc$  : 舒密特常數 (Schmidt number)

## 2. 差分方程式

### (1) 時間之離散

對時間項的離散，FDS 採用 Second order predictor-corrector scheme。在每個 time-step 開始的時候， $\rho^n$ 、 $Y_i^n$ 、 $\bar{u}^n$ 、 $H^n$  與  $p_0^n$  均為已知，需特別注意的是，上標  $(n+1)_e$  代表的是第  $(n+1)$  個 time-step 時程式預估出來的值。

1. 熱物理性質  $\rho$ 、 $Y_i$  和  $p_0$  是利用顯性的尤拉法 (explicit Euler step)

得到，例如密度可由下式預估

$$\rho^{(n+1)_e} = \rho^n - \delta t (\bar{u}^n \cdot \nabla \rho^n + \rho^n \nabla \cdot \bar{u}^n) \quad (4.11)$$

2. 解壓力的 Poisson 方程式則可由

$$\nabla^2 H^n = -\frac{(\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^n \quad (4.12)$$

$\bar{F}$  這一項包含了動量方程式裡得對流、發散及外力項。速度則由下個 time-step 預估

$$\bar{u}^{(n+1)_e} = \bar{u}^n - \delta t(\bar{F}^n + \nabla H^n) \quad (4.13)$$

而 time-step 必須符合

$$\delta t < \min\left(\frac{\delta x}{u}, \frac{\delta y}{v}, \frac{\delta z}{w}\right) \quad (4.14)$$

3. 前述兩者算完之後，熱物理性質  $\rho$ 、 $Y_i$  和  $p_0$  將在下一個 time-step 做校正。例如密度將寫成

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2}(\rho^n + \rho^{(n+1)_e} - \delta t(\bar{u}^{(n+1)_e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)_e} + \rho^{(n+1)_e} \nabla \cdot \bar{u}^{(n+1)_e})) \quad (4.15)$$

4. 透過之前預估出來的結果來重新計算壓力

$$\nabla^2 H^{(n+1)_e} = -\frac{2(\nabla \cdot \bar{u})^{n+1} - (\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^{(n+1)_e} \quad (4.16)$$

更正過的速度如下

$$\bar{u}^{n+1} = \frac{1}{2}[\bar{u}^n + \bar{u}^{(n+1)_e} - \delta t(\bar{F}^{(n+1)_e} + \nabla H^{(n+1)_e})] \quad (4.17)$$

## (2) 空間之離散

所有空間項的離散皆採用二階中央差分法 (Second order central difference)，整個計算的範圍是一個被長方體格點分割的長方體。每個格點裡面，用  $i$ 、 $j$  和  $k$  分別代表格點的  $x$ 、 $y$  及  $z$  方向。所有線性的量 (如密度) 都是在格點的中心給定，例如  $\rho_{ijk}^n$  代表的是第  $n$  個 time-step 格點  $i$ 、 $j$ 、 $k$  裡的密度。向量的值則是在格點的表面給定。

## (3) 收斂條件

FDS 軟體在數值計算方法上，主要採 LES (Large Eddy Simulation 大尺度渦流模擬方法) 模式進行計算。對計算疊代時間 (time step)，

程式會根據 CFL 穩定條件 (Courant-Friedrichs- Lewy condition) 與 VN 穩定條件(Von-Neumann condition)，依據計算所得之速度數值與物理量，自動進行疊代時間  $\delta t$  (time step) 之調整，使計算過程中之 CFL 數與 VN 數均介於 0.8 至 1 之間，以達到數值方法的計算之收斂。

$$CFL = \delta t \max \left( \frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) \quad (4.18)$$

$$VN = 2 \max \left( \nu, D, \frac{k}{\rho C_p} \right) \delta t \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad (4.19)$$

$\delta t$  : 疊代時間 (time step)

$u, v, w$  : 速度分量

$\delta x, \delta y, \delta z$  : 網格大小

$\nu$  : 黏滯係數(viscosity)

$D$  : 擴散係數(diffusivity)

$k / \rho c_p$  : 熱導率(thermal conductivity)

### 3. 燃燒模式

FDS 中提供混合比燃燒模式 (Mixture Fraction Combustion Model; MFCM) 及有限速率反應模式，主要差別在於 MFCM 是以氧消耗率之原理來計算熱釋放率，有限速率反應模式則是使用有限速率化學反應方程式來描述燃燒之化學反應。

混合比燃燒模式 (Mixture Fraction Combustion Model)



其中  $V_i$  :  $i$  分子化學反應當量係數

對化學當量反應而言

$$\frac{\dot{m}_F'''}{V_F M_F} = \frac{\dot{m}_O'''}{V_O M_O} \quad (4.21)$$

$M_i$  :  $i$  分子之莫耳重量 (kg)

$m_i$  :  $i$  分子之質量消耗率 (kg/s)

定義  $z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F^I + Y_O^\infty}$  ;  $s = \frac{V_O M_O}{V_F M_F}$  (4.22)

其中  $Y_O^\infty$  : 氧氣於大氣中之質量分率

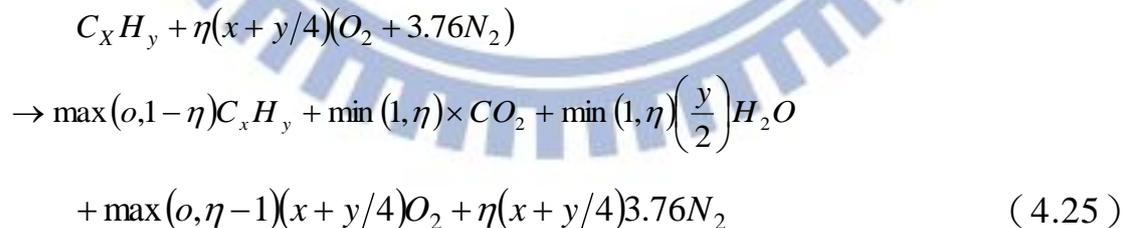
$Y_F^I$  : 燃料之質量分率

在此模式中假設，當燃料與氧同時存在同一空間時，便隨即產生化學反應，因此火焰面 ( $Z_f$ ) 可定義為：

$$Z(x, t) = Z_f ; Z_f = \frac{Y_O^\infty}{sY_F^I + Y_O^\infty} \quad (4.23)$$

$$\text{且 } Y_O(Z) = \begin{cases} Y_O^\infty (1 - Z/Z_f) & Z < Z_f \\ 0 & Z > Z_f \end{cases} \quad (4.24)$$

由上述定義對一般碳氫化合物燃料之化學反應可以下式表示：



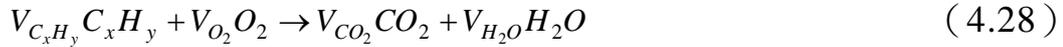
針燃燒反應之熱釋放率  $\dot{q}'''$  則由氧氣消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_o \dot{m}_O''' \quad (4.26)$$

其中  $\Delta H_o$  代表單位質量之氧消耗時之熱釋放率，且由氧氣之質量守恆可導出

$$-\dot{m}_o'' = \nabla \left( \rho D \frac{dY_o}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_o}{dZ} \nabla \cdot \rho D \nabla Z = \rho D \frac{d^2 Y_o}{dZ^2} |\nabla Z|^2 \quad (4.27)$$

以上為混合比燃燒模式在計算熱釋放率之原理，至於在有限速率反應模式中則是以下列方程式表示之。



其化學反應速率以單一步驟之反應式表之，藉此求得熱釋放率。

$$\frac{d[C_x H_y]}{dt} = -B [C_x H_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (4.29)$$

其中  $B$ ：反應常數 (pre-exponential factor for arrhenius reaction)

$E$ ：活化能 (kJ/mol)

#### 4. 熱輻射之統御方程式

FDS 之熱輻射傳統御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)], \quad n=1, \dots, N \quad (4.30)$$

$$\text{其中 } I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi \quad (4.31)$$

$$I \cdot (x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (4.32)$$

$I$ ：輻射熱強度 (kw/m<sup>2</sup>)

$k$ ：吸收係數

$\lambda$ ：波長 (m)

$\sigma$ ：史蒂芬-波茲曼 (Stefan-Boltzman constant)

對於牆面之熱輻射，FDS 採用之邊界條件如下：

$$I_w(S) = \varepsilon I_{bw} + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (4.33)$$

其中  $I_w$ ：牆面之輻射熱強度 (kw/m<sup>2</sup>)

$S$ ：單位向量

$\varepsilon$  : 放射率

$I_{bw}$  : 牆面黑體輻射強度 (kw/m<sup>2</sup>)

上述統御方程經有限體積法轉換後，再經由假設任一隔面之輻射強度相同，便可得知輻射熱通量。

$$q_r(x) = \int SI(x, s)d\Omega \quad (4.34)$$

因此能量守恆方程式中輻射熱之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x)[U(x) - 4\pi I_b(X)]; U(x) = \int_{4\pi} I(x, s)d\Omega \quad (4.35)$$

## 5. 邊界條件

FDS 中提供四種型態之邊界條件供使用者作選擇：1.絕熱、2.特定溫度（溫度可為時間之函數）、3.熱薄型燃料模式及 4.熱厚型燃料模式。

根據所計算出邊界吸收或放出的熱量，配合不同材料裂解之模式，敘述各種相異邊界因受熱所產生的化學變化，再進一步計算其對模擬空間所造成的影響。

在 LES 計算模式中

$$\dot{q}_c'' = h\Delta T ; h = \max \left[ C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left( \frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \right] \quad (4.36)$$

$\Delta T$  : 邊界與氣態分子間之溫差(°C)

$C$  : 自然對流係數(經驗常數，此模式中預設在水平面時  $C = 1.43$ ，垂直面  $C = 0.95$ ) (kw/m<sup>2</sup>)

$L$  : 特徵長度 (m)

$V$  : 動黏滯係數 (m<sup>2</sup>/s)

1. 熱厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(o,t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (4.37)$$

其中  $\rho_s$  : 固態燃料密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_s$  : 固態燃料比熱 ( $\text{kJ/kg k}$ )

$\dot{q}_c''$  : 對流熱通量 ( $\text{kw/m}^2$ )

$\dot{q}_r''$  : 輻射熱通量 ( $\text{kw/m}^2$ )

$T_s$  : 固態燃料溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

2. 熱薄型固態燃料 (假設溫度在垂直固態燃料方向為均勻分佈)

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (4.38)$$

其中  $\delta$  : 固態燃料厚度(m)

3. 液態燃料

燃燒時液體燃料蒸發，此現象為一函數，且與溫度與蒸氣濃度有關。當液體表面蒸氣之分壓等於 Clausius-Clapeyron 壓力時，將達平衡狀態。

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[ -\frac{h_v M_f}{\mathcal{R}} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (4.39)$$

其中  $h_v$  : 蒸發熱

$M_f$  : 分子重

$T_s$  : 表面溫度

$T_b$  : 燃料沸騰溫度

FDS 在求解以上之統御方程式、燃燒模式、熱輻射模式以及邊界條件上的計算上皆採用大渦流模擬法 (Large Eddy Simulation, LES) 計算方法，LES 法是將流體物理量區分為大尺度(grid-scale)及次網格

尺度 (sub-grid scale, SGS) 兩部份。對於大尺度的物理量在 LES 中直接由 Navier-Stokes 方程式求解；而在次格點尺度內的物理量，將小於網格尺寸之漩渦或紊流以次網格紊流模式 (Sub-grid Turbulence Model) 表示，並直接計算流場暫態變化。另依方面 FDS 亦提供了 DNS 之計算方法，但由於 DNS 法需大量實驗資料作驗證而在計算上同時也需要相當龐大之硬體設備，因此考量學術上與工程上之實用性與經濟效應，本研究採用 FDS 技術手冊上建議使用之 LES 模式，DNS 法相關之模式內容則未於本論文中列舉。

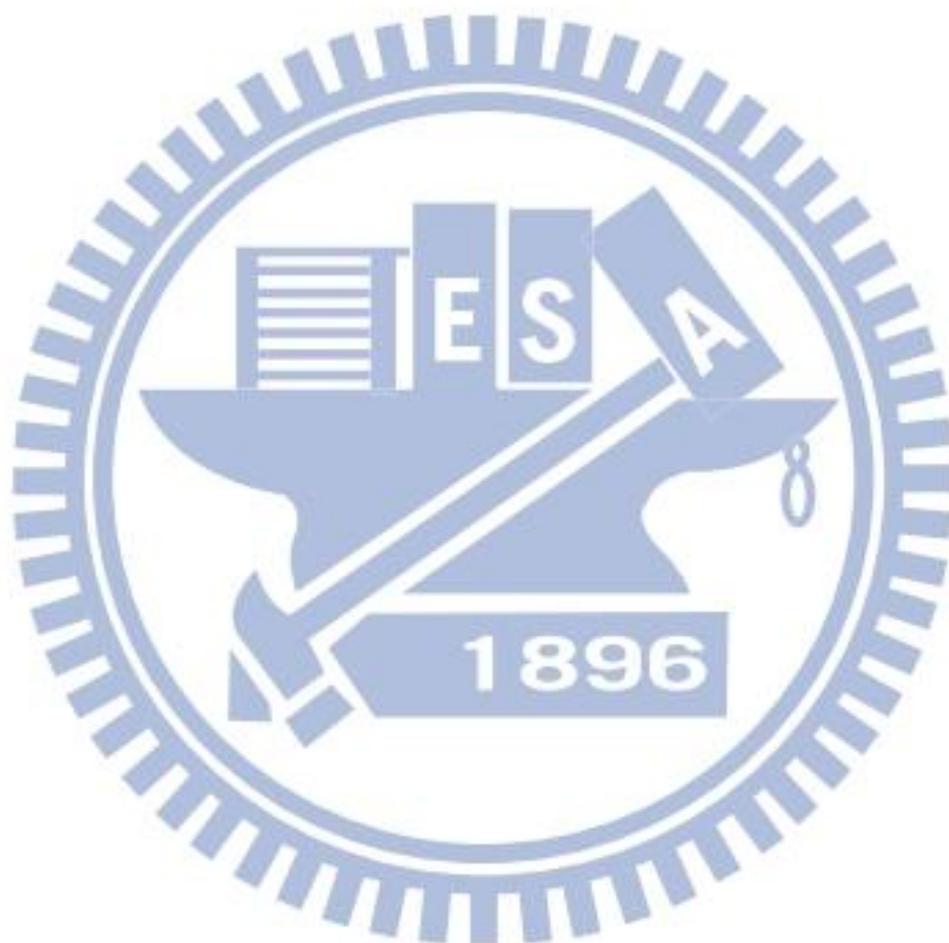
## 6. 平行運算

FDS 在運算的過程中會大幅的佔據電腦的記憶體與 CPU，而由於電腦硬體上的限制，故在格點的設計上必須限定格點的數量，以避免格點數過多，硬體無法負荷而導致 FDS 無法運行或需要極長的運算時間。而在模擬大型的建築物時，為了限定格點的總數量，則需要使用較大的體積格點進行設計，在數值模擬中，為了提高模擬的準確度，會希望格點能越小越好。

為了解決格點數限制，FDS 可利用平行運算串連多個核心進行運算，提高運算的速度，進而可以使用較小的格點數進行模擬。FDS 利用 MPI (訊息傳遞介面；Message Passing Interface) 這套函數庫及網路串連多顆核心，MPI 主要是描述訊息傳遞的函式庫，也是為了滿足高效能計算族群所需要的高效率核可攜性軟體，可用來處理分散計算之下不同計算節點之間資料之交換，可以使用在 Fortran、C、C++ 等語言撰寫的程式上，它提供了一百多個副程式，讓程式人員來選用。目前最通用的 MPI 軟體是美國的 Argonne National Lab 和 Mississippi 州立大學所發展出來的免費軟體 MPICH。

MPICH 是一套符合 MPI 規範的程式庫，且提供了跨平台、高度可調整性…等特質，如此一來可以輕易的處理分散計算時資料的交換，極適合各種平行計算模式。

利用 MPICH 可將 FDS 設定之多個網格組分配給多顆核心進行運算，而在網格組數量設定上須依照平行核心數進行設定，如平行四顆核心即設定四組網格，若以四顆核心計算五組網格，則會有一顆核心需要負擔兩組網格的計算量，而拖慢了運算的速度，而各網格組的網格數量須評估其計算量進行分配，避免單一核心負擔較大的計算量，而減緩了其於核心計算的速度。



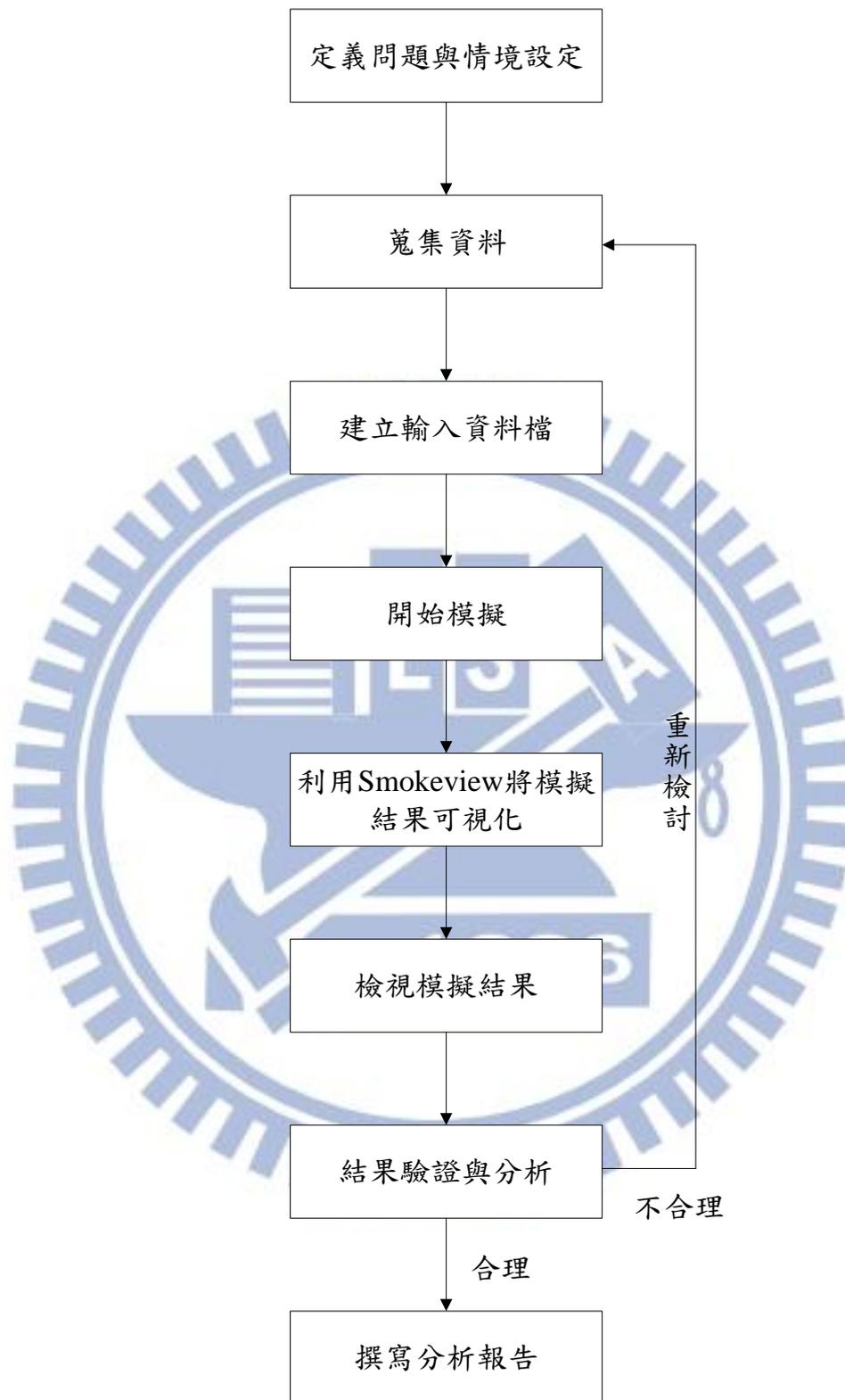


圖 4-1 FDS 分析流程圖

## 4.3 避難模擬軟體

### 4.3.1 Simulex

Simulex 是由英國的 Fire Safety Group 所發展的避難模擬軟體，可模擬人群於複雜之建築物內的避難行為，其程式的特色為一以避難人員間的距離來決定步行速度，與一般使用人員密度來決定步行速度不同。

模擬的過程首先需假設相關參數，首先是利用 AutoCAD 程式繪製建築空間配置平面圖，然後將平面圖匯入 Simulex 軟體中，同時設定逃生出口級與各樓層連接之樓梯口，完成空間的配置。然後進行人員的設定，包括人數、人員之間的距離、步行速度、性別及年齡組成比例等各項參數進行模擬。Simulex 之模擬流程如圖 4-2 所示。

人員的尺寸 Simulex 係以三個圓圈來分別代表人員的軀幹及肩膀（手臂）部位（如圖 4-3 所示），而程式本身提供了 4 種人體尺寸以為模擬之用，使用者可依照建築物用途的不同來選擇所需使用的尺寸。人員步行速度則是依據最基本的兩點間距離公式，同時判斷人員在避難過程中是否重疊，大約離前方人員 1.6 公尺以上時，人員需依最快的速度前進。但當距離前方人員 0.3 公尺以下，步行速度將會減低為零，形成滯留現象，距離與步行速度之關係如圖 4-4 所示。Simulex 軟體亦提供多種人群屬性分佈（如表 4-1 所示），可針對不同建築物之實際場合，設定不同屬性人群的百分比，以更貼近實際逃生人員的狀況。

依據上述步驟進行設定後，即可進行模擬，Simulex 可於模擬過程中提供 2D 的動態逃生狀況，故可於模擬過程中觀察人員逃生的動向是否合理，以及時修正其不合理處，獲得最接近實際狀況的逃生時間。

表 4-1 不同人群模式之男女分布表

人群模式	%平均	%男性	%女性	%兒童
辦公室員工	30	40	30	0
乘客	30	30	30	10
購物者	30	20	30	20
學童	10	10	10	70
老人	50	20	30	0
所有男性	0	100	0	0
所有女性	0	0	100	0
所有兒童	0	0	0	100

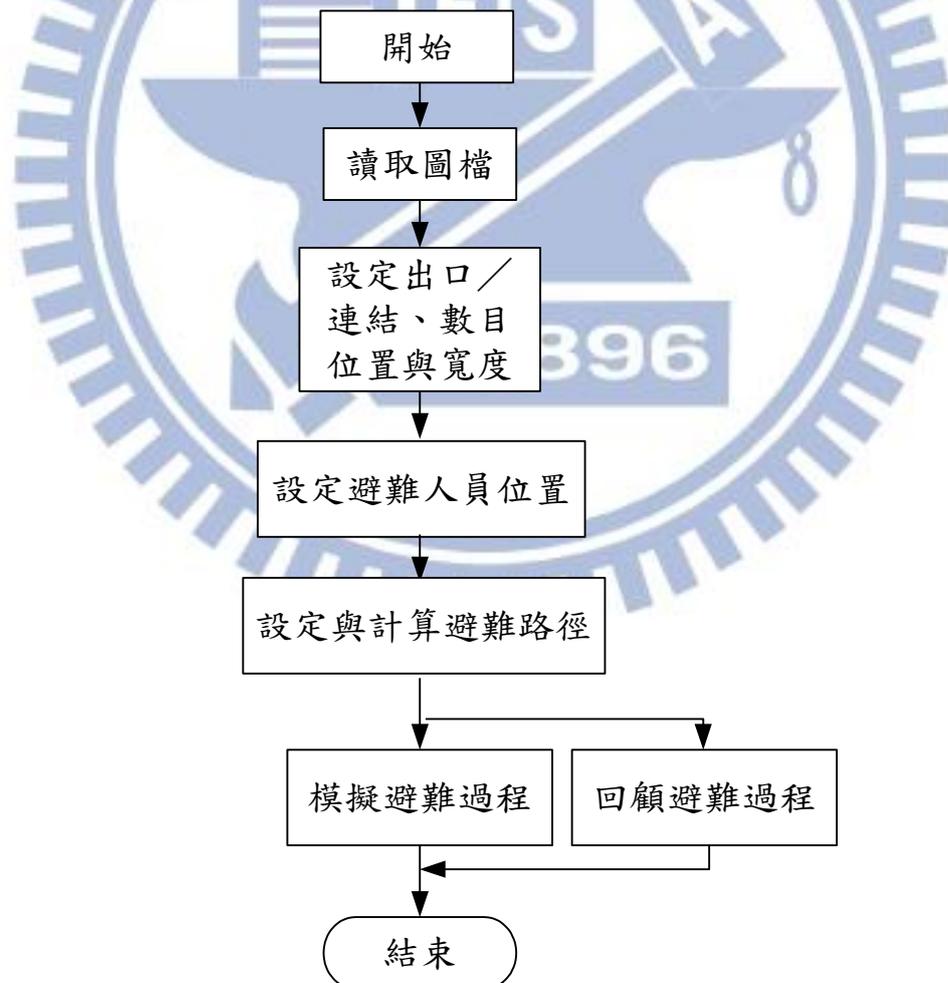


圖 4-2 Simulex 模擬流程

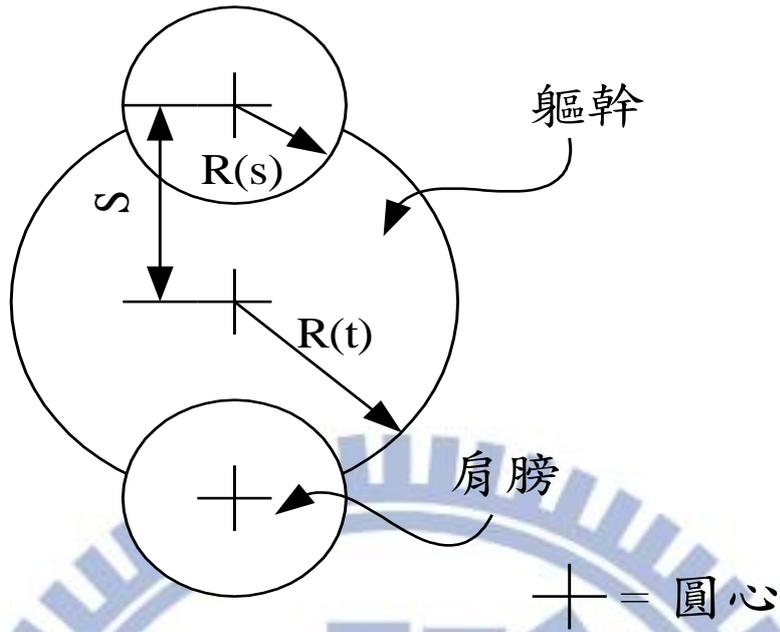


圖 4-3 模擬人體尺寸示意圖

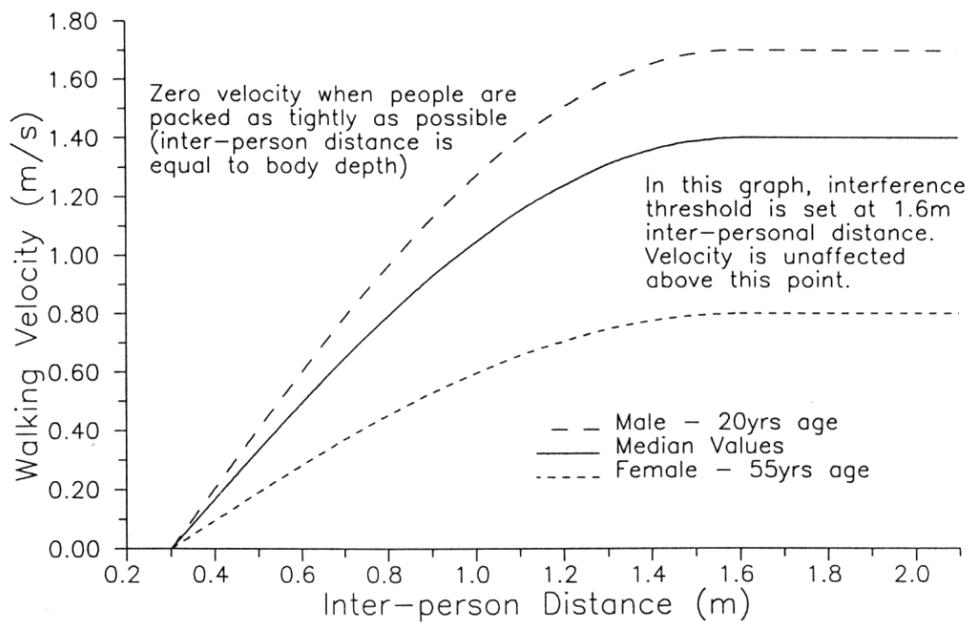


圖 4-4 人員間距離與步行速度之關係

### 4.3.2 FDS+Evac

FDS+EVAC 是由芬蘭的 VTT 技術研發中心 (VTT Technical Research Centre of Finland) 開發的避難計算模型，做為 FDS 的附屬程式進行，可將逃生模擬與火災模擬進行結合，模擬火災的即時狀況對逃生人員的影響，故稱為 FDS+EVAC (Fire Dynamics Simulator with Evacuation)，第一版於西元 2007 年隨 FDS5 問世，現於 2010 年隨 FDS5.5.3 版更新至 2.3.1 版。

FDS+Evac 將逃生人員視為粒子，依據 Helbing[38]的「社會力」演算模型做為基礎，針對每個逃生個體所受到周遭的影響力進行計算。Helbing 的人體表示方式使用單圓周模型，經 Langston 以及 Korhonen 等人的理論，修正為以三個圓周來表示人體的模型 (如圖 4-5)，在計算的過程中，三個圓周被視為有彈性的三個圓在二維的平面上運動，而針對不同的群體設有不同的身體尺寸與移動速度，人體的預設尺寸與移動速度如表 4-2 所示，每個人的身體尺寸與移動速度為設定範圍內均勻分布的亂數。

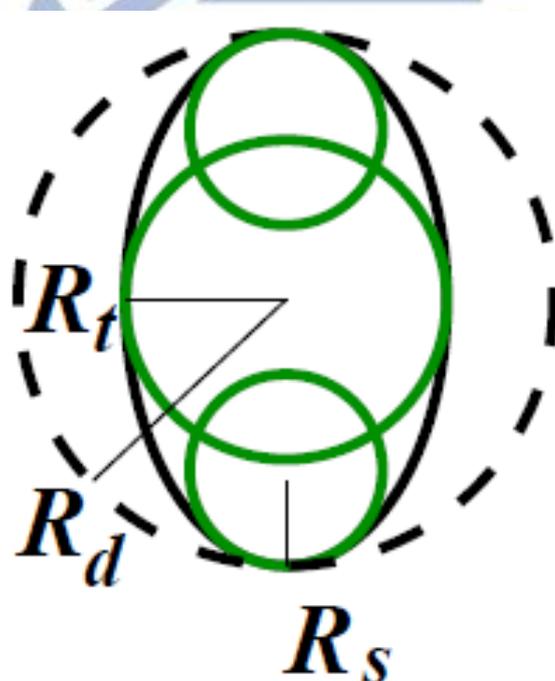


圖 4-5 FDS+Evac 模擬人體尺寸示意圖

表 4-2 FDS+Evac 預設人體尺寸與移動速度

身體類型	$R_d(m)$	$R_t/R_d$	$R_s/R_d$	$d_s/R_d$	Speed(m/s)
成人	0.255±0.035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25±0.30
男性	0.270±0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.35±0.20
女性	0.240±0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15±0.20
小孩	0.210±0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.90±0.30
老人	0.250±0.020	0.6000	0.3600	0.6400	0.80±0.30

FDS+Evac 以牛頓運動方程式為基礎，針對每個逃生個體進行計算，運用兩大方向的方程式，控制粒子的移動及旋轉，其方程式如下所示：

1. 移動方程式：

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \xi_i(t) \quad (4.40)$$

$m_i$ ：個體  $i$  的質量。

$x_i(t)$ ：個體  $i$  在時間  $t$  時的位置。

$f_i(t)$ ：周圍環境對個體  $i$  產生的外力。

$\xi_i(t)$ ：一個很小的不規則力。

而個體  $i$  所受到的外力由許多不同的力組成，如下式所示：

$$f_i = \frac{m_i}{\tau_i} (v_i^0 + v_i) + \sum_{i \neq j} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^{att} + f_{ij}^c) + \sum_{i \neq w} (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c) + \sum_{i \neq k} f_{ik}^{att} \quad (4.41)$$

$\frac{m_i}{\tau_i} (v_i^0 + v_i)$ ：人群疏散的驅動力。

$\sum_{i \neq j} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^{att} + f_{ij}^c)$  : 描述人對人產生的影響力。

$\sum_{i \neq w} (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c)$  : 描述牆對人產生的影響力。

$\sum_{i \neq k} f_{ik}^{att}$  : 描述環境對人產生的影響力。

人群疏散的驅動力提供每個個體以自己的步行速度朝出口移動的力量，其中  $v_i^0 = |v_i^0|$  為個體  $i$  的最快步行速度，寬鬆時間參數  $\tau_i$  確定驅動力。

人對人產生的影響力由三個部分組成，其中描述社會力  $f_{ij}^{soc}$  的非均質方程式由 Helbing 等人提出，細節如下說明：

$$f_{ij}^{soc} = A_i e^{\frac{-(r_{ij}-d_{ij})}{B_i}} (\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos \varphi_{ij}}{2}) n_{ij} \quad (4.42)$$

$A_i$  : 邏輯力。Helbing 使用值為 2000N。

$r_{ij}$  : 個體  $i$  與個體  $j$  圓周中心之間的距離。

$d_{ij}$  : 個體  $i$  與個體  $j$  圓周半徑 ( $R_d$ ) 的和。

$B_i$  : 設定距離。Helbing 使用值為 0.08。

$\lambda_i$  : 控制各向異性社會力量的參數。當  $\lambda_i = 1$ ，則是相互對稱的力量；當  $0 < \lambda_i < 1$ ，則後方人員受前方人員影響力較大。

$\varphi_{ij}$  : 人員  $i$  與人員  $j$  運動方向的夾角。

$n_{ij}$  : 人員  $j$  指向人員  $i$  的單位向量。

實際上每個人應該有不同的 $A_i$ 、 $B_i$ 及 $\lambda_i$ 的參數值，但在目前的FDS+Evac內的預設值，是把每個人當作具有相同的值。而牆對人的影響力 $f_{iw}^{SOC}$ 被認為與人對人的影響力 $f_{ij}^{SOC}$ 是相似的，使用 $A_w$ 、 $B_w$ 及 $\lambda_w$ 的值作為計算力量的常數。

人與人的接觸力 $f_{ij}^c$ 如下式所示：

$$f_{ij}^c = [k(d_{ij} - r_{ij}) + c_d \Delta v_{ij}^n] n_{ij} + \kappa(d_{ij} - r_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (4.43)$$

$\Delta v_{ij}^t$ ：圓周接觸時的切向速度差。

$\Delta v_{ij}^n$ ：圓周接觸時的正向速度差。

$c_d$ ：物理阻尼參數。

$t_{ij}$ ：圓周接觸點的單位切向向量。這個力僅用於人員相互接觸時。

$k$ ：摩擦係數

牆對人的影響力 $f_{iw}^{SOC}$ 被認為與人對人的影響力 $f_{ij}^{SOC}$ 是相似的，並具有相同的力常數。 $f_{ij}^{att}$ 用來描述不同群組人與人之間的吸引力或排斥力，如群集行為或「成人-孩童」之間產生的相互作用。

2. 旋轉方程式：

$$I_i^z \frac{d^2 \varphi_i(t)}{dt^2} = M_i^z(t) + \eta_i^z(t) \quad (4.44)$$

$I_i^z$ ：轉動慣量。

$\varphi_i(t)$ ：個體 $i$ 在時間 $t$ 時的角度。

$M_i^z(t)$ ：周圍環境對個體 $i$ 產生的扭矩。

$\eta_i^z(t)$  : 一個很小的不規則扭矩。

每個人都有自己的旋轉運動方程式，而個體  $i$  所受到環境作用的總扭矩如下式所示：

$$M_i^z = M_i^c + M_i^{soc} + M_i^{\tau} \quad (4.45)$$

$$M_i^c = R_i^c \times f_{ij}^c \quad (4.46)$$

$$M_i^{soc} = R_i^{soc} \times f_{ij}^{soc} \quad (4.47)$$

$$M_i^{\tau}(t) = \frac{I_i^z}{\tau_i^z} \left[ \frac{\varphi_i(t) - \varphi_i^0}{\pi} \omega_i^0 - \omega_i(t) \right] = \frac{I_i^z}{\tau_i^z} [\tilde{\omega}_i^0 - \omega_i(t)] \quad (4.48)$$

$M_i^c$  : 個體  $i$  所受的接觸力扭矩。

$M_i^{soc}$  : 個體  $i$  所受的社會力扭矩。

$M_i^{\tau}$  : 個體  $i$  所受的動力扭矩。

$R_i^c$  : 個體  $i$  圓周中心指向接觸點的徑向向量。

$R_i^{soc}$  : 個體  $i$  圓周中心指向社會力假想接觸點的向量。

$\omega_i^0$  : 個體  $i$  最大角速度。

$\omega_i(t)$  : 個體  $i$  於時間  $t$  時的角速度。

$\varphi_i(t)$  : 個體  $i$  於時間  $t$  時的角度。

$\varphi_i^0$  : 個體  $i$  的目標角度。

在 FDS+Evac 中，人員逃生的方向是利用建立向外的流場來決定，FDS+Evac 將所有逃生人員視為粒子，並將每個逃生出口設置一個往

外吹送的氣流，使人員的逃生環境內產生一個二維的流場，該流場的方向決定人員的初始逃生方向，這個方法使得逃生人員多會朝向較為寬廣的路徑進行避難，而不一定是選擇最接近的出口進行避難，此方法對於數量較大的人群被視為是符合實際狀況的方法。

在方程式 (4-38) ~ (4-46) 中使用了許多的參數，這些參數中，部份與一般逃生人員的物理尺寸有關，如  $m_i$  與  $I_i^Z$ ，但大多數的參數與選擇的模型有關，而部份參數是由試驗計算的結果所得，為了弄清楚哪些是最重要的模型參數，曾針對計算式進行了蒙地卡羅模擬法 (Monte Carlo simulations)，並對各項參數做了進一步的分析。經過試驗得知，社會力參數所呈現的影響最為重要，且其計算結果對於真實的人員通過門及走廊的結果是相當接近的。

人與人之間相互作用的社會力參數，程式設定的第一選擇是  $A_i = 2000\text{N}$ 、 $B_i = 0.04\text{m}$  及  $\lambda_i = 0.5$ 。人與牆的相互作用則為  $A_w = 2000\text{N}$ 、 $B_w = 0.08\text{m}$  及  $\lambda_i = 0.2$ 。但這些參數在模擬的過程中被發現，對於堵塞的現象並不能得到良好的模擬結果，通過改進後，相互作用的參數  $A$  由速度決定， $A(v_i) = 2000\text{Max}(0.5, v_i/v_i^0)\text{N}$ 。

人與人及人與牆相互作用的接觸點壓力參數值  $k = 12 \times 10^4\text{kgm}^{-2}$ 、 $\kappa = 4 \times 10^4\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$  及  $c_d = 500\text{kgs}^{-1}$ 。對於一個重量  $80\text{kg}$  的男性，其轉動慣量為  $I_i^Z = 4.0\text{kgm}^{-2}$ ，其他人員的重量與轉動慣量則可以由相對應的縮放比例得到。鬆弛時間參數  $\tau_z = 0.2\text{s}$ ，角速度參數  $w_i^0 = 4\pi\text{s}^{-1}$ 。

### 3. 火災對逃生人員的影響

FDS+Evac 將火災與逃生模擬進行結合，經由 FDS 平臺的運算，在逃生過程中可以直接獲得火災的即時訊息，如氣體能見度、溫度、CO 濃度及熱輻射等，可用來計算煙氣對人員逃生的影響，以模擬人員於火場中進行逃生的過程。

煙氣的能見度會降低人員移動的速度，FDS+Evac 參考了

Frantzich 和 Nilsson 的煙霧對人類步行速度影響的實驗，其實驗值與方程式 4.47 值相符合。

$$v_i^0(K_s) = \text{Max}[v_{i,\min}^0, \frac{v_i^0}{\alpha}(\alpha + \beta K_s)] \quad (4.49)$$

$k_s$  : 消光係數。

$v_{i,\min}^0$  : 人員最低的移動速度  $0.1 \times v_i^0$ 。 $v_i^0$  為個體  $i$  初始速度

$\alpha$  :  $0.706 \text{ m}^{-1}$ 。

$\beta$  :  $-0.057 \text{ m}^{-1}$ 。

由上式可知，人員於濃煙中不會完全停止，而是會以緩慢的速度移動，直到氣體的毒性作用使人員喪失工作能力，人員才會停止。

氣體的毒性作用採用 Purser 的分數等效劑量 (Fractional Effective Dose, FED) 概念來處理。目前的版本僅用  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  及  $\text{O}_2$  的濃度來計算 FED 值：

$$\text{FED}_{\text{tot}} = \text{FED}_{\text{CO}} + \text{HV}_{\text{CO}_2} + \text{FED}_{\text{O}_2} \quad (4.50)$$

上式假設  $\text{CO}_2$  的濃度比較低並且沒有麻醉效應， $\text{CO}_2$  濃度達到 5% 時亦沒有毒性影響，但是當其他火災產物出現時， $\text{CO}_2$  的濃度增長率會增長呼吸的刺激。

$\text{CO}$  濃度致死劑量計算如下式所示：

$$\text{FED}_{\text{CO}} = 4.607 \times 10^{-7} (C_{\text{CO}})^{1.036} t \quad (4.51)$$

$t$  : 時間 (s)。

$C_{\text{CO}}$  :  $\text{CO}$  濃度 (ppm)。

O<sub>2</sub> 濃度致死劑量計算如下式所示：

$$FED_{O_2} = \frac{t}{60 \exp [8.13 - 0.54(20.9 - C_{O_2})]} \quad (4.52)$$

C<sub>O<sub>2</sub></sub>：O<sub>2</sub> 濃度 (ppm)。

CO<sub>2</sub> 濃度導致呼吸問題的係數計算如下式所示：

$$HV_{CO_2} = \frac{\exp (0.1930C_{CO_2} + 2.0004)}{7.1} \quad (4.53)$$

當 FED 值超過統一設定的值時，人員即喪失一切能力，無法再受到其他人的社會力或接觸力，且運動速度  $v_i^0$  變成 0，但身體尺寸不會發生變化。

#### 4. 數值方法

平移和旋轉運動方程使用改良的 Verlet 速度演算法 (modified velocity-Verlet algorithm)，而平移的動力部份則是使用自相容 (self-consistent dissipative) 的 Verlet 速度演算法計算，其他部份則使用標準的 Verlet 速度演算法進行計算。計算中每步的時間長度選擇適用於模擬人體最大作用力的長度。

在 FDS 中可以使用煙流的探測引發警報器，但在 FDS+Evac 中逃生人員不能經由警報器的作動得知火災的發生並開始逃生，而必須在模擬的邊界條件設定中給定探測火災的時間及人員反應時間。煙泣或毒性氣體濃度會影響出口的選擇，在預設的狀態下，若出口 FED 值小於 0.000001，則門是無煙的。而能見度超過人員到門口距離的 0.5 倍，則門口是可見的，如果看不見門，則運用人員位置處的局部濃度和人員移動路徑計算與門之間的距離。

### 4.3.3 建築物避難安全檢證技術手冊

本手冊是內政部建築研究所引用日本檢證公式於 2004 年出版，內容可分為三個部分，分別是居室避難安全檢證、樓層避難安全檢證及整棟避難安全檢證，因本研究所探討的區域為無塵室 FAB 層工作區域，故採用樓層避難進行逃生人員安全檢討。樓層避難安全檢證法計算如下：

樓層避難安全檢證法，分為兩個階段來檢證樓層避難安全是否合格，第一階段先確認居室內人員是否能安全避難，計算該樓層所有人員離開居室所花費總時間；第二階段考量到起火居室火勢延燒至樓層其他區域的情況，故此階段計算樓層所有人員是否能安全抵達樓梯完成避難動作。其流程圖如圖 4-7 所示。

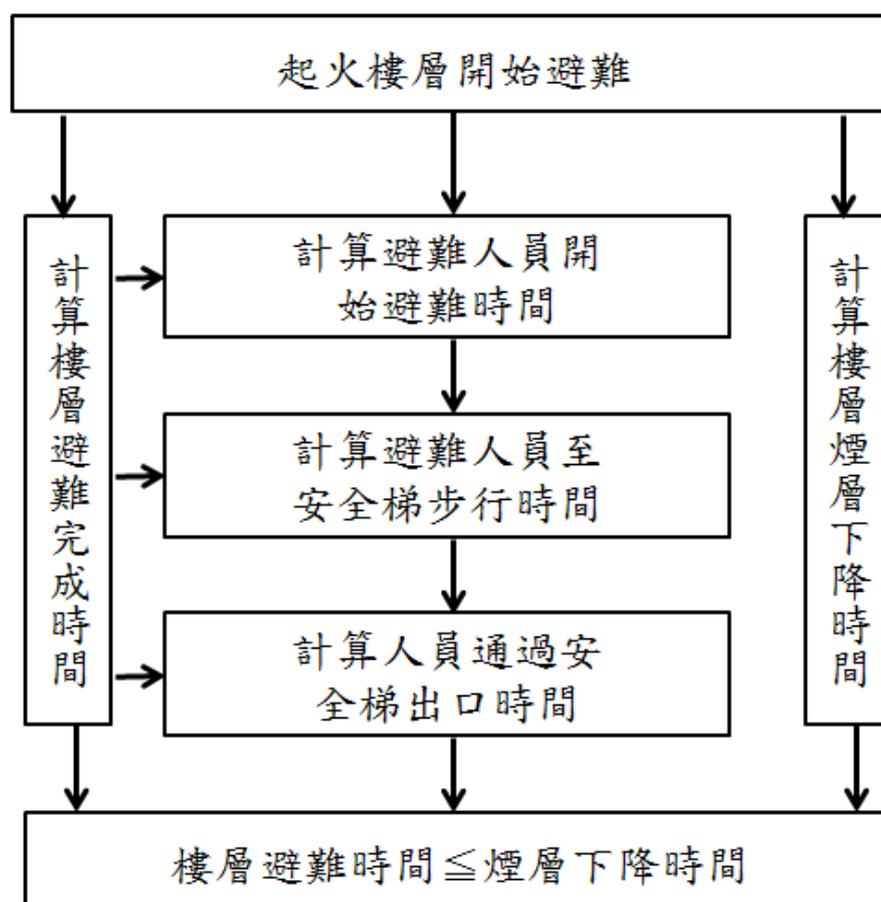


圖 4-7 樓層避難流程圖

逃生時間所需總時間可分為三個部份，第一部份是避難開始時間，第二部份是到達出口所需時間，第三部份是通過出口所需時間。

$$T_{\text{escape}} = T_{\text{start}} + T_{\text{travel}} + T_{\text{queue}}$$

$T_{\text{escape}}$ ：逃生所需總時間

$T_{\text{start}}$ ：避難開始所需時間，這階段包含火災從發生至火災警報動作之覺知時間，及從覺知時間至開始反應進行避難行動這兩部分，依下列公式計算。

$$\text{樓層避難開始時間： } t_{\text{start}} = \frac{\sqrt{A_{\text{floor}}}}{30} + 3 \quad (4.54)$$

$A_{\text{floor}}$ ：樓層樓地板面積 ( $\text{m}^2$ )。

$T_{\text{travel}}$ ：到達出口所需時間，最長避難逃生路徑距離除以步行速度所得之時間，依下列公式計算。

$$\text{步行時間： } t_{\text{travel}} = \max \left( \sum \frac{l_i}{v} \right) \quad (4.55)$$

$l_i$ ：逃生路徑距離 ( $\text{m}$ )。

$v$ ：步行速度 ( $\text{m/s}$ )。人員步行速度如表 4-2 所示。

$T_{\text{queue}}$ ：通過出口所需時間，指人員通過出口時會造成前方的滯留，而欲使人員解除滯留之時間全部通過出口，花費的總時間即為通過出口所需時間，依下列公式計算。

$$\text{通過出口時間： } t_{\text{queue}} = \frac{\sum p \cdot A_{\text{area}}}{\sum N_{\text{eff}} \cdot B_{\text{st}}} \quad (4.56)$$

$p$ ：人員密度 ( $\text{人}/\text{m}^2$ )。

$A_{\text{area}}$ ：該樓層各居室部份之樓地板面積 ( $\text{m}^2$ )。

$N_{eff}$ ：有效流動係數（人/m分）。

$B_{st}$ ：該樓層直通樓梯之出口寬度（m）。

經由以上式子計算，得到避難開始時間、到達出口所需時間及通過出口所需時間後相加，即為該樓層總避難時間。

表 4-3 各場所用途之人員步行速度

建築物之居室使用用途別	用途特徵	避難方向	步行速度 (m/分)
戲院等其他類似用途之場所	樓梯	上行	27
		下行	36
	座位席部份	-	30
	樓梯及座位席以外之部份	-	60
百貨公司、展示場等其他類似用途及集合住宅、旅館、飯店等其他類似用途之場所 (醫院、療養院、兒童照顧中心等場所除外)	樓梯	上行	27
		下行	36
	樓梯以外之建築物其他部份	-	60
學校、辦公室等其他類似用途之場所		上行	35
		下行	47
		-	78

## 第五章 結果與討論

本研究利用先前介紹之性能設計方法與模擬軟體進行實際的案例分析，探討現行無塵室煙控設備的有效性，利用不同情境對各式煙控系統進行試驗分析，並參考邱奕雄[13]與邱晨瑋[14]的研究進行比較，以及利用不同的方法計算無塵室內部人員的避難逃生時間，探討其差異性。

### 5.1 火災煙流控制模擬分析

#### 5.1.1 火源設計、排煙設備及相關設定

##### 1. 火源設定

火災情境設計方面，我們選用無塵室最常發生火災的 Wet Bench 機台作為火源位置，機台大小為 6.4m×2.3m×1m，火源面積為 1m<sup>2</sup>，以無塵室製程中使用之異丙醇 (Isopropyl Alcohol; IPA) 化學品來做為火災之燃料。Factory Mutual Research Corporation (FMRC) 曾進行 Wet Bench (使用易燃的 PP『Polypropylene』材質) 的燃燒實驗，最大熱釋放率可達 10MW，而本論文之 Wet Bench 機台材質採用金屬材質，為不燃材料，因此保守估計火源之最大熱釋放率為 5MW，火災設計熱釋放率規模乃依據 NFPA92B 所建議之  $Q = \alpha t^2$  火災成長曲線採用 Ultra-fast 進行模擬評估，即於 164 秒內，熱釋放率即達到 5MW (4760 BTU/sec)，並忽略機台內 CO<sub>2</sub> 自動滅火與自動撒水等滅火設備，以 worst case 模擬火災情境。

##### 2. 內部氣流模擬

無塵室模擬區域可分為兩區的三層式建築 (模擬外觀如圖 5-1 及圖 5-2 所示)，尺寸分別為 205m×47m×18m (區域 1; RAP/Fab/SAC 高度為 7m /4.6m /6.4m) 與 205m×22m×8m (區域 2 ; RAP/Fab/SAC 高度為 1m /4.1m /2.9m)，內部之氣流循環則以 FFU 系統垂直向下吹送，吹送氣流速度為 0.34 (m/s)，氣流由 Fab 層天花板向下吹送經過

高架地板孔洞進入 RAP 層，然後經由回風道流回 SAC 層，完成一個循環。為了模擬實際的無塵室內部流場對火災煙流的影響，本論文之模擬皆會先於無火源之狀況進行無塵室內部流場模擬，待內部流場達到穩態後再進行點火，而內部流場約為 150 秒左右到達穩態，故設定無塵室於 200 秒開始發生火災。

### 3. 排煙設備設置

無塵室於 Fab 層天花板處以防煙垂壁做防煙區劃的分隔，防煙垂壁由天花板下垂 50 公分(如圖 5-3 所示)，共隔出 36 個防煙區劃(如圖 5-4 所示)，每區面積約介於  $300\text{m}^2\sim 370\text{m}^2$  之間，起火點位置位於區劃 F6 內。每區防煙區劃內皆設置一個排煙口，所有排煙口大小皆為  $1.2\text{m}\times 1.2\text{m}$ ，排煙量於區域 1 兩側各設置一台 1200CMM 之排煙風機(排煙風機 1、2)，而區域 2 兩側各設置一台 1000CMM 之排煙風機(排煙風機 3、4)，各排煙風機於所涵蓋範圍如圖 5-5 所示。各排煙口與排煙風機使用偵測煙流減光率之偵煙探測器進行作動，第一個防煙區劃的偵煙式探測器偵測到火災時，考慮資訊傳遞與風機運轉至全速時間為 30 秒，在 30 秒後會啟動該防煙區劃之排煙機，之後當偵煙器偵測到煙時，排煙口立即開啟。

### 4. 格點設定

在格點測試中火源部份以  $0.25\text{m}\times 0.25\text{m}\times 0.25\text{m}$ 、 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$  與  $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$  之大小作格點測試來量測溫度(如表 5-1 所示)，經分析後其量測溫度的誤差為 0.9% 以內，故以  $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$  的格點大小作為此次模擬區域之格點，總格點數為 173 萬個，其格點配置圖如圖 5-6~5-8 所示。各項模擬參數列表如表 5-2 所示。

表 5-1 格點測試

格點大小(公尺) X×Y×Z	格點數	量測點 1 平均溫度(°C)	量測點 2 平均溫度(°C)	最大誤差值
0.25×0.25×0.25	220 萬	78.5	133.0	0%
0.5×0.5×0.5	27.7 萬	78.3	131.8	0.9%

1×1×1	3.5 萬	77.8	130.2	2.1%
-------	-------	------	-------	------

表 5-2 各項模擬參數列表

參數	詳細設定說明	
無塵室空間	尺寸 (長×寬×高)	205m×47m×18m (區域 1)
		205m×22m×8m (區域 2)
	RAP/Fab/SAC 高度	7m /4.6m /6.4m (區域 1)
		1m /4.1m /2.9m (區域 2)
FFU 速度	0.34m/s	
Wet Bench	尺寸 (長×寬×高)	6.4m×2.3m×1m
	材質	金屬
	位置	區域 1 防煙區劃 F6 內
火源	火載量	5MW
	火災成長模式	Ultra Fast
	燃料	異丙醇
	火源面積	1m <sup>2</sup>
防煙區劃	設置位置	Fab 層天花板
	數量	36
	面積	300m <sup>2</sup> ~370m <sup>2</sup>
	防煙垂壁長度	50cm
排煙系統	排煙量	區域 1 兩側各 1200CMM
		區域 2 兩側各 1000CMM
	排煙啟動時間	偵煙器偵測後 30 秒
相關模擬參數	環境起始溫度	25°C
	總模擬時間	800 秒
	火源引燃時間	200 秒
	格點大小	0.5m×0.5m×0.5m
	總格點數	173 萬

## 5.1.2 案例情境設定

### 1. 案例 1

由於現今晶圓廠的晶片尺寸越來越大，無塵室屋頂必須架設運送軌道 (AGV; Automated Guided Vehicle) 來搬運晶圓，此軌道可能會

穿過防煙垂壁，使防煙區劃受到破壞（見圖 5-3），防煙垂壁無法有效的抵擋煙流，且由於無塵室內部流場循環，會將火災煙流向向下吹送，使煙流直接越過防煙垂壁，防煙垂壁無法有效發揮其功能。故本案例將針對防煙垂壁的設置進行比較，由結果分析於無塵室內依法規設置防煙垂壁之效能。

本案例分為兩個情境，情境一為符合實際現狀設置防煙垂壁，但防煙垂壁受運送軌道的影響而具有開口，使防煙區劃受到破壞；情境二則將防煙垂壁全部拆除，並將其結果與情境一進行比較，以分析無塵室內防煙垂壁之效能。

## 2. 案例 2

由於風機濾網組（FFU）的下吹式氣流作用，將使火場中的煙流受下吹式氣流流動的影響而於 Fab 層快速的向下沉積與擴散，將大幅的影響人員安全與財產維護。無塵室之工作人員與昂貴設備皆位於 Fab 層，然而發生火災時煙流是 FFU 濾網與下吹式氣流的影響，煙流無法直接流往 SAC 層，而於 Fab 層快速的擴散，但 FFU 之濾網易受高溫的影響而損壞，由文獻「Air Pollution Control Technology Fact Sheet」可知 HEPA And ULPA Filters 約於 200°F（93.3°C）的溫度會燒破，但只要 FFU 持續運作，即使濾網受到火場的高溫而燒破，煙流仍會因為 FFU 的下吹式氣流影響，無法大量的往 SAC 層流動，大部份的煙仍會在 Fab 層進行擴散。故本案例將針對 FFU 濾網燒破特性，嘗試於火災時改變排煙機制啟動之區劃的 FFU 風速，使熱氣將濾網燒破後，煙流可以快速的往 SAC 層流動，並於 SAC 層增加排煙口進行排煙（圖 5-9），觀察其結果對於 Fab 層煙流的沉積與擴散之影響。

本案例將增加三個情境與情境二進行比較，情境三為防煙垂壁全部拆除的情況下，於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉；情境四為參考邱晨瑋之設計，於防煙垂壁全部拆除的情況下，火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機降載至 20%；情境五為防煙垂壁

全部拆除的情況下，於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機進行反轉。以此結果分析 FFU 風機風速的改變對 Fab 層煙流的沉積與擴散之影響。

### 3. 案例 3

由於情境三至情境五的煙流控制，皆是在火載量較大時，濾網可能產生燒破的情形下進行模擬，若火災所產生的煙氣溫度不足以使濾網產生燒破的現象，則煙流將隨無塵室內部流場於 FAB 層擴散。故本案例將以不足以使濾網產生燒破現象的小火進行模擬，針對火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉、降載及反轉的情境進行測試，以觀察其設計在該情形下是否亦能有效的控制煙流的擴散。

經測試火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉之情境，火載量約於 350KW 即無法使濾網產生燒破現象；而將 FFU 風機反轉之情境約於 400KW 即無法使濾網產生燒破現象。故本案例將增加三個情境進行模擬比較，情境六為防煙垂壁全部拆除的情況下，於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉，火載量為 350KW；情境七為防煙垂壁全部拆除的情況下，於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機進行反轉，火載量為 400KW；情境八為參考邱晨瑋之設計，於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機降載至 20%，火載量為 400KW。

各情境之設定比較如表 5-3 所示。

表 5-3 各情境設定比較表

情境	火載量	防煙垂壁	SAC 層排煙口	FFU
情境一	5MW	有設置	無設置	開啟
情境二	5MW	無設置	無設置	開啟
情境三	5MW	無設置	有設置	關閉
情境四	5MW	無設置	有設置	降載至 20%
情境五	5MW	無設置	有設置	反轉

情境六	350KW	無設置	有設置	關閉
情境七	400KW	無設置	有設置	降載至 20%
情境八	400KW	無設置	有設置	反轉

### 5.1.3 小結

#### 1. 案例 1 結果與討論

由情境一模擬結果（如圖 5-10~5-13 所示）可知，煙流產生時會直接隨著下吹式氣流越過防煙垂壁，亦會沿著防煙垂壁之開口流向其他防煙區劃，且由於下吹式氣流流場的作用，部分煙流被往下帶，通過高架地板至 RAP 層，經由回風道流向 SAC 層，使煙流佈滿整個空間，造成汙染。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-4 所示，當偵煙器偵測到煙時，排煙風機會於 30 秒後運轉至全速並且開啟該排煙區劃之排煙口，爾後任一區防煙區劃偵測到煙時則立即開啟排煙口。F6 為第一區偵測煙之防煙區劃，時間為 227.8s，故排煙風機啟動至全速的時間為第 257.8s。（以上排煙口開啟時間均包括穩定流場時間 200s）

由情境二的模擬結果（如圖 5-14~5-17 所示）可知，在無防煙垂壁的情況下，煙流會直接往四面八方擴散，並隨著下吹式氣流往下沉積，排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-5 所示，F6 為第一區偵測煙之防煙區劃，時間為 228.4s，故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.4s。

與情境一模擬結果比較得知，情境一的煙流擴散速度與情境二相近，而於 Fab 層之擴散範圍兩情境幾乎相同（如圖 5-18 所示），故由此案例結果可得知，因運送軌道通過而具有開口之防煙垂壁，煙流會經由開口流通及無塵室內部氣流影響，防煙垂壁無法達到阻擋煙流的效果。

表 5-4 排煙口開啟時間（情境一）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F1	477.9s
F2	400.5s
F3	589.0s
F5	289.0s
<b>F6</b>	<b>227.8s</b>
F7	305.9s
F8	461.9s
F9	469.5s
F10	791.2s
F26	281.7s
F28	410.3s
F29	454.6s
F30	557.6s

表 5-5 排煙口開啟時間（情境二）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F1	408.2s
F2	361.1s
F3	591.9s
F5	279.8s
<b>F6</b>	<b>228.4s</b>
F7	280.8s
F8	386.5s
F9	449.9s
F10	769.5s

F11	776.0s
F26	391.3s
F28	370.5s
F29	554.4s
F30	601.0s

## 2. 案例 2 結果與討論

由情境三的模擬結果（如圖 5-19~5-22 所示）可知，煙流產生初期於 Fab 層進行擴散，受火災熱氣的影響，火源上方之 FFU 濾網於 282 秒燒破，煙流開始往 SAC 層竄升，並於 SAC 層設置之排煙口進行排煙，減緩煙流於 Fab 層的擴散與沉積。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-6 所示，F6 為第一區偵測煙之防煙區劃，時間為 228.3s，故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.3s。（以上排煙口開啟時間均包括穩定流場時間 200s）

情境四（如圖 5-23~5-26 所示）煙流產生初期藉由 FFU 降載的設計可將煙流侷限於起火區劃中，但隨著火勢的擴大，煙流的產生量大幅的增加，而擴散至其他區劃，並隨著無塵室的流場流向 RAP 層，經由回流道流至 SAC 層，充斥整個無塵室空間。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-7 所示，F6 為第一區偵測煙之防煙區劃，時間為 228.6s，故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.6s。

情境五（如圖 5-27~5-30 所示）煙流產生初期亦於 Fab 層進行擴散，受火災熱氣的影響，火源上方之 FFU 濾網於 265 秒燒破，煙流開始往 SAC 層竄升，並由 SAC 層設置之排煙口進行排煙，減緩煙流於 Fab 層的擴散與沉積。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-8 所示，F6 為第一區偵測煙之防煙區劃，時間為 228.2s，故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.2s。

由情境二至情境五的結果比較得知，由於情境三煙流於濾網燒破後大量流入 SAC 層，並於 SAC 層進行排煙，而大幅減緩煙流於 Fab

層的沉積與擴散，在模擬時間內，Fab 層之煙流擴散維持於 2 個防煙區劃內部，大幅降低煙流對 Fab 層內部之人員生命安全的威脅及煙流對儀器的損害；而情境四 FFU 降載的設計隨發煙量的增大而降低其效用，由邱晨瑋的研究結果可知，降載之設計於火載量低於 800KW 才可將煙流侷限於起火區劃中，故此設計須於固定火載量下才能有效控制煙流；情境五則由於將 FFU 反轉，使得濾網較快的受到高溫煙流的影響而產生燒破的現象，並使得濾網被燒破的範圍較廣，煙流較快速的往 SAC 層竄升，於 FAB 層可將煙流限制於起火區劃內。故將 FFU 風機關閉與反轉之方式均可以獲得不錯的煙控效果，而於大火的情況下，反轉的設定略優於關閉的設定。

表 5-6 排煙口開啟時間（情境三）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F5	265.7s
<b>F6</b>	<b>228.3s</b>

表 5-7 排煙口開啟時間（情境四）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F1	385.6s
F2	366.9s
F3	622.1s
F5	253.1s
<b>F6</b>	<b>228.6s</b>
F7	292.0s
F8	384.8s
F9	441.3s

F10	729.7s
F26	379.2s
F28	370.4s
F29	540.5s
F30	596.3s

表 5-8 排煙口開啟時間 (情境五)

排煙區劃	排煙口開啟時間
F6	228.2s

### 3. 案例 3 結果與討論

由情境六 (如圖 5-31~5-34 所示) 的模擬結果可知, 對於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉之設定, 火載量為 350KW 時, 煙流之溫度不足以產生濾網燒破的現象, 使煙流於 FAB 層蓄積, 但經由將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉, 以及排煙風機的啟動, 使得煙流所流至的區劃形成負壓區 (如圖 5-35), 煙流被侷限於 2 個防煙區劃內。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-9 所示, F6 為第一區偵測煙之防煙區劃, 時間為 228.7s, 故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.7s。

由情境七 (如圖 5-36~5-39 所示) 的模擬結果可知, 對於火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機降載之設定, 亦可在起火之區劃形成負壓區, 且該設定使得起火區劃 FFU 風機仍以較低之風速向下送風, 進而減緩了高溫煙流竄升的速度, 並經由排煙風機的啟動, 可將煙流侷限於起火區劃內, 效果略優於關閉之設定。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-10 所示, F6 為第一區偵測煙之防煙區劃, 時間為 228.7s, 故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.7s。

而由情境八 (如圖 5-40~5-43 所示) 的模擬結果可以得知, 由於

火災時將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機反轉之設定，使得火源上方之煙流受風機影響往四周擴散，較不易蓄積，經測試其不足以燒破濾網之火載量為 400KW，略高於情境六，而 FFU 風機反轉將起火區劃氣流往上送，使得起火區劃與相鄰之區劃正負壓差較大，進而可將煙流控制於起火區劃內。排煙風機與各防煙區劃排煙口啟動時間如表 5-11 所示，F6 為第一區偵測煙之防煙區劃，時間為 228.2s，故排煙風機啟動至全速的時間為第 258.2s。

由以上三個情境模擬結果比較得知，於小火的情況下 FFU 風機反轉的設定較不易使濾網產生燒破，煙控效果略優於 FFU 風機關閉的設定，但結果相差並不大。其綜合結果比較如表 5-12 所示。

表 5-9 排煙口開啟時間（情境六）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F5	294.4s
F6	228.7s

表 5-10 排煙口開啟時間（情境七）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F6	228.5s

表 5-11 排煙口開啟時間（情境八）

排煙區劃	排煙口開啟時間
F6	228.2s

表 5-12 綜合結果比較

案例	案例 1	案例 2	案例 3
目的	觀察防煙垂壁之效用	觀察改變 FFU 風速之煙控效果	觀察火載量不足以使濾網燒破時之煙控效果
比較情境	情境一、二	情境二~五	情境六~八
結果	防煙垂壁無法有效的發揮效用	關閉與反轉之設計皆成功降低煙流於 Fab 層的擴散與沉積。	關閉、降載及反轉之設計皆可控制煙流的擴散，但其結果相差不大



## 5.2 逃生避難模擬分析

### 5.2.1 人員參數設定說明

本研究利用 Simulex、FDS+Evac 及性能驗證手冊三種方法，針對無塵室工作人員進行逃生計算，無塵室內部工作人員多為一般成年人，且對環境十分熟悉，並皆受過緊急情況的應變訓練，在火災發生時，可即時依照應變的流程進行避難。

本研究之逃生情境設定如下：

1. 模擬範圍：無塵室內部空間
2. 避難人數計算：無塵室所容許之最大限制人數，區域一（見圖 5-1）為 200 人，區域二為 50 人，共 250 人。
3. 人員位置分布：採平均分布。
4. 出口位置及寬度設定：出口位置如圖 5-44 所示，出口 1 及 7 寬度為 1.1m，出口 2~6 寬度各為 1.25m，出口 8~11 寬度各為 1m。
5. 人員屬性：Simulex 中使用軟體內建的辦公室員工（Office）做為設定（見第四章表 4-1）；FDS+Evac 則使用成人（Adult）進行設定（見第四章表 4-2）；性能驗證手冊使用辦公室類用途人員（見第四章表 4-3）。其各計算方法人員移動速度與特色比較如表 5-13 所示。

表 5-13 各計算方法比較表

計算方法	人員性質設定	移動速度 (m/s)	計算特色
Simulex	Office staff	0.8~1.7	1. 每個人員個體朝距離自己最近的出口進行移動。 2. 移動速度由自身與他人的距離決定。

FDS+Evac	Adult	0.95~1.55	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 利用環境影響所產生的外力，來推動人員的移動。</li> <li>2. 可將火災所產生的影響與逃生做結合，以模擬實際火場的逃生過程。</li> <li>3. 針對逃生人員建立流場，來決定人員移動的方向。</li> </ol>
性能驗證手冊	學校、 辦公室 類用途	1.3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 利用最遠的逃生距離除以移動速度來計算逃生時間。</li> <li>2. 以樓地板面積大小評估人員避難開始時間。</li> <li>3. 利用公式帶入初始條件進行運算，較無法評估逃生過程可能發生的問題。</li> </ol>

## 5.2.2 小結

### 1. Simulex

Simulex 模擬無塵室人員通過逃生出口的時間為 57 秒，由於 Simulex 在模擬過程中不會考量火災所造成的影響，考量在火場中人員在避難過程可能因為慌亂而產生推擠的現象，故將模擬時間乘上安全係數 1.5 倍作為較保守至估算。

因為人員開始避難的時間並非為火災剛發生時，需要有偵煙探測器與人員反應的前置時間，雖然無塵室中一般都裝有極早期偵煙系統 (Vesda)，可以於火災的前期發出警戒，讓人員有提早避難的準備，但 Vesda 的作用通常是在火災的潛伏期時偵測到並發出警戒，然而本研究之火源設計採用 T-squared Fire，將火災之潛伏期的部分忽略，是以較危險的模擬情境來進行探討，故將偵煙探測器反應時間估為 30 秒，人員反應為 60 秒，故人員真正開始進行逃生避難的時間為起火

後第 90 秒，總逃生時間為 176 秒。計算結果如表 5-14 所示。

一般於 Simulex 的模擬過程中，由於人員皆選擇離自己最接近的逃生出口進行逃生，故人員容易堵塞於同一條逃生路線上（如圖 5-45 所示），而無法有效的使用可利用於逃生的空間。但由於無塵室內人員數量具有一定的限制，故人員分佈密度較低，無此現象產生。

## 2. FDS+Evac

FDS+Evac 模擬無塵室人員通過逃生出口的時間為 90 秒，由於 FDS+Evac 的逃生過程與火災所產生的影響進行結和，係以 real time 的方式進行呈現，故其模擬結果不乘上 1.5 倍的安全係數。其偵煙探測器反應時間及人員反應時間與 Simulex 相同，分別估為 30 秒及 60 秒，故人員真正開始進行逃生避難的時間為起火後第 90 秒，總逃生時間為 180 秒。計算結果如表 5-14 所示。

在 FDS+Evac 的計算過程中，人與人之間的影響力對速度的影響最大，本研究將其計算式提出，計算軟體中人與人間的距離所對應的速度，並與 Simulex 比較（如圖 5-46 所示），可發現 FDS+Evac 整體速度較 Simulex 快，但其模擬所得之逃生時間卻較長。估計其主要原因是因為 FDS+Evac 將逃生人員視為粒子，利用建立 outflow 的流場決定人員逃生的方向，在結構較為複雜的空間中易發生寬度不足以通過的通道，仍被視為逃生路徑，使逃生人員於該通道入口卡住。無塵室內機台眾多，故容易發生此現象而拉長總逃生時間。

一般於火場中，火焰對周圍環境或人員所產生的影響最直接又最快的是溫度，但目前 FDS+Evac 在計算逃生的過程中並無考慮溫度，故在煙氣未下降的情況下，火源的位置對逃生的計算幾乎沒有影響，人員仍會從火源旁邊經過，甚至跨越。

## 3. 性能驗證手冊

性能驗證手冊計算無塵室人員通過逃生出口的時間為 54 秒，由於性能驗證手冊之人員開始避難時間是使用樓地板面積進行估算，而

本研究模擬區域之樓地板面積達 11402m<sup>2</sup>，故人員開始避難時間為 394 秒 (6.56 分)，總逃生時間為 448 秒。計算結果如表 5-14 所示。

在性能驗證手冊計算中，無塵室內部人員密度低，逃生口之有效出口流動係數 ( $N_{eff}$ ) 為 90，於出口沒有堵塞狀況，人員抵達逃生口的時間為利用距離除以速度，此計算方法無法估量人員於逃生過程中可能發生堵塞或推擠的情形，但全部人員通過逃生口的總時間僅低於 Simulex 的模擬結果 3 秒，其原因為模擬範圍面積廣大，逃生人員分佈在此區域中，於逃生過程人與人間多保持有一定距離，較無堵塞情形發生，且於 Simulex 模擬中人員多以最快速度達成避難，通過出口時間相差不大。

無塵室內除了裝有 Vesda 外，亦有傳統型偵煙器進行偵煙，也有完善的警報系統與平日的避難訓練，故人員的避難開始時間應可大幅的降低，故對於無塵室的避難開始時間估算，性能驗證手冊利用面積計算的方法過為嚴謹。

表 5-14 模擬避難時間表

	模擬避難 時間	模擬時間 ×安全係數	探測器訊息傳遞 +人員反應時間	總計
Simulex	57 秒	86 秒	90 秒	176 秒
FDS+Evac	90 秒	無	90 秒	180 秒
性能驗證手冊	54 秒	無	394 秒	448 秒

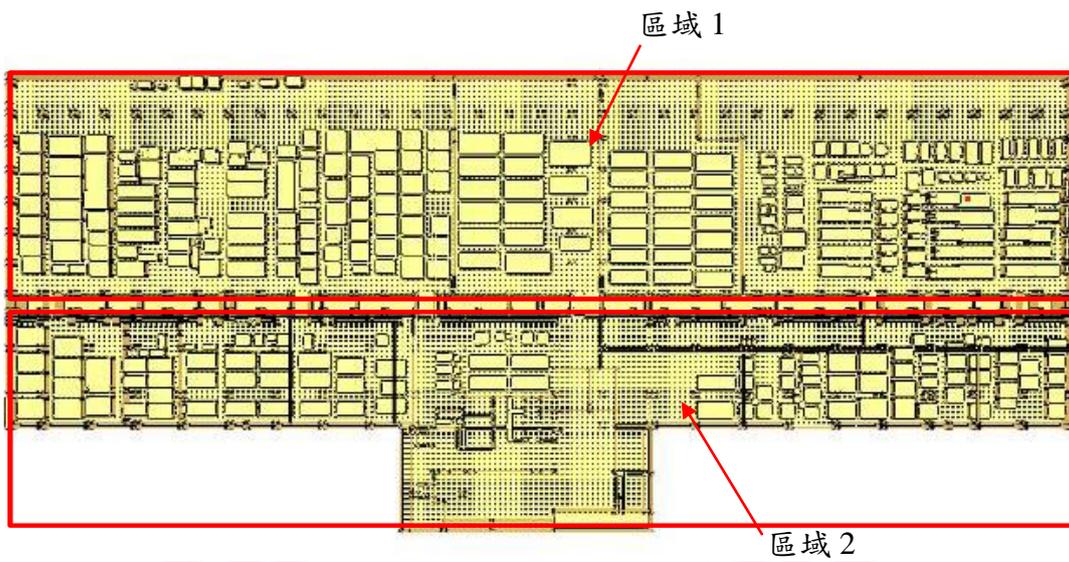


圖 5-1 模擬空間俯視圖

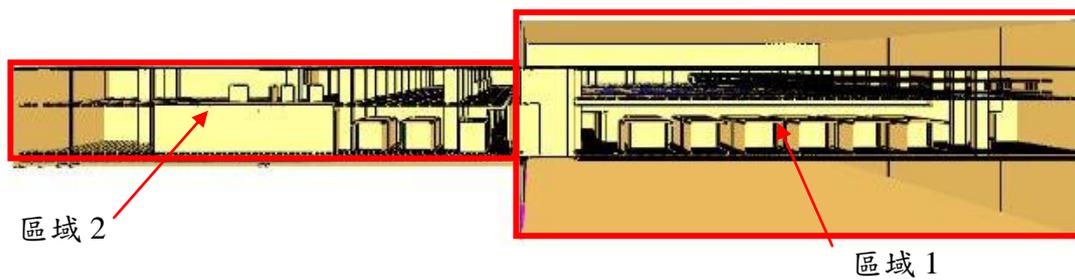


圖 5-2 模擬空間剖面圖

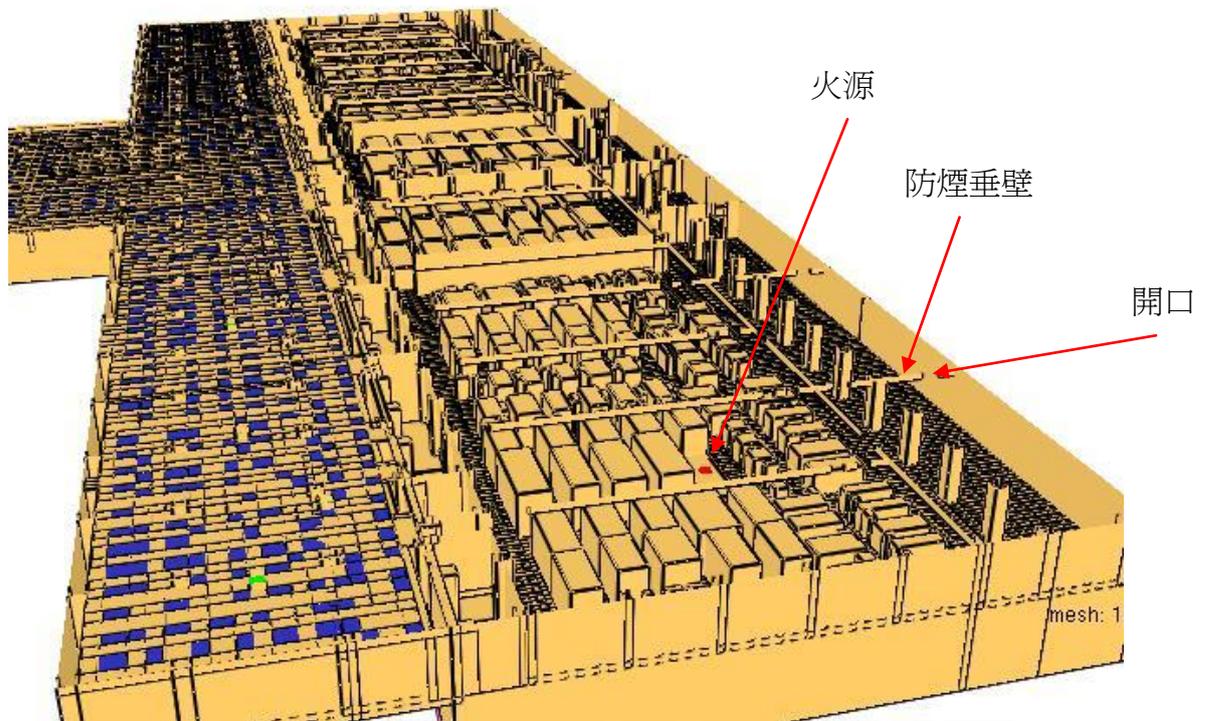


圖 5-3 防煙垂壁示意圖



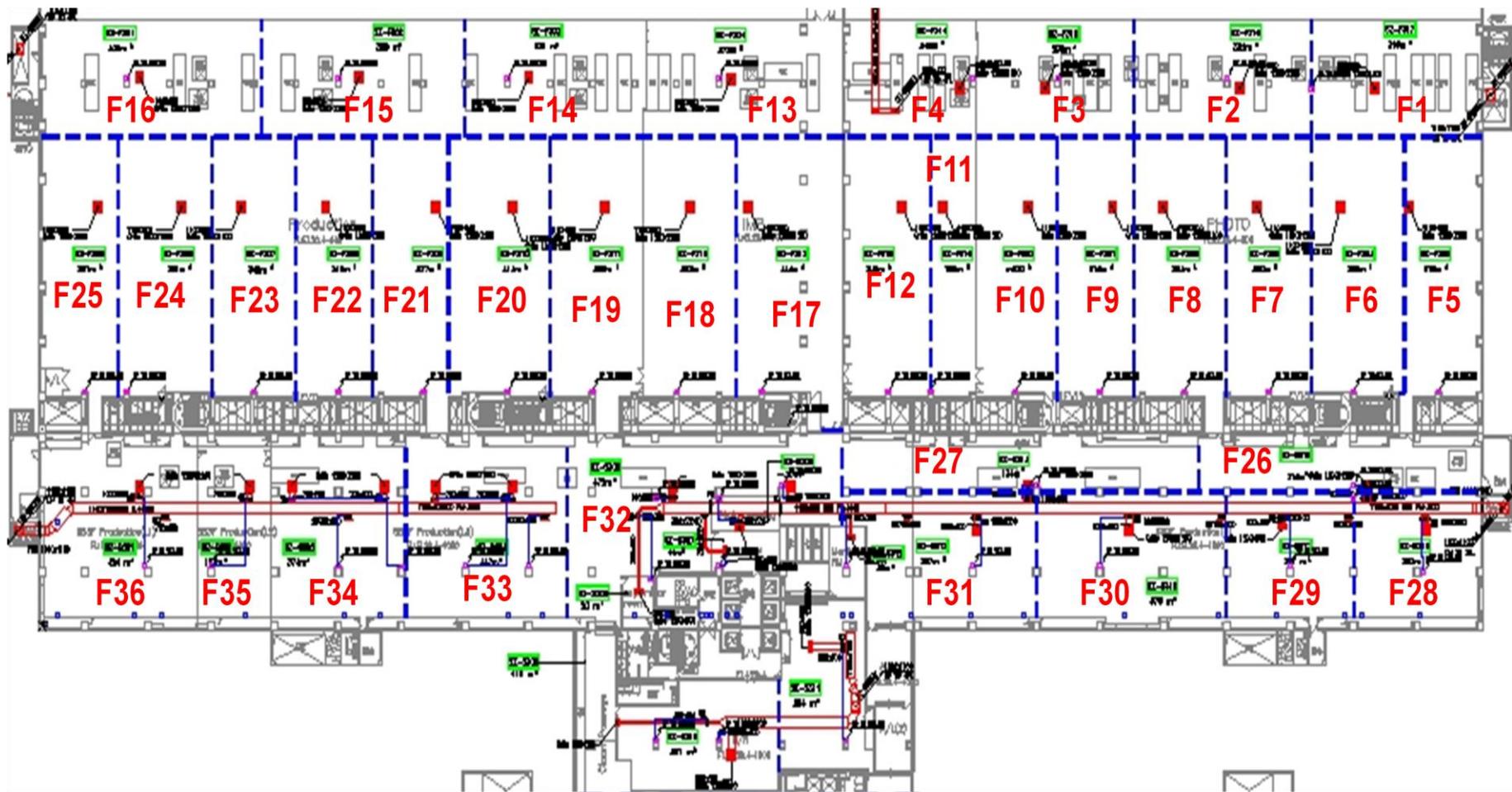


圖 5-4 防煙區劃示意圖

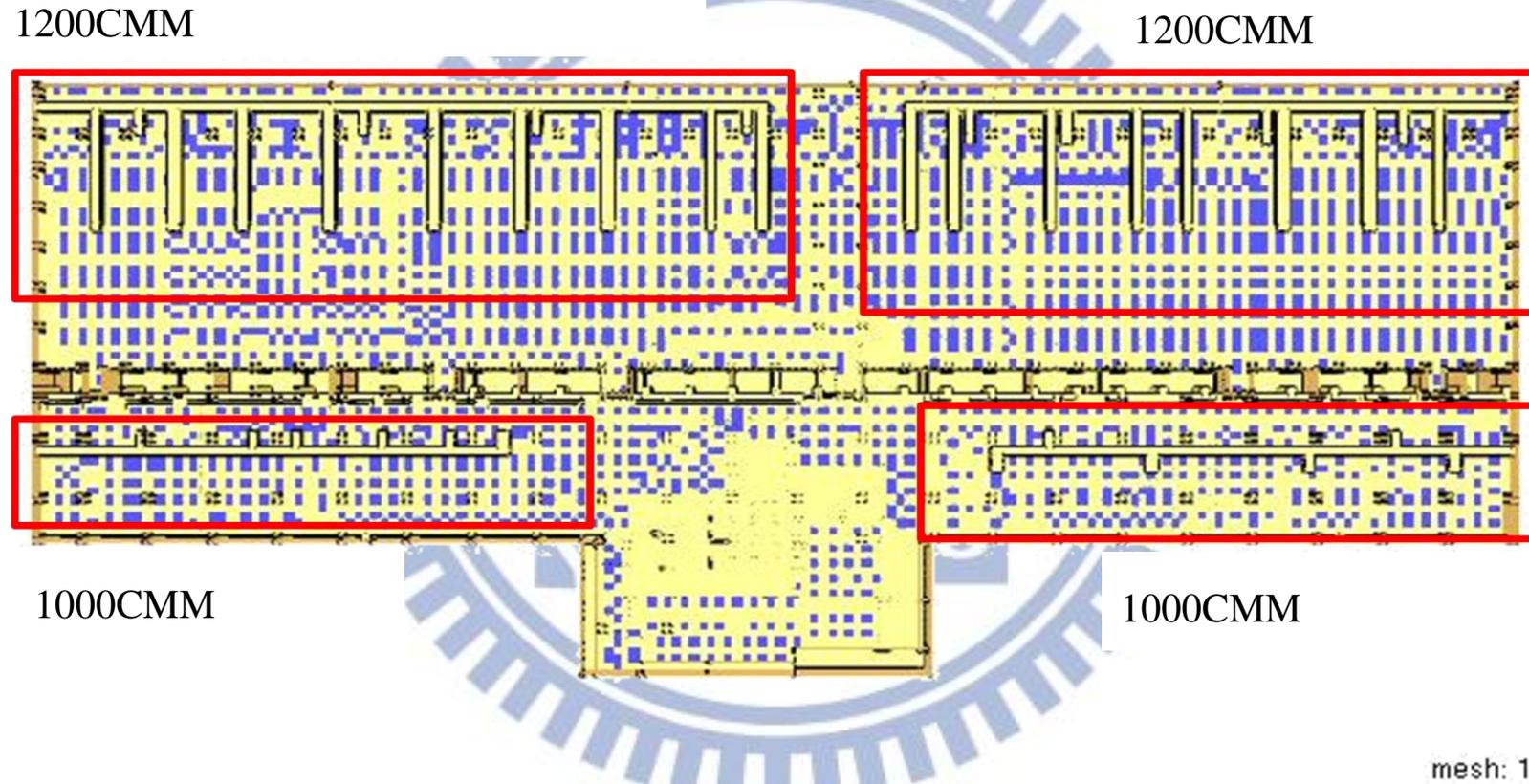
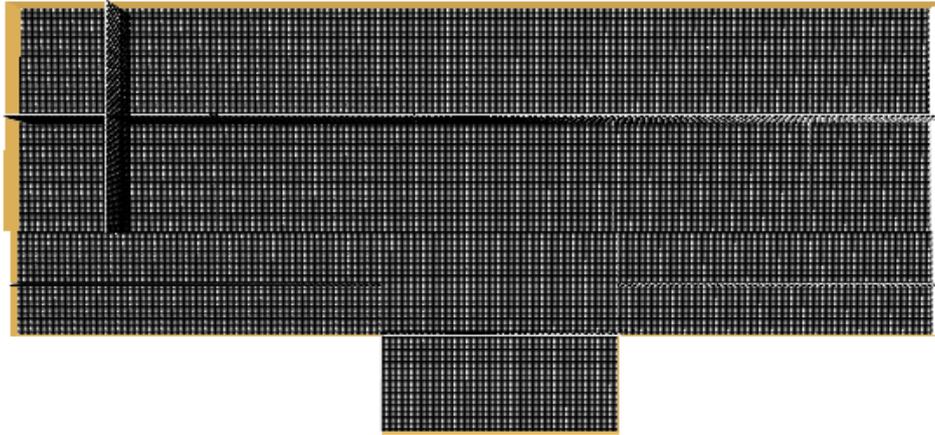
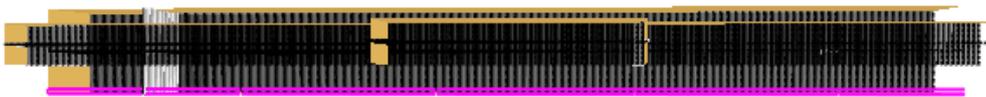


圖 5-5 排煙風機涵蓋範圍及風量示意圖



mesh: 1

圖 5-6 格點配置示意圖 x-y 平面



mesh: 1

圖 5-7 格點配置示意圖 x-z 平面

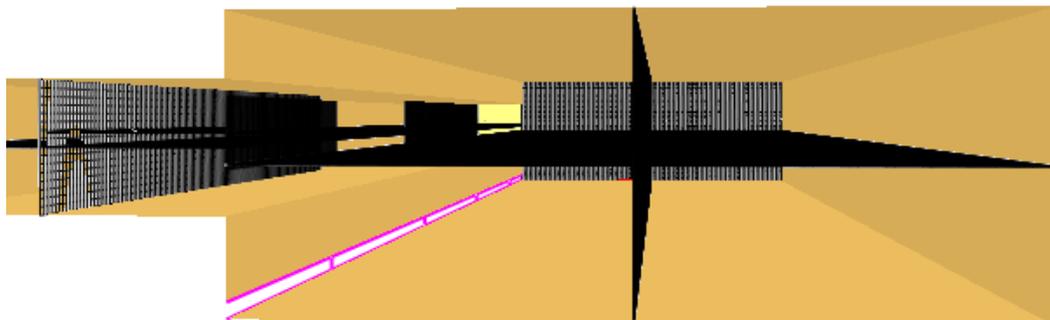


圖 5-8 格點配置示意圖 y-z 平面

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

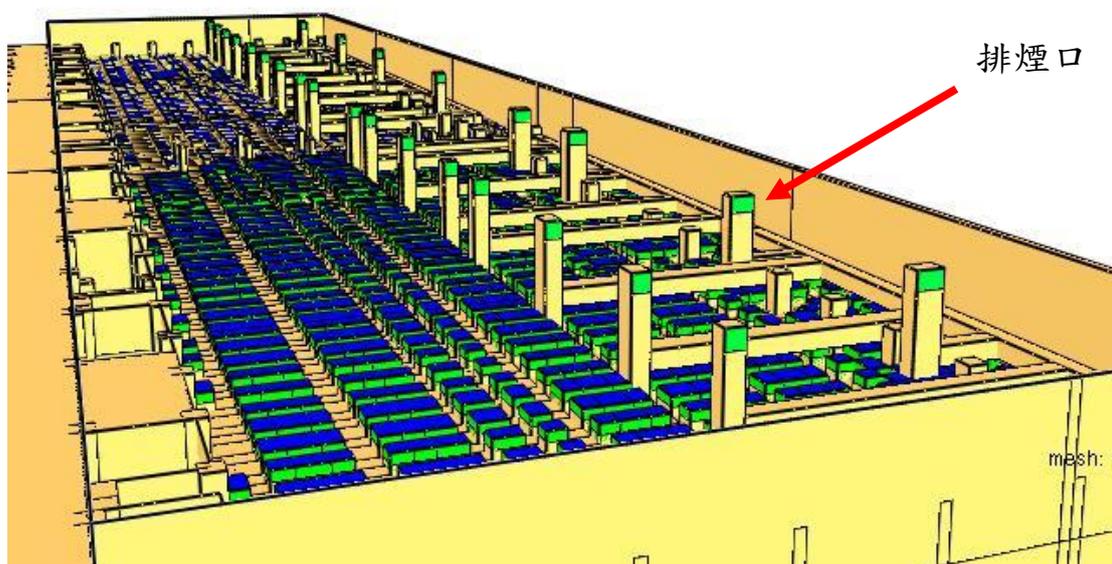
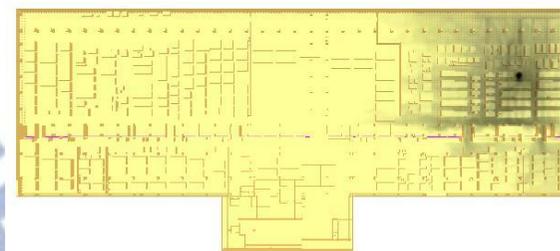
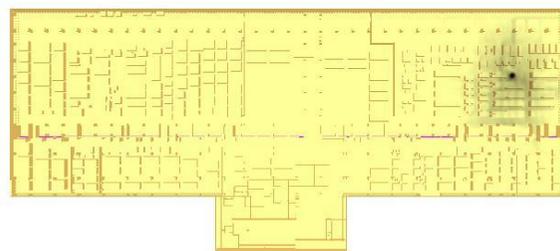
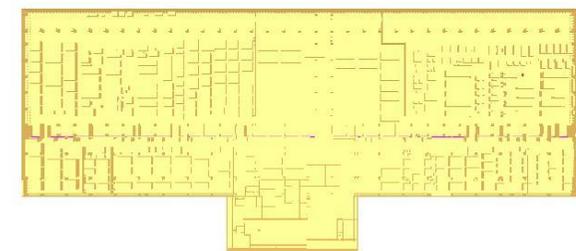


圖 5-9 SAC 層排煙口位置示意圖

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



Frame: 249  
Time: 200.0

T=200sec

Frame: 399  
Time: 320.0

T=320sec

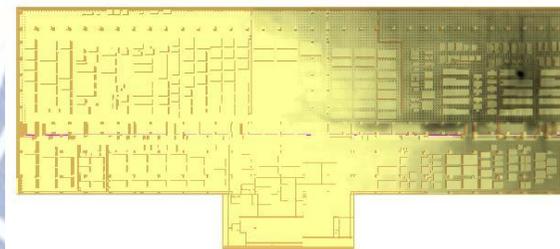
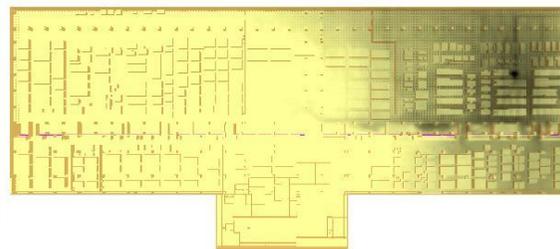
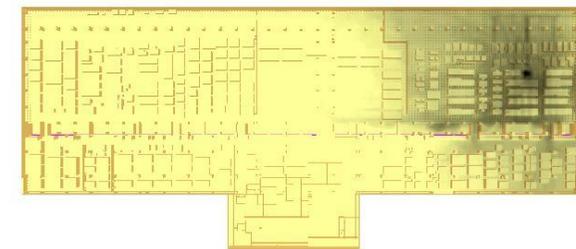
Frame: 549  
Time: 440.0

T=440sec

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



Frame: 699  
Time: 560.0

T=200sec

Frame: 649  
Time: 680.0

T=320sec

Frame: 999  
Time: 800.0

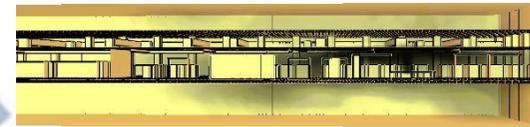
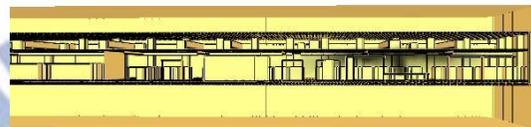
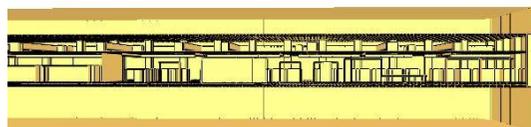
T=440sec

圖 5-10 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境一)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 248  
Time: 199.2



T=200sec

mesh: 1

Frame: 399  
Time: 320.0



T=320sec

mesh: 1

Frame: 549  
Time: 440.0



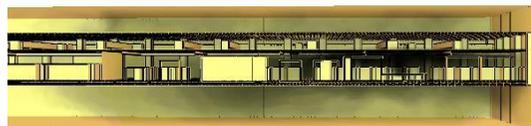
T=440sec

mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 699  
Time: 560.0



T=560sec

mesh: 1

Frame: 849  
Time: 600.0



T=680sec

mesh: 1

Frame: 999  
Time: 600.0



T=800sec

mesh: 1

圖 5-11 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境一)

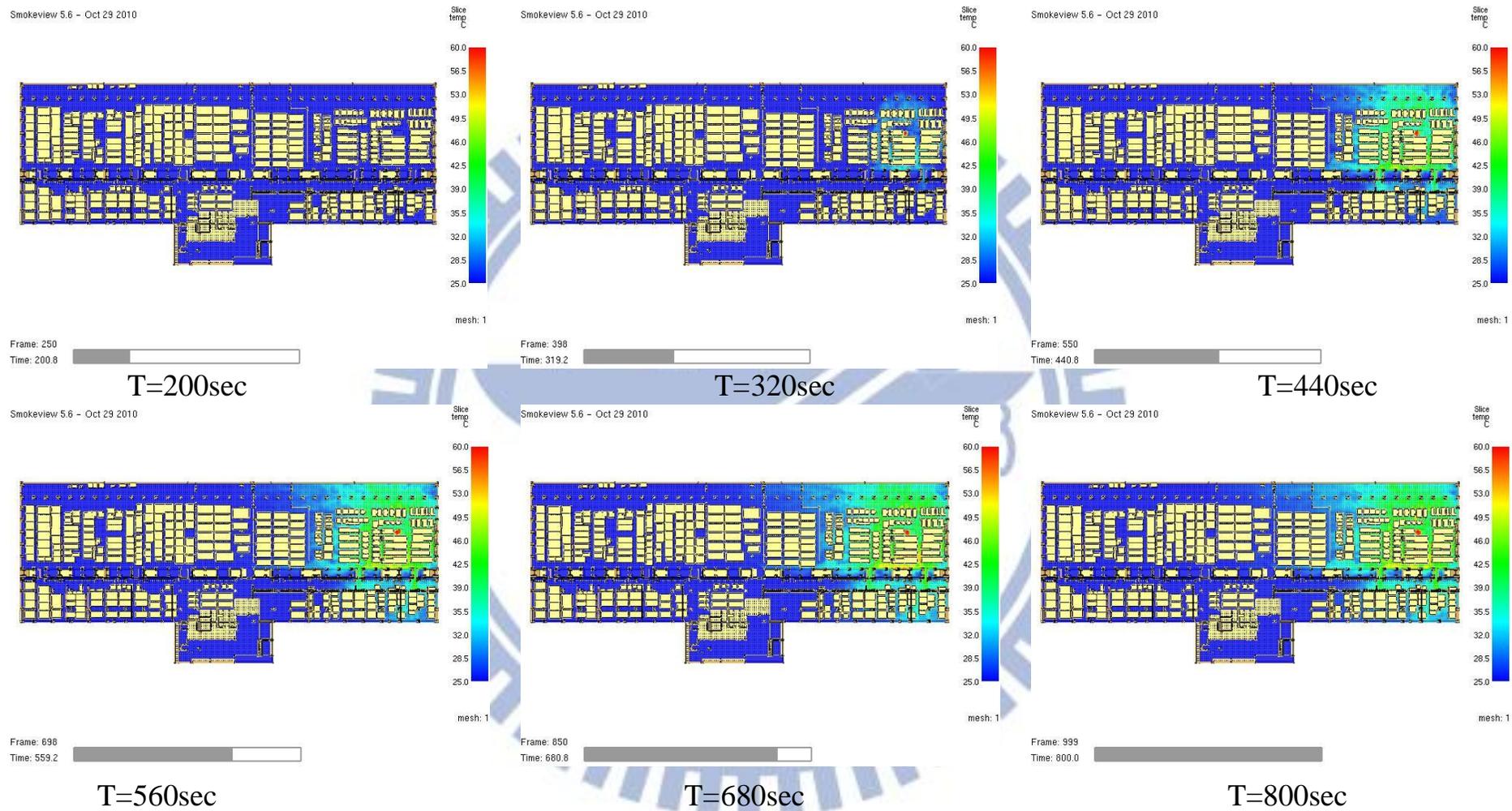


圖 5-12 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境一)

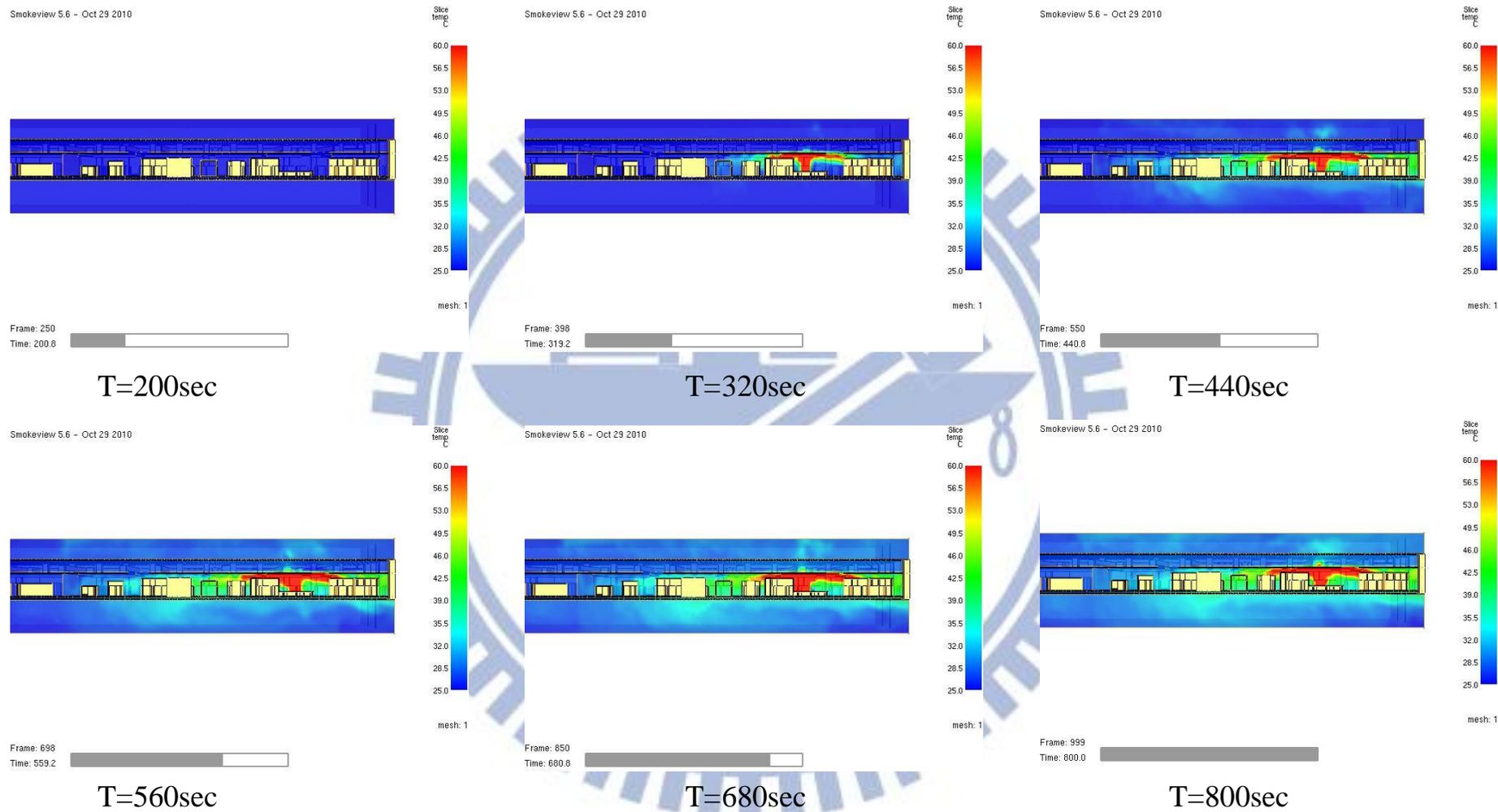


圖 5-13 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境一)

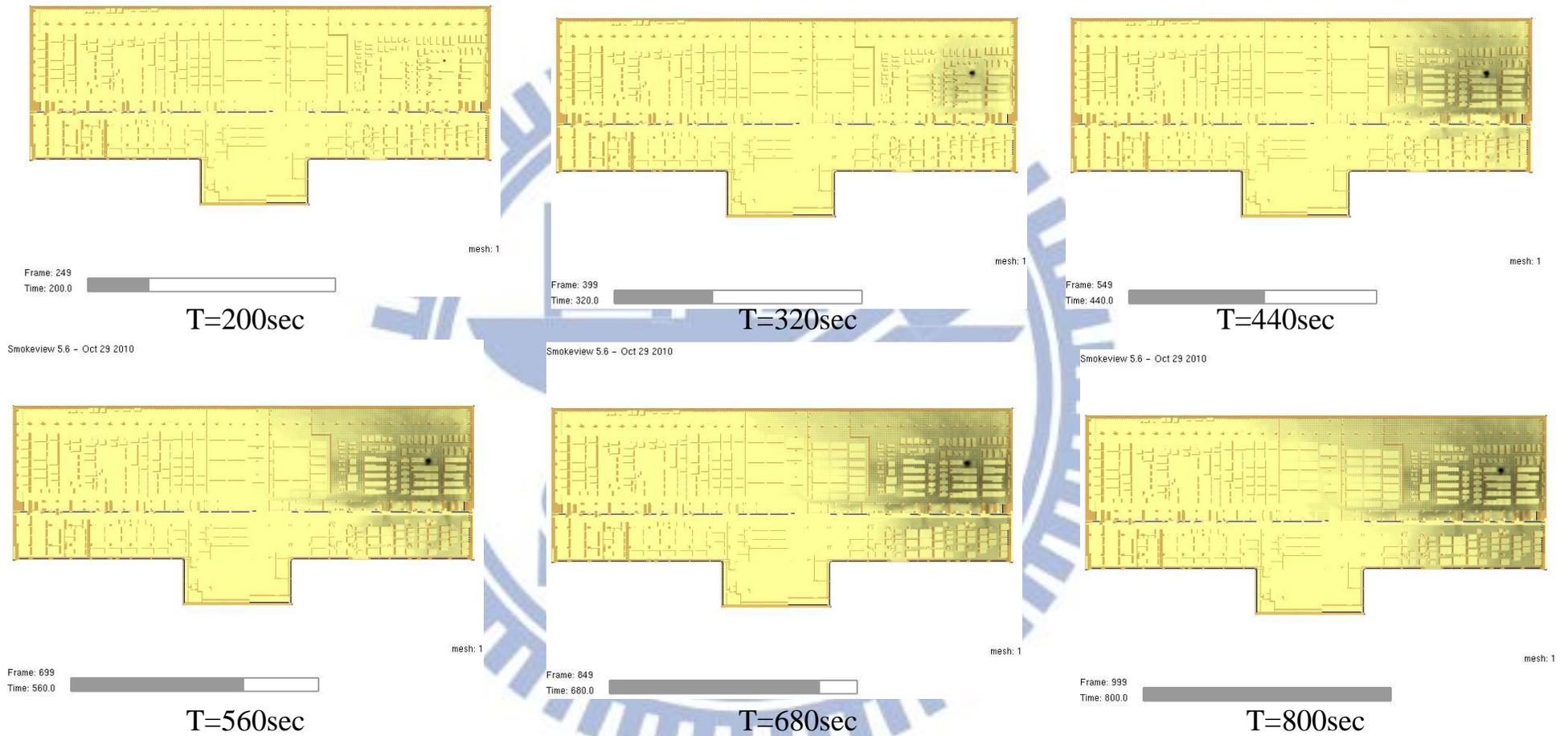
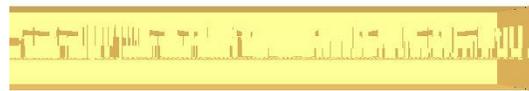
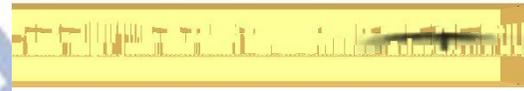


圖 5-14 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境二)



Frame: 249  
Time: 200.0

T=200sec



Frame: 399  
Time: 320.0

T=320sec



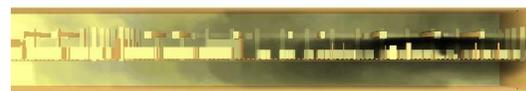
Frame: 549  
Time: 440.0

T=440sec



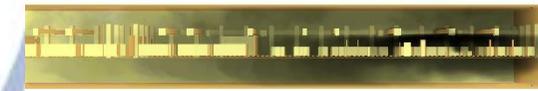
Frame: 699  
Time: 560.0

T=560sec



Frame: 849  
Time: 680.0

T=680sec



Frame: 999  
Time: 800.0

T=800sec

圖 5-15 煙塵分佈圖 y-z 平面 (情境二)

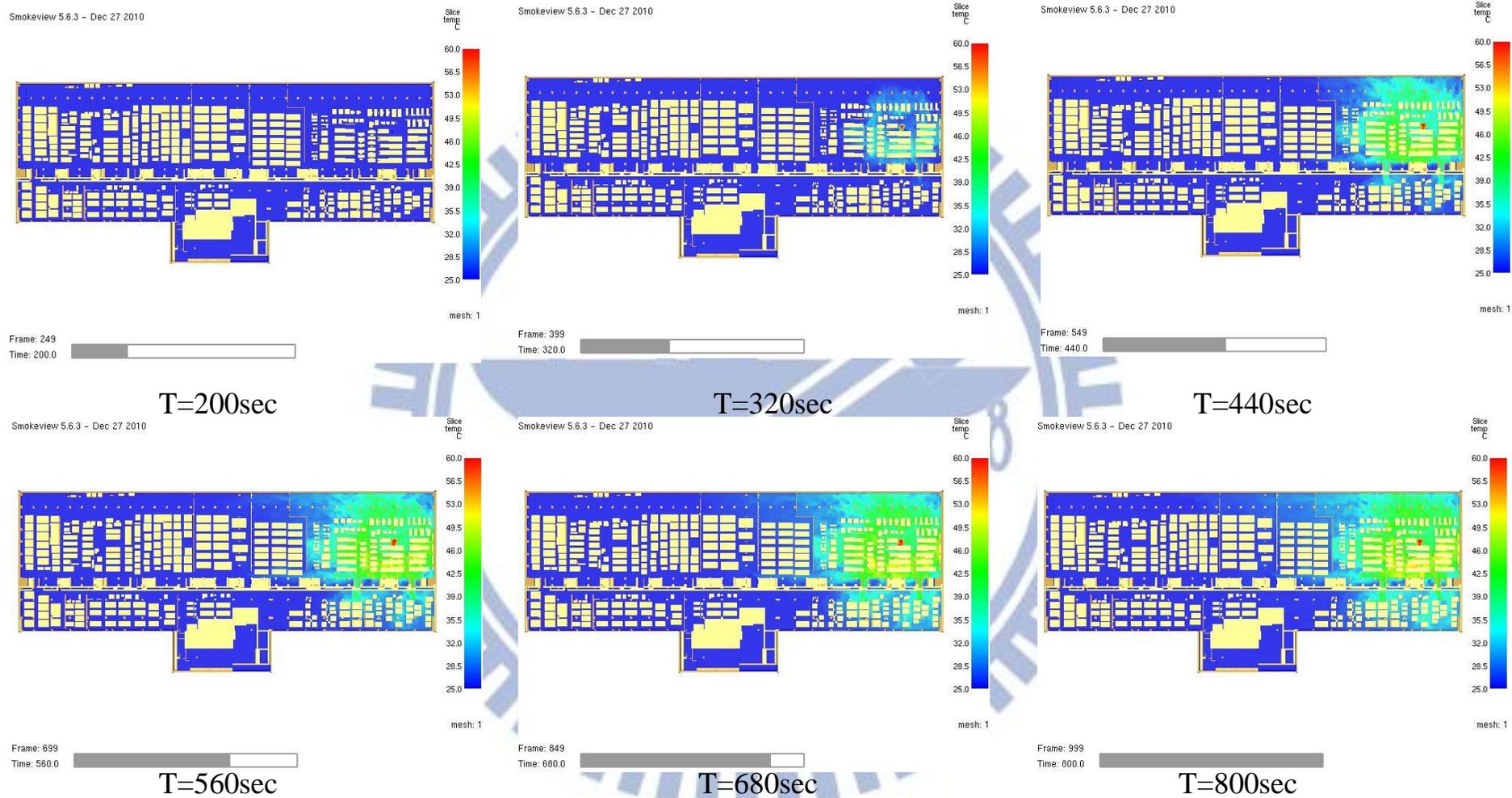


圖 5-16 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面圖 (情境二)

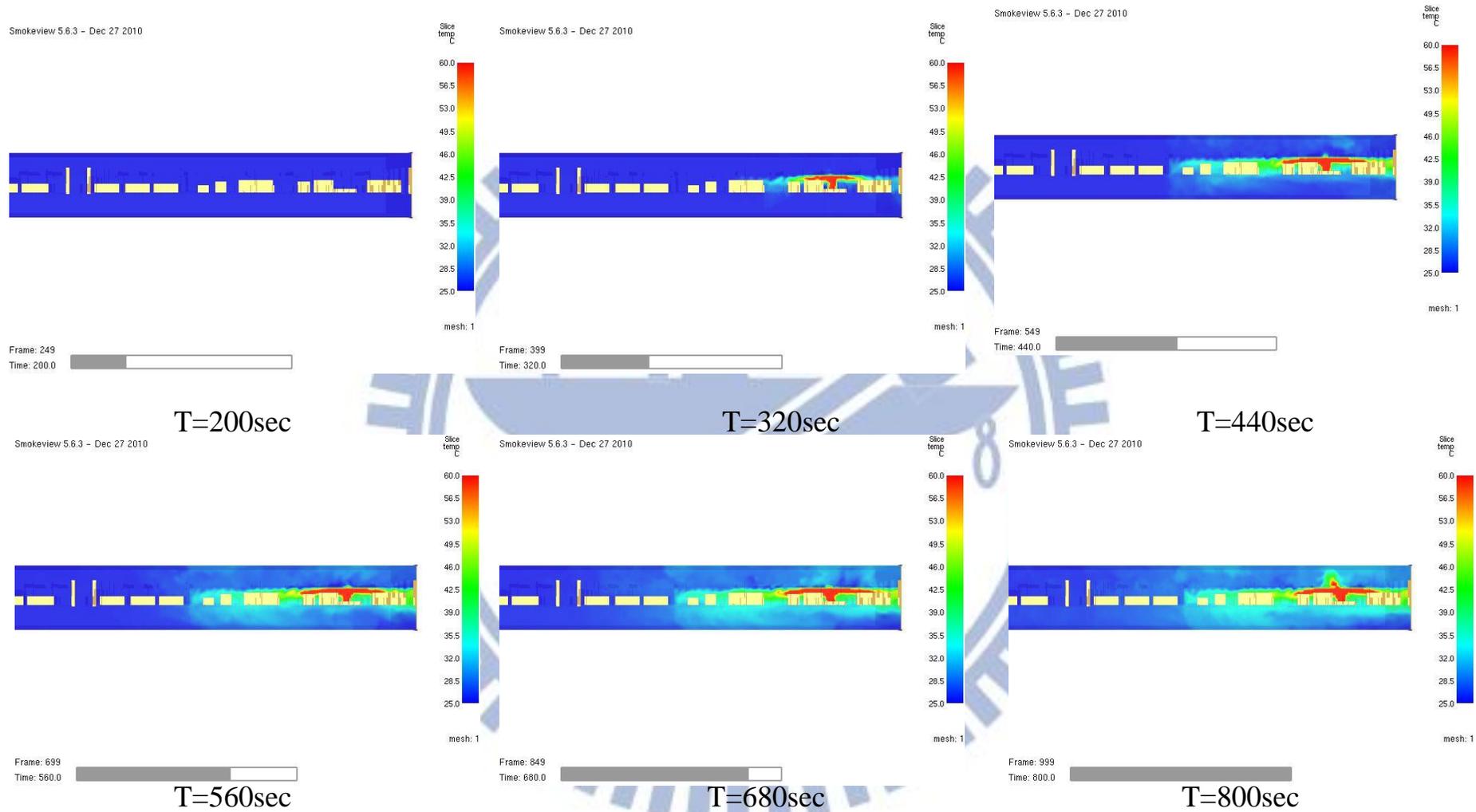


圖 5-17 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境二)

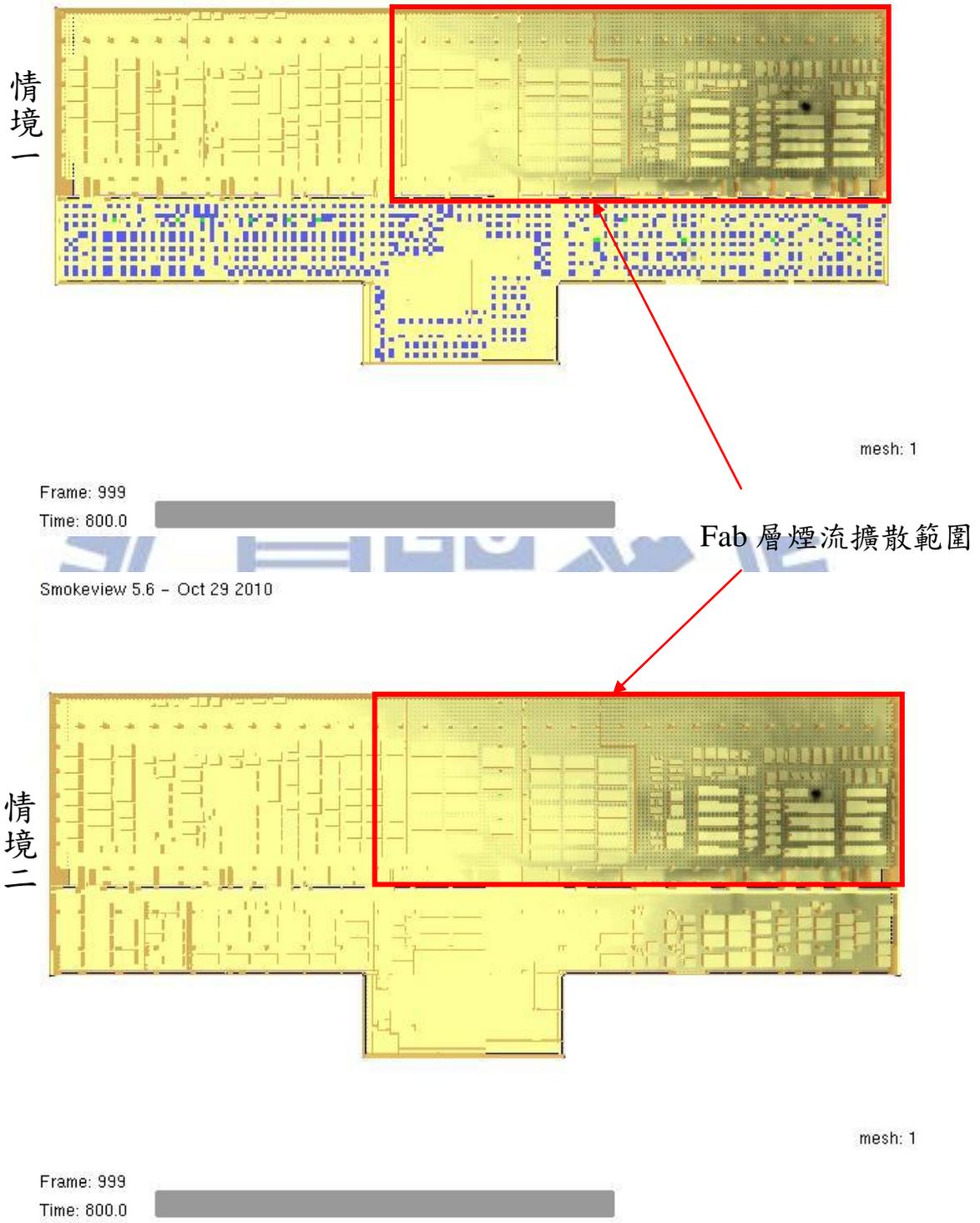
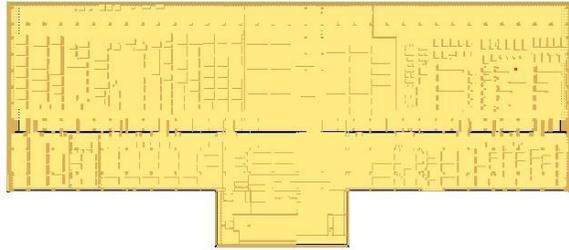


圖 5-18 案例 1 煙層擴散範圍比較圖

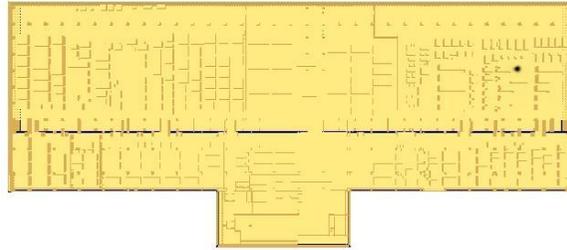
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 249  
Time: 200.0

T=200sec

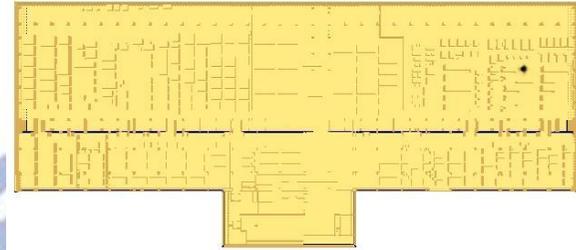
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 399  
Time: 320.0

T=320sec

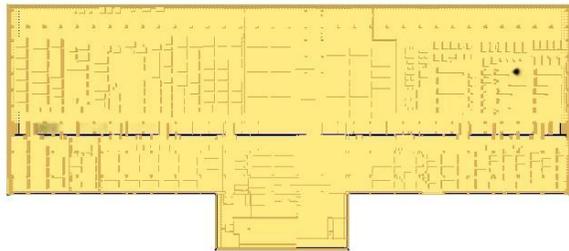
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 549  
Time: 440.0

T=440sec

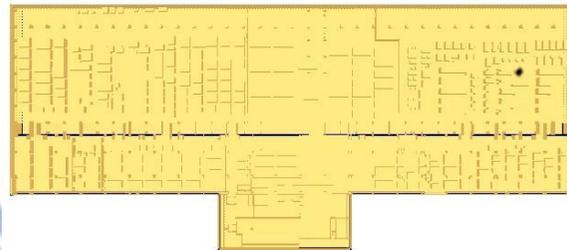
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 699  
Time: 560.0

T=560sec

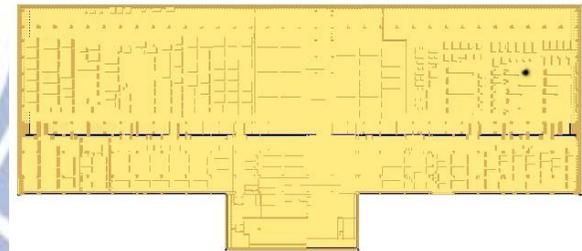
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 849  
Time: 680.0

T=680sec

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 999  
Time: 800.0

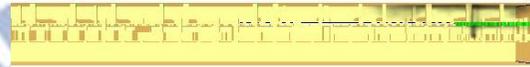
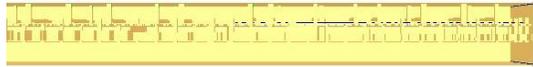
T=800sec

圖 5-19 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境三)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 250  
Time: 200.0

T=200sec

mesh: 1

Frame: 400  
Time: 320.0

T=320sec

mesh: 1

Frame: 550  
Time: 440.0

T=440sec

mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 700  
Time: 560.0

T=560sec

mesh: 1

Frame: 850  
Time: 680.0

T=680sec

mesh: 1

Frame: 1000  
Time: 800.0

T=800sec

mesh: 1

圖 5-20 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境三)

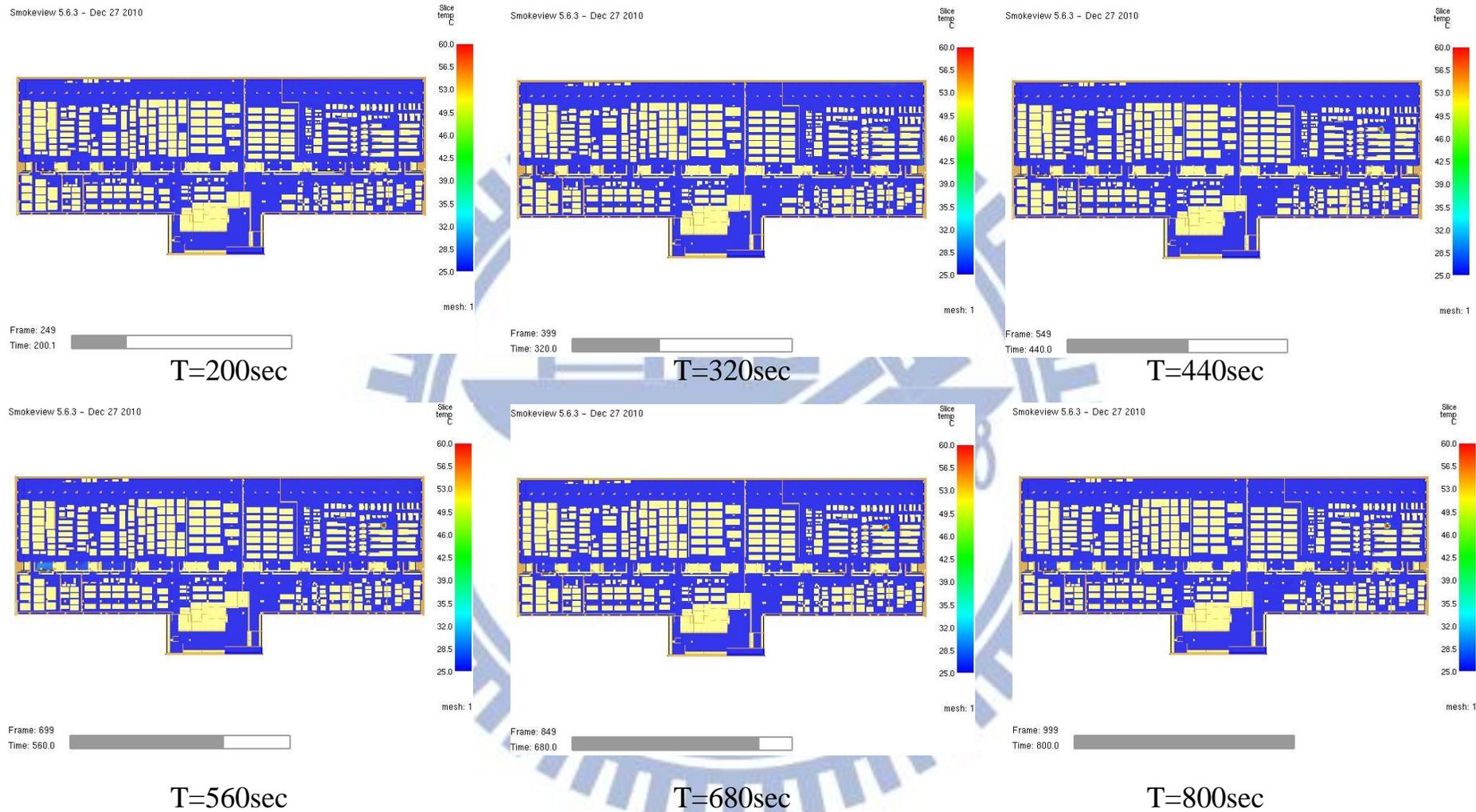


圖 5-21 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境三)

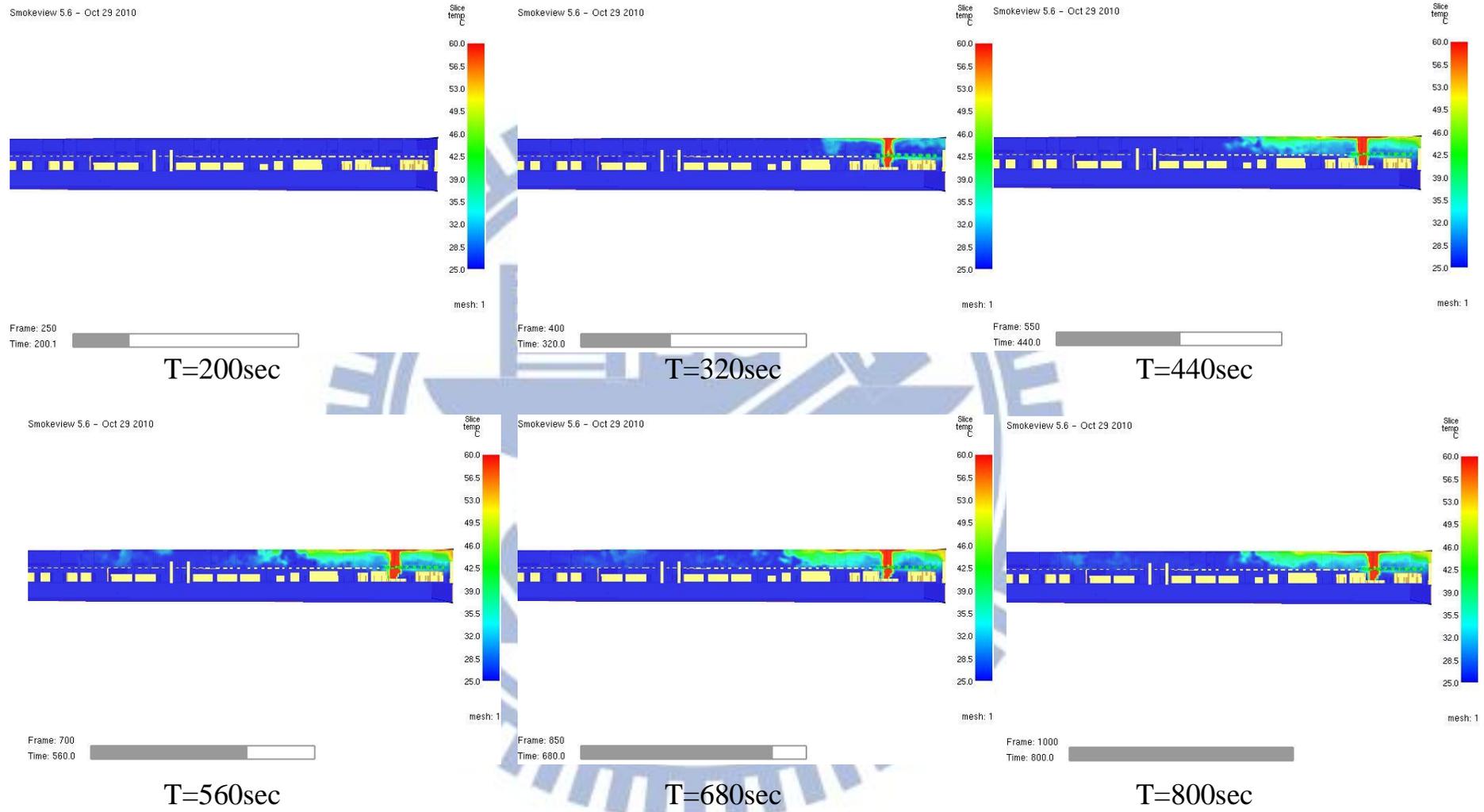
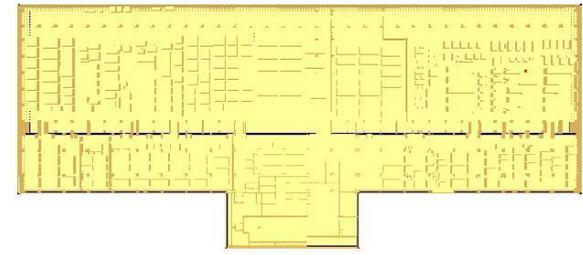


圖 5-22 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境三)

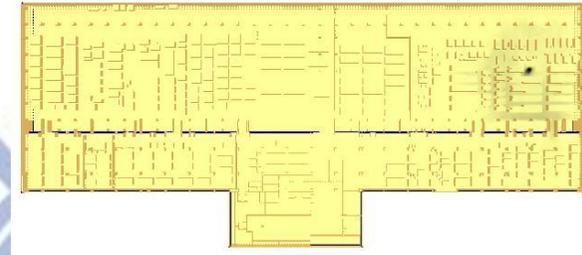
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 249  
Time: 200.0

T=200sec

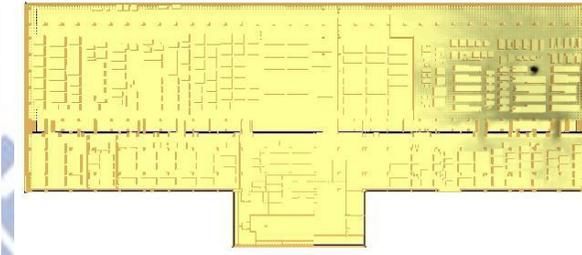
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 399  
Time: 320.0

T=320sec

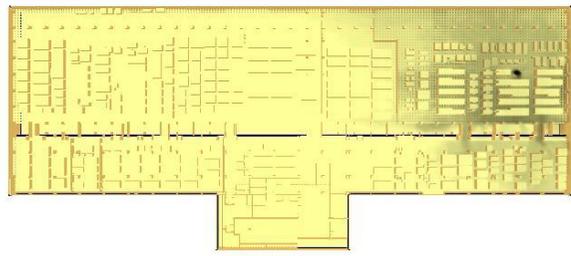
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 549  
Time: 440.0

T=440sec

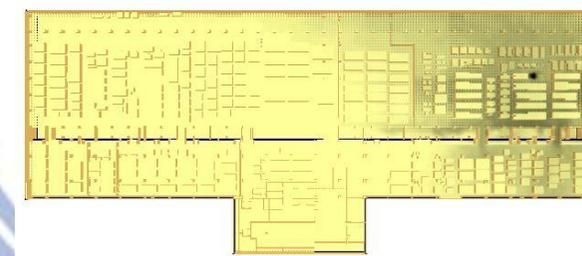
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 699  
Time: 560.0

T=560sec

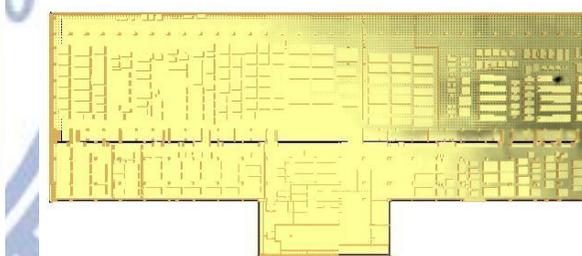
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 849  
Time: 680.0

T=680sec

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 999  
Time: 800.0

T=800sec

圖 5-23 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境四)

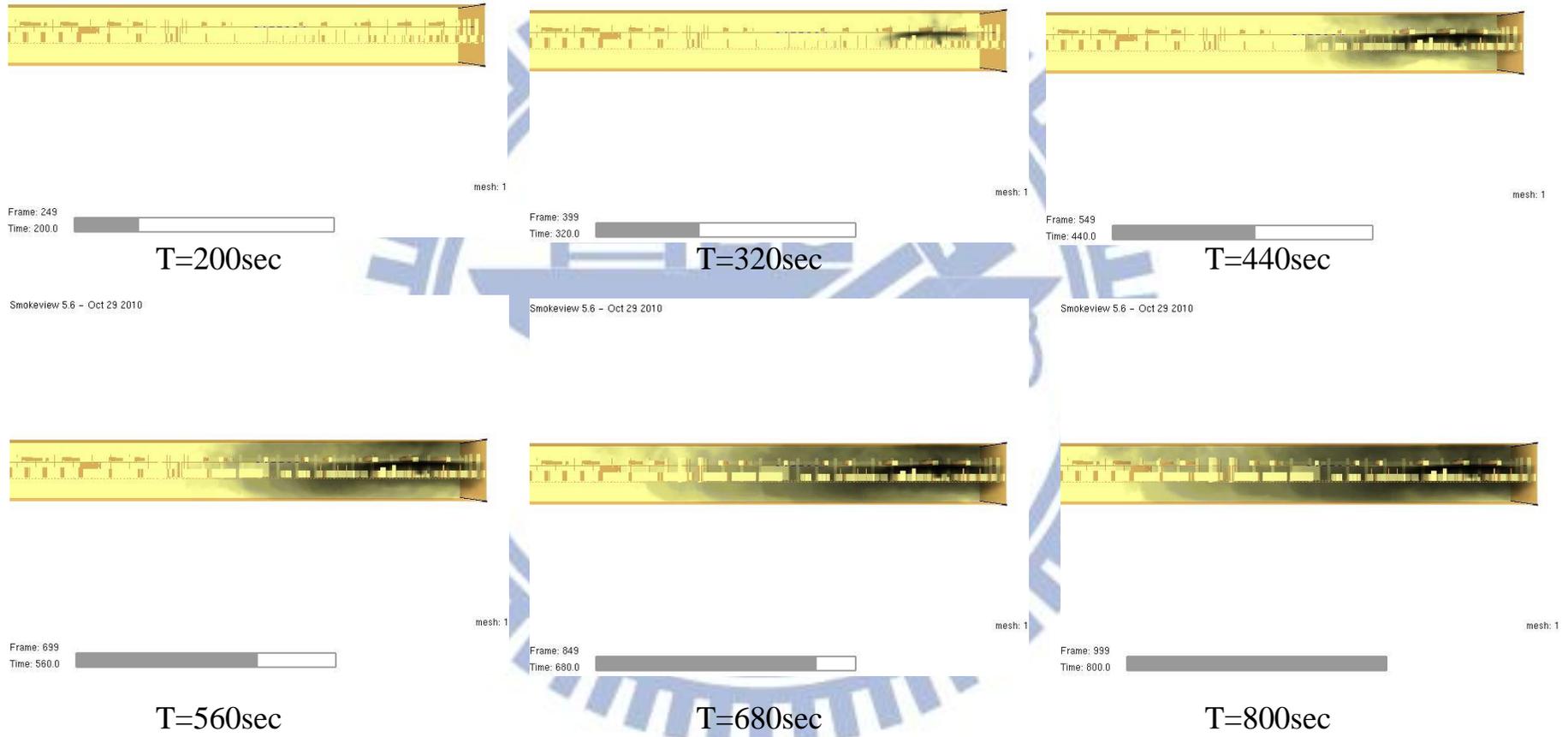


圖 5-24 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境四)

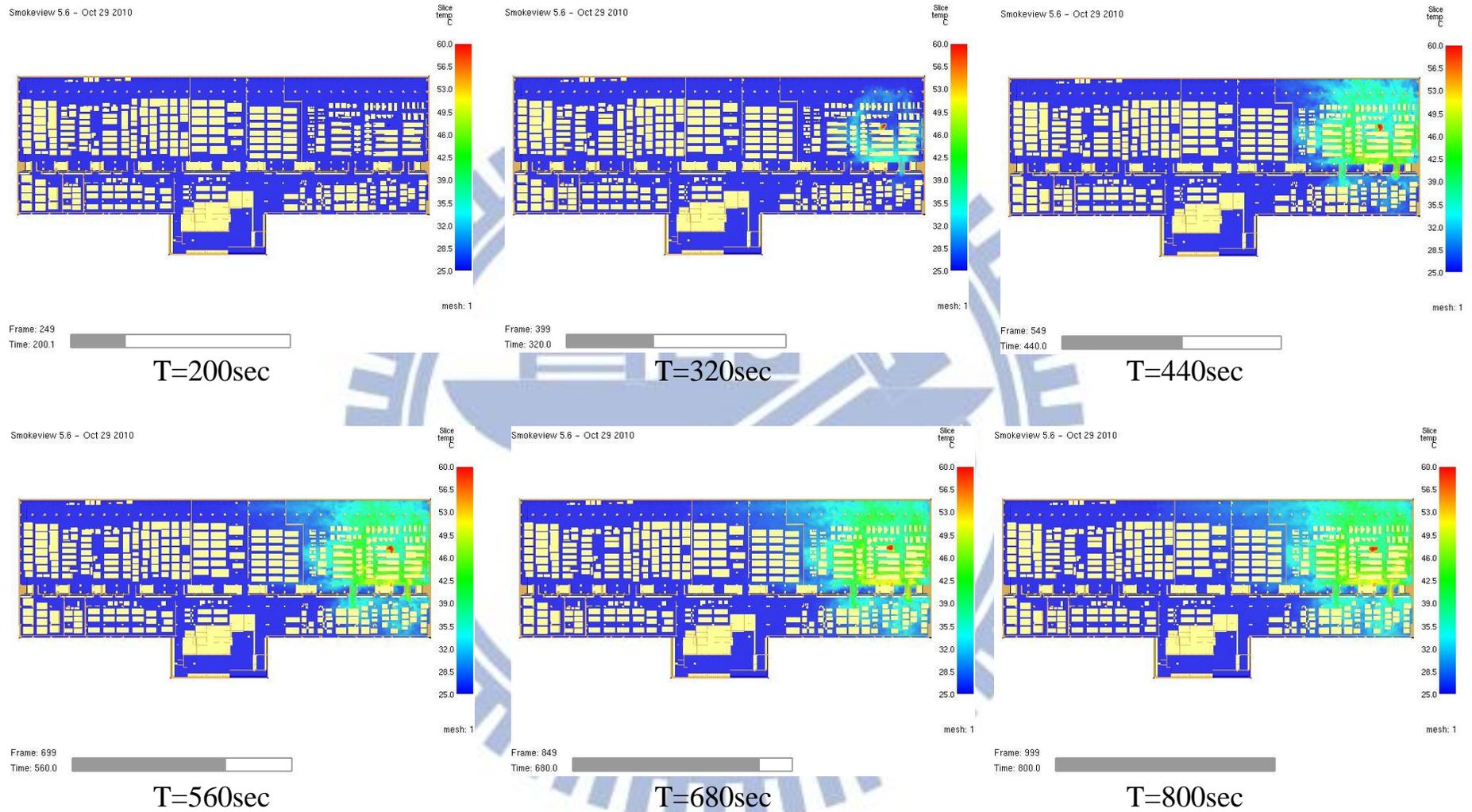


圖 5-25 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境四)

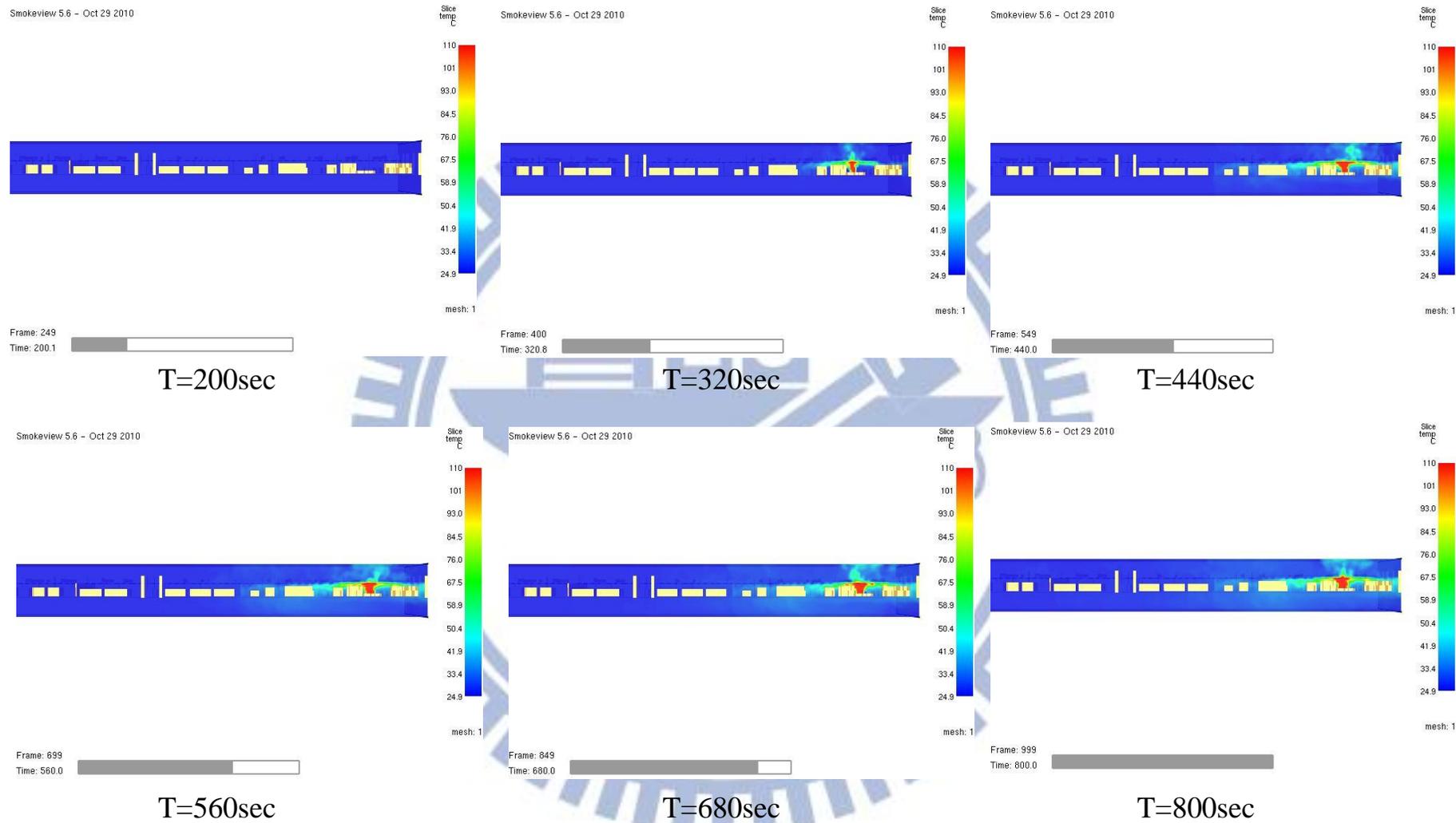
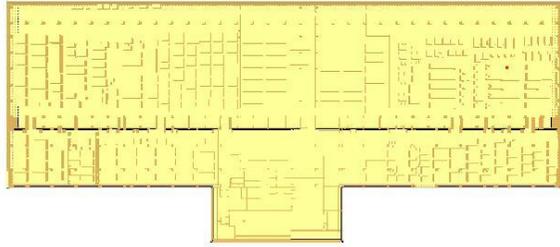


圖 5-26 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境四)

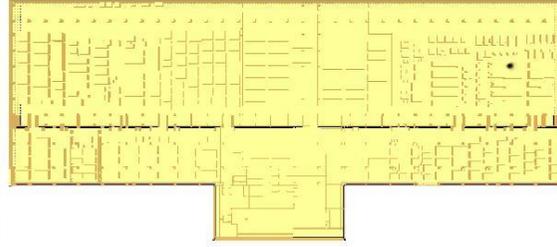
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 250  
Time: 200.0

T=200sec

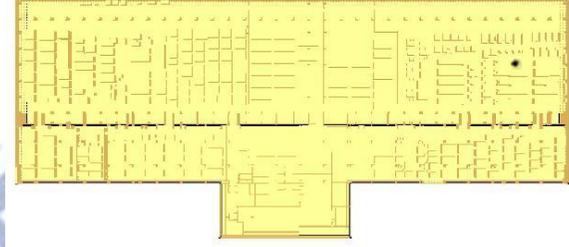
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 400  
Time: 320.0

T=320sec

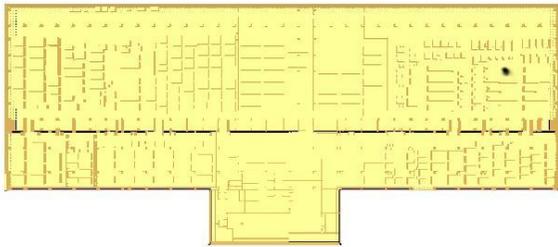
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 550  
Time: 440.0

T=440sec

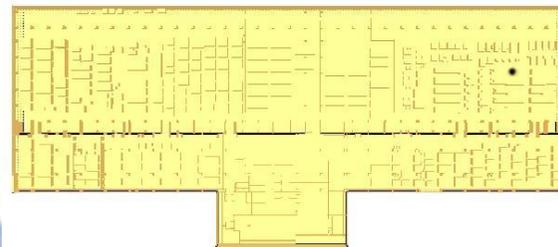
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 700  
Time: 560.0

T=560sec

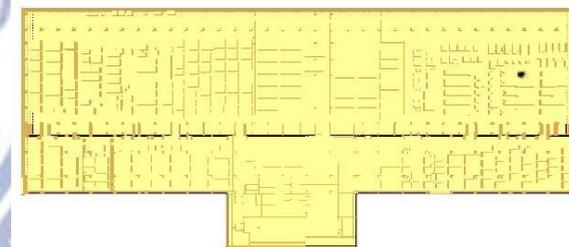
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 850  
Time: 680.0

T=680sec

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 1000  
Time: 800.0

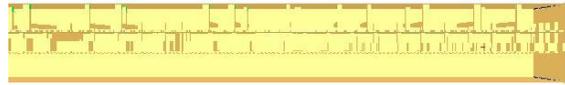
T=800sec

圖 5-27 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境五)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 250  
Time: 200.0



T=200sec

mesh: 1

Frame: 400  
Time: 320.0



T=320sec

mesh: 1

Frame: 550  
Time: 440.0



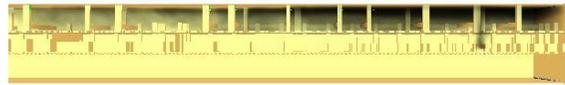
T=440sec

mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 700  
Time: 560.0



T=560sec

mesh: 1

Frame: 850  
Time: 680.0



T=680sec

mesh: 1

Frame: 1000  
Time: 800.0



T=800sec

mesh: 1

圖 5-28 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境五)

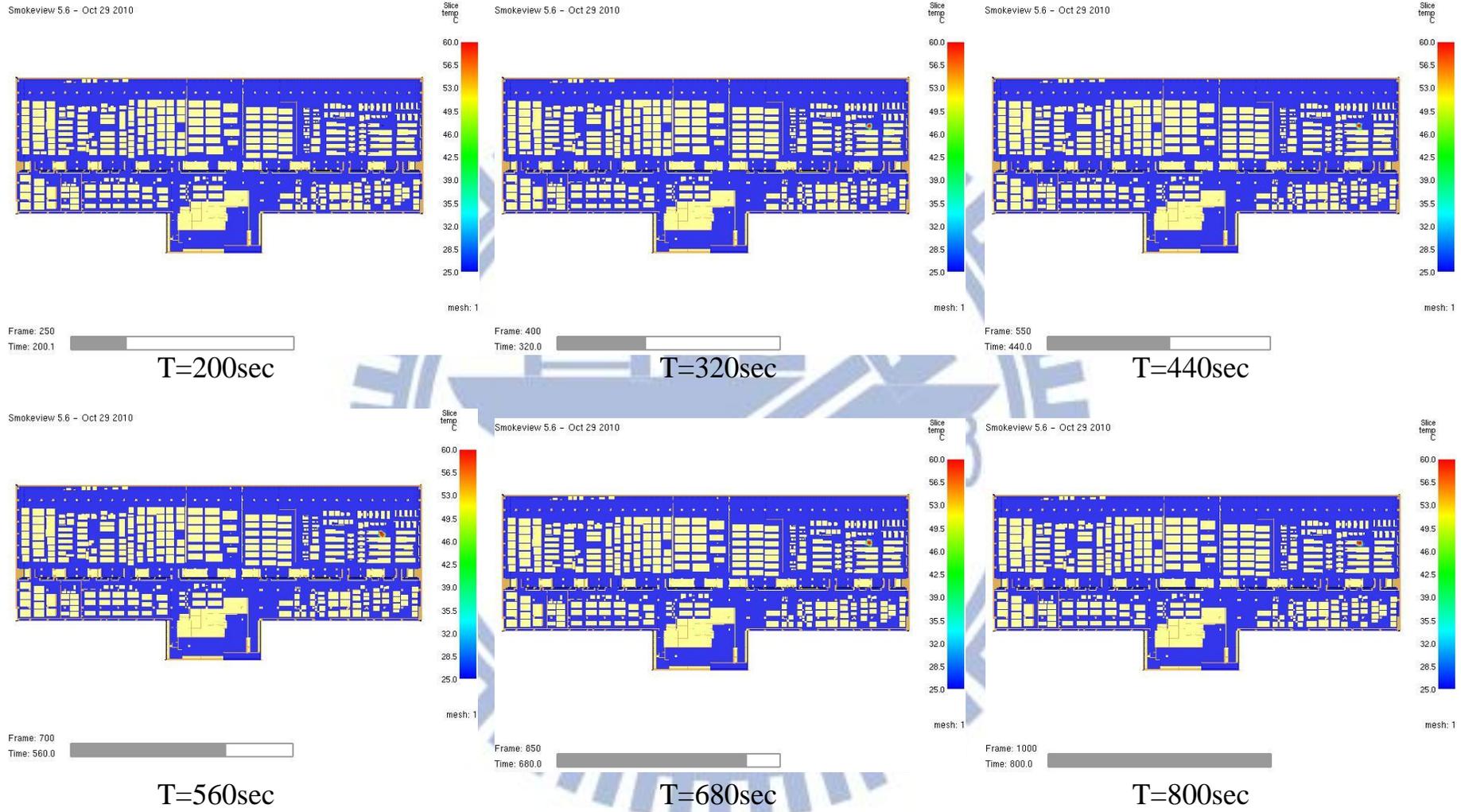


圖 5-29 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境五)

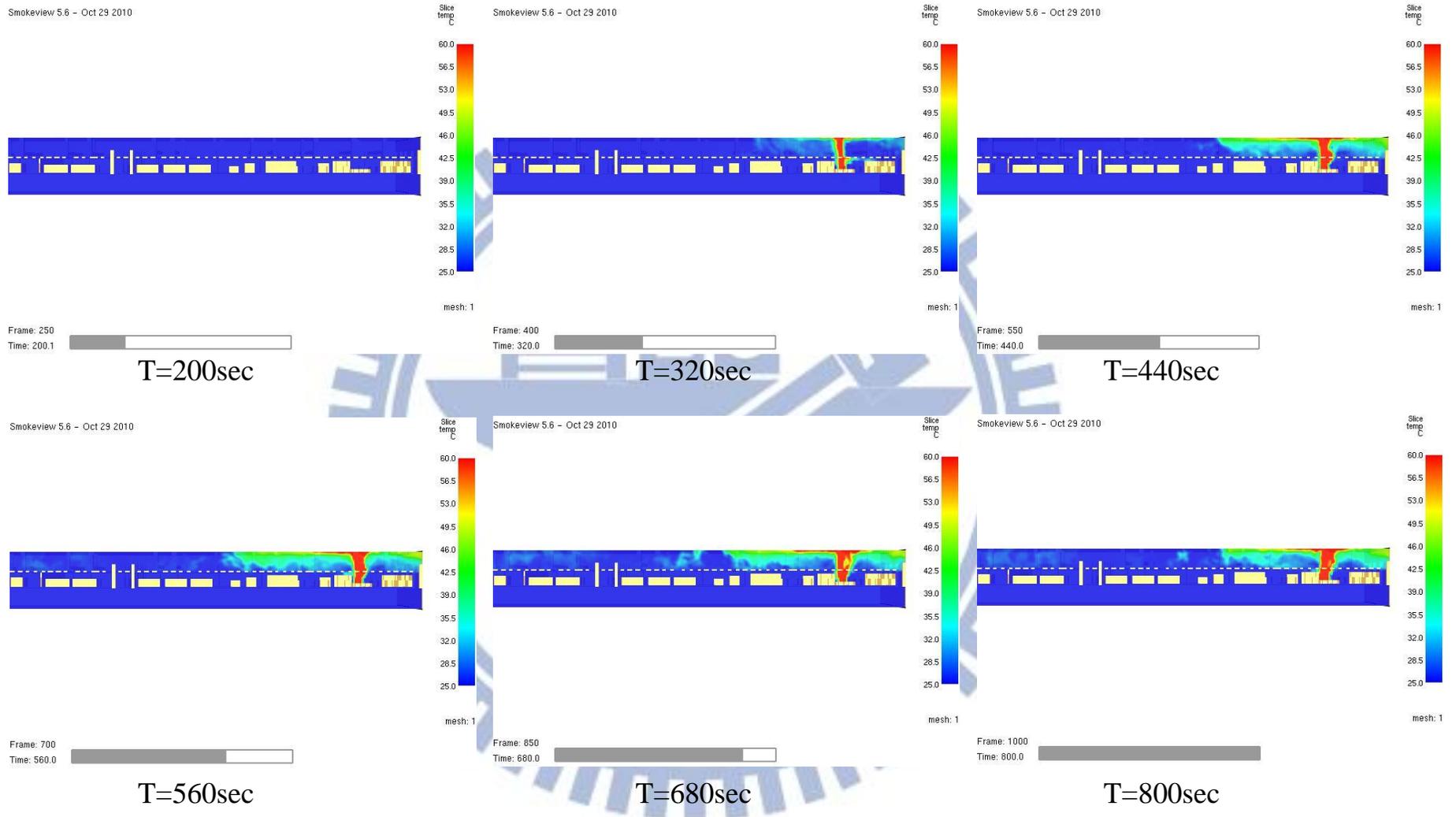
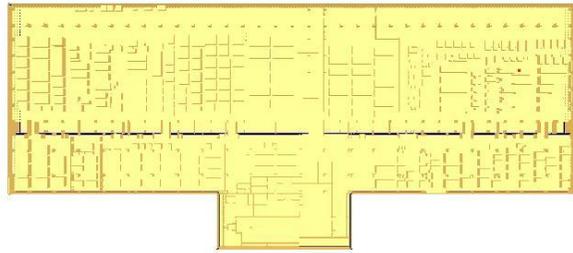
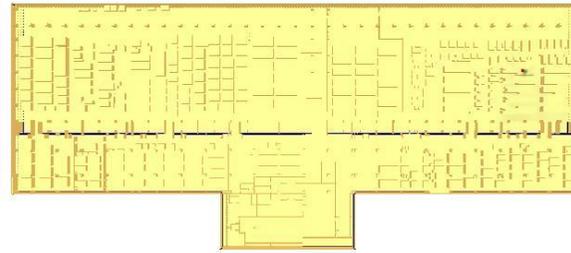


圖 5-30 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境五)



Frame: 250  
Time: 200.0

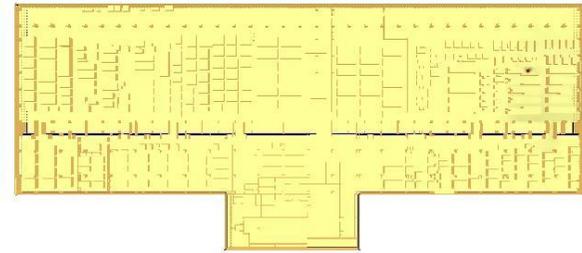
T=200sec



mesh: 1

Frame: 400  
Time: 320.0

T=320sec

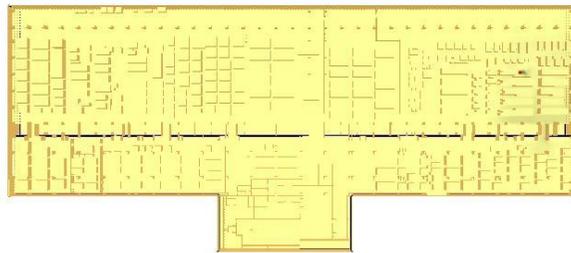


mesh: 1

Frame: 550  
Time: 440.0

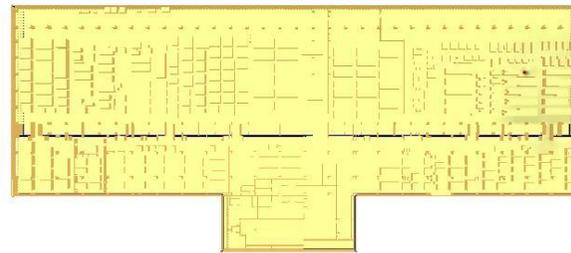
T=440sec

mesh: 1



Frame: 700  
Time: 560.0

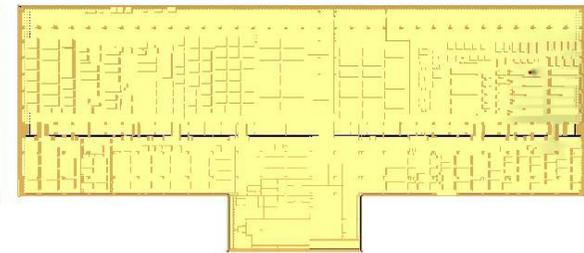
T=560sec



mesh: 1

Frame: 850  
Time: 680.0

T=680sec



mesh: 1

Frame: 1000  
Time: 800.0

T=800sec

mesh: 1

圖 5-31 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境六)



Frame: 250  
Time: 200.0  
**T=200sec**



Frame: 400  
Time: 320.0  
**T=320sec**



Frame: 550  
Time: 440.0  
**T=440sec**



Frame: 700  
Time: 560.0  
**T=560sec**



Frame: 850  
Time: 680.0  
**T=680sec**



Frame: 1000  
Time: 800.0  
**T=800sec**

圖 5-32 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境六)

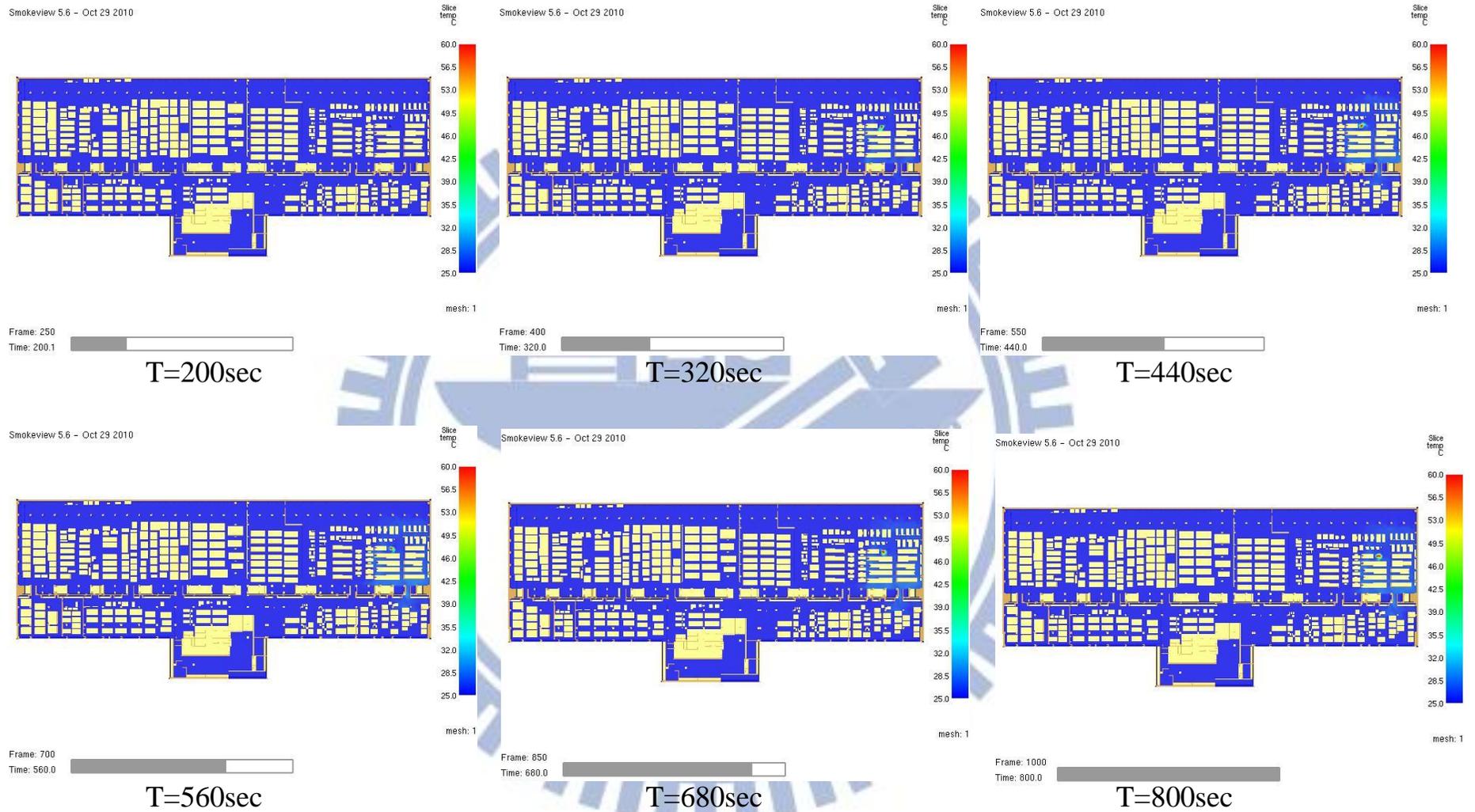


圖 5-33 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境六)

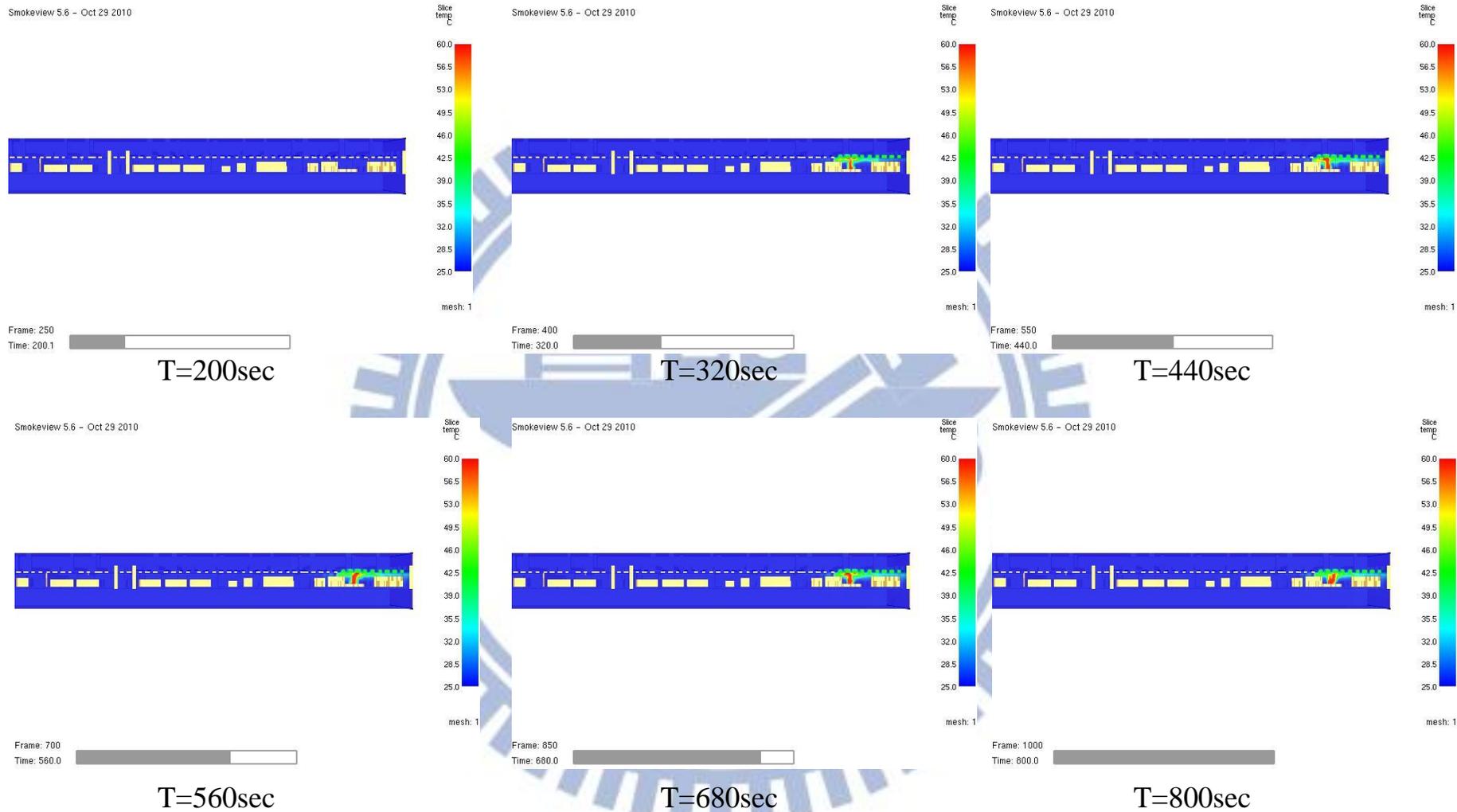


圖 5-34 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境六)

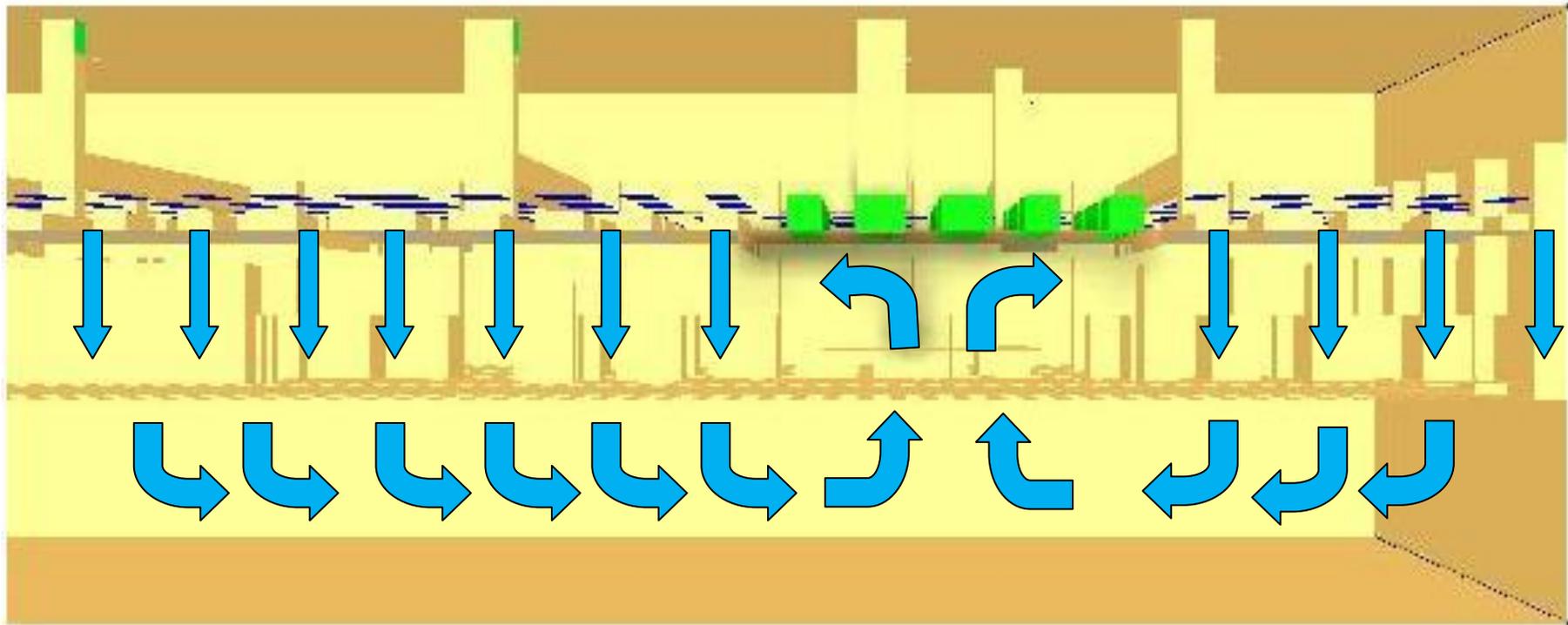
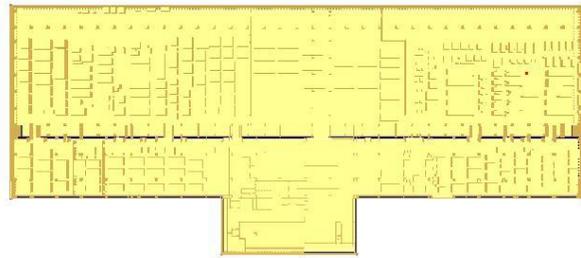
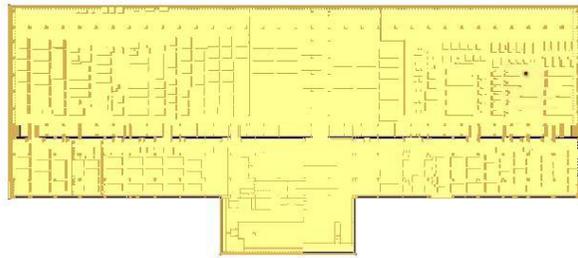


圖 5-35 FFU 風機關閉形成負壓區示意圖



Frame: 249  
Time: 200.0

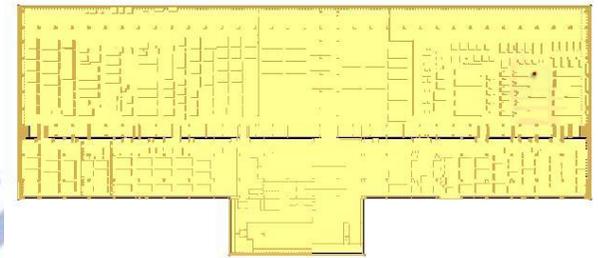
T=200sec



mesh: 1

Frame: 399  
Time: 320.0

T=320sec

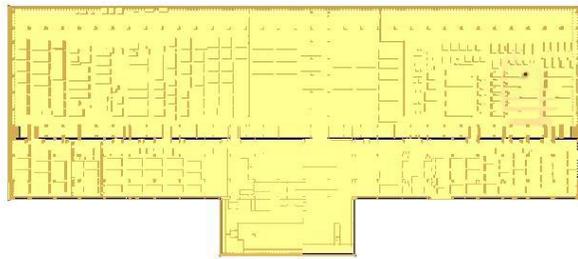


mesh: 1

Frame: 549  
Time: 440.0

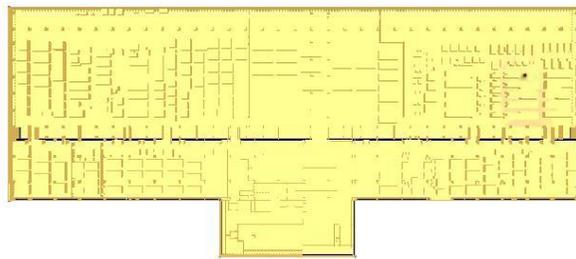
T=440sec

mesh: 1



Frame: 699  
Time: 560.0

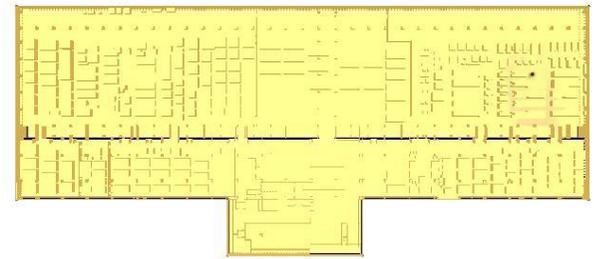
T=560sec



mesh: 1

Frame: 849  
Time: 680.0

T=680sec



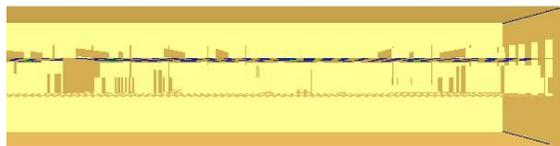
mesh: 1

Frame: 999  
Time: 800.0

T=800sec

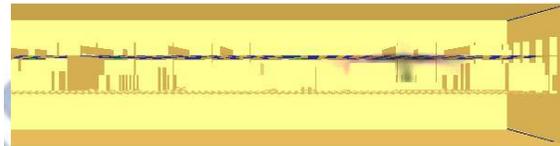
mesh: 1

圖 5-36 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境七)



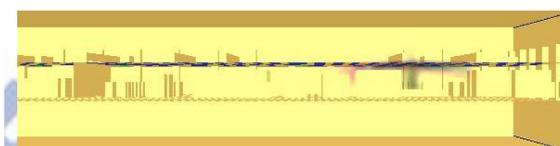
Frame: 249  
Time: 200.0

T=200sec



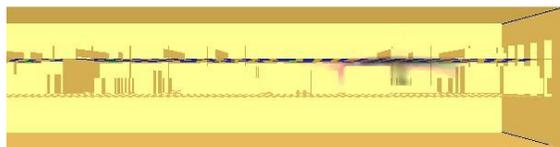
Frame: 399  
Time: 320.0

T=320sec



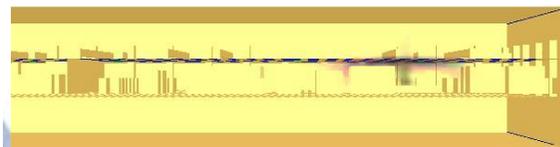
Frame: 549  
Time: 440.0

T=440sec



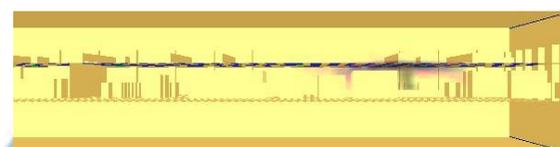
Frame: 699  
Time: 560.0

T=560sec



Frame: 849  
Time: 680.0

T=680sec



Frame: 999  
Time: 800.0

T=800sec

圖 5-37 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境七)

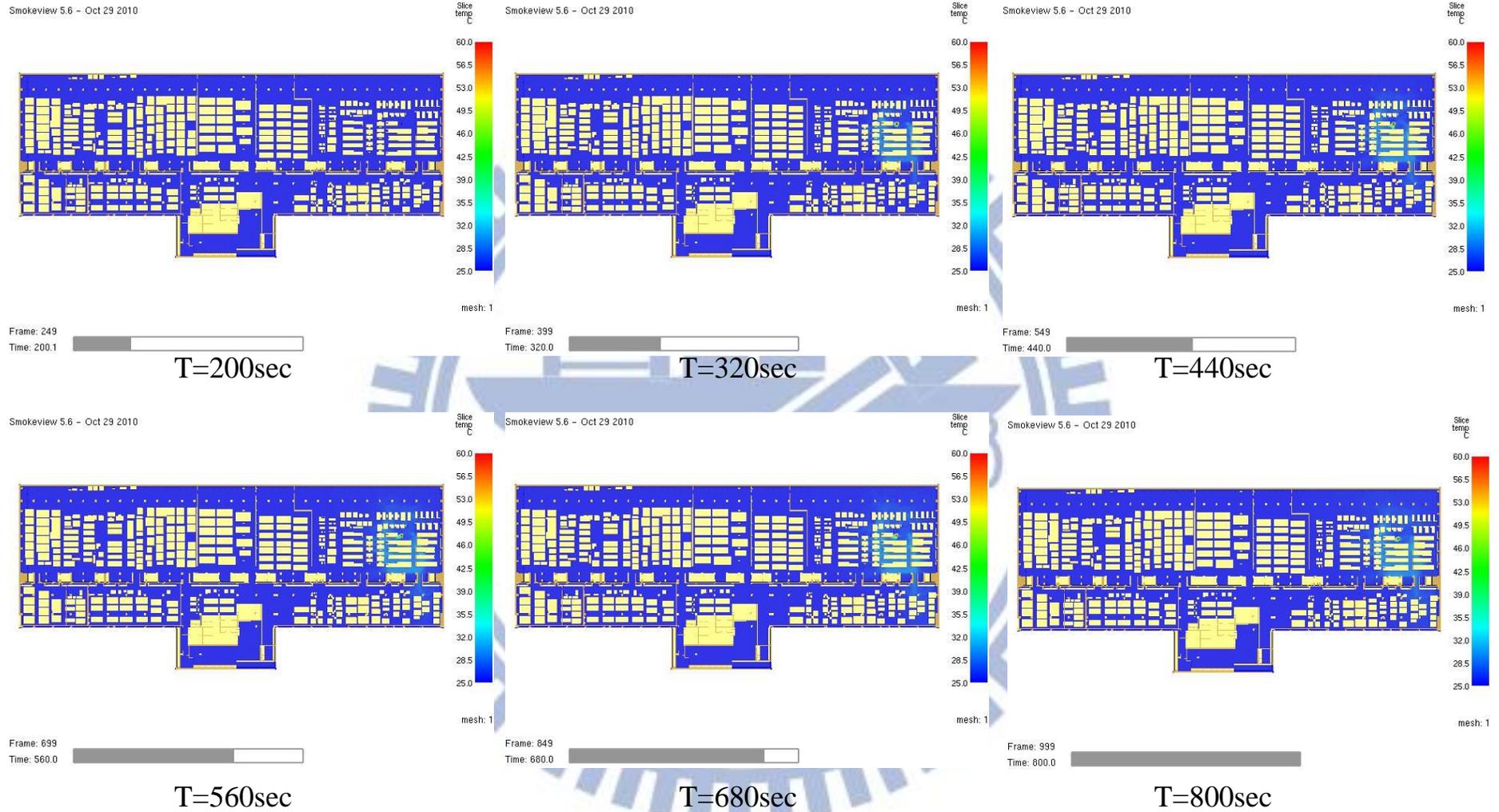


圖 5-38 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境七)

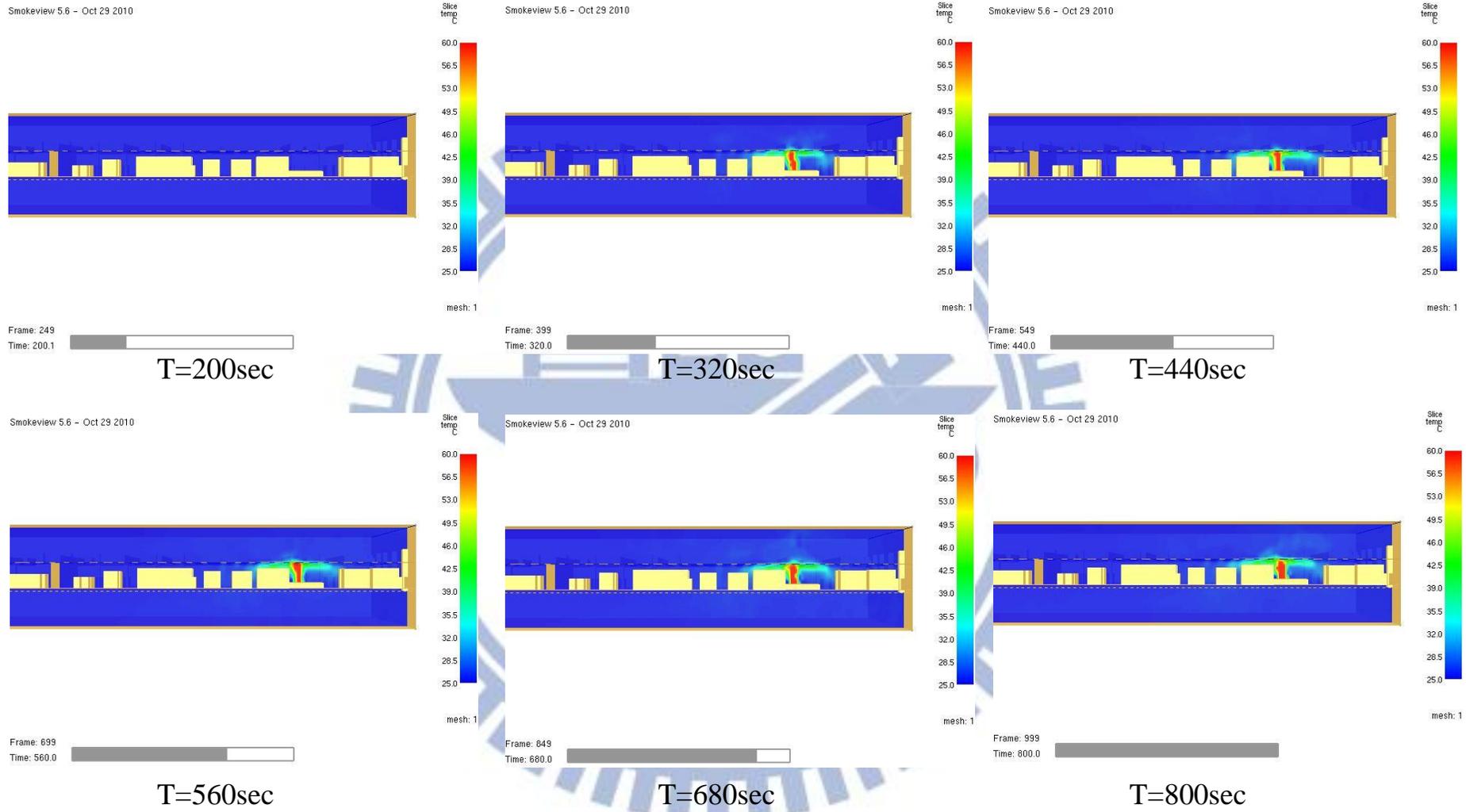
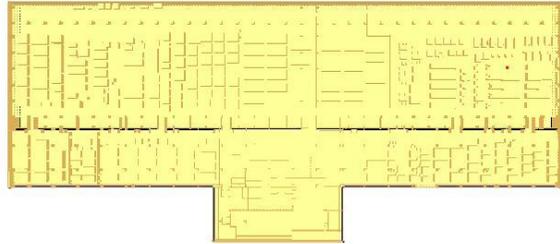


圖 5-39 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境七)

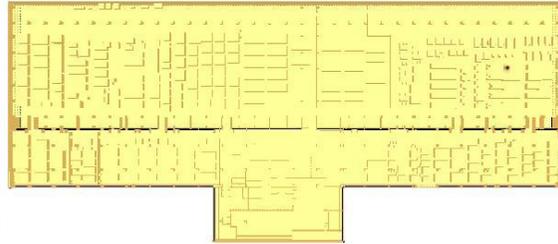
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 250  
Time: 200.0

T=200sec

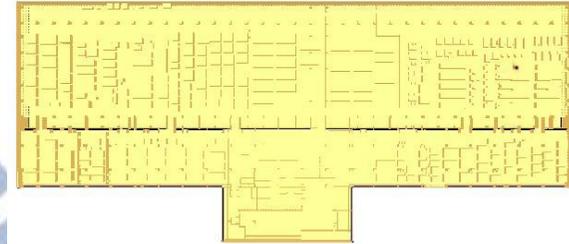
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 400  
Time: 320.0

T=320sec

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 550  
Time: 440.0

T=440sec

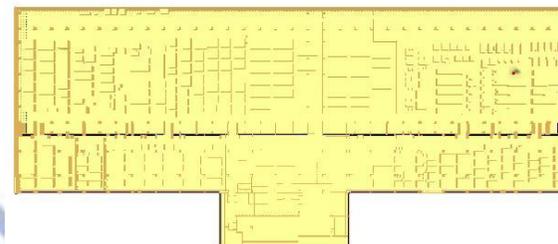
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 700  
Time: 560.0

T=560sec

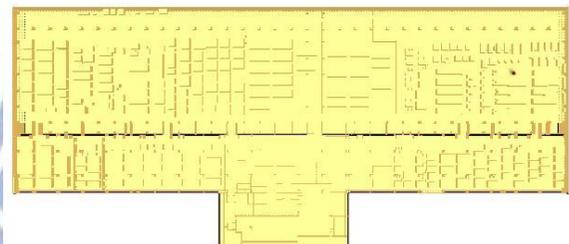
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 850  
Time: 680.0

T=680sec

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 1000  
Time: 800.0

T=800sec

圖 5-40 Fab 層煙塵分佈圖 x-y 平面 (情境七)

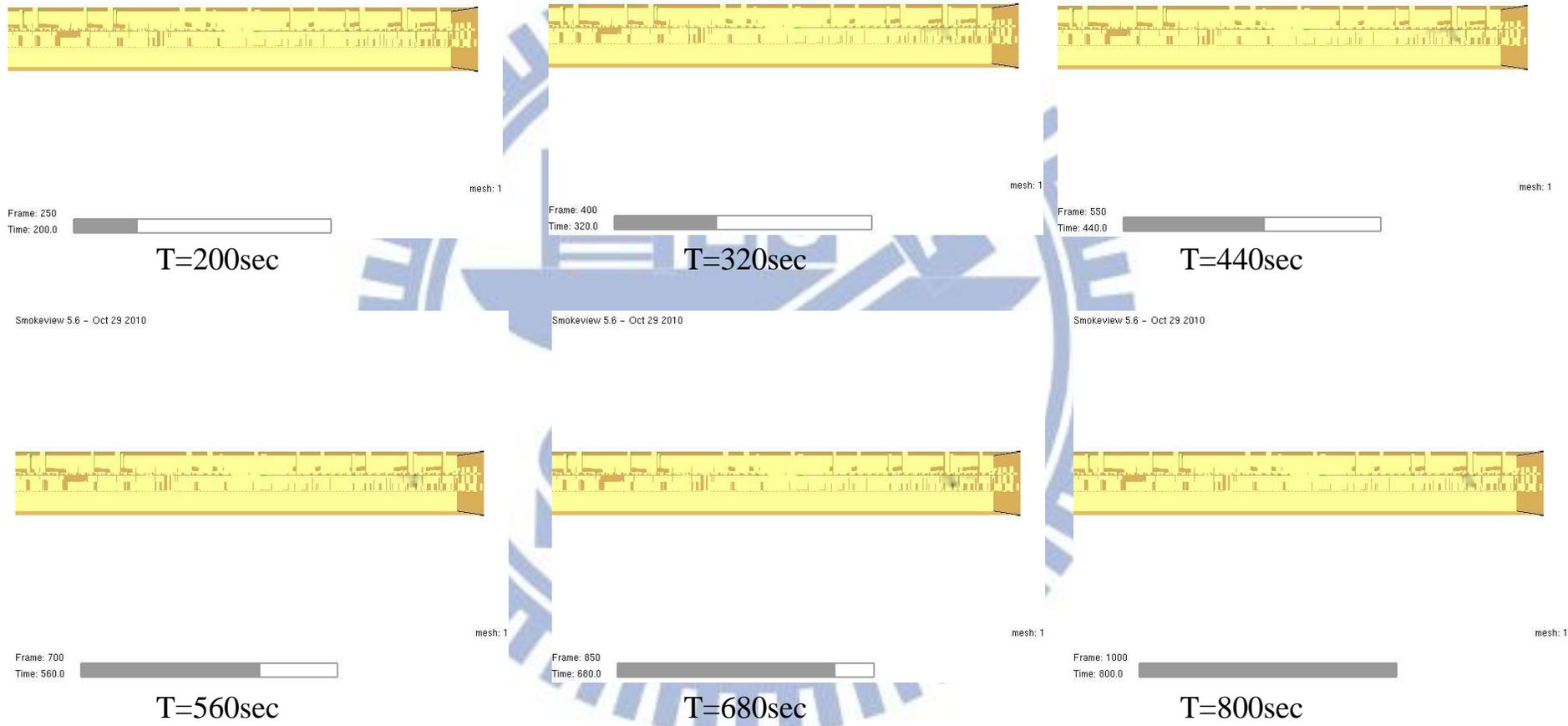


圖 5-41 煙塵分佈圖 x-z 平面 (情境七)

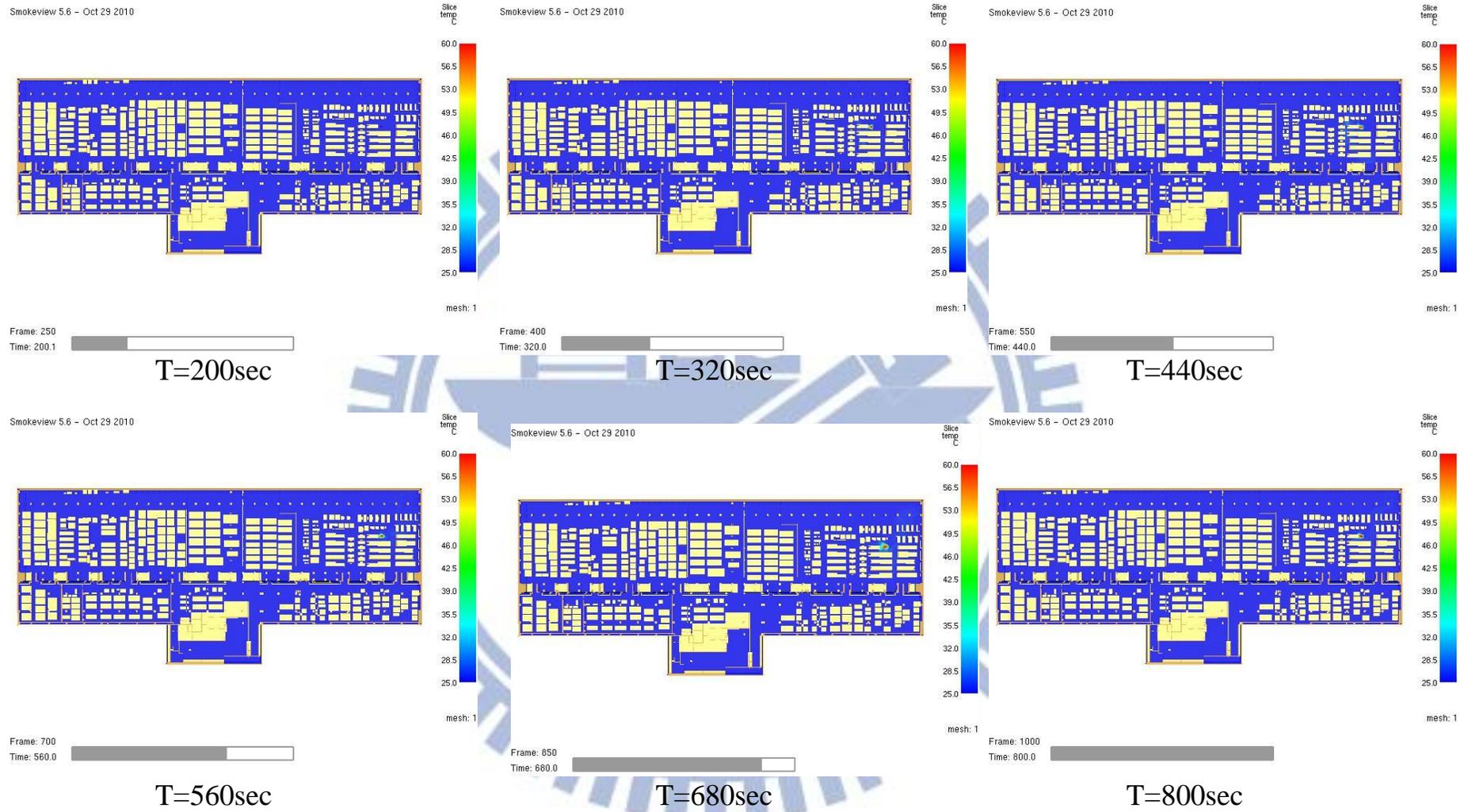


圖 5-42 Fab 層溫度分佈圖 x-y 平面 (情境七)

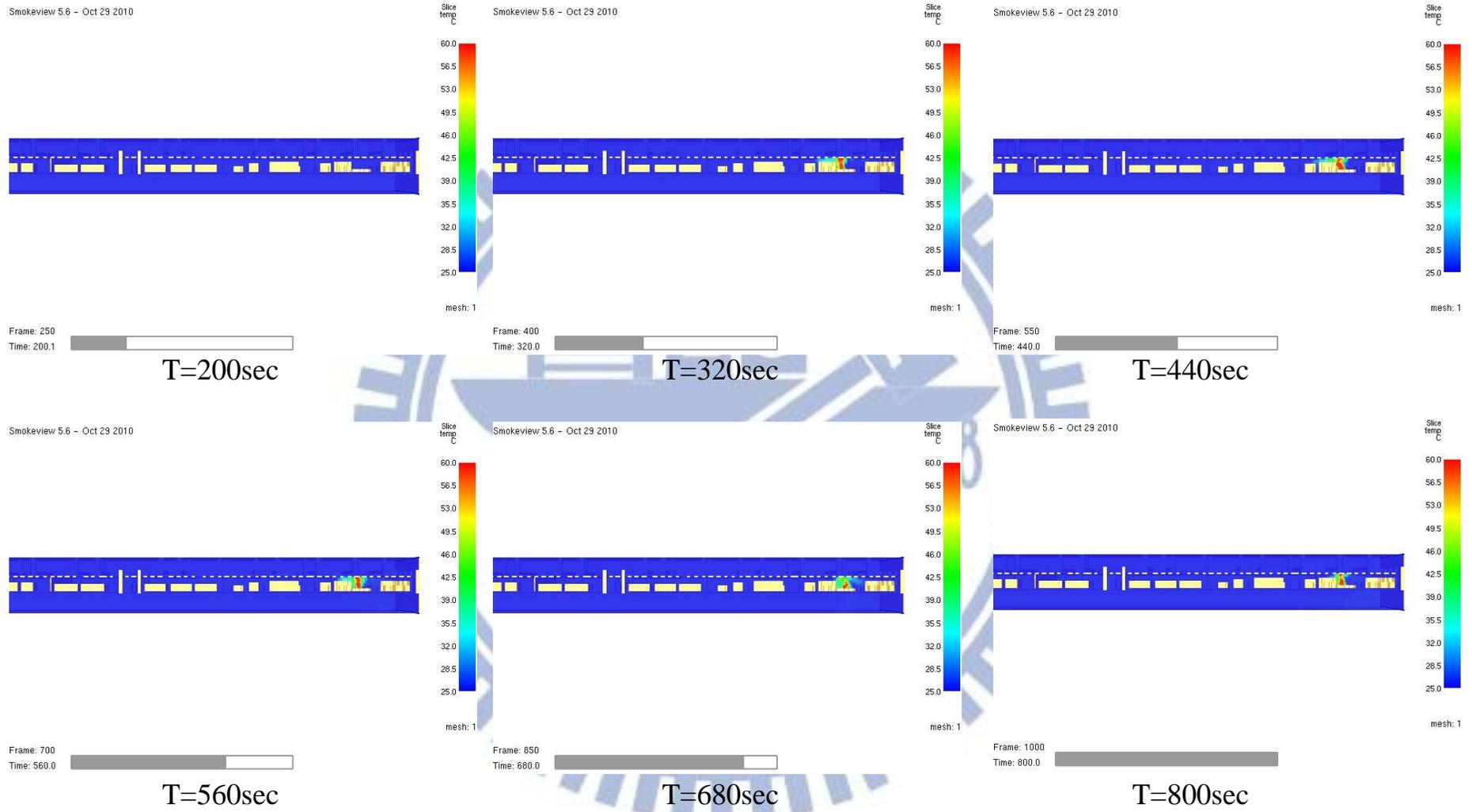


圖 5-43 溫度分佈圖 x-z 平面 (情境七)

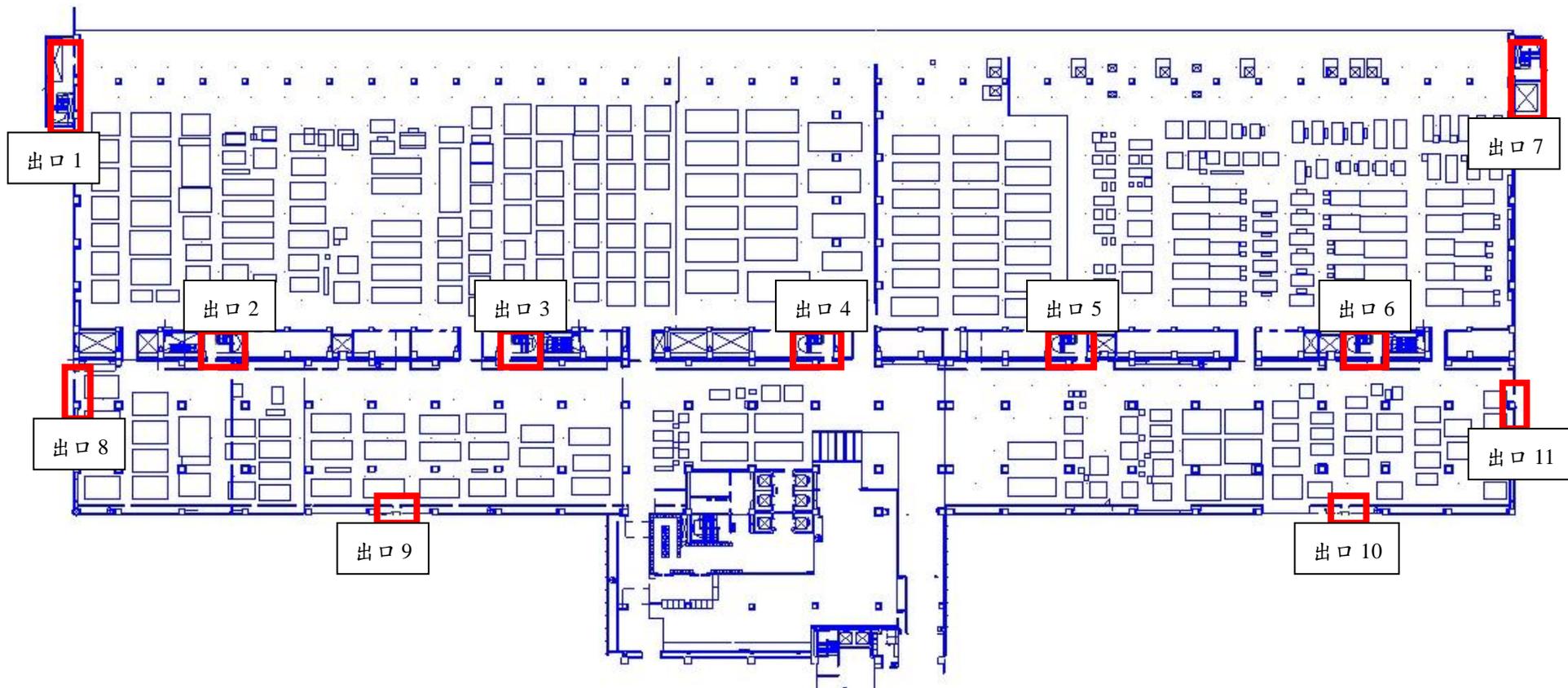


圖 5-44 逃生出口位置與人員分佈示意圖

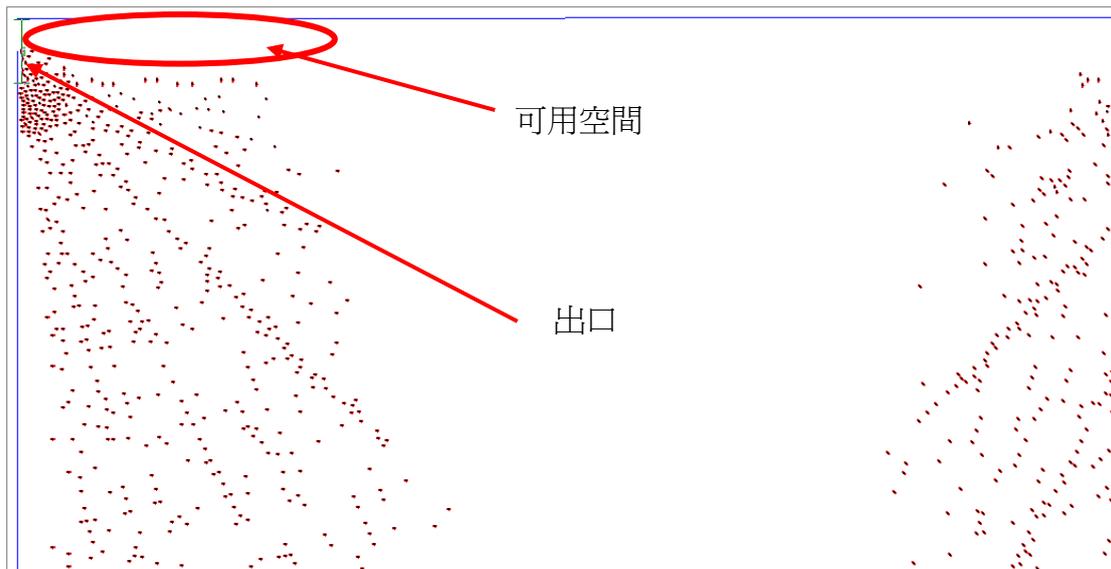


圖 5-45 人員擠於相同逃生路線示意圖

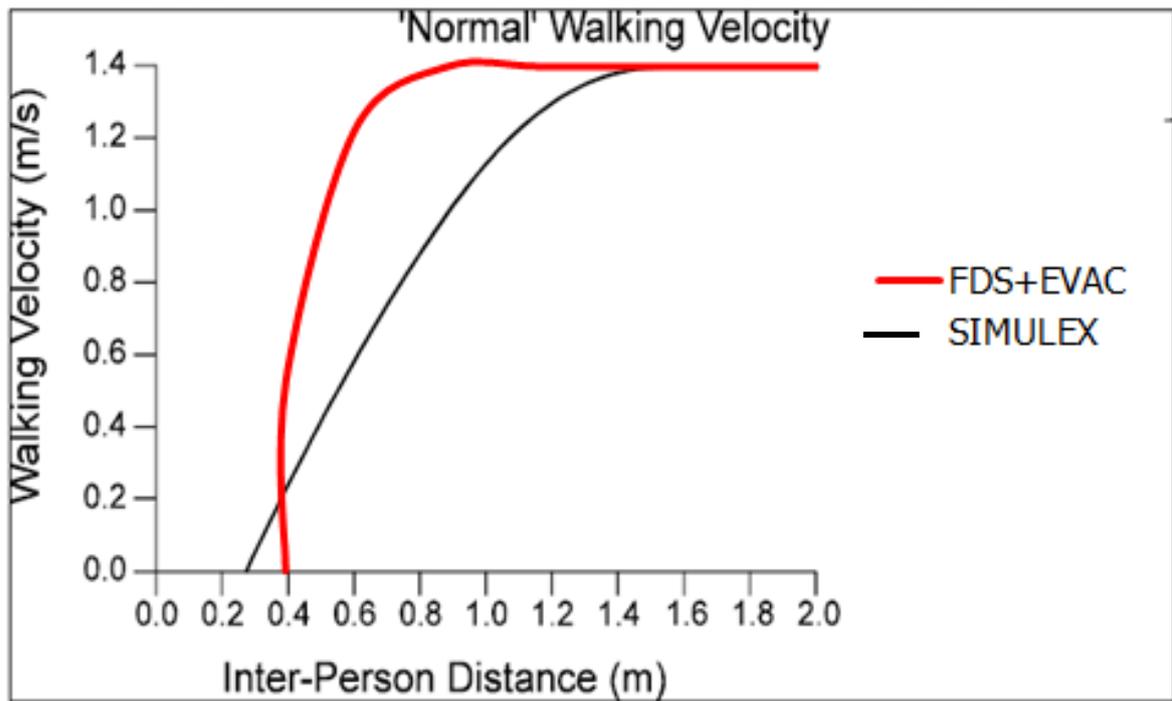


圖 5-46 人與人距離相對之速度比較

## 第六章 結論與建議

無塵室的內部空調循環流場，於火災發生時煙流容易受到循環流場的影響而往四周擴散，並降低了排煙設備於火場中的功用及效率，故無塵室較不適合依照傳統式的規格性法規進行排煙設備設置。本研究利用 FDS 針對無塵室之火災進行模擬分析，並利用 Simulex、FDS+Evac 及性能驗證手冊針對人員避難時間進行分析與比較，現將本研究成果與發現歸納整理如下：

### 煙流控制

1. 由情境一與情境二的模擬結果可以得知，由於防煙垂壁受到無塵室天花板之運送軌道系統穿越，而具有開口，當無塵室發生火災時煙流將經由這些開口流向其他區劃，且因下吹式流場的影響，煙流會隨著向下之氣流而往下帶，直接越過防煙垂壁，使得防煙垂壁無法達到阻擋煙流的效用。由以上的原因可以歸納出，在火載量較大的情況下，於下吹式空調系統之無塵室，其防煙垂壁無法發揮效用，形同虛設，故建議於下吹式空調系統之無塵室內可免設防煙垂壁。
2. 由於無塵室之工作區必須維持一定的換氣率及潔淨度，即使於火災時，其空調循環系統無法全部關閉，故所有的消防設備（如火警探測器、極早期偵煙器、排煙設備等）皆須考慮於該流場循環之環境下的作動效率。且由於無塵室三明治式的結構，其上方具有廣大的空間（SAC 層）可用來蓄煙，以及 FFU 之濾網於火場中易受高溫影響而產生燒破的現象，故藉由控制火場中局部區塊的 FFU 風速，利用無塵室內的流場來抑制煙流的擴散，並利用以上之特性來進行煙流的控制，並增加排煙設備的排煙效率，為一值得嘗試之方法。
3. 於火載量較大時，濾網可能受高溫影響而燒破，煙流往 SAC 層竄升，將使得原來設置的排煙設備無法吸收到煙流，故利用 SAC

層進行蓄煙須於該層增設排煙口進行排煙，且經由模擬結果發現，於 SAC 層進行排煙可作動較多區劃之排煙機，提供較大的排煙量進行排煙，可有效的減緩煙流沉降，提供無塵室內部人員進行緊急應變的時間。

4. 由模擬結果可知於大火的情況下，將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機關閉或反轉皆可以獲得不錯的煙控效果，而反轉的設計會使高溫煙流較快的上升，使濾網產生燒破的時間較短且範圍較大，使得煙流較快的往 SAC 層竄升，但其煙流擴散的區域僅相差一個防煙區劃，而濾網燒破的時間相差僅差 17 秒，故其差異不大。
5. 於小火的情況下，將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機反轉的設定較不易使濾網產生燒破，而由於反轉之設定可產生較大的正負壓差，故煙控效果略優於關閉之設定，但其煙流擴散的區域亦僅相差一個防煙區劃，且經測試，兩設計不足以燒破濾網之火載量僅相差 50KW，其結果差異亦不大。而將 FFU 風機降載至 20% 之設計，使得起火區劃仍以較低之風速向下送風，進而減緩了高溫煙流竄升的速度，可將煙流侷限於起火區劃內。由以上結果可知於小火的情況下，FFU 風機關閉、降載與反轉之設定並無太大的差異，但是降載的設定於大火的情況下無法有效的控制煙流的擴散，而欲將排煙機制啟動之區劃的 FFU 風機反轉，須將全區域之 FFU 風機進行加工設定，故建議以關閉之設定進行煙控為較好的選擇。

### 逃生避難

1. 性能驗證手冊在計算人員抵達逃生口的時間中，僅利用最遠的移動距離除以人員移動速度，即考慮距離出口最遠的逃生人員以全速到達出口的時間，此方法無法估量人員於火場中可能因為恐慌而產生推擠的現象，或人員不熟悉環境而延長的逃生時間。
2. 由於無塵室內部人員密度較低，故於 Simulex 的模擬過程中，人

員堵塞的情況並不顯著，其通過逃生出口的時間與性能驗證手冊的時間結果相當接近，而由於 FDS+Evac 將逃生人員視為粒子，利用建立 outflow 的流場決定人員逃生的方向，在結構較為複雜的空間中易發生寬度不足以通過的通道，仍被視為逃生路徑，使逃生人員於該通道入口卡住，大幅的拖延了逃生時間，故於通過逃生出口的時間部份，Simulex 為較合乎實際狀況及保守之計算結果。

3. 在人員開始避難時間的部份，性能驗證手冊以樓地板面積進行估算，而由於無塵室內樓地板面積達 11402m<sup>2</sup>，故人員開始避難時間為 394 秒（6.56 分），占總逃生時間（448 秒）的 88%。無塵室內除了裝設有一般傳統式的火警探測器，還裝有極早期偵煙器（Vesda），可於火災發生初期對工作人員發出警報，可大幅降低人員開始避難時間，故性能驗證手冊所估之人員開始避難時間過為嚴謹。由以上原因可知，人員開始避難時間利用偵測器探測時間 30 秒與人員反應時間 60 秒，共 90 秒做為人員開始避難時間為較合理及保守之估算。
4. 由以上之結果分析可知，目前 Simulex 之模擬人員避難所需時間，為較保守且符合實際狀況的方法。雖然 FDS+Evac 能將火災產生之影響與人員避難過程進行結合，但仍有很多需要改進的地方，如修正人員選擇寬度不足已通過的通道進行逃生、溫度對人員產生之影響等，相信未來此方法將可更準確的模擬出人員於火場中的逃生狀況。

煙流控制與逃生避難之綜合比較如下表所示：

表 6-1 結果綜合比較表

情境	火載量	防煙垂壁	FFU 風速 控制	生命安 全防護	財產防 護

一	5MW	依現況設置	保持不變	○	×
二	5MW	拆除	保持不變	○	×
三	5MW	拆除	關閉	○	○
四	5MW	拆除	降載至 20%	○	×
五	5MW	拆除	反轉	○	○
六	350KW	拆除	關閉	○	○
七	400KW	拆除	降載至 20%	○	○
八	400KW	拆除	反轉	○	○

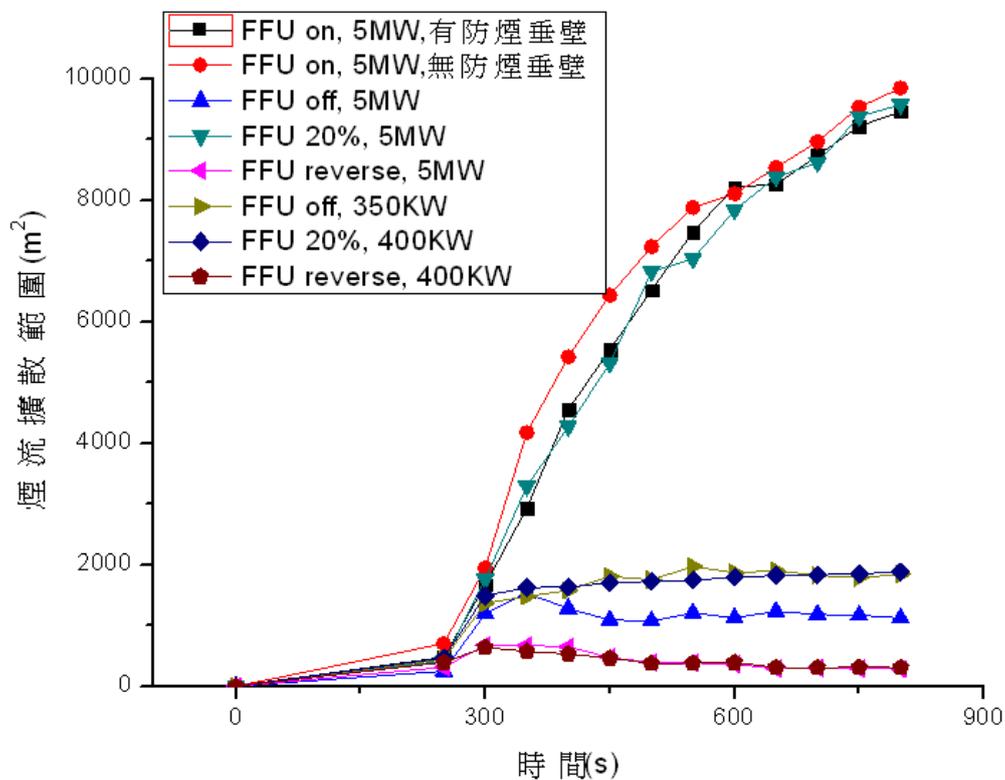


圖 6-1 煙流擴散面積隨時間變化圖

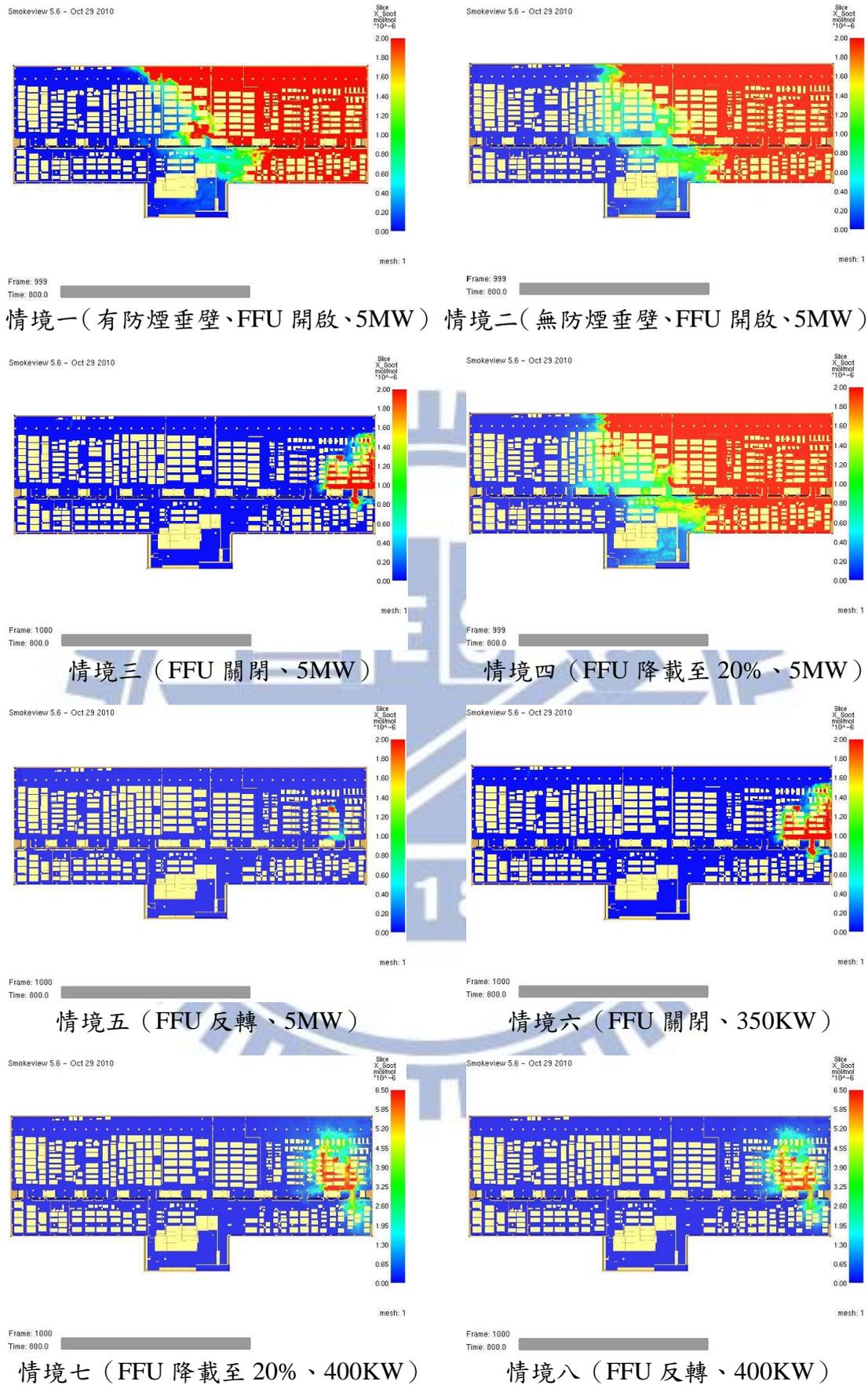


圖 6-2 各情境煙流擴散區域圖

## 參考文獻

1. 內政部消防署,“各類場所消防安全設備設置標準”,2008
2. U.S. Environmental Protection Agency,“Air Pollution Control Technology Fact Sheet”2003
3. Cooper, L. Y., Harkleroad, H., “An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full- scale Multi- room Fire Scenarios”, Journal of Heat Transfer, vol.104, pp.742-749, 1982.
4. G.Heskestad and J.C. Lutton,“Novel Smoke / Flume control for clean rooms,” FMRC Technical Report, 1997
5. M. Cheng, G. R. Liu, K. Y. Lam, W. J. Cai, E. L. Lee “Approaches for Improving Airflow Uniformity in Unidirectional Flow Cleanrooms”, Building and Environment, Vol.34, No.2,pp.275-284, 1999.
6. Soonil Nam, “Numerical simulation of smoke movement in clean room environments”, Fire Safety Journal, Vol.34, 2000, pp. 169-189
7. S. Nam, “Numerical Simulation of Smoke Movement in Clean Room Environment,” Fire Safety Journal, Vol. 34, pp. 169-189, 2000.
8. 邱晨璋,“半導體產業無塵室消防安全設計因素之研究”,中央警察大學碩士論文, 1999
9. 賴偉芸,“高科技廠房防火安全性能研究-避難安全評估”國立交通大學機械研究所碩士論文,2001
10. 林木榮,“火災後果模擬運用在緊急應變系統設計之研究”,國立交通大學產安學程碩士論文,2001
11. 陳朝慶,“無塵室火災模擬”,中山大學,2001 年
12. Gunnar Heskestad,“Somke distributions from fir plumes in uniform downdraft from a ceiling”,Fire Safety Journal,Vol.39,2004
13. 邱奕雄,“性能式煙控設計與避難分析~以無塵室為例”,國立交通大

- 學機械研究所碩士論文,2005
14. 邱晨瑋,“區劃空間火災閃燃和回燃現象實驗及十二吋晶圓廠無塵室防火性能設計之研究”, 交通大學博士論文, 2005
  15. Che-Tzu Lin, G.W.H. Silcock, M.A. Delichatsios,“Flame interactions and smoke containment by downward displacement ventilation”, Combustion and Flame,Vol.150,2007
  16. Peter K. Wu, Robert G. Bill Jr,“Comparison of simulated wet bench fires with small- and intermediate-scale fire tests”, FIRE AND MATERIALS,2008
  17. Yet-Pole I , Yi-Long Chiu, Shi-Jen Wu,“The simulation of air recirculation and fire/explosion phenomena within a semiconductor factory”, Journal of Hazardous Materials,2008
  18. Y. Huo, Y. Gao, H. M. Wu, J. H. Zhao,“The Characteristics of Temperature Near the Ceiling of Liquid Fires in Vertical Laminar Clean Room Environments”,IEEE,2009
  19. 王俊傑,“高科技廠房防火工程設計應用-以晶圓廠為例”, 交通大學碩士論文, 2002
  20. TAN Jialei, WANG Tong, “Safety Evacuation Measures in Urban Subway Fire”,IEEE,2009
  21. 黃莉芸,“應用 Simulex 模擬公共建築避難時間之研究-以大型量販店為例”, 朝陽科技大學碩士論文, 2010
  22. 白坤鼎,“建築物人員避難安全評估與 FDS+Evac 電腦模擬之應用研究-以大型展覽館為例”, 吳鳳科技大學碩士論文, 2011
  23. C. Y. Yang, H. M. Wu, Y. Gao, Y. Huo,“CFD Simulations and assessment of life safety in underground emporium”,IEEE,2010
  24. Xiaoge Wei, Wei Lv, Weiguo Song, Deqiang Wang,“Evacuation analysis of a hospital based on FDS+Evac software ”,IEEE,2011

25. NIST, “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide”,2010
26. IES, “Simulex User Guide,” 1998
27. VTT, “Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations”,2010
28. 內政部建築研究所,“建築物防火避難安全性能驗證技術手冊”,2009
29. International Standardization Organization (ISO), ISO 14644-1, Cleanrooms and Associated Controlled Environments-Part 1: Classification of cleanliness, Geneva, Switzerland, ISO, 2001
30. FEDERAL STANDARD 209E, “Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones”, approved by the Commissioner, Federal Supply Service, General Services Administration, for the use of all Federal agencies,1992
31. 內政部消防署,“潔淨區消防安全設備設置指導綱領”, 2005
32. NFPA 13 National Fire Protection Association, May,2010
33. NFPA 318 National Fire Protection Association, May,2009
34. 內政部營建署,“建築技術規則”,2011
35. NFPA 92B National Fire Protection Association, May,2009
36. 楊冠雄,「挑高中庭及大型開闊空間建築煙控技術規範之研究」, 內政部建築研究所, 2000
37. 黃弟勝,“我國捷運系統地下車站避難安全性評估之研究”,1999
38. Helbing D.Molnar P, “Social Force Model for Pedestrian Dynamics”, Physical Review E 51:4282-4286,1995
39. K.B. McGrattan, G.P. Forney, J.E. Floyd, and S. Hostikka, Fire Dynamics Simulator (Version 4)- User’s Guide, NISTIR 6783, National Institute of Standards and Technology, 2004