

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

鐵路地下隧道及車站之
防火性能設計研究



The Study of Fire Safety Engineering Design for Underground Railroad Tunnel
and Station

研究生：楊智欽
指導教授：陳俊勳 教授

中華民國九十八年六月

鐵路地下隧道及車站之防火性能設計研究

The Study of Fire Safety Engineering Design for Underground Railroad Tunnel
and Station

研究生：楊智欽

Student : Chih-Chin Yang

指導教授：陳俊勳

Advisor : Chiun-Hsun Chen



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of
Master of Science
In Mechanical Engineering
June 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

鐵路地下隧道及車站之防火性能設計研究

學生：楊智欽

指導教授：陳俊勳

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

因地下場站防火設計無法以一般規格性法規來進行設計，因此本研究利用性能式設計法（performance-based design method）之驗證程序和步驟，以及數值火災模擬軟體 FDS（Fire Dynamics Simulator）和 SIMULEX 人員逃生避難軟體分別針對地下車站公共區以及軌道區進行案例分析，來確保其消防設備的性能能夠確實的達到保障人員安全的目標。另外，針對地下隧道進行案例分析，探討隧道通風設備對煙流的影響。

本研究共模擬兩個案例，案例一主要分為軌道區火災及車站火災模擬兩個部份。案例二為隧道火災模擬。在分析的過程中，首先以火災模擬軟體 FDS 模擬火災的煙層流動情形、CO 濃度分佈、溫度分佈及能見度分佈來計算出所能提供人員疏散的時間。接著再利用動態避難模擬 SIMULEX 模擬計算人員避難逃生情形和避難所需時間，以評估人員避難安全。由案例一模擬結果可得，由於車站內採用分區排煙設計，此設計可以集中排煙風機的抽風能力，對特定區劃進行排煙，增強排煙效果，因此可減緩煙塵影響逃生避難空間的速度，增加旅客逃生避難的時間。另外，經由軌道區火災案例之模擬結果發現，利用 UPE(Under Platform Exhaust)切換 OTE(Over Track Exhaust)並隨後開啟 TVF(Tunnel Ventilation Fan)的控制模式，有助於延後月台層逃生環境受到火災影響的時間。而在案例二模擬結果可得，增設隧道通風設備能有效控制煙流的方向，增加人員逃生的時間。最後經由數值模擬結果比對逃生時間後可得知，所有案例均能滿足人員生命安全的標準，並可讓地下車站建築設計者作為逃生避難及煙控設計之參考。

關鍵字：FDS；SIMULEX；地下車站；隧道；煙流

The Study of Fire Safety Engineering Design for Underground Railroad Tunnel and Station

Student : Chih-Chin Yang

Advisor : Chiun-Hsun Chen

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The fire safety design of underground station generally cannot meet the requirements by building and fire codes, therefore, this research carried out the case studies for track and public areas of underground station by utilizing the design procedures of performance-based design method and the numerical simulation softwares, FDS (Fire Dynamics Simulator) and Simulex. It needs to ensure that the performance of fireproof equipments can retain the goal of occupant safety. In another case, it is to analyze the smoke movement in the underground railroad tunnel for investigating how the smoke management system affect its movement in tunnel.

In this research, two case studies were chosen. Case 1 was further divided into three fire scenarios; fire sources were located at track (scenario 1), platform (scenario 2) and concourse (scenario 3) areas, respectively. Case 2 concerned on the fires occurred in tunnel. In the process of simulation, FDS was firstly used to simulate the fire growth and smoke movement, CO concentration and temperature distributions, and visibility. After that, a dynamic egress model, SIMULEX, was applied to calculate the situations of evacuating occupants and the corresponding available evacuation time to justify the safety level of egress. From the simulation results in Case 1, they showed that the station area, including the platform and concourse, facilitates

the sub-compartmental desmoke system so that can utilize the full capacity of smoke exhaust fan for the particular region, such as fire origin area, to enhance the smoke effect and to mitigate the smoke influence on occupant traveling speed. Therefore, the evacuation time can be prolonged. As to the train fires at underground station trackway, it was found to turn off the under platform exhaust (UPE) and turn on the over track exhaust (OTE) simultaneously, and start tunnel ventilation fan (TVF) later can effectively exhaust smoke to keep the whole station attainable. Such installations and desmoke procedure are very helpful for mitigating the fire/smoke influence on the evacuation route that increase the escaping time from the platform to the safe area. From the simulation results of tunnel fire, they showed that the existing tunnel ventilation facilities are capable of controlling the direction of smoke effectively so that the available evacuation time in tunnel can be increased. To summarize, all of the fire protection designs in the station are found to be able to comply with the life safety requirements for occupant evacuation. And the results of this research can serve as a proper reference for smoke control system design and evacuation plan for underground station.

Keyword : FDS ; SIMULEX ; Underground Station ; Tunnel ; Smoke

誌謝

時光飛逝，轉眼間兩年研究所的生活已悄悄的結束，在這一段時間非常感謝恩師 陳俊勳教授不厭其煩的指導，不僅讓我在學術上獲得專業的知識，同時也培養我擁有獨立自主的能力。在撰寫論文的過程中，老師不辭煩苦逐字斧正，使本論文得以順利完成，謹在此向老師致上最崇高的感謝與敬意。

同時特別要感謝中台技術學院 徐一量教授與台灣警察專科學校 邱晨瑋教授於口試期間給予的指正與建議，使得本論文更加完善。

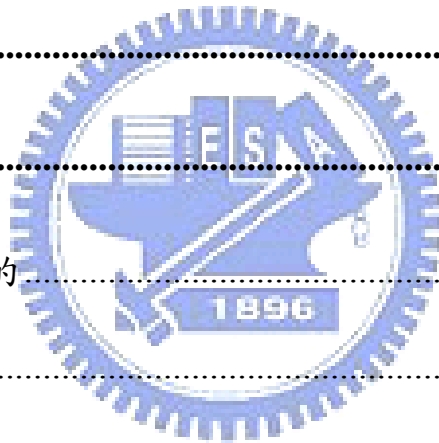
在兩年的研究生涯中，非常感謝文耀、彥成、維義、成陽、家維、靖山、宏一、彥佐、昇宏等學長在生活及課業上的指導。同時一起畢業的金輝、振稼、致瑋與長新，還有非常好的朋友思賢以及在其他學校奮鬥的同學們，這兩年有你們的陪伴，讓我忘卻學業上的辛苦，還有信錡、瑋琮等學弟幫我處理一些繁瑣雜事，讓我能順利地完成論文。

最重要的是感謝女友雅琪在這段求學與做研究期間的陪伴，在喜怒哀樂的生活中，有妳一路的支持與鼓勵，成為我向前的動力，使我在學校能順利完成學業。

最後，將這份榮耀獻給我最摯愛的家人，非常感謝生我、育我的爸爸、媽媽以及常關心我的老哥，還有從小看著我長大的爺爺、奶奶還有外婆，感謝你們在這段期間給我無後顧之憂的念書環境以及一路的支持及鼓勵。

目錄

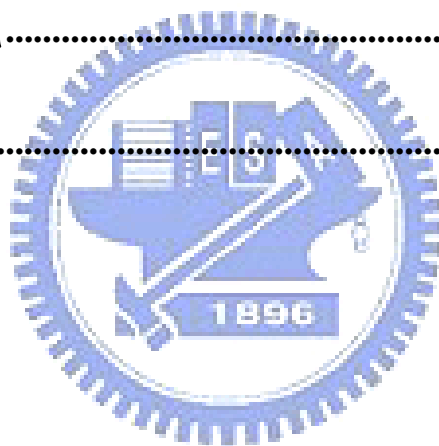
| | |
|----------------------------|------|
| 摘要..... | I |
| ABSTRACT | II |
| 誌謝 | IV |
| 目錄 | V |
| 表目錄 | VIII |
| 圖目錄 | X |
| 符號表 | XXII |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究動機與目的 | 1 |
| 1.2 文獻回顧 | 3 |
| 1.3 研究內容 | 7 |
| 第二章 地下場站空間型態之特性分析與避難 | 9 |
| 2.1 地下場站空間之特性 | 9 |
| 2.2 火災燃燒過程 | 10 |
| 2.3 火源設計 | 11 |
| 2.4 煙層流動特性 | 15 |
| 2.5 煙控之設計 | 17 |



| | |
|-------------------------------|-----------|
| 2.6 避難安全界定標準..... | 20 |
| 第三章 性能式防火設計方法..... | 28 |
| 3.1 性能設計法之目的..... | 28 |
| 3.2 性能式設計法規介紹..... | 29 |
| 3.3 建築技術規則性能式設計規定..... | 31 |
| 3.4 性能式防火安全設計程序..... | 35 |
| 第四章 火災模擬軟體及理論基礎介紹..... | 49 |
| 4.1 FDS軟體理論基礎與數值分析方法..... | 49 |
| 4.1.1 流體力學之統御方程式..... | 49 |
| 4.1.2 差分方程式..... | 51 |
| 4.1.3 燃燒模式..... | 53 |
| 4.1.4 熱輻射之統御方程式..... | 54 |
| 4.1.5 邊界條件..... | 55 |
| 4.2 逃生模擬軟體(SIMULEX)..... | 57 |
| 第五章 案例分析..... | 66 |
| 5.1 前言..... | 66 |
| 5.2 地下化車站(案例一)..... | 66 |
| 5.2.1 火源設計、煙控設計及相關設定..... | 66 |



| | |
|------------------------------|------------|
| 5.2.2 FDS模擬情境設定..... | 72 |
| 5.2.3 FDS模擬結果..... | 73 |
| 5.2.4 Simulex參數設定及模擬結果 | 79 |
| 5.3 地下隧道(案例二)..... | 82 |
| 5.3.1 火源設計、煙控設計及相關設定..... | 82 |
| 5.3.2 FDS模擬情境設定..... | 83 |
| 5.3.3 FDS模擬結果..... | 84 |
| 第六章 結論與建議..... | 143 |
| 參考文獻..... | 145 |



表目錄

| | |
|---------------------------------------|----|
| 表 1.1 世界各國捷運及地下鐵系統重大火災事故一覽表..... | 3 |
| 表 2.1 火災案例 | 13 |
| 表 2.3 人體承受危害程度指標值分析表(SFPE及紐西蘭設計)..... | 20 |
| 表 2.4 建議人員逃生安全環境要求..... | 21 |
| 表 3.1 適用建築物防火避難安全性能驗證技術手冊之建築物 | 33 |
| 表 3.2 建築物防火避難安全性能驗證技術手冊可替代之法規 | 34 |
| 表 3.3 火災後果分級表..... | 43 |
| 表 3.4 發生機率分級表..... | 43 |
| 表 3.5 風險等級矩陣..... | 44 |
| 表 4.1 Simulex提供之人體尺寸..... | 58 |
| 表 4.2 Simulex提供不同人群模式之男女分布表 | 59 |
| 表 5.1 排煙系統啟動時間(情境一)..... | 68 |
| 表 5.2 排煙系統啟動時間(情境二)..... | 68 |
| 表 5.3 排煙系統啟動時間(情境三)..... | 69 |
| 表 5.4 軌道區風機參數設定..... | 69 |
| 表 5.5 隧道通風口設定..... | 70 |
| 表 5.6(a) 格點配置表 | 70 |
| 表 5.6(b) 格點配置表 | 71 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 表 5.6(c) 格點配置表 | 71 |
| 表 5.7 格點測試(720 秒之平均溫度)..... | 71 |
| 表 5.8 模擬情境..... | 72 |
| 表 5.9 模擬情境之各項參數..... | 73 |
| 表 5.10 格點配置圖(情境一)..... | 74 |
| 表 5.11 格點配置圖(情境二)..... | 76 |
| 表 5.12 格點配置圖(情境三)..... | 78 |
| 表 5.13 模擬避難時間表(月台層疏散完畢)..... | 81 |
| 表 5.14 模擬避難時間表(穿堂層疏散完畢)..... | 81 |
| 表 5.15 模擬避難時間表(總疏散完畢)..... | 81 |
| 表 5.16 模擬避難時間表(NFPA 計算時間)..... | 82 |
| 表 5.17 隧道通風設備設定..... | 83 |
| 表 5.18 隧道模擬情境..... | 84 |
| 表 5-19 模擬情境之各項參數 | 84 |

圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 2.1 火災發展過程圖..... | 22 |
| 圖 2.2 火災成長曲線圖..... | 23 |
| 圖 2.3 不同熱釋放率之火災成長曲線圖..... | 24 |
| 圖 2.4 T-Square火災成長曲線圖..... | 24 |
| 圖 2.5 Kisok實際量測之火災成長曲線圖 (NIST,1995)..... | 25 |
| 圖 2.6 正煙囪效應 (Normal Stack Effect)..... | 25 |
| 圖 2.7 逆煙囪效應 (Reverse Stack Effect)..... | 26 |
| 圖 2.8 自然排煙口設計..... | 26 |
| 圖 2.9 機械排煙設計..... | 27 |
| 圖 2.10 光電分離式探測器..... | 27 |
| 圖 3.1 性能式法規階層架構圖..... | 46 |
| 圖 3.2 避難安全驗證方式..... | 46 |
| 圖 3.3 性能式設計基本流程圖..... | 47 |
| 圖 3.4 評估試驗設計流程圖..... | 48 |
| 圖 4.1 FDS分析執行計畫流程圖..... | 60 |
| 圖 4.2 FDS與Smokeview之組織架構與工作流程圖..... | 61 |
| 圖 4.3 Simulex模擬避難流程..... | 62 |
| 圖 4.4 電腦模擬人體尺寸示意圖..... | 63 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 圖 4.5 人員間的接觸距離..... | 63 |
| 圖 4.6 人員間距離與步行速度之關係..... | 64 |
| 圖 4.7 避難人員超越之角度..... | 64 |
| 圖 4.8 Simulex模擬不同方向阻礙下之超越路線圖..... | 65 |
| 圖 5.1 車站模型..... | 86 |
| 圖 5.2(a) 穿堂層防煙區劃圖..... | 86 |
| 圖 5.2(b) 月台層防煙區劃圖..... | 86 |
| 圖 5.3 車站排煙設備..... | 87 |
| 圖 5.4 軌道上、下方排氣系統..... | 87 |
| 圖 5.5(a) 火源位置I..... | 88 |
| 圖 5.5(b) 火源位置II..... | 88 |
| 圖 5.5(c) 火源位置III..... | 88 |
| 圖 5.6(a) 月台層量測點位置..... | 89 |
| 圖 5.6(b) 穿堂層量測點位置..... | 89 |
| 圖 5.7 月台層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境一)..... | 90 |
| 圖 5.8 月台層 1.8 米高度CO分佈圖(情境一)..... | 90 |
| 圖 5.9 月台層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境一)..... | 90 |
| 圖 5.10 穿堂層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境一)..... | 91 |
| 圖 5.11 穿堂層 1.8 米高度CO分佈圖(情境一)..... | 91 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 圖 5.12 | 穿堂層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境一)..... | 91 |
| 圖 5.13 | t=120 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 92 |
| 圖 5.14 | t=240 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 92 |
| 圖 5.15 | t=360 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 92 |
| 圖 5.16 | t=480 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 92 |
| 圖 5.17 | t=600 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 93 |
| 圖 5.18 | t=720 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 93 |
| 圖 5.19 | t=120 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 93 |
| 圖 5.20 | t=240 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 93 |
| 圖 5.21 | t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 94 |
| 圖 5.22 | t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 94 |
| 圖 5.23 | t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 94 |
| 圖 5.24 | t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一) | 94 |
| 圖 5.25 | t=120 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境一)..... | 95 |
| 圖 5.26 | t=240 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境一)..... | 95 |
| 圖 5.27 | t=360 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境一)..... | 95 |
| 圖 5.28 | t=480 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境一)..... | 95 |
| 圖 5.29 | t=600 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境一)..... | 96 |
| 圖 5.30 | t=720 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境一)..... | 96 |

| | | | |
|--------|---------|--------------------------|-----|
| 圖 5.31 | t=120 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一) | 96 |
| 圖 5.32 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一) | 96 |
| 圖 5.33 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一) | 97 |
| 圖 5.34 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一) | 97 |
| 圖 5.35 | t=600 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一) | 97 |
| 圖 5.36 | t=720 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一) | 97 |
| 圖 5.37 | t=120 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 98 |
| 圖 5.38 | t=240 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 98 |
| 圖 5.39 | t=360 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 98 |
| 圖 5.40 | t=480 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 98 |
| 圖 5.41 | t=600 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 99 |
| 圖 5.42 | t=720 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 99 |
| 圖 5.43 | t=120 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 99 |
| 圖 5.44 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 99 |
| 圖 5.45 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 100 |
| 圖 5.46 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 100 |
| 圖 5.47 | t=600 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 100 |
| 圖 5.48 | t=720 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一) | 100 |
| 圖 5.49 | t=120 秒 | 煙流分佈圖(情境一) | 101 |

| | | |
|--------|-------------------------------------|-----|
| 圖 5.50 | t=240 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 101 |
| 圖 5.51 | t=360 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 101 |
| 圖 5.52 | t=480 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 101 |
| 圖 5.53 | t=600 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 102 |
| 圖 5.54 | t=720 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 102 |
| 圖 5.55 | 熱輻射分佈圖(情境一)..... | 102 |
| 圖 5.56 | 月台層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境二)..... | 103 |
| 圖 5.57 | 月台層 1.8 米高度CO分佈圖(情境二)..... | 103 |
| 圖 5.58 | 月台層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境二)..... | 103 |
| 圖 5.59 | 穿堂層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境二)..... | 104 |
| 圖 5.60 | 穿堂層 1.8 米高度CO分佈圖(情境二)..... | 104 |
| 圖 5.61 | 穿堂層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境二)..... | 104 |
| 圖 5.62 | t=120 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 105 |
| 圖 5.63 | t=240 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 105 |
| 圖 5.64 | t=360 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 105 |
| 圖 5.65 | t=480 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 105 |
| 圖 5.66 | t=600 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 106 |
| 圖 5.67 | t=720 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 106 |
| 圖 5.68 | t=120 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)..... | 106 |

| | | | | |
|--------|---------|-------------------------|-------|-----|
| 圖 5.69 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二) | ..... | 106 |
| 圖 5.70 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二) | ..... | 107 |
| 圖 5.71 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二) | ..... | 107 |
| 圖 5.72 | t=600 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二) | ..... | 107 |
| 圖 5.73 | t=720 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二) | ..... | 107 |
| 圖 5.74 | t=120 秒 | 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 108 |
| 圖 5.75 | t=240 秒 | 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 108 |
| 圖 5.76 | t=360 秒 | 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 108 |
| 圖 5.77 | t=480 秒 | 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 108 |
| 圖 5.78 | t=600 秒 | 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 109 |
| 圖 5.79 | t=720 秒 | 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 109 |
| 圖 5.80 | t=120 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 109 |
| 圖 5.81 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 109 |
| 圖 5.82 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 110 |
| 圖 5.83 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 110 |
| 圖 5.84 | t=600 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 110 |
| 圖 5.85 | t=720 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境二) | ..... | 110 |
| 圖 5.86 | t=120 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 111 |
| 圖 5.87 | t=240 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 111 |

| | | | | |
|---------|---------|-------------------------|-------|-----|
| 圖 5.88 | t=360 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 111 |
| 圖 5.89 | t=480 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 111 |
| 圖 5.90 | t=600 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 112 |
| 圖 5.91 | t=720 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 112 |
| 圖 5.92 | t=120 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 112 |
| 圖 5.93 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 112 |
| 圖 5.94 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 113 |
| 圖 5.95 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 113 |
| 圖 5.96 | t=600 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 113 |
| 圖 5.97 | t=720 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二) | ..... | 113 |
| 圖 5.98 | t=120 秒 | 煙流分佈圖(情境二) | ..... | 114 |
| 圖 5.99 | t=240 秒 | 煙流分佈圖(情境二) | ..... | 114 |
| 圖 5.100 | t=360 秒 | 煙流分佈圖(情境二) | ..... | 114 |
| 圖 5.101 | t=480 秒 | 煙流分佈圖(情境二) | ..... | 114 |
| 圖 5.102 | t=600 秒 | 煙流分佈圖(情境二) | ..... | 115 |
| 圖 5.103 | t=720 秒 | 煙流分佈圖(情境二) | ..... | 115 |
| 圖 5.104 | | 熱輻射分佈圖(情境二) | ..... | 115 |
| 圖 5.105 | | 月台層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境三) | ..... | 116 |
| 圖 5.106 | | 月台層 1.8 米高度CO分佈圖(情境三) | ..... | 116 |

| | | |
|---------|--------------------------------------|-----|
| 圖 5.107 | 月台層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境三)..... | 116 |
| 圖 5.108 | 穿堂層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境三)..... | 117 |
| 圖 5.109 | 穿堂層 1.8 米高度CO分佈圖(情境三) | 117 |
| 圖 5.110 | 穿堂層 1.8 米高度能見度分佈(情境三)..... | 117 |
| 圖 5.111 | t=120 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 118 |
| 圖 5.112 | t=240 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 118 |
| 圖 5.113 | t=360 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 118 |
| 圖 5.114 | t=480 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 118 |
| 圖 5.115 | t=600 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 119 |
| 圖 5.116 | t=720 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 119 |
| 圖 5.117 | t=120 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 119 |
| 圖 5.118 | t=240 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 119 |
| 圖 5.119 | t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)..... | 120 |
| 圖 5.120 | t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三) | 120 |
| 圖 5.121 | t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三) | 120 |
| 圖 5.122 | t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三) | 120 |
| 圖 5.123 | t=120 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境三)..... | 121 |
| 圖 5.124 | t=240 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境三)..... | 121 |
| 圖 5.125 | t=360 秒 月台層距地面 1.8 米CO分佈圖(情境三)..... | 121 |

| | | | |
|---------|---------|-------------------------------|-----|
| 圖 5.126 | t=480 秒 | 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 121 |
| 圖 5.127 | t=600 秒 | 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 122 |
| 圖 5.128 | t=720 秒 | 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 122 |
| 圖 5.129 | t=120 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 122 |
| 圖 5.130 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 122 |
| 圖 5.131 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 123 |
| 圖 5.132 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 123 |
| 圖 5.133 | t=600 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 123 |
| 圖 5.134 | t=720 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)..... | 123 |
| 圖 5.135 | t=120 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 124 |
| 圖 5.136 | t=240 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 124 |
| 圖 5.137 | t=360 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 124 |
| 圖 5.138 | t=480 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 124 |
| 圖 5.139 | t=600 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 125 |
| 圖 5.140 | t=720 秒 | 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 125 |
| 圖 5.141 | t=120 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 125 |
| 圖 5.142 | t=240 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 125 |
| 圖 5.143 | t=360 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 126 |
| 圖 5.144 | t=480 秒 | 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 126 |

| | | |
|---------|-------------------------------------|-----|
| 圖 5.145 | t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 126 |
| 圖 5.146 | t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三) ... | 126 |
| 圖 5.147 | t=120 秒 煙流分佈圖(情境三)..... | 127 |
| 圖 5.148 | t=240 秒 煙流分佈圖(情境三)..... | 127 |
| 圖 5.149 | t=360 秒 煙流分佈圖(情境三)..... | 127 |
| 圖 5.150 | t=480 秒 煙流分佈圖(情境三)..... | 127 |
| 圖 5.151 | t=600 秒 煙流分佈圖(情境三)..... | 128 |
| 圖 5.152 | t=720 秒 煙流分佈圖(情境三)..... | 128 |
| 圖 5.153 | 熱輻射分佈圖(情境三)..... | 128 |
| 圖 5.154 | 月台層逃生出口與人員配置..... | 129 |
| 圖 5.155 | 穿堂層逃生出口與人員配置..... | 129 |
| 圖 5.156 | 出口封閉圖(情境二)..... | 129 |
| 圖 5.157 | 人員逃生分佈圖(情境三)..... | 129 |
| 圖 5.158 | 隧道模型..... | 130 |
| 圖 5.159 | 通風口位置..... | 130 |
| 圖 5.160 | 隧道量測點分佈圖..... | 130 |
| 圖 5.161 | t=60 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)..... | 131 |
| 圖 5.162 | t=120 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)..... | 131 |
| 圖 5.163 | t=240 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)..... | 132 |

| | | |
|---------|-----------------------------|-----|
| 圖 5.164 | t=360 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)..... | 132 |
| 圖 5.165 | t=480 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)..... | 133 |
| 圖 5.166 | t=600 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)..... | 133 |
| 圖 5.167 | t=60 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 134 |
| 圖 5.168 | t=120 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 134 |
| 圖 5.169 | t=240 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 135 |
| 圖 5.170 | t=360 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 135 |
| 圖 5.171 | t=480 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 136 |
| 圖 5.172 | t=600 秒 煙流分佈圖(情境一)..... | 136 |
| 圖 5.173 | t=60 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)..... | 137 |
| 圖 5.174 | t=120 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)..... | 137 |
| 圖 5.175 | t=240 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)..... | 138 |
| 圖 5.176 | t=360 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)..... | 138 |
| 圖 5.177 | t=480 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)..... | 139 |
| 圖 5.178 | t=600 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)..... | 139 |
| 圖 5.179 | t=60 秒 煙流分佈圖(情境二)..... | 140 |
| 圖 5.180 | t=120 秒 煙流分佈圖(情境二)..... | 140 |
| 圖 5.181 | t=240 秒 煙流分佈圖(情境二)..... | 141 |
| 圖 5.182 | t=360 秒 煙流分佈圖(情境二)..... | 141 |

圖 5.183 $t=480$ 秒 煙流分佈圖(情境二)..... 142

圖 5.184 $t=600$ 秒 煙流分佈圖(情境二)..... 142



符號表

| | |
|----------------|--|
| D | 擴散係數 (m^2/s) |
| f | 外力 (包含撒水頭之拖曳力) (N/m^3) |
| g | 重力加速度 (m/s^2) |
| H | 總壓力 |
| h | 焓 (kJ/kg) |
| h_ℓ | ℓ 物種之焓值 (kJ/kg) |
| k | 熱傳導係數 (kW/mk) |
| n | 1,2,3,4,..... |
| p | 壓力 (N/m^2) |
| P_o | 外界壓力 (N/m^2) |
| \tilde{P} | 擾動壓力 (N/m^2) |
| Q | 火源的熱釋放率 (kW) |
| q_r | 輻射熱通量 (kW/m^2) |
| T | 溫度 ($^\circ\text{C}$) |
| t | 時間 (s) |
| t_0 | 有效的著火時間 (s) |
| t_g | 有效的燃燒後的時間 (s) |
| u | 流體速度 (m/s) |
| \vec{u} | 速度向量 |
| \dot{W}_ℓ | ℓ 物種單位體積生成率 |
| Y_i | 第 i 種之質量分率 |

| | |
|---------------------|--|
| Y_ℓ | ℓ 物種之質量分率 |
| α | 火源的成長係數 (kW/s ²) |
| α | 衰減係數(attenuation coefficient) (m ⁻¹) |
| ρ | 密度 (kg/m ³) |
| τ | 黏滯剪應力張量 (N/m ²) |
| $\Delta T_{ref}(t)$ | 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) |
| $\rho_\infty gZ$ | 靜壓 (N/m ²) |
| Q_g | 控制體積的熱生成量(kW) |
| Q_t | 由周遭傳入控制體積之熱量(kW) |
| m | 質量流率(kg/s) |
| h_i | 進入控制體積之焓(kW/s) |
| h_e | 離開控制體積之焓(kW/s) |
| ΔKE | 動能變化量(kW /kg) |
| ΔPE | 位能變化量 (kW /kg) |
| w | 由周遭所作的功(kW) |
| ζ | 0.7 |
| C_1 | 0.071 |
| C_8 | 0.0081 |
| Z | 煙流高度(m) |
| T_p | 煙流在高度 Z 之平均溫度(°C) |

T_a 環境溫度(°C)
 C_p 煙流氣體之比熱(kJ/kg-°C)



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

軌道運輸系統為一個國家經濟發展之重要動脈，同時為旅客載運量最高之運輸工具。萬一發生災害，常釀成重大的人員死傷與財物損失，對社會造成極大的衝擊。而災害發生之各種因素有時會先後發生並互成因果或同時發生，使情況更加複雜。

隨著世界人口持續的成長，生活水準的提升，人類對於食物、物質、能源及生活空間之需求不斷增加。由於人口的增加造成耕地及生活空間的減少，在地上資源、空間不敷需求之情形下，人類開始往地下發展，諸如在臺灣，就開始進行鐵路地下化、大眾捷運系統地下化、隧道、地下街、地下停車場、地下建築物等，所以各式各樣的地下空間利用迅速成長，儼然形成地下城市，其中最具代表性為臺北車站，除三鐵共構外（隧道）亦包括有相連通的地下街及地下停車場，形成以地下軌道交通為中心向外延伸發展而成的地下城市。由於地下運輸系統其構造及使用特性較為特殊，加上地下隧道通風對煙流的影響，由過去重大災例之發生可知除了由火災所引起外，仍不外乎是濃煙毒氣遮蔽視線、避難逃生路徑遭阻斷、消防防災系統功能失效，滅火困難延誤搶救時效等因素。因此地下運輸系統在發生災害時，除了使消防、排煙設備維持正常運作外，有效的進行避難與疏散也是非常重要的。

根據過去相關資料統計，歷年來發生在世界各國地鐵及捷運系統中之重大火災事故（詳見表 1.1），就奪走超過 500 條人命，其中又以 2003 年發生於南韓大邱捷運系統之火災傷亡最為慘重。為了保障人民的生命安全，世界各國對於建築物的防火消防與逃生避難，均有其相關的法律要求，而目前台灣所制定的火災安全法規為內政部「各類場所消防安全設備設置標準」[1]與「建築技術規則」[2]作為一般建築物建造時之標準，此為傳統式的規格性規範（prescriptive-based codes）。建築設計者只要確實依照法規的範圍設置防火避難設備，理應有一定水準的消防安全，但是近年來拜經濟

成長所賜，國內陸續有著各種特殊的建築物出現在我們的四周，例如特別挑高的中庭（往往會有三、四層樓高甚或更高）的大樓、具有巨型內部空間的建築（如巨蛋球場）或者是大型的地下建築空間（如地下捷運站）等，對於這些特殊的建築物，都是無法依循傳統式的規格性建築法規來加以設計規範。例如「各類場所消防安全設備設置標準」中第 188 條，條文中規定於地下建築物中樓地板面積每 300m² 內應以防煙壁區劃與防煙壁下垂之深度為 80 公分、排煙量大小等設計，以及在「建築技術規則」第 202 條，地下建築物總樓地板面積在 1000 平方公尺以上者，應按每 1000 平方公尺，以具有一小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備以區劃分隔，對於地下車站來說，在建築及消防法規上的設計皆無法符合其規定設計。故為了給予建築型態與使用上更大的自由，並確保建築物之消防設備能於火災發生時能有效的保護人員的安全，利用性能式火災安全設計方法（performance-based fire safety design method）來評估建築物消防設備之有效性乃是有效解決前述問題的一種方法。另外，交通部於 97 年 7 月 29 日頒布「鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防安全設備設置規範」**錯誤! 找不到參照來源。**，作為鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防安全設備規劃設計時之參考依循，此外配合美國防火協會（Nation Fire Protection Association, NFPA）公佈有關固定式軌道運輸系統之設計標準，NFPA 130「Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems」[4][5]，係針對地上或地下車站本體結構、軌道、隧道、緊急通風系統、運輸列車、機廠及維修站、緊急應變程序、通信連絡等詳加規範，並具體提供消防排煙通風及避難時間計算方法以檢討避難安全性能。

因此本研究利用性能式火災安全設計方法來評估建築物消防設備能在火災發生時有效保護人員的安全，在經濟效應的因素以及能依照個別建築物給予精確的消防安全設計，此乃本文之動機所在。

表 1.1 世界各國捷運及地下鐵系統重大火災事故一覽表

| 日期 | 重大火災事故 | 死亡 人數 | 受傷 人數 | 備註 |
|------------|-------------------------------|----------|----------|-------------------------|
| 2005.7.7 | 英國倫敦地鐵 車站火災 | 56 | 700 | 連續 3 起人為恐怖攻擊 炸彈爆炸案件 |
| 2003.2.18 | 南韓 Daegu 捷 運系統火災 | 198 | 147 | 人為縱火 |
| 1995.10.28 | 亞塞拜然 Baku 地鐵火災 | 289 | 265 | 列車底盤電氣設備起火 引發之火災 |
| 1994.5.26 | 台灣台北車站 | 0 | 10 | 地下二層繼電器電線走 火 |
| 1987.11.18 | 英國 King's Cross 捷運車 站火災 | 31 | 27 | 香菸掉落造成木製電扶 梯失火引發之火災 |
| 1979.1.17 | 美國舊金山地 下捷運火災 | 1 | 58 | 列車底盤電氣設備起火 引發之火災 |
| 1972.11.6 | 日本國鐵 北陸隧道 | 714 | 30 | 運行中的餐車漏電起 火，在隧道內緊急停車 |
| 1968 | 日本東京日比 谷線神谷町電 車火災 | 0 | 11 | 剎車系統故障，一節車廂 失火全毀 |
| 1976 | 英國倫敦地鐵 火災 | 0 | 25 | 月台層配電室起火引發 火災 |

1.2 文獻回顧

NFPA 92B [6]提供了大空間建築物，為排除因火災造成煙流的相關方法論，包括煙控系統之設計、安裝、測試、操作、及維護之技術基礎。NFPA

130 規範涵蓋載客軌道，地下、平面、與高架固定軌道輸送系統，並包括車體、固定軌道運輸車站與車體維修及儲存區域之防火需求，以及固定軌道運輸車站、行車路線、車體、和戶外車體維修及儲存區域內之防火逃生措施。NFPA 130 的目的在於建立最低需求，以提供消防及其相關危害之合理的安全措施。在 2000 版 NFPA 130 附錄 B 修訂可維生之環境(Tenable Environments)標準，針對火場中維持一段時間內可維生環境之因素訂定標準，如溫度、氣流中的 CO 濃度、濃煙遮蔽度（能見度）、輻射熱通量等，在保障人身安全上更進一步。

Petterson [7]利用 McLeans Island 的房間進行火災實驗，實驗之火源大小分別為 55kW、110 kW，以及進行 Us Navy Hanger 的大型火災實驗，實驗之火源大小分別為 5580kW、6670kW，實驗並與 FDSv2.0 版所計算的模擬結果進行比較。結果顯示，在紊流強度較弱時（小空間之房間火災），格點加密的比較結果（100mm、150mm、300mm）下，FDS 在 100mm、150mm 的預測數值準確性較高；但在紊流強度較強之大空間，格點加密（300mm、600mm、1800mm、3600mm）的比較結果下，反而在 1800mm 較大格點的預測數值比較準確，在格點大小 300mm、600mm 所預測的溫度偏高。因此，格點的尺寸越小，模擬所的結果不一定會更準確，而應使用適當的格點大小，同時也可減少計算的時間。

蔡尤溪[8]利用 FDS 與 FLUENT 進行大空間煙流的模擬，由格點分析的結果，FDS 對於遠離火場溫度的預測值，有相當高的精確度，因此可利用非均勻分佈格點，火場附近處加密格點，遠離火場可上適當加大格點尺寸，以減少運算時間；而 FLUENT 由於使用許多簡化假設，因此所得結果與實驗和 FDS 相差較大。且在格點加密的部份，的測試，發現局部加密的結果以正方體格點（寬高比 aspect ratio 為 1：1）時，收斂的結果、反應的火載量與溫度的現象最平穩，而 aspect ratio 最好不要大於 1：4。

Simcox 等人[9]利用小尺寸實驗與電腦模擬 King's Cross 地下鐵火災，並將實驗與模擬結果相互比對。比對結果發現 King's Cross 地下鐵火災，因煙蒂掉落在電扶梯的齒輪，使火焰集中在電扶梯溝渠的一角落，加上冷空

氣注入角落而產生漩渦狀的 vortex，產生溝渠效應(trench effect)，使得火勢沿著電扶梯的側壁向上傳播，延燒至木製廣告看板及天花板，加上鋪板及廣告夾板上的塗料具有高度可燃性，因此更加速了火勢之延燒擴大。他們並發現影響火勢大小的主要原因為溝渠效應，而火車進站時所產生的活塞效應(piston effect)對於火勢影響則較小。

Oka 和 Atkinson [10]利用實驗的方式量測火災的大小、位置以及形式對臨界速度的影響。經由實驗得知火災的大小對於臨界速度的影響較小，但是如果火源大小佔據了一半以上的隧道寬度，臨界速度會相對地減小。於實驗中也可發現，如果可得知 Froude scaling，進而可藉由小尺寸隧道所量測出的臨界速度，計算得知大尺寸隧道的臨界速度。

張文嘉[11]利用CFX4 模擬軟體，討論列車進出站所形成之活塞效應(piston-effect)對月台層火災之影響，並且分析著火列車靠站以及站內軌道區火災之煙流。月台層火災因列車進出站產生活塞效應，帶入速度 3m/s 的風，建議採取的煙控模式為啟動TVF 和UPE，在啟動TVF 和UPE 的作用下，月台層與隧道間會形成較大的壓差將濃煙抽離。而著火列車靠站之案例，建議採取的煙控模式也為啟動TVF 和UPE，使著火列車產生的濃煙完全經由隧道段空間被抽離，沒有任何濃煙飄散至月台層和穿堂層。站內軌道區火災由於啟動TVF 和UPE，形成的強大吸力將濃煙從隧道段抽離，所以月台層之煙霧濃度與溫度甚低，並不影響能見度，因此對月台層人員沒有立即的危險。因此可得知當月台層以及軌道區發生火災時，TVF 和UPE 在煙控上扮演著相當重要的角色，不僅可減緩濃煙的蔓延，同時降低環境溫度和一氧化碳濃度，使乘客擁有足夠的時間安全地逃生。

陳榮進[12]利用 CFAST 與 FDS 火災模擬軟體做為輔助工具，預測火災之煙沈積速度，模擬捷運車站月台層發生火災時，捷運車站月台層之濃煙煙層高度沈降速率及煙層溫度分佈。並且針對捷運車站避難系統設計進行分析，利用 NFPA130 配合日本建築中心對捷運系統避難逃生時間進行討論與計算。並與動態避難模擬分析(SIMULEX)所模擬之避難時間相互比對，評估各避難路徑之安全性。最後，整合煙控與避難系統，完成最新型之捷

運地下車站之緊急運轉模式。

Chow 等人[13]針對隧道火災的各種不同的煙控方式，利用 CFD 軟體 (PHOENICS) 進行模擬比較。模擬結果可得知，增通風速度會導致火載量提高，並於火場附近 20 公尺處的煙流溫度可達到 700°C，對於隧道通風系統法規規定須達到 1 小時 250°C 之防火時效而言，通風系統的耐熱是不足的，此外，其他環境因素例如氣象條件、運載量，以及交通工具的種類都是需考慮至隧道火災安全的設計中。

Lin 和 Chuah[14]利用 FDSv3.1 模擬捷運車站火災，火源位置位於車站大廳與月台層，熱釋放率分別為 2.5 MW 和 1.0 MW。火災發生後，車站大廳之排煙系統提供 15m³/s；月台層之排煙系統提供 13m³/s。由模擬結果可得知，排煙系統與防煙垂壁能有效的控制並減緩煙層的擴散與沉降速度，且能見度為逃生環境安全設計最關鍵的指標。

柯建明[15]以 FDS (Fire Dynamics Simulator) 和 Star-CD 兩套軟體來模擬比較地下車站火災時狀況且預測火災之煙沈積高度，和高度沈降速率。模擬結果顯示 FDS 與 STAR-CD 兩套軟體模擬溫度分佈情況類似，但在煙沈積速度，由於 FDS 與 Star-CD 兩套軟體模擬理論並不相同，Star-CD 對火災模擬是利用熱輻射原理來模擬火災對四周環境溫度變化，因此溫度變化是漸進的增加，所以利用 N% 來判斷煙沈積曲線也是漸進的沈積至最低高度。而 FDS 則可直接輸入燃料種類，並藉由所設定之火災成長曲線進行燃燒模擬，以接近真實火災情況，不論是燃燒化學材質、傳導方式以及火災對四周環境的影響皆真實模擬，所以曲線在火災初期煙沈積高度就立即下降。但火災發展至穩態後，兩個程式之模擬結果皆呈現相同之煙層積高度，獲得一致之結果。

Chiam[16]利用 FDS 模擬列車火災，火源位置分別位於列車座位上 (縱火)、列車裡的某一角落 (縱火或電器設備故障) 以及列車底盤 (電器設備故障)。經由模擬結果可得知，當火災發生於角落的區域，強制通風(forced ventilation)的速度較小，促進火災成長；反之，當火災發生於列車底盤時，燃燒的面積大於火災發生於角落的區域，並且擁有較大的強制通風，但是

火源的大小決定於燃燒的時間長短。Chiam 並且發現當強制通風的速度過大時，容易發生閃燃(flashover)的現象，因此當火災發生時，必須關閉列車門，以防止火災發生後產生閃燃現象，造成火勢的蔓延。Chiam 並建議當火災發生於站內軌道區時，最大火載量為 5 MW，當火災發生於隧道中時，建議最大火載量為 10 MW。

陳昱勳[17]針對捷運列車於隧道中發生火災事件做分析與研究，以 FDS(Fire Dynamics Simulator)火災模擬軟體，模擬列車外底盤電阻格柵高溫起火引起底盤著火與列車車廂內蓄意縱火之兩種情境。由模擬結果可得知，如火災如為原兩倍設計火載量(24MW)相同臨界風速下亦可以阻止煙回流。且發現隧道風速未達臨界風速的狀況下，無法阻止煙霧蔓延，而且也觀察到因為隧道風速的不同之火災煙與熱的分佈差異，過大的隧道風速不但阻礙人員逃生速度且增加不必要的設備容量。

Van Maele 和 Merci[18]利用 FDS(Fire Dynamics Simulator)模擬隧道火災案例，分析三種不同長度的隧道其溫度的差異性以及隧道不同傾斜角對煙流的影響。模擬結果得知，在三種不同長度的隧道火災模擬中，在相同時間下，瞬間的溫度會有較大的差異；但在同一段時間下的平均溫度值是相近的，故可在隧道火災模擬中，縮短隧道長度作計算，以降低計算實際長隧道網格數多的時間。而在不同坡度隧道模擬結果顯示，有坡度的情況下會造成煙囪效應，煙只會往單一邊流動，考慮最嚴重的情況下，在模擬隧道火災中建議採用水平的隧道模擬。

1.3 研究內容

煙控設計及避難系統為建築物消防設計的重要考量，煙控系統最主要的目的是可適當延阻煙層的擴散或沉降時間，使建築物內部之人員不被火災產生的濃煙所傷害，而增加人員避難安全的逃生時間。因此，在性能式設計法中必須同時評估煙控以及避難系統上之配合，以發展出最適合之共生系統。

本研究的內容將以性能式設計法之驗證程序和步驟，並使用國內實際

之地下化車站及隧道，進行煙控系統設計分析，並利用數值模擬軟體分析煙控及避難設計是否達到安全標準。

本研究之模擬主要分為兩大部分，第一部份將以車站公共區、軌道區進行火災案例分析；第二部份則針對地下隧道火災進行模擬分析。首先探討各案例之初始條件，火源位置及熱釋放率，邊界條件，排煙系統設定，接著再以美國 NIST (National Institute of Standards and Technology) 所發展的火災模擬軟體 FDS [19] (Fire Dynamics Simulator)，對於火災發生時之流場、溫度場及煙層流向作三維模擬分析，分析模擬結果所得之流場、溫度場、一氧化碳濃度、能見度及熱輻射強度，驗證車站排煙系統之設計性能是否能符合人員安全逃生之環境要求，並在改變必要參數（如隧道通風系統），保持其它參數固定的情形下，做出煙控最佳化設計之建議。



第二章 地下場站空間型態之特性分析與避難

安全標準設定

2.1 地下場站空間之特性

地下場站等地下空間具有密閉化、地下化等特性，在地下這個封閉且黑暗的有限空間裡，災害事故發生時往往造成人員避難與災害搶救上的困難，因而加重災害的危害程度。在軌道運輸系統地下交通設施之火災意外，是被認為具有較高的公共危險性及社會成本嚴重損失的潛在危害，因此必須瞭解地下空間所存在於火災時之避難危險性，才能清楚的得知火災發生情況，甚至加以預測分析，以減少預防火災的發生，進而減少生命財產的損失。地下場站空間之火災危害特性如下：

一、地下空間型態之特徵：

1. 空間封閉，位置辨識困難，容易迷失方向感。
2. 到達地面仰賴樓梯設施，垂直距離長，向上步行容易疲累。
3. 步行距離明顯受通往地面之出入口數量、位置、大小之限制。
4. 自然光與外氣供應有限，換氣不良，易蓄積有害氣體。
5. 地面難以掌握地下空間之內部狀況；地下空間內部亦不易掌握地面外界之各種情況。

二、地下空間火災特性：

1. 外氣供應受限，火災時易因不完全燃燒或悶燒產生大量濃煙。
2. 開口有限，排煙困難，火災發生地點及火勢狀況難以辨識掌握。
3. 地下層結構複雜，用途分歧，火勢蔓延快速，火災現場瞬息萬變。
4. 空間密閉，散熱困難，易蓄積高溫，火場溫度上升快。
5. 大量高溫燃氣，一旦接收新鮮空氣進入，容易產生二次爆炸或回燃之風險。

三、避難逃生不易：

1. 火災之熱、煙、毒氣難以排出室外，而易蓄積並流入避難路徑。

2. 地下空間火災時，火煙擴散蔓延之流動路徑常與避難方向相同。
3. 採光或照明不足，因濃煙遮蔽，視線不良，影響逃生路徑判斷。
4. 群眾因急欲求生之本能，產生不安、恐慌之負面心理，而造成盲從、壓迫、擁擠之危險行為。
5. 排氣效果不佳，需仰賴大規模耐高溫之通風換氣及排煙設備。

四、消防搶救困難：

1. 消防進入搶救活動與避難路徑方向相反，容易延誤搶救時機。
2. 受地下空間地形、距離及設施之阻隔，內外通信連絡困難。
3. 受出入口及空間限制，同時間不易容納大量消防搶救人員及裝備進入內部救災。
4. 消防人員需仰賴空氣呼吸器具，容量有限，搶救活動範圍受限。
5. 因滅火大量用水，排放不易，造成嚴重水損。

2.2 火災燃燒過程

在設計火災模式時，需先由火災發展的過程探討，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.引燃 (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 2.1 所示。各階段所代表的特徵與意義如下：

(1) 引燃 (Ignition)

當環境中具備可燃物、氧氣、熱能三要素時便可能起火燃燒。並於燃燒放熱過程中，導致周圍環境溫度大幅升高，稱之為引燃 (Ignition)，引燃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，火災逐漸發展並傳播至鄰近可燃物，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，若空間內的溫度達到 600°C 時，或地板表面積之熱輻射約達 20 kW/m^2 ，即有很高的機會發生閃燃。在閃燃之後因火場的高溫、高濃度一氧化碳、濃煙及氧氣缺乏，幾乎無人可在火場中生還。

(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 (小空間) 或燃料控制 (大空間)。如在密閉之小空間中，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°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。一般以燃料消耗至 80% 的時間來定義。

2.3 火源設計

火源的設計對於煙控系統來說有決定性的影響，並且於設計時，需考慮隨時間變化的熱輸出值。在火災的初期階段，熱釋放率由燃燒體之性質、數量及大小來決定。如果火源持續擴大，導致閃燃的發生時，此刻的煙控系統就會失效。但是如果火源發生的區域在與大空間連接的小區域內，經由門或窗進入大空間的煙流仍可利用煙控系統加

以控制，以避免煙流的擴大。因此，火源的成長期為人員逃生避難的最佳時期，同時也是消防煙控設計的關鍵時期。

設定火源大小是火災危險評估（fire hazard assessment）中最重要的一部分，因為火災產生之濃煙的沈積與煙控系統（smoke management system）之設計均受設定的火源大小影響。一般火災強度的設定分為穩態火源（Steady fire）、非穩態火源（Unsteady fire）以及實驗量測火災成長曲線三種方法。

1. 穩態火源（Steady fire）

一般在自然狀態下火源是不穩定的，但為使火源較容易描述以及研究上的需要，因此將火源假設為穩態火源。穩態火源與非穩態火源的最大差異處為穩態火源之熱釋放率為定值，非穩態火源之熱釋放率則會隨時間以及可燃物的性質改變。在應用上，通常採用穩態火源做為設計。Klote（2002）[20]建議將商業、住宅區每單位樓層面積之熱釋放率可大約估計為 $500\text{kW}/\text{m}^2$ ，而辦公室建築每單位面積之熱釋放率則為 $225\text{kW}/\text{m}^2$ 。在特殊大空間建築中，依據可燃物之多寡，比照商業建築將每單位面積之熱釋放率可大約估計為 $500\text{kW}/\text{m}^2$ （ $44\text{Btu}/\text{s}\cdot\text{ft}^2$ ），對於存放少許可燃物之大空間，每單位面積之熱釋放率則可大約估計為 $225\text{kW}/\text{m}^2$ （ $20\text{Btu}/\text{s}\cdot\text{ft}^2$ ）。而特殊空間穩定火源設計的基準量，於大型空間中存放少許可燃物最小火源，火源大小設計的基準量為 2000kW ，而於大型空間中存放可燃物最小火源則為 5000kW ，此外一般大型火源則制定為 25000kW 。

軌道運輸系統目前多以耐燃材料作設計，因此火災發生之機會以人為縱火或機電設備故障引起之火災機率較大，可燃物來源除了電扶梯及列車車廂等設備外，主要包括旅客行李、車站內廣告招牌、垃圾桶等。就火災熱釋放率大小而言，由表 2.1 所列模擬案例可知，一般旅客行李火災火源熱釋放率之設計值約為 1MW ，至於非行李火災所採用之設計火源熱釋放率約介於 2MW 至 5MW 間。

表 2.1 火災案例

| 數據來源 | 位置 | 火場規模 |
|---|-------------|------|
| 「高雄捷運 R3 車站月台層公共區及軌道區火災煙控模擬」 [21] | 月台層 | 1MW |
| 新近英國倫敦地鐵 Jubilee Line 延伸線 [22] | 公共區行李火災 | 1MW |
| 「台北捷運新莊線 DK-193 標；蘆洲線 DL131、DL132/133 標細部設計」 [23][24][25] | 地下捷運車站公共區火災 | 2MW |
| 「高雄都會區捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動線分析之檢討」 [26] | 地下捷運車站公共區火災 | 2MW |
| 萬華地下車站測試月台區與隧道區排煙系統模擬分析 [27] | 月台區 | 5MW |
| 「高速鐵路左營站車站大廳煙控系統設計分析」 [28] | 車站大廳 | 5MW |

2. 非穩態火源 (Unsteady fire)

在 NPFA 92B 中，則是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 (Heskestad, 1984)，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，意即當火源成長至一臨界點後，其熱釋放率會與時間的平方成正比，如圖 2.2(a)、2.2(b) 所示。

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

Q : 火源的熱釋放率 (kW)

α : 火源的成長係數 (kW/s²)

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,.....

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

t_g : 有效的燃燒後的時間 (s)

此式稱為 "T-Squared Fires"，NFPA92B 使用成長時間的觀念，時間 t_g 定義為有效燃燒之成長至 1,055kW 以後之時間，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，各種型式的火源成長係數與成長時間如表 2.2 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止，而後其熱釋放率可視為常數，如圖 2.3 所示。各種火源成長型式及其各類替代物質如圖 2.4 所示。

表 2.2 火源成長模式係數

| 項目 | 成長係數 | | 成長時間 |
|------------------|------------------------|--------------------------------|-----------|
| | A (kW/s ²) | α (Btu/s ²) | t_g (s) |
| 緩慢 (Slow) | 0.002931 | 0.002778 | 600 |
| 普通 (Medium) | 0.01127 | 0.01111 | 300 |
| 快速 (Fast) | 0.04689 | 0.04444 | 150 |
| 極快速 (Ultra Fast) | 0.1878 | 0.1778 | 75 |

3. 實驗量測火災成長曲線

定義火源熱釋放率的方式為火災發生時啟動撒水系統裝置，並將火源熱釋放率控制使達到穩定狀態，抑制閃燃現象發生的狀況。

實驗量測火災成長曲線是指利用 Cone-Calorimetry、Bench-Scale Test 或 Full-Scale Test 等方法實際量測可燃燒物質之熱釋放率，進而得到實際發生火災的熱釋放率。圖 2.5 為美國國家標準與技術研究所（NIST, National Institute of Standards and Technology）與建築物火災研究實驗室（BFRL）進行全尺度燃燒測試實驗，量測販賣亭（kiosk）於燃燒時之火災的熱釋放率成長曲線。

2.4 煙層流動特性

煙從一空間流至另一空間，主要的驅使力（Driving Force）依其性質可分為兩大類：一為自然式（Passive），二為主動式（Active）。自然式驅使力包括：煙囪效應、浮力、熱膨脹、自然風。而強制式驅使力有空調系統與電梯活塞效應兩種。在自然式驅使力中，浮力與熱膨脹為煙的溫度所引起。煙囪效應及自然風則受當時氣象條件中的外氣溫度與風的大小、方向影響。而強制式驅使力中的空調系統和電梯活塞效應，則為建築物內的設施所致。上述六種驅使力會在隔離物、牆、樓地板之間產生壓力差，而影響煙的流動。

1. 煙囪效應（Stack Effect）

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。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。當外牆上有開口時，通過建築物上部的開口，室內空氣沿樓梯間、電梯井、管道井等豎井流動而流向室外；通過下部的開口，室外空氣進入豎井流動而流向室內，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) 如圖 2.6 所示；反之，若建築物外部溫度高於內部溫度時，所形成的壓力差將空氣從高處壓入，則建築物豎井空間則有向下的氣流產生，稱這現象為逆煙囪效應 (Reverse Stack Effect) 如圖 2.7。

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，使火災的蔓延更加迅速。一般煙火災煙氣在垂直方向的擴散流動速度較大，通常為 1~5m/s。在樓梯間或管道井中，由於煙囪效應產生的拉力，煙氣流動的速度可達 6~8m/s。

2. 浮力 (Buoyancy)

因火焰上方的高溫氣體與周圍冷空氣之間的密度不同，煙的密度較低，相對的產生煙的浮力。當煙從火場流出後，本身溫度會因熱增關係 (Heat Gain) 而降低，因此煙受浮力影響會因距離愈遠而愈小，也會隨火場的成長而有所改變。

3. 熱膨脹 (Expansion)

火場的高溫除了會產生浮力驅動煙外，能量的釋放也會有熱膨脹的現象，而使煙流動。根據氣體膨脹定律，可推算出著火期間著火區域內的氣體體積將擴大 3 倍，其中 2/3 氣體將轉移到建築物的其他部分。而且膨脹過程發生相當迅速，並造成相當大的壓力，這些壓力如果不採取措施減弱，就會迫使煙從著火層往上和往下向建築物其他部分流動。

4. 自然風效應 (Wind Effect)

外界的風對煙的流動有顯著的效應。建築物窗戶、門被打開時，風可以影響到建築物內煙的流動。室內風向、風力、風速對高層煙霧流動有顯著影響，且這種影響隨建築物的形狀與規模而變化。

氣密較好的建築物而言，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。若再加上前述的煙囪效應，則外界氣象條件，

即風與溫度，將會對建築物內部煙的流動造成顯著影響。

5. 空調系統 (HVAC System)

建築物內通風、空調系統對建築物內壓力的影響，取決於供風和排風的平衡狀況。如果建築物內各處的供風和排風是相同的，那麼空調系統對建築物內的壓力不會產生影響，在建築物某區火災中，該區空調系統的供氣超過排氣，該區便出現增壓現象，空氣就從該區流流向建築物內其他區域部分。反之，該區空調系統的排氣超過供氣，則出現相反的現象。

火災發展時，空調系統將大量的煙送至它所供給的區域。且空調系統還可能將大量新鮮空氣到火場，助長燃燒。故在警報器偵測到火或煙時，便把空調系統電源關掉，使得空調系統不繼續送風或換氣。但為避免空氣經由風管竄到空調系統所供給的區域。可在各送風管回風管的開口，裝上防煙/防火閘門 (Fire Smoke Damper)，則煙不致沿著空調系統，跑得整棟建築物。

建築物內通風、空調系統可依照某種預定而有益的方式設計，以控制建築物內的煙霧流動。如在發生火災時，空調系統亦可運用來做為強制排煙系統，使空調系統在平時或緊急狀態都能發揮效用。

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，因受擠壓而產生向豎井外的氣流。在電梯以上部分的空氣，會被吸入而產生向豎井內的氣流。換言之，電梯可視為一個活塞，壓出並吸入上下方的空氣，形成氣流，造成壓力差。

2.5 煙控之設計

現今在我國條例式的法規中，煙控系統部份於「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條上有相關規定，其規定防煙區劃大小、防煙垂壁下

降之深度、排煙量大小及排煙口之位置及大小等。但此法規並無充分考慮建築物特性，如地下車站、挑高中庭、體育館等。因此針對不同需求之建築物，發展各自適合的煙控系統，為性能式防火設計的重點之一。以下將詳細說明一些常用之煙控系統之性能式設計理念：

(1) 排煙系統設計

1. 自然排煙

自然排煙是指利用煙之浮力，經由開設於建築物之天花板或外部牆面之開口，直接將濃煙排向外部。自然排煙不僅要達到煙之排除，且希望能達到將煙稀釋效果。在典型挑高中庭設計中大多將自然排煙口設置於蓄煙區的頂部或側邊。當火災發生時，可先將煙蓄積在頂部蓄煙區，再經由自然排煙口將煙排出，達到所需煙控性能，如圖 2.8。

自然排煙口之設計大多分為三種，包括外推式、滑動式與破裂式。外推式常用於蓄煙區之側面，設計時需考量建築物外風向對排煙的影響。滑動式常用於蓄煙區之頂端，發生火災時利用電力或人力開啟。破裂式較類似滑動式，於發生火災時藉由人力或連動破壞，進行排煙。

2. 機械排煙

機械排煙是指將所產生之濃煙藉由排煙機排出至外部的方法。排煙機動作中，火災室的內壓變低，故不僅是煙的排除，同時能在開口處發揮遮煙效果，如圖 2.9。

(2) 補氣設計

利用蓄煙區或自然排煙作為煙控設計時，皆必須於建築物底部設置補氣設計，以造成推拉 (Push-Pull) 效應，才能有效達到之煙控設計。補氣量和補風位置及面積，為設計煙控系統時之重要考量。如補氣量不足，則煙將無法順利排出；反之，如補氣量太大，則火場會形成更大的紊流，加速煙的沈積速度。而補氣位置如果太高，將會使煙層成為紊流狀態，導致煙更難控制；如補氣於火災發生點，則會產生助燃的效果，使火勢更加難以

控制。因此補氣設計為煙控系統設計之重要一環。

(3) 探測器設計

火警探測器大多裝置於建築物的頂部，發生火災時，煙與火藉由熱浮力效應上升至建築物頂端，而做動火警探測器。但挑高中庭建築物頂端之蓄煙區，受到日照產生輻射熱，導致蓄煙區內的溫度可能達到 50°C 以上。熱空氣層形成後，沈積在蓄煙區裡。當火災發生時，煙的溫度因於上升的過程中受到周圍空氣的冷卻，使煙氣溫度比蓄煙區裡的熱空氣低，導致煙氣無法上升至挑高中庭頂部。因此若火警探測器裝置於建築物的頂部，將無法感測到火災發生，煙控系統也無法連動，增加人員逃生的危險性。

為避免上述情形發生，可採用較先進之火警探測器，例如光電式偵煙器 (Beam Smoke Detector)，裝置於挑高中庭兩側邊，以偵測煙層發展狀況，進而啟動煙控系統，配置情況如圖 2.10。

(4) 避免產生 Plugholing 現象和換氣率設計

1. 避免產生 Plugholing 現象

Plugholing 現象為當機械排煙風機運轉時，由於蓄煙區之煙量不足，使排煙風機不僅抽到煙氣，同時也抽到了大量空氣，導致排煙效率降低，煙氣在建築物內部蔓延擴散，影響逃生避難安全。因此必須制定正確之機械排煙運轉策略，使煙氣於蓄煙區沈積到某一厚度後，再啟動機械排煙，達到良好的煙控性能。

2. 換氣率設計

性能式設計中有關機械排煙量之設計依據為換氣率大小。換氣率的定義為某空間於某一段時間內，完全換氣次數。NFPA101—人命安全法規 (Life Safety Code) 內有相關規定，若設置機械排煙設備，排煙量不得小於其體積的 6 次/小時換氣量。

2.6 避難安全界定標準

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。在防火安全工程的 SFPE Handbook[29] 中有詳細的規定，而紐西蘭設計指針[30]的危險指標即是參考 SFPE Handbook 制定，其規定如表 2.3 所示。

表 2.3 人體承受危害程度指標值分析表(SFPE 及紐西蘭設計)

| 危害類型 | 承受極限 |
|------|---|
| 熱對流 | 氣流層溫度 $\leq 65^{\circ}\text{C}$ (不能超過 30 分鐘以上的暴露時間) |
| 煙吸光率 | 在煙層下能見度不能低於 2 公尺 |
| 毒性 | $\text{CO} \leq 1500\text{ppm}$ $\text{CO}_2 \leq 5\%$ $\text{HCN} \leq 80\text{ppm}$ $\text{O}_2 \geq 12\%$ (以上氣體濃度範圍一般僅能承受 30 分鐘以下) |
| 熱輻射 | 上層的輻射流 $\leq 2.5\text{KW}/\text{m}^2$ (承受時間 20 秒以下) |

其中毒性危害中以 CO 對人體危害性最高，因 CO 會阻礙血液吸收 O₂，造成死亡比例較高，而除了有毒氣體外，火場所產生高溫也會經由對流效應對人體產生危害，濃煙也會使逃生路線遭受阻礙。另外在 NFPA130 分別對 CO 濃度、溫度以及能見度建議值如下：

火場內 CO 含量，數秒內最大濃度 2000ppm，現場最初 6 分鐘平均濃度低於 1500ppm 以及 15 分鐘內平均濃度低於 800ppm，之後平均暴露濃度低於 50ppm。在濃煙狀況下 CO 之產生，應在 30 分鐘內平均濃度不超過 800ppm，之後應隨時間遞減。

火場內維生之環境其溫度限制如下：最高 140°F (60°C) 數秒，現場最

初 6 分鐘允許暴露平均 120°F (49°C)，之後可維生環境之溫度限制得隨時間遞減。

火場內能見度避難人員須有 10 米的可視距離才能安全離開煙區。

依據以上 SFPE Handbook 及 NFPA 130 中所建議，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 2.4 所示。

表 2.4 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 | 輻射熱 < 2.5 kW/m ² |
| 5 | 煙層高度 > 1.8m |



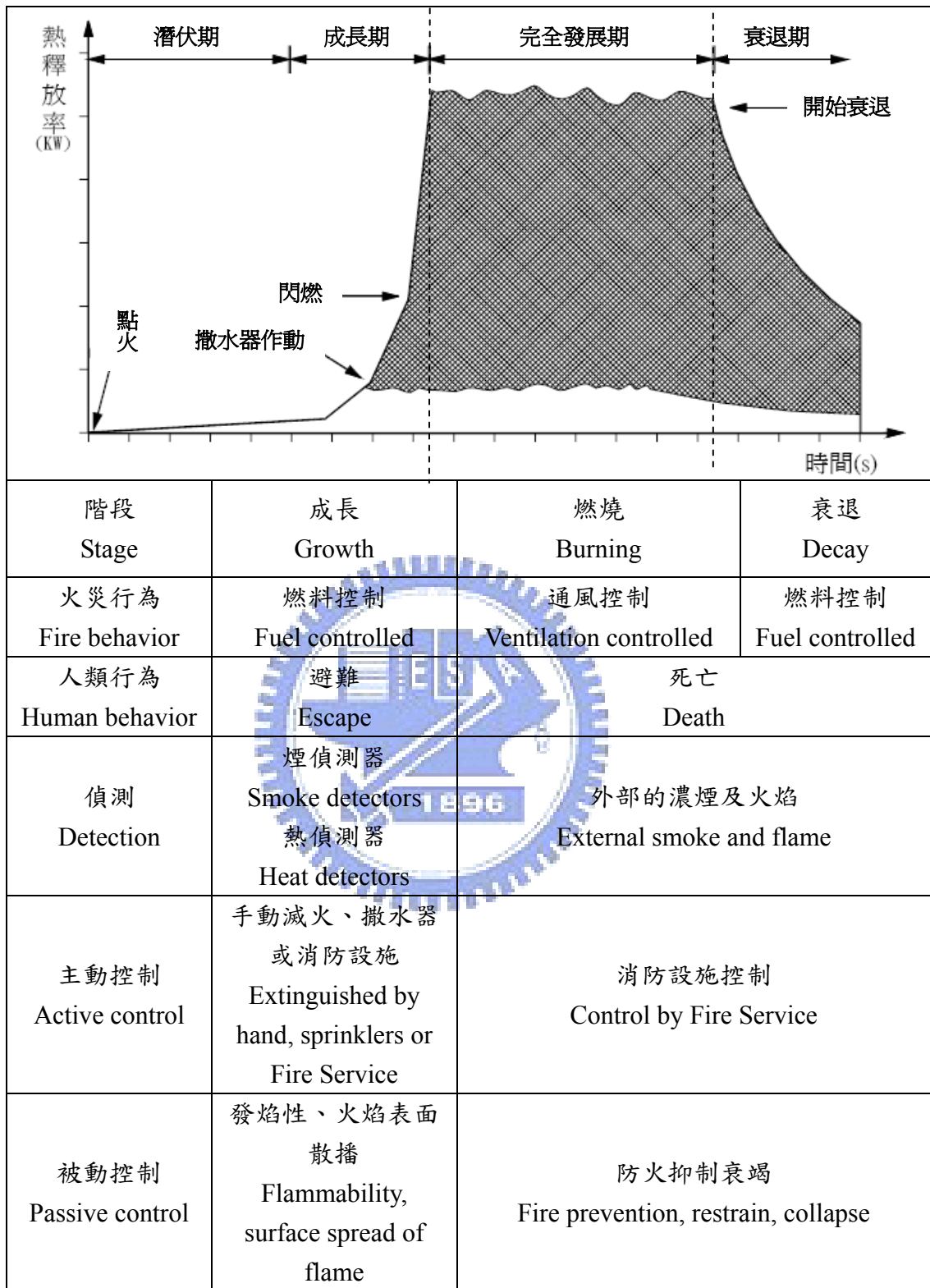
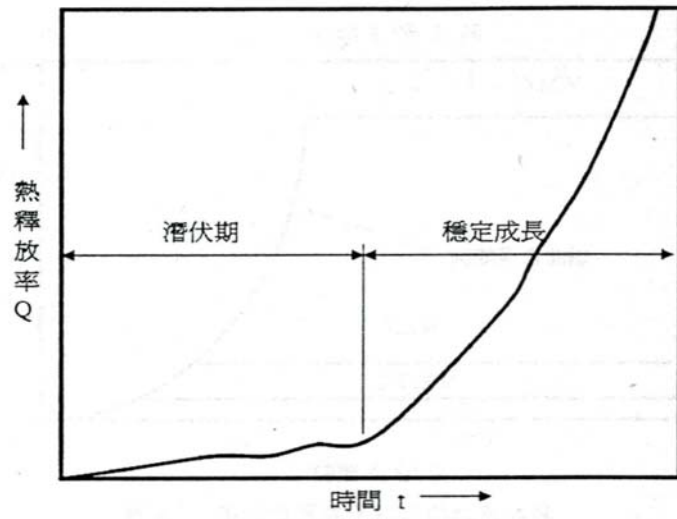
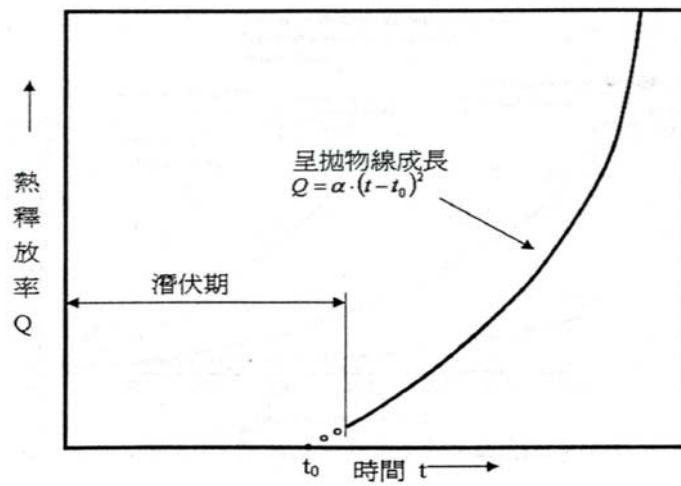


圖 2.1 火災發展過程圖



(a) 典型火源成長曲線



(b) 理想二次火源成長曲線

圖 2.2 火災成長曲線圖

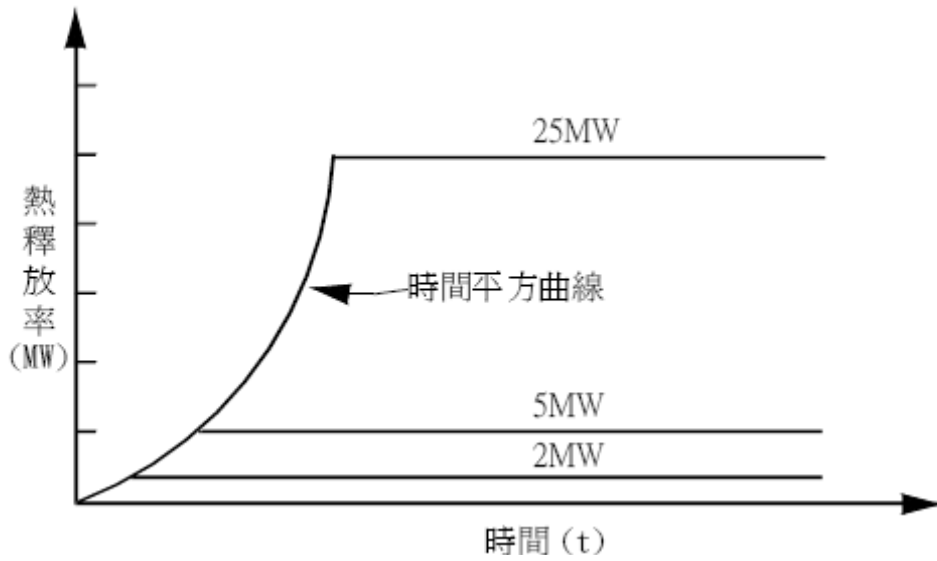


圖 2.3 不同熱釋放率之火災成長曲線圖

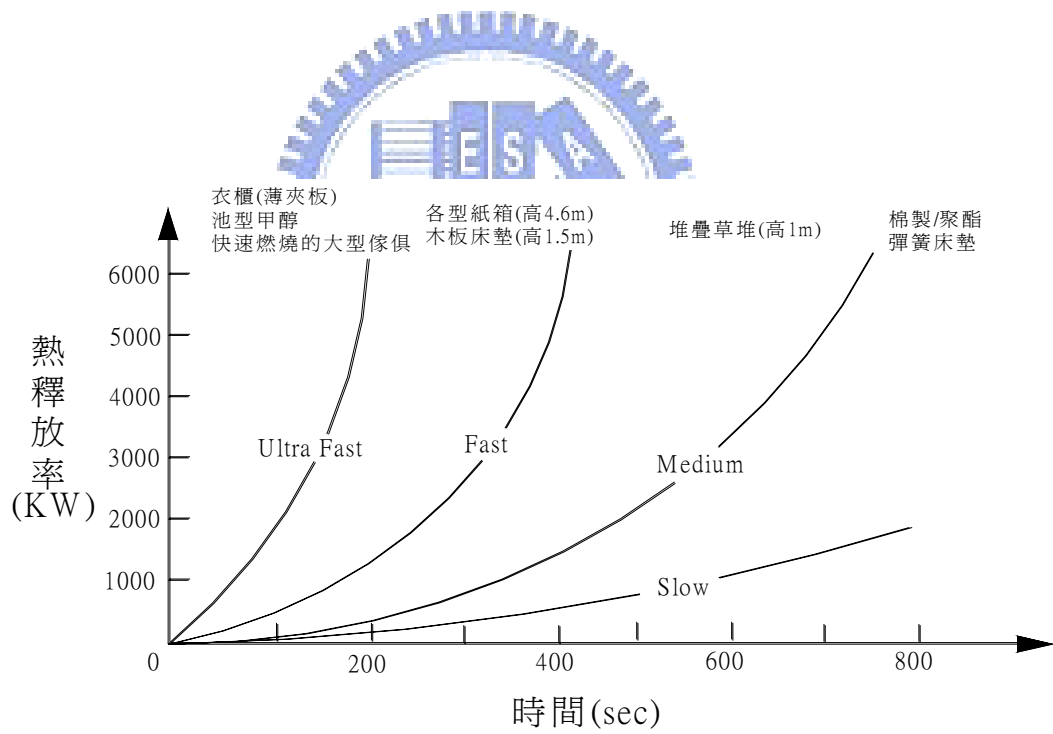


圖 2.4 T-Square 火災成長曲線圖

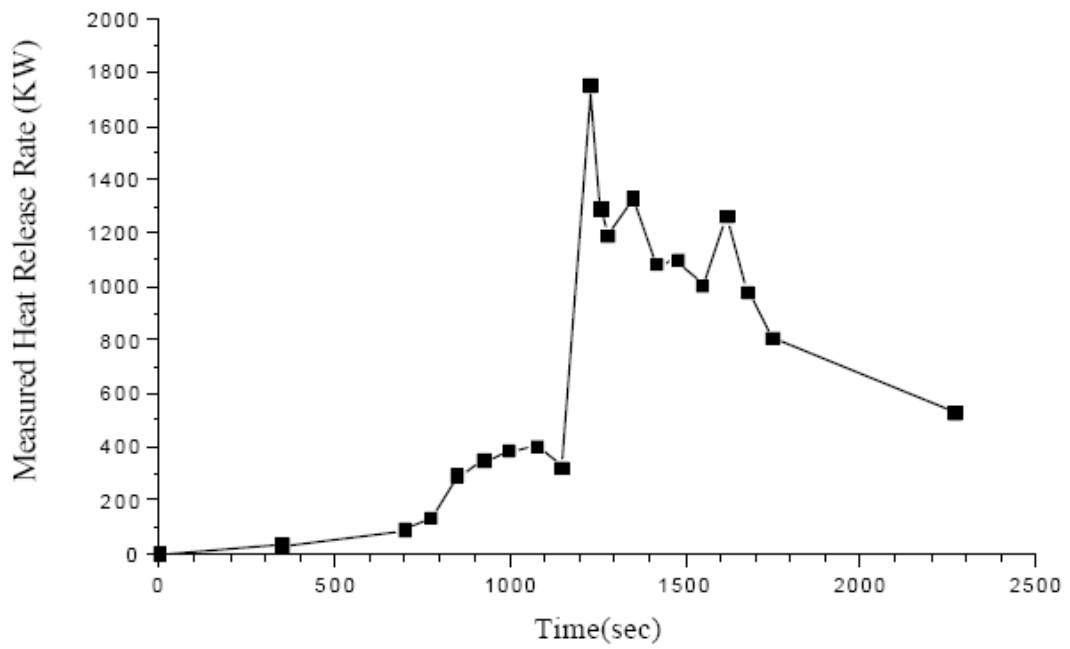


圖 2.5 Kisok 實際量測之火災成長曲線圖 (NIST,1995)

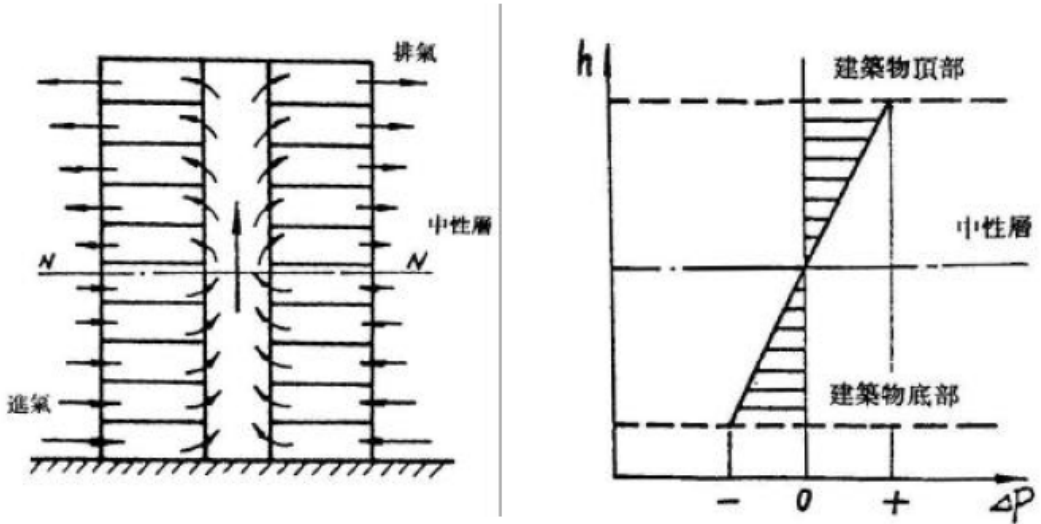


圖 2.6 正煙囪效應 (Normal Stack Effect)

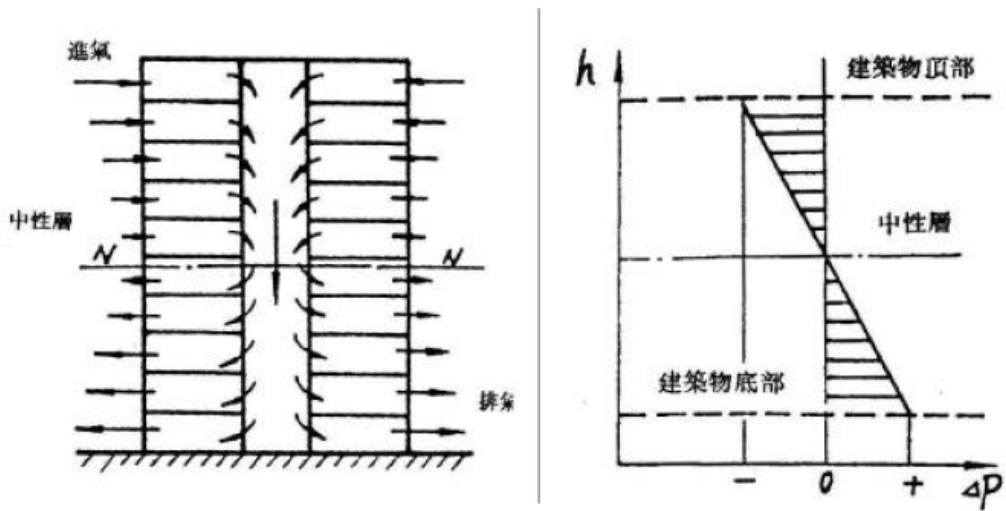


圖 2.7 逆煙囪效應 (Reverse Stack Effect)

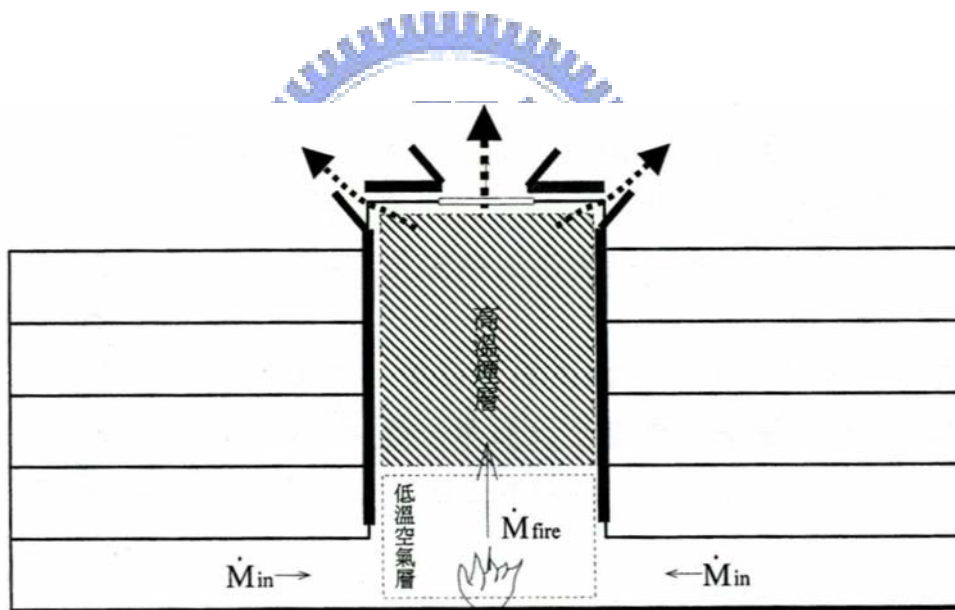


圖 2.8 自然排煙口設計

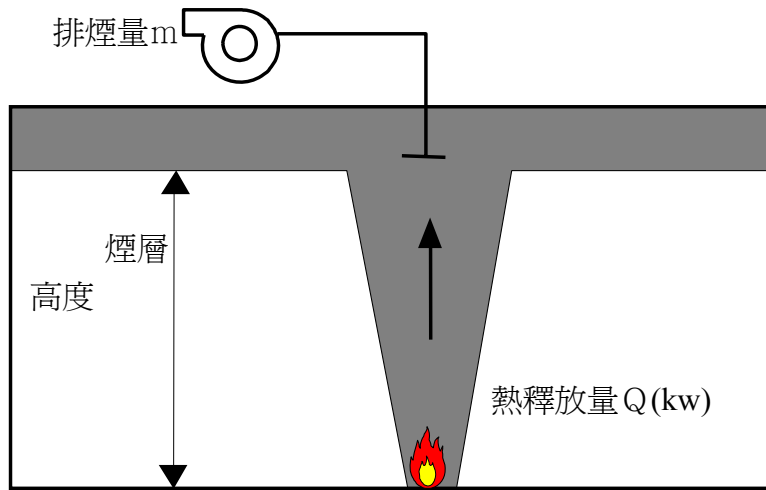
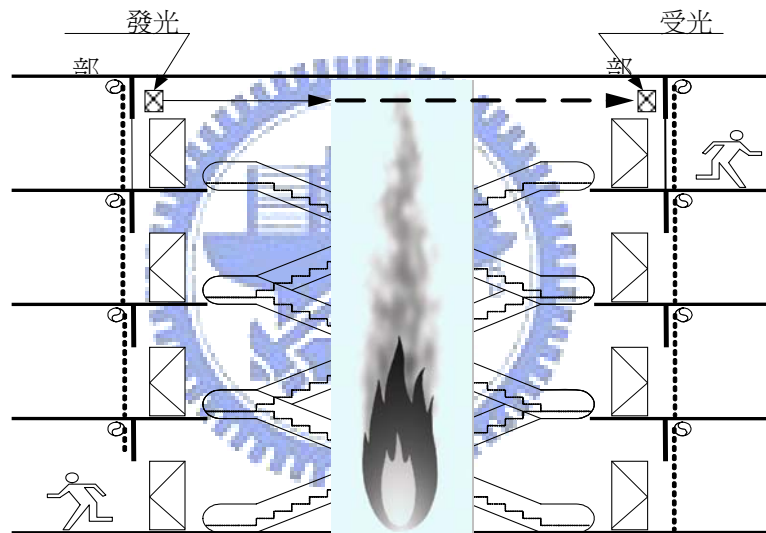


圖 2.9 機械排煙設計



因光線被遮蔽而偵測到煙

圖 2.10 光電分離式探測器

第三章 性能式防火設計方法

因應社會之發展與進步，國內許多建築物因用途、構造特殊或其他特別需求，於建構時未能、也未必需要完全符合建築法規之要求，依建築法第 98 條之規定：「特種建築物得經行政院之許可，不適用本法全部或一部之規定」，所謂「特種建築物」乃應運而生。因此對於建築物防火安全的規範，已逐漸從規格式法規（Prescriptive-Based Codes）轉換至性能式法規（Performance-Based Codes）。主要的原因是希望對於不斷創新新式建築和防火材料，能以科學方式來驗證其於規格式法規無詳盡規範的部分之防火安全性能，使建築物能達到防火安全性能的同時，也讓設計者的創意能自由發揮。我國近年來性能式設計之案例已有不少。例如：台灣高鐵、台北地下捷運車站及機場航廈等。以台灣高鐵為例，台灣高鐵車站龐大，需廣大的空間因應大量人潮，以及車站因講究設計與美感，採用挑高設計、屋頂形狀不規則等，因此難以符合建築技術規則設計施工篇第 79 條和第 101 條，有關防火區劃規定和排煙設備之構造規定，因此必須採用性能式規定設計。由上述可知，性能式設計法已為現今設計之趨勢，以下將針對性能式設計法做詳細介紹。

3.1 性能設計法之目的

傳統式法規根據不同建築物用途而制定之基本要求，規定往往過於嚴苛，也限制了新建材和新建築技術的使用。而性能式法規為具體描述出目標需求的法規，通常是為了達到某種需求，除了考慮現行法規外，所提供之另一種解決方式，同時也符合經濟效應，降低建造成本。有關於性能法規之目的如下列幾點[31][32]：

(1) 技術要求的理由及目的合理化：

明確規定建築計畫中技術要求的理由及目的，讓缺乏建築專門技術者也能清楚地了解法規規定的目的。

(2) 增大設計自由度：

對於建築物所需具備的性能需求加以明確的敘述，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性。

(3) 促進技術革新：

建築技術規則制定時並未對材料或技術的演進做一應變措施，因此許多建築技術被法規所限制。例如大規模的中庭天井、地下建築物、發泡性耐火塗料等等，都是在規格式法規制定時所無法預期的。因此以規格式法規達到審查認定的階段需要較長的時間，若以「性能」來對工學之材料、施工法加以評估，將能促進各種新技術的開發。

(4) 法規的合理修正：

建築技術規則雖已修正多次，但仍會因時間的關係而不合時宜。若加強建築物對時效性上有問題之設計加以嚴格要求，或者為達到相同之目的而可以採取不同設計，以及為達不同目的之設計而產生矛盾的狀況，都可加以改善。

3.2 性能式設計法規介紹

性能法規詳列防火和消防安全之各項目標 (Goal)、各種手段之目的 (Objectives) 以及各種機能需求 (Functional Requirements)，同時列出各種可符合法規要求的設計方法 (Alternative Design Method)。

近年來，世界各先進國家：例如英、紐、澳、加、美等國所推行之性能法規共通特色可歸納如下：

1. 以達到特定安全水準之設計目標為依歸
2. 以成熟工程技術設計所需目標
3. 以定量方法評估各種不同設計，使性能設計目標達到最低損失
4. 允許各種代替設計方法

由各國性能式法規訂定的架構來看，多以階層式架構，分別描述不同層次的目標需求，可分為以下五層架構，如圖 3.1。第一層是以與基本社會

事務目標為主，而這些目標則界定法規的範圍。第二層是針對其目標強調所應具備的機能性需求。第三層是對性能要件所需性能要求定量化、定性化。第四層為具體的建築設計方法。以下將對各層級加以詳述說明[33]：

1. 社會目標 (Social Goal)

社會目標大多站在法規主管事項的立場，對一建築物所需之安全及舒適水準予以規範。這些規定一般而言極為定性化，但在法規中針對設計者之設計是否符合法令規定，有關人員可採用經認可的方法或定量模式予以評估。

2. 機能需求 (Functional Requirements)

機能需求敘述內容大多是指一棟建築物或其中各項設施系統功能如何符合建築物之社會目標。

3. 性能需求 (Performance Requirements)

性能需求為性能法規中規定最詳盡之層級。敘述內容是指建築物內之建築材料、系統、元件和構造方法等需達到法規中對此建築物之社會目標和機能需求。

4. 設計方法和基準

設計方法為連接性能需求和可接受之解決方案，此連接關係將成為性能設計和設立量化判斷標準的接受基準。

5. 計算方法或評估方法

達到性能需求的特定方法，使設計達到法規的要求。設計者可使用性能式設計方法，例如：工程計算數據、測試和實驗等方法，評估是否達到要求。性能法規設計中雖無明確的指出何種設計方法較好，但近幾年來，最常被使用來驗證其性能的方法為工程計算方式 (Engineering Calculation Method)。

3.3 建築技術規則性能式設計規定

建築技術規則裡面，對人員避難安全設施的要求，主要是訂定在建築設計施工編第四章「防火避難設施及消防設備」中。內容包含對開口大小、材質，對走廊高度、寬度與內裝的規定，安全梯的構造與設置，排煙設備的構造及設置，緊急照明設備等。總括而言，建築技術規則第四章的內容主要分為兩個部分，一為對避難設施的規定，二為消防救助設備的規範。

根據建築技術規則[2]總則篇第三條規定，建築物之避難安全有三種驗證的模式，1.途徑 A—內部裝修或避難設施符合法規認定的要求（如耐燃材認證）等。2.途徑 B—一般的（政府、法規給予的）檢證方法來做建築物安全確認。3.途徑 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。在此將此三種方法其整理如圖 3.2，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途徑 A。但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。

途徑 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」作為避難安全設計。若建築物為百貨公司、市場、量販店、餐廳、住宅與事務所時（如表 3.1），若這一類的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，待審查通過後，地方政府即可發出建築執照。而「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」可有效替代之法規則整理如表 3.2 所示。

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特殊構造之場所，因此對上述建築物範圍而言，其性能式設計只能採取路徑 C 的方式。而路徑 C 的送審方式，目前還尚未完全制訂完成，但原則上也是利用先利用 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、人員可視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，此外亦需確保火場溫度、CO 濃度等模擬結果是符合生命安全基準。



表 3.1 適用建築物防火避難安全性能驗證技術手冊之建築物

| 類別 | | 類別定義 | 空間名稱 |
|-----|--------|-------------------------------|---|
| A 類 | 公共集會類 | 供集會、觀賞、社交、等候運輸工具，且無法防火區劃之場所。 | 戲(劇)院、電影院、演藝廳、車站、航空站、候船室等空間。 |
| B 類 | 商業類 | 供商業交易、陳列展售、娛樂、餐飲、消費之場所。 | 夜總會、酒家、美容院、KTV、MTV、公共浴室、百貨公司、商場、市場、量販店、餐廳、旅館、觀光飯店等空間。 |
| D 類 | 休閒、文教類 | 供運動、休閒、參觀、閱覽、教學之場所 | 保齡球、溜冰場、會議廳、展示廳、博物館、美術館、圖書館、各級學校教室等空間。 |
| E 類 | 宗教、殯葬類 | 供宗教信徒聚會殯葬之場所 | 寺、廟、教堂、宗祠等空間。 |
| G 類 | 辦公、服務類 | 供商談、接洽、處理一般事務或一般門診、零售、日常服務之場所 | 金融機構、證券交易所、政府機關、一般辦公室、事務所、一般診所、衛生所、店舖等空間。 |
| H 類 | 住宿類 | 供特定人住宿之場所 | 寄宿舍、招待所、住宅、集合住宅等空間。 |

表 3.2 建築物防火避難安全性能驗證技術手冊可替代之法規

| 法源依據 | | 規定內容概要 | |
|---------------|-------------|----------|--------------|
| 建築技術規則（設計施工篇） | 建築物之防火 | 第 70 條 | 建築物主結構之防火時效 |
| | | 第 79 條 | 防火構造建築物之防火區劃 |
| | | 第 79-2 條 | 防火構造建築物之垂直區劃 |
| | | 第 83 條 | 11 樓以上的防火區劃 |
| | | 第 88 條 | 建築物之內部裝修材料 |
| | 防火避難設施及消防設備 | 第 90 條 | 直通樓梯開向屋外出入口 |
| | | 第 90-1 條 | 避難層開向屋外出入口寬度 |
| | | 第 91 條 | 避難層以外樓層出入口寬度 |
| | | 第 92 條 | 走廊寬度 |
| | | 第 93 條 | 到達直通樓梯之步行距離 |
| | | 第 94 條 | 避難層步行距離 |
| | | 第 98 條 | 直通樓梯總寬度 |
| | | 第 100 條 | 排煙設備之設置 |
| | | 第 101 條 | 排煙設備之構造 |

3.4 性能式防火安全設計程序

本節採用美國 SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design 所定義之性能式設計程序[34][35]作基本架構的介紹。性能式設計程序[36][37]可分為八個步驟，如圖 3.3，由圖中可得知在前半段的程序中包含了性能法規類似的架構（目標、機能目的、性能要求），後半段則是加上試驗設計的性能評估以及性能設計報告等，經由性能式設計程序，可完成所需的特殊需求。性能式設計程序詳細介紹如下：

1. 定義計畫範圍（Define Project Scope）

在進行性能式設計時，應同時對建築物進行性能式防火設計的原則，此原則必須建立在實質的需要而不是假設，所以原則的敘述應以可量化來描述。計畫開始之初應著重於建立與建築物相關之場址或計畫所需之資料，大致可分為下列 10 項：(可以視計畫本身需要增減)

- (1) 使用者特性（Occupant characteristics）
- (2) 建築物特性（Building characteristics）
- (3) 所有物的位置（Location of property）
- (4) 消防單位特性（Fire service characteristics）
- (5) 公共設施（Utilities）
- (6) 環保考量（Environmental considerations）
- (7) 歷史（古蹟）的維護（Historical preservation）
- (8) 建築物的管理及保全（Building management and security）
- (9) 建築物的經濟以及社會價值（Economic and social value of the building）
- (10) 可採行的法規（Applicable regulations）

同時應確認計畫中之全部業主，例如：建築物擁有者、建築物管理

者、設計團隊、建築團隊、主管機關等，因為計畫目標之決定將完全取決於業主要求，因此在計畫開始之初便必須確認所有參與計畫之業主。

2. 確立目標 (Identify Goals)

此步驟需透過制定確認所需火災安全防護的目標，達成訂定的防火安全原則，並決定出這些目標之間的輕重緩急次序。一般的火災安全防護目標具有下列 4 種：

- (1) 確保建築物內部群眾、員工以及消防人員的生命安全，使得火災造成的人員傷亡數目降至最低。
- (2) 保護財產安全，將火災造成的財物損失降至最低。
- (3) 提供建築物持續的運作。
- (4) 將火災以及防火設施對環境所造成的衝擊限制在某一範圍之內。

在決定優先順序之後，即可幫助設計者去決定可使用的防火手段，並且幫助設計者確立最重要之火災防護分析和設計觀點，避免產生火災安全設計重點與業主要求不符合之情形發生。

3. 定義目標 (Define Objectives)

定義目標主要是為了進行細部的工程分析和設計，必須將前一步驟中所決定的業主目標轉換成可以使用火災防護用語來量化的項目，這些項目就是用來制定性能規範的設計目標。而量化的過程可以是決定性 (deterministic) 或是機率性 (probabilistic)。

4. 發展性能要求 (Develop Performance Criteria)

火災安全防護的性能要求可以是一個確切的數值，或是一個數值的範圍，其必須相當精確的量化出防火目標的內容，其包含的項目有：

a. 生命安全要求

- (1) 熱效應：包含溫度的極限值以及暴露在高溫的時間。
- (2) 氣體毒性：由於起火建築物內部的溫度上升，造成人員呼吸速度加快，同時也加速吸入了各種火災產生的毒性氣體，主要是 CO、HCl、HCN。
- (3) 能見度：此項會嚴重影響人員是否能夠安全的經由逃生通道逃出火場，而影響能見度的因素就是在視線方向上的粒子數量，以及眼睛本身的生理因素。

b. 非生命安全要求

- (1) 物體的引燃：引燃所需要考慮的條件包括引燃源、引燃源和目標物之間的距離、引燃源以及目標物的外型、目標物的材料性質、目標物的表面積-重量比等。
- (2) 火焰延燒：影響因素包括燃燒表面的形狀、方向、燃料的表面積-重量比，通風條件以及氣流流向都會影響火焰延燒的方向以及速度。
- (3) 煙氣損害：損害程度將取決於目標物對於煙氣的敏感程度。
- (4) 防火區劃損害以及結構完整度：此項目之主要功能為保持人員逃生避難以及消防人員進入救災這段時間內的建築物結構完整性，保護人員的生命安全。
- (5) 物品暴露在火災中造成的損害：損害的機制可以分為熱或是煙所造成的損害。

5. 發展火災情境及設計火災 (Develop Fire Scenarios & Design Fires)

確認火災情境並將之發展成為設計火災的過程包含以下三步驟：

- (1) 利用工程方法找出可能發生的火災情境：使用失效模式與效應分析 (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)、失效分析 (Failure Analysis)、歷史資料、手冊、查核表、相關的統計資料等方法建立火災情境。同時火災情境中應該包含三種內容：建築物特性、人員特性以及火災特性。
- (2) 在可能的火災情境中定義出設計的火災情境：利用機率的方式，如火災頻率、事件發生的機率、火災防護系統的可用度 (Availability)、火災防護系統的可靠度 (Reliability) 以及風險評估等方法；或者可以採用決定性的方式，此種方式是依照物理或化學性質的分析及評估，或採用實驗數據的相關經驗公式來預測火災的情形並決定設計的火災情境。
- (3) 量化設計的火災情境：分別依照火災情境中的建築物、人員、火災三種特性進行量化的過程，此過程通常合併了危害分析 (Hazard Analysis) 以及風險分析 (Risk Analysis) 兩種方法。危害分析用以找出可能潛在的引燃源、燃料以及火災發展情形；風險分析則是研究危害發生的可能性以及可能造成的結果。建築物特性方面包括有：各房間的面積及形狀、天花板高度、裝修材料的性質、建築結構所使用的材料性質、所有的開口尺寸及位置、樓層數目等。火災特性主要為定義火災成長曲線的各階段，從引燃開始，歷經成長階段、閃燃階段、

完全發展階段、到最後衰退以至於熄滅。人員特性方面則包含行為模式、反應時間、反應特質（敏感度、反應性、行動能力）、人員的避難行動時間等等。

6. 發展試驗設計 (Develop Trial Designs)

試驗設計是由數個相互關聯的子系統 (Sub System, SS) 所組成，共計有六種，代稱分別為 SS1~SS6。

- (1) SS1 為火災的發生與成長 (Fire Initiation and Development)，其目標為減少引燃發生的機率以及降低火災成長（包含火災產生的煙氣及熱量）的速率。而可提供防護的概念有管制火源及可燃物質、良好的火災安全管理措施、物品的堆放情形、房間的尺寸等。
- (2) SS2 為煙層的擴散及控制 (Spread, Control, and Management of Smoke)，其目標為經由限制煙氣的產生量、控制煙氣的流動情形來降低因為煙氣所造成的危害。可藉由建築物內外所用材料的管制、蓄煙設備或結構、排煙設備以及加壓控制，達到煙層的擴散及控制，並確保人員逃生以及救災時的安全。
- (3) SS3 為火災偵測 (Fire Detection)，其中又可以分為兩部分，一為火災探測，目的在及早發現火災的發生，可以有充足的時間通知建築物內部人員並且可與排煙、自動滅火設備動，達到早期發現並抑制的功能；另一部分為火災警報，目的在於警告建築物內部人員進行逃生避難的動作，同時通知鄰近的消防單位火災發生的位置，以利消防人員進行搶救的

工作。

(4) SS4 為火災抑制 (Fire Suppression)，目的在於及早進行控制或抑制火災的成長，降低火災所造成的損失。SS4 與 SS3 的相互關聯性很高，由自動偵測器或人為發現火災的發生後，利用自動或手動的消防設備進行初期的滅火。然而時間上的延遲 (Delay) 是無法避免的，經由偵測系統的作動、訊號的傳遞到自動消防設備的啟動，其中延滯的時間都有可能造成火災的迅速擴大，更遑論等鄰近的消防單位來進行滅火工作所需要的時間了。

(5) SS5 為人員行為及逃生避難 (Occupant Behavior and Egress)，目的在於使建築物內部人員在發生火災時能夠平安的逃生至安全的地方。相關的議題如：不論火災發生於建築物內部何處，人員都必須能夠經由出口逃生、逃生通道應該經由防護的手段保持在人員可以安全使用的狀態等，都是必須考慮的要點。

(6) SS6 為被動式火災防護 (Passive Fire Protection)，目的在於利用被動式防火結構來限制火災延燒的範圍，並需防止建築物結構因火災損害而過早崩塌，危及人員生命安全。可使用的防護方法包括防火區劃、防煙垂壁、管道中的防火擋板、窗戶開口防護措施、建築結構本體的耐火性能等。

由前述的介紹可以發現各個子系統之間是互相關聯的，雖然不同的子系統所要達到的目的都不同，但是仔細觀察其所使用的方法，不難發現各

子系統之間很多相似之處，因此在發展試驗設計的時候這六個子系統必須同時一起考慮進去。

7. 此步驟中又可以細分為四個不同的子步驟：

- (a) 評估試驗設計 (Evaluate Trial Designs)
- (b) 選擇符合性能要求的設計 (Selected Design Meets Performance Criteria)
- (c) 修改設計或目標 (Modify Design or Objectives)
- (d) 選擇最終設計 (Select Final Design)

其相互之間的程序關係可以由圖 3.4 表示。這四個子步驟屬於性能設計中的重點項目，藉由不同的評估方式來決定所發展的試驗設計是否能夠符合先前所訂定的性能要求。設計者必須提出數個不同的試驗設計，當某個試驗設計評估的結果為可以通過性能要求時，接著逐一進行其餘不同試驗設計的評估；若是不能通過性能要求時，此試驗設計將進行修正或直接放棄不予採用，轉而進行下一個試驗設計的性能評估。此種評估的程序當所有試驗設計皆完成評估之後就可以進行選擇符合性能要求的最終設計。

當不只一種試驗設計皆能符合所需的性能要求時，所花費的成本就是選擇最終設計的重要因素，業主所願意付出的建造成本決定了試驗設計的最終選擇。若是沒有一種試驗設計可以符合業主的預算且通過性能要求時，就可能是因為業主提出的性能要求太嚴苛而無法以有限的預算達到，因此性能要求必須經由設計者與業主相互討論後加以修改，再藉由新的性能要求重新設計建築物的防火設備來完成最終的設計。

接著介紹評估試驗設計時可以使用的驗證方法，就如同先前量化火災防護目標時所使用的兩種方式：機率性分析或決定性分析。機率性分析可分為傳統風險分析 (Classic Risk Analysis) 以及總體風險分析 (Risk Binning Analysis)。在傳統的風險分析中，每一個設計火災情境的發生機率以及每

一個防火元件的可靠性都必須加以量化進行分析，分析的步驟如下：

- (1) 發展設計火災情境並決定其發生的機率。
- (2) 決定試驗設計的可靠度。
- (3) 對於採用試驗設計時，火災發生所造成的損失進行量化。
- (4) 對於試驗設計失敗時，火災發生所造成的損失進行量化。
- (5) 對每一個火災情境皆進行上述相同步驟。
- (6) 計算試驗設計的相關風險。
- (7) 對每一個試驗設計進行風險評估。

另一個替代的選擇是總體風險分析，此方法相對於傳統風險分析來說是較為簡單而易於使用的，只要將事件火災後果分級（表 3.3）並且與發生機率（表 3.4）合併就可以得到相對的風險等級矩陣，如表 3.5 所示。而人員死亡或受傷也可以量化成具體的價值，加總在表 3.3 中對財產的影響項目之內，然而由於目前各國對於人命的價值到底如何估計尚無明確的定論，因此僅能藉由部分資料的參考數值來加以計算，例如 John and Hall[38]中就提到了人命價值的相關討論，其中先將觀念加以說明，同時舉出該數值的範例以作為參考。

表 3.3 火災後果分級表

| 事件後果等級 | 對於人員的影響 | 對於財產的影響 |
|------------------|------------------|--------------------------|
| 高(High) | 造成立即的死亡或嚴重的傷害 | 損失金額 > 5 億新台幣* |
| 中(Moderate) | 造成嚴重的傷害、永久殘廢 | 1 億新台幣 < 損失金額 < 5 億新台幣* |
| 低(Low) | 造成輕微的傷害、無永久殘廢的情形 | 1 千萬新台幣 < 損失金額 < 1 億新台幣* |
| 可忽略的(Negligible) | 可忽略的傷害 | 損失金額 < 1 千萬新台幣* |

*為舉例數值

表 3.4 發生機率分級表

| 等級 | 事件發生頻率等級 |
|----------------------------------|---|
| 預期會發生(Anticipated) | 發生頻率 > 10 ⁻² /年* |
| 不太可能發生(Unlikely) | 10 ⁻⁴ /年 < 發生頻率 < 10 ⁻² /年* |
| 極度不可能發生(Extremely Unlikely) | 10 ⁻⁶ /年 < 發生頻率 < 10 ⁻⁴ /年* |
| 幾乎不發生(Beyond Extremely Unlikely) | 發生頻率 < 10 ⁻⁶ /年* |

*為舉例數值

表 3.5 風險等級矩陣

| | | | | |
|--------------|-------|-------------|------------|-------|
| 頻率等級 後果等級 | 幾乎不發生 | 極度不可能 發生 | 不太可能 發生 | 預期會發生 |
| 高 | 可忽略風險 | 中風險 | 高風險 | 高風險 |
| 中 | 可忽略風險 | 低風險 | 中風險 | 高風險 |
| 低 | 可忽略風險 | 低風險 | 低風險 | 中風險 |
| 可忽略的 | 可忽略風險 | 可忽略風險 | 可忽略風險 | 可忽略風險 |

然而在使用風險分析時必須非常小心謹慎，因為在量化的過程中需要有很多的統計資料做為參考，在這些參考的資料中又有許多不同的變數需要考慮，例如統計資料的單位是否引用正確的數據、統計資料對於計畫對象物的相關聯性程度等；也由於諸多的限制以及不確定性，建議由經驗豐富的使用者進行風險分析，將不確定性及誤差降至最低。

在決定性分析的方法方面，經常使用的就是火災模式（Fire Model）以及其他型式的解析分析方法，如使用手算的簡算公式等，而使用決定性分析時採用的流程如下：

- (1) 選擇欲分析的試驗設計
- (2) 評估各種火災情境下系統的性能表現
- (3) 決定是否符合各個性能要求
- (4) 重複上述步驟直到每個試驗設計均評估完畢

近年來由於電腦科技的不斷進步，同時火災模式也在積極的研究之下日趨完善，在模擬過程迅速、所需花費低廉，同時模擬的結果十分準確的

情形下，各個先進國家都逐漸仰賴以電腦模擬軟體來計算火災的發展情形，同時模擬人員避難的過程、所需要的時間等等。因此電腦模式成為火災安全設計時用來評估其性能表現的重要工具。不過在使用電腦程式進行火災模擬的時候也要很注意各方面的不確定性（Uncertainty），例如程式本身理論以及使用模式的不確定性、輸入數據的誤差、計算上的限制以及設計火災情境與真實情形的不同之處等等，都會導致模擬結果不正確，誤導設計者使用錯誤的結果進行性能評估。因此使用者必須將這些不確定性徹底了解後才能進行試驗設計的性能評估。

8. 準備性能設計文件及報告（Prepare Design Documents）

完成性能評估以及選定最終設計之後，最後的階段就是撰寫性能設計報告書，提供業主了解整個建築物防火設計的成果、維護以及持續性。性能設計報告（Performance Design Report）必須詳細且清楚且，由於報告是提供給計畫中的所有業主參考，有些業主並不具備火災防護的相關專業知識，因此應該避免使用艱深的理論以及技術性的文字來描述。性能設計報告中應該具有下列內容：

- (1) 計畫範圍概要
- (2) 計畫目標
- (3) 所採用的性能要求標準
- (4) 火災情境以及設計火災
- (5) 最終的設計
- (6) 評估結果
- (7) 參考資料

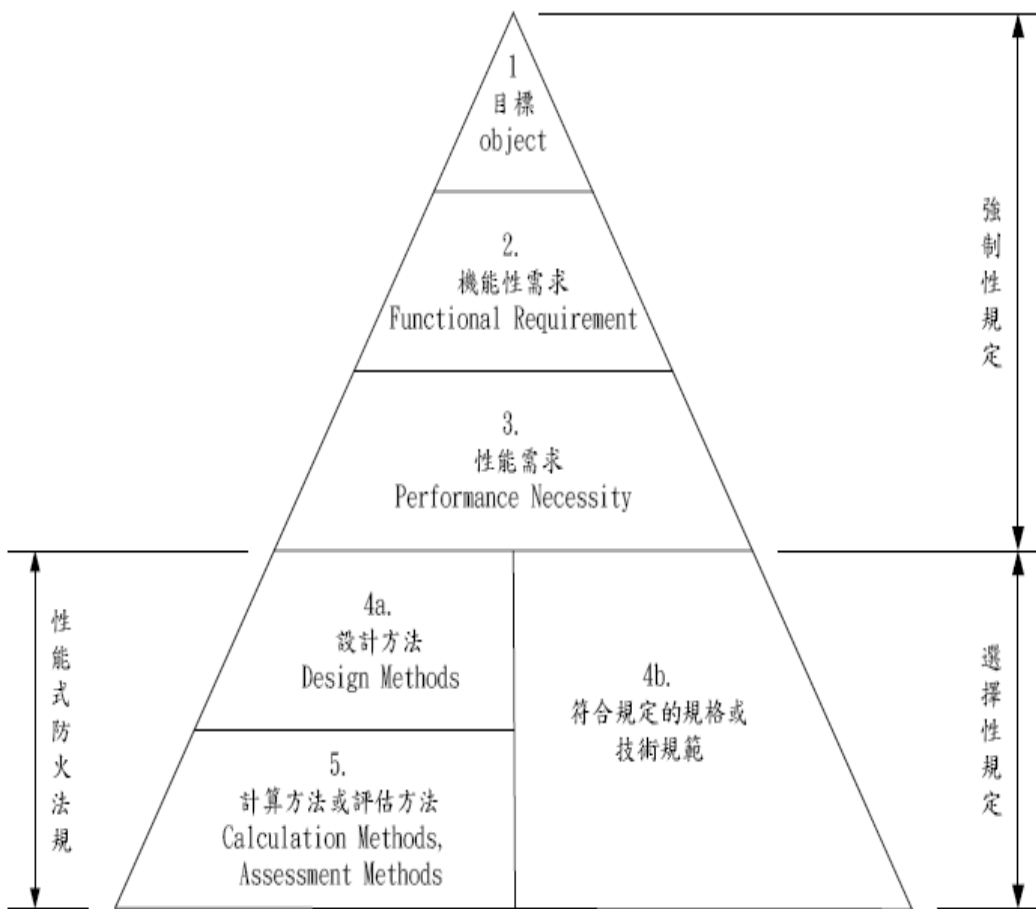


圖 3.1 性能式法規階層架構圖

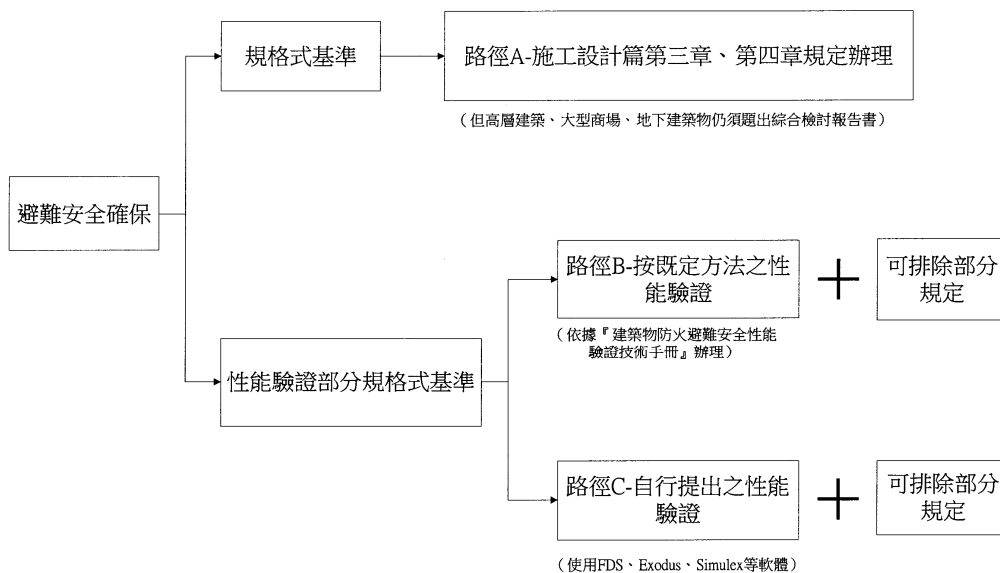


圖 3.2 避難安全驗證方式

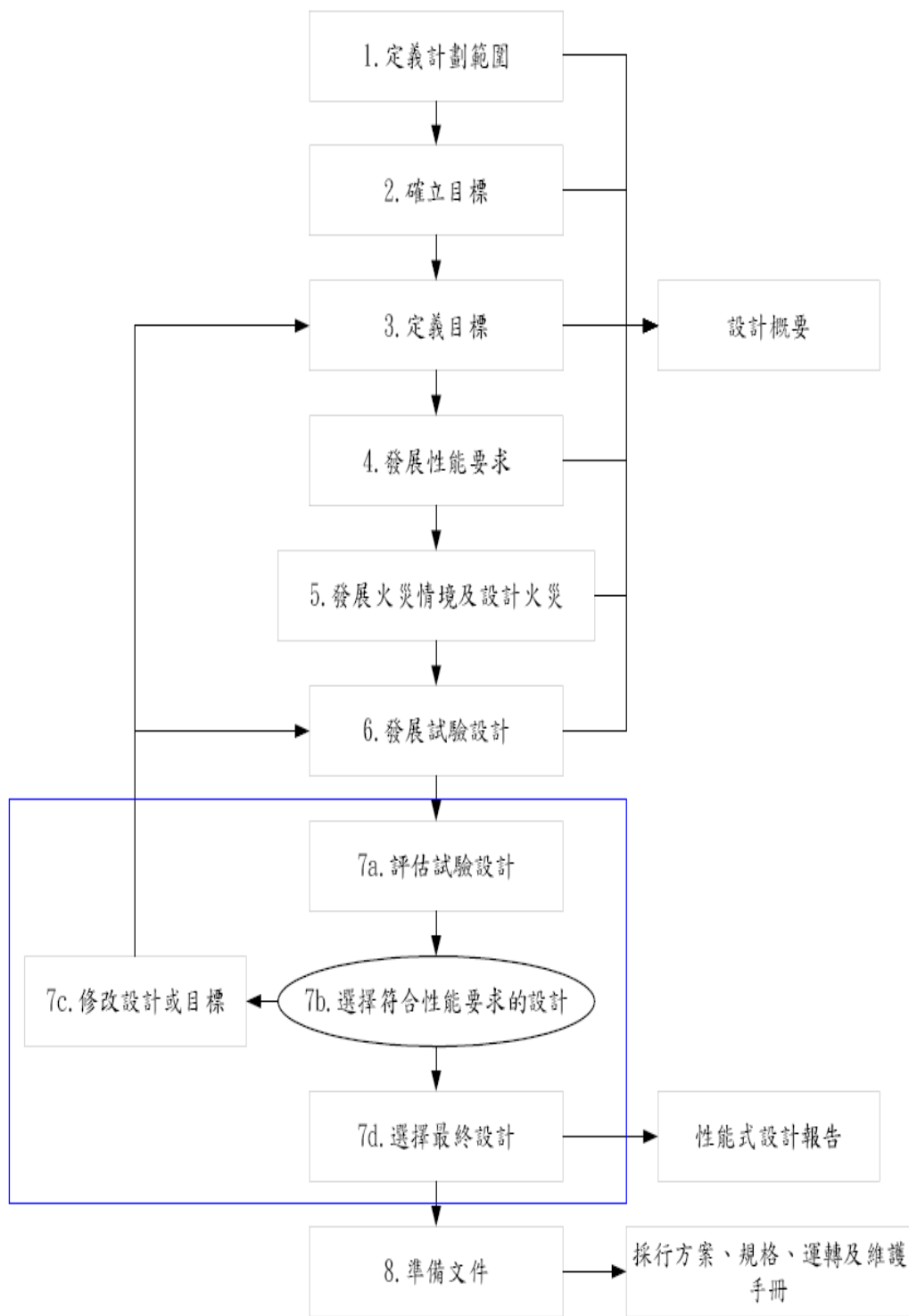


圖 3.3 性能式設計基本流程圖

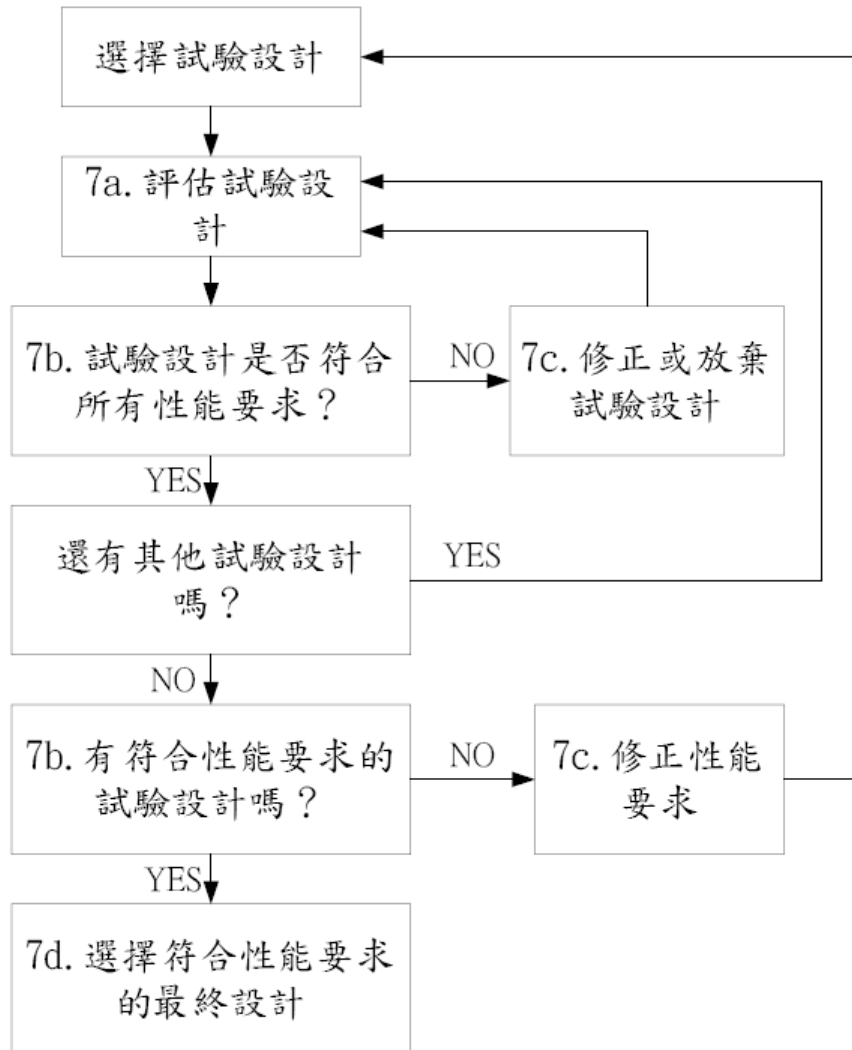


圖 3.4 評估試驗設計流程圖

第四章 火災模擬軟體及理論基礎介紹

4.1 FDS 軟體理論基礎與數值分析方法

FDS (Fire Dynamics Simulator) 為美國國家標準暨技術研究院(National Institute of Standards and Technology ; NIST) 所研發之計算流體力學程式，FDS 的特色在於其可針對三維空間之火災行為 (包含火場之溫度及煙氣流動速度及軌跡作分析)，且其計算結果可經由後處理程式 Smokeview 作動態及靜態之可視化輸出。除了一般火災中所包含複雜的熱傳、質傳現象解析外，FDS 更可將建築物之煙控及撒水頭等消防安全設計納入模擬過程，針對特定之設計條件，計算其對空間火災行為之影響，因此 FDS 較一般計算流體力學軟體，更具實際應用上之價值，也因此其廣泛被應用在學術研究及工程設計上。

在 FDS 程式執行上，首先須建立一個副檔名為 txt 之輸入檔(*.txt)，此輸入檔之資料須包含模擬空間之幾何形狀，材料之特性，撒水頭所在位置，火災情境(fire scenario) 模擬時間，邊界條件，大氣條件，格點分佈，擷取資料點及時間等。在程式執行後，執行結果便可利用 Smokeview 作動態及靜態可視化之處理，以供模擬結果做進一步分析與探討。圖 4.1 為利用 FDS 模擬分析之流程，圖 4.2 為 FDS 與 Smokeview 之組織架構圖。

FDS 是利用數值分析方法將質量、動量、能量及物種守恆方程式、狀態方程式等離散化，並配合初始條件、邊界條件等限制，針對特定空間之流場、溫度場或火災等特性作解析。為了更精確描述空間中物質在特殊狀況下 (如火災) 之行為，FDS 亦加入燃燒輻射等模式，其統御方程式如下所述。

4.1.1 流體力學之統御方程式

1. 質量守恆

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

其中 ρ : 流體密度 (kg/m³)

u : 流體速度 (m/s)

t : 時間 (s)

2. 動量守恆

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

其中 p : 壓力 (nt/m²)

g : 重力加速度 (m/s²)

f : 外力 (包含撒水頭之拖曳力) (nt/m³)

τ : 黏滯剪應力張量 (nt/m²)

3. 能量守恆

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

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/m²)

k : 熱傳導係數 (kw/mk)

T : 溫度 (°C)

h_{ℓ} : ℓ 物種之焓值 (kJ/kg)

D : 擴散係數 (m²/s)

Y_{ℓ} : ℓ 物種之質量分率

4. 物種守恆

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

其中 \dot{W}_{ℓ}''' : ℓ 物種單位體積生成率

5. 狀態方程式

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

對低馬赫數流而言

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

其中 P_o : 外界壓力 (nt/m²)

$\rho_\infty gZ$: 靜壓 (nt/m²)

\tilde{P} : 擾動壓力 (nt/m²)

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

Δ : 格點長度

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

(4.8)

$$\text{定義 } (\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (4.9)$$

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

其中 Pr : 普朗特常數 (Prandtl number)

Sc : 舒密特常數 (Schmidt number)

4.1.2 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， ρ^n 、 Y_i^n 、 \vec{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。

- a. 熱物理性質 ρ 、 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

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

- b. 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

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

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

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

- d. 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

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

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 ρ_{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。

4.1.3 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

$$\frac{\dot{m}_F}{V_F M_F} = \frac{\dot{m}_o}{V_o M_o} \quad (4.19)$$

M_i : i 分子之莫耳重量 (kg)

m_i : i 分子之質量消耗率 (kg/s)

$$\text{定義 } z = \frac{s Y_F - (Y_o - Y_o^\infty)}{s Y_F^I + Y_o^\infty}; \quad s = \frac{V_o M_o}{V_F M_F} \quad (4.20)$$

其中 Y_o^∞ : 氧氣於大氣中之質量分率

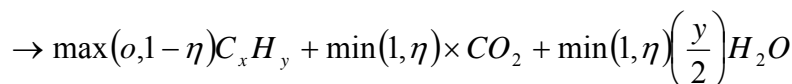
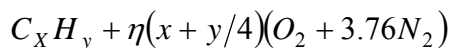
Y_F^I : 燃料之質量分率

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：

$$Z(x, t) = Z_f; \quad Z_f = \frac{Y_o^\infty}{s Y_F^I + Y_o^\infty} \quad (4.21)$$

$$\text{且 } Y_o(Z) = \begin{cases} Y_o^\infty (1 - Z/Z_f) & Z < Z_f \\ 0 & Z > Z_f \end{cases} \quad (4.22)$$

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：



$$+ \max(o, \eta - 1)(x + y/4)O_2 + \eta(x + y/4)3.76N_2 \quad (4.23)$$

針燃燒反應之熱釋放率 \dot{q}''' 則由氧氣消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_o \dot{m}_o''' \quad (4.24)$$

其中 ΔH_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

$$-\dot{m}_o''' = \nabla \left(\rho D \frac{dY_o}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_o}{dZ} \nabla \cdot \rho D \nabla Z = \rho D \frac{d^2 Y_o}{dZ^2} |\nabla Z|^2 \quad (4.25)$$

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。

$$\frac{d[C_x H_y]}{dt} = -B [C_x H_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (4.27)$$

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

E ：活化能 (kJ/mol)

4.1.4 熱輻射之統御方程式

FDS 之熱輻射傳統御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)] \quad n=1, \dots, N \quad (4.28)$$

$$\text{其中 } I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi \quad (4.29)$$

$$I \cdot (x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (4.30)$$

I ：輻射熱強度 (kw/m²)

k ：吸收係數

λ ：波長 (m)

σ ：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：

$$I_w(S) = \varepsilon I_{bw} + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (4.31)$$

其中 I_w ：牆面之輻射熱強度 (kw/m²)

S ：單位向量

ε ：放射率

I_{bw} ：牆面黑體輻射強度 (kw/m²)

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。

$$q_r(x) = \int SI(x,s) d\Omega \quad (4.32)$$

因此能量守恆方程式中輻射熱之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x)[U(x) - 4\pi I_b(X)]; U(x) = \int_{4\pi} I(x,s) d\Omega \quad (4.33)$$

4.1.5 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

$$\dot{q}_c''' = h\Delta T ; h = \max \left[C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left(\frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} P_r^{1/3} \right] \quad (4.34)$$

ΔT ：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/m²)

L ：特徵長度 (m)

V ：動黏滯係數 (m^2/s)

1. 熱厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(o,t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (4.35)$$

其中 ρ_s ：固態燃料密度 (kg/m^3)

C_s ：固態燃料比熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{k}$)

\dot{q}_c'' ：對流熱通量 (kw/m^2)

\dot{q}_r'' ：輻射熱通量 (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)

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (4.36)$$

其中 δ ：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。

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[-\frac{h_v M_f}{\mathcal{R}} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (4.37)$$

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

針對上述統御方程式，FDS 在離散化過程中，其時間之處理採用 Second

Order Predictor-corrector Scheme；在空間項則採用 Second Order Finite Differences。在動量方程式計算採用大渦流模擬法(Large Eddy Simulation, LES)，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。另外在燃燒模式計算上亦採用 LES 計算方法，主要原因是 DNS 法是直接模擬燃料與氧氣的擴散，其使用之有限化學反應速率化學反應方程式需大量實驗資料作驗證。因此，本研究採用 FDS 技術手冊上建議使用之 LES 模式作為選定的計算模式。

4.2 逃生模擬軟體(Simulex)

Simulex 為英國 Fire Safety Group 所研發高層建築物避難的電腦動態模擬程式，其使用人員間的距離來決定步行的速度，此方式更符合人員在移動時的特性，與一般使用人員密度來決定步行速度的計算方式不同。另外由於 Simulex 本身為二維空間之模擬程式，因此在高樓層避難的模擬時，可使用連結(Link)的功能將不同樓層之平面利用樓梯串聯起來，並且在樓梯間由於人員上樓的步行速度比下樓緩慢，Simulex 也蒐集了大量的資料庫模擬人員在上下樓層時速度的不同，以切實的模擬出人員在高樓層必難時之行為與特性。模擬流程如圖 4.3 所示。

其中在模擬中必須要考慮以及假設的相關參數如下：

(1) 建築物內空間的配置：

建築物空間的配置可藉著匯入 AutoCad 案例圖檔(*.dxf)來達成，同時設定出口與連結的位置。

(2) 避難人員的設定：

人員尺寸、人員之間的距離、人員步行速度等等的設定。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，亦即利

用一個較大的圓形來代表軀幹，而另兩個等大的圓圈來代表手臂部位。模擬尺寸示意圖如圖 4.4 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，模擬人員的尺寸如表 4.1 所示。人與人間的距離如圖 4.5 所示，其採用的數學模式為最基本的兩點間距離公式，而此公式除了判斷人員在避難過程中是否重疊之外，同時亦作為人員步行速度之依據，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 4.6。Simulex 也可針對不同場合，依據人群不同屬性，其男女分布百分比作基本設定如表 4.2 所示。此一設定將會影響模擬人群之體型、分布與個人行走最大速度。

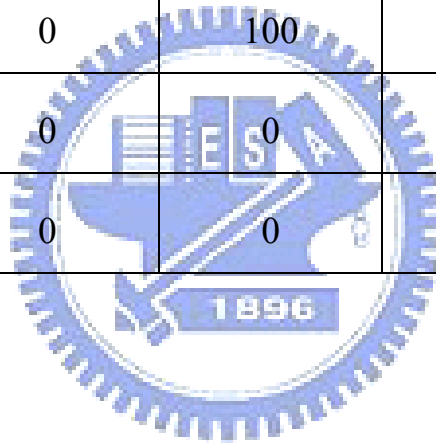
至於 Simulex 同時也可模擬避難過程中步行速度較快的人超過前方步行速度較慢的人之情況，以使模擬結果符合實際的狀況。當電腦模擬避難進行當中，若身處前方的人員步行速度較慢或甚至停止不動時，後方的人員便進行判斷是否超越的可行性。首先，程式會模擬後方人員先以 θ_1 與 θ_2 判斷新的方向是否有障礙物或其他避難人員，如果沒有阻礙，後方人員就會向 θ_1 或 θ_2 方向行進直到超越前方的人員，超越過後再轉往出口方向進行，如圖 4.7 所示。圖 4.8 為 SIMULEX 模擬不同方向阻礙下之超越路線圖。

表 4.1 Simulex 提供之人體尺寸

| 種類 | R(t) [m] | R(s) [m] | S [m] |
|----|----------|----------|-------|
| 男性 | 0.27 | 0.17 | 0.11 |
| 女性 | 0.24 | 0.14 | 0.09 |
| 平均 | 0.26 | 0.155 | 0.10 |

表 4.2 Simulex 提供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 |



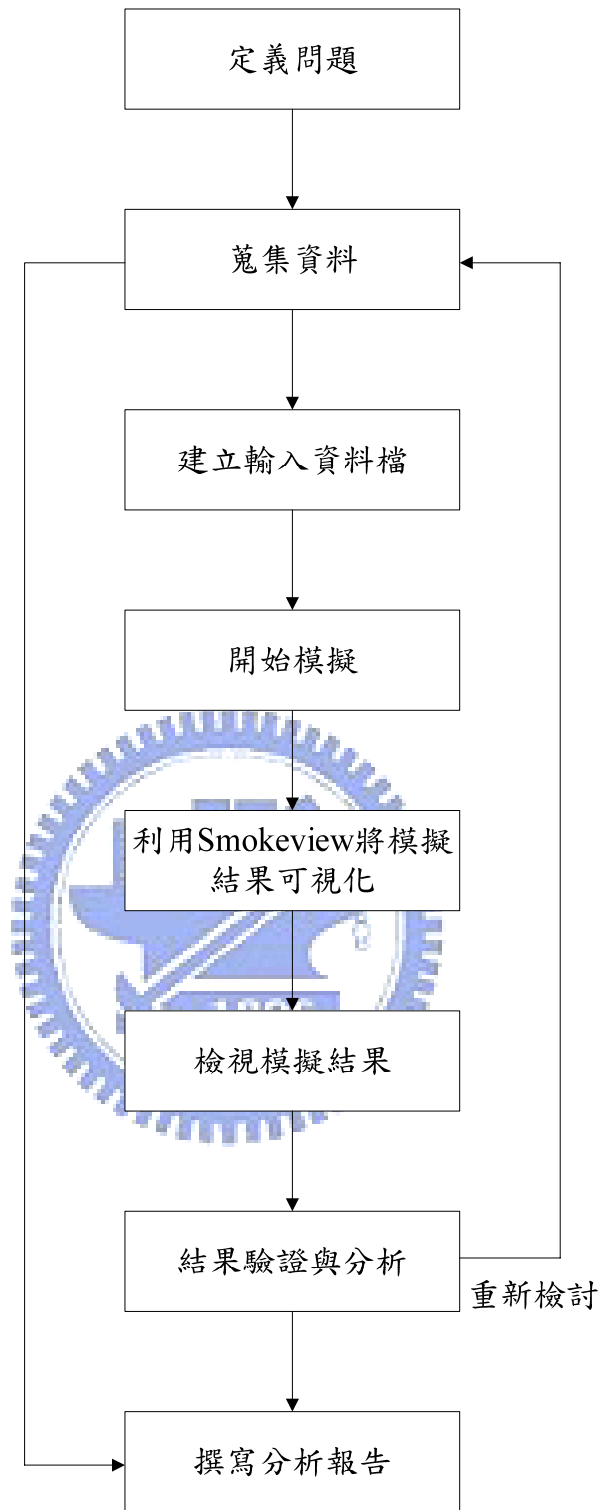


圖 4.1 FDS 分析執行計畫流程圖

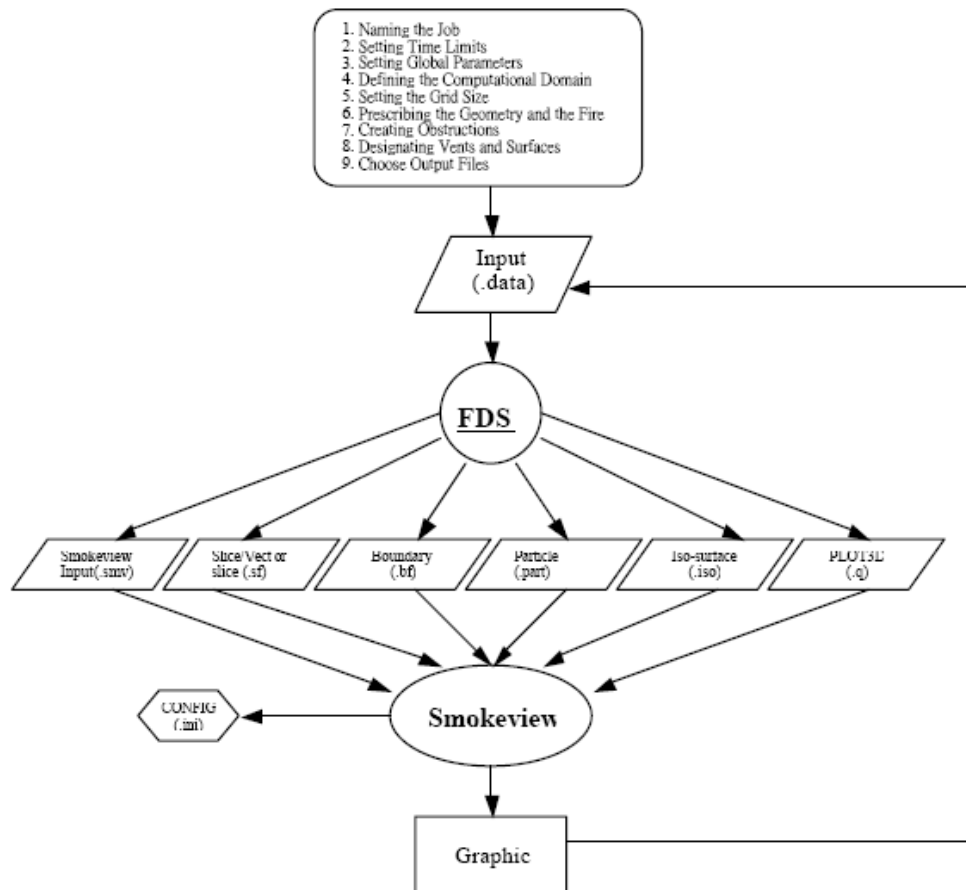


圖 4.2 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖



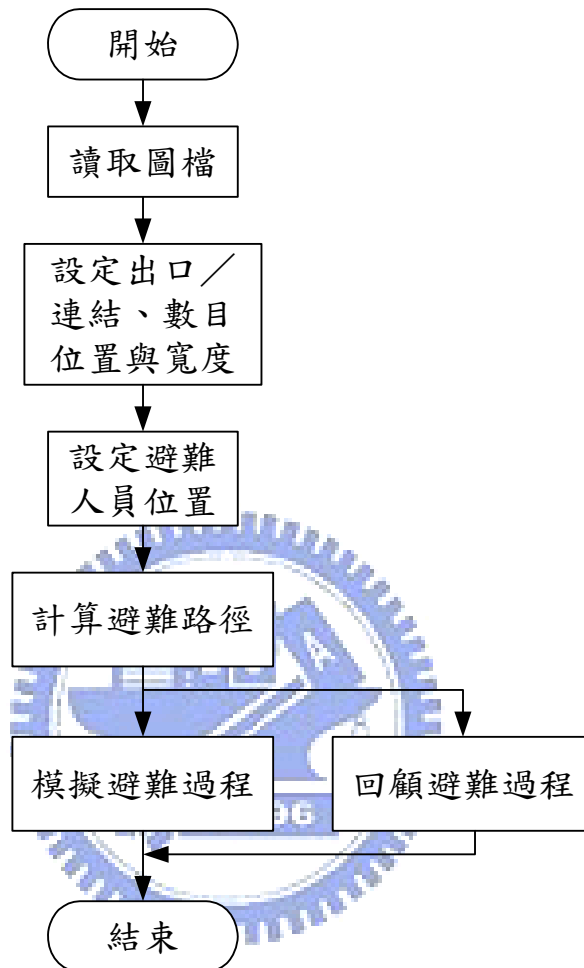


圖 4.3 Simulex 模擬避難流程

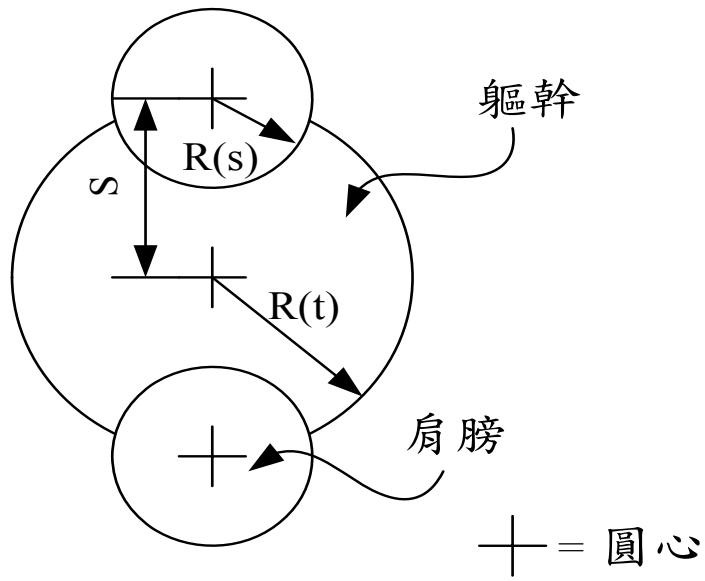


圖 4.4 電腦模擬人體尺寸示意圖

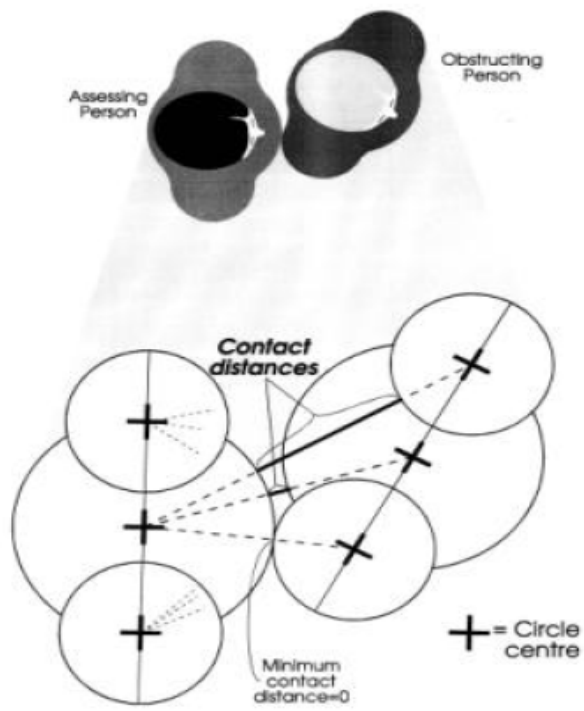


圖 4.5 人員間的接觸距離

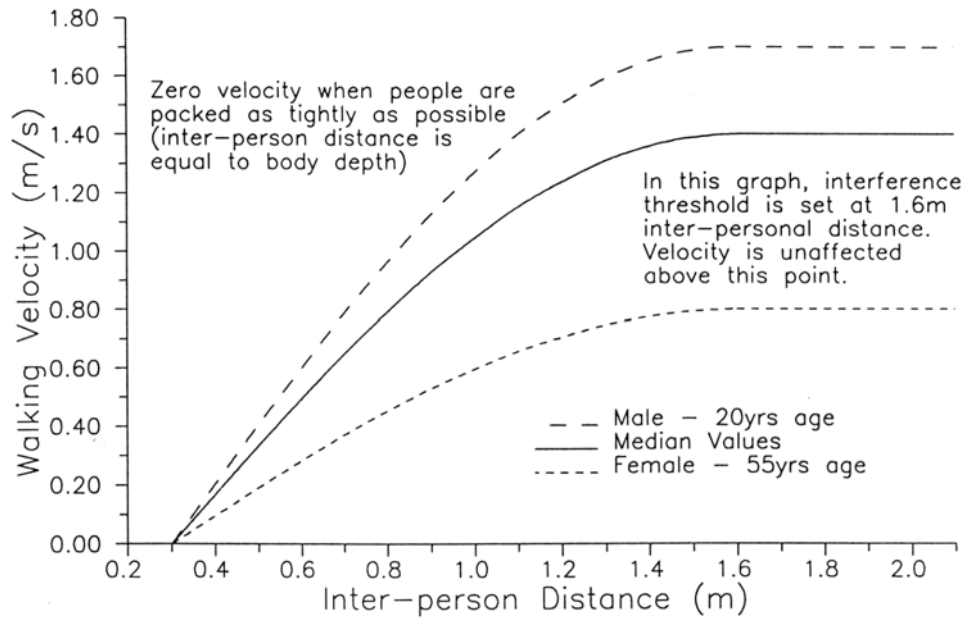


圖 4.6 人員間距離與步行速度之關係

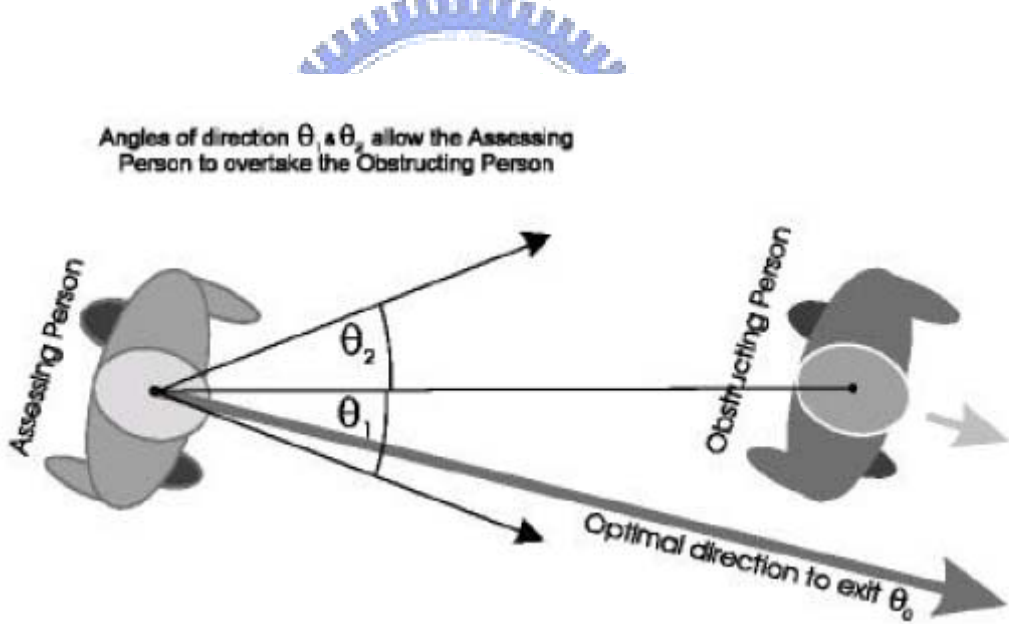


圖 4.7 避難人員超越之角度

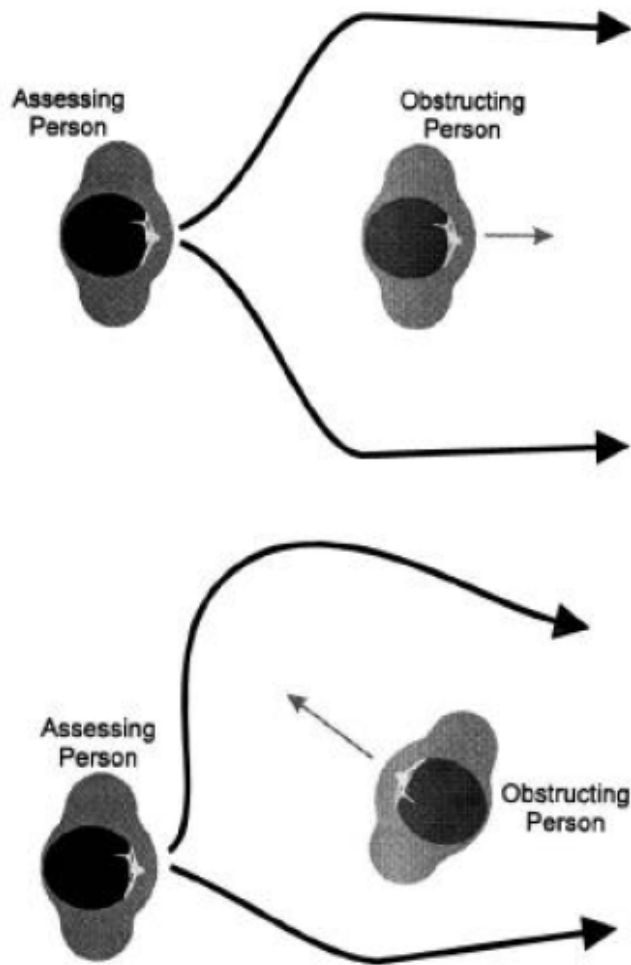


圖 4.8 Simulex 模擬不同方向阻礙下之超越路線圖

第五章 案例分析

5.1 前言

本章節中將進行兩個案例分析，首先在實際的鐵路地下車站，因其建築物的結構特殊，導致無法符合在「建築技術規則」第 79 條所規定總樓地板面積超過 1500m² 以上者，應按每 1500m² 區劃設置相關防火設備以及在「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條有關於煙控系統設計，故以「各類場所消防安全設備設置標準」之第二條以及「建築技術規則」總則編第三條的描述，使用性能式設計來進行設計並驗證。另外，將討論列車於臨近隧道發生火災時，驗證隧道通風系統其煙控策略之成功與否，攸關大量旅客之生命安危。

5.2 地下化車站(案例一)

案例一為一地下化車站，地下車站其空間型態分為上下兩層，地下一層為穿堂層及地下二層為月台層。車站總長度為 260 公尺，寬為 18 公尺，高為 12.75 公尺。主要出口為穿堂層一座通往地面層的樓梯，以及兩座緊急逃生梯。

本案例最主要的目的，確保發生火災時，所設計的排煙系統能有效的保護人員，達到法規對生命安全的要求，本案例所作建立之模型如圖 5.1 所示。

5.2.1 火源設計、煙控設計及相關設定

(1) 火源大小及火災成長模式設定

根據 NFPA92B 火災熱釋放率曲線將隨時間平方成正比，本案例針對車站不同火災情境之模擬分為下列兩部份：

1. 車站

火災發生原因主要分為意外災害與人為縱火。但由於地下化車站目前

多以耐燃材料作設計，因此火災發生之機會以人為縱火或機電設備故障引起之火災機率較大，可燃物來源除了電扶梯及列車車廂等設備外，主要包括旅客行李、車站內廣告招牌、垃圾桶等。

就火災熱釋放率大小而言，一般旅客行李火災火源熱釋放率之設計值約為 1 MW，至於非行李火災所採用之設計火源熱釋放率約介於 2 MW 至 5 MW 間。因此為保守估計，本案例模擬採用 5MW 的熱釋放率火源，火源成長速率採用 Ultra-fast 型式。依 2.2 式計算火災開始後約 164 秒，火災熱釋放率將達峯值。

2. 軌道區

假設軌道區產生火源之可燃物為柴油，且火源位置位於軌道區正中央，並根據地鐵環境模擬程式(SES)設計時之熱釋放率 20MW 進行模擬，火源成長速率採用 Fast 型式。依 2.2 式計算火災開始後約 654 秒，火災熱釋放率將達峯值。

(2) 煙控設備動作流程與排煙設備之設置

發生火災時，先利用防煙垂壁減緩煙層由月台層擴散至穿堂層的時間，接著當各區塊之偵煙探測器偵測到能見度低於 20 米時，則啟動該區塊的排煙機。

(1) 防煙垂壁設計：

本研究案例於月台層皆有設置 80cm 深度的防煙垂壁已減緩煙層擴散至穿堂層的時間。

(2) 排煙設計：

本研究案例假設當火場中特定點（探測器所在位置）能見度降至 20 米以下 30 秒後便啟動該區劃之排煙系統進行排煙。由於藉由此方式決定排煙系統開啟之時間無法事先預測得知，因此本模擬均先進行無排煙系統開啟之狀況，來決定排煙區劃煙控系統之開啟時間，並反覆藉由此程序決定其他區劃排煙系統之啟動時間，防煙區劃及啟動時間如圖 5.2(a)(b)和表 5.1~

表 5.3 所示。

表 5.1 排煙系統啟動時間(情境一)

| 防煙區劃 | 排煙量(CMM) | 排煙系統啟動時間(秒) |
|-------|----------|-------------|
| P15-2 | 150 | 166 |
| P14-2 | 150 | 174 |
| P14-1 | 260 | 251 |
| P15-1 | 260 | 252 |
| P15-3 | 235 | 255 |
| P14-3 | 235 | 260 |
| P27 | 115 | 262 |
| P06 | 117 | 263 |
| P03 | 180 | 273 |
| P26 | 214 | 291 |
| C31-2 | 280 | 407 |
| C31-1 | 298 | 408 |
| C31-3 | 195 | 418 |
| C41-1 | 95 | 440 |
| C41-2 | 90 | 446 |
| C41-3 | 90 | 462 |

表 5.2 排煙系統啟動時間(情境二)

| 防煙區劃 | 排煙量(CMM) | 排煙系統啟動時間(秒) |
|-------|----------|-------------|
| P15-1 | 260 | 232 |
| P06 | 117 | 268 |
| P14-1 | 260 | 277 |
| P14-2 | 150 | 462 |
| P15-2 | 150 | 600 |

表 5.3 排煙系統啟動時間(情境三)

| 防煙區劃 | 排煙量(CMM) | 排煙系統啟動時間(秒) |
|-------|----------|-------------|
| C31-2 | 280 | 135 |
| C31-1 | 298 | 171 |
| C31-3 | 195 | 183 |
| C41-1 | 95 | 247 |
| C41-2 | 90 | 253 |
| C41-3 | 90 | 334 |
| P15-3 | 235 | 367 |

在軌道區中，主要分為兩個排氣系統，一為軌道下方排熱系統，即 Under Platform Exhaust(UPE)。因在軌道區中，列車底空調機組設備會放出大量的熱氣，這些廢熱經由月台下排熱設備，直接排至外界，有效排出列車所產生的熱。UPE 通常設置於車站的平台，或是靠近月台的建築物上。二為軌道上方排熱系統，即 Over Track Exhaust(OTE)，設置於列車上方的風扇，OTE 可幫助排除車頂空調散熱器的熱氣，以及於火災發生時可協助將濃煙排出。另外，在地下車站的軌道中，於月台的兩側設置一對並聯式的隧道通風風扇(TVF)。TVF 主要功用是用於火災的時候能夠抽送濃煙，設置位置位於月台兩側。本研究之車站排煙設備及軌道上、下方排氣系統如圖 5.3 和圖 5.4 所示。TVF、UPE、及 OTE 之啟動時間以及風量，如表 5.4 所示。

表 5.4 軌道區風機參數設定

| | TVF | UPE | OTE |
|----------|---------|-------|---------|
| 啟動時間(秒) | 180~720 | 0~180 | 180~720 |
| 排煙量(CMS) | 四排(240) | 20 | 80 |

(3) 補氣口設計

在火災發生時，為了使火災發生所產生的濃煙有效的排出，必須要有

新的冷空氣進到車站內，而使熱空氣可以藉由出口或是經排氣口排出。補氣口的位置位於穿堂層通往地面層的主要出口作為補氣口，以及在軌道兩側隧道口也作為補氣的來源，隧道口通風依據 SES 設定，如表 5.5 所示。

表 5.5 隧道通風口設定

| | | 流入 | 流出 |
|-------|-----------|-------|------|
| 引進氣流量 | 流量(cms) | 84.86 | 114 |
| | 產生風速(m/s) | 1.16 | 1.56 |

(4) 格點測試

本案例中將整體空間分為六個區域之格點以方便平行處理，由於在火源周圍之溫度變化量較大，因此針對火源周圍區域之格點作分析，以三種不同的格點大小來做測試，不同格點配置如表 5.6(a)(b)(c)所示。

表 5.6(a) 格點配置表

| | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | 格點大小 |
|-----|---------|------|-----------|----------------|
| 格點一 | 0-120 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點二 | 120-140 | 1-19 | 1-8.3 | 0.20×0.20×0.20 |
| 格點三 | 140-260 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點四 | 0-87 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點五 | 87-173 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點六 | 173-260 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |

表 5.6(b) 格點配置表

| | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | 格點大小 |
|-----|---------|------|-----------|----------------|
| 格點一 | 0-120 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點二 | 120-140 | 1-19 | 1-8.3 | 0.25×0.25×0.25 |
| 格點三 | 140-260 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點四 | 0-87 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點五 | 87-173 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點六 | 173-260 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |

表 5.6(c) 格點配置表

| | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | 格點大小 |
|-----|---------|------|-----------|----------------|
| 格點一 | 0-120 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點二 | 120-140 | 1-19 | 1-8.3 | 0.50×0.50×0.50 |
| 格點三 | 140-260 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點四 | 0-87 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點五 | 87-173 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點六 | 173-260 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |

格點測試所用之量測點設置於距離火源周圍 3 公尺，高度於 1.8 公尺之區域，量測其 720 秒之平均溫度如表 5.7 所示。

表 5.7 格點測試(720 秒之平均溫度)

| 格點大小(m) | 量測點一 | 量測點二 | 量測點三 | 最大誤差值 |
|----------------|------------|------------|------------|-------|
| 0.20*0.20*0.20 | 76.5(0%) | 71.2(0%) | 74.8(0%) | 0% |
| 0.25*0.25*0.25 | 77.4(1.1%) | 72.5(1.8%) | 75.8(1.3%) | 1.8% |
| 0.50*0.50*0.50 | 78.1(2.0%) | 73.1(2.6%) | 77.1(3%) | 3% |

由以上測試結果可以看出，格點大小為 $0.50*0.50*0.50$ 之結果最大誤差為 3%，而格點大小為 $0.25*0.25*0.25$ 之誤差最大為 1.8%，因此顧及計算之精確性，熱傳值結果的準確性與計算時間的需求，此案例在火源區域採用 $0.25*0.25*0.25$ 大小之格點。

5.2.2 FDS 模擬情境設定

在車站火災意外中，常是列車意外事故或人為縱火所引起的，故本案例共分為三個模擬情境，主要分為在軌道區由於列車所引起的火災，以及在月台及穿堂層公共區域所引起的火災，如圖 5.5(a)(b)(c)所示。量測點設置於月台層及穿堂層樓梯口 1.8 米高的位置，在月台層及穿堂層各有 8 個量測點，共有 16 個量測點，如圖 5.6(a)(b)所示。模擬情境及相關參數設定如表 5.8~表 5.9 所示。

表 5.8 模擬情境

| | 火源大小 | 燃燒速率 | 火源位置 |
|-----|------|------------|-----------------|
| 情境一 | 20MW | Fast | 中央軌道區 |
| 情境二 | 5MW | Ultra Fast | 月台層樓梯口 |
| 情境三 | 5MW | Ultra Fast | 穿堂層收費閘門前 15 公尺處 |

表 5.9 模擬情境之各項參數

| 設定條件 | 設定值 | 說明 |
|-----------|---------------------|--|
| 起始溫度 | 25°C | 考慮空調作用下之常態溫度 |
| 火載量 | 20MW/5MW | 本案例火源假設狀況有兩種，第一種為軌道區起火之情境，最大熱釋放率為 20MW，燃燒面積為 3m x 2.5m; 第二種為月台層及穿堂層起火狀況，最大熱釋放率為 5MW，燃燒面積為 1m x 1m。 |
| 火源成長模式 | Fast/ Ultra fast | 軌道區為快速(Fast) 月台及穿堂層為極快速(Ultra fast)。 |
| 排煙口啟動所需時間 | 30 秒 | 依照排煙風機規格數值設定 |
| 自然補氣口 | 由週遭樓梯及進出口等作為補氣來源 | 考慮火災發生時現場實際開口換氣條件 |
| 模擬時間 | 720 秒 | 模擬時間為 720 秒。 |

5.2.3 FDS 模擬結果

(一) 情境一模擬結果

(1) 模擬空間尺寸配置表

情境一格點配置圖如表 5.10 所示，總網格數為 632160 個。

表 5.10 格點配置圖(情境一)

| | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | 格點大小 |
|-----|---------|------|-----------|----------------|
| 格點一 | 0-120 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點二 | 120-140 | 1-19 | 1-8.3 | 0.25×0.25×0.25 |
| 格點三 | 140-260 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點四 | 0-87 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點五 | 87-173 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點六 | 173-260 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |

(2) 量測點分析

在月台層部分，由量測點 1~8 的分佈圖(圖 5.7~圖 5.9)得知溫度值在 430 秒以前，皆符合標準值 60°C 以下；一氧化碳值在 720 秒以內最大值 130ppm，皆符合標準值 1500ppm 以下；能見度值在 513 秒以前皆符合標準值 10 米以上。在穿堂層部分，由量測點 9~16 的分佈圖(圖 5.10~圖 5.12)得知，溫度、一氧化碳及能見度值在 720 秒內皆符合標準值。

因火源位於軌道區，故對月台層影響較大，除了月台層溫度及能見度值超過標準值之外，其餘區域在 720 秒內皆符合標準。

(3) 溫度分析

就火災發生後，空間溫度之分佈情形，及其對月台層所產生之影響，我們以距月台層及穿堂層樓地板 1.8 米平面溫度分佈圖(圖 5.13 至圖 5.18 及圖 5.19 至圖 5.24)來作說明。

月台層部份，約在 240 秒時，中間樓梯區域附近的溫度達到 60°C 以上，但根據模擬避難逃生時間，人員已於 162 秒離開此區域；而在約 600 秒時，月台層大部份空間溫度達到 60°C 以上，但人員早已於 266 秒離開月台層；故不會造成人員上的危害。

穿堂層部份，在 720 秒內，溫度皆低於 60°C 以下，故皆符合安全值的範圍之內。

(4) 一氧化碳濃度分析

在相對應的一氧化碳濃度分佈方面，由圖 5.25 至圖 5.30 及圖 5.31 至圖 5.36 為一氧化碳濃度分佈圖，針對一氧化碳之濃度分佈我們可發現在 0 到 720 秒間，一氧化碳濃度皆低於 1500ppm，根據逃生環境之要求準則，一氧化碳濃度上限為 1500ppm，因此就此項目之檢討，在火災發生後 720 秒內，並不會對逃生空間造成威脅。

(5) 能見度分析

針對火災發生後 720 秒內空間中能見度之變化情形，圖 5.37 至圖 5.42 及圖 5.43 至圖 5.48 顯示距月台層及穿堂層距樓地板 1.8 米平面在不同時間之能見度分佈。約在 $t=240$ 秒時，月台中間附近的能見度開始低於 10m 以下，但人已在 162 秒離開此區域；而在約 600 秒時，月台層大部份空間能見度達到 10m 以下，但人員早已於 266 秒離開月台層，故不影響到月台層人員安全，根據模擬避難逃生時間，所有人員逃生皆符合安全值的範圍之內。

(6) 煙流及熱輻射分析

針對火災發生後 720 秒內空間中煙流之變化情形，圖 5.49 至圖 5.54 顯示月台層及穿堂層不同時間之煙流分佈。從圖可以發現，在 720 秒內煙已經充滿整個月台層，因在月台層有防煙垂壁，故可延緩煙上升至穿堂層的情況。

圖 5.55 顯示 720 秒內熱輻射分佈的狀態，可以發現在火源位置附近熱輻射值高於 $2.5\text{KW}/\text{m}^2$ ，其餘區域皆小於標準值。

(二) 情境二模擬結果

(1) 模擬空間尺寸配置表

情境二格點配置圖如表 5.11 所示，總網格數為 547200 個。

表 5.11 格點配置圖(情境二)

| | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | 格點大小 |
|-----|---------|------|-----------|----------------|
| 格點一 | 0-94 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點二 | 94-102 | 1-19 | 1-8.3 | 0.25×0.25×0.25 |
| 格點三 | 102-181 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點四 | 181-260 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點五 | 0-87 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點六 | 87-173 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點七 | 173-260 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |

(2) 量測點分析

在月台層部分，由量測點 1~8 的分佈圖(圖 5.56~圖 5.58)得知溫度值在 720 秒以內，除了量測點 6 高於 60°C 以上，其餘皆符合標準值；一氧化碳值在 720 秒以內最大值 349ppm，皆符合標準值 1500ppm 以下；能見度值除了量測點 6 低於 10 米以下，其餘皆符合標準值 10 米以上。在穿堂層部分，由量測點 9~16 的分佈圖(圖 5.59~圖 5.61)得知，溫度、一氧化碳及能見度值在 720 秒內皆符合標準值。

因火源位於月台層樓梯口，故對月台層影響較大，除了月台層溫度及能見度值超過標準值之外，其餘區域在 720 秒內皆符合標準。

(3) 溫度分析

就火災發生後，空間溫度之分佈情形，及其對月台層所產生之影響，我們以距月台層及穿堂層樓地板 1.8 米平面溫度分佈圖（圖 5.62 至圖 5.67 及圖 5.68 至圖 5.73）來作說明。

月台層部份，就火災發生時，火源區域附近的溫度在 60°C 以上，但沒有擴大範圍，根據模擬避難逃生時間，人員在逃生的過程中，皆不會造成危害。

穿堂層部份，在 720 秒內，溫度皆低於 60°C 以下，故皆符合安全值的

範圍之內。

(4) 一氧化碳濃度分析

在相對應的一氧化碳濃度分佈方面，我們由圖 5.74 至圖 5.79 及圖 5.80 至圖 5.85 一氧化碳濃度分佈圖，針對一氧化碳之濃度分佈我們可發現在 0 到 720 秒間，一氧化碳濃度皆低於 1500ppm，根據逃生環境之要求準則，一氧化碳濃度上限為 1500ppm，因此就此項目之檢討，在火災發生後 720 秒內，並不會對逃生空間造成威脅。

(5) 能見度分析

針對火災發生後 720 秒內空間中能見度之變化情形，我們以圖 5.86 至圖 5.91 及圖 5.92 至圖 5.97 顯示距月台層及穿堂層距樓地板 1.8 米平面在不同時間之能見度分佈。就火災發生時，火源附近的能見度開始低於 10m 以下，但不影響到月台層人員安全，根據模擬避難逃生時間，所有人員逃生皆符合安全值的範圍之內。

(6) 煙流及熱輻射分析

針對火災發生後 720 秒內空間中煙流之變化情形，圖 5.98 至圖 5.103 顯示月台層及穿堂層不同時間之煙流分佈。從圖可以發現，在月台層煙從火源處慢慢往兩側擴散，因在月台層有防煙垂壁，故可延緩煙上升至穿堂層的情況。

圖 5.104 顯示 720 秒內熱輻射分佈的狀態，可以發現在火源位置附近熱輻射值高於 $2.5\text{KW}/\text{m}^2$ ，其餘區域皆小於標準值。

(三) 情境三模擬結果

(1) 模擬空間尺寸配置表

情境三格點配置圖如表 5.12 所示，總網格數為 531072 個。

表 5.12 格點配置圖(情境三)

| | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | 格點大小 |
|-----|---------|------|-----------|----------------|
| 格點一 | 0-87 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點二 | 87-173 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點三 | 173-260 | 1-19 | 1-8.3 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點四 | 0-109 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點五 | 109-117 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.25×0.25×0.25 |
| 格點六 | 117-173 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |
| 格點七 | 173-260 | 1-19 | 8.3-13.75 | 0.5×0.5×0.5 |

(2) 量測點分析

在穿堂層部分，由量測點 9~16 的分佈圖(圖 5.108~圖 5.110)得知溫度值在 149 秒時，已超過標準值 60°C 以上；一氧化碳值在 720 秒以內最大值 18ppm，皆符合標準值 1500ppm 以下；能見度值在 374 秒後開始超過標準值 10 米以上。在月台層部分，由量測點 1~8 的分佈圖(圖 5.105~圖 5.107)得知，量測點 3 之溫度值在 479 秒高過標準值、而一氧化碳及能見度值在 720 秒內皆符合標準值。

因火源位於穿堂層，故對穿堂層影響較大，除了穿堂層溫度及能見度值以及月台層一座樓梯口溫度值超過標準值之外，其餘區域在 720 秒內皆符合標準。

(3) 溫度分析

就火災發生後，空間溫度之分佈情形，及其對月台層所產生之影響，我們以距月台層及穿堂層樓地板 1.8 米平面溫度分佈圖(圖 5.111 至圖 5.116 及圖 5.117 至圖 5.122) 來作說明。

月台層部份，在 720 秒內，溫度值除了中間一座樓梯口超過標準值，其餘皆低於 60°C 以下，故皆符合安全值的範圍之內，與避難逃生時間比對，人員在逃生上不會受到影響。

穿堂台層部份，火災發生時，火源附近的溫度達到 60°C 以上，但根據模擬避難逃生時間，人員離開此區域皆不會受到影響；故不會造成人員上的危害。

(4) 一氧化碳濃度分析

在相對應的一氧化碳濃度分佈方面，我們由圖 5.123 至圖 5.128 及圖 5.129 至圖 5.134 一氧化碳濃度分佈圖，針對一氧化碳之濃度分佈我們可發現在 0 到 720 秒間，一氧化碳濃度皆低於 1500ppm，根據逃生環境之要求準則，一氧化碳濃度上限為 1500ppm，因此就此項目之檢討，在火災發生後 720 秒內，並不會對逃生空間造成威脅。

(5) 能見度分析

針對火災發生後 720 秒內空間中能見度之變化情形，我們以圖 5.135 至圖 5.140 及圖 5.141 至圖 5.146 顯示距月台層及穿堂層距樓地板 1.8 米平面在不同時間之能見度分佈。火災發生時，火源附近的能見度開始皆高於 10m 以上，根據模擬避難逃生時間，所有人員逃生皆符合安全值的範圍之內。

(6) 煙流及熱輻射分析

針對火災發生後 720 秒內空間中煙流之變化情形，圖 5.147 至圖 5.152 顯示月台層及穿堂層不同時間之煙流分佈。從圖可以發現，在穿堂層煙從火源處慢慢往一側擴散，煙流從右側樓梯下降至月台層，與避難時間比對，人員在逃生的路徑上是安全的。

圖 5.153 顯示 720 秒內熱輻射分佈的狀態，可以發現在火源位置附近熱輻射值高於 2.5KW/m²，其餘區域皆小於標準值。

5.2.4 Simulex 參數設定及模擬結果

(1) Simulex 設定

本案例避難人員資料如下：

- A. 模擬範圍：通勤車站之月台層及穿堂層部分。
- B. 避難人數：據進出站旅客總容量，旅客人數為 1558 人。

- C. 人員位置分布：採平均分布。
- D. 人員屬性：使用 SIMULEX 中，內建的通勤者(Commuters)設定。
- E. 建築物內空間的配置及避難動線：依其實際建築圖之 CAD 檔輸入軟體計算。

本案模擬 2 個樓層(月台層及穿堂層)，月台層和穿堂層樓層逃生出口與人員配置如圖 5.154 和圖 5.155。共模擬三種情境，第一個情境因火源位於軌道區，在逃生的路徑上不會受到影響，故開啟所有樓梯口逃生；情境二因火源位於月台層樓梯口，逃生路徑上受到影響，故封閉火源旁的樓梯，人員將往其餘出口逃生，封閉出口如圖 5.156 所示；在情境三中，因火源位於穿堂層收票閘門口前，火源右側的人員將不會通過收票閘門，人員將往另外樓梯口往下逃生至月台層，在往月台層兩側緊急逃生出口逃生，人員逃生分佈如圖 5.157。

(2) Simuex 模擬結果

SIMULEX 軟體對於人群避難的基本假設為：人群會自動選擇離自己最近的避難出口逃生。這個假設雖然合理，但在真實避難狀況中，由於人群對現場不熟悉，容易有盲從行為產生，這點在電腦模式便難以呈現，因此 SIMULEX 軟體所計算之避難時間，一般情況下需乘以 1.5 倍安全係數，才比較貼近真實的狀況。另外由於人員開始避難的時間並非為火災剛發生時，因此應該要有偵煙式探測器與人員反應的前置時間，本案例所使用的偵煙式探測器反應時間為 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。綜合上述因素後所計算出之避難時間的詳細列表如表 5.13~表 5.16，分為月台層疏散完畢時間、穿堂層疏散完畢時間、總疏散完畢時間以及 NFPA 所計算出來的時間，其中穿堂層疏散完畢時間指人員進入同往地面層樓梯口即停止計算。

表 5.13 模擬避難時間表(月台層疏散完畢)

| | 探測器+ 人員反應時間 | Simulex 模擬 避難時間 | Simulex 模擬避難 時間×安全係數 | 總計 |
|-----|----------------|--------------------|-------------------------|-------|
| 情境一 | 90 秒 | 117 秒 | 176 秒 | 266 秒 |
| 情境二 | 90 秒 | 120 秒 | 180 秒 | 270 秒 |
| 情境三 | 90 秒 | 213 秒 | 320 秒 | 410 秒 |

表 5.14 模擬避難時間表(穿堂層疏散完畢)

| | 探測器+ 人員反應時間 | Simulex 模擬 避難時間 | Simulex 模擬避難 時間×安全係數 | 總計 |
|-----|----------------|--------------------|-------------------------|-------|
| 情境一 | 90 秒 | 183 秒 | 275 秒 | 365 秒 |
| 情境二 | 90 秒 | 233 秒 | 350 秒 | 440 秒 |
| 情境三 | 90 秒 | 50 秒 | 75 秒 | 165 秒 |

表 5.15 模擬避難時間表(總疏散完畢)

| | 探測器+ 人員反應時間 | Simulex 模擬 避難時間 | Simulex 模擬避難 時間×安全係數 | 總計 |
|-----|----------------|--------------------|-------------------------|-------|
| 情境一 | 90 秒 | 268 秒 | 402 秒 | 492 秒 |
| 情境二 | 90 秒 | 314 秒 | 471 秒 | 561 秒 |
| 情境三 | 90 秒 | 213 秒 | 320 秒 | 410 秒 |

表 5.16 模擬避難時間表(NFPA 計算時間)

| | 總計 | 標準 | |
|------------------|-------|------|----|
| NFPA 計算避難時間(月台層) | 178 秒 | 4 分鐘 | 合格 |
| NFPA 計算總避難時間 | 328 秒 | 6 分鐘 | 合格 |

5.3 地下隧道(案例二)

案例二為一地下隧道，總長度為 800 公尺，寬為 12.55 公尺，高為 5.95 公尺。主要出口為隧道內緊急逃生出口，共有三個。

本案例最主要的目的，確保列車在隧道發生火災時，隧道通風系統必須提供緊急排煙功能。使隧道內風速超過臨界風速，方可壓制煙塵擴散，維持人員逃生路徑安全。人員逃生的路線必須與氣流方向相反。本案例所作建立之模型如圖 5.158 所示。

5.3.1 火源設計、煙控設計及相關設定

(1) 火源大小及火災成長模式設定

根據地鐵環境模式(SES)分析，設定在緊急模式狀況時，列車之火災釋熱量為 30MW，火源成長速率採用 Fast 型式，且依據 NFPA92B 火災熱釋放率曲線將隨時間平方成正比，計算出火災開始後約 400 秒，火災熱釋放率將達峯值。

(2) 煙控設備動作流程與排煙設備之設置

在消防安全方面，考量地下隧道發生火災時，濃煙會迅速瀰漫整個地下空間，因此在隧道中會設置隧道通風設備，以保障人員在逃生的路徑上不會受到濃煙的波及。在火災發生後 100 秒時，將啟動隧道兩側通風設備(編

號為 K20 及 K22 通風口，如圖 5.159)，產生一隧道氣流，使風速大於臨界風速，有效抑制煙流擴散。表 5.17 為隧道通風設備設定。

表 5.17 隧道通風設備設定

| | 流入(cms) | 流出(cms) |
|-----|---------|---------|
| K20 | 235.1 | - |
| K22 | - | 214.7 |

(3) 補氣口設計

在隧道火災發生時，除了設置機械式通風設備外，亦設置自然通風口，平時主要引進足夠外氣，稀釋列車所排放的氮氧化物濃度，使隧道及車站的空氣品質合乎要求，同時冷卻列車所散發的熱量，使隧道溫度保持在 40°C 以下；而在火災發生時，能有效的將煙流排至地面空間。本案例在此隧道有一自然通風口通往地面，編號為 K21 自然通風口。

5.3.2 FDS 模擬情境設定

本案例主要分析在有無隧道通風對人員逃生的影響，驗證煙控系統性能的可靠性。共分為兩種情境，火源大小及位置設定皆相同，主要在情境二增加隧道通風設備的影響。量測點平均分布於地面 1.8 公尺處，如圖 5.160 所示。模擬情境及相關參數設定如表 5.18~表 5.19 所示。

表 5.18 隧道模擬情境

| | 火源大小 | 燃燒速率 | 火源位置 | 通風設計 |
|-----|------|------|----------------------|---------------------|
| 情境一 | 30MW | Fast | K22 通風口西側 199 公尺處 | 無 |
| 情境二 | 30MW | Fast | K22 通風口西側 199 公尺處 | 啟動 K20 及 K22 通風口 |

表 5-19 模擬情境之各項參數

| 設定條件 | 設定值 | 說明 |
|----------|-------|------------------------------------|
| 起始溫度 | 35°C | 正常狀態下隧道溫度不超過 40°C |
| 火載量 | 30MW | 本案例火源假設最大熱釋放率為 30MW，燃燒面積為 3m x 3m。 |
| 火源成長模式 | Fast | 計算火災後 400 秒，熱釋放率達最大值。 |
| 隧道通風啟動時間 | 100 秒 | 根據 SES 分析設定，火災後 100 秒啟動隧道通風。 |
| 自然補氣口 | K21 | 考慮火災發生時現場實際開口換氣條件 |
| 模擬時間 | 600 秒 | 模擬時間為 600 秒。 |

5.3.3 FDS 模擬結果

(一) 情境一模擬結果

(1) 溫度分析

就火災發生後，空間溫度之分佈情形，我們以垂直地面溫度分佈圖(圖

5.161 至圖 5.166)來作說明。

當火災發生時，未運轉隧道通風設備，火場因溫度升高，熱煙自然往兩側擴散，由於無法控制氣流流動的方向，故使人員在逃生的過程中造成危害。

(2) 煙流分析

當火災發生後，由煙流分佈圖(圖 5.167 至圖 5.172)來作說明，可以發現煙會往隧道兩側擴散，600 秒時，在 K21 通風口右側煙已經佈滿整個空間，因煙流會從 K21 向外排出，故對 K21 通風口左側段不會造成影響。

(二) 情境二模擬結果

(1) 溫度分析

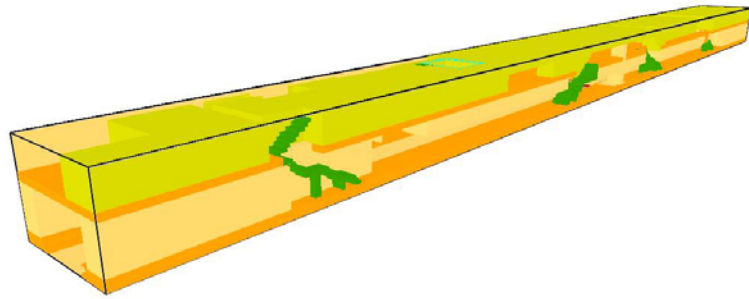
就火災發生後，空間溫度之分佈情形，我們以垂直地面溫度分佈圖(圖 5.173 至圖 5.178)來作說明。

當火災發生時，隧道通風設備在 100 秒時，通風模式達到設定風量，運轉產生一定的風速向右，使煙流方向改變，由溫度分佈圖來看，在火源右側溫度超過標準值之外，火源左側溫度因受通風設備影響，溫度擴散比較慢，故有增長人員在逃生的時間。

(2) 煙流及速度場分析

由煙流分佈圖(圖 5.179 至圖 5.184)來作說明，在火災初期，煙往兩側擴散，當啟動隧道排煙設備後，可以發現煙會往隧道另一段流動，在 600 秒時，在火源右側段煙已經佈滿整個空間，但對於左側人員逃生的路徑上，不會影響到人員的安全。

由量測點分析，隧道內在排煙設備啟動後，產生的隧道氣流風速為 3.57m/s。



mesh: 1

圖 5.1 車站模型



圖 5.2(a) 穿堂層防煙區劃圖

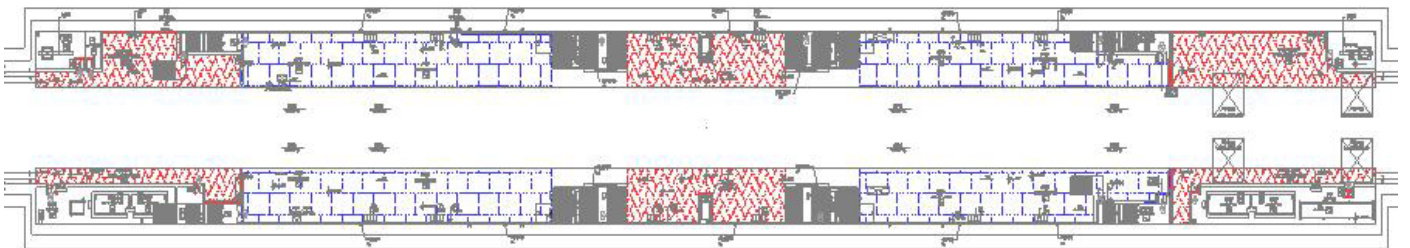


圖 5.2(b) 月台層防煙區劃圖

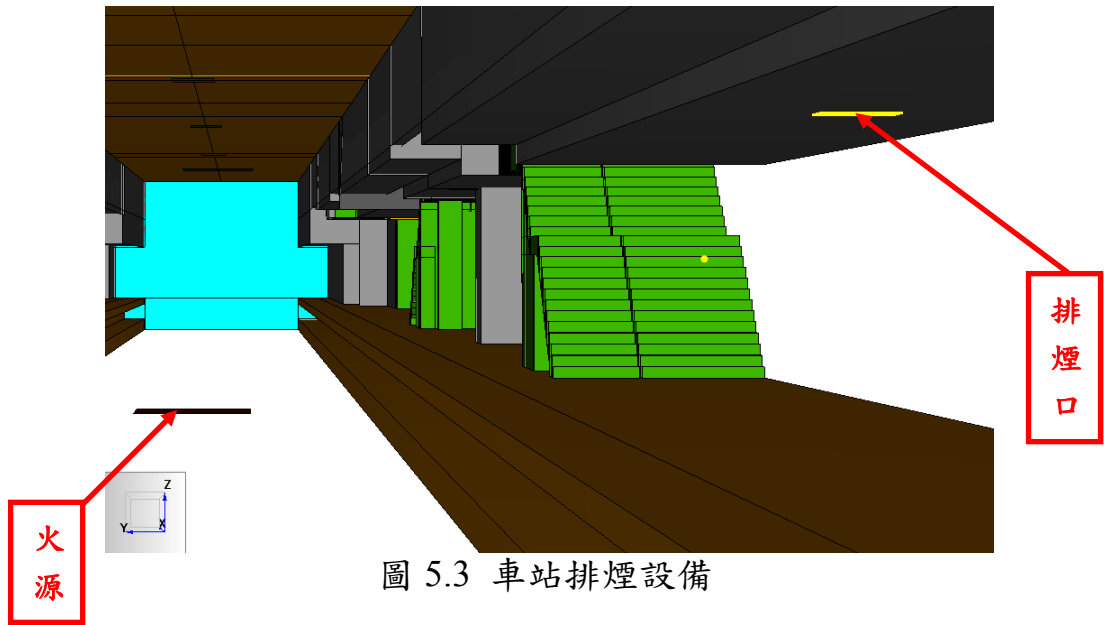


圖 5.3 車站排煙設備

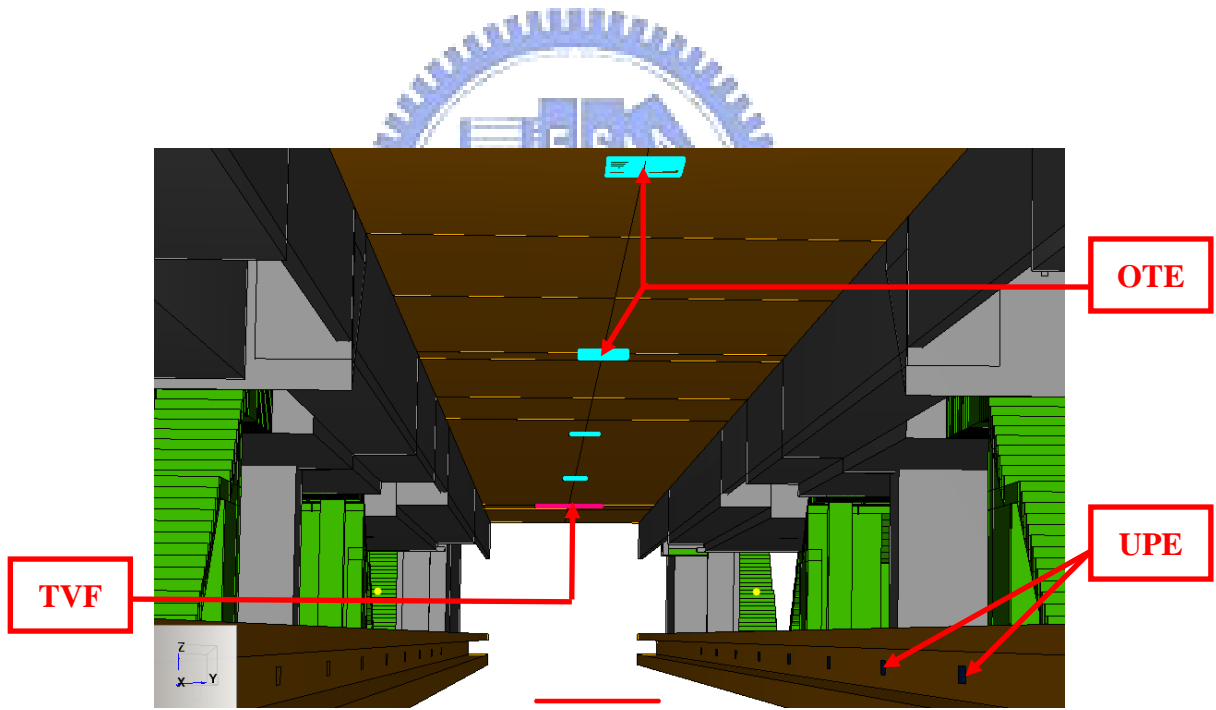
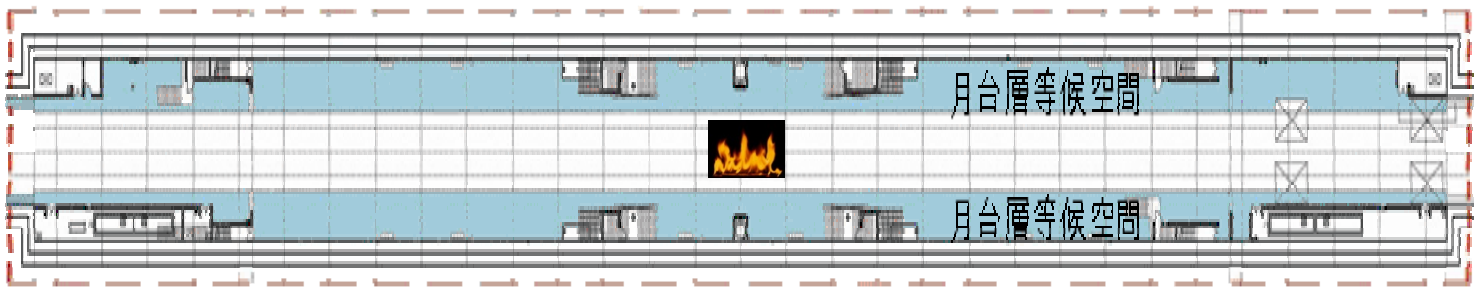
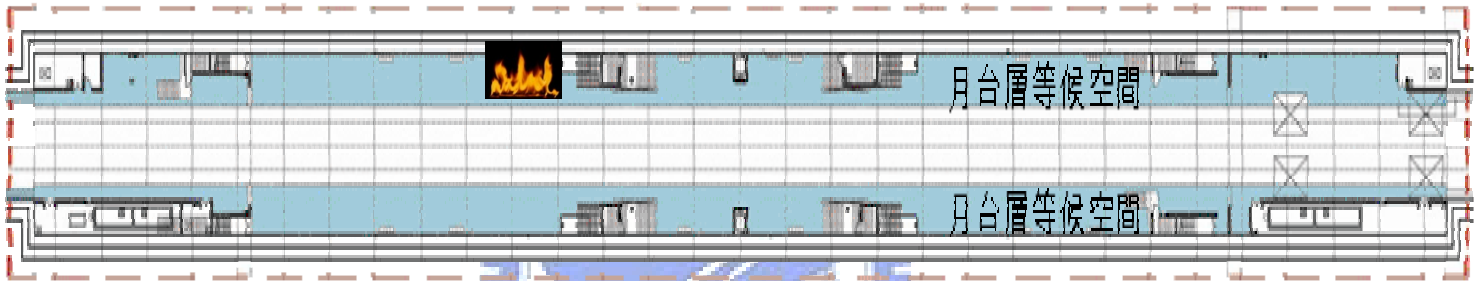


圖 5.4 軌道上、下方排氣系統



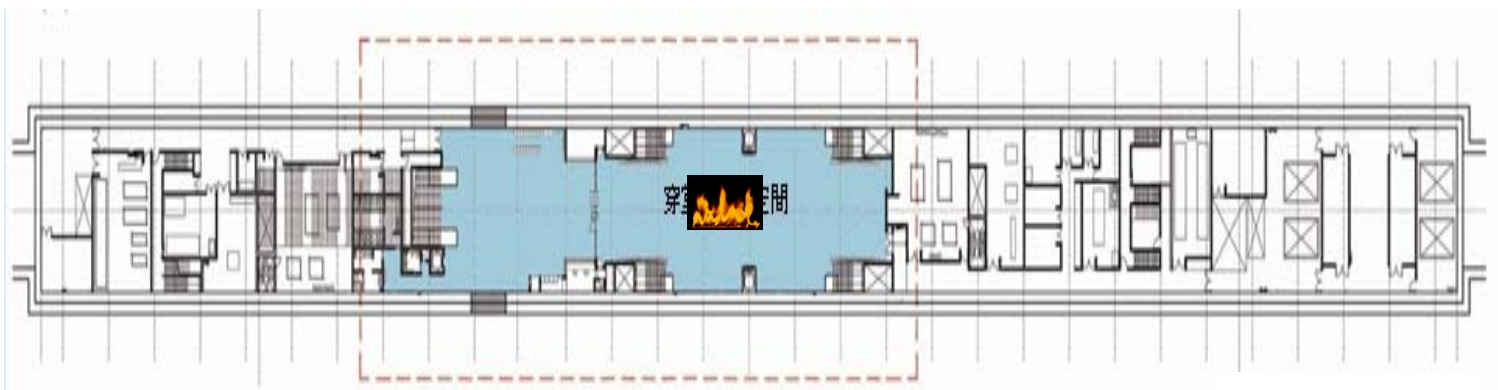
月台層

圖 5.5(a) 火源位置 I



月台層

圖 5.5(b) 火源位置 II



穿堂層

圖 5.5(c) 火源位置 III

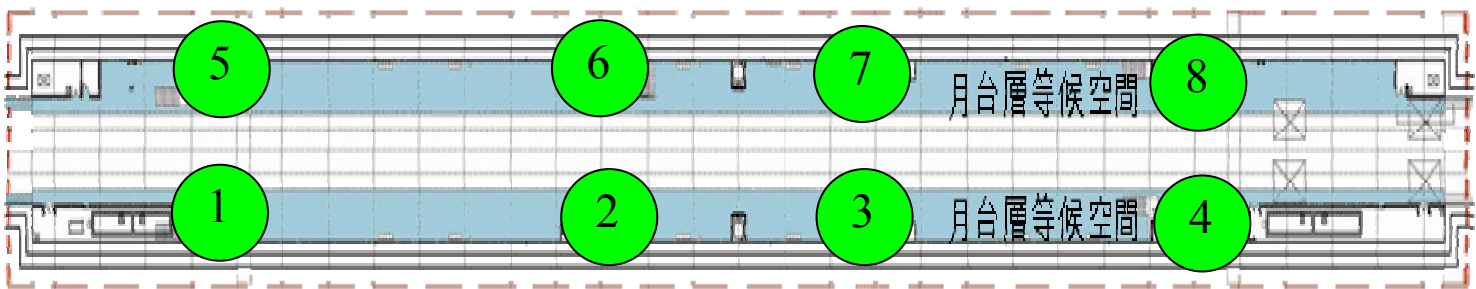


圖 5.6(a) 月台層量測點位置

月台層

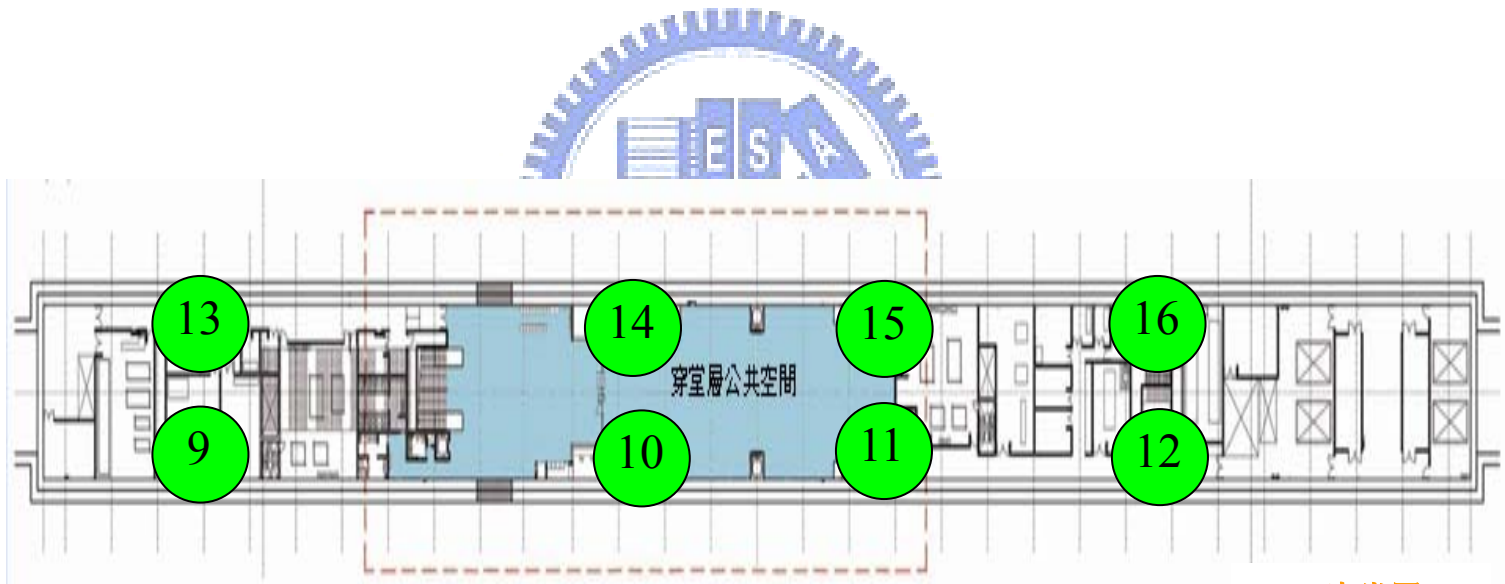


圖 5.6(b) 穿堂層量測點位置

穿堂層

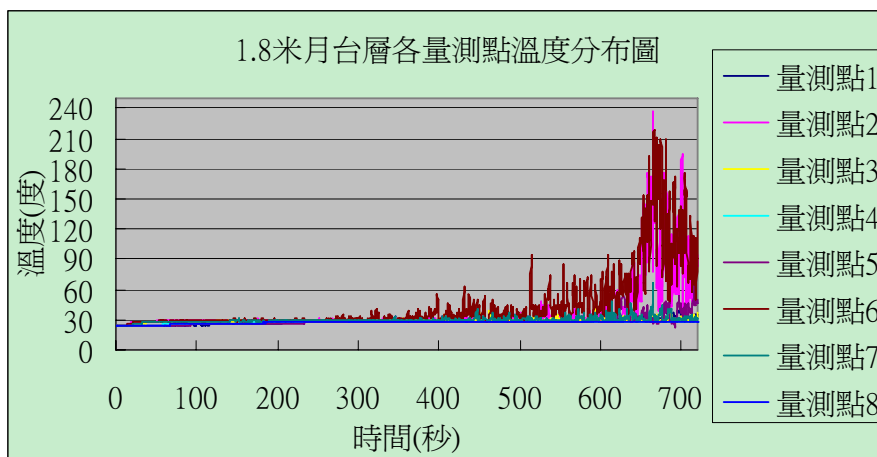


圖 5.7 月台層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境一)

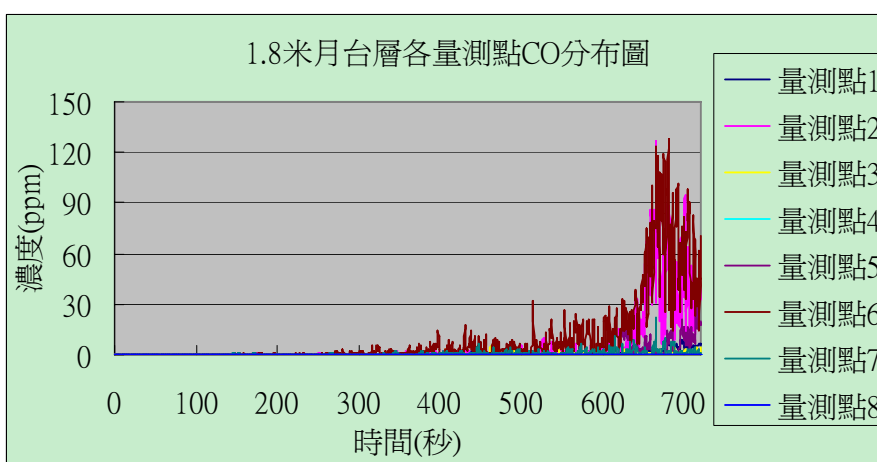


圖 5.8 月台層 1.8 米高度 CO 分佈圖(情境一)

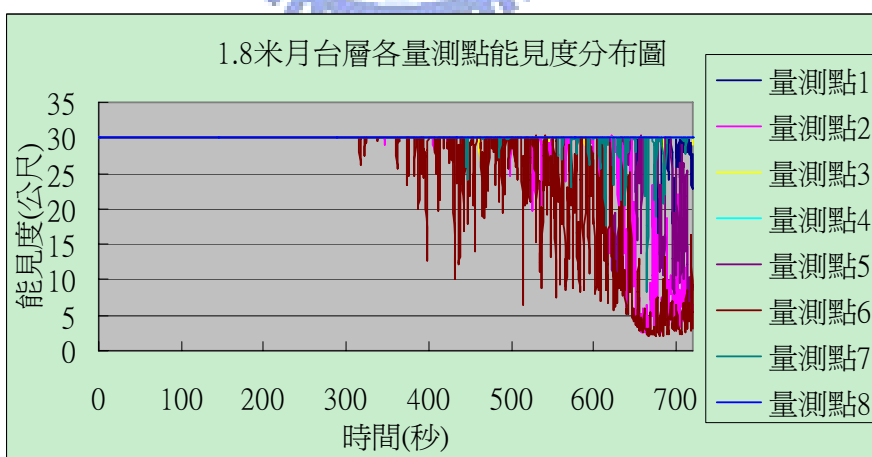


圖 5.9 月台層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境一)

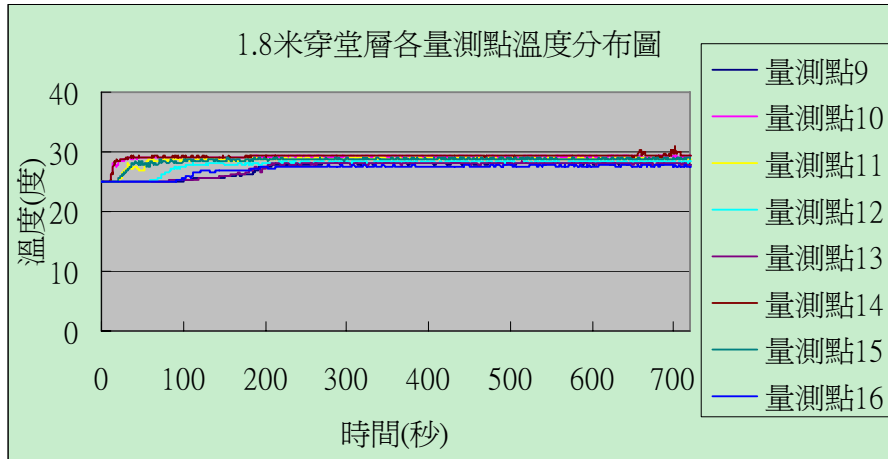


圖 5.10 穿堂層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境一)

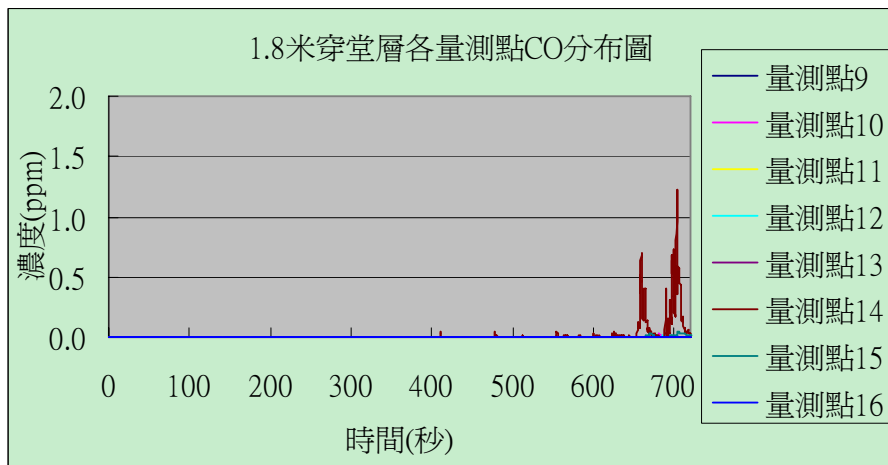


圖 5.11 穿堂層 1.8 米高度 CO 分佈圖(情境一)

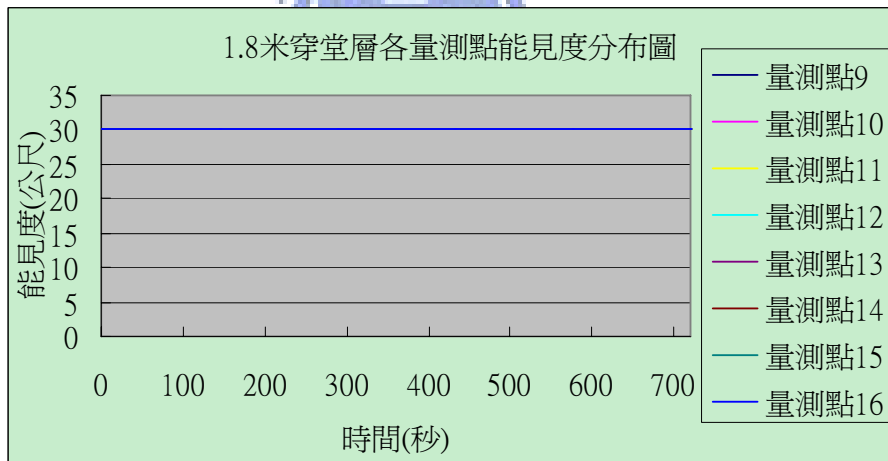


圖 5.12 穿堂層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境一)

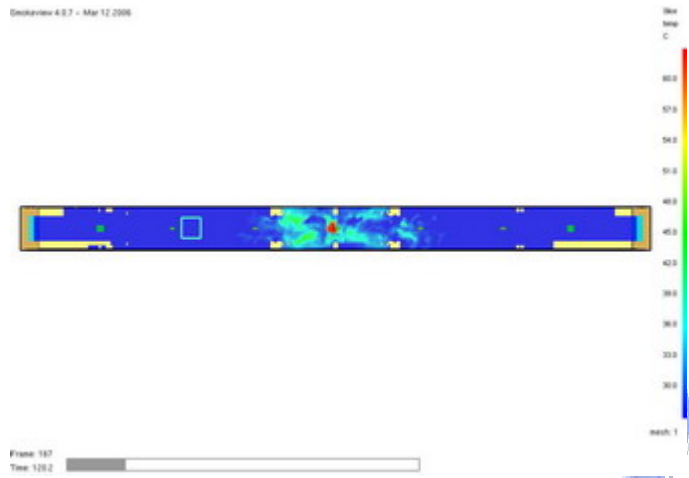


圖 5.13 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

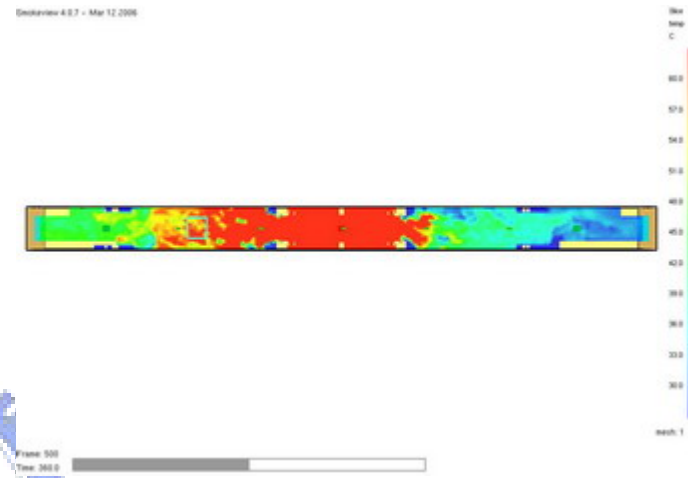


圖 5.15 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

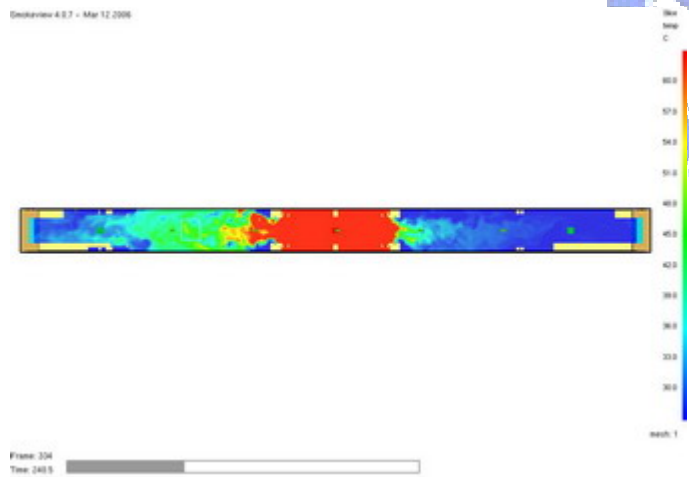


圖 5.14 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

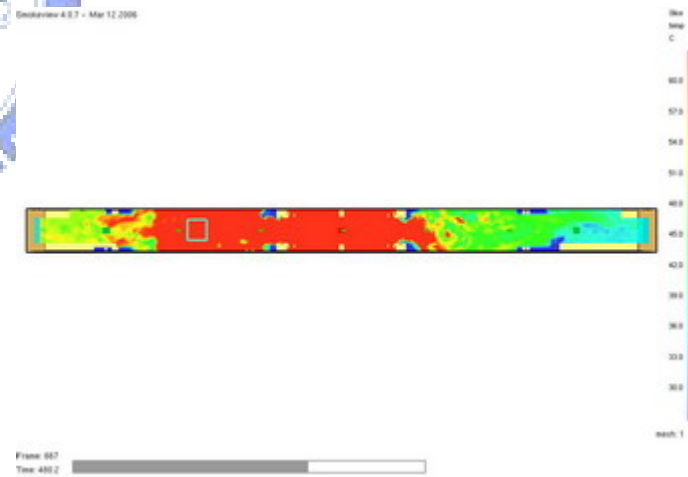


圖 5.16 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

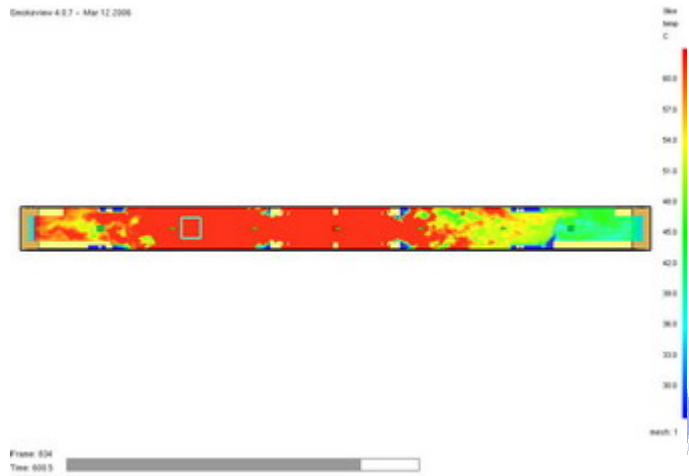


圖 5.17 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

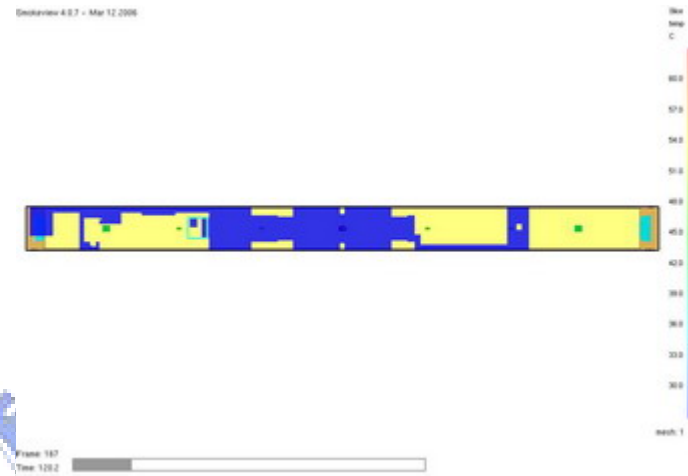


圖 5.19 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

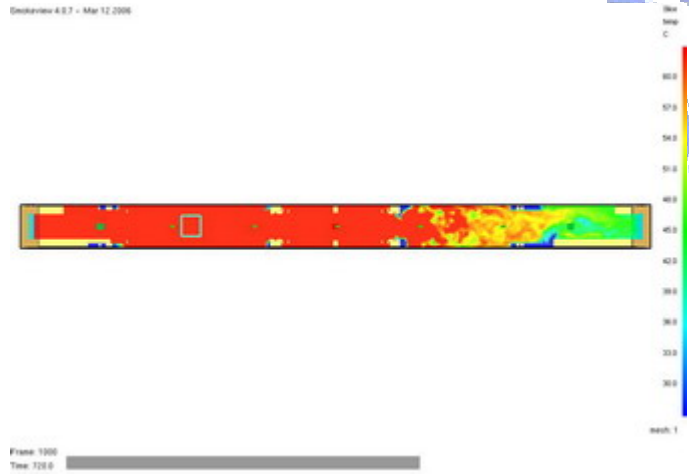


圖 5.18 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

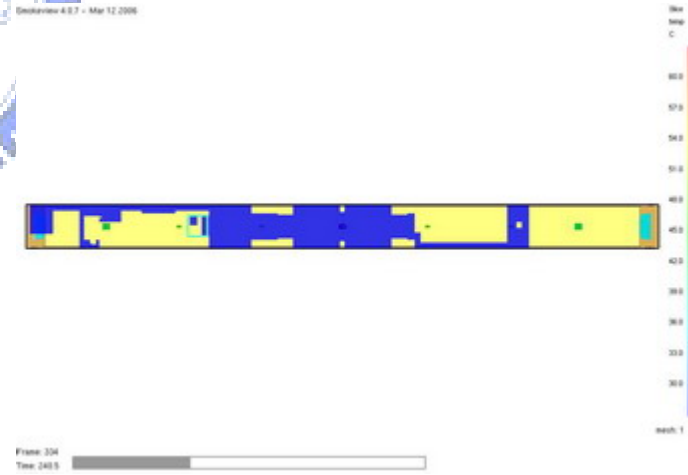


圖 5.20 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

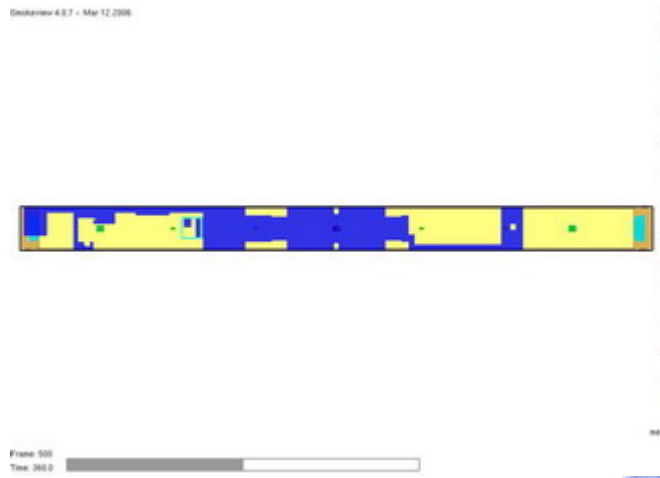


圖 5.21 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

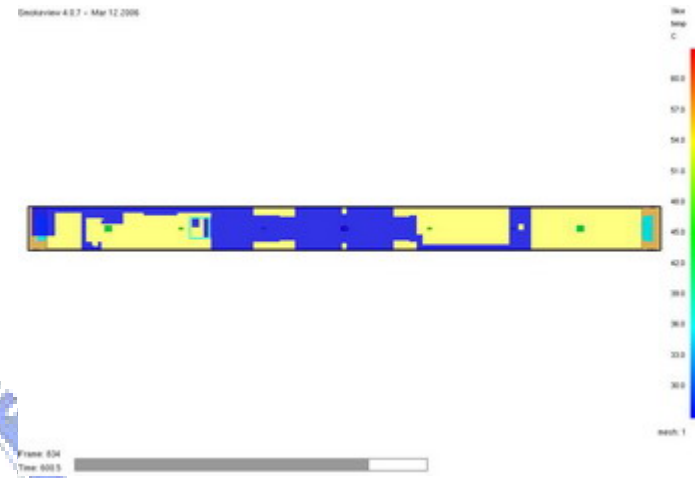


圖 5.23 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

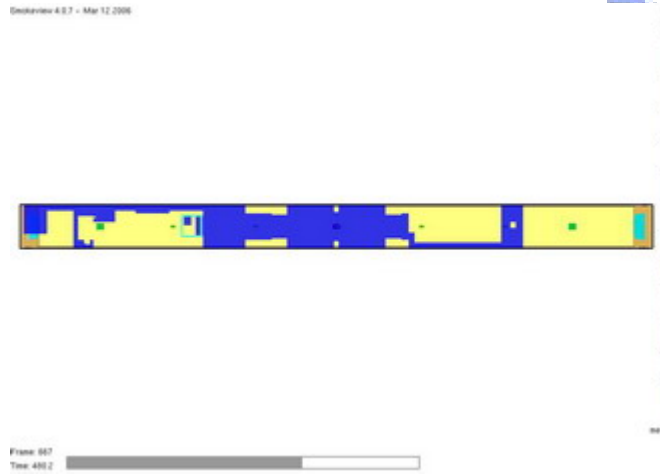


圖 5.22 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)



圖 5.24 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境一)

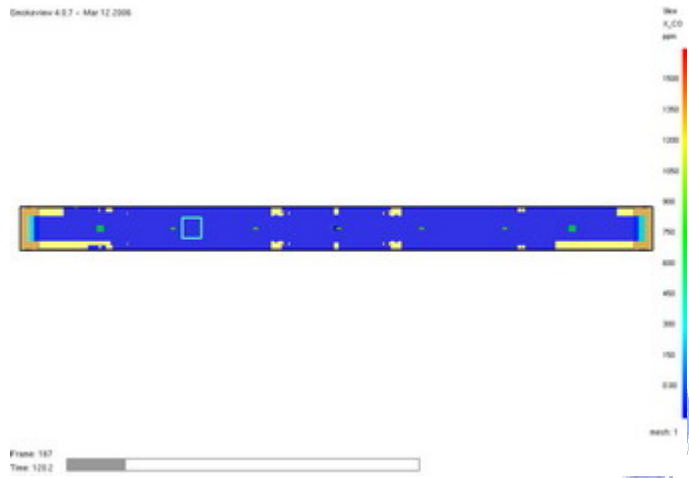


圖 5.25 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

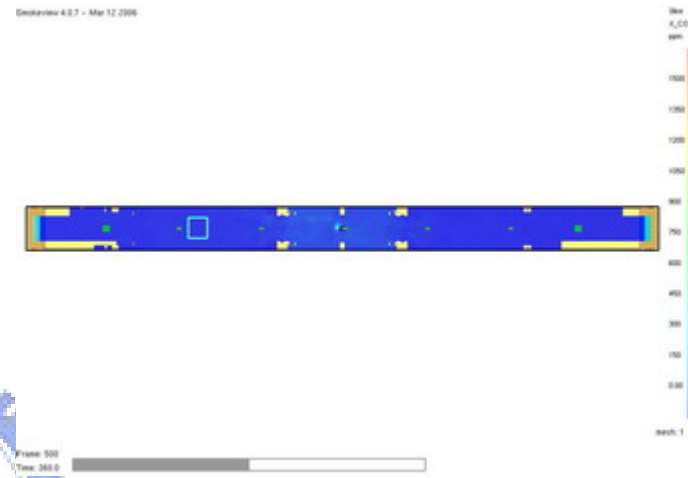


圖 5.27 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

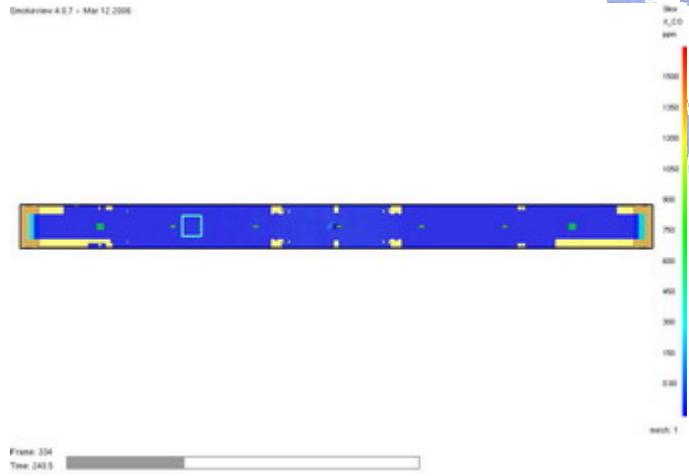


圖 5.26 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

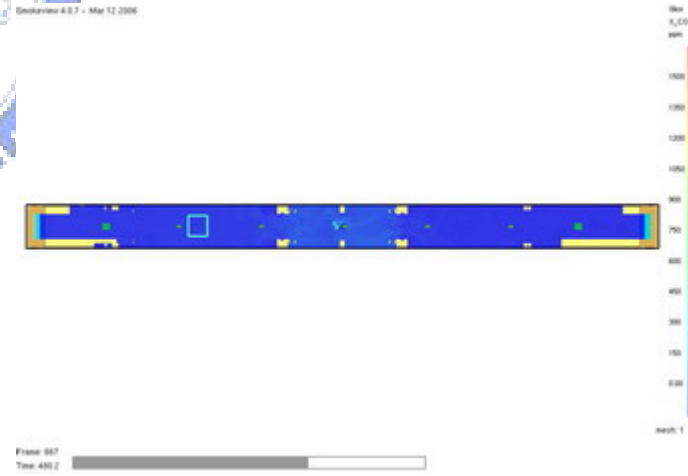


圖 5.28 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

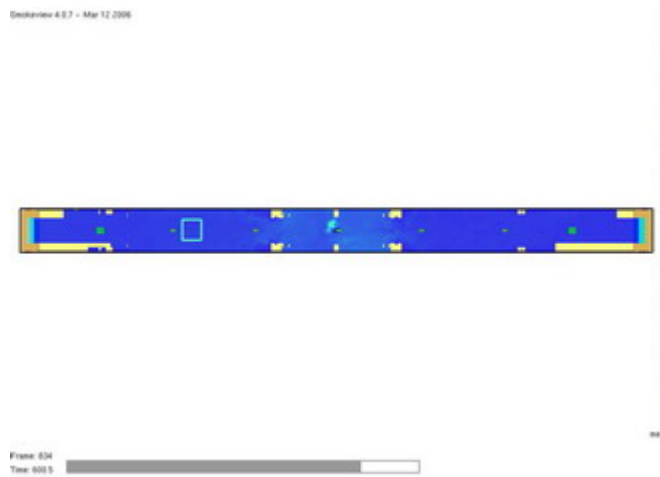


圖 5.29 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

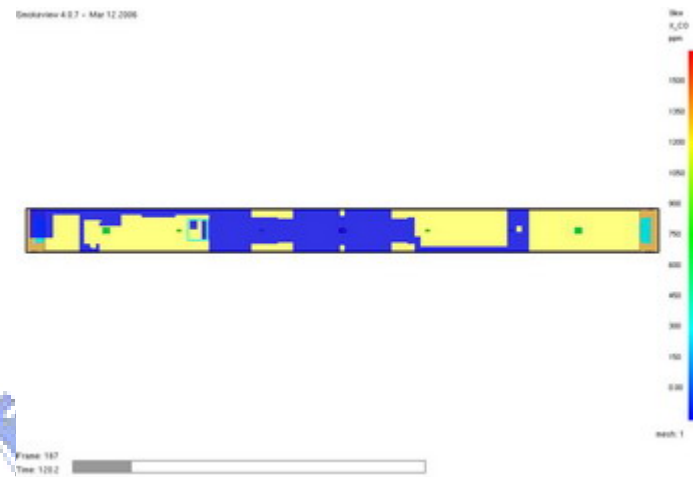


圖 5.31 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

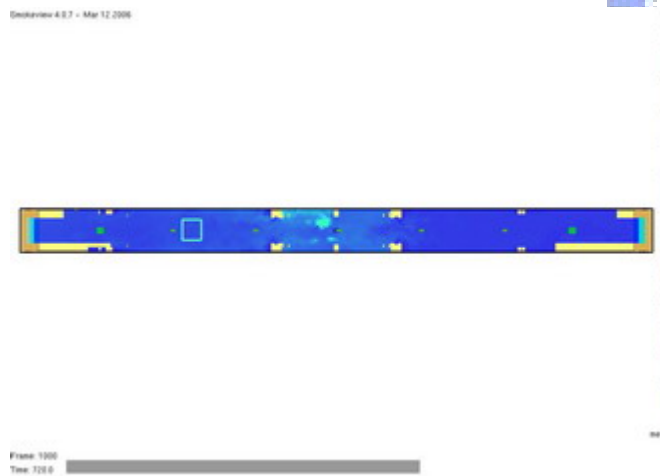


圖 5.30 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

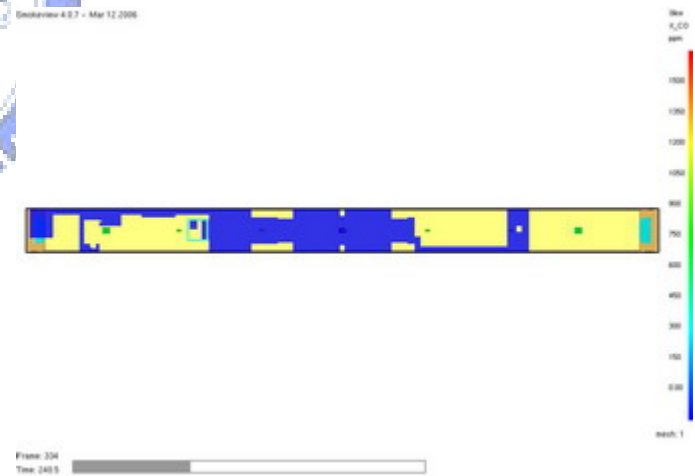


圖 5.32 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

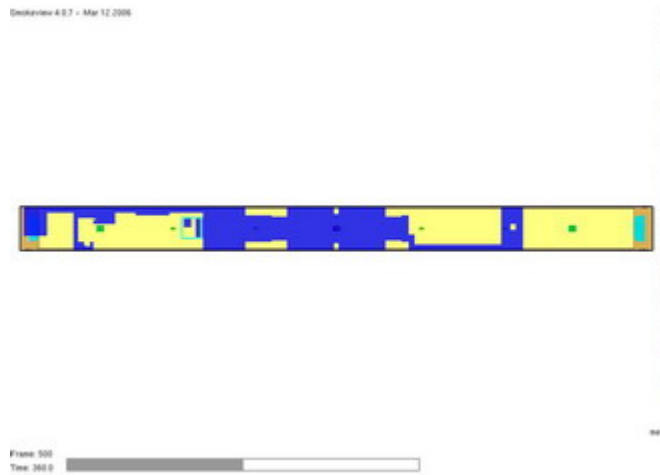


圖 5.33 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

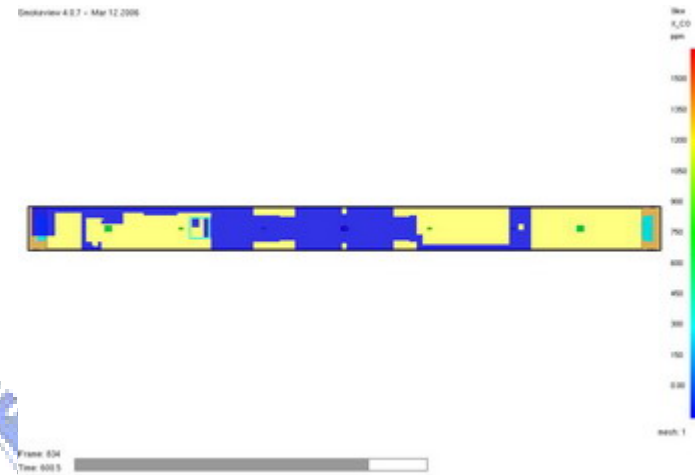


圖 5.35 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

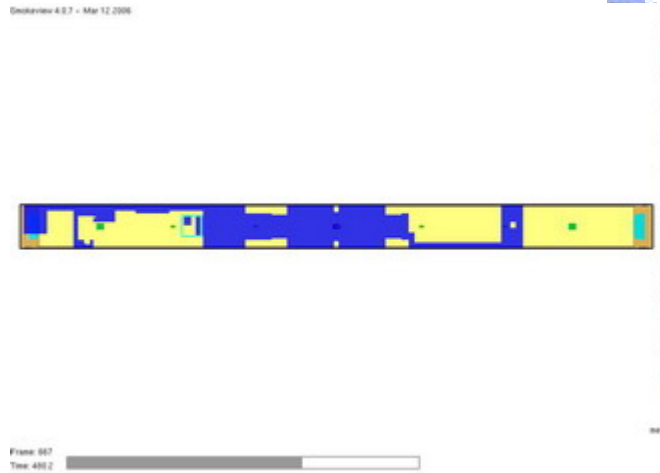


圖 5.34 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

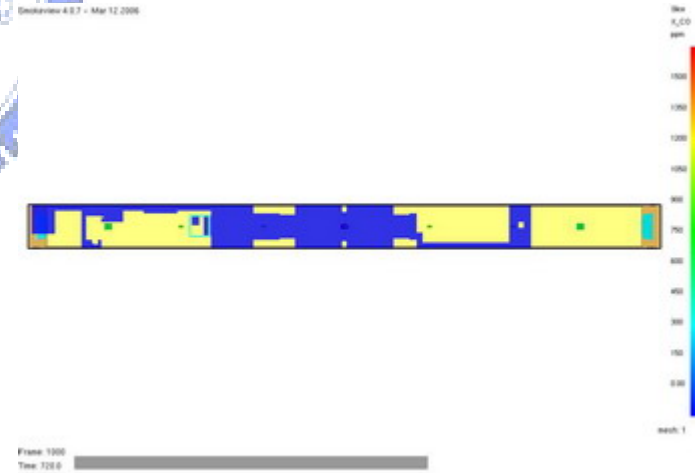


圖 5.36 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境一)

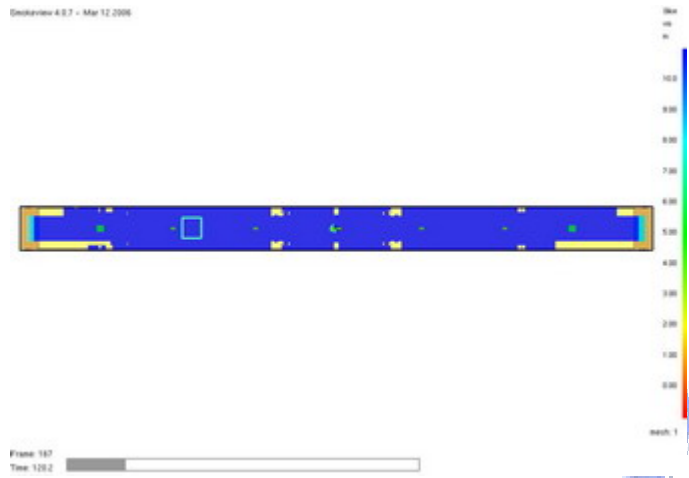


圖 5.37 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

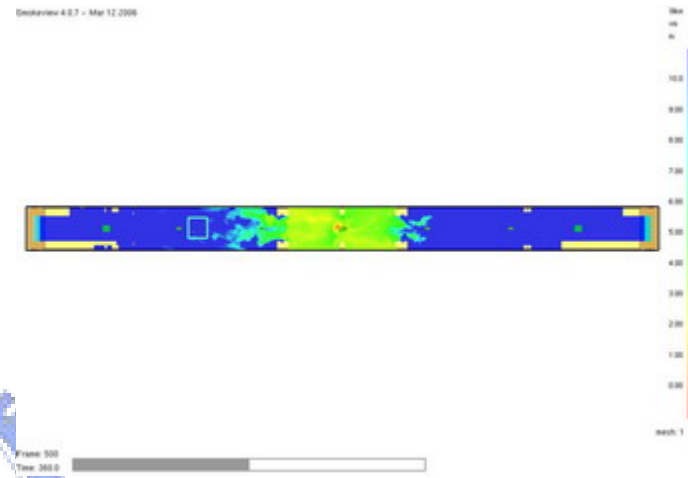


圖 5.39 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

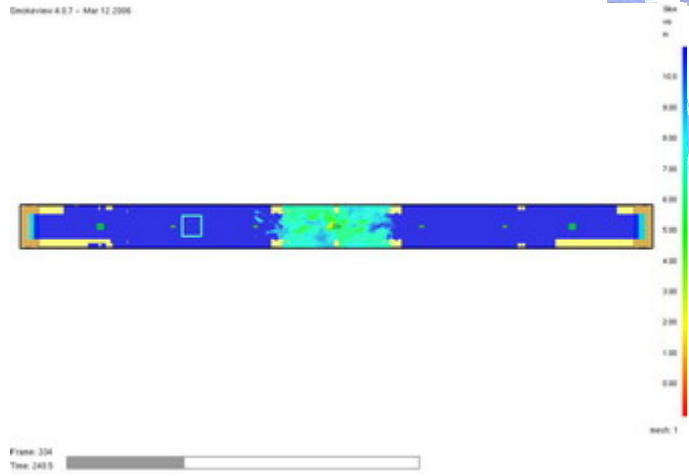


圖 5.38 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

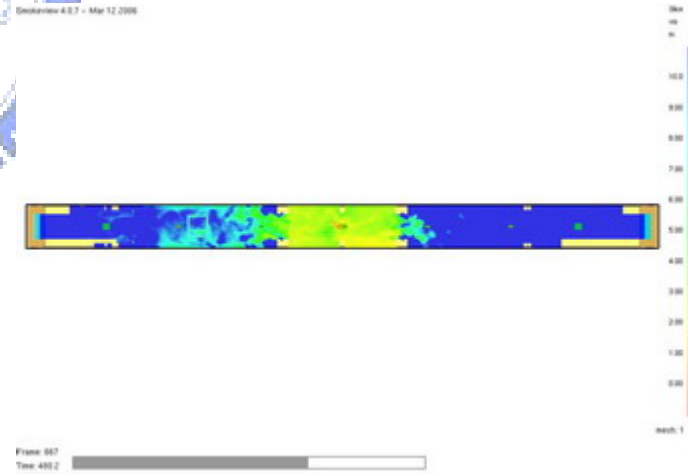


圖 5.40 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

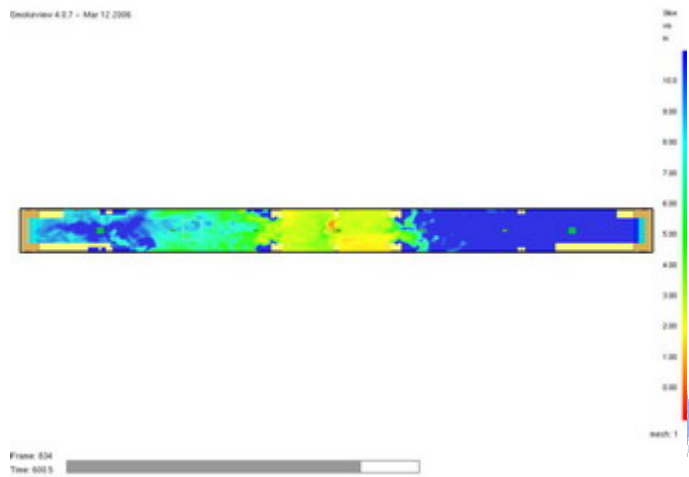


圖 5.41 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

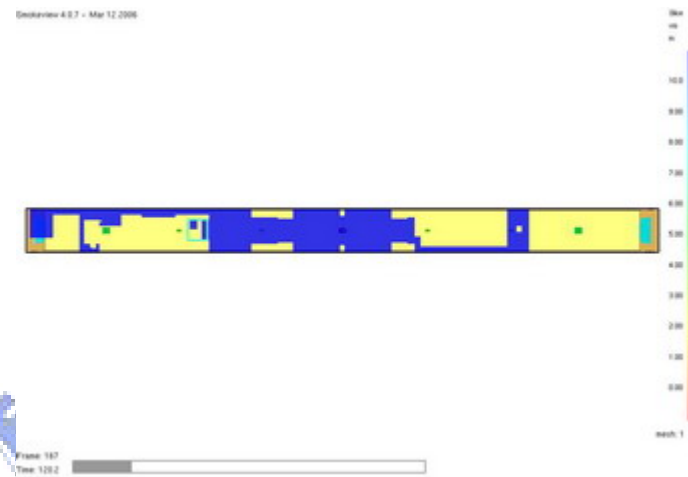


圖 5.43 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

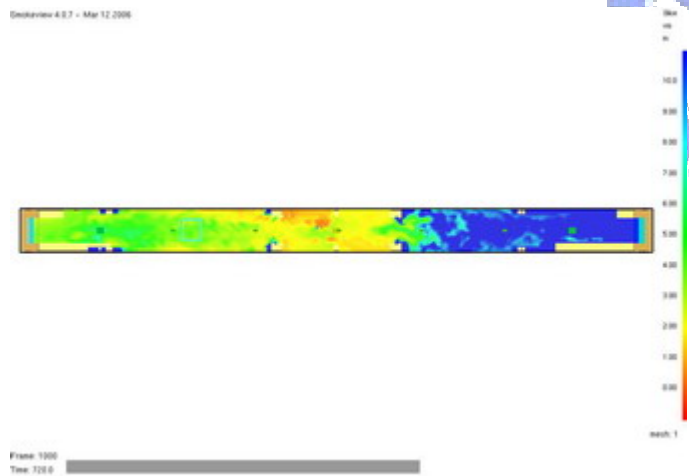


圖 5.42 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

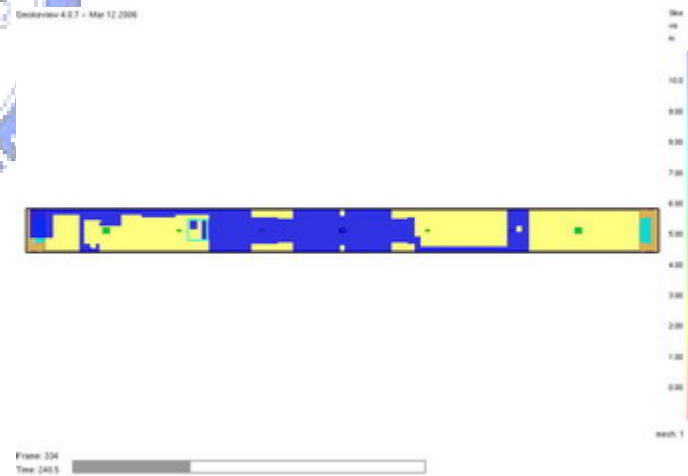


圖 5.44 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)



圖 5.45 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

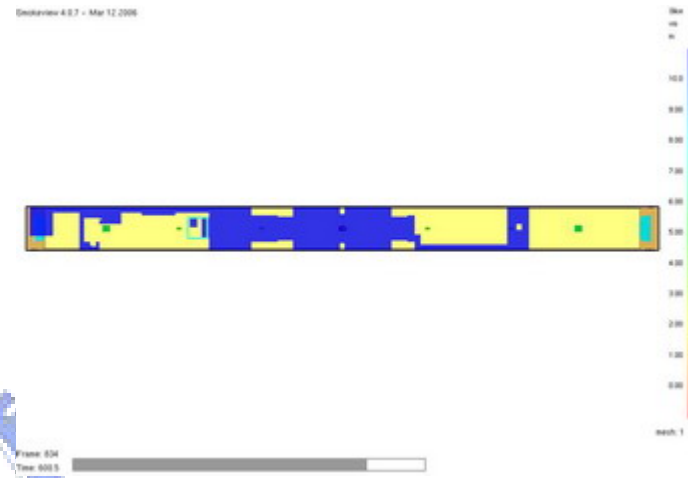


圖 5.47 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)



圖 5.46 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)

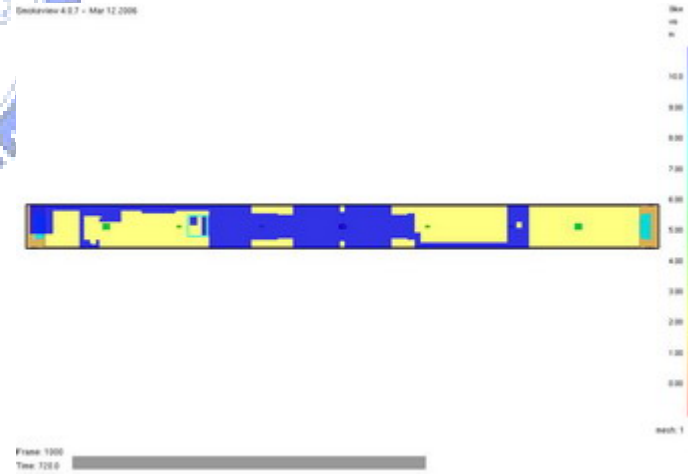


圖 5.48 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境一)



圖 5.49 t=120 秒 煙流分佈圖(情境一)

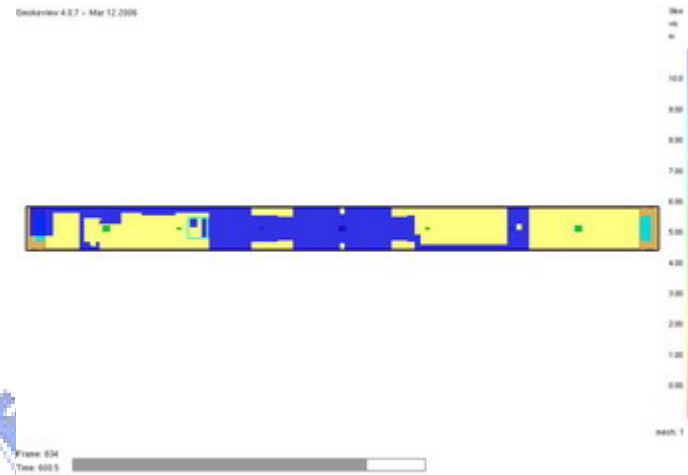


圖 5.51 t=360 秒 煙流分佈圖(情境一)

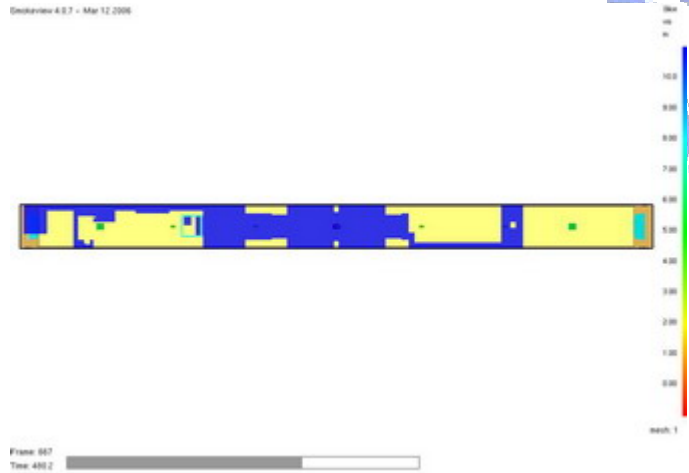


圖 5.50 t=240 秒 煙流分佈圖(情境一)

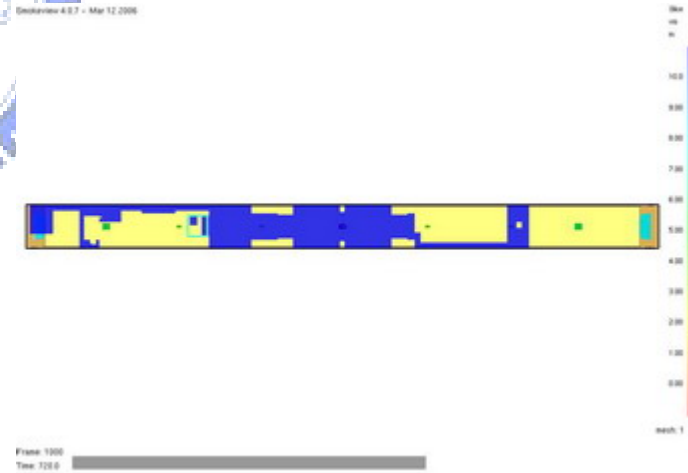


圖 5.52 t=480 秒 煙流分佈圖(情境一)

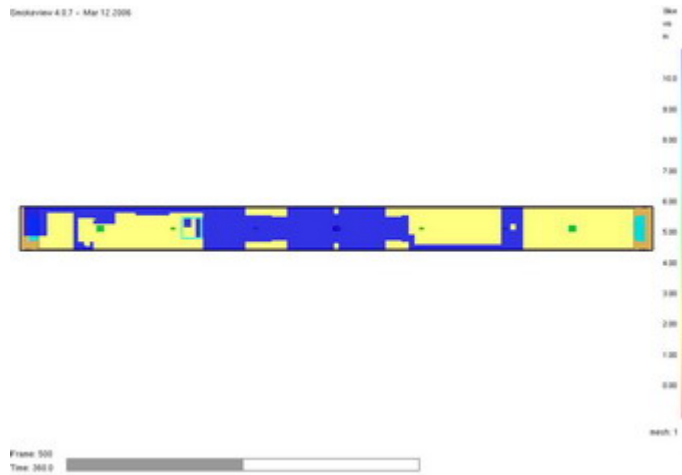


圖 5.53 t=600 秒 煙流分佈圖(情境一)

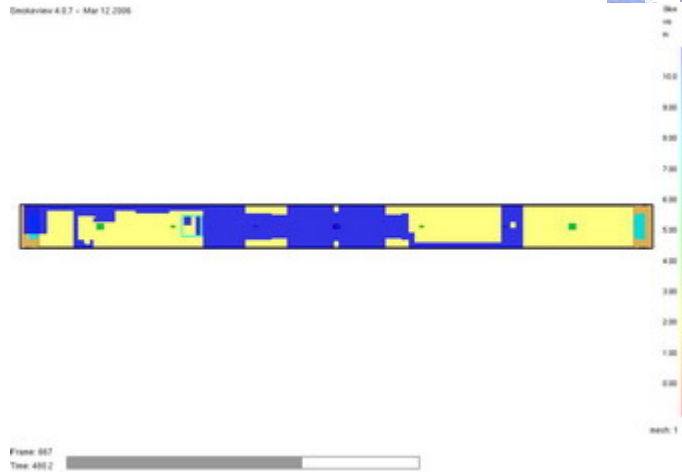


圖 5.54 t=720 秒 煙流分佈圖(情境一)

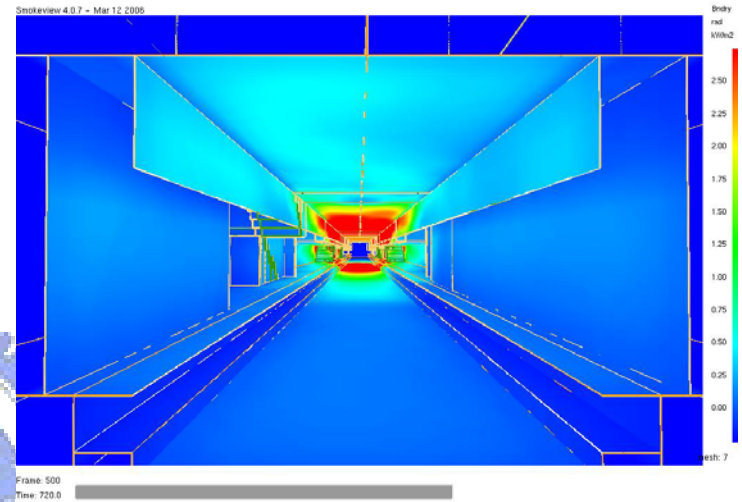


圖 5.55 熱輻射分佈圖(情境一)

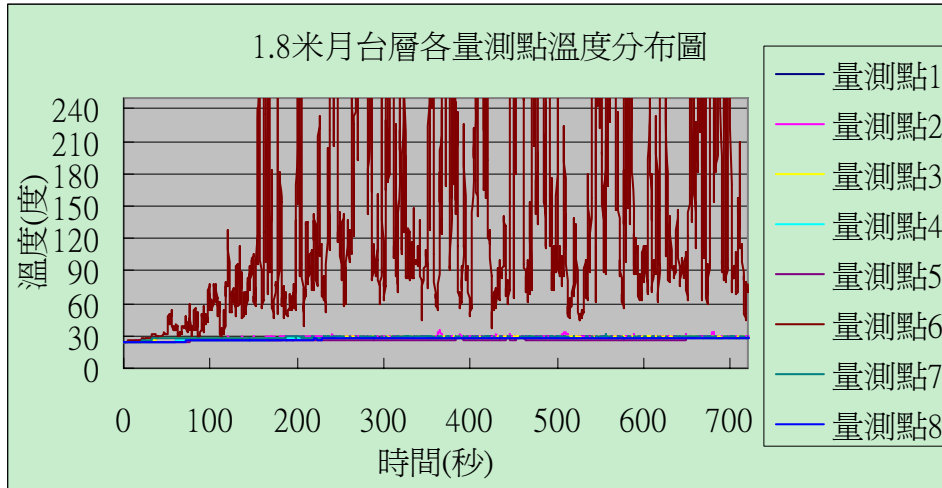


圖 5.56 月台層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境二)

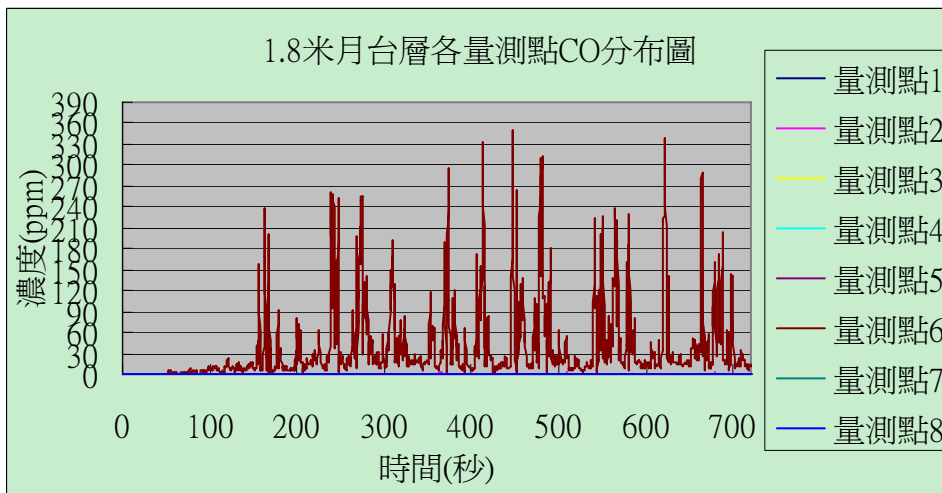


圖 5.57 月台層 1.8 米高度 CO 分佈圖(情境二)

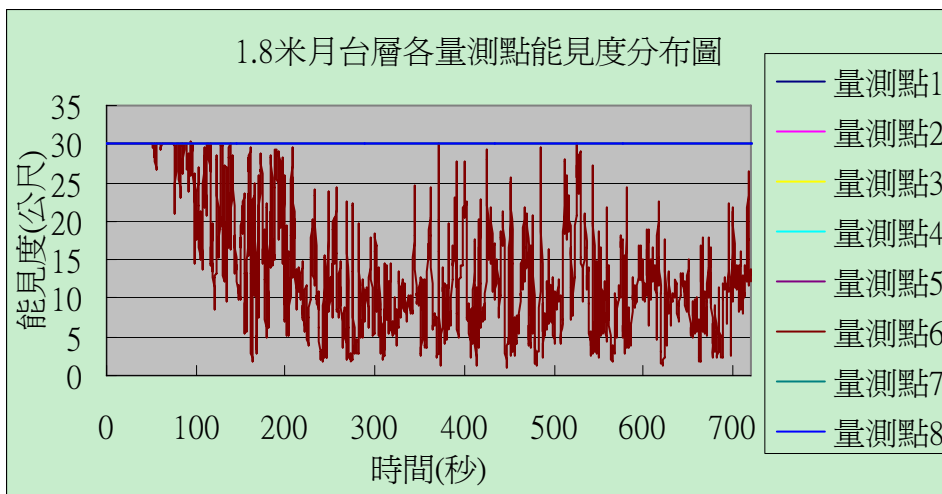


圖 5.58 月台層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境二)

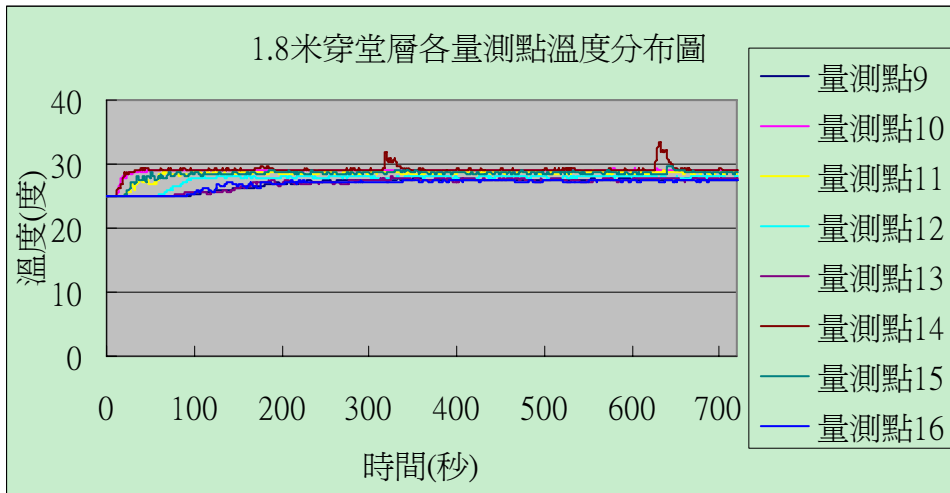


圖 5.59 穿堂層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境二)

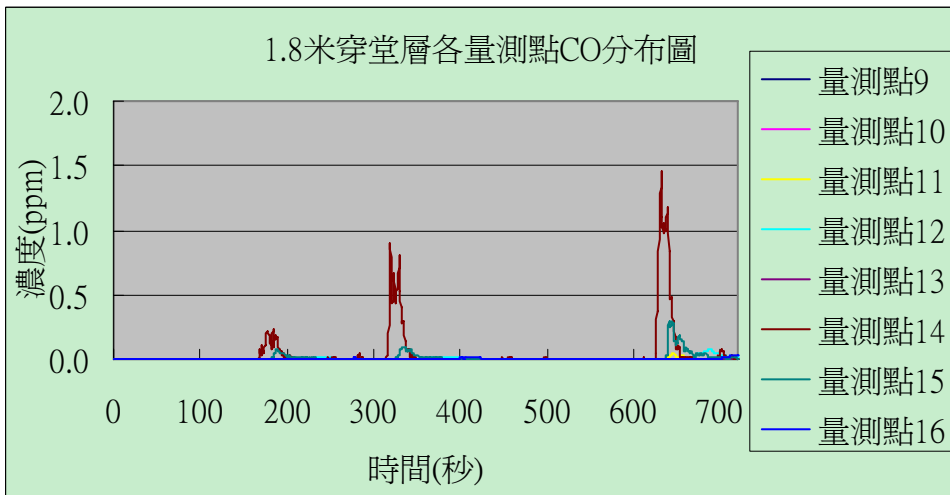


圖 5.60 穿堂層 1.8 米高度 CO 分佈圖(情境二)

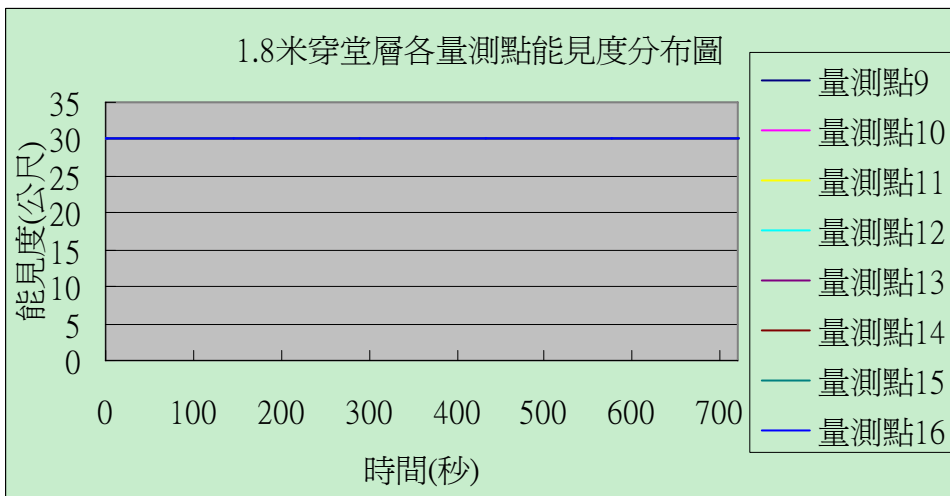


圖 5.61 穿堂層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境二)

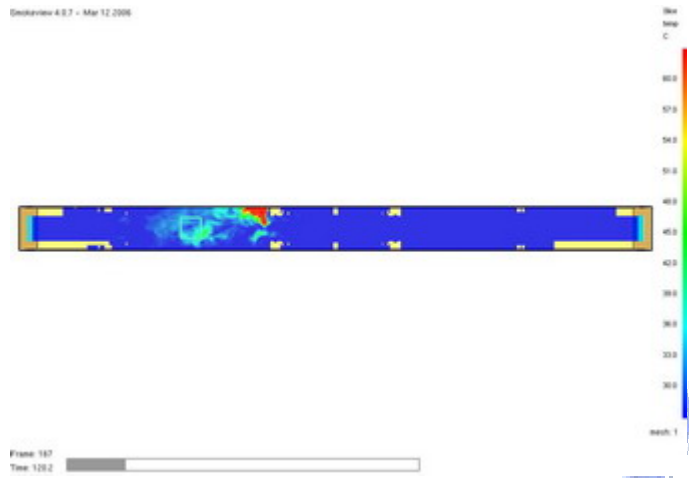


圖 5.62 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

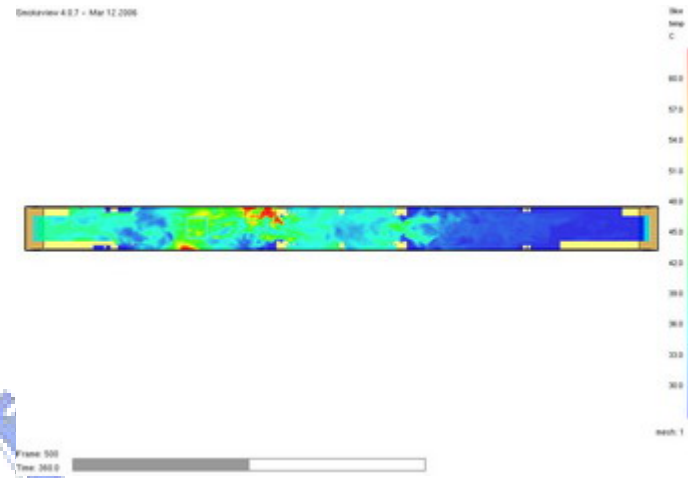


圖 5.64 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

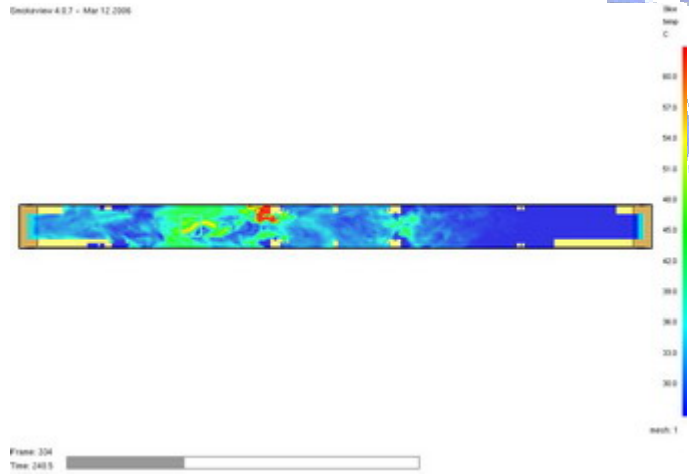


圖 5.63 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

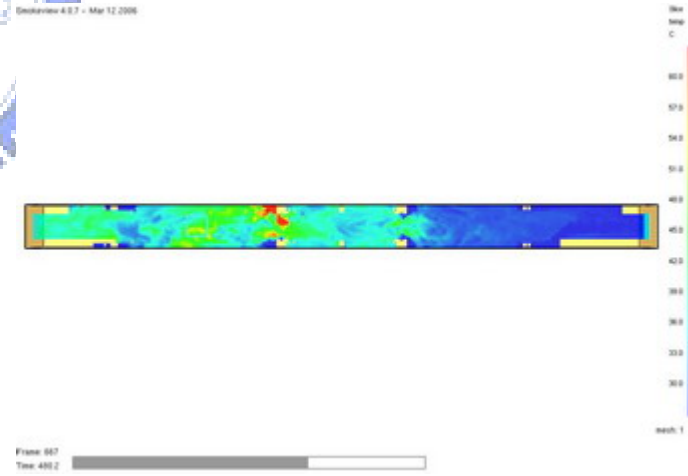


圖 5.65 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

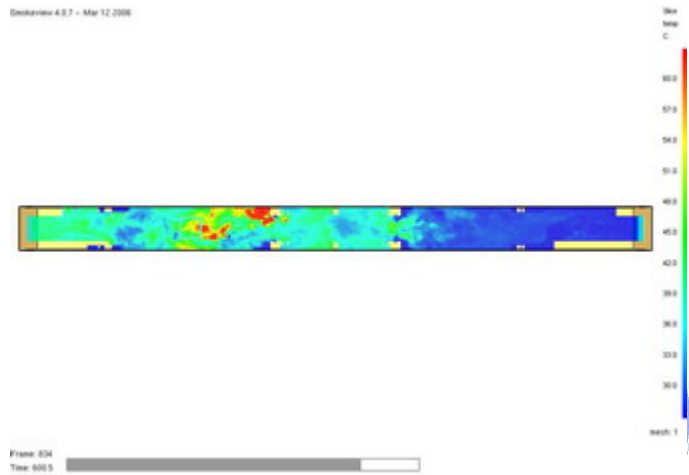


圖 5.66 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

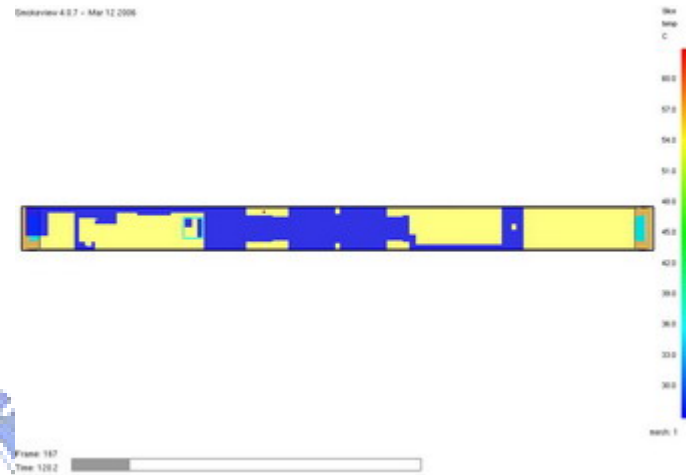


圖 5.68 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

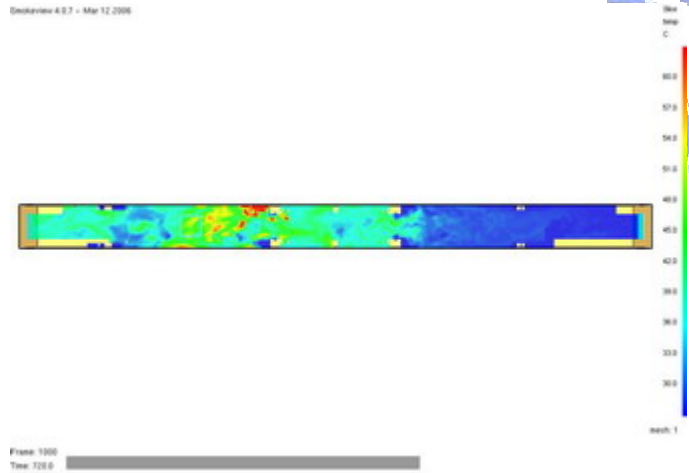


圖 5.67 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

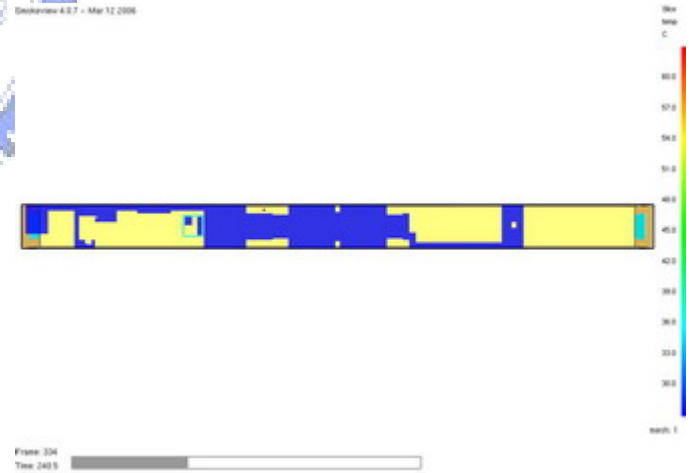


圖 5.69 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

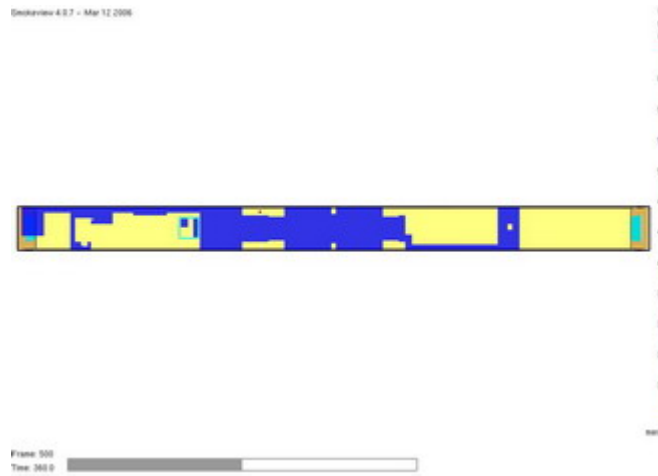


圖 5.70 $t=360$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

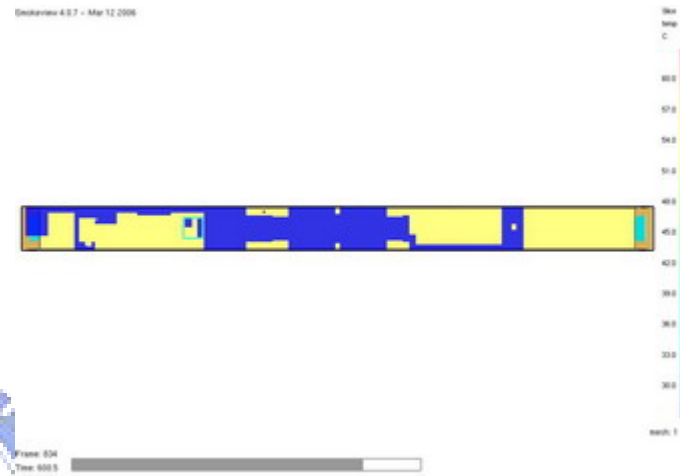


圖 5.72 $t=600$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

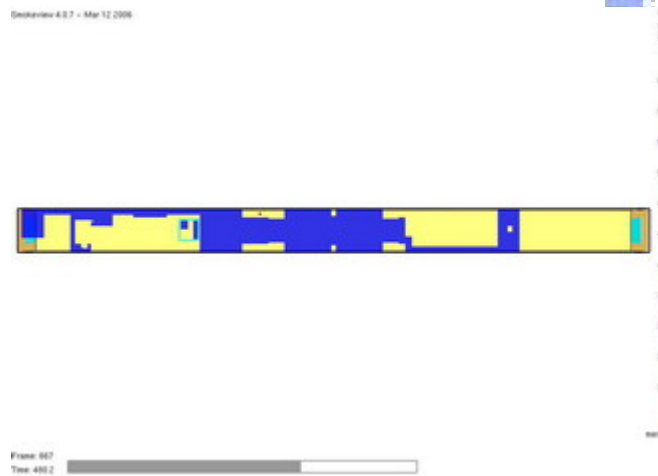


圖 5.71 $t=480$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

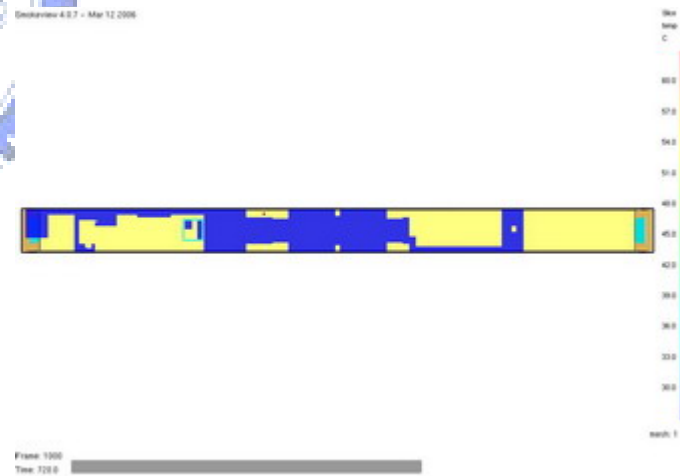


圖 5.73 $t=720$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境二)

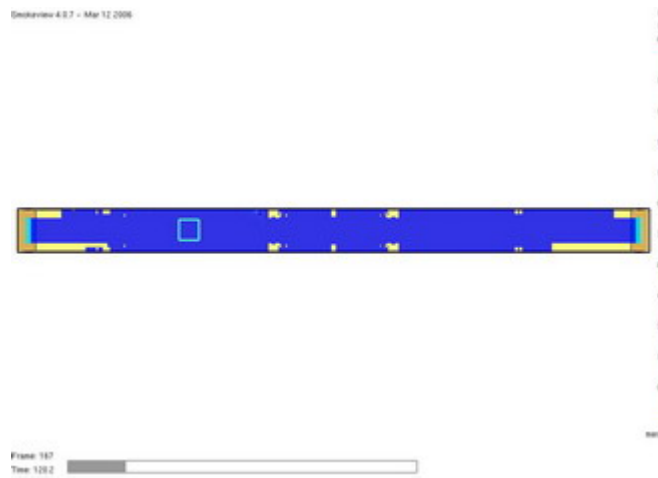


圖 5.74 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

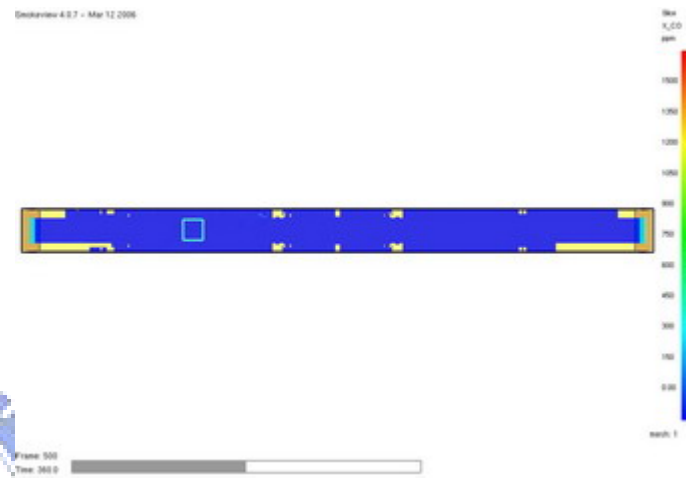


圖 5.76 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

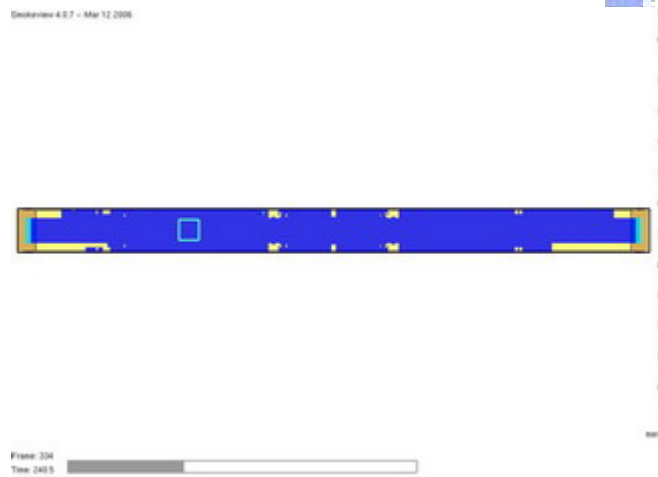


圖 5.75 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

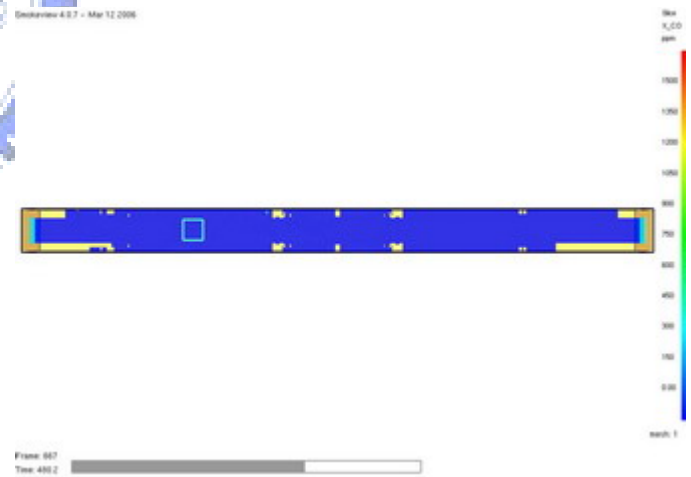


圖 5.77 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

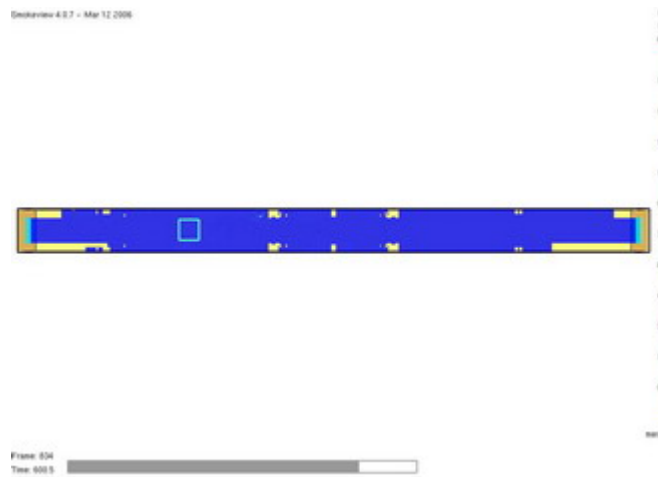


圖 5.78 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

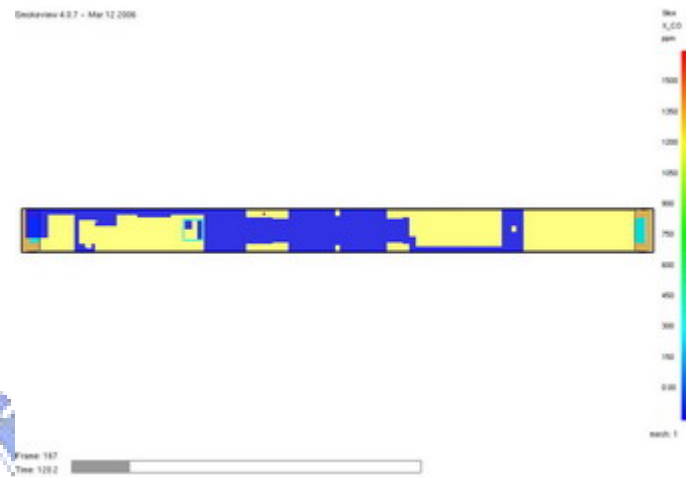


圖 5.80 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

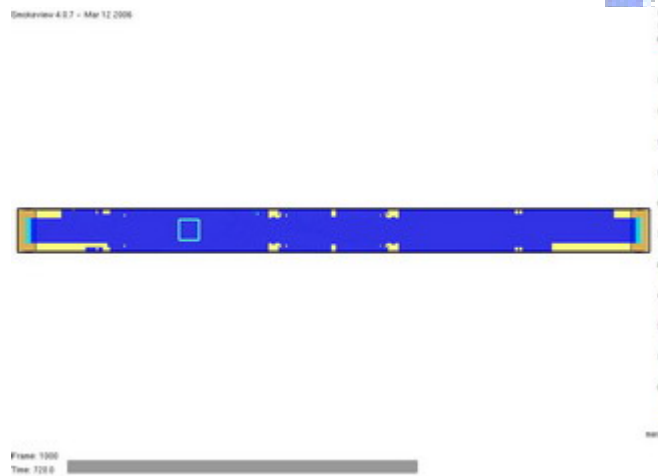


圖 5.79 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)



圖 5.81 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

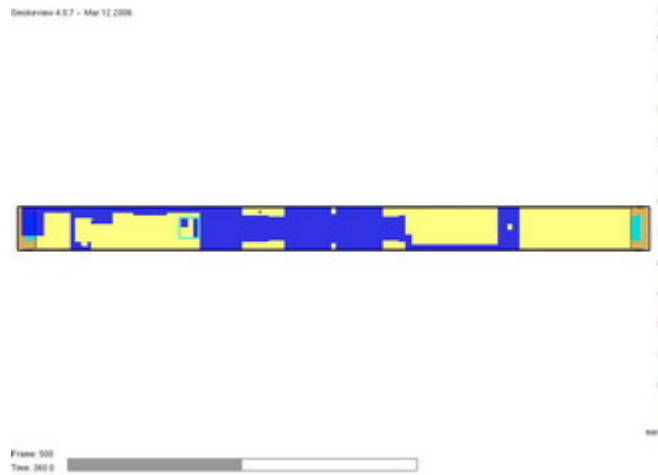


圖 5.82 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

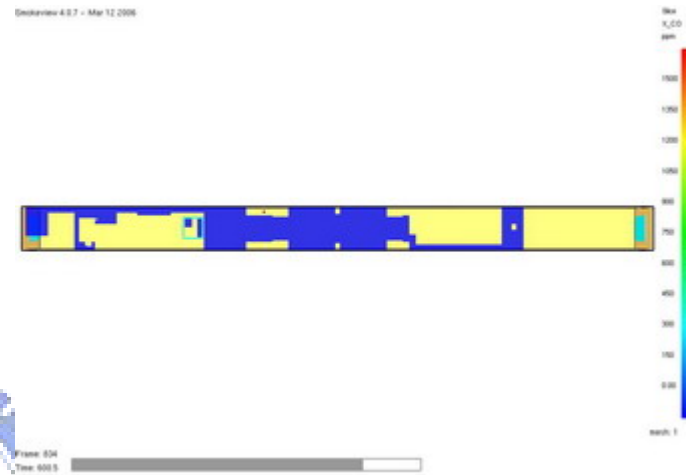


圖 5.84 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

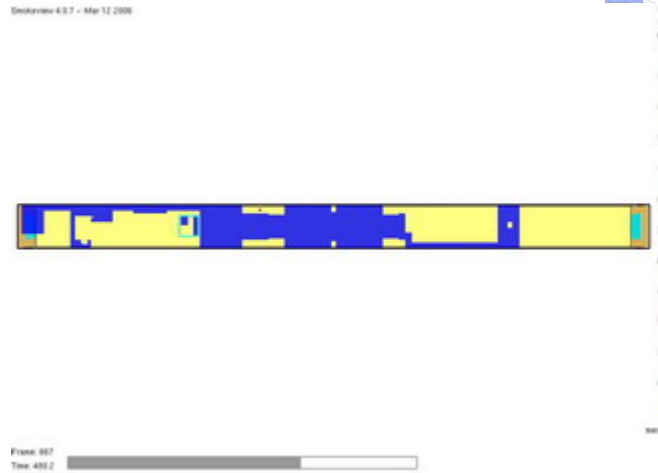


圖 5.83 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

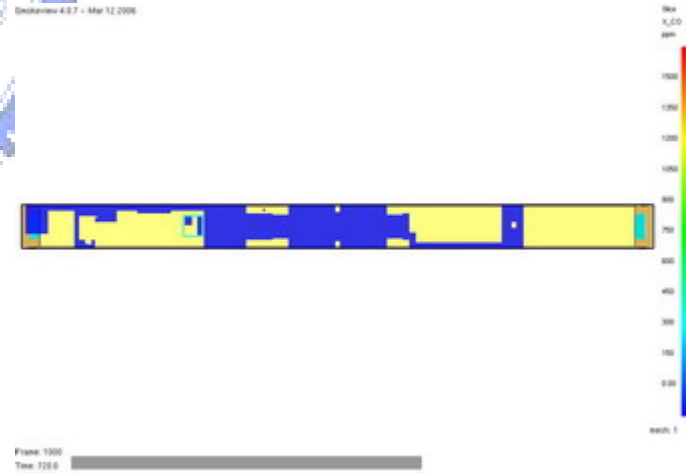


圖 5.85 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境二)

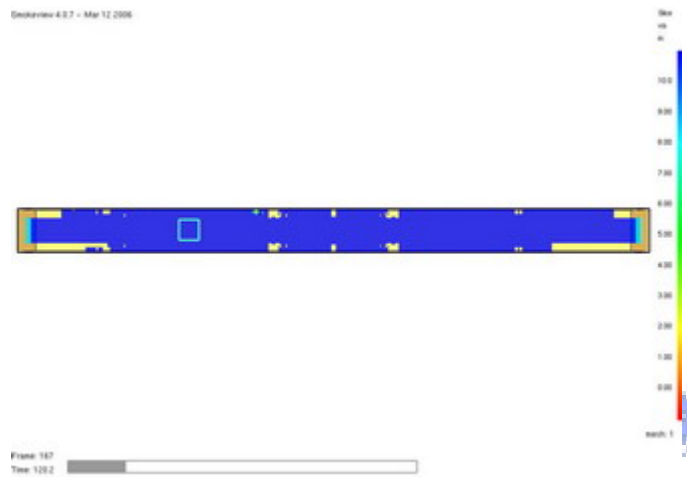


圖 5.86 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

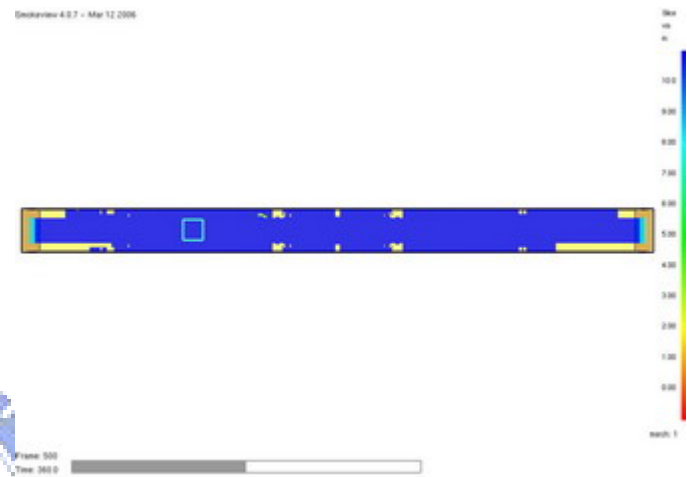


圖 5.88 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

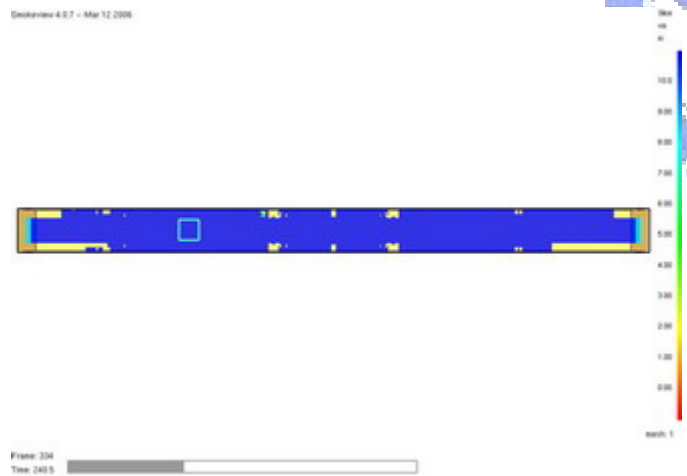


圖 5.87 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

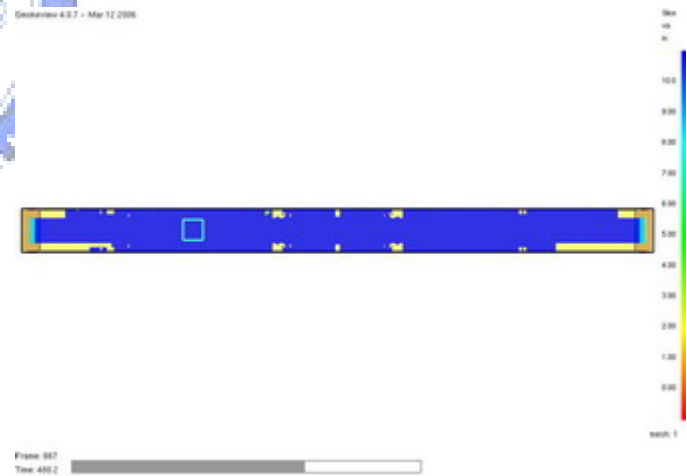


圖 5.89 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

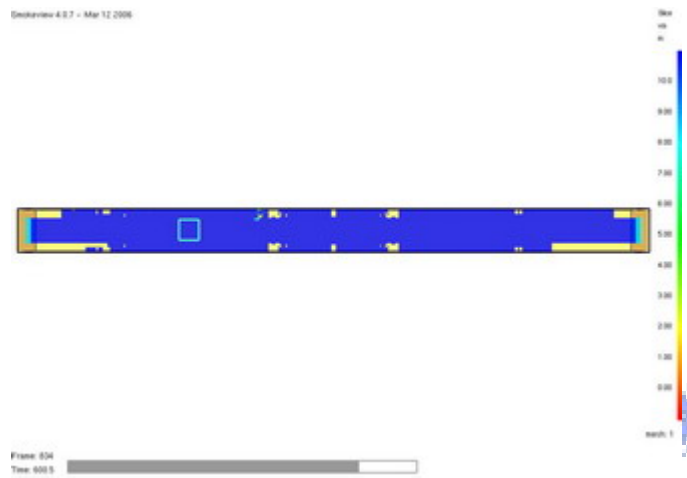


圖 5.90 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

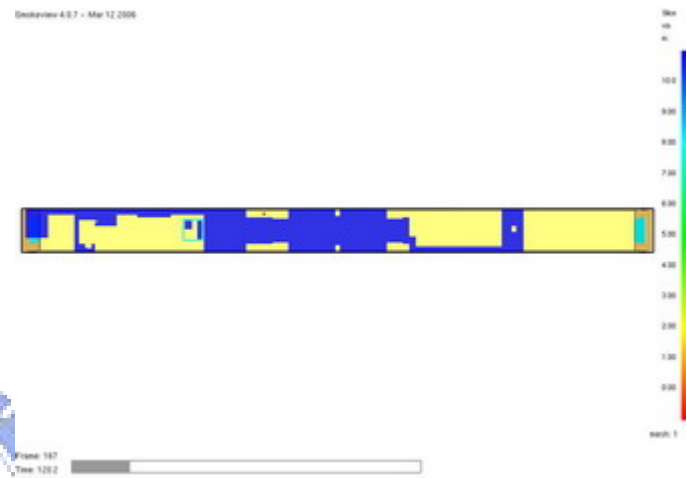


圖 5.92 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

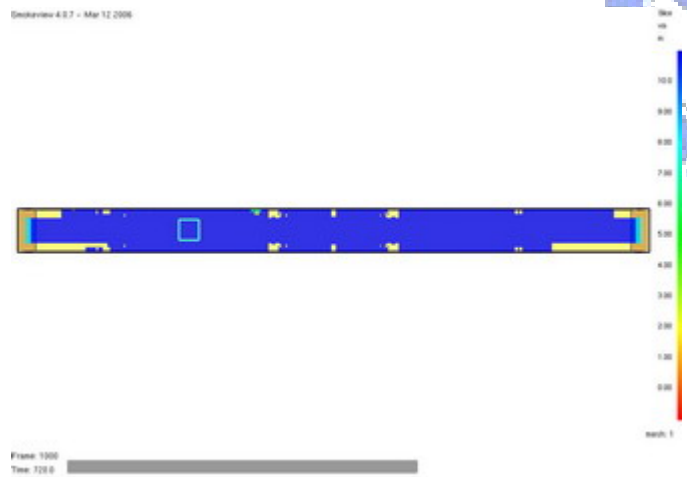


圖 5.91 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

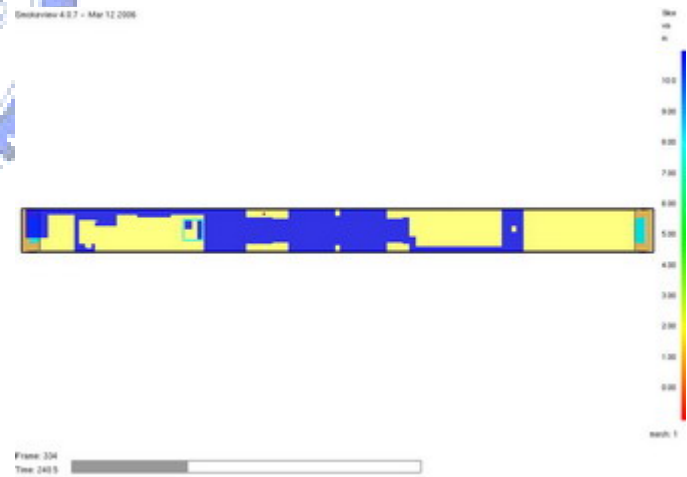


圖 5.93 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)



圖 5.94 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

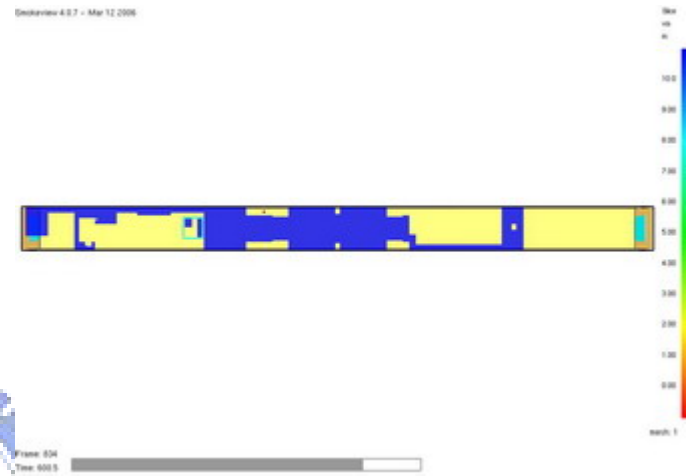


圖 5.96 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

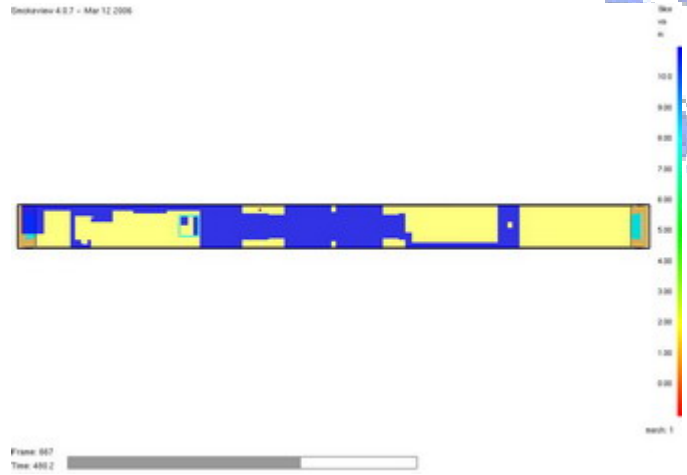


圖 5.95 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)

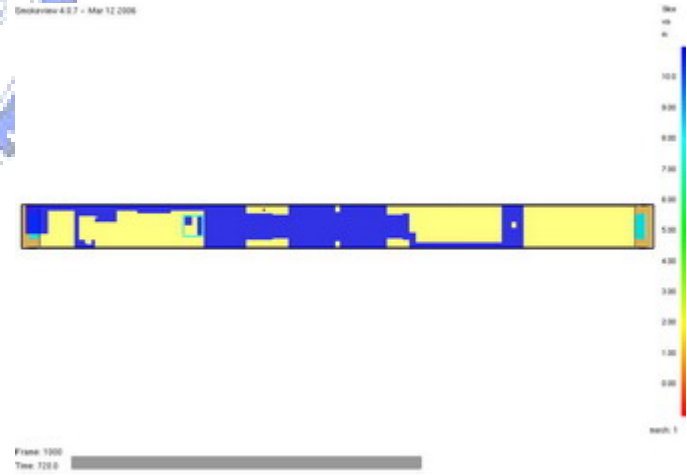


圖 5.97 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境二)



圖 5.98 t=120 秒 煙流分佈圖(情境二)

圖 5.100 t=360 秒 煙流分佈圖(情境二)



圖 5.99 t=240 秒 煙流分佈圖(情境二)

圖 5.101 t=480 秒 煙流分佈圖(情境二)

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 634
Time: 600.0

圖 5.102 $t=600$ 秒 煙流分佈圖(情境二)

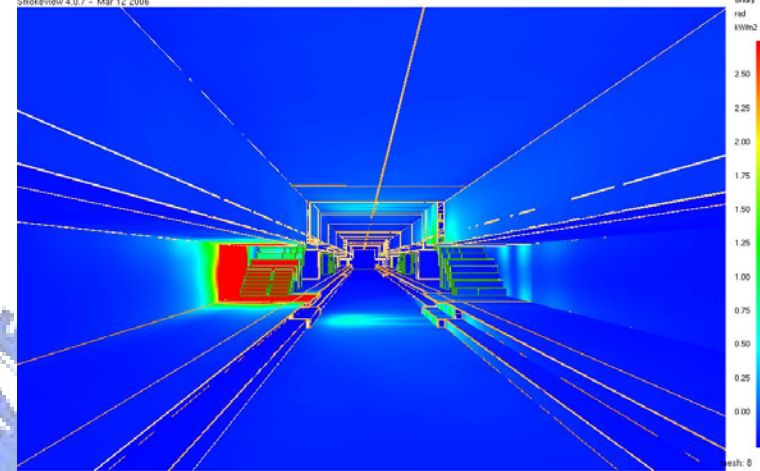
Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 1300
Time: 720.0

圖 5.103 $t=720$ 秒 煙流分佈圖(情境二)

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 500
Time: 720.0

圖 5.104 熱輻射分佈圖(情境二)

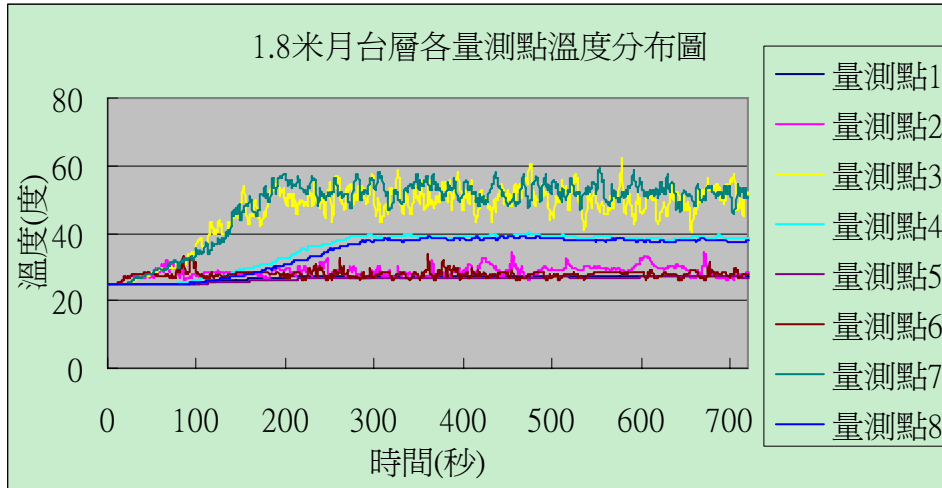


圖 5.105 月台層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境三)

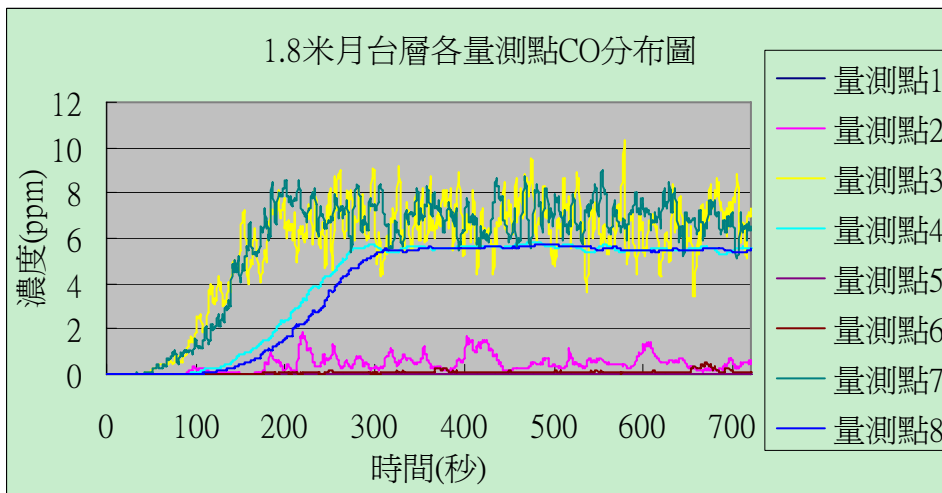


圖 5.106 月台層 1.8 米高度 CO 分佈圖(情境三)

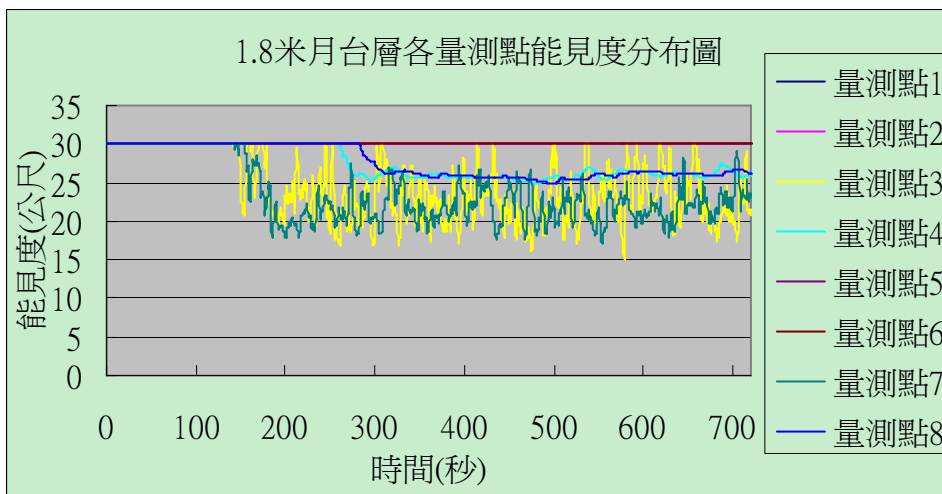


圖 5.107 月台層 1.8 米高度能見度分佈圖(情境三)

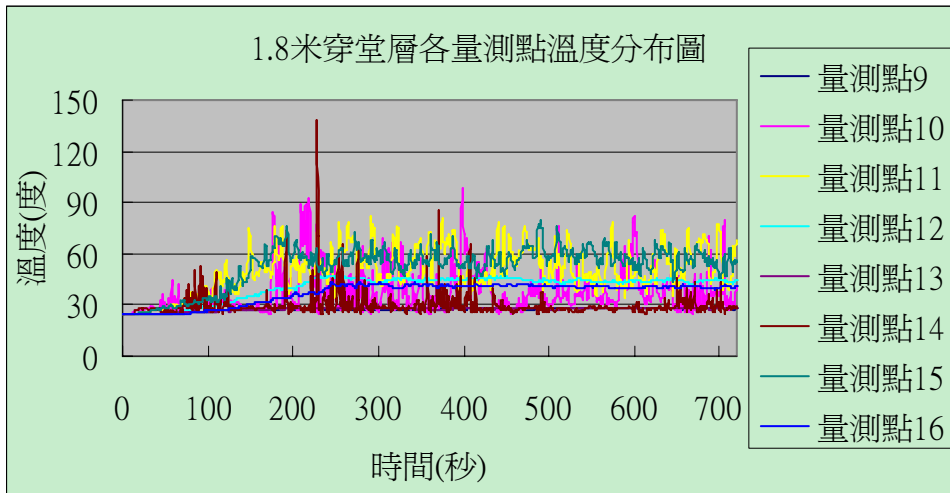


圖 5.108 穿堂層 1.8 米高度溫度分佈圖(情境三)

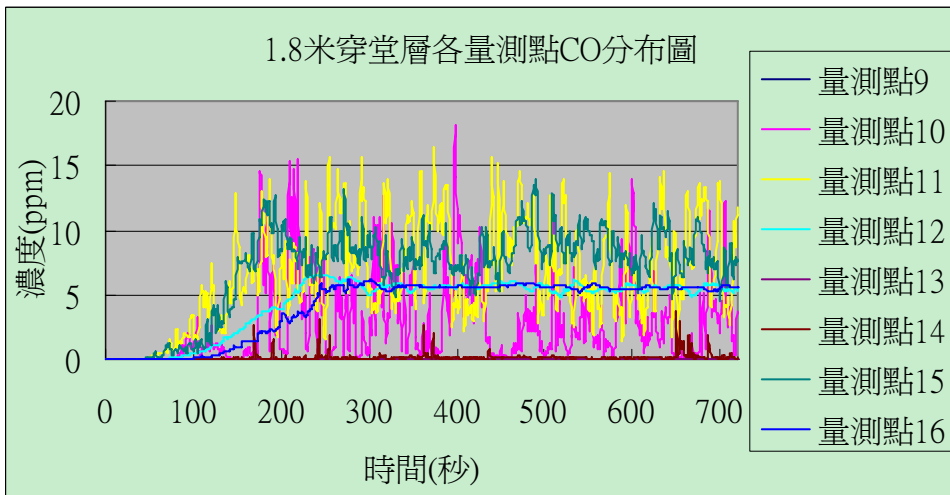


圖 5.109 穿堂層 1.8 米高度 CO 分佈圖(情境三)

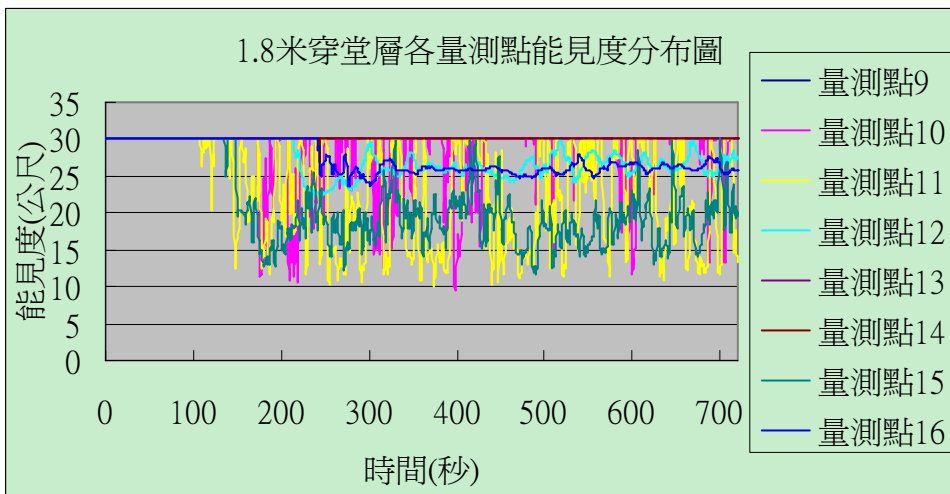


圖 5.110 穿堂層 1.8 米高度能見度分佈(情境三)

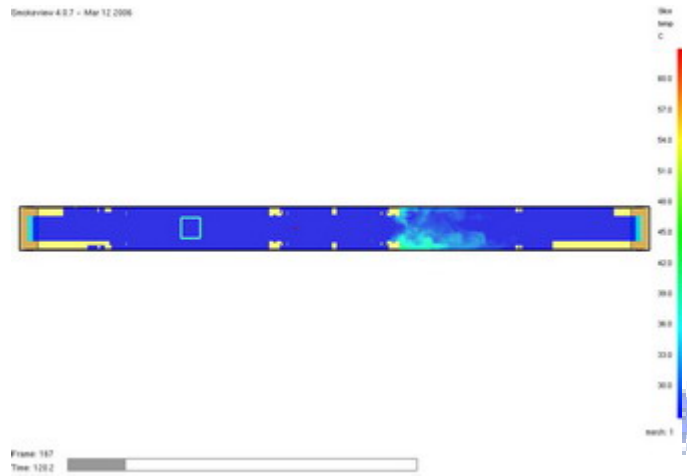


圖 5.111 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

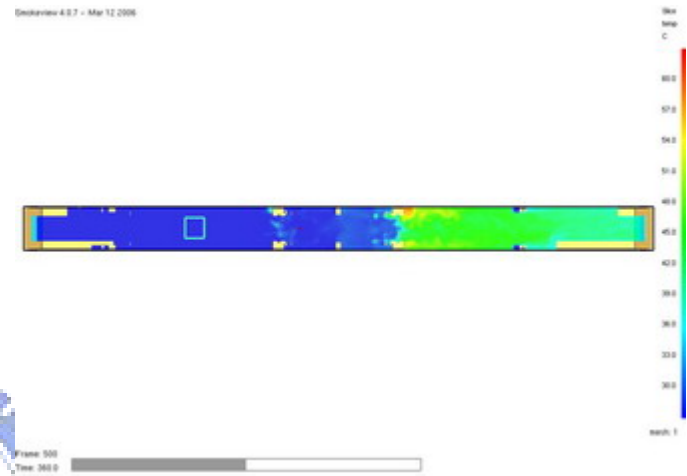


圖 5.113 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

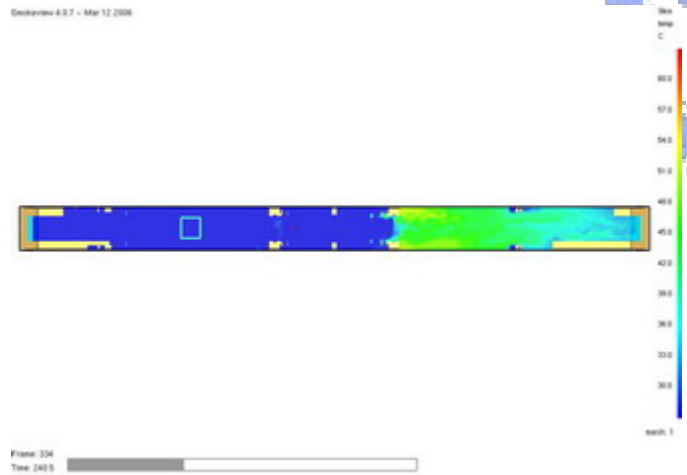


圖 5.112 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

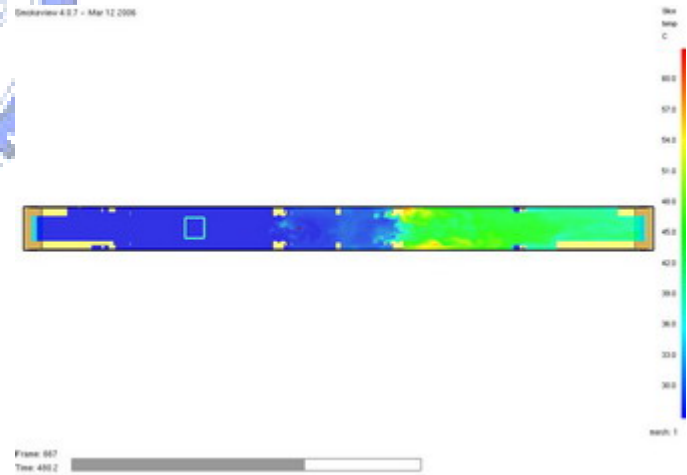


圖 5.114 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

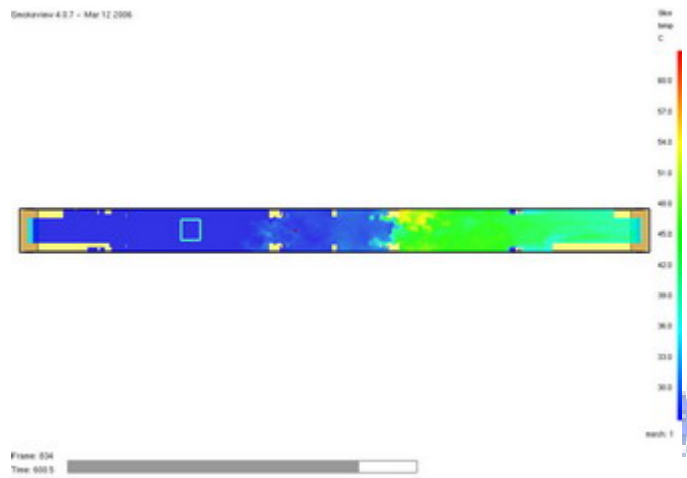


圖 5.115 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

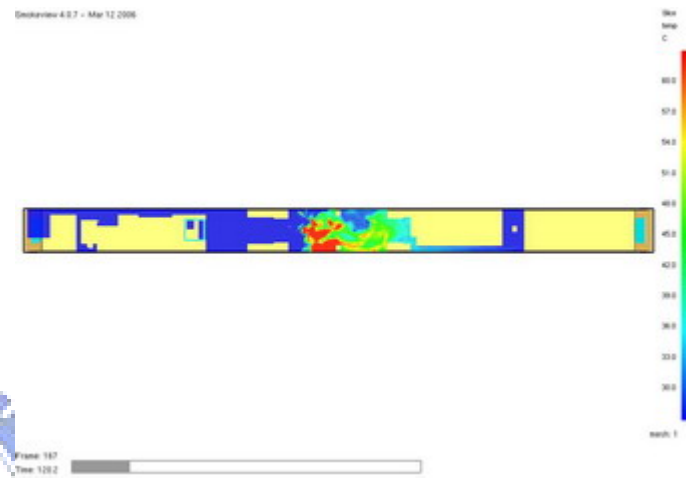


圖 5.117 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

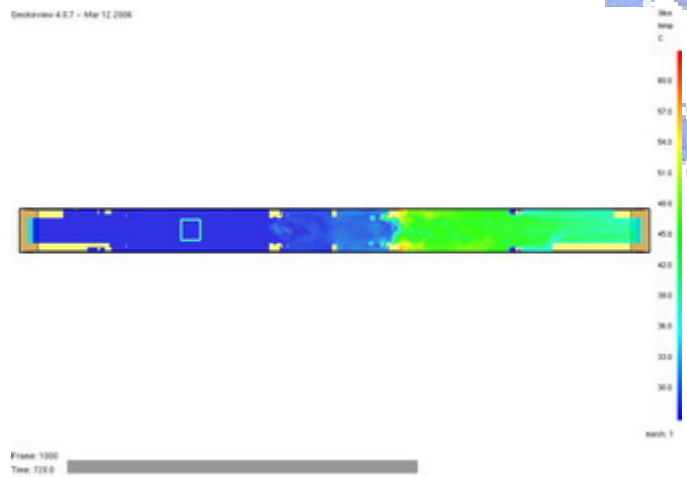


圖 5.116 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

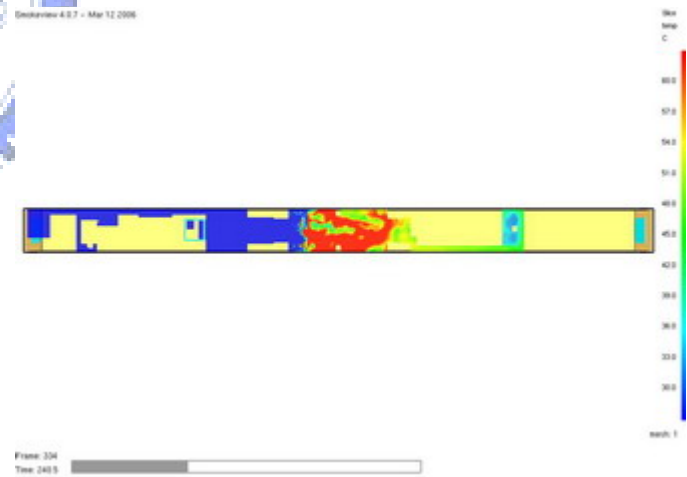


圖 5.118 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

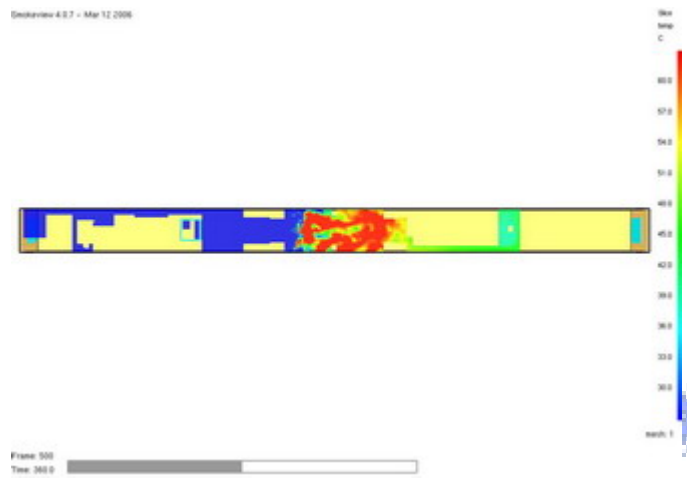


圖 5.119 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

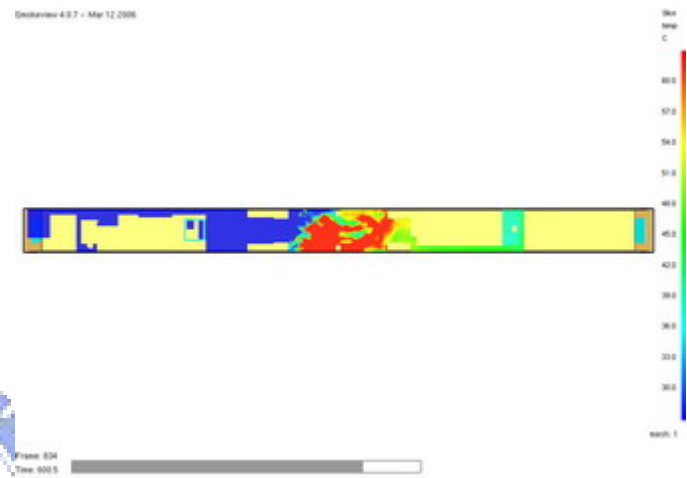


圖 5.121 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

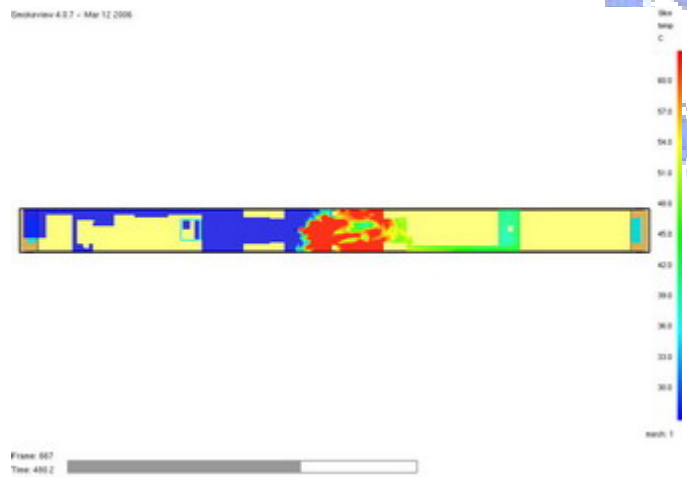


圖 5.120 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

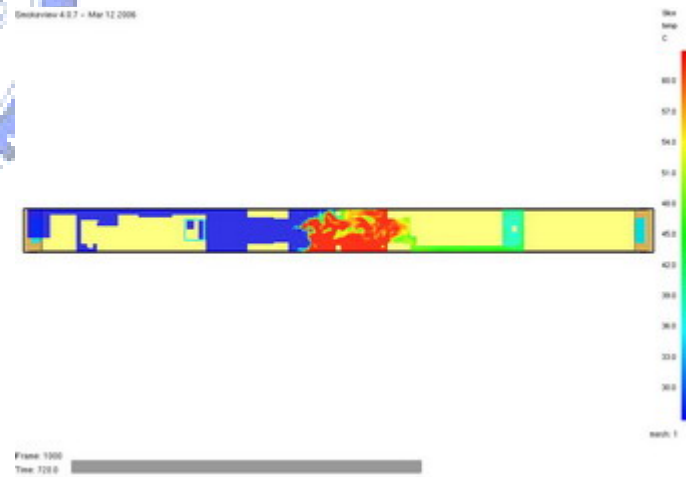


圖 5.122 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米溫度分佈圖(情境三)

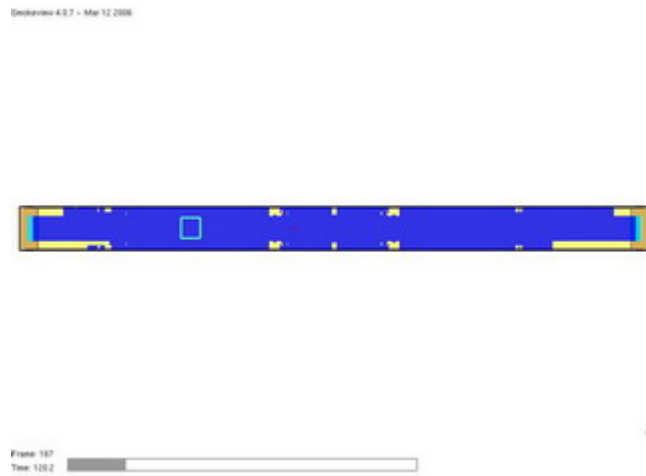


圖 5.123 t=120 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

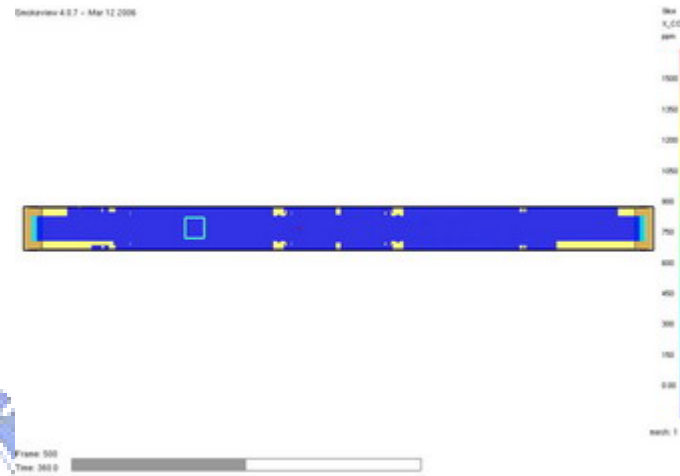


圖 5.125 t=360 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

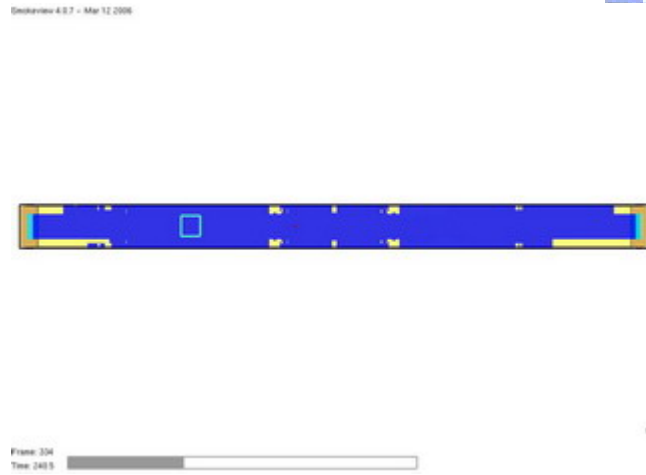


圖 5.124 t=240 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

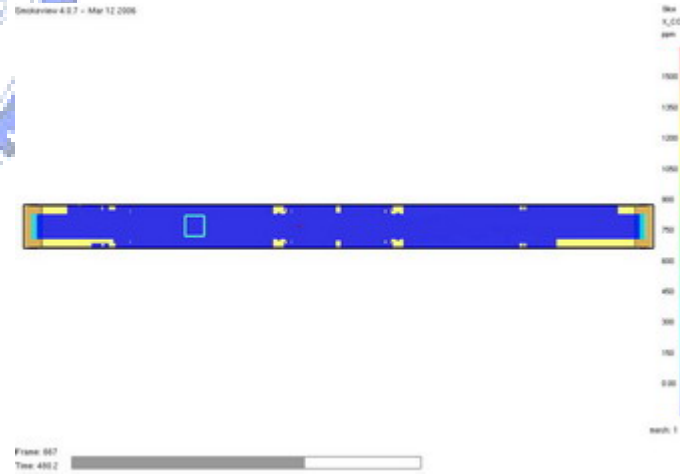


圖 5.126 t=480 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

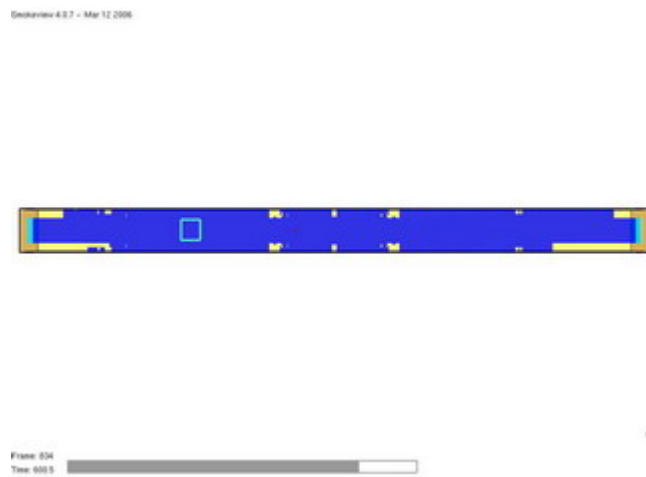


圖 5.127 t=600 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

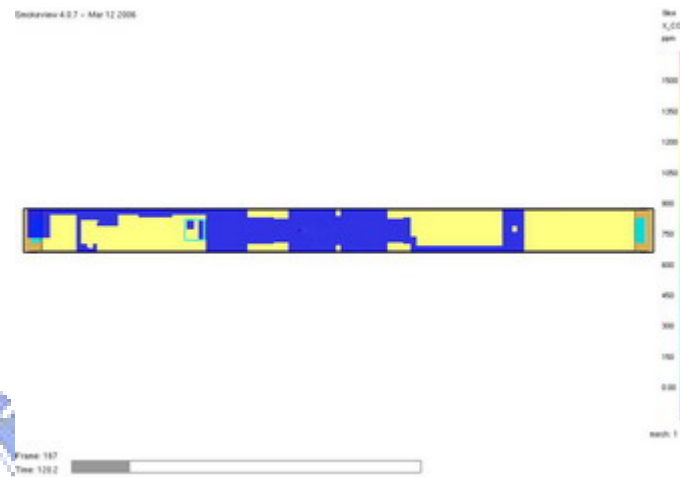


圖 5.129 t=120 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

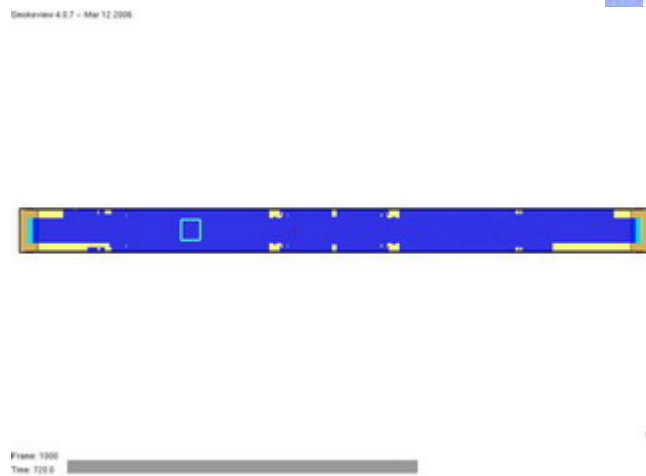


圖 5.128 t=720 秒 月台層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

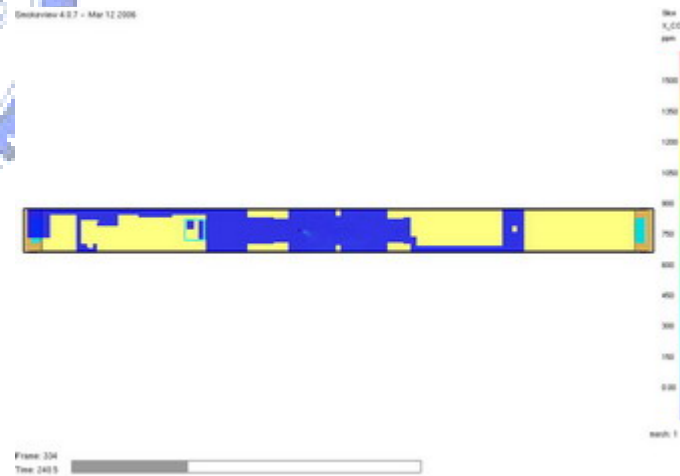


圖 5.130 t=240 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

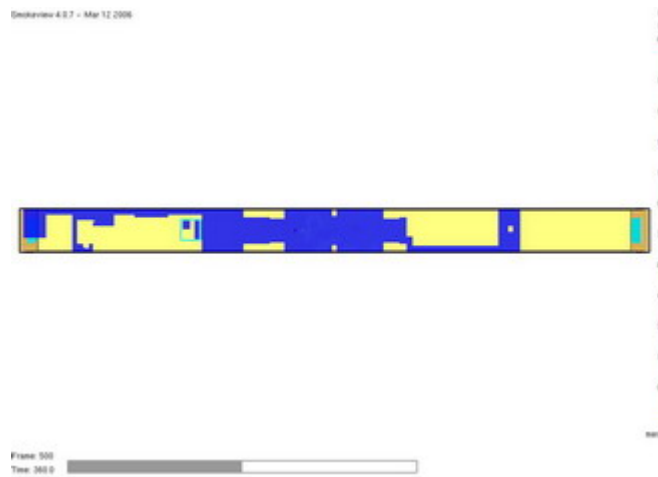


圖 5.131 t=360 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

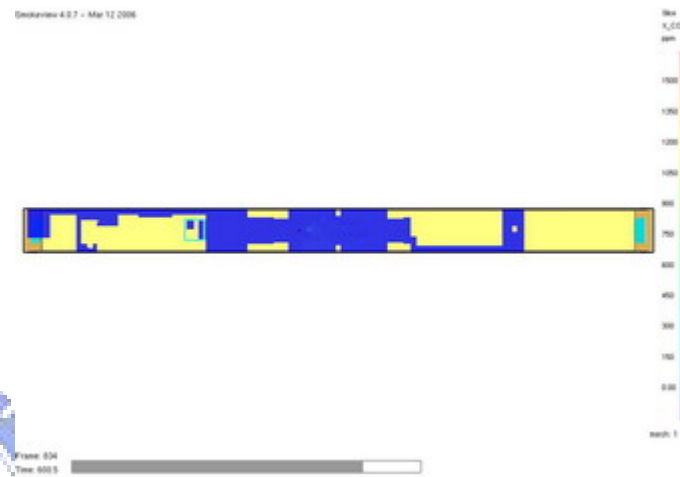


圖 5.133 t=600 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

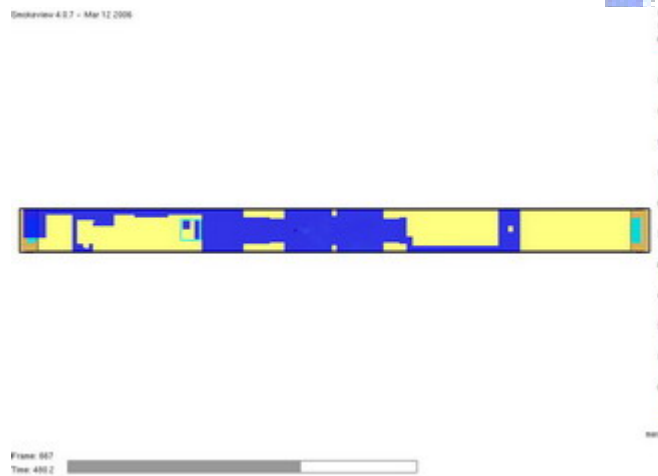


圖 5.132 t=480 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

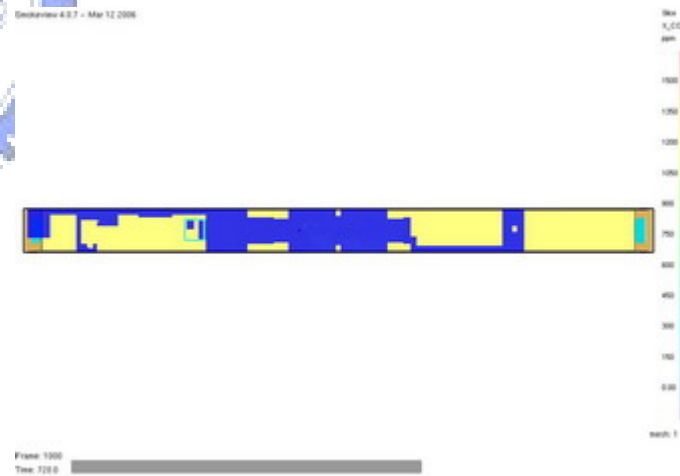


圖 5.134 t=720 秒 穿堂層距地面 1.8 米 CO 分佈圖(情境三)

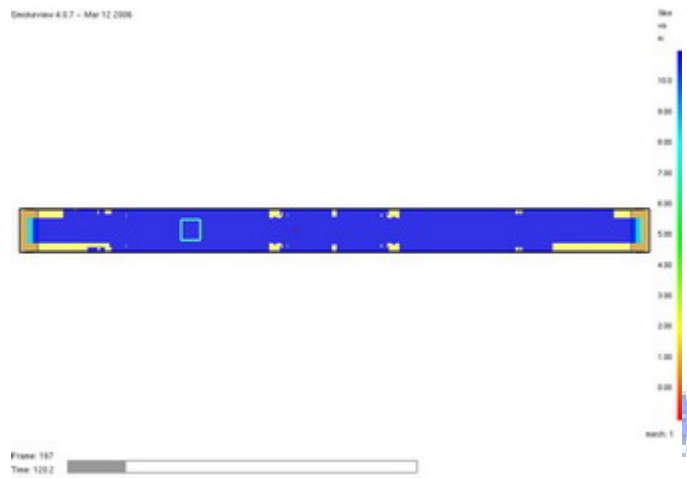


圖 5.135 $t=120$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

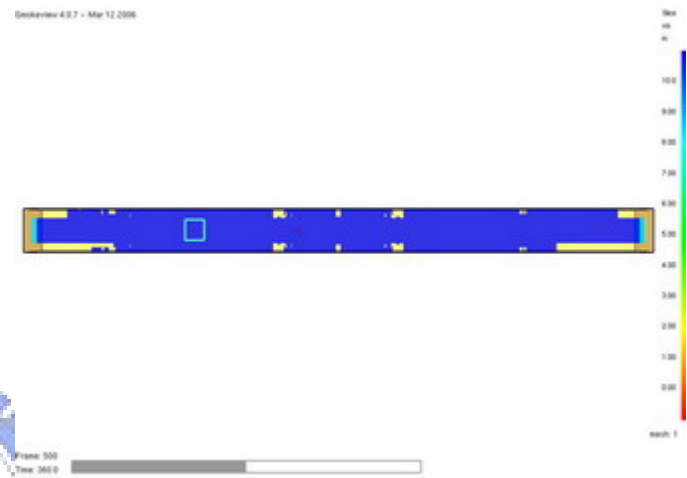


圖 5.137 $t=360$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

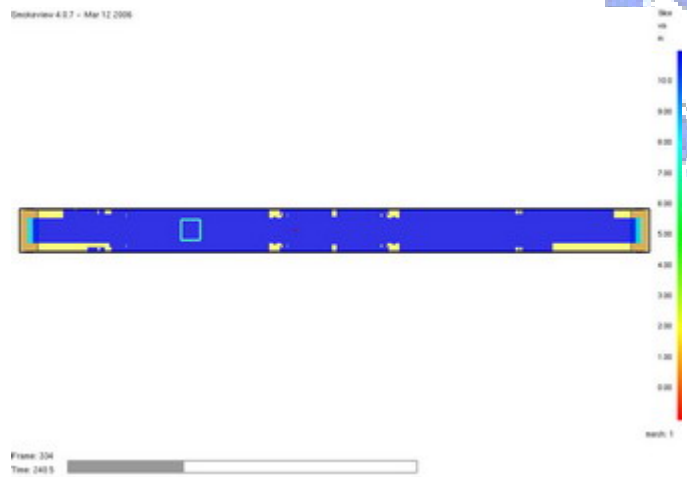


圖 5.136 $t=240$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

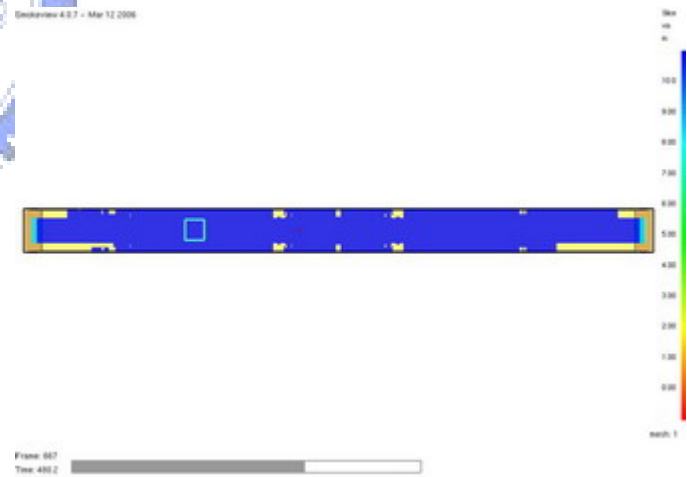


圖 5.138 $t=480$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

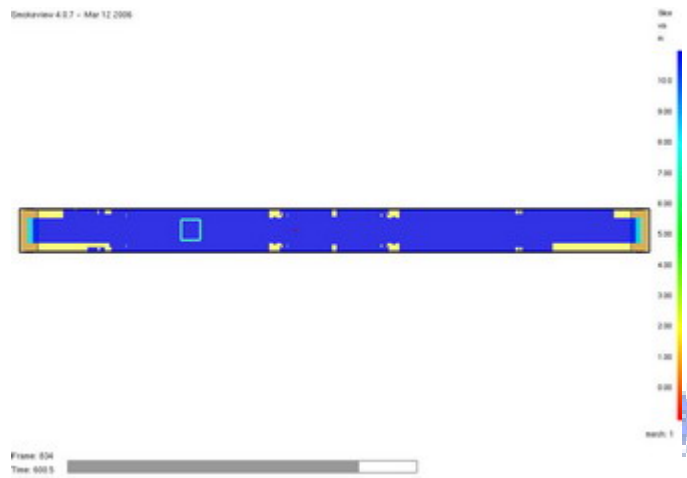


圖 5.139 $t=600$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

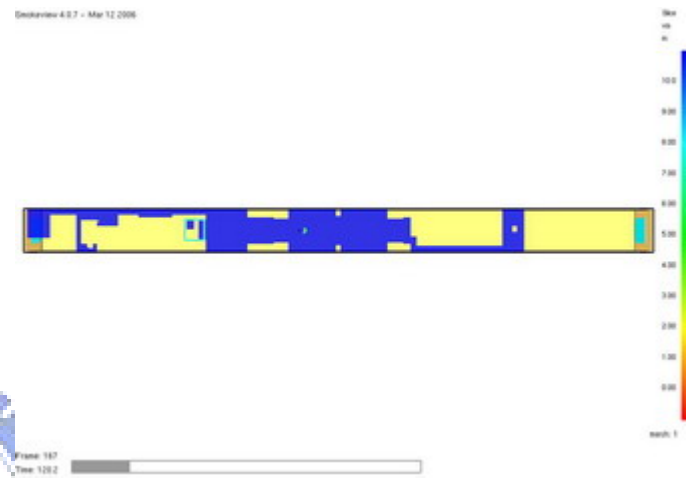


圖 5.141 $t=120$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

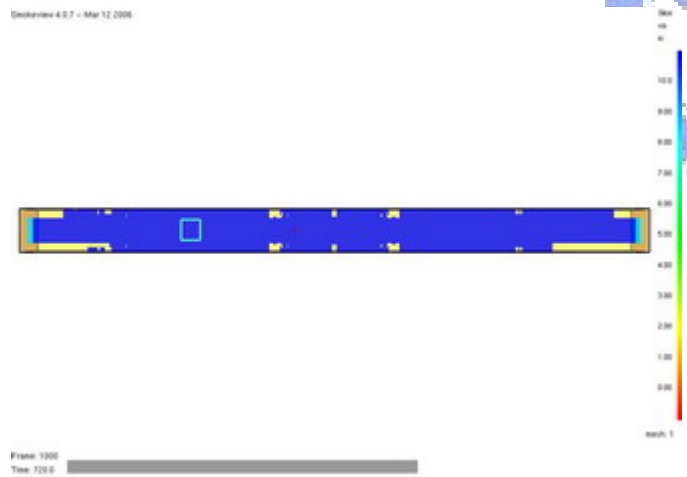


圖 5.140 $t=720$ 秒 月台層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

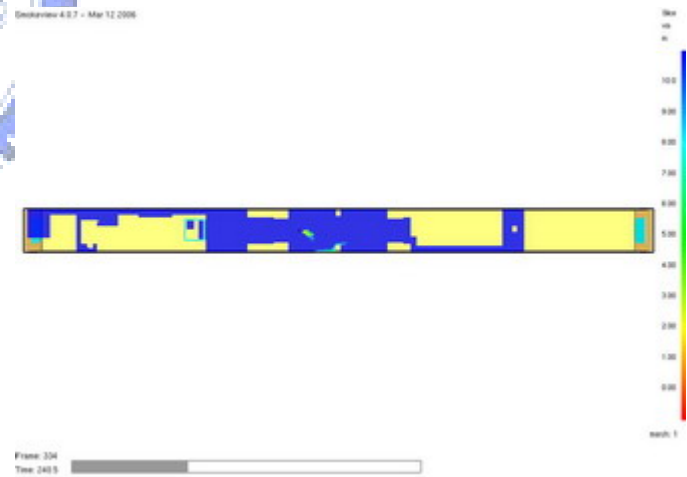


圖 5.142 $t=240$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)



圖 5.143 $t=360$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

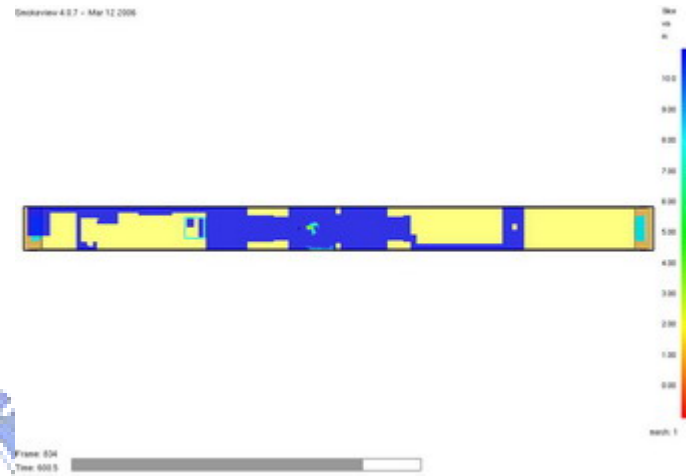


圖 5.145 $t=600$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)



圖 5.144 $t=480$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)

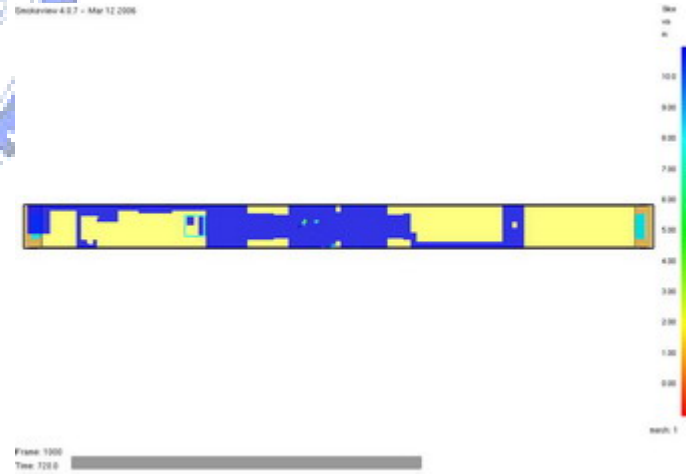


圖 5.146 $t=720$ 秒 穿堂層距地面 1.8 米能見度分佈圖(情境三)



圖 5.147 $t=120$ 秒 煙流分佈圖(情境三)

圖 5.149 $t=360$ 秒 煙流分佈圖(情境三)



圖 5.148 $t=240$ 秒 煙流分佈圖(情境三)

圖 5.150 $t=480$ 秒 煙流分佈圖(情境三)

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 504
Time: 600.0

圖 5.151 $t=600$ 秒 煙流分佈圖(情境三)

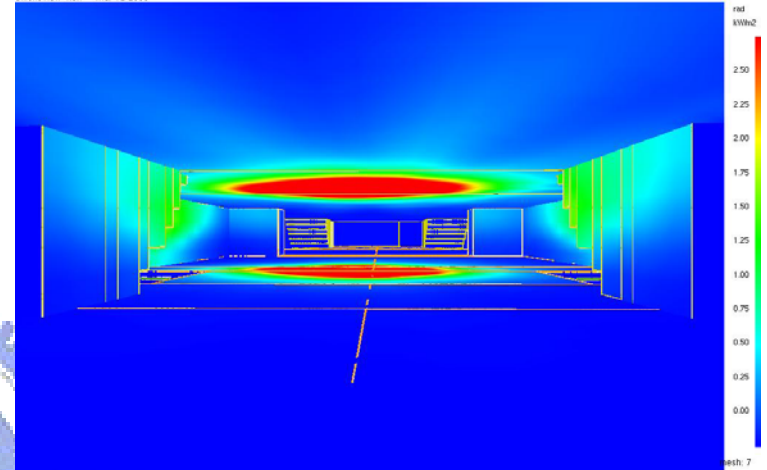
Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 1000
Time: 720.0

圖 5.152 $t=720$ 秒 煙流分佈圖(情境三)

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 500
Time: 720.0

圖 5.153 熱輻射分佈圖(情境三)

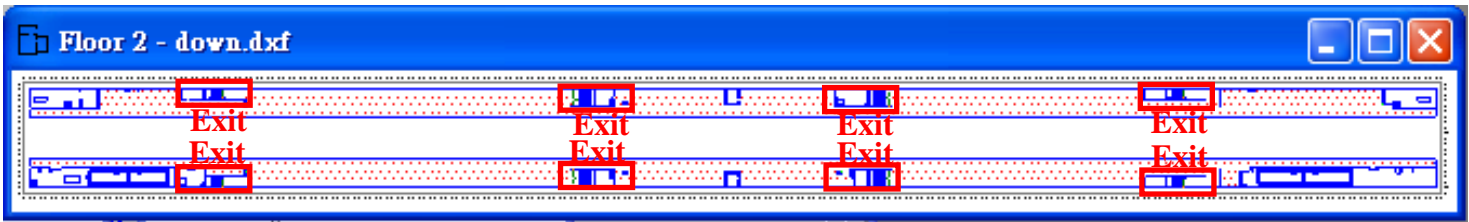


圖 5.154 月台層逃生出口與人員配置

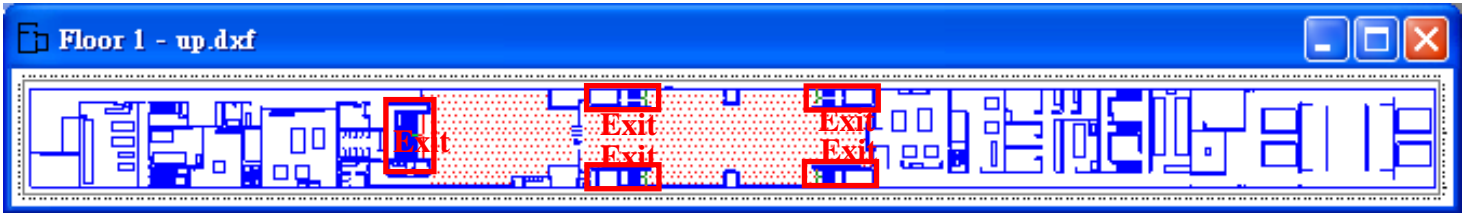


圖 5.155 穿堂層逃生出口與人員配置

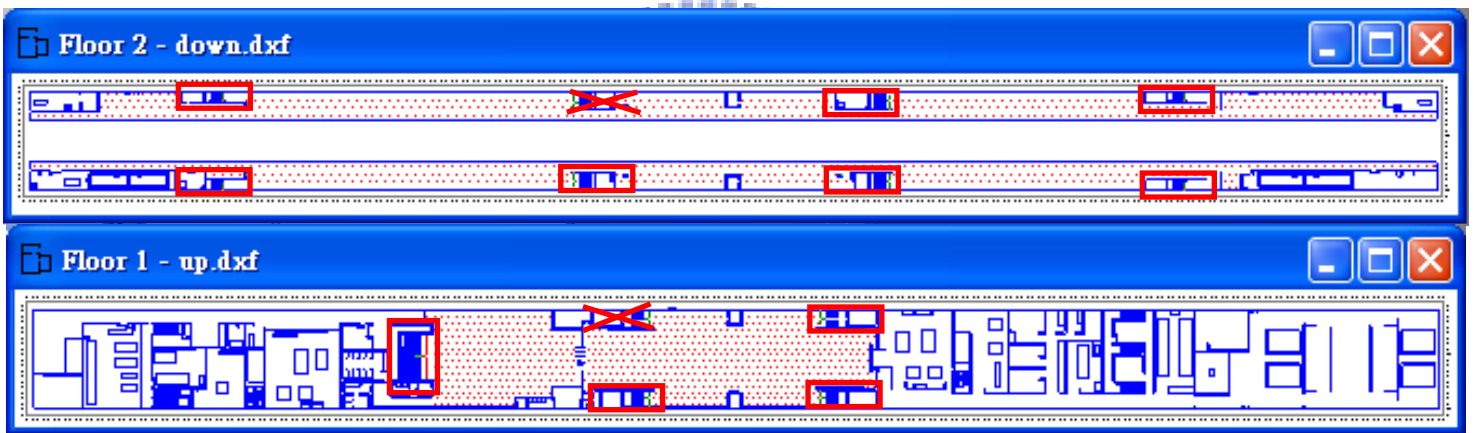


圖 5.156 出口封閉圖(情境二)

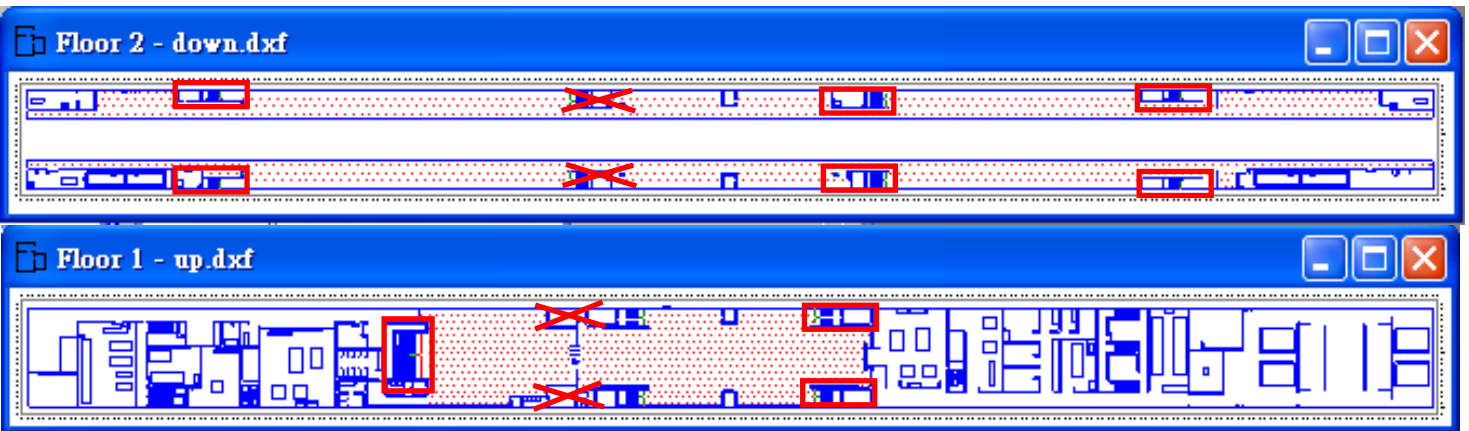


圖 5.157 人員逃生分佈圖(情境三)

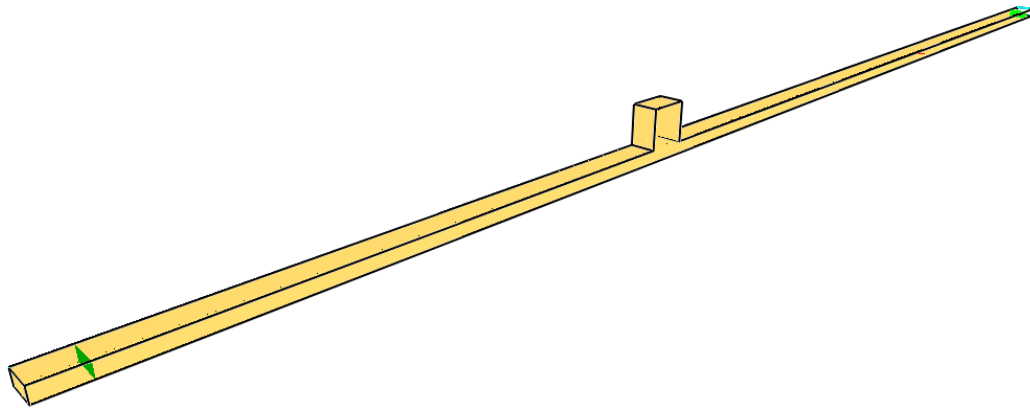


圖 5.158 隧道模型



圖 5.159 通風口位置



圖 5.160 隧道量測點分佈圖

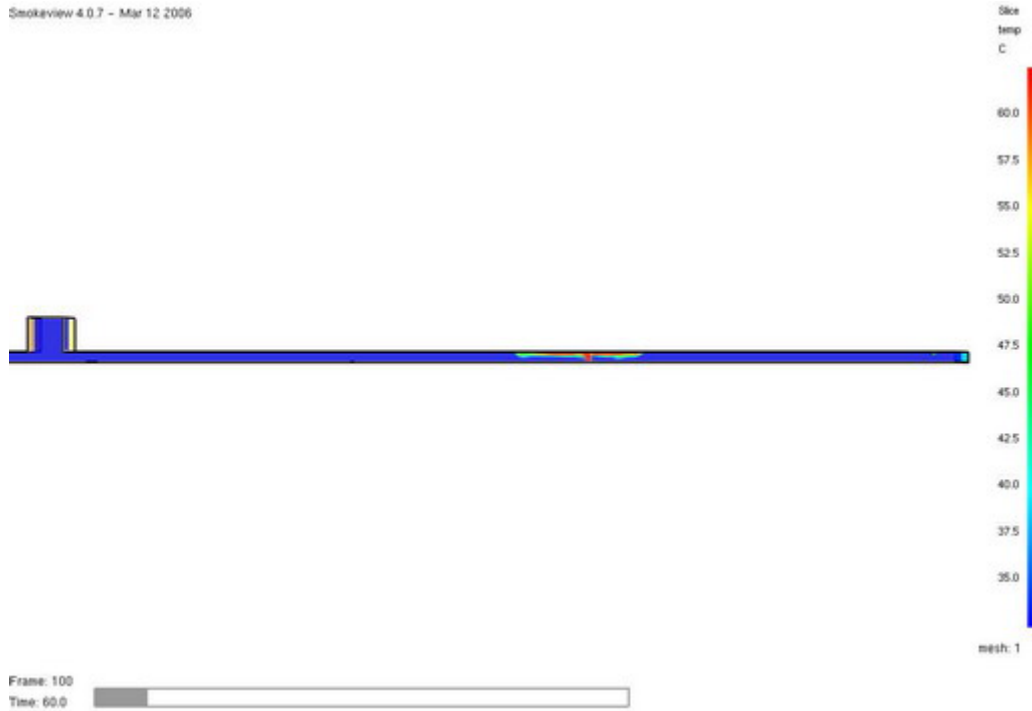


圖 5.161 t=60 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)

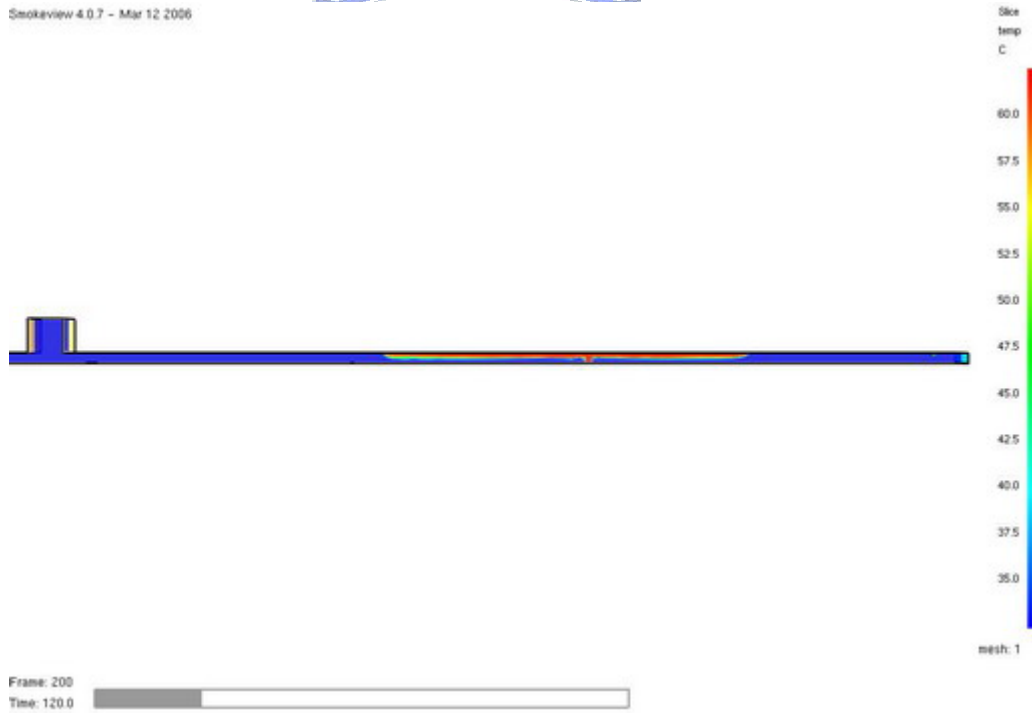


圖 5.162 t=120 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)

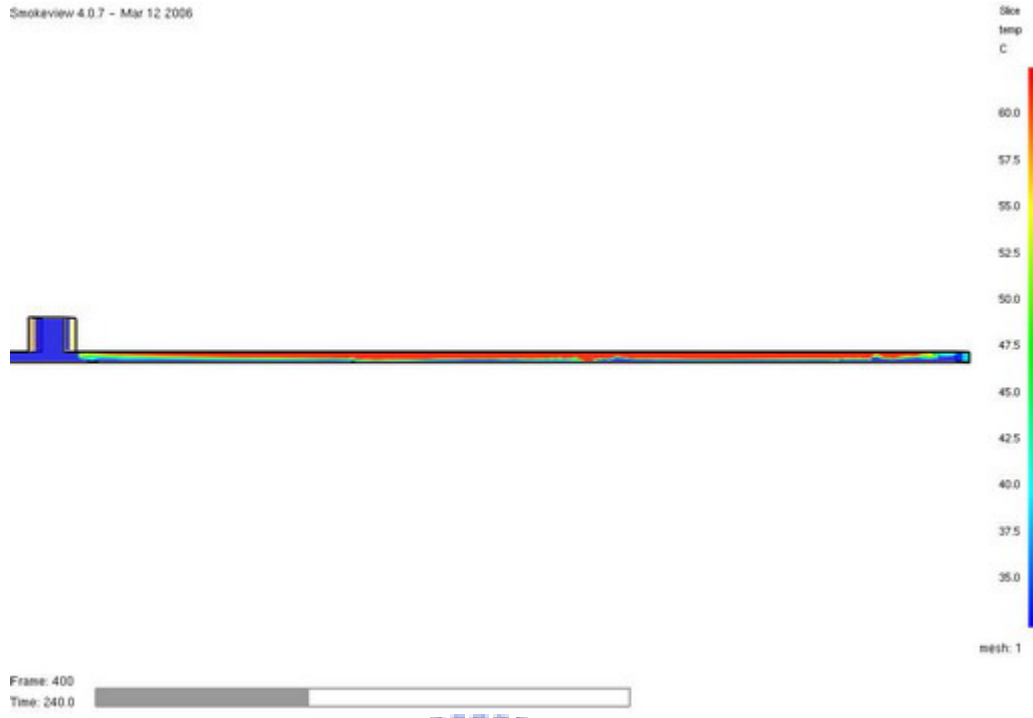


圖 5.163 t=240 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)

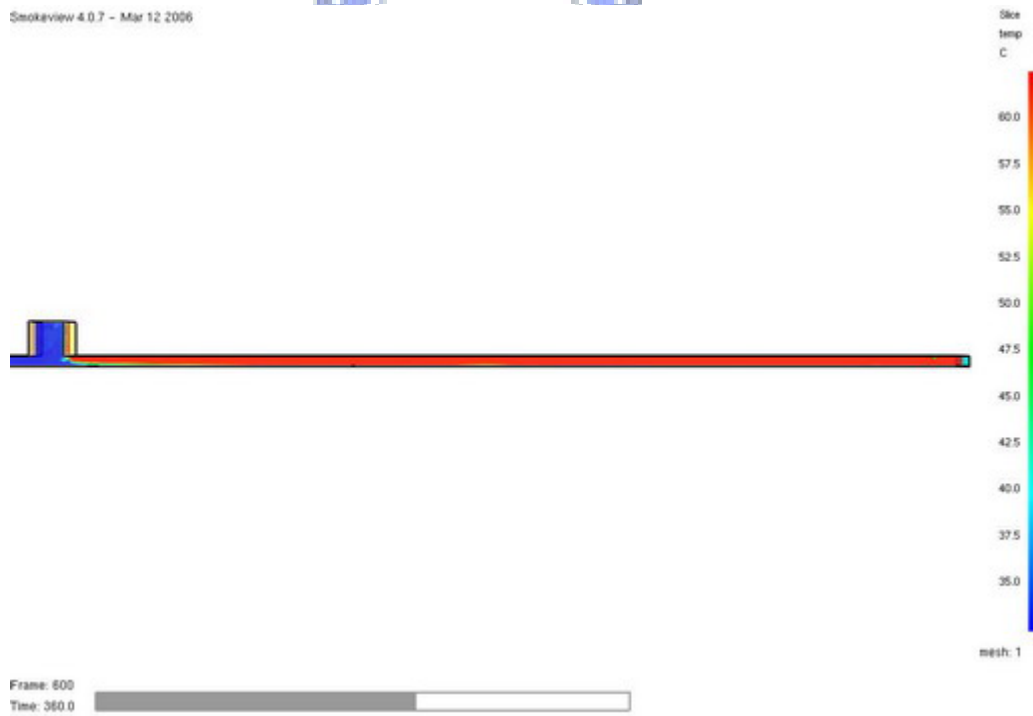


圖 5.164 t=360 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)

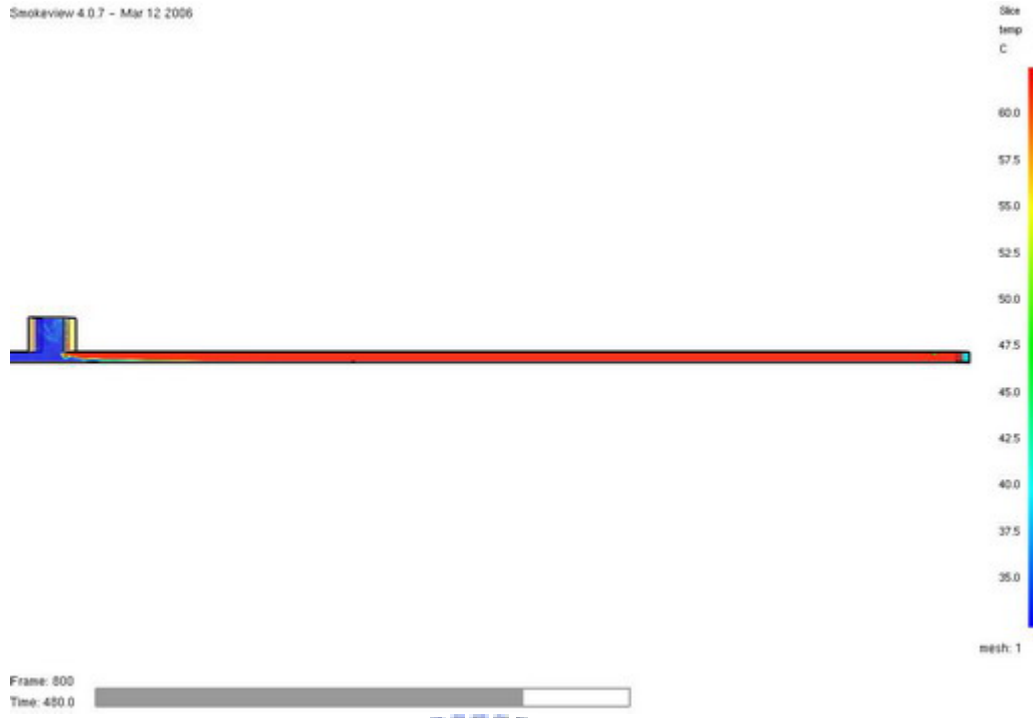


圖 5.165 t=480 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)



圖 5.166 t=600 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境一)



Frame: 100
Time: 60.0

mesh: 1

圖 5.167 t=60 秒 煙流分佈圖(情境一)



Frame: 200
Time: 120.0

mesh: 1

圖 5.168 t=120 秒 煙流分佈圖(情境一)



Frame: 400
Time: 240.0

mesh: 1

圖 5.169 t=240 秒 煙流分佈圖(情境一)



Frame: 600
Time: 360.0

mesh: 1

圖 5.170 t=360 秒 煙流分佈圖(情境一)

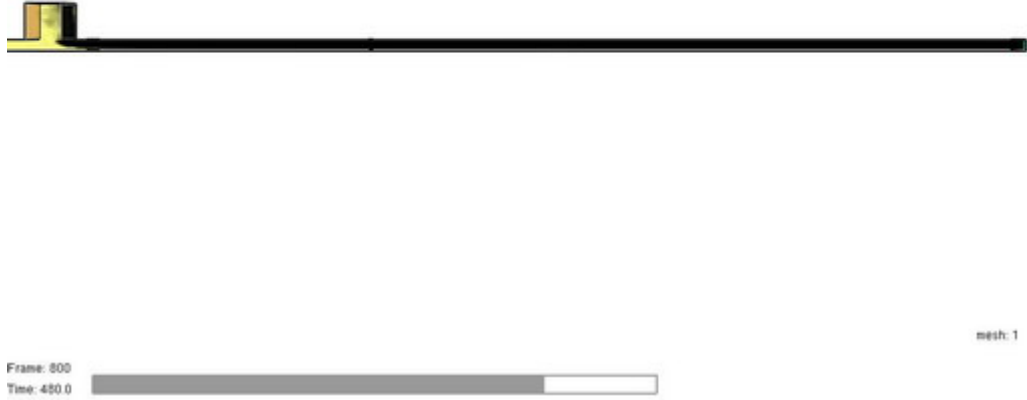


圖 5.171 $t=480$ 秒 煙流分佈圖(情境一)



圖 5.172 $t=600$ 秒 煙流分佈圖(情境一)

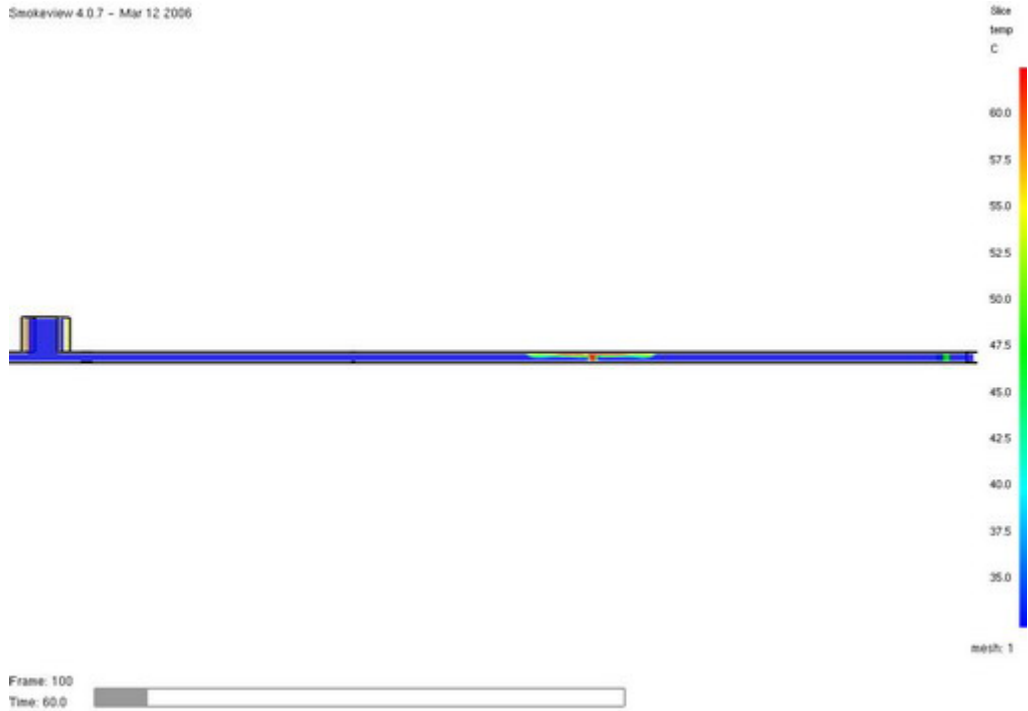


圖 5.173 t=60 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)

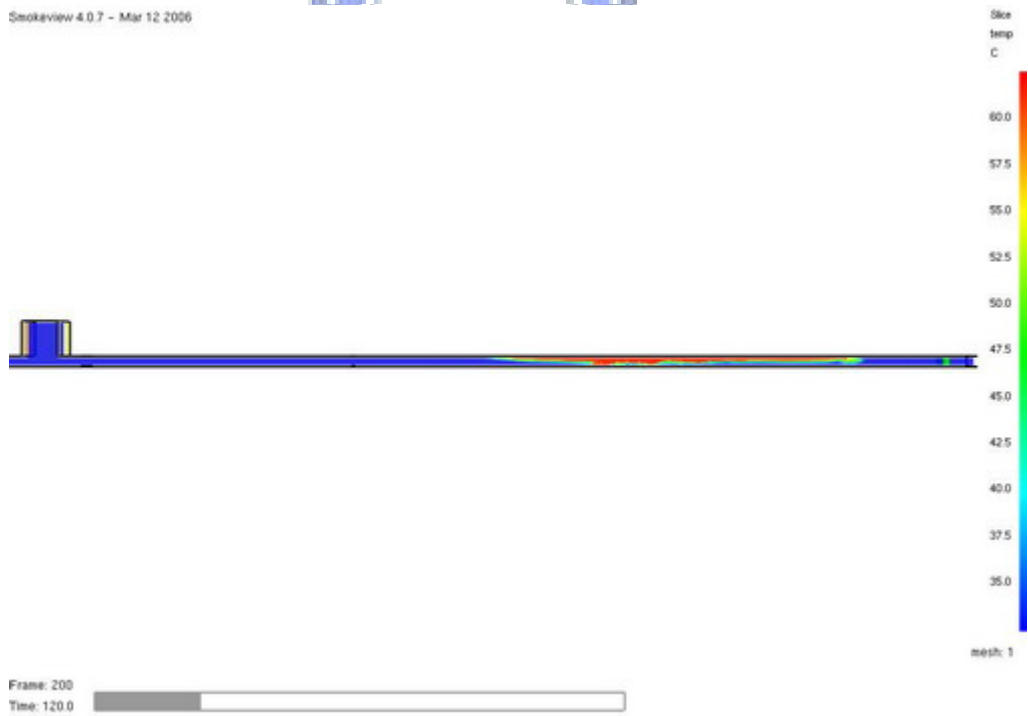


圖 5.174 t=120 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)

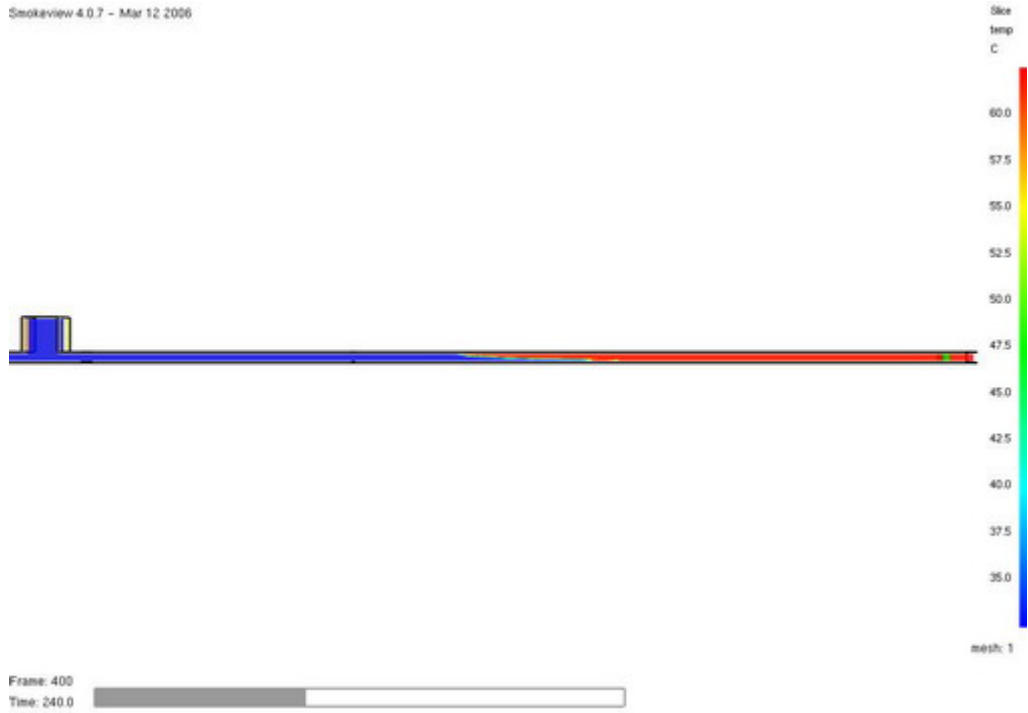


圖 5.175 t=240 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)



圖 5.176 t=360 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)

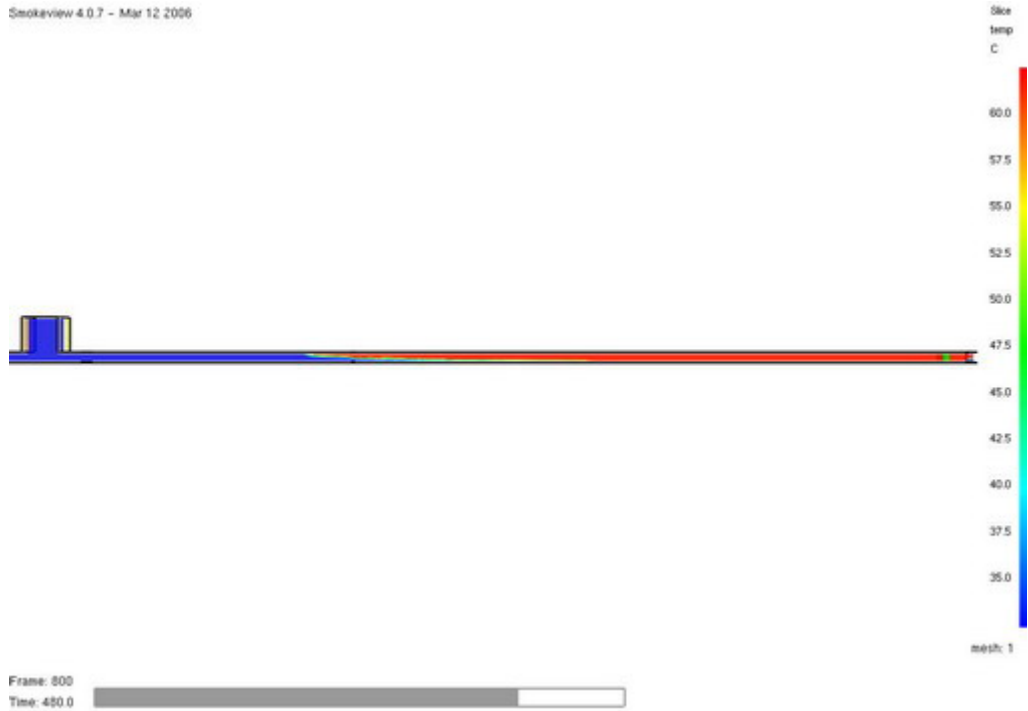


圖 5.177 t=480 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)



圖 5.178 t=600 秒 垂直地面溫度分佈圖(情境二)



Frame: 100
Time: 60.0

mesh: 1

圖 5.179 t=60 秒 煙流分佈圖(情境二)



Frame: 200
Time: 120.0

mesh: 1

圖 5.180 t=120 秒 煙流分佈圖(情境二)



Frame: 400
Time: 240.0

mesh: 1

圖 5.181 $t=240$ 秒 煙流分佈圖(情境二)



Frame: 600
Time: 360.0

mesh: 1

圖 5.182 $t=360$ 秒 煙流分佈圖(情境二)

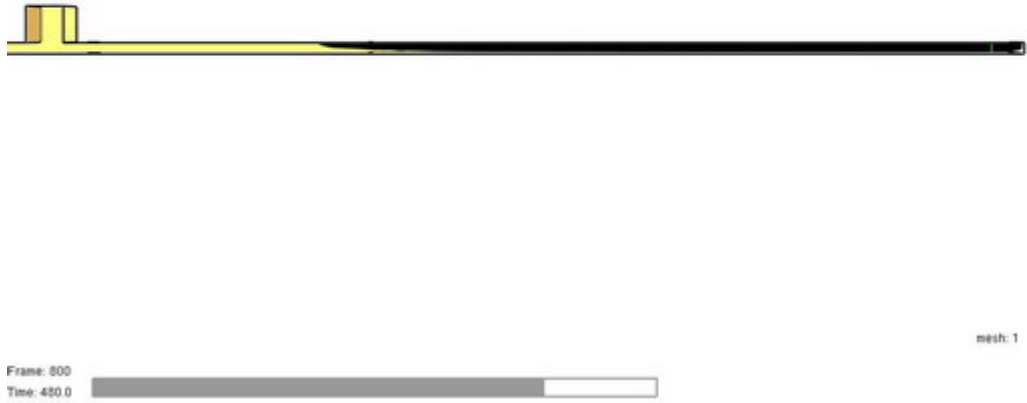


圖 5.183 t=480 秒 煙流分佈圖(情境二)



圖 5.184 t=600 秒 煙流分佈圖(情境二)

第六章 結論與建議

本報告以性能式設計法並配合火災模擬軟體 FDS 及逃生避難軟體 SIMULEX 來驗證煙控設備與避難時間。對於無法依照法規設置排煙設備之建築物，使用 CFD 軟體來模擬火場煙流情形並配合人員逃生避難的分析，為目前最適合的驗證方式。由模擬結果顯示本研究所分析的兩個案例，其排煙設備皆能確實達到所要求的標準，而以下為針對各案例所作之結論：

➤ 案例一

1. 根據 NFPA130 建議之安全逃生環境要求條件包括溫度、CO 濃度、能見度及輻射熱強度之計算結果皆大於人員逃生所需之時間，故皆達到人員避難所需之標準，人員皆可安全地逃離火場。
2. 在情境一中，由於火源位於軌道區且火源熱釋放率較大，火災為三個情境中最危險的情境，由模擬結果得知，先後啟動 UPE、OTE 及 TVF 的控制模式，可增加月台層逃生的時間。原因是位於軌道區的 UPE 及 OTE，可控制火災初期的影響程度，而之後開啟 TVF，抽取大量於軌道區的濃煙，更可以延緩煙瀰漫到站內。建議火災發生時有效地開啟軌道區排煙設備，以減少火災對月台內逃生空間的影響。另外在穿堂層部份，由於在月台層部份加設防煙垂壁，能有效地阻隔煙上竄至穿堂層，故穿堂層能維持安全的逃生空間。
3. 在情境二及情境三中，火源皆在公共區域，由模擬結果來看，啟動月台及穿堂層分區排煙即能有效進行排煙，根據 1.8 米切面高度的各種性質來看，人員的影響只有在火源附近的範圍較危險，對人員逃生路徑上不會受到影響。
4. 根據模擬結果可知，能見度在逃生避難上也是會遭遇到之障礙，再加上本案例位於地下空間，火災發生後造成電力中斷後所處的黑暗環境中更不容易逃生，因此有必要加強逃生指示，建議在避難指上標示上設計上應裝於較低且明顯處，或於地板處設置避難標示，以加強逃生指示的能

見度。

5. 本案例的逃生出入口分散較均勻，因此人員在逃生避難時容易分散逃生，有助於逃生避難的順暢。

➤ 案例二

1. 在情境一中，模擬隧道發生火災時未運轉隧道通風設備的情況，由模擬結果顯示，火災發生後火場因溫度升高，熱煙自然往兩側擴散，無法控制氣流之流動方向，當熱煙通過 K21 自然通風口時，熱的氣流上浮往大氣方向流出，不會流入另一端隧道。但因隧道火災發生時，煙流往兩側擴散造成人員無法在安全的環境上逃生，故在情境一中，無法控制煙流的方向對人員逃生上是非常不利的。
2. 在情境二中，模擬假設於 100 秒時啟動隧道通風系統運轉產生 3.57m/s 之平均風速往隧道右端排煙，使火災初期往左端擴散之濃煙往右端流動，人員可以有充足的時間往左側逃生，使煙控系統達到其性能標準。故在情境二中，啟動隧道通風設備能控制氣流方向，使人員往逆風方向逃生。
3. 本案例採用採用實際隧道進行模擬，根據地鐵環境模式 (SES) 分析隧道內臨界風速為 2.36m/s，運轉產生 3.57m/s 之風速大於臨界風速，符合事故地點風速必須大於臨界風速之設計標準，以防止煙流逆流。
4. 由模擬結果可知，啟動隧道通風設備能有效地增加人員逃生的逃生時間，但因隧道內火災常在逃生上造成困難，故建議在火災發生時，應立即啟動隧道通風設備，使人員在逃生上有充裕的時間逃到出口。

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”, 2004
2. 內政部營建署, “建築技術規則”, 2005
3. 交通部, “鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防安全設備設置規範”, 2008
4. NFPA 130, 「Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems」, 2007 Edition。
5. NFPA 130, 「Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems」, 2000 Edition。
6. NFPA, 2000 “NFPA 92B Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas”, National Fire Protection Association.
7. Petterson, N.M., Assessing the Feasibility of Reducing the Grid Resolution in FDS Field Modeling Fire Engineering Research Report, University of Canterbury, New Zealand, 2002
8. 蔡尤溪, “建築防煙計畫及實驗研究子計畫(II)大空間防煙性能模擬與現場實測基準之研究”, 內政部建築研究所, 2003
9. S. Simcox, N. S. Wilkes & I. P. Jones, “Computer Simulation of the Flows of Hot Gases from the Fire at King’Cross Underground Station”, Fire Safety Journal, No.25, pp.305-322, 1995
10. Yasushi Oka, Graham T. Atkinson, “Control of smoke Flow in Tunnel Fires”, Fire Safety Journal, No. 25, pp.305-322, 1995
11. 張文嘉, “排煙系統對捷運公館地下站煙流之影響”, 台灣大學應用力學研究所碩士論文, 2000
12. 陳榮進, “新型捷運車站性能式煙控與避難系統設計分析”, 中山大學機械工程系碩士論文, 2001
13. Jojo S. M. Li, W. K. Chow., “Numerical Studies on Performance Evaluation of Tunnel Ventilation Safety System”, Tunneling and Underground Space

Technology, No. 18, pp.435-452, 2003

14. Chi-Ji Lin and Yew Khoy Chuah, “Smoke Management Design and Computer Simulation of an Underground Mass Transit Station in Taiwan”, National Taipei University of Technology, Taiwan
15. 柯建明, “大型車站建築之火災煙控系統設計與電腦模擬分析”, 中山大學機械與機電工程系碩士論文, 2004
16. Boon Hui Chiam, “Numerical Simulation of a Metro Train Fire”, Department of Civil Engineering of Canterbury University, 2005
17. 陳昱勳, “隧道列車火災之模擬研究”, 台北科技大學冷凍空調工程系碩士論文, 2004
18. Van Maele and Merci, “Fire Safety Case Study of A Railway Tunnel : Smoke Evacuation”, Thermal Science, 2007
19. 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
20. J.H. Klote and J.A. Milke, “Principle of Smoke Management Systems”, ASHRAE and SFPE, 2002
21. 高雄市政府捷運工程局, “高雄都會區捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動分析之檢討”, 2001
22. 高雄捷運計畫-C3 聯合顧問團備忘錄, 文號 M91287, 2002
23. 台北市政府捷運工程局, “台北捷運新莊線 DK193 標 CK378B 期終送審—第一卷設計報告書 (II) 3D-CFD 模擬”, 財團法人中華顧問工程司, 1999
24. 台北市政府捷運工程局, “台北捷運蘆洲線 DL131 標 CL608A 期終送審—第一卷設計報告書 (II) 3D-CFD 模擬”, 財團法人中華顧問工程司, 2000
25. 台北市政府捷運工程局, “台北捷運蘆洲線 DL132/133 標 CL608B 期終送審, 第一卷設計報告書 (II) 3D-CFD 模擬”, 財團法人中華顧問工程

司, 2000

26. 高雄市政府捷運工程局, “高雄都會區捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動分析之檢討,” 2001
27. 台北市區鐵路地下化工程處, “萬華車站月台區與隧道區排煙系統擬分析,” 財團法人中華顧問工程司, 1999
28. 高速鐵路左營站大空間煙控與避難系統設計分析, 消防署審查報告書, 2002
29. “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, SFPE and NFPA, 2nd Edition, 1995
30. NFPA, “NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems“, 2000
31. 丁育群、周智中、陳火炎, “建築物性能防火法規之規劃研究“, 內政部建築研究所, 1997
32. 江哲銘、賴榮平, “建築通風性能式規範之研究”, 內政部建築研究所, 2000
33. 陳俊勳, “我國建築防火安全工程及設計法發展策略及必要項目規劃研究”, 內政部建築研究所, 2000
34. 楊靖威, “建築物性能式防火設計程序之研究—以地下街為例”, 交通大學機械系碩士論文, 2002
35. “The SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design,” SFPE and NFPA, 1998
36. 陳俊勳, “我國建築防火安全工程及設計法法展策略及必要項目規劃研究”, 八十九年度建築研究計畫聯合研討會, 2000
37. “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering,” SFPE and NFPA, 2nd Edition, 1995
38. John R. Hall, Jr. , “The Total Cost of Fire in The Unite States”, Fire Analysis and Research Division, NFPA, 2001