

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文

玻璃或捲門構成防火區劃



The Study on Fire Endurance Evaluation of Fire Compartment made by  
Glasses or Shutters

研究生：黃鈞  
指導教授：陳俊勳 教授

中華民國一〇〇年六月

# 玻璃或捲門構成防火區劃之研究

The Study on Fire Endurance Evaluation of Fire Compartment  
made by Glasses or Shutters

研究生：黃鈞

Student : Chun Huang

指導教授：陳俊勳

Advisor : Chiun-Hsun Chen



A Thesis

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 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇〇年六月

# 玻璃或捲門構成防火區劃之研究

學生：黃鈞

指導教授：陳俊勳

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本研究運用火災模擬軟體 FDS 以及有限元素分析軟體 ANSYS 對建築內使用玻璃材料或是防火捲門構成之防火區劃進行分析與討論。

玻璃區劃部分，當玻璃材質採用非具有防火時效之防火玻璃，火場中環境溫度升高，玻璃材料溫差過大時有破裂掉落之疑慮，經由文獻的探討，一般玻璃或是強化玻璃溫差達到  $250^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  時即有破裂掉落之可能，本研究以常見之透明玻璃升降機道做為討論對象，在一地下場站內進行 FDS 火災模擬，由模擬結果得知當一個  $1 \times 1\text{m}^2$ 、 $5\text{MW}$  之火源臨近玻璃分間牆，該玻璃分間牆將於火災發生後第 75 秒破裂，造成火災產生之濃煙將向上竄升，並於第 147 秒造成上一樓層之玻璃破裂，原有垂直區劃遭到破壞，造成煙層於上一樓層蓄積，火災之危害範圍擴大，上述情境分析結果亦對照我國「建築技術規則」以及「鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防設備設置規範」對於防火區劃之規定進行討論。

在防火捲門部分，以區劃電扶梯間之防火捲門做為討論對象，在一地下場站內進行 FDS 火災模擬，且由 FDS 模擬之捲門溫度分佈進一步運用 ANSYS 分析捲門之變形狀況以及熱應力分佈，電扶梯間之防火捲門與該防煙區劃之偵煙器連動，並設定三種情境進行比較，分別為無動作、下降至距地面 2 公尺處及完全關閉，此三種動作情形導致火場之煙流及環境條件均不相同，尤以捲門無動作情境對起火樓層之上一樓層影響最為嚴重，而捲門完全關閉之情境則造成該起火樓層受火災影響最為嚴重，由模擬結果顯示，捲門動作時起火樓層之環境達到不利於人員逃件條件較捲門無動作提早約 30 秒，此外，當捲門下降之距地面兩公尺處及全關之情形其受熱產

生變形均以向火場方向凹陷為主，於模擬時間 720 秒內，其最大變形量分別為 319mm 及 630mm，此兩種捲門下降情況其熱應力分佈則因邊界條件不同而有所差異，於模擬時間 720 秒內，其最大應力分別為 1.0 GPa 及 2.2 GPa。

**關鍵字：**火災模擬軟體、有限元素分析、玻璃、防火捲門



The Study on Fire Endurance Evaluation of Fire Compartment made by Glasses  
or Shutters

Student : Huang Chun

Advisor : Chiun-Hsun Chen

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

## ABSTRACT

This research carries out the fire resistance evaluations of the glass partition wall and the fire shutters used in building by FDS (Fire Dynamics Simulator) and ANSYS software, a finite element software.

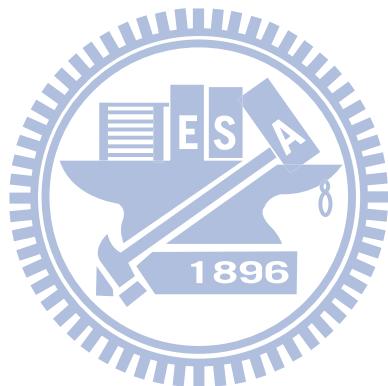
For the glass partition wall, it might be broken due to the temperature gradient if it is not a flameproof glass. From literature review, it shows that the temperature difference between the two sides causing glass to break is ranged from 250 to 300°C. A see-through glass elevator and its channel is the target of this research. The FDS simulation result shows that the glass is broken in 75 second at the floor, where fire occurs, and another one is broken in 145 second at the upper floor when a 1m×1m, 5MW fire is near the glass partition wall. In this situation, smoke can spread to the upper floor through the elevator's channel. The vertical fire compartment becomes invalid. This situation leads to a discussion with the present national building code.

On the part of fire shutters, shutters used in escalator room is the target of this research. Three scenarios are specified. In The first scenario, the shutters do not activate in a fire. The second, the shutters descend down to a position, where is 2 meter-height from the floor. The last one is that the shutters close completely. The FDS simulations show that the upper floor is most seriously affected by the fire in first scenario; the floor, where fire occurs, is the most severely influenced by the fire in the last scenario. It shows that the environment meet the conditions, which is not suitable for evacuation, in the second and the third scenario is about

30 second earlier than the first scenario.

The ANSYS simulation results show that the shutters expand toward the fire exposure side in the second and last scenarios. The maximum deformations are 319 mm and 630 mm during the simulation time. Because the shutters have different boundary conditions, they have different thermal stress distributions in the second and the last scenarios. The maximum stress intensities are 1.0 GPa and 2.2 GPa during the simulation time.

**Key words :** FDS(Fire dynamics simulator)、finite element、ANSYS、glass、shutter



## 致謝

時光匆匆，研究所生涯最後隨著此篇論文畫下了句點，能完成碩士學位，首先我要感謝我的老師 陳俊勳教授，老師的諄諄教誨與指導，使我在學識與待人處事上都獲益良多，在此致上最深的感謝。

本研究由事故調查及成災因素分析應用於風險評估和災害預防之整合研究計畫支持，感謝研究計畫的支持使研究更能順利進行，我也要感謝論文口試委員，中台技術學院 徐一量教授、台灣警察專科學校 邱晨瑋教授與高雄第一科技大學 蔡匡忠教授所提出的指導與建議，在研究之路上都是寶貴的經驗。

在這兩年研究所的時光，感謝實驗室彥成、達叔、阿貴、湯圓、家維、宗翰、昶安、金輝、信錡、義嘉、瑋琮等學長對我的照顧與指導，使我不管在論文或是日常雜事都能吸取他們的經驗更上層樓。同時還要感謝抓抓、世庸、云婷、聖容，因為有他們的扶持，使我在這兩年的求學生涯中並不孤單，也很高興我們都一起順利畢業了。還要感謝實驗室的學弟阿扁、小豬、天洋、證鈞幫我處理很多雜事還有工作上的協助，讓我在寫論文之外，也無須花太多心力在其他的事務上。還要感謝已畢業的張敬桐 學長在這段時間耐心的輔導我並提供寶貴的建議。

最後我要感謝的是我的家人，父母一直是我最重要的支持，不論開心或難過，他們的關心始終不變，姊姊在生活中也常帶給我歡樂與幫助，芳瑤一路陪伴著我進入研究所並陪伴著我畢業，在一起的時光是快樂的，也不斷的給予我鼓勵與支持，我要對我深愛的人們獻上這份榮耀。

# 目錄

摘要 .....	i
ABSTRACT .....	iii
目錄 .....	vi
表目錄 .....	viii
圖目錄 .....	ix
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	3
1.2.1 防火區劃 .....	3
1.2.2 玻璃受熱破裂 .....	4
1.2.3 火災模擬 .....	5
1.2.4 捲門分析 .....	7
1.3 研究內容 .....	8
第二章 法規與標準介紹 .....	10
2.1 國內法規與標準 .....	10
2.2 美國標準 .....	15
2.3 英國標準 .....	17
第三章 延燒防止理論方法及模擬軟體介紹 .....	19
3.1 延燒防止理論 .....	19
3.1.1 火災燃燒過程 .....	19
3.1.2 火源設計 .....	20
3.1.3 延燒類型 .....	23
3.1.4 抑制火災蔓延之設計 .....	27
3.2 火災模擬軟體(FDS) .....	29
3.2.1 流體力學之統御方程式 .....	29
3.2.2 差分方程式 .....	32
3.2.3 燃燒模式 .....	33
3.2.4 熱輻射之統御方程式 .....	35

3.2.5 邊界條件.....	36
3.3 模型建立軟體 PyroSim .....	38
3.4 ANSYS 有限元素法.....	40
3.4.1 ANSYS Mechanical 的主要分析功能.....	40
3.4.2 元素型態.....	41
3.4.3 結構理論基礎.....	41
<b>第四章 結果與討論.....</b>	<b>55</b>
4.1 模擬範圍 .....	55
4.2 參數設定 .....	55
4.2.1 火源大小設定.....	55
4.2.2 火災成長模式.....	56
4.2.3 防煙垂壁設計： .....	56
4.2.4 排煙設計： .....	56
4.2.5 補氣口設計： .....	56
4.2.6 邊界條件 .....	56
4.2.7 玻璃破裂量測點設置.....	57
4.2.8 格點設定方法與測試.....	57
4.2.9 人員安全標準判斷.....	59
4.3 玻璃材料破裂模擬.....	60
4.3.1 說明 .....	60
4.3.2 模擬結果.....	60
4.4 捲門模擬 .....	62
4.4.1 捲門變形模擬驗證.....	62
4.4.2 案例探討 .....	66
4.4.3 模擬結果.....	66
4.5 法規與標準檢討 .....	70
4.6 結果討論 .....	71
4.6.1 玻璃昇降機道.....	71
4.6.2 捲門模擬.....	71
<b>第五章 結論與建議.....</b>	<b>116</b>

## 表目錄

表 2.1	建築技術規則防火區劃相關規定 .....	11
表 2.2	「鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防設備設置規範」防火區劃相關規定 .....	12
表 2.3	國內防火門窗相關標準 .....	13
表 2.4	NFPA 130(2007)【29】防火區劃相關規定 .....	15
表 2.5	NFPA 130(2010)【30】防火區劃相關規定 .....	16
表 2.6	NFPA 耐火構件相關標準 .....	16
表 2.7	英國標準耐火構件相關標準 .....	17
表 3.1	火源成長模式係數 .....	22
表 3.2	火焰高度計算相關參數值 .....	25
表 4.1	邊界條件設定 .....	57
表 4.2	FDS 格點測試 .....	57
表 4.3	ANSYS 格點測試 .....	58
表 4.4	人體承受危害程度指標值分析表(SFPE 及紐西蘭設計) .....	59
表 4.5	建議人員逃生安全環境要求 .....	59
表 4.6	試體樣式 .....	63
表 4.7	捲門控制說明 .....	66
表 4.8	各情境達到危險時間 .....	68

# 圖目錄

圖 1.1	開口部所要求性能 .....	1
圖 1.2	研究架構圖.....	9
圖 3.1	火災發展過程圖 .....	44
圖 3.2	火災成長曲線圖 .....	45
圖 3.3	不同熱釋放率之火災成長曲線圖 .....	46
圖 3.4	T-Square 火災成長曲線圖 .....	46
圖 3.5	Kisok 實際量測之火災成長曲線圖 (NIST,1995) .....	47
圖 3.6	水平火焰及垂直火焰延燒【16】 .....	48
圖 3.7	熱輻射傳導型態係數【17】 .....	49
圖 3.8	熱輻射型態係數 .....	50
圖 3.9	防火區劃方式 .....	51
圖 3.10	FDS 分析執行計畫流程圖 .....	52
圖 3.11	FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖 .....	53
圖 3.12	元素 SHELL181 .....	53
圖 3.13	應力向量圖.....	54
圖 4.1	模擬範圍外觀示意圖 .....	73
圖 4.2	玻璃分間牆外觀示意圖 .....	73
圖 4.3	電扶梯間防火捲門區劃 .....	74
圖 4.4	案例一補氣口位置圖 .....	74
圖 4.5	玻璃破裂量測點設置位置 .....	75
圖 4.6	FDS 格點測試溫度分佈 .....	76
圖 4.7	火源位置.....	76
圖 4.8	情境一昇降機旁火源煙層圖 .....	77
圖 4.9	情境一昇降機旁火源煙層圖 .....	78
圖 4.10	情境一煙層分佈圖 .....	79
圖 4.11	情境二煙層分佈圖 .....	80

圖 4.12 門片組成方式 .....	81
圖 4.13 快速捲門排列方式 .....	81
圖 4.14 大型加熱爐模型側視圖 .....	82
圖 4.15 大型加熱爐模型立面圖 .....	82
圖 4.16 大型加熱爐模擬升溫曲線 .....	83
圖 4.17 試體變形導致背火面加熱情形 .....	84
圖 4.18 ANSYS 門片模型外觀 .....	85
圖 4.19 ANSYS 門片模擬拘束條件 .....	85
圖 4.20 變形量模擬結果 .....	86
圖 4.23 上門片變形量模擬結果(16min) .....	88
圖 4.24 上門片變形量模擬結果側視圖(16min) .....	88
圖 4.25 中門片變形量模擬結果(12min) .....	89
圖 4.26 中門片變形量模擬結果側視圖(12min) .....	89
圖 4.27 下門片變形量模擬結果(18min) .....	90
圖 4.28 下門片變形量模擬結果側視圖(18min) .....	90
圖 4.29 捲門模擬討論範圍 .....	91
圖 4.30 捲門及火源位置 .....	91
圖 4.31 情境一煙層分佈圖 .....	92
圖 4.32 情境一地下三層溫度分佈圖 .....	93
圖 4.33 情境一地下三層能見度分佈圖 .....	94
圖 4.34 情境一地下三層 CO 分佈圖 .....	95
圖 4.35 情境一地下二層溫度分佈圖 .....	95
圖 4.36 情境一地下二層能見度分佈圖 .....	95
圖 4.37 情境二煙層分佈圖 .....	96
圖 4.38 情境二地下三層溫度分佈圖 .....	97
圖 4.39 情境二地下三層能見度分佈圖 .....	98
圖 4.40 情境二地下三層 CO 分佈圖 .....	99

圖 4.41	情境二地下二層溫度分佈圖 .....	99
圖 4.42	情境二地下二層能見度分佈圖 .....	99
圖 4.43	情境三煙層分佈圖 .....	100
圖 4.44	情境三地下三層溫度分佈圖 .....	101
圖 4.45	情境三地下三層能見度分佈圖 .....	102
圖 4.46	情境三地下三層 CO 分佈圖 .....	103
圖 4.48	各情境量測點溫度變化 .....	104
圖 4.49	防火捲門位置 .....	104
圖 4.50	門片形式 .....	104
圖 4.51	情境二捲門表面溫度 .....	105
圖 4.52	情境三捲門表面溫度 .....	106
圖 4.53	ANSYS 捲門模型 .....	107
圖 4.54	ANSYS 捲門模型 .....	107
圖 4.55	捲門均溫 .....	108
圖 4.56	捲門變形量 .....	108
圖 4.57	捲門變形模擬外觀 .....	109
圖 4.58	捲門變形模擬外觀 .....	109
圖 4.59	捲門變形量模擬結果 .....	110
圖 4.60	捲門熱應力模擬結果 .....	111
圖 4.61	捲門均溫 .....	112
圖 4.62	捲門變形量 .....	112
圖 4.63	捲門變形模擬外觀 .....	113
圖 4.64	捲門變形模擬外觀 .....	113
圖 4.65	捲門變形量模擬結果 .....	114
圖 4.66	捲門熱應力模擬結果 .....	115

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

近年來，我國陸續興建許多大型化、立體化、地下化之建築，在此趨勢發展下，對於災害的防範更顯重要，火災之危害常造成嚴重的人員傷亡及財物損失，其發生突然且破壞力迅速，實令人戒慎恐懼。

當火災發生後，建築物依其本身防火構造及防火組件組成之防火區劃侷限火勢發展並提供安全區劃以利人員逃生，防火區劃之性能及防火時效扮演相當重要之角色，一般來說，防火區劃之性能應具有（1）阻熱性（Insulation）、（2）遮焰性（Integrity）、（3）構造穩定（Stability）、（4）遮煙性等要求【1】。此外，防火區劃之弱點通常出現於區劃開口部；例如門、窗和管線所需開孔，開口部所要求性能如圖 1.1 所示【2】，因此在門、窗及其他開口部所設置之防火門窗、防火填塞都應具備良好的火、煙阻隔性，以確保其區劃空間之完整。

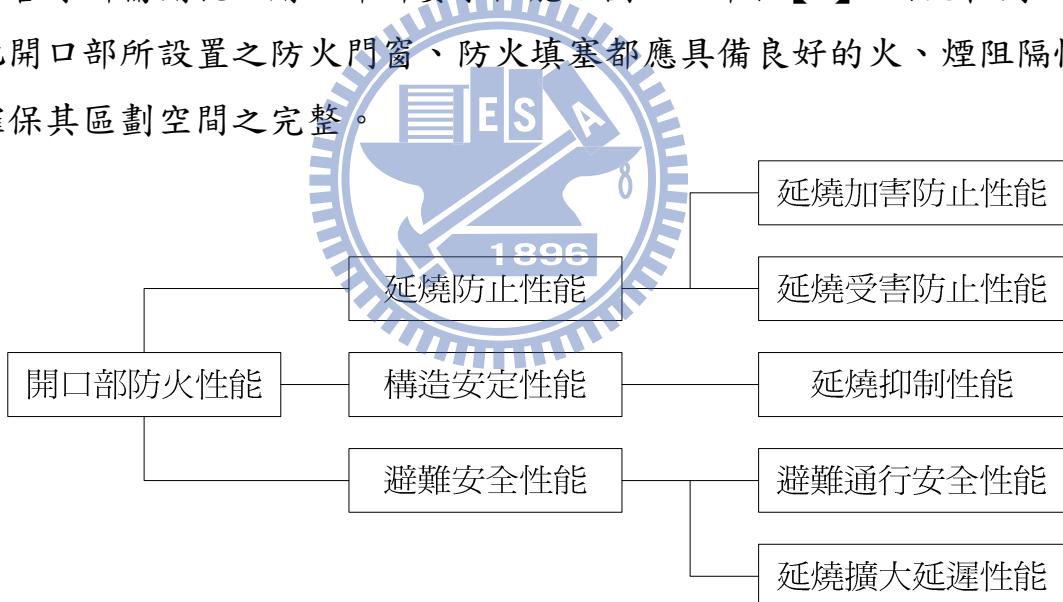


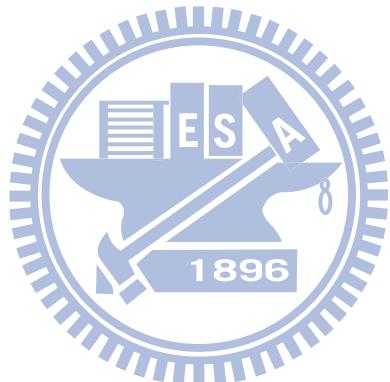
圖 1.1 開口部所要求性能

在百貨商場、車站、展覽館、美術館等需具有視覺穿透性及動線明顯特性之空間，常以玻璃分間牆或捲門作為其區劃方式。兩者各有不同之特性；就玻璃來說，玻璃為可耐高溫之材料，但當溫差過大時易導致玻璃變形破裂，而常用之強化玻璃在破裂後即會整面碎裂落下；就捲門而言，其

主要應用於區劃之開口部，平時收納於捲門廂中，火災發生後降下形成區劃分割，由於捲門之門片由鋼材所構成，受熱後升溫快速且變形量大。基於上述兩種區劃特性，以此兩種方式進行防火區劃，火災發生時可能面臨之危害如下：

1. 玻璃因溫差碎裂落下，火煙透過此開口蔓延。
2. 捲門快速升溫，高溫門片對非曝火面之熱輻射影響。
3. 捲門受熱變形造成開口部之區劃不完整。

鑑於上述問題，本研究透過法規整理、相關理論介紹、建立模型進行計算及軟體模擬，評估火災發生時建築物運用玻璃或是捲門進行區劃之個別變化行為，並討論火場在此情況可能造成之危害情形。



## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 防火區劃

張文耀【3】以實驗的方式分析影響分間牆隔熱性質之參數，其中包括面板厚度、耐燃級數、面板種類、填充材種類及骨架種類等五種因素，實驗結果顯示面板厚度為影響隔熱性最關鍵之因素，且雙層面板較單層為佳。

鄭紹材【4】探討區劃構件受火非曝火面之熱輻射造成鄰近建築材料引燃之研究，以實驗方式量測在中國國家標準的加熱實驗中鍍鋅鋼板捲門及膨脹型積層防火玻璃在非曝火面處之熱輻射值，其結果顯示，鍍鋅鋼板鐵捲門量測之背溫最高達  $800^{\circ}\text{C}$  而防火玻璃背溫最高  $89.1^{\circ}\text{C}$ ，並以此值配合先前對建築材料輻射引燃之實驗結果推估安全距離。

趙鋼【5】透過法規整理、工程調查分析法及 FDS 電腦模擬評估分析面積廣大及用途複雜之空間各類防火區劃行為之防範與研究分析，國外法規整理日本及美國部分規範，提出區劃空間越大，熱容量亦越大，達到危害指標時間越久，當起火點位於區劃中心點危險性較起火點位於區劃邊緣高，並建議以性能式設計時防火區劃不需受法規限制。

Babrauskas【6】透過整理前人之相關文獻及實驗結果進行研究對於耐火試驗中非曝火面溫度之規範。耐火試驗量測背溫並有所限制之目的是為了防止當火勢未侵入居室之前鄰近之可燃物引燃情形。他整理前人實驗結果後發現目前對於背溫之限制是過於保守的，因此建議任何量測背溫的熱電偶之最高溫度應在  $400^{\circ}\text{C}$  以下(應使用溫度而非溫差)；此外，由於各國規範在背溫規定有平均之最高溫度及任一點之最高溫度兩種規範，Vytenis 建議規定任一點之最高溫較為合理。

### 1.2.2 玻璃受熱破裂

Skelly 等人【7】以實驗的方式量測玻璃於火災環境中受熱破裂之溫度、時間，實驗結果顯示當玻璃邊緣在有包覆的情況下較玻璃邊緣無包覆的情況容易破裂，由實驗數據及結果指出玻璃破裂主要是受熱不分中心點與玻璃邊緣溫差所造成，且溫差大約於 90°C 時產生破裂。

Joshi 和 Pagni 【8】針對火災環境中的玻璃進行熱傳理論的探討，此研究指出玻璃的溫度場是由熱傳係數(heat transfer coefficient)、輻射衰退長度(radiative decay length)及火焰熱輻射(flame radiative)所支配，其中，輻射衰退長度下降及火焰熱輻射增大將會使得玻璃表面溫度上升，此外，當玻璃邊緣遮蔽寬度越寬及衰退長度下降會使玻璃破裂時間減少，本研究也指出當火災剛發生時，因熱輻射緣故玻璃溫度可能會高於熱氣層溫度，之後將會低於熱氣層溫度。

Dembele 等人【9】運用 DOM 方法計算光譜的熱輻射傳導，分析玻璃在火災中受熱之影響，並與三份文獻之實驗數據進行比較，首先對照 Skelly et al. 之居室火災實驗，第二組為戶外火災熱輻射對於玻璃之影響，第三組對照不同的熱輻射量之實驗數據，其計算結果誤差值在 12% 以下，並可針對不同的火災情境進行計算分析。

Xie 等人【10】於 ISO 9705 火災實驗室進行全尺寸火災實驗，分析厚度 6 mm 及 10 mm 的強化玻璃破裂及掉落的現象，實驗記錄玻璃受熱面與邊緣遮蔽部分之溫差，實驗結果顯示厚度 6 mm 的玻璃在溫差 330~380°C 時破裂而 10 mm 厚度的玻璃破裂溫差為 470~590°C，當玻璃任何一處產生破裂後玻璃立即掉落，本實驗亦以小片玻璃裝框取代大片玻璃進行實驗，結果顯示取代厚玻璃將較不易破裂。

### 1.2.3 火災模擬

NFPA 92B 【11】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 【12】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 2010 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 【13】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。

Simcox 等人【14】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。

Chow 等人【15】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【16】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 15m<sup>3</sup>/s；月台層之排煙系統提供 13m<sup>3</sup>/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【17】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。

蕭建永【18】以 FDS (Fire Dynamics Simulator) 模擬當火災時，間隔牆與空調風管連接處裝設防火閘門之性能，並以實驗測試防火閘門之耐火性能，結果顯示煙流動較火勢快速，當無設置防火閘門時，煙在 120 秒蔓延所有辦公空間，而在有設置防火閘門情況下，煙被控制於起火室，其他空間不受威脅，並提出以模擬方式進行防煙閘門之驗證合理性。

#### 1.2.4 捲門分析

李鎮宏等人【19】運用數值模擬探討鋼結構受火害之火場環境與非線性結構行為，使用 FDS 計算火場結構之溫度場搭配 ABAQUS 有限元素軟體進行熱傳與結構行為分析。模擬結果顯示，不同位置之火源在火災全盛期時對環境溫度影響不明顯，而結構體溫度分佈雖略有不同，但在環境最高溫度相當接近之情況下，結構之斷面軸力之最大值差異不大。

陳建銘【20】以中國國家標準 CNS12514 A3305「建築物構造部份之耐火試驗法」為標準，進行 FDS 電腦模擬與大型加熱爐試驗。在模擬結果的部分，由 FDS 所模擬出之加熱爐環境與標準試驗相當接近，但對於測試設備-防火鐵捲門背溫之量測在不斷加細網格的嘗試下仍宣告失敗，原因歸納有可能是網格設置過大或是複合材料性質不易表現，因此 FDS 電腦模擬不適用於微觀、小尺寸與尺寸差異過大複合材料之模擬。

涂耀庭【21】以有限元素法模擬防火門耐火測試，藉以找出影響耐火時效(Fire resistance during)的因素。研究中採用有限元素軟體 ANSYS 作為研究平台，考慮材料以及結構之輻射(Radiation)、對流(Convection)及傳導(Conduction)效應。經由模擬結果此研究作出以下結論；(1) 防火材料中熱傳導係數影響防火門之阻熱時效最大；(2) 防火門骨架結構對於阻熱時效影響甚鉅；(3) 材料性質為影響模擬準確性的重要參數。

### 1.3 研究內容

本論文針對玻璃或捲門構成之防火區劃進行探討，透過文獻回顧、國內外法規整理、延燒理論介紹並進行案例之數值模擬分析，研究架構如圖 1.2 所示，研究內容分為兩部分說明：

#### 一、 玻璃區劃

由於玻璃在溫度差異過大時，有破裂掉落之虞，一旦發生此情形，火場中帶有高溫、有毒氣體之濃煙將很快的透過破裂之開口蔓延至非起火居室。在所模擬之火場模型中，將設置由玻璃構成防火區劃之空間，透過美國 NIST (National Institute of Standards and Technology) 所發展的火災模擬軟體 FDS【22】(Fire Dynamics Simulator) 進行火災之流場、溫度場及煙層流向作三維模擬分析，藉由不同火源位置之情境比較玻璃破裂對於火場安全之影響。

#### 二、 捲門區劃

捲門在火場中隨環境溫度快速升高，材料結構產生變形及熱應力，在此部份，本研究先使用前述火災模擬軟體 FDS【22】進行火場之三維模擬分析，並搭配有限元素軟體 ANSYS 進行火災-結構(Fire-Structure)之數值分析。火場與結構間之熱傳效應包括熱傳導、熱對流以及熱輻射，這些熱傳效應在 FDS 模擬時納入，至於在 ANSYS 結構分析則以結構內部之熱傳導效應為主。首先由 FDS 進行火災環境之模擬，此時可獲得捲門非曝火面之熱輻射影響及捲門之表面溫度，運用捲門表面溫度之模擬結果作為 ANSYS 結構分析之輸入參數，再由 ANSYS Multiphysics. 耦合分析方法進行捲門溫度分佈及熱負載之結構模擬分析，由此分析可得到捲門在火災時之結構變形行為。

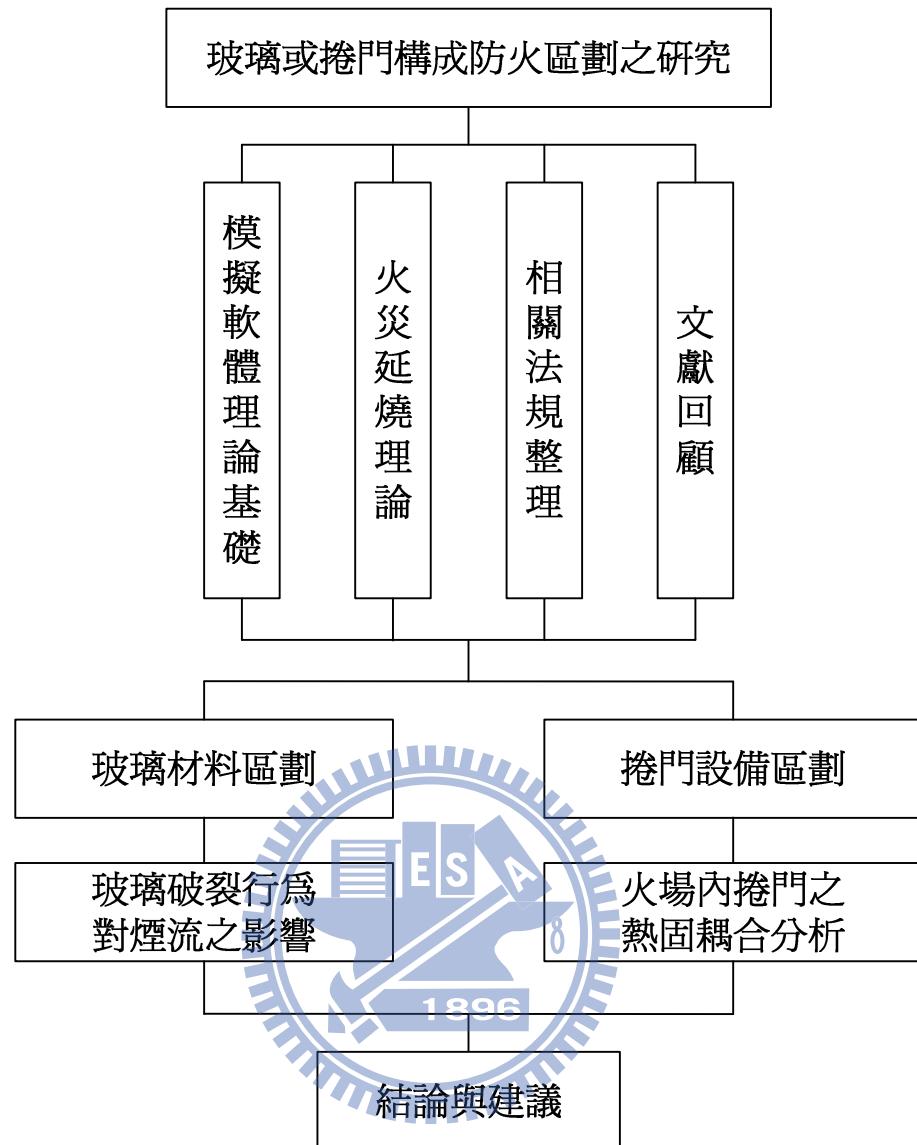


圖 1.2 研究架構圖

## 第二章 法規與標準介紹

### 2.1 國內法規與標準

國內建築相關規定有「建築法」及「建築技術規則」，其中「建築技術規則」設計施工篇第三章、第四章對於建築物之消防安全有其明確之規範，對於建築物防火區劃之相關規範內容整理如表 3.1 所示。對於較為特殊之建築物而言，我國亦有針對特殊用途之建築物訂定之消防安全法規，例如地下隧道及地下場站，不論是建築形態或其用途相較於一般建築物都有其獨特之處，鑑於此交通部於民國 97 年頒布「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」【23】，提供設計者另一依據標準，其中第三章明確規範地下場站之消防安全相關設施、設備，對於建築物防火區劃之相關規範內容整理如表 3.2 所示，其規範內容參考國內外相關規定，如我國建築技術規則、美國 NFPA 及日本地下鐵路火災對策基準等，就防火區劃規定而言，除面積區劃的規定以外都較國內建築技術規則之規定嚴格且詳細，由此亦可見地下場站之特殊性及防救災困難性。

防火區劃相關規定不外乎對於面積<sup>6</sup>、用途、垂直區劃、貫穿部等部份訂定其所應具備之防火時效，在進行區劃時可用鋼筋混泥土牆、防火門窗、防火填塞等方式進行，就居室空間而言，常見的開口部分均是以門窗所構成，而門窗則為此一區劃空間最脆弱之部分，例如在一個視覺穿透性高、人員動線明顯之建築物，如車站、商場等，經常會使用防火捲門作為區劃方式，一旦發生火災事故其將自動關閉形成防火區劃，為確保防火門窗可有效發揮其功能，國內亦特別規定防火門窗之性能標準，國內生產製造之防火門需具有經濟部所核發的驗證登錄證書，此經過性能驗證之合格防火門始能被建築設計者所採用，國內對於防火門窗相關規定如表 3.3 所示，試驗標準均明確規範實驗室規模、量測方法、精度要求及最後判斷之標準，而未規定出材質要求，為性能導向之規範。

表 2.1 建築技術規則防火區劃相關規定

檢討內容		條次	條文概述
面積區劃	樓層 $\leq 10$ 層	79	規定每小於 $1500\text{ m}^2$ 為防火區劃且防火時效達 1 小時以上
	樓層 $\geq 11$ 層	83	規定高樓層不同用途空間應有之防火區劃面積
特定用途空間區劃		79-1	放寬特定空間面積限制
垂直區劃	挑高空間	79-2	規定 1 小時防火時效
	電扶梯間		可排除此條規定之條件:
	昇降機間		1. 避難層直上、直下層且內裝為耐燃一級
	垂直貫穿樓板 之管道間及其 他類似部分		2. 連跨三層以下，且樓地板面積小於 $1500\text{ m}^2$
層(戶)間區劃		79-3~79-4	應設防火外牆構造物
貫穿部區劃		85	貫穿部應設 1 小時防火時效防火閘門或防火填塞
地下建築物區劃	與地下建築物 連通區劃	181、189	規定緩衝區防火時效、裝修材料限制、面積、防火避難設施等(緩衝區具 1 小時防火時效)
	地下建築物本體區劃	201~203	規定供地下使用單元每小於 $1000\text{ m}^2$ 為防火區劃且防火時效達 1 小時以上
	中央管理室	182	規定防火時效 2 小時
高層建築物區劃		241~242	應設特別安全梯、垂直防火區劃
		259	規定防災中心防火時效 2 小時
防火區劃之防火門窗		75~76	說明防火門窗之構造及安裝方式

表 2.2 「鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防設備設置規範」防火區

劃相關規定

檢討內容	條次	條文概述
地下場站區 劃	3.1.2	規定緩衝區防火時效、裝修材料限制、面積、防火避難設施等(緩衝區具 2 小時防火時效)
地下建築物本體區劃	3.1.5	規定主結構 3 小時、樓地板 2 小時防火時效
面積區劃	3.1.9	規定每小於 $1000\text{ m}^2$ 為防火區劃
用途區劃	3.1.8	規定 2 小時防火時效，且防火門窗具 1 小時阻熱性與遮煙性能
	3.1.11 3.1.13 3.1.14	規定 2 小時防火時效，此外防火門窗具 1 小時阻熱性與遮煙性能
	3.1.12	規定 3 小時防火時效，且防火門窗具 1 小時阻熱性與遮煙性能
	3.1.15	規定 1 小時防火時效
垂直區劃	3.1.7	規定 2 小時防火時效，且防火門窗具 1 小時遮煙性能
貫穿部區劃	3.1.17	貫穿部應設 2 小時防火時效 防火閘門或防火填塞

表 2.3 國內防火門窗相關標準

標準	適用對象	條文概述
CNS 11227 【24】	防火門	<ol style="list-style-type: none"> <li>對加熱溫度、加熱試驗、加熱後噴水試驗、加熱後衝擊試驗、加熱後室溫遮煙試驗建立標準</li> <li>加熱溫度於三小時約 1000°C</li> <li>分為 A 種 (具阻熱；背溫低於 260 °C ) 及 B 種 (不具阻熱性；背溫高於 260 °C )</li> </ol>
CNS 12514 【25】	建築構造	<ol style="list-style-type: none"> <li>對建築結構耐火性能建立標準，包含牆壁、樓板、屋頂等。</li> <li>對加熱溫度、加熱試驗、加熱後噴水試驗、加熱後衝擊試驗建立標準</li> <li>加熱溫度於三小時約 1100°C</li> <li>阻焰性判定以不出現下列情形為原則:           <ol style="list-style-type: none"> <li>棉花墊引燃</li> <li>非加熱面出現火焰超過 10 秒</li> </ol> </li> <li>阻熱性判定以不出現下列情形為原則:           <ol style="list-style-type: none"> <li>非加熱面均溫超過 170°C</li> <li>非加熱面任一點溫度超過 210°C</li> </ol> </li> <li>防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時、3 小時及 4 小時</li> </ol>
CNS 14803 【26】	防火捲門	<ol style="list-style-type: none"> <li>對加熱溫度、加熱試驗、加熱後噴水試驗、加熱後衝擊試驗建立標準</li> <li>加熱溫度於三小時約 1100°C</li> <li>阻焰性判定以不出現下列情形為原則:           <ol style="list-style-type: none"> <li>非加熱面出現火焰超過 10 秒</li> <li>捲門底部上拱量超過 1.91 cm</li> <li>捲門葉片脫出導軌</li> </ol> </li> <li>阻熱性判定以不出現下列情形為原則:           <ol style="list-style-type: none"> <li>非加熱面均溫超過 170°C</li> <li>非加熱面任一點溫度超過 210°C</li> </ol> </li> </ol>

		<p>5. 防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時、3 小時及 4 小時</p> <p>6. 依其性能可分為不同之防火時效與阻熱性組合</p>
CNS 14815 【27】	防火窗	<p>1. 對加熱溫度、加熱試驗、加熱後噴水試驗、加熱後衝擊試驗</p> <p>2. 加熱溫度於三小時約 <math>1100^{\circ}\text{C}</math></p> <p>3. 阻焰性判定以不出現下列情形為原則:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A. 非加熱面出現火焰超過 10 秒</li> <li>B. 組件與周圍壁體產生貫穿間隙</li> </ul> <p>4. 阻熱性判定以不出現下列情形為原則:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A. 非加熱面均溫超過 <math>170^{\circ}\text{C}</math></li> <li>B. 非加熱面任一點溫度超過 <math>210^{\circ}\text{C}</math></li> </ul> <p>5. 防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時</p> <p>6. 依其性能可分為不同之防火時效與阻熱性組合</p>
建築用防火門同型式判定原則【28】	防火門	<p>1. 簡化建築用防火門檢驗作業</p> <p>2. 經同型式判定之防火門組其尺寸與五金得依申請項目變更</p>

## 2.2 美國標準

美國消防協會（National Fire Protection Association，簡稱 NFPA）成立於 1896 年 11 月 6 日，其規範包含各種用途建築物之防火、消防、避難、煙控及試驗標準等等。NFPA 130 為針對固定式軌道運輸系統之規範，1983 年制定出第一版本，最近年版本為 2007 及 2010 年版，見表 3.4 及表 3.5，我國「鐵路隧道及地下場站防火避難設施及消防設備設置規範」即參考 NFPA 130 內多處規範，富有與世界接軌之意義。防火門窗相關之試驗標準有 NFPA 80 為防火門窗標準、NFPA 252 為防火門試驗方法、NFPA 257 為防火窗及玻璃組件防火試驗標準，其相關內容整理於表 3.6。

表 2.4 NFPA 130(2007)【29】防火區劃相關規定

檢討內容	條次	條文概述
車站主體結構	5.2.1	結構防火時效應依 NFPA 220 規定，防火時效 0~4 小時不等
樓梯電扶梯	5.2.3.1	供乘客使用者不需區劃
用途區劃	動力室	5.2.3.2.1 規定防火區劃時效 3 小時
	電氣、電池室	5.2.3.2.2 規定防火區劃時效 2 小時
	垃圾室	5.2.3.2.3 規定防火區劃時效 1 小時
	列車控制室	5.2.3.2.4 規定防火區劃時效 2 小時
	門及開口部	5.2.3.3 5.2.3.3.1 規定防火時效為 1.5~3 小時不等
公共區與非公共區防火時效	5.2.3.5.1	規定防火時效 3 小時
性能式設計	5.2.3.5.2	同意以工程分析方法修正防火時效
防火門	5.2.3.6.1	非公共區與公共區間開口應採該居劃防火時效之防火門
	5.2.3.6.2	規定防火門開啟方式
	5.2.3.6.3	規定防火門安裝依 NFPA 80 規定

表 2.5 NFPA 130(2010)【30】防火區劃相關規定

檢討內容	條次	條文概述
車站主體結構	5.2.2.1	結構防火時效應依 NFPA 220 規定，防火時效 0~4 小時不等
樓梯電扶梯	5.2.3.1.1	供乘客使用者不需區劃
公共區與非公共區間區劃	5.2.3.2	規定區劃分割
公共區運輸系統與非系統區域	5.2.3.5	規定連接處應進行防火區劃

表 2.6 NFPA 耐火構件相關標準

標準	適用對象	條文概述
NFPA 80 2010【31】	防火門、開口部構件	<ol style="list-style-type: none"> <li>各種形式之開口部構件安裝、動作方式、適用環境等等規範</li> <li>對防火門窗依適用之位置和欲防護之火災規模分為五類</li> <li>防火門窗上應標有尺寸及適用規格，若無標記背溫規格則其背溫將超過 343°C(30 分鐘)</li> <li>作為樓梯區劃用途之防火門其背溫應使用背溫 232°C(30 分鐘)以下之規格</li> </ol>
NFPA 251 2006【32】	建築結構	<ol style="list-style-type: none"> <li>對建築結構耐火性能建立標準，包含承重、非承重牆、梁、柱等。</li> <li>試驗包含耐火性質及噴水試驗</li> <li>規定非承重牆非曝火面之溫度與初始溫度之溫差不得大於 140°C</li> </ol>
NFPA 252 2008【33】	防火門、防火捲門	<ol style="list-style-type: none"> <li>試驗包含耐火性質及噴水試驗</li> <li>加熱溫度於四小時約 1100°C</li> <li>非強制規定背溫，經過測試之防火門符合背溫 140°C、250°C、361°C(30 分鐘)標準特別標示。</li> </ol>
NFPA 257 2007【34】	防火窗 玻璃組件	<ol style="list-style-type: none"> <li>試驗包含耐火性質及噴水試驗</li> <li>加熱溫度於三小時約 1100°C</li> <li>要求非曝火面之熱輻射值註明於報告中</li> </ol>
		<ol style="list-style-type: none"> <li>對加熱溫度、加熱試驗、加熱後噴水試驗建立標準</li> <li>加熱溫度於三小時約 1100°C</li> </ol>

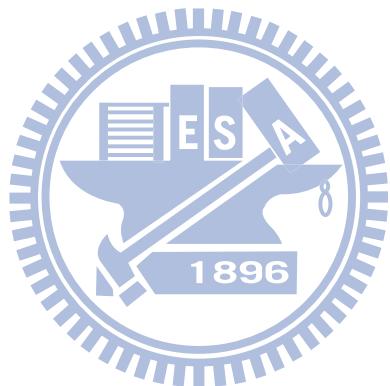
## 2.3 英國標準

英國標準由參考國際上及歐洲相關規範為提供設計者參考標準所編匯而成，且以下英國標準均通過歐洲標準委員會 CEN 之認可，於歐洲標準會員國均可適用，提供英文、法文、德文三種版本。

表 2.7 英國標準耐火構件相關標準

標準	適用對象	條文概述
BS EN 1363-1 【35】	所有耐火結構、組件	<ol style="list-style-type: none"> <li>加熱溫度於三小時約 <math>1100^{\circ}\text{C}</math></li> <li>阻焰性判定以不出現下列情形為原則:           <ol style="list-style-type: none"> <li>棉花墊引燃</li> <li>非加熱面持續出現火焰</li> </ol> </li> <li>阻熱性判定以不出現下列情形為原則:           <ol style="list-style-type: none"> <li>非加熱面均溫超過初始均溫 <math>140^{\circ}\text{C}</math></li> <li>非加熱面任一點溫度超過初始均溫 <math>180^{\circ}\text{C}</math></li> </ol> </li> </ol>
BS EN 1363-2 【36】	所有耐火結構、組件	<ol style="list-style-type: none"> <li>建立耐火試驗的熱輻射量測方法</li> <li>熱輻射測量位置為距離非曝火面 <math>1\text{m}</math> 處</li> <li>對 <math>300</math> 以下表面未規定熱輻射量測</li> <li>每個特定測量位置應紀錄輻射值達到 <math>5、10、15、20、25\text{kW/m}^2</math> 之間</li> </ol>
BS EN 1634-1 【37】	防火門、 防火捲門	<ol style="list-style-type: none"> <li>實驗量測方法依照 BS EN1363-1 及 BS EN1363-2</li> <li>阻熱性及阻鰥性標準如 BS EN1363-1</li> <li>熱輻射標準如 BS EN1363-2</li> </ol>
BS EN 13501-2 【38】	建築結構及 組件	<p>對通過試驗物件之測試性能分為許多項目：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>R—承重能力（受熱情況下結構穩定）</li> </ol>

- |  |   |
|--|---|
|  | <p>2. E—阻焰性 (BS EN1363-1)</p> <p>3. I—阻熱性 (BS EN1363-1)</p> <p>4. W—抗熱輻射能力 (距非曝火面 1m 低於 15kW/m<sup>2</sup>)</p> <p>5. M—機械行為 (抵擋衝擊力之能力)</p> <p>6. C—自動關閉能力</p> <p>7. S—遮煙性 (分為 S<sub>a</sub> 在周遭環境溫度條件下及 S<sub>m</sub> 在周遭環境溫度及 200°C 條件下)</p> <p>8. K—防火時效</p> |
|--|---|



## 第三章 延燒防止理論方法及模擬軟體介紹

### 3.1 延燒防止理論

#### 3.1.1 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 3.1 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  $600^{\circ}\text{C}$  時，或地板表面積之熱輻射約達  $20 \text{ kW/m}^2$ ，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  $1200^{\circ}\text{C}$  以上。

#### 5. 衰退期 (Decay)

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

### 3.1.2 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<sup>6</sup>，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【39】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  $500\text{kW/m}^2$ ，而辦公室建築每單位面積之熱釋放率則為  $225\text{kW/m}^2$ 。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  $500\text{kW/m}^2$  ( $44\text{Btu/s-ft}^2$ )，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  $225\text{kW/m}^2$  ( $20\text{Btu/s-ft}^2$ )。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  $2\text{MW}$ ，而於大型空間中存放可燃物最小火源則為  $5\text{MW}$ ，此外一般大型火源則制定為  $25\text{MW}$ 。

## 2. 非穩態火源 (Unsteady fire)

在 NPFA 92B【40】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【41】，也就是將式 (3.1) 中的  $n$  取 2 並且加入不同火源成長時間的觀念成為如式 (3.2) 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 3.2(a)、3.2(b) 所示。

$$Q = \alpha(t - t_0)^n \quad (3.1)$$

$Q$ ：火源的熱釋放率 ( $\text{kW}$ )

$\alpha$ ：火源的成長係數 ( $\text{kW/s}^2$ )

$t$ ：開始燃燒後的時間 ( $\text{s}$ )

$t_0$ ：有效的著火時間 ( $\text{s}$ )

$n$ ： $1, 2, 3, 4, \dots$

$$Q = \alpha t_g^2 \quad (3.2)$$

$t_g$ ：有效的燃燒後的時間 ( $\text{s}$ )

此式稱為 "T-Squared Fires"，NFPA92B 使用成長時間的觀念，成長時間

$t_g$  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 3.1 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 3.3 所示。各種火源成長型式及其各類替代物質如圖 3.4 所示。

表 3.1 火源成長模式係數

項目	成長係數		成長時間
T-Squared Fires	A (kW/s <sup>2</sup> )	$\alpha$ (Btu/s <sup>2</sup> )	$t_g$ (s)
緩慢 (Slow)	0.002931	0.002778	600
普通 (Medium)	0.01172	0.01111	300
快速 (Fast)	0.04689	0.04444	150
極快速 (Ultra Fast)	0.1876	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 3.5 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。

### 3.1.3 延燒類型

依照延燒類型之不同可分為三種形式：飛火、接焰與輻射熱，接焰與輻射熱常為同時進行且相互作用，近距離延燒接焰與輻射熱同時作用，遠距離延燒時由輻射熱先行加熱，一旦受加熱之可燃材料接觸火焰或是達到材料引燃輻射照度即瞬間起火，飛火的發生則由火災發生處之可燃物材料以及氣流所決定，一般飛火均發生於木造建築物。以下就針對這三種延燒類型分別加以討論【42】：

#### 1. 飛火

通常發生於木造建築物，防火構造建築物發生飛火之可能性低，飛火由火粉附著於木質材料等可燃性材料作為其媒介物，透過燃燒之熱氣流或自然風向外飄動，一旦掉落在可燃物上即有可能引起飛火火災，飛火所能延燒之距離與風速成正比，與上升氣流傾斜角及星火的性質、粒徑有關，為三種延燒類型中最遠。以都市大火為例，1994 年發生於日本富山縣火災，飛火延燒達到 2750m 的最大飛火距離【42】。

#### 2. 接焰

接焰為可燃材料因火焰直接接觸導致引燃之情形，在防火建築物居室發生火災，其接焰途徑唯有外牆開口部，然而在火災高溫高熱的情況下，居室外牆受到火焰而產生變形甚至破壞結構亦會造成接焰延燒的發生，由建築研究所進行的一個全尺寸實驗中【43】，於一居室(7.4mx6.5m)進行木堆燃燒實驗，燃燒後 25 分鐘，鋁橫料產生變形帷幕外牆部分掉落造成火焰竄出，居室設置之具阻熱性與遮焰性防火區劃產生缺口而遭到破壞。在一個設計上有缺失之防火建築物，雖其結構為不可燃材料但仍然會因高溫而變形、破壞造成防止火勢蔓延之缺口，此種情況造成火焰由缺口竄出，增大接焰延燒之可能。

火焰延燒可在任何可燃物質發生，當火焰加熱空氣，熱空氣因密度變化產生向上流動之氣流柱(plume)，以牆面延燒與水平延燒相比，因牆面延

燒熱氣流加熱範圍與接焰位置相近，因此延燒速度較為快速，造成之危害亦較大，如圖 3.6 所示【44】。

空間分區之火源對上層空間或對對面空間是否產生延燒，均依據火焰高度等相關資料，而火焰的高度與火源的有效直徑有關，火焰高度之定義可分為以下幾種，並可依半理論實驗公式計算【45】：

(1) 連續火焰高度(Solid Flame Height)：

長時間穩定存在火焰之連續火焰域的高度，在計算熱輻射量時，通常以此作為計算依據。

(2) 間歇火焰高度(最高火焰高度)(Intermittent flame height)：

火焰因周期性的上升氣流造成火焰上端見歇性的存在見些火焰域，取其見些性存在之最高高度及為間歇性火焰高度，通常用以判斷對象物是否產生接焰延燒。

(3) 平均火焰高度：

時段內脈動火焰高度之平均值。

火焰之高度計算公式如式(3.3)及式(3.4)所示，此半經驗公式之相關參數值如表 3.2 所示。

$$L_F = r \cdot Q^{*n} \cdot D \quad (3.3)$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_\infty C_p T_0 \sqrt{gD^5}} = \frac{Q}{1116 D^{5/2}} \quad (3.4)$$

$L_F$ ：火焰高度(m)

D：火源代表長度(m)

Q：火源熱釋放率(kW)

N：實驗乘幕

R：實驗常數

$Q^*$ ：火源熱釋放率無次元數

$\rho_\infty$ ：捲入空氣密度

C<sub>p</sub>：捲入空氣比熱

T<sub>0</sub>：捲入空氣溫度

g：重力加速度

表 3.2 火焰高度計算相關參數值

火源條件	發熱條件	n	r	
			間歇火焰	連續火焰
自由空間	$0.3 < Q^* < 1.0$	2/3	3.5	1.8
面火源	$1.0 < Q^*$	2/5	3.5	1.8
線火源	-	2/3	4.5	2.8

### 3. 輻射熱

獨立的居室火災，其外牆開口部及噴出火焰之加害輻射熱會形成一大面積之輻射熱源，可能造成受熱輻射之材料達到其材料引燃輻射值而著火造成延燒之情形，在建築物密集的都市區域或是建築物內結構為無法有效阻隔熱輻射之隔間牆，熱輻射的延燒效應更為明顯。

熱輻射可由史蒂芬-波茲曼方程式(Stefan-Boltzmann equation)來表示如式(3.5)所示，熱輻射和溫度四次方成正比，此外，某一面受到熱輻射之強度可以用式(3.4)表示，其中 F 為型態系數(configuration factor)，型態係數如式(3.7)由熱輻射釋放源之幾何形狀、受熱輻射面之幾何形狀、兩者間距所構成如圖 2.7 所示【44】，常見的熱輻射釋放源與受輻射面幾何形狀與相對位置之型態係數如圖 2.8 所示【45】。

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.5)$$

E：物體之熱輻射 ( $\text{W/m}^2$ )

$\varepsilon$ ：放射率，物體表面材質的熱輻射性質

$\sigma$ ：史蒂芬-波茲曼常數 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

T：物體之絕對溫度(K)

$$q'' = F \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.6)$$

F：型態係數(configuration factor)

$$F = \int_0^{A_i} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} \bullet dA_i \quad (3.7)$$

在 NFPA 80 的附錄 I 中指出計算通過玻璃之熱輻射對於非曝火面之輻射量可以用式(3.8)表示，並指出玻璃穿透率  $t$  經過許多報告顯示其值介於 0.4 至 0.6 之間且穿透率 0.5 常用於分析玻璃非曝火面之熱輻射量。

$$I_i = F t I \quad (3.8)$$

$I_i$ ：非曝火面輻射量

$F$ ：型態係數(configuration factor)

$t$ ：玻璃穿透率(transmisivity of the glazing material)

$I$ ：火場熱輻射

在 NFPA 92B 中所建議火源之熱輻射量計算方法，以在火源中心半徑為  $R$  之空間範圍內，火源對該區域內產生之熱輻射量為  $q''$ ，如式(3.9)及式(3.10)所示，其中熱輻射分率依據不同燃料類型介於 0.2~0.6 之間，NFPA 92B 建議以 0.3 作為一般火源之熱輻射分率，且受熱輻著火之下限值定為  $10\text{ kW/m}^2$ ，除非有實驗測試結果得以替換。

$$R = \left( \frac{Q_r}{4\pi q_r''} \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

$R$ ：受熱輻射傳導物體至火源中心之距離 (m)

$Q_r$ ：火源熱輻射傳導 (kW)

$q_r''$ ：可燃物引燃熱輻射值 ( $\text{kW/m}^2$ )

$$Q_r = \xi \cdot Q \quad (3.10)$$

$Q_r$  : 火源熱輻射傳導 (kW)

$Q$  : 火源熱釋放率 (kW)

$\xi$  : 热輻射分率(radiative fraction)

### 3.1.4 抑制火災蔓延之設計

在火災的燃燒過程中，火勢蔓延的形勢有所不同，在火災初期，火勢擴大因子有火源種類、火源周遭之可燃物狀態，不同條件將造成不同之發展，一般情況下火焰由地板沿牆壁而延燒至天花板，隨之因溫度提高，環境中可燃性氣體增加，當火災現場產生之熱及累積足夠可燃性氣體將發生閃燃(flash over)，使的環境溫度迅速上升加快燃燒速度。在防火建築中火災發展受建築物內可燃物、空氣流入之流量及樓地板面積影響。

如同先前所述，火災之延燒途徑有飛火、火焰接觸及熱輻射等，為抑制火災蔓延透過先前對延燒之了解，建築物設計之初即應設計完善之被動性防火設施，並於火災發生後，以預先設置之滅火設備進行火災撲滅，火災之各發展階段防止火勢蔓延擴大之方法如下：

#### 1. 初期滅火

火災剛發生階段最為容易撲滅，燃燒面積與損害隨時間做二次方比例增加，而燃燒速度則依溫度變化呈指數增加，因此火災發生初期，及早發現通報，進行火勢控制為重要抑制火災方法之一。

#### 2. 防火區劃

火災發生後產生之火焰及有毒濃煙對人員、財產產生極大威脅，將建築物分割成若干區域，可將火勢限制於局部區域，限制火勢蔓延與擴大，如居室空間、樓梯間、管道間等。

防火區劃可分為水平及垂直兩種方式區劃，如圖 3.9 所示；水平防火區劃以面積及用途兩方面進行區劃，將大面積空間區劃成許多小空間可有效限制火勢成長，火災發生之該區劃以外空間則可維持安全環境提供人員避難，如走道、居室之間以具防火時效之結構分割區劃，於居室中發生火災時，走道仍可提供人員避難逃生；以用途不同之場所區劃分隔空間則可以限制每一空間內不同類型之可燃物，依空間內發生火災之風險與危險性進行消防之規劃，以達有效且經濟之消防設計。垂直防火區劃如樓層間之天花板、管道間之外牆均須考慮其防火時效，防止火勢越過天花板或是透過管道間之垂直通道向上延燒。

### 3. 控管可燃物

可燃物為燃燒重要因素之一，因此對於建築物發生火災風險較高之區域避免放置危險物、準危險物等，容易燃燒之紙張、文件收納於金屬櫃中，儲藏室收納之物品列表管理，周遭環境加以整頓降低起火可能及減緩燃燒速度。

### 4. 內裝材料難燃化、不燃化

建築物內部裝修材料難燃化、不燃化可以延緩火勢擴大之速度，有助於人員避難及消防搶救之進行，如窗簾、地毯等施以防焰處理，並將室內裝潢材料如天花板、牆壁、電線披覆使之難燃化，以抑制火勢之擴大。

## 3.2 火災模擬軟體(FDS)

FDS(Fire Dynamics Simulator)，是由美國國家標準與科技研究所(National Institute of Standard and Technology；NIST)發展之模擬火場計算軟體。於西元 2000 年 2 月公開發表第一版，現於西元 2010 年 10 月公開發表第五版(5.3.3 版)。

FDS 是 NIST 發展於低馬赫數的火災計算流體力學程式，可以計算三維空間火災行為，它的計算運作方式是先將整個空間分割成許多細小的格點，再以質量、動量、能量、燃燒與熱傳守恆等統御方程式下去求解。當計算完成後在利用後處理軟體 Smokeview【41】將流場可視化做靜態或動態的輸出，後處理軟體 Smokeview 亦於西元 2010 年 10 月公開發表第五版(5.6 版)。FDS 更可以將建築物內之煙控系統，撒水頭等消防設備建入模型中，以更符合實際上的需求，因此也被廣泛的使用在工程界上。

在使用 FDS 時必須先將模擬之幾何形狀、材料特性、火源大小、排煙設備、補氣口、大氣溫度、模擬時間以及邊界條件等...以固定之格式輸入至一文字檔(\*.data)，再由 FDS 軟體開始計算，由於 FDS 本身並沒有將流場可視化之功能，故需要再利用 Smokeview 軟體來讀取 FDS 所計算出之數據來做進一步的分析與探討。圖 3.10 為 FDS 流程圖，圖 3.11 為 FDS 與 Smokeview 之組織架構。

FDS 所使用之數值方法與其主要的統御方程式如以下所介紹。

### 3.2.1 流體力學之統御方程式

#### 1. 質量守恆

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (3.11)$$

其中  $\rho$ ：流體密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$u$  : 流體速度 (m/s)

$t$  : 時間 (s)

## 2. 動量守恆

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3.12)$$

其中  $p$  : 壓力 (nt/m<sup>2</sup>)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$f$  : 外力 (包含撤水頭之拖曳力) (nt/m<sup>3</sup>)

$\tau$  : 黏滯剪應力張量 (nt/m<sup>2</sup>)

## 3. 能量守恆

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{DP}{Dt} = Q - \nabla \cdot q'' + \nabla k \nabla T + \nabla \cdot \sum_{\ell} h_{\ell} (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} \quad (3.13)$$

其中  $\frac{DP}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla P$

$h$  : 焓 (kJ/kg)

$Q$  : 热釋放率 (kw)

$q''$  : 輻射熱通量 (kw/m<sup>2</sup>)

$k$  : 热傳導係數 (kw/mk)

$T$  : 溫度 (°C)

$h_{\ell}$  :  $\ell$  物種之焓值 (kJ/kg)

$D$  : 擴散係數 (m<sup>2</sup>/s)

$Y_{\ell}$  :  $\ell$  物種之質量分率

## 4. 物種守恆

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\ell}) + \nabla \cdot \rho Y_{\ell} u = \nabla \cdot (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} + \dot{W}_{\ell}''' \quad (3.14)$$

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

## 5. 狀態方程式

$$P = P_o - \rho_{\infty} g Z + \tilde{P} \quad (3.15)$$

對低馬赫數流而言

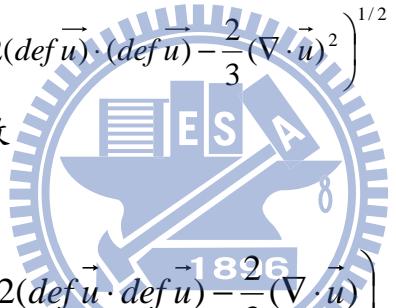
$$P_o = \rho T R \sum (Y_i / M_i) = \rho T R / M \quad (3.16)$$

其中  $P_o$  : 外界壓力 (nt/m<sup>2</sup>)

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

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

## 6. 擴散 LES(Large Eddy Simulation)模型



$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left( 2(\vec{\text{def } u}) \cdot (\vec{\text{def } u}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

其中  $C_s$  : 經驗常數

$\Delta$  : 格點長度

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

$$\text{定義} \quad (\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (3.18)$$

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} \quad (3.19)$$

其中  $Pr$  : 普郎特常數 (Prandtl number)

$Sc$  : 舒密特常數 (Schmidt number)

### 3.2.2 差分方程式

#### 1. 時間之離散

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

- a. 热物理性質  $\rho$ 、 $Y_i$  和  $p_0$  是利用顯性的尤拉法 (explicit Eluer step) 得到，例如密度可由下式預估

$$\rho^{(n+1)_e} = \rho^n - \delta(\bar{u}^n \cdot \nabla \rho^n + \rho^n \nabla \cdot \bar{u}^n) \quad (3.20)$$

- b. 解壓力的 Poisson 方程式則可由

$$\nabla^2 H^n = -\frac{(\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta} - \nabla \cdot \vec{F}^n \quad (3.21)$$

$\vec{F}$  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

$$\bar{u}^{(n+1)_e} = \bar{u}^n - \delta t(\vec{F}^n + \nabla H^n) \quad (3.22)$$

而 time-step 必須符合

$$\delta t < \min\left(\frac{\delta x}{u}, \frac{\delta y}{v}, \frac{\delta z}{w}\right) \quad (3.23)$$

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

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2} \left( \rho^n + \rho^{(n+1)_e} - \delta(\bar{u}^{(n+1)_e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)_e} + \rho^{(n+1)_e} \nabla \cdot \bar{u}^{(n+1)_e}) \right) \quad (3.24)$$

- d. 透過之前預估出來的結果來重新計算壓力

$$\nabla^2 H^{(n+1)_e} = -\frac{2(\nabla \cdot \bar{u})^{n+1} - (\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \vec{F}^{(n+1)_e} \quad (3.25)$$

更正過的速度如下

$$\bar{u}^{n+1} = \frac{1}{2} [\bar{u}^n + \bar{u}^{(n+1)_e} - \delta t(\vec{F}^{(n+1)_e} + \nabla H^{(n+1)_e})] \quad (3.26)$$

## 2. 空間之離散

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

### 3.2.3 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

$$\frac{\dot{m}_F'''}{V_F M_F} = \frac{\dot{m}_o'''}{V_o M_o} \quad (3.28)$$

$M_i$  :  $i$  分子之莫耳重量 (kg)

$m_i$  :  $i$  分子之質量消耗率 (kg/s)

$$\text{定義 } z = \frac{s Y_F - (Y_o - Y_o^\infty)}{s Y_F' + Y_o^\infty}; \quad s = \frac{V_o M_o}{V_F M_F} \quad (3.29)$$

其中  $Y_o^\infty$  : 氧氣於大氣中之質量分率

$Y_F^I$  : 燃料之質量分率

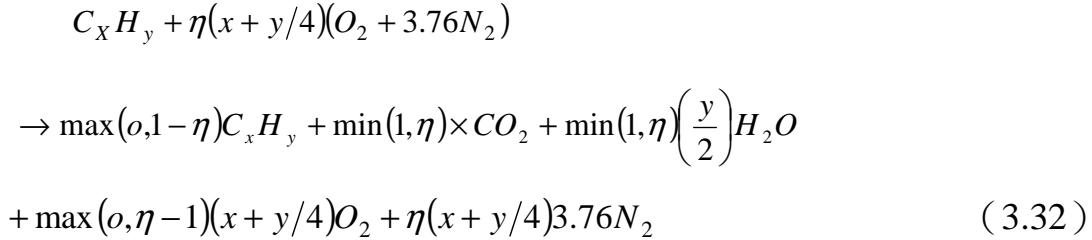
在此模式中假設，當燃料與氧同時存在同一空間時，便隨即產生化學

反應，因此火焰面( $Z_f$ )可定義為：

$$Z(x,t) = Z_f ; Z_f = \frac{Y_o^\infty}{sY_F^I + Y_o^\infty} \quad (3.30)$$

$$\text{且 } Y_o(Z) = \begin{cases} Y_o^\infty(1 - Z/Z_f) & Z < Z_f \\ o & Z > Z_f \end{cases} \quad (3.31)$$

由上述定義對一般碳氫化合物燃料之化學反應可以以下式表示：



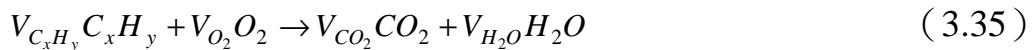
針燃燒反應之熱釋放率  $\dot{q}'''$  則由氧氣消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_o \dot{m}_o''' \quad (3.33)$$

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

$$-\dot{m}_o''' = \nabla \left( \rho D \frac{dY_o}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_o}{dZ} \nabla \cdot \rho D \nabla Z = \rho D \frac{d^2 Y_o}{dZ^2} |\nabla Z|^2 \quad (3.34)$$

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。

$$\frac{d[C_x H_y]}{dt} = -B [C_x H_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (3.36)$$

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

$E$ ：活化能 ( kJ/mol )

### 3.2.4 热辐射之统御方程式

FDS 之热辐射传统御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)], \quad n=1..N \quad (3.37)$$

其中  $I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi$  (3.38)

$$I \cdot (x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (3.39)$$

$I$  : 辐射热强度 ( $\text{kw/m}^2$ )

$k$  : 吸收係數

$\lambda$  : 波長 (m)

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

對於牆面之热辐射，FDS 採用之邊界條件如下：

$$I_w(S) = \epsilon I_{bw} + \frac{1-\epsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (3.40)$$

其中  $I_w$  : 牆面之辐射热强度 ( $\text{kw/m}^2$ )

$S$  : 單位向量

$\epsilon$  : 放射率

$I_{bw}$  : 牆面黑體辐射强度 ( $\text{kw/m}^2$ )

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辐射强度相同，便可得知辐射热通量。

$$q_r(x) = \int S I(x, s) d\Omega \quad (3.41)$$

因此能量守恆方程式中辐射热之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x) [U(x) - 4\pi I_b(X)]; U(x) = \int_{4\pi} I(x, s) d\Omega \quad (3.42)$$

### 3.2.5 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响。

在 LES 計算模式中

$$\dot{q}_c'' = h\Delta T ; \quad h = \max \left[ C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left( \frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} P_r^{1/3} \right] \quad (3.43)$$

$\Delta T$ ：邊界與氣態分子間之溫差( $^{\circ}\text{C}$ )

$C$ ：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  $C = 0.95$  ) ( $\text{kw/m}^2$ )

$L$ ：特徵長度 (m)

$V$ ：動黏滯係數 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

1. 热厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(o, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3.44)$$

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

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

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

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

$T_s$ ：固態燃料溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

2. 热薄型固態燃料（假設溫度在垂直固態燃料方向為均勻分佈）

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (3.45)$$

其中  $\delta$  : 固態燃料厚度(m)

### 3. 液態燃料

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

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[ -\frac{h_v M_f}{\mathfrak{R}} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (3.46)$$

其中  $h_v$  : 蒸發熱

$M_f$  : 分子重

$T_s$  : 表面溫度

$T_b$  : 燃料沸騰溫度

FDS 在求解以上之統御方程式、燃燒模式、熱輻射模式以及邊界條件上的計算上皆採用大渦流模擬法( Large Eddy Simulation , LES )計算方法，LES 法是將流體物理量區分為大尺度( grid-scale )及次網格尺度( sub-grid scale , SGS )兩部份。對於大尺度的物理量在 LES 中直接由 Navier-Stokes 方程式求解；而在次格點尺度內的物理量，將小於網格尺寸之漩渦或紊流以次網格紊流模式( Sub-grid Turbulence Model )表示，並直接計算流場暫態變化。另依方面 FDS 亦提供了 DNS 之計算方法，但由於 DNS 法需大量實驗資料作驗證而在計算上同時也需要相當龐大之硬體設備。因此為符合學術上與工程上之實用性與經濟效應，本研究採用 FDS 技術手冊上建議使用之 LES 模式，DNS 法相關之模式內容亦未列舉於本論文中。

### 3.3 模型建立軟體 PyroSim

PyroSim 是一個互動式模型建立軟體作為火災動力學計算軟體 (FDS) 之前端設計。此套件模軟體提供即時的回饋並確保輸入 FDS 之文件格式正確。建模時可以任意切換公制單位模式或英制單位模式。PyroSim 提供二維和三維幾何創建功能，並可使用旋轉、複製、移動等等功能簡化空間建立之程序。

現代建築外觀的多樣化及量體的大型化增加了分析者建立模型之難度，為了能有效提高分析者運用 FDS 之效率，使用可視化之建模軟體創建空間之模型並設定空間之邊界條件，除了可降低建模之困難度，亦可減少分析者在空間建立及邊界條件設定發生錯誤之可能，或是在第一時間即可進行修正。

以下介紹建模之步驟順序

#### 1. 建立幾何外觀(Obstruction)

在 PyroSim 繪圖的介面中，可透過直接建立 3D 模型或是透過 2D 分別繪製各樓層空間幾何，在 2D 的建構模式中，可匯入建築平面圖做為考，可支援之檔案格式如 bmp, dxf, gif, jpg, png, tga, 及 tif，複雜之建築空間以 2D 方式進行較為快速。

#### 2. 表面性質設定(Surface)

此步驟用於定義固體(solid)以及通風口(vent)之性質，在此，固體表面可定義熱傳導、或是燃燒性質；通風口則可定義風速或溫度等性質。

#### 3. 消防排煙設備設置(Devices)

建模過程中可依建築設計建立撒水設備、火警探測器以及機械排煙設備，前兩項均屬設備(device)之設定，而機械排煙設備則以通風口(vent)進行設定，其中火警探測器目前具有連動其他設備之功能，此功能亦大為提升模擬之真實度。

#### 4. 量測點設置(Devices)

運用 FDS 計算之前，分析者須先由建築模型判斷模擬空間內何處具有重要之分析結果，如 CO、溫度、能見度、熱輻射及速度場等，由事前之規劃，模型建立時即進行量測點設置，量測點對於不同之量測對象可分氣體及固體之量測點(gas phase and solid phase device)，在量測點設置處可獲得對應時間之量化數據。

#### 5. 初始條件設定

模型空間內之初始環境條件亦可在 PyroSim 平台設定，初始條件一般以設定環境溫度為主。

#### 6. 邊界條件設定

模型之邊界條件設定即為重要，在建築空間開口部以及外氣是否有速度場之存在均應詳細考慮以進行設定，對於與外氣連通或是自然風影響均可透過通風口(vent)進行設定。

#### 7. 網格劃分(Meshes)

透過 Meshes 可將所建之模型劃分網格，就網格大小可分為單一網格(Uniform Meshes)及非單一網格(Nonuniform Meshes)，在較為龐大之模型內使用單一網格易造成網格數過多導致運算時間過長或是無法分析之情形，當網格數目過多但放大網格大小又會導致計算結果誤差過大之情況下，建議使用非單一網格，將模型切割為多個空間，在各空間以不同大小之網格進行劃分，一般以火源附近區域使用最小之網格，而向外區域則可略為放大。

#### 8. 計算條件設定(Simulation parameter)

在此可設定模型運用 FDS 計算之時間及求解方法，運算時間以秒為單位，而求解方法可選擇 Large Dddy(LDS) 或是 Direct Numerical(DNS)，此兩方法之不同處於介紹於前一節關於 FDS 部分。

## 3.4 ANSYS 有限元素法

ANSYS Mechanical 為美國 ANSYS 公司所開發之有限元素分析軟體，目前最新版本為 ANSYS 13.0，軟體主要包括三個部分：前處理模組，分析計算模組和後處理模組。

前處理模組提供實體建模及網格劃分工具，使用者可以方便地構造有限元模型。

分析計算模組包括結構分析（可進行線性分析、非線性分析和高度非線性分析）、流體動力學分析、電磁場分析、聲場分析、壓電分析以及多物理場的耦合分析，可模擬多種物理介質的相互作用，具有靈敏度分析及最佳化分析能力。

後處理模組可將計算結果以彩色等值線顯示、梯度顯示、向量顯示、粒子流跡顯示、立體切片顯示、透明及半透明顯示（可看到結構內部）等圖形方式顯示出來，也可將計算結果以圖表、曲線形式顯示或輸出。

### 3.4.1 ANSYS Mechanical 的主要分析功能

在結構力學方面，ANSYS Mechanical 的分析型式包含了靜態(static)分析、振動模態(modal)分析、簡諧響應(harmonic response)分析、頻譜(spectrum)分析、隨機振動(random vibration)分析、暫態動力學(transient dynamic)分析、挫屈(buckling)分析、破壞力學(fracture mechanics)分析、最佳化(optimization)分析等。

在熱傳學方面，ANSYS Mechanical 的分析型式包含了穩態(steady-state)分析、暫態(transient)分析、熱傳導(heat conduction)、熱對流(heat convection)、熱輻射(heat radiation)、相變化(phase change)、質量傳遞(mass transport)等。

在耦合場(coupled fields)方面，ANSYS Mechanical 的分析型式包含了熱-結構(thermal-structural)分析、熱-電(thermal-electric)分析、壓電(piezoelectric)

分析、聲場-結構(acoustic-structural)分析等。

### 3.4.2 元素型態

ANSYS 之元素型態可分為 3D 及 2D，依使用者所分析對象不同而選擇不同之元素型態，本研究選用 SHELL181 元素，如圖 3.12 所示，SHELL181 由四點所構成，當 K 點與 L 點重合時則可形成三角型元素，此元素應用於 3D 結構，有四個節點(node)、六個自由度，分別為平移(translation)的變位自由度 UX、UY、UZ 以及旋轉(rotation)的自由度 ROTX、ROTY、ROTZ，可應用於線性或是大應變非線性分析，SHELL181 可用分層(layered)建立多層或有夾層之複合材料結構。

SHELL 元素有以下特點：

1. 適用於分析厚度較薄(相對長寬)之 3D 實體結構。
2. 應用於變形以翹曲為主之分析，亦即 out of plane 之變形。
3. 對於厚度較薄之物體(相對於長、寬)可節省計算時間並增加解答精度。

### 3.4.3 結構理論基礎

線性分析下應力與應變之關係為

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (3.45)$$

其中

$$\{\sigma\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T : \text{應力向量，如圖 3.12 所示}$$

[D]：彈性矩陣

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\} : \text{彈性應變向量}$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T : \text{應變向量}$$

$$\{\varepsilon^{th}\} : \text{溫度應變向量}$$

而對於三維而言，溫度應變向量為

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \alpha_y \alpha_z 0 0 0] \quad (3.46)$$

式(3.45)可改寫成

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^h\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (3.47)$$

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -v_{xy}/E_x & -v_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -v_{yx}/E_y & 1/E_y & -v_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -v_{zx}/E_z & -v_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

其中

$E_x$  : x 方向之楊氏係數

$v_{xy}$  : 主普松比

$v_{yx}$  : 次普松比

$G_{xy}$  : x-y 平面之剪應力模數

$[D]^{-1}$  矩陣假設為對稱，可得下列關係式：

$$\frac{v_{yx}}{E_x} = \frac{v_{xy}}{E_y}, \quad \frac{v_{xx}}{E_x} = \frac{v_{xz}}{E_z}, \quad \frac{v_{zy}}{E_y} = \frac{v_{yz}}{E_z} \quad (3.49)$$

透過式子 3.46~3.48 展開式 3.47 得到

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{v_{xy} \sigma_x}{E_x} - \frac{v_{xy} \sigma_z}{E_x} \quad (3.50)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{v_{xy} \sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{v_{yz} \sigma_z}{E_y} \quad (3.51)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{v_{xz} \sigma_x}{E_x} - \frac{v_{yz} \sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z} \quad (3.52)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}} \quad (3.53)$$

其中

$\varepsilon_x$  : x 方向之應變

$\sigma_x$  : x 方向之應力

$\varepsilon_{xy}$  : x-y 平面剪應變

$\sigma_{xy}$  : x-y 平面剪應力

反之，透過式 3.46、3.48、3.49 展開式子 3.45 可得到：

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left( 1 - (v_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left( v_{xy} + v_{xz} v_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (v_{xz} + v_{yz} v_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{E_y}{h} \left( v_{xy} + v_{xz} v_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left( 1 - (v_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \\ &\quad \frac{E_z}{h} \left( v_{yz} + v_{xz} v_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E_z}{h} (v_{xz} + v_{yz} v_{xy}) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left( v_{yz} + v_{xz} v_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \\ &\quad \frac{E_z}{h} \left( 1 - (v_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \end{aligned} \quad (3.56)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy}, \quad \sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz}, \quad \sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz} \quad (3.57)$$

其中

$$h = 1 - (v_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (v_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} - (v_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} - 2v_{xy} v_{yz} v_{xz} \frac{E_z}{E_x}$$

當剪力模數  $G_{xy}$ 、 $G_{yz}$ 、 $G_{xz}$  無輸入值時，則

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2v_{xy} E_x} \quad (3.58)$$

上述式子為等向性材料之應力應變關係式。

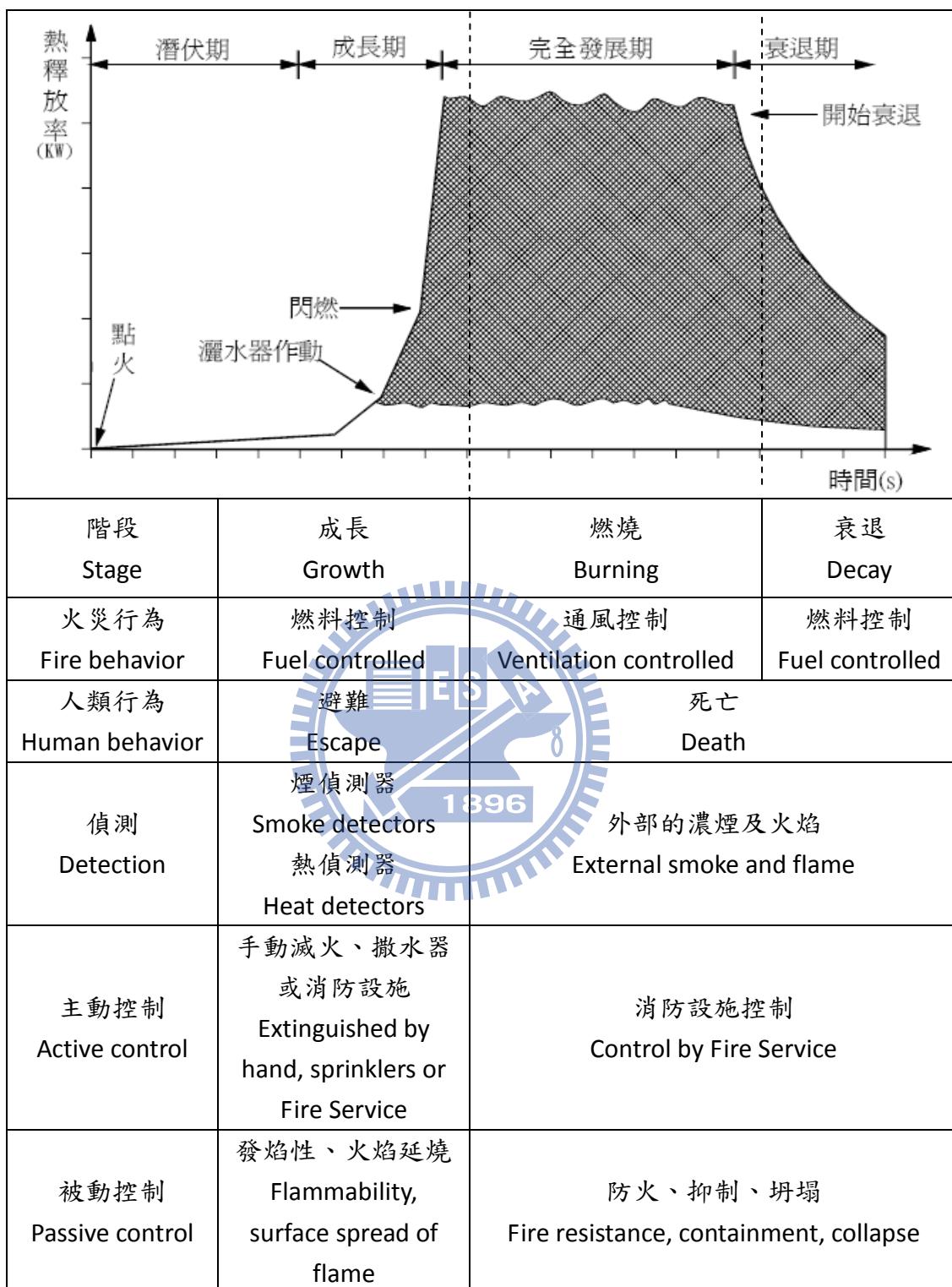
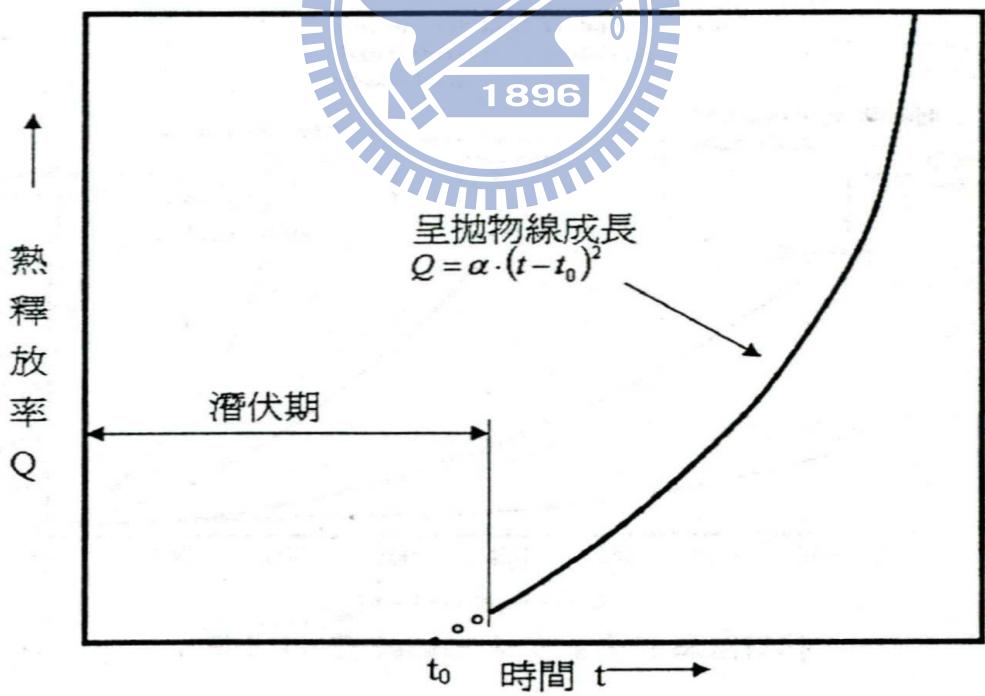
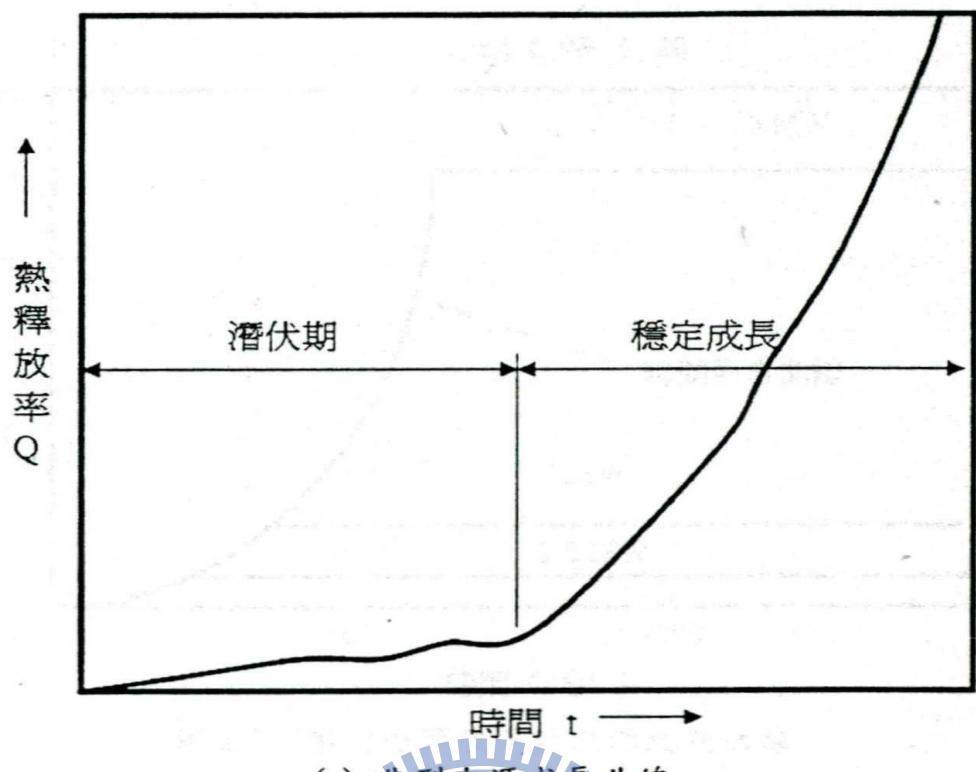


圖 3.1 火災發展過程圖



(b) 理想二次火源成長曲線

圖 3.2 火災成長曲線圖

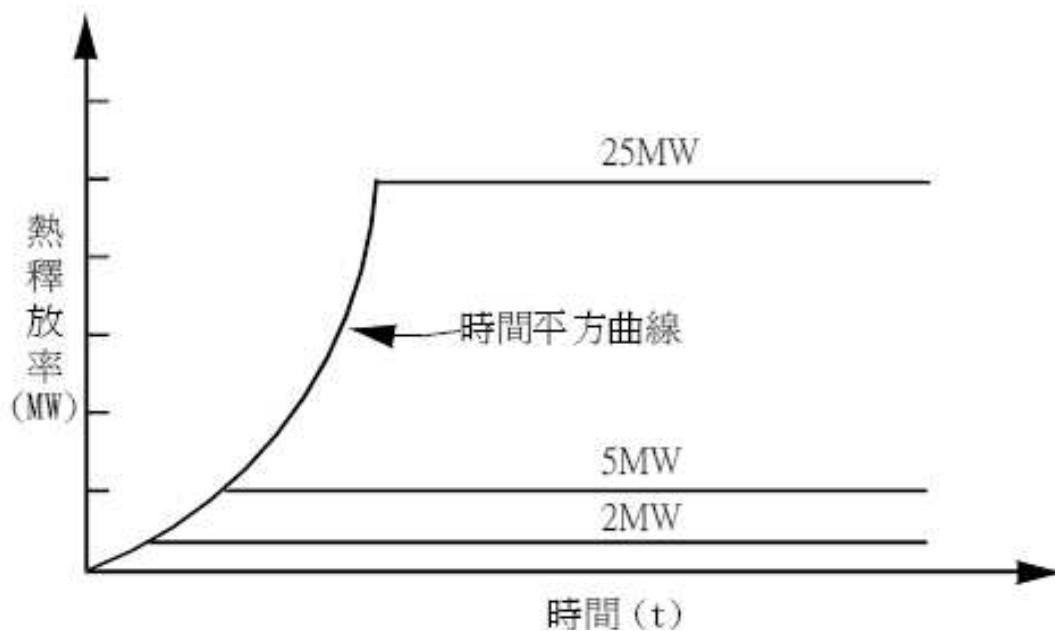


圖 3.3 不同熱釋放率之火災成長曲線圖

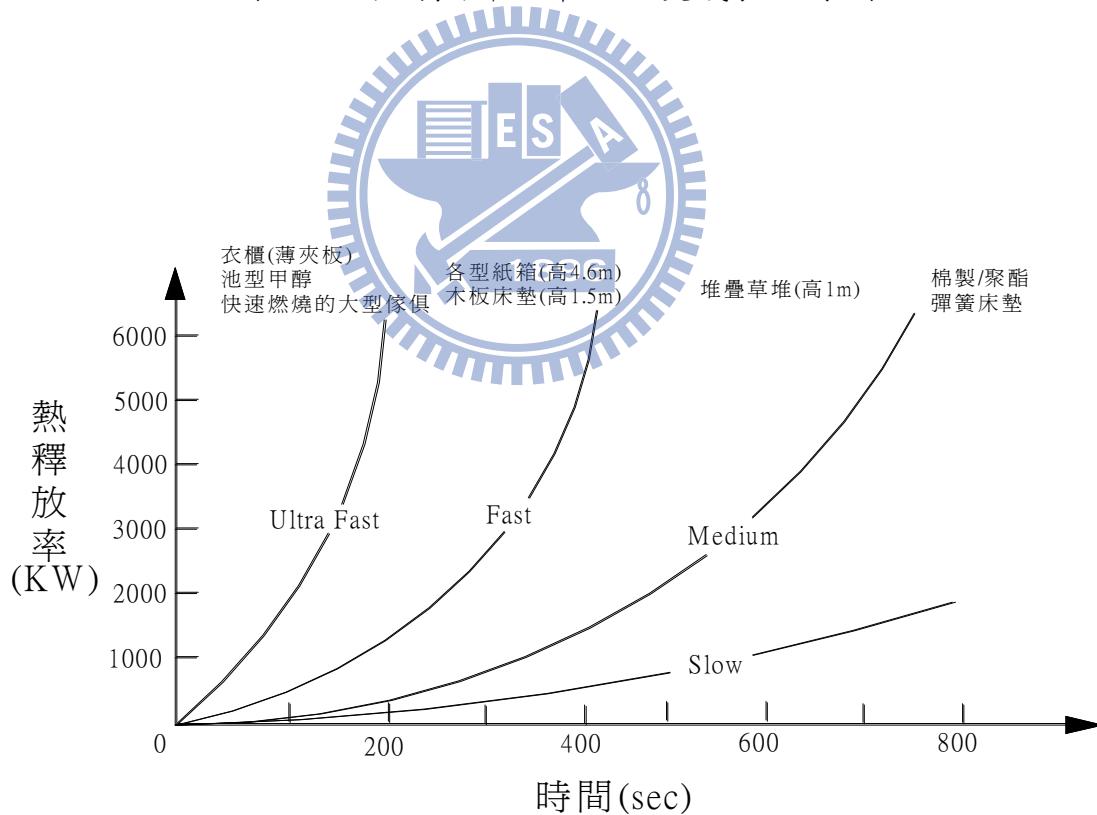


圖 3.4 T-Square 火災成長曲線圖

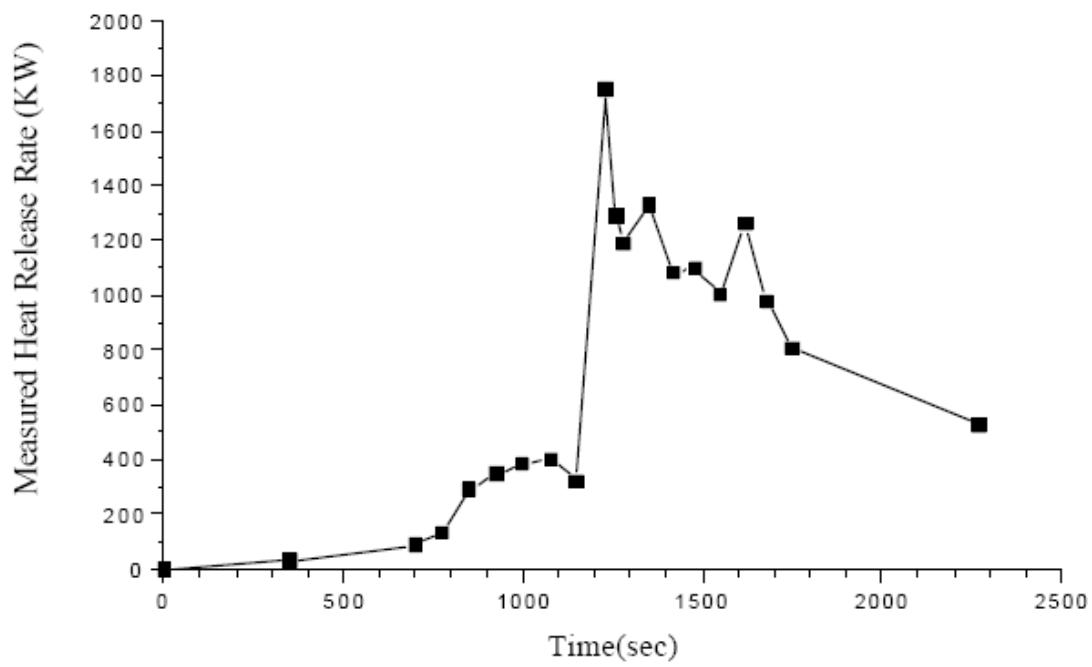
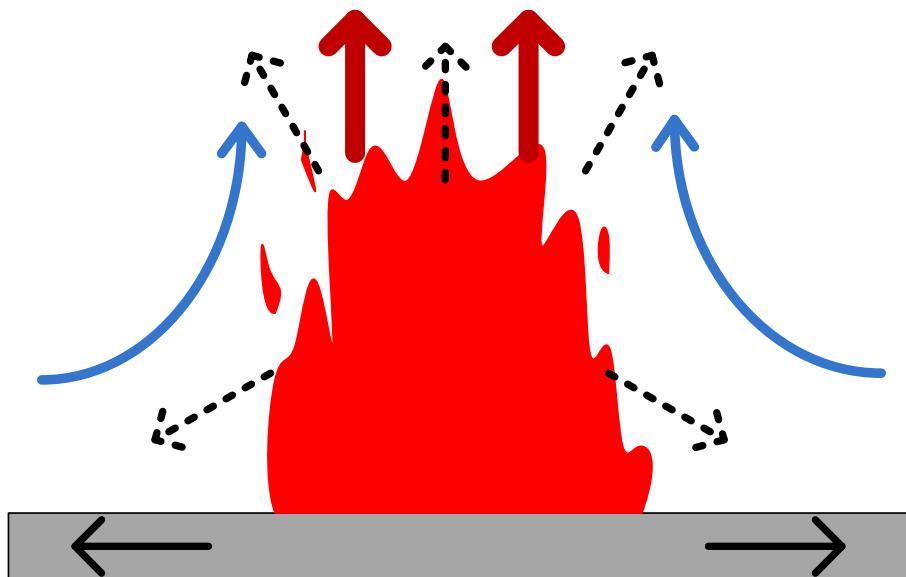


圖 3.5 Kisok 實際量測之火災成長曲線圖 (NIST,1995)



(a) 水平火焰



(b) 垂直火焰

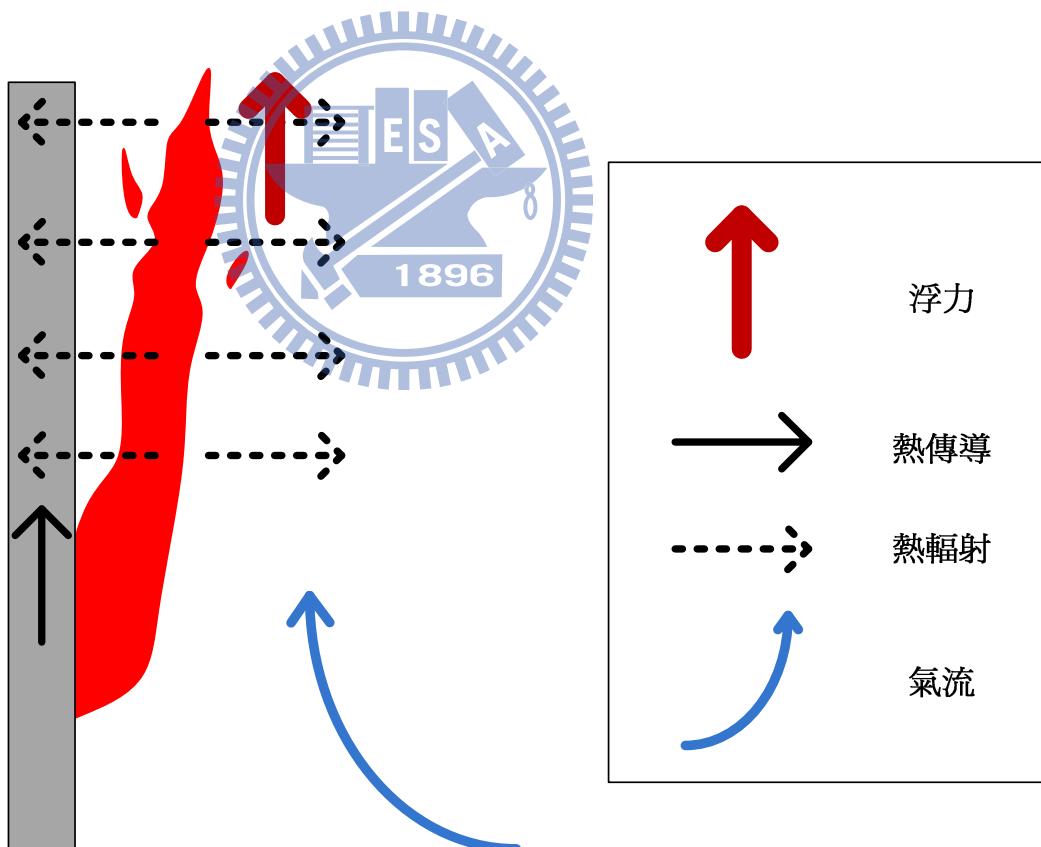


圖 3.6 水平火焰及垂直火焰延燒【16】

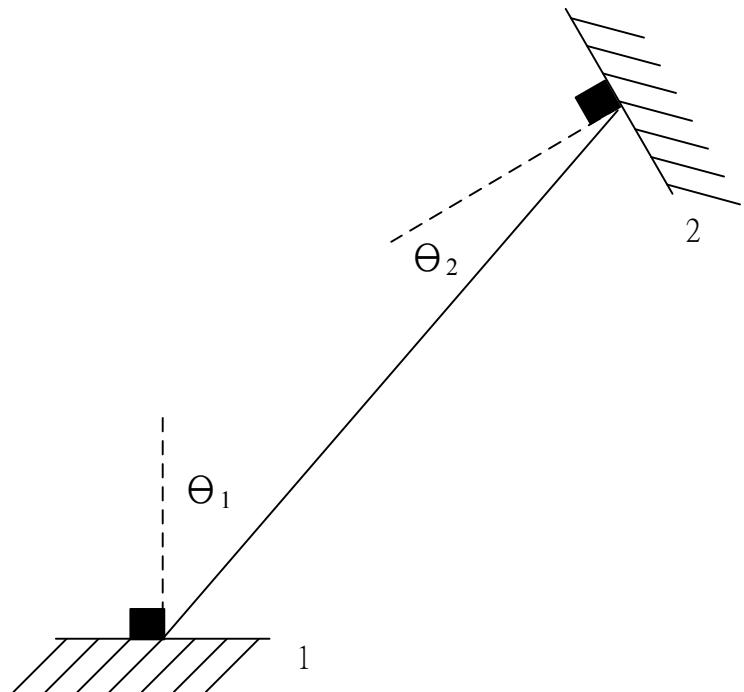
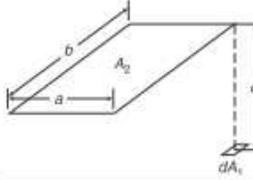


圖 3.7 热輻射傳導型態係數【17】



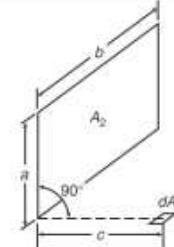
---



$$X = a/c \quad Y = b/c$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \left( \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right]$$

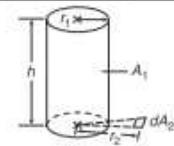
---



$$X = a/b \quad Y = c/b \quad A = 1/\sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} [\tan^{-1}(1/Y) - AY \tan^{-1} A]$$

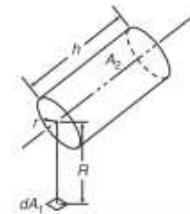
---



$$R = r_1/r_2 \quad L = h/r_2 \quad X = \sqrt{(1+L^2+R^2)^2 - 4R^2}$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} R + \frac{1}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \right) - \frac{1+L^2-R^2}{X} \tan^{-1} \left( \frac{X \tan(0.5 \cos^{-1} R)}{1+L^2+R^2-2R} \right) \right]$$

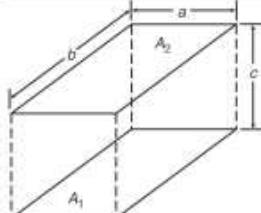
---



$$L = h/r \quad H = R/r \quad X = (1+H)^2 + L^2 \quad Y = (1-H)^2 + L^2$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{H^2-1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{X-2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} - \frac{1}{H} \tan^{-1} \sqrt{\frac{H-1}{H+1}} \right]$$

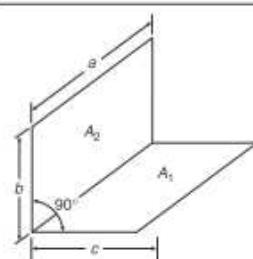
---



$$X = a/c \quad Y = b/c$$

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi XY} \left[ \ln \sqrt{\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}} + X \sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right. \\ \left. + Y \sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \right) - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right]$$

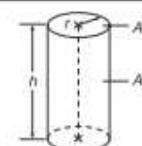
---



$$X = b/a \quad Y = c/a$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi Y} \left( Y \tan^{-1} \left( \frac{1}{Y} \right) + X \tan^{-1} \left( \frac{1}{X} \right) - \sqrt{X^2+Y^2} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \left[ \frac{X^2(1+X^2+Y^2)}{(1+X^2)(X^2+Y^2)} \right]^{X^2} \left[ \frac{Y^2(1+X^2+Y^2)}{(1+Y^2)(X^2+Y^2)} \right]^{Y^2} \right\} \right)$$

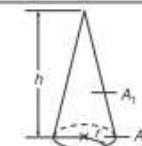
---



$$H = h2r$$

$$F_{1-2} = 2(\sqrt{1+H^2} - H)$$

---



$$H = h/r$$

$$F_{1-2} = 1/\sqrt{1+H^2}$$

圖 3.8 热輻射型態係數

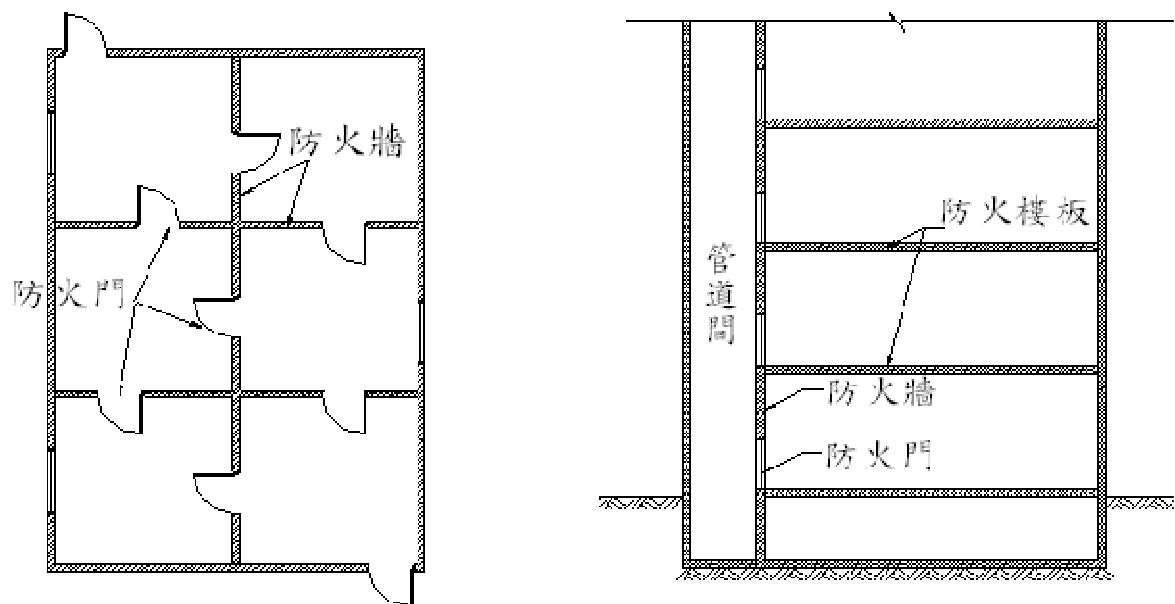


圖 3.9 防火區劃方式



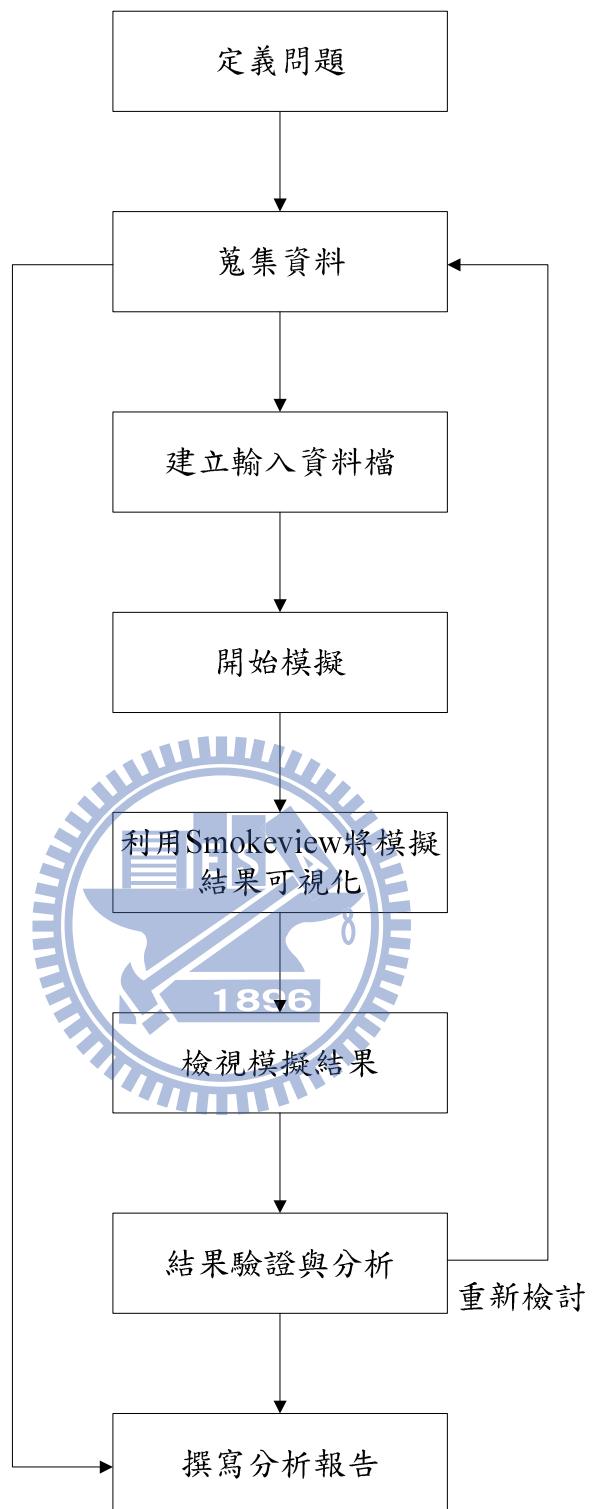


圖 3.10 FDS 分析執行計畫流程圖

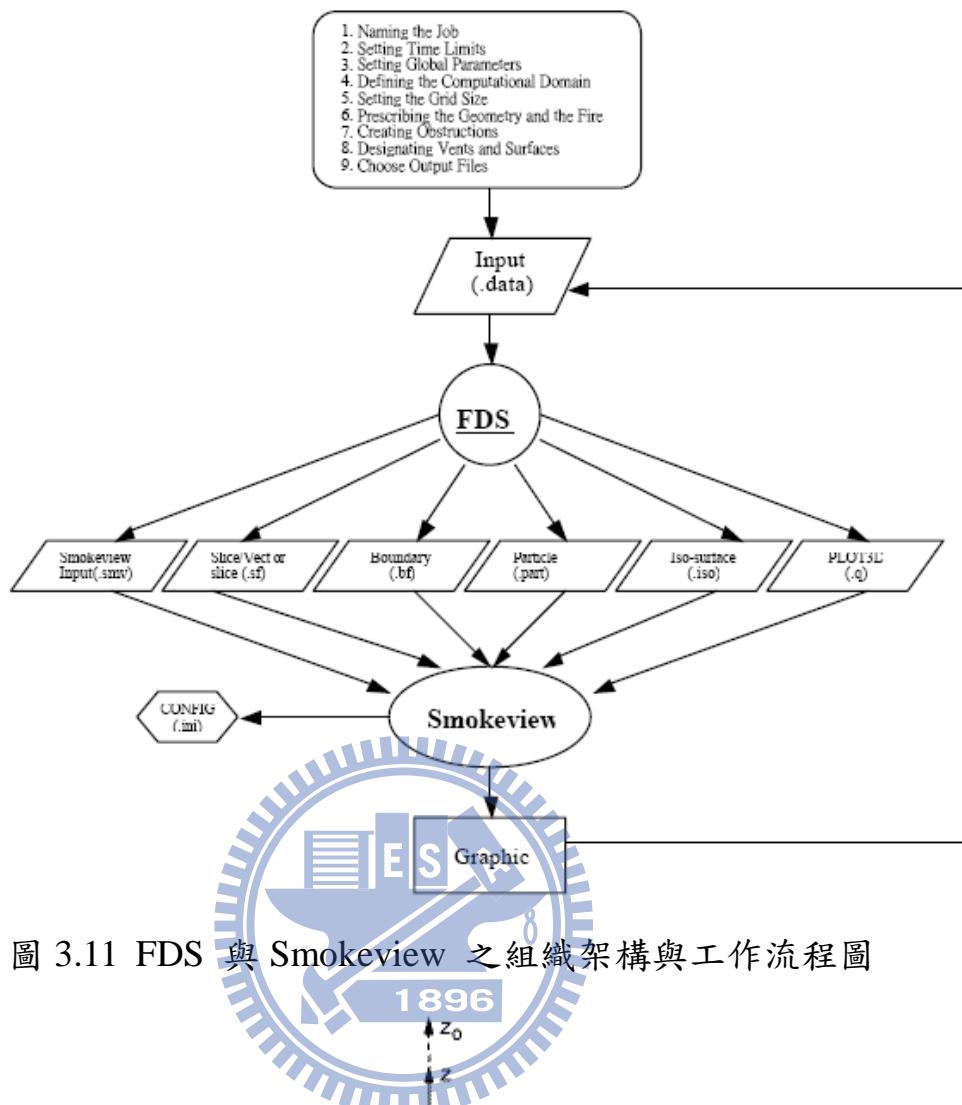


圖 3.11 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖

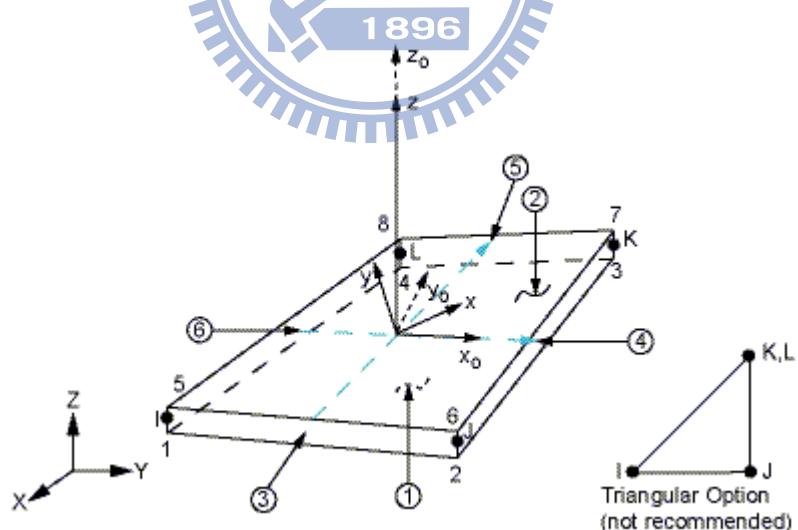


圖 3.12 元素 SHELL181

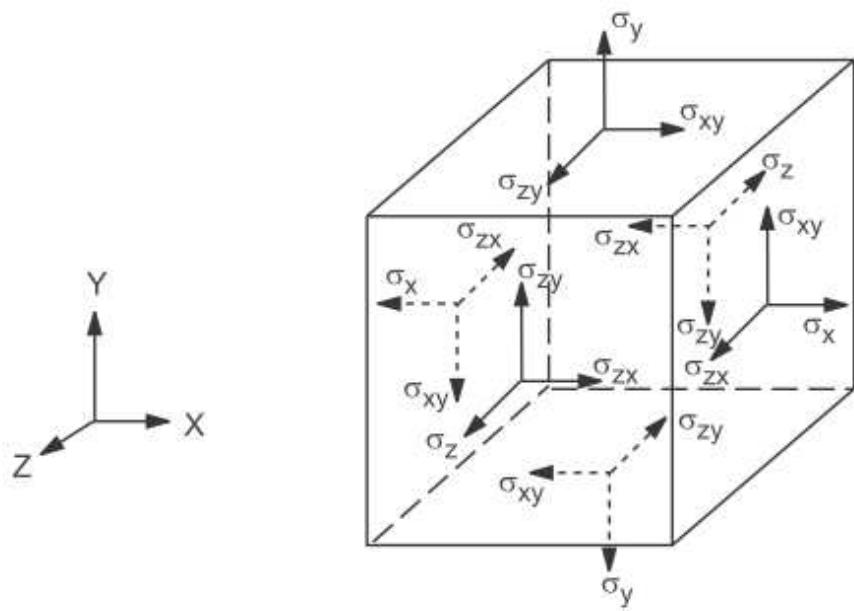
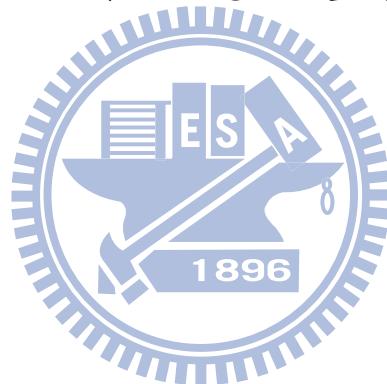


圖 3.13 應力向量圖



## 第四章 結果與討論

本研究在第一章所提及之研究內容主要分為兩大主題，分別為玻璃材料以及防火捲門應用於建築內部進行區劃，當火災發生時此兩類區劃方式於火場內之分析研究，如圖 1.2 所示，本章在同一建築模型內分別就以下兩方面進行模擬與分析：(一) 火源位於昇降機道所使用之玻璃分間牆旁，玻璃因溫差過大導致破裂對煙流之影響 (二) 電扶梯間設置之防火捲門於火場內做動對環境之影響及捲門本身受熱之變形量及熱應力分佈。

### 4.1 模擬範圍

由於地下場站用途特殊、環境封閉，又為交通運輸之重要樞紐，在災害防制有其重要與困難之處，故本研究以地下場站為模擬案例，本模擬範圍總長度 330m，寬度 155m，高度 23m；模擬外觀如圖 4.1 所示。其地下車站部分共分四層，地下一層為戶外廣場與台鐵票口，地下二層為台鐵月台層及商場，地下三層為轉換層及商場，地下四層為捷運月台層。

其中，地下一層至地下二層有兩座對稱設置之無障礙電梯，提供旅客直達台鐵月台，並以具視覺穿透性之玻璃作為分間牆，見圖 4.2。在地下三層轉換層，此樓層設有商場，在商場區域以常見之防火捲門作為電扶梯道與樓地板之區劃，見圖 4.3，本研究即以此兩區域作為模擬研究對象。

### 4.2 參數設定

在模擬範圍內對欲探討之對象所進行之模擬，具備以下基本參數設定。

#### 4.2.1 火源大小設定

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，燃燒面積為 1m×1m，火源成長速率採用 Ultra-fast 型式。

#### 4.2.2 火災成長模式

月台層與轉換層火災設計熱釋放率規模乃依據 NFPA92B 所建議之  $Q = \alpha t^2$  火災成長曲線並採用 Ultra-fast 進行模擬評估，一個 1m×1m 大小火源之熱釋放率於 163 秒達到 5MW。

#### 4.2.3 防煙垂壁設計：

本章模擬範圍皆有設置 80cm 深度的防煙垂壁以減緩煙層擴散時間。

#### 4.2.4 排煙設計：

本模擬車站設有機械排煙，而本模擬均假設其在未動作下之最危險狀況。

#### 4.2.5 補氣口設計：

模擬範圍之補氣口設計將穿堂層通往地面層主要進出口以及隧道兩側作為自然補氣口的來源，也就是考慮真實火災發生時現場實際開口補氣條件，總共有 3 個補氣口，如圖 4.4 所示。

#### 4.2.6 邊界條件

建築之邊界條件如表 4.1 所示，建築物於地下一層之開口設定為與外氣連接，此處開口會因建築內部燃燒所需補氣形成自然補氣口，地下二層隧道兩端開口，考慮隧道本身之通風設備，此處開口之邊界條件為一進一排之設計，而在建築內部結構均為絕熱表面。

表 4.1 邊界條件設定

位置	邊界條件
地下一層開口	與外氣連接
隧道兩端開口	116.9 cms (流入)
	98.01 cms (流出)
建築結構	絕熱

#### 4.2.7 玻璃破裂量測點設置

玻璃破裂量測點設於玻璃表面，除距離火源最近之玻璃設於昇降機外部表面外，其餘均設於昇降機內部表面，並在各面玻璃由上而下均勻分布三點兩側點，做為玻璃表面溫度之量測，如圖 4.5 所示。

#### 4.2.8 格點設定方法與測試

在 FDS 的模擬部分因建築模型範圍廣大，若採取單一網格方法配置將造成格點數過多之情況，因此將以火源周圍區域局部加密之方式進行網格配置，對於火源周圍區域格點大小之選擇由格點測試之結果決定，在相同模擬條件情況下，取 11 個溫度量測點進行比較，如表 4.2 所示，並以最小之格點尺寸為基準進行誤差分析，考慮電腦運算能力並合乎模擬誤差容許範圍，本研究以火源周圍區域設置  $0.25m \times 0.25m \times 0.25m$  格點，其他區域設置  $0.5m \times 0.5m \times 0.5m$  之網格。

表 4.2 FDS 格點測試

格點尺寸( $m^3$ )	溫度分佈	最大誤差	總網格數
$1 \times 1 \times 1$	圖 4.6	17.8%	9 萬
$0.5 \times 0.5 \times 0.5$		3.6%	93 萬
$0.25 \times 0.25 \times 0.25$		1.2%	106 萬
$0.125 \times 0.125 \times 0.125$		-	358 萬

ANSYS 模擬部分，以捲門做為網格測試之對象，在相同模擬條件情況下共進行四組格點尺寸進行分析，如表 4.3 所示，並以最小之格點尺寸為基準進行誤差分析，考慮電腦運算能力並合乎模擬誤差容許範圍，本研究將以  $0.05 \times 0.05\text{ m}^2$  尺寸之格點進行模擬分析。

表 4.3 ANSYS 格點測試

格點尺寸( $\text{m}^2$ )	變形量(mm)	誤差
$0.2 \times 0.2$	-153	18.6%
$0.1 \times 0.1$	-153	18.6%
$0.05 \times 0.05$	-183	2.7%
$0.025 \times 0.025$	-188	-



#### 4.2.9 人員安全標準判斷

火場中所產生的有毒氣體含有相當多的刺激性與痙攣性成份，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[27] 中有詳細的規定，而紐西蘭設計指針【28】的危險指標即是參考 SFPE Handbook 制定，其規定如表 4.4 所示。

表 4.4 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	上層的幅射流 $\leq 2.5\text{kW/m}^2$ (承受時間 20 秒以下)

依據以上 SFPE Handbook 及內政部建築研究所出版之「大空間建築火災性能式煙設計與應用手冊」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 4.5 所示。

表 4.5 建議人員逃生安全環境要求

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

## 4.3 玻璃材料破裂模擬

### 4.3.1 說明

前兩節所介紹之模擬範圍及參數設定為本節之基本條件，本節模擬討論之對象為連通地下一層與地下二層之無障礙電梯，此無障礙電梯連跨樓層數為兩層，並以透明玻璃做為其升降機道之區劃材料，由玻璃材料性質及相關文獻指出，玻璃在溫度差異過大之情形下有產生裂痕甚至破裂掉落之虞，而常受採用之強化玻璃一旦產生裂痕將立即破裂掉落產生開口，在此，模擬過程中設定玻璃破裂條件為溫差達到  $250^{\circ}\text{C}$ ，且當溫差到達玻璃之破裂條件，玻璃將整面掉落形成開口，一旦升降機道之區劃遭受破壞，將造成樓層間之開口，火煙即有透過此開口蔓延之可能，此外，樓層間另一處可能造成火煙向上蔓延之開口處即為電扶梯間，因此，本研究將選定兩處火源位置進行比較：

情境一、火源位於地下二層升降機道旁，如圖 4.7 所示。

情境二、火源位於地下二層電扶梯入口處，如圖 4.7 所示。

### 4.3.2 模擬結果

#### 1. 情境一：

- A. 模擬時間 75 秒時位於地下二層離火源最近之玻璃分間牆發生破裂，並於 147 秒時地下一層玻璃分間牆發生破裂。
- B. 火災發生之初，煙流沿地下二層之天花板向四周蔓延，當玻璃分間牆發生破裂，高溫濃煙向升降機道蓄積且地下二層煙層蔓延減緩，當地下一層玻璃破裂，濃煙瞬間竄入地下一層，並且快速在地下一層蓄積，如圖 4.8、圖 4.9 及圖 4.10 所示。
- C. 煙流經由升降機道竄升至地下一層後，向兩側樓梯挑空區蔓延，且隨著氣流下向下流動，造成兩側樓梯均受濃煙侵害。

#### 2. 情境二

- A. 火災發生後，玻璃分間牆均未破裂。
- B. 煙流在整個模擬過程沿著地下二層天花板向兩側蔓延並逐漸下降，如圖 4.11 所示。



## 4.4 捲門模擬

本節將探討捲門於火場中與偵煙器連動下降對煙流之影響以及捲門本身在火場中受熱造成之變化。首先對於火場的煙流及溫度分佈使用火災模擬軟體 FDS 做為模擬工具進行分析，後續對於捲門本身受熱造成之變化，則運用 ANSYS 有限元素分析軟體進行模擬。

在進行建築模型之整體案例探討之前，本研究先透過前人之實驗結果與模擬進行比對，確認模擬之正確性。

### 4.4.1 捲門變形模擬驗證

本研究欲透過 FDS 模擬軟體搭配有限元素法分析捲門之變形及熱應力分析，使用之軟體為有限元素分析軟體 ANSYS，在針對本研究模擬案例分析之前，先藉由前人所進行之實驗結果與 ANSYS 模擬分析所得知結果，以確認 ANSYS 模擬結果之準確性，在此，以陳建銘【21】所進行之大型加熱爐火場試驗之實驗結果進行驗證。

#### 一、 試驗內容

試驗方法以 CNS12514 「建築物構造部份耐火試驗法」為基準，運用大型加熱爐進行試驗，標準加熱溫度一時間曲線如下

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20$$

其中

T：平均爐內溫度(°C)

t：試驗經過時間(分)

試驗對象為 3m × 3m 之快速捲門，以三片單邊向上開的快速捲門為基礎，並設定填充不同厚度之阻熱性材料，三片式體所填充之阻熱性材料如表 4.6 所示，門片之框架及阻熱材料填充方式如圖 4.12 所示，由於快速捲門排列方式不對稱，需要正反兩面進行實驗，因此將快速捲門排列方式改變僅進行一次實驗，快速捲門排列方式之改變如圖 4.13 所示，試體為三片

分離之門片，依照所設定之排列方式固定於框架內，門片除了固定於框架外，彼此接觸之區域並無進行任何形式之固定，此試驗於式體背火面設置多組熱電偶以量測試體背溫，並於三片門片中間點上各設定一點量測其變位量。

表 4.6 試體樣式

試體	阻熱材	陶瓷棉板厚度
上部試體		5 cm
中部試體		2.5 cm
下部試體		2.5 cm

## 二、 FDS 模擬

運用 FDS 模擬大型加熱爐對快速捲門所進行之耐火試驗，在 FDS 模擬過程中對於試體之表面溫度進行量測，所獲得之試體表面溫度將做為 ANSYS 模擬之負載，模擬外觀如圖 4.14 及圖 4.15 所示，於模擬過程中，其爐內加熱之溫度曲線如圖 4.16 所示，由模擬所得之爐內溫度曲線介於 CNS12514 標準加熱溫度曲線和實驗所獲得之爐內溫度曲線之間，在模擬時間 20 分鐘內所獲得之試體表面溫度將做為 ANSYS 模擬之負載，然而在實驗過程中試體產生變形，造成試體間產生開口，爐內之高溫氣體透過此開口向外竄出，造成試體表面受熱情況改變，欲增加模擬之準確性，FDS 模擬過程中加入試體產生開口之設定，高溫氣體竄出加熱非加熱面試體之情形如圖 4.17 所示。

## 三、 ANSYS 模擬

ANSYS 模擬分別對三片門片進行模擬，模型外觀如圖 4.18 所示，門片在加熱過程中之溫度分佈為門片之負載，在 ANSYS 模擬過程中僅考慮門片內部熱傳導進行分析，三片門片邊界之拘束條件均不相同，各門片四邊之拘束條件說明如圖 4.19 所示，門片之材料在溫度負載及拘束力影響下將產生外凸或內凹型式之變形。

由 ANSYS 所模擬出之結果與前人實驗比較如圖 4.20 所示，變形量之正負值配合實驗之量測結果，正值表示向爐內(加熱面)變形，在爐外觀測則視為凹陷，負值則表示向爐外(非加熱面)變形，在爐外觀測則視為凸出，由於三片門片變形量不盡相似，以下分別進行說明。

### (一) 上門片

在實驗開始後 8 分鐘內，該點之變形量為正值，之後則轉向為負值，表示該點在實驗過程中先向爐內凹陷後轉為向爐外凸出，變形轉為凸出後變形量值隨實驗時間逐漸放大。

在此選取差異較為明顯之兩組分析結果進行討論，分別為時間為 4 分鐘及 16 分鐘之結果，如圖 4.21 至圖 4.24 所示，因模擬方向設定與實驗不同，正負號之定義與實驗相反，當門片在受熱時間為 4 分鐘時，變位量測點之變形量為負值，即為向爐內凹陷，如圖 4.22 所示，而當門片受熱時間為 16 分鐘時，變位量測點之變形量為正值即為向爐外凸出，如圖 4.24 所示，雖然在此點有先凹後凸之現象，但門片整體變形具有相近之趨勢，就整體而言，在門片內部均有向爐內凹陷之情形而門片下部始終保持向爐外翹出，隨著溫度升高門片下部向爐外之變形量越大，此部分變形量的增大也導致門片中間位置產生先凹後凸之情形。

### (二) 中門片

在實驗開始後，該點之變形量均為正值，表示該點在實驗過程中均為向爐內凹陷，且隨實驗時間逐漸放大，實驗在 12 分 30 秒說明中門片之變位量測點失效，且並未採用後續所量測之數值。

在此選取時間為 12 分鐘之分析結果進行討論，如圖 4.25 及圖 4.26 所示，因模擬方向設定與實驗不同，正負號之定義與實驗相反，門片在各時間點整體之變形趨勢均相同，門片左右兩側因拘束力固定所有自由度，未有變形發生，門片之上下端有些微凸出現象，而門片中間之變形量最為明顯，變形方向為向爐內凹陷，此區域亦為實驗變位量測點所在位置。

### (三) 下門片

在實驗開始後，該點之變形量均為正值，表示該點在實驗過程中均為向爐內凹陷，然而實驗值在約 10 分鐘時變形量發生了向下之震盪，在 16 分鐘時有回升之趨勢，發生此現象應為門片間產生縫隙導致爐內溫度分佈發生變化所致，而模擬值在此段時間僅些微向下變動，並未能準確模擬出此現象。

在此選取時間為 18 分鐘之分析結果進行討論，如圖 4.27 及圖 4.28 所示，因模擬方向設定與實驗不同，正負號之定義與實驗相反，門片在各時間點整體之變形趨勢均相同，門片下端及左右兩側因拘束力固定所有自由度，未有變形發生，門片上端之變形向爐外凸出且最為明顯，而門片中間之變形方向為向爐內凹陷，此區域亦為實驗變位量測點所在位置。

## 四、小結

由門片變形量之模擬結果與陳建銘【21】所進行之大型加熱爐耐火試驗實驗結果進行比對，確認 FDS 搭配 ANSYS 之熱固耦合分析在變形量的模擬上可獲得與實驗相近之結果，且在變形之趨勢上相當接近。



#### 4.4.2 案例探討

本章第一、二節所介紹之模擬範圍及參數設定為本節之基本條件，本節模擬討論目標為地下三層商場內之火災，如圖 4.29 所示，火源設於一座通往地下二層之電扶梯旁，電扶梯周圍以防煙垂壁環繞並以捲門區劃，如圖 4.30 所示，本節將討論之重點如下：

1. 捲門在不同作動模式下對煙流蔓延之差異，表 4.7 為各情境之捲門控制模式
2. 捲門本身受熱之變形情況以及熱應力分佈

表 4.7 捲門控制說明

情境	捲門控制模式
情境一	未動作
情境二	地下三層偵煙器確認火災發生後連動捲門下降，捲門下降至離地面 2 公尺處。
情境三	地下三層偵煙器確認火災發生後連動捲門下降，捲門下降至地面。

#### 4.4.3 模擬結果

##### 一、情境一

1. 火災發生後煙流於地下三層蔓延，於 120 秒後煙流開始向地下二層蔓延，地下三層與地下二層煙層持續下降，如圖 4.31 所示。
2. 地下三層於高度 1.8 公尺處之溫度、能見度、CO 之分佈如圖 4.32、圖 4.33 及圖 4.34 所示，由於在 120 秒至 300 秒之間環境之變化明顯，在此段時間內每 30 秒取一張圖表示，而在 300 秒之後環境幾乎已不利於人員逃生，因此取最後模擬時間 720 秒表示。
3. 地下二層於高度 1.8 公尺處之溫度、能見度之分佈如圖 4.35、圖 4.36 所示，在火災模擬時間 720 秒內，地下二層僅在手扶梯開口處有危

險之狀況，其於區域仍在人員生命安全標準之範圍內。

## 二、情境二

1. 於火源所在之防煙區劃設置之偵煙器於 38 秒時確認發生火災，並連動防火捲門開始下降，於 57 秒時捲門下降至距地面 2 公尺處。
2. 火災發生後煙流於地下三層開始蔓延，在 360 秒後煙流開始向地下二層蔓延，地下三層與地下二層煙層持續下降，如圖 4.37 所示。
3. 地下三層於高度 1.8 公尺處之溫度、能見度及 CO 分佈如圖 4.38、圖 4.39 及圖 4.40 所示，此情境擷取圖之方式如同情境一。
4. 地下二層於高度 1.8 公尺處之溫度、能見度分佈如圖 4.41、圖 4.42 所示，在火災模擬時間 720 秒內，地下二層僅在電扶梯開口處有溫度高於  $60^{\circ}\text{C}$  之狀況。

## 三、情境三

1. 於火源所在之防煙區劃設置之偵煙器於 38 秒時確認發生火災，並連動防火捲門開始下降，於 79 秒時捲門完全關閉。
2. 火災發生後煙流於地下三層蔓延，地下二層未有煙流竄入，煙層高度在地下三層逐漸下降，如圖 4.43 所示。。
3. 地下三層於高度 1.8 公尺處之溫度、能見度及 CO 之分佈如圖 4.44、圖 4.45 及圖 4.46 所示，此情境擷取圖之方式如同情境一。
4. 地下一層在火災模擬時間 720 秒內，其環境均在人員生命安全標準之範圍內。

## 四、情境比較

各情境於起火室內環境達到不利於人員逃生時間之比較，以設於緊急逃生梯入口處、高度 1.8m 之溫度量測點進行分析，所分析之量測點位置如圖 4.47 所示，此點溫度隨時間變化情形如圖 4.48 所示，該量測點之溫度隨時間逐漸上升，各情境溫度達到  $60^{\circ}\text{C}$  之時間如表 4.8 所示，而情境二、情境三上升情況較情境一快速，在此以溫度達到  $60^{\circ}\text{C}$  為判定標準，則情境二

與情境三該點之環境達到危險較情境一提早約 30 秒，因此，該位置之緊急逃生梯在捲門動作之情況下將減少約 30 秒之逃生時間。

表 4.8 各情境達到危險時間

情境	情境一	情境二	情境三
時間	217 秒	189 秒	186 秒

## 五、捲門變形模擬

電扶梯間共設有三組捲門，在此選用離火源最近之捲門進行分析，如圖 4.49 所示，捲門之門片形式如圖 4.50 所示，由先前 FDS 模擬所得之捲門表面溫度如圖 4.51 及圖 4.52 所示，表面溫度除了離火源最近處溫度略高外，其於部分溫度分佈均相當均勻，以下所討論之捲門變形量以垂直捲門面之變形量為主：

### (一) 捲門下降至離地面兩公尺處

1. 模型外觀及其拘束條件如圖 4.53 所示，捲門寬 7.2 公尺、高 2.5 公尺，頂端之拘束為完全固定，左右兩側限制其 x、z 方向之位移，底端則無任何拘束條件。
2. 由情境二進行模擬得到捲門之均溫如圖 4.55，而捲門變形量如圖 4.56 所示，由捲門均溫以及變形量可以發現捲門變形量之變化趨勢與捲門溫度相當接近，捲門變型之外觀示意圖如圖 4.57 及 4.58 所示。
3. 捲門在每兩分鐘之變形情況如圖 4.59 所示，變形量為負值表示變形向火場之方向，捲門之變形量以中間偏下部為最大，方向為向火場內變形，最大值為 319mm。
4. 捲門在每兩分鐘之熱應力分佈如圖 4.60 所示，最大值達到 1.0 Gpa，熱應力由兩側向中間遞減，在門片與門片接合部分所承受之應力強度較小，而最大之應力強度則集中於捲門底端兩

側。

## (二) 捲門全關

1. 模型外觀及其拘束條件如圖 4.54 所示，捲門寬 7.2 公尺、高 4.5 公尺，頂端之拘束為完全固定，左右兩側限制其 x、z 方向之位移，底端則限制其 y 方向之位移。
2. 由情境三進行模擬得到捲門之均溫如圖 4.61，而捲門變形量如圖 4.62 所示，由捲門均溫以及變形量可以發現捲門變形量之變化趨勢與捲門溫度相當接近，捲門變型之外觀示意圖如圖 4.63 及圖 4.64 所示。
3. 捲門在每兩分鐘之變形情況如圖 4.65 所示，變形量為負值表示變形向火場之方向，捲門之變形量以中間以及底部較大，方向為向火場內變形，最大值為 630mm。
4. 捲門在每兩分鐘之熱應力分佈如圖 4.66 所示，最大值達到 2.2 Gpa，在門片與門片接合部分所承受之應力強度較小，而最大之應力強度則集中於捲門底端中間部分。



## 4.5 法規與標準檢討

### 1. 昇降機道玻璃分間牆

在我國建築技術規則設計施工編 79-2 條規定防火構造建築物內之挑空部分、電扶梯間、安全梯之樓梯間、昇降機道、垂直貫穿樓板之管道間及其他類似部分，應以具有一小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備與該處防火構造之樓地板形成區劃分隔。

挑空符合下列情形之一者，得不受第一項之限制：

- A. 避難層通達直上層或直下層之挑空、樓梯及其他類似部分，其室內牆面與天花板以耐燃一級材料裝修者。
- B. 連跨樓層數在三層以下，且樓地板面積在一、五〇〇平方公尺以下之挑空、樓梯及其他類似部分。

在「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」第 3.1.7 條規定安全梯之樓梯間、緊急升降機間、垂直貫穿樓板之管道間及其他類似部分，應以具有 2 小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設施形成區劃分隔。

### 2. 防火捲門

在我國防火捲門之標準有 CNS 14803，其規定經過標準試驗之防火捲門應具有以下三項性能標準：

阻焰性：

- D. 非加熱面不得出現火焰超過 10 秒
- E. 捲門底部上拱量不得超過 1.91 cm
- F. 捲門葉片不得脫出導軌

阻熱性：

- C. 非加熱面均溫不得超過 170°C
- D. 非加熱面任一點溫度不得超過 210°C

防火時效：分為 30 分鐘、1 小時、2 小時、3 小時及 4 小時

## 4.6 結果討論

### 4.6.1 玻璃昇降機道

1. 當火源距離玻璃分間牆距離夠近，將可導致其因溫差過大而破裂。
2. 貫穿兩層樓之昇降機道一但區劃分隔失效，將造成煙流透過昇降機道直接向上形成煙囪效應（Stack Effect），使火災的蔓延更加迅速。
3. 地下場站之避難方向為由下往上避難，一旦高溫濃煙直接透過昇降機道於上一樓層蓄積將增加避難及搶救之困難。
4. 由於模擬對象為位於地下之建築，其向戶外之開口位於最頂層，火災時燃燒所需要之空氣由此戶外開口進入，且經由樓層間之開口，如樓梯，向下流動，若煙層直接透過挑空區竄升至最頂層，此時部分煙流將伴隨補入之空氣進入樓梯之開口，造成環境之危害。
5. 依照建築技術規則 79-2 條規定，本模擬案例之昇降機道不需設置具防火時效之牆壁或是防火門窗，而模擬結果顯示此挑空區無垂直防火區劃之分隔將提升建築火災之危險性，相較之下，「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」第 3.1.7 條之規定，設定 2 小時防火時效之區劃則較為安全且合理。

### 4.6.2 捲門模擬

1. 運用 FDS 火災模擬軟體搭配 ANSYS 有限元素軟體進行熱固耦合分析可運用於探討捲門設備受熱所導致之變形。
2. 由捲門火災模擬情境二及情境三之煙層分佈及地下二層之溫度、能見度可以發現，在商場與電扶梯間設置防火捲門可以延緩或是阻擋濃煙之侵入，提升避難路徑之安全性並延緩或防止火煙蔓延至他樓層。
3. 對於情境一(捲門未動作)與情境二(捲門下降距地面 2m 處)進行比較，就地下二層而言，因捲門遮蔽高溫濃煙蔓延，情境二之環境受火災影響較情境一小；就地下三層而言，因捲門遮蔽造成高溫濃煙僅在地下三層蓄

積，因此情境二受火災影響導致不利於人員逃生之情況較情境一嚴重。以上現象於情境一(捲門未動作)與情境三(捲門完全關閉)之比較亦可發現相同之結果。

4. 對於情境二(捲門下降距地面 2m 處)與情境三(捲門完全關閉)就地下二層進行比較，情境二於電扶梯開口處之溫度高於 60°C，且其他區域溫度均有上升，情境三環境則無變化；就地下三層而言，此兩情境因捲門下降對於高溫濃煙均有遮蔽之效果，因此在該樓層環境受火災影響之差異並不明顯。
5. 由緊急逃生梯入口處所設置之溫度量測點所得模擬結果，捲門有動作之情況將較捲門無動作之情況減少約 30 秒逃生時間。
6. 由防火捲門下降至距地面 2m 以及全關兩種情況進行受熱變形及熱應力分佈之模擬結果，防火捲門在火場中受熱產生之變形均以向火場方向變形為主，且在底端不會產生上拱之情形。在模擬時間內，情境二最大之變形量為 319mm，而情境三為 630mm，是以全關形式之捲門具有較大之變形量；在熱應力的部分，兩種動作情況則不盡相似，就下降至距地面 2m 的防火捲門而言，其熱應力分佈由兩側向中間逐漸降低，捲門邊緣受拘束部分應力較大，又以下端兩側之熱應力最大；就全關的防火捲門而言，在門片中間部分所受應力相當接近，而最大之熱應力集中於門片底端，全關形式之捲門最大熱應力約為下降之距地面 2m 處之捲門的 2 倍。

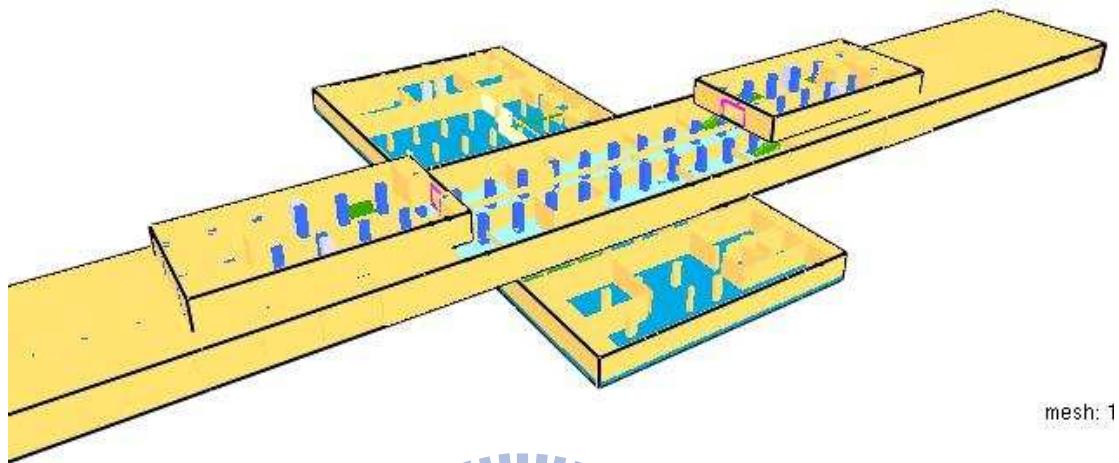


圖 4.1 模擬範圍外觀示意圖



昇降機道

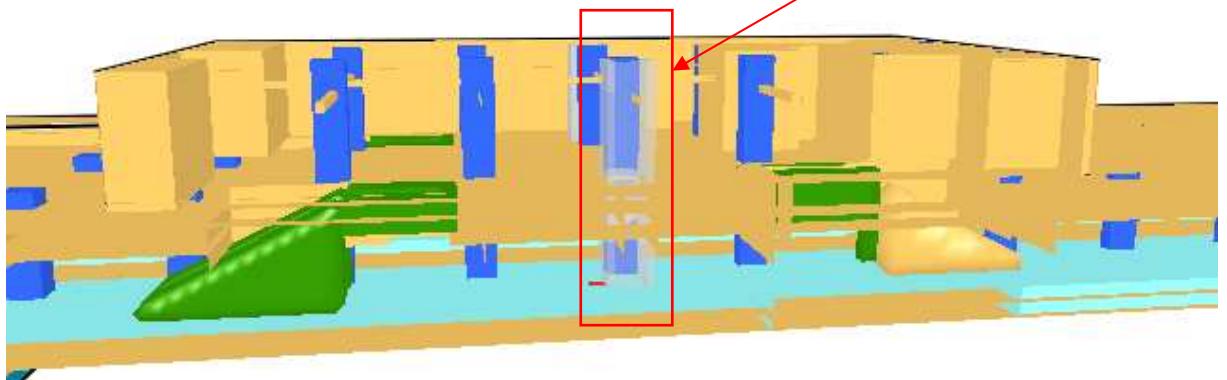


圖 4.2 玻璃分間牆外觀示意圖

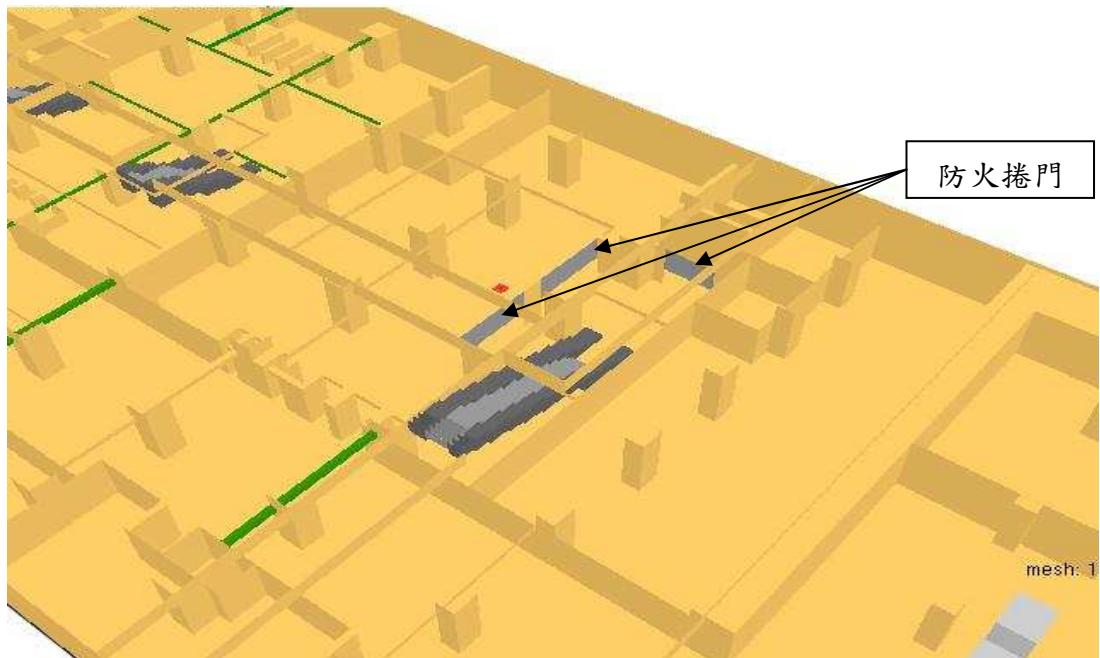


圖 4.3 電扶梯間防火捲門區劃

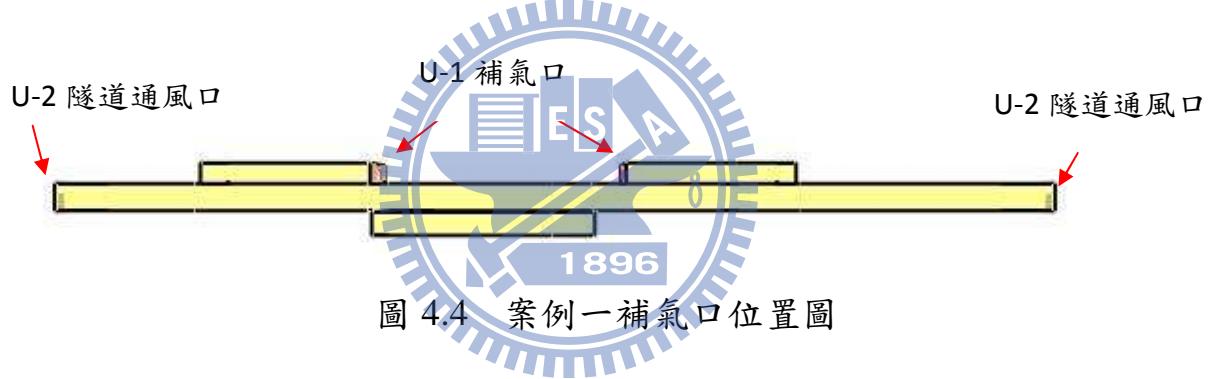


圖 4.4 案例一補氣口位置圖

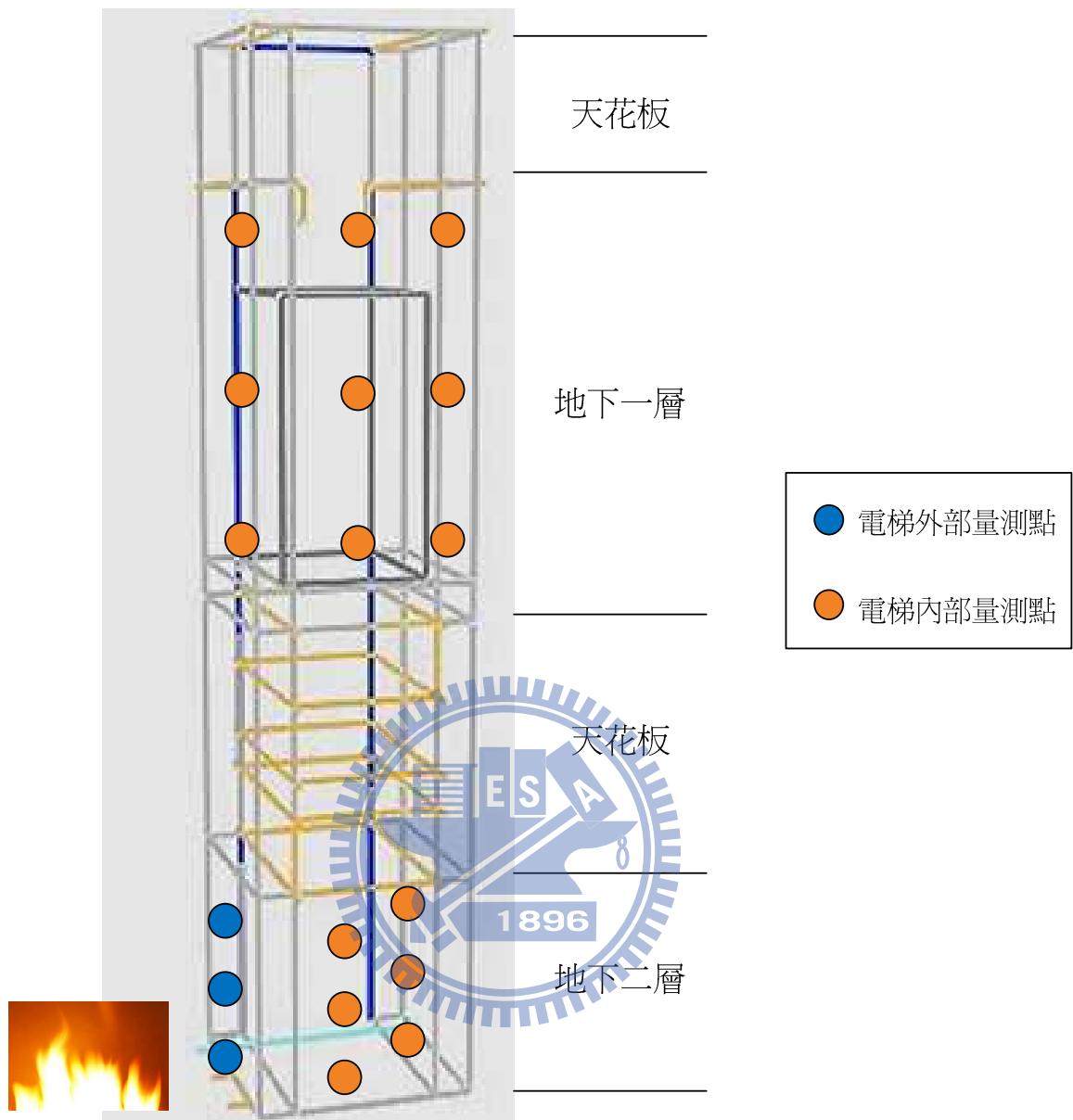


圖 4.5 玻璃破裂量測點設置位置

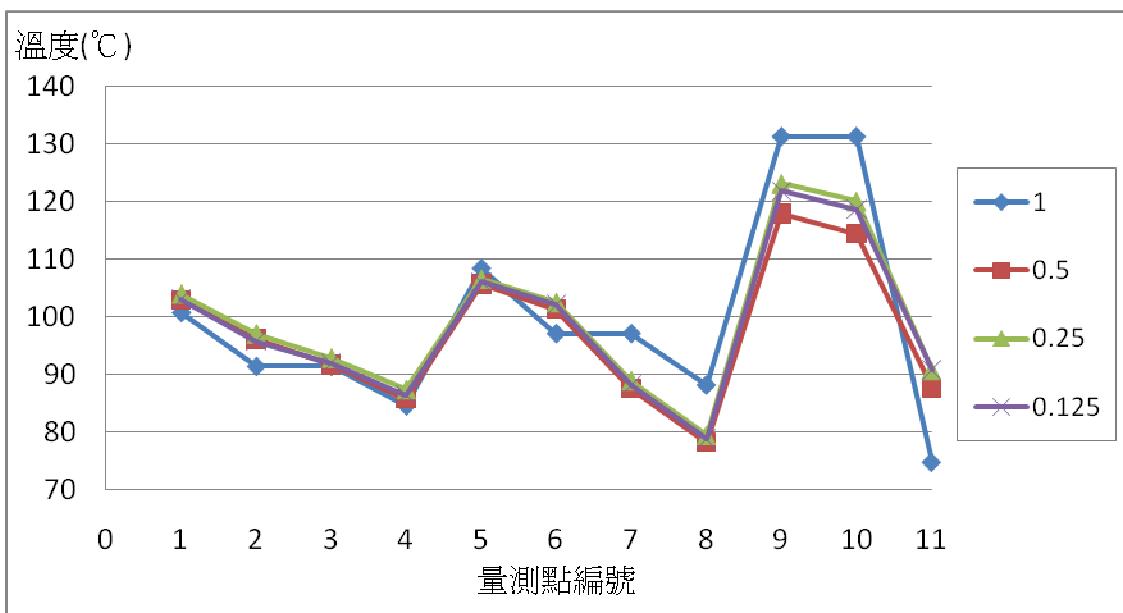


圖 4.6 FDS 格點測試溫度分佈

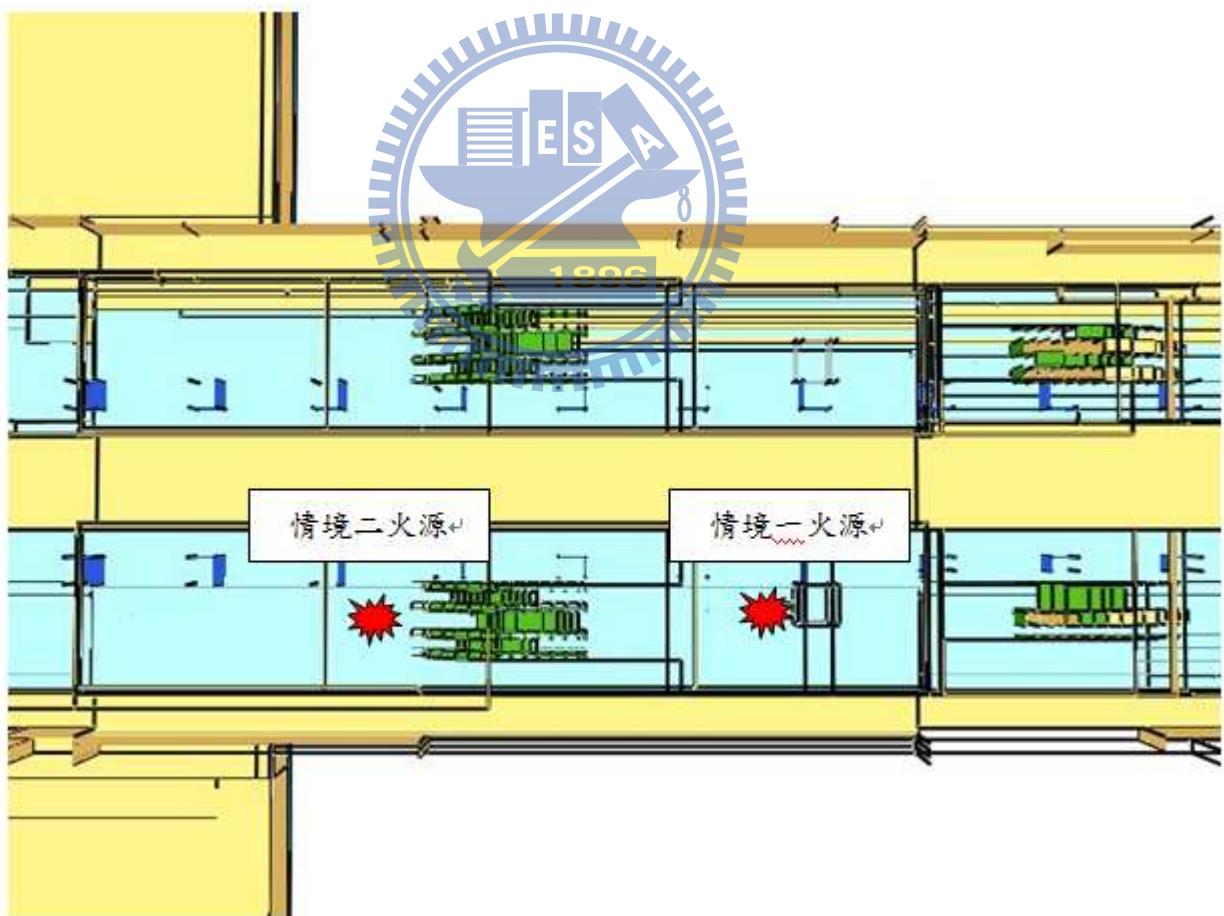
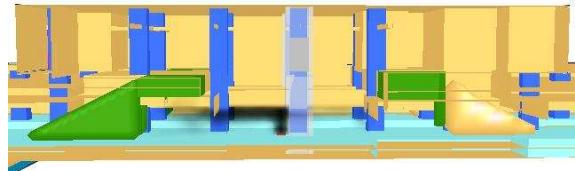


圖 4.7 火源位置

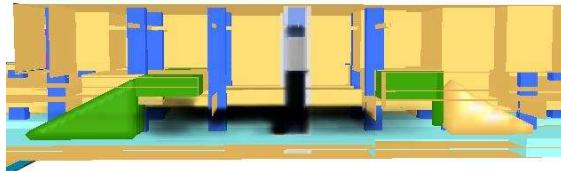
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 84  
Time: 60.5

mesh: 1

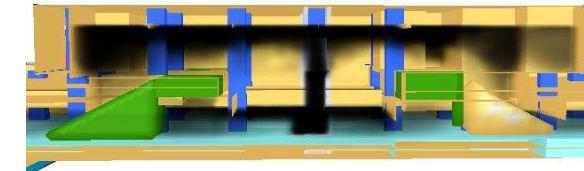
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 167  
Time: 120.2

mesh: 1

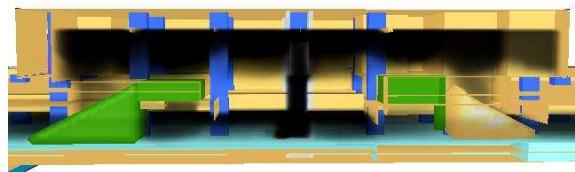
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 250  
Time: 180.0

mesh: 1

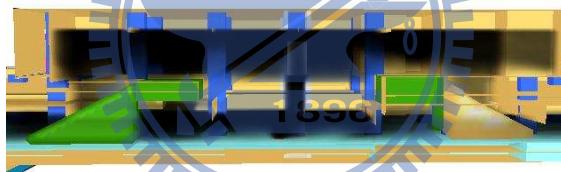
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 334  
Time: 240.5

mesh: 1

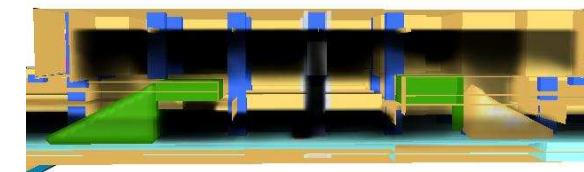
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 417  
Time: 300.2

mesh: 1

Smokeview 5.6 – Oct 29 2010

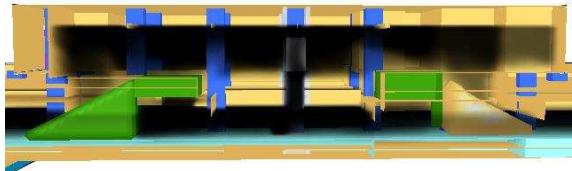


Frame: 500  
Time: 360.0

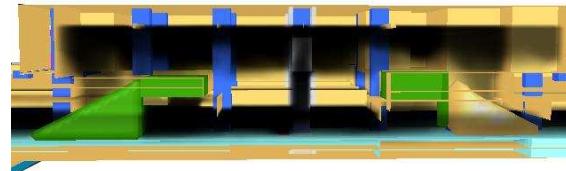
mesh: 1

圖 4.8 情境一昇降機旁火源煙層圖

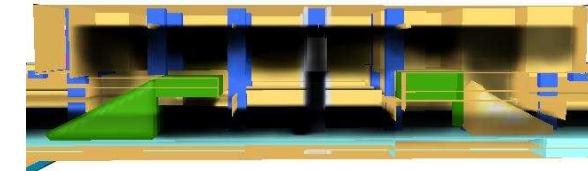
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



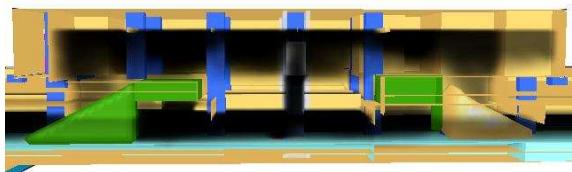
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 584  
Time: 420.5

mesh: 1

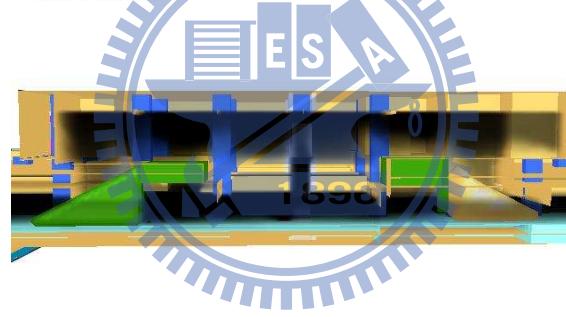
Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 667  
Time: 480.2

mesh: 1

Smokeview 5.6 – Oct 29 2010



Frame: 750  
Time: 540.0

mesh: 1

Smokeview 5.6 – Oct 29 2010

Frame: 834  
Time: 600.5

mesh: 1

Frame: 917  
Time: 660.2

mesh: 1

Frame: 1000  
Time: 720.0

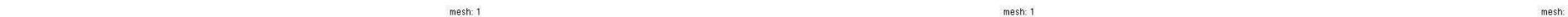
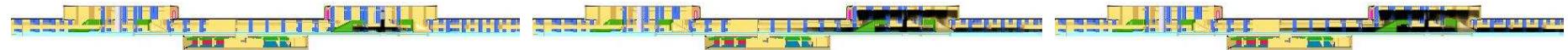


圖 4.9 情境一昇降機旁火源煙層圖

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 167  
Time: 120.2

mesh: 1

Frame: 334  
Time: 240.5

mesh: 1

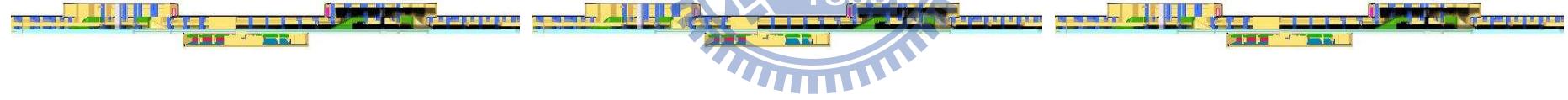
Frame: 501  
Time: 360.7

mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 667  
Time: 480.2

mesh: 1

Frame: 834  
Time: 600.5

mesh: 1

Frame: 1000  
Time: 720.0

mesh: 1

圖 4.10 情境一煙層分佈圖

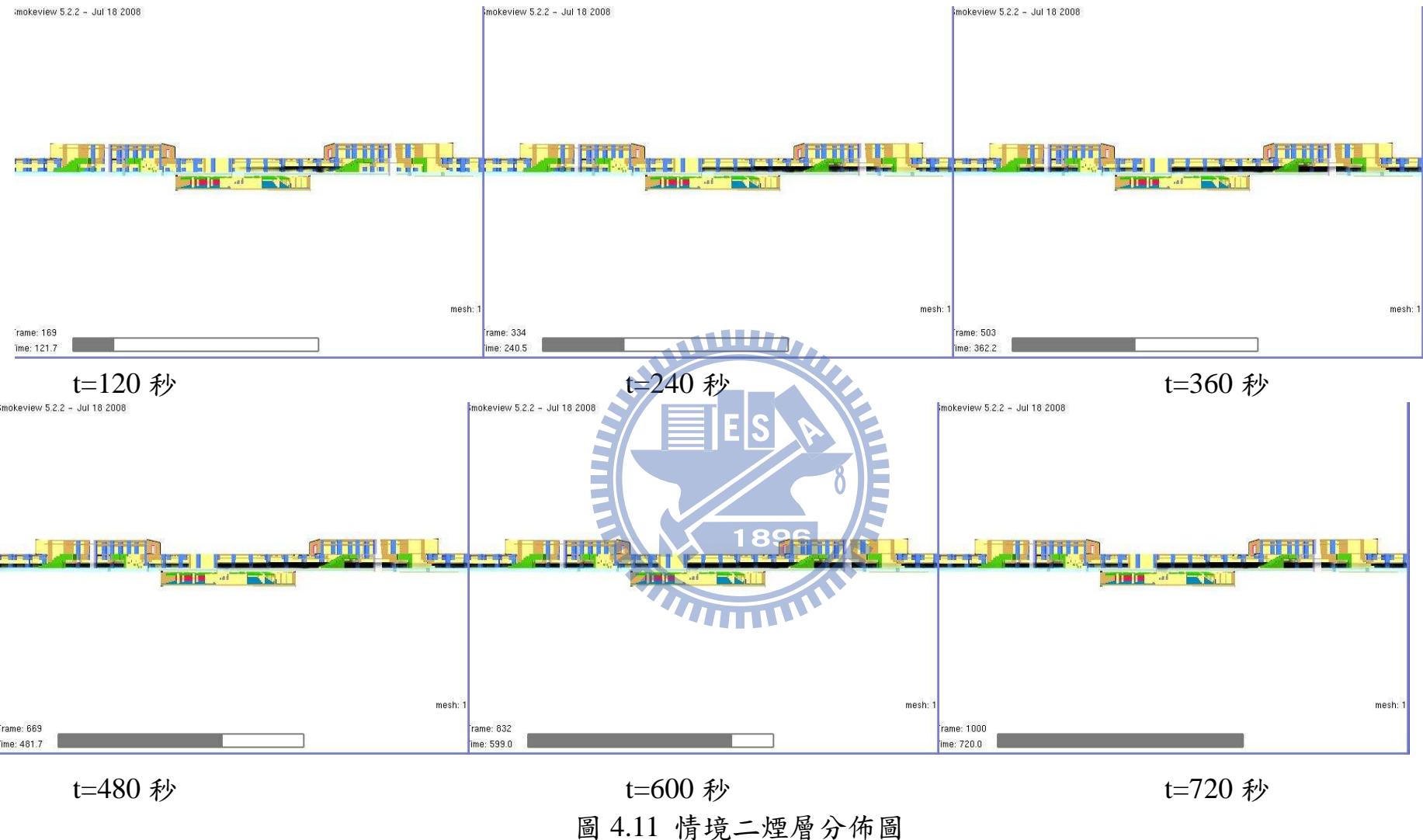


圖 4.11 情境二煙層分佈圖

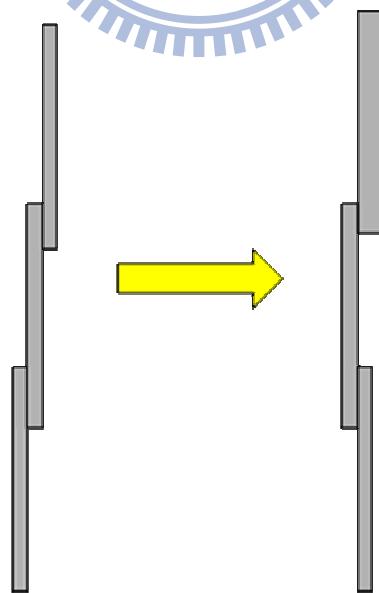
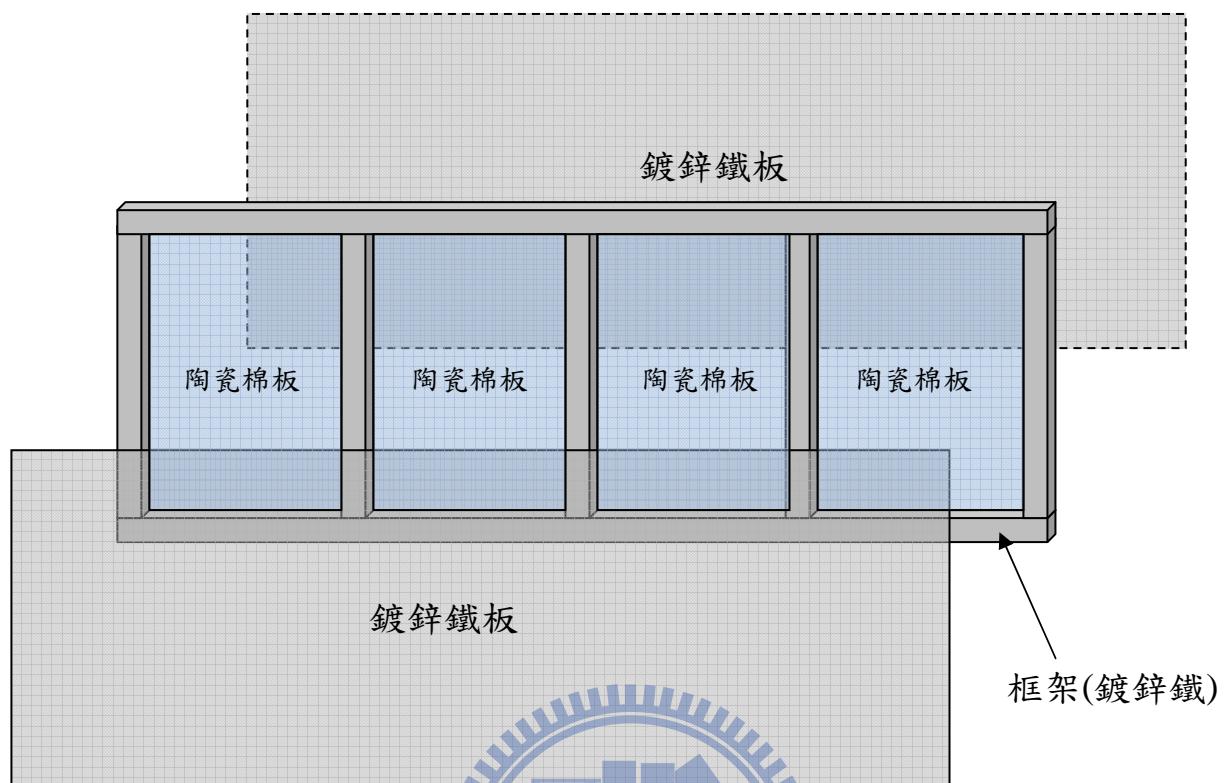


圖 4.13 快速捲門排列方式

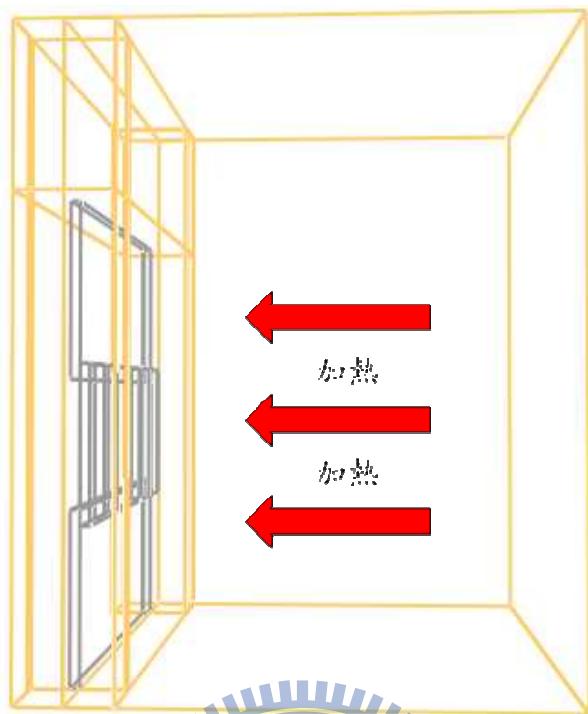


圖 4.14 大型加熱爐模型側視圖

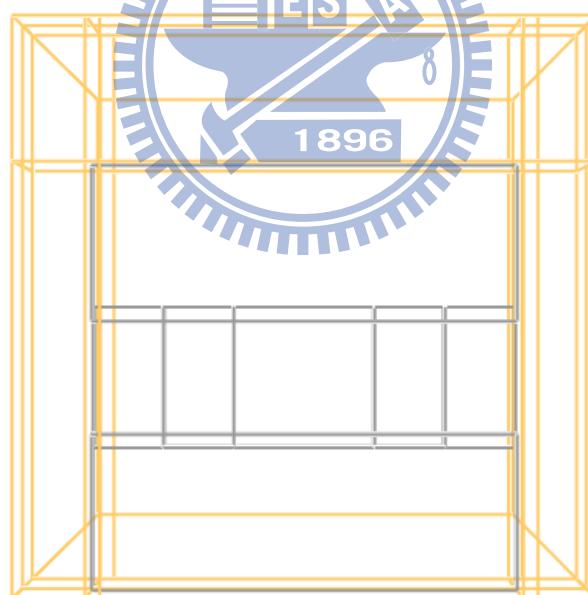


圖 4.15 大型加熱爐模型立面圖

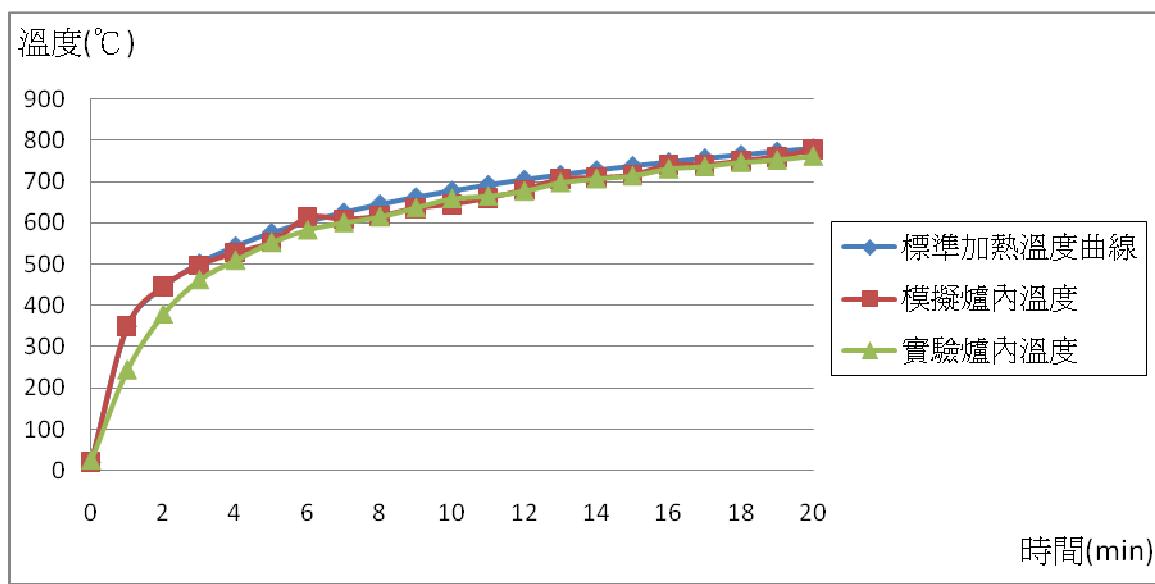
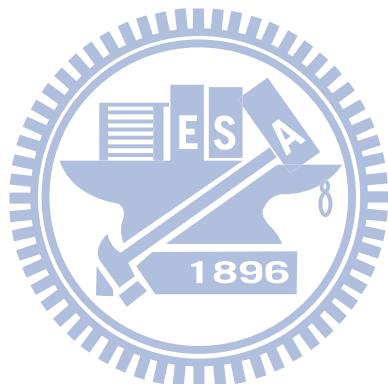


圖 4.16 大型加熱爐模擬升溫曲線



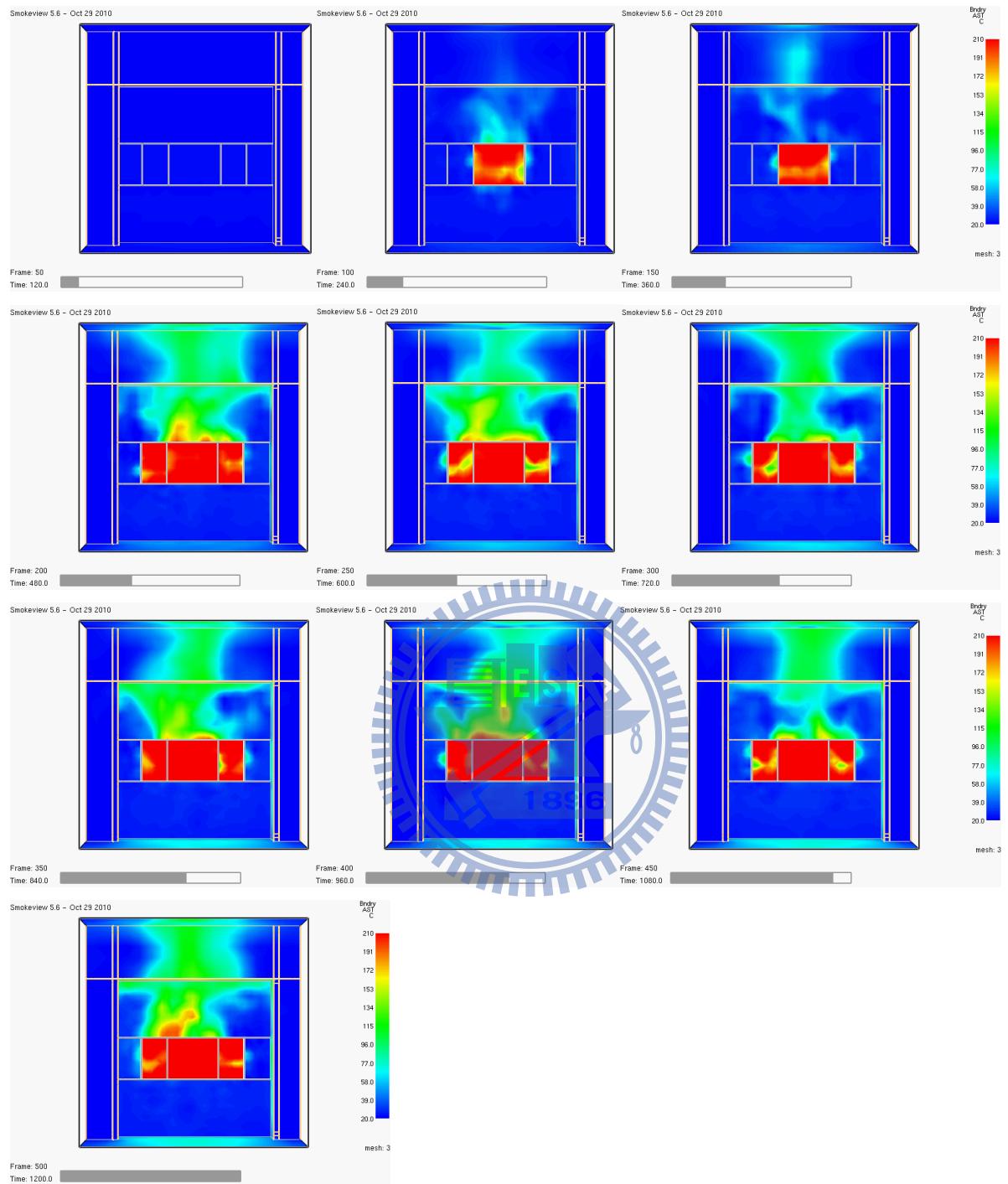


圖 4.17 試體變形導致背火面加熱情形

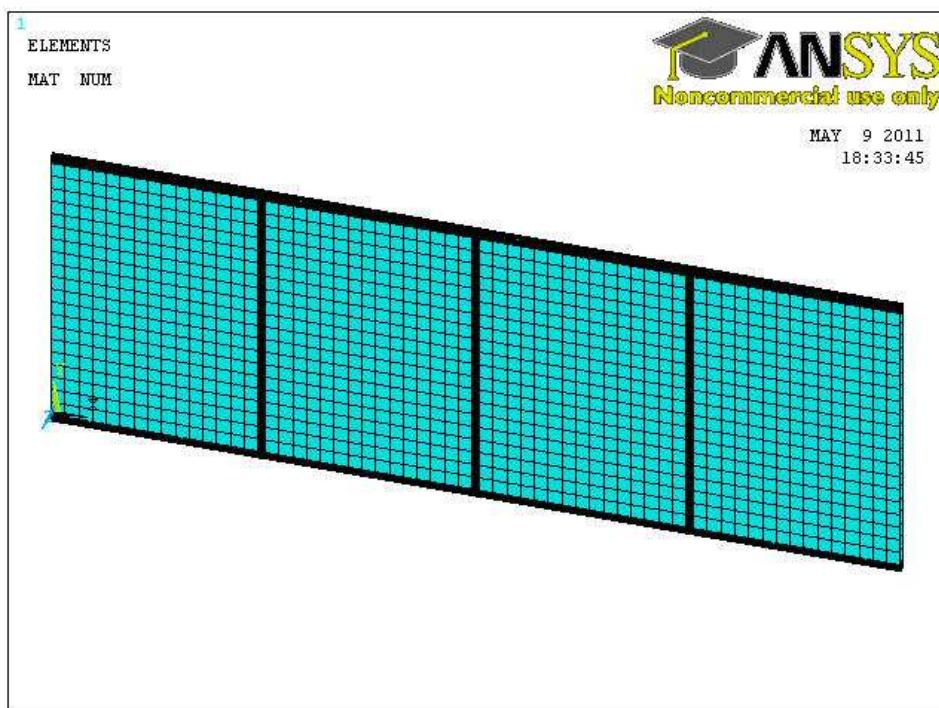


圖 4.18 ANSYS 門片模型外觀

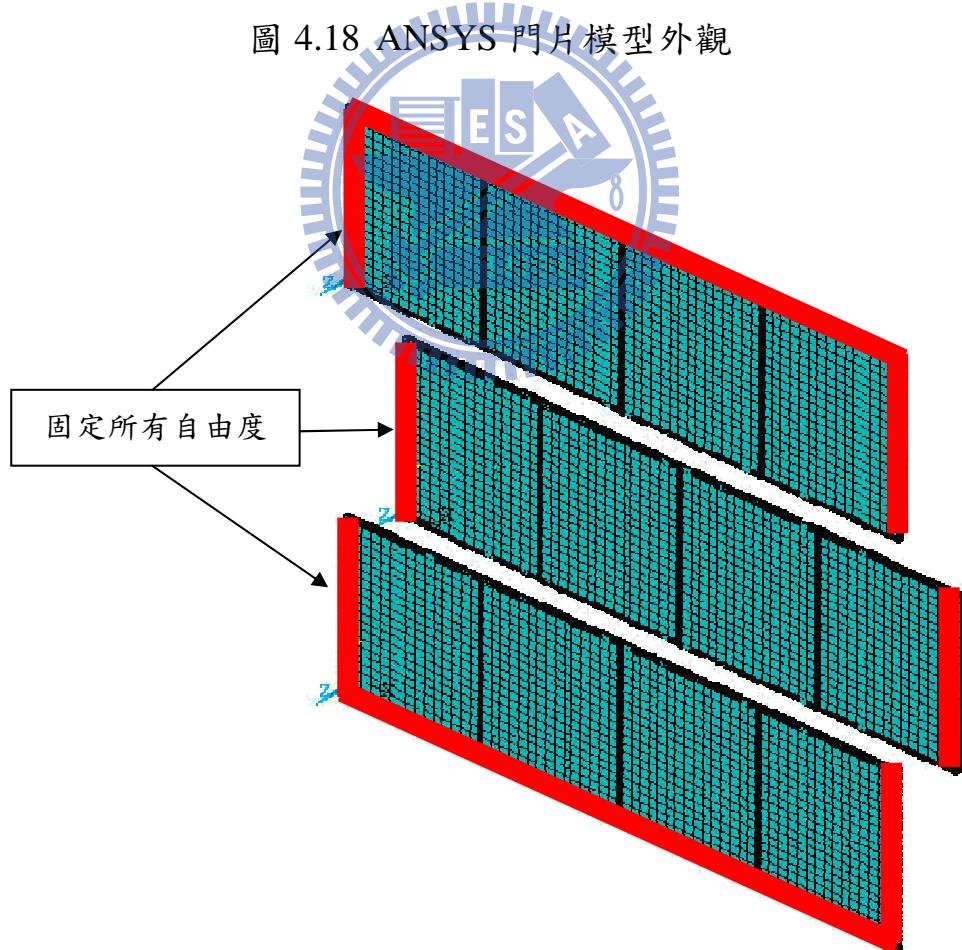


圖 4.19 ANSYS 門片模擬拘束條件

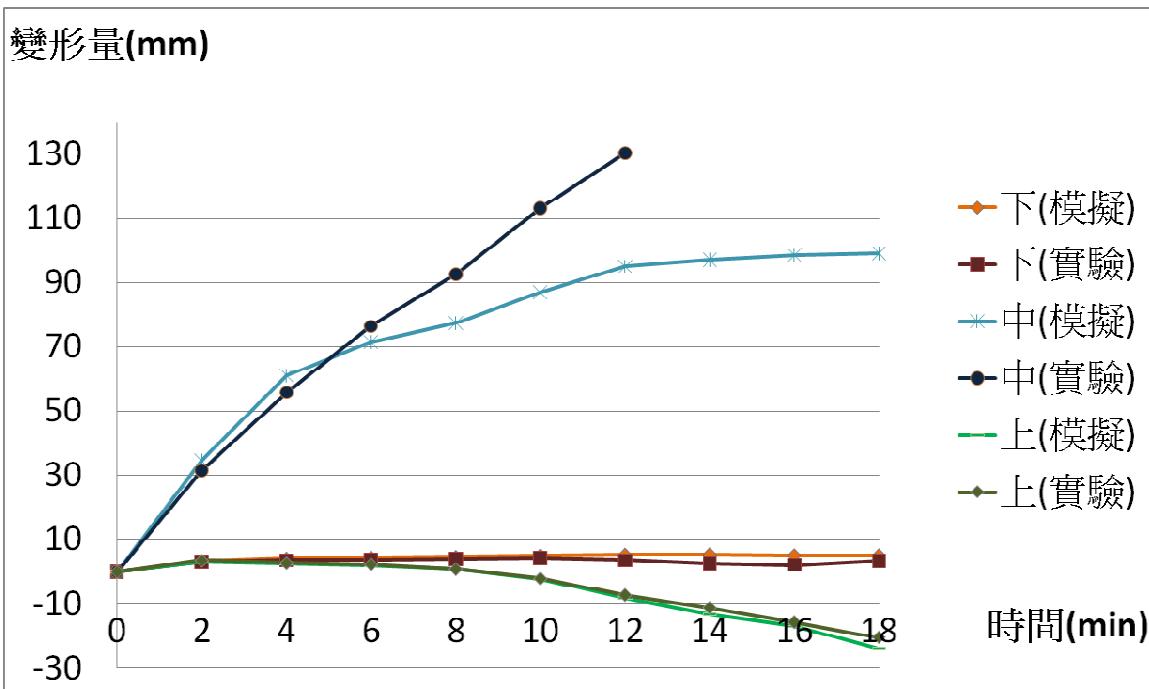


圖 4.20 變形量模擬結果

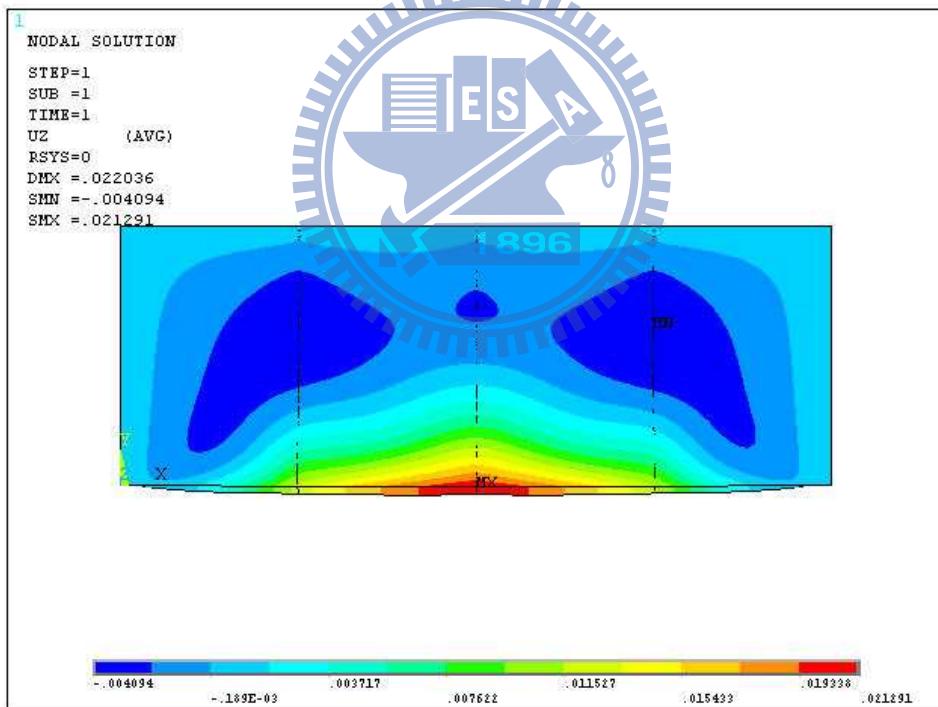


圖 4.21 上門片變形量模擬結果(4min)

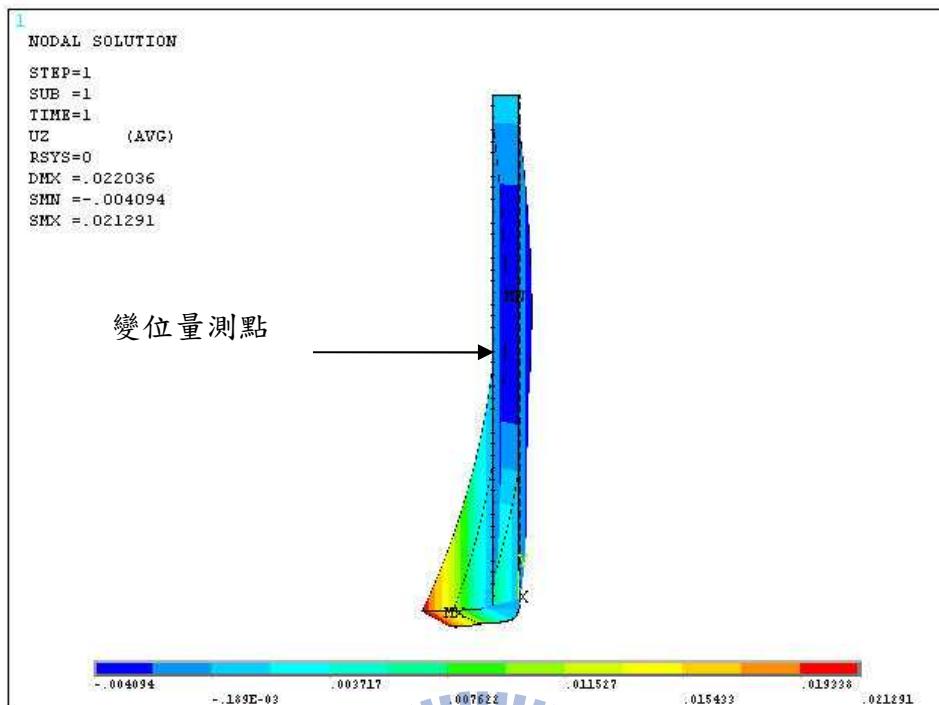


圖 4.22 上門片變形量模擬結果側視圖(4min)



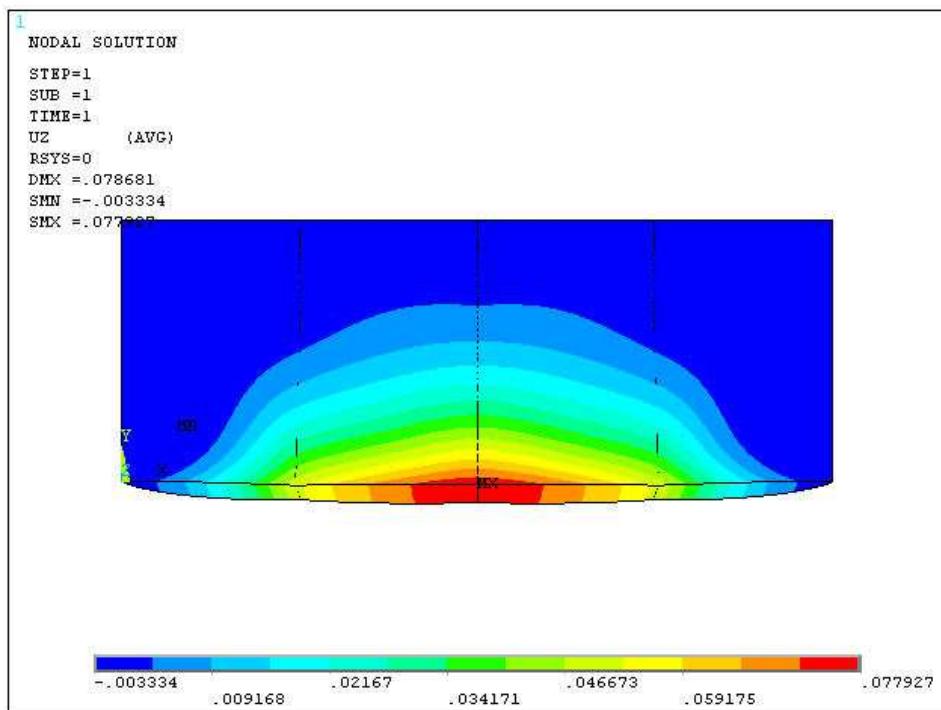


圖 4.23 上門片變形量模擬結果(16min)

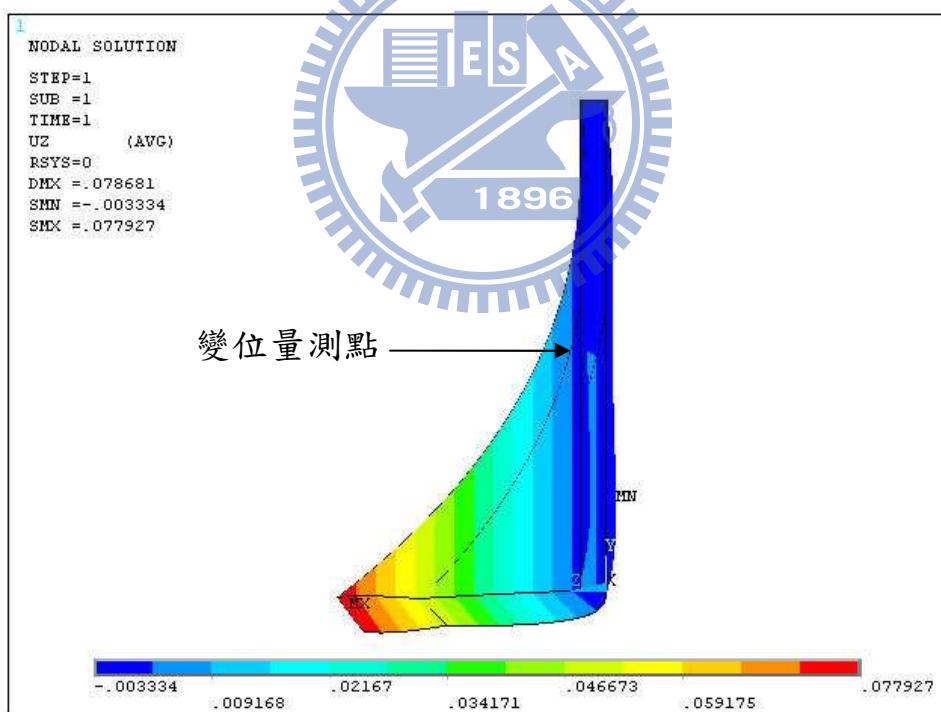


圖 4.24 上門片變形量模擬結果側視圖(16min)

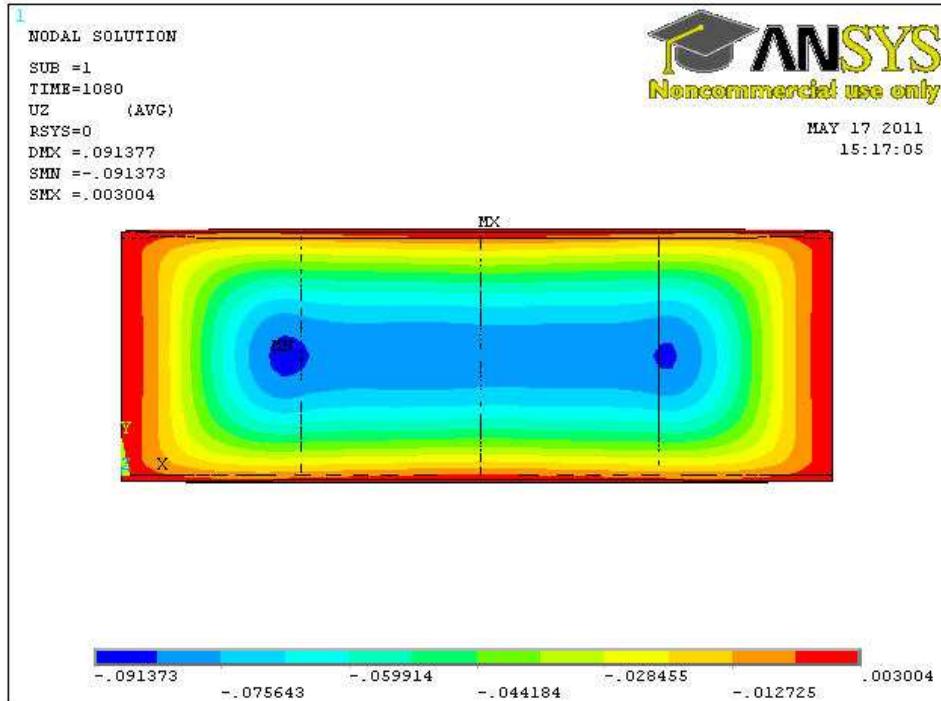


圖 4.25 中門片變形量模擬結果(12min)

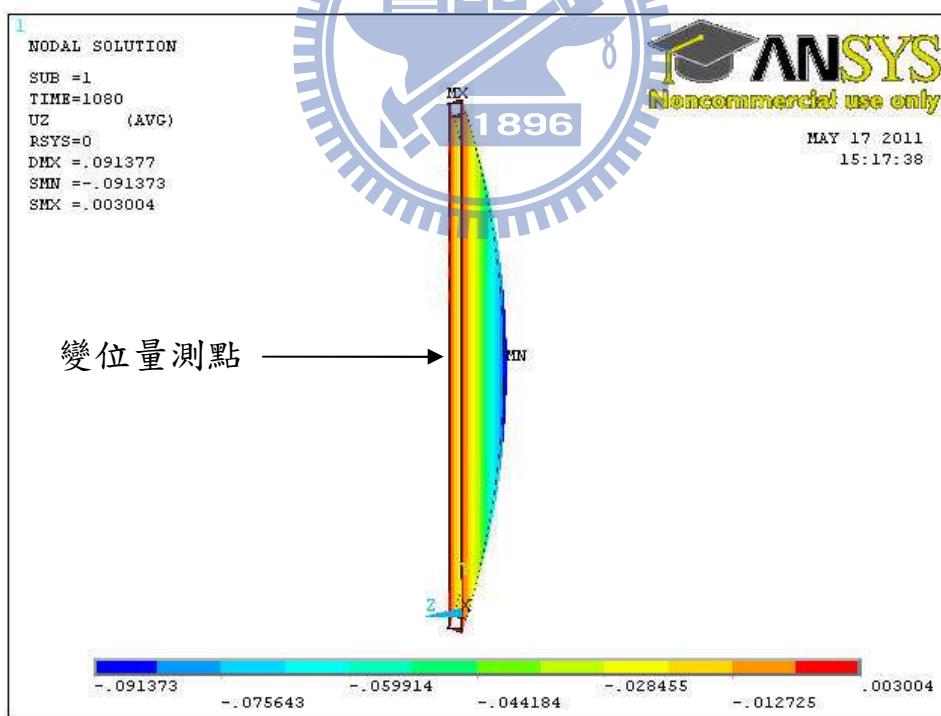


圖 4.26 中門片變形量模擬結果側視圖(12min)

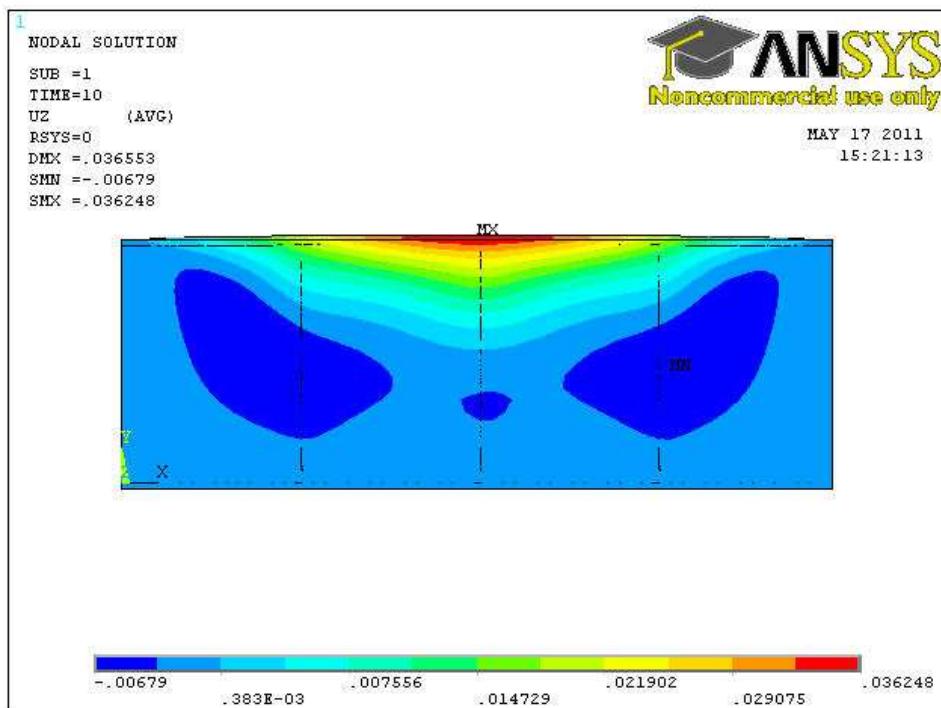


圖 4.27 下門片變形量模擬結果(18min)

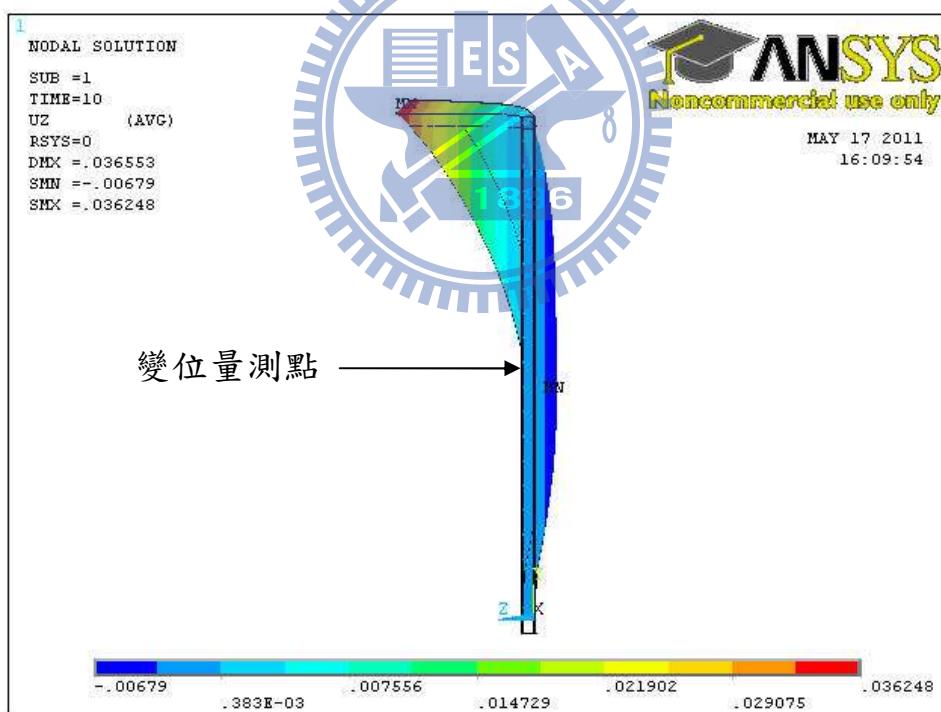


圖 4.28 下門片變形量模擬結果側視圖(18min)

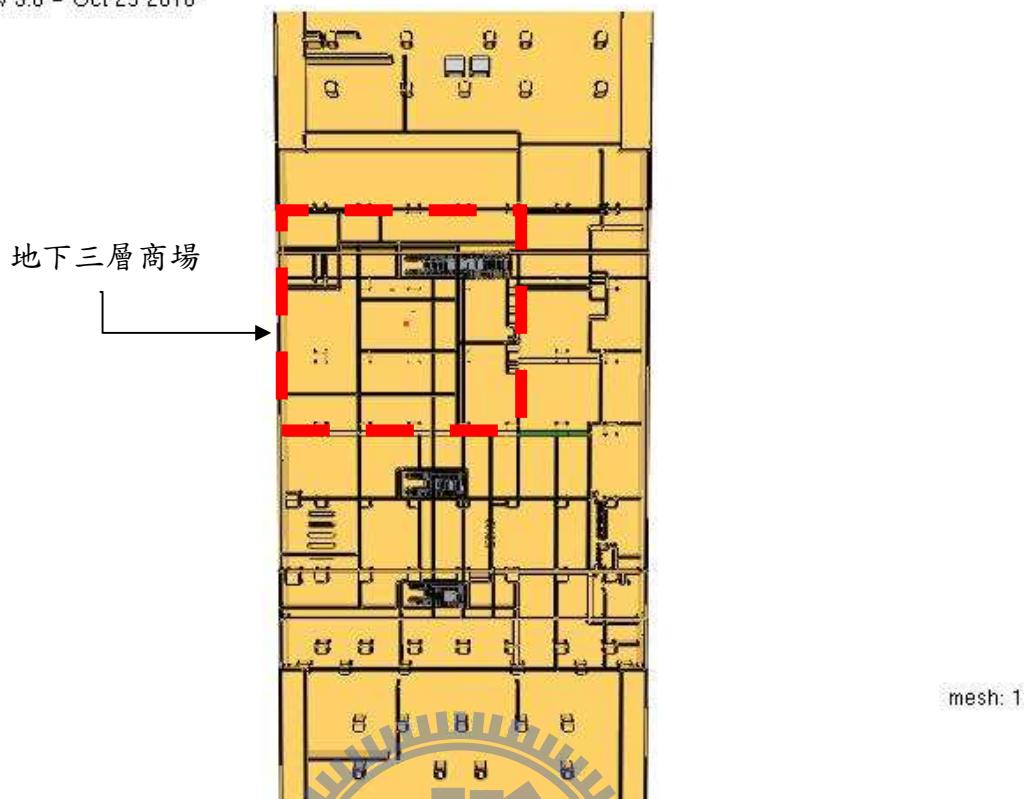


圖 4.29 捲門模擬討論範圍

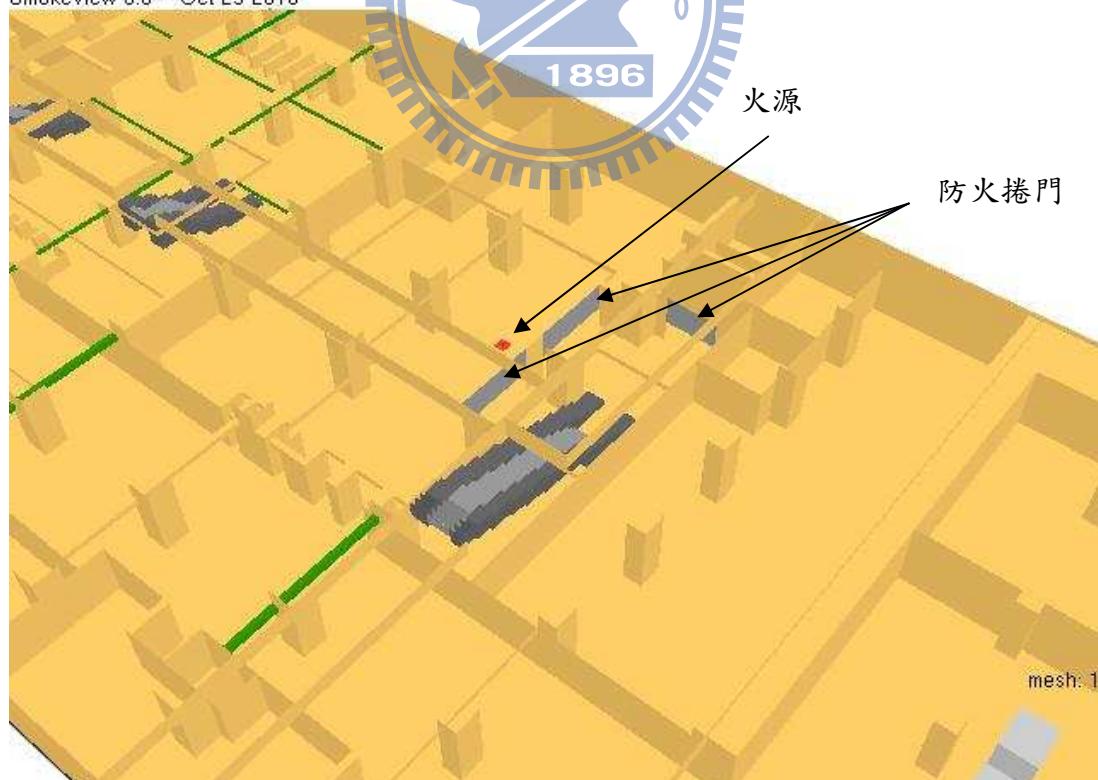
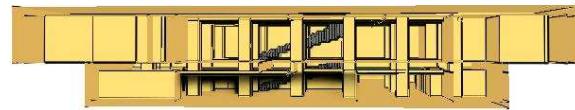


圖 4.30 捲門及火源位置

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 167  
Time: 120.2  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 1

Frame: 334  
Time: 240.5  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 1

Frame: 500  
Time: 360.0  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 666  
Time: 479.5



mesh: 1

Frame: 834  
Time: 600.5



mesh: 1

Frame: 1000  
Time: 720.0

mesh: 1

圖 4.31 情境一煙層分佈圖

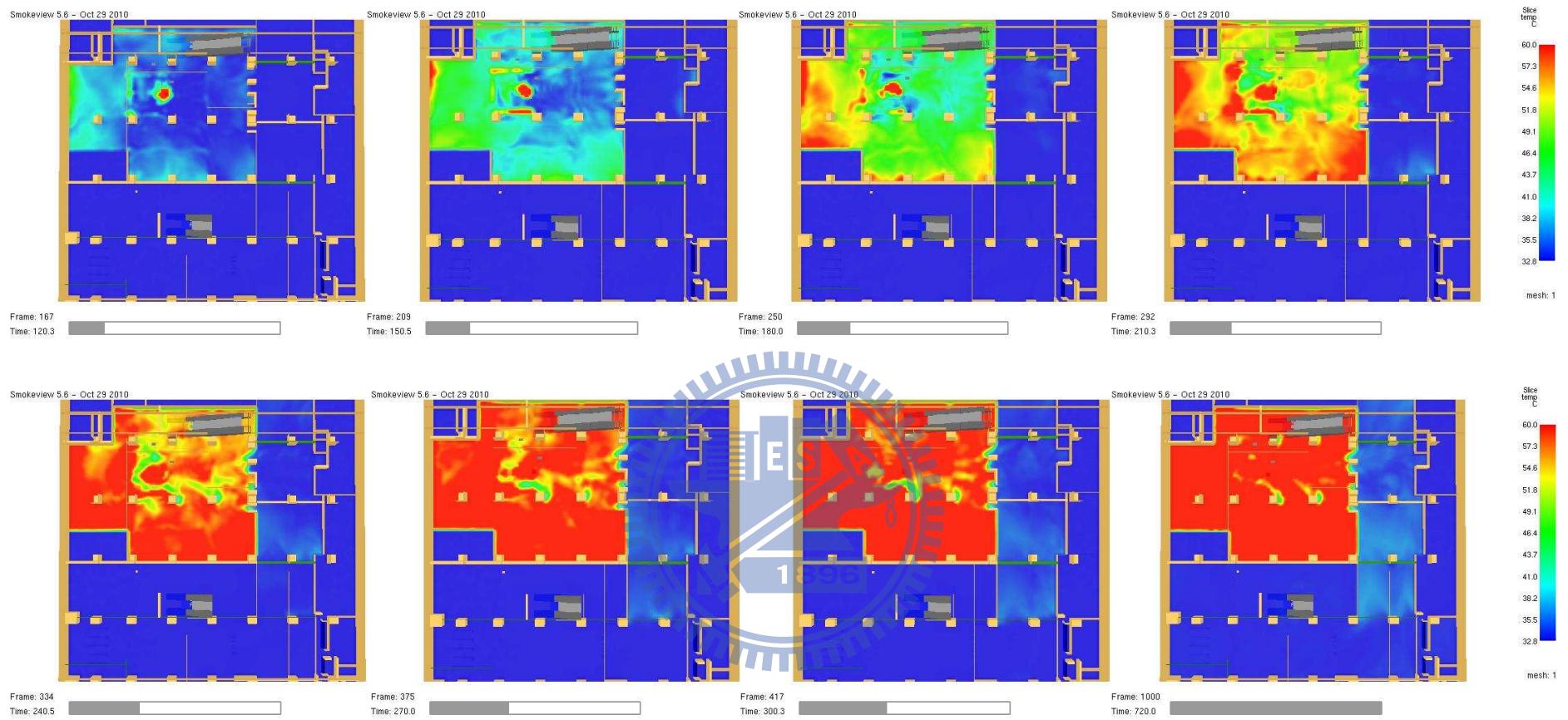


圖 4.32 情境一地下三層溫度分佈圖

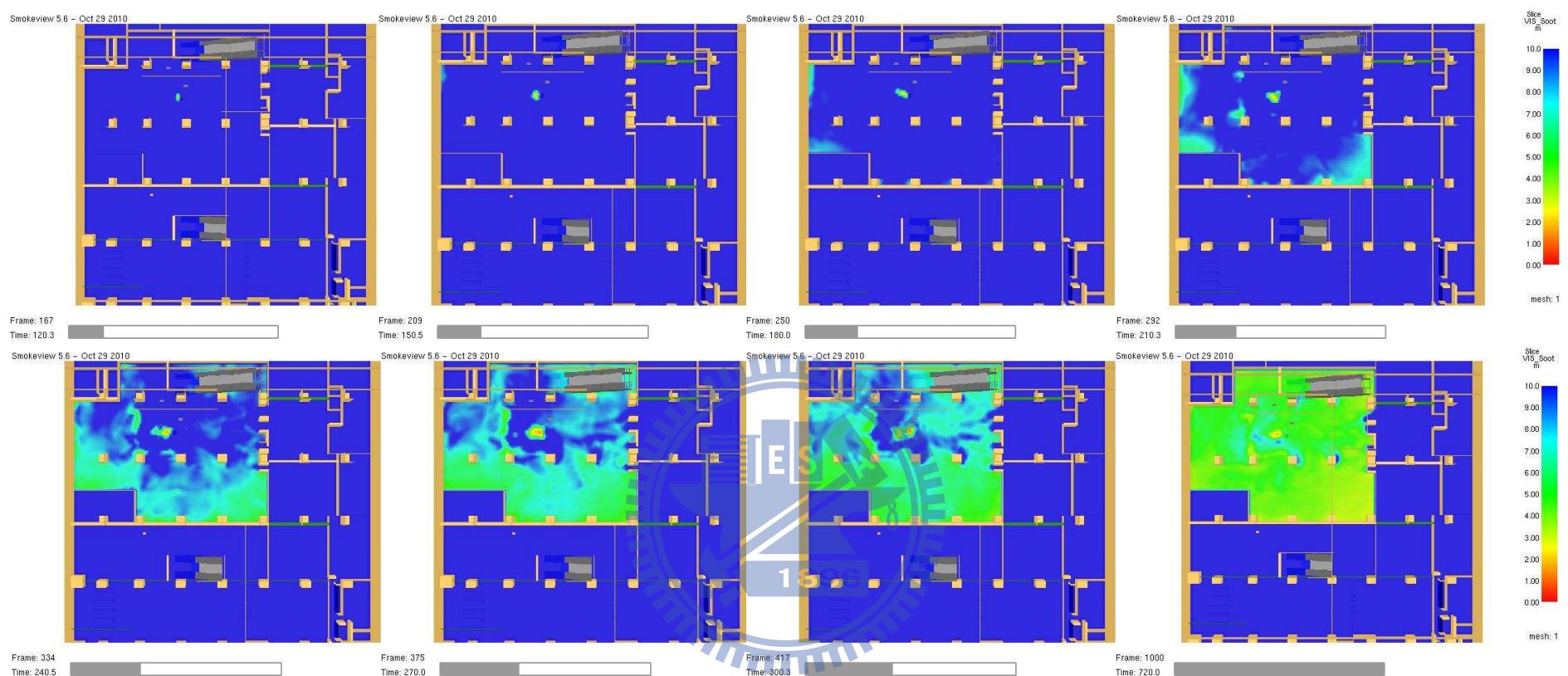


圖 4.33 情境一地下三層能見度分佈圖



圖 4.34 情境一地下三層 CO 分佈圖



圖 4.35 情境一地下二層溫度分佈圖

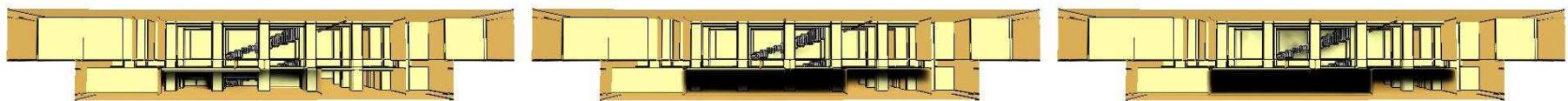


圖 4.36 情境一地下二層能見度分佈圖

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 167  
Time: 120.2  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

mesh: 1  
Frame: 334  
Time: 240.5  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

mesh: 1  
Frame: 501  
Time: 360.7  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

mesh: 1



Frame: 667  
Time: 480.2  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

mesh: 1  
Frame: 834  
Time: 600.5  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

mesh: 1  
Frame: 1000  
Time: 720.0  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

mesh: 1

圖 4.37 情境二煙層分佈圖

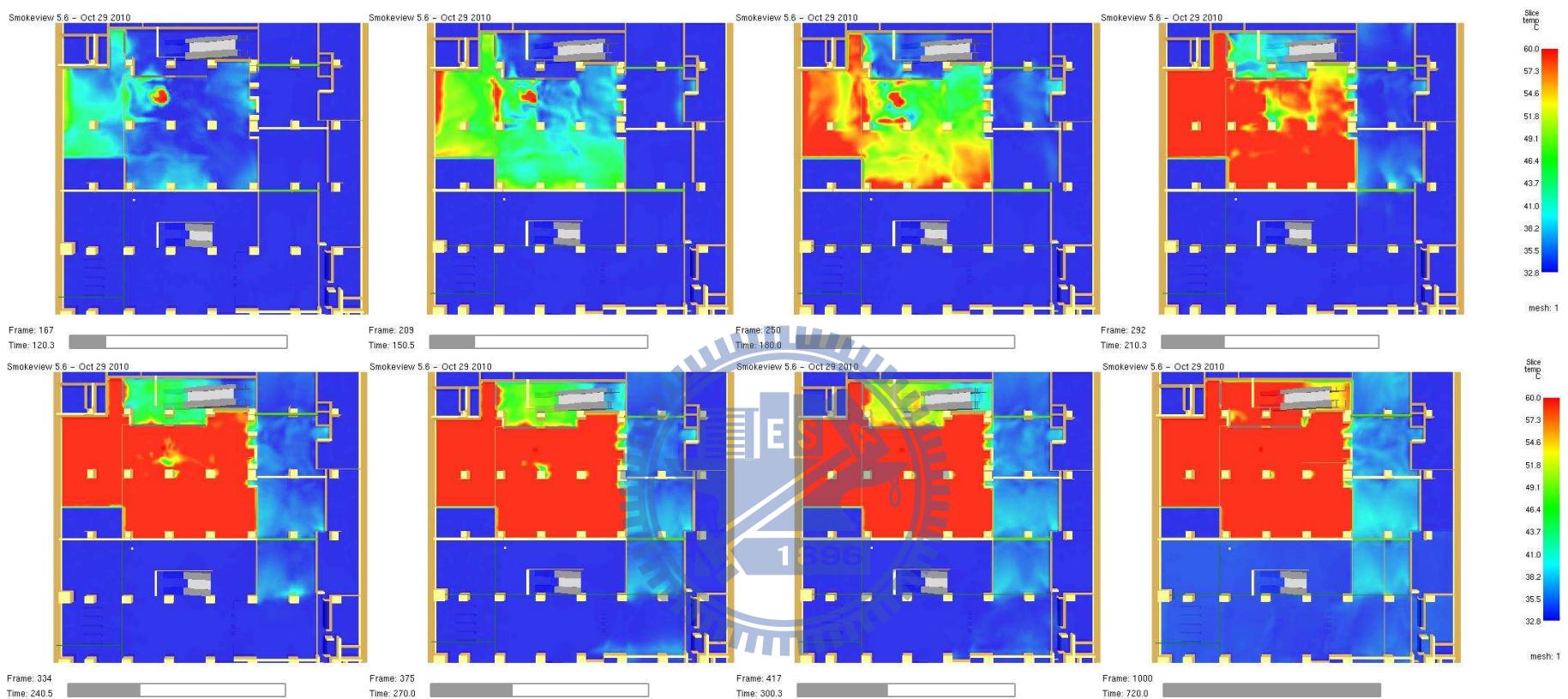


圖 4.38 情境二地下三層溫度分佈圖

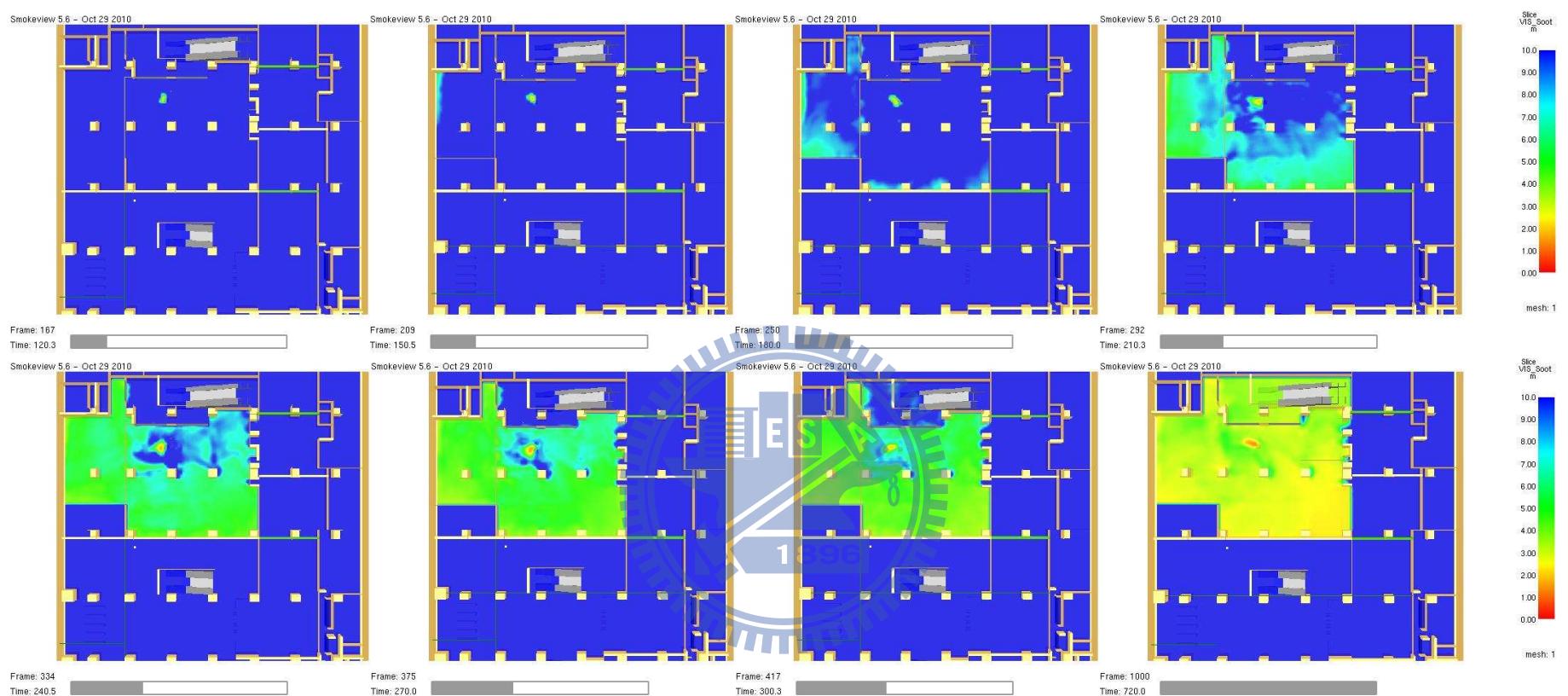


圖 4.39 情境二地下三層能見度分佈圖



圖 4.40 情境二地下三層 CO 分佈圖



圖 4.41 情境二地下二層溫度分佈圖

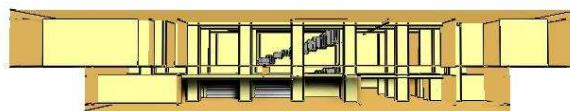


圖 4.42 情境二地下二層能見度分佈圖

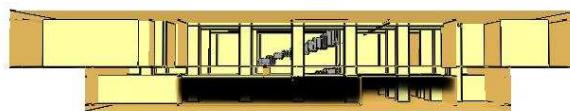
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

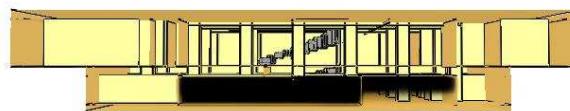
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



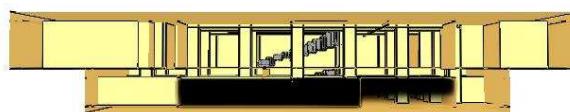
Frame: 167  
Time: 120.2  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 1  
Frame: 334  
Time: 240.5  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



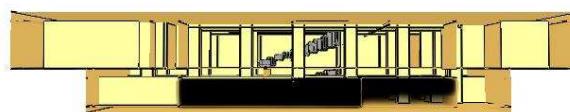
mesh: 1  
Frame: 500  
Time: 360.0  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 667  
Time: 480.2  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 1  
Frame: 834  
Time: 600.5  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 1  
Frame: 1000  
Time: 720.0  
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

圖 4.43 情境三煙層分佈圖

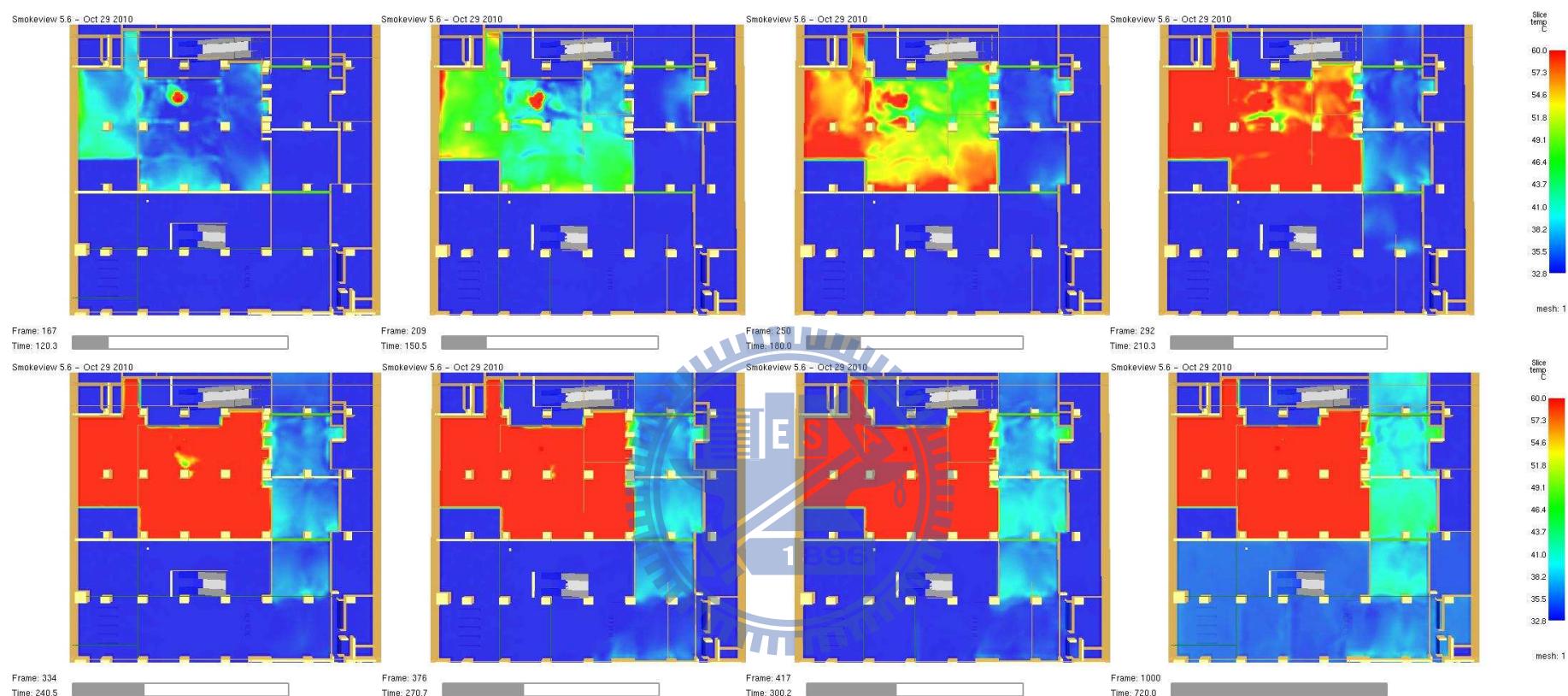


圖 4.44 情境三地下三層溫度分佈圖

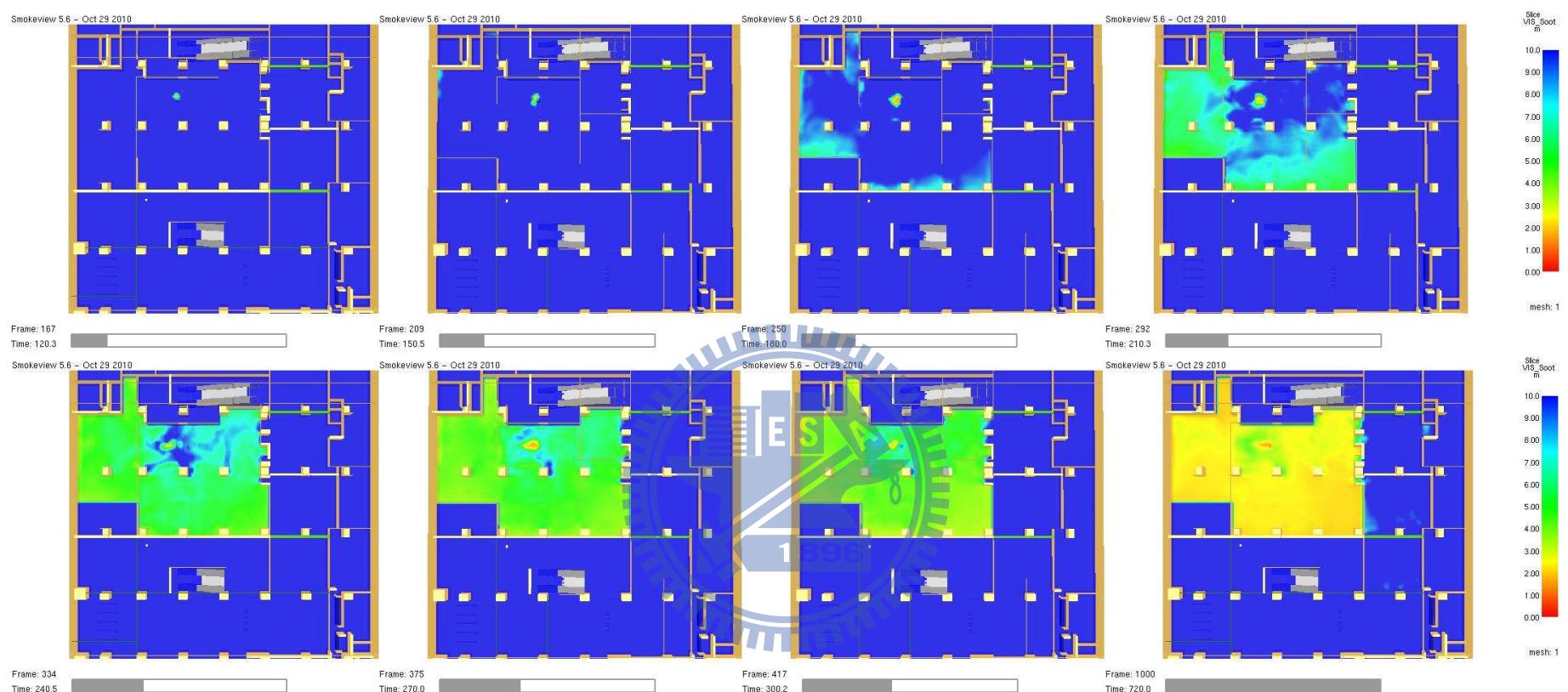


圖 4.45 情境三地下三層能見度分佈圖

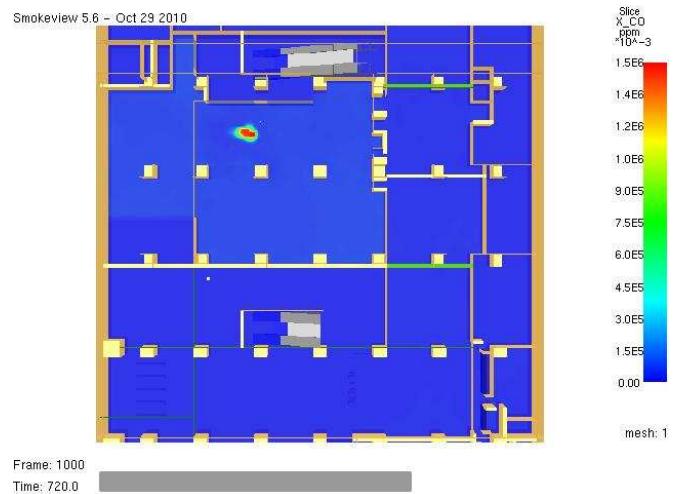


圖 4.46 情境三地下三層 CO 分佈圖

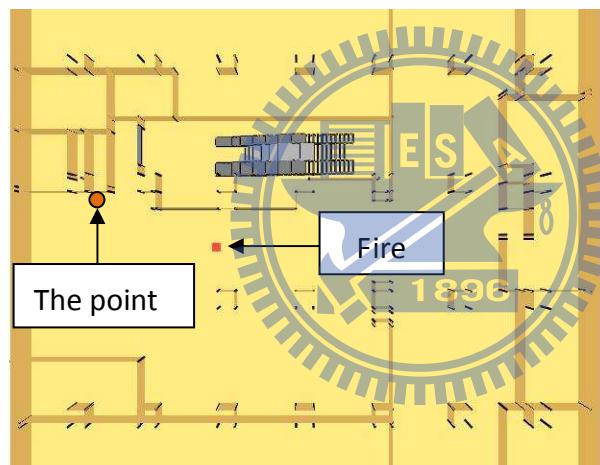


圖 4.47 量測點位置

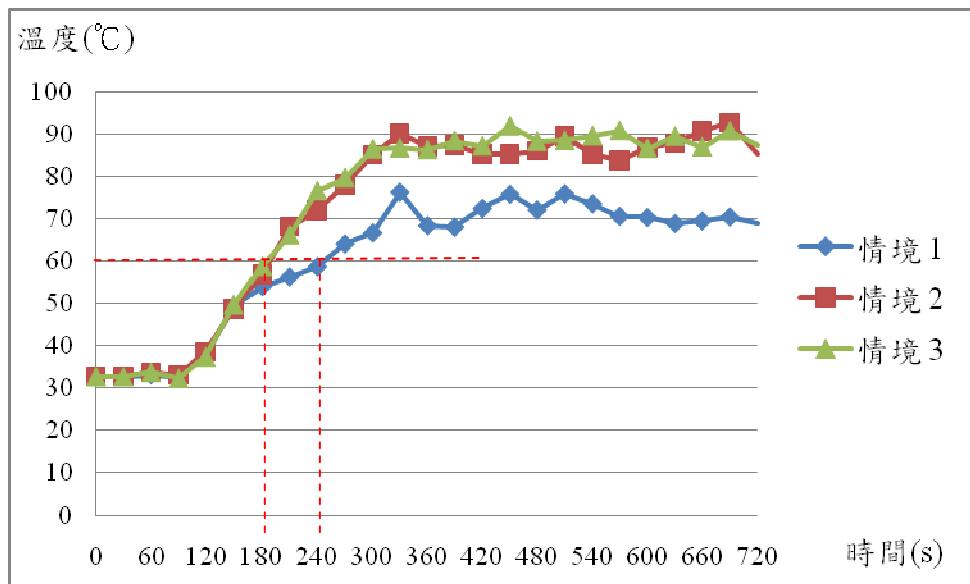


圖 4.48 各情境量測點溫度變化

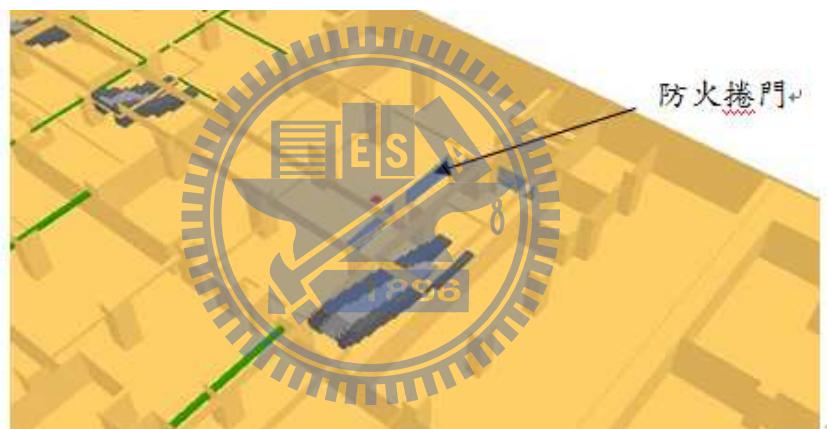


圖 4.49 防火捲門位置

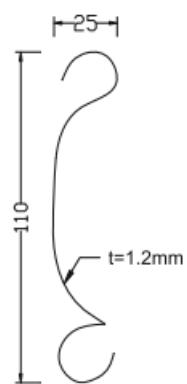


圖 4.50 門片形式

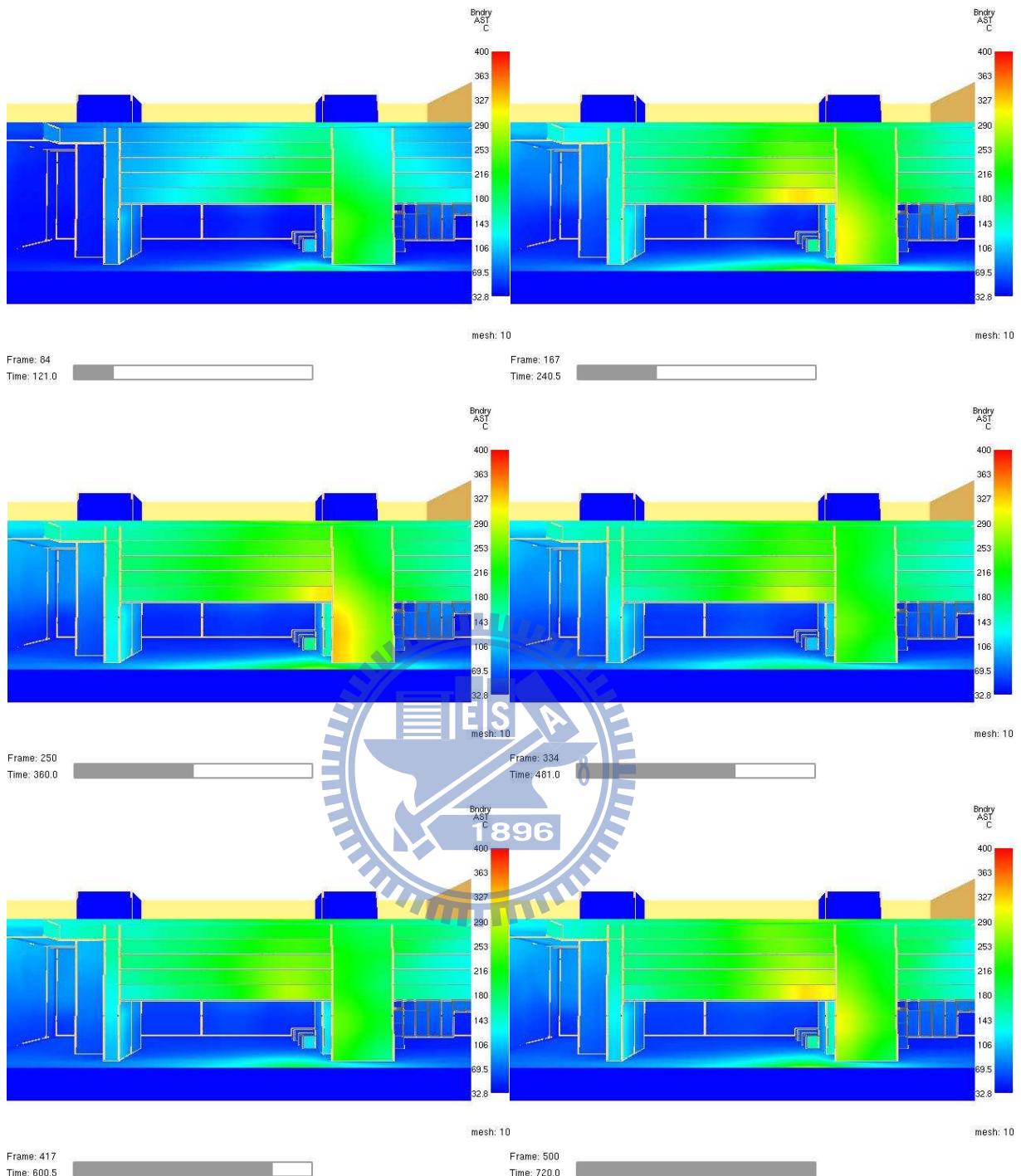


圖 4.51 情境二捲門表面溫度

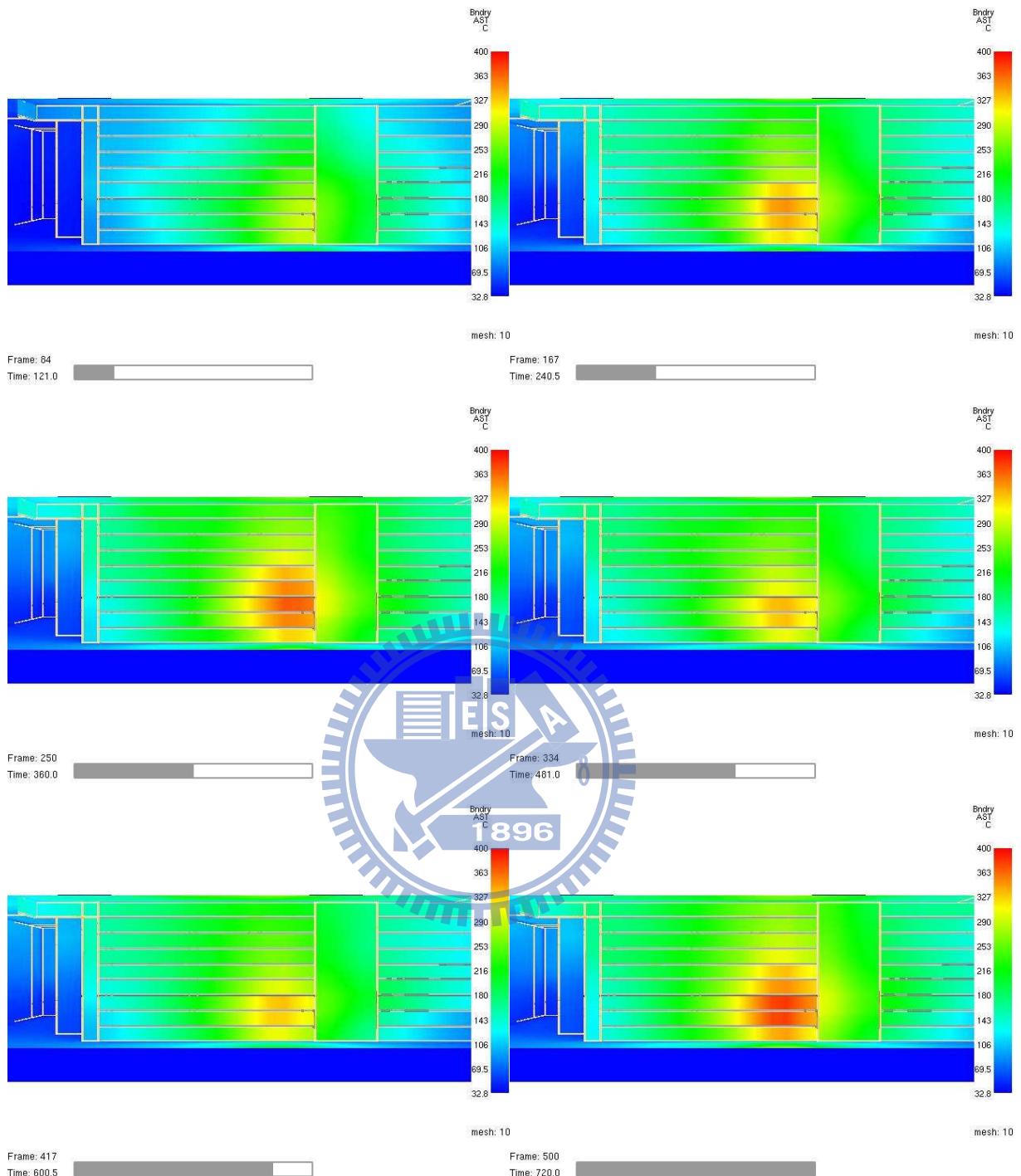


圖 4.52 情境三捲門表面溫度

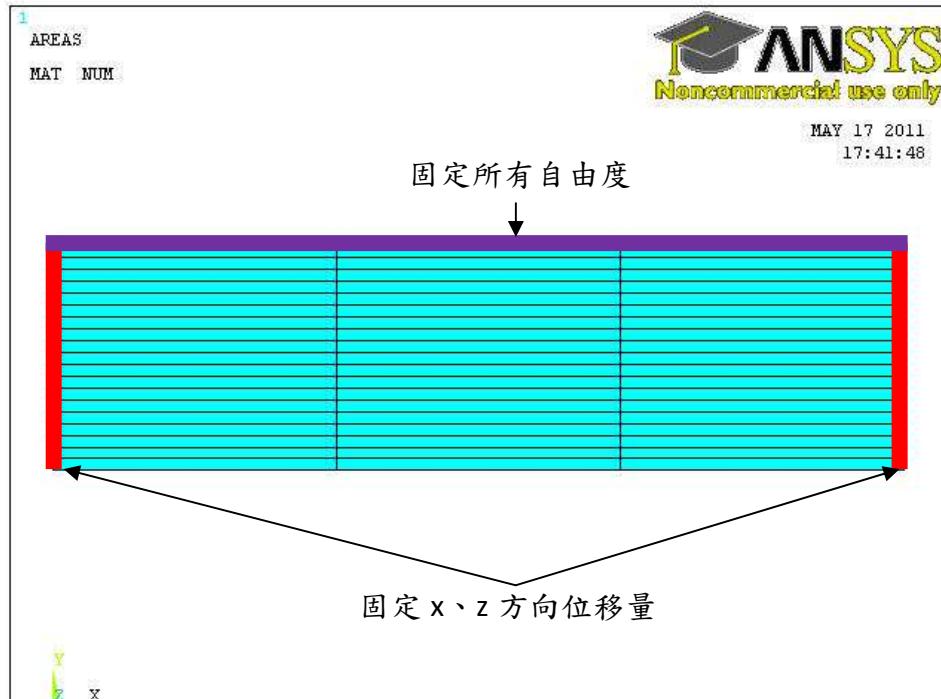


圖 4.53 ANSYS 滾門模型

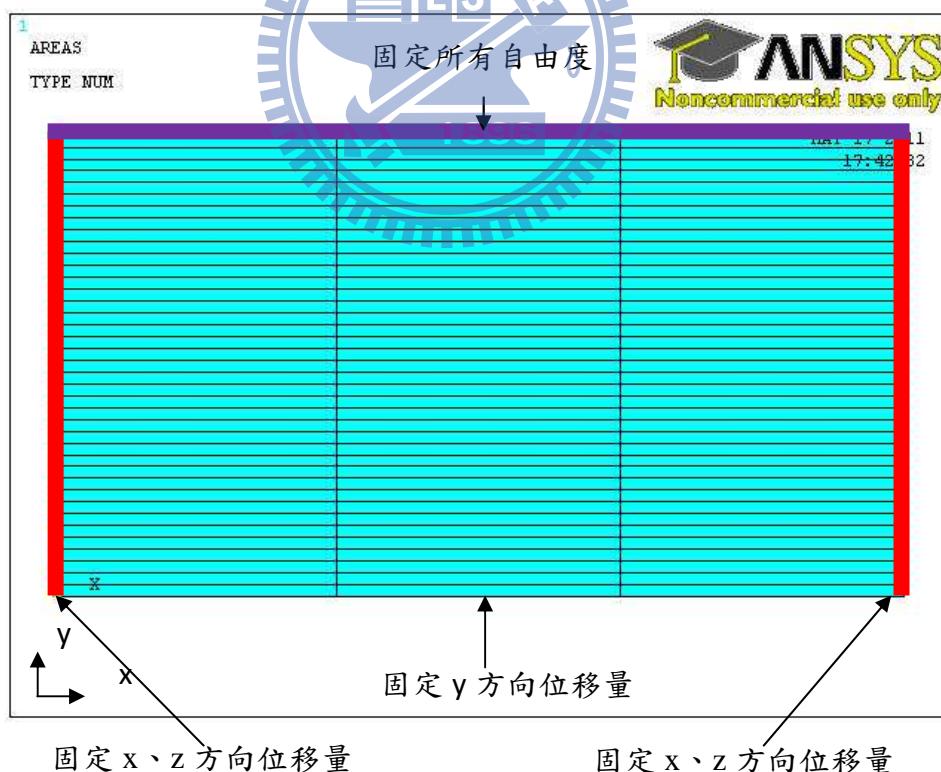


圖 4.54 ANSYS 滾門模型

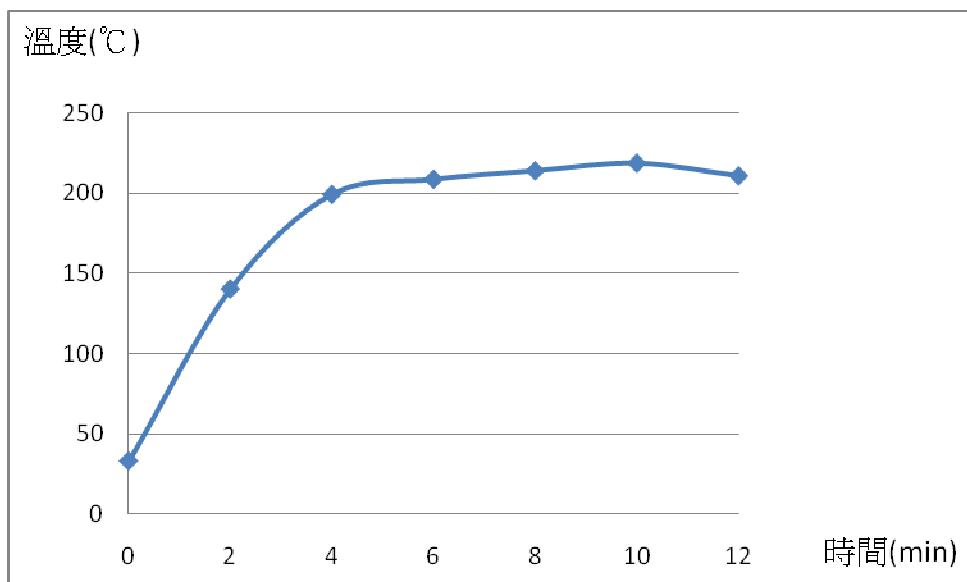


圖 4.55 捲門均溫

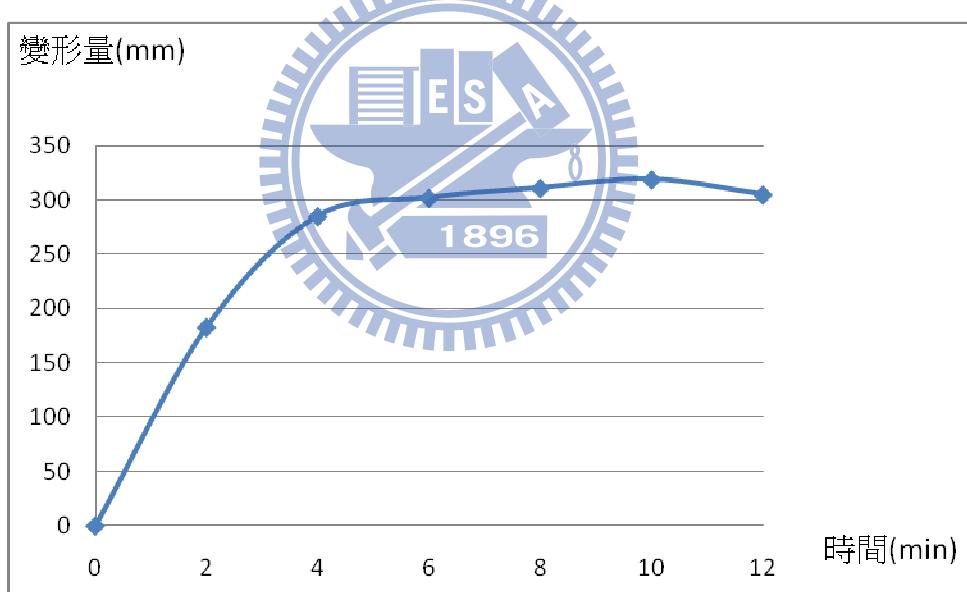


圖 4.56 捲門變形量

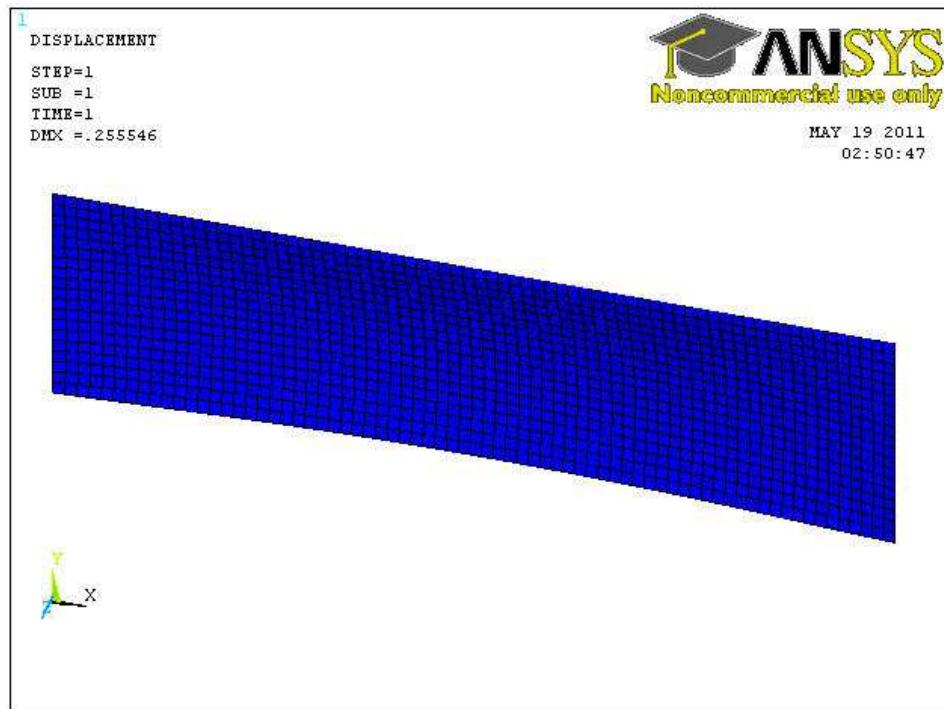


圖 4.57 捲門變形模擬外觀

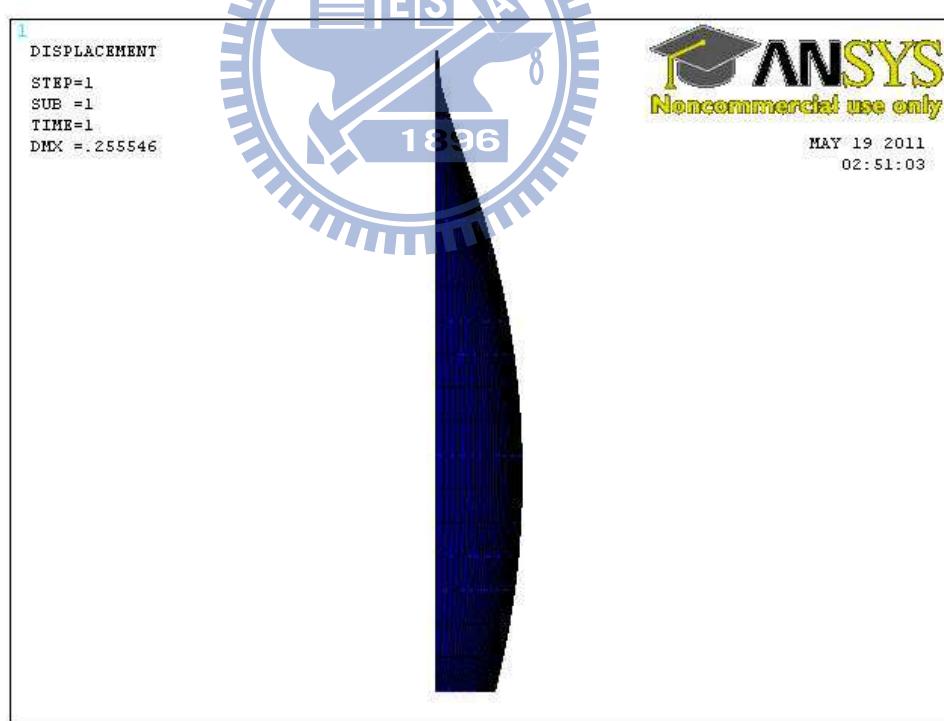


圖 4.58 捲門變形模擬外觀

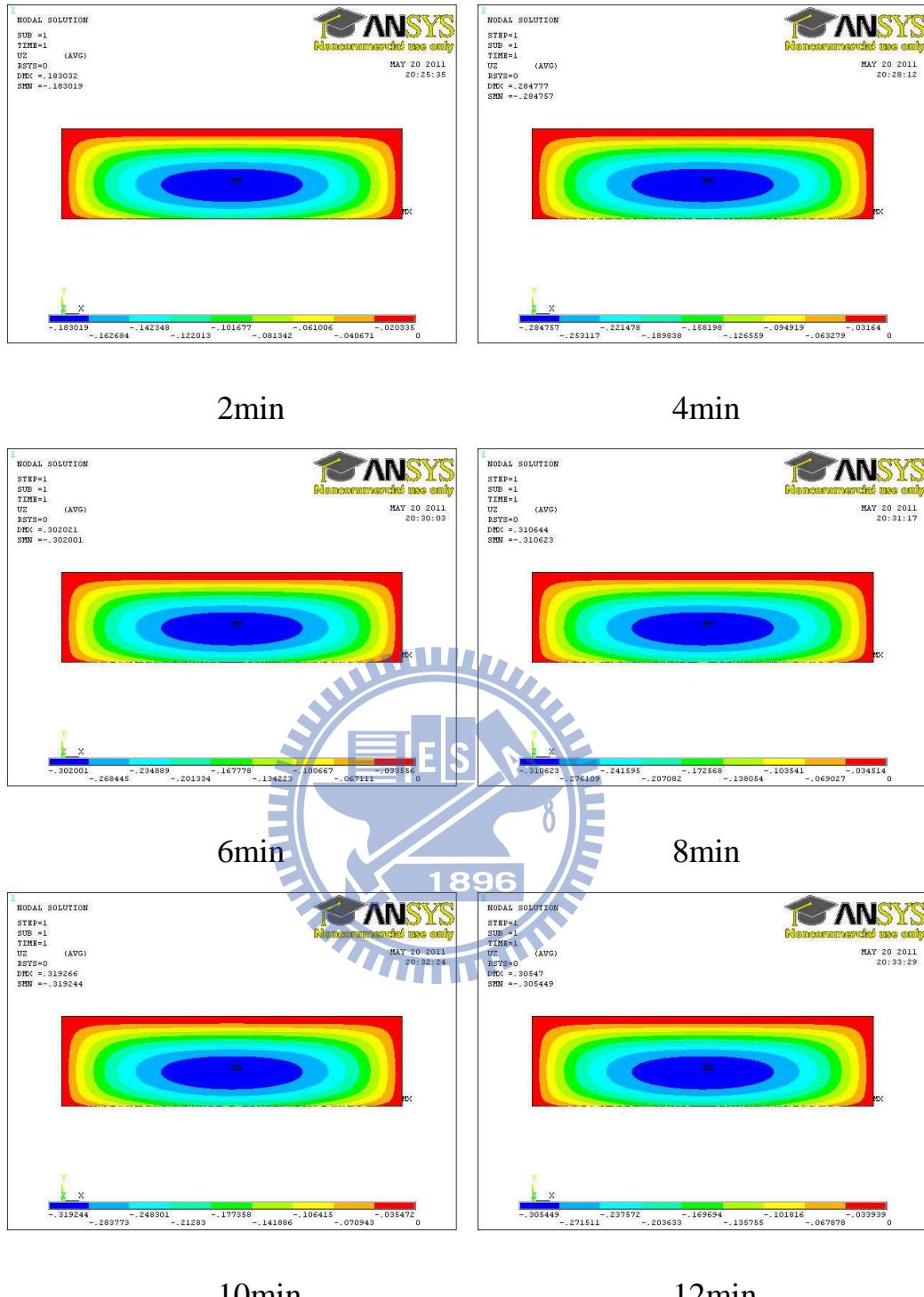


圖 4.59 捲門變形量模擬結果

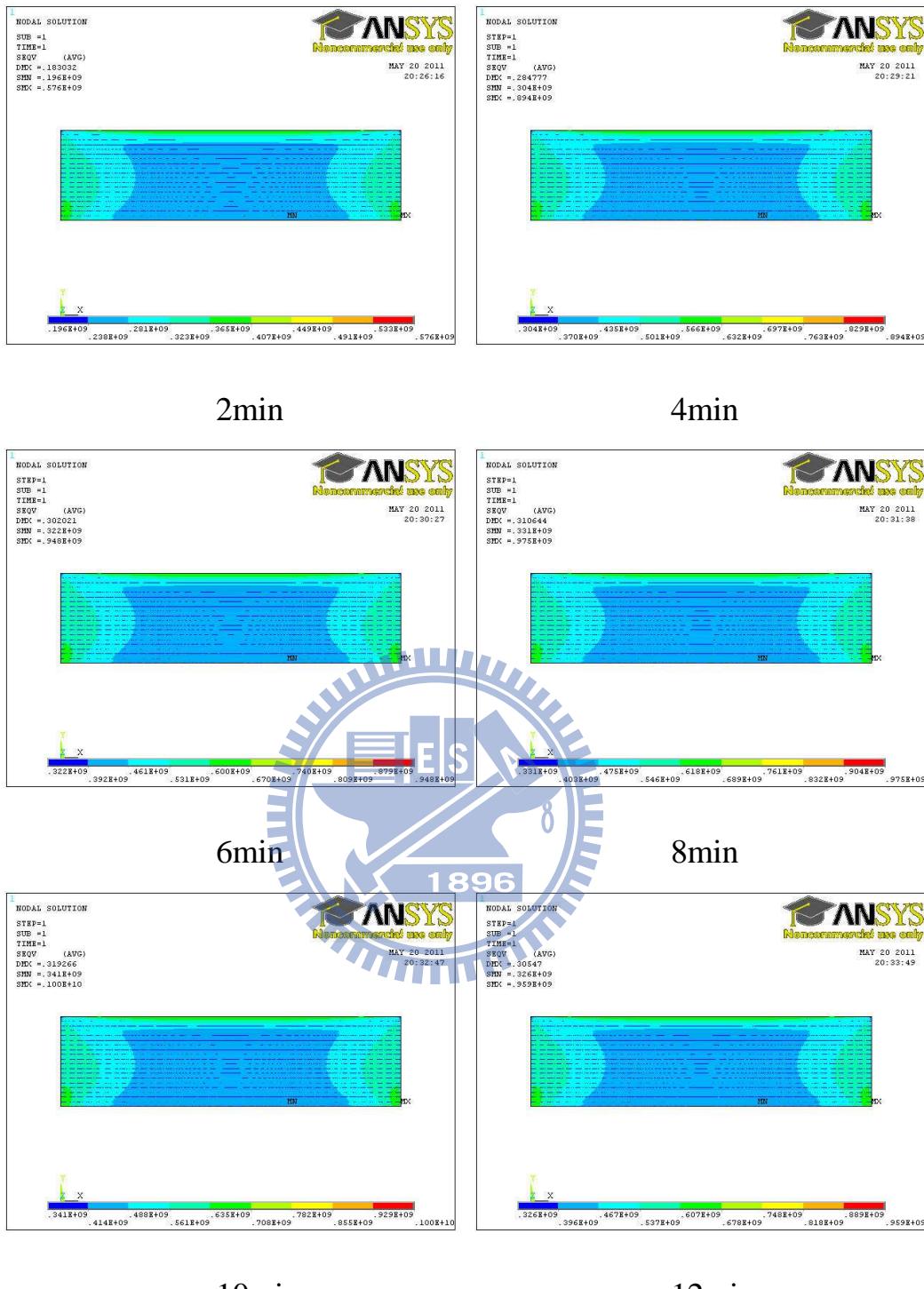


圖 4.60 捲門熱應力模擬結果

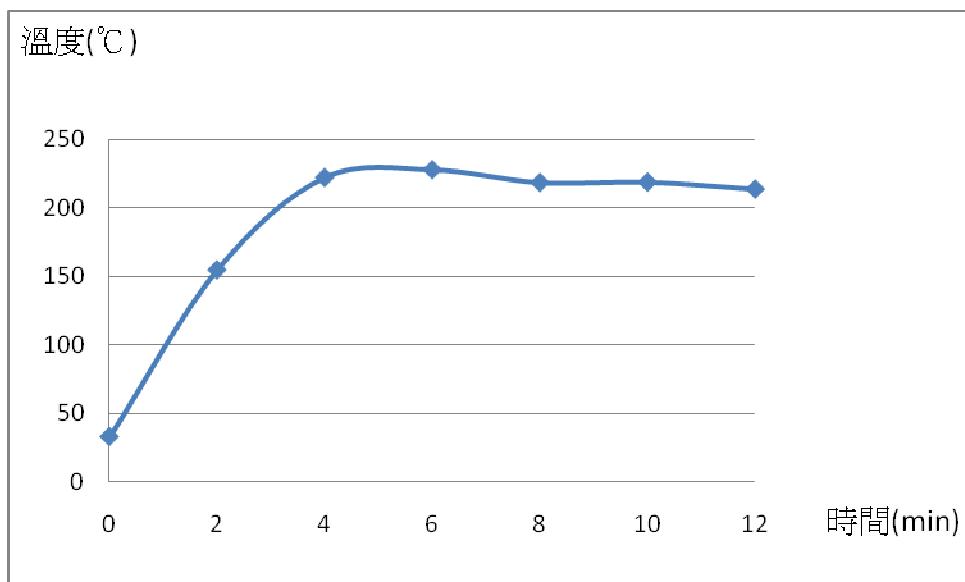


圖 4.61 捲門均溫

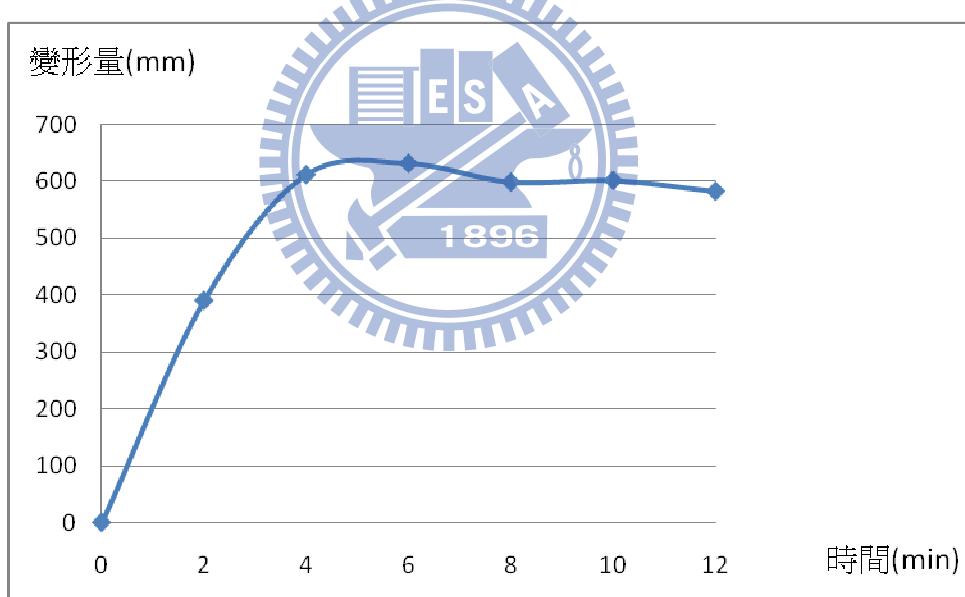


圖 4.62 捲門變形量

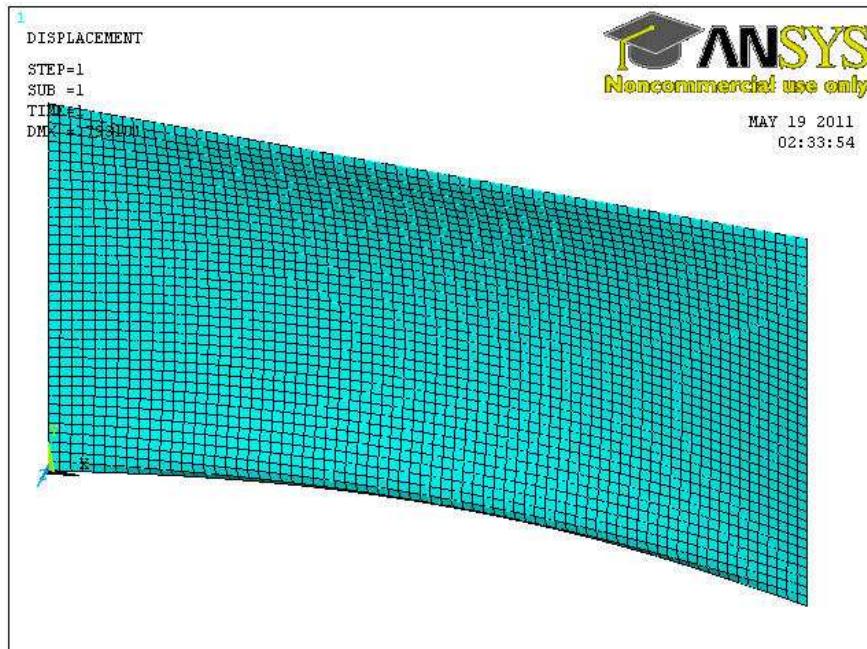


圖 4.63 捲門變形模擬外觀

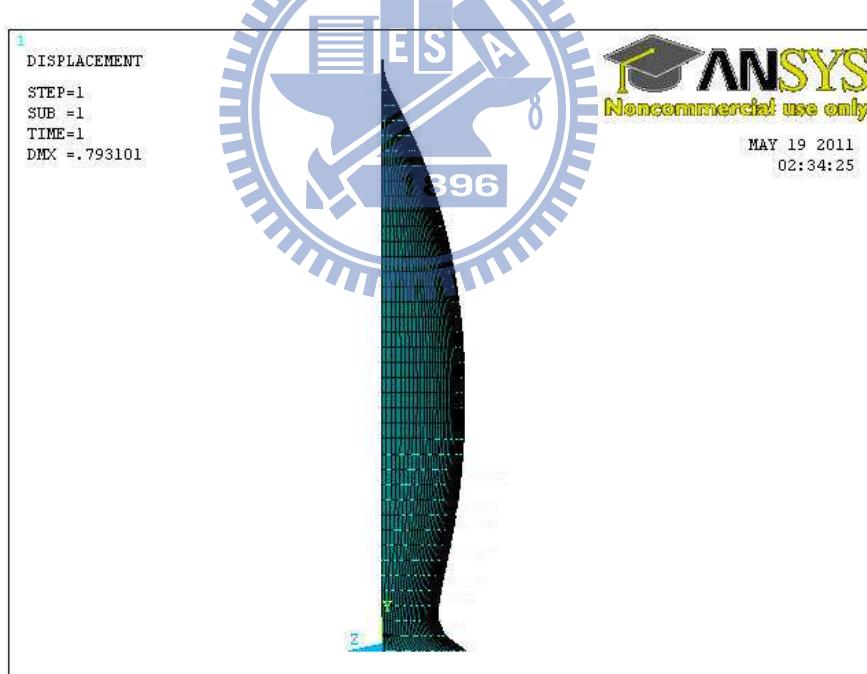


圖 4.64 捲門變形模擬外觀

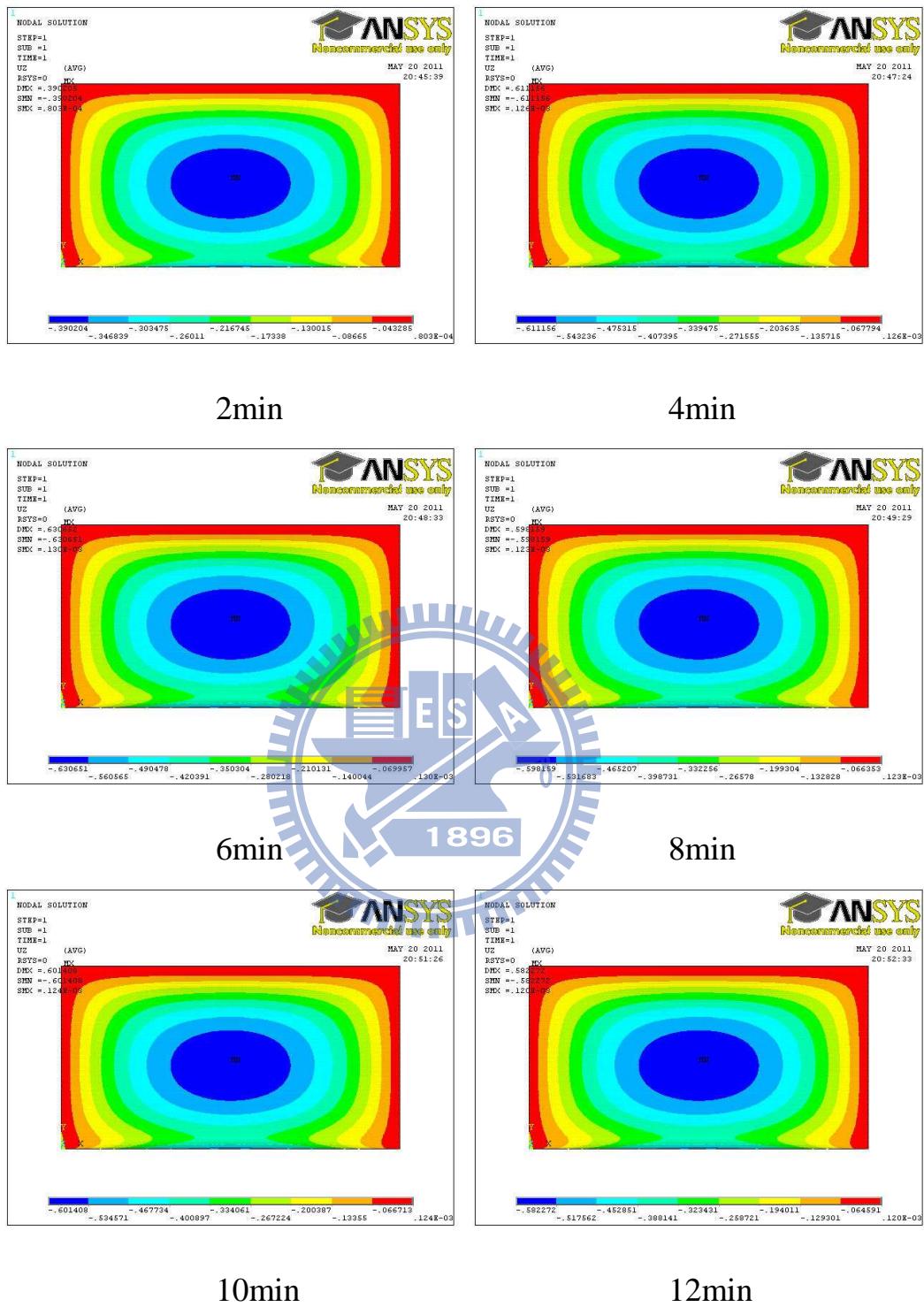


圖 4.65 捲門變形量模擬結果

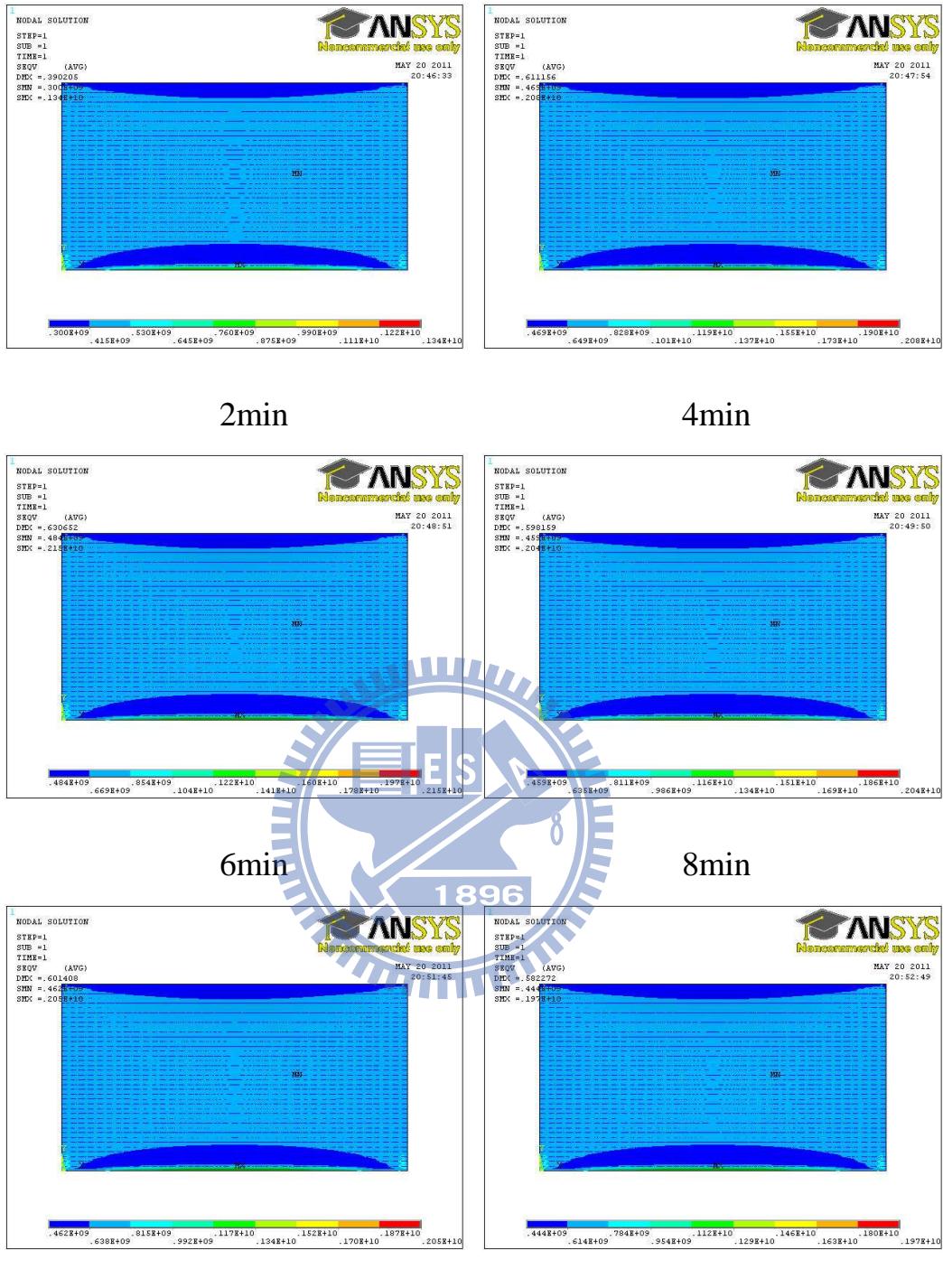


圖 4.66 捲門熱應力模擬結果

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

1. 當火災發生於玻璃分間牆附近，將可導致其破裂產生開口。
2. 昇降機道一但區劃分隔失效，將造成煙流透過昇降機道直接向上形成煙函效應（Stack Effect），使火災產生向上蔓延，一旦高溫濃煙直接透過昇降機道於上一樓層蓄積將增加地下場站避難及搶救之困難。
3. 依照建築技術規則 79-2 條規定，本模擬案例之昇降機道不需設置具防火時效之牆壁或是防火門窗，而模擬結果顯示此挑空區無垂直防火區劃之分隔將提升建築火災之危險性，相較之下，「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」第 3.1.7 條之規定，設定 2 小時防火時效之區劃則較為安全且合理。
4. 運用 FDS 火災模擬軟體搭配 ANSYS 有限元素軟體進行熱固耦合分析可運用於探討捲門設備受熱所導致之變形。
5. 設置有防火捲門之電扶梯間，火災發生時捲門動作可有效延緩或防止高溫濃煙向上一樓層蔓延，然而，此種遮蔽之情況卻會減少該起火樓層蓄煙空間，造成該樓層受高溫濃煙影響加劇，在本研究所討論之案例內，此種影響加劇情況甚至減少其中一座緊急逃生梯約 30 秒之逃生時間。
6. 防火捲門在火場中受熱產生之變形均以向火場方向變形為主，在底端不會產生上拱之情形。
7. 防火捲門下降至距地面 2m 處與全關閉所受熱應力分布情況相異，前者最大熱應力集中於捲門下端兩側，後者最大熱應力集中於門片底端，而以全關所受到之應力較大，約為下降至距地面 2m 處捲門應力之 2 倍。

## 5.2 建議

1. 地下場站因逃生方向與煙流方向相同，對於垂直區劃可能遭受破壞部分應格外注意，並參考「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」第 3.1.7 條之規定進行設計檢討。
2. 在玻璃升降機道破裂之過程，對於危害的擴大主要由於上一樓層之玻璃破裂所造成，而此處破裂是由於高溫濃煙大量蓄積並加熱玻璃所造成，為降低高溫蓄積之情況，本研究建議在建築空間許可下，可於升降機道頂部設置排煙口，減少煙層蓄積情況，提升建築整體安全性能。
3. 本研究以溫差做為玻璃破裂條件之設定，然而火場內造成玻璃破裂之條件除了溫差以外，亦可增加對於熱通量及熱輻射值之討論，提升此方面探討之完整性。
4. 防火門、窗或是防火捲門在進行耐火試驗前可先透過有限元素法進行熱固耦合分析，提供設計者預估欲測試設備之變形情況。
5. 設置防火捲門可延緩或是防止煙層蔓延至起火室以外區域，但此方法亦會降低蓄煙空間使煙層下降較快<sup>89</sup>，對建築進行設計時應詳加考慮此效應。
6. 對於火場內捲門變形之模擬，本研究以溫度變化為其負載，建議未來相關研究可增加火場環境造成之壓力進行模擬，以提升模擬之準確性。

## 參考文獻

1. 雷明遠,“建築內裝材料及區劃構件防火安全技術要點”,防火建材設計與應用技術研討會,2000
2. 黃仁智、林慶元,“建築物防火門牆設計要求及檢驗基準之研究”,內政部建築研究所籌備處八十年研究計畫聯合研討會「建築防火」,1998
3. 張文耀,“建築物防火分間牆防火性能之研究”,國立交通大學機械工程研究所碩士論文,1998
4. 鄭紹材,“防火區劃構件之熱輻射引燃鄰近材料之研究”,行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告,2002
5. 趙鋼,“建築物區劃延燒控制之研究(I)－自動滅火設備與區劃延燒替代調查研究”,內政部建築研究所,2007
6. Vytenis Babrauskas, Unexposed-face temperature criteria in fire resistance : A reappraisal, Fire Safety Journal, 2009
7. M. J. Skelly, R. J. Roby, and C. L. Beyler, An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires, J. Fire Protect. Eng., vol. 3, pp. 25–34, 1991
8. A. A. Joshi, P J Pagni Fire-Induced Fields in Window Glass -I –Theory, Fire Safety Journal 22,1994
9. Dembele S, Rosario RAF, Wen JX. Investigation of glazing behavior in a fire environment using a spectral discrete ordinates method for radiative heat transfer. Numerical Heat Transfer, Part B. 2007;52:489-506.
10. Qiyuan Xie, Heping Zhang, Yutian Wan, Qingwen Zhang, Xudong Cheng, Full-scale experimental study on crack and fallout of toughened glass with different thicknesses, FIRE AND MATERIALS, 2008
11. Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas (NFPA 92B), National Fire Protection Association, 2000 Edition

12. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems (NFPA 130), National Fire Protection Association, 2010 Edition
13. 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
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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。
18. 蕭建永，「利用 FDS 模擬辦公空間防火閘門與空調風管之性能研究」，中華技術學院機電光工程研究所碩士論文」，2005。
19. 李鎮宏、邱耀正、陳建忠，「火災—結構行為模擬以 CIB W14 國際比對試驗為例」，建築防火科技創新技術國際研討會論文集，2010。
20. 陳建銘，「具阻熱性能防火鐵捲門耐火試驗研究」，國立台北科技大學建築與都市設計研究所碩士論文，2010。
21. 涂耀庭，「防火門阻熱時效之數值模擬」，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文，2009。
22. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST, 2010.
23. 「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」，交通

技術標準規範鐵路類防火消防設備部，2008。

24. 「CNS 11227 建築用防火門耐火試驗法」，中華民國國家標準，2002。
25. 「CNS 12514 建築物構造部分耐燃試驗方法」，中華民國國家標準，2010。
26. 「CNS 14803 建築用防火捲門耐火試驗法」，中華民國國家標準，2010。
27. 「CNS 14815 建築用防火固定窗耐火試驗法」，中華民國國家標準，2010。
28. 「建築用防火門同型式判定原則」，經濟部標準檢驗局，2002。
29. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems (NFPA 130), National Fire Protection Association, 2007 Edition.
30. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems (NFPA 130), National Fire Protection Association, 2010 Edition.
31. Standard for Fire Doors and Other Opening Protectives (NFPA 80), National Fire Protection Association ,2010 Edition.
32. Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials (NFPA 251), National Fire Protection Association, 2006 Edition.
33. Standard Methods of Fire Tests of Door Assemblies (NFPA 252), National Fire Protection Association, 2008 Edition.
34. Standard on Fire Test for Window and Glass Block Assemblies (NFPA 257), National Fire Protection Association, 2007 Edition.
35. Fire resistance tests - Part 1 : General requirements (BS EN1363-1), British Standards Institution, 1999 Edition.
36. Fire resistance tests- Part 2 : Alternative and additional procedures (BS EN1363-2), British Standards Institution, 1999 Edition.
37. Fire resistance tests for door and shutter assemblies Part 1 : Fire doors and shutters (BS EN 1634-1), British Standards Institution, 2000 Edition.

38. Fire classification of construction products and building elements - Part 2  
Classification using data from fire resistance tests (BS EN 13501-2), British Standards Institution, 2003 Edition.
39. J.H. Klote and J.A. Milke, Principle of Smoke Management Systems” , ASHRAE and SFPE, 2002.
40. Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces (NFPA 92B), National Fire Protection Association, 2009 Edition.
41. Heskestad, G., Engineering relations for fire plumes, Fire Safety Journal 7: 25-32, 1984.
42. 林慶元，「建築物外牆開口與鄰棟間隔大小對火災延燒之影響」，內政部建築研究所，1997。
43. 黃守謙，「鋁擠型玻璃帷幕牆層間構造防火性能之研究」，國立台灣科技大學建築研究所碩士論文，2008。
44. 「防止火災延燒安全性能驗證技術手冊」，財團法人台灣建築中心，2008。
45. Dougal Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edition, 1998.
46. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE and NFPA, 2nd Edition, 1995.