

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

鐵捲門於防火區劃中受火熱變形之研究

The Simulation Study for Fire shutter Deformation
in a Fire Compartment

研究生：蘇鈺鈞

指導教授：陳俊勳 教授

中華民國一〇一年六月

鐵捲門於防火區劃中受火熱變形之研究

The Simulation Study for Fire shutter Deformation
in a Fire Compartment

研究生：蘇鉦鈞

Student：Jeng-Jiun Su

指導教授：陳俊勳

Advisor：Chiun-Hsun Chen



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of
Master of Science

In Mechanical Engineering

June 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年六月

鐵捲門於防火區劃中受火熱變形之研究

學生：蘇鈺鈞

指導教授：陳俊勳

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

本論文運用火災模擬軟體FDS對火場進行熱流分析，並將捲門之溫度分佈與壓力分佈作為ANSYS分析之負載，考慮材料性質隨溫度之變化與拘束條件等特性分析捲門變形狀況以及熱應力分佈，並再回饋於FDS進一步對防火捲門構成之防火區劃進行分析與討論。

案例分析前，本研究先藉由大型加熱爐火場試驗進行驗證。模擬結果顯示，模擬之變形趨勢與實驗相近，且因考量材料性質之參數，模擬與實驗之誤差由30%降低至14%。

案例的討論對象則為區劃電扶梯間之防火捲門，於一地下場站內進行火災模擬。設定捲門完全關閉及下降至距地面2公尺處兩種情境。由模擬結果顯示，捲門完全關閉的情境中，其變形呈波浪狀，最大變形量為202mm，熱應力最大值則為2.3 Gpa並集中於門片底端。經文獻比較，其變形較符合實際民宅火災與實驗之變形趨勢，而與前人模擬結果，捲門均朝火場方向變形相異，本研究推測因考量壓力分佈與捲門本身之推擠導致。此外，當捲門下降之距地面兩公尺處之情境，因壓力之推擠朝非曝火面凹陷，最大變形量為207mm，熱應力最大值則為1.2 Gpa並集中於捲門兩側。

本研究經由文獻比較，整理出各參數對模擬捲門變形之影響：(1) 溫度分佈為捲門膨脹變形之主因；(2) 壓力分佈與捲門結構影響捲門變形之方向；(3) 材料性質影響捲門變形量之大小；(4) 拘束條件影響熱應力之分佈。

關鍵字：火災模擬軟體、有限元素分析、防火捲門

The Simulation Study for Fire shutter Deformation
in a Fire Compartment

Stuent : Jeng-Jiun Su

Advisor : Prof. Chiun-Hsun Chen

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

This study carries out the fire resistance evaluations of the fire shutters used in building by FDS (Fire Dynamics Simulator) and ANSYS software. We use the results of temperature and pressure distribution on the shutters which is simulated by FDS to be the load of ANSYS. Besides, we also consider the material properties that vary from temperature and boundary conditions to analyze the deformation and the thermal stress distribution of the shutters.

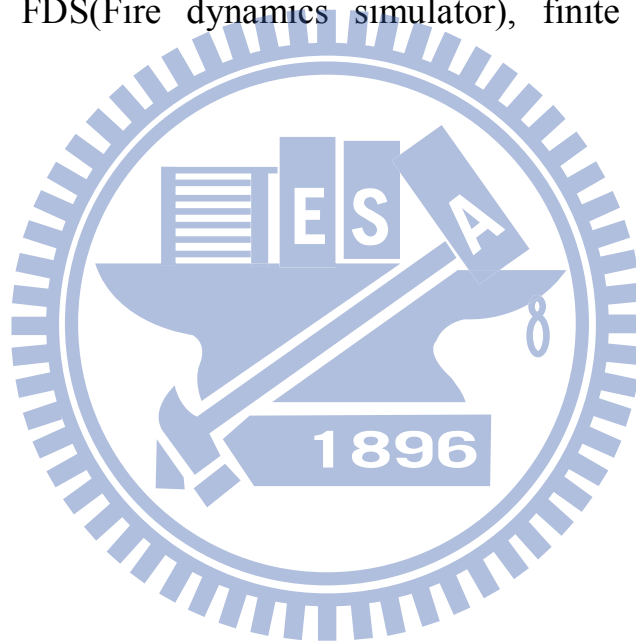
Before simulations of case analysis, we verify the cooperation between two commercial codes, FDS and ANSYS, by large boiler fire test. Simulation results show that simulate and experimental deformation are similar. The error between simulate and experimental deformation decrease from 30% to 14% for considering the parameters of material property.

Shutters used in escalator room are the target of this study. The study uses FDS to simulate a fire accident in a substructure that are specified into two scenarios. In the first scenario, the shutters close completely. In the second, the shutters descend down to a position, where 2 meter-height above the floor. The results show that the deformation of the shutters forms into wavy while the shutters close completely, which the maximum deformation is 202mm and the maximum thermal stress is 2.3Gpa. Compare with other experimental researches, it is more practical than the one who neglects the pressure

distribution. In addition, the maximum deformation is 207mm and the maximum thermal stress is 1.2Gpa when the shutters close incompletely.

Finally, the study obtains the relationship between parameters and deformation of shutters: (1) the main reason of expansion of shutters is the temperature distribution; (2) pressure distribution and the structure of shutter affect the deformation direction of shutter; (3) material properties affect the size of shutter deformation; (4) boundary conditions affect the thermal stress distribution of the shutters.

Key words: FDS(Fire dynamics simulator), finite element, ANSYS, shutter



致謝

研究所的生涯隨著論文的完成畫下了句點，在點點滴滴的求學過程中，首先必須要感恩的是我的指導教授 陳俊勳教授，從做學問的小細節與大方向、做人處事的原則與倫理、到求學態度的叮嚀和教誨，無一不用心指導，使得在這短短的兩年受益良多。

再來是感謝張敬桐學長，在論文的編排與邏輯上給予很大的啟發；也感謝大學摯友詹登棋，提供了最關鍵的文獻協助；感謝高中摯友鄭庭鈞，給與適時的關心與陪伴；感謝幼稚園摯友黃玉閔，願意於台北借住一宿；感謝張庭瑋的關懷，給予最多的溫暖、支持與肯定；更感謝的是身邊許多善知識、默默支持或關心我的朋友，於錯折時給與最大的動力。

接著是感謝實驗室的諸位。感恩唐原大學長的關懷，總是實驗室最早也最晚走的一位，是實驗室的楷模與標竿；感恩家維學長的陪伴，在歡笑與淚水中給與模擬需多的寶貴建議；感恩宗翰學長，總是從五樓千里迢迢下來陪同買飯與討論；感恩昶安學長，在上課中給與許多的經驗；感恩黃均、盛容、芸婷、嘉軒，在碩士時給予許多的建議與指導；感恩詠翔的同甘共苦，並在許多作業流程上給予許多的協助；感恩天洋的陪伴，在深夜時會幫我關螢幕節省電源；感恩凌宇的相挺，總是有許多的鬼點子；感恩學弟妹奕玢、秉楷、子博、泰詮、毓瑾，給了許多的配合、支持與協助。感謝所有曾經給我鼓勵的朋友，雖然無法一一列出，但你們曾經給予我的祝福，我都會放在心中。

最後我要感謝我的父母，不論順境逆境，總是給予我最大的支持與動力，在求學的過程中讓我勇往直前的邁進。我要將這份榮耀獻給愛我的人以及我深愛的人們，感恩。

目錄

摘要	I
ABSTRACT	III
致謝	IV
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 防火區劃	2
1.2.2 火災模擬	3
1.2.3 捲門分析	5
1.3 研究內容	7
第二章 法規與標準介紹	9
2.1 國內法規與標準	9
2.2 美國標準	15
2.3 英國標準	18
2.4 法規整理	20
第三章 理論基礎及模擬軟體介紹	21
3.1 理論基礎介紹	21
3.1.1 火災燃燒過程	21
3.1.2 火源設計	22
3.1.3 抑制火災蔓延之設計	23
3.2 火災模擬軟體(FDS)	27
3.2.1 流體力學之統御方程式	27
3.2.2 差分方程式	30

3.2.3 燃燒模式	32
3.2.4 熱輻射之統御方程式	34
3.2.5 邊界條件	35
3.3 模型建立軟體 PyroSim.....	37
3.4 ANSYS 有限元素法	39
3.4.1 ANSYS Mechanical 的主要分析功能	39
3.4.2 ANSYS 熱-結構耦合分析	39
3.4.3 元素型態	39
3.4.4 結構理論基礎	39
第四章 結果與討論	53
4.1 模擬範圍	53
4.2 參數設定	53
4.2.1 火源大小設定	53
4.2.2 火災成長模式	54
4.2.3 防煙垂壁設計	54
4.2.4 排煙設計	54
4.2.5 補氣口設計	54
4.2.6 邊界條件	54
4.2.7 格點設定方式與測試	55
4.2.8 人員安全標準判斷	56
4.3 捲門模擬	58
4.4.1 捲門變形模擬驗證	58
4.4.2 案例探討	64
4.4.3 模擬結果	64
4.4 結果討論	68
第五章 結論與建議	105

表目錄

表2.1 建築技術規則防火區劃相關規定	10
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【29】防火區劃相關規定	16
表2.5 NFPA耐火構件相關標準	17
表2.6 英國標準耐火構件相關標準	18
表2.7 防火門試驗標準整理	18
表3.1 火源成長模式係數	24
表4.1 FDS格點測試	55
表4.2 ANSYS格點測試	56
表4.3 人體承受危害程度指標值分析表(SFPE及紐西蘭設計)	56
表4.4 建議人員逃生安全環境要求	57
表4.5 捲門控制說明	64
表5.2 模擬參數影響之整理	106

圖目錄

圖1.1 開口部所要求性能.....	1
圖1.2 研究架構圖	8
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.....	48
圖3.7 防火區劃方式.....	49
圖3.8 FDS分析執行計畫流程圖.....	50
圖3.9 FDS 與Smokeview 之組織架構與工作流程圖	51
圖3.10 元素SHELL181.....	52
圖3.11 應力向量圖.....	52
圖4.1 模擬範圍外觀示意圖.....	69
圖4.2 各樓層用途.....	70
圖4.3 電扶梯間防火捲門區劃.....	71
圖4.4 火災熱釋放率圖.....	71
圖4.5 防煙垂壁設置示意圖.....	72
圖4.6 補氣口位置圖.....	72
圖4.7 楊式係數與溫度關係圖.....	73
圖4.8 熱膨脹係數與溫度關係圖.....	73
圖4.9 大型加熱爐升溫曲線.....	74

圖4.10 大型加熱爐壓力曲線	74
圖4.11 大型加熱爐捲門外觀示意圖	75
圖4.12 門片組合示意圖	75
圖4.13 快速捲門排列方式	76
圖4.14 熱電偶位置示意圖	76
圖4.15 加熱爐變形量結果圖	77
圖4.16 黃鈞模擬之上門片變形量結果圖(4min)	78
圖4.17 黃鈞模擬之上門片變形量結果側視圖(4min)	78
圖4.18 黃鈞模擬之上門片變形量結果圖(16min)	79
圖4.19 黃鈞模擬之上門片變形量結果側視圖(16min)	79
圖4.20 黃鈞模擬之中門片變形量結果(12min)	80
圖4.21 黃鈞模擬之中門片變形量結果側視圖(12min)	80
圖4.22 黃鈞模擬之下門片變形量結果圖(18min)	81
圖4.23 黃鈞模擬之下門片變形量結果側視圖(18min)	81
圖4.24 加熱爐捲門拘束條件示意圖	82
圖4.25 大型加熱爐模型側視圖	83
圖4.26 大型加熱爐模型立面圖	83
圖4.27 加熱爐捲門溫度分佈圖	84
圖4.28 加熱爐捲門壓力分佈圖	85
圖4.29 試體變形導致背火面加熱情形	86
圖4.30 上門片變形量模擬結果圖(16min)	87
圖4.31 上門片變形量模擬結果側視圖(16min)	87
圖4.32 中門片變形量模擬結果圖(12min)	88

圖4.33 中門片變形量模擬結果側視圖(12min)	88
圖4.34 下門片變形量模擬結果圖(18min)	89
圖4.35 下門片變形量模擬結果側視圖(18min)	89
圖4.36 加熱爐實驗捲門變形示意圖	90
圖4.37 黃鈞模擬之捲門變形示意圖(捲門全關)	90
圖4.38 民宅火災捲門變形圖	91
圖4.39 民宅火災捲門變形示意圖	91
圖4.41 捲門壓力分佈示意圖(情境一)	92
圖4.42 捲門拘束條件示意圖	93
圖4.43 捲門變形量模擬結果(情境一)	94
圖4.44 情境一捲門變形量側視圖(12min)	95
圖4.45 捲門熱應力分佈(情境一)	95
圖4.47 捲門壓力分佈(情境二)	96
圖4.48 捲門變形量模擬結果(情境二)	97
圖4.49 情境二捲門變形量側視圖(12min)	98
圖4.50 捲門熱應力分佈圖(12min)	98
圖4.52 情境一地下三層能見度分佈圖	100
圖4.53 情境一煙層分佈圖	101
圖4.54 情境二地下三層溫度分佈圖	102
圖4.55 情境二地下三層能見度分佈圖	103
圖4.56 情境二煙層分佈圖	104

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

隨著科技日新月異，社會人口的成長，土地資源的侷限，再加上消費者的需求，使得近年來建築物的興建朝大型化、立體化、與多元複合化的趨勢發展。如果發生火災，勢必因人數眾多，建築結構的複雜，更容易造成重大的生命傷亡及財物損失。

因此，防火區劃的規劃便顯得極為重要。防火區劃之應用定義與概念為，具有一定防火時效之建築防火構造，為防止火焰、熱氣、濃煙擴散，限制火災規模之區劃【1】。而防火區劃應具有（1）阻熱性（Insulation）、（2）遮焰性（Integrity）、（3）構造穩定（Stability）、（4）遮煙性等要求【2】。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【3】，因此在門、窗及其他開口部所設置之防火門窗都應具備良好的火、煙阻隔性，以確保其區劃空間之完整。

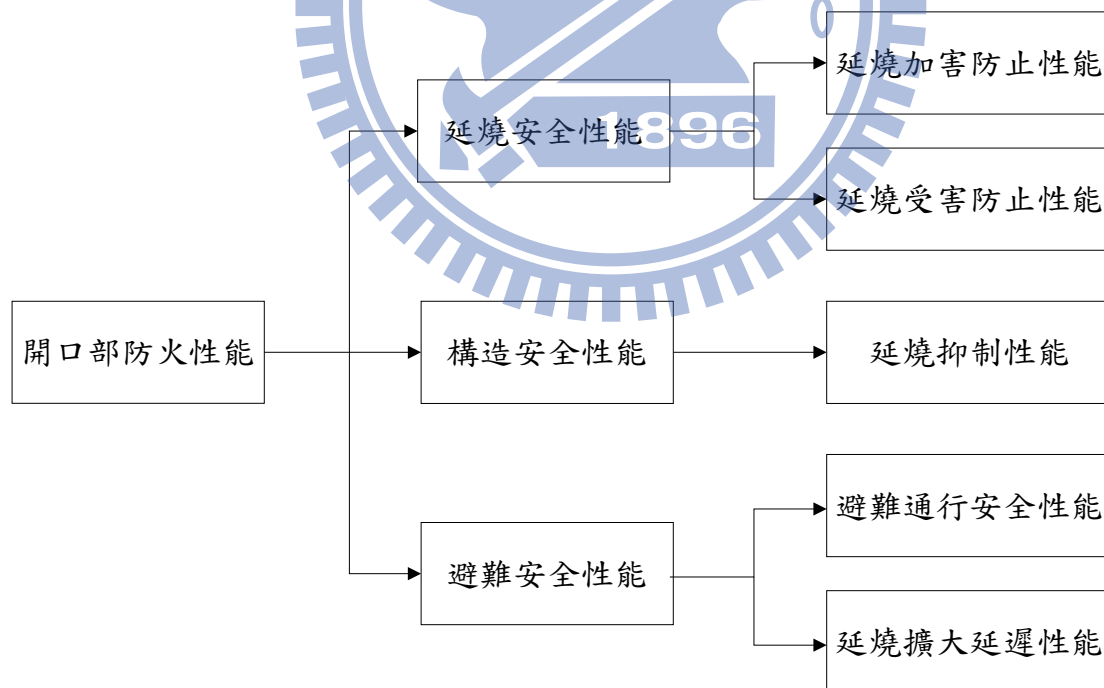


圖 1.1 開口部所要求性能

在建築技術規則施工編第七十五條內容提到，防火鐵捲門為防火設備種類之一【4】。一般商界中，鑒於經營與管理，通常不採用防火牆做為建築的防火構造，往往普遍地採用防火鐵捲門替代防火牆，以延緩火災發展，因此，防火鐵捲門在建築的設計中成為不可或缺的角色。

對於捲門作為防火區劃而言，平時收納於捲門廂中，當發生火災後開始下降，以遮擋濃煙與火勢的蔓延，然而捲門之門片為鋼材所構成，易快速升溫，使高溫門片對非曝火面有熱輻射之影響。並且容易受熱變形，使其開口區劃不完整，對火勢的控制造成影響。

鑒於上述問題，本研究透過法規整理、相關論文介紹、建立模型進行計算與軟體模擬，評估防火鐵捲門於火災中的變化行為，並討論此情況於火場中可能造成之危害情形。

1.2 文獻回顧

1.2.1 防火區劃

高敬忠【5】以實驗方式結合水霧噴頭灑水系統與鐵捲門，經由耐火爐加熱實驗分析測試，分析是否符合 CNS14803 規範的阻熱性要求。在耐火爐加熱實驗發現，耐火爐升溫曲線在某時段會超出 CNS 14803 規範。鐵捲門在高溫加熱後，產生熱變形，影響其部分水膜覆蓋在門片的完整性，使部分測點溫度出現局部高溫，進而使部分水霧噴入捲箱內，造成捲箱內的溫度跳動。實驗結果證實鐵捲門片只需有水膜覆蓋，就可以控制其表面溫度於 1000 度左右，符合 CNS14803 規範。

張文耀【6】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【7】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，以實驗方式量測中型門牆爐為試驗儀器進行構件加熱式驗，加熱時間為兩小時，其結果顯示，受火面為凹面，最高背溫為 800 度，背面量測到熱輻射值最高為 $7.29\text{W}/\text{cm}^2$ 。

趙鋼【8】透過 FDS 模擬，整理法規、與工程調查分析法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，結果顯示，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【9】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，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°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，他建議規定任一點之最高溫較為合理。

1.2.2 火災模擬

NFPA 92B【10】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【11】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【12】進行房間火災實驗與大型火災實驗，並運用 FDS 模擬

相同情境，比較兩者間之區別。結果顯示，在紊流強度較弱時，小尺寸之格點的預測數值比較準確，但在紊流強度較大的空間，大尺寸的格點所模擬出的結果比較準確。因此，格點的尺寸越小，模擬結果不一定比較準確，應使用適當的格點大小。

邱健倫【13】運用 FDS 模擬密空間的火場，並以文獻 Steckler 實驗的房間火災驗證。且藉由 FDS 模擬天花板之溫度分佈作為 ANSYS 之負載，以分析天花板之熱應力分析。此研究天花板材料為混凝土，等壓比熱為 $880(\text{J/kg K})$ ，熱傳導係數為 $1.0(\text{W/mK})$ ，發現天花板最高溫為 53.6 度，最大壓應力為 162.71kPa ，發生在接近中央的位置。

Chiun-Heng【14】應用 STAR-CD 模擬分析高層建築梯間加壓系統性能評估。模擬的對象為 20 層的高樓（四層在地下室），裝設在頂層的加壓風機其流量為 19000CMH 。分別建立三種不同的模型，分別為無模擬樓梯、梯間含前室、梯間模擬剪刀樓樓梯間。並在針對門縫有無氣密設計，防火門有無打開以及可壓縮流和不可壓縮流燈三中參數對梯間加壓性能的影響。其模擬結果顯示，梯間裝設氣密條有助於加壓，不過防火門打開與否影響壓力分佈更鉅。

Sherman【15】以 FDS 模擬室內火災，並探討門關閉時，室內外之溫度與壓力分布，結果顯示因室內外之壓差，冷空氣會由底下之門縫進入室內，且由門兩側之壓力數據，推測門可能會因室內外的高壓差而被推開。

蕭建永【16】以 FDS 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。

1.2.3 捲門分析

張婉瑩【17】針對防火鐵捲門缺乏阻熱性之問題，蒐集國內外鐵捲門解決阻熱性能之相關文獻，進行發明原則分析，從中整理得捲門之材質與結構為兩個發明原則之重要因素。

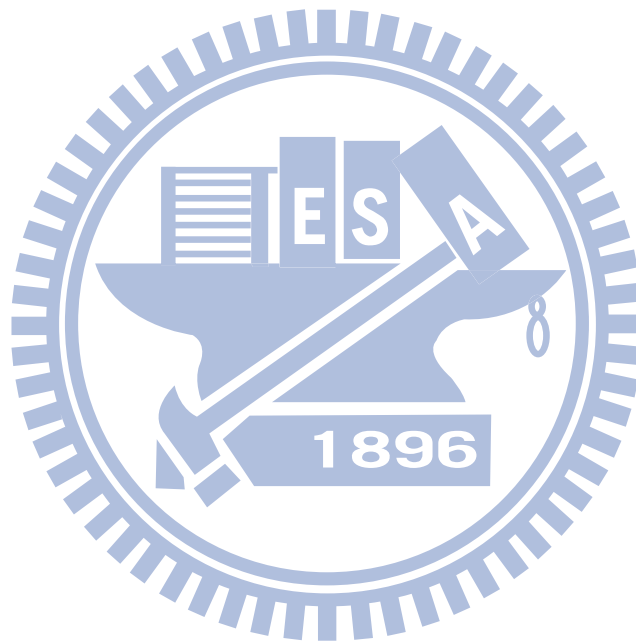
黃鈞【18】運用火災模擬軟體 FDS 以及有限元素分析軟體 ANSYS 對建築內使用玻璃材料或是防火捲門構成之防火區劃進行分析與討論。在防火捲門部分，以區劃電扶梯間之防火捲門做為討論對象，設定三種情境進行比較，分別為無動作、下降至距地面 2 公尺處及完全關閉，此三種動作情形導致火場之煙流及環境條件均不相同，尤以捲門無動作情境對起火樓層之上一樓層影響最為嚴重，而捲門完全關閉之情境則造成該起火樓層受火災影響最為嚴重。此外，當捲門下降之距地面兩公尺處及全關之情形其受熱產生變形均以向火場方向凹陷為主，於模擬時間 720 秒內，其最大變形量分別為 319mm 及 630mm，此兩種捲門下降情況其熱應力分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。

李鎮宏等人【19】運用數值模擬探討鋼結構於火場環境中的物理行為，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，結構斷面所承受之力差異不大。

涂耀庭【20】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。

Private Mail Bag 【21】 利用脈衝激勵技術(Impulse excitation technique) 量測鐵於不同溫度下之楊式係數(Young's modulus)。結果顯示，楊式係數會隨溫度升高而下降，當溫度為 25 度時，為 215GPa，升高到 600 度時，則下降至 170GPa。

J.E. Daw 【22】 利用膨脹計(Pushrod dilatometer schematic)量測鐵於不同溫度下之熱膨脹係數(Thermal expansion coefficient)。結果顯示，鐵的熱膨脹係數會隨溫度升高而增加。當溫度從常溫升高至 700 度時，熱膨脹係數會增加一倍。



1.3 研究內容

本研究針對捲門在火場中之變形的行為，以對防火區劃之防火性能影響作探討，透過文獻回顧、法規整理、並對案例之數值模擬分析，研究架構如圖 1.2 所示。

本研究先透過 FDS，進行捲門於火災環境中的模擬分析，得出捲門非曝火面之表面溫度與壓力分佈，再運用此模擬結果作為 ANSYS 結構分析之輸入參數，由 ANSYS 進行捲門之結構變形分析。而 ANSYS 的模擬得出捲門結構變形的結果，再由此結果回饋 FDS 作熱流分析，重新模擬此變形的捲門於火場中之溫度分布與壓力分佈，再由此模擬結果輸入 ANSYS 進行分析，由此兩種模擬軟體之相互循環搭配，分析捲門在火災時之結構變形行為。



捲門構成防火區劃之研究

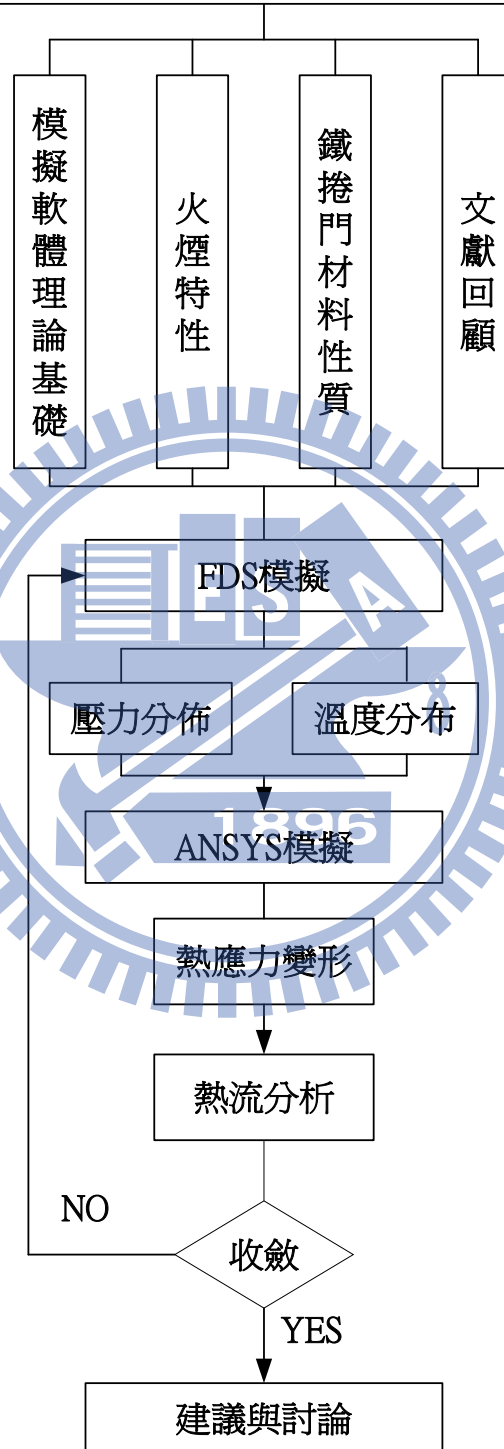


圖 1.2 研究架構圖

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 2.1 所示。此外，對於特殊之建築物而言，例如地下隧道與地下場站，其用途與建築構造接與一般建築不同，鑑於交通部於民國 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】，其中第三章明確規範地下場站之消防安全相關設施、設備，以提供設計參考，其相關規範內容整理如表 2.2 所示。此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。

防火區劃相關規定依特性及規定可大致分為幾種類型，面積區劃、用途區劃、樓層區劃、豎道區劃、貫穿部區劃等，訂定其所應具備之防火時效，在進行區劃時可用鋼筋混凝土牆、防火門窗、防火填塞等方式進行。就居室空間而言，常見的開口部分大多為門窗，而門窗通常為此一區劃最脆弱之部分。而一般如車站、商場等建築物，經常會使用防火捲門作為區劃方式，當發生火災其捲門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，並且國內生產製造之防火門需經過性能驗證之合格並具有經濟部所核發的驗證登錄證書，才能被允許採用。國內對於防火門窗相關規定如表 2.3 所示。

表 2.1 建築技術規則防火區劃相關規定

種類		條次	規定範圍	防火時效
水平面積區劃	樓層 ≤ 10 層	79	樓地板面積每 1500 m ² 為防火區劃。而設有自動滅火設備時，得放寬 3000 m ² 為一區劃	1 小時
	樓層 ≥ 11 層	83	規定高樓層不同用途空間應有之防火區劃面積	1 小時
水平用途區劃		79-1 86	特定空間面積限制與防火時效規定	1 小時
樓層區劃		79-3	規定樓地板面積應為連續完整面	1~2 小時
豎道區劃	挑高空間	79-2	規定 1 小時防火時效 可排除此條規定之條件： 1. 避難層直上、直下層且內裝為耐燃一級 2. 連跨三層以下，且樓地板面積小於 1500 m ²	1 小時
	電扶梯間			
	升降機間			
	垂直貫穿樓板之管道間及其他類似部分			
安全梯、特別安全梯及其排煙室		97	安全梯、特別安全梯及其排煙室	1 小時
貫穿部區劃		85	貫穿部之防火閘門及管路貫通防火區劃部位	1 小時
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)	1 小時
	地下建築物本體區劃	201~203	規定地下建築物使用單元每小於 1000m ² 為防火區劃，地下建築物地下通道每 1500m ² 為防火區劃	1 小時

	中央管理室	182、259	中央管理室	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	1 小時
		259	規定防災中心防火時效 2 小時	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

種類		條次	規定範圍	防火時效
地下場站區劃	連接不同地下場站區劃	3.1.2	緩衝區、裝修材料限制、面積、防火避難設施 (緩衝區具 2 小時防火時效)	2 小時
地下建築物本體區劃		3.1.5	主結構	3 小時
			樓地板	2 小時
面積區劃	非公共區	3.1.9	規定每小於 1000 m ² 為防火區劃	
用途區劃			公共區與非公共區間區劃	2 小時
		3.1.8	防火門窗	1 小時阻熱性與遮煙性能
		3.1.11	商店、防災中心、一般機房	2 小時
		3.1.13	防火門窗	1 小時阻熱性與遮煙性能
		3.1.14		
		3.1.12	變電站及附屬機房	3 小時
			防火門窗	1 小時阻熱性與遮煙性能
豎道區劃		3.1.7	安全樓梯間	2 小時
			緊急昇降機間	
			垂直貫穿樓板之管道間及其他類似部分	
			防火門窗	1 小時遮煙性能
貫穿部區劃		3.1.17	防火閘門、防火填塞	2 小時

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"> 1. 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 2. 加熱溫度於三小時約 1000℃ 3. 分為 A 種（具阻熱；背溫低於 260 ℃）及 B 種（不具阻熱性；背溫高於 260 ℃）
CNS 12514 【25】	建築構造	<ol style="list-style-type: none"> 1. 對建築結構耐火性能建立標準，包含牆壁、樓板、屋頂等。 2. 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 3. 加熱溫度於三小時約 1100℃ 4. 阻焰性判定以不出現下列情形為原則： <ol style="list-style-type: none"> A. 棉花墊引燃 B. 非加熱面出現火焰超過 10 秒 5. 阻熱性判定以不出現下列情形為原則： <ol style="list-style-type: none"> A. 非加熱面均溫超過 170℃ B. 非加熱面任一點溫度超過 210℃ 6. 防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時、3 小時及 4 小時
CNS 14803 【26】	防火捲門	<ol style="list-style-type: none"> 1. 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 2. 加熱溫度於三小時約 1100℃ 3. 阻焰性判定以不出現下列情形為原則： <ol style="list-style-type: none"> A. 非加熱面出現火焰超過 10 秒 B. 捲門底部上拱量超過 1.91 cm C. 捲門葉片脫出導軌 4. 阻熱性判定以不出現下列情形為原則： <ol style="list-style-type: none"> A. 非加熱面均溫超過 170℃ B. 非加熱面任一點溫度超過 210℃

		<ol style="list-style-type: none"> 防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時、3 小時及 4 小時 依其性能可分為不同之防火時效與阻熱性組合
CNS 14815 【27】	防火窗	<ol style="list-style-type: none"> 對加熱溫度、加熱試驗、加熱後噴水試驗、加熱後衝擊試驗 加熱溫度於三小時約 1100℃ 阻焰性判定以不出現下列情形為原則： <ol style="list-style-type: none"> 非加熱面出現火焰超過 10 秒 組件與周圍壁體產生貫穿間隙 阻熱性判定以不出現下列情形為原則： <ol style="list-style-type: none"> 非加熱面均溫超過 170℃ 非加熱面任一點溫度超過 210℃ 防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時 依其性能可分為不同之防火時效與阻熱性組合
建築用防火門同型式判定原則【28】	防火門	<ol style="list-style-type: none"> 簡化建築用防火門檢驗作業 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

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，為減少全球對於火災或其他相關災害所帶來的損失，並致力於倡導防火滅火的共識，提供防火消防相關訓練與設備，以及制訂安全相關的標準的規範和維護。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 2010 年版，見表 2.4，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，其相關內容整理於表 2.5。



表 2.4 NFPA 130 【29】 防火區劃相關規定

種類	條次	規定範圍	防火時效
車站主體結構	5.2.1	結構防火時效應依 NFPA 220 規定	0~4 小時
樓梯電扶梯	5.2.3.1	供乘客使用者不需區劃	
用途區劃	5.2.3.2.1	動力室	3 小時
	5.2.3.2.2	電氣、電池室	2 小時
	5.2.3.2.3	垃圾室	1 小時
	5.2.3.2.4	列車控制室	2 小時
	5.2.3.3 5.2.3.3.1	門及開口部	1.5~3 小時
公共區與非公共區 防火時效	5.2.3.5.1	公共區與非公共區	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 耐火構件相關標準

標準	適用對象	條文概述
NFPA 80 【30】	防火門、 開口部構件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 各種形式之開口部構件安裝、動作方式、適用環境等等規範 2. 對防火門窗依適用之位置和欲防護之火災規模分為五類 3. 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) 4. 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
NFPA 251 【31】	建築結構	<ol style="list-style-type: none"> 1. 對建築結構耐火性能建立標準，包含承重、非承重牆、梁、柱等。 2. 試驗包含耐火性質及噴水試驗 3. 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
NFPA 252 【32】	防火門、 防火捲門	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試驗包含耐火性質及噴水試驗 2. 加熱溫度於四小時約 1100°C 3. 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。

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，如表 2.6 所示。

表 2.6 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 【33】	所有耐火 結構、組件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加熱溫度於三小時約 1100°C 2. 阻焰性判定以不出現下列情形為原則： 棉花墊引燃 非加熱面持續出現火焰 3. 阻熱性判定以不出現下列情形為原則： 非加熱面均溫超過初始均溫 140°C 非加熱面任一點溫度超過初始均溫 180°C
BS EN 1363-2 【34】	所有耐火 結構、組件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立耐火試驗的熱輻射量測方法 2. 熱輻射測量位置為距離非曝火面 1m 處 3. 對 300 以下表面未規定熱輻射量測 4. 每個特定測量位置應紀錄輻射值達到 5、10、15、20、25kW/m² 之時間
BS EN 1634-1 【35】	防火門、 防火捲門	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗量測方法依照 BS EN1363-1 及 BS EN1363-2 2. 阻熱性及阻焰性標準如 BS EN1363-1 3. 熱輻射標準如 BS EN1363-2
BS EN 13501-2 【36】	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> <p>R—承重能力（受熱情況下結構穩定）</p> <p>E—阻焰性（BS EN1363-1）</p>

		<p>I—阻熱性（BS EN1363-1）</p> <p>W—抗熱輻射能力（距非曝火面 1m 低於 15kW/m²）</p> <p>M—機械行為（抵擋衝擊力之能力）</p> <p>C—自動關閉能力</p> <p>S—遮煙性（分為 Sa 在周遭環境溫度條件下及 Sm 在周遭環境溫度及 200°C 條件下）</p> <p>K—防火時效</p>
--	--	---



2.4 法規整理

本節針對各國防火捲門試驗標準進行整理，如表 2.7 所示。阻焰性部分，僅我國有對捲門底部上拱量與脫軌進行相關之規範；阻熱性部分我國規定的背溫則為三者最高，而 NFPA 無硬性規定但需將背溫量測結果註明於報告書中；在熱輻射部分，則僅有英國標準有明確之規定。整體而言，在阻焰性與阻熱性上我國標準較為嚴苛，在熱輻射量測上則屬英國標準。

表 2.7 防火門試驗標準整理

防火門 試驗標準	CNS 14803 (台灣)	NFPA 252 (美國)	BS EN 1634-1 (英國)
試驗內容	1. 加熱試驗 2. 加熱後噴水試驗 3. 加熱後衝擊試驗	1. 加熱試驗 2. 加熱後噴水試驗	1. 加熱試驗 2. 熱輻射量測
阻焰性	1. 非加熱面出現火焰 2. 捲門底部上拱量 超過 1.91 cm 3. 捲門葉片脫出導軌	非加熱面持續出現火焰	非加熱面持續出現火焰
阻熱性	1. 非加熱面均溫 超過 170°C 2. 非加熱面任一點 溫度超過 210°C	非強制規定。	1. 非加熱面均溫超過 140°C 2. 非加熱面任一點溫度 超過 180°C
熱輻射量測	無規定	非強制規定。	非曝火面 1 公尺處熱輻射 值不得大於 15kW/m ²

第三章 理論基礎及模擬軟體介紹

3.1 理論基礎介紹

3.1.1 火災燃燒過程

探討火災模式時，需探討火災之燃燒過程，一般而言火災隨著燃燒時間的增長有其發展之規則性，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（Flash over）、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（Flash over）

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（Flash over）現象。一般而言，若空間內的溫度達到600°C時，或地板表面積之熱輻射約達20 kW/m²，即有很高的機會發生閃燃。在閃燃之後因火場的高溫、高濃度一氧化碳、濃煙及氧氣缺乏，幾乎無

人可在火場中生還。

4. 完全發展期 (Fully Developed)

當火災發展至閃燃後，火災進入擴展階段，此時火場具有相當高的溫度與熱釋放率，此階段火災為通風控制（小空間）或燃料控制（大空間）。如在密閉之小空間中，火場燃燒的速率受到火場開口流進之空氣量所支配，而此時火場內的溫度將可高達 1200°C 以上。

5. 衰退期 (Decay)

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

3.1.2 火源設計

於探討煙控系統中，火源設計有其決定性的影響，通常需考慮隨熱輸出值與時間之關係。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，煙控系統會因閃燃的發生失效。但如果此火災區域為與其它大空間有連結，煙流會經由門或窗進入大空間，此情況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)

火源往往在實際情況中為不穩定，但為使火源較容易描述以及研究

上的需要，一般會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【37】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 500kW/m^2 ，而辦公室建築每單位面積之熱釋放率則為 225kW/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 500kW/m^2 （ 44Btu/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 225kW/m^2 （ 20Btu/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 2MW ，而於大型空間中存放可燃物最小火源則為 5MW ，此外一般大型火源則制定為 25MW 。

2. 非穩態火源（Unsteady fire）

在NFPA 92B中，則是認為大多數的燃燒火源在發展期間的熱釋放率非常低，且其熱釋放率會隨時間變化，因此將火災成長狀況理想化，以拋物線方程式表示【38】，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（kW）

α ：火源的成長係數（ kW/s^2 ）

t ：開始燃燒後的時間（s）

t_0 ：有效的著火時間（s）

n ：1,2,3,4,.....

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

t_g ：有效的燃燒後的時間（s）

此式稱為"T-Squared Fires"，NFPA92B使用成長時間的觀念，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 ²)	α (Btu/s ²)	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 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3.6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)為美國國家標準與科技研究所(National Institute of Standard and Technology ; NIST)所研發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可以計算三維空間火災行為(包含火場之溫度、煙氣流動速度、軌道)，其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。且經由後處理程式Smokeview將流場依靜態與動態之方式可視化輸出，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，撒水頭等消防設備實際需求納入模型中，以更符合現場之狀況，也因此被廣泛應用於學術研究和工程界上。

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3.7為FDS流程圖，圖3.8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 ρ ：流體密度 (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/m²)

g : 重力加速度 (m/s²)

f : 外力 (包含撒水頭之拖曳力) (nt/m³)

τ : 黏滯剪應力張量 (nt/m²)

3 能量守恆

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

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

h : 焓 (kJ/kg)

Q : 熱釋放率 (kw)

q'' : 輻射熱通量 (kw/m²)

k : 熱傳導係數 (kw/mk)

T : 溫度 (°C)

h_{ℓ} : ℓ 物種之焓值 (kJ/kg)

D : 擴散係數 (m²/s)

Y_{ℓ} : ℓ 物種之質量分率

4 物種守恆

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

其中 \dot{W}_{ℓ}''' : ℓ 物種單位體積生成率

5 狀態方程式

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

對低馬赫數流而言

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

其中 P_o : 外界壓力 (nt/m²)

$\rho_\infty gZ$: 靜壓 (nt/m²)

\tilde{P} : 擾動壓力 (nt/m²)

6 擴散 LES(Large Eddy Simulation)模型

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

其中 C_s : 經驗常數

Δ : 格點長度

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

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

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

其中 Pr : 普朗特常數 (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， ρ^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. 熱物理性質 ρ 、 Y_i 和 p_0 是利用顯性的尤拉法（explicit Euler step）得到，例如密度可由下式預估

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

b. 解壓力的 Poisson 方程式則可由

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

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

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

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 ρ 、 Y_i 和 p_0 將在下一個 time-step 做校正。例如密度將寫成

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

d. 透過之前預估出來的結果來重新計算壓力

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

更正過的速度如下

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

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 ρ_{ijk}^n 代表的是第 n 個 time-step 格點 i 、 j 、 k 裡的密度。向量的值則是在格點的表面給定。

3. 收斂條件

FDS 軟體在數值計算方法上，主要採 LES (Large Eddy Simulation 大尺度渦流模擬方法) 模式進行計算。對計算疊代時間 (time step)，程式會根據 CFL 穩定條件 (Courant-Friedrichs- Lewy condition) 與 VN 穩定條件 (Von-Neumann condition)，依據計算所得之速度數值與物理量，自動進行疊代時間 δt (time step) 之調整，使計算過程中之 CFL 數與 VN 數均介於 0.8 至 1 之間，以達到數值方法的計算之收斂。

$$\text{CFL} = \delta t \max \left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) \quad (3.27)$$

$$\text{VN} = 2 \max \left(v \cdot D \cdot \frac{k}{\rho C_p} \right) \delta t \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad (3.28)$$

δt ：疊代時間 (time step)

u 、 v 、 w ：速度分量

δx 、 δy 、 δz ：網格大小

V ：黏滯係數 (viscosity)

D ：擴散係數 (diffusivity)

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

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

$$\frac{\dot{m}_F}{V_F M_F} = \frac{\dot{m}_o}{V_o M_o} \quad (3.30)$$

M_i : i 分子之莫耳重量 (kg)

m_i : i 分子之質量消耗率 (kg/s)

$$\text{定義 } z = \frac{s Y_F - (Y_o - Y_o^\infty)}{s Y_F^I + Y_o^\infty} ; s = \frac{V_o M_o}{V_F M_F} \quad (3.31)$$

其中 Y_o^∞ : 氧氣於大氣中之質量分率

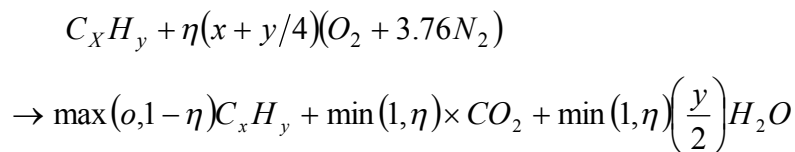
Y_F^I : 燃料之質量分率

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

$$Z(x, t) = Z_f ; Z_f = \frac{Y_o^\infty}{s Y_F^I + Y_o^\infty} \quad (3.32)$$

$$\text{且 } Y_o(Z) = \begin{cases} Y_o^\infty (1 - Z/Z_f) & Z < Z_f \\ 0 & Z > Z_f \end{cases} \quad (3.33)$$

由上述定義對一般碳氫化合物燃料之化學反應可以下式表示：



$$+ \max(o, \eta - 1)(x + y/4)O_2 + \eta(x + y/4)3.76N_2 \quad (3.34)$$

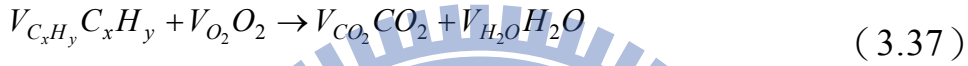
針燃燒反應之熱釋放率 \dot{q}''' 則由氧氣消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_o \dot{m}_o'' \quad (3.35)$$

其中 ΔH_o 代表單位質量之氧消耗時之熱釋放率，且由氧氣之質量守恆可導出

$$-\dot{m}_o''' = \nabla \left(\rho D \frac{dY_o}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_o}{dZ} \nabla \cdot \rho D \nabla Z = \rho D \frac{d^2 Y_o}{dZ^2} |\nabla Z|^2 \quad (3.36)$$

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。

$$\frac{d[C_x H_y]}{dt} = -B [C_x H_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (3.38)$$

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

E ：活化能 (kJ/mol)

3.2.4 熱輻射之統御方程式

FDS之熱輻射傳統御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)] \quad n=1, \dots, N \quad (3.39)$$

$$\text{其中 } I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi \quad (3.40)$$

$$I \cdot (x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (3.41)$$

I ：輻射熱強度 (kw/m²)

k ：吸收係數

λ ：波長 (m)

σ ：史蒂芬-波茲曼 (Stefan-Boltzman constant)

對於牆面之熱輻射，FDS採用之邊界條件如下：

$$I_w(S) = \varepsilon I_{bw} + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (3.42)$$

其中 I_w ：牆面之輻射熱強度 (kw/m²)

S ：單位向量

ε ：放射率

I_{bw} ：牆面黑體輻射強度 (kw/m²)

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

$$q_r(x) = \int S I(x, s) d\Omega \quad (3.43)$$

因此能量守恆方程式中輻射熱之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x) [U(x) - 4\pi I_b(X)]; U(x) = \int_{4\pi} I(x, s) d\Omega \quad (3.44)$$

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響。

在LES計算模式中

$$\dot{q}_c'''' = h\Delta T ; h = \max \left[C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left(\frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \right] \quad (3.45)$$

ΔT ：邊界與氣態分子間之溫差(°C)

C ：自然對流係數(經驗常數，此模式中預設在水平面時 $C=1.43$ ，垂直面 $C=0.95$) (kw/m²)

L ：特徵長度 (m)

V ：動黏滯係數 (m²/s)

1. 熱厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(o, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3.46)$$

其中 ρ_s ：固態燃料密度 (kg/m³)

C_s ：固態燃料比熱 (kJ/kg·k)

\dot{q}_c'' ：對流熱通量 (kw/m²)

\dot{q}_r'' ：輻射熱通量 (kw/m²)

T_s ：固態燃料溫度 (°C)

2. 熱薄型固態燃料（假設溫度在垂直固態燃料方向為均勻分佈）

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (3.47)$$

其中 δ ：固態燃料厚度(m)

3. 液態燃料

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

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[-\frac{h_v M_f}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (3.48)$$

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

對於以上FDS之統御方程式，在其離散化過程中，時間之處理採用Second Order Predictor-corrector Scheme；空間項則採用Second Order Finite Differences。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。

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)

9. 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 Eddy(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。

前處理模組提供元素之選用、定義元素及材料性質，也提供實體建模及網格劃分工具，使其產生有限元模型。

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，提供使用者多種之分析方式與解法選項，並於分析計算模組設定邊界條件、外力、與設定輸出等。

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 ANSYS 熱-結構耦合分析

ANSYS 分析兩種以上物理現象的分析方式稱為耦合場分析，而本研究主要利用耦合場中的熱-結構(thermal-structural)分析計算因溫度變化而導致結構變形之情境。

耦合場的解法可以分為兩種，一種稱為 Seauential Method，另一種則為 Direct Method。Seauential Method 是先解出其中一種物理現象的分析結果，再將此結果當作另一種分析的邊界條件，而此種方式比較適合熱應力分析，先得出溫度分佈後再以溫度分佈解出應力，而 Direct Method 則是同時將不同的物理現象一次計算，此種方式比較適合兩種物理現象容易有交互影響時使用。

本研究主要探討捲門的應力，溫度分佈以 FDS 模擬得出，再將此結果當作 ANSYS 之邊界條件求物體的變形量，故採 Seauential Method 之方式計算。

3.4.3 元素型態

一般而言，須設定三種較常用之元素屬性，分別為種類、特性參數、材料性質。而ANSYS之元素型態又分為3D及2D，提供使用者針對不同分析對象而選擇適當之元素模型，本研究選用SHELL181元素，如圖3.9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。

3.4.4 結構理論基礎

線性分析下應力與應變之關係為

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (3.49)$$

其中

$\{\sigma\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$ ：應力向量，如圖3.10所示

$[D]$ ：彈性矩陣

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

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

$\{\varepsilon^{th}\}$ ：溫度應變向量

而對於三維而言，溫度應變向量為

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \alpha_y \alpha_z 0 0 0] \quad (3.50)$$

式(3.45)可改寫成

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (3.51)$$

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

其中

E_x ：x方向之楊氏係數

ν_{xy} ：主普松比

ν_{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：

$$\frac{\nu_{yx}}{E_x} = \frac{\nu_{xy}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{xx}}{E_x} = \frac{\nu_{xz}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{zy}}{E_y} = \frac{\nu_{yz}}{E_z} \quad (3.53) \quad \text{透 過 式 子}$$

3.46~3.48展開式3.47得到

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy} \sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz} \sigma_z}{E_x} \quad (3.54)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy} \sigma_x}{E_y} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz} \sigma_z}{E_y} \quad (3.55)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz} \sigma_x}{E_z} - \frac{\nu_{yz} \sigma_y}{E_z} + \frac{\sigma_z}{E_z} \quad (3.56)$$

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

其中

ε_x ：x方向之應變

σ_x ：x方向之應力

ε_{xy} ：x-y平面剪應變

σ_{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：

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left(1 - \left(\nu_{yz} \right)^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (3.58)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(1 - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (3.59)$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (3.60)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy} \quad , \quad \sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz} \quad , \quad \sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz} \quad (3.61)$$

其中

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

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

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2\nu_{xy} E_x} \quad (3.62)$$

上述式子為等向性材料之應力應變關係式。

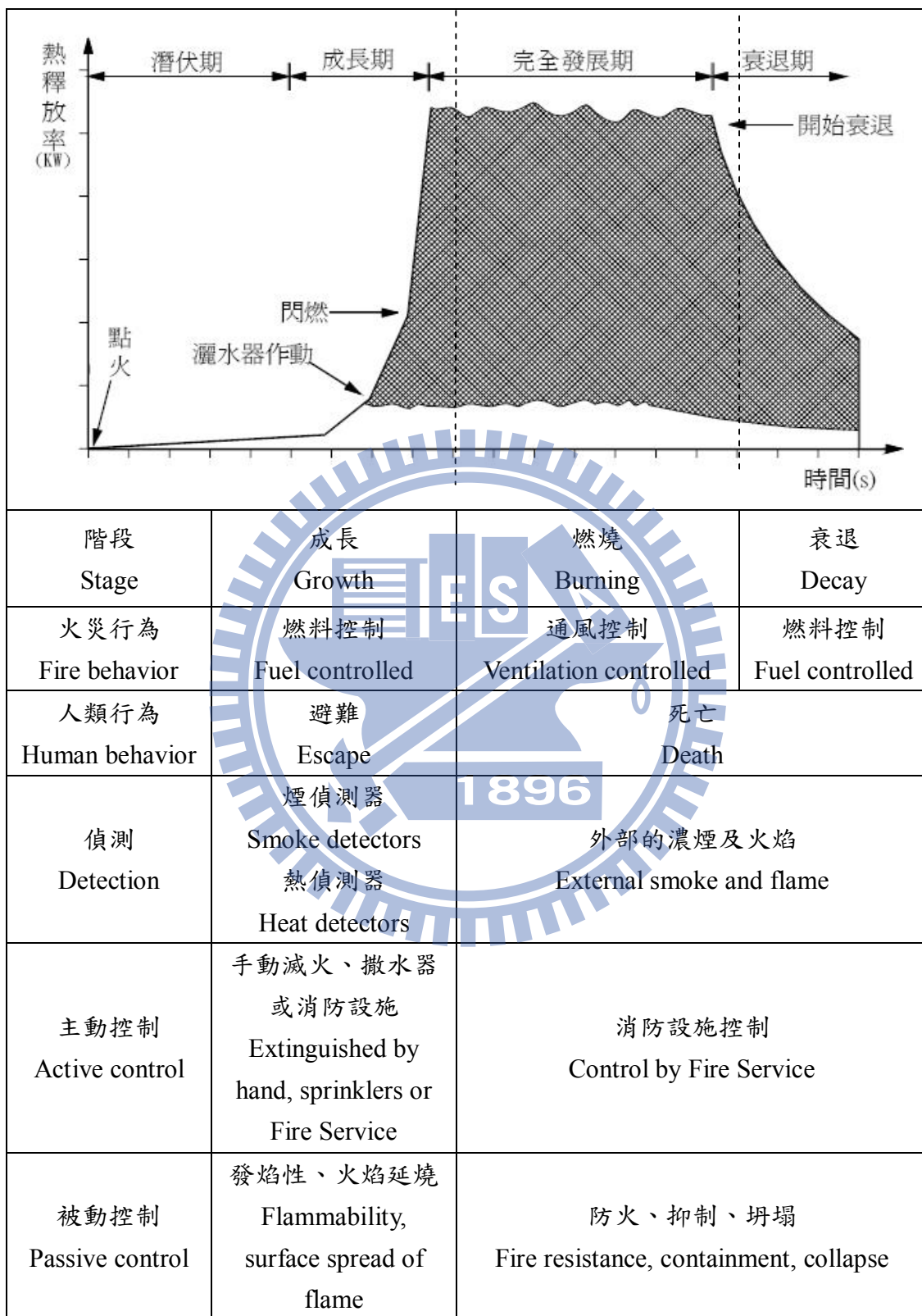
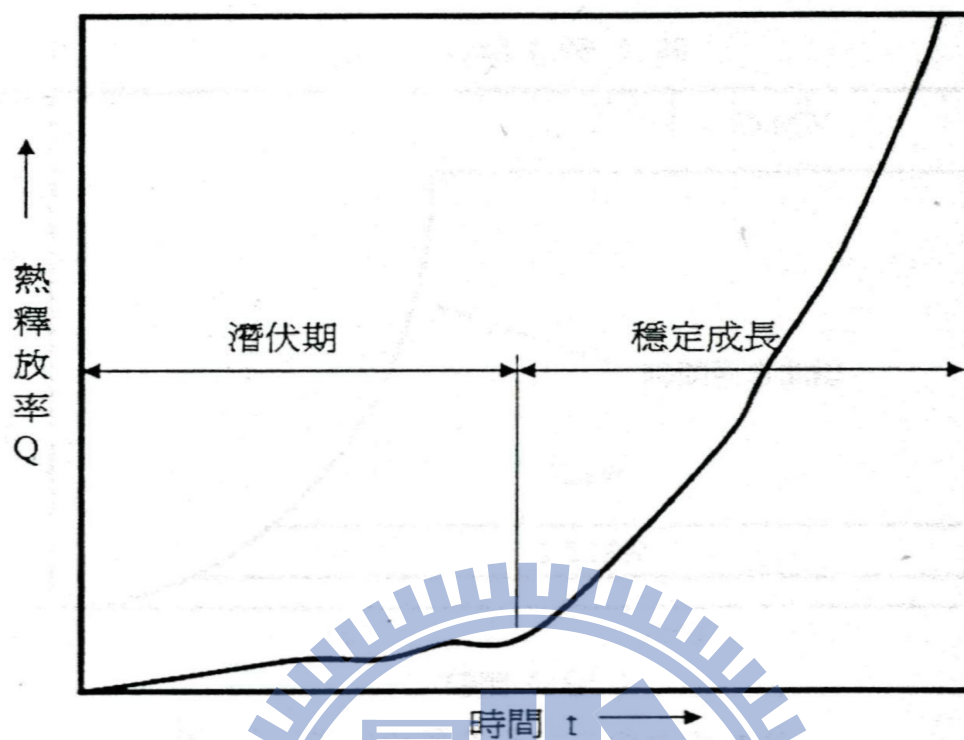
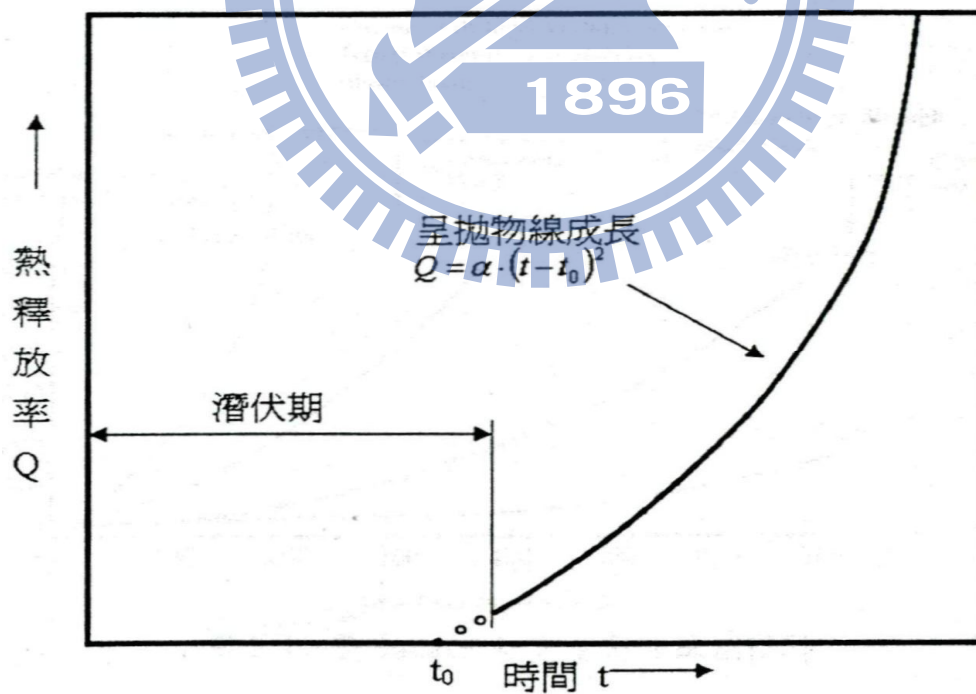


圖 3.1 火災發展過程圖



(a) 典型火源成長曲線



(b) 理想二次火源成長曲線

圖 3.2 火災成長曲線圖

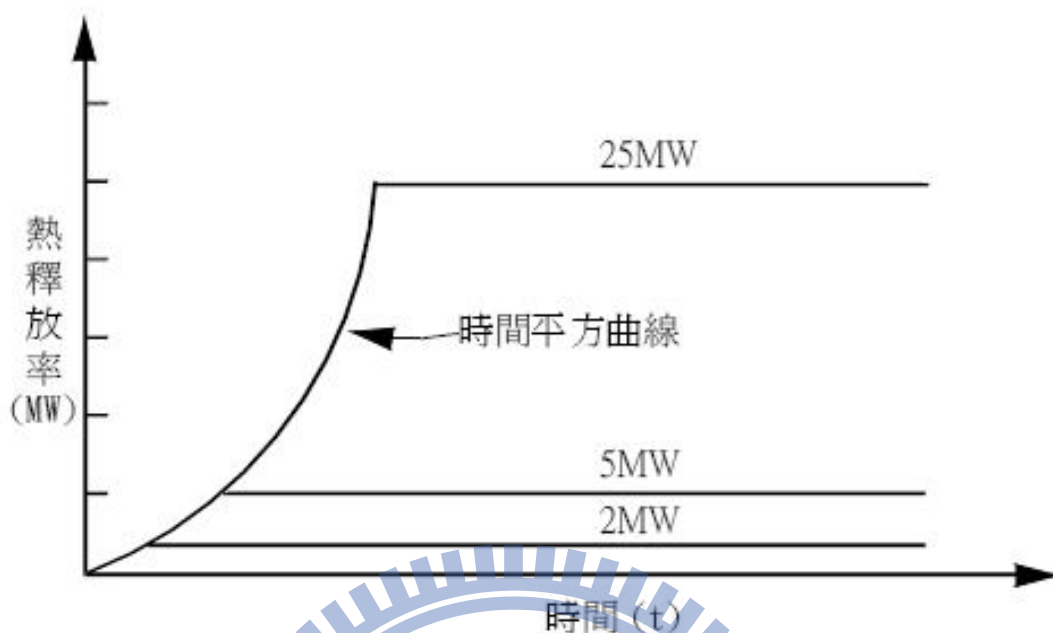


圖 3.3 不同熱釋放率之火災成長曲線圖

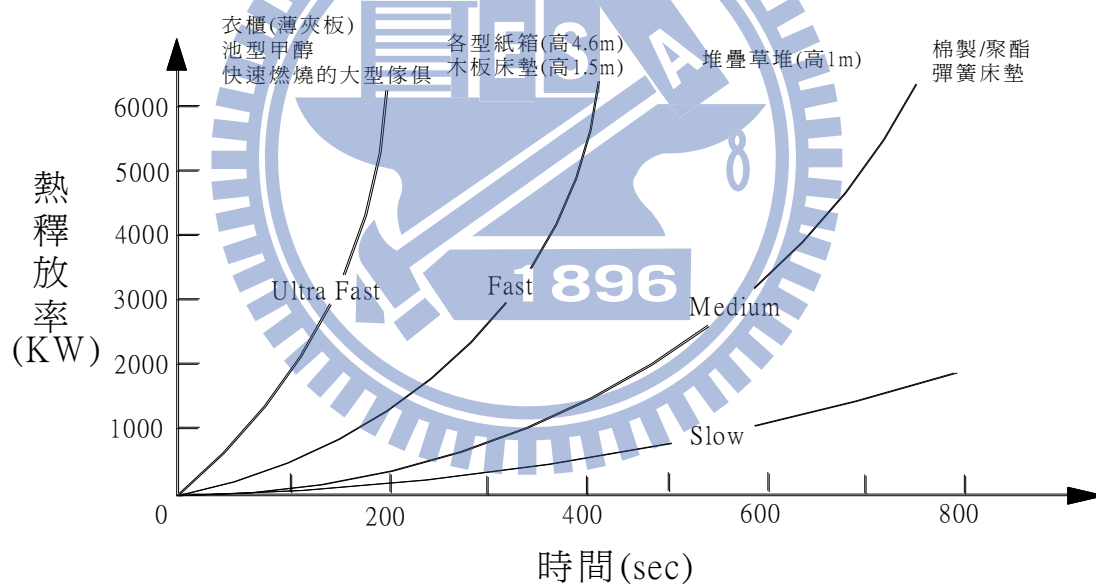


圖 3.4 T-Square 火災成長曲線圖

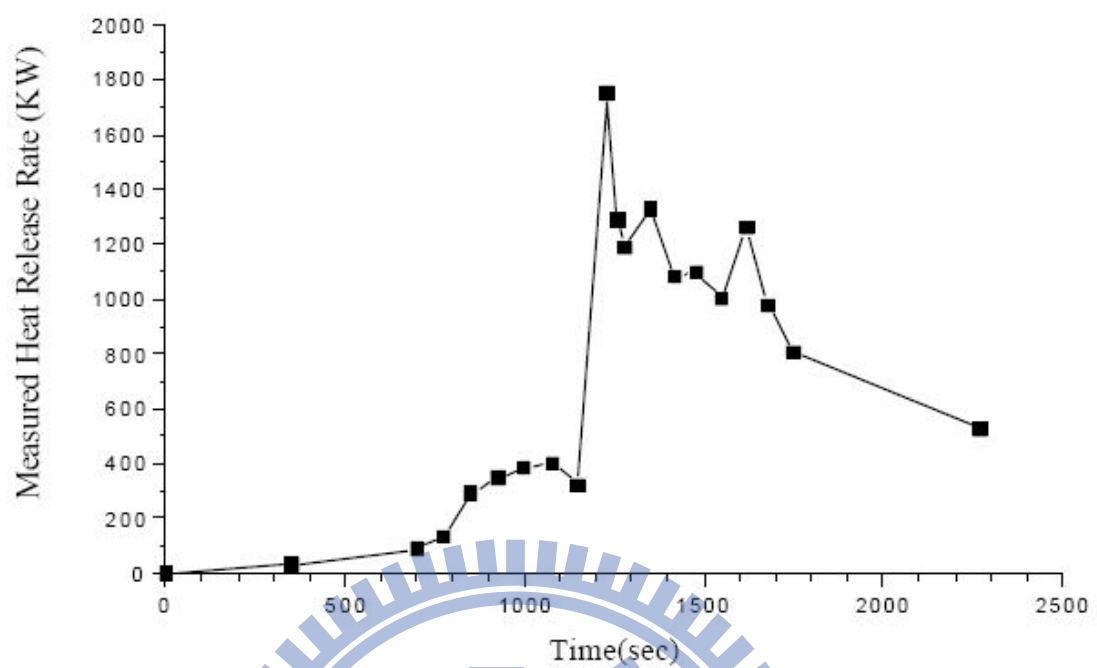
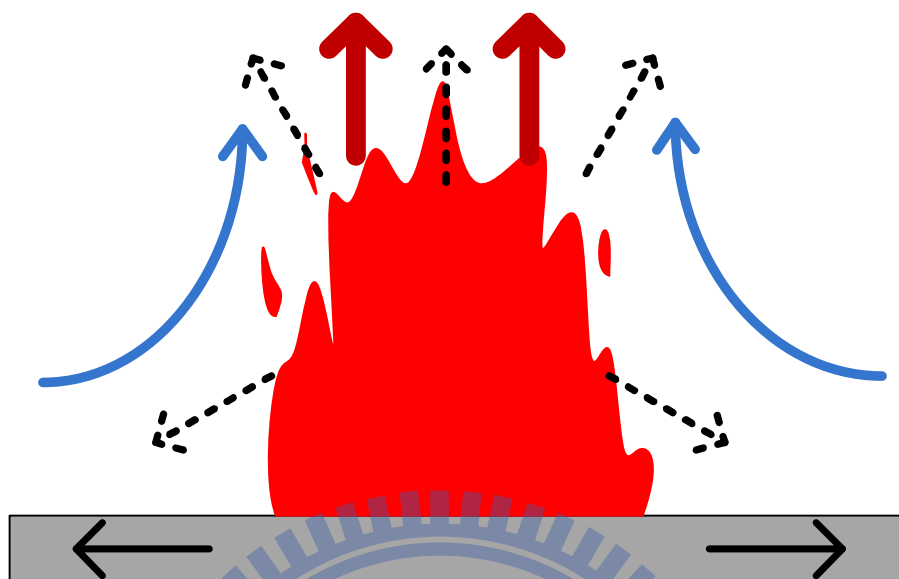


圖 3.5 Kisok 實際量測之火災成長曲線圖 (NIST,1995)

(a) 水平火焰



(b) 垂直火焰

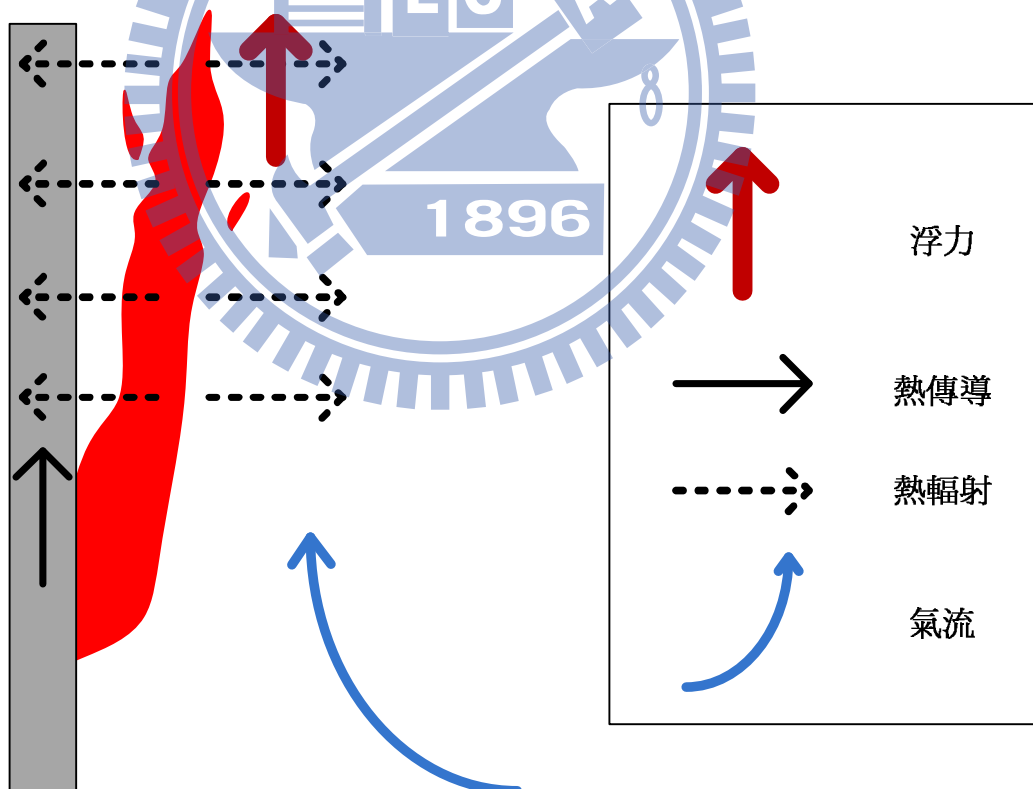


圖 3.6 水平火焰及垂直火焰

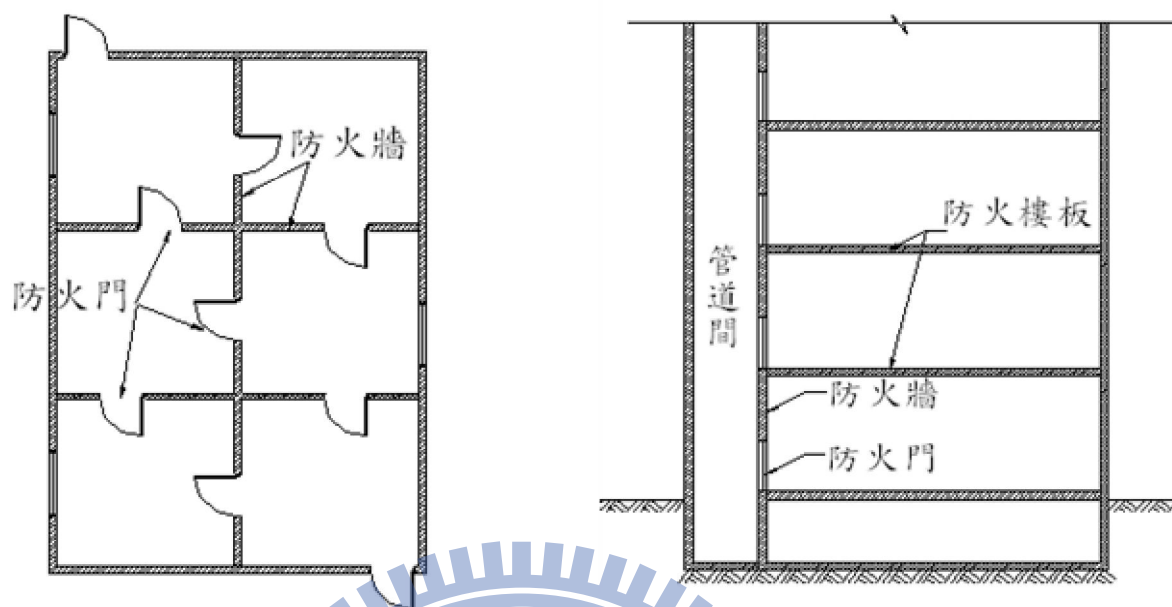


圖 3.7 防火區劃方式

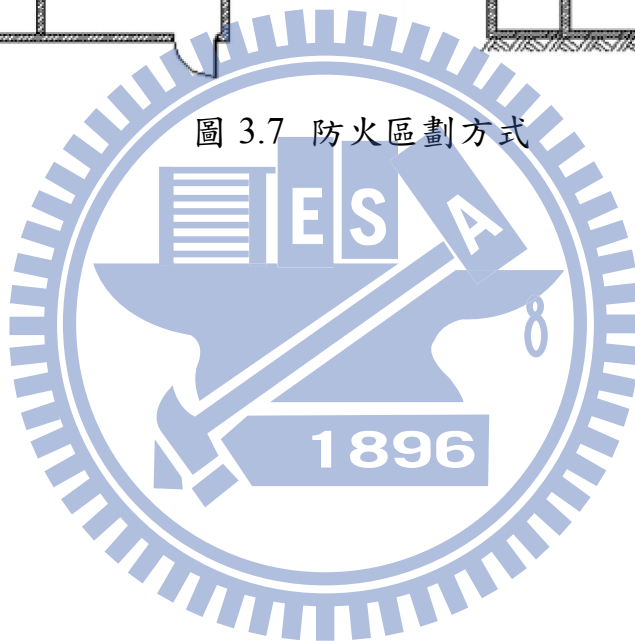




圖 3.8 FDS 分析執行計畫流程圖

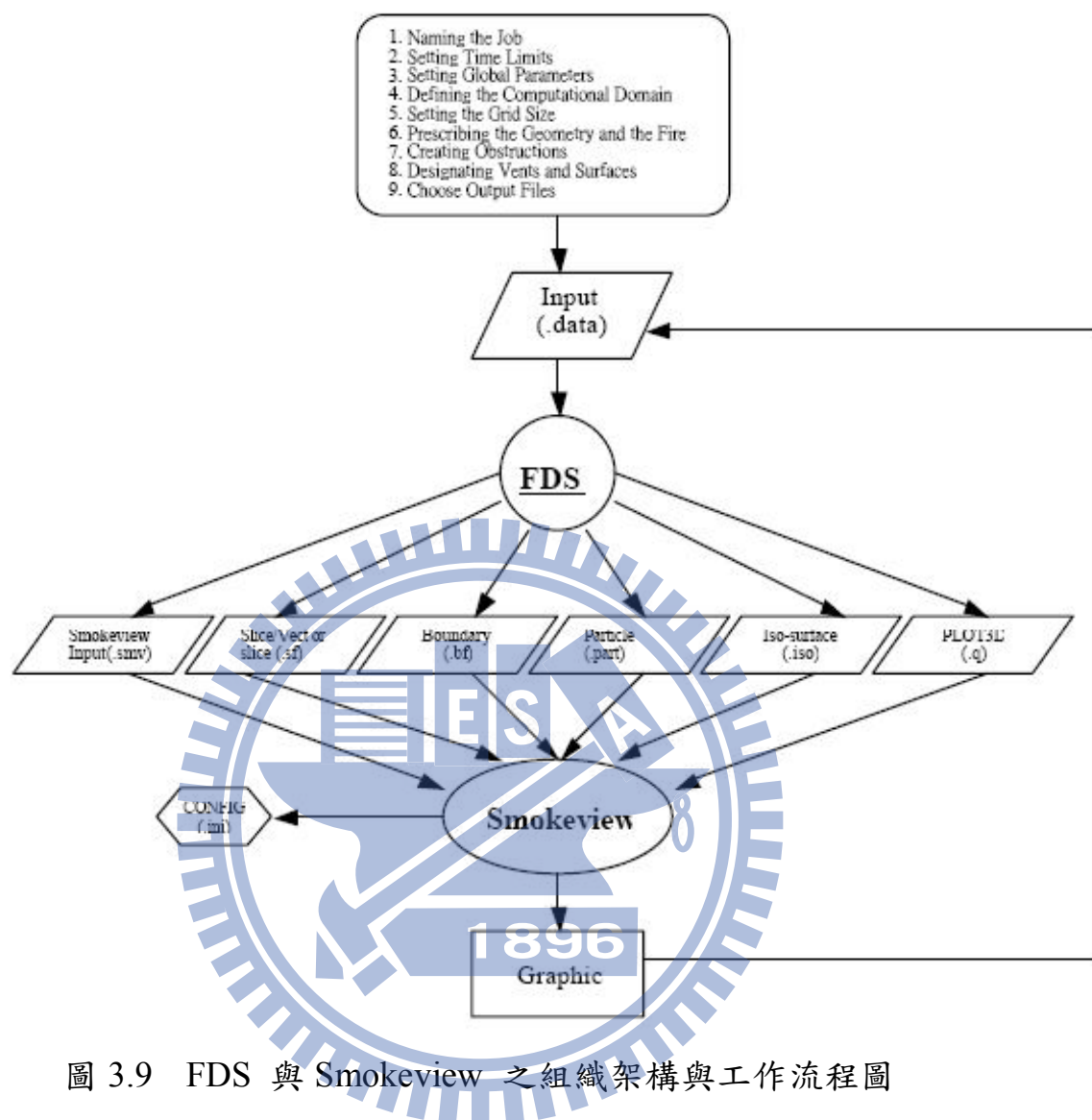


圖 3.9 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖

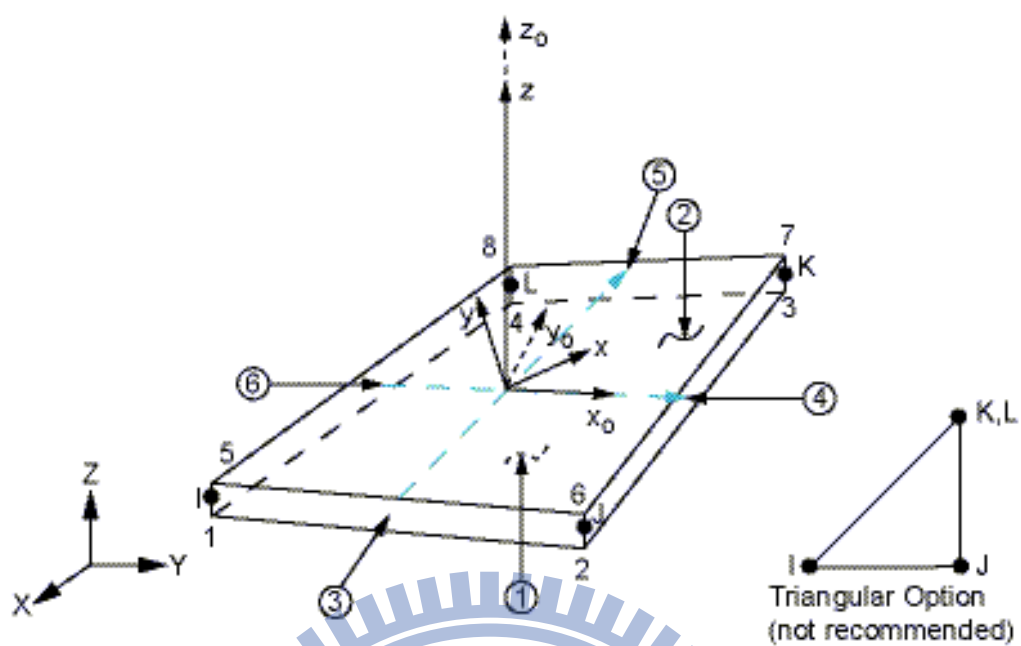


圖 3.10 元素 SHELL181

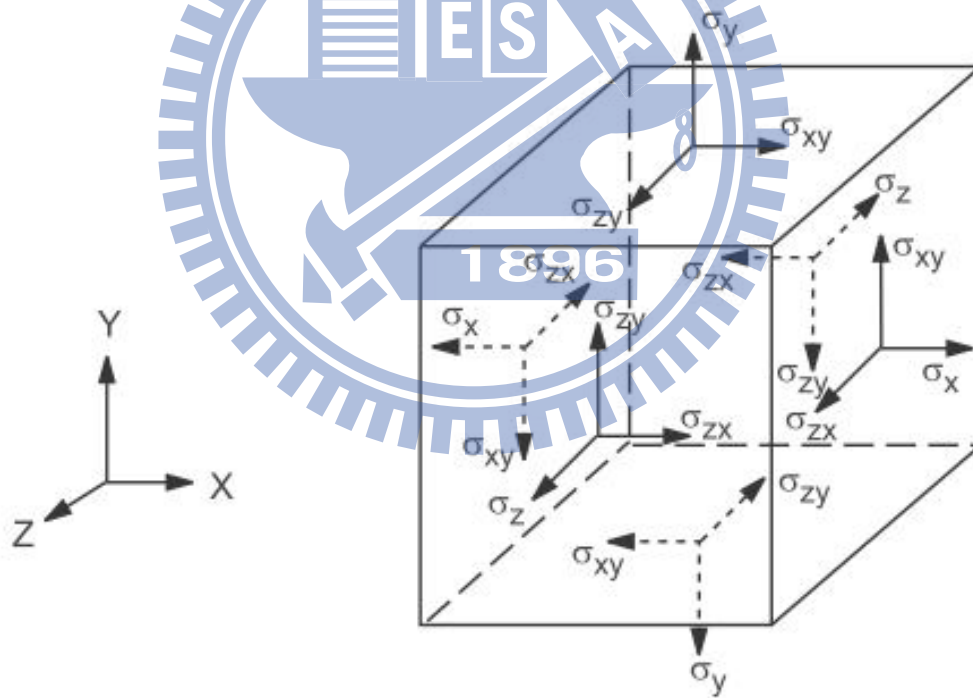


圖 3.11 應力向量圖

第四章 結果與討論

本研究主要為防火捲門應用於建築內部構成的防火區劃，探討當火災發生時此類區劃方式之應用以及對捲門於火場中的行為進行分析研究，研究流程如圖 1.2 所示。本章運用模擬軟體 FDS 與 ANSYS 模擬在車站建築的電扶梯間設置防火捲門，探討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，並將模擬結果與前人文獻進行比較。

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，各層用途如圖 4.2 所示。

其中，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，如圖 4.3 所示，本研究即以此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。火源位於離捲門4.5公尺之位置。

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，火災熱釋放率如圖4.4所示。

4.2.3 防煙垂壁設計：

本章模擬範圍皆有設置80cm的防煙垂壁以減緩煙層擴散時間，如圖4.5所示。

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4.6所示。

4.2.6 邊界條件

在FDS模擬部分，建築之邊界條件如圖4.6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，由於隧道口並不會有強風來影響其隧道口風速，故在模擬設定自然補氣口。

在ANSYS部分，因考量溫度分佈、壓力分佈與材料性質均會影響模擬之準確性，故上述之參數均納入ANSYS之邊界設定。溫度分佈與壓力分布以FDS模擬結果做為參數，材料性質則考慮材料的楊式係數與熱膨脹係數隨溫度之變化，係參考Private Mail Bag【21】利用脈衝激勵技術量測鐵於不同溫度下之楊式係數，如圖4.7所示，與J.E. Daw【22】利用膨脹計量測鐵於不同溫度下之熱膨脹係數，如圖4.8所示。

4.2.7 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4.1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 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$ 格點，其他區域設置 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 之網格。

表 4.1 FDS 格點測試

格點大小（公尺） $X \times Y \times Z$	格點數	量測點 1 平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	量測點 2 平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	最大誤差值
$0.2 \times 0.2 \times 0.2$	105 萬	100.19	101.02	0%
$0.25 \times 0.25 \times 0.25$	54 萬	101.45	101.97	1.26%
$0.5 \times 0.5 \times 0.5$	6.7 萬	102.35	103.72	2.67%

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4.2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，本研究將以 $0.05 \times 0.05 \text{ m}^2$ 尺寸之格點進行模擬分析。

表 4.2 ANSYS 格點測試

格點尺寸(m^2)	變形量(mm)	誤差
0.2×0.2	-153	18.6%
0.1×0.1	-153	18.6%
0.05×0.05	-183	2.7%
0.025×0.025	-188	-

4.2.8 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痲痺性成份，因此當濃度過高或暴露其中的時間過長，則容易導致人員吸入過多有毒氣體而昏迷、休克，嚴重的話甚至會導致死亡。在防火安全工程的SFPE Handbook中有詳細的規定，而紐西蘭設計指針的危險指標即是參考SFPE Handbook制定，其規定如表4.3所示。

表 4.3 人體承受危害程度指標值分析表(SFPE 及紐西蘭設計)

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

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4.4所示。

表 4.4 建議人員逃生安全環境要求

項目	建議人員逃生安全環境要求（1.8m高度逃生路徑空間內）
1	逃生環境氣體溫度 $<60^{\circ}\text{C}$
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 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進行比較分析，以確認 ANSYS 模擬結果之準確性。在此以陳建銘所進行之大型加熱爐火場試驗之實驗結果進行驗證，並與黃鈞對此大型加熱爐火場試驗之模擬結果進行比較。

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—時間曲線如下：

$$T=345 \log_{10}(8t+1)+20$$

其中

T：平均爐內溫度(°C)

t：試驗經過時間(分)

標準加熱爐升溫曲線如圖 4.9 所示。

標準加熱爐內之壓力則規定為線性梯度狀態，設定每公尺高度壓力差為 $8 \sim 8.5 \text{ Pa} \{0.8 \sim 0.85 \text{ kgf/m}^2\}$ ，對於垂直構造部分之試驗面壓力，原則上

在距離試體門板(片)最下緣上方高度 50cm 處維持零壓力(中性壓力面)，並在以上高度維持正壓時，以每公尺高度壓力差評估爐內氣壓狀況，但試體上端壓力應不大於 20Pa，依此中性壓力面配合整個試驗高度予以調整，如圖 4.10 所示。

試驗對象為 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 之快速捲門，以三片單邊向上開的快速捲門為基礎，如圖 4.11 所示，並設定填充陶瓷棉版做為阻熱性材料，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，此試驗於試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，其熱電偶如圖 4.14 所示。

二、 文獻內容

陳建銘進行大型加熱爐火場試驗，探討捲門於加熱過程之行為，實驗結果上門片往非曝火面變形，中門片往曝火面變形，下門片往非曝火面變形，如圖 4.15 所示。而本實驗室黃鈞則運用 FDS 模擬此大型加熱爐試驗之情境，並將 FDS 模擬過程中所得的溫度分佈做為 ANSYS 模擬之負載，其變形量模擬結果的變形趨勢與實驗相同，但中門片有相當的誤差，如圖 4.16~23 所示。

本節即運用此兩文獻進行比較與分析，並改良黃鈞之模擬，使模擬結果更符合實驗數據與物理現象，並驗證此模擬方式之準確性。

三、 模擬流程

本模擬除依照黃鈞模擬方式，運用 FDS 模擬大型加熱爐試驗之情境，並將 FDS 模擬過程中所得的溫度分佈做為 ANSYS 之負載外，本模擬更考量壓力分佈、材料性質(楊式係數、熱膨脹係數)與邊界拘束條件的設定。而楊式係數與熱膨脹係數隨溫度之變化如圖 4.7 及圖 4.8 所示，邊界條件則參照實驗之邊界條件設定，將捲門以螺栓之方式固定於加熱爐，其設定如圖 4.24 所示。

四、 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與表面壓力進行量測，所獲得之試體表面溫度與壓力將做為 ANSYS 模擬之負載，模擬外觀如圖 4.25 及圖 4.26 所示，於模擬過程中，其爐內加熱之溫度曲線與壓力曲線如圖 4.9 及圖 4.10 所示，溫度分布與壓力分佈如圖 4.27、4.28 所示。由結果顯示，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。關於壓力分佈，壓力曲線亦在標準壓力之規範，整體而言，壓力分佈上方為正壓(即壓力方向朝曝火面)，隨高度下降遞減，於高度 1.3m 處轉為負壓(壓力方向朝非加熱面)。

模擬時間 20 分鐘內所獲得之試體表面溫度與壓力將做為 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，如圖 4.29 所示。

五、 ANSYS 模擬

ANSYS模擬分別對三片門片進行模擬，模型外觀如圖4.10所示，門片在加熱過程中之溫度分佈與壓力分佈為門片之負載，在ANSYS模擬過程中的熱傳機制僅考慮門片內部熱傳導，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如圖4.24所示，門片之材料在溫度與壓力負載、材料性質及拘束力影響下將產生外凸或內凹型式之變形。

由ANSYS所模擬出之結果與陳建民的實驗和黃鈞的模擬結果比較，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。

整體而言，因加入壓力、材料性質與邊界拘束條件之參數，三片門片之變形量比前人模擬之變形量更符合實驗結果，以下分別對三門片進行說明。

(一) 上門片

在實驗開始後8分鐘，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16分鐘之結果進行討論，模擬結果如圖4.30及圖4.31所示，變位量測點之變形量為正值即為向爐外凸出，就整體而言，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的角落兩側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，而門片中間之變形方向為向爐外凸出，此區域亦為實驗變位量測點所在位置。

本模擬最大變形量為0.254m，發生於門片下方兩側的角落，而前人模擬變形量0.07792m，發生於門片的下方中間，推測此差異應為本研究邊界條件使用螺栓固定的方式，使得變形量往角落集中，在加上正壓與

材料性質的考量產生較大的變形，而門片中間的變形量兩者則無太大之差異，均與實驗量測之變形量接近。

(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，模擬結果如圖4.32及圖4.33所示，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，無明顯的變形發生，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。

本模擬最大變形量為0.112m，大於前人模擬變形量0.0913m，推測此差異應為本研究考量壓力與材料性質之影響，將實驗值的誤差從30%大幅降低至14%。

(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4.34及圖4.35所示，門片下端及左右兩側因拘束力，較無明顯的變形發生，門片上端之角落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。

本模擬最大變形量為0.111m，發生於門片上方兩側的角落，而前人模擬變形量0.0362m，發生於門片的上方中間，推測此差異應為本研究邊

界條件使用螺栓固定的方式，使得變形量往角落集中，在加上正壓與材料性質的考量產生較大的變形，而門片中間的變形量兩者則無太大之差亦，均與實驗量測之變形量接近。

六、 小結

由門片變形量之模擬結果與陳建銘【39】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。

由門片變形量之模擬結果與黃鈞【18】所進行之大型加熱爐耐火試驗模擬結果進行比對，發現考慮壓力分佈以、材料性質隨溫度變化及拘束條件之參數，對捲門之變形量會有較準確之結果，由模擬結果得知，原本誤差最大的中門片，因考量壓力與材料性質，大幅降低與實驗之誤差。



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4.3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4.3及圖4.5所示，本節將討論之重點如下：

1. 捲門本身受熱之變形情況以及熱應力分佈，並與前人文獻和實際案例比較分析
2. 探討各情境對煙流蔓延之差異，表 4.5 為各情境之捲門控制模式

表 4.5 捲門控制說明

情境	捲門控制模式
情境一	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。
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。

4.4.3 模擬結果

一、 捲門變形模擬

(一) 文獻回顧

1. 陳建銘所進行之大型加熱爐耐火試驗實驗結果，捲門遭嚴重破壞前以 S 之形狀變形，變形示意圖如圖 4.36 所示。
2. 本實驗室黃鈞，運用 FDS 與 ANSYS 模擬捲門變形，其變形朝曝火面變形，如圖 4.37 所示。
3. 2011 年 6 月，新竹市寶山路上發生民宅火災，本實驗室黃鈞於現場拍攝捲門之變形，由照片觀察得知捲門以波浪的型狀變形，如圖 4.38、圖 4.39 所示。

(二) 模擬結果

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FDS模擬所得捲門的表面溫度與壓力分佈如圖4.40及圖4.41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，壓力分佈上方為正壓(即壓力方向朝曝火面)，隨高度下降遞減轉為負壓(壓力方向朝非加熱面)。ANSYS邊界的拘束條件如圖4.42所示，考量實際受限於軌道，將捲門正反兩面的兩側軌道處固定一自由度以符合實際情境。以下所討論之捲門變形量均以垂直捲門面之變形量為主：

1. 情境一(捲門全關)

- (1) 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) 由情境一進行模擬得到捲門之均溫與壓力分佈如圖 4.40、圖 4.41，熱膨脹係數與楊氏係數隨溫度之變化如圖 4.7、圖 4.8 所示，而捲門變形量如圖 4.43、圖 4.44 所示。
- (3) 捲門之變形量成波浪型，捲門上方變形量為正值，表示往非曝火面變形，中間則為負值，朝向曝火面變形，到下方則又轉為正值，朝背火面變形，其變形的最大值為 202mm。
- (4) 觀察捲門的壓力分佈與變形量的趨勢，發現捲門變形量之變化會隨壓力的正負變形，本研究推測捲門因受熱膨脹後，因壓力與結構的推擠導致波浪狀的變形。
- (5) 模擬結果與文獻比較，本模擬的捲門變形為波浪狀比黃鈞模擬的變形更接近實際案例前後變形的趨勢，推測本模擬考量了壓力分佈而致。而本模擬最大變形量為 202mm，小

於黃鈞模擬的最大變形為 582mm，推測因邊界條件多拘束了捲門表面兩側，以及前後的變形推拉導致。

- (6) 模擬結果與陳建銘加熱爐實驗和實際民宅火災比較，發現變形趨勢比較符合民宅火災的波浪狀變形而非 S 型的變形，推測因捲門結構與民宅火災的捲門結構相似導致。
- (7) 捲門之熱應力分佈如圖 4.45 所示，最大值達到 2.3 Gpa，而最大之應力強度則集中於捲門底端中間部分。

2. 情境二(捲門半關)

- (1) 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溫度與壓力分佈如圖 4.46 及圖 4.47 所示，而捲門變形量如圖 4.48 及圖 4.49 所示。
- (3) 捲門變形量為正值表示變形向非曝火面的方向，捲門之變形量以下部為最大，變形量最大值為 207mm。
- (4) 與黃鈞模擬結果比較，捲門變形方向相反，推測因考量了壓力分佈，將捲門推向非曝火面變形。而本模擬的變形量最大為 207mm，小於黃鈞的 319mm，推測因邊界條件多拘束了捲門表面兩側導致。
- (5) 捲門之熱應力分佈如圖 4.50 所示，最大值達到 1.2 Gpa，熱應力由兩側向中間遞減，而最大之應力強度則集中於捲門底端兩側。

二、 煙流模擬

(一) 情境一(捲門全關)

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 4.53 所示。
3. 地下三層於高度 1.8 公尺處之溫度即及能見度之分佈如圖 4.51 及圖 4.52 所示。
4. 地下二層在火災模擬時間 720 秒內，其環境均在人員生命安全標準之範圍內。

(二) 情境二(捲門半關)

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 4.56 所示。
3. 地下三層於高度 1.8 公尺處之溫度、能見度分佈如圖 4.54 及圖 4.55 所示。
4. 地下二層在火災模擬時間 720 秒內，地下二層僅在電扶梯開口處有溫度高於 60°C 之狀況。

4.4 結果討論

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. 由捲門全關進行受熱變形及熱應力分佈之模擬結果，捲門在火場中之變形呈波浪狀，且在底端不會產生上拱之情形。在模擬時間內，最大變形量為 202mm，熱應力部分最大之熱應力集中於門片底端。
3. 由捲門半關進行受熱變形及熱應力分佈之模擬結果，捲門在火場中之變形以非曝火面方向變形為主，且在底端不會產生上拱之情形。在模擬時間內，最大變形量為 207mm，熱應力部分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。
4. 由本研究之捲門模擬與前人模擬和實驗比較，整理新考量之參數會有以下影響：
 - (1) 溫度分佈：捲門膨脹變形的主要因素
 - (2) 壓力分佈：捲門變形趨勢的主要因素
 - (3) 材料性質：影響捲門變形量的大小
 - (4) 拘束條件：影響捲門變形量的大小與熱應力分佈
 - (5) 捲門結構：影響捲門變形的趨勢
5. 由模擬結果與實驗和實際火災後的捲門變形比對，本模擬之變形比前人的模擬較符合實際之結果，推測本模擬考量壓力分布、材料性質、拘束條件與結構等因素導致。
6. 由捲門火災模擬情境一及情境二之煙層分佈及地下三層之溫度、能見度發現，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。

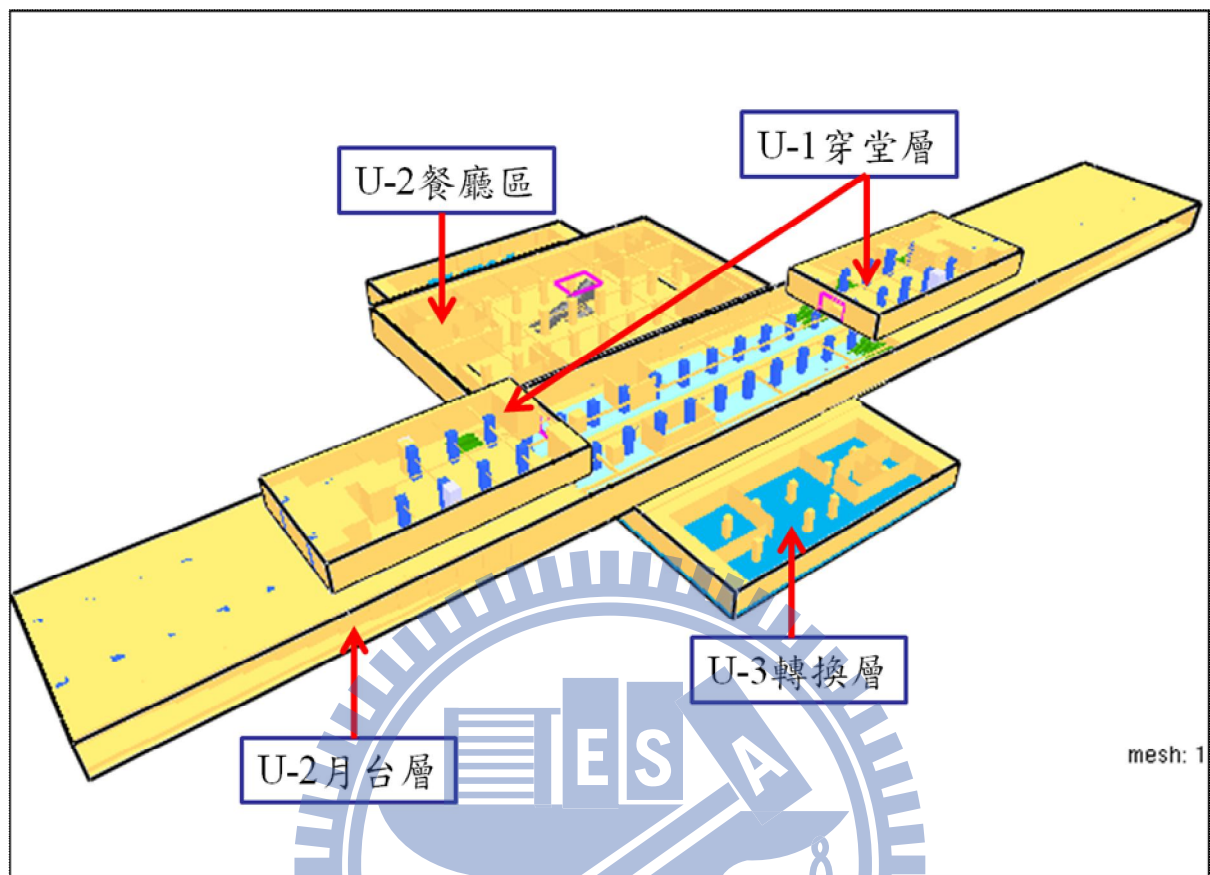


圖 4.1 模擬範圍外觀示意圖

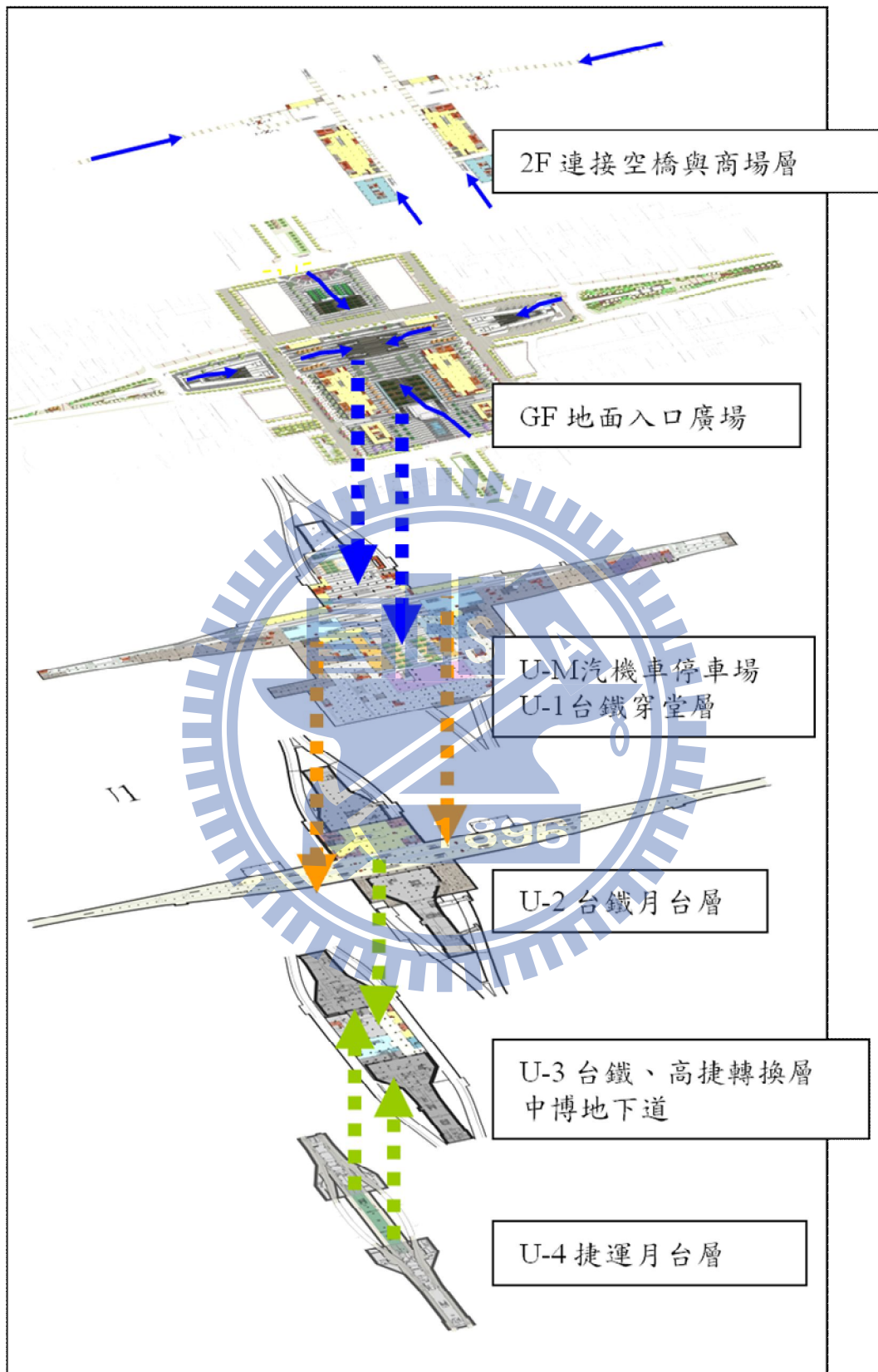


圖 4.2 各樓層用途

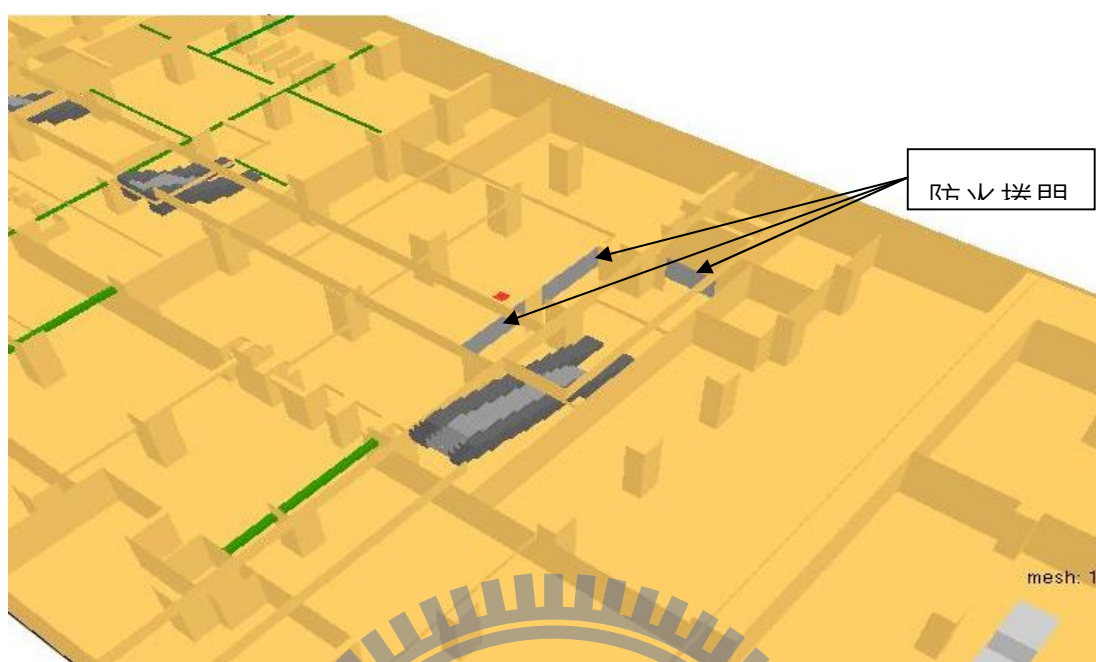


圖 4.3 電扶梯間防火捲門區劃

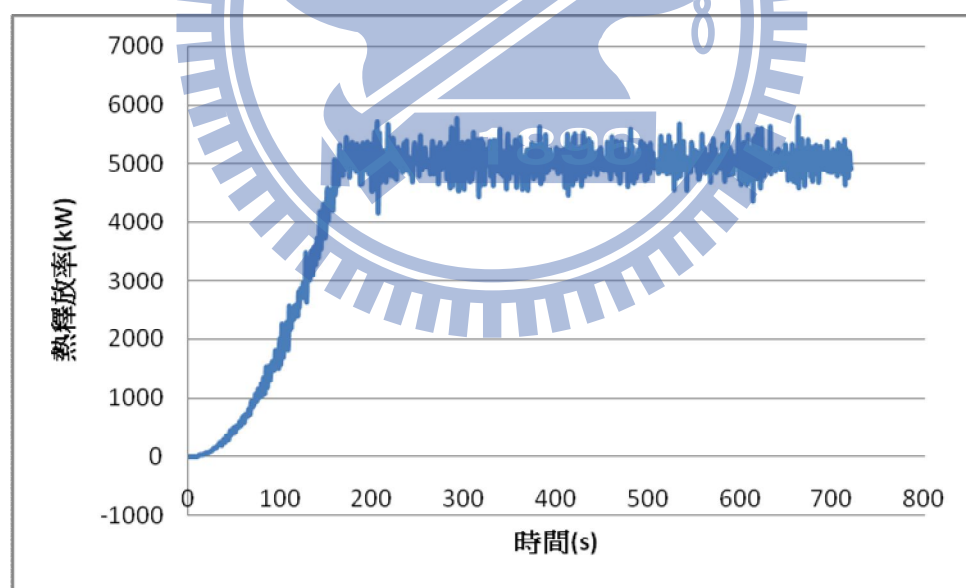


圖 4.4 火災熱釋放率圖

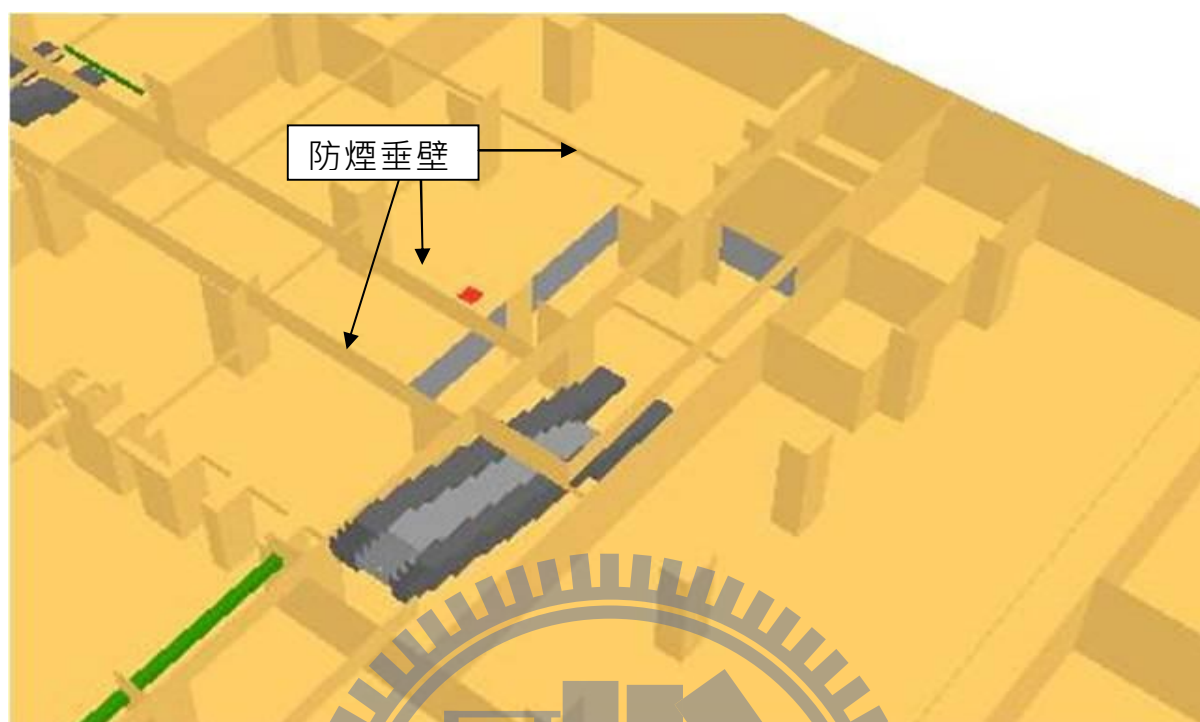


圖 4.5 防煙垂壁設置示意圖

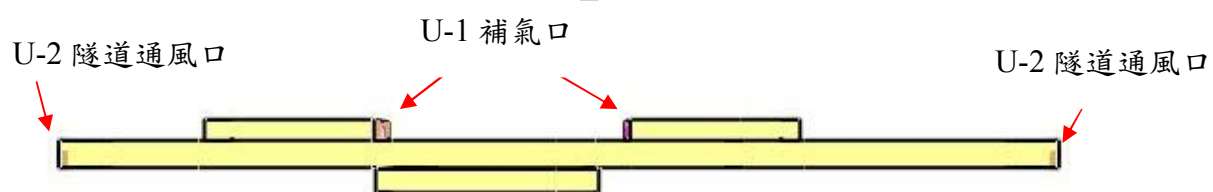


圖 4.6 補氣口位置圖

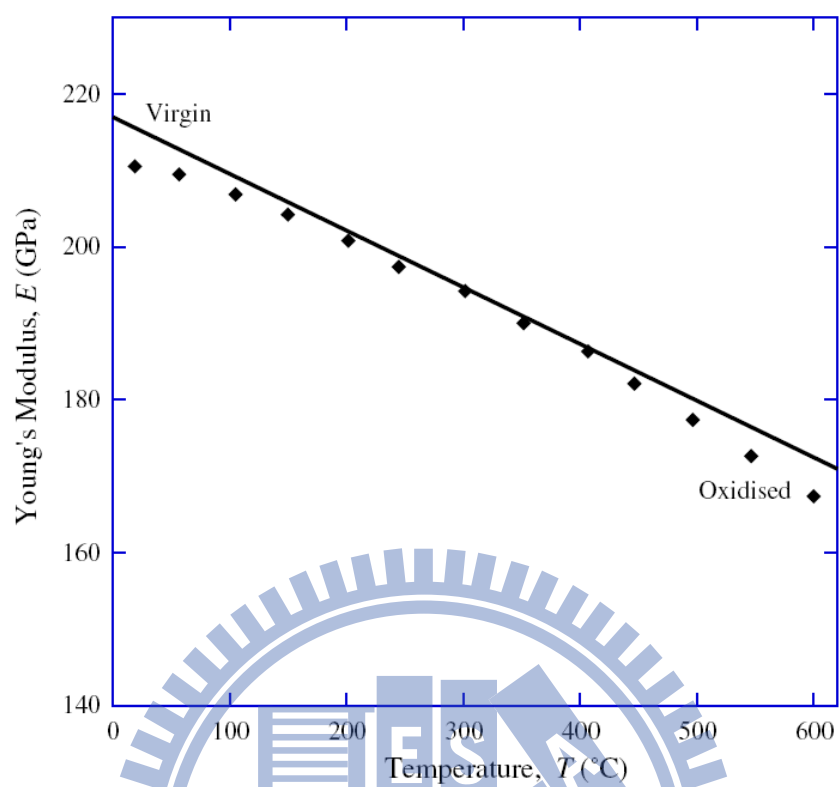


圖 4.7 楊式係數與溫度關係圖

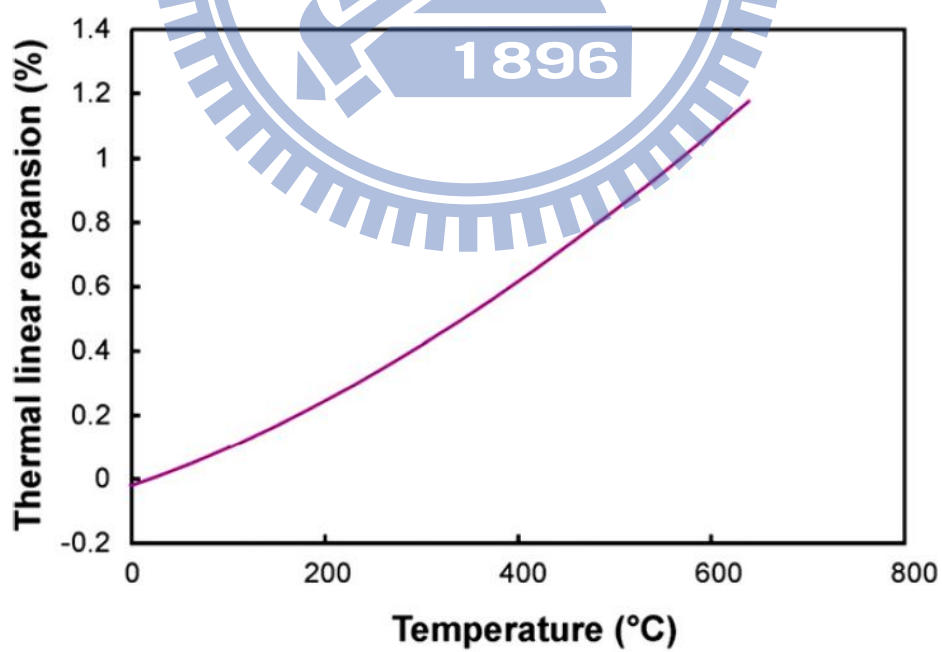


圖 4.8 熱膨脹係數與溫度關係圖

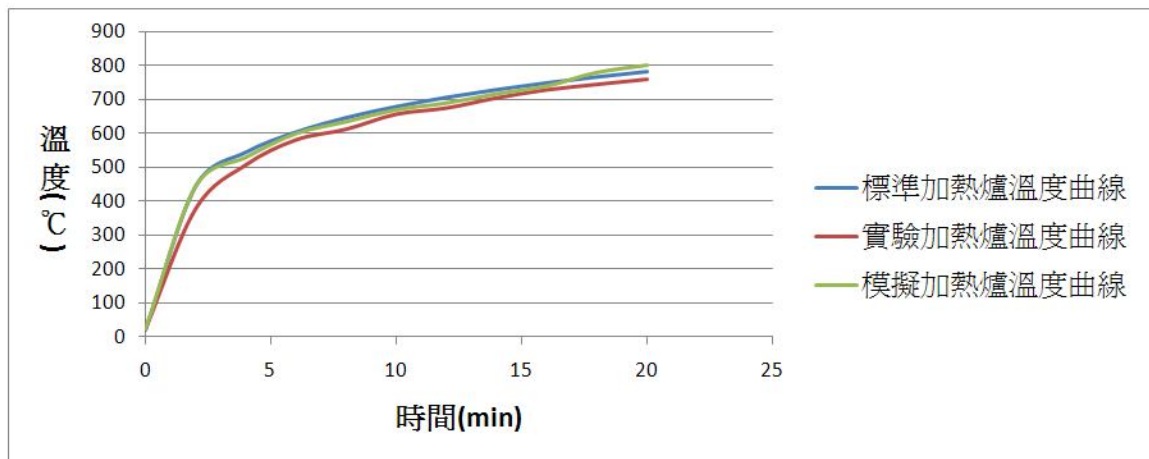


圖 4.9 大型加熱爐升溫曲線

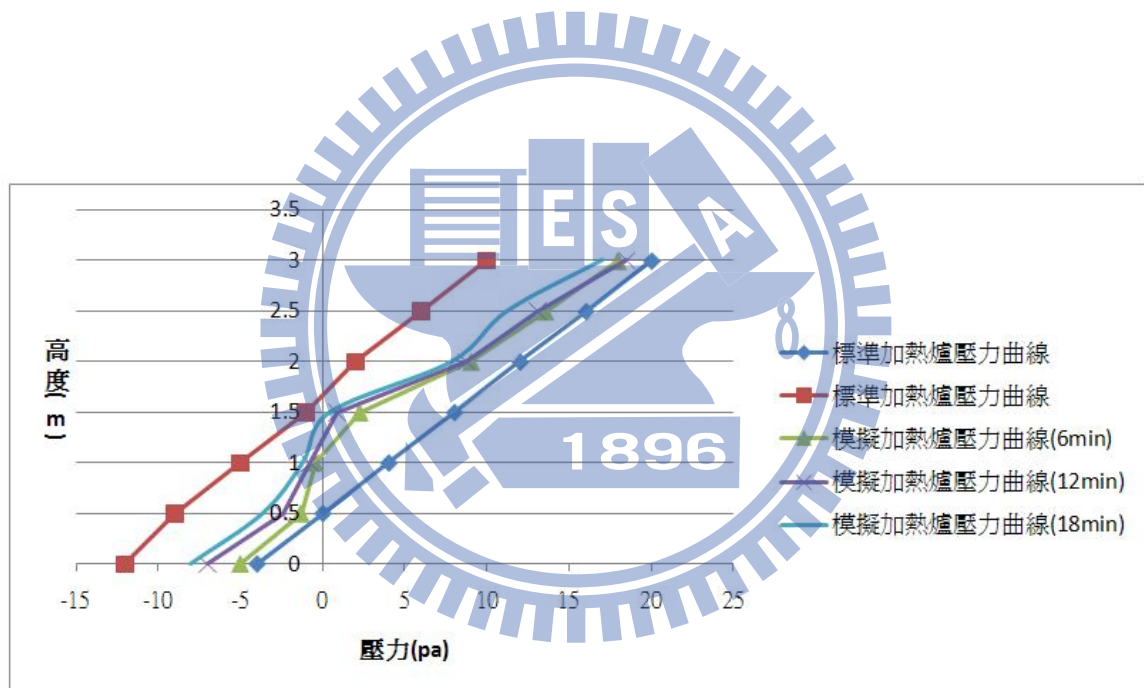


圖 4.10 大型加熱爐壓力曲線

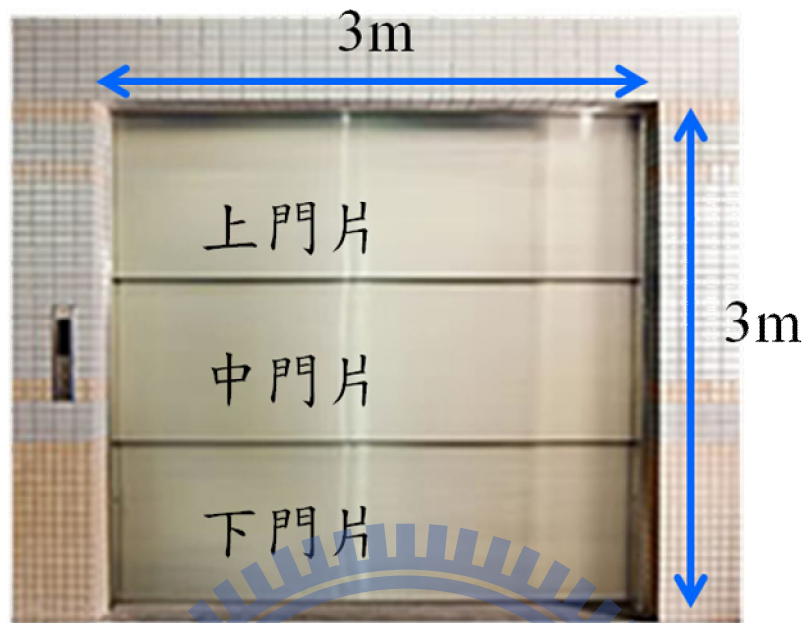


圖 4.11 大型加熱爐捲門外觀示意圖

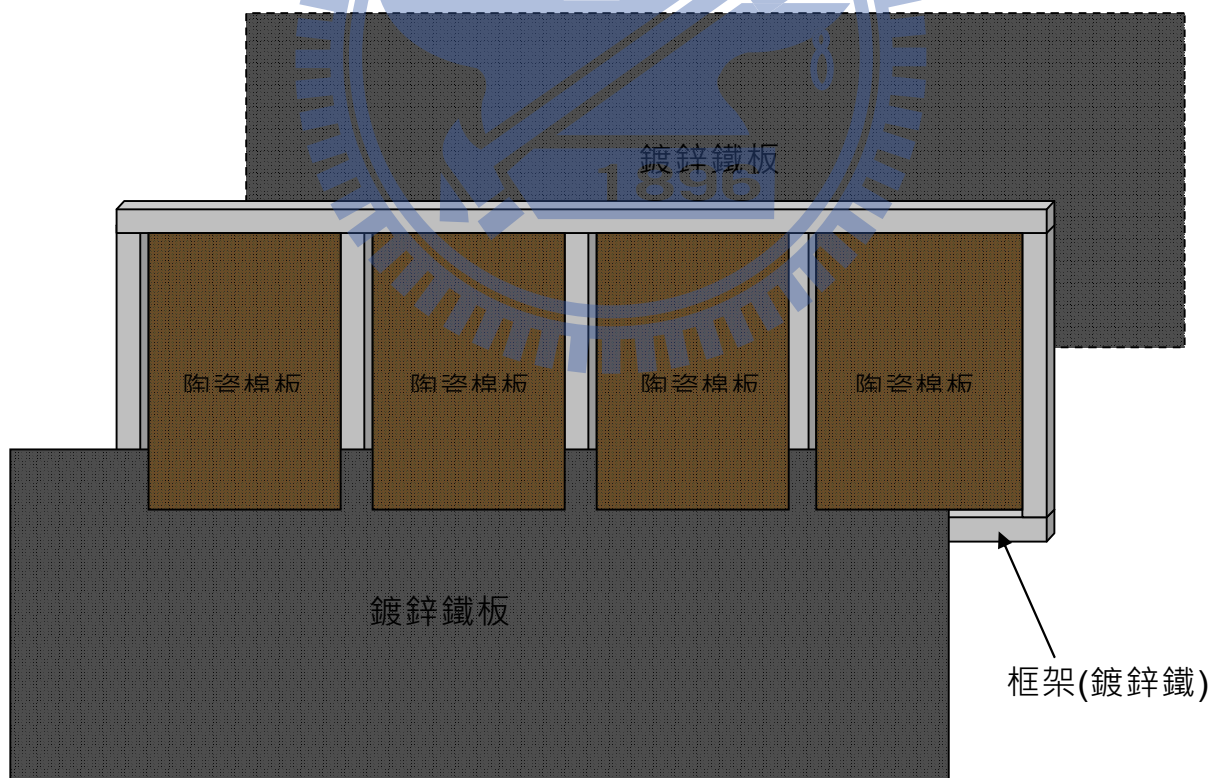


圖 4.12 門片組合示意圖

變更排列方式

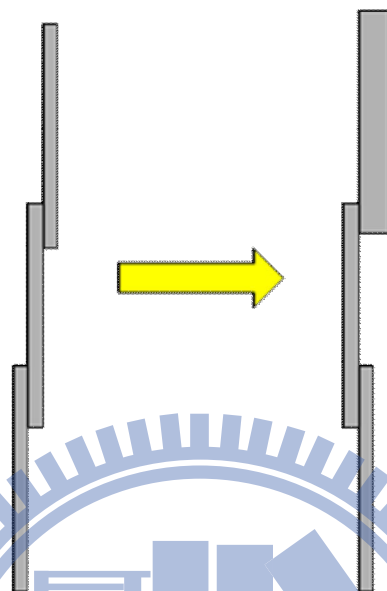


圖 4.13 快速捲門排列方式

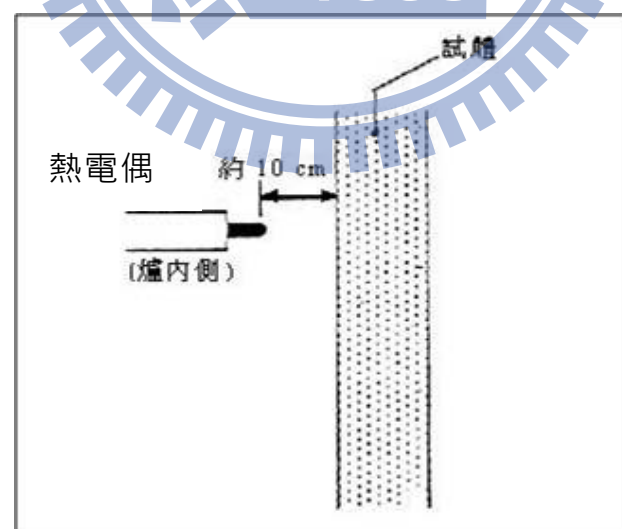


圖 4.14 熱電偶位置示意圖

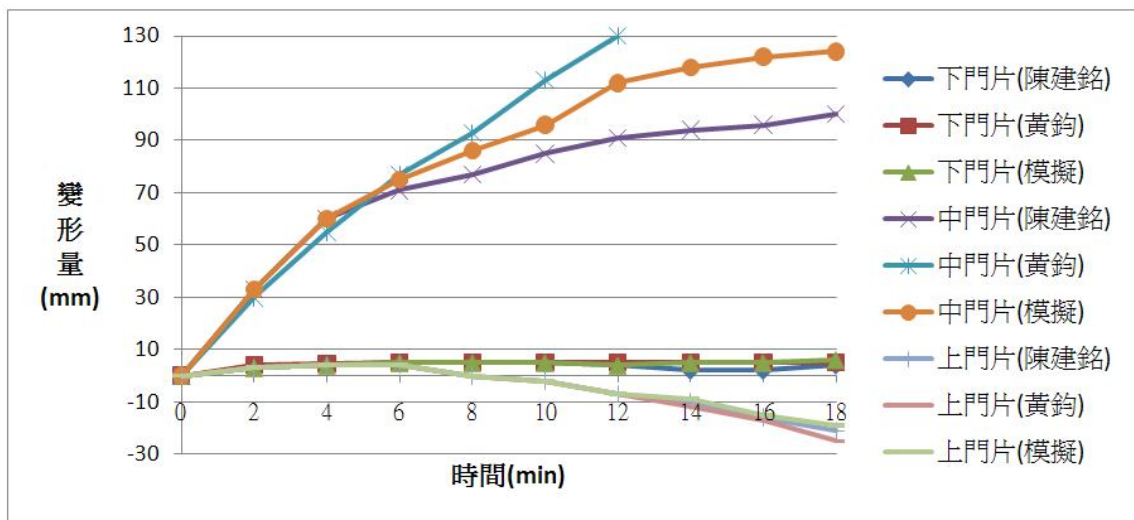


圖 4.15 加熱爐變形量結果圖



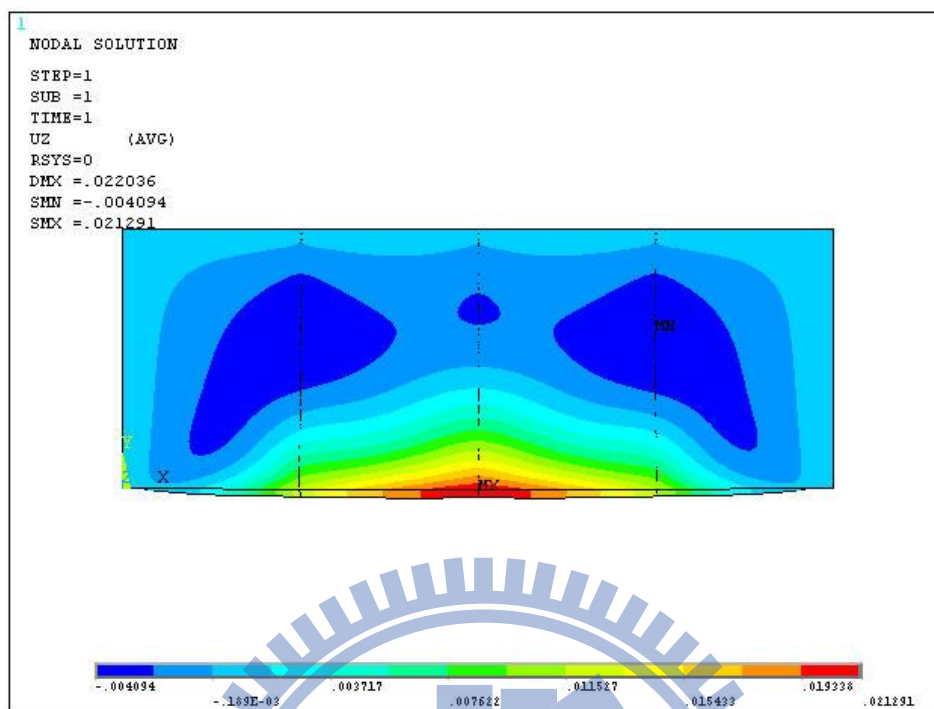


圖 4.16 黃鈞模擬之上門片變形量結果圖(4min)

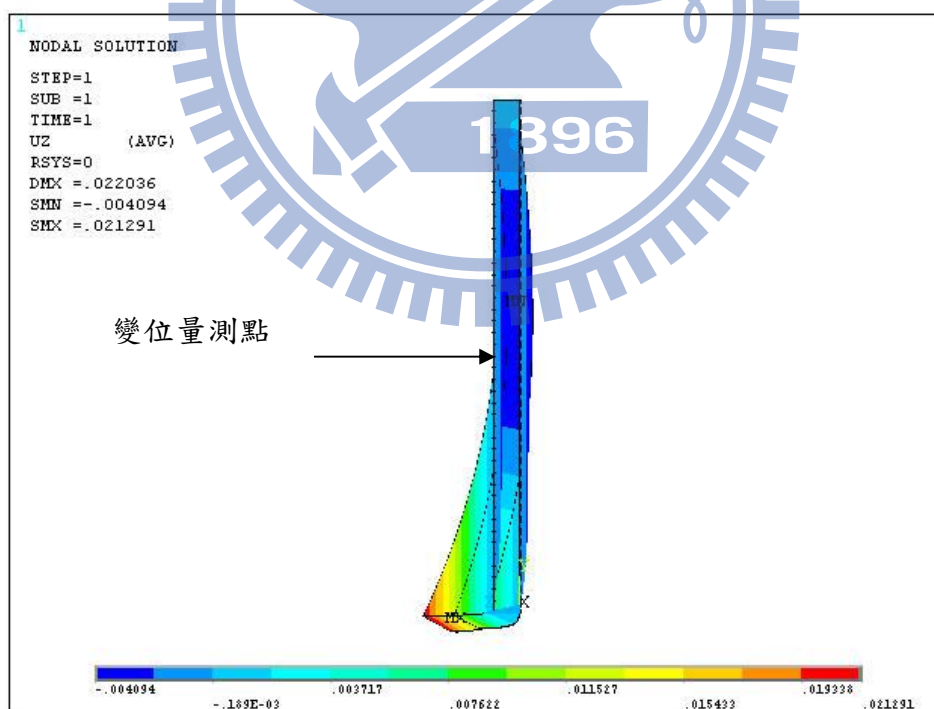


圖 4.17 黃鈞模擬之上門片變形量結果側視圖(4min)

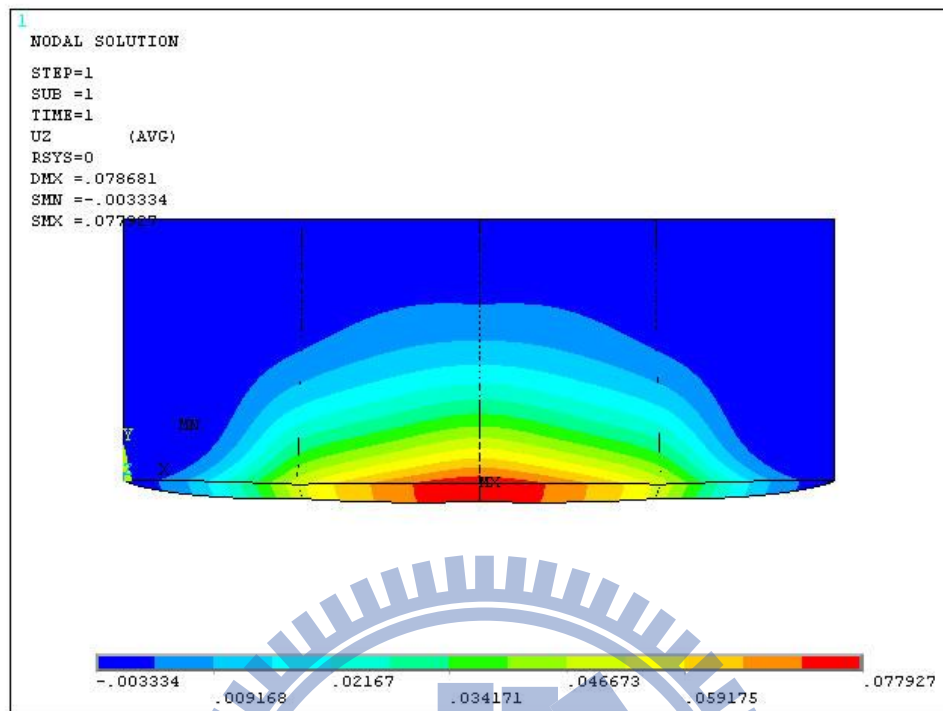


圖 4.18 黃鈞模擬之上門片變形量結果圖(16min)

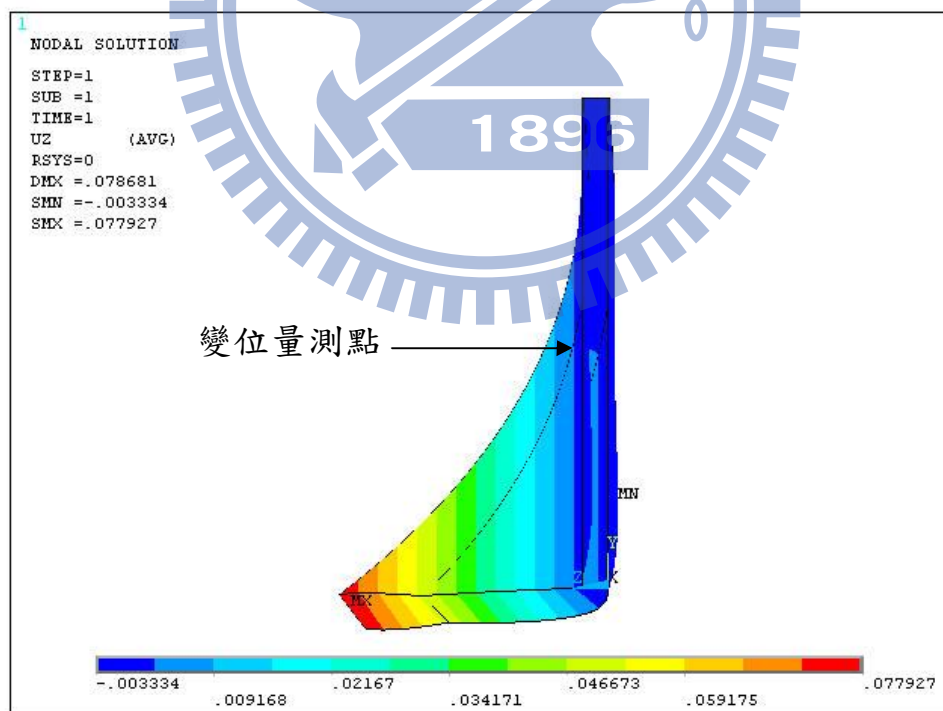


圖 4.19 黃鈞模擬之上門片變形量結果側視圖(16min)

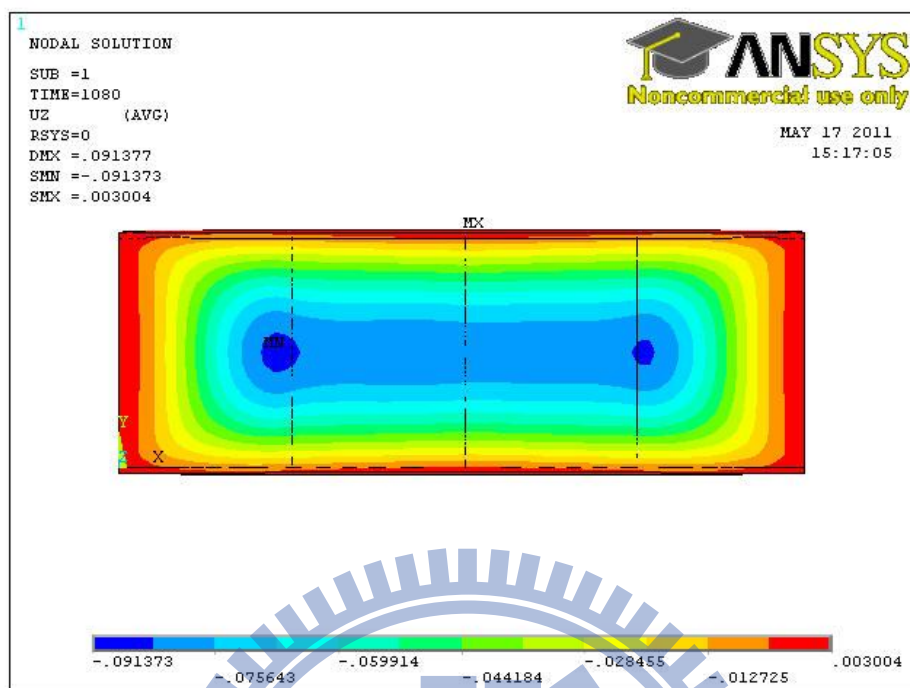


圖 4.20 黃鈞模擬之中門片變形量結果(12min)

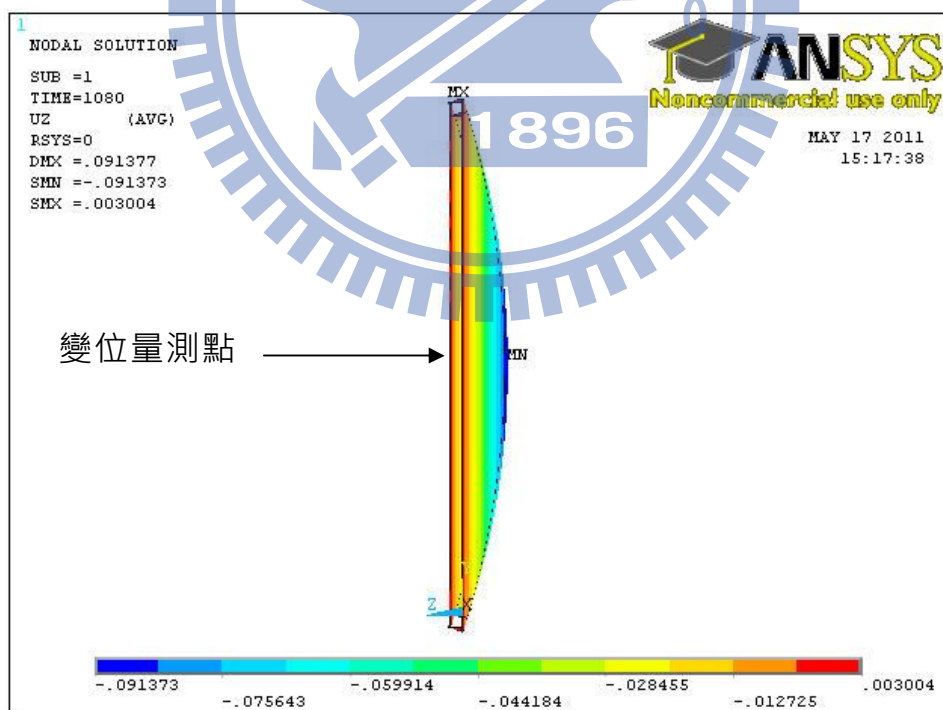


圖 4.21 黃鈞模擬之中門片變形量結果側視圖(12min)

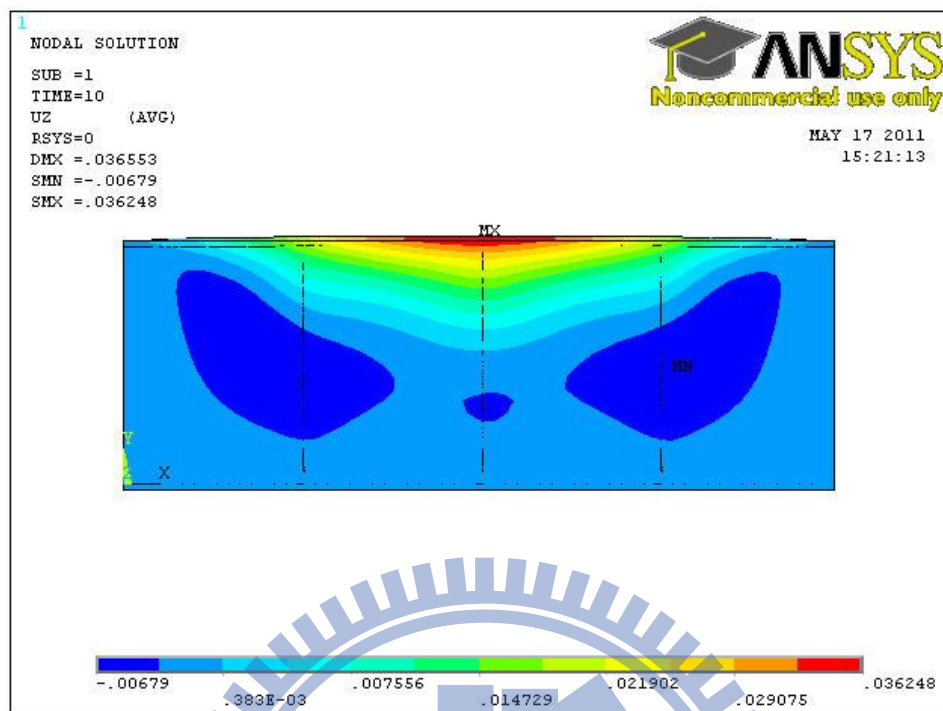


圖 4.22 黃鈞模擬之下門片變形量結果圖(18min)

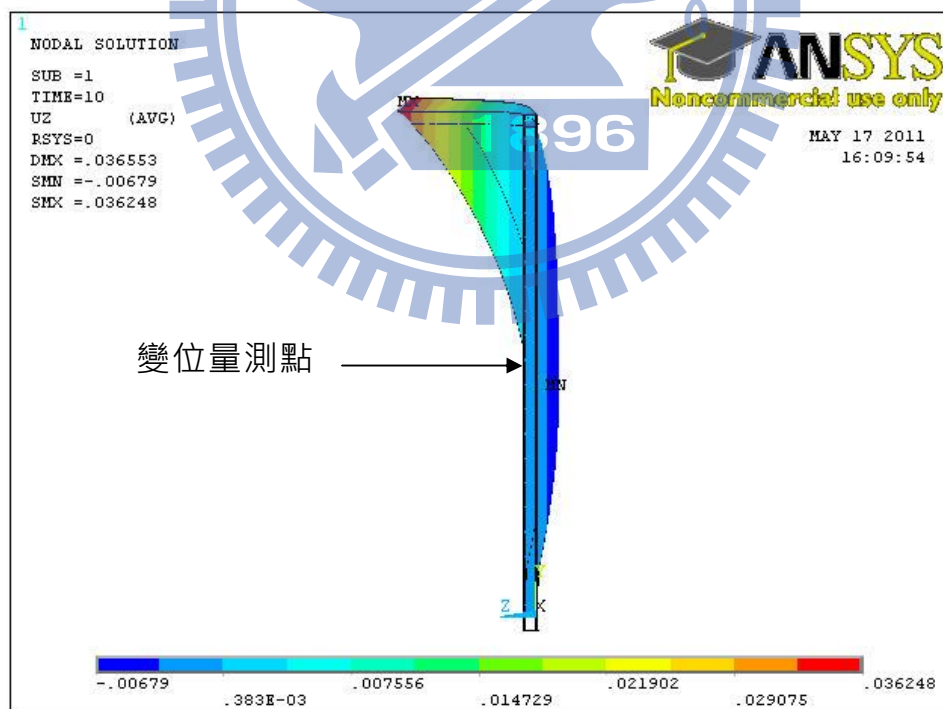


圖 4.23 黃鈞模擬之下門片變形量結果側視圖(18min)

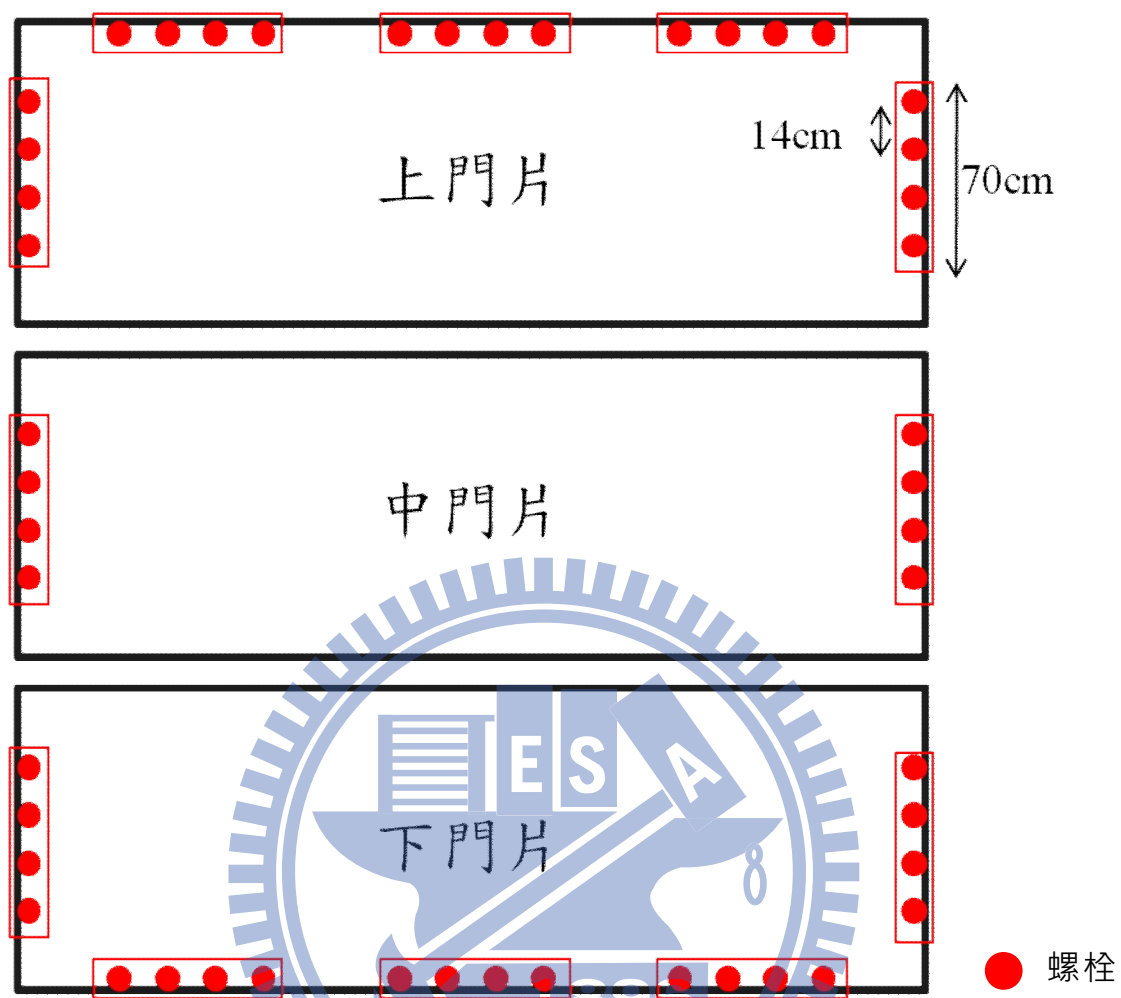


圖 4.24 加熱爐捲門拘束條件示意圖

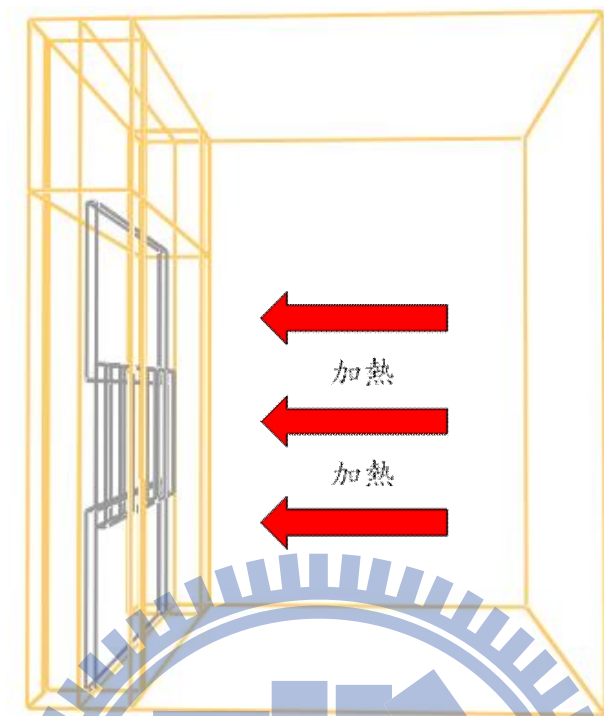


圖 4.25 大型加熱爐模型側視圖

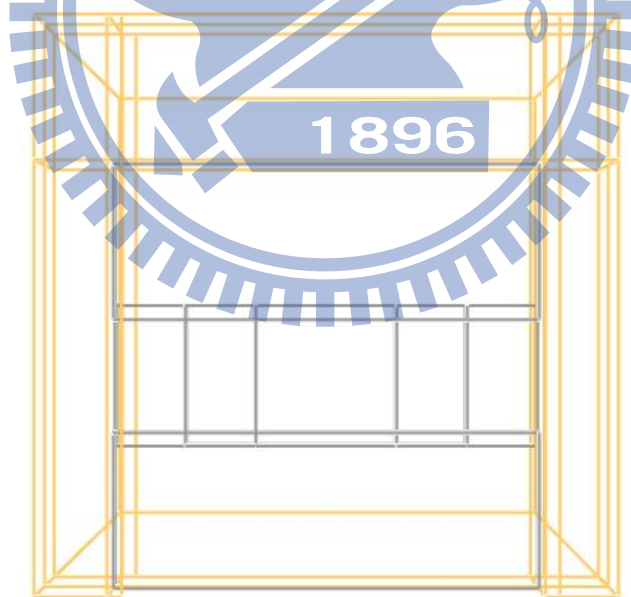
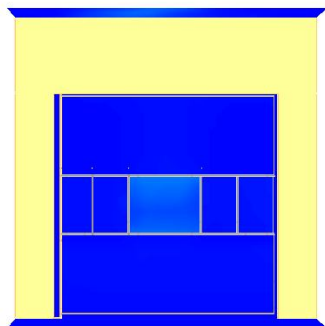


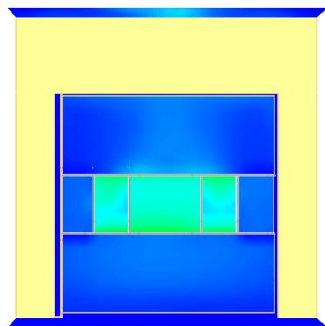
圖 4.26 大型加熱爐模型立面圖

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



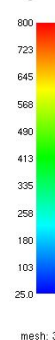
Frame: 84
Time: 201.6

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 333
Time: 799.2

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 167
Time: 400.0

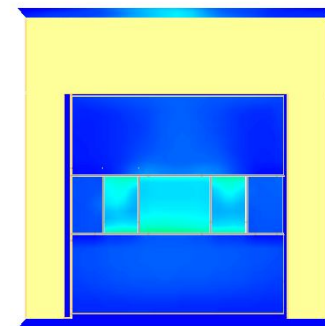
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 417
Time: 1000.8

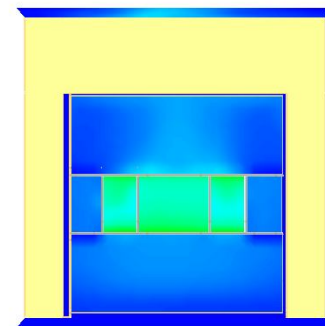


Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 500
Time: 1200.0

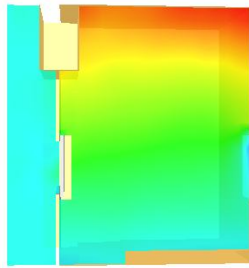
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 500
Time: 1200.0

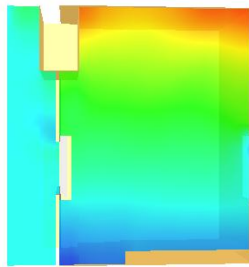
圖 4.27 加熱爐捲門溫度分佈圖

Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 167
Time: 200.4

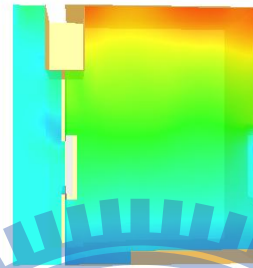
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 667
Time: 800.4

Slice
pres
Pa
30.0
25.9
21.8
17.7
13.6
9.50
5.40
1.30
-2.80
-6.90
-11.0

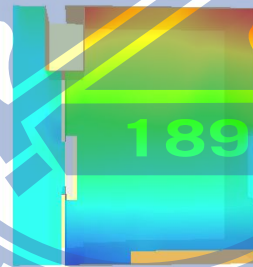
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 3

Frame: 334
Time: 400.0

Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010

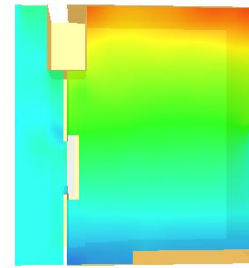


mesh: 3

Frame: 634
Time: 1000.0

Slice
pres
Pa
30.0
25.9
21.8
17.7
13.6
9.50
5.40
1.30
-2.80
-6.90
-11.0

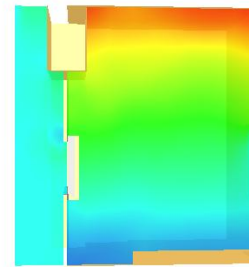
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 3

Frame: 500
Time: 600.0

Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 3

Frame: 1000
Time: 1200.0

Slice
pres
Pa
30.0
25.9
21.8
17.7
13.6
9.50
5.40
1.30
-2.80
-6.90
-11.0

mesh: 3

Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



mesh: 3

圖 4.28 加熱爐捲門壓力分佈圖

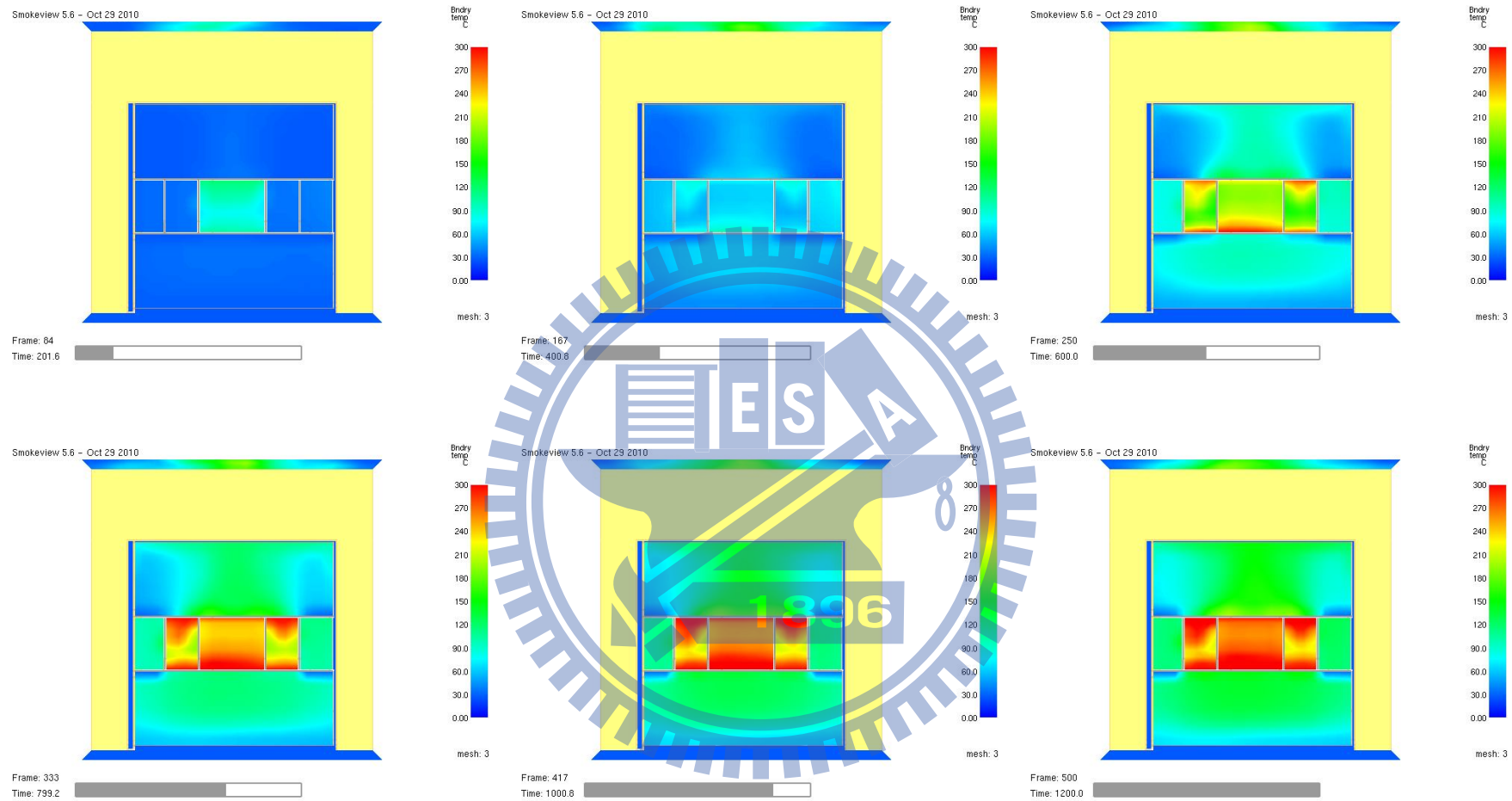


圖 4.29 試體變形導致背火面加熱情形

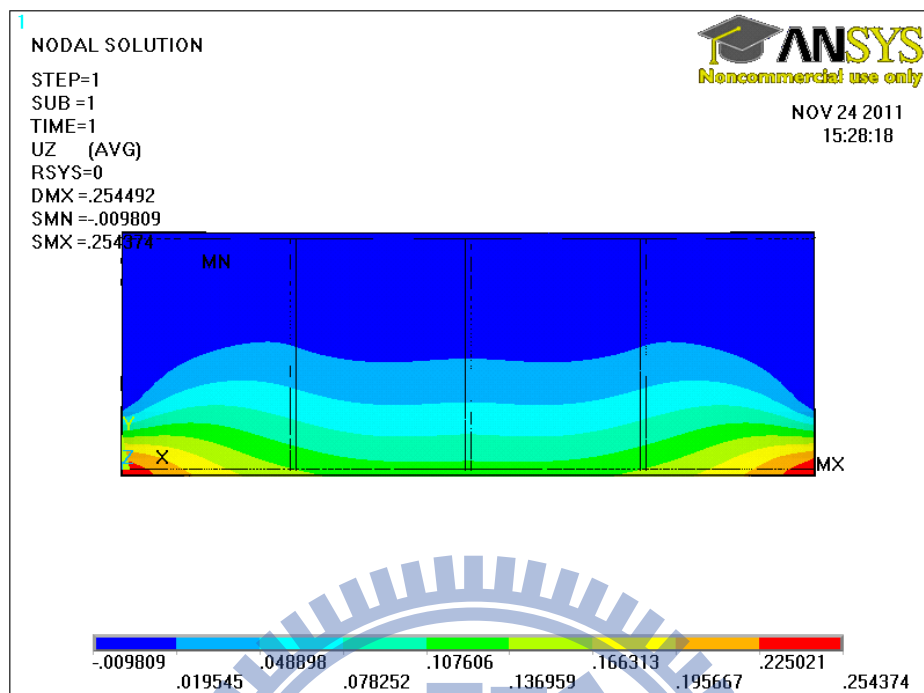


圖 4.30 上門片變形量模擬結果圖(16min)

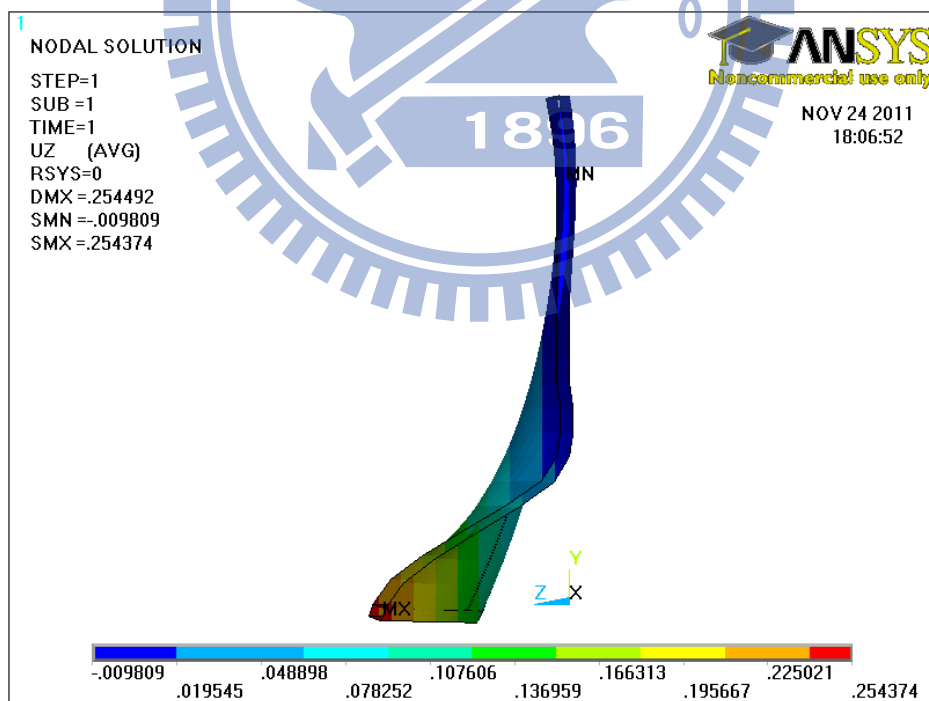


圖 4.31 上門片變形量模擬結果側視圖(16min)

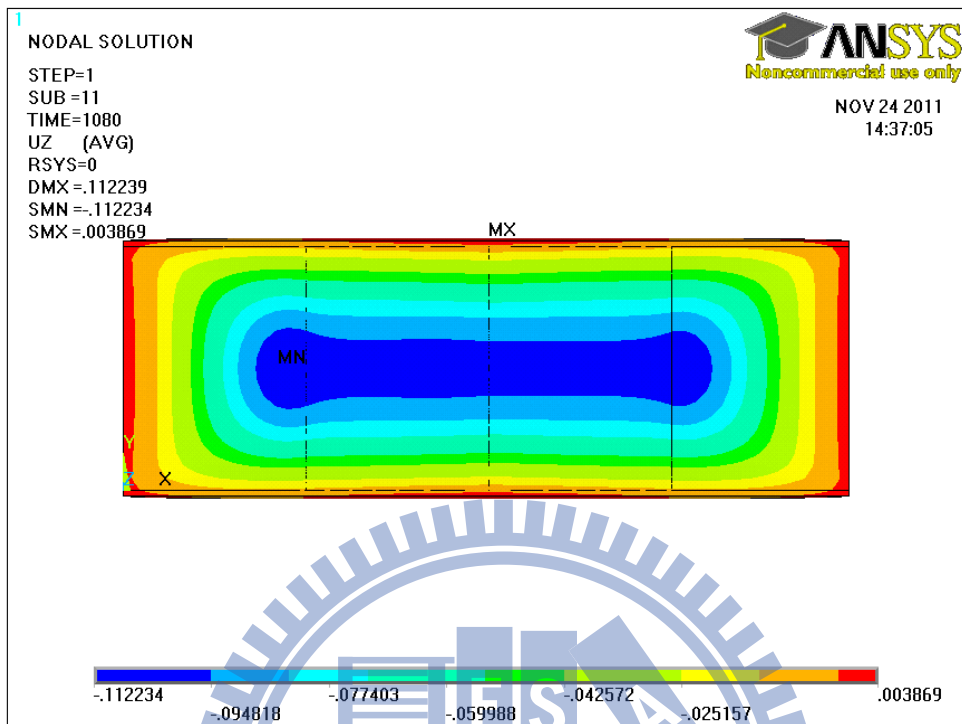


圖 4.32 中門片變形量模擬結果圖(12min)

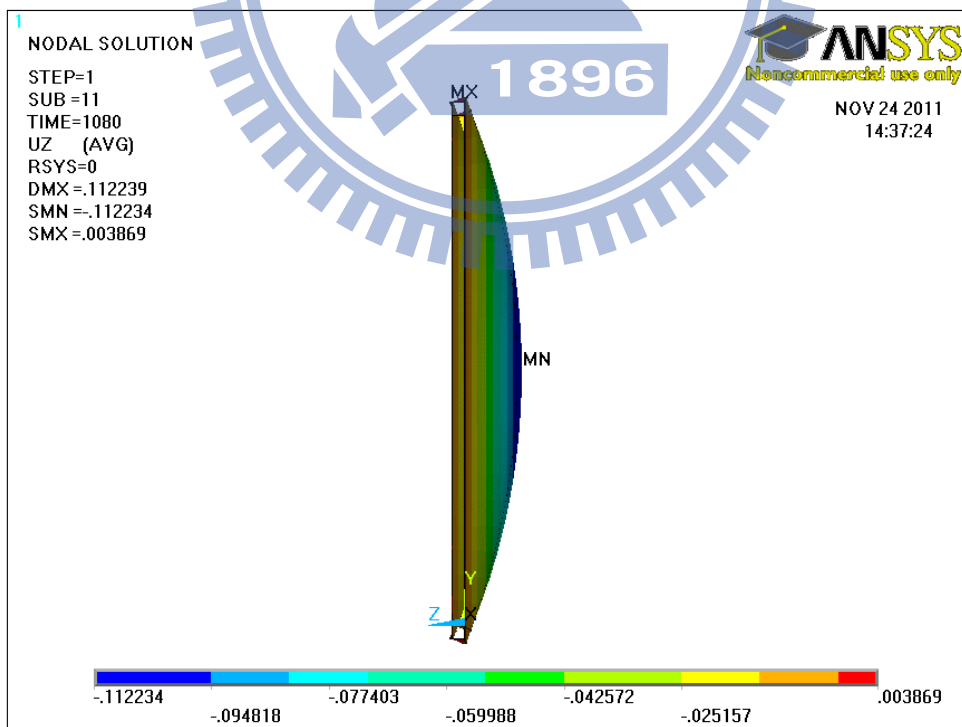


圖 4.33 中門片變形量模擬結果側視圖(12min)

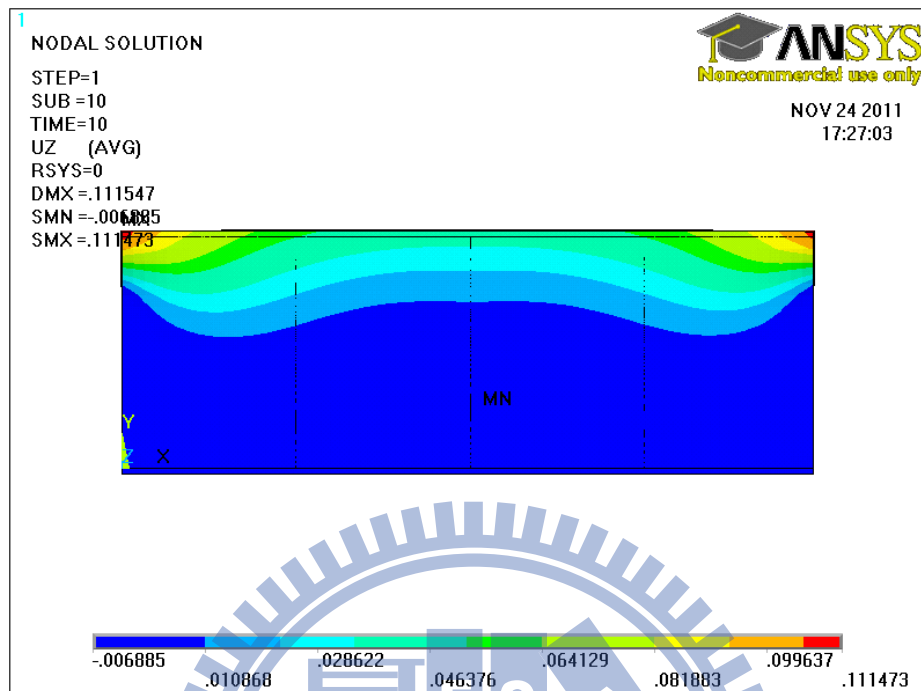


圖 4.34 下門片變形量模擬結果圖(18min)

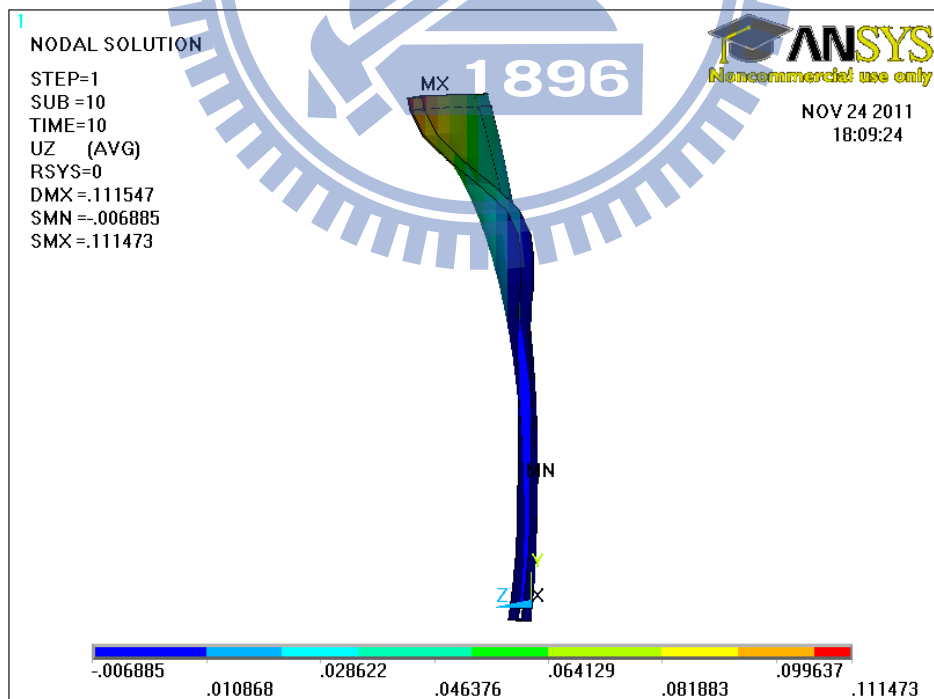


圖 4.35 下門片變形量模擬結果側視圖(18min)

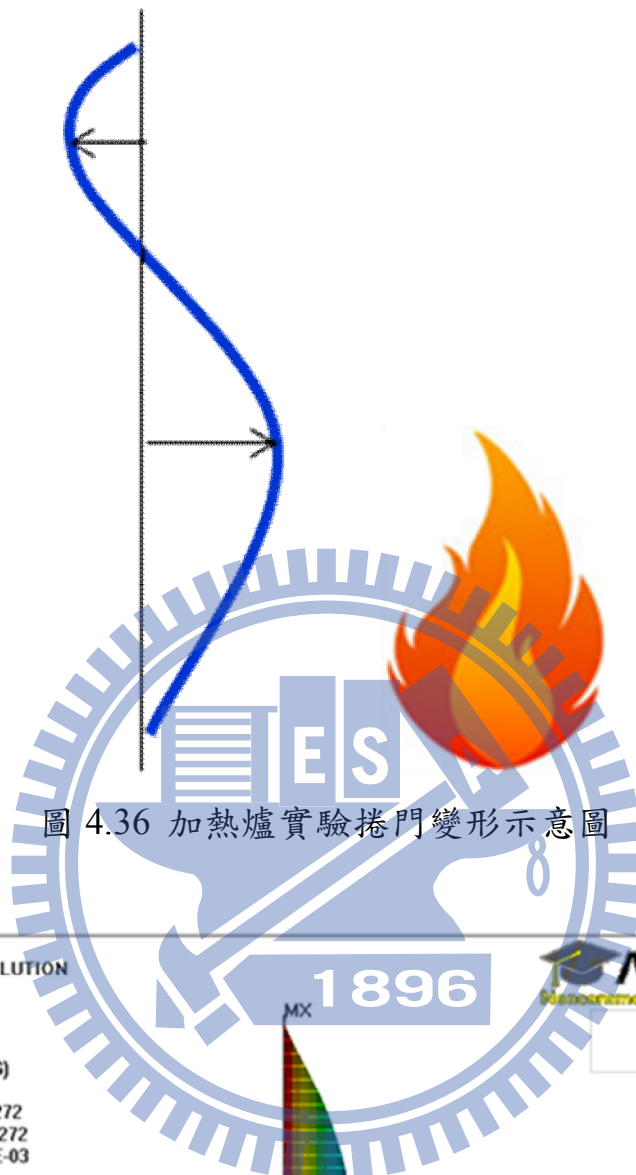


圖 4.36 加熱爐實驗捲門變形示意圖

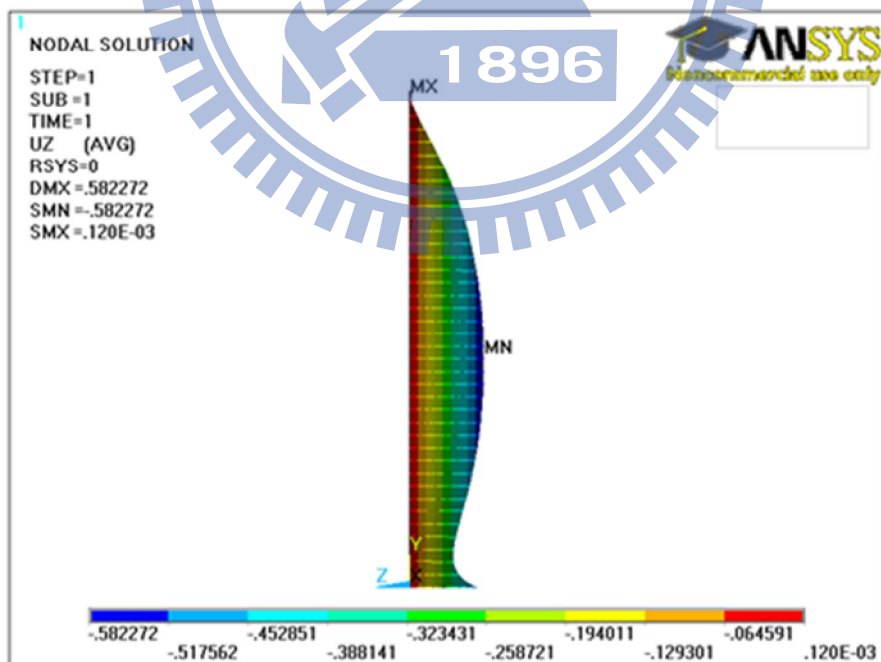


圖 4.37 黃鈞模擬之捲門變形示意圖(捲門全關)



圖 4.38 民宅火災捲門變形圖

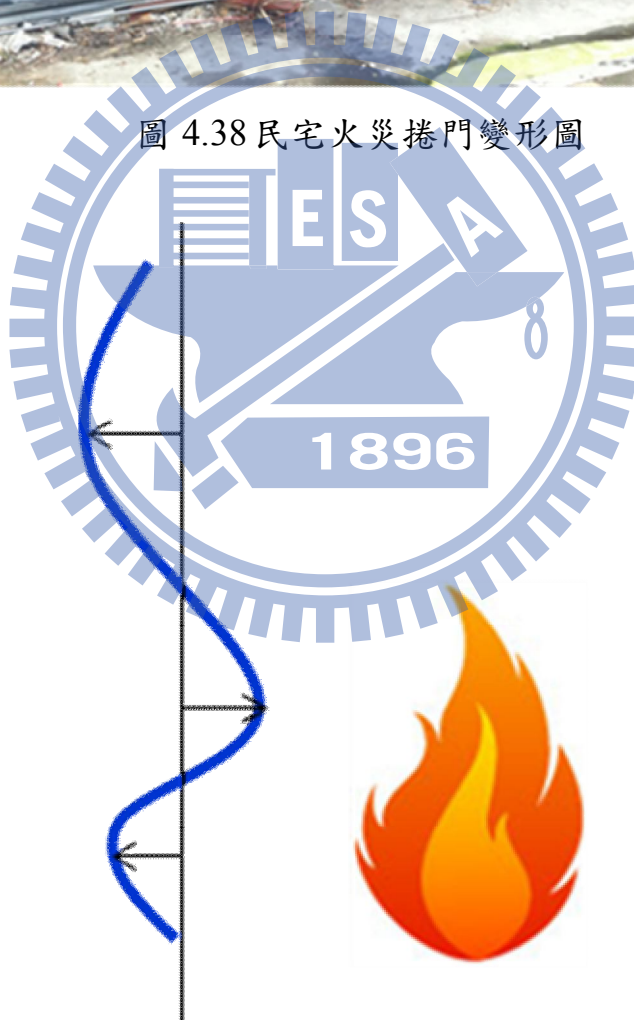


圖 4.39 民宅火災捲門變形示意圖

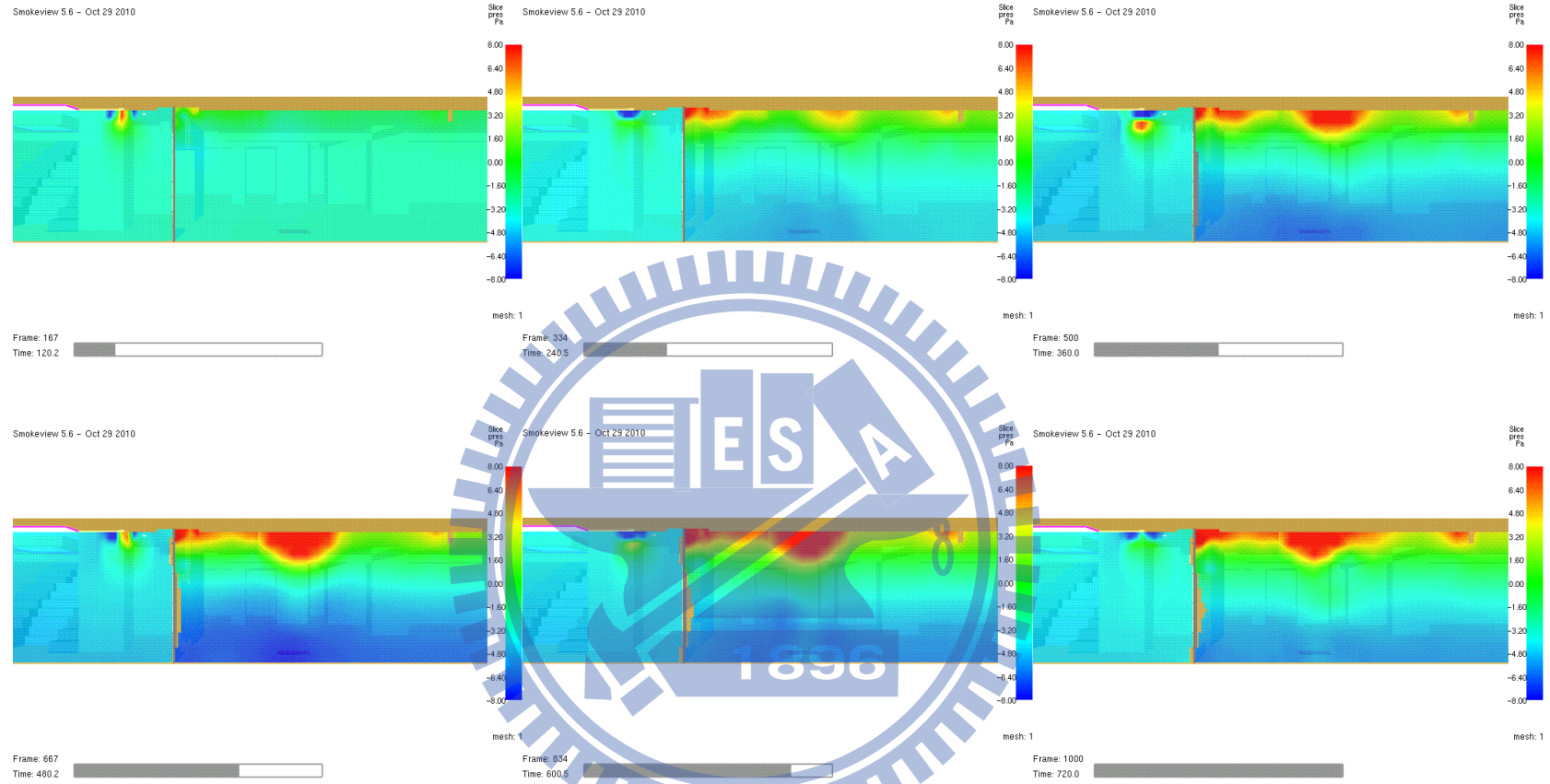


圖 4.41 捲門壓力分佈示意圖(情境一)

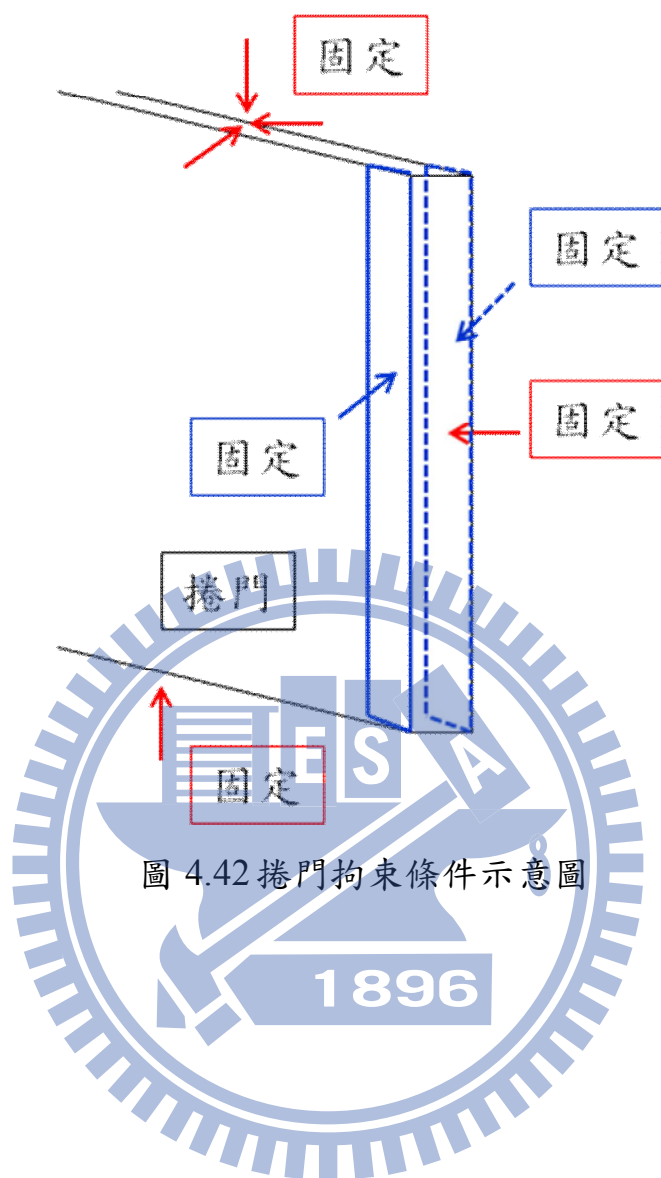


圖 4.42 捲門拘束條件示意圖

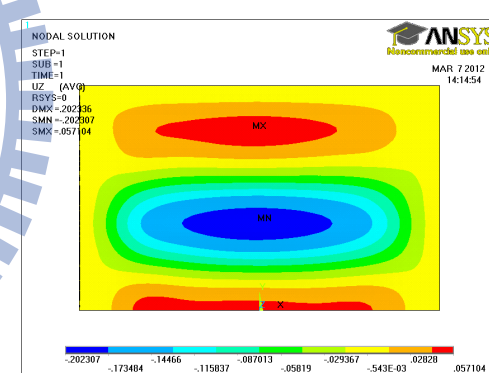
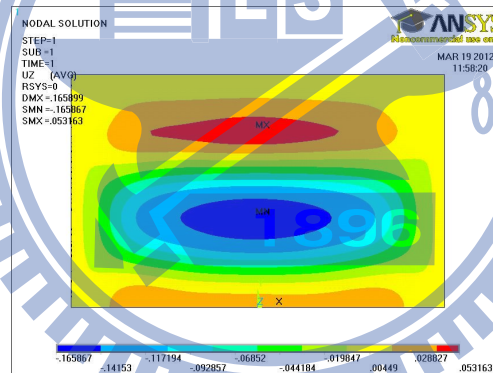
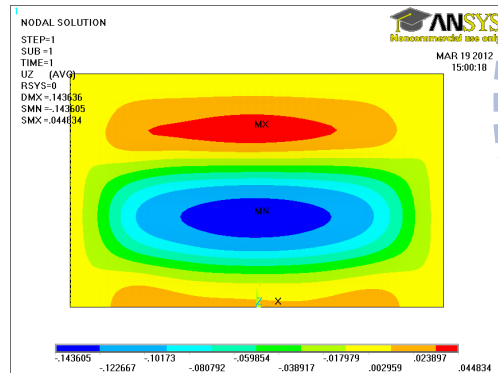
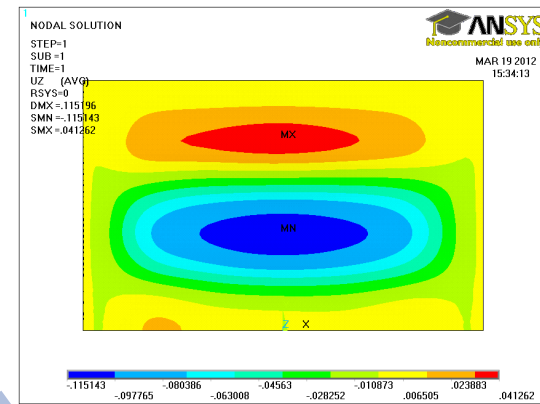
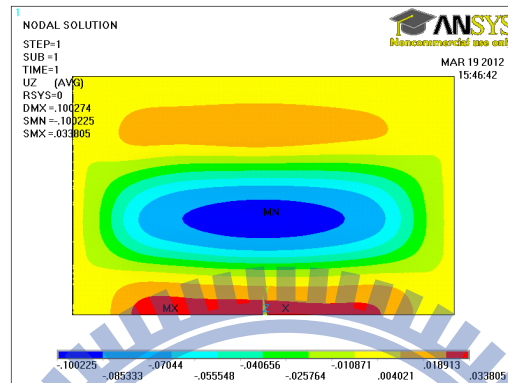
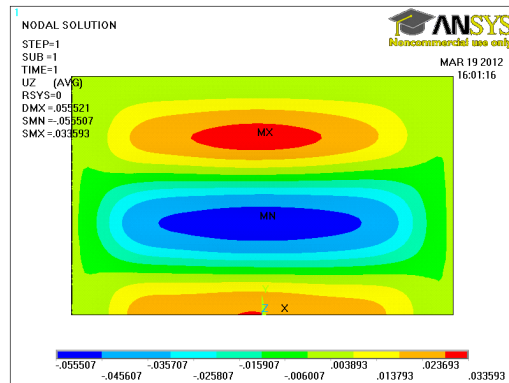


圖 4.43 捲門變形量模擬結果(情境一)

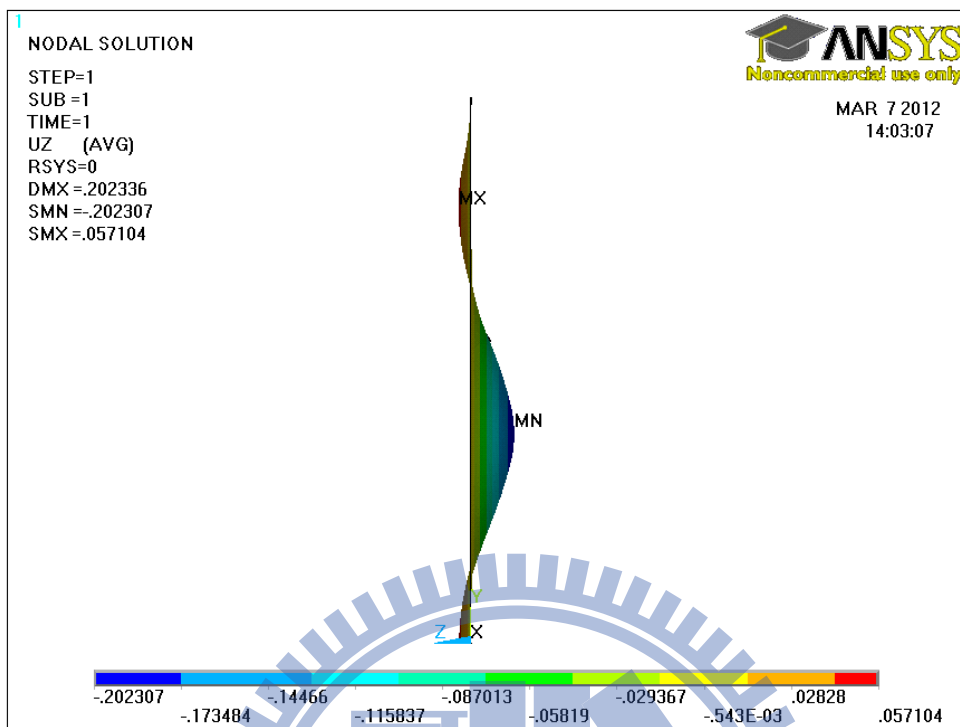


圖 4.44 情境一捲門變形量側視圖(12min)

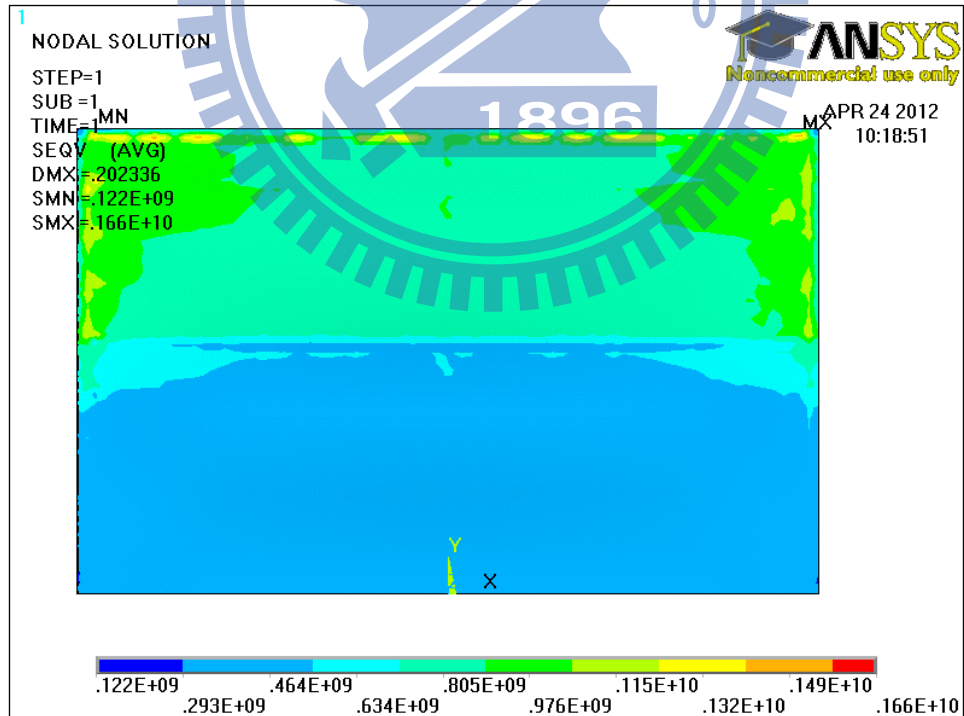


圖 4.45 捲門熱應力分布(情境一)

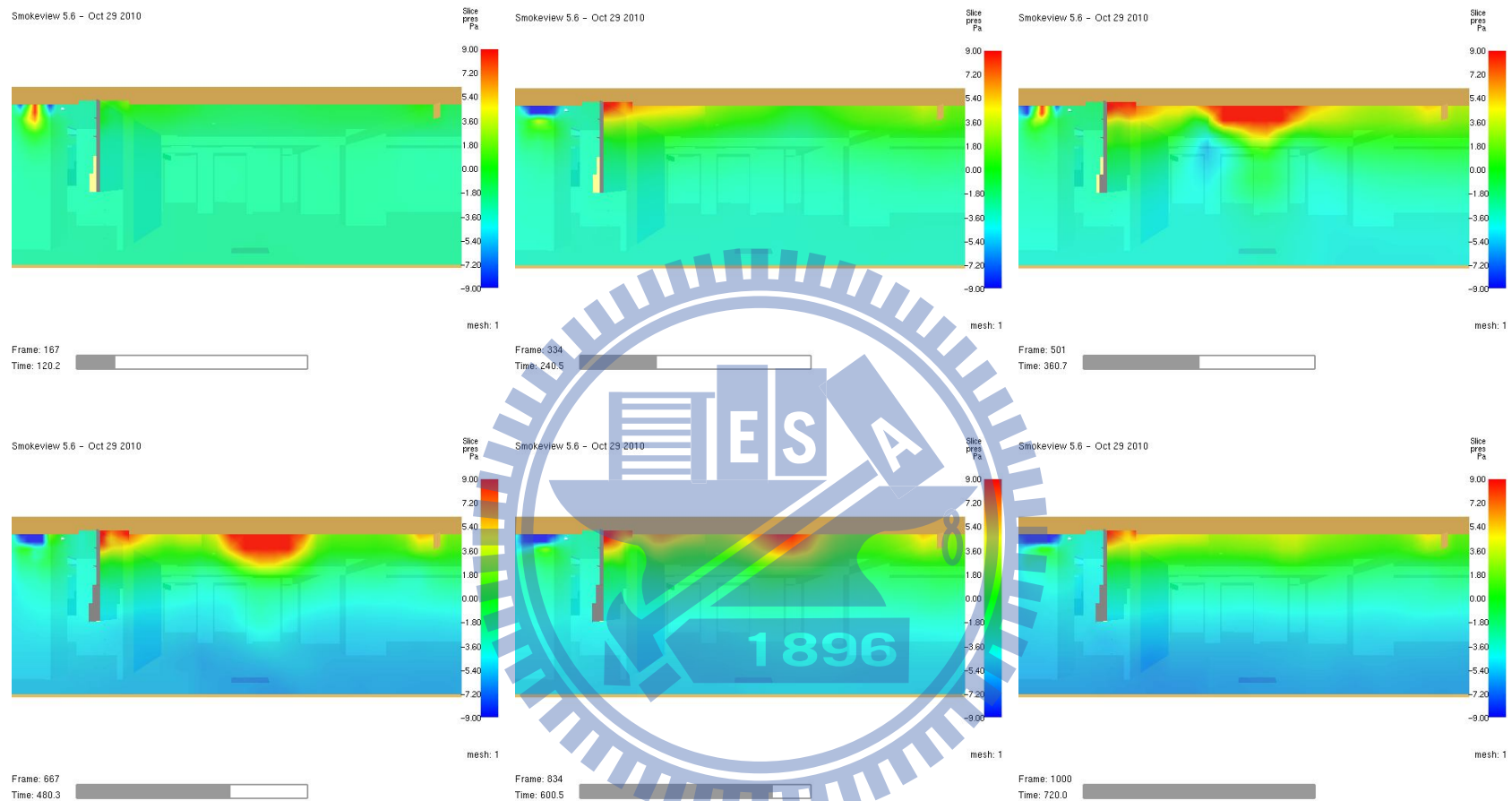


圖 4.47 捲門壓力分佈(情境二)

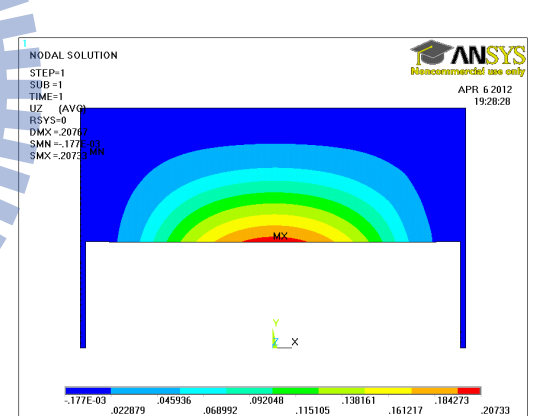
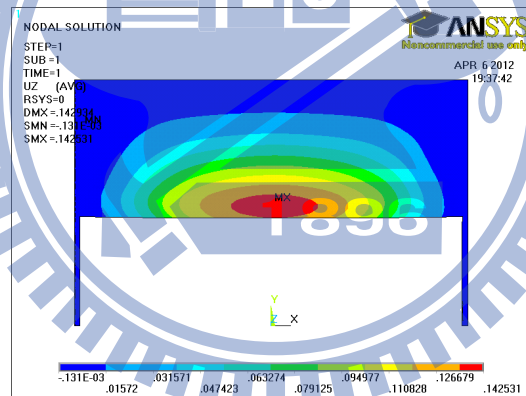
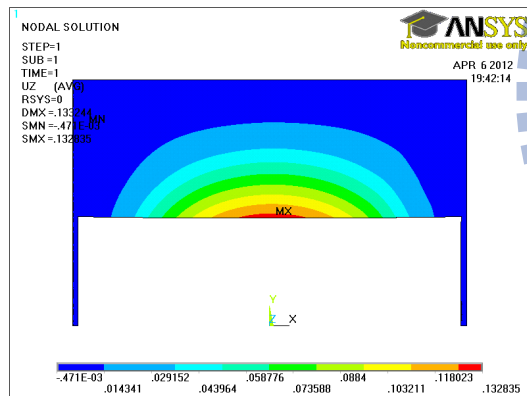
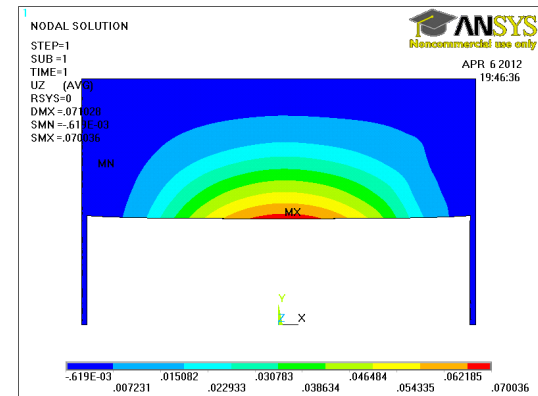
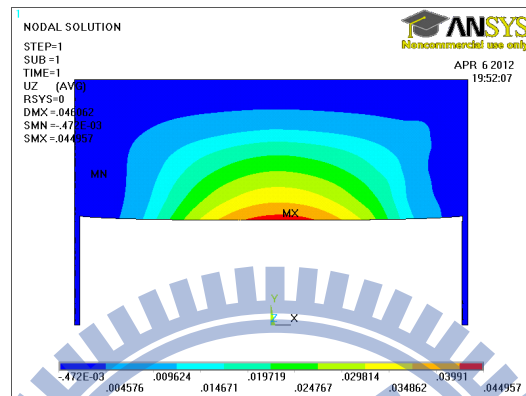
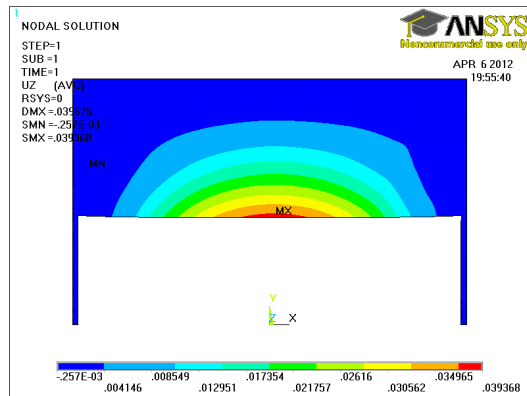


圖 4.48 捲門變形量模擬結果(情境二)

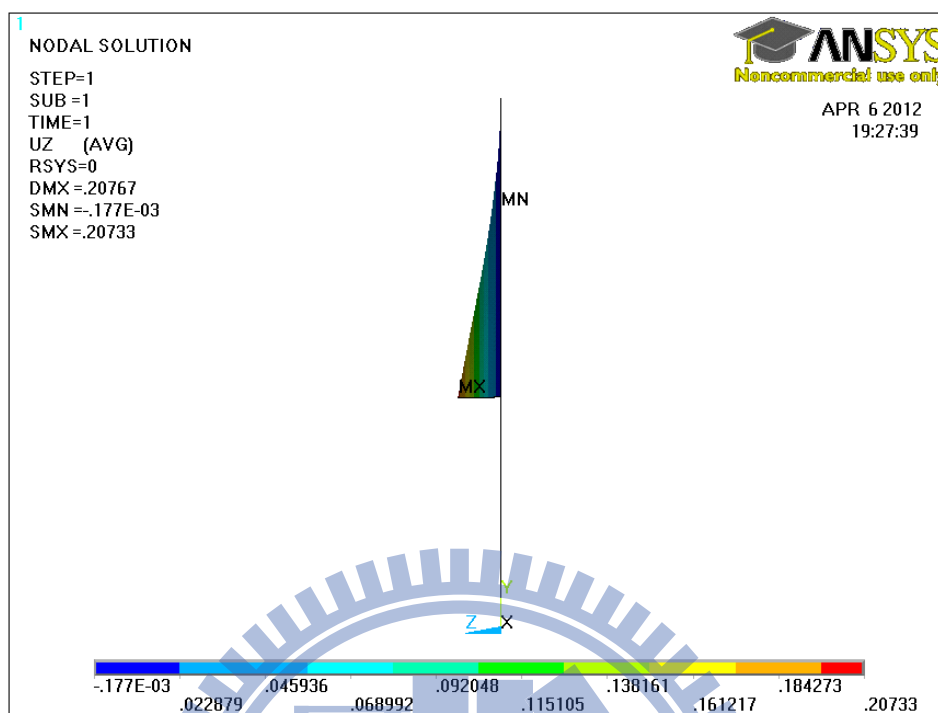


圖 4.49 情境二捲門變形量側視圖(12min)

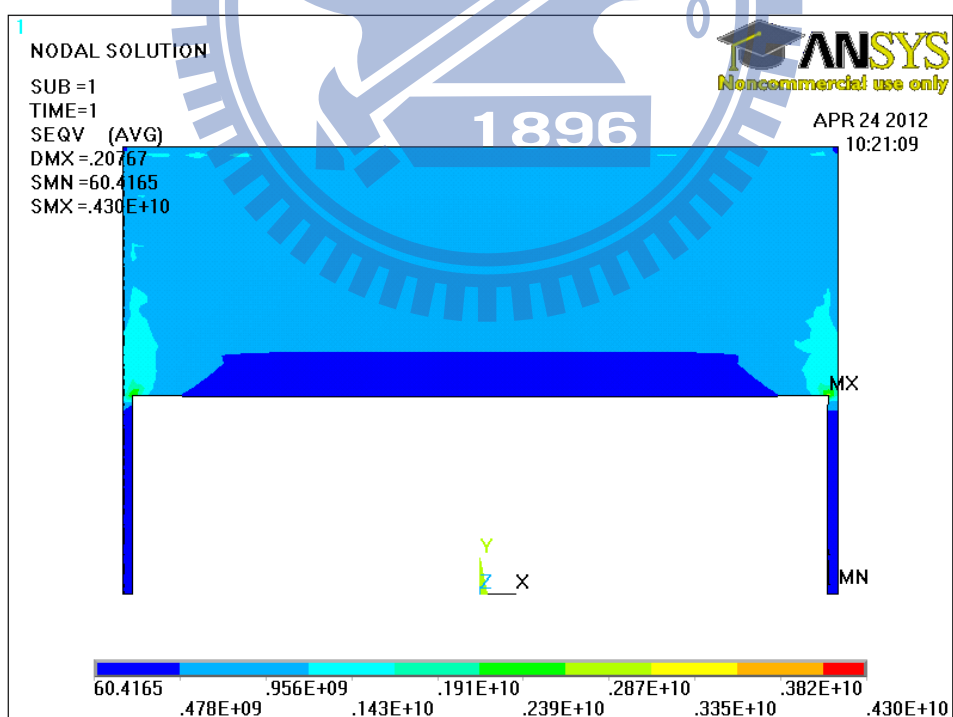


圖 4.50 捲門熱應力分布圖(12min)

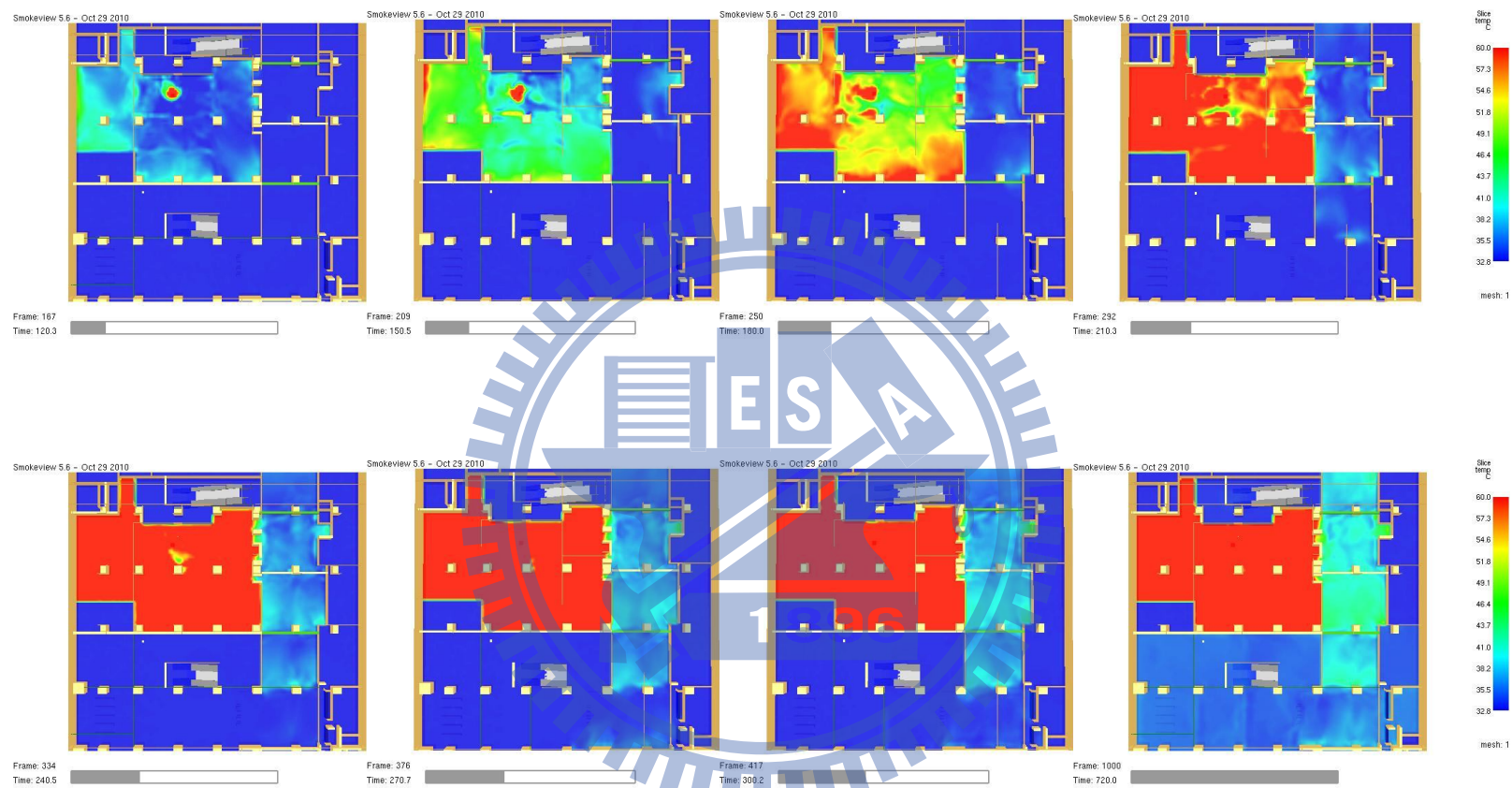


圖 4.51 情境一地下三層溫度分佈圖

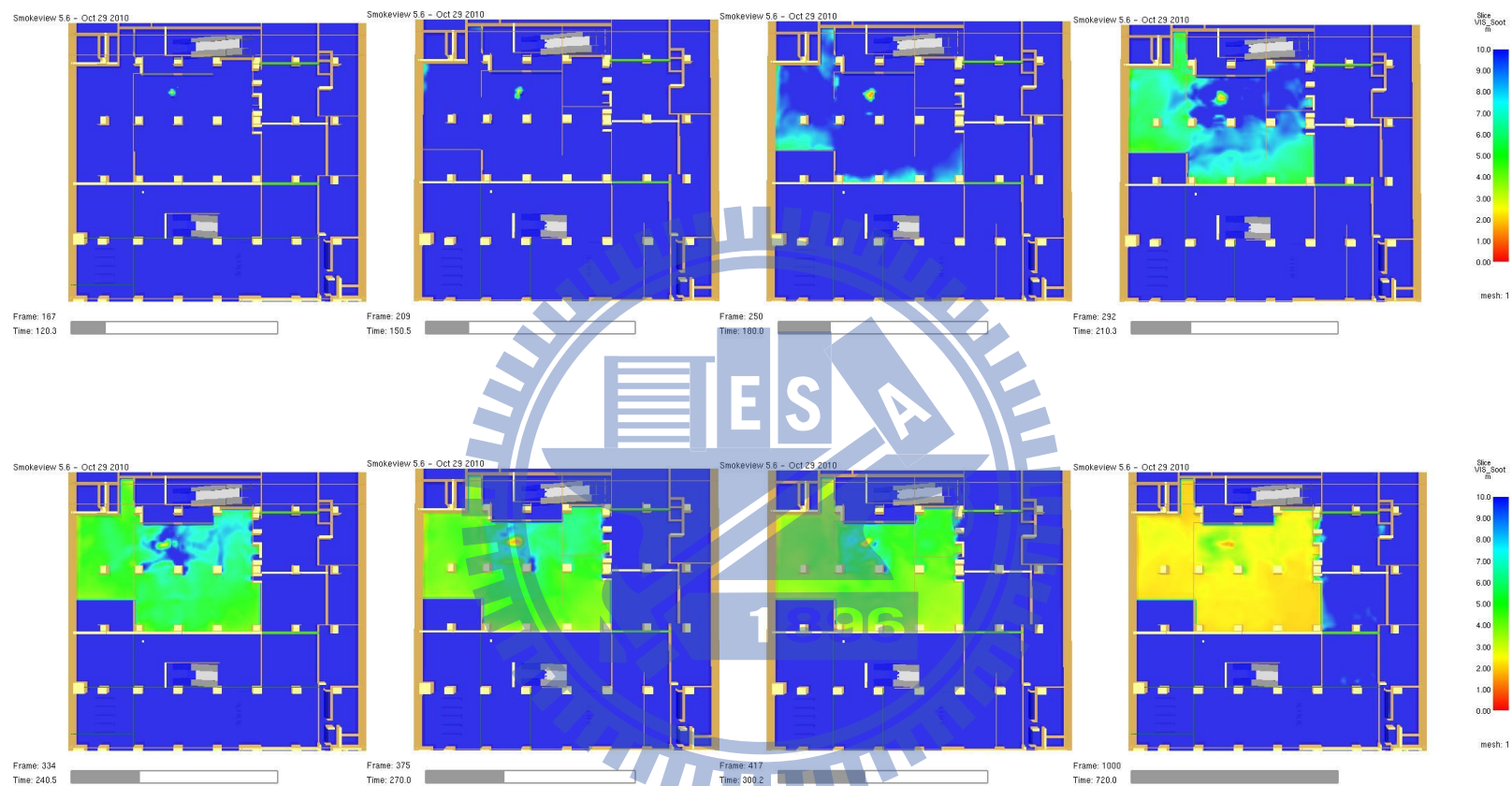


圖 4.52 情境一地下三層能見度分佈圖

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

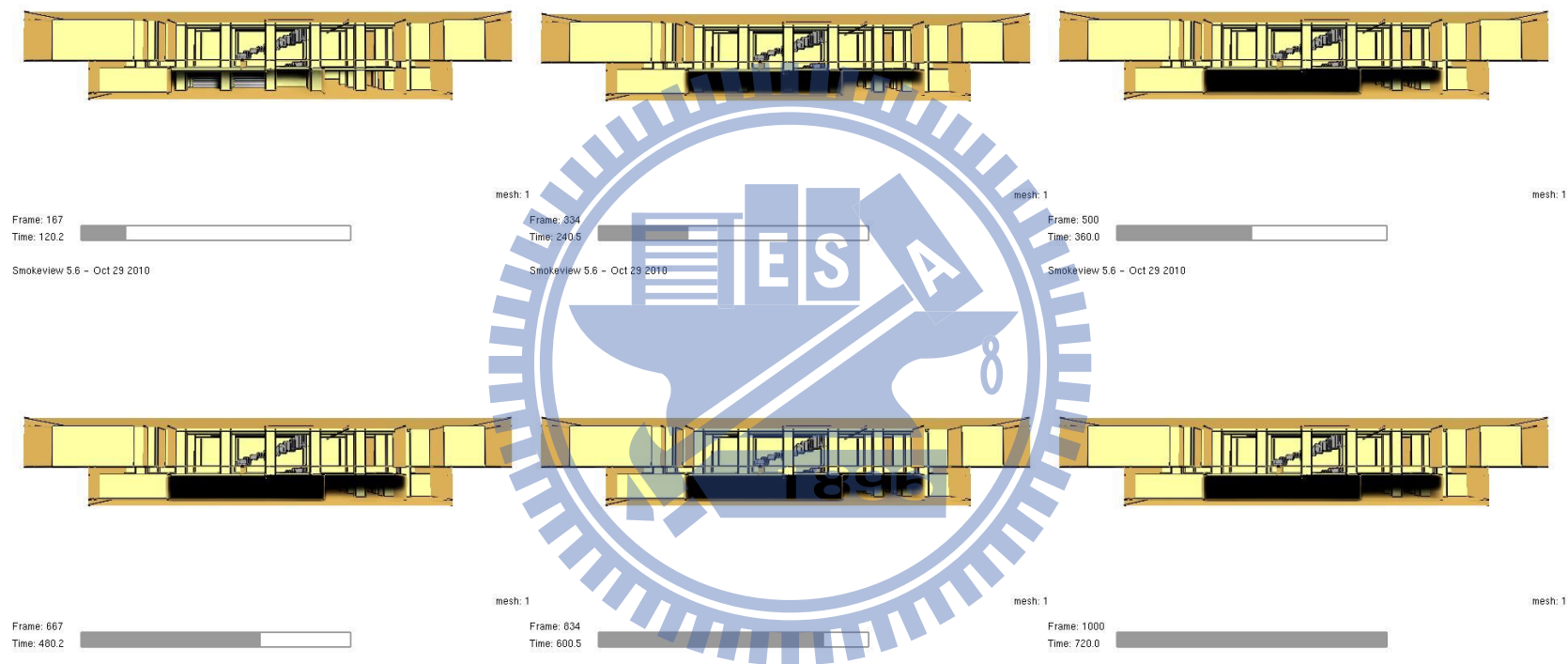


圖 4.53 情境一煙層分佈圖

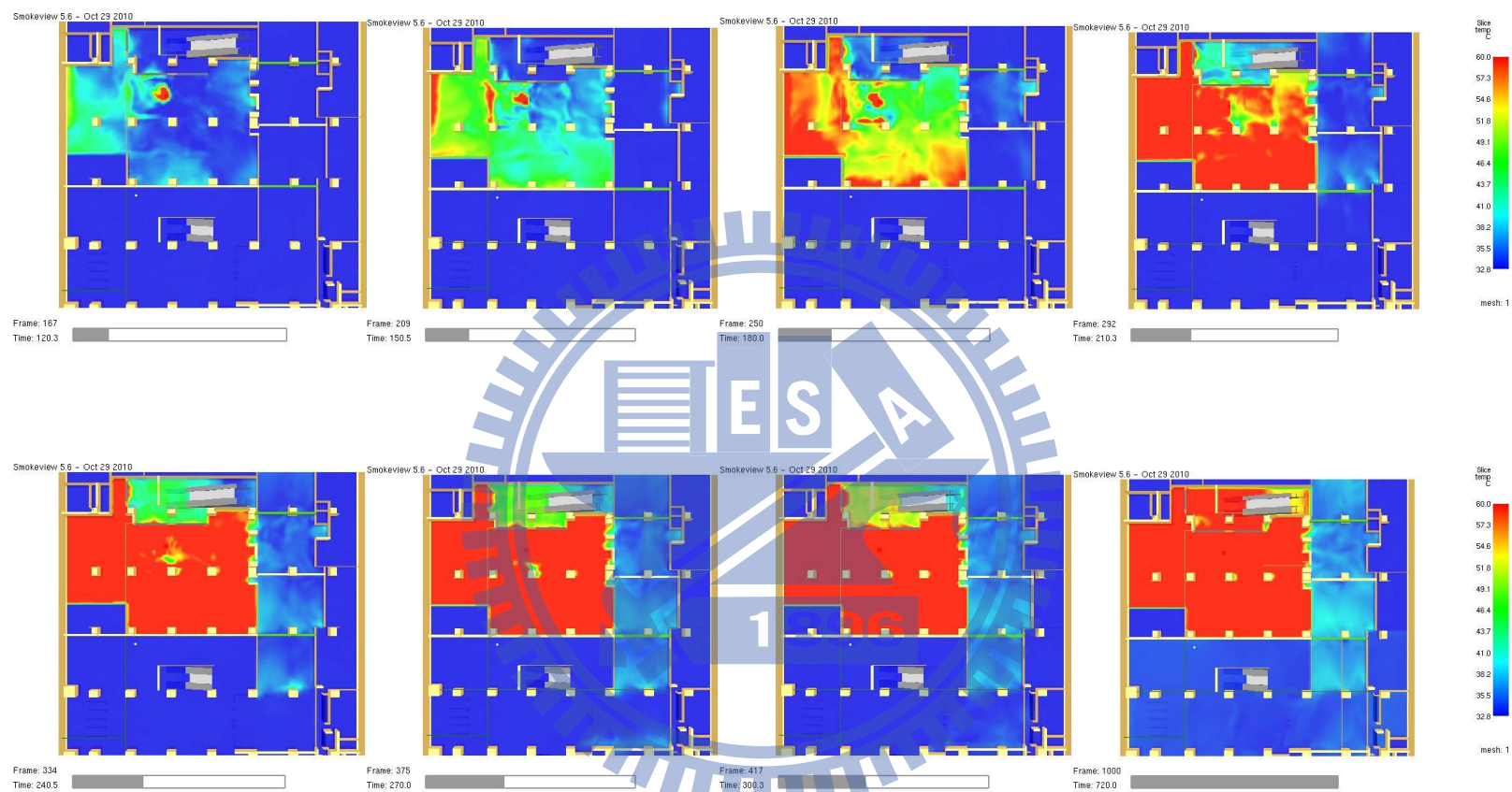


圖 4.54 情境二地下三層溫度分佈圖

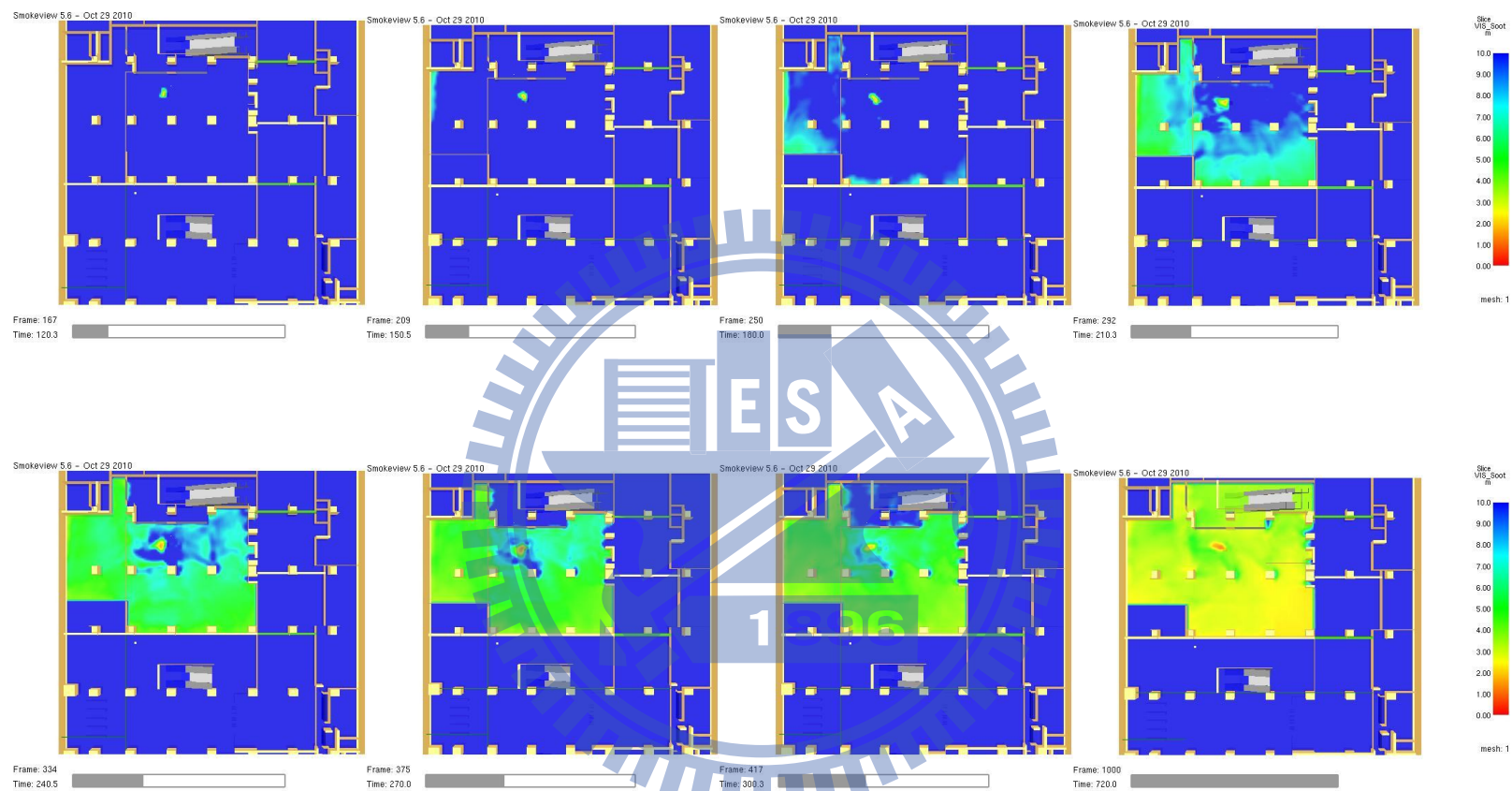


圖 4.55 情境二地下三層能見度分佈圖

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

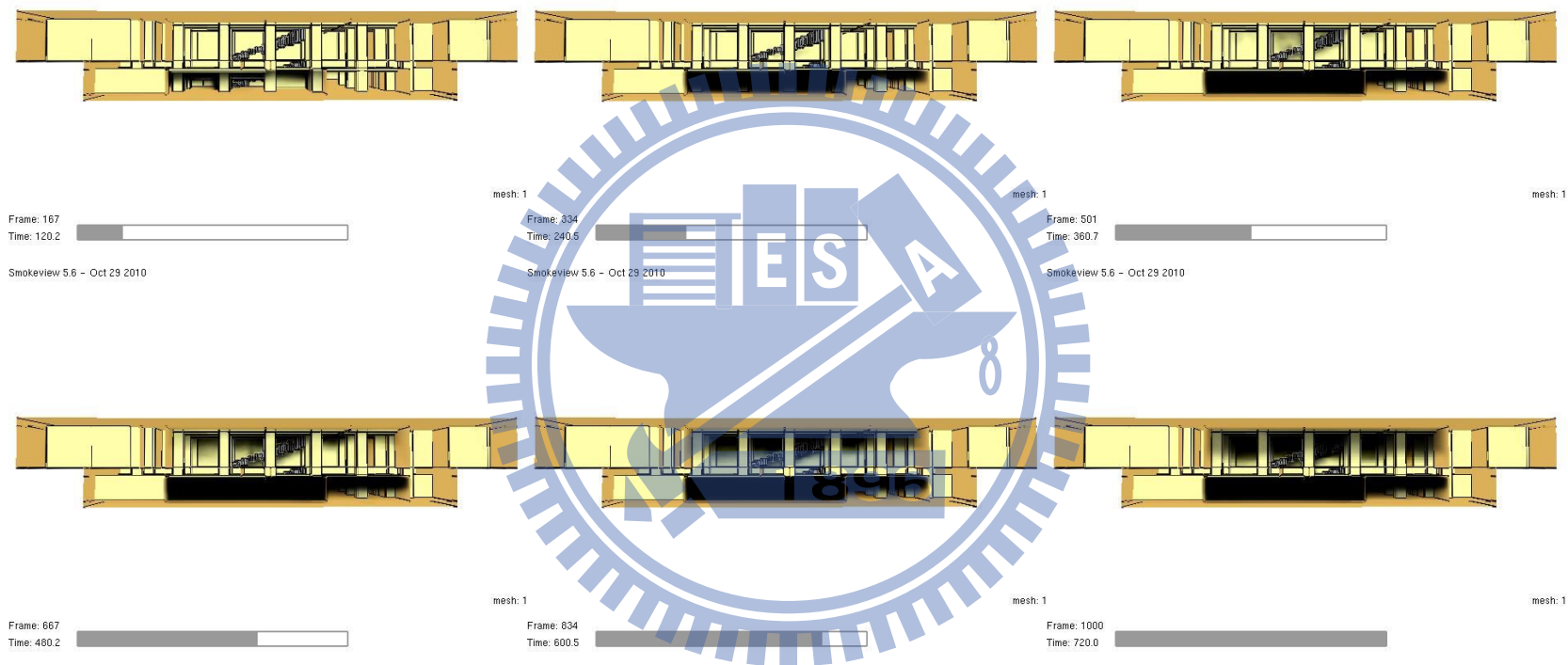


圖 4.56 情境二煙層分佈圖

第五章 結論與建議

1. 由各國防火捲門試驗標準之整理如表 5.1 所示，阻焰性部分，僅我國有對捲門底部上拱量與脫軌進行相關之規範；阻熱性部分我國在捲門背溫任一點量測值均不得超過 210 度，NFPA 則無硬性規定但需將被溫量測結果註明於報告書中，英國則規定任一點不得超過 180 度；熱輻射部分，則僅有英國標準有明確之規定。

表5.1 防火門試驗標準整理

防火門 試驗標準	CNS 14803 (台灣)	NFPA 252 (美國)	BS EN 1634-1 (英國)
試驗內容	加熱試驗 加熱後噴水試驗 加熱後衝擊試驗	加熱試驗 加熱後噴水試驗	加熱試驗 熱輻射量測
阻焰性	○	○	○
阻熱性	○ 均溫170℃ 最高溫210℃	非強制規定	○ 均溫140℃ 最高溫180℃
熱輻射量測	X	非強制規定	○

2. 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，並建議防火門、窗或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。
3. 防火捲門全關之情境與下降至距地面 2m 之情境，兩情境在火場中之變形相異，前者呈波浪型，後者往非曝火面方向變形，推測原因為壓力分佈不同對捲門推拉導致。

4. 防火捲門全關之情境與下降至距地面 2m 之情境，兩情境所受熱應力分佈情況相異，前者最大熱應力集中於門片底端，後者最大熱應力集中於捲門下端兩側，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. 模擬捲門於火場中的變形，除溫度分佈外，壓力分佈、材料性質、捲門結構與邊界拘束條件均會影響其模擬結果，並使結果較符合實際狀況，各模擬參數對捲門物理現象之影響整理如表 5.2 所示。

表5.2 模擬參數影響之整理

模擬參數	影響因素	說明	案例
溫度分佈	影響捲門膨脹變形的主要因素	因捲門受高溫產生膨脹造成捲門變形	黃鈞捲門模擬
壓力分佈	影響捲門變形趨勢的主要因素	觀察正負壓分佈與捲門變形方向推測得知	比較本模擬與黃鈞模擬捲門全關之情境
楊式係數	影響捲門變形量大小	因楊式係數隨溫度下降，使捲門更易受壓力而變形	比較本模擬與黃鈞模擬加熱爐實驗之情境
熱膨脹係數	影響捲門變形量大小	因熱膨脹係數隨溫度升高，使捲門更易受高溫而膨脹變形	比較本模擬與黃鈞模擬加熱爐實驗之情境
拘束條件	影響捲門變形量大小 影響捲門熱應力分佈	由結果比較，不同拘束條件會影響變形量與熱應力的分佈。	比較本模擬與黃鈞模擬加熱爐實驗之情境
捲門結構	影響捲門變形的趨勢	由結果比較，不同捲門結構會影響變形量的趨勢。	比較捲門全關與加熱爐實驗之情境

6. 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。
7. 建議防火門、窗或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，並考量溫度、壓力、材料性質與邊界條件等因素，以提供設計者預估欲測試設備之變形情況。
8. 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，對建築進行設計時應詳加考慮此效應。



參考文獻

1. 張敬桐, “建築物防火消防區劃總體規劃構想”, 消防與防災科技雜誌第 47 期, 2010
2. 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
3. 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
4. 建築技術規則建築設計施工編
<http://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCode=D0070115>, 2010
5. 高敬忠, “利用水霧系統提昇鐵捲門阻熱性能研究”, 國立成功大學機械工程學系碩士論文, 2011
6. 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
7. 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
8. 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
9. Vytenis Babrauskas, Unexposed-face temperature criteria in fire resistance : A reappraisal, Fire Safety Journal, 2009
10. NFPA 92B, “Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas” ,2000 Edition
11. NFPA 130, “Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems” ,2010 Edition
12. 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

13. 邱健倫 “Numerical Simulation of Enclosure Fire and Thermal Stress Analysis” ,2008 Edition
14. 陳俊衡, “Performance Simulations of Ceramic Recuperator and Stairshaft Pressurization”, 交通大學機械工程學系碩士論文, 1995
15. Sherman, “The influence of gaps of fire-resisting doors on the smoke spread in a building fire”, 2006
16. 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
17. 張婉瑩, “改善防火鐵捲門阻熱性之創新設計”, 中華大學營建管理研究所碩士論文, 2009
18. 黃鈞, “玻璃或捲門構成防火區劃之研究”, 交通大學機械工程學系碩士論文, 2011
19. 李鎮宏、邱耀正、陳建忠, “火災—結構型為模擬以 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. 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
21. Private Mail Bag, “Young’s modulus of a 2.25Cr-1 Mo steel at elevated temperature”, 2004
22. J.E. Daw, “Thermal expansion coefficient of steels used in LWR vessels”, 2008
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
24. 中華民國國家標準, “CNS 11227「建築用防火門耐火試驗法」”, 2002
25. 中華民國國家標準, “CNS 12514「建築物構造部分耐燃試驗方法」”, 2010

26. 中華民國國家標準, “CNS 14803「建築用防火捲門耐火試驗法」”, 2010
27. 中華民國國家標準, “CNS 14815「建築用防火固定窗耐火試驗法」”, 2010
28. 經濟部標準檢驗局, “建築用防火門同型式判定原則”, 2002
29. NFPA 130, “Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems”, 2010 Edition
30. NFPA 80, “Standard for Fire Doors and Other Opening Protectives”, 2010 Edition
31. NFPA 251, “Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials”, 2006 Edition
32. NFPA 252, “Standard Methods of Fire Tests of Door Assemblies”, 2008 Edition
33. BS EN1363-1, “Fire resistance tests - Part 1 : General requirements”, 1999 Edition
34. BS EN1363-2, “Fire resistance tests- Part 2 : Alternative and additional procedures”, 1999 Edition
35. BS EN 1634-1, “Fire resistance tests for door and shutter assemblies Part 1 : Fire doors and shutters”, 2000 Edition
36. BS EN 13501-2, “Fire classification of construction products and building elements - Part 2 Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services”, 2003 Edition
37. J.H. Klote and J.A. Milke, “Principle of Smoke Management Systems”, ASHRAE and SFPE, 2002
38. Heskestad, G. “Engineering relations for fire plumes”, Fire Safety Journal 7: 25-32, 1984

39. 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

