

A044-89-FCE-01

高雄都會區捷運系統地下車站 之緊急煙控策略及 避難動線分析之檢討 (期末報告)

執行單位：國立中山大學機械系

計劃主持人：楊冠雄

協同主持人：王士紘

研究助理：陳榮進

蔣鎮宇

王子文

高雄市政府捷運工程局委託研究

中華民國 九十年 十二月

摘 要

高雄市政府捷運工程局已完成高雄都會區大眾捷運系統橘、紅線典型車站之基本設計，且於「高雄都會區大眾捷運系統工程民間參與捷運顧問（第一部份）橘紅線地鐵環境模擬報告」中提出地下車站火災緊急煙控策略。故本研究將針對所提出之月台區與軌道區之煙控系統設計，進行電腦模擬分析，以確認其性能之可靠性。另外亦將進行避難動線與性能分析，保障日後高雄捷運完工營運時之人身安全。

本計劃主要內容為研究高雄捷運系統之地下車站發生火災等緊急事件時，煙控系統運轉策略及人員避難動線分析。研究內容包括：

- 一、地鐵火災相關資料搜集
- 二、高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬
- 三、高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬
- 四、站體煙控系統縮小模型試驗分析
- 五、人員避難動線分析檢討

本研究之成果證明，當高雄捷運典型地下車站發生火災時，目前煙控系統其排煙量足夠應付可能發生的煙害，而其避難系統設計良好，人員可在煙控系統正常運作下，於無煙之逃生路徑上完成緊急避難過程。確實可保障高雄捷運系統日後完工通車後，旅客之人身安全。

然而，未來於高雄都會區捷運系統實際興建進行細部設計之際，由於各車站將因地形之不同而各種不同之幾何尺寸與布置（Layout），也因此所有 3D CFD 電腦模擬及動態避難模擬分析皆須再依各車站之特性各自模擬分析一次，才可確實保障高雄捷運系統日後完工通車後，旅客之人身安全。

目 次

摘要	I
目次	II
第一章 緒論	1
1.1 計畫目的與預期成果	1
1.2 全程研究方法與步驟	3
1.3 研究工作項目說明	9
第二章 地鐵火災相關資料搜集	10
2.1 亞塞拜然地鐵大火	10
2.1.1 背景概述	10
2.1.2 事故發生經過	10
2.1.3 災後調查分析	12
2.2 英國 King's Cross 地下車站火災	13
2.2.1 背景概述	13
2.2.2 事故發生經過	13
2.2.3 災後調查分析	18
2.3 美國舊金山灣地下捷運大火	21
2.3.1 背景概述	21
2.3.2 事故發生經過	22
2.3.3 災後調查分析	23
2.4 日本日比谷地下鐵火災	25
2.4.1 背景概述	25

2.4.2	事故發生經過.....	25
2.4.3	災後調查分析.....	27
2.5	英法海峽隧道火災.....	28
2.5.1	背景概述.....	28
2.5.2	事故發生經過.....	29
2.5.3	災後調查分析.....	30
2.6	小結.....	31
第三章	高雄捷運典型地下車站煙控模擬分析.....	34
3.1	煙控模擬分析原理.....	34
3.1.1	模擬程式簡介.....	34
3.1.2	統御方程式.....	36
3.1.3	火源強度說明.....	38
3.1.4	格點測試與結果分析.....	41
3.1.5	邊界條件說明.....	45
3.1.6	捷運車站附設月台屏門之特性.....	48
3.2	高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬.....	50
3.2.1	月台區模擬參數說明.....	50
3.2.2	月台區煙控模擬結果分析.....	57
3.3	高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬.....	98
3.3.1	軌道區模擬參數說明.....	98
3.3.2	軌道區煙控模擬結果分析.....	101
第四章	站體煙控系統縮小模型試驗分析.....	159
4.1	縮小尺度試驗原理.....	159
4.2	站體縮小模型系統製作.....	163
4.2.1	模型本體製作.....	163

4.2.2	模型煙控系統設計	165
4.2.3	模型量測系統架設	166
4.3	煙控系統縮小模型試驗結果分析	169
4.3.1	大廳層火災排煙系統單區排煙	169
4.3.2	大廳層火災排煙系統雙區排煙	174
4.3.3	月台層火災排煙系統單區排煙	179
4.3.4	月台層火災排煙系統雙區排煙	185
4.3.5	月台層軌道區火災隧道通風機雙邊排煙	191
4.4	縮小模型煙控模擬分析	198
第五章	人員避難動線分析檢討	207
5.1	避難時間分析原理	207
5.2	傳統靜態避難分析比較	209
5.2.1	我國現行法規之避難時間分析	209
5.2.2	美國 NFPA 130 之避難時間分析	210
5.2.3	日本建築中心之避難時間分析	211
5.3	高雄捷運典型車站之動態避難模擬分析	213
5.3.1	案例 1	213
5.3.2	案例 2	217
5.4	小結	222
第六章	結論與建議	224
參考文獻		240

第一章 緒論

1.1 計畫目的與預期成果

隨著台北捷運系統的完工通車，使用捷運系統的旅客日益增多，已成為都會區民眾最喜歡使用的大眾運輸工具，每天有高達九十餘萬的旅次，尤其於節慶期間更是人滿為患。因此，如何確保旅客之人身安全，為重要課題之一。於歷次捷運系統發生事故中，以火災事故最為頻繁。又因為捷運車站常為地下化設施且為人潮聚集之處，其發生火災時之避難逃生與消防救助等等，皆較一般建築困難與特殊，有必要針對捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動線分析，進行深入探討。

高雄市政府捷運工程局已完成高雄都會區大眾捷運系統橘、紅線典型車站之基本設計，且於「高雄都會區大眾捷運系統工程民間參與捷運顧問（第一部份）橘紅線地鐵環境模擬報告」中提出地下車站火災緊急煙控策略。故本研究將針對所提出之月台區與軌道區之煙控系統設計，進行電腦模擬分析，以確認其性能之可靠性。另外亦將進行避難動線與性能分析，保障日後高雄捷運完工營運時之人身安全。

經由本研究計劃之執行可獲得如下之成果：

1. 完成高雄捷運典型地下車站之圖面資料分析，並檢討防火與防煙區劃之設置，以確認其功能性之完整。
2. 建立高雄捷運地下車站月台區之緊急煙控運轉模式，並利用火災煙控電腦模擬程式，印證其煙控性能。
3. 建立高雄捷運地下車站軌道區之緊急煙控運轉模式，並利用火災煙控電腦模擬程式，印證其煙控性能。

4. 製作典型之高雄捷運地下車站縮小尺度模型，以進行火災煙控實驗，並完成模型實驗之流場可視化觀察與分析。
5. 完成高雄捷運地下車站人員避難動線之分析，並結合緊急煙控運轉策略模式，與整體旅客避難時間進行比對。
6. 利用計畫成果，做為日後高雄捷運地下車站細部設計與安全營運計畫之重要參考。

1.2 全程研究方法與步驟

本計劃主要內容為研究高雄捷運系統之地下車站發生火災等緊急事件時，煙控系統運轉策略及人員避難動線分析。本研究計畫全程主要工作項目可詳述如下：

(1) 高雄捷運典型地下車站資料整理與地鐵火災相關資料搜集

本項研究工作主要為進行包含月台屏門、月台尺寸、機電設備佈置、與穿堂層之聯絡道、人員進出動線……等之圖面檢討審視。一般而言，防火區劃為發生火災時，所有防救災及避難行為之基本。故有鑑於此，防火區劃之有效性，遂為本項工作之重點。

一旦地下捷運車站發生火災時，若無有效之防火區劃，便有可能因火勢控制不住，而產生大規模延燒之可能。為防止大規模延燒之發生，除了按照我國現行消防法規「各類場所消防安全設備設置標準」內，有關火警警報器與自動撒水頭之規定設置外，應加強防火區劃之設計，以作為有效防止火災延燒面積擴大之策略。

此外，若利用防火區劃，以構成相對避難安全區劃。於不特定多數人存在之用途中，如大面積的車站、賣場、百貨公司等，更是不可或缺的構成與設計。

(2) 高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬

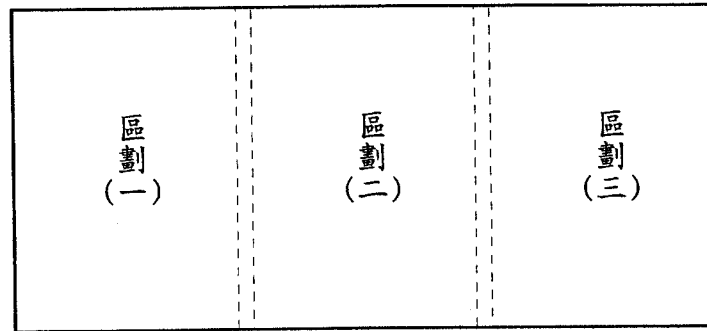
當月台屏門將月台候車區與隧道區分開後，則月台候車區可視為與居室雷同之空間。此時進行區劃機械排煙，則可獲得較佳的煙控效果。其設計重點有：1.防煙區劃配置、2.定址式探測器及排煙口設計。

有關防煙區劃的配置，即對月台屏門內之空間進行適當之區劃。可依據我國現行法規「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條中規定：「每層樓地板面積每 500 m² 內，以防煙壁區劃。」。為了增進煙控系統之排煙效率，除了有防煙區劃之規劃外，其另一設計重點為定址式探測器 (Detector) 及排煙口的設置。

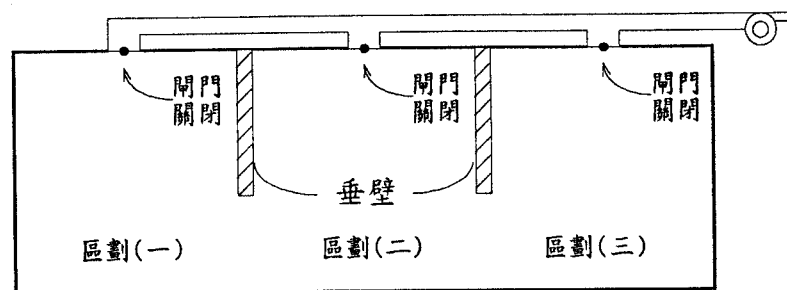
在防煙區劃內裝置定址式的探測器及排煙口，而進行點排放 (Point Extraction) 之機械排煙煙控系統。所謂定址式 (Addressable) 探測器及排煙口之運轉情形，可參考圖 1-1 以進一步了解。

在圖 1-1 中的建築物內，假設規劃有區劃一、區劃二及區劃三等三個防煙區劃，每個區劃內有自己本身的偵煙器與排煙口，如圖 1-1(a)所示。排煙口由防煙閘門 (Smoke Damper) 控制關閉或開啓，平時呈關閉狀態 (Normal Closed, NC)，如圖 1-1(b)。若區劃三發生火災時，則區劃三的探測器偵測到區劃三內有煙時，將訊號傳回監控中心，啓動火災警報器及開啓該區劃內的排煙閘門及排煙風機，做緊急排煙運轉模式，如圖 1-1(c)。

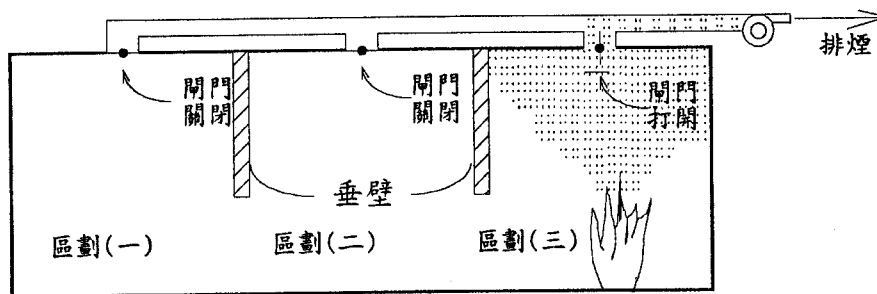
探測器及排煙口定址化的結果，使得無煙區劃之排煙閘門於緊急排煙時並沒有開啓，對於火場內排煙效率提高很多。故點排放最重要的目的為增強排煙效率，而完成有效排煙。



(a)區劃平面圖



(b)區劃立面圖- 閘門平時呈關閉狀態



(c)區劃立面圖- 只開區劃內有火災的閘門

圖 1-1 定址式探測器及排煙口運轉情形

(3) 高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬

當捷運車站設置月台屏門，捷運車站之軌道區可視為隧道之一部分，而隧道與月台層僅以月台屏門相連接。因此新型捷運車站隧道通風系統之主要目的不是在於使逃生梯內產生向下的風速，以提供人員一條無煙之避難路徑；而是要防止隧道發生火災時產生之濃煙經由月台屏門進入月台層內，造成月台層與車廂之乘客無法安全地逃生。

本研究利用 3D-CFD 模擬程式模擬當隧道發生火災時，隧道區之溫度、速度與濃度場，分析採用推拉式（Push-Pull）或單抽式（Pull Only）風機運轉模式對隧道內之溫度與濃煙擴散的影響。所完成的案例包括：

	案例八	案例九	案例十	案例十一	案例十二	案例十三
隧道風機運轉模式	Pull Only	Push and Pull	X	Pull Only	Push and Pull	Push and Pull
OTE 排氣系統	O	O	O	O	O	O
UPE 排氣系統	X	X	X	X	X	X
火源釋放	X	X	X	O	O	O

(4) 站體煙控系統縮小模型試驗

縮小尺寸模型實驗乃是根據【動態相似理論】使模型與實體之間不但尺寸成比例，而且運動及動力亦成比例。縮小尺寸模型實驗之優點為實驗成本較全尺寸模型實驗低，而且對於實驗裝置的變更容易，實驗條件參數的控制容易；而其缺點對於複雜的案例，必須加以簡化。縮小模型實驗為能將全尺度實體之現象結果，映射至模型實驗中，必須符合動態相似理論之三種相似條件：

- 一、幾何相似：指模型與原型之間其幾何尺寸成比例關係。
- 二、運動相似：指模型與原型之間相對應點之運動速度、運動加速度等特性成比例關係。
- 三、動力相似：指模型與原型間相對應點所受的各種外力及總和成比例關係。

由於高雄捷運尚未完工，無法進行全尺度現場火災煙控實驗。故本研究將製作典型之高雄捷運地下車站縮小尺度模型，以進行火災煙控實驗。將根據動態相似理論建立縮小尺寸模型以及量測儀器之安裝與架設完成之後，本研究之模型實驗將進行實驗流場可視化觀察。

(5) 人員避難動線分析檢討

地下捷運車站站體設計在保障正常營運及緊急狀況時之乘客安全，依據 NAPA 130 之規定，應採取了以下二點考慮：

① 足夠設施容量

包含有車站內之乘客設施，如樓梯、電扶梯、走道、收費設施（自動售票機、驗票柵門……等）、月台寬度、緊急逃生梯等等之容量，須滿足預估尖峰小時運量之需求，而且車站內空間與設施之佈置，須符合逃生時間安全檢測之規定，以確保公共安全。

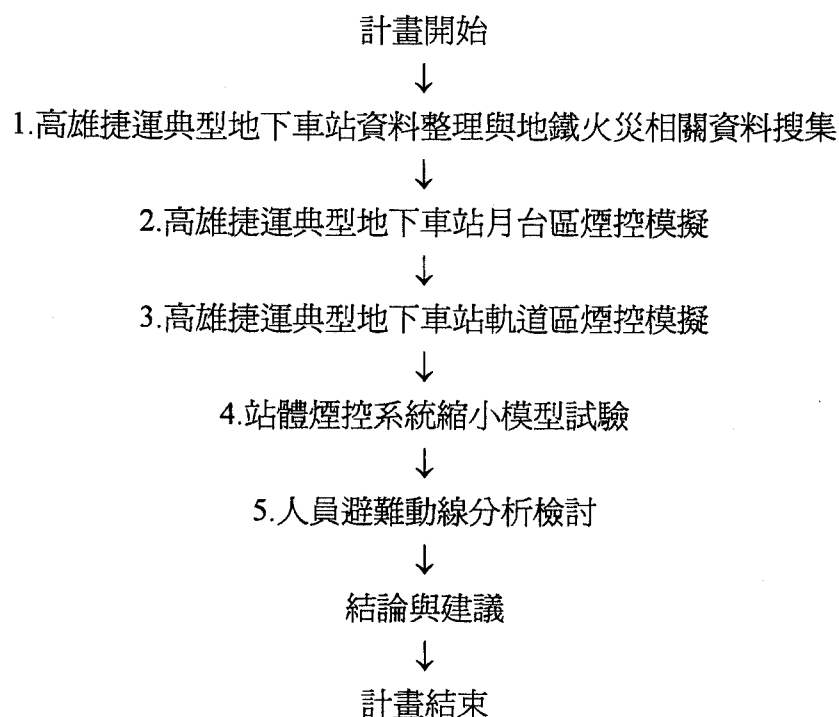
② 安全設施設計

如電扶梯兩端之安全淨距規定及邊緣與結構物之最小間隙規定、月台邊緣之警戒線、車廂與月台間之最小間隙規定、收費閘門出站方向自動釋放、消防防火設施支配置、防火建材之使用及明確的逃生標誌等等，皆是維護公共安全所採之必要措施。

當火災發生時，建築物應能對提供利用該設施之使用人員能安全避難，而設施之管理人員、災害搶救之消防人員，應能瞭解在避難或搶救時有何特殊之事項存在，方能確保火災發生時人員之安全。故除透過對先進國家相關災例分析探討外，瞭解火災時避難安全因素外，更應瞭解該空間在火害發生時之特徵，掌握潛在之避難危險性，俾提出適當之對策，達成避免或降低損失之目的。

本項工作將自火災強度（Fire Size）與發煙量之計算開始，配合地下捷運車站站體建築結構，與緊急煙控運轉策略模式，計算其煙沈積速度，並與整體旅客避難時間進行比對。推估逃生避難系統有無改善修正之必要。

根據以上陳述，本研究計畫詳細之工作流程如以下所列：



1.3 研究工作項目說明

根據計畫書內容，本研究所完成之工作項目包括：

一、高雄捷運典型地下車站資料整理與地鐵火災相關資料搜集，包括：

1. 1995 年 10 月 29 日發生於亞塞拜然首府巴庫之地鐵大火
2. 1987 年 11 月 18 日晚上英國 King's Cross 地下車站
3. 1979 年 1 月 17 日美國舊金山與奧克蘭間的舊金山灣捷運系統大火
4. 1968 年 1 月 27 日，日本東京都日比谷線地下鐵火災
5. 1996 年 11 月 8 日英法海峽隧道火災

二、高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬

月台區煙控模擬分析，共完成七個案例，包括大廳層四個案例、月台層三個案例。

三、高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬

軌道區煙控模擬分析，共完成六個案例，包括 Pull only 模式、Push-Pull 模式、OTE Only 模式、與 Pull only 模式、Push-Pull 模式火源釋放及不同起火地點等案例。

四、站體煙控系統縮小模型試驗

煙控系統縮小模型試驗分析，共完成五個案例，包括大廳層、月台層、與軌道區煙控系統模擬等。

五、人員避難動線分析檢討

共完成二種模擬情境下之四個動態避難模擬案例分析，包括：依據捷運局設計之人數，以及依據 NFPA 130 設計之人數。

最後，並提出本研究案之結論與建議。

第二章 地鐵火災相關資料搜集

2.1 亞塞拜然地鐵大火【1】

2.1.1 背景概述

1995 年 10 月 29 日星期六傍晚時分，於亞塞拜然共和國（Azerbaijan）首府巴庫（Baku），一列五節車廂之地下鐵列車，由 Uldus 站往 Narimanov 站行駛，每節車廂約載有 250~300 人，如圖 2-1 所示。

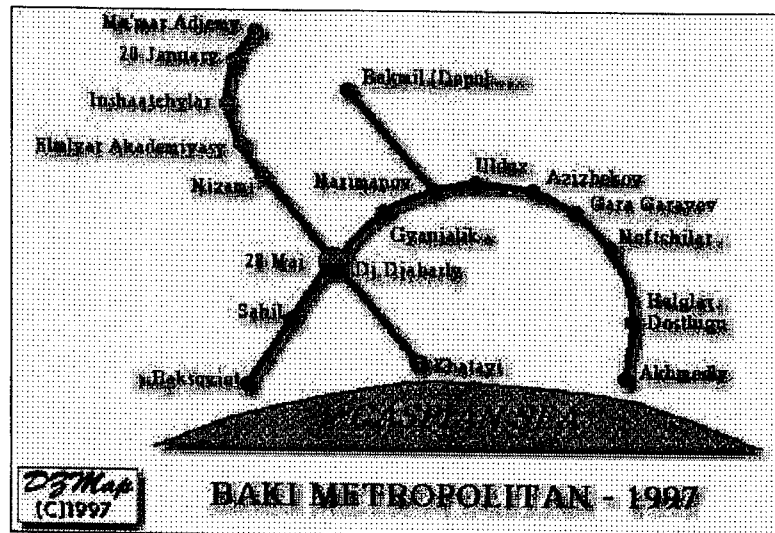


圖 2-1 亞塞拜然首府巴庫地區地下鐵路系統圖

因列車機件故障，列車於地下隧道內發生嚴重火災，共造成 289 人死亡，265 人重傷，750 人以上獲救。

2.1.2 事故發生經過

列車於 17 時 51 分進入 Uldus 站前，第 4 節車廂底盤已經故障，集電器與主保險箱發生火花，保險絲並未跳脫。金屬開始燒溶成鐵水滴落，旅客渾然未知，並正常上下月台。

約 18 時，列車重新啟動出 Uldus 站後，經由列車天花板上空調機引入，第 5 節車廂已聞到煙味。當進入隧道時，列車停止加速，此時行駛顛簸，車內照明閃爍。第 4 節車廂旅客聞到座椅下方滲出大量濃黑煙，嗆鼻且能見度低，火勢加大。

車長已警覺車廂發生事故並停車檢視，此時列車距 Uldus 站 200 公尺，距 Narimanov 站約 2,000 公尺，車長跳下至軌道以緊急電話向行控中心呼叫及通知將第 3 軌斷電，如圖 2-2 所示。

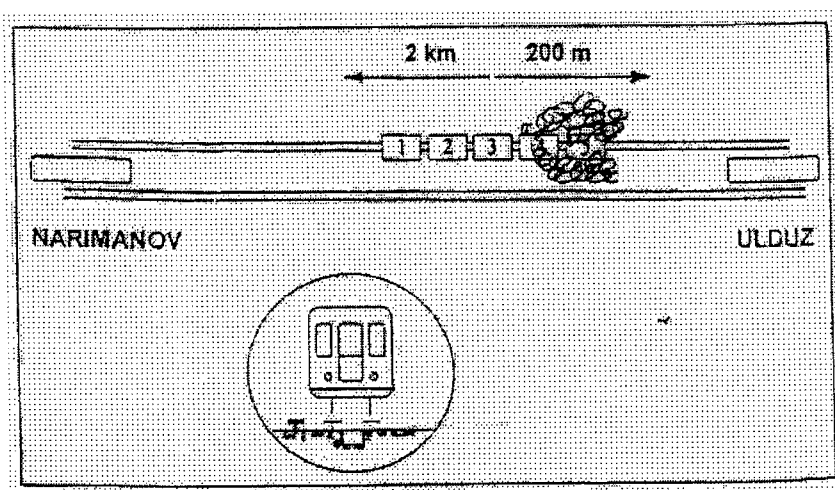


圖 2-2 亞塞拜然地鐵火災地點示意圖

當列車完全停止時，隧道內部很快地濃煙密佈，但第 1 至第 3 車廂內仍無濃煙蓄積，第 4 車廂內部並未全面燃燒，此時旅客開始疏散。由於氣動裝置失效，位於第 4 車廂前後之 2 扇緊急逃生門無法開啓。而位於列車側向之 4 扇正常上下車之門，亦因人員擁擠不堪而無法推開，旅客只好打破窗戶逃生，但此舉卻引進大量濃煙自隧道灌入車廂內。

但於第 3 車廂中連接第 2 車廂的門已被逃生旅客打開，駕駛助手也將其他車廂連接門打開，使第 1 至第 4 車廂間，成爲一內部逃生路徑。於是，旅

客可藉由此路徑，往前面車廂逃生，然後跳下軌道，往離列車極近 Uldus 站前進。而第 5 車廂旅客亦跳下軌道向 Uldus 站方向逃跑。

第 4 車廂氣動門管線熔化，有如乙炔切割，底部燒出一大洞。第 4 車廂被燒穿，火舌竄出，並延燒到第五車廂，造成多人罹難。此外，第 1、2、3 車廂內之旅客往 Uldus 站方向逃生路徑亦被切斷，人們因而反向返回 Narimanov 站方向逃生，以致互相推擠踐踏，無法到達出口，造成多人罹難。此時，從列車於隧道內停車算起，已經過了大約 15 分鐘。

當時濃煙密佈整個隧道內部，位於隧道上方的燈，根本無法提供照明，隧道能見度為 0。逃出車廂之旅客乃是在黑暗中沿著隧道壁、電纜線或拉住前人衣角，很困難地往 Narimanov 站逃生。原本濃煙往 Uldus 站方向流動，但監控中心人員卻使隧道風機反轉，造成濃煙往 Narimanov 站方向流動，再度造成多人於往 Narimanov 站方向逃生過程中罹難。

2.1.3 災後調查分析

經過災後調查分析，得到下列幾點結論：

1. 火場緊急避難應於火災發生時，就儘快進行，以免錯失火災前期之可共安全避難之環境。
2. 避難設施之標示，如本事故中之列車逃生門氣動門栓開啓標示，應盡量標示清楚與簡單易懂，以利緊急避難時，人員之操作與運用。
3. 隧道區內應提供緊急事故時之良好避難環境，如平坦易走的步道、設置位置較低的照明與指標、及良好的隧道通風設備，以便提供逃生避難人員一條安全無煙之逃生路徑。
4. 消防救助單位須配置適當之器具，以提供救援人員與獲救人員使用。

2.2 英國 King's Cross 地下車站火災【2】

2.2.1 背景概述

於 1987 年時，King's Cross 地下車站是英國地下鐵路網中最忙的車站。平均每日有 250,000 名乘客使用該車站，在 07 點 30 分至 10 點 00 分及 16 點 00 分至 18 點 30 分的尖峰時段，約有 100,000 名左右乘客經過該車站。

1987 年 11 月 18 日晚上 19 時 29 分，因旅客抽煙，未熄滅之火柴經電扶梯之縫隙，掉落至電扶梯之機件溝槽，引燃油脂，形成火災。再加上車站內部大量使用易燃和有毒的裝修材料，火勢一發不可收拾，終至閃燃。共造成 31 人死亡，多人重傷。

2.2.2 事故發生經過

時 間	概 況
19：29	旅客在 4 號電扶梯發現上部右邊一踏板底下，有微小火，他將此情況報告給售票員，而售票員打電話給救助站的稽查員。
19：30	另一旅客看到 2-3 處煙從電扶梯底下冒出，即刻緊急按停 4 號電扶梯按鈕，並向民眾呼喊離開電扶梯，此時擔任引導的鐵路員工及出口處收票員跑去查看。 鐵路員工跑至 Piccadilly 線電扶梯的底端，出口處收票員工下降至 4 號電扶梯，看到電扶梯下煙及火焰大約有 3-4 英吋高。
19：32	出口處收票員工原本欲以個人無線電通知本部資訊室向倫敦消防隊報案，但因於地下空間無線電難以發揮功能，

	故需跑到地面發訊，他被告知在 Euston 路的樓梯頂端等待消防隊。
19 : 33	英國運輸警察局收到出口處收票員工的呼救，另站務員因聽到無線電呼叫，迅速從鐵路主幹線大廳跑到管狀售票大廳幫忙。英國運輸警察局以 999 緊急電話聯絡市中心倫敦消防隊。
19 : 35	救助站稽查員到達 Piccadilly 線電扶梯大廳並進入較低層的機械室，但並未看到或聞到任何味道。
19 : 36	已經下降至 5 號電扶梯的鐵路員工看到煙有 2-3 處經 4 號電扶梯上來，警察要求把旅客疏散上 Victoria 線電扶梯。同時，倫敦消防隊迅速從 Soho Clerkwell 及 Manchester Square 消防站調遣 4 部泵浦車，一部雲梯車與最近消防隊員出動。
19 : 39	在車站大廳的警官決定疏散此區域旅客，Piccadilly 線控制員 hanson 通知倫敦地鐵管理人 Tumbridge，並告訴火災情形。
19 : 40	Mr Hanson 電知 Piccadilly 線交通控制員 Weston . Farrell 援助警察封鎖 4 號電扶梯上部及引導旅客進入售票大廳往 Victoria 線電扶梯避難。 P.C.Kukielka 從臨時車站控制室以 999 緊急電話要求 Piccadilly 及 Victoria 線的列車，在 King's Cross 站不停。
19 : 41	Farrell 下樓至 Victoria 線月台層並電知勿停於 King's Cross 站。售票員 Newman 由 P.C.Balfe 告知停止售票。

19 : 44	在非常短的時間內，整個車站大廳內的溫度極速升高及產生大量的濃黑煙，Flanagen 命令所以隊員引導眾人逃生，沒多久閃燃發生，掛在 Piccadilly 線電扶梯上頭的指鐘停在 19 : 45。
19 : 45	從 Piccadilly 線電扶梯附近，看到一噴射火焰從電扶梯豎坑迅速升起，衝到車站大廳天花追向他，P.C.Hanson 失去平衡，爬回 Victoria 電扶梯，並喊叫旅客保持低姿由車站大廳最近出口逃離，當時熱仍在增溫中，火蔓延到售票大廳的屋頂。 看到發生此狀況的車站官員叫旅客趕緊回到下層，並協助在售票大廳受傷的旅客。
19 : 46	一列往北的 Victoria 列車，由 Mr.Barret 駕駛，已收到命令勿靠近 King's Cross 站，並以走路速度般通過並停止，約有 150 至 200 位旅客藉此列車逃離。
19 : 47	倫敦救護隊首次接到 King's Cross 請求出動救護車，並於 19 : 49 從 John's Wood 街派遣一部救護車。
19 : 52	Metropolitan 線月台已完全無旅客。
19 : 57	Tumbridge 電給在家的倫敦地鐵事故責任主管 Mr Green 並告知火災。
19 : 59	第一部救護車到達 King's Cross。
20 : 05	原本深陷於 Metropolitan 線月台濃煙區的女警官及 8 位倫敦地鐵員工，藉由列車逃生。
20 : 06	稽查員 Nilkinson 向倫敦運輸警察局 L 分部資訊室誤報「火已經熄滅!」

20 : 12	倫敦消防分部官員到達 King's Cross 接管指揮，當時有 6 部救護車在現場。
20 : 15	倫敦消防隊代理助理主管 Wilson 到達並接管指揮。
20 : 17	Mitland City 地下道 Bostwick 鐵路出口由鐵路清潔工打開，受重傷的 Mr Bates 被救護車送往醫院，區域經理 Harley 指示車站稽查員疏散所有工作人員由 Midland City 地下道出口避難。
20 : 25	車站稽查員 Hayes，地鐵員工 Farrell 及大部分地鐵員工由 Midland City 地下道離開車站。
20 : 41	倫敦地鐵助理主管 Kennedy 到達並接管指揮。
20 : 53	車站官員從倫敦消防總隊在車站中的平面箱中取出車站平面圖，交給在當地的消防隊。
21 : 32	有 14 部救護車在現場。
21 : 48	助理主管傳送訊息”火已被控制”。
01 : 46	倫敦消防隊告知火已熄滅，並進行殘火處理與清理火場。

經本研究之分析整理，英國 King's Cross 地下車站大火詳細之火勢成長、避難過程與救災過程之時間流程表，如圖 2-4 所示。

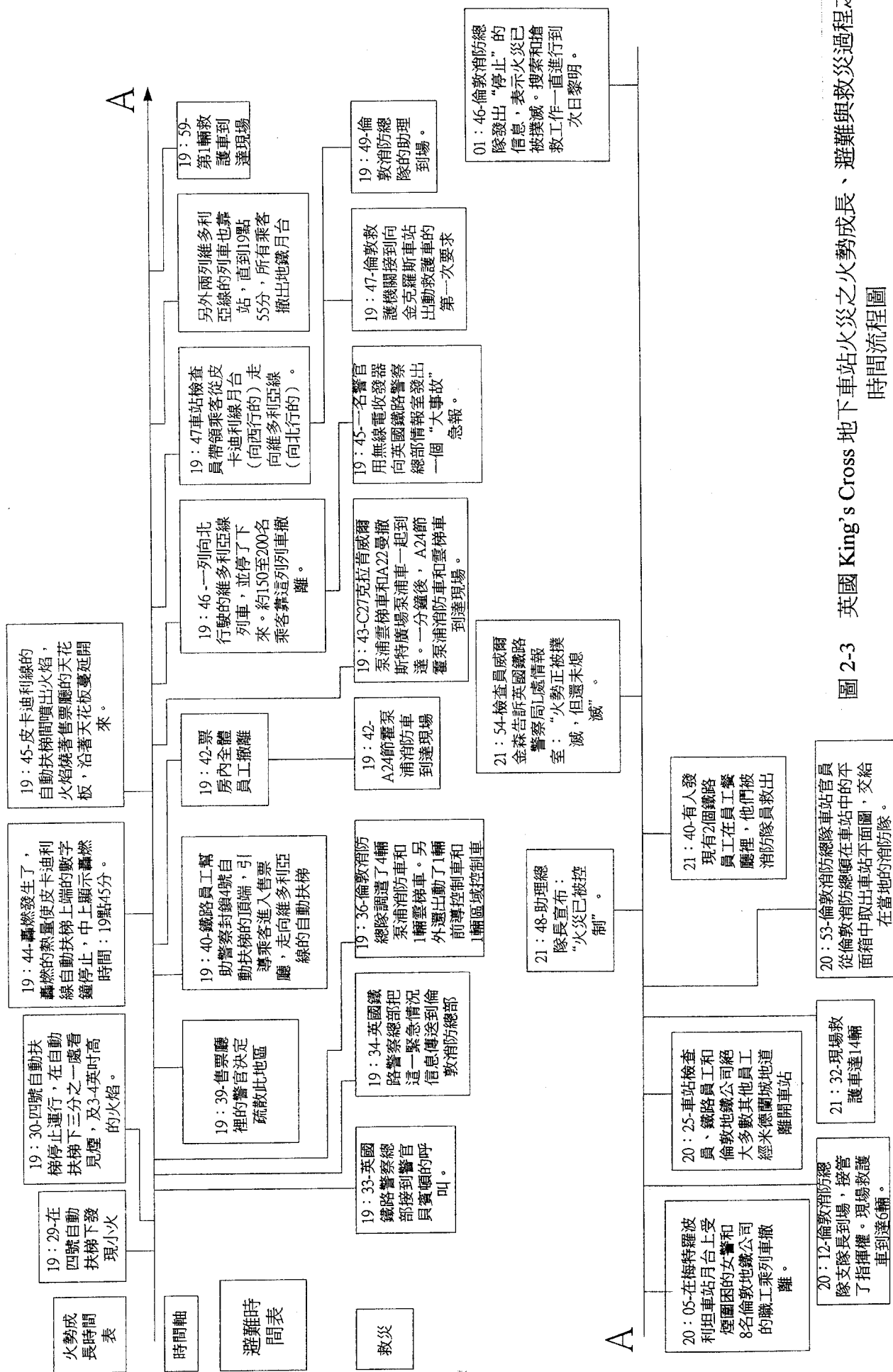


圖 2-3 英國 King's Cross 地下車站火災之火勢成長、避難與救災過程之時間流程圖

2.2.3 災後調查分析

經過災後之調查 King's Cross 地下車站大火，起火的原因為有人亂丟火柴，火柴經由電扶梯之細縫掉到扶梯溝槽，在引燃扶梯運行軌道上的潤滑脂與碎屑。炙熱的氣流上升至天花板並預熱該處的天花板，而電扶梯上方天花板上的油漆，則為使火迅速擴展的主要原因。閃燃迅速形成的原因為“溝槽效應”分為上下層氣流，當自動扶梯兩旁的欄杆起火時，火焰會向溝槽的中心線上方移動，並朝斜坡彎曲，這就是所謂的“溝槽效應”。

A. 缺失與檢討

倫敦消防總隊到達火場時倫敦地鐵公司沒人接應，在三個部門中分別各有安全的聯絡人員，但是卻沒有一個總負責的部門。地鐵員工知道通訊設備卻沒有使用這些通訊設備，沒有及時通知倫敦消防總隊，也沒有利用廣播系統告訴站內乘客火災的狀態，甚至有些廣播系統不能擴及到所有站內乘客和員工知道。在火災發生的那一天倫敦地鐵公司有一些監視器被關閉，使的乘客疏散的情況無法得知。

倫敦地鐵公司沒有依建議裝置自動灑水系統、消防設備及備有兩種以上緊急逃生措施。此外，亦沒有訓練工作人員在緊急狀況下做出正確的反應。倫敦地區運輸公司只對倫敦地鐵公司的運輸的效率、經濟感到興趣而對旅客的安全不感興趣。倫敦地鐵公司過去訓練的方式不是很專業且一成不變主要是記筆記、提問和問答。

倫敦地鐵公司當時防火策略主要是利用倫敦消防總隊每年進行的檢查且是經要求才進行，檢查的內容只不過是涉及易燃物品的堆放和滅火器的放置罷了。

B. 改善方法

車站硬體設施改善部分包括：

- 木質構件全部改採用金屬構件
- 使用防火角鐵
- 全面禁止吸煙
- 按裝火災與煙感測器
- 建立每年更換六部或六部以上的自動扶梯的制度
- 建議能對現有的通訊設備進行改進，擴大廣播範圍
- 可在站台上或較低的廣場上裝設公用電話
- 閉路電視設備的工作範圍需要改進

車站軟體設施改善部分包括：

- 訂定安全管理計畫包括：消防設備的檢查、逃生出口的通暢、訂立各車站安全等級、設消防隊長、安全檢查長、安全委員會、安全管理計畫等能對火災報告進行分析也能對消防總隊提出的問題進行糾正、禁止客人和站務人員吸煙。
- 地區經理及以下的主管人員的訓練包括：人員疏散、對非主管人員進行通訊設備及消防安全知識，建議管理人員和主管人員需要加強培訓、提高安全意識。
- 業務管理員與主管人員每隔 2 年定期訓練其內容包括車站緊急狀態時處理方法、滅火設備、擴音設備、通訊工具的使用。
- 倫敦地鐵公司與緊急服務機構的通訊聯絡需隨時保持暢通且各緊急服務單位皆須密切的配合

- 解決擁擠方法可以在通向梅特羅波利坦線的通道之間建造一通往地下的地下通道或是安裝監控系統觀察站內最新擁擠範圍的狀況
- 通訊系統的改善、地鐵公司與警察間密切聯絡、照明設備、職員的調度可以抑制犯罪的進行。
- 建議政府制訂更有效的法令來增加對觸犯或違背抽煙或叼煙斗、雪茄或香菸的人員進行處罰。
- 在實際火災中發現倫敦消防總隊和英國鐵路警察誰來領導滅火和疏散都並無困難但是爲了避免疑惑，應該明確規定相應機構（醫療、救難、應急）作用和法律責任。

2.3 美國舊金山灣地下捷運火災 (Transbay Tube Fire) 【3】

2.3.1 背景概述

美國舊金山與奧克蘭間的舊金山灣捷運系統 (The Bay Area Rapid Transit, BART)，1972 年 9 月 11 日開始營運，其路線如圖 2-5 所示。

於 1979 年 1 月 17 日下午 6 時許，因先前列車的意外事故，使得行車路線旁受到損害，但由於沒有徹底檢查與修護，突出不整的護板架導致 117 次列車的接觸板組件因而損壞。損壞的組件再接觸到最後兩節車廂上的 5000 立方英吋空氣槽，產生電弧，導致儲氣槽燃燒，形成列車大火。共造成 1 位消防隊副隊長死亡，44 位消防人員受傷。



圖 2-5 美國舊金山灣捷運系統路線圖

2.3.2 事故發生經過

往西向舊金山行駛的 117 次列車司機，以無線電通知控制中心，稱列車後頭可能著火，此時車上恰有一位 BART 管理員，協助 40 名乘客避難。當列車煞往後，因活塞效應的影響，濃煙向前捲入列車前頭。BART 控制中心依據緊急送風機的操作指示，打開通風調節閘門，但因一扇通風調節閘門原先已是打開，以致濃煙籠罩整輛列車，並持續蔓延。

BART 控制中心通知奧克蘭消防隊，稱列車在靠近舊金山之 Embarcadero 車站側之 M1 隧道被煙所困住。但消防隊卻弄錯出事地點，將救災器材快速地運至奧克蘭之 West Oakland 車站，此時煙正由隧道內湧向 West Oakland 車站側之通風排氣口。

在 West Oakland 車站一位消防隊長和八位隊員背負呼吸器和水帶乘坐一救援列車，進入 M1 隧道進行救援。而在奧克蘭之 West Oakland 車站側通風排氣口處，兩應訊趕到之奧克蘭消防隊，採徒步方式進入保養用隧道 (Service Tunnel)。同時，BART 控制中心亦迅速自舊金山之 Embarcadero 車站派遣另一救援列車進入 M2 隧道營救，此營救列車有十節車廂，估計可運送 1000 至 2000 名乘客，但卻未乘載消防人員隨同進入。

著火列車停車約 8 分鐘後，列車上之 BART 管理員稱濃煙瀰漫，但“大家平安”，再過 3 分鐘，又報告說煙相當濃烈，且能見度低，呼吸困難，所有乘客已避至曳引車廂，並試圖使避難車廂與著火車廂脫離，但告失敗。

來自奧克蘭之 West Oakland 車站載有消防人員之救援列車，在 M1 隧道內距著火列車僅 100~200 ft 的地方失去牽引而停住，於是消防人員下車進入保養用隧道，並經由一位 BART 技術人員協助進入著火列車內。同時，在保

養用隧道內的十位奧克蘭消防人員，亦以徒步方式漸漸接近著火列車現場，而從舊金山之 Embancadero 車站派遣來的救援列車已停在 M2 隧道內。

當從舊金山之 Embancadero 車站派遣來的救援列車完成救援任務後，接獲來自 BART 控制中心指示，全速朝奧克蘭之 West Oakland 車站方向行駛，卻因此造成強大之活塞效應，使濃煙由 M1 隧道被導入保養用隧道和 M2 隧道成空氣亂流，將兩位在 M2 隧道內的消防人員衝倒及將其他在保養用隧道內的消防人員衝得亂成一團。

此時救火工作仍未開始，舊金山消防隊也尚未被要求加入此項搶救行動，而兩批奧克蘭消防人員則仍待在隧道內。首批進入坑道參與營救工作的消防人員，因擔心氧氣不足，於是朝舊金山之 Embancadero 車站方向撤走。而由奧克蘭來的第二批消防人員亦遭遇濃煙戴上面罩，但保養用隧道濃煙變劇，15 分鐘後亦決定撤退。

當消防人員欲朝奧克蘭撤走時，已全然看不見任何東西，於是以一線縱隊前進，但因常常碰撞到障礙物，致使隊伍拉長。此時，一位副隊長耗盡了氧氣，當折下面罩後立即陷入癱瘓，其他的人攙扶他繼續前行，隨後另一位副隊長亦覺呼吸困難。不久，三人氧氣均將耗盡，向 BART 控制中心緊急救助。最後，副隊長被找到時已告死亡，其餘均經由一扇坑道門或奧克蘭通風排氣口走出保養用隧道。

2.3.3 災後調查分析

經過災後調查，可以從本次舊金山灣捷運火災得到下列之啓示：

- 1、本次火災事故初期，由於緊急通風閘門未全部關閉，因而致使濃煙籠罩整輛列車。建議發生火災時，通風系統從正常模式轉成緊急煙控模式時，

須確認各處風機與閘門的運轉情形，再進行轉換。換言之，經由原先擬訂之緊急煙控策略，並內建（Build-in）於防災中心之控制盤上，只要值班人員確認事故發生地點，按下所屬按鈕，則風機與閘門的開啓與關閉，即可完全按照原先擬定之策略運轉，事故災害程度將可減至最低。

- 2、本次火災事故中，消防隊員奔錯地點，因而浪費許多寶貴時間。故為讓出事列車清楚說明正確出事或停車地點，應確實標示列車行走路線上之里程碑（Milestone），以提供列車回報防災中心的重要依據。
- 3、M2營救列車啓動行駛，造成活塞效應，使濃煙進入維修通道與M2隧道，而氣流大亂造成傷亡。依照國際間普遍之規定，隧道內營救列車巡航速度應小於每小時15 km。另外，消防隊自維修間避難隧道徒步撤退時，內部充滿濃煙，亦顯出加壓煙控之必要性。若再配合上消防隊撤退時，改以自動軌道導引車輛，除避免速度太快造成氣流太亂外，亦避免發生撞車意外。以上三種設計理念，即應用於英法海峽隧道之維修間避難隧道設計。
- 4、整個進行救災時，並無依照緊急運轉程序來進行，顯見事先並無演練運作。須建立火災時之緊急運轉程序與避難救災計劃，並定期演練。

2.4 日本日比谷線地下鐵火災

2.4.1 背景概述

1968 年 1 月 27 日中午時分，日本東京都日比谷線地下鐵發生火災，地點在「六木本」車站與「神谷町」車站間之隧道內，因機件故障，列車發生火災。總共造成 11 名人員受傷，包括：團營地下鐵職員 8 名及消防隊員 3 名。其火災位置圖，如圖 2-6 所示。

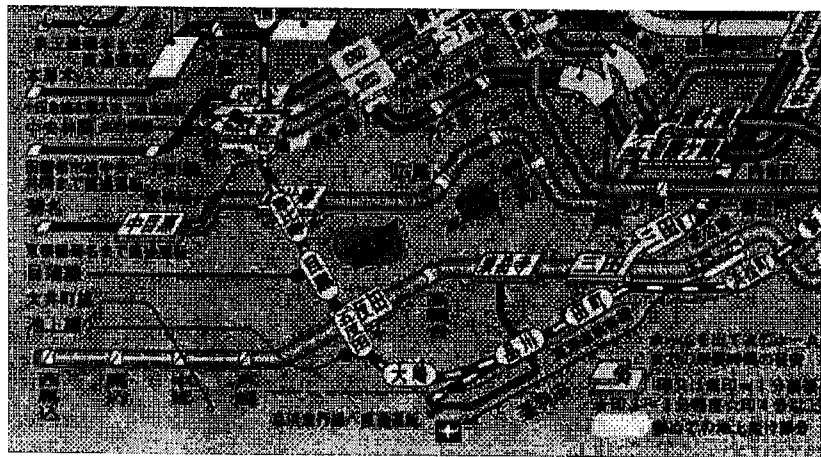


圖 2-6 日本日比谷線地下鐵火災位置圖

2.4.2 事故發生經過

一輛列車準時從「中目黑」車站發車，往「北春日部」車站前進。不久列車速度變慢，司機員感覺異常，好像列車後部被拉住。

到達「廣尾」車站後，乘坐在第 3 車廂的站務人員，感覺先前車輛進行中，第 3 車廂之第 6 號地板底下好像有摩擦聲，後經司機員下至軌道檢查第 3 車廂底部，發現第 3 輪軸變得很熱，故開啓車廂地板下的第 2 制動器，但不認為有發煙等情形。

列車在「廣尾」車站延遲 6 分鐘發車，但是制動器異常狀況未改善，於是保持低速進行，在到達「六本木」車站後，車長通報稱白煙已從中間車廂冒出，且達窗戶高度，於是司機員前往確認，發現主抵抗器已變紅，司機員判斷此狀況列車已不能運轉，聯絡車輛運轉指揮中心。

列車回到「霞關」車站後，讓約 200 名乘客下車避難，並以空車開往「神谷町」車站。途中，列車幾乎無法行駛，不久車長稱煙已蔓延開來，司機員看到列車後方冒出煙與火，於是放棄開離著火列車，轉而求助救援列車。車輛運轉指揮中心接到事故列車不能運轉之訊息後，對剛達到「六本木」之另一列車下達到救援指令，被指定之救援列車馬上請旅客下車。

著火列車停車 13 分鐘後，救援列車到達著火列車停車現場。與著火列車乘務員會面，並將兩列車結成一體，欲往「神谷町」車站前進，但變電所之自動保護器動作，停止送電無法前進。

兩列車的乘務員，因隧道內濃煙愈積愈多，感覺生命受到威脅，故著火列車的乘務員以徒步方式往「神谷町」方向避難，而救援列車的乘務員則往該列車的後部之駕駛室避難。

著火列車停車 19 分鐘後，東京消防廳接獲 119 電話報案稱「地下鐵通風口正冒出煙來」，東京消防廳立即詢問地下鐵車輛運轉指揮中心得到相關訊息後，迅即下令出動。

著火列車停車 28 分鐘後，消防隊分成兩組，到達「六本木」與「神谷町」兩個車站，煙正從「六本木」車站噴出，而「神谷町」車站無煙。

2 名站務員與指揮人員共 9 名從「神谷町」車站進入隧道內，其餘隊員在外待命。在第 6 車廂附近遇 2 名乘務員說著「沒有受傷，但第 3 車廂的抵

抗器已經燒起來」，此時隊員全體著裝，帶著滅火器前進去滅火，但車廂火勢過猛必須引進水帶，指揮官叫現場待命的隊員返回「神谷町」車站引進水帶，但路徑距離約有 550 公尺長。最後，消防隊員從最近的通風口引入水帶滅火。

著火列車停車 2 小時 22 分鐘後，列車火災完全熄滅，而隧道內之無線電話機經再三試驗亦不能使用。

2.4.3 災後調查分析

- 1、因隧道內並無通風煙控系統之設計，故火災時產生的濃煙，受到列車的活塞效應與大氣的自然風二種因素的影響。本次事故中消防隊選擇從「神谷町」車站進入，正是從上風方向進入火場，乃為幸運之處。應設置通風煙控系統，而提供消防隊員一條無煙之進入搶救路線，才是正確之設計理念。
- 2、隧道內部並無消防栓之設置，故消防隊員搶救不易，須從車站內拉很長的水帶進入搶救。
- 3、進入火場搶救之救援列車，因電力供應中斷，無法抵達現場，失去救援目的。救援列車應是自己提供動力，如柴油車等，才不會應火場斷電而失去動力。

2.5 英法海峽隧道火災 (Channel Tunnel Fire)

2.5.1 背景概述

英法海峽隧道全長 50.45 公里，供專用列車行駛，列車以 140km/hr 的時速通過，須費時 35 分鐘。圖 2-7 為英法海峽隧道之構造圖，其中有二條供列車運行之主隧道 (Running Tunnel)，其直徑為 7.6m。兩條主隧道間有一條維修兼避難隧道 (Service Tunnel)，其直徑為 4.8m。而主隧道與維修隧道間每隔 375m 有一直徑 4.8m 之橫坑連絡道 (Cross Passage)，連接主隧道與維修兼避難隧道。其橫坑連絡道與主隧道接壤處，並設置防火門，防止主隧道發生火災時，火場蔓延到維修兼避難隧道。而在維修兼避難隧道本身亦加壓送風，以提供人員一條無煙之逃生避難路徑。

1996 年 11 月 18 日於英法海峽隧道運行中的載貨列車 (Heavy Goods Vehicle Shuttle, HGV Shuttle) 發生火災，其發生原因為縱火。因具備完整之緊急運轉程序，所幸並無造成人員重大傷亡，只造成部分之財物損失。

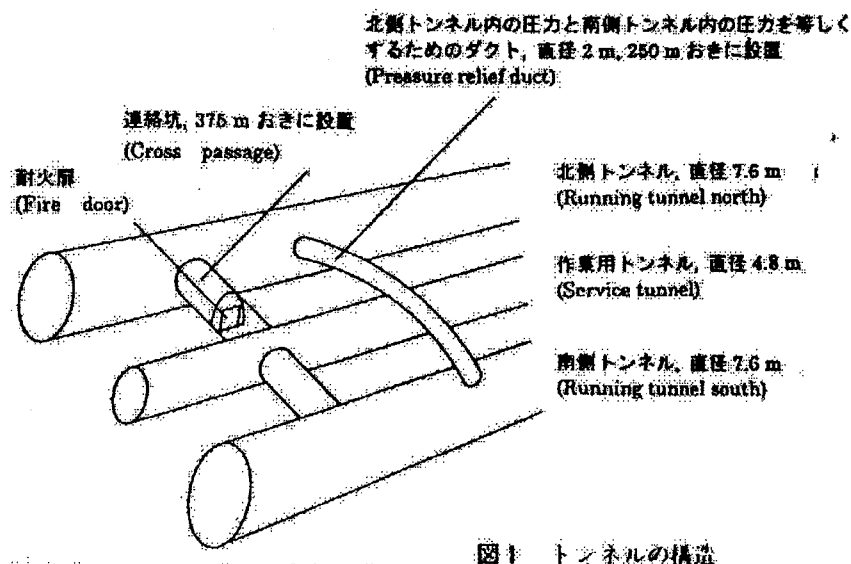


圖 2-7 英法海峽隧道構造圖

2.5.2 事故發生經過

1996 年 11 月 8 日晚上，一列載貨列車途經英法海峽隧道之南側主隧道（Running Tunnel South, RTS），由法國端往英國端行駛。

但在晚上 8 時 45 分，列車剛進入隧道的入口時，於法國端的控制中心（Terminal Control Center）接獲值班人員報告，列車後半部疑似發生火災。法國控制中心立刻通知待命中的消防隊出發前往救助，並通知英國端的控制中心（Railway Control Center），英國控制中心相同地派出待命中的消防隊前往救助。此時亦通知列車司機，有疑似列車火災情形。但列車司機遲疑，並未警覺到情況之嚴重。

晚上 9 時 4 分，列車司機發現駕駛座控制盤上有異常警報燈亮起，於是按照列車發生火災時的標準緊急運轉策略，停止列車行駛，準備將著火之貨車廂與列車脫離，然後將載有人員之車廂拖離事故現場。但因電氣系統故障，無法將著火之貨車廂與列車脫離。

又先前列車停車前之速度極快，列車停後之活塞效應極大，將列車後面貨車廂產生的濃煙往前推送。不巧於客車廂中有人將窗戶打開，大量濃煙侵入車廂中，乘客紛紛以手帕等掩住口鼻，等待救援。

著火列車停車後 11 分鐘，在有消防隊員的維修兼避難隧道之專用運輸車（Service Tunnel Transport System Vehicle）已經抵達著火列車停車地點之橫坑附近。經由消防隊員的協助，將出事列車上的所有人員，包括 3 名列車工作人員與 31 位乘客，引導至維修兼避難隧道搭專用運輸車離去。總共有 8 人因濃煙嗆傷，其中駕駛與一位孕婦共 2 人傷勢較重，不過經送往醫院後，均無大礙。

2.5.3 災後調查分析

英法海峽過港隧道對於列車發生火災時的標準緊急運轉策略（Standards Operation Procedure）主要有二點：

1. 當列車在隧道內發生火災且未失去動力時，列車繼續行駛並開出隧道外，停靠於安全迴避軌道線上。
2. 當列車在隧道內發生火災且失去動力時，須將貨車與列車脫離，以避免火勢延燒至整個列車。

因此當本列車於英法海峽隧道內發生火災時，列車之工作人員馬上依照標準緊急運轉策略進行，但並未成功將著火貨車廂脫離。

所幸英法海峽隧道本身具備良好的通風煙控系統，尤其維修兼避難隧道，裝置加壓設備與自動導引列車，更是讓避難人員與消防隊員，能於無煙的環境從容行進。最重要地，整個進行救災時，依照緊急運轉程序來進行，顯見建立火災時之緊急運轉程序與避難救災計劃，並定期演練之重要性。如此，才能將災害傷亡降到最低，本次事故即是明證。

2.6 小結

總結上述國際間五個重大捷運地鐵系統火災事故，如表 2-1 所示：

表 2-1 國際間五個重大捷運地鐵系統火災事故統計

重大火災事故	死亡人數	受傷人數	安全設施運轉
亞塞拜然地鐵大火	289	265	失效
英國 King's Cross 地下車站火災	31	27	失效
美國舊金山灣地下捷運火災	1	44	失效
日本日比谷線地下鐵火災	0	11	成功
英法海峽隧道火災	0	0	成功

1995 年 10 月 29 日傍晚，於亞塞拜然共和國首府巴庫，一列五節車廂之地下鐵列車，由 Uldus 站往 Narimanov 站行駛，每節車廂約載有 250~300 人。因列車機件故障，列車於地下隧道內發生嚴重火災，共造成 289 人死亡，265 人重傷，750 人以上獲救。

此次造成如此重大傷亡事件，主要肇因於隧道通風系統之緊急煙控模式失敗所致。由於事先沒有一套完整有效的緊急運轉程序體系，以致事故發生時，隧道內無法提供緊急事故時之良好避難環境。旅客倉皇無章地逃生避難，增加傷亡機會。

加上車廂內部大量使用易燃裝修材料，助長火勢並切斷旅客逃生去向，造成避難者相互踐踏，場面更加混亂無章。

上述亞塞拜然地鐵大火之缺失，同樣地發生在 1987 年 11 月 18 日晚上英國 King's Cross 地下車站。

因旅客抽煙，未熄滅之火柴經電扶梯之縫隙，掉落至電扶梯之機件溝槽，引燃油脂，形成火災，火勢一發不可收拾。共造成 31 人死亡，多人重傷。造成傷亡慘重的原因可從硬體面與制度面來檢討。

首先為車站設施硬體方面，車站內部大量使用易燃和有毒的裝修材料，火災形成時，遂很快造成閃燃。再加上車站消防安全設備設置不全，如並無裝置自動灑水系統等，以致火勢擴大而無法控制。車站內雖有緊急廣播系統，但事故發生時沒有告知旅客火災的狀態，以及引導人員逃生避難等。

每年有消防檢查，但檢查的內容只不過是涉及易燃物品的堆放和滅火器的放置，並無消防安全設備性能之檢驗。

其次為車站使用管理方面，車站方面並無嚴格禁止旅客在站內飲食及抽煙，以致形成本次火災之導因。此外，並無一套完整有效之緊急運轉程序，以致發生事故時，工作人員在緊急狀況下並未做出正確的反應，而幫助旅客避難逃生，以及幫助消防救助之進行。

歸納上述兩大火災事後分析可得知，為減少因發生火災時之傷亡程度，首先有必於硬體方面要求使用難燃物或不可燃物，對於基本的消防安全設備之設置，如火警探測器、自動撒水系統、緊急廣播等，需確實要求。

最後再依照消防設備之性能與操作，如煙控性能與煙控系統運轉特性，訂定一套完整有效之緊急運轉程序。然後，確實落實於管理者，如車站工作人員，甚至使用者，旅客等。如此才能大大減低因火災所能造成之危害，以增進人身安全，提供安全舒適之運轉環境。

美國舊金山與奧克蘭間的舊金山灣捷運系統，於 1979 年 1 月 17 日下午 6 時許，因先前列車的意外事故，但由於沒有徹底檢查與修護，導致後面行駛

列車機件故障形成大火。共造成 1 位消防隊副隊長死亡，44 位消防人員受傷。

本次火災事故中，火災事故初期，由於緊急通風閘門未全部關閉，因而致使濃煙籠罩整輛列車。其次，連絡失當，消防隊員奔錯地點，因而浪費許多寶貴時間。再由於營救列車啟動行駛，造成活塞效應，使濃煙進入維修通道與 M2 隧道，而氣流大亂造成傷亡。顯見並無依照緊急運轉程序來進行救災，須建立完整之火災緊急運轉程序與避難救災計劃，並定期演練。

1968 年 1 月 27 日中午時分，日本東京都日比谷線地下鐵發生火災，地點在「六木本」車站與「神谷町」車站間之隧道內，因機件故障，列車發生火災。總共造成 11 名人員受傷，包括：團營地下鐵職員 8 名及消防隊員 3 名。

因隧道內並無通風煙控系統之設計，故火災時產生的濃煙，受到列車的活塞效應與大氣的自然風二種因素的影響。進入火場搶救之救援列車，因電力供應中斷，無法抵達現場，失去救援目的。另外，消防隊員從上風方向進入火場，乃為幸運之處。應設置通風煙控系統，而提供消防隊員一條無煙之進入搶救路線，才是正確之設計理念。

最後介紹之 1996 年 11 月 8 日英法海峽隧道火災，因具備完整之緊急運轉程序，所幸並無造成人員重大傷亡，只造成部分之財物損失。

英法海峽隧道本身具備良好的通風煙控系統，尤其維修兼避難隧道，裝置加壓設備與自動導引列車，更是讓避難人員與消防隊員，能於無煙的環境從容行進。最重要地，整個進行救災時，依照緊急運轉程序來進行，顯見建立火災時之緊急運轉程序與避難救災計劃，並定期演練之重要性。如此，才能將災害傷亡降到最低，本次事故即是明證。

第三章 高雄捷運典型地下車站煙控模擬分析

3.1 煙控模擬分析原理

3.1.1 模擬程式簡介

本案針對高雄捷運系統有關地下車站於裝設月台屏門系統下進行整體環境狀況模擬，以瞭解萬一發生火災時可能產生之影響。所採用之方法為利用三維計算流體力學模擬程式（Computational Fluid Dynamics, CFD）進行煙控系統性能之模擬與分析。

電腦模擬分析之軟體程式為 Computational Dynamics Ltd.所發展之三維計算流體力學軟體 *Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions*（以下簡稱 STAR-CD），為現今國際間流體計算應用著名熱流分析程式之一。

一般而言，熱流分析軟體於工程應用上，首先面對之問題即在於所求解之流場形狀極為多樣，幾何形狀之複雜性遠非一般實驗室設備所能比擬。STAR-CD 因具有強大的非結構性網格系統（Unstructured mesh）功能，可以接受 Hexahedron，Tetrahedron，Triangular prism，Pyramid，Polyhedron 等形狀的網格元素，對與網格建立具有極大的彈性（state-of-the-art meshing flexibility）。

配合 STAR-CD 數值穩定性及收斂速度，可以解決模擬臨格點數量、收斂速度、記憶體空間和準確度之間取舍的難題，考量避免題目解析於建立幾何結構時產生失真性，故本報告採用 STAR-CD 之考量之一即著眼於該軟體非結構化網格的建立特色，可以分析捷運工程設計案任何複雜的幾何外型問題。有關 STAR-CD 執执行程序【6】，圖 3-1 為 STAR-CD 架構圖，圖 3-2 為 STAR-CD 程序處理流程圖。

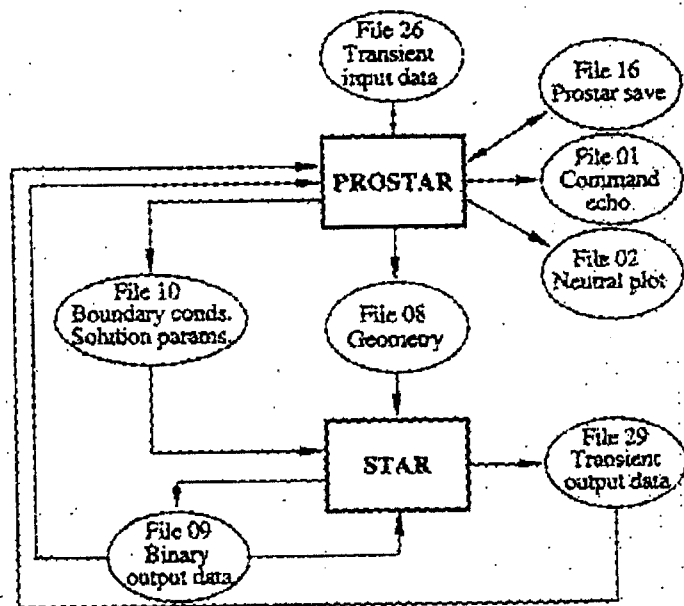


圖 3-1 STAR-CD 架構圖

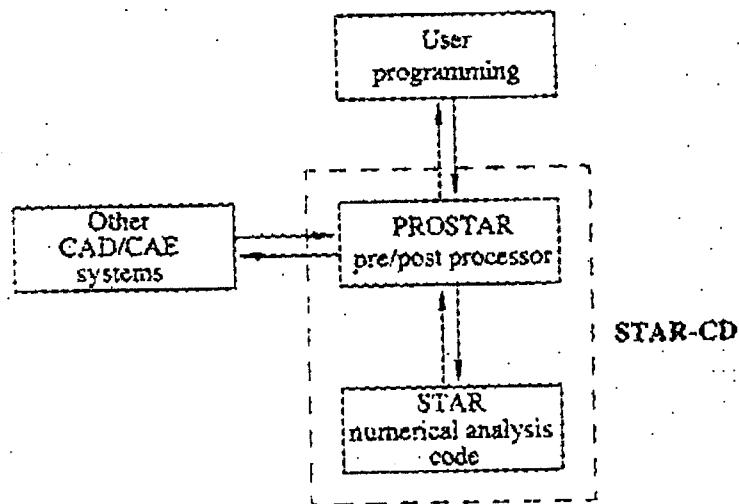


圖 3-2 STAR-CD 處理流程圖

3.1.2 統御方程式

吾人如欲瞭解捷運車站環境狀況，可利用三維計算流體力學及熱傳學之數值分析方法，預測其氣流場、壓力場、溫度場及濃度場。分析此種型態之統御方程式（Governing Equation），主要原理為藉由質量與動量守恆原理推導而得，其方程式如下：

(1) 連續方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

(2) 動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U} - \mu \nabla \vec{U}) = B - \nabla P + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{U})] \quad (2)$$

其中：

$\vec{U} = (u, v, w)$ ：流體速度

P：壓力

ρ ：流體密度

t：時間

B：重力項

μ ：流體黏滯係數

(3) 能量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} H) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0 \quad (3)$$

其中：

$\vec{U} = (u, v, w)$ ：流體速度

P：壓力

T：溫度

ρ ：流體密度

t：時間

B：重力項

μ ：流體黏滯係數

$H = h + \frac{1}{2}U^2$ ：總焓

λ ：熱擴散係數

(4) 對於浮力效應採用布氏近似法 (Boussinesq Approximation)，亦即：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{U}\phi - \Gamma \text{grad}\phi) = S \quad (4)$$

其中：

左邊第一項代表時間項

左邊第二項代表對流項

左邊第三項代表擴散項

右邊為源項

ϕ 為變數

Γ 為擴散係數

上述方程式除了動量方程式的重力項之密度表示為 $\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$ 外，其他各項之密度均設為常數， $\rho = \rho_0$ ，其中 β 為熱膨脹係數， T_0 為參考溫度。

3.1.3 火源強度說明

有關火源的設計對建築的煙控系統有決定性的影響，火源大小代表熱釋放率的量，熱釋放率亦會影響火源之成長速度，而設計之基礎在於穩定的火源（steady fire）、不穩定的火源（unsteady fire）。

A、穩定的火源：

在自然狀態下火源是不穩定的，但將其理想化成穩定的火源，較容易描述及研究。穩定的火源其熱釋放率為定值，在應用上，通常採用穩定的火源做為明確且保守的設計。Morgan（1979）【7】建議將商業、住宅區每單位樓層面積之熱釋放率視為 500kW/m^2 (44Btu/s-ft^2)，而辦公室建築每單位面積之熱釋放率視為 225kW/m^2 (20Btu/s-ft^2)，在特殊大空間建築中，則將擁有可燃物之建築空間每單位面積之熱釋放率視為 500kW/m^2 (44Btu/s-ft^2)，而可燃物有限之建築空間之每單位面積之熱釋放率則視為 225kW/m^2 (20Btu/s-ft^2)。為穩定火源設計的基準量。地下捷運車站屬於可燃物有限的空間。

B、不穩定的火源：

火源在潛伏期內燃燒的熱釋放率非常低，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 3-3 所示，可將此狀況表示成理想化的拋物線方程式。

$$Q = a(t - t_o)^2 \quad (5)$$

其中

Q：火源的熱釋放率，kW (Btu/s)

a：火源的成長係數， kW/s^2 (Btu/s^3)

t：開始燃燒後的時間，sec

t₀：有效的著火時間，sec

而在本模擬之煙控系統中，潛伏期並非必要考慮之因素，所以上式可簡化為：

$$Q = at^2 \quad (6)$$

其中

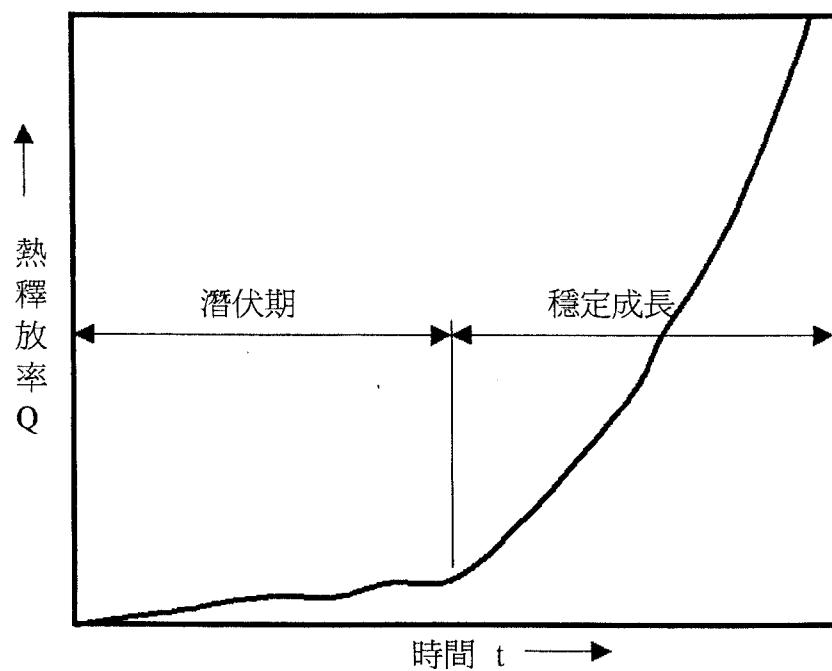
t：有效燃燒後的時間，sec

將此式稱為"t-squared fires"。NFPA 92B (2000) 【8】廣泛的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 (1,000Btu/s) 以後之時間，表 3-1 列出一些火源模式及 t_g 之值。因火源防護之作用或燃燒空氣之缺乏，其熱釋放率便會至一臨界點後停止成長，而後其熱釋放率可視為常數，如圖 3-4 所示。

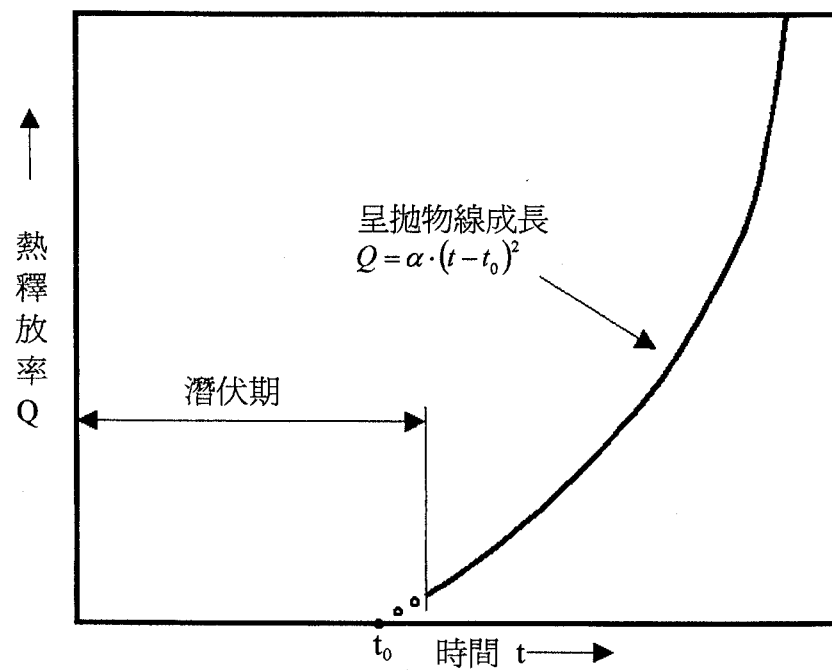
表 3-1 火源成長模式的係數

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

有關本案火源強度量估算，考量捷運地下車站火災發生後車站內部設備及實際進、出站人員攜帶行李等可能之燃燒物，並經參考英國 Building Research Establish 出版報告：Design Principles for Smoke Ventilation in Enclosed Shopping Center 【7】，其統計在人員聚集公共場所時可能火災強度為 2.0~2.5MW，因此在本報告模擬大廳層及月台層中所選用之火災強度為 2.0MW，此數值之假設應屬合理。



(a) 典型火源成長曲線



(b) 理想二次火源成長曲線

圖 3-3 火源成長曲線

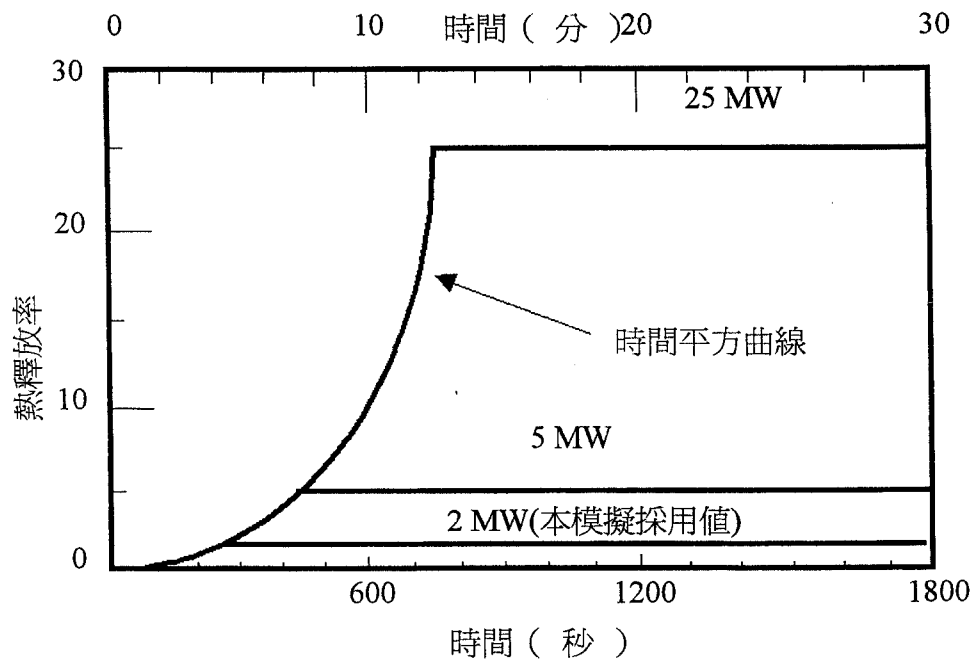


圖 3-4 不同熱釋放率的火源成長曲線

有關地下車站相關火載量資料，可參考國外防火工程設計手冊【9】所附表格進行推估。表 3-2 為各種常見物質的淨燃燒熱 (Net Calorific Values)，而表 3-3 則為常見液體或固體可燃物之燃燒特性，其中包括熱釋放率 (Heat Release Rate)。日後等高雄捷運系統地下車站站體決定出所採用的裝修材料後，即可依照所附表格大略求得站體的火載量。

求出火載量後，發煙量可依循下列公式估算：【8】

$$m = C \times E^{1/3} \times Z^{5/3}$$

其中

- m 為發煙量 (kg/sec)
- C 為火場周圍空氣捲入係數 (Entrainment Contant)
- E 為火載量 (kW)
- Z 為火場淨高 (m)

由以上公式顯示，發煙量之求得，除火載量較為單純外，其他項 C、E 皆與火場當時的環境有關如火場附近有無門窗、門窗形狀、建築物尺寸等等複雜因素有關。發煙量之求得，實比火載量為不易。

表 3-2 常見物質的淨燃燒熱統計表

Solids	MJ/kg		MJ/kg
Anthracite	31-36	Ureaformaldehyde	14-15
Asphalt	40-42	Ureaformaldehyde foam	12-15
Bitumen	41-43	Foam rubber	34-40
Cellulose	15-18	Rubber isoprene	44-45
Charcoal	34-35	Rubber tire	31-33
Clothes	17-21	Silk	17-21
Coal, Coke	28-34	Straw	15-16
Cork	26-31	Wood	17-20
Cotton	16-20	Wool	21-26
Grain	16-18	Particle board	17-18
Grease	40-42	(chipboard and hardboard)	
Kitchen refuse	8-21		
Leather	18-20	Liquids	MJ/kg
Linoleum	19-21	Gasoline	43-44
Paper, Cardboard	13-21	Diesel oil	40-42
Paraffin wax	46-47	Linseed oil	38-40
Plastics:		Methanol	19-20
ABS	34-40	Paraffin oil	40-42
Acrylic	27-29	Spirits	26-28
Celluloid	17-20	Tar	37-39
Epoxy	33-34	Benzene	40.1
Melamine resin	16-19	Benzyl alcohol	26.9
Phenolformaldehyde	27-30	Ethyl alcohol	26.9
Polyester	30-31	Isopropyl alcohol	31.4
Polyester, fibre-reinforced	20-22		
Polyethylene	43-44	Gases	MJ/kg
Polystyrene	39-40	Acetylene	48.2
Petroleum	40-42	Butane	45.7
Polyisocyanurate foam	22-26	Carbon monoxide	10.1
Polycarbonate	28-30	Hydrogen	119.7
Polypropylene	42-43	Propane	45.8
Polytetrafluorethylene	5.0	Methane	50.0
Polyurethane	22-24	Ethanol	26.8
Polyurethane foam	23-28		
Polyvinylchloride	16-17		

表 3-3 常見液體或固體可燃物燃燒特性統計表

	Bulk density	Regression rate	Specific burning rate	Specific surface	Unit burn rate	Nett calorific value	Heat release rate
	kg/m ³	mm/hr	kg/s.m ² (surface)	$\frac{\text{m}^2(\text{surface})}{\text{m}^2(\text{floor})}$	kg/s.m ² (floor)	MJ/kg	MW/m ² (floor)
Liquids							
Petrol	731	370	0.0751	1.0	0.0751	43.5	3.27
Kerosene	790	282	0.0619	1.0	0.0619	44	2.72
Light oil	930	162	0.0419	1.0	0.0419	41.9	1.75
Meths	806	107	0.0240	1.0	0.0240	27	0.65
Wood							
Flat wood	550	40	0.0061	1.0	0.0061	16.7	0.10
1m cube	550	40	0.0061	6.0	0.0367	16.7	0.61
100mm in crib	550	40	0.0061	18.0	0.110	16.7	1.84
Furniture	550	40	0.0061	65.0	0.397	16.7	6.63
25mm in crib	550	40	0.0061	150.0	0.917	16.7	15.3
Softboard	300	108	0.0090	1.0	0.0090	16.7	0.15
Plastics							
PMMA			0.054	1.0	0.0540	24.9	1.34
Polyethelene			0.031	1.0	0.0310	43.8	1.36
Polystyrene			0.035	1.0	0.0350	39.9	1.40

3.1.4 格點測試與結果分析

本報告進行模擬分析格點測試，以瞭解在採用電腦模擬分析時模擬方法產生結果之準確度。首先比較參考文獻 MacCaffery【10】之實驗，探討在 24KW 火災強度下實測值與電腦計算結果之差異性。其所模擬之模型尺寸為 5.0 公尺 × 5.0 公尺、高度 3.5 公尺之空間。

經其將電腦模擬結果作一對比，有關氣流部分，除在火盤附近（約 1.0 公尺以下）與實測值略有差異外，二者有極佳之相似性。對於溫度場分析結果，本參考文獻之計算值與實測值亦有極吻合。圖 3-5 與圖 3-6 為其氣流場與溫度場之比較圖。

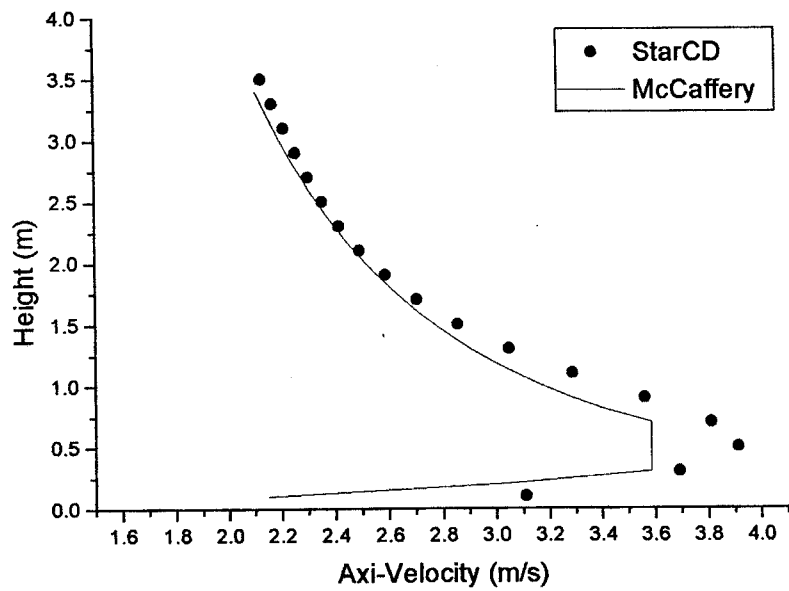


圖 3-5 速度場模擬結果比較圖

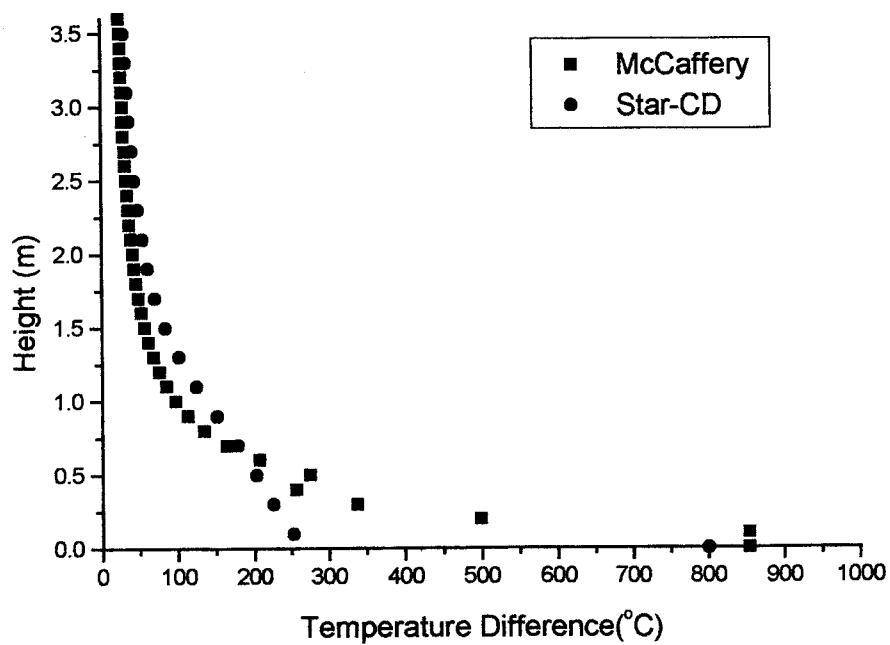


圖 3-6 溫度場模擬結果比較圖

其次針對本報告所採用 2.0MW 火災強度作一分析，經由分析三種不同格點之三維空間模擬—粗格點（40 cm/cell）圖 3-7、細格點（10 cm/cell）圖 3-8 及極細格點（5 cm/cell）圖 3-9，分別顯示不同建立之格點模擬結果。由結果得知，當格點尺寸於 10 cm 以下時，即可獲得極佳火場狀況模擬結果。

STAR-CD 具有格點分析及調適網格產生法之功能，主要作用原理為當初步所規劃之網格於執行獲得結果後，可藉由其各參數計算結果之網格變化率、誤差、殘值等作判斷，自動進行網格與收斂值之調整，以取得正確資料。

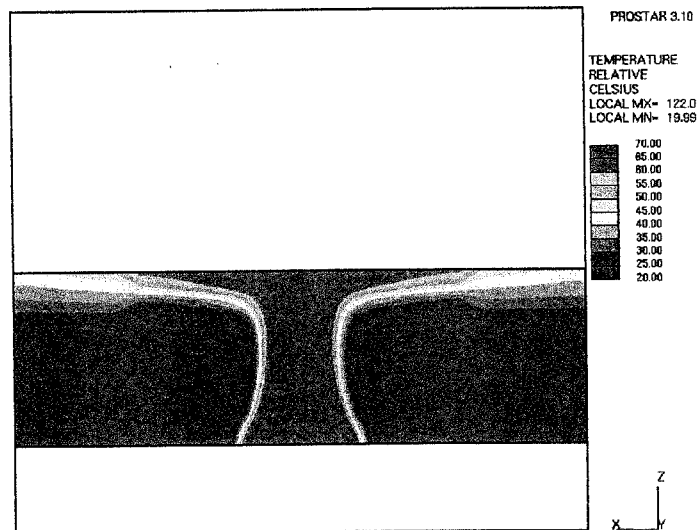


圖 3-7 粗格點模擬分析圖

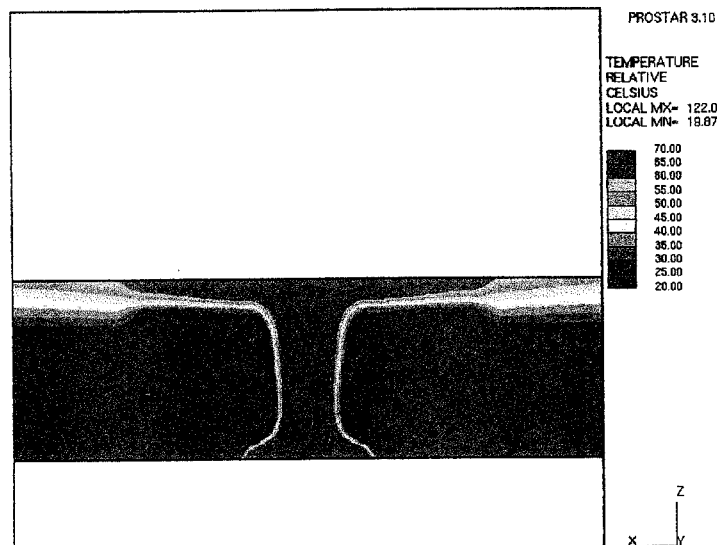


圖 3-8 細格點模擬分析圖

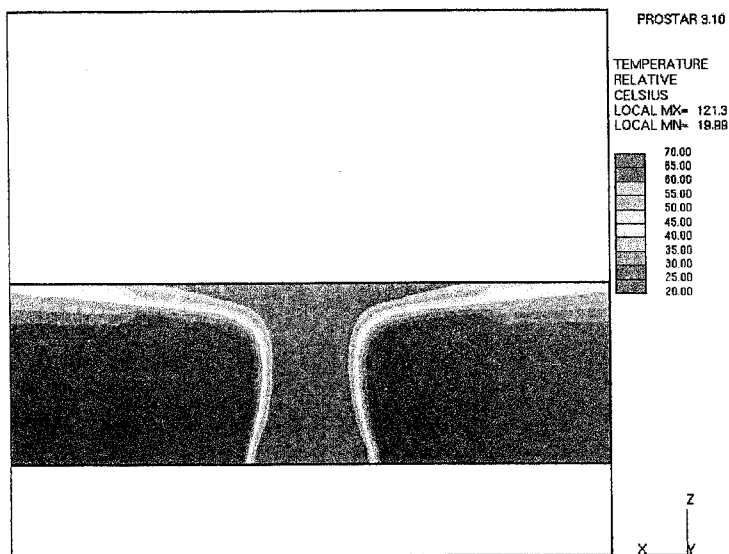


圖 3-9 極細格點模擬分析圖

本報告模擬之車站約為 130 公尺長、9.8 公尺寬（大廳層為 17.0 公尺）、3.0 公尺高之空間，並有二座電扶梯、二座樓梯貫穿大廳層及月台層，經考量精準度及模擬時間二者均衡下建立適當之格點，以獲得準確之結果。圖 3-10 為本報告於模擬大廳層火災其火源位置處建立之格點圖。

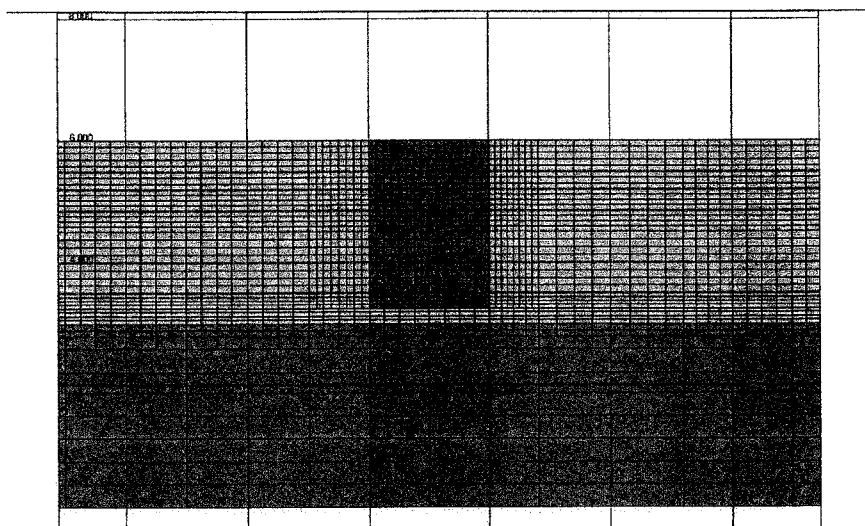


圖 3-10 火源位置格點圖

3.1.5 邊界條件說明

地下捷運車站因需停靠捷運列車並使乘客上、下車廂，因而特色為一狹長之建築物體，造成地下捷運車站風管系統管路極為複雜之現象，圖 3-11 即為一典型地下捷運風管路徑。由圖中顯示，自機房至風口需經由各類風門、彎管分歧管、保溫軟管等，因此如依實際狀建構模擬模型將由其困難性。為簡化問題複雜性並不失模擬精準度下，所選取之邊界位置需詳加探討。

考慮實際風管系統流體流動特性，以 Bernoulli 方程式表示二段風管間流動時氣流狀態為：

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + P_1 + \rho g h_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + P_2 + \rho g h_2 + \Delta P_f \quad (7)$$

其中，符號 V 表示氣流流速， P 為靜壓， h 為高程，而 ΔP_f 為氣流與管壁及配件間產生摩擦損失、能量以不可逆方式消耗造成之壓力損失現象。

關於壓力損失部分（ ΔP_f ）可分為二種形式：摩擦損失（friction loss）及局部抵抗（local resistance），前者導自於流體本身之黏滯性，後者為氣流行經風管系統彎曲、分歧或截面積變化之路徑處。二者計算方式為：

$$\text{摩擦損失：} \Delta P_r = \frac{f_D L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2}$$

$$\text{局部抵抗：} \Delta P_r = \sum C_i \frac{\rho V^2}{2}$$

f_D 為摩擦係數

L 為風管長度

D_h 為水力直徑

C_i 為各式配件局部抵抗係數

C_i 為各式配件局部抵抗係數

由於目前車站風管確實路徑尚未設計，同時考量所建立之風管尺寸、路徑、分歧位置及配件（如防火風門、導流片、風口格柵等）如與實際狀況不符，模擬結果將有失真之虞，因此本次模擬排煙系統之邊界以選取在風口位置處。

依據現場施工情形，在末期風量平衡階段，車站大廳層及月台層排煙風管排煙口之風量可藉由現場人員以風量計調整至相同之風量值，如圖 3-12，此亦為施工階段一必要工作項目，主因消防審查於現場測試時，對各排煙口風量需檢測排煙系統是否達到原設計值。

另在車站月台層軌道區 OTE 回風口部分，由於 OTE 正常作用狀態如上所述可調節至各風口為相同之風量，而此時所使用之風機為與 UPE 合併共用。然在緊急狀況時，所有 UPE/OTE 風機的合併排氣導向了軌道上方排氣管道，排氣氣流因此大增。對於最終氣流壓降部分，因本研究於 3D CFD 所建之格點亦包含風管，將可於模擬結果中顯現。

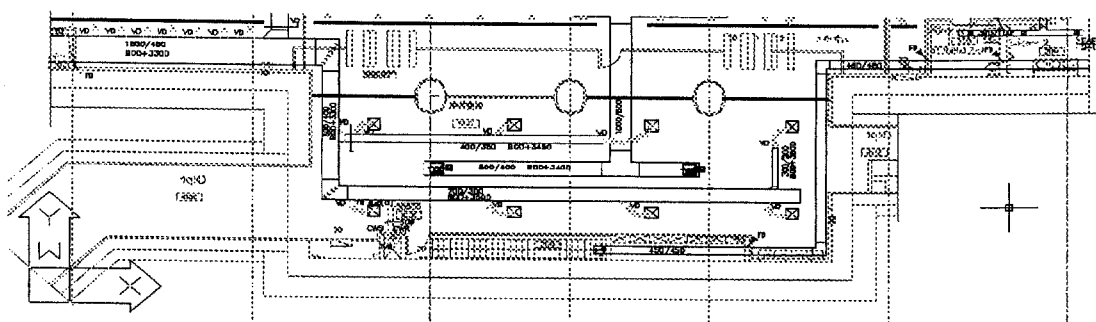


圖 3-11 地下捷運車站風管配置圖範例

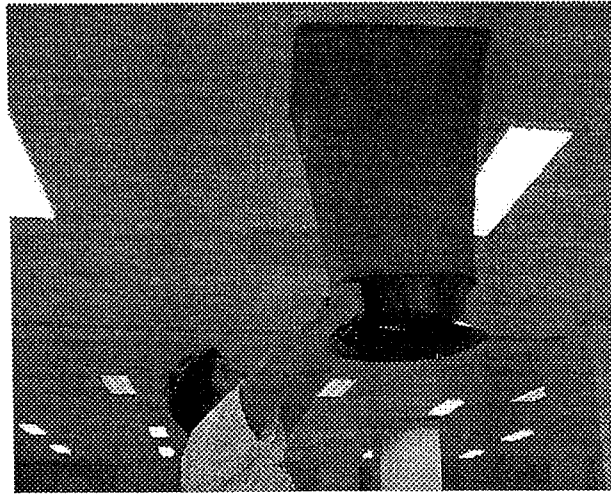


圖 3-12 現場風量調整情形

3.1.6 捷運車站附設月台屏門之特性

目前高雄捷運系統新規劃之捷運車站均採設置月台屏門之設計理念。所謂月台屏門係於捷運車站內，沿月台邊緣設置之透明自動門，當列車到達時，列車門與月台門同時開啓，待乘客全部上車後，月台門即關閉。本系統可將有空氣調節的月台乘客區與列車行駛的軌道區予以隔開，應用於熱帶地區效果尤為顯著，所具備之優點如下：

- (1) 安全性：將月台上的旅客與通過的列車加以隔離，避免乘客失足墜落軌道危險。
- (2) 噪音減少：月台屏門有隔音效果，故車站內較為寧靜，乘客可更清楚聽到廣播。
- (3) 節省能源消耗：列車產生的熱氣不會進入車站，空調效果較佳，使乘客感覺比較舒適，並可有效降低空調容量。
- (4) 清潔、美觀：月台屏門的設置展現安全、舒適及現代化的風貌。
- (5) 降低建造成本：地下車站因設置月台屏門可降低環控設備容量同時縮減站體尺寸，扣除裝設月台屏門之成本，將可節省建造成本。

3.2 高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬

3.2.1 月台區模擬參數說明

為瞭解捷運地下車站設置排煙系統之效能，本案針對車站之排煙系統進行模擬，範圍包含大廳層及月台層等公共區域，因目前本工程案尚屬規劃階段，各車站詳細建築及機電圖說仍於作業階段中，模擬過程為考量與規劃報告一致性，所引用之參數及排煙系統所擬訂之規格容量主要數據係參考自「高雄都會區大眾捷運系統工程民間參與捷運顧問（第一部份）橘紅線地鐵環境模擬報告」之內容。

本研究項目之進行為典型地下車站大廳層及月台層排煙系統煙控模擬，當月台屏門將月台候車區與隧道區分開後，則月台候車區可視為與居室雷同之空間，此時進行區劃機械排煙，則可獲得較佳的煙控效果。其設計重點有：

- 1.防煙區劃配置、
- 2.定址式探測器及排煙口設計。

有關捷運車站防煙區劃的配置，即對月台屏門內之空間進行適當之區劃。依據我國現行法規「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條中規定：「每層樓地板面積每 500 m² 內，以防煙壁區劃。」第三款亦規定：「依第一款區劃（以下稱為防煙區劃）之範圍內，任一位置至排煙口之水平距離不得超過 30 m，排煙口應設於天花板或其下方 80 cm 範圍內，除直接面向戶外，應與排煙管道連接。但排煙口設在天花板下方，防煙壁下垂高度未達 80 cm 時，排煙口應設在該防煙壁之下垂高度內。」之相關規定設計。同條文亦規定地下建築物之地下通道，防煙壁應自天花板下垂 80 cm 以上。

經由電腦 3D CFD 模擬分析可取得站內各區域之氣流分析情形，為進一步瞭解模擬結果有關氣流流速對人員與環境產生之影響，可參考表 3-2 作一比照與參考。

表 3-2 風力級數表

風級	風級名稱	風速 (m/s)	狀態說明
0	無風	0~0.2	靜，煙直上。
1	軟風	0.3~1.5	煙能表示方向，樹葉略有搖動。
2	輕風	1.6~3.3	樹葉微響，旗子開始飄動，人臉部感到有風。
3	微風	3.4~5.4	樹上有很細樹枝搖動不停，旗子展開。
4	和風	5.5~7.9	小樹枝搖擺，地面上灰塵和紙屑被吹起。
5	勁風	8.0~10.7	有葉的小樹搖擺，內陸水面有小波。
6	強風	10.8~13.8	大樹枝搖動，舉傘困難，電線呼呼作響。
7	疾風	13.9~17.1	全樹搖動，迎風步行感到不便。
8	大風	17.2~20.7	拆毀小樹枝，迎風步行感到阻力很大。

目前高雄典型捷運地下車站有關防煙區劃的區分及面積大小決定，為依我國現行消防法規進行設計，將月台層規劃為 5 個防煙區劃，而大廳層則為 6 個防煙區劃。我國現行消防法規雖然容許之最大區劃面積為 500 平方公尺，然考量風機容量及區劃數量二者，本報告將取一適當防煙區劃面積值。

為增進煙控系統之排煙效率，除了有防煙區劃之規劃外，其另一設計重點為定址式探測器 (Detector) 及排煙口的設置。在防煙區劃內裝置定址式的探測器及排煙口，而進行點排放 (Point Extraction) 之機械排煙煙控系統。

圖 3-13 為模擬之典型標準化地下車站模型立面圖，車站區分為上方大廳層及下方月台層二部分，圖 3-14 為車站模型平面圖，圖中亦顯示各模型之尺寸，如月台層、大廳層之整體建築長度、寬度及高度值，並將設計圖中之欄杆、盥洗室等部分一一建立，另設計圖有關升降梯部分將其挖空，即視為牆壁邊界。

建立之模型外觀圖型可分別如圖 3-15、圖 3-16 之說明，因目前車站各站之地面層出入口高程已初步擬訂完成，本報告模擬之捷運車站地面層出入

口相關尺寸值如圖 3-17，據此建立網格，並將出入口於地面出口處定義為壓力邊界，即在此處地下車站環境氣流與外界環境相接鄰。其他說明如下：

- (A) 所有建立模擬模型之網格數計約十三萬個網格 (cell)，依不同案例而有增減。
- (B) 為瞭解排煙設備啟動後大廳層流場狀況，案例一、二為大廳層排煙系統在相同排煙風機容量下，開啓單一區劃及二相鄰區劃時，分析氣流組織之差異性。
- (C) 案例三、四則為比較月台層排煙系統開啓中央單一區劃時，受出入口自然風 1.5 m/s 對排煙氣流組織之影響。
- (D) 為研究月台層火災發生後溫度場及濃度場隨時間變化下其分佈情形，本報告以案例五加以分析，並觀察 A-A、B-B 兩斷面之變化。
- (E) 不必要之密閉空間，如電梯機房、PAO、樓梯下方之網格予以挖空去除。月台層、穿堂層間之樓板及隔間牆設其材質為流體無法穿透之 Baffle，代替實心壁體之網格。
- (F) 大廳層經區分為 6 個防煙區劃，防煙區劃的面積平均值為 357.0 m²，區劃及設置防煙垂壁之位置如圖 3-15、3-16 所示。月台層則區分為 5 個防煙區劃，防煙區劃面積平均值為 244.4m²。各區劃及設置防煙垂壁之位置如圖 3-18、3-19 所示。
- (G) 經參考現行「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條內容，計算並取安全係數 1.2 倍，穿堂層排煙風機容量為 13.09 CMS、月台層排煙風機容量為 8.96 CMS。排煙口之設置尺寸為 1200mm x 600mm，主要考量為取較適當之尺寸除可維持風速不致過高產生音嘯效應外，亦可減少現場配管工作，避免增加施工困難度。排煙口之開啓區域則分為單一區及二區二種模式。
- (H) 具火源釋放之模擬案例，其火災地點於月台層位置中央處，火源採用

2.0MW 之設計值，火災型式為依循 NFPA 之「T-square」理論進行，最大火載量發生時間為 240 秒，採用 2.0 MW 火源設計值之依據已於 3.1.3 節中說明。

- (I) 有關火場濃度場，因考量不同燃燒物質將有不同之燃燒生成物，因此本研究係以無因次化方式進行分析，並以二氧化碳作為濃度判斷依據。本研究係定義在 240 秒時火源處濃度為 1.0，觀察整個現場濃煙分佈狀況。本研究對火場中濃度場計算係以實際現場狀況而定，假設在完全燃燒下 (full developed fire) 火源處濃煙之濃度值為 1.0，採無因次化方式進行分析，以相對值擴散現象，觀察並分析火場濃煙分布情形。本研究採二氧化碳作為濃度追蹤依據，藉由 Star-CD 內建二氧化碳性質曲線，計算在不同位置處、不同時間下，濃煙隨溫度、壓力變化下濃度場分布情形。
- (J) 所有模擬均假設站體除四座出入口外，其餘部分均為密閉、無洩漏情形。

表 3-3 為相關月台層、大廳層排煙系統模擬參數值，表 3-4 為本文模擬案例說明。

表 3-3 月台區煙控模擬案例說明

排煙區劃	排煙區數	平均排煙面積 (m ²)	排煙口 (mm × mm)	排煙風機 (CMS)
大廳層	6	357.0	1200x600	13.09
月台層	5	244.4	1200x600	8.96

註：風機容量安全係數取 1.2

表 3-4 月台區煙控模擬案例說明

排煙區劃	案例一	案例二	案例三	案例四	案例五	案例六	案例七
排煙區數	1	2	1	1	1	1	1
大廳層 排煙系統	√	√				√ (無自然風)	√ (有自然風)
月台層 排煙系統			√	√	√		
火源釋放					√	√	√

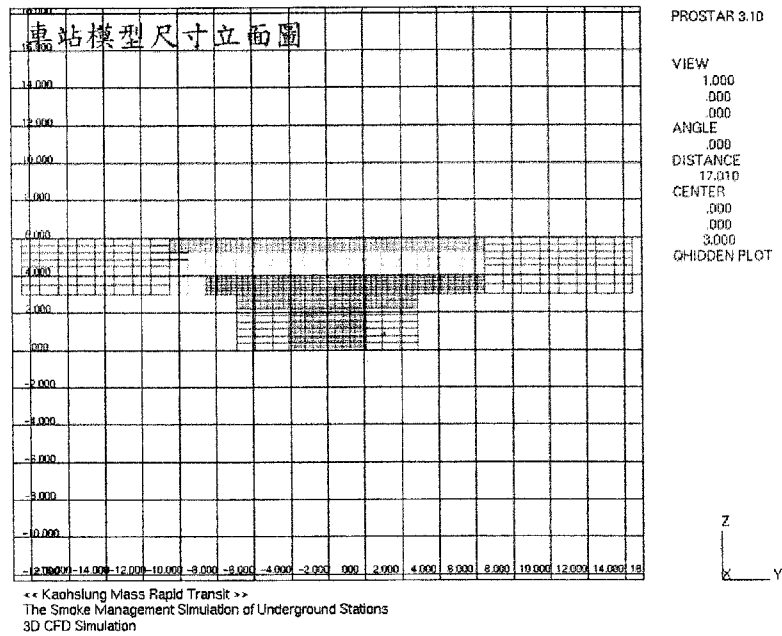


圖 3-13 車站模型立面圖

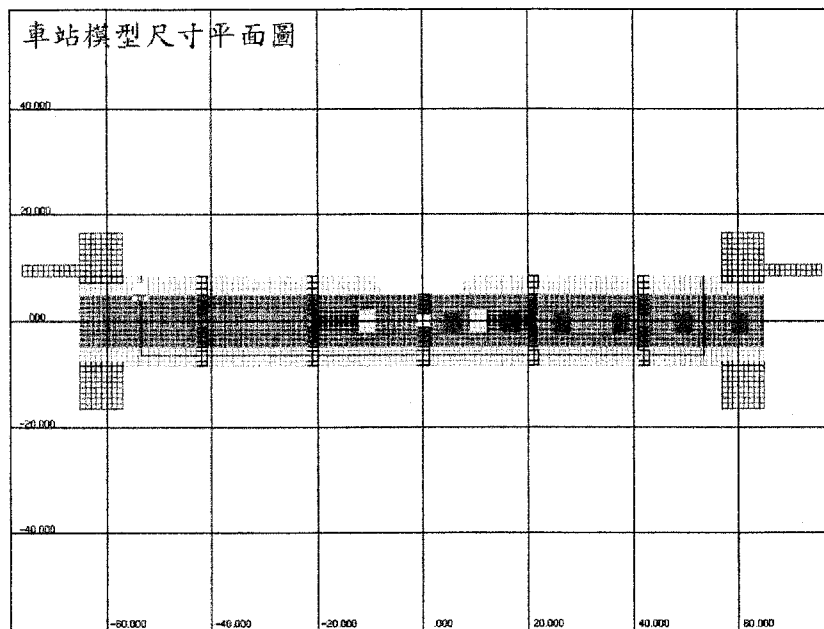


圖 3-14 車站模型平面圖

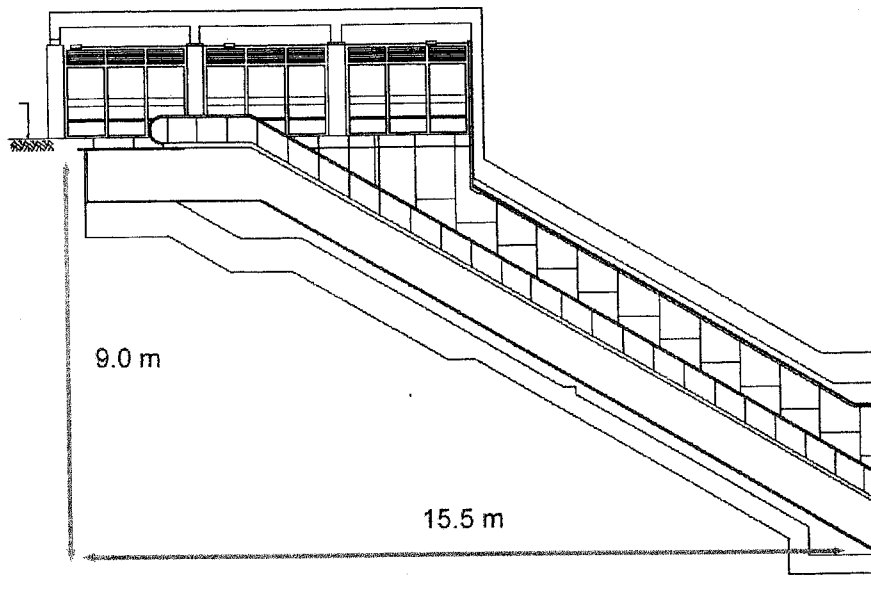


圖 3-17 捷運車站地面層出入口示意圖

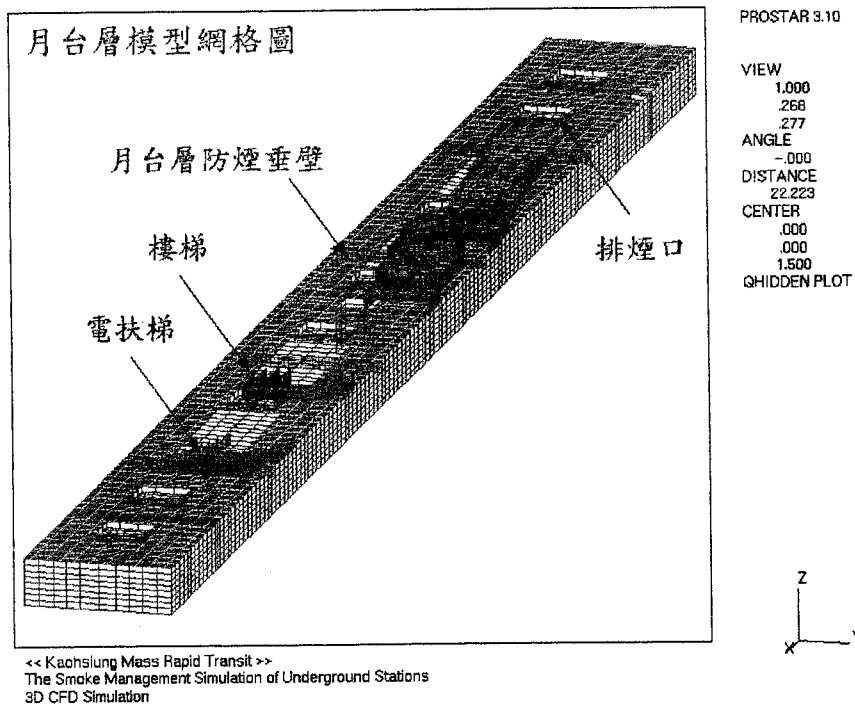


圖 3-18 月台層網格圖

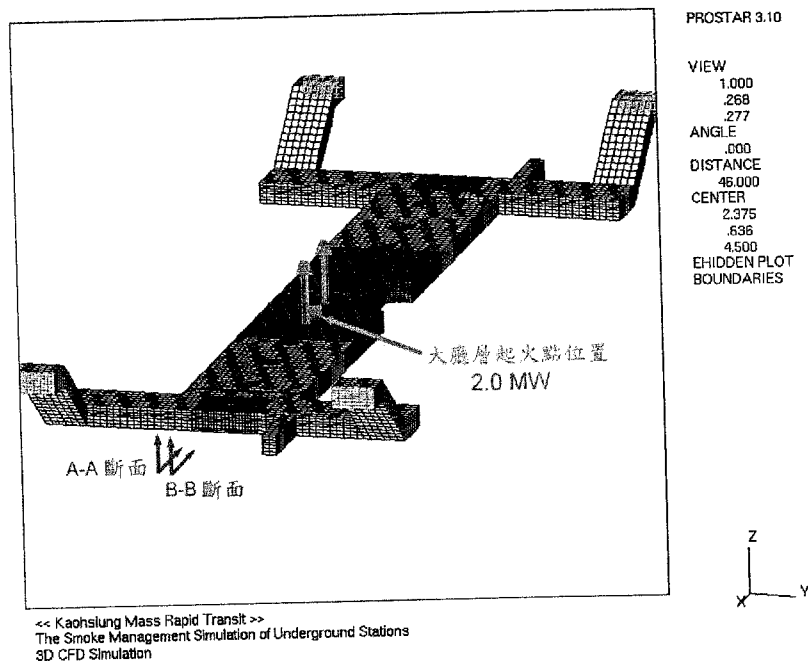


圖 3-19 大廳層排煙系統網格圖

3.2.2 月台區煙控模擬結果分析

由以往模擬經驗與現場瞭解，火災發生後除火場附近外，氣流溫度均不高，故本次模擬先進行四項不考慮溫度場影響之模擬。案例一與案例二分別模擬單一區劃排煙口及二個區劃排煙口分別進行排煙，觀察比較其煙控效果。案例三與案例四為模擬火災發生於月台區、有無外界風速 1.5m/s 時、對排煙性能之影響。案例五與案例六分別模擬月台層與大廳層發生火災時，檢視在火源斷面處及在排煙口斷面處之斷面，顯示不同時間濃煙分佈現象。案例六並假設在實際狀況下排煙風機在 60 秒後方達到全量之運轉狀態，觀察自火災發生後隨著不同時間溫度場及濃度場之變化情形。以上各個案例模擬條件及其結果說明如下：

◎案例一

模擬情境：

假設月台區大廳層發生火災時，排煙系統只啟動單一防煙區劃排煙口。

模擬結果：

經由模擬結果分析顯示，由於月台區大廳層有較為寬闊之空間，當啟動單一區劃之排煙口時，雖依據現行消防法規所設計之排煙風量，然橫斷面氣流速度極小，其值小於 1.0 m/s，模擬結果如圖 3-20 所示。

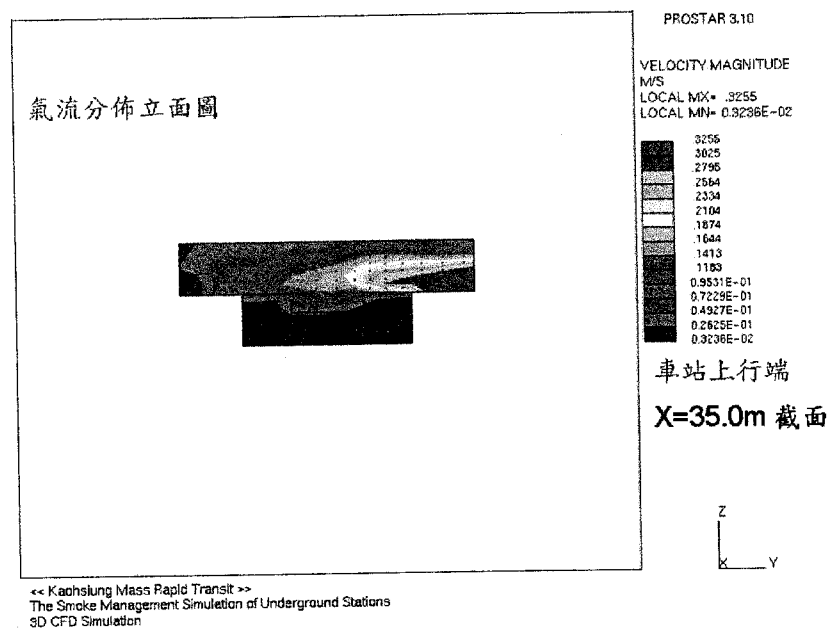


圖 3-20 氣流分佈立面圖（案例一）

其排煙系統所抽取之排煙風量之來自於外界氣流，氣流進入站體後，環繞出入口產生回流後由排煙系統抽出，如圖 3-21 所示。且僅在排煙口位置處有較為高速之氣流，其結果如圖 3-22 所示。

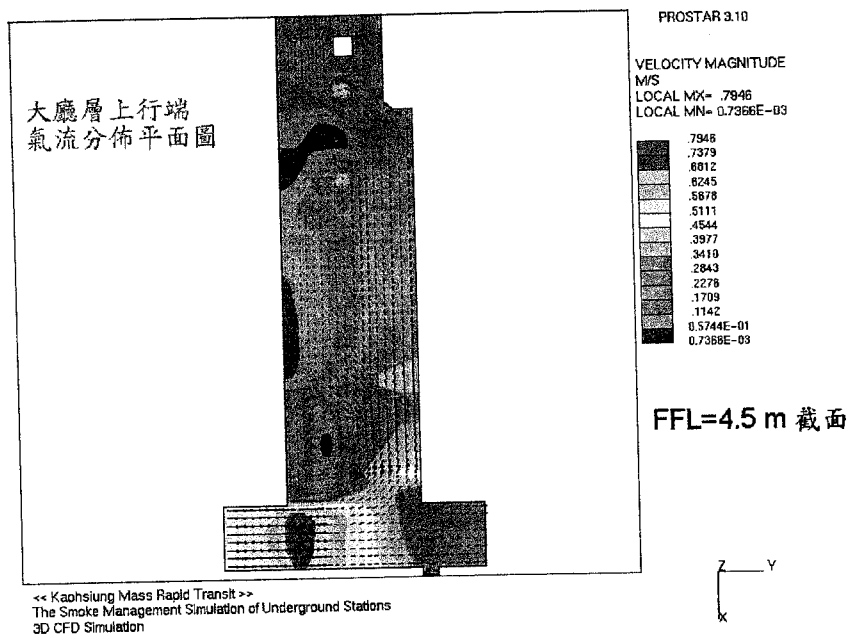


圖 3-21 氣流分佈平面圖（案例一）

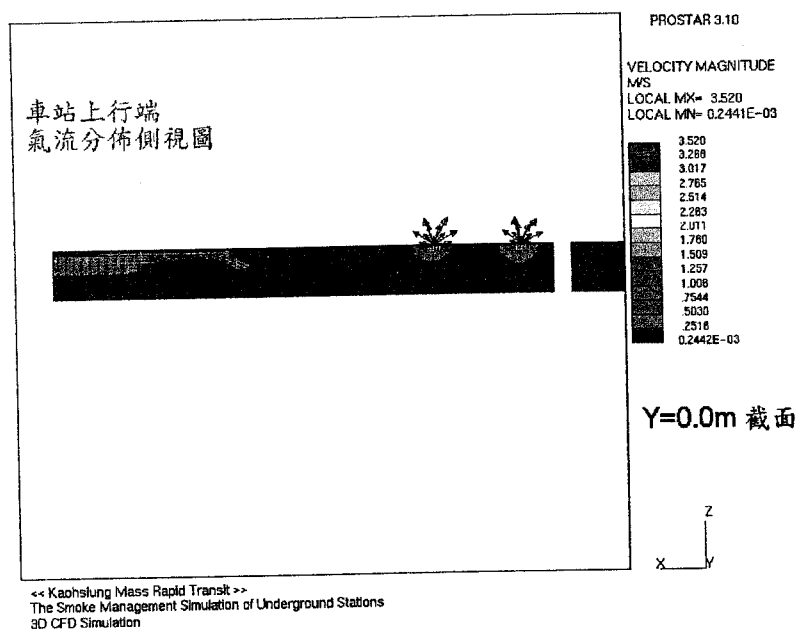


圖 3-22 氣流分佈側面圖（案例一）

◎案例二

模擬情境：

假設月台區大廳層發生火災時，排煙系統啟動二個防煙區劃之排煙口。

模擬結果：

經由模擬結果分析顯示，由於月台區大廳層有較為寬闊之空間，當啟動二個防煙區劃之排煙口時，其示意圖如圖 3-23 所示，雖依據現行消防法規所設計之排煙風量，然橫斷面氣流速度極小，其值小於 1.0 m/s，模擬結果如圖 3-24 所示。

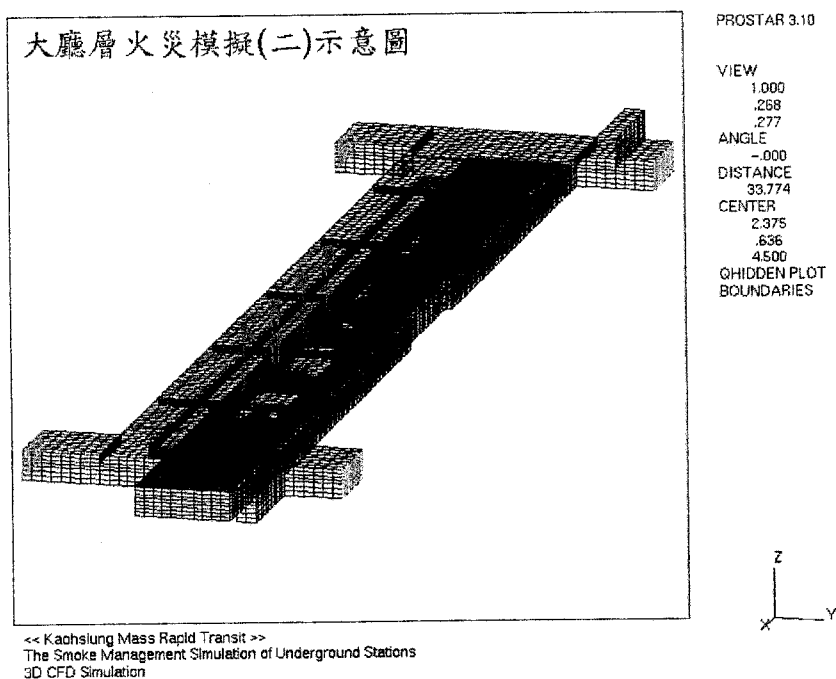


圖 3-23 大廳層排煙系統網格圖（案例二）

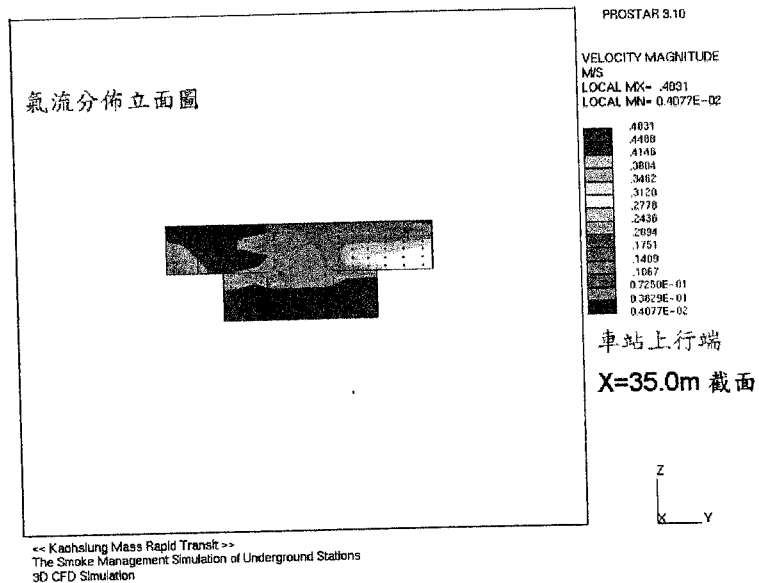


圖 3-24 氣流分佈立面圖（案例二）

其排煙系統所抽取之排煙風量之來自於外界氣流，氣流進入站體後，環繞出入口產生回流後由排煙系統抽出，如圖 3-25 所示。且僅在排煙口位置處有較為高速之氣流，其結果如圖 3-26 所示。

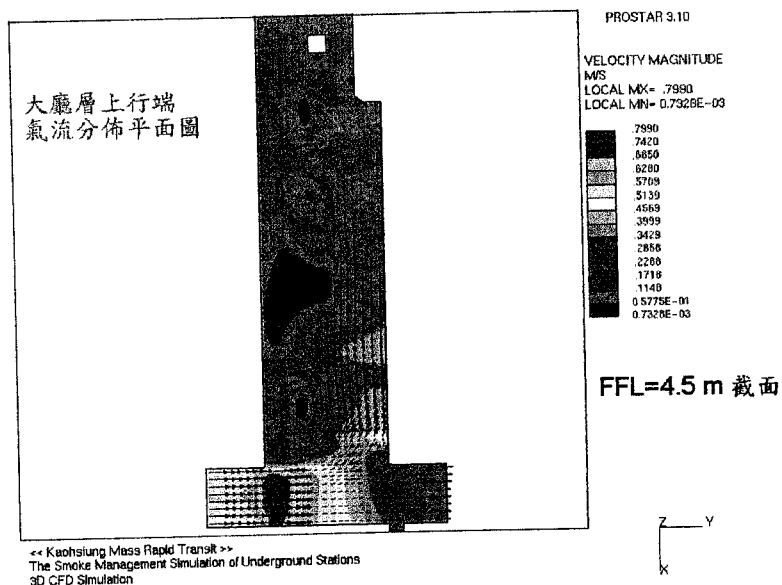


圖 3-25 氣流分佈平面圖（案例二）

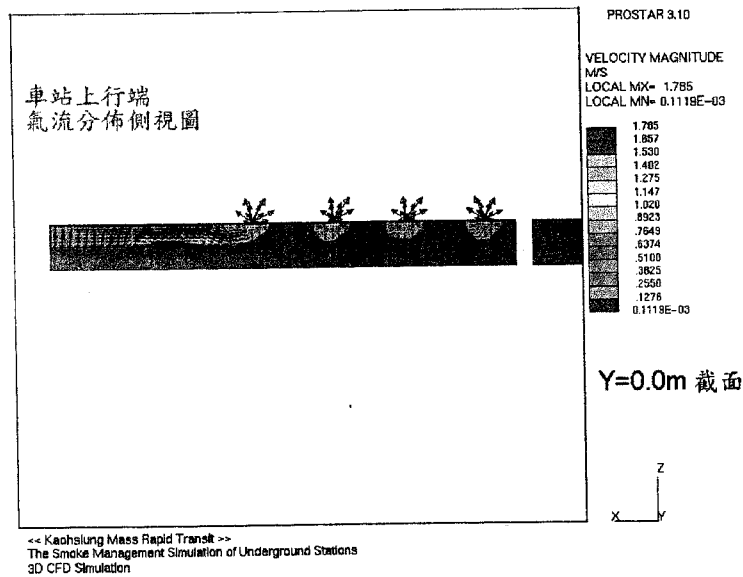


圖 3-26 氣流分佈側面圖（案例二）

因此，對於開啓單一排煙區劃或兩區劃之差異性，由案例一與案例二之模擬結果顯示，二者均在排煙口位置處有較為高速之氣流，且開啓單一防煙區劃時，比開啓兩區劃為高，有較佳之排煙效果。然離排煙口約 10 公尺以外之區域則已降至極低，此為 Plugholing 效應。

比較案例一與案例二，當不同區劃個數進行排煙時，由於總排煙量固定，在出入口端處有相同之氣流分布情形，然而當二個區劃排煙進行時，整體排煙功能將不如單一區劃來得集中，由圖 3-22 及圖 3-26 即可觀察其差異性。

◎案例三

模擬情境：

假設月台區月台層發生火災時，排煙系統啓動單一防煙區劃之排煙口，無自然風之影響。

模擬結果：

月台層排煙系統啟動單一防煙區劃之排煙口，網格圖示如圖 3-27，經模擬結果顯示，其氣流分佈平面圖與立面圖，分別如圖 3-28 與圖 3-29 所示。本案例氣流之流動，僅受排煙口啟動之影響，其結果將與案例四進行比較。

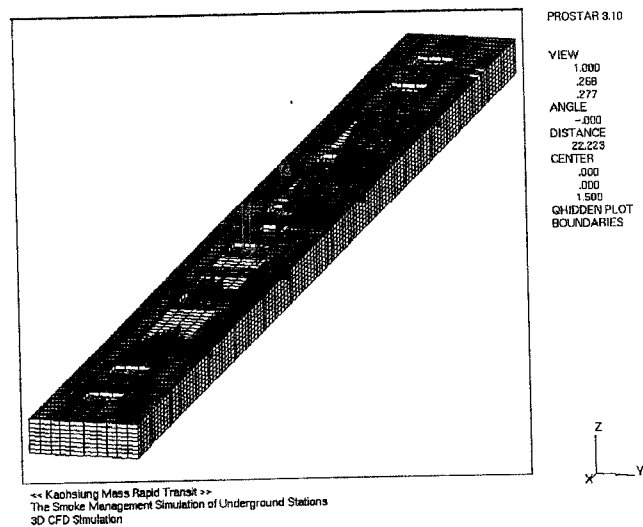


圖 3-27 月台層排煙系統網格圖（案例三）

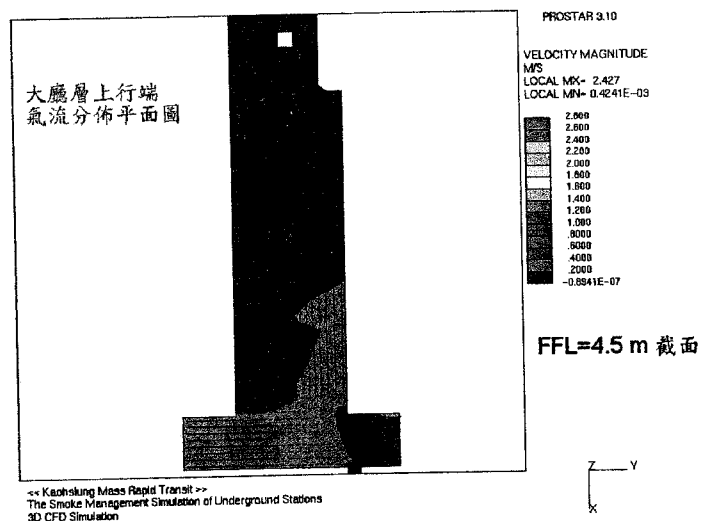


圖 3-28 氣流分佈平面圖（案例三）

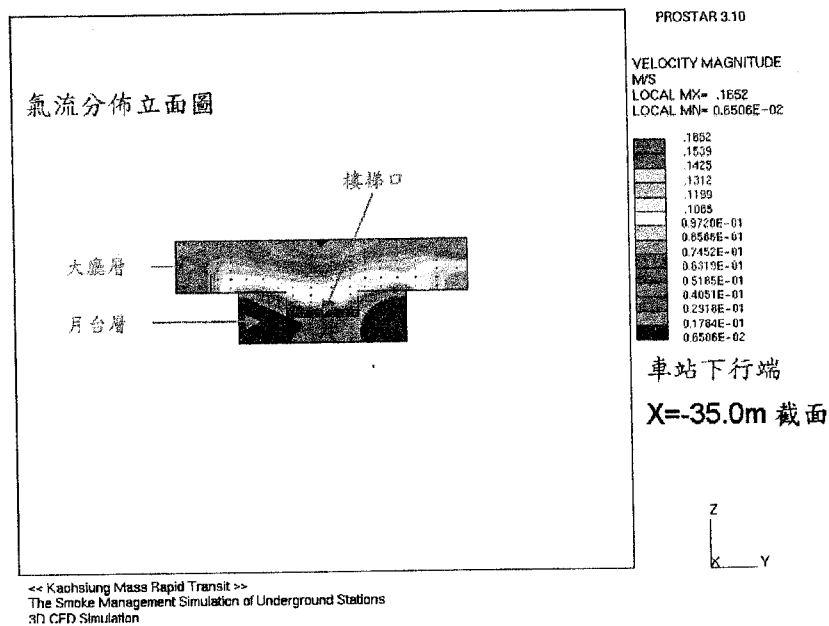


圖 3-29 氣流分佈立面圖（案例三）

◎案例四

模擬情境：

假設月台區月台層發生火災時，排煙系統啟動單一防煙區劃之排煙口，於大廳層之一側出入口有 1.5m/s 速度邊界之自然風吹入。

模擬結果：

經模擬結果顯示，其氣流分佈平面圖與立面圖，分別如圖 3-30 與圖 3-31 所示。於月台層啟動單一防煙區劃之排煙口時，由案例三與案例四模擬結果顯示，因站體幾何形狀之因素，當某出入口雖有氣流進入，然一部份會經由對側出入口排出。比較圖 3-29 及圖 3-31 之結果，顯示自然風影響靠壁端之氣流組織，對大廳層之影響程度較月台層為大，但對排煙系統性能影響不大。

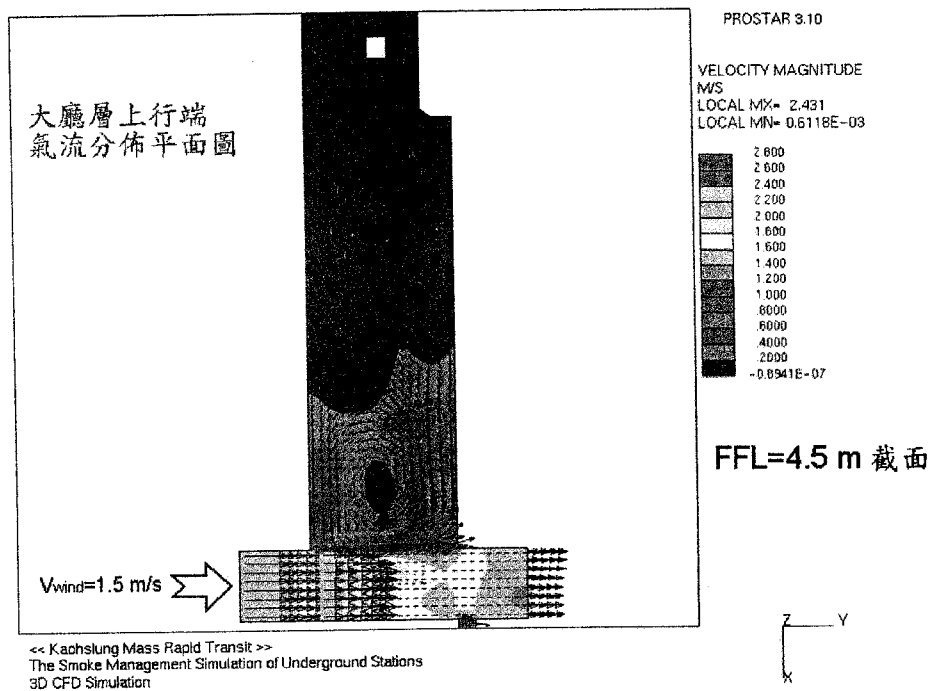


圖 3-30 氣流分佈平面圖（案例四）

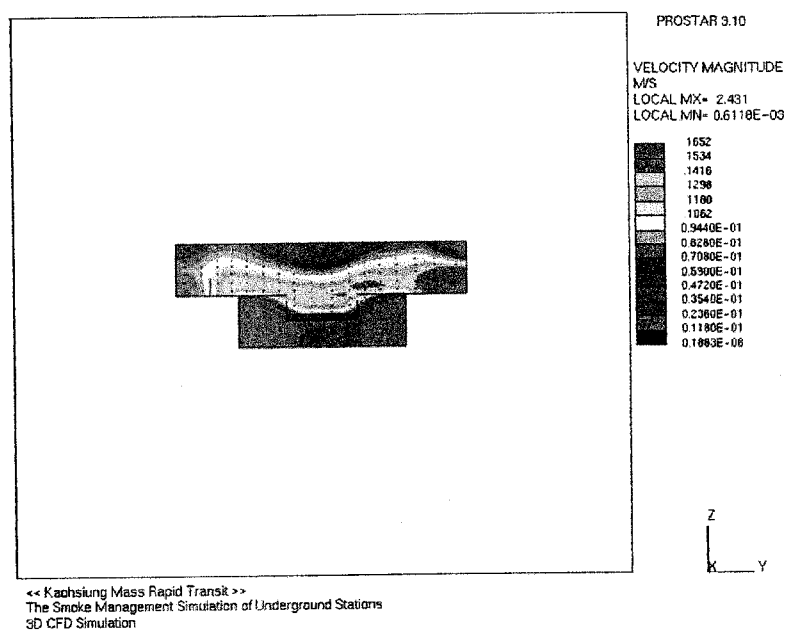


圖 3-31 氣流分佈立面圖（案例四）

◎案例五

模擬情境：

假設月台區月台層發生火災時，且火載量為 2 MW，本模擬所採用火源特徵為考量現場實際可燃燒物質極為有限，且無擴散之可能性，故為一限制性燃燒範圍之火災，依據 NFPA 92B 假設為不大於 2.0m x 2.0m。火場位於月台層平面中央，其排煙系統啟動單一防煙區劃之排煙口。

模擬結果：

案例五為在 2.0MW 之火災規模下不同時間之火場溫度及濃度之變化，火災係以「T-square」理論釋放熱量，圖 3-32 為其模擬網格圖。經模擬結果顯示，當火災發生後 60 秒，火場之氣流溫度約為 40°C，此時月台層之溫度分佈如圖 3-33 (A-A 斷面) 及圖 3-37 (B-B 斷面) 所示，濃度分佈如圖 3-41 (A-A 斷面) 與圖 3-45 (B-B 斷面) 所示。由上述模擬結果得知，在火災初期時，溫度尚未達到妨礙人員逃生通道之值。

觀察案例五在 2.0MW 之火災規模，當於發生後 240 秒時火場之氣流溫度約為 96.89°C，此時月台層之溫度分佈如圖 3-35 (A-A 斷面) 及圖 3-39 (B-B 斷面)，濃度分佈如圖 3-42 (A-A 斷面)、圖 3-46 (B-B 斷面) 所示。由上述圖中模擬結果得知在火災發生時，防煙垂壁確時可阻擋濃煙之擴散。

而由圖 3-35 與圖 3-36 (A-A 斷面)、圖 3-39 與圖 3-40 (B-B 斷面) 分別顯示火災發生後 360 秒及 600 秒之溫度分佈，圖 3-43 與圖 3-44 (A-A 斷面)、圖 3-47 與圖 3-48 (B-B 斷面) 分別顯示火災發生後 360 秒及 600 秒之濃度分佈得知，目前車站月台區月台層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，可一直維持煙層在人眼睛高度以上。

故經上述模擬結果得知，當消防人員進入搶救時，不需要改變車站內部任何煙控策略，即可提供消防人員一條無煙之搶救路徑。

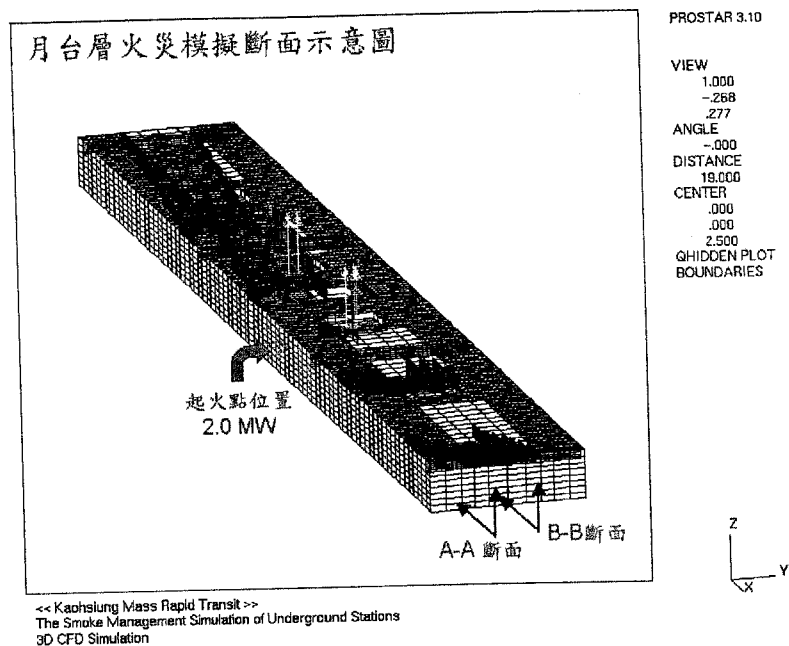


圖 3-32 月台層火場模擬示意圖（案例五）

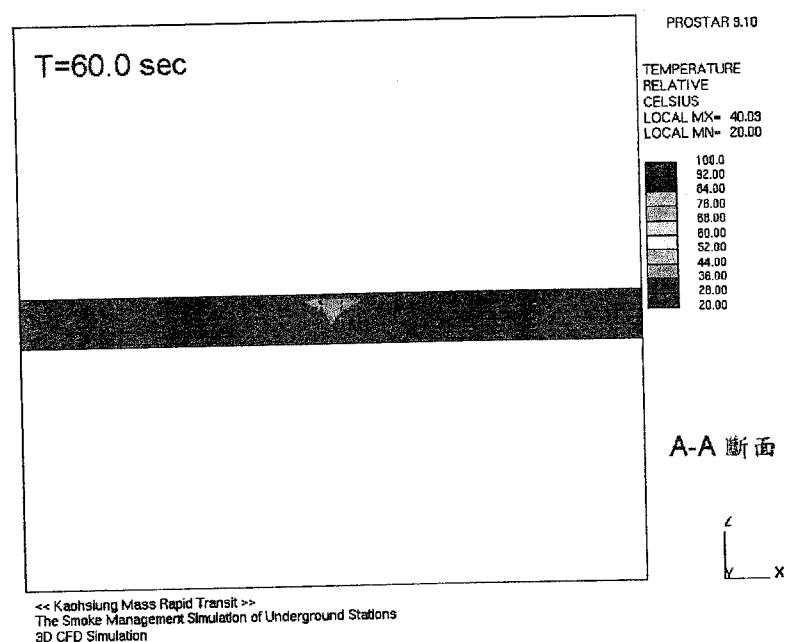


圖 3-33 溫度場模擬結果（案例五，A-A 斷面，60 秒）

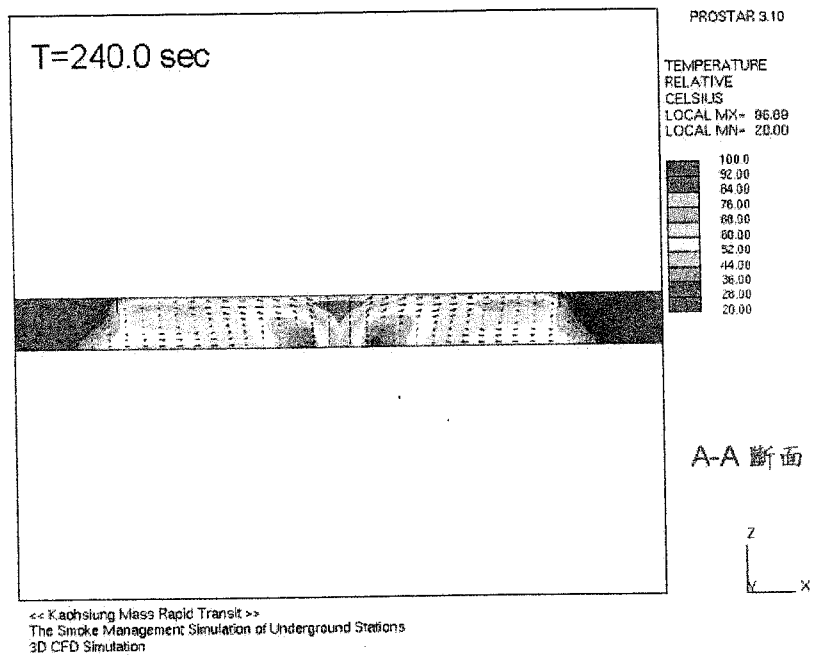


圖 3-34 溫度場模擬結果（案例五，A-A 断面，240 秒）

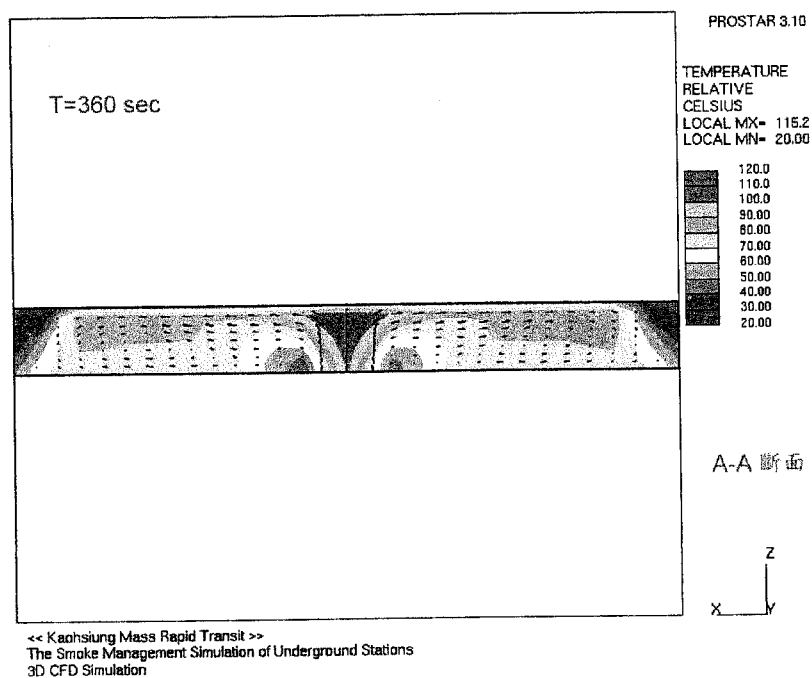


圖 3-35 溫度場模擬結果（案例五，A-A 断面，360 秒）

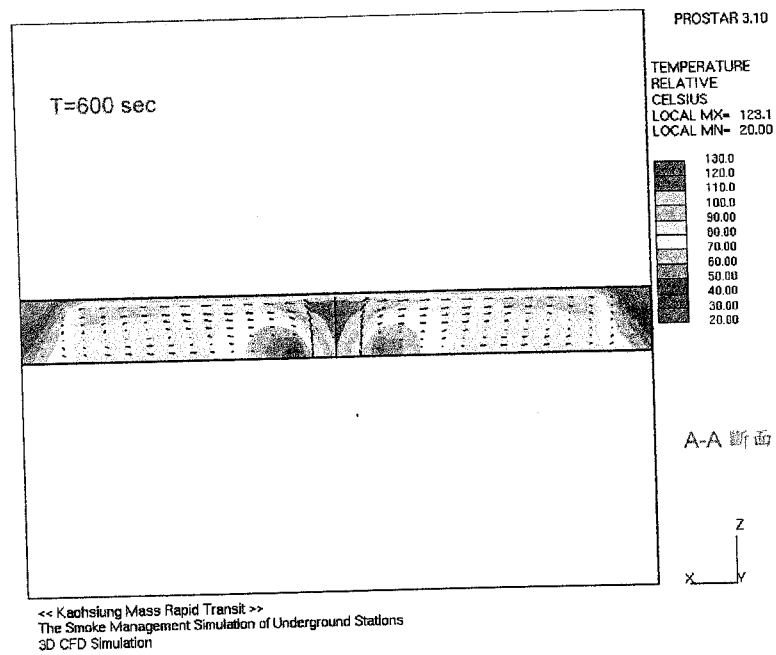


圖 3-36 溫度場模擬結果（案例五，A-A 斷面，600 秒）

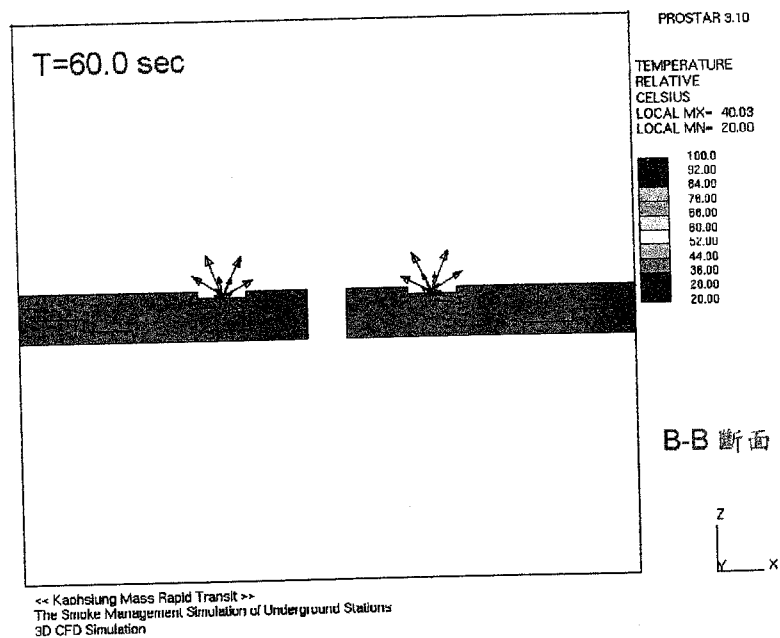


圖 3-37 溫度場模擬結果（案例五，B-B 斷面，60 秒）

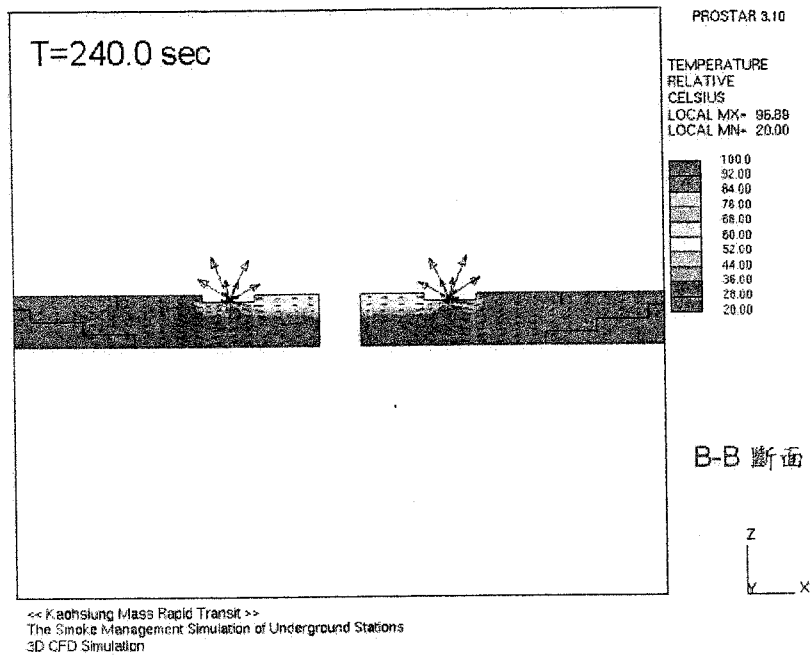


圖 3-38 溫度場模擬結果（案例五，B-B 断面，240 秒）

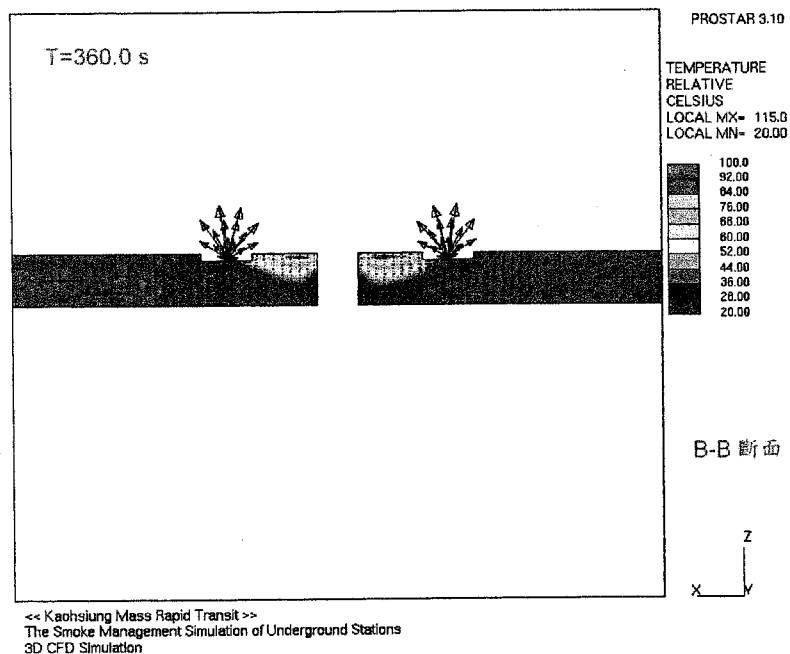


圖 3-39 溫度場模擬結果（案例五，B-B 断面，360 秒）

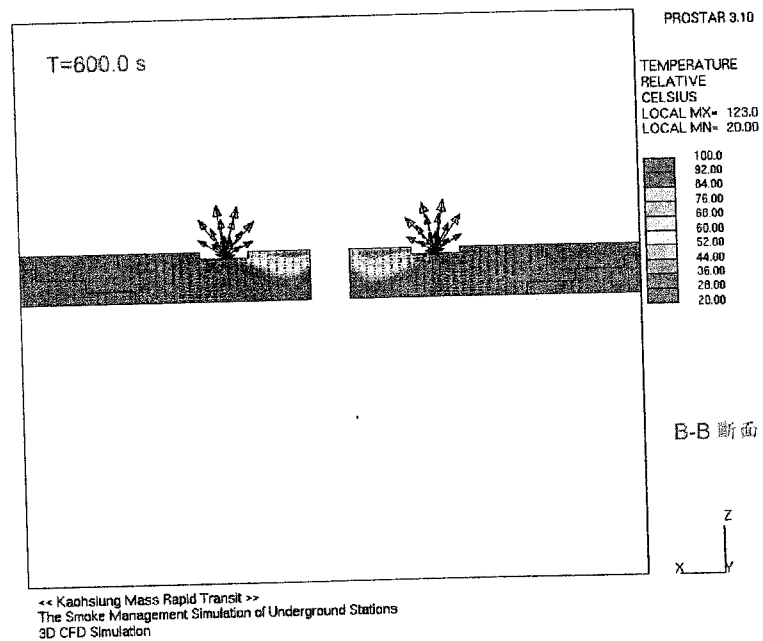


圖 3-40 溫度場模擬結果（案例五，B-B 断面，600 秒）

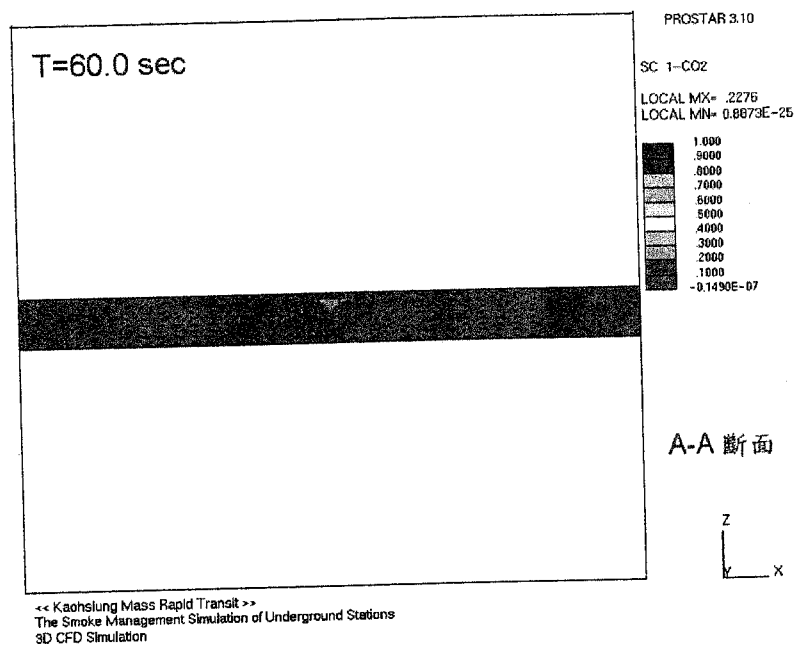


圖 3-41 濃度場模擬結果（案例五，A-A 断面，60 秒）

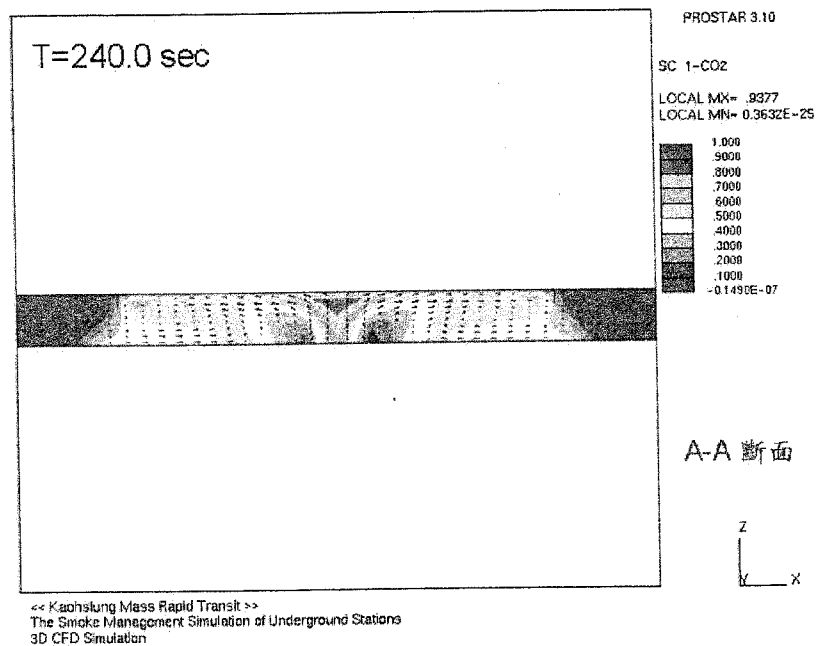


圖 3-42 濃度場模擬結果（案例五，A-A 断面，240 秒）

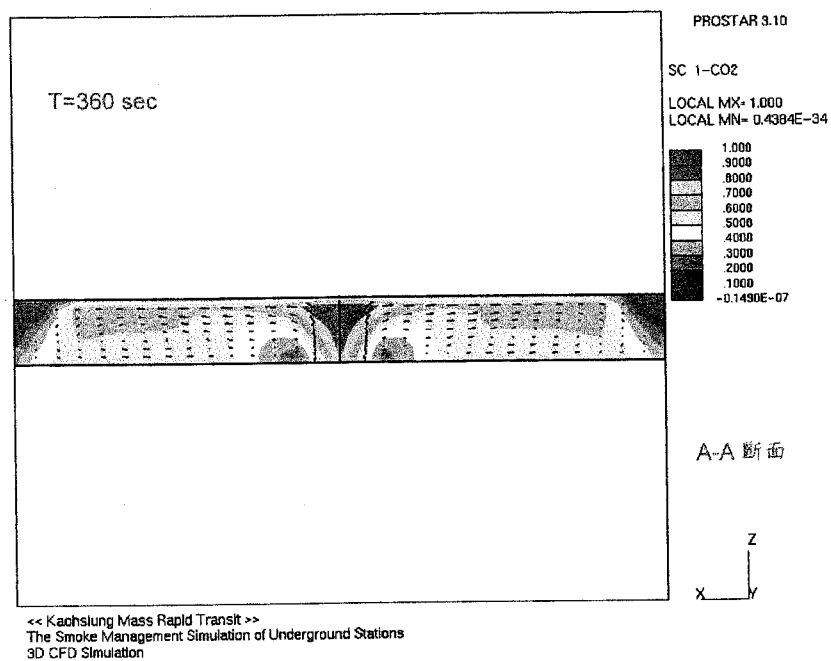


圖 3-43 濃度場模擬結果（案例五，A-A 断面，360 秒）

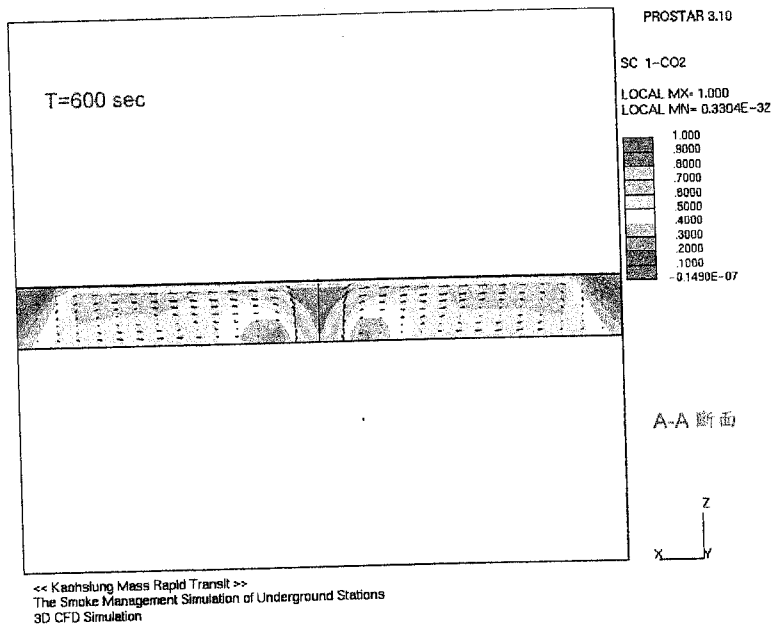


圖 3-44 濃度場模擬結果（案例五，A-A 断面，600 秒）

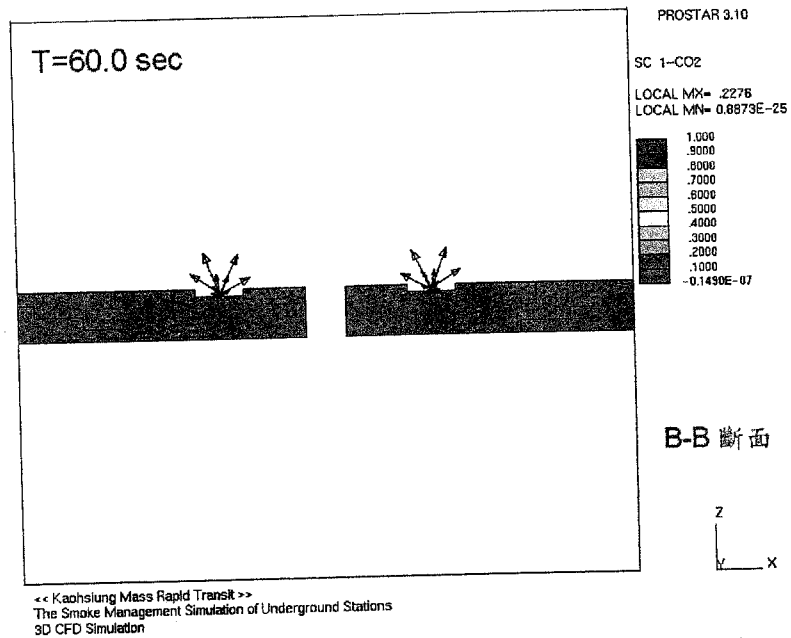


圖 3-45 濃度場模擬結果（案例五，B-B 断面，60 秒）

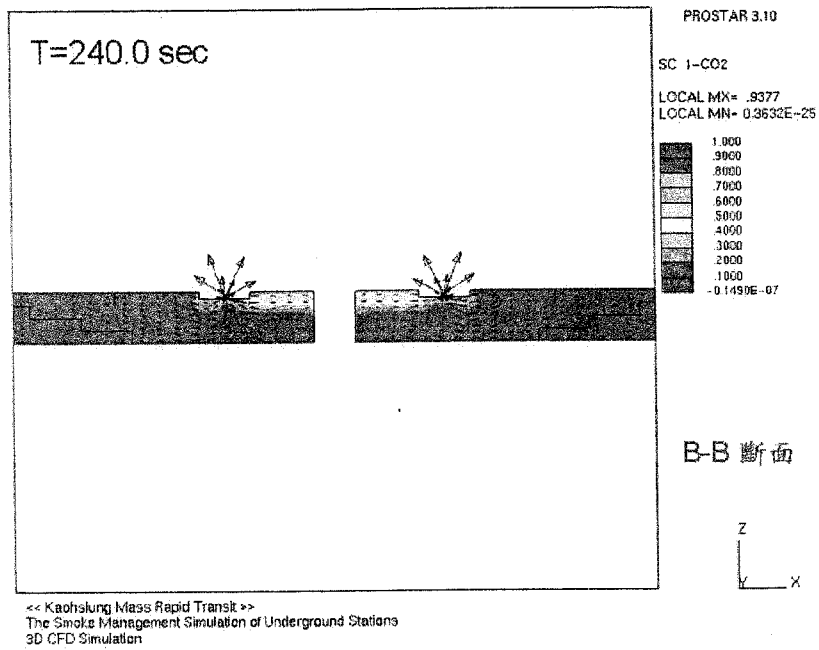


圖 3-46 濃度場模擬結果（案例五，B-B 断面，240 秒）

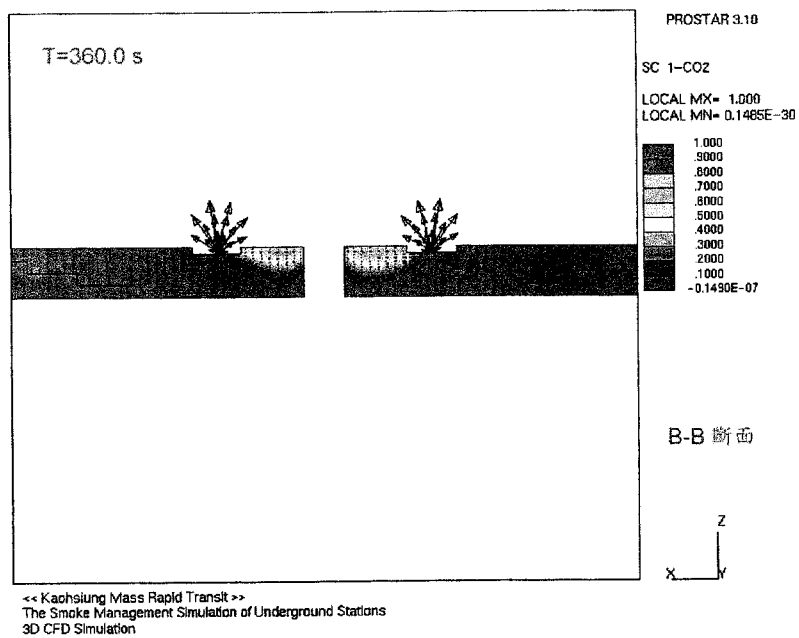


圖 3-47 濃度場模擬結果（案例五，B-B 断面，360 秒）

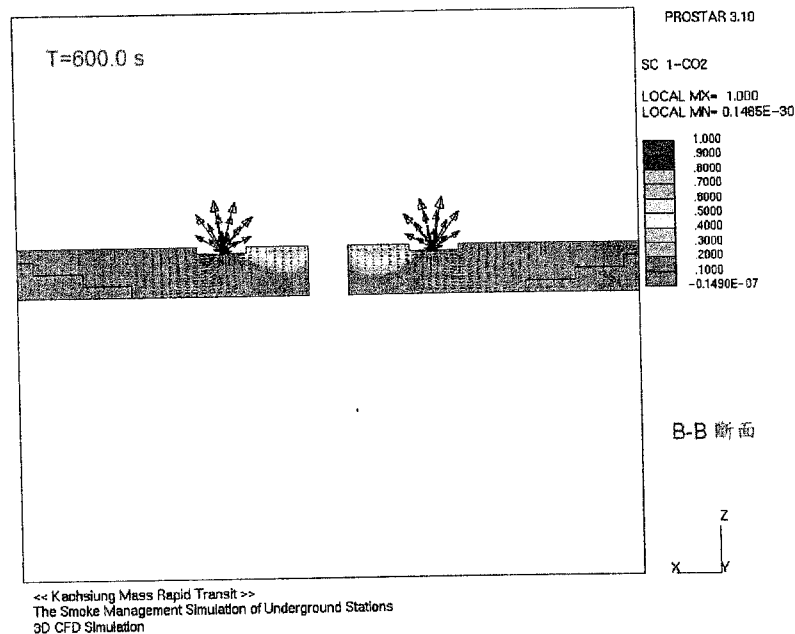


圖 3-48 濃度場模擬結果（案例五，B-B 斷面，600 秒）

◎案例六

模擬情境：

假設月台區大廳層中央發生火災時，且火載量為 2 MW。本模擬所採用火源特徵為考量現場實際可燃燒物質極為有限，且無擴散之可能性，故為一限制性燃燒範圍之火災，依據 NFPA 92B 假設為不大於 2.0m x 2.0m。假設在 60 秒後排煙風機方達到設計運轉狀態，其排煙系統啟動單一防煙區劃之排煙口，且此時並無自然風之影響。

模擬結果：

經模擬結果得知，當火災發生 30 秒後，此時因排煙風機尚未開啓，濃煙呈現自然擴散狀況，而圖 3-49 則顯示此時大廳層溫度分佈情形，經模擬結果

當火災發生 60 秒後，此時排煙風機完全啓動，由圖 3-57 防煙垂壁附近斷面顯示濃煙持續擴散情況，而圖 3-50 顯示此刻大廳層溫度已上昇至 53 °C。同時由排煙口處氣流分佈狀況顯示，此時濃煙由排煙口排除，且具明顯之 Plugholing 現象。

至火災發生 120 秒後，由圖 3-51 顯示，起火點上方之火場溫度已超過 60°C，此溫度為可能造成避難行動減緩之值，但僅有影響火場附近極小範圍，於大廳層仍有足夠寬度之安全避難走道。火災發生 180 秒後，由圖 3-52 則顯示高溫氣流已持續擴散，相對於圖 3-59 防煙垂壁附近斷面濃煙分佈圖，觀察發現濃煙已擴散至防煙垂壁位置處。

火災發生 240 秒後，即當火災燃燒現象進行至最高點，熱釋放率為最大值 2 MW。由圖 3-53 顯示，火場超過 60 °C 溫度之範圍已由起火點位置擴散。而由圖 3-60 防煙垂壁附近斷面濃度分佈圖顯示，此刻排煙風機進行排煙動作，濃煙擴散範圍比 180 秒時為大。

而由圖 3-54 與圖 3-55 顯示火災發生後 360 秒及 600 秒之溫度分佈，與圖 3-61 與圖 3-62 顯示火災發生後 360 秒及 600 秒之防煙垂壁附近斷面濃度分佈，得知，目前車站月台區大廳層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，防煙垂壁充分發揮阻煙功能，且機械排煙之排煙量足夠，可一直維持煙層在人眼睛高度以上。

故經上述模擬結果得知，當消防人員進入搶救時，不需要改變車站內部任何煙控策略，即可提供消防人員一條無煙之搶救路徑。

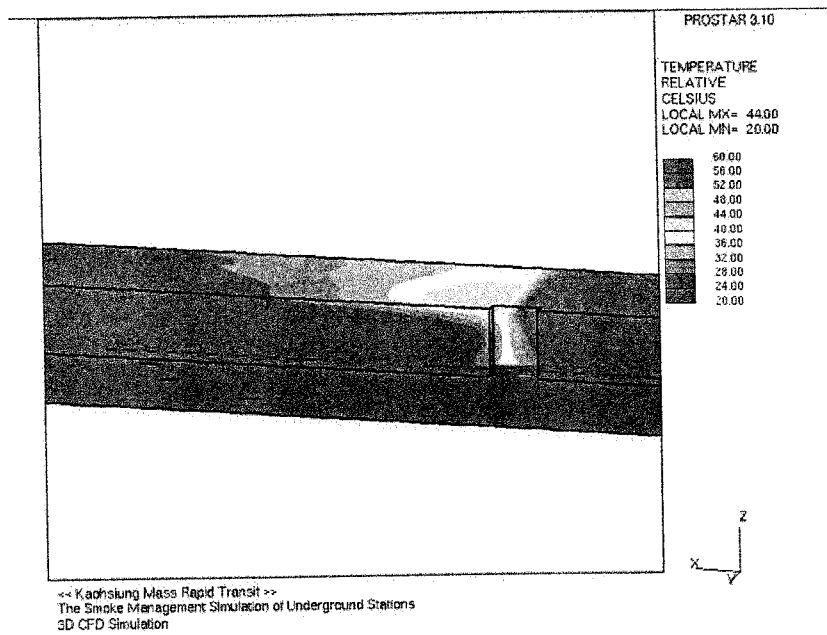


圖 3-49 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，30 秒）

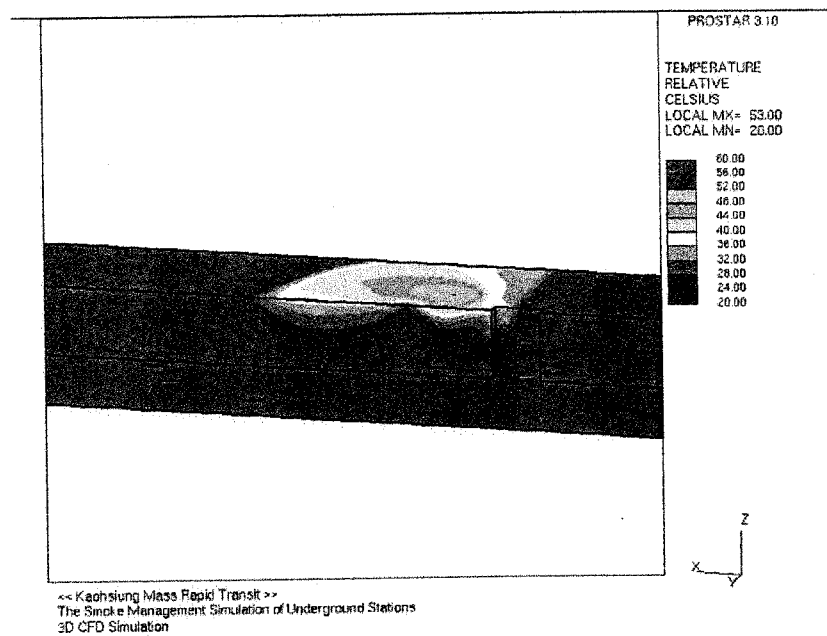


圖 3-50 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，60 秒）

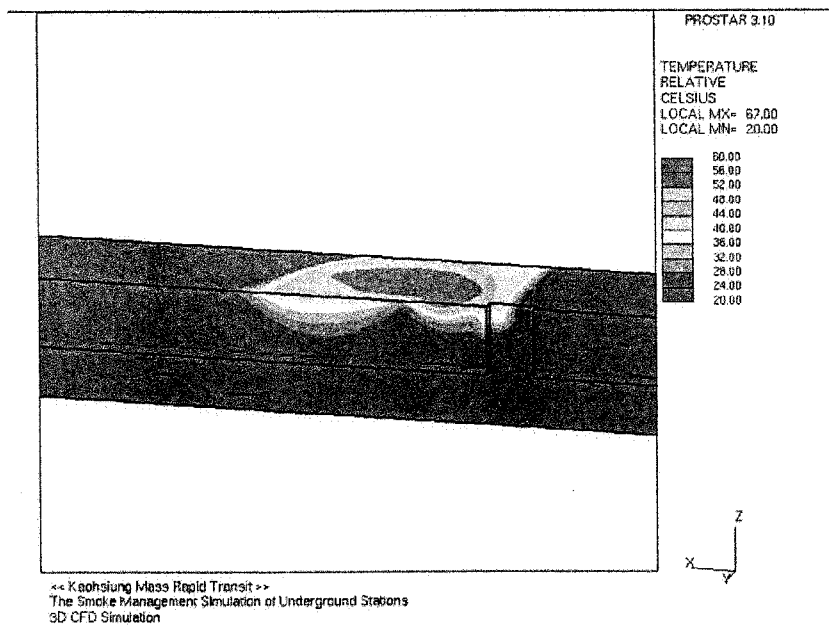


圖 3-51 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，120 秒）

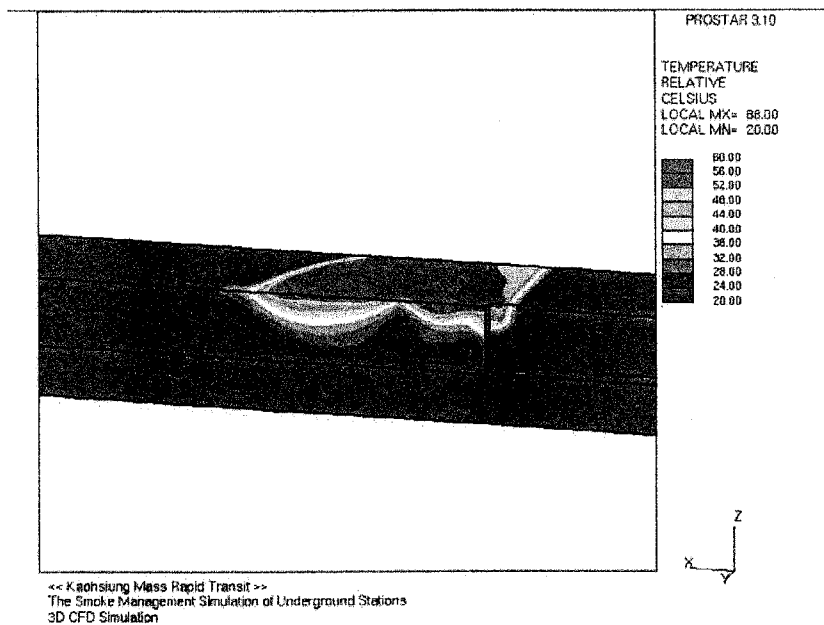


圖 3-52 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，180 秒）

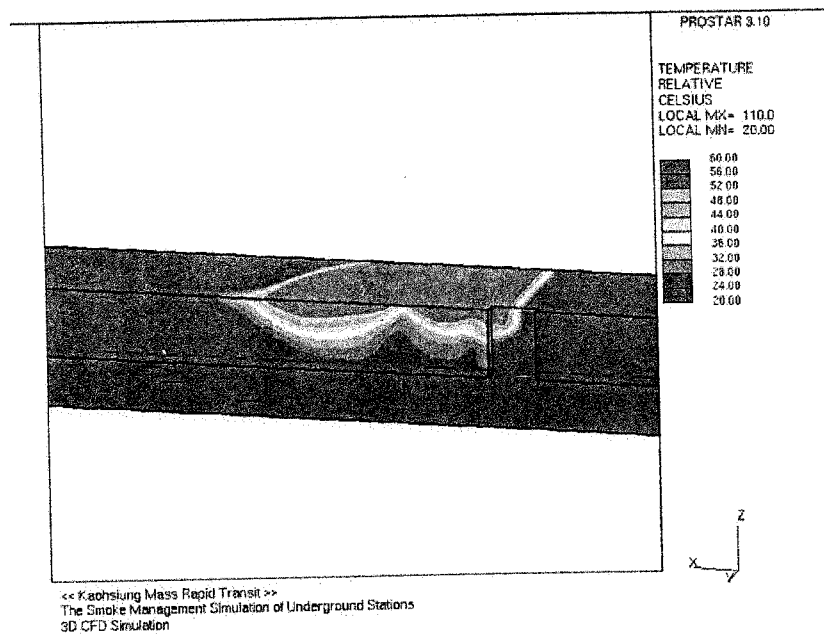


圖 3-53 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，240 秒）

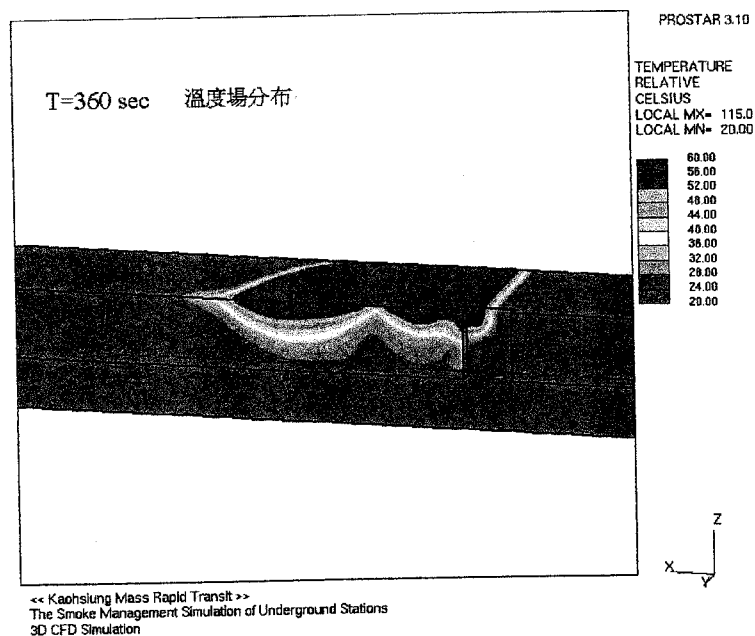


圖 3-54 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，360 秒）

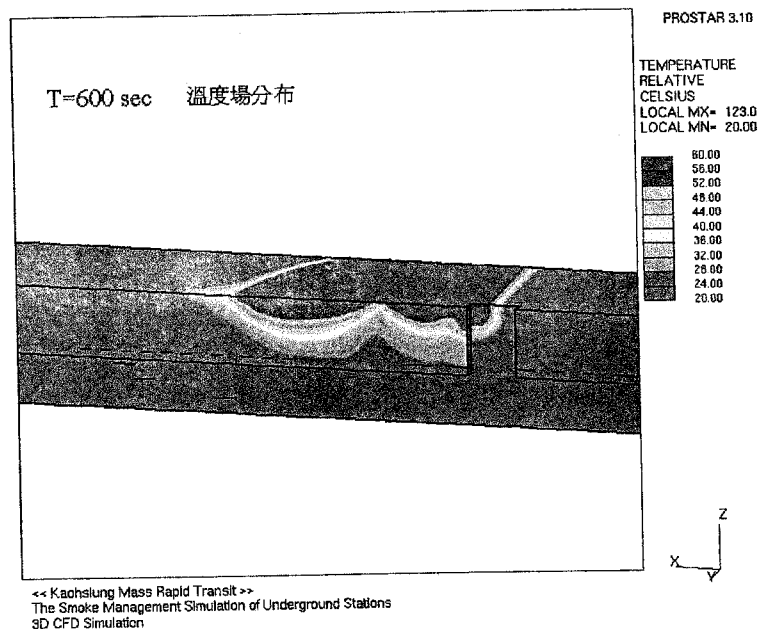


圖 3-55 溫度場模擬結果（案例六：大廳層斷面，600 秒）

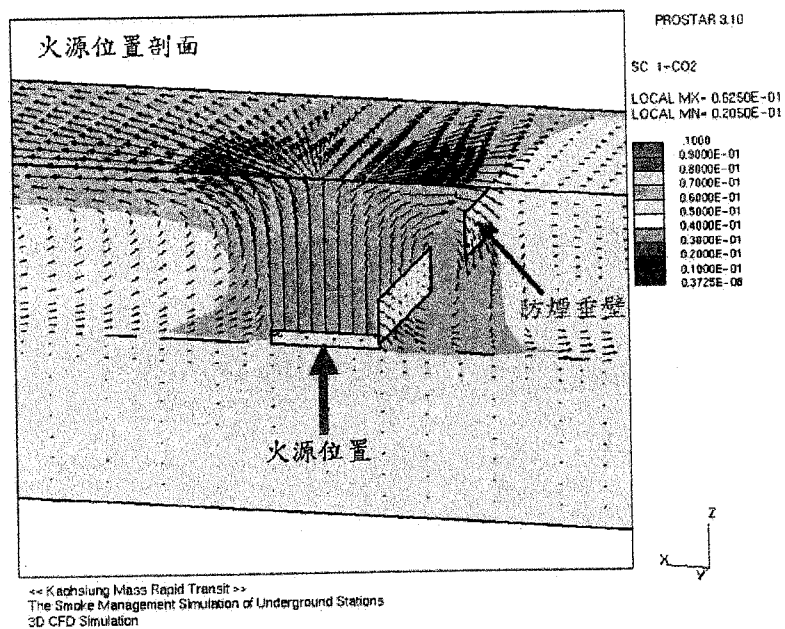


圖 3-56 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，30 秒）

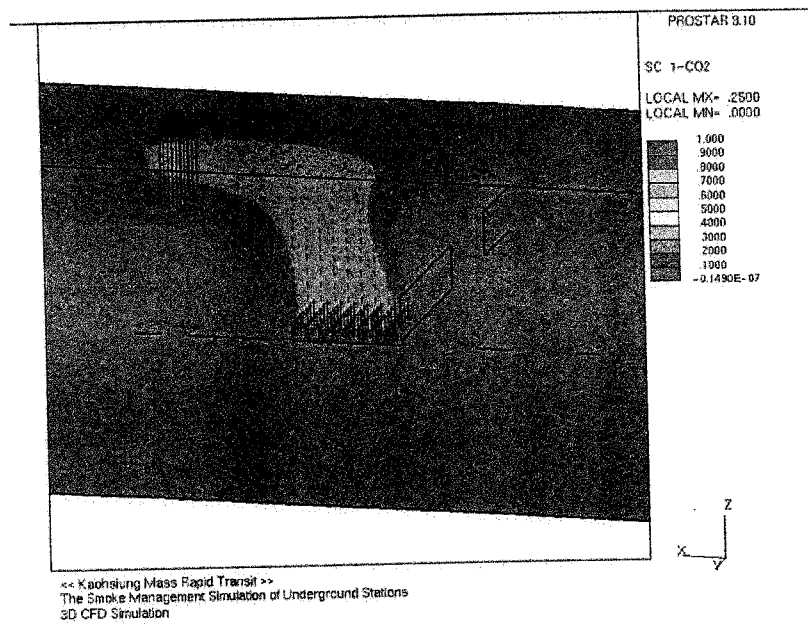


圖 3-57 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，60 秒）

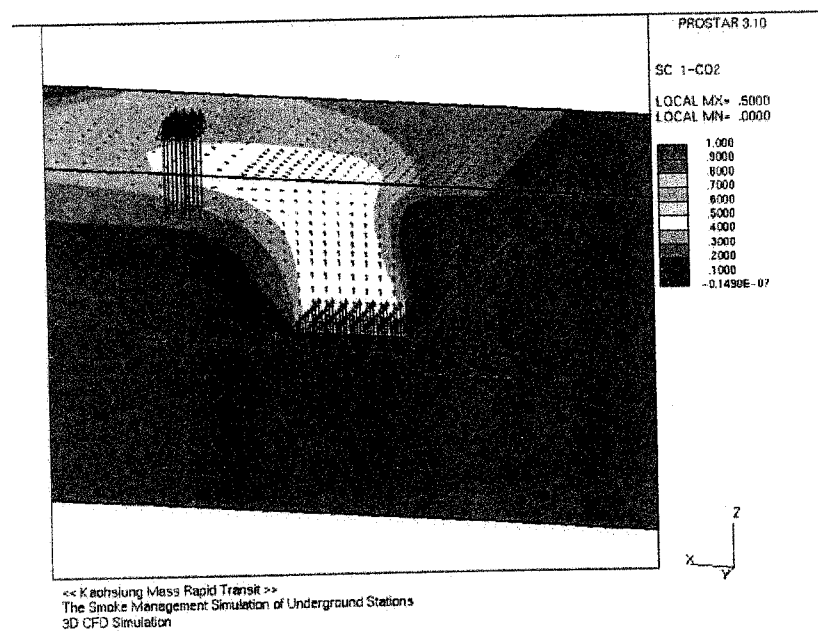


圖 3-58 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，120 秒）

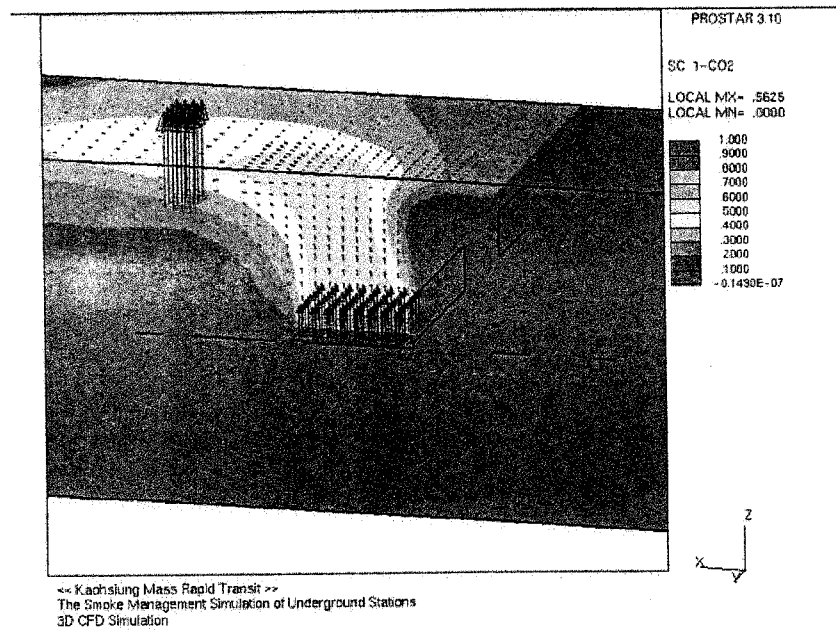


圖 3-59 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，180 秒）

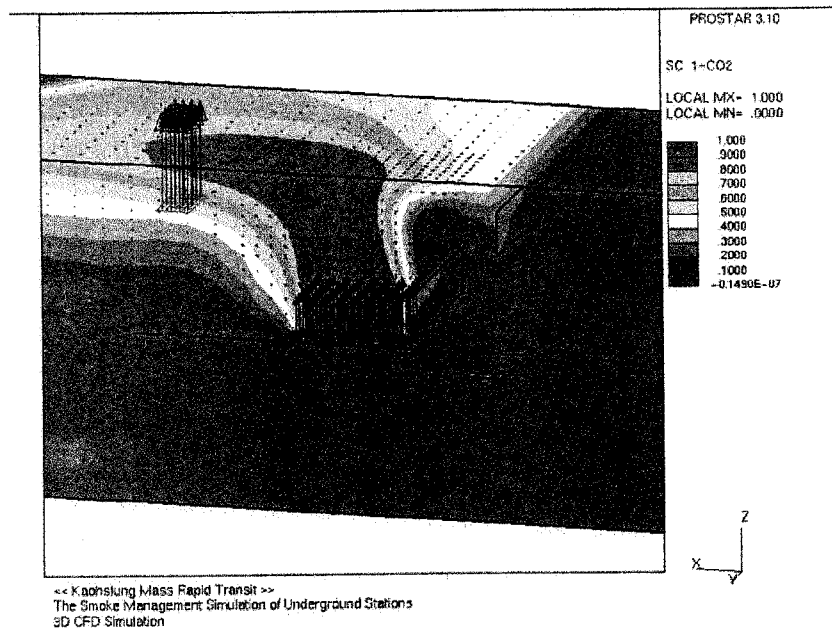


圖 3-60 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，240 秒）

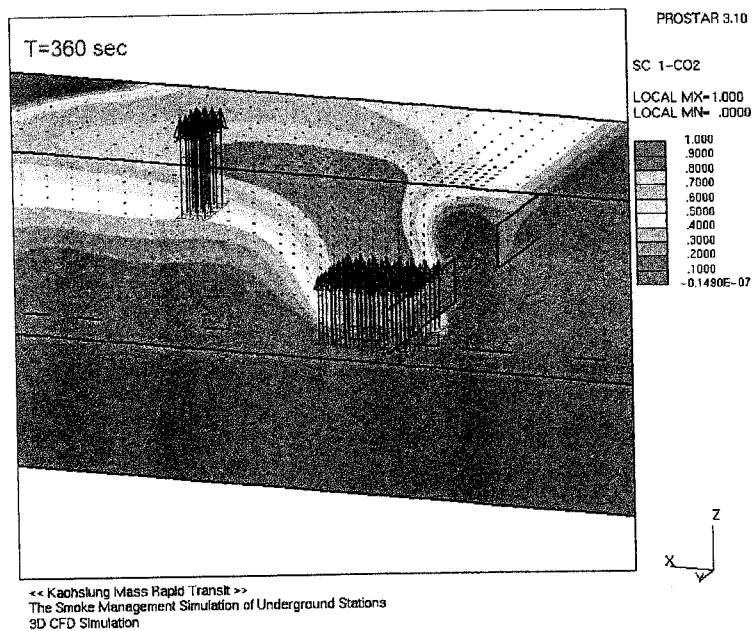


圖 3-61 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，360 秒）

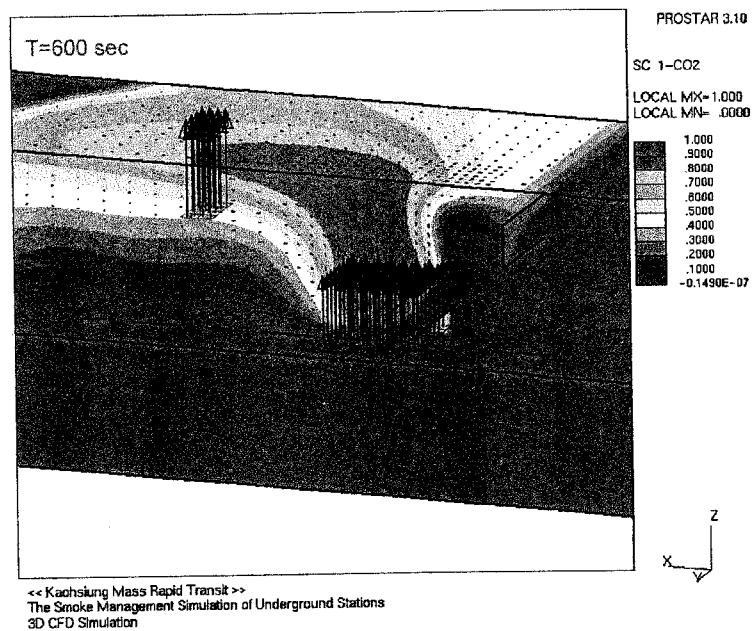


圖 3-62 防煙垂壁阻煙性能濃度場模擬結果（案例六垂壁附近斷面，600 秒）

◎案例七

模擬情境：

假設月台區大廳層中央發生火災時，且火載量為 2 MW，本模擬所採用火源特徵為考量現場實際可燃燒物質極為有限，且無擴散之可能性，故為一限制性燃燒範圍之火災，依據 NFPA 92B 假設為不大於 2.0m x 2.0m。假設在 60 秒後排煙風機方達到設計運轉狀態，其排煙系統啟動單一防煙區劃之排煙口，且受到自然風之影響。

模擬結果：

本案例與之前案例六之差異，即在於有無自然風之影響。圖 3-63 顯示案例七中，其一側之兩個樓梯出入口受到自然風之壓力邊界影響。本案例依實際狀況訂定邊界條件，以模擬兩側地面出入口自然風同時對車站影響之真實情況。模擬地面出入口在設定一大氣壓靜壓下、氣流為 1.5m/s 的動壓狀況下之影響。之前案例四直接假設速度邊界，須考慮質量守恆原理，較案例七不接近真實狀況，故本案例遂採用壓力邊界進行假設，以接近真實狀況。

經電腦模擬結果顯示，因設置月台屏門之故，出入口樓梯速度分佈相當小，示如圖 3-64 所示。由上述模擬結果可知，外界之自然風並無法經由出入口樓梯而灌進地下車站大廳層內，外界自然風之影響，有如像吹氣球的情況一樣，只是朝車站大廳層吹氣加壓，並不會對煙控系統之性能產生影響。以下再由各時段之濃度場與溫度場，以印證外界自然風之吹入，並不會對煙控系統之性能產生影響。

經模擬結果得知，當火災發生 30 秒後，此時因排煙風機尚未開啓，濃煙呈現自然擴散狀況，而圖 3-65 則顯示此時大廳層溫度分佈情形，經模擬結果得知約為 30 °C~40 °C 之間。圖 3-72 為大廳層濃度分佈、與圖 3-79 為大廳層防煙垂壁附近斷面之濃煙變化情形。由此結果得知，在此時排煙設備未啓

動狀況下，防煙垂壁發揮其功能。

當火災發生 60 秒後，此時排煙風機完全啓動，由圖 3-73 大廳層斷面與圖 3-80 防煙垂壁附近斷面顯示濃煙持續擴散情況，而圖 3-66 顯示此刻大廳層溫度已上昇至 53 °C。同時由排煙口處氣流分佈狀況顯示，濃煙排除且具明顯之 Plugholing 現象。

至火災發生 120 秒後，由圖 3-67 顯示，起火點上方之火場溫度已超過 60°C，此溫度為可能造成避難行動減緩之值，但僅有影響火場附近極小範圍，於大廳層仍有足夠寬度之安全避難走道。火災發生 180 秒後，由圖 3-68 則顯示高溫氣流已持續擴散，相對於圖 3-75 大廳層斷面與圖 3-59 防煙垂壁附近斷面濃煙分佈圖，觀察發現濃煙已擴散至防煙垂壁位置處。

火災發生 240 秒後，即當火災燃燒現象進行至最高點，熱釋放率為最大值 2 MW。由圖 3-69 顯示，火場超過 60 °C 溫度之範圍已由起火點位置擴散。而由圖 3-76 大廳層斷面與圖 3-83 防煙垂壁附近斷面濃度分佈圖顯示，此刻排煙風機進行排煙動作，濃煙擴散範圍比 180 秒時為大。

而由圖 3-70 與圖 3-71 顯示火災發生後 360 秒及 600 秒之溫度分佈，與圖 3-77、圖 3-78 大廳層斷面、與圖 3-84、圖 3-85 顯示火災發生後 360 秒及 600 秒之防煙垂壁附近斷面濃度分佈，得知，目前車站月台區大廳層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，防煙垂壁充分發揮阻煙功能，且機械排煙之排煙量足夠，可一直維持煙層在人眼睛高度以上。故經上述模擬結果得知，當消防人員進入搶救時，不需要改變車站內部任何煙控策略，即可提供消防人員一條無煙之搶救路徑。

以上案例七之模擬結果與案例六之模擬結果比較大致相同，故可推論外界自然風之吹入，並不會對煙控系統之性能產生影響。

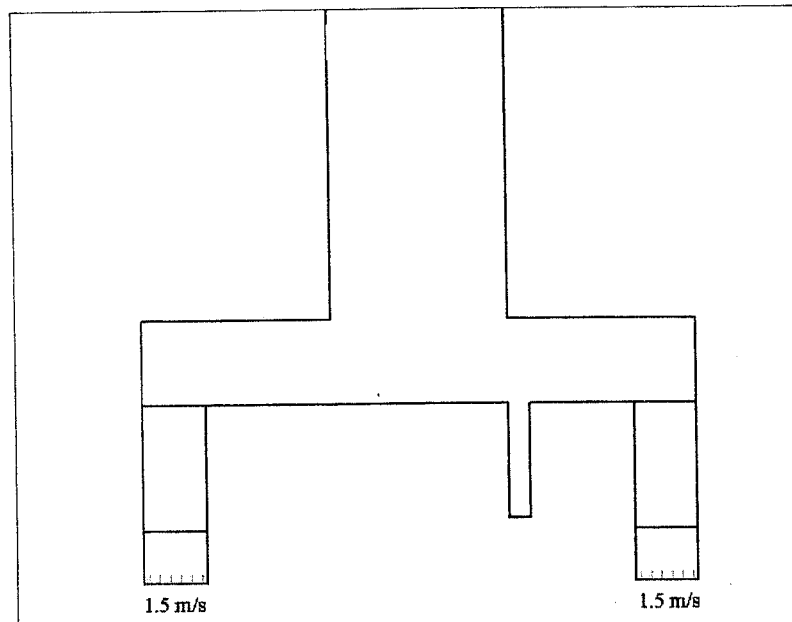


圖 3-63 案例七模型平面圖

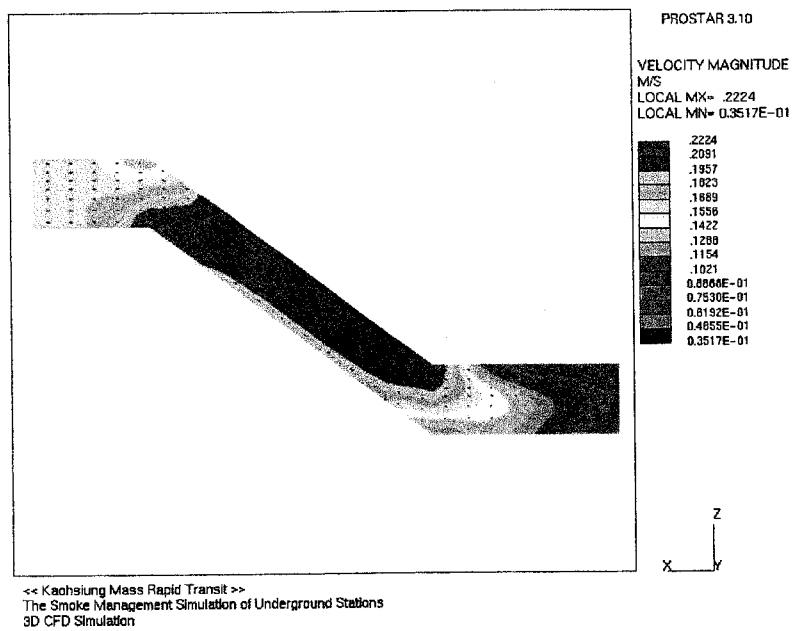


圖 3-64 案例七受自然風影響下，出入口樓梯速度分佈圖

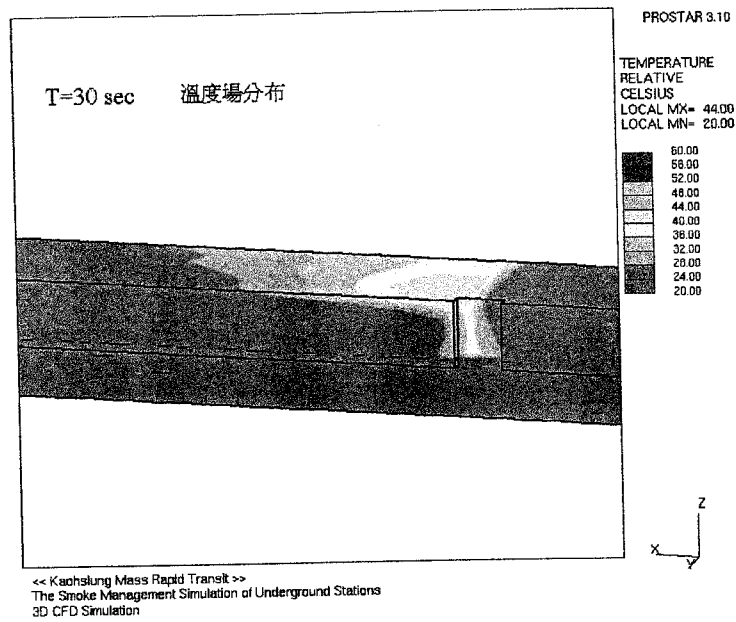


圖 3-65 溫度場模擬結果（案例七：A-A 斷面，30 秒）

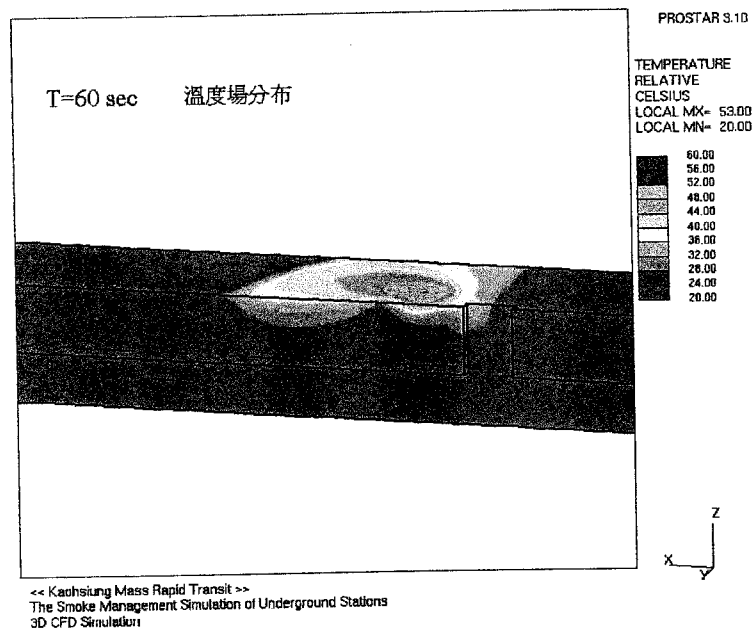


圖 3-66 溫度場模擬結果（案例七：A-A 斷面，60 秒）

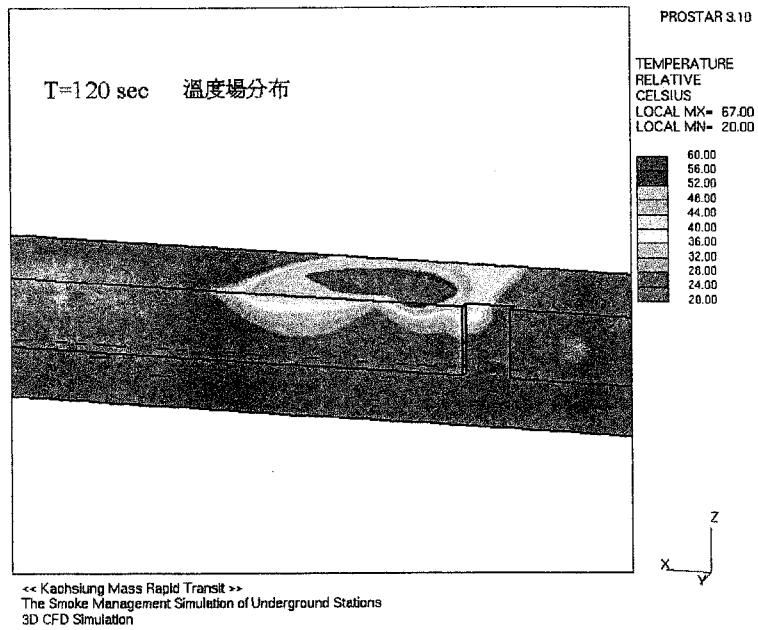


圖 3-67 溫度場模擬結果（案例七：A-A 斷面，120 秒）

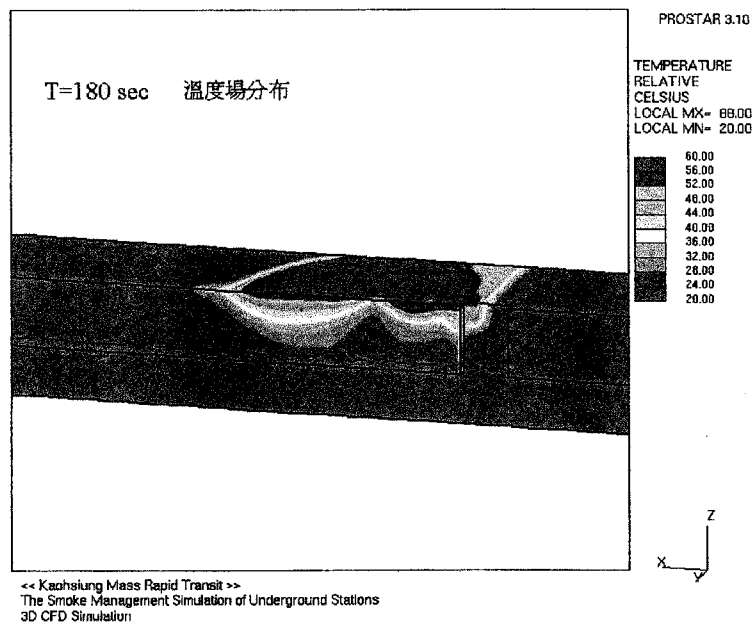


圖 3-68 溫度場模擬結果（案例七：A-A 斷面，180 秒）

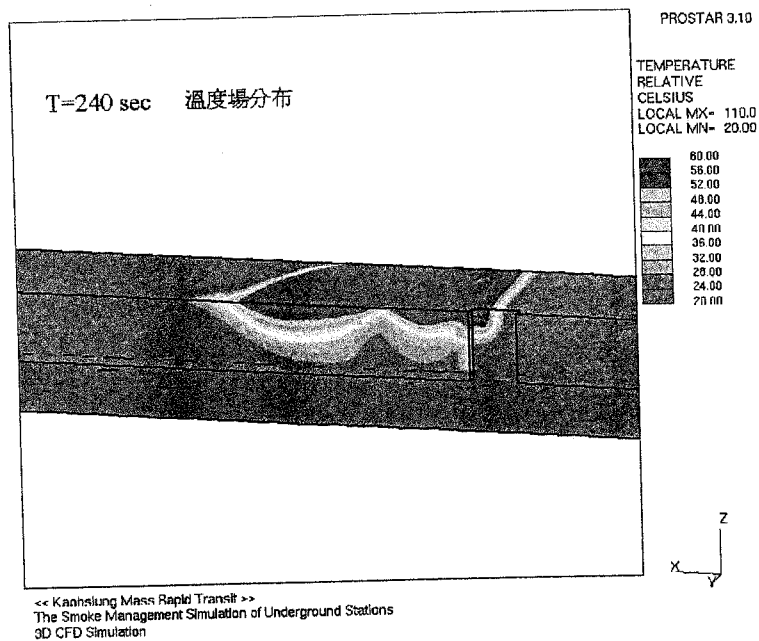


圖 3-69 溫度場模擬結果（案例七：大廳層斷面，240 秒）

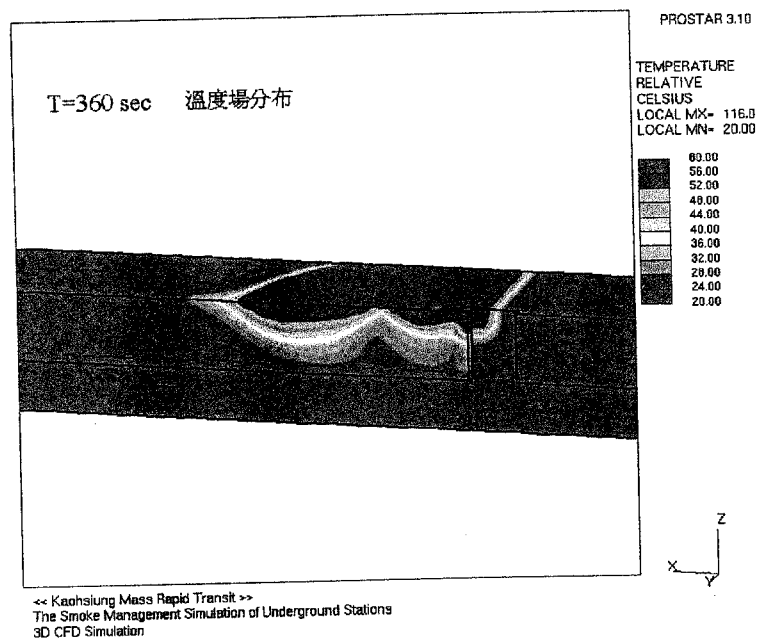


圖 3-70 溫度場模擬結果（案例七：大廳層斷面，360 秒）

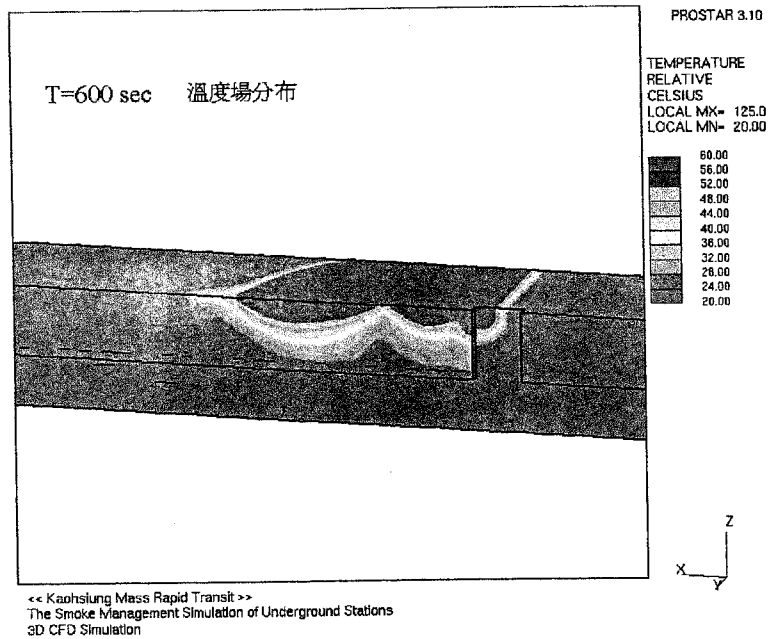


圖 3-71 溫度場模擬結果（案例七：A-A 斷面，600 秒）

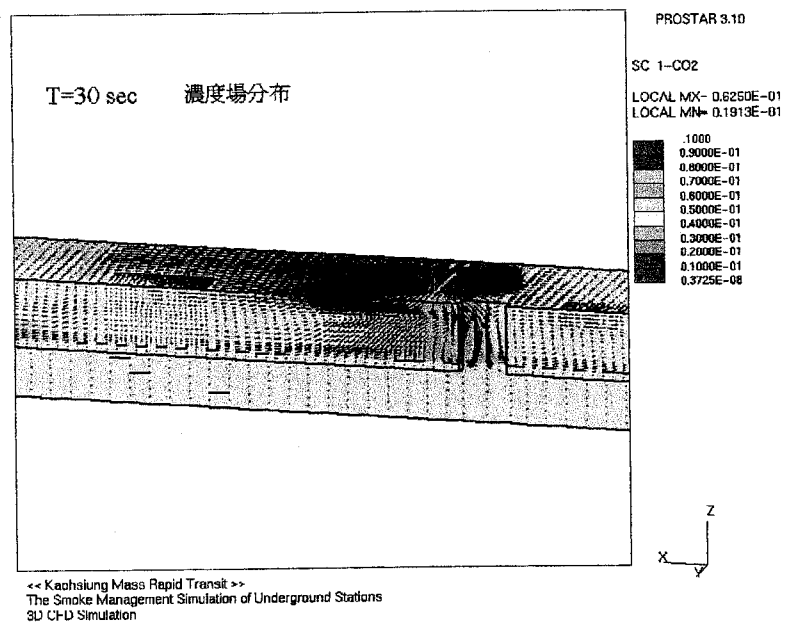


圖 3-72 濃度場模擬結果（案例七：A-A 斷面，30 秒）

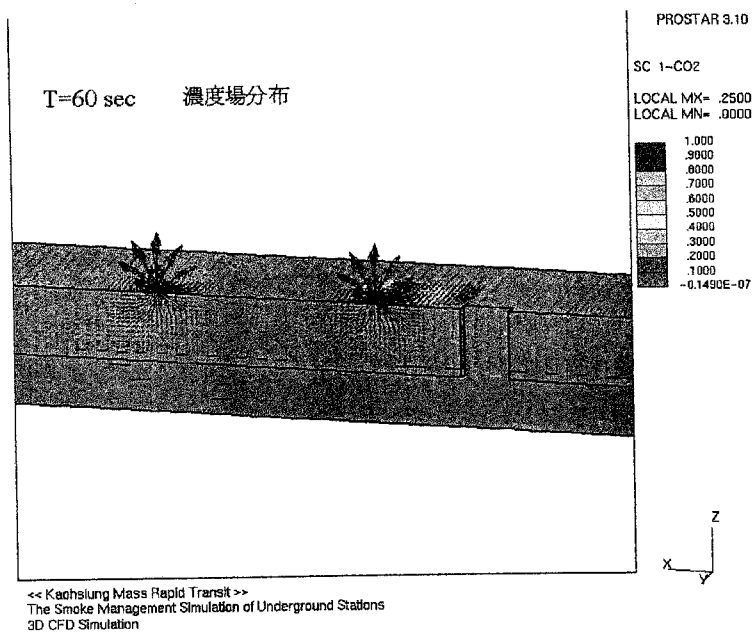


圖 3-73 濃度場模擬結果（案例七：大廳層斷面，60 秒）

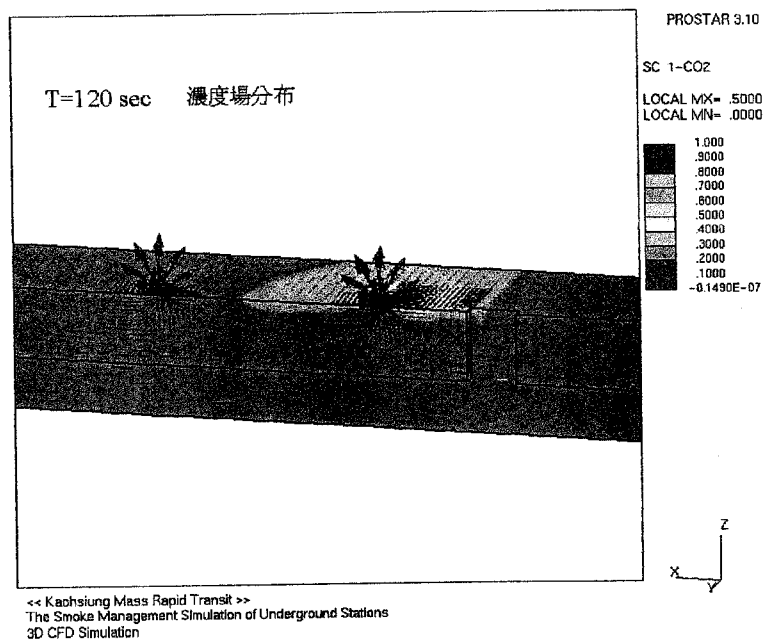


圖 3-74 濃度場模擬結果（案例七：大廳層斷面，120 秒）

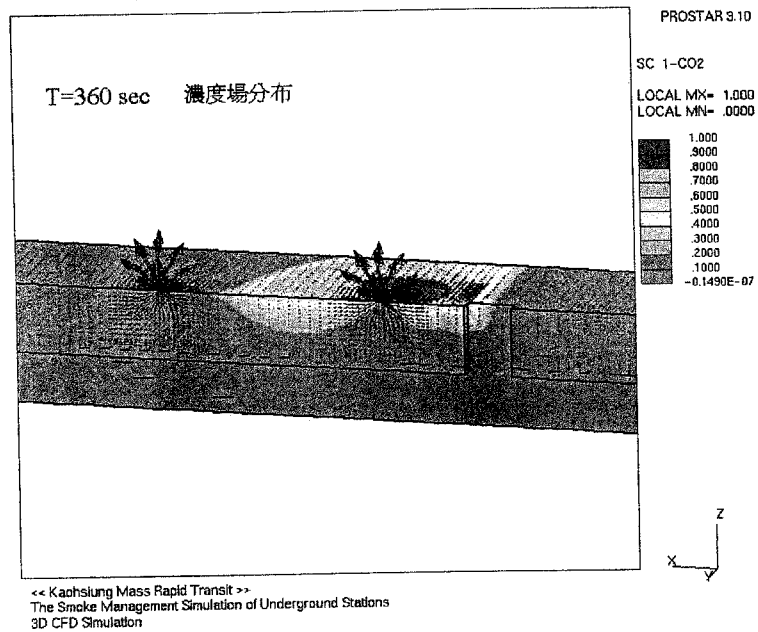


圖 3-77 濃度場模擬結果（案例七：大廳層斷面，360 秒）

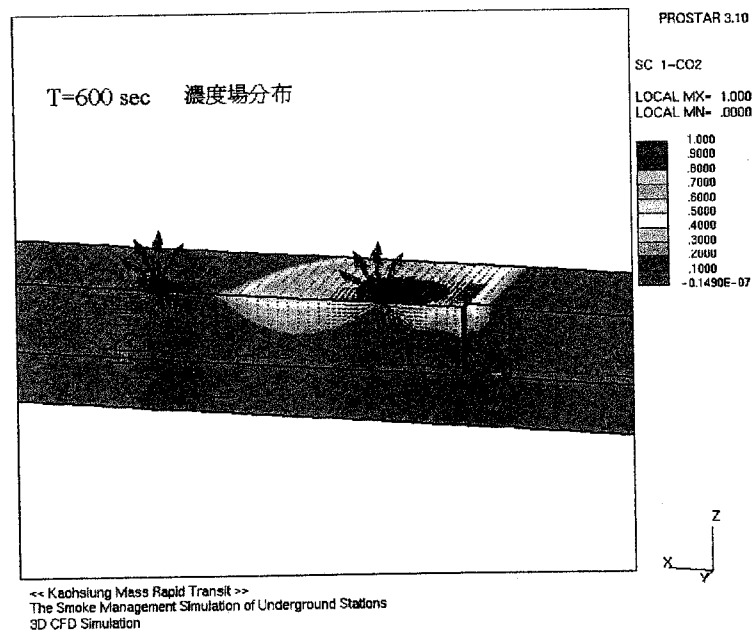


圖 3-78 濃度場模擬結果（案例七：大廳層斷面，600 秒）

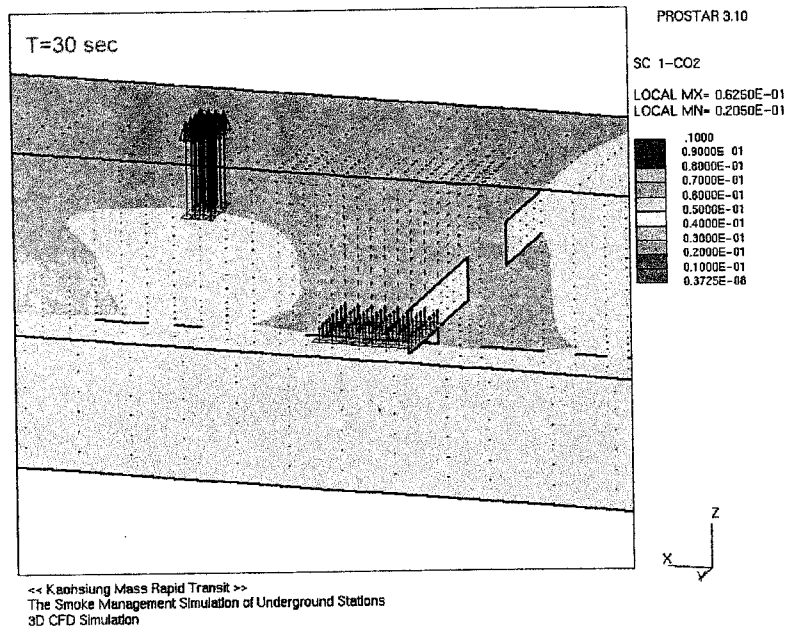


圖 3-79 防煙垂壁阻煙功能濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，30 秒）

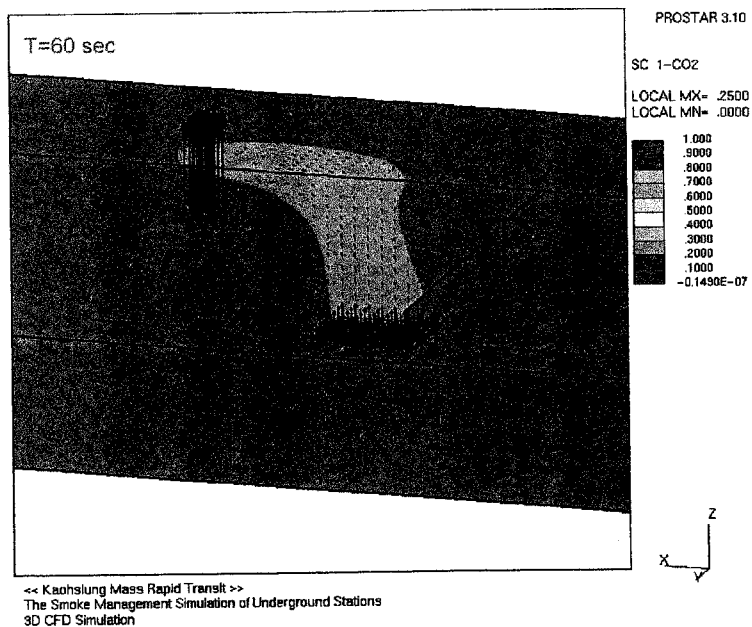


圖 3-80 垂壁附近斷面濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，60 秒）

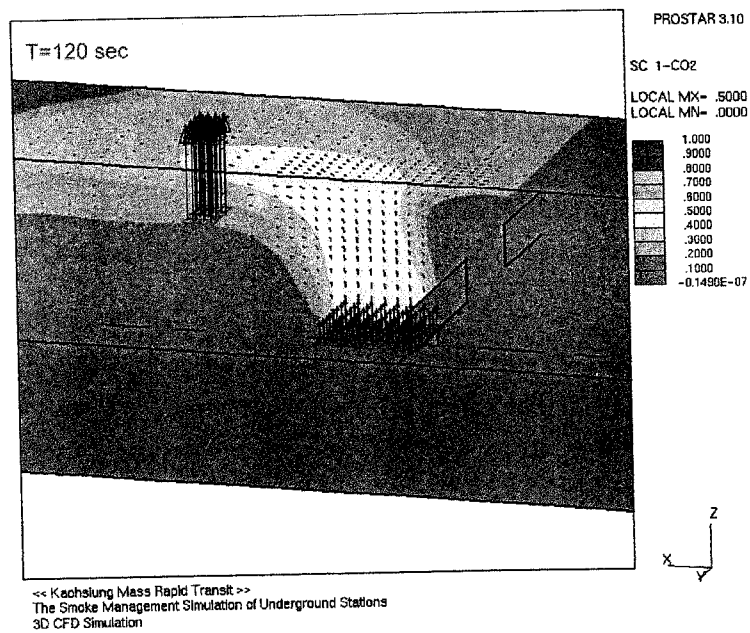


圖 3-81 垂壁附近斷面濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，120 秒）

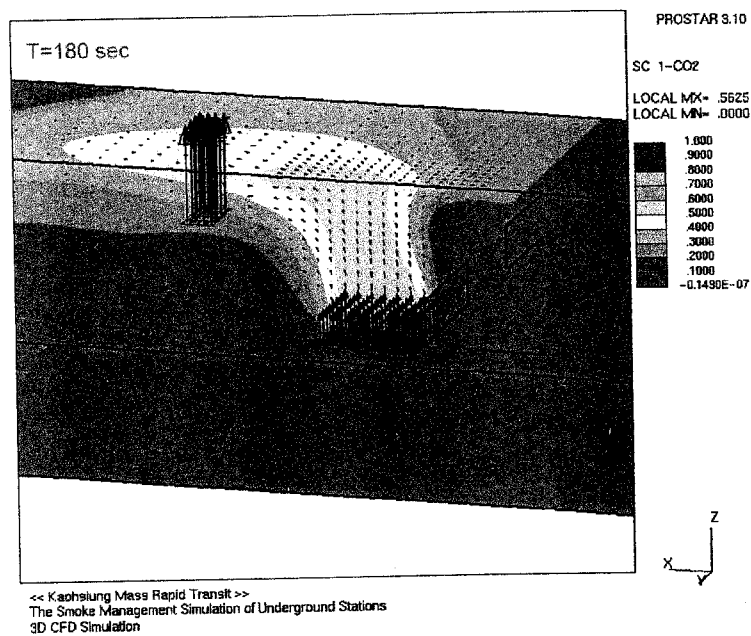


圖 3-82 垂壁附近斷面濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，180 秒）

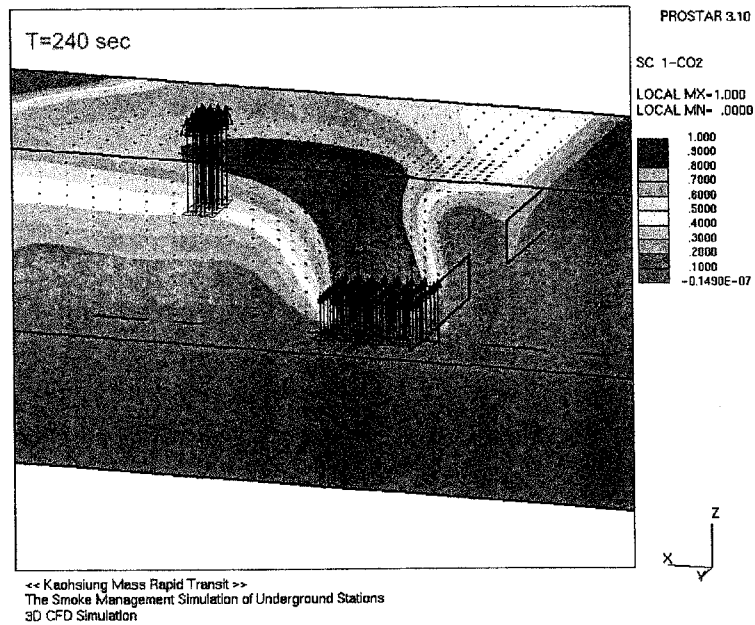


圖 3-83 垂壁附近斷面濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，240 秒）

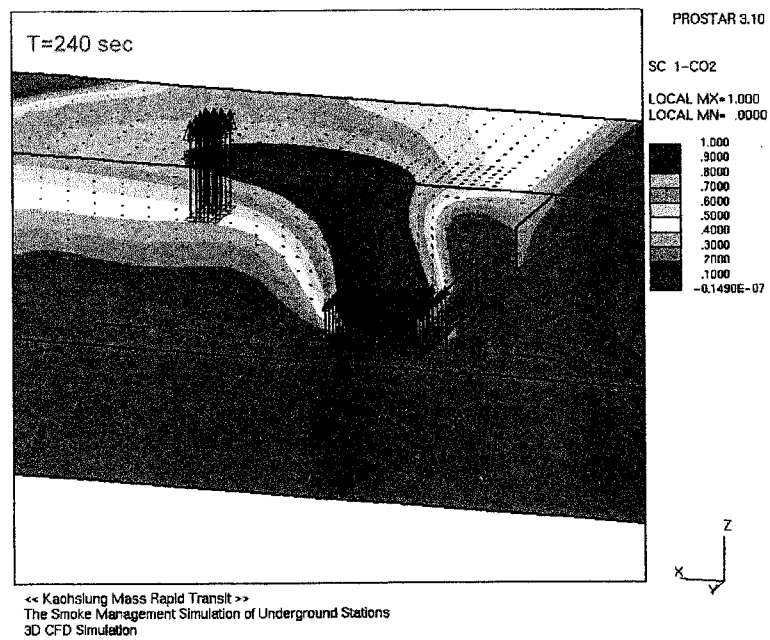


圖 3-84 垂壁附近斷面濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，360 秒）

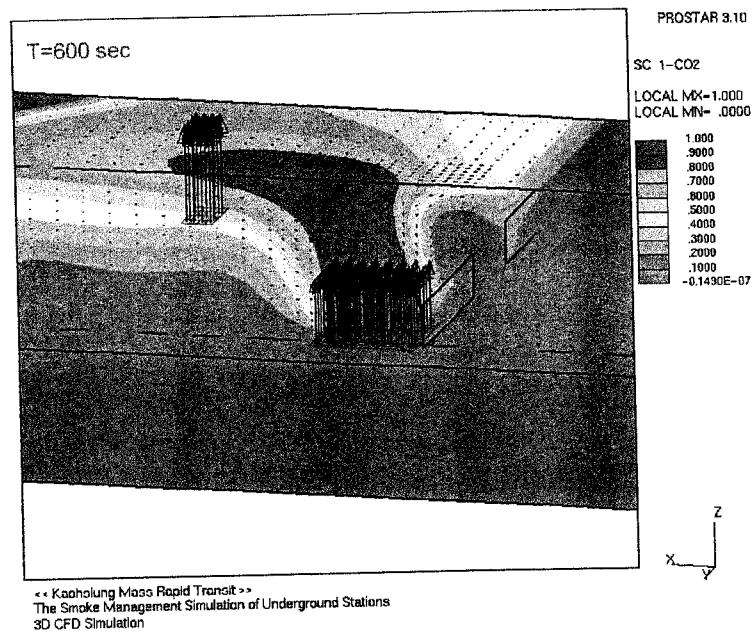


圖 3-85 垂壁附近斷面濃度場模擬結果（案例七：垂壁附近斷面，600 秒）

3.3 高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬

3.3.1 軌道區模擬參數說明

本研究進行典型地下車站軌道區通風及排氣系統煙控模擬，本模擬針對月台軌道上方排氣系統（Over Track Exhaust System，簡稱 OTE）及車站兩端之隧道通風豎井（Vent Shaft），其緊急運轉模式進行數值模擬。

圖 3-86 為整體模擬網格圖，顯示月台層各主要結構及月台屏門。模擬網格中各相關設備，如月台屏門、車廂尺寸等，則如圖 3-87 與圖 3-88 所示。

另外，軌道區上方為 OTE 排氣口，各排氣口尺寸為 1200mm × 800mm，排氣量為 5.42 CMS，如圖 3-89 所示。依以完成之規劃報告中，OTE 之風機為與月台下方排氣系統（UPE）共用，在本模擬中風量採 65.0 CMS 之風機規格，另車站兩端之隧道通風風機風量每台為 60 CMS。

本研究所完成之高雄捷運系統典型地下車站軌道區模擬案例條件說明，示如表 3-5。

表 3-5 高雄捷運系統典型地下車站軌道區煙控模擬案例說明

	案例八	案例九	案例十	案例十一	案例十二	案例十三
隧道風機 運轉模式	Pull Only	Push and Pull	X	Pull Only	Push and Pull	Push and Pull
OTE 排氣系統	O	O	O	O	O	O
UPE 排氣系統	X	X	X	X	X	X
火源釋放	X	X	X	O	O	O

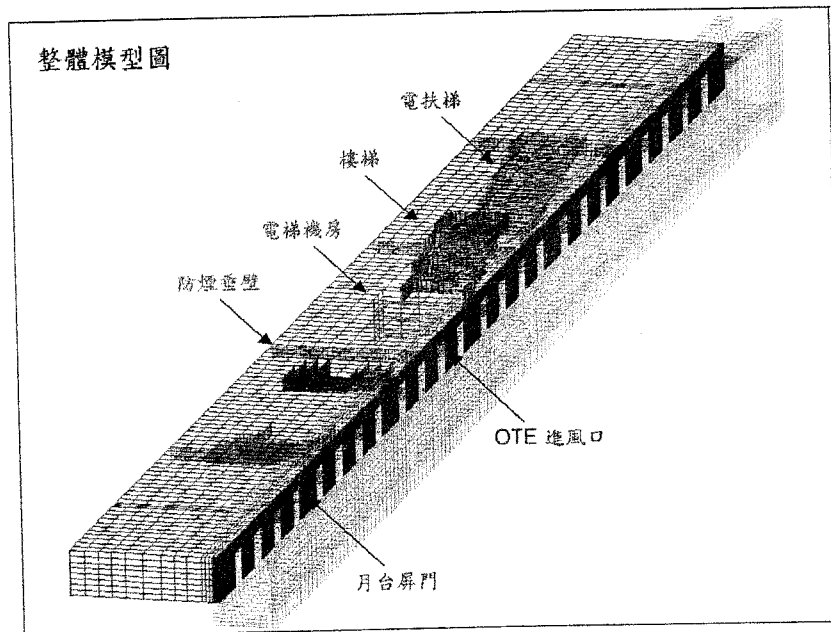


圖 3-86 車站軌道區模型網格圖

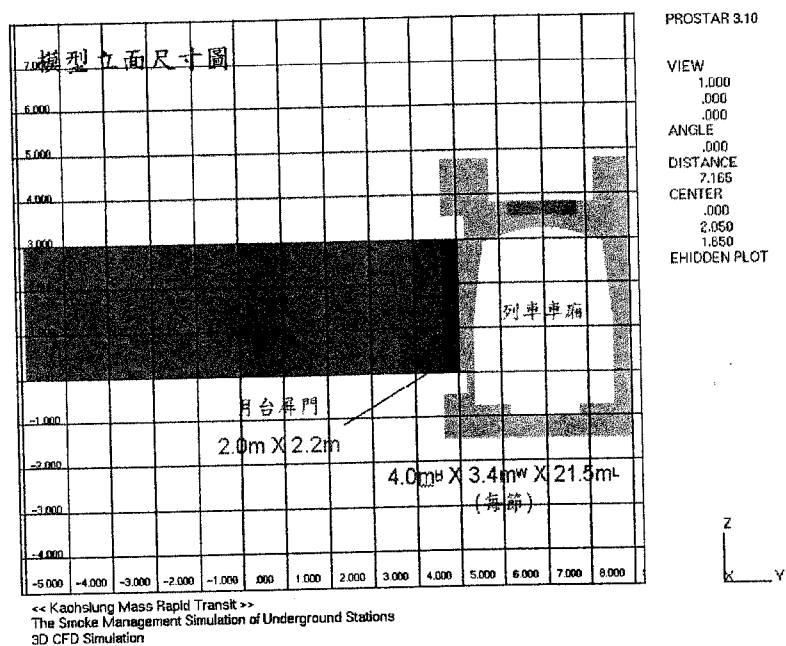


圖 3-87 月台區與軌道區模型立面圖

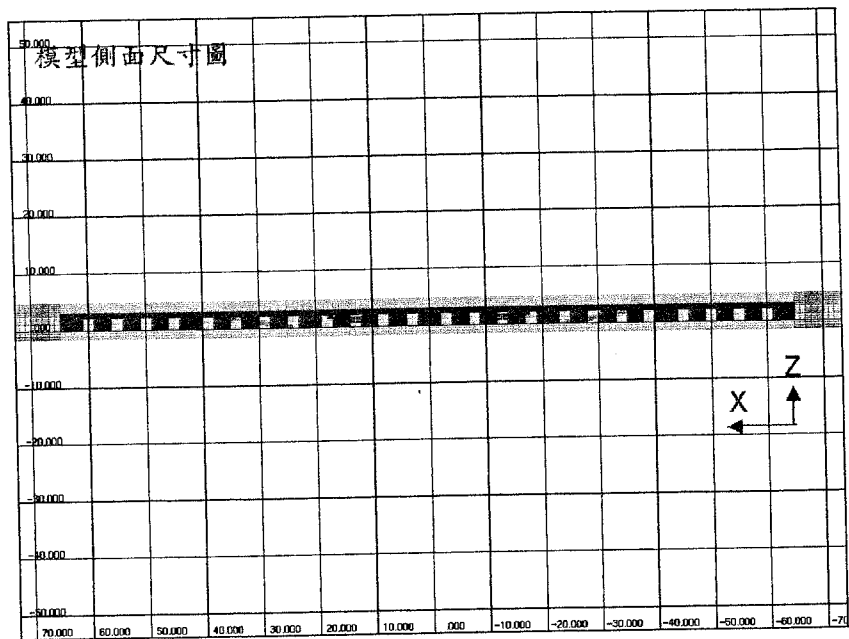


圖 3-88 軌道區模型側面圖

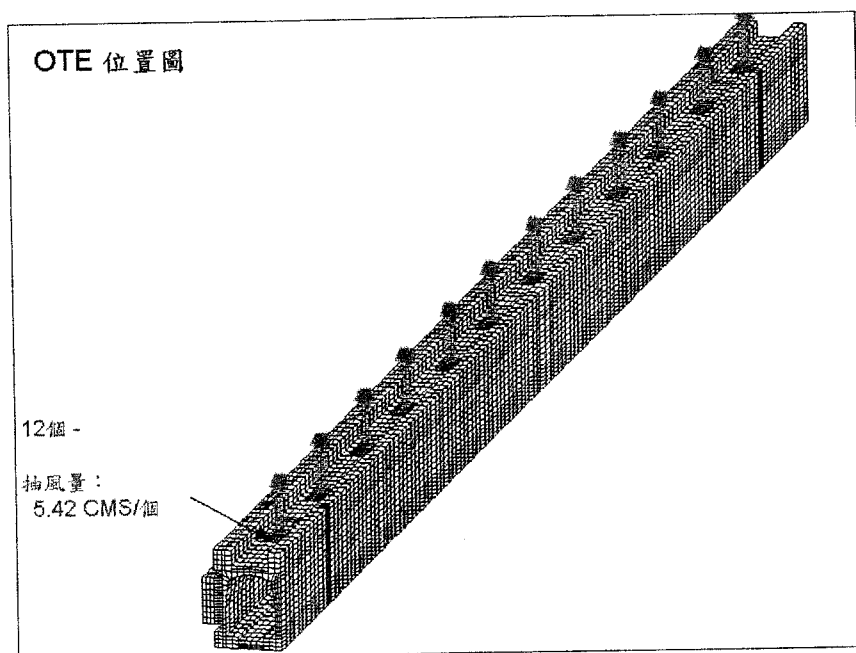


圖 3-89 軌道區 OTE 位置圖

3.3.2 軌道區煙控模擬結果分析

軌道區煙控模擬分析，共完成三個案例，分別為 Pull only 模式、Push-Pull 模式、與 OTE Only 模式，以上各個案例模擬條件及其結果說明如下：

◎案例八

模擬情境：

假設軌道區發生火災時，月台軌道上方排氣系統（OTE）啟動，車站兩端之隧道通風豎井以全部排氣方式（Pull only）運轉模式啟動。

模擬結果：

經模擬結果分析，當隧道風機以全部排氣方式運轉（Pull only）及 OTE 系統皆開啓下，圖 3-90 顯示月台屏門之風速分佈情形，其氣流速度約為 0.4~0.6 m/s，流動方向為自月台區流至軌道區。圖 3-91 與圖 3-92 則顯示 OTE 排氣口之運作情形，由結果顯示可有效抽取軌道上方氣流，因此在列車發生火災停靠車站時，OTE 系統可將受熱上浮之濃煙予以排除。

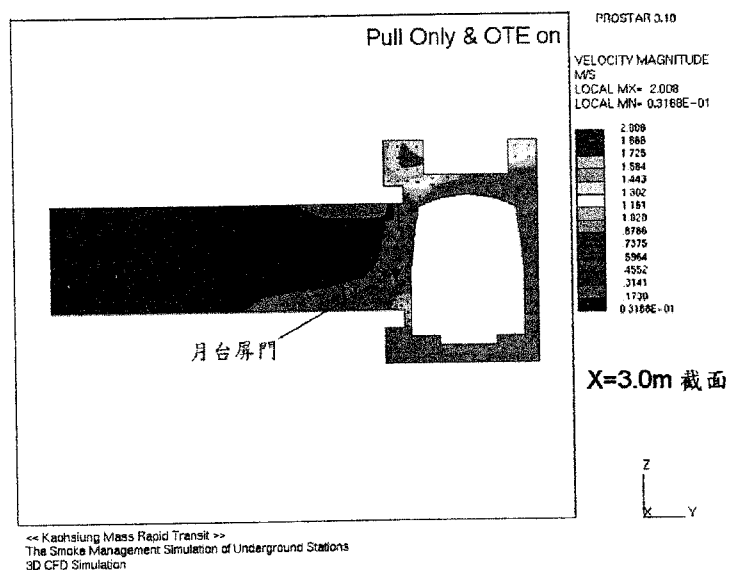


圖 3-90 案例八氣流分佈立面圖（一）

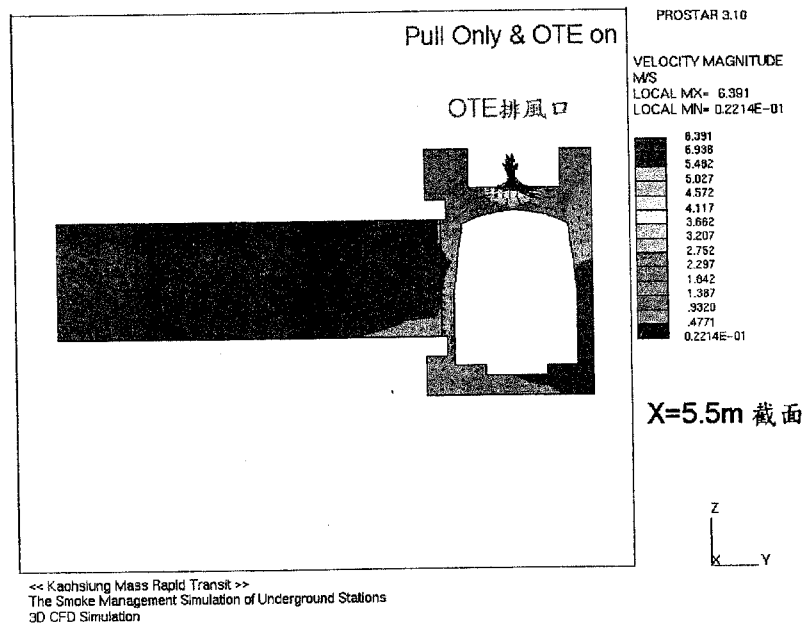


圖 3-91 案例八氣流分佈立面圖（二）

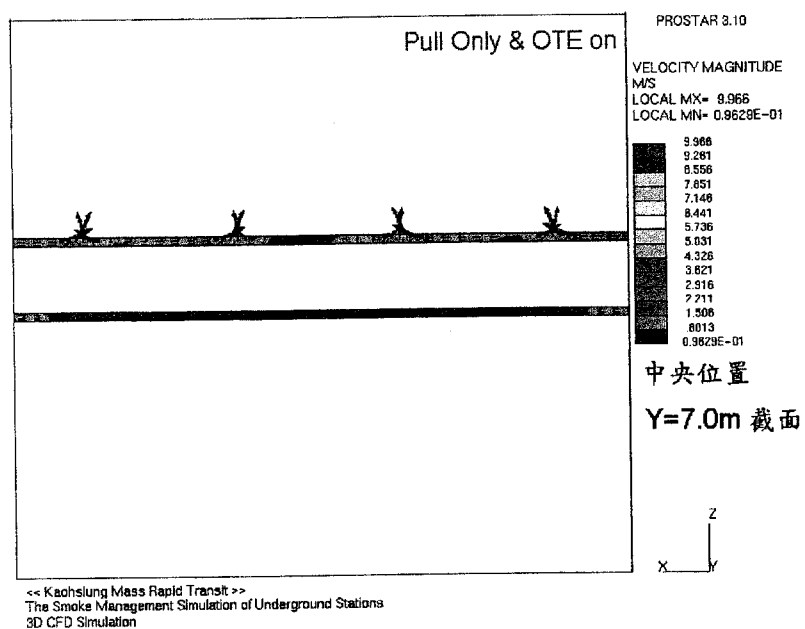


圖 3-92 案例八氣流分佈圖（三）

◎案例九

模擬情境：

假設軌道區發生火災時，月台軌道上方排氣系統（OTE）啟動，車站兩端之隧道通風豎井以一送一排方式（Push & Pull）運轉模式啟動。

模擬結果：

經模擬結果分析，圖 3-93 顯示當隧道風機以一送一排方式運轉（Push and Pull）及 OTE 系統均開啓下月台屏門之風速，由結果顯示月台屏門處氣流速度約為 1.3~1.7m/s，流動方向為自軌道區流至月台區，顯示氣流方向係受隧道風機之送氣因素影響。圖 3-94、圖 3-95 顯示 OTE 排氣口之運作情形，由結果顯示除可抽取軌道上方氣流外，受隧道風機之送氣因素影響，列車周圍亦有股氣流流動，約為 1.7~2.0m/s。

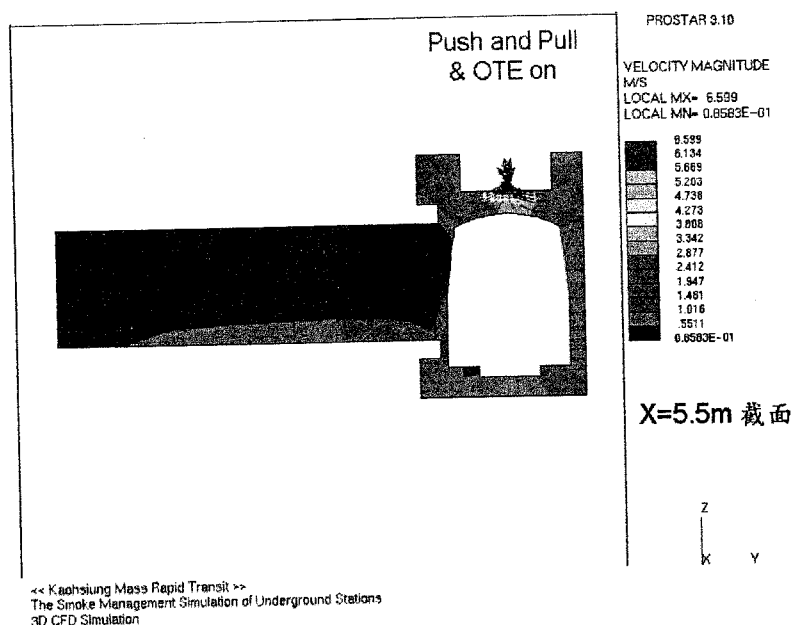


圖 3-93 案例九氣流分佈立面圖（一）

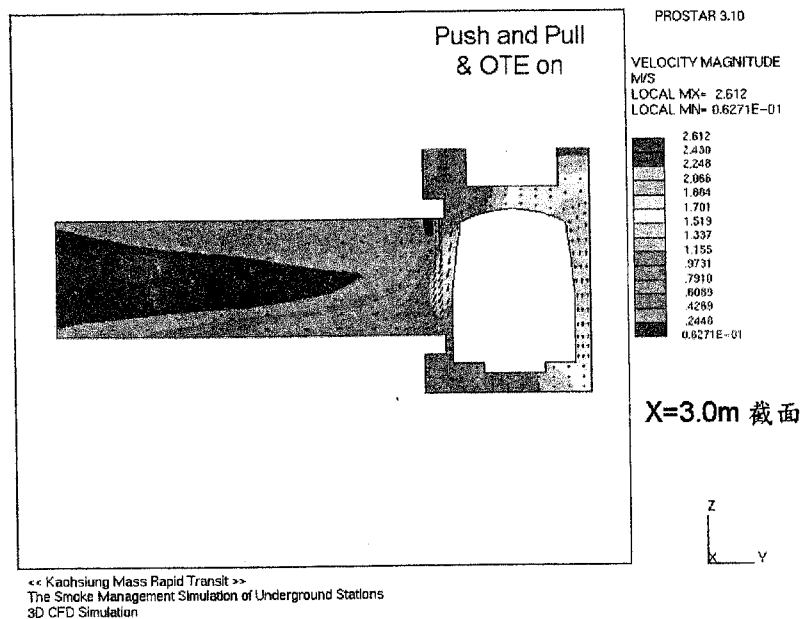


圖 3-94 案例九氣流分佈立面圖（二）

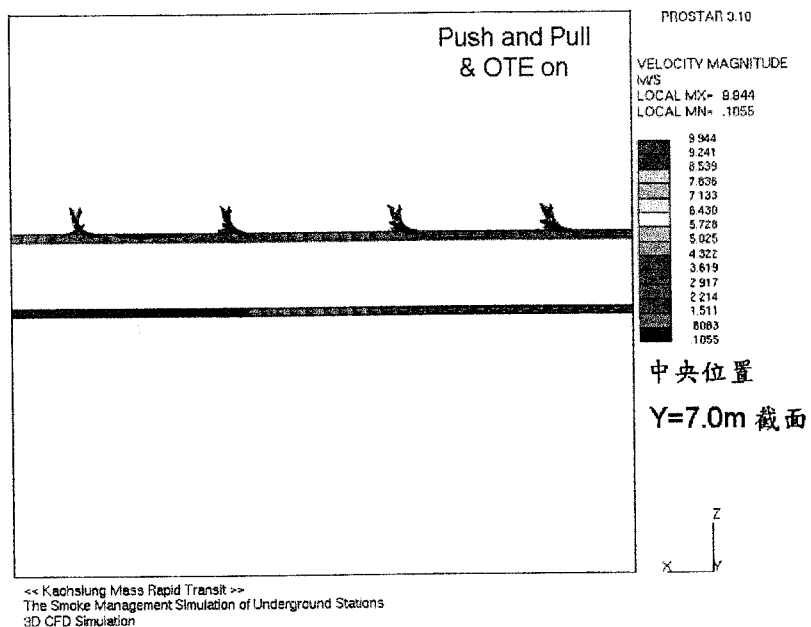


圖 3-95 案例九氣流分佈圖（三）

◎案例十

模擬情境：

假設軌道區發生火災時，只有月台軌道上方排氣系統（OTE）啟動，車站兩端之隧道通風豎井並不啟動。

模擬結果：

經模擬結果分析，圖 3-96 顯示當隧道風機不運轉，僅 OTE 系統單獨開啓時，月台屏門之風速約為 0.3~0.4m/s，流動方向為自月台區流至軌道區，此結果恰可顯示 OTE 系統之存在對軌道區環境影響。圖 3-97、圖 3-98 顯示 OTE 排氣口之運作情形，由結果顯示 OTE 系統運作時，可在月台門處產生一股氣流，抑制軌道區氣流竄入月台區。

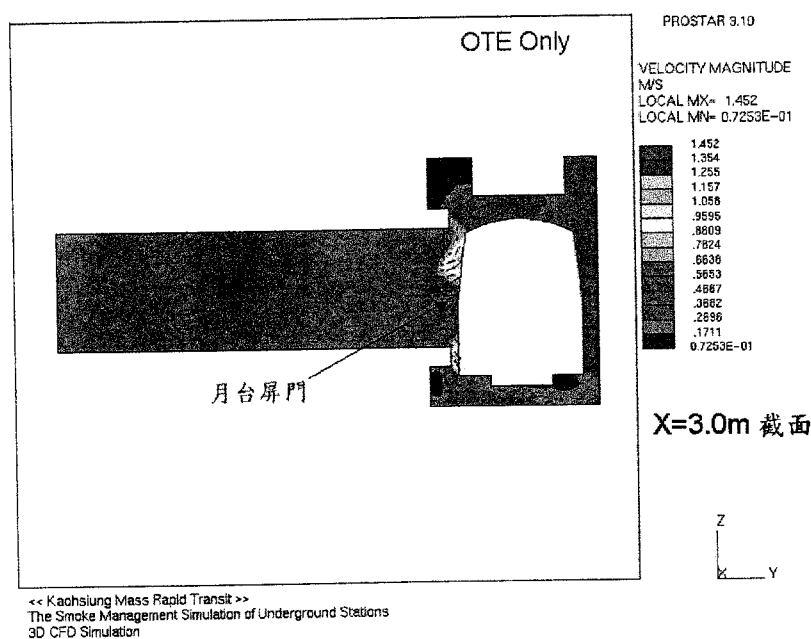


圖 3-96 案例十氣流分佈立面圖（一）

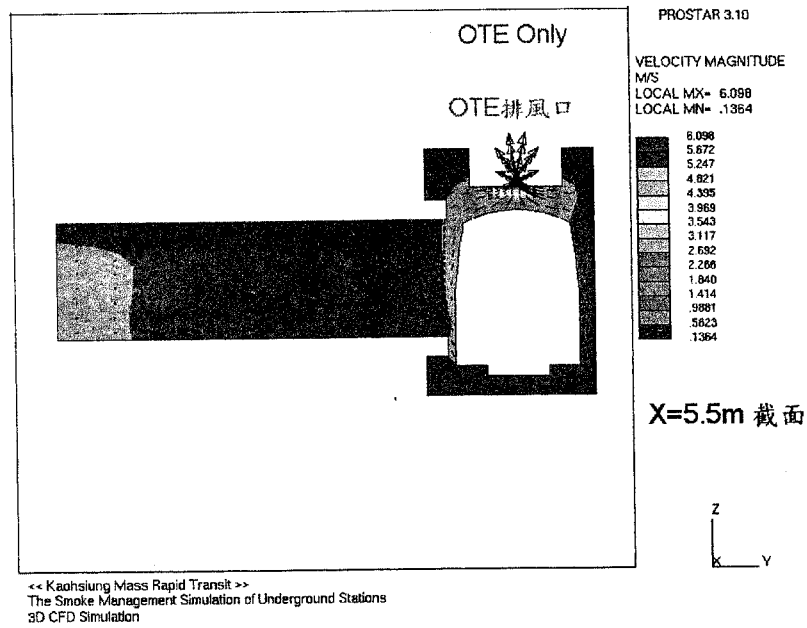


圖 3-97 案例十氣流分佈立面圖（二）

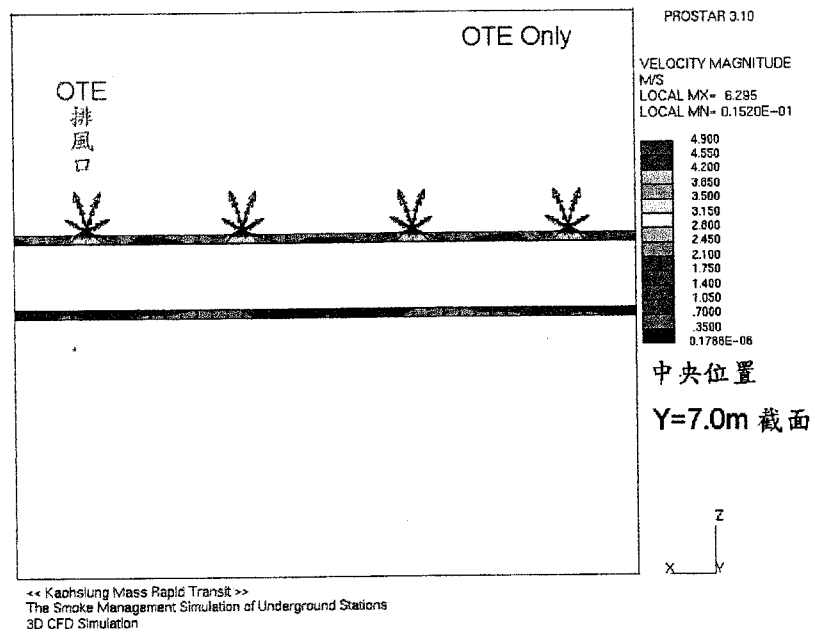


圖 3-98 案例十氣流分佈圖（三）

◎案例十一

模擬情境：

模擬列車於車站月台層軌道區發生火災時啟動排煙系統之排煙狀況，模擬情形為當列車中央處發生火災（ $X = 0$ ）因需疏散車上旅客，因此月台門為開啓狀態、車站兩端之隧道風機 TVF 系統為以 Pull Only 形式進行緊急模式運轉。進行之分析規模為參考 Mott MacDonald 撰寫「高雄都會區大眾捷運系統工程民間參與捷運顧問（第一部份）橘紅線地鐵環境模擬報告」成果報告之內容。圖 3-99 為描述列車失火發展過程。

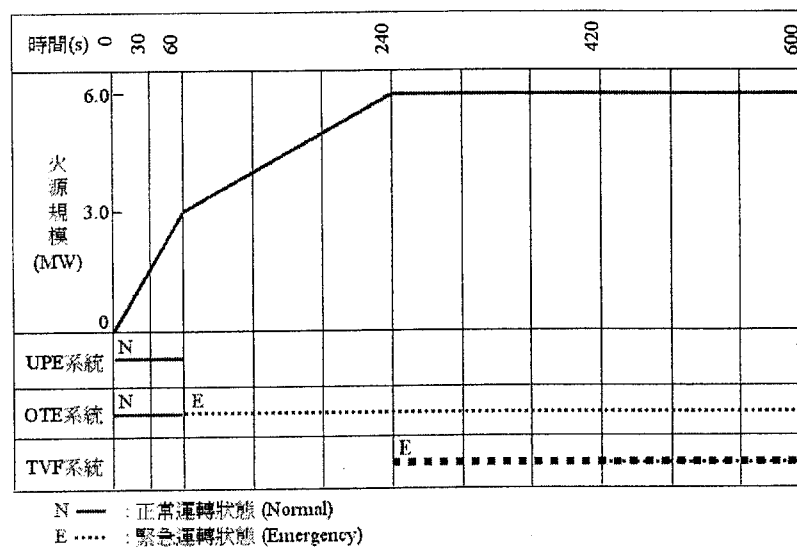


圖 3-99 列車失火發展過程

本案例所進行之分析目的如下：

1. 觀察火災在起火後十分鐘（600 秒）內濃煙之擴散現象，研究之地點包含軌道區起火點處第一扇月台門位置之橫斷面、起火點與通風井中間位置（約 1.5 節車廂長度）之橫斷面、軌道區縱向分佈及車站兩端隧道通風井下方位置等地點。

2. 觀察在整個列車起火燃燒過程中，不同階段之通風及排煙設備運轉對濃煙擴散或排放之影響程度，由於 TVF 系統為 240 秒之後方能啟動，本案例觀察在 240 秒及 285 秒兩階段之情形，以作為 TVF 系統運轉效果分析。
3. 觀察濃煙對月台層之影響，因此分析人員逃生高度（FFL Z=1.5 公尺）下濃煙之擴散現象。

模擬結果：

將模擬結果選取五個位置，以進行不同時間變化下火場觀察與研究。今分析模擬結果如下：

A. 觀察位置一：起火點處第一扇月台門位置（X = +3.0）

圖 3-100 為顯示列車起火後 30 秒時於火場處 UPE 系統運轉情形。由於此時距列車起火時間僅為 30 秒之時間，車站緊急排煙系統尚未運轉，因此 UPE 系統及 OTE 系統仍處於正常模式下運轉。由模擬結果顯示，由於火場高溫現象，導致濃煙因浮力作用往上流動，因而位於月台下方之 UPE 系統僅有部分排煙效果，另部分之濃煙則無法排除。

圖 3-101 至圖 3-106 顯示在火場附近不同時間下溫度之分佈情形。由模擬結果得知，在 60 秒之前，因受 UPE 系統抽取氣流之引導影響，列車下方於靠近月台側有較高溫度之趨勢，而高溫之氣流逐漸於上方空間累積。同時，於 240 秒 TVF 系統啟動之前，可發現離火場最近之月台門下方已受約 60 °C 高溫包圍，可能對逃生略有影響，此情況可由圖 3-102 與圖 3-103 得知。

及至 TVF 系統啟動後，可發現溫度場分佈情況有顯著之改變，主要為高溫氣流蓄積位置有不對稱之傾斜現象發生。原因為風機運轉模式係 Pull Only 模式，當隧道風機抽取軌道區氣流時，外界氣流自月台層、經由月台門進入

車站軌道區域，以進行補充作用。觀察整個橫斷面溫度分佈，由圖 3-104、圖 3-105、與圖 3-106 可發現，列車在靠近月台門側之高溫濃煙因被進入之外界氣流沖淡而逐漸消失，另一側卻逐漸佈滿約 60 °C 之濃煙。

B. 觀察位置二：起火點與通風井中間位置 ($X = +36.5$)

圖 3-107 至圖 3-112 為濃度場之分佈情形。整體而言，濃煙之累積情形與溫度場極為類似，受 UPE 系統及 TVF 系統運轉之影響，高溫、高濃度之氣流以列車與軌道區連續壁間之縫隙流動。

圖 3-113 至圖 3-118 為列車起火地點與通風井中間位置 ($X = 36.5\text{m}$ 、約 1.5 節車廂長度) 溫度場之分佈情形，此位置之特色為遠離起火點已有一段之距離，可觀察濃煙擴散之現象，同時並可研究 OTE 系統之運轉效果。由圖 3-113 至 3-115 可發現，列車下方已無高溫氣流存在，而為累積於軌道區上方處，因此於軌道上方之 OTE 系統恰可扮演有效抽取濃煙之角色。

高溫氣流並以不對稱形式累積，究其原因，乃 OTE 系統排氣時，月台門有氣體進入以補充被抽取之高溫氣流，導致流場有向右流動之趨勢。

於 240 秒 TVF 系統啟動後，累積於上方之高溫氣流受影響產生縱向流動，故列車正上方、靠近 OTE 排氣口之氣流溫度已不若 TVF 系統未啟動前之高，此現象可由圖 3-115 顯示 240 秒時之模擬結果與圖 3-116 有關 285 秒之結果對照得知。

相關之濃度分佈情形如圖 3-119 至圖 3-124 所示。顯示隨不同時間模擬結果與溫度場分佈類似，因此可得知，在此位置之濃煙為沿軌道上方流動。

C. 觀察位置三：軌道區縱向分佈 ($Y = +7.0$)

圖 3-125 至圖 3-130 為沿火場軌道區縱方向之溫度分佈情形，圖 3-131 至圖 3-136 為濃度場之分佈情形。由圖 3-125 至 3-127 及圖 3-131 至圖 3-133 觀察隨時間之變化，發現高溫濃煙沿軌道上方朝縱向（即車站兩端）逐漸擴散，同時亦顯示 OTE 系統運轉時產生排煙、降溫區隔等效果，導致高溫濃煙每經過一只排風口、溫度與濃度即明顯降低。

於 240 秒 TVF 系統啟動後，如同第二處觀察地點所顯示，累積於列車正上方之高溫濃煙受影響 TVF 排氣氣流牽引作用，產生明顯縱向流動，增加擴散效果，氣流溫度、濃度變化梯度增加，此現象可由圖 3-127、圖 3-128 相互比較 240 秒與 285 秒下溫度差異，圖 3-133、圖 3-134 相互比較濃度差異，再參考 420 秒時圖 1-129 溫度場分佈與圖 3-135 濃度場分佈便可得知 TVF 系統啟動後之結果。

D. 觀察位置四：車站兩端隧道通風井下方位置 ($X + \text{Shaft}$)

觀察車站兩端隧道通風井下方處濃煙分佈情形，圖 3-137 至圖 3-142 為溫度場分佈，圖 3-143 至圖 3-148 為濃度場分佈，由結果顯示濃煙量與分佈情形視 TVF 系統是否啟動有關。

於 240 秒（含）之前，此時隧道風機尚未啟動，濃煙為自然擴散方式流動至通風井，由圖圖 3-139 與 3-145 可觀察在 240 秒瞬間，濃煙於通風井位置呈現渦捲狀分佈狀況，通風井下方已有濃煙聚集。

於 240 秒（不含）後，因月台層受月台門阻絕之影響，風機抽取之氣流相對地大部分為來自隧道，顯示濃煙排放效果事實上並不如設計考量上之顯著，此點由圖 3-140、圖 3-141 及圖 3-142 觀察氣流溫度場，或由圖 1-146、

圖 3-147 及圖 3-148 觀察濃煙濃度場之變化過程即可得知。

E. 觀察位置五：人員逃生高度 ($Z = 1.5$ 公尺)

因本模擬案例有關隧道風機運轉模式為採用 Pull Only 模式，由模擬結果顯示，流場係以軌道區中央為對稱面、呈現上下行端對稱現象。在本觀察位置為能顯示較大區域之模擬結果，故僅將月台層上行端於不同時間下結果逐一顯示，而有關下行端之結果雖不在顯示圖片範圍內，然與上行端相同。

圖 3-149 至圖 3-154 為分析本觀察位置有關人員逃生高度 ($Z=1.5$ 公尺) 下濃煙之擴散現象有關溫度場分佈情形，而圖 3-155 至圖 3-160 為濃度場之分佈情形。

由圖 3-149、圖 3-150、圖 3-155、與圖 3-156 四圖結果顯示，在火災發生後 60 秒內，在 1.5 公尺高度之平面，高溫之濃煙將僅侷限在火災地點附近第一扇月台門位置。及至 240 秒，由圖 3-151 與 3-157 二圖觀察，濃煙將擴散至火災地點附近第二個月台門位置。

當隧道風機啟動後，該高度月台門位置之溫度場及濃度場有逐漸下降之趨勢，由 285 秒圖 3-152 與 3-158 可顯示此現象，而至 420 秒圖 3-153 與 3-159 顯示溫度場及濃度場已降低至安全之範圍內。

在上述各時間中，經在 1.5 公尺高度之平面無明顯有濃煙流入月台層而導致妨礙人員逃生之情形產生。

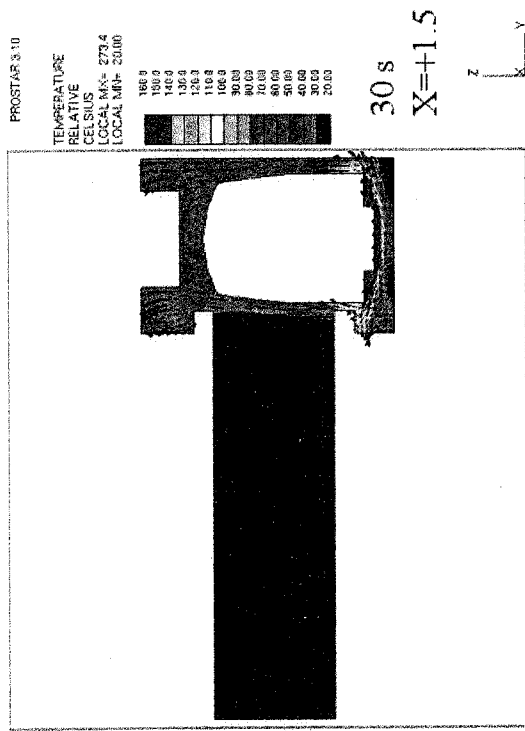


圖 3-100 UPE 系統運轉下溫度場分佈圖(案例十一：30 秒)

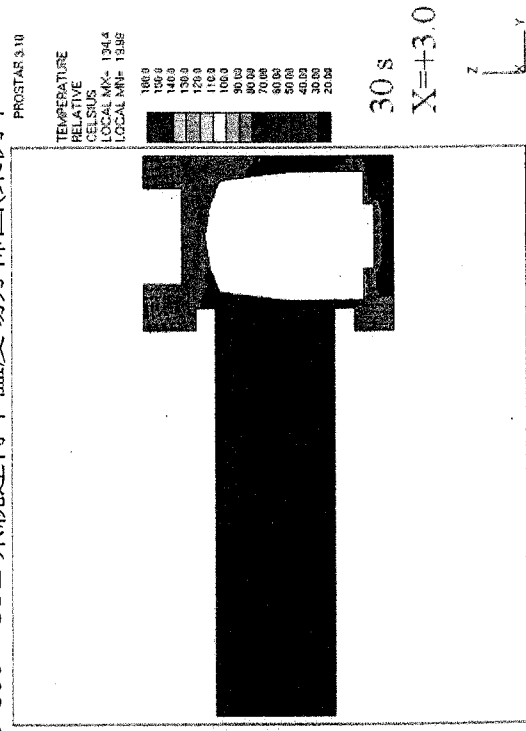


圖 3-101 中央位置火場溫度分佈圖(案例十一：30 秒)

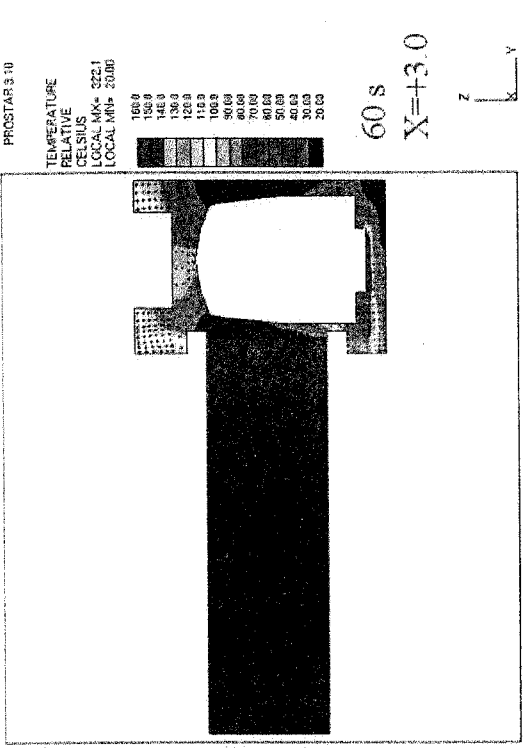


圖 3-102 中央位置火場溫度分佈圖(案例十一：60 秒)

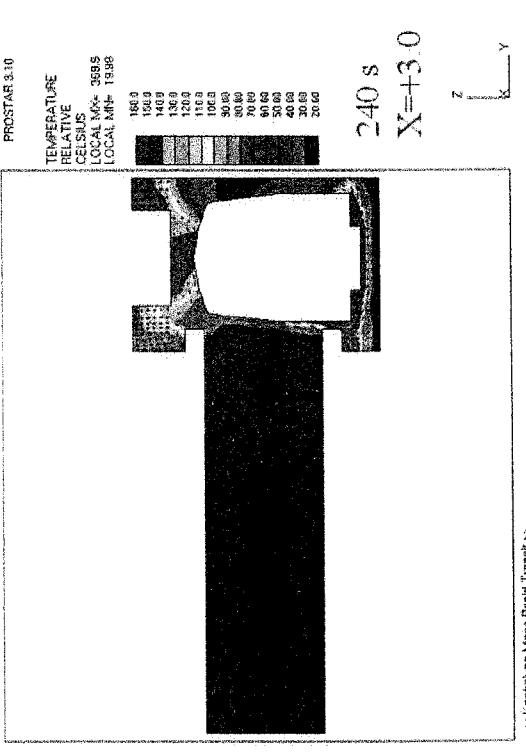


圖 3-103 中央位置火場溫度分佈圖(案例十一：240 秒)

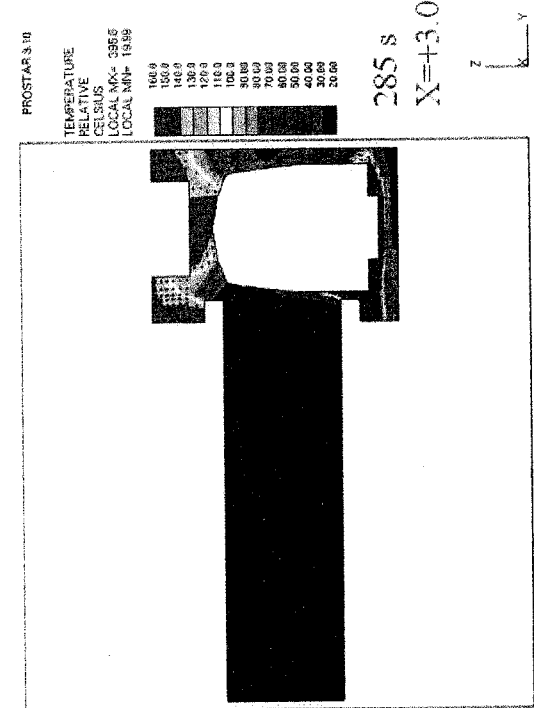


圖 3-104 中央位置火場溫度分佈圖(案例十一：285 秒)

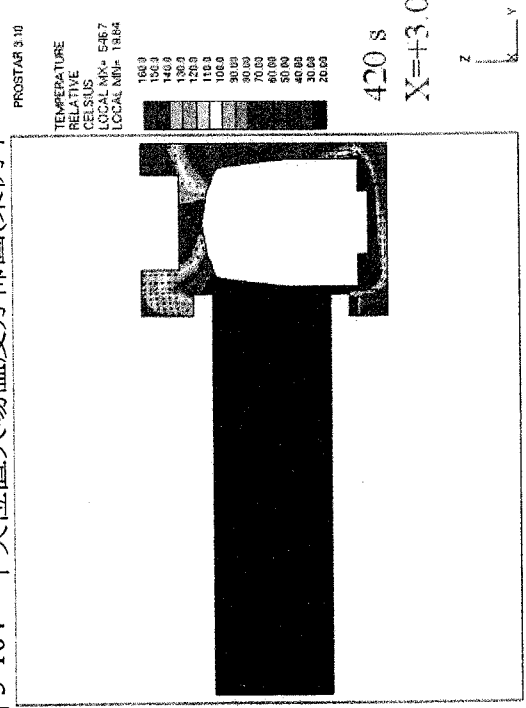


圖 3-105 中央位置火場溫度分佈圖(案例十一：420 秒)

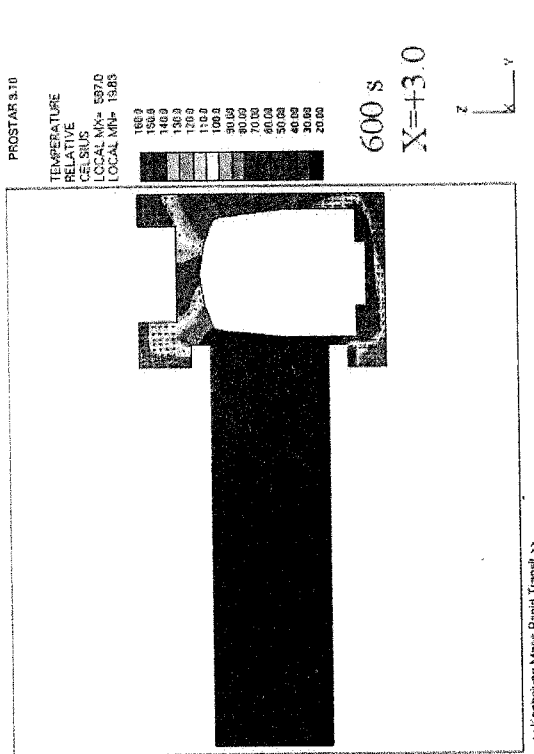


圖 3-106 中央位置火場溫度分佈圖(案例十一：600 秒)

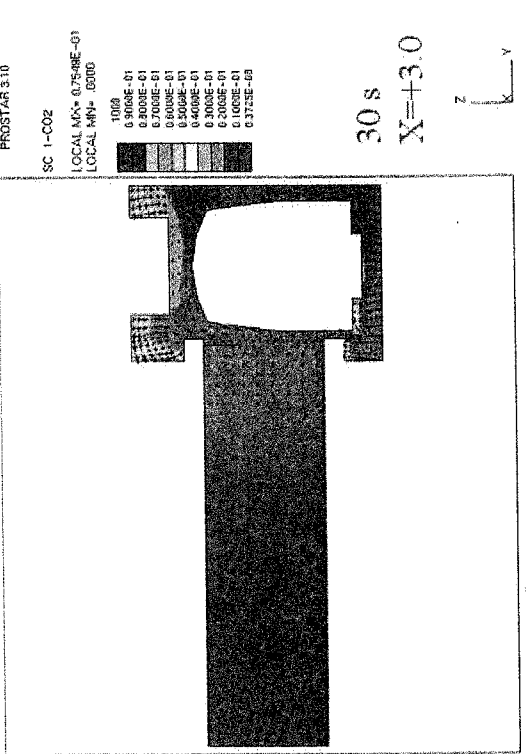


圖 3-107 中央位置火場濃度分佈圖(案例十一：30 秒)

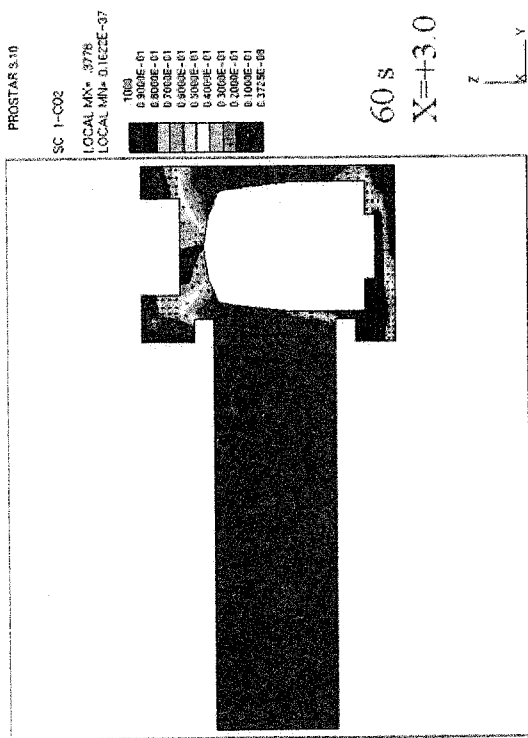


圖 3-108 中央置火場濃度分佈圖(案例十一：60 秒)

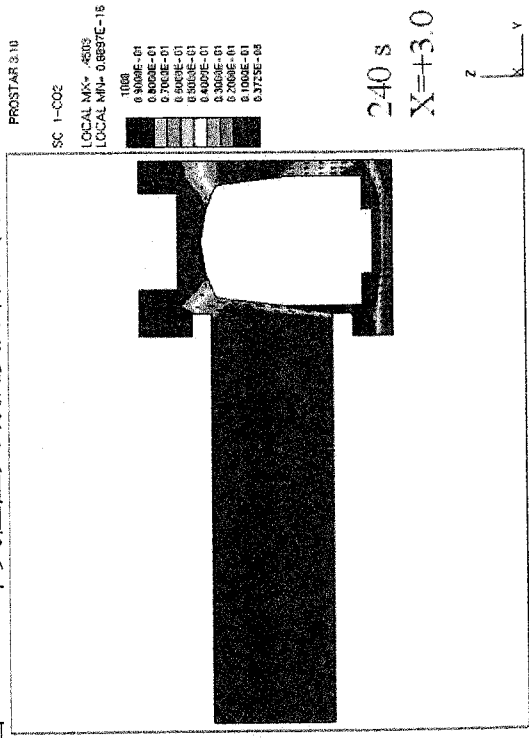


圖 3-109 中央置火場濃度分佈圖(案例十一：240 秒)

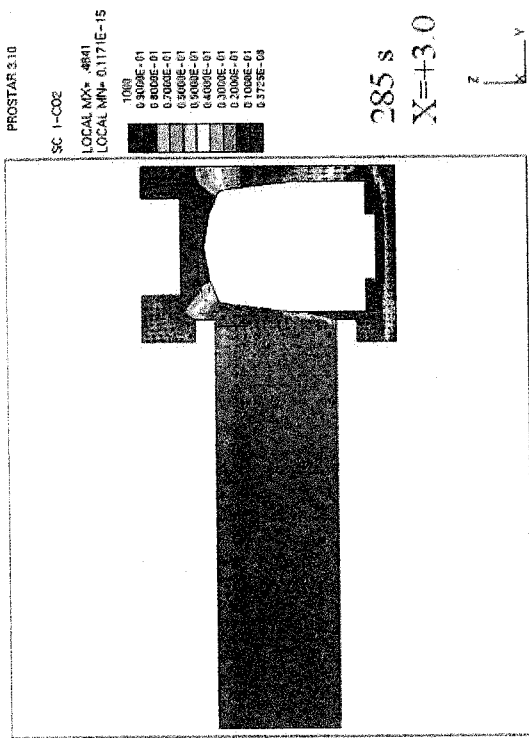


圖 3-110 中央置火場濃度分佈圖(案例十一：285 秒)

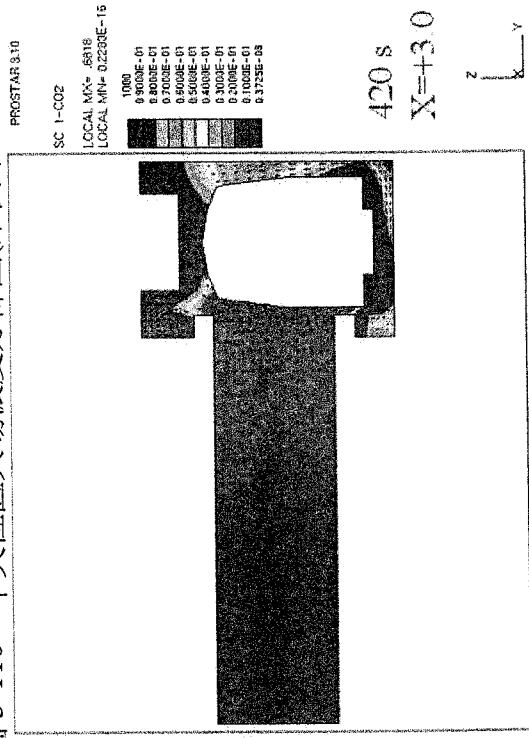


圖 3-111 中央置火場濃度分佈圖(案例十一：420 秒)

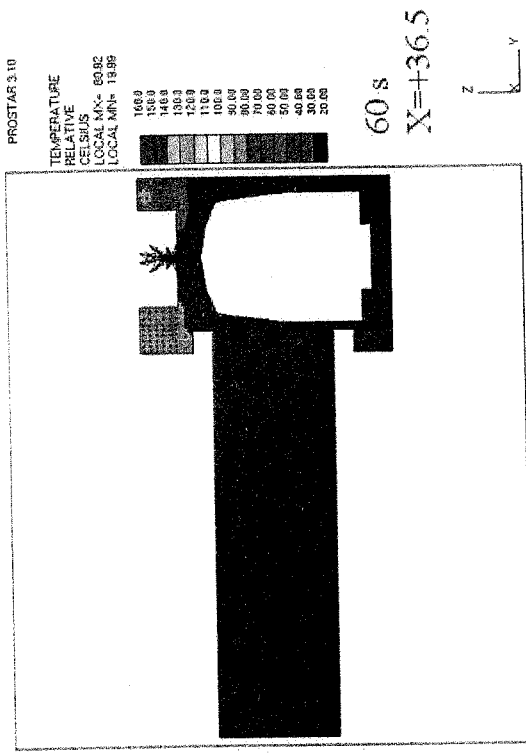


圖 3-114 火場溫度分佈圖(案例十一：60 秒)

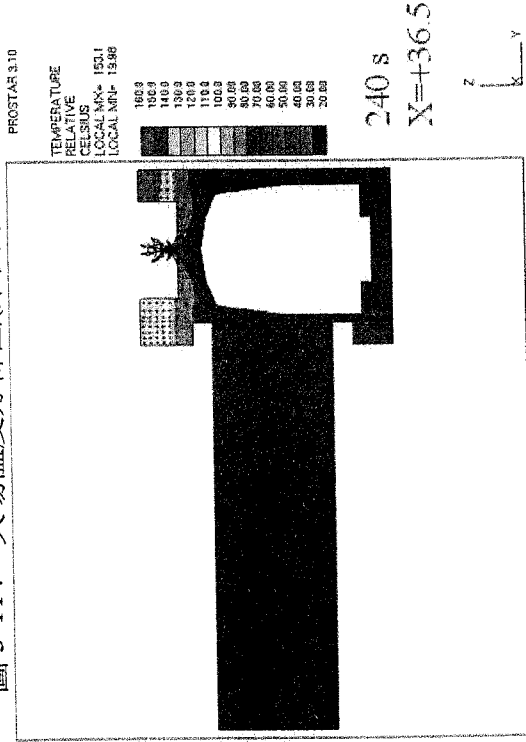


圖 3-115 火場溫度分佈圖(案例十一：240 秒)

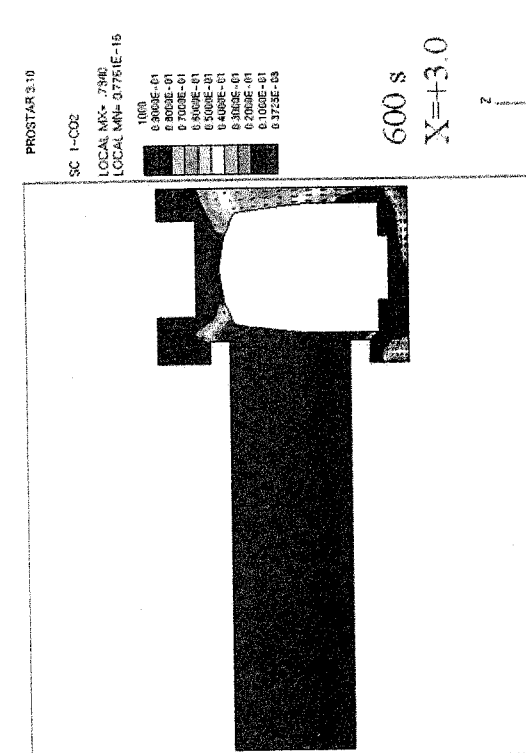


圖 3-112 中央位置火場濃度分佈圖(案例十一：600 秒)

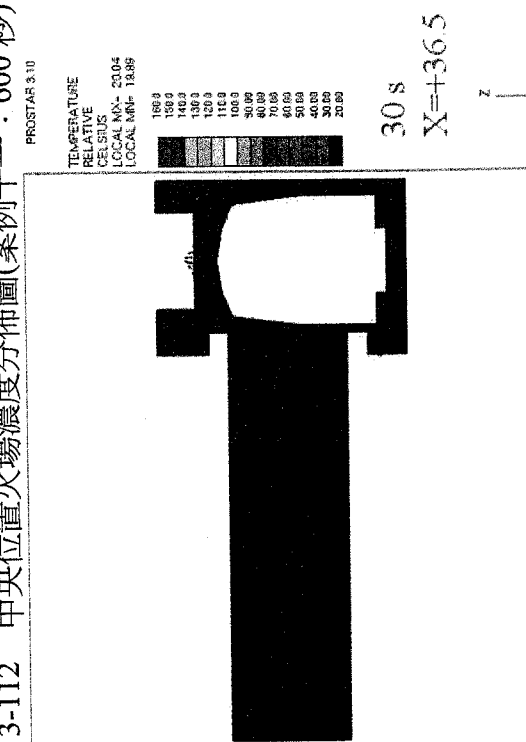
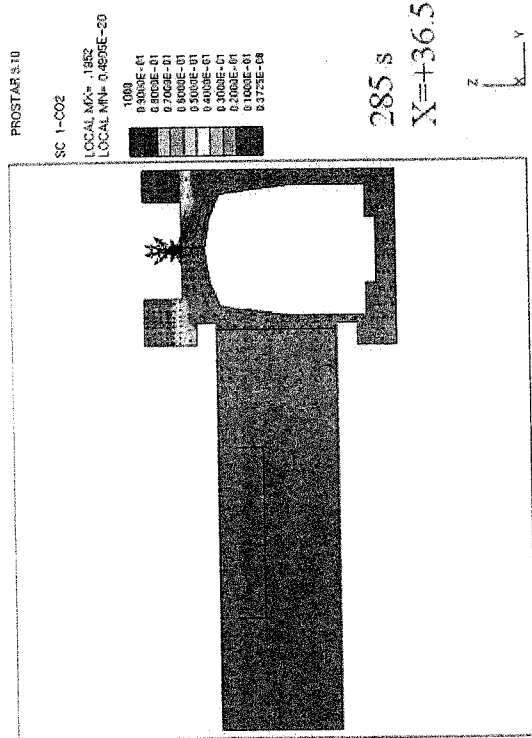
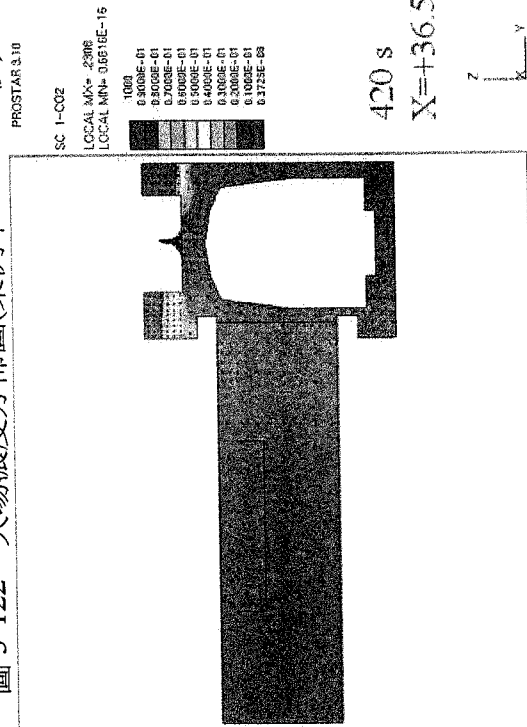


圖 3-113 火場溫度分佈圖(案例十一：30 秒)



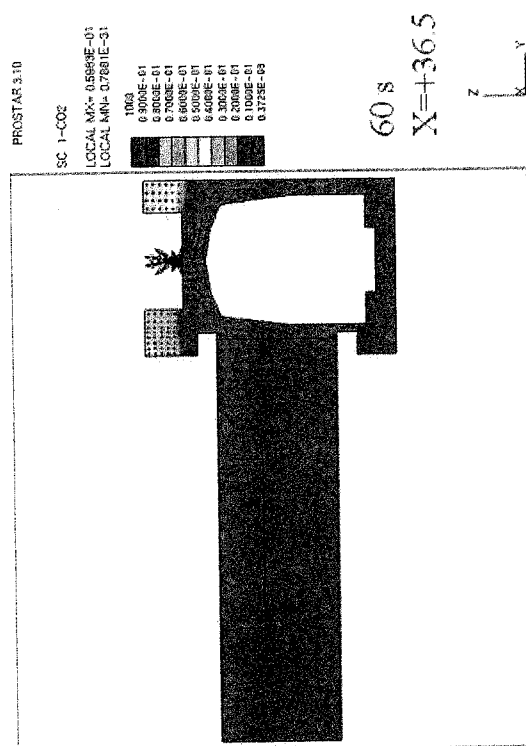
<< Kaohsiung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-122 火場濃度分佈圖(案例十一：285 秒)



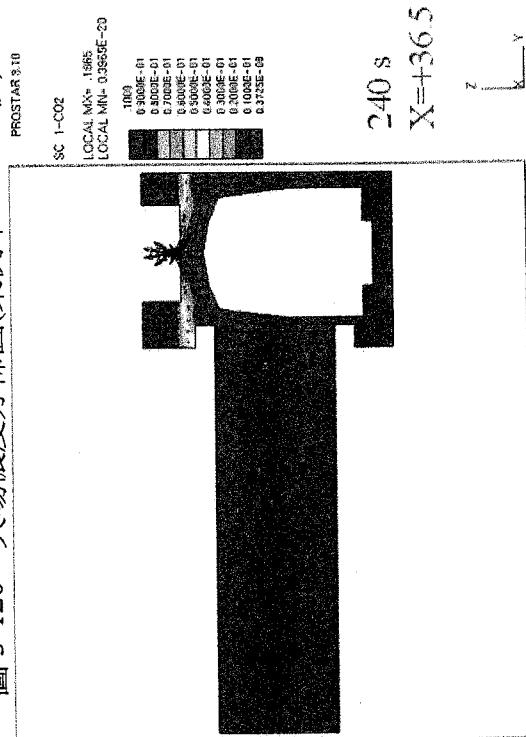
<< Kaohsiung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-123 火場濃度分佈圖(案例十一：420 秒)



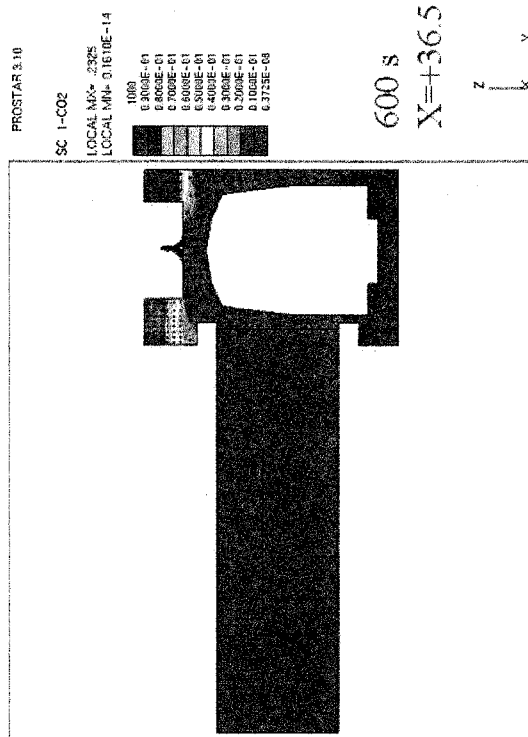
<< Kaohsiung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-120 火場濃度分佈圖(案例十一：60 秒)



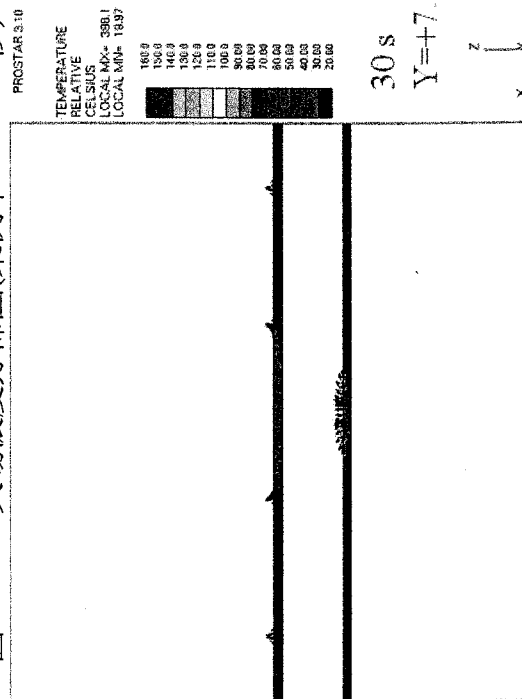
<< Kaohsiung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-121 火場濃度分佈圖(案例十一：240 秒)



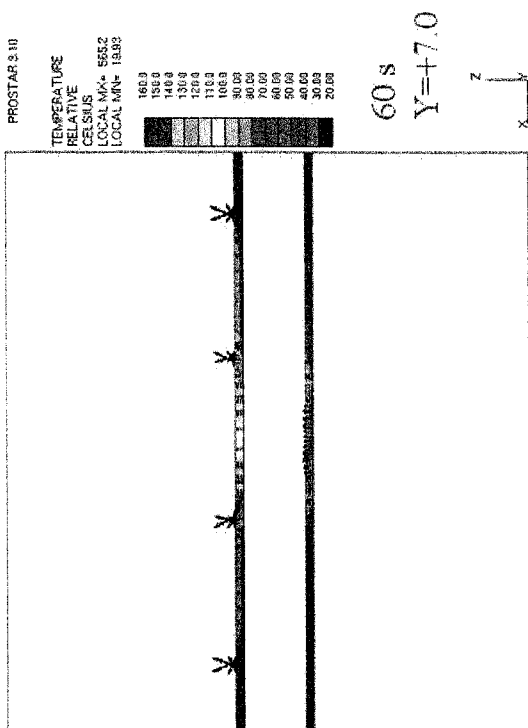
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-124 火場濃度分佈側視圖(案例十一：600 秒)



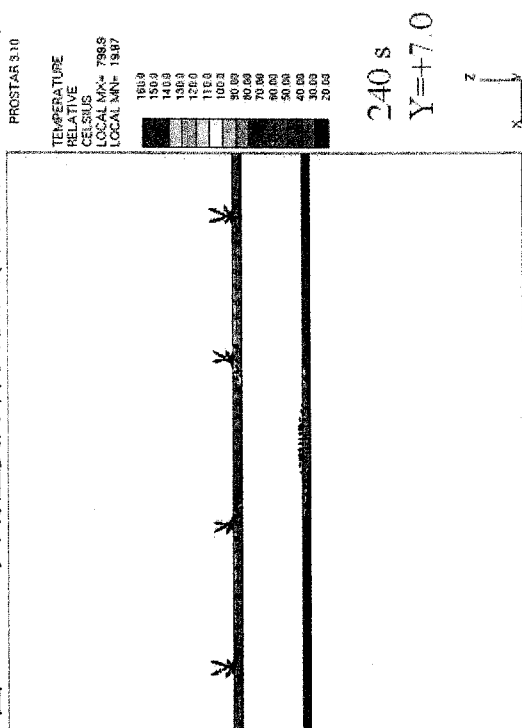
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-125 火場溫度分佈側視圖(案例十一：30 秒)



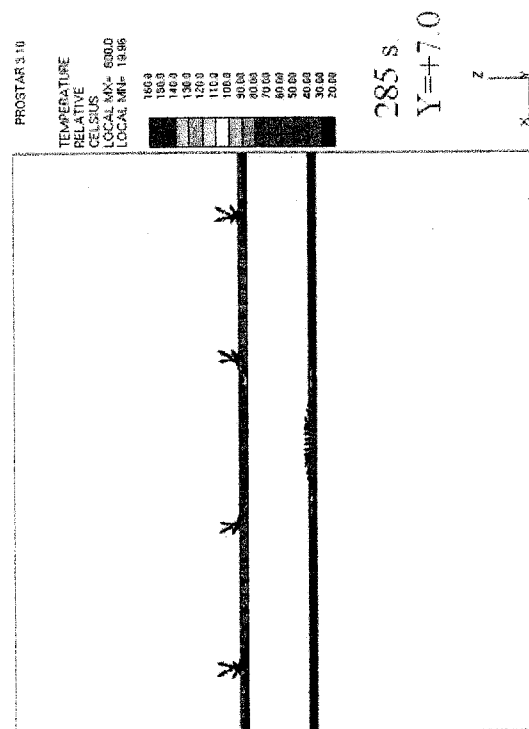
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-126 火場溫度分佈側視圖(案例十一：60 秒)



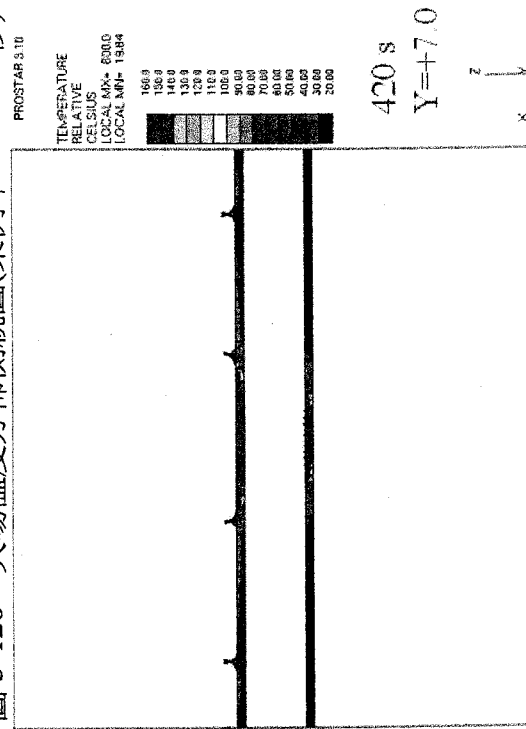
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-127 火場溫度分佈側視圖(案例十一：240 秒)



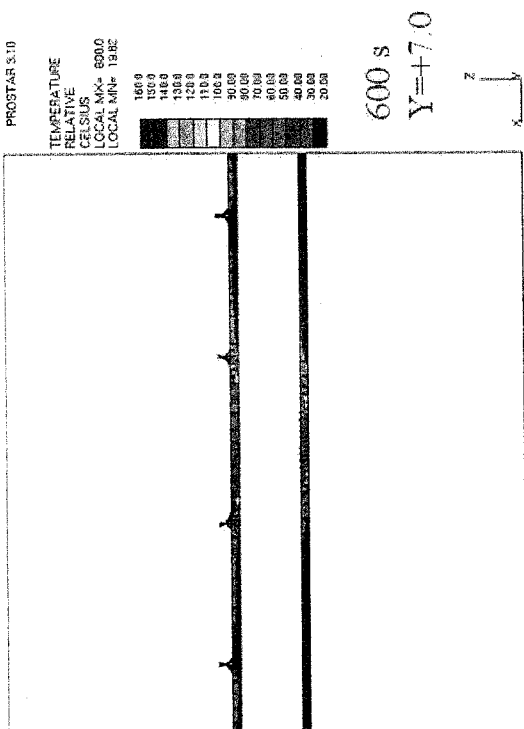
« Kapschling Mass Rapid Transit »
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-128 火場溫度分佈側視圖(案例十一：285 秒)



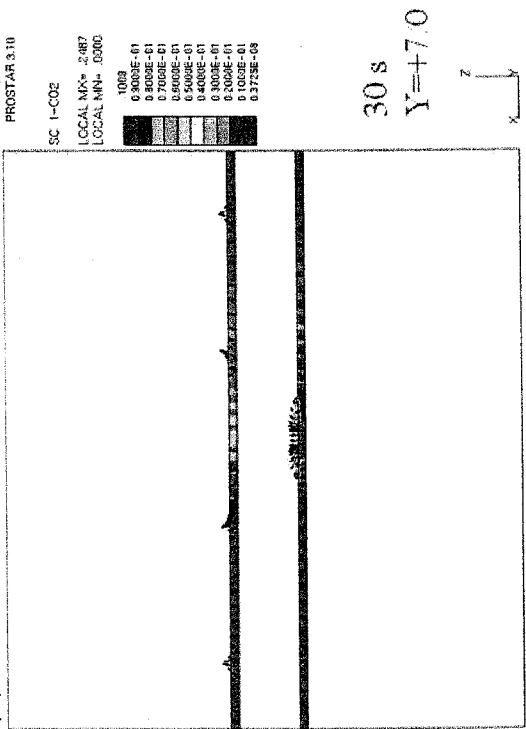
« Kapschling Mass Rapid Transit »
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-129 火場溫度分佈側視圖(案例十一：420 秒)



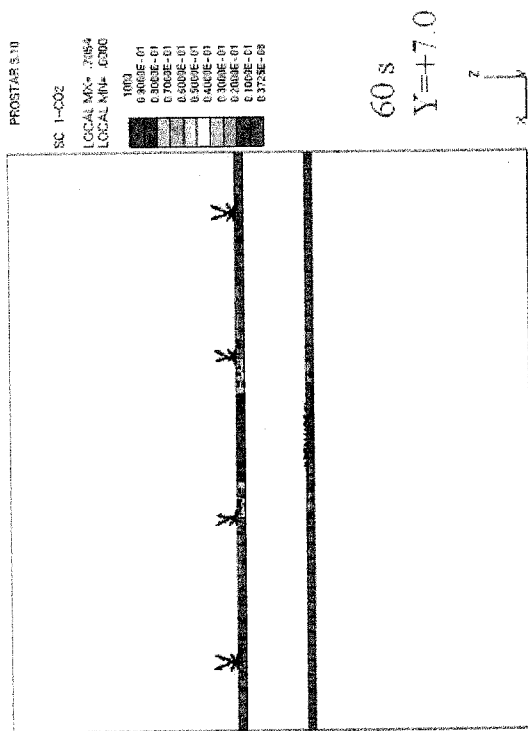
« Kapschling Mass Rapid Transit »
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-130 火場溫度分佈側視圖(案例十一：600 秒)



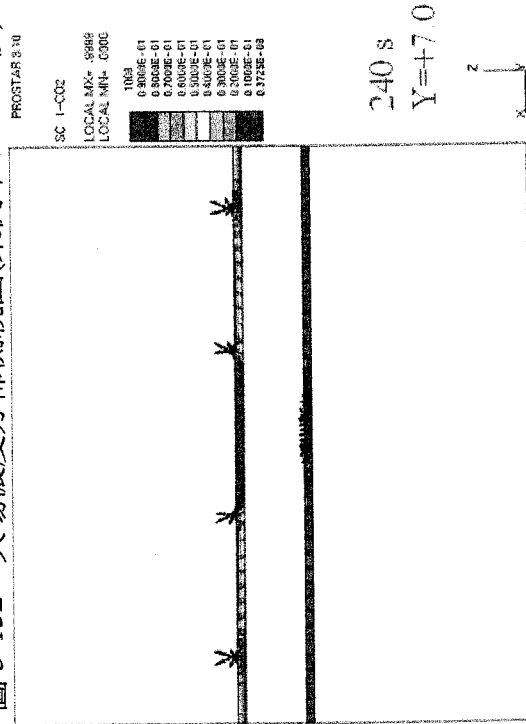
« Kapschling Mass Rapid Transit »
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-131 火場濃度分佈側視圖(案例十一：30 秒)



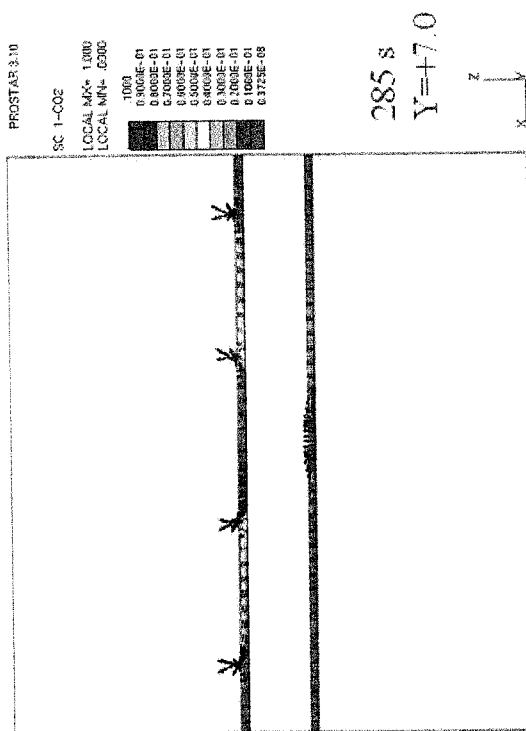
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-132 火場濃度分佈側視圖(案例十一：60 秒)



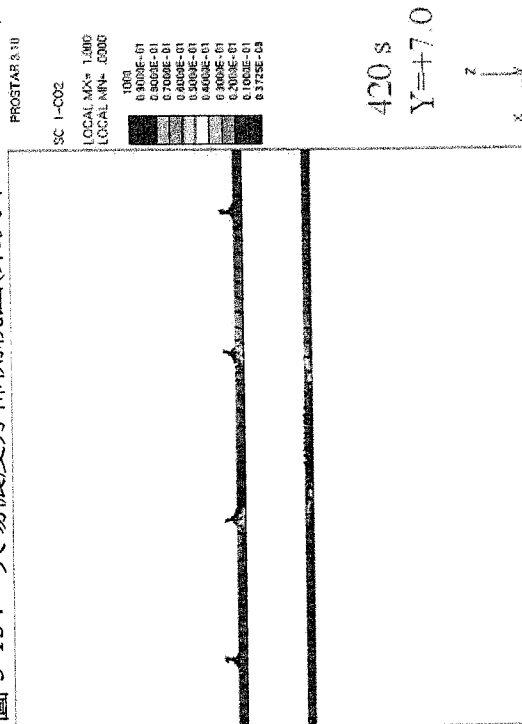
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-133 火場濃度分佈側視圖(案例十一：240 秒)



<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-134 火場濃度分佈側視圖(案例十一：285 秒)



<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-135 火場濃度分佈側視圖(案例十一：420 秒)

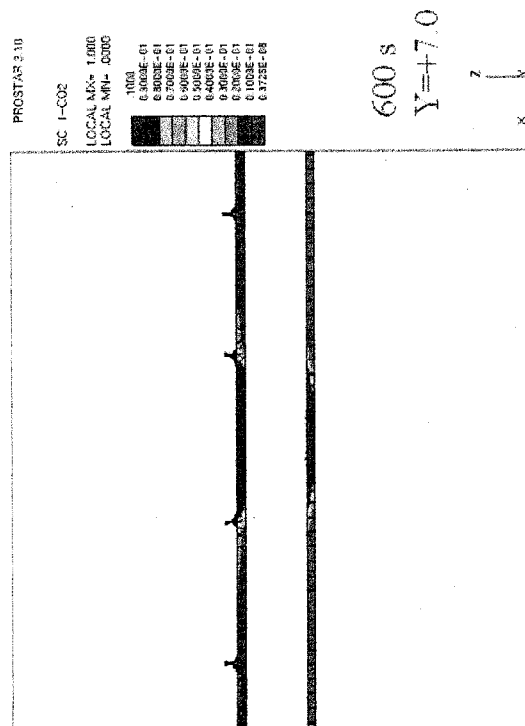


圖 3-136 火場濃度分佈側視圖(案例十一：600 秒)

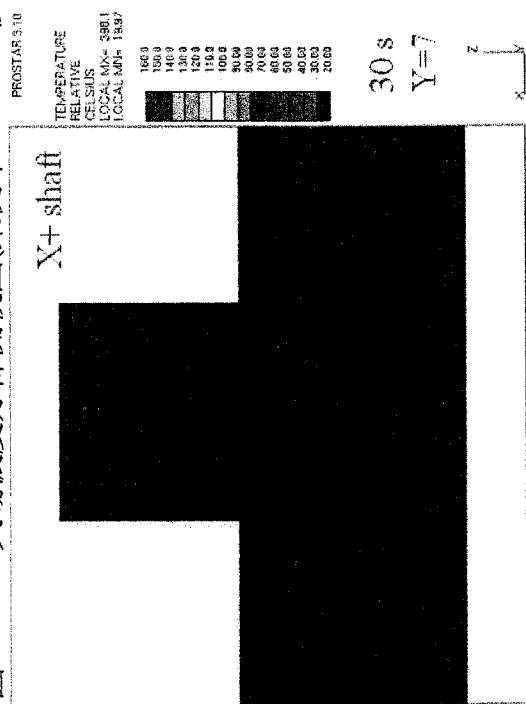


圖 3-137 通風井溫度分佈圖(案例十一：30 秒)

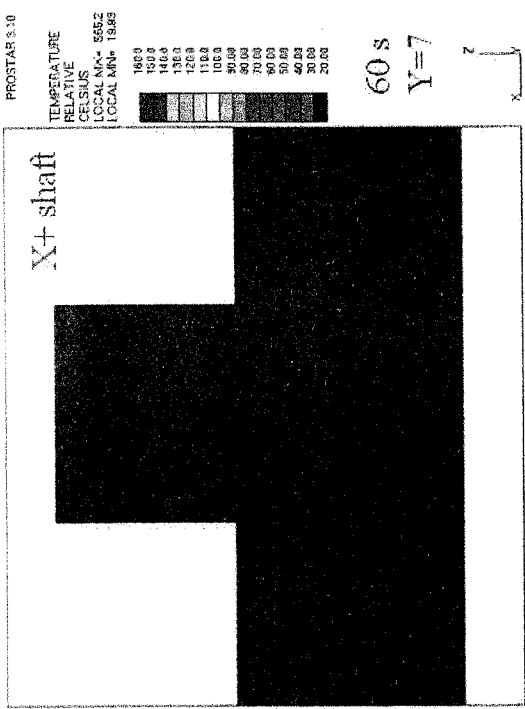


圖 3-138 通風井溫度分佈圖(案例十一：60 秒)

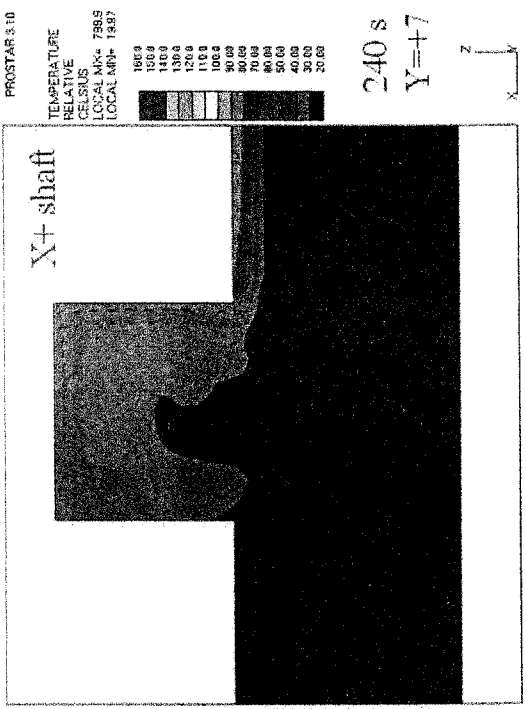


圖 3-139 通風井溫度分佈圖(案例十一：240 秒)

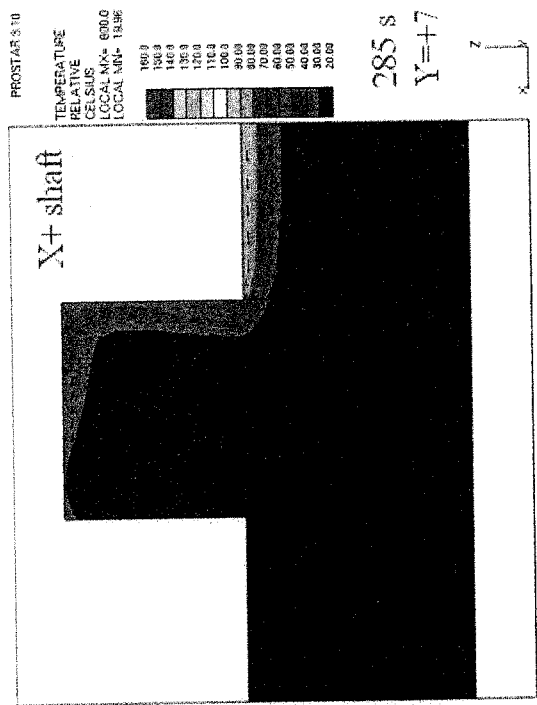


圖 3-140 通風井溫度分佈圖(案例十一：285 秒)

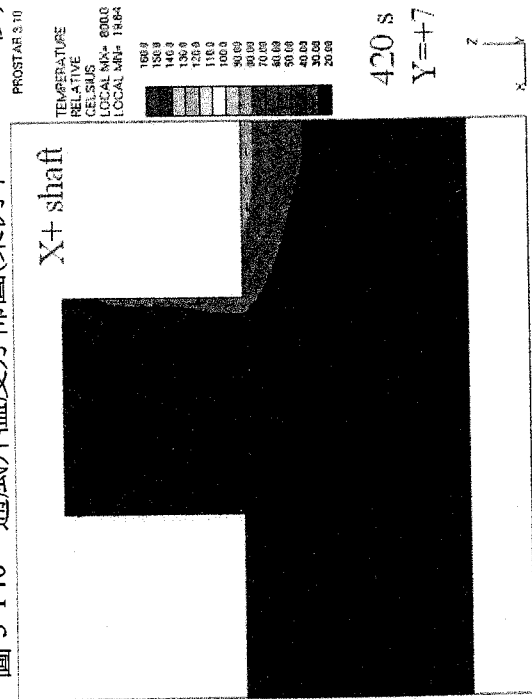


圖 3-141 通風井溫度分佈圖(案例十一：420 秒)

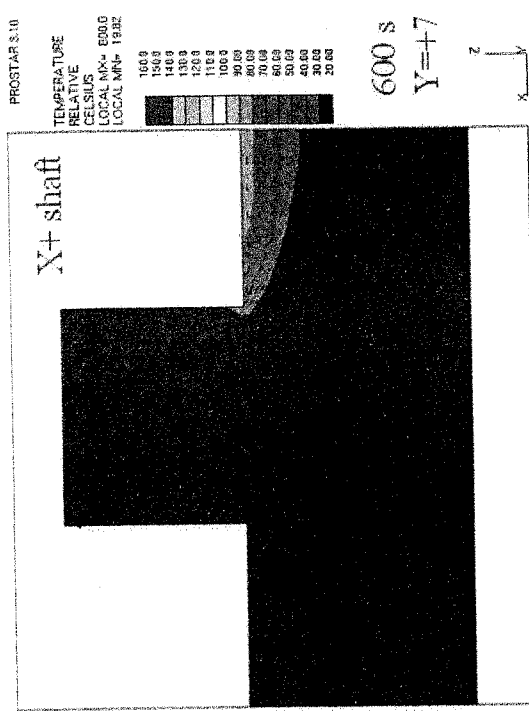


圖 3-142 通風井溫度分佈圖(案例十一：600 秒)

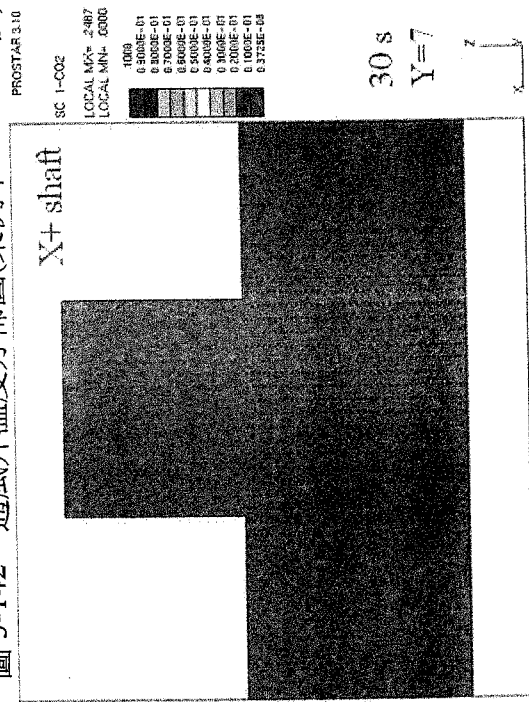
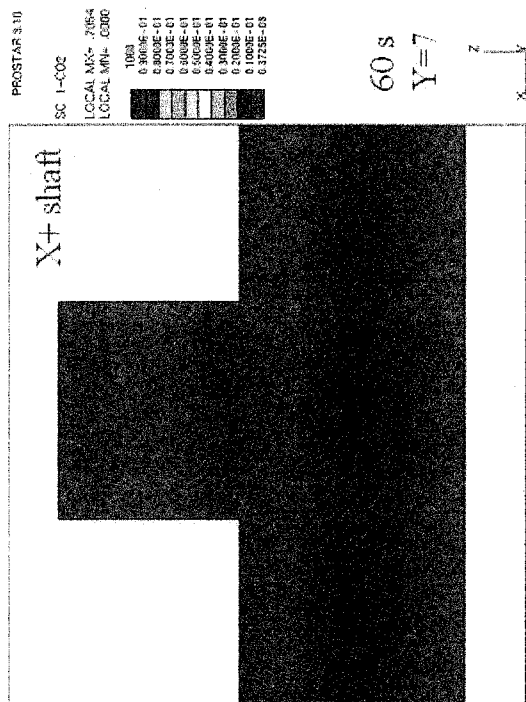
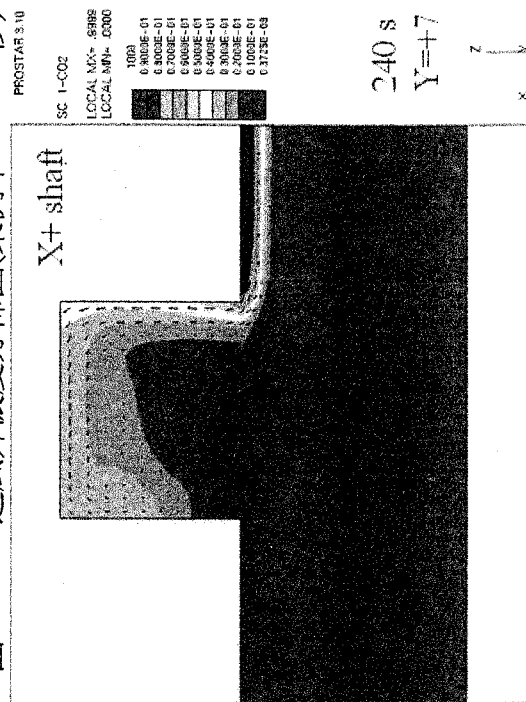


圖 3-143 通風井溫度分佈圖(案例十一：30 秒)



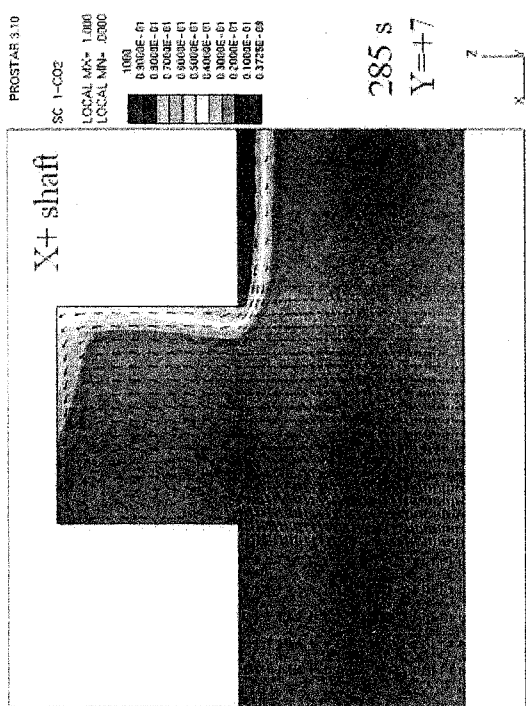
<< Kachung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-144 通風井濃度分佈圖(案例十一：60 秒)



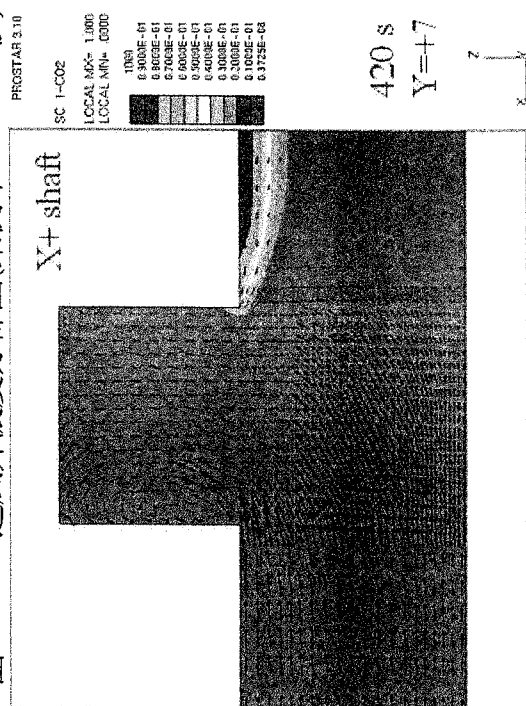
<< Kachung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-145 通風井濃度分佈圖(案例十一：240 秒)



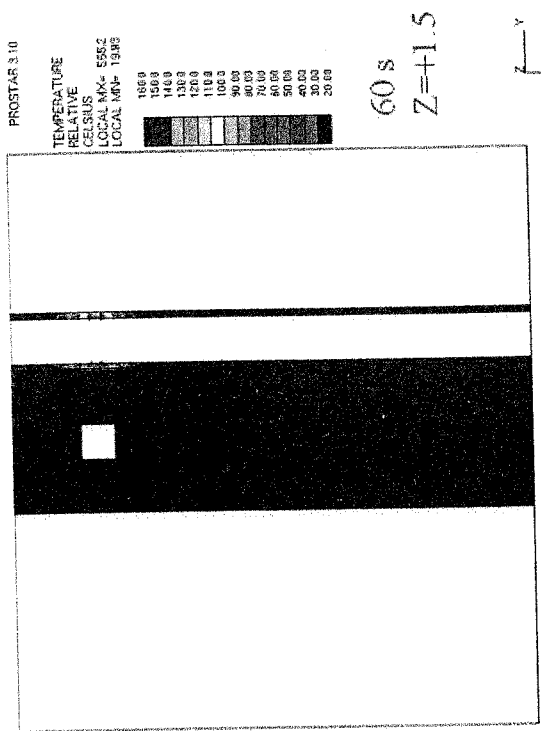
<< Kachung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-146 通風井濃度分佈圖(案例十一：285 秒)



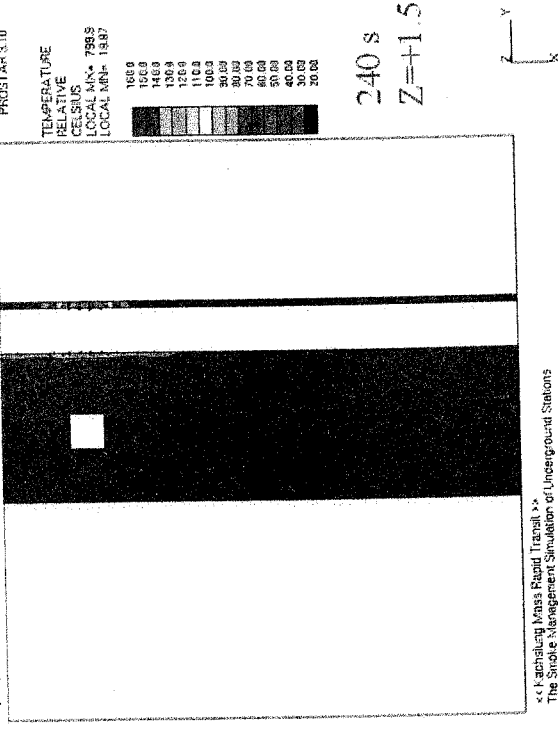
<< Kachung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-147 通風井濃度分佈圖(案例十一：420 秒)



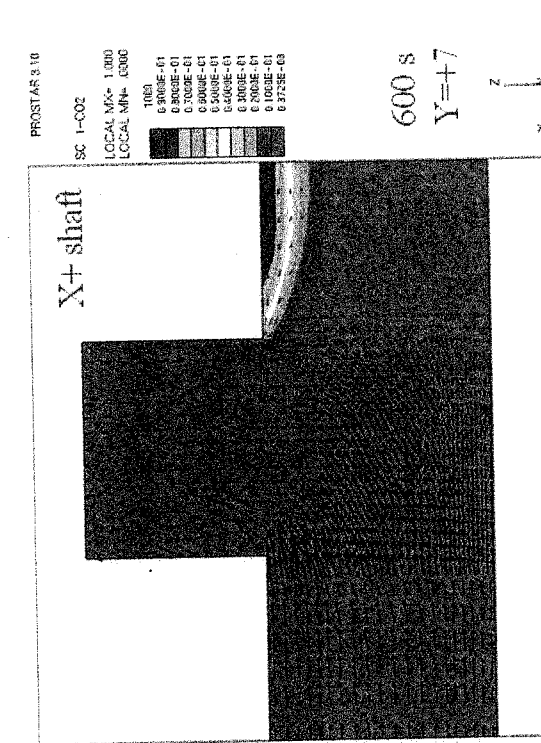
«Kachilung Mass Rapid Transit»
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-150 火場溫度分佈上視圖(案例十一：60 秒)



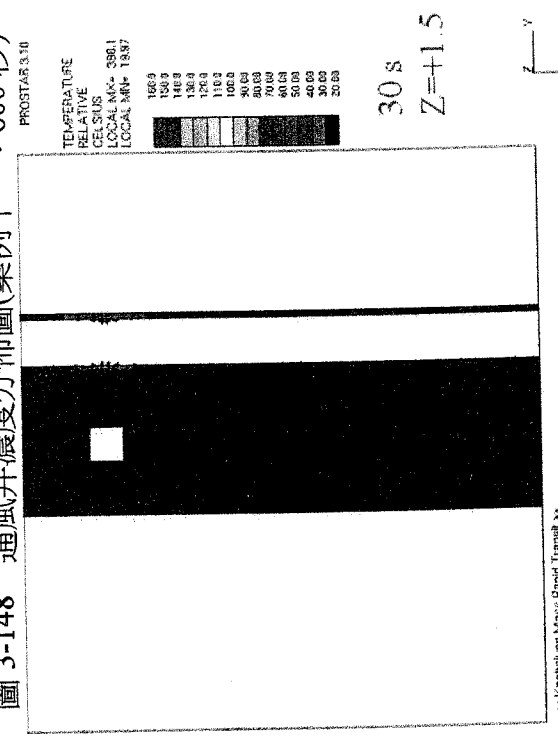
«Kachilung Mass Rapid Transit»
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-151 火場溫度分佈上視圖(案例十一：240 秒)



«Kachilung Mass Rapid Transit»
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-148 通風井濃度分佈圖(案例十一：600 秒)



«Kachilung Mass Rapid Transit»
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-149 火場溫度分佈上視圖(案例十一：30 秒)

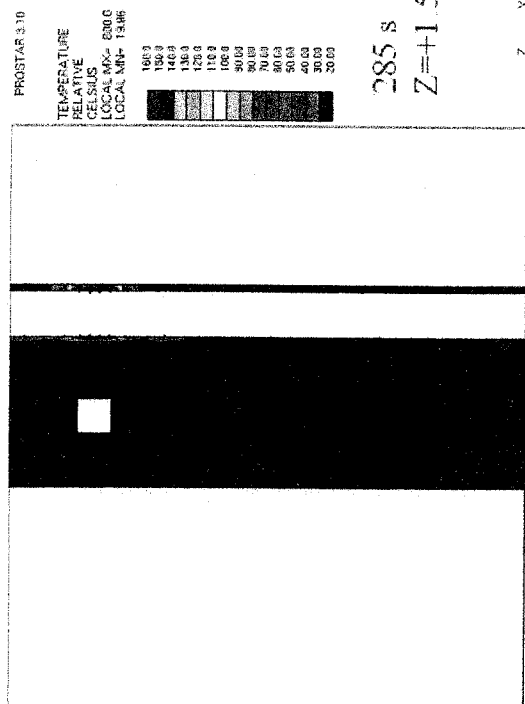


圖 3-152 火場溫度分佈上視圖(案例十一：285 秒)

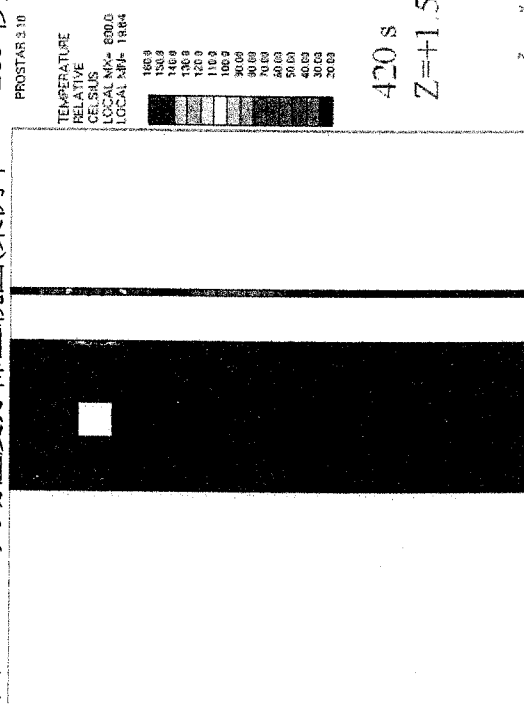


圖 3-153 火場溫度分佈上視圖(案例十一：420 秒)

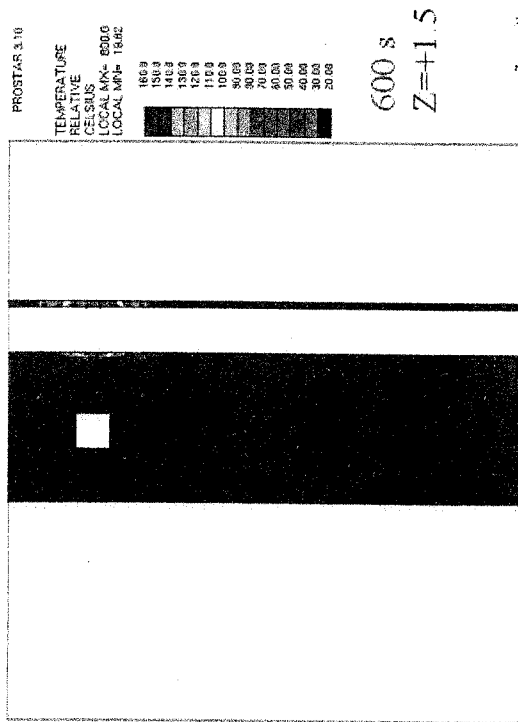


圖 3-154 火場溫度分佈上視圖(案例十一：600 秒)

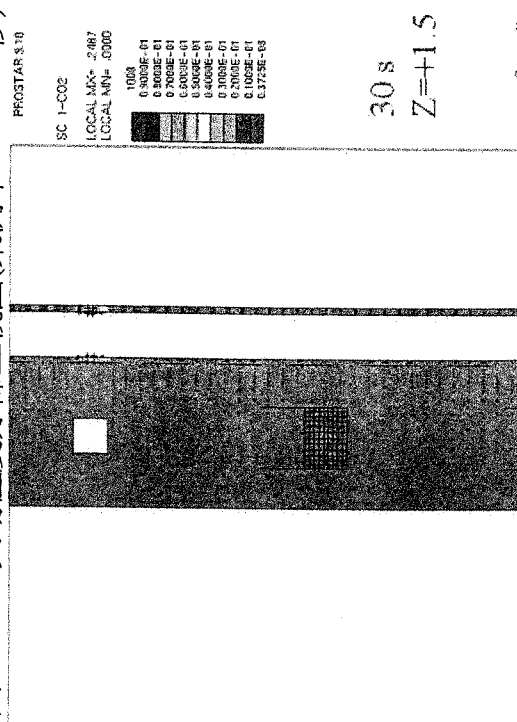
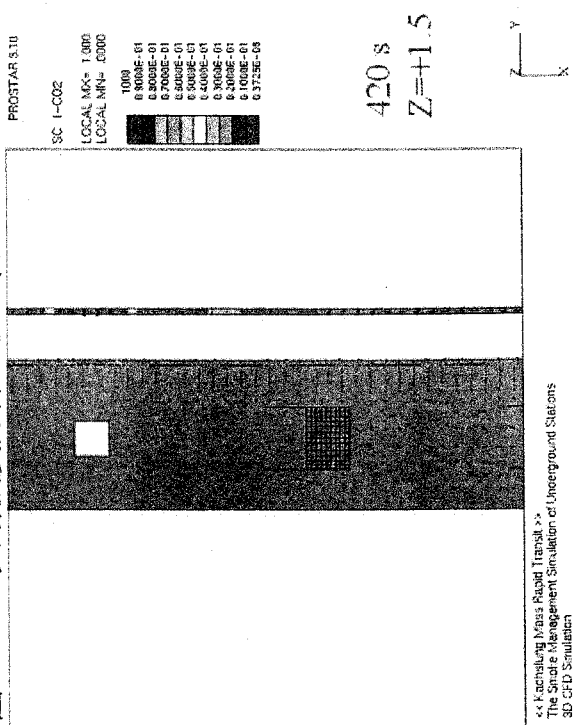
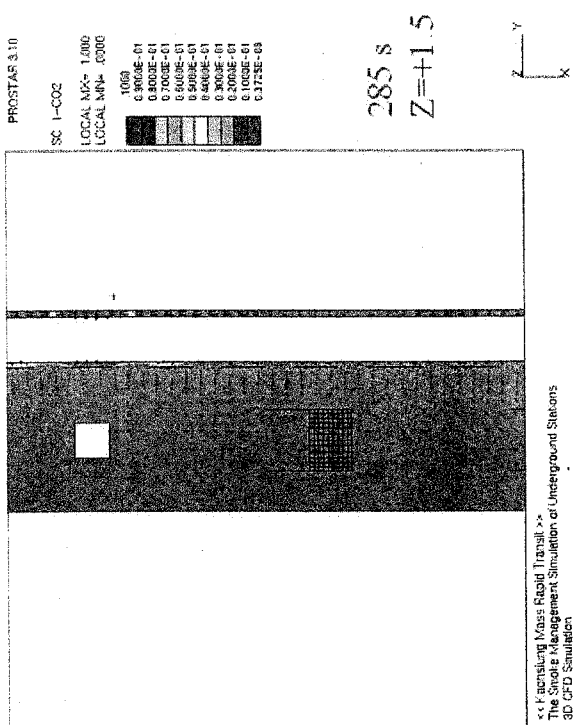
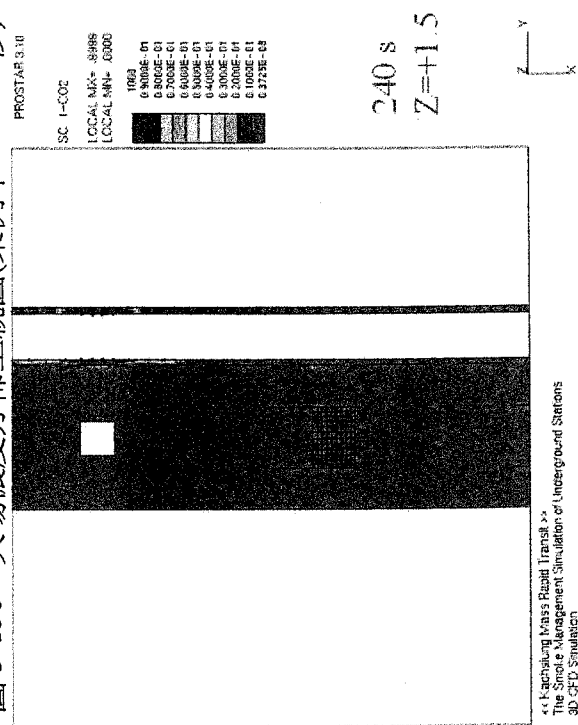
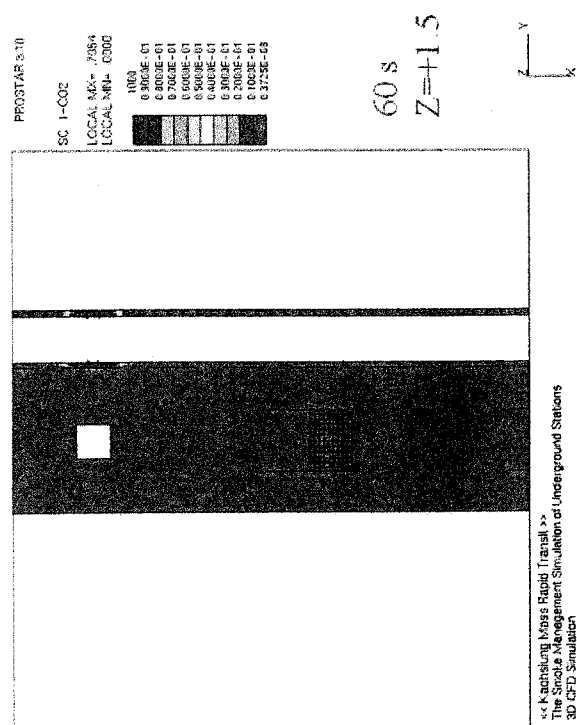


圖 3-155 火場濃度分佈上視圖(案例十一：30 秒)



◎案例十二

模擬情境：

本模擬案例與案例十一之條件均大致相同，為模擬列車於車站月台層軌道區發生火災時啟動排煙系統之排煙狀況，火災發生處為車站中央位置。唯一差異處為當列車發生火災時車站兩端之隧道風機 TVF 系統為以 Push & Pull 形式進行緊急模式運轉，啟動時間為火災發生後 240 秒。

模擬結果：

觀察位置除與案例十一選取之五個位置相同外，考量 TVF 系統運轉之特性，因此亦觀察通風井位置（X + Shaft）對稱軌道區中央橫斷面之對應面（X-Shaft）位置，以觀察與研究相同時間下、不同位置火場變化。分析模擬結果如下：

由於本案例與案例十一之邊界條件設定唯一差異為 240 秒之後 TVF 系統運轉模式，經觀察結果顯示 240 秒（含）前之模擬結果與案例十一相同，因此本案例說明僅說明 240 秒（不含）後之模擬分析結果。

圖 3-161 至圖 3-165、圖 3-176 至圖 3-180 分別為在 285 秒之瞬間下溫度場與濃度場之分佈情形，此時隧道風機已運轉約 45 秒之時間。由圖 3-161、圖 3-176 顯示，濃煙有部分已跨過月台門快進入月台層區。由圖 3-162、圖 3-165 與圖 3-177、圖 3-180 顯示高溫之濃煙已開始被隧道風機吹向車站某一端（本案例中為 X+ 端），不再如案例十一般以車站中央為對稱面。

圖 3-163、圖 3-164 與圖 3-178、圖 3-179 為本案例車站兩端通風井（X+ 端與 X- 端）之溫度場與濃度場之分佈情形。由結果顯示在風機已運轉約 45

秒後，原本藉由自然擴散方式到達送風側通風井之濃煙已幾乎快無蓄積現象，而排風側通風井濃煙則逐漸增多，可將圖 3-163 與圖 3-140 之溫度場、圖 3-178 與圖 3-146 之濃度場作一比較即可得知。

在 420 秒之瞬間，溫度場與濃度場之分佈情形分別如圖 3-166 至圖 3-170、圖 3-181 至圖 3-185 所示，此時隧道風機已運轉約 180 秒之時間。由圖 3-167、圖 3-170 與圖 3-182、圖 3-185 顯示高溫之濃煙分佈已被隧道風機吹離車站中央，而向車站某一端聚集（本案例中為 X+ 端）。

圖 3-168、圖 3-169 與圖 3-183、圖 3-184 為 420 秒時兩端通風井（X+ 端與 X- 端）處溫度場與濃度場之分佈情形。由結果顯示，送風側通風井之濃煙已消失不見，而排風側通風井濃煙則逐漸增多。對於排風側通風井氣流組織之觀察，可發現因 X- 端送風機產生作用，致使抽取軌道區濃煙量增多、隧道風量被抽取量降低。圖 3-168 與圖 3-141 之溫度場、圖 3-183 與圖 3-147 之濃度場顯示此一現象。

在 600 秒時，此刻距離隧道風機採 Push and Pull 方式運轉已經過 360 秒之時間，溫度場與濃度場之分佈情形分別如圖 3-171 至圖 3-175、圖 3-186 至圖 3-190 所表示。由圖 3-171、圖 3-186 顯示距起火點處第一扇月台門位置已無高溫之濃煙，另由圖 3-172、圖 3-175 與圖 3-187、圖 3-190 顯示出現最高溫度之月台門為距離起火點處第四扇月台門位置。

600 秒時車站兩端通風井位置（X+ 端與 X- 端）之溫度場與濃度場如圖 3-173、圖 3-174 與圖 3-188、圖 3-189。分析模擬結果得知，送風側通風井無任何濃煙累積現象，排風側通風井濃煙因送風側風機 Push 效應逐漸增多，抽取隧道風量降低，而氣流組織不同於圖 3-142 之 Pull Only 形式。圖 3-173 與圖 3-142 之溫度場、圖 3-188 與圖 3-146 之濃度場亦印證此一現象。

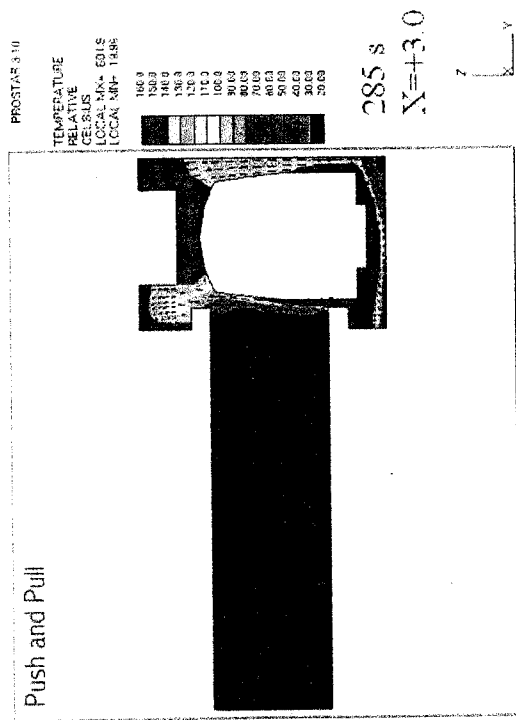


圖 3-161 中央位置火場溫度分佈圖(案例十二：285 秒)

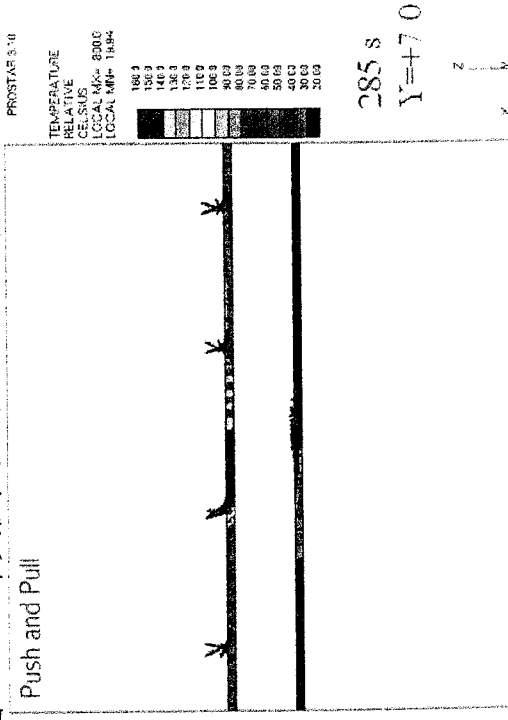


圖 3-162 火場溫度分佈側視圖(案例十二：285 秒)

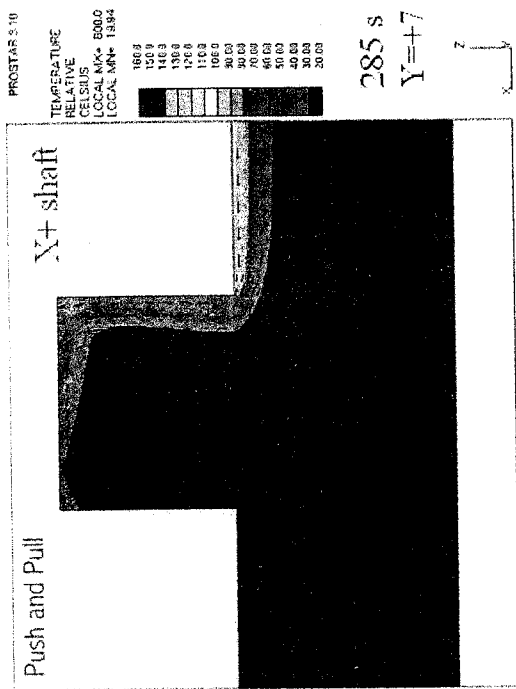


圖 3-163 上行端通風井溫度分佈圖(案例十二：285 秒)

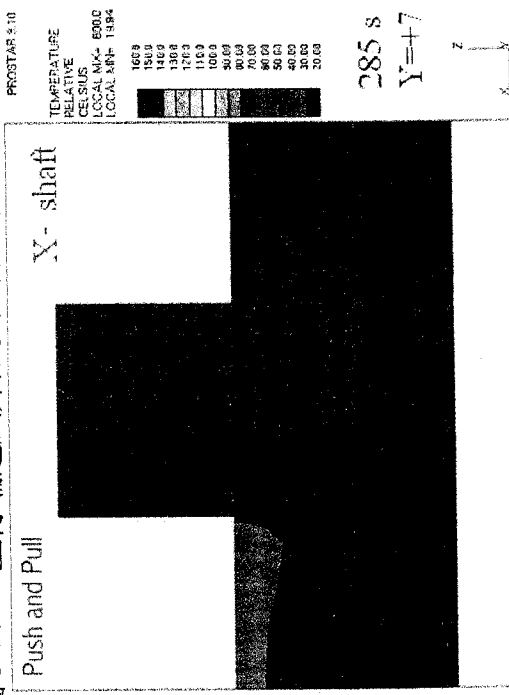


圖 3-164 下行端通風井溫度分佈圖(案例十二：285 秒)

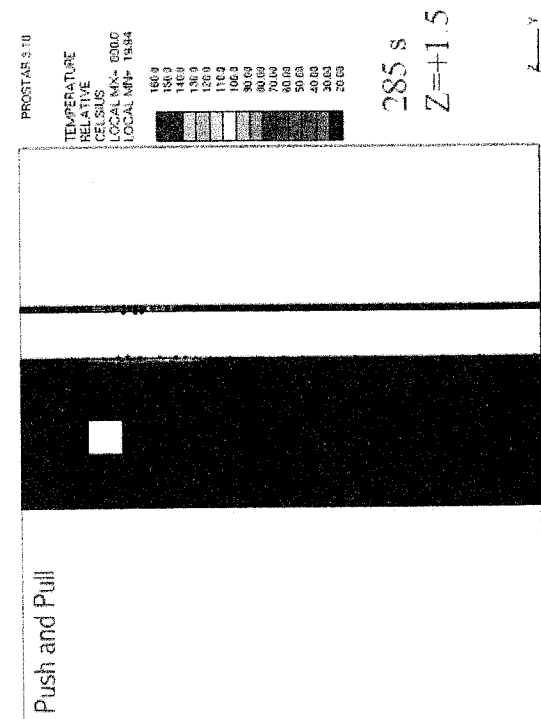


圖 3-165 火場溫度分佈上視圖(案例十二：285 秒)

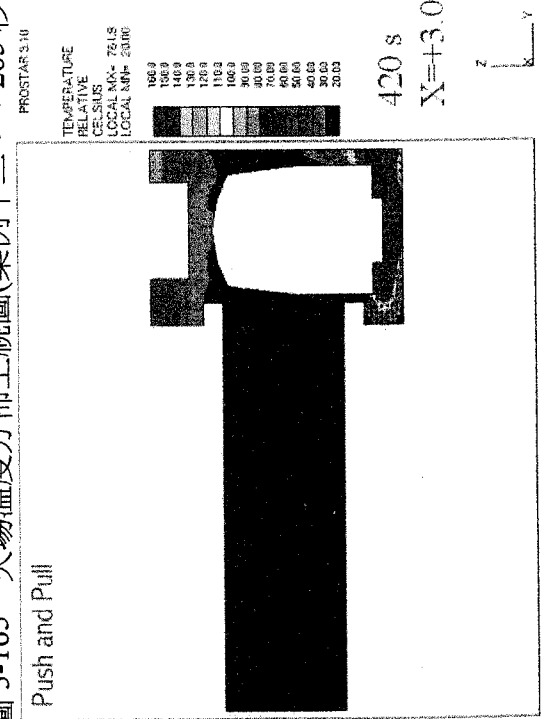


圖 3-166 中央位置火場溫度分佈圖(案例十二：420 秒)

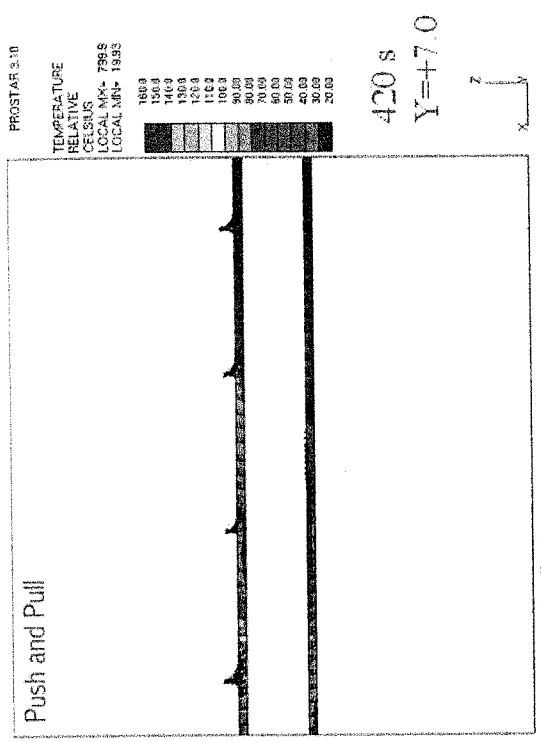


圖 3-167 火場溫度分佈側視圖(案例十二：420 秒)

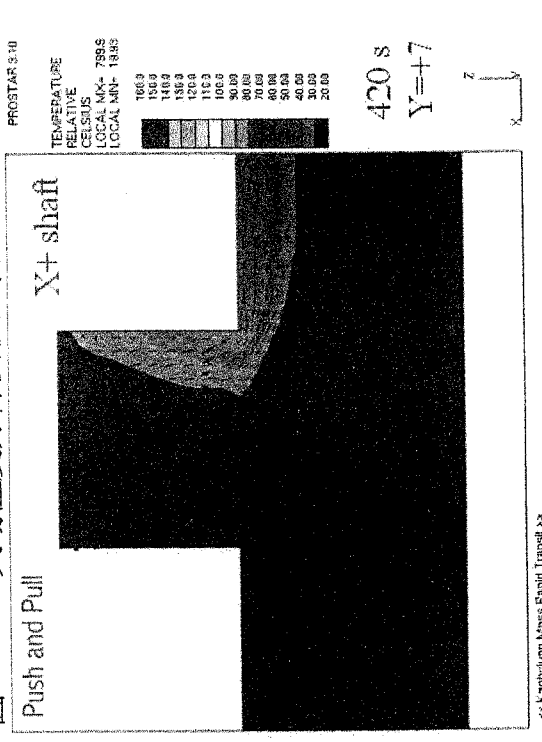


圖 3-168 上行端通風井溫度分佈圖(案例十二：420 秒)

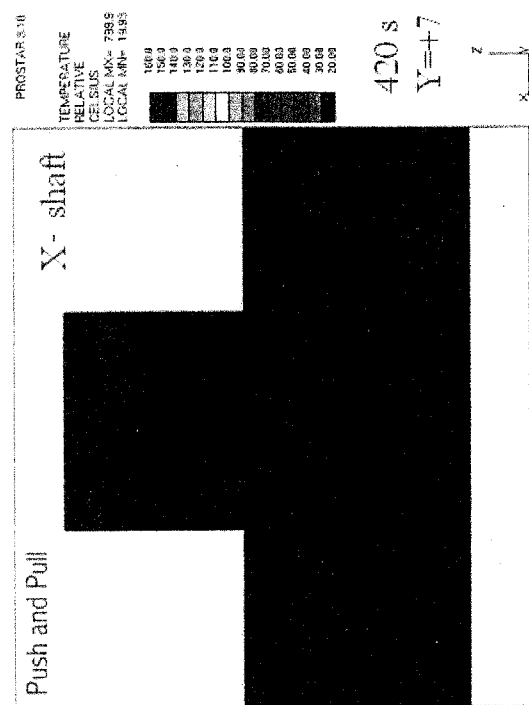


圖 3-169 下行端通風井溫度分佈圖(案例十二：420 秒)

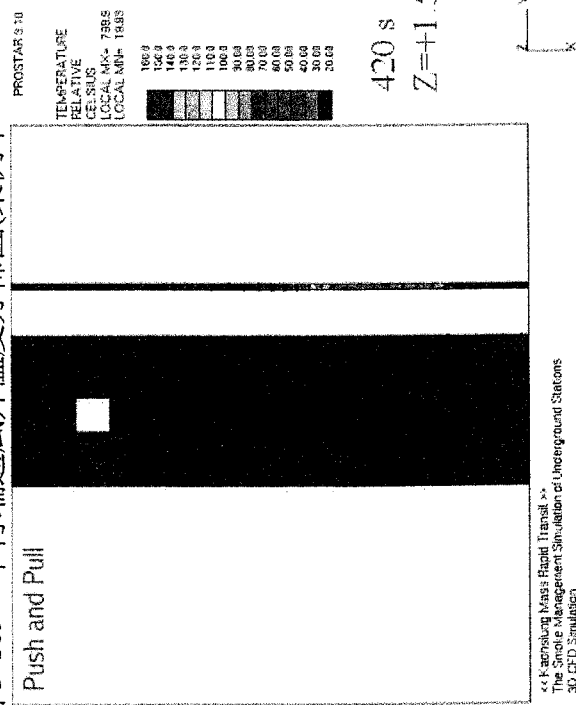


圖 3-170 火場溫度分佈上視圖(案例十二：420 秒)

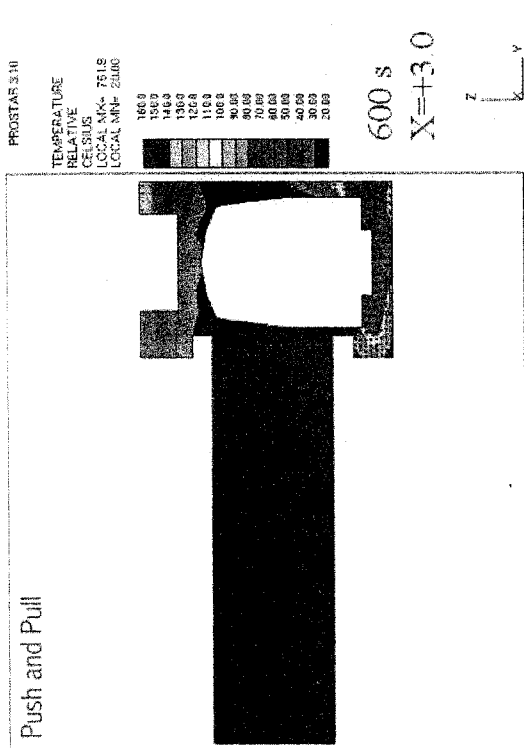


圖 3-171 中央位置火場溫度分佈圖(案例十二：600 秒)

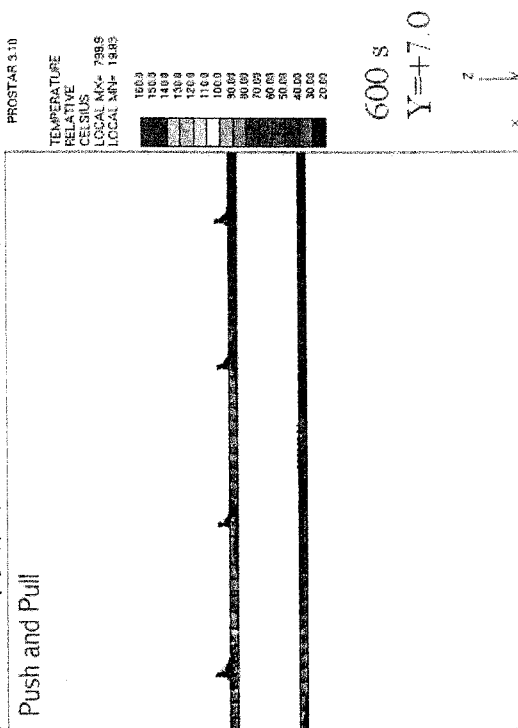


圖 3-172 火場溫度分佈側視圖(案例十二：600 秒)

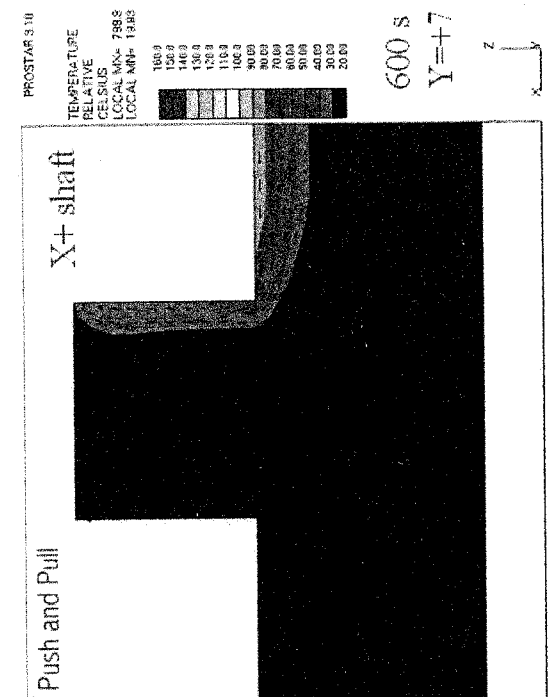


圖 3-173 上行端通風井溫度分佈圖(案例十二：600 秒)

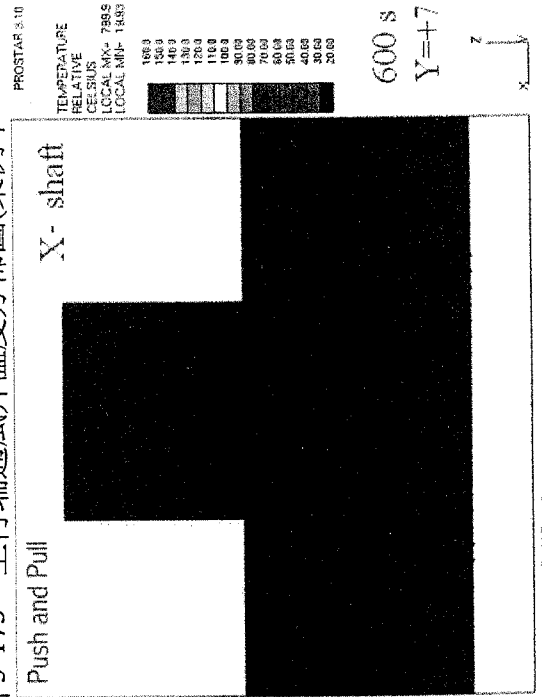


圖 3-174 下行端通風井溫度分佈圖(案例十二：600 秒)

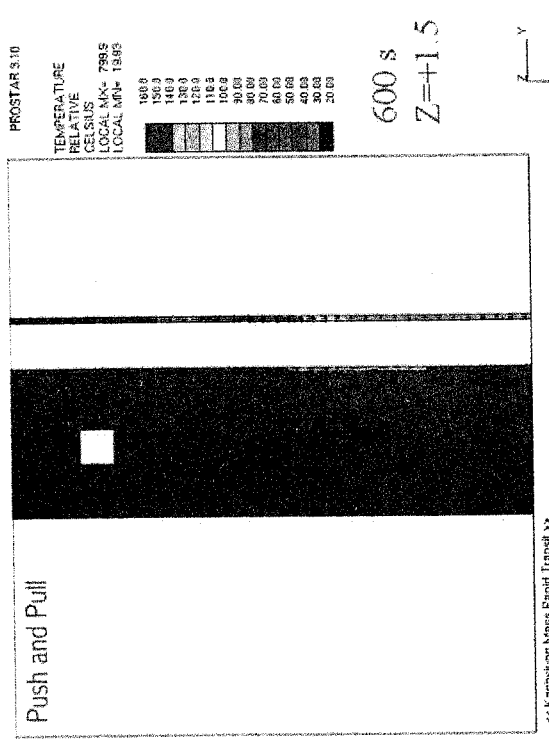


圖 3-175 火場溫度分佈上視圖(案例十二：600 秒)

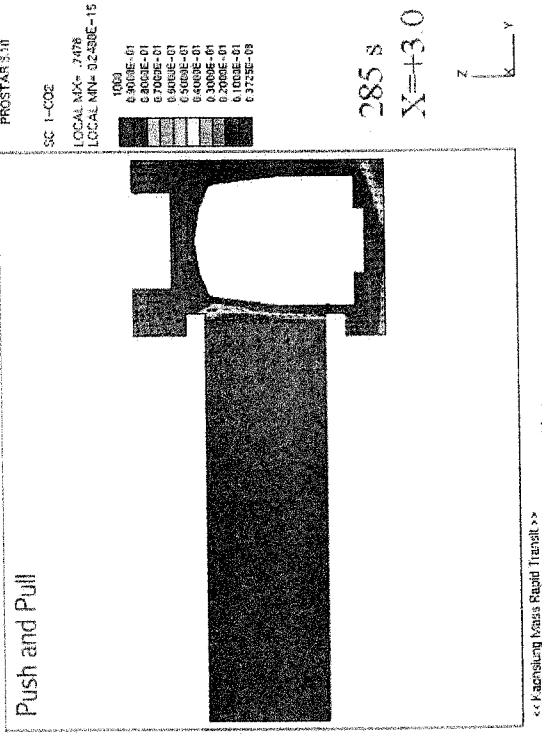
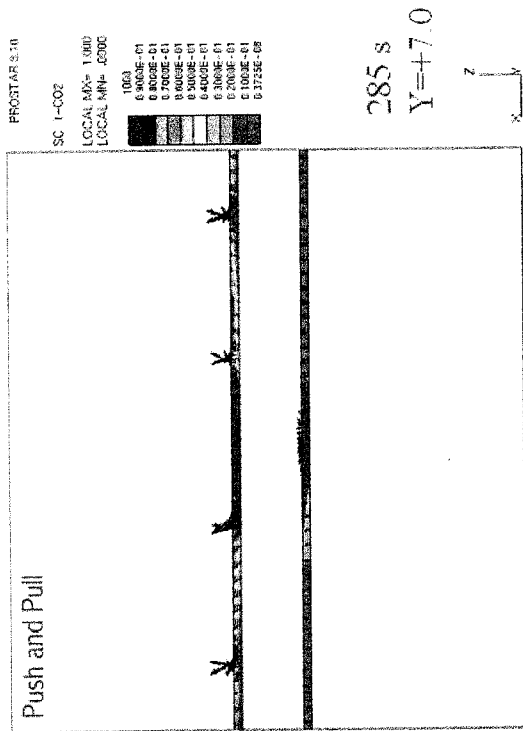
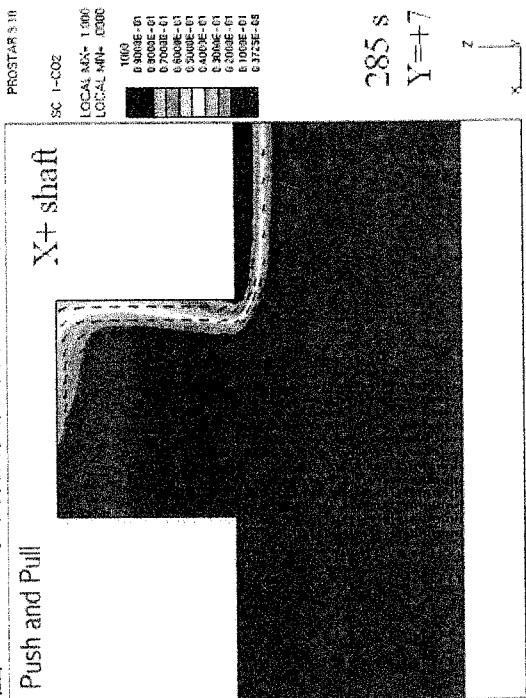


圖 3-176 中央位置火場濃度分佈圖(案例十二：285 秒)



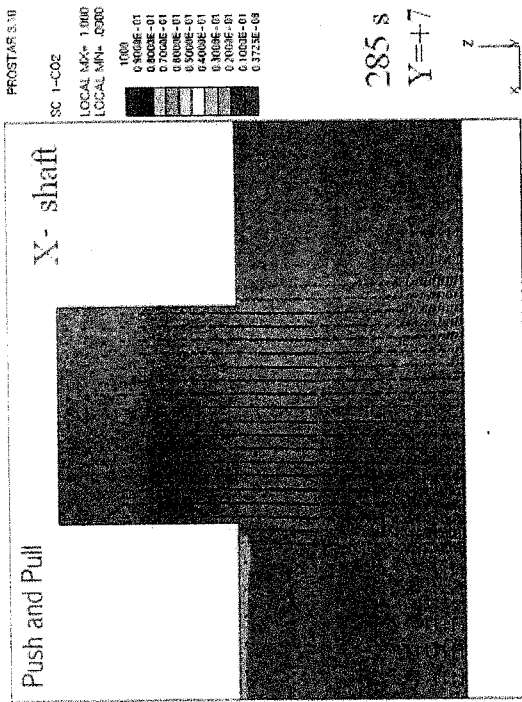
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-177 火場濃度分佈側視圖(案例十二：285 秒)



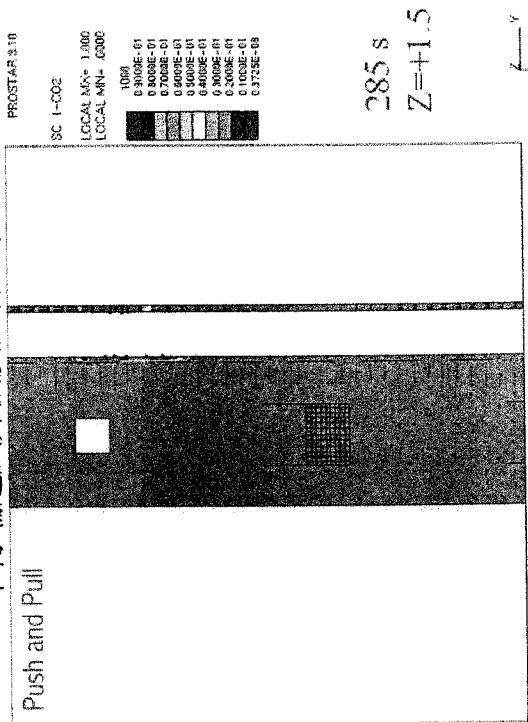
<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-178 上行端通風井濃度分佈圖(案例十二：285 秒)



<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-179 下行端通風井濃度分佈圖(案例十二：285 秒)



<< Kachilung Mass Rapid Transit >>
The Smoke Management Simulation of Underground Stations
3D CFD Simulation

圖 3-180 火場濃度分佈上視圖(案例十二：285 秒)

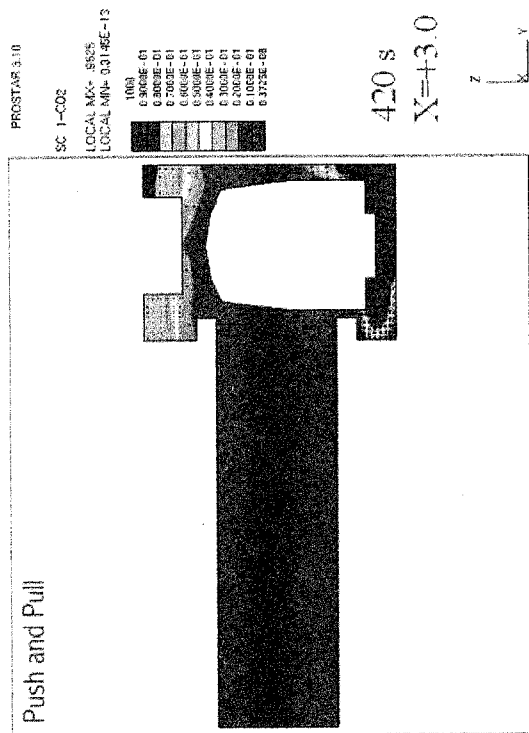


圖 3-181 中央位置火場溫度分佈圖(案例十二：420 秒)

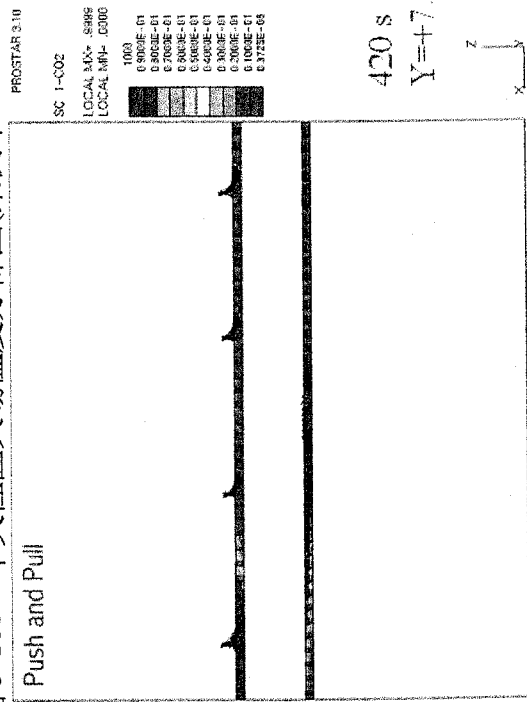


圖 3-182 火場濃度分佈側視圖(案例十二：420 秒)

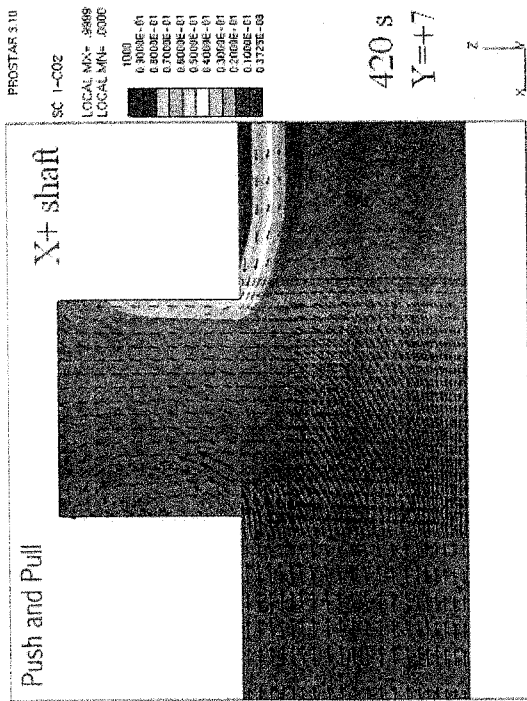


圖 3-183 上行端通風井濃度分佈圖(案例十二：420 秒)

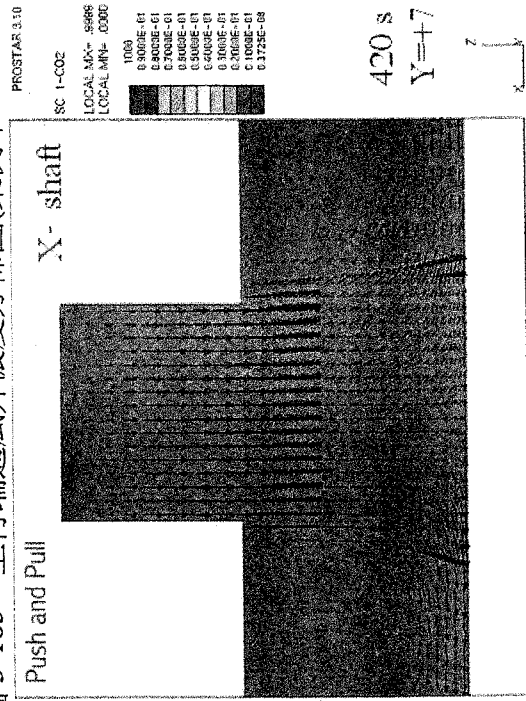
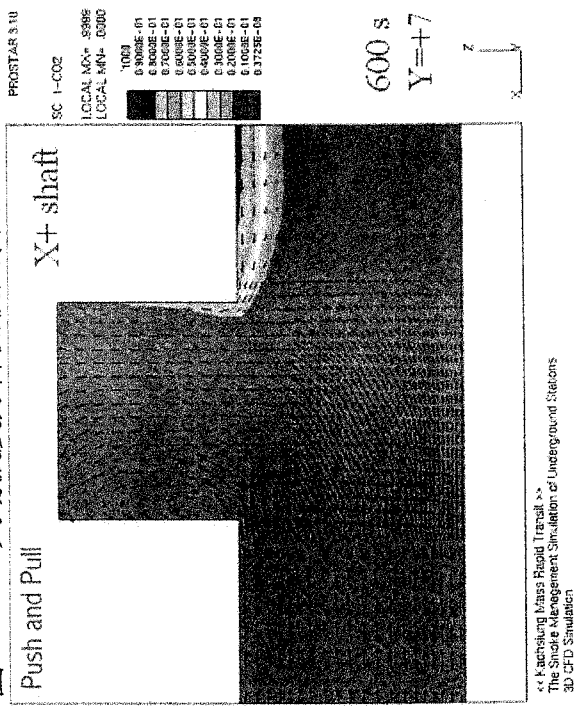
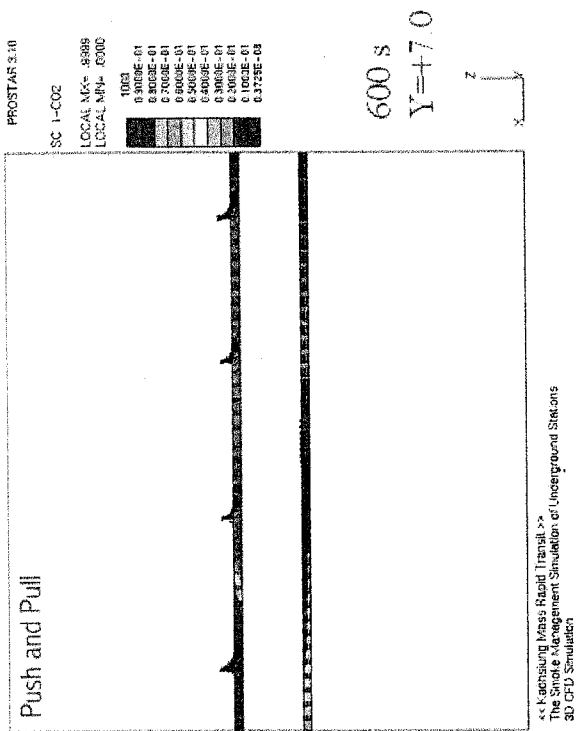
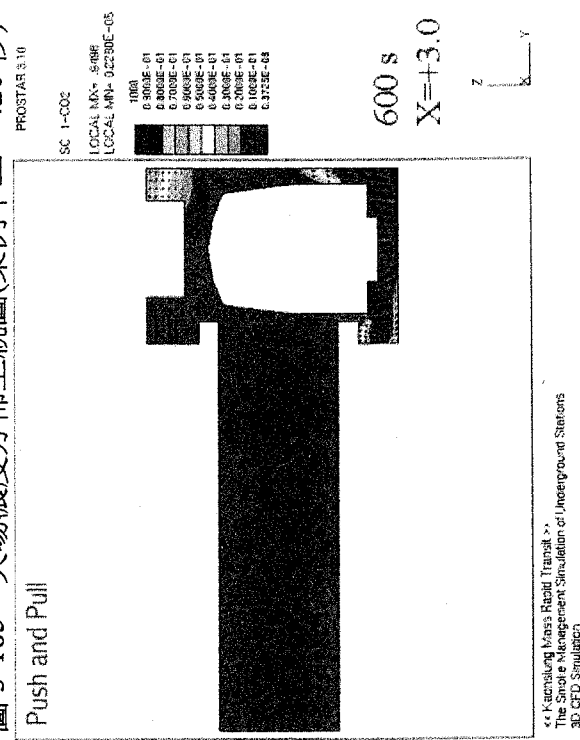
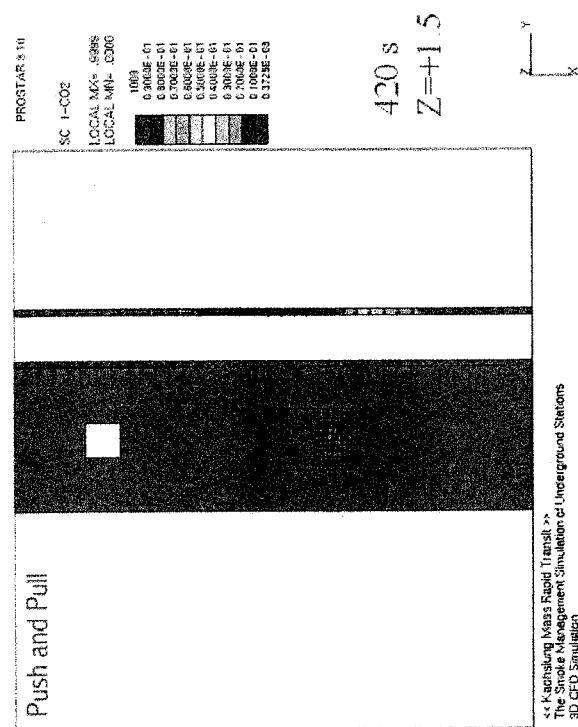


圖 3-184 下行端通風井濃度分佈圖(案例十二：420 秒)



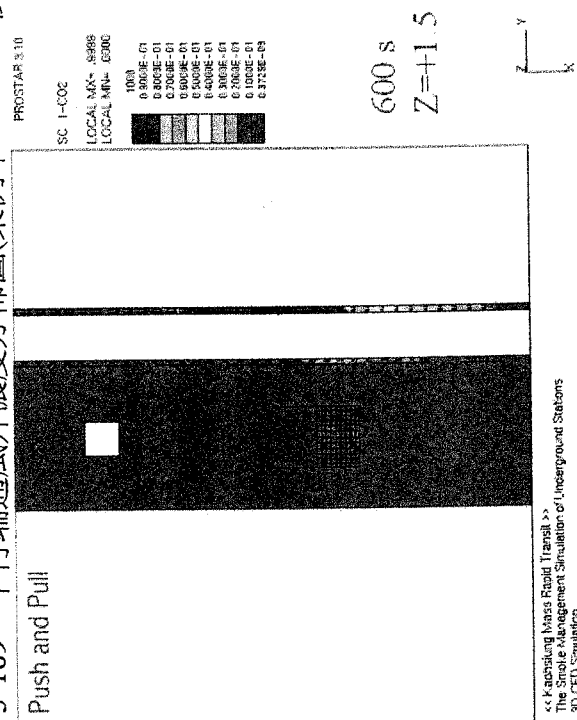
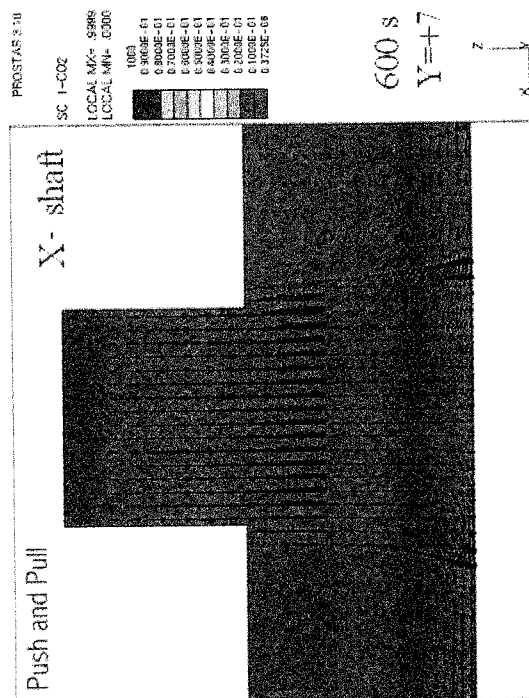


圖 3-189 下行端通風井濃度分佈圖(案例十二：600 秒)

圖 3-190 火場濃度分佈上視圖(案例十二: 600 秒)

◎案例十三

模擬情境：

本研究另模擬起火點位於列車第一節車廂處，隧道風機以兩種不同運轉模式（Pull Only Mode, Push and Pull Mode）運轉下，觀察溫度場及濃度場分布情形。

模擬結果：

圖 3-191 為模型中火災相對於車站軌道區位置圖形。不同風機運轉模式模擬有關火場發展過程與案例十一起火點位於列車中央處相同。

圖 3-192 至圖 3-196 與圖 3-220 至圖 3-226 為觀察在列車中央車廂處溫度場及濃度場斷面分布圖。由結果顯示，在風機啟動前(240 秒)，僅 OTE 系統運轉，高溫濃煙累積於車廂上方。風機啟動後，濃煙逐漸被抽離，於 420 秒時，分布情況已趨於穩定，與 600 秒時狀況相似。由圖 3-197 至圖 3-203 與圖 3-227 至圖 3-233 觀察火場附近處溫度與濃度分布情形，圖 3-197 顯示月台下方 UPE 初期運轉情形。在隧道通風風機啟動前（240 秒），高溫濃煙已蔓延至月台門處，風機啟動後，溫度逐漸下降，至圖 3-202（420 秒）時氣流趨於穩定。

圖 3-204 至圖 3-210 與圖 3-242 至圖 3-248 顯示縱向溫度與濃度分布情形。在風機啟動前（240 秒），溫度呈現穩定上升現象，高溫濃煙並逐漸擴散至隧道區。當風機啟動後，高溫濃煙則被吸引至隧道端末之通風豎井中。由圖 3-211 至圖 3-217 與圖 3-240 至圖 3-241、及圖 3-218 與圖 3-219 與圖 3-234 至圖 3-239 可觀察兩通風豎井處高溫濃煙累積情形。因起火點較靠近 X- 側之通風豎井，顯示在風機啟動前濃煙自然累積並至呈捲曲現象。當風機啟動

後，因列車廂體阻塞比大，風機抽取氣流大部分來自隧道區，故濃煙氣流排出時呈現聚集於部分一側之現象。

另一 X+ 側通風豎井，因離起火點車廂較遠，故濃煙聚集現象較不明顯，除在風機啟動初期（285 秒）時有部分濃煙被抽除外，至 420 秒時通風井內即已無明顯之高溫濃煙。

隧道風機另一運轉模式(Push and Pull)模擬結果顯示，當起火點位於較靠近通風井處，可獲得不同之運轉結果。因通風設備於 240 秒前運轉項目及數量均與 Pull Only 運轉模式相同，故僅紀錄 240 秒之後運轉。

觀察圖 3-249 至圖 3-251 與圖 3-262 至圖 3-263，顯示 240 秒隧道風機運轉後，軌道區中央處溫度場及濃度場斷面分布狀況。發現在此運轉模式下，當隧道風機啟動後，高溫濃煙逐漸被排除，至 420 秒時已無濃煙蓄積現象。圖 3-252 至圖 3-254 與圖 3-264 至圖 3-266，顯示火場附近處狀況。不同於 Pull Only 運轉模式在 420 秒後已呈現穩定狀況，本運轉模式在 600 秒時，因 X+ 側風機將濃煙推送，因而於隧道末端處有濃煙再累積現象，此亦可由圖 3-259 至圖 3-261 與圖 3-271 至圖 3-273 有關縱向溫度與濃度分布圖得知。

對於隧道兩側通風井高溫濃煙累積情況，由圖 3-255 至圖 3-258 及圖 3-267 至圖 3-270 發現較靠近起火點之 X- 通風豎井濃煙蓄積情形較為濃密。

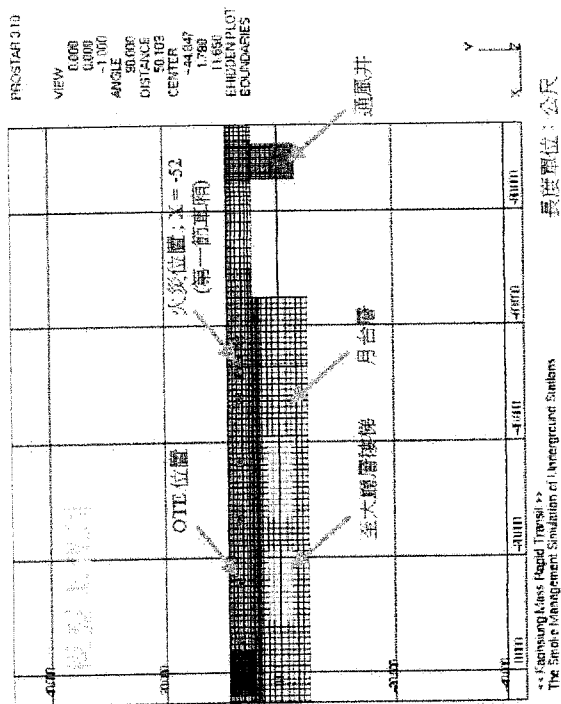


圖 3-191 軌道區火災位置圖(第一節車廂處)

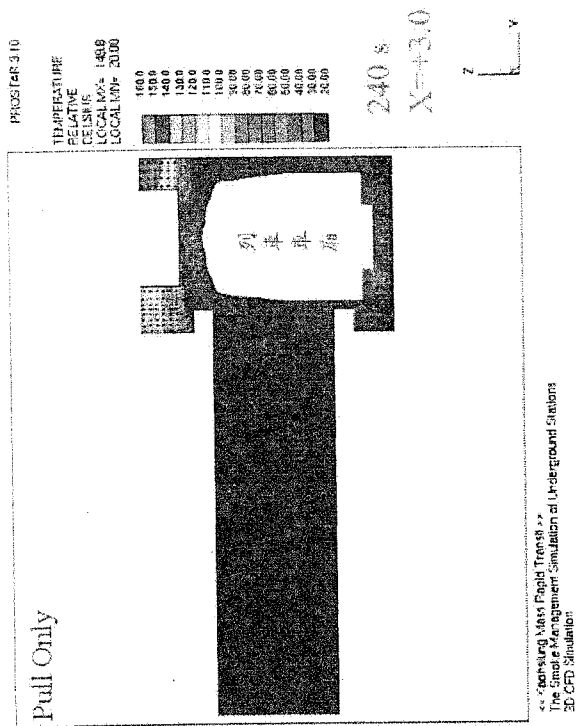


圖 3-193 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 240 秒)

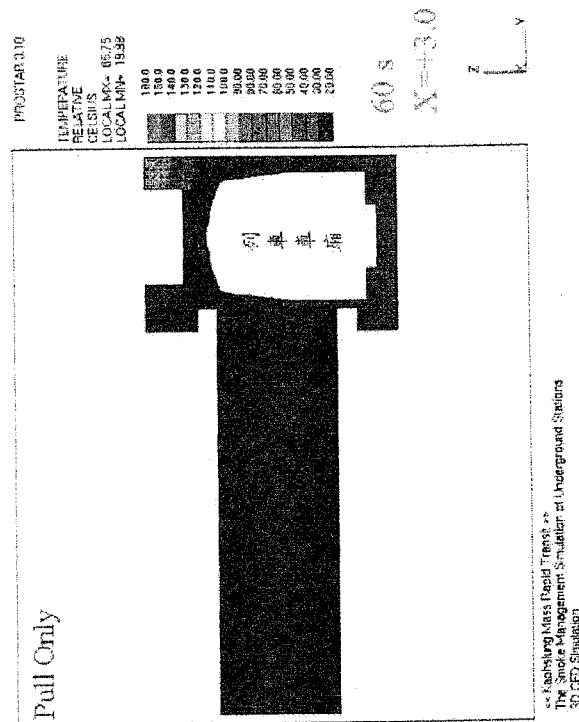


圖 3-192 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 60 秒)

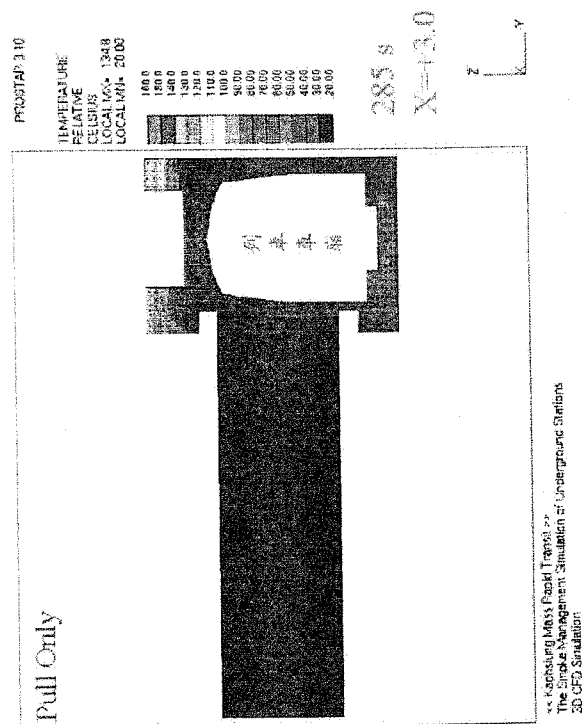


圖 3-194 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 285 秒)

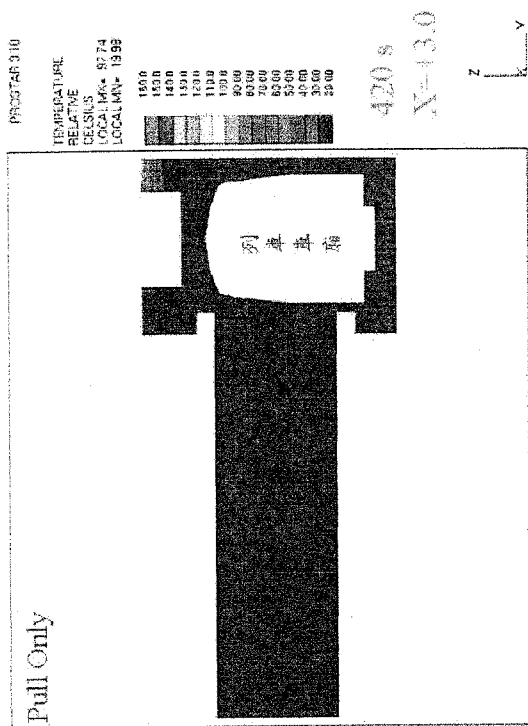


圖 3-195 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 420 秒)

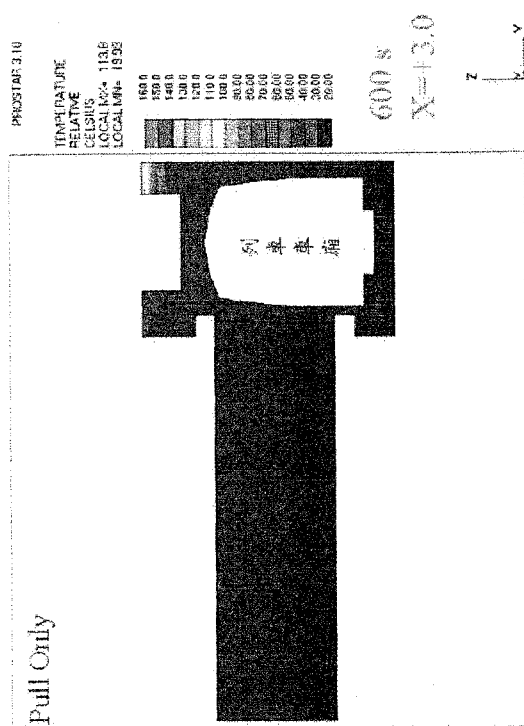


圖 3-196 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 600 秒)

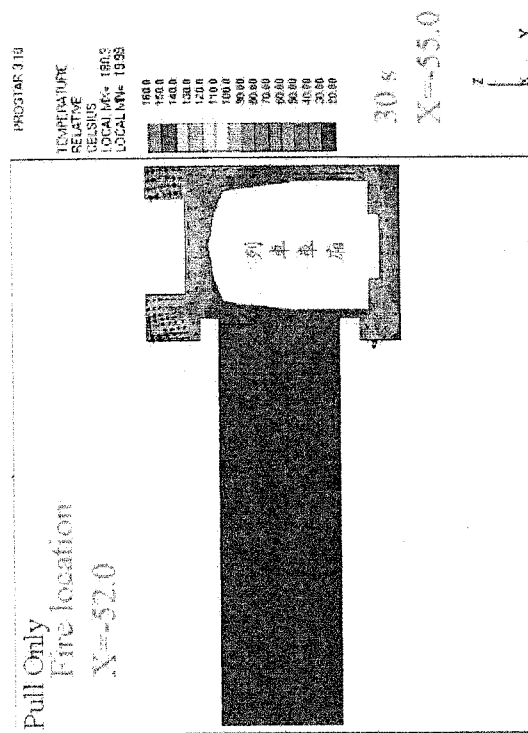


圖 3-197 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 30 秒)

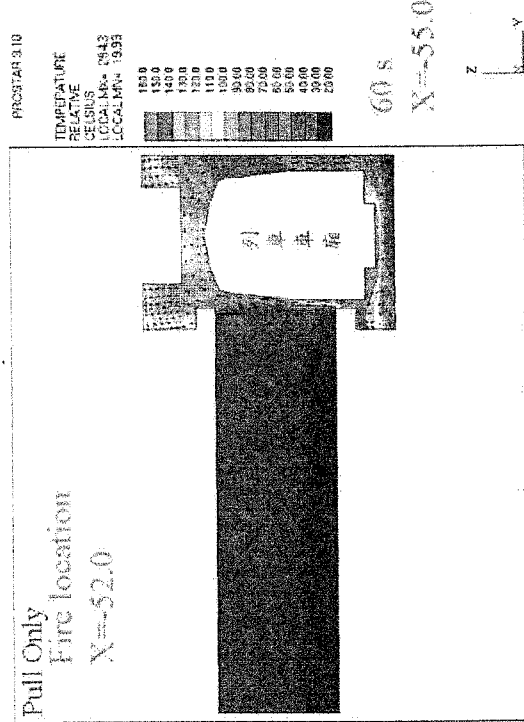


圖 3-198 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 60 秒)

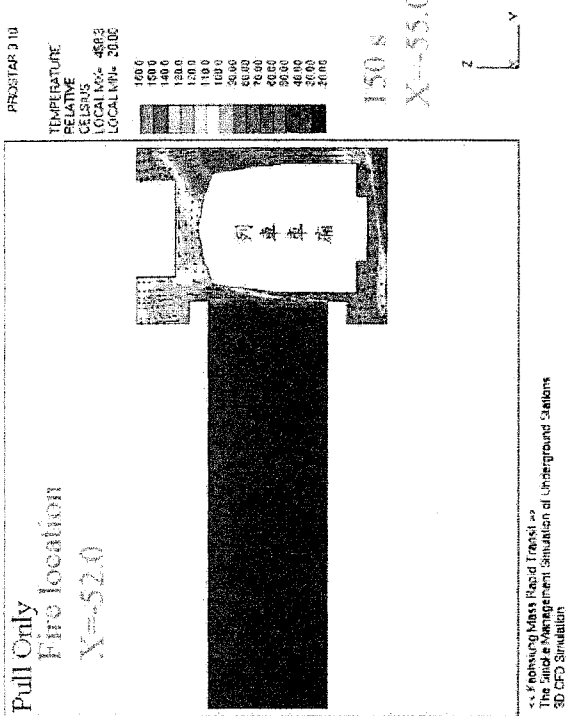


圖 3-199 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 150 秒)

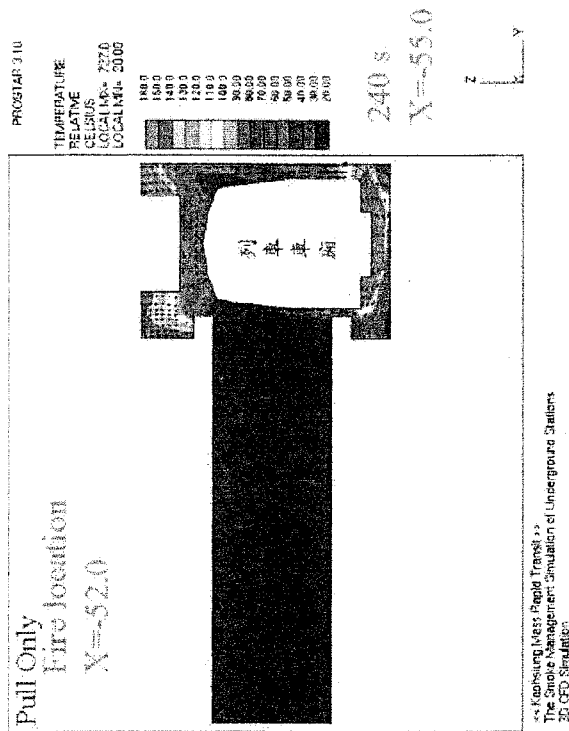


圖 3-200 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 240 秒)

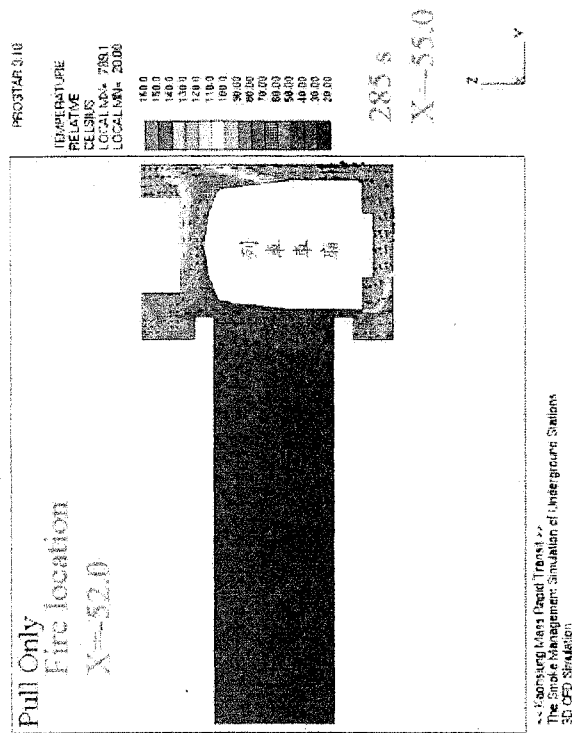


圖 3-201 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 285 秒)

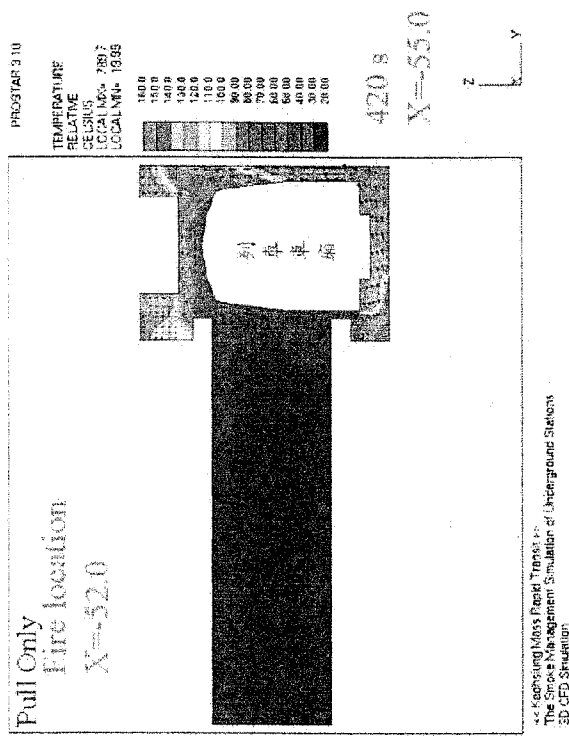


圖 3-202 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 420 秒)

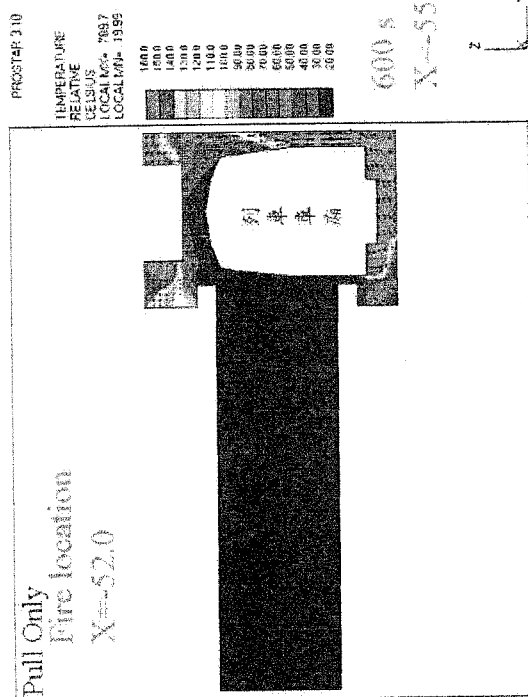


圖 3-203 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 600 秒)

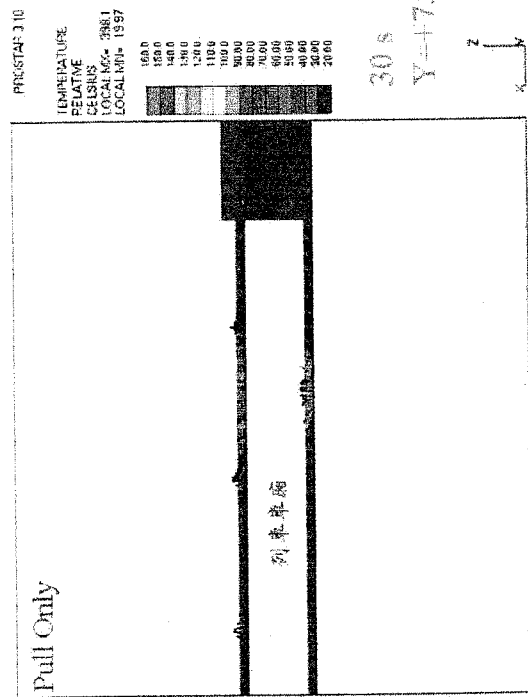


圖 3-204 溫度分布斷面圖(30 秒)

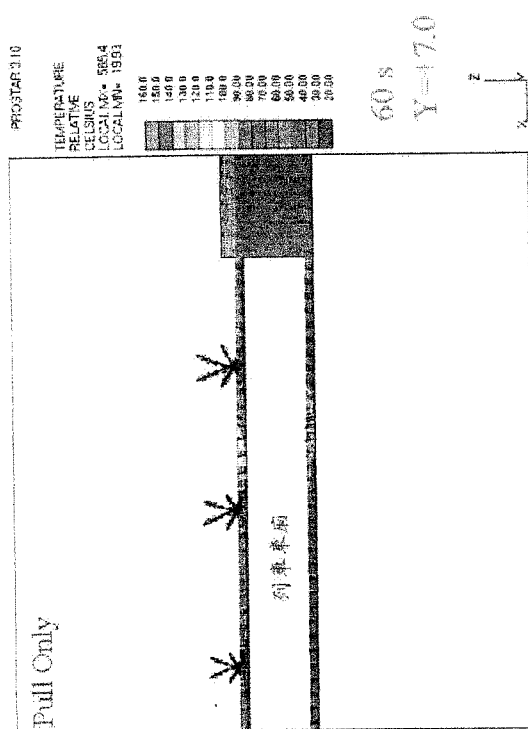


圖 3-205 溫度分布縱面圖(60 秒)

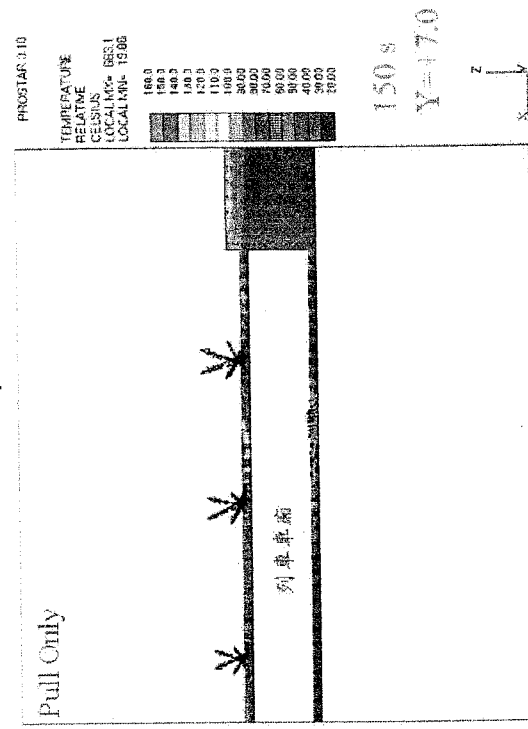


圖 3-206 溫度分布縱面圖(150 秒)

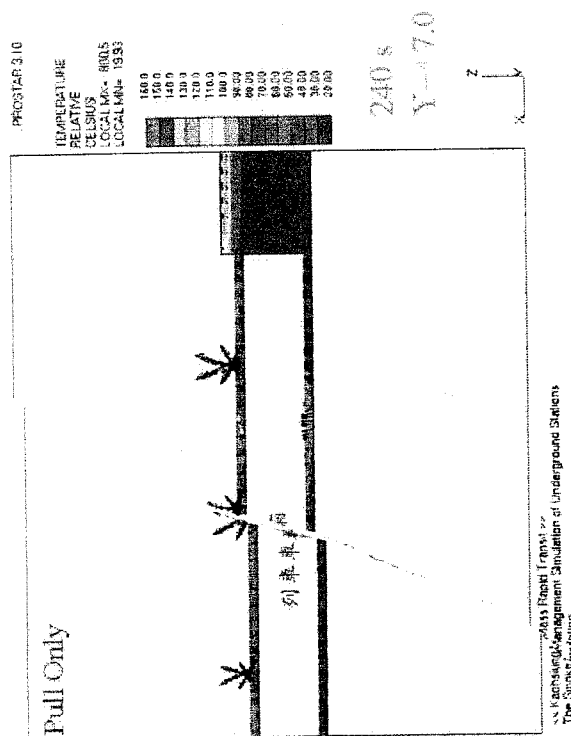


圖 3-207 溫度分布縱面圖(240 秒)

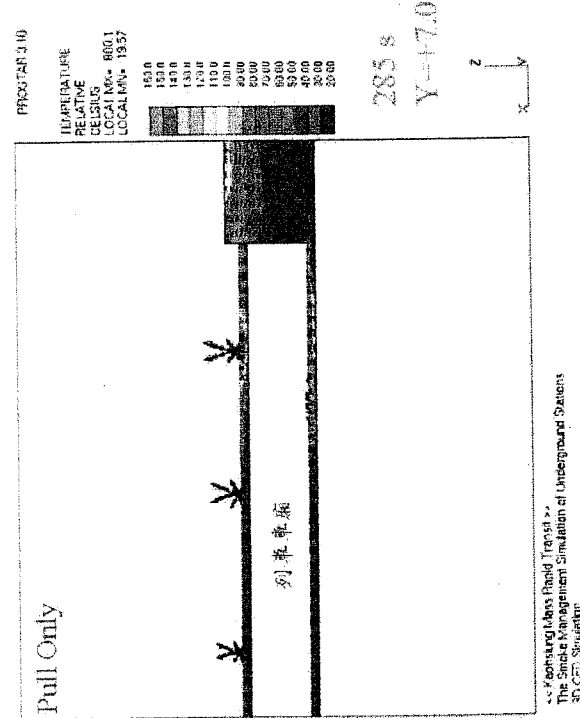


圖 3-208 溫度分布縱面圖(285 秒)

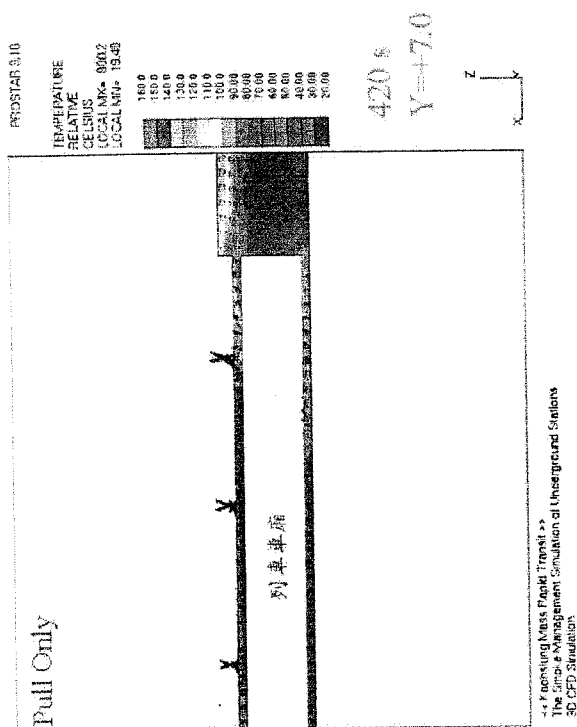


圖 3-209 溫度分布縱面圖(420 秒)

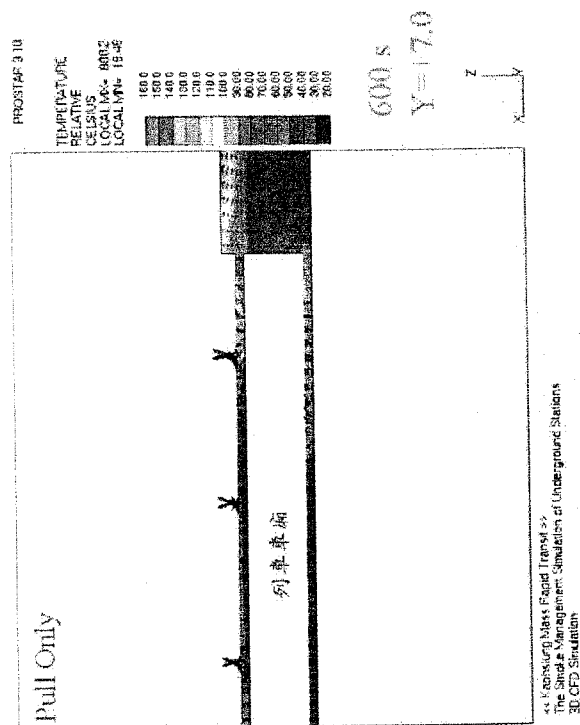


圖 3-210 溫度分布縱面圖(600 秒)

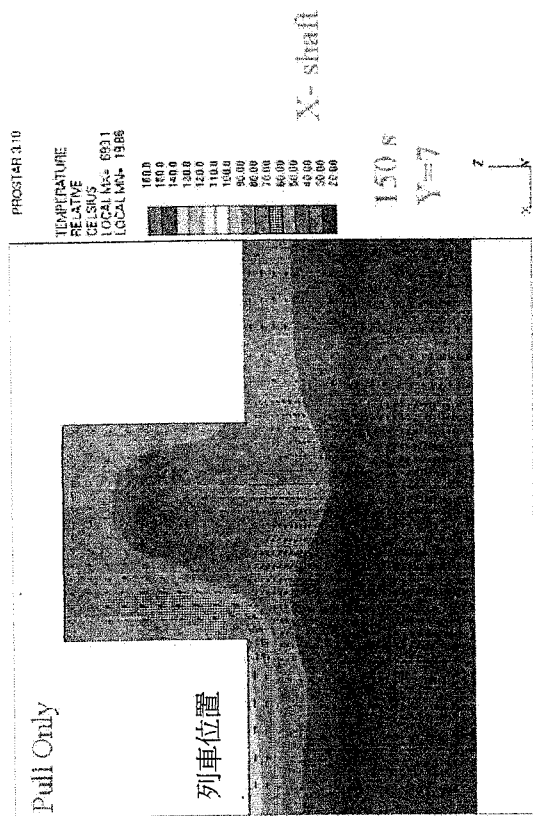


圖 3-213 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 150 秒)

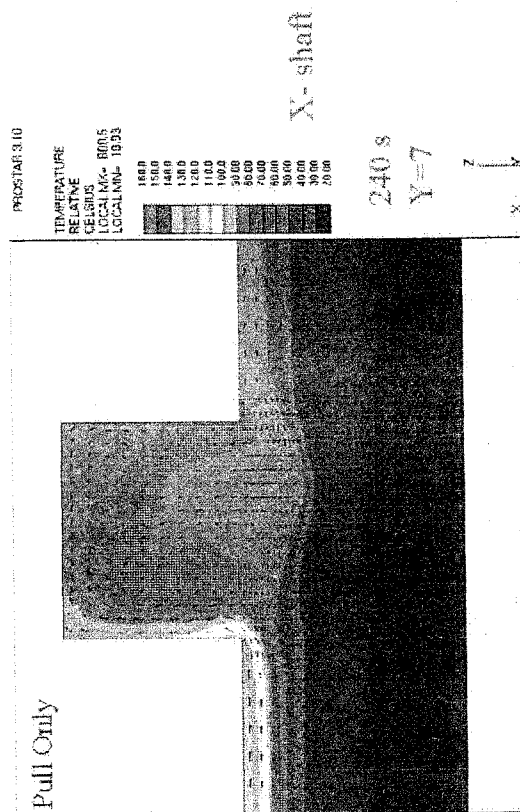


圖 3-214 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 240 秒)

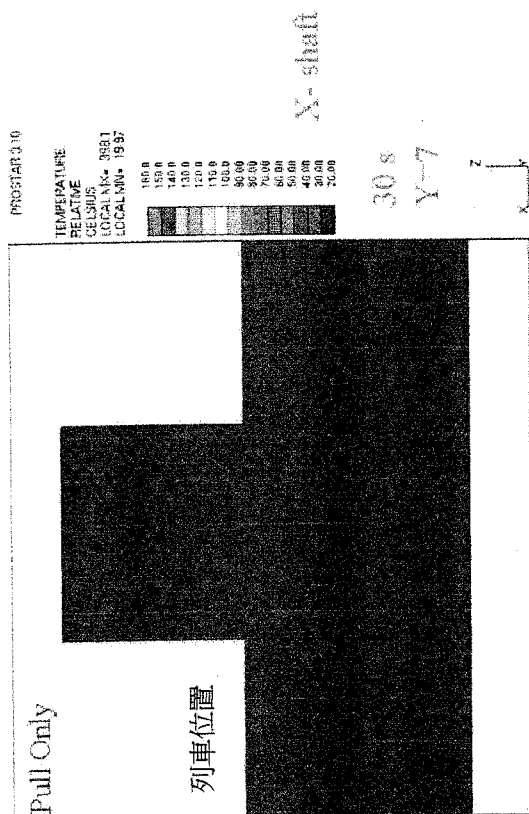


圖 3-211 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 30 秒)

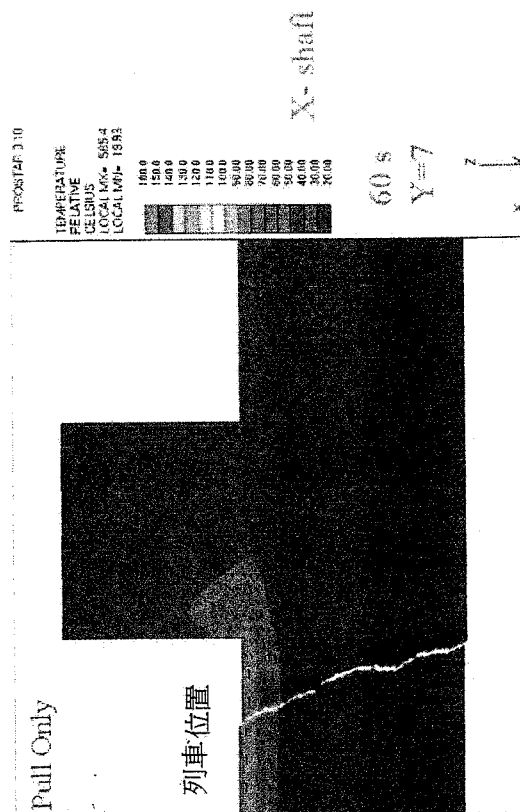


圖 3-212 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 60 秒)

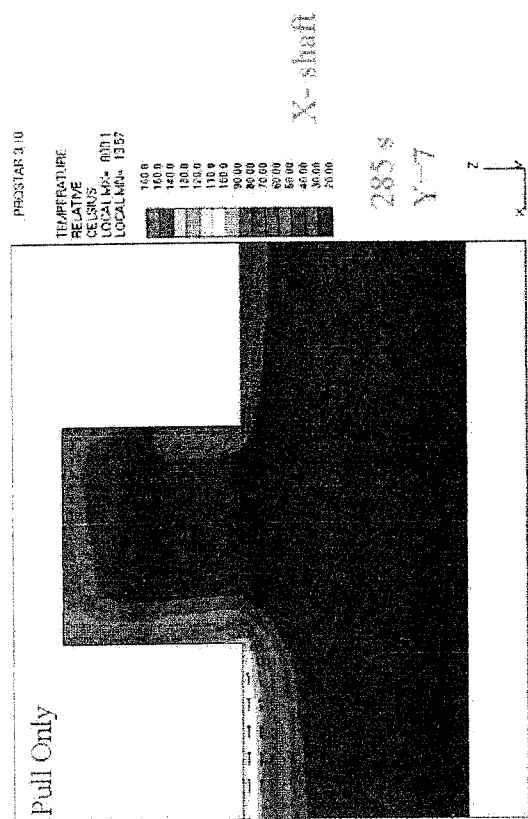


圖 3-215 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 285 秒)

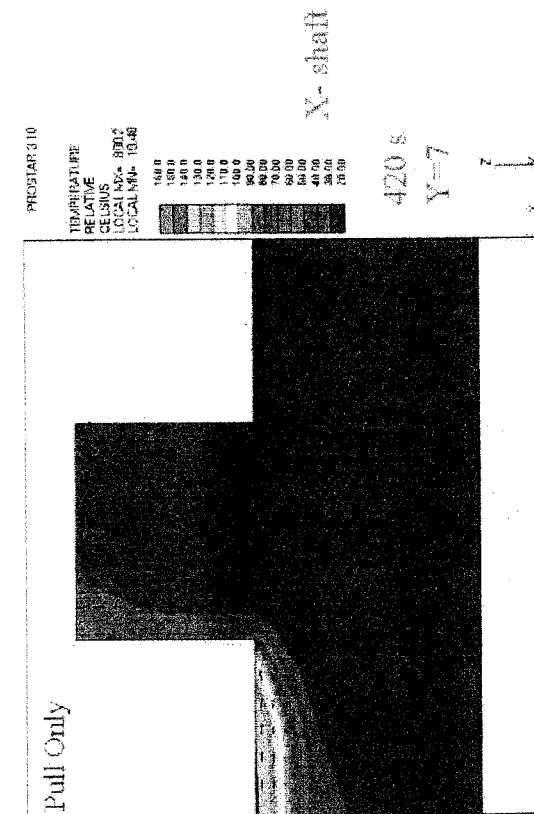


圖 3-216 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 420 秒)

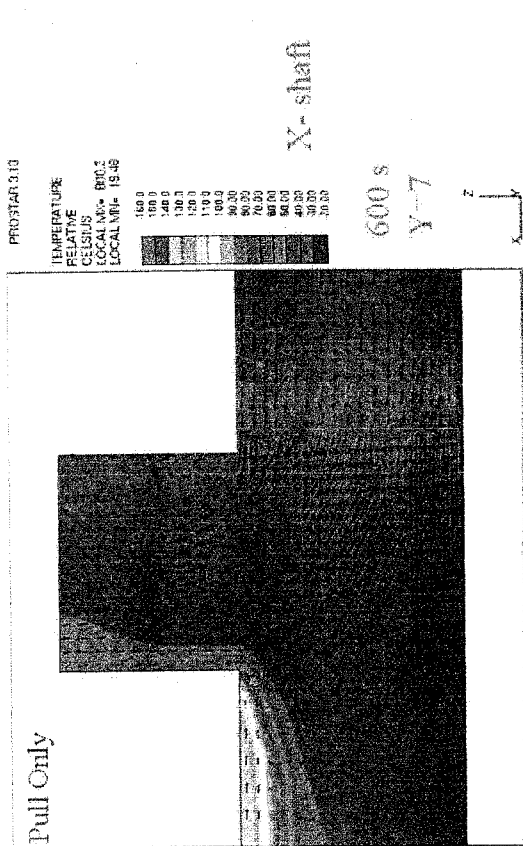


圖 3-217 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 600 秒)

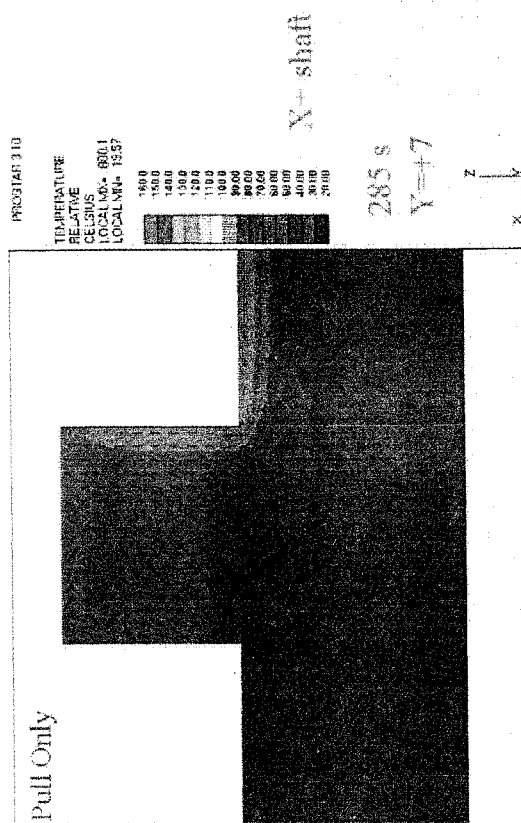


圖 3-218 溫度分布縱面圖(X+通風井位置; 285 秒)

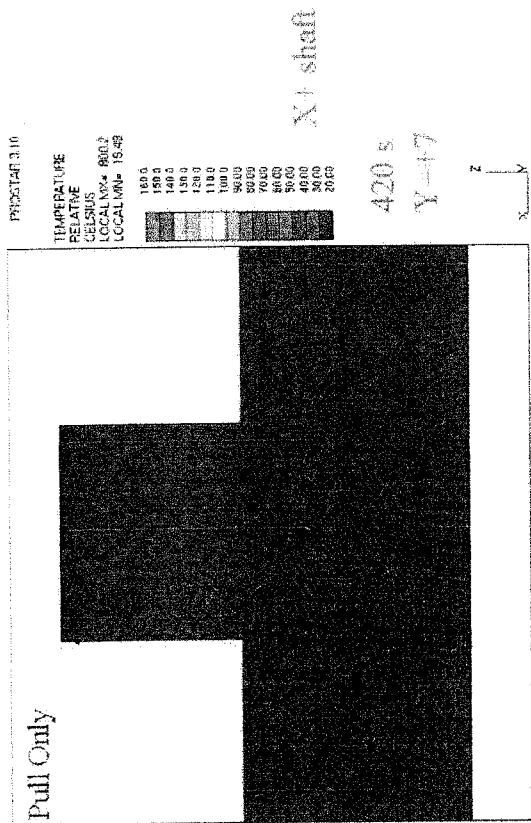


圖 3-219 溫度分布縱面圖(X+通風井位置, 420 秒)

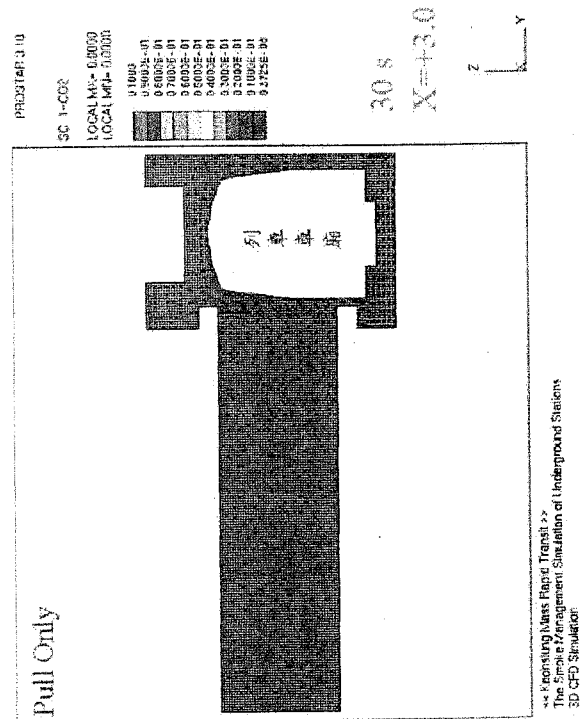


圖 3-220 濃度分布斷面圖(中央車廂處, 30 秒)

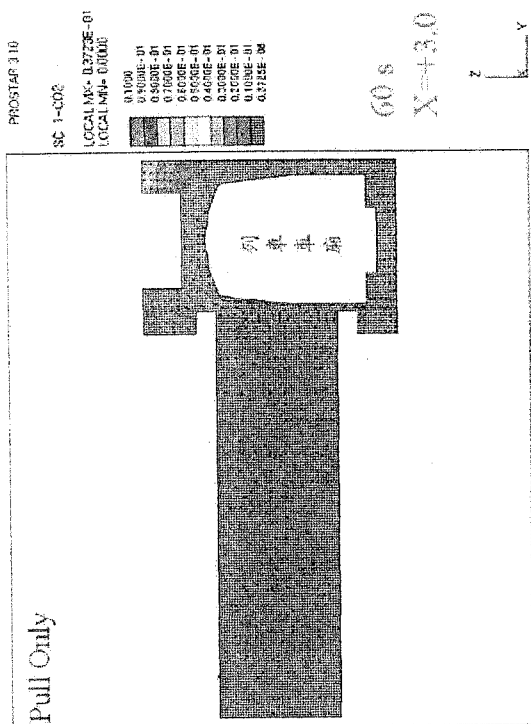


圖 3-221 濃度分布斷面圖(中央車廂處, 60 秒)

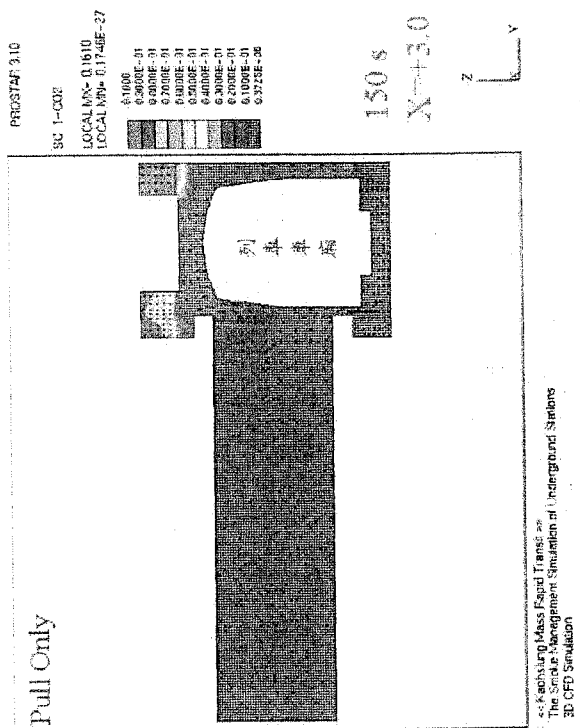
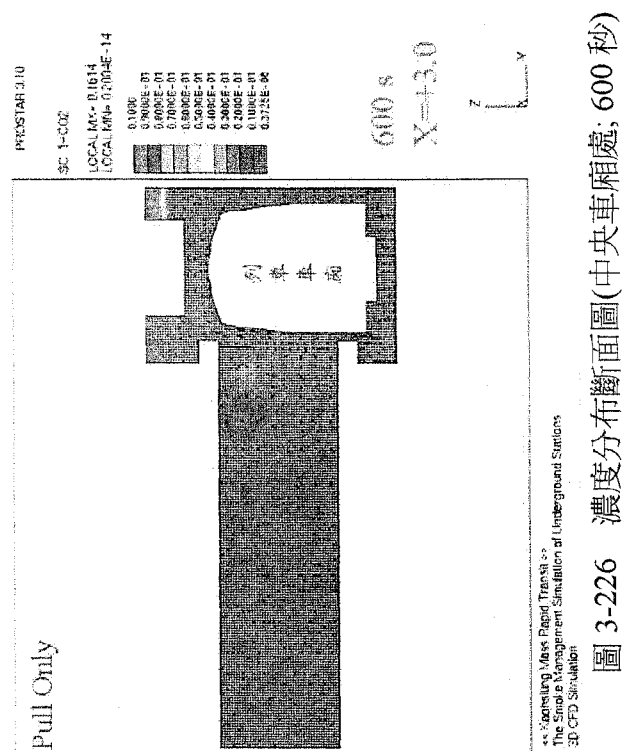
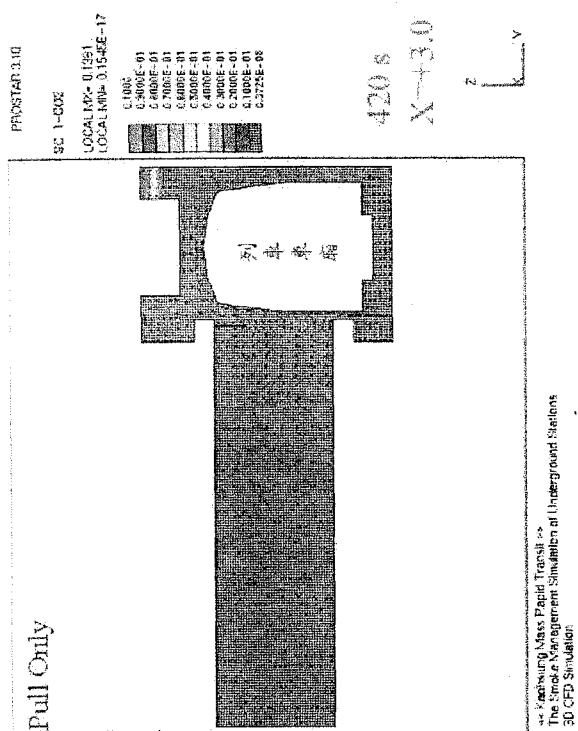
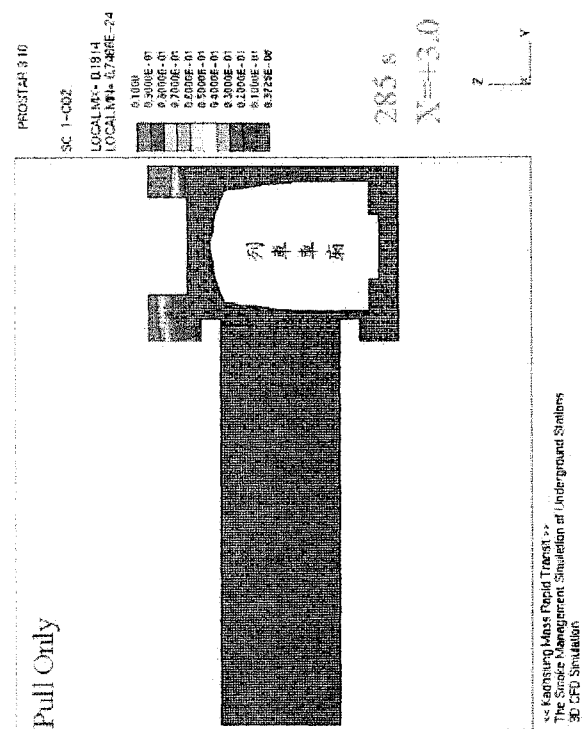
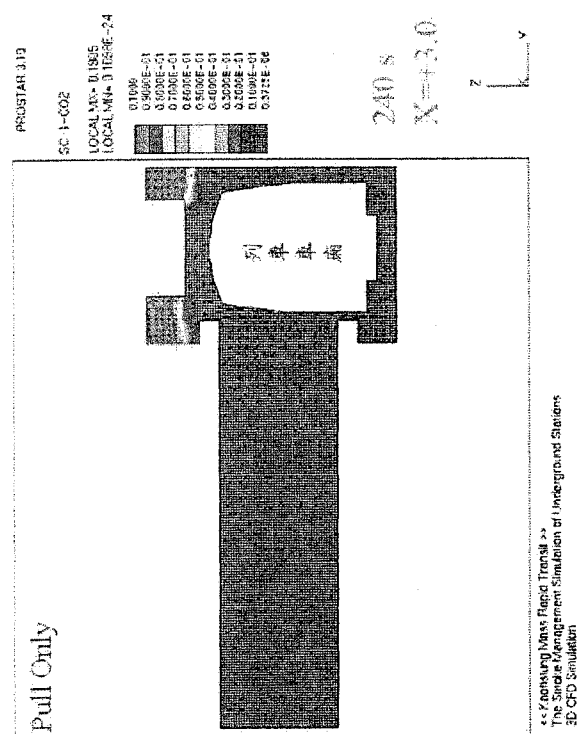
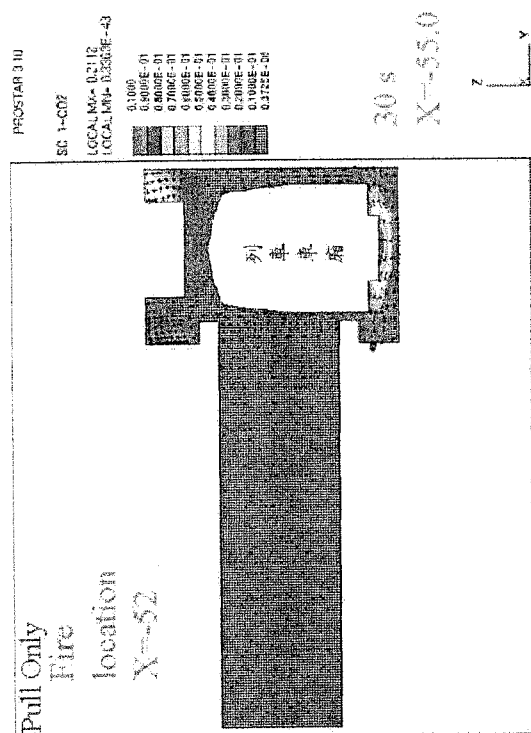


圖 3-222 濃度分布斷面圖(中央車廂處, 150 秒)





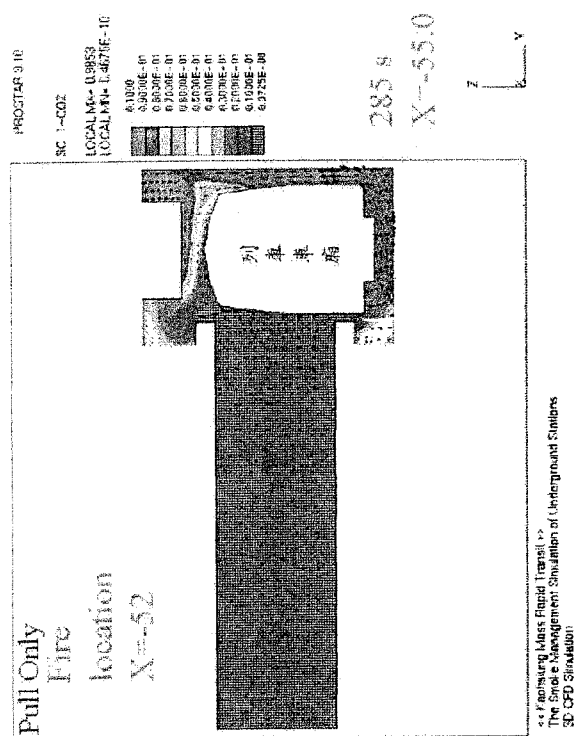


圖 3-231 濃度分布斷面圖(第一節車廂處; 285 秒)

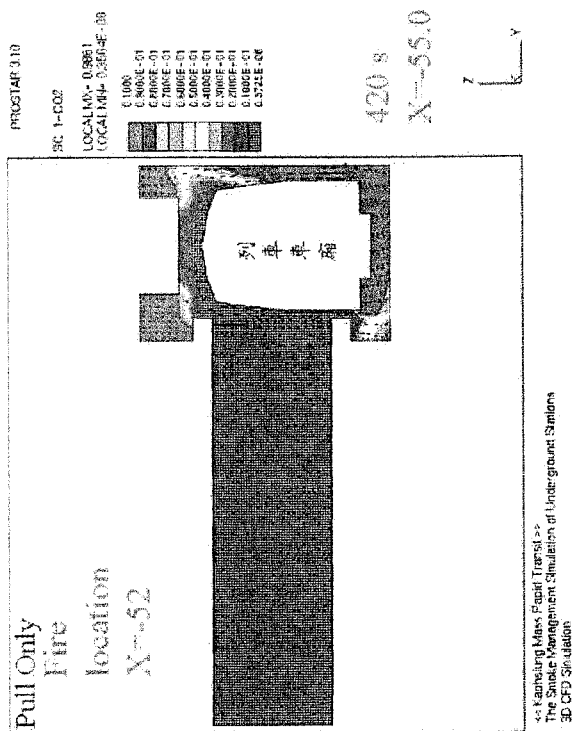


圖 3-232 濃度分布斷面圖(第一節車廂處; 420 秒)

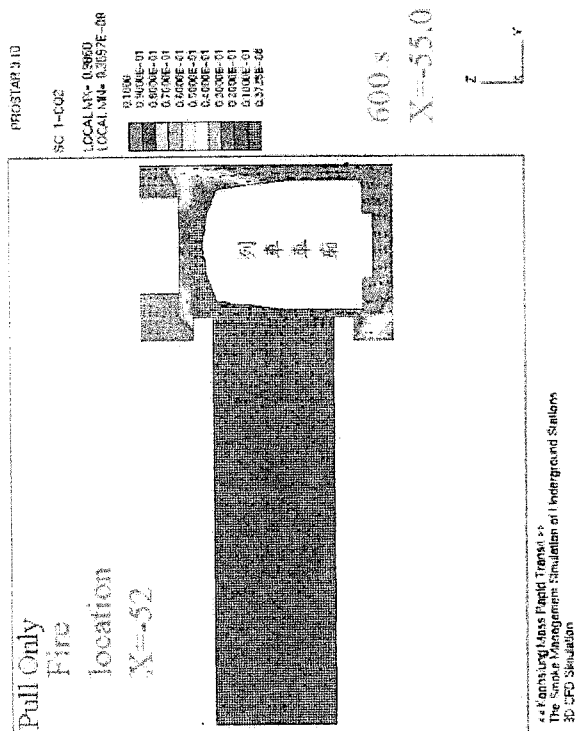


圖 3-233 濃度分布斷面圖(第一節車廂處; 600 秒)

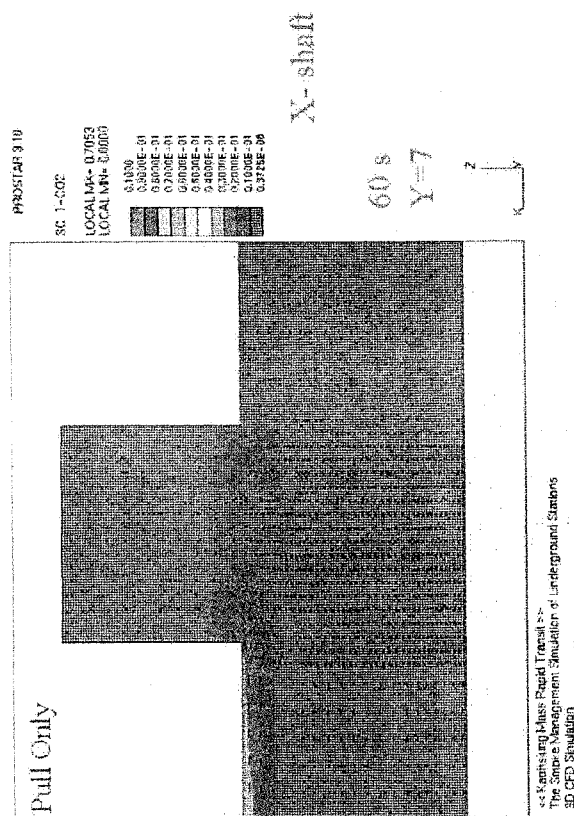


圖 3-234 濃度分布縱面圖(X-通風井位置; 60 秒)

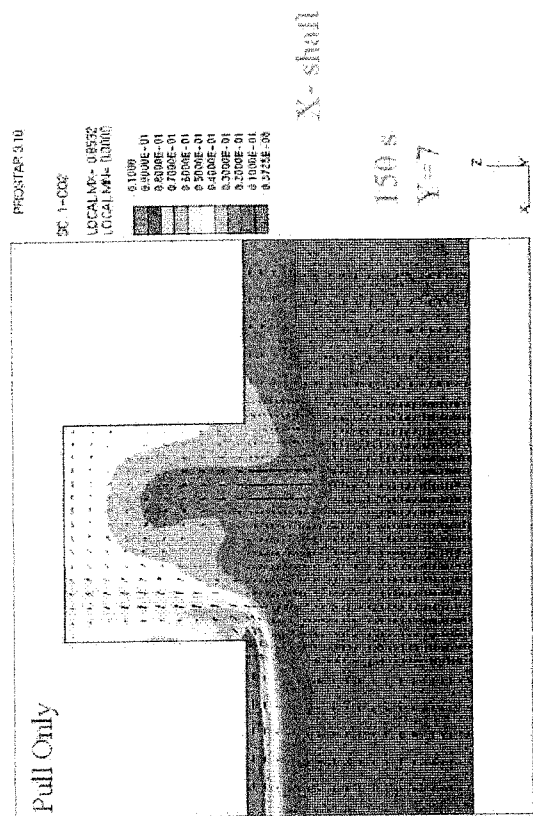


圖 3-235 濃度分布縱面圖(X-通風井位置; 150 秒)

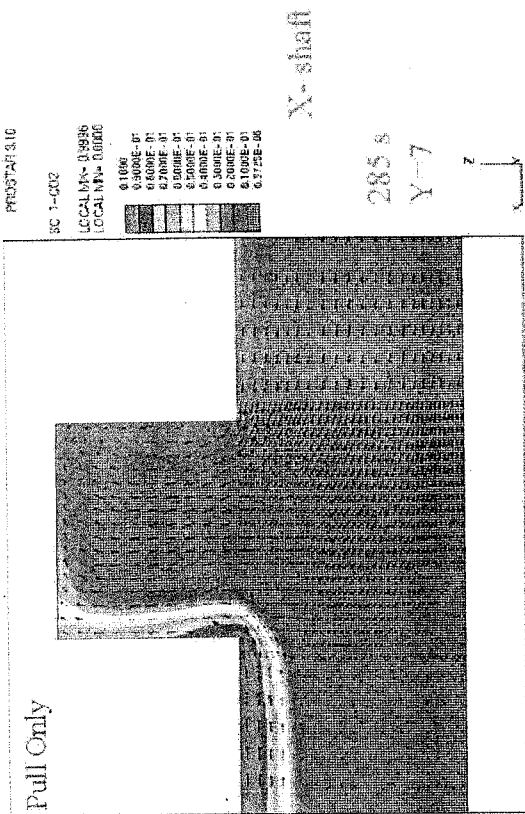


圖 3-237 濃度分布縱面圖(X-通風井位置; 285 秒)

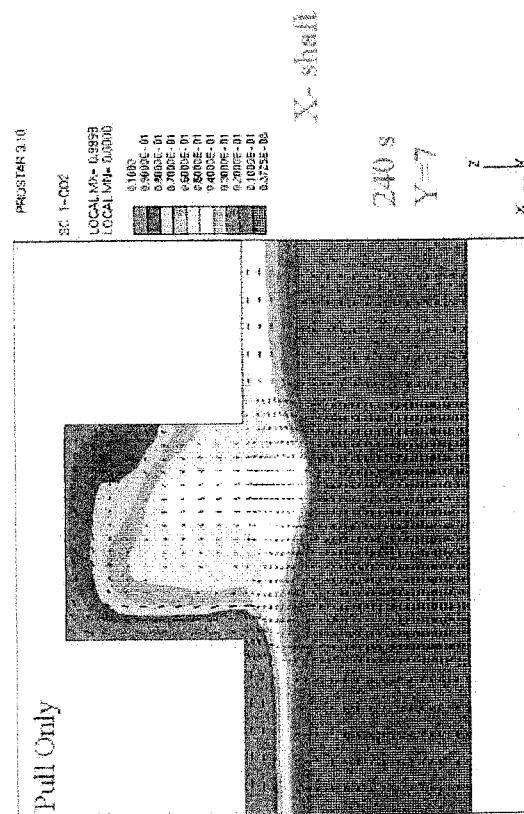


圖 3-236 濃度分布縱面圖(X-通風井位置; 240 秒)

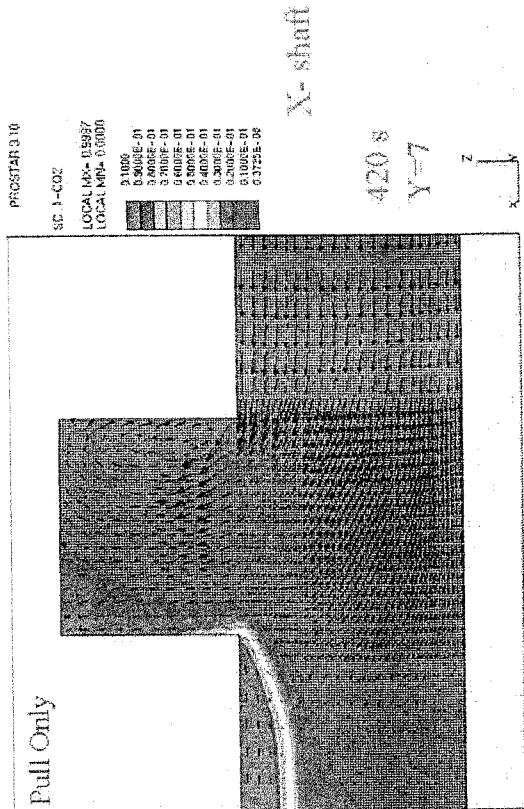


圖 3-238 濃度分布縱面圖(X-通風井位置; 420 秒)

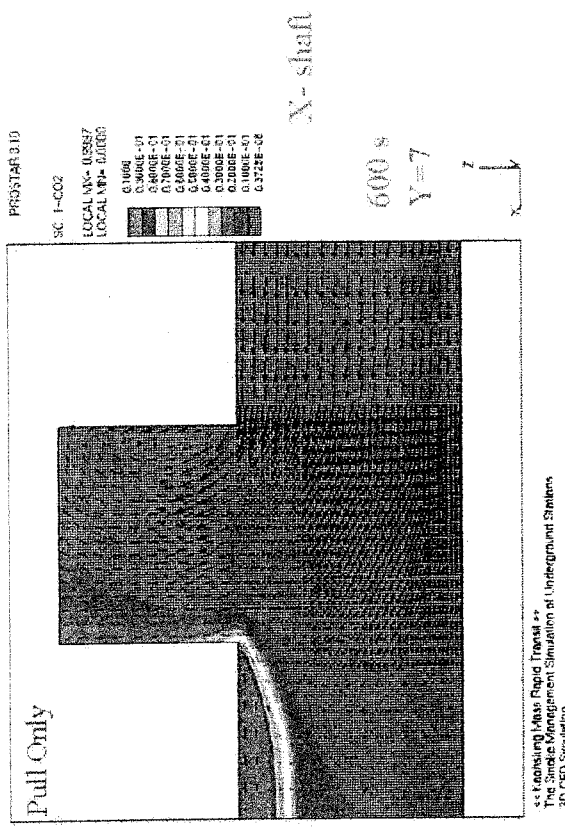


圖 3-239 濃度分布縱面圖(X-通風井位置; 600 秒)

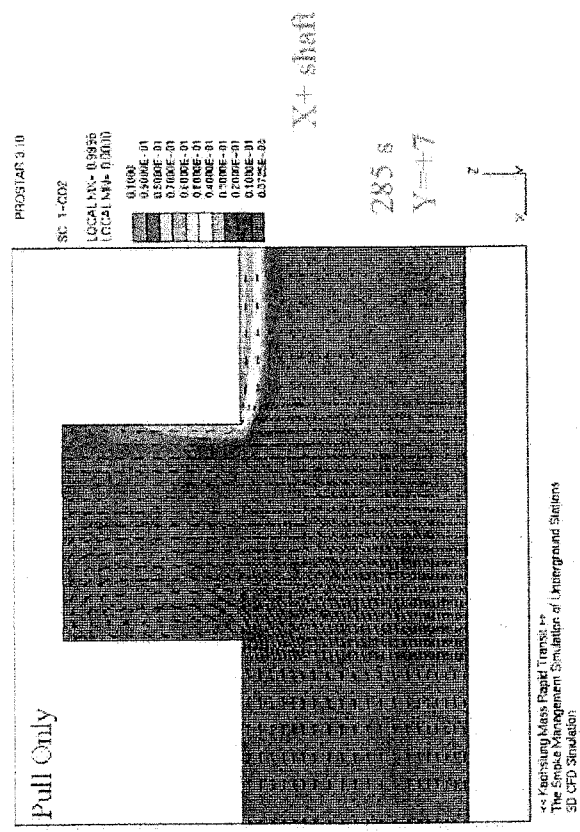


圖 3-240 濃度分布縱面圖(X+通風井位置; 285 秒)

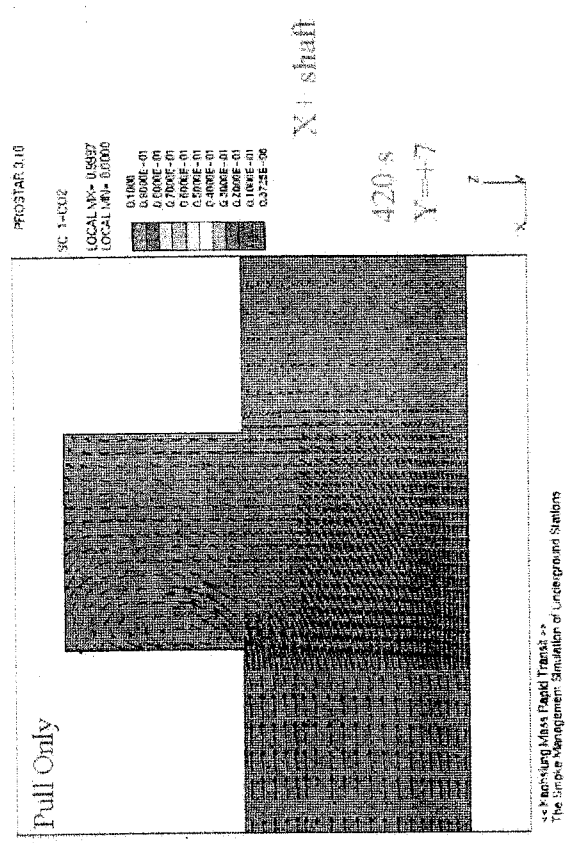


圖 3-241 濃度分布縱面圖(X+通風井位置; 420 秒)

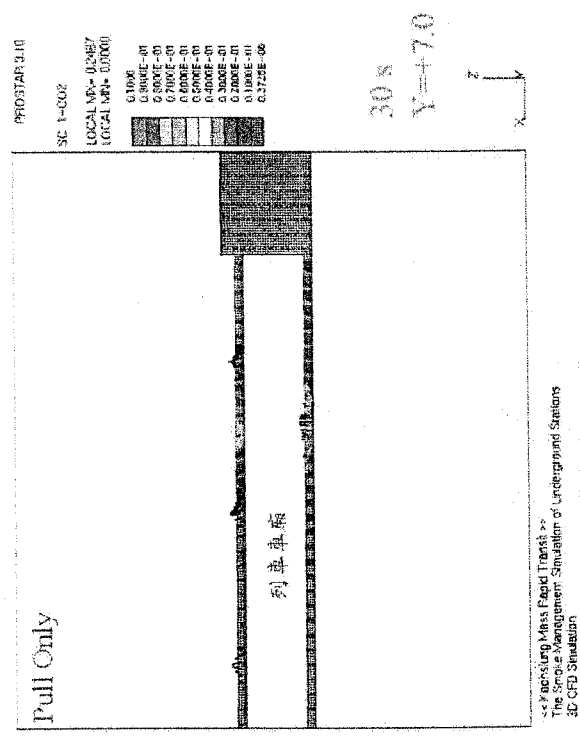


圖 3-242 濃度分布縱面圖(30 秒)

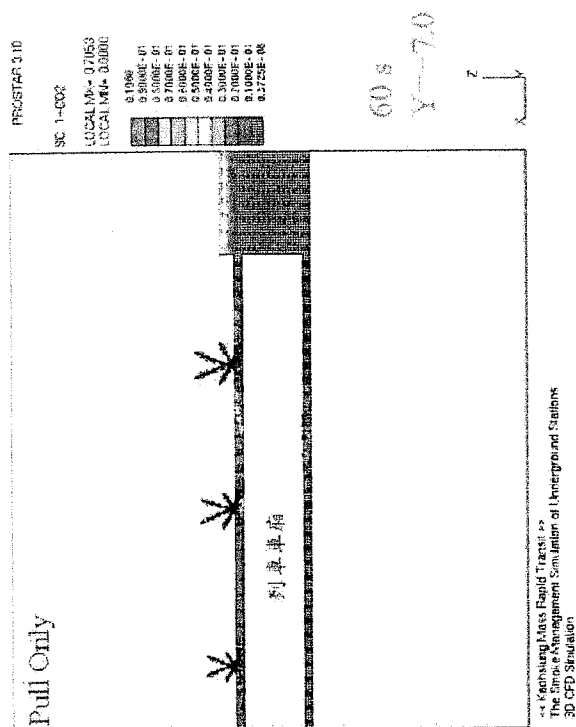


圖 3-243 濃度分布縱面圖(60 秒)

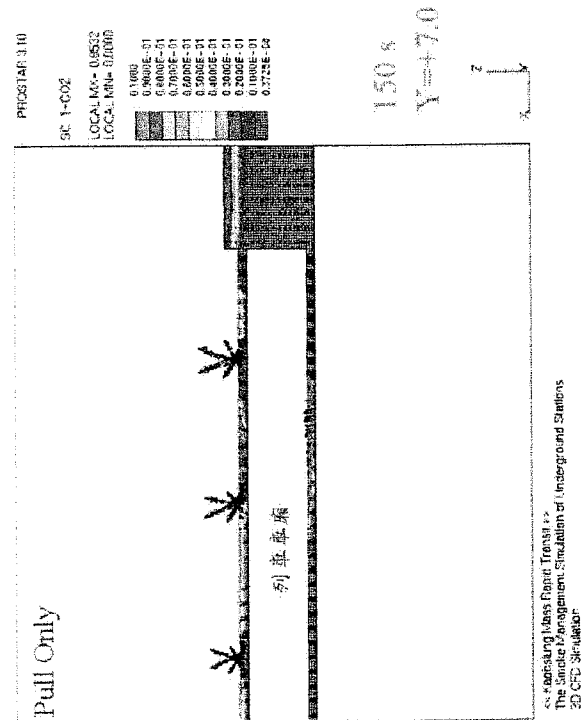


圖 3-244 濃度分布縱面圖(150 秒)

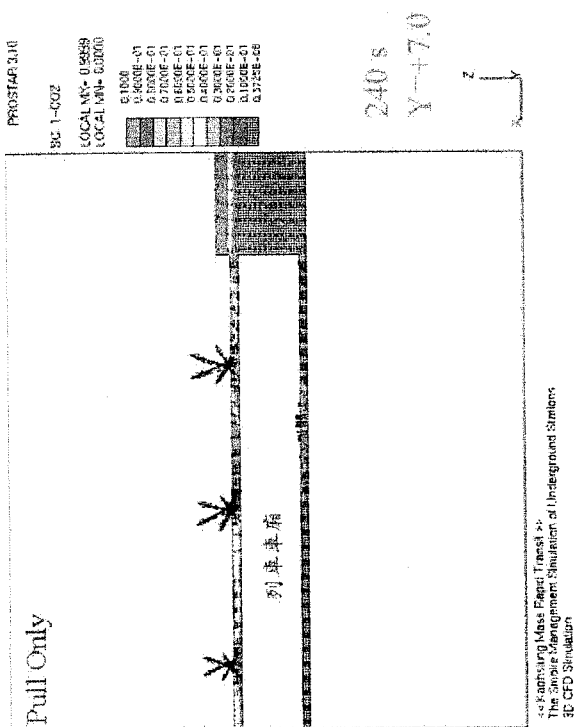


圖 3-245 濃度分布縱面圖(240 秒)

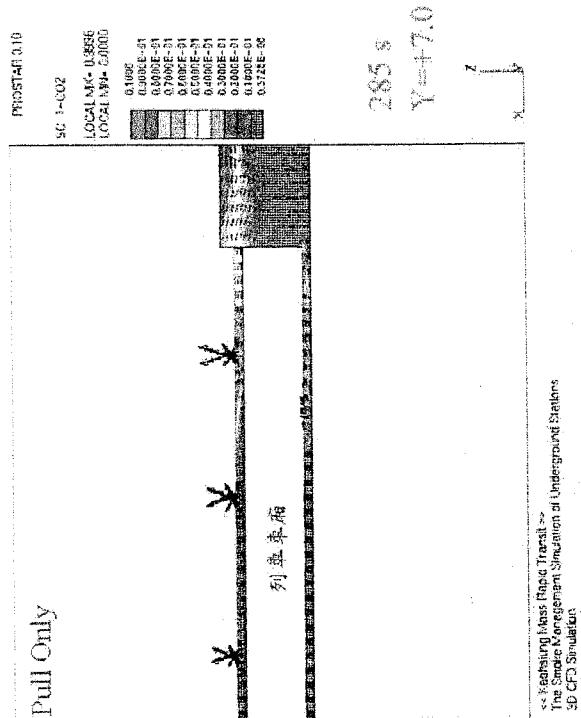


圖 3-246 濃度分布縱面圖(285 秒)

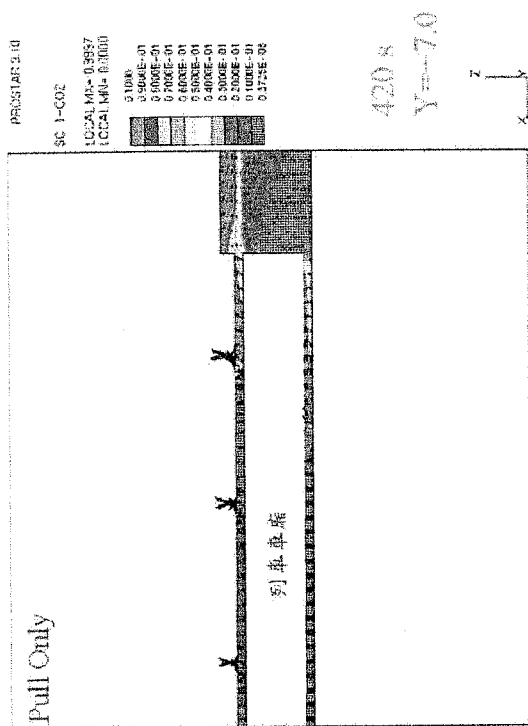


圖 3-247 濃度分布縱面圖(420 秒)

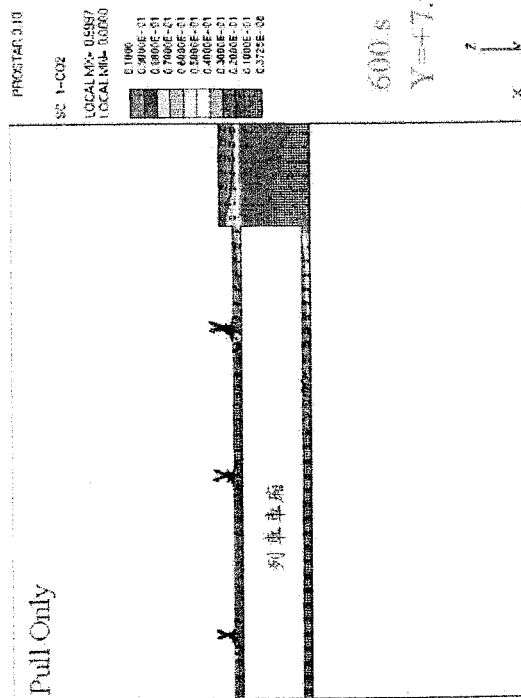


圖 3-248 濃度分布縱面圖(600 秒)

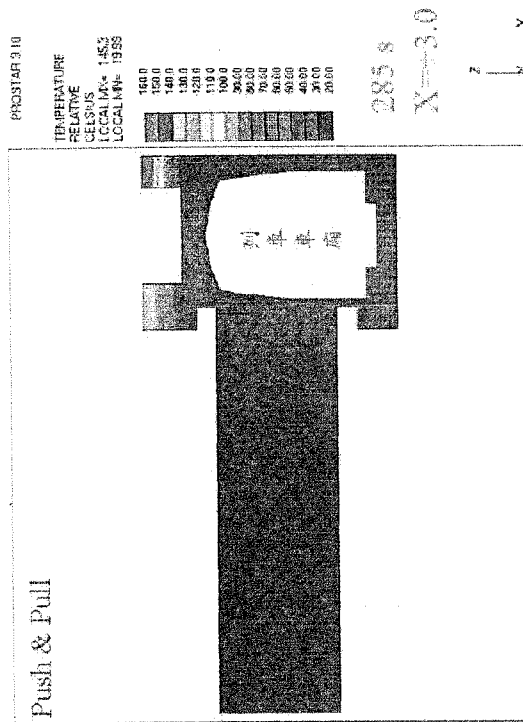


圖 3-249 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 285 秒)

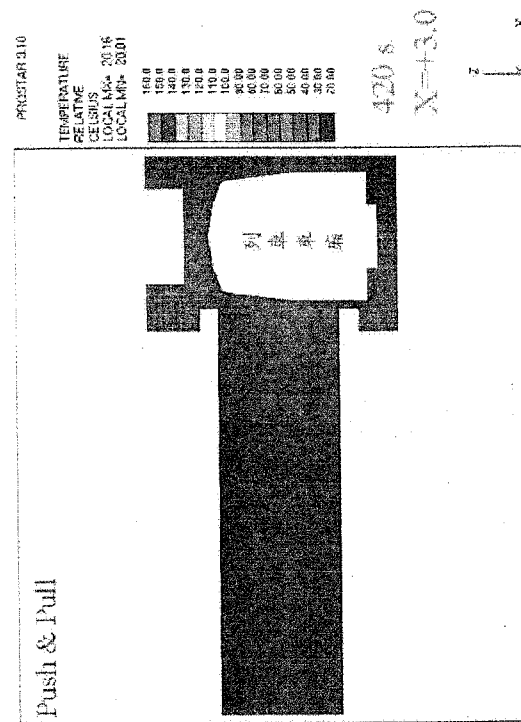


圖 3-250 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 420 秒)

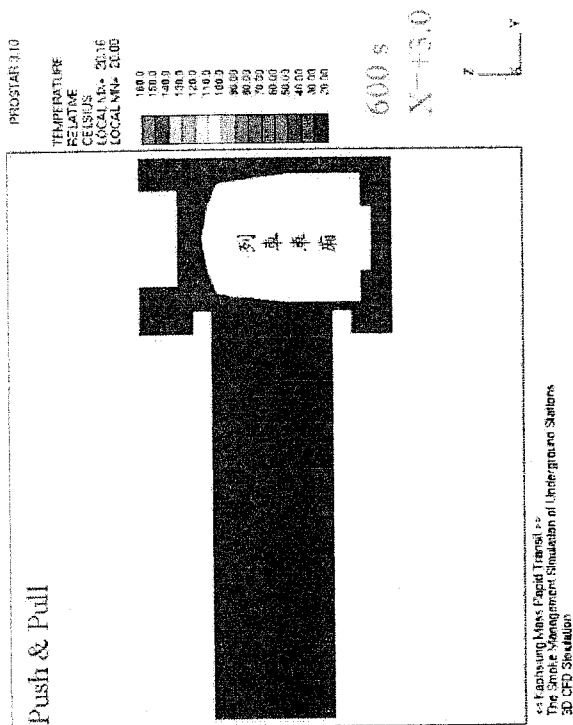


圖 3-251 溫度分布斷面圖(中央車廂處; 600 秒)

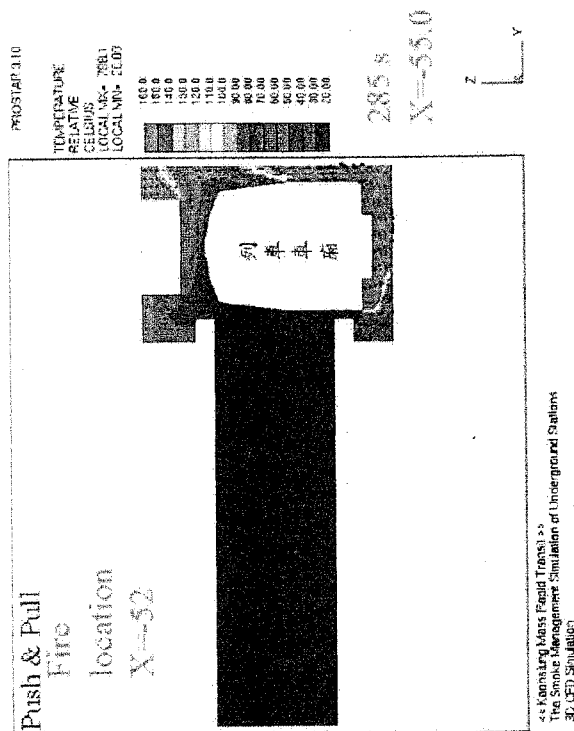


圖 3-252 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 285 秒)

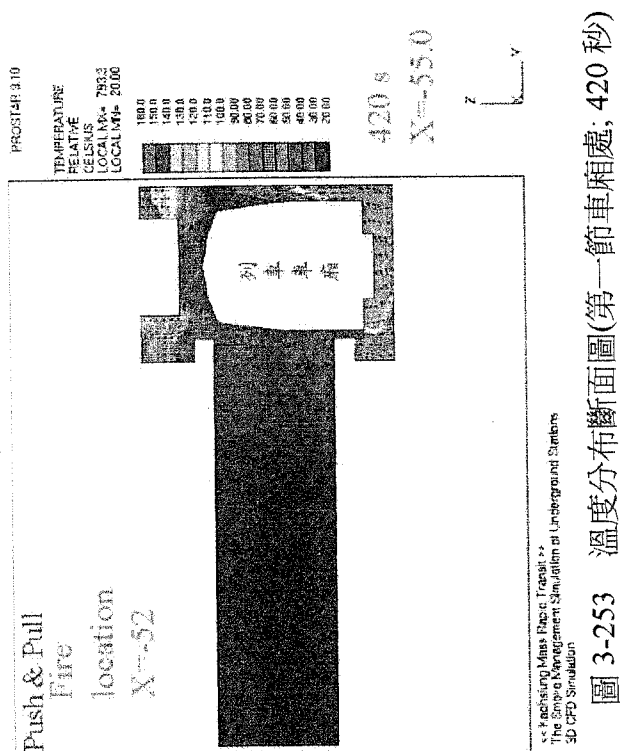


圖 3-253 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 420 秒)

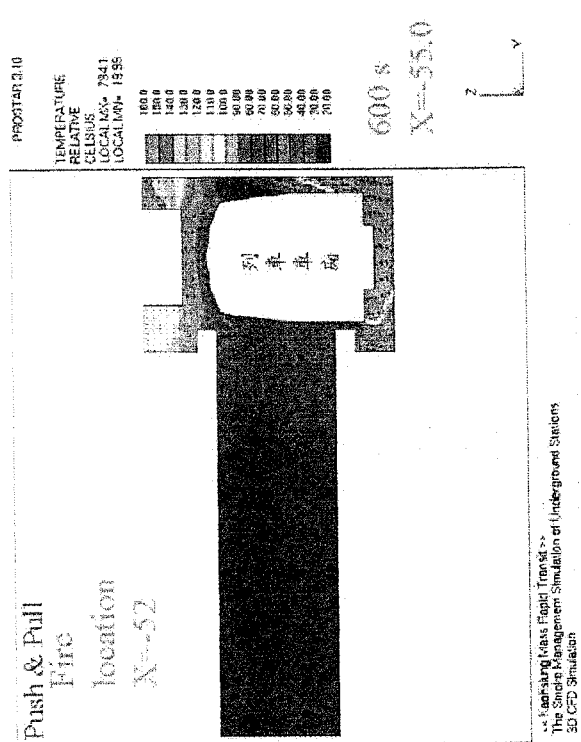


圖 3-254 溫度分布斷面圖(第一節車廂處; 600 秒)

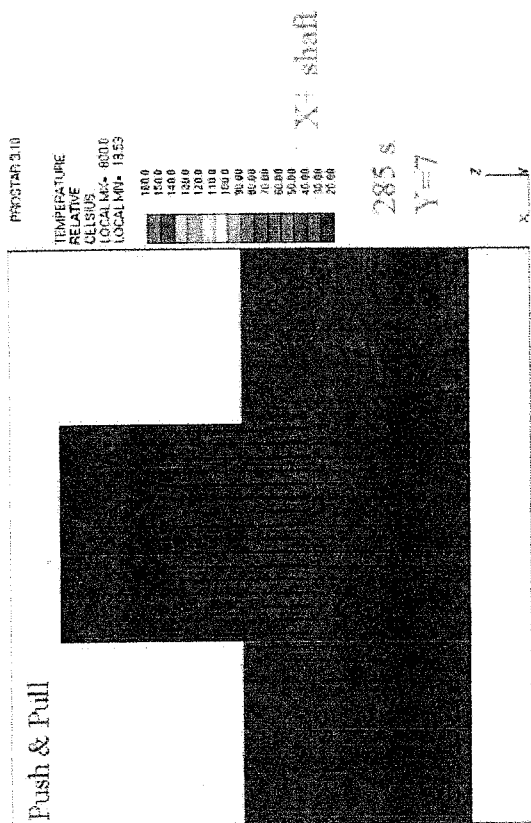


圖 3-255 溫度分布縱面圖(X+通風井位置; 285 秒)

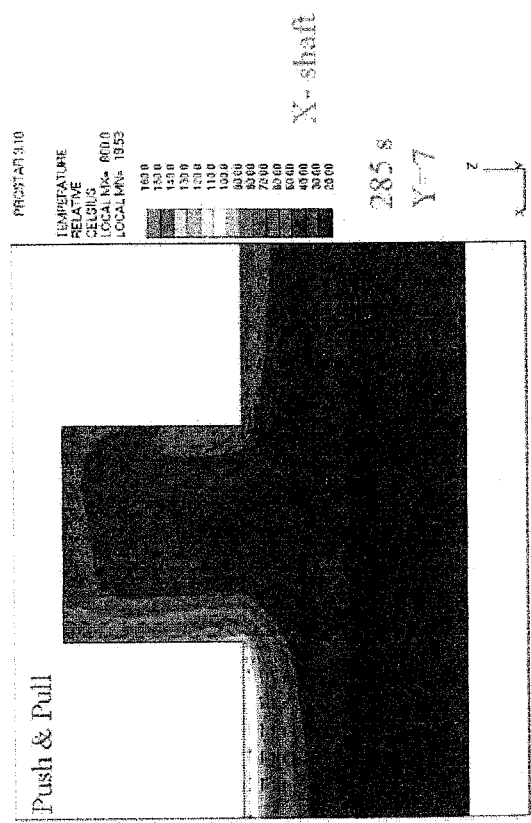


圖 3-256 溫度分布縱面圖(X+通風井位置; 285 秒)

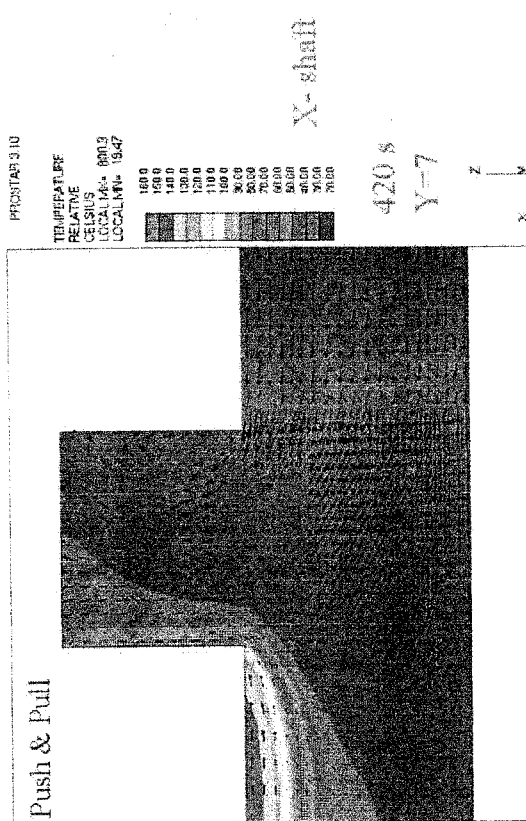


圖 3-257 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 420 秒)

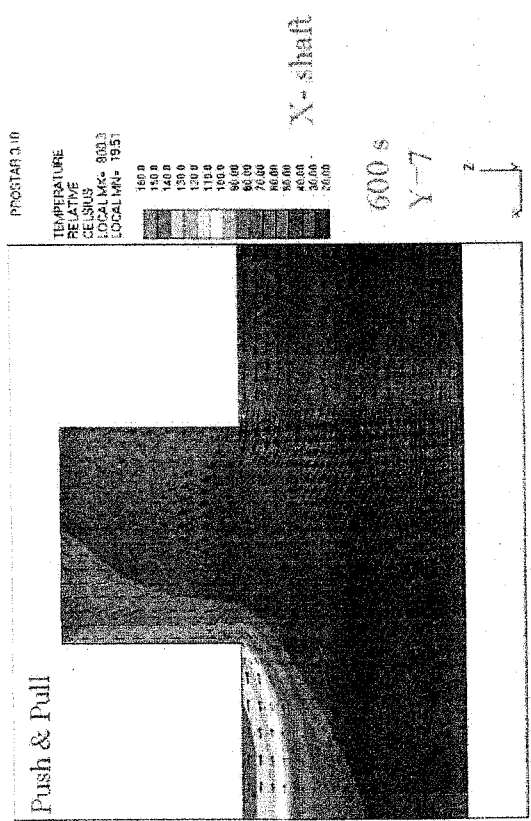


圖 3-258 溫度分布縱面圖(X-通風井位置; 600 秒)

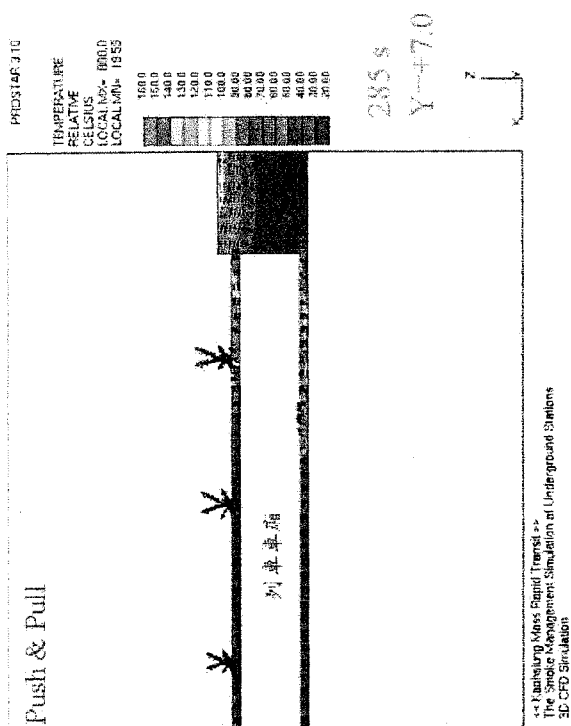


圖 3-259 溫度分布縱面圖(285 秒)

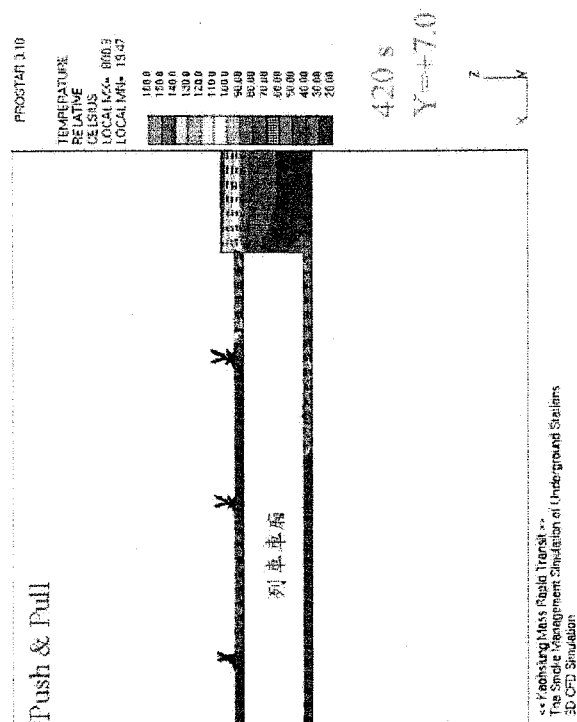


圖 3-260 溫度分布縱面圖(420 秒)

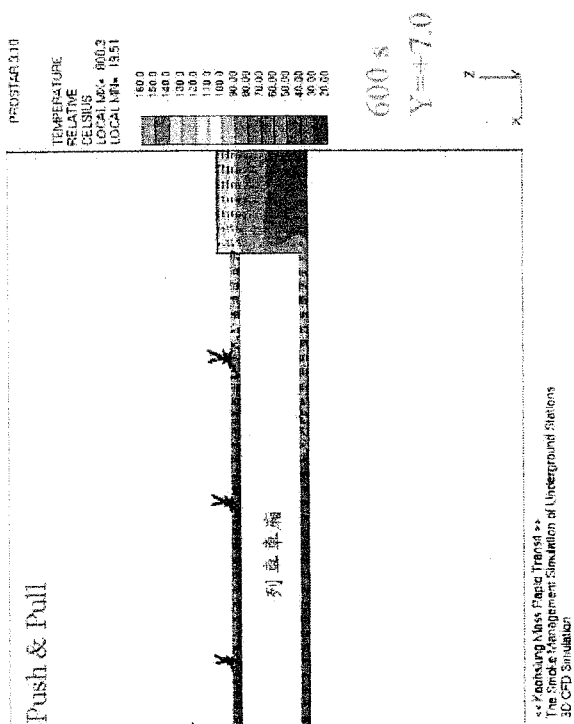


圖 3-261 溫度分布縱面圖(600 秒)

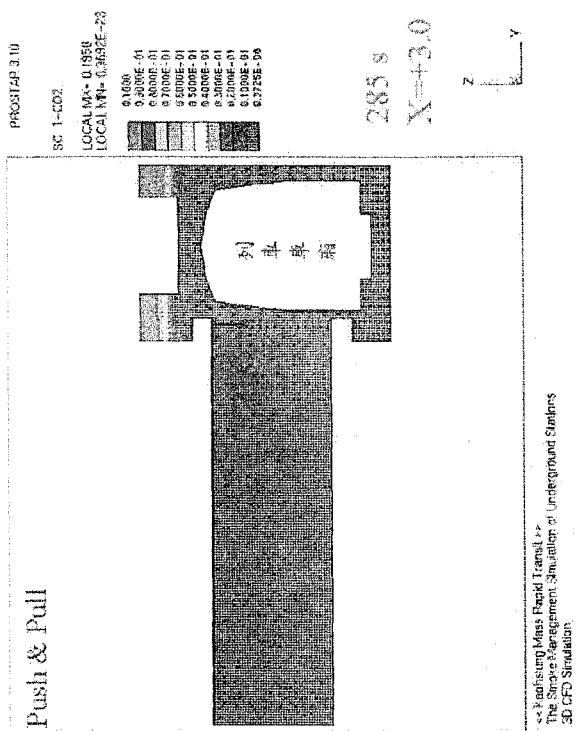


圖 3-262 濃度分布縱面圖(中央車廂處; 285 秒)

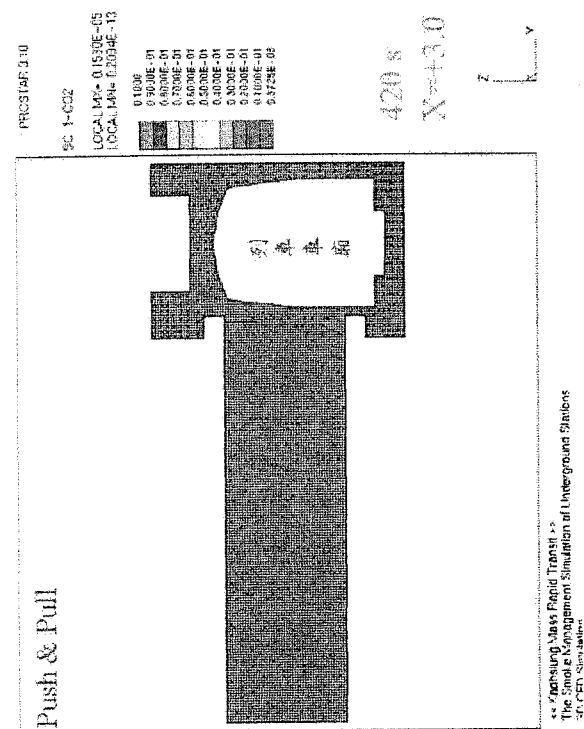


圖 3-263 濃度分布斷面圖(中央車廂處; 420 秒)

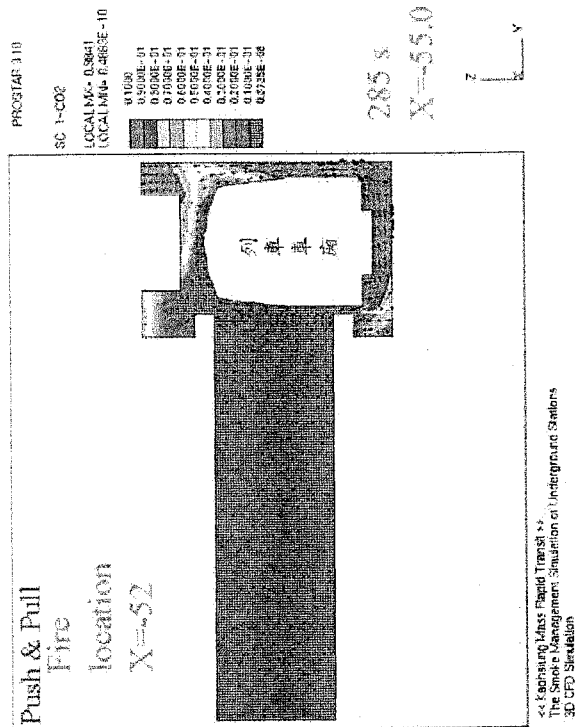


圖 3-264 濃度分布斷面圖(第一節車廂處; 285 秒)

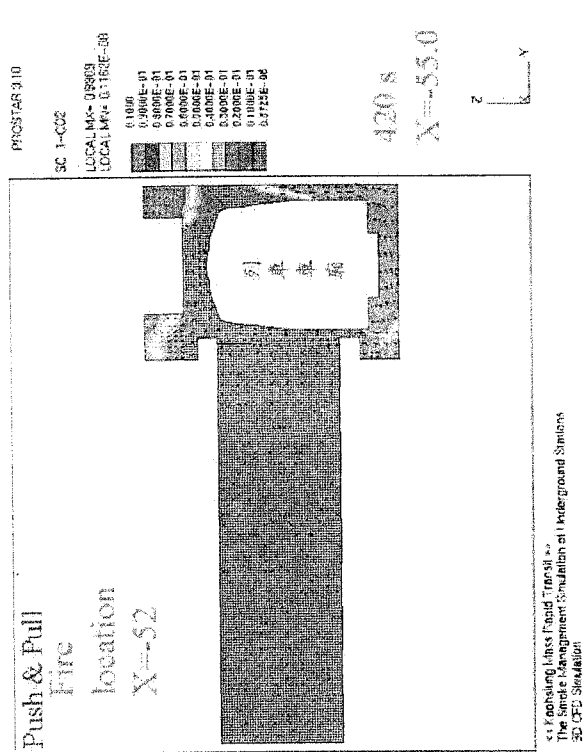


圖 3-265 濃度分布斷面圖(第一節車廂處; 420 秒)

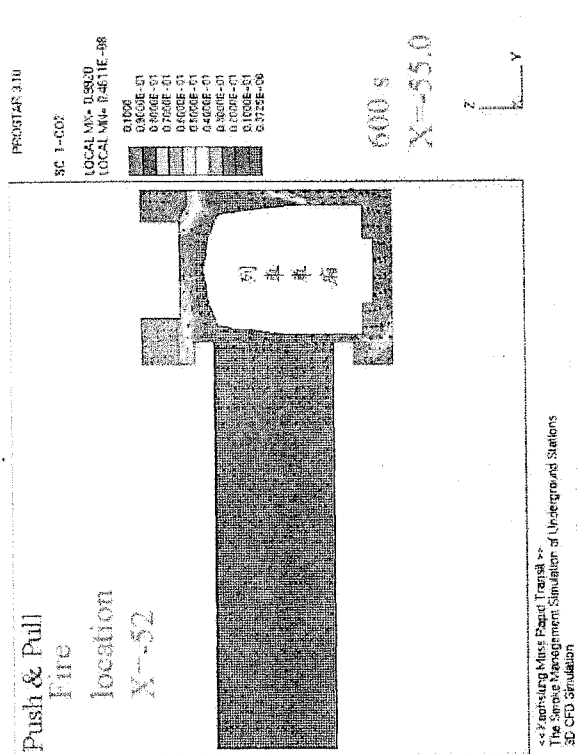
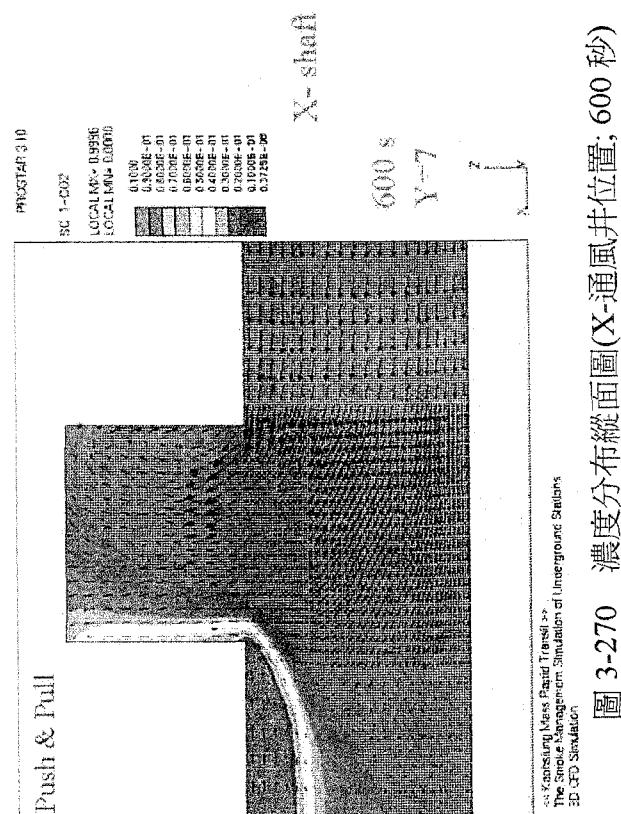
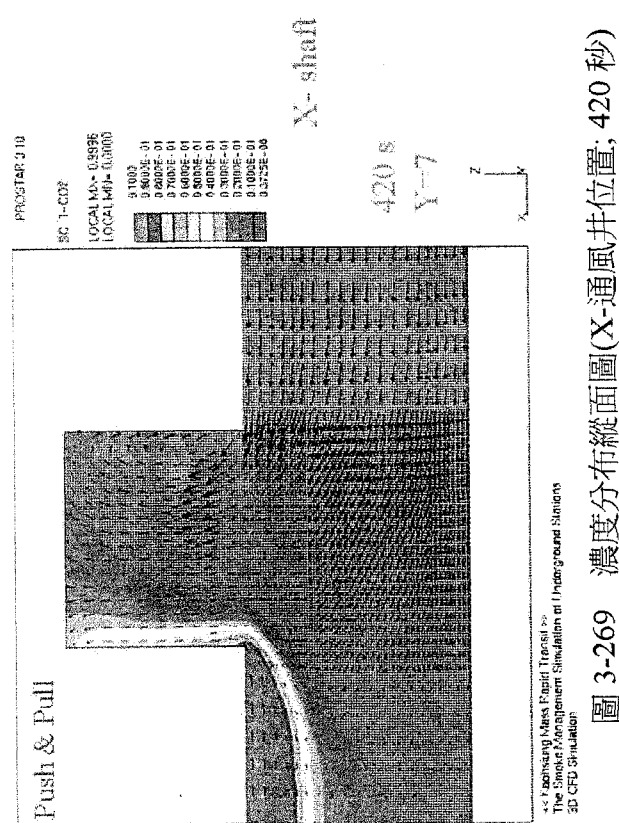
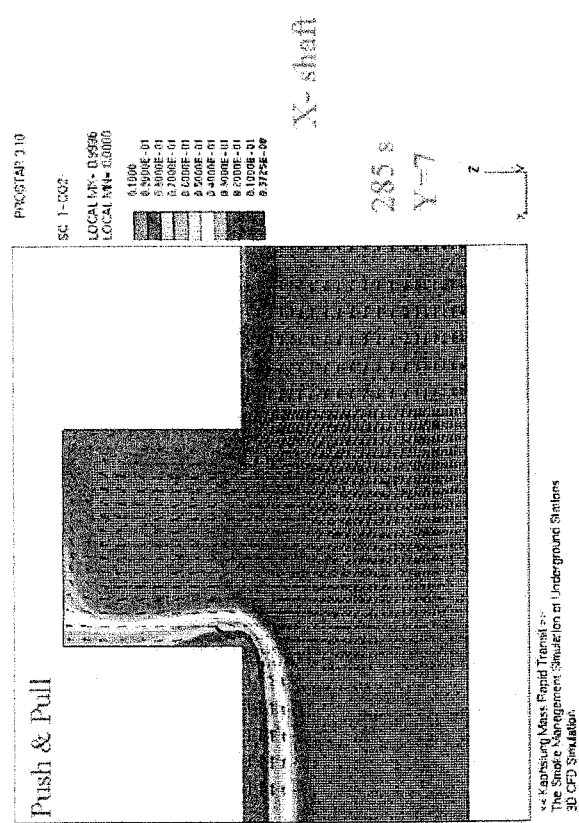
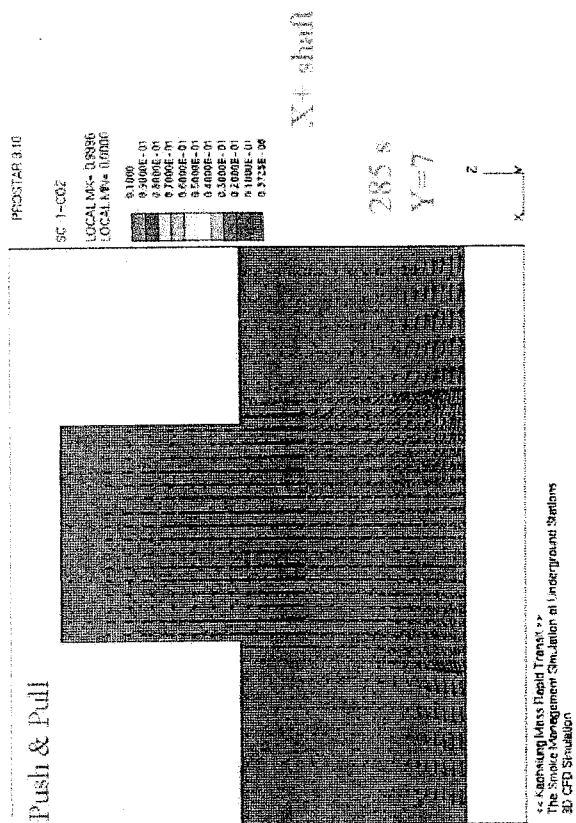


圖 3-266 濃度分布斷面圖(第一節車廂處; 600 秒)



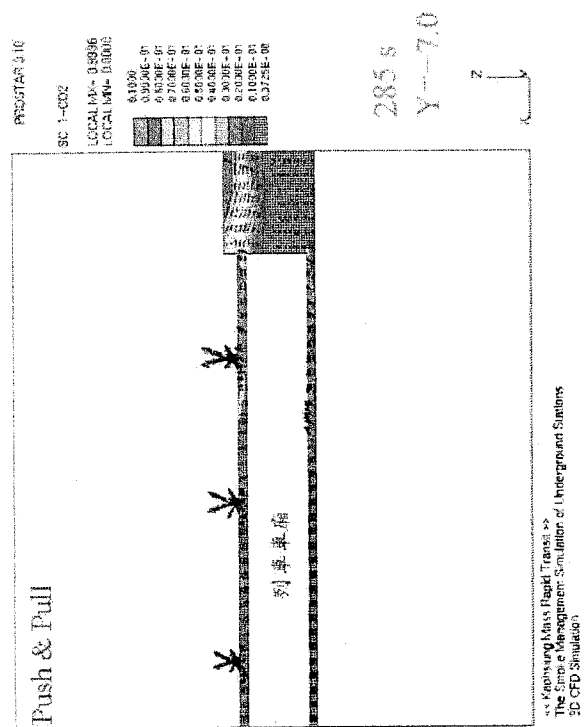


圖 3-271 濃度分布縱面圖(285 秒)

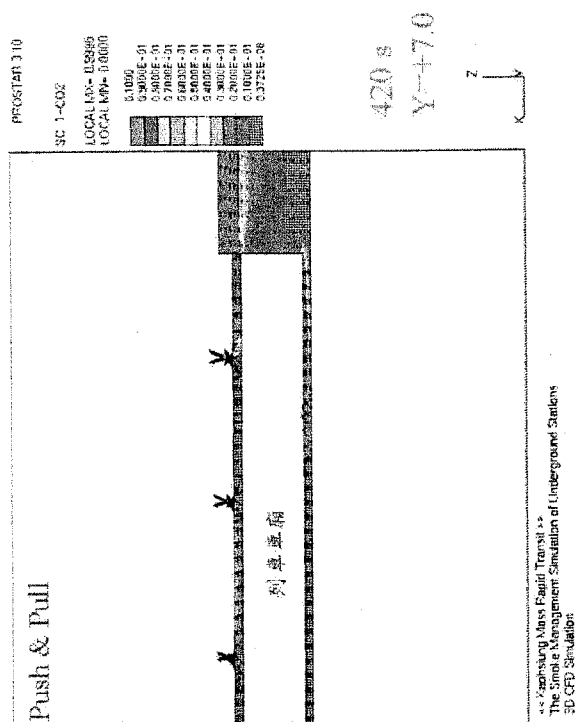


圖 3-272 濃度分布縱面圖(420 秒)

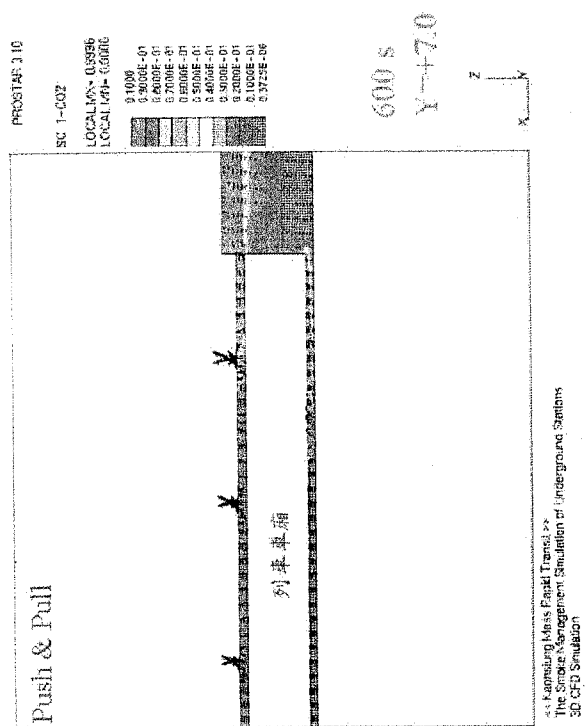


圖 3-273 濃度分布縱面圖(600 秒)

第四章 站體煙控系統縮小模型試驗分析

4.1 縮小尺度試驗原理

評估捷運車站之煙控系統能力之方法，大致可分為全尺度實驗、縮小尺寸模型試驗及電腦模擬分析等三種方法。

全尺度實驗是以實際為實驗對象，實地進行實驗，因此其實驗結果為真實狀況。但全尺度實驗所耗費之成本高，而且對於實驗裝置的變更以及實驗的重現性不易，故大部份的研究均採行後者。於本案中，由於高雄捷運系統尚未完工，目前無法依此方法分析。

電腦模擬分析乃是藉由整個煙控系統之數學模式的建立，加上初始條件、邊界條件之設定，而加以計算數學模式的結果。電腦模擬分析之成本為三者最低者，且其預測結果亦與實際狀況相當，為大部分研究所採用。

而縮小尺寸模型實驗乃是根據『動態相似理論』使模型與實體之間不但尺寸成比例，而且運動及動力亦成比例。縮小尺寸模型實驗之優點為實驗成本較全尺寸模型實驗低，而且對於實驗裝置的變更容易，實驗條件參數的控制容易；而其缺點對於複雜的案例，必須加以簡化。對於無法完全依照『動態相似理論』模擬出所有的條件時，僅能針對重要的實驗進行『非完全動態相似理論（Incomplete Similarity Dynamic Theory）』。

於進行縮小模型試驗時，為能將全尺度實體之現象結果，映射至模型實驗中，必須符合動態相似理論之三種相似條件：

- 一、幾何相似：模型與原型之間其幾何尺寸成比例關係。
- 二、運動相似：模型與原型之間相對應點之運動速度、運動加速度等特性成比例關係。

三、動力相似：模型與原型之間相對應點所受的各種外力及總和成比例關係。

綜合上述三種方法特點，本研究計畫除第三章已完成利用 3D CFD 進行電腦模擬分析外，亦採行縮小模型試驗進行煙控系統評估。

在一般模型實驗中，模型與原型間相對應各點所受之各式型態力量均應成一定比例，但有時基於現實考量，完全之“動力相似”要求無法獲得。因此，在設計實驗模型時必須考慮欲模擬流場中最重要之特性為何，且注意與此時特性有相關參數，要求二者之間呈現相似關係即可。

縮小模型實驗基於觀察煙控系統所造成之流場為考量，於不考慮站體發生火災所產生的濃煙下，則所考慮最重要之無因次參數為雷諾數（Re）。因此於進行本研究時，欲使縮小模型與原型間具有『雷諾數相似』之要求的實驗方式有兩種：

其一為增加排煙風扇的風速，使得在縮小尺寸內之模型中維持相同的雷諾數。但是利用增加排煙風扇的風速以維持雷諾數相同的要求，將使車站內之氣流速度高達不合理的速度。

因此，在模擬實驗中，與模擬真實情況之空氣動力特性，必須利用『非完全動態相似理論（Incomplete Similarity Dynamic Theory）』，使模型與全尺度實體二者支流場分佈符合紊流區狀態，即可到達模擬效果。故本研究之模型的氣流保持與實體相同，雖然兩者之雷諾數相差兩個級數，但均在紊流區內，可縮小模型試驗可模擬真實車站之空氣動力性質。

而另一種實驗方式，則為更換所使用之工作流體，以達到雷諾數相同之要求。例如可於模型實驗中不用空氣而改用水或乙二醇（Ethylene Glycol）等流體，此時雷諾數將可趨向一致。

但在實驗數據與實驗設備、經濟效益等方面考量下，其實驗數據之擷取與觀察困難倍增，耗費亦大增。因此，本實驗仍維持以空氣為工作流體進行。

有關縮小模型試驗之統御方程式，如下所列：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0 \\
 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g_i \beta (\bar{\theta} - \theta_0) + \nu_i \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \\
 \rho c_p \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right) &= \rho c_p \alpha_i \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_i \partial x_i} + Q
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

其中，其中為 u 為平均速度、 t 為時間、 ρ 為密度、 P 為壓力、 θ 為溫度、 C_p 為比熱， Q 為熱釋放率

(4-1) 式經 π 定理之無因次化 (dimensionless) 後，可得四個無因次參數 π_1 、 π_2 、 π_3 、與 π_4 如下所列：

$$\begin{aligned}
 \Pi_1 &= \frac{L_0}{u_0 t_0} \\
 \Pi_2 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P_0}{u_0^2} \\
 \Pi_3 &= g_i \beta \Delta \theta_0 \frac{L_0}{u_0^2} \\
 \Pi_4 &= \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \theta_0 L_0^2}
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

因此，由以上無因次化後，可得縮小模型與實體間各種參數的比例，如下式所列：

$$\begin{aligned}
\frac{Q_M}{Q_R} &= \left(\frac{\Delta\theta_M}{\Delta\theta_R} \right)^{3/2} \left(\frac{L_M}{L_R} \right)^{5/2} \\
\frac{t_M}{t_R} &= \left(\frac{\Delta\theta_M}{\Delta\theta_R} \right)^{-1/2} \left(\frac{L_M}{L_R} \right)^{1/2} \\
\frac{u_M}{u_R} &= \left(\frac{\Delta\theta_M}{\Delta\theta_R} \right)^{1/2} \left(\frac{L_M}{L_R} \right)^{1/2} \\
\frac{\Delta P_M}{\Delta P_R} &= \left(\frac{\Delta\theta_M}{\Delta\theta_R} \right) \left(\frac{L_M}{L_R} \right)
\end{aligned} \tag{4-3}$$

其中 M 代表縮小模型，R 代表實體。若 $\Delta\theta_0 = \text{Constant}$ 時，則 (4-3) 可簡化為：

$$\begin{aligned}
\frac{Q_M}{Q_R} &= \left(\frac{L_M}{L_R} \right)^{5/2} \\
\frac{t_M}{t_R} &= \left(\frac{L_M}{L_R} \right)^{1/2} \\
\frac{u_M}{u_R} &= \left(\frac{L_M}{L_R} \right)^{1/2} \\
\frac{\Delta P_M}{\Delta P_R} &= \left(\frac{L_M}{L_R} \right)
\end{aligned} \tag{4-4}$$

亦即於熱量方面，模型與實際之比例為縮尺比例 (L_M/L_R) 之 5/2 次方。而在時間方面，模型與實際之比例為縮尺比例之 1/2 次方。於速度方面，模型與實際之比例為縮尺比例之 1/2 次方。於壓力方面，模型與實際之比例與縮尺比例相同。

舉例而言，若實際時間為 60 秒的話，則於模型試驗時，其所呈現的時間僅有 7.746 秒。另外，本模型試驗之發煙量，為依照本書第三章中之發煙量計算而得。若實際發煙量為 1 m^3 ，則於模型試驗時，其所呈現的體積僅有 $3.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 。

4.2 站體縮小模型系統製作

經上一章節之縮小模型設計原理，則可進行高雄捷運系統縮小模型之設計與製作。基於置放縮小模型場地之大小，本案之縮小模型為 1/30 之所小尺度。故依照高雄捷運典型地下車站之尺寸，本模型主要結構將分為月台層與大廳層兩部份。而縮小模型製作過程，首先將模型本體完成。其次，將設計縮小模型內部之煙控系統。最後安裝其他實驗設備，再架設與校正實驗結果量測儀器。

4.2.1 縮小模型本體製作

首先於模型本體製作方面，月台層製作流程如下：

- 1.將鐵板（隧道地面）置放於操作平台上
- 2.將月台屏門利用角鋼固定於月台底板上
- 3.將天花板格版（鐵網）利用角鋼固定於月台屏門
- 4.將防煙垂壁固定在月台牆壁
- 5.將兩側牆壁固定在隧道地面
- 6.將月台層風管固定在月台天花板上，再將 OTE 風管利用角鋼固定於隧道。

而大廳層之製作流程為：

- 1.將鍍鋅鐵板（地板）放置在平台上
- 2.將柵欄利用 AB 膠固定在鐵板上
- 3.將兩側壓克力（牆壁）固定在鐵板
- 4.將天花板（鐵網）固定於壓克力板上
- 5.將防煙垂壁固定於天花板下方
- 6.將大廳層風管固定於天花板上

等大廳層與月台層製作完成後，再將其組合而成一典型地下車站之模型。月台層之模型照片如圖 4-1 所示，而大廳層之模型照片，如圖 4-2 所示。

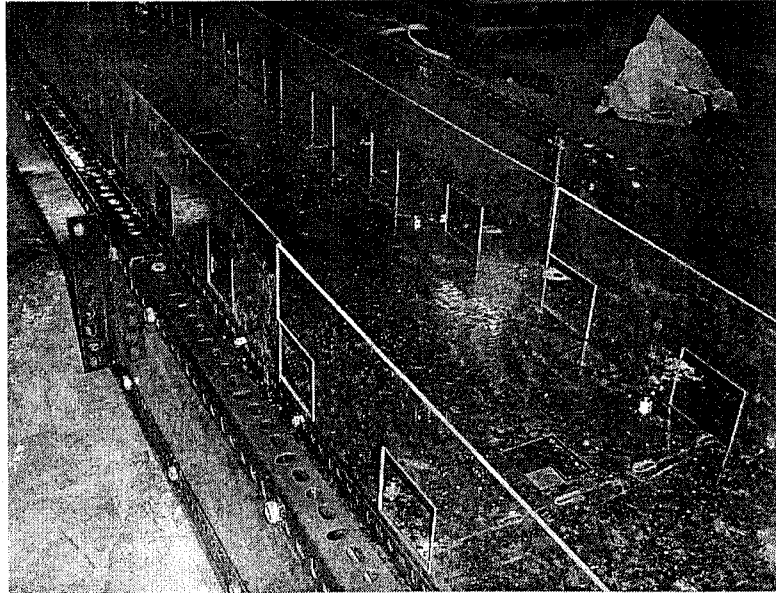


圖 4-1 月台層之模型照片

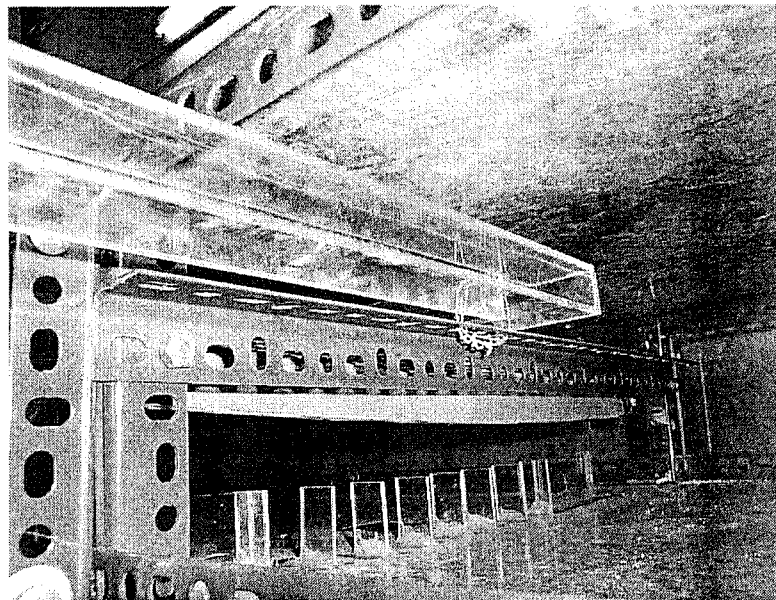


圖 4-2 大廳層之模型照片

4.2.2 模型煙控系統設計

其次有關縮小模型內部之煙控系統設計方面，將分為大廳層、月台層、軌道區 OTE 系統、與隧道通風系統等，四部份進行設計。

1. 大廳層模型煙控系統設計：

原排煙量：單區兩個排煙口，排煙量 13.09CMS，其計算結果為，

$$13.09 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ l/m}^3 \times 60 \text{ s/min} = 785400 \text{ l/min}$$

$$\text{縮小模型：} 785400 / (30)^{2.5} = 159.3265 \text{ l/min}$$

排煙口大小：

原尺寸：1200mm*600mm

模型尺寸：40mm*20mm

2. 月台層模型煙控系統設計：

原排煙量：單區兩個排煙口，排煙量 8.96 CMS，其計算結果為：

$$8.96 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ l/m}^3 \times 60 \text{ s/min} = 537600 \text{ l/min}$$

$$\text{縮小模型：} 537600 / (30)^{2.5} = 109.06 \text{ l/min}$$

排煙口大小：

原尺寸：1200mm*600mm

模型尺寸：40mm*20mm

3. 軌道區模型 OTE 排煙系統設計：

原排煙量：單一排煙口排煙量為 5.42 CMS，其計算結果為：

$$5.42 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ l/m}^3 \times 60 \text{ s/min} = 325200 \text{ l/min}$$

$$\text{縮小模型：} 325200 / (30)^{2.5} = 66 \text{ l/min}$$

排煙口大小：

原尺寸：1200mm*800mm

模型尺寸：40mm*26.67 mm

4. 隧道通風排煙系統設計：

原排煙量：每側各有兩台排煙機，每台排煙量 60 CMS，其計算結果為：

$$60 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ l/m}^3 \times 60 \text{ s/min} = 3600000 \text{ l/min}$$

$$\text{縮小模型：} 3600000 / (30)^{2.5} = 730.3 \text{ l/min}$$

4.2.3 模型量測系統架設

本研究之煙控系統縮小模型試驗，其量測系統包括：可調式燃燒器系統、熱電藕束、與數據自動擷取系統。

在可調式燃燒器系統方面，如圖 4-3 所示，其中包含瓦斯筒、流量計、與燃燒器等三大部分。透過流量計的安裝，煙控系統縮小模型試驗可以藉此設備調出所欲產生的火災強度大小。

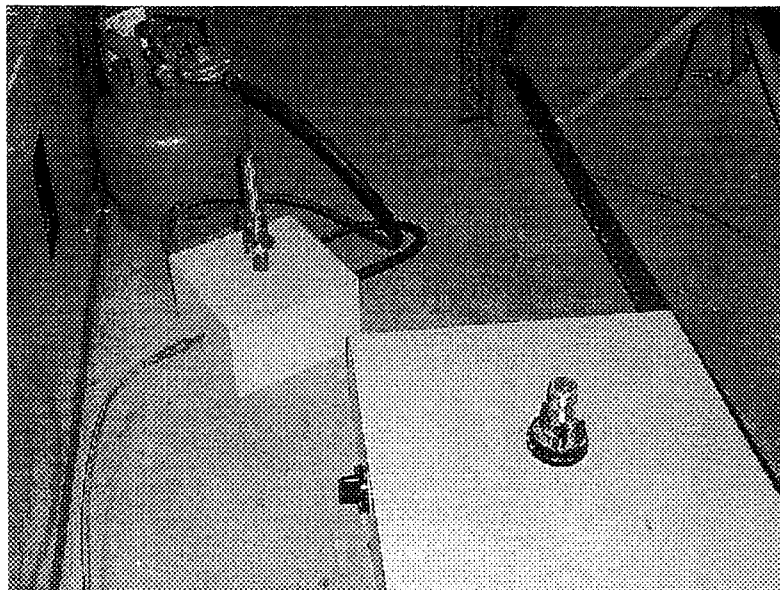


圖 4-3 可調式燃燒器系統

圖 4-4 為縮小尺度模型中，量測火場溫度之熱電藕束。此熱電藕束將分別置於縮小模型各處，包括模擬火場附近、月台屏門附近與樓梯入口附近等等。以便利用火場溫度判斷煙層之所在位置。而圖 4-5 為將所有熱電藕束與數據自動擷取系統連接，將每次試驗數據詳細記錄。

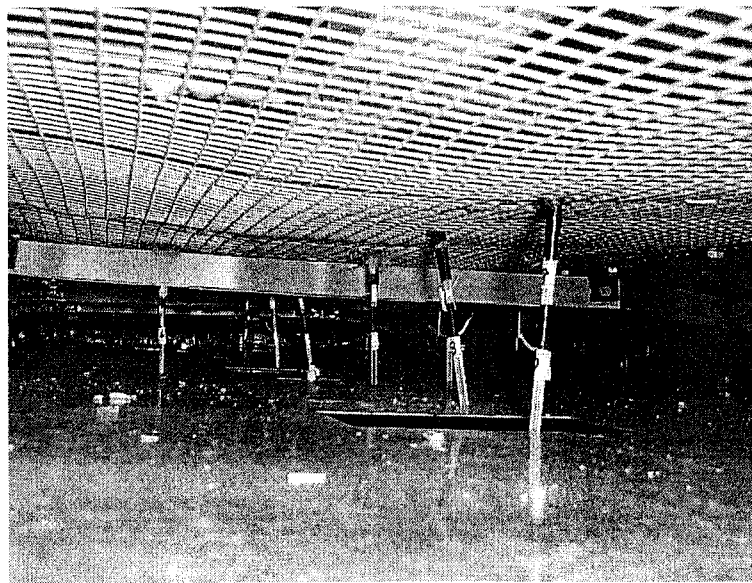


圖 4-4 量測溫度之熱電藕束

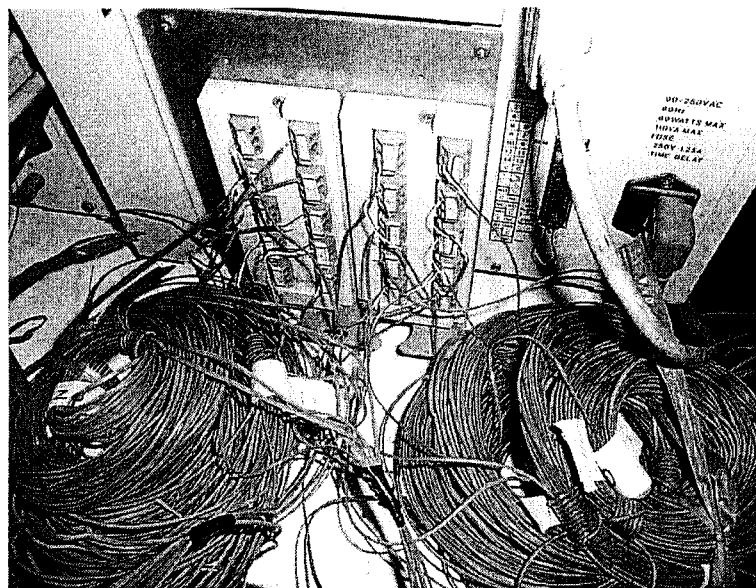


圖 4-5 熱電藕束連接數據自動擷取系統

由於本縮小模型煙控系統試驗，將分別進行數量化之溫度量測與可視化分析（Visualization Analysis），因此試驗量測設備除了前面所述之熱電藕束與數據自動擷取系統外，尚需縮小模型之可視化設備。

圖 4-6 為縮小模型試驗之可視化設備，包括雷射光束發射器及其電源供應器、與攝影器材 V8 等。如此才能清楚地藉由可視化分析煙層擴散與下降之情形。

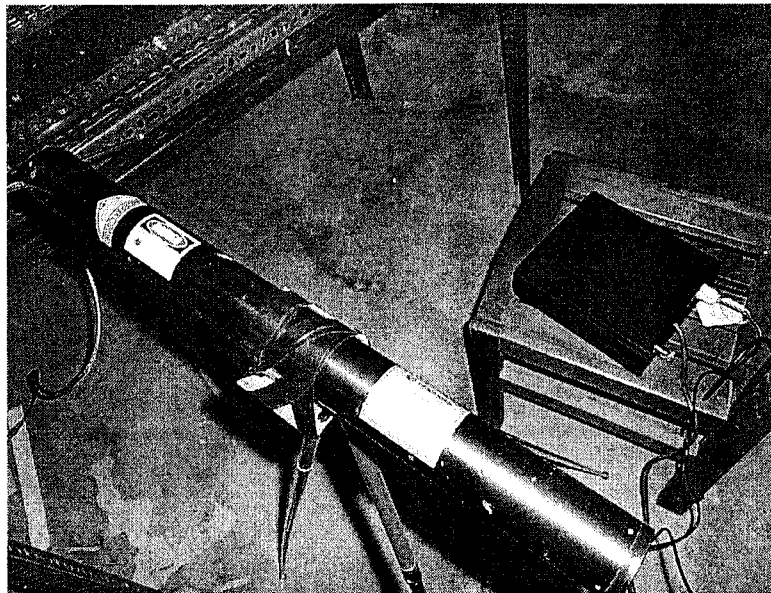


圖 4-6 縮小模型可視化設備

4.3 煙控系統縮小模型試驗結果分析

4.3.1 大廳層火災排煙系統單區排煙

本項目模型試驗首先利用流場可視化方式觀察流場之變化情形，藉以了解火災發生時之煙沉積速度，並觀察排煙系統對流場之影響。其次，利用置於模型內部之熱電藕束，量測模型大廳層火災時之火場附近溫度。此溫度量測結果可與先前之電腦模擬比較外，並可藉以判斷煙沈積高度。

首先，本項試驗進行可視化實驗，其全部過程已詳細拍攝於錄影帶中，如圖 4-7 所示，以提供分析流場與煙沈積速度。其次，將進行本項試驗之火場溫度量測，模型內之熱電藕束擺設位置，如圖 4-8 所示。



圖 4-7 可視化實驗情形

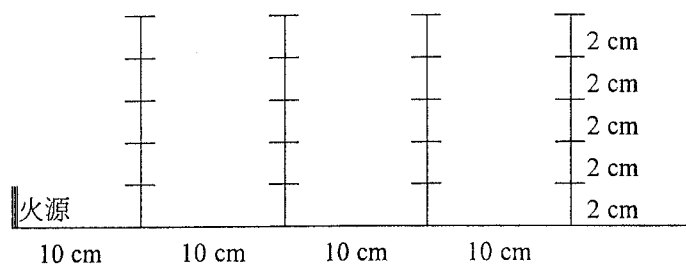


圖 4-8 大廳層火災時，模型內之熱電藕束擺設位置示意圖

經可視化實驗結果觀察得知，當縮小模型大廳層發生火災，且只單區之排煙系統啟動後，濃煙被局限在火場開區之防煙區劃內，並未流出開防煙區劃外之區域。此定性之結果，與前述之電腦模擬結果比較，模型試驗之結果相當吻合。

再經熱電藕量測溫度結果顯示，如圖 4-9 至圖 4-12，分別表示縮小模型內距離火源 10 公分、20 公分、30 公分、與 40 公分之溫度量測結果。其氣流最高溫度發生於離火場 10 公分處且離模型地面 10 公分之熱電藕，其值約為 87 °C。

其次，可藉由氣流溫度，來判斷當時之煙層溫度。於模型火場燃燒後轉換成實際時間為 180 秒、300 秒、與 360 秒，其各熱電藕量測值分別列於圖 4-13 至圖 4-15。由圖中可知，煙層底部約位於離模型地面 6 公分~8 公分之間，其結果與電腦模擬結果比較相當吻合。

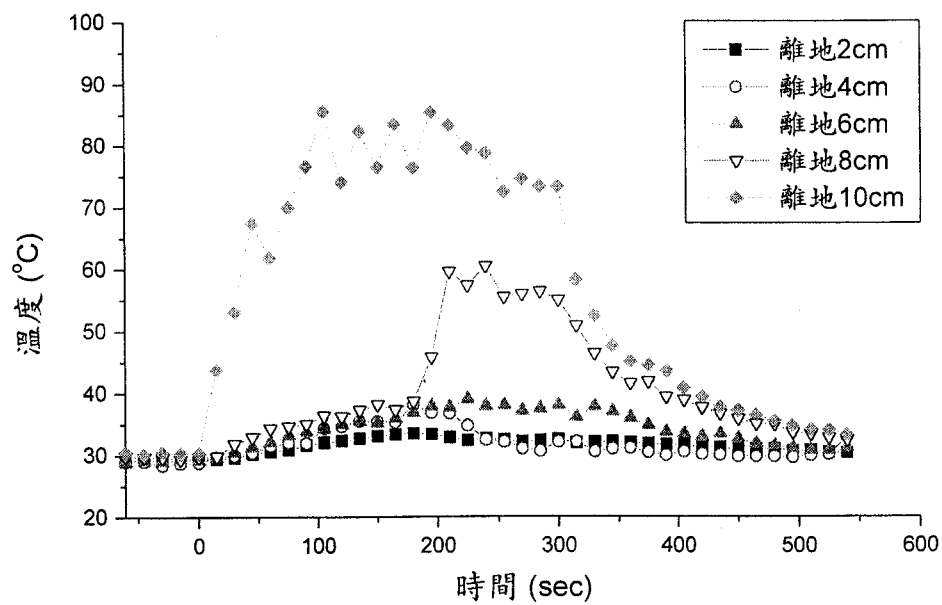


圖 4-9 大廳層火災單區排煙，距離火源 10 公分處之熱電偶束量測結果

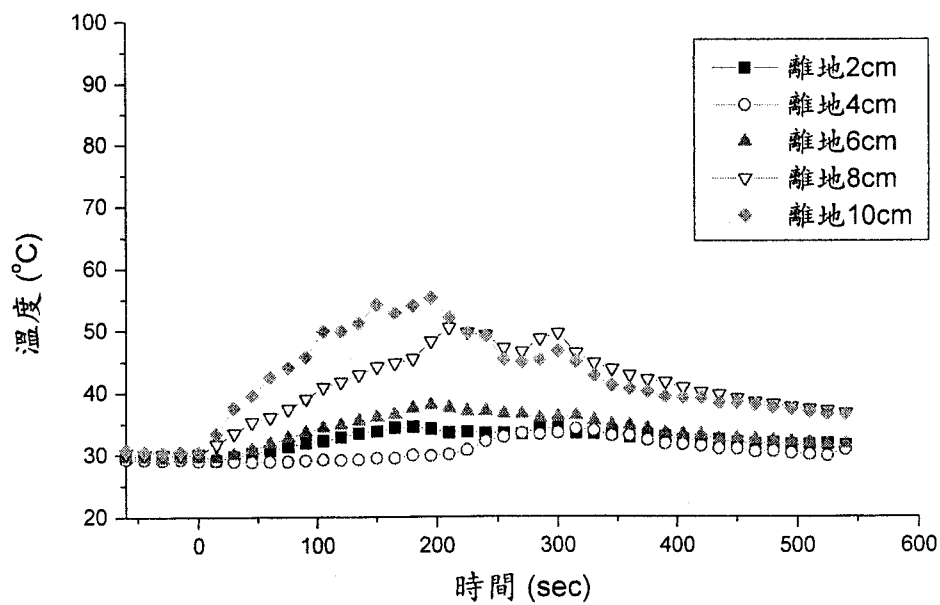


圖 4-10 大廳層火災單區排煙，距離火源 20 公分處之熱電偶束量測結果

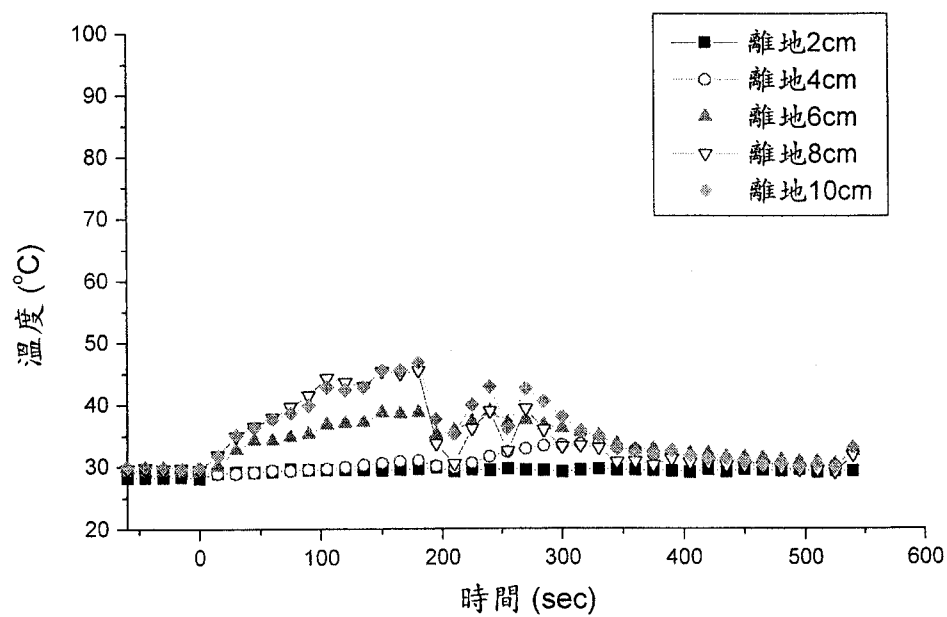


圖 4-11 大廳層火災單區排煙，距離火源 30 公分處之熱電偶束量測結果

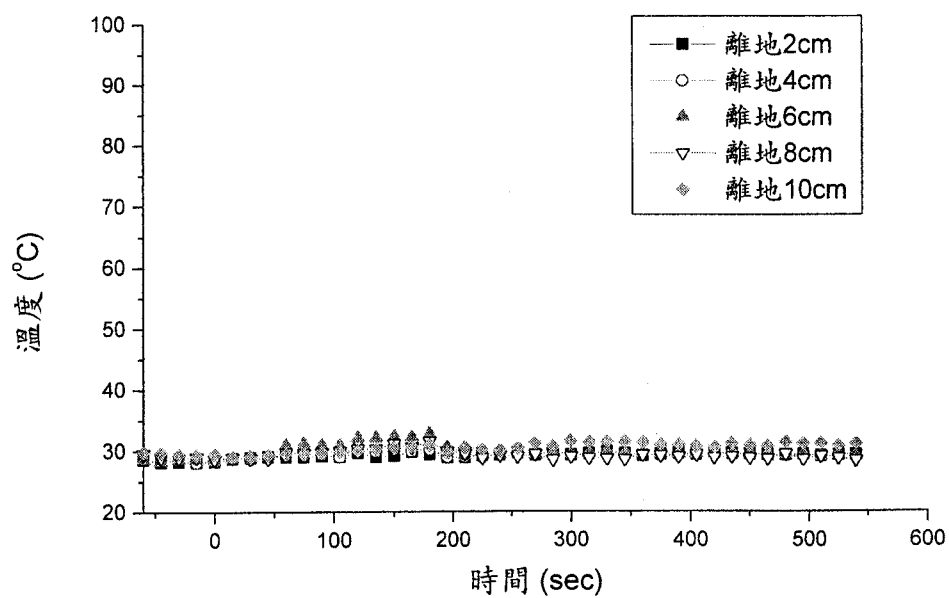


圖 4-12 大廳層火災單區排煙，距離火源 40 公分處之熱電偶束量測結果

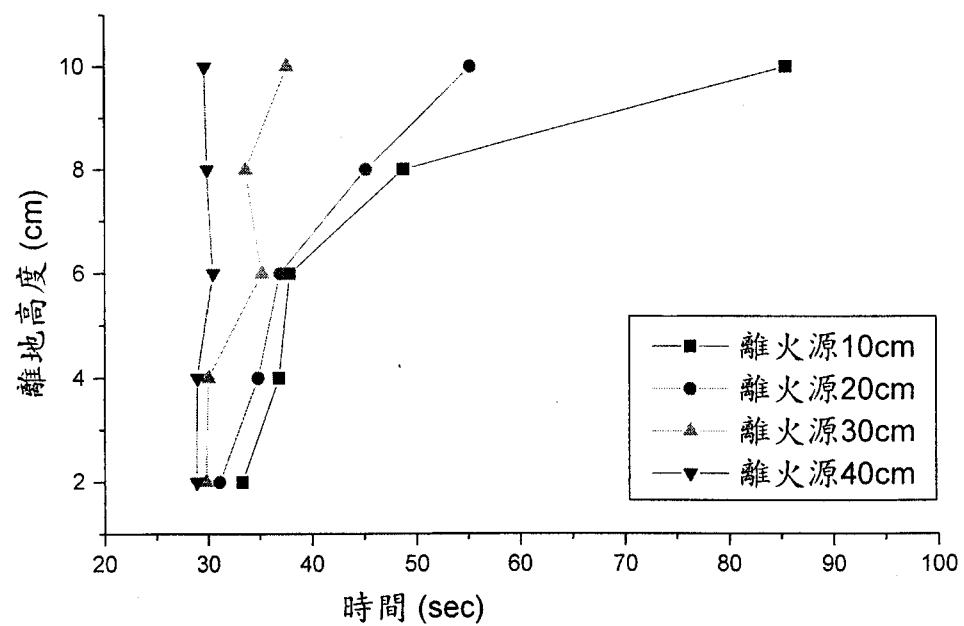


圖 4-13 大廳層燃燒 180 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

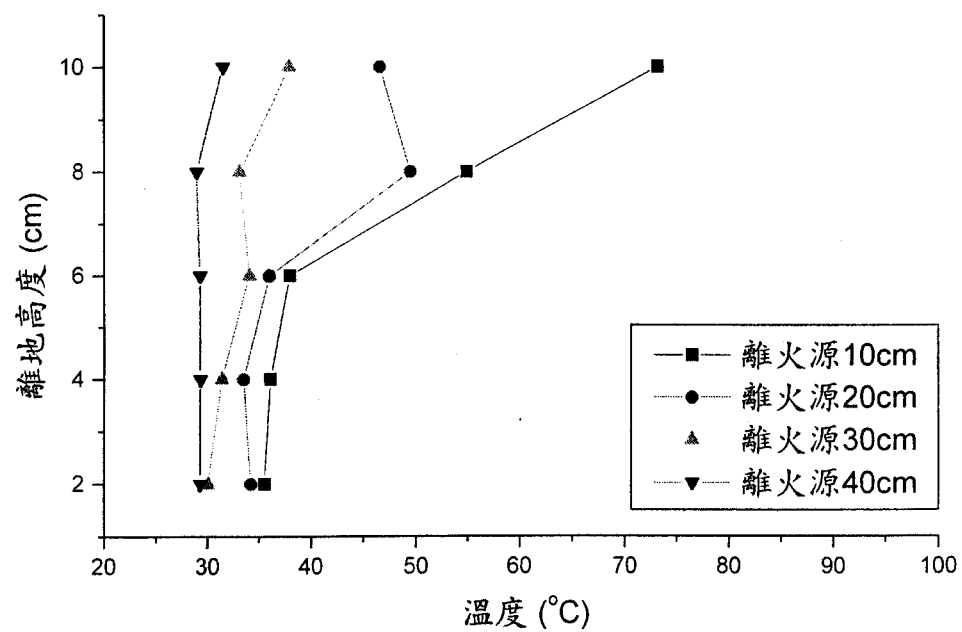


圖 4-14 大廳層燃燒 300 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

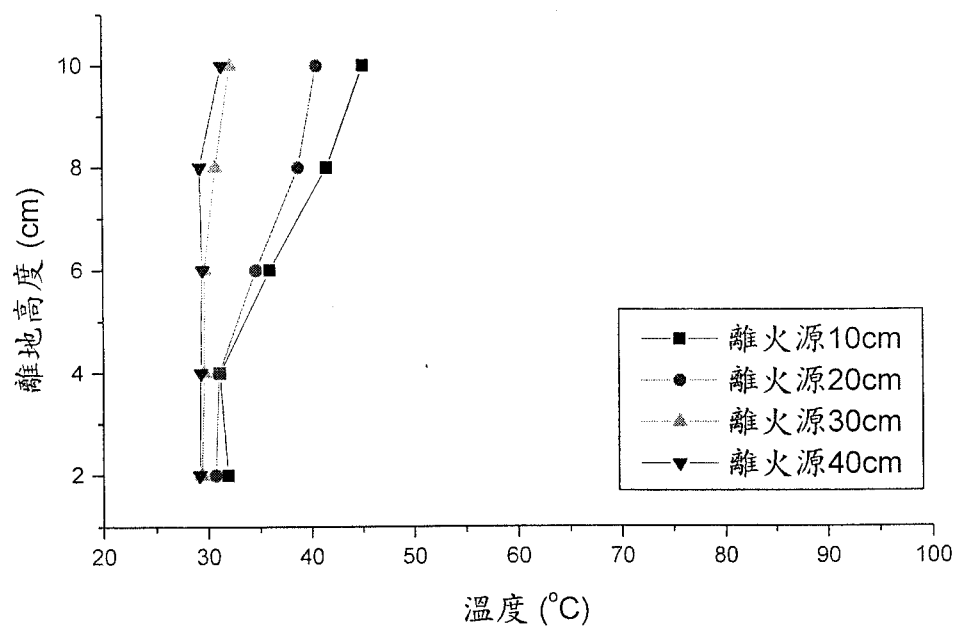


圖 4-15 大廳層燃燒 360 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

4.3.2 大廳層火災排煙系統雙區排煙

首先，本項試驗進行可視化實驗，其全部過程已詳細拍攝於錄影帶中，如圖 4-16 所示，以提供分析流場與煙沈積速度。

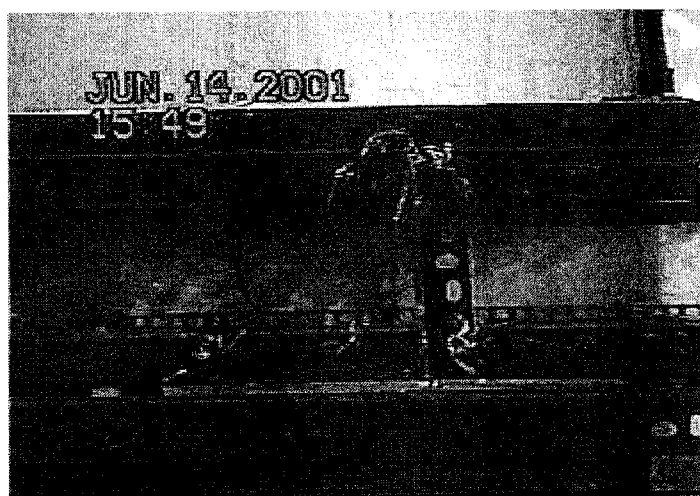


圖 4-16 大廳層火災排煙系統雙區排煙實驗情形

再經熱電藕量測溫度結果顯示，如圖 4-17 至圖 4-20，分別表示縮小模型內距離火源 10 公分、20 公分、30 公分、與 40 公分之溫度量測結果。其氣流最高溫度發生於離火場 10 公分處且離模型地面 10 公分之熱電耦，其值約為 91 °C。

其次，可藉由氣流溫度，來判斷當時之煙層溫度。於模型火場燃燒後轉換成實際時間 180 秒、300 秒、與 360 秒，其各熱電藕量測值分別列於圖 4-21 至圖 4-23。由圖中可知，煙層底部約位於離模型地面 6 公分。

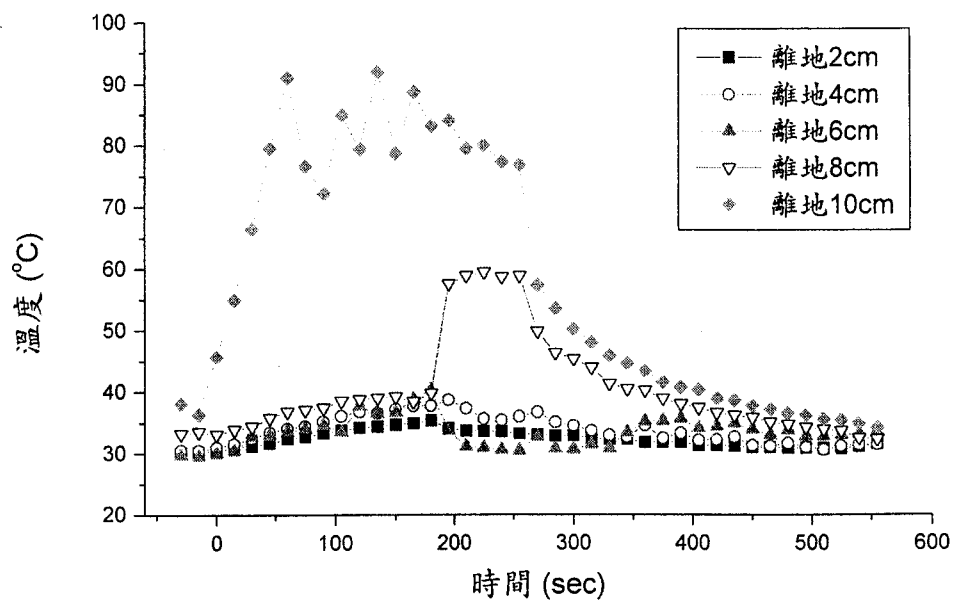


圖 4-17 大廳層火災雙區排煙，距離火源 10 公分處之熱電偶束量測結果

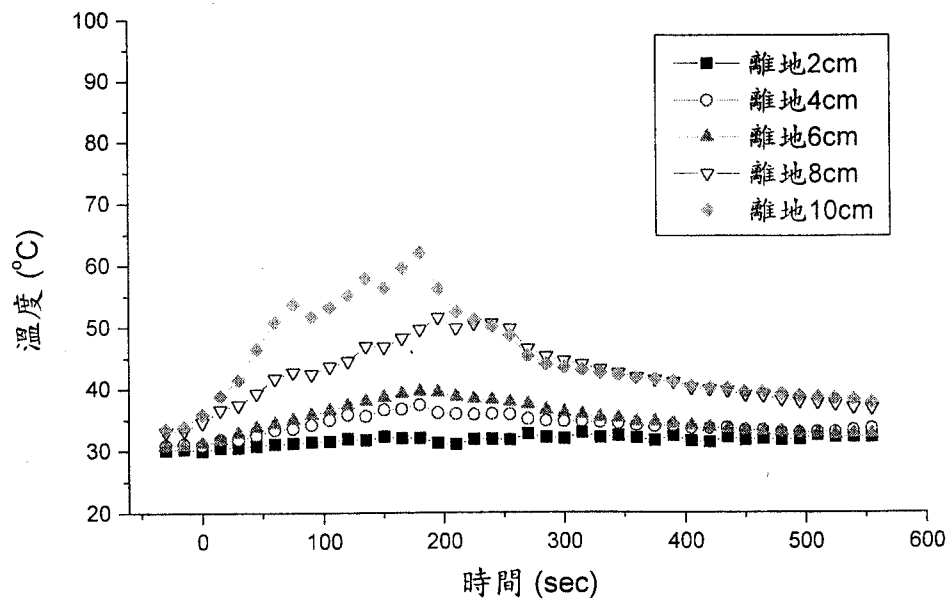


圖 4-18 大廳層火災雙區排煙，距離火源 20 公分處之熱電偶束量測結果

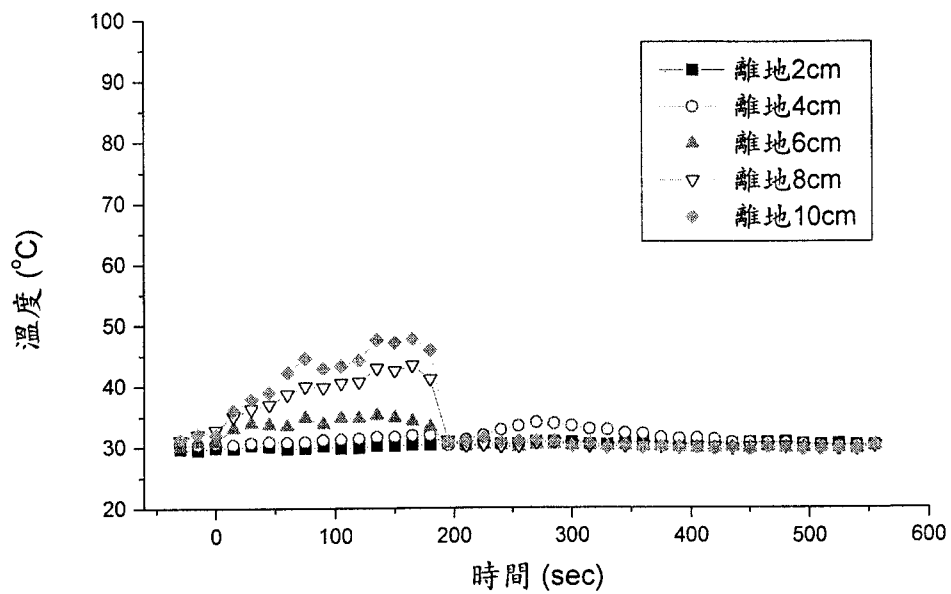


圖 4-19 大廳層火災雙區排煙，距離火源 30 公分處之熱電偶束量測結果

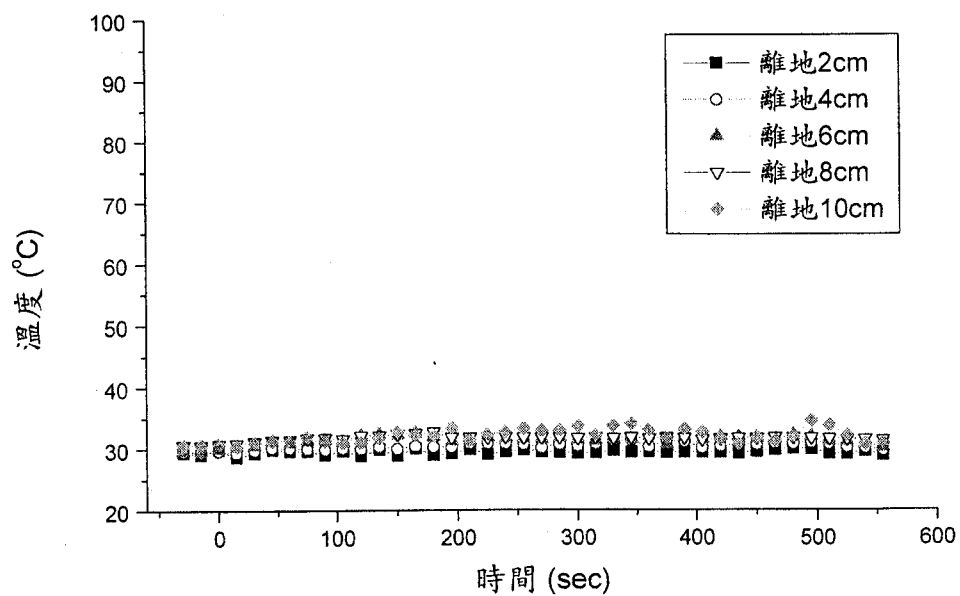


圖 4-20 大廳層火災雙區排煙，距離火源 40 公分處之熱電偶束量測結果

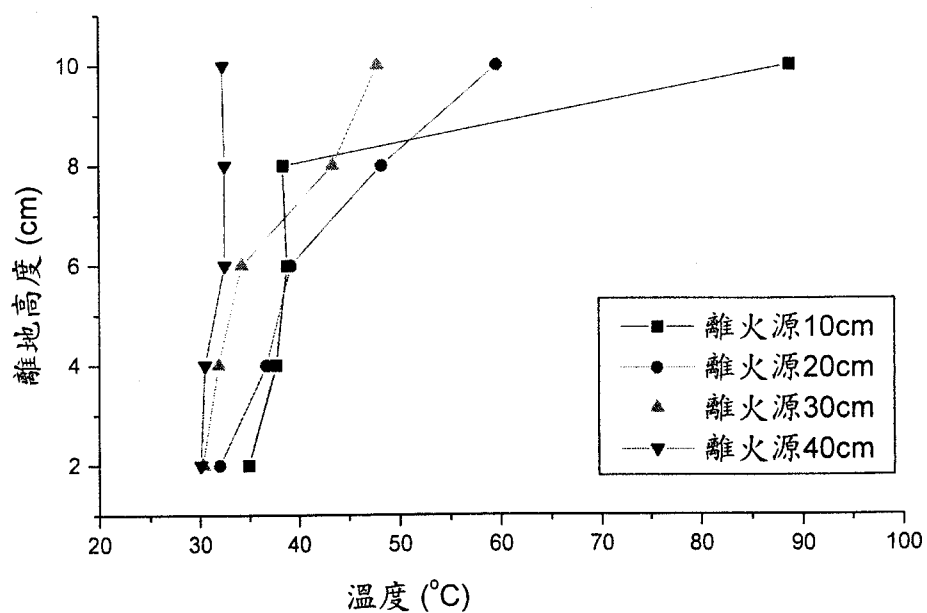


圖 4-21 大廳層燃燒 180 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

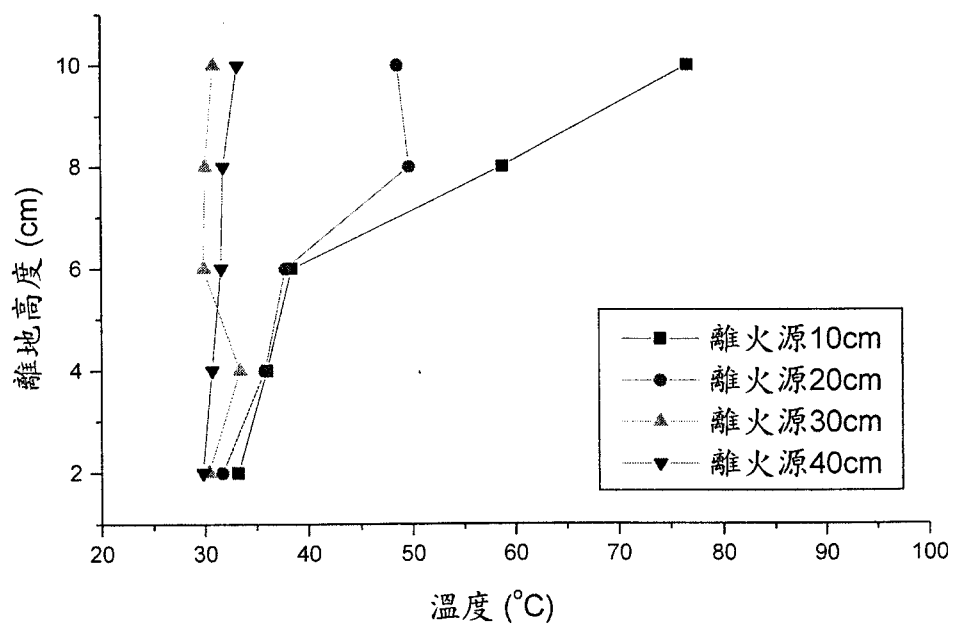


圖 4-22 大廳層燃燒 300 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

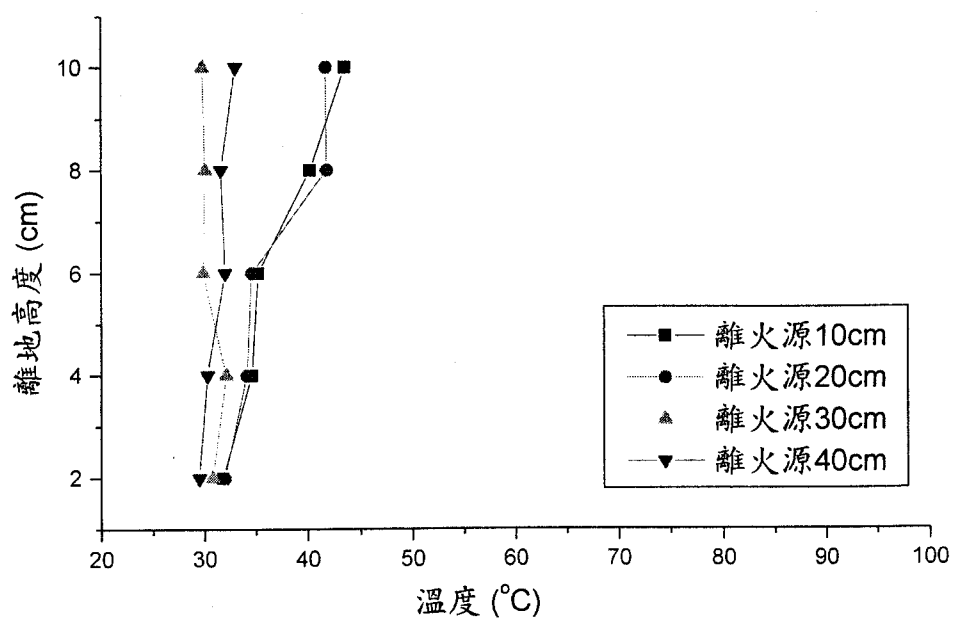


圖 4-23 大廳層燃燒 360 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

4.3.3 月台層火災排煙系統單區排煙

本項目模型試驗首先利用流場可視化方式觀察流場之變化情形，藉以了解火災發生時之煙沉積速度，並觀察排煙系統對流場之影響。其次，利用置於模型內部之熱電藕束，量測模型月台層火災時之火場附近溫度。此溫度量測結果可與先前之電腦模擬比較外，並可藉以判斷煙沈積高度。

首先，本項試驗進行可視化實驗，其全部過程已詳細拍攝於錄影帶中，如圖 4-24 所示，以提供分析流場與煙沈積速度。其次，將進行本項試驗之火場溫度量測，模型內之熱電藕束擺設位置，如圖 4-25 所示。

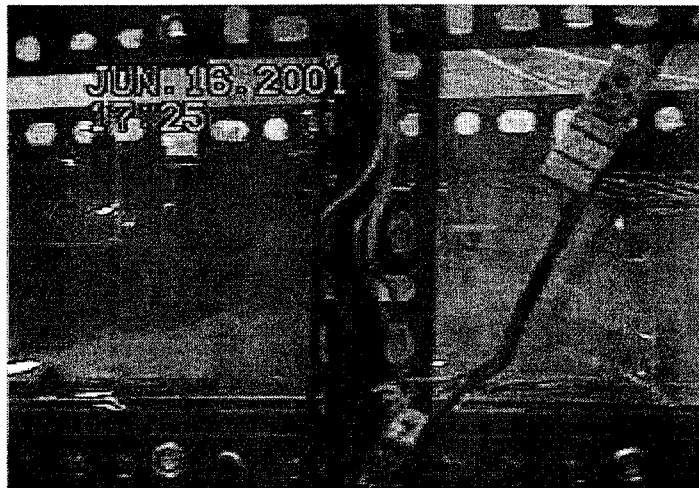


圖 4-24 月台層火災排煙系統單區排煙實驗情形

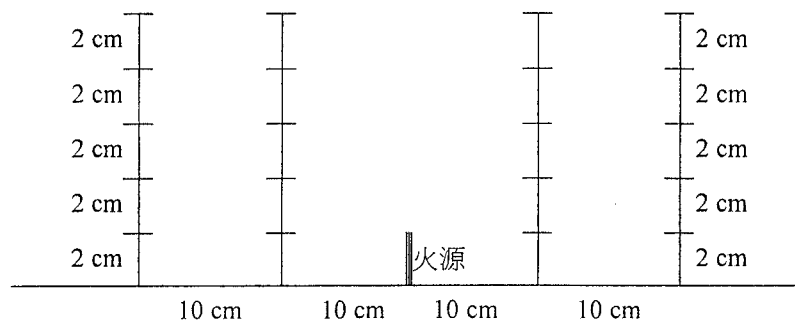


圖 4-25 月台層火災時，模型內之熱電藕束擺設位置示意圖

經可視化實驗結果觀察得知，當縮小模型月台層發生火災，且只單區之排煙系統啟動後，濃煙被局限在火場開區之防煙區劃內，並未流出開防煙區劃外之區域。此定性之結果，與前述之電腦模擬結果比較，模型試驗之結果相當吻合。

再經熱電藕量測溫度結果顯示，如圖 4-26 至圖 4-29，分別表示縮小模型內距離火源 10 公分、20 公分、30 公分、與 40 公分之溫度量測結果。其氣流最高溫度發生於離火場 10 公分處且離模型地面 10 公分之熱電藕，其值約為 103 °C。與前述之電腦模擬結果案例五比較，其氣流溫度約為 96.89 °C，模型試驗之結果相當接近。

其次，可藉由氣流溫度，來判斷當時之煙層溫度。於模型火場燃燒後轉換成實際時間 180 秒、300 秒、360 秒、與 480 秒，其各熱電藕量測值分別列於圖 4-30 至圖 4-33。由圖中可知，煙層底部約位於離模型地面 6 公分之間。

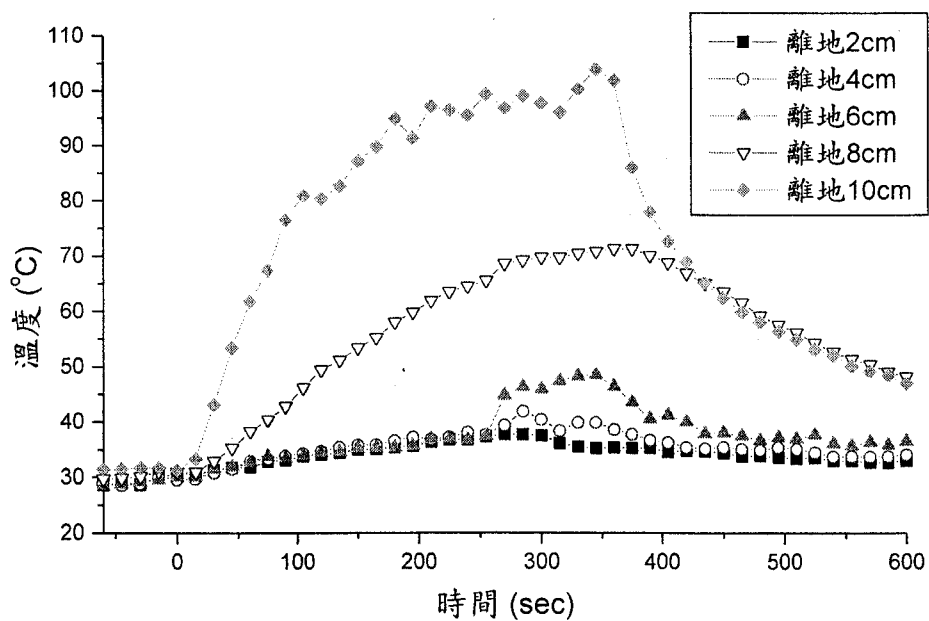


圖 4-26 月台層火災單區排煙，距離火源左側 10 公分處熱電偶束量測結果

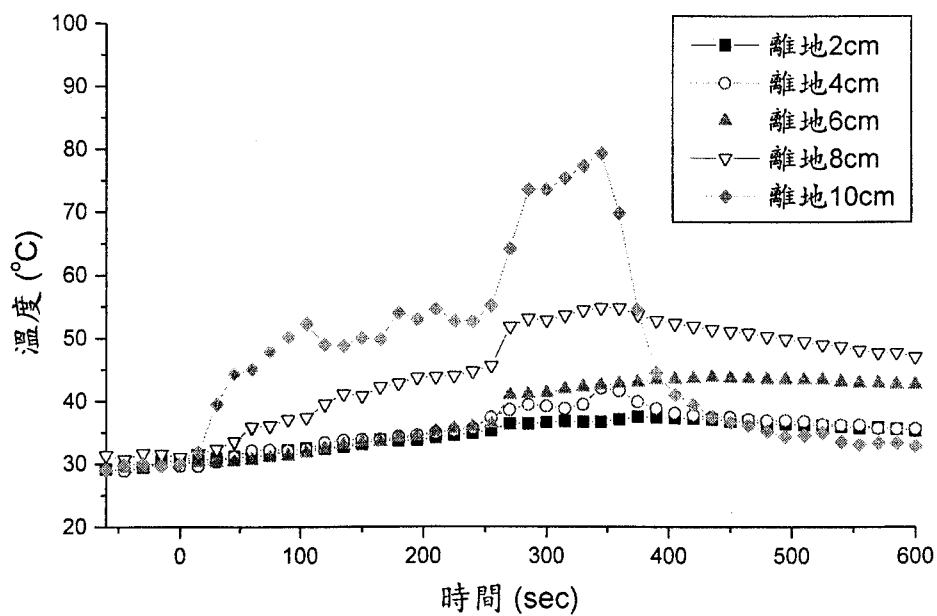


圖 4-27 月台層火災單區排煙，距離火源左側 30 公分處熱電偶束量測結果

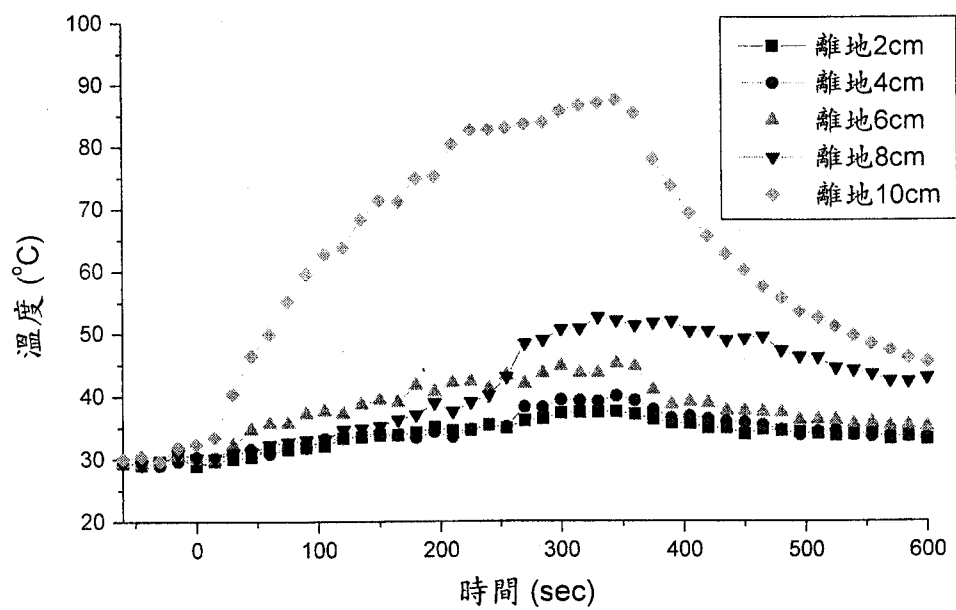


圖 4-28 月台層火災單區排煙，距離火源右側 10 公分處熱電偶束量測結果

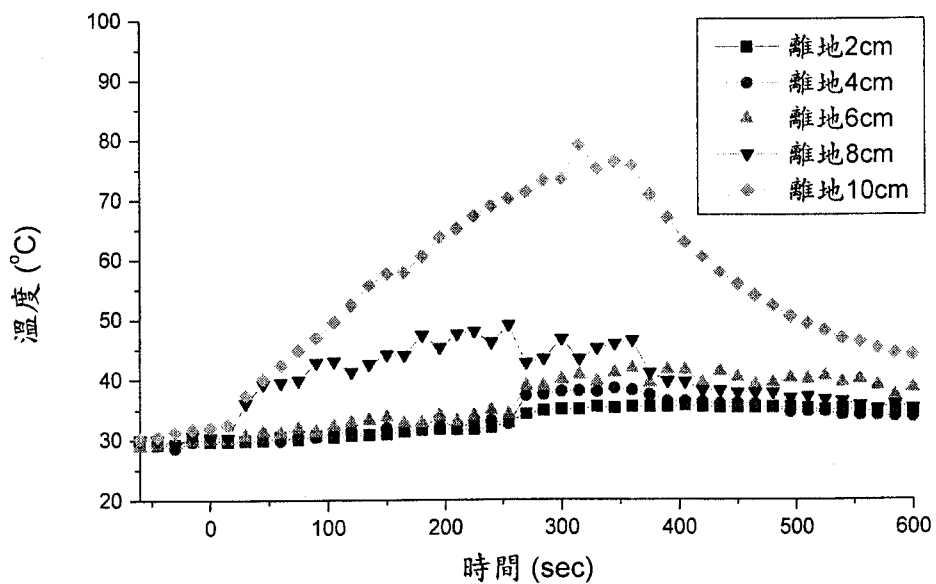


圖 4-29 月台層火災單區排煙，距離火源右側 30 公分處熱電偶束量測結果

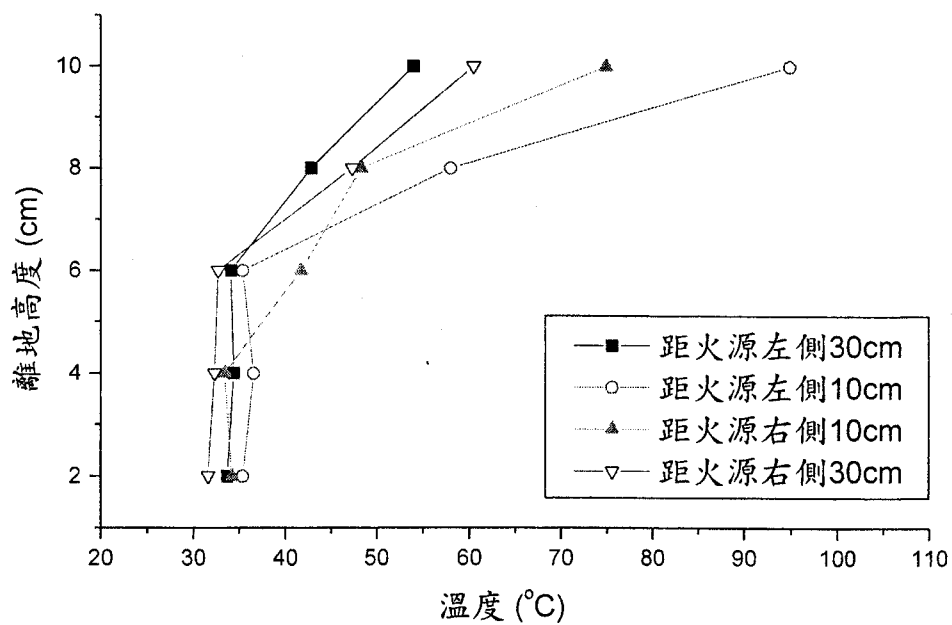


圖 4-30 月台層燃燒 180 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

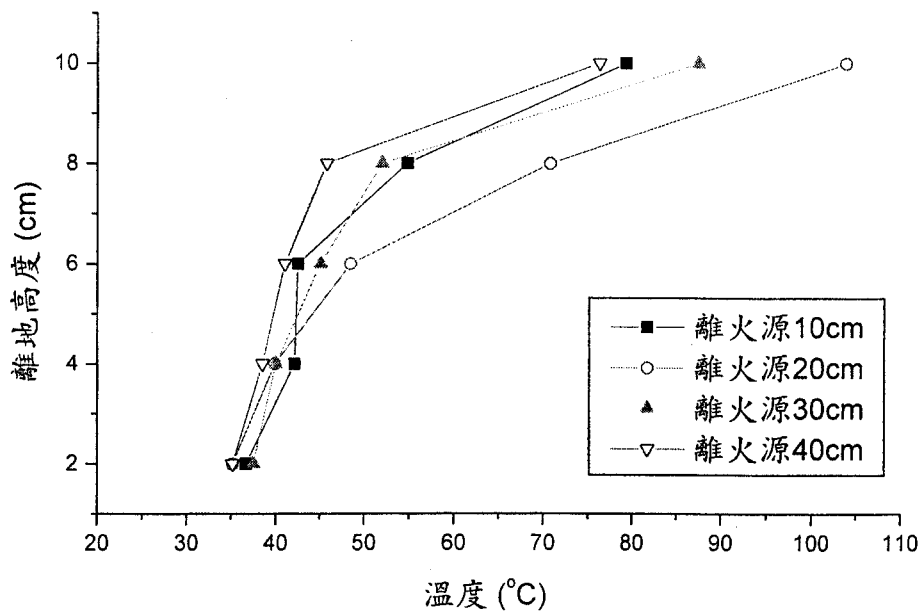


圖 4-31 月台層燃燒 300 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

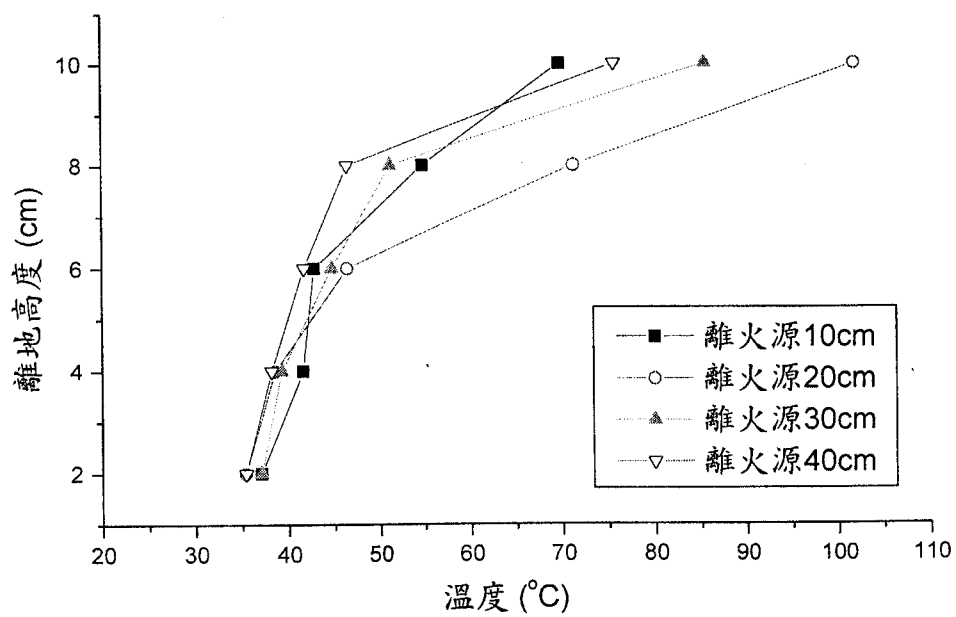


圖 4-32 月台層燃燒 360 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

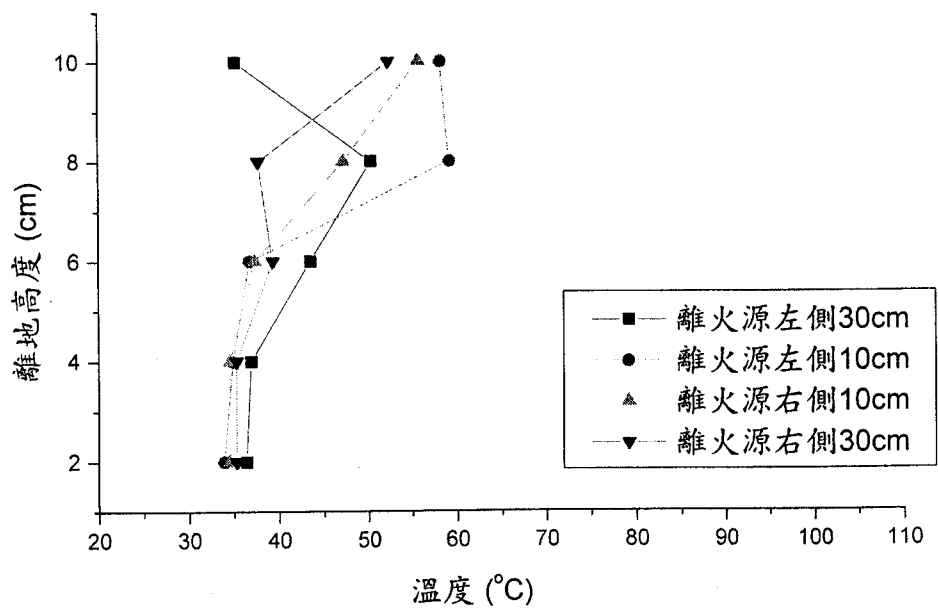


圖 4-33 月台層燃燒 480 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

4.3.4 月台層火災排煙系統雙區排煙

本項目模型試驗首先利用流場可視化方式觀察流場之變化情形，藉以了解火災發生時之煙沉積速度，並觀察排煙系統對流場之影響。其次，利用置於模型內部之熱電藕束，量測模型月台層火災時之火場附近溫度。此溫度量測結果可與先前之電腦模擬比較外，並可藉以判斷煙沈積高度。

首先，本項試驗進行可視化實驗，其全部過程已詳細拍攝於錄影帶中，如圖 4-34 所示，以提供分析流場與煙沈積速度。

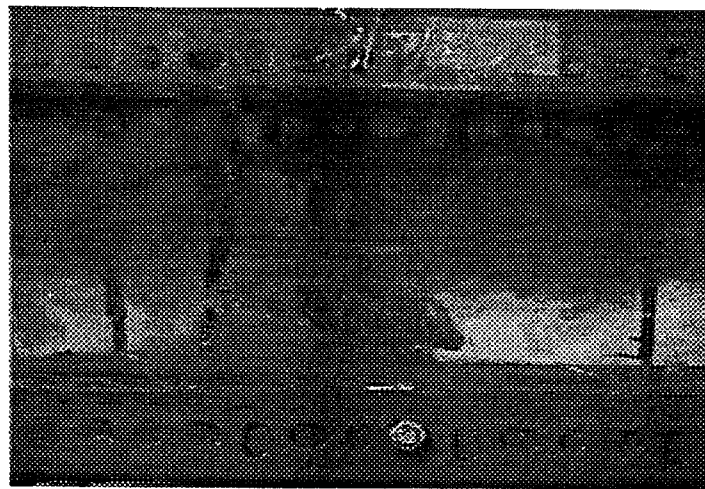


圖 4-34 月台層火災排煙系統雙區排煙實驗情形

再經熱電藕量測溫度結果顯示，如圖 4-35 至圖 4-38，分別表示縮小模型內距離火源 10 公分、20 公分、30 公分、與 40 公分之溫度量測結果。其氣流最高溫度發生於離火場 10 公分處且離模型地面 10 公分之熱電藕，其值約為 105 °C。

其次，可藉由氣流溫度，來判斷當時之煙層溫度。於模型火場燃燒後轉換成實際時間 180 秒、300 秒、360 秒、與 480 秒，其各熱電藕量測值分別列於圖 4-39 至圖 4-42。由圖中可知，煙層底部約位於離模型地面 6 公分之間，其結果與電腦模擬結果比較相當吻合。

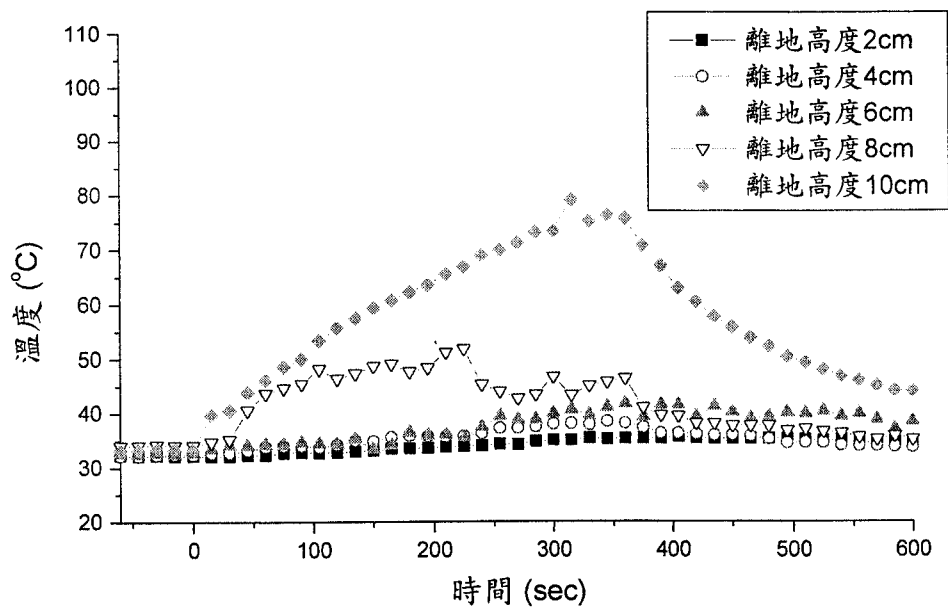


圖 4-35 月台層火災雙區排煙，距離火源左側 10 公分處熱電偶束量測結果

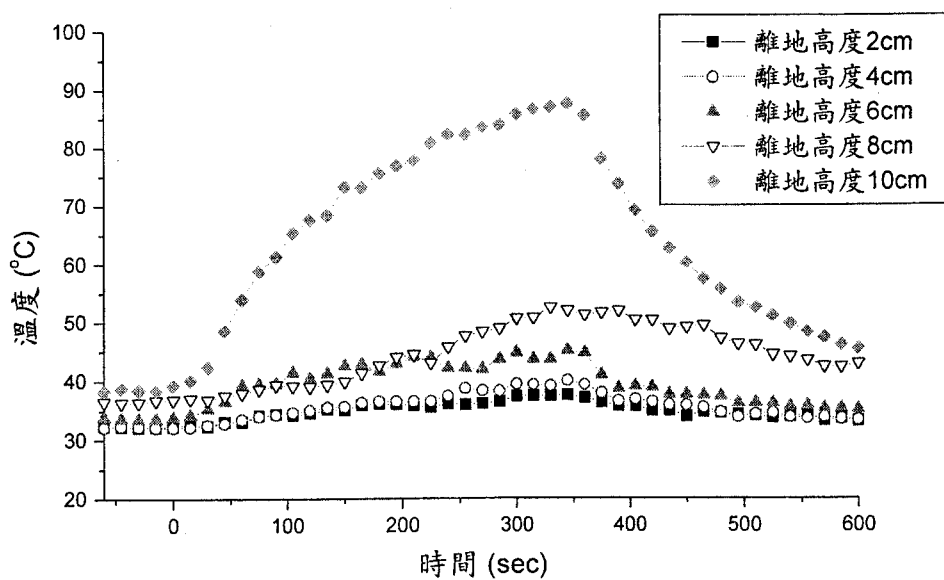


圖 4-36 月台層火災雙區排煙，距離火源左側 30 公分處熱電偶束量測結果

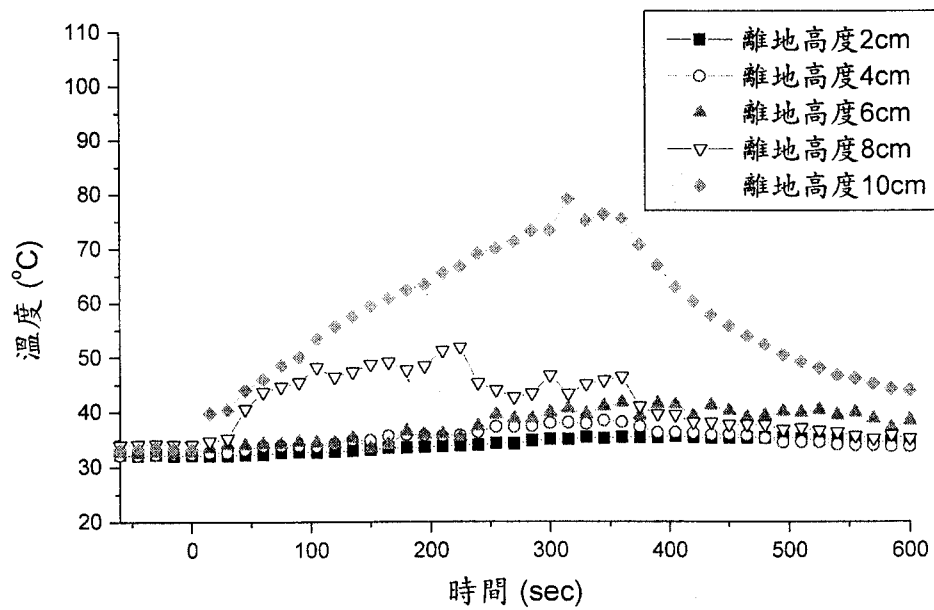


圖 4-37 月台層火災雙區排煙，距離火源右側 10 公分處熱電偶束量測結果

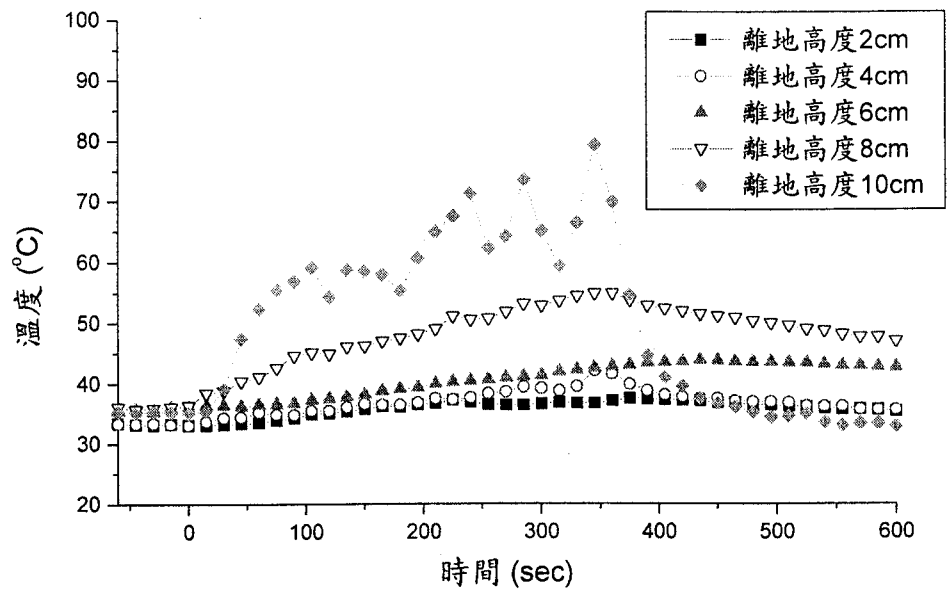


圖 4-38 月台層火災雙區排煙，距離火源右側 30 公分處熱電偶束量測結果

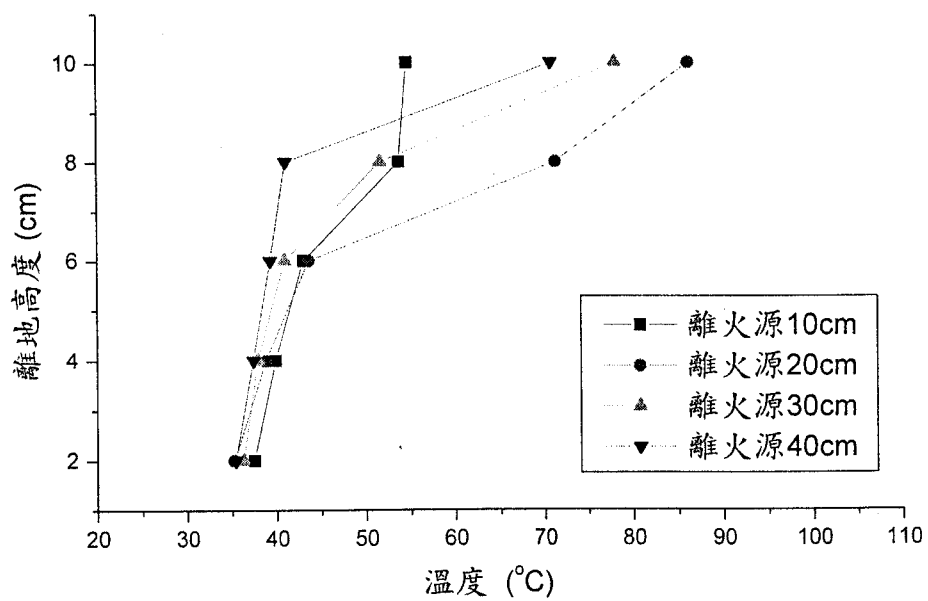


圖 4-39 月台層燃燒 180 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

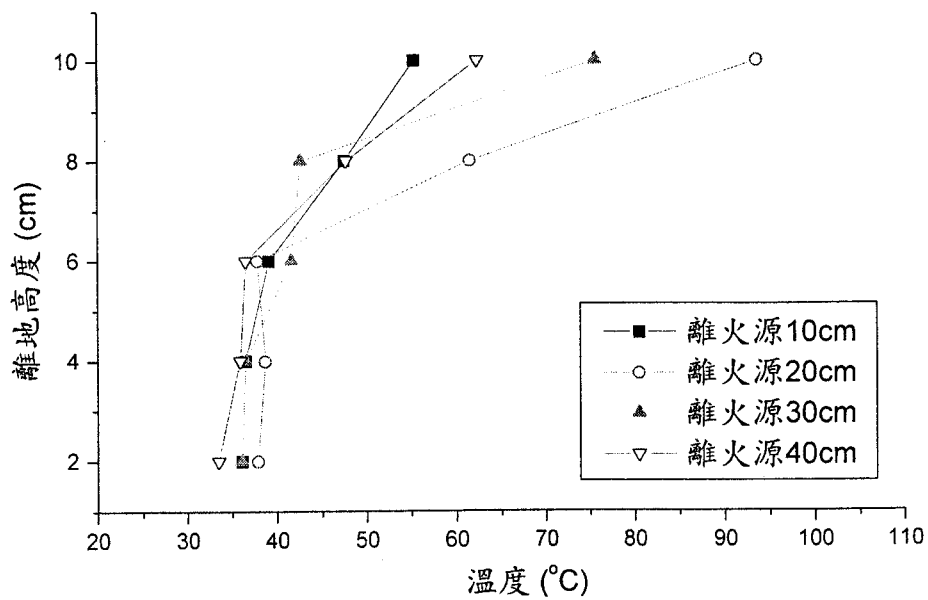


圖 4-40 月台層燃燒 300 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

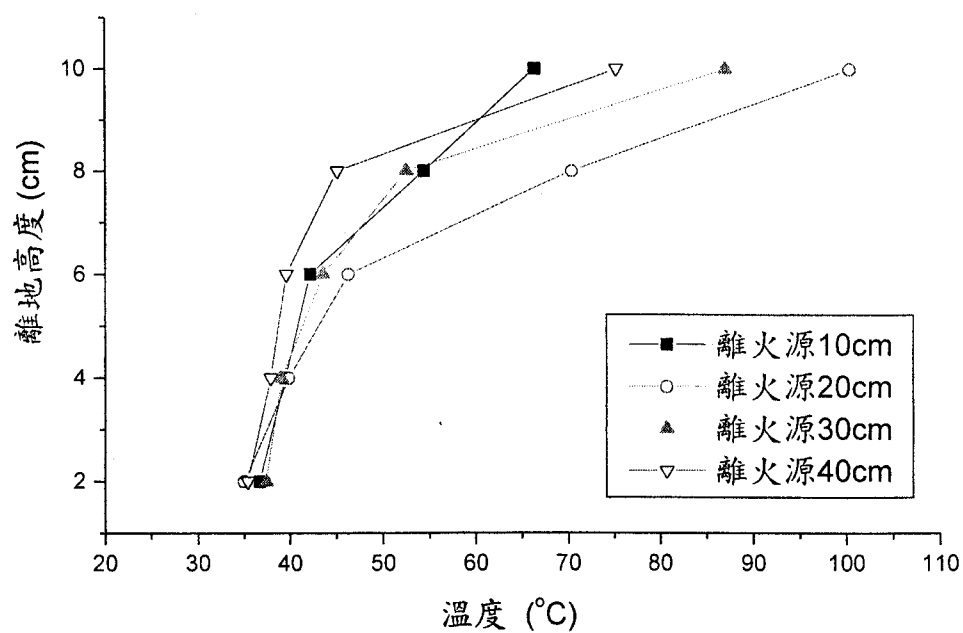


圖 4-41 月台層燃燒 360 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

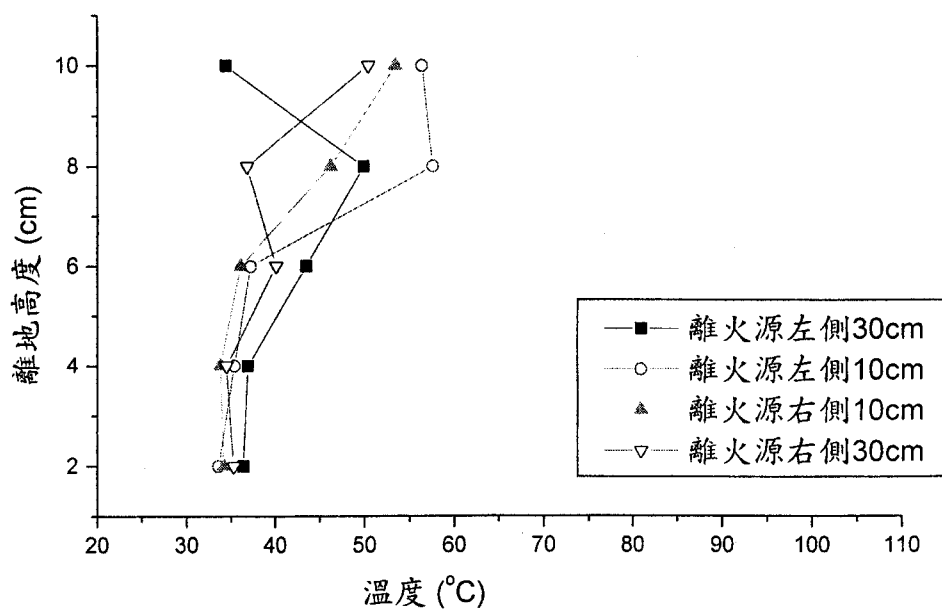


圖 4-42 月台層燃燒 480 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

4.3.5 月台層軌道區火災隧道通風機雙邊排煙 (Pull-only)

本項目模型試驗利用置於模型內部之熱電偶束，量測模型月台層軌道區火災時之火場附近溫度。本試驗於火災發生後 240 秒時啟動月台兩側隧道通風機 (TVF) 進行排煙，並模擬月台有列車停留但月台屏門並未開啓之情況。圖 4-43 為月台層軌道區，模型內之列車與熱電偶束擺設位置示意圖，圖 4-44 為月台層軌道區火災時，模型內之熱電偶束擺設位置示意圖。

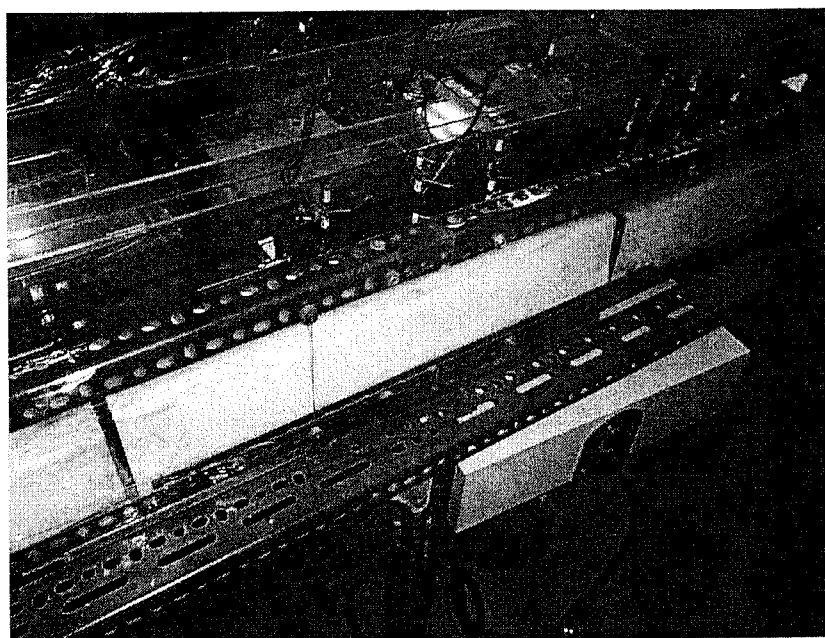


圖 4-43 月台層軌道區，模型內之列車與熱電偶束擺設位置示意圖

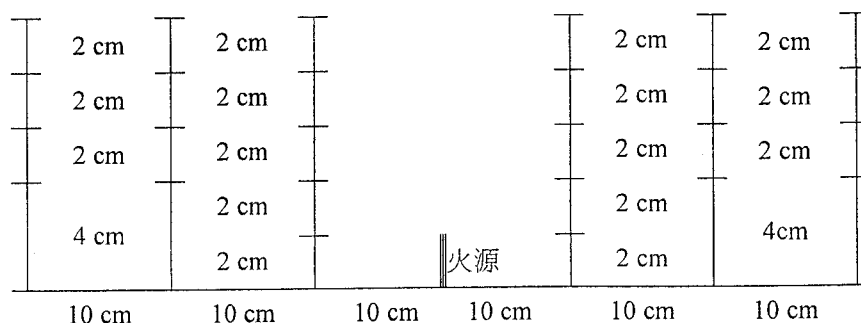


圖 4-44 月台層軌道區火災時，模型內之熱電偶束擺設位置示意圖

經熱電偶量測溫度結果顯示，如圖 4-45 至圖 4-50，分別表示縮小模型內距離火源左右兩側 10 公分、20 公分、與 30 公分之溫度量測結果。其氣流最高溫度發生於離火場 10 公分處且離模型地面 10 公分之熱電偶，其值約為 104 °C。

其次，可藉由氣流溫度，來判斷當時之煙層溫度。於模型火場燃燒後轉換成實際時間 180 秒、300 秒、360 秒、與 480 秒，其各熱電偶量測值分別列於圖 4-51 至圖 4-54。由圖中可知，煙層底部約位於離模型地面 6~8 公分之間。

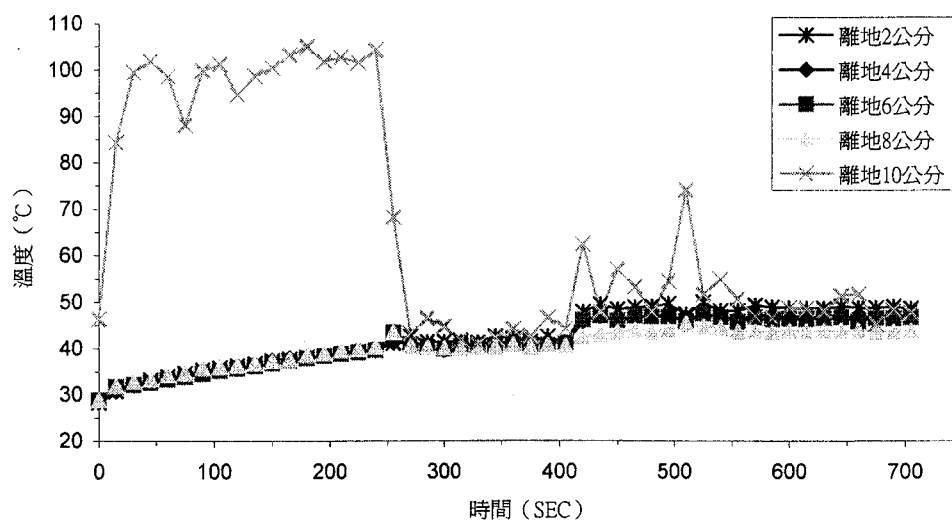


圖 4-45 月台層軌道區火災，距離火源左側 10 公分處熱電偶束量測結果

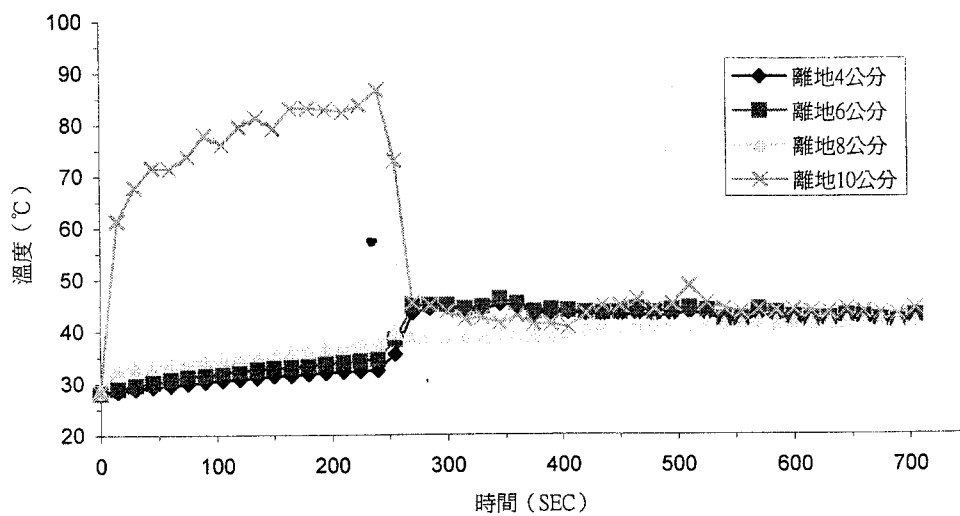


圖 4-46 月台層軌道區火災，距離火源左側 20 公分處熱電偶束量測結果

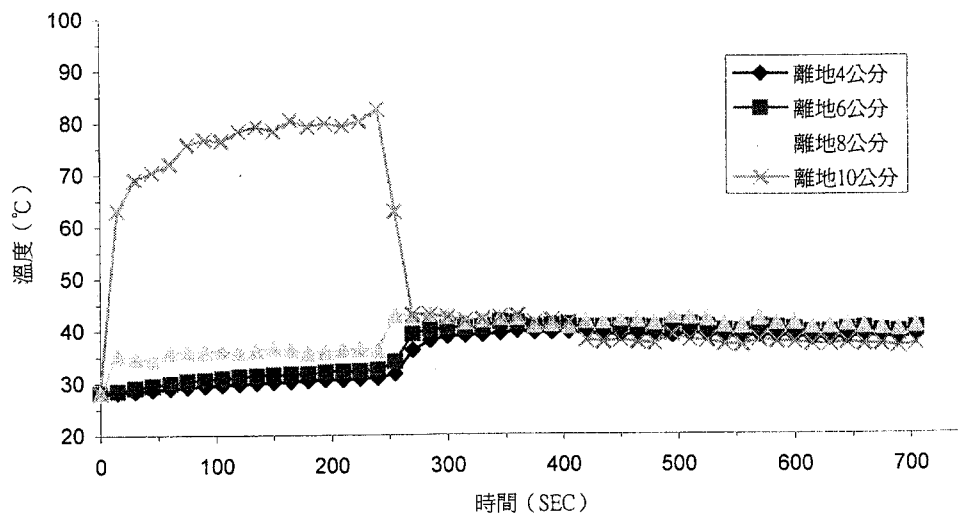


圖 4-47 月台層軌道區火災，距離火源左側 30 公分處熱電偶束量測結果

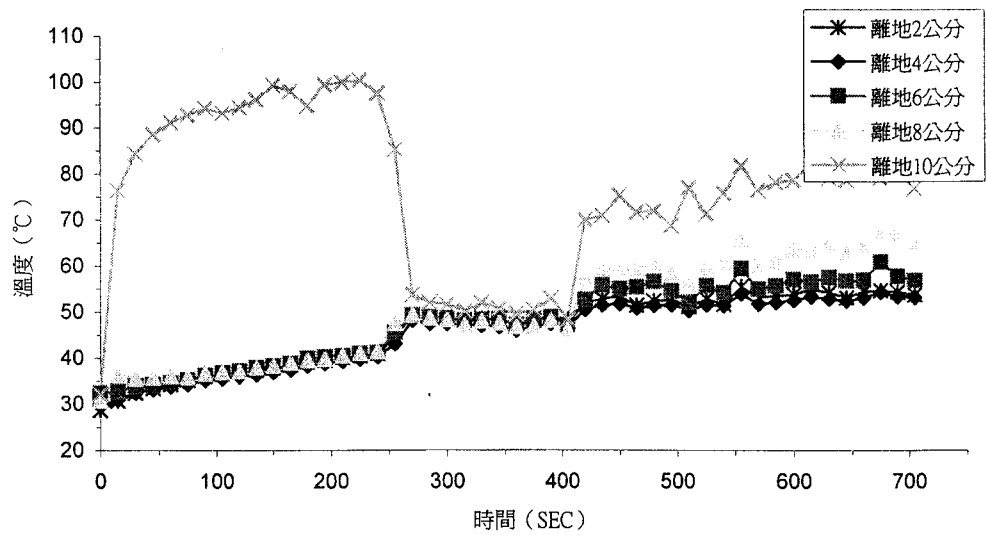


圖 4-48 月台層軌道區火災，距離火源右側 10 公分處熱電偶束量測結果

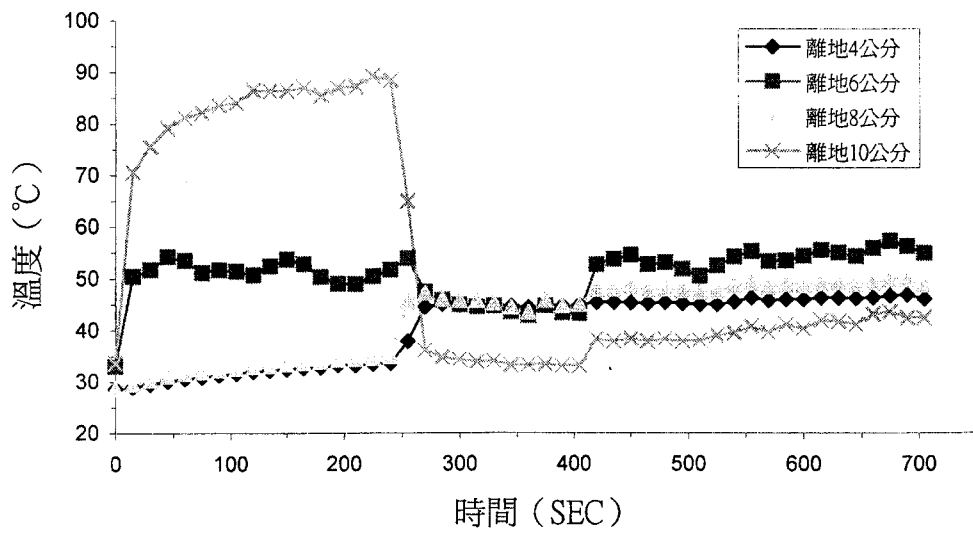


圖 4-49 月台層軌道區火災，距離火源右側 20 公分處熱電偶束量測結果

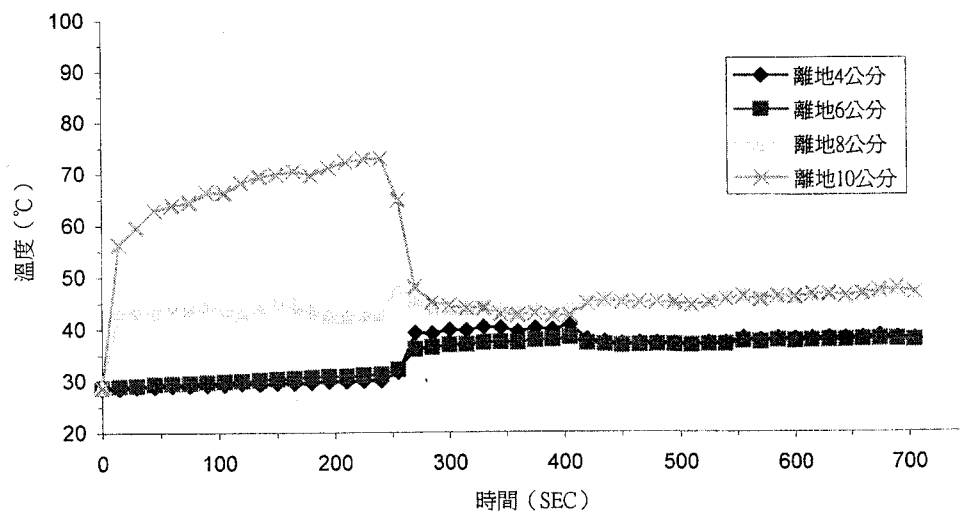


圖 4-50 月台層軌道區火災，距離火源右側 30 公分處熱電偶束量測結果

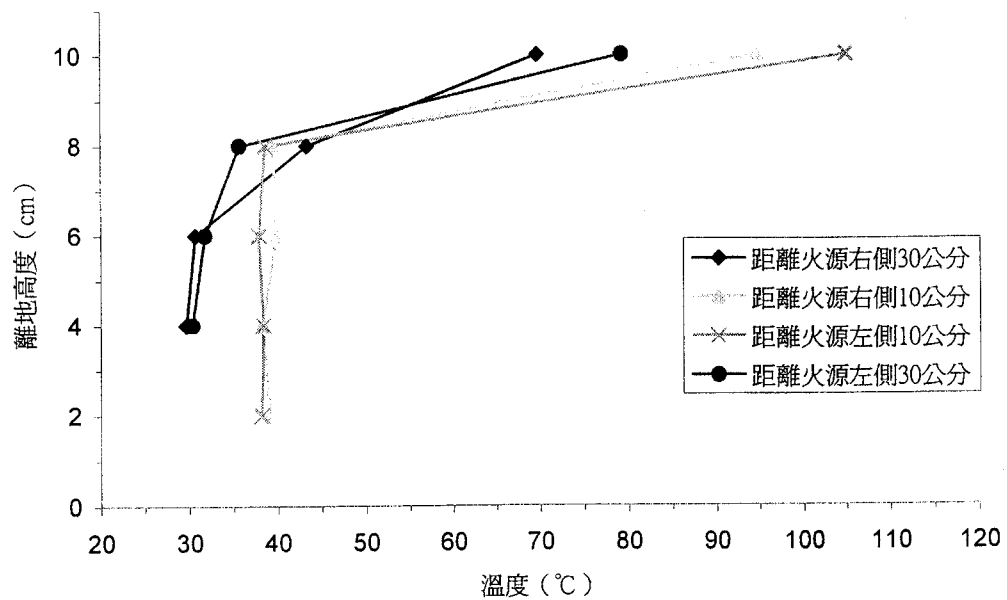


圖 4-51 月台層軌道區燃燒 180 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

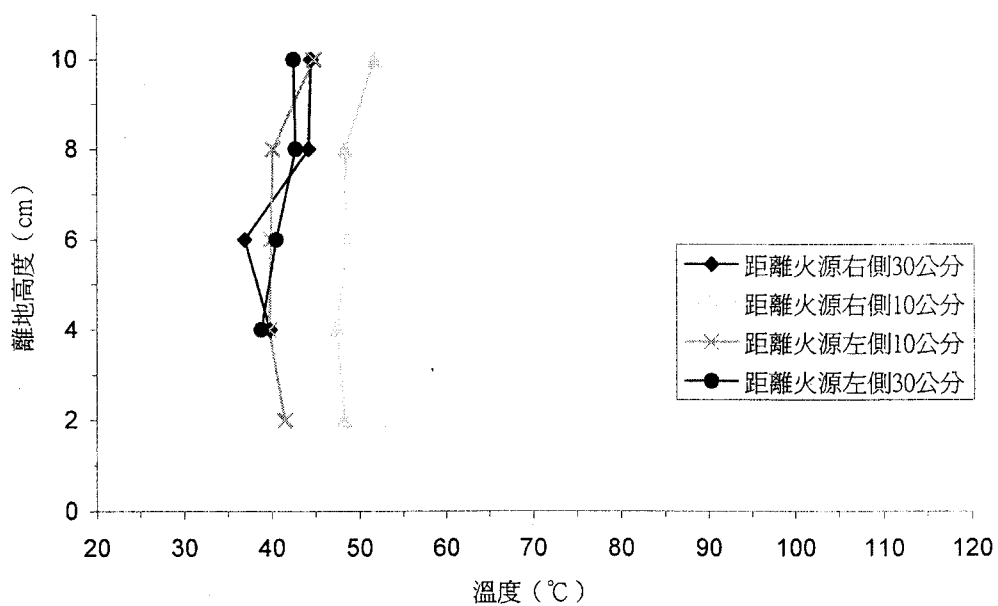


圖 4-52 月台層軌道區燃燒 300 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

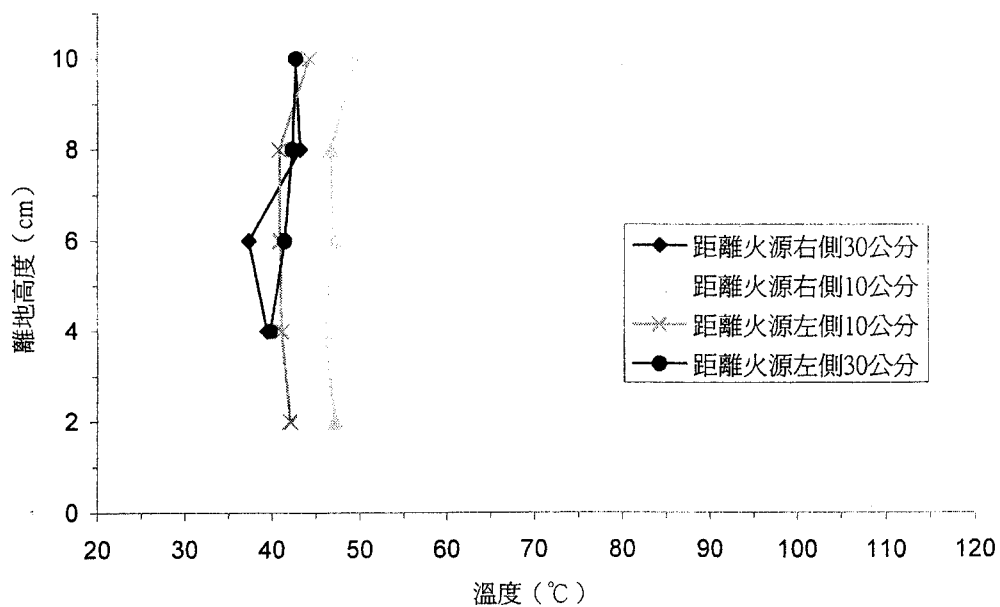


圖 4-53 月台層軌道區燃燒 360 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

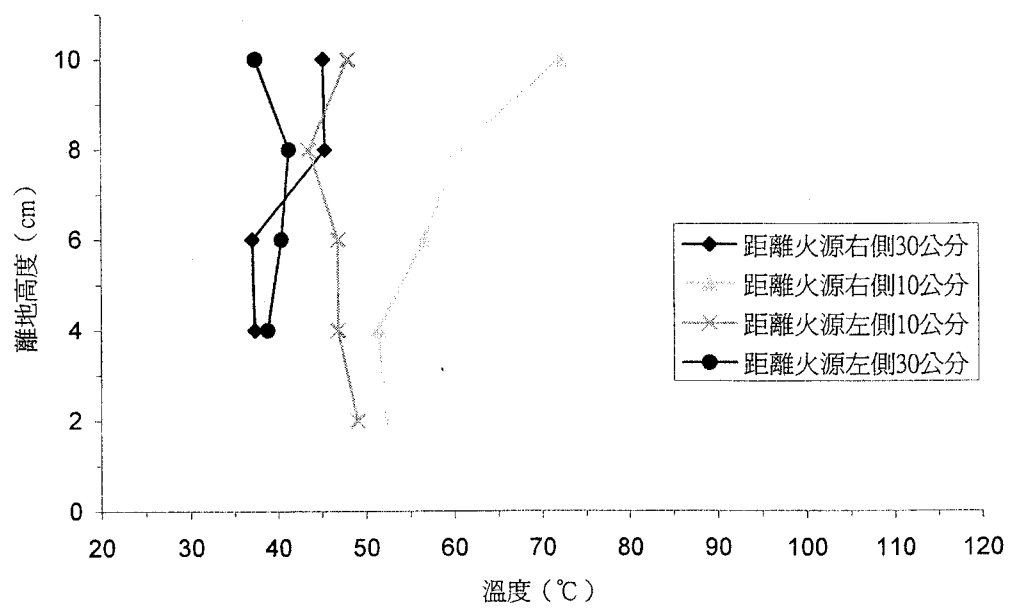


圖 4-54 月台層軌道區燃燒 480 秒後，各量測點所得溫度之數據分佈

4.4 縮小模型煙控模擬分析

為驗證縮小尺度車站模型火災試驗之準確度，本研究除進行格點分析外亦對縮小模型進行 3D CFD 的模擬，以進行交叉比對。本項模擬依據車站縮小模型實驗之幾何尺寸建立格點，並依照縮小模型實驗之各項設定資料設立邊界條件。

模擬情境：

本案例之模擬情境為與 4.3.3 節模型試驗情境相同，即月台層發生火災，且只單區之排煙系統啟動。月台區月台層發生火災，實際火載量為 2 MW，模型火載量為 405.7 W 本模擬所採用火源特徵為考量現場實際可燃燒物質極為有限，且無擴散之可能性，故為一限制性燃燒範圍之火災，依據 NFPA 92B 其實際火盤大小為 2.0m x 2.0m，模型火盤大小為 6.66cm x 6.66cm。火場位於月台層平面中央，其排煙系統啟動單一防煙區劃之排煙口。

模擬結果：

經模擬結果顯示，當火災發生為實際時間 60 秒後，火場之氣流溫度約為 40°C，此時月台層之溫度分佈如圖 3-191 (A-A 斷面) 及圖 3-195 (B-B 斷面) 所示，濃度分佈如圖 3-199 (A-A 斷面) 與圖 3-203 (B-B 斷面) 所示。由上述模擬結果得知，在火災初期時，model scale 3D CFD 之溫度值略高於 full scale 3D CFD 之模擬結果，但兩者之模擬結果並無太大差異。

觀察本案例在實際火載量為 2 MW，模型火載量為 405.7 W 之火災規模，當於實際時間 240 秒時，火場之氣流溫度約為 120.3°C，此時月台層之溫度分佈如圖 3-192 (A-A 斷面) 及圖 3-196 (B-B 斷面)，濃度分佈如圖 3-200 (A-A 斷面)、圖 3-204 (B-B 斷面) 所示。由上述圖中模擬結果得知在火災發生時，防煙垂壁確時可阻擋濃煙擴散。

而由圖 3-193 與圖 3-194 (A-A 斷面)、圖 3-197 與圖 3-198 (B-B 斷面) 分別顯示火災發生為實際時間後 360 秒及 600 秒之溫度分佈，圖 3-201 與圖 3-202 (A-A 斷面)、圖 3-205 與圖 3-206 (B-B 斷面) 分別顯示火災發生為實際時間後 360 秒及 600 秒之濃度分佈得知，Model scale 3D CFD 之溫度值略低於 Full scale 3D CFD 之模擬結果。

故經上述模擬結果得知，本章節之縮小模型 3D CFD 與 4.3.3 節模型試驗結果並無太大差異。

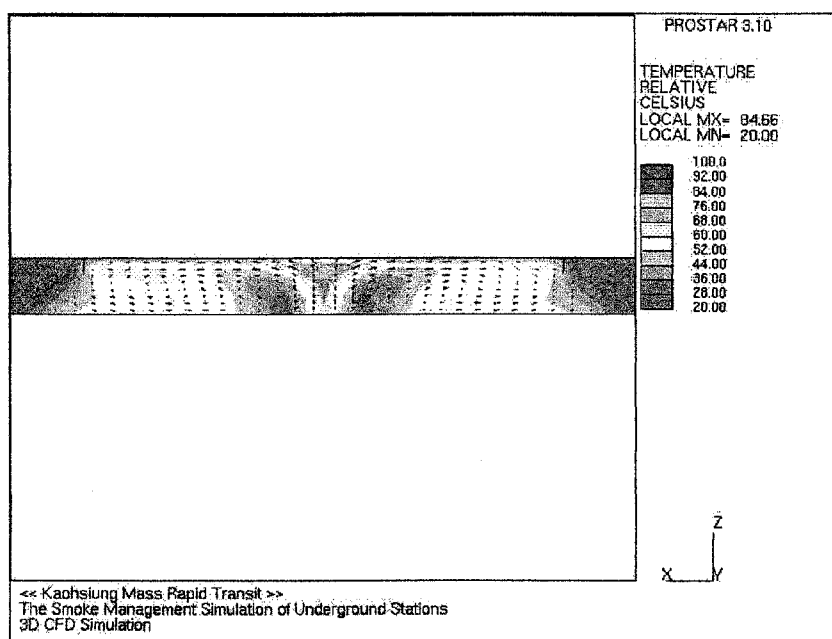


圖 3-191 溫度場模擬結果 (A-A 斷面，60 秒)

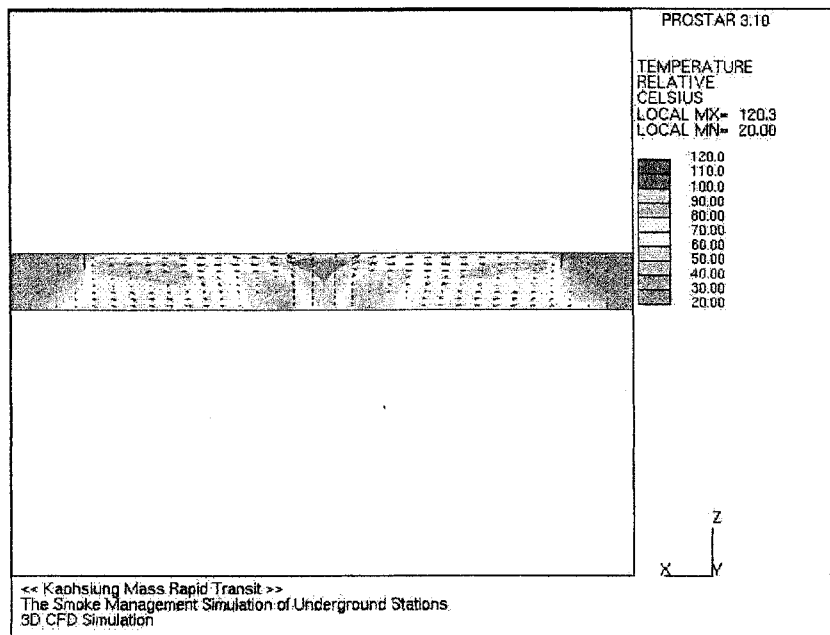


圖 3-192 溫度場模擬結果 (A-A 斷面，240 秒)

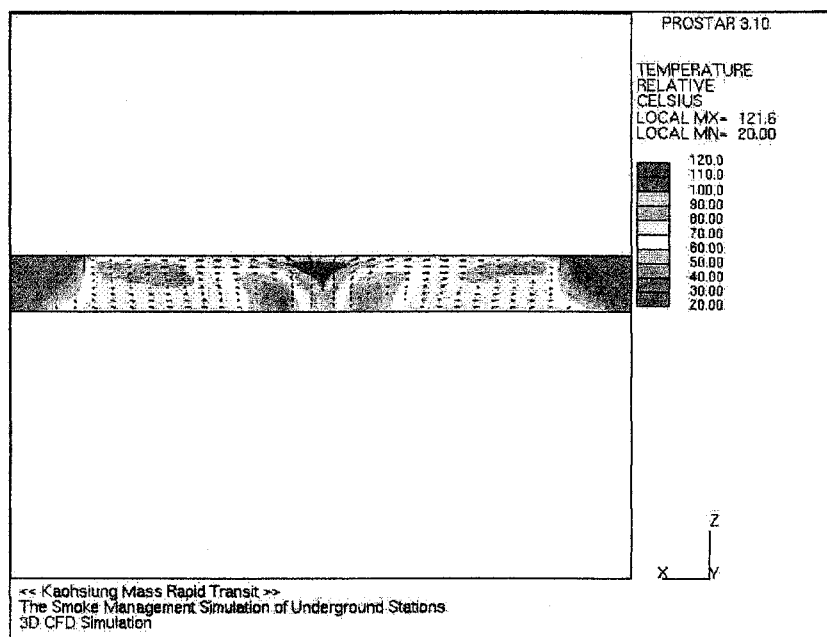


圖 3-193 溫度場模擬結果 (A-A 斷面，360 秒)

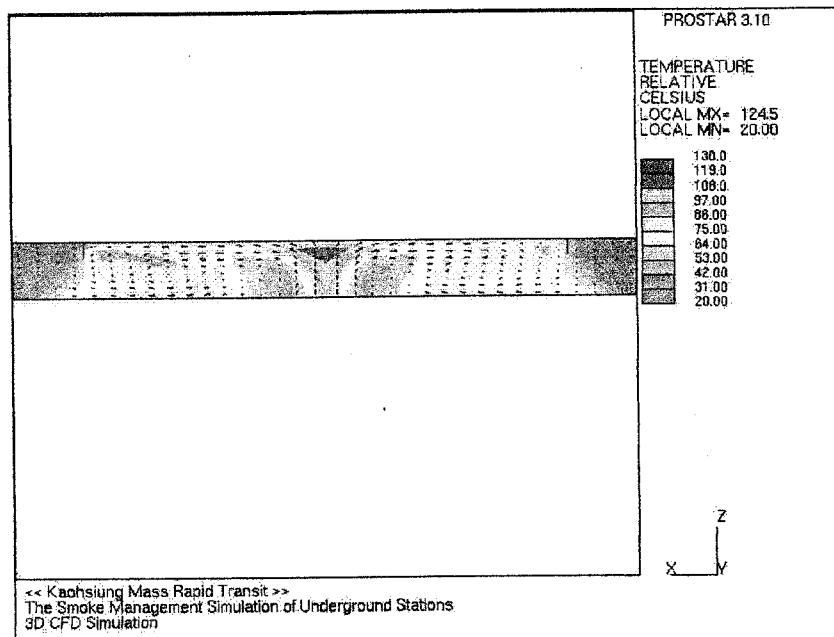


圖 3-194 溫度場模擬結果 (A-A 斷面，600 秒)

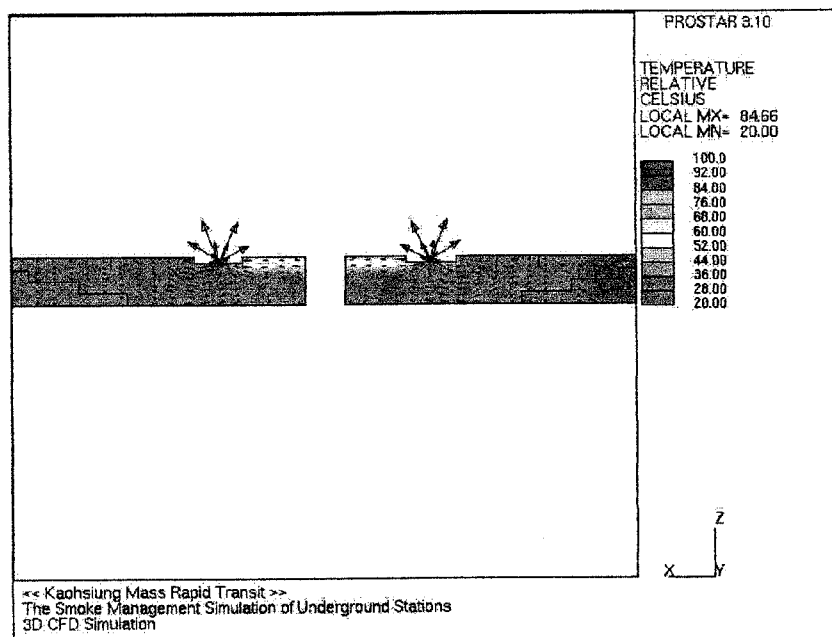


圖 3-195 溫度場模擬結果 (B-B 斷面，60 秒)

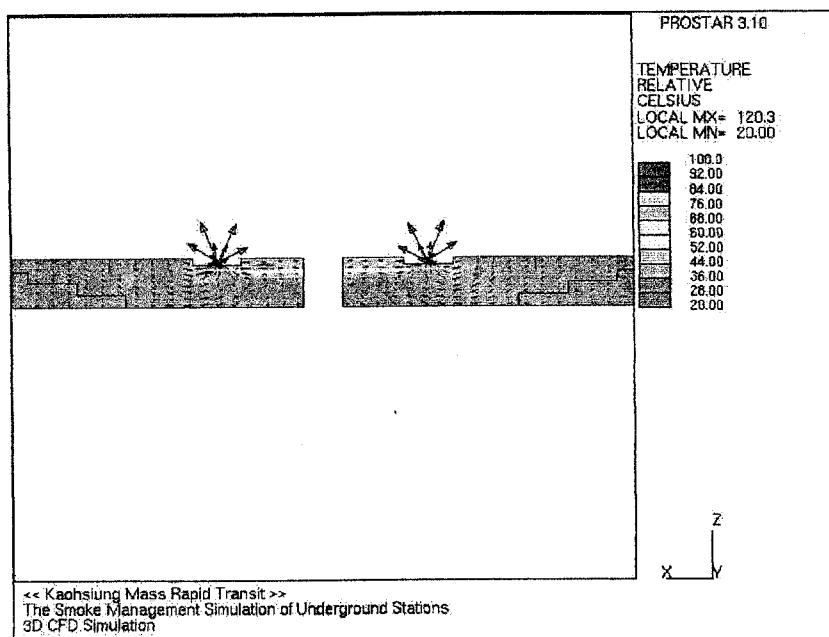


圖 3-196 溫度場模擬結果 (B-B 斷面，240 秒)

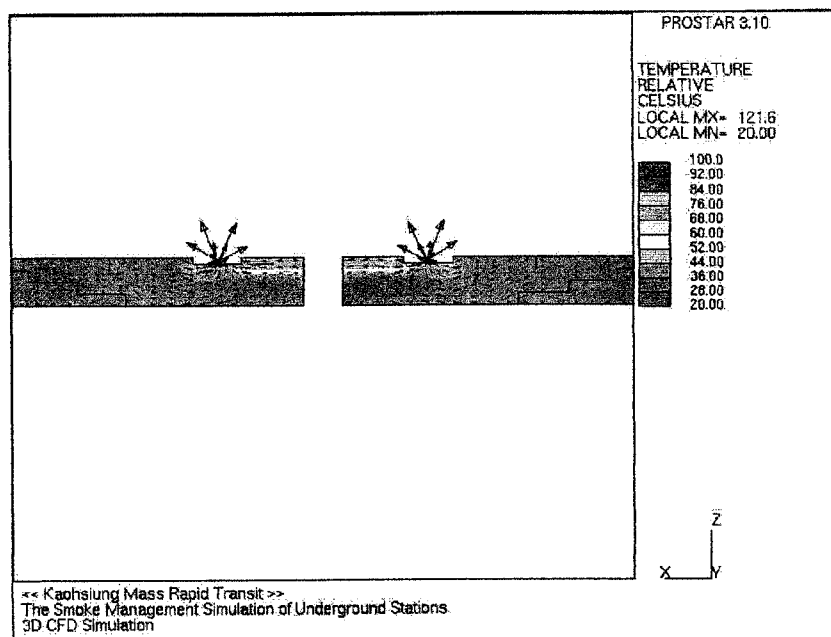


圖 3-197 溫度場模擬結果 (B-B 斷面，360 秒)

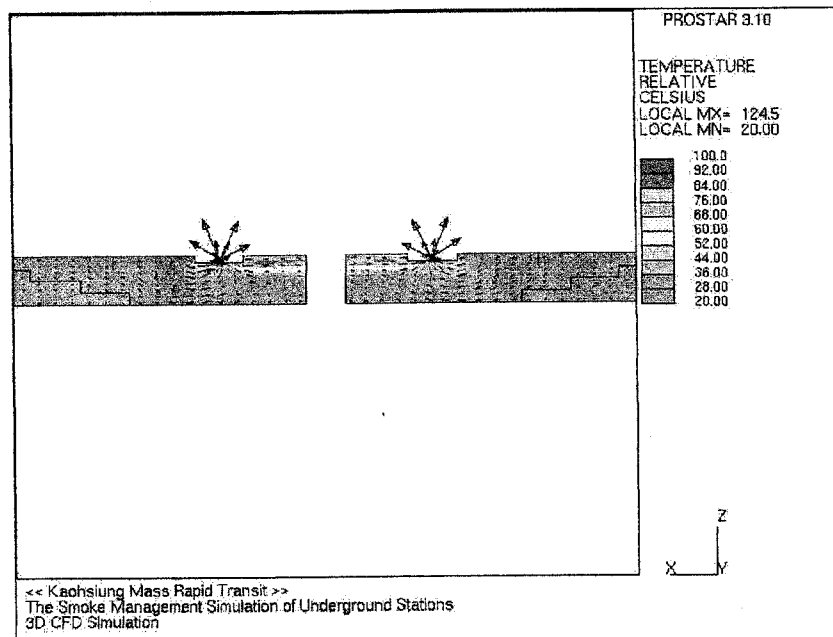


圖 3-198 溫度場模擬結果 (B-B 斷面, 600 秒)

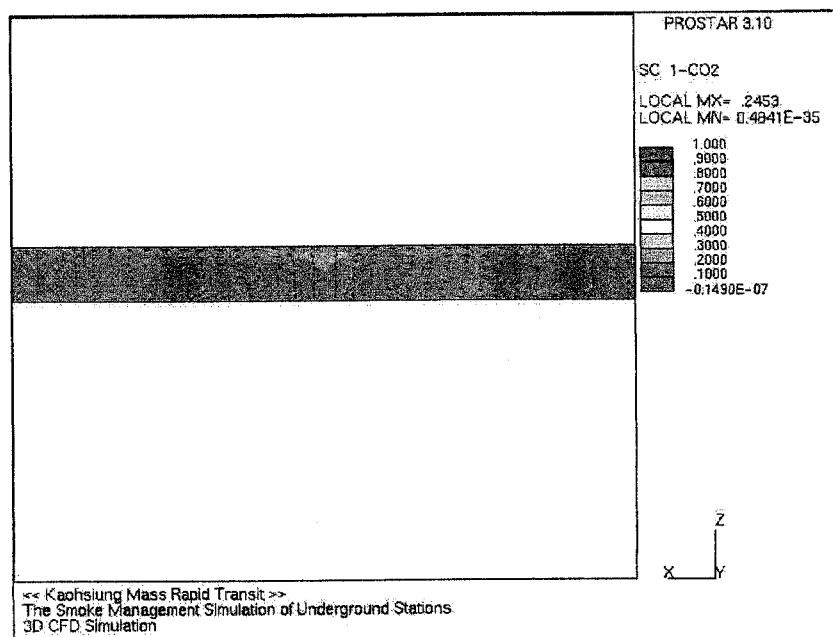


圖 3-199 濃度場模擬結果 (A-A 斷面, 60 秒)

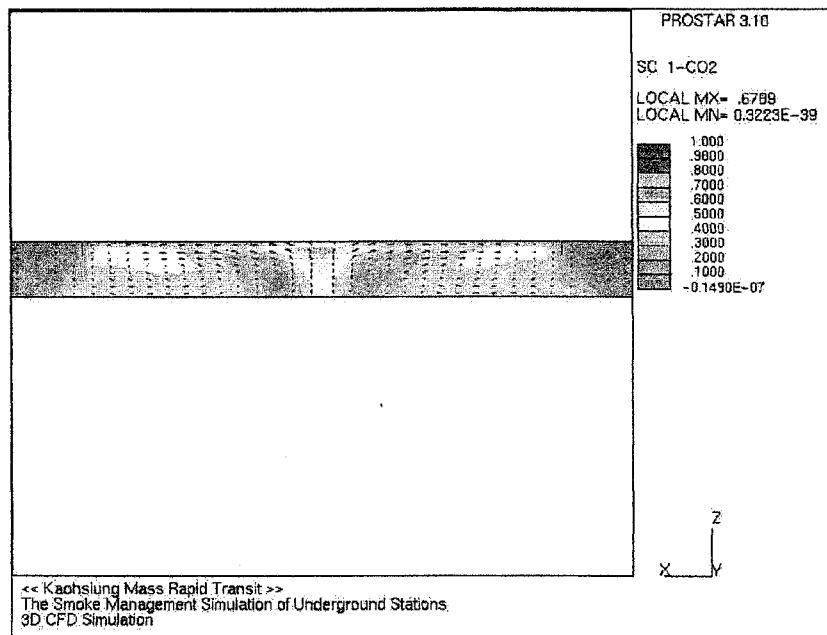


圖 3-200 濃度場模擬結果 (A-A 斷面，240 秒)

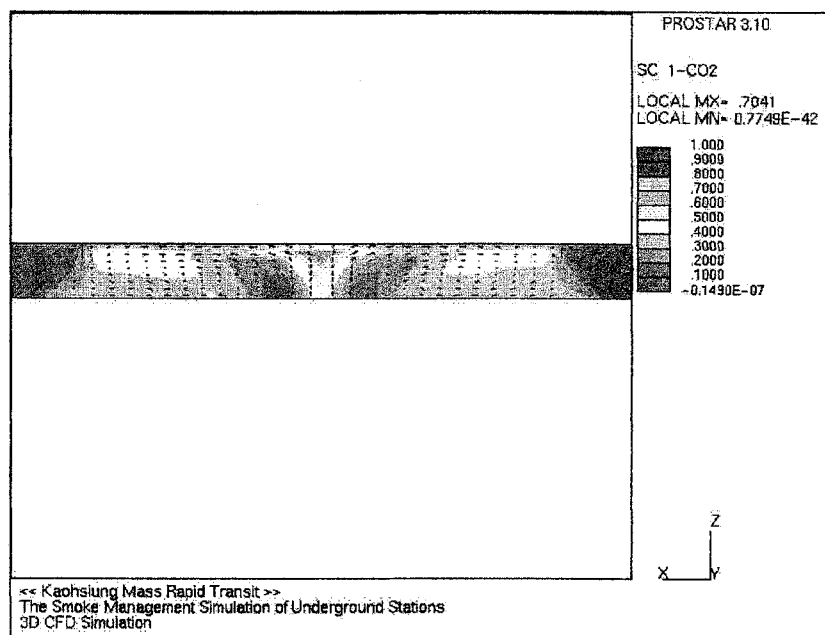


圖 3-201 濃度場模擬結果 (A-A 斷面，360 秒)

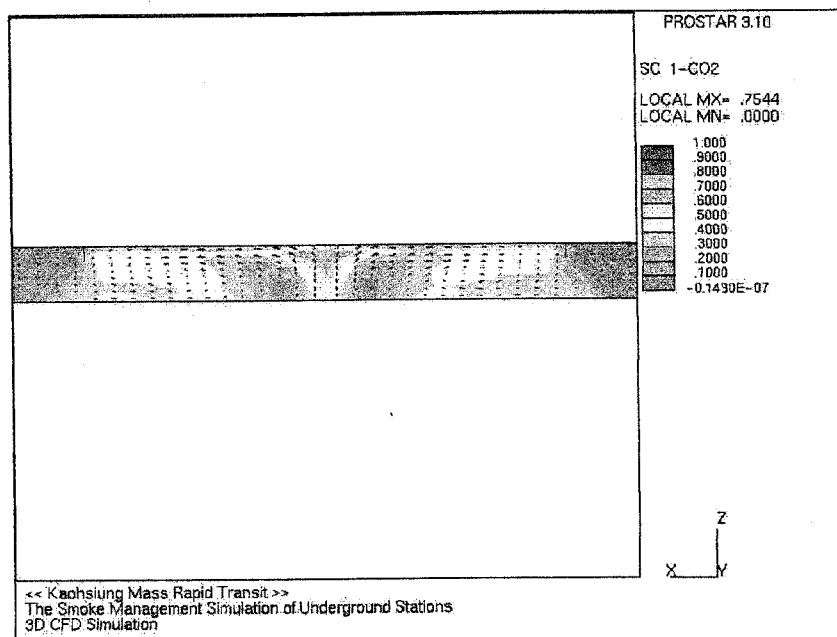


圖 3-202 濃度場模擬結果（A-A 斷面，600 秒）

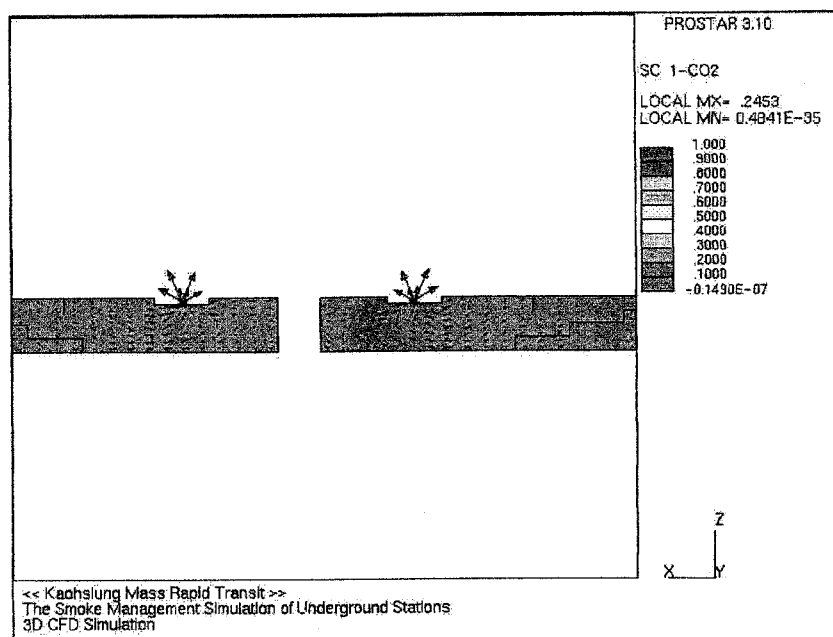


圖 3-203 濃度場模擬結果（B-B 斷面，60 秒）

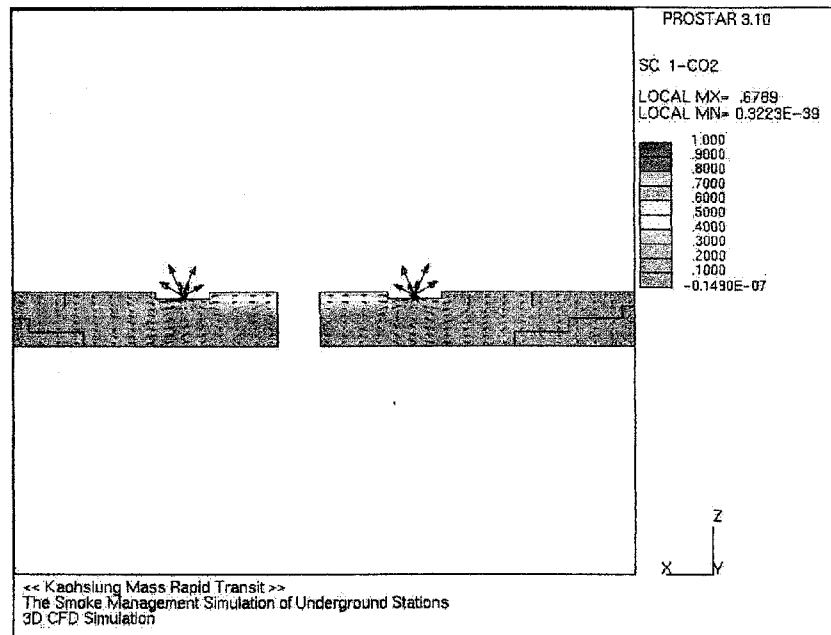


圖 3-204 濃度場模擬結果 (B-B 斷面，240 秒)

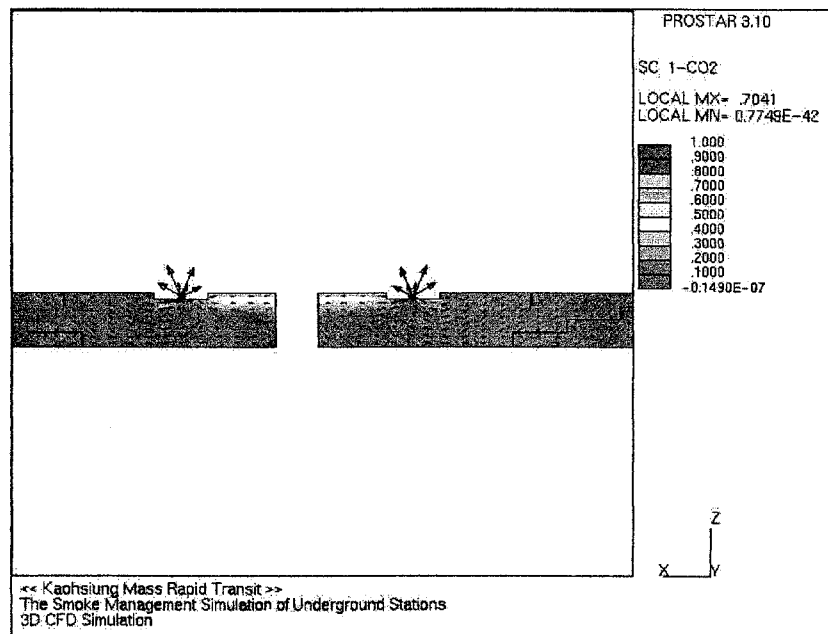


圖 3-205 濃度場模擬結果 (B-B 斷面，360 秒)

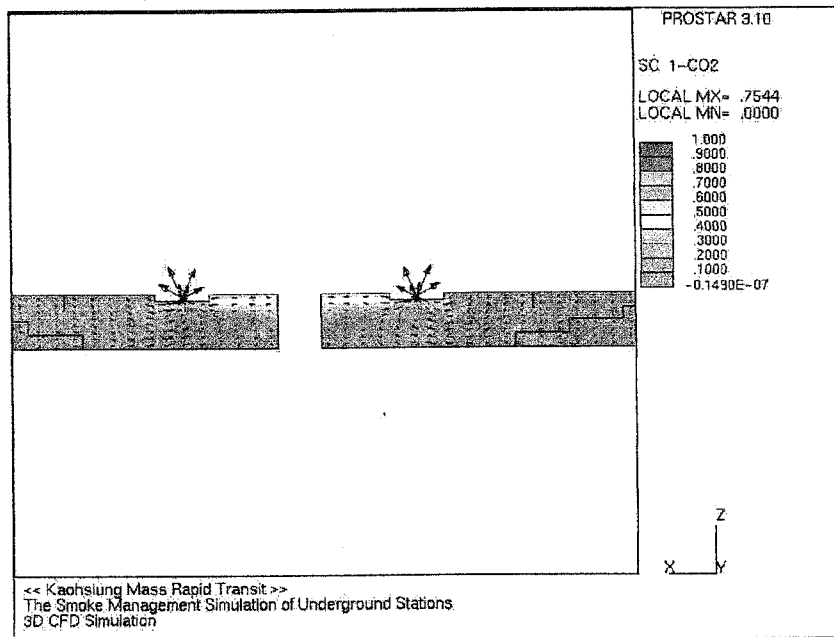


圖 3-206 濃度場模擬結果 (B-B 斷面，600 秒)

第五章 人員避難動線分析檢討

5.1 避難時間分析原理

避難時間之計算包含知曉火災發生的時間、對火災做出反應的時間與避難過程經歷時間等三部分。其中知曉火災發生的時間以及對火災做出反應的時間與建築物消防管理系統、避難人員生理、心理狀態有關，無法直接推導，一般均採用固定的計算值。而避難行動歷經的時間，則與人員的密度、逃生口之設計有直接的關係。因此避難計算之主要工作即為計算避難行動歷經的時間。

目前國際間常用避難時間之計算方法可分為簡算公式 (Hydraulic Model) 和動態避難模擬 (Dynamic Model)。簡算公式必須假設同一居室火空間之人必須同一時間開始逃生行動、避難人員之間無互動性、避難人員可以順暢流動及每一避難人員之設定參數均勻相等。

而動態避難模擬方面，每位避難人員具有各自之設定參數，可依據各人之所在情況模擬每一避難人員之避難行為，避難人員間之互動關係會影響到各人之步行速度與行進方向之變化，此為動態避難模擬與簡算公式之主要差別之一。其模擬結果較近似於真實狀況，對於避難過程中所產生之各種瓶頸問題、避難人員位置、速度、方向等可以加以重現，以提供設計者更多資訊參考。

一般設計對車站旅客動線之規劃首重簡單明瞭、方便性，減少交叉節點及最短之步行距離等，以提供旅客安全快速自月台進入列車，以達到提升捷運運能之目標，並且在意外發生時能迅速疏散旅客離開車站。基於乘客安全之考量，捷運車站在規劃設計乘客動線必須考慮以下幾個重點：

1. 直接 (Directness)：乘客從地面進出口，經大廳抵達月台之距離，越短越好。動線上改變方向（180 度或 90 度）之次數，越少越好。
2. 簡單 (Simplicity)：動線上最好沒有讓乘客有選擇方向猶豫之情形，並盡量減少動線上交叉點之發生，消除乘客移動時之干擾。
3. 連續 (Continuity)：乘客從地面進入車站之動線必須連續，保持專用之路徑，不可為其他非乘客活動區所隔斷。此外，動線上各環節之容量，應保持連續一致，使無交通瓶頸存在。

當緊急事故發生，可以分成兩個部分，一是月台發生火災；一是列車發生火災。當月台發生火災時，月台屏門關閉，所有在月台上等待之乘客快速利用樓梯或電扶梯進行避難，並開啓月台層之煙控系統，進行排煙。

而當列車發生火災，有必要疏散列車上旅客情況時，應盡量將列車行駛至車站，以避免於站間疏散旅客至隧道，必要時得安排該列車逆向行駛或安排故障支援列車協助，或利用旅客救援列車接駁至車站。若上述方式皆無法利用，則安排旅客進行隧道避難，並指示其最近緊急逃生口或車站所在位置。

所以地下車站最大的旅客疏散情況是列車發生火災駛入最近車站避難，疏散人員包括列車旅客以及在月台上候車的旅客。

5.2 傳統靜態避難分析比較

5.2.1 我國現行法規之避難設計分析【12】

目前我國建築物常引用之避難設計法規，為「建築技術規則」建築設計施工篇第四章防火避難設施及消防設備中，其第九十三條直通樓梯之設置。其詳細規定條文如下：

直通樓梯之設置應依下列規定：

- 一、任何建築物自避難層以外之各樓層均應設置一座以上之直通樓梯（包括坡道）通達避難層或地面，樓梯位置應設於明顯處所。
- 二、自樓面居室之任一點至樓梯口之步行距離（即隔間後之可行距離非直線距離）依左列規定：
 - （一）供本編第六十九條第一類及第四類使用之建築物及無窗戶之居室不得超過三十公尺；供第五類使用之建築物，不得超過七十公尺。
 - （二）前目規定以外用途之建築物不得超過五十公尺。
 - （三）十五層以上建築物依其使用應將本款（一）（二）目規定為三十公尺者減為二十公尺，五十公尺者減為四十公尺。
 - （四）集合住宅之採取複層式構造者，其自無出入口之樓層居室任一點至直通樓梯之步行距離不得超過四十公尺。
 - （五）非防火構造或非使用不燃材料所建造之建築物，不論任何用途，應將本款所規定之步行距離減為三十公尺以下。

基於以上規定，是故於國內建築圖上，常見距樓梯不得小於 30 公尺之檢驗，而以此驗證避難系統之設計是否合法。

5.2.2 美國 NFPA 130 之避難設計分析【13】

目前捷運地下車站避難逃生計畫之基本設計依據為美國國家防火協會 NFPA130, "Standard for Fixed Guideway Transit Systems" 之相關規定, 此標準廣為現行各國捷運系統避難逃生系統所引用。NFPA130 專門針對定軌運輸系統的火災預防及人命安全而提出, 且已涵蓋了所有緊急事件同時發生之最壞情況下, 所做之逃生時間計算。

其中, NFPA 130 於 2-5.3.1 章節及 2-5.3.2 章節中明文列出, 除可照條例式設計讓月台上所有人員於 4 分鐘內離開月台, 及 6 分鐘內到達安全點外, 亦可利用性能式工程分析方式, 藉由火載量設計、車站建築構型與緊急通風系統設計等方式, 而放寬於 4 分鐘內離開月台, 及於 6 分鐘內到達安全點之避難時間。其詳細條文規定如下:

2-5.3.1

There shall be sufficient exit lanes to evacuate the station occupant load as defined in 2-5.2 from the station platforms in 4 minutes or less. The maximum travel distance to an exit from any point on the platform shall not exceed 300ft (91.4m).

EXCEPTION: Modification of the evacuation time should be permitted based on an engineering analysis *by evaluating material heat release rates, station geometric, and emergency ventilation systems.*

2-5.3.2

The station also shall be designed to permit evacuation from the most remote point on the platform to a point of safety in 6 minutes or less.

EXCEPTION: Modification of the evacuation time should be permitted based on an engineering analysis *by evaluating material heat release rates, station geometric, and emergency ventilation systems.*

根據 NFPA 130 之 2-5.2 及附錄 C 中提到，可分成新系統之負載人數（occupant load）與既有系統之負載人數，以下分別依據各系統進行估算：

1.新系統之負載人數：

新系統的負載人數的計算係以運量預測值為主，故須輔以分佈曲線修正值做修正，建議採 1.5 為修正值。整個負載人數包含兩部分，即月台等待人員（Entraining Load）及站間運量（Link Load）。依照附錄 C 的說明其算法為：

$$\text{月台等待人員} = (\text{尖峰小時進站等待人員數} / 4) \times 1.5$$

$$\text{站間運量} = (\text{尖峰小時站間運量人員數} / 4) \times 1.5$$

$$\text{負載人數} = \text{月台等待人員} + \text{站間運量}$$

2.既有系統的負載人數：

既有系統負載人數的計算方式係以既有的調查統計資料為分析的對象，因此並無所謂的分佈曲線修正係數的考量。

5.2.3 日本建築中心之避難設計分析【14】

國外部分除美國 NFPA 130 可做為避難設計分析參考外，另為日本建築中心所提出之設計理念。其基本設計方程式如下所列：

$$\frac{T_p + T_r + T_a}{T_f} \leq 1 \quad (5-1)$$
$$T = T_p + T_r + T_a$$

其中 T 為逃生所需的總避難時間； T_p 為知曉火災發生所需之時間； T_r 為對火災做出反應所需時間； T_a 為避難時間所需時間； T_f 為避難者無法自力逃生之環境出現的時間。

由程式 (5-1) 可看出，分母代表著避難者傷亡出現或無法自行避難而需外力介入之狀況出現的時間，而分子代表的是避難者從知曉火災到行動至安全區之所有時間，因此若分子大於分母則人員無法避難成功；反之，則避難成功。

因此若以日本建築中心的避難時間之計算公式，其計算過程如下：

$$T_1 = \max(t_{11}, t_{12}) \quad (5-2)$$

$$t_{11} = \frac{L}{V} \quad (5-3)$$

$$t_{12}, t_{22} = \frac{Q}{n \cdot b} \quad (5-4)$$

$$T_2 = t_{21} + \max(t_{22}, t_{23}) \quad (5-5)$$

其中：

t_{11} ：避難人員距出口最遠端步行到達出口所需時間

t_{12} ：避難人員通過出口所需時間

t_{21} ：自最近樓梯處之出口經月台進入樓梯口之步行時間

t_{22} ：全部人員通過樓梯入口之時間

t_{23} ：從第一位避難者到達樓梯入口之時間開始，到最後一位避難者通過該入口為止之時間。

L ：出口到樓梯入口之最短距離

V ：步行速率

Q ：利用該樓梯避難之有效人數

b ：樓梯入口之有效寬度

N ：單位流量（日本建築中心採用 1.5 人/m-sec）

5.3 高雄捷運典型車站之動態避難模擬分析

當發生火災時，人員於湧向逃生口時將產生大量之推擠與瓶頸等遲滯現象而呈現明顯的動態反應（Dynamic Response）。目前傳統式之避難規劃皆以簡易穩態穩流（Steady State-Steady Flow）進行，人員行進間並不互相等待或超越，而以與逃生口之距離除以平均之逃生速度而得。

為了重現於逃生避難時，人員產生之推擠、超越、等待、瓶頸…等情況，本案採取 SIMULEX 程式以進行動態模擬分析。

SIMULEX 程式源自英國，與 EXDOUS 程式並列國際間最具公信力之動態避難模擬程式。曾被廣泛應用於倫敦地鐵、英法海峽隧道，及多項重大公共工程設計上。

本項工作將以高雄捷運典型 C 型車站大廳層與月台層之平面圖，進行動態避難模擬分析，包括二種不同人數的模擬案例。

5.3.1 案例 1

Scenario 1：月台層至大廳層之一個電扶梯故障

- 火災情境：一輛滿載旅客的失火列車駛入高雄捷運典型地下車站，此時月台層至大廳層之一個電扶梯故障，月台層與列車所有人員利用其他電扶梯或樓梯進行避難。
- 設計人數：月台層人數 902 人，電聯車人數 2,010 人，共計 2,919 人，是以高雄捷運 C 型車站運量最大的 O10 車站在設計目標年 2020 年的旅運量，依據高雄捷運局設計規範規定的月台容納旅客量為基礎。

• Scenario 1 動態避難模擬結果分析

圖 5-1 為其月台層動態避難模擬情形，圖 5-2 為其大廳層動態避難模擬情形，而圖 5-3 則顯示樓梯間內之動態避難模擬。其電腦模擬結果顯示，所有人員撤離電聯車共費 3 分 17 秒，所有人員離開月台層共費 5 分 58 秒，所有人員至安全點共費 7 分 49 秒。

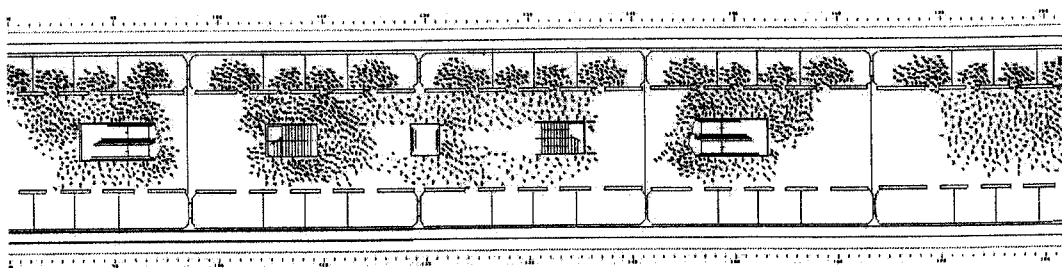


圖 5-1 Scenario 1 月台層動態避難模擬情形

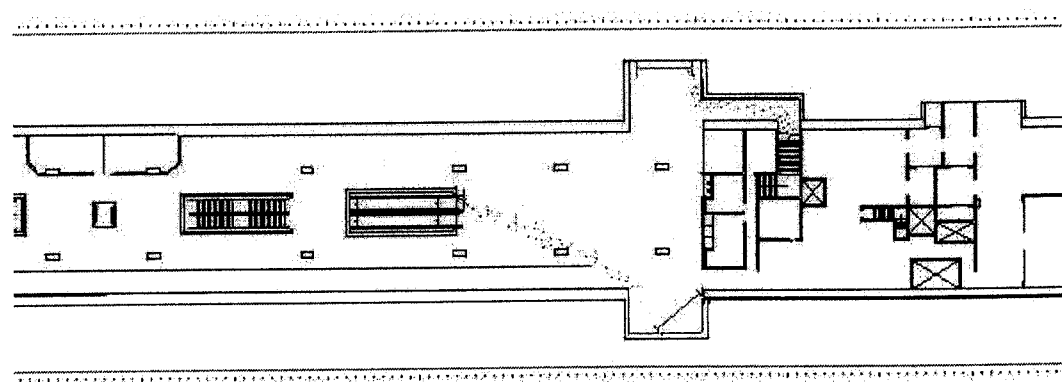
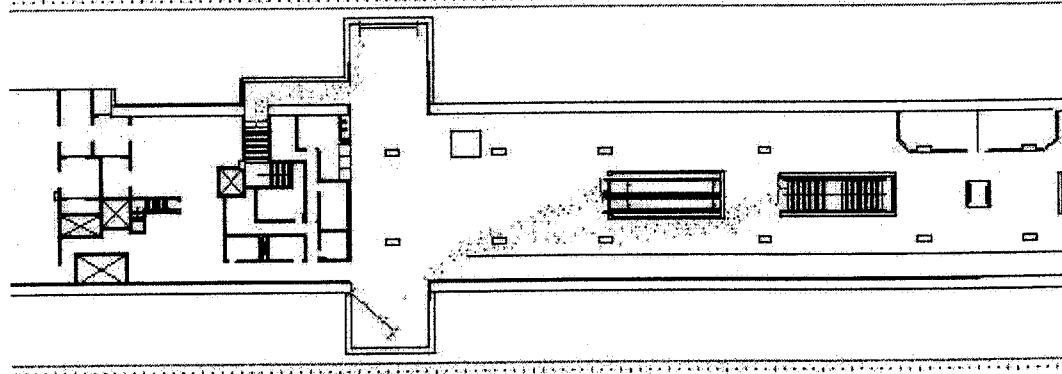


圖 5-2 Scenario 1 大廳層動態避難模擬情形

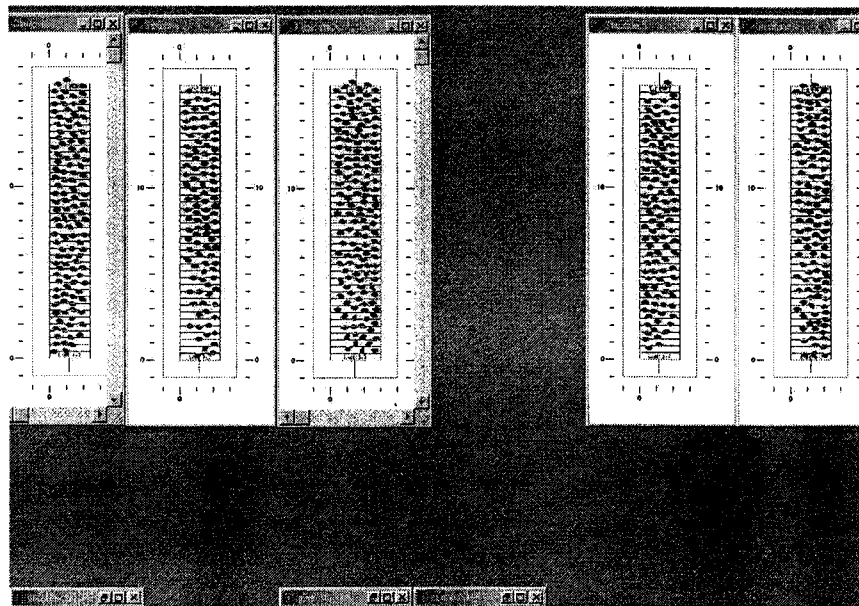


圖 5-3 Scenario 1 樓梯間內之動態避難情形

Scenario 2：大廳層至地面層之一個電扶梯故障

- 火災情境：一輛滿載旅客的失火列車駛入高雄捷運典型地下車站，此時大廳層至地面層之一個電扶梯故障，月台層與列車所有人員利用其他電扶梯或樓梯進行避難。
- 設計人數：月台層人數 902 人，電聯車人數 2,010 人，共計 2,919 人，是以高雄捷運 C 型車站運量最大的 O10 車站在設計目標年 2020 年的旅運量，依據高雄捷運局設計規範規定的月台容納旅客量為基礎。
- Scenario 2 動態避難模擬結果分析

圖 5-4 為其月台層動態避難模擬情形，圖 5-5 為其大廳層動態避難模擬情形，而圖 5-6 則顯示樓梯間內之動態避難模擬。其電腦模擬結果顯示，所有人員撤離電聯車共費 2 分 22 秒，所有人員離開月台層共費 4 分 12 秒，所有人員至安全點共費 7 分 19 秒。

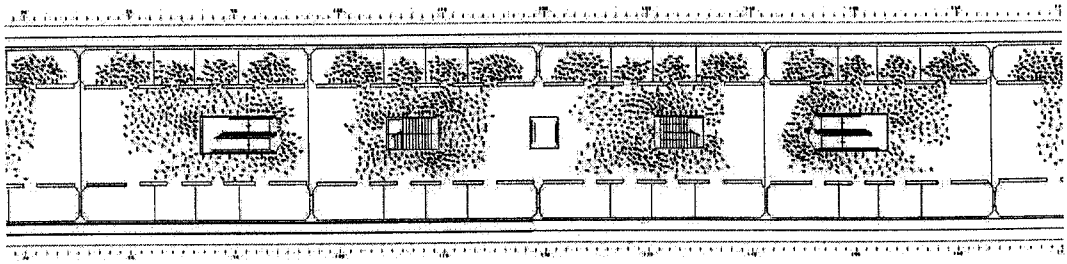


圖 5-4 Scenario 2 月台層動態避難模擬情形

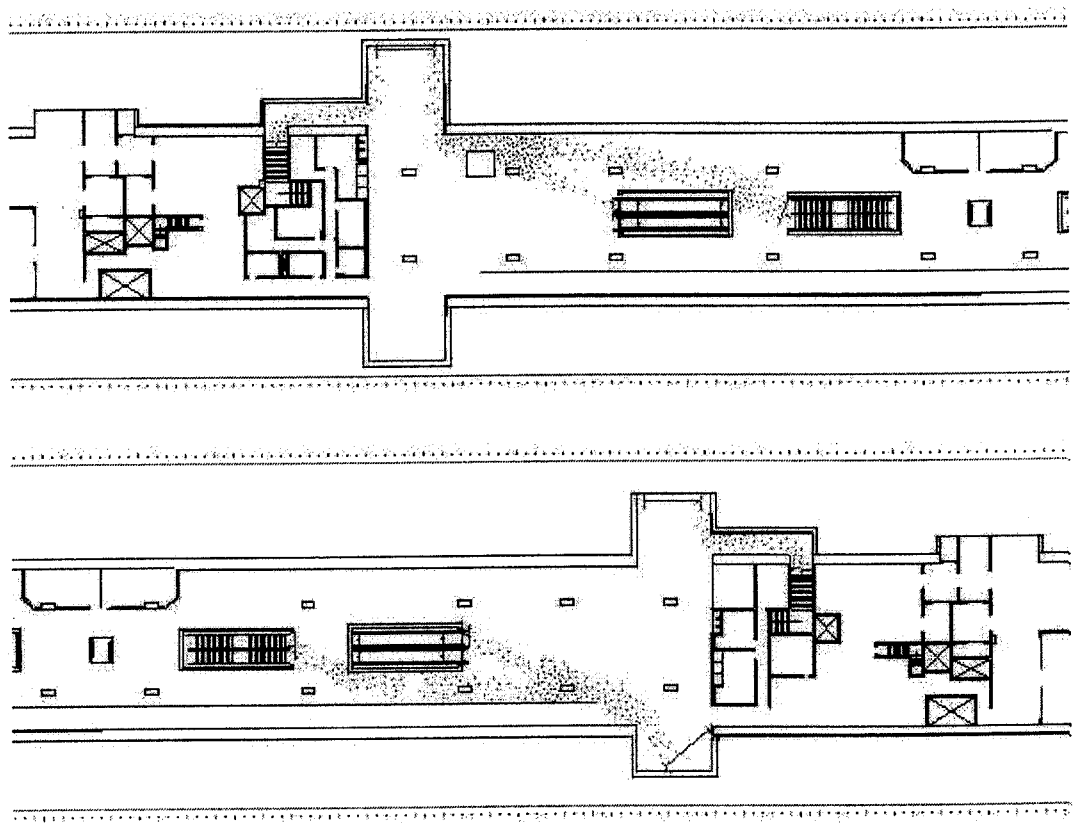


圖 5-5 Scenario 2 大廳層動態避難模擬情形

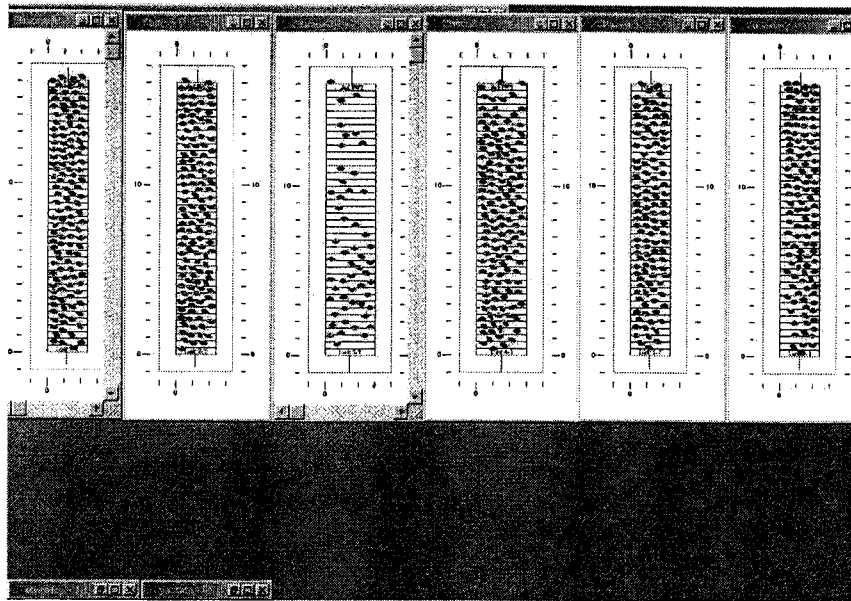


圖 5-6 Scenario 2 樓梯間內之動態避難情形

5.3.2 案例 2

Scenario 3：月台層至大廳層之一個電扶梯故障

- 火災情境：一輛尖峰滿載旅客的失火列車與另一列車非尖峰同時駛入高雄捷運典型地下車站，此時月台層至大廳層之一個電扶梯故障，月台層與列車所有人員利用其他電扶梯或樓梯進行避難。
- 設計人數：月台層人數 1,949 人，電聯車人數 2,396 人，共計 4,345 人，是以高雄捷運 C 型車站運量最大的 O10 車站在設計目標年 2020 年的旅運量，依據 NFPA 130 規定的月台容納旅客量為基礎。
- Scenario 3 動態避難模擬結果分析

圖 5-7 為其月台層動態避難模擬情形，圖 5-8 為其大廳層動態避難模擬情形，而圖 5-9 則顯示樓梯間內之動態避難模擬。其電腦模擬結果顯示，所有人員撤離電聯車共費 4 分 38 秒，所有人員離開月台層共費 8 分 59 秒，所有人員至安全點共費 10 分 47 秒。

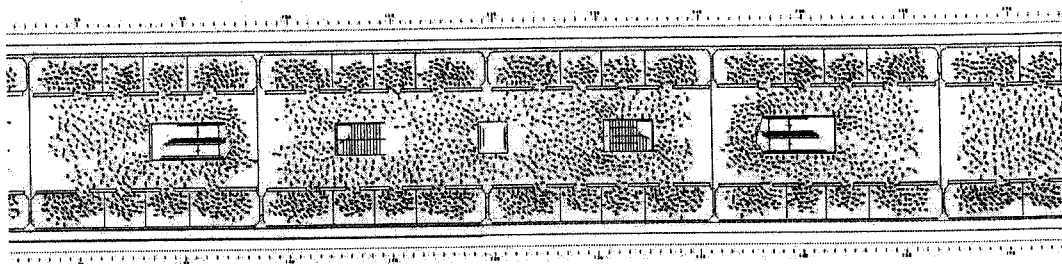


圖 5-7 Scenario 3 月台層動態避難模擬情形

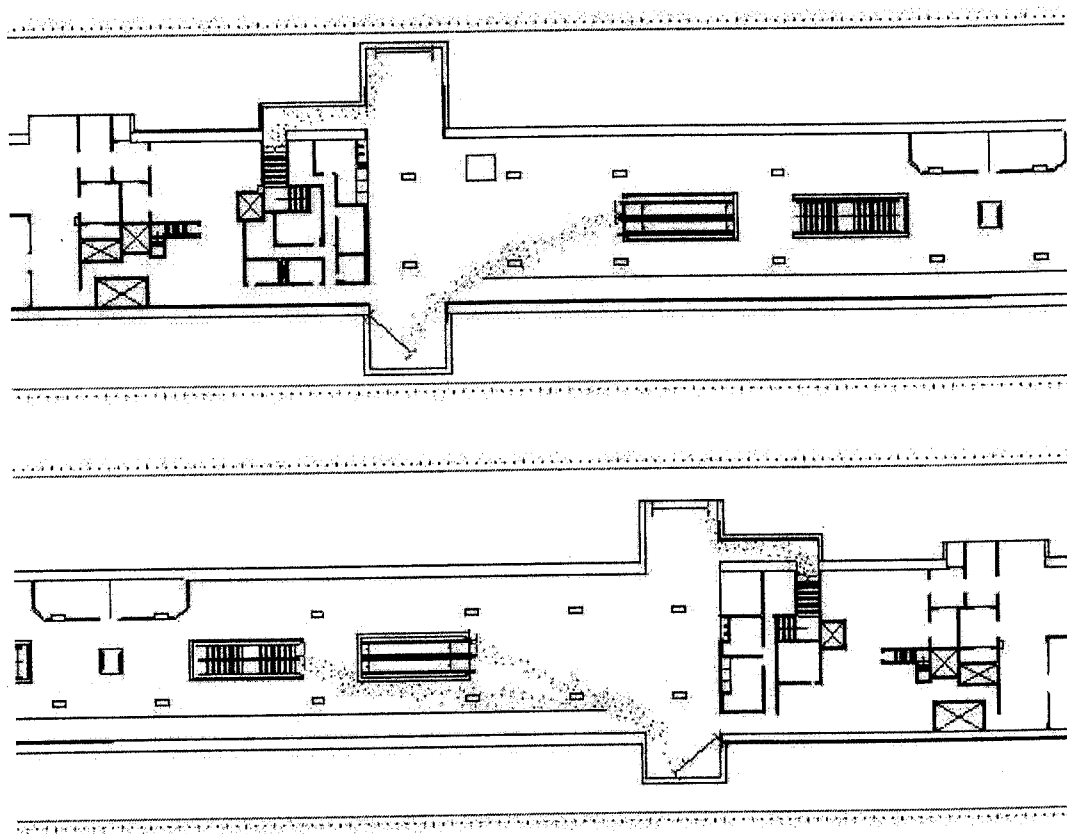


圖 5-8 Scenario 3 大廳層動態避難模擬情形

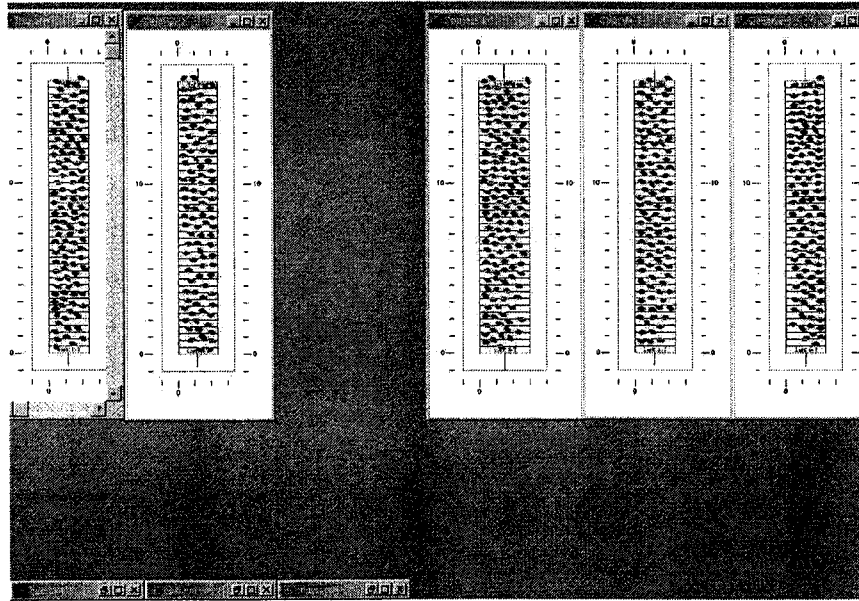


圖 5-9 Scenario 3 樓梯間內之動態避難情形

Scenario 4：大廳層至地面層之一個電扶梯故障

- 火災情境：一輛尖峰滿載旅客的失火列車與另一列車非尖峰同時駛入高雄捷運典型地下車站，此時大廳層至地面層之一個電扶梯故障，月台層與列車所有人員利用其他電扶梯或樓梯進行避難。
- 設計人數：月台層人數 1,949 人，電聯車人數 2,396 人，共計 4,345 人，是以高雄捷運 C 型車站運量最大的 O10 車站在設計目標年 2020 年的旅運量，依據 NFPA 130 規定的月台容納旅客量為基礎。
- Scenario 4 動態避難模擬結果分析

圖 5-10 為其月台層動態避難模擬情形，圖 5-11 為其大廳層動態避難模擬情形，而圖 5-12 則顯示樓梯間內之動態避難模擬。其電腦模擬結果顯示，所有人員撤離電聯車共費 3 分 5 秒，所有人員離開月台層共費 4 分 57 秒，所有人員至安全點共費 9 分 5 秒。

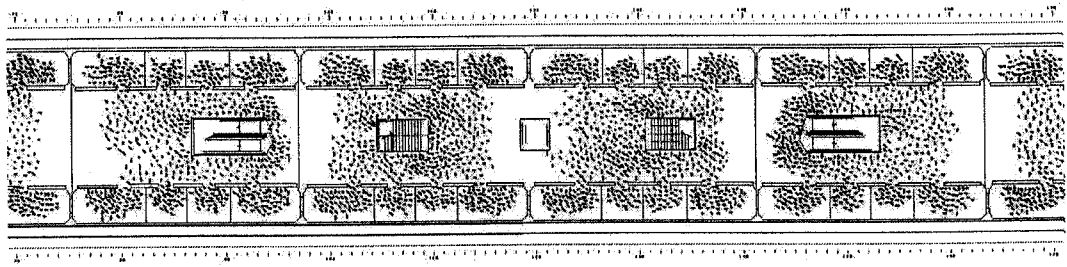


圖 5-10 Scenario 4 月台層動態避難模擬情形

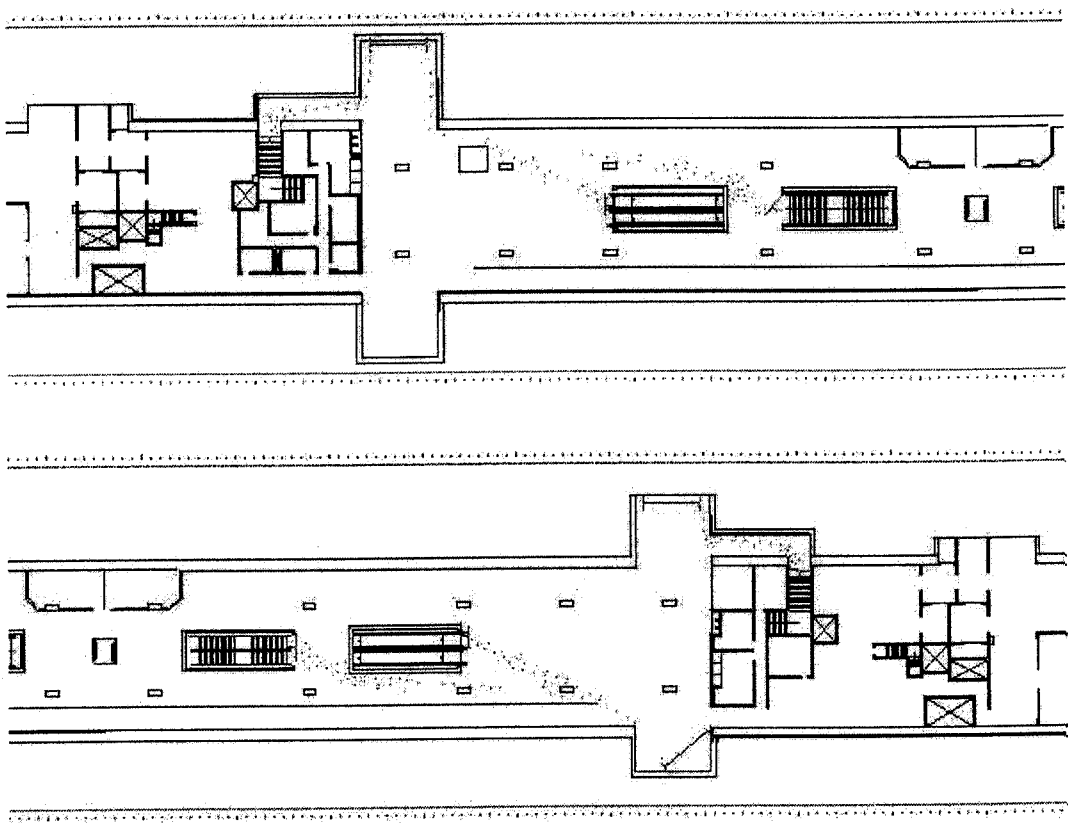


圖 5-11 Scenario 4 大廳層動態避難模擬情形

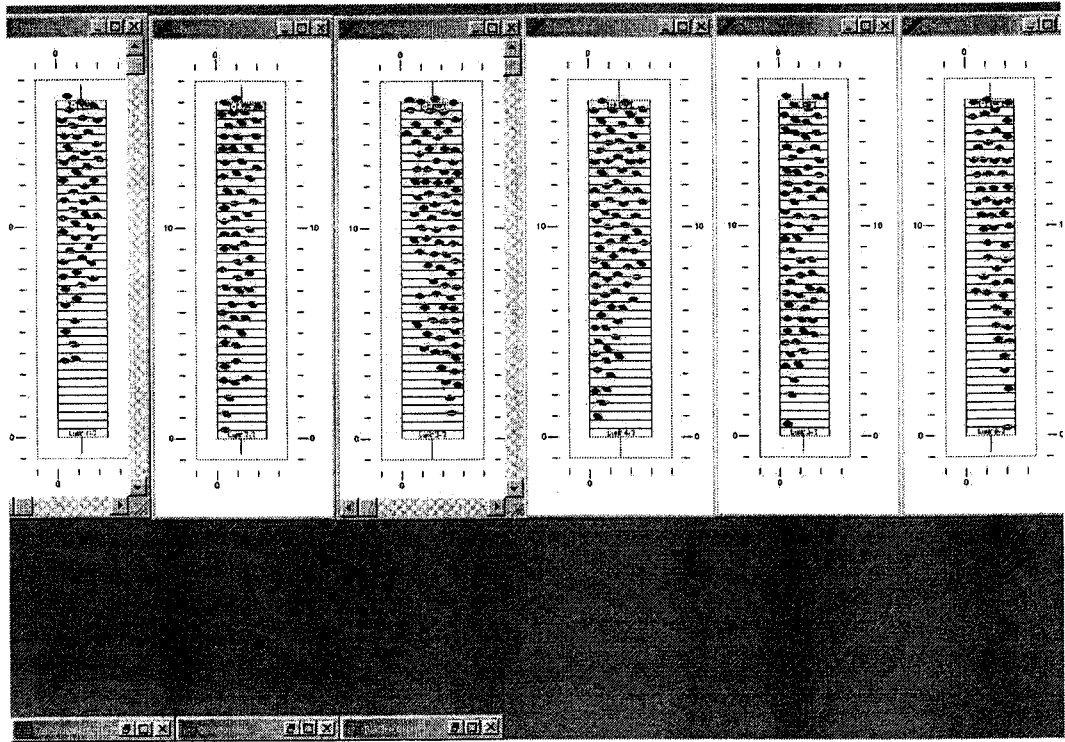


圖 5-12 Scenario 4 樓梯間內之動態避難情形

5.4 小結

目前國內之建築技術規則對於逃生避難設計方面僅提出『距離』之觀念，例如僅利用建築物內任一點至出口之最遠步行距離需小於 30 公尺，對於避難時間與避難過程所遇到之瓶頸及人員避難之心理狀況等問題並沒有加以探討。因此當建築師規劃設計新建築物時，僅按建築技術規則之規定進行設計。

然先進國家近年來陸續推出相關之避難設計理論，以提高建築物之安全性。以鄰近之日本為例，提出避難時間之簡算公式；西方工業國家多數則以電腦動態模擬避難動線與避難時間。雖然如此，許多避難設計與策略並未考慮到煙控系統之限制，以至於緊急狀況時，可能導致煙控策略或避難策略之目的失效。

避難計算乃是假設建築物發生火災的情況下，預測所有人員全部逃至安全出口的時間，以作為評估該建築物之避難是否安全之參考。其目的不僅在於「避難動線」的考量，而且更積極地去檢討原有設計之缺失，提出更好的意見，以作為設計之初改進之參考。

本項工作針對高雄捷運典型車站大廳層與月台層之平面圖，進行動態避難模擬分析。所完成的案例有二個，包含 4 個不同火災情境（Scenario）。

由於本動態避難模擬分析，為由車廂進入月台層，再由月台層至大廳層最後至地面層。與其他捷運車站實際避難逃生實驗結果，單單只從月台至大廳層在至地面層之模擬情境不同。因此，其二者之結果並無法比較差異。

另外，此種具月台屏門之捷運地下車站，因月台屏門之開口與捷運車廂之開口相同，並不對人員之避難產生影響，此點亦可由動態避難模擬過程中得知。

另外，動態避難模擬結果再與第三章中之煙控性能電腦模擬結果比對，目前車站大廳層與月台層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，防煙垂壁充分發揮阻煙功能，且機械排煙之排煙量足夠，可一直維持煙層在人眼睛高度以上，且時間可長達 10 分鐘。與各案例之總避難時間皆在 10 分鐘內比較，可知目前高雄捷運典型地下車站其煙控系統與避難系統，於發生火災時，皆可提供人員安全地逃生車站外。

第六章 結論與建議

本研究計畫【高雄都會區捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動線分析之檢討】經過一年來之研究，已獲得重大成果。

根據計畫書內容，本研究所完成之工作項目包括：

一、高雄捷運典型地下車站資料整理與地鐵火災相關資料搜集，包括：

1. 1995 年 10 月 29 日發生於亞塞拜然首府巴庫之地鐵大火
2. 1987 年 11 月 18 日晚上英國 King's Cross 地下車站
3. 1979 年 1 月 17 日美國舊金山與奧克蘭間的舊金山灣捷運系統大火
4. 1968 年 1 月 27 日，日本東京都日比谷線地下鐵火災
5. 1996 年 11 月 8 日英法海峽隧道火災

二、高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬

月台區煙控模擬分析，共完成七個案例，包括大廳層四個案例、月台層三個案例。

三、高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬

軌道區煙控模擬分析，共完成六個案例，包括 Pull only 模式、Push-Pull 模式、OTE Only 模式、與 Pull only 模式、Push-Pull 模式火源釋放及不同起火地點等案例。

四、站體煙控系統縮小模型試驗

煙控系統縮小模型試驗分析，共完成五個案例，包括大廳層、月台層、與軌道區煙控系統模擬等。

五、人員避難動線分析檢討

共完成二種模擬情境下之四個動態避難模擬案例分析，包括：依據捷運局設計之人數，以及依據 NFPA 130 設計之人數。

最後，提出本研究案之結論與建議如下。

◎ 地鐵火災相關資料搜集

所搜集的地鐵火災相關資料，五個火災案例如下：

1995 年 10 月 29 日傍晚，於亞塞拜然共和國首府巴庫，一列五節車廂之地下鐵列車，由 Uldus 站往 Narimanov 站行駛，每節車廂約載有 250~300 人。因列車機件故障，列車於地下隧道內發生嚴重火災，共造成 289 人死亡，265 人重傷，750 人以上獲救。

此次造成如此重大傷亡事件，主要肇因於隧道通風系統之緊急煙控模式失敗所致。由於事先沒有一套完整有效的緊急運轉程序體系，以致事故發生時，隧道內無法提供緊急事故時之良好避難環境。旅客倉皇無章地逃生避難，增加傷亡機會。加上車廂內部大量使用易燃裝修材料，助長火勢並切斷旅客逃生去向，造成避難者相互踐踏，場面更加混亂無章。

上述亞塞拜然地鐵大火之缺失，同樣地發生在 1987 年 11 月 18 日晚上英國 King's Cross 地下車站。

因旅客抽煙，未熄滅之火柴經電扶梯之縫隙，掉落至電扶梯之機件溝槽，引燃油脂，形成火災，火勢一發不可收拾。共造成 31 人死亡，多人重傷。造成傷亡慘重的原因可從硬體面與制度面來檢討。

首先為車站設施硬體方面，車站內部大量使用易燃和有毒的裝修材料，火災形成時，遂很快造成閃燃。再加上車站消防安全設備設置不全，如並無裝置自動灑水系統等，以致火勢擴大而無法控制。車站內雖有緊急廣播系統，但事故發生時沒有告知旅客火災的狀態，以及引導人員逃生避難等。

每年有消防檢查，但檢查的內容只不過是涉及易燃物品的堆放和滅火器的放置，並無消防安全設備性能之檢驗。

其次為車站使用管理方面，車站方面並無嚴格禁止旅客在站內飲食及抽煙，以致形成本次火災之導因。此外，並無一套完整有效之緊急運轉程序，以致發生事故時，工作人員在緊急狀況下並未做出正確的反應，而幫助旅客避難逃生，以及幫助消防救助之進行。

美國舊金山與奧克蘭間的舊金山灣捷運系統，於 1979 年 1 月 17 日下午 6 時許，因先前列車的意外事故，但由於沒有徹底檢查與修護，導致後面行駛列車機件故障形成大火。共造成 1 位消防隊副隊長死亡，44 位消防人員受傷。

本次火災事故中，火災事故初期，由於緊急通風閘門未全部關閉，因而致使濃煙籠罩整輛列車。其次，連絡失當，消防隊員奔錯地點，因而浪費許多寶貴時間。再由於營救列車啟動行駛，造成活塞效應，使濃煙進入維修通道與 M2 隧道，而氣流大亂造成傷亡。顯見並無依照緊急運轉程序來進行救災，須建立完整之火災緊急運轉程序與避難救災計劃，並定期演練。

1968 年 1 月 27 日中午時分，日本東京都日比谷線地下鐵發生火災，地點在「六木本」車站與「神谷町」車站間之隧道內，因機件故障，列車發生火災。總共造成 11 名人員受傷，包括團營地下鐵職員 8 名及消防隊員 3 名。

因隧道內並無通風煙控系統之設計，故火災時產生的濃煙，受到列車的活塞效應與大氣的自然風二種因素的影響。進入火場搶救之救援列車，因電力供應中斷，無法抵達現場，失去救援目的。另外，消防隊員從上風方向進入火場，乃為幸運之處。應設置通風煙控系統，而提供消防隊員一條無煙之進入搶救路線，才是正確之設計理念。

最後為 1996 年 11 月 8 日英法海峽隧道火災，因具備完整之緊急運轉程序，所幸並無造成人員重大傷亡，只造成部分之財物損失。

英法海峽隧道本身具備良好的通風煙控系統，尤其維修兼避難隧道，裝置加壓設備與自動導引列車，更是讓避難人員與消防隊員，能於無煙的環境從容行進。最重要地，整個進行救災時，依照緊急運轉程序來進行，顯見建立火災時之緊急運轉程序與避難救災計劃，並定期演練之重要性。如此，才能將災害傷亡降到最低，本次事故即是明證。

歸納上述五個火災事故分析可得，為減少因發生火災時之傷亡程度，首先有必於硬體方面要求使用難燃物或不可燃物，對於基本的消防安全設備之設置，如火警探測器、自動撒水系統、緊急廣播等，需確實要求。

最後再依照消防設備之性能與操作，如煙控性能與煙控系統運轉特性，訂定一套完整有效之緊急運轉程序。然後，確實落實於管理者，如車站工作人員，甚至使用者，旅客等。如此才能大大減低因火災所能造成之危害，以增進人身安全，提供安全舒適之運轉環境。有關以上地鐵火災相關資料搜集，整理如表 6-1，以提供捷運公司日後作為設計與營運之參考。

表 6-1 地鐵火災相關資料整理

重大火災事故	死亡	受傷	發生原因	災後檢討
蘇聯亞塞拜然地鐵大火	289	265	機件故障導致火災	隧道通風策略失效
英國 King's Cross 地下車站火災	31	27	旅客引起火災	車站裝修易燃物過多，消防設備不足
美國舊金山灣地下捷運火災	1	44	機件碰撞導致火災	緊急運轉策略失效
日本地下鐵日比谷線電車火災	0	11	機件故障導致火災	緊急運轉策略失效
英法海峽隧道火災	0	0	機件故障導致火災	緊急運轉策略成功

◎ 高雄捷運典型地下車站月台區煙控模擬

本研究項目之進行為典型地下車站大廳層及月台層排煙系統煙控模擬，當月台屏門將月台候車區與隧道區分開後，則月台候車區可視為與居室雷同之空間，此時進行區劃機械排煙，則可獲得較佳的煙控效果。

由以往模擬經驗與現場瞭解，火災發生後除火場附近外，氣流溫度均不高，故本次模擬先進行四項不考慮溫度場影響之模擬。本次首先模擬為以二個區劃排煙口及一個區劃排煙口進行排煙，觀察排煙效果。另模擬火災發生時、於月台區時受外界風速 1.5m/s 之影響。

目前車站大廳層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能。經目前電腦模擬結果分析得知，當火災發生後 600 秒後，防煙垂壁充分發揮阻煙功能，且機械排煙之排煙量足夠，可一直維持煙層在人眼睛高度以上。故當消防人員進入搶救時，不需要改變車站內部任何煙控策略，即可提供消防人員一條無煙之搶救路徑。

月台區煙控模擬分析，共完成七個案例，包括大廳層月台區四個案例、月台層三個案例。如下表 3-4 所示。

表 3-4 月台區煙控模擬案例說明

排煙區劃	案例一	案例二	案例三	案例四	案例五	案例六	案例七
排煙區數	1	2	1	1	1	1	1
大廳層 排煙系統	✓	✓				✓ (無自然風)	✓ (有自然風)
月台層 排煙系統			✓	✓	✓		
火源釋放					✓	✓	✓

其模擬結果分析如下：

- (A) 經由分析發現，整體而言，由於大廳層及月台層有較為寬闊之空間，當排煙系統運作時，雖然以現有的法規抽取一定之排煙風量，案例一模擬結果顯示，其橫斷面氣流速度值極小，均小於 1.0 m/s。另外，其抽取之排煙風量之來自於外界氣流，氣流進入站體後，環繞出入口產生回流後由排煙系統抽出。
- (B) 對於開啓單一排煙區劃或兩區劃之差異性，由案例一、二之模擬結果顯示，二者均僅在排煙口位置處有較為高速之氣流，開啓單一排煙區劃時較兩區劃為高，有較佳之排煙效果。然離排煙口約 10 公尺以外之區域則已降至極低，此為 Plugholing 效應。
- (C) 比較案例一、二，當不同區劃個數進行排煙時，由於總排煙量固定，在出入口端處有相同之氣流分布情形，然而當二個區劃排煙進行時，整體排煙功能將不如單一區劃來得集中，由模擬結果即可觀察其差異性。
- (D) 另為觀察出入口自然風之影響，於月台啓動排煙系統，由案例三、四結果發現，因站體幾何形狀之因素，當某出入口雖有氣流進入，然一部份會經由對側出入口排出。比較其模擬結果發現，自然風影響靠壁端之氣流組織，對大廳層影響程度較月台層為大，但對排煙系統性能影響不大。
- (E) 案例五為觀察在 2.0MW 之火災規模下不同時間之火場溫度及濃度之變化。火災係以「T-square」理論釋放熱量。當於發生後 60 秒時火場之氣流溫度約為 40°C。由模擬結果得知，在火災初期時，溫度尚未達到阻礙人員逃生通道之值。
- (F) 案例五在 2.0MW 之火災規模，當於發生後 240 秒時火場之氣流溫度約為 96.89°C，此時月台層之溫度分佈得知，在火災發生時，防煙垂壁確時可阻擋濃煙之擴散。

- (G) 由案例五中，火災發生後 360 秒及 600 秒之溫度與濃度分佈圖得知，目前車站月台區月台層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，可一直維持煙層在人眼睛高度以上。當消防人員進入搶救時，不需要改變車站內部任何煙控策略。
- (H) 案例六假設在 60 秒後排煙風機方達到設計運轉狀態。火災發生後 30 秒時大廳層之濃煙變化情形，因此時排煙風機尚未開啓，濃煙呈現自然擴散狀況。由結果得知，在此時排煙設備未啓動狀況下，防煙垂壁發揮了其效果，此時大廳層分佈之溫度約為 30~40℃。
- (I) 案例六在火災發生 60 秒後，排煙風機完全啓動下，顯示濃煙持續擴散，顯示此刻大廳層溫度已上昇至 53℃，同時由排煙口處氣流分佈狀況顯示，此刻濃煙排除具有極為明顯的 Plugholing 現象。至火災發生後 120 秒時，顯示起火點上方之火場溫度已超過 60℃，此溫度為可能造成避難行動減緩之值，但僅有影響火場附近極小範圍，於大廳層仍有足夠寬度之安全避難走道。
- (J) 在案例六中，當火災燃燒現象進行至最高點時（即 240 秒），由模擬結果顯示火場超過 60℃ 溫度之範圍已由起火點位置擴散，可能造成避難行動減緩之值，但僅有影響火場附近極小範圍，於大廳層仍有足夠寬度之安全避難走道。
- (K) 由案例六中，火災發生後 360 秒及 600 秒之溫度與濃度分佈圖得知，目前車站月台區月台層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，可一直維持煙層在人眼睛高度以上。當消防人員進入搶救時，不需要改變車站內部任何煙控策略。
- (L) 案例七與案例六之差異，在於有無自然風之影響。本案例依實際狀況訂

定邊界條件，以模擬兩側地面出入口自然風同時對車站影響之真實情況。模擬地面出入口在設定一大氣壓靜壓下、氣流為 1.5m/s 的動壓狀況下之影響。之前案例四直接假設速度邊界，須考慮質量守恆原理，較案例七不接近真實狀況，故本案例遂採用壓力邊界進行假設，以接近真實狀況。

(M) 案例七經模擬結果顯示，因設置月台屏門之故，出入口樓梯速度分佈相當小。由結果可知，外界自然風之影響，有如像吹氣球的情況一樣，只是朝車站大廳層吹氣加壓，並不會對煙控系統之性能產生影響。

◎ 高雄捷運典型地下車站軌道區煙控模擬

本研究計畫進行典型地下車站軌道區通風及排氣系統煙控模擬，本次模擬中針對緊急運轉模式，建立模型月台軌道上方排氣系統（OTE）及車站兩端之通風豎井（Vent Shaft），以在緊急狀況下可將濃煙有效予以排除。

本研究所完成之高雄捷運系統典型地下車站軌道區模擬案例條件說明，示如下表 3-5。

表 3-5 高雄捷運系統典型地下車站軌道區煙控模擬案例說明

	案例八	案例九	案例十	案例十一	案例十二	案例十三
隧道風機運轉模式	Pull Only	Push and Pull	X	Pull Only	Push and Pull	Push and Pull
OTE 排氣系統	O	O	O	O	O	O
UPE 排氣系統	X	X	X	X	X	X
火源釋放	X	X	X	O	O	O

其模擬結果分析如下：

(A) 案例八模擬結果顯示，當隧道風機以排氣方式運轉（Pull only）及 OTE 系統皆開啓下月台屏門之風速分佈情形，由結果顯示月台屏門處氣流速

度約為 0.4~0.6m/s，流動方向為自月台區流至軌道區。模擬結果亦顯示，當 OTE 排氣口之運作情形，由結果顯示可有效抽取軌道上方氣流，因此在列車發生火災停靠車站時，OTE 系統可將受熱上浮濃煙予以排除。

- (B) 案例九模擬結果顯示，當隧道風機以一送、一排方式運轉 (Push and Pull) 及 OTE 系統均開啓下月台屏門之風速，由結果顯示月台屏門處氣流速度約為 1.3~1.7m/s，流動方向為自軌道區流至月台區，顯示氣流方向係受隧道風機之送氣因素影響。再由 OTE 排氣口之運作情形得知，其除可抽取軌道上方氣流外，受隧道風機之送氣因素影響，列車周圍亦有股氣流流動，約為 1.7~2.0m/s。
- (C) 案例十模擬結果顯示當隧道風機不運轉、僅 OTE 系統單獨開啓時月台屏門之風速，由結果顯示月台屏門處氣流速度約為 0.3~0.4m/s，流動方向為自月台區流至軌道區，此結果恰可顯示 OTE 系統之存在對軌道區環境影響。再由模擬結果顯示，OTE 系統運作時，可在月台門處產生一股氣流，抑制軌道區氣流竄入月台區。
- (D) 案例十一為觀察火災在起火後十分鐘內濃煙之擴散現象，研究之地點包含軌道區起火點處第一扇月台門位置之橫斷面、起火點與通風井中間位置（約 1.5 節車廂長度）之橫斷面、軌道區縱向分佈及車站兩端隧道通風井下方位置與人員逃生高度 (FFL Z=1.5 公尺) 等地點。
- (E) 由案例十一模擬結果得知，在 TVF 系統啓動後，可發現溫度場分佈情況有顯著之改變，主要為高溫氣流蓄積位置有不對稱之傾斜現象發生。原因為風機運轉模式係 Pull Only 模式，當隧道風機抽取軌道區氣流時，外界氣流自月台層、經由月台門進入車站軌道區域，以進行補充作用。
- (F) 另觀察案例十一之軌道區縱向，可發現高溫濃煙沿軌道上方朝縱向（即

車站兩端) 逐漸擴散，同時亦顯示 OTE 系統運轉時產生排煙、降溫區隔等效果，導致高溫濃煙每經過一只排風口、溫度與濃度即明顯降低。

- (G) 而觀察案例十一在 1.5 公尺高度之模擬結果，無明顯有濃煙流入月台層而導致妨礙人員逃生之情形產生。
- (H) 案例十二之觀察位置除與案例十一選取之五個位置相同外，考量 TVF 系統運轉之特性，因此亦觀察通風井位置 (X + Shaft) 對稱軌道區中央橫斷面之對應面 (X-Shaft) 位置，以觀察與研究相同時間下、不同位置火場變化。
- (I) 案例十二之車站兩端通風井 (X+ 端與 X- 端) 溫度場與濃度場之分佈情形。由結果顯示在風機已運轉約 45 秒後，原本藉由自然擴散方式到達送風側通風井之濃煙已幾乎快無蓄積現象，而排風側通風井濃煙則逐漸增多。
- (J) 由案例十二結果顯示，送風側通風井之濃煙已消失不見，而排風側通風井濃煙則逐漸增多。對於排風側通風井氣流組織之觀察，可發現因 X- 端送風機產生作用，致使抽取軌道區濃煙量增多、隧道風量被抽取量降低。
- (K) 觀察案例十二模擬結果得知，送風側通風井無任何濃煙累積現象，排風側通風井濃煙因送風側風機 Push 效應逐漸增多，抽取隧道風量降低，而氣流組織不同於案例十一之 Pull Only 形式。
- (L) 案例十三另模擬起火點位於列車第一節車廂處，隧道風機以兩種不同運轉模式 (Pull Only Mode, Push and Pull Mode) 運轉下，觀察溫度場及濃度場分布情形。
- (M) 由案例十三結果顯示，在風機啟動前(240 秒)，僅 OTE 系統運轉，高溫

濃煙累積於車廂上方。風機啓動後，濃煙逐漸被抽離，於 420 秒時，分布情況已趨於穩定，與 600 秒時狀況相似。

- (N) 觀察案例十三模擬結果得知，因起火點較靠近 X- 側之通風豎井，顯示在風機啓動前濃煙自然累積並至呈捲曲現象。當風機啓動後，因列車廂體阻塞比大，風機抽取氣流大部分來自隧道區，故濃煙氣流排出時呈現聚集於部分一側之現象。

◎ 站體煙控系統縮小模型試驗分析

評估捷運車站之煙控系統能力之方法，大致可分為全尺度實驗、縮小尺寸模型試驗及電腦模擬分析等三種方法。

全尺度實驗是以實際為實驗對象，實地進行實驗，因此其實驗結果為真實狀況。但全尺度實驗所耗費之成本高，而且對於實驗裝置的變更以及實驗的重現性不易，故大部份的研究均採行後者。於本案中，由於高雄捷運系統尚未完工，目前無法依此方法分析。

電腦模擬分析乃是藉由整個煙控系統之數學模式的建立，加上初始條件、邊界條件之設定，而加以計算數學模式的結果。電腦模擬分析之成本為三者最低者，且其預測結果亦與實際狀況相當，為大部分研究所採用。

而縮小尺寸模型實驗乃是根據『動態相似理論』使模型與實體之間不但尺寸成比例，而且運動及動力亦成比例。縮小尺寸模型實驗之優點為實驗成本較全尺寸模型實驗低，而且對於實驗裝置的變更容易，實驗條件參數的控制容易；而其缺點對於複雜的案例，必須加以簡化。對於無法完全依照『動態相似理論』模擬出所有的條件時，僅能針對重要的實驗進行『非完全動態相似理論（Incomplete Similarity Dynamic Theory）』。

因此，在模擬實驗中，與模擬真實情況之空氣動力特性，必須利用『非完全動態相似理論（Incomplete Similarity Dynamic Theory）』，使模型與全尺度實體二者支流場分佈符合紊流區狀態，即可到達模擬效果。故本研究之模型的氣流保持與實體相同，雖然兩者之雷諾數相差兩個級數，但均在紊流區內，可縮小模型試驗可模擬真實車站之空氣動力性質。

基於置放縮小模型場地之大小，本案之縮小模型為 1/30 之所小尺度。故依照高雄捷運典型地下車站之尺寸，本模型主要結構將分為月台層與大廳層兩部份。而縮小模型製作過程，首先將模型本體完成。其次，將設計縮小模型內部之煙控系統。有關縮小模型內部之煙控系統設計方面，將分為大廳層、月台層、軌道區 OTE 系統、與隧道通風系統等，四部份進行設計。最後安裝其他實驗設備，再架設與校正實驗結果量測儀器，包括：可調式燃燒器系統、熱電藕束、與數據自動擷取系統。

本研究之煙控系統縮小模型試驗項目將分成五部份，包括：大廳層火災排煙系統單區排煙、大廳層火災排煙系統雙區排煙、月台層火災排煙系統單區排煙、月台層火災排煙系統雙區排煙、與月台層軌道區火災隧道通風機雙邊排煙。

而於月台層與軌道區模型試驗結果分析方面，經觀察結果得知，於排煙系統啟動後，濃煙被局限在防煙區劃內，並未流出月台屏門或防煙區劃外之區域。而於大廳層模型試驗結果分析方面，經觀察結果得知，於排煙系統啟動後，濃煙被局限在防煙區劃內，並未流出防煙區劃外之區域。

基於以上試驗結果，目前高雄捷運地下車站月台層與大廳層之排煙系統設計，具備良好之煙控系統，可於火災時維持煙層於人的眼睛高度以上。

最後，為驗證縮小尺度車站模型火災試驗之準確度，本研究除進行格點

分析外亦對縮小模型進行 3D CFD 的模擬，以進行交叉比對。本項模擬依據車站縮小模型實驗之幾何尺寸建立格點，並依照縮小模型實驗之各項設定資料設立邊界條件。

經 3D CFD 電腦模擬結果得知，Model scale 3D CFD 與 Full scale 3D CFD 之模擬結果並無太大差異。

◎ 人員避難動線分析檢討

目前國際間常用避難時間之計算方法可分為簡算公式 (Hydraulic Model) 和動態避難模擬 (Dynamic Model)。簡算公式必須假設同一居室火空間之人必須同一時間開始逃生行動、避難人員之間無互動性、避難人員可以順暢流動及每一避難人員之設定參數均勻相等。

目前捷運地下車站避難逃生計畫之基本設計依據為美國國家防火協會 NFPA130, "Standard for Fixed Guideway Transit Systems" 之相關規定，此標準廣為現行各國捷運系統避難逃生系統所引用。NFPA130 專門針對定軌運輸系統的火災預防及人命安全而提出，且已涵蓋了所有緊急事件同時發生之最壞情況下，所做之逃生時間計算。

其中，NFPA 130 於 2-5.3.1 章節及 2-5.3.2 章節中明文列出，除可照條例式設計讓月台上所有人員於 4 分鐘內離開月台，及 6 分鐘內到達安全點外，亦可利用性能式工程分析方式，藉由火載量設計、車站建築構型與緊急通風系統設計等方式，而放寬於 4 分鐘內離開月台，及於 6 分鐘內到達安全點之避難時間。

而動態避難模擬方面，每位避難人員具有各自之設定參數，可依據各人之所在情況模擬每一避難人員之避難行為，避難人員間之互動關係會影響到

各人之步行速度與行進方向之變化，此為動態避難模擬與簡算公式之主要差別之一。其模擬結果較近似於真實狀況，對於避難過程中所產生之各種瓶頸問題、避難人員位置、速度、方向等可以加以重現，以提供設計者更多資訊參考。當發生火災時，人員於湧向逃生口時將產生大量之推擠與瓶頸等遲滯現象而呈現明顯的動態反應（Dynamic Response）。目前傳統式之避難規劃皆以簡易穩態穩流（Steady State-Steady Flow）進行，人員行進間並不互相等待或超越，而以與逃生口之距離除以平均之逃生速度而得。

本項工作針對高雄捷運典型車站大廳層與月台層之平面圖，進行動態避難模擬分析。所完成的案例有二個，包含 4 個不同火災情境（Scenario）。

由於本動態避難模擬分析，為由車廂進入月台層，再由月台層至大廳層最後至地面層。與其他捷運車站實際避難逃生實驗結果，單單只從月台至大廳層在至地面層之模擬情境不同。因此，其二者之結果並無法比較差異。

另外，此種具月台屏門之捷運地下車站，因月台屏門之開口與捷運車廂之開口相同，並不對人員之避難產生影響，此點亦可由動態避難模擬過程中得知。

另外，動態避難模擬結果再與第三章中之煙控性能電腦模擬結果比對，目前車站大廳層與月台層之煙控系統設計，具備良好之煙控性能，防煙垂壁充分發揮阻煙功能，且機械排煙之排煙量足夠，可一直維持煙層在人眼睛高度以上，且時間可長達 10 分鐘。與各案例之總避難時間皆在 10 分鐘內比較，可知目前高雄捷運典型地下車站其煙控系統與避難系統，於發生火災時，皆可提供人員安全地逃生車站外。

◎ 計畫總結

以上所述是本研究案【高雄都會區捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動線分析之檢討】總結。本研究之成果證明，當高雄捷運典型地下車站發生火災時，目前煙控系統其排煙量足夠應付可能發生的煙害，而其避難系統設計良好，人員可在煙控系統正常運作下，於無煙之逃生路徑上完成緊急避難過程。確實可保障高雄捷運系統日後完工通車後，旅客之人身安全。

然而，未來於高雄都會區捷運系統實際興建進行細部設計之際，由於各車站將因地形之不同而各種不同之幾何尺寸與布置（Layout），也因此所有 3D CFD 電腦模擬及動態避難模擬分析皆須再依各車站之特性各自模擬分析一次，才可確實保障高雄捷運系統日後完工通車後，旅客之人身安全。

參考文獻

1. 「The Baku Subway Fire」, Bo Wahlstorm, Stockholm Fire Department, Sweden
2. 「倫敦地鐵 King's Cross 站火災調查報告」, 上海消防科學研究所譯。
3. 「地下設施災害の消防戰術」, 日本消防活動研究會, 平成六年
4. 「We don't have any air – The story of BART fire 136 feet under bay」, July 1979, Fire Engineering.
5. 鈴木 健, 「英海峽トンネルで發生した火災の概要」, 火災 (228 號), Vol. 47, No 3, 1997 6。
6. STAR-CD (Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions) USER MENU, Computational Dynamics Ltd.
7. Morgan, H.P. "Smoke Control Methods in Enclosed Shopping Complexes of One or More Stories: A Design Summary", Building Research Establishment Report, 1979
8. NFPA 92B, 2000, "*Guide for Smoke Management Systems in Mall, Atria, and Large Areas*".
9. New Zealand Fire Protection Association, "*Fire Engineering Design Guide*".
10. MacCaffrey, B.J., "Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results", National Bureau of Standards, NBSIR 79-1910, 1979.
11. Chow, W. K., Lo, Anthony C. W., "*Scale Modelling Studies on Atrium Smoke Movement and the Smoke Filling Process*"
12. 內政部營建署, 「*建築技術規則*」。
13. NFPA 130, 2000, "*Standard for Fixed Guideway Transit Systems*".
14. 沈子勝, 1996, 「*避難設計與專題*」, 鼎茂圖書出版公司。
15. 楊冠雄, 1996, 「*建築物防火之煙控設計分析*」, 復文書局。