

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

有著「隱形殺手」之稱的一氧化碳，無色無味，吸入體內後，其量微則頭暈、呼吸困難，多則反胃、抽筋甚至死亡，若是在居室內瀰漫開來，將令人防不勝防，造成不可挽回的後果。

台灣每年都會因為瓦斯熱水器安裝不當、通風不良，造成重大傷亡的案件出現，大多發生於冬天東北季風與寒流來襲時，門窗緊閉，因氧氣濃度不足 15%，使瓦斯熱水器燃燒不完全而產生大量一氧化碳，進而使人員發生中毒現象。

因此，為了讓人民更了解在室內加裝熱水器其嚴重性，政府機關每年冬季都會做加強宣導；專業人員方面，消防署在民國 94 年 7 月 22 日發佈「燃氣熱水器及其配管安裝標準」，以減少因為熱水器安裝不當所造成的人員傷亡，使中毒案件數維持在 50 件以下(圖 1-1)，但是這反而造成了一種迷思，以為只要裝在室外陽台就能保證安全，這只有對一半，還得確保通風才是正確的。

勞工安全衛生所[1]已使用全尺寸實驗的方式，針對不同通風條件下，居室一氧化碳累積情形，可供政府與學術界做為參考，但實驗基於成本考量與人員風險過大，只能針對典型建築進行探討，故本研究使用 FDS (Fire Dynamics Simulator)以各種不同參數設定進行一氧化碳濃度擴散分析；目前國內使用 FDS 模擬分析大多為火災煙控模擬，皆會設定補氣口促使火源完全燃燒，產生之一氧化碳幾乎不會對人體造成傷害，但對於通風不良使火源燃燒不完全而產生大量一氧化碳之火災模擬的探討少之又少，故本研究也將著重於 FDS 通風不良燃燒模型進行分析。

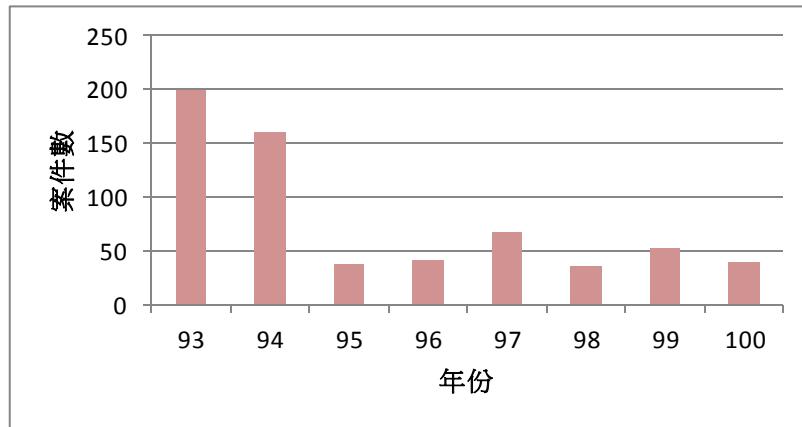


圖 1-1 瓦斯熱水器一氧化碳中毒案例

資料來源：內政部消防署

1.2 文獻回顧

呂博弘等人[1]以全尺寸實驗的方式，探討密閉空間、風向、開窗面積大小及導管的有無及門窗的阻隔等對於一氧化碳的累積或排除等影響，結果發現在體積約 14m^3 的全密閉的陽台空間中，其一氧化碳濃度值可在15分鐘高達 1500ppm ，且在開窗的情況下，若風向為吹往室內，室內於50分鐘後達到 100ppm ，打破一般認為只要開窗就不會有危險的迷思。

陳躍仁[2]使用NIST所發展的FDS (Fire Dynamics Simulator) 模擬軟體進行瓦斯熱水器一氧化碳擴散分析，並將結果與呂博弘等人[4]之實驗相比較，發現其趨勢極吻合。結果發現陽台空間大於 14m^3 使用瓦斯規格小於 $16\text{L}(33.1\text{KW})$ ，並且關閉陽台與室內相通門窗且陽台未晾曬衣物之環境下，將陽台對外窗開啟 0.2m^2 以上時，即可保持室內空間之人員安全。

Forbes等人[3]研究一氧化碳毒性對於人體內部的影響，研究發現其吸收量依每分鐘通氣量、暴露時間長短、環境中一氧化碳和氧氣之相對濃度而定。

Rodkey等人[4]說明一氧化碳如何與人體中血紅素進行結合，並

提出碳氧血紅蛋白的形成與溫度有關，分別測試攝氏26度以37度的血液，結果顯示攝氏26度的血紅素一氧化碳攜帶量低於37度。

Lippi等人[7]分析一氧化碳中毒時給予高壓氧氣的正確性。理論上常壓氧也有加速碳氧血紅蛋白分離的效果，但臨床研究發現也是有案例會出現認知障礙等後遺症，且對於重症病患(血液中一氧化碳濃度大於30%)很難讓一氧化碳濃度低於5%~10%，故此研究提出雖然使用高壓有治療會導致肺泡破裂、增加心臟負擔等症狀，但病情重大者經衡量過後使用高壓氧仍然是風險最低的治療。

NIST Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide[15]提供FDS燃燒模型相關數據與模式說明。

宋艷[16]使用FDS與實驗進行驗證，探討計算領域的不同是否會影響計算結果。結果顯示若考慮室外空間之網格，除了趨勢正確外，還可有效降低誤差。

吳世騰[18]分析與歸納新竹地區歷年來發生一氧化碳中毒事件，其中以熱水器安裝在室內與加蓋陽台為多，而案件發生的建築類型以集合住大樓最多，佔總件數34%。研究結果建議政府除了加強宣導外，更要積極採取入屋檢查，並規範詳細罰則與提高熱水器遷移補助，以確保居住環境安全。

Floyd[19]等人使用FDS在居室在通風不良的條件下進行模擬，並以文獻Wolfhard-Parker實驗進行驗證，探討single-step與two-step之燃燒模型對於一氧化碳的準確度，結果發現two-step一氧化碳生成量在燃燒爐的前後量測誤差值為0.7%與0.8%，而single-step則是往不同方向成長。

楊東等人[20]分析FDS之single-step與two-step的燃燒模型對於火場預測的準確度，與實驗數據比較，發現兩者預測火場的溫度分佈差距不大，而two-step對於通風不良的環境下能就較準確的預測出一氧化碳的生成量，就算加大single-step一氧化碳生成量，兩者還是有

相當明顯之差異。

郭倩倩等人[21]利用 FDS 模擬地下礦坑因電纜線走火釀成火災，所產生之有毒物質分析，發現一氧化碳濃度危害最大，分別在地下 60m 與 70m 處量測到 0.0156% 與 0.0215% 的濃度。模擬所得之數據可為往後地下礦坑安全設置提供一個依據。

蔡銘儒等人[22]參照內政部建築研究所防火實驗中心建置的 10MW 大尺度燃燒分析裝置、ISO 9705 房間量熱儀及可調整天花板高度之單一房間火災模式驗證實驗屋之局限空間，所進行之研究實驗資料使用 FDS 建立模型，再將模擬結果與實驗結果進行比對，得出針對火災模式驗證與文件化等標準之研訂，可供設計者設計評估與主管官署評定之參考。

Prasad 等人[23]使用 FDS 及分析模型預測氫氣濃度並與實驗對照。實驗場所為車庫，裡頭放置一台汽車，氫氣洩漏位置在車子底下。結果發現分析模型預測值與實驗非常接近，則 FDS 在自然通風下與實驗值誤差 0.4%，強制對流相差 1.0%。雖然分析模型結果十分準確，但無法預測氣體流到其他居室的體積分率。

王佩琪[24]以統計分析法說明近年來國內外一氧化碳中毒事件數據，文獻蒐集與回顧法說明燃氣熱水器類型與一氧化碳生成關係，及國外防範一氧化碳中毒相關規定；並針對國內燃氣熱水器承裝制度、建築相關法令、政府補助措施、消防法修正草案內容等，於了解執行情形及缺失後，依國內民情及參考國外法規提具建議，做為完備國內相關防範措施之參考。

李東昇[25]年利用 FDS 火災模擬軟體對公寓住宅進行火災模擬，以瞭解火災的成長、延燒、濃煙流動擴散、溫度及一氧化碳濃度變化。由研究結果顯示，FDS 可設定偵測居室中特定點之氧氣、一氧化碳及二氧化碳濃度之蓄積情況，並可匯出時間—濃度曲線圖，可用於評估室內空間在多久時間內即可蓄積至一氧化碳危險濃度，造成內部人員

健康上的危害性。

張瑋如[26]使用CFD-ACE⁺模擬典型台灣住家環境，陽台熱水器因燃燒不完全產生一氧化碳擴散至鄰室之探討，發現當通氣速度小於 $3.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，流場主要運動為擴散作用，室內門關閉與否，並不影響一氧化碳的分佈，若通氣速度大於 $3.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，當室內門開啟時一氧化碳之濃度遠小於室內門關閉的情況。

張裕忠等人[27]分別使用 6.5 m^3 與 15 m^3 進行在有開口與無開口的情境下燃氣熱水器燃燒情形，發現密閉空間越大，空氣中一氧化碳濃度越高，而在 6.5 m^3 開啟一面積為 0.17 m^2 之窗戶，持續使用則一氧化碳濃度會超過25ppm。

Chow 和 Gao[28]使用計算式，探討小居室火災牆面垂直開口與天花板之水平開口，利用 $B = Gr/Re^2$ 判斷排煙時主導力是氣體膨脹壓力或是浮力。結果發現，當 $B \ll 1$ ，窗口排煙機制為熱膨脹所以起的壓力主導；當 $B > 10$ ，排煙機制為浮力主導，因密度差異會產生一中性帶，形成上方排氣下方吸氣的現象。

王馨[29]使用FDS模擬小居室火災具有開口之驗證，與文獻比對結果其速度與溫度達不到實驗的最大值，但趨勢相符且誤差不大；中性帶的高度也能準確地預測。針對不同熱釋放率進行模擬，發現從67.5KW增加到500KW，中性帶不斷下降，最後由氣體膨脹壓力主導，形成氣體不斷排出，新鮮空氣無法補給的狀況。

1.3 研究內容

本研究參照行政院勞工委員會勞工安全衛生所於95年12月發表之「陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究」[1]所記載之數據，利用美國 NIST（National Institute of Standards and Technology）所發展之火災模擬軟體 FDS（Fire Dynamics Simulator）建模重現其現場，模擬出瓦斯熱水器在各種情境下，一氧化碳濃度分佈情形，再把得出之數據與勞研所之實驗數據進行驗證，而後針對陽台的安全性，參考國內常見中毒原因，進行一氧化碳擴散分析。研究流程如圖 1-2 所示。



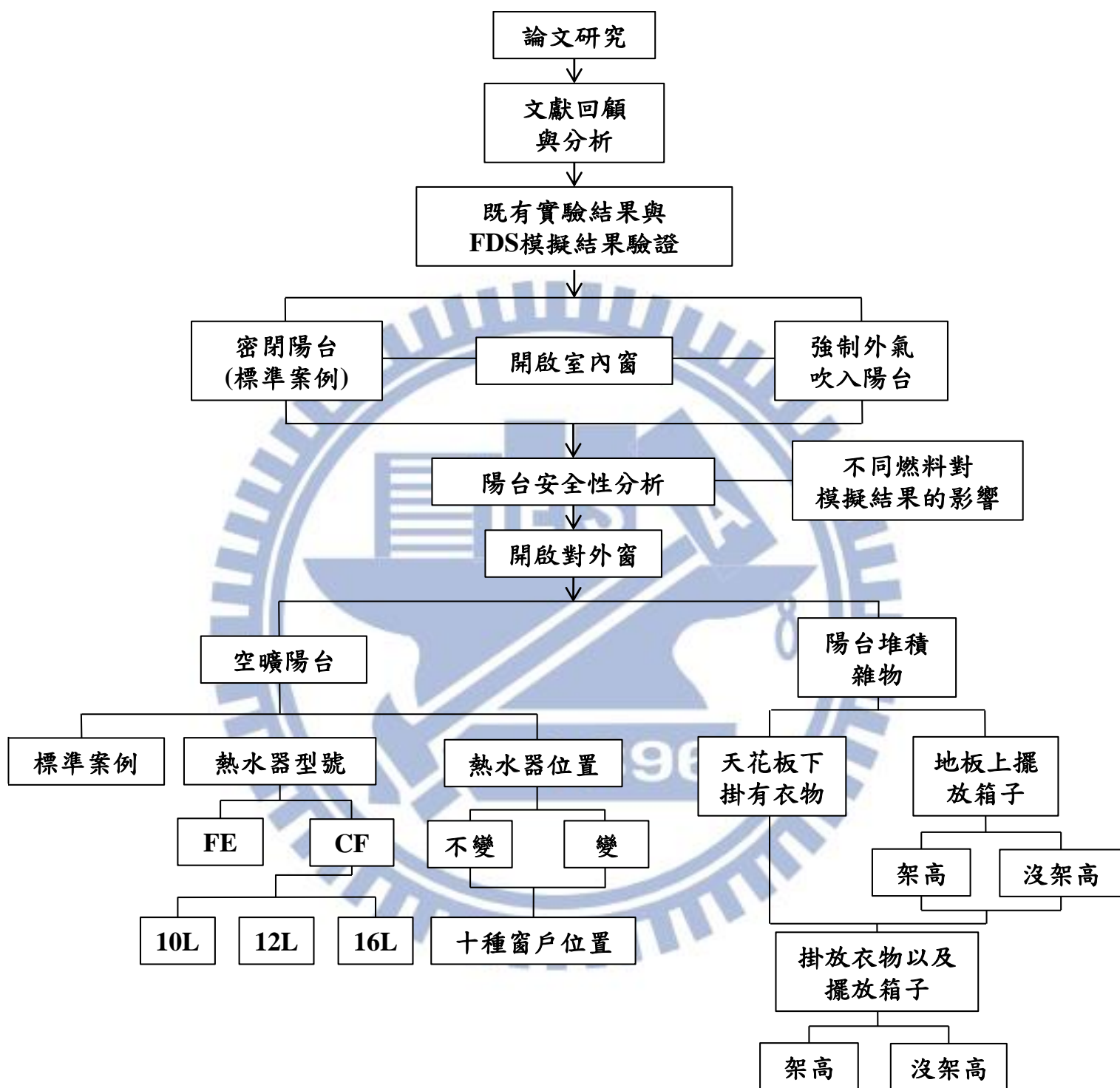


圖 1-2 研究流程圖

第二章 一氧化碳與國內外中毒防範措施介紹

2.1 一氧化碳中毒特性

一氧化碳為無色、無味、無臭、無刺激性之有毒氣體，瀰漫開來不易察覺，且吸入體內容易被肺部吸收，吸收量依每分鐘通氣量、暴露時間長短、環境中一氧化碳和氧氣之相對濃度而定[3]。一氧化碳對人之所會造成這麼大的威脅，主要是因為其容易與人體內血紅素（hemoglobin）結合形成碳氧血紅蛋白（COHb），結合能力比氧強200-230倍[4,5]，且碳氧血紅蛋白的解離速度比氧血紅蛋白(O₂Hb)慢3600倍，若空氣中一氧化碳的濃度達60ppm，即可抑制血紅素攜帶氧氣的一半能力；因此血紅素在優先與一氧化碳結合的情況下，將會大幅降低血液輸送氧的功能，導致心臟和腦組織缺氧而嚴重受創；若處於高濃度下，會使大腦失去正常功能甚至死亡。

一般人在吸入過多的一氧化碳後，會先出現頭暈、疲倦、四肢無力等，因此常被誤認為感冒前兆，錯過逃生第一時間，接著出現嗜睡、視力模糊、心律不整、心肌缺氧、呼吸困難等症狀，經過急救後有可能會留下智能障礙、大小便失禁、步態不穩等嚴重後遺症，甚至因此而送命。參考 NFPA（美國國家消防協會，National Fire Protection Association）防火手冊（NFPA's Fire Protection Handbook）[6]，整理出空氣中一氧化碳濃度對於一般成人之影響如表 2-1。此外，目前針對一氧化碳中毒，最有效的方法是使用高壓氧治療[7]。

由上述特性可見，若發生一氧化碳中毒事件，其威脅人命安全程度之高可見一斑。一般常見的情況有汽柴油引擎或幫浦等機械設備排放之廢氣、火災事故現場及不當使用燃氣器具等加熱設備，此類機具在燃燒的過程中，燃料因氧氣缺乏而導致燃燒不完全，使大量一氧化碳釋出，進一步引發一氧化碳中毒事故。其中，一氧化碳中毒事故就屬居家所使用之燃氣熱水器處於通風不良之環境最廣為人知。觀察以

上不同類型之事故，可發現燃燒所產生之一氧化碳濃度危險與否與是否處在通風環境下之關係非常密切。

表 2-1 一氧化碳濃度對於一般成人之影響[6]

環境中一氧化碳含量 (PPM)	暴露時間	出現症狀
50	8 小時	無明顯症狀
200	2~3 小時	輕微頭痛
400	1~2 小時	明顯頭痛、反胃
800	45 分鐘	頭暈、反胃、暈眩，1 小時即失去知覺
1,000	40 分鐘	意識混亂、心跳呼吸加速，1 小時即失去知覺
1,600	20 分鐘	頭痛、反胃、暈眩情形，2 小時會死亡
3,200	5~10 分鐘	頭痛、反胃、暈眩情形，30 分鐘會死亡
6,400	1~3 分鐘	頭痛、暈眩，10-15 分鐘內會死亡
12,800	1~3 分鐘	1-3 分鐘內可能會死亡

2.2 各國防範一氧化碳中毒措施

2.2.1 我國防範措施

台灣每年至少有 50 件以上一氧化碳中毒事件，燃氣熱水器為主要禍首，其原因大多有兩個因素，一是燃氣熱水器擺置室內且沒有安裝排氣管或排氣管安置錯誤，二是通風不良導致燃料燃燒不完全而產生大量一氧化碳，而大部分案件發生在冬季，東北季風與寒流來襲使得民眾門窗緊閉並符合以上兩個條件，此時發生一氧化碳中毒的機率就會大幅增加。

為確保熱水器使用安全，在專業人員方面消防署於 94 年 2 月 2 日公布消防法增訂第 15 條之 1[8]，規範承裝業者必須向當地直轄市、縣（市）政府申請營業登記證書才得營業，且自民國 95 年 2 月 1 日起規定「特定瓦斯器具裝修技術士」得依照「燃氣熱水器及其配管安裝標準」[9]安裝熱水器及其配管，若業者違反上述條款，則依照同時增訂之第 42 條之 1[10]開罰新臺幣一萬元以上五萬元以下罰鍰，如未在期限內改善將繼續開罰甚至處以停業處分等針對熱水器本身所訂定之法規，由此可知政府想從根本方面著手改善，讓一氧化碳中毒事件發生機率降至最低。相關法規整理如表 2-2 所示。

選購熱水器方面，標準檢驗局於 2012 年 4 月 1 日實施瓦斯器具新標準[11]，呼籲民眾必須選有「商品安全標章」之燃氣熱水器並遵循「五要」原則：

1. 要保持環境的通風：保持居家環境的「通風」狀況，避免陽台違規使用、加裝門窗、紗窗不潔及晾曬大量衣物等情形。
2. 要使用安全的品牌：使用合格的「品牌」，熱水器貼有 CNS（國家標準）及 TGAS（台灣瓦斯器具安全標示）檢驗合格標示(圖 2-1)。
3. 要選擇正確的型式：選擇正確的「型式」，如室外專用型（RF）、室內強制排氣型（FE）熱水器。
4. 要注意安全的安裝：由合格技術士安裝熱水器。

5. 要注意平時的檢修：注意平時的定期檢修或汰換。

表 2-2 安裝燃氣熱水器相關法規

公布施行日期	法規名稱	規範目的及內容
94.02.02	消防法第 15 條之 1	燃氣熱水器承裝業營業登記之申請、由中央主管機關訂定安裝標準
94.02.02	消防法第 42 條之 1	違反第 15 條之 1 處以新台幣一萬元整，如未如期改善將繼續開罰或處以停業處分。
94.07.22	燃氣熱水器及其配管安裝標準	各種燃氣熱水器及其配管安裝標準與竣工檢查
94.11.29	燃氣熱水器及其配管施工標籤及施工登錄卡作業規定	規範燃氣熱水器及其配管施工標籤及施工紀錄之規格及格式等事項
94.12.30	燃氣熱水器及其配管承裝業管理辦法	申請合格燃氣熱水器及其配管安裝業者之管理規定
95.01.12	直轄市縣（市）政府辦理燃氣熱水器承裝業管理作業要點	地方政府對於燃氣熱水器及其配管安裝業者之管理規定



(a)



(b)

圖 2-1 台灣家電用品認證標誌(a)CNS(b)TGAS

2.2.2 美國防範措施

根據美國疾病控制中心 (Centers for Disease Control) 數據統計，每年都有超過 400 人意外死於一氧化碳中毒，政府終究無法忽視這沉默的殺手繼續危害人民，近年來在美國各大洲都已陸續開始立法關於居家一氧化碳中毒防治方法。

全美州立法機構會議 (National Conference of State Legislatures) 網頁資料顯示，美國有 25 個州已強制住家裝設一氧化碳偵測器[12]。節錄部分城市規定整理如表 2-3。

表 2-3 美國一氧化碳偵測器設置規範

阿拉斯加 (Alaska)	法規名稱	Alaska Stat. § 18.70.095 - Smoke and Carbon Monoxide Detection Devices
		1.房屋出租人必須提供一氧化碳偵測器，並確保其電力充足，如有損壞，得負起修理或更換的責任。 2. 2005 年 1 月 1 日起，需於住宅區域之碳基燃料裝置、車庫、停車位與臥室應設置偵測器。
喬治亞州 (Georgia)	法規名稱	Sec. R313.4.1 of the Ga. State Minimum Standard One and Two Family Dwelling Code adopted pursuant to Ga. Code Ann. § 8-2-20.
		2009 年 1 月 1 日後建造之一戶或兩戶住宅、聯排別墅在 3 樓以下之臥房都必須加裝一氧化碳偵測器。
明尼蘇達州 (Minnesota)	法規名稱	Minn. Stat. § 299F.50 to .51 – Carbon Monoxide Alarms

	1.2007 年 1 月 1 日起，新建之單戶和多戶之住宅均須設置偵測器。 2.2008 年 8 月 1 日起，現有之單戶住宅皆設置偵測器。 3.2009 年 8 月 1 日起，現有之多戶住宅皆設置偵測器。 4.偵測器設置在離臥室 10 英尺內之位置。	
紐約 (New York)	法規名稱	N.Y. Exec. Law § 378 – Standards for New York state uniform fire prevention and building code.
	1. 2002 年 7 月 30 日起，新建或是販售之住宅皆需安裝一氧化碳偵測器。 2. 2002 年 7 月 13 日起，新建或是販售之公寓或合作公裕街需安裝一氧化碳偵測器。 3. 2005 年 8 月 9 日起，新建或是販售集合式住宅皆需安裝一氧化碳偵測器。	
新紐澤西州 (New Jersey)	法規名稱	N.J. Stat. Ann. § 52:27D-133.3 to 133.5 – Carbon monoxide sensor device required for issuance of certificate of occupancy
	單戶或兩戶住宅在入住或搬家後應設置偵測器。	
德州 (Texas)	法規名稱	Tex. Hum. Res. Code Ann. § 42.060 – Carbon Monoxide Detectors.
	2003 年 9 月 1 日起，要求日間照護中心、護理之家及一般住家均應設置一氧化碳偵測器。	
佛蒙特州 (Vermont)	法規名稱	Vt. Stat. Ann. tit. 9 § 2881 to 2883 – Smoke Detectors and Carbon Monoxide Detectors

	<p>2005 年 7 月 1 日起：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 新建造之單戶住宅，得在臥室附近裝設偵測器。 2. 偵測器之電源供應需以插座為主，電池為輔。 3. 住宅所有權變更時，賣方必須向買方說明此處設置之所有偵測器，並簽署已告知文件。如買方發現偵測器不符合規定，應通知賣方，賣方應於 10 日內改善。 	
華盛頓州 (Washington)	法規名稱	Alaska Stat. § 18.70.095 - Smoke and Carbon Monoxide Detection Devices
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 2009 年 7 月 26 後出售之房屋，賣方有義務為買方安裝一氧化碳偵測器 2. 2010 年 7 月 1 日起，所有新建與換手之住宅皆需安裝一氧化碳偵測器。 3. 既有住宅於 2013 年 1 月 10 日前全面裝設好一氧化碳偵測器。 4. 房東架設好之偵測器，房客有維護其正常運作之義務。 	

2.2.3 英國防範措施

英國每年因一氧化碳中毒死亡人數約11人，為避免悲劇發生，英國相關防治單位：健康及安全委員會（HSE, Health and Safety Executive），針對燃氣工程師、屋主、房東以及學生，制定相關燃氣安全規範與建議。

燃氣工程師方面，必須擁有合法之燃氣安全登記證明（CORGI, Council for Registered Gas installer），才可從事瓦斯器具安裝及檢查之工作，降低民眾在選購燃氣機具時的疑慮與不安；屋主部分，HSE建議選擇擁有CORGI認證之工程師進行器具安裝，並在屋內安裝一氧化碳警報器，警報器必須標示有英國標準EN5029與英國或歐洲認證標誌，例如Kitemark，如圖2-2。還為此訂定了「瓦斯器具—委託檢查」（Gas Appliance-Get them Checked）[13]，方便民眾自行檢驗家中燃氣機具是否安全。若還有任何疑慮還配置了免費諮詢專線，以利民眾詢問。

出租公寓方面，HSE於1998年制訂了「1998年瓦斯安全規範：房東義務守則」（Landlord. A guide to landlords duty: Gas safety Regulations 1998）[14]，除了上述屋主注意事項外還規定了必須對承租人應盡的義務，節錄重要條文如下：

1. 每年都應請擁有合格認證之安全工程師進行燃氣機具(不包括房客自帶的機具)檢修。
2. 在新租約開始之前，必須確保燃氣機具在一年之內有經由燃氣工程師檢驗合格。
3. 至少保存兩年燃氣機具檢驗紀錄。
4. 於檢查後28天內提交給承租人燃氣機具檢驗紀錄。

而承租人方面，為維護自身權益，不應由房東單方面進行燃氣機具維護保養，房客也必須時時刻刻保持警覺，避免悲劇發生。

由上述可知，英國對於人命安全之重視；除此之外，由於英國人

口眾多，民族語言複雜，因此政府在印製安全手冊時，特別針對中文、阿拉伯文、葡萄牙文、西班牙文、土耳其...等22種語文印製，使人命安全不會因為語言隔閡而受到挑戰。



圖2-2 BSI英國標準協會認證標誌：Kitemark

第三章 模擬軟體介紹

3.1 火災模擬軟體(FDS)

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

FDS 可以計算三維空間火災行為(包含火場之溫度、煙氣流動速度、軌跡)，其計算運作方式是先將整個空間分割成許多細小的格點，再以質量、動量、能量、燃燒與熱傳守恆等統御方程式下去求解。且經由後處理程式 Smokeview 將流場依靜態與動態之方式可視化輸出，後處理軟體 Smokeview 亦於西元 2010 年 10 月公開發表第五版 (5.6 版)。FDS 更可以將建築物內之煙控系統，撒水頭等消防設備實際需求納入模型中，以更符合現場之狀況，也因此被廣泛應用於學術研究和工程界上。

FDS 使用上必須先將模擬之幾何形狀、材料特性、火源大小、排煙設備、補氣口、大氣溫度、模擬時間以及邊界條件等...以固定之格式輸入至一文字檔(*.data)，再由 FDS 軟體開始計算，由於 FDS 本身並沒有將流場可視化之功能，故需要再利用 Smokeview 軟體來讀取 FDS 所計算出之數據來做進一步的分析與探討。圖 3.1 為 FDS 流程圖，圖 3.2 為 FDS 與 Smokeview 之組織架構。

FDS 所使用之數值方法與其主要的統御方程式如以下所介紹。

3.1.1 流體力學之統御方程式

1 質量守恆

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (3.1)$$

其中 ρ ：流體密度 (kg/m^3)

u : 流體速度 (m/s)

t : 時間 (s)

2 動量守恆

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3.2)$$

其中 p : 壓力 (nt/m²)

g : 重力加速度 (m/s²)

f : 外力 (包含撒水頭之拖曳力) (nt/m³)

τ : 黏滯剪應力張量 (nt/m²)

3 能量守恆

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{DP}{Dt} = Q - \nabla \cdot q'' + \nabla k \nabla T + \nabla \cdot \sum_{\ell} h_{\ell} (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} \quad (3.3)$$

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

h : 焓 (kJ/kg)

Q : 熱釋放率 (kw)

q'' : 輻射熱通量 (kw/m²)

k : 熱傳導係數 (kw/mk)

T : 溫度 (°C)

h_{ℓ} : ℓ 物種之焓值 (kJ/kg)

D : 擴散係數 (m²/s)

Y_{ℓ} : ℓ 物種之質量分率

4 物種守恆

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\ell) + \nabla \cdot \rho Y_\ell \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_\ell \nabla Y_\ell + \dot{W}_\ell''' \quad (3.4)$$

其中 \dot{W}_ℓ''' : ℓ 物種單位體積生成率

5 狀態方程式

$$P = P_o - \rho_\infty gZ + \tilde{P} \quad (3.5)$$

對低馬赫數流而言

$$P_o = \rho TR \sum (Y_i / M_i) = \rho TR / M \quad (3.6)$$

其中

P_o : 外界壓力 (nt/m²)

$\rho_\infty gZ$: 靜壓 (nt/m²)

\tilde{P} : 擾動壓力 (nt/m²)

6 擴散 LES(Large Eddy Simulation)模型

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left(2(\text{def } \vec{u}) \cdot (\text{def } \vec{u}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

其中 C_s : 經驗常數

Δ : 格點長度

$$\Phi \equiv \tau \cdot \nabla \vec{u} = \mu \left(2(\text{def } \vec{u}) \cdot (\text{def } \vec{u}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)$$

$$= \left\{ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right\}$$

$$- \left\{ \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

定義 $(\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc}$ (3.8)

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} \quad (3.9)$$

其中 Pr : 普郎特常數 (Prandtl number)

Sc : 舒密特常數 (Schmidt number)

3.1.2 差分方程式

1. 時間之離散

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

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

得到，例如密度可由下式預估

$$\rho^{(n+1)_e} = \rho^n - \delta t (\bar{u}^n \cdot \nabla \rho^n + \rho^n \nabla \cdot \bar{u}^n) \quad (3.10)$$

2. 解壓力的 Poisson 方程式則可由

$$\nabla^2 H^n = - \frac{(\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^n \quad (3.11)$$

\bar{F} 這一項包含了動量方程式裡得對流、發散及外力項。速度則由

下個 time-step 預估

$$\bar{u}^{(n+1)_e} = \bar{u}^n - \delta t (\bar{F}^n + \nabla H^n) \quad (3.12)$$

而 time-step 必須符合

$$\delta t < \min \left(\frac{\delta x}{u}, \frac{\delta y}{v}, \frac{\delta z}{w} \right) \quad (3.13)$$

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

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2} \left(\rho^n + \rho^{(n+1)_e} - \delta t (\bar{u}^{(n+1)_e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)_e} + \rho^{(n+1)_e} \nabla \cdot \bar{u}^{(n+1)_e}) \right) \quad (3.14)$$

4. 透過之前預估出來的結果來重新計算壓力

$$\nabla^2 H^{(n+1)_e} = -\frac{2(\nabla \cdot \bar{u})^{n+1} - (\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^{(n+1)_e} \quad (3.15)$$

更正過的速度如下：

$$\bar{u}^{n+1} = \frac{1}{2} \left[\bar{u}^n + \bar{u}^{(n+1)_e} - \delta t (\bar{F}^{(n+1)_e} + \nabla H^{(n+1)_e}) \right] \quad (3.16)$$

2. 空間之離散

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

3. 收斂條件

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

$$CFL = \delta t \max \left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) \quad (3.17)$$

$$VN = 2 \max \left(v \cdot D \cdot \frac{k}{\rho C_p} \right) \delta t \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad (3.18)$$

δt ：疊代時間 (time step)

u 、 v 、 w ：速度分量

δx 、 δy 、 δz ：網格大小

V：黏滯係數(viscosity)

D：擴散係數(diffusivity)

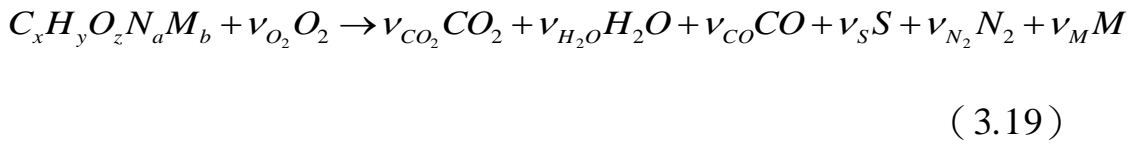
$k/\rho c_p$ ：熱導率(thermal conductivity)

3.1.3 燃燒模式

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

在混合比燃燒模式(Mixture Fraction Combustion Model; MFCM)中，燃料與氧氣混合立即燃燒不一定是個合理的假設，例如在有通風限制的居室環境下，氧氣逐漸消耗的同時，燃燒所產生之反應物也不盡相同，故定義多個混和分率使燃料消耗與生成物產生關聯。對應不同情境下，燃燒模式分為單步反應(single-step reaction)和兩步反應(two-step reaction)。

1. 單步反應(single-step reaction)



其中 V_i : i 分子化學反應當量係數

$$\text{定義 } z = \frac{sY_F - (Y_o - Y_o^\infty)}{sY_F^I + Y_o^\infty} ; s = \frac{\nu_o M_o}{\nu_F M_F} \quad (3.20)$$

其中 Y_o^∞ : 氧氣於大氣中之質量分率

Y_F^I : 燃料之質量分率

M_i : i 分子之分子量

Z 的函數中也包含了燃料與其燃燒後產物之質量分率:

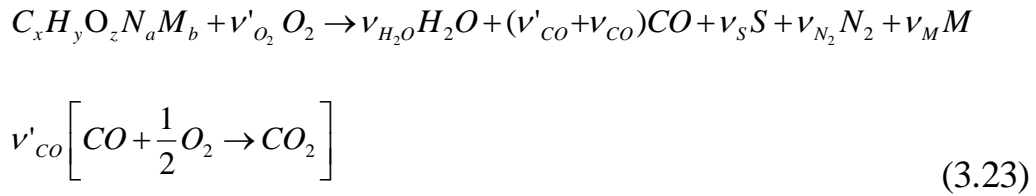
$$Z = \frac{1}{Y_F^I} (Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S) \quad (3.21)$$

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

$$Z(x,t) = Z_f ; \quad Z_f = \frac{Y_o^\infty}{sY_F^I + Y_o^\infty} \quad (3.22)$$

2. 兩步反應(Two-step reaction)

在通風限制條件下之火災，氧氣濃度會隨著時間逐漸下降，燃料與氧氣的反應物不再固定，瞬間反應之假設也不再合理，故將燃燒模型修改如下式：



其中 ν'_{CO} 為可能與氧氣發生反應之數量

ν_{CO} 為在氧氣充足的情形下所生成之一氧化碳之數量

為了描述物種的組成，將混合分率 (Z) 分為：

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_F^I} \quad (3.24)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{[x - (1 - X_H)\nu_S]W_{CO}} \frac{Y_{CO}}{Y_F^I} \quad (3.25)$$

$$Z_3 = \frac{W_F}{[x - (1 - X_H)\nu_S]W_{CO_2}} \frac{Y_{CO_2}}{Y_F^I} \quad (3.26)$$

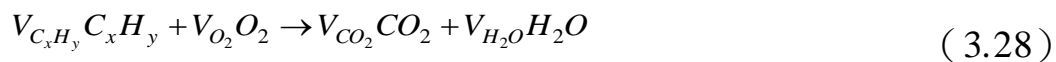
使用上三式來推出其他物種之質量分率。

而燃燒反應之熱釋放率 \dot{q}''' 則由燃料消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_F \dot{m}_F''' \quad (3.27)$$

其中 ΔH_o 代表單位質量之氧消耗時之熱釋放率。

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



其化學反應速率以單一步驟之反應式表之，藉此求得熱釋放率。

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -B[C_xH_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (3.29)$$

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

E ：活化能 (kJ/mol)

3.1.4 熱輻射之統御方程式

FDS 之熱輻射傳統御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)] \quad n = 1, \dots, N \quad (3.30)$$

其中 $I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi$ (3.31)

$$I(x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (3.32)$$

I ：輻射熱強度 (kw/m²)

k ：吸收係數

λ ：波長 (m)

σ ：史蒂芬-波茲曼 (Stefan-Boltzman constant)

對於牆面之熱輻射，FDS 採用之邊界條件如下：

$$I_w(S) = \varepsilon I_{bw} + \frac{1 - \varepsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (3.33)$$

其中 I_w ：牆面之輻射熱強度 (kw/m²)

S ：單位向量

ε ：放射率

I_{bw} ：牆面黑體輻射強度 (kw/m²)

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

$$q_r(x) = \int S I(x, s) d\Omega \quad (3.34)$$

因此能量守恒方程式中輻射熱之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x)[U(x) - 4\pi I_b(X)]U(x) = \int_{4\pi} I(x, s) d\Omega \quad (3.35)$$

3.1.5 邊界條件

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

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

在 LES 計算模式中

$$\dot{q}_c'' = h\Delta T ; h = \max \left[C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left(\frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \right] \quad (3.36)$$

ΔT ：邊界與氣態分子間之溫差(°C)

C ：自然對流係數(經驗常數，此模式中預設在水平面時 $C = 1.43$ ，

垂直面 $C = 0.95$) (kW/m²)

L ：特徵長度 (m)

V ：動黏滯係數 (m²/s)

1. 熱厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(o, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3.37)$$

其中 ρ_s ：固態燃料密度 (kg/m³)

C_s ：固態燃料比熱 (kJ/kg·K)

\dot{q}_c'' ：對流熱通量 (kW/m²)

\dot{q}_r'' ：輻射熱通量 (kW/m²)

T_s ：固態燃料溫度 (°C)

2. 熱薄型固態燃料（假設溫度在垂直固態燃料方向為均勻分佈）

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (3.38)$$

其中 δ ：固態燃料厚度(m)

3. 液態燃料

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

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[-\frac{h_v M_f}{\Re} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (3.39)$$

其中 h_v ：蒸發熱

M_f ：分子重

T_s ：表面溫度

T_b ：燃料沸騰溫度

對於以上 FDS 之統御方程式，在其離散化過程中，時間之處理採用 Second Order Predictor-corrector Scheme；空間項則採用 Second Order Finite Differences。燃燒模式、熱輻射模式以及邊界條件上的計算上皆採用大渦流模擬法(Large Eddy Simulation，LES)計算方法，LES 法是將流體物理量區分為大尺度(grid-scale)及次網格尺度(sub-grid scale，SGS)兩部份。對於大尺度的物理量在 LES 中直接由 Navier-Stokes 方程式求解；而在次格點尺度內的物理量，將小於網格尺寸之漩渦或紊流以次網格紊流模式(Sub-grid Turbulence Model)表示，並直接計算流場暫態變化。另依方面 FDS 亦提供了 DNS 之計算

方法，但由於 DNS 法需大量實驗資料作驗證而在計算上同時也需要相當龐大之硬體設備。因此為符合學術上與工程上之實用性與經濟效應，本研究採用 FDS 技術手冊上建議使用之 LES 模式。

3.2 模型建立軟體 PyroSim

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

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

以下介紹建模之步驟順序

1. 網格劃分(Meshes)

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

2. 建立幾何外觀(Obstruction)

在 PyroSim 繪圖的介面中，可透過直接建立 3D 模型或是透過 2D 分別繪製各樓層空間幾何，在 2D 的建構模式中，可匯入建築平面圖

做為考，可支援之檔案格式如 bmp, dxf, gif, jpg, png, tga, 及 tif，複雜之建築空間以 2D 方式進行較為快速。

3. 表面性質設定(Surface)

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

4. 消防排煙設備設置(Devices)

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

5. 量測點設置(Devices)

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

6. 初始條件設定

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

7. 邊界條件設定

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

8. 計算條件設定(Simulation parameter)

在此設定模型運用 FDS 計算之時間及求解方法，運算時間以秒為單位，而求解方法可選擇 Large Dddy(LDS)或是 Direct Numerical(DNS)，此兩方法之不同處於可參閱前一節。

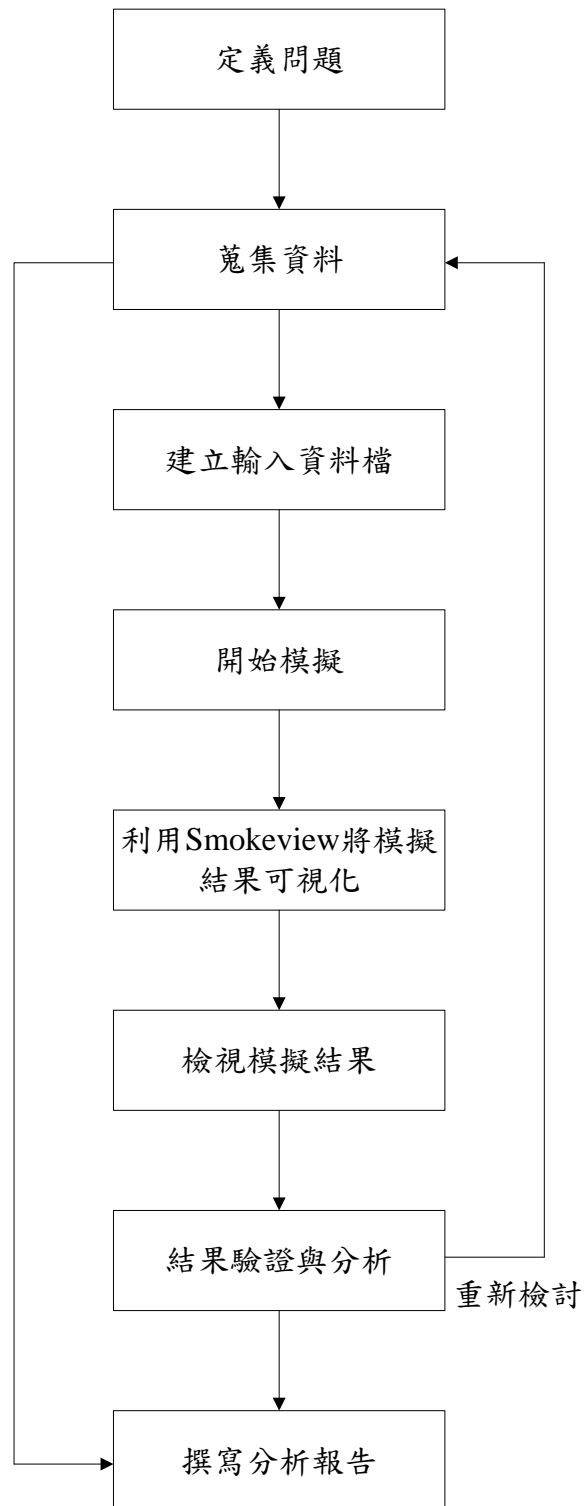


圖 3.1 FDS 分析執行計畫流程圖

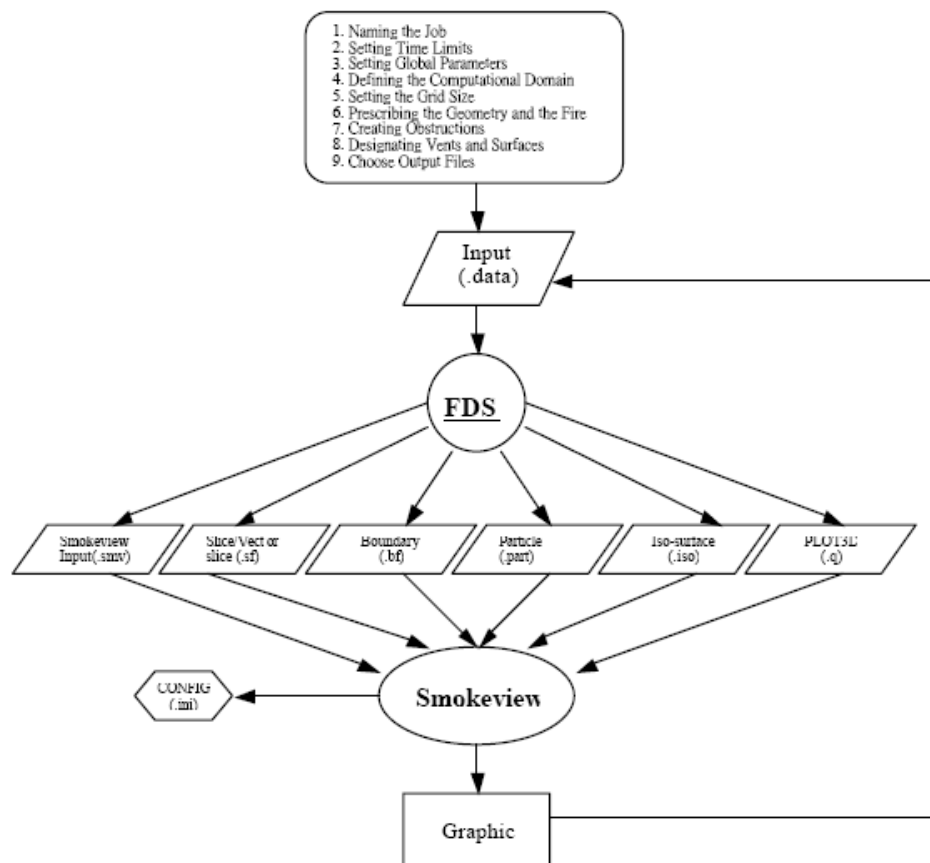


圖 3.2 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖

第四章 結果與討論

本研究主要針對居家燃氣熱水器因 O_2 不足導致燃料燃燒不完全，進而引發 CO 中毒之探討。本章節參照勞工安全衛生所之實驗[1]環境數據使用 FDS 建立模型，並將模擬結果與實驗之數據進行驗證，分析 FDS 燃燒模型之準確度後，再以自行設定之情境探討燃氣熱水器對於人命安全之影響。

4.1 FDS 模擬參數定義

4.1.1 模擬範圍

勞研所之實驗中宿舍空間之陽台為一長方形格局，其長寬高分別為 $2.9\text{ m} \times 1.27\text{ m} \times 3.8\text{ m}$ （體積約為 14 m^3 ），而其室內房間為 $2.9\text{ m} \times 7.07\text{ m} \times 3.8\text{ m}$ ，體積約 78 m^3 ；陽台所加裝之鋁窗尺寸有兩種，上面為小型鋁窗，開窗面積為 $53\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，下面為大型鋁窗，開窗面積為 $144\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，房間配置如圖 4-1 所示。依據文獻之實驗空間規格來當作模擬模型的基準，其模擬圖如圖 4-2 所示，而主要開啟陽台窗戶位置與上、下窗戶位置則如圖 4-3 所示，實驗空間陽台窗戶內部及外觀照片如圖 4-4、4-5 所示。

實驗使用兩具五用氣體量測儀，以偵測是陽台與室內 CO 、 CO_2 與 O_2 濃度，其位置以室內窗為基準，分別位於右側(陽台)0.5m 處與左側(室內)1.5m 處，高度皆為一般人呼吸高度 1.5m，如圖 4-2 所示。

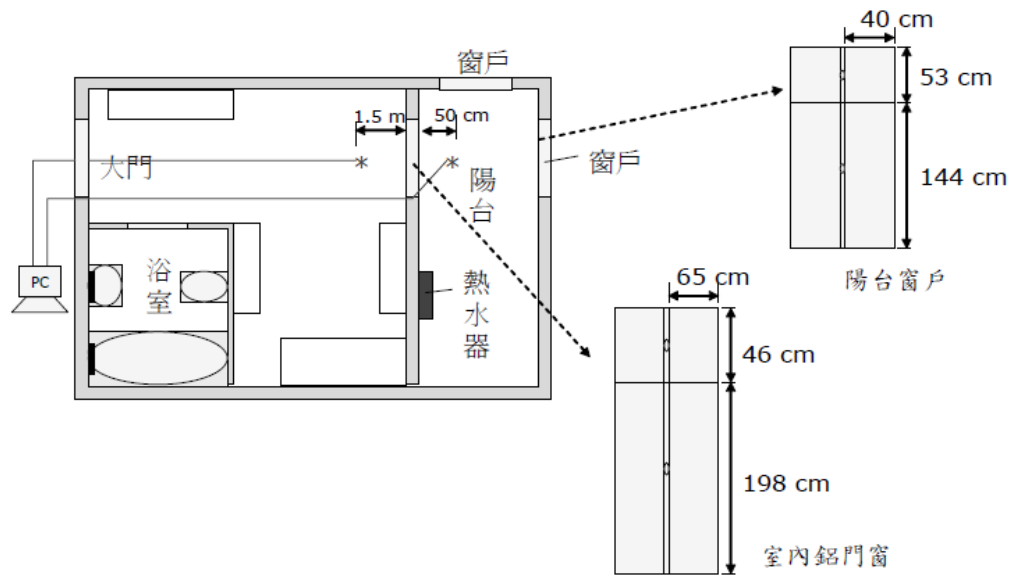


圖4-1 實驗空間示意圖

資料來源：勞工安全衛生研究季刊(95年12月)



圖4-2 模擬空間示意圖

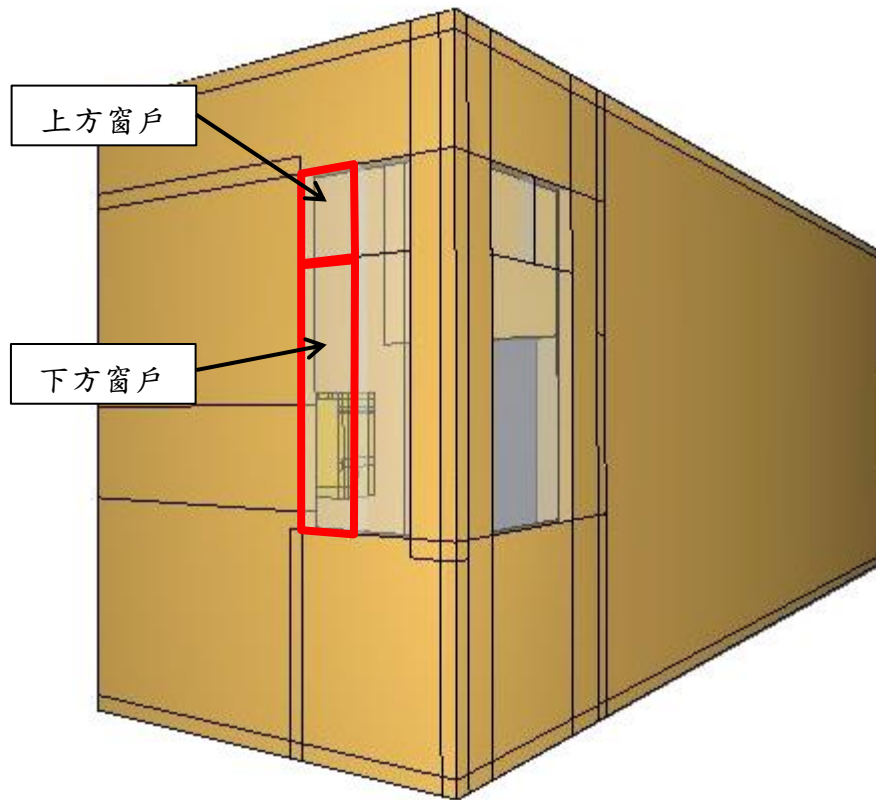


圖4-3 模擬空間窗戶示意圖



圖4-4 實驗空間陽台外觀照片



圖4-5 實驗空間陽台內部窗戶照片

4.1.2 火源設計及相關設定

1. 火源設定

熱水器外型方面，為了貼近實際情況，數據參照實驗文獻中之 CF 型燃氣熱水器(如圖 4-7 所示)，長寬高約為 $0.25\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.75\text{ m}$ ，並且在熱水器上方設置 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的開孔，以利熱氣排出，如圖 4-6 所示；火源設定方面，依照所使用之機具，採用 10L 的瓦斯熱水器機型來做為模擬之瓦斯熱水器規格，其火源大小為 21.4 KW，而火源規格有 13 排，單排的火源尺寸為 $0.55\text{ cm} \times 10.5\text{ cm}$ （為固定規格品），13 排總寬度 21.8 cm（如圖 4-8 所示），故模擬之火源大小為 $0.105\text{ m} \times 0.218\text{ m}$ ，熱釋放率為 21.4KW。

2. 格點設定

網格配置方面，觀察陳躍仁[2]CO 分佈圖，發現由完全燃燒轉變為燃燒不完全時，震盪程度相當劇烈，根據文獻說明，陳躍仁使用 0.1 m 網格大小分佈在熱水器周圍，故本研究推測此現象是火源周圍

網格密度不足，故將熱水器周遭網格進行加密。

在格點測試中加密火源部份網格以 0.025 m×0.025 m×0.025 m、0.05 m×0.05 m×0.05 m 與 0.1 m×0.1 m×0.1 m 之大小作格點測試來量測 CO 濃度（如表 4-1 所示），考量時間成本以及誤差 5% 以內，本研究以 0.05 m×0.05 m×0.05 m 的格點大小作為此次模擬區域之格點，總格點數為 13.08 萬個。各項模擬參數列表如表 4-2 所示。

表 4-1 格點測試

格點大小（公尺） X×Y×Z	格點數	CO 濃度(ppm)	最大誤差值
實驗		1520.0	0.0%
0.025×0.025×0.025	61.4 萬	1547.6	1.8%
0.05×0.05×0.05	17.2 萬	1589.0	4.5%
0.1×0.1×0.1	10.8 萬	289.5	81.0%

表 4-2 各項模擬參數列表

參數	詳細設定說明	
居室空間	尺寸（長×寬×高）	2.9 m×1.27 m×3.8 m（陽台）
		2.9 m×7.07 m×3.8 m（室內）
火源	火載量	21.4 KW
	燃料	液化石油氣(丙烷 50%+丁烷 50%)
	火源面積	0.105 m×0.218 m
相關模擬參數	環境起始溫度	25°C
	模擬時間	1000~3600 秒

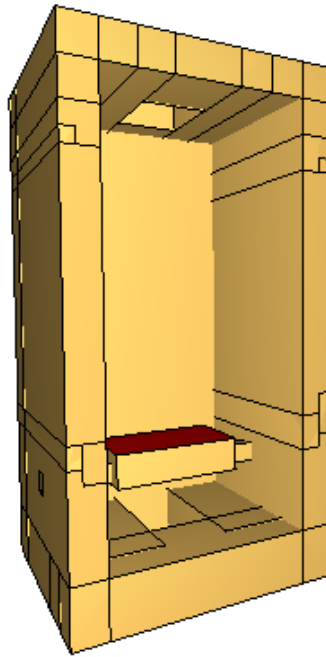


圖 4-6 模擬空間熱水器外觀

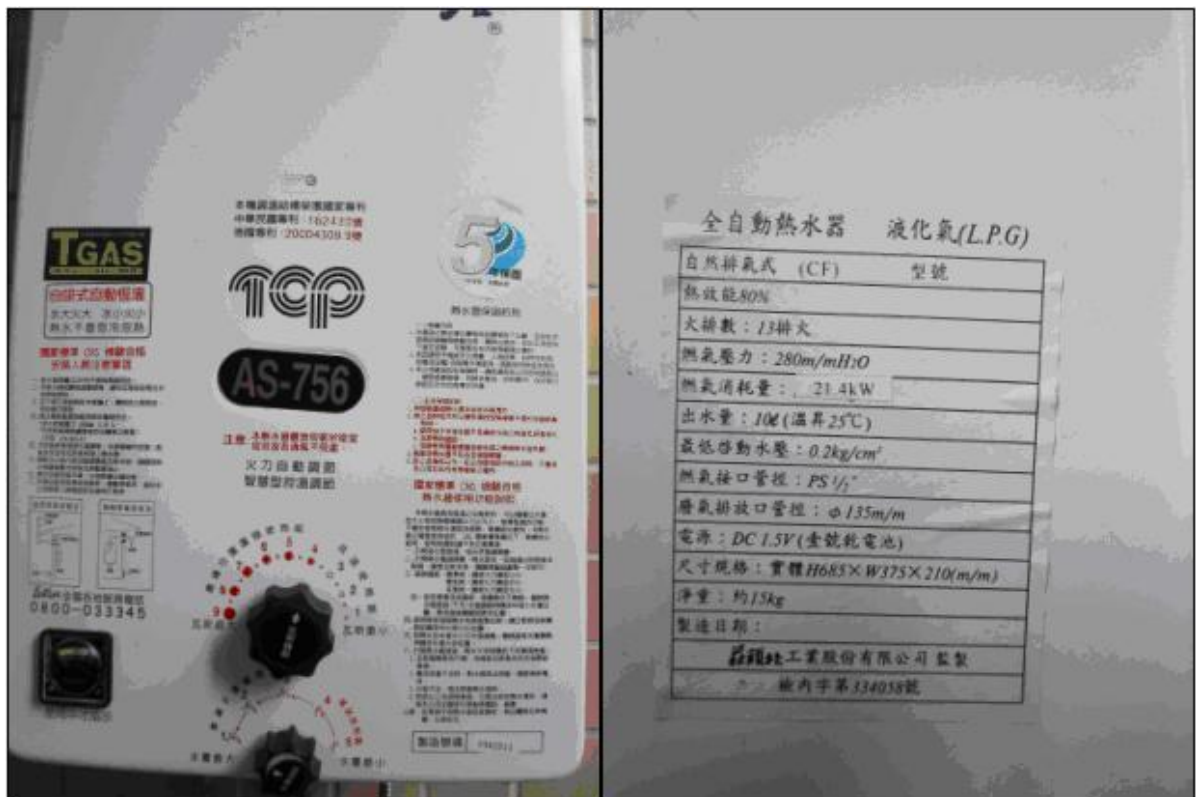


圖4-7 實驗瓦斯熱水器外觀及規格照片



圖 4-8 實際火源規格示意圖

4.2 既有實驗結果與 FDS 模擬結果驗證

國內使用 FDS 模擬主要都是運用在煙控模擬上，會設置一補氣口，使火源穩定成長，而相較於 CO 中毒事件之主因-燃料燃燒不完全，其相關研究如鳳毛麟角，其中本師門專班學長陳躍仁[2]使用 FDS 與勞研所實驗[1]進行驗證，模擬結果趨勢與實驗相符，但數據誤差還差強人意，而本小節利用改良過後之設計再對照實驗數據，觀察驗證結果是否更為接近實際的物理現象。情境設定如表 4-3 所示。

表 4-3 與既有實驗驗證之情境設定

情境	居室環境設定
密閉陽台	門窗全數關閉。
開啟室內窗	開啟陽台通往室內之窗戶。
強制通風	開啟陽台對外窗，於窗外設定排風扇往室內吹送。

● 模擬結果

1. 密閉陽台

模擬結果之 CO、CO₂ 與 O₂ 濃度與實驗數據比較如圖 4-9~4-11 所示。

由模擬結果可得知，在陽台窗戶全數關閉的情況下，使陽台呈現完全密閉的狀態，亦表示 O₂ 含量有限，隨著 O₂ 的消耗，燃料燃燒不完全，而 CO 開始在陽台累積。由圖 4-9、4-10 可得知 O₂ 在 10 分鐘時低於 15% 時，CO 濃度逐漸上升，顯示 O₂ 已無法足夠使燃料完全燃燒，由圖 4-11 也可看出 CO₂ 在 14 分鐘起，斜率趨近於平緩，表示生成速率下降，燃燒產物逐漸被 CO 取代。

各數據與實驗值比較下，觀察圖 4-10，在 10 分鐘前與實驗數據極為吻合，10~12 分鐘之間低於實驗值，12 分鐘後超越；圖 4-9 的

O₂ 濃度在 8 分鐘前低於實驗值，8 分鐘後超越；圖 4-11 之 CO₂ 濃度在 8 分鐘前低於實驗值，8 分鐘後逐漸吻合。可以發現在八分鐘前燃料的耗氧量主導 CO₂ 的生成，8 分鐘後則主導著 CO 的生成，此現象與 FDS 之兩步反應模型有關，模型在判斷 O₂ 濃度不足以使 CO 氧化成 CO₂ 後，CO 大量生成。

本模擬與陳躍仁之模擬的最大差異在於網格大小的不同，本模擬對於火源處以 0.05 m×0.05 m×0.05 m 網格進行局部加密，而陳躍仁則是在窗口處以 0.05 m×0.05 m×0.05 m 之網格大小局部加密，且本模擬熱水器也比照實際設計。比較後，可以發現本模擬無論在 CO、CO₂ 或是 O₂ 濃度之預測值，更為貼近實驗值。

由圖 4-9~4-11 可看出，陳躍仁之模擬在 14 分鐘時，O₂ 濃度低於 15%，使燃料難以完全燃燒，使得 CO 大量釋出，比較其 CO、CO₂ 與 O₂ 在此時的預測值，震盪幅度常劇烈，顯示流場極不穩定，而本模擬則是循線著實驗值緩慢上升，等 O₂ 濃度低於 15% 時，以合理之曲率大量產生 CO，故可發現火源處之網格密度以及熱水器外觀會影響 FDS 計算之精確度。

2. 開啟室內窗

模擬結果之 CO、CO₂ 與 O₂ 濃度與實驗數據比較如圖 4-12~4-14 所示。

參照全尺寸實驗[1]之配置，設定陽台對外窗戶全數關閉，僅開啟室內通往陽台之氣窗。熱水器所燃燒之氣體會經由開啟之氣窗擴散到室內，而 CO 比空氣輕且溫度比室內高的緣故，會在天花板開始逐漸累積(圖 4-17)。與密閉陽台相比，由於開啟氣窗連通室內空間，因此該情境比密閉陽台多出 78 m³ 的空間大小，即空間 O₂ 含量提高，表示燃燒不完全的現象將延後，由圖 4-13 顯示，在 20 分鐘左右 CO 開始在室內大量累積，在 60 分鐘時已有 600ppm。

與文獻比較之下，模擬在前期 O_2 充足時，其曲線與實驗吻合，在 20 分鐘後開始出現較大的誤差，但在趨勢是相符的。推測原因為熱水器放置於陽台與量測點設置在室內，兩者之間在不同區劃空間，使得 CO 在擴散途中產生了誤差；另一方面，FDS 的兩步燃燒模型也是一大關鍵，FDS user guide[15]說明了 O_2 要低於限定條件才會產生 CO，因此其二分法也是造成誤差的主要原因。此外，根據勞研所實驗[1]所述，開啟之門窗為陽台進入室內的氣窗，而陳躍仁設定為落地窗，造成兩空間分界線模糊，室內 O_2 不斷補充至陽台，也大大延後燃燒不完全的時間。由圖 4-12 可以看出其室內 O_2 的消耗速率比本模擬還要快速。

3. 強制外氣吹入陽台

模擬結果之 CO、 CO_2 與 O_2 濃度與實驗數據比較如圖 4-14、4-15、4-18 所示。

參照全尺寸實驗[1]之配置，設定陽台開啟對外氣窗、室內通往陽台之氣窗，並於設定室外吹入陽台內的風速為 0.9 m/s。結果顯示，熱水器燃燒所產生之氣體受到窗前強制送風的影響，加速 CO 經由開啟之氣窗擴散到室內，且 CO 比空氣輕且溫度比室內高，故會在天花板開始逐漸累積(圖 4-18)。

與文獻比較，模擬的趨勢與數據都和實驗誤差不大，與陳躍仁都在前期略高於實驗值，不同的是在 40 分鐘左右，陳躍仁開始偏離趨勢，推測原因為陳躍仁是將風機貼於窗前，將 O_2 源源不絕的灌入陽台，濃度始終高於 15%；而本模擬則有考慮窗外網格，將風機架設在室外向陽台吹送，造成應該排出室外的氣體轉向流回陽台，更為貼近實際狀況，其結果也十分逼近實驗值。

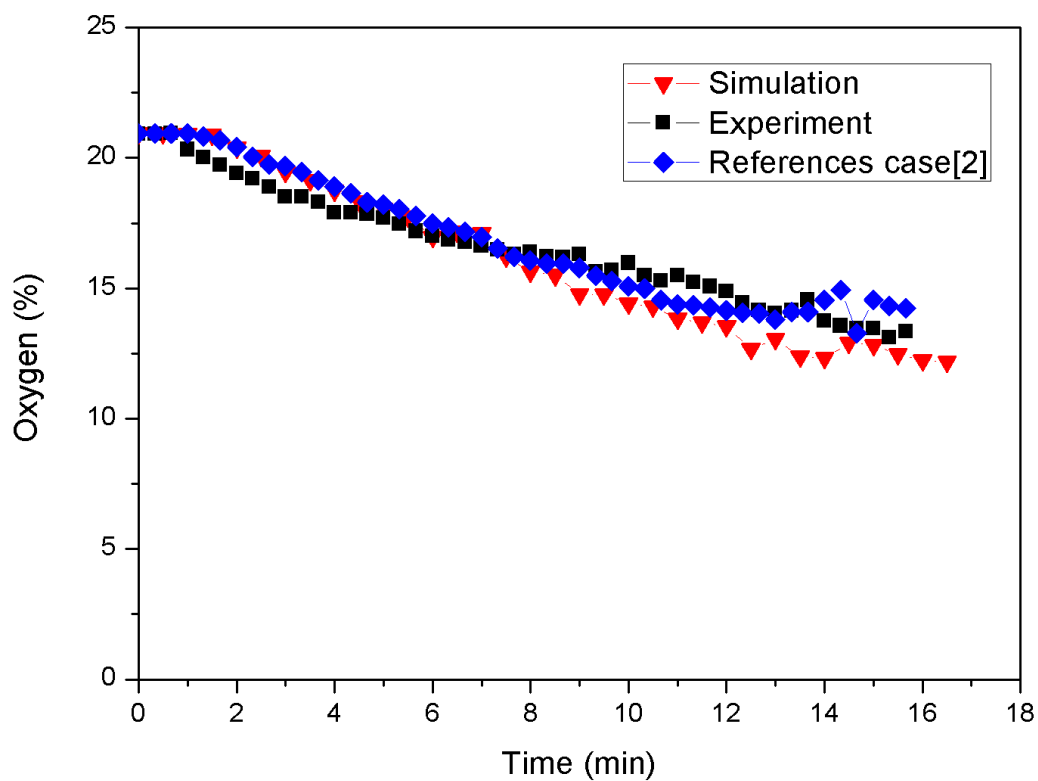


圖 4-9 密閉陽台情境 O₂ 濃度圖

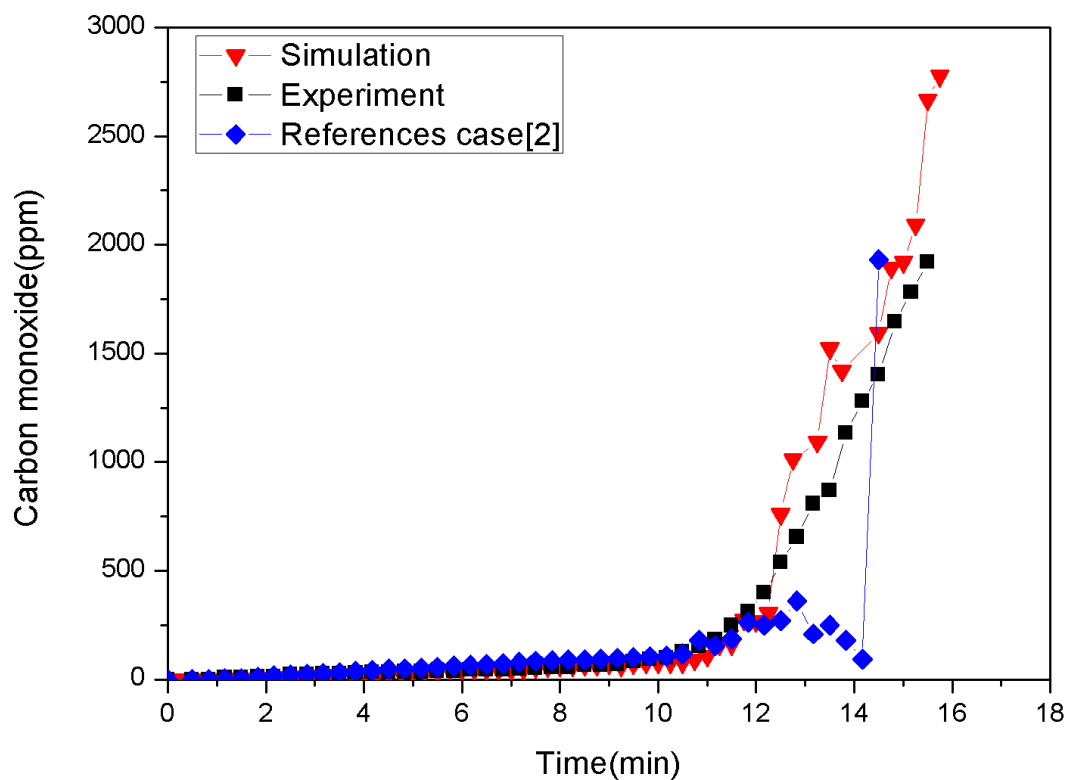


圖 4-10 密閉陽台情境 CO 濃度圖

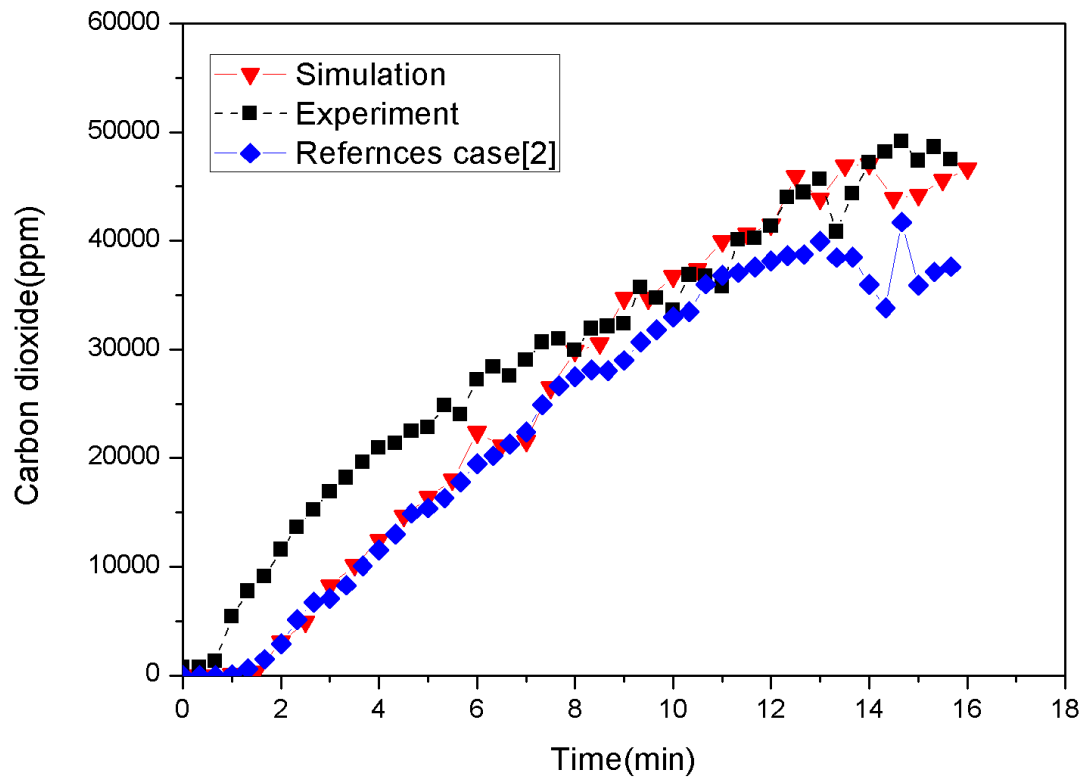


圖 4-11 密閉陽台情境 CO₂ 濃度圖

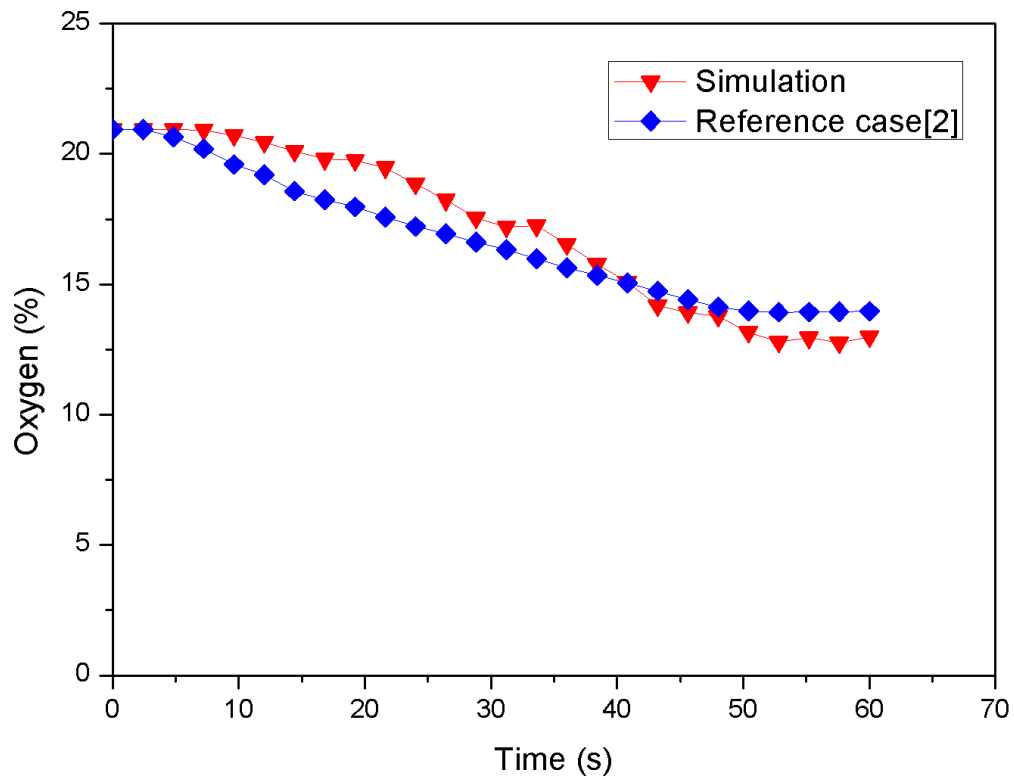


圖 4-12 開啟室內窗情境 O₂ 濃度圖

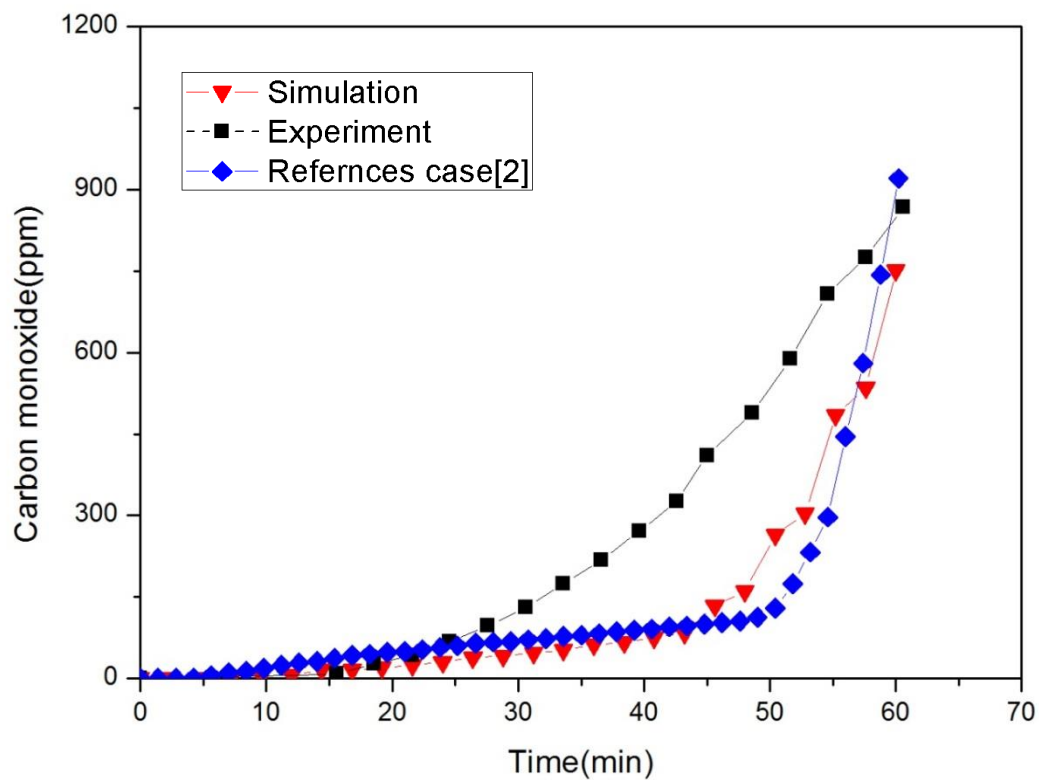


圖 4-13 開啟室內窗情境 CO 濃度圖

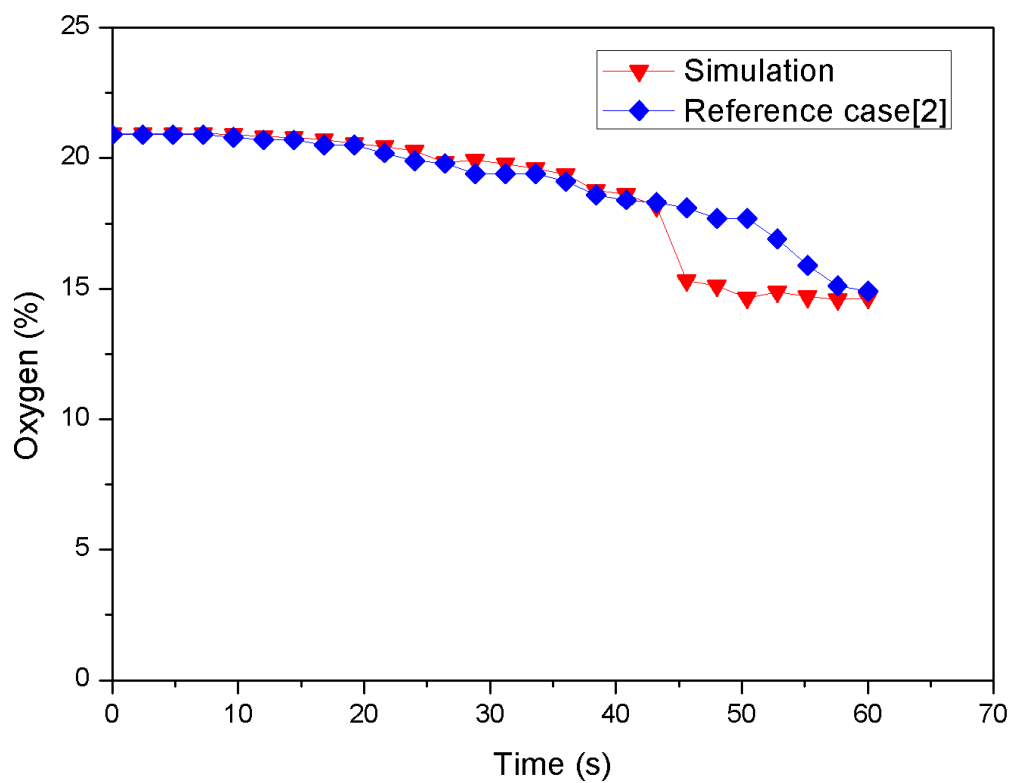


圖 4-14 強制進氣情境 O₂ 濃度圖

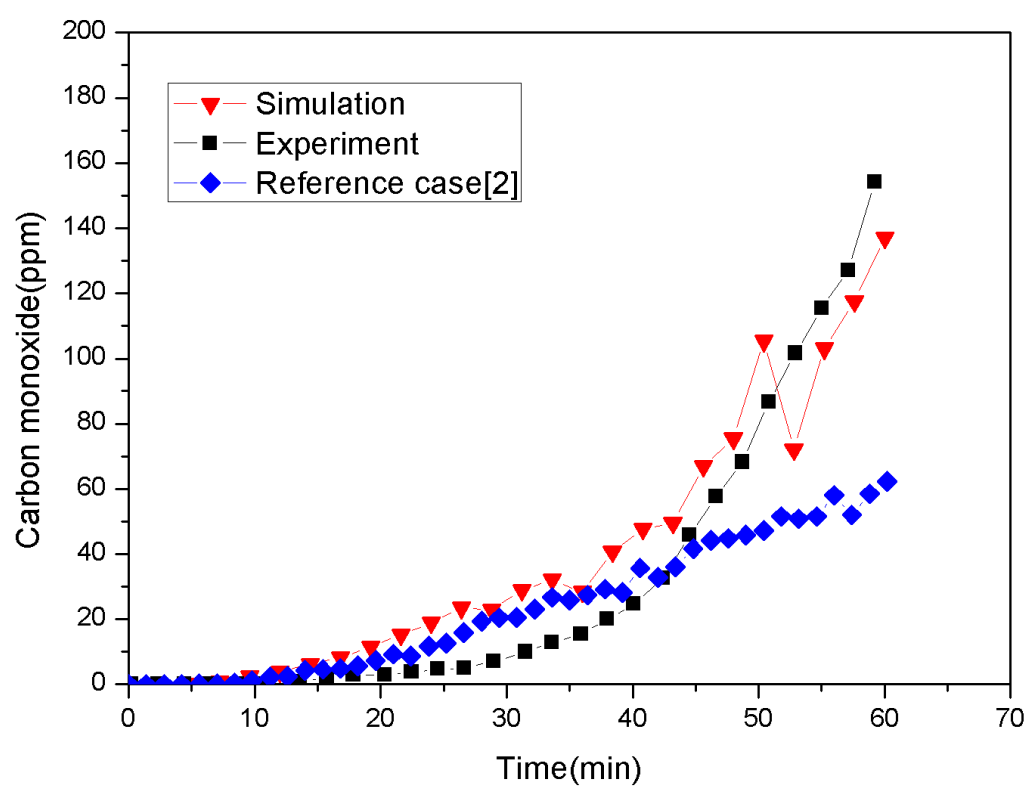


圖 4-15 強制進氣情境 CO 濃度圖

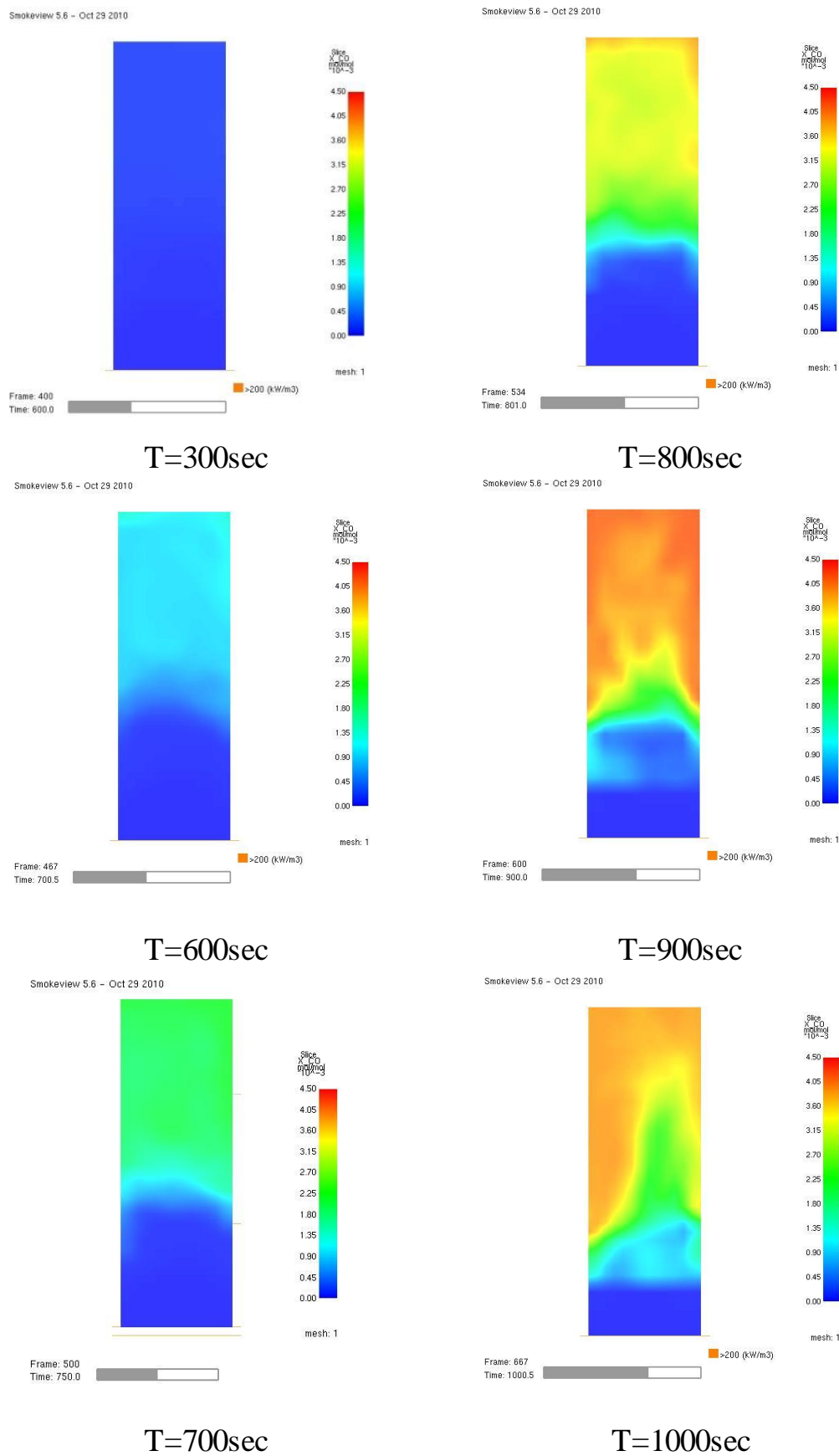
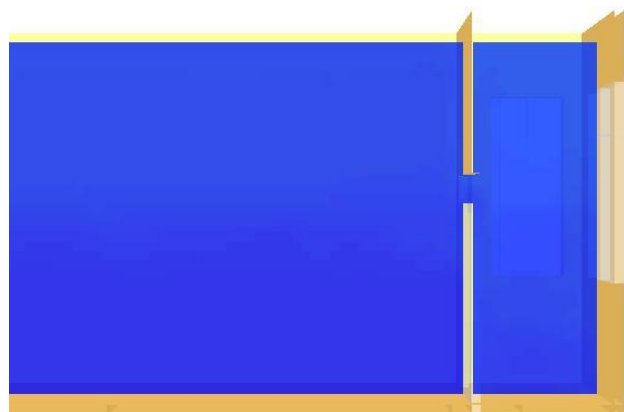


圖 4-16 密閉陽台情境 CO 分佈圖 x-z 剖面

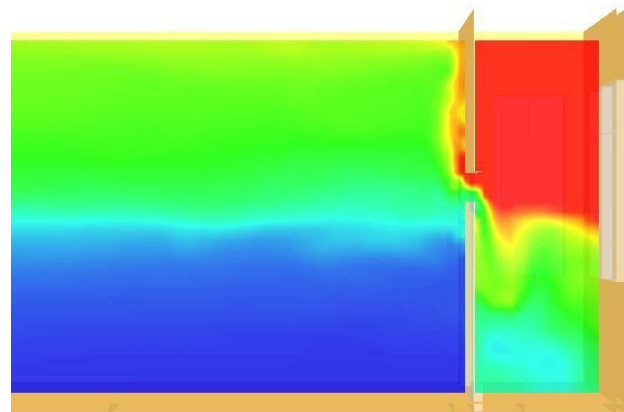
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 278
Time: 1000.8

T=1000sec

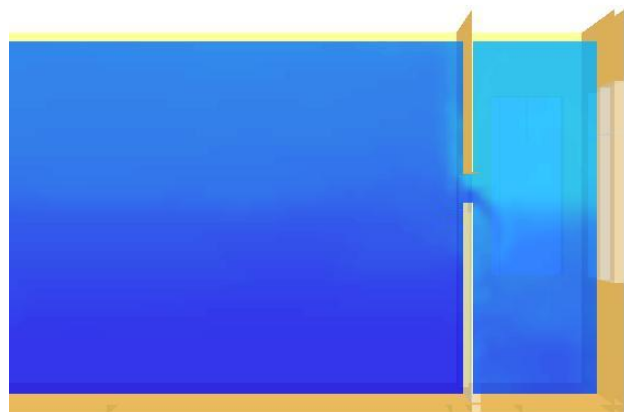
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 834
Time: 3002.4

T=3000sec

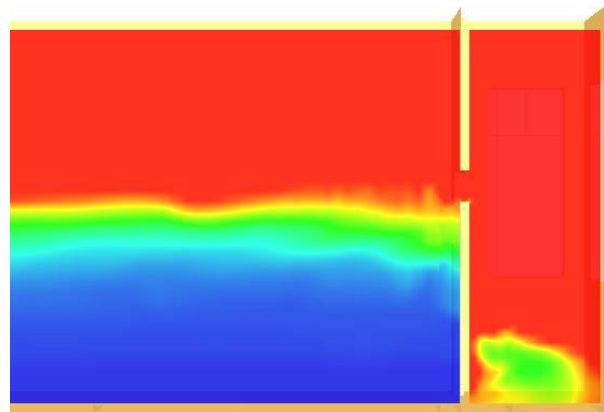
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 555
Time: 1998.0

T=2000sec

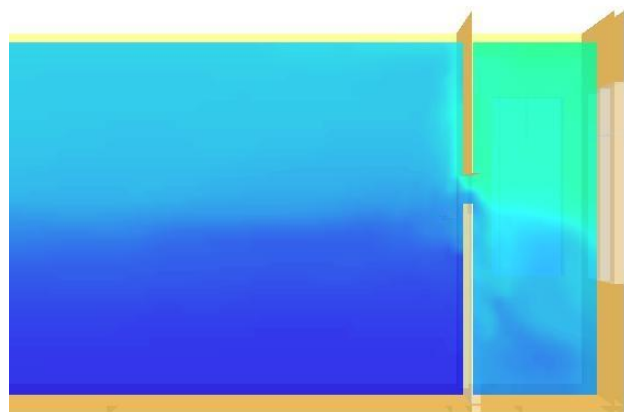
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 920
Time: 3312.0

T=3300sec

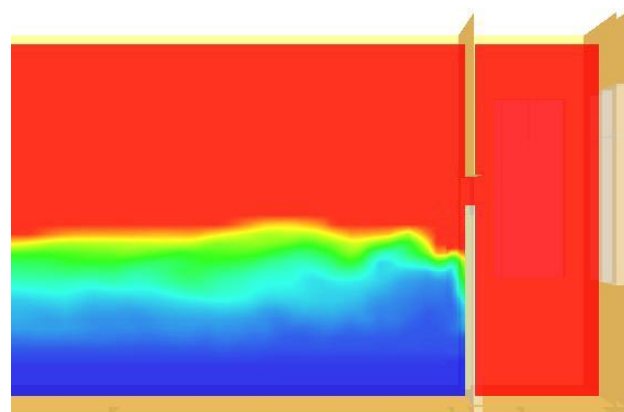
Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 695
Time: 2502.0

T=2500sec

Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010

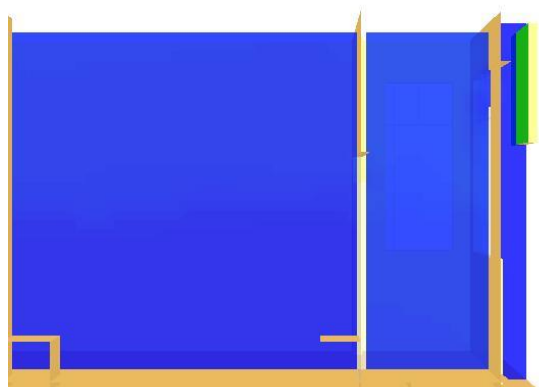


Frame: 1000
Time: 3600.0

T=3600sec

圖 4-17 開啟室內窗情境 CO 分佈圖 x-z 剖面

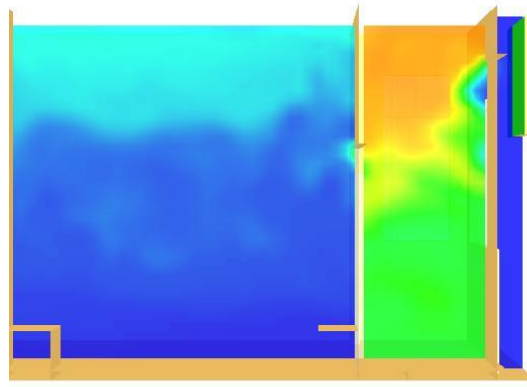
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 278
Time: 1000.8

T=1000sec

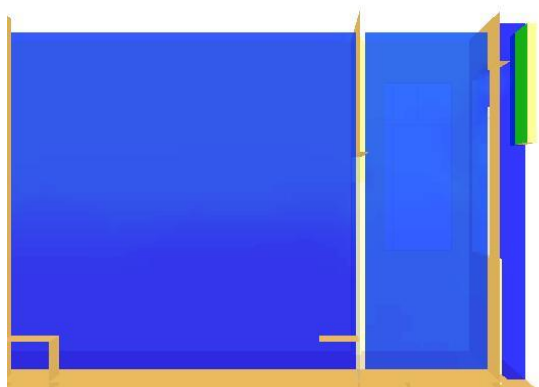
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 634
Time: 3002.4

T=3000sec

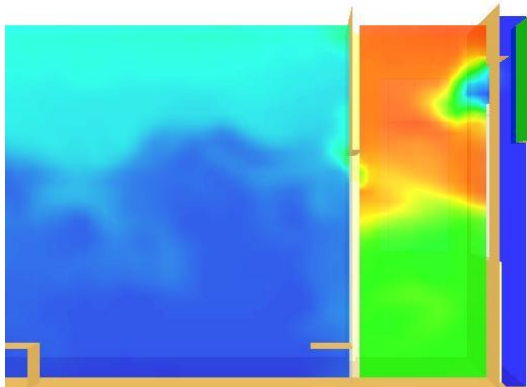
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 555
Time: 1998.0

T=2000sec

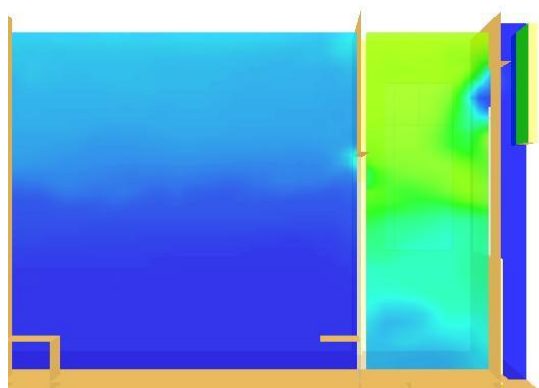
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 917
Time: 3301.2

T=3300sec

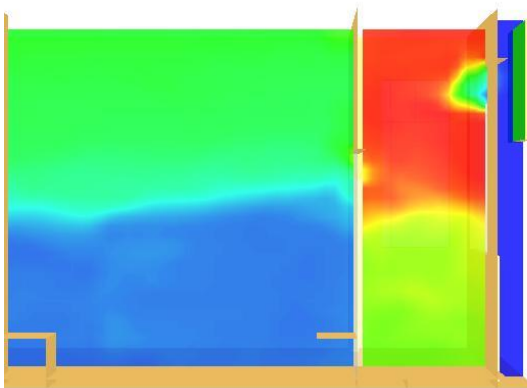
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 695
Time: 2502.0

T=2500sec

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 1000
Time: 3600.0

T=3600sec

圖 4-18 開啟室內窗情境 CO 分佈圖 x-z 剖面

4.3 陽台安全性分析

由 4.2 節的結果來看，FDS 在火源燃燒不完全的情況下，能很好的預測出的 CO 濃度值。而本小節以 4.2 節密閉陽台之範圍作為標準案例，探討各種危險因子對於陽台安全的影響。另外，考慮一般市售熱水器在連續使用 20 分鐘後，會自動阻斷瓦斯供給，故以下設定模擬時間為 20 分鐘。

4.3.1 空曠陽台

由於台灣冬季濕冷，許多民眾為避免寒風灌入室內，而將陽台外推，改建成半密閉陽台(僅由窗戶與室外進行換氣)，再加上 94 年以前，政府還未發布「燃氣熱水器及其配管安裝標準」[9]，許多民眾錯把戶外型熱水器安裝在室內或是安裝 CF 型熱水器卻偷工減料不加裝排氣導管而沿用至今，如此這般的情形下，使用熱水器時，一時疏忽忘記開啟窗戶(或是開窗寬度不足)，導致陽台內 O_2 濃度消耗至 15% 以下，燃料燃燒不完全使得大量 CO 竄出，促使悲劇發生。本節先針對標準案例進行開窗分析，接著探討改變熱水器與窗口位置以及熱水器型號會對陽台帶來什麼影響。

4.3.1.1 標準案例開窗探討

本小節以 4.2 節之密閉陽台為基準(熱水器、窗戶位置皆不更動)，在陽台不增設任何雜物的情況下，開啟對外小窗，分別開啟 0.1 m、0.15 m、0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.35 m 以及 0.4 m，探討開窗寬度對於陽台安全之影響。增設速度量測點位置設於窗口前，以觀測其流場變化，如圖 4-19 所示。

● 模擬結果

模擬結果與文獻相比，陳躍仁[2]在相同情境下，0.2 m 以及 0.25 m 皆有產生燃燒不完全的情況(圖 4-22)，寬裕度比起本模擬少了兩階。

觀察陳躍仁之計算領域，其僅設定到窗口前(設定為 open)，而根據宋艷[16]針對實驗所做的驗證，擴大計算領域比起邊界條件設於窗口前能夠得到更準確的結果。故本模擬將網格延長至室外，除了能讓結果更為準確也可追蹤氣體流出窗口後之物理現象。

由模擬結果可得(圖 4-23~4-25)，在開啟窗戶的情況下，開窗面積愈大，發生燃燒不完全現象的時間就愈晚，開窗寬度大於 0.2 m 以上甚至不會發生危險。

熱水器排氣口排出的煙氣，由於溫度比室溫高，會因浮力作用而在上方累積，累積至窗口前時，受到環境與陽台之密度與壓力差影響而向外排出，在排出的同時，陽台下方呈現一負壓(與大氣壓力之差值)，使得室外 O_2 得以補充至陽台，當陽台內流場達到穩態時，於窗口前形成一中性帶(壓力、速度為零之所在)，如圖 4-21，而中性帶以上為排氣，以下為進氣。故由於中性帶的形成， O_2 得以從室外補充，使得 O_2 低於 15% 的時間延後，開窗寬度大於 0.2 m 以上則始終保值在 15% 以上。圖 4-25 為各開窗寬度在窗前達到穩態時的速度向量圖，可以發現寬度愈大，中性帶愈往中間移動，最終停在中間位置。

各開窗寬度相互比較下，圖 4-24 顯示，開窗寬度 0.1m 與 0.15m 中性帶落在窗戶高度 0.15~0.2 之間，而 0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.35 m 及 0.4 m 則是落在 0.2 m~0.25 m 之區間，開窗寬度愈窄中性帶愈低，室外 O_2 補給量愈少，最終使熱水器的 O_2 消耗量大與室外補給量，進而發生燃燒不完全的現象。

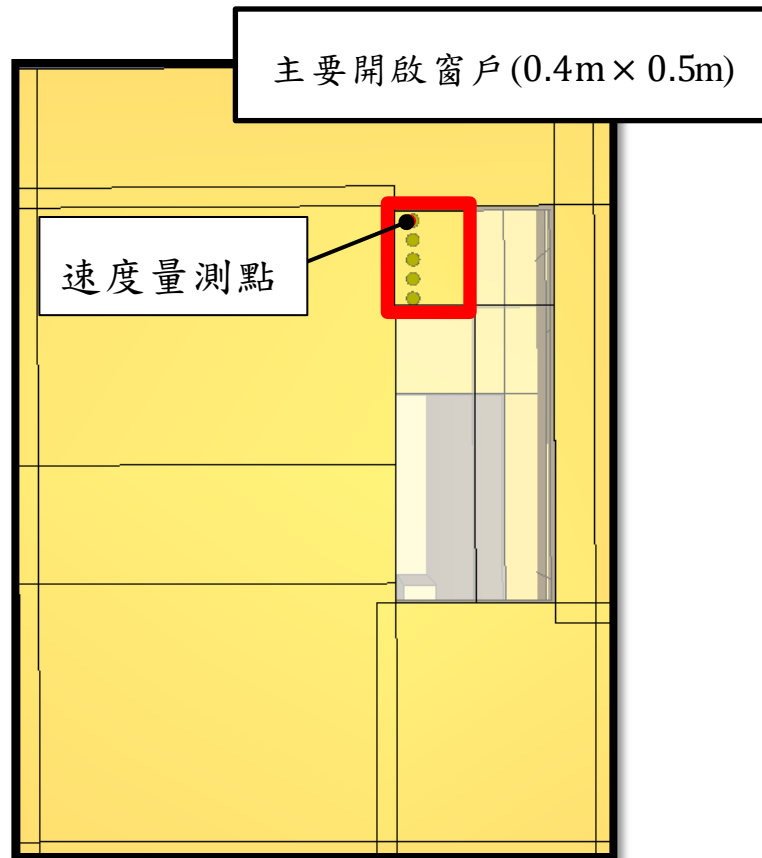


圖 4-19 標準案例開窗探討模型示意圖

Smokeyview 5.6 - Oct 29 2010

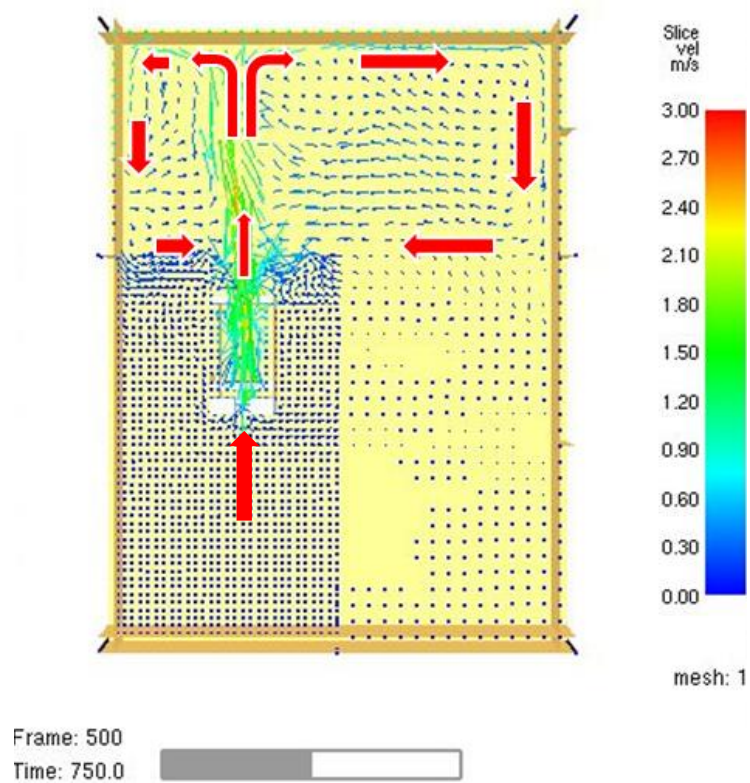


圖 4-20 陽台內流場示意圖

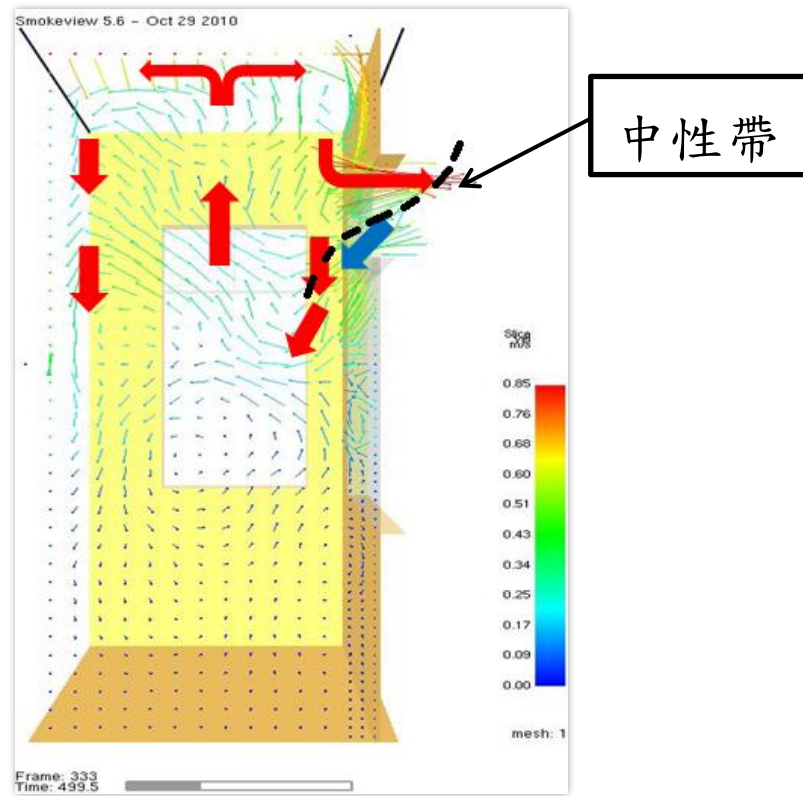


圖 4-21 窗口中性帶示意圖

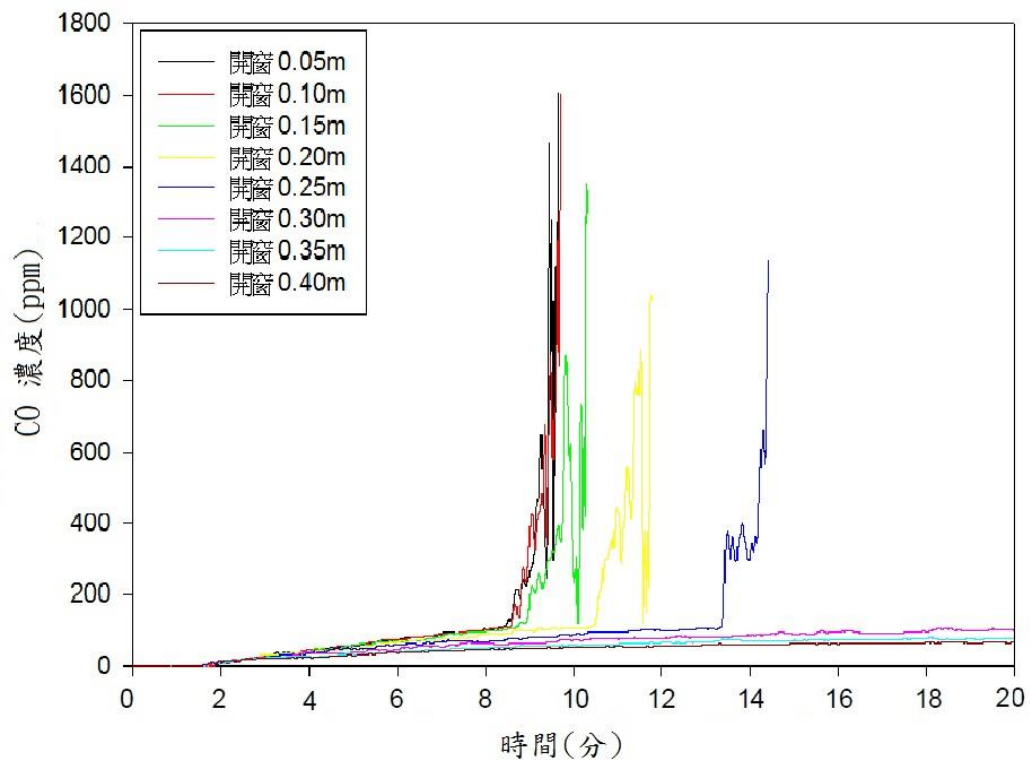


圖 4-22 標準案例開窗探討之 CO 濃度圖(陳躍仁)

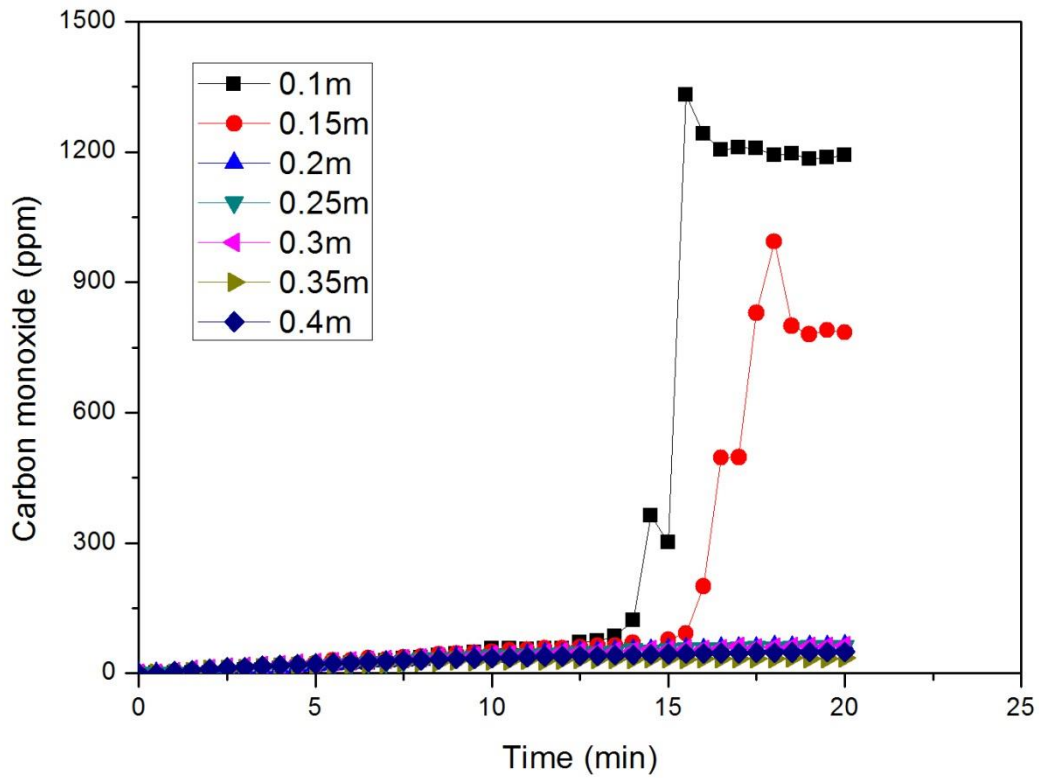


圖 4-23 標準案例開窗探討之 CO 濃度圖

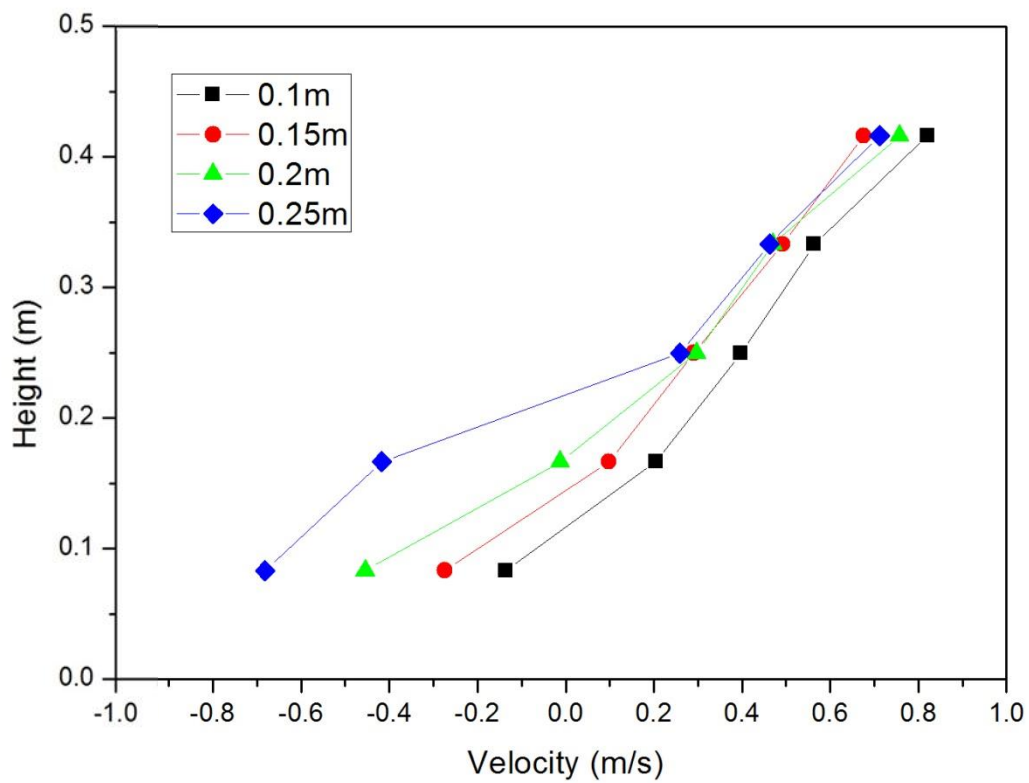


圖 4-24 標準案例開窗探討之窗口前速度分佈圖

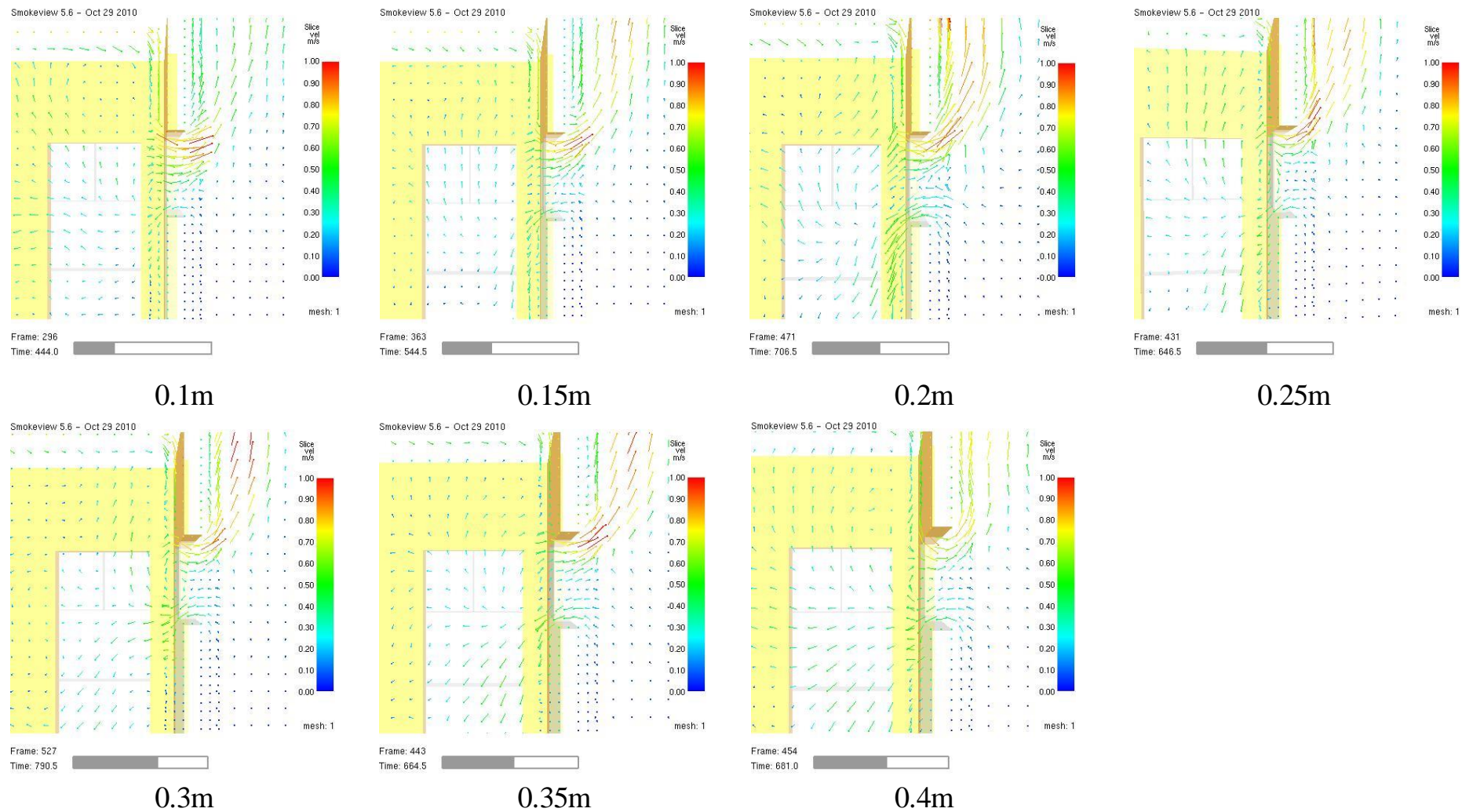


圖 4-25 標準案例開窗探討之窗前速度向量圖 x-z 剖面

4.3.1.2 熱水器自然以及強制排氣對於陽台安全之影響

根據消防法第 15 條之 1[8]所述，若熱水器無法安裝於室外空間，則必須裝排氣管將廢氣排至室外，但上述法條設立於民國 94 年，在此之前並無相關安裝規範，且熱水器壽命平均 5~6 年，壞了再修又可再用 2~3 年，所以現今民眾所使用的熱水器安裝在錯誤場所的比比皆是。而本小節以目前市面上所販賣的 FE 型(強制通風)與實驗[1]所使用的 CF 型熱水器相互比較，開啟對外窗以分析兩者對於陽台的安全性分析。FE 型熱水器模擬外觀如圖 4-26 所示。

● 模擬結果

根據王保友[17]所提及，出水量 10 L 的 FE 型熱水器所用之風機風量大約在 8.5~9.5 m/s，本模擬熱水器設定為大火，故將風速設定為 9.5 m/s。

由結果來看，FE 型熱水器經由上方導管將煙氣排出(圖 4-27)，因此不會有任何因熱水器所產生之氣體蓄積在陽台，因此陽台內 CO 濃度值為零(圖 4-28)，且在其頂端所加裝的排煙風扇能夠快速將煙氣排出，不會有氣體溢出的疑慮，安全性有如銅牆鐵壁；反觀 4.3.1.1 節之結論，CF 型熱水器所在陽台之窗口受到煙氣的影響，必須開窗 0.2 m 以上才能供給足夠的氧氣量，可見要鞏固生命安全，安裝擁有強制排氣功能的熱水器才是上上之策。

本模擬從開窗寬度 0.2 m 開始依序遞減，到 0.1 m 陽台內的氧氣還是絲毫不減，這是因為有導管將廢氣排出，使陽台內溫度與並不會有太大變化，故不會有熱膨脹壓力的產生使陽台內氣體向外排出，而在熱水器持續使用氧氣的情況下，室外空氣會不斷的補入室內，整個窗口面積皆為補氣的作用，讓氧氣濃度始終在 21% 左右，如圖 4-29 所示。

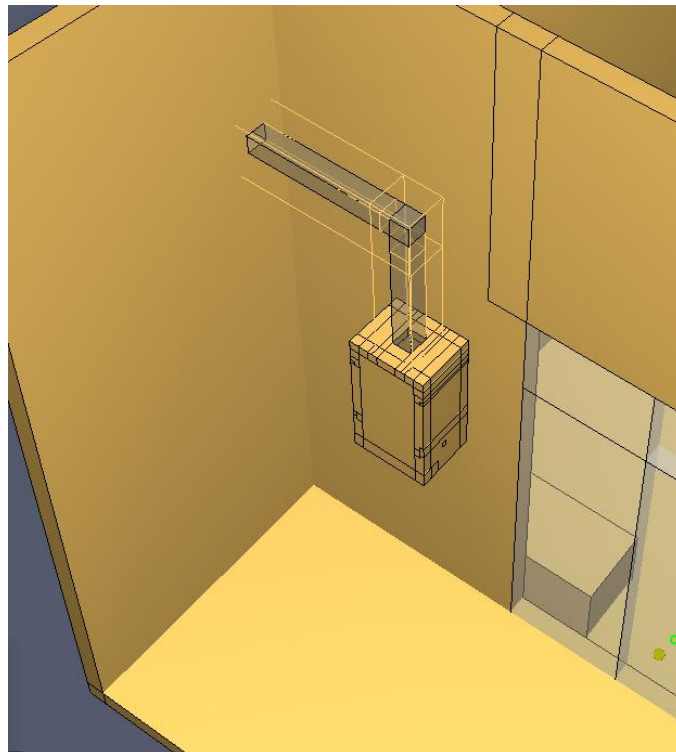


圖 4-26 FE 型熱水器外觀示意圖

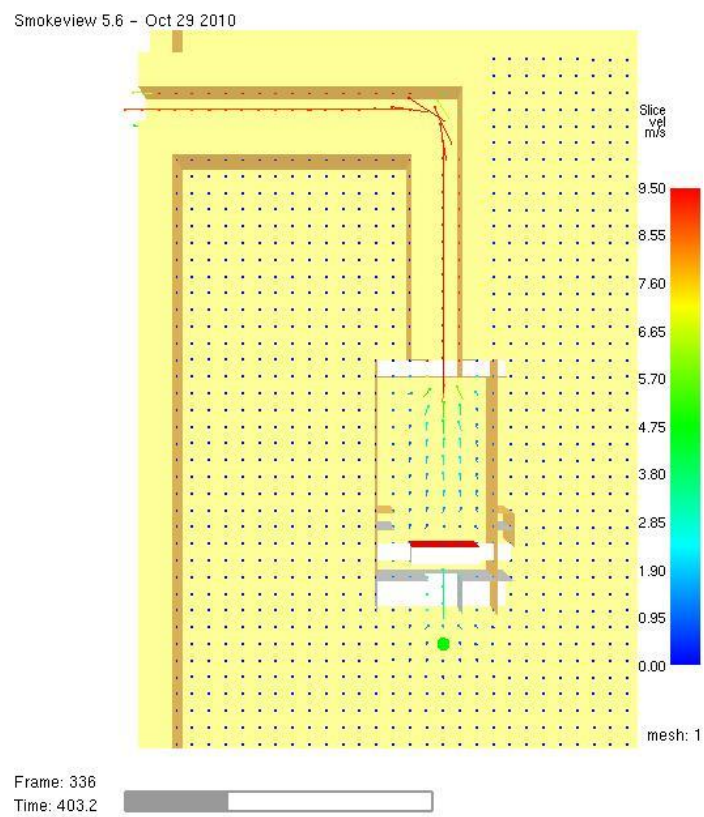


圖 4-27 FE 型熱水器流場示意圖

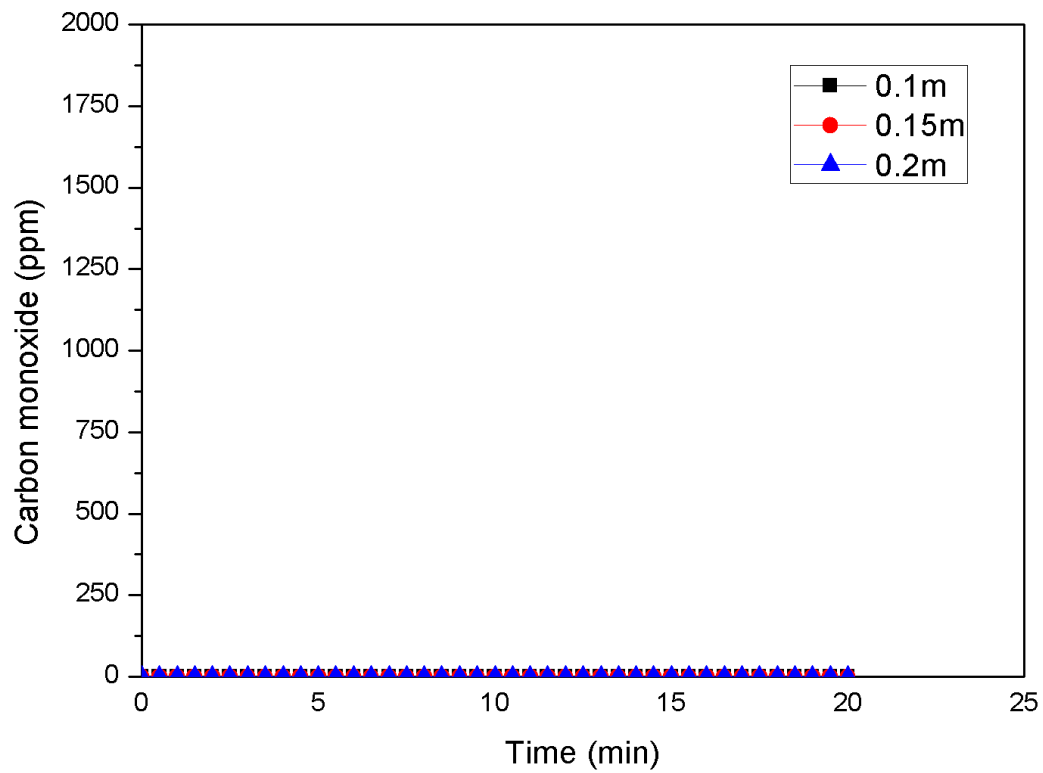


圖 4-28 FE 型熱水器 CO 濃度圖

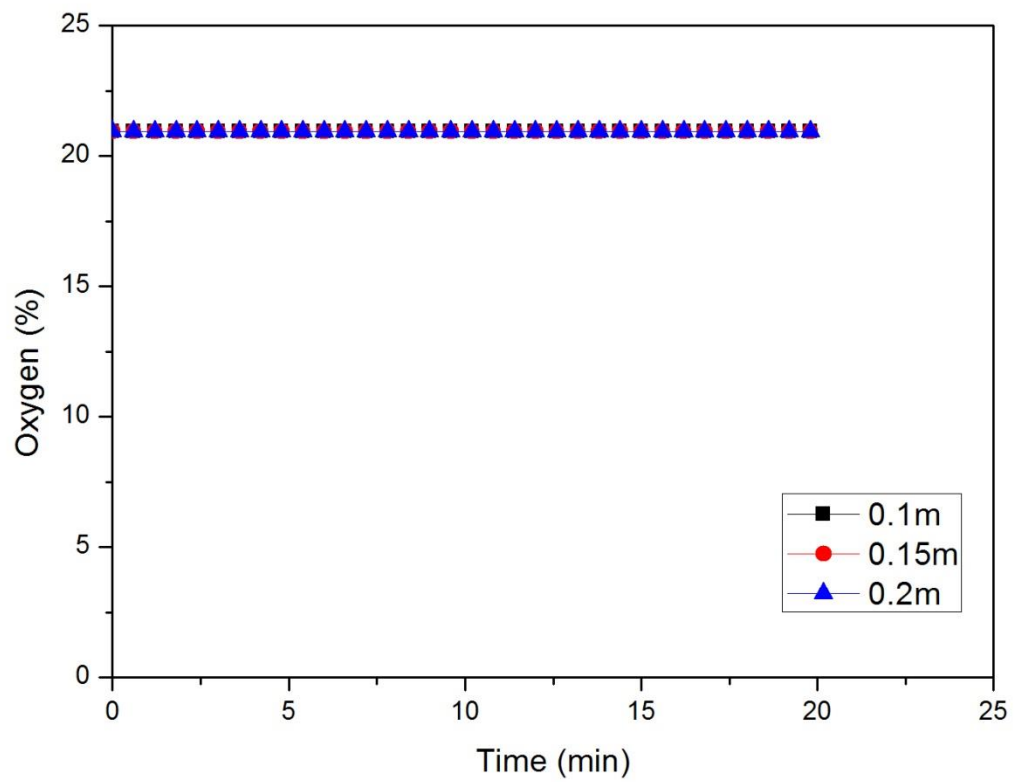


圖 4-29 FE 型熱水器 CO 濃度圖

4.3.1.3 熱水器出水量對於陽台安全之影響

市面上販售之熱水器出水量除了本模擬所使用的 10L 以外，還有 12 L 以及 16 L 的規格，其熱釋放率分別為 26.1 KW 以及 33.1 KW。本小節依照標準案例之結論，開窗寬度 0.2 m 以上(包含)，在 20 分鐘內能夠確保陽台的安全，故本小節針對不同規格依序開啟 0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.35 m 以及 0.4 m 開窗大小，並以 10L 為基準，對照在陽台使用 12L 與 16L 之熱水器對於安全開窗寬度是否有影響。

由於強制排氣型之熱水器並不會影響到陽台內流場，故此型號不在本小節討論範圍內。

● 模擬結果

由模擬結果來看(圖 4-30~4-35)，對 12 L 的結果而言，在室外無風的情形下，0.2 m 的開窗寬度已經無法滿足安全需求，必須加寬到 0.25 m 以上才能確保陽台的安全，而 16 L 更要開到 0.3 m 以上。觀察整體現象發現，出水量大相對來說耗氧量也大，且熱水器水排出之煙氣速度也快，迅速在陽台上方開始累積，使窗前產生之浮力足夠形成中性帶，且各窗口上方速度平均落在 0.8 m/s，下方則為 0.6 m/s，反觀先前的情境，只要下方窗口低於 0.4 m/s 就容易產生燃燒不完全的現象，此時若考慮開窗寬度，結果很明顯，就算窗口下方速度夠快，不夠的寬度仍舊造成室外補充量不足，使耗氧量大於補氣量的緣故，最終還是發生燃燒不完全的現象。

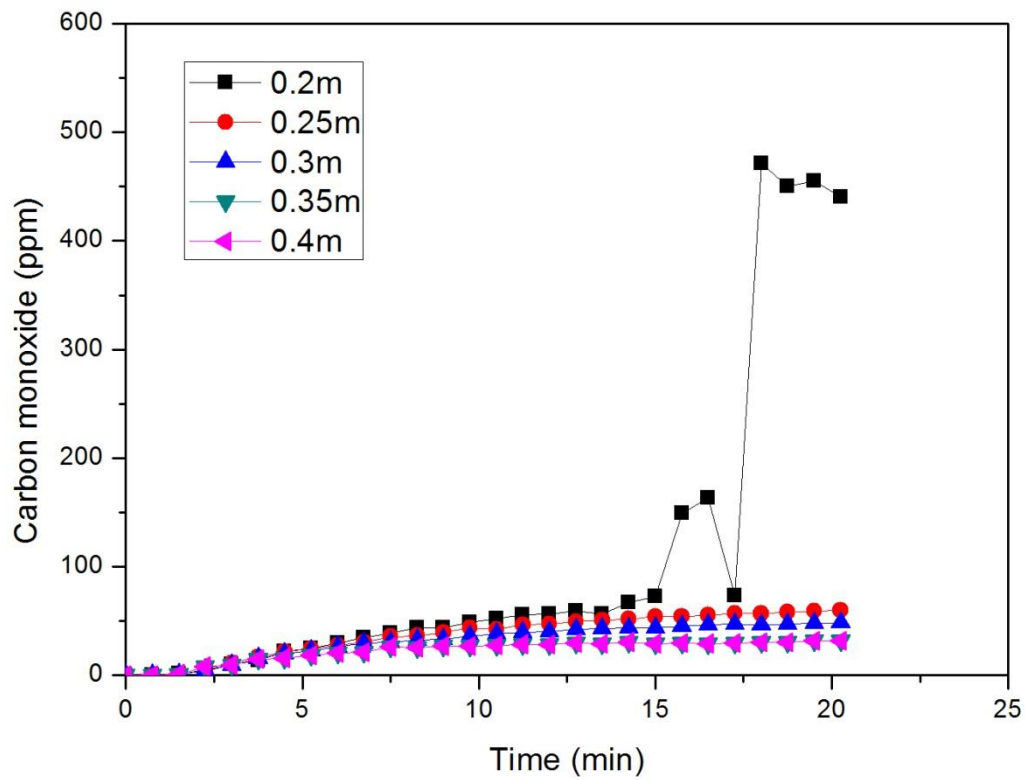


圖 4-30 熱水器型號 12 L 之 CO 濃度分佈圖

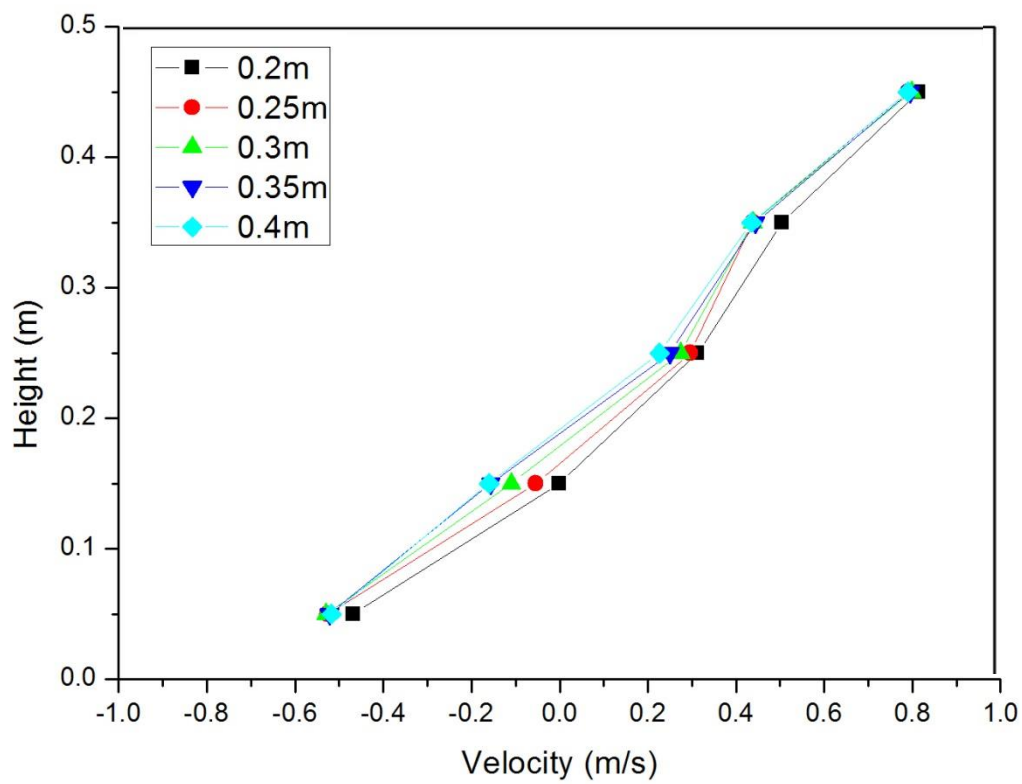


圖 4-31 熱水器型號 12 L 之速度分佈圖

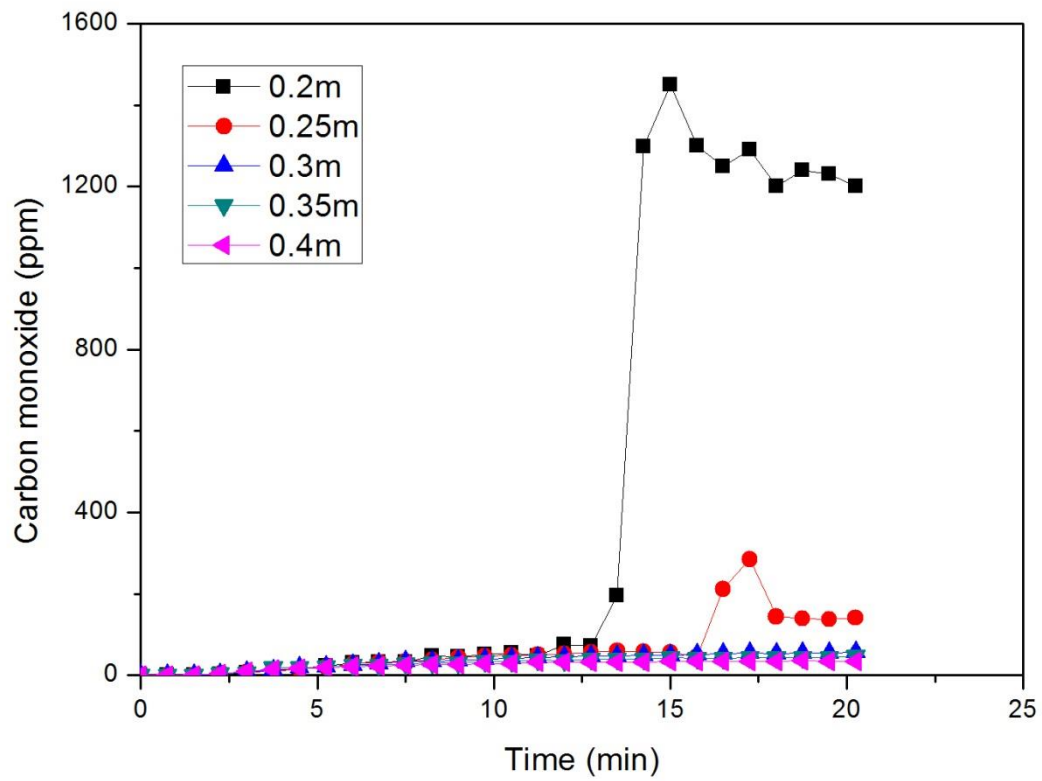


圖 4-32 熱水器型號 16 L 之 CO 濃度分佈圖

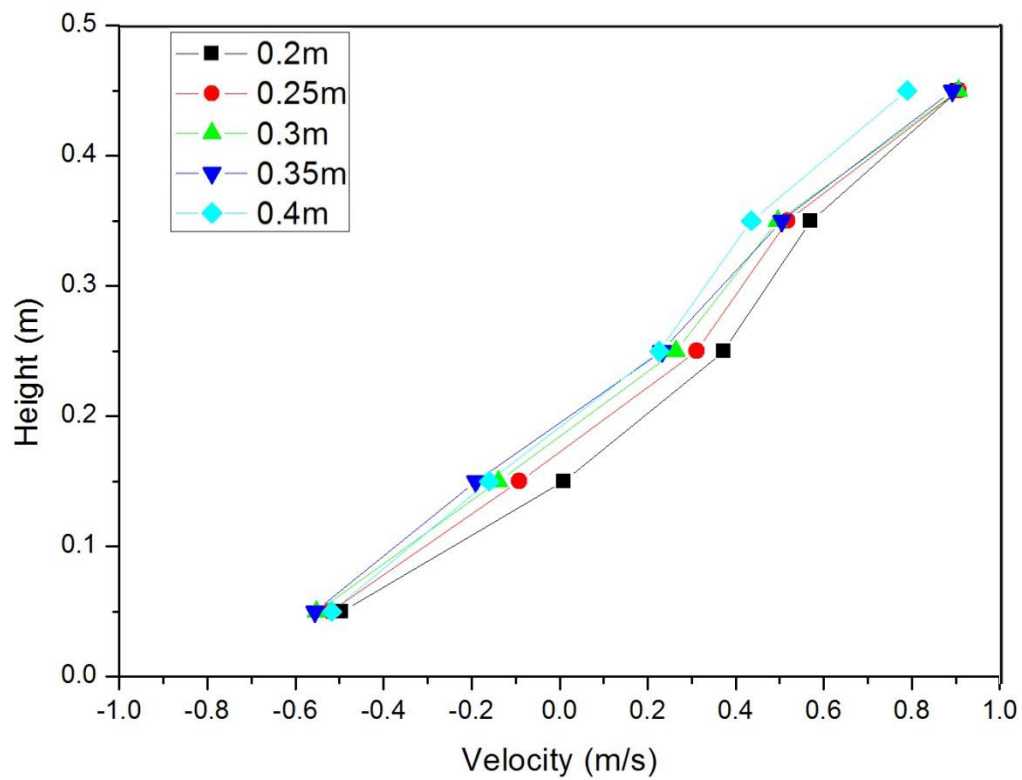
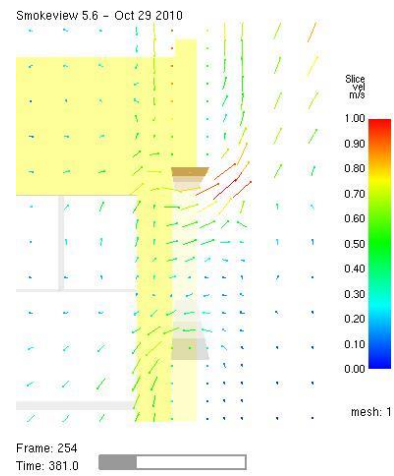
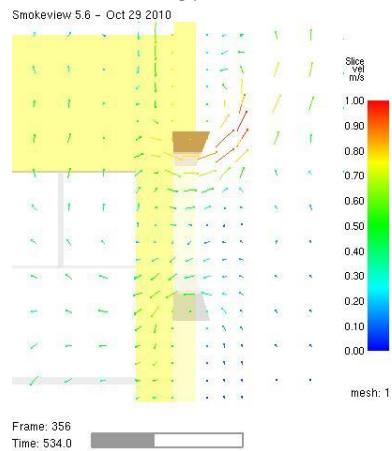


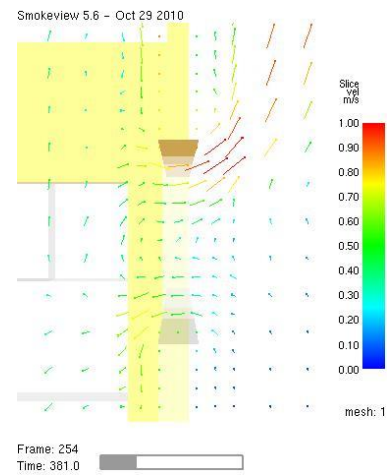
圖 4-33 熱水器型號 16 L 之速度分佈圖



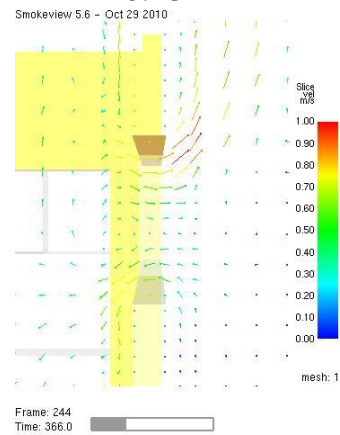
0.2m



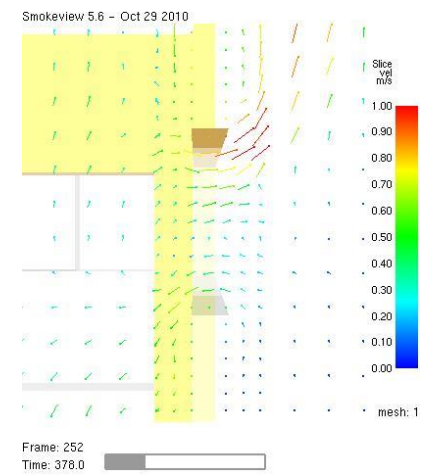
0.35m



0.25m

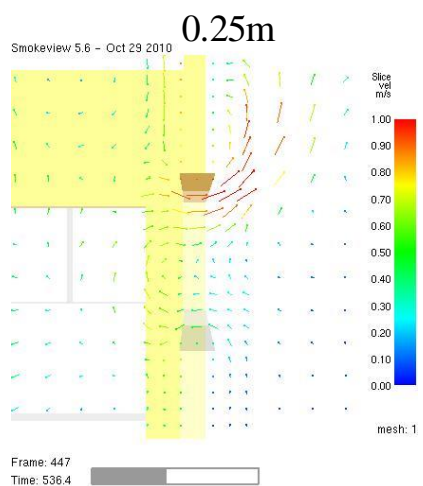
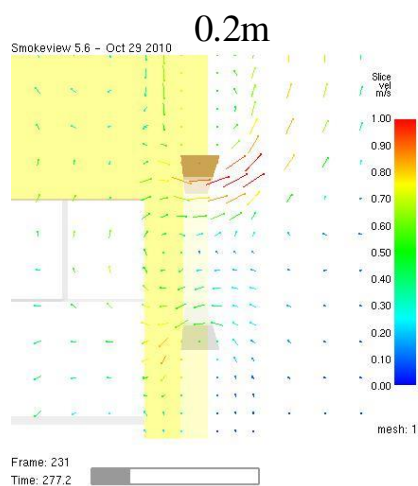
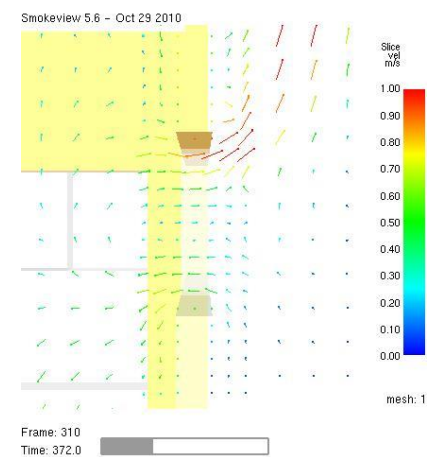
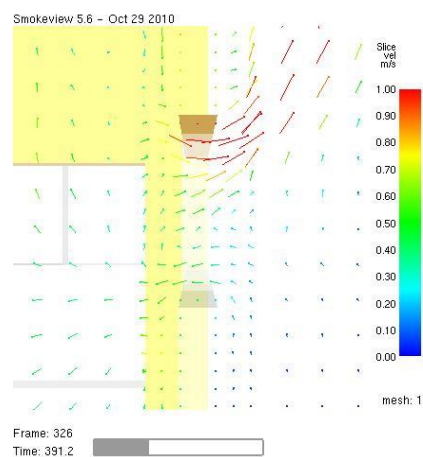
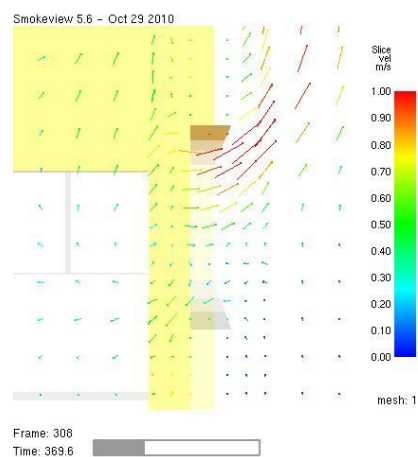


0.4m



0.3m

圖 4-34 熱水器型號 12 L 之各開窗寬度窗前速度向量圖 x-z 剖面



0.35m

0.4m

0.3m

圖 4-35 熱水器型號 16 L 之各開窗寬度窗前速度向量圖 x-z 剖面

4.3.1.3 改變熱水器以及窗戶位置對於陽台安全之影響

如圖 4-20 所示，熱水器內部流場為向上排氣下方吸氣，其燃燒所生成的產物(CO、CO₂等)溫度高於室溫(25°C)，因浮力作用而在陽台上方累積，所以陽台空間主要受到影響的位置為熱水器排氣口上方。相較於熱水器下方，上方除了溫度較高外，流速也比較快，依照標準案例之結論，以安全開窗寬度 0.2m 為基準(介於安全與不安全之界線)，在熱水器排氣口上方及下方各開 5 道寬度 0.2 m 之窗口，以探討不同開窗位置對於陽台安全之影響。此外，一般陽台常見為長方形，故本小節採用兩種熱水器位置，一為原先配置(陽台長向)；二將其旋轉 90 度貼靠於牆上(陽台短向)，觀察與窗戶位置之相互關係。各窗口配置與名稱如圖 4-36 所示；情境設定於表 4-4 所示。

表 4-4 改變熱水器以及窗戶位置之情境設定

情境	設定
情境一	不改變熱水器位置，探討八種開窗位置對於陽台安全之影響
情境二	改變熱水器位置，探討八種開窗位置對於陽台安全之影響

● 模擬結果

1. 情境一

由模擬結果可得知(圖 4-37、4-39、4-41)，位於熱水器排氣口上方之窗口情境在 20 分鐘內都能使陽台處於安全的範圍，由窗口前速度向量圖觀察可得(圖 4-41)，形成之中性帶十分典型，換句話說其速度為零之處在窗口中央；反觀排氣口下方，全數皆會發生燃料燃燒不完全的現象，發生時間大約在 13 分鐘左右。此情境窗口與熱水器位置彼此之間的距離最短大約 1 公尺；最長約 2 公尺，並不影響燃燒不完全的發生時間與中性帶之形成，中性帶位置大都維持在窗口高度

0.2 m 處，最高速度都在 0.2m/s 左右。

2. 情境二

由模擬結果可得知(圖 4-38、4-40、4-42)，牆面 No.1 以及 No.3 位於排氣口上方之窗口皆未發生燃燒不完全的現象，而牆面 No.2 則有發生。觀察圖 4-42 之速度向量圖，由於窗口位置位於熱水器正上方，排出之氣體流經窗口有部分排出窗外，而室外空氣受到排氣口之上升氣流所阻擋，再由窗口前速度分佈圖可以明顯看出牆面 No.2 窗口下方速度為零，導致室外空氣無法補充，因此在 O_2 持續消耗的情況下，造成燃燒不完全的現象發生。

而在熱水器排氣口下方之窗口，位在排氣正下方的窗口最早發生燃燒不完全的現象。市面上熱水器的進氣位置位於裝置的下方，一般而言會認為在其最近的位置設置開口會有最好的補氣效果，但結果與與預想卻是大相逕庭。由於陽台內溫度高於室外，產生的熱膨脹壓力使氣體不斷向外排出，導致熱水器下方進氣受到阻擾，在進氣量大幅減少的情況下，最後產生燃燒不完全的現象。

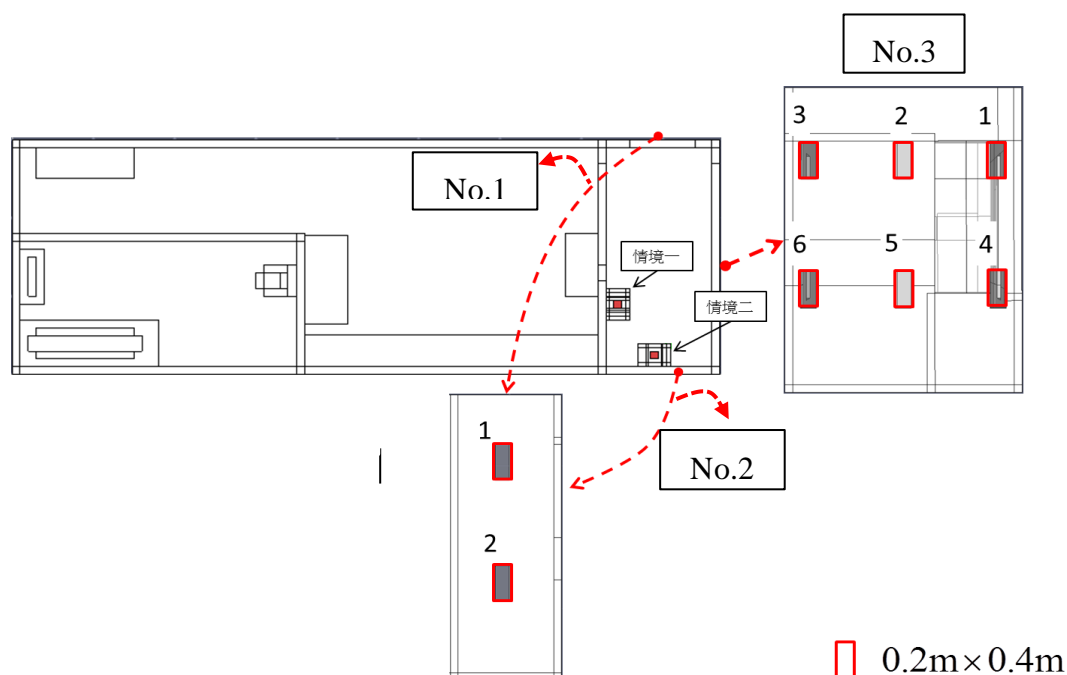


圖 4-36 窗口與熱水器位置示意圖

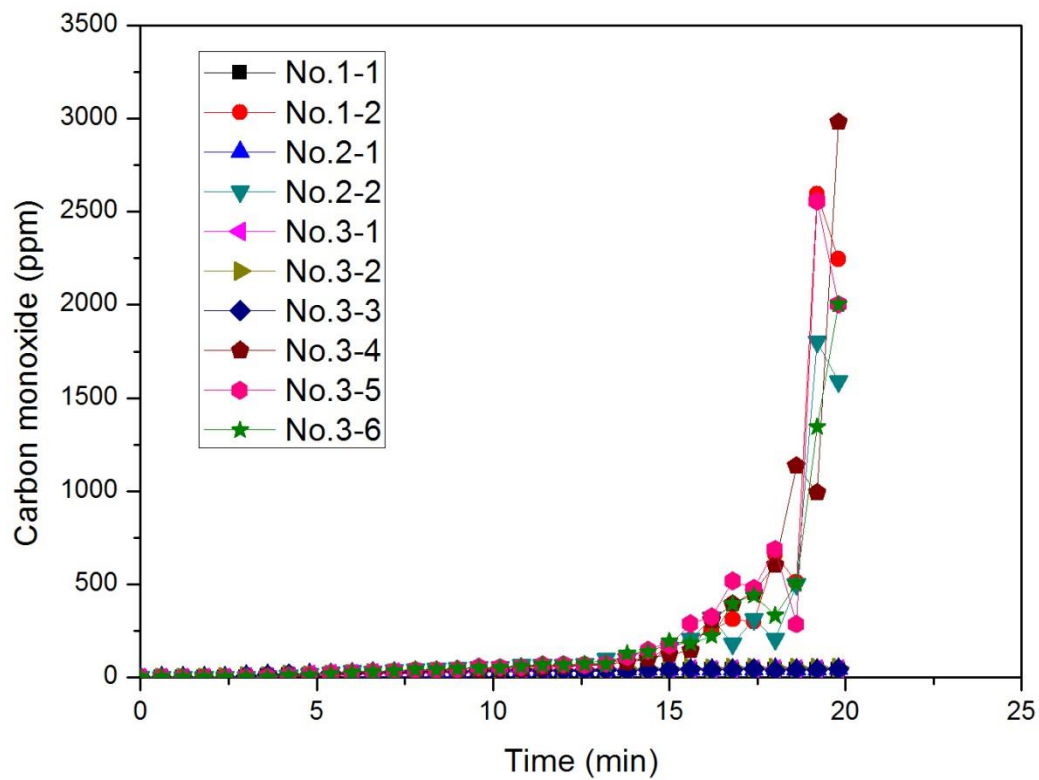


圖 4-37 情境一 CO 分佈圖

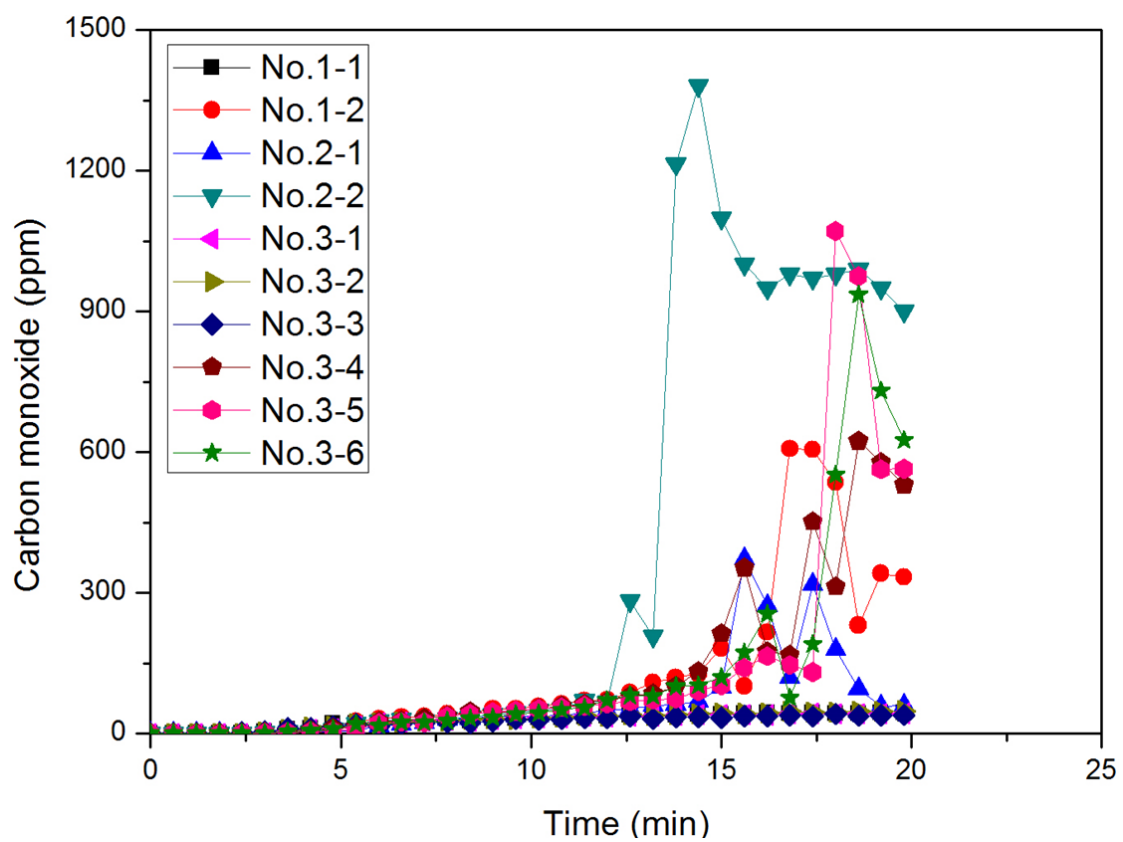


圖 4-38 情境二 CO 分佈圖

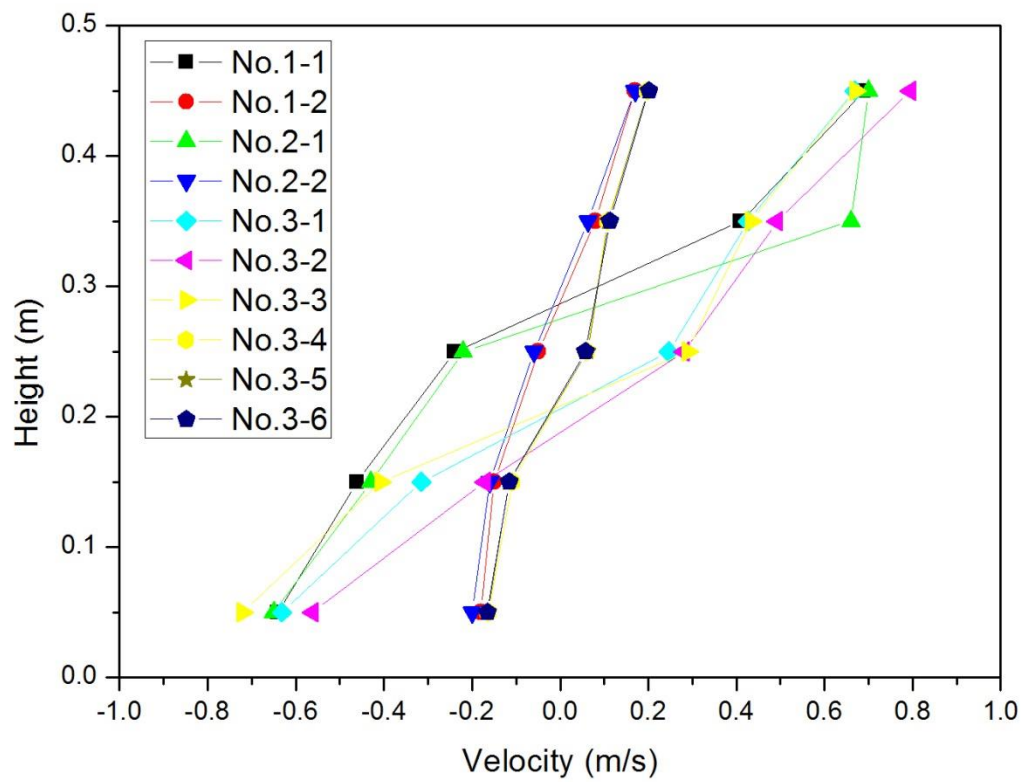


圖 4-39 情境一窗前速度分佈圖

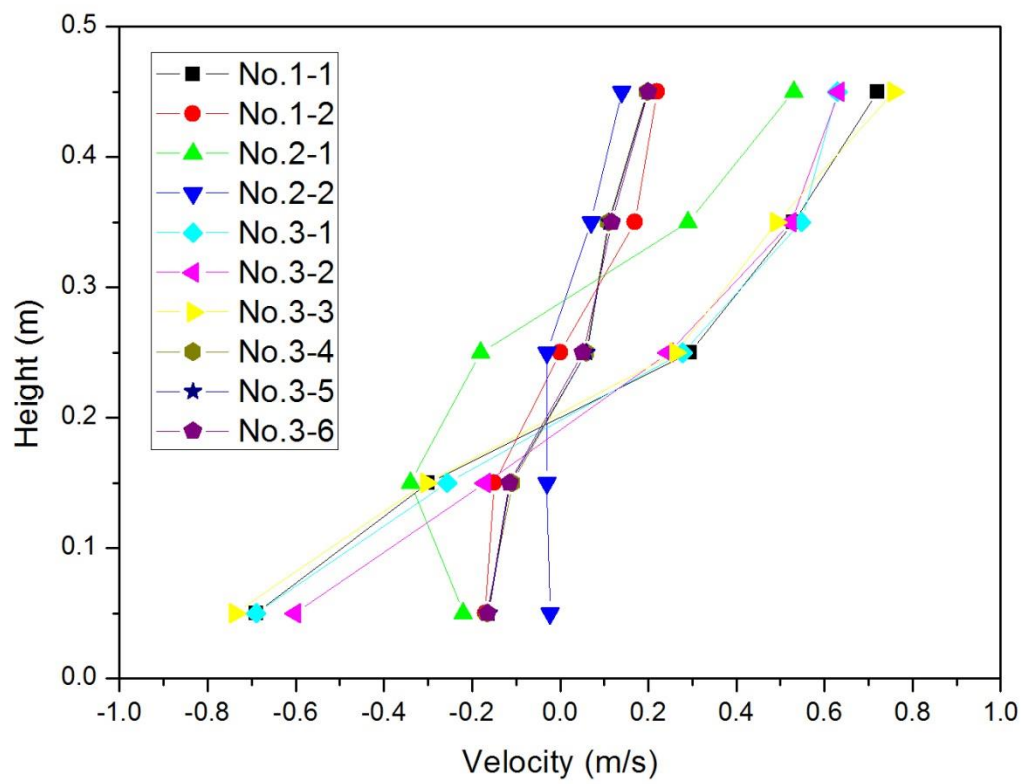
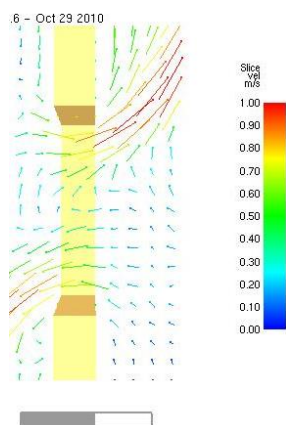
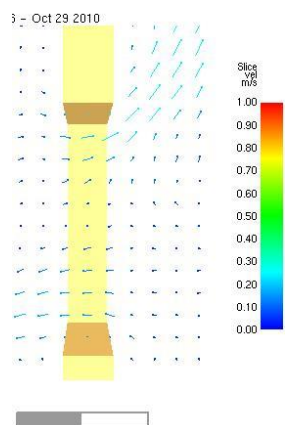


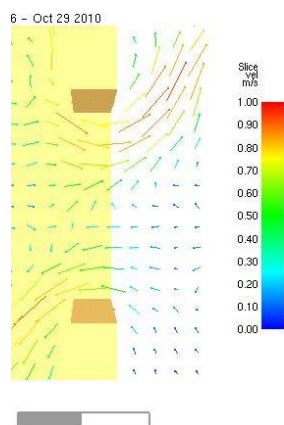
圖 4-40 情境二窗口前速度分佈圖



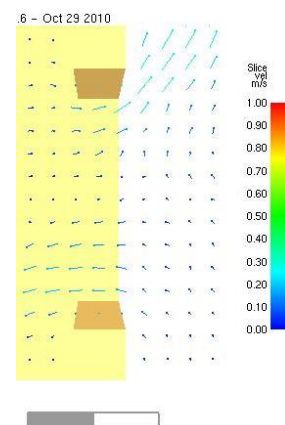
No.1-1



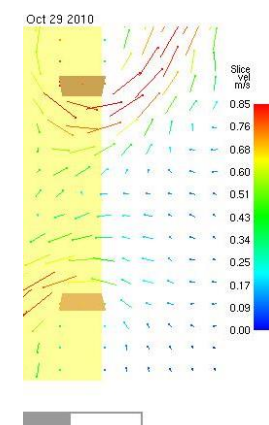
No.1-2



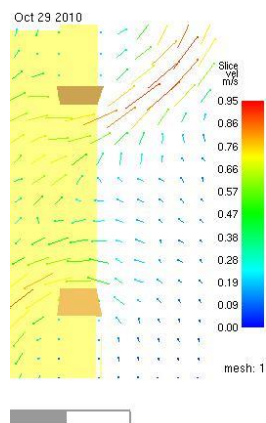
No.2-1



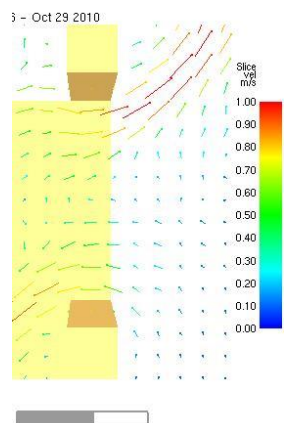
No.2-2



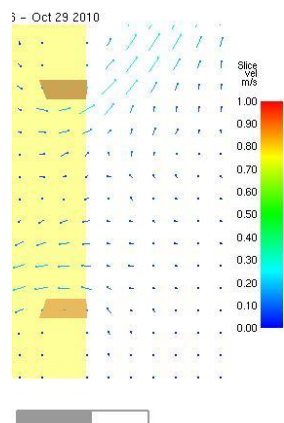
No.3-1



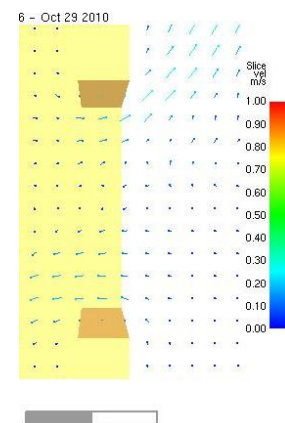
No.3-2



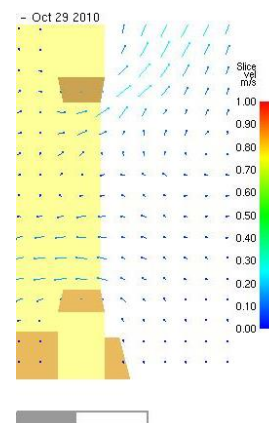
No.3-3



No.3-4

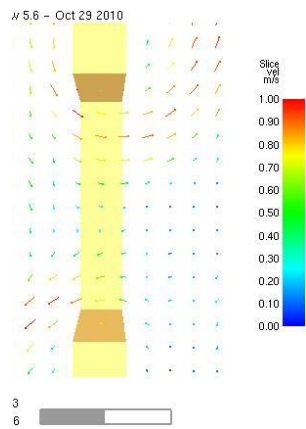


No.3-5

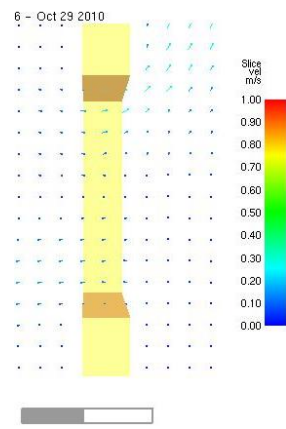


No.3-6

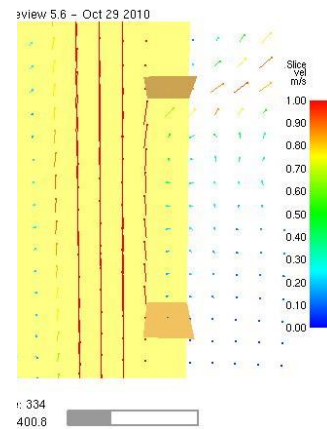
圖 4-41 情境一向量圖 x-z 剖面



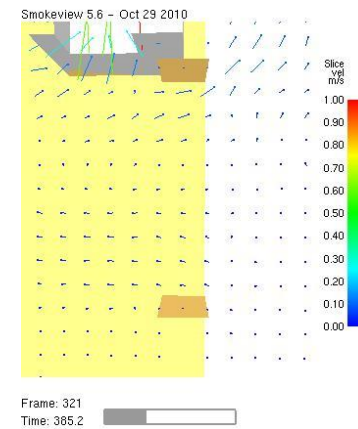
No.1-1



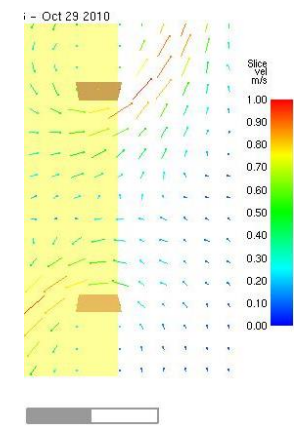
No.1-2



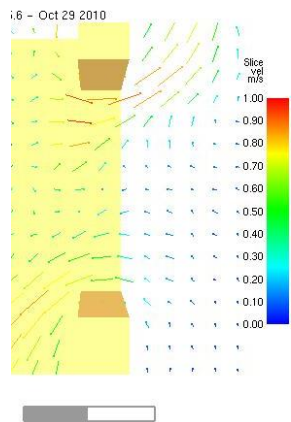
No.2-1



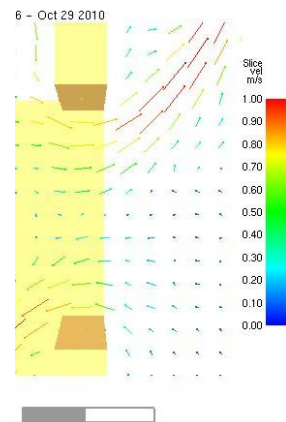
No.2-2



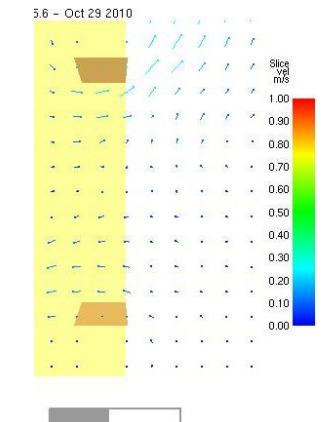
No.3-1



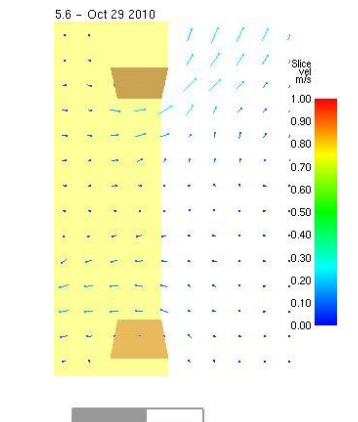
No.3-2



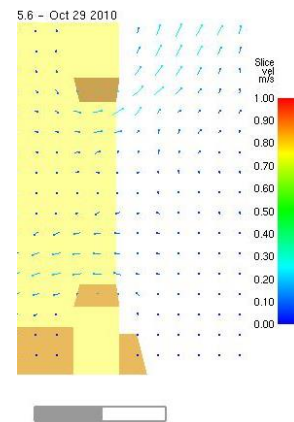
No.3-3



No.3-4



No.3-5



No.3-6

圖 4-42 情境二各窗口窗前速度向量圖 x-z 剖面

4.3.2 陽台堆積雜物

政府歷年來的加強宣導使民眾已有開窗能夠降低CO中毒事件發生的概念，不過還是有許多案例是在開窗的情況下發生中毒事件，常是天冷民眾為抵禦風寒，開窗的寬度過小而導致釀災。相較於標準案例，一般陽台主要功能用於晾衣、置物等，其結果可能與實際不盡相同。因此本小節以下將針對於天花板掛上衣物以及地板放置箱子進行陽台安全性分析。

4.3.2.1 天花板下掛有衣物

窗戶為加蓋型陽台(半密閉)與環境換氣唯一的途徑，由吳世騰[18]所整理出之常見中毒因素，其中窗前掛晾衣物也是榜上有名，其原因不外乎為衣物掛放在窗口前使得窗口的排氣效率變差，而本小節將分別開啟 0.1 m、0.15 m、0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.35 m 以及 0.4 m 之窗口大小，探討在窗前掛放衣物為何能夠危害陽台安全，模型如圖 4-43 所示。

● 模擬結果

由模擬結果可得知(圖 4-44~4-47)，寬度在 0.1 m、0.15 m 以及 0.2 m 時發生燃燒不完全的現象。由於衣物阻擋在窗前，且此窗口為陽台與室外換氣的唯一途徑，使得在陽台上方累積的氣體排出不易(圖 4-47)。觀察圖 4-45 窗口前速度分佈圖，開窗寬度 0.1 m 於窗口前沒有產生中性帶，這是因為寬度過窄，使得氣體多壟罩在窗口前，室外空氣就無法補充；而開窗寬度 0.2 m 雖然有產生中性帶，但是位置大約在窗口高度 0.175 m 處，雖然有 O_2 補給，但仍然低於消耗量，造成 O_2 供應不足。與空曠陽台比較，在相同開窗寬度 0.2 m 之下，其結果由安全轉為危險，由圖 4-46 速度分佈圖來看，有掛晾衣物的情境下方速度只有空曠陽台的一半，證明了擺放在窗前的異物會降低室

外空氣進入的速度，且 CO 濃度明顯高出了約 400 ppm，故對於室內氣體的排出也有明顯的影響。

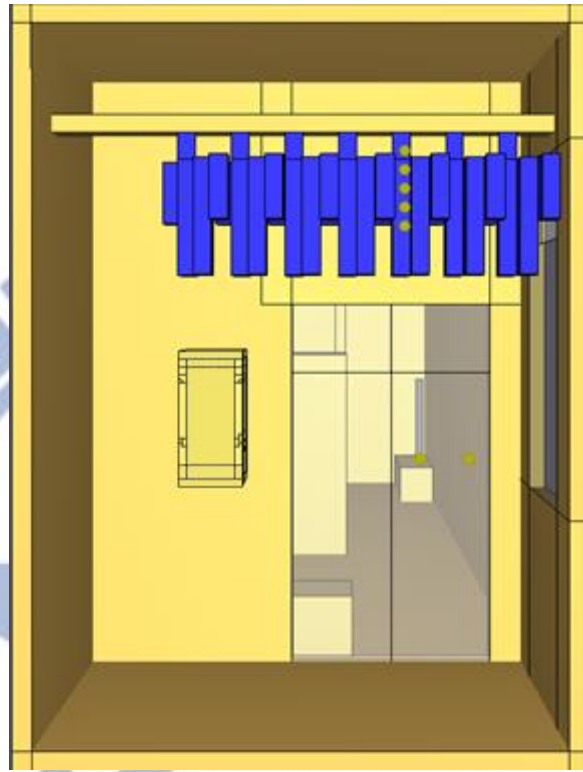


圖 4-43 陽台掛上衣物示意圖

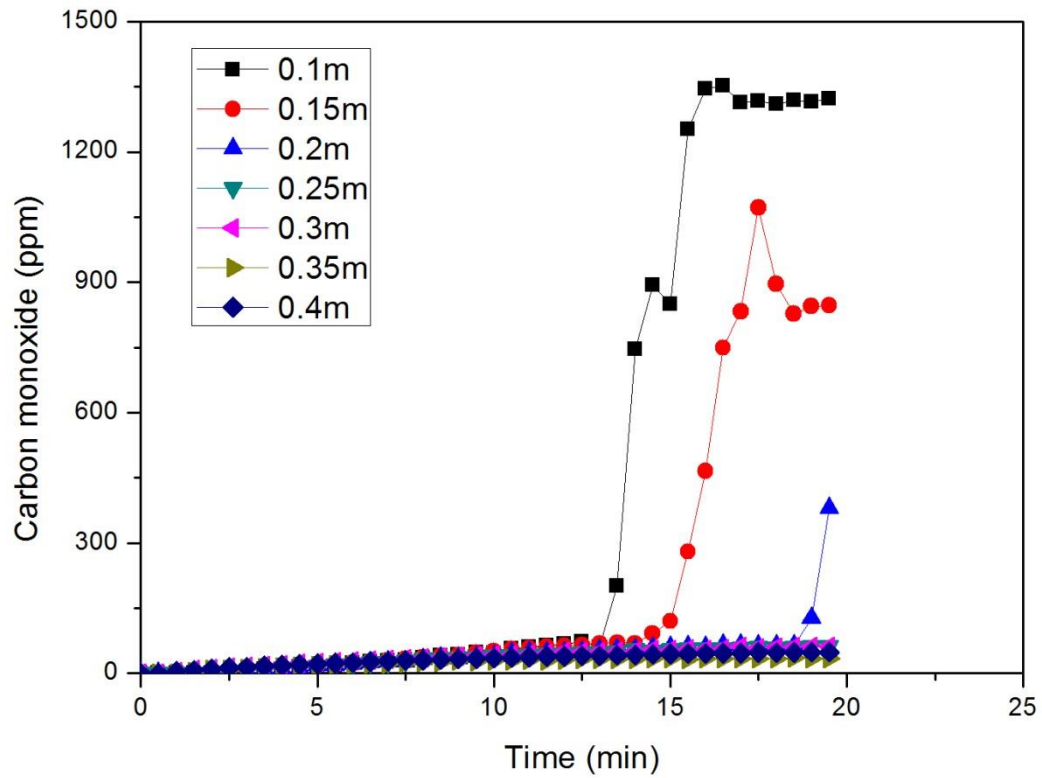


圖 4-44 天花板下掛有衣物之 CO 濃度圖

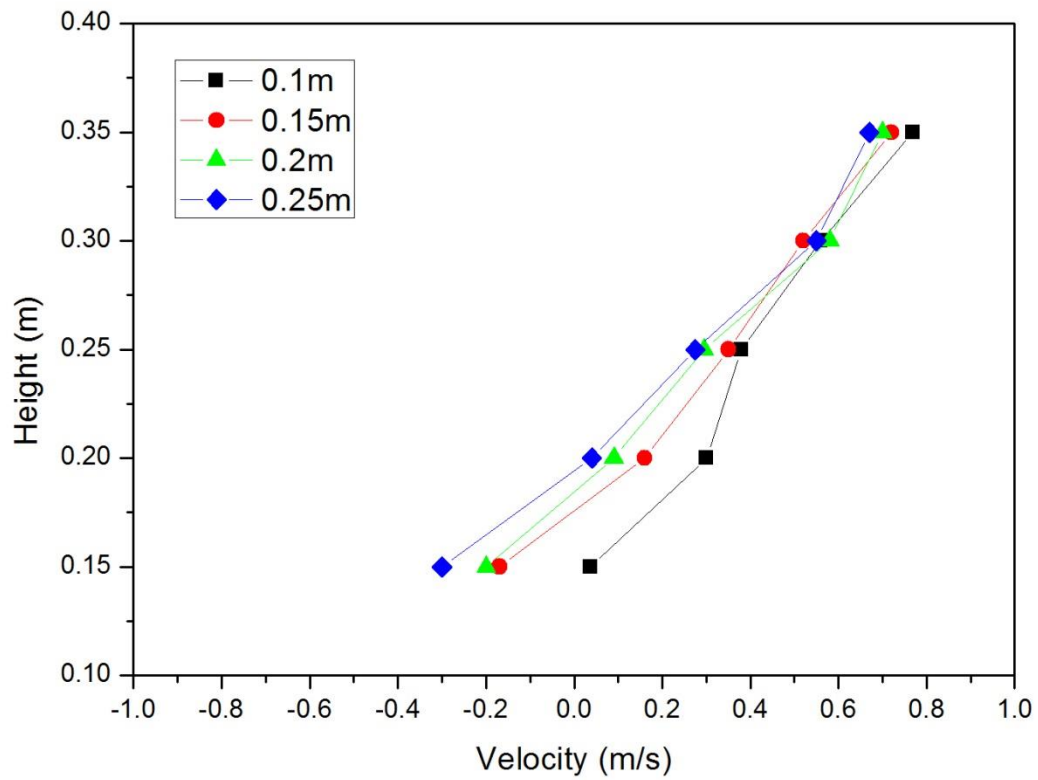


圖 4-45 天花板下掛有衣物之窗前速度分佈圖

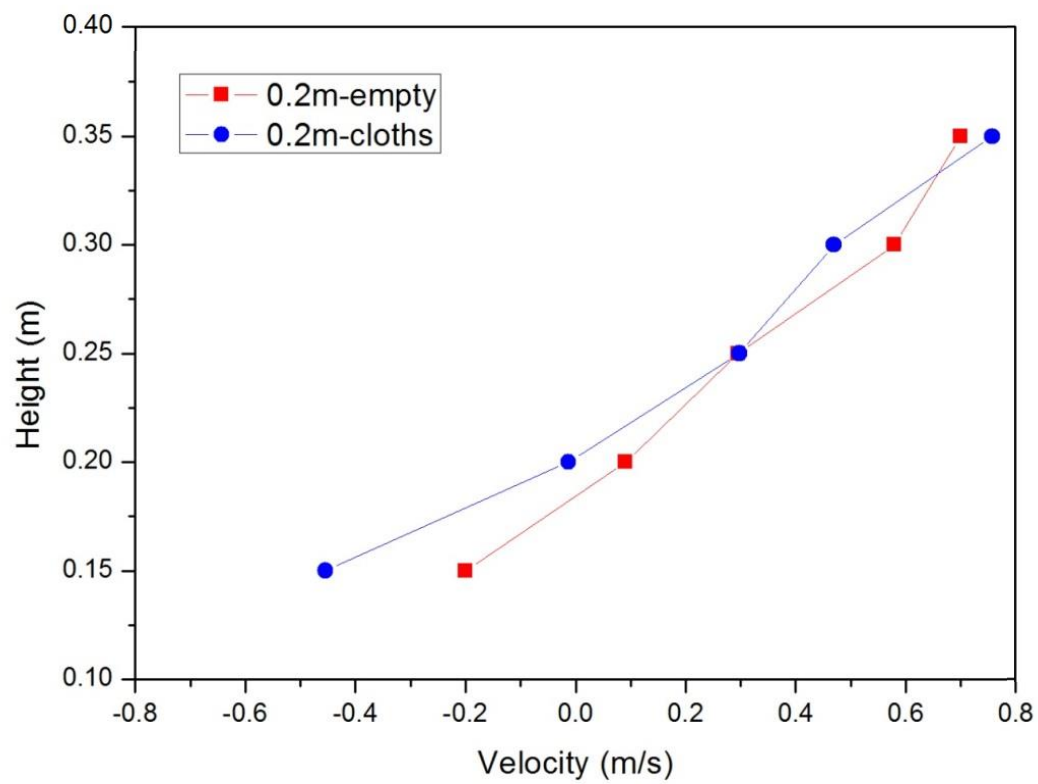
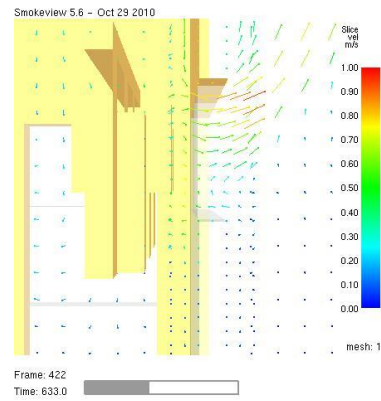
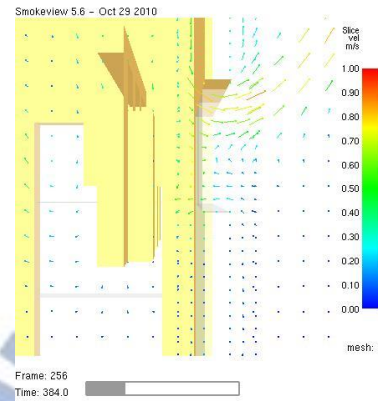


圖 4-46 陽台淨空以及天花板下掛有衣物
開窗寬度 0.2 m 窗前速度分佈圖

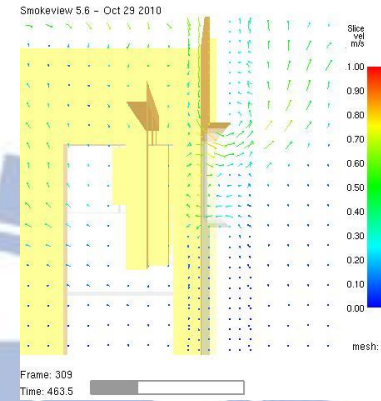




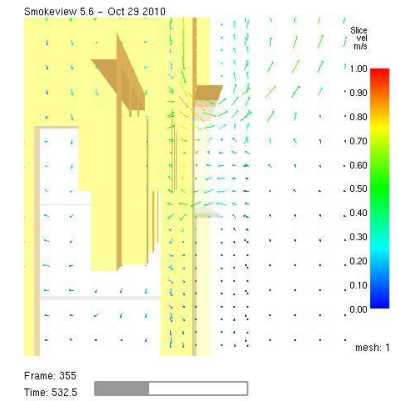
0.1m



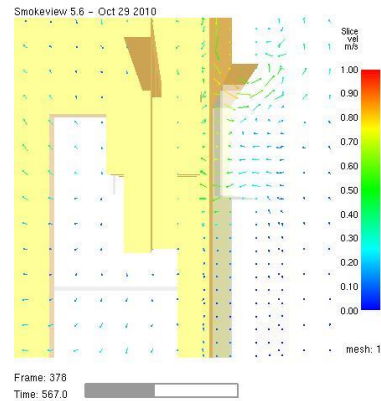
0.15m



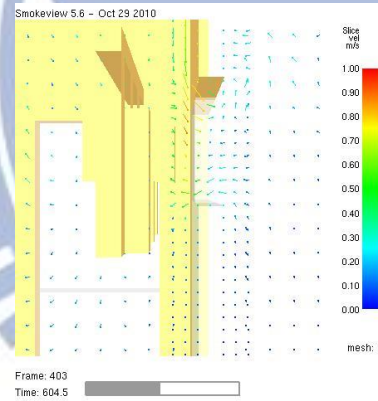
0.2m



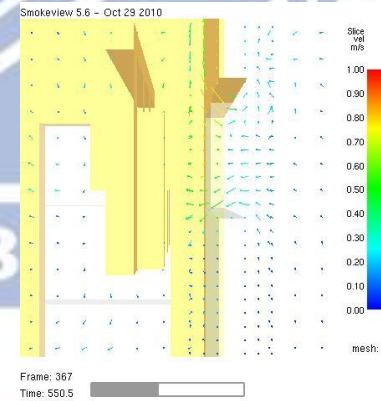
0.25m



0.3m



0.35m



0.4m

圖 4-47 天花板下掛有衣物之窗前速度向量圖 x-z 剖面

4.3.2.2 地板上擺放箱子

現今住宅型態多以公寓居多，由於坪數不大，一些鮮少用到的物品、洗衣機、鞋櫃等等可能會堆積在陽台中，且在內政部消防署每年的宣導中也有著重在陽台地板不應堆積物品以避免通風不良的情況發生，因此本小節以地板擺放箱子來模擬陽台堆積雜物的狀況。

堆積所造成的影響除了會降低 O_2 容量外，本小節欲觀察若箱子放在熱水器周圍是否會危害到陽台安全，又熱水器是由下方開口進氣，故箱子堆放位置設定為高過熱水器下緣(與熱水器相距 10cm)，堆放方式分為底部貼平地板以及架離地板 10 cm，且為分析雜物圍住的空間內外 O_2 差異，故在其內外增設量測點，如圖 4-48 所示。

● 模擬結果

本小節依照 4.3.1.1 之結論，開啟對外窗 0.2 m(安全與危險情況之界線)，再在地板擺設箱子，觀察是否會影響到陽台安全。

分析箱子貼平地板的結果(圖 4-49、4-51、4-52)， O_2 由下方進氣口吸氣，再經由上方排氣口排出，且排氣口下方氣體溫度較低，溫度較低的空氣乘積在底下，再加上箱子堆積在熱水器四周的情況下，陽台在約 17 分鐘時發生燃燒不完全的現象。從圖 4-33 觀察可得，熱水器只能靠箱子所圍成的範圍裡吸取 O_2 ，或是從箱頂進行補充。對照圖 4-49 來看，箱子圍成的範圍內外 O_2 濃度相差 5%，由此可知，熱水器供氧來源還是陽台下方所乘積的 O_2 較為重要。反觀箱子架離地板 10cm 的情況(圖 4-50、4-51、4-53)，陽台在 20 分鐘內為安全的範圍， O_2 始終保持在 15% 以上，不會產生 CO，由圖 4-34 的 O_2 剖面圖來看， O_2 藉由架高的縫隙補給空氣，再對照 O_2 濃度圖，箱子圍成的範圍內外 O_2 濃度然還是相差 5%，但情勢完全相反，反而是箱子圍住的範圍內 O_2 高過外圍濃度。由此可知，就算堆積物品，只要架高也能有效助於熱水器吸取 O_2 。

繼續加大開窗寬度的結果，無論有沒有架高箱子，在開啟窗戶寬度為 0.25 m 以上都能使陽台處於安全的範圍內。

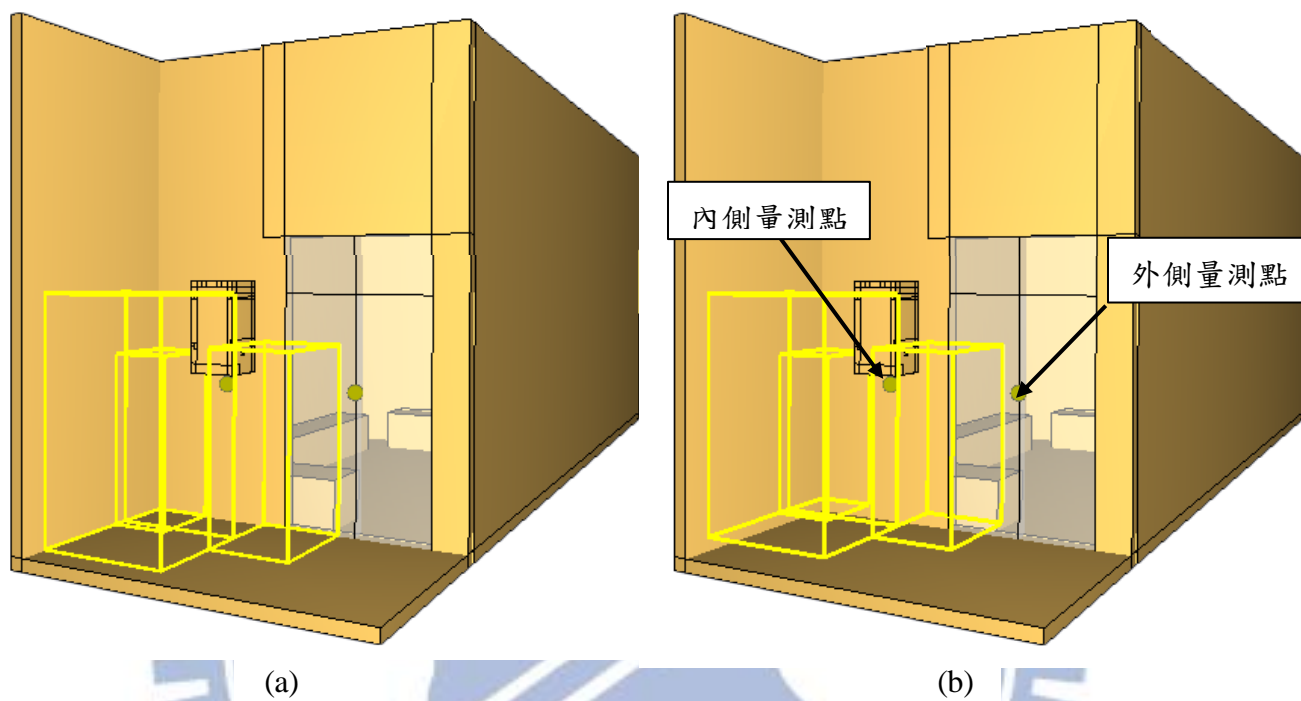


圖 4-48 地板擺放箱子示意圖
(a)箱子貼平地板(b)架高箱子離地 10 cm

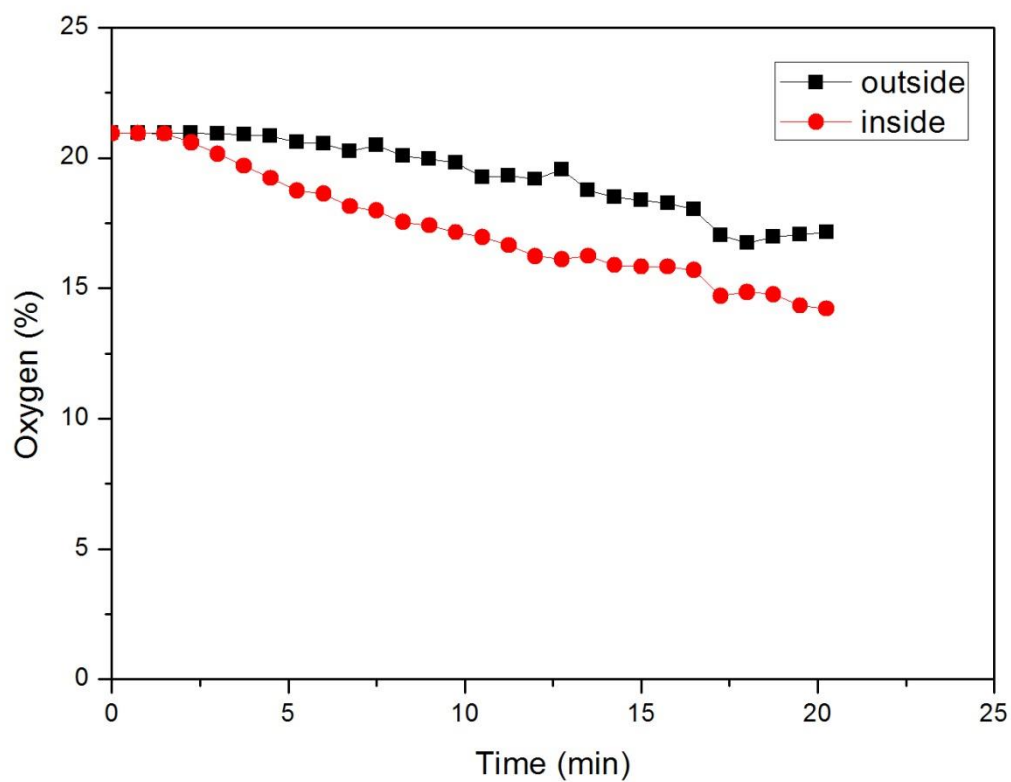


圖 4-49 箱子內外圍 O₂ 濃度圖

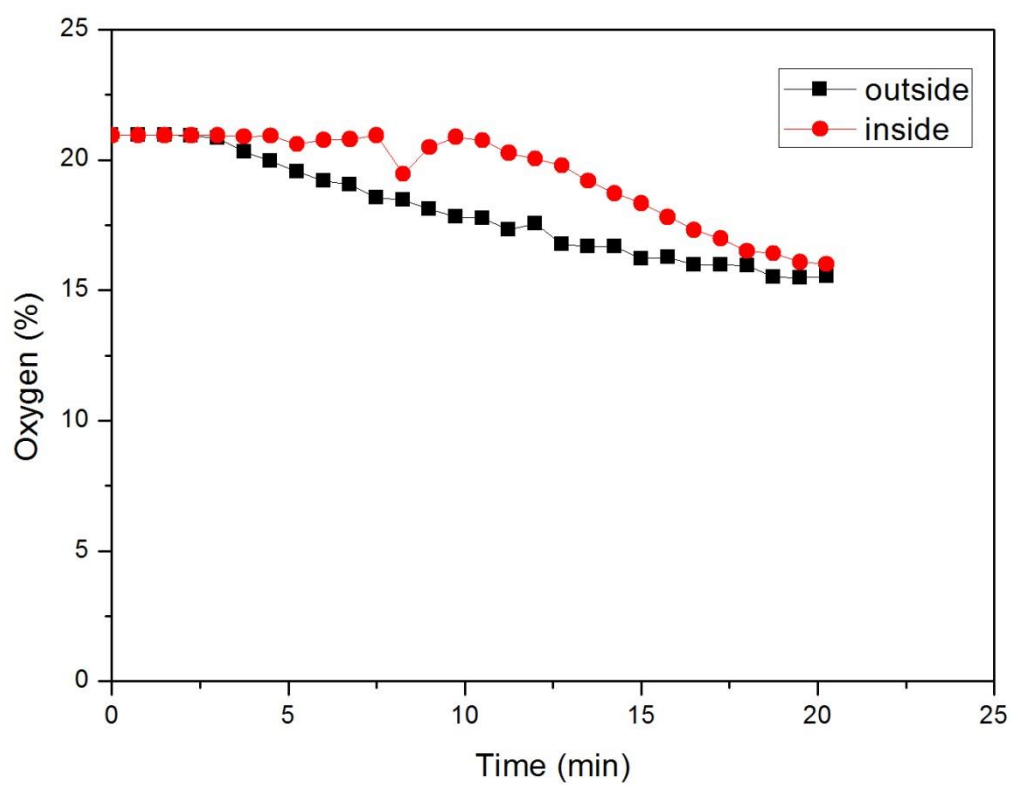


圖 4-50 箱子內外圍 O₂ 濃度圖(有架高)

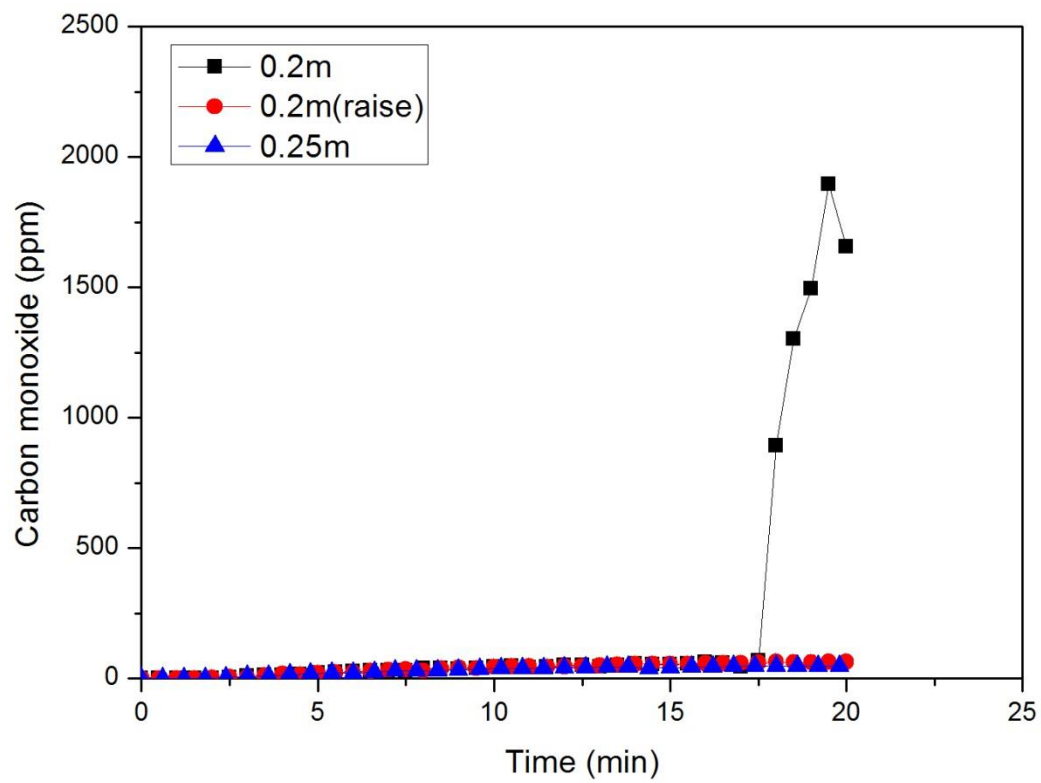


圖 4-51 有無架高箱子之 CO 濃度圖



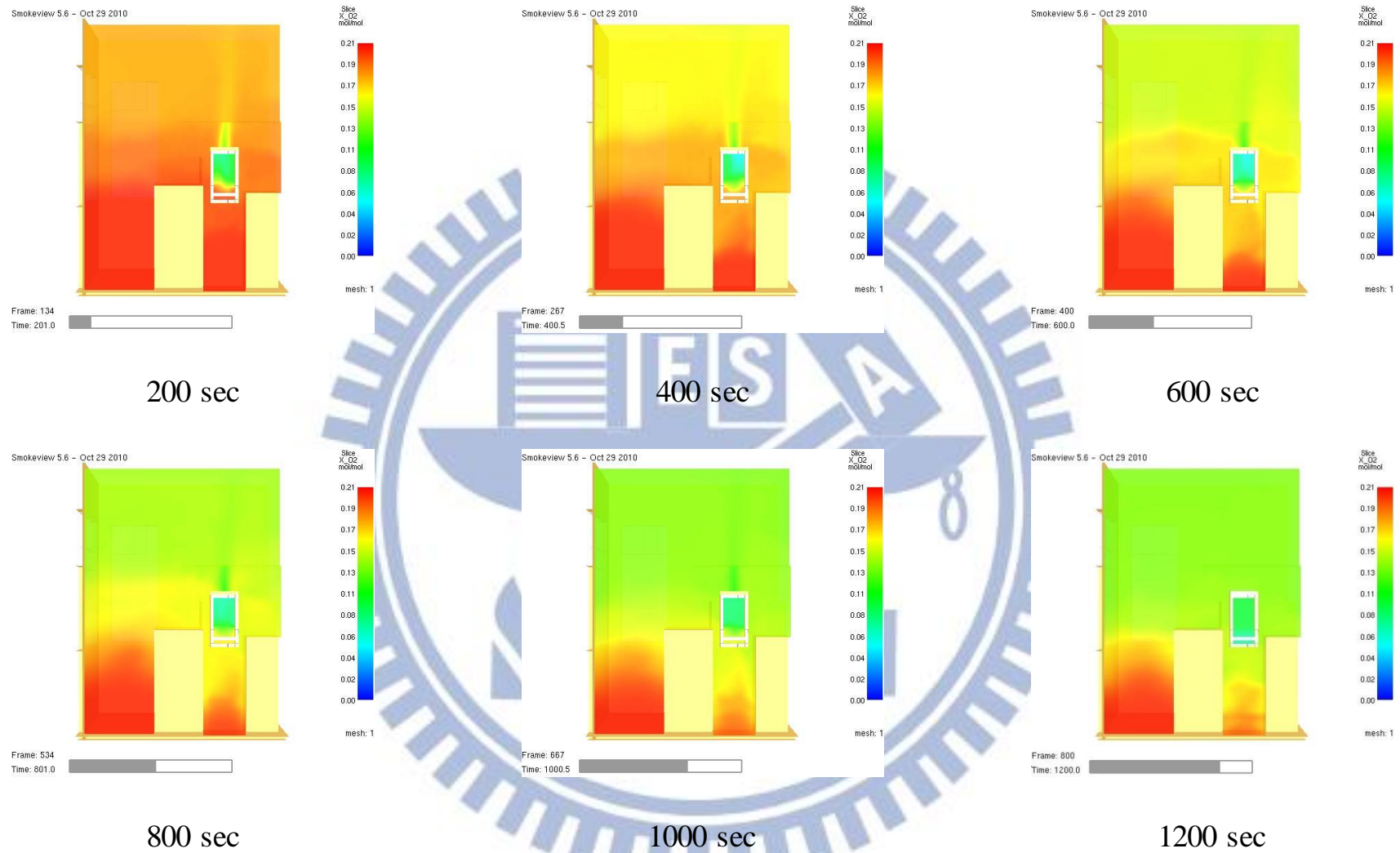


圖 4-52 箱子圍住熱水器之 O_2 分佈圖 y-z 剖面

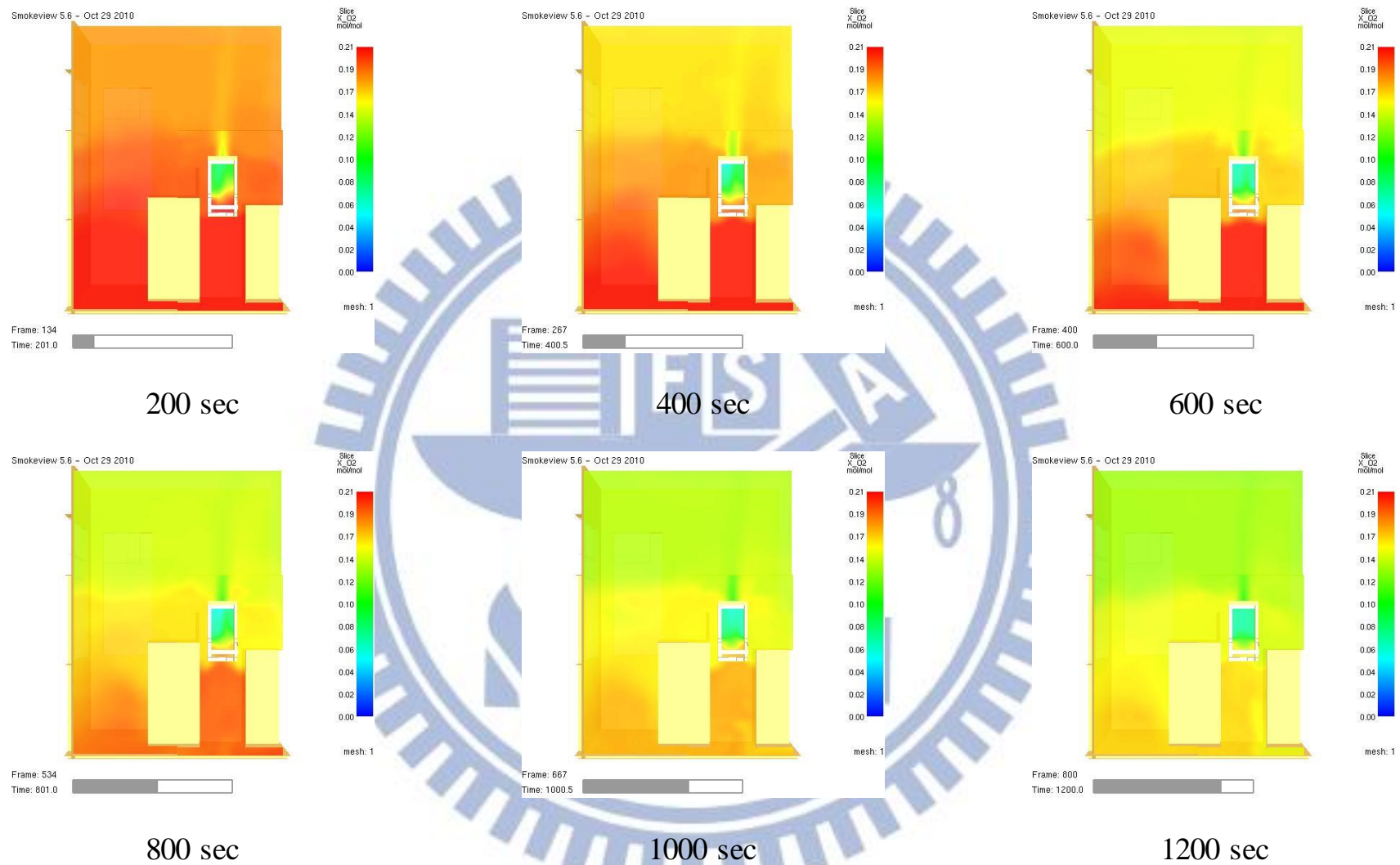


圖 4-53 箱子圍住熱水器之 O_2 分佈圖 y-z 剖面(有架高)

4.3.2.3 天花板掛有衣物以及地板擺放箱子

綜合以上兩節，於陽台天花板掛上衣物以及地板放箱子，開啟窗戶寬度 0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.35 m、0.4 m，並針對有無架高雜物進行陽台安全性分析，模型外觀如圖 4-54。

● 模擬結果

依照標準案例的結果，本小節首先探討空曠陽台的安全開窗寬度在有雜物堆積的情況是是否會有變動。由模擬結果來看，在 0.2 m 的開窗寬度下掛有衣物、擺放箱子以及上述兩種綜合皆有發生燃燒不完全的現象，發生時間分別為 18 分鐘、17 分鐘以及 16 分鐘。而陽台累積的一氧化碳濃度值如圖 4-55 所示，可以發現有擺放箱子的情況一氧化碳濃度都會比較高，這是因為箱子的體積減少了一氧化碳可以蓄積的空間，加快了濃度蓄積的速度。比較擺放箱子的情況下天花板有無掛上衣物，發現掛有衣物的情況下氧氣的消耗率較快，由 4.2.3.1 的結論，窗前的衣物使氧氣難以補充至陽台，而這也影響到熱水器所生成的一氧化碳，從圖 4-56 來看，同時掛有衣物以及地板擺放箱子的狀況下火勢較早轉為衰落，可能是因為氧氣補充的少導致火源難以繼續燃燒而熄滅，因此產生的 CO 比起沒有掛衣物來的少。總而言之，原先以為綜合所有危險因子的情況下會是雪上加霜，就結果來說反而是窗前沒有受到阻礙才最為危險；正如同水能載舟亦能覆舟的道理，氧氣能夠適當或是過量的補充能夠維持陽台的安全，但若是補充速度過慢而使火源持續著燃燒不完全的狀態，反而會使一氧化碳持續竄出。

另一方面，原先 0.2 m 開窗寬度在 16 分鐘時會發生燃燒不完全的現象，在架高箱子後熱水器能從底部吸取足夠的氧氣而達到完全燃燒，在 20 分鐘內終能不危害到陽台安全。繼續加大開窗寬度的結果，無論有沒有架高箱子，在開啟窗戶寬度為 0.25 m 以上都能使陽台處於安全的範圍內，如圖 4-57 所示。

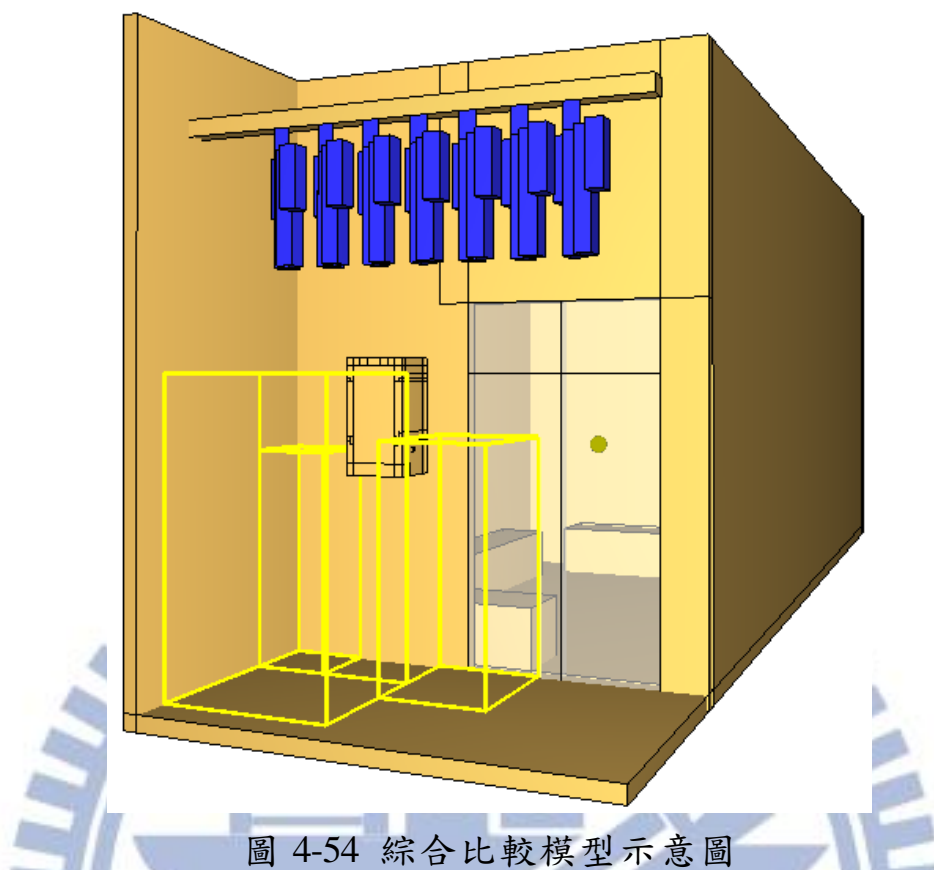


圖 4-54 綜合比較模型示意圖

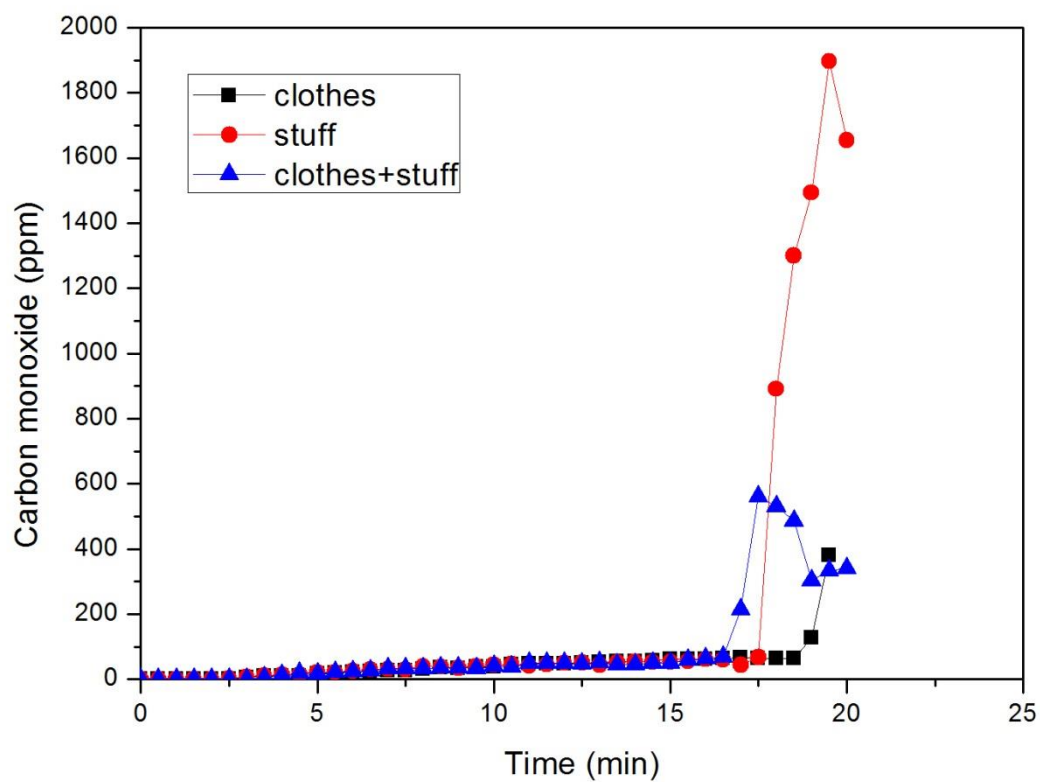


圖 4-55 綜合比較 CO 濃度圖

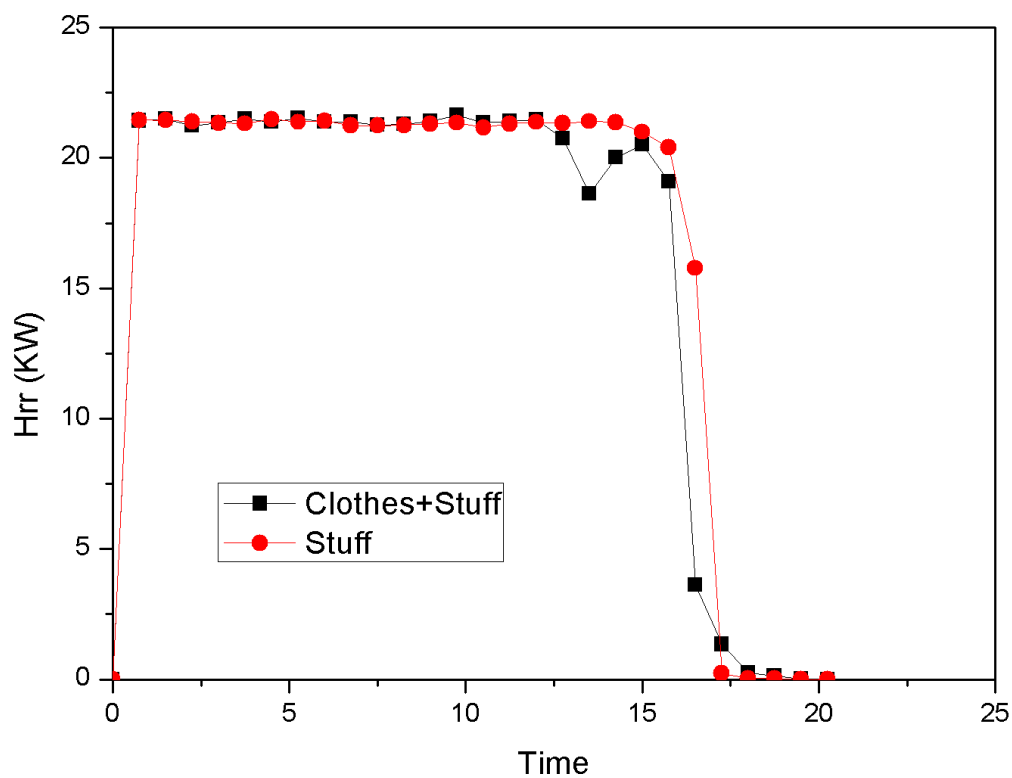


圖 4-56 天花板掛有衣物以及地板擺放箱子之 Hrr 比較圖

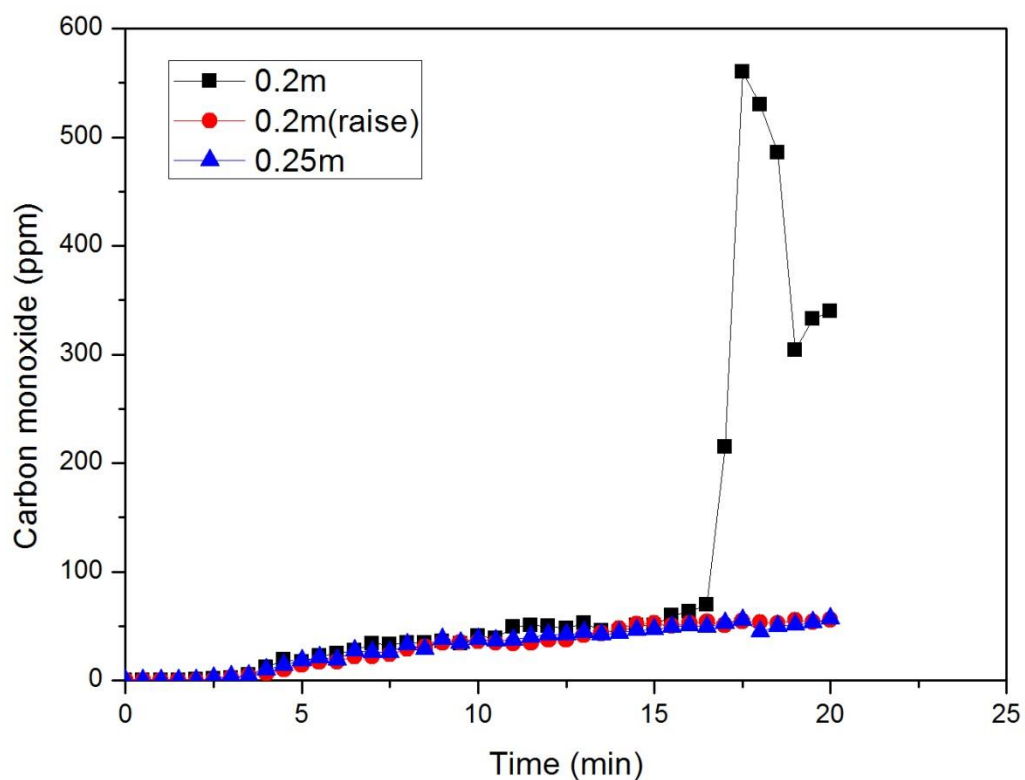


圖 4-57 天花板掛有衣物以及地板擺放箱子之 CO 濃度圖

4.4 不同燃料對模擬結果的影響

本模擬參照實驗所使用之熱水器型號，設定燃料為液態石油氣 (LPG)，其成分為丙烷以及丁烷之混和物，本小節為探究純物質以及混和物對於結果之影響，因此，除了原先的 LPG 外，另外再模擬丙烷與丁烷來做為對照組。

● 模擬結果

由模擬結果來看(圖 4-58~4-60)，除了在 CO 濃度上有差異之外，其餘 CO₂ 以及 O₂ 都沒有太大的變化。這三種燃料在程式中除了分子式上的不同外，所設定之燃燒熱也不同，LPG、丙烷、丁烷分別為 49925 KJ/Kg、50350 KJ/Kg 以及 49500 KJ/Kg，可以發現在燃燒熱比較高的丙烷所產生的 CO 量比起其他燃料高出約 500 ppm，但是其他數據卻沒有太大的變化，合理的懷疑是由於燃燒熱愈高，產生的火焰溫度就愈高，帶動流場的對流就愈強，使得本在上方的 CO 較快向下沉積，而 CO₂ 以及 O₂ 由於已到達飽和所以在氣體流動時濃度不會有太大的變化。

就整體來看，在 FDS 中使用分子量較近的燃料所得到的結果並不會有大差異，因此發生中毒的原因與燃料並沒有太大的關係，要注意的是在選購熱水器記得對應家中所使用的燃料，並且避免裝在室內，若不得已得安裝在非開放式空間，也記得請合格技師安裝強制排風型熱水器，以避免災害發生。

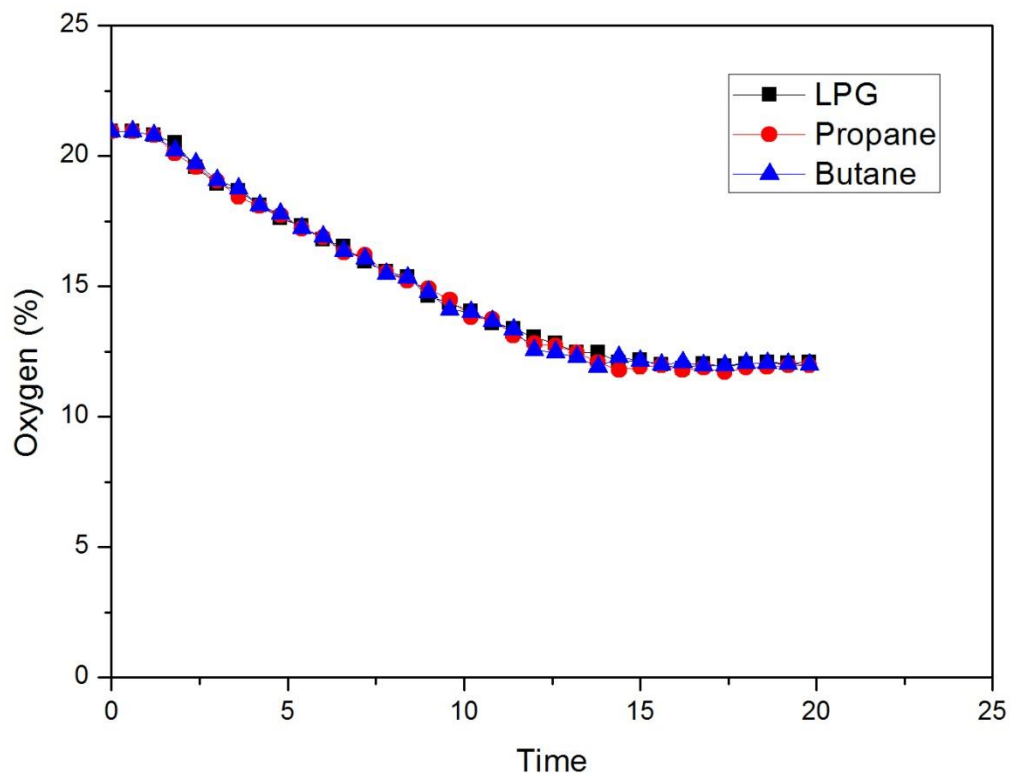


圖 4-58 不同燃料對模擬結果的影響之 O_2 濃度圖

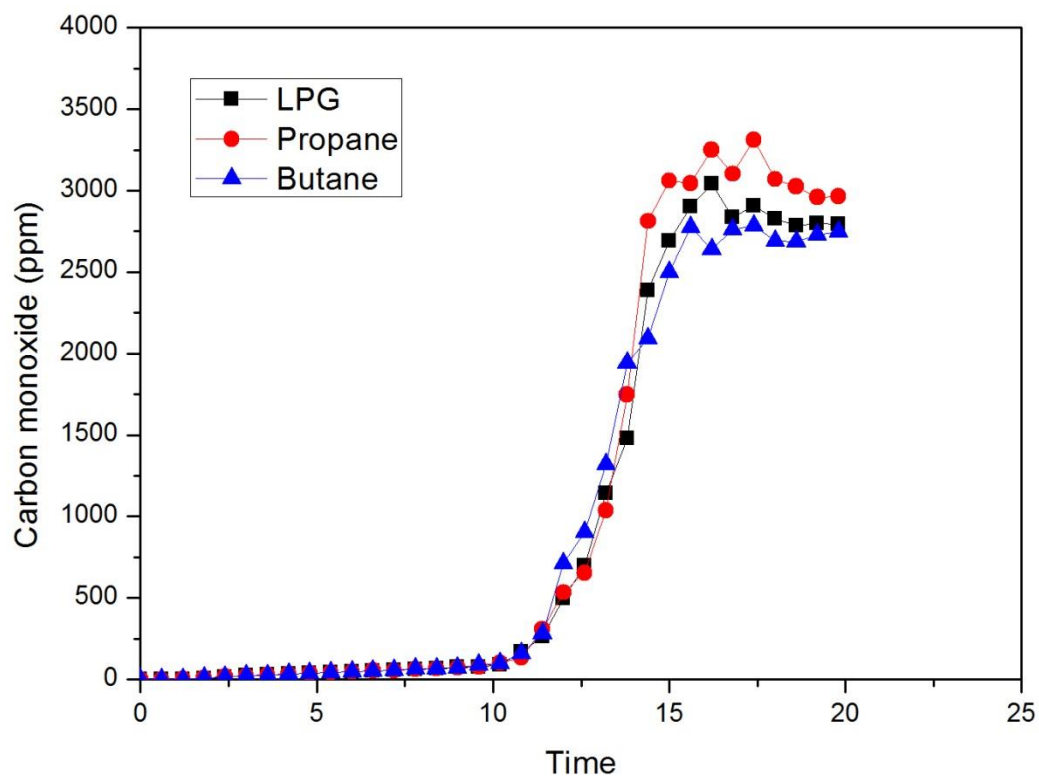


圖 4-59 不同燃料對模擬結果的影響之 CO 濃度圖

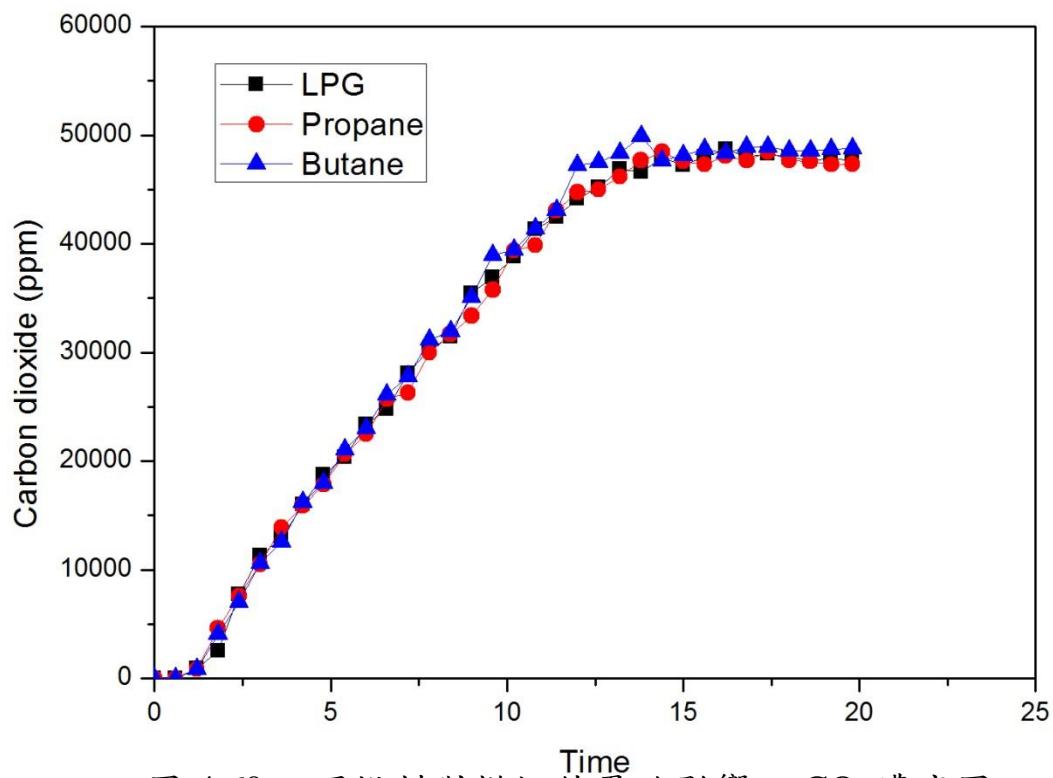


圖 4-60 不同燃料對模擬結果的影響之 CO₂ 濃度圖



第五章 結論與建議

由於台灣冬季易受北方高氣壓以及東北季風影響，所形成的寒流使得民眾為抵禦風寒而將門窗緊閉，若熱水器放置位置在室內或是加蓋陽台內，就有可能發生一氧化碳中毒事件。為探討現今住宅型態對於熱水器燃燒效率的影響，本研究使用 FDS 進行情境分析，但礙於 FDS 為火災模擬軟體，無法確定其在本研究範疇內之適用性，故在情境分析前先與勞研所所做之實驗[1]進行驗證。現將本研究成果與發現歸納整理如下：

5.1 結論

1. 使用火災模擬軟體 FDS 與實驗進行驗證，以一氧化碳濃度值來看，在密閉陽台的情境中除了趨勢吻合之外，雖然在峰值出現較大誤差，但其餘時間與實驗之誤差僅有 1.2%；開啟室內通往陽台門窗之情境在 30 分鐘左右開始出現較大的差異，推斷一氧化碳在跨越區劃的過程中產生了誤差；強制通風之情境修正陳躍仁[2]模擬之計算領域，擴大至室外空間，其結果顯示峰值的誤差由原先的 60% 降至 12%。由以上結果可得，使用 FDS 進行燃氣熱水器一氧化碳預測，能夠準確捕捉其物理現象，拓展此模擬軟體之適用範圍。
2. 探討不同開窗寬度對於空曠陽台安全的影響，結果發現，在陽台僅開啟一扇窗的情形下，窗口前形成的中性帶主導著陽台的排氣與補氣，且寬度愈大，中性帶愈往中央移動，而陽台經由室外所補充的氧氣就愈多。且開窗寬度 0.2 m 以上，可在 20 分鐘內使陽台處於安全的範圍。

3. 本研究分析裝有強制排氣的熱水器所帶來的效益，由於此型號是經由導管將廢氣排出，故陽台內部並不會直接受到煙氣影響，而在熱水器持續使用氧氣的情況下，能將室外空氣導入陽台，使得整個窗口都能拿來做為補氣的功用，熱火源穩定燃燒。因此，若要確保陽台的安全，使用有強制排氣的熱水器絕對是民眾首選。
4. 為探究市面上熱水器(自然排氣型)出水量是否會對陽台(14 m^3)安全開窗寬度造成影響，分別設定出水量 12 L 以及 16 L 與 10 L 進行比較。結果顯示，由於熱釋放愈大，熱水器產生之氣體速率就愈快，但氧氣消耗也愈快，雖然在窗前有進氣-補氣的效應，但是受到開窗寬度影響，造成型號 12 L 的熱水器所在陽台，窗戶必須開到 0.25 m 才能確保安全；16L 則要 0.3 m 以上。
5. 氣體受溫度影響產生浮力而在陽台上方盤據，使得整個空間分為兩個部分，以熱水器排氣口為界線分為上方熱氣循環以及下方空氣乘積，藉以改變窗口以及熱水器位置以探討其中的相對關係。情境一結果顯示，排氣口上下方之窗口流速差異 2~3 倍，上方所有的窗口位置對於結果並無太大影響，在 20 分鐘內皆可確保陽台安全；反觀下方窗口，由於流速過慢，會降低中性帶效益而危害陽台安全。一般而言，民眾多認為開口開在熱水器周圍能有助於吸氣與排氣，但從情境二的結果來看，位於熱水器正上方的窗口受到上升氣流的影響使得室外空氣隔絕在外；而正下方的窗口受到熱膨脹壓力影響使得原先應供應熱水器的空氣被向外擠出。故熱水器位置的放置，本研究建議不應低於窗口，也不應擺在窗口正上方或是正下方，以避免悲劇發生。

6. 針對一般民眾陽台使用習慣以及新聞事件常見的中毒事因，本研究以天花板下掛放衣物以及地板擺放箱子來探討陽台安全。掛晾衣物的結果顯示，熱水器產生之氣體下降到窗前時，因受到衣物的影響而排出不易，排出的氣體少，當然中性帶所帶來的效益就降低，氧氣補充不足。與空曠陽台比較之下，在相同開窗寬度 0.2 m，由原先安全的環境轉變為不安全的處境，兩者一氧化碳差異達 400 ppm，此濃度雖然不會造成立即性的傷亡，但是若不即刻改善，長期下來的累積也是不容小覷。地板擺放箱子的結果顯示，由於雜物堆積在熱水器周遭並高過吸氣口，使得熱水器補充空氣的範圍受到限制。0.2 m 開窗寬度約 17 分鐘發生燃燒不完全的現象，比起晾衣情境多出了 1500 ppm，這是因為受到箱子體積影響，陽台體積變小，加快一氧化碳濃度累積。最後，綜合上述兩種危險因子再做一次模擬，其結果顯示，雖然在 16 分鐘時就發生危險，但探究危險程度卻不如地板擺放箱子來的危險，這是因為受到窗口衣物的影響，氧氣補充量不足以提供火源燃燒而比只有擺放箱子的狀況早熄滅。另一方面，架高箱子所帶來的效果，使熱水器能夠從底部吸取足夠氧氣，結果顯示，陽台在 20 分鐘內始終處於安全的範圍內。本研究建議民眾不應將衣物貼近窗口，且雜物擺放建議將底部架高，但還是盡量不要在熱水器周圍堆積雜物。
7. 使用分子量相近之燃料所得出之數據，燃燒熱愈高，對流愈強，會將在上方累積之 CO 較早下降，就整體而言其濃度差異並不大，對於民眾發生中毒事件的最大主因還是室內通風與否較為重要。

5.2 建議

本研究尚有改進之處，建議後續研究者可往以下方向發展：

1. 由於本研究皆以最危險之狀況為前提，在陽台僅開啟一扇窗戶進行分析，建議可以開啟兩扇窗戶室或開啟室內門來進行通風效率分析。
2. 本研究在情境模擬中，環境設定皆設為無風狀態，建議可針對不同風速以及風向分析其對於窗口前排氣或是進氣效率的影響。
3. 對於陽台架高雜物，可分析雜物圍住的面積百分比與架離地板高度的相互關係。
4. 建議能夠考量其他居住型態，例如透天、樓中樓等南部常見的建築，分析在發生瓦斯燃燒不完全的擴散分析。或者是考慮高樓大廈的通風系統，觀察案發現場的一氧化碳是否會經由抽風系統擴散的別層樓，引發中毒連鎖效應。
5. 在各情境中的一氧化碳濃度值可搭配一氧化碳致死率半經驗公式，找出各情境下人體吸入後發生中毒的時間，以做為後續民眾安裝一氧化碳偵測器一個依據。

參考文獻

1. 呂博弘、陳春萬、張振平，「陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究」，勞工安全衛生研究季刊,第 14 卷第 4 期,299-307，2006
2. 陳躍仁，「家用瓦斯熱水器一氧化碳模擬分析與中毒防制之研究」，國立交通大學產安學程碩士論文，2012
3. Forbes W. H. , Sargent F. and Roughton F. J. W. , “Rate of carbon monoxide uptake bt normal men,” *Am J Physiol*, vol. 143, pp.594-608, 1945
4. Rodkey F. and O’Neal J. , “Collision H. Relative affinity of hemoglobin S and hemoglobin A for carbon monoxide and oxygen,” *Clin Chem*, Vol. 20, pp.83-84, 1974
5. Roughton F.J.W. and Darling R.C. , “The effect of carbon monoxide on the oxyhemoglobin dissociation curve,” *Am J Physiol*, Vol.141, pp.17, 1943
6. NFPA, “Fire Protection Handbook”, 20th Edition, 2008
7. Giuseppe Lippi, Gianni Rastelli, Tiziana Meschi, Loris Borghi and Gianfranco Cervellin, “Pathophysiology, clinics, diagnosis and treatment of heart involvement in carbon monoxide poisoning,” *Clinical Biochemistry*, Vol.46, no.16-17, pp.1278-1285, 2012
8. 「消防法」，內政部消防署，第 15 條之 1，2011
9. 「燃氣熱水器及其配管安裝標準」，內政部消防署，2011
10. 「消防法」，內政部消防署，第 42 條之 1，2011
11. 「4 月 1 日起實施瓦斯器具新標準，讓居家生活更安全更節能」，經濟部標準檢驗局，2012，取自
<http://www.bsmi.gov.tw/wSite/ct?xItem=40441&ctNode=2015>.
12. National Conference of State Legislatures, “Carbon Monoxide

- Detectors-State Statutes,” 2009, from
<http://www.ncsl.org/default.aspx?tabid=13238>
13. Health and Safety Executive, “Gas appliances-Get them checked
Keep them safe,” 2009, from
<http://www.hse.gov.uk/pubns/indg238.pdf>
 14. Health and Safety Executive, “Landlord. A guide to landlords duty:
Gas safety Regulations 1998,” 2009, from
<http://www.hse.gov.uk/pubns/indg285.pdf>
 15. NIST, “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide,” 2010
 16. 宋艷, 「計算區域對開口流量影響的 FDS 模擬研究」, 中國礦業大學安全工程學院論文, 2011
 17. 王保友, 「強排式燃氣熱水器設計要點」, 囊蒜技術探索, 34-36, 2006
 18. 吳世騰, 「應用地理資訊系統分析住居熱水器一氧化碳中毒事件及其防治對策—以新竹市消防局第二大隊轄區為例」, 國立中央大學碩士論文, 2011
 19. J.E. Floyd and K.B. McGrattan, “Extending the mixture fraction concept to address under-ventilated fires,” *Fire Safety Journal*, Vol.44, pp.291-300, 2009
 20. D. Yang, L. H. Hu, Y. Q. Jiang, R. Huo, S. Zhu and X. Y. Zhao, “Comparison of FDS predictions by different combustion models with measured data for enclosure fires,” *Fire Safety Journal*, Vol.45, pp.298-313, 2010
 21. 杜翠鳳、郭倩倩、李懷宇, 「基於 FDS 的礦井火災數值模擬」, 2010 國際安全科學與技術學術研討會論文集, 864-869, 2010
 22. 蔡銘儒、李鎮宏、謝煒東, 「以 FDS 模擬局限空間火災與實驗驗證之研究」, 內政部建築研究所, 2008

23. Kuldeep Prasad, William M. Pitts, Marco Fernandez and Jiann C. Yang, "Natural and forced ventilation of buoyant gas released in a full-scale garage: Comparison of model predictions and experimental data," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.37, no.22, pp.17436-17445, 2012
24. 王佩琪,「住宅一氧化碳中毒防範措施之評估」,國立台北科技大學碩士論文,2009
25. 李東昇,「公寓住宅火災模擬分析」,國立屏東科技大學碩士論文,2009
26. 張瑋如,「室內空間一氧化碳擴散現象之 CFD 研究」,國立台灣科技大學博士論文,2010
27. 張裕忠、何景文,「熱水器使用與一氧化碳等氣體關係之研究-以在室內空間使用熱水器為例」,消防月刊,94 年 5 月號,15-21,2005
28. W. K. Chow 、Y. Gao, "Buoyancy and inertial force on oscillations of thermal-induced convective flow across a vent," *Building and Environment*, Vol.46, no.2, pp.315-323, 2011
29. 王馨,「開口小空間火災流場特性」,哈爾濱工程大學碩士論文,2008