地下停車空間電池類火災之風險控制與換氣策略研究

資料蒐集分析報告

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 111 年 12 月

（本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

11115B0005

地下停車空間電池類火災之風險控制與換氣策略研究

計 畫 主 持 人：欒中丕

協 同 主 持 人：鍾基強

研　　究　　員：陳又嘉、王天志、陳佳玲、詹家旺

研　究　助　理：黃祥志、陳進澤

研　究　期　程：中華民國 111 年 03 月至 111 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 111 年 12 月

（本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

目次

目次.....I
表次.....III
圖次.....VII
摘要.....XIII
ABSTRACT.....XXI
第一章 緒論.....1
第一節 研究背景與研究範圍.....1
第二節 研究目的.....5
第三節 研究內容.....7
第四節 研究方法及進度說明.....10
第二章 地下停車空間文獻分析.....13
第一節 地下停車空間定義.....13
第二節 地下停車空間火災風險評估.....16
第三節 地下停車空間消防安全設備設置要求.....25
第三章 鋰離子電池相關文獻分析.....45
第一節 鋰離子電池概要.....45
第二節 電動車發展概要.....54
第三節 電動車充電設備規格及相關安全規範介紹.....61
第四節 鋰電池火災案例分析.....78
第五節 鋰離子電池火災風險評估.....89
第六節 鋰離子電池燃燒情形.....99
第七節 鋰離子電池類火災的特性.....104
第八節 鋰離子電池火災滅火措施.....106
第九節 國外全尺度電動車火災實驗.....110

第四章 地下停車空間排煙系統模擬分析 125
第一節 軟體介紹 125
第二節 火場煙毒危害說明 127
第三節 模擬空間建構及參數規劃 134
第四節 電腦模擬情境規劃及模擬結果 156
第五節 電腦模擬結果分析與小結 197
第五章 鋰離子電池滅火實測實驗 201
第一節 實驗規劃 201
第二節 實驗設備及耗材說明 202
第三節 實驗過程與結果 208
第四節 實驗結果分析與小結 224
第六章 結論與建議 227
第一節 結論 227
第二節 建議 230
附錄一 審查回應表 233
附錄二 地下停車空間電池類火災之風險控制與建議 267
參考書目 273

表次

表 1-1 DNV 公司於不同類型電池燃燒之廢氣濃度分佈表 9
表 1-2 各部份之研究內容表 10
表 1-3 研究進度及預期完成之工作項目表 12
表 2-1《GB50067》停車空間說明 14
表 2-2《NFPA 88A》停車場說明.....14
表 2-3 混凝土在高溫環境的微觀結構圖 24
表 2-4 國內停車空間相關法令標準 25
表 2-5 地下停車空間相關防火安全規定《建築技術規則》 27
表 2-6《建築技術規則》防火構造建築物防火時效規定-第 70 條 ...28
表 2-7 地下停車空間適用消防安全設備表 30
表 2-8 滅火設備之適用火災類別 30
表 2-9 傳統撒水系統與 VID 低壓細水霧系統比較表 33
表 2-10 消防滅火系統比較表 33
表 2-11 AVD 各類常用型號規格 34
表 2-12 誘導式風機規格 39
表 2-13 泡沫滅火設備系統差異比較表 44
表 3-1 鋰電池的正極材料 49
表 3-2 常見電解液的化學特性 50
表 3-3 各種電動車輛綜合比較 56
表 3-4 油電混合車各系統類型差異說明表 58
表 3-5 常見的鋰離子電池 SOC 值估算方法比較表 64
表 3-6 現階段常見充電方式差異表 73
表 3-7 特殊標準之要項 73
表 3-8 鋰離子電池與電動車充電站相關標準 74

表 3-9 電動車火災案例表 85
表 3-10 各式電動車車輛緊急救援手冊消防搶救內容表 87
表 3-11 各國針刺試驗之規範要求表 96
表 3-12 油車(ICEV)與電動車(BEV)燃燒氣體種類 102
表 3-13 不同規格電池的燃燒廢氣表 103
表 3-14 氣體自燃溫度表 103
表 3-15 HRR、溫度和熱通量結果 116
表 3-16 所有測試的水流計算總結 122
表 4-1 煙霧濃度與可視距離的關係表 132
表 4-2 人體承受危害程度之指標分析表 133
表 4-3 人體暴露在有毒氣體之情況 133
表 4-4 不同電池類型之產氣量 142
表 4-5 本研究案火源條件設置 143
表 4-6 本研究案模擬氣體含量估算 143
表 4-7 模擬空間網格數量表_台南美術館二館 146
表 4-8 模擬空間網格數量表_集合住宅建案 147
表 4-9 模擬溫度量測點設置表_台南美術館二館 148
表 4-10 模擬溫度量測點設置表_集合住宅建案 149
表 4-11 煙層高度量測點設置表_台南美術館二館 150
表 4-12 煙層高度量測點設置表_集合住宅建案 151
表 4-13 氣體濃度量測點設置表_台南美術館二館 152
表 4-14 氣體濃度量測點設置表_集合住宅建案 153
表 4-15 能見度量測點設置表_台南美術館二館 154
表 4-16 能見度量測點設置表_集合住宅建案 155
表 4-17 模擬情境規劃表 156

表 4-18 模擬 1(無通風換氣設備)之動畫表 157
表 4-19 模擬一之溫度變化圖(高度 1.8m 處) 159
表 4-20 模擬一之溫度變化圖(天花板高度) 160
表 4-21 模擬一之能見度變化圖(高度 1.8m 處) 163
表 4-22 模擬一之能見度變化圖(天花板高度) 164
表 4-23 模擬 2 之動畫表 167
表 4-24 模擬二之溫度變化圖(高度 1.8m 處) 169
表 4-25 模擬二之溫度變化圖(天花板高度) 170
表 4-26 模擬二之能見度變化圖(高度 1.8m 處) 173
表 4-27 模擬二之能見度變化圖(天花板高度) 174
表 4-28 模擬 3(無通風換氣設備)之動畫表 177
表 4-29 模擬三之溫度變化圖(高度 1.8m 處) 179
表 4-30 模擬三之溫度變化圖(天花板高度) 180
表 4-31 模擬三之能見度變化圖(高度 1.8m 處) 183
表 4-32 模擬三之能見度變化圖(天花板高度) 184
表 4-33 模擬 4(有通風換氣設備)之動畫表 187
表 4-34 模擬四之溫度變化圖(高度 1.8m 處) 189
表 4-35 模擬四之溫度變化圖(天花板高度) 190
表 4-36 模擬四之能見度變化圖(高度 1.8m 處) 193
表 4-37 模擬四之能見度變化圖(天花板高度) 194
表 5-1 鋰離子電池滅火實驗規劃總表 201
表 5-2 本研究實驗之鋰離子電池規格 204
表 5-3 熱電偶規格 204
表 5-4 氣體量測設備規格 205
表 5-5 實驗設置表_實驗一 210

表 5-6 實驗過程紀錄表_實驗一 213
表 5-7 實驗設置表_實驗二(撒水) 215
表 5-8 實驗過程紀錄表_實驗二(撒水) 218
表 5-9 實驗設置表_實驗三(撒泡沫) 220
表 5-10 實驗過程紀錄表_實驗三(撒泡沫) 223

圖次

圖 1-1 我國直轄市建築物附設停車位數量.....1
圖 1-2 研究流程圖.....11
圖 2-1 小型汽車燃燒熱釋放率圖.....17
圖 2-2 滅火毯示意圖.....31
圖 2-3 緊急應變車實體圖.....35
圖 2-4 Rosenbauer 開發之設備示意圖.....36
圖 2-5 泡沫系統誤動作造成財物損失.....43
圖 2-6 開放式與密閉式泡沫撒水頭比較圖.....43
圖 3-1 鋰電池結構圖(a-圓柱型；b-方型；c-軟包型).....45
圖 3-2 不同電池類型組裝間隙會影響模組密度與散熱性能.....46
圖 3-3 鋰電池充放電概念圖.....53
圖 3-4 電動車種類.....57
圖 3-5 電動車動力結構比較圖.....57
圖 3-6 純電動車(BEV)系統架構.....59
圖 3-7 全球電動車輛發展預估(單位：千輛).....60
圖 3-8 快速充電設備的基本構成.....62
圖 3-9 充電站示意方塊圖.....63
圖 3-10 電池充電過程電流變化曲線.....65
圖 3-11 多階段恆流充電方法.....66
圖 3-12 馬斯三定律示意圖.....68
圖 3-13 各國電動車充電介面規格與標準.....71
圖 3-14 各國電動車充電介面樣式.....71
圖 3-15 (泰國)住家保時捷充電起火新聞報導.....79
圖 3-16 (美國)特斯拉起火新聞報導.....79

圖 3-17 (中國)特斯拉起火新聞報導 80
圖 3-18 (荷蘭)BMW i8 起火新聞報導 80
圖 3-19 (高雄)大樓地下室電動機車燃燒新聞報導 81
圖 3-20 (美國)喬治亞州服務中心 Tesla Model S 起火新聞報導 81
圖 3-21 (台南)特斯拉自撞起火新聞報導 82
圖 3-22 (中國)比亞迪電動車「充電中起火」新聞報導 82
圖 3-23 (印度) TSRTC 汽車站充電巴士充電時火新聞報導 83
圖 3-24 (台南) Gogoro 電池充換電站起火新聞報導 83
圖 3-25 (新北)電動車行起火新聞報導 84
圖 3-26 (荷蘭)Volkswagen ID.3 電動車地下停車場起火新聞報導 84
圖 3-27 熱失控昇溫曲線與散熱曲線關係圖 90
圖 3-28 鋰離子電池熱失控過程概述 91
圖 3-29 油車(ICEV)與電動車(BEV)熱釋放率比較圖 93
圖 3-30 X 射線觀察鋰離子電池內部結構情況 97
圖 3-31 鋰離子電池電池過充試驗溫度變化曲線圖 98
圖 3-32 電動車輛燃燒溫度圖 99
圖 3-33 特徵溫度下的熱失控反應機理 101
圖 3-34 用於 HRR 測試的電池 B 配置和燃燒器的位置 112
圖 3-35 HRR 測試設置 113
圖 3-36 HRR 測試結果 114
圖 3-37 HRR 測試圖像 115
圖 3-38 車輛模型配置圖 117
圖 3-39 電力測量的簡化電路圖 118
圖 3-40 車輛模型的內裝配置 119
圖 3-41 試驗過程 121

圖 4-1 不同 SOC 值之鋰離子電池熱失控過程產氣總量 128
圖 4-2 實驗台架構示意圖(a);實驗台實際圖 129
圖 4-3 熱失控產生的氣體的採樣組成 129
圖 4-4 停車空間平面圖_台南美術館二館 135
圖 4-5 實際現勘圖_台南美術館二館 136
圖 4-6 誘導式風機示意圖_台南美術館二館 137
圖 4-7 誘導式風機設置平面圖_台南美術館二館 137
圖 4-8 預留電線槽孔示意圖 138
圖 4-9 停車空間平面圖_集合住宅建案 138
圖 4-10 實際現勘圖_集合住宅建案 139
圖 4-11 誘導式風機示意圖_集合住宅建案 140
圖 4-12 誘導式風機設置平面圖_集合住宅建案 140
圖 4-13 電動車熱釋放率圖 141
圖 4-14 電動車與燃油車輛火災之車頂位置溫度圖 142
圖 4-15 本研究案火源熱釋放率圖 144
圖 4-16 本研究案起火車輛車頂溫度曲線圖 144
圖 4-17 格點劃分示意圖_台南美術館二館 146
圖 4-18 格點劃分示意圖_集合住宅建案 147
圖 4-19 溫度量測點設置示意圖(台南美術館二館) 148
圖 4-20 溫度量測點設置示意圖(集合住宅建案) 149
圖 4-21 煙層高度設置空間示意圖_台南美術館二館 150
圖 4-22 煙層高度設置空間示意圖_集合住宅建案 151
圖 4-23 氣體濃度量測點設置空間示意圖_台南美術館二館 152
圖 4-24 氣體濃度量測點設置空間示意圖_集合住宅建案 153
圖 4-25 能見度分析點設置空間示意圖_台南美術館二館 154

圖 4-26 能見度分析點設置空間示意圖_集合住宅建案.....155
圖 4-27 模擬 1(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度) 158
圖 4-28 模擬 1(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)158
圖 4-29 模擬 1(無通風換氣設備)_煙層高度曲線圖 161
圖 4-30 模擬 1(無通風換氣設備)_ 出入口煙層高度曲線圖 161
圖 4-31 模擬 1(無通風換氣設備)_能見度曲線圖 162
圖 4-32 模擬 1(無通風換氣設備)_ 出入口能見度曲線圖 162
圖 4-33 模擬 1(無通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化.....165
圖 4-34 模擬 1(無通風換氣設備)_出入口一氧化碳(CO)濃度變化.165
圖 4-35 模擬 1(無通風換氣設備)_二氧化碳(CO_2)濃度變化.....166
圖 4-36 模擬 1(無通風換氣設備)_出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化166
圖 4-37 模擬 2(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度) 168
圖 4-38 模擬 2(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)168
圖 4-39 模擬 2(有通風換氣設備)_煙層高度曲線圖 171
圖 4-40 模擬 2(有通風換氣設備)_出入口煙層高度曲線圖 171
圖 4-41 模擬 2(有通風換氣設備)_能見度曲線圖 172
圖 4-42 模擬 2(有通風換氣設備)_ 出入口能見度曲線圖 172
圖 4-43 模擬 2(有通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化.....175
圖 4-44 模擬 2(有通風換氣設備)_出入口一氧化碳(CO)濃度變化.175
圖 4-45 模擬 2(有通風換氣設備)_二氧化碳(CO_2)濃度變化.....176
圖 4-46 模擬 2(有通風換氣設備)_出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化176
圖 4-47 模擬 3(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度) 178
圖 4-48 模擬 3(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)178
圖 4-49 模擬 3(無通風換氣設備)_煙層高度曲線圖 181
圖 4-50 模擬 3(無通風換氣設備)_出入口煙層高度曲線圖 181

圖 4-51 模擬 3(無通風換氣設備)_能見度曲線圖 182
圖 4-52 模擬 3(無通風換氣設備)_出入口能見度曲線圖 182
圖 4-53 模擬 3(無通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化.....185
圖 4-54 模擬 3(無通風換氣設備)_ 出入口一氧化碳(CO)濃度變化 185
圖 4-55 模擬 3(無通風換氣設備)_ 二氧化碳(CO_2)濃度變化.....186
圖 4-56 模擬 3(無通風換氣設備)_出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化186
圖 4-57 模擬 4(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度) 188
圖 4-58 模擬 4(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)188
圖 4-59 模擬 4(有通風換氣設備)_煙層高度曲線圖 191
圖 4-60 模擬 4(有通風換氣設備)_出入口煙層高度曲線圖 191
圖 4-61 模擬 4(有通風換氣設備)_能見度曲線圖 192
圖 4-62 模擬 4(有通風換氣設備)_ 出入口能見度曲線圖 192
圖 4-63 模擬 4(有通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化.....195
圖 4-64 模擬 4(有通風換氣設備)_ 出入口一氧化碳(CO)濃度變化 195
圖 4-65 模擬 4(有通風換氣設備)_ 二氧化碳(CO_2)濃度變化.....196
圖 4-66 模擬 4(有通風換氣設備)_ 出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化 196
圖 4-67 誘導式風機系統(左圖)/傳統風管式通風系統(右圖) 197
圖 5-1 實驗防護平台示意圖 202
圖 5-2 撒水及泡沫滅火設備示意圖 203
圖 5-3 撒水頭及泡沫頭示意圖 203
圖 5-4 快速爐及鐵板示意圖 206
圖 5-5 數據收集系統(外觀圖(左)；軟體介面(右)).....206
圖 5-6 本研究案實驗示意圖 208

圖 5-7 電池表面溫度曲線圖(無撒水)_實驗一 211
圖 5-8 HCL 氣體濃度量測曲線圖(無撒水)_實驗一 211
圖 5-9 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(無撒水)_實驗一.....212
圖 5-10 CO 氣體濃度量測曲線圖(無撒水)_實驗一.....212
圖 5-11 電池表面溫度曲線圖(撒水)_實驗二 216
圖 5-12 HCL 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二 216
圖 5-13 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二.....217
圖 5-14 CO 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二.....217
圖 5-15 電池表面溫度曲線圖(撒泡沫)_實驗三 221
圖 5-16 HCL 氣體濃度量測曲線圖(撒泡沫)_實驗三 221
圖 5-17 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(撒泡沫)_實驗三.....222
圖 5-18 CO 氣體濃度量測曲線圖(撒泡沫)_實驗三.....222
圖 5-19 實驗電池溫度量測曲線圖 224
圖 5-20 CO_2 氣體量測實驗結果圖.....225
圖 5-21 CO 氣體量測實驗結果圖 226
圖 5-22 HCL 氣體量測實驗結果圖 226

摘要

關鍵詞：地下停車空間、電池類火災、換氣策略研究

一、研究緣起：

各國政府皆為減緩全球暖化現象而全力發展新興能源(例如：氫能、風能、太陽能和地熱能等)，其中作為能源儲存用途的鋰離子電池發展日趨成熟，於 21 世紀初正式成為重點戰略性新興產業【1】。鋰離子電池相較於傳統電池，具有體積小、電容量高、輸出電壓高、充放電時間短、循環壽命長、成本低等優點，大量運用於輕巧、方便攜帶的電子產品(例如：手機、筆記型電腦及數位相機等)或需高容量的電動汽機車、工業、航海等產業【2】【3】。

臺灣地狹人稠，為增加國人居住或可利用空間，建築物型態逐漸往高樓層及地下層發展。106 年行政院宣佈三階段電動車發展目標(2030 年全面使用電動公車與公務車、2035 年禁售汽油機車、2040 年禁售汽油汽車)。內政部營建署於 2019 年修正「建築技術規則建築設計施工編第 62 條」，條文新增第 4 款，規定新建物停車空間構造應預留電動車的充電設備與設置空間；舊有建築物若要設置充電樁，則需經過管委會、區分所有權人會議同意方可設置。

美國亞特蘭大市政府則通過新法案要求新興建的住宅房屋和公共停車設施，需具備一定比例之電動車適用設施；歐盟要求 2019 年起，會員國所有新屋或翻修房屋均須安裝電動車充電裝置，包括所有商用或大型住宅區，至少需 20%的車位為電動車使用，顯而易見電動車產業推動及發展勢必為未來重要的施政目標，此時開放建築物室內空間停放電動車或設置其充電系統所衍伸的居家安全性問題與電池

類本身火災應變策略，應謹慎探討並提前部署。

隨電動車市佔率逐漸上升，我國若要推動電動車普及化勢必要在室內外停車空間設置大量電動車充電設備，但地下建築空間其空間特性較為封閉且動線複雜，若不幸發生電池類火災，產生的大量濃煙將使受困人員迷航且受制於半封閉空間特性，火場能見度極差、通訊不良、氧氣補給困難等危害，將徒增救援行為的難度與危險性【4】。此外基於電池類火災不易撲滅的特性，若要在地下停車空間提供救災過程所需的環境安全條件，是否應調整或加強原有建築物設置的通風換氣設備，考量火災煙流流向與補風換氣量等參數，控制高溫煙毒流向與濃度不致於對救災或受困人員造成生命威脅為現階段電動車普及化過程中的重要安全課題。

鋰離子電池雖為國人生活便利帶來躍進，但潛在安全問題亦成為鋰離子電池的應用瓶頸，此類火災與一般火災在滅火性質上有極大的不同，若救援人員在未知條件與環境下，採用一般火災的滅火處置方式搶救，將會使救援人員身處險境之中，謹慎應對電池類火災將是現今迫切需探討與解決的重要課題。

由 110 年 07 月 06 日某國外廠牌電動車失控衝撞民宅起火一案發現，電池類火災從冒出陣陣濃煙到火勢猛烈的反應時間非常短暫，該例共計費時 1 小時且動用 20 噸的水量才得以撲滅火勢。顯見電池類火災不易撲滅的特性且地下停車空間近似半封閉空間的特性，若發生電池類火災將加大其危害風險與救援難度，此時不斷產生的高溫煙毒可能從通道快速擴散至垂直區劃，對地上層人員造成安全威脅，若為深開挖的地下停車空間更可能對建築結構造成嚴重損傷。

從救災角度切入討論，撲滅電池類火災需要大量的水源進行有效降溫，因此水源供應及水線是否充足為電池類火災抑制的關鍵，就目前地下停車空間所設置的撒水設備對於電池類火災的抑制效果及撲滅當量的電池類火災所需火源量亦為重要研究方向。

二、研究方法與過程：

2021 年德國一處地下停車場發生電動車起火事故，僅僅一輛舊款 Volkswagen Golf 電動車起火燃燒即難以撲滅。可想而知在地下停車空間若持續燃燒將引發更嚴重的危害，此件案例也暴露電動車停放於地下停車空間具有安全上的隱憂。

本研究團隊係針對未來推廣電動車普及化而廣設充電站或將電動車停放於地下停車空間時的火災風險評估與該類空間設置充電站的火災風險因子進行文獻蒐集，例如：燃油車與電動車之車位過於靠近；充電車位不集中，易造成管線錯綜複雜、轉折過度、舊用電設施變動，容易增加結構風險；舊公寓大廈停車位不易調整，難以更新並裝設充電樁，同時涉及用途變更與使用執照...等問題，以及針對撒水設備是否有助於抑制電池類火災規劃一系列的實測實驗，透過實驗結果確認地下停車空間現行的消防設備設置要求，是否有需因應電池類火災的特殊性而進行局部調整或加強。

基於電池類火災與傳統火災危害與特性的不同，以及電池類火災發生於地下停車空間的潛在風險，本研究團隊將蒐集地下停車空間等地下層場所，若發生火災與地上層建築的危害風險差異，並針對地下停車空間火災案例與電動車輛火災案例進行分析與檢討，同時瞭解現行地下停車空間的消防設備設置與國內外對於電動車輛停放與充電設備設置之相關規定。本研究將利用雲林科技大學防火工程中心的實

驗室規劃實測實驗，確認泡沫及撒水設備對於電池類火災的抑制效果，作為後續電動車及其充電設備普及化時之安全基礎及滅火設備設置參考。

對於地下空間而言，若無法補入足夠的空氣來稀釋空間煙流濃度則容易造成人員傷亡，因此如何調整地下停車空間的通風換氣設備使其於發生火災時，降低毒性氣體產生或控制毒性氣體濃度於人員可接受的安全值內，將是本研究另一個重點研究方向。本研究團隊將實地現勘我國某一設置充電樁的公共場所，瞭解設置現況與分析電動車輛及其充電設備設置於停車空間的火災風險因子，同時利用電腦模擬軟體(Pyrosim)模擬該類場所若遭遇電池類火災時，應如何控制通風換氣設備使高溫煙流流向，不致於對救災或人員避難造成威脅，以及地下停車空間後續增設電動車停車位及其充電設備時，應如何調整通風換氣設備以提升空間安全。

三、重要發現：

(一) 本研究經大量蒐集整理相關文獻與法規資料，目前國際上(包含日本、美國、中國等)尚未有針對建築物地下停車空間停放電動車輛相關規定。由蒐集電動車火災案例可知，電動車火災事故的情況大多為 1、行駛中自燃；2、靜置停放自燃；3、充電過程自燃；4、事故碰撞自燃，顯見電池由外力或內部發生熱失控為成災主因。

(二) 各家車廠的緊急救援手冊均建議使用大量的水(2600 加侖以上，約等於 10 公噸的水量)進行滅火。為了降低電動車起火導致的火災風險，以及可以方便取用大量的水進行電動車火災的救援行動，故本研究建議現階段電動車充電樁設置以在地面層為主，

或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域[1]。

(三) 依據本研究針對地下停車空間電動車輛及充電系統火災煙毒特性相關文獻可知，傳統汽/柴油車與電動車之火災燃燒產物截然不同，汽/柴油車燃燒時會產生完全燃燒產物(例如：二氧化碳(CO_2)與水(H_2O)及其它不完全燃燒產物(例如：一氧化碳(CO)與氮氧化物(NOx)等其他有毒氣體)。但電動車起火燃燒不僅會產生上述燃燒產物，還會產生劇毒氣體(例如：HF、HCl、HBr、HCN、SO_2)產生，其中電動車起火會產生比燃油車起火更多的氟化氫(HF)。氟化氫(HF)是一種有毒、具腐蝕性、重量輕的氣體，可以滲透某些類型的安全防護裝備，因此鋰離子電池火災之毒性氣體稀釋為救援過程的重點所在。

(四) 本研究團隊於雲林科技大學防火中心實驗場的實驗空間，規劃『撒火設備』與『泡沫設備』應用於鋰離子電池滅火實測實驗，本研究案將以鋰鐵電池(LFP)作為實測實驗的燃燒對象。由實驗結果可知，當 LFP 電池外殼溫度達 100～150℃左右時，電池即有發生爆炸燃燒的可能，不過無論是撒水或是撒泡沫，均可降低電池表面溫度，並達到滅火效果。但在周圍環境溫度或電池溫度沒有降低的情況下，有高機率會發生復燃。故由實驗結果得知，若要撲滅鋰離子電池火災，必須持續撒水(或泡沫)或泡水降溫，以防止復燃。由實驗結果得知，在電池類發生火災時，除持續撒水(或泡沫)或泡水降溫以防止復燃外，同時也可減少或降低電池

[1] 有關「電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域」之策略，或可降低發生的風險，但無法消除，仍應就現況依風險評估，採取最佳策略。

內部因高溫分解而產生的有害氣體。

(五) 本研究以電腦模擬進行地下停車空間通風換氣設備對電動車輛及充電系統火災效應影響評估。由電腦模擬結果可知，在火災初期(15 分鐘內)地下停車空間若有開啟通風換氣設備，火場環境無論在溫度、煙層高度、能見度或有害氣體濃度方面，均較未開啟通風換氣設備有利於人員進行避難。[2]

[2] 有關「在火災初期(15 分鐘內)地下停車空間若有開啟通風換氣設備，火場環境無論在溫度、煙層高度、能見度或有害氣體濃度方面，均較未開啟通風換氣設備有利於人員進行避難。」之策略，或可降低人員避難時的風險，但無法消除，仍應就現況依風險評估，採取最佳策略。

四、主要建議事項：

立即可行之建議：規劃進行電動車停車空間及充電專用區域之主被動防護對策研究

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部消防署、內政部營建署

有鑑於我國停車空間規劃大都設置於地下樓層，對於該空間之電動車及充電樁災害緊急應變及救災相對較戶外或地面層複雜。地下停車空間特性較為封閉，屬於無開口樓層，若不幸發生電動車火災，將產生高溫與大量濃煙(含劇毒氣體)；其車輛火災溫度可高達 800～1000℃甚至更高，可能危及建築結構，倘動線複雜的話，而其產生的濃煙可能造成人員避難與消防救災的困難度與危險性。

現階段地下停車空間依法無須設置排煙設備，但考慮到電動車充電時發生火災的風險較高，因此建議若電動車充電區域設置在地下層者，則需規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備。且排煙設備對外口應設置有毒成份過濾網，防止有毒氣體逕自排放而造成地上層環境汙染。

建議二

中長期建議：研擬電動車充電專用區域撒水設備。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部消防署

由於電動車鋰離子電池模組放置於車輛底部，燃燒時撒水系統或泡沫系統於上方放射無法射至火點，應考慮調整原有地下停車空間所設置的泡沫及其他撒水滅火設備之設置方式，以達針對電動車電池模組持續撒水滅火降溫之功效，並應設置有效排水之裝置。

ABSTRACT

Key words: underground parking space, battery fire, ventilation strategy research

1. Origin of research：

Governments of all countries are making every effort to develop new energy sources (such as hydrogen energy, wind energy, solar energy and geothermal energy, etc.) in order to slow down global warming. Among them, the development of lithium-ion batteries for energy storage is becoming more and more mature, and it officially became the focus in the early 21st century. Strategic Emerging Industries【1】。Compared with traditional batteries, lithium-ion batteries have the advantages of small size, high capacity, high output voltage, short charge and discharge time, long cycle life, and low cost. They are widely used in light and portable electronic products (such as mobile phones, Notebook computers and digital cameras, etc.) or high-capacity electric vehicles, industry, navigation and other industries【2】【3】

Taiwan is narrow and densely populated. In order to increase the living space or usable space for Chinese people, the building types are gradually developing towards high floors and basements. In 2016, the Executive Yuan announced a three-stage electric vehicle development goal (full use of electric buses and official vehicles in 2030, a ban on the sale of gasoline locomotives in 2035, and a ban on the sale of gasoline cars in 2040). In 2019, the Construction Administration of the Ministry of the Interior revised Article 62 of the "Architectural Technical Regulations on Building Design and Construction", adding a new paragraph 4, which stipulates that the parking space structure of new buildings should reserve charging equipment and installation space for electric vehicles; old

buildings If you want to set up charging piles, you need to get the approval of the management committee and the divisional owner meeting.

The Atlanta city government of the United States passed a new bill requiring newly built residential houses and public parking facilities to have a certain proportion of electric vehicle-compatible facilities; the European Union requires that all new or renovated houses in member states must be equipped with electric vehicle charging devices from 2019. Including all commercial or large residential areas, at least 20% of the parking spaces must be used by electric vehicles. It is obvious that the promotion and development of the electric vehicle industry is bound to be an important policy goal in the future. At this time, open the indoor space of the building to park electric vehicles or set up its charging system. Derived home safety issues and battery fire response strategies should be carefully discussed and deployed in advance.

With the gradual increase in the market share of electric vehicles, if my country wants to promote the popularization of electric vehicles, it is necessary to install a large number of electric vehicle charging equipment in indoor and outdoor parking spaces. , the large amount of smoke generated will make the trapped people lose their way and be subject to the characteristics of semi-enclosed space, the fire site has extremely poor visibility, poor communication, difficulty in oxygen supply and other hazards, which will only increase the difficulty and danger of rescue operations【4】。In addition, based on the fact that battery fires are not easy to extinguish, if the underground parking space is to provide the environmental safety conditions required for the disaster relief process, should the ventilation equipment installed in the original building be adjusted or strengthened? Air exchange rate and other parameters, controlling the flow direction and concentration of high-temperature

smoke and poison so as not to cause life-threatening to disaster relief or trapped personnel is an important safety issue in the process of popularization of electric vehicles at this stage。

Although lithium-ion batteries have brought a leap forward in the convenience of Chinese people's lives, potential safety issues have also become a bottleneck in the application of lithium-ion batteries. This type of fire is very different from general fires in terms of fire fighting properties. If rescuers are under unknown conditions and environments, Rescue using general fire extinguishing and disposal methods will put rescuers in danger. Dealing with battery fires carefully will be an important issue that urgently needs to be discussed and resolved。

On July 06, 2010, it was found that an electric vehicle of a foreign brand ran out of control and crashed into a residential house and caught fire. tons of water to extinguish the fire. It is obvious that battery fires are not easy to extinguish and the underground parking space is similar to a semi-enclosed space. If a battery fire occurs, the hazard risk and rescue difficulty will be increased. At this time, the continuously generated high-temperature smoke may quickly spread from the passage to the vertical division , poses a safety threat to the personnel on the ground floor, and if the underground parking space is excavated deeply, it is more likely to cause serious damage to the building structure。

From the perspective of disaster relief, a large amount of water is needed to effectively cool down the battery fire. Therefore, whether the water supply and water line are sufficient is the key to the suppression of battery fires. The sprinkler equipment installed in the underground parking space is currently used for the suppression of battery fires. The effect and the amount of fire source required to extinguish the equivalent battery fire

are also important research directions。

2. Research Methods and Process：

In 2021, an electric vehicle fire accident occurred in an underground parking lot in Germany. Only an old Volkswagen Golf electric vehicle caught fire and was difficult to extinguish. It is conceivable that if the underground parking space continues to burn, it will cause more serious hazards. This case also exposes the safety concerns of electric vehicles parked in the underground parking space。

This research team is aiming at the popularization of electric vehicles in the future and the fire risk assessment when charging stations are widely installed or when electric vehicles are parked in underground parking spaces, and the fire risk factors of charging stations in such spaces are collected. For example: fuel vehicles and The parking spaces for electric vehicles are too close together; the charging parking spaces are not concentrated, which can easily lead to intricate pipelines, excessive turning, and changes in old power facilities, which are likely to increase structural risks; parking spaces in old apartment buildings are difficult to adjust, difficult to renew and install charging piles, and involve usage at the same time Issues such as changes and use licenses, etc., as well as planning a series of experiments on whether sprinkler equipment can help suppress battery fires, through the experimental results to confirm the current fire protection equipment installation requirements in underground parking spaces, and whether there are special requirements for battery fires local adjustment or enhancement.

Based on the differences in hazards and characteristics between battery fires and traditional fires, as well as the potential risk of battery fires occurring in underground parking spaces, this research team will collect

underground parking spaces and other underground places. , and analyzed and reviewed the fire cases of underground parking spaces and electric vehicle fires, and at the same time understood the current fire-fighting equipment settings in underground parking spaces and the relevant regulations on electric vehicle parking and charging equipment settings at home and abroad。This study will use the laboratory planning and actual measurement experiments of the Fire Protection Engineering Center of Yunlin University of Science and Technology to confirm the suppression effect of foam and water sprinkler equipment on battery fires, which will serve as a safety basis for the subsequent popularization of electric vehicles and their charging equipment and a reference for setting up fire extinguishing equipment。

For the underground space, if it is not possible to add enough air to dilute the smoke concentration in the space, it will easily cause casualties. Therefore, how to adjust the ventilation equipment in the underground parking space to reduce the generation of toxic gases or control the toxicity in the event of a fire The gas concentration is within the acceptable safety value for personnel, which will be another key research direction of this study. The research team will conduct an on-the-spot survey of a public place in my country where charging piles are installed, understand the current situation of the installation and analyze the fire risk factors of electric vehicles and their charging equipment installed in the parking space, and use computer simulation software (Pyrosim) to simulate how such places When encountering a battery fire, how to control the ventilation and ventilation equipment so that the high-temperature smoke flow will not pose a threat to disaster relief or personnel evacuation, and how to adjust the ventilation and ventilation equipment when adding electric vehicle parking spaces and charging equipment in the underground parking space

Gas equipment to improve space safety。

3. Important Founds：

(1) This research has collected and sorted out a large amount of relevant literature and legal information. At present, there are no relevant regulations on parking electric vehicles in the underground parking spaces of buildings in the world (including Japan, the United States, China, etc.). From the collection of electric vehicle fire cases, it can be seen that most of the electric vehicle fire accidents are 1. Spontaneous combustion while driving; 2. Spontaneous combustion when parked; 3. Spontaneous combustion during charging; 4. Spontaneous combustion due to accidental collision. the main cause of the disaster

(2) The emergency rescue manuals of each car factory recommend using a large amount of water (above 2600 gallons, equivalent to about 10 metric tons of water) to extinguish the fire. In order to reduce the fire risk caused by electric vehicle fires and facilitate the use of a large amount of water for rescue operations in electric vehicle fires, this study suggests that electric vehicle charging piles should be mainly located on the ground floor at this stage, or on the underground floor near the entrance and exit of the driveway and the area is limited within the rescue range of indoor and outdoor fire hydrants

(3) According to the relevant literature on fire and smoke characteristics of electric vehicles and charging systems in underground parking spaces in this study, it can be seen that the combustion products of traditional gasoline/diesel vehicles and

electric vehicles are completely different. Gas/diesel vehicles will produce complete combustion products (such as : carbon dioxide (CO2) and water (H2O) and other incomplete combustion products (such as: carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NOx) and other toxic gases). However, the combustion of electric vehicles will not only produce the above combustion products, but also Produce highly toxic gases (for example: HF, HCl, HBr, HCN, SO2), among which electric vehicle fires will produce more hydrogen fluoride (HF) than fuel vehicle fires. Hydrogen fluoride (HF) is a toxic, corrosive, light-weight The gas can permeate some types of safety protective equipment, so the dilution of toxic gases from lithium-ion battery fires is the focus of the rescue process.

(4) In the experimental space of the Fire Prevention Center of Yunlin University of Science and Technology, the research team plans to apply the "fire sprinkler equipment" and "foam equipment" to the actual fire extinguishing experiment of lithium-ion batteries. This research project will use lithium-iron batteries (LFP) as The combustion object of the actual measurement experiment。It can be seen from the experimental results that when the temperature of the LFP battery casing reaches about 100-150°C, the battery may explode and burn. However, whether it is sprayed with water or foam, the surface temperature of the battery can be reduced and the fire extinguishing effect can be achieved. However, if the ambient temperature or battery temperature does not drop, there is a high probability that re-ignition will occur. Therefore, it is known from the experimental results that if the lithium-ion battery fire is to be extinguished, it is necessary to

continuously sprinkle water (or foam) or soak in water to cool down, so as to prevent re-ignition. According to the experimental results, in the event of a battery fire, in addition to continuously spraying water (or foam) or soaking in water to cool down to prevent re-ignition, it can also reduce or reduce the harmful gas produced by pyrolysis inside the battery.

(5) This study uses computer simulation to evaluate the impact of underground parking space ventilation equipment on the fire effect of electric vehicles and charging systems. From the computer simulation results, it can be seen that if the underground parking space has ventilation equipment in the early stage of the fire (within 15 minutes), the fire scene environment will be better than that without ventilation in terms of temperature, smoke layer height, visibility or harmful gas concentration. The equipment is beneficial for people to take refuge.

4. main recommendations：

Suggest 1

Immediately feasible suggestions: planning a dedicated area for electric vehicle charging and setting up special smoke exhaust equipment.。

Organizers: Institute of Architecture, Ministry of the Interior

Co-organizer: Fire Department of the Ministry of the Interior, Construction Administration of the Ministry of the Interior

At present, the underground parking space does not need to be equipped with smoke exhaust equipment according to law, but considering the high risk of fire when electric vehicles are charged, it is recommended that if the electric vehicle charging area is set in the basement, it is

necessary to plan a special area for electric vehicle charging and set up a dedicated area. Smoke extraction equipment. And the smoke exhaust equipment should be equipped with a toxic component filter to prevent the toxic gas from being discharged directly and causing environmental pollution on the ground layer.

Suggest 2

Mid-to-long-term suggestion : research and develop the water sprinkling equipment at the bottom of the special area for electric vehicle charging.

Organizers: Institute of Architecture, Ministry of the Interior

Co-organizer: Fire Department of the Ministry of the Interior

Since the lithium-ion battery module of the electric vehicle is placed at the bottom of the vehicle, the water sprinkler system or the foam system radiates from the top and cannot reach the fire point during combustion. Consider adjusting the installation method of the foam and other sprinkler fire extinguishing equipment installed in the original underground parking space. In order to achieve the effect of continuously spraying water to extinguish the fire and cool down the electric vehicle battery module, an effective drainage device should be installed。

第一章 緒論

第一節 研究背景與研究範圍

臺灣地狹人稠、都市高樓建築林立且地面可用空間越來越少，為增設更多停車空間，不論是路邊或路外停車場皆有持續增加的趨勢，建築物亦盡可能地設置地下停車空間將土地利用程度最大化。然而現有法規將地下停車空間定義為非居室空間，因此在未建立充足的安全防護下，若停放的電動車輛或設置其充電設備發生火災，將對火場環境存在更多不確定性。此時相較於傳統燃油車輛火災可產生更高燃燒溫度的電動車火災，若無法在短時間撲滅則長時間高溫侵襲將對建築物造成不可逆結構損害。因此對於此類地下層建築場所或電池類火災的風險、災情預防及消防滅火設備的設置，皆為現行電動車普及化過程中，實為有必要進行及深入討論的研究課程。

排序	縣市別	停車位數量	比重
1	臺北市	1,156,743	22.62
2	新北市	746,442	14.59
3	桃園市	649,428	12.70
4	台中市	591,946	11.57
5	高雄市	565,658	11.06
6	台南市	351,377	6.87

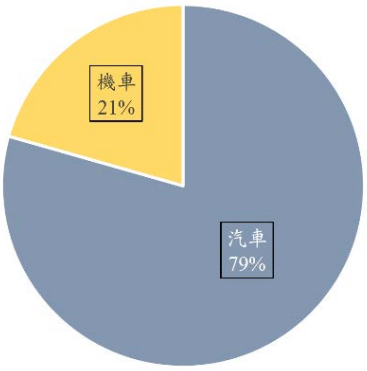


圖 1-1 我國直轄市建築物附設停車位數量

(資料來源：內政部統計處)

國內地下停車空間發展十分迅速，地下停車空間樓層面積不斷擴大、結構趨漸複雜，火災隱憂實在不容小覷。我國直轄市建築物附設停車位數量如圖 1-1 所示。地下停車空間不管發生任何類型的火災，在無法快速抑制的情況下，周遭可燃物都可能因吸收大量熱輻射而造成火勢擴大延燒，或者因燃燒產生的大量濃煙，使得火場能見度下降而造成受困人員無法順利逃生的情況發生。

火災燃燒時間的長短將會影響到建築物的結構安全，一般地下停車空間建築結構防火時效大多為 1~3 小時，此時高溫環境與延燒時間若大於場所設置的防火時效，火勢將快速延燒且對於建築物結構強度有極大的影響，不僅可能大幅降低其耐震能力，甚至因無法承受其高溫而有倒塌的風險。

地下停車空間在建築空間的消防設計規劃上，主要有防火區劃與防煙區劃等兩個部分。其中防火區劃主要防止火煙蔓延擴大，有利於搶救和人員的疏散。地下停車空間的防火分區的劃分，應考量汽車的流通和停放數的合理性，且要兼顧建築平面分割的方便性。防煙區劃則是在火災發生期間，避免煙氣侵入非火災區域，影響人員逃生且作為提供搶救過程的有利條件。防煙區劃一般採用防煙垂壁、隔牆或者從天花板下突出的樑柱劃分。基於電池類火災不易撲滅以及地下停車空間火災風險性較高的情況，電動車及其充電設備未來若要推廣並考慮設置於地下停車空間，仍有待進行更多的相關研究以及各種情境皆應予以討論。

地下停車空間除停駐電動車外，還有大量燃油車輛等可燃物，當發生火災時，若無法在短時間內撲滅將可能造成重大危害，長時間燃燒更可能對該建築物的結構產生嚴重傷害。因此對於此種建築空間區域，若要推動電動車普及化或增設電動車充電裝置於地下停車空間，對於現有的消防安全設備、防護要求與避難設施規定是否仍能負荷或應如何調整以增進其安全性，實有必要詳加研究。

地下停空間屬半封閉空間，故建築與防火設計應具備平時通風換氣量充足，災時具備排煙、阻煙能力，達到防止高溫煙流擴散至人員疏散路線，但同時亦需迅速排除煙氣與熱量於戶外，避免積累過多熱

量而引起閃燃疑慮。此外不管傳統燃油車或電動車，其火災發生都會伴隨大量毒性氣體，如何引入大量空氣稀釋環境毒性氣體濃度更為一大挑戰。若要達到稀釋地下停車空間有毒有害氣體、增加安全疏散條件、控制火勢蔓延擴大、提升消防搶救機會，對於地下停車空間之通風排煙設備規劃，參考 97 年內政部建築研究所之研究報告，應加以考量下列情況【5】:

1. 由於地下停車場空間面積大且屬半封閉或封閉狀態，無法利用建築物門窗等開口進行通風與排煙，因此可考慮設置機械排煙設備且排煙量建議採用不小於 6 次/h。

2. 地下停車空間之通風換氣與災時排煙系統應獨立設置，不應和其它層有相通設置，排煙口的位置建議到防煙分區最遠點的水平距離為 30m 以內。

3. 排煙風機可採離心風機或排煙軸流風機，並應在其機房入口處，設有煙氣溫度超過 280℃時，自動關閉之排煙防火閥，並與排風機連動。

4. 通風排煙管道必須採用不燃材料製作，管道和設備的保溫材料、滅音材料和凝結劑應為不燃材料或耐燃材料。

各國政府為解決能源匱乏問題而積極發展綠色能源產業。根據交通部統計數據顯示，台灣汽機車總數位居亞洲之冠，約為 2,100 萬台，幾乎每位國人都至少擁有一輛機車。中央政府為解決汽機車帶來的交通堵塞與空氣污染問題，積極發展綠色能源並擬定政策法規、獎勵補助，推動電動汽機車產業發展。我國中央政府預計於 2030 年全面使用電動公車及電動公務車、2035 年禁售汽油機車、2040 年禁售汽油車，並預計興建約三千座充換電站。

隨著新能源電動汽車的迅速推廣，消費者對電動汽車的性能需求逐漸增大，尤其是續航里程和電池容量，同時使用安全也成為國人關注焦點。新能源電動汽車現階段大多以鋰離子電池作為儲能裝置，鋰離子電池具有能量密度高、放電平穩、充放電循環長等優點，使得高能量密度鋰離子電池不管在電動汽車、可攜式電子設備、分散式儲能系統等需求量越來越大。

惟鋰化學特性非常活潑，具高度危險性，若操作不當可能發生起火燃燒等意外。若政府要大力推動電動車產業則勢必需在國內廣設充換電站，鑒於未來電池充換電站越來越多，災害防範意識及對策擬定刻不容緩。

目前充交換電站主要設於加油站、百貨公司停車場，但由《CNS 15511-3_電動車輛傳導式充電系統-安全要求》中載明，充電設備零件有引起火花電弧的可能性，因此將電池充換電站與加油站設置同一地方，恐有將「汽油與火柴同置一地」的隱憂；而將充電設備設置於地下停車空間，則可能因電池類火災難以短時間撲滅，進而影響到建築結構安全。

因此電動車的政策推廣應從多方面角度考量車輛停放及充電問題，同時鋰離子電池的熱失控蔓延問題是造成電動汽車事故危害的重要因素【6】。近些年電動汽車因電池熱失控而引發的爆炸自燃事故時有發生。這些電動汽車的安全事故給消費者帶來很多顧慮，電動汽車產業的發展也勢必受到限制【7】。

第二節 研究目的

傳統地下停車空間所發生的火災類型大多為固體火災與油類火災等兩類，現行對於地下停車空間之消防安全設備設置要求包含:《各類場所消防安全設備設置標準》第 18 條第 1 項規定，「地下層或第二層以上樓地板面積在 200m^2 以上者，得就水霧、泡沫、乾粉、二氧化碳滅火設備等選擇設置之」；設置標準第 71 條規定，「室內停車空間或汽車修理廠等場所，使用泡沫噴頭，並樓地板面積每 9m^2 設置一個，使防護對象在其有效防護範圍內」。

地下停車空間因車輛停放位置較於集中，當車輛起火將迅速向四周車輛延燒而造成火勢成長猛烈，因此地下停車空間所設置消防安全設備，其控制火勢燃燒範圍較撲滅火勢來的關鍵。現階段地下停車空間主要以設置泡沫滅火系統為主，然而現行設置的泡沫或其他撒水設備是否對於電動車及其充電系統火災具有優良的抑制能力或有需因應電動車的火災特性及風險加以調整，則尚未有明確定向。

學者丘澄彬【8】研究指出，當滅火時機在火源完全成長之後時，撒水對火的抑制效果並不會隨著撒水量增加而增加。換言之，當火源達到完全成長後，相較於火源完全成長前更加難以控制。因此本研究將規劃實測實驗瞭解泡沫及撒水設備對於電池類火災是否有優良的抑制能力。

對於地下空間而言，若無法補入足夠的空氣來稀釋空間煙流的濃度氣體濃度將造成人員傷亡，因此如何調整地下停車空間的通風換氣設備使其於發生火災時，降低毒性氣體產生或控制毒性氣體濃度於人員可接受的安全值內，將是本研究另一個重點研究方向。本研究團隊將實地現勘我國某一設置充電樁的公共場所，瞭解設置現況與分析電

動車輛及其充電設備設置於停車空間的火災風險因子，同時利用電腦模擬軟體(Pyrosim)模擬該類場所若遭遇電池類火災時，應如何控制通風換氣設備使高溫煙流流向，不致於對救災或人員避難造成威脅，以及地下停車空間後續增設電動車停車位及其充電設備時，應如何調整通風換氣設備以提升空間安全。

本研究預期目標如下：

1. 彙整分析國際上地下停車空間停放電動車輛之規定要點(例如：是否分區停放、區劃規定、擴大停車距離或使用特殊之消防設備要求等)。
2. 地下停車空間電動車輛及充電系統火災煙毒流動特性分析。
3. 泡沫及其他撒水滅火設備對電動車輛及充電系統火災之影響評估。
4. 地下停車空間通風換氣設備對電動車輛及充電系統火災煙毒效應評估。

第三節 研究內容

近年來國內外停車場火災頻傳，濃煙易侵入安全梯，使得人員避難困難且消防人員救災不易，更甚者地下停車場空間較為封閉，在火災發生時，濃煙擴散路徑與人員避難方向相同，再加上光線昏暗使得位置辨識困難，容易迷失於火場之中。台灣建築物之地下停車場隨著人口分佈，大多集中於都會區，並且有深層化的趨勢，地下 4 層至 8 層的停車場並不少見。現階段國內地下停車場依法定義為非居住用途，因此對於排煙設備以及消防設備設置並沒有特別要求，亦沒有針對若設置電動車輛之場所有特別要求。

一般建築物火災的應變對策大多以如何讓人員快速避難至安全區為考量，但對於地下停車空間而言，因空間格局屬於半封閉型，同時空間內部集中停放大量車輛，此時不管是燃油車或電動車發生火災，火勢都會迅速向四周蔓延，因此對於此類不易於火勢抑制的場所，加強其內部火載量控管相當重要。

隨著鋰離子電池發展至今，統計鋰離子電池火災事故發生成因為55%是短路造成；28%充放電造成；7%設備意外造成；10%其他原因所造成【9】【10】【11】【12】。由上述統計資料發現，電動車等電池類產品發生熱失控的時機主要發生於充電過程或受到撞擊(擠壓)當下，基於未來建築物可能普及設置充電樁的情況，如何提升建築物安全以保障國人財產則需要進一步針對電動車的火災特性、現行建築物停車空間的建築型態、消防設備設置及規劃、停車相關法規要求等多方面文獻蒐集與案例檢討。

當地下停車空間遭遇如電池類火災等不易撲滅且燃燒溫度極高的火災特性時，在長時間高溫的侵襲下，受災建築物的空間結構將造

成不可逆的損害。基於電池類火災與傳統火災危害與特性的不同，以及電池類火災發生於地下停車空間的潛在風險，本研究團隊將蒐集地下停車空間等地下層場所，若發生火災與地上層建築的危害風險差異，並針對地下停車空間火災案例與電動車輛火災案例進行分析與檢討，同時瞭解現行地下停車空間的消防設備設置與國內外對於電動車輛停放與充電設備設置之相關規定。

本研究將利用雲林科技大學防火工程中心的實驗室規劃實測實驗項目，確認泡沫及撒水設備對於電池類火災的抑制效果。本研究團隊將以磷酸鋰鐵電池為本研究實測實驗的測試對象，電池引燃方式參考電動車常見起火方式或電池出廠的安全測試(如：直接加熱、隔板加熱等方式)將電池引燃，分析泡沫及撒水設備對於電池類火災的反應及效果，作為後續推行電池類等綠色潔淨能源的安全基礎，以及電動車推廣或其充電設備設置區域的滅火設備設置參考。

鋰離子電池熱失控狀態會排放金屬微粒與易燃、有毒氣體，若在封閉空間更存有爆炸風險。截自 DNV 公司研究報告之電池燃燒氣體濃度分佈表(如表 1-1)發現，除 CO、CO_2 等常見燃燒廢氣氣體外，尚有多種氫元素所組成的氣體，因此電池類火災除高溫危害外，有毒氣體方面亦需慎重考量。鋰離子電池燃燒代表性氣體包含 CO_2、CO、HF、C_2H_6、CH_4、H_2、HCI 和 SO_2 等【13】。

對於地下空間而言，若無法補入足夠的空氣來稀釋空間煙流的濃度氣體濃度將造成人員傷亡，因此如何調整地下停車空間的通風換氣設備使其於發生火災時，降低毒性氣體產生或控制毒性氣體濃度於人員可接受的安全值內，將是本研究的重點研究方向。

本研究團隊將實地現勘我國某一設置充電樁的公共場所，瞭解設

置現況與分析電動車輛及其充電設備設置於停車空間的火災風險因子，同時利用電腦模擬軟體(Pyrosim)模擬該類場所若遭遇電池類火災時，應如何控制通風換氣設備使高溫煙流流向，不致於對救災或人員避難造成威脅，以及地下停車空間後續增設電動車停車位及其充電設備時，應如何調整通風換氣設備以提升空間安全。

表 1-1 DNV 公司於不同類型電池燃燒之廢氣濃度分佈表

Value	NMC【63Ah】					LFP【2.5Ah】				LFP【1.5Ah】		
引燃方式	SOC			過充	短路	SOC			過充	SOC		
	50	75	100			50	75	100		50	75	100
CO_2	19.6	25.7	40.3	38.8	65.9	44.3	20.2	63.4	20.9	22.5	23	35.1
CO	29.2	38.1	11.4	34.4	19	7.6	15.9	15.1	26.1	12	13.9	11.3
HCL	9.7	0.8	1.9	0.2	0.2	1.1	0.8	0.2	0.3	2.1	1.9	1
HF	0.7	0.3	0.3	0.1	0.1	1.6	1.6	0.4	0.1	1.9	3.7	3.6

備註：單位為%；節錄部分數據。
(資料來源：參考文獻【13】)

第四節 研究方法及進度說明

鋰離子電池為現今社會常見的儲能裝置，在其廣泛應用的同時，如何有效預防災害發生或降低災害損失為相關產業的發展關鍵。本研究主要探討電池類火災的危害風險以及電池類火災發生在地下停車空間時之風險控制與換氣策略分析研究。本研究計畫執行將採「文獻回顧」、「實測研究」、「電腦模擬分析」為主，工作項目如表 1-2 所示。

表 1-2 各部份之研究內容表

	項目	研究內容
第一部份	國內外地下停車空間停放電動車輛之相關規定蒐集分析 **(文獻回顧)**	● 蒐集地下停車空間發生火災之危害風險，以及現行地下停車空間之消防設備設置要求。 ● 蒐集國內外地下停車空間之停放電動車輛與設置充電設備相關規定。 ● 蒐集與分析電動車及其充電設備火災風險因子。
第二部份	泡沫及撒水設備於電池類火災的效果評估實驗 **(實測研究)**	● 規劃泡沫及撒水設備實測實驗項目，瞭解撒水設備對於電池類火災及火場煙毒濃度的抑制效果。 ● 本研究將選用【磷酸鋰鐵電池】作為實測實驗對象，並探討不同電池模組規模對於鋰離子電池的燃燒特性與的抑制效果。
第三部份	地下停車空間通風設備之氣流場電腦模擬分析 **(電腦模擬分析)**	● 蒐集國內地下停車空間通風換氣設備設置規定，以及換氣量與氣流流向規劃之文獻及案例分析。 ● 本研究團隊將以計畫執行期間實地現勘場所之平面格局、車位格局與通風換氣設備等進行模型建構，並作為氣流場電腦模擬分析之對象。 ● 本研究將利用電腦模擬軟體(Pyrosim)進行分析，提出地下停車空間遭遇電池類火災時，應如何控制通風設備使其高溫煙流，不致於對救災或人員避難造成威脅。

(資料來源：本研究整理)

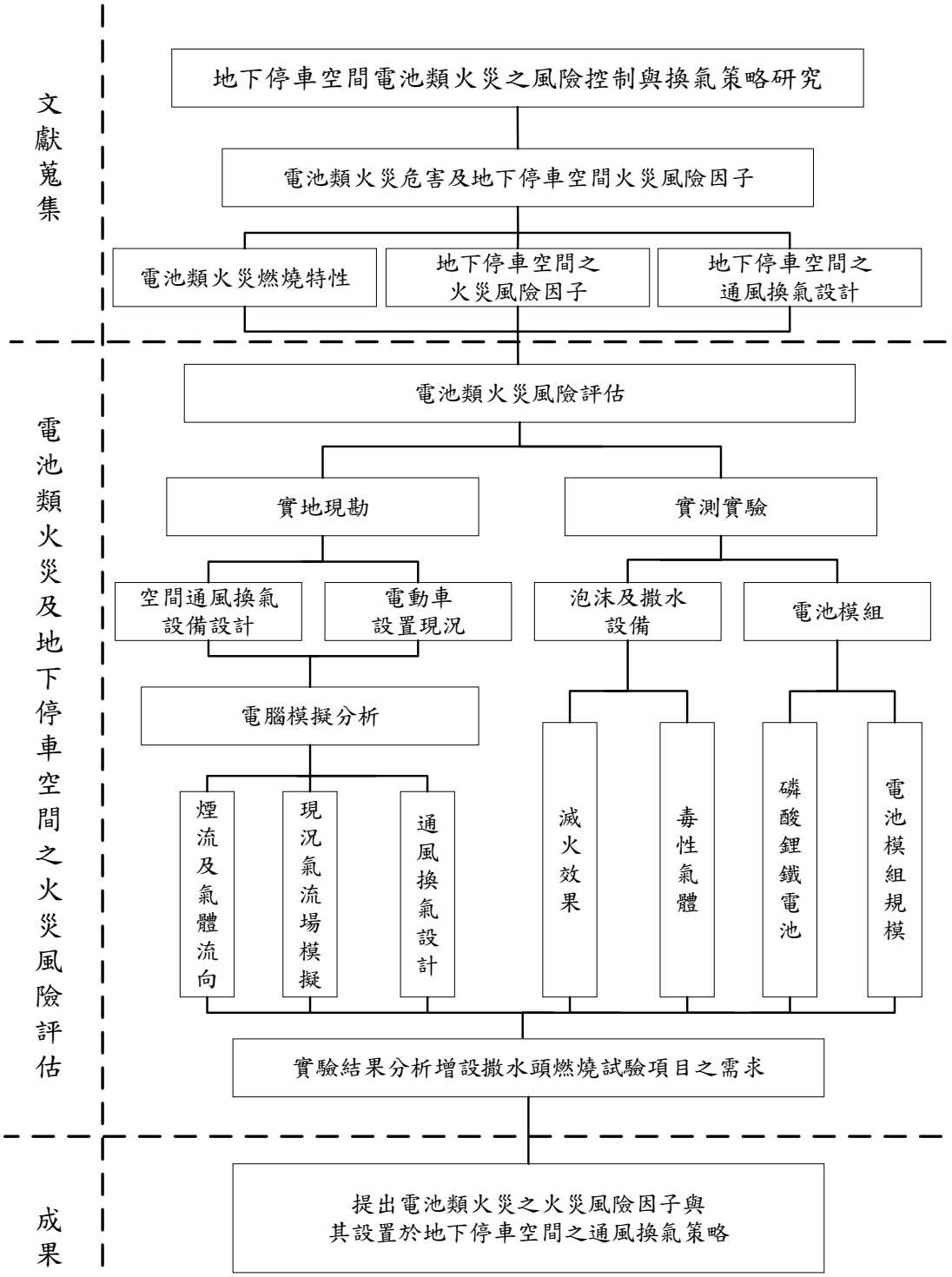


圖 1-2 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

本研究執行進度及預期完成之工作項目如表 1-3 所示：

表 1-3 研究進度及預期完成之工作項目表

月 / 工作項目	第1個月	第2個月	第3個月	第4個月	第5個月	第6個月	第7個月	第8個月	第9個月	第10個月	第11個月	備註
地下停車空間相關文獻蒐集及分析												
電動車及充電設備火災因子分析												
我國設置電動車建築場所現場勘查												
地下停車空間氣流場模擬分析												
地下停車空間通風換氣策略規劃												
第一次學者專家座談會												
期中簡報												
實測實驗(撒水系統)												
實測實驗(泡沫系統)												
實測實驗數據分析												
第二次學者專家座談會												
期末簡報及結案報告整理												
預定進度(累積數)	3%	7%	23%	43%	66%	76%	86%	89%	92%	96%	100%	

(資料來源：本研究整理)

第二章 地下停車空間文獻分析

第一節 地下停車空間定義

民國 105 年 11 月 09 日修正公佈的「停車場法」第二條用語說明定義，「停車場」與「停車空間」法定名稱差異。停車場為「法令設置供車輛停放之場所」；停車空間為「建築物依建築法令規定，應附設專供車輛停放之空間」。因此道路旁或道路外供車輛停放的場所被定義為「停車場」；附屬於建築物供車輛停放的場所則定義為「停車空間」。本年度主要研究於建築物地下層建築區域設置停放車輛之場所，依據「停車場法」將本研究對象定義為地下停車空間。

中國「汽車庫建築設計規範」則統一使用「汽車庫」作為通用名稱，其定義為「停放和儲存汽車的建築物」。另外「汽車庫、修車庫、停車場設計防火規範」則提出非屬於建築物的「停車場」一詞，作為開放式空間停放或儲存汽車的場所之用語。當停車空間室內地平面低於室外地平面高度且超過該層空間樓高一半時，則根據中國「汽車庫建築設計規範」將其定義為「地下汽車庫」。GB50067 對於停車空間定義如表 2-1 所示。

表 2-1《GB50067》停車空間說明

名稱	定義
汽車庫	停放由內燃機驅動且無軌道的客車、貨車、工程車等汽車的建築物。
修車庫	用於保養、修理由內燃機驅動且無軌道的客車、貨車、工程車等汽車的建(構)築物。
停車場	專用於停放由內燃機驅動且無軌道的客車、貨車、工程車等汽車的露天場地或構築物。
地下汽車庫	地下室內地板面與室外地板面的高度之差大於該層車庫淨高1/2的汽車庫。
半地下汽車庫	地下室內地板面與室外地板面的高度之差大於該層車庫淨高1/3且不大於1/2的汽車庫。
多層汽車庫	建築高度小於或等於24m的兩層及以上的汽車庫或設在多層建築內地面層以上樓層的汽車庫。
高層汽車庫	建築高度大於24m的汽車庫或設在高層建築內地面層以上樓層的汽車庫。
機械式汽車庫	採用機械設備進行垂直或水平移動等型式停放汽車的汽車庫。
敞開式汽車庫	任一層車庫外牆敞開面積大於該曾四周外牆體總面積的25%，敞開區域均勻布置在外牆上且其長度不小於車庫周長的50%的汽車庫。

(資料來源：本研究整理)

表 2-2《NFPA 88A》停車場說明

名詞	定義
停車場	建築物、結構物全部或部分供機動車輛停放、儲存之場所。
機械輔助停車場	使用升降機或其他機械裝置將車輛移到停車場所在的樓層，然後再由駕駛負責停放。
自動化停車場	利用電腦控制機械來停車及取車，車輛停放在沒有樓板之多層停車架上(即國內俗稱：機械式停車塔) 。
室內停車場	即非開放式停車場。
開放式停車場	具有2個面以上的外牆自然通風開口，開口面積大於總牆壁面積20%，合計供自然通風開口寬度大於周長40%，任一到內隔牆或沿任一柱軸線，能勻分布提供通風之開口面積比例不低於20%。
坡道	利用傾斜的地板作為車輛垂直跨樓層移動通道。

(資料來源：本研究整理)

日本「駐車場法」規定中，以「駐車場」作為法定用語，路上駐車場（即路邊停車場）定義為「於停車場整備地區內之道路的路面一定區劃範圍內設置作為公用汽車停車用途的設施。」；路外駐車場（道路外停車場則定義為「於道路的路面以外設置作為公用汽車停車用途的設施。」除上述用詞外，該法中另列出「建築物停車設施」的附屬設置與管理規定，要求樓地板面積超過 2,000m^2 以上之建築，於新建或擴建時，應有供汽車停車用途的「停車設施」之設置。顯見日本在法規要求中，將道路上或道路外開放空間的停車設施定義為「駐車場」；建築物相關停車空間則定義為「停車設施」。

我國車輛停放區域依停放區域類型可劃分為路邊、路外與建築物附屬停車場；依建築結構可劃分為平面式、地下式、屋頂層、封閉式、開放式與坡道式；依機械停車裝置可劃分為垂直循環型、多層循環型、水平循環型、平面往復型、昇降機型、簡易昇降型、多段型與昇降滑動型等多種。地下停車空間火災常見發生區域分別有汽機車停放區、機械設施控制裝置與機房等；發生原因則除人為縱火外，以車輛自燃、車輛內部雜物等可燃物或停車空間周遭設置的機械裝置故障為主要起火原因之一。

第二節 地下停車空間火災風險評估

相較於地上層建築物而言，地下層建築物因其半封閉的空間特性，導致在照明、通風及功能設計相較地上層建築物更為複雜。此外地下層空間建築與地面層連接出入口較少且通道狹小、樓高較低的情況，當其發生火災時，天花板遍布各種管線可能成為火勢蔓延的管道，將徒增火勢危害風險。

從地下層建築火災案例發現，起火原因主要來自下列幾個方面：一、電氣設備、線路故障；二、裝修等施工操作不當；三、人為因素(包含：不當用火、吸煙等)。人為因素導致火災占比較大，其次便是電氣設備、線路故障引發的火災。線路故障的原因通常來自於建築物多年使用所衍伸線路老化的問題，此外新設設備不斷增加也會造成線路超過負載而引起火災【14】。

當地下停車空間發生火災時，相鄰車輛可能受起火車輛的熱輻射影響而間接起火燃燒【15】【16】【17】。總體而言，地下停車空間火災特性具有火勢蔓延快、撲救難度高、煙氣溫度高且難以排出、火場存有大量易燃的可燃物、對上層居民生命威脅極大、消防人員不容易進入停車場內部救災、消防車輛不容易接近部署、救災現場通訊不良等特點【18】【5】。因此雖然地下停車空間可提升對土地資源的利用，同時也能集中管理汽機車輛的放置，但伴隨的消防安全議題不容忽視。

自 1960 年起，已有相關學者開始對地下停車空間內部氣體與熱量流動進行研究；1980 年起，某些國家已編制相關地下停車空間火災通風與排煙設計規範【19】。學者 X. G. Zhang【20】等人利用 FDS 對不同火災場景分析發現，地下汽車空間火災發展過程可分為 4 個階段：初始階段、發展階段、熄滅再燃燒階段以及快速發展階段。

學者賈春芬【21】等人分析地下停車空間的火災特性，提出下列觀點：汽車火災大多按 t^2 快速火發展，火災增長係數(α)為 0.04689kW/s；汽車著火的臨界熱流量為 16kW/m^2；地下停車空間不會發生閃燃的臨界條件為 T_s＜456℃且 H_{somke}≥1.6m；相鄰汽車不被引燃的臨界條件為 $I_{car}+I_{somke}$＜16kW/m^2。

學者何明錦【22】進行全尺寸汽車燃燒實驗發現，小型汽車空燒的熱釋放率最大值可達 5 MW；總發熱量為 3,250 MJ，如圖 2-1 所示。學者程遠平【23】實驗提出，汽車火災起火後的 15min 是人員逃生疏散的最佳時機。

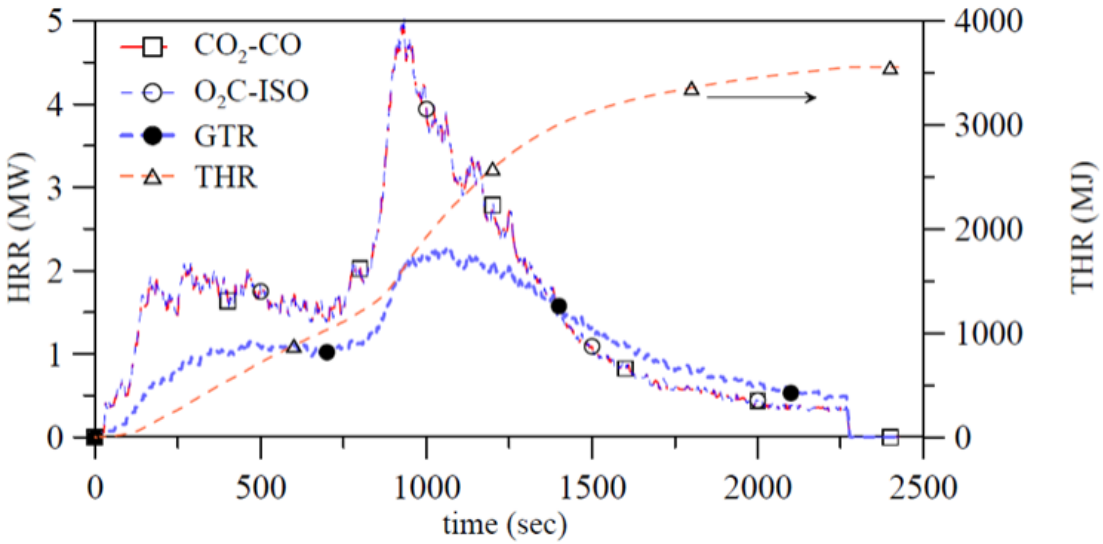


圖 2-1 小型汽車燃燒熱釋放率圖

(資料來源：參考文獻【22】)

隨著地下停車空間的大規模興建及空間結構的日益複雜，停車空間火災案例層出不窮，火災風險也明顯提高，一旦發生火災往往帶來極為嚴重的後果，近年來國內發生多起地下停車空間的火災案例，充分凸顯地下停車空間設置消防安全設備的必要性。

此外地下停車空間通常也設有電氣機房，因此地下停車空間發生火災可能伴隨多種火災類型，使得救援相對困難且複雜。地下空間因

採光不足使火災狀況不易掌握，同時空間密閉使得外氣供給受限而產生大量燃燒不完全的濃煙，造成 2014 年新北市華○之星地下停車場火災發生消防隊員深入火場，最終因吸入大量高溫濃煙嚴重嗆傷不幸殉職的遺憾。

為避免此種遺憾再次發生，蒐集及瞭解地下層建築的火災風險與現行地下停車空間之消防設備設置要求，並考量該類場所可能因排煙及散熱困難等救援負面現象所造成救災及逃生不易的情形，並基於電池類火災與傳統火災危害及特性的不同，評估電池類火災若發生於地下停車空間應如何進行火災風險控制為主研究的研究主軸。

地下停車空間中火載量高、可燃物密集等特性，火災發生不僅可能燒損大量車輛，若無法有效將火煙隔離並稀釋火災毒性氣體(如：一氧化碳、氮氧化合物（NOX）、碳氫化合物)，將極容易造成受困人員傷亡。學者張文耀【24】利用電腦模擬(FDS)分析地下層停車場火災，該研究結果發現，火災煙流危害較溫度危害達臨界值快，因此控制地下停車空間的煙流途徑更為關鍵。

一般車道設置的防火鐵捲門可作為劃分防煙區劃的功用，防火鐵捲門可延長煙層蔓延至其他樓層的時間，甚至可防止濃煙蔓延，同時為避免地下停車空間火災發生閃燃現象(Flashover)應避免高溫熱輻射接觸車輛表面或讓車輛長時間接觸高溫煙氣。

學者諸偉【25】提出地下停車空間常見的起火因素如下：

（一）電路原因：

汽車內部電路密佈且車載用電設備較多，經長時間使用容易造成設備局部溫度升高的現象，此時在散熱環境不佳的地下停車空間，容易使車輛因無法降溫而起火燃燒【26】。或者當電氣線路與用電設備使用年限過長時，產生的線路老化情形也會引起故障、漏電、短路，甚者導致車輛自燃。

（二）燃油洩漏：

汽機車使用過程中，可能因生銹腐蝕、碰撞摩擦、自然老化等原因出現油箱漏油、油路破裂或管路密封性差等現象。當地下停車空間某停放車輛出現漏油並與空氣混合時，遭遇明火或電火花則容易引起燃料燃燒。此外汽機車的配件大多屬於易燃合成材料，其火勢發展將極其迅猛，並產生大量煙熱。

（三）車輛碰撞：

地下停車空間因視線與動線較容易受到遮擋，此時車輛行駛過程發生碰撞或擦撞障礙物等意外，油路系統可能受到撞擊破壞而開始漏油，此時撞擊引起的明火或電路損壞產生的電火花將引燃燃料與車內易燃可燃物(衛生紙、座椅、腳墊等)。

（四）人為原因：

人為原因包含縱火、車內吸煙、擺放易燃物品都屬於潛在的火災風險。舉例來說，當車輛內部擺放打火機、酒精濕巾、煙花爆竹等易燃物品時，遇到車內溫度較高或者明火就會引發燃燒，從而造成車輛起火【27】。

地上層火災所產生的高溫熱煙流大部分都能夠從門窗直接排出，而地下空間由於四周被磚牆包覆，僅能透過出入口或通風管道與外界連接，因此高溫煙流若無法及時且大量排出將會對人員逃生與火災撲救造成阻礙。學者張邦立等人【28】、楊智欽【29】、瑞德消防雜誌【30】等提出地下樓層火災特性包含【31】：

1. **區域環境較為封閉**：依據《各類場所消防安全設備設置標準》第28條與《建築技術規則》建築設計施工編第1條第19款，停車場定義為非居室用途場所，依法得免設排煙設備。地下停車空間其內部空間大，可容載大量車輛但其出入口較少。當發生火災時，容易因空間對外開口較少，使得氧氣供應不足或大量濃煙無法排除等情況發生，不利於救援行動的展開。
2. **光線昏暗逃生不易**：地下停車空間當光線不足時，將無法全視空間環境。因此當火災發生時室內環境漆黑無光、能見度降低，不僅無法判斷起火點位置，逃生更是極易迷失方向。此外該區域進出大多以車輛為主，一般民眾對於人員步行疏散路徑並不熟悉，無法判斷起火點位置且於慌亂之間將難以辨識逃生方向。
3. **搶救困難**：停車空間的火載量極大(包含：車內設備（輪胎、儀表板、控制線、座椅等）與易燃燃油等)，當火勢蔓延迅速且無法即時滅火，後果將不堪設想。其中地下停車空間濃煙不易排除，其救難困難點包含可能因車輛燃燒產生的大量濃煙，導致停車空間內部能見度極度下降，嚴重影響救援人員辨別方向，或者受到空間封閉及氣流循環不佳的情況，存有爆炸與中毒的高度風險，因此救難人員進入應配置空氣呼吸器。
4. **高溫灼熱**：地下停車空間一般處於通風不良的場所，熱量不易擴散至室外，此時當室內不斷燃燒的情況下，在短短幾分鐘內溫度

將上升至攝氏 600 度以上，此時室內不易排除的濃煙積累到一定程度，當有新鮮空氣進入將造成閃燃現象。地下停車空間車輛停放密集，車與車之間距離小，相鄰兩車間距往往不到一米。只要有一輛車起火，猛烈的火勢就會迅速蔓延到旁邊停靠的車輛，當發生燃油洩漏，出現流淌火時，熱量快遞更快，著火的車輛數量會迅速增多，火勢蔓延極快。同時在社區地下停車場還有各種管道和樓梯等，這種立體佈置的地下車庫結構更容易形成立體燃燒，擴大燃燒範圍。

5. **煙囪效應**：地下樓層火災所產生的濃煙，會有沿著樓梯或管道間迅速向上延燒之特性，因此地下停車空間發生火災時，濃煙與人員避難方向相同，將對人員逃生造成嚴重危害。

當地下停車空間發生車輛火災時，起火車輛將釋放大量熱能並迅速往四周快速擴散，從而造成火勢擴大及蔓延。火勢的熱蔓延方式主要包含：火焰接觸蔓延、導熱蔓延、熱輻射蔓延等【32】。其中造成火勢蔓延的關鍵火場因子，簡述如下：

一、 熱輻射：

熱輻射是一種火災蔓延方式，此方式不需要火源與受熱源間有任何媒介。地下停車空間當某一車輛發生火災時，隨車輛劇烈燃燒釋放大量熱能並透過熱輻射的關係將熱量傳遞到相鄰可燃物，造成其溫度到達自燃點，從而使火勢進一步擴大。地下停車空間之間，由於空間較為封閉，因此需要著重考量熱輻射所引起的火災蔓延情形。學者賈春芬等人【21】認為，汽車被引燃的輻射熱臨界值應為 16 kW/m^2，一旦超過此數值即車輛將受熱輻射所引燃。火源相鄰車輛的熱輻射可由下式進行估計：

$$I = \frac{Q/3}{4\pi x^2} \tag{2.1}$$

其中，公式 2.1：

I 為火源周圍物體表面熱輻射(kW/m^2)；

Q 為熱釋放速率(kW)；

x 為著火汽車中心到相鄰汽車表面的距離(m)。

二、溫度

火場溫度決定煙流的運動規律，周圍物體受煙流熱輻射與熱對流作用，將導致其表面溫度升高。當熱量被周圍環境物件吸收且達到可燃物自燃溫度點時將起火燃燒而衍伸火勢蔓延現象。一般而言，木材、可燃性裝修材料等材料自燃溫度點大多位在 400℃至 500℃之間

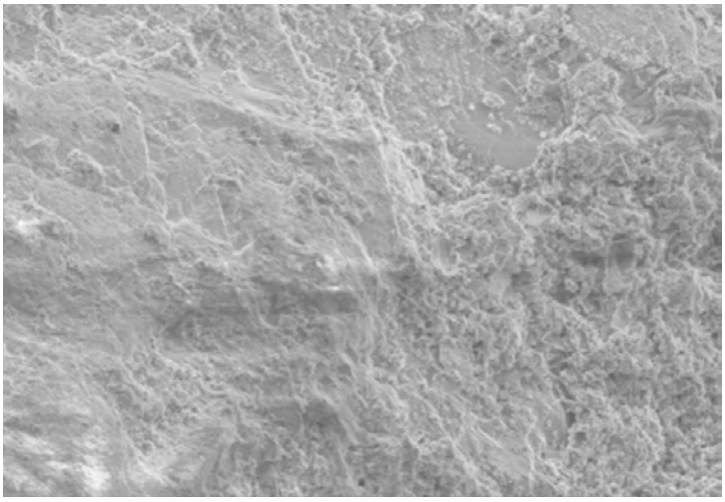
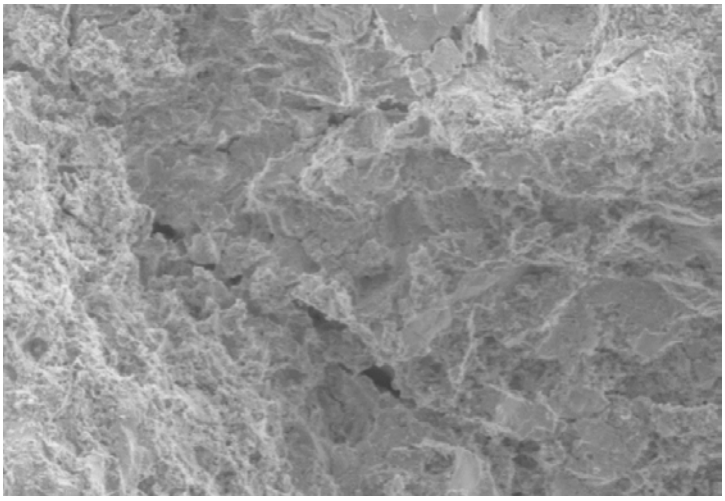
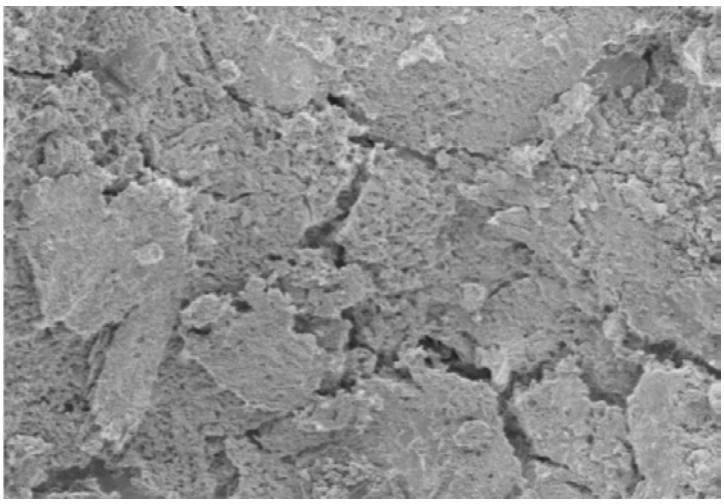
【35】；而汽油車火災中，學者張曉鴿【36】研究發現，油箱附近溫度若高於 200℃且長時間接觸時，該車輛即有可能引起燃燒。同時地下停車空間的建築結構若採用鋼鐵或鋼筋混凝土結構，耐火等級較低。

鋼材雖然不屬於易燃材料，但其強度與剛度會在高溫環境發生塑性變形，強度大幅下降。舉例來說，當鋼材溫度為 550℃時，其強度僅為常溫一半；溫度上升至 600℃時，其強度僅為常溫時的 1/3。然而一般地下停車空間發生火災，其內部溫度遠高於 600℃，對建築物結構強度將受到嚴重影響，當災情時間拉長時，恐有坍塌風險。

鋼筋混凝土(RC)建築物當遭受火災侵襲後，雖然可能從外觀無法辨認受損狀況，但其結構內部可能已造成嚴重的強度衰退。學者黃彰斌【40】研究發現，高溫環境下的鋼筋與混凝土，因材料膨脹係數不同，將造成混凝土覆蓋層剝落，使鋼筋直接暴露於高溫中，這將降低鋼筋承載能力。

學者 Wang G.【41】研究長齡期混凝土老化與環境條件暴露下對於混凝土的影響中發現，隨著混凝土使用年限拉長，其結構性能將隨時間延長而降低。學者劉白梅【42】研究發現，當建築物受火害的影響愈久則結構抗壓強度愈低，當斷面溫度超過 700℃時，混凝土抗壓強度將可能無任何作用【31】。高溫後混凝土力學性能與其內部的變化密切相關。學者白亮【43】利用顯微鏡觀察混凝土於不同溫度的作用下，其內部顯微結構變化如表 2-3 所示。

表 2-3 混凝土在高溫環境的微觀結構圖

混凝土溫度條件	微觀結構圖
溫度≤300℃時： 混凝土微觀結構比較均勻緻密。	
溫度達 700℃時： 內部結構多孔疏鬆。	
溫度達 900℃時： 內部結構多孔疏鬆，缺陷、裂紋增多，強度下降。	

(資料來源：參考文獻【43】)

第三節 地下停車空間消防安全設備設置要求

地下停車空間不僅車輛眾多且人員流動頻繁，發生事故容易造成人員傷亡。一般而言，當地下停車空間場所發生火災時，救援團隊應在第一時間進行災情偵察，瞭解停車空間內部火災基本情況，掌握地下停車空間內部消防設備分佈情況及相關設備是否仍能正常運作。彙整建築法、建築技術規則以及各類場所安全設備設置標準等法令，說明現況國內對於停車空間要求，如表 2-4 所示：

表 2-4 國內停車空間相關法令標準

法令名稱	條文	內容簡述
建築法	第 7 條	定義機械停車設備屬於雜項工作物
	第 73 條	停車空間如用途變更者，應申請變更使用執照
	第 77-4 條	建築物昇降設備及機械停車設備，非經竣工檢查合格取得使用許可證，不得使用
	第 102-1 條	建築物依規定應附建防空避難設備或停車空間，其防空避難設備興建因特殊因素確有施工困難或停車空間在一定標準以下等條件，代為興建規定
建築技術規則	第 59 條	建築物附設停車空間之設置數量標準
	第 59-1 條	停車空間設置規定
	第 59-2 條	鼓勵建築物增設營業使用之停車空間規定
	第 60 條	停車空間及停車空間預留車道尺寸之相關規定
	第 61 條	車道之寬度、坡度及曲線半徑規定
	第 62 條	停車空間之車道出入口、有效通風面積、樓層淨高等規定
	第 136 條	規定汽車出入設置緩衝空間寬度及深度
	第 137 條	車庫等知建築物構造應為防火建築物
	第 138 條	供車庫之使用部分之構造及設備之相關規定
	第 139 條	車庫樓地板面積超過 500m^2 者，其設置相關通風換氣設備、入口警示、安全梯之規定
	構造編 第 19 條	作業場、停車場如須通行車輛，其樓地板之活載重應按車輛後輪載重設計之
各類消防安全設備設置標準	第 12 條	室內停車場所、建築物附屬之室內停車場，按用途分類屬丙類場所
	第 18 條	室內停車空間設置水霧、鮑莫、乾粉、二氧化碳滅火設備之規定

法令名稱	條文	內容簡述
	第 68 條	裝置水務滅火設備之室內停車空間，其排水設備規定
	第 71 條	室內停車空間使用泡沫噴頭，使防護對象在其有效防護範圍之規定
	第 73 條	室內停車空間之高發泡出口之泡沫水溶液放射量規定
	第 101 條	供室內停車空間使用之滅火藥劑規定

(資料來源：參考文獻【44】)

地下停車空間屬於半封閉空間，火勢發展期間，半封閉空間所產生的熱輻射量極有可能使汽機車油箱熱膨脹，甚至爆炸的風險。一般而言，地下停車空間依法規要求設置各類消防設備，當災害發生時應及時啟用排煙設施與自動撒水設備，降低火場煙霧濃度並控制火害範圍。因應停車場及修車場的使用型態與危害程度差異，美國國家防火協會(NFPA)於 1973 年分別對兩者空間出版停車場防火安全標準《NFPA 88A Standard for Parking Structures》及修車場防火安全標準《NFPA 88B Standard for Repair Garages》；中國大陸為防止及降低停車空間的火災危害，制定《GB50067 汽車庫、修車庫、停車場設計防火規範》【45】，其規範適用對象包含：新建、擴建和改建的汽車庫、修車庫及停車場。其規範項目包含：分類和耐火等級、整體配置和平面配置、防火分隔和建築構造、安全疏散和救援設施、消防給水和滅火設施、供暖設備、通風和排煙設備、電氣設備等。

地下停車空間的火勢延燒非常快速，造成的溫度、熱輻射對人員及建物結構都會造成嚴重威脅。依據《建築技術規則》總則篇第三條規定:「建築物之設計、施工、構造及設備，依本規則各編規定」【32】，該規則內容計有 4 大篇，分別為總則篇、建築設計施工篇、建築構造篇及建築設備篇，有關適用地下停車空間之防火安全，主要規範於設計施工篇，重點條文說明如表 2-5、表 2-6 所示。

表 2-5 地下停車空間相關防火安全規定《建築技術規則》

規範項目	條文編號	條文說明	備註
停車數量	第59條	依都市計畫法令、都市計畫書或第59條規定	
集中設置	第59-1條 第1項 第3款	停車空間部分或全部設置於建築物各層時，於各該層應集中設置，並以分間牆區劃用途	
環境通風	第62條 第1項 第2款	設置戶外空氣之窗戶或開口，其有效通風面積不得小於該層樓地板面積百分之五或依規定設置機械通 風設備	
	第138條 第1項	應有2面以上直通戶外之通風口，或有代替之機械	附設停車空間超過 30 輛
	第2款	通風設備	
	第139條 第1項 第1款	設有各層樓地板面積1/10以上有效通風之開口面積者或設置機械通風設備能供給樓地板面積每1平方公尺25m^3/h以上換氣量。	車庫部分樓地板面積超過500 平方公尺者
	219條	地下建築物，其樓地板面積在1000m^2以上之樓層，應設置機械送風及機械排風；其樓地板面積在1000m^2以下之樓層，得視其地下使用單元之配置狀況，擇一設置機械送風及機械排風系統、機械送風及自然排風系統、或自然送風及機械排風系統。	
樓層淨高	第62條 第1項 第3款	樓層淨高，不得小於2.1公尺	
防火構造	第3章	建築物附設停車空間應依循整體建築物之防火規定	
	第137條 第1項 第2款	設在避難層以外之樓層者，應為防火建築物	附設停車空間超過30輛
	第202條	地下建築物供地下使用單元使用之總樓地板面積在1000m^2以上者，應按每1000 m^2，以具有1小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備及該處防火構造之樓地板予以區劃分隔。」	
防火區劃	第79-1條 第1項 第2款	防火構造建築物供左列用途使用，無法區劃分隔部分，以具有1小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備與該處防火構造之樓地板自成一個區劃者，不受前條第一項之限制。	

規範項目	條文編號	條文說明	備註
安全梯	第139條 第1項 第3款	直通樓梯應改為安全梯	車庫部分樓地板面積超過500 m^2者

(資料來源：本研究整理)

表 2-6《建築技術規則》防火構造建築物防火時效規定-第 70 條

主要構造部份	自頂層起算不超過4層之各樓層	自頂層起算超過第4層至第14層之各樓層	自頂層起算第15層以上之各樓
承重牆壁	1小時	1小時	2小時
樑	1小時	2小時	3小時
柱	1小時	2小時	3小時
樓地板	1小時	2小時	2小時
屋頂	0.5小時		
(一)屋頂突出物未達計算層樓面積者，其防火時效應與頂層同。 (二)本表所指之層數包括地下層數。			

(資料來源：參考文獻【32】)

台灣關於地下停車空間的滅火設備法規「各類場所消防安全設備設置標準」第 18 條規定室內停車空間在第 1 層樓地板面積 500 ㎡以上者；地下層或第 2 層以上樓地板面積在 200 ㎡以上者，應就水霧、泡沫、乾粉、二氧化碳滅火設備等選擇設置。

雖然法規允許室內停車空間得就水霧、泡沫、乾粉、二氧化碳等滅火設備選擇設置，然而因水霧、乾粉、二氧化碳等滅火設備各有其不同建置成本、資源整合、人員安全等不同考量。實際上發現台灣的地下停車空間大多採用泡沫滅火設備進行火災防護。

以水霧滅火設備設置標準第 68 條規定應設置排水設備，應設置高十公分以上之地區境界堤，或深十公分寬十公分以上之地區境界溝，並與排水溝連通，且需設置滅火坑具備油水分離裝置。對整體施工成本皆造成一定程度的影響，也降低開發商和設計單位採用水霧滅火設備進行地下停車空間防護的意願。

除了昇降式停車塔以外，地下停車空間極少設置二氧化碳滅火設備。主要擔心一旦滅火藥劑誤釋放，恐對人員造成窒息風險。而乾粉滅火設備則是顧慮乾粉釋放時對於人員視線之障礙及眼睛和呼吸系統的刺激性，且乾粉滅火設備在台灣市場上較不普及，在顧及設置成本和維護成本之下，停車空間幾乎不被選用乾粉滅火設備。

綜合上述，台灣地下停車空間幾乎皆採取泡沫滅火設備進行火災防護。表 2-7 針對室內停車空間適用的消防安全設備，從滅火藥劑、滅火原理、放水範圍、感知及放水機制、缺點或限制等構面進行比較。無論是哪個選項，對於停車空間的防護皆採取滅火機制的防護觀點，以撲滅火災或抑制火勢為對策。

表 2-7 地下停車空間適用消防安全設備表

滅火設備 / 項目	水霧	泡沫	二氧化碳	乾粉
滅火藥劑	水	氟基合成介面活性劑為主要成份	CO_2	第三種乾粉、磷酸鹽類乾粉
滅火原理	易燃蒸氣阻隔熱能和吸熱冷卻作用	窒息作用、易燃蒸氣阻隔作用和冷卻作用	窒息作用和冷卻作用	中斷連鎖反應之抑制作用和易燃蒸氣阻隔作用
放射範圍	以50 ㎡為原則	50㎡至 100 ㎡區域同時放射	全區放射方式	全區放射方式及局部放射
感知及放射機制	以感知撒水頭或火警探測器自動偵測火災或以手動啟動方式進行泡沫放射	以感知撒水頭或火警探測器自動偵測火災或以手動啟動方式進行泡沫放射	以火警探測器自動偵測火災或以手動啟動方式進行二氧化碳放射	以火警探測器自動偵測火災或以手動啟動方式進行乾粉放射
缺點或限制	需設置洩水坡度、地區境界堤（溝）、滅火坑、油水分離裝置	泡沫原液對環境和健康疑慮及泡沫釋放後的處理方式	二氧化碳誤釋放對於人員窒息風險之擔憂	顧慮乾粉釋放時對於人員視線之障礙及眼睛和呼吸系統的刺激性

(資料來源：參考文獻【33】)

表 2-8 滅火設備之適用火災類別

滅火設備 / 分類	水霧	泡沫	二氧化碳	乾粉
A 類火災	O	O		O
B 類火災		O	O	O
C 類火災			O	O
D 類火災				O

(資料來源：本研究案整理)

而除了上述水霧、泡沫、乾粉、二氧化碳等滅火設備外，尚有部分滅火設備可考慮配合使用：

1. 滅火毯（資料來源：參考文獻【A14】）

即使在電動汽車中，阻隔氧氣也是撲滅汽車火災的方法之一。任何汽車火災都是危險和有毒的。加油站、公路隧道、停車場或客運渡輪發生的汽車火災更可能是釀成一場災難。

滅火毯折疊後體積不大，可以單人背負，具有良好的機動性展開有 8x6m 的大小可適用於普通尺寸的車輛，包括 SUV、比如 Volvo XC90 和 Land Rover。

由於鋰電池接觸空氣燃燒產生高溫可達 800 度，如採用窒息方式將整個車體進行覆蓋，預估滅火毯需可承受 1,000 度以上之高溫，覆蓋後之滅火毯內尚有剩餘空氣有助於鋰電池燃燒，故覆蓋後灌入二氧化碳、或其他惰性氣體，將有助於火勢迅速得到控制。

圖 2-2 滅火毯示意圖
（資料來源：參考文獻【A14】）

2. 細水霧設備(資料來源：參考文獻【A14】)

由於細水霧與傳統撒水相比水粒徑較小(表面積較大)，因此吸熱效果能有效提高，大量細水霧及水蒸氣能排除火源附近之氧氣供應，使燃燒反應因缺氧而中止細水霧滯留於空中之時間較長，因此具備如水幕之功用，大幅遮蔽輻射及對流熱。

同時也因水霧粒徑較小，會隨著火災氣流被捲入汽車底部對電池組周遭進行冷卻，並包覆住電動車以便阻隔外部氧氣，其亦能大量稀釋易燃性與爆炸性毒性氣體之濃度水之比表面積則愈大，汽化成水蒸氣之速率則愈快降低火場溫度，減緩燃燒化學反應之速率能大幅降低火場溫度，減緩燃燒化學反應之速率有效節省水量 70~80%。

表 2-9 傳統撒水系統與 VID 低壓細水霧系統比較表

	傳統撒水系統	VID 低壓細水霧系統
工作壓力(Bar)	1-10	2.5-16
噴頭孔徑(mm)	10	2
水表面積(m^2)	3	30-60
放水密度 ($1/min/m^2$)	10	1.7~3.3
水源容量(頓)	90*15*20=27 (國內消防設置標準:20min)	47.23*7*30=9.9 (NFPA750 放水時間:30min)

（水表面積為 1 公升的水測量得）

(資料來源：參考文獻【A15】)

表 2-10 消防滅火系統比較表

	傳統撒水系統	VID 低壓細水霧滅火系統	高壓細水霧滅火系統
造價	便宜	中等，但經濟效益高	極高
維修保養	易	不易，因系統特殊性較高	
所需蓄水池容量	極大，因施水密度大	小，施水密度小	
降溫效果	差	極佳	
適用類型	油類火災無效	對 A、B、C 類火災佳	
損失	水損大於火損	大幅降低水、煙損、火損	
元件特性	壽命較低	許多元件可與灑水系統共用	需原廠整組系統元件進口
工作壓力	1~10bar	低，16bar 以下	極高，100bar 以上
噴頭			

（資料來源：參考文獻【A16】）

3. AVD 鋰電池專用滅火器

AVD(aqueous vermiculite dispersion)是經化學剝離產生微觀、個別的蛭石小板，其自由懸浮在水中，產生穩定的蛭石水分散液[3]。它以霧狀形式應用於鋰電池火災，將其撲滅並防止火勢蔓延。

AVD 可用於撲滅鋰離子電池火災、A 類火災與易燃金屬火災，蛭石小板可包覆燃料源，形成氧氣屏障且蛭石薄膜不導電對於 A 類火災 AVD 的滅火效能幾乎是水的兩倍。AVD 可作為防火層，以防止火勢蔓延。

表 2-11 AVD 各類常用型號規格

	AEROSOL	1 公升	2 公升	6 公升	9 公升
容量(L)	0.5	1	2	6	9
總重量(kg)	0.69	2.1	3.9	10.7	15
總高度(mm)	300	320	380	522	664
總寬度(mm)	95	85	110	170	170
最低工作溫度(°C)	5				
最高工作溫度(°C)	50	60			
釋放時間(秒)	90	25	50	120	180
釋放距離(m)	2m 內	1.5~2			
鋼瓶操作壓力(bar)	10.8	15			
滅火藥劑	AVD				
加壓氣體	氮氣				
售價(元)	2920	7160	11050	29000	40800
圖樣					

（資料來源：參考文獻【A17】）

[3] 資料來源：http://www.rihsi.com.tw/chinese/products/edit.php?type=fire&pid=1

4. 浸漬水槽

哥本哈根與比利時的消防單位開發一種電動車火災專屬的緊急應變車，外觀像是一個標準貨櫃上方採用開放式設計，能夠將悶燒中的電動車吊入貨櫃當中，接著透過水泵將水注入貨櫃淹沒燃燒中的電動車，變成一個「大水缸」放置燃燒中的電動車，如此一來就能為其降溫。

不但不需要持續噴灑水霧，同時還是一個相對安全的反應空間。而且還可更有效控制撲滅電動車時的廢水，減少對於環境衝擊。

圖 2-3 緊急應變車實體圖

（資料來源：參考文獻【A18】）

5. 以底盤噴水進行降溫

水是最佳降溫利器，以往消防人員只要火災都用消防瞄子射水對火點進行降溫滅火，此舉雖可有效降溫但耗水量大，奧地利消防服務公司 Rosenbauer 開發新的電動車滅火系統，以千斤頂頂起車輛後將此設備深入車輛底盤，便可退到約 7.5 公尺外操作消防作業。也能保證一定程度的安全性，並降低水的使用量。

圖 2-4 Rosenbauer 開發之設備示意圖

（資料來源：參考文獻【34】）

地下層建築與地上層建築火災相比，由於出入口相對較少，當燃燒過程供氧不足將造成可燃物不完全燃燒並產生大量有毒煙氣，短時間內將擴散至整個地下停車空間，對火場內部尚未安全逃生的人員造成生命威脅。此外聚集於火場的煙流溫度極高，可能在短時間達到800℃以上【14】。因此對於地下停車空間而言，通風及排煙系統設計須具備平時通風，災時排除火場燃燒產生的大量煙氣與熱量，以及稀釋火災產生的有害氣體濃度(例如：一氧化碳、氮氧化合物、碳氫化合物與揮發汽油)，防止煙氣蔓延及保障人員生命與財產安全之目的。

多數學者建議地下停車空間設置機械排煙設備時，其排煙量不小於 6 次/h；換氣方法可考慮車道自然換氣(車道進風面風速建議小於0.5m/s)或採用機械供氣系統，但同時為避免火場有毒氣體從車道溢出，送風量應小於排風量(一般建議為排風量的 80%~90%)。建築場所之排煙類型一般分成自然排煙與機械排煙，簡述兩者差異如下：

（1）自然通風：

利用室外風力與高溫氣流浮力的相互作用，將高溫煙氣從建築物與外部空間直接相通的孔洞排出，這種排煙方式被稱為自然通風。常見自然通風排煙方式包含豎井排煙與採光窗井排煙【46】。

（2）機械排煙：

在設置區域之場所內部設置完整的排煙系統(包括：排煙風機、排煙風管、排煙風口、防火閘門等)，利用排煙風機將防護區域內部的煙氣流進行強制排煙。

通風與防排煙系統應獨立於建築內部的其他通風系統，大型綜合地下停車空間由於其樓層面積較大，一般設計採用分區規劃。舉例來說，常見的方式為將停車空間劃分為多個面積相等的停車區域，這種分區規劃方式有助於快速辨別。

對於停車空間的排煙量要求，中國《汽車庫設計防火規範》中明確規定，面積超過 2,000m^2 的地下停車空間應設置機械排煙系統，同時排煙風機排煙量應按照換氣次數不小於 6 次/小時。此外排煙量按防煙分區計算：當排煙系統負載一個防煙分區時，應按該煙分區面積每 m^2 不小於 60m^3/h 來計算；負載 2 個或 2 個以上防煙分區時，應按最大防煙分區面積每 m^2 不小於 120m^3/h 來計算。

排煙系統風機的最小排風量不應小於 7,200m^3/h。若停車空間出入口的風速超過 0.5m/s 時，可作為自然補氣口並降低供氣設備的補風量，其補風量不得小於排煙量的 50%。為使建築空間與設計之消防設施、設備得以相輔相成達到防災之效果。

誘導式風機系統最早是由瑞典 ABB-Asea Brown Boveri 所開發生產的 DIRIVENT 系統，自 1974 年開發以來已有德國、日本、韓國等陸續開發此類產品，是一種適合廣大空間之通風換氣系統，亦被應用於大型地下停車場之通風換氣。【37】

誘導式風機的設計理念是以高壓風機，透過螺旋風管及噴嘴，噴出少量高速空氣，當空氣流速大時，便能帶動周圍氣旋，造成壓力差，進而帶動流場，將廢氣帶到主排氣機處排出，形成置換空氣之功能。

誘導式風機特性是以螺旋風管代替風管，與誘導式風機連接，其主幹管直徑在 25~35cm 之間；支幹管直徑依風量遞減並接至噴嘴。由於支管直徑小，可裝於樑下或穿樑而過，每一支噴嘴之直徑不同，

並搭配停車位設置，一般以一個停車位或是每 20~30m^2 安裝一只噴嘴。噴嘴可由水平式引導或結合垂直式噴嘴，使空氣混合擾動。每台誘導式風機可接 20~30 只噴嘴（30mm），主機乃藉由高壓傳送，故必須加裝消音箱。

此種方式之優點為適用空間較大場所，其管路設計活潑，可變性大，管路較小且可穿樑而過，無壓迫感，針對建築死角，可以高壓氣流帶動廢氣流動。但是此種方式也有噪音過大的缺點，而須搭配消音箱，成本較高，而且此系統為專業設計，乃是利用壓力差設計管路及噴頭位置、方向，常因設計系統之壓力不足或過大，造成空間內空氣之氣流擾動效果不佳。

跟隨著時代的演變，建築工法的提升，在地下停車場的通風進排氣設備上也漸漸的捨棄了舊式傳統的風管進排氣做法，進展出新的工法，不但節省了時間，也省下許多的建築空間，由於現有市場上的通風設備大多改用導流式風機來帶替傳統式風管，傳統式風管的設計也慢慢減少淘汰，而誘導式風機的方式由於設計上較為複雜較具專業性且成本增加，所以目前市面上還處於推廣階段，大多以大而複雜的停車空間較能見到。【38】

表 2-12 誘導式風機規格

型號	風量 (m3/h)	出口風速 (m/s)	功率 (w)	射程	噴口型式
YDF-I-6L	650-850	11-15	100	10	Ø80×3
YDF-I-6W			120	10	Ø80×3
YDF-I-12	1150-1350	14-24		15	Ø80×3
YDF-II-2.25	2300	風壓 1300Pa	180	/	Ø35×23
YDF-II-2.5	3600	風壓 1300Pa	2200	/	Ø35×36
YDF-II-2.8	6000	風壓 1300Pa	4000	/	Ø35×60

(資料來源：參考文獻【39】)

在空間建築設計方面，主要分為防火區劃與防煙區劃等兩類【5】，簡述兩者差異如下：

防火區劃：

防火區劃用於防止火煙蔓延擴大，造成救援及人員疏散的阻礙。地下停車空間防火分區的劃分，應考量汽車流通與車位停放數量的合理性，並兼顧建築平面分割的方便性，每個防火分區間可以使用防火牆進行分隔。中國《GB50067》第 5.1.1 條指出，地下停車空間的單一防火區劃所允許的最大建築面積為 2,000m^2，若區劃內部設有自動滅火系統則可擴大到 4,000m^2。

有關水平區劃部分，依建築設計施工編第 79 條之 1 規定，防火構造建築物總樓地板面積在 1,500m^2 以上者，應按每 1,500m^2 具有 1 小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備與該處防火構造之樓地板區劃分隔。防火設備並應具有 1 小時以上之阻熱性；但地下停車空間及其他類似用途建築物防火構造建築物，無法區劃分隔部分，以具有 1 小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備與該處防火構造之樓地板自成一個區劃者，亦可達到水平區劃要求。

防煙區劃：

防煙區劃主要用於火災發生時，避免火場高溫煙氣入侵非起火區域。多數國家規定每個防煙分區的建築面積為 500m^2，且不能跨越防火區劃。防煙區劃一般以防煙垂壁、隔牆或天花板下方凸出固定尺寸樑來劃分。防煙垂壁材質必須使用非燃材料製作。

對於地下停車空間而言，受限於停車空間高度及便於汽車行駛，建議防煙垂壁採自動型，平時在非火災發生可置於樑內或懸吊於天花板，災情期間才放下阻擋煙霧流竄。中國《GB50067》第 8.2.1 條規

定，除敞開式汽車庫、建築面積小於 1,000m^2 的地下層汽車庫和修車庫外，汽車庫、修車庫應設排煙系統並劃分防煙分區，防煙區劃的建築面積不宜超過 2,000m^2。

除上述提及的排煙設備外，消防滅火系統的設置對於火勢控制更為關鍵【47】。現行地下停車空間滅火設備設置要求包含：各類場所消防安全設備設置標準第 18 條第 1 項規定，「地下層或第二層以上樓地板面積在 200m^2 以上者，得就水霧、泡沫、乾粉、二氧化碳滅火設備等選擇設置之。

一、水霧滅火設備規定：

水霧滅火滅火設備噴頭配置之水平距離不大於 2.1m 且而噴頭配置數量依其裝設之放水角度、放水量及防護區域面積核算，放射區域每 50m^2 一區為原則，放射量不小於 20 LPM/m^2，放射壓力不小於 2.7 kgf/cm^2。

二、泡沫滅火設備規定：

各類場所消防安全設備設置標準第 71 條規定，「室內停車空間或汽車修理廠等場所，使用泡沫噴頭，並樓地板面積每 9m^2 設置一個，使防護對象在其有效防護範圍內，並依照不同的泡沫液有不同之放射量，連續放射時間為 20 分鐘。此外室內停車空間有複層式停車設施者，其最上層上方之裝置面應設泡沫噴頭，並應延伸配管至車輛間以及礙於構造無法在最上層以外之停車平台配置時，則在其四周設置泡沫噴頭。一般泡沫滅火設備所採用的感知元件，大多僅達到第二種一般反應型的感知能力，因此對於燃燒猛烈的油類火災或本研究所探討的電池類火災，恐有無法快速啟動滅火設備之虞。傳統汽車燃燒可高達 400℃；電動車燃燒

可高達 1000℃，因此起火車輛之相鄰車距不足或無適當防火阻隔，很容易引起車輛延燒。

三、二氧化碳滅火設備規定：

二氧化碳滅火設備以全區放射方式所設之噴頭能使放射藥劑迅速均勻地擴散至整個防護區域，放射壓力分成高壓型及低壓型，滅火藥劑量依照保護區域之體積大小而有所不同，而放射時間皆為 1 分鐘內將全部的量發射完畢。

四、乾粉滅火設備規定：

乾粉滅火設備供室內停車空間使用之滅火藥劑，以第三種乾粉為限，滅火藥劑量也依照全區放射以及局部放射而配置，放射壓力不小於 0.1Mpa，放射時間於 30 秒內全部放射完畢。

現行設置的泡沫及其他撒水滅火設備是否仍能有效應用於電動車及其充電系統裝置所產生的火災，並具備正向且高效效果尚未有專家學者進行相關研究，因此本研究團隊將進行少量電池模組作為測試對象，探討泡沫及其他撒水滅火設備對於電池類火災是否具有正面抑制效果。傳統撒水系統已有百年歷史，水作為中性物質具備環保、經濟、對人體無危害等特點，常被作為滅火系統的工作流體使用；泡沫滅火系統則用於撲滅固體、非水溶性液體火災，其優點包含滅火效率高、經濟實惠、安全可靠；缺點是滅火後產生大量廢液，造成生態環境汙染。

傳統設置的泡沫滅火設備是採同時間啟動放射的滅火設備，然而時常聽聞故障產生泡沫水損的情況發生，如今年 3 月底，新竹停車場因感應器故障，造成數十輛汽車被覆蓋泡沫，導致車體漆面腐蝕的財產損失，後續還須請人現場清消與更換相關構件，如圖 2-5 所示。為

改善開放式泡沫系統對於誤動作造成的損失，日本、中國及某些歐美國家陸續開放使用密閉式泡沫滅火設備作為停車空間的滅火設備設置，並訂有相關試驗及設置與檢修標準。密閉式泡沫滅火設備，其設置方式較開放式泡沫滅火設備簡易，能有效減少整體構件及配管且其功能類似自動撒水設備具自動感知自動撒水之性能【48】。若地下停車空間未來考量使用密閉式泡沫滅火系統，當其發生誤動作時，所造成的波及範圍將僅剩故障的撒水頭之防護區而非全區，可降低一定程度財物損失。開放式與密閉式泡沫系統差異如圖 2-6 所示。

圖 2-5 泡沫系統誤動作造成財物損失

(資料來源:東森新聞節錄)

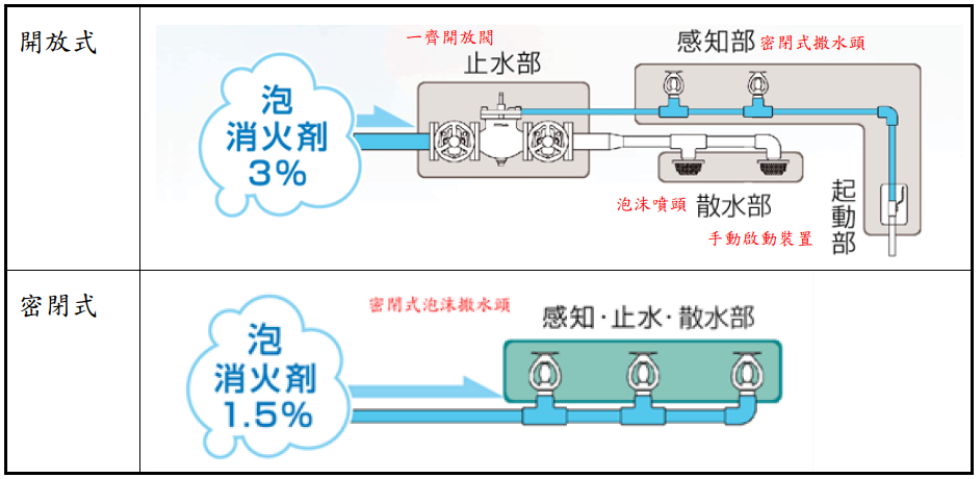


圖 2-6 開放式與密閉式泡沫撒水頭比較圖

(資料來源：參考文獻【48】)

密閉式泡沫滅火設備，其放射裝置不具發泡裝置，而是將泡沫水溶液從密閉式泡沫撒水頭之迴水板放射出，再透過與大氣摩擦及與可燃物或油面碰撞方式進行二次發泡，並覆蓋正在燃燒的可燃物上方。綜上說明，開放式泡沫滅火設備與密閉式泡沫滅火設備之滅火原理相同，其二者設備概要比較如表 2-13 所示。泡沫滅火設備滅火原理簡述如下：

(一)窒息作用

B 類火災滅火原理之一，透過用泡沫覆蓋燃燒之油面，限制供給燃燒需要的氧氣，達到滅火及抑制作用。

(二)燃燒阻斷作用

同屬 B 類火災滅火原理之一，透過泡沫覆蓋燃燒油面及覆蓋油面間之水成膜的薄膜，限制供給燃燒需要的可燃性燃料蒸氣，達到滅火及抑制作用。

(三)冷卻作用

同屬 B 類火災滅火原理之一，也是所有 A 類滅火之滅火原理，使用泡沫水溶液之比熱與蒸發時的潛熱，冷卻然霧霧之周圍，達到滅火及抑制作用。

表 2-13 泡沫滅火設備系統差異比較表

系統型式	開放式	密閉式
發泡倍率	發泡倍率 5 倍以上。	分為發泡倍率 5 倍以上，以及發泡倍率 5 倍以下。
放射範圍	放射面積為 $50m^2$~$100m^2$ 之間。	僅放射被啟動的泡沫頭防護面積，非全區放射。
感知與放射	分成感知部與放射部，透過感知撒水頭感知後，再由泡沫噴頭放射。	結合感知與放射功能於一體的設備，其靈敏度屬於快速反應型，因此能早期偵測火災，並達快速啟動滅火設備。

(資料來源:本研究整理)

第三章 鋰離子電池相關文獻分析

第一節 鋰離子電池概要

電池(Battery)是一種儲能裝置，透過化學能轉換直流電能使用，一般可分為一次電池與二次電池。其中一次電池顧名思義為僅能使用一次的電池，無法透過充電方式補充轉化的化學能，例如：鹼性電池、水銀電池、乾電池等；二次電池，意即電能消耗完畢仍可再次充電使用，例如：鉛酸電池、鎳氫電池、鋰離子電池。而燃料電池與太陽能電池雖無法再次充電，但只要持續供應氫氣、氧氣或太陽能即可再次產生電能，被稱為發電式電池或連續電池。現階段電動車屢見火警災況，使得國人對於電動車或鋰離子電池的使用有安全上的考量及顧慮。鋰離子電池的需求量隨著動力電池與中大型電池發展趨勢呈倍數成長。目前市面廣泛使用的電池類型大致分成方型電池、軟包電池及圓柱型電池三款，如圖 3-1 所示。

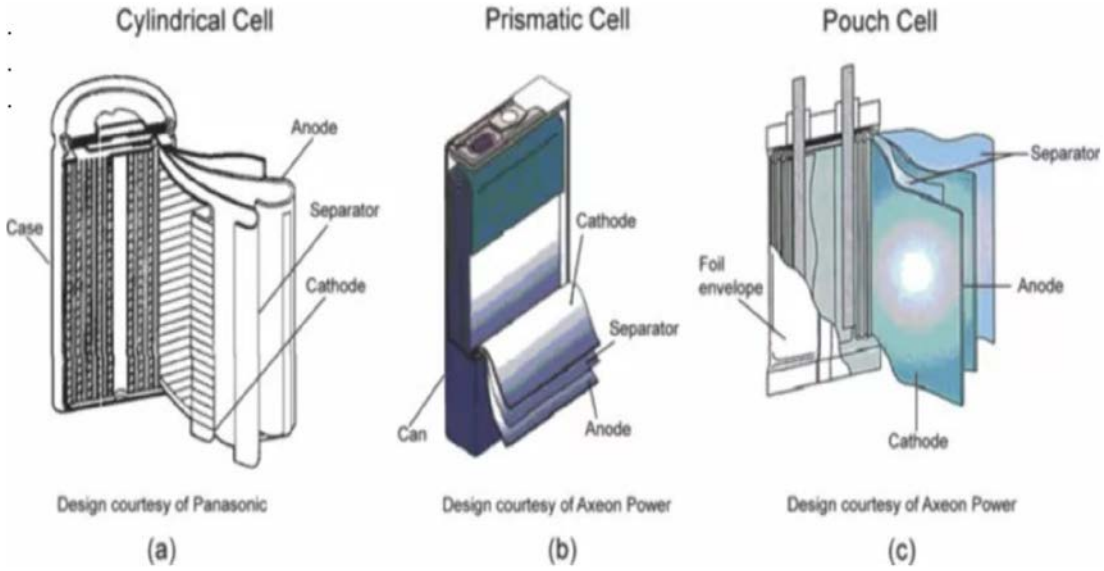


圖 3-1 鋰電池結構圖(a-圓柱型；b-方型；c-軟包型)

(資料來源：參考文獻【A1】)

圓柱形電池具有非常高的機械穩定性，然而模組組裝排列上，受制於圓柱型電池的外型，其電池模組的組裝體積會大於其他兩種形狀的電池，但產生的多餘空間可作為散熱使用；方形電池通常作為牽引電池的組裝元件，各模組間可層層堆疊排列且不占多餘空間，但因缺少多餘散熱空間，其熱管理系統相當重要；軟包電池則是將電池結構放置於軟性箔袋中，而非剛性容器，因此軟包電池內部可填充大量電解液，提供高能量密度，但使用過程因避免容器受外力破壞而導致電池失控。

由圖 3-2 可間接說明，不同電池類型在進行排列組合成電池模組時，會因為空間格局而影響電池密度與產生不易散熱的問題。

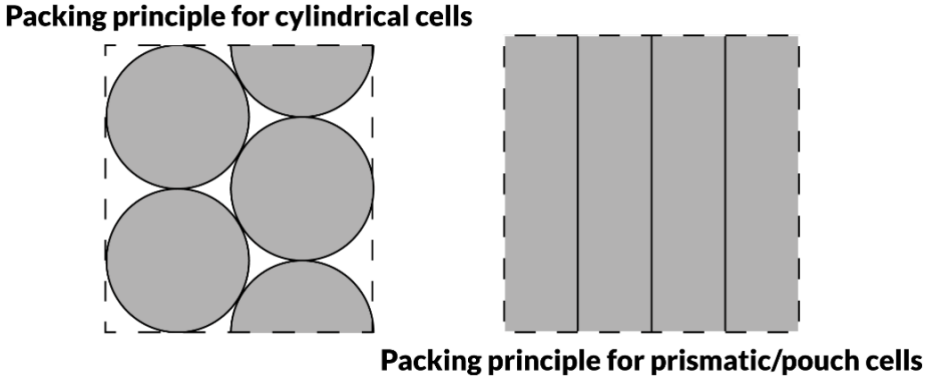


圖 3-2 不同電池類型組裝間隙會影響模組密度與散熱性能
(資料來源：參考文獻【49】)

鋰離子電池種類主要根據鋰離子電池的正極材料進行區分，常見正極材料包含：錳酸鋰、鈷酸鋰、鈦酸鋰、三元鋰（鎳鈷錳，鎳鈷鋁）、磷酸鐵鋰【128】。各種電池種類的特點簡述如下：

(1) 鈷酸鋰電池：容易受大電流或高溫環境影響，當超過 1C 的充放電速率即會造成內部結構破壞而電容量縮減。

(2) 錳酸鋰電池：具有較低的電池內阻且較不受大電流影響，具有較好的穩定性。常用在醫療設備和傳動系統中。

(3) 鈦酸鋰電池：低溫或快速大電流充放電下具有優秀性能，能夠承受最高 10C 的高倍率電流。常用於不斷電供應系統。

(4) 三元鋰電池：具有較高的比能量及比功率，經常作為電動車的儲能電池，但其在高溫環境可能導致失控。

(5) 磷酸鐵鋰：擁有極佳的耐用性及熱穩定性且製造成本較低。磷酸鐵鋰電池相較於其它電池具有較高的安全性，其製成材料氧化鐵、碳酸鋰不含任何貴金屬且在中國儲量豐富，具有較低的生產成本。同時，磷酸鐵鋰電池具有較長的迴圈壽命，能夠較好的符合新能源汽車平均使用時長。綜上所述，本研究將挑選磷酸鋰鐵電池作為本研究之實驗對象。

本研究將探討鋰離子電池的火災特性及防災策略。鋰離子電池主要由正極、負極材料、隔離膜、電解液、外殼等構件組成(圖 3-1)，經由串聯、並聯方式結合 BMS 電池管理系統晶片基板(Battery Management System)成為電池模組【50】。鋰離子電池組成架構如圖 3-1 所示。

1. 正極 (Positive electrode)：

鋰離子電池正極材料為氧化金屬。依據正極材料區分種類，包含：層狀結構_鈷酸鋰 ($LiCoO_2$)、尖晶石結構_錳酸鋰 ($LiMn_2O_4$)、橄欖石結構_磷酸鋰鐵($LiFePO_4$)及三元系($LiNiCoMnO_2$，NMC)等。鋰離子電池正極材料在充電狀態存有化學不穩定性，此過程可能與電解液產生化學反應而釋放熱能，因此電池使用過程中的安全性問題將成為現階段急需解決的課題之一。

現今主流可攜式電子產品(如：手機、筆記型電腦等)的儲能電池種類大多以鈷酸鋰電池為主。鈷酸鋰電池具有高放電電壓、性能穩定、容易合成等優點被廣泛使用，然而鈷酸鋰電池在操作電壓 4.2 V 以上容易出現結構崩塌而引起熱失控現象，許多研究指出鈷酸鋰電池材料的熱穩定性較差且鈷金屬為稀有金屬，製作成本相對高且對環境具有污染性。

鋰鎳電池生產過程存有潛在不安全的疑慮，故生產與使用者較少；錳酸鋰電池具有高電容量、安全、高功率放電等優點，被廣泛應用於手工具中；磷酸鋰鐵電池雖有良好的熱穩定性及循環性能，同時材料製造成本也較鈷酸鋰電池、鋰鎳電池、錳酸鋰電池低，但磷酸鋰鐵電池在同規格下，電容量較其他材料低【51】【52】。鋰離子電池之正極材料如表 3-1 所示。

表 3-1 鋰電池的正極材料

	鈷酸鋰 $LiCoO_2$	鋰鎳 $LiNiO_2$	錳酸鋰 $LiMn_2O_4$	磷酸鋰鐵 $LiFePO_4$
工作電壓 (V)	3.7	2.5-7.0	3.0-4.0	3.4
操作溫度	< 180 ºC	< 180 ºC	< 180 ºC	< 300 ºC
電容量 (mAh/g)	140-160	190-210	100-120	120-160
循環壽命	中	中	低	高
特性	市面常見使用	電容量高，但安全性較差	安全、穩定性佳	安全、穩定性佳
缺點	鈷金屬價格較高	合成不易，有安全性疑慮	電容量低	同規格下，電容量低

(資料來源：參考文獻【53】)

2. 負極 (Negative electrode)：

一般的電池多用石墨作為負極材料，鋰離子負極材料通常為碳，負極材料常用石墨【11】。

3. 電解液 (Electrolyte)：

電解液在鋰離子電池中扮演重要的角色，主要功能為傳導鋰離子及隔離正負極直接接觸，僅提供鋰離子可以在正負極間順利傳遞。電解液工作溫度通常介於-20°C 至 50°C 之間【54】，當超過工作溫度環境時，將產生永久性破壞。

現階段由於電解液的易燃性，影響鋰離子電池使用的安全性，如表 3-2 所示。最易燃的溶劑是乙酸乙酯(EA)，這是由於其閃點低於零度以下，當其被火花或火焰引燃時，乙酸乙酯(EA)會釋放足夠的蒸氣以維持燃燒。

表 3-2 常見電解液的化學特性

電解質類型	沸點【℃】	自燃溫度【℃】	閃點【℃】	可燃極限(下限/上限)【%】
Ethyl Acetate (EA)	77	427	-3	2.2/9
Dimethyl Carbonate (DMC)	91	458	16	4.22/12.87
Ethyl Methyl Carbonate (EMC)	110	440	24	-/-
Diethyl Carbonate (DEC)	126	445	25	1.4/14.3
Ethylene Carbonate (EC)	248	465	143	3.6/16.1
Propylene Carbonate (PC)	242	455	132	1.8/14.3
Gasoline	30-210	>350	<-40	1.4/7.6
Diesel	>180	240	>61.5	0.7/5.0

(資料來源：參考文獻【55】【56】)

理想電解液需要具備下列特性，包含：良好導離子率、電子絕緣體、低熔點、高沸點、低黏度、非易燃、無毒性汙染物質等等。電解液大致可以分成 3 大類：液體電解質、固體電解質、離子型電解質。目前鋰電池市場上以有機液體電解質為主，有機電解質裡面的組成包含溶劑和鋰鹽。

溶劑：大多由環狀碳酸酯類組成，例如：碳酸乙烯酯、碳酸丙烯酯（Ethylene Carbonate（EC）、propylene carbonate（PC）），以及鏈狀的碳酸類，如碳酸二甲酯、碳酸二乙酯、碳酸甲乙酯（dimethyl carbonate（DMC）、Diethyl Carbonate（DEC）、Ethyl Methyl Carbonate（EMC））等。

鋰鹽：電解液另一個重要的組成，又稱為鹽橋。常見鋰鹽包含：$LiPF_6$、$LiBF_4$、$LiClO_4$。目前市場上最常用的是 $LiPF_6$，因其導電度高、解離性好。LiBF4 電荷轉移阻抗低，但是價格較貴，且溶解度較低，因此較少使用。$LiClO_4$ 中高氧化態的氯容易與有機溶劑產生高溫，有安全上的疑慮。目前商業化的電解液多是 $LiPF_6$ 與 EC 組成的多元系電解液。

4. 隔離膜 (Separation film)：

隔離膜置於正負極板間，是一種微孔性或多孔性的薄膜，主要隔離正負極板，防止短路並提供正極與負極電子通過的功能，但其關鍵功能在於具備關閉或阻斷功能，意即電池出現異常溫度上升，將即時阻斷離子通道的細孔，使電池停止充放電反應。主要以高分子材料製成，如聚乙烯(PE)、聚丙烯 (PP) 或其附合膜等。

當新電池首次充電時，部份電解質與電極和電解質交界面附近游離的鋰離子發生還原反應，在碳質陽極表面形成一層亞穩態烷基碳酸鋰、聚合物和氣態產物的薄膜。鋰離子能夠通過滲透穿過這層薄膜，

但是電子和任何其他漂浮在電解質中的化學物質不能通過這層薄膜。當薄膜足夠厚時，其覆蓋整個陽極表面以阻止所有電子進入，通常把這層薄膜稱為 SEI 膜，它可以有效地防止電解液由於化學還原而腐蝕帶電陽極，但是並不影響鋰離子通過時的傳輸速率。當 SEI 膜處於較高溫度環境將逐漸分解和溶解，使得陽極暴露在電解液中。

5. 罐體 (Shell)：

電池的外殼，不同用途之鋰電池，其外殼各其所異，如鋼、鋁或聚合物等材料【50】。

鋰離子電池由正極、負極、電解液和隔離膜所組成。鋰離子電池的工作原理主要透過正負極間的電位差產生氧化還原反應來儲存/釋放能量。工作原理簡述如下：鋰離子電池充電時，Li^+從正極脫出，經電解質嵌入到負極，負極處於富鋰狀態，正極處於貧鋰狀態，此時電子的補償電荷從外電路供給負極，以確保電荷平衡，放電過程則為相反【50】。其充放電反應式如下【57】：

正極半反應式：

$$LiMO_2 \leftrightharpoons Li_{1-X}MO_2 + xLi^+ + xe^-$$

負極半反應式：

$$nC + xLi^+ + xe^- \leftrightharpoons Li_xC_n$$

全反應：

$$LiMO_2 + nC \leftrightharpoons Li_{1-X}MO_2 + Li_xC_n$$

備註：代號【M】可為金屬 Co、Fe、Ni、Mn 等材料，意即正極材料可能為 $LiCoO_2$、$LiNiO_2$、$LiMn_2O_4$、$LiFePO_4$ 等【11】。

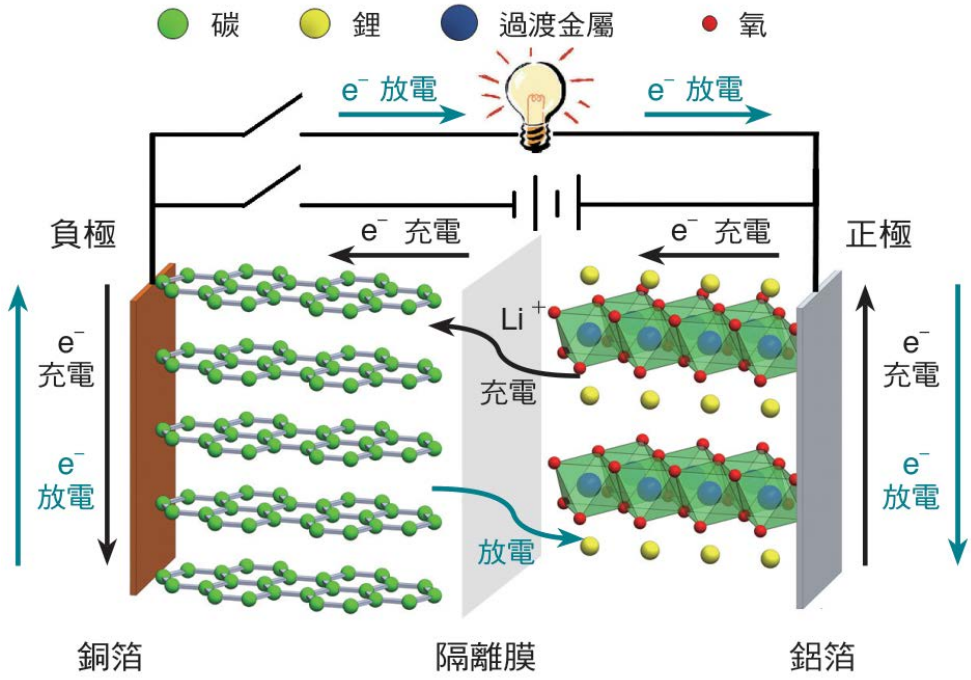


圖 3-3 鋰電池充放電概念圖

(資料來源：參考文獻【58】)

第二節 電動車發展概要

電動車發展歷程可追溯到 19 世紀末，然而當年的電動車因行駛里程較短、充電不方便且充電成本太高，使得市場被燃油車給取代。如今隨環保意識抬頭，各國積極推動潔淨無汙染的新興能源，各大車廠也積極開發純電動車的產品。簡述電動車成長歷程如下：

- 1873 年電動汽車出現於英國。
- 1886 年 Karl Benz 發明內燃引擎汽車。
- 1900 年美國生產 4,159 輛汽車；電動汽車 1,575 輛；內燃機汽車 936 輛。
- 1908 年 Henry Ford 開發汽油車價格為電動車的一半。
- 1920 年電動車逐漸減少，退出一般市場，轉為室內空間與特殊用途車輛。
- 1997 年氣候變化公約國制定京都議定書，電動車再次受到重視。
- 1997 年豐田汽車(Toyota)發表油電混合車 Prius 省能低污染。
- 2009 年 i-MiEV、Leaf 等多款量產型電動車問世。
- 2015 年超過 50 款電動車量產，銷售超過 100 萬輛。

各國政府為解決能源匱問題而積極發展綠色能源產業。鋰離子電池具有能量密度高、放電平穩、充放電循環長等優點。使得高能量密度鋰離子電池不管在電動汽車、可攜式電子設備、分散式儲能系統等需求量越來越大，惟鋰化學特性非常活潑，具高度危險性，若操作不當可能發生起火燃燒等意外。根據交通部統計數據顯示，台灣汽機車總數位居亞洲之冠，約為 2,100 萬台，幾乎每位國人都至少擁有一輛車。中央政府為解決汽機車帶來的交通堵塞與空氣污染問題，積極發

展綠色能源並擬定政策法規、獎勵補助，推動電動汽機車產業發展。我國中央政府預計於 2030 年全面使用電動公車及電動公務車、2035 年禁售汽油機車、2040 禁售汽油車，並預計興建約三千座充換電站。因應該股趨勢潮流，台灣中油總經理李順欽先生提出「2020 年推出自有品牌電池、建置千座智慧綠能加油站，打造智慧綠色生活圈」。

因應全球氣候暖化變遷所帶動的環境衝擊，各國政府皆朝節能減碳的方向邁進，主要執行方式大多採用補貼購車、財稅補助、基礎充電設施布建、補助研發及示範計畫等政策推動。燃油車輛已經成為改善全球暖化與空氣污染的絆腳石，2016 年德國參議院投票決定，將於 2030 年禁止所有以汽油和柴油為動力的車輛，這項決議目前還沒有法律約束，但德國三大汽車製造商(Volkswagen、BENZ、BMW)都表明將極力推動電動車的發展。近年來空氣污染與溫室效應等環保意識的抬頭，各國政府紛紛制定獎勵辦法來補助電動車(含純電動車與油電混合車)發展，2015 年起全球電動車銷量已超過 100 萬輛，其中以中國、美國、荷蘭、挪威與英國為前五大銷售國。目前純電動車的續航力、充電方便性與電動車售價還難與傳統汽油車競爭，其關鍵點就是車輛內部的動力電池的製造成本，而電池規格會大幅影響續航里程與價格。為解決電池製造成本與規格技術的突破，Tesla 投資鉅額建造電池工廠，目標降低電池成本 30%及提供 50 萬輛電動車的電池產能；Nissan 公司於 2016 年新款 Leaf 搭載 30kWh 的鋰電池動力模組，相較舊款 24kWh 動力電池模組，其重量僅增加 21kg，續航力則由 160km 增加至 250km。

為配合全球節能減碳的政策以及環保訴求，各國相繼投入電動車產業發展，並推動燃油車轉換成全電動化或油電混合的轉換期，減少全球溫室氣體的重要措施。現階段除純電動車，亦有油電混合車

(Hybrid Electric Vehicle , HEV)與插電式油電混合電動車(Plug-in HEV, PHEV)的類型。油電混合車主要電力補充來源為車上引擎，其引擎運轉過程仍會排放污染，但與純汽油車相比可降低污染程度；插電式油電混合電動車(Plug-in HEV, PHEV)則可使用外部電源充電，例如使用住家插座即可充電，當需行駛較遠或電池電量不足的情況下，將啟動引擎補充動力或對電池充電。此時為推動電動車產業的發展，其電池充電方便性除考慮充電站的覆蓋範圍外，也需同時考量充電速度與充電標準。

基於各國政府的積極作為，電動車年銷售量節節攀升，其中，日本、英國、法國首重電動車充電站的完善擴充；美國與中國積極提升電動車的市場占有率。電動車輛依電動化程度，由淺而深分別是：油電混合車(Hybrid Electric Vehicle, HEV)、插電式油電混合車(Plug-in HEV, PHEV)、增程式電動車(Range Extended Electric Vehicle, REEV)、純電動車(Battery Electric Vehicle, BEV)、燃料電池電動車(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)，如圖 3-4、表 3-3 所示。

表 3-3 各種電動車輛綜合比較

電動車種類	HEV	PHEV、REEV	BEV	FCEV
動力來源	馬達、引擎	馬達、引擎	馬達	馬達
電池容量	中	大	很大	很小
動力獲取來源	加油站	加油站(很少) 電網充電設施	電網充電設施	氫氣補充設備
特色	行駛污染低。 燃油經濟性比內燃機高。 行駛里程長，車輛價格高。		行駛零污染或極低污染。 能量效率高。 車輛價格高。 不全依賴石油。 BEV 及 FCEV 受限於能源儲存量，其行駛里程較短。 車輛價格高。	

(資料來源：參考文獻【59】)

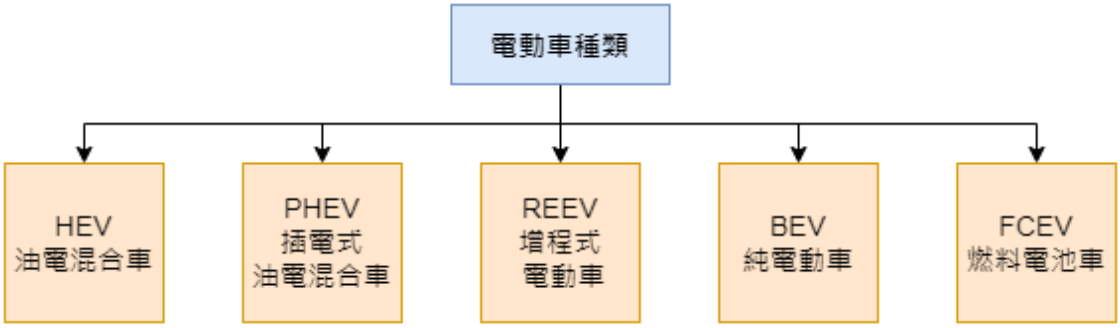


圖 3-4 電動車種類

(資料來源：參考文獻【59】)

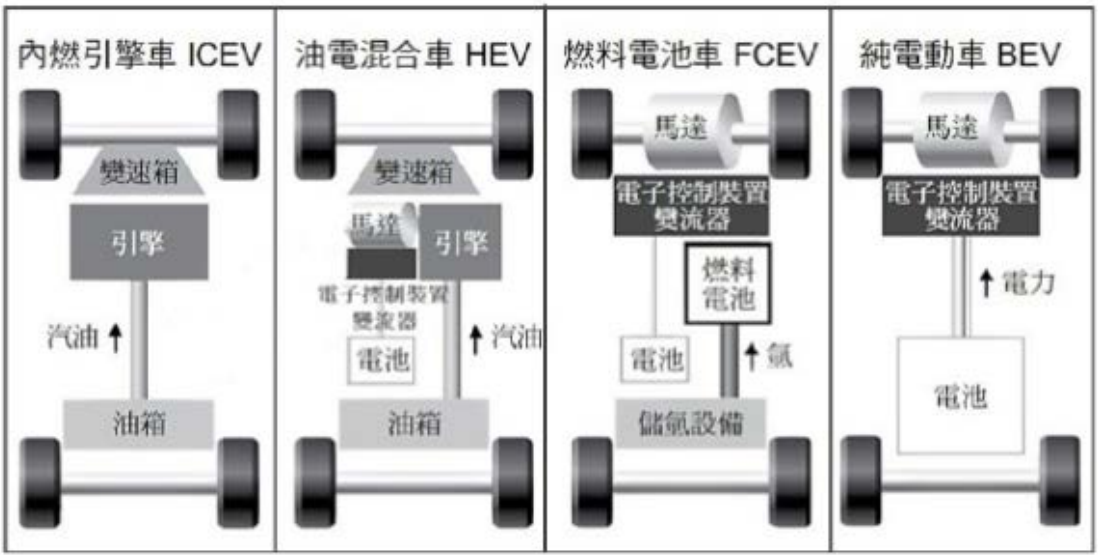


圖 3-5 電動車動力結構比較圖

(資料來源：參考文獻【133】)

油電混合車(Hybrid Electric Vehicle, HEV)：

油電混合輛係指同時配備電動馬達與內燃機的電動車輛，同時擁有內燃機與電動馬達的優點，使得性能與效率都得到提昇。舉例來說，藉由內燃機燃料添加方便且快速的優點，改善純電動車續航力不足或充電不方便的缺點。其運轉原理根據車輛運行階段相互使用，例如啟動及低負載時，使用電動馬達取代引擎燃燒不良造成油耗高、污染差的缺點；中高車速因引擎效率較佳，則使用引擎驅動；爬坡、加速、高負載時，引擎與馬達一同使用；煞車時可用再生煞車，意即將車子動能轉換為電能；電池電量不

足時，使用引擎驅動發電機對電池充電；停車時引擎自動熄火，減少油耗污染【59】。

油電混合車整合電力系統與內燃機，使內燃機可運行在高效率、低污染的範圍。目前依據電動輸出比例與系統功能可細分為：輕型混合動力系統(Micro HEV)、中型混合動力系統(Mild HEV)、全混合動力系統(Full HEV)，簡述三者差異如表 3-4 所示：

表 3-4 油電混合車各系統類型差異說明表

系統類型	差異說明
輕型混合動力系統	具備怠速熄火系統(Start-stop System)。 具備再生煞車充電(Regenerative Brake)。 不具備電動動力輸出。
中型混合動力系統	具備怠速熄火系統(Start-stop System)。 具備再生煞車充電(Regenerative Brake)。 馬達可輸出動力輔助引擎。
全混合動力系統	具備怠速熄火系統(Start-stop System)。 具備再生煞車充電(Regenerative Brake)。 馬達可直接驅動車輛。。

(資料來源：參考文獻【59】)

插電式油電混合車(Plug-in HEV, PHEV)：

插電式油電混合車係整合電力驅動系統，同時具備充電設備與內燃機，其電池可作為電力儲存並能從電網進行充電。插電式油電混合車以高效率鋰離子充電電池配合馬達作為動力來源，具備電能驅動系統的高效率輸出特性。一般平日通勤可採電動車模式運行；若要進行長距離移動時，車載電池模組可透過內燃機引擎持續提供動力，兼顧使用成本、節能、環保與方便等特性【59】。

增程式電動車(Range Extended Electric Vehicle, REEV)：

增程式電動車由於搭載了引擎發電機模組(Genset)的增程器，近年來許多車廠積極投入相關研發，並將其視為解決電動車續航力問題的短期替代方案。增程式電動車是純電動車配備增程器

(Range Extender)，可增加續航里程。增程器使用汽油引擎或柴油引擎驅動發電機，用來對電池充電，也可視為串聯式油電混合車的一種，引擎無法對車子提供動力。REEV 一般行駛狀況主要是以電動馬達驅動車輛，根據能量管理控制策略，找出雙電力源(電池、增程器發電機)的最佳能量分配以同時滿足駕駛動力與續航性能需求，可以提高燃油經濟性降低排放污染【59】。

燃料電池電動車(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)：

燃料電池式電動車，車上的燃料電池是將化學能源-進行氫轉化為電力能源。能源補充是由充氫站或更換儲氫罐完成。燃料電池車具有零排放及高續航力優勢，性能足以與引擎車媲美，是終極綠能車，各車廠已投入開發數十年，如今終於進入量產階段。2014 年底，Toyota 燃料電池車 Mirai 開始量產開賣，由於產能仍在建置階段，2015 年僅銷售 498 輛，Toyota 計畫在 2017 年將 Mirai 產能提高至 3,000 台。

純電動車(Battery Electric Vehicle, BEV)：

純電動車(BEV)純粹由車載電池模組供動力驅動電動馬達，系統架構如圖 2-1 所示，電池的電力經由電子控制裝置驅動馬達，馬達的動力經由傳動系統驅動車輪。

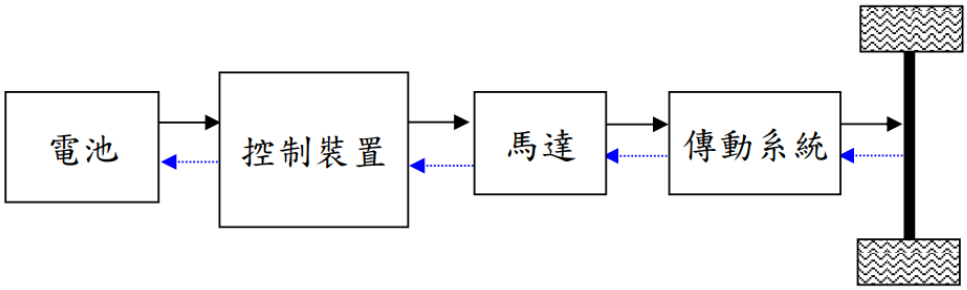


圖 3-6 純電動車(BEV)系統架構

(資料來源：參考文獻【59】)

當未來電動車大量使用將對全國電網產生顯著影響，為避免大量用電載具對區域電網及其供電變壓器造成衝擊，應提前部屬電能整合策略並建立電能管理，降低對全國電力系統的衝擊。

電動車對提高車輛耗能標準、導入更多綠色能源、降低車輛 CO_2 排放等有所助益，我國政府近年積極推動電動車輛發展，行政院在 2017 年通過之「空氣汙染防制行動方案」中，提出 2030 年市區公車、公務車輛全面電動化、2040 年新售汽車全電動化等政策目標，並訂定公路公共運輸補助電動大客車作業要點、電動小客車貨物稅及燃料稅免等優惠措施，以加速推廣電動車。

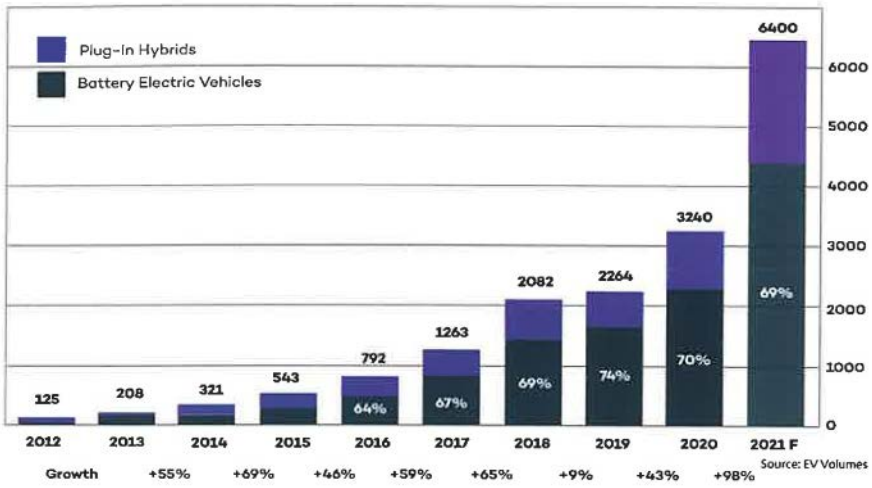


圖 3-7 全球電動車輛發展預估(單位：千輛)

第三節 電動車充電設備規格及相關安全規範介紹

迄今電動車發展概況，電動車充電設施不足已成為推動電動車普及化的阻礙之一。臺灣電動車發展自 2010 年 4 月推動『智慧電動車發展策略與行動方案』起，預計七年內投入 138.77 億元，從示範運行、技術研發和推廣普及三大方向全力發展智慧電動車。

行政部於 2017 年底核定「電動機車產業創新躍升計畫」，總統更於 2021 年 4 月宣示 2050 年淨零轉型為全世界目標；立法部門同年 5 月提案修正公寓大廈管理條例第 11 條增訂第 1 項但書，「電車供電設備設置得使用共用部分，以不妨礙其原有效用為限，並應於事先徵求區分所有權人會議之決議同意，區分所有權人會議無正當理由不得拒絕。」且通過立法院一讀程序。

美國加州政府於 1991 年開展『零排放車輛計畫』，強制汽車生產商必須生產一定比例之潔淨能源車輛；其他州政府則要求某些較大地區必須在州際公路與州道路每隔 1 英里範圍設置電動車充電設施，並鼓勵設置電動車充電裝置；夏威夷則要求公共設施每 100 個停車位需有 1 個電動車充電裝置系統且設置指示標誌【60】，顯見我國及各國政府與民間企業皆認同電動車為全球未來趨勢。

電動車輛充電方式依使用場合有三種：充電站、車載充電器(On-board Charger)、車上發電機充電。充電站類似於加油站功能，充電站設有充電樁可對電動車提供充電功能；車載充電器(On-board charger)則是將充電器安裝於車體，可直接將其插到牆面插座進行充電；車上發電機則是依靠引擎驅動發電機，對電池本體進行充電。

針對充電效率可大致分成 AC 交流充電(慢速充電)與 DC 直流充電(快速充電)，AC 交流充電主要透過車內搭載的充電器將交流電轉

換成直流電後，對車載電池進行充電，其輸出功率大多為低於 20kW，通常需數小時才能完全充電，但建置較為簡易，目前住家、商場、辦公大樓等停車場大多設置 AC 交流充電設備為主；DC 直流充電設備則是將原本放置於車內負責交流電轉換成直流電的車載充電器移置於車外，並提高能量轉換效率提高，平均 30 分鐘即可補充 80%車輛電池電能。快速充電設備的基本構成與蓄電系統的基本構成如圖 3-8 所示。

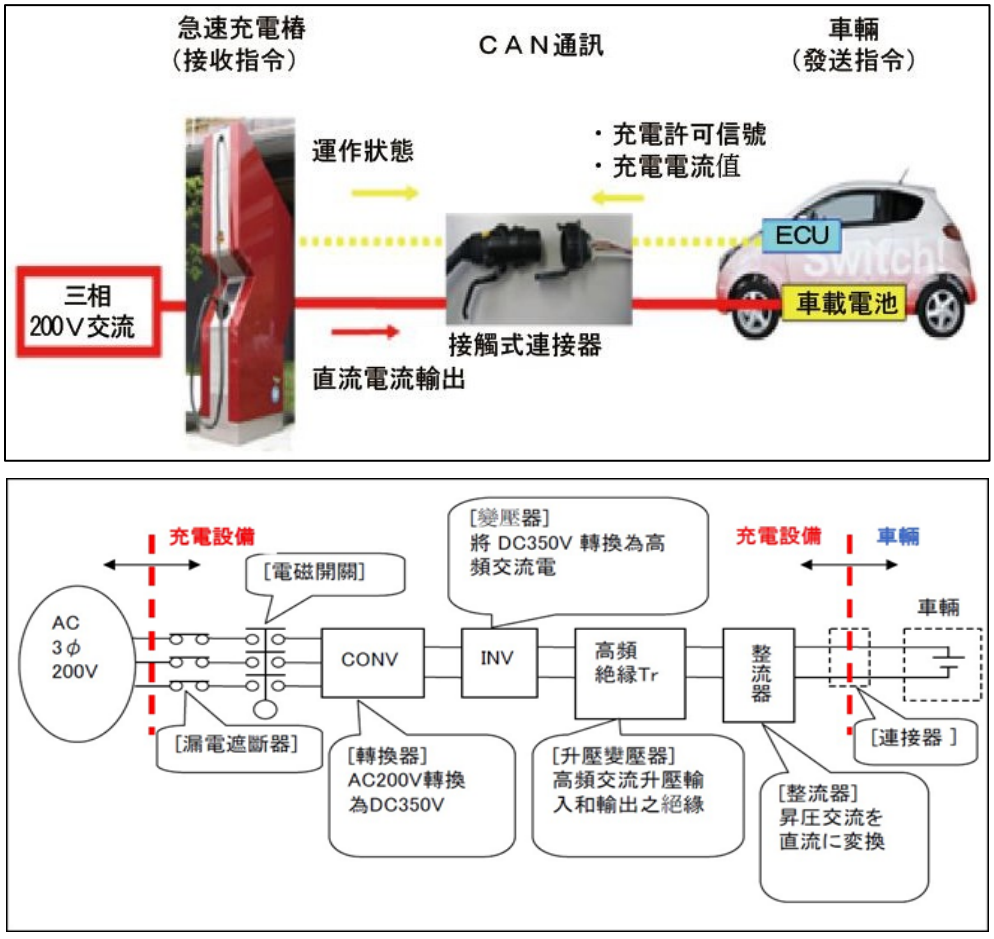


圖 3-8 快速充電設備的基本構成

(資料來源：參考文獻【61】)

一般而言，充電站架構由充電設備、配電設備、管理輔助設備三部份組成，其中充電設備整合斷路器(Breaker)、電路設計、充電插頭加電線、充電設備外殼、通訊模組、計價模組、智慧電錶及電力轉換設備等設備；配電設備包含系統變壓器、高壓保護設備、低壓保護設

備以及低壓開關配電設備等電力保護控制裝置；管理輔助設備包含電池模組管理系統、電池儲存架構、軟體控制系統等，充電站組成架構如圖 3-9 所示。

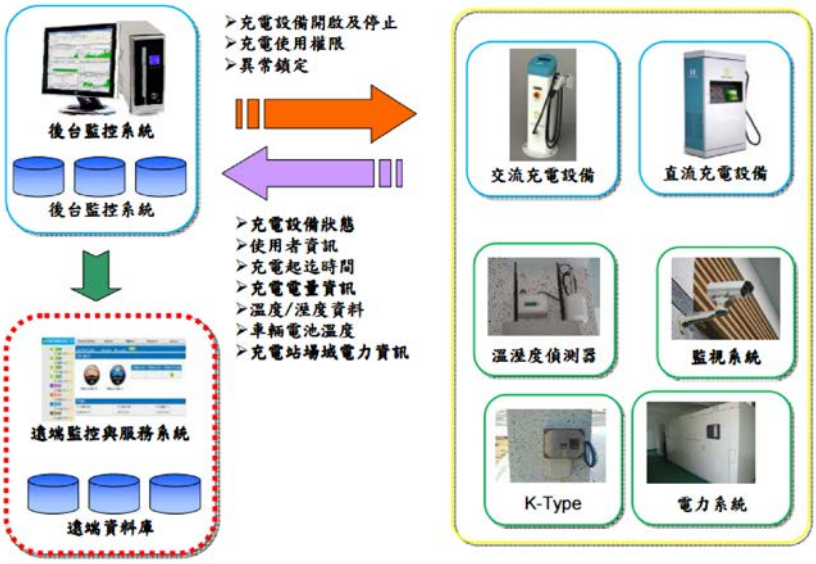


圖 3-9 充電站示意方塊圖

(資料來源：參考文獻【59】)

鋰離子電池是一種複雜的化學反應過程，其充放電過程的管理與控制都會對電池壽命產生大幅影響。若要達到高效、省時且不傷害電池的快速充電技術，則需同步監控充電過程的關鍵參數，作為即時調整或控制的條件依據，有效抑制鋰離子電池於充電過程產生的極化效應。因此，鋰離子電池的健康度不外乎與充電方式有著高度關聯性，不同充電方式對於充電速率、充電效率、過充概率、迴圈次數等方面都可能產生明顯差異。鋰離子電池的 SOC 值可用來說明鋰離子電池的剩餘電量，其定義為電池剩餘可用電量與最大可用容量的比值，如公式 3.1 所示【131】。

$$\mathrm{SOC} = \left(1 - \frac{C_r}{Cap}\right) K_N K_T \mathrm{f(I)} \tag{3.1}$$

其中，

C_r 為電池容量；Cap 為標稱電池最大容量；

K_N 為電池不可恢復係數；K_T 為溫度係數；f(I)為電流變化係數。

鋰離子電池實際使用過程中，SOC 值的變化會隨環境溫度、充放電電流、開路電壓等因素造成動態非線性變化【117】。一般而言，溫度會影響電池充放電效率；充放電倍率會影響電池容量；開路電壓會影響電池容量初始值。基於上述影響 SOC 值的參數，從而衍伸 SOC 值的推算公式，常見鋰離子電池 SOC 值估算法如表 3-5 所示。

表 3-5 常見的鋰離子電池 SOC 值估算方法比較表

預測方法	預測方法特點	優點	缺點
安時積分法【111】	通過歷史 SOC 值推算當前 SOC 值	實時估算 SOC 值	誤差累積大
電路模型法【112】	通過線性加權計算	方法簡易	僅適用於小電流的 SOC 值
卡爾曼濾波法【113】	通過最小方差估算	自動修正初始值	雜訊幹擾較大
測量內阻法【114】	通過 SOC 值與電池內阻的相關性估算	適應性強、估算精度高	SOC 值與內阻的相關性較難定義
放電實驗法【115】	控制放電過程的荷電狀態值，反向估算電流與時間的乘積	方法簡易	耗時
OCV 法【116】	測量開路電壓，進而推算 SOC 值	估算精度高	適用靜態量測

(資料來源：參考文獻【110】)

鋰離子電池常見充電方法包含：階段充電法、脈衝充電方法、最大電流充電法，簡述各種充電方法如下：

一、階段充電法：

階段充電方法顧名思義是將充電過程分為多階段進行，由於此充電方法無需依賴過多資料參數來控制充電切換，因此控制過程相對簡單，但也會因為參數考量不夠細緻而造成充電速度較慢、電池壽命產生衰退等等影響。一般電池在低 SOC 值的情況下，會先採用恆流方式進行充電，當電池即將充飽或達到高電壓時，則轉換成恆壓充電。恆流恆壓充電法(Constant Current Constant Voltage，CCCV)的優點在於相對簡單的控制機制及設置難易度較低，僅需對電流、電壓參數實時檢測，即可控制充電情況。電池充電過程變化曲線如圖 3-10 所示。

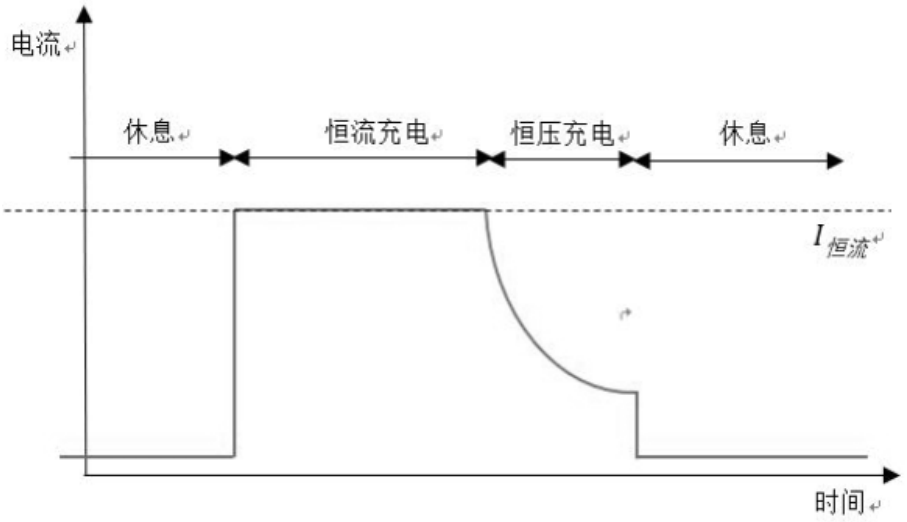


圖 3-10 電池充電過程電流變化曲線

(資料來源：參考文獻【110】)

恆流充電方法在實際充電時，經常會因為充電時間過長而導致電池發熱現象。為解決充電時間過長造成電池發熱，從而破壞電池品質的情況，現階段採用的解決辦法大多改為多階段恆流充電。多階段恆流充電方法是將恆流充電過程進行階段性切割，根據電池 SOC 值與截止電壓作為切割依據，確保充電過程電流逐漸變小。多階段恆流充

電方法如圖 3-11 所示。由圖 3-11 發現，當實際電壓等於截止電壓，就會進入下一個充電階段，等到電流符合達截止電流則充電結束【118】。

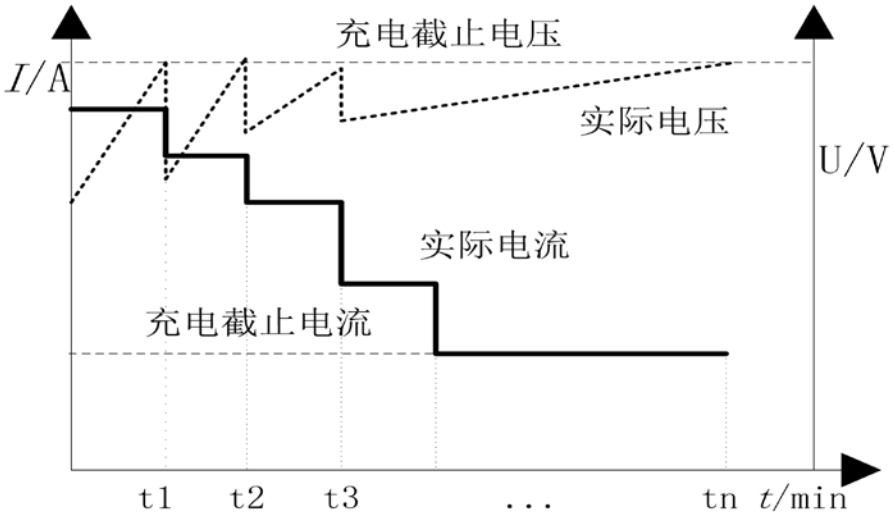


圖 3-11 多階段恆流充電方法

(資料來源：參考文獻【110】)

基於特定充電電流作為充電完成的根據，但是充電截止電流與電池容量最大值並非保持一固定值。因此在充電過程可能出現過充或充電不完全的情況發生。學者 Huang【119】提出一種五步驟充電方案，基於嚴格控制電池溫度上昇的基礎，分成五階段控制充電電壓、充電電流。學者李文華【120】則以極化現象為出發點，研究電池壽命與充電效率之間的相互關係，提出一種分階段恆流脈衝的充電方法，可以緩解充電過程的極化效應，並有效降低充電時間。學者袁臣虎【121】提出一種四階段充電法，各階段分別為預處理、恆流、曲線跟蹤、脈衝充電等階段。每個充電階段都有各自的充電管理策略，達到即時調整充電電流並控制電池溫度上昇量。

二、脈衝充電法：

馬斯三定律提出充電過程若電池存有放電動作能提升下一階段的充電電流接受率，提高電池充電速率。因此鋰離子電池採用正負脈

衝充電方法能夠增加電池充電接受率，並且當脈衝持續時間越長，越能夠提高電流接受率。脈衝充電方法可減緩或控制電池的極化效應，避免充電過程出現不合理的電池升溫現象。

三、最大充電電流充電法：

馬斯三定律提出電池於充電過程中將存在一條最大充電電流曲線，同時最大充電電流值將與電池 SOC 值呈反比。換句話說，電池充電過程所能承受的充電電流值有一個極限，當實際充電電流超出最大電流時，將會使電池內部產生析氣現象，造成電池損害並伴隨大量熱量產生，使電池壽命大幅縮短。最大充電電流充電方法意即利用最大電流曲線範圍內的最大充電電流值進行充電，不僅可達到高充電效率，也能延長電池使用壽命【122】。現階段快速充電技術的研究方向，就是基於電池當前狀態(SOC 值、溫度、迴圈次數)下可接受的最大充電電流持續充電，從而達到電池快速充電的效果。

基於自身結構優勢與性能優勢，鋰離子電池逐漸成為應用水準最高的一種迴圈型蓄電池產品，鋰離子電池的快速充電技術也成為近年來各界關注的焦點。馬斯三定律指出鋰離子電池充電過程會有一條最大充電電流曲線特徵。在充電過程中，一旦充電電流超出其合理範圍，則將導致電池內部出現析氣問題，導致內部溫度上升甚至過熱，加劇電池化學材料的損耗程度影響其正常使用。

馬斯理想充電曲線可利用公式 3.2 說明，其中當實際充電電流值大於最大充電電流曲線將對電池造成損傷。從圖 3-12 發現，當充電過程實際電流高於最大充電電流會導致電池內部出現複雜的副化學反應，引發不同程度的析氣現象；過小充電電流也將造成充電時間過長而使充電效率低。因此充電方式必須平衡充電電流與充電時間，在確保電池性能品質的前提，盡可能提升充電效率。

$$I=I_o\times e^{-\alpha t} \tag{3.2}$$

其中，

I=充電電流(隨時間 t 變化)。

I_o=初始充電電流。

α=充電比。充電初始電流與待充入容量比(I_o/C)。

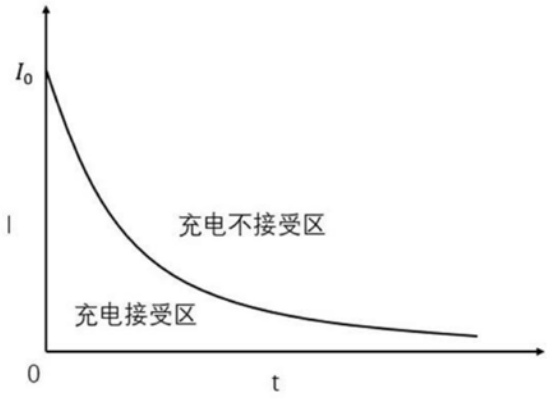


圖 3-12 馬斯三定律示意圖

(資料來源：參考文獻【110】)

極化效應介紹

極化效應意即鋰離子電池於充電過程出現不同形式的內阻而造成的壓降現象【123】。電池充電過程普遍存在極化效應，然而當充電電流過大的情況下，更容易產生顯著的極化效應。極化效應不僅會造成鋰離子電池在充電過程中出現動態變化的充電速度、充電效率，也會使電池壽命受損、內部發熱，甚者造成火災風險【124】。基於極化效應的根本起因，可將其細分為歐姆極化、電化學極化、濃差極化【125】，概述三者極化效應差異如下：

(1)歐姆極化效應：

鋰離子電池充電過程意味著鋰離子由電池正極向負極方向移動，而鋰離子電池結構特徵、組成元素及相互關係都會造成鋰離子的運動型態，這種影響可利用歐姆內阻進行解釋【126】。歐姆極化意即利用歐姆定理對於歐姆內組造成的壓降現象進行說明。

(2)電化學極化效應：

電化學極化現象主要受材料特性差異的影響，電子運動速率與材料表面電化學反應速率出現些許偏差，當前者大於後者的情況下，將導致電子過度累積於電池負極區域，導致正負極發生兩極電位偏離，從而造成電池電壓差異【127】。

(3)濃差極化效應：

當電流流經鋰離子電池的過程中，電池內部同步發生電解反應，導致電極材料出現氧化還原反應，使得電極區域鋰離子濃度上升並受到不同的擴散速度影響，使得鋰離子濃度在電極表面、電解液中出現差異，從而引起電壓差。

美國電業法(National Electrical Code，NEC)對於充電器等級定義為一級充電與二級充電模式係直接利用車載充電器將市區供電網提供的交流電轉換成直流電並將電力儲存於車載電池，目前以傳導式充電與感應式充電模式為主。傳導式充電系統(Conductive charging system)係包含交流與直流電力輸入的充電裝置，但充電過程牽涉到高電壓與大電流的傳輸，因此人員防護與產品電氣安全性能要求較一般家用電器標準高；感應式充電系統(inductive charging system)是利用高頻轉換器將交流電經由特殊介面進行傳輸，再由車載整流器以直流電進行充電。

不同電動車廠商所使用的充電連結器規格不盡相同。IEC(International Electrotechnical Commission，國際電工委員會)提出 IEC 61851 標準，針對電動車週邊系統或零組件進行規格標準化，歐盟地區大多採用 IEC 標準；SAE(Society of Automotive Engineers，美國自動機工程學會)則是提出 SAE J1772 規格標準化規範，針對電動車用車輛端插頭及車輛連接器，美國地區主要採用 SAE J1772 標準。

現階段各國充電標準簡述如下：美國與歐洲主要使用交流/直流合一的 Combo 型，其採用 PLC (Power Line Communication)的通訊介面，Combo 插座允許電動車慢充和快充，是目前在歐洲應用最廣的插座類型，包括奧迪、寶馬、克萊斯勒、戴姆勒、福特、通用、保時捷以及大眾都配置 SAE 所制定的充電界面。日本採用 CAN 通訊界面；中國採用 CAN/PLC 通訊界面。為使不同廠牌電動車的充電系統具備相容性，初步可透過轉換盒來解決系統間的相容性問題。各國電動車充電站規格與標準如圖 3-13 所示。

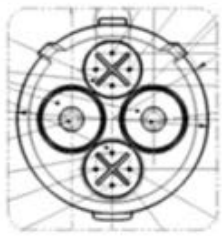
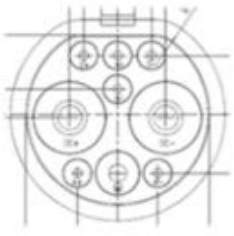
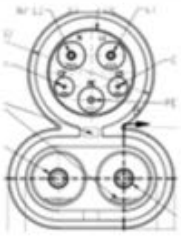
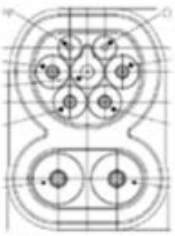
			
IEC 62196-3 Annex AA	IEC 62196-3 Annex BB	IEC 62196-3 Annex EE	IEC 62196-3 Annex FF
CHAdeMO	GB/T 20234.3	美規Combo	歐規Combo
600V/200A 120KW	750V/250A 187.5KW	600V/200A 120KW	850V/200A 170KW
DC		DC+AC	
通訊協定:CAN BUS		通訊協定: PLC (Power Line Communication)	

圖 3-13 各國電動車充電介面規格與標準

(資料來源：台灣大電力研究試驗中心)

▲美國慢速充電接頭樣式

▲歐盟慢速充電接頭樣式

▲大陸慢速充電接頭樣式

▲美國快速充電接頭樣式

▲歐盟快速充電接頭樣式

▲日本快速充電接頭樣式

▲大陸快速充電接頭樣式

圖 3-14 各國電動車充電介面樣式

(資料來源：財團法人車輛研究測試中心(ARTC)-電動車安全入門手冊)

各國電動車充電器相關標準與規範如表 3-8 所示。台灣電動車輛充電設備之需求，應符合中華民國國家標準 CNS15511 充電系統之規定。充電站設施與施工均應依據「屋內線路裝置規則」及「電業供電線路裝置規則」等電工法規進行規劃與設置；美國則依據 NFPA70、IBC 與 UL2202 等規範，並由各州制定防火安全相關法規；日本除電氣法規之電氣設備技術基準，在消防法規部分亦有以消防法為依據的火災預防條例來對電動車充電設備進行防火與消防安全要求。

以特斯拉電動車為例，目前特斯拉超級充電站(DC 直流充電設備)有 V2 及 V3 兩種規格，V2 最大功率為 120 kW；V3 最大功率可達 250 kW，特斯拉電動車主要三種充電方式如表 3-6 所示。日本東京火災預防條例於 2020 年 8 月 27 日修正快速充電設備適用範圍，將其輸出範圍上限值由 50kW 上修至 200kW，意即輸出功率在 200kW 以上的快速充電設備將視為「變電設備」。若設備具備一定安全措施(表 3-7)，得排除「變電設備」的條例規定(不可設置於室內停車場、一般使用者不能自行使用、設置於戶外時必須與建築物保持 3 公尺的安全距離等限制)。

表 3-6 現階段常見充電方式差異表

充電方式	家用充電	目的地充電站	公用充電站
對象	個人用戶	商用合作建置	公共服務
輸出功率	6~22 kW	22~100 kW	50~350 kW
充電時間	4~8 小時	1~4 小時	小於 1 小時
備註： A. 家用充電：回家後將車輛接入電源即可充電。 B. 目的地充電站：與餐廳、百貨商場、飯店等合作建置。 C. 公用充電站：主要為設置在公路沿線的超級充電站。			

(資料來源：本研究整理)

表 3-7 特殊標準之要項

序號	要項
1	電工法第三條規定由電工執行作業。
2	設置在不會產生或積聚易燃或腐蝕性蒸氣、氣體、灰塵等的位置。
3	充電前自動進行自診斷檢測功能，且異常時不動作的保護功能。
4	快速充電設備與電動車等連接不牢固時，有防止充電開始之措施。
5	充電設備與電動車連接處有電壓時，有防止連接處脫開之措施。
6	偵測到漏電時，具有遮斷機能。
7	自動監測電壓和電流，當發生異常時，快速充電設備可自動停止。
8	偵測到溫度異常時可自動停止充電。
9	接地故障或控制異常時，快速充電設備可自動停止。
10	在緊急情況下快速充電設備可手動停止。
11	外殼為不燃材料。

(資料來源：參考文獻【61】)

表 3-8 鋰離子電池與電動車充電站相關標準

項目	適用範圍
美國電工法規	NEC Article 625
電動車充電站測試法規與標準	UL 2594、UL2231、CSA C22.2NO.107.1、SAE J2293、IEC 61851、IEC 61008-1、IEC61009-1
電動車充電電池	UL 2202、UL2230、UL2251、UL2580、ANSI C18.1 PART1、ANSI C18.3PART1、SAND99-0497、SAE J2461
車載充電器測試	UL 2202、SAE J2894
電動車充電線組測試	UL 2251、UL 2231、IEC 61851、IEC 62335、IEC 61540、IEC 61008-1、IEC 61009-1
電動車用電池管理系統	UL 508、UL 991、UL 1998、UL 60730
電動車用電池	IEC619821-3、UL2580、UL2271
鋰電池(Cell)	IEC62660-1、IEC62660-2、UN-T 38.3、GB18333.1
鋰電池(Module)	ISO12405-1、ISO12405-2、UN-T38.3、SAE J1798、SAE J2288、SAE J2380、SAE J2464、QC743
鋰電池(Pack)	ISO12405-1、SO12405-2、UN-T38.3、SAE J1798、SAE J2288、SAE J2380、SAE J2464
電動車用電流轉換變頻器	UL1012、UL498A
電動車馬達控制器	UL508、UL991、UL1998、UL60730、GB18488-1、GB18488-2
電動車充電站	IEC61851-1、IEC61851-21、IEC61851-22、IEC61851-23、IEC61851-24、UL2594、EN61851-1、EN61851-21、EN61851-22、GB18487.3
電動車充電站電錶及設施	IEC61010-1、UL2735、UL61010、EN61010-1、EN621051、EN621052、EN621053、EN621054、EN621055
電動車充電設施	IEC61851-1、IEC61851-21、IEC61851-22、IEC61851-23、UL2202、JEVS G109、JEVS G106、EN61851-1、EN61851-21、EN61851-22、EN61851-23、GB18481.1、GB18487.2、GB18487.3
電動車充電用纜線	IEC60245-1.2.4、IEC60245-3.5.6.7.8、UL62、UL1581
電動車插頭&連接器	IEC62196-1、IEC62196-2、UL2251、SAE J1772、JEVS G105、EN62196-1
電動車電池與充電器連接組件	UL2734
電動車充電控制板	UL508、UL991、UL1998、UL60730
電動車充電電錶	UL61010、UL2735
電動機車	ISO7176-21、EN15194

(資料來源：參考文獻【59】)

鋰離子電池熱失控風險對國人生命財產造成安全隱憂，如何早期偵測並警示鋰離子電池將發生熱失控以及提高鋰離子電池安全性為現階段極需解決的議題。大多研究學者將鋰離子電池的工作溫度、工作電壓、工作電流以及副反應產生的氣體作為熱失控的預警監控參考，從而有效預防鋰離子電池的熱失控。鋰離子電池性能檢測不僅可用於檢測出廠電池安全性與可靠性，亦能作為預防鋰離子電池安全事故的預警策略參考。

目前世界各國組織均制定相關檢測標準，例如：SAE J2929 涉及電池模組及全車安全性檢測；ISO 12405-3 針對電池模組及電池系統安全性要求；GB/T 31467.3-2015 說明電池單體及電池模組檢測要求，充電系統必須經由一系列之安全性測試，測試項目包括三大類：電氣安全、機械安全、環境安全，簡述如下：

一、電氣安全測試：

主要係針對充電系統設備端以及電動車輛端，進行人員電擊保護、端子接地阻抗、端子座強度、表面溫度、沿面及空間距離、啟斷容量(breaking capacity)、絕緣電組、耐電壓、耦合器耐溫、連接器短路等測試項目。全車檢測與電池模組檢測的最大區別在於全車檢測考量到車體失控造成的嚴重後果，因此檢測標準要求不應出現明火、電池包裝破損或爆炸，同時於檢測過程應使用氣體濃度檢測設備且可燃性氣體濃度不得超過最低可燃濃度。

- **過充放電檢測**

過充放電檢測是檢查電池在過充電與過放電過程的保護系統的功能性，實現控制充放電電流的超載並保護電池設備。GB/T31467.3-2015 提出鋰離子電池過充放電保護檢測，過充電檢

測的終止電壓為最高電壓的 1.2 倍；過放電檢測的總電壓為低於額定電壓 25%。

國際標準組織針對過充放電檢測制定 ISO12405-1(高功率型)與 ISO12405-2(高能量型)，功率型電池的過充電檢測的電流倍率為 5C；過放電檢測電流倍率為 1C；而能量型電池的過充電檢測的電流倍率為 2C；過放電檢測的電流倍率為 1/3C。美國 UL 2580 標準對過充放電參數的定義比較模糊，只是對過充電的終止條件進行嚴格限制，定義為電壓與溫度等電路保護系統起作用或電池系統爆炸著火；過放電終止條件為電路保護系統起作用。

- **短路檢測**

短路保護是指電池發生短路時，系統能夠即時做出應急反應保護並避免電動車發生火災事故。中國 GB/T31467.3-2015 對鋰離子電池短路保護系統的檢測方式要求在短路電阻不能超過 20mΩ 的情況下，將接線端短路 10min 後，觀察鋰離子電池 2 小時，若鋰離子電池沒有發生洩露、著火或爆炸現象，同時絕緣電阻超過 100Ω/V，則能夠代表短路保護裝置發揮其功能。GB/T31467.3-2015 與 ISO12405-2:2012 及 UL2580-2011 的檢測方法類似。

二、機械安全測試：

機械安全性檢測是說明電池實際使用過程可能受環境濕度、路面顛簸或交通事故等因素所衍伸的機械應力，例如：振動、衝擊、碰撞、擠壓等。主要針對充電系統設備之硬體架構，進行可靠性試驗，例如機體耐衝擊、插拔力、耐插拔、耐震動、壓毀、掉落及穩定性等測試。

三、環境安全測試：

主要針對電動車用充電系統設備進行撲滅電動車、高濕度環境絕緣電阻與耐電壓、低溫環境、電磁相容性(Electro Magnetic Compatibility，EMC)等測試。環境安全性檢測則是包含電池使用於不同氣候(高溫、低溫)以及濕熱條件的工作條件，環境安全性檢測包含熱衝擊、熱穩定、起火、浸泡、過熱等。

檢測項目 / 標準	震動	機械	碰撞	擠壓	針刺	翻轉	跌落	熱衝擊	熱穩定	起火	浸泡	過熱	濕熱
ISO12405-1	O	O						O					O
ISO12405-2	O	O						O					O
ISO12405-3	O	O	O	O				O		O	O	O	O
SAEJ2929	O	O		O		O	O	O	O	O	O	O	
UL2580	O	O		O		O	O	O		O	O	O	
GB/T31485				O	O		O	O	O		O		
GB/T31467.3	O	O	O	O		O	O	O		O	O		O

(資料來源：參考文獻【62】)

第四節 鋰電池火災案例分析

政府極力推動電動車產業發展勢必需在國內廣設充換電站，鑒於未來電池充換電站越來越多，災害防範意識及對策擬定刻不容緩。目前充交換電站主要設於加油站、百貨公司停車場，但由 CNS 15511-3_電動車輛傳導式充電系統-安全要求中提及，充電設備零件有引起火花電弧的可能性，因此將電池充換電站與加油站設置同一地方，恐有將「汽油與火柴同置一地」的隱憂；而將充電設備設置於地下停車空間，則可能因電池類火災難以短時間撲滅而影響到建築結構安全，因此電動車的政策推廣應從多方面角度考量車輛停放及充電問題。鋰離子電池在受到高溫、高充放電流或外部因素(例如：內外部短路、衝擊、穿刺等)的情況下，電池會因劇烈的放熱反應使內部材料存有熱失控風險【63】。

近些年電動汽車因電池熱失控而引發的爆炸自燃事故時常發生，對於消費者帶來很多顧慮，對其產業發展勢必產生負面影響【7】。鋰離子電池熱失控過程可能持續數小時，並且經常有失控後數小時又再次復燃的案例，因此對於失控後電池的監測尤為重要，因為很難從外觀判斷被撲滅的電池是否會有再次復燃的可能性【65】。收集國內外近幾年電動車及充電樁火災案例，簡述說明如下：

一、(泰國)住宅保時捷充電起火：

2018 年 03 月 18 日(週五)，泰國發生一起電動車火災事故。事故車輛為一輛保時捷 Panamera，在住家利用客廳電源插座充電時起火，火勢蔓延到客廳。泰國消防人員共計花費 30 分鐘控制火勢，損失估計為 600 萬泰銖。

圖 3-15 (泰國)住家保時捷充電起火新聞報導

(資料來源：參考文獻【A2】)

二、(美國)特斯拉起火：

2018 年 12 月 21 日，美國一名民眾行駛一台特斯拉，疑似汽車爆胎被拖吊至附近汽車修理廠。期間 Model S 因不明原因起火燃燒，消防人員動用 2,000 加侖的水才以撲滅火勢。消防人員於救援過程中發現，當撲滅一開始的火勢後不久，車輛開始冒出蒸汽並開始復燃。而後該車輛轉移至附近拖車場置放時，又再次起火。此事件共計花費數十個小時在控制電動車火災。

圖 3-16 (美國)特斯拉起火新聞報導

(資料來源：參考文獻【A3】)

三、(中國)特斯拉 Model S 停車場起火：

2019 年 04 月 21 日，一輛停放在地下室的特斯拉電動車(Model S)自燃起火。該案電動車並非在充電過程起火，事故判斷可能是車底高壓電池受到撞擊而引起電池內部電芯損傷，最終導致起火。本事故共計花費 50 分鐘才控制火勢。

圖 3-17 (中國)特斯拉起火新聞報導

(資料來源：參考文獻【A4】)

四、(荷蘭) BMW i8 起火：

2019 年 03 月 26 日，荷蘭一家經銷商展示的 BMW i8 因不明原因冒煙，該經銷商立刻尋求當地消防局協助，消防人員為確保火勢得到完善控制，將汽車直接浸入水中，並放置 24 小時。

圖 3-18 (荷蘭)BMW i8 起火新聞報導

(資料來源：參考文獻【A5】)

五、(高雄)大樓地下室電動機車竄出無名火：

2020 年 04 月 26 日，高雄市一棟住商混合大樓，該棟大樓為地上 25 樓、地下 3 樓建築物。火警發生在地下一樓停車場，濃煙從通道竄出，起火點是地下停車空間的一台電動機車，本事故僅一台電動機車被燒到剩骨架、周圍 3 公尺處的一部汽車被燻黑，另部分輕鋼架雜物遭波及。火場鑑識人員不排除起火原因為人為縱火。

圖 3-19 (高雄)大樓地下室電動機車燃燒新聞報導

(資料來源：參考文獻【A6】)

六、(美國)喬治亞州服務中心 Tesla Model S 起火：

2021 年 10 月 01 日，該輛特斯拉 Model S P100D 停在服務中心時起火，因多數損壞的地方靠近前座，因而認定可能是起火的最初位置。由本事故發現，若將水流直接從汽車底部噴撒，有助於快速撲滅電池類火災。

圖 3-20 (美國)喬治亞州服務中心 Tesla Model S 起火新聞報導

(資料來源：參考文獻【A7】)

七、(台南)特斯拉自撞起火：

2021 年 07 月 06 日，特斯拉電動車失控自撞民宅騎樓梁柱後起火。特斯拉車底不斷冒出火焰，消防人員共計動用 20 噸水量，相當於 6 部水箱車。由本事故分析得知，相較於電動車起火，一般燃油車只需 1/3 的水量(即 2 部水箱車)就能夠撲滅火勢，因此電動車起火的救援行動需著重考量水線補給是否即時且足夠。

圖 3-21 (台南)特斯拉自撞起火新聞報導

(資料來源：參考文獻【A8】)

八、(中國)比亞迪電動車「充電中起火」：

2021 年 11 月 24 日，比亞迪電動車在北京某停車場充電中起火，雖火勢被立即撲滅，但車頂仍被燒光。

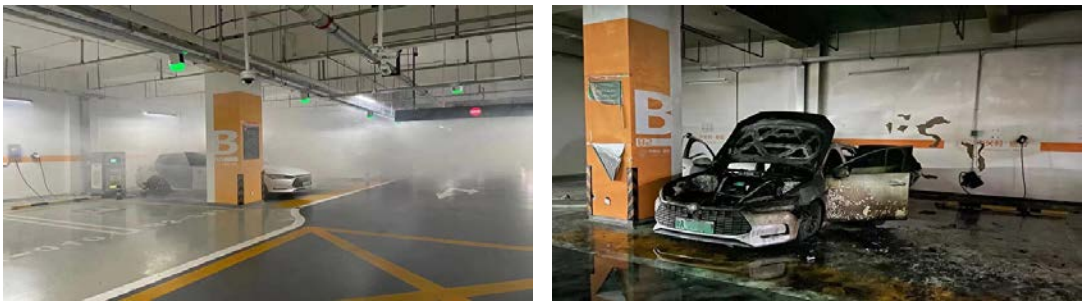


圖 3-22 (中國)比亞迪電動車「充電中起火」新聞報導

(資料來源：參考文獻【A9】)

九、(印度)TSRTC 汽車站充電巴士充電時火：

2022 年 02 月 22 日，TSRTC 的一輛電動巴士在充電時起火，消防人員抵達現場共計花費 30 分鐘才撲滅火勢，然而因電池類火災的燃燒溫度較一般燃油車更高，因此在短短 30 分鐘內，巴士已嚴重損壞，幾乎僅剩下車架殘骸。

圖 3-23 (印度) TSRTC 汽車站充電巴士充電時火新聞報導
(資料來源：參考文獻【A10】)

十、(台南)Gogoro 充電站電動車鋰電池爆炸起火：

2021 年 06 月 28 日，設置於室外停車場的 Gogoro 電池充換電站突然有 1 顆電池發生爆炸起火的情況。消防局歸納本事故的起火原因，可能是電池因過充、內部短路所造成。

圖 3-24 (台南) Gogoro 電池充換電站起火新聞報導
(資料來源：參考文獻【A11】)

十一、(新北)電動車行起火：

2022 年 03 月 01 日，新北市一間電動車行發生火警，警消接獲通報後，派遣 51 輛救援車輛前往現場(包括：44 輛消防車、5 輛救護車)，共計消防人員 136 人佈水救援。本事故初步調查燃燒面積約 25m^2；共計 15 台電動車燒毀。

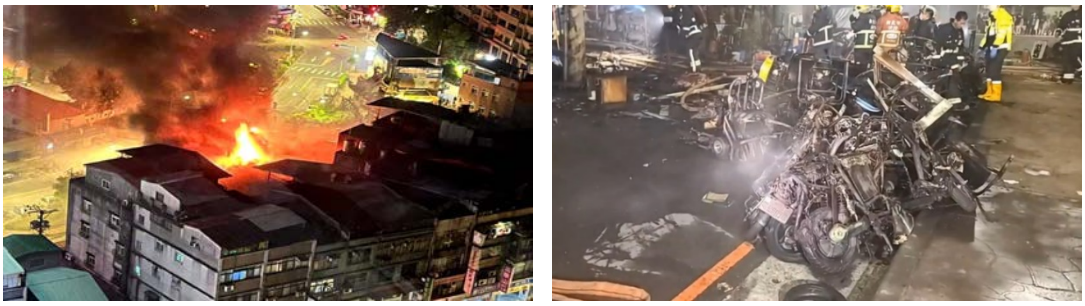


圖 3-25 (新北)電動車行起火新聞報導
(資料來源：參考文獻【A12】)

十二、(荷蘭)Volkswagen ID.3 電動車地下停車場起火：

2022 年 02 月 14 日，一輛 Volkswagen ID.3 在地下停車場起火，起火時汽車處於靜止狀態，當地消防人員在初步撲滅火勢後，並將其浸入水中，防止再次復燃。

圖 3-26 (荷蘭)Volkswagen ID.3 電動車地下停車場起火新聞報導
(資料來源：參考文獻【A13】)

表 3-9 電動車火災案例表

時間	地點	車型	起火原因	傷亡情況
2018.03.18	泰國，自家一樓	汽車，保時捷 Panamera	充電起火	無
2018.12.21	美國，修理廠一樓	汽車，特斯拉 Model S	不明	無
2019.03.26	荷蘭，汽車展示間	汽車，BMW i8	不明	無
2019.04.21	中國，地下停車場	汽車，特斯拉 Model S	疑似電池損傷短路	無
2019.05.12	中國，地下停車場	汽車，特斯拉 Model S	不明	無
2020.04.26	台灣，地下停車場	機車	疑似縱火	無
2020.05.28	中國，充電站	汽車，比亞迪秦 Pro EV	充電起火	無
2020.06.28	中國，地下停車場	汽車，吉利帝豪 EV	充電起火	無
2021.01.12	台灣，室外空間	機車，Gogoro	充電站電池起火	無
2021.06.06	台灣，室外空間	機車，Gogoro	充電站電池起火	無
2021.06.28	台灣，室外空間	機車，Gogoro	充電站電池起火	無
2021.07.06	台灣，室外空間	汽車，特斯拉	自撞	1 傷
2021.08.14	荷蘭，道路	汽車，Volkswagen ID.3	不明	無
2021.10.01	美國，汽車服務廠	汽車，特斯拉 Model S	不明	無
2021.11.22	中國，地下停車場	汽車，比亞迪秦 Pro EV	充電起火	無
2022.02.14	荷蘭，地下停車場	汽車，Volkswagen ID.3	不明	無
2022.02.22	印度，巴士充電站	電動巴士	疑似電池短路起火	無
2022.03.13	台灣，	電動自行車	不明	無

	電動車行			
2022.04.18	中國， 道路上	汽車，特斯拉 Model 3	交通事故	1 傷
2022.06	美國， 汽車報廢場	汽車，特斯拉 (車禍嚴重毀損車輛)	疑似天氣過熱自燃	無
2022.06.12	中國， 道路旁	汽車，比亞迪	不明	無
2022.07.21	中國， 道路上	汽車，特斯拉 Model 3	交通事故	無
2022.07.22	台灣， 道路上	汽車，特斯拉 Model x	自撞	2 傷
2022.09.26	韓國， 地下停車場	汽車	充電起火	7 死 1 傷

(資料來源：參考網路資料後由本研究自行整理)

鋰電池內部電解液材質為易燃液體，電極為可燃材料，鋰電池於過充、短路、過熱、穿刺或碰撞等情況下極易產生溫度異常升高、過熱起火或產生爆炸現象，不當之放置環境、堆疊方式、包裝是否完整等因素亦均有可能導致鋰電池內部機件之碰撞及損傷，致內部線路絕緣破壞，進而造成電池芯內部或外部短路起火【64】。

由表 3-9 可知，電動車火災事故的原因大多為 1、行駛中自燃；2、靜置停放自燃；3、充電過程自燃；4、事故碰撞自燃。顯見電池發生熱失控時的安全防護與發生災害後的緊急處理，為未來電動車發展目標必須要面對的首要課題。

各式電動車車輛緊急救援手冊中，有關消防搶救之內容表列如下：

表 3-10 各式電動車車輛緊急救援手冊消防搶救內容表

廠牌	緊急救援手冊消防措施之摘要內容
特斯拉	● 使用水柱撲滅高壓電池火情。如果電池著火、暴露在高熱量環境中或者正在散發熱量或氣體，可使用大量水為電池降溫。 ● 完全撲滅電池火災並加以冷卻可能需要大約 3,000 加侖的水 (直接澆於電池上)，請務必準備或請求額外水源。如果無法即時獲得水源，在有水可用之前，可使用乾粉、CO_2、泡沫或其他一般滅火設備來滅火。 ● 電池火災可能需要最多 24 小時才能熄滅。可以考慮讓電池燃燒，期間要對暴露人員採取防護措施。 ● 所有火焰和煙霧明顯減弱後，可以使用熱影像處理攝像機來量測高電壓電池的溫度，並監控加熱或冷卻的趨勢。高電壓電池沒有火焰、煙霧或熱量的時間 ● 由於存在重燃風險，Model S 因淹沒、著火或碰撞而導致高電壓電池受損之後，須將其存放在開放區域，並且與任何暴露人員距離至少 50 英尺 (15 公尺)。
保時捷	● 車輛起火使用水為滅火劑，並大量潑水以冷卻鋰離子電池。
麥拉倫	● 建議使用水進行滅火。 ● 對於 HV 電池電氣火災，只能使用二氧化碳滅火器。 ● 使用 CO_2滅火器後，由於磷酸鐵鋰電池的點火特性，電池可能隨時重新起火。但是，如果必須使用水，則需要大量的水（例如來自消防栓的水）來撲滅火焰。 ● 如果電池被刺破，則只能使用二氧化碳滅火器從電池中釋放電解液可能會產生氟化氫酸。 水或水蒸氣與暴露的六氟磷酸鋰 (LiPF6) 的相互作用可能導致產生氫氣和氟化氫 (HF) 氣體。

BMW	● 水被認為是首選的滅火劑，因為它可以同時冷卻 HV 電池組。 ● 建議使用大量的水滅火或冷卻。
TOYOTA	發生火災時： ● 使用大量的水 ● 可能會復燃 ● 假如已判定難以利用大量的水來撲滅高電壓電池火勢，建議讓高電壓電池自行燃燒殆盡。
現代	● 不要用少量水撲滅涉及高壓電池的火災，因為這可能導致觸電。 ● 涉及高壓電池的火災應使用大量水（至少 2,650 加侖）來冷卻高壓電池。在這種情況下，消防員應該毫不猶豫地向車輛倒大量的水，確保電池已完全冷卻，以避免火災復燃。 ● 不要使用海水或鹽水。 它會產生有毒蒸氣或引起復燃。 ● 將車輛浸泡在裝滿水的容器中是滅火的有效方法。
HONDA	● 起火時，請用大量水滅火，還可以冷卻電池。 ● 如果用大量水難以滅火，則使用 ABC 滅火器可同時撲滅油火與電氣火災 。
NISSNA	● 進行滅火作業時請務必穿戴全套個人防護裝備 (PPE) 及自給式呼吸設備。LEAF 車輛起火所產生的煙霧和傳統車輛起火所產生的煙霧類似。 ● 如果要用水滅火，必須使用消防栓 (若有時) 供應大量的水灌救。不可只使用少量水來滅火。
MITSUBISHI	● 電池電解液使用易燃的“鋰鹽碳酸酯溶液”，當與空氣中的水分反應，電解液會產生對人體有害的酸性有機蒸氣。因此在處理時請使用個人防護裝備(PPE)，包含用於有機氣體的面罩、耐溶劑手套與護目鏡，並小心使用。 ● 使用滅火器滅火。 ● 不要試圖用少量的水來滅火，這是非常危險的。使用大量的水源如消防栓，除非無大量的水可用時，請遠離車輛直到消防隊抵達。

(資料來源：參考內政部消防署網頁資料後由本研究自行整理)

第五節 鋰離子電池火災風險評估

鋰離子電池熱失控是一種劇烈反應、危害性高，帶有鼓包、脹氣、膨脹甚至爆炸過程的現象【64】。鋰離子電池燃燒過程火勢成長迅速且溫度極高，從熱失控初徵到猛烈燃燒階段僅需幾秒鐘的時間，此外鋰離子電池大多由化學成份組合而成，燃燒會伴隨大量有毒濃煙，存有爆炸、中毒等危害風險且救援過程容易受到煙流濃度過高使能見度低而不易發現起火源及展開救援行動。

「熱能」為造成鋰離子電池熱失控(Thermal Runaway)的關鍵，鋰離子電池熱失控火災與尋常火災具有本質區別，惟鋰離子電池內部化學反應放熱的同時，亦同時釋放可燃氣體與氧氣，使得電池類火災燃燒速度極快，針對此種現象應擬定針對性的應對手段或措施【66】。

鋰離子電池熱失控現象反應來自於電池內部產熱與傳熱間的關係，參考圖 3-27 發現，由 Arrhenius equation 與 Newton's law of cooling 分析鋰離子電池熱失控原理，鋰離子電池的熱現象來自於溫度表現，將產熱曲線 4 與三種不同的傳熱曲線 1、2、3 重疊分析，如圖 3-27 所示。

當產熱曲線 4 與傳熱曲線 1 相交於 E 點時為穩定狀況(電池昇熱與放熱速率均相同)。若溫度上升則散熱速率大於生熱速率，溫度會重新下降到該點，若溫度下降則生熱速率大於散熱速率，溫度會重新升高到該點；然而若產熱曲線 4 與傳熱曲線 1 相交於 F 點時，溫度若持續上升，將引起電池熱失控現象，故 F 點可被視為熱失控不可逆溫度點。

如果將產熱曲線 4 與傳熱曲線 2 進行分析發現，當兩條曲線相交於 D 點時為電池臨界溫度點，當溫度超過 D 點則發生熱失控現象。

如果將產熱曲線 4 與傳熱曲線 3 進行分析發現，兩條曲線沒有相交處，因此電池產熱速率永遠大於傳熱效率，電池溫度將不斷上升，最終引起熱失控。

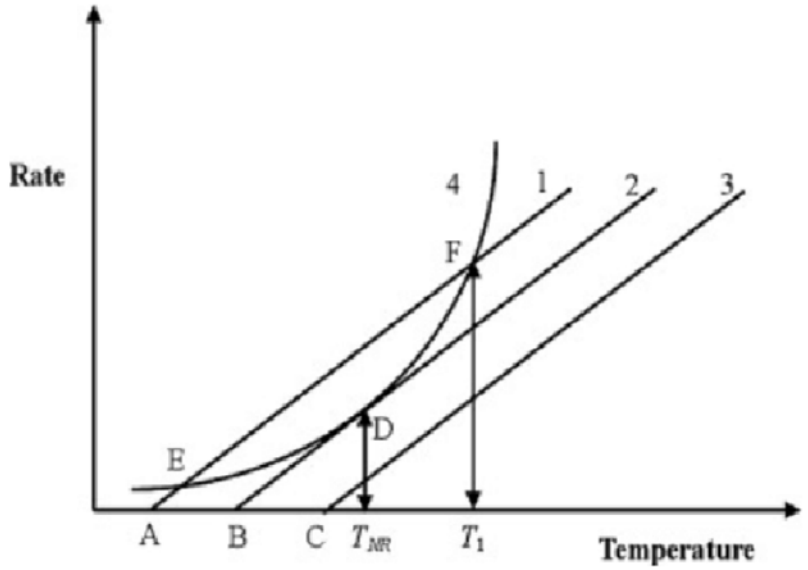


圖 3-27 熱失控昇溫曲線與散熱曲線關係圖

(資料來源：參考文獻【67】)

儘管現今各國政府皆針對鋰離子電池制定管理與出廠要求，降低鋰離子電池故障率，但仍有非預期情況而造成鋰離子電池失控。鋰離子電池容易受『熱能』造成局部或單體的劇烈放熱反應，無論是因為高溫、過充、過放或短路等不當使用行為造成鋰離子電池溫度上升，此時電池溫度超過隔離膜臨界溫度(Critical Temperature，T_{cr})時，內部材料(SEI 膜、電解液、負極與正極材料)將開始自催化（Autocatalytic reaction）熱裂解產生放熱反應，與氧氣接觸可能伴隨劇烈燃燒或爆炸。鋰離子電池熱失控火災與尋常火災具有本質差異，因鋰離子電池內部化學反應放熱的同時，亦釋放可燃氣體與氧氣，使得鋰離子電池燃燒速度快【66】。

鋰離子電池熱失控的引發因素來源於兩方面。其一為電池本身材料及製造過程的品質，當電池製造材料有摻雜金屬雜質或極片毛刺、

正負極錯位、電解液分佈不均、隔膜表面導電粉塵等情形都會對日後使用留下安全隱患；另一方面則是電池使用過程發生問題，使用過程造成電池熱失控的誘因包含：電池內部/外部短路、過充放電、高溫環境、高倍率充放電、老化、擠壓變形等，其中內部短路和過充電是造成鋰離子電池熱失控最為常見的原因【7】。

鋰離子電池火災之救援行動涉及大量消防設計、安全管理等專業，然而目前尚無針對電池類火災的抑制策略，造成政府及民間皆對電池類起火產生安全憂患。就火災分類來說鋰電池火災是結合 A 類（電池外殼、電池電極）和 B 類（易燃性液態電解質）和 C 類(通電中電氣元件)之複合式類型火災，而正負極集電器為銅或鋁金屬，銅或鋁並非活性金屬所以無包含 D 類（金屬火災)。

學者 Egelhaaf 【68】發現，與傳統燃油車起火相比，鋰離子電池火災在撲滅後會釋放大量煙氣，同時對於電動汽車火災而言，不僅起火當下存在熱失控威脅，當撲滅後或轉移失事車輛過程，都可能再次復燃的風險。

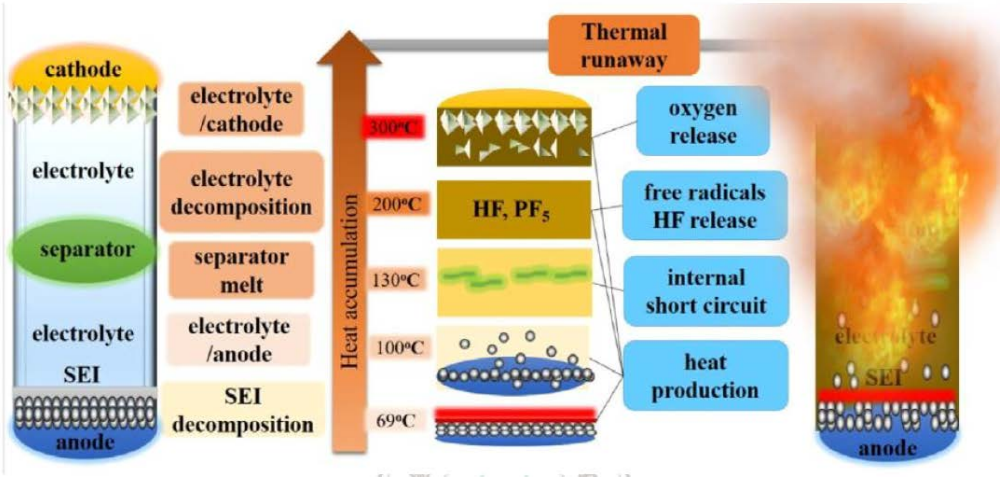


圖 3-28 鋰離子電池熱失控過程概述

(資料來源：參考文獻【10】)

鋰離子電池作為一種儲能介質，在其使用過程可能會受到溫度、振動等不利因素而衍伸非線性的退化特徵，甚者造成電池失效的情形

【129】。近年來相關研究學者針對鋰離子電池的 SOH 值進行研究發現，當鋰離子電池容量健康值在縮減 20%~30%時，即應汰換老舊的鋰離子電池【130】，降低使用過程的安全隱患。若要更精準的預估鋰離子電池的 SOH 值，首先應針對鋰離子電池的種類、結構、基本原理和迴圈特性細項分析，再充分通過數據資料逆向推估鋰離子電池使用壽命與 SOH 值。

鋰離子電池因其工作電壓高、能量密度高、無記憶效應等優點受到各界關注並被作為電動汽機車的動力儲能裝置，然而鋰離子電池熱失控所引發的火災事故屢見不鮮，其安全性問題已成為阻礙鋰離子電池快速發展的癥結。

鋰離子電池主要受高溫而產生熱失控現象，當鋰離子電池內部溫度達 80℃時，就有可能引起電池的熱失控現象，最終造成起火燃燒或爆炸。其中正極材料的熱分解以及電解液的燃燒釋熱為影響占比較高的兩大因素，因此各界學者皆積極投入探討鋰離子電池的正極材料與電解液的熱穩定性及材料特性以提升鋰離子電池的安全性。

為杜絕此種災害發生的前提即為事前預防規劃，現今『鋰電池或其他電池類火災撲救技術』普遍採取當災害發生時，第一時間切斷與鋰電池互相聯結的電源及周圍電源，防止鋰電池因過度充電或內部溫度持續上升而發生起火爆炸。因此若能夠快速得知鋰電池起火位置，便可盡早啟動滅火設備，避免因燃燒猛烈、蔓延迅速，導致滅火時間延長或波及相鄰鋰電池，造成連環起火爆炸等災害發生。

然而鋰離子電池燃燒過程中，金屬鋰的密度僅為水的一半，滅火劑打到火源表面容易使滅火劑沉沒而無法覆蓋，因此使用滅火設備需具備快速降溫及隔絕氧氣的特性才足以撲救火災。最終當電池內部化學反應完全且內部電量已通過接地線流失，才可算是電池類火災之滅

火成功。

我國目前建築物停車空間以設置泡沫滅火設備為大宗，不同於中國大陸及美國訂定停車空間防火規範專法及允許停車空間在依一定條件下設置自動撒水系統。學者李雨修【69】提出泡沫滅火設備泡沫原液保存情形會影響滅火效能，而自動撒水設備具有經濟及環保效益且系統穩定度較高，同時其研究結果發現自動撒水系統可抑制火焰高度與阻止機車間延燒，同時開放式撒水系統相對於密閉式撒水系統其滅火所需時間較短，此外放水量越多對於滅火與環境控制較佳，且其水損程度相較於火害損失影響較小。RISE Research Institutes of Sweden AB 曾對不同製造商的傳統內燃引擎車(ICEV)與電動車輛(BEV)進行熱釋放率測試如圖 3-29 所示。

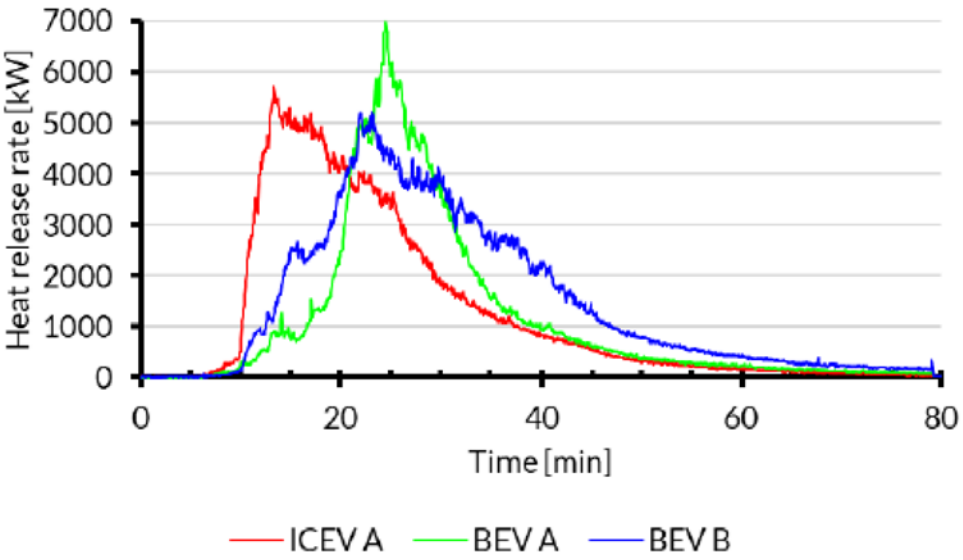


圖 3-29 油車(ICEV)與電動車(BEV)熱釋放率比較圖

(資料來源：參考文獻【70】)

主要用於分析蓄電系統的起火、發熱、故障的原因，其原因有內部短路、外部短路、過電流、過放電與使用再利用產品；而內部短路的原因則有蓄電池製造不良、低溫充電、過充電、溫度上升與衝擊。日本總務省消防廳針對加油站或商業設施設置快速充電站的安全措施，提出相關火災風險考量如下：

A. **火災風險**

- 外力造成的損壞、短路會進而引發火災。連接器端子之間可能會出現漏電現象，導致過熱並引起火災。
- 冷卻裝置故障導致零件過熱，可能會發生設備內部燒毀。
- 雷擊損壞電路導致設備燒毀和火災。
- 快速充電設備起火時可能會延燒至外部。

B. **漏電風險**

- 設置在室外時，可能會因雨水滲入發生漏電，導致觸電。
- 下雨時充電接口可能被淋濕而導致觸電。
- 外部火災時放水，水可能會浸入外殼內部，導致漏電或觸電。

C. **消防救助風險**

- 可能會產生有毒氣體並阻礙消防救助的進行。
- 外部火災可能使設備過熱並產生有毒氣體，阻礙救難行為。

鋰離子電池熱失控成因可大略分為【熱濫用】、【電力濫用】、【機械濫用】等三種類型。熱濫用包含過熱；電力濫用包含過充放電及外部/內部短路；機械濫用包含碰撞、穿透、彎曲等【66】。整理鋰離子電池熱失控發生原因如下：

(一)外部短路

從鋰電池運作原理發現，當電芯外部短路且保護裝置未能即時切斷迴路時，電芯內部將產生高熱，若溫度持續升高將造成電解液汽化，使電池外殼撐大而破裂，造成起火燃燒。當電池發生過充時，負極材料表面容易析出金屬鋰，從而形成鋰枝晶引起短路，短路可能造成鋰電池儲存的能量以熱形式釋放，造成短路區域溫度劇烈升高，達電池起火燃燒溫度點，碰撞或崩潰本身就有可能造成鋰離子電池燃燒。

學者 A. S. Böe【71】將定制的 EV 從 20 m 的高度自由墜落，研究過程發現強烈撞擊後，鋰離子電池開始釋放大量煙霧，從而引發火災。自由墜落過程車速可達 70Km/hr。

常見電池單體觸發熱失控的方式有針刺、加熱、過充等。目前針對電池安全性的相關測試規範中，考量到可行性及再現性的需求，大多採用針刺或加熱這兩種方式來觸發電池熱失控現象。其中加熱觸發方式存有一定觸發時長，當加熱器加熱時間越長，電池試驗模組在發生熱失控現象前將吸收更多的熱能，將較難以反應電池本身熱現象；針刺試驗是指在電池中(通常是極片垂直方向)插入刺針使正負極片短路，此時電池能量會從短路位置快速釋放，導致局部溫度短時間急劇升高，因沒有多餘的外部能量介入且觸發熱失控現象的時間較為迅速，被視為最苛刻的電池濫用條件。不同標準組織對於刺針類型與結構、針刺方向、針刺速度、刺入深度均有明文規定，本研究團隊針對各國針刺試驗規範標準整理如表 3-11 所示。

針刺造成熱失控現象大致分成 4 個階段：

- **階段一**：針刺開始，電壓下降，過大的短路電流使局部產生巨大焦耳熱。
- **階段二**：溫度驟升，熱穩性差的 SEI 膜與負極分解釋熱。
- **階段三**：溫度逐漸升高，當溫度達安全極限時，正極材料與電解液開始分解釋熱。
- **階段四**：熱失控達到溫度最高點，並逐漸進入降溫階段。

表 3-11 各國針刺試驗之規範要求表

規範	GB/T31485 (中國)	IEC TR 62660-4 (歐盟)	EVS—UN GTR (聯合國)
	單體/模組	單體/模組	單體
刺針參數	**鋼針：** 直徑為 5-8 mm；針尖圓錐角度為 45°-60°。	**陶瓷針：** 直徑為 3±0.2 mm；針尖圓錐角度 45°±3°。 **鎳頭陶瓷針：** 直徑為 1±0.1 mm；針尖圓錐角度 28°-45°	**鋼針：** 直徑為≥3mm；針尖圓錐角度 20°-60°。
位置	**單體：** 電池幾何中心貫穿。 **模組：** 依次貫穿至少 3 個單體	電池幾何中心貫穿。	可能導致熱失控的方向(電芯排氣口位置)。
方向	垂直電池極板方向	垂直電池極板方向	垂直電池極板方向
速度	25±5 mm/s	≤0.1 mm/s	0.1～10mm/s
標準	當『**鋼針貫穿**』時停止動作，1 hr 內不得起火及爆炸。	當『**壓降≥5mV 或針刺深度達電池一半**』時停止動作，1 hr 內不得起火及爆炸。	5 min 內無產生火苗及煙霧。

(資料來源：參考文獻【72】【73】【74】)

(二)內部短路

內部短路為最常見的熱失控成因。觸發電池熱失控的主要直接因素是劇烈的內短路。內短路產生瞬間將造成局部電流急劇增大而引起局部溫度過高的現象，引發正負極材料與電解液分解而釋放大量熱量【75】。此外，若因電池保護機構設計不良或沒有安全設計裝置時，當在電池內部形成大面積鋰結晶時，電能高功率釋放或鋰結晶致刺破隔膜造成內部短路，皆會引起電池起火燃燒。由圖 3-30 說明不同機械外力造成電池內短路的原因，其中：

圖 3-30 (a)：正常狀態。正常狀態下卷芯截面的 X 射線照片，正常極片表面平整，卷芯層次均勻。

圖 3-30 (b)：擠壓測試。擠壓導致內短路，隔膜無規則破裂或多層正負極片出現位錯，刺破隔膜，引起正負極片大規模點狀接觸而造成內短路。

圖 3-30 (c)：針刺測試。主要是正負極片通過鋼針導通瞬間產生大電流，引起鋼針周圍極片電阻產熱。

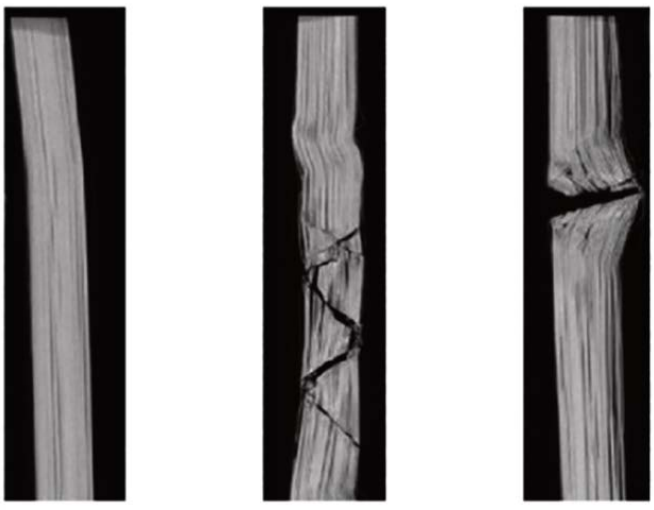


圖 3-30 X 射線觀察鋰離子電池內部結構情況

(資料來源：參考文獻【76】)

(三)過充

過充是一種常見的濫用形式，過充將使電池芯正極鋰數量大量減少，當正極儲存格會垮掉將造成蓄電量永久性下降。此外持續充電將使鋰電池電壓失去控制且處於貧鋰狀態下的正極材料將不斷放熱，電解液開始分解並釋放大量氣體與熱量，導致電池內部壓力增大而撐破電池外殼。由圖 3-31 發現，溫度伴隨充電時間提升，而到達 80℃(F 點)時，溫度變化率明顯增大，最終達最高溫度 561℃(G 點)。

此趨勢明顯說明電池進入過充階段後，鋰離子將被還原成金屬鋰，當金屬鋰急劇增加，不僅會提高電池溫度且金屬鋰會堆積到負極表面形成鋰枝晶，鋰枝晶刺破隔膜將造成電池內部短路而引起電池熱失控【77】。此時不論是溫度過高使材料燃燒爆炸，還是外殼先被撐破使空氣進入與鋰金屬發生激烈氧化，都會引起激烈反應(例如：爆炸)【10】。

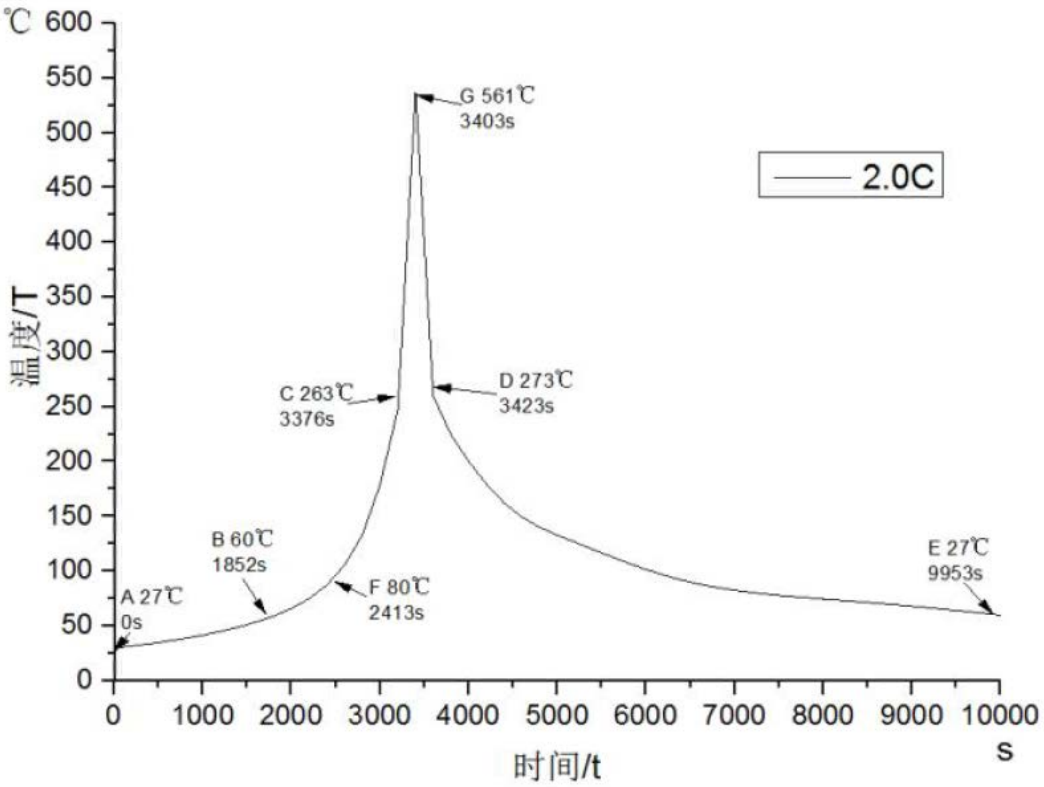


圖 3-31 鋰離子電池電池過充試驗溫度變化曲線圖

(資料來源：參考文獻【77】)

第六節 鋰離子電池燃燒情形

目前鋰電池最大爭議點在於安全性，鋰離子電池作為主要儲能裝置為生活便利帶來一大躍進，但潛在安全問題也成為鋰離子電池開發及應用的瓶頸。「熱能」為造成鋰離子電池熱失控(Thermal Runaway)的關鍵，無論是因電池濫用或外界環境因素(例如：高溫環境、潮濕環境等)使鋰離子電池溫度不斷爬昇並超過電池出廠安全溫度，此時電池內部 SEI 膜(固態電解質介面)、電解液、黏著劑、負極和正極材料等組件會逐步產生裂解而引起放熱反應，從而發生鋰離子電池燃燒、爆炸等意外。

常見電池失控原因包含電池過度充電、瞬間大電流充電、不當加熱、正負極材料接觸短路、外部擠壓造成內部短路等。鋰離子電池尤其是三元正極材料鋰離子電池，如使用不當，會發生泄漏、燃燒甚至爆炸，釋放有毒氣體。學者王青松等人【12】研究調查發現，電池產熱過程被視為電池安全性的主要威脅，若要保證電池安全性，應做好電池散熱系統、相鄰電池熱隔離措施。此外鋰離子電池燃燒所衍伸的熱蔓延現象亦不容忽視。熱蔓延意旨電池單體釋放的熱量會向周遭相鄰電池傳遞，造成整體動力系統的所有電池發生熱失控，此時巨大能量在短時間內釋放將加重火災危險性與涉及範圍。

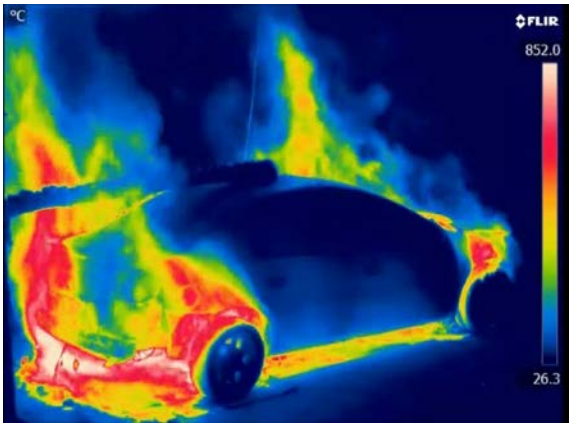


圖 3-32 電動車輛燃燒溫度圖

(資料來源：參考文獻【78】)

目前市面廣泛使用的電池類型大致分成方型電池、軟包電池及圓柱型電池三款，不同類型、組成材料的電池熱現象會有所不同，舉例來說，方型電池由於電容量大，厚度亦較其他二款大，使得電池熱失控過程之電池內部與表面存在明顯溫度差；不同串接方式也會對熱現象造成差異，串聯的電池模組發生熱失控時，電路將處於斷路狀態；並聯的電池模組發生熱失控時，除失效電路外，其他並聯電路並不會產生斷路，此時失效電池可能被視為短路負載，其餘正常電池不斷將電能通過失效電路，將使電池出現局部昇溫現象。電池類火災因同時包含多種類型的火災特性(液體、氣體、金屬)，很難以被快速撲滅，從而造成國人財產損失或危害國人生命安全【13】【79】。學者 Tobishima 等人提出鋰電池 7 種可能的放熱反應【80】:

1. 負極與電解液的還原反應。
2. 電解質中存在的熱分解。
3. 正極與電解液的氧化反應。
4. 負極材料的熱分解。
5. 碳材黏著劑的熱分解。
6. 正極材料的熱分解。
7. 隔離膜裂解造成大量的熱產生。

電子產品的供應需求推動鋰離子電池能量及密度的增加，當電池進入熱失控狀態時，它可能會排放並噴射微粒及易燃且有毒氣體。學者 Ohsaki T.【81】發現當內部電解質溫度超過 60°C 時，將釋放大量 CO_2。學者 Santhanagopalan【82】研究提出，在剛性外殼尚未破裂或氣體安全閥未啟動前，電池內部熱能釋放量會受到電池產氣的影響，相比於氣體安全閥未開啟前，可達 2~3 倍的熱量釋放。因此電池氣體安全閥的啟動可作為一種判斷電池是否即將進入熱失控的判斷根據。

彙整學者 FENG【83】及 Doughty【84】將鋰離子熱失控過程分為三個階段，簡述各階段現象如下：

第一階段：此階段電池處於悶燒階段。電池伴隨熱量與氣體積累，因電池為密閉狀態無法讓氣體釋出，致使電池外觀逐漸膨脹。由於電池內部 SEI 膜分解以及正負極與電解液發生化學反應，此時負極與電解液兩者所產生的熱量佔熱失控第一階段總釋放熱量的 17%。此階段溫昇速率仍屬可控，溫昇速率約為 0.2℃/min，若及早偵測可避免電池發生熱失控。

第二階段：當鋰離子電池表面溫度逐漸升高至安全值(通常為 130℃以上)將引起熱失控現象，此時可明顯聽見爆炸聲與明亮火花，火花主要來自高溫電解液的噴射。此時電池內部 SEI 膜坍塌而造成內部短路（ISC）發生，此時內部短路所產生的熱量佔整體熱失控釋放熱量的 9%。

第三階段：正負極間的氧化還原反應開始並釋放大量熱量，占總熱量的絕大部分，該學者提出熱失控階段的溫昇速率應大於 10℃/min。

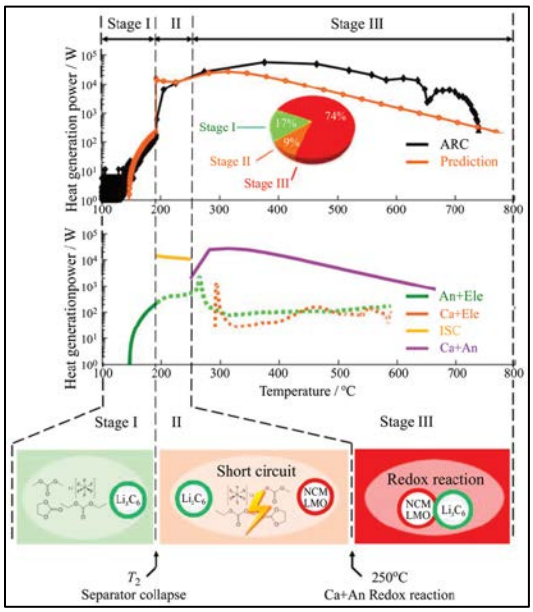


圖 3-33 特徵溫度下的熱失控反應機理

(資料來源：參考文獻【83】)

鋰離子電池熱失控過程除釋放熱量外，有毒氣體的排放也是鋰離子電池熱失控過程的另一個危害風險因素。鋰離子電池燃燒廢氣不僅有毒且可燃，當電池火災發生在封閉空間更存在爆炸風險。鋰離子電池熱失控過程所排放的有毒氣體為現階段電動車起火救援的研究重點，當電動車輛熱失控且發生在停車空間或隧道等半密閉空間時，其危險程度隨之增加【85】。

傳統汽/柴油車與電動車之火災燃燒產物截然不同，汽/柴油車燃燒時會產生完全燃燒產物(例如：二氧化碳(CO_2)與水(H_2O)及其它不完全燃燒產物(例如：一氧化碳(CO)與氮氧化物(NOx)等其他有毒氣體)，但電動車起火燃燒不僅會產生上述燃燒產物，還會產生劇毒氣體(例如：HF、HCl、HBr、HCN、SO_2)產生，其中電動車起火會產生比燃油車起火更多的氟化氫(HF)。氟化氫(HF)是一種有毒、腐蝕性、重量輕的氣體，可以滲透某些類型的安全防護裝備，同時 HF 在低濃度時便會對刺激人體【55】。因此鋰離子電池火災之毒性氣體稀釋為救援過程的重點所在。如表 3-12、表 3-13 所示。由表 3-14 說明不同氣體的自燃溫度，因此當電池熱失控時，應盡快降低火場環境溫度至氣體自燃溫度，方可降低氣爆或火勢蔓延的風險。

表 3-12 油車(ICEV)與電動車(BEV)燃燒氣體種類

Gas measurements	燃油車	電動車
CO_2,[kg]	344	438
CO,[g]	6,420	9,510
THC,[g]	2,370	2,750
HF,[g]	11	859
HCl,[g]	1,100	1,800
HBr,[g]	18	88
HCN,[g]	-	155
SO_2,[g]	479	645
NO,[g]	452	617
NO_2,[g]	44	76
PAH,[g]	112	334

(資料來源：參考文獻【70】)

表 3-13 不同規格電池的燃燒廢氣表

Value	NMC【63Ah】					LFP【2.5Ah】				LFP【1.5Ah】		
SOC	50	75	100	OC	SC	50	75	100	OC	50	75	100
CO_2	19.6	25.7	40.3	38.8	65.9	44.3	20.2	63.4	20.9	22.5	23	35.1
CO	29.2	38.1	11.4	34.4	19	7.6	15.9	15.1	26.1	12	13.9	11.3
NO_2	-	-	-	-	-	4.9	9.7	5.9	1.3	4.8	5.6	4.9
CH_4(methane)	12.6	9.4	19.4	12.5	2.7	4.3	5.6	3	3.7	5.9	5.9	5.6
C_2H_6(ethane)	10.6	10.5	11.7	4.8	7.6	15.6	23	7.7	15.4	21	23.1	20
C_2H_4(ethylene)	10.5	4.4	9.6	4.9	1.6	7.3	11.4	1.9	13.7	12	8.8	5.8
C_3H_8(propane)	-	-	-	-	-	3.9	5.8	0.6	4.2	5.8	3.7	4.5
HCL	9.7	0.8	1.9	0.2	0.2	1.1	0.8	0.2	0.3	2.1	1.9	1
HF	0.7	0.3	0.3	0.1	0.1	1.6	1.6	0.4	0.1	1.9	3.7	3.6
HCN	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0.1	0.4	0.7	0.6
C_6H_6(benzene)	4.1	5.2	1.1	4.3	1.9	0	0.7	0	13.6	0.6	0	0.3
C_7H_8(toluene)	2	4.1	0.3	0.5	0.9	0	0	0.2	0	0.1	0.5	0.7
C_2H_6O(ethanol)	0.3	0.7	2.9	0.1	0	3.7	0.4	0.5	0	7	4.6	4
CH_4O(methanol)	0.7	0.8	1.1	0.5	0.2	5.6	4.7	0.9	0.4	3.9	4.6	2.5

(資料來源：參考文獻【13】) 備註：單位為%

表 3-14 氣體自燃溫度表

Value	自燃溫度(℃)	Value	自燃溫度(℃)
Ethylene Carbonate	465	C_3H_8 (propane)	455
CO_2	-	HCL	-
CO	609	HF	-
NO_2	-	HCN	538
H_2	536	C_6H_6 (benzene)	560
CH_4 (methane)	580	C_7H_8 (toluene)	530
C_2H_6 (ethane)	515	C_2H_6O (ethanol)	365
C_2H_4 (ethylene)	450	CH_4O (methanol)	470

(資料來源：參考文獻【13】)

第七節 鋰離子電池類火災的特性

鋰離子電池最大的特點就是單位重量的能量密度高，且具高電容與高電壓。因為其電極是用鋰化合物與石墨做成，以同樣蓄電量比較，重量比傳統電池輕不少，非常適合作為攜帶式電子產品的電力來源。鋰離子電池需儘量避免過度充電，因充電時是把正極的鋰離子遷出並嵌入負極，若正極的鋰離子一直沒有回到正極，可能造成正極材料結構崩壞而影響電池的安全性及使用壽命。因此，鋰離子電池產品通常需要有電池管理系統，以維持其安全性及健康狀況。【135】

鋰離子電池主要由正負極材料、隔離膜、電解液、外殼等構件組成，經由串聯、並聯方式結合成為電池模組。其中電解液為有機溶劑與鋰離子化合物之溶質組合而成[4]，具有高度易燃性。一旦發生鋰離子電池熱失控，將產生帶有鼓包、脹氣、膨脹甚至爆炸的高危險劇烈反應，並伴隨大量有毒濃煙，存有爆炸、中毒等危害風險。

鋰離子電池類火災具有以下特點：

- **燃燒猛烈、蔓延迅速**

  鋰離子電池發生火災後，由於鋰元素遇水將產生反應生成 Li_2O 和 H_2，使火勢迅速猛烈燃燒、蔓延速度極快。

- **毒害性強、危險性大**

  鋰離子電池燃燒將伴隨大量有毒煙氣產生，對救災團隊或現場民眾可能造成頭暈噁心的狀況，甚者造成中毒昏迷。同時鋰電池快速且大量的化學反應可能引起爆炸，高溫及強烈衝擊波對救災團隊將成為嚴重的潛在危險。

[4] 資料來源：https://www.stockfeel.com.tw/鋰離子電池（lithium-ion-battery）的原理、特性與應用/

- **復燃機率大**

  由於鋰電池具備持續放電特性，明火熄滅仍需持續撒水降溫，確保電池表面溫度保持在合理安全範圍內。此期間救災團隊需利用測溫設備對起火電池進行實時檢測，防止電池復燃或突發事故發生。鋰離子電池的工作溫度範圍較窄，當電池溫度超過最佳使用溫度時，會對電池的壽命和工作性能產生嚴重的影響。

學者 Long【65】於 2013 年針對電池類型進行火災實驗發現，鋰離子電池火災撲滅的最大困難點在於準確的向火源撒水。因為電動車的鋰離子電池大多放置於車底，然而建築物設置的滅火設備一般設置在天花板，它們僅能對車體外殼進行冷卻，但工作流體卻無法到達燃燒電池內部，因此該學者在火災實驗中發現，鋰離子電池火災會有多次復燃的問題。

第八節 鋰離子電池火災滅火措施

現階段各類研究指出，鋰離子電池火災的最佳滅火方式，是尋找一種能夠高效將鋰離子電池釋放熱量快速排除或冷卻，即可降低鋰電池熱失控的危害及抑制熱失控發展，若無法將鋰離子電池釋放的熱量排除，將會使災害變得不可收拾。

然而大部分電池模組設計緊密且為防止電池受到異物汙染，電池出廠的國際防護等級(IP)很高。電動車的動力電池一般放置於車底，造成固定式滅火設備由上往下的噴撒方式，很難將滅火物質直接覆蓋在電池表面，間接造成電池難以在短時間撲滅的原因。

學者徐雪春【86】研究發現採用全室噴水或水霧滅火系統可能對於電池內部難以侵入；但若使用水及低膨脹泡沫等熱容量高的滅火劑，除具有快速冷卻的作用外，低膨脹泡沫因降低流體表面張力而提高流體滲透的可能性，改善純水無法有效侵入電池內部的問題；使用熱容量較小的滅火劑(例如：高膨脹泡沫和氮氣)，則冷卻效果較差。

FAA 研究報告【3】提出海龍滅火劑無法抑制鋰電池火災且該機構 2014 年的鋰電池火災撲滅技術研究報告中提到水基型滅火劑(如水，AF-31，AF-21 等)相較於非水基型滅火劑(如 FM-200，FE-36 等)對於鋰電池火災抑制效果更好。目前對於鋰離子電池火災的撲滅研究發現，鋰離子電池火災使用水或水基型的滅火設備並不會對救援人員造成觸電危險【65】【87】。

其他專家學者也針對各相態滅火設備進行研究發現，固體滅火劑對撲滅鋰電池火災效果不佳；氣體滅火劑雖具備無顆粒物、無腐蝕、無殘留的優點，但因降溫效果有限，不適合應用於鋰電池火災；液體滅火劑具有強大的降溫能力，為抑制鋰電池火災中效果最佳的選擇。

目前各種滅火系統應用於電池類火災的抑制文獻彙整如下【89】。

一、水及泡沫系統：

水滅火系統被廣泛應用於各種建築場所，其滅火介質為相對廉價、可再生、環境無污染的水，但水滅火系統因粒滴顆粒大，僅適合用於 A 類火災。水滅火系統主要是靠直接冷卻來撲滅火災，整個撲滅過程耗水量高、水損大、噴頭誤動作後果嚴重。

因純水雖然可用於撲滅電池類火災，但用水量大，因此需額外加入其他添加劑，例如：全氟己酮、水成膜泡沫、F-500、Firesorb 添加劑等具有較大的比熱容，能夠對電池火災起到有效撲滅效果。學者 Larsson【90】研究發現，水可作為鋰離子電池火災的滅火流體，但撲滅過程產生的有毒廢水，可能對生態造成汙染，因此需研究後續撲滅廢水的處理。

學者 Andersson【91】研究指出，只要能夠將具有高熱容量的物質(例如：水或低膨脹泡沫)直接噴入鋰離子電池內部，則可有效撲滅火勢，此外使用低表面張力的物質有助於將流體快速擴散並覆蓋在電池模組內部各個表面；高黏度藥劑則不具備快速擴散的能力。

二、氣體滅火系統：

惰性氣體滅火劑，主要由二氧化碳、氮氣和氬氣按一定比例混合而成，其滅火機理為降低火場內的氧氣濃度，從而實現滅火【92】。惰性氣體靜電絕緣性好、對臭氧層無破壞性、滅火過程清潔環保且無殘留物，常用於封閉空間的撲滅技術；缺點是具有毒性，不能用於有人員駐留的場所。此外氣體滅火劑雖能夠起到滅火作用，但基本不具備降溫能力且比熱容較小，若無法長時間或採淹沒式的方法則對於鋰離子電池火災的滅火效率不高。

因此，雖然目前有些儲能電池廠採用管網全淹沒式氣體滅火系統，採用七氟丙烷（HFC）、三氟甲烷、IG-541、IG-100 等作為滅火介質【93】，若無法長時間或採淹沒式的方法則對於鋰離子電池火災的滅火效率不高。其中七氟丙烷通常以液體形式儲存在容器中，其滅火機理為物理冷卻與化學抑制。

七氟丙烷電絕緣性良好、不會對臭氧層造成破壞、整個滅火過程清潔環保且無殘留物，但其腐蝕性比較強且有效滅火及防護區域較小。學者張青松【94】等人研究表明七氟丙烷（HFC）可有效地撲滅單體或小型電池模組火災，但電池內部放熱反應仍可能使電池複燃。學者 LIU Y. J. 【95】研究發現氟化酮能有效抑制電容量規模較大電池火災，但需調整氟化酮的劑量。

三、細水霧系統：

細水霧滅火技術繼 1987 年《加拿大蒙特利爾公約》迎來快速發展階段。細水霧系統相對於傳統自動撒水具有明顯優勢，傳統自動撒水設備主要採噴撒大量純水來達到撲滅或冷卻作用，但會對噴撒對象造成永久破壞且存有電氣短路的風險，不能應用於高壓及電類場所。

細水霧系統雖其介質同樣為水，但其透過噴頭設計產生足夠細小的水霧，除能增加吸熱表面積外，亦有隔絕氧氣的作用【96】，對於電氣火災也有抑制作用，打破『液態水』不能撲滅 B 類火災的限制。細水霧系統優點包含用水量少、反應靈敏、動作迅速、短時間滅火、遮罩熱輻射的作用，可降低人體熱灼傷概率，使救援人員快速接近火源區域。

LUO 等【97】研究含有添加劑的水霧系統對於電池類火災的滅火效果，其中實驗結果發現添加 5%的 F-500 對於電池火災的滅火效果明顯優於純水，可以在短時間內撲滅明火並快速降低電池表面溫度。

四、固態滅火系統：

固態滅火系統包含磷酸銨鹽、氯化鈉、硫酸銨、超細乾粉等，其滅火原理是化學抑制和窒息滅火，滅火效果較差。固體滅火劑對撲滅鋰電池火災效果不佳，而氣溶膠滅火劑是一種新型固態滅火劑，其主要作用是發生氧化還原反應產生大量的煙霧，達到化學抑制和降低火場中的氧氣濃度【98】。氣溶膠滅火不會對臭氧層造成破壞，且具有滅火效率高、無毒、安裝維護簡單、在大氣中存留時間短、儲存方便的優點。然而氣溶膠滅火劑不適合在人員密集場合使用。

五、AVD 滅火劑

AVD 滅火劑(Aqueous Vermiculite Dispersion)是一組水合層狀鋁矽鐵鎂矽酸鹽的名稱，加熱時會發生明顯膨脹。AVD 不易燃並具有出色的散熱性絕緣性。AVD 會在火源上方形成一不易燃的薄膜，作為隔絕氧氣的屏障。

第九節 國外全尺度電動車火災實驗[5]

2009 年，美國國家消防協會(NFPA)開始與美國能源部(DOE)和汽車行業合作，為緊急應變人員製定、實施與提供安全培訓的計劃，使其可以安全處理電動汽車的事故。為了加強 NFPA 和汽車工程師協會(SAE)針對涉及電動汽車(electric drive vehicle，EDV)的火災緊急情況，進行了全面的滅火測試，以收集數據並評估電動汽車(EDV)火災與傳統內燃機(internal combustion engine，ICE)相比的差異。

消防策略與實驗目的

1. 美國國家公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration，NHTSA) 對配備高壓電池的電動汽車和混合動力汽車的臨時指南描述了 EDV 危害相關的潛在後果，並提出了在涉及 EDV 的事故發生後，保護緊急應變人員、拖曳或回收、存儲、維修的通用程序。

2. 鎳氫電池(NiMH)和鋰離子電池(Li-ion)被推薦用來假設當作電動車的推進力電池系統。

3. ICE 滅火戰術與當前對 EDV 滅火戰術的建議基本一致：識別車輛；固定車輛；使車輛熄火或關閉；救援；滅火。

4. 鑑於 EDV 的激增，急救人員現在必須首先識別車輛（即它是 ICE 還是 EDV），然後才能執行任何操作。ICE 和 EDV 策略之間的主要區別包括：需要大量的水來撲滅 EDV 電池起火、EDV 相關的高壓電氣危險，以及建議在火災後將所有損壞的 EDV 存放在距離

[5] 本節內容翻譯自 Blum, A. and Long, R., "Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 8(2):2015, doi:10.4271/2015-01-1383.

其他結構或車輛 50 英尺以外的地方。

防護設備

1. 典型的緊急應變人員防護設備包括：聚苯並咪唑纖維(polybenzimidazole，PBI)外套、褲子、聚碳酸酯頭盔、袋鼠皮或皮革手套、PBI 或蘭辛頭巾、皮靴和自給式呼吸器 (self-contained breathing apparatus，SCBA)。

2. 電動車火災的危害可分為三個不同的類別：化學（腐蝕性或有毒化合物）、電氣（高壓系統）和熱（燒傷）。

3. 研究目標之一是從實際的 EDV 電池火災中獲取科學數據，為急救人員在 EDV 火災中可能遇到的情況以及如何最好地保護自己和設備提供依據。

實驗電池規格

1. 美國市場上的許多 EDV 均使用大型鋰離子電池組排列的鋰離子電池，鋰離子電池包含高能量密度和易燃有機電解質。

2. 鑑於當前汽車行業的發展方向，故採用鋰離子電池進行全面測試。電池從兩家汽車製造商處採購，指定為電池 A 和電池 B。電池 A 是 4.4 kWh 電池，用於安裝在車輛後車廂下方的插電式混合動力電動汽車(PHEV)；電池 B 是 16kWh 電池，用於增程型電動汽車(EREV)。T 形電池幾乎橫跨車輛從後軸到前軸的長度，並牢固地安裝在車輛底板下方。

備註[6]：EREV 增程型電動車有點類似 PHEV 插電式混合動力車款，具有燃油引擎、電池和電動馬達，也就是說需要幫油箱加油，也要幫電池充電。然而，不同的是 EREV 增程型電動車的引擎主要用途是「幫電池充電」，不提供車輛的動力輸出，車輛的動力來源還是全靠電池與馬達提供。

熱釋放率測試

1. 熱釋放率(HRR)測試的主要目的是確定電池在被外部點火源點燃時釋放的能量。

2. 由於 EDV 電池數量有限，故只有一個電池進行了 HRR 測試。電池 B 位於五個不銹鋼架支撐的 20x20 英尺的引擎蓋下方。不銹鋼架將電池固定在距離地面 20 英吋的位置，以便在測試期間為電池底部提供視角。四個以丙烷為燃料的燃燒器放置在電池下方 6 英吋處，為電池底部提供約 400kW 的火，持續 20 分鐘，如下圖。

圖 3-34 用於 HRR 測試的電池 B 配置和燃燒器的位置
(資料來源：參考文獻【83】)

[6] 資料來源：https://tw.stock.yahoo.com/news/電動車-ev-bev-hev-phev-122830805.html

在外部電池外殼、內部電池以及距電池 5 英尺和 10 英尺的隔離距離處記錄溫度和熱通量測量值，如下圖。在電池正上方放置一個較小的 10 英尺乘 10 英尺的罩子進行收集氣體樣品，以便將燃燒產物匯集到氣體採樣管中，進行分析有毒或腐蝕性化合物。

錄影機和熱像儀也被放置在電池周圍以記錄測試，直到實驗完成。

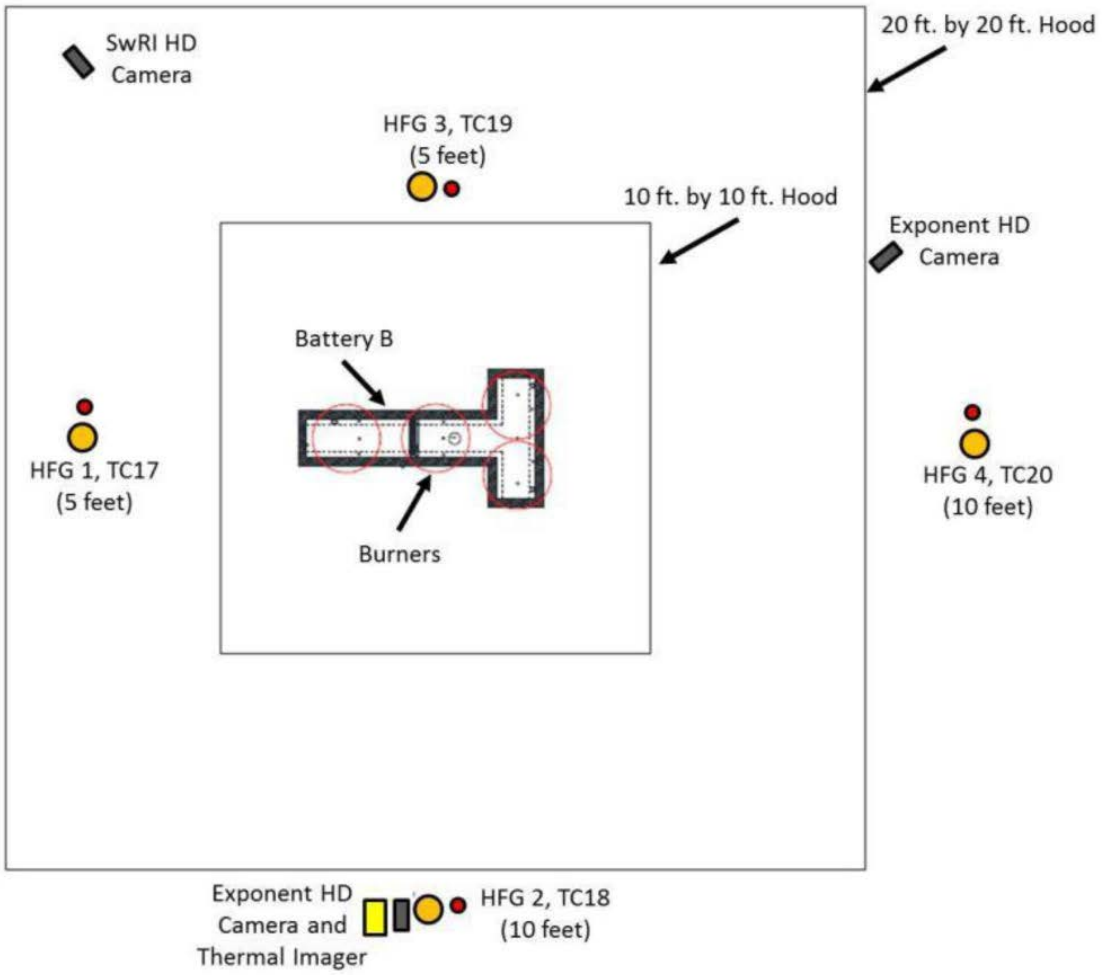


圖 3-35 HRR 測試設置

（資料來源：參考文獻【83】）

3. 測試期間測得的最大 HRR 約為 700 kW，測試時間為 17 分 30 秒（燃燒器關閉前約 3 分鐘）。移除 400kW 丙烷燃燒器後，電池因火災而釋放的峰值熱量約為 300kW。一旦燃燒器關閉，大約 20 分鐘，HRR 會隨著電池的自持燃燒而達到平穩狀態，然後緩慢衰減，如圖 3-36。

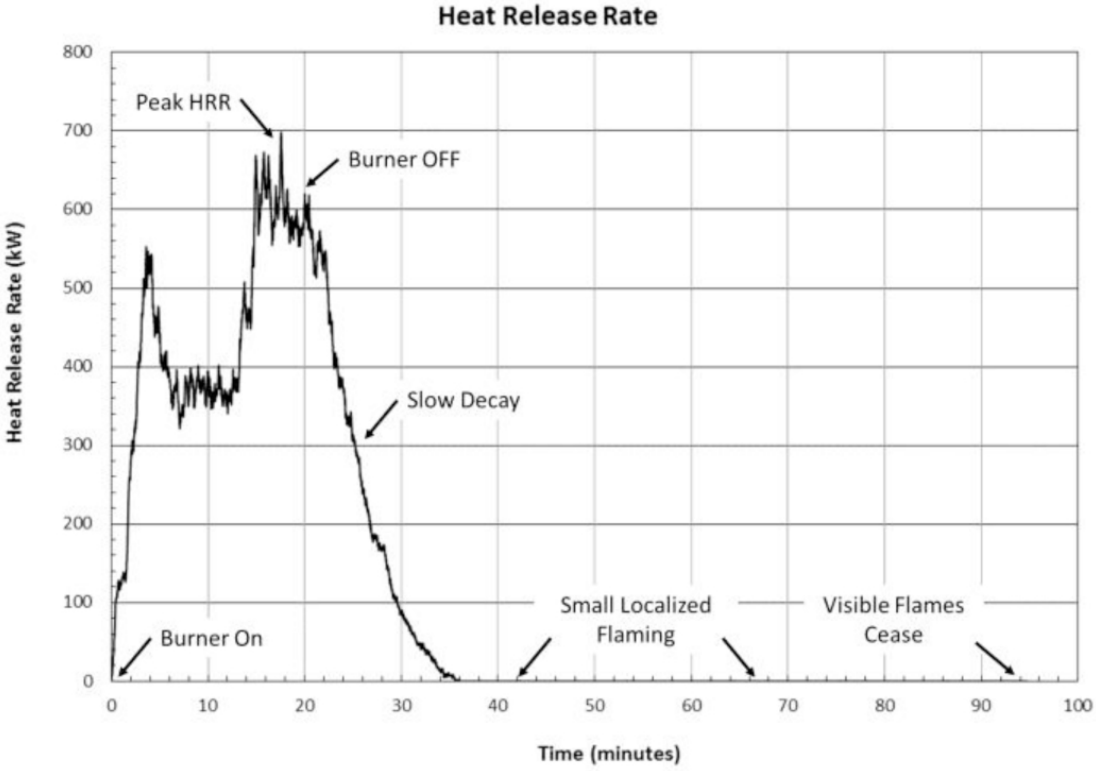


圖 3-36 HRR 測試結果

（資料來源：參考文獻【83】）

4. 從 HRR 數據與圖 3-37 可以看出，在 36 分鐘之後，電池上的火焰明顯消退到 HRR 基本為零的點。電池上的局部小火焰持續了大約一個小時，此時所有可見的火焰都停止了。當可見火焰停止時，觀察到的外部最高溫度約為 750˚F (400˚C)。在所有可見火焰停止三小時後，電池上觀察到的最高外部溫度仍然升高，約為 310˚F (155˚C)。

圖 3-37 HRR 測試圖像

初始燃燒器啟動(左上)、大約 4:00(右上)的初始峰值 HRR(～550kW)、
17:30 左右(左中)峰值(～700kW)、燃燒器在 20:00 左右關閉(右中)、
47:00 左右(左下)從電池噴出小火焰、可見火焰在 1:34:00 左右熄滅(右下)

(資料來源：參考文獻【83】)

5. 測試期間在距電池 5 英呎距離處測得的最高空氣溫度和熱通量介於 201.7 和 230.0°F（94.3 和 110°C）和 17.1 和 18kW/m^2 之間；在 10 英尺處，這些值下降到 106.7 和 127.0°F（41.5 和 52.8°C）和 3.7 和 4.7kW/m^2 間，如表 3-15。

表 3-15 HRR、溫度和熱通量結果

Measurement	Value	Time
HRR Maximum	698 kW	0:17:33
TC17 (5 feet)	201.7°F (94.3°C)	0:24:09
TC18 (10 feet)	127.0°F (52.8°C)	0:24:27
TC19 (5 feet)	230.0°F (110°C)	0:18:14
TC20 (10 feet)	106.7°F (41.5°C)	0:22:35
HFG1 (5 feet)	17.1 kW/m^2	0:23:05
HFG2 (10 feet)	4.7 kW/m^2	0:15:52
HFG3 (5 feet)	18.0 kW/m^2	0:14:54
HFG4 (10 feet)	3.7 kW/m^2	0:14:54

(資料來源：參考文獻【83】)

實驗模型

1. 因車輛成本昂貴，故製造車輛模型配置兩種不同電池組件模擬，車輛模型的支柱構造在尺寸和設計上都類似於現代 EDV，並在後部打開(類似掀背車)，以便安裝電池

2. 使用相同車輛模型可對不同的電池和電池尺寸和安裝位置進行多次測試。

3. 將電池放置於 0.25 英吋的鋼板定部，模擬車輛的底板，底板下方 6 英吋放置燃燒器使得熱源能傳至電池組件的底部。

圖 3-38 車輛模型配置圖

（資料來源：參考文獻【83】）

毒液取樣

1. 在測試中從車輛模型下方收集水樣本，分析 EDV 電池起火後水中是否存在有害物質。

2. 與之前的 HRR 測試類似的位置收集溫度和熱通量測量值，直到外部電池溫度降至接近環境水平。溫度記錄電池外殼和內部電池，熱通量記錄 5、15、20 和 25 英吋的間隔距離處。

電流量測

1. 檢驗消防人員在撲滅 EDV 火災時是否有觸電的可能性

2. 記錄電氣測量以調查消防員在撲滅 EDV 火災時觸電的可能性，通過直接接觸車輛模型支柱或向高壓電池施加穩定的水流。電氣測量是通過測量滅火噴嘴和電池所在的底盤主體處的電壓和電流進行的。

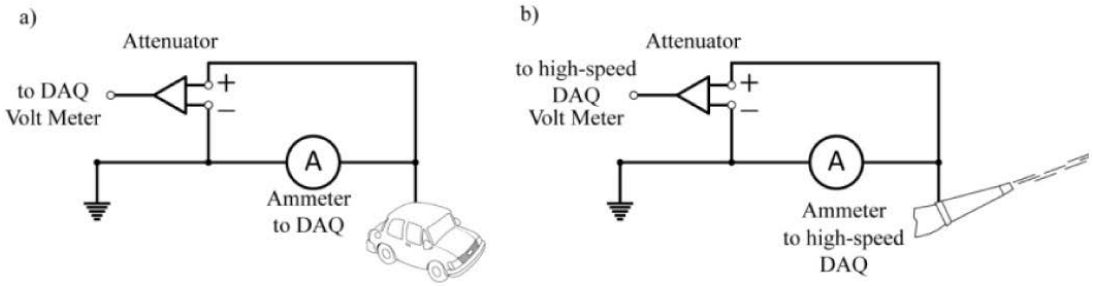


圖 3-39 電力測量的簡化電路圖

（資料來源：參考文獻【83】）

滅火程序

1. 滅火過程由馬里蘭火災研究所(Maryland Fire Research Institute，MFRI)執行，且沒有提供應採取何種撲滅火災的指導，任何策略均基於 MFRI 消防人員多年的消防和培訓經驗來執行。

2. 消防小組被限制使用工具接近車輛模型支柱和電池，由於存在四個丙烷燃燒器，也被限制從車輛模型支柱下方滅火。

3. 鑑於美國採用的典型車輛消防技術，雖以前的研究已經調查滅火使用添加劑的水作為滅火好處，但這項研究僅使用水來滅火。

4. 水從附近的消防栓供應，且由一條直徑為 1.75 英吋的軟管在 75 psi 的壓力供水，即每分鐘排放約 125 加侖的水 (gpm)。在測試期間量測用水量，以便可以確定用於抑制的總用水量的估計值。

實驗結果

1. 六次測試，分別為電池 A（指定為 A1、A2 和 A3）電池 B（指定為 B1、B2 和 B3）作三次測試，

2. 其中兩項測試是在車輛模型內放置電池組，另一項測試除了在車輛模型內放置電池組亦加上汽車內裝作測試。見下圖。

圖 3-40 車輛模型的內裝配置

（資料來源：參考文獻【83】）

3. 車輛有內裝的全尺度滅火測試，產生的火災更加強烈，火焰高度更高

4. 在最大熱通量測量中(距車輛模型 5 英呎的距離處)，車輛模型內僅放置電池組測量值在 2.1～3.7 kW/m^2 之間，加上內裝的測量值介於 8.1～11.9 kW/m^2 之間。

5. 在所有測試過程中都能聽到電池組內部的爆裂和電弧聲及產生大量煙霧，但電池並無爆炸飛出的情況

6. 在測試過程用水成功撲滅了所有火災，但 EDV 電池火災與傳統 ICE 車輛火災相比，澆水所需的時間和滅火所需的總水量明顯較多。

7. 測試期間收集的水樣本表明存在氯化物和氟化物(可能以 HF 和氯化氫(HCl)的形式存在)，溶液中氯化物的濃度為正常檢測水平的 2 至 3 倍，而氟化物的濃度則為正常檢測水平的 100 多倍，水樣本中沒有發現其他腐蝕性或有毒化合物。

8. 在測試中底盤電流可以忽略不計，因為底盤上的電壓水平達到大約 0.3 或 0.4 V 的範圍，與測試前的測量結果一致。消防員向高壓電池注水時，噴嘴處的電壓和電流水平亦可忽略不計。

9. 在電池熄滅後，需監測溫度直到它們恢復到接近環境條件。電池的外部溫度通常會在熄滅一小時後恢復到環境溫度。在其他情況下，需要長達 12 小時才能恢復到環境溫度。不過在一次測試中，電池在沒有燃燒、明顯排氣或冒煙跡象並且電池表面為環境溫度下，熄滅 22 小時候復燃。

圖 3-41 試驗過程

丙烷燃燒器點火（左上）、後方起火（右上）、
第一次滅火（左下）、完成滅火（右下）

（資料來源：參考文獻【83】）

消防人員注意事項

1. 在所有測試中，皆發現火焰在熄滅後發生了復燃。這可能與電池內的溫度過高以至於內部電池發生熱失控有關，雖然電池的可見火焰明顯熄滅，但很明顯電池內的溫度仍然足夠高，以至於內部電池仍在發生熱失控。

2. 主電池火災得到控制後，將噴嘴設置為霧狀的情況下連續向電池澆水，進一步冷卻了電池的外部，有助於降低電池的溫度、電解液額外放氣和內部電池重新點火的可能性，也減少了滅火所需的總水量。

3. 在兩次測試中，滅火的總時間超過了其中一名消防員的可用空氣

供應量

4. 消防員一致認同，進入「熱點」或「高溫」是滅火工作的重要障礙，無法在熱源和火焰產生的地方取水，以迅速撲滅大火。

5. 因電池被放置在車輛模型內，而不是功能齊全的車輛內。因此可以假設，消防員在此測試過程遇到的問題將在實際車輛火災中被放大。

用水量統計

1. 在滅火測試中用水撲滅了所有火災。如下表 1 所見，滅火時間長達 50 分鐘及使用 2600 加侖的水

2. MFRI 消防人員表示，典型的車輛火災可在 30 秒內撲滅，不過一些車輛火災可能需要長達2-3 分鐘。EDV 電池起火和典型 ICE 車輛起火相比，明顯需要更長的滅火時間及更多的總水量來滅火。

表 3-16 所有測試的水流計算總結

Test	Elapsed Suppression Operation Time (min)	Water Flow Time (min)	Total Water Flow (gal)	Comments
A1	5.88	2.20	275	Battery Only
A2	36.60	3.53	442	Battery Only
A3	49.67	9.77	1060	Battery + Interior Components
B1	26.52	14.03	1754	Battery Only
B2	37.60	21.37	2639	Battery Only
B3[a]	13.88	9.32	1165	Battery + Interior Components

[a] Suppression times and water flow times influenced by the previous experience of one of the firefighters, who extinguished the Test B2 battery fire the previous day. This firefighter acknowledged that he had gained knowledge on the best and most appropriate way to access the battery below the floor pan during the previous test.

（資料來源：參考文獻【83】）

實驗發現之重點

1. 在六項全尺度滅火測試中，消防員都使用了符合 NFPA 標準的個人保護設備，沒有觀察到有需要更換任何使用的個人保護設備的不利條件（化學、電氣和熱）。

2. EDV 電池起火和典型 ICE 車輛起火相比，明顯需要更長的滅火時間及更多的總水量來滅火，水量與時間增加的原因，係水不僅須撲滅火焰，仍須將電池組件冷卻到不會繼續熱失控的情況。

3. 水可成功用來撲滅燃燒中的電池，但需要長時間供水量的來撲滅火災及充分冷卻電池來降低溫度，供水是個問題。如：偏遠地區或沒有消火栓的地方

4. 在兩次測試中，滅火的總時間超過了一名消防員可用空氣供應量的時間。鑑於預計冷卻燃燒電池的持續時間較長，消防員協議應考慮到對多個 SCBA 儲罐的潛在需求

5. 除了可能需要更多的水和消防員可用空氣供應量之外，今日仍無足夠數據表示目前標準消防車需要改變何種裝備及策略來撲滅 EDV 火災

6. 在滅火完成後，可以藉由熱成像技術來確定電池是否冷卻及電池位置，以確保能進行下一步檢修及清理。但不應過度依賴電池外殼的溫度測量值，因在一次測試後電池處於環境溫度下，22 小時後，電池在存儲區域中復燃。因此，損壞的 EDV 在未經專業人員正確放電前，需與其他可燃物分開存放，以保護人員、建築物、結構和其他車輛。

未來注意事項

由以上觀察向 NFPA 提供了一系列建議，以補充其電動汽車應急現場指南。考慮以下可能的未來工作，以進一步了解 EDV 火災滅火策略：

1. 對實際 EDV 進行全尺度滅火測試，以評估特定車輛、不同碰撞場景的滅火策略和車輛配有電力系統後可能存在的電擊危險。
2. 更換不同規格的電池進行全尺度滅火測試，例如 18650。
3. 全尺度滅火測試中對比讓 EDV 火災自由燃燒與撲滅的優缺點。
4. 評估可直接向位於車輛底部總成下方的 EDV 電池撒水的替代噴嘴設計。
5. 評估使用新的消防策略實現滅火所需的總水流速，如穩定的水或兩組水帶滅火小隊。

第四章 地下停車空間排煙系統模擬分析

近年來因土地成本上升，地下停車空間不斷興建且隨著電動車市占率的提高，對於電動車停放於地下停車空間的安全防護應為近年來的重點議題，其安全考量應同步考慮建築格局、容留人數與火災情境等複雜條件。

一般而言，火災研究屬於不可逆的實驗，因此大多研究人員採電腦模擬軟體作為分析方式，電腦模擬軟體可用於模擬火災假想情境或還原火場，省去高昂實驗費用與人力成本，同時依照研究議題探討火災變因與結合不同參數考量，達到防火規劃設計之需求。

第一節 軟體介紹

火災模擬軟體主要用於模擬火源燃燒時所產生的熱傳與熱浮力等等相關的流體問題。軟體運算求解法以 Navier-Stokes 方程組為基礎，用於求解低速流場、煙流及熱傳遞的現象。

本研究預計使用 Pyrosim 進行電腦模擬分析，Pyrosim 是由美國 Thunderhead Engineering 公司所開發的火災模擬軟體，其數值運算架構與美國國家標準及技術研究院 NIST(National Institute of Standards and Technology)附屬建築物與火災研究實驗室 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)所開發的 FDS 相同。

FDS 為美國國家標準及技術研究院 NIST(National Institue of Standrad and Technology)和建築物與火災研究實驗室 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)所發展的火災模擬軟體。主要用於模擬火源燃燒所產生的熱傳問題與熱浮力所推動的流體問題，以大渦流模擬(Large Eddy Simulation，LES)為基礎模擬三維的火災情境。

將三維空間分割成多個細小隔點，利用數值方法求解各個守恆之統禦方程式，預估火災發生時火場的壓力、溫度、速度和煙流動等等火災的物理數據，並且搭配數據後處理軟體(Smokeview，SMV)將計算出來的結果利用 Open GL 繪圖軟體以 2D 或 3D 的方式呈現，用來觀測火場煙流流動方向及煙層分佈。

Pyrosim 電腦模擬軟體具有以下特點：具有直接回饋幾何形狀的優點，大幅度降低建構空間及設置邊界條件的困難度、可由外部匯入 2D 或 3D 的圖檔，能快速建構模擬之幾何輪廓，以及確保轉換之 FDS 文件輸入格式及語法正確，省略除錯的時間。本研究將使用 Pyrosim 版本為 2022.1.0413 版，其運算架構版本為 FDS 版本 6.7.6 版。

Pyrosim 操作步驟主要分成三個階段：

一、創建幾何形狀及設置邊界條件:

Pyrosim 可提供 2D 或 3D 的建模功能，採用基本的點線面來建構模擬所需之模型尺寸、物件規格、網格大小及邊界條件等等。同時 Pyrosim 可同步匯出成 FDS 運行計算文件格式檔(.fds)以利後續數值運算。

二、數值解:

數值解為火災模擬軟體的核心部分，Pyrosim 將已設置的模型架構及邊界與條件參數轉換成 FDS 運行碼後，以 FDS 的運算流程進行求解。

三、後處理:

將數值求解完的結果匯入 Smokeview，以 3D 的動畫效果來呈現火場場景，也可透過設置斷面層或偵測點來瞭解不同斷面的參數分佈現象。

第二節 火場煙毒危害說明

電動車或儲能設備等充電設備其充電區域應保持現場通風良好且空間容積需有一定規模以降低充電過程可能伴隨釋放的氣體濃度。以鉛酸蓄電池為例，學者陳瑜平【9】研究鉛酸蓄電池電動車輛設置於空間區域的安全措施評估發現，鉛酸蓄電池充電過程會產生氫氣和氧氣，當氫氣蓄積到臨界值可能存有爆炸風險，因此防止氫氣爆炸的措施主要有 3 種途徑(防止氫氣濃度過高、避免現場有明火、靜電或電火花等火源、切斷空氣或氧氣供給)，因此設置充電設備之區域應如同設置加油站，保持空間環境通風充足。此外地下停車空間發生火災事故時，火災發展特性取決於氧氣供給量，當氧氣量不足則可燃物將不完全燃燒而衍伸數種副產物氣體，因此如何將煙氣流動方向與人員逃生方向錯開，將是研究通風換氣設備設置方式的重要方向。

地下停車空間之火災煙氣流動與蔓延特性與地上層建築火災有明顯差異，地下停車空間因可燃物種類繁多，柴油、塑膠、橡膠等有機物燃燒會產生大量煙氣，當吸入過多毒性氣體時將對人體造成傷害。此外地下建築空間一般無自然採光，而是依靠輔助燈具照明，同時相比於地上層建築物而言，地下停車空間的通風口較少，通風效果差。因此災害發生當下，地下停車空間因氧氣濃度較低，造成燃燒不完全而產生大量煙氣，此時電源供應系統受災害而被切斷，大量煙氣瀰漫且在有限的緊急照明的環境下，空間能見度將迅速下降，對於人員逃生十分不利【99】。煙是火災發生時無可避免的一種產物。在火場中，可燃物因氧化作用而迅速放熱增溫，引起極速猛烈的燃燒。燃燒過程中更有一種「熱分解反應」或被稱為【熱解】的現象產生。熱解係指物質由於溫升而產生無氧化的一種不可逆化學分解，會造成大量煙氣產生。火場煙霧通常由下列三種型態所組成：

一、從燃燒物質中釋放出高溫蒸氣與有毒氣體。

二、已分解和凝固的未燃燒物質。

三、大量的空氣被火焰加熱進而造成渦旋型式的流動。

電池類火災從冒出陣陣濃煙到火勢猛烈的反應時間非常短暫，因此停放電動車輛的區域應考慮如何調整或增設火警探測器使得電池發生異常時，能夠迅速偵知電池類火災以提供更多火災預警時間。電池類火災初期會產生大量白色濃煙，因而相較於溫度，電池類火災的預警監控採用特徵氣體較為合適且快速，但可能會受地下停車空間通風換氣設備的氣流影響。學者郭超超等人【100】研究不同荷電狀態下鋰離子電池熱失控釋放氣體特性過程中利用 GC-MS 進行氣體組成檢測發現，氣體成分會隨著鋰離子電池自身的 SOC（荷電狀態）值而產生影響，CO、H_2 的體積分數隨 SOC 值增加而增加，然而 CO_2 會隨 SOC 值上昇而減少。

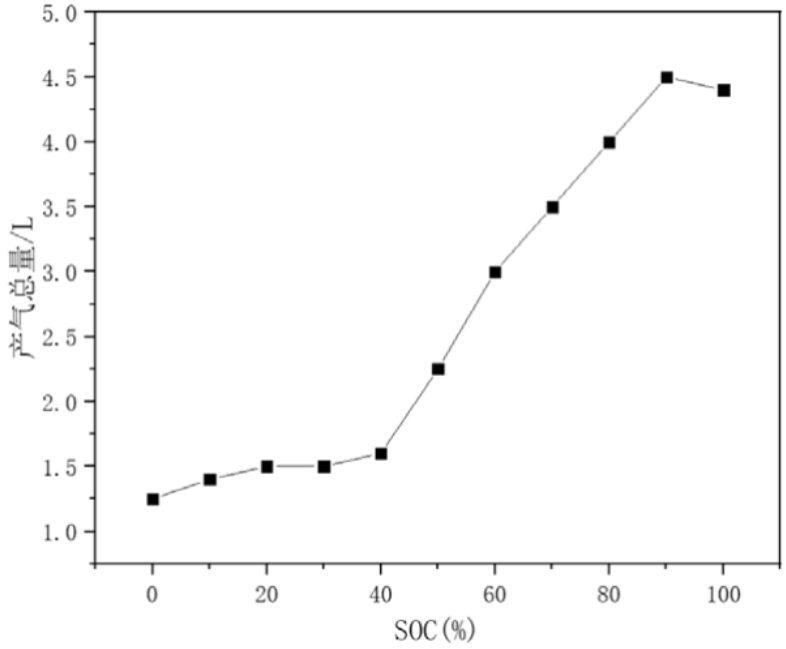


圖 4-1 不同 SOC 值之鋰離子電池熱失控過程產氣總量
(資料來源：參考文獻【100】)

此外鋰離子電池燃燒過程產生某些毒氣氣體也會對火場救援造成困難，學者 GOLUBKOV 等人【101】針對鈷酸鋰電池（LCO）、鎳鈷錳酸鋰電池（NMC）、及磷酸鐵鋰電池（LFP）的燃燒產生氣體組成成份進行採樣分析，該學者設計一個測試台（如圖 4-2），其測試台包含加熱器、溫度量測與氣體採樣設備，同時整個實驗台封閉，可精確地捕捉鋰離子電池熱失控過程所產生的氣體總量，並透過氣相色譜儀（GC，Agilent Technologies 3000 Micro GC）分析 H_2、O_2、N_2、CO、CO_2、CH_4、C_2H_2、C_2H_4 和 C_2H_6 等氣體含量。該研究結果發現氣體組成成分大致包含 CO、H_2、CO_2、C_xH_y 等氣體，其中 CO、CO_2、H_2 的占比高達 70%以上，電池產氣成份占比如圖 4-3 所示。

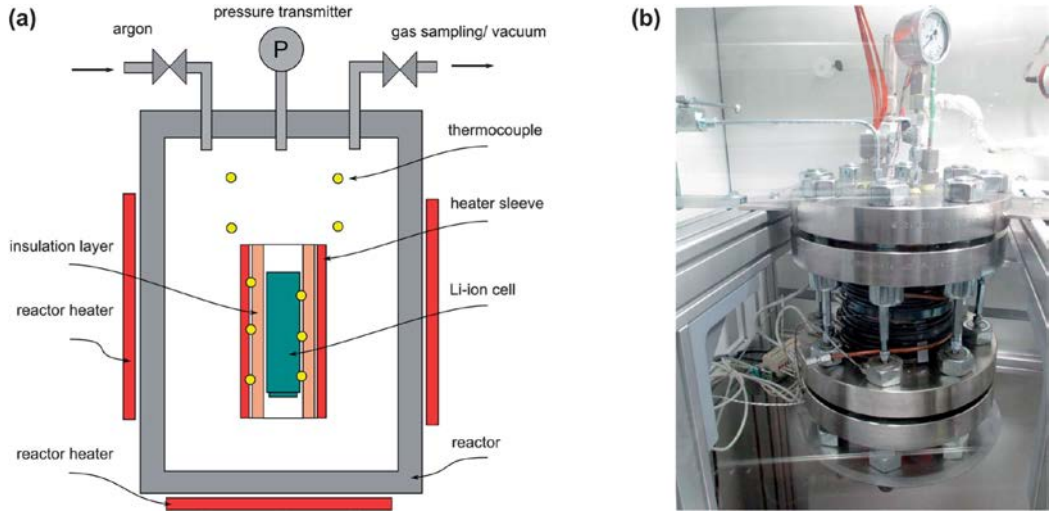


圖 4-2 實驗台架構示意圖(a);實驗台實際圖

(資料來源：參考文獻【101】)

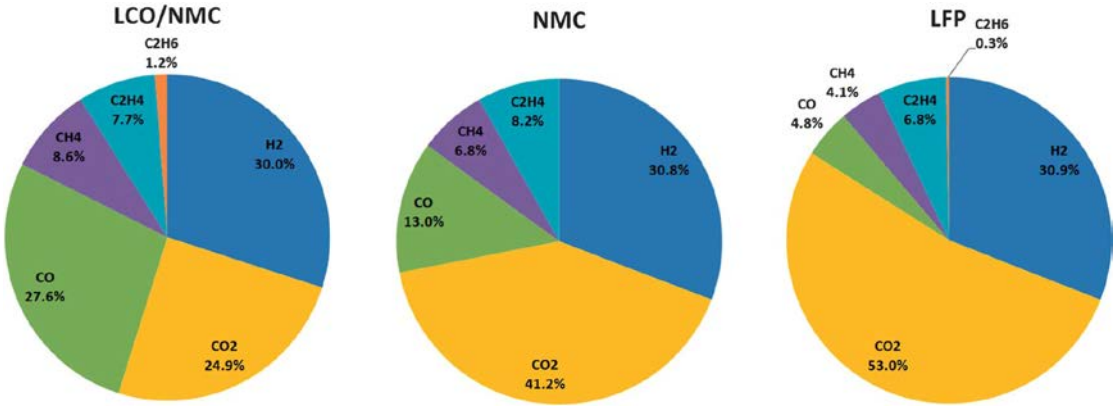


圖 4-3 熱失控產生的氣體的採樣組成

(資料來源：參考文獻【101】)

學者 B. Merci【102】等人進行全尺寸地下停車空間火災研究發現，機械通風系統的能夠有效降低停車空間內部的環境溫度。學者肖淑衡【103】等人利用 PHEONICS 對地下停車空間火災煙流情況進行模擬，提出頂排系統的排煙性能優於側排系統，同時該學者認為排煙系統的性能優劣與其排煙方式、排煙口位置、火源強度和排煙量等參數有高度關聯性。

學者張沁南【104】利用 FDS 軟體對垂直立體停車庫火災進行模擬分析，探討排煙系統與撒水系統的啟動耦合關聯性發現，最終學者提出下列建議：不要單獨使用排煙系統，應同時使用噴淋系統和排煙系統，方能對地下停車空間火災起到控制作用。綜合上述文獻資料分析，電池類火災初期會冒出大量含有多種毒性氣體的濃煙，因此地下停車空間設置的通風換氣設備應能夠在發生電池類火災的時候，及時的將毒性濃煙排出，降低火場受困人員的危害。與此同時，若將未經氣體處理的高溫有毒濃煙排出於戶外也會對地上層或環境造成汙染，因此是否在排煙設備末端設置有毒成份過濾網，將排出濃煙的毒氣成份稀釋也能確保災情區域的擴大。

地下停車空間由於有天花板樓高限制，因此火災安全應考量火焰與煙流撞擊天花板後向四周擴散的問題。火災中煙流會造成能見度降低而阻礙人員避難逃生。能見度的高低取決於煙的成份、濃度、微粒的大小與多寡、分佈情況、照明設備及人員現場的心理狀態。火場高溫熱煙如果濃度過高或暴露在其中的時間過長則容易導致吸入過多煙氣而導致昏迷、休克，嚴重甚至會造成死亡。這兩個因素互相的影響大小，取決於建築物內部的情況差異。針對火場的煙流特性，可分為以下幾種特性：

1. **煙囪效應**：因建築物內部空氣與室外空氣溫度不同產生壓力差所造成。在建築物內部垂直通路內，產生上升的氣流稱為正煙囪效應；氣流下降即為反煙囪效應。影響氣流流動方向的主要因素，取決於建築物內部空氣與室外空氣的溫度差異高低。

2. **煙的熱浮力效應**：因火焰上方的高溫氣體與周圍冷空氣之間的密度不同，煙的密度較低，相對的產生煙的浮力。

3. **風的影響效應**：在建築物不同方位之開口，因風向的關係，便有不同的壓力。當建築物所有門窗或開口部都緊閉時，風的影響便極輕微，但所有建築物都有或大或小的孔隙，如：門縫，窗縫等，這些孔隙將因風的影響，使建築物內部的空氣產生流動。

4. **機械通風系統**：由於現有建築物以密閉空間居多，大都採用空調通風系統，例如：中央空調系統可通達各樓層，當某樓層發生火災所產生的煙氣，將隨空調系統的管路將煙氣轉移到其他地方。

此類煙氣大多為有機煙粒及酸性氣體，如遭受 HCl 此種氣體刺激會快速引起眼睛、呼吸道及肺的疼痛，接著造成呼吸困難等症狀。在未達閃燃點前火災中所產生的麻痺性有毒氣體其成份主為一氧化碳與氰化物。火災中除有毒氣體外，高溫煙流所伴隨的高溫也會經由對流、傳導效應與輻射效應對人體造成皮膚及呼吸道灼傷，而濃煙微粒也會使人員在避難路線上遭受封阻。基本上避難人員最少需要 8～10m 的可視距離才能通過煙區，而當避難人員因視線不良無法辨識避難路線時，往往因避難不及而造成嚴重傷亡。建研所於 2014 年提出在避難逃生路徑上，當避難人員進行避難時，於距離地面 1.8m 高處之可視距離對避難人員的影響說明，如表 4-1 所示。

表 4-1 煙霧濃度與可視距離的關係表

可視距離	狀況說明
20-30m	煙霧剛發生時之淡薄濃度，煙霧探測器開始有反應，此時對不熟悉建築物動線的人會有避難障礙
5m	對於熟悉建築物動線的人亦會有避難障礙
3m	感覺昏暗時的濃度，避難人員需摸黑前進
1~2m	幾乎看不見前方
低於 1m	火災旺盛期之濃度，幾乎完全看不見，誘導燈也看不見

(資料來源：參考文獻【105】)

如果暴露於上述煙流小於五分鐘內，還不至於吸入過量的痲痺性有毒氣體而昏厥，但仍需注意樓層上方之高溫煙流的熱輻射效應，依舊會對人體造成嚴重的傷害。當皮膚在超過 1.7 KW/m^2 的環境下便會受到傷害，依傷害程度不同可分為輕度、重度灼傷，嚴重者甚至於死亡。熱輻射值達 3.0 KW/m^2 時，皮膚暴露超過 10 秒就會造成傷害，而達 7.0 KW/m^2 時，暴露超過 2 秒即會燒傷。人體能承受危害程度的指標分析，如表 4-2 所示。人體暴露在一般有毒氣體之情況如表 4-3 所示。

表 4-2 人體承受危害程度之指標分析表

	承 受 極 限
火場溫度	氣流溫度需低於 60℃
有毒氣體	CO 濃度需低於 1400ppm CO_2 濃度需低於 50,000ppm
煙層濃度	能見度不得低於 8m
熱輻射值	不得超過 1.7 KW/m^2

（資料來源：參考文獻【106】）

表 4-3 人體暴露在有毒氣體之情況

一氧化碳濃度(ppm)	症狀
100(0.01%)	8 小時內尚無感覺
200(0.02%)	2-3 小時後，輕微頭痛、乏力。
400～500(0.05%)	1 小時內尚無感覺 1-2 小時內，前額痛； 3 小時後，威脅生命。
600～700(0.07%)	1 小時內感覺頭痛、噁心、呼吸不暢
800(0.08%)	45 分鐘內，眼花、噁心、痙攣； 2 小時內，失去知覺； 2-3 小時內，死亡。
1000～2000(0.2%)	5-10 分鐘內，頭痛、眼花、噁心； 2 小時內意識矇矓、呼吸困難、昏迷； 逾 2 小時即死亡
3000～5000(0.5%)	20～30 分鐘內即死亡。
6400(0.64%)	1-2 分鐘內，頭痛、眼花、噁心； 10-15 分鐘內，死亡。
10000(1%)	1 分鐘內即死亡。
二氧化碳濃度(%)	症狀
1～2%	數小時內安全
3～4%	1 小時內安全
5～7%	30 分鐘～1 小時即有危險
20%以上	短時間內即可死亡

（資料來源：參考文獻【99】、【107】）

第三節 模擬空間建構及參數規劃

因應未來電動車普及化可能造成的電池類火災風險，本研究團隊經實地勘察我國目前設立充電樁之公共場所後，將蒐集與分析電動車及其充電設備設置情形與地下停車空間的潛在火災風險因子。地下停車空間對比地面層停車空間而言，屬於半封閉的空間結構，因此當該場所發生火災所產生的高溫煙流流動與火災燃燒特性等方面勢必與一般開放空間有所不同。

基於地下停車空間的特點，本研究團隊利用電腦模擬軟體 Pyrosim 進行地下停車空間之通風換氣設備對於電池類火災所產生的高溫有毒煙流之流向分析及改善建議，達到發生電池類火災時，能夠利用通風換氣設備加以控制環境氣流流量以及換氣量，將高溫煙毒流向與人員避難方向進行反向切割，使其不致於對救災或人員避難造成威脅。因電動車全車燃燒實驗尚少有學者獨立研究及出具燃燒熱釋放率報告，因此本研究團隊將參考 NRC 機構對於電動車全車燃燒之熱釋放率圖作為本研究案模擬條件設置。

地下停車空間的建築結構較為封閉，內部停放車輛較多且車型種類繁雜。現階段地下停車空間僅依照建築技術規則建築設計施工編第 139 條規定，車庫部分之樓地板面積超過 500 m^2 者，設置供給每平方公尺樓地板 25m^3/h 以上的換氣通風設備。本研究團隊經現勘兩處公私有建築物停車空間發現，該類場所通風換氣設備採用誘導式風機形成氣流導向，然而地下停車空間非屬居室用途，依法無須設置排煙設備，但現階段從文獻資料發現，電池類火災具有難以快速撲滅且燃燒溫度高於其它類型火災的特性，因此是否就電池類火災的特殊性，應對停放電動車的空間加強其消防安全措施為本研究案的重點討論。

針對電池類火災產生的高溫有毒煙氣與建築空間內部設置的通風換氣設備影響評估，本研究團隊經考量到私有建築物與公共建築物對於設置電動車充電樁出發點的差異，將各自挑選一處進行電腦模擬分析，探討不同用途之建築空間其內部設置的通風換氣設備當遭遇電動車火災所產生的高溫有毒煙氣時，應如何進行調整設計以提升建築空間使用者的生命安全。本研究案模擬條件設置如下說明：

一、停車空間格局(公共建築物-台南美術館二館)

本研究團隊挑選台南市美術館二館之地下一樓停車空間作為本研究公共建築物之代表，其室內格局如圖 4-4、圖 4-5 所示。該區域長度約為 70m；寬度約為 63m；樓高為 3.9m，電動車充電區域為紅框處(11 個電動車充電格)。其中電動車充電區域附近有一處與地上層連通的樓梯。

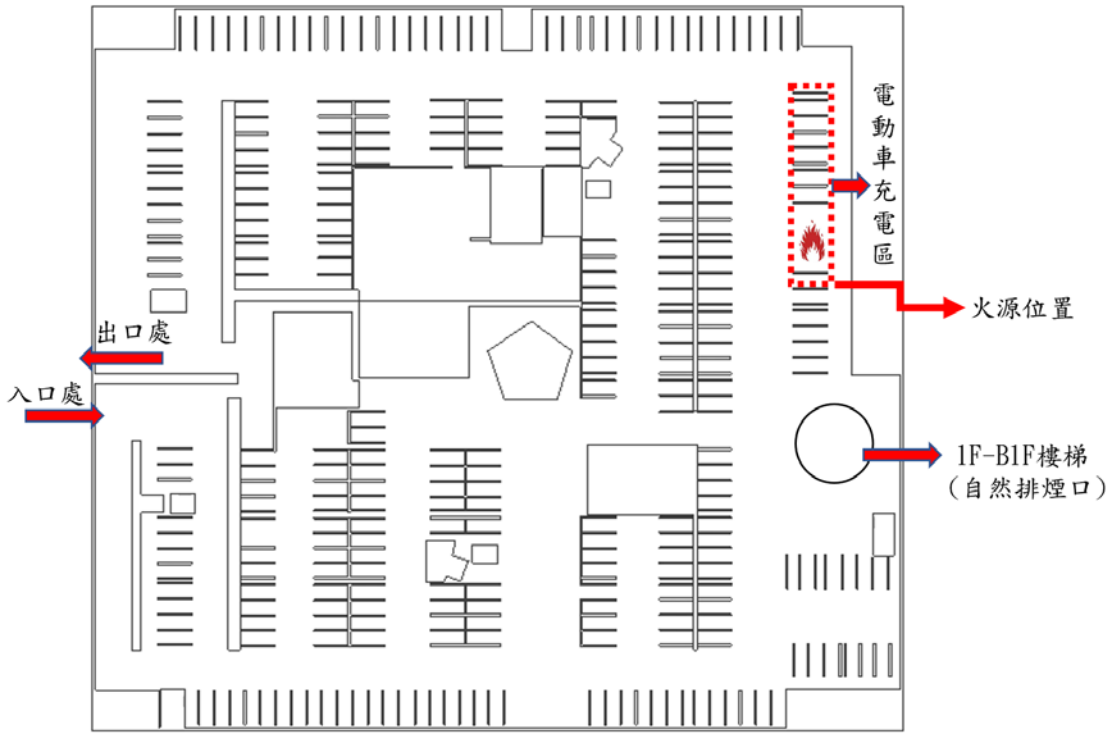


圖 4-4 停車空間平面圖_台南美術館二館

(資料來源：本研究整理)

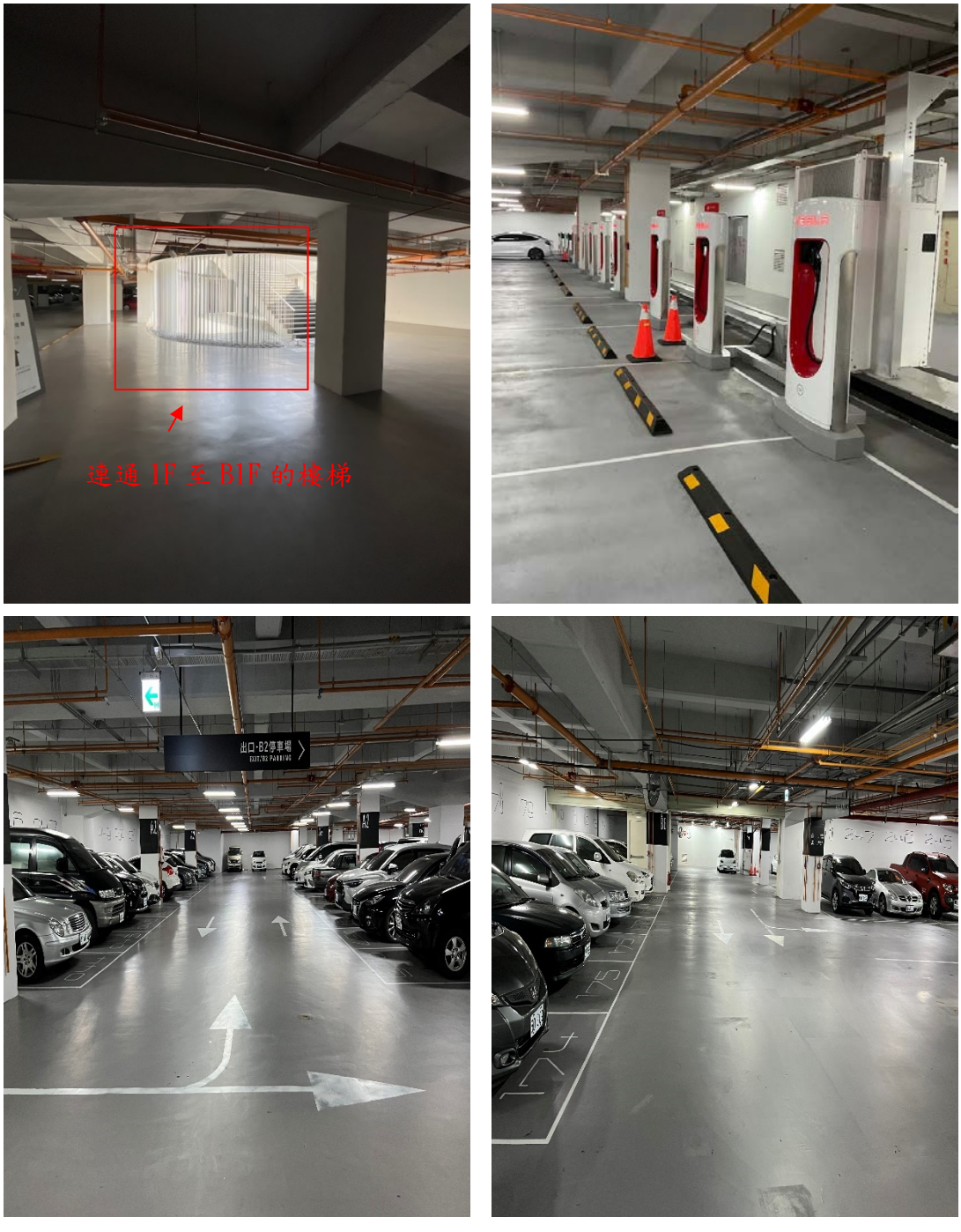


圖 4-5 實際現勘圖_台南美術館二館

(資料來源：本研究整理)

現有法規將地下停車空間定義為非居室空間，因此無須設計排煙設備而僅需設置通風換氣設備。然而當停放的電動車輛或其充電設備發生電池類火災，在未建立充足的安全防護將對火場環境控制充滿不確定性。本研究經現勘發現台南美術館二館採用和旭機械股份有限公司所生產製造的誘導式風機，單台設備風量為 14 CMM，地下一層停車空間共設置 16 台，風機規格及設置平面如圖 4-6、圖 4-7 所示。

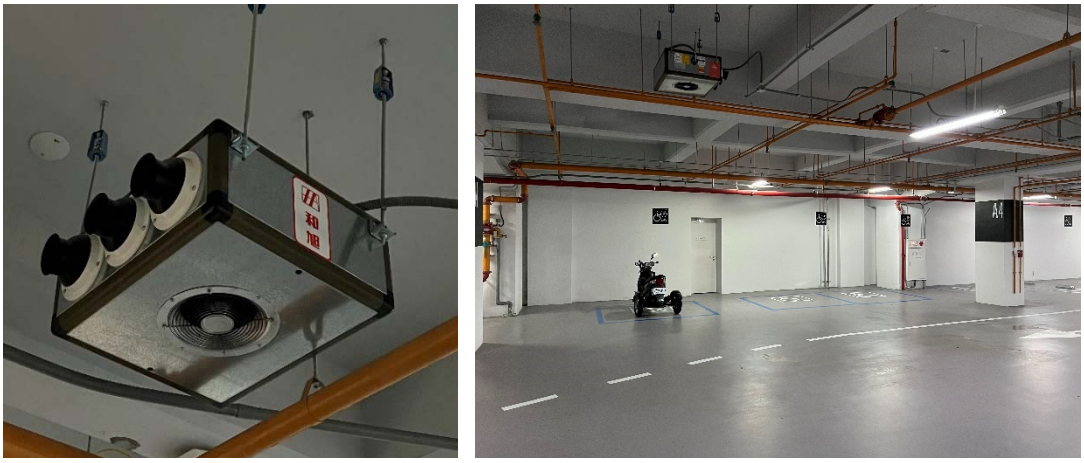


圖 4-6 誘導式風機示意圖_台南美術館二館

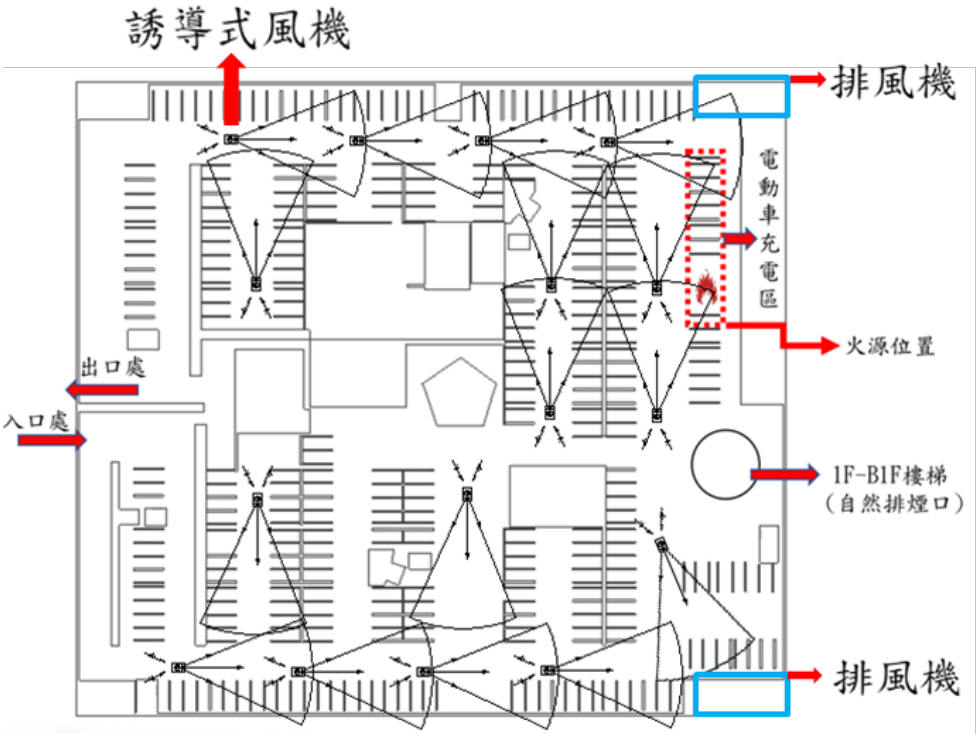


圖 4-7 誘導式風機設置平面圖_台南美術館二館

(圖 4-6、圖 4-7 資料來源：本研究整理)

二、停車空間格局(私有建築物-集合住宅建案)

本研究團隊挑選一集合住宅建案之地下二樓停車空間作為本研究私有建築物之代表，其室內格局如圖 4-9、圖 4-10 所示。該區域長度約為 56m；寬度約為 42m；樓高為 2.9m。各平面車位皆預留一電線槽孔(如所示)，後續住戶可依自身需求增設充電樁或用電設備，現勘情況如圖 4-8 所示。

圖 4-8 預留電線槽孔示意圖

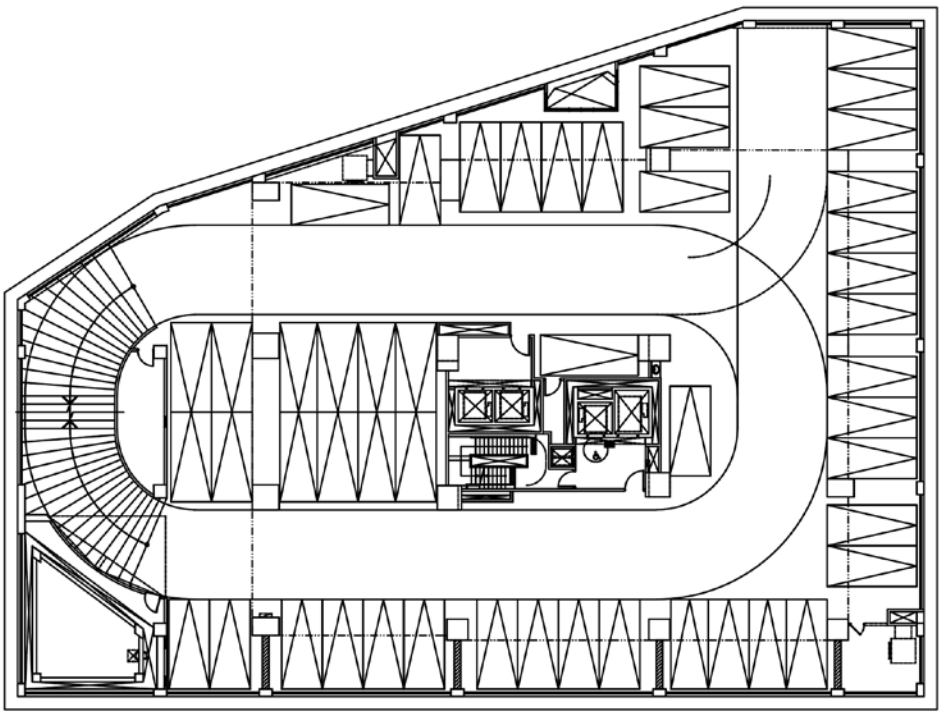


圖 4-9 停車空間平面圖_集合住宅建案

(圖 4-8、圖 4-9 資料來源：本研究整理)

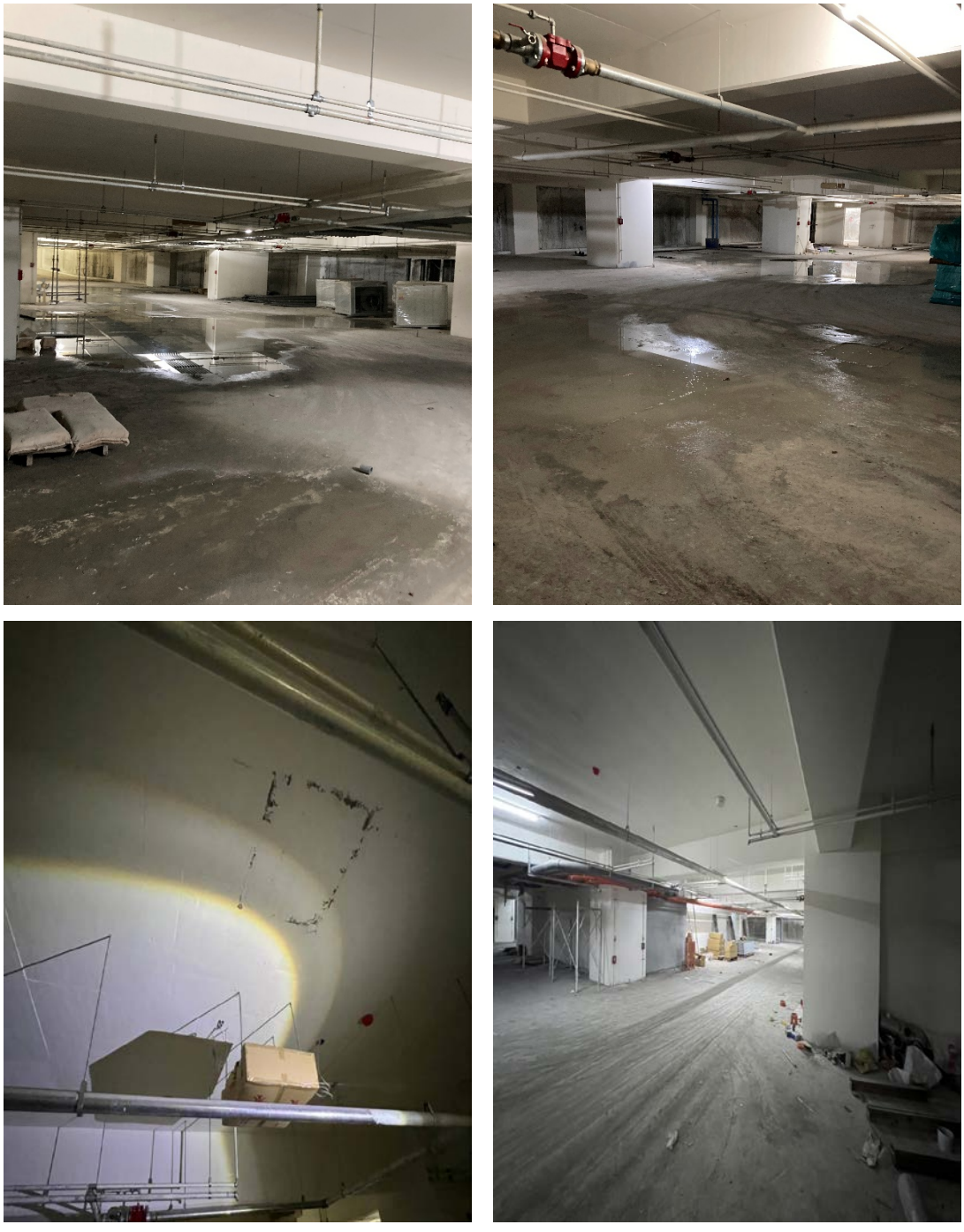


圖 4-10 實際現勘圖_集合住宅建案

(資料來源：本研究整理)

現有法規將地下停車空間定義為非居室空間，若停放的電動車輛或設置其充電設備發生電池類火災，在未建立充足的安全防護下，將對火場環境控制充滿不確定性。經現勘發現該集合住宅建案地下二層停車空間共設置 12 台誘導式風機(風量為 14 CMM)；排風機共計 2 台(單台風量為 450CMM)，如圖 4-11、圖 4-12 所示。

圖 4-11 誘導式風機示意圖_集合住宅建案

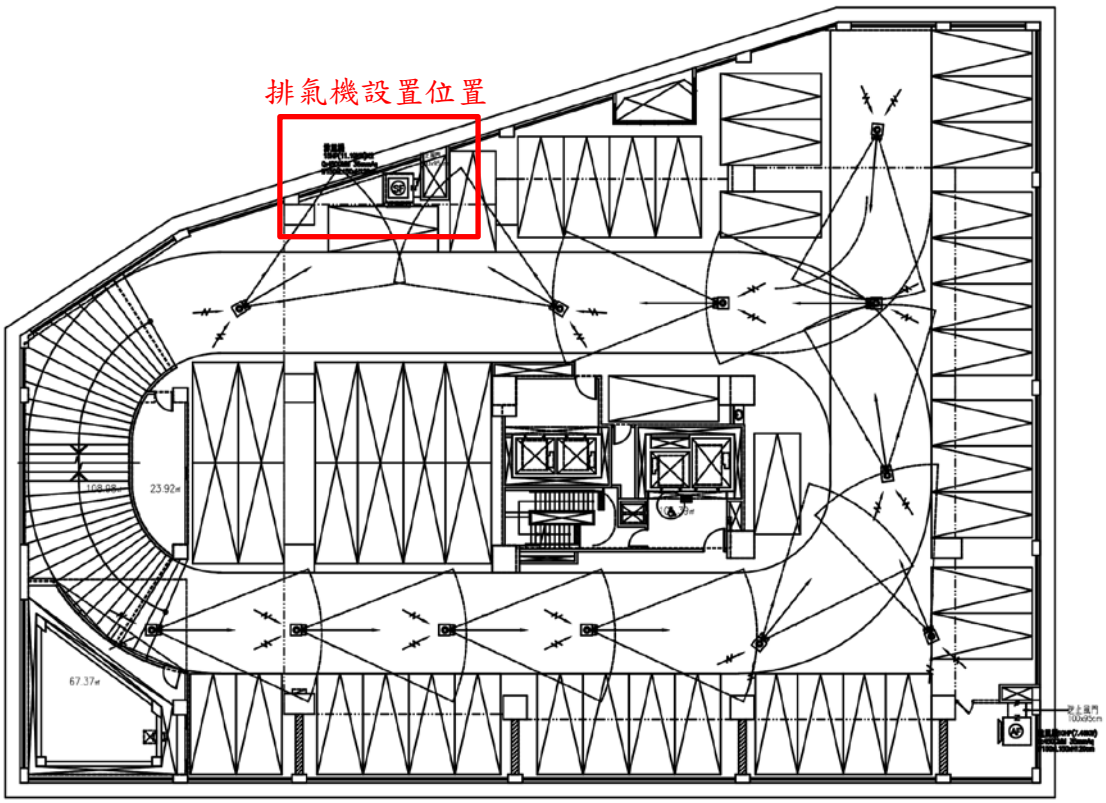


圖 4-12 誘導式風機設置平面圖_集合住宅建案

(圖 4-11、圖 4-12 資料來源：本研究整理)

三、火源參數設置

當火源熱釋放率曲線確定後，即可對火源發展過程作近似模擬。學者程遠平【23】研究發現，一般燃油車熱釋放率最大值約為 4.08 MW；學者 Tohir【108】實驗分析得出，單輛燃油車熱釋放率峰值約為 4 MW 左右，均值為 4.7 MW。然而本研究案主要係探討電動車輛若於地下停車空間發生火災之危害分析，因目前尚少有針對電動車全車的燃燒實驗，因此本研究團隊將參考 NRC 機構【78】所進行的電動車全車燃燒實驗數據，作為本研究案的火源假設條件，同時本年度研究案應不考慮電動車燃燒所產生延燒問題，因此模擬空間僅假設放置一輛電動車作為起火源。

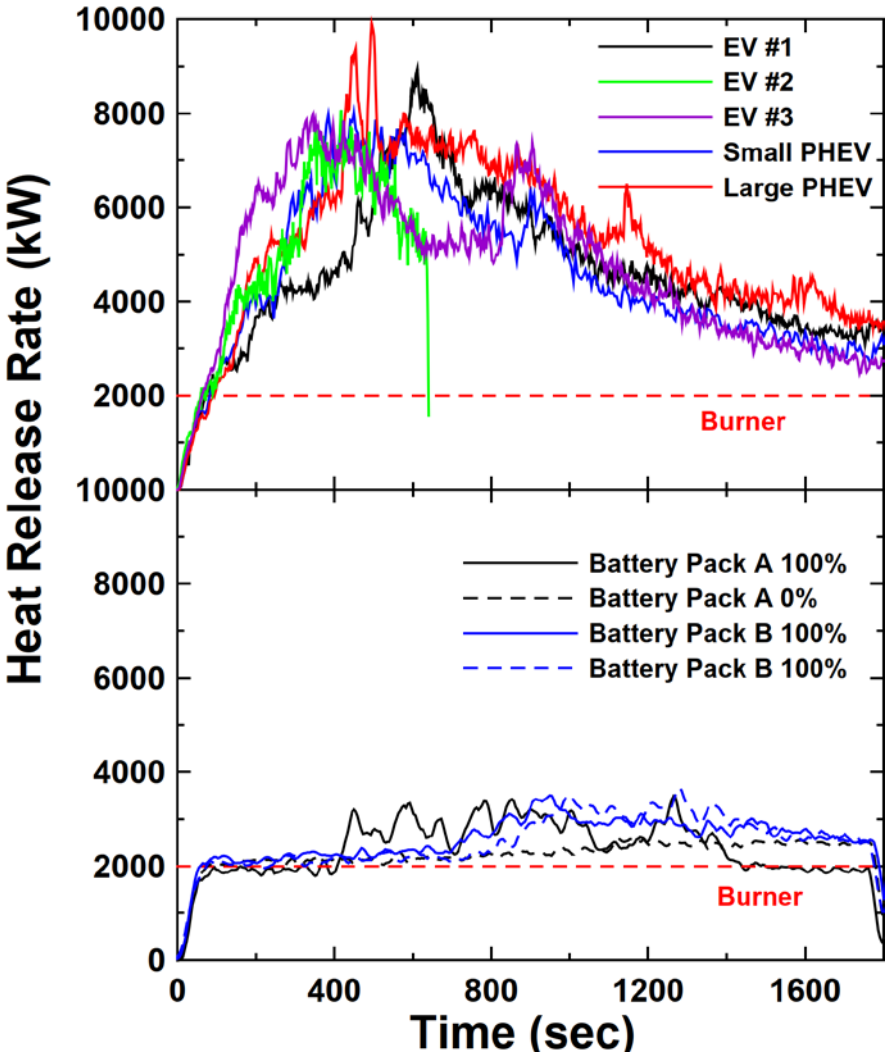


圖 4-13 電動車熱釋放率圖

(資料來源：參考文獻【78】)

由圖 4-14 發現，電動車燃燒過程之車廂頭頂位置溫度約為800~1000°C，由此可知電池類火災起火的燃燒溫度相較於一般可燃物燃燒溫度更高，應更加注意其高溫所產生的熱輻射是否會引起周遭可燃物的燃燒，從而造成火勢擴大的風險。

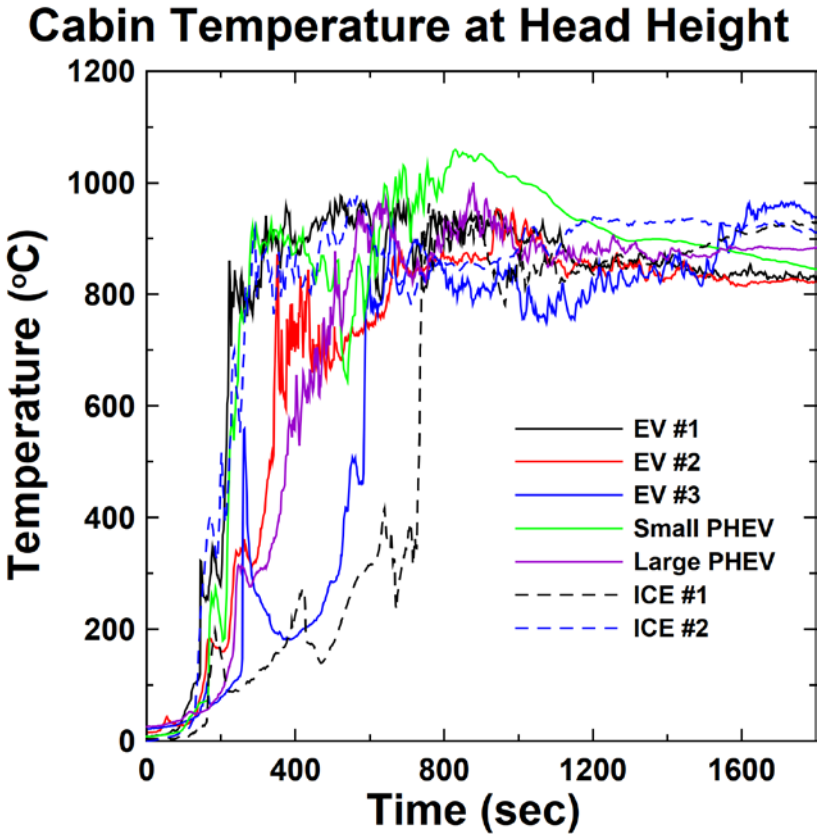


圖 4-14 電動車與燃油車輛火災之車頂位置溫度圖

(資料來源：參考文獻【78】)

參考學者 GOLUBKOV 等人【101】針對鎳鈷錳酸鋰電池(NMC)、及磷酸鐵鋰電池（LFP）等電池類型的燃燒產生的氣體組成進行火源氣體設置，該學者研究發現其氣體組成成分如表 4-4 所示。

表 4-4 不同電池類型之產氣量

	LCO	NMC	LFP
電池質量(g)	44.3	43.0	38.8
電池容量(Ah)	2.6	1.5	1.1
燃燒產氣量(mol)	265±44	149±24	50±4

(資料來源：參考文獻【101】)

本研究案主要係探討電動車輛若於地下停車空間發生火災之危害分析，因目前尚少有針對電動車全車燃燒實驗數據，經蒐集上述文獻資料得知電動車之燃燒熱釋放率、燃燒溫度數值及相應電池燃燒產氣量與產氣成份占比，依據上述文獻資料作為 Pyrosim 電腦模擬軟體之火源條件設置。本研究之模擬規劃假設地下停車空間僅有一台電動車(電容量為 100KWh)，同時不考慮高溫環境所產生的熱輻射可能引起火勢擴大的疑慮，探討電動車火災所產生的高溫煙流應如何加以控制及排除，本研究案火源條件設置如圖 4-15、圖 4-16、表 4-5 所示。

表 4-5 本研究案火源條件設置

	電容量(KWh)	氣體產生量(mol)
模擬條件【LFP】	100	4,545
GOLUBKOV【LFP】	1.1	50±4

(資料來源：本研究整理)

由表 4-5 計算得知，本研究案假設地下停車空間有一台電容量為 100KWh 的電動車，假設該輛電動車由磷酸鐵鋰電池（LFP）所組成，則換算成 100KWh 後的燃燒產生氣體量為 4,545mol。同時參考該學者透過氣體分析儀得知各類氣體含量比例進行氣體成份換算，計算如表 4-6 所示。

表 4-6 本研究案模擬氣體含量估算

氣體含量 / 電池類型	一氧化碳 (CO)	二氧化碳 (CO_2)	氫氣(H_2)
LFP	218	2,409	1,404

(資料來源：本研究整理)

備註：單位為 mol；僅設置比例較高的三種氣體。

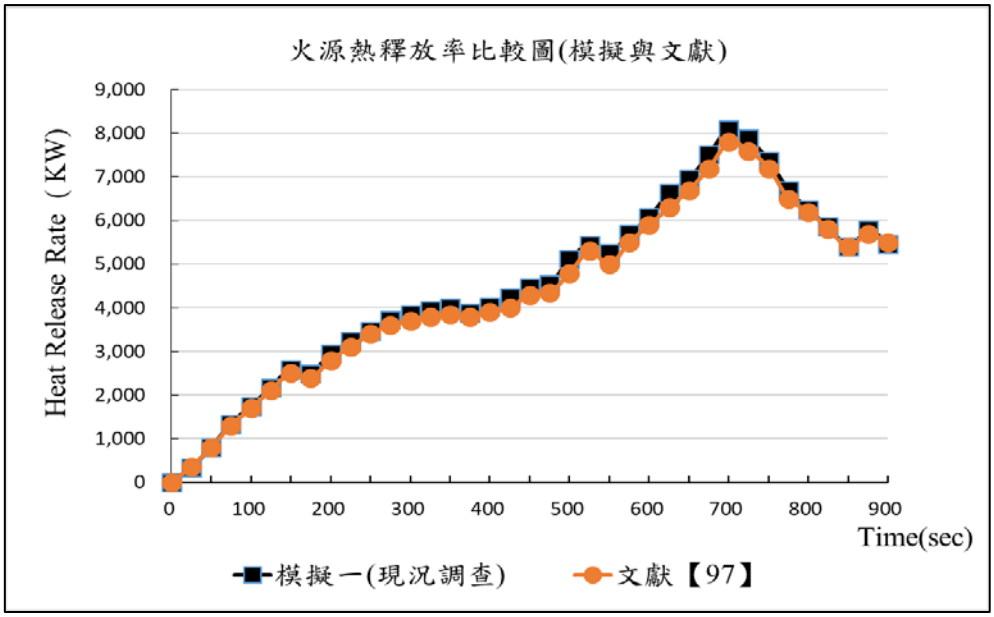


圖 4-15 本研究案火源熱釋放率圖

(資料來源：本研究整理)

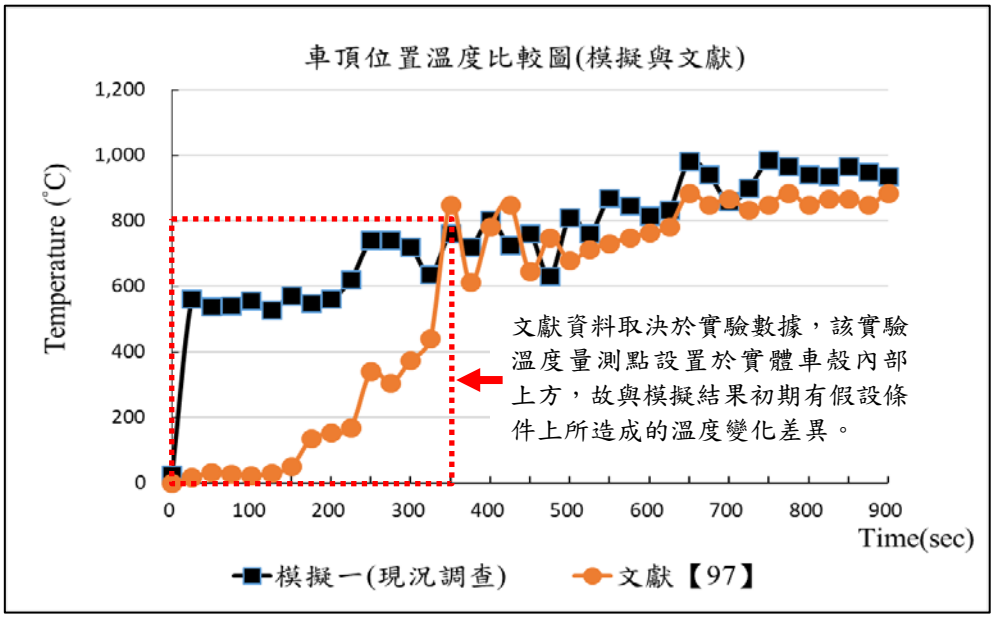


圖 4-16 本研究案起火車輛車頂溫度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

四、網格格點分析

電腦數值模擬可以用於將火災數值模擬結果與實測實驗結果相互結合比較，在保證良好重複性的基礎上，觀察實測實驗過程不易捕捉的諸多參數，從而更好地掌握火場煙氣與溫度分佈發展規律【99】。本研究團隊參照 Pyrosim 用戶手冊之網格尺寸進行計算，即選用火源特徵直徑計算火源附近網格尺寸大小，其公式如 4.1 所示。過往研究學者針對 FDS 電腦模擬之格點分析發現，當網格使用 0.1D*~0.12D* 時，模擬結果與實驗結果吻合度較高。

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \tag{4.1}$$

其中，公式 4.1：

D*為火源特徵直徑(m)；Q 為火災熱釋放率（kW）；

ρ_0為流體密度（kg/m^3）；C_p 為環境空氣比熱（kJ/(kg·K)）；

T_0 為環境溫度（K）。

假設火源熱釋放率平均值為 4,475(kW)；空氣流體密度為 1.29（kg/m^3）；空氣比熱 0.718 kJ/(kg·K)；環境溫度為 300(K)。利用公式 4.1 計算可得火源特徵直徑(D*)為 1.925m，本研究團隊將火源特徵直徑採 2m 計算。

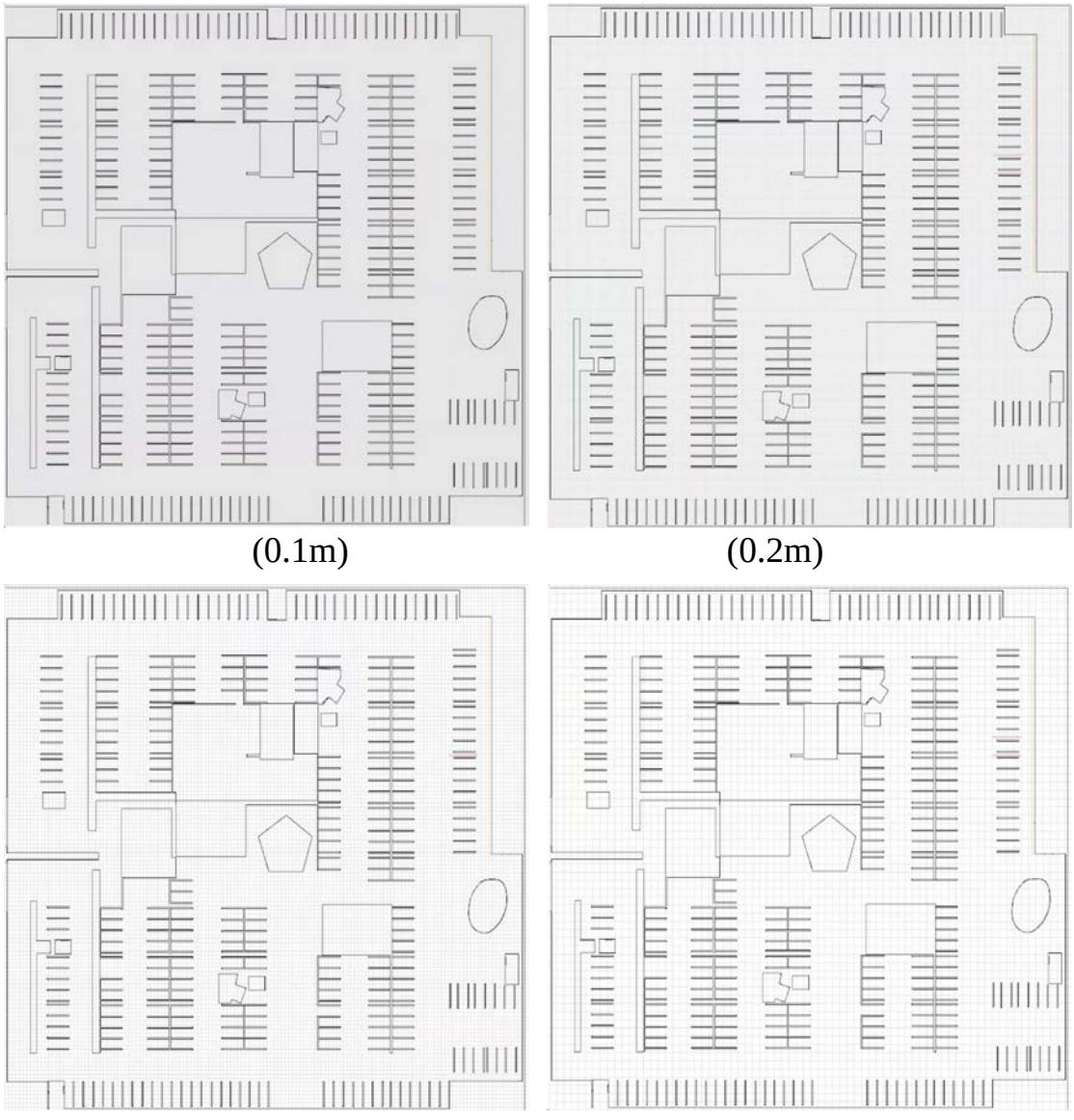
由表 4-7、表 4-8、圖 4-17、圖 4-18 發現，網格尺寸大小將影響模擬結果的數值收斂程度，隨網格尺寸不斷變小，各情境誤差值逐漸縮小。本研究團隊為確保計算精度，統一採用 0.1D*(0.2m)進行本研究案兩處模型的格點設置。

表 4-7 模擬空間網格數量表_台南美術館二館

尺寸(m)		網格數量
0.05D*	0.1	27,648,000
0.1D*	0.2	3,456,000
0.25D*	0.5	221,184
0.5D*	1.0	27,648

備註：火源特徵直徑(D*)為 2m。

(資料來源：本研究整理)



(0.1m) (0.2m)

(0.5m) (1.0m)

圖 4-17 格點劃分示意圖_台南美術館二館

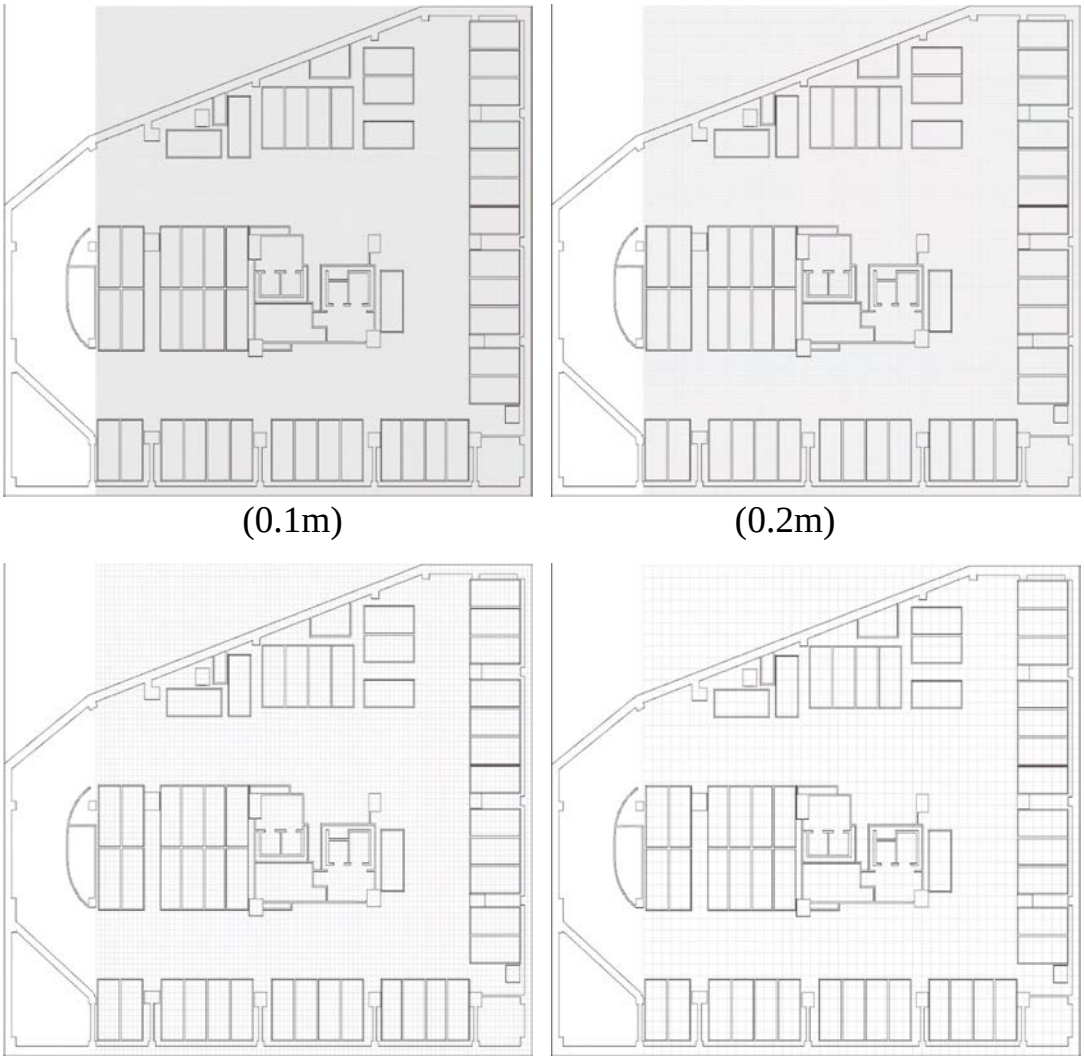
(資料來源：本研究整理)

表 4-8 模擬空間網格數量表_集合住宅建案

尺寸(m)		網格數量
0.05D*	0.1	5,912,027
0.1D*	0.2	716,688
0.25D*	0.5	49,020
0.5D*	1.0	6,063

備註：火源特徵直徑(D*)為 2m。

(資料來源：本研究整理)



(0.1m) (0.2m)

(0.5m) (1.0m)

圖 4-18 格點劃分示意圖_集合住宅建案

(資料來源：本研究整理)

五、溫度量測點設置(台南美術館二館)

本研究團隊於模擬空間內部設置溫度量測點以量測火場溫度變化。其中一點量測點設置於電動車頂部溫度；其餘量測點設置於電動車位前車道中間且距離地面為 1.8m 處；各溫度量測點間距為 2.0m，兩處詳細設置位置如圖 4-19 所示。

表 4-9 模擬溫度量測點設置表_台南美術館二館

溫度量測點													
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
座標 (m)	X	63	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
	Y	45	55	53	51	49	47	45	43	41	39	37	35
量測點設置高度		1.8m											

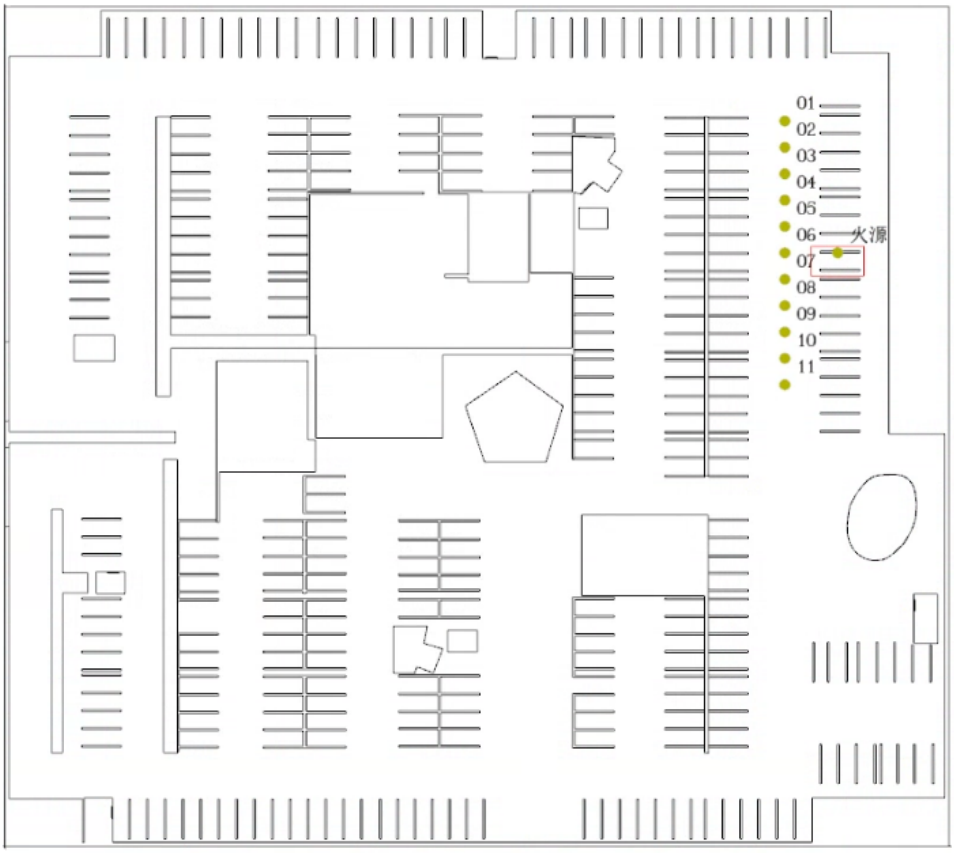


圖 4-19 溫度量測點設置示意圖(台南美術館二館)

(表 4-9、圖 4-19資料來源：本研究整理)

六、溫度量測點設置(集合住宅建案)

本研究團隊於模擬空間內部設置溫度量測點以量測火場溫度變化。其中一點量測點設置於電動車頂部溫度；其餘量測點設置於電動車位前車道且距離地面為 1.8m 處；各溫度量測點間距為 7.0m，兩處詳細設置位置如圖 4-20 所示。

表 4-10 模擬溫度量測點設置表_集合住宅建案

溫度量測點																	
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
座標(m)	X	26	12	19	26	33	40	47	12	19	26	33	40	47	39	10	10
	Y	4.3	10	10	10	10	10	10	27	27	27	27	27	27	13	10	27
設置高度		1.8m															

圖 4-20 溫度量測點設置示意圖(集合住宅建案)

(表 4-10、圖 4-20資料來源：本研究整理)

七、煙層高度量測點規劃(台南美術館二館)

本研究團隊於模擬空間內部設置煙層高度量測點以火場空間內部煙層隨時間的高度變化。煙層高度量測範圍由地面至天花板高度。經現勘台南市美術館二館從電動車充電區域至其他區域有三個通道及六處人員出入口處，因此本研究團隊在通道及人員出入口處，各自設置煙層高度量測點(量測範圍由地面至天花板處)以判斷火場煙流流動情況。

表 4-11 煙層高度量測點設置表_台南美術館二館

溫度量測點												
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
座標(m)	X	63	53	53	53	36	44	68	34	8.5	8	1.5	1.5
	Y	45	57	26	05	59	49	18	16	2.5	21	35	27
量測點設置高度		地面至天花板高度											

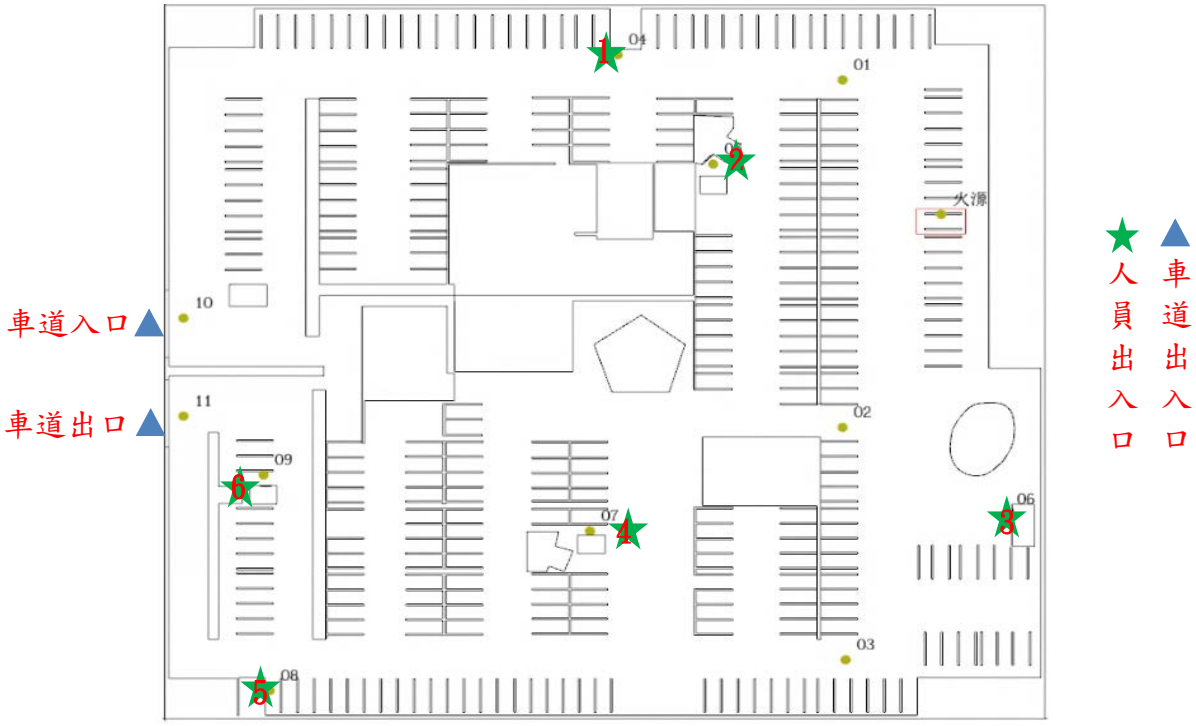


圖 4-21 煙層高度設置空間示意圖_台南美術館二館

(表 4-11、圖 4-21資料來源：本研究整理)

八、煙層高度量測點規劃(集合住宅建案)

本研究團隊於模擬空間內部設置煙層高度量測點以火場空間內部煙層隨時間的高度變化。煙層高度量測範圍由地面至天花板高度。經現勘集合住宅建案整體區域僅有兩個通道及一處人員出入口，因此本研究團隊在此兩個通道間及一個人員出入口，各自設置煙層高度量測點(量測範圍由地面至天花板處)以判斷火場煙流流動情況。

表 4-12 煙層高度量測點設置表_集合住宅建案

煙層高度量測點																	
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
座標(m)	X	26	12	19	26	33	40	47	12	19	26	33	40	47	39	10	10
	Y	4.3	10	10	10	10	10	10	27	27	27	27	27	27	13	10	27
設置高度		1.8m															

圖 4-22 煙層高度設置空間示意圖_集合住宅建案

(表 4-12圖 4-22資料來源：本研究整理)

九、氣體濃度量測點設置規劃(台南美術館二館)

本研究團隊於模擬空間內部設置一氧化碳、二氧化碳量測點以量測模擬空間內部危害氣體隨時間的變化。經現勘台南市美術館二館從電動車充電區域至其他區域有三個通道及六處人員出入口，因此本研究團隊在通道間及人員出入口處，各自設置一氧化碳、二氧化碳量測點以分析火場氣體濃度情況。

表 4-13 氣體濃度量測點設置表_台南美術館二館

氣體濃度量測點												
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
座標(m)	X	63	53	53	53	36	44	68	34	8.5	8	1.5	1.5
	Y	45	57	26	05	59	49	18	16	2.5	21	35	27
量測點設置高度		1.8m											

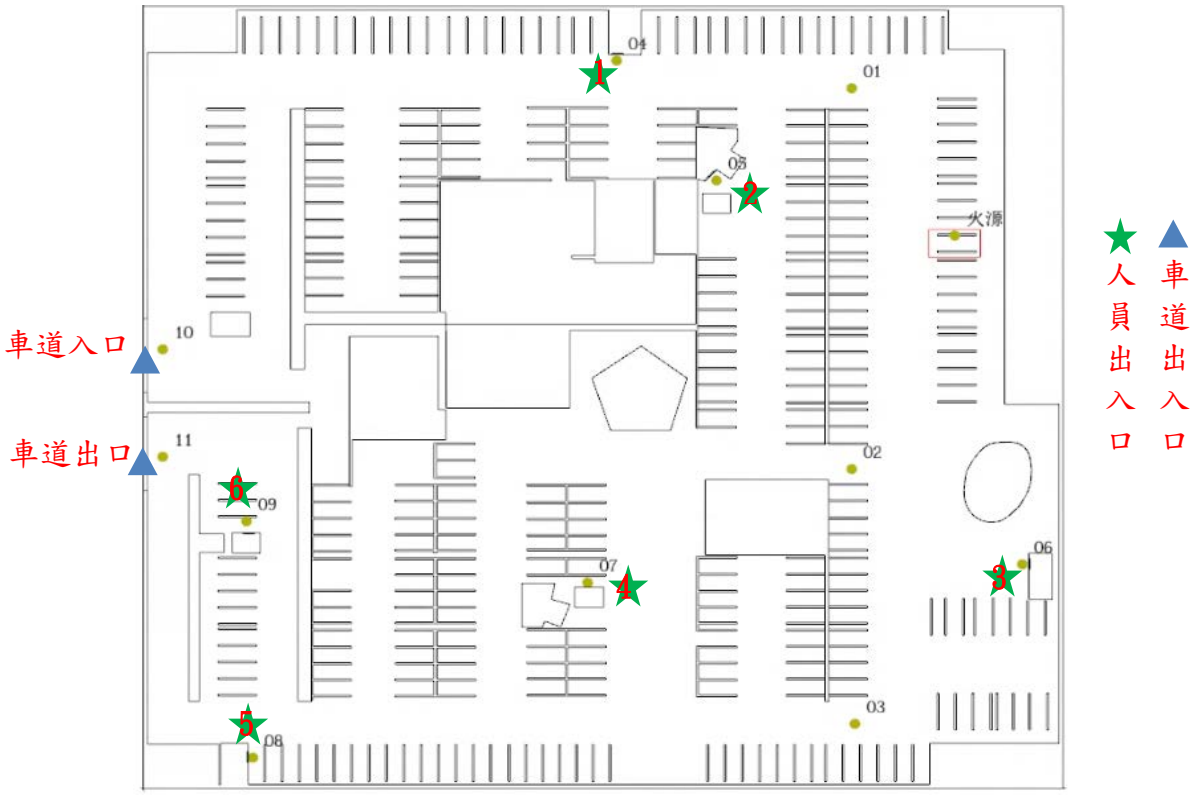


圖 4-23 氣體濃度量測點設置空間示意圖_台南美術館二館

(表 4-13、圖 4-23資料來源：本研究整理)

十、氣體濃度量測點設置規劃(集合住宅建案)

本研究團隊於模擬空間內部設置一氧化碳、二氧化碳量測點以量測模擬空間內部危害氣體隨時間的變化。經現勘集合住宅建案整體區域僅有兩個通道及一個人員出入口，因此本研究團隊在此通道間及人員出入口處，各自設置一氧化碳、二氧化碳量測點以分析火場氣體濃度情況。

表 4-14 氣體濃度量測點設置表_集合住宅建案

氣體濃度量測點																	
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
座標(m)	X	26	12	19	26	33	40	47	12	19	26	33	40	47	39	10	10
	Y	4.3	10	10	10	10	10	10	27	27	27	27	27	27	13	10	27
設置高度		1.8m															

圖 4-24 氣體濃度量測點設置空間示意圖_集合住宅建案

(表 4-14圖 4-24資料來源：本研究整理)

十一、能見度量測點設置規劃(台南美術館二館)

本研究團隊於模擬空間內部設置能見度量測點以量測模擬空間內部煙氣流動情況。經現勘台南市美術館二館從電動車充電區域至其他區域有三個通道及六處人員出入口，因此本研究團隊在此通道間及人員出入口處，各自設置能見度量測點以分析火場能見度情況。

表 4-15 能見度量測點設置表_台南美術館二館

能見度量測點													
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
座標(m)	X	63	53	53	53	36	44	68	34	8.5	8	1.5	1.5
	Y	45	57	26	05	59	49	18	16	2.5	21	35	27
量測點設置高度		1.8m											

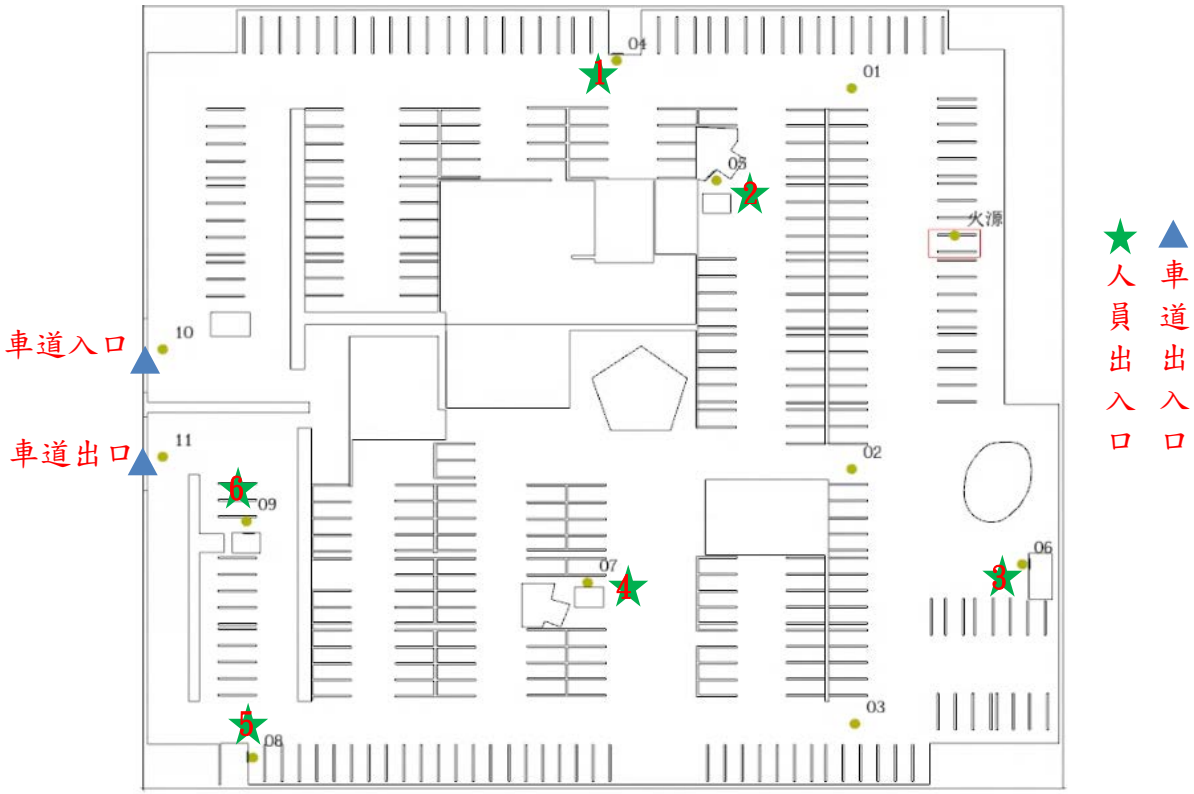


圖 4-25 能見度分析點設置空間示意圖_台南美術館二館

(表 4-15、圖 4-25資料來源：本研究整理)

十二、能見度量測點設置規劃(集合住宅建案)

本研究團隊於模擬空間內部設置能見度量測點以量測模擬空間內部煙氣流動情況。經現勘集合住宅建案整體區域僅有兩個通道及一個人員出入口，因此本研究團隊在此通道間及人員出入口處，各自設置能見度量測點以分析火場能見度情況。

表 4-16 能見度量測點設置表_集合住宅建案

能見度量測點																	
量測點編號		火源	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
座標(m)	X	26	12	19	26	33	40	47	12	19	26	33	40	47	39	10	10
	Y	4.3	10	10	10	10	10	10	27	27	27	27	27	27	13	10	27
設置高度		1.8m															

圖 4-26 能見度分析點設置空間示意圖_集合住宅建案

(表 4-16、圖 4-26資料來源：本研究整理)

第四節 電腦模擬情境規劃及模擬結果

本研究團隊經現勘公共建築物及私有建築物之地下停車空間規劃發現，現階段地下停車空間大多採用誘導式風機作為通風換氣設備選擇，然而地下停車空間非屬居室用途，依法無須設置排煙設備，但從文獻資料發現，電池類火災具有難以快速撲滅且燃燒溫度高於其它類型火災的特性，因此是否就電池類火災的特殊性，應對停放電動車的空間加強其消防安全措施為本研究案的重點討論。

本研究團隊以電腦模擬軟體(Pyrosim)探討現階段在無撒水(或泡沫)的情況下，通風換氣設備對於電池類火災發生時之高溫煙流流向影響分析。本研究案電腦模擬規劃如表 4-17 所示：

表 4-17 模擬情境規劃表

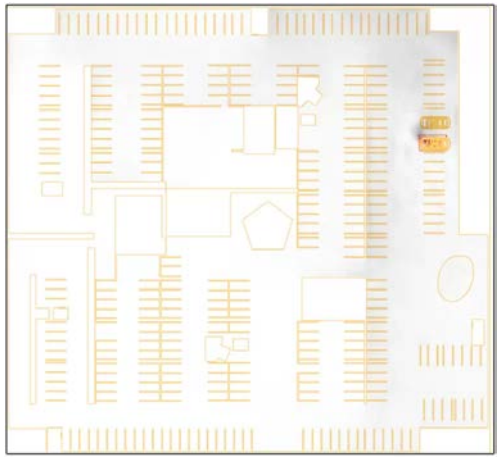
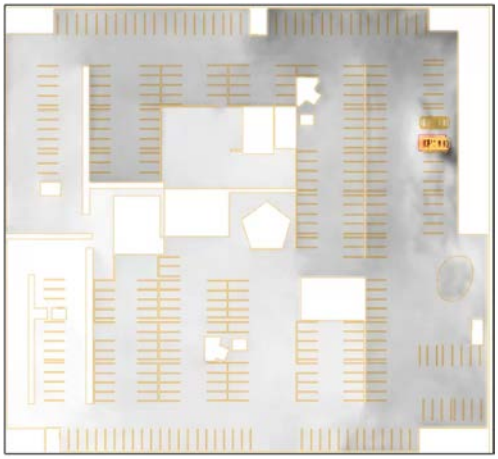
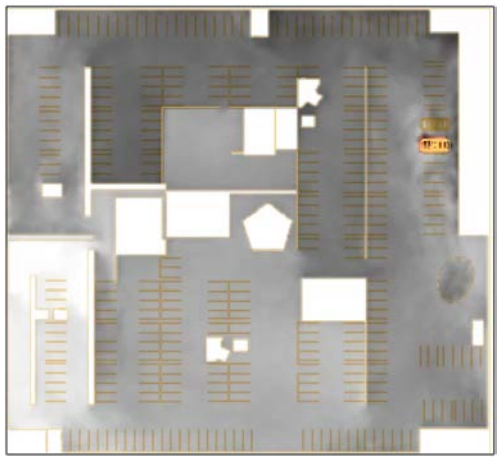
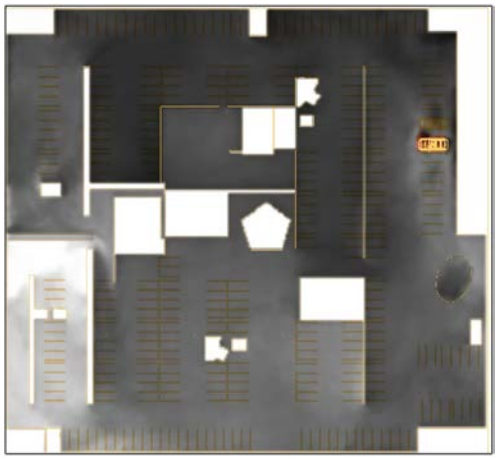
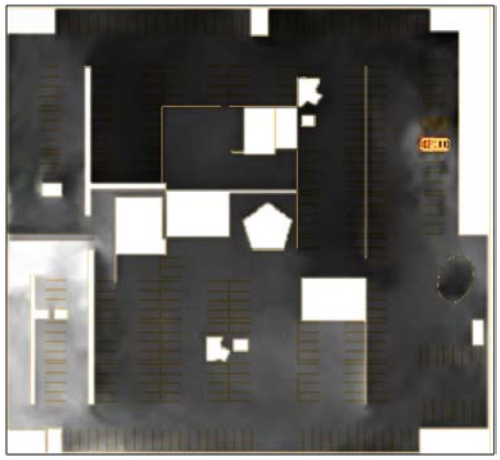
案場	項次	通風設備啟動	撒水(或泡沫)設備啟動	模擬目的
台南美術館二館	模擬一	否	無撒水(或泡沫)	瞭解現階段我國公共建築物當地下停車空間之電動車充電區域發生電池類火災時，通風換氣啟動對於電動車火災煙流的影響，並討論是否應就電池類火災的特殊性，加以調整現有通風換氣設備之設置規格及設置方式。
	模擬二	是	無撒水(或泡沫)	
集合住宅建案	模擬三	否	無撒水(或泡沫)	瞭解現階段我國私有建築物當地下停車空間之電動車充電區域發生電池類火災時，通風換氣啟動對於電動車火災煙流的影響，並討論是否應就電池類火災的特殊性，加以調整現有通風換氣設備之設置規格及設置方式。
	模擬四	是	無撒水(或泡沫)	

備註：本研究案各情境模擬時間為 900 秒。

(資料來源：本研究整理)

模擬一_【台南美術館-無通風換氣設備】_【模擬動畫圖】

表 4-18 模擬 1(無通風換氣設備)之動畫表

	
模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬一_【台南美術館-無通風換氣設備】_【溫度結果】

人員生存極限溫度(Breathing level temperature)約為 131˚C，但當室內溫度高於 60˚C 時，人員便難以忍受且易造成逃生行為遲緩。

綜合本次模擬(一)結果由圖 4-27、圖 4-28 發現，模擬(一)車頂位置最高溫度達 758°C；平均溫度為 612°C，周圍車道間最高溫度達 198°C；平均溫度為 127°C。

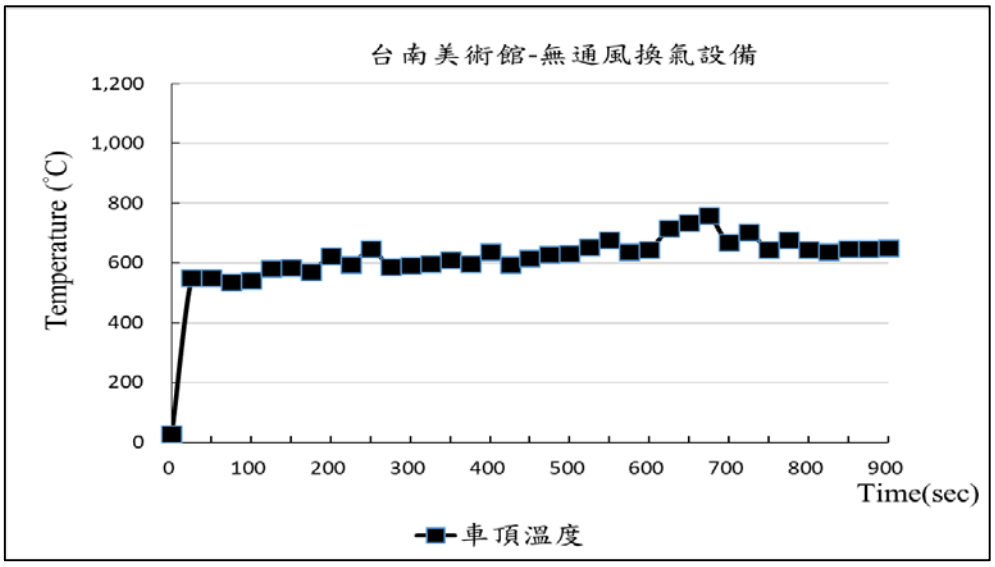


圖 4-27 模擬 1(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度)
(資料來源：本研究整理)

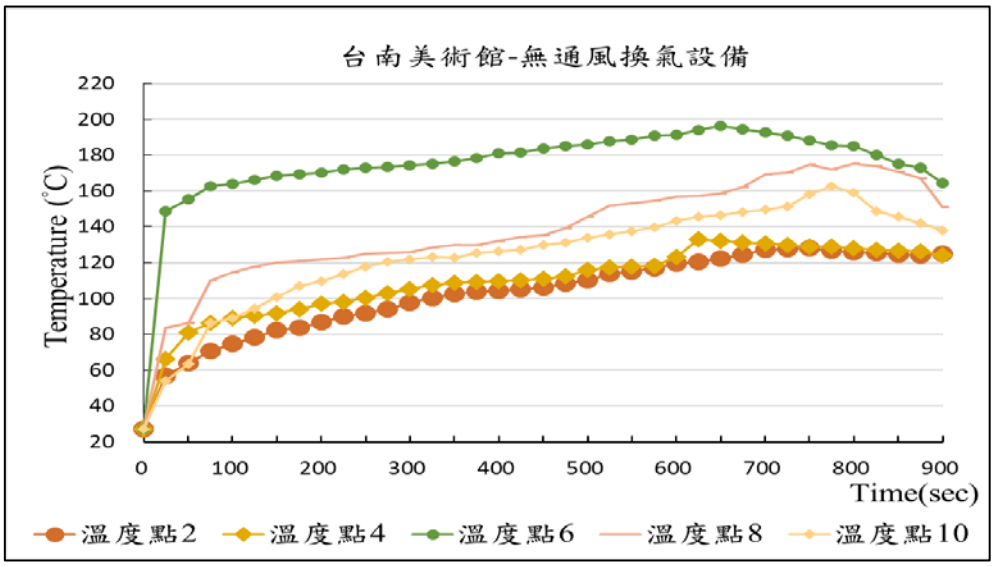
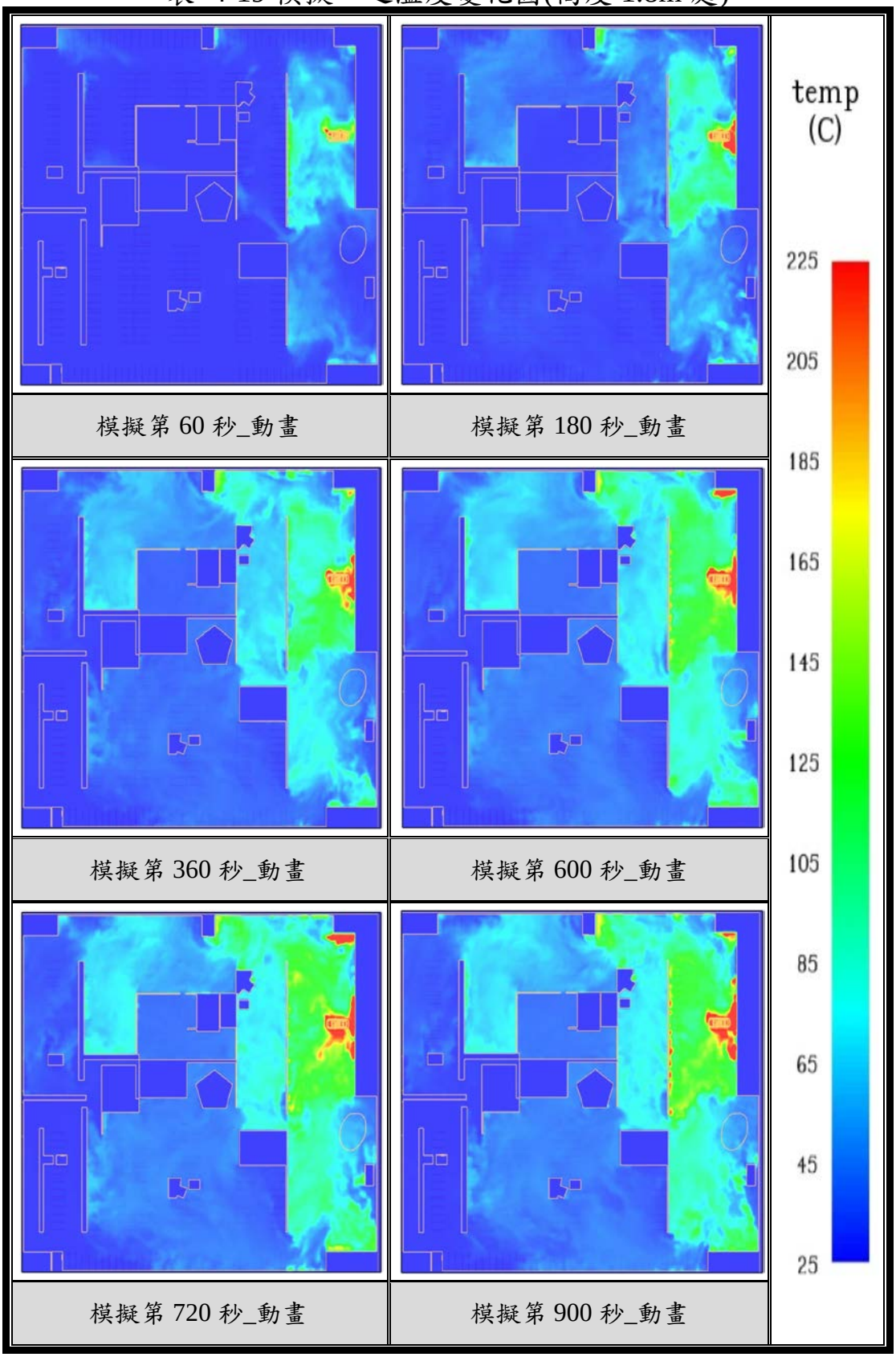


圖 4-28 模擬 1(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)
(資料來源：本研究整理)

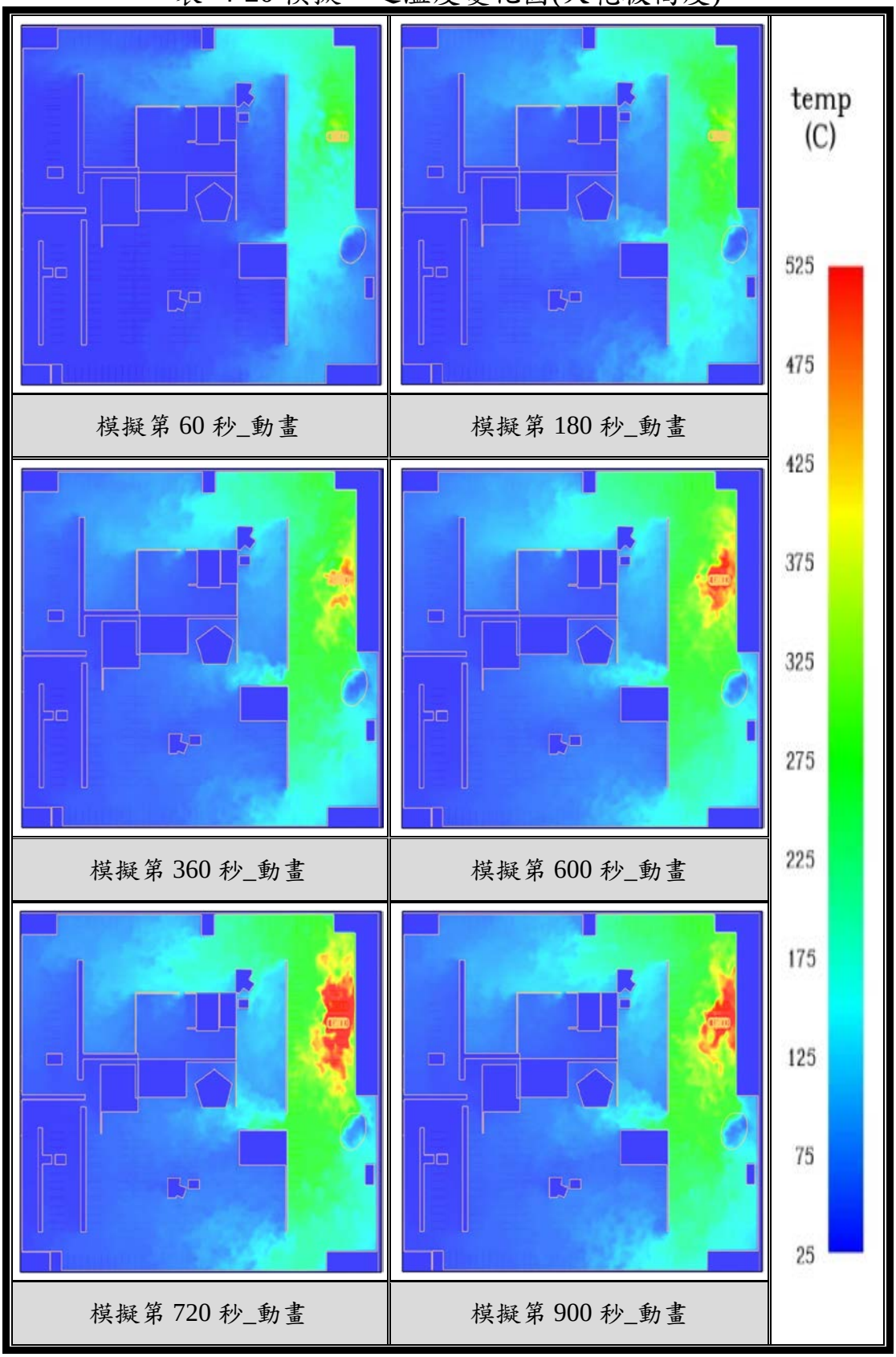
表 4-19 模擬一之溫度變化圖(高度 1.8m 處)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

表 4-20 模擬一之溫度變化圖(天花板高度)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬一_【台南美術館-無通風換氣設備】_【煙層高度及能見度】

基於滿足人員生命安全無虞的前提下，本研究團隊探討電動車燃燒煙流堆積至離地 1.8m 處之火場情形。

由圖 4-29 發現，煙層量測點最低點達 1.3m；圖 4-30 煙層量測點最低點達 0.5m，其中出入口 3 量測點位置因有經過一個對外樓梯口，將部分煙流排出至戶外，故煙層高度較其他處高，可維持在 1.7m 以上。

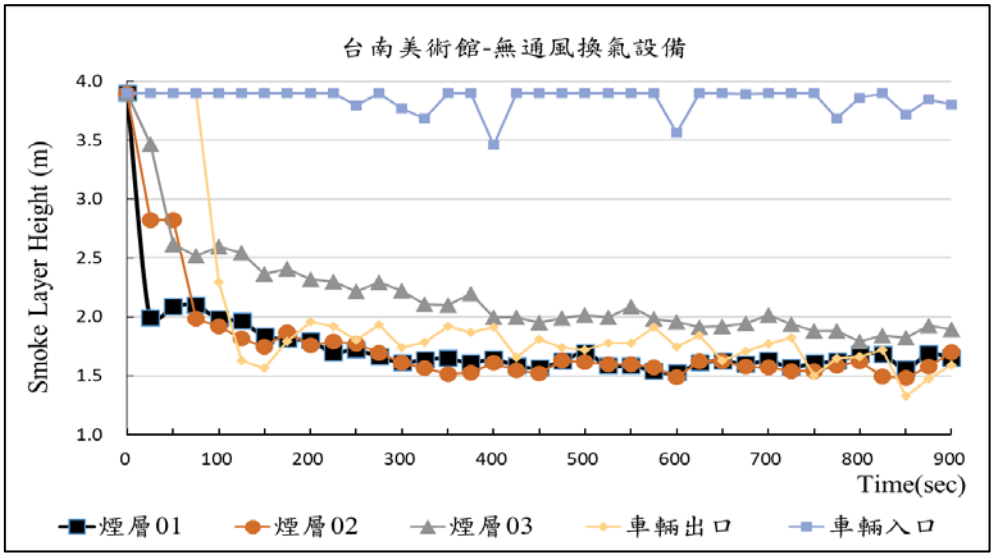


圖 4-29 模擬 1(無通風換氣設備)_煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

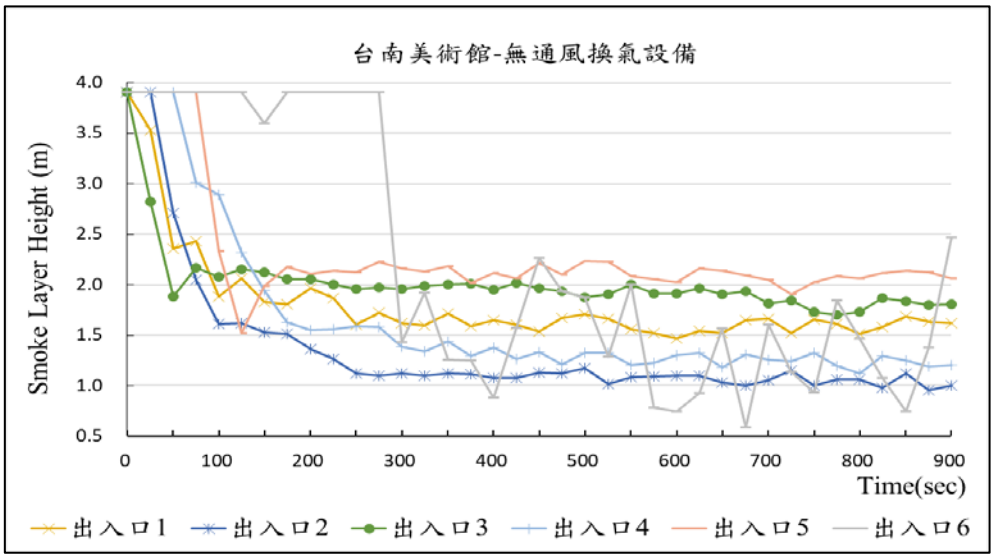


圖 4-30 模擬 1(無通風換氣設備)_ 出入口煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

若考量人員移動所需能見度距離，由圖 4-31 發現，能見度量測點最低點達 2.1m；圖 4-32 煙層量測點最低點達 1.7m，其中出入口 3 量測點位置因有經過一個對外樓梯口，將部分煙流排出至戶外，故能見度較其他處高，可維持在 4.4m 以上。

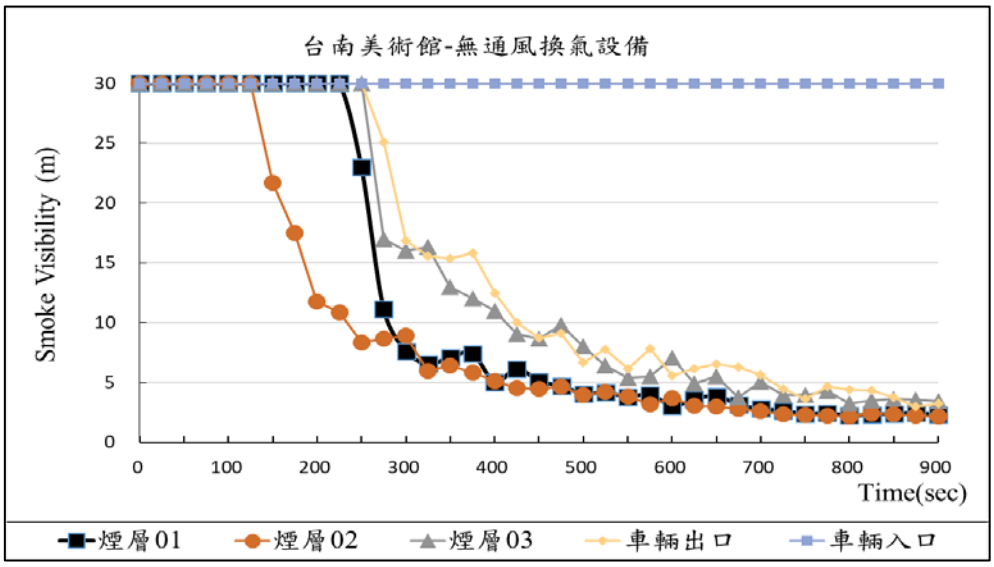


圖 4-31 模擬 1(無通風換氣設備)_能見度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

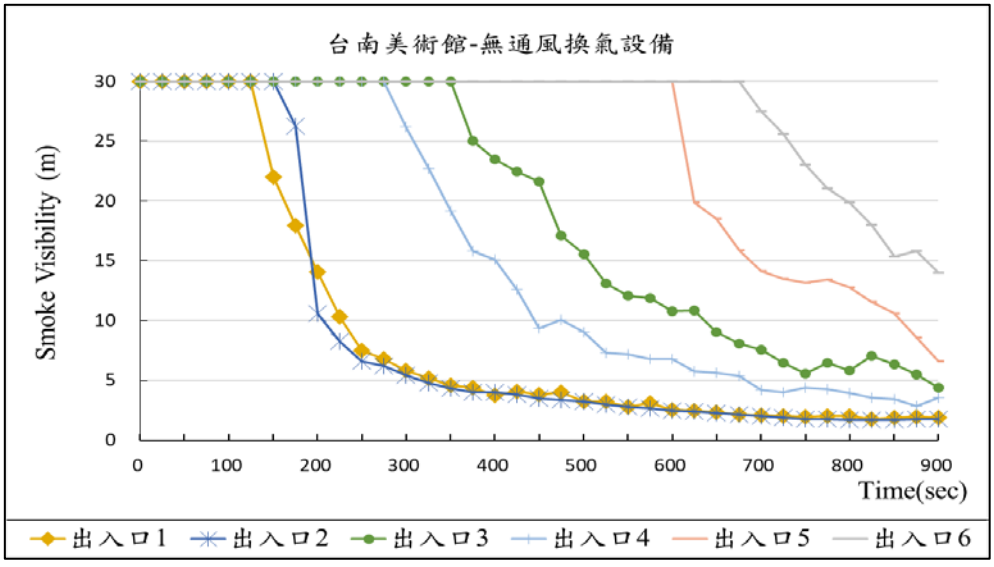
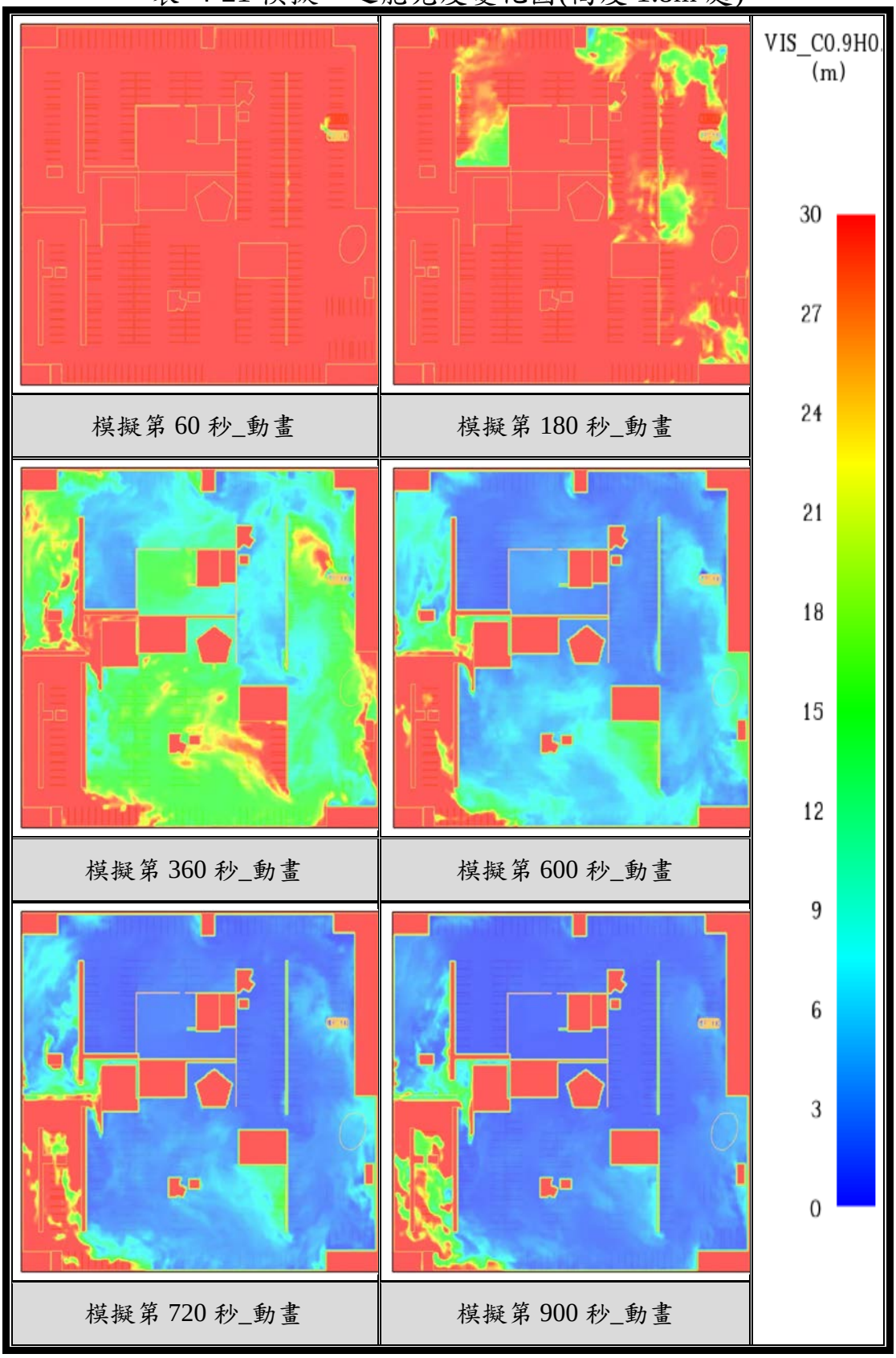


圖 4-32 模擬 1(無通風換氣設備)_ 出入口能見度曲線圖

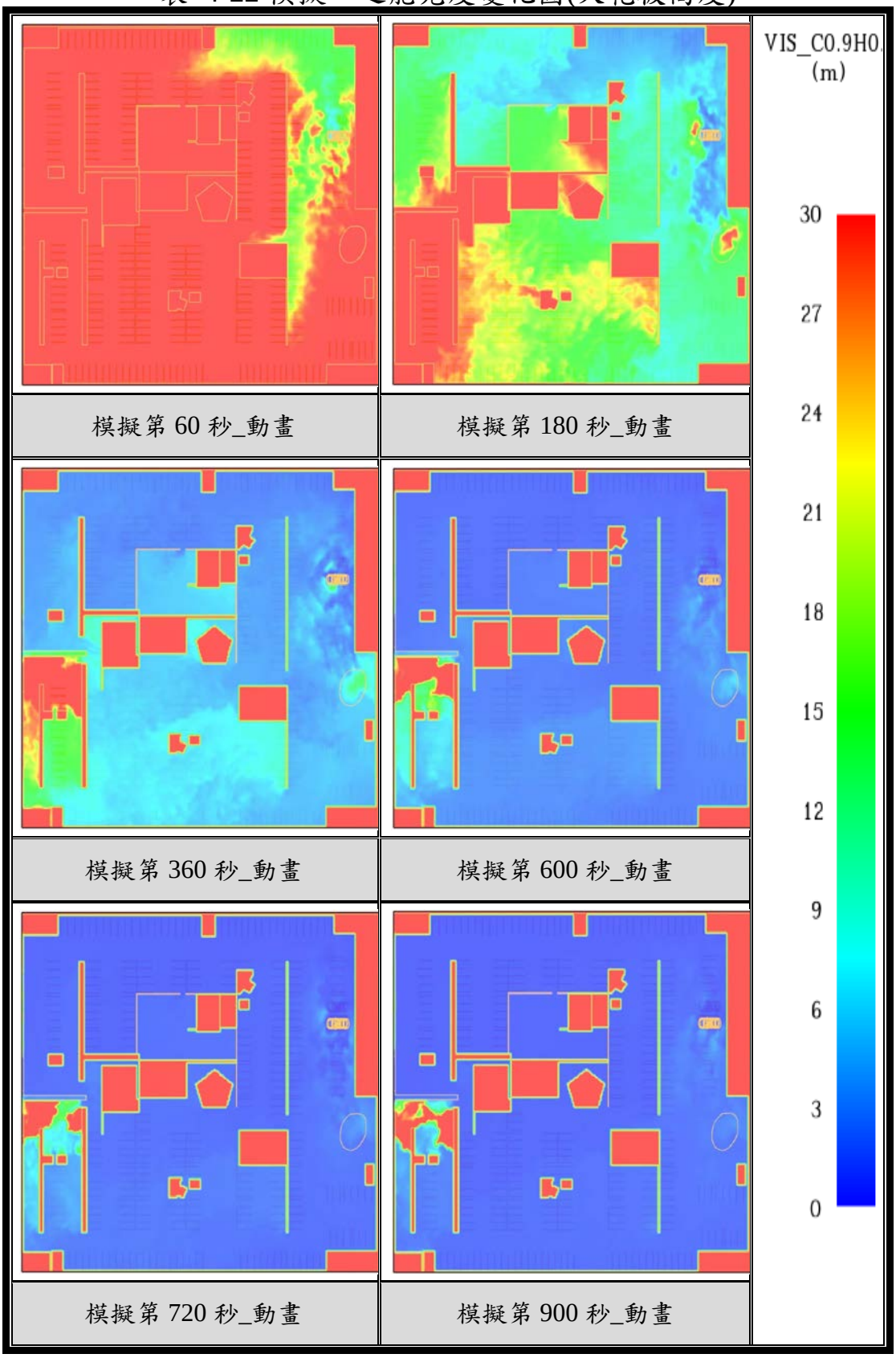
(資料來源：本研究整理)

表 4-21 模擬一之能見度變化圖(高度 1.8m 處)



(資料來源：本研究整理)

表 4-22 模擬一之能見度變化圖(天花板高度)



(資料來源：本研究整理)

模擬一_【台南美術館-無通風換氣設備】_【危害氣體結果】

由參考書目【107】得知，當 CO 濃度超過 200PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-33、圖 4-34 得知，模擬第 200 秒左右，CO 濃度將超過 200PPM。

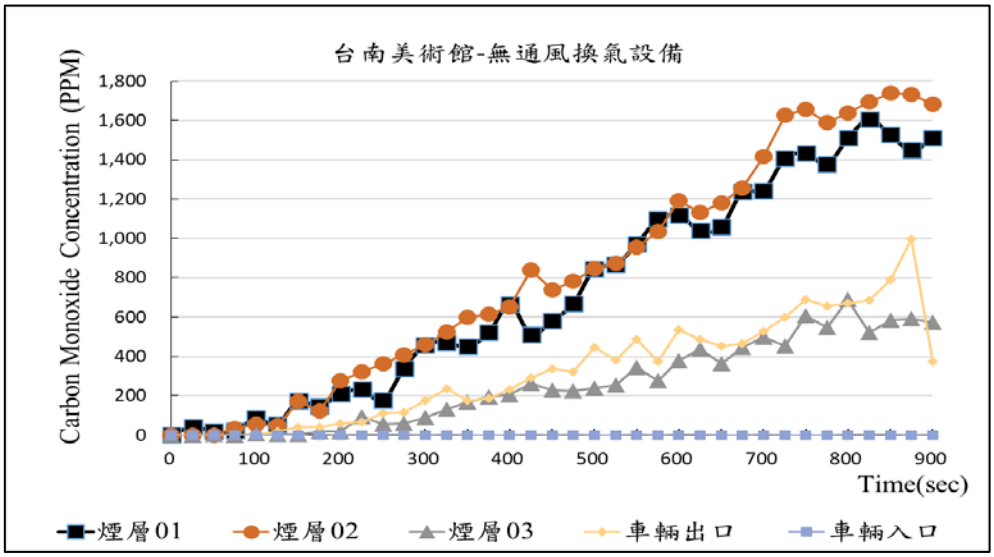


圖 4-33 模擬1(無通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

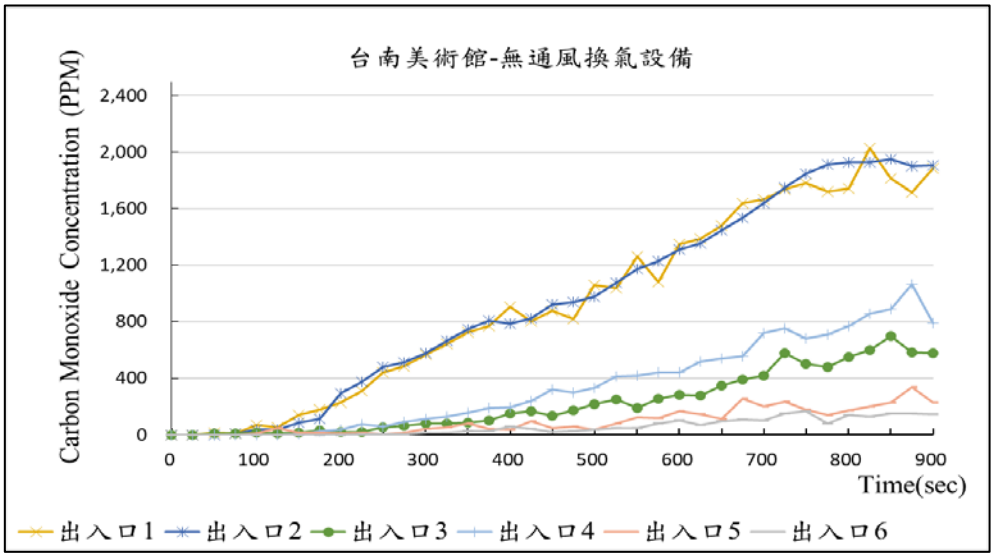


圖 4-34 模擬1(無通風換氣設備)_出入口一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

由參考書目【107】得知，當 CO_2 濃度超過 10,000PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-35、圖 4-36 得知，模擬第 580 秒左右，CO_2 濃度將超過 10,000PPM。

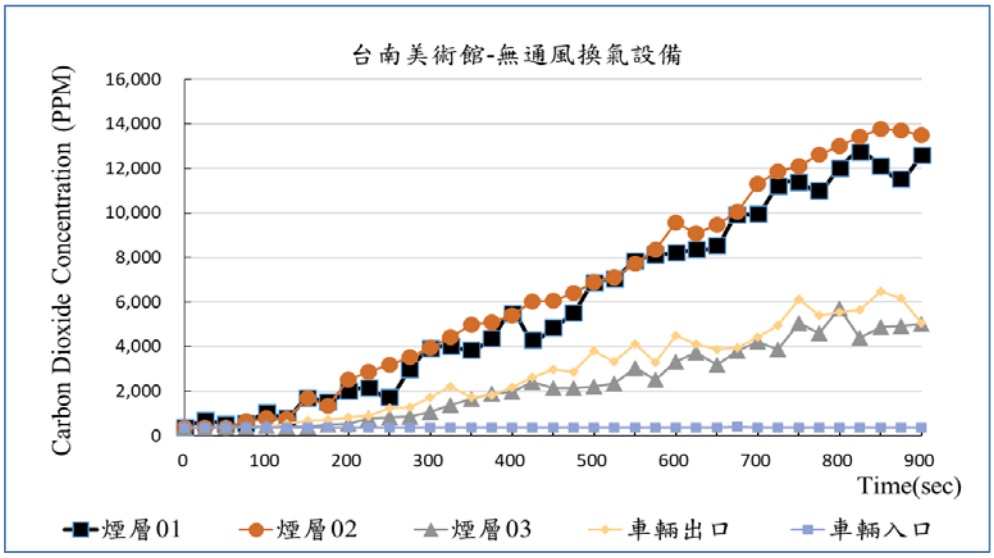


圖 4-35 模擬1(無通風換氣設備)_二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

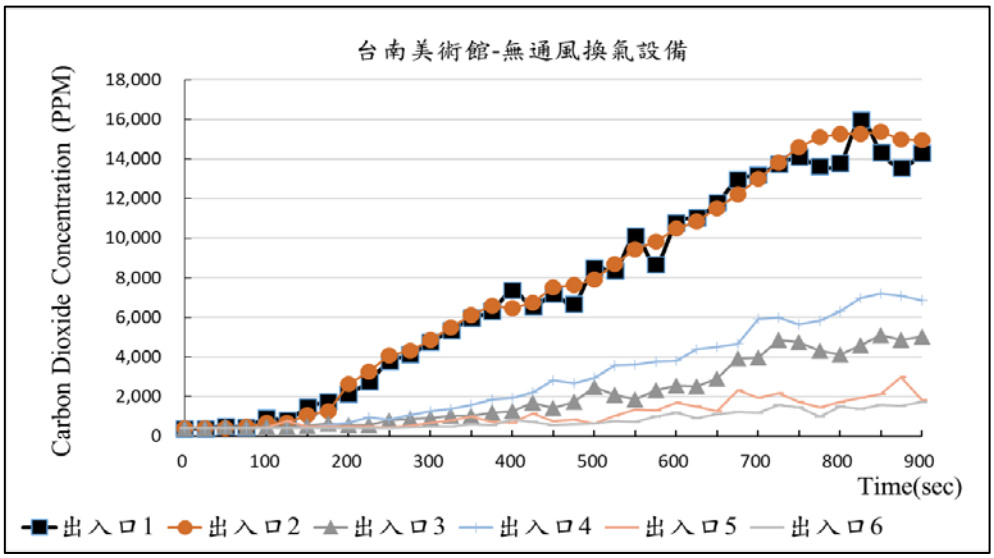
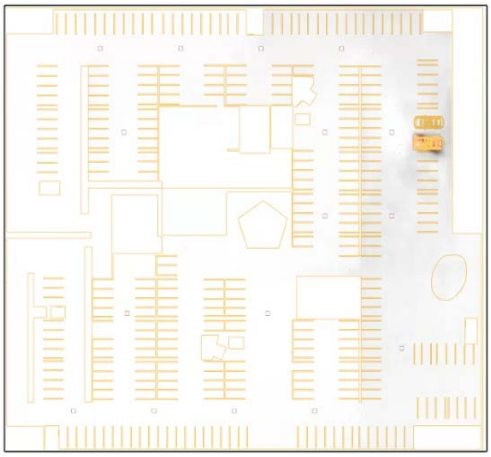
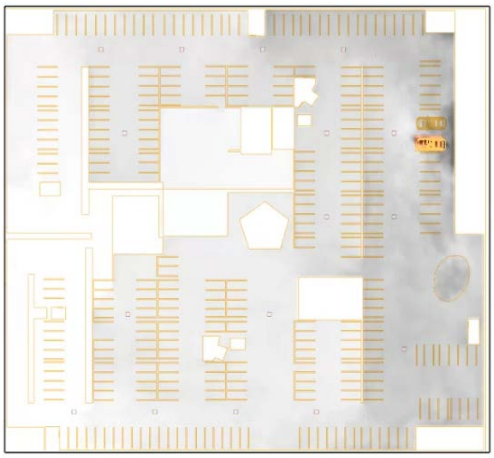
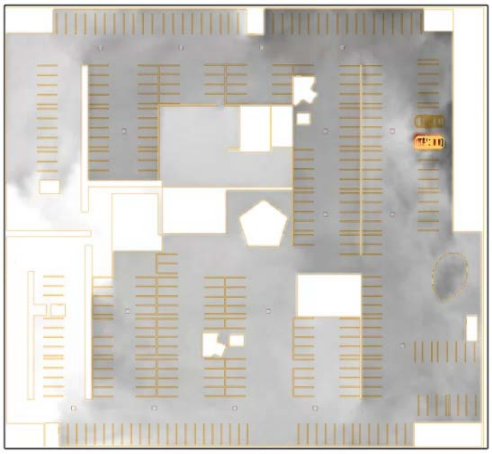
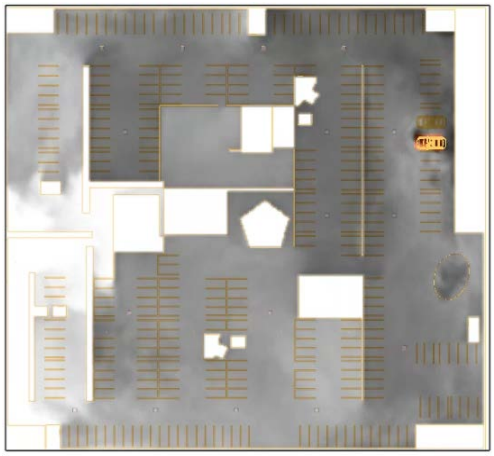
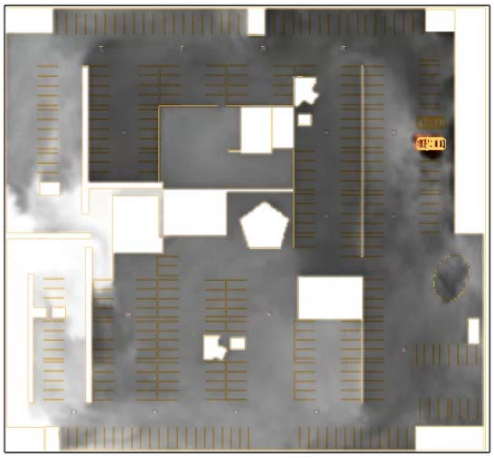
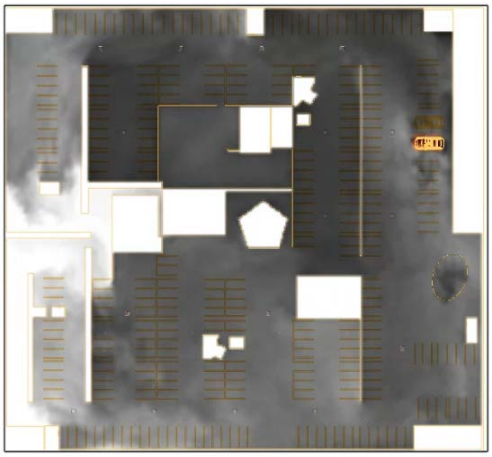


圖 4-36 模擬1(無通風換氣設備)_出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

模擬二_【台南美術館-通風換氣設備】_【模擬動畫圖】

表 4-23 模擬 2 之動畫表

	
模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬二_【台南美術館-有通風換氣設備】_【溫度結果】

人員生存極限溫度(Breathing level temperature)約為 131˚C，但當室內溫度高於 60˚C 時，人員便難以忍受且易造成逃生行為遲緩。

綜合本次模擬(二)結果由圖 4-37、圖 4-38 發現，模擬(二)車頂位置最高溫度達 772˚C；平均溫度為 594˚C，周圍車道間最高溫度達 183˚C；平均溫度為 114˚C。

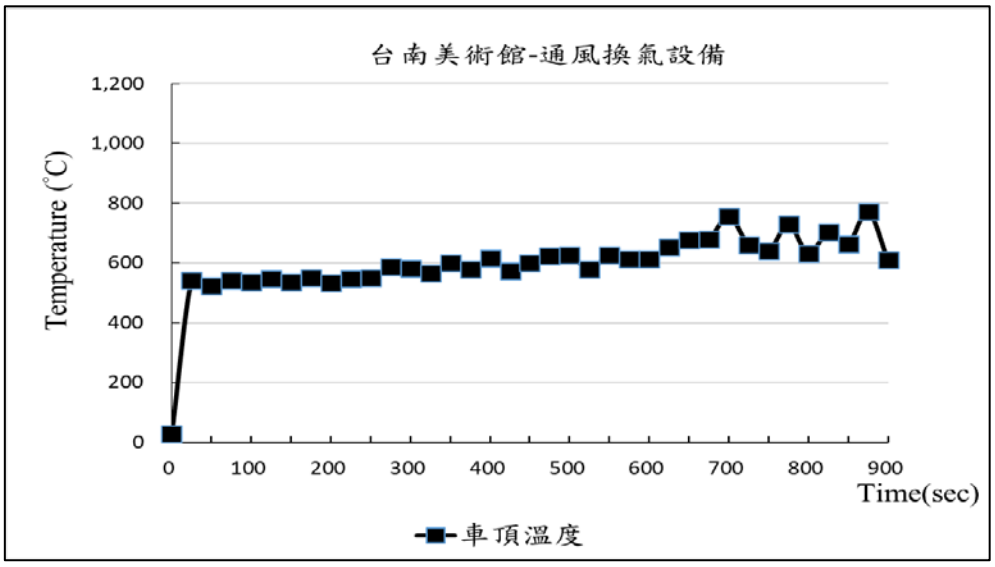


圖 4-37 模擬 2(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度)
(資料來源：本研究整理)

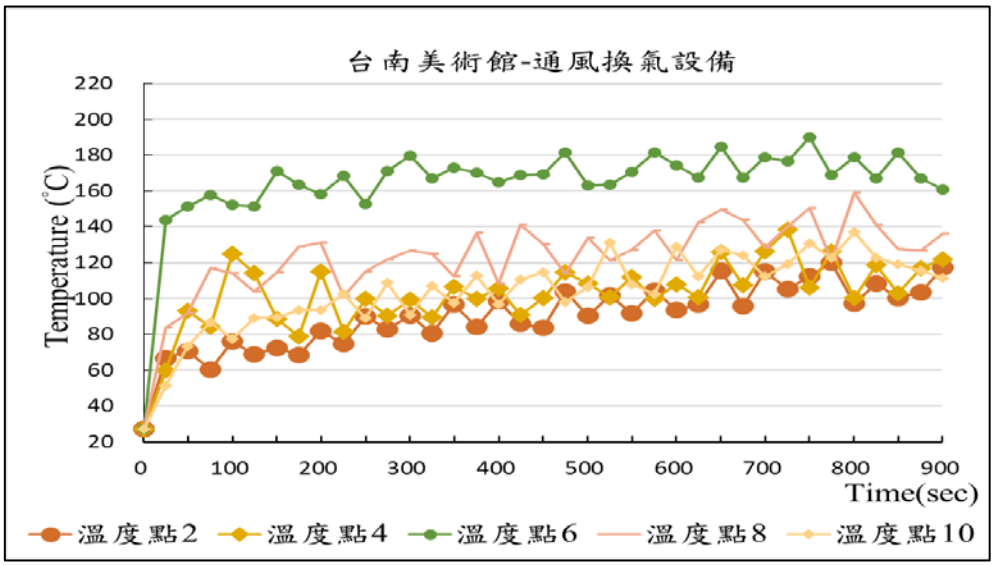
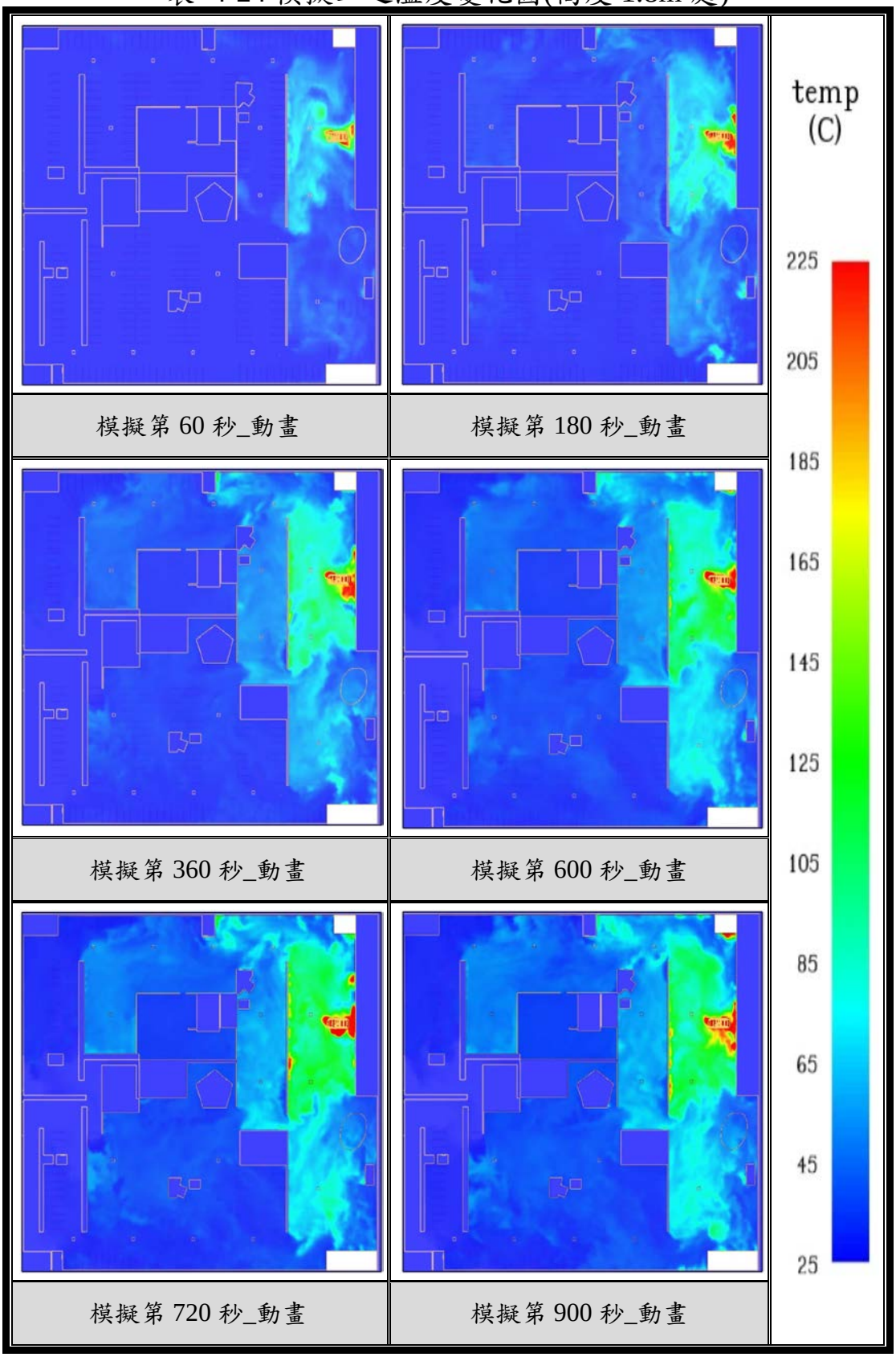


圖 4-38 模擬 2(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)
(資料來源：本研究整理)

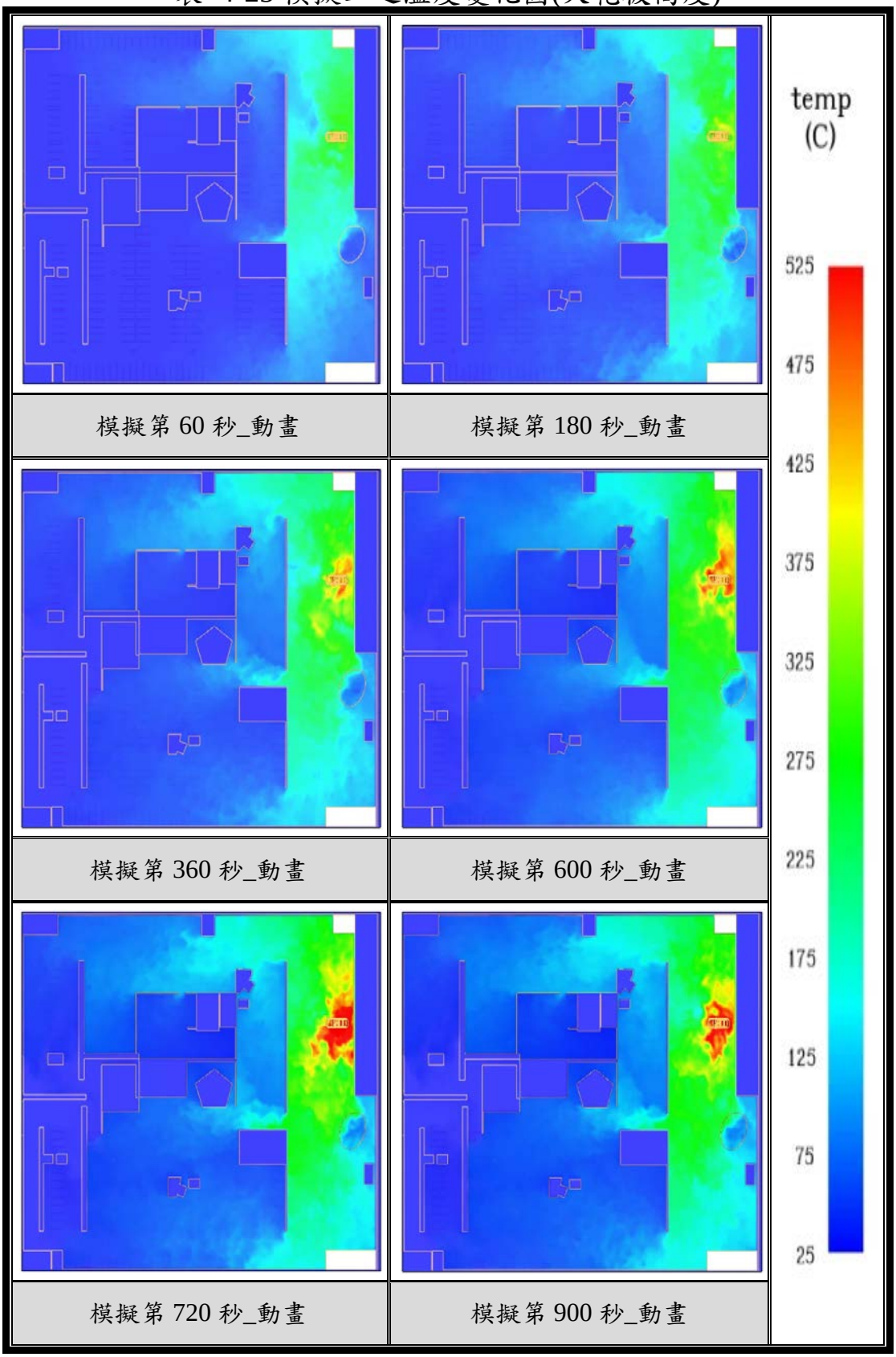
表 4-24 模擬二之溫度變化圖(高度 1.8m 處)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

表 4-25 模擬二之溫度變化圖(天花板高度)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬二_【台南美術館-有通風換氣設備】_【煙層高度及能見度】

基於滿足人員生命安全無虞的前提下，本研究團隊探討電動車燃燒煙流堆積至離地 1.8m 處之火場情形。

由圖 4-39 發現，煙層量測點最低點達 1.7m；圖 4-40 煙層量測點最低點達 1.1m，其中出入口 3 量測點位置因有經過一個對外樓梯口，將部分煙流排出至戶外，故煙層高度較其他處高，可維持在 1.8m 以上。

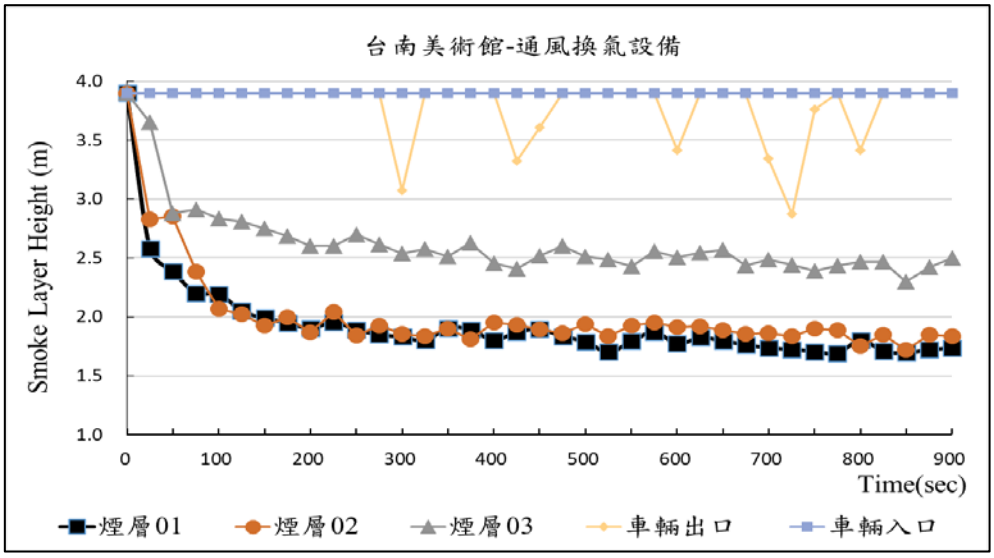


圖 4-39 模擬 2(有通風換氣設備)_煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

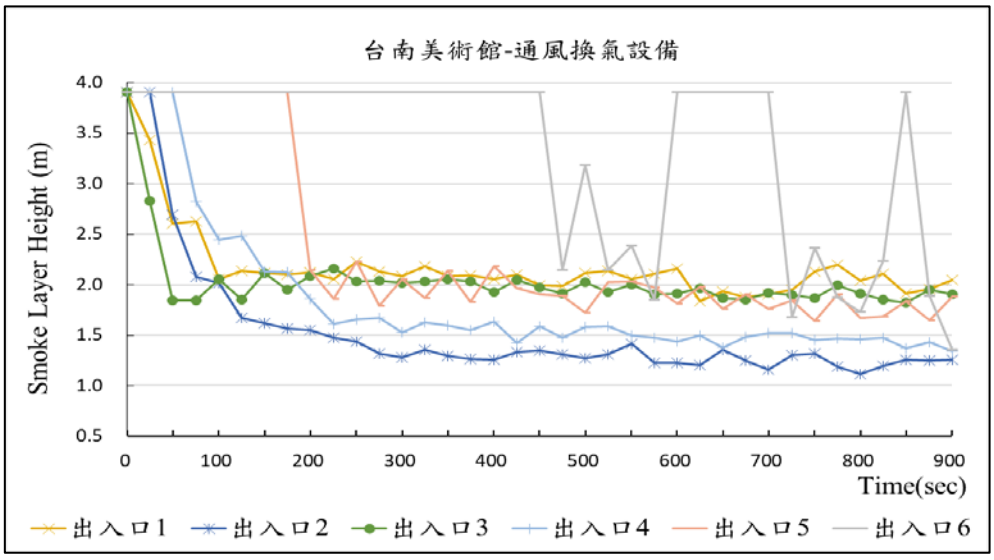


圖 4-40 模擬 2(有通風換氣設備)_出入口煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

若考量人員移動所需能見度距離，由圖 4-41 發現，能見度量測點最低點達 3.5m；圖 4-42 煙層量測點最低點達 2.7m，其中出入口 3 量測點位置因有經過一個對外樓梯口，將部分煙流排出至戶外，故能見度度較其他處高，可維持在 6.5m 以上。

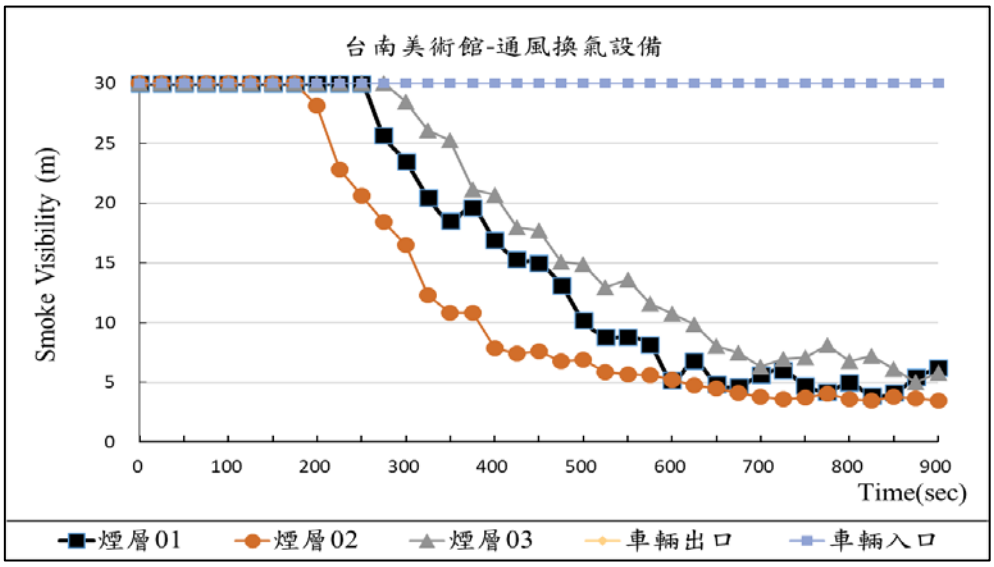


圖 4-41 模擬 2(有通風換氣設備)_能見度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

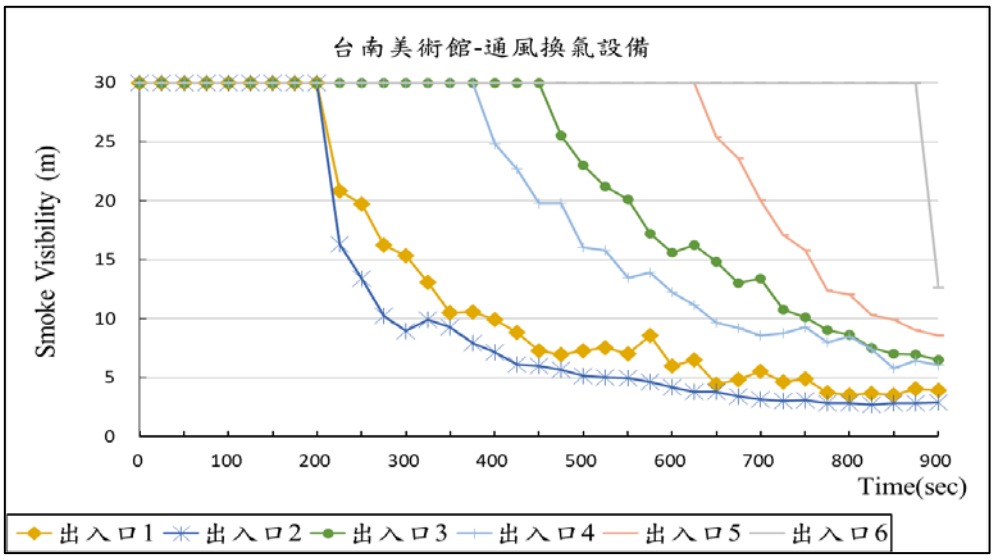
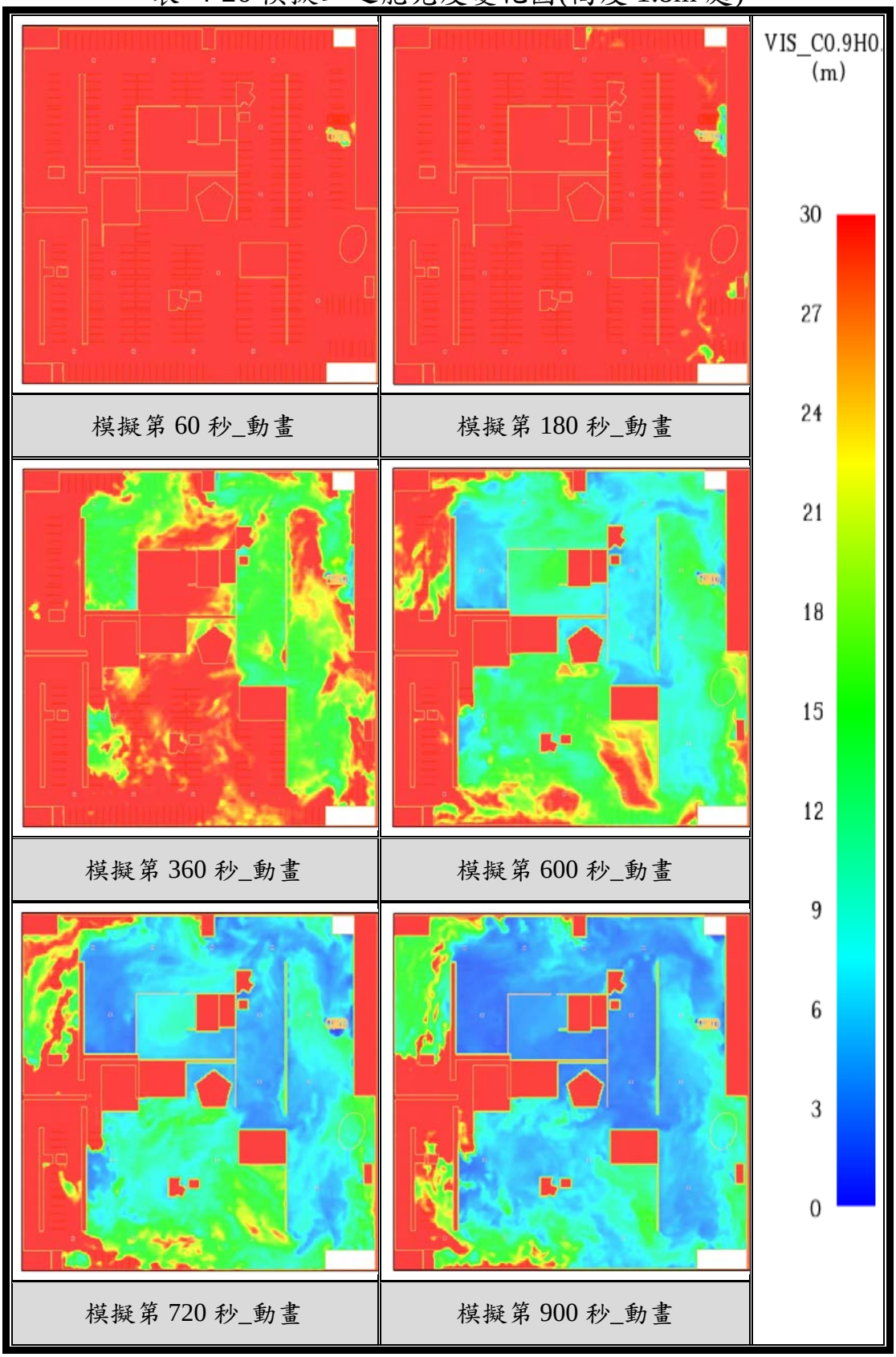


圖 4-42 模擬 2(有通風換氣設備)_ 出入口能見度曲線圖

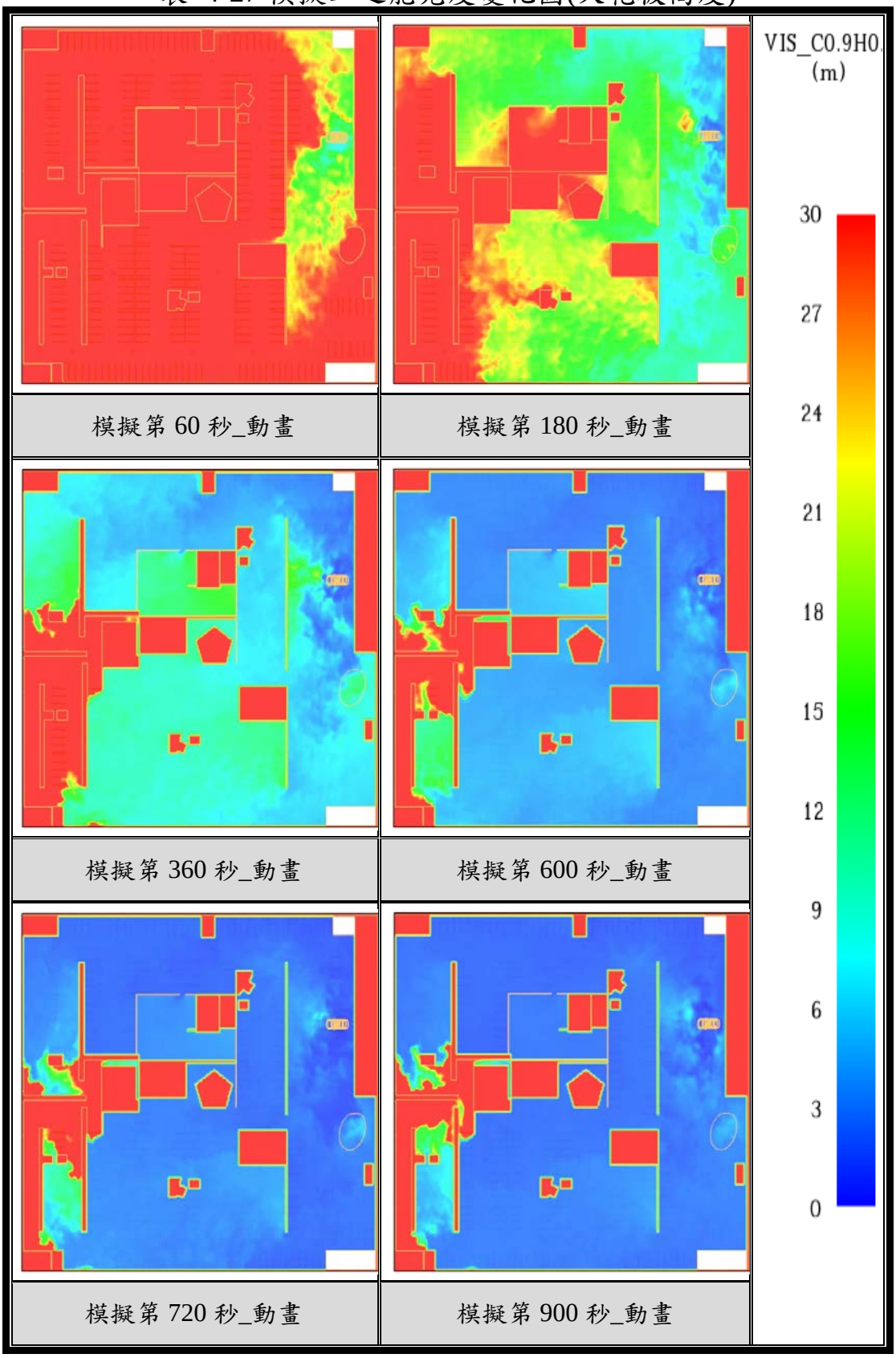
(資料來源：本研究整理)

表 4-26 模擬二之能見度變化圖(高度 1.8m 處)



(資料來源：本研究整理)

表 4-27 模擬二之能見度變化圖(天花板高度)



(資料來源：本研究整理)

模擬二_【台南美術館-有通風換氣設備】_【危害氣體結果】

由參考書目【107】得知，當 CO 濃度超過 200PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-43、圖 4-44 得知，模擬第 325 秒左右，CO 濃度將超過 200PPM。

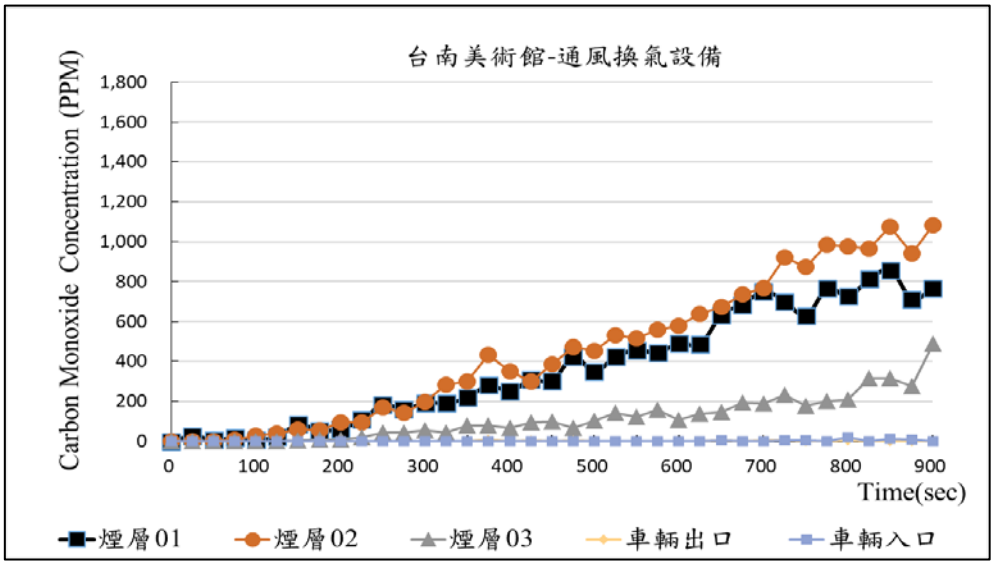


圖 4-43 模擬2(有通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

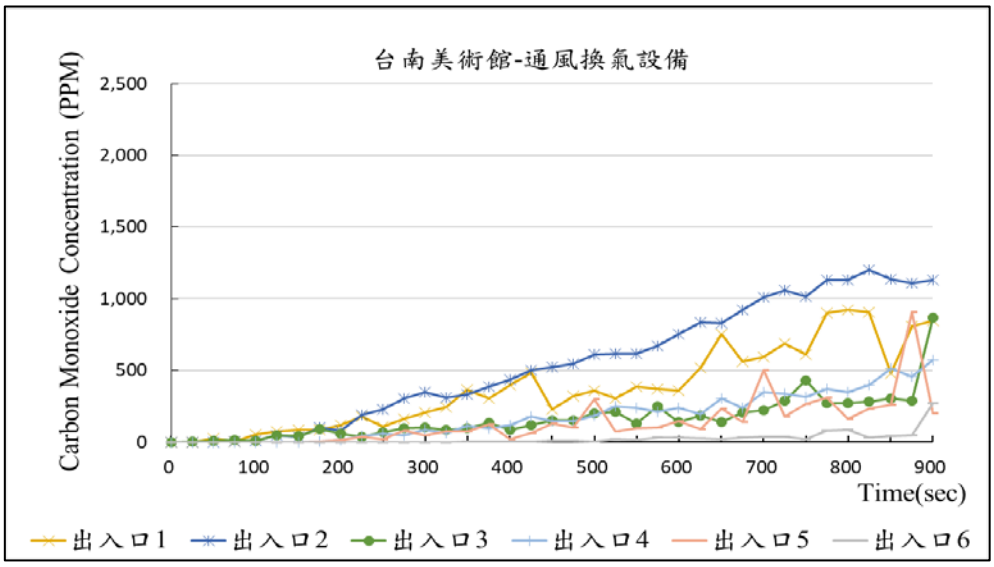


圖 4-44 模擬2(有通風換氣設備)_出入口一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

由參考書目【107】得知，當 CO_2 濃度超過 10,000PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-45、圖 4-46 得知，模擬第 580 秒左右，CO_2 濃度將超過 10,000PPM。

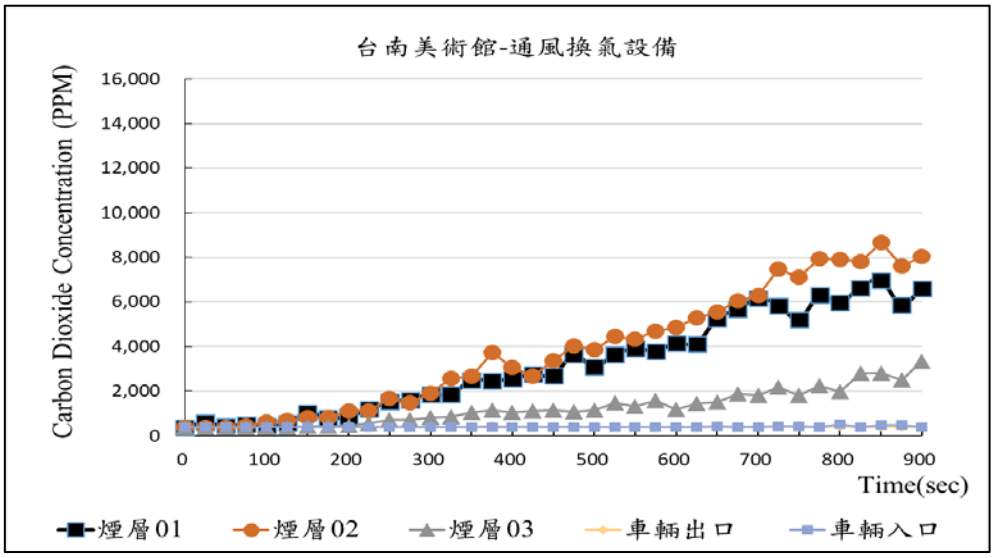


圖 4-45 模擬2(有通風換氣設備)_二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

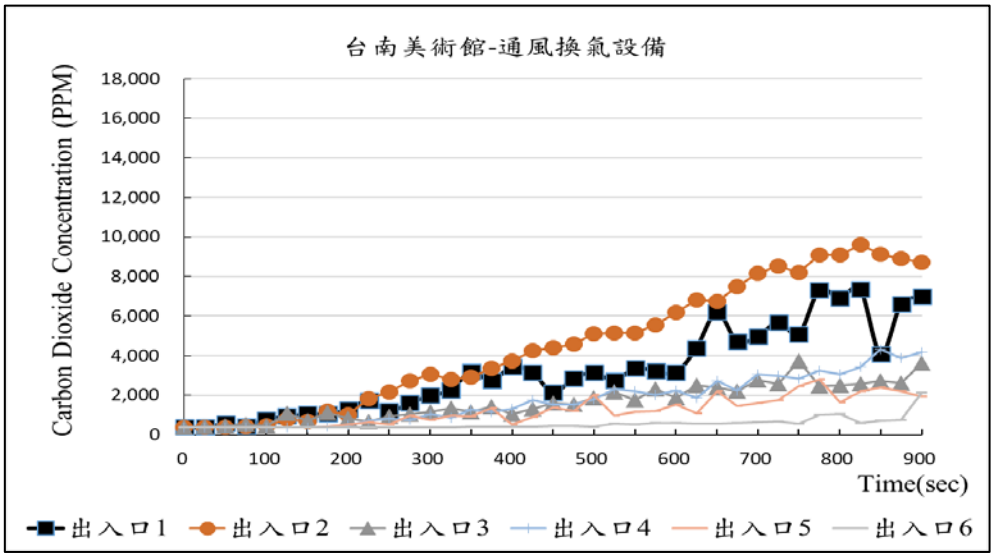
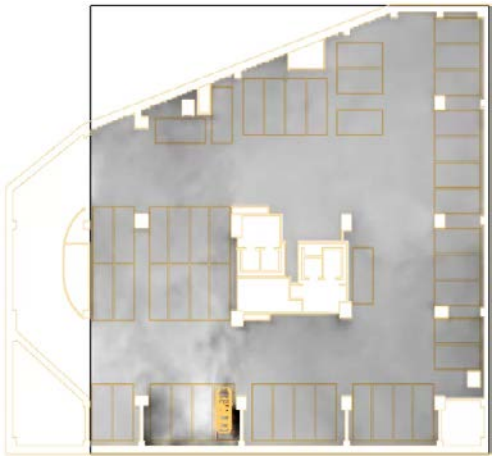
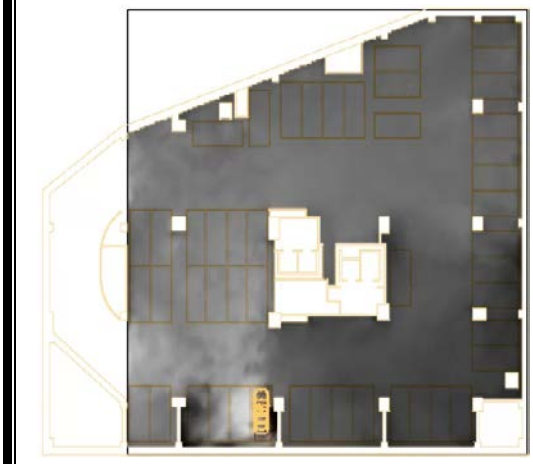
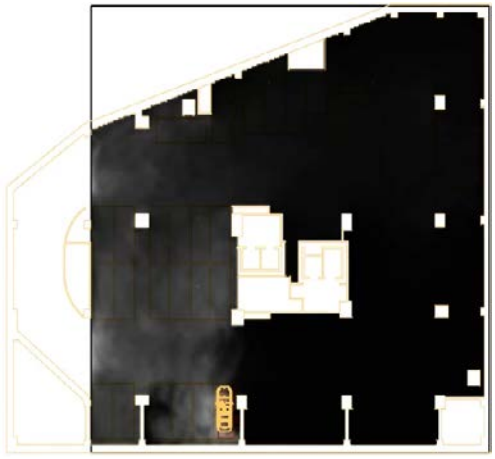


圖 4-46 模擬2(有通風換氣設備)_出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

模擬三_【集合住宅建案-無通風換氣設備】_【模擬動畫圖】

表 4-28 模擬 3(無通風換氣設備)之動畫表

	
模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬三_【集合住宅建案-無通風換氣設備】_【溫度結果】

人員生存極限溫度(Breathing level temperature)約為 131˚C，但當室內溫度高於 60˚C 時，人員便難以忍受且易造成逃生行為遲緩。

綜合本次模擬(三)結果由圖 4-47、圖 4-48 發現，模擬(三)車頂位置最高溫度達 992˚C；平均溫度為 732˚C，周圍車道間最高溫度達 190˚C；平均溫度為 98˚C。

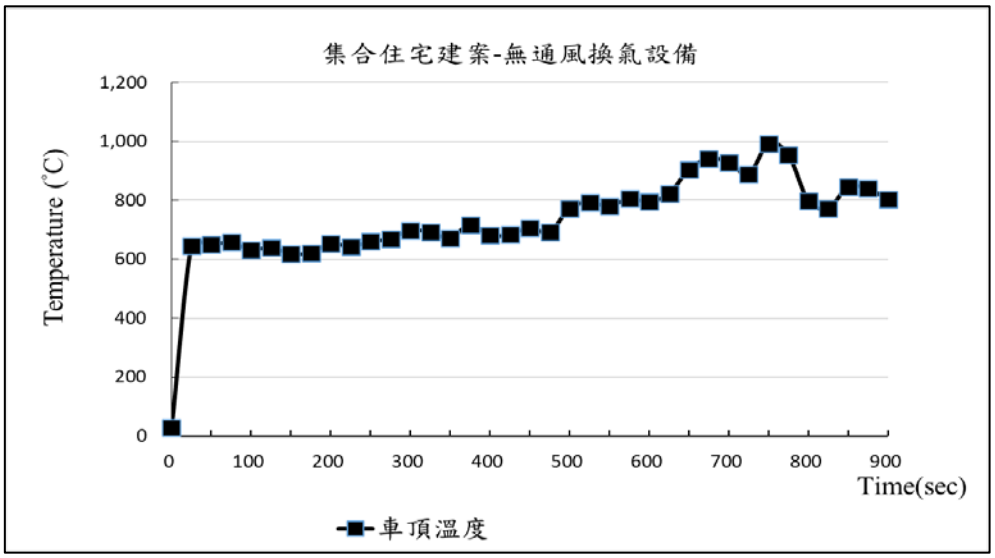


圖 4-47 模擬 3(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度)
(資料來源：本研究整理)

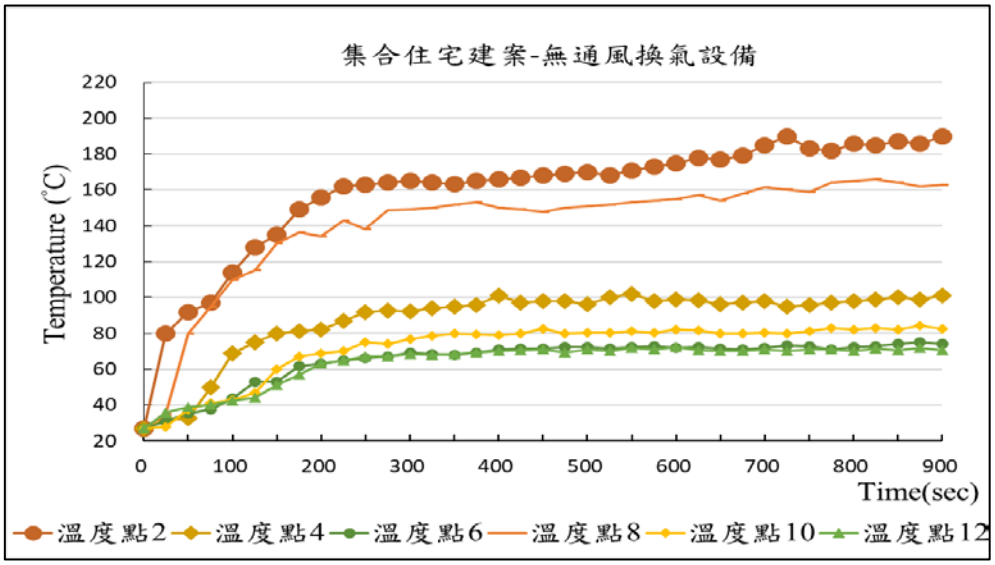
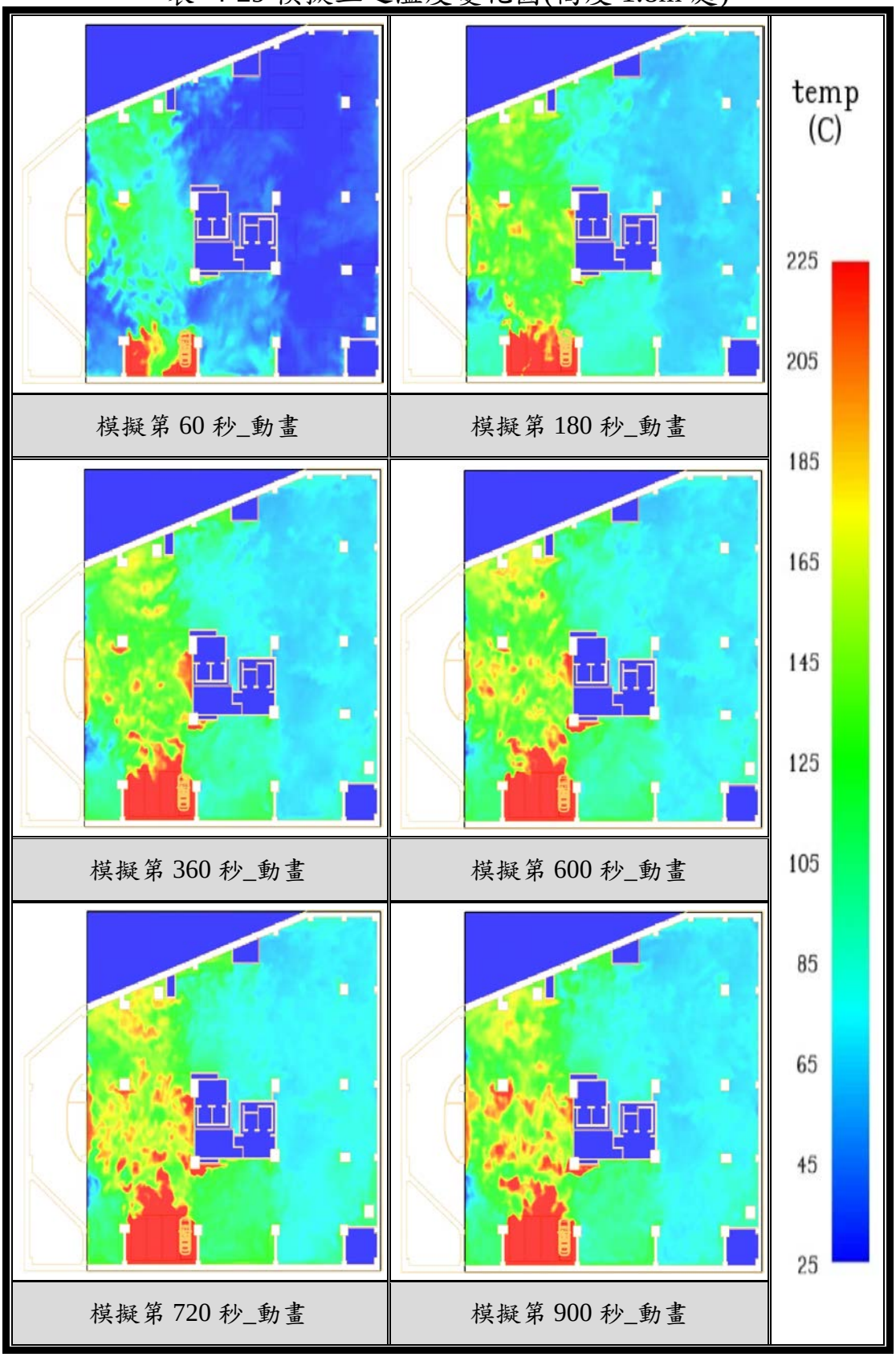


圖 4-48 模擬 3(無通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)
(資料來源：本研究整理)

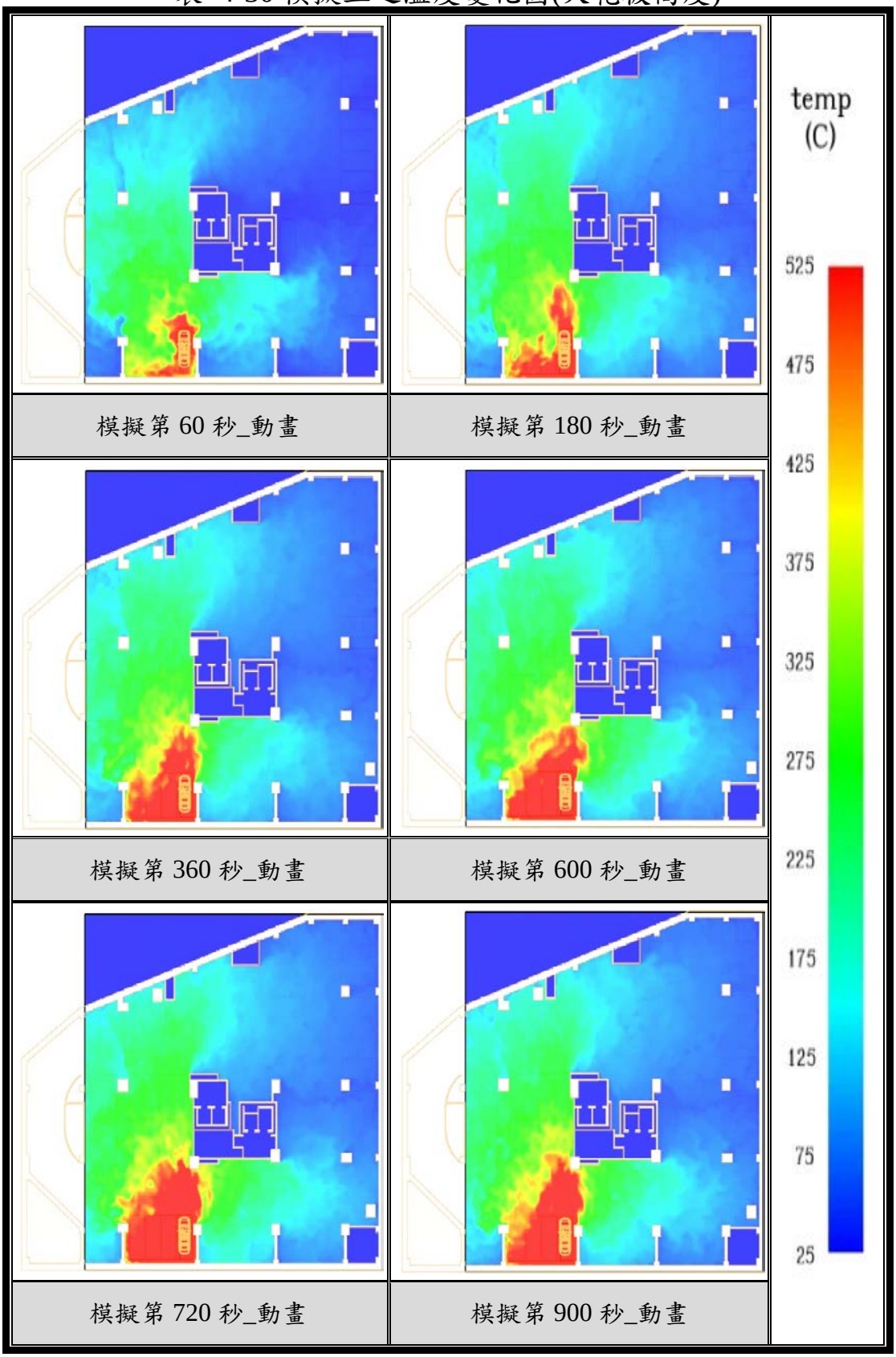
表 4-29 模擬三之溫度變化圖(高度 1.8m 處)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫	

(資料來源：本研究整理)

表 4-30 模擬三之溫度變化圖(天花板高度)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫	

(資料來源：本研究整理)

模擬三_【集合住宅建案-無通風換氣設備】_【煙層高度及能見度】

基於滿足人員生命安全無虞的前提下，本研究團隊探討電動車燃燒煙流堆積至離地 1.8m 處之火場情形。

由圖 4-49 發現，煙層量測點最低點達 0.9m；圖 4-50 煙層量測點最低點達 0.7m。

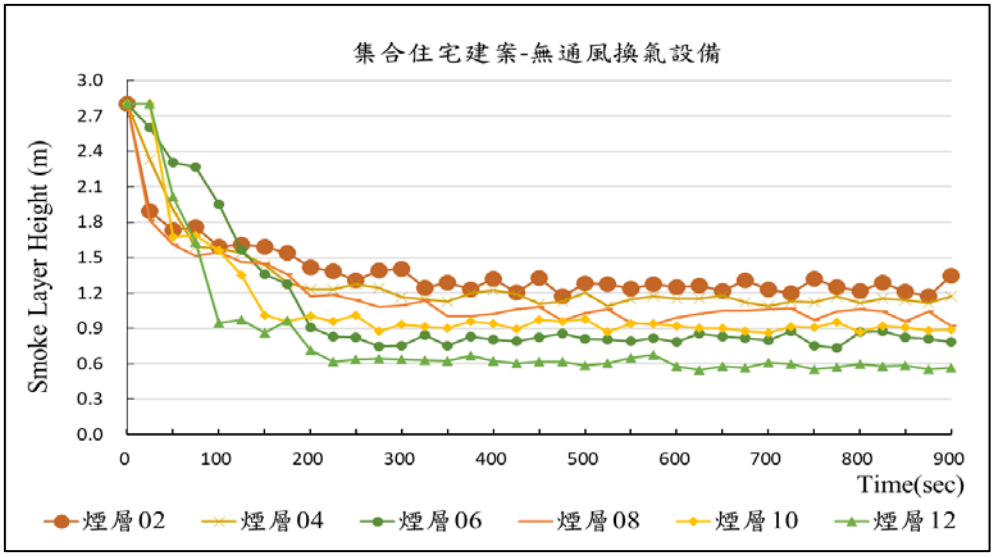


圖 4-49 模擬 3(無通風換氣設備)_煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

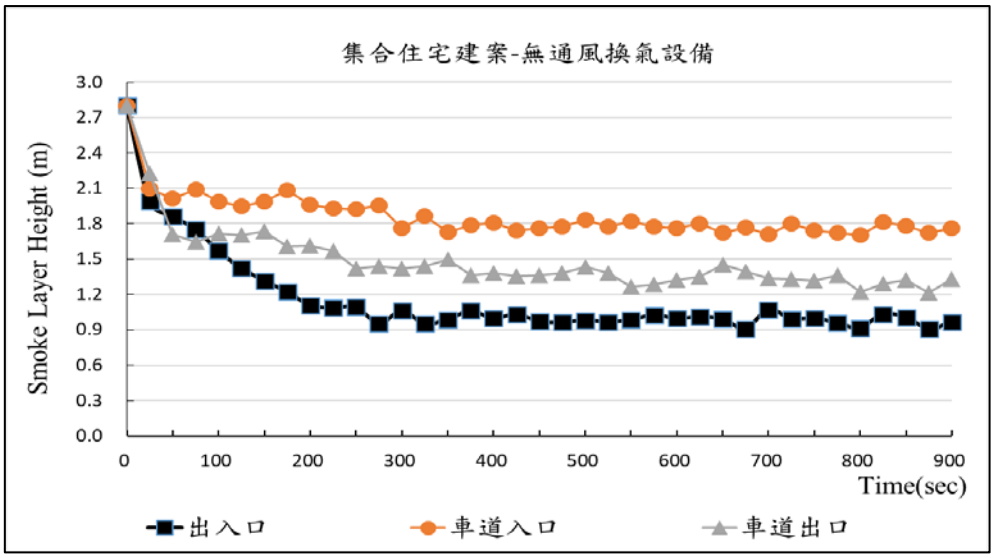


圖 4-50 模擬 3(無通風換氣設備)_出入口煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

若考量人員移動所需能見度距離，由圖 4-51 發現，能見度量測點最低點達 0.9m；圖 4-52 煙層量測點最低點達 0.9m。

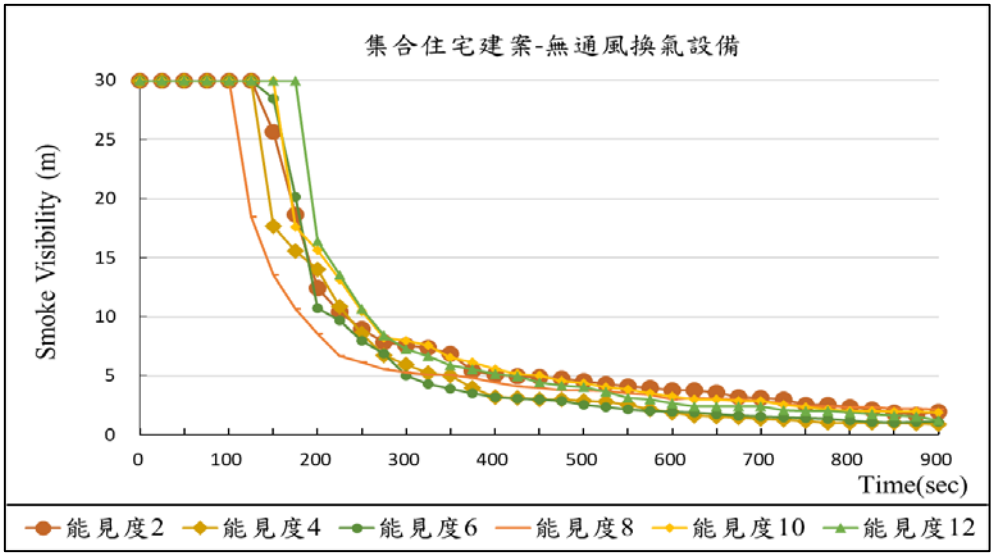


圖 4-51 模擬 3(無通風換氣設備)_能見度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

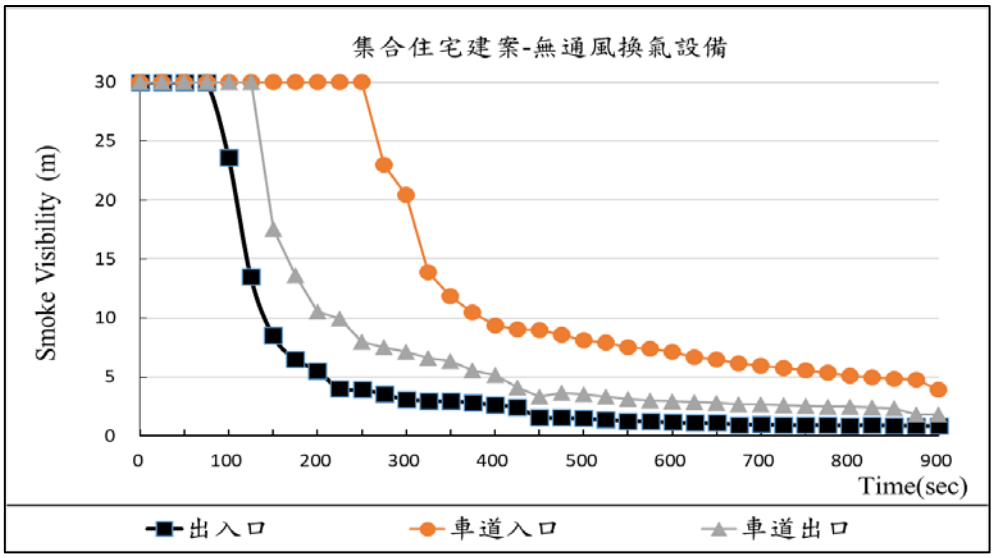
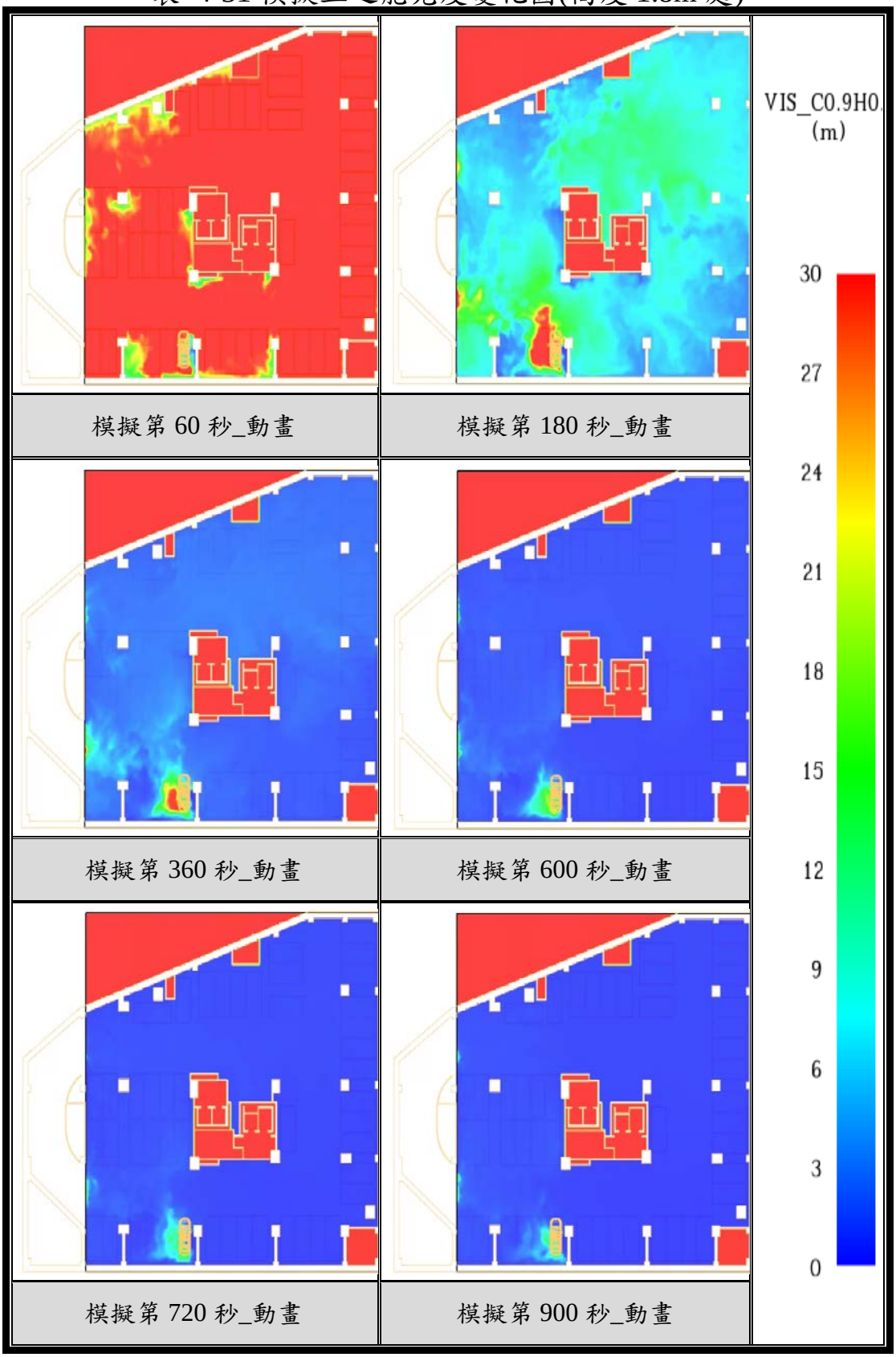


圖 4-52 模擬 3(無通風換氣設備)_出入口能見度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

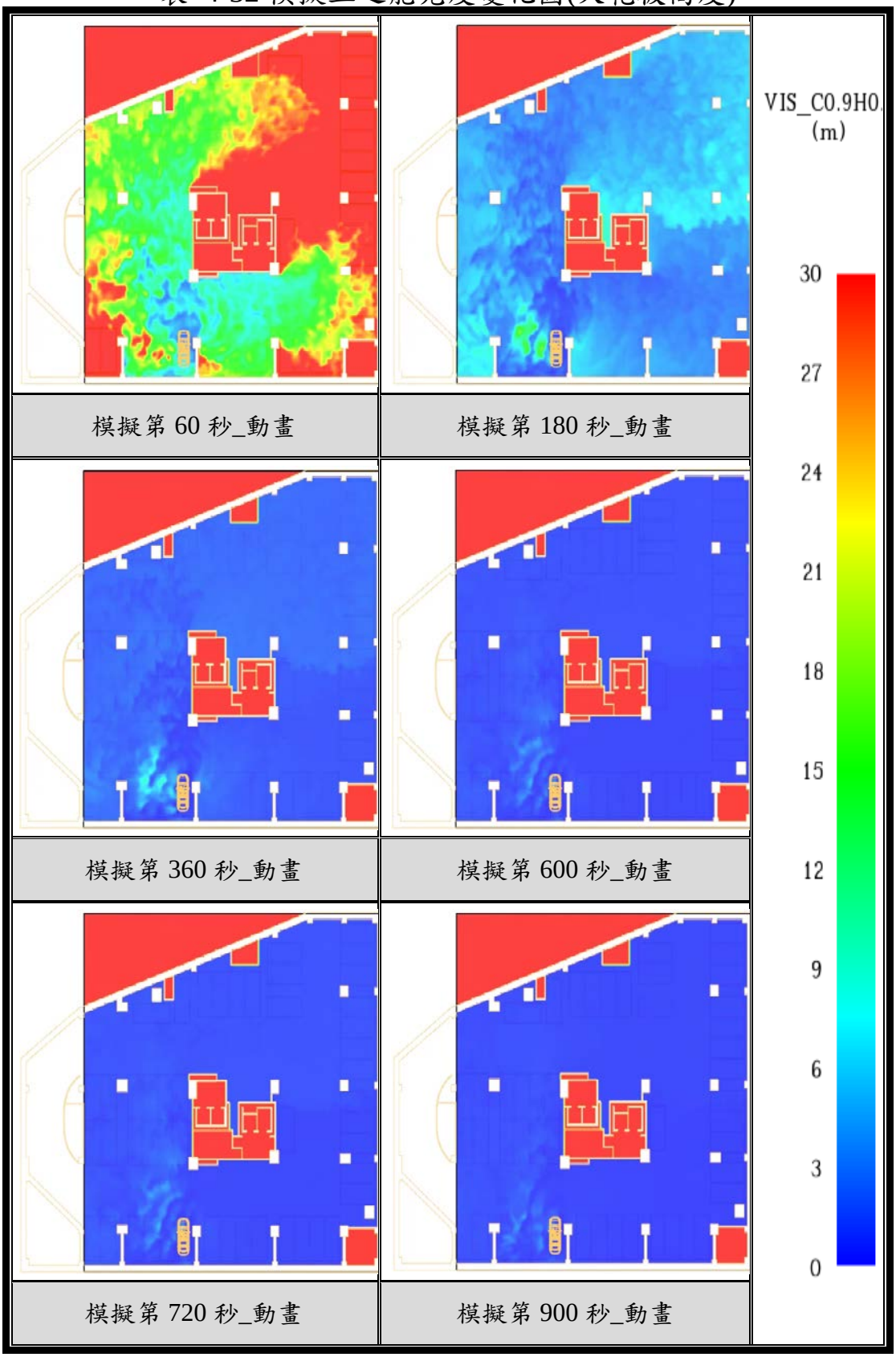
表 4-31 模擬三之能見度變化圖(高度 1.8m 處)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

表 4-32 模擬三之能見度變化圖(天花板高度)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫	

(資料來源：本研究整理)

模擬三_【集合住宅建案-無通風換氣設備】_【危害氣體結果】

由參考書目【107】得知，當 CO 濃度超過 200PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-53、圖 4-54 得知，模擬第 150 秒左右，CO 濃度將超過 200PPM。

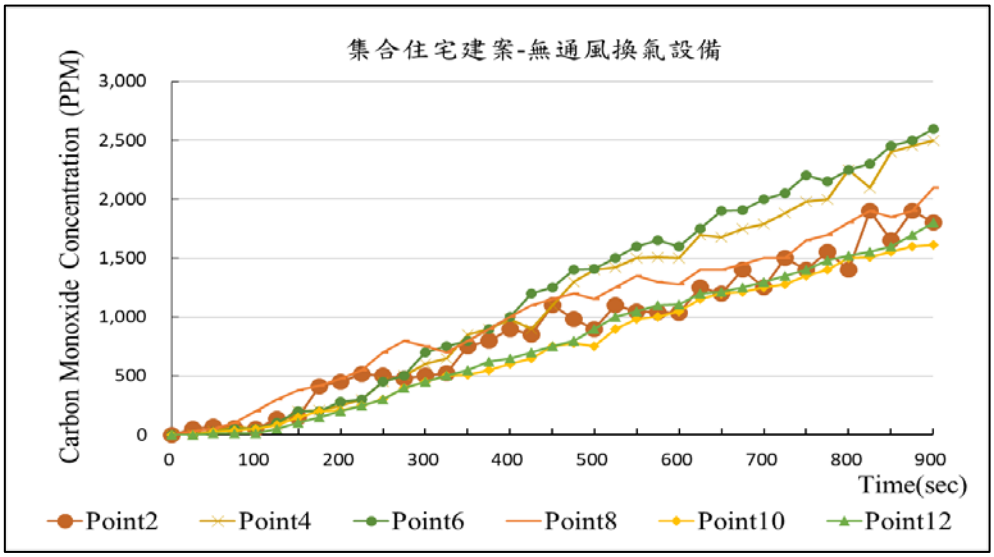


圖 4-53 模擬3(無通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

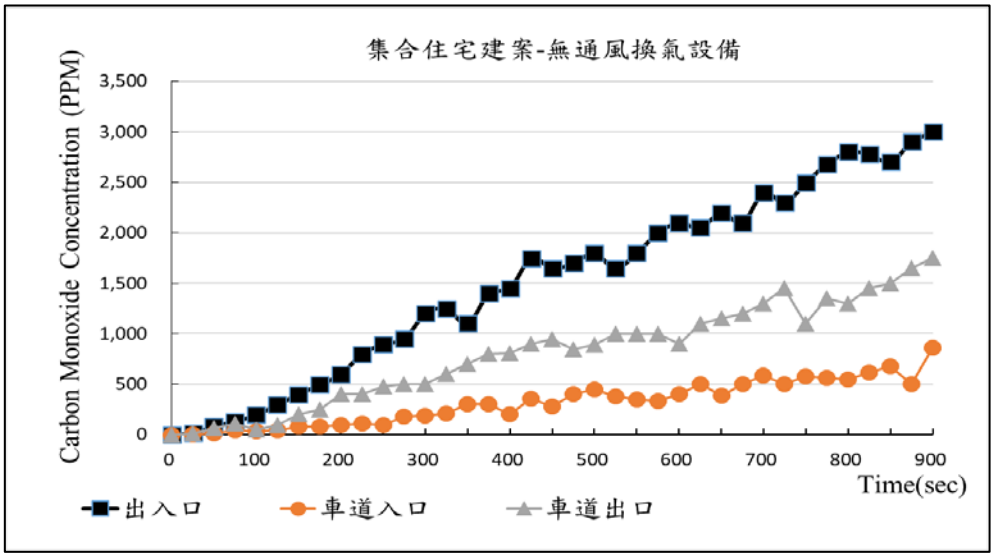


圖 4-54 模擬3(無通風換氣設備)_ 出入口一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

由參考書目【107】得知，當 CO_2 濃度超過 10,000PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-55、圖 4-56 得知，模擬第 550 秒左右，CO_2 濃度將超過 10,000PPM。

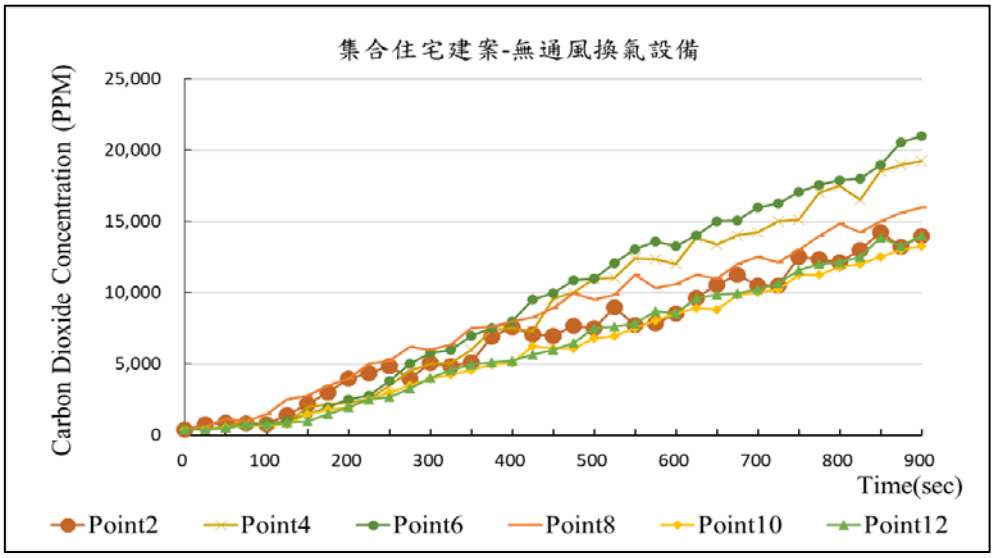


圖 4-55 模擬3(無通風換氣設備)_ 二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

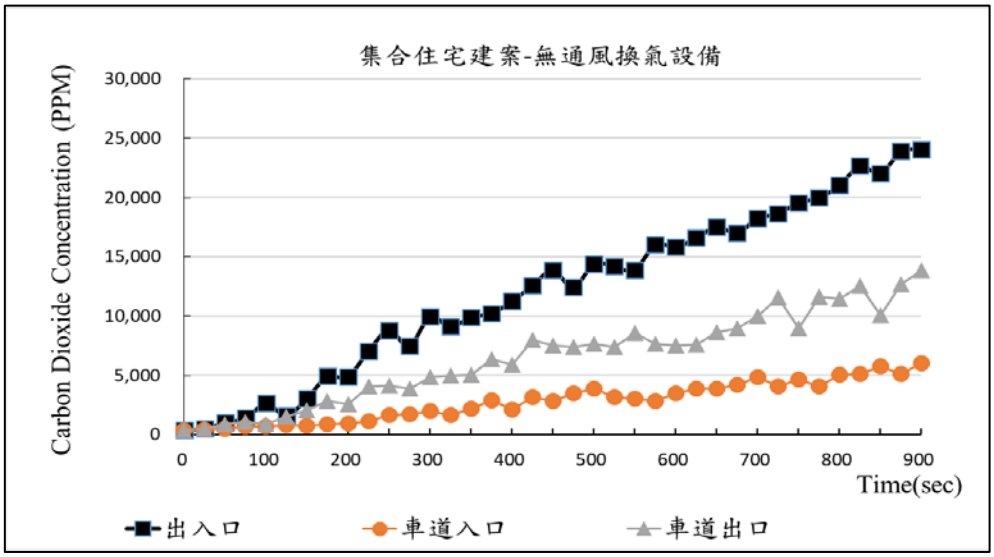
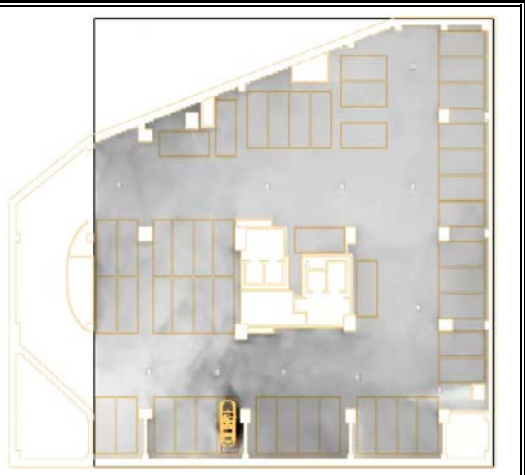
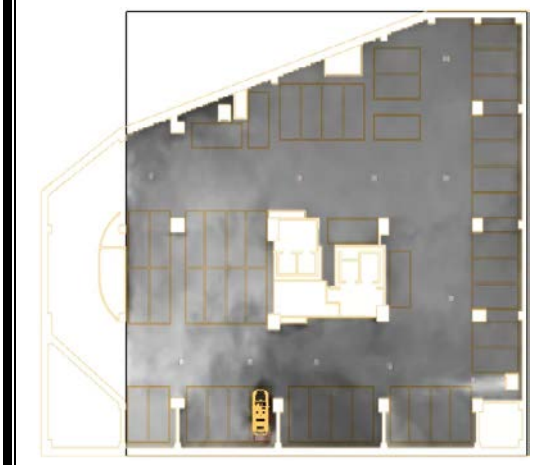
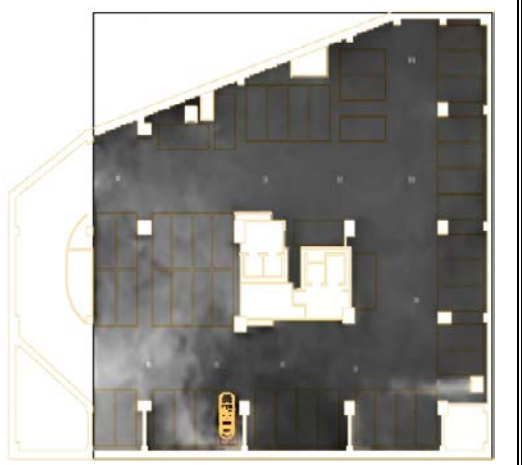
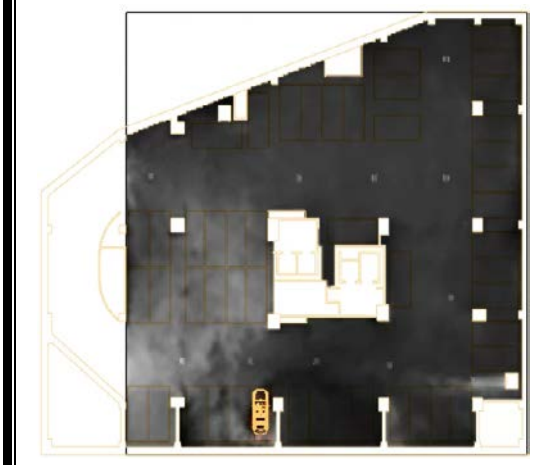
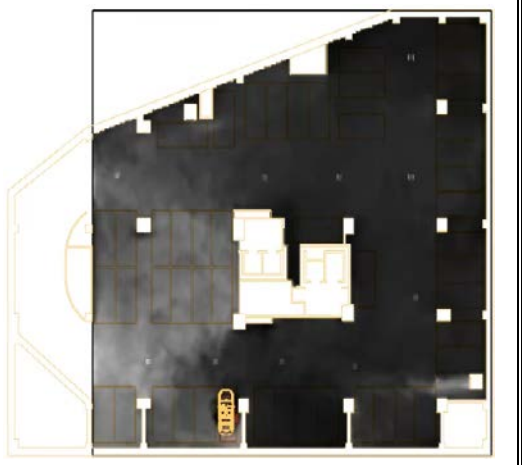


圖 4-56 模擬3(無通風換氣設備)_出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

模擬四_【集合住宅建案-有通風換氣設備】_【模擬動畫圖】

表 4-33 模擬 4(有通風換氣設備)之動畫表

	
模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
	
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
	
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬四_【集合住宅建案-有通風換氣設備】_【溫度結果】

人員生存極限溫度(Breathing level temperature)約為 131˚C，但當室內溫度高於 60˚C 時，人員便難以忍受且易造成逃生行為遲緩。

綜合本次模擬(四)結果由圖 4-57、圖 4-58 發現，模擬(四)車頂位置最高溫度達 853˚C；平均溫度為 718˚C，周圍車道間最高溫度達 117˚C；平均溫度為 69˚C。

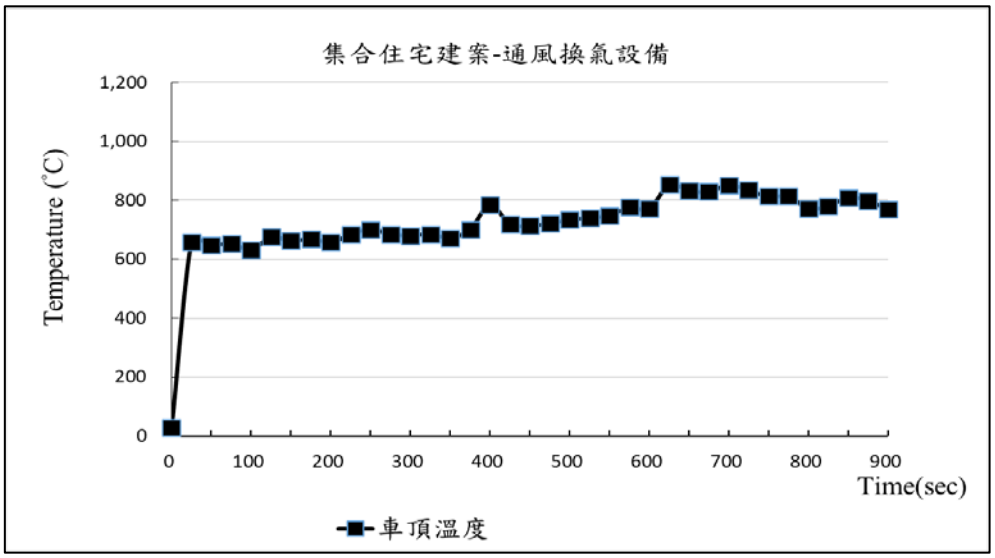


圖 4-57 模擬 4(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車頂溫度)
(資料來源：本研究整理)

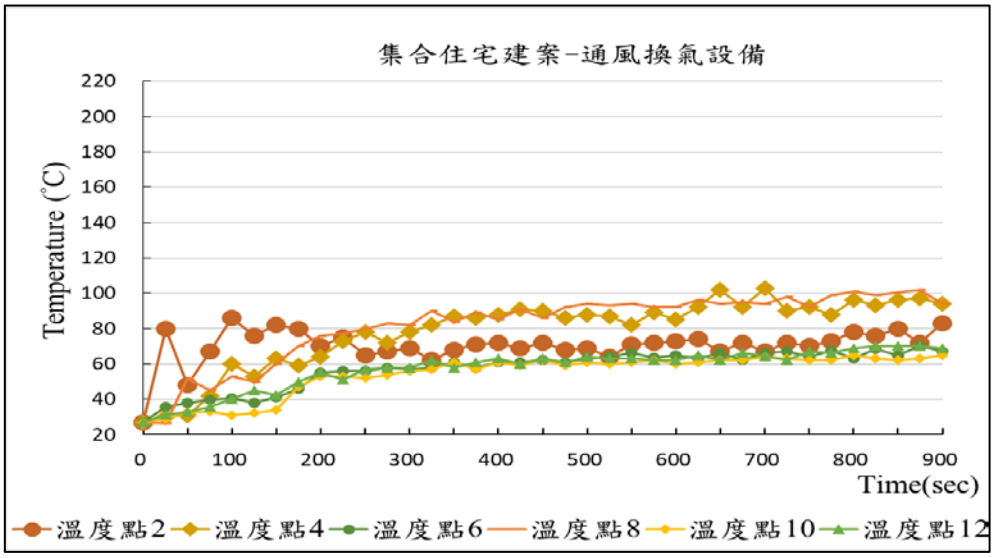
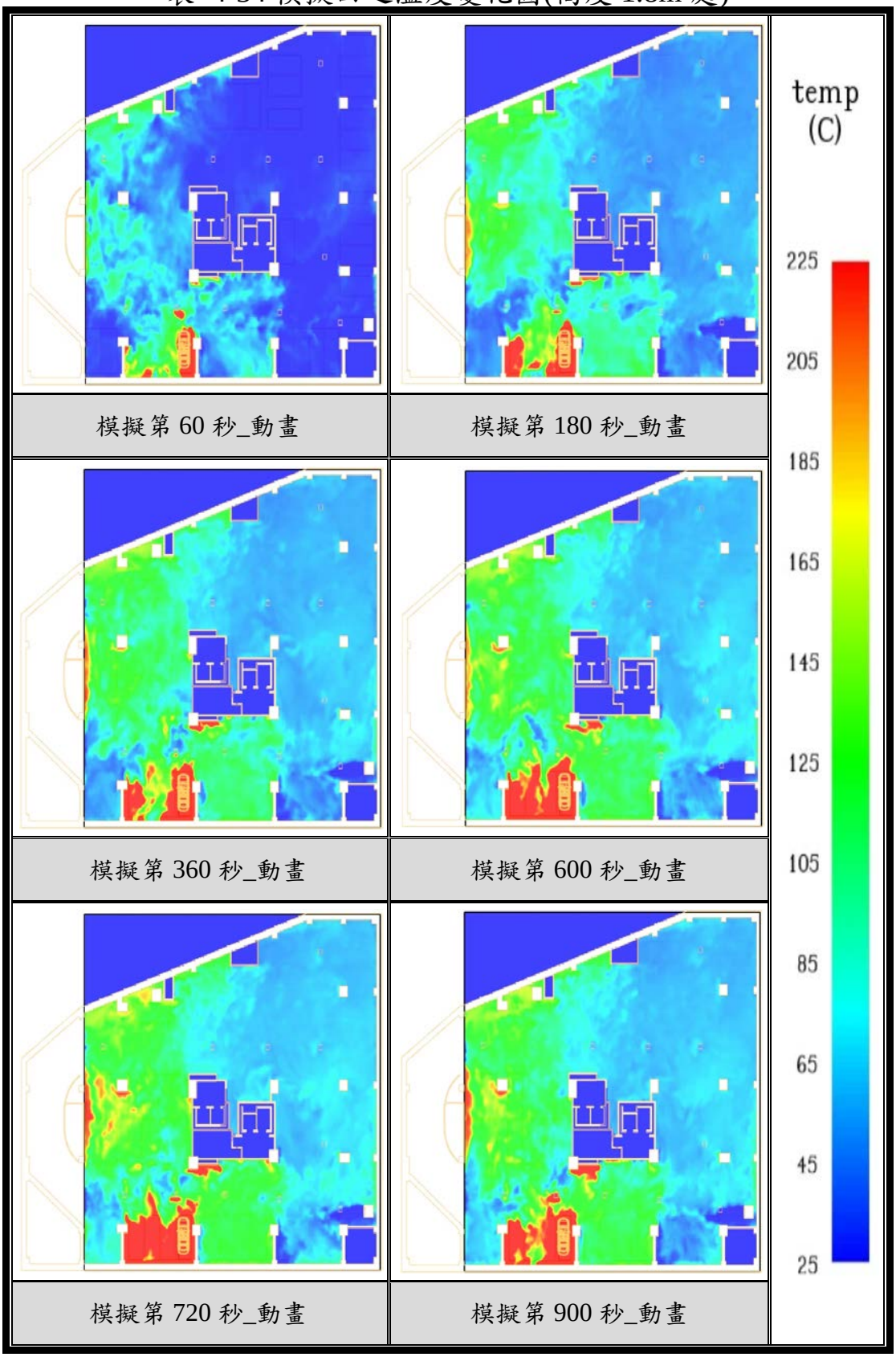


圖 4-58 模擬 4(有通風換氣設備)_溫度模擬曲線圖(車道位置溫度)
(資料來源：本研究整理)

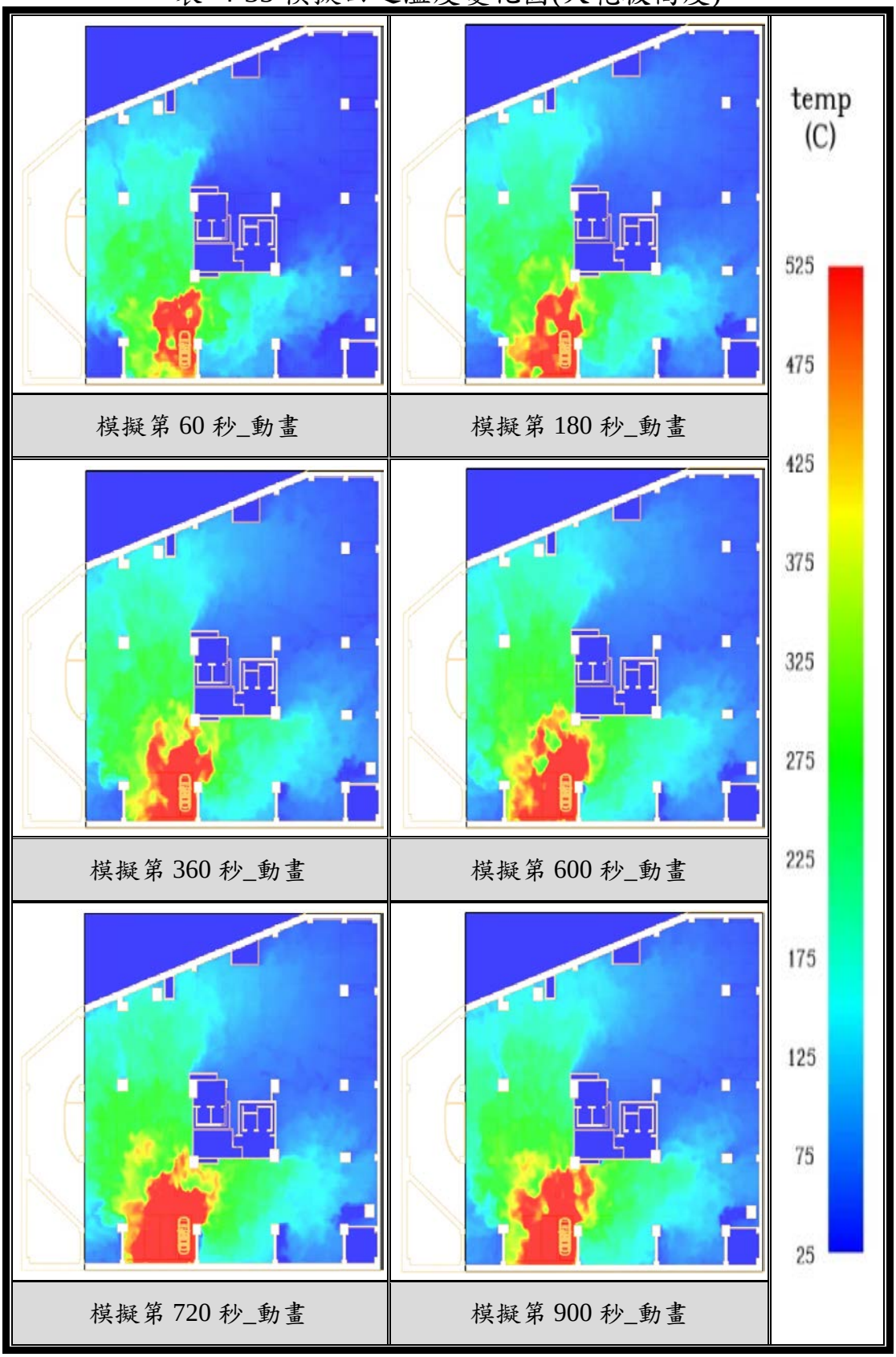
表 4-34 模擬四之溫度變化圖(高度 1.8m 處)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

表 4-35 模擬四之溫度變化圖(天花板高度)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬四_【集合住宅建案-有通風換氣設備】_【煙層高度及能見度】

基於滿足人員生命安全無虞的前提下，本研究團隊探討電動車燃燒煙流堆積至離地 1.8m 處之火場情形。

由圖 4-59 發現，煙層量測點最低點達 0.7m；圖 4-60 煙層量測點最低點達 1.3m。

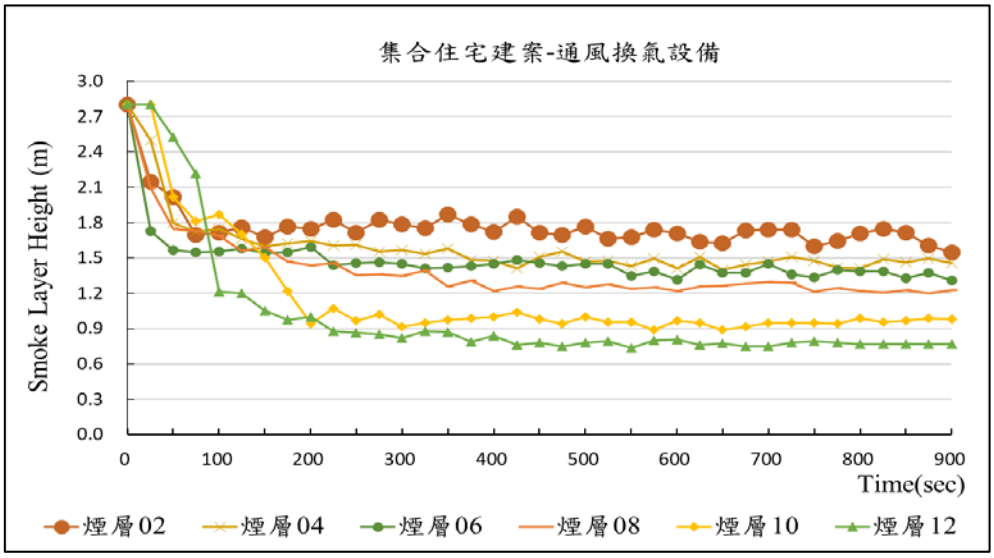


圖 4-59 模擬 4(有通風換氣設備)_煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

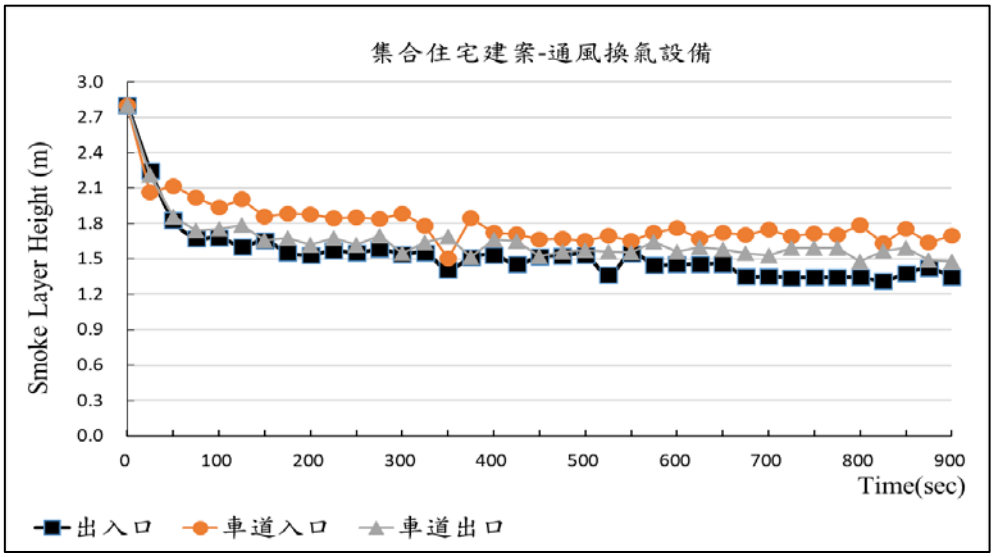


圖 4-60 模擬 4(有通風換氣設備)_出入口煙層高度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

若考量人員移動所需能見度距離，由圖 4-61 發現，能見度量測點最低點達 1.9m；圖 4-62 煙層量測點最低點達 2.2m。

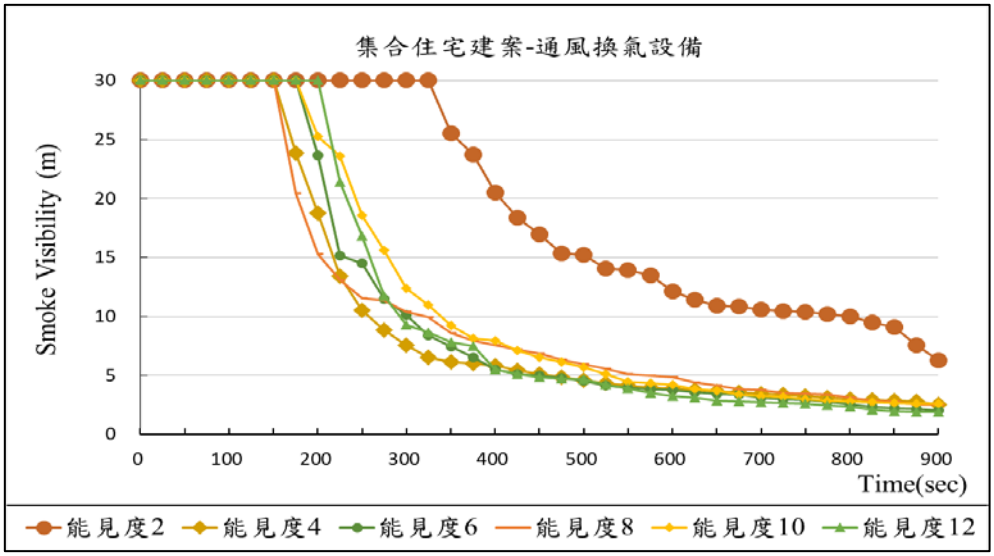


圖 4-61 模擬 4(有通風換氣設備)_能見度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

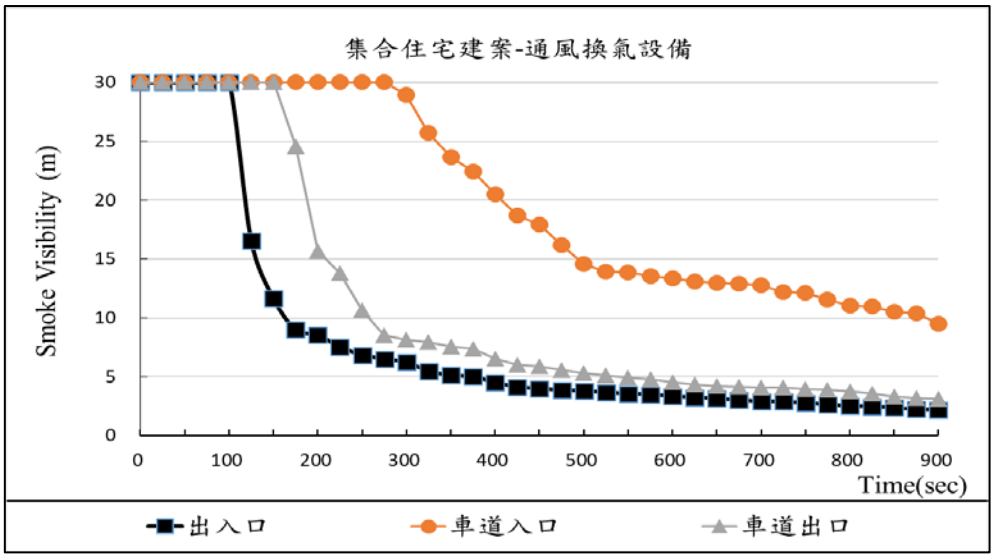
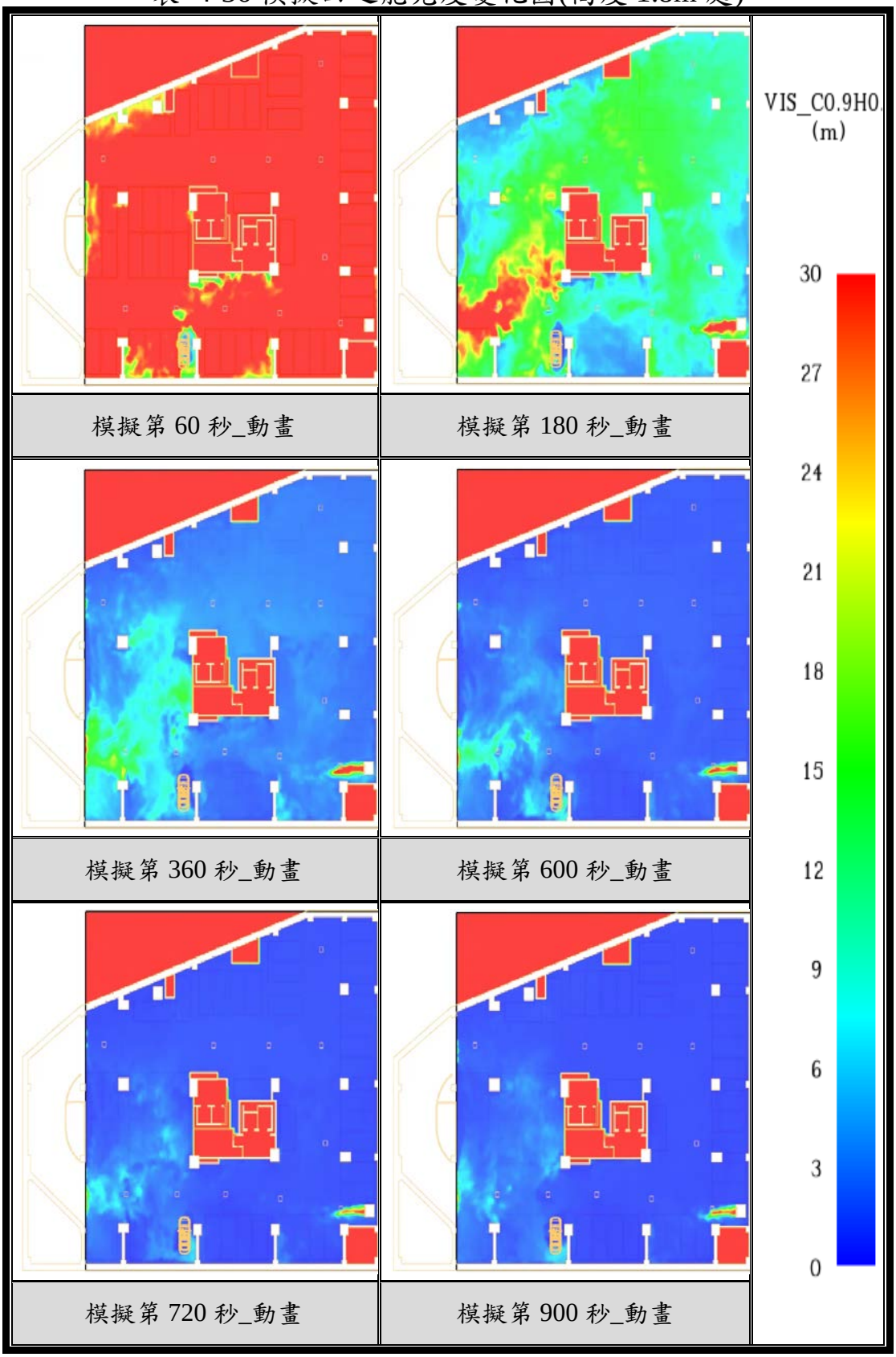


圖 4-62 模擬 4(有通風換氣設備)_ 出入口能見度曲線圖

(資料來源：本研究整理)

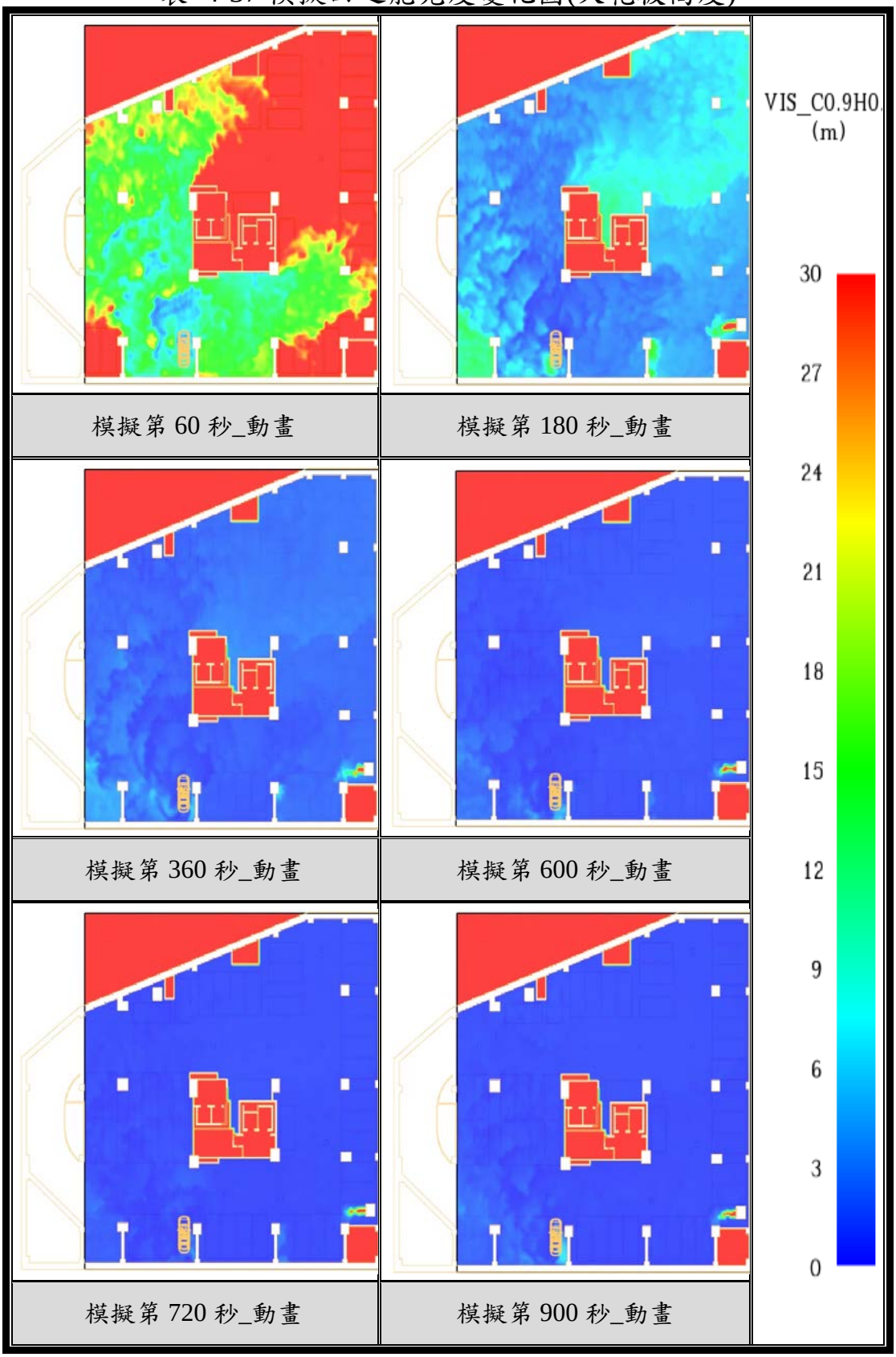
表 4-36 模擬四之能見度變化圖(高度 1.8m 處)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

表 4-37 模擬四之能見度變化圖(天花板高度)



模擬第 60 秒_動畫	模擬第 180 秒_動畫
模擬第 360 秒_動畫	模擬第 600 秒_動畫
模擬第 720 秒_動畫	模擬第 900 秒_動畫

(資料來源：本研究整理)

模擬四_【集合住宅建案-有通風換氣設備】_【危害氣體結果】

由參考書目【107】得知，當 CO 濃度超過 200PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-63、圖 4-64 得知，模擬第 225 秒左右，CO 濃度將超過 200PPM。

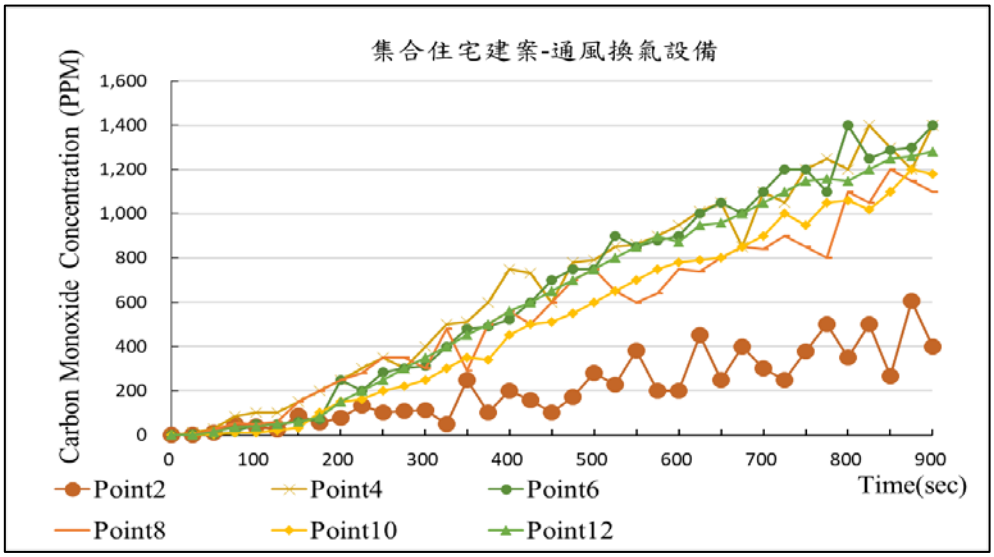


圖 4-63 模擬4(有通風換氣設備)_一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

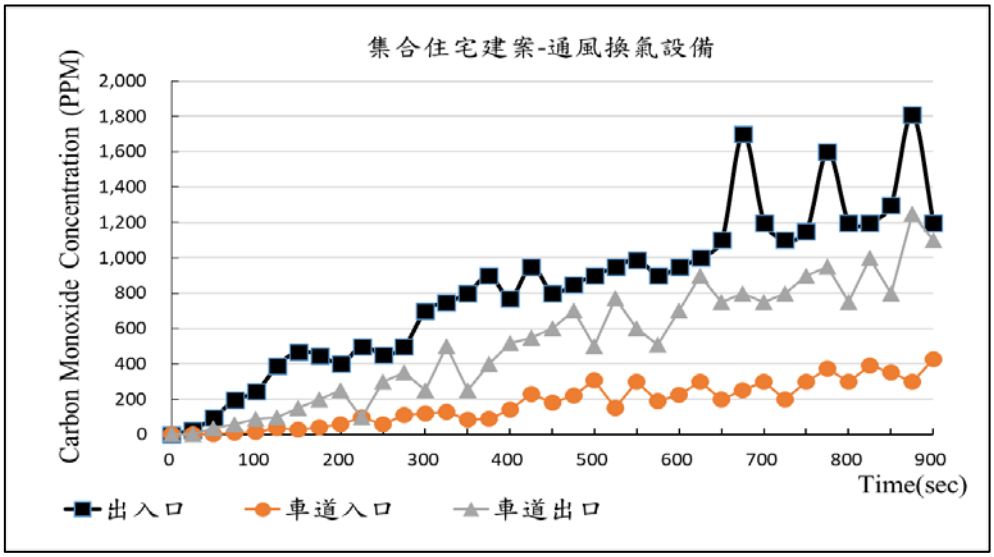


圖 4-64 模擬4(有通風換氣設備)_ 出入口一氧化碳(CO)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

由參考書目【107】得知，當 CO_2 濃度超過 10,000PPM 時，便會對人體產生危害。由圖 4-65、圖 4-66 得知，模擬第 850 秒左右，CO_2 濃度將超過 10,000PPM。

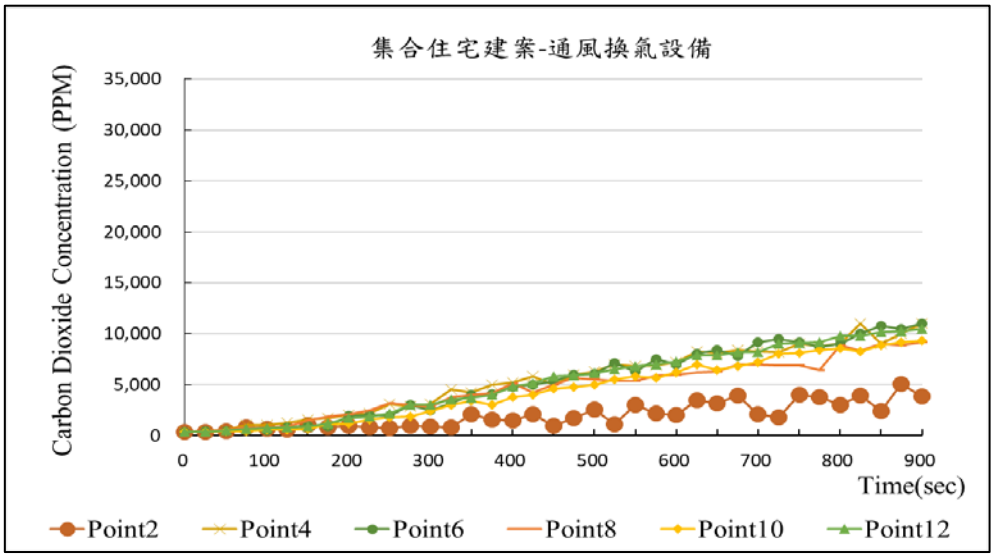


圖 4-65 模擬4(有通風換氣設備)_ 二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

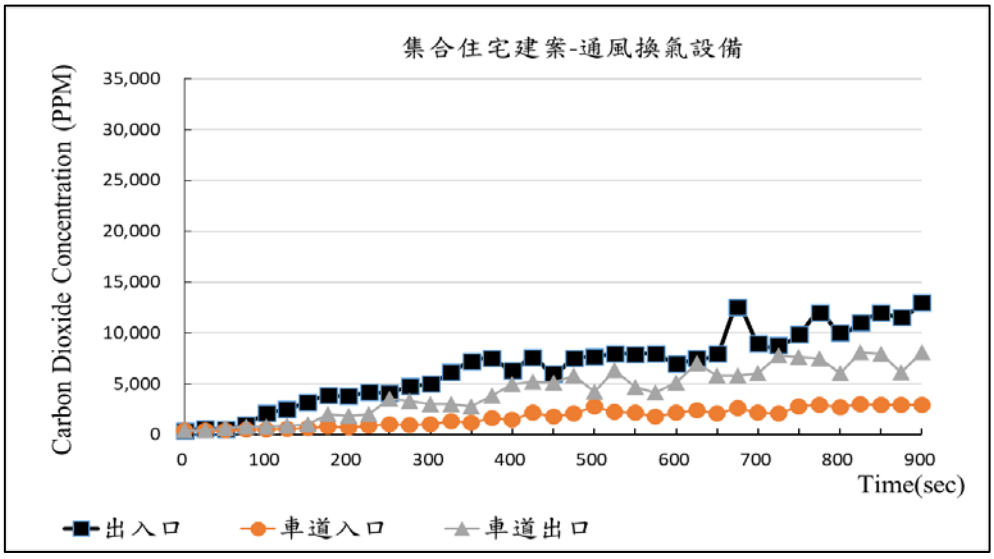


圖 4-66 模擬4(有通風換氣設備)_ 出入口二氧化碳(CO_2)濃度變化

(資料來源：本研究整理)

第五節 電腦模擬結果分析與小結

本研究案為瞭解現階段公共建築物與私有集合住宅建築物於地下停車空間設置電動車充電樁以及通風換氣設備的設置情況，探討當發生電池類火災時，通風換氣對於電池類火災所產生的高溫煙流的影響，以及提供未來加強電動車充電區域之消防安全參考。

一、 地下停車空間之誘導式風機對於火災煙流影響

傳統風管通風系統使用箱型離心式風機並由風管與風口組成。透過進氣風口將室外新鮮空氣送入內部區域；利用排氣風口將內部污染氣體排出，形成完整地下停車場通風換氣循環。誘導式通風系統又稱為無風管通風系統，一般採多台誘導式風機並按固定間距與方向設置，單台誘導式風機噴出少量但高速的氣體，帶動周圍空氣循環，達到高效通風換氣效果。目前新建建築物大多以誘導式風機作為通風系統設計，誘導式風機系統如圖 4-67 所示。

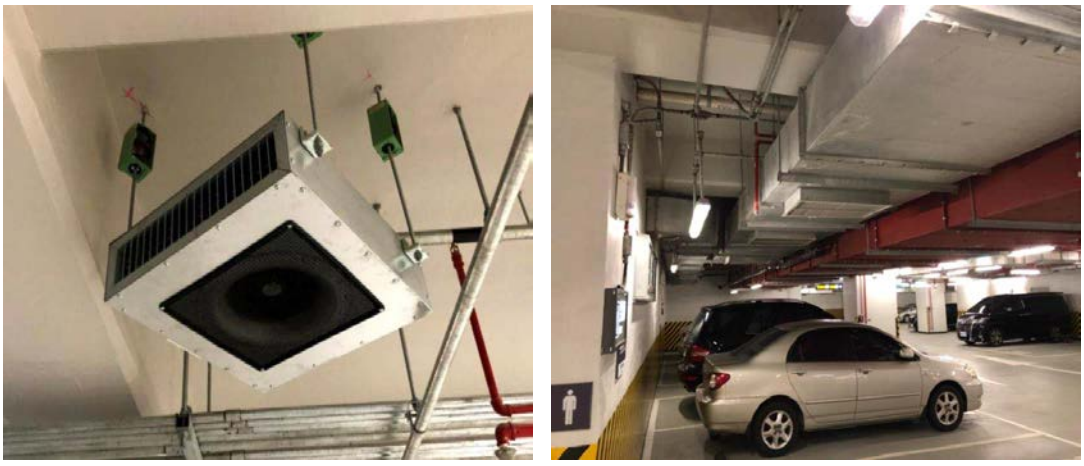


圖 4-67 誘導式風機系統(左圖)/傳統風管式通風系統(右圖)

(資料來源：李俊幟，2022，「地下停車場通風系統探討與模擬分析」，國立勤益科技大學冷凍空調與能源系碩士在職專班碩士論文)

二、 彙整模擬一至模擬四之模擬結果，地下停車空間之通風換氣設備設置對於火災影響分析如下：

1. 溫度方面：

從溫度方面來說，在台南美術館二館的案例裡，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場環境最高溫度降低約6.79～22.53%，平均降低14.43%；而在集合住宅建案案例中，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場環境最高溫度降低約3.5～54.74%，平均降低22.25%。

2. 煙層高度與能見度方面：

在台南美術館二館的案例裡，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其地下停車空間6個出入口附近的煙層距離地面的高度提高約6.3～56.52%，平均提升20.06%；能見度距離增加約23.07～51.16%，平均增加38.88%。

而在集合住宅建案案例中，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其地下停車空間出入口附近的煙層距離地面的高度提高約30.97%；能見度距離增加約60.8%。

3. 有害氣體方面(以CO與CO_2判定)：

在台南美術館二館的案例裡，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場中的最高CO濃度降低約7.18～54.42%，平均降低38.42%；最高CO_2濃度降低約6.25～54.04%，平均降低36.49%。

而在集合住宅建案案例中，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場中的最高CO濃度降低約22.22～68.08%，平均降低41.64%；最高CO_2濃度降低約25.31～64.5%，平均降低42.62%。

三、 地下停車空間為半封閉狀態，高溫對建築結構之影響：

電動汽機車於地下停車空間發生火災時，由於電動車鋰離子電池模組放置於車輛底部，使得傳統滅火系統無法直接對車輛底部的起火電池模組滅火，同時電池類火災在撲滅明火後，電池表面溫度仍相當高溫，需不斷撒水降溫以避免引燃周遭可燃物。

回顧本研究第二章第二節所述，

1. 當鋼材溫度為 550℃時，其強度僅為常溫一半；溫度上升至 600℃時，其強度僅為常溫時的 1/3。然而一般地下停車空間發生火災，其內部溫度遠高於 600℃，對建築物結構強度將受到嚴重影響，當災情時間拉長時，恐有坍塌風險。
2. 混凝土溫度達 900℃時，內部結構多孔疏鬆，缺陷、裂紋增多，強度下降。【43】

經本研究電腦模擬結果發現，起火電動車的車頂溫度約為 750~950°C 左右；鄰近車道溫度 110~190°C 左右，因此當地下停車空間發生火災時，若無法在初期階段控制火害範圍及排除燃燒產生的高溫煙流，此時高溫長時間侵襲建築物結構將使建築物產生不可逆的損毀，災後受損建築物是否存有安全疑慮等問題，需要請專業技師針對災後建築物結構進行慎重評估。

四、 地下停車空間電動車起火時，有無撒水之影響：

經本研究電腦模擬結果發現，在無撒水的情況下，起火電動車的車頂溫度約為 750~950°C 左右，有撒水(或泡沫)時的車頂溫度約為 110°C 左右，顯見電動車發生火災時，因為電池模組在車體下方，在車頂上方撒水(或泡沫)雖然可能無法直接滅火，但為了防止延燒降低

災害擴大，仍是必要的救災策略之一。

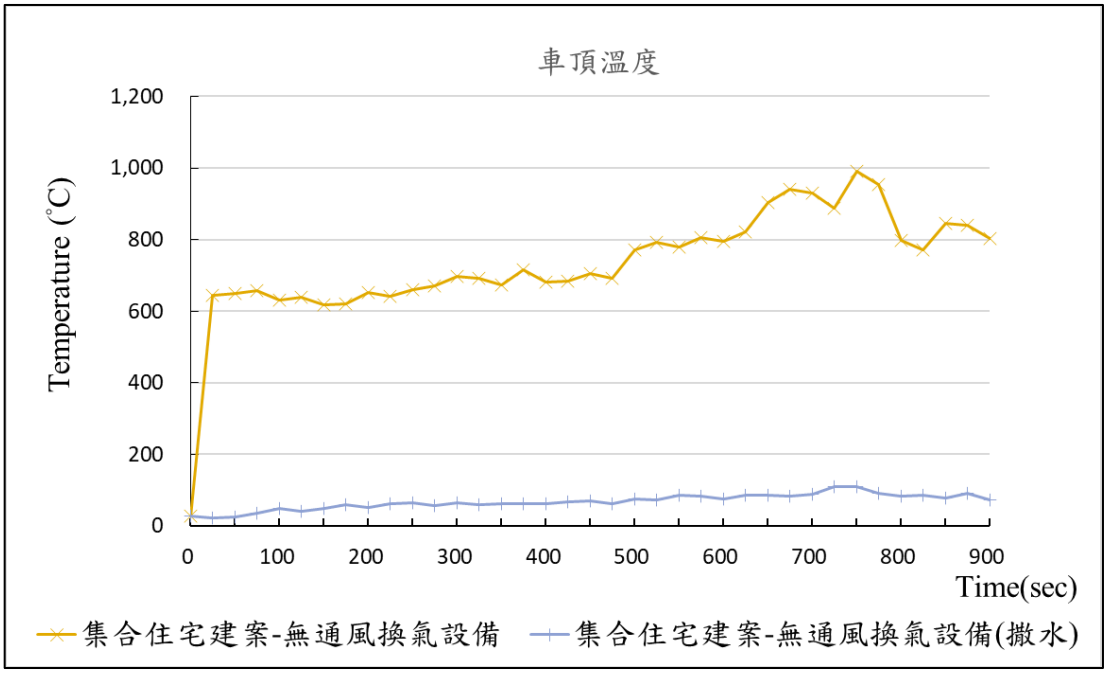


圖 4-68 電動車起火有無撒水車頂溫度之變化-以集合住宅為例

(資料來源：本研究整理)

第五章 鋰離子電池滅火實測實驗

第一節 實驗規劃

本研究團隊將於雲林科技大學防火中心實驗場的實驗空間進行『撒火設備』與『泡沫設備』應用於鋰離子電池滅火之實測實驗。本研究團隊以磷酸鋰鐵(LFP)電池作為實測實驗的燃燒對象，從實驗結果分析撒水系統對於抑制電池類火災的效果，作為後續電動車推廣或電動車相關電池類產品之滅火設備設置參考。本研究案實驗項目規劃如表 5-1 所示。

表 5-1 鋰離子電池滅火實驗規劃總表

項目	鋰電池種類	滅火系統
實驗一	鋰鐵電池(LFP) (8 顆)	無
實驗二		撒水系統
實驗三		泡沫系統

(資料來源：本研究整理)

第二節 實驗設備及耗材說明

實驗防護平台

因鋰離子電池熱失控相較於固體燃燒具有較大的危險性，因此本研究團隊在執行本階段實驗時，將於一實驗防護平台進行。

實驗防護平台由厚度 1mm 的金屬板所製成，空間尺寸為長 1.8m；寬 1.8m；高 2.0m，該防護平台三側封閉，其中一面開放用於觀測實驗結果，同時平台下方設置洞洞孔板用以排水，實驗防護平台如圖 5-1 所示。

圖 5-1 實驗防護平台示意圖

(資料來源：本研究整理)

撒水頭及泡沫頭設置規劃

本研究實驗將採用鋰離子電芯作為燃燒實驗對象，其外部沒有額外的塑料或鐵件外殼進行包覆。撒水頭及泡沫頭將設置於電池上方 80cm 處且水平間隔 50cm，如圖 5-2 所示。撒水頭單顆放水量為 9LPM；泡沫頭單顆放水量為 11.5 LPM。

圖 5-2 撒水及泡沫滅火設備示意圖

圖 5-3 撒水頭及泡沫頭示意圖

(圖 5-2、圖 5-3 資料來源：本研究整理)

鋰離子電池

本研究將使用鋰鐵電池(LFP)進行實驗，電池型號為 40138(直徑為 40mm；長度為 138mm；電容量為 50Ah。一般而言，鋰離子電池危險性隨 SOC 值上升而增加，因此本研究將全數使用 100% SOC 值的鋰離子電池進行實驗規劃，鋰離子電池規格如表 5-2 所示。

表 5-2 本研究實驗之鋰離子電池規格

電池規格		電池圖示	
電池種類	鋰鐵電池(LFP)		
電池規格	40138		
電池直徑/長度	40 mm / 138 mm		
電池 SOC 值	100 %		
單顆電池電壓/容量	3.3 V / 15Ah		

溫度量測設備

熱電偶具有價格便宜、結構簡單、量測溫度範圍廣泛及準確度高的特性，因而經常被作為實驗過程的溫度量測設備使用。本研究案將採用熱電偶規格為 K-Type；直徑為 0.8mm。詳細熱電偶規格如表 5-3 所示。本研究團隊將在鋰離子電池表面及正負極處貼附熱電偶，量測鋰離子電池熱失控實驗的溫度變化。

表 5-3 熱電偶規格

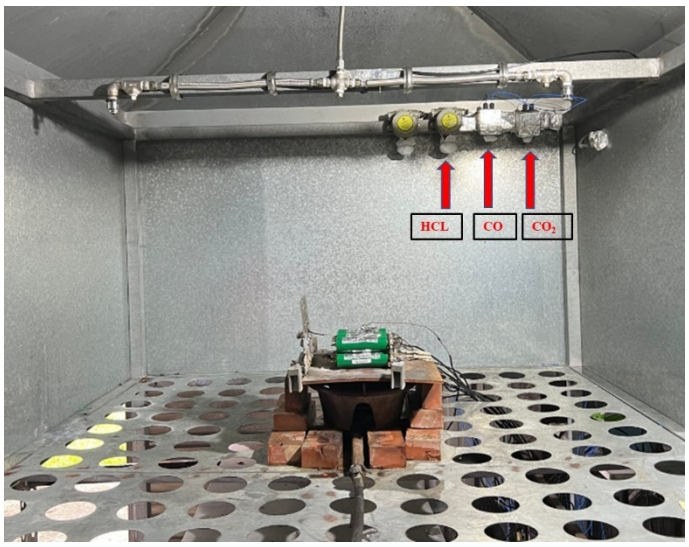
規格	圖示
◎ 規格：0.8mm × 2C ◎ 材質：(內層)玻璃纖維、(外層) SUS 304 不鏽鋼網線 ◎ 類型：K Type	

(表 5-2、表 5-3 資料來源：本研究整理)

氣體量測設備

為瞭解電池類火災燃燒過程中所產生的有害氣體濃度。本研究團隊將在實驗防護平台右上方設置一氧化碳及二氧化碳的量測設備，氣體量測設備規格及設置情況如表 5-4 所示。

表 5-4 氣體量測設備規格

量測類型	量測範圍 (PPM)	圖 示
氯化氫 (HCL)	0~17	
一氧化碳 (CO)	0 ~ 1,000	
二氧化碳 (CO_2)	0 ~ 10,000	

(資料來源：本研究整理)

加熱設備(快速爐)

本研究加熱方式為利用快速爐火加熱金屬鐵板作為引起鋰離子電池熱失控的方式。鐵板尺寸為 40cm×40cm；厚度為 0.8mm。加熱設備如圖 5-4 所示。

圖 5-4 快速爐及鐵板示意圖

(資料來源：本研究整理)

數據收集系統

數據擷取裝置主要作用是將測試過程中的熱電偶所量測的數據傳輸並記錄，為能準確反應實驗結果，本研究團隊將選用高頻率的數據採集及多點數據收集，數據收集系統如圖 5-5 所示。

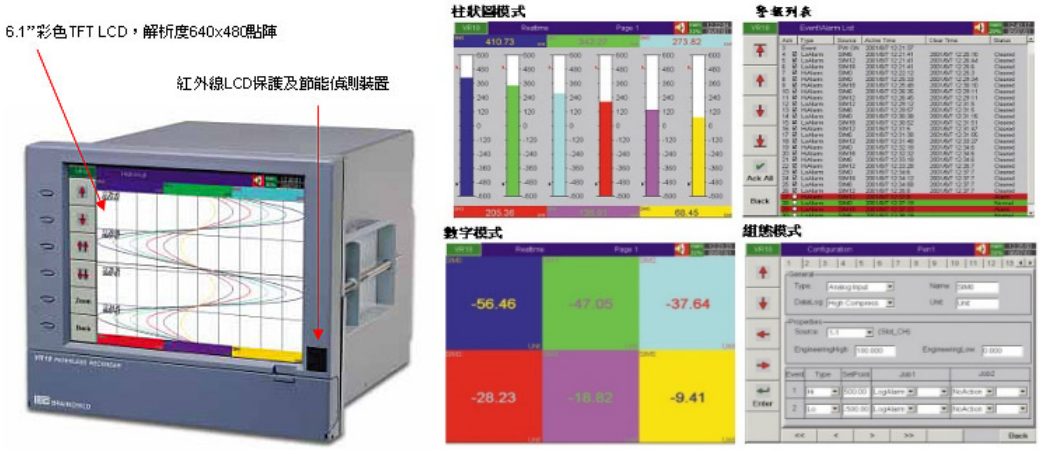


圖 5-5 數據收集系統(外觀圖(左)；軟體介面(右))

(資料來源：本研究整理)

攝影設備及其他

為記錄實驗過程以利後續研究分析及確認試驗環境及設置架設是否有需變動或增設的問題。本研究團隊將在防護空間角落放置攝影設備並全程錄製實驗過程。除上述提及的內容外，現場周遭仍需準備其他雜項設備(例如：瓦斯桶、防火棉、碼表、滅火器等設備)及五金材料(水管、鐵件、墊片、螺絲螺帽等等)。

第三節 實驗過程與結果

本研究團隊以鋰鐵電池(LFP)作為實測實驗的燃燒對象，從實驗結果分析撒水及泡沫滅火系統對於電池類火災的抑制效果。經蒐集大量相關文獻發現溫度為造成鋰離子電池熱失控的關鍵原因。本研究團隊預計利用『鐵板傳導加熱』的引燃方式，觀察鋰離子電池熱失控表現及後續滅火設備對於電池類火災的抑制效用。

為確保進行鋰離子電池熱失控實驗過程並不會因電池破裂噴飛而造成實驗人員受傷的風險可能，本研究團隊將在實驗防護平台內部進行實驗。

鐵板傳導加熱是利用快速爐加熱上方鐵板，鐵板再將熱能傳導至鋰離子電池，從而觀察底層熱失控電池產生的熱量擴散至第二層電池的熱失控現象。

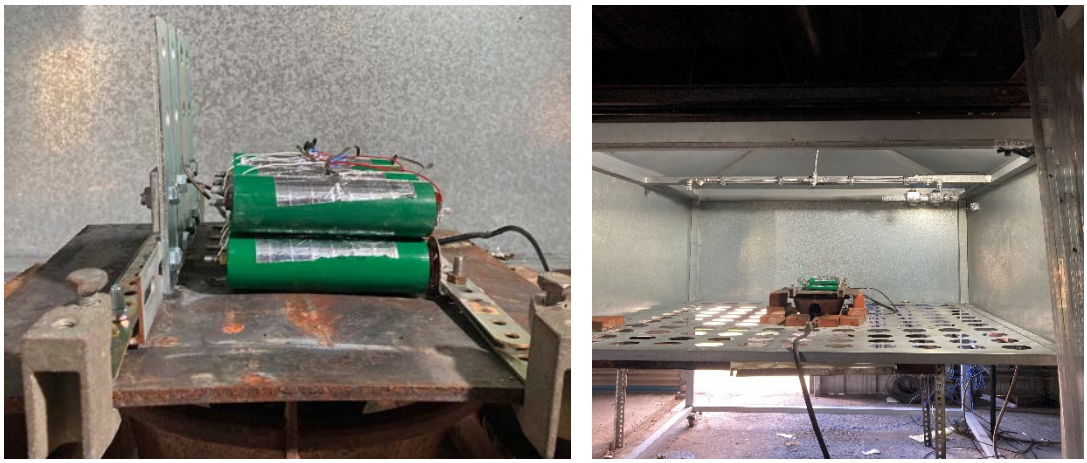


圖 5-6 本研究案實驗示意圖

(資料來源：本研究整理)

實驗(一)步驟：

(一)於鋰離子電池表面貼附熱電偶線、依情境需求調整滅火設備、架設數據收集系統及量測設備並確認功能使用正常、確認攝影設備正常運作。

(二)確認實驗所使用的鋰離子電池 SOC 值是否保持 100%。本研究將利用電源供應器採 3.7V 固定電壓對鋰離子電池進行充電。

(三)實驗開始：啟動快速爐並調整為大火模式即實驗開始。

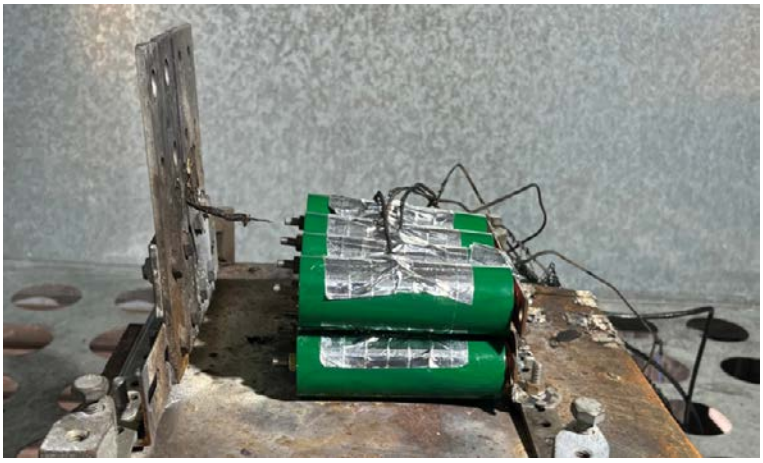
(四)實驗結束條件：實驗進行 30 分鐘為實驗結束條件。

(五)數據收集系統應紀錄從實驗全程的溫度、氣體濃度、電壓變化。並採人工方式紀錄快速爐啟動時間/關閉時間、滅火設備啟動時間、鋰離子電池冒煙/起火/爆炸等現象發生時間。

(六)實驗結束後將各項數據儲存，當所有量測數值回歸初始條件即可進行後續實驗。

表 5-5 實驗設置表_實驗一

電池規格		電池圖示	
電池種類	鋰鐵電池(LFP)		
電池數量	8 顆(4 顆×2 排)		
電池 SOC 值	100%		
單顆電池電壓	3.3V		
單顆電池容量	15Ah		
引燃方式			
引燃方式	利用快速爐火加熱鐵盤；鐵板將熱能傳導至上方電池。		
加熱時間	30 分鐘		
滅火方式			
滅火系統	無		
量測點位示意圖			



(資料來源:本研究整理)

由圖 5-7、表 5-6 發現，第一顆鋰離子電池約在實驗第 8 分 12 秒起火燃燒，此時電池最高溫度為 130°C，後續分別在 10:18、13:46 發生電池氣閥洩漏起火。從這 4 次的氣閥洩漏起火觀察發現，氣閥洩漏瞬間會伴隨明顯地洩氣聲且洩漏氣體接觸明火會瞬間引燃並產生大面積火光，其燃燒現象類似於油氣引燃的情況。

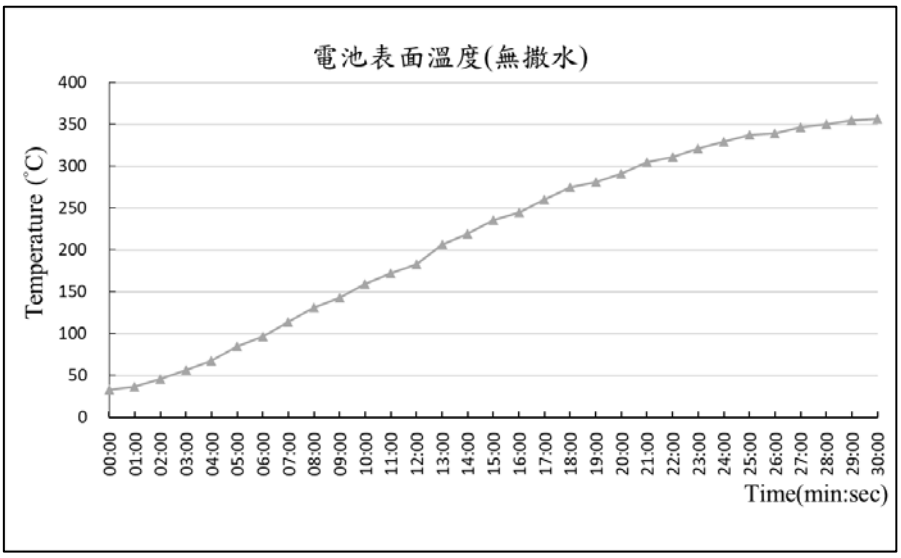


圖 5-7 電池表面溫度曲線圖(無撒水)_實驗一

(資料來源:本研究整理)

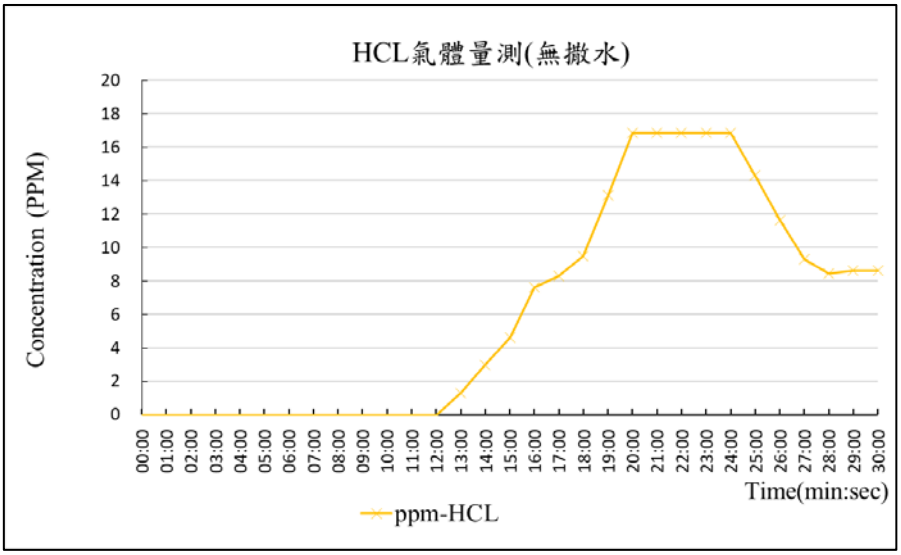


圖 5-8 HCL 氣體濃度量測曲線圖(無撒水)_實驗一

(資料來源:本研究整理)

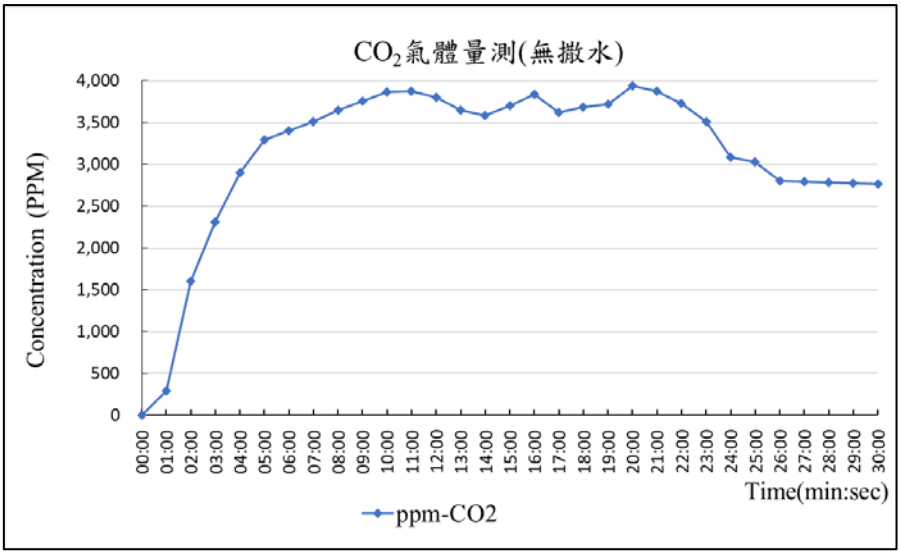


圖 5-9 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(無撒水)_實驗一

(資料來源:本研究整理)

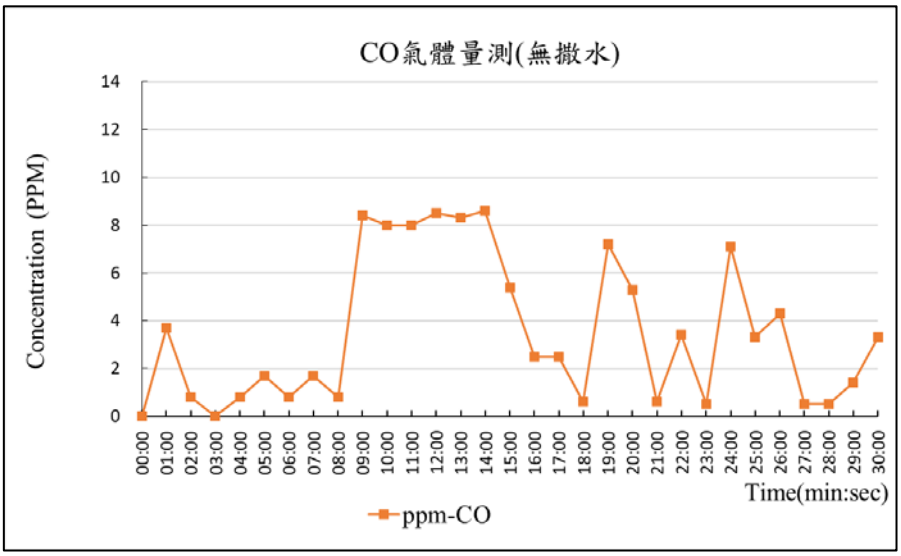
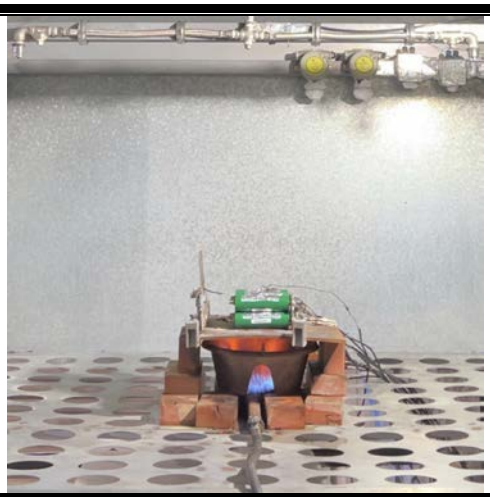
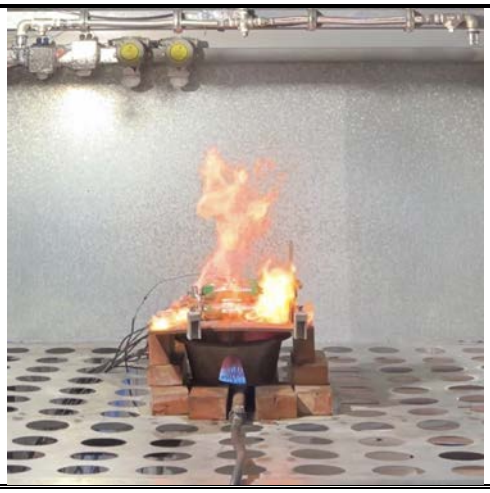
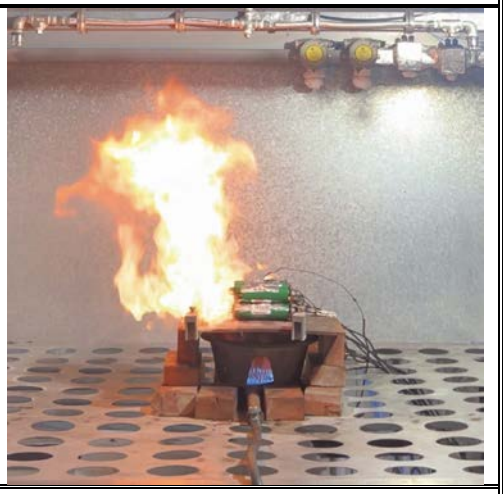
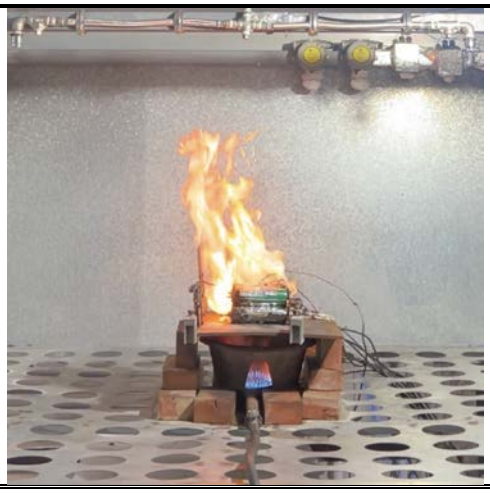
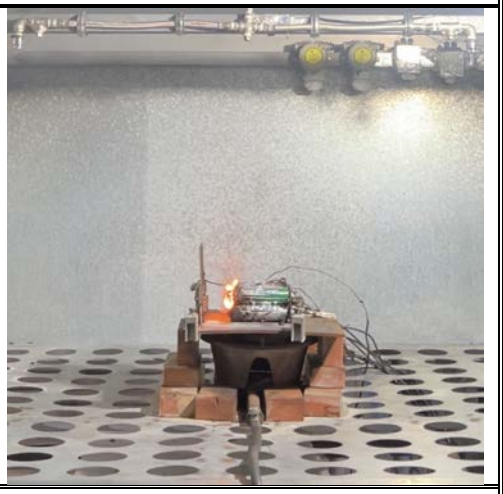


圖 5-10 CO 氣體濃度量測曲線圖(無撒水)_實驗一

(資料來源:本研究整理)

表 5-6 實驗過程紀錄表_實驗一

實驗過程		
說明	【00：00】點火開始	【05：05】電池氣體洩漏
實驗過程		
說明	【08：12】第一次電池起火	【10：18】電池爆炸瞬間
實驗過程		
說明	【13：46】電池爆炸瞬間	【30：00】實驗結束

(資料來源:本研究整理)

實驗(二)(撒水)步驟：

(一)於鋰離子電池表面貼附熱電偶線、依情境需求調整滅火設備、架設數據收集系統及量測設備並確認功能使用正常、確認攝影設備正常運作。

(二)確認實驗所使用的鋰離子電池 SOC 值是否保持 100%。本研究將利用電源供應器採 3.7V 固定電壓對鋰離子電池進行充電。

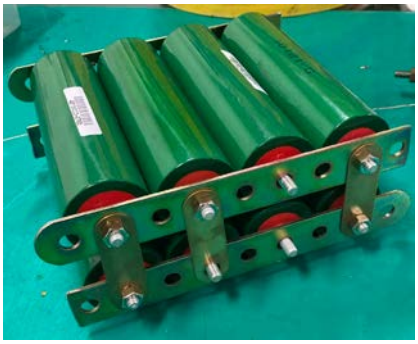
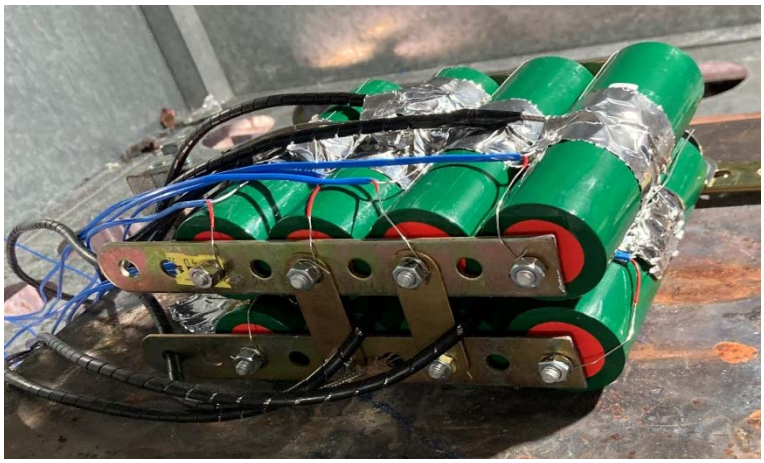
(三)實驗開始：啟動快速爐(調整為大火模式)即為實驗開始；當電池出現明火時，立即啟動撒水設備並於五分鐘後關閉，當實驗過程中再次出現明火，則重複上述操作至實驗結束。

(四)實驗結束條件：實驗進行 30 分鐘為實驗結束條件。

(五)數據收集系統應紀錄從實驗全程的溫度、氣體濃度、電壓變化。並採人工方式紀錄快速爐啟動時間/關閉時間、滅火設備啟動時間、鋰離子電池冒煙/起火/爆炸等現象發生時間。

(六)實驗結束後將各項數據儲存，當所有量測數值回歸初始條件即可進行後續實驗。

表 5-7 實驗設置表_實驗二(撒水)

<table>
<tr><td colspan="2">電池規格</td><td rowspan="6">電池圖示</td><td rowspan="6">  </td></tr>
<tr><td>電池種類</td><td>鋰鐵電池(LFP)</td></tr>
<tr><td>電池數量</td><td>8 顆(4 顆×2 排)</td></tr>
<tr><td>電池 SOC 值</td><td>100%</td></tr>
<tr><td>單顆電池電壓</td><td>3.3V</td></tr>
<tr><td>單顆電池容量</td><td>15Ah</td></tr>
<tr><td colspan="4">引燃方式</td></tr>
<tr><td>引燃方式</td><td colspan="3">利用快速爐火加熱鐵盤；鐵板將熱能傳導至上方電池。</td></tr>
<tr><td>加熱時間</td><td colspan="3">30 分鐘</td></tr>
<tr><td colspan="4">滅火方式</td></tr>
<tr><td>滅火系統</td><td colspan="3">撒水系統</td></tr>
<tr><td>撒水量</td><td colspan="3">9 LPM(單顆)</td></tr>
<tr><td colspan="4">量測點位示意圖</td></tr>
<tr><td colspan="4">
  </td></tr>
</table>

(資料來源:本研究整理)

由圖 5-11、圖 5-13 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二表 5-8 發現，第一顆鋰離子電池約在實驗第 07 分 13 秒起火燃燒，電池最高溫度為 113°C，立即啟動撒水設備，並於撒水五分鐘後關閉撒水。持續加熱鐵盤溫度至 18 分 40 秒時，第二顆電池起火燃燒，電池最高溫度為 139°C，再次撒水五分鐘後關閉撒水。

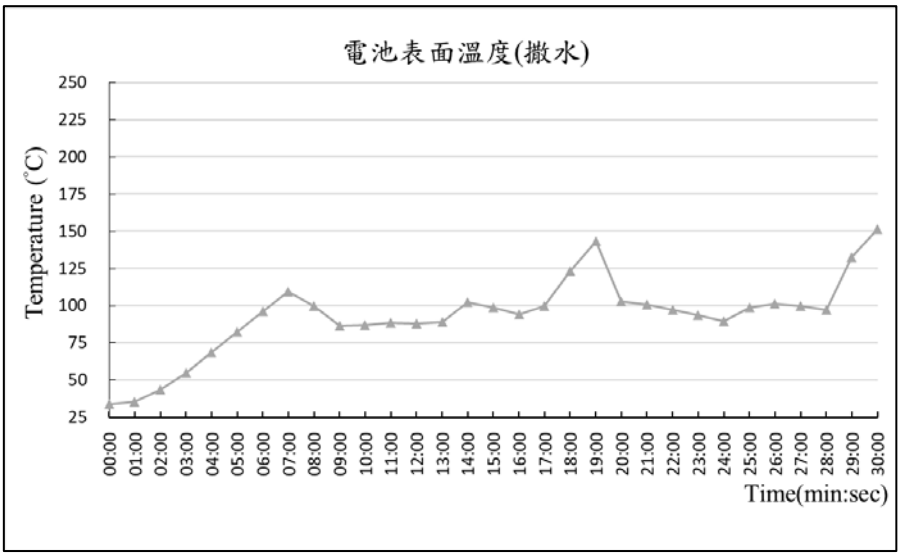


圖 5-11 電池表面溫度曲線圖(撒水)_實驗二

(資料來源:本研究整理)

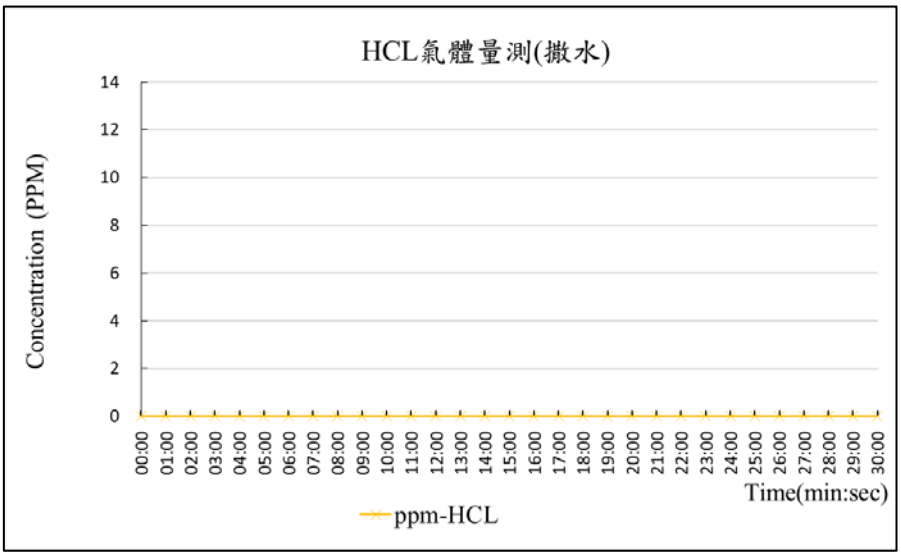


圖 5-12 HCL 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二

(資料來源:本研究整理)

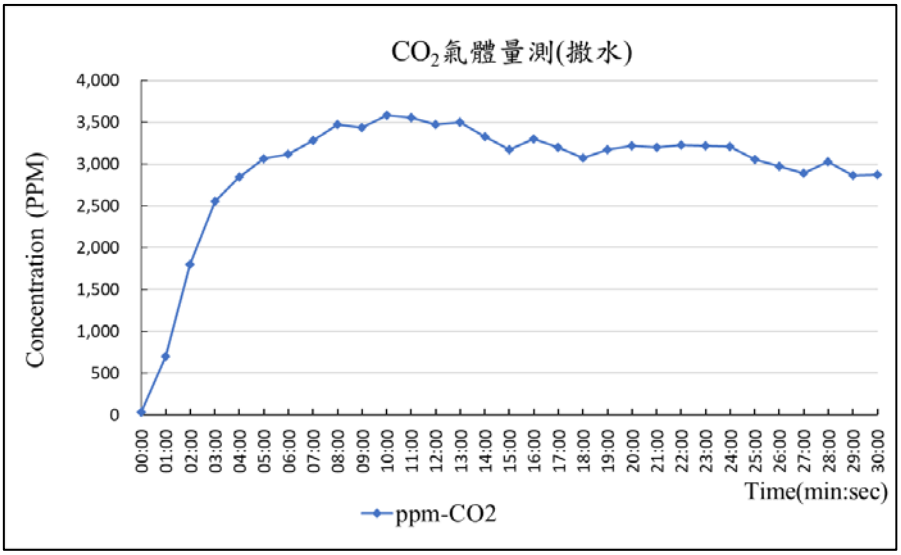


圖 5-13 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二

(資料來源:本研究整理)

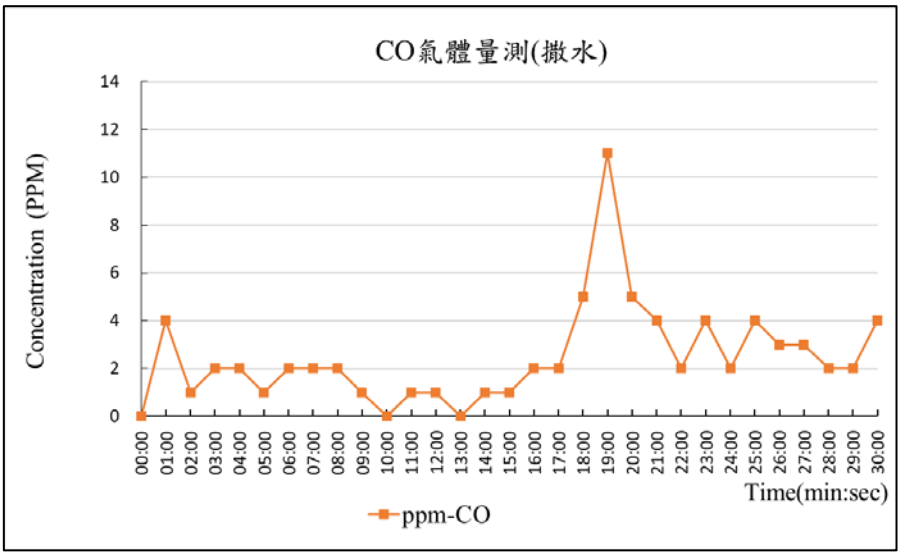
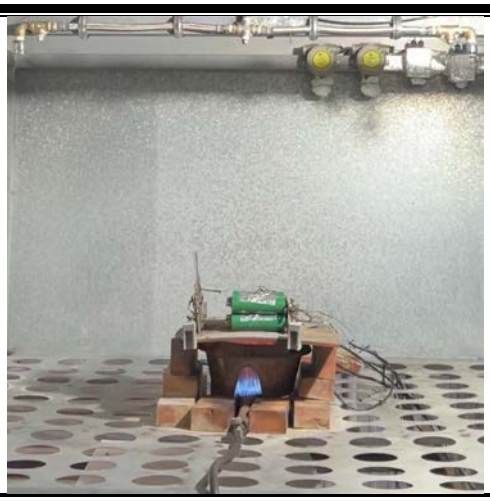
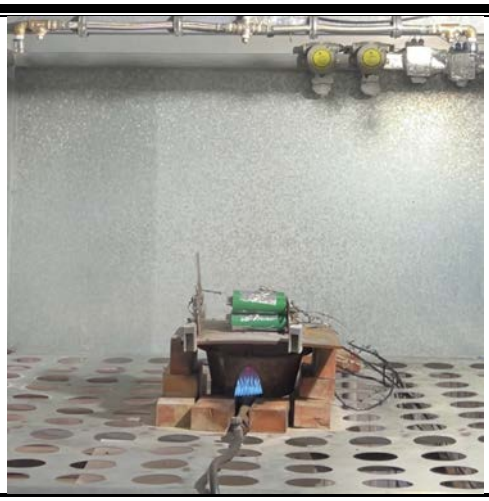
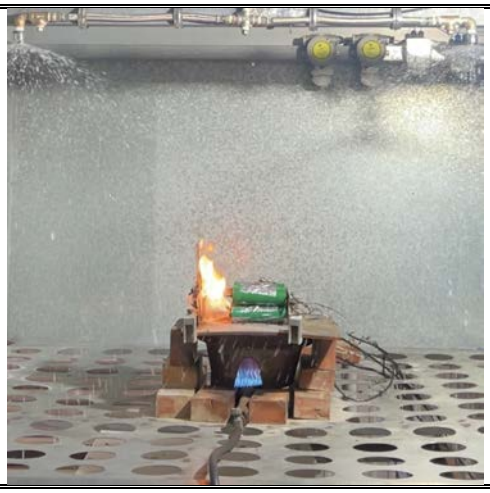
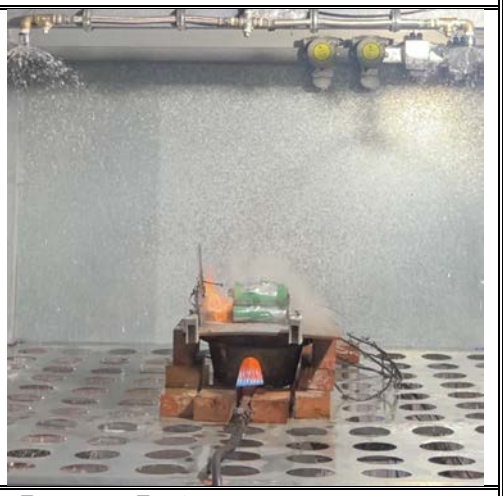
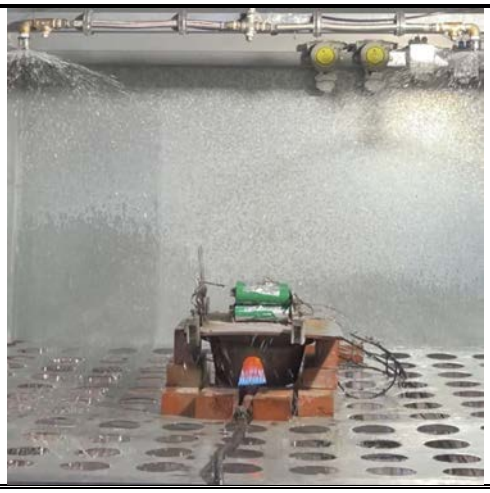
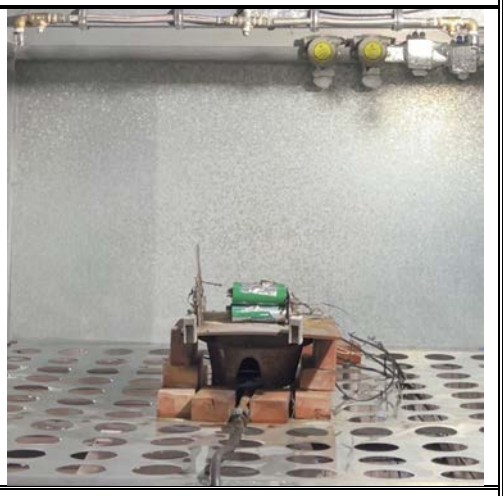


圖 5-14 CO 氣體濃度量測曲線圖(撒水)_實驗二

(資料來源:本研究整理)

表 5-8 實驗過程紀錄表_實驗二(撒水)

實驗過程		
說明	【00：00】點火開始	【06：01】電池氣體洩漏
實驗過程		
說明	【07：13】第一次電池起火即啟動撒水設備五分鐘	【18：40】第二次電池起火即啟動撒水設備五分鐘
實驗過程		
說明	【20：00】撒水情況	【30：00】實驗結束

(資料來源:本研究整理)

實驗(三) (撒泡沫)步驟：

(一)於鋰離子電池表面貼附熱電偶線、依情境需求調整滅火設備、架設數據收集系統及量測設備並確認功能使用正常、確認攝影設備正常運作。

(二)確認實驗所使用的鋰離子電池 SOC 值是否保持 100%。本研究將利用電源供應器採 3.7V 固定電壓對鋰離子電池進行充電。

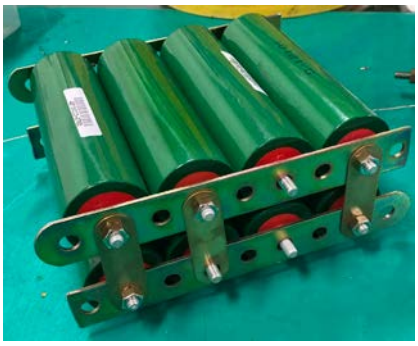
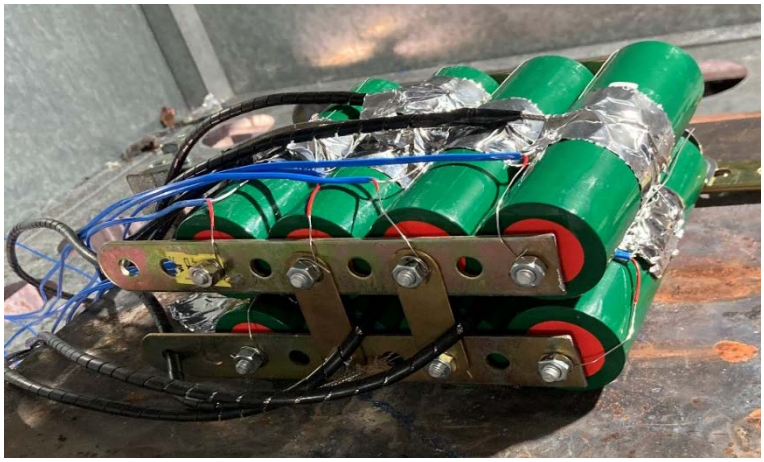
(三)實驗開始：啟動快速爐(調整為大火模式)即為實驗開始；當電池出現明火時，立即啟動泡沫設備並於五分鐘後關閉，當實驗過程中再次出現明火，則重複上述操作至實驗結束。

(四)實驗結束條件：實驗進行 30 分鐘為實驗結束條件。

(五)數據收集系統應紀錄從實驗全程的溫度、氣體濃度、電壓變化。並採人工方式紀錄快速爐啟動時間/關閉時間、滅火設備啟動時間、鋰離子電池冒煙/起火/爆炸等現象發生時間。

(六)實驗結束後將各項數據儲存，當所有量測數值回歸初始條件即可進行後續實驗。

表 5-9 實驗設置表_實驗三(撒泡沫)

<table>
<tr><td colspan="2">電池規格</td><td rowspan="6">電池圖示</td><td rowspan="6">  </td></tr>
<tr><td>電池種類</td><td>鋰鐵電池(LFP)</td></tr>
<tr><td>電池數量</td><td>8 顆(4 顆×2 排)</td></tr>
<tr><td>電池 SOC 值</td><td>100%</td></tr>
<tr><td>單顆電池電壓</td><td>3.3V</td></tr>
<tr><td>單顆電池容量</td><td>15Ah</td></tr>
<tr><td colspan="4">引燃方式</td></tr>
<tr><td>引燃方式</td><td colspan="3">利用快速爐火加熱鐵盤；鐵板將熱能傳導至上方電池。</td></tr>
<tr><td>加熱時間</td><td colspan="3">底層電池全數起火後關閉瓦斯。</td></tr>
<tr><td colspan="4">滅火方式</td></tr>
<tr><td>滅火系統</td><td colspan="3">泡沫滅火系統</td></tr>
<tr><td>撒水量</td><td colspan="3">11LPM</td></tr>
<tr><td colspan="4">量測點位示意圖</td></tr>
<tr><td colspan="4">
  </td></tr>
</table>

(資料來源:本研究整理)

由圖 5-15、表 5-10 發現，第一顆鋰離子電池約在實驗第 8 分 35 秒起火燃燒，電池最高溫度為 101°C，立即啟動泡沫設備，並於五分鐘後關閉泡沫設備。持續加熱鐵盤溫度至 22 分 26 秒時，第二顆電池起火燃燒，電池最高溫度為 99˚C，再次啟動泡沫設備五分鐘後關閉泡沫設備。

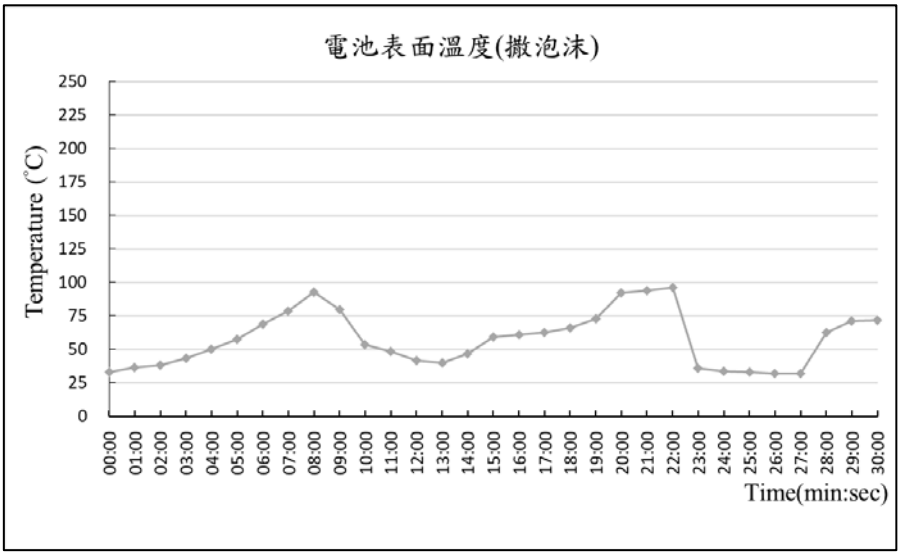


圖 5-15 電池表面溫度曲線圖(撒泡沫)_實驗三

(資料來源:本研究整理)

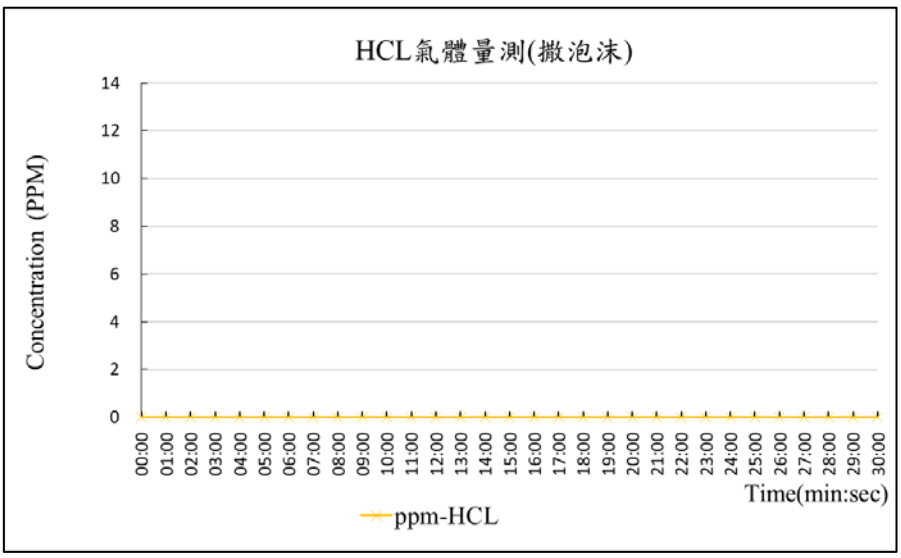


圖 5-16 HCL 氣體濃度量測曲線圖(撒泡沫)_實驗三

(資料來源:本研究整理)

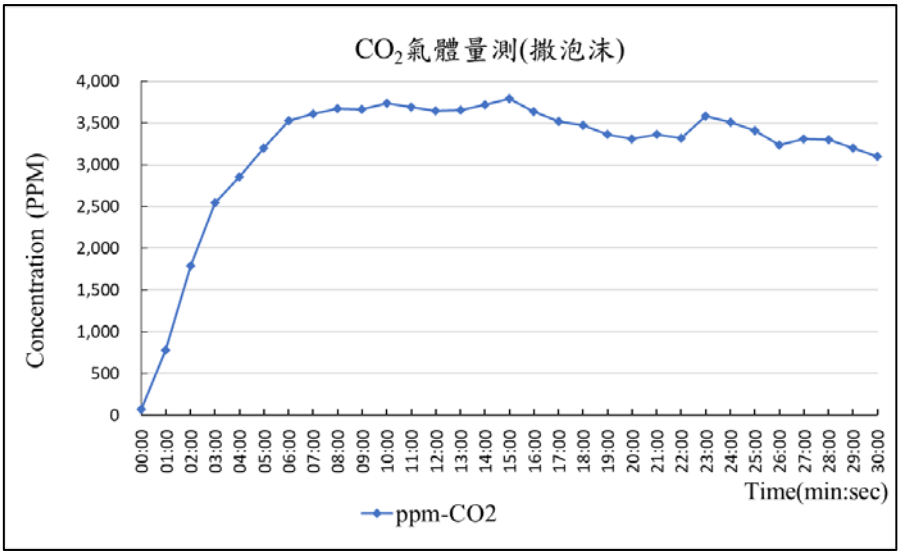


圖 5-17 CO_2 氣體濃度量測曲線圖(撒泡沫)_實驗三

(資料來源:本研究整理)

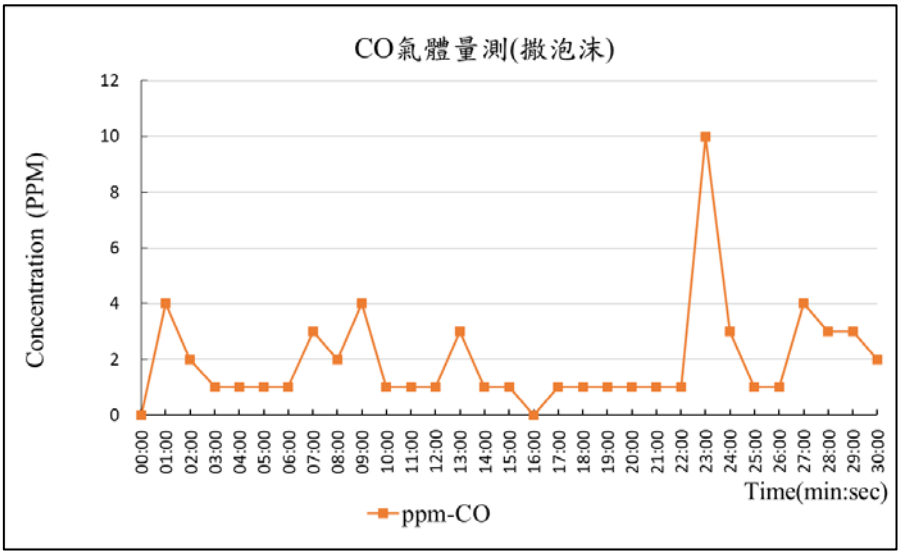
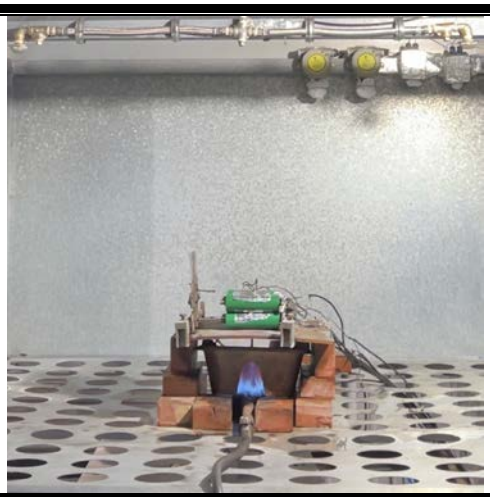
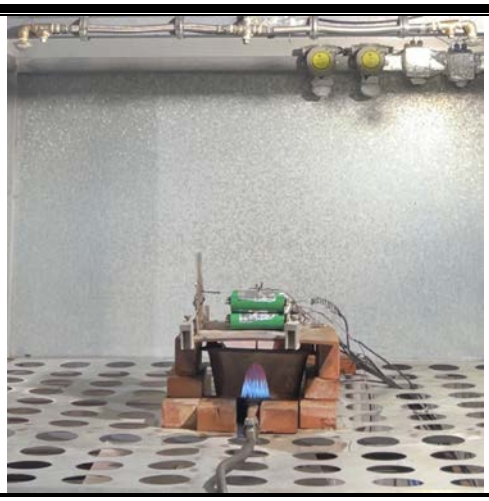
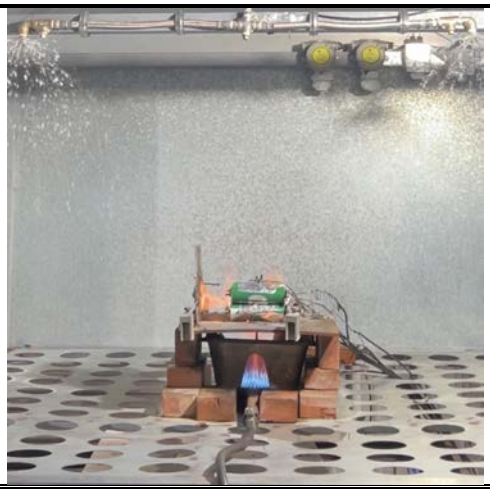
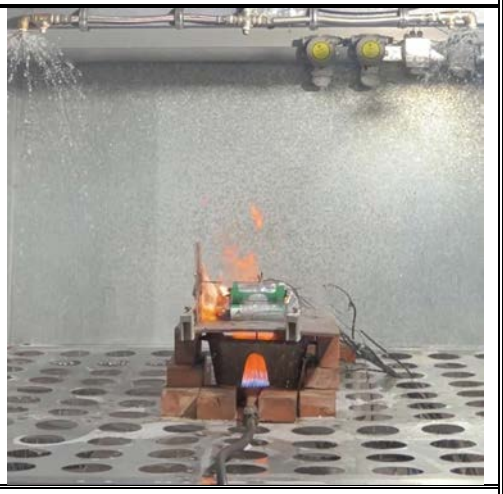
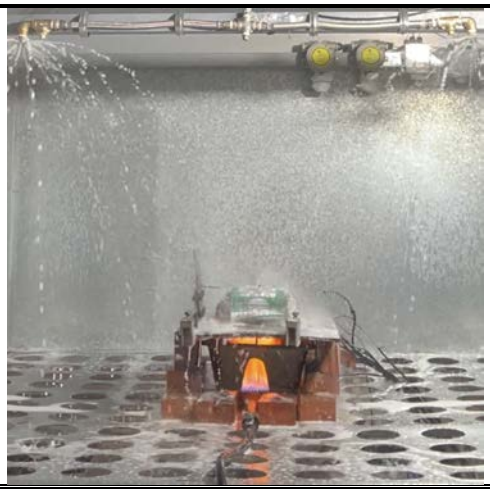
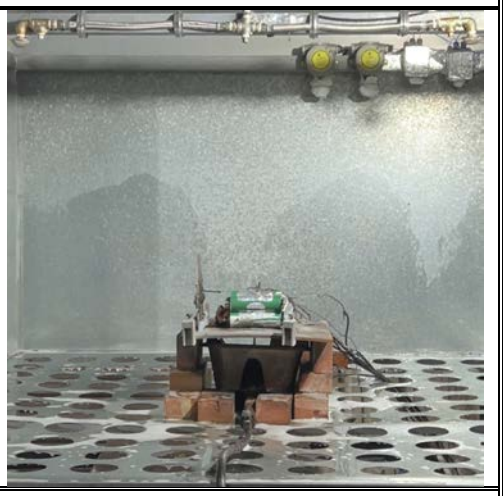


圖 5-18 CO 氣體濃度量測曲線圖(撒泡沫)_實驗三

(資料來源:本研究整理)

表 5-10 實驗過程紀錄表_實驗三(撒泡沫)

實驗過程		
說明	【00：00】點火開始	【03：16】電池氣體洩漏
實驗過程		
說明	【08：35】第一次電池起火即啟動泡沫設備五分鐘	【22：26】第二次電池起火即啟動泡沫設備五分鐘
實驗過程		
說明	【23：00】撒泡沫過程	【30：00】實驗結束

(資料來源:本研究整理)

第四節 實驗結果分析與小結

本研究團隊以八顆鋰鐵電池(LFP)作為實測實驗的燃燒對象，從實驗結果分析撒水及泡沫滅火系統對於電池類火災的抑制效果。彙整實驗結果，撒水及泡沫滅火系統對於電池類火災的抑制效果分析如下：

1. 溫度與滅火效果方面：

由實驗可知，當LFP電池外殼溫度達100～150℃左右時，電池即有發生爆炸燃燒的可能，不過無論是撒水或是撒泡沫，均可降低電池表面溫度，並達到滅火效果。但在周圍環境溫度沒有降低的情況下，有高機率會發生復燃。故由實驗結果得知，若要撲滅鋰離子電池火災，必須持續撒水(或泡沫)或泡水降溫，以防止復燃。

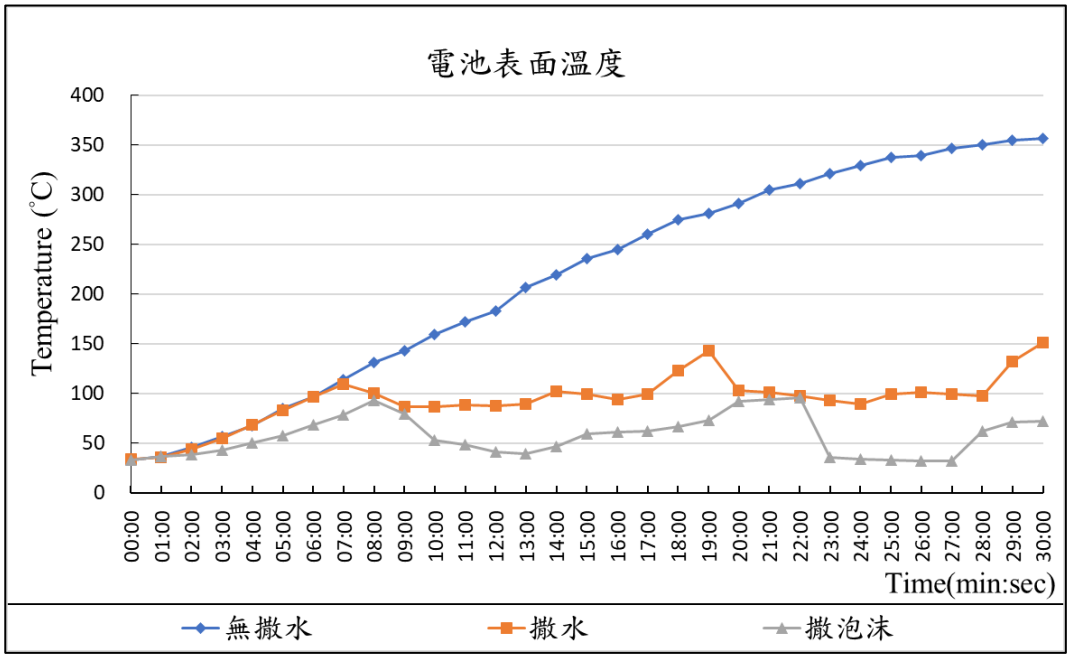


圖 5-19 實驗電池溫度量測曲線圖

(資料來源:本研究整理)

2. 有害氣體方面：

彙整三次實驗的氣體量測數據(以八顆鋰鐵電池(LFP)作為實測實驗的燃燒對象)，其中CO_2氣體濃度約為2700～4000ppm，CO氣體濃度約為11ppm以下，短時間內對人體尚不至於造成傷害。

而HCL氣體僅在無撒水的情境中有採集到，推測是因為無撒水情境電池溫度較高，可能導致電池內的電解質產生分解而生成HCL氣體[7]，而在有撒水與撒泡沫的情境下，即使發生復燃，電池溫度僅大約在150℃左右。故由實驗結果得知，在電池類發生火災時，除持續撒水(或泡沫)或泡水降溫以防止復燃外，同時也可減少或降低電池內部因高溫分解而產生的有害氣體。

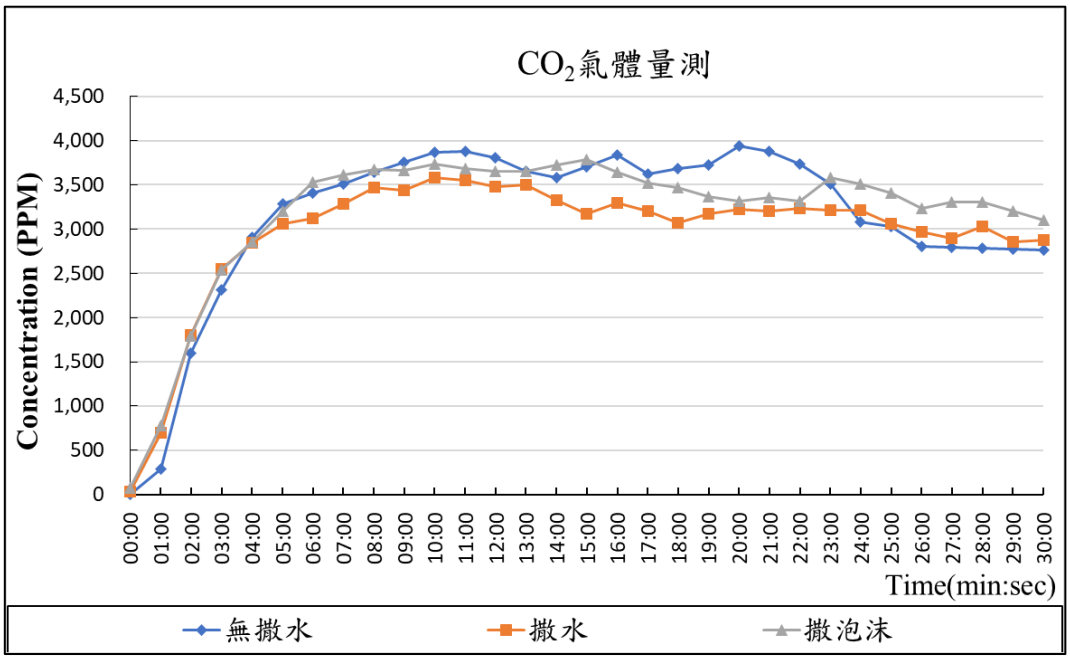


圖 5-20 CO_2 氣體量測實驗結果圖

(資料來源:本研究整理)

[7] 參考孫克寧等編著，2022，「鋰二次電池原理、關鍵材料及應用」，北京化學工業出版社。常見用於鋰離子電池電解質鋰鹽，其中一種為 $LiClO_4$，其熔點為 236℃，分解溫度>100℃。

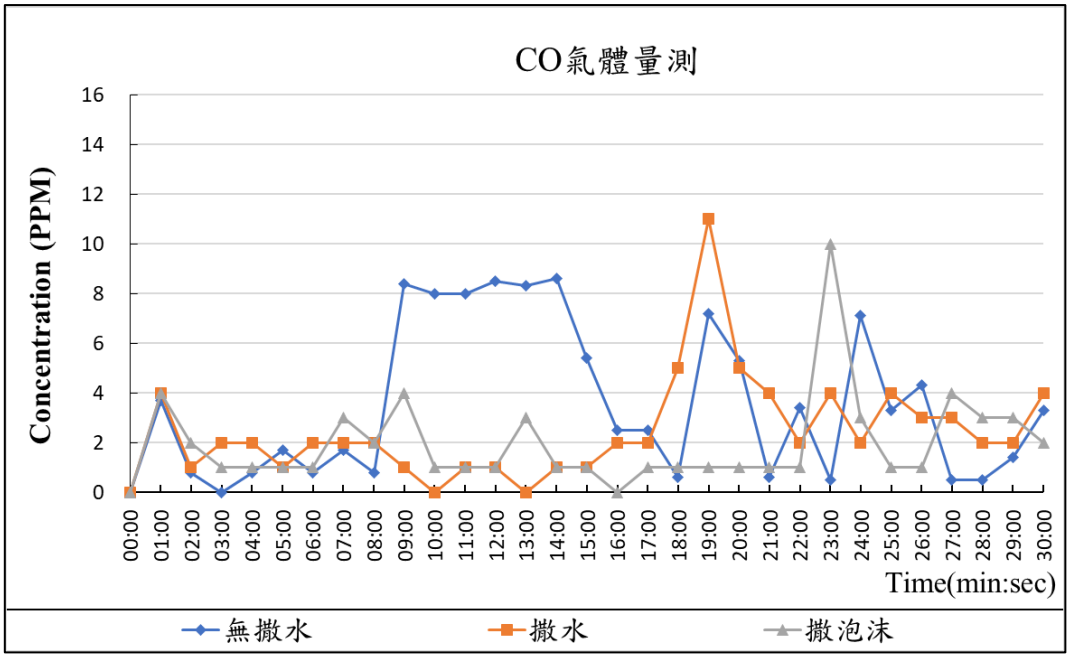


圖 5-21 CO 氣體量測實驗結果圖

（資料來源:本研究整理）

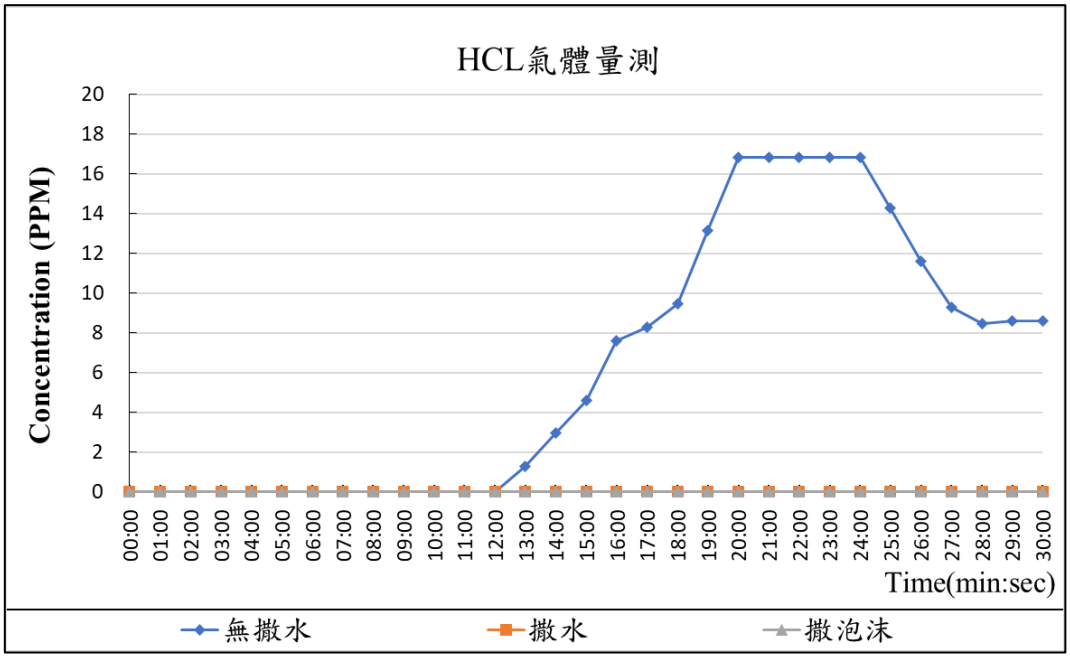


圖 5-22 HCL 氣體量測實驗結果圖

（資料來源:本研究整理）

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究之定位主要係基於評估電動車鋰離子電池火災產生之危害與地下停車空間換氣設備產生的效益而提出初步風險評估，學者王青松等人【12】調查鋰離子電池熱失控現象之研究發現，電池產熱過程可被視為鋰離子電池安全性的主要威脅。基於地下停車空間的空間特殊性，一旦鋰離子電池產生熱失控現象時，如何有效且快速針對電池類火災進行風險控制極為關鍵。本研究結論如下：

一、本研究預期目標之一為「彙整分析國際上地下停車空間停放電動車輛之規定要點」。經本研究大量蒐集整理相關文獻與法規資料，目前國際上(包含日本、美國、中國等)尚未有針對建築物地下停車空間停放電動車輛相關規定。由蒐集電動車火災案例可知，電動車火災事故的情況大多為 1、行駛中自燃；2、靜置停放自燃；3、充電過程自燃；4、事故碰撞自燃，顯見電池由外力或內部發生熱失控為成災主因。

各家車廠的緊急救援手冊均建議使用大量的水(2600 加侖以上，約等於 10 公噸的水量)進行滅火。為了降低電動車起火導致的火災風險，以及可以方便取用大量的水進行電動車火災的救援行動，故本研究建議現階段電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域[8]。

[8] 有關「電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域」之策略，或可降低發生的風險，但無法消除，仍應就現況依風險評估，採取最佳策略。

二、本研究預期目標之二為「地下停車空間電動車輛及充電系統火災煙毒流動特性分析」。依據本研究針對地下停車空間電動車輛及充電系統火災煙毒特性相關文獻可知，傳統汽/柴油車與電動車之火災燃燒產物截然不同，汽/柴油車燃燒時會產生完全燃燒產物(例如：二氧化碳(CO_2)與水(H_2O)及其它不完全燃燒產物(例如：一氧化碳(CO)與氮氧化物(NOx)等其他有毒氣體)。但電動車起火燃燒不僅會產生上述燃燒產物，還會產生劇毒氣體(例如：HF、HCl、HBr、HCN、SO_2)產生，其中電動車起火會產生比燃油車起火更多的氟化氫(HF)。氟化氫(HF)是一種有毒、具腐蝕性、重量輕的氣體，可以滲透某些類型的安全防護裝備，因此鋰離子電池火災之毒性氣體稀釋為救援過程的重點所在。

三、本研究預期目標之三為「泡沫及其他撒水滅火設備對電動車輛及充電系統火災之影響評估」。本研究團隊於雲林科技大學防火中心實驗場的實驗空間，規劃『撒火設備』與『泡沫設備』應用於鋰離子電池滅火實測實驗，本研究案將以鋰鐵電池(LFP)作為實測實驗的燃燒對象。由實驗結果可知，當 LFP 電池外殼溫度達 100～150℃左右時，電池即有發生爆炸燃燒的可能，不過無論是撒水或是撒泡沫，均可降低電池表面溫度，並達到滅火效果。但在周圍環境溫度或電池溫度沒有降低的情況下，有高機率會發生復燃。故由實驗結果得知，若要撲滅鋰離子電池火災，必須持續撒水(或泡沫)或泡水降溫，以防止復燃。由實驗結果得知，在電池類發生火災時，除持續撒水(或泡沫)或泡水降溫以防止復燃外，同時也可減少或降低電池內部因高溫分解而產生的有害氣體。

四、本研究預期目標之四為「地下停車空間通風換氣設備對電動車輛及充電系統火災煙毒效應評估」。本研究以電腦模擬進行地下停車

空間通風換氣設備對電動車輛及充電系統火災煙毒效應影響評估。由電腦模擬結果可知，在火災初期(15 分鐘內)地下停車空間若有開啟通風換氣設備，火場環境無論在溫度、煙層高度、能見度或有害氣體濃度方面，均較未開啟通風換氣設備有利於人員進行避難。[9]

五、綜合以上所述，有關地下停車空間電池類火災之風險控制，將概括預防管理、建築防火設施、避難安全與搶救應變感電風險等幾個方面。其中**預防管理**包含：(一)水源取得之便利性；(二)不可堆積雜物；(三)防止過充等。**建築防火設施**包含：(一)獨立防火區劃與排煙設備；(二)持續撒水；(三)災後結構評估等。**避難安全**包含：(一)增設特別安全梯或排煙設備；(二)火災初期開啟通風換氣設備等。**搶救應變感電風險**包含使用符合 NFPA 標準的個人保護設備可用於電池類火災等。(相關細節可參考附錄二之內容)

[9] 有關「在火災初期(15 分鐘內)地下停車空間若有開啟通風換氣設備，火場環境無論在溫度、煙層高度、能見度或有害氣體濃度方面，均較未開啟通風換氣設備有利於人員進行避難。」之策略，或可降低人員避難時的風險，但無法消除，仍應就現況依風險評估，採取最佳策略。

第二節 建議

本研究綜合本年度研究成果與經驗，提出以下未來較具有研究價值的課題，供有關主管機關參考。

建議一

立即可行之建議：規劃進行電動車停車空間及充電專用區域之主被動防護對策研究

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部消防署、內政部營建署

有鑑於我國停車空間規劃大都設置於地下樓層，對於該空間之電動車及充電樁災害緊急應變及救災相對較戶外或地面層複雜。地下停車空間特性較為封閉，屬於無開口樓層，若不幸發生電動車火災，將產生高溫與大量濃煙(含劇毒氣體)；其車輛火災溫度可高達 800～1000℃甚至更高，可能危及建築結構，倘動線複雜的話，而其產生的濃煙可能造成人員避難與消防救災的困難度與危險性。

現階段地下停車空間依法無須設置排煙設備，但考慮到電動車充電時發生火災的風險較高，因此建議若電動車充電區域設置在地下層者，則需規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備。且排煙設備對外口應設置有毒成份過濾網，防止有毒氣體逕自排放而造成地上層環境汙染。

建議二

中長期建議：研擬電動車充電專用區域撒水設備。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部消防署

由於電動車鋰離子電池模組放置於車輛底部，燃燒時撒水系統或泡沫系統於上方放射無法射至火點，應考慮調整原有地下停車空間所設置的泡沫及其他撒水滅火設備之設置方式，以達針對電動車電池模組持續撒水滅火降溫之功效，並應設置有效排水之裝置。

附錄一 審查回應表

一、期初審查（評審會議）回應表

項次	評選委員意見	廠商回應
1	地下停車空間停駐電動車位置，可能位於充電樁處所，亦可能停駐在其它停車位，如何有效運用或強化泡沫及撒水抑制任一位置之電動車火災。	感謝委員意見，考量電動車應在充電時較有可能發生火災機率，故本研究主要針對充電樁處所進行研究，未來視研究結果可能提出強化泡沫及撒水抑制任一位置電動車火災之建議。
2	鋰電池火災時之燃燒生成氣體，建請確認有無於本研究中呈現。	感謝委員意見，因設備有限且有安全疑慮，故僅能蒐集分析部分鋰電池火災時之燃燒生成氣體。
3	建議補充鋰電池構造、可燃物分析、可燃性及延燒特性，以方便釐清火災類型，便於擬定適合之滅火方式。	感謝委員意見，將依據委員意見於後續研究中補充鋰電池構造、可燃物分析、可燃性及延燒特性，以釐清火災類型並探討適合的滅火方式。
4	鋰電池火災有以水系統抑制控制之案件，但鋰元素與水有化學反應，鋰化合物能否適用水滅火機制，請補充探討。	感謝委員意見，有關鋰化合物能否適用水滅火機制將納入後續研究探討。
5	金屬火災有專用滅火乾粉藥劑，換採消防砂之可行性、適用性之調查，再檢討能否轉變為自動滅火系統。	感謝委員意見，有關消防砂之可行性、適用性將納入後續研究建議。

6	排煙排氣裝置是否應增設集塵設備。	感謝委員意見，由於鋰電池火災時將產生有毒氣體與微量粉塵，故建議地下停車空間之排煙排氣裝置均應考量增設氣體過濾裝置與集塵設備。
7	宜收集及歸納鋰電池安全規範，納入文獻收集及研究背景介紹。	感謝委員意見，後續研究將繼續蒐集與整理國內外相關案例與安全規範文件。
8	宜充分分析鋰電池引火延燒特性及煙毒性能。	感謝委員意見，將依據委員意見於後續研究中補充鋰電池燃燒特性及煙毒性能，但因設備有限且有安全疑慮，故僅能蒐集分析部分有害氣體。
9	鋰電池燃燒過程需要注意實驗安全。	感謝委員意見，本研究進行實驗時預計設有一金屬罩以防電池爆炸，並將依據委員意見特別留意實驗操作人員之相關安全防護。
10	鋰電池的應用、電動車輛，設備大量使用及伴隨火災，濃煙及毒性氣體的產生，會造成搶救困難、人命傷亡，地下密閉空間尤其嚴重。該方面之研究乃國際趨勢，值得鼓勵及大力推動。	感謝委員意見。
11	服務建議書第7頁，表2停車場火災案例(2017-2018二年案例) (1) 案例建議蒐尋至2022年	感謝委員意見，後續研究將繼續蒐集與整理國內外相關案例。

	含5年內，同時應將地下與地上案例區分。廣泛蒐集電動車火災案例，並應再強化國外案例。 (2) 請列出案例中停車場規模(車位數量、面積大小)及火災原因?	
12	服務建議書第15頁，七氟丙烷為HFC-227ea 非 HFC，請更正。	感謝委員意見，將依據委員意見修正文字誤植。
13	實測實驗：請將來詳細說明實驗場地布置，火源大小及欲量測的溫度及氣體種類數據?	感謝委員意見，將依據委員意見於後續研究中詳細說明實驗場地布置，火源大小及欲量測的溫度及氣體種類數據。
14	泡沫與撒水測試，是否可推導出最小放射時間的結論。目前很多報導均提及長期冷卻是最佳之滅火方式。	感謝委員意見，由於發生火災時的電池種類與數量均不同，本研究將依據實驗結果提出相關實驗結論。
15	使用鋰電池電動車火災的撲滅需耗費大量水，現有停車空間設置之滅火設備(泡沫設備)是否能滅火?又改設自動撒水設備是否能滅火?以上乃現今消防安全疑慮問題，希本案能有明確說明。	感謝委員意見，此部分非本年度研究範圍，將納入後續研究建議之中。
16	建議蒐集電動車廠相關安全指南文件，另鋰電池種類希請分析不	感謝委員意見，後續研究將繼續蒐集與整理國內外相關案例與安

	同種類電池的火災風險，併請說明。	全指南文件。
17	鋰電池燃燒實驗可能爆炸，毒性氣體擴散，實驗操作人員安全防護宜多加留意。	感謝委員意見，本研究進行實驗時預計設有一金屬罩以防電池爆炸，並配戴至少為N95等級之口罩，將依據委員意見特別留意實驗操作人員之相關安全防護。
18	建請本案預期成果可以增列研提未來相關研究課題。	感謝委員意見，本案預期成果將依據委員意見增列研提未來相關研究課題。
19	電動車火災模式如何?關鍵的危害性質化、量化資料請收集，再應考量與其他車輛之影響如何?	感謝委員意見，後續研究將探討電池火災模式與相關的危害性質。
20	先從規劃著手，電動車停放於地下停車場是否要分區，且予區劃。	感謝委員意見，電動車停放於地下停車場建議分區區劃停放，以防止災害擴大。
21	搶救方式據說有一案例連續射水7小時才完成滅火，可否借用防洪擋水板圍束成一個水池，讓鋰電池快速降溫失效。	感謝委員意見，後續實測實驗將考量納入以水池方式使鋰電池降溫之方式。
22	此消防射水過程是否會如太陽能板之滅火有觸電的危險。	感謝委員意見，後續實測實驗將考量納入進行相關測試。
23	建議收集國際電動車火災搶救經驗，做為改善消防設備技術參考。	感謝委員意見，後續研究將繼續蒐集與整理國內外相關案例與國際電動車火災搶救經驗。
24	有關毒氣的處理，國際上是否有	感謝委員意見，後續將考量納入

	應用現場化學綜合處理的技術，建議行有餘力也可蒐集相關文獻。	毒氣處理的相關文獻。
25	未來可否依實驗結果，充電樁應設置於地面開放空間？	感謝委員意見，因地下停車空間不利於救災與滅火，以安全的角度為考量出發點，充電樁設置於地面開放空間是優於設置在地下停車空間，未來將依據研究結果提出相關建議。

二、期中審查回應表

委員	委員評選意見	廠商回應
曾教授偉文	1. 第三章第四節 有關鋰電池火災案例分析資料非常寶貴，建議能夠追蹤進一步的起火原因以及電池型式。 2. 有關第五章實測實驗主要針對滅火方式進行規劃，如何呼應研究案主題必須考量。 3. 本案較偏向基礎研究，如何對應研究案主題應用研究內容，建議能提出後續整體研究架構，讓本案更具價值。	1. 感謝委員意見，因案例資料取得有限，故僅列表補充相關車型與起火原因。 2. 感謝委員意見，本研究預期目標之一為「泡沫及其他撒水滅火設備對電動車輛及充電系統火災之影響評估」，故以撒水及泡沫設備進行鋰離子電池芯滅火測試。 3. 感謝委員意見，後續研究架構將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
邱教授晨瑋	1. 風險控制請考量預防管理，建築防火設施，避難安全，及搶救應變感電風險。 2. 由於感電問題，請考量是否以細水霧或水霧設計分析且搭配或自衛消防編組人員的感電防護裝備之研議。 3. 電動車停放規劃之設計防火鐵捲門之區劃或與滅火系統放射密度及水	1. 感謝委員意見，已依據委員意見於報告結論補充相關風險控制內容。 2. 感謝委員意見，感電問題不在本年度研究範圍內，將考量納入後續研究建議。 3. 感謝委員意見，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設

	源容量強化及等價替代議題分析。 4. 實驗設計請考量電動車火災持續時間。	置專用排煙設備」方向進行。 4. 感謝委員意見，本研究實驗主要係針對鋰離子電池芯進行滅火測試，以確認撒水及泡沫設備對於鋰離子電池火災之滅火效果。
黃理事長鴻勛	1. Tesla Emergency Response Guide 提及不建議電動車使用泡沫來滅火，本研究以泡沫設備對鋰電池火災進行探討是否與電動車大廠之緊急應變指導手冊似有所衝突。	1. 感謝委員意見，依據特斯拉緊急應變指南技術文件，其中「消防措施」內容中提到:「使用水柱撲滅高壓電池火情。如果電池著火、暴露在高熱量環境中或者正在散發熱量或氣體，可使用大量水為電池降溫。完全撲滅電池火災並加以冷卻可能需要大約 3,000 加侖的水 (直接澆於電池上)，請務必準備或請求額外水源。如果無法即時獲得水源，在有水可用之前，可使用乾粉、CO_2、泡沫或其他一般滅火設備來滅火。」
	2. 泡沫設備主要以窒息法，而撒水設備主要以潤濕法(Wetting)來撲滅或抑制火災，然電動車之鋰電池置於底盤處故上述設備皆無法打到火	2. 感謝委員意見，本研究實驗主要係針對鋰離子電池芯進行滅火測試，以確認撒水及泡沫設備對於鋰離子電池火災之滅火效果。後續

	點，然實驗規劃於防護平台上以無遮蔽物之實驗場景進行滅火測試是否具代表性?亦或是可微調實驗場景佈置?	研究將建議「研擬電動車充電專用區域底部撒水設備」。
	3. 瑞典 RISE 之 Charging of electric cars in parking garages(RISE-report 2020:30)報告提及撒水/細水霧才是防護停車場電動車火災最基本之消防設備，故建議也將細水霧設備納入本研究範圍內。	3. 同上。
	4. 電動車火災之主動式消防設備應以防延燒能力和降低有毒和爆炸性氣體能力為兩大主軸，建議探討各主動式消防設備對上述之性能進行優劣分析之綜合比較。	4. 感謝委員意見，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
李理事長明智	1. 本研究對相關文獻及實例收集，及電腦模擬已見符合預期進度，值得肯定。	1. 感謝委員意見。
	2. 依實務建築或消防設計角度，會期待未來能提出最適滅火設備機制外，針對停車空間是否採分區停放，防火區劃停車區防火間隔，以及是否需有更完善或可自動調整的防煙區劃及排煙措施準則建立，對於	2. 感謝委員意見，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。

	實務建築或消防設計必有莫大助益。	
莫組長懷祖	1. 針對停車空間需設之設備已有說明，為對鋰電池（電動車）的滅火效果，請團隊協助深入了解，未來可提供設備師設計參採。	1. 感謝委員意見，依據實驗結果，無論是撒水或是撒泡沫，均可降低電池表面溫度，並達到滅火效果。但在周圍環境溫度沒有降低的情況下，有高機率會發生復燃。故由實驗結果得知，若要撲滅鋰離子電池火災，必須持續撒水(或泡沫)或泡水降溫，以防止復燃。
	2. 有關電動車發生事故時的危害已有探討，請協助彙整表列，作為配置電動車位，充電樁位，通風換氣設備、避難逃生通道、位置動線等設施時設計參考。	2. 感謝委員意見，因案例資料取得有限，故僅列表補充相關車型與起火原因。
	3. 現有設備、設施的強化建議，例如通風換氣設備之耐熱措施、設置防火區劃、捲門等之建議。	3. 感謝委員意見，由於通風換氣設備主要用在火災初期(15 分鐘內)，故提升其耐熱措施效益可能不大，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
	4. 請提供後續研究建議？	4. 感謝委員意見，遵照辦理。
營建署 孫研究員立	1. 建請評估地下停車空間電池類火災之火災持續	1. 感謝委員意見，依據電腦模擬結果可知，起火

言	時間是否會造成建築物耐火性能不足而引起建築物倒塌，如有疑慮，並提出控管此一風險之建議對策。	電動車的車頂溫度約為750~950°C左右，因此當地下停車空間發生火災時，若無法在初期階段控制火害範圍及排除燃燒產生的高溫煙流，高溫長時間侵襲建築物結構將使建築物產生不可逆的損毀，災後受損建築物是否存有安全疑慮等問題，需要請專業技師針對災後建築物結構進行慎重評估。
	2. 地下停車空間依據現行法規得免按樓地板面積作防火區劃，也免逐層防火區劃，請納入評估延燒範圍之考量。	2. 感謝委員意見，在後續研究建議中，現階段地下停車空間依法無須設置排煙設備，但考慮到電動車充電時發生火災的風險較高，因此建議若電動車充電區域設置在地下層者，則需規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備。
經濟部能源局(由智庫工研院代表) 黃副組長怡碩	1. 報告書第52頁，第二段中針對Crate的說明，建議可以在與電池專家確認轉寫內容是否正確。 2. 報告書第54頁，圖3-9說明的應該是充電介面規格，並非充電站規格，圖的標示建議修正。充電介面部分可以參考	1. 感謝委員意見，已依據委員意見修正報告書相關內容。 2. 感謝委員意見，已依據委員意見修正報告書相關內容。

	CNS 15511 系列相關規範。另外，最後一段提到”台灣目前主要依據用戶用電設備裝置規則”，這部分建議要補充說明清楚，因為設備有設備標準(由標準局訂定)，用戶用電裝置規則(能源局訂定)主要在處理充電器裝設時須符合的相關規範，例如需要用多粗線徑電線、需要設置那些保護設備…等。	
	3. 報告書第59頁，”充電系統設備進行高溫環境”，還是針對”電池系統”請釐清。	3. 感謝委員意見，充電系統文字為正確敘述。
	4. 報告書第84頁，最後一段文字描述”撲滅電動車需要4.4~10公升水”，建議是否數字與單位有誤？	4. 感謝委員意見，已依據委員意見修正報告書相關內容。
	5. 報告書第103頁，建議於文章補充說明圖4-9相關曲線代表的用意，提升易讀性，例如:Battery Pack A 100%是否代表電池組是全滿的狀況？	5. 感謝委員意見，已依據委員意見修正報告書相關內容。
	6. 第五章實驗採用40138鋰鐵電池16顆，可否說明選擇依據?另外未來如何放大實驗結果適用	6. 感謝委員意見，本研究實驗主要係針對鋰離子電池芯進行滅火測試，以確認撒水及泡沫

	於EV的電池組,建議可以補說明。另外,考量目前Gogoro與Tesla還在使用鋰三元電池，其能量密度較鋰鐵高，因此是否將三元系也納入評估。	設備對於鋰離子電池火災之滅火效果。採用8顆鋰鐵電池進行實驗主要係根據一輛特斯拉約使用1700顆鋰鐵電池之5%縮小比例而來。而三元電池部分已逐漸被特斯拉淘汰,故不納入本研究範圍。
交通部路政司 朱科長大慶	1. 研究事項涉及地下停車場及機械停車設備之設置及營運管理，建議於後續研究階段適時徵詢台灣立體停車機械產業協會及台北市停車場商業同業公會實務意見。 2. 因業界曾反映，地下停車場及機械停車設備設置充電設施並供電動車停放，有關消防以及安全規範之要求等須請相關主管機關進行研議。	1. 感謝委員意見,後續將考量邀請台灣立體停車機械產業協會及台北市停車場商業同業公會參與專家學者座談會。 2. 感謝委員意見。
中華民國全國建築師公會 楊勝德建築師	1. 在設計端，請考量是否需要在建築技術規則設立專章來規定。 2. 在使用端，使用誘導式風機是否足夠進行排氣，也請考慮是否使用排煙豎井。	1. 感謝委員意見,將考量納入後續研究建議。 2. 感謝委員意見,依據電腦模擬結果,現有地下停車空間通風換氣設備開啟的狀態下,在火災初期(15分鐘內)對於人員避難與火場環境均有正面幫助。
中華民國消防工程器材	1. 本研究對目前現況乃國際趨勢，極具意義且非	1. 感謝委員意見。

商業同業公會全國聯合會 蘇副理事長慶昌	常具有價值，非常感謝研究團隊。	
	2. 電動車及充電樁最好放置於地面層，若停放於室內空間建議僅設置於B1F，有獨立防火區劃，且車格間距加大，區劃上方至少防火時效 2 小時以上，增設排煙設備及開放式撒水。	2. 感謝委員意見，為了降低電動車充電起火導致的火災風險，以及可以方便取用大量的水進行電動車火災的救援行動，故本研究建議電動車充電樁設置在地面層為主，若一定要設在地下層，也以地下一層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限。後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
	3. 起火電動車的上方溫度約為 600~800°C 左右，誘導式通風系統其誘導式風機無法抵擋高溫，建議採箱型離心式耐熱風機並由防火風管與風口組成之排煙系統排毒性煙及熱煙，且可排至安全之戶外空間。	3. 感謝委員意見，依據電腦模擬結果，現有地下停車空間通風換氣設備開啟的狀態下，在火災初期(15 分鐘內)對於人員避難與火場環境均有正面幫助。
	4. 由於電動車鋰離子電池模組放置於車輛底部，燃燒時泡沫系統於上方放射泡水溶液無法射至火點，建議於停車位下方設置開放型撒水設備以冷卻及滅火(滅火水源	4. 感謝委員意見，將納入後續研究建議。

	容量應計算1小時以上)並應設置有效排水之裝置。	
台灣電力公司 許專員思強	1. 一般針對電氣類火災會使用細水霧系統，請本研究納入探討。 2. 未來的趨勢，有可能會朝向各車位均留設充電樁，請本研究針對此型態多加探討。	1. 感謝委員意見，本研究實驗主要係針對鋰離子電池芯進行滅火測試，以確認撒水及泡沫設備對於鋰離子電池火災之滅火效果。 2. 感謝委員意見，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
中華民國消防設備師（士）協會 吳消防設備師曉峯	1. 電動車已經成為趨勢，已無法限制地面停車，建議本研究就電動車火災的周圍溫度分佈，在防止延燒條件下，提出電動車鄰近停車位的最小間距建議值，作為室內停車空間規劃電動車車位的參考。 2. 建議參考台中歌劇院的撒水幕作為防火區劃及防煙區劃，阻斷火災輻射熱及洗滌毒煙，爭取消防力有效介入的時機，作為防止延燒及通風換氣的策略選擇。 3. 電動車火災通常始於車底電池部位，建議電動車停車位設置地面噴水設施，以降低電池溫度	1. 感謝委員意見，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。 2. 同上。 3. 感謝委員意見，將納入後續研究建議。

	避免擴大延燒。	
雷研究員明遠	1. 既有大樓設置電動車位及充電樁時，其通風換氣設備是否需更新或調整？要如何更新或調整？達多少車位（數量）則需更換為機械排煙設備？希請提出科學依據的具體建議。	1. 感謝委員意見，依據電腦模擬結果，現有地下停車空間通風換氣設備開啟的狀態下，在火災初期(15分鐘內)對於人員避難與火場環境均有正面幫助。後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
	2. 停車位連續停放電動車，如發生多輛車輛火災，是否有其模擬或災例，可供推估可能對建築結構的影響（此為火災風險之一），另建議災後應進行結構勘檢。	2. 感謝委員意見，依據電腦模擬結果可知，起火電動車的車頂溫度約為750~950°C左右，因此當地下停車空間發生火災時，若無法在初期階段控制火害範圍及排除燃燒產生的高溫煙流，高溫長時間侵襲建築物結構將使建築物產生不可逆的損毀，災後受損建築物是否存有安全疑慮等問題，需要請專業技師針對災後建築物結構進行慎重評估。
王研究員天志	1. 基於我國2040年將禁售燃油車，停車空間越來越多電動車是可預期的，考量現階段的立即需求及未來可能全面停放電動車，請研究團隊	1. 感謝委員意見，後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。

	思考是否以模組化的區劃來設計，以使可適用不同電動車數量的停放需求。	
	2. 在期末研究成果，如有研擬通風換氣相關法規修訂時，請考量敘明整體系統的性能、規格、有毒氣體的處理及排放等內容。	2. 感謝委員意見，依據電腦模擬結果，現有地下停車空間通風換氣設備開啟的狀態下，在火災初期(15分鐘內)對於人員避難與火場環境均有正面幫助。後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向進行。
	3. 本年度係先探討水系統及泡沫消防系統何者對鋰電池滅火較為有效，但也請納入考量法規另外列出的各種消防系統的有效性，以供實務設計參考，或規劃於後續研究執行。	3. 感謝委員意見，本研究實驗主要係針對鋰離子電池芯進行滅火測試，以確認撒水及泡沫設備對於鋰離子電池火災之滅火效果。並已依據委員意見納入考量法規另外列出的各種消防系統的有效性。
王組長順治	1. 通風換氣策略，應考量都市稠密地區建築物地下層電動車火災後產生毒性氣體之逸散或無害之時間，以及如何處理及排放進行探討及提出建議；建議得以不同情境設想地下層電動車火災後之結果與各項損害影響，藉以提供車主、管	1. 感謝委員意見，依據電腦模擬結果，現有地下停車空間通風換氣設備開啟的狀態下，在火災初期(15分鐘內)對於人員避難與火場環境均有正面幫助。後續研究將建議朝「規劃電動車充電專用區域並設置專用排煙設備」方向

	委會、樓管人員及充電樁業者等設置及維護之參考。	進行。
	2. 考量營建署現階段表示有關評估電動車充電系統設置，以基於確保用電安全與消防安全的前提之下，尊重社區自治與公眾利益的決定，「並非不得拒絕」。惟為協助政策推動電動車，建議後續可多加徵詢建管、消防、環保、法律、保險等各方面的專家學者，預先討論未來執行管理層面之合作關係。	2. 感謝委員意見，後續將考量邀請建管、消防、環保、法律、保險等各方面的專家學者參與座談會。
	3. 在建築技術規則裡地下室多為防空避難設備，並兼停車空間，所以在報告內文請以建築技術規則為主，停車為輔論述。	3. 感謝委員意見，遵照辦理。
	4. 本研究收集案例豐富，請研究團隊以表列方式歸納分析呈現，有助後續使用者參考引用。	4. 感謝委員意見，遵照辦理。

三、期末審查回應表

委員	委員評選意見	廠商回應
徐教授一量	1. 期末報告說明所執行計畫進行鋰電池特性探討、各國案例、鋰電池燃燒實驗及室內停車場電動汽車火災煙流模擬，內容詳盡且具參考性，符合計畫要求。 2. 預估我國很快就會有地下停車空間停放電動汽車之大量需求，電動汽車於地下停車空間之火災危害預防具有急迫性，建議持續進行後續研究，完善法規及預防方案。	1. 感謝委員意見。 2. 感謝委員意見，針對不同種類的建築物，電動車充電專用區域的位置選擇、大小、防火區劃面積範圍、規劃的原則，以及專用區域的滅火機制和換氣設計原則內容，將納入後續研究建議。
曾教授偉文	1. 整理分析相關資料豐富，惟建議在實測與模擬相關性，能先描述相關的風險情境。 2. 因應未來電動車發展趨勢，並考慮我國建築物地下停車特性，建議對未來持續研究，能提出通盤完整後續相關研究架構，例如：地下空間火災風險、電池模組密閉、車輛延燒、機械排煙有效性、專用區域規劃、搶救策略及救災方式工	1. 感謝委員意見。 2. 感謝委員意見，針對不同種類的建築物，電動車充電專用區域的位置選擇、大小、防火區劃面積範圍、規劃的原則，以及專用區域的滅火機制和換氣設計原則內容，將納入後續研究建議。

	具…等，提供建築研究所規劃後續研究主題。 3. 期末報告內容符合預期成果。	3. 感謝委員意見。
邱教授晨瑋	1. 地下停車空間不易於救災行動，如何提升該類場所的安全? 簡報內容說明，因應電池類火災特性，調整通風換氣設備設置方法。本案利用電腦模擬火場通風換氣情形，針對3方面探討： (1) 溫度方面：在台南美術館二館案例中，其火場環境最高溫度降低約 6.79～22.53 %，平均降低14.43%。在集合住宅建案案例中，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場環境最高溫度降低約 3.5～54.74 %，平均降低22.25%。 (2) 煙層高度方面：台南美術館二館的地下停車空間開啟通風換氣設備後，其地下停車空間 6 個出入口附近的煙層距離地面的高度提高約2.9～9.5%，平均提升5.26%；在集	1. 感謝委員意見，本研究建議現階段電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域，且建議地下停車空間設置特別安全梯等。

	合住宅建案案例中，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其地下停車空間出入口附近的煙層距離地面的高度提高約 14.5％ 。 (3) 有害氣體方面：台南美術館二館地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場中的最高 CO 濃度降低約 7.18～54.42％，平均降低 38.42％；集合住宅建案案例中，地下停車空間開啟通風換氣設備後，其火場中的最高 CO 濃度降低約 22.22～68.08％，平均降低 41.64％。	
	2. 建議排煙設備代替通風換氣設備，減少溫度、煙層、有害氣體，通風換氣設備重新規範不易，建議可考量修正各類場所消防安全設備設置標準-消防搶救上之必要設備-排煙設備第 188 條及第 189 條，增加消防人員搶救速度與效率。	2. 感謝委員意見，本研究建議現階段電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域，同時建議針對電動車充電區考量設置獨立防火區劃以及設置獨立排煙設備。
	3. 有關充電樁關閉電源（Disable）部分，社區大	3. 感謝委員意見。

	樓請管委會(或物業保全人員)與台電人員等協助斷電，充電樁依據廠商既有應變流程進行斷電，如廠商未制定者得諮詢廠商、或由廠商應變人員參與指導斷電事宜。充電樁即使斷電仍有殘留電壓之可能，例如連接綠電(太陽光電、風力)及儲能系統電池等，應加以注意。	
	4. 基於電池類火災不易撲滅且燃燒溫度極高的特性，撲滅電池類火災需要大量用水，因此水線供給為電池類火災抑制關鍵。本研究團隊進行小尺度實測實驗，透過少量鋰離子電池實測確認『泡沫設備』與『撒水設備』是否對於電池類火災有正面且高效的抑制效果，以及現行設置的消防設備是否需加強或改善。	4. 感謝委員意見，依據本研究實驗結果，發現水與泡沫均可撲滅電池火災，惟鋰離子電池有高度復燃機率，須持續撒水。但由於電動車電池模組大多設置於車輛下方，導致現有消防設備(由上往下噴撒方式)無法直接觸及火源，建議可參閱圖 2-4，奧地利消防服務公司 Rosenbauer 開發的電動車滅火系統，以千斤頂頂起車輛後將地盤噴水設備深入車輛底盤後，便可退到約 7.5 公尺外操作消防作業。
	5. 我國現行法令各類場所消防安全設備設置標準第 18 條，不論使用『泡沫設備』或『撒水設備』	5. 感謝委員意見。

	都很難有效降低減少車內鋰電池熱失控反應，建議參考下列方式： (1) 防火區劃加大降低延燒性。 (2) 消防力介入搶救，電動車鋰電池熱失控仍須消防人員搶救破壞方式搶救，車底瞄子、穿刺瞄子、 防火毯等利用大量水源破壞車體將水灌入車體鋰電池模組內將低熱失控。或採取適當搶救作為，如小火以盡可能使用乾粉（如磷酸銨鹽乾粉滅火劑、磷酸銨鹽乾粉滅火劑）或 絕緣氣體滅火，避免感電威脅。大火則以水為滅火劑，斷電後以水霧射水時保持 6~10 公尺，以大於 30 度以上夾角水霧射水，且壓力應超過 7kg/cm^2。	
	6. 目前電動車所使用的電池，依據正極材料不同可大致區分為鈷酸鋰(LCO)、磷酸鐵鋰 (LFP)與三元材料 (NCM、NCA)，請補充說明本次	6. 感謝委員意見，本研究因考量特○拉廠牌之電動車電池模組，現已因為考量安全性，由三元電池逐漸汰換為磷酸鐵鋰電池，且磷酸鐵

	實驗選用鋰鐵電池的原因？不同種類的鋰電池對於火災危害是否有影響？	鋰電池在實驗操作上之風險較三元電池低，故為了上述兩個原因，本研究選用鋰鐵電池進行相關實驗。
	7. 建議考量地下室通風換氣設備是否會因為火災發生而造成無法正常運作的情形，如電線因高溫損壞、正常電源跳脫等情形。	7. 感謝委員意見，通風換氣設備的運作，主要是在火災初期爭取人員安全避難時間，並無長時間持續運轉的需求，本研究建議地下室通風換氣設備應選用具有可耐300℃@30分鐘以上之性能，並連接緊急電源，以利人員進行避難。
	8. 其他建議討論事項，包括原有公寓大廈地下室之功能與設計問題，裝置電動車充電設備衍生問題，如燃油車位與電動車位相鄰靠近、增設充電車位易造成管線錯綜複雜、轉折過度、原有用電設施變更增加結構風險及缺乏足夠監視設備增加風險。	8. 感謝委員意見。
李理事長明智	1. 肯定本研究資料文獻收集以及實測實驗程序與邏輯，有相當完整可信賴的成果。	1. 感謝委員意見。
	2. 針對不同種類的建築物，電動車充電專用區域的位置選擇、大小、防	2. 感謝委員意見，針對不同種類的建築物，電動車充電專用區域的位

	火區劃面積範圍、規劃的原則為何? 此專用區域的滅火機制和換氣設計原則內容，後續研究可再加以探討，供設計者實務上應用參考。	置選擇、大小、防火區劃面積範圍、規劃的原則，以及專用區域的滅火機制和換氣設計原則內容，將納入後續研究建議。
莫組長懷祖	1. 有關預期成果均已提出。 2. 各項評估資料建議行程可操作指標、方法及檢核表，作為法制作業規劃及設計參考。 3. 針對鋰電池之滅火設備仍有討論空間，考量停車空間已有消防設備設置標準，有關如涉修法建議，建請擬提具體條文草案供參。 4. 其他有需要修法者也請一併提出草案。	1. 感謝委員意見。 2. 感謝委員意見，本研究有關地下停車空間電池類火災之風險控制已分別提出說明，各項目中均包含有關單位應注意事項或可行方式建議，可供參考之用。 3. 感謝委員意見，滅火設備的改善與法令修正建議，將考量納入後續研究建議。 4. 感謝委員意見，遵照辦理。
呂科長佳憲	1. 建議未來研究方向，可討論電池使用那個階段風險較高，是車子停放時或充電中，進而評估分區或分樓層設置充電設備或車輛停放。	1. 感謝委員意見，鋰電池發生火災的事故原因大多為充電起火或是撞擊導致起火。雖當車輛停放未使用或未遭撞擊亦有起火案例，但考量未來車輛電池老化後，無論是因為高溫、過充、過放或短路等使用行為造成鋰離

		子電池溫度上升，此時電池溫度超過隔離膜臨界溫度時，內部材料(SEI 膜、電解液、負極與正極材料)將開始自催化熱裂解產生放熱反應，與氧氣接觸可能伴隨劇烈燃燒或爆炸。
	2. 有關滅火毯的功效主要是窒息滅火，但鋰電池不管由研究單位的實驗或搶救實務上，如果無法撒水到電池芯，不易撲滅火勢，有關報告書第31頁滅火毯在幾分鐘內撲滅火勢，建議再確認實際效果。	2. 感謝委員意見，已修正報告書內部分文字敘述。
	3. 建議未來研究方向亦可由車輛設計方面考量，如果電池起火後可脫離車輛之機制，以利搶救。	3. 感謝委員意見，電池起火後可脫離車輛之機制將考量納入後續研究建議。
陳副局長崇岳	1. 電動車停放位置影響搶救難易度甚鉅，停放位置應以地上層為主；地下層則須安排於車道口等消防力易抵達處： (1) 電動車運用鋰電池作為動力來源，鋰電池發生火災的事故原因大多為充電起火或是遭撞擊導致起火，故獨自停放、未遭撞擊亦有起火可能。	1. 感謝委員意見。

	(2) 電動車火災高溫、生成大量毒氣及容易復燃，需要大量水方能撲滅火勢，阻止鋰電池產生熱失控現象，故造成火災時，其救災環境嚴苛且須大量水滅火。 (3) 近期德國亦有推出類似法令，在相關配套法令及設施完備前，電動車禁止停放於地下停車空間，我國亦可效法。	
	2. 電動車搶救之觸電風險高，消防人員應有充分防護裝備及完整斷電程序： (1) 電動車搶救戰術建議步驟分別為以下：識別車輛、固定車輛、車輛熄火及斷電、滅火及救援。 (2) 運用電池作為動力來源之車輛並不僅限於電動車，油電混合車亦有運用電池作為動力來源。故消防人員於進行車輛救援或滅火時，充份識別車輛類型及其動力來源相當關鍵。	2. 感謝委員意見。

	(3) 自本研究第 121 頁觀之，使用符合 NFPA 的個人安全防護裝備可有效防範觸電可能。惟我國消防人員個人安全防護裝備多僅具有歐規(EN)防護標準，對於觸電的防範係數仍遜於美規(NFPA)標準，故我國消防人員面對是類電動車火災風險時，穿著全套個人安全防護裝備(PPE)外，仍須留意斷電程序、避免碰觸漏電部位。	
	3. 地下室通風設備能力雖有限，但仍能有效提升可視距離，提升搶救效率： (1) 本研究案之模擬情境均係使用誘導式通風設備，其係用於噴出少量但高速的氣體，帶動周圍空氣循環，達到高效通風換氣效果。 (2) 自本研究模擬結果觀之，通風設備之啟動可有效提升可視距離、提升煙層高度、降低有毒氣	3. 感謝委員意見。

	體濃度，能有效提升可視距離。 4. 考量電動車之火災特性，各地方政府消防單位應進行相關整備工作，購置各式專用搶救器材： 電動車電池位於車輛底部，故其降溫及滅火方式需運用各種新式器材進行滅火，各項新式電動車滅火器材說明： (1) 防火毯：覆蓋電動車外部，運用窒息法撲滅明火，藉此降溫滅火，營造搬運車輛之時間。 (2) 電池冷卻瞄子：自車底針對電池進行滅火降溫，避免鋰電池產生熱失控現象。 (3) 緊急斷電插座：可自電動車充電處插入斷電，免除複雜識別程序。	4. 感謝委員意見。
營建署 孫研究員立言	除就目前現況考量外，因應國家減碳及電動車推動政策方向，可預見未來使用電動車之比例會提高，本研究之結論與建議請就這個趨勢預為考量。	感謝委員意見，本研究建議現階段電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域。以現有消防設備與技術，事實上還無法因應地下停車空間電動車普及後

		發生火災之狀況，故針對國家減碳及電動車推動政策方向，進行未來電池與消防技術滾動精進與修正。
經濟部能源局（由智庫工研院代表） 黃副組長怡碩	1. 針對「彙整分析國際上地下停車空間停放電動車輛之規定要點」部分，報告提到「國際上尚未有針對建築物地下停車空間停放電動車輛相關規定」，建議可補充說明研究過程中有搜尋那些國家或國際組織資訊，當作佐證資訊。	1. 感謝委員意見，本研究搜尋包含中國、日本、美國等國，均未見其建築物地下停車空間停放電動車輛相關規定。
	2. 報告第 223 頁提到「而 HCL 氣體僅在無撒水的情境中有採集到，推測是因為無撒水情境電池溫度較高，可能導致電池內的電解質產生分解而生成 HCL 氣體」，是否代表撒水的環境中沒有採集到，但是是否有可能是 HCL 溶解水中，如同報告第 118 頁提到「測試期間收集的水樣本表明存在氯化物和氟化物(可能以 HF 和氯化氫 (HCl) 的形式存在)」，建議可以釐清或是補充說明。	2. 感謝委員意見，有關 HCL 是否會溶於撲滅鋰離子電池燃燒之水溶液，將考量納入後續研究建議。
	3. 結論第 227 頁提到「避免電動車過度充電，充滿電後應立即停止充	3. 感謝委員意見，已依據委員意見調整相關文字敘述。

	電，並將充電設備妥善歸位放置。」，提到的過度充電狀況是否會發生，建議可以釐清，或是刪除「避免電動車過度充電」的文句。 4. 結論第 229 頁建議「研擬電動車充電專用區域底部撒水設備」，是否有國際相關案例可供參考，以利國內後續推動。	4. 感謝委員意見，請參閱圖 2-4，奧地利消防服務公司 Rosenbauer 開發新的電動車滅火系統，以千斤頂頂起車輛後將地盤噴水設備深入車輛底盤後，便可退到約 7.5 公尺外操作消防作業。
中華民國全國建築師公會 楊建築師勝德	1. 結論有的建議「暫時訂定限制或鼓勵在地面層設置充電車位」，贊同此類做法。 2. 地下層要有獨立防火區劃及專屬的撒水系統，也非常贊同技術規則有專章規範。	1. 感謝委員意見。 2. 感謝委員意見。
中華民國消防設備師公會全國聯合會 嚴理事長順福	1. 排氣模擬依既有設備做基本條件，建議就改善對策另做模擬，作為對照。 2. 消防安全設備的改善，建議提供法令修正意見。	1. 感謝委員意見，排氣改善對策與模擬，將考量納入後續研究建議。 2. 感謝委員意見，消防安全設備的改善與法令修正建議，將考量納入後續研究建議。
台灣建築中心	1. 本案研究參考資料豐富，唯其中多有部份廠商提供或由網路蒐集資	1. 感謝委員意見，遵照辦理。

陳經理盈月	料，建議集中在一起，並於文字標註，於表號亦標註，以避免日後之誤用。	
	2. 本案報告書第31頁提及防火布為唯一能夠有效處理電動汽車火災的解決方案，是否有相關文獻可供佐證，而防火布是否有國際測試認證。	2. 感謝委員意見，已修正報告書內部分文字敘述；目前滅火毯在歐盟有 DIN EN 1869-2001 (BS EN 1869)-Fire blanket 的認證。
	3. 文獻中表 2-5 有關防火安全規定為建築技術規則規定，其中有消防設備者，依營建署曾有函示，建議以各類場所消防安全設備規定載明。	3. 感謝委員意見，已依據委員意見修正報告書內部分文字敘述。
	4. 本案以電腦模擬方式驗證，是否能呈現電池火災時跳焰的情形，建議於模擬前提出驗證限制說明，也建議明年建研所可以進一步研究。	4. 感謝委員意見，電腦模擬之火源熱釋放率依據國外相關電動車鋰離子電池火災實驗數據進行相關參數設定，無法模擬電池燃燒跳焰狀況。
	5. 本中心防火避難委員會因地下停車空間防火及消防設備規定有限，故就防火避難安全十分關心，本案煙流模擬結果將提供委員會報告參採。	5. 感謝委員意見。
雷研究員明遠	1. 有關FDS電腦模擬所得電動車火災情境，建請註明有關風險條件(如未撒水)，另建議增加撒水	1. 感謝委員意見，已依據委員意見註明電腦模擬有關風險條件(如未撒水)，並增加撒水(或

	(或泡沫)後的情境。 2. 避難安全建議強化地下層安全梯防護功能，如高層建築物特別安全梯下至地下室，安全梯(含特別安全梯)防火門遮煙性、增設地下層機械排煙設備等。	泡沫)後之差異結果。 2. 感謝委員意見，已依據委員意見於避難安全風險對策項目中補充強化地下層避難路徑之安全性。
王組長順治	1. 報告內容請增加一小節，補充電池類火災的特性；另外報告書表3-9所列火災案例，是否有傷亡人數、發生地點(例如地下室或地面)的資訊，請補充增列。 2. 因應電動車火災的特性，現行建築或消防有哪些應精進加強的策略，並聲明所建議的策略可降低發生的風險，但無法消除，仍應就案場現況依風險評估，採取最佳策略。 3. 請補充說明在管理預防、後續滅火、避難逃生階段，各階段、單位該有	1. 感謝委員意見，將依據委員意見以專節(第三章第七節)補充電池類火災的特性，並增列表3-9火災案例之細節。 2. 感謝委員意見，在建築方面可考量將充電樁設置在地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內為限之區域，以及在火災初期(15分鐘內)地下停車空間開啟通風換氣設備；在消防部分必須持續撒水(或泡沫)或泡水降溫，以防止復燃。並依據委員意見聲明所建議的策略可降低發生的風險，但無法消除，仍應就現況依風險評估，採取最佳策略。 3. 感謝委員意見，已依據委員意見在風險管理各階段補充建議有關

	哪些作為或應注意事項? 4. 請補充換氣、防火策略相關可行方法? 供主管機關參採，以降低人員傷亡和災情擴大。	單位應注意事項。 4. 感謝委員意見，已依據委員意見補充換氣、防火策略相關可行方法，以降低人員傷亡和災情擴大。

附錄二 地下停車空間電池類火災之風險控制與建議

地下停車空間電池類火災之風險控制與建議，將概括以下幾個方面：

A. 預防管理：

a. 因電動車火災事故的部分原因為充電起火或是事故自撞導致鋰離子電池熱失控而起火，且由於地下停車空間電池類火災搶救不易，為了可以方便取用大量的水進行電動車火災的救援行動，建議電動車充電樁設置以在地面層為主，或地下層靠近車道出入口並在室內外消防栓救援範圍內之區域。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 台灣電力公司：應注意供電安全是否符合需求。 II. 能源局或經濟部標準檢驗局：應注意充電樁與鋰離子電池之品質是否符合規定。 III. 充電樁安裝廠商：安裝時應注意設備與線路之完善，以及供電壓力是否符合原廠要求。 IV. 營建署：建議規定建築物地下停車空間之電動車與充電樁設置方式與設置位置。 V. 消防署：應注意室內消防栓防護面積是否涵蓋電動車充電樁設置位置。 VI. 業主或管理委員會：應定時檢修充電樁與線路。

b. 地下停車空間不可放置與堆積雜物，尤其是電動車充電樁周圍不可放置任何易燃物或可燃物。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 當地消防局與工務局：應不定期派員檢視轄區內建築物地下停車空間使用情況。 II. 業主或管理委員會：應於管理公約律定地下停車空間不可放置與堆積雜物，尤其是電動車充電樁周圍不可放置任何易燃物或可燃物。

c. 電動車充滿電後應立即停止充電，並將充電設備妥善歸位放置。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 充電樁安裝廠商：充電樁設備應具有充滿電後可立即停止充電之安全裝置。 II. 業主或管理委員會：應於管理公約律定電動車車主避免電動車過度充電，充滿電後應立即停止充電，並將充電設備妥善歸位放置。

B. 建築防火設施：

a. 為防止電動車充電時發生火災並延燒擴散，建議可針對電動車充電區考量設置獨立防火區劃以及設置獨立排煙設備。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 營建署：建議建築物地下停車空間之可針對電動車充電區，考量設置獨立防火區劃。 II. 消防署：建議建築物地下停車空間之電動車充電區防火區劃應設置獨立排煙設備。

b. 無論是撒水或是泡沫，均可降低電池表面溫度，並達到滅火效果。但在周圍環境溫度沒有降低的情況下，有高機率會發生復燃。故若要撲滅鋰離子電池火災，必須持續撒水(或泡沫)或泡水降溫，以防止復燃。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 自來水公司：建議於地下層設有停放電動車之建築物附近增設消防栓，以利救災時水源之供給。 II. 業主或管理委員會：建議可採購防火毯或其他有利防火之設備備用，於災害初期覆蓋起火車輛，避免火勢延燒。(若火勢已擴大則不建議使用，以免因高溫導致人員受傷。)

c. 起火電動車的車頂溫度約為 750~950°C 左右，因此當地下停車空間發生火災時，若無法在初期階段控制火害範圍及排除燃燒產生的高溫煙流，高溫長時間侵襲建築物結構將使建築物產生不可逆的損毀，災後受損建築物是否存有安全疑慮等問題，需要請專業技師針對災後建築物結構進行慎重評估。
有關單位應注意事項或可行方式建議： 業主或管理委員會:因高溫長時間侵襲建築物結構將使建築物產生不可逆的損毀,建議於災後委請專業技師針對災後建築物結構進行評估。

C. 避難安全：

a. 強化地下層避難路徑之安全性，如高層建築物特別安全梯(或戶外安全梯)下至地下室，安全梯(含特別安全梯)防火門具遮煙性，增設地下層機械排煙設備等。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 營建署：建議修正有停放電動車與設置充電樁之建築物地下停車空間，其地下室樓地板面積未超過一百平方公尺者，仍應設置戶外安全梯或特別安全梯，或是地下層設置機械排煙設備。 II. 業主或建築師：建議於設計階段考量將地下室安全梯提升為特別安全梯，或是地下層設置機械排煙設備。

b. 在火災初期(15 分鐘內)地下停車空間開啟通風換氣設備，火場環境無論在溫度、煙層高度、能見度或有害氣體濃度方面，均較未開啟通風換氣設備有利於人員進行避難。
有關單位應注意事項或可行方式建議： 業主：建議通風換氣設備應選用具有可耐 300℃@30 分鐘以上之性能，並連接緊急電源，以利人員進行避難。

c. 電動車起火燃燒會產生劇毒氣體(例如：HF、HCl、HBr、HCN、SO_2)產生，因此藉由通風換氣設備將鋰離子電池火災之毒性氣體稀釋或排除，為救援過程與人員避難安全的重點所在。
有關單位應注意事項或可行方式建議： I. 業主：建議通風換氣設備之排氣口應裝設毒氣過濾裝置，避免排出之濃煙毒氣汙染空氣與造成民眾身體不適。 II. 消防署：應注意使用具防毒氣之個人防護裝備。

D. 搶救應變感電風險：

依據國外的全尺度電動車滅火測試，現有符合 NFPA 標準的個人保護設備可用於電池類火災，但依據部分車廠的緊急應變手冊提到：「不要用少量水撲滅涉及高壓電池的火災，因為這可能導致觸電」。
有關單位應注意事項或可行方式建議： 消防署：建議採用具防感電性能之個人防護裝備。

參考書目

【1】 楊君濤，2014，「電動汽車充換電站火災風險評估的思考」，現代職業安全。

【2】 鄭錦淑，2009，「高安全性鋰電池材料」，工業材料雜誌。

【3】 Rao H. et al., 2015, “Study of fire tests and fire safety measures on lithium ion battery used on ships, Transportation Information and Safety (ICTIS).

【4】 王榮進，2020，「地下建築空間防火設計與消防救災結合應用」，內政部建築研究所。

【5】 李玉生，2008，「建築物依法設置室內停車空間之防火安全之研究」，內政部建築研究所。

【6】 芮新宇，2020，「鋰離子電池熱失控蔓延問題研究綜述」，電池工業。

【7】 胡廣，2021，「車用鋰離子電池熱失控研究綜述」，電工電能新技術。

【8】 丘澄彬，1990，「水對固態燃料組列之火焰抑制研究」，國立成功大學碩士論文。

【9】 陳瑜平，2019，「淺論煙草企業廠內電動車輛充電安全措施」，企業管理。

【10】 張磊等人，2017，「抑制鋰電池火災滅火劑技術研究進展」，科技通報。

【11】 Qingsong Wang, 2018, “A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies”.

【12】 Wang Q. et al., 2012, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery”, Journal of Power Sources.

【13】 Ben Gully,2019, “Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression”, DNV GL Report.

【14】 彭文軍，2019，「浅析加强暖通施工管理的方法」，智能城市。

【15】 吳新華等人，2003，「城市小汽车发展预测」，現代城市研究。

【16】 程遠平等人，2003，「地下汽车库火灾与烟气发展过程研究」，

中國礦業大學學報。

【17】 Emmons H. W., 1980, “Scientific progress on fire”, Annual Review of Fluid Mechanics.

【18】 彭婷，2019，「圆筒形地下立体停车库火灾通风排烟系统与影响因素研究」，西南交通大學碩士論文。

【19】 王彩霞，1996，「高层建筑地下停车库的通风设计和诱导通风方式的应用」，暖通空調。

【20】 Zhang, X.G. et.al., 2007, “Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park”, Building and Environment.

【21】 賈春芬，2006，「地下停车库火灾风险性的评价研究」，火災科學。

【22】 何錦明，2009，「細水霧設備於建築物室內停車空間應用之研究」，內政部建築研究所。

【23】 程遠平，2002，「小汽车火灾试验研究」，中國礦業大學學報。

【24】 張文耀，2015，「深層地下汽機車停車場火災特性解析研究」，國立臺北科技大學碩士論文。

【25】 諸偉，2021，「小区地下停车场火灾的扑救」，消防界。

【26】 杜宏，2015，「浅谈车辆火灾的预防和扑救工作」，消新西部。

【27】 鄭榮升，2014，「浅析车辆火灾原因与调查」，機電技術。

【28】 張邦立，2012，「大規模地下空間避難弱者之情境模擬及避難疏散策略」，內政部建築研究所。

【29】 楊智欽，2009，「鐵路地下隧道及車站之防火性能設計研究」，國立交通大學機械系碩士論文。

【30】 2018，「停車場火災的災害特性，你必須要知道的 6 件事」，瑞德消防雜誌。

【31】 許志豪，2020，「地下停車空間變更為倉儲使用之安全性改善探討」，國立交通大學碩士論文。

【32】 陳琳，2014，「地下室车库火灾蔓延规律及灭火措施的研究」，武漢理工大學。

【33】 王安強，2021，「停車空間以自動滅火設備替代泡沫滅火設備之可行性研究」，內政部建築研究所。

【34】 John Slawson,2022, “Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression”, Rosenbauer.

【35】 郭樹林，1996，「烟气流动造成火灾蔓延距离计算」，河南消防。

【36】 張曉鴿，2006，「地下车库火灾过程及消防措施的研究」，工程熱物理學報。

【37】 李子勛，1993，「停車場通風系統之效能比較」，中國冷凍空調雜誌。

【38】 王清松，2011，「通風設備對地下停車場內空氣品質之研究探討」，中臺科技大學。

【39】 赵淑娟，2011，「一种新的车库通风系统——诱导式通风系统」，中国中建设计集团(天津)。

【40】 黃彰斌，2006，「筋混凝土樑受火害時之溫度分佈與殘餘強度分析」，技術學刊。

【41】 Wang G., 2013, “Fire safety provisions for aged concrete building structures”, Procedia Engineering.

【42】 劉白梅，2001，「火害後鋼筋混凝土建築物耐震評估」，中華民國建築學會。

【43】 白亮，2014，「高溫後長齡期在役混凝土抗壓強度研究及微觀分析」，長安大學建築科學與工程學報。

【44】 洪培耕，2016，「地下機車停車場全尺寸火災特性實驗研究」，國立台北科技大學碩士論文。

【45】 GB50067，「汽車庫、修車庫、停車場設計防火規範」，中華人民共和國國家標準。

【46】 任進，2013，「地下车库通风及排烟系统分析与应用」，西安建築科技大學。

【47】 沈子勝，2018，「停車塔自動滅火設備設計及滅火效能之研究」，內政部建築研究所。

【48】 李佳蓉，2021，「停車場用密閉式泡沫撒水頭認可基準之研究」，

陽明交通大學碩士論文。

【49】 Roeland Bisschop, 2019, “Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles”, RISE Report.

【50】 黃可龍等人，2010，「鋰電池原理與技術」，五南圖書出版股份有限公司。

【51】 Jiang J. et al., 2004, “ARC studies of the thermal stability of three different cathode materials: LiCoO2; Li[Ni0.1Co0.8Mn0.1]O2; and LiFePO4,in LiPF6 and LiBoB EC/DEC electrolytes”，Electrochemistry Communications.

【52】 吳弘俊，2008，「高功率鋰電池正極材料的發展現況與市場應用」，工業材料雜誌。

【53】 林素琴，2009，「大好前景-鋰電池材料發展分析」，Industrial Economics &Knowledge Center (IEK)。

【54】 K. Xu, 2004, “Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries,” Chemical Reviews.

【55】 F. Larsson, 2017, “Lithiumion Battery Safety: Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation, Chalmers University of Technology.

【56】 G. G. Eshetu, 2013, “In-Depth Safety-Focused Analysis of Solvents Used in Electrolytes for Large Lithuim Ion Batteries” , Physical Chemistry Chemical Physis.

【57】 Sato N., 2001, “Thermal behavior analysis of lithiumion batteries for electric and hybrid vehicles”, Journal of Power Sources.

【58】 陳祐頎，2019，「鋰離子電池電解質-鋰離子傳遞的橋梁」，科學發展。

【59】 2017，「電動車機電整合工程師初級能力鑑定參考指引-電動車概論」，iPAS 經濟部產業人才能力鑑定。

【60】 陳汝吟，2016，「論公寓大廈設置電動車充電裝置之相關法律問題」，海峽法學。

【61】 総務省消防庁，2011，電気自動車用急速充電設備の安全対策に係る調査検討会.

【62】 何岩，2021，「电动汽车用锂离子电池安全性能检测浅析」，測試工具。

【63】 王義文，2013，「鋰電池熱爆炸之動力學機制建立」，燃燒季刊。

【64】 梁玉璇，2020，「新北市純電能車輛調查暨案例分析探討」，消防月刊。

【65】 T. Long, 2013, “Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results”, The Fire Protection Research Foundation.

【66】 何宜謙，2020，「細水霧對鋰電池火災之控制技術」，國立雲林科技大學碩士論文。

【67】 蔣皓靜，2021，「消费型锂离子电池安全试验研究浅析」，標準科學。

【68】 M. Egelhaaf., 2014, “Fire Fighting of Battery Electric Vehicle Fires”, Stuttgart.

【69】 李雨修，2019，「自動撒水系統應用在地下停車空間之研究-以機車防護為例」，國立交通大學碩士論文。

【70】 O. Willstrand et al., 2020, “Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles”, RISE Research Institutes of Sweden AB.

【71】 A. S. Böe, 2017, “Fullskala branntest av elbil,” SP Fire Research AS”, SPFR-rapport.

【72】 2010 ,“Safety requirements Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles—rules for bibliographic references and citations to information resources: IEC 62660-3”, The International Electrotechnical Commission.

【73】 2017, “Proposal for a new UN GTR on electric vehicle safety—rules for bibliographic references and citations to information resources: EVS-UN GTR”, Inland transport committee.

【74】 2015，「電動汽車用動力蓄電池安全要求及實驗方法，規則: GB/T 31485」，中華人民共和國國家品質監督檢驗檢疫總局。

【75】 Santhanagopalan S. et al., 2009, “Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell”, Journal of Power Sources.

【76】 TIAN J. et al., 2018, “Analysisof safety test and evaluation methods for lithium ion batteries”, Energy Storage Science and Technology.

【77】 邵慶，2020，「锂电池热失控预警机制设计」，內燃機與配件。

【78】 Gary Lougheed, 2015, “Electric Vehicle Fire Testing”, NRC-CNRC.

【79】 張金泉，2009，「模擬在鋰離子電池熱失控機制的應用」，工業材料雜誌。

【80】 Tobishima S. et al., 2000, “Lithiumion cell safety”, Journal of Power Sources.

【81】 Ohsaki T. et al., 2005, “Overcharge reaction of lithiumion batteries”.

【82】 S. Sriramulu., 2014, “Final Technical Report: Internal Short Circuits in Lithium-Ion Cells for PHEVs”, TIAX LLC.

【83】 FENG X. N. et al., 2019, “Key Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries”, Energy procedia.

【84】 D. H. Doughty, 2012, “Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance”, National Renewable Energy Laboratory.

【85】 Ruiz, V., 2018, “JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation - Workshop report: summary & outcomes”, Publications Office of the European Union.

【86】 徐雪春，2020，「淺析鋰離子電池火災危險性及撲救方法」，今日消防。

【87】 Watanabe., 2012, “Comparison of fire behaviors of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test”, National Institute of Police Science.

【88】 N. K. Reitan, 2016, “Brannsikkerhet og alternative energibarere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom,” SP Fire Research AS.

【89】 Abada S. et al., 2016, “Safety focused modeling of lithiumion batteries: A review”， Journal of Power Sources.

【90】 F. Larsson., 2017, “Lithiumion Batteries used in Electrified Vehicles - General Risk Assessment and Construction Guidelines from a Fire and Gas Release Perspective”, RISE Research Institutes.

【91】 P. Andersson, 2018, “Lion Fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea,” RISE .

【92】 周波，2012，「滅火劑的滅火類型及機理」，科技傳播。

【93】 WANG Q. S., et al., 2016, “The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppressing the lithium titanate battery fire”, Fire technology.

【94】 张青松等人，2017，「哈龙替代灭火剂抑制空运锂离子电池试验研究」，消防科学与技术。

【95】 LIU Y. J. et al., 2018, “Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing lithium-ion battery fires”, RSC advances.

【96】 陸春義，2004，「細水霧噴射系統及滅火機理研究」，南京理工大學。

【97】 LUO W. T. et al., 2017, “Research and development of fire extinguishing technology for power lithium batteries”, Procedia engineering.

【98】 Ndubizu C.C. et al., 1998,“On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame”,Fire Safety Journal.

【99】 宋健，2015，「机械通风和细水雾对地下停车库火灾轰燃的抑制作用」，瀋陽建築大學。

【100】郭超超，2020，「不同荷电状态下锂离子电池热失控释放气体特性研究」，科技創新與應用。

【101】GOLUBKOV A. W. et. al., 2014, “Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes”, RSC.

【102】B. Merci., 2013, “Smoke and heat control for fires in large car parks: Lessons learnt from research”, Fire Safety Journal.

【103】肖淑衡等人，2005，「地下车库火灾烟气运动的数值模拟」，安全與環境工程。

【104】張沁南，2014，「垂直升降类机械立体车库火灾模拟研究」，西華大學。

【105】鍾基強，2014，「建築機械通風與空調設備防火防煙性能基準及驗證研究」，內政部建築研究所。

【106】L. T. Wong, 2003, “Hazard of thermal radiation from a heated fire shutter surface to a standing person”, Building Services

Engineering Research and Technology.

【107】陳弘毅、紀人豪，2016，「火災學」，鼎茂圖書出版股份有限公司。

【108】Mohd Tohir., 2013, “Distribution analysis of the fire severity characteristics of single passenger road vehicles using heat release rate data, Fire Science Reviews.

【109】Roth E. P. et al., 2004, “Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells’’, Journal of Power Sources.

【110】朱正坤，2020，「車載鋰離子電池 SOC 預測及優化充電策略研究」，江西理工大學。

【111】鐘國彬等人，2019，「基於等效熱模型的鋰電池容量衰減特性研究」，電源學報。

【112】Kishimoto Y,. 2015, “Measurement method of current density in lithium-ion battery by using magnetic sensor, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers.

【113】Opan P. A., 2017, “State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) estimation on lithium polymer battery via Kalman filter, International Conference on Science and Technology-Computer.

【114】Shang L., 2014, “ Airborne battery SOC estimate method study based on discharge test method, Journal of Power Supply.

【115】Liu Y., 2013, “Dual estimation of lithiumion battery internal resistance and SOC based on the UKF”, International Congress on Image and Signal Processing.

【116】謝文強，2019，「遺傳演算法優化 BP 網路的鋰電池剩餘容量預測」，儀錶技術。

【117】陳德海，2020，「交互多模型無跡卡爾曼濾波演算法預測鋰電池」，儲能科學與技術。

【118】Yun jian Li., 2020, “Optimized charging of lithium-ion battery for electric vehicles: Adaptive multistage constant current – constant voltage charging strategy”, Renewable Energy.

【119】Huang J.W.,2009,“Fuzzy-control-based five-step Li-ion batterycharger”, International Conference on Power Electronics and Drive Systems.

【120】李文華，2018，「鋰電池五階段新型快速充電方法研究」，電源技術。

【121】袁臣虎，2019，「鋰電池四階段智慧充電方法的研究」，電源技術。

【122】鄒爭明，2020，「車載鋰離子電池快速充電策略研究」，江西理工大學。

【123】羅輯，2017，「老化鋰離子動力電池 Peukert 方程的適用性分析」，電源技術。

【124】Jiang J., 2014, “Evaluation of Acceptable Charging Current of Power Li-IonBatteries Based on Polarization Characteristics”, IEEE Transactions on Industrial Electronics.

【125】姚雷，2014，「鋰離子電池極化電壓特性分析」，北京理工大學學報。

【126】白雲光，2014，「鉛酸蓄電池脈衝快速充電過程優化及硫化故障的研究」，東北大學。

【127】靳啟源，2017，「鋰離子電池快速充電系統的設計」，湖南大學。

【128】曹翰林，2021，「车载锂离子电池健康状态估算方法研究」，湖北工業大學。

【129】Liu D., 2014, “Lithiumion battery remaining useful life estimation based on fusion nonlinear degradation AR model and RPF algorithm”, Neural Computing and Applications.

【130】Zhang H., 2020, “Echelon utilization of waste power batteries in new energy vehicles: Review of Chinese policies”, Energy.

【131】麻友良，2001「變電流下的電池荷電狀態定義方法探討」，電池。

【132】楊金石，2022，「我國電動車充電產業之發展與檢測」，中華水電冷凍空調月刊。

【133】2020，「12 月消防月刊」，內政部消防署

【134】孫克寧等，2022，「鋰二次電池原理、關鍵材料及應用」，北京化學工業出版社。

【135】何冠廷等，2019，「儲能發展的勁旅—鋰離子電池」，2019 年 5 月科學發展第 557 期，P.60。

網路資料

【A1】2017，「電芯主要三種類型」，網址：http://bangqu.com/6358Tc.html。

【A2】2018, “Porsche catches fire while charging”,網址:https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1429518/porsche-catches-fire-while-charging。

【A3】2018,“New Tesla car bursts into flames TWICE in a day with firefighters using 2000 gallons of water to battle blaze”, 網址：https://www.dailymail.co.uk/news/article-6519645/Tesla-car-catches-fire-3-times-one-day-firefighters-battle-blaze-2000-gallons-ater.html。

【A4】2019,“Tesla investigating explosion of car in Shanghai”,網址：https://www.shine.cn/news/metro/1904223436/。

【A5】2019,“BMW i8 Catches Fire In Europe Dealership, Gets Dropped In Huge Bath”, 網址：https://motorillustrated.com/bmw-i8-catches-fire-in-europe-dealership-gets-dropped-in-huge-bath/23440/。

【A6】2020，「高雄大樓地下室電動機車竄無名火」，網址：https://www.mir rormedia.mg/story/20200426soc021/。

【A7】2021，「喬治亞州服務中心 Tesla Model S 起火」，網址：https://auto.ltn.com.tw/news/18670/56。

【A8】 2022，「很難滅的火！特斯拉「鋰電池」燃燒消防花 20 噸水撲救」，網址：https://news.tvbs.com.tw/local/1543741。

【A9】 2021，「大陸比亞迪電動車「充電中起火」去年以來第三輛」，網址：https://udn.com/news/story/7333/5914104。

【A10】 2022，「TSRTC 一輛電動巴士充電時起火」.網址：https://telanganatoday.com/hyderabad-tsrtc-electric-bus-catches-fire-while-on-charging。

【A11】 2021，「電動車鋰電池爆炸起火！Gogoro 充電站火災事件頻傳」，網址：https://msntw.com/14879/。

【A12】 2022，「中和枋寮街電動車行凌晨大火！15 輛車「燒到剩骨架」，

網址：https://www.ettoday.net/news/20220313/2206980.htm。

【A13】 2022,“Electric car fire in central Brussels leads to restaurant evacuation”, 網址：https://www.brusselstimes.com/206288/electric-car-fire-in-central-brussels-leads-to-restaurant-evacuation。

【A14】 2022,「細水霧、防火毯和鋰電池專用滅火器，日熙防災介紹 3 種撲滅電動車火災的設備裝置及效能」，網址：https://news.u-car.com.tw/news/article/71804。

【A15】 日熙防災「VS.傳統撒水系統」，網站：http://www.rihsi.com.tw/chinese/products/edit.php?type=water&pid=2。

【A16】 日熙防災「VID 系統優勢」，網站：http://www.rihsi.com.tw/chinese/products/edit.php?type=water&pid=4。

【A17】 日熙防災「AVD 規格資訊」，網站：http://www.rihsi.com.tw/chinese/products/edit.php?type=fire&pid=3。

【A18】 2021,「比利時消防隊特製「車輛浴缸」！電動車起火直接變成泡水車！」，網址：https://www.supermoto8.com/articles/8459。

地下停車空間電池類火災之風險控制與換氣策略研究
出版單位：內政部建築研究所
電話：(02) 89127890
地址：新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓
網址：http://www.abri.gov.tw
編者：**欒中丕、鍾基強、王天志、陳佳玲、詹家旺、陳又嘉、黃祥志、陳進澤**
出版年月：111 年 12 月
版次：第 1 版
ISBN：978-626-7138-39-7（平裝）