

自動撒水系統對地下停車場電動車火災的滅火效能研究

Research on fire-extinguishing efficiency of an automatic sprinkler system for the electric vehicle fire in a underground parking lot

邱晨瑋 *

林尚瑩 **

蔡春進 ***

Chiu, Chen-Wei

Lin, Shang-Ying

Tsai, Chuen-Jinn

摘要

近年來氣候變遷加劇，為減少二氧化碳排放量，各國政府皆致力於推動運具電動化，國內電動車與充電樁數量正逐步增加，相較於傳統燃油車，電動車的電池系統一旦起火燃燒將釋放出大量有毒氣體和高溫，對消防人員和周圍環境造成嚴重威脅。

本研究主要探討電動車停放於地下停車空間，當電動車起火燃燒，如何設置自動撒水設備能有最大的滅火效益。本研究使用火災模擬軟體（Fire Dynamics Simulator, FDS）進行模擬，比較不同撒水系統設置方式對電動車火災之影響，分析密閉濕式與開放式撒水設備，在不同的防護半徑、放水壓力、放水量等條件進行比較，同時也分析依照 NFPA 規範設置的自動撒水設備及細水霧設備對於電車是否有足夠的滅火效能。

經電腦模擬，因電動車鋰電池放置於汽車底盤，且為避免車輛行駛時碰撞、震動等衝擊損害電池穩定性，故皆有加固與包覆，造成滅火水滴無法觸及燃燒面，燃燒熱釋率難以下降，使得自動撒水設備滅火效能減低。如不考慮電池遮蓋，採用開放式撒水設備並增加放水壓力，對於電動車滅火有較好之功效。霧滅火設備規劃參考。

關鍵字：電動車、鋰電池、自動撒水系統、地下停車空間、FDS

* 臺灣警察專科學校消防安全科教授，eswin.wei@gmail.com。

** 國立交通大學產業安全與防災學程碩士班，ch150361@gmail.com。

*** 國立交通大學環境工程研究所終身講座教授，cjtsai@nycu.edu.tw。

Abstract

In recent years, climate change has intensified, prompting governments worldwide to promote electrification of transportation to reduce carbon dioxide emissions. The number of electric vehicles and charging stations is gradually increasing. Compared to traditional fuel vehicles, electric vehicle battery systems release a large amount of toxic gases and high temperatures when they catch fire, posing a serious threat to firefighters and the surrounding environment.

This study primarily investigates the installation of automatic sprinkler system in underground parking spaces for electric vehicles to maximize fire extinguishing efficiency in the event of a fire. Fire Dynamics Simulator (FDS) software is used for simulation, comparing the effects of different automatic sprinkler system on electric vehicle fires. The study analyzes enclosed wet and open automatic sprinkler system under various conditions such as protection radius, water pressure, and water discharge. It also examines whether automatic sprinkler system and automatic mist system installed according to NFPA regulations provide sufficient fire extinguishing capability for electric vehicles.

Through computer simulations, it is found that lithium batteries of electric vehicles are placed under the vehicle chassis and are reinforced and covered to ensure stability and protect against impact and vibration during vehicle operation. This arrangement prevents water droplets from reaching the burning surface, resulting in difficulty in reducing the burning heat release rate and decreasing the fire extinguishing efficiency of automatic water spraying devices. However, without considering battery covers, using open water spraying devices and increasing water pressure proves to be more effective in extinguishing electric vehicle fires.

Key words: Electric vehicles, lithium batteries, automatic water spraying system, underground parking space, FDS

壹、緒論

一、研究動機

近年來，隨著氣候變遷全球暖化加劇，熱浪、寒潮、乾旱、洪災等極端氣候現象頻繁發生，造成社會經濟重大損失，極地冰川融化、海平面上升，更對人類生存帶來嚴峻挑戰。為了因應全球暖化，各國紛紛致力於節能減碳，以有效降低碳排放量，透過電力、化石燃料脫碳、運輸、建築、工業和循環經濟等六大領域積極制定相關減碳政策，而我國政府亦於 2022 年 3 月公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，以「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」等四大轉型，及「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎，輔以「十二項關鍵戰略」，就能源、產業、生活轉型政策預期增長的重要領域制定行動計畫，落實淨零轉型目標¹。

我國 2050 淨零排放路徑涵蓋建築、運輸、工業、電力及負碳技術等面向，透過減少化石燃料及開發再生能源，如：風力、太陽能、氫能等以實現能源轉型。在交通運輸方面，則是大力推動運具電動化，並以 2030 年市區公車及公務車全面電動化、2040 年電動小客車及電動機車市售比 100% 作為運具電動化的目標，進而達成 2050 淨零排放。隨著國內電動車數量持續增長，一旦發生電動車火災，其有別於傳統燃油汽車的能源型態與驅動裝置將產生特殊燃燒型態，不僅為消防機關帶來前所未有的挑戰，此新興火災類型也成為社會的一大隱憂。

¹ 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，行政院國發會，2022

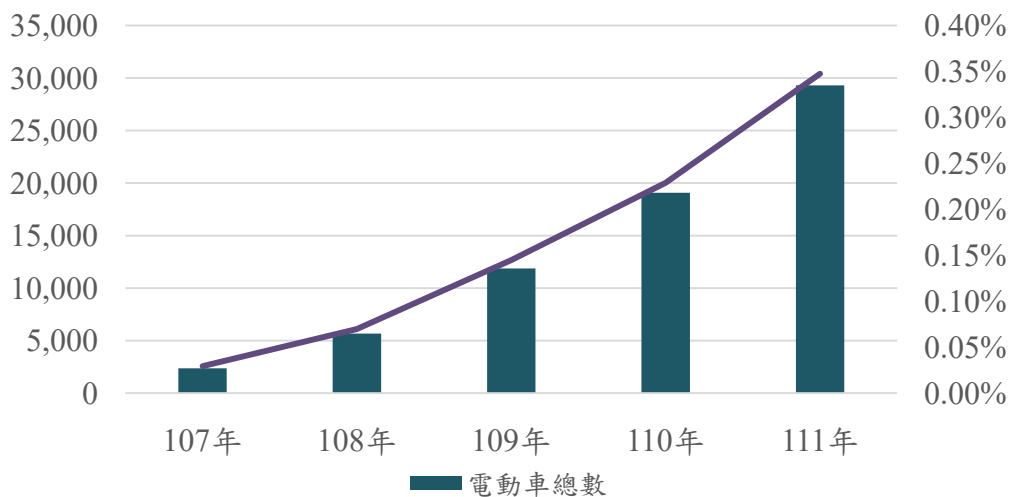


圖 1 國內近 5 年電動車數量與占比

資料來源：交通部公路局統計查詢網

電動車 (Electric Vehicle) 泛指具備電動機，以電能來驅動的車種。電能來源可以是蓄電池、太陽能、燃料電池 (Fuel Cell) 或油電混合動力 (Hybrid) 等，目前燃料電池 (Fuel Cell) 與太陽能所驅動的電動車，都處於概念車階段，尚未進入量產²。

國內電動車主要以電力做為車輛動力來源，同時配有電動機與蓄電池，又可依不同型態分為油電混合車及純電動車等種類。此外為了便於電動車充電，也需要提高充電設備的設置密度，內政部營建署為了加速國內電動車普及，於 2019 年修正建築技術規則建築設計施工編第 62 條³時，配合行政院 106 年 12 月 8 日核定之「電動機車產業創新躍升計畫」，規定新建建築物供停車空間之樓層，應依用戶用電設備裝置規則預留供電動車輛充電相關設備及裝置之裝設空間；住宅法於 110 年 6 月 9 日修正第 41 條第 4 款⁴，規範直轄市、縣（市）主管機關應主動辦理電動車輛充電相關設備之推動事宜。充電設備設置地點常見以戶外停車場、集合住宅、辦公大樓或百貨商場等地下停車場為主，然而電動車於充電時電池內部化學反應可能產生熱能，如充電不當火電池本身有缺陷將造成熱失控，產生高溫與可

² 陳帝鴻，不能輸在起跑點 擁抱綠能，搶進電動車，工業技術與資訊月刊，2009

³ 建築技術規則建築設計施工編第 62 條修正總說明，內政部，2019

⁴ 住宅法第 41 條，民國 110 年 6 月 9 日修正

燃性氣體進而導致火災。當電動車發生火災時，除了高溫與濃煙外，也會產生有毒氣體，且大多數電動車電池組位於車輛底部，一旦起火燃燒滅火水源無法有效觸及，燃燒的高溫亦會導致電池組內各單電池芯持續熱失控，而撲滅電動車火災需要大量水源，在以水滅火的過程中鋰電池的高壓電也會帶來導電風險，且滅火後還有極高機率發生復燃情形，造成消防搶救上的困難。國內近年來已發生多起電動自行車於自家車庫充電時不慎發生火災之案例，如何創造安全的使用環境攸關國內電動車推廣成效。「各類場所消防安全設備設置標準」為我國建築物消防安全設備的指導準則。該法令於民國 78 年制定，當時受限於技術水平和市場需求，國內電動車尚未普及。時至今日，政府將電動運具納入能源轉型的重要策略之一，藉由增加政策補貼、擴大充電基礎設施建設、推動電動車製造產業發展等措施，大幅提升了國內電動車數量。然而消防設備法令至今仍以燃油汽車作為室內停車空間設置滅火設備之防護對象，考量電動車與燃油汽車火災所產生的危害及滅火方式有所不同，又 113 年 4 月修正之各類場所消防安全設備設置標準，考量停車空間設置自動撒水設備具泡沫滅火設備同等效能，故放寬停車空間得選設自動撒水設備。有鑑於此，本研究將針對電動車火災危害、燃燒型態、滅火方式等進行研究探討，分析出較經濟有效之滅火設備設置方式，並將結果作為行政機關未來法令修正之建議，確保消防安全設備能夠更貼近實際需求。停車空間設置自動撒水設備具泡沫滅火設備同等效能

二、研究目的

本研究旨在探討停放在室內停車空間的電動車如發生火災時，應如何設置滅火設備才能有效降低災害損失提升建築物安全。為達成此目的，本研究將結合過往電動車燃燒實驗研究成果，並採用不同的撒水系統設置方式，利用電腦軟體 Fire Dynamic Simulation（簡稱 FDS）進行火災模擬，分析不同撒水設備配置方式對滅火效果之影響，期望能達到以下目的：

- （一）瞭解電動車與鋰電池火災可能的原因與產生的危害。
- （二）透過電腦模擬軟體評估室內停車空間電動車起火燃燒時，自動撒水設備能否有效防止火勢擴大，降低火災危害，並模擬分析最適當的設置方式，提升自動撒水設備的設置效益。
- （三）提供消防專技人員針對停放電動車之室內停車空間消防安全設備設計之參考。

(四) 就國內現行法令不足之處提出建議，作為行政機關實施消防管理之參考。

三、研究範圍及研究限制

(一) 研究範圍

1. 本研究對象為僅針對建築物地下停車空間，且樓地板面積在 200 平方公尺以上者。
2. 模擬起火燃燒之電動車為純電動車，即以蓄電池供電予電動機，由電動機提供動能行駛之汽車。

(二) 研究限制

1. 起火車輛為純電動車，不考慮油電混合車，且停車空間內只停放汽車，不考慮電動機車或充電自行車。
2. 模擬空間不包含頂樓停車空間、室內牆壁具有直接對外氣開口的停車空間及機械式停車。
3. 本研究模擬室內地下停車空間車輛停放方式，以同一平面式停車為限，不包含複層式停車。
4. 僅針對自動撒水設備動作後室內溫度的變化進行分析，不討論熱釋率變化。

貳、文獻探討

一、室內停車空間與電動車簡介

依據 111 年 11 月 30 日修訂之「停車場法」第 2 條⁵，明定「停車場」與「停車空間」名詞意義。停車場為依法令設置供車輛停放之場所；建築物附設停車空間係指建築物依建築法令規定，應附設專供車輛停放之空間。本次研究對象定義為建築物附設之室內停車空間。

電動車係指以電力作為主要動力來源之車輛。目前國內常見的電動車型態可概略分為純電動車 (Battery Electric Vehicle, BEV)、油電混合車 (Hybrid Electric Vehicle, HEV) 與插電式油電混合車 (Plug in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) 等，說明如下：

⁵ 停車場法，民國 111 年 11 月 30 日修訂

(一) 純電動車 (Battery Electric Vehicle, BEV) :

僅由車載電池模組提供動力驅動電動馬達，馬達的動力經由傳動系統驅動車輪，可完全取代內燃引擎亦不需設置油箱，故不會排放廢氣，目前純電動車充電一次可行駛的距離約在 200 至 300 公里之間。

(二) 油電混合車 (Hybird Electric Vehicle, HEV) :

油電混合車指同時配備電動馬達與內燃引擎的電動車輛，無法藉由外部電源充電，僅能透過再生煞車來回收動力。其優點在於內燃引擎的燃料添加方便且快速，可改善純電動車續航力不足或充電耗時的缺點。可依車輛運行狀況交互使用電力或燃油輸出動力，例如車輛剛啟動或低速行駛時，使用電動馬達輔助動力，減少引擎燃燒不良產生高油耗、高污染的缺點；中高車速因引擎效率較佳，則使用引擎驅動；爬坡、加速、高速行駛時，同時由引擎與馬達輸出動力，達到更佳效能，相較於傳統燃油汽車有更好的油耗表現，也更加環保。

(三) 插電式油電混合車 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) :

同時具備電動馬達與內燃引擎，其電池可儲存電力並可由外部電源充電。插電式油電混合車以電動模式啟動，依靠電力運行，當電池電量不足時，引擎開始為電池充電，從而延長電動續航里程。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引擎持續提供動力，兼顧使用成本、節能、環保與方便等特性。

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

增程式電動車是純電動車配備增程器 (Range Extender)，通常擁有電動機、電池組和內燃引擎發電機，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。增程式電動車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。

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

使用燃料電池的電動車，是由氫燃料電池作為電力能源，氫能電池使

用上只會排放H₂O，不會排放CO與CO₂，是所有電池中碳足跡最低者。氫能電池可透過加氫站或更換儲氫罐完成充電，與傳統燃油汽車加油所需的時間接近是其一大優點。燃料電池具有零碳排及高續航力優勢，性能足以媲美引擎車，是終極綠能車⁶⁷⁸。

二、電動車燃燒特性及危害

電動車火災與燃油車火災有不同的危害，其主要原因便是電動車的動力來源為鋰電池，而鋰電池一旦起火，具有下列危害：

(一) 熱失控 (Thermal runaway, 簡稱 TR)：

造成鋰電池熱失控的原因可概略分為三大類：機械濫用、電氣濫用及熱濫用。機械濫用指電池如受到撞擊、擠壓等外力衝擊時，電池內部隔膜受損而產生短路現象，使得電池溫度上升。電氣濫用則是由過度充、放電或外部短路所引起。而熱濫用則是電池處在高溫環境，造成電池持續升溫。熱濫用是直接導致熱失控的原因，電池所產生（接受）之熱量、超過其有效散熱能力，進而影響周遭電池持續升溫，可能造成燃燒或爆炸。

(二) 高溫、爆炸：

鋰電池具有高能量密度，一旦起火燃燒可能有噴射火 (Jet fire)，顯著加速火勢的蔓延並產生大量熱量，使得電池溫度急劇升高。而電池內部因化學反應產生的氣體有可能導致電池壓力上升，產生爆炸。

(三) 電能滯留 (感電)

鋰電池在燒損後仍有可能有電能滯留，並有短路的可能，一旦發生短路，電池溫度上升而產生復燃。

(四) 產生毒性、腐蝕性及易燃氣體

大多數電池在經歷熱失控燃燒後會產生氫氟酸(HF)、一氧化碳(CO)、

⁶ 陳彥豪、盧思穎，電動車發展趨勢與營運模式探討，台灣經濟研究院，2016

⁷ 饒中丕、鍾基強，地下停車空間電池類火災之風險控制與換氣策略研究，內政部建築研究所協同研究報告，2022

⁸ K. V. Vidyanandan, "Batteries for Electric Vehicles," Energy Scan: A House e-Journal of Corporate Planning, NTPC Ltd., vol. I (2019-20), no. 38, New Delhi, Jun 2019.

一氧化氮 (NO)、二氧化硫 (SO₂)、氯化氫 (HCl) 和氫氣 (H₂)、氰化氫 (HCN) 等具毒性、腐蝕性及易燃之氣體，另救災所產生之廢水亦具毒性 (氫氰酸)。(五) 電解液洩漏

電池內部可能有具腐蝕性的電解液，如鋰離子電池的乙醚、碳酸乙烯酯……等，其與空氣中的水蒸氣反應，將產生有害的酸性有機氣體⁹¹⁰¹¹。

三、電動車燃燒熱釋放率

熱釋放率 (Heat Release Rate, 簡稱 HRR) 是指火災或燃燒過程中每單位時間釋放的能量多寡，也是評估火災發展速度和火勢強度的重要指標之一，它通常以功率的形式表示，單位是瓦特 (W) 或兆瓦 (MW)。此外，熱釋放率也是設計火災安全系統和評估建築材料防火性能的重要參考指標之一，可用於規劃建築物的消防系統。

電動車燃燒的熱釋放率，目前尚無明確之數據。影響電動車熱釋放率的因素包含電池技術和能量密度。鋰電池種類繁多，依正負極所使用的材料不同可分為鋰鈷電池 (LiCoO₂)、鋰鎳鈷電池 (LiNiCoO₂)、鋰鎳電池 (LiNiO₂)、鋰錳電池 (LiMn₂O₄)、磷酸鋰鐵 (LiFePO₄) 電池等，而能量密度較高的電池具有較高的熱釋放率，因為它們在單位體積或質量下儲存了更多的能量，當發生熱失控反應時整體釋出的能量更多。此外，車型大小、車輛電池數量及充電狀態 (State of charge, 簡稱SOC)、車輛內裝材料等因素也會使燃燒熱釋放率有所不同，參考P. Sun¹²等人的研究，全尺寸火災測試中電動車輛的熱釋放率 (HRR) 列表，可得知電動車燃燒熱釋放率峰值 (Peak heat release rate, PHRR) 約在 4.2-7MW之間。

⁹ 消防人員救災安全手冊，內政部消防署

¹⁰ Benlong Liu, Yingying Su, Qiaoyang Deng, Song Jin, Yong Chen, Tiancheng Ouyang, "Reducing lithium-ion battery thermal runaway risk based on an integrated cooling strategy for electric vehicles," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 216, 2023

¹¹ Ouyang, Dongxu, Mingyi Chen, Que Huang, Jingwen Weng, Zhi Wang, and Jian Wang, "A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures," Applied Sciences, 2019

¹² Peiyi Sun, Roeland Bisschop, Huichang Niu, Xinyan Huang, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," Fire Technology, Vol. 56, 2020.

表 1 電動車燃燒實驗數據

Type	Vehicle	Weight before test [kg]	Battery or fuel capacity	PHRR [MW]	tPHRR [min.]	THRR[GJ]
BEV	2011 Nissan Leaf [94]	1520	24 kWh	6.3	40	6.4
	Unknown [95]	1122	16.5 kWh	4.2	~25	6.3
	Unknown [95]	1501	23.5 kWh	4.7	~20	8.5
	Vehicle 1A [91]	unknown	100% SOC	6	7	
	Vehicle 1B [91]	unknown	85% SOC	6	6	
	Vehicle 2 [91]	unknown	100% SOC	7	10	
	2014 Vehicle A [99]	1448	'Large' LIB 100 % SOC	6.0	7	
	2013 Vehicle A [99]	1475	'Large' LIB 80 % SOC	5.9	5.8	4.9
2013 Vehicle B [99]	1659	'Large' LIB 100 % SOC	6.9	10.2	4.7	

資料來源：Peiyi Sun, Roeland Bisschop, Huichang Niu, Xinyan Huang¹, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," Fire Technology, Vol. 56, 2020.

學者Brzezinska, D¹³的研究中，電動車的HRR可採用以下公式計算：

$$HRR = \dot{m} \times \Delta H_e = A_f \dot{m} \eta \Delta H_c \quad (\text{公式 1})$$

其中 \dot{m} 是由測試中的質量損失率決定的燃燒速率 (kg/s)； ΔH_e 為燃燒熱 (MJ/kg)； A_f 是燃料或火源的面積 (m^2)，即 EV 的面積； \dot{m}'' 為質量燃燒速率 (kg/m²-s)； η 為燃燒效率，取決於氧氣供應量； ΔH_c 是電動車電池的燃燒熱，它隨鋰電池的類型和 SOC 的不同而變化。

在 P. Sun 等人的研究中也提到，以鈦酸鋰 (LTO) 電池驅動的電動車為例，在充滿電階段，LTO 的平均熱通量 (q'') 約為 2.3MW/m²。這相當於相同燃燒面積的汽油和其他碳氫化合物液體燃料的 2~3MW/m²，考慮到普通電動車的佔地面積為 $AEV \approx 3 m^2$ ，這種電動車的平均火災 HRR 可以估算為 $HRR = A_{EV} q'' = 3 m^2 \times 2.3 MW/m^2 \approx 7 MW$ 。

另 O. Willstrand¹⁴等人的研究，針對使用不同類型電池的電動車及燃油汽車進行燃燒實驗，所獲得的燃燒曲線其最大熱釋放率約為 7 MW。

¹³ Brzezinska D, Bryant P, "Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions," Energies, 2022.

¹⁴ Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson, "Toxic gases from fire in electric vehicles," RISE Report 90, 2020.

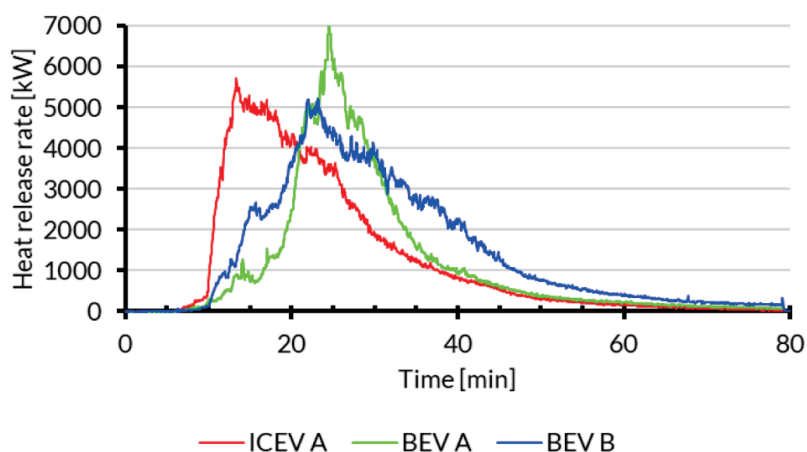


圖 2 電動車輛燃燒實驗熱釋率曲線圖

資料來源：“Toxic gases from fire in electric vehicles,” RISE Report

四、電動車滅火藥劑

學者S. Yuan¹⁵等人的研究中提到，關於鋰電池滅火藥劑的比較，分析海龍滅火藥劑、二氧化碳、七氟丙烷、C₆F₁₂O（Novec1230）、乾粉、水、泡沫等水性滅火藥劑，並以流動性、絕緣性、吸熱性、潤濕性、可生物分解能力、吸煙性和成本等指標分析，氣體滅火設備雖然能維持滅火後鋰電池的完整性，但降溫能力不佳，乾粉滅火劑雖然能避免導電危害，但會產生污染，而水劑滅火藥劑最為優良，水具有良好的降溫能力，且水具有低成本的優勢，但水仍有造成電池短路的風險。

表 2 各種鋰電池滅火藥劑比較表

滅火藥劑種類	降溫效果	絕緣性	吸煙性 (提高能見度)	成本	生物分解能力 (環境保護)
氣態滅火劑 (海龍滅火藥劑、七氟 丙烷、Novec1230)	較差	佳	差	高	差
二氧化碳	較差	佳	差	普通	差
乾粉	較差	佳	普通	普通	普通

¹⁵ S. Yuan, C. Chang, S. Yan, P. Zhou, X. Qian, M. Yuan, et al. “A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire,” Journal of Energy Chemistry, Vol. 62, Pages 262-280, 2021.

滅火藥劑種類	降溫效果	絕緣性	吸煙性 (提高能見度)	成本	生物分解能力 (環境保護)
水性滅火劑	佳	較差	較佳	低	佳

資料來源：文獻¹⁵及本研究彙整

五、電動車滅火所需水量

火災試驗表明，與傳統汽車相比，撲滅電動車火災需要更多的水和更長的滅火時間，各類型車輛所需滅火時間與滅火用水量統整如表 3。

表 3 車輛燃燒滅火所需用水量及滅火時間

類型	用水量	滅火時間
傳統汽車		5 分鐘內
混合動力汽車	1,040 - 4,010 升	15 - 56 分鐘
電動車	4,410 - 9,990 升	36 - 60 分鐘

資料來源：文獻¹⁶及本研究彙整

在滅火操作期間，可能會出現電動車電池復燃的情況，要徹底撲滅火災，必須冷卻電池，以免熱失控擴散到相鄰電池。

六、電動汽車火災案例

雖然目前國內電動車火災案例尚屬稀少，但已經有一些引人注目的案例。電動車於行駛中，如發生碰撞可能損壞電池系統或其他電子部件，造成火災。表 4 為目前國內所發生的電動車火災案例。

表 4 國內電動車火災案例

編號	發生日期	地點	案情簡述	資料來源
1	2020 年 4 月 1 日	桃園市龍潭區中正 路佳安段	特斯拉 Model 3 行駛 中自撞中央分隔島， 整輛車翻覆起火，造 成駕駛受困車內死 亡。	高宇震，桃園特斯拉愚人 節自撞分隔島起大火 23 歲駕駛受困死亡， 聯合新聞，2020 年 4 月 3 日，取自 https://video.udn.com/ne

¹⁶ N. K. Reitan and A. Bøe, "Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom," SP Fire Research AS, Trondheim, Norway, A16 20096-1:1, Feb. 2016.

編號	發生日期	地點	案情簡述	資料來源
				ws/1173079
2	2021 年 7 月 6 日	臺南市仁德區文賢路	特斯拉電動車自撞路旁民宅樑柱造成火燒車意外，消防隊員協助駕駛脫困，並送醫搶救。	吳俊鋒，台南仁德特斯拉撞民宅樑柱火燒車駕駛獲救昏迷，自由時報，取自 https://news.ltn.com.tw/news/society/breakingnews/3594436
3	2022 年 7 月 22 日	桃園市蘆竹區中正北路 326 號中正橋往桃園方向	行進間電動車輛撞上半島號誌桿後起火燃燒，駕駛及前座人員受傷，緊急送往醫院急救。	謝武雄，林志穎駕特斯拉桃園自撞半島起火父子受傷送醫，自由時報，2022/07/22，取自 https://news.ltn.com.tw/news/society/breakingnews/4000515
4	2024 年 3 月 16 日	苗栗縣獅潭鄉	車輛行經山區一處產業道路彎道直接衝下 10 米邊坡起火燃燒，駕駛逃出受輕傷，消防隊獲報花了一個小時才將火勢撲滅。	蔡文淵，苗栗特斯拉衝落 10m 溪谷！瞬間起火燃燒整輛車燒成廢鐵，ETtoday 新聞雲，2024 年 03 月 17 日，取自 https://www.ettoday.net/news/20240317/2701730.htm
5	2024 年 6 月 6 日	雲林縣國道中山高南下約 238K 處	車輛撞擊後由高速公路墜橋，車體斷裂起火燃燒，消防人員利用防汛擋板圍成水池將車輛置入其中降溫，避免復燃。此事共計造成車上 3 人 1 死 2 傷。	蔡佩旻，特斯拉起火超難滅！雲林勇消出招對決「救援神器」曝光 ETtoday 新聞雲，2024 年 6 月 7 日，取自 https://www.ettoday.net/news/20240607/2753909.htm

資料來源：本研究彙整

表 5 近年國外電動車火災主要案例

日期	地點	起火狀況
2019 年 2 月 8 日	賓夕法尼亞州	一輛停在車庫裡的特斯拉 Model S 著火了。兩個月後（4 月 8 日），同一輛車在調查期間再次起火
2019 年 4 月 21 日	中國	一輛特斯拉 Model S 在地下停車場著火併爆炸；總共有五輛汽車在火災中受損
2019 年 11 月 12 日	英國	2017 年的特斯拉 Model X 在充電時起火。確認電池組起火，起火原因是其中一個電池組模組受到撞擊
2019 年 7 月 26 日	加拿大	一輛 Kona Electric 在停在蒙特利爾的一個住宅車庫時著火。車子沒插電，起火引發爆炸，對附屬結構造成破壞
2019 年 7 月 28 日	韓國	Kona Electric 在充電時著火
2019 年 8 月 13 日	韓國	一輛 Kona Electric 在地下停車場充電時突然起火
2020 年 2 月 16 日	佛羅里達州	停在住宅車庫中的保時捷 Taycan 完全燒毀
2022 年 2 月	荷蘭	一輛 wroksragen 1.3 電動車地下停車場起火，地火時汽車處於靜止狀態
2024 年 5 月 16 日	中國福建	比亞迪電動車於汽車展示間發生火警，有 7 輛車完全被燒毀，其他車輛則是受到波及
2024 年 8 月 1 日	韓國首爾仁川市	一輛停在社區地下室的 Mercedes-Benz EQE350+ 自燃爆炸，造成大樓 140 多輛汽車損毀、23 人吸入過量濃煙送醫

資料來源：本研究彙整

七、鋰電池種類與安全問題

電動車的電池一般採用鋰電池，主要是鋰電池能重複充放電，且能儲存大量電能並長時間輸出大電流供電動機運轉，常見鋰電池種類分為以下幾種¹⁷：

（一）鋰鎳電池（LiNiO₂）：

鋰鎳電池的成本較低而且能儲存的電容量較高，但對於材料性能的一致性和再現性差，造成其製作過程困難，最嚴重的是依然有污染及安全性的問題。

¹⁷ 許家興，電動車電池類型與電池基礎介紹，車輛研測資訊，2009。

(二) 鋰鎳鈷電池 (LiNiCoO₂):

鋰鎳鈷電池是鋰鎳電池和鋰鈷電池的固溶體（綜合體），兼具鋰鎳和鋰鈷的優點，一度被產業界認為是最有可能取代鋰鈷電池的新正極材料，但是，鋰鎳鈷的循環壽命差、安全性不佳，需要有安全迴路的設計，若設計不良，容易因為使用或充電時間過長造成過熱現象，甚至爆炸起火，再加上鈷的價格高昂，成本居高不下，以致無法廣泛應用。

(三) 鋰錳電池 (LiMn₂O₄):

鋰錳電池的成本低且安全性比鋰鈷好很多，但循環壽命欠佳，且在高溫環境下有時甚至會出現錳離子溶出的現象，或造成自放電嚴重，導致儲能特性差。

(四) 磷酸鋰鐵電池 (LiFePO₄):

磷酸鋰鐵電池本身原料價格低而且磷、鋰、鐵存在於地球的資源含量豐富，沒有供料問題，同時磷酸鋰鐵的結構穩定，並且兼具環保及安全性，使用時也不會有燃燒爆炸危險。

目前電動車使用的鋰電池以磷酸鋰鐵電池 (LiFePO₄) 為主，其在性能與安全的表現符合需求，更重要的是它對生態環境不會造成傷害，所以是目前最具發展潛力的電池。

表 6 各類鋰電池比較

電池種類	化學式	性能	安全性	成本	污染性
鋰鎳電池	LiCoO ₂	電容量高	差	低	有
鋰鎳鈷電池	LiNiCoO ₂	循環壽命差、能量密度高、放電電壓高	差	較昂貴	有
鋰錳電池	LiMn ₂ O ₄	循環壽命差、電容量低、適合大功率放電、儲能效果差	尚可	低	較環保
磷酸鋰鐵電池	LiFePO ₄	循環壽命長、體積較大	高	低	較環保

資料來源：本研究彙整

根據Dr. K.V. Vidyanandan¹⁸發表的文章提到，鋰電池包含的安全問題有：

¹⁸ K. V. Vidyanandan, "Batteries for Electric Vehicles," Energy Scan: A House e-Journal of Corporate Planning, NTPC Ltd., vol. I (2019-20), no. 38, New Delhi, Jun 2019.

(一) 過度充電：

鋰離子電池的工作電壓和溫度範圍非常窄，安全電壓範圍在 2.3V（最小放電）到 4.2V（最大充電）之間。鋰離子電池的充電分為三個步驟：恆定電流充電（大量充電）、恆定電壓充電（飽和充電）和涓流充電。當鋰離子電池的電壓達到額定值（4.2V），並且充電電流下降到額定值的 3% 左右時，就被認為是完全充電。當達到設計容量後，過量的能量以滑流的形式強行進入電池時，就會發生過充電。鋰離子電池不能吸收過度充電。在達到完全充電（SOC：100%）後，即使是小的持續電流也會被強迫使用將導致電池電壓上升。當電池電壓達到 4.7V 左右時，電解質和溶劑會分解並形成可燃氣體。這些氣體的加壓導致電池膨脹，同時電池溫度升高，在最壞的情況下，可能導致爆炸和火災。

(二) 過度放電：

當電池放電低於規定的電壓下限時，就會出現所謂的過度放電。鋰離子電池的過度放電會導致陽極的銅質集電體的溶解。隨著時間的推移，這些銅會沉積在其他部件上，導致內部短路。這也導致了永久性的容量衰減或故障。

(三) 熱失控：

一旦電池溫度由於任何原因超過 60°C，就會引發許多副反應，如陽極的 SEI 層的分解。這些反應產生更多的熱量，加速進一步的反應，導致更多的熱量釋放。這就是所謂的熱失控，在這種條件下，電池溫度在很短的時間內迅速上升到 300-400°C 或更高，導致電池中的各種化學品熔化或汽化。

(四) 氣體演變：

鋰離子電池中氣體的產生主要是由於電解質的分解及其與正/負電極的反應造成的。氣體產生的數量將取決於電池的狀態。在正常的充電/放電迴圈中。氣體的釋放將是非常少的。然而，在正常情況下，如過充、過放、熱失控等，氣體的產生會增加，並可能導致增壓和爆炸。

(五) 樹枝狀生長：

鋰枝晶的生長導致容量下降，除了內部短路、產生高溫和電池爆炸或

起火外，還減少了壽命。

八、停車空間國內外法規

(一) 設置條件

國內室內停車空間滅火設備設置規範於《各類場所消防安全設備設置標準》第 18 條，該條文中針對停車空間型態、面積、樓層分別訂定應設置設備之種類，另對於外牆開口面積（常時開放部分）達該層樓地板面積百分之十五以上者，除惰性氣體及鹵化烴外之滅火設備得採移動式設置。

表 7 室內停車空間得設置消防安全設備種類一覽表

場所用途	樓層	面積	滅火設備種類					
			撒水	水霧	泡沫	二氧化碳或惰性氣體	鹵化烴	乾粉
汽車修理廠			○	○	○	○	○	○
室內停車空間	第一層	500 以上	○	○	○	○	○	○
	地下層或第二層以上	200 以上	○	○	○	○	○	○
	屋頂層	300 以上	○	○	○	○	○	○
昇降機械式停車場	不分樓層面積，可容納十輛以上者		○	○	○	○	○	○

註：停車空間內車輛採一列停放，並能同時通往室外者，得不受本表限制。

資料來源：本研究彙整

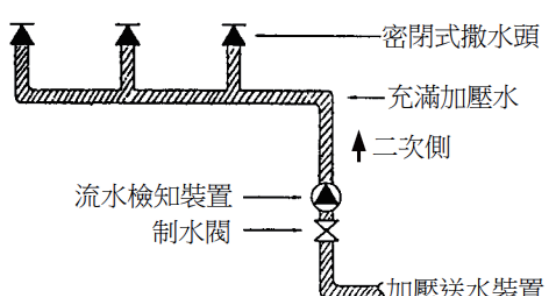
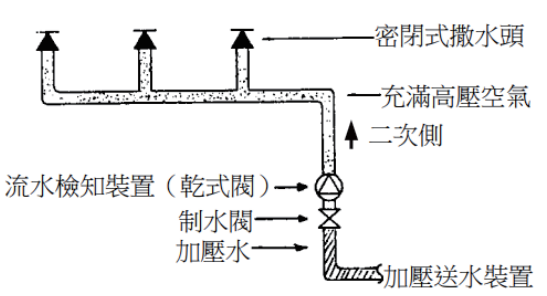
各類場所消防安全設備設置標準自民國 78 年訂定後，對於室內停車空間能選設之自動滅火設備種類僅有水霧滅火設備、泡沫滅火設備、二氧化碳滅火設備及乾粉滅火設備，直至 113 年修法時，因考量現今車輛動力來源可概略分為燃油與電力，燃油車較適合使用泡沫滅火，電動車則較適合使用大量水滅火，且參酌內政部建築研究所 110 年度「停車空間以自動滅火設備替代泡沫滅火設備之可行性研究」研究結論顯示，室內停車空間設置自動撒水設備已具有泡沫滅火設備同等滅火效能，且在歐洲、美國多是採用撒水設備，為因應臺灣 2050 淨零排碳路徑及策略規劃 12 項關鍵戰略計畫之運具電動化及無碳化政策，因此進行修法，改變建築物附設停車場

滅火藥劑及方式。

(二) 配管型式

自動撒水設備是利用加壓送水裝置將建築物消防水池內的水，透過預先配置之消防配管送到各樓層，配管末端連接撒水頭，當撒水頭因高溫動作時，可快速放出加壓水進行滅火。依《各類場所消防安全設備設置標準》第 43 條規定，國內自動撒水設備的配管型式可分為四種，各型式配管詳細說明如表 8。

表 8 撒水設備配管型式一覽表

配管類型	說明	示意圖
密閉濕式	國內最常見的配管型式，利用幫浦將水加壓，使撒水配管內充滿具有壓力之水，當密閉式撒水頭因高溫破裂時，可立即放射散水滅火。	
密閉乾式	流水檢知裝置二次側充滿高壓空氣，一次側則是由加壓送水裝置提供具有壓力之水，當密閉式撒水頭因高溫破裂時，先將二次側空氣排出，繼而撒水滅火。此類配管方式多是設於低溫場所，以避免水結凍。	

配管類型	說明	示意圖
開放式	<p>一齊開放閥二次側與大氣連通，當感知元件（自動火警探測裝置或感知撒水頭）偵測到火災發生時，將訊號傳至電磁閥，電磁閥動作開啟一齊開放閥後，配管內的水及透過撒水頭放射。本型式可同時讓同一放射區域內的多顆撒水頭一起放射，產生大水量以達到較佳的滅火效能。通常設於火載量大、可能快速延燒之場所。</p>	
預動式	<p>一齊開放閥二次側平時充滿低壓空氣，當感知元件（自動火警探測裝置或感知撒水頭）偵測到火災發生時，將訊號傳至電磁閥，電磁閥動作使一齊開放閥一次側的水流入二次側預先充滿配管，當撒水頭受高溫破裂，可立即放射滅火。</p>	

資料來源：文獻¹⁹及本研究彙整

(三) 撒水頭防護距離

國內法令對於撒水頭設置間距及防護面積並無相關規範，亦無要求撒水密度，而是以撒水頭最大防護水平距離為規範，如表 9。

¹⁹ 吳玉祥，消防工程，三版，五南圖書出版股份有限公司，臺北市，民國 99 年。

表 9 撒水頭最大防護水平距離

場所分類		任一點至撒水頭之水平距離 (m)	
		防火構造建築物	其他構造建築物
一般場所	一般反應型撒水頭 (第二種感度)	2.3 公尺以下	2.1 公尺以下
	快速反應型撒水頭 (第一種感度)	2.6 公尺以下	2.3 公尺以下
特定場所	戲院、舞廳、夜總會、歌廳、集會堂等表演場所之舞臺及道具室、電影院之放映室或儲存易燃物品之倉庫	1.7 公尺以下	
	汽車修理廠、室內停車空間及升降機械式停車場	2.1 公尺以下	
	高架儲存倉庫設在天花板或樓板之撒水頭	2.1 公尺以下	
	高架儲存倉庫設在貨架之撒水頭	一、2.5 公尺以下，並以交錯方式設置。 二、儲存棉花類、塑膠類、木製品、紙製品或紡織製品等易燃物品時，每 4 公尺高度至少設置 1 個；儲存其他物品時，每 6 公尺高度至少設置 1 個。 三、儲存之物品會產生撒水障礙時，該物品下方亦應設置。 四、設置符合規定之防護板。但使用經中央主管機關認可之貨架撒水頭者，不在此限。	

資料來源：本研究彙整

(四) 放水量及放水壓力

依各類場所消防安全設備設置標準，撒水頭放水量及放水壓力如表 10。

表 10 撒水頭放水壓力一覽表

對象		放水量	放水壓力
一般場所		80 l/min 以上	1 kgf/cm ²
高架倉庫		114 l/min 以上	
小區劃型撒水頭		50 l/min 以上	
放水型撒	設於一般場所	5 l/min·m ²	

對象		放水量	放水壓力
水頭	設於儲存可燃物場所	10 l/min·m ²	

資料來源：本研究彙整

(五) 水源容量

有關密閉濕式及開放式自動撒水設備水源容量，應符合規定數量撒水頭連續放水 20 分鐘，如表 11、表 12。

表 11 密閉濕式撒水頭水源容量

各類場所		撒水頭數量	
		快速反應型	一般反應型
十一樓以上建築物、地下建築物		12	15
十樓以下建築物	供第十二條第一款第四目使用及複合用途建築物中供第十二條第一款第四目使用者	12	15
	地下層	12	15
	其他	8	10
汽車修理廠、室內停車空間及昇降機械式停車場		15	
高架儲存倉庫	儲存棉花、塑膠、木製品、紡織品等易燃物品	24	30
	儲存其他物品	16	20

資料來源：本研究彙整

表 12 開放式撒水頭水源容量

各類場所	樓層	放水區域
供第十二條第一款第一目使用場所及第二目集會堂之舞臺	在 10 層以下建築物之樓層	在最大放水區域全部撒水頭
	在 11 層以上建築物之樓層	在最大樓層全部撒水頭

(六) 國外法令

在地下停車空間滅火設備以設置自動撒水設備為主，對於電動車停放之地下停車場在消防法令上較無特殊規定，僅對於電動汽車充電電源和插座有特殊規範。

表 13 國外室內停車空間相關規範

國家	相關規範
挪威	<p>於停車庫、停車場和地下停車場，當總樓地板面積大於 1200m² 時，應設置火災報警系統。或者，也可以安裝自動撒水系統。</p> <p>如果每層停車場的牆面開口超過 1/3，並且頂層停車面低於平均地面高度的 16 公尺，且開口位置設置良好以實現良好的通風，則仍然可以建造無需火災報警系統或自動撒水系統的停車場。</p>
美國	<p>美國國家消防協會在數年前已發布了 NFPA 88A 《停車場結構標準》。該標準將停車場區分為露天停車場、至少有兩個開放面的停車場和封閉停車場。對於封閉停車場，要求需設置撒水系統，而對於露天結構，天然通風可被視為足夠減少火災蔓延的風險。</p> <p>隨著近年車輛材料改變，汽車製造商迫於滿足政府規定的燃油效率和安全最低要求，有條不紊地將金屬部件更換為新型耐用塑料，以使車輛更輕、更安全、更防鏽且更便宜，此一改變意味著現代車輛比老式車輛有更大的火災危險。因此在 2023 年 NFPA 88A 停車結構標準第 6.4.1 節開始要求所有新停車均應設置消防撒水裝置進行全面保護。這將包括開放式和封閉式結構，無論大小如何，但不會影響已建成的現有停車結構。</p> <p>對於停車場中的撒水系統，參考了 NFPA 13 《撒水系統安裝標準》。幾十年來，NFPA 13 撒水系統安裝標準技術委員會一直將停車場列為普通危險第一類（Ordinary Hazard Group 1），但為了解決現代汽車火災，重新修訂相關分類，2022 年將汽車停車場和陳列室從普通危險 1 提高安全標準為普通危險第 2 組（Ordinary Hazard Group 2）。</p>
英國	<p>英國車庫設施的建築規定在《核准文件 B，第 2 卷：住宅以外的建築物》（Approved Document B. Volume 2: Buildings other than dwellings）。</p> <p>一般而言，對停車場的滅火系統沒有特殊要求，但要求結構必須使用不燃材料建造。防火要求主要基於通風以減少熱煙的蓄積，從而降低火勢蔓延的風險。該法規區分了停車場的三種通風配置：開放式、自然通風和機械通風。</p> <p>在 2018 年，英國引入了新的法律，涉及電動汽車的充電，《2018 年自動化和電動汽車法》。該法案描述了公共充電站基礎設施的組織要求，但未涉及停車設施的技術要求。</p>

資料來源：文獻²⁰及本研究彙整

²⁰ Are W. Brandt and Karin Glansberg, "Charging of electric cars in parking garages," RISE-report 2020:30. Trondheim, Norway 2020

參、研究方法與模擬情境

一、研究流程及研究方法

本研究探討當電動車停放於地下停車空間發生火災時，如何適當地設置自動撒水設備以有效滅火。研究方法使用電腦模擬軟體，探討不同情境下自動撒水設備對電動車滅火效能的影響，並分析出最佳的設置方式。

二、PyroSim 及 FDS 介紹說明

本研究所使用的電腦軟體包含 Fire Dynamics Simulator、Pyrosim 及 Smokeview。

Fire Dynamics Simulator，簡稱FDS，是由美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standard and Technology, NIST）所研發，為計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）的一種火災場模式電腦模擬軟體，軟體的核心是 Navier Stokes 方程組，用於解析熱驅動的低速流場，著重在煙流及熱傳遞的現象，同時也可模擬撒水頭動作，計算撒水後火場溫度、煙流等變化。²¹

PyroSim 是由美國的 Thunderhead Engineering 公司所開發，專門設計用來輸入 FDS 的模擬數據和建立模擬場景的前端程式。它提供了直觀的圖形化使用者介面，讓使用者在建立模型的過程中能更輕鬆地確認模型的正確性。此外，PyroSim 的設計介面也方便使用者設定火災模擬的各項參數，無需直接輸入程式碼。

Smokeview 是一款用來顯示 FDS 輸出數據的可視化軟體，能以圖形化的方式展示 FDS 計算的結果。它可以以二維或三維形式呈現燃燒物、室內溫度、煙流動、撒水設備動作情形等狀況，讓使用者能根據需求有效地分析 FDS 模擬的結果。

本研究所使用的 Pyrosim 版本為 2023.2.0816 版，其運算架構版本為 FDS 版本 6.8.0 版。

三、模擬區域模型建置及參數說明

本研究場景為某住宅大樓的地下停車空間，四周無直接面對戶外之外氣流通開口，該場所設有電動樁可供電動車停放充電，也可停放燃油汽車，車輛在停放時皆採同一平面停放，無機械式停車位。透過電腦模擬軟體分析不同的撒水頭設

²¹ 邱晨瑋，夜店火場重建模擬驗證分析之研究，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，民國 104 年。

置情況，來模擬電動車起火燃燒的情境，藉以找出最適合之設置方式。

表 14 模擬場景基本資料

項目	設定說明
場所用途	室內停車空間
樓層位置	地下 4 層
場景尺寸	52.5M*55.70M*3.2M
該樓層樓地板面積	3902.03m ²
該防火區劃面積	2968.67m ²
電動車停車位數量	12 格 (全部停車位 74 格)
停車格尺寸	5.5m (長) * 2.5 (寬)
樓層高度	3.2m
火源 (最大熱釋放率)	7MW
模擬時間	1800 秒

資料來源：本研究彙整

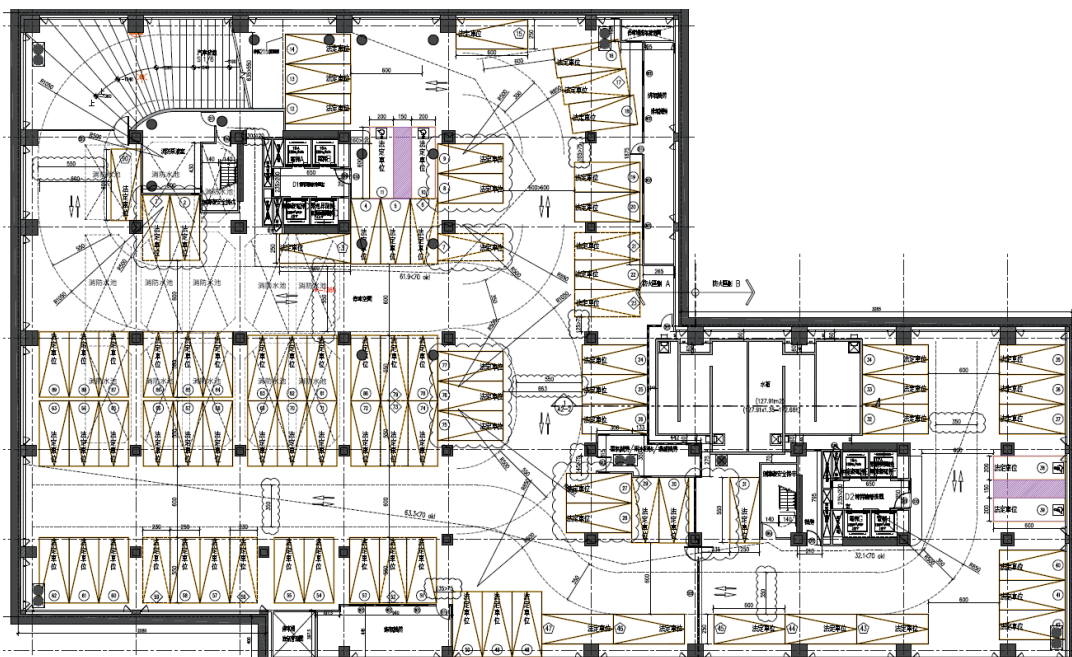


圖 3 模擬場景平面圖

資料來源：本研究取得

本次模擬是在住宅大樓室內停車場的最底層地下四層進行，停車場的設計是讓電動車和燃油汽車交錯停放。電動車停放在該樓層靠近中央的位置，所有電動車輛都位於同一區塊（如圖 3 紅框所標示），但彼此不相鄰，與燃油汽車相互穿插排列。環境溫度設置為攝氏 20 度，停車場的牆壁是由混凝土材料建造的。在圖 8 中，標示有 EV 的停車格是供電動車停放並充電的位置，其餘的車格則可供燃油汽車停放。

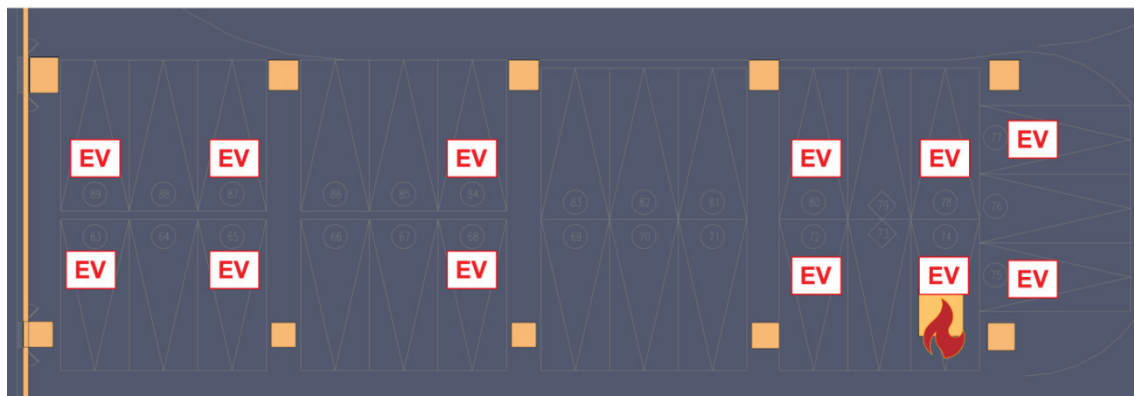


圖 4 電動車停車位置平面圖

資料來源：本研究繪製

本次模擬是將車輛以未發動、靜止狀態停放在室內停車場中，由於鋰電池故障產生高溫而發生起火燃燒，車輛車型為自用小客車。

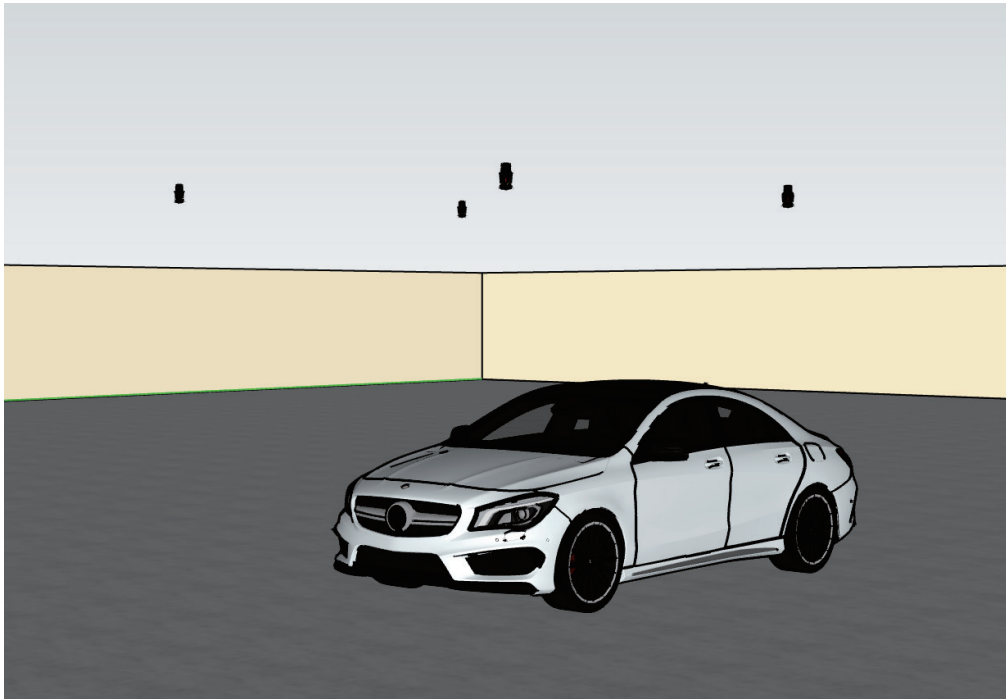


圖 5 模擬空間示意圖

資料來源：本研究繪製

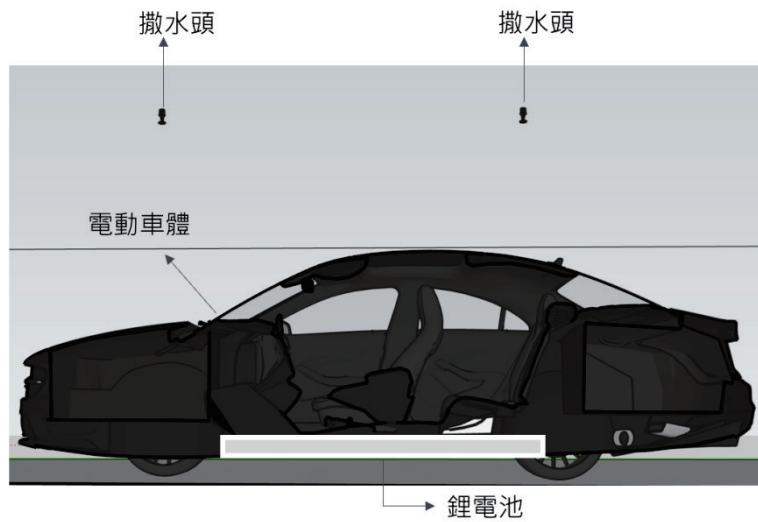


圖 6 模擬車輛剖面圖

資料來源：本研究繪製

依據 RISE 瑞典研究院的實驗結果所得到的熱釋放率曲線如圖 11 所示，其最

大熱釋率達到 7MW。本研究以 BEV A 車輛在燃燒實驗中的熱釋放率曲線作為火源設定。曲線描繪了各時間點的熱釋放率數值，並持續將熱釋放率維持在 7MW，不考慮火勢減弱的情形。這樣的設定讓我們能近似模擬火勢的發展情形。

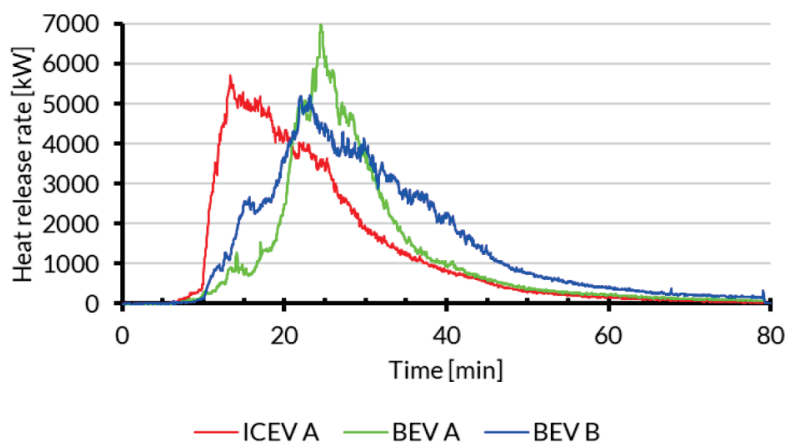


圖 7 電動車燃燒熱釋放曲線

資料來源：文獻²²

在燃燒面積上，考量各電動車車型和廠商不同而有差異，本研究參考市售電動車實際所配置之鋰電池，設定長 1.78 公尺、寬 1.63 公尺、高 0.155 公尺作為模型尺寸，如圖 8。

²² Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson, "Toxic gases from fire in electric vehicles," RISE Report 90, 2020.

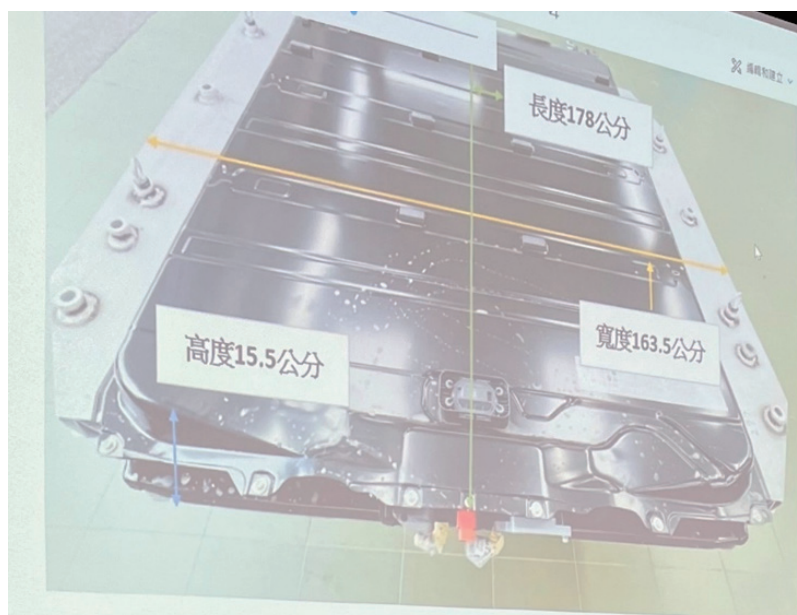


圖 8 電動車鋰電池

資料來源：本研究取得

在燃燒反應參數設定中，其燃料則參考Andrii Gavryliuk²³等人發表之《特斯拉S在封閉停車場發生火災時之安全距離》研究，利用特斯拉S燃燒生成物換算其等效燃燒物，燃料中所含之C（碳原子）、H（氫原子）、O（氧原子）、N（氮原子）等元素之佔比依序為C（碳原子）1.9、H（氫原子）40、O（氧原子）2.6，CO排放量為0.015，煙塵排放量為0.098。

在 Pyrosim 用戶手冊中提到網點尺寸設定的計算公式如下。

$$D^* = \left[\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (\text{公式 2})$$

D*：火源特徵直徑（m）

Q：火災熱釋放率（kW）

ρ_0 ：流體密度（kg/m³）

C_p ：環境空氣比熱（kJ/(kg·K)）

T_0 ：環境溫度（K）

²³ Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., Tur, N., “Determination of fire protection distances during a Tesla Model S fire in a closed parking lot,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023

格點尺寸採 $0.1\sim 0.2D^*$ 時模擬可較精準，本研究電動車熱釋放率為 7MW，環境溫度攝氏 20 度，格點尺寸建議採 20.9cm~41.8cm。本研究在網點設定方式，因模擬空間較大，考量誤差、軟體運行能力與模擬所需時間，採用 $80\times 80\times 80\text{cm}$ 作為網點之大小，其中火源區場景(中央 400 平方公尺處)則局部加密，以 $40\times 40\times 40\text{cm}$ 作為網點之大小，如圖 9 所示。

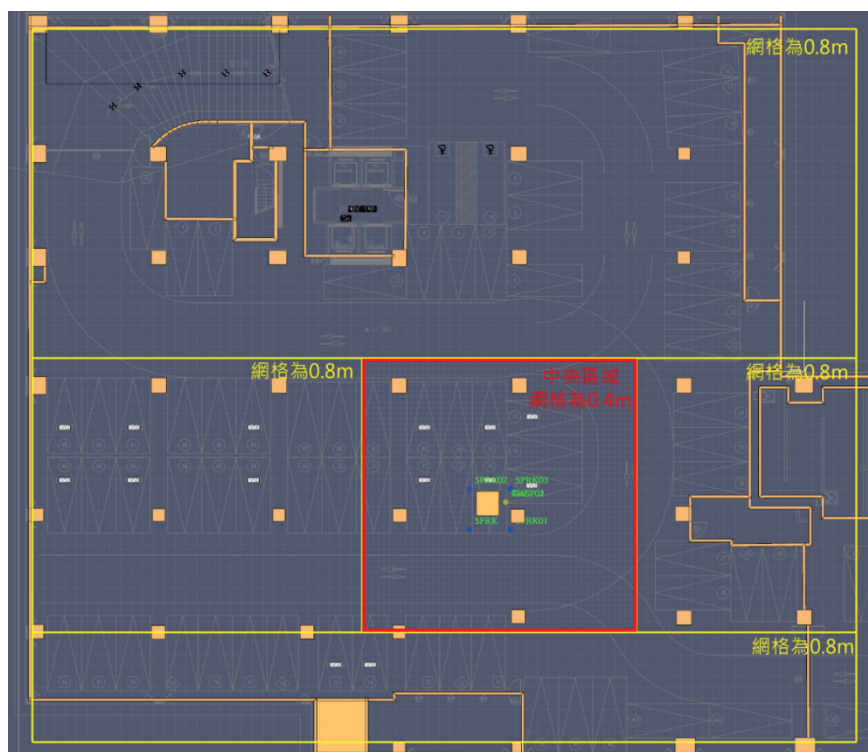


圖 9 網點尺寸設定

資料來源：本研究繪製

本研究的溫度測量點設於模擬空間內距離起火電動車水平距離 0.5 公尺處，其中一個測量點高度在接近該樓層最高處樓板的 3.2 公尺處，此量測點測得之溫度約為室內最高溫度。另一個測量點設在距離地面為 1.8 公尺處，用以撒水頭放射後室內溫度變化與起火溫度對人員避難及火災搶救人員的影響，如圖 10。

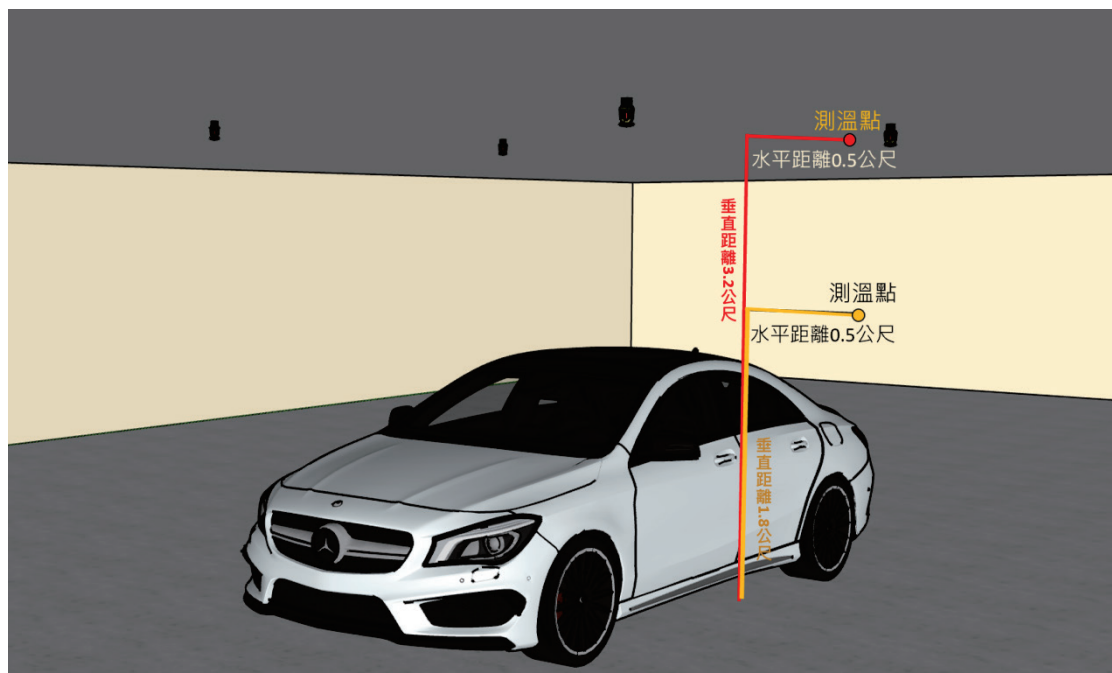


圖 10 室內溫度量測點設定

資料來源：本研究繪製

在各種型式之自動撒水設備中，國內以「密閉濕式」使用最為普遍，而「開放式」則與現行國內地下停車空間設置之泡沫滅火設備動作原理相同，於同一放射區域內所有撒水頭可同時放射，具有瞬間放水量大之特性，此外細水霧設備則為近來各國針對電動車火災考慮使用之滅火設備，水霧滅火特性可避免感電危害，國內用於變電站等電力設施，故細水霧對於電動車應具有滅火效果並可防止感電危害。

在情境設定部分，影響撒水頭滅火效能之因素如下：撒水設備管系型式、動作溫度、放水量、K 值、放水壓力、RTI (Response Time Index) 值、防護半徑等。故本研究將分別模擬「密閉式」及「開放式」自動撒水設備及細水霧滅火設備不同之放水量、放水壓力、防護半徑、RTI 值、動作溫度等變數進行研究。

表 15 撒水設備模擬情境

項目	配管型式	動作溫度 (°C)	放水量 (l/min)	K 值	放水 壓力 (kgf/cm ²)	RTI	防護 半徑 (m)	備註
1	未設置滅火設備							
2	密閉濕式 撒水設備	68	80	80	1	42	2.1	現行法規
3		68	80	80	1	42	1.7	參照設置 標準第 46 條
4		68	114	114	1	42	2.1	參照設置 標準第 50 條高架倉 庫
5		68	139	80	3	42	2.1	
6		68	179	80	5	42	2.1	
7		68	放水密 度 8.1 l/min·m ²	80	0.5	42	噴頭 間距 2.64m	參照 NFPA 13
8		開放式 撒水設備	差動式 一種 (+30°C)	80	80	1	42	2.1
9	80			80	1	42	1.7	
10	114			114	1	42	2.1	
11	139			80	3	42	2.1	
12	低壓細水 霧設備	57	65	19	<12.1bar	<50	噴頭 間距 3.6m	粒徑 300µm 實際案例
以下情境不考慮電動車鋰電池遭遮蓋								
13	密閉濕式 撒水設備	68	80	80	1	42	2.1	現行法規
14	開放式 撒水設備	差動式 一種 (+30°C)	80	80	1	42	2.1	現行法規
15			114	114	1	42	2.1	
16			139	80	3	42	2.1	
17			179	80	5	42	2.1	

資料來源：本研究彙整

四、模擬情境設計

(一) 情境 1：電動車燃燒情形

本研究模擬情境 1 為一輛電動車在地下停車空間燃燒，且該空間未設置任何自動滅火設備，作為後續撒水設備放射滅火情境對照。考量一般自小客電動車之電池設於車底盤，不直接暴露於空間中，故將火源設於起火物下方。

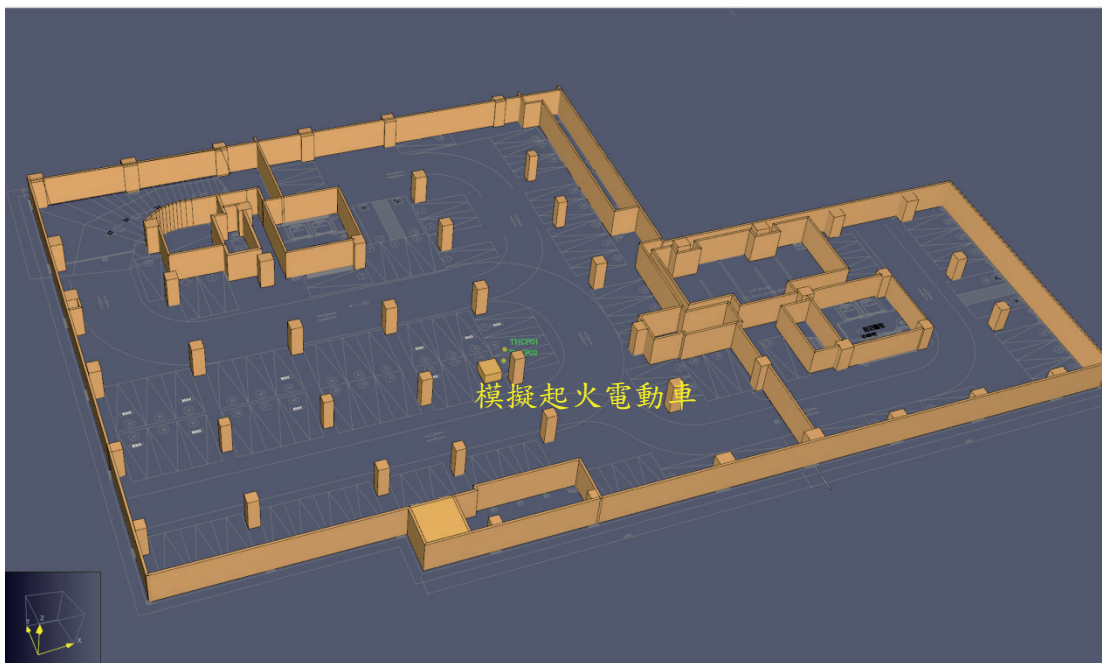


圖 11 模擬情境示意圖

資料來源：本研究繪製

(二) 情境 2 至 7：密閉濕式撒水設備

依據《各類場所消防安全設備設置標準》第 46 條、第 48 條、第 50 條及第 52 條規定，情境 2 模擬以國內法令為基礎，將放水量、放水壓力及任一點至撒水頭之水平距離（又稱防護半徑）設定在法規值的下限，另查詢撒水頭型式認可及實務設計，大多採用動作溫度 68°C 快速反應型撒水頭，RTI 值為 42。情境 3 是比較防護半徑縮減，以提升單位面積放水量（又稱放水密度，單位 $l/min \cdot m^2$ ）時，對火災之影響，本情境防護半徑參照國內法令室內停車空間撒水頭防護半徑應在 2.1 公尺以下，調整為國內法令針對

表演場所之舞臺或儲存易燃物品倉庫等易擴大延燒場所防護半應在 1.7 公尺以下。情境 4 為比較國內對於高架儲存倉庫另訂有增加放水量之規定，故採放水量 114 l/min，情境 5 及情境 6 是依照公式 3 增加放水壓力同時提升放水量。情境 7 則是參照美國 NFPA 13 規範室內停車場自動撒水設備設置規定。

$$Q=K\sqrt{P} \quad (\text{公式 3})$$

Q：放水量 (L/min)

P：放水壓力 (kgf/cm²)

K：流量特性係數

(三) 情境 8 至 11：開放式撒水設備

開放式撒水設備為管系平時內無水，透過火災探測器偵測到火災發生時，連動一齊開放閥放水。本次研究情境 8 為國內法令最低設計值，情境 9 為比照高架儲存倉庫增加放水量，情境 10 為縮減防護半徑，增加單位面積放水量，情境 11 為提升放水壓力，並與密閉濕式撒水系統互相比照，研究不同配管型式在相同放水量、放水壓力、防護半徑等放射條件下，對滅火效能之影響。

(四) 情境 12：細水霧滅火設備

參照國內地下停車空間實際設置之細水霧滅火設備，模擬實際放射時對火災之滅火效能。

(五) 情境 13 至 17：不考慮電動車鋰電池遭車體遮蓋之影響

電動車鋰電池大多安裝於汽車底盤，且為避免碰撞、震動產生危險皆會完整包覆，造成起火燃燒時自動撒水設備啟動所放射水量無法直接觸及燃燒表面。本研究情境 13 至 17 則是模擬不考慮電動車體遮蓋的狀況，讓自動撒水設備放射水量可直接觸及鋰電池表面進行滅火降溫，並比較車體遮蓋對電動車滅火之影響。

肆、研究結果與討論

一、熱釋放率與燃燒溫度

模擬起火車輛燃燒之熱釋放率與時間如圖 12，在地下停車空間場景，單一電動車起火燃燒在 1200 秒進入燃燒最盛期，熱釋放率達到 7MW，產生的瞬間熱釋放率最大峰值為 8.096MW，發生時間為燃燒後第 1654 秒。

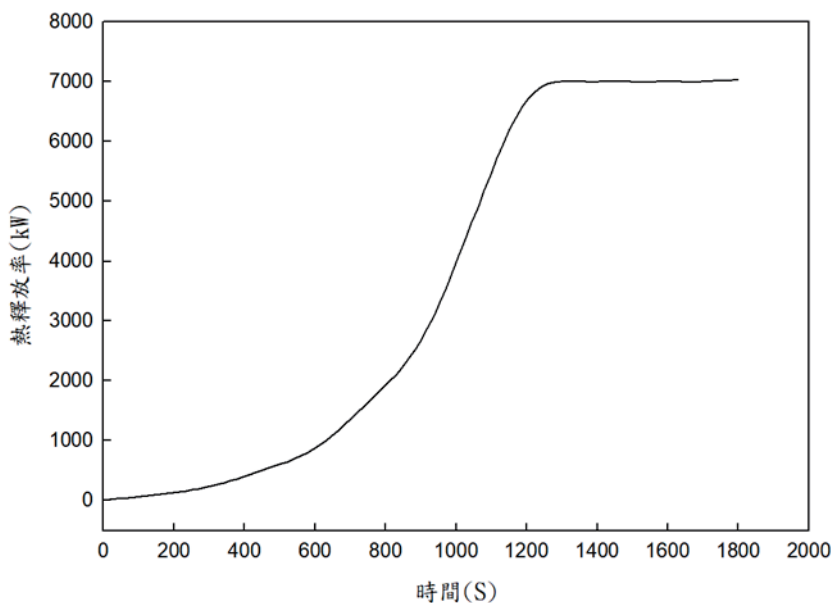


圖 12 電動車在地下室燃燒之熱釋放率時間曲線圖

資料來源：本研究繪製

將溫度量測點設在距起火車輛水平距離 0.5 公尺處，並分析高度 3.2 公尺處及高度 1.8 公尺處的溫度變化差異如圖 13。在高度 3.2 公尺處測量到的瞬間最高溫度是攝氏 804 度，發生在燃燒開始後的第 1191 秒，在高度 1.8 公尺處測量到的最高溫度是燃燒開始後的第 1431 秒，量測到的溫度是攝氏 798 度，已經達到可能發生閃燃的 600 度。因為模擬空間為密閉空間，僅有少量空氣流通，故可看到燃燒溫度隨室內氧氣濃度變化呈反向關係，在燃燒最盛期階段，溫度呈現先下降後再上升，主要是因為當室內氧氣量下降到一定程度時，火勢發展減弱，等到空氣持續流動氧氣濃度再增加時，燃燒轉趨旺盛。

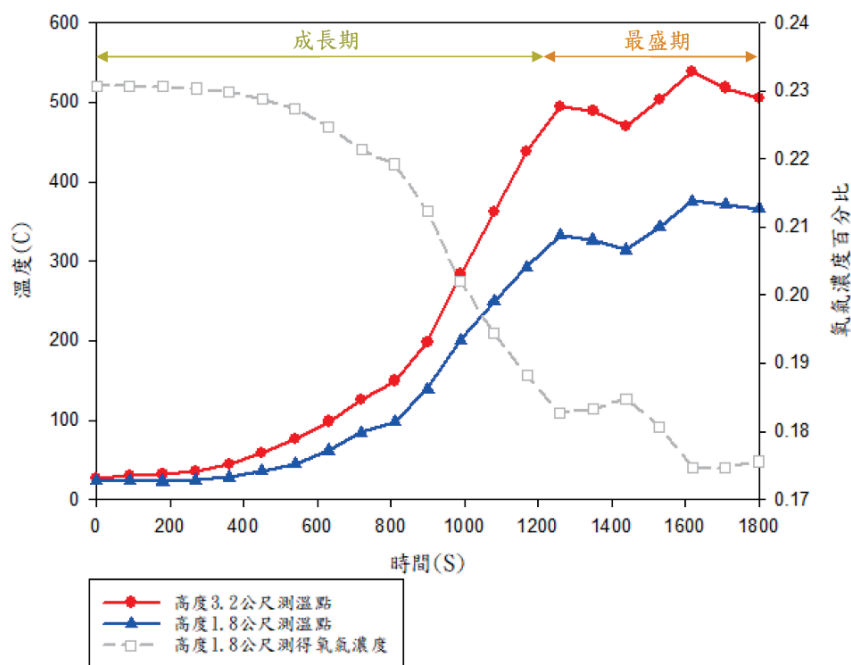


圖 13 模擬情境溫度與時間關係圖

資料來源：本研究彙整

火災於 1200 秒到達最盛期，後因地下停車空間為密閉式建築物，氧氣量減少，溫度下降後再上升。本研究以高度 1.8 公尺測溫點進行自動撒水降溫效果之比較分析。

二、密閉濕式撒水設備對燃燒之影響

本研究情境 2 至情境 7 為模擬密閉濕式撒水設備在不同動作溫度、放水密度、放水量、放水壓力下對燃燒產生之影響，另外情境 8 為參考國外 NFPA 13 標準，探討在國外法規中，是否能對電動車有較好之滅火效果。

(一) 國內法規

情境 1 是依國內法規採用最低標準，放射壓力在 1 kgf/cm^2 ，放水量在 80 L/min ，防護半徑取 2.1 公尺，動作溫度 68°C ，RTI 值 42 之條件下，進行模擬，電動車四周設置 4 顆撒水頭，量測距地面高度 1.8 公尺的溫度。

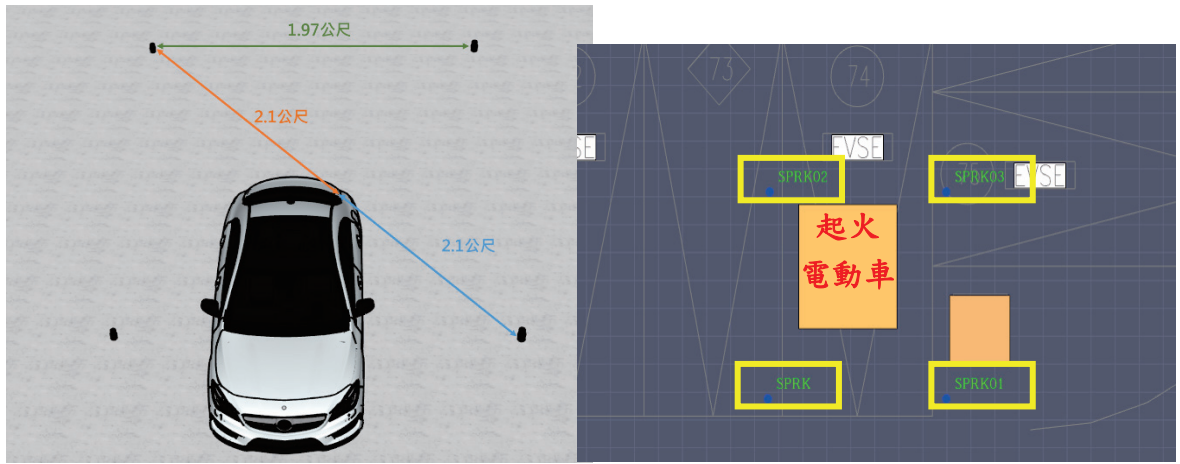


圖 14 模擬情境撒水頭配置情形

資料來源：本研究繪製

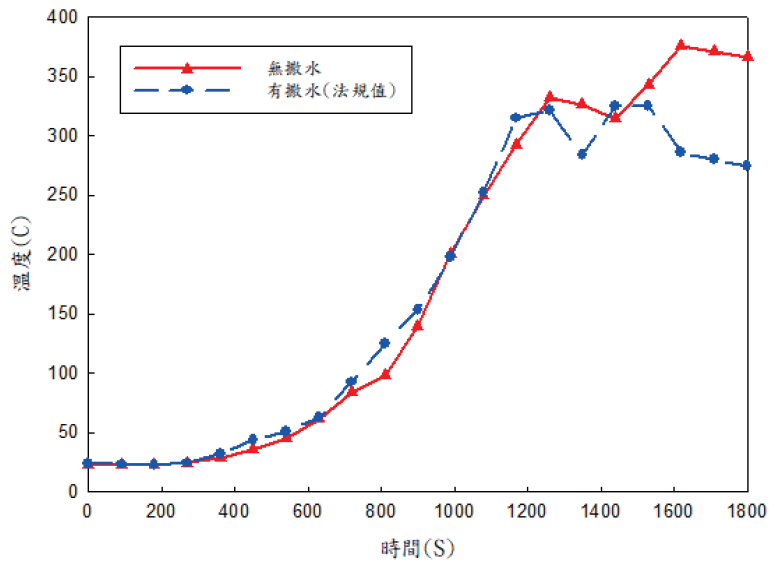


圖 15 密閉濕式撒水頭放射時間與溫度曲線圖

資料來源：本研究彙整

在火災成長期 0 至 1200 秒間，撒水頭是否動作對溫度變化影響不大，於到達 1200 秒後燃燒進入最盛期，設置撒水頭能降低室內溫度，在 1800 秒時有無設置撒水設備室內溫度大約相差 100 度。

(二) 增加撒水密度

將防護半徑由 2.1 公尺縮減成 1.7 公尺，單位面積放水密度由 9.07l/min 提升至 13.89l/min。

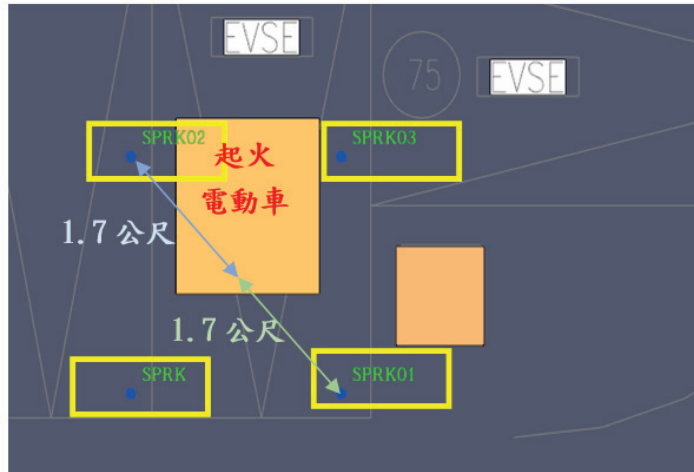


圖 16 模擬情境撒水頭配置情形（防護半徑 1.7 米）

資料來源：本研究繪製

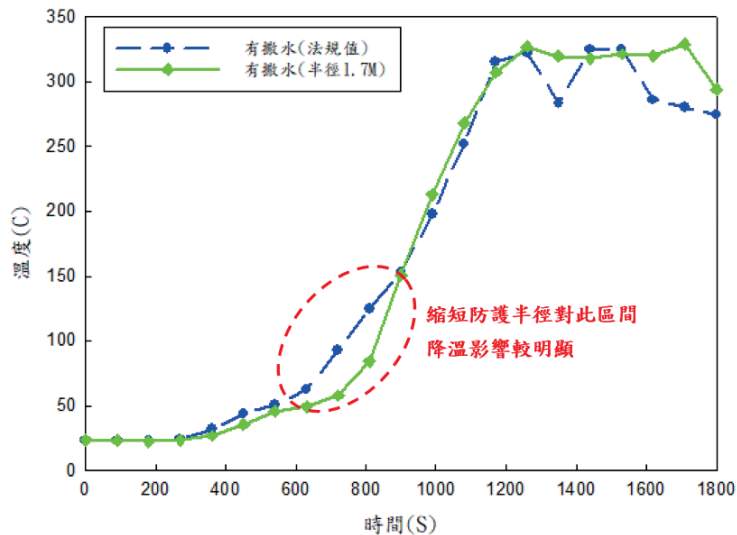


圖 17 密閉濕式不同撒水半徑溫度曲線

資料來源：本研究彙整

提升撒水密度對室內溫度變化的影響主要在火災成長期，縮短防護半徑使撒水頭動作時間提早，動作時間在 491 秒至 646 秒，故在 600 秒至 900

秒間內以防護半徑 1.7 公尺的設置方式溫度較低，但當燃燒進入最盛期，經比較兩者對於室內溫度變化差異不大，提升撒水密度對於電動車火災室內溫度變化已無顯著影響。

(三) 增加放水量

將各撒水頭放水量由 80l/min，提升至比照高架倉庫 114l/min。不同放水量撒水頭動作時間略有不同，但對於整體室內溫度變化差異不大。

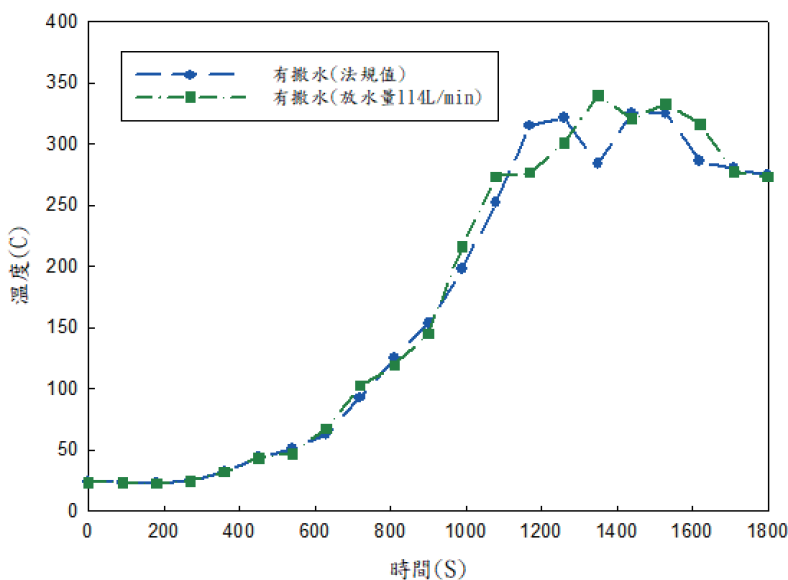


圖 18 密閉濕式不同放水量溫度曲線

資料來源：本研究彙整

(四) 增加放水壓力

比較撒水頭放水壓力增加對室內溫度變化，設定撒水頭壓力分別為 11kgf/cm²、3kgf/cm² 及 5kgf/cm²。

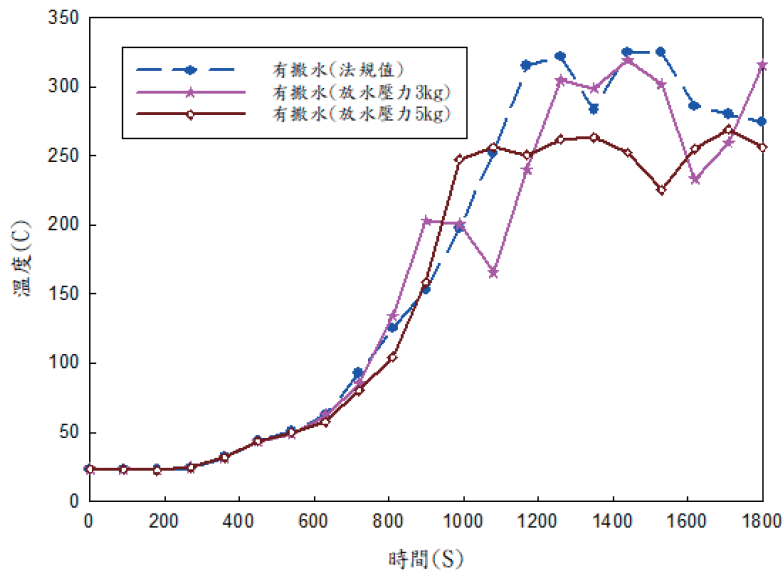


圖 19 密閉濕式不同放水壓力溫度曲線

資料來源：本研究彙整

在不同放射壓力下，可以看出隨著壓力增加，降溫效果亦有提升，在放水壓力 5kg/cm² 時，室內溫度最高約在 250 度左右。

(五) 國外法規

在NFPA 13²⁴的法令中，停車空間屬於普通危險二級，依照下圖曲線，在防護面積 139 平方公尺時撒水密度應為 8.1 (L/min) /m²，放水壓力採用 0.5kgf/cm²，RTI值 42，K值 80，分析室內溫度變化。

²⁴ NFPA, NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems, 2022

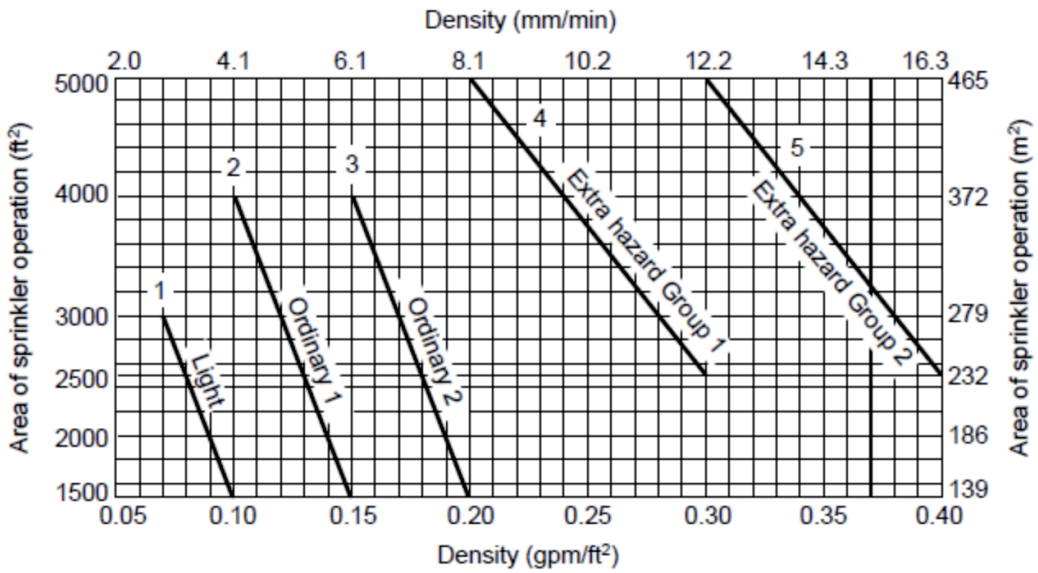


圖 20 NFPA 13 撒水防護面積與放水密度關係圖

資料來源：NFPA 13

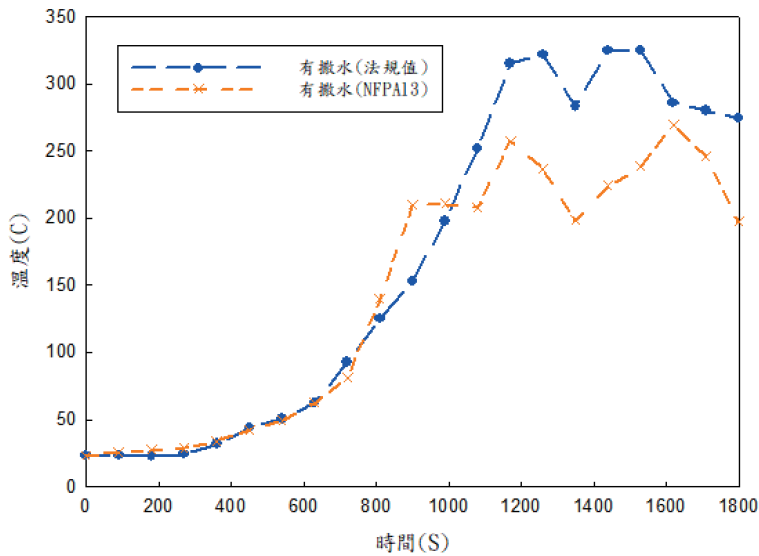


圖 21 NFPA 13 撒水放射溫度曲線

資料來源：本研究彙整

依 NFPA 13 設置的撒水頭在火勢成長期，降溫效果不如依國內密閉濕式法令設置的撒水頭，但在接近燃燒到達最盛期時，其降溫效果則明顯優於國內法規密閉濕式設置之撒水頭。

(六) 小結

設有撒水設備之情境，其室內燃燒後溫度皆低於未設置撒水設備之情境，顯見撒水設備對於起火空間內有降溫冷卻效果。綜合比較分析各密閉濕式撒水頭設置方式對溫度變化的影響，可看出以撒水設備動作初期對溫度影響不大，於燃燒最盛期後，影響較明顯。分析燃燒達最盛期（1200 秒至 1800 秒之間），1.8 公尺處的平均室內溫度如表 16。

表 16 密閉濕式撒水設備不同放射條件下室內平均溫度

撒水頭設置條件	室內平均溫度 (°C)
無設置撒水設備	345.12°C
依國內法規設置	303.35°C
放射半徑縮小至 1.7 公尺	324.7°C
放水量提升至 114 l/min	310.4°C
放水壓力提升至 3kgf/cm ²	290.39°C
放水壓力提升至 5kgf/cm ²	255.39°C
依美國 NFPA 13 規範設置	234.30°C

資料來源：本研究彙整

在放水壓力增壓的行情下，降溫效果有提升，另依照 NFPA 13 規定設置之密閉濕式撒水設備，滅火效能亦優於國內法規。

三、開放式撒水設備對燃燒之影響

本研究情境 8 至情境 11 模擬以差動式 1 種探測器連動一齊開放閥同時讓起火電動車周遭 4 顆撒水頭放射。比較開放式撒水設備在不同放射半徑、放水量、放水壓力等條件下，對室內溫度變化之影響。

(一) 國內法規

依照國內現行法令，採開放式撒水系統放射壓力在 1 kgf/cm²，放水量在 80 L/min，防護半徑取 2.1 公尺，動作溫度 68°C，RTI 值 42，並採用差動式一種探測器連動一齊開放閥之條件下，觀察對室內溫度變化之影響。

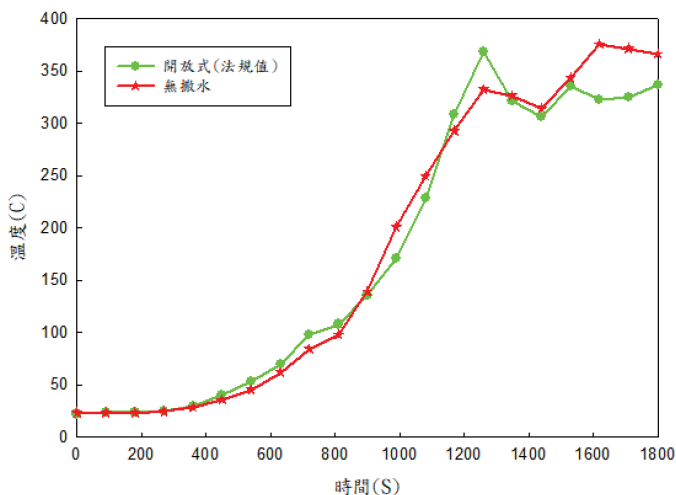


圖 22 開放式撒水頭放射時間與溫度曲線圖

資料來源：本研究彙整

開放式撒水設備撒水頭動作時間皆在 423 秒，撒水頭放射初期對室內溫度變化影響不大，至燃燒後期有較明顯之降溫，與無設置撒水設備約相差 50 度。

(二) 增加撒水密度

將防護半徑由 2.1 公尺縮減成 1.7 公尺，單位面積放水密度由 9.07l/min 提升至 13.89l/min，對室內溫度變化影響如下圖：

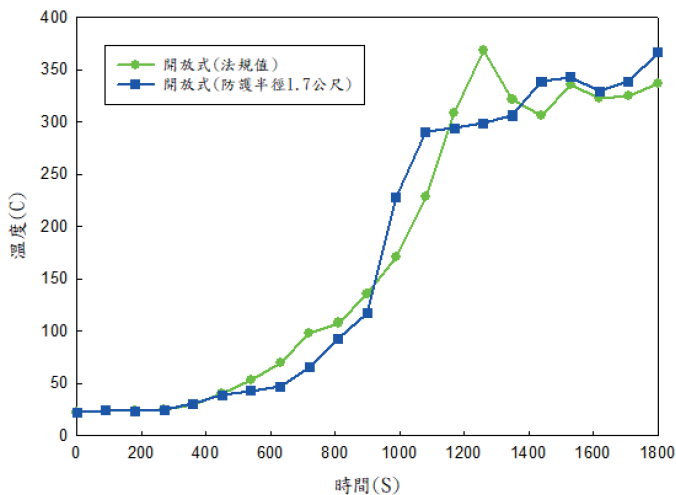


圖 23 開放式不同撒水半徑溫度曲線

資料來源：本研究彙整

調整撒水頭防護半徑，增加單位面積放水量，在撒水頭剛動作時有較好之降溫效果，隨著熱釋放率持續增加，其降溫效果與設置防護半徑 2.1 公尺撒水頭相差不大。

(三) 增加放水量

將開放式撒水頭放水量由 80l/min，提升至比照高架倉庫 114l/min，對室內溫度變化如下：

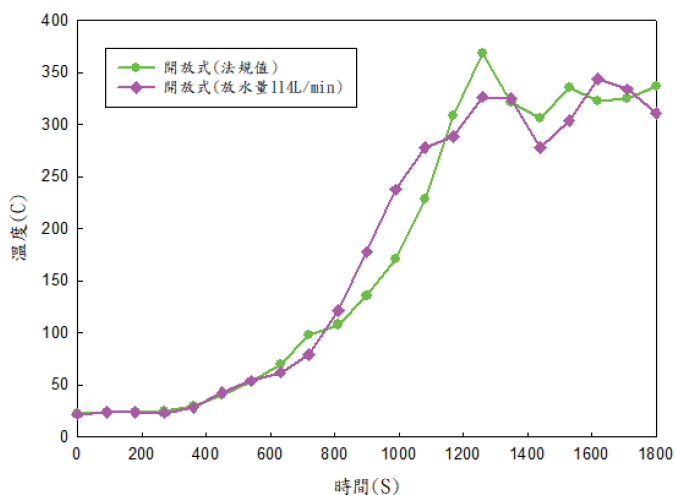


圖 24 開放式不同撒水半徑溫度曲線

資料來源：本研究彙整

在設置開放式撒水設備的室內空間，放水量增加對於室內溫度變化影響不大。

(四) 增加放水壓力

比較撒水頭放水壓力增加對室內溫度變化，設定撒水頭放水壓力分別為 11kgf/cm²、3kgf/cm²。

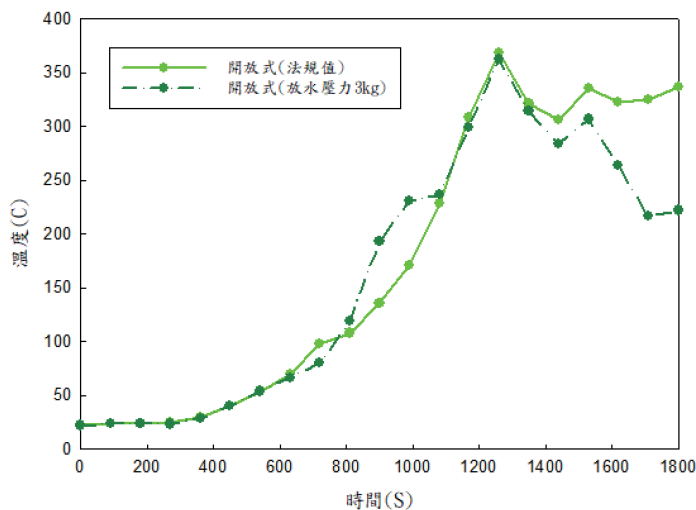


圖 25 開放式不同放水壓力溫度曲線

資料來源：本研究彙整

當放水壓力提升至 3 kgf/cm² 時，依照公式 $Q = K\sqrt{P}$ 放水量增加為 139 l/min，此時室內降溫效果較 1 kgf/cm² 佳。

(五) 小結

分析開放式撒水設備之對室內降溫情形，有設置開放式撒水設備室內燃燒後溫度皆低於未設置之情境，顯見撒水設備對於起火空間內有降溫冷卻效果。綜合比較分析各開放式撒水頭設置方式對溫度變化，可看出以撒水設備動作初期對溫度影響不大，於燃燒最盛期後影響較明顯。分析燃燒達最盛期（1200 秒至 1800 秒之間），1.8 公尺處的平均室內溫度如表 17，以增加放水壓力對降溫效果有顯著增加。

表 17 開放式撒水設備不同放射條件下室內平均溫度

撒水頭設置條件	室內平均溫度 (°C)
無設置撒水設備	345.12°C
依國內法規設置	333.12°C
放射半徑縮小至 1.7 公尺	326.81°C
放水量提升至 114 l/min	318.53°C
放水壓力提升至 3kgf/cm ²	286.1°C

資料來源：本研究彙整

四、密閉濕式與開放式對燃燒影響之比較

進一步探討自動撒水設備採用不同配管型式對於室內降溫效果是否有差異。分別就密閉濕式及開放式針對國內法規（情境 2 與情境 8）、增加撒水密度（情境 3 與情境 9）、增加放水量（情境 4 與情境 10）及增加放水壓力（情境 5 與情境 11）互相比較，圖 26 為法規值之比較、圖 27 為防護半徑 1.7 公尺之比較、圖 28 為放水壓力 3 公斤之比較、圖 29 為放水量 114 l/min 之比較，可以看出不論選用密閉濕式或開放式，在不同放射條件下，對於室內降溫效果差異不明顯。

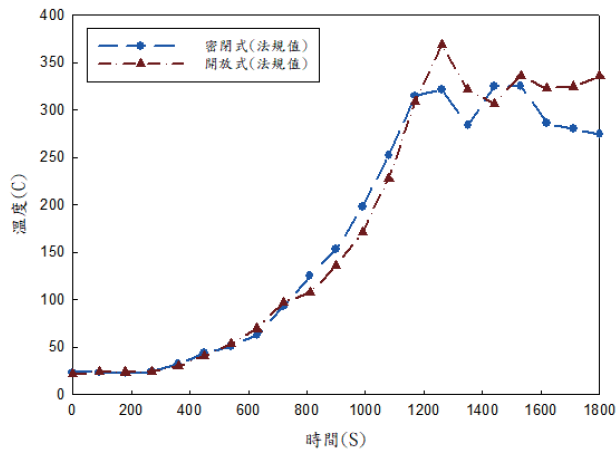


圖 26 密閉濕式與開放式在法規值下的溫度曲線

資料來源：本研究彙整

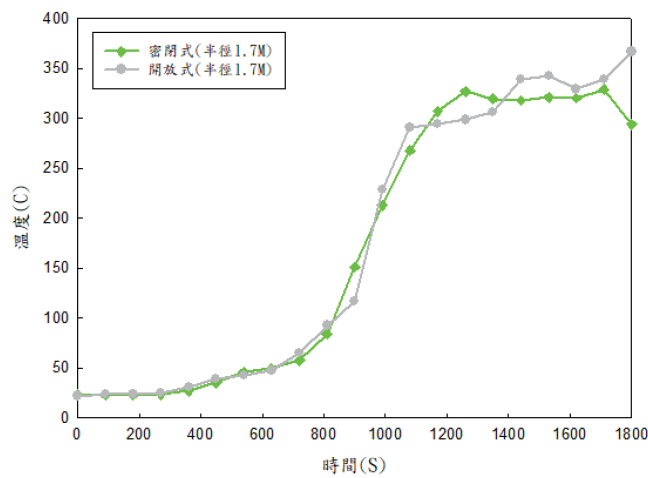


圖 27 密閉濕式與開放式在放射半徑 1.7 公尺下的溫度曲線圖

資料來源：本研究彙整

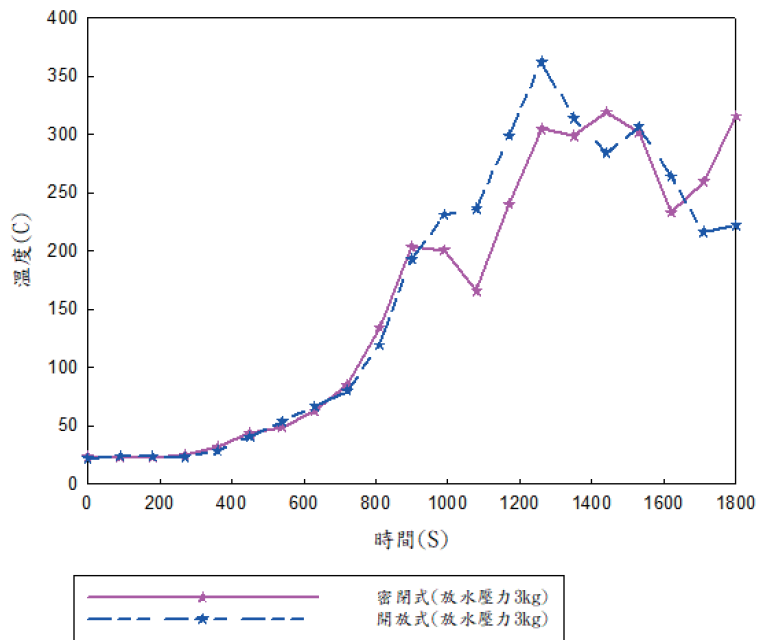


圖 28 密閉濕式與開放式在放水壓力 3 公斤下的溫度曲圖

資料來源：本研究彙整

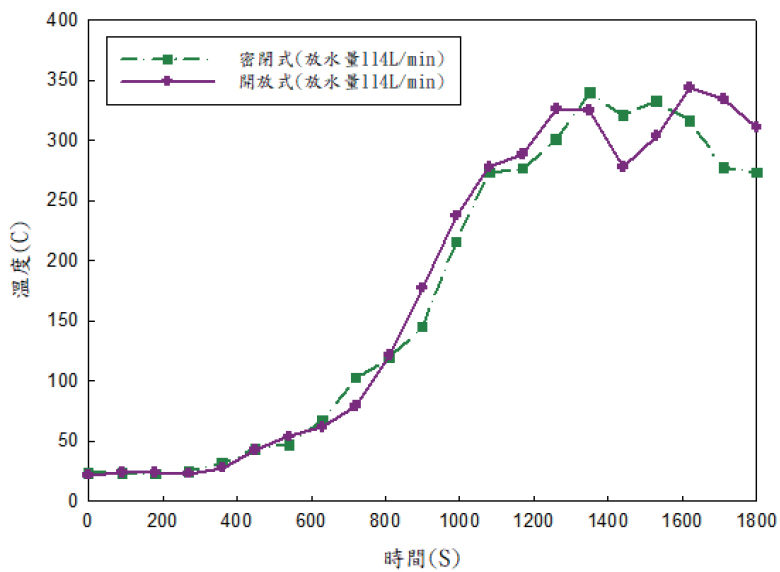


圖 29 密閉濕式與開放式在放水量 114l/min 下的溫度曲線

資料來源：本研究彙整

五、細水霧滅火設備對燃燒之影響

細水霧滅火設備同樣以水作為滅火藥劑，在 NFPA750 規定中，定義細水霧為水滴粒徑直徑必須 99% 小於 $1000\mu\text{m}$ (即 $Dv0.99 < 1000\mu\text{m}$)，其滅火原理為透過細小水滴在接觸高溫時能快速汽化吸收大量熱能，且水蒸發後體積可膨脹 1700 倍，能有效稀釋空間中氧氣濃度，進而達到滅火效果。

本研究情境 12 是針對目前國內電動車室內停車空間設置之低壓細水霧系統進行模擬，放射壓力在 12bar，放水量在 65 L/min，噴頭間距 3.6 公尺，動作溫度 57°C ，RTI 值 50，粒徑 $300\mu\text{m}$ 之情形下動作，經比較開放式撒水設備，細水霧滅火設備相較自動撒水設備有較佳之降溫效果。

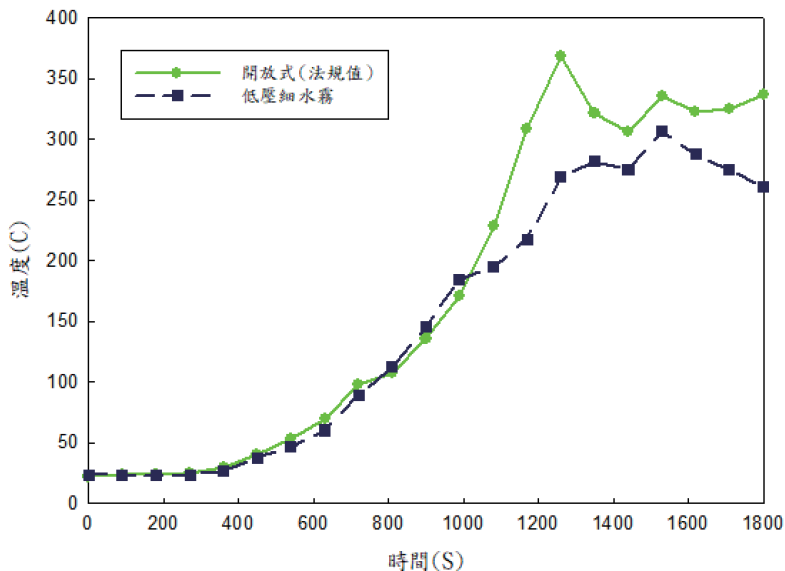


圖 30 細水霧設備溫度曲線

資料來源：本研究彙整

進一步分析不同粒徑的細水霧滅火設備對燃燒之影響，分別進行粒徑 $500\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 及 $50\mu\text{m}$ 進行比較，其中以粒徑 $300\mu\text{m}$ 的降溫效果最佳。細水霧粒徑越小越能夠快速蒸發，有效吸收火場熱量，從而降低火焰的溫度，但粒徑越小越容易受到燃燒火焰產生的火羽流影響，火焰產生的熱流會對周遭的空氣產生擾動，這種擾動可能會影響到水霧粒子的分布，造成滅火效果受到影響。

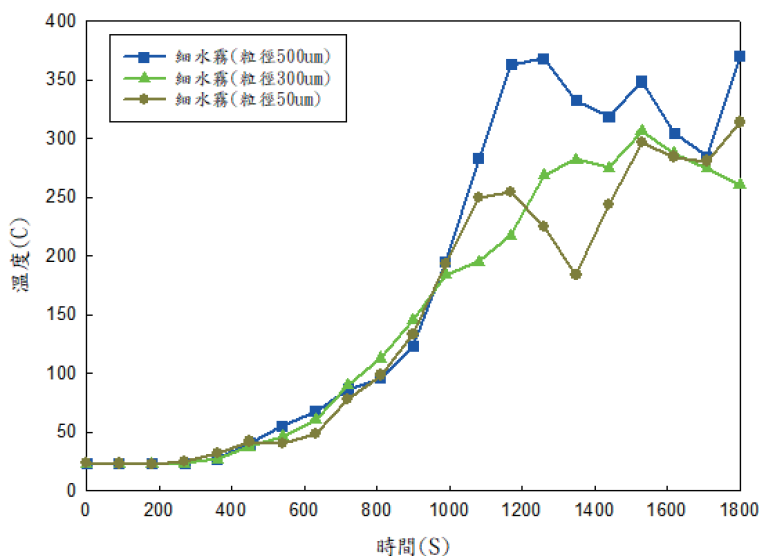


圖 31 不同粒徑下細水霧設備溫度曲線

資料來源：本研究彙整

六、不考慮鋰電池遮蔽情形下撒水設備的滅火效益

分析密閉式自動撒水設備、開放式自動撒水設備及細水霧滅火設備後，可發現雖然自動滅火設備能針對室內溫度有一定之降溫效果，但無法有效撲滅火災，此係因為電動車為避免碰撞、震動等，鋰電池常放置於汽車底盤，並完整包覆，故撒水頭動作時放出水量無法直接接觸起火面，無論是否設有撒水設備，燃燒熱釋放率曲線變化不大。

模擬電動車鋰電池未遭遮蓋，室內停車空間設置密閉濕式與開放式撒水設備對燃燒熱釋放率下降的影響。使用密閉濕式撒水頭，在起火後 412 秒時熱釋放率上升到 420KW 後開始下降，降至 0KW 所需時間為 38 秒；使用開放式撒水頭，在起火後 375 秒時熱釋放率上升到 345KW 後開始下降，降至 0KW 所需時間為 5 秒，如圖 32。

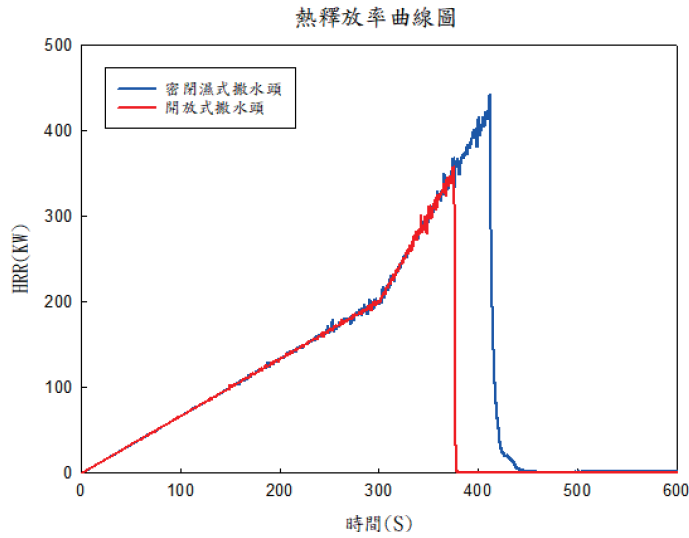


圖 32 設置密閉濕式與開放式撒水設備對熱釋放率的變化

資料來源：本研究彙整

在溫度變化方面，使用密閉濕式撒水頭，溫度量測點設於距離地面高度 3.2 公尺處，溫度達到 65 度後，撒水頭在 412 秒時動作放水。使用開放式撒水頭，距地面高度 3.2 公尺處，溫度達到 50 度後，撒水頭在 375 秒時動作放水，如圖 33。

撒水頭動作時間與 RTI 值有關，本次密閉濕式撒水頭採用動作溫度 68°C，而開放式撒水頭則是以差動式一種探測器作為感知元件，故在動作時間上，開放式較密閉濕式早動作。

$$RTI = \tau u^{\frac{1}{2}} = \frac{mc}{hc a} u^{\frac{1}{2}} \quad (\text{公式 3})$$

RTI：反應時間指數 ($m^{1/2}s^{1/2}$)。

τ ：時間常數 (sec)。

u ：氣流速度 (m/s)。

m ：感熱元件質量 (g)。

c ：感熱元件比熱 ($cal/g^{\circ}C$)。

hc ：熱對流傳導係數 (w/m^2C)。

a ：感熱元件暴露在氣流中表面積 (m^2)。

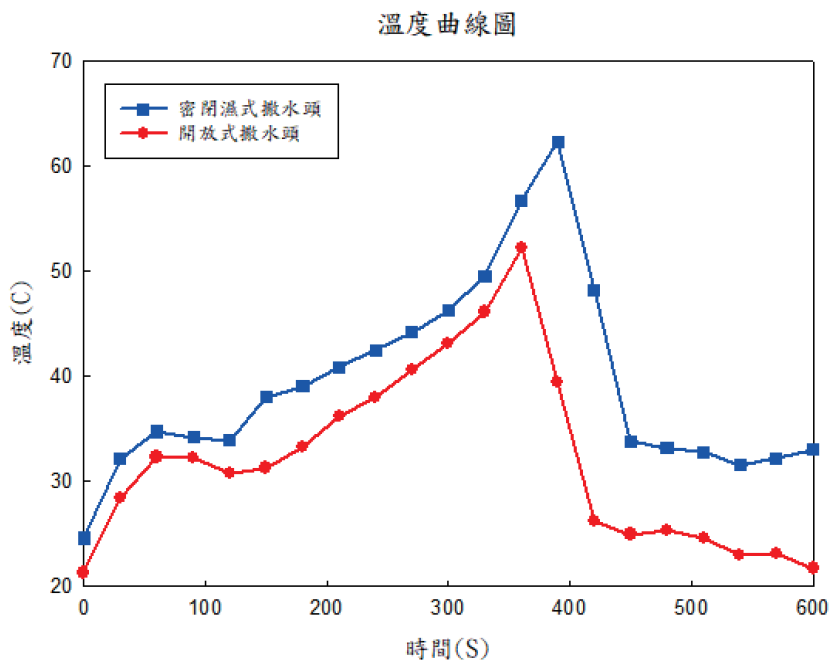


圖 33 比較密閉濕式與開放式撒水溫度的變化

資料來源：本研究彙整

以撒水頭動作時間、熱釋放率成長最大值、熱釋放率降到 0KW 所需時間、環境溫度下降及滅火後環境溫度作為指標，分析比較密閉濕式及開放式撒水設備滅火效能，如表 18。

表 18 密閉濕式及開放式滅火效能比較表

	密閉濕式	開放式
撒水頭動作時間	418 秒	375 秒 (較早)
熱釋放率成長最大值	420KW	345KW (較低)
熱釋放率降到 0KW 所需時間	38 秒	5 秒 (較短)
環境溫度下降	68°下降至 30°C，須 29 秒。	50°C 下降至 30°C，須 13 秒。(較快)
滅火後環境溫度	30°C	20°C (較低)

資料來源：本研究整理

從上表格中可以看出開放式撒水頭有較佳的滅火效能，進一步分析開放式撒水設備不同放射條件下的滅火效能，比較提升壓力與增加放水量，其降溫效果如

圖 38。在撒水頭放射後，以放射壓力 5 kgf/cm^2 有最好的降溫效果。

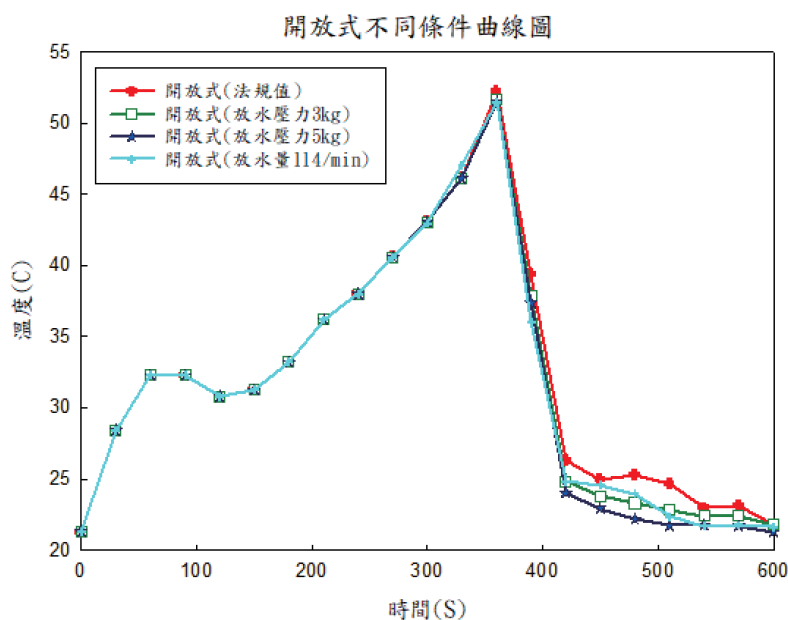


圖 34 開放式撒水設備在未遮蓋情形下不同條件溫度曲線

資料來源：本研究彙整

伍、結論與建議

一、結論

經由文獻收集，可以得知電動車火災相較於一般燃油汽車會產生更多的有毒氣體，如一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x)、氫氟酸 (HF)、氫氯酸 (HCl)、氫溴酸 (HBr)、氰化氫 (HCN)、二氧化硫 (SO₂) 等，煙灰中則有重金屬 (Al、Cd、Pb、Co 等)，且滅火所需水量明顯增加，滅火所需時間也變長，地下停車場較難取得大量水源，不利於消防搶救。

鋰電池一旦發生熱失控，即會持續反應產生大量熱能，目前無有效的滅火藥劑可直接抑制熱失控，僅能以射水降溫來阻斷電池持續熱失控反應。

地下停車場之封閉特性易造成極高的火災溫度，現行電動車火災熱釋率約 7MW，一輛電動車起火模擬結果可達到最高溫 600°C 以上。一旦電動車發生活災，燃燒的時間很長，鋰電池內部持續熱失控反應約在 15 分鐘以後達到最大熱釋放率，燃燒達到最盛期。依據本研究電腦模擬結果顯示，評估地下停車空間設置以

國內現行法規設置自動撒水系統，不同撒水模式對滅火效率影響程度，無論採用「密閉濕式」或「開放式」撒水滅火效能相差不大，相關說明如下：

- (一) 採用密閉濕式撒水設備，在增加放水壓力至 5 kgf/cm^2 時，室內溫度下降較多，滅火效能較佳。
- (二) 在相同放設條件下，採「密閉濕式」或「開放式」對於整體滅火效能差異不大。
- (三) 電動車鋰電池常見設於汽車底盤，且為避免因撞擊、震動等外力造成危害，皆會加固及包覆，撒水放射時水滴無法觸及燃燒表面，造成熱釋率難以下降，是造成滅火困難的主要原因。在鋰電池遮蓋的情況下，設置密閉濕式或開放式撒水差異性不大，提升放水壓力能有較好的滅火效果。
- (四) 相較於撒水設備，細水霧滅火設備利用極細微之水霧粒子在室內空間吸收熱能汽化，較有效能降低室內溫度，火災控制效果優於撒水設備。惟其對於已經燃燒達到最盛期的電動車火災仍難以於短時間內將火勢撲滅，僅能控制室內溫度升高。
- (五) 在不考慮電動車鋰電池遮蓋的影響，以設置開放式撒水設備且提升放射壓力能提升滅火效能。

二、建議

- (一) 現行撒水設備對於撲滅電動車火災仍有難度，建議持續提升鋰電池技術，在維持續航力、減輕電池重量、循環充電次數外，應將火災風險納入設計研發之考量，減低火災發生之可能。
- (二) 現行撒水頭設置位置皆在車輛上方，考量鋰電池位於車輛底盤且受包覆，未來可將撒水頭設在靠近底盤處，讓撒水頭放射水量可觸及燃燒的電池表面。
- (三) 本研究主要係針對電動車停放於室內停車空間起火燃燒，有關設置於停車空間之充電設施及其對電動車充電時產生之風險與滅火對策，可作為研究議題之延伸，對於如何維護電動車充電安全，亦為後續研究方向。

參考文獻

臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，行政院國發會，2022

- 陳帝鴻，不能輸在起跑點擁抱綠能，搶進電動車，工業技術與資訊月刊，2009
- 建築技術規則建築設計施工編第 62 條修正總說明，內政部，2019
- 住宅法第 41 條，民國 110 年 6 月 9 日修正
- 停車場法，民國 111 年 11 月 30 日修訂
- 陳彥豪、盧思穎，電動車發展趨勢與營運模式探討，台灣經濟研究院，2016
- 樂中丕、鍾基強，地下停車空間電池類火災之風險控制與換氣策略研究，內政部
建築研究所協同研究報告，2022
- K. V. Vidyanandan, "Batteries for Electric Vehicles," *Energy Scan: A House e-Journal of Corporate Planning*, NTPC Ltd., vol. I (2019-20), no. 38, New Delhi, Jun 2019.
- 消防人員救災安全手冊，內政部消防署
- Benlong Liu, Yingying Su, Qiaoyang Deng, Song Jin, Yong Chen, Tiancheng Ouyang, "Reducing lithium-ion battery thermal runaway risk based on an integrated cooling strategy for electric vehicles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 216, 2023
- Ouyang, Dongxu, Mingyi Chen, Que Huang, Jingwen Weng, Zhi Wang, and Jian Wang, "A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures," *Applied Sciences*, 2019
- Peiyi Sun, Roeland Bisschop, Huichang Niu, Xinyan Huang¹, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," *Fire Technology*, Vol. 56, 2020.
- Brzezinska D, Bryant P, "Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions," *Energies*, 2022.
- Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson, "Toxic gases from fire in electric vehicles," *RISE Report 90*, 2020.
- S. Yuan, C. Chang, S. Yan, P. Zhou, X. Qian, M. Yuan, et al. "A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire," *Journal of Energy Chemistry*, Vol. 62 ,Pages 262-280, 2021
- N. K. Reitan and A. Bøe, "Brannsikkerhetog alternative energibærere: El- og gasskjøretøy I innelukkede rom," *SP Fire Research AS*, Trondheim, Norway, A16 20096-1:1, Feb. 2016.
- 許家興，電動車電池類型與電池基礎介紹，車輛研測資訊，2009

K. V. Vidyanandan, "Batteries for Electric Vehicles," *Energy Scan: A House e-Journal of Corporate Planning*, NTPC Ltd., vol. I (2019-20), no. 38, New Delhi, Jun 2019.

吳玉祥，消防工程，三版，五南圖書出版股份有限公司，臺北市，民國 99 年。

Are W. Brandt and Karin Glansberg, "Charging of electric cars in parking garages," RISE-report 2020:30. Trondheim, Norway 2020

邱晨瑋，夜店火場重建模擬驗證分析之研究，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，民國 104 年

Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson, "Toxic gases from fire in electric vehicles," RISE Report 90 , 2020.

Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., Tur, N., "Determination of fire protection distances during a Tesla Model S fire in a closed parking lot," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023