

室內濃煙環境下高功率空氣負離子除煙輔助 逃生系統之研究與設計

郭其綱* 楊玉綺**

朝陽科技大學建築系

* chyigang@cyut.edu.tw

** Hyacinth870212@gmail.com

摘要

本研究模擬室內火場濃煙環境，架設高功率空氣負離子除煙陣列，藉由量測濃煙中負離子數和 PM2.5 微粒濃度變化，探討除煙裝置去除 PM2.5 懸浮微粒之單位效能。本研究也以住宅樓梯空間為實際實驗場域，檢測有無風力輔助下之負離子擴散程度差異，藉以設計應用於室內濃煙環境下之空氣負離子除煙系統，期望未來能將系統重點配置於建築物室內空間中，協助救難人員和逃生民眾在煙霧瀰漫且無機械排煙設備與自然排煙口的環境中，能夠獲得更乾淨的空氣與最佳的能見度，增加寶貴逃生時間。

關鍵詞：空氣負離子、室內除煙設計、除煙效能、懸浮微粒、消防逃生設備

論文引用：郭其綱、楊玉綺（2024）。室內濃煙環境下高功率空氣負離子除煙輔助逃生系統之研究與設計。《設計學報》，29（1），1-20。

一、前言

1-1 研究動機與目的

根據內政部消防署發布的「110 年全國火災統計分析」，在火場罹難的主要因素中，「濃煙阻礙」是罹難人次最高的因素（陳紫竹，2022）。由於煙霧的傳播速度比火焰快，往往阻礙逃生視線，造成救援人員及逃生民眾因濃煙產生「空間迷向」，遲滯逃生黃金時間，最終吸入有害煙霧而導致遺憾事件。因此確保火場中逃生通道不被煙霧遮蔽，協助人員盡快撤離危險區域，避免空間迷向，實為當務之急。

於火場中排除濃煙，最有效率的方式是透過機械排煙設備，因此「各類場所消防安全設備設置標準」（消防署，2021）第 28 條第一項規定，下列場所應設置排煙設備：

- 一、供第十二條第一款及第五款第三目所列場所使用，樓地板面積合計在五百平方公尺以上。
- 二、樓地板面積在一百平方公尺以上之居室，其天花板下方八十公分範圍內之有效通風面積未達該

居室樓地板面積百分之二者。

三、樓地板面積在一千平方公尺以上之無開口樓層。

四、供第十二條第一款第一目所列場所及第二目之集會堂使用，舞臺部分之樓地板面積在五百平方公尺以上者。

五、依建築技術規則應設置之特別安全梯或緊急昇降機間。

同時，「建築技術規則 建築設計施工編」（國土管理署，2021）第 244 條規範：「高層建築物地板面高度在五十公尺以上或十六層以上之樓層應設置緊急昇降機間」。

然而設置機械排煙設備，對於法規制定之前即已完工使用的「原有合法建築物」而言，往往遭遇改建施工困難及結構安全顧慮等問題。因此「原有合法建築物公共安全改善辦法」（國土管理署，2022）第 25 條第一項第三款另立規範：「排煙設備之施工及結構安全確有困難者，於樓地板面積每一百平方公尺以防煙壁區劃間隔，且天花板及牆面之室內裝修材料使用不燃材料或耐燃材料。」對於火場煙霧，不得已只能暫時減緩其蔓延，但無法將其主動排出或消除。

除了老舊建築物之外，依法不需要裝設排煙設備的中型、大型空間類型仍然甚多，例如：

- 樓高五層之自建公寓，單層樓地板面積 30 坪，劃分成五間出租雅房，其房間外共用一條無對外開窗之逃生走廊，連接無防火門之昇降機間（非緊急升降機間）及室內直通樓梯（非安全梯）。

--- 如此空間類型於火災發生時，火場濃煙將直接瀰漫所有水平與垂直逃生路線。

- 樓地板面積達 145 坪之失智長照中心，隔間複雜，日夜照顧多位失智且行動不便的長者。

---- 如此空間類型於火災發生時，長者需要比常人更長的逃生時間，因此暴露於火場濃煙的時間可能更久，安危更加堪慮。

- 樓地板面積達 300 坪的地面上無開口樓層。

---- 無開口樓層之有效開口面積不足，火場濃煙無法靠「自然通風」排除。

- 樓地板面積達 148 坪且無對外開窗的地下室

---- 無對外開窗之地下室於火災發生時，火場濃煙同樣無法靠自然通風排除。

- 位於住宅大樓最高樓層十四樓，僅配置無排煙設備的「昇降機間」與室內「安全梯」。

---- 火災發生時，各樓層逃生人員反覆開啟符合遮煙性能規範之防火門時，濃煙仍將不斷滲入「升降機間」與室內「安全梯」，並於逃生通道中持續累積。

如上舉例之空間皆可能符合現行各項建築法規與消防法規，然而面對火場濃煙，上述空間中的逃生者卻將面臨更大的危險。是故，雖然各項法規已經行之有年，但是礙於裝設「排煙設備」工程浩大、「自然通風」又屬被動排煙且無法確保排煙效率的情況下，很遺憾在「110 年全國火災統計分析」中「濃煙阻礙」仍是火場罹難人次最高的因素。

基於上述動機，本研究期望探討除了「排煙設備」與「自然通風」之外的第三種除煙途徑，期望藉由實際測量高功率空氣負離子發射裝置於室內濃煙環境下的除煙效率，研究高濃度空氣負離子對於降低室內火場煙霧濃度的可行性，同時設計單一負離子除煙裝置構造，提出除煙裝置陣列於實際空間配置上

之建議，以協助提高火場中逃生人員的生存機率。

1-2 研究限制與研究方法

在研究限制上，本研究不探討火場中有毒煙霧的影響與其消除方式，僅聚焦於如何於室內濃煙環境下，藉由高功率空氣負離子發射器於關鍵空間節點重點除煙，以協助逃生人員獲得較清晰之能見度，盡快逃離有毒空氣成分之火場。

此外，由於每個火場的發煙量、發煙時間長短、蓄煙空間大小等條件皆不相同，故本研究著重於測量出空氣負離子除煙系統的「除煙效能」，亦即「單位除煙量」，而不以模擬各種火場的發煙量為目標。

在研究方法上，本研究藉由文獻研究法，回顧並歸納國內外學者之空氣懸浮微粒與空氣負離子相關研究，瞭解空氣負離子之特性與原理，探討人造空氣負離子之可能模式。

其次藉由實驗模擬法設計空氣負離子除煙實驗，於特製之煙霧室中燃燒煙餅產生濃煙，模擬火場中濃煙瀰漫之情境，同時，設計空氣負離子發射陣列於濃煙空間中，實測每單位空間、單位時間、單位功率下空氣負離子發射器之除煙效能及產生效應。

最終，本研究實際裝設空氣負離子發射裝置於出租住宅且無排煙室之「昇降機間」與「室內直通樓梯」梯廳當中，測量位於不同高度與是否搭配風力傳送裝置下，空氣負離子的有效擴散距離與濃度衰減梯度，以作為建築室內濃煙環境下之空氣負離子除煙陣列之配置設計參考。

二、文獻回顧

2-1 懸浮微粒

火災產生之煙霧為「材料發生燃燒或熱分解時所釋放出散播於空氣中之固態、液態微粒及氣體，一般而言，煙粒子的大小在 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 」（陸維良，2022）。如此煙粒子懸浮微粒 (particulate matter, PM) 粒徑極小，為「 ≤ 2.5 微米 (μm) 的懸浮微粒，稱為細懸浮微粒 (PM2.5)，單位為微克/立方公尺 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)」（屏東縣政府環保局，2017）。「它的直徑還不到人的頭髮絲粗細的 $1/28$ ，非常微細可穿透肺部氣泡，並直接進入血管中隨著血液循環全身，此污染是目前世界上最大的健康環境風險。」（衛生福利部胸腔病院，2015）根據聯合國世界衛生組織的標準，細懸浮微粒 PM2.5 一年每日平均濃度不能超過 $15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而 24 小時平均濃度最高不能超過 $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，否則將會對大多數人造成健康傷害（高小萍、陳佩安、劉志青，2014）。

然而「由熱分解及燃燒產生之煙依可燃物之材質、量、燃燒溫度、氧氣濃度等條件所產生之煙成分各異」且「火災時煙粒子之分佈受氣流之局部加熱、亂流擴散、凝集、沉降等影響時常改變濃度」（國立台灣師範大學化學系，2002），是故火災發生當下可能之懸浮微粒暴露濃度高低起伏、瞬息萬變。若火場燃燒猛烈、溫度持續攀升、煙霧濃度極高且持續，甚至發生閃燃現象，則效率再高的人工除煙方法恐怕仍是枉然。然而持續投入研究人工除煙新模式之目的在於，在火場失控之前，盡量為逃生者爭取寶貴時間。透過重點式減少關鍵逃生節點之煙霧濃度，來提高逃生人員安全逃生的機率。

2-2 空氣負離子

空氣負離子為空氣中帶有負電荷的離子簇（cluster），其活性強、容易與空氣中的物質反應（吳宜穎，2014）。具有熱電性、壓電性、遷移距離遠、生命周期短等特性。依照粒徑及遷移距離可分為大、中、小離子。大離子直徑約 0.03~0.10 μm ，遷移率小於 0.04 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ；中離子直徑約 0.003~0.030 μm ，遷移率介於 0.04 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 至 0.4 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 之間，小離子直徑約 0.001~0.003 μm 遷移率則大於 0.4 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。其中對人體有益的是小離子，也稱為輕離子，具有良好的生物活性（林金明、宋冠群、林玲、趙利霞，2022）。

小粒徑之空氣負離子除了可以改善人體的心肺功能，還能促進血液循環及新陳代謝，對大腦、心臟、緩解呼吸道疾病等都具功效。此外，也可以淨化空氣，去除甲醛、異味、懸浮微粒等汙染物質，因此亦有「空氣維他命」之稱。

空氣負離子的產生方式分為自然方式及人造方式，自然方式包含：植物尖端放電及光電效應、宇宙射線及閃電、地球上放射物質、萊納德效應；人造方式包含：電暈放電、水負離子、放射線。本研究以人造之電暈放電產生空氣負離子進行實驗，以檢測環境中負離子濃度及其除煙效率。負離子產生模式之文獻整理如表 1 所示。

表 1. 空氣負離子產生模式之相關文獻

年份	作者	題目	重點
2006	陳志漢	利用氧化鋅奈米線陣列所完成之新型的負離子產生器	利用氧化鋅奈米線陣列連接到高壓電的陰極，導電金屬連接到高壓電的陽極，成功開發出一全新型奈米級的負離子產生器，並在實驗過程中使用一負離子檢測器來檢測環境中的負離子數目，結果顯示此新型的負離子產生器比過去傳統的負離子產生器能發射出更多數量之負離子。
2007	陳亮清、何俊明、李益誠、陳其佑	室內人工產生負離子濃度之分布與衰減	該研究發現負離子濃度的空間分布與風速、風向、距離及出口口的初始濃度有關。乾燥型負離子產生器的負離子濃度分布模式除了考慮分散與衰減機制之影響外，還需考慮負離子飄升之影響。
2009	盧宣任	奈米碳管場發射特性對放電產生空氣負離子影響之研究	該研究探討奈米碳管場發射特性應用在負極放電產生空氣負離子的影響，並且探討發展微型空氣清淨裝置的可行性。研究發現：利用模擬脈衝放電產生空氣負離子的穩定度遠高於連續放電。
2012	林瑾杰	奈米碳管重量對放電產生空氣負離子影響之研究	該研究利用奈米碳管之場發特性設計出高濃度、高穩定性且具備經濟效益及市場高競爭性之微型空氣清淨裝置。實驗結果發現：奈米碳管長徑比愈大，其場增強效應愈大。定量不同奈米碳管時，以定量 1.5mg 奈米碳管時，有最低之測試電壓。在相同電壓下奈米碳管長徑比愈大，負極放電產生空氣負離子濃度之穩定度愈好。利用間歇放電產生空氣負離子的穩定度遠高於連續放電。

環境中的負離子濃度會隨著環境因子造成不同的影響。依據農業部林業及自然保育署的調查，全台灣 8 處國家森林遊樂區中，滿月圓國家森林遊樂區之處女瀑布具有最高天然空氣負離子含量，約為 3104-27192 ions/cc（農業部林業及自然保育署，2018）。其他負離子和環境因子的相關研究整理如表 2 所示。空氣負離子和懸浮微粒對應之相關研究整理如表 3 所示。

表 2. 空氣負離子與自然環境因子相關研究彙整

年份	作者	題目	重點
2007	吳志湘、黃翔、黃春松、王與娟	空氣負離子的濃度實驗研究	溫度和濕度會影響負離子的數量，摩擦次數的影響更明顯。負離子在空氣中的衰減距離為 20 公分。風速在 3m/s~10m/s 時，風速的摩擦可以產生出負離子。
2010	林宏泉	校園綠化與空氣負離子濃度之研究—以中華大學為例	該研究以中華大學為例，探討各分區的負離子濃度與綠化量的關係，及其與環境指標的相關性。最後將數據轉換成空氣品質評價指數，以分析中華大學的空氣品質。分析結果顯示負離子與綠化量、濕度、風速呈現正相關；與二氧化碳、溫度呈現負相關；負離子濃度在陰天的負離子濃度會高於晴天。
2010	吳振發、林溫凰、賴純紘	住宅庭園景觀配置與空氣離子濃度分佈關係之研究	該研究以個案研究方式應用空氣離子係數、迴歸法、克利金法 (kriging) 及疊圖法，分析庭園景觀配置與空氣離子濃度相關性。研究發現水景是庭園負離子主要產生源，住宅活動與交通工具廢氣是正離子主要產生源。而距離對於負離子濃度、高空氣負離子係數具有負向影響，對於正離子濃度、單極係數具有正向影響。且高負離子濃度、低正離子濃度、低單極係數、高空氣負離子係數的環境有助於人的身、心健康。

表 3. 空氣負離子和懸浮微粒對應之相關研究彙整

年份	作者	題目	重點
2006	黃志弘	都市生活空間中的懸浮微粒分佈之探討	本研究發現若建築物配置過於零碎，會使地表摩擦度增加、風速降低，導致懸浮微粒在此區域集中濃度升高。且植栽的分佈與懸浮微粒集中之趨勢似有相當程度的關聯性。在都市地區中懸浮微粒污染的微觀分佈極不均勻，常有局部集中之現象。而風場強度、建築物形式與排列方式對懸浮微粒的分佈有顯著的影響。
2007	陳仕昇	空氣負離子對影印室懸浮微粒 PM2、PM10 及臭氧去除效率與分佈影響之研究	本研究選定室內密閉影印空間進行現場實驗檢測，將檢測數據以 MapInfo 軟體進行套疊，提供定量污染，再藉由負離子發生器與污染物反應，評估靜電移除技術中的空氣負離子對懸浮微粒 PM2、PM10 及臭氧之去除效率與分佈影響。結果顯示空氣負離子去除懸浮微粒整體效果十分顯著；並且得知空氣負離子對細小微粒有著更佳的去除效果。且空氣負離子濃度會隨著與負離子發生器之距離而有著區域性的分佈，溼度的差異會影響空氣負離子濃度隨距離衰減之速率，而溫度的差異並不具有特別影響。
2014	吳宜穎	探討空氣負離子控制測試艙內單粒徑及多粒徑分佈次微米微粒之去除效能	本研究結果顯示，空氣負離子對氯化鈉微粒的沉降效率較油酸高，且於低風速的條件下最佳。而空氣負離子可以有效地增進次微米微粒的沉降去除。

2-3 小結

經過上述文獻分析，可歸納以下有助於本研究實驗設計之重點項目：

1. 空氣負離子為空氣中一種帶電之細微粒子，可以有效增進次微米微粒的沉降去除。
2. 火災產生之煙霧材料發生燃燒或熱分解時所釋放出散播於空氣中之固態、液態微粒及氣體，一般而言，煙粒子的大小在 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$ ，為 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ （微米）的懸浮微粒，稱為細懸浮微粒（PM2.5）。故於後續模擬火場煙霧之相關實驗當中，本研究聚焦偵測 PM2.5 之數值變化。
3. 空氣負離子產生方式可分為自然產生方式及人工製造方式。人工製造方式中電暈放電型產生空氣負離子的方式應用較廣。故本研究採用坊間單獨販售中最高電壓之電暈放電設備，以備製空氣負離子。
4. 於自然環境中風速在 $3\text{m/s}\sim 10\text{m/s}$ 時，風速的摩擦可以產生出負離子，負離子在空氣中的衰減距離為 20 公分。在陰天的負離子濃度會高於晴天，高負離子濃度、低正離子濃度、低單極係數、高空氣負離子係數的環境有助於人的身、心健康。
5. 然而自然環境產生之單位體積負離子數量太少（大多少於 $30000\ \text{ions/cc}$ ），且室內環境中自然元素條件缺乏，故本研究將忽略不計一般室內原始環境之空氣負離子濃度對於消除火災煙霧之助益。

三、實驗設計

3-1 實驗設備

根據文獻回顧可知，產生負離子的方式很多，但人工製造負離子的方式相較於自然產生負離子的方式簡易，且可利用電暈放電裝置製造出大量負離子。然而坊間較為普及、採用電暈放電裝置、且標榜較大功率之負離子空氣清淨機，其近距離負離子濃度大約僅能達到每立方公分 $35,000,000$ 顆（單位： ions/cm^3 ），功能介紹主要用於消除環境中的輕度煙塵，並不適用於濃煙環境當中。

因此本研究嘗試引進輸出電壓為 43KV 之高功率空氣負離子發射器，當距離發射器 5 公分以內時，負離子濃度約可達到每立方公分 $199,000,000$ 顆（單位： ions/cm^3 ）。每台發射器的發射端連接兩片條狀碳刷條，作為負離子之發射介面，如此形成一組負離子發射器。負離子發射器之組裝過程如圖 1 所示。

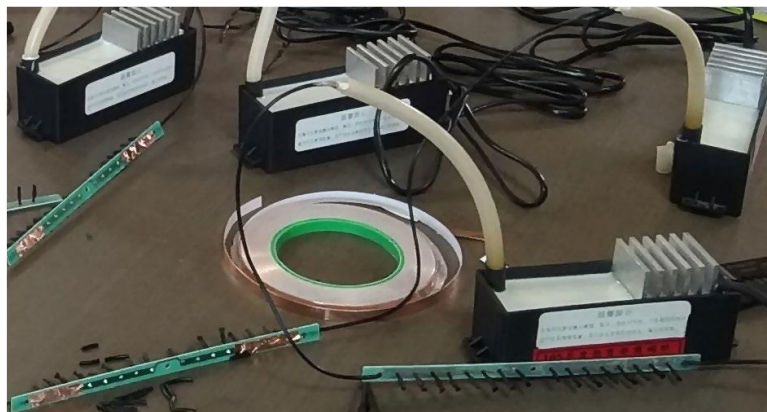


圖 1. 空氣負離子發射陣列組裝過程

本實驗同時採用市面販售可檢測 PM2.5 濃度之空氣品質檢測儀、空氣負離子數檢測儀、定速風扇、風速計，以及發煙用煙餅，進行後續實驗。實驗儀器與物件如表 4 所示：

表 4. 相關實驗設備與材料

設備名稱	實務照片	規格說明
空氣品質檢測儀		<ul style="list-style-type: none"> ● 空氣品質檢測儀可檢測甲醛、PM1、PM2.5、PM10、和TVOC（總揮發性有機化合物）數值。本研究於實驗中著重記錄 PM2.5 之數值。PM2.5 量測單位為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$（微克/立方公分）。 ● 檢測原理：雷射光散射原理 ● 採樣時間：10 秒 ● 偵測範圍：0~999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ● 檢測溫度：-10°C 至 45°C ● 測量精度：±5%
空氣負離子數檢測儀		<ul style="list-style-type: none"> ● 空氣負離子數檢測儀可檢測正離子和負離子。本研究於實驗中著重記錄負離子數值。量測單位是 ions/cm^3（離子數/立方公分）。 ● 偵測範圍：0~199.9 x $10^6 \text{ ions}/\text{cm}^3$ ● 解析度：1000 ions/cc ● 雜訊：10 ions/cc (平均 2 秒) ● 測量精度：±25%
煙餅		煙餅的成份包括硝酸鉀、樹膠、氯化銨和硫。煙餅產生的濃煙具有較低的能見度和刺激性氣味，可以模擬火場中真實煙霧的狀態，本實驗所使用之煙餅直徑 7 公分，高度 1.5 公分，重量約 10 公克。
定速風扇		定速風扇可提供約 6.5km/h 的固定風速。

3-2 煙霧室空氣負離子除煙效能實驗設計

本研究為探討高功率負離子除煙陣列之除煙效率，建構一個長 140 公分×寬 120 公分×高 220 公分的煙霧室，其體積約為 3.696 立方公尺。此煙霧室由鋁擠型構材建造，上方覆蓋透明塑膠布，用塑膠膜及透明膠帶將其角落之縫隙密封，以使煙霧確實充滿於煙霧室中。4 組空氣負離子發射陣列懸掛在煙霧室頂端 4 個角落，每組負離子發射陣列具備 2 條碳刷條，每條碳刷分別固定於透明塑膠布離地 170 公分之 4 個面向上。而後空氣品質檢測儀、空氣負離子檢測儀與煙餅放置於一個小架子的頂部，約離地面高 60 公分位置處，以進行後續實驗，如圖 2 所示。



圖 2. 煙霧室之設備配置與邊界條件

3-3 室內空間空氣負離子發射陣列配置模式實驗設計

為了解負離子裝設於室內空間的較佳配置方式，本研究於走廊及樓梯間分別裝設一台負離子發射器，藉此探討在不同發射高度及有無裝設風扇的情況下，不同水平距離偵測點之空氣負離子濃度，以利設計應用。

本研究將負離子發射器架設於寬 120cm、長 1490cm、高 230cm 的走廊，走廊兩端各有一扇橫拉窗但未符合「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條所規範之「排煙口」條件。負離子偵測點置於發射器前方 1M、橫 1M 處（左側水平 1M 處）、前方 2M、前方 3M、前方 4M、前方 5M 處，共 6 個偵測點，如圖 3 所示。

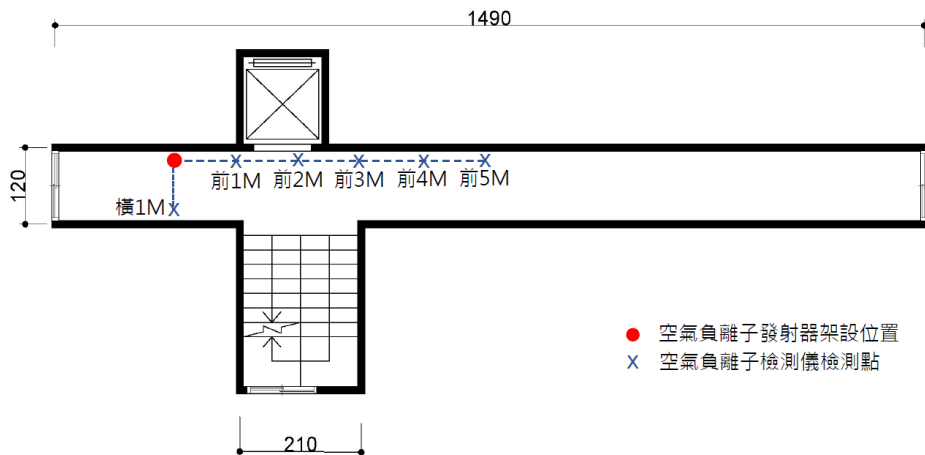


圖 3. 走廊空氣負離子實驗配置平面圖

空氣負離子發射器於 170cm 與 230cm 不同發射高度、有無架設風扇的情況下，測量於 150cm 高處之不同距離偵測點的負離子濃度變化。走廊空氣負離子發射器放置方式如圖 4 所示。



圖 4. 走廊空氣負離子發射器放置方式

此外，本實驗將負離子發射器架設於寬 210cm、長 420cm、高 300cm 的樓梯間，針對於 170cm 與 230cm 不同發射高度、距離及風速進行實驗，測量偵測點位於發射器前方 1M（地板高程降低 20cm）、前方 2M（地板高程降低 100cm）、前方 3M（地板高程降低 160cm）處。樓梯間空氣負離子實驗配置平面圖與空氣負離子發射器放置方式如圖 5 所示。

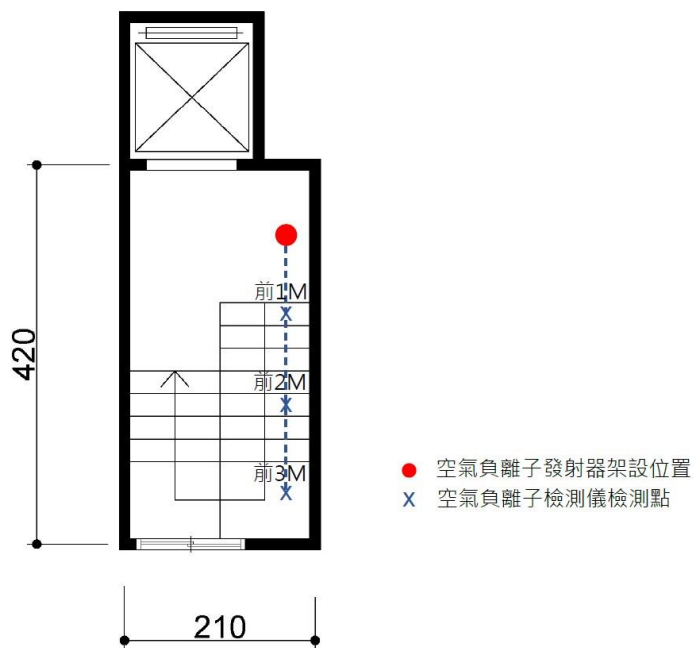


圖 5. 樓梯間空氣負離子實驗配置平面圖



圖 6. 樓梯間空氣負離子發射器放置方式

四、實驗過程與結果分析

4-1 煙霧室空氣負離子除煙效能實驗結果分析

開啟上述實驗設計之煙霧室中 4 個角落的 4 個負離子發射器，同時，在煙霧室外桌上的筆記型電腦上，設置錄影設備。設備架設完畢後，點燃煙餅，並以空氣品質檢測儀量測懸浮微粒濃度，觀察煙霧室中 PM2.5 數量變化，如圖 7 (a) 所示。燃燒完全後，煙霧充滿煙霧室，如圖 7 (b) 所示。

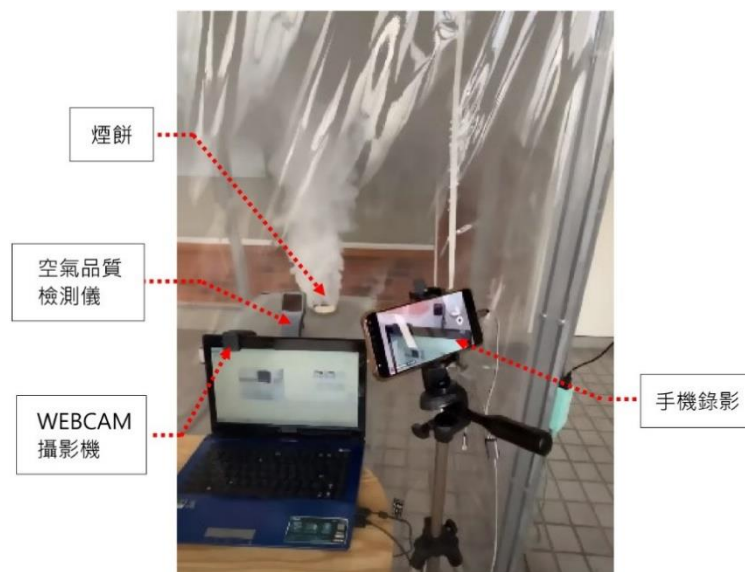


圖 7. 煙霧室中煙餅燃燒中之情形 (a)



圖 7. 煙霧室中煙餅燃燒完全後之情形 (b)

待煙餅燃燒完全後，打開 4 個空氣負離子發射陣列以消除煙霧。同時錄影並紀錄懸浮微粒檢測儀的數據畫面，以觀察負離子發射陣列開啟後煙霧濃度之變化，總記錄期間為 25 分鐘。空氣負離子陣列開啟後不同方向觀測煙霧室當中煙霧消散之情形如圖 8 所示。

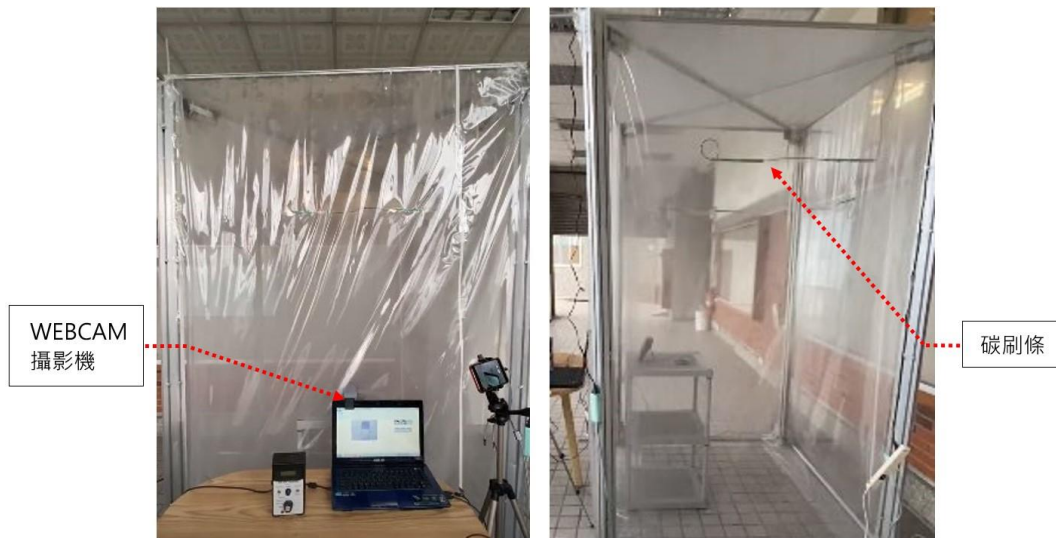


圖 8. 空氣負離子發射陣列開啟後，不同方向觀測煙霧室當中煙霧消散之情形

根據實驗結果，記錄實驗期間 PM2.5 之變化狀態如圖 9，並分析歸納整理如表 5 所示。

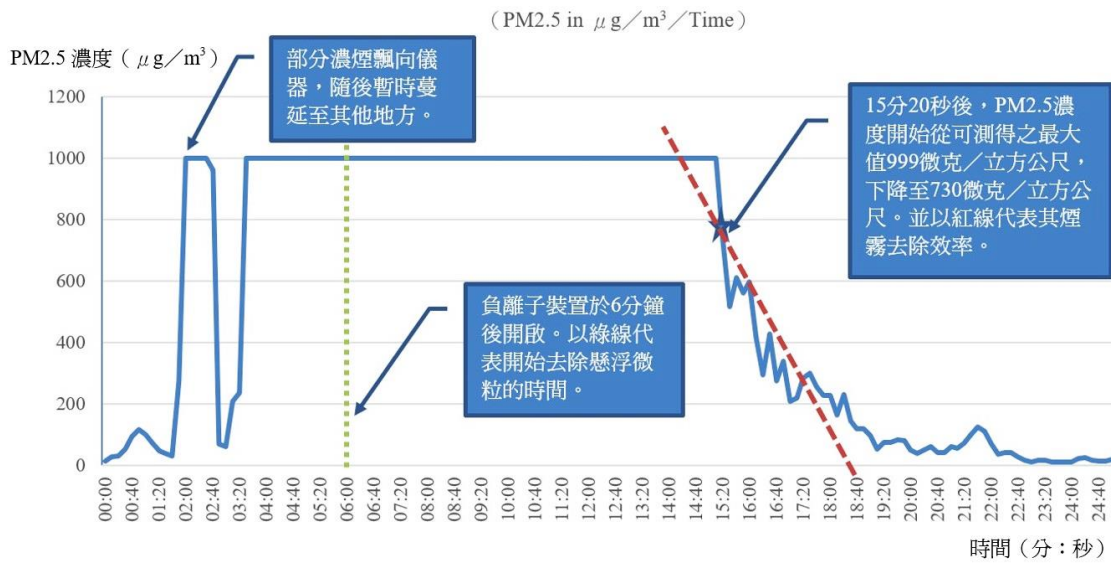


圖 9. PM2.5 於 25 分鐘內之變化

表 5. 煙霧室空氣負離子除煙效能實驗結果分析

項目	實驗結果分析
1.	實驗於 2 分鐘至 2 分 40 秒之間，PM2.5 濃度突然增加到 $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。推測在此期間一小股濃煙恰巧飄向儀器，但隨後煙霧飄散到其他地方，因此 2 分 40 秒後 PM2.5 濃度又回到 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。
2.	於 3 分 30 秒至 15 分 10 秒之間，因 PM2.5 的濃度超過探測儀可以檢測到的最大範圍，因此在此期間之 PM2.5 的濃度顯示為 $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
3.	煙餅於 5 分 30 秒完全燃燒完畢。再等待 30 秒後，煙霧濃度完全穩定不再因布朗運動而飄動，方於 6 分鐘整開啟負離子除煙陣列之電源，開始除煙。故從初始發煙到穩定濃度需時 6 分鐘。
4.	開啟負離子除煙陣列之後，此時煙霧室中 PM2.5 濃度極高，超過 $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 非常多，視線完全無法穿透白霧（如圖 7 所示），但是空氣負離子除煙系統其實已在進行大量除霧。直到 15 分 20 秒後，PM2.5 的濃度才開始從 $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $730 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
5.	PM2.5 濃度於 15 分 20 秒時為 $730 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，17 分 20 秒時 PM2.5 濃度已降為 $283 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2 分鐘內 PM2.5 的濃度共下降 $447 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，已降至環保署制定之 PM2.5 即時測量值可分級制度的紅色區塊，能見度大為提升，逃生人員於火場中應已可看清近距離逃生路徑。因此本研究視此階段為除煙第一階段，亦為「有效除煙階段」，故以此階段之數據計算空氣負離子發射陣列之除煙效率。
6.	除煙第一階段數據中繪製線性迴歸直線（最小平方差直線），可得到迴歸方程為： $y = -3.88x + 654.59$ 斜率為 -3.88， $R^2 = 0.81$ ，顯示迴歸模型擬合度佳。
7.	根據除煙第一階段數據可知，空氣負離子發射陣列每分鐘約可去除 $223.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的粒子。而此陣列由 4 台輸出電壓為 43kV 的空氣負離子發射器組成，總輸出電壓為 $43\text{kV} \times 4 = 172\text{kV}$ 。由此可知 1 台空氣負離子發射器的除煙效率約為： $223.5 (\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}) \div 172 (\text{kV}) \approx 1.3 (\mu\text{g}/\text{kV} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{min}) \approx 1.3 (\text{g}/\text{kV} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{min})$ 因此單一負離子發射器在每千伏特電壓下於每立方公尺的密閉空間中每分鐘去除 PM2.5 懸浮微粒的除煙效能約為 $1.3 \text{g}/\text{kV} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{min}$ 。
8.	自 17 分 30 秒至 19 分 30 秒期間，PM2.5 濃度已經相對較低，空氣負離子發射陣列之除煙效率開始降低，本研究視此階段為除煙第二階段。由數據繪製線性迴歸直線，可得迴歸方程為： $y = -1.94x + 278.13$ 斜率為 -1.94， $R^2 = 0.90$ ，顯示迴歸模型擬合度佳。
9.	自 19 分 40 秒之後至 25 分 00 秒期間，PM2.5 濃度已經相對甚低，空氣負離子發射陣列之除煙效率連帶降低，因此本研究視此階段為除煙第三階段。雖然此階段於 21 分 40 秒附近 PM2.5 濃度一度稍微竄升，但估計其導因於空氣負離子發射陣列產生之電子風形成擾動，一小團煙霧恰巧飄移至偵測器前使濃度數值短暫上升，但其後數值即迅速且持續下降至 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，並維持相對穩定。

4-2 室內空間空氣負離子發射陣列配置模式實驗結果分析

本研究將負離子發射器架設於寬 120cm、長 1490cm、高 230cm 的走廊，於離地 150cm 高處，偵測發射器前方 1M、橫 1M 處（左側水平 1M 處）、前方 2M、前方 3M、前方 4M、前方 5M 處 6 個偵測點，記錄無裝設風扇狀況下（圖 10）與有裝設風扇狀況下（圖 11）空氣負離子發射器離地 170cm 及 230cm 的各偵測點負離子濃度數值。

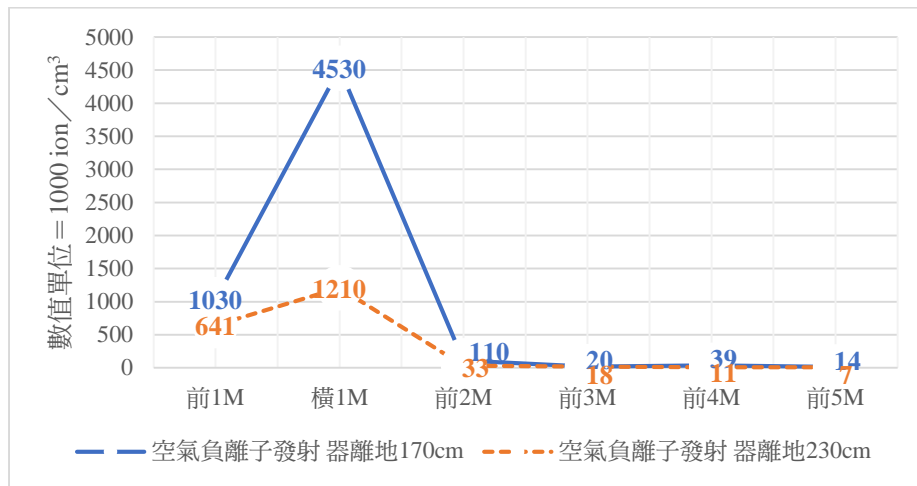


圖 10. 走廊空氣負離子發射器無裝設風扇時各測點負離子濃度

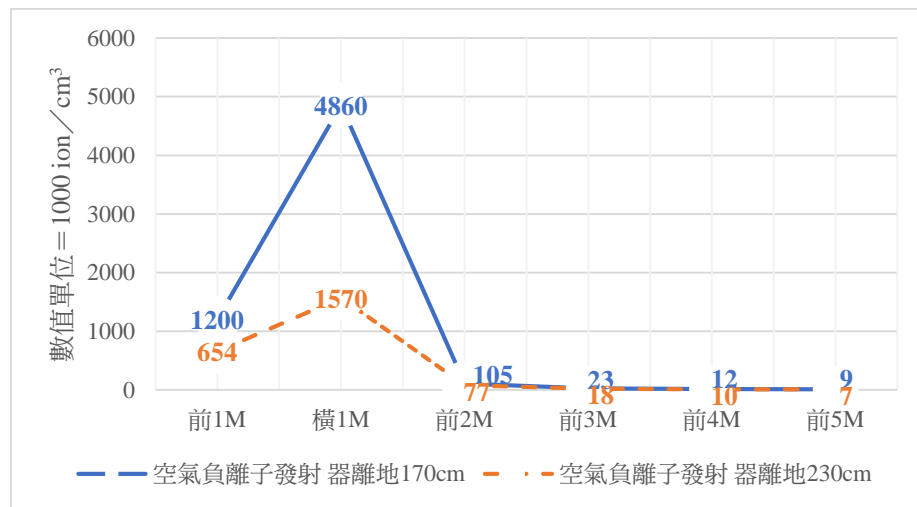


圖 11. 走廊空氣負離子發射器有裝設風扇時各測點負離子濃度

走廊有無裝設風扇之負離子濃度變化以前向 1M 偵測點、負離子裝設高度 170cm、測量高度 150cm 為例：有裝設風扇負離子濃度為 $4860 \times 10^3 \text{ ion/cm}^3$ ，無裝設風扇負離子濃度為 $4530 \times 10^3 \text{ ion/cm}^3$ ，空氣負離子濃度多了 $330 \times 10^3 \text{ ion/cm}^3$ ，共提升約 1.07 倍。然而超過 1M 後負離子數快速衰減，已較無實質除煙貢獻。

此外，本研究亦將負離子發射器架設於寬 210cm、長 420cm、高 300cm 的樓梯間，測量發射器前方 1M（地板高程降低 20cm）、前方 2M（地板高程降低 100cm）、前方 3M（地板高程降低 160cm）3 個偵測點，記錄無裝設風扇狀況下（圖 12）與有裝設風扇狀況下（圖 13）空氣負離子發射器離地 170cm 及 230cm 的各偵測點負離子濃度數值。

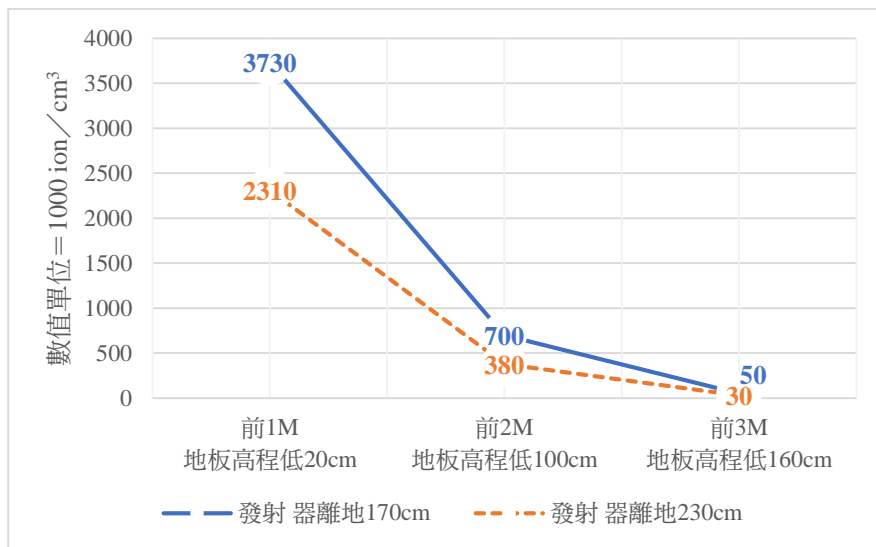


圖 12. 樓梯間空氣負離子發射器沒裝設風扇時各測點負離子濃度

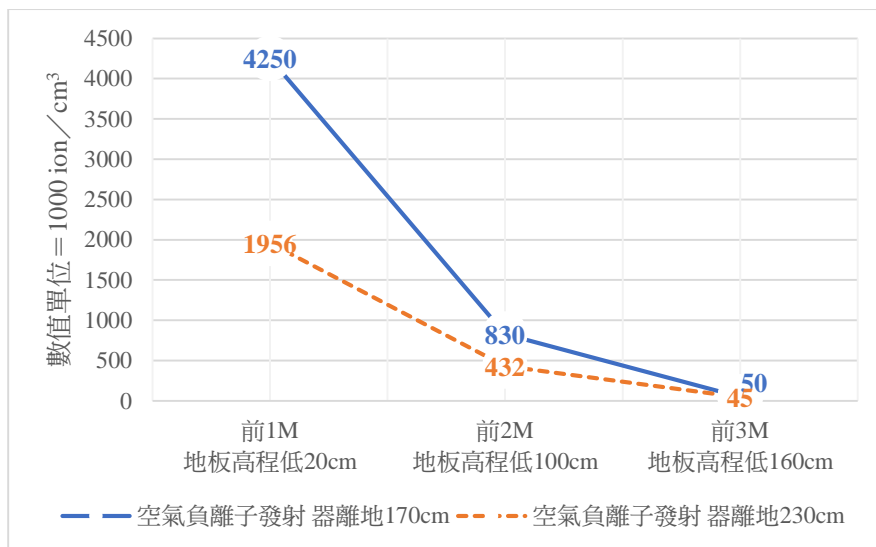


圖 13. 樓梯間空氣負離子發射器有裝設風扇時各測點負離子濃度

根據上述結果，以空氣負離子發射器前方 1M 之偵測點、負離子裝設高度 170cm、測量高度 130cm（標準量測桿高度 150cm 減去地板高程降低 20cm）為例，有裝設風扇負離子濃度為 $4250 \times 10^3 \text{ ion/cm}^3$ ，無裝設風扇負離子濃度為 $3730 \times 10^3 \text{ ion/cm}^3$ ，空氣負離子濃度多了 $520 \times 10^3 \text{ ion/cm}^3$ ，共提升約 1.14 倍。

五、結論

本研究所聚焦於協助不具備安裝自然排煙窗（排煙口）與機械排煙條件的空間，或是法規並不強制安裝機械排煙，卻又於火災時可能面臨濃煙滲入、危害到逃生避難的特殊路徑空間。是故，期望在不需更動建築結構與安裝機械設備之下，可以相對經濟、簡單、彈性、擴充的方式，來延伸保障自然排煙與機械排煙無法保護到的關鍵空間與節點。經過各項實驗、計算、與模擬之後，歸納總結本研究之結果如下。

5-1 研究實驗結論

1. 本研究架設總輸出電壓為 172kV 的空氣負離子發射器陣列於 3.7 立方公尺的密閉煙霧室中，將負離子發射探刷分佈在距離地面約 170 公分高處。除煙過程中期，煙霧室 PM2.5 的濃度於 2 分鐘內從 $730 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降為 $283 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，已降至環保署制定之 PM2.5 即時測量值可分級制度的紅色區塊，能見度大為提升，逃生人員於火場中應已可看清近距離逃生路徑。因此本研究視此階段為「有效除煙階段」，據以計算空氣負離子發射陣列之除煙效率。
2. 經由計算可得單一空氣負離子發射器在「每千伏特電壓下」於「每立方公尺」的密閉空間中「每分鐘」去除 PM2.5 懸浮微粒的除煙效能約為 $1.3 \text{ g} / \text{kV} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{minute}$ 。
3. 於不同條件下，高功率空氣負離子發射陣列的最大除煙量，可由〔高功率空氣負離子發射裝置單位除煙效能〕 \times 〔除煙系統總電壓〕 \times 〔除煙時間〕/〔空間體積〕公式計算得知。
4. 空氣負離子發射之後會呈下墜趨勢，並且於距離 1M 之內快速衰減，因此可將負離子發射陣列配置在逃生路線上較靠近地板的位置（建議低於 170 公分），以求一般人體身高之下、寬度 1M 內之逃生空間具有更佳能見度。
5. 當空氣負離子除煙裝置有風扇輔助時，走廊上相同距離之偵測點負離子濃度約可提高 1.07~2.3 倍，樓梯間負離子濃度約可提高 1.14~1.6 倍，因此不管於走廊或是樓梯間架設空氣負離子除煙裝置時，皆建議增加風扇輔助。

5-2 除煙逃生輔助系統設計與應用

火場發煙量大，且各種嚴重的有毒氣體濃度高，在有毒氣體發生時，逃生人員若可配戴氧氣面罩或防毒面罩實為最佳上策，否則最好盡速逃離火場。然而，各種面罩並無法克服濃煙屏蔽逃生視線、空間迷向等受困於火場的問題，因此本研究著重於關鍵節點空間，透過空氣負離子除煙系統輔助清除阻礙視線的煙霧，包含黑碳、高溫燃燒產物、海綿狀多孔微粒、混合物等，幫助人員盡速逃離火場。

高功率空氣負離子發射陣列對於消除煙塵具實用效果，依據不同空間尺寸與造型，配合本研究得知之除煙效率計算，可設計不同空氣負離子除煙裝置之配置密度，建置因地制宜之除煙逃生輔助系統。

空氣負離子除煙裝置之設計上，外殼可採用耐燃材質及塗佈防火耐燃保護層，以抵擋火場之高溫。裝置內置風扇、LED 光源、碳刷面板，與充電電池。整體裝置可與緊急照明設備、出口標示燈、避難方向指示燈結合，平時備載充電，火災發生時則可作為協助逃生或救援的輔助裝置，即使遭遇停電時仍可運作。

若考量空間中潛在的發煙易燃物品較多，又無法實現自然通風或機械通風的條件，則可考慮配置較多套除煙輔助系統，以提高單位空間的除煙能力；反之，則不需要配置多套系統，或可集中配置多台空氣負離子除煙裝置於逃生關鍵空間節點或路徑上，例如：可能發生濃煙滲漏的室內門周邊、一般安全梯（無排煙室）頻繁開閉之防火門周邊、一般安全梯之垂直樓梯間沿線等（如圖 14），亦可與室內自動灑水頭、水霧灑水頭相結合，使空氣負離子藉由水霧之承載與擴散，提高整體之有效除煙量，達到經濟、方便、且架設彈性的除煙功效。



圖 14. 空氣負離子除煙裝置配置應用模擬

參考文獻

1. 吳志湘、黃翔、黃春松、王與娟（2007）。空氣負離子濃度的實驗研究。《西安工程科技學院學報》，21（6），803-806。

Wu, J. S., Huang, S., Huang, C. S., & Wang, Y. J. (2007). Experimental research on concentration of negative air ions. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 21(6), 803-806. [in Chinese, semantic translation]
2. 吳宜穎（2014）。探討空氣負離子控制測試艙內單粒徑及多粒徑分布次微米微粒之去除效能（未出版之碩士論文）。國立陽明交通大學，台北市。

Wu, Y. Y. (2014). *Removal efficiency of monodisperse and polydisperse submicron particles in a test chamber by using a negative air ionizer* (Unpublished master's thesis). National Yang Ming Chiao Tung University, Taipei City, Taiwan. [in Chinese, semantic translation]
3. 吳振發、林溫凰、賴純絃（2010）。住宅庭園景觀配置與空氣離子濃度分佈關係之研究。《建築學報》，71，213-232。

Wu, C. F., Lin, W. H., & Lai, C. H. (2010). Relationship between residual garden landscape and air ions distribution. *Journal of Architecture*, 71, 213-232. [in Chinese, semantic translation]
4. 林宏泉（2010）。校園綠化與空氣負離子濃度之研究—以中華大學為例（未出版之碩士論文）。中華大學，新竹市。

Lin, H. C. (2010). *The research of campus vegetation and anion* (Unpublished master's thesis). Chung Hua University, Hsinchu City, Taiwan. [in Chinese, semantic translation]

5. 林金明、宋冠群、林玲、趙利霞 (2022)。環境、健康與空氣負離子。北京：化學工業。
Lin, J. M., Song, G. C., Lin, L., & Zhao, L. S. (2022). *Environment, health, and negative air ions*. Beijing: Chemical Industry. [in Chinese, semantic translation]
6. 林瑾杰 (2012)。奈米碳管重量對放電產生空氣負離子影響之研究 (未出版之碩士論文)。國立臺灣大學，台北市。
Lin, C. C. (2012). *Effect of carbon-nanotubes mass on the generation of negative air ions* (Unpublished master's thesis). National Taiwan University, Taipei City, Taiwan. [in Chinese, semantic translation]
7. 屏東縣政府環保局 (2017)。PM2.5 是什麼？Q&A 問答集。取自：
https://www.ptepb.gov.tw/News_Content.aspx?n=718A4BD53437A014&sms=29841AE05DB47DEF&s=68C1422CF4E98D1D
Environment Protection Bureau, Pingtung County. (2017). What is PM2.5? *Questions and Answers*. Retrieved from
https://www.ptepb.gov.tw/News_Content.aspx?n=718A4BD53437A014&sms=29841AE05DB47DEF&s=68C1422CF4E98D1D [in Chinese, semantic translation]
8. 高小萍、陳佩安、劉志青 (2014)。懸浮微粒之健康危害及預防。國家同步輻射研究中心簡訊，89，13-14。
Gao, S. P., Chen, P. A., & Liou, J. C. (2014). Health hazards and prevention of suspended particles. *NSRRC Newsletter*, 89, 13-14. [in Chinese, semantic translation]
9. 消防署 (2021)。各類場所消防安全設備設置標準。全國法規資料庫。取自：
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0120029&kw=%e5%90%84%e9%a1%9e%e5%a0%b4%e6%89%80%e6%b6%88%e9%98%b2%e5%ae%89%e5%85%a8%e8%a8%ad%e5%82%99%e8%a8%ad%e7%bd%ae%e6%a8%99%e6%ba%96>
National Fire Agency. (2021). *Standard for installation of fire safety equipments based on use and occupancy*. *Laws & Regulations Database of The Republic of China* (Taiwan). Retrieved from
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0120029&kw=%e5%90%84%e9%a1%9e%e5%a0%b4%e6%89%80%e6%b6%88%e9%98%b2%e5%ae%89%e5%85%a8%e8%a8%ad%e5%82%99%e8%a8%ad%e7%bd%ae%e6%a8%99%e6%ba%96> [in Chinese, semantic translation]
10. 國土管理署 (2021)。建築技術規則建築設計施工編。全國法規資料庫。取自：
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0070115>
National Land Management Agency. (2021). *Chapter of building design and construction, building technical regulations*. *Laws & Regulations Database of The Republic of China* (Taiwan). Retrieved from
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0070115> [in Chinese, semantic translation]
11. 國土管理署 (2022)。原有合法建築物公共安全改善辦法。全國法規資料庫。取自：
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0070150&kw=%e5%8e%9f%e6%9c%89%e5%90%88%e6%b3%95%e5%bb%ba%e7%af%89%e7%89%a9%e5%85%ac%e5%85%b1%e5%ae%89%e5%85%a8%e6%94%b9%e5%96%84%e8%be%a6%e6%b3%95>

- National Land Management Agency. (2022). Regulations on improvement on existing building public security. *Laws & Regulations Database of The Republic of China (Taiwan)*. Retrieved from <https://law.moj.gov.tw/Law-Class/LawAll.aspx?pcode=D0070150&kw=%e5%8e%9f%e6%9c%89%e5%90%88%e6%b3%95%e5%bb%ba%e7%af%89%e7%89%a9%e5%85%ac%e5%85%b1%e5%ae%89%e5%85%a8%e6%94%b9%e5%96%84%e8%be%a6%e6%b3%95> [in Chinese, semantic translation]
12. 陳仕昇 (2007)。空氣負離子對影印室懸浮微粒 PM₂、PM₁₀ 及臭氧去除效率與分佈影響之研究 (未出版之碩士論文)。國立台北科技大學，台北市。
Chen, S. S. (2007). *The removal efficiency and distribution of suspended particles and ozone in photocopy room by negative air ions* (Unpublished master's thesis). National Taipei University of Technology, Taipei City, Taiwan. [in Chinese, semantic translation]
13. 陳志漢 (2006)。利用氧化鋅奈米線陣列所完成之新型的負離子產生器 (未出版之碩士論文)。國立雲林科技大學，雲林縣。
Chen, C. H. (2006). *A new negative ion generator using ZnO nanowire array* (Unpublished master's thesis). National Yunlin University of Science and Technology, Yunlin County, Taiwan.. [in Chinese, semantic translation]
14. 陳亮清、何俊明、李益誠、陳其佑 (2007)。室內人工產生負離子濃度之分布與衰減。《東南學報》，31，195-206。
Chen, L. C., He, J. M., Li, Y. C., & Chen, J. Y. (2007). The distribution and decay of indoor artificial generated negative ions. *Journal of Tungnan University*, 31, 195-206. [in Chinese, semantic translation]
15. 陳紫竹 (2022)。110 年全國火災統計分析。《消防月刊》，111 (4)。取自：
<http://monthly.nfa.gov.tw/article.php?id=2763>
Chen, Z. J. (2022). Statistical analysis of fire incidents in Taiwan in 2021. *Fire Safety Monthly*, 111(4). Retrieved from <http://monthly.nfa.gov.tw/article.php?id=2763> [in Chinese, semantic translation]
16. 陸維良 (2022)。預防與搶救 (五)：三、煙與熱流之火災特論。《一般警察特考：消防警察》。取自：
<https://www.3people.com.tw/%E7%9F%A5%E8%AD%98/%E9%A0%90%E9%98%B2%E8%88%87%E6%90%B6%E6%95%91-%E5%85%AC%E8%81%B7%E7%89%B9%E7%A8%AE%E8%80%83%E8%A9%A6-%E4%B8%80%E8%88%AC%E8%AD%A6%E5%AF%9F%E7%89%B9%E8%80%83-%E6%B6%88%E9%98%B2%E8%AD%A6%E5%AF%9F/84f2cdce-d29a-46de-94f9-07c9df6c98d4>
Liou, W. L. (2002). Prevention and rescue (5): 3. Special discussion on fires with smoke and heat flow. *General police special examination: Fire police*. Retrieved from [https://www.3people.com.tw/%E7%9F%A5%E8%AD%98/%E9%A0%90%E9%98%B2%E8%88%87%E6%90%B6%E6%95%91-%E5%85%AC%E8%81%B7%E7%89%B9%E7%A8%AE%E8%80%83%E8%A9%A6-%E4%B8%80%E8%88%AC%E8%AD%A6%E5%AF%9F/E7%89%B9%E8%80%83-%E6%B6%88%E9%98%B2%E8%AD%A6%E5%AF%9F/84f2cdce-d29a-46de-94f9-07c9df6c98d4](https://www.3people.com.tw/%E7%9F%A5%E8%AD%98/%E9%A0%90%E9%98%B2%E8%88%87%E6%90%B6%E6%95%91-%E5%85%AC%E8%81%B7%E7%89%B9%E7%A8%AE%E8%80%83%E8%A9%A6-%E4%B8%80%E8%88%AC%E8%AD%A6%E5%AF%9F%E7%89%B9%E8%80%83-%E6%B6%88%E9%98%B2%E8%AD%A6%E5%AF%9F/84f2cdce-d29a-46de-94f9-07c9df6c98d4) [in Chinese, semantic translation]

17. 國立台灣師範大學化學系 (2002)。煙之理化性質。消防化學。取自：
<http://140.122.142.231/~chem/oldWWW/antiFire/03.htm>
Department of Chemistry, National Taiwan Normal University. (2002). Physical and chemical properties of smoke. *Fire chemistry*. Retrieved from
<http://140.122.142.231/~chem/oldWWW/antiFire/03.htm> [in Chinese, semantic translation]
18. 黃志弘 (2006)。都市生活空間中的懸浮微粒分佈之探討。環保資訊月刊, 93。取自：
<http://www.fengtayeps.org.tw/paper.asp?page=2006&num=297&num2=72>
Huang, J. H. (2006). Discussion on the distribution of suspended particles in urban living space. *Environmental Protection Source*, 93. Retrieved from <http://www.fengtayeps.org.tw/paper.asp?page=2006&num=297&num2=72> [in Chinese, semantic translation]
19. 農業部林業及自然保育署 (2018)。行走就能享受芳療！來國家森林遊樂區做森林療癒 SPA。取自：
<https://www.forest.gov.tw/forest-news/0061932>
Forestry and Nature Conservation Agency. (2018). *Aromatherapy can be enjoyed while walking! Come to the National Forest Recreation Area for forest healing SPA*. Retrieved from
<https://www.forest.gov.tw/forest-news/0061932> [in Chinese, semantic translation]
20. 衛生福利部胸腔病院 (2015)。PM2.5 是什麼？衛教資訊。取自：
https://www.ccd.mohw.gov.tw/?aid=508&pid=0&page_name=detail&iid=496
Chest Hospital, Ministry of Health and Welfare. (2015). What is PM2.5? *Health education information*. Retrieved from
https://www.ccd.mohw.gov.tw/?aid=508&pid=0&page_name=detail&iid=496 [in Chinese, semantic translation]
21. 盧宣任 (2009)。奈米碳管場發射特性對放電產生空氣負離子影響之研究 (未出版之碩士論文)。國立臺灣大學, 台北市。
Lu, S. J. (2009). *The effect of field emission traits of carbon-nanotubes on the generation of negative air ions* (Unpublished master's thesis). National Taiwan University, Taipei City, Taiwan. [in Chinese, semantic translation]

Design and Research of the High-power Negative-air-ion Smoke Removal Assisted Escape System in Indoor Dense Smoke Environment

Chyi Gang Kuo* Yu Chi Yang**

Department of Architecture, Chaoyang University of Technology

* chyigang@cyut.edu.tw

** Hyacinth870212@gmail.com

Abstract

This study simulated the smoke environment of the fire site and set up a high-power negative-air-ion (NAI) smoke removal array. By measuring the number of NAIs and the change of PM2.5 particle concentration in the smoke, the unit efficiency of the smoke removal array to remove PM2.5 suspended particles was calculated. This study used the residential stair hall as the experimental site to detect the difference in the degree of NAI diffusion with or without wind assistance to design an NAI smoke-removal-assisted escape system for indoor smoke environments. It is expected to assist rescuers and escape people in obtaining cleaner air and clearer sight in a smoky environment, increasing the golden escape time.

Keywords: Negative Air Ion, Indoor Smoke Removal Design, Smoke Removal Efficiency, Particulate Matter, Fire Escape Equipment.