

# 以奈米碳管塗佈材料誘發電漿放電技術抑制禽舍 空氣中生物氣膠之實場確效評估

EFFICACY EVALUATION OF A CARBON NANOTUBE-INDUCED PLASMA DISCHARGE DEVICE FOR BIOAEROSOLS  
INACTIVATION IN A LAYER HEN HOUSE

勞動部  
勞動及職業安全衛生研究所  
副研究員

**洪柏宸**  
**Po-Chen Hung**

中信金融管理學院  
AI 環境工學與循環經濟研究中心  
研究員

**黃筱茜**  
**Hsiao-Chien Huang**

長榮大學  
職業安全與衛生學系  
副教授

**莊啓佑**  
**Chi-Yu Chuang**

中信金融管理學院  
通識教育中心自然學科  
教授

**徐櫻芳**  
**Chi-Yu Chuang**

中信金融管理學院  
通識教育中心自然學科  
教授

**楊心豪\***  
**Shin-Hao Yang**

嘉南藥理大學  
職業安全衛生系  
教授

**黃小林**  
**Hsiao-Lin Huang**

## 摘要

禽舍環境中生物氣膠為影響人員與動物健康之重要因子，為提升禽舍場域內空氣中微生物污染去除效能，本研究評估自行組裝奈米碳管塗佈電漿裝置，於實場實施放電作用，對於空氣中細菌與真菌氣膠濃度之活性抑制效果。本研究於選定之蛋雞飼養禽舍內裝設由奈米碳管材料塗佈之電漿放電裝置，並於 7 處不同位置進行空氣採樣，瞭解禽舍環境內細菌與真菌生物氣膠濃度分布情況，並選定 1 處作為評估奈米碳管材料塗佈之電漿放電裝置抑菌能力，分別於啟動前與後每 30 分鐘進行測定細菌與真菌氣膠濃度，評估抑菌能力隨時間變化趨勢。結果顯示，奈米碳管材料塗佈電極所誘發之電漿裝置於實場操作條件中，對空氣中細菌與真菌生物氣膠確實均具明顯去除效果。細菌氣膠濃度可降低約 65%，真菌氣膠則可達 55%，並於操作初期 (60~120 分鐘內) 即顯現之去除穩定效果。

**關鍵詞：**禽舍、生物氣膠、奈米碳管、電漿、抑菌。

\* 中信金融管理學院通識教育中心自然學科教授

709 台南市安南區台江大道 3 段 600 號 · [shinhaoyang@ntu.edu.tw](mailto:shinhaoyang@ntu.edu.tw)

## EFFICACY EVALUATION OF A CARBON NANOTUBE-INDUCED PLASMA DISCHARGE DEVICE FOR BIOAEROSOLS INACTIVATION IN A LAYER HEN HOUSE

### Po-Chen Hung

Institute of Labor,  
Occupational Safety and Health,  
Ministry of Labor, New Taipei  
City, Taiwan, ROC.

### Chi-Yu Chuang

Department of Occupational  
Safety and Health,  
Department of Occupational  
Safety and Health, Chang Jung  
Christian University, Tainan,  
Taiwan, ROC.

### Shin-Hao Yang\*

Division of Natural Science,  
Center for General Education,  
CTBC Business School, Tainan,  
Taiwan, ROC.

### Hsiao-Chien Huang

Research Center for AI  
Environmental Engineering and  
Circular Economy,  
CTBC Business School, Tainan,  
Taiwan, ROC.

### Ying-Fang Hsu\*

Division of Natural Science,  
Center for General Education,  
CTBC Business School, Tainan,  
Taiwan, ROC.

### Hsiao-Lin Huang

Department of Occupational  
Safety and Health, Chia Nan  
University of Pharmacy and  
Science, Tainan, Taiwan, ROC.

## ABSTRACT

Bioaerosols in poultry house environments are important factors affecting the health of both workers and animals. To improve the effectiveness of microbial pollution control in poultry house air, this study evaluated the antibacterial efficacy of a carbon nanotubes (CNTs)-coated plasma module under real-field conditions. The CNT-coated plasma device was installed in a selected layer hen house, and viable bioaerosols samples were collected at seven different locations to assess the distribution of bacterial and fungal bioaerosols concentrations. One location was designated to evaluate the inactivating efficacy of the CNTs plasma discharge device, with sampling conducted every 30 minutes before and after device operation to observe time-dependent changes in bioaerosols concentration. The results showed that the plasma discharge generated by electrodes coated with nanotube materials had a significant removal effect on airborne bacteria and fungi under actual operating conditions. The concentration of bacterial aerosols was reduced by approximately 65%, while fungal aerosols were reduced by about 55%, with a stable removal effect observed within 60 to 120 minutes of operation.

**Keywords:** Poultry house, Bioaerosols, Carbon nanotubes, Plasma, Inactivation.

Hung, P.C., Chuang C.Y., Yang S.\*, Huang, H.C., Hsu, Y.F., & Huang, H.L. (2026). "Efficacy Evaluation of a Carbon Nanotube-Induced Plasma Discharge Device for Bioaerosols Inactivation in a Layer Hen House." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 72(1), 15-24. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202603\\_72\(1\).0002](https://doi.org/10.29974/JTAE.202603_72(1).0002)

## 一、前言

在集約式、高密度的禽類飼養設施中，在空間中懸浮移動的生物氣膠 (bioaerosols) 污染已被證實為影響禽隻健康、降低生產效能，並造成作業人員職業性健康風險的重要因子。此些生物氣膠相關污染主要由細菌、真菌孢子、病毒及其代謝產物構成，來源包括禽隻排泄物、羽毛脫落、飼料粉塵與動物活動產生之懸浮粒子等。在 Wlazlo *et al.* (2023) 的調查研究中發現，禽舍場所內細菌與真菌濃度分別可高達  $10^8$  CFU/m<sup>3</sup>與  $10^5$  CFU/m<sup>3</sup><sup>[1]</sup>。楊等 (2014) 的研究團隊針對臺灣地區家禽屠宰場所空氣中生物氣膠進行污染監測分析，也發現作業區細菌總濃度與真菌孢子皆明顯偏高，並呈現空間分佈特性與危害潛勢<sup>[2]</sup>。上述研究結果均顯示禽舍與屠宰場域為高生物氣膠污染暴露風險之環境。

生物氣膠污染之健康影響包括呼吸道過敏、慢性支氣管炎、過敏性肺炎、黴菌毒素相關中毒、鼻眼喉部刺激症候群及氣味相關壓力反應等<sup>[3-4]</sup>。對動物而言，則可能導致肺部感染、抵抗力下降及生長指標不良<sup>[5]</sup>。因此，禽舍場所針對空氣品質實施控制工程措施不僅關係到作業人員之職業健康，也攸關畜禽生產效益與農業防疫安全。

現有科技中常見之空氣中生物氣膠污染控制或去除技術，主要包括安裝高效微粒空氣過濾器、紫外線消毒照射 (ultraviolet germicidal irradiation)、臭氧殺菌與化學藥劑噴霧消毒等。然而在高濕度、高粉塵量、糞尿羽毛等有機物濃度較高的實際動物飼養環境中，上述技術可能面臨濾材容易堵塞、紫外線照射死角、化學物質殘留與操作人員二次暴露等風險問題<sup>[6-7]</sup>。因此，尋求具備高效率、低副作用，且適用於禽舍飼養環境之替代性氣膠控制技術，已成為當前農業生物安全管理之關鍵議題。

近年電解鹽類產生之氯系消毒劑為近年逐漸應用於畜禽場域之空間消毒物質，因其具有廣泛抑制生物活性能力與良好材料相容性。Park *et al.* (2007) 與 Zhao *et al.* (2014) 證實其於禽舍環境中可有效抑制生物氣膠濃度<sup>[8-9]</sup>，黃等人 (2014) 亦於實場試驗中證明使用弱鹼性電解水能有效降低禽舍環境中生物氣膠總量<sup>[10]</sup>。惟其對於空氣中生物氣膠之即時去除效率仍受限於空間氣流混合與接觸時間等因素而尚有改善空間<sup>[11]</sup>。

針對空氣中生物氣膠污染控制技術的新近發展中，奈米碳管 (carbon nanotubes, CNTs) 材料因具備高導電性與場致發射 (field emission) 特性，可被應用於

電漿放電 (plasma discharge) 裝置中以提升自由基與電子活性物質產生效率。奈米碳管材料具備優異之場致發射特性，能有效降低放電電極啟動所需之起始電壓。所謂場致發射，係指電子在強電場作用下由材料表面逸出的現象。奈米碳管被廣泛認為為優良之場致發射材料，主因其結構具備極高之長徑比 (aspect ratio)，當施加外部電壓時，可於其尖端形成顯著之電場集中現象 (field enhancement effect)，導致局部電場強度大幅提升<sup>[12-13]</sup>。此一效應使得即使在相對較低之外加電壓下，仍可產生足夠高之局部電場以促進電子發射，並提升電流密度，進而強化放電效率。

本研究團隊先前已建構奈米碳管材料塗佈之電漿放電電極模組，並於環境模擬艙中進行細菌與真菌生物氣膠之活性抑制效能評估。實驗採用 *Escherichia coli*、*Bacillus subtilis* 與 *Candida famata* 為測試菌株，在 6.0 kV 放電條件下，90 分鐘內可達成超過 90% 之抑菌效果<sup>[14]</sup>。

本研究即以前述基礎成果為依據，將奈米碳管材料塗佈電極所製成之電漿放電模組，進一步組裝為主動空間淨化功能之電漿放電裝置，並將其應用於禽類養殖場中，進行現場效能測試。本研究先選定一處禽舍作為現地研究目標之場所，實施兩階段之試驗規劃。第一階段試驗為針對選定之禽舍進行全場域之活性生物氣膠之採樣與分析 (含細菌與真菌)，藉以瞭解其空間污染濃度背景分佈情形 (back-ground distribution)。而後第二階段則是在禽舍內部空間選定一處，將本研究所製作組裝之電漿放電裝置 (以下簡稱 CNT plasma 裝置) 裝設於目標禽舍，在連續運轉操作下進行對於區域生物氣膠去除效果之觀察，藉此驗證本研究所研製之奈米碳管材料電漿放電模組，對禽舍現場環境中生物氣膠污染之抑制成效與穩定性，並探討其對於禽類養殖場中生物氣膠淨化工作之實務可行性與推廣潛力。

## 二、研究方法

### 2.1 奈米碳管材料塗佈電漿放電裝置

本研究使用之空間淨化裝置以奈米碳管作為核心材料，塗佈於電極作為本裝置獨特之誘發電漿放電模組，再搭配抽風風扇與電源供應器元件共同組成具有空間淨化功能之裝置。電漿放電原理為利用高壓放電，激發空氣中水分子成為電漿狀態後釋放至空氣中，與空氣中細菌性與真菌性生物氣膠接觸後，予以破壞其

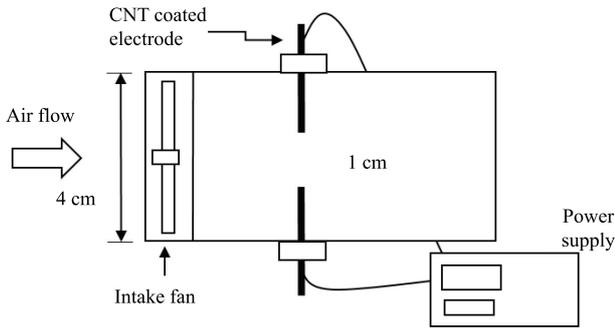


圖 1 奈米碳管材料塗佈之電漿放電裝置

細胞膜表面之蛋白質，進而抑制其生物活性，最後達到控制繁殖生長之目標。

奈米碳管 CNTs 材料塗佈之電漿放電模組如圖 1 所示，模組中奈米碳管放電電極，是利用銀膠將奈米碳管材料塗佈黏著於不鏽鋼電極上，透過外部電源供應器控制放電電壓。奈米碳管部分則選用以弧光放電法 (arc-discharge) 產生之多壁奈米碳管材料 (multi-wall carbon nanotube, MWCNT)，其中電極長度為 100 mm、奈米碳管塗佈區域為尖端 10 mm。本研究依據前期研究結果，將實場測試之電壓直接設定為 6.0 kV 之操作電壓<sup>[14]</sup>，而此奈米碳管材料塗佈誘發電漿放電之空間抑菌裝置之抽氣風速則是設定為 10 cm/s。

## 2.2 現場測試禽舍場所生物氣膠分佈背景調查

本研究執行空間淨化裝置現場測試之選定禽舍，為一室內蛋雞飼養場所，飼養作業環境換氣率約為 3.0 (l/hr)，作業環境之平面大小為 180 m × 20 m，空間配置如圖 2 所示，本研究分為兩個階段進行試驗，第一階段為針對選定禽舍進行活性生物氣膠污染之分佈背景調查。第二階段再將前一節所述及所研製並組裝之 CNT plasma 裝置架設於測試禽舍中，進行對於空間中活性生物氣膠抑制效果之確效 (efficacy) 評估。此蛋雞飼養之禽舍共有飼養區共三條走道，在本研究中選擇其中兩條走道作為生物氣膠分佈採樣之位址，作為第一階段背景分佈之調查區域，飼養區中每條走道中選擇 3 點(每 60 m 選取一點)作為實際活性生物氣膠採樣位址 (sampling site)，共計 6 點位 (編號為 A ~ F)。每個位址之生物氣膠採樣高度設定為離地 1.0 ~ 1.5 m，每個位址之採樣執行均是三重複方式。實際採樣則規劃為一日間早、中、晚三次採樣，時間則設定於早上 (9:00)、中午 (13:00)、傍晚 (17:00)，同時也同步紀錄現場溫度與濕度，作為全天性禽舍場所生物氣膠

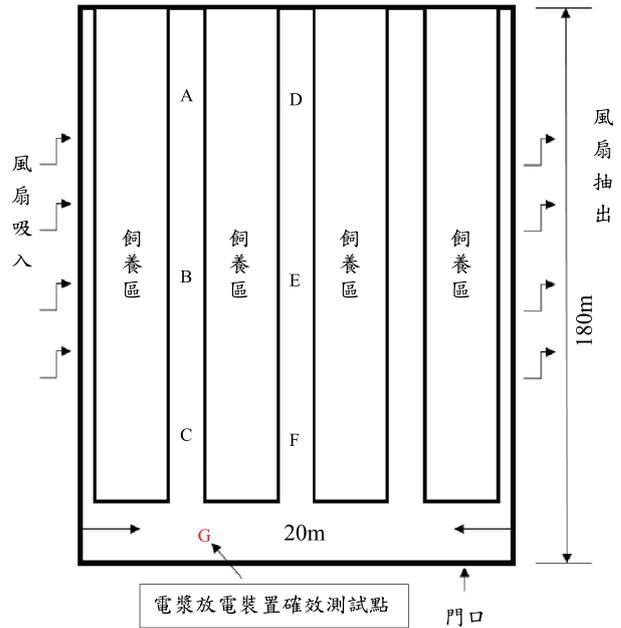


圖 2 禽舍現場環境與採樣點設定位置圖

背景分佈七個位址 (圖 2 之 A ~ G 點) 之資訊建立，可用於後續第二階段電漿放電裝置現場確效測試之條件規劃考量 (包含全禽舍內部濃度分佈、局部高濃度區域、日間濃度變化情形等)，同時亦避免禽舍中活性生物氣膠濃度於測試期間高度波動而干擾去除效果。此外，本研究同時也設置位於蛋雞飼養舍外部鄰近風扇吸入處設置一處之大氣環境濃度參考點進行採樣。

現場測試禽舍內外針對活性生物氣膠之採樣方法，依照我國環境部 NIEA E301.15C「室內空氣中總細菌檢測方法」及 NIEA E401.15C「室內空氣中總真菌數檢測方法」之規範，採樣高度則為距離地面 1.0 ~ 1.5 m 高 (由於考量禽舍場所作業人員均為彎腰或直立進行作業，故設定較此高度模擬人體呼吸)，以模擬人類呼吸帶之暴露。採樣位置數目之規劃原則上以每 500 ~ 1,000 平方公尺設立一個採樣位址，並且依照禽舍內部飼養作業及污染來源狀況，確定採樣位址數目與分佈。

## 2.3 現場測試禽舍中活性生物氣膠之採樣與分析

本研究於活性細菌與真菌採樣之執行，係依照上述環境部規範，使用衝擊式微生物空氣採樣器 (Quick Take 30r, SKC Inc., USA) 執行，此採樣器上設有 400 孔篩網，孔徑為 0.75 mm，採樣時以充電電池啟動內置馬達抽取場所內之空氣，當氣流經篩網轉變方向時，空氣內細菌及真菌氣膠即因慣性被收集到培養基上，

採樣流量為 28.3 L/min，採樣前後該機器本身會自行補正其流量，使用之採樣介質為倒入 27 mL 固體培養基之直徑 90 mm 可拋棄式塑膠培養皿。本研究採用二種培養基，Malt Extract Agar (MEA) 及 Trypticase Soy Agar (TSA)。其中 MEA 為美國工業衛生師協會 (American Conference of Government Industrial Hygienists, ACGIH) 推薦使用的廣效性培養基，可提供大部份的真菌生長，而 TSA 則用以收集培養空氣中之細菌。

每個採樣位址於背景調查部分進行早上、中午、傍晚等三次採樣，亦每個採樣點位輔以三重複樣本試驗進行，藉以瞭解現場測試禽舍之生物氣膠濃度全天分布情形。考量本研究之測試場所為封閉式室內養殖場，生物氣膠濃度容易累積，因此每次採樣時間設定為 10 秒 (s)，避免菌落數過多而無法計數 (too numerous to count) 無法情形出現。研究團隊於現場採樣後將培養基攜回實驗室後依規範放入恆溫培養箱中培養，TSA 於 30 °C 下培養 48 小時以計算細菌濃度，而 MEA 則於 25 °C 下培養 5 天以計算真菌濃度。培養後將所有培養基取出計數菌落生成數 (colony forming unit, CFU)，再依照環境部 NIEA 規範推算空氣中活性生物氣膠濃度。各個採樣位址取得之活性生物氣膠濃度數據，以變異數分析 ANOVA 觀察其有無統計上之差異。

## 2.4 禽舍中電漿放電裝置抑制活性生物氣膠之確效測試

在針對現場測試禽舍完成第一階段活性生物氣膠污染之背景濃度調查後，研究團隊即將 CNT plasma 裝置裝設於禽舍中進行第二階段之確效測試。CNT plasma 裝置之架設位置選定於禽舍內部兩條走道間外緣處，鄰近出入口 (位於圖 2 之 G 點)，進行使用 CNT plasma 裝置作用於活性生物氣膠之去除確效測試位址。選擇此處 G 點作為去除確效測試位址之原因，為預期避免禽舍內局部生物氣膠濃度分布變動，干擾去除效果之觀察，同時也免除電漿施放之聲音與光線對於雞隻驚擾。更為重要的是，減少禽舍風扇尾氣吹送、通風變動對於電漿濃度等干擾因素。所有測試均於無人進入之條件下實施，以減少人類移動對於生物氣膠濃度的即時影響。

本研究第二階段之確效測試同樣亦是包含細菌與真菌氣膠微粒分別各進行 2 次去除效果觀察，合計進行 4 次之禽舍現場生物氣膠抑制確效測試。本研究研製組裝之 CNT plasma 裝置於測試禽舍內架設高度為 1.5 m (與生物氣膠採樣高度相同)，但採樣位址為距離

CNT plasma 裝置 1.0 m 處，避免因電漿施放範圍而造成誤差干擾。

CNT plasma 裝置之生物氣膠抑制確效測試流程為裝置啟動前同樣先進行一次活性生物氣膠採樣作為抑制前濃度基準點；而後啟動裝置後讓其持續操作，且每 30 分鐘進行一次活性生物氣膠採樣至啟動後 180 分鐘 (採取 6 個樣本)，藉由觀察生物氣膠濃度變化，以確定裝置之抑制效果與持續性。

## 三、結果與討論

### 3.1 現場測試禽舍場所生物氣膠之背景濃度與分佈

本研究第一階段之試驗為針對蛋雞舍進行生物氣膠背景濃度調查，共設置 7 個空氣採樣位址，包括飼養區每條走道 6 個位址 (如圖 2 之 A~F) 與 1 個 CNT plasma 裝置架設處 (位於走道外緣之 G 點)。活性生物氣膠採樣與分析結果綜合而論，禽舍中空氣細菌濃度普遍落在  $1.23 \times 10^5$  至  $1.99 \times 10^5$  CFU/m<sup>3</sup> 範圍之間，真菌濃度則介於 2,000 至 5,000 CFU/m<sup>3</sup> 範圍，但呈現內部空間不均分布情形，且中央走道區域與排氣末端位置濃度略高，顯示禽隻飼養密度與活動、排泄與通風流向，皆可能為生物氣膠產生污染集中與滯留原因。

表 2 即是本研究現場測試禽舍空間中，合計 7 個採樣位址之真菌生物氣膠濃度分佈、環境溫度 (Temp) 與相對濕度 (relative humidity, RH) 之調查結果。整體採樣環境之環境特性為，上午相對濕度 55% 及溫度 15 °C；中午相對濕度 51% 及溫度 15 °C；下午相對濕度 50% 及溫度 14 °C。數據顯示在測試禽舍內部 7 個採樣點之真菌生物氣膠濃度在 1,974~4,986 CFU/m<sup>3</sup>。而在走道外緣之採樣點 G 真菌生物氣膠濃度則介於在 1,974~2,341 CFU/m<sup>3</sup> 間。觀察整體數據可發現，禽舍內部之走道各區真菌生物氣膠濃度顯著高於外緣濃度，而中午時段全禽舍內部之真菌濃度顯著低於其他兩個時段 ( $p < 0.05$ )。而在走道內不同採樣點之採樣結果並無顯著差異 ( $p > 0.05$ )。

表 3 即是本研究現場測試禽舍中，針對內部 7 個採樣點細菌生物氣膠濃度分佈、環境溫度與濕度之調查結果。結果顯示在測試禽舍飼養區走道之 7 個採樣點之細菌生物氣膠濃度在  $1.23 \times 10^5 \sim 1.99 \times 10^5$  CFU/m<sup>3</sup>，在走道外緣之採樣位址 G 之細菌生物氣膠濃度在  $1.33 \times 10^5 \sim 1.52 \times 10^5$  CFU/m<sup>3</sup> 間，而禽舍外大氣環境之濃度約為  $2.5 \times 10^3$  CFU/m<sup>3</sup>。觀察整體數

表 2 現場測試禽舍中真菌性生物氣膠濃度

採樣點	上午	中午	下午
	平均菌落數 (CFU/m <sup>3</sup> ) RH 50%, Temp 15 °C	平均菌落數 (CFU/m <sup>3</sup> ) RH 51%, Temp 15 °C	平均菌落數 (CFU/m <sup>3</sup> ) RH 50%, Temp 14 °C
A	4,542±473	3,128±541	4,518±764
B	3,997±541	3,068±285	4,688±598
C	4,552±389	3,093±244	4,986±1,213
D	4,594±822	2,969±678	4,796±1,132
E	4,432±365	2,731±293	4,005±1,026
F	4,077±722	3,166±165	3,958±532
G	2,067±365	1,974±355	2,341±426

表 3 現場測試禽舍中細菌性生物氣膠濃度

採樣點	上午	中午	下午
	平均菌落數 (10 <sup>5</sup> CFU/m <sup>3</sup> ) RH 50%, Temp 15 °C	平均菌落數 (10 <sup>5</sup> CFU/m <sup>3</sup> ) RH 51%, Temp 15 °C	平均菌落數 (10 <sup>5</sup> CFU/m <sup>3</sup> ) RH 50%, Temp 14 °C
A	1.67±0.32	1.25±0.48	1.98±0.32
B	1.67±0.45	1.23±0.36	1.94±0.26
C	1.50±0.17	1.25±0.43	1.86±0.37
D	1.66±0.27	1.35±0.29	1.79±0.18
E	1.56±0.33	1.42±0.36	1.92±0.29
F	1.55±0.56	1.27±0.27	1.99±0.10
G	1.42±0.12	1.33±0.22	1.52±0.31

據，可發現細菌生物氣膠與真菌生物氣膠濃度分佈情形一致，飼養區走道（採樣點 A~F）之細菌生物氣膠濃度是高於外緣（採樣點 G），而中午時段細菌生物氣膠濃度也是顯著低於其他兩個時段（ $p < 0.05$ ）。而在飼養區走道內不同採樣點之採樣結果同樣也並無統計上之顯著差異（ $p > 0.05$ ）。

另比較真菌與細菌之採樣結果，可以發現細菌生物氣膠濃度顯著高於真菌生物氣膠濃度（ $p < 0.05$ ）。推測主要原因在於養雞場作業環境中糞便等排泄物累積而造成之現象。此一結果與過往文獻中對於禽舍環境之生物氣膠各項調查特性結果是相符的<sup>[1-2]</sup>。整體觀察，可以發現養雞場作業環境之生物氣膠濃度相當高，在通風換氣率為 3 (1/hr) 之情形下，細菌生物氣膠濃度仍可達到 10<sup>5</sup> CFU/m<sup>3</sup> 數量級水準，顯示此一蛋雞飼養禽舍具有盡力推動環境清潔、空氣品質改善措施之必要性。此外，位於禽舍內部外緣之採樣點 G，其真菌與細菌之採樣所得濃度皆較飼養區走道（採樣點 A~F）顯著為低，但細菌生物氣膠濃度仍維持穩定於 10<sup>5</sup> CFU/m<sup>3</sup> 數量級、真菌生物氣膠仍為 10<sup>3</sup> CFU/m<sup>3</sup> 數量級，且上午、中午、下午三次採樣結果皆未有顯著變動（濃度差異低於 10%），表示採樣點 G 雖然同樣位於禽舍內部而有高污染情形，但濃度較為穩定，不似飼養區走道（採樣點 A~F）可見濃度分布不均現象

（真菌濃度介於 2,700 至 5,000 CFU/m<sup>3</sup> 範圍）。故選定採樣點 G 作為後續 CNT plasma 裝置去除確效之位址，較能排除背景濃度變動之干擾，亦能全天操作裝置而不驚擾飼養蛋雞活動，符合本研究希冀釐清奈米電漿對於生物氣膠活性抑制效果之預期，可後續執行後續之第二階段試驗。

### 3.2 禽舍中電漿放電裝置抑制細菌生物氣膠效果

本研究於第二階段將 CNT plasma 裝置架設於現場測試禽舍中（位於圖 2 之 G 點）並啟動裝置進行持續放電操作，對於禽舍內部細菌生物氣膠實施污染抑制處理，並搭配採樣與分析比較啟動前後之細菌氣膠濃度變化以確定其效果，共進行兩次測試。第一次去除測試之結果顯示，禽舍內部於 CNT plasma 裝置啟動前，初始細菌濃度約介於  $1.42 \times 10^5$  至  $1.52 \times 10^5$  CFU/m<sup>3</sup>，經 CNT plasma 裝置啟動後，30 分鐘內即可發現細菌氣膠濃度發現下降趨勢（約為初始濃度之 65%，如圖 3 所示），而後細菌氣膠持續降低至原濃度之約 40%，等於對於禽舍內局部空間之細菌氣膠去除率可達到約 60%，且持續至 180 分鐘測試結束。此一結果顯示，該 CNT plasma 裝置於自然通風條件下之

禽舍，可取得有效之細菌氣膠濃度抑制效果，特別在距離裝置 1 公尺範圍效果顯著。

圖 4 為第二次 CNT plasma 裝置對於禽舍內部細菌生物氣膠之抑制測試結果。數據顯示與第一次測試之趨勢類似，CNT plasma 裝置啟動後 30 分鐘禽舍內部之細菌生物氣膠濃度可降低至初始濃度之約 65%，而持續操作裝置可達成約 60% 之抑制效果直至 180 分鐘測試結束。本研究於蛋雞飼養場內部所進行之兩次使用 CNT plasma 裝置去除細菌生物氣膠之抑制測試結果趨勢一致，顯示即便是針對細菌氣膠背景數量級濃度為  $10^5$  CFU/m<sup>3</sup> 等級之較高污染之禽舍，本研究所設計研製之 CNT plasma 裝置仍可透過放電操作顯著降低污染濃度，且具有再現性。

### 3.3 禽舍中電漿放電裝置抑制真菌生物氣膠效果

本研究所研製之 CNT plasma 裝置架設於現場測

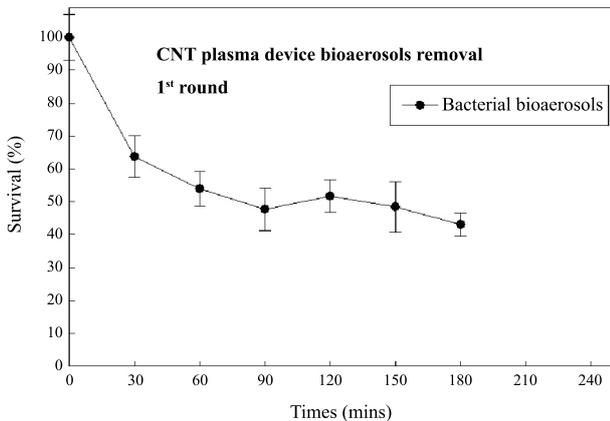


圖 3 禽舍中電漿放電裝置對細菌生物氣膠之抑制確效測試 (第一次測試)

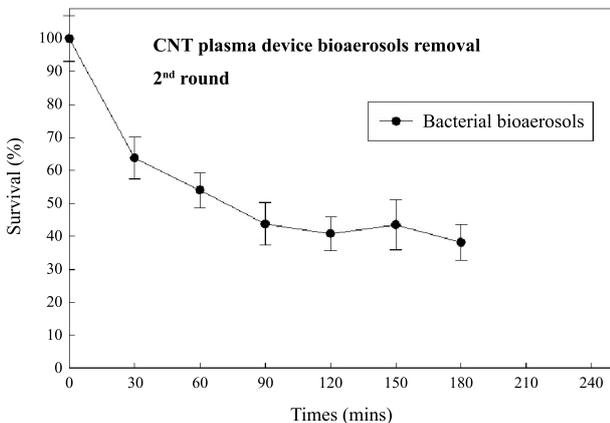


圖 4 禽舍中電漿放電裝置對細菌生物氣膠之抑制確效測試 (第二次測試)

試禽舍中對於真菌生物氣膠之兩次抑制測試效果如圖 5 與圖 6 所示。圖 5 顯示測試禽舍空間中真菌生物氣膠濃度於 CNT plasma 裝置啟動前，初始濃度約為 1,974 ~ 2,341 CFU/m<sup>3</sup>。而於 CNT plasma 裝置啟動放電之後於 30 分鐘內可觀察到 25% 之真菌生物氣膠濃度下降之現象。而後隨著 CNT plasma 裝置連續操作，真菌氣膠濃度最低可減少至試驗開始前之約 45%，表示其抑制效率最佳可達約 55%。此效果於第二次測試中亦重現，圖 6 顯示 CNT plasma 裝置啟動放電之後於 30 分鐘後，真菌生物氣膠濃度由初始時降低至約 75%，且最佳抑制效率出現於 120 分鐘與 180 分鐘時，同為約 55%，顯示此 CNT plasma 裝置具有穩定之真菌氣膠活性抑制能力。

### 3.4 奈米碳管材料塗佈電漿放電裝置抑制生物氣膠之確效評估

本研究所研製之奈米碳管材料誘發電漿放電作用

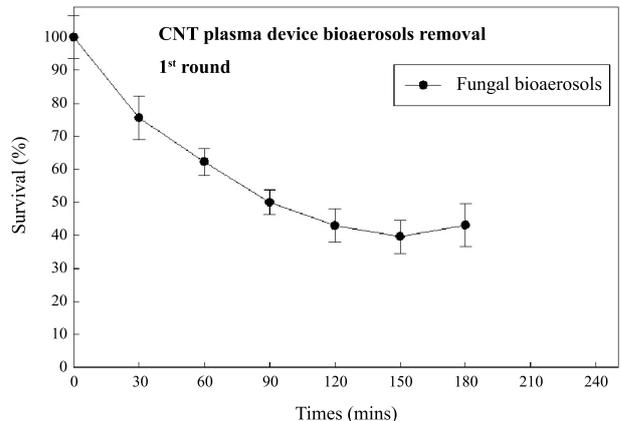


圖 5 禽舍中電漿放電裝置對真菌生物氣膠之抑制確效測試 (第一次測試)

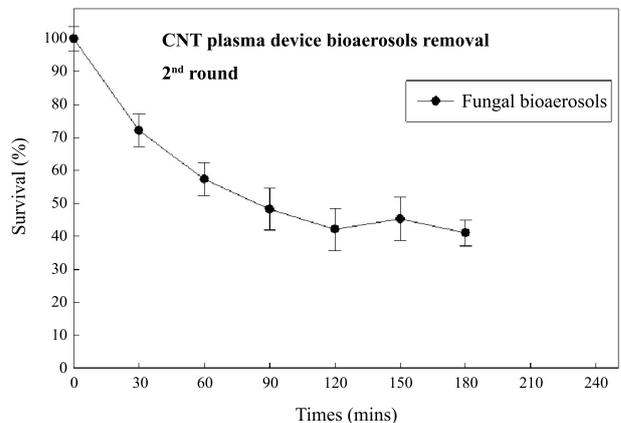


圖 6 禽舍中電漿放電裝置對真菌生物氣膠抑制確效測試 (第二次測試)

之 CNT plasma 裝置，在共四次禽舍現場測試中確實可發現具有對於細菌與真菌生物氣膠之濃度抑制功能。在 CNT plasma 裝置啟動後的 30 分鐘內，細菌氣膠抑制效率可達約 35%，至 90 分鐘時則提高至約 65%。而對於真菌氣膠而言，則是於啟動 30 分鐘內可達成 25% 之抑制效率，抑制效率可延續至 120 分鐘後仍維持約 55% 之水準，顯示此裝置對於不同類型之生物氣膠都具有持續性之濃度抑制作用，且具有再現性。由奈米碳管材料所誘發之電漿，由於可對於微生物本身產生包括物理性破壞與化學性氧化等多重作用，進而達到抑制生物氣膠活性的目標。首先是奈米碳管具有之高長徑比 (aspect ratio) 與尖端結構 (sharp-tipped structure)，可能直接穿刺鄰近微生物細胞膜而破壞其結構(即所謂奈米飛鏢效應 (nano-dart effect))。再者，CNT plasma 能夠促進活性氧化物 (reactive oxygen species, ROS) 與氫氧自由基 (hydroxyl radicals) 之產生，此些具有高度反應性之化學物質，可對於微生物產生氧化壓力 (oxidative stress)，造成其細胞膜、蛋白質與遺傳物質之損傷，最終使其喪失感染與繁殖之活性<sup>[15-17]</sup>。

而電漿放電對於真菌之抑制效果不如細菌，其原因係真菌生物氣膠常以孢子 (fungal spore) 型態懸浮於空氣之中，而真菌孢子細胞壁通常比細菌的細胞壁更深厚且結構更複雜，同時亦具有幾丁聚醣 (chitosan) 類物質，能有效阻擋電漿中活性氧化物 ROS 之穿透，從而具有更高的耐受性與活性。相較之下，細菌之細胞壁雖然也具有保護作用，但在面對電漿的物理性與化學性作用時，其結構的緻密性不如真菌孢子，使得活性氧化物更容易接觸並破壞細胞膜及內部結構。另外，真菌孢子於微生物生命週期中屬於休眠狀態，其代謝活動極低。而 ROS 所帶來之遺傳物質損傷與蛋白質變性等效應，由於真菌孢子的代謝活動低下，故其累積速度也不如處於活躍生長期、代謝反應旺盛的細菌，此一條件使得真菌氣膠比起細菌氣膠，面對電漿放電之抑制處理更具有抵抗能力<sup>[18-19]</sup>。

### 3.5 電漿放電裝置抑制生物氣膠之分布效益與空間限制

雖然本研究所研製之 CNT plasma 裝置經確效測試顯示，其於禽舍局部空間中可發揮顯著抑制生物氣膠濃度之效果，但由於禽舍場域空間較大，本研究所研製及測試之單一電漿放電裝置僅能提供局部且有限之淨化範圍。故若欲於全場域希冀取得有效抑制生物氣膠、淨化環境污染之效果，則需進一步擴增 CNT

plasma 裝置數量，以提升整體空間涵蓋率與控制效益。

此外，以通風換氣的角度來評估電漿放電對於微生物的作用，以細菌生物氣膠數據而言，在本研究中禽舍中細菌生物氣膠濃度大約為  $10^5$  CFU/m<sup>3</sup> 數量級範圍，而禽舍外採樣參考點之大氣中細菌氣膠濃度大約為  $2.5 \times 10^3$  CFU/m<sup>3</sup> 層級，若是以雞舍換氣率 3 (l/hr) 進行空氣置換，理論上測試禽舍內細菌氣膠濃度應會迅速降低至與大氣濃度接近之  $10^3$  CFU/m<sup>3</sup> 附近範圍，但於背景採樣過程中可發現，禽舍內細菌氣膠濃度在各個時段均位於  $10^5$  CFU/m<sup>3</sup> 數量級水準，故可推論雞舍內確實存在細菌氣膠之污染源，例如雞舍地面上各類動物排泄物或遺落物如羽毛、砂塵、糞便、尿液與飼料殘餘，此些有機物質之累積均可能是細菌生長繁殖，而後成為氣膠產生來源，且數據顯示，即便以風扇對於禽舍內部實施通風換氣並無法有效置換空氣並移除污染，造成禽舍內細菌氣膠濃度仍是顯著高揚。以環境衛生與飼養實務角度而言，禽舍管理者應考慮導入周遭環境清潔、消毒與物料管制措施，由污染來源實施源頭控管，強化整體生物安全管理，減少禽隻與人員之健康風險。本研究所推動之裝設電漿放電裝置，針對空氣進行淨化處理，雖可達成部分污染傳播路徑阻斷之效果，實為整體改善飼養環境品質方案之一。

本研究使用奈米碳管材料所誘發之電漿作為媒介，確定可在放電裝置啟動後，在低耗電、短時間之條件下即收致抑制細菌與真菌活性，進而達到降低生物氣膠濃度之效果，且在裝置持續操作中也能夠持續穩定發揮淨化局部空間之能力。但考量電漿物質在空氣中會快速與水分發生反應，故能夠發揮抑制微生物活性之範圍較窄<sup>[19-20]</sup>。根據本研究之實場操作經驗與試驗結果可得知，未來若欲進一步應用電漿放電於農牧場所之飼養環境品質改善，除提升 CNT plasma 裝置數量與部署密度外，亦可搭配通風空調系統調整氣流導向、控制溫濕度與風速，使得電漿能夠與微生物有更多接觸之機率，並且搭配不同通風與環境條件進行長期性、更為完整之後續抑制效能評估。

## 四、結論

綜合本研究之試驗結果可知，蛋雞飼養禽舍確實有導入空間淨化措施、改善環境品質之必要性，奈米碳管材料塗佈電極所誘發之電漿放電裝置於實場操作條件中，對空氣中細菌與真菌生物氣膠確實均具明顯濃度抑制效果。細菌氣膠濃度可降低約 65%，真菌氣

膠則可達 55%，並於操作初期 (60 ~ 120 分鐘內) 即顯現之去除穩定效果。然其作用範圍受限於空間與氣流條件，僅能提供局部空間淨化之效益，對於整體禽舍空間之改善仍有其侷限性與限制條件，有待未來拓展其潛力。

## 五、誌謝

感謝勞動部勞動及職業安全衛生研究所提供經費贊助此研究，研究團隊致上最高敬意。

## 參考文獻

1. Wlazło, Ł., J. Sowińska, A. Chmielowiec-Korzeniowska and Z. Dobrzański, "Poultry House as a Point Source of Intense Bioaerosol Emission," *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 30(1), pp.82-88, 2023.
2. 楊心豪、黃筱茜、洪柏宸、莊啟佑、羅金翔：家禽屠宰作業環境空氣中細菌與真菌之分佈與特性，*勞動及職業安全衛生研究*，第 22 卷，第 4 期，pp. 317-330，2014。
3. Jones, R. M., "Indoor bioaerosol exposure and health effects," *Environmental Health Perspectives*, 107 (Suppl 3), pp.487-492, 1999.
4. Thorne, P. S., M. S. Kiekhaefer, P. Whitten and K. J. Donham, "Comparison of Bioaerosol Sampling Methods in Barns Housing Swine," *Applied and Environmental Microbiology*, 58(9), pp.2543-2551, 1992.
5. Schlosser, O., A. Huyard and V. Degrange, "Bioaerosol Emissions from Livestock Buildings: Quantification and Risk Assessment," *Atmospheric Environment*, 244, 117973, 2021.
6. Chen, L., H. Zhang and Y. Wang, "Inactivation of Airborne Escherichia Coli and Porcine Respiratory Coronavirus by Cold Plasma Ionizer Combined with Electrostatic Precipitator," *Journal of Environmental Sciences*, 114, pp.123-130, 2022.
7. Lee, B. U. and M. Yermakov, "Assessment of Bioaerosol Control by a Mobile Air Filtration System," *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2), pp.180-185, 2011.
8. Park, G. W., D. M. Boston, J. A. Kase, M. N. Sampson and M. D. Sobsey, "Evaluation of Fog-based Application of Sterilox Hypochlorous Acid Solution for Inactivation of Human Norovirus," *Applied and Environmental Microbiology*, 73(14), pp.4463-4468, 2007.
9. Zhao, Y., H. Xin and W. Zheng, "Free Chlorine Loss During Spraying of Membraneless Acidic Electrolyzed Water and Its Antimicrobial Effect on Airborne Bacteria from Poultry House," *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(2), pp.249-255, 2014.
10. Zheng, W., Y. Zhao and H. Xin, "Optimization of Slightly Acidic Electrolyzed Water Spray for Airborne Culturable Bacteria Reduction in Animal Housing," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(4), pp.185-192, 2013.
11. 黃筱茜、楊心豪、方煒、羅金翔、洪柏宸、莊啟佑：應用弱鹼性電解水於禽類飼養場中抑菌之研究，*農業工程學報*，第 60 卷，頁 35-42，2014。
12. Lu, J., Y. Cheng and D. Wang, "Enhancement of Cold Plasma Sterilization Using CNT-based Electrodes in Low Pressure Systems," *Plasma Processes and Polymers*, 20(2), e2100213, 2023.
13. Yao, M., G. Mainelis and T. Reponen, "Application of Electrical Field in Filtration and Bioaerosol Control: A Review," *Science of the Total Environment*, 407(21), pp.6060-6074, 2009.
14. Chuang, C.-Y., Y.-F. Hsu, P.-C. Hung, Y.-T. Dai and S. Yang, "Evaluation of the Inactivating Ability of Carbon-Nanotube Coated Plasma Treatment on Bioaerosols for Indoor Air Cleaning," *Coatings*, 12(10), 1497, 2022.
15. Teixeira-Santos, R., Gomes, M., Gomes, L. C., Mergulhão, F. J., & Gomes, J. Antimicrobial and Antibiofilm Activity of Carbon Nanotube-based Surfaces: A Systematic Review. *Microorganisms*, 8(11), 1824, 2020.
16. Saleemi, M., Naveed, M., Shoaib, M., Ahmed, A., Arshad, M., & Hussain, T. Enhanced Antibacterial Activity of Silver-decorated Carbon Nanotubes Via Reactive Oxygen Species Generation. *Frontiers in Chemistry*, 9, 672423. 2021.
17. Ishikawa, K., Mizuno, H., Tanaka, H., Tamiya, K., Hashizume, H., Ohta, T., Hori, M. *et al.* Real-time in Situ Electron Spin Resonance Measurements on Fungal Spores of *Penicillium Digitatum* During Exposure of Oxygen Plasmas. *Applied Physics Letters*, 101(1), 2012.
18. Soušková, H., Scholtz, V., Julák, J., Savická, D. "The Fungal Spores Survival Under the Low-temperature Plasma," In: Machala, Z., Hensel, K., Akishev, Y. (eds)

Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer, *Dordrecht*, 2012.

19. Sakudo, A., Yagyu Y., Onodera T, “Disinfection and Sterilization Using Plasma Technology: Fundamentals and Future Perspectives for Biological Applications,” *International Journal of Molecular Sciences*, 20(20), 5216, 2019.
20. Moszczyńska, J., Roszek, K., & Wiśniewski, M. “Non-

thermal Plasma Application in Medicine-focus on Reactive Species Involvement,” *International Journal of Molecular Sciences*, 24(16), 12667, 2023.

收稿日期：民國 114 年 06 月 27 日

修改日期：民國 114 年 09 月 03 日

接受日期：民國 114 年 09 月 15 日