

廢(污)水處理類

非熱電漿產生雞尾酒式活性物種處理 新興污染物技術評析

柯致宇*、林威澄**、謝章興***、官文惠****

摘 要

新興污染物為新認定或之前未確認、法規未規範，但對人體健康及生態環境具有風險性的化學污染物，這類污染物目前尚未有完整調查、評估或監測資料顯示是否對人體造成影響，國際上也普遍尚未列管。使用後的新興污染物被排放至環境水體，對自然界與人體可能造成一定程度的危害，傳統污水處理程序卻難以將這類污染物有效降解去除，故如何妥善處理環境中的新興污染物，成為近年國內外關注的議題。

非熱電漿(non-thermal plasma)利用電子撞擊原子或分子，激發出多樣化具反應性的高活性物種，近似高級氧化處理，但非熱電漿技術可藉由操作參數之調控，如雞尾酒般產出不同種類與比例的自由基、激發態分子或碎片、陰陽離子、以及電子，且具不須外加化學藥劑與佔地空間小之優勢，近年來在環境污染控制之應用研究受到大量的關注。儘管非熱電漿技術近年快速發展，且較熱電漿處理技術節能、設置成本低，但應用於水處理領域仍有許多待突破之處，本文針對國內外近年非熱電漿應用於水中新興污染物處理之技術進展與應用、機會與挑戰進行評析。

【關鍵字】新興污染物、非熱電漿、高級氧化處理、活性物種

* 明志科技大學 環境與安全衛生工程系

** 明志科技大學 環境與安全衛生工程系

*** 明志科技大學 電漿與薄膜科技中心

**** 明志科技大學 環境與安全衛生工程系

研究助理

碩士班研究生

顧問

教授

一、前言

依據美國環境保護署白皮書 (EPA, 2008) 定義，新興污染物為新認定、尚未確認、或法規未規範，但對人體健康及生態環境具有風險的化學污染物質。這類污染物多數由人類活動產生且不易於環境中分解。由於目前尚未有完整調查、評估或監測資料顯示是否對人體造成影響，國際上多數國家均尚未列管。隨著分析技術的進步，逐漸在河川、海洋、甚至飲用水中測得這些污染物蹤跡，因而稱為新興污染物。

新興污染物種類廣泛，包含藥物與個人衛生保健用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs)、內分泌干擾物 (endocrine disrupting chemicals, EDCs)、持久性有機污染物 (persistent of organic pollutants, POPs)、微塑料 (microplastic)、無機污染物 (inorganic pollutant)、奈米材料 (nanomaterials)、消毒副產物 (disinfection byproducts) 等 (Lei et al., 2015)。這些污染物結構複雜且生物難分解性，水中含量低，故無法以傳統污水處理程序有效降解 (Rathi et al., 2021)；因此，利用氫氧自由基為主要氧化劑的高級氧化技術 (Advanced oxidation processes, AOP) 成為降解該些污染物的重要方法。成熟的 AOP 程序有光催化、臭氧氧化、芬頓和光芬頓氧化與 UV/H₂O₂ 氧化等；近年則有電離輻射、非熱電漿等新興高級氧化水處理技術之應用報導。非熱電漿藉由外加高壓或電磁波等方式，使通入的載流氣體分子產生放電現象後，激發出多樣化具反應性的高活性物種，可藉由操作參數之調控，如雞尾酒般調配出不同種類與比例的自由基、激發態分子或碎片、陰陽離子、以及電子，且具不須外加化學藥劑、佔地空間小與產生污泥量少之優勢，近年來在水中新興污染物控制之應用研究受到大量的關注 (Mouele et al., 2021)。本文回顧整理近年非熱電漿用於新興污染物水處理領域的成果，針對新興污染物降解、礦化能力進行評析。

二、非熱電漿技術原理

電漿 (plasma) 一詞緣起於 1927 年，科學家 Irving Langmuir 將電解離氣體稱為電漿，是一種正電與負電數目相同的穩定電中性氣體，是除了一般熟知的固、液、氣三態外的第四態物質，另有等離子體之名稱。如圖 1 (a) 所示，固、液、氣態物質的

電子皆分布於原子或分子外圍的軌域，電漿態則為原子或分子外圍的電子受到足夠能量或熱激發，而脫離原子或分子束縛的狀態，這些被激發的電子會再次撞擊其他分子，這個一傳十、十傳百的電子激發再撞擊的過程，被稱為崩潰現象（avalanche），示意如圖 1（b）。在氣體崩潰過程中或之後，起始的氣態分子會產生離子化、激發、分解等現象，這個過程並形成大量正或負離子、激發態分子、自由基或分子碎片、甚至電磁波，故有時可見顯著的亮光，此系統中所有物質的總和即稱為電漿態 (Lieberman & Lichtenberg, 1994)。由於其中含有許多具反應性的物種，故被廣泛應用於材料表面改質、光電產品、半導體製程，近年也在健康醫療、美容照護、精準農業以及環境污染控制與復育等領域有快速的發展。

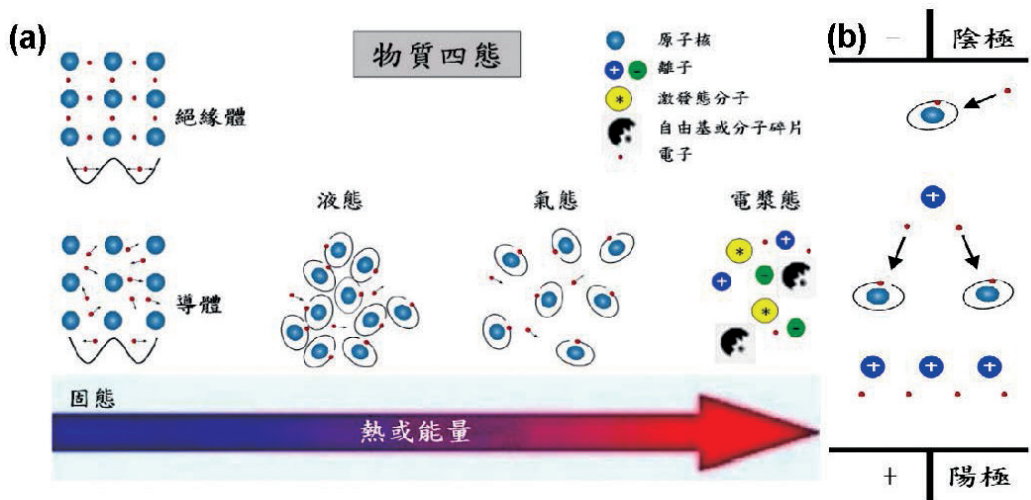


圖 1 電漿特性 (a) 四態物質比較；(b) 電場作用下之電子崩潰現象

2.1 非熱電漿特性

依照電漿態離子化的程度，可區分成熱電漿（thermal plasma）與非熱電漿（non-thermal plasma），前者為氣體分子近乎完全離子化的型態，電子溫度與整個氣體的溫度幾乎相等，電漿溫度約在 20,000 K 以上，由於內部所有粒子的溫度相當，故又稱為（熱）平衡電漿；非熱電漿則是部分離子化的形態，其中的電子溫度約為 1~5 eV（1eV 等於 11,605 K），但氣體溫度卻遠低於電子溫度，甚至僅略高於室溫，由於其中的粒

子未達熱平衡，故非熱電漿也被稱為非（熱）平衡電漿，或低溫電漿或冷電漿，兩者之特性比較彙整文獻資料如表 1 所示（李灝銘 & 張木彬，2004; Indarto et al., 2008）

表 1 熱電漿與非熱電漿特性比較彙整

	熱電漿	非熱電漿
定義	完全離子化之氣體	部份離子化之氣體
離子化程度 (%)	100	10^{-4} – 10^{-1}
系統壓力 (atm)	≥ 1 大氣壓	≤ 1 大氣壓
氣體溫度 (T_g , K)	$> 2\times10^4\text{K}$	$\sim 300\text{ K}$ (室溫)
電子溫度 (T_e , K)	$T_e = T_g$	$T_e/T_g = 10\sim1000$
電子數目 ($\#/m^3$)	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^{20}$
反應轉化率	高	低
建造成本	高	低
氣體狀態	熱平衡狀態	非熱平衡狀態

資料來源：（李灝銘 & 張木彬，2004; Indarto et al., 2008）

電漿技術應用於環境污染控制領域仍以使用熱（高溫）電漿為主，由於能耗較高，目前以有害廢棄物熔融、氣態污染物氧化破壞為主；非熱電漿則是在氣狀污染物分解已有實務技術或商品（如空氣清淨機）問世，但運用在水處理領域相對發展較慢，究其原因可能是電漿與水的界面物理化學現象仍有許多未解的問題，以及水中複雜成分對電漿的反應性等仍待釐清。

2.2 產生非熱電漿之方式

非熱電漿技術的應用中，選擇適切的電漿產生方式是系統的關鍵，包括氣體壓力、能量源與電極配置，不同的組合產生的非熱電漿形式不盡相同。由於電漿的產生，是因為其中的氣體分子受到外加的能量源而產生電子游離作用，故文獻中敘述電漿的產生方式，常用放電（discharge）一詞。目前常用的非熱電漿放電形式包含有介電層屏蔽放電（dielectric barrier discharge, DBD）、電暈放電（corona discharge）、輝光放電（glow discharge）、微波放電（microwave-driven discharge）等形式 (Ehlbeck et

al., 2010)。介電層屏蔽放電係利用介電材料屏蔽放電之電極，由於介電層為絕緣材且覆蓋電極，故介電層上會聚積與該電極相反的電荷並形成與電極相反的電場，當累積足夠電荷即會在該點處產生微放電（microdischarge）或稱為電漿絲（Li et al., 2020）；由於介電層存在，故可限制放電電流，並防止放電現象從電漿絲轉變為電弧，且因為電荷可在整個介電層表面蓄積，故放電區可遍及整個介電層覆蓋區域，可創造較大面積的電漿作用區。微放電產生的電漿絲脈衝，持續時間與壓力、氣體特性和選用的介電層材料有關（Liao et al., 2017; Liu et al., 2016）。

圖 2 為透過放電過程產生非熱電漿的電壓、電流關係圖。在常壓或低壓下進行放電，當施予的電壓高於崩潰電壓時，能量粒子撞擊氣體分子，導致氣體分子游離、激發，故產生輝光放電，輝光放電區域包含典型輝光與非典型輝光（圖中灰色區域）；當電流大於非典型輝光區的臨界點時，放電型態改變為電弧放電（arc discharge）；反之低於崩潰電壓時，能量粒子未能完全解離、激發氣體分子，此區域稱為暗電流放電（dark discharge），亦可稱為湯森放電（Townsend discharge）。

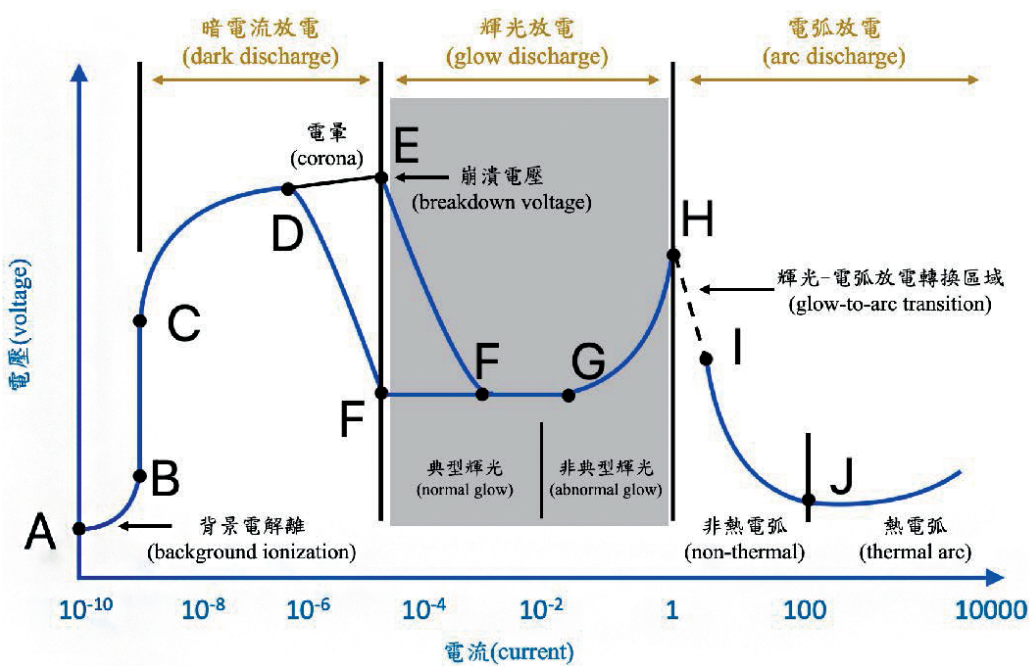


圖 2 直流放電電漿電流與電壓關係圖 (Ramachandra Kurup et al., 2021)

若在一般大氣壓下放電，產生的電漿稱為大氣電漿或常壓電漿，特性與低壓或真空電漿定義與特性不同，後者多用於半導體製程，較不適用於水處理。常壓電漿的特性有兩種，一是加載高電流使氣體分子加熱，當能量足夠時，即可形成高溫電漿；二是不斷提供極大電場，讓電子在 2 次碰撞時的距離（即平均自由路徑），能有效累積足以造成解離的能量，如圖 3，在不同氣體環境裡，其關係曲線包含了氣體壓力與電極距離的乘積以及崩潰電壓，此稱為 Paschen curves；在曲線右半部，當壓力上升越大所需的崩潰電壓相對越大，而此崩潰電壓是形成常壓電漿的重要因素。在工業上較廣泛用於金屬材料的熔接、加工及礦石與鋼鐵的冶煉 (Schutze et al., 1998)。

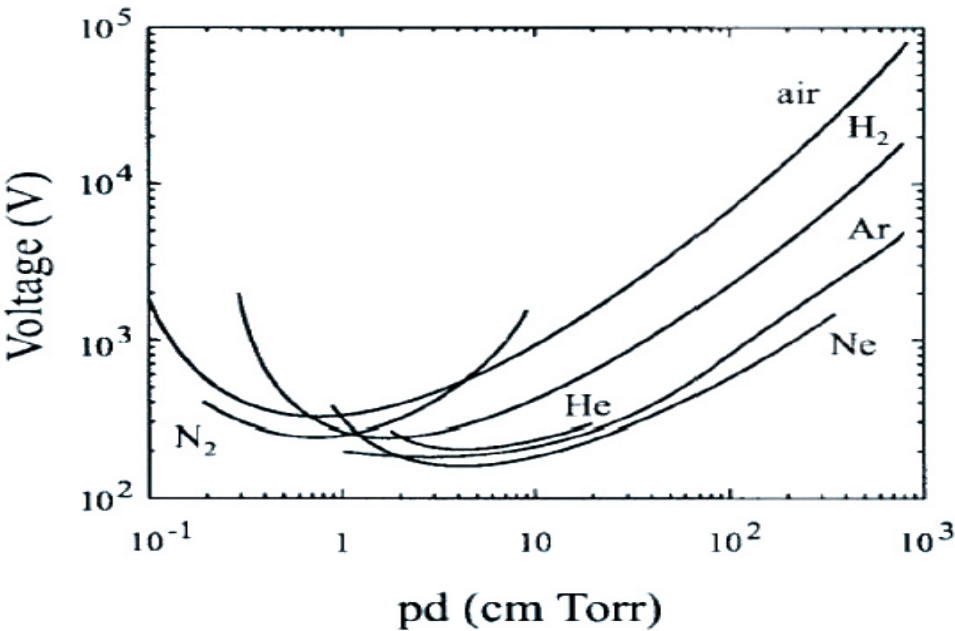


圖 3 不同載流氣體的崩潰電壓 (Schutze et al., 1998)

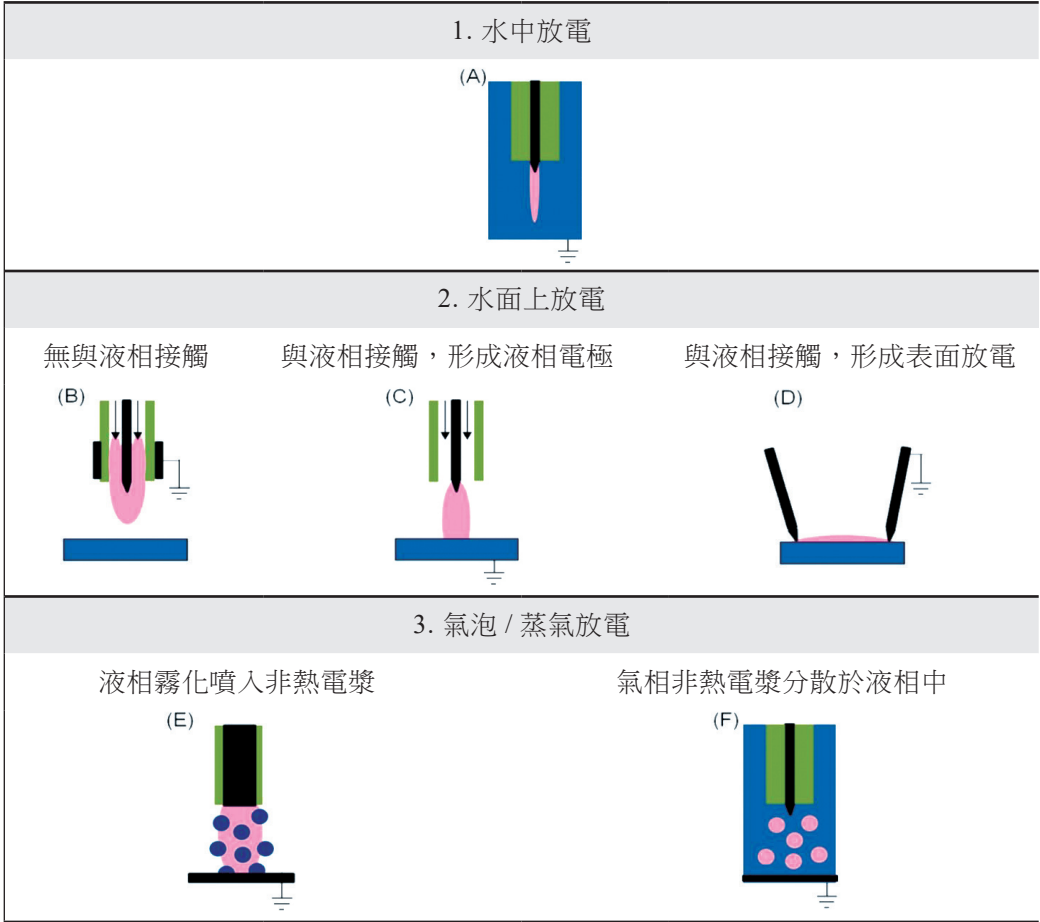
三、非熱電漿與液相之界面反應

由於電漿態與液態在自然界中少有交互作用，故兩態間之作用探討仍是一個新興的研究領域，電漿與液相的界面物理化學現象仍有許多未解的問題，以下就非熱電漿與水溶液相之物理與化學作用分別進行介紹。

3.1 非熱電漿與液相之作用方式

表 2 整理非熱電漿與水相作用的方式，可概分為水中放電、水面上放電與氣泡 / 蒸氣放電 3 大類 (Bruggeman & Leys, 2009)。此分類強調電漿與液體較微觀的物理交互作用方式，質量與能量傳輸上各有不同。諸多研究致力於發展不同形式的非熱電漿反應槽以適用不同情境 (Magureanu et al., 2021; Murugesan et al., 2020)，例如：減少水溶液與電漿的距離，使活性物質導入水溶液中形成最佳化的狀態、以微米曝氣方式增加電漿與水之間的接觸面積、利用具有多孔材質提升質傳效果等諸多應用，除了可產生較高密度的非熱電漿，亦可提升電漿輸出穩定度，進而提升處理效率。

表 2 非熱電漿使用不同放電與液體的相互作用示意



資料來源：(Bruggeman & Leys, 2009)

3.2 水中活性物種形成機制

不論是水中或水面上電漿處理，都會產生大量活性物質與自由基，包括 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{H}\cdot$ 、 O 、 O_2 、 H_2O_2 、 $\text{e}^-_{(\text{aq})}$ 及 UV 光等 (Palma et al., 2022)，若選用不同的氣體，甚至可能產生 O_3 、 $\text{NO}_2\cdot$ 、 $\text{NO}\cdot$ ，相當類似常見的高級氧化處理程序，差別在於電漿處理不需要另外添加化學藥劑，且不會有污泥產生；若電漿密度夠高，也會對液相產生衝擊波。除了氧化性物種，電漿反應還可以產生還原性的物種，有機會應用在需進行還原性降解的環境污染物處理程序中 (Lukes et al., 2012)，圖 4 為非熱電漿在氣-液界面的物理化學反應示意圖。由於電漿可與氣相發生反應，也可直接與液相發生反應，在液面上產生的活性物質或自由基則會根據各自對應的亨利定律常數溶解於水中，並與水中污染物發生反應。若亨利常數越大，則表示與該氣相物質與水中物質接觸的機會較大，例如 H_2O_2 和 HNO_3 易溶於水，而 O_3 則較不易溶解 (Tian & Kushner, 2014)。由於同時自氣、液相產生活性物質，且同時產生多種活性物質，故相較於傳統的高級氧化處理有更優異的處理效能 (Foster, 2017; Shang et al., 2019; Vanraes & Bogaerts, 2018)。作者研究團隊刻正以不同的載流氣體及流量，如混合氣體 (Ar/O_2)、空氣，使用本團隊研製之非熱電漿模組，進行新興污染物降解礦化之研究。

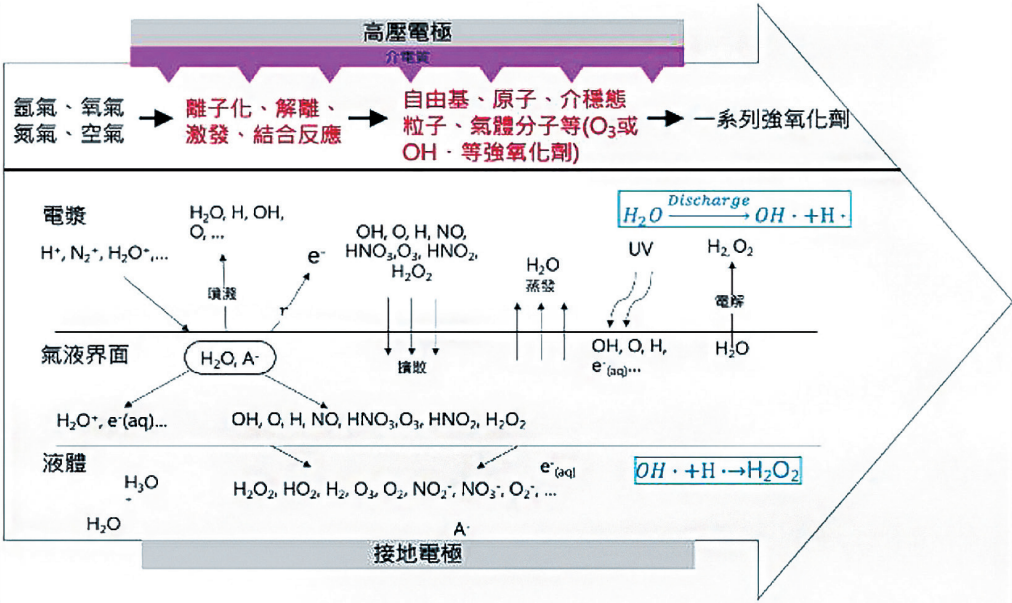


圖 4 非熱電漿在氣-液界面物理化學反應示意圖

四、非熱電漿水處理應用

非熱電漿用於水中污染物之研究主要集中於難分解之有機物處理、酚類、藥物、全氟化物、生活污水等，近年的研究有逐漸增多的趨勢，惟多數研究尚在實驗室研發階段，不同的電漿氣體種類可創造氧化或還原態電漿水，pH 值也可維持中性或調整為酸性 (Bolouki et al., 2021)。本文以水中藥物與全氟化物 2 種新興污染物為例進行說明。

4.1 非熱電漿用於水中藥物降解

PPCPs 為預防與治療疾病處方藥或個人護理產品，包括一般抗生素、激素、鎮痛劑、消炎藥等。這些產品經服用後，會隨著人體代謝排出，進入污水下水道系統，由於傳統污水廠通常不是為處理藥物而設計的，因此無法去除某些不可生物降解的藥物。同時與污水程序消毒用的氯化物反應，有可能形成具毒性消毒副產物。這些藥物長存於水體環境中，僅在歐洲，就有 3,000 多種藥物被發現 (Taylor & Senac, 2014)。甚至在美國、加拿大、瑞士、德國、澳大利亞和中國的地表、地下、飲用水和廢水處理廠中都檢測到 ng/L 至 $\mu\text{g/L}$ 範圍內的 PPCPs。儘管藥物濃度於環境水體很低，但長期暴露下，可能造成生物突變，不僅增加細菌抗藥性，亦有可能演變成超級細菌，且長期輸入水中，呈持久性或假持久性，科學家稱為“偽持久性”污染物 (Kavitha, 2022)。而微量 PPCPs 殘留也已被證明對人類和動物的生命可能有危害影響，不僅使生物體具慢性和急性毒性，包括破壞幾個生物過程以及發育和繁殖抑制，且具有未知的長期潛在影響 (Krishnan et al., 2021)。

表 3 整理近年利用非熱電漿處理常見抗生素之研究，諸多文獻皆指出非熱電漿技術相較於一般高級氧化處理，具有產生大量不同種類的活性物質優勢，對多種 PPCP 可達 50~100% 之去除效率，但相同處理時間下，對 COD 與 TOC 之去除率則較差 (He et al., 2022)。

表 3 近年非熱電漿用於抗生素降解之研究

目標污染物	電漿形式	實驗條件	實驗結果	參考文獻
培氟沙星 (pefloxacin)	介電層 屏蔽放電	放電功率：0.7 W 頻率：50 Hz 氣體流量 O ₂ ： 125 mL/min 水樣體積：100 mL 初始濃度：120 mg/L	去除率： 96.1% (25min) 能源消耗： 39.6 g/kWh	(Hu & Wang, 2021)
土黴素 (oxytetracycline)	介電層 屏蔽放電	放電電壓：4.8 kV 頻率：10kHz 氣體流量 Air： 1.0 L/min 水樣體積：200 mL 初始濃度：50 mg/L	去除率： 88.2% (20min) TOC 去除率： 36.7% COD 去除率： 21.2% 能源消耗： 0.27 mg/kJ	(Shoufeng et al., 2019)
阿莫西林 (amoxicillin)	介電層 屏蔽放電	放電電壓：15 kV 頻率：50 Hz 初始濃度：16 mg/L 初始 pH：4.5	去除率： 75% (18min)	(Ansari et al., 2020)
鹽酸四環黴素 (tetracycline hydrochloride)	介電層 屏蔽放電	放電電壓：7 kV 放電功率：38.8 W 氣體流量 Air： 2.0 L/min 水樣體積：450mL 初始濃度：50mg/L 初始 pH：7.2	去除率約： 52% (5min) 能源消耗： 3.79 g/kWh	(Lou et al., 2021)
乙醯胺酚 (acetaminophen)	介電層 屏蔽放電	放電電壓：18 kV 氣體流量 Air： 200 L/h 水樣體積：180 mL 初始濃度：20 mg/L	去除率： 50% (18min)	(Zhang et al., 2017)
雙氯芬酸 (diclofenac)	介電層 屏蔽放電	放電功率：150 W 氣體流量 Air： 20 L/h 水樣體積：500 mL 初始濃度：50 mg/L 初始 pH：5.6	去除率： 100% (30min)	(Aziz et al., 2017)

布洛芬 (ibuprofen)	介電層 屏蔽放電	放電功率：150 W 氣體流量 Air： 20 L/h 水樣體積：500 mL 初始濃度：50 mg/L 初始 pH：5.7	去除率：100% (20min)	(Aziz et al., 2017)
布洛芬 (ibuprofen)	電暈放電	放電電壓：18 kV 放電功率：2.1 W 頻率：25 Hz 水樣體積：330 mL 初始濃度： 22.8 mg/L	去除率： 100% (20min) 能源消耗： 20.2 g/kWh	(Magureanu et al., 2018)
乙醯胺酚 (acetaminophen)	介電層 屏蔽放電	放電電壓：5.9 kV 頻率：500 Hz 氣體流量 Air： 100 sccm 水樣體積：40 mL 初始濃度：25 mg/L	去除率： 90% (60min) 能源消耗： 2.9 g/kWh	(Korichi et al., 2020)

4.2 非熱電漿用於全氟化物降解

全氟 / 多氟烷基化合物 (per-and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 在工業用途上，廣泛作為表面塗料、阻燃劑、潤滑劑、光刻膠片、地毯清潔劑使用 (Park et al., 2009; Song et al., 2013)。近年來環境中持久性污染物對於人類健康影響被受關注，美國毒性物質及疾病登記署 (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR) 指出，人體含有高濃度全氟 / 多氟烷基化合物，會影響孕婦與胎兒健康、幼兒生長、肝功能、免疫系統等問題；美國環境保護署飲用水健康建議將 PFAS 中的全氟辛酸 (Perfluorooctanoic acid, PFOA)、全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctanesulfonic acid, PFOS) 標準，訂定為 PFOA：0.004ppt、PFOS：0.02ppt；我國環保署則將 PFOA 公告為一級毒性化學物質，PFOS 為一、二級毒性化學物質，限制其使用量，降低排放量，因此如何處理環境中 PFAS，成為各國所面臨的問題。

PFAS 官能基中，C-F 鍵結具有非常高的解離能 (116 kcal/mol)，造就 PFAS 的化學性質穩定，使用非熱電漿產生的高能量自由電子 $e^-_{(aq)}$ 可解離斷鍵，具有長鏈的全氟烷基酸 PFOA、PFOS 解離後會產生副產物，如：全氟庚酸、全氟己酸等短鏈全氟

烷基酸，短鏈全氟烷基酸再降解礦化，產生氟離子、硫酸根、二氧化碳 (Nau-Hix et al., 2021; Singh et al., 2019; Stratton et al., 2017)。彙整近年利用非熱電漿處理 PFAS 之研究如表 4。學者 Singh 等人則推論對 PFOA、PFOS 降解途徑係透過高能量活性物質對官能基結構進行解離斷鍵，產生自由基，此自由基與 OH•結合形成副產物，再透過 e⁻_(aq) 的熱傳遞，消除水中 HF，將不穩定的烯醇轉化為酮，轉化後的酮副產物水解成產生具有羧基的副產物 (Singh et al., 2019)。

表 4 近年非熱電漿用於全氟化物降解之研究

目標污染物	電漿形式	實驗條件	實驗結果	參考文獻
全氟辛酸 (Perfluorooctan- oic acid)	脈衝放電	放電功率：19 W 氣體流量： 100 mL/min 初始濃度： 41.4 mg/L	去除率： 84% (30min)	(Saleem et al., 2020)
	介電層 屏蔽放電	放電功率：7 W 氣體流量： 100 mL/min 初始濃度： 41.4 mg/L	去除率： 49% (30min)	
	電暈放電	放電功率：10 W 氣體流量： 100 mL/min 初始濃度： 41.4 mg/L	去除率： 12% (30min)	
全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctan- esulfonic acid)	脈衝輝光 放電	放電頻率：60 Hz 充電電容：8 nF 充電電壓：-30 kV 載流氣體：Ar	長鏈全氟化物 去除率：>90% 短鏈全氟化物 去除率： 0~95%	(Nau-Hix et al., 2021)
全氟辛酸 (Perfluorooctan- oic acid)、 全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctan- esulfonic acid)、 全氟己酸 (Perfluorohexan- oic acid)	脈衝輝光 放電	水樣體積：50 mL 初始濃度：1 ppb 放電電壓： 100~130 kV 放電頻率： 5~17 Hz 放電電流： 20~40 A 載流氣體：Air	去除率： 全氟辛酸：60% 全氟辛烷磺酸： 30% 全氟己酸：60%	(Palma et al., 2021)

長鏈全氟化物 (long-chain perfluoroalkyl acids)、 短鏈全氟化物 (short-chain perfluoroalkyl acids)、 全氟化物前體 (perfluoroalkyl acids precursors)	脈衝輝光 放電	放電頻率：60 Hz 充電電容：8 nF 充電電壓：-30 kV 氣體流量 Ar： 1~5 L/min	去除率： 長鏈全氟化物： >99.9% 短鏈全氟化物： 10 ~ 99% PFAS 全氟化 物：44~99%	(Singh et al., 2021)
---	------------	---	--	-------------------------

4.4 非熱電漿技術應用於水處理之機會與挑戰

非熱電漿技術，相較於熱電漿技術，具有較低能耗的優勢，可藉由液面上、液體中、氣泡等多樣化的界面產生具反應性物種，包括 O_3 、 $OH\cdot$ 、 $O\cdot$ 、 e^- 、 H_2O_2 、 $O_2^{\cdot-}$ 、UV 光、震波等，並藉由電漿產生之參數調控，視水中目標污染物之特性生成不同之活性物質，將污染物破壞分解；故電漿破壞污染物之方式近似高級氧化反應，但由於電漿不需外加化學藥品，且可視應用目的，像是雞尾酒般進行調整與組合，設備空間需求小，以及能源效率近似之優點，極具應用於不同水處理情境之潛力 (Lukes et al., 2012)。

由於非熱電漿應用於水處理仍是新興的技術，故相關的成本資訊較為缺乏。初設成本因牽涉反應器形式與處理規模，故較少文獻報導；操作成本則被認為近似甚或優於傳統高級氧化處理程序 (Magureanu et al., 2021)。另外，水中複雜成分對電漿的反應性等亦待釐清，故雖然非熱電漿在氣狀污染物分解已有實務技術或商品（如空氣清淨機）問世，但運用在水處理領域相對發展較慢。由於電源供應器技術的進步，近年利用各式非熱電漿進行水處理相關研究之國際期刊文獻已有逐漸增加的趨勢，其中尚待突破的關鍵方向包括：

1. 掌握非熱電漿活性物種之調控方式—產生非熱電漿的電極配置與材質、氣體種類與流量等電源特性控制活性物種類與濃度，需有系統化試驗建立操作參數。
2. 提升電漿氣體與液相之混和效率並提升能源效率—將能源最有效運用以產生活性物種，並讓電漿氣與液相進行最快速的混合，完整運用電漿優勢。

3. 技術整合與系統最佳化—截至目前非熱電漿水處理反應器多為實驗室小規模水量試驗為主，需將系統放大至實廠規模，並考慮台灣地狹人稠或廠房空間有限，設備宜盡量小型化之需求。

本文作者研究團隊已研發數種非熱電漿水處理反應器模組，並針對不同電漿氣體與參數所產生的活性物質進行研究 (Bolouki et al., 2021)。對於含中低濃度氨氮廢水，利用非熱電漿技術可在 10 分鐘內達 65% 去除且 90% 氮氣轉換率之成效 (吳柏璋 et al., 2021)。作者團隊也以含抗生素、偶氮染料與全氟化物等難分解之污染物作為標的模擬實廠廢水，進行非熱電漿處理成效評估，處理時間在 30 分鐘內均有超過 80% 之降解成效 (官文惠, 2022)，且中間產物與產物之生物毒性均較原廢水低許多；目前團隊正積極整合其他技術 (如微米氣泡、觸媒) 並與業界合作，開發用於降解難分解污染物的電漿反應系統，放大規模朝向非熱電漿技術實廠化邁進。

五、結論

非熱電漿技術對於生物難分解之污染物降解極具應用潛力，透過反應器模組型式與操作參數調控，可組合產出不同種類與比例之活性物種，在短時間內，降解包括新興污染物在內的水中生物難分解污染物。以含抗生素廢水為例，經非熱電漿處理後，除可有效降解原藥物分子外，放流水之生物毒性亦遠低於原廢水，惟礦化效率則較低，需要搭配其他技術達到完全礦化的效果。整體而言，非熱電漿水處理技術具有佔地空間小、沒有污泥產生、處理時間短等優勢，若能與其他技術加以整合，提升礦化效率，並輔以系統整合與程序控制，則能實現技術實廠化擴大應用範圍之目標。

本篇結合 RTO 處理流程，彙整國內歷史事故、國際間安全措施規定，並參考製程安全評估方法，初擬石化業 RTO 檢核表，從防火防爆、VOCs 濃度、風管設計等方面提出初步之防範措施建議；對於廢氣成分複雜之系統，建議輔以其他的方析方法 (如 HAZOP) 妥善預作因應。未來仍可嘗試從危害分析或個別製程事故案例進行深度探討，希冀提供國內業者更多有關 RTO 環保與安全設計之經驗參考。

六、致謝

本文承行政院環境保護署水質保護處 111 年度「廢污水新興處理技術示範驗證計畫」與國科會計畫 (MOST-111-2221-E-131-007-MY3) 經費支持，特此致謝。

參考文獻

吳柏璋、侯嘉洪、賴進興、官文惠、駱尚廉、蔡人傑、張莉珣、顏旭明 . (2021)，含氮物質之新興物化處理技術評析，工業污染防治 第 153 期 :p 15-19.

李灝銘、張木彬 (2004)，氣態污染物控制新技術 - 非熱電漿技術，工業污染防治 第 89 期 :p 169-191。

官文惠 (2022)，非熱電漿產生雞尾酒式活性物種處理難分解染料廢水之研究，2022 新興廢水處理技術研討會暨創新水科技展，行政院環保署及國立台灣大學，台北。

Ansari, M., Mahvi, A. H., Salmani, M. H., Sharifian, M., Fallahzadeh, H., & Ehrampoush, M. H. (2020). Dielectric barrier discharge plasma combined with nano catalyst for aqueous amoxicillin removal: Performance modeling, kinetics and optimization study, energy yield, degradation pathway, and toxicity. *Separation and Purification Technology*, 251:p 117270.

Aziz, K. H. H., Miessner, H., Mueller, S., Kalass, D., Moeller, D., Khorshid, I., & Rashid, M. A. M. (2017). Degradation of pharmaceutical diclofenac and ibuprofen in aqueous solution, a direct comparison of ozonation, photocatalysis, and non-thermal plasma. *Chemical Engineering Journal*, 313:p 1033-1041.

Bolouki, N., Kuan, W.-H., Huang, Y.-Y., & Hsieh, J.-H. (2021). Characterizations of a plasma-water system generated by repetitive microsecond pulsed discharge with air, nitrogen, oxygen, and argon gases species. *Applied Sciences*, 11(13):p 6158.

Bruggeman, P., & Leys, C. (2009). Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(5):p 053001.

- Ehlbeck, J., Schnabel, U., Polak, M., Winter, J., Von Woedtke, T., Brandenburg, R., Von dem Hagen, T., & Weltmann, K. (2010). Low temperature atmospheric pressure plasma sources for microbial decontamination. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(1):p 013002.
- EPA, U. S. (2008). White Paper Aquatic Life Criteria for Contaminants of Emerging Concern Part I General Challenges and Recommendations. U.S. EPA:p 1-2.
- Foster, J. E. (2017). Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future. *Physics of Plasmas*, 24(5):p 055501.
- He, Y., Sang, W., Lu, W., Zhang, W., Zhan, C., & Jia, D. (2022). Recent advances of emerging organic pollutants degradation in environment by non-thermal plasma technology: A Review. *Water*, 14(9):p 1351.
- Hu, X., & Wang, B. (2021). Removal of pefloxacin from wastewater by dielectric barrier discharge plasma: Mechanism and degradation pathways. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4):p 105720.
- Indarto, A., Choi, J.-W., Lee, H., & Song, H. K. (2008). Decomposition of greenhouse gases by plasma. *Environmental Chemistry Letters*, 6:p 215-222.
- Kavitha, V. (2022). Global prevalence and visible light mediated photodegradation of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs)-a review. *Results in Engineering*:p 100469.
- Korichi, N., Aubry, O., Rabat, H., Cagnon, B., & Hong, D. (2020). Paracetamol degradation by catalyst enhanced non-thermal plasma process for a drastic increase in the mineralization rate. *Catalysts*, 10(9):p 959.

- Krishnan, R. Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Biruntha, M., Govarthanan, M., & Karmegam, N. (2021). Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 23:p 101757.
- Lei, M., Zhang, L., Lei, J., Zong, L., Li, J., Wu, Z., & Wang, Z. (2015). Overview of emerging contaminants and associated human health effects. *BioMed research international*, 2015:p 404796.
- Li, S., Dang, X., Yu, X., Abbas, G., Zhang, Q., & Cao, L. (2020). The application of dielectric barrier discharge non-thermal plasma in VOCs abatement: A review. *Chemical Engineering Journal*, 388:p 124275.
- Liao, X., Liu, D., Xiang, Q., Ahn, J., Chen, S., Ye, X., & Ding, T. (2017). Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review. *Food Control*, 75:p 83-91.
- Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. (1994). Principles of plasma discharges and materials processing. *MRS Bulletin*, 30(12):p 899-901.
- Liu, C., Li, M., Wang, J., Zhou, X., Guo, Q., Yan, J., & Li, Y. (2016). Plasma methods for preparing green catalysts: Current status and perspective. *Chinese Journal of Catalysis*, 37(3):p 340-348.
- Lou, J., Wei, Y., Zhang, M., Meng, Q., An, J., & Jia, M. (2021). Removal of tetracycline hydrochloride in aqueous by coupling dielectric barrier discharge plasma with biochar. *Separation and Purification Technology*, 266:p 118515.
- Lukes, P., Locke, B. R., & Brisset, J.-L. (2012). Aqueous-phase chemistry of electrical discharge plasma in water and in gas-liquid environments. *Plasma chemistry and catalysis in gases and liquids*, 1:p 243-308.

- Magureanu, M., Bilea, F., Bradu, C., & Hong, D. (2021). A review on non-thermal plasma treatment of water contaminated with antibiotics. *Journal of Hazardous Materials*, 417:p 125481.
- Magureanu, M., Mandache, N. B., Bradu, C., & Parvulescu, V. I. (2018). High efficiency plasma treatment of water contaminated with organic compounds. Study of the degradation of ibuprofen. *Plasma Processes and Polymers*, 15(6):p 1700201.
- Mouele, E. S. M., Tijani, J. O., Badmus, K. O., Pereao, O., Babajide, O., Fatoba, O. O., Zhang, C., Shao, T., Sosnin, E., & Tarasenko, V. (2021). A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5):p 105758.
- Murugesan, P., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5):p 104377.
- Nau-Hix, C., Multari, N., Singh, R., Richardson, S., Kulkarni, P., Anderson, R., Holsen, T., & Thagard, S. (2021). Field Demonstration of a Pilot-Scale Plasma Reactor for the Rapid Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Groundwater. *ACS ES&T Water*:p 680-687.
- Palma, D., Papagiannaki, D., Lai, M., Binetti, R., Sleiman, M., Minella, M., & Richard, C. (2021). PFAS degradation in ultrapure and groundwater using non-thermal plasma. *Molecules*, 26(4):p 924.
- Palma, D., Richard, C., & Minella, M. (2022). State of the art and perspectives about non-thermal plasma applications for the removal of PFAS in water. *Chemical Engineering Journal Advances*:p 100253.

- Park, H., Vecitis, C. D., Cheng, J., Choi, W., Mader, B. T., & Hoffmann, M. R. (2009). Reductive Defluorination of Aqueous Perfluorinated Alkyl Surfactants: Effects of Ionic Headgroup and Chain Length. *The Journal of Physical Chemistry A*, 113(4):p 690-696.
- Ramachandra Kurup, A., Rozban, D., Kahana, L., Abramovich, A., Yitzhaky, Y., & Kopeika, N. (2021). Performance Enhancement of Inexpensive Glow Discharge Detector Operating in Up-Conversion Mode in Millimeter Wave Detection for Focal Plane Arrays. *Applied Sciences*, 11(20):p 9564.
- Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Show, P.-L. (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *Journal of Hazardous Materials*, 409:p 124413.
- Saleem, M., Biondo, O., Sretenović, G., Tomei, G., Magarotto, M., Pavarin, D., Marotta, E., & Paradisi, C. (2020). Comparative performance assessment of plasma reactors for the treatment of PFOA; reactor design, kinetics, mineralization and energy yield. *Chemical Engineering Journal*, 382:p 123031.
- Schutze, A., Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Park, J., Selwyn, G. S., & Hicks, R. F. (1998). The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE transactions on plasma science*, 26(6):p 1685-1694.
- Shang, K., Jie, L., & Morent, R. (2019). Hybrid electric discharge plasma technologies for water decontamination: a short review. *Plasma Science and Technology*, 21(4):p 043001.
- Shoufeng, T., Xue, L., Zhang, C., Yang, L., Zhang, W., & Deling, Y. (2019). Strengthening decomposition of oxytetracycline in DBD plasma coupling with Fe-Mn oxide-loaded granular activated carbon. *Plasma Science and Technology*, 21(2):p 025504.

- Singh, R. K., Brown, E., Thagard, S. M., & Holsen, T. M. (2021). Treatment of PFAS-containing landfill leachate using an enhanced contact plasma reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 408:p 124452.
- Singh, R. K., Fernando, S., Baygi, S. F., Multari, N., Thagard, S. M., & Holsen, T. M. (2019). Breakdown Products from Perfluorinated Alkyl Substances (PFAS) Degradation in a Plasma-Based Water Treatment Process. *Environmental Science & Technology*, 53(5):p 2731-2738.
- Song, Z., Tang, H., Wang, N., & Zhu, L. (2013). Reductive defluorination of perfluorooctanoic acid by hydrated electrons in a sulfite-mediated UV photochemical system. *Journal of Hazardous Materials*, 262:p 332-338.
- Stratton, G. R., Dai, F., Bellona, C. L., Holsen, T. M., Dickenson, E. R., & Mededovic Thagard, S. (2017). Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Perfluoroalkyl Substances in Prepared Solutions and Contaminated Groundwater. *Environ Sci Technol*, 51(3):p 1643-1648.
- Taylor, D., & Senac, T. (2014). Human pharmaceutical products in the environment—the “problem” in perspective. *Chemosphere*, 115:p 95-99.
- Tian, W., & Kushner, M. J. (2014). Atmospheric pressure dielectric barrier discharges interacting with liquid covered tissue. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(16):p 165201.
- Vanraes, P., & Bogaerts, A. (2018). Plasma physics of liquids—A focused review. *Applied Physics Reviews*, 5(3):p 031103.
- Zhang, G., Sun, Y., Zhang, C., & Yu, Z. (2017). Decomposition of acetaminophen in water by a gas phase dielectric barrier discharge plasma combined with TiO₂-rGO nanocomposite: Mechanism and degradation pathway. *Journal of Hazardous Materials*, 323:p 719-729.