

電漿技術應用於化生戰劑消除作業之可行性研究

作者簡介

作者胡自強少校，畢業於中正理工學院專 23 期、化校正規班期，歷任連長、作戰官、參謀主任、副營長，現任本校防護組教官。

提要

- 一、自從 1995 年東京地鐵的沙林神經毒劑恐怖攻擊事件、波斯灣及朝鮮半島區域的生化恐怖威脅，在在顯示國家恐怖主義者崛起及區域軍事衝突，生化武器(CBW)的使用有白熱化趨勢。如此，則更證明研發有效且可靠的戰劑消除方式是刻不容緩。
- 二、化學兵部隊所使用的 M8A1 毒氣警報器、Chempro100、JCAD、AN/VDR-II 射線偵檢器、GC/MS 氣相層析/質譜儀等精密偵檢儀器，由於電子儀器大部分皆不能防水，以擦拭法消毒殺菌確實有其難度，而對儀器設備的接縫處的消除更屬不易。
- 三、傳統的消除方式對於高度靈敏性的設備的消除有其限制存在及不可接受性，例如：指揮中心、雷達站、船艦、航管、飛機起落架、戰甲車輛內部等控制面板，而這些設備又是指管通資系統，指揮三軍聯合作戰所不可或缺。本研究在探討電漿技術進行高精密裝備染毒後的表面消除作業，及大型電漿消除系統成為國軍次世代戰劑消除作業主力的可能性。

壹、前言

最近發表關於電漿氧化固體廢棄物的運用，對於有危險性及非危險性廢棄物的處置，環境的保護，以及綠色化學的運用，顯示對於電漿化學及伴隨的技術有廣大的興趣(註1)。像是分解和有害物質適合的轉化去減少有害物質的量。這些努力的成果有時會影響解決環境問題新技術的發展。此類技術成立於電漿化學廣大的領域裡(註2)。西元 1879 年當 Crookes(註3)研究氣體中放電情形時瞭解了電漿之重要性，直到戰後幾年，電漿技術成為重要的經濟意義。然而，電漿在環境化學上的使用仍然在初期，但有實際價值的東西已在最近的十年獲得

註1 P.P. Ward, "Plasma cleaning techniques and future applications in environmentally conscious manufacturing" SAMPE J., Vol. 32, 51-54 (1996).

註2 H.V. Boenig, "Fundamentals of Plasma", Technomic Publishing Co., Lancaster, 417, (1988).

註3 F.K. McTaggart, "Plasma Chemistry in Electrical Discharges" Elsevier, New York, 1 (1967).

了。電漿技術對於環境問題可能的應用仍是一個未經探索的機會。電漿中間處理的領域正剛開始發展，除了有害廢棄物的處理像是分類、淨化等，還有綠色化學努力的成果像是電漿化學淨化替代溶劑(註4)。

一般裝備、車輛、火砲、航空器及器材受生物戰劑或化學戰劑沾染後，可以 82 式清潔劑、82 式消除劑、漂白水等加水調製藥劑或 DS2 等液體藥劑進行消除作業，以利迅速恢復戰力再次投入戰場。然而，一般部隊的指揮中心、雷達站、船艦、航管、飛機起落架、戰甲車輛內部等控制面板，還有化學兵部隊所使用的 M8A1 毒氣警報器、Chempro100、JCAD、AN/VDR-II 射線偵檢器、GC/MS 氣相層析/質譜儀等精密偵檢儀器及一般部隊所使用的通訊裝備，由於電子儀器大部分皆不能防水，一般而言以不傷害電子設備為前提，以棉布沾消除藥劑擦拭，作業上亦必須非常謹慎小心液滴對電子零件的破壞，且儀器設備的接縫處等更是困難重重，因此，本研究嘗試以電漿技術進行精密貴重儀器染毒的表面消除作業。

貳、電漿基本原理

Tonks 和 Langmuir(註5)指出對於電漿狀態的兩個必要條件：近似電中性和有高濃度的自由帶電荷體。在電漿狀態的物質中，自由電子存在於合理高濃度狀態且電子電荷會被正離子平衡。物質第四態“電漿”在說明非熱電漿之前，我們想先描述一下何謂「電漿」，讓讀者可以較輕易瞭解本文。「電漿」又稱為物質的第四態，傳統上物質包括三態為「氣、液、固」，不論何態電子均安分的存在原子或分子外圍的軌域；而電漿態則是，原子或分子外圍的電子受外力（如熱、光、或電場）而脫離原子或分子束縛的狀態（讀者不妨想像一下月亮脫離地球的情景）。簡單的說「電漿態」即是系統中包含大量電子的狀態，在電漿態中仍然遵守電中性原則，因此電子的生成意味著離子的存在（ $e^- + M \rightarrow M^+ + 2e^-$ ），換言之，電漿態中不僅存在大量的電子亦存在幾乎同量的離子。上面說明電漿即是一個存在大量電子的狀態，所謂大量並不代表全部；換言之系統中的氣體並不一定要全部離子化，僅有部份離子化亦可稱之為電漿態。

由此延伸，可以將電漿區分為「熱電漿」及「非熱電漿」，所謂「熱電漿」就是指完全離子化的氣體，而「非熱電漿」就是部份游離

註4 同註 1。

註5 L. Tonks and I. Langmuir, Phys. Rev., Vol. 33, 195 (1929).

化的氣體。

一、熱電漿：

熱電漿中的電子溫度與氣體溫度相近，熱電漿的定義雖然為完全離子化且電子與氣體溫度相近，則此時氣體溫度約一萬度；實際上完全離子化的情況並不多見，一般而言氣體溫度約 2~3 千度就被稱為熱電漿系統。值得一提的是，這樣的溫度較燃燒所能達到的溫度（1~2 千度）高出非常多，這也衍生出熱電漿不同於燃燒化學的特性，及其相關應用，例如電漿玻璃化技術處理核廢料、電漿融熔處理廢棄物、及電漿火炬處理廢液或難分解氣體等。

二、非熱電漿：

非熱電漿的電子溫度則遠高於氣體溫度。非熱電漿又稱為非平衡電漿，意指尚未達到熱平衡的電漿狀態；典型非熱電漿的電子溫度約 1~5 電子伏特(eV)，1 eV 接近 1 萬度，換言之 5 eV 相當於 5 萬度，能量相當高；然而此時的氣體溫度一般小於 1 千度，甚至僅較室溫略高一點。這樣的差異讓非熱電漿成為一個非常特殊的系統，此系統的氣體溫度不高卻存在相當高溫（即高能量）的電子。上述特質讓非熱電漿技術可以在不用全部加熱氣體的狀況下，就可生成具高能量的電子並加以利用，例如氮氧化物控制、揮發性有機物氧化、臭味氣體分解、及溫室效應氣體轉化等。

非熱電漿技術屬於新式的氣態污染控制技術，其利用電能誘發高能電子，電子與氣體分子碰撞後生成氧原子及氫氧自由基等活性粒子，上述活性粒子具高度活性可與氣流中的污染物反應，將其氧化成無害物質。非熱電漿技術已被證實，對於酸性氣體（氮氧化物及硫氧化物）、揮發性有機物、溫室效應氣體、及臭味物質等氣態污染物具有良好的控制效果，處理成本比傳統控制技術更具優勢，乃一值得開發的可用技術。

三、非熱電漿產生方式

非熱電漿的最大特色乃利用「高能電子」去撞擊並分解氣體分子，因此如何有效產生「高能電子」便是本技術的第一個關鍵。電漿的誘發方式主要利用高頻率或高電壓。

(一)低壓電漿

高頻率的電漿產生方式一般適用在氣體壓力較低的環境，如高

週波電漿(radio frequency plasma, rf)、微波電漿(microwave plasma)、感應耦合電漿(inductively coupled plasma, ICP)等通常操作在氣體壓力小於10 torr甚至更低的环境（註：1大氣壓=760 torr），高週波電漿的典型操作頻率為13.56 MHz、微波電漿的典型操作頻率為 26.5 GHz。低壓操作對於空氣污染控制而言有其限制性，因此近年來國際間亦開始著手上述技術在常壓使用的開發，但仍未成熟。

(二)高壓電漿

高電壓的電漿產生方式一般在常壓下操作，如介電質放電(dielectric barrier discharge, DBD)、電暈放電(corona discharge, CD)、電子束(electron beam, EB)等，較適用於空氣污染控制的應用。以高壓電方式生成電漿時，電壓通常須達到數千至數萬伏特方能誘發生成電漿，此時所需的頻率不用太高，最簡單者可直接利用市售電的60 Hz，亦有拉高至數千至數萬 Hz操作者；但無論何者，以高壓電生成電漿的操作頻率遠低於高頻方式產生電漿者。上述技術適用的操作壓力不同，衍生出不同的應用範疇。傳統的空氣污染控制均屬於常壓系統(圖1)，因此以高電壓生成電漿的方式為目前電漿技術應用於空氣污染控制的主流；至於高頻率生成電漿的低壓操作電漿技術，目前有安裝於半導體業作為溫室效應氣體之全氟化物(PFCs)或揮發性有機物(VOCs)去除的實例，此乃因為半導體業的製程即為低壓，可直接安裝使用的緣故。低壓操作具有電漿穩定的優點，廣泛應用在半導體業及光電業之生產製程中，然而低壓操作需要真空腔體及真空幫浦來維持，設置成本與操作成本較高，此外真空設備怕強酸、強鹼、微粒及水氣，因此反應產物可能導致真空設備受損，且維護較麻煩。整體而言，空氣污染控制以常壓電漿較合適。

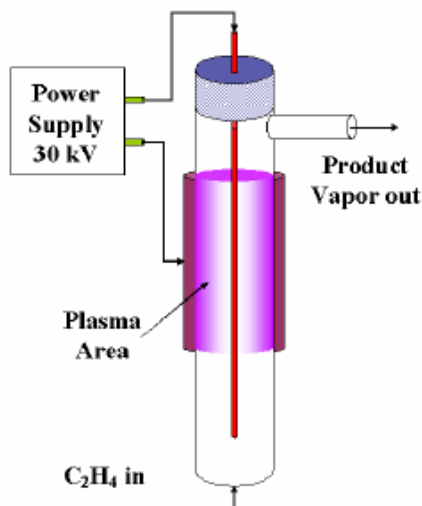


圖1 非熱電漿反應器裝置示意圖

資料來源：作者自繪

四、非熱電漿的生成方式

首先由高電壓或高頻率誘發外部電場，此時氣體中包含三種粒子「電子、離子、及氣體分子」，各有不同影響：氣體分子為電中性，因此不受電場影響。離子因質量遠大於電子（兩者相差數萬倍），雖然會受電場影響，但相較於電子的飄移速度，離子幾乎可視為不動。電子質量輕，受電場作用容易加速，加速過程中電子的動能隨之增加，此一具有高動能的電子稱為「高能電子(energetic electron)」。由於電子向電極移動的速度很快（註：音速 340 m/sec、電漿中的電子飄移速度約 10^6 m/sec、光速 3×10^8 m/sec），相對於電子而言氣流中的氣體分子可視為靜止不動，在這樣高速度差的情況下，粒子間很容易發生非彈性碰撞，例如產生激發(excitation)、解離(dissociation)、或離子化(ionization)等反應，同時生成原子(atom)、自由基(radical)、介穩態(metastable)粒子、離子(ion)、或光子(photon)等粒子，這些粒子具高活性，一旦與氣態污染物接觸，便有機會將其分解、氧化或還原，進而達到污染物去除之目的。

參、電漿應用

一、電漿空氣污染防制技術(Plasma air pollution control technology)

氣相污染物可分成以下八種，包含(1)粒狀物質、(2)酸性氣體(SO_x 、 NO_x 、 HCl 等)、(3)溫室氣體(CO_x 、 NO_y 、PFCs(全氟化物)等)、(4)高耗氧物質、(5)揮發性有機物(TCE、TCA 等)、(6)毒性氣體(Hg、

戴奧辛等)、(7)放射性氣體(碳同位素、Cs 等)及(8)生物細胞與細菌。

這類污染物通常是以混合的方式出現且必須整合多種污染控制設備始可去除，電漿技術則具簡化上述整合系統之優點。舉例來說，高級的室內空氣淨化系統包含：粒狀物質控制設備(濾清器或靜電集塵器,ESP)、細菌控制設備(紫外光或注入化學物質)、室外及揮發性有機物控制設備(紫外光催化)；然而，非熱電漿方法(pulsed corona)則兼具 ESP、UV 及化學分解裝置功能，故可減少占用體積，甚至可減少化學藥劑使用量（如除臭劑、催化劑、吸附劑）。表 1 列出用於空氣污染的電漿 8 項基本裝置：電漿來源(1)-(3)和(5) 是非熱電漿；(4)和(6)-(8) 是熱電漿(註6)。這些表格與多種試驗結果顯示(註7)：因污染物不同而以不同的電漿裝置來做氣體淨化，圖 2 為電漿污染控制裝置圖。為了利用電漿將污染物轉變成無毒性的氣體，通常會在還原的環境下添加氨態還原劑，或使用碳氫化合物來獲得反應較高的勢能以減少 CO₂、O₂ 等煙道氣的產生，如此便可增加能源效率，如利用非熱電漿技術去除氣流與工業煙道氣中之揮發性有機物(註8)；在非熱電漿中加入催化物質以進行處理有害空氣污染物(註9)便是這類實際應用之例子。藉由電漿使污染物轉變成可利用之產物已是目前常見之燃燒化學領域，且需添加如氨、碳氫化合物等添加劑，但對於氣體轉變成固體產物部分，較常利用靜電集塵來蒐集粒狀物；另外，非熱電漿亦可用於分解空氣中稀薄之 VOCs，以達環境保護之目的(註10)。

註6 K.Urashima and J.S. Chang, "Removal of volatile organic compounds from airstreams and industrial flue gases by non-thermal plasma technology" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat., Vol. 7, 602-614 (2000).

註7 K.L.L. Vercammen, A.A. Berezin, F. Lox, J.S. Chang, Destruction of volatile organic compounds by non-thermal plasma, J. Adv. Oxid. Tech. 2 (1997) 312-319

註8 如註 6。

註9 T. Oda, "Non-thermal plasma processing for environmental protection:decomposition of dilute VOCs in air" Catalysis Today, Vol. 72, 259 – 265 (2002).

註10 J.S. Chang, "Plasma Pollution control technology" Proc. First Asia-Pacific Int. Symp. Basic & Appl. Plasma Tech., 11-18 (1997).

表 1 電漿氣狀污染控制裝置參數

編號	-	電漿密度	電子溫度	氣體溫度	電場	處理設備煙道氣
1	Electron beam	非常高	極高	低	非常低	酸氣體、VOCs
2	Barrier discharge (silent/surface)	高	中等	低	中等	氧化性 VOCs、酸氣體
	Barrier discharge (ferro-electric)	低	高	低	非常高	PFCs、氧化性 VOCs
3	Pulsed corona	高	中等	低	高	VOCs
	Pulsed power	非常高	高	中等	高	酸氣體
4	Capillary	高	低	中等	低	VOCs
5	Flow stabilized corona	部分高	部分低	低	高	酸氣體、VOCs、毒性氣體
6	Arc/plasma torch	極高	部分低	極高	低	ODS/VOCs ^a 、酸氣體
7	RF discharge	高	中等	高	低	ODS/VOCs ^a
8	Microwave discharge	高	中等	中等	中等	ODS/VOCs ^a

資料來源：K.L.L. Vercammen, A.A. Berezin, F. Lox, J.S. Chang, Destruction of volatile organic compounds by non-thermal plasma, J. Adv. Oxid. Tech. 2 (1997) 312-319

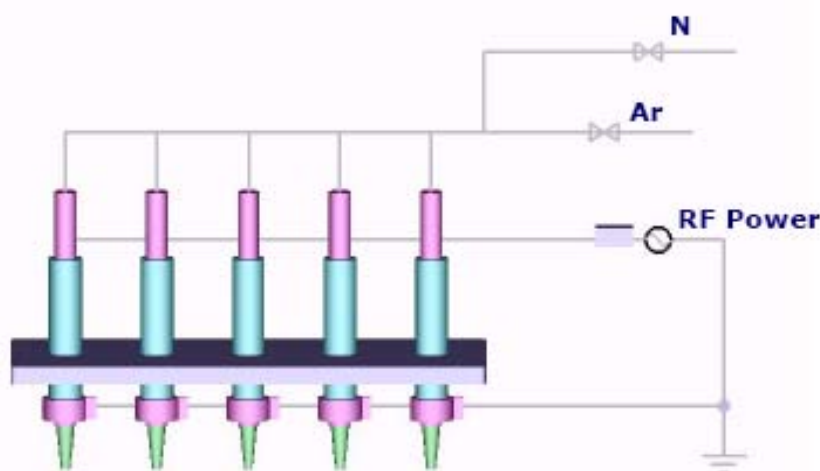


圖 2 單排型大氣筆式電漿炬裝置示意圖

資料來源：K.Urashima and J.S. Chang, "Removal of volatile organic compounds from airstreams and industrial flue gases by non-thermal plasma technology" IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insulat., Vol. 7, 602-614 (2000).

二、電漿廢水處理：

在水及液相污染處理方法中，主要有三種形式的電漿被使用，如下：

- (一)間接式電漿法：在高壓排氣電漿反應裝置內，會生成臭氧及許多氫氧物質注入液體中，將發熱排氣法應用於液體薄膜處理亦屬於此類。

- (二)間接式輻射電漿法：係指須光催化劑之高壓發射燈及不須光催化劑之低壓發射燈，以產生紫外光進行處理廢棄物，電子束及液體中高能量 γ 光屬於此類。
- (三)直接式電漿法：利用電子、離子及基本的化學反應過程與利用壓力波及形成超臨界點的方式直接處理液體，在受污液體中會產生律動電弧及(或)律動冠狀排熱現象。液態廢棄油、廢棄高耗氧物質及溶劑的處理，主要利用熱電漿技術，其中所包含之所有毒性化合物包含Cl、F、Br 等將被固定在Ca-化合物上以回收再利用，例如路面建材。(註11)

三、電漿固體廢棄物處理：

在固體廢棄物處理中，主要是利用熱電漿來進行處理(註12)，可分為以下三種方式：

- 1、氧化/焚化法：在熱電漿熔化/氧化不可燃固體廢棄物以降低毒性，產物主要作建材用途或以可回收使用之氧化性金屬為主，如利用非轉換性DC 蒸汽(H_2O)電漿在100kW 的操作環境下處理PCBs，可降低毒性副產物之產生。
- 2、熱分解電漿：此方式可焚化可燃性固體廢棄物並在具還原性氣體的環境條件下被氣化轉變成被改善之氣體(syngases，混和 CO 、 H_2 、 CO_2 等氣體)，以供燃燒、鐵礦還原、燃料推進氣等用途；如煤的氣化，將可產生含有75%(H_2+CO)之合成氣體；利用“water gas reaction ($2C + H_2O \rightarrow CO + H$)”氣化有毒廢棄物之碳化物，將減少其重量及體積並生成合成氣體(H_2+CO)；利用熱電漿處理廢棄物及生物質(biomass)可作為熱量來源。
- 3、電漿震動波：此方式通常被用來分解固體廢棄物，使金屬、塑膠與無機性等物質分離以利回收。氧化/熔化式電漿主要可回收再利用之產物為建築材料及氧化金屬回收；而熱分解電漿通常是產生syngases(混和 CO 、 CO_2 、 H_2 、 HCl 等氣體)供燃燒、鐵礦轉變或燃氣等使用。其中頗值得注意的問題是在於電漿的燃氣中是由何種物質供應熱電漿形成 $NO_x(10^3-10^4 ppm)$ 熱量。另外，利用熱電漿

註11 同註 10。

註12 J.S. Chang, R.P. Mohant, “A status report on environmental applications of thermal plasma technology” Metallurgical Industry, The Metallurgical Society of CIM Press, Toronto, 119-132(1994).

高溫分解廢棄橡膠會產生氣態燃料(如 H_2 、 CO 、 C_2H_2 、 CH_4 及 C_2H_4 ，氣體的熱值約為 $5-9MJ/Nm^3$)及可回收性黑炭填充料(pyrolytic carbon black, CBp)，應用於輪胎橡膠中，均為有價值、易於操作處理之產物。

肆、電漿應用於未來生化消除發展

受限於生物戰劑公約(BWC)和化學戰劑公約(CWC)的約束，我國化學兵部隊及裝備一直未能有機會對生物戰劑和化學戰劑，進行實際消除的作業，並且取得相關數據。自西元1999年至今，已有數篇國際SCI論文(註13、14、15及16)，針對電漿技術處理生物及化學戰劑進行深入探討與驗證。

一、電漿技術應用於消除作業的可行性

Kim 等人(2007)研究(圖 3a 和 3b)，利用 200W Ar/O₂ 電漿處理染有神經毒劑($8.5 \mu g/cm^2$ Parathion 及 $5.8 \mu g/cm^2$ Paraoxon)的表面，以每秒約 0.3 公分的速度對染毒表面進行一次掃描，可降低 95% 毒劑劑量。經第二次掃描後，以 Polarization-modulation reflection – absorption infrared spectroscopy (PM-PAIR)儀器分析發現幾乎沒有毒劑的吸收峰存在，且主要分解為磷化物。

Herrmann 等人(1999)以高壓電漿技術 (Atmospheric-pressure plasma jet, APPJ)進行 10 μ L 水溶液中超過一千萬 *Bacillus globigii*(BG)菌株的殺菌研究如圖 4，可在 170°C、30 torr 壓力的實驗條件下，在 0.5 公分的 300W 電漿放電區內，經 4.5 秒鐘的電漿消除，殺菌率可達到 99.9% 消除效果。

註13 S.H. Kim, J.H. Kim, and B.K. Kang, “Decomposition Reaction of Organophosphorus Nerve Agents on Solid Surfaces with Atmospheric Radio Frequency Plasma Generated Gaseous Species” *Langmuir*, Vol. 23, 8074 – 8078 (2007).

註14 H.W. Herrmann, G.S. Selwyn, I. Henins, J. Park, M. Jeffery, and J. M. Williams, “Chemical Warfare Agent Decontamination Studies in the Plasma Decon Chamber” *IEEE Transactions on plasma science*, Vol. 30, 1460 – 1470 (2002).

註15 H.W. Herrmann, I. Henins, J. Park, and G.S. Selwyn, “Decontamination Chemical and Biological Warfare (CBW) Agent Using an Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ)” *Physics of Plasma*, Vol. 6, 2284–2289 (1999).

註16 T.M. Moeller, L.L. M. Alexander, M.H. Engelhard, D.J. Gaspar, M.L. Luna, and P.M. Irving, “Surface Decontamination of Simulated Chemical Warfare Agents” *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 30, 1454-14594 (2002).

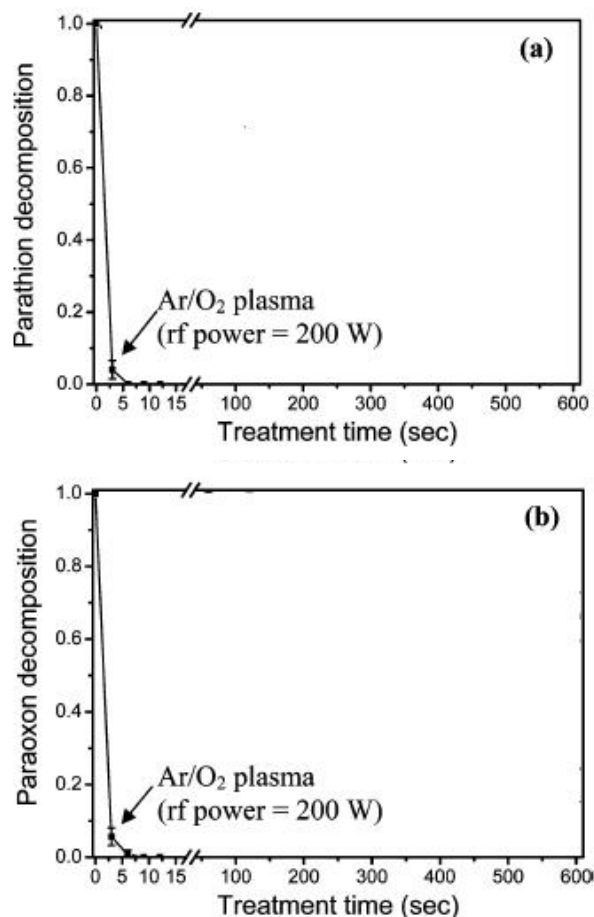


圖 3 電漿技術消除神經毒劑 Parathionc 和 Paraoxon

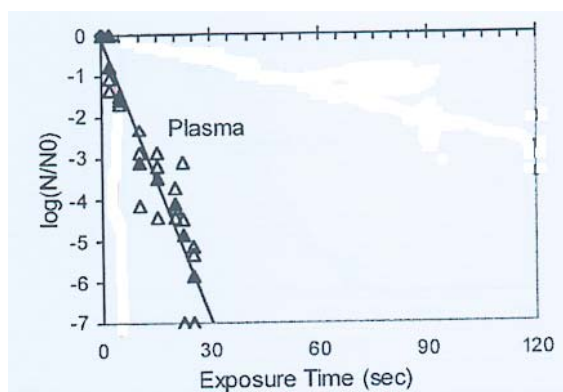
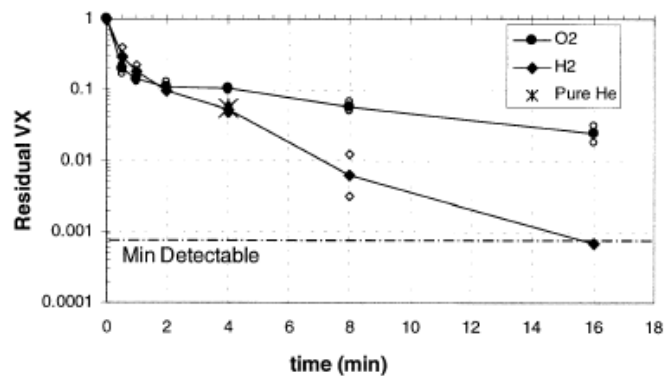


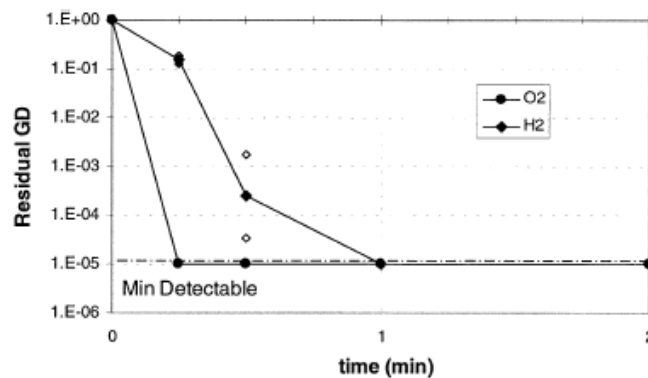
圖 4 高壓電漿技術進行 *Bacillus globigii*(BG)菌株的殺菌

Herrmann 等人(2002)以電漿消除艙(Plasma decon chamber)進行鋁質表面的 VX、GD 神經戰劑與 HD 糜爛性戰劑等實體毒劑(來源：U.S Army Dugway Proving Ground)分解消除研究(圖 5)，Los Alamos Nation Laboratory (LANL)於西元 1995 年發展出電漿消除艙，主要以高壓電漿技術(Atmospheric-pressure plasma jet, APPJ)為設計藍圖，結合真空技術概念的綜合放大版艙室，在 70°C、30 torr 壓力的實驗條件下，在 10

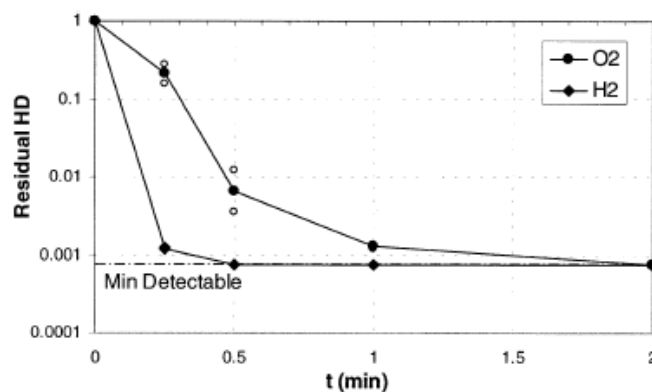
公分的電漿放電區內，GD 神經戰劑與 HD 糜爛性戰劑經過 2 分鐘內電漿消除超過 99.9%(0.1%是 GC/MS 的儀器偵測極限)；另外 VX 神經戰劑經 16 分鐘的電漿消除後，亦可達到 99.9%消除效果。



(a)



(b)



(c)

圖 5 電漿技術消除 VX(a)、GD(b)和 HD(c)戰劑

二、高精密裝備及指揮控制面板的消除

主要是針對靈敏性、高價值及執行重要任務裝備，這裡所指靈敏性裝備是不能使用傳統消除劑和消除程序之裝備。高價值裝備大都是小尺寸和運用封閉迴路系統，如夜視裝備、電腦、精密儀控等或執行重要任務之裝備，如作戰指揮中心、飛彈控制中心等。

(一)高精密裝備種類及特性：

- 1、電子：許多電子設備在隱蔽的地方都有冷卻風扇來冷卻內部的電子零件及電路板(圖6)，而所有缺少襯墊布或讓外圍的冷空氣來冷卻的電子設備均歸類為未封印裝備，由空氣傳播的污染將會滲透進入內部儀器零件中。非封閉式的電子裝備電路系統會由濕氣，灰塵腐蝕而使表面受到損害，大部分的電子裝備對環境是有防水防護的，這也對核生化作戰污染提供了良好的防護，污染或許將不會滲透到防護套襯墊的裝備，但是假如密閉式裝備上的組合元件暴露的話，污染就可能侵蝕露在外邊電子裝備所含的零件。
- 2、光學：可提供夜間偵察、搜索、警戒與部隊指揮等多項功能。望遠鏡、狙擊鏡等裝備之接物鏡及接目鏡，或是飛彈循標器等，皆是光學裝備之主要元件(圖7)，不當之消除物資會使光學系統損壞或是對眼睛有不利影響。

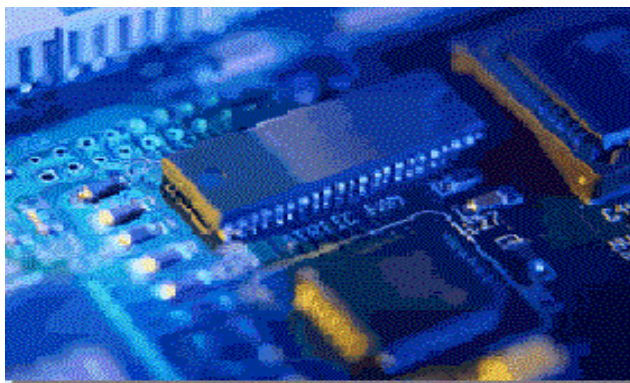


圖 6 電子裝備電路系統



圖 7 光學裝備

- 3、高價值軍品：飛行器(圖8)、防空飛彈為台海作戰時之有生戰力，但由於新一代裝備造價昂貴，獲得不易且數量有限。作戰時若遭敵核生化戰劑感染，將直接影響作戰能力之發揮。實施消除作業時過高之壓力或不當之藥劑將導致蒙皮、雷達、火控及相關電子系統等之損害。



圖 8 AH-1W超級眼鏡蛇攻擊直升機

(二)高精密裝備消除作業方式比較：

傳統的「濕式」消除生化戰劑的方式主要以漂白水、消除劑、清除劑及DS2等液體溶液消除為主，而這些溶液儲存、運輸、需30分鐘以上的消除時間，而且與戰劑反應完後有大量有毒廢水須處理等問題；另外，「濕式」藥劑消除對塑膠、金屬、皮革、橡膠塗料等表面造成腐蝕的現象，因此，對於高度靈敏性的設備消除有其限制存在及不可接受性，例如：指揮中心、雷達站、船艦、航管、飛機起落架、戰甲車輛內部等控制面板(註17)，而這些設備又是指管通資系統，指揮三軍聯合作戰所不可或缺。

化學兵部隊所使用的M8A1毒氣警報器、Chenpro100、JCAD、AN/VDR-II射線偵檢器、GC/MS氣相層析/質譜儀等精密偵檢儀器及一般部隊所使用的通訊、光學、航空電子等裝備，由於通訊、光學、電子儀器大部分皆不能防水，一般而言以不傷害電子設備為前提。以棉布沾消除藥劑擦拭，作業上亦必須非常謹慎小心，以免液滴對電子零件造成破壞，且儀器設備的接縫處等更是困難重重。因此，次世代的消除作業方式，必須能符合以下條件：能快速而有效的處理靈敏性的控制介面、乾式的處理方式、沒有儲存及運輸上的困擾、不會侵蝕消除裝備的表面、可對接縫處及多孔隙材料進行有效消除及符合環境友善的原則(註18)。

1、現今高精密裝備消除作業

- (1) 噴刷法(Spraying and Brushing Decontamination Method)：將消毒液均勻的噴灑在受染裝備或武器表面上，併用洗刷的消毒方式，大型武器裝備消毒通常採用此法。消毒時，應嚴控噴灑壓力及消毒液用量，使其成霧狀均勻灑布，自上而下、由外向內、分段進行消毒；消毒後，須對武器裝備進行沖洗及保養。
- (2) 擦拭法(Wiping Decontamination Method)：利用布、棉紗(球)、毛刷等沾取消毒液對受污染武器、裝備表面進行擦拭的消毒方式，主要適用於小型武器裝備消毒。
- (3) 溶劑法(Solvent Cleaning Decontamination Method)：利用有機

註17 同註 15。

註18 同註 15。

溶劑將受污染表面上毒劑溶解的消毒方式，常用溶劑有汽油、煤油、酒精、二氯乙烷等。有機溶劑腐蝕性小，常用於對精密器材消毒，對毒劑易滲入內部的鬆軟器材，則不宜採用。消毒時，先以棉球或棉紗將受染表面上的毒劑液吸附，再沾取溶劑擦拭，反覆進行4~5次直至完成消毒。

2、電漿技術應用高精密裝備消除作業

InnovaTek 公司於近期正在開發手持式的電漿表面消除器 (Portable nonequilibrium plasma surface decontamination system)(註19)，主要是以電漿技術產生離子、自由基、電子及部分中性粒子，是一種多功能的流體，具有高能量密度、高化學反應性等特質，大約數秒內即可將表面淨化。其產品的特性是微型手持型，由電池或發電機提供電能，對污染表面進行慢速的掃描移除。且非常適合在短的時間內消除淨化較深的摺層、接縫或細縫。

(1) 生物戰劑的消除：

InnovaTek公司的測試試驗中，手持式的電漿表面消除器的原型裝置如圖9，對每平方英吋超過6百萬炭疽模擬菌株的表面進行消除，僅需60秒的處理時間，在塑膠、鋁質及棉花等三種表面上，殺菌率分別為98%、99.9% 及99.4%。而經過5分鐘的消除處理，殺菌率高達99.99%，且經過5分鐘的淨化後，表面毫無損壞。InnovaTek公司的以實際生物戰劑進行測試，發現在塑膠表面及CARC-塗佈鋁的表面的250萬炭疽菌株，經電漿60秒鐘消除後的殺菌率高達99.7%。

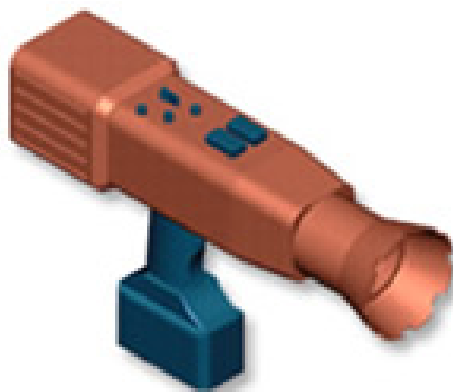


圖 9 手持式的電漿表面消除器的原型裝置

註19 同註 16。

(2) 化學戰劑的消除：

InnovaTek公司的以實際沙林化學戰劑及VX神經戰劑進行研究，發現CARC-塗布鋁的表面，經電漿15分鐘消除後，可降低76%的VX毒劑劑量(初始劑量 11.5g/m^2)，及100%沙林毒劑劑量(初始劑量 11.2g/m^2)。

陸、結語

電漿技術可以產生短生命週期但反應性極強的物質，如：激發態及自由基型態的離子、原子或分子，對受生化戰劑污染的表面進行迅速而有效的分解消除，電漿的產生也只需高壓電，所以沒有儲存和運輸的問題，且低功率電漿火炬可深入接縫和間隙，不須添加藥劑的乾式作業，進行靈敏性精密儀器及電控、雷達、射控、通訊及指揮控制面板的表面消除，更不會侵蝕表面。

InnovaTek 公司的以實際生物戰劑進行測試，發現在塑膠表面及CARC-塗布鋁的表面的 250 萬炭疽菌株，經電漿 60 秒鐘消除後的殺菌率高達 99.7%。此外，經電漿 15 分鐘消除後，可降低 76%的 VX 毒劑劑量(初始劑量 11.5g/m^2)及 100 % 沙林毒劑劑量(初始劑量 11.2g/m^2)，綜合本研究結果可知以電漿技術摧毀表面戰劑，已邁向反應迅速、無消除藥劑及無水、無污染、符合環保等方向發展。