



專案基本資料表

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別(單選)		<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型	
研究主題		<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他					
申請機構系所		中原大學環境工程學系					
機構地址		桃園市中壢區中北路200號					
專案主持人		游勝傑		職等／職稱		教授	
協同主持人		王琳麒		職等／職稱		教授	
專案 名稱	中文	以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治					
	英文	Remediation of organic matter contaminated soil by microwave plasma					
	關鍵字	微波電漿, 有機物, 土壤整治					
執行期程		自民國 110 年 3 月 19 日起 至民國 111 年 2 月 28 日止					
專案主持人		姓名：游勝傑 E-mail：sjyou@cycu.edu.tw 專線：03-2654911 手機：0928-210407					
專兼任人員		姓名：戴欣姿 E-mail：s8524625@gmail.com 專線：03-2654909 手機：0975-225936					
經費 分 析 總 表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)		專案預估經費		第一年 金額	第二年 金額	編列說明	
		1.	人事費用	210,000		(1~5項相加之50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	0		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	245,000		(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	0		(含差旅與租賃費用)	
		5.	雜支費用	0		(1~6項相加之5%為限)	
		6.	行政管理費	45,000		(1~5項相加之10%為限)	
		7.	自籌款	0		(自行籌備款項)	
		申請補助金額(1~6項)		500,000		總金額：500,000	
計畫總金額(1~7項)		500,000		總金額：500,000			

專案主持人(簽名及蓋章)：_____

日期： 111.03.23





研究成果中英文摘要

一、中文摘要：

受有機物污染之土壤可採用(1)土壤氣體抽取法(Soil Vapor Extraction, SVE)、(2)生物通氣法、(3)加熱脫附法、(4)空氣注入法(Air Sparging, AS)、(5)化學氧化法及(6)雙向抽除法(Dual-phase Extraction, DPH)等，前述處理方法對於清除條件亦有受限，而本研究所提出之微波電漿(Microwave plasma)透過磁控管(Magnetron)產生微波源，於常溫環境下產生高能量電子，相比起其他電漿源，微波電漿的氣體解離率及電漿密度、操作壓力範圍廣、快速且均勻地加熱、操作時不需使用電極等優點，微波電漿整體處理過程相較其他技術而言，其不會產生二次污染物，且處理成本相較熱處理法來的低。

因此，本研究建置一套微波電漿系統設備，針對受有機物污染之土壤進行試驗，以室外土壤為樣品作為實際測試之前期試驗，實驗的參數包含載氣(N_2 、Ar)、功率(800W、1000W、1200W)以及土壤重量(1g、2g)。研究結果顯示，於1g 土壤、載氣為 N_2 、功率800W 以及180秒的情況下， CH_4 總產氣量為254.2 ppm；2g 土壤、載氣為 N_2 、功率1200W 以及420秒的情況下， CH_4 總產氣量為975.7 ppm；1g 土壤、載氣為 Ar、功率800W 以及180秒的情況下， CH_4 總產氣量為5.42 ppm；於2g 土壤、載氣為 Ar、功率1200W 以及420秒的情況下， CH_4 總產氣量為39.8 ppm。另外也獲致以下結論： N_2 載氣比 Ar 載氣的產氣量高出許多；使用功率越高產氣量越多；隨著處理系統的反應時間越長，產氣量也隨著增加；增加土壤重量，產氣量也跟著變多。

本研究已成功藉由不同載氣以及反應功率取得各條件之土壤空白實驗數據，下期計畫可利用該等數據做為背景值，以降低系統誤差，提升微波電漿技術用於受有機物污染土壤整治之實驗可信度，提供土基會做為未來針對整治受有機物污染土壤之另一選擇。



二、英文摘要：

Soils contaminated by organic matter can be desorbed and decomposed by soil vapor extraction (SVE), Air Sparging (AS), Dual-phase Extraction (DPH), in-situ soil inversion and dilution, and heat treatment. However, the above treatment methods also have certain restrictions on removal conditions. And the microwave plasma proposed by this research produces microwave source through a magnetron, which generates high-energy electrons at room temperature. Compared with other plasma sources, the gas dissociation rate of microwave plasma is the advantages of plasma density, wide operating pressure range, rapid and uniform heating, and no need to use electrodes during operation. Compared with other technologies, the overall microwave plasma processing process does not produce secondary pollutants, and the processing cost is relatively low. It is lower than the heat treatment method.

Therefore, this research built a set of microwave plasma system equipment to facilitate subsequent experiments on soil contaminated by organic matter. At present, the microwave plasma system has been used to complete the experiment. The outdoor soil is used as a sample, the parameters of this experiment including carrier gas (N_2 , Ar), power (800W, 1000W, 1200W) and soil weight (1g, 2g). The results of the study show that under the conditions of 1g soil, carrier gas of N_2 , power of 800W, and 180 seconds, the total CH_4 gas production is 254.2 ppm; under the conditions of 2g soil, carrier gas of N_2 , power of 1200W, and 420 seconds, the total CH_4 production volume is 975.7 ppm; when 1g soil, carrier gas is Ar, power of 800W, and 180 seconds, the total CH_4 gas production is 5.42 ppm; when 2g soil, carrier gas is Ar, power is 1200W, and 420 seconds, the total CH_4 gas production is 39.8 ppm. In addition, the following conclusions were obtained: N_2 carrier gas has much higher gas production than Ar carrier gas; as the used power increases, the gas production increases; the longer the reaction time of the treatment system, the more gas is produced; the soil weight increases, and the gas production also increases.

The experiment uses different gases and reaction powers to obtain experimental data under various conditions, and will be used in the future to reduce system errors, improve



the experimental credibility of microwave plasma technology for soil remediation contaminated by organic matter, and provided “Soil and Groundwater Remediation Fund Management Board” as another option for remediation of soil contaminated by organic matter in the future.



目次

第一章	前言	1
第二章	研究目的	3
第三章	文獻探討	5
第四章	研究方法與過程(含工作進度甘特圖)	25
第五章	結果與討論(含結論與建議)	29
第六章	參考文獻	43
110年度專案成果績效自評表		I



圖次

圖 1 電漿氣體與電子溫度與壓力影響關係圖(Grill 1994)[10].....	19
圖 2 微波電漿火炬系統示意圖(林聖凱 2005)[16].....	21
圖 3 工作進度甘特圖	25
圖 4 微波電漿設備配置圖	26
圖 5 微波電漿系統設備	29
圖 6 電磁場配置圖	30
圖 7 樣本載台圖	31
圖 8 電漿系統操作參數整合	32
圖 9 載氣為氮氣之電漿火炬	33
圖 10 載氣為氬氣之電漿火炬	33
圖 11 電漿系統運作圖	34
圖 12 微波電漿(N ₂)處理土壤(1g)之 CH ₄ 總產氣量	35
圖 13 微波電漿(N ₂)處理土壤(2g)之 CH ₄ 總產氣量	36
圖 14 不同重量土壤使用微波電漿(N ₂)之 CH ₄ 總產氣量	37
圖 15 微波電漿(Ar)處理土壤(1g)之 CH ₄ 總產氣量	38
圖 16 微波電漿(Ar)處理土壤(2g)之 CH ₄ 總產氣量	39
圖 17 不同重量土壤使用微波電漿(Ar)之 CH ₄ 總產氣量	40
圖 18 使用不同載氣時微波電漿系統之 CH ₄ 總產氣量	41



表次

表 1 低溫電漿與高溫電漿之特性	20
表 2 微波電漿(N ₂)處理土壤(1g)之 CH ₄ 總產氣量	35
表 3 微波電漿(N ₂)處理土壤(2g)之 CH ₄ 總產氣量	36
表 4 微波電漿(N ₂)處理不同重量土壤之 CH ₄ 總產氣量	37
表 5 微波電漿(Ar)處理土壤(1g)之 CH ₄ 總產氣量	38
表 6 微波電漿(Ar)處理土壤(2g)之 CH ₄ 總產氣量	39
表 7 微波電漿(Ar)處理不同重量土壤之 CH ₄ 總產氣量	40



第一章 前言

隨著工業蓬勃發展及人為活動增加，在產業的興起及發展初期對於環境保護的知識較為不足，使許多有害物質被排放至環境介質中，根據近年我國行政院環境保護署(以下簡稱環保署)全國廢棄工廠污染調查等計畫之歸納，其中造成土壤有機物污染之工廠行為包括(1)直接排放未經處理之廢水、(2)儲槽/管線洩漏、(3)意外洩漏、(4)廢棄物堆置/掩埋等，導致土壤污染問題日益嚴重，對於生態及人類健康亦造成嚴重衝擊，由於土壤具有極高質地不均之特性，故一旦遭受污染，使得土壤與地下水整治技術執行相當困難，不僅所需經費極為龐大，且所耗時也較長，為了能使環境與產業能永續發展，因此土壤污染整治儼然已成為國內外備受關注與重視之環境保護課題。

我國環保署於民國89年2月2日正式發布「土壤及地下水污染整治法(簡稱土污法)」，並於民國99年2月3日修正公布施行，對於受污染之土壤及地下水建置一套從調查到整治策略之完整系統，且不論是預防機制、法規制度、推動場址整治及發展土水污染調查與整治技術等到現今已有具體成果。污染場址整治技術可依受污染土壤或地下水之取出與否、整治機制、處理程度差異及待整治之污染物濃度分類，受污染土壤或地下水之取出與否可分為現地方法及離地方法。依整治技術所使用之機制歸屬可分為物理化學方法、生物方法、熱處理方法等[1]。

土壤污染可分為有機與無機污染兩大類，其中受有機物污染土壤之整治技術可採用(1)土壤氣體抽取法(Soil Vapor Extraction, SVE)、(2)空氣注入法(Air Sparging, AS)、(3)雙相抽除法(Dual-phase Extraction, DPH)、(4)翻轉稀釋法及(5)熱處理法等進行土壤中有機污染物處理，然前述處理方法對於清除條件亦有受限，而本研究所提出之微波電漿(Microwave plasma)透過磁控管(Magnetron)產生微波源，於常溫環境下產生高能量電子，相比起其他電漿源，微波電漿的氣體解離率及電漿密度、操作壓力範圍廣、快速且均勻地加熱、操作時不需使用電極等優點，微波電漿整體處理過程相較其他技術而言，其不會產生二次污染物，且處理成本相較熱處理法來的低。

因此，本研究本年度利用微波電漿技術，嘗試建置一套微波電漿系統設



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

備，後續針對受有機物污染之土壤進行處理，探討該技術用於受有機物污染土壤整治之可行性，提供土基會做為未來針對整治受有機物污染土壤之另一技術選擇。



第二章 研究目的

基於上述研究背景可知目前土壤整治技術亦有部分受限條件，藉由本研究微波電漿技術，該技術可將土壤中之有機污染物進行脫附及分解，具有處理受有機物污染土壤之發展潛勢，故本研究嘗試利用微波電漿進行有機污染土壤處理之可行性探討，期達成土壤及地下水污染整治應用，確保土地永續利用之目標。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治



第三章 文獻探討

一. 土壤地下水污染整治技術

由於化學品不當之處理或處置造成土壤及地下水污染事件時有所聞，對人體健康及生態形成潛在的威脅甚或危害，這些有機化學物質除了對人類有害，對於其他生物同樣會造成危害，甚至影響生態平衡，是以討論其環境衝擊時，污染物於環境中之流佈、傳輸、各項物理、化學及生物性反應均須納入評估考慮。

土壤中無機物組成之黏粒及有機物組成之腐植質皆會與有機污染物產生結合，黏粒表面帶負電，具層狀構造，其表面及層間孔隙都可吸附有機物與水份，黏粒粒徑極小($<0.002\text{ mm}$)，若土壤中黏粒含量少而砂粒(粒徑在 $2\sim0.05\text{mm}$ 間)含量偏高，則土壤屬粗質地土壤，對有機污染物之吸附力差，污染物較易因淋洗或滲濾作用而進入地下水中。而腐植質為土壤中分子極大且非常穩定，不易被微生物分解之有機化合物，如同黏粒具很大的表面積及多孔隙可吸附有機物與水份，但較黏粒有更多之化學作用基，產生較黏粒複雜之吸附、分配及化學作用，是以有機污染物若進入含有有機化合物之土壤後就不易被釋放出來，此時則可考慮經由電子轉移、催化、生物分解等作用以降解有機污染物。

一旦有機污染物釋放至環境中，會經由蒸發、飄散、沉降、淋洗、溢流、滲濾、吸附及攝食而分別進入空氣、土壤、河川及生物體中，此即污染物之環境流佈(environmental distribution)；爾後，進入環境中之有機污染物可因光分解、土壤之生物與化學分解、水解、作物代謝等作用而降解，此即有機污染物之環境宿命(environmental fate)。換言之，有機污染物中的長鏈碳或苯環碳藉著微生物分解、光分解與化學分解作用，直接斷鏈或分次裂解，逐漸降解為小分子碳(C)。

污染場址整治技術可依受污染土壤或地下水之移除與否、整治機制、處理程度差異及待整治之污染物濃度分類，受污染土壤或地下水之取出與否可分為現地方法及離地方法。依整治技術所使用之機制歸屬可分為物理化學方法、生物方法、熱處理方法等[1]。依其對污染物之處理程度差異又可以分成不移動化



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

或阻絕技術、破壞性技術、分離濃縮技術、毒性/移動性降低技術等。依待整治之污染物濃度及強度則又可分為污染源整治技術、污染團中心區整治技術、以及污染團邊緣區整治技術等。其中在污染源區域整治方式，主要是應用物理、化學或熱方法加強回收或現地破壞之方法，包括油液回收、介面活性劑或共溶劑熱加強回收、蒸氣注入回收、熱加強回收及化學氧化法[2]。而在污染團中心區的整治方法，則包括空氣注入與土壤氣體抽取法、生物復育法、化學氧化法及化學還原法等。污染團邊緣區的整治方法則包括有監測式自然衰減法、生物整治法、化學氧化法、化學還原法及透水性反應牆等。

在進行有機物污染土壤整治技術選取之前，須瞭解並無一種整治技術能適用於所有場址，並保證其整治成效。一個成功的整治場址，往往具有許多客觀的條件來達成，且大部分可以在整治之前作進一步釐清，以節省整治所需之時間及費用。以下就常見之整治技術進行說明[3]。

1. 土壤氣體抽除法

(1) 原理

土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction, SVE)係針對不飽和層或通氣層(Vadose Zone)土壤中高揮發性污染物進行整治之方法。此技術利用真空抽氣，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，污染物由固相或液相轉移為氣相，並因抽氣井使污染區土壤產生負壓，使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動而被抽出，被抽除土壤氣體再進行回收或經處理後排放。此技術於操作時，常在地表上覆蓋一層不透水布，以避免產生短流現象，並增加抽氣井影響半徑及處理效率。

(2) 適用時機及環境介質

土壤氣體抽除法成功地運用在處理位於中透氣性及高透氣性土壤中含有揮發性污染物成分，並被大量運用在含氯溶劑污染的場址中。其限制說明如下：

A. 不適用於低揮發性或低亨利常數之污染物，亦不適合處理水分含量高或黏土質之土壤，更不適用於低透氣性的土壤環境中。雖可以運用工程技術克服上述不利的條件，但會顯著增加整治之經費。

B. 土壤對揮發性有機物之吸附力，會降低土壤氣體抽除系統對揮發性有機物



之萃取率，亦即將揮發性有機物轉化為氣體之效率，土壤對污染物吸附力的影響，在整治階段後期最為明顯，土壤氣體抽除法將需要更長的操作時間，以處理最後殘留於土壤的揮發性有機物。

C. 土壤的異質性亦將影響土壤氣體抽除系統的成效，氣體易在大粒徑土壤中流動，但不易在粒徑小的黏土中流動，且在一般情形下，揮發性有機物亦累積在黏土表面，因此，相對地流過高污染土壤的氣流量將極為有限。

(3) 優點

A. 在國外相關整治成效已被證明，使用者容易取得設備，設置安裝容易。

B. 對場址運作之干擾最小。

C. 整治期程短，在理想情況下，一般整治期程約6個月至2年。

D. 整治價格具競爭性。

E. 易與其他技術結合運用，如空氣注入法、生物整治法、生物漱洗法等。

F. 可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。

(4) 缺點

A. 污染物濃度降低90%以上不易達成。

B. 當應用於低滲透性土壤或分層土壤之場址時，其處理效果之可靠性低。

C. 經抽除後之土壤氣體，為符合空氣排放標準，其廢氣處理費用可能需支付較昂貴的處理費用。

D. 僅適用不飽和層土壤污染之整治；飽和層土壤及地下含水層部分需要採用其他整治方法。

(5) 對於環境的影響

土壤氣體抽除法對環境造成之影響，主要在於其抽出之氣體是否有效的被處理，如無設置適當之尾氣處理設備，可能會造成空氣污染。

2. 生物通氣法



(1) 原理

生物通氣法(Bioventing)是一種常用的現地(in-situ)的處理技術，主要係針對吸附於不飽和層土壤間隙的有機物污染物，進行抽取移除的機制。其處理程序類似土壤氣體抽除法，亦即其主體設備仍為土壤氣體抽除設備，藉以抽除土壤層中的揮發性有機污染物，但其中比較特別的是多加了一個整治程式單元，於土壤層中添加了營養鹽(Nutrient)的成份，其目的係為增加土壤的生物分解作用，以加速土壤層中污染物質降解速率，使得部分分子量較大、揮發性較低，或是吸附於土壤顆粒微細間隙、吸附引力較強、不易抽離的污染物，可以藉由生物降解作用，將污染物水解或分解成小分子中間產物，而得以再繼續藉由抽氣引力，離開土壤微細間隙，或是較容易抽離土壤層。

生物通氣法適用於油品類污染，例如汽油、柴油、航空燃油等，但在處理柴油、航空燃油等污染時更具成效，因為汽油污染往往使用 SVE 即可得達到良好的成效(揮發性相較高)，但柴油、航空燃油等污染，SVE 所能達成的成效就有限，利用生物通氣法的生物降解輔助作用，可加強其功效。

(2) 適用時機及環境介質

關於污染物濃度，建議總石油碳氫化合物(TPH)濃度不大於25,000 ppm，而重金屬也必須小於2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。

(3) 優點

D.簡單可得之工具器材，容易設置。

E.操作的空間較小。

F.較短的處理時間，在已調整為最適的操作狀況之下，平均約6個月至2年間可以完成整治工作。

G.每噸土壤處理費用約45~140美元，較其他地面處理程式便宜。

H.可以和簡單地和其他類型的整治技術結合，例如整治地下水的空氣注入法(air sparging)、抽出處理法(groundwater extraction)等。



I.可能不需要昂貴的尾氣處理費用。

(4) 缺點

A. 濃度太高的成份，可能對於微生物造成毒性。

B. 在低透水性、黏土質高的土壤層，可能不適用，或是地質條件未調查明確的情況下可能效能有減低的現象。

C. 土壤若有分層，恐造成效能降低。

D. 無法達到太低的污染物濃度處理目標。

(5) 對於環境的影響

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。除此之外，整治過程中有可能產生好氧微生物，協助進行污染物分解，因此須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數。

3. 低溫加熱脫附法

(1) 原理

低溫加熱脫附法(Low-Temperature Thermal Desorption, LTDD)。低溫加熱脫附法被歸類為離地(ex-situ)型態的處理技術，針對受到油品類污染之土壤，利用「物理性」處理方式，移除受污染之土壤，主要係將受污染土壤挖除之後，送入加熱脫附機，使得污染物和土壤分離。低溫加熱脫附法之加熱脫附機內主要污染物去除機制可能由下列三項單元組成：a.熱揮發(thermal volatilization)、b.熱脫附(thermal stripping)、c.熱烤(soil roasting)，被移除之污染物因屬於有機氣體成分，因此需要利用後續「二次處理」(secondary treatment)設施進行處理，例如：a.焚化：設置焚化器(incinerator)，將污染物焚化成二氧化碳及水。b.觸媒氧化：設置觸媒氧化器(catalytic oxidation chamber)，同樣將污染物分解成無機性之二氧化碳及水。c.冷凝：設置凝結器(condenser)等，將含污染物高溫氣體凝集之後收集，蒐集之液體再進行後續處理。d.吸附：設置活性炭吸附設備(carbon adsorption unit)吸附氣體中之污染物，將其移除。部分污染土壤必須進行初篩工作，以避免大型土壤顆粒或石塊進入低溫加熱脫附器之中，通常篩選器設定土壤粒徑應至少小於2英吋(約5公分)較佳。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

低溫加熱脫附處理器可分為「移動型設備」及「非移動型設備」。移動型設備可以搬至污染場址內，現場直接處理挖除的土壤；而非移動型設備則因設置於場外，污染土壤可能會有運送行為產生，必須注意運送過程中，避免土壤二次污染產生，以及進行必要的運送管制作業。低溫加熱脫附法對於處理油品類污染土壤相當有用，但對於地下含水層污染而言，本項方法並不適用。至於加熱溫度一般經常控制於150~540°C，最高不超過650°C左右下操作。較低溫度下可以脫附油品類物質中汽油等成分，而不產生燃燒作用；柴油、煤油等則必須達到370°C以上；至於不具揮發性的潤滑油、加熱用油等，則需要更高的加熱溫度才能脫附。

(2)適用時機及環境介質

低溫加熱脫附法僅適用於處理受污染之土壤，對於地下水含水層污染並不適用。

(3)優點

- A. 現場(on-site)或離場(off-site)的技術及設備上取得容易，已經商業化。
- B. 非常快速的處理時間，商業化系統每小時處理量可達25噸土壤。
- C. 處理大量土壤時(大於 765 立方公尺)，具有競爭優勢，每噸土壤處理費用約30~70美元，但不包括離場(off-site)處理方式的土壤運輸費用。可以快速處理主污染區(hot spot)的高濃度油品污染。
- D. 可以簡單的和其他技術再進行結合處理，例如空氣注入法等。
- E. 經處理土壤可以回填原場址，或是做為原污染場址以外地方之其他填土用途(惟必須經環保機關同意)。
- F. 可持續降低 TPH 至10 ppm 以下，以及 BTEX 至100 ppb 以下，或甚至更低。

(4)缺點

- A. 必須挖除土壤，但一般限制在地表以下深度7.6公尺以內。



- B. 現地處理必須有足夠的設備設置空間(大約大於2,000平方公尺)，離場(off-site)處理方式的土壤運輸費用較高。
- C. 欲處理地下水面以下之含水層土壤者，必須以抽水等方式先降低地下水位元。

(5)對於環境的影響

VOCs 氣體逸散濃度必須符合國內相關空氣污染防治法令。此外，以焚化方式處理尾氣者，另會產生粒狀污染物，粒狀污染物經集塵袋等處理之後，其排放濃度亦必須符合我國「固定污染源空氣污染物排放標準」規定，依據煙囪高度、管徑大小等，計算粒狀污染物之排放許可濃度。若遭污染土壤中含有 PCBs 或是其他含氯化合物，即有可能在處理過程中產生戴奧辛，須考量採取戴奧辛去除之措施。

4. 空氣注入法

(1)原理

空氣注入法(Air Sparging)被視為最常用的現地(in-situ)的處理技術，主要針對吸附於土壤或溶解於地下水中的揮發性或半揮發性有機物質進行處理，將未受污染的乾淨空氣注入地下水污染區(通入含水層)中，藉由水中曝氣作用，使得有機物質從溶解的液相中吹出移除，當其到達不飽和層之土壤層中，可藉由土壤氣體抽除設備如 SVE(Soil Vapor Extraction)等抽除。其經評估對於遭受油品污染的地下水，有相當良好的效果。

(2)適用時機及環境介質

有關使用空氣注入法的適用性，可藉由初步篩選、細部評估、系統設計、操作及監控等四個流程進行評估。

(3)優點

- A. 簡單可得之工具器材，容易設置。
- B. 操作空間較小。



- C. 較短的處理時間，在特定條件操作下，整治期程小於1至3年。
- D. 每噸土壤處理費用約20~50美元，較其他地面處理程式便宜。
- E. 不須移除、處理、儲存、處置遭受污染的地下水。
- F. 可以 SVE 加強處理效能。

(4)缺點

- A. 若有自由相浮油存在，不能同時處理，必須先移除浮油。
- B. 不能處理遭特殊地質侷限之污染團。
- C. 土壤若有分層，恐造成效能降低。
- D. 一些化學性、物理性、生物性的交互作用尚不清楚。
- E. 缺乏實場及實驗室數據支持設計考量因數，場址差異性影響參數，不能通用。
- F. 會造成組成物的移動須細部設計模場試驗，確認氣體揮發之控制。

(5)對於環境的影響

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。除此之外，整治過程中有可能產生好氧微生物，協助污染物分解，但必須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數[4]。

5. 現地化學氧化法

(1)原理

現地化學氧化法，係利用各種化學氧化劑，注入土壤或地下水污染層中，氧化油品污染所造成環境中存在之各項化合物，使其成為二氧化碳及水。現地化學氧化法之特點為處理時間較快，然因為地質條件限制，以及各種氧化劑的特性，都會限制氧化的時間以及效果，故在氧化劑的選擇上須加以評估。現地化學氧化法最主要的考量因數是土壤與氧化劑的反應性，如果土壤中含有大量



的其他有機質，則有可能會消耗大量的化學藥劑，造成成本的浪費。

(2)適用時機及環境介質

現地化學氧化法適用於土壤、地下水污染併同處理。但可能因化學藥劑較貴，考量經濟因素下，往往優先應用於小污染區域場址，或是為了縮小污染區範圍之目的而使用。在使用現地化學氧化法前，必須先進行自由相(free product)之回收，在確定場址內沒有浮油層之後，才會使用現地化學氧化法，其理由有兩點：a.避免發生浮油與氧化劑產生劇烈的氧化作用而發生危險；b.避免浪費太多化學藥劑，造成成本浪費。基於安全的理由，現地化學氧化法常常搭配其他整治技術，例如土壤氣體抽除法(SVE)一併施行，以幫助緩和安全問題，控制可能因各種化學氧化劑添加所產生的氧化作用，所引起含有揮發性有機物(VOCs)、氧氣和其它反應副產物的尾氣[3]。

(3)優點

- A. 污染物可以在現地被破壞移除。
- B. 處理效率較為快速。
- C. 處理過程中沒有廢棄物、廢水等產生，場址中加藥氧化過程產生的氣體也不多。
- D. 可以氧化 MTBE 等油品類較難分解污染物。
- E. 減少操作及監測成本。
- F. 殘餘的碳氫化合物可以持續由氧化劑產生的溶氧等，加強後續的生物分解作用。
- G. 對於場址運作干擾最小。

(4)缺點

- A. 初設成本及總成本可能較高。
- B. 滲透性較差的地方，化學氧化劑可能無法到達以及氧化污染物。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

- C. 過氧化氫可能在現場產生危害性氣體，可能需要輔以其他設備抽除，避免危險。
- D. 在處理數週至數月後，溶解性的水中污染物濃度可能回升。
- E. 污染團結構及範圍可能在施作數週之後改變。
- F. 化學藥劑之使用，有健康風險以及場址作業安全之考量。
- G. 僅用現地化學氧化法將場址整治至非常低的濃度是不經濟的甚至技術上很難達成的。
- H. 化學藥劑有可能浪費在與土壤層中其他物質作用而消耗。
- I. 有可能造成沉澱性固體，阻塞土壤層中的顆粒間隙。

(5)對於環境的影響

➤ 過氧化氫

- A. 可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE
- B. 增加污染團結構改變的風險。
- C. 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層氧化污染，可能產生不被預期產生的有害副產物。
- D. 需要現地儲槽。
- E. 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。

➤ 高錳酸鹽

- A. 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性土壤層氧化污染。
- B. 可能產生不被預期產生的有害副產物。
- C. 需要現地儲槽。



D.有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。

➤ 臭氧

A.可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE 等。

B.增加污染團結構改變的風險。

C.氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層氧化污染。

D.需要現地氣體產生機。

E.可能產生不被預期產生的有害副產物。

F.需要現地儲槽。

6. 雙相抽除法

(1)原理

雙相抽除法 (Dual-phase Extraction) 亦稱為多相抽除法 (Multi-phase extraction)、真空抽除法 (vacuum-enhanced extraction) 以及生物漱洗法 (bioslurping)，屬於現地處理方式之一。主要於污染區土壤上方，挖設一個回收整治井，井中設置泵，由泵抽離、移除土壤及地下水中以不同型態存在的污染物質[5]，其中包括液態之地下水自由相(free product)、溶解相，以及不飽和土壤層中以氣相存在之揮發性有機物等物質，屬於油、水、氣可同時抽除處理之整治技術[6]。

(2)適用時機及環境介質

雙相回收抽除系統適用於土壤、地下水污染併同處理，甚至包括浮油之回收，具有氣、液、油共同處理之適用優勢。

雙相回收抽除系統的適用條件包括：

A.低到中等的透水性地質(<10⁻³ cm/s)或較薄的浮油厚度(<15cm)。

B.地下水位介於1.5到6公尺。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

C. 傳統的抽出法或回收溝技術不適用。

D. 浮油位於鋪面或不透氣表面之下。

當雙相回收系統之浮油回收體積不夠多的時候，就該考慮停止操作，所以訂定停止運作之標準也是系統建置時必須審慎考慮的條件。停止運作的標準可能包括總浮油回收率(例如：每個月少於 2 加侖或者浮油回收體積對地下水抽出速率的比例小於0.1%)與回收/監測井中浮油厚度(例如：小於3公分)。浮油厚度應按季或按月進行監測，以確保回收/監測井中的浮油厚度在規定時間內(如2年)沒有超過閾值(如3公分)，此閾值也可同時作為重新啟動回收設備的參考。

(3)單泵雙相抽除法優缺點

優點：

A. 在低滲透性地質特性場址中，整治較有效。

B. 操作空間較小。

C. 較短之處理時間(一般在最適條件下操作約為至6個月至2年)。

D. 增加污染地下水之抽除速率。

E. 可以應用於有浮油的場址，並且可以結合其他整治技術併行，例如空氣注入法、生物整治法等。

F. 在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。

缺點：

A. 在高滲透性地質特性場址中，要達到整治目標所需之經費較高。

B. 在地下水水位變動較大之區域難以處理。

C. 處理抽除之土壤氣體或是分離油、水兩相之經費可能較高。

D. 在地面上，必須設置能夠處理大量地下水的設備。

E. 須有特殊的機器設備以及有經驗的操作及試驗技術。



F. 操作期間需要複雜的操作、控制以及監測計畫。

(4)雙泵雙相抽除法優缺點

優點：

- A. 廣泛適用於各種條件之地質狀況，機具設備較容易獲得。
- B. 處理設施運作之空間需求較小。較短之處理時間(一般在最適條件下操作約為6個月至2年)。
- C. 對於地下水位變化較大的區域有較大的彈性運用空間。
- D. 可以應用於有浮油的場址，並且可以結合其他整治技術併行，例如空氣注入法、生物整治法等。
- E. 在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。

缺點：

- A. 對於地下環境之資訊不完整之場址有使用上的限制，可能較無效。
- B. 氣體處理需要較多的經費。
- C. 分離油、水兩相，經費可能較高。
- D. 操作期間需要複雜的操作、控制以及監測計畫。

(5)對於環境的影響

抽取地下水可能造成地下水擾動，以及局部性的水位變化。地下水抽出井位置除了需要符合污染整治效率需求之外，也必須仔細評估是否會影響到地下水污染管制區外的地下水文流向、流速及水質，必要時應規劃足夠的水文緩衝區。一般建議進行小規模抽水試驗，並求得影響半徑，藉此再推估大規模整治工程之可能影響範圍，再選擇合適之設備。抽水量必遵照規劃設計操作參數操作。抽出的地下水進行油水分離的處理，油的部分可回收或送交處理業者進行有害廢棄物處理。地下水後續處理可能進行排放，若場址位於工廠之內，一般建議納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污



染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，處理後之放流水須符合「放流水標準」。

二. 電漿技術

電漿係指完全或部分離子化的氣體，原子或分子經能量作用後，其外層的電子脫離核束縛，分離成帶負電的電子、和帶正電的離子、自由基及中性物種等級和狀態，可視為一種能量較高且不同於固態、液態與氣態的第四態，電漿效率高、使用範圍廣、操作簡單等優點，近年來已成為各國研究的熱點，使用電漿技術處理廢棄物的研究逐漸增加。

近年來，一種新型的廢物處理技術電漿氣化回收技術(Plasma arc recycling plasma recycling or plasma gasification)，被認為是有效的廢棄物處理技術，電漿技術通常應用在材料改質與廢料處理，而許多研究已經證明在等離子體燃燒處理後，可以作為一種安全廢棄物進入垃圾填埋場，其可將城市固體廢物(MSW)、石油焦、煤和生物質能轉化為合成氣，可用於發電、取暖，以及乙醇等合成燃料的原料，而合成氣就是電漿處理重要生成物之一，合成氣是由氫氣 H_2 和一氧化碳 CO (水煤氣的重用組成部分)，其可以作為未來燃料電池或內燃機的燃料[7-9]。與傳統方式相比電漿熔融氣化技術處理廢棄物的減容比高達99.7%。並且最終產物氣體和固體殘渣都可進一步被利用，從而實現資源再利用，搖籃到搖籃。電漿熔融氣化技術與焚燒法相比，成本可降低10~50%，電漿技術應用於有機物污染土壤上開拓一條新途徑。以下就電漿技術進行說明。

1. 電漿原理

電漿(Plasma)是由離子、電子、自由基及中性物種等所組成之準電中性氣體，而且因為其部分離子化的氣體狀態不屬於以往所認知的固、液、氣三態中，故被歸類於物質的第四型態—電漿態，如太陽就是屬於自然的電漿，人造電漿則是像日光燈管。主要利用以下兩種方式用來產生電漿，(1) 透過電子在電場中加速利用高動能碰撞到氣體分子後的能量轉移，使原子中的電子與原子核進行分離來產生電漿；(2) 透過加熱氣體分子，加熱至原子中的電子獲得足夠的能量使其足以有機會能夠脫離原子核之束縛，成為離子與自由電子，達到離子化的過程。氣體完全或是部分離子化，因受到電場或是磁場的影響下，電漿中



的帶電粒子受到外在的磁場或電場而與其他中性粒子產生能量轉移，使氣體產生解離(Dissociation)、激發(Excitation)、離子化(Ionization)、或形成自由基(Radical)、離子(Ion)等高活性粒子，而同時存在上述幾種狀態則稱之為電漿。

2. 電漿種類

電漿可分為高溫電漿(thermal plasma)、非熱電漿(non-thermal plasma)以及低溫電漿(cold plasma)；根據平均自由路徑原理(Mean free path)，電子和其他氣體分子的碰撞頻率與壓力會成反比，因此電漿中的電子溫度以及氣體溫度會因為碰撞頻率的高低而受到影響。圖1則顯示了壓力的影響以區分了三種電漿型態。

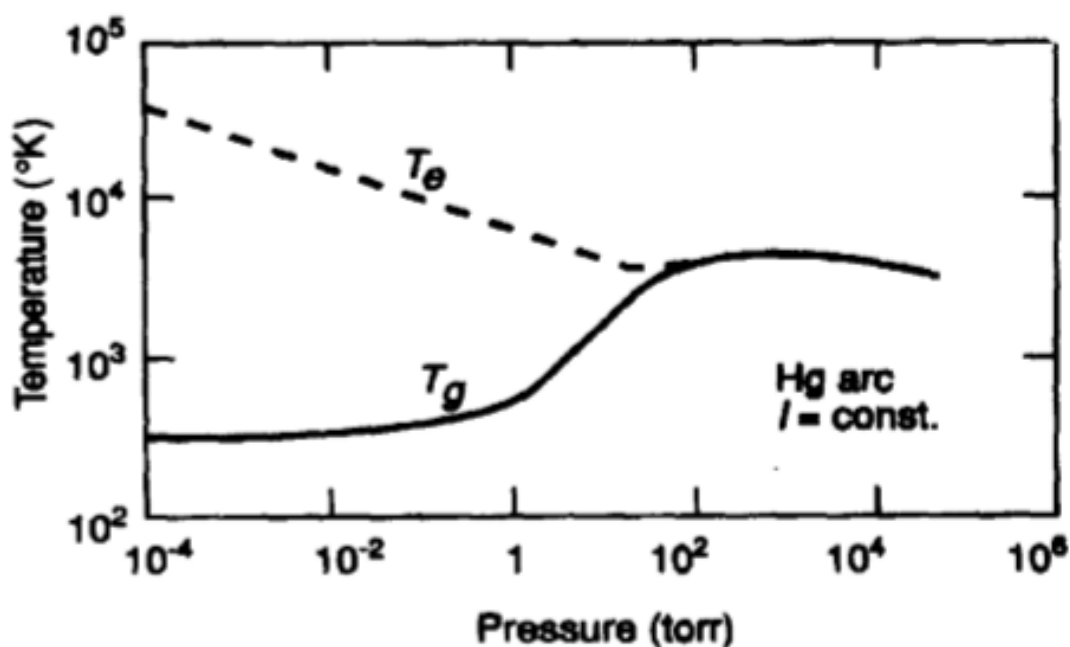


圖 1 電漿氣體與電子溫度與壓力影響關係圖(Grill 1994)[10]

而其中以 T_e 代表電子溫度， T_g 為中性粒子溫度， T_i 為離子溫度，當 $T_e = T_i$ 時，可稱之為熱平衡電漿，又可以簡稱熱電漿(Thermal Plasma)。熱電漿不只是電子溫度與離子溫度高，其他粒子(原子或分子)的溫度也相對地高。但由於電漿輻射的原因，部分能量會因此而溢散又無法有效地補充，使得熱平衡達到理想的狀態。實際上容易形成的是各種粒子的溫度幾乎相等($T_e \cong T_g \cong T_i$)，組成上也接近理想狀態的電漿，主要的電漿溫度約為 $5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4 \text{ K}$ ，一般可以在常壓狀態下產生。

熱電漿常用於金屬加工、鋼鐵及礦石冶煉，電漿火炬也屬於熱電漿的應用



範圍之一，廣泛應用於切割、高熔點金屬加工、金屬或非金屬熔射等。若是 $T_e \gg T_i$ ，電子溫度高達 $10^4 \sim 10^5 K$ ($1 \sim 10 eV$)，且 T_g 溫度可低至室溫，則可以稱之為低溫電漿(cold plasma)或是非熱平衡電漿(Non-Thermal Plasma)，其形成在 100Torr 以下的低壓產生，常見的例子有介電質放電及低壓輝光放電。一般情況下都會認為高溫必定為高熱量，但對於非熱平衡電漿中並非如此，如在輝光放電的系統中，假設內部 $T_e = 10 eV$ ， T_e 大約相當為 $1 \times 10^5 K$ ，但 T_i 只有幾百 K 左右，而電子份量佔整體比例又微乎其微，使得系統的反應管壁溫度接近於室溫。這對於應用上有著很大的幫助，因為一方面電子有充足的能量可以進行激發、電離成電漿，另一方面溫度又可以保持在室溫的情況下，不僅僅能夠省能源且可在一般的實驗室環境下就可以進行操作與研究。而表1為低溫與高溫電漿之比較。

表 1 低溫電漿與高溫電漿之特性(李灝銘 2001)[11]

項目	低溫電漿	高溫電漿
定義	部分游離	完全游離
壓力	$10^{-6} \text{ torr} < P < 10^{-2} \text{ torr}$	$\geq 760 \text{ torr}$
氣體溫度	$< 1,000 K$	$> 10,000 K$
電子溫度	$T_e \approx T_g \approx T_i$	$T_e \gg T_g > T_i$
游離度	$10^{-4} \sim 10^{-1} \%$	$\sim 100 \%$
(Degree of Ionization)		
氣體狀態	非熱平衡	熱平衡

3.微波電漿應用

微波電漿(Microwave plasma)使用導波裝置產生微波藉此誘導微波電漿火炬[12]。利用產生器產生 2.45 GHz 之微波功率，整個裝置中包括了三探針匹配器、方向耦合器以及隔離器等，而微波電漿火炬於石英管中產生。圖2為微波電漿火炬示意圖。

王雅玢等人[13]利用常壓微波電漿系統對於甲醇進行重整，藉由熱解甲醇來製備氫氣。得出在高功率以及低入口莫耳分率的情況下，甲醇的轉化率($>97\%$)以及 H_2 的選擇性(85.5%)皆達到最好，而副產物以 CO 及碳黑為主，還有部分的 C_2H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 及 CO_2 。但在高入口莫耳分率及低功率的情況下 H_2 有著較低的能量耗損(13.2 eV/molecule- H_2)。



Yoon 等人[14]利用微波電漿系統，對於甘油進行了不同條件的氯化特性，得出了當 O_2 /燃料比越低，產生了高 H_2 及 CO 的合成氣各為57%及35%，但有著最低的碳轉換率約80%；反之， O_2 /燃料比越高，合成氣含量降低，有著最高的碳轉換率，功率的提升也導致了合成氣的增加(H_2 與 CO)。使用噴嘴霧化甘油時， H_2 及 CO 能夠提升含量而 CO_2 的容量減少，而且燃料的停留時間與氯化的反應及效率有著相當大的關連性。

Sekiguchi 等人[15]利用微波放電蒸氣電漿來對於已烷重整以製備氫氣，從發射光譜得知在純蒸氣微波電漿下，能夠觀察到 OH 、 O 以及 H 的光譜；已烷注入後則檢測到 C 以及 C_2 的光譜。由此可知微波電漿應用於已烷的重整是能有製氫，但是已烷的轉化率不足則是需要改進的地方。

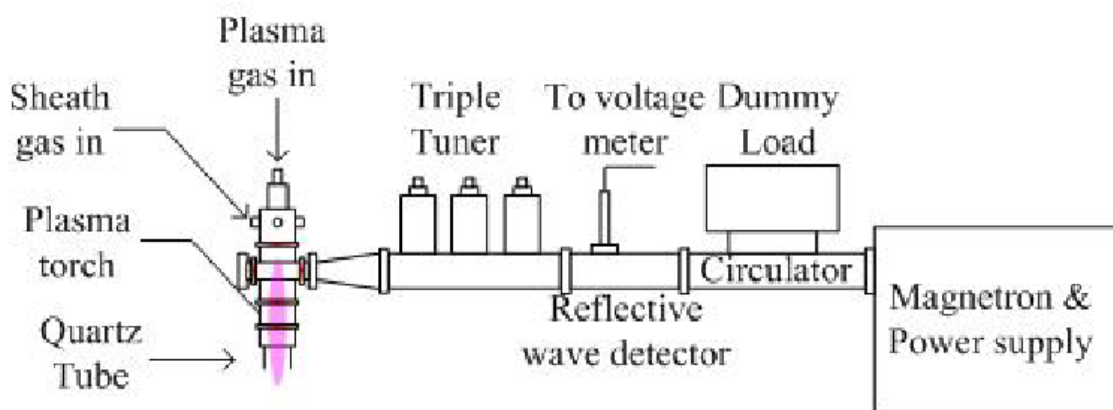


圖 2 微波電漿火炬系統示意圖(林聖凱 2005)[16]

4.電漿與有機物之反應探討

電漿是典型離子化氣體的獨特狀態，利用微波能量激發承載氣體(常見如氮氣、氬氣)的分子，以提高其電能階層，成為非常活潑的自由基，在電漿狀態下，被激發的電子將能量轉換以破壞物質內的化學鍵，其中碳—碳鍵為其中最脆弱者，據此，任何有機廢棄物(液態、固態或氣態)置入電漿中可分解成中間或最後產物，進而瓦解其毒性。

何俊翰[17]利用微波電漿技術(Microwave Plasma)針對有機廢溶劑進行實驗，探討不同氣體、不同功率以及不同體積對於 CH_4 以及 H_2 的產生量之影響。其批次實驗結果顯示，較多的溶劑體積、載氣為 N_2 、功率越高的情況下有著較大的產氣量。



郭芳汝[18]的研究探討將氣化或裂解生質物後所產生的焦油(以甲苯(C_7H_8)做為模型產物)與二氧化碳(CO_2)進行熱電漿重組以產製合成氣。其研究使用熱電漿反應器(電漿火炬)重組甲苯以及二氧化碳，實驗結果顯示，隨 N_2 進流率提高，甲苯轉換率亦隨之增加。

洪梓彬[19]利用常壓微波電漿進行乙醇裂解與部份氧化產製氫氣之探討。實驗結果顯示乙醇轉化率隨氧氣/乙醇進流比例而提升，且獲致副產物資訊，包含氣態副產物部分，乙醇裂解或部份氧化以 CO 為主要產物，其他產物濃度除 CO_2 外，其高低順序為 $C_2H_2 > C_1 CH_4 > C_2H_4$ ，而固態副產物方面，則以碳黑為主要產物。

李灝銘[11]以低溫電漿技術處理揮發性有機物—對二甲苯及乙醛，研究結果顯示，低溫電漿技術對於對二甲苯及乙醛兩種不同分子結構之揮發性有機物，在特定操作條件下均可獲致相當高的去除效率(>99%)。許多操作因子會影響低溫電漿技術對揮發性有機物的去除率，其中，去除率與施加電壓、輸入功率、水氣濃度、氣流溫度及停留時間成正相關；與污染物負荷量成負相關；氧氣濃度的影響較特殊，氧氣為低溫電漿系統中最重要的活性物種—氧原子的提供者，換言之，氣流中存有愈多的氧分子應該愈有利於氧原子的生成，進而促進揮發性有機物的氧化；另一方面，由於氧氣本身電陰性會耗損電漿中的電子數，上述兩種現象在低溫電漿系統中彼此競爭，造成過高與偏低的氧氣濃度均不利於揮發性有機物在低溫電漿系統中的去除。產物鑑定部份，乙醛上的碳經放電後95%轉化為 CO_2 ，少部份變成 CO ；對二甲苯上的碳經放電後70%轉化為 CO_2 ，另有醛類物質(15%)及 CO (10%)之生成；除了有機物的轉換外，放電後會生成數十 ppm 的 NO_2 及 N_2O 副產物。

劉永銓等人[20]開發出一種新型式的微波電漿火炬反應器，並探討此反應器對於揮發性有機物質的破壞效率，使用乙醇當作模式氣體、氧氣或空氣當作攜流氣體，藉由操作參數(包括：供給能量大小、乙醇的進料流量、攜流氣體的流量等)的調整，可得到一最經濟且有效率之處理條件。獲得以下結果，在其功率輸出為600W、電源頻率為200Hz、空氣流量為1Lpm、水氣流速為0.48 mL/min 時，乙醇進料流量1730 sccm 時，其分解破壞效率值可達99.3%以上。

賴俊諾等人[21]利用常壓電漿設備輔助柴油引擎，探討不同混合配比油品之污染排放變化。研究成果顯示柴油引擎污染排放隨著電漿設備之電壓提高有



逐漸降低趨勢。

陳雅雯[22]則是利用微波電漿系統處理台灣養殖廢保麗龍，進行三階段的探討，一為針對氮氣電漿與氫氣電漿跟一般燃燒的差異，二為研究不同電將功率對氫氣和甲烷氣產生效率影響，最後探討了不同樣品表面積與樣品重量對氫氣和甲烷氣的處理差異，結果顯示氮氣電漿能將 C—H 鍵結打斷形成 C=C 雙鍵與 O—H 氫氧基。且實驗結果顯示氮氣電漿處理保麗龍相對起氫氣電漿能產生更高的氫氣與甲烷氣、功率越高反應速率越快，同時保麗龍重量越重，所需的處理時間越長。

運用微波電漿系統分解有機物質已有多多年之研究，參考各研究文獻，對於微波電漿系統之操作參數包含有電流、電壓、功率、載氣成分、載體容積、系統溫度、反應停留時間，甚至環境水氣，均會對反應有所貢獻；歸納文獻之實驗處理對象涵蓋有機性氣體、液體甚或固體，顯示電漿技術處理不同對象時均能有其分解能力。

綜合上述文獻彙整，針對含有不同比例之含有機污染物土壤可以藉由土壤氣體抽取法、空氣注入法、雙相抽除法、翻轉稀釋法、熱處理法等進行土壤之有機污染物處理，然前述處理方法對於清除條件亦有受限，例如土壤氣體抽取法利用真空抽氣，將土壤中的污染物有固或液相轉換為氣相，產生揮發作用，然而此法僅適用於不飽和層土壤污染之整治；空氣注入法無法處理遭特殊地質局限之污染團；雙向抽除法於處理抽除之土壤氣體或是分離油、水兩相之產生較高經費；翻轉稀釋法係將污染土壤與乾淨土壤進行混和，從而降低污染物濃度，然而此法雖然施工簡易，但其污染物之總量不變，未能徹底去除土壤中之污染物；熱處理法係將污染土壤挖出，燃燒方式使土壤污染物脫附並分解，然而此法之所需成本與技術層面要求高。

目前鮮少研究應用微波電漿技術進行有機物污染土壤整治，因此本研究利用電漿高能高溫的特性於短時間內能夠處理大量污染物，進一步應用微波電漿處理技術處理有機物污染土壤，達到整治及土地再利用之目的，且相較於熱處理法之成本來的低，其具有處理受有機物污染土壤之發展潛勢與價值。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治



第四章 研究方法與過程(含工作進度甘特圖)

由於電漿產生之方式有很多種，相比起其他電漿源，微波電漿的氣體解離率及電漿密度、操作壓力範圍廣、快速且均勻地加熱、操作時不需使用電極等優點。因此，本研究以本實驗室過去研究結果為基礎，首先利用室外土壤針對系統進行操作實驗，改變電漿載氣及功率，並且將結果進行反饋並將其完善優化。實驗分成三部分進行：一. 設備之建置、二. 探討不同載氣之影響、三. 探討電漿功率之影響，最終綜合評估模組參數及運行綜合效率評估。計畫工作進度甘特圖示如圖3。

工作項目	110年										111年		備註
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
1. 微波電漿模組建置													
2. 測試去除有機污染物的能力													
3. 不同載氣及不同功率之有機污染物去除效果													
4. 期中報告						※							
5. 期末報告												※	
工作進度估計百分比 (累積數)	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	

圖 3 工作進度甘特圖

一.設備建置

(一)、本團隊開發一套微波電漿系統，設備配置圖如圖4所示，其能量介於紅外光及電磁波之間，頻率介於 0.3~10 GHz。

(二)、反應器之規格為外徑3.3 cm、內徑2.9 cm、長35 cm 之石英管，最外層則為不鏽鋼艙體，艙體與石英管間由冷卻水管包覆，氣體分別從旋



進氣流以及中心氣流流入，進入後輝光區反應。

- (三)、電漿供應源為一般交流電，經過磁控管產生電磁共振之現象，發射 2.45GHz 之微波，經由導波管傳送至共振腔中，並且給予一電弧，產生電漿。碰到共振腔之腔壁後反射回到隔離器，以水負載之方式將反射之微波能量吸收，以保護微波源不受反射波的影響或破壞。
- (四)、設備最大輸出功率為 5000 W，由輸出功率與反射功率相減得到輸入至反應器中的實際功率。導波管為中空的金屬管，能有效地傳送微波能量。

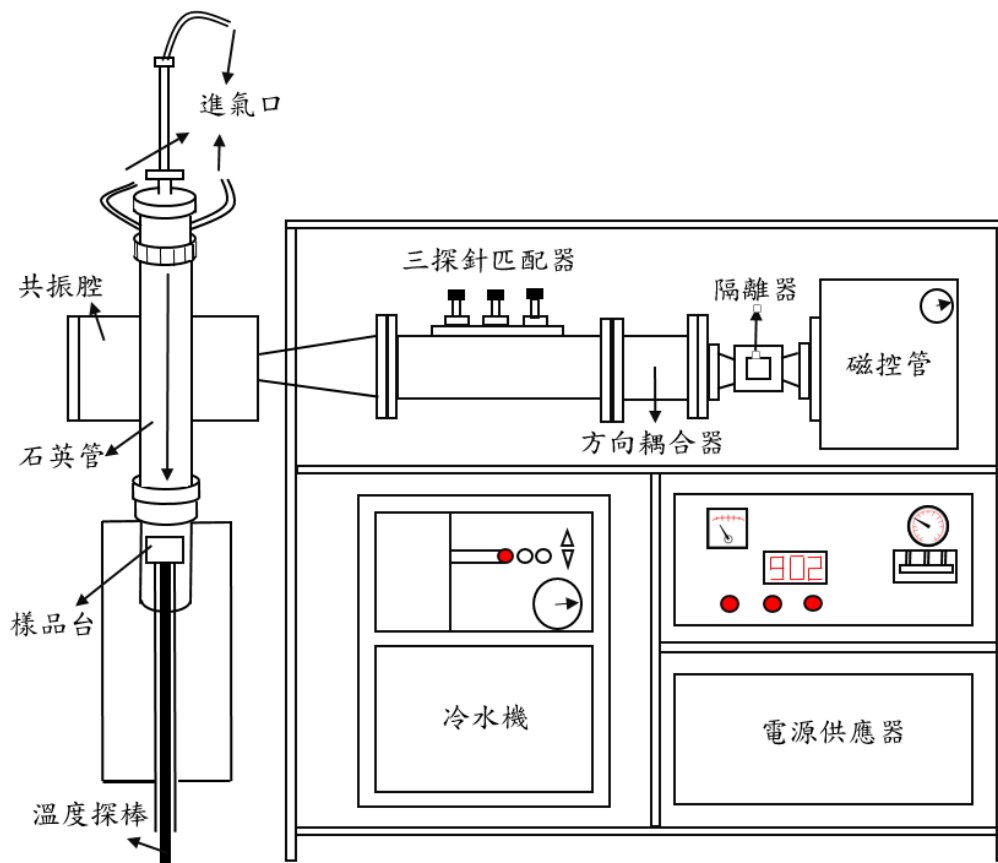


圖 4 微波電漿設備配置圖

二.實驗設計

- (一)、本研究使用室外土壤作為實驗樣品。分別以1公克土壤及2公克土壤進行以下測試。
- (二)、使用氮氣及氬氣作為電漿系統載氣，反應時間、氣體流量及電漿功



率皆為定值，進行實驗比較。

(三)、 調整電漿功率進行實驗比較，預計分別使用800、1000與1200瓦之功率，反應時間、氣體流量及載氣皆為定值。

(四)、 彙整實驗結果，將系統運行情況和建議撰寫報告。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治



第五章 結果與討論(含結論與建議)

一.微波電漿設備建置

本實驗使用微波電漿機，以建置一套微波電漿系統設備，執行本計畫之研究實驗，並搭配後端採用氣相層析火焰離子化偵檢器(GC-FID)進行檢測分析。

微波之生成需要高電壓及很強之磁場，由產生電池波的磁控管裝置，發射出電池波再經由導波管而達反應區。微波輸出功率隨距離之增減，使磁控管之陰極與陽極及磁場強度與回轉電子極產生密度變化，以電磁鐵線圈的電流來控制功率最為常見，隨著功率上升，磁控管電磁線圈的電流增加，使得旋轉電子的密度提高，釋放出較高的能量。在反應器系統方面，本研究所使用之反應器由石英管(外徑 3.3 cm；內徑 2.9 cm；長 35 cm)組成，最外層則為不鏽鋼腔體，腔體與石英管間由冷卻水管包覆，氣體分別從旋進氣流以及中心氣流流入，進入後輝光區反應。本實驗之微波電漿系統設備圖請參照圖5。



圖 5 微波電漿系統設備

電漿供應源利用一般交流電 (220 Volts；3 Φ ；60 Hz)，經過磁控管產生電磁共振之現象，發射2.45 GHz 之微波，經由導波管傳送至共振腔中，並且給予一



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

電弧，產生電漿，碰到共振腔之腔壁後反射回到隔離器，以水負載之方式將反射之微波能量吸收，以保護微波源不受反射波的影響或破壞。其最大輸出功率為 5000 W，由輸出功率與反射功率相減得到輸入至反應器中的實際功率。導波管為中空的金屬管，能有效地傳送微波能量，但是產生的反射波會使微波於導波管中形成駐波，因此，藉由調整三探針匹配器，使駐波位置於共振腔中央石英管處達到電場最強及電流最小開路面把引弧的裝置伸到電場最強的地方，靠微波的電場去激發一串很高的能量電子，而高能電子瞬間衝擊氣體分子把氣體分子中電子打出來，成為二次電子，再去游離其他分子使電漿激發。藉由電源供應器調整功率使中心溫度改變，將樣品放置載台後，送入石英管內，固定於預設的高度以進行煅燒。本實驗之微波電磁場設備圖請參照圖6。

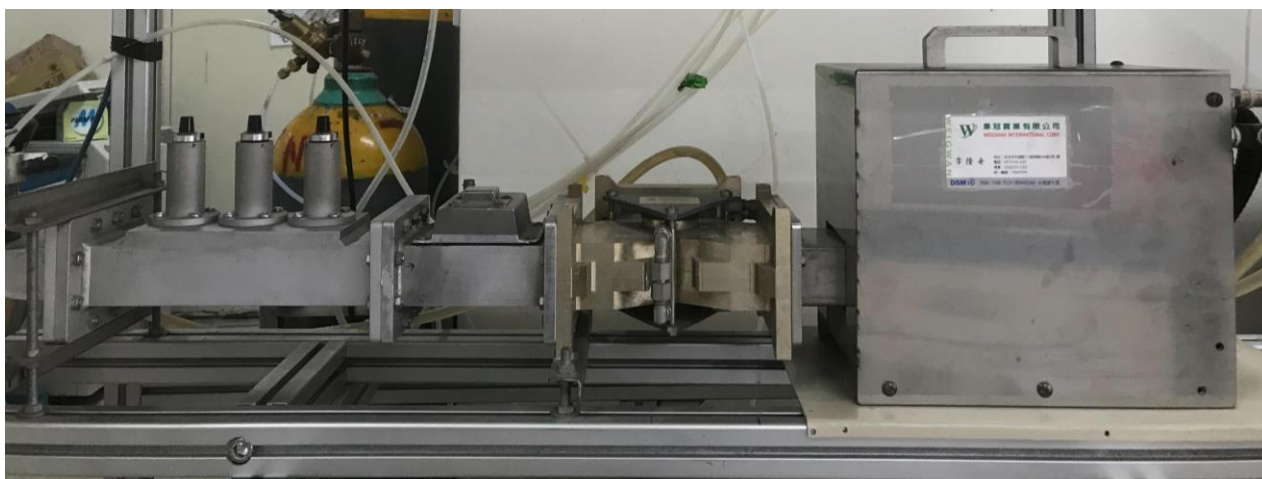


圖 6電磁場配置圖

實驗開始時，使用該次所需要使用的載氣進行系統的淨化後，再將所要使用的實驗樣品及所需要載流氣體導入微波電漿系統中進行處理。將土壤樣品放入載台，如圖7所示，待樣品製備好後，打開冷水機並設定在10°C，於電漿腔循環降低其初始溫度，並將該實驗目標電漿載氣接上電漿進氣管線後，把樣品載台放入電漿腔，調整至正確高度，而後將引弧石英管拉至最高處，防止開啟電漿電源時提早啟動電漿，於出氣口接上氣體採樣袋，打開氣體質量流量控制器，並將軸進氣體流量與旋進氣體流量設定完成，隨後啟動微波電漿電源，調整功率至所需的瓦數後，開始引弧，待電漿啟動後，於固定時間更換氣體採樣袋。



圖 7 樣本載台圖

實驗透過調整不同的參數操作，反應在微波電漿系統中相當迅速，生成之合成氣以容量為 10L 的採氣袋收集，並檢測其中 CH_4 的產氣量。實驗結束後，關閉微波電源將電漿火炬熄滅，取下氣體採樣袋，並予冷卻水和載氣在電漿中循環一段時間，降低電腔與樣品載台溫度後再關閉冷卻水與載氣，而後取出樣品載台，記錄其形貌與重量後保存，隨後將載台與電漿腔中的反應石英管取出，使用鹼性洗劑浸泡三小時以上後刷洗並使用二次水沖洗，完畢再放入低溫烘箱保持其乾燥。電漿系統之各項設備操作參數整合圖示如圖8。



圖 8 電漿系統操作參數整合

電漿是原子被激發成基發態時縱而去游離其他分子，利用電漿中激發態的電子與原子、分子碰撞，進行熱化學較困難產生的化學反應，而氮氣是雙原子氣體，由於分子解離與能量，氮氣電漿具有比氫氣原子氣體更高的能量含量，且氫氣亦為惰性氣體，為非反應氣體，因此被廣泛使用在電漿改質中。故本實驗分別選用氮氣及氫氣作為電漿系統載氣，執行電漿實驗。**圖9**顯示以氮氣為載氣時之電漿火炬圖，以氫氣為載氣時之電漿火炬圖則為**圖10**。比較兩圖，可以發現氫氣電漿火炬為分散弧狀，而氮氣電漿為集中式高能火炬，氮氣電漿相對起氫氣電漿，其形成的火炬應更能與樣品快速的發生反應。

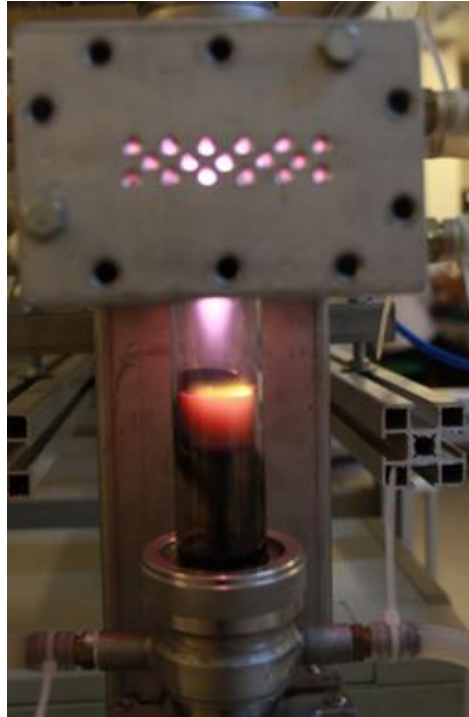


圖 9 載氣為氮氣之電漿火炬



圖 10 載氣為氬氣之電漿火炬

在實驗進行時，為有效的控制成本及時間，研究其參數有極大的重要性。因本實驗電漿系統基於對實驗設備的安全最高功率為1200瓦，而能形成電漿的



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

最低功率為700瓦，故實驗設定分別在氮氣與氬氣為進氣的狀態下，進行電漿功率操作參數分別設定為800、1000與1200瓦。另樣品表面積增大會有效加速反應速率，為有效評估實驗效益，因此實驗設計樣品重量分別為1公克土壤與2公克土壤。當載體經由微波電漿處理時，因其中有機物迅速的被電漿熱解以及合成產生 CH_4 ，故本實驗使用總產氣量進行比較，若 CH_4 的產量高可推測受污染土壤中因電漿而被分解處理的有機污染物也高，也就是處理效能較好的實驗組合。



圖 11 電漿系統運作圖

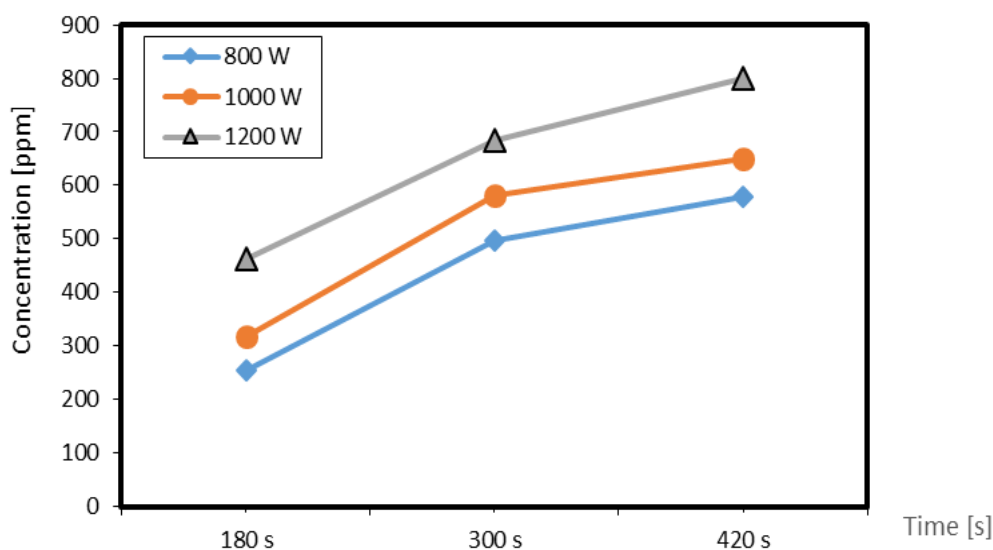
二.載氣為 N_2 之實驗結果

表2 與圖12 為1g 土壤透過 N_2 載氣的微波電漿系統處理後的 CH_4 產氣量，在功率800W 的情況下， CH_4 產氣量在0~180 秒期間為254.2 ppm，0~300 秒時期間總產氣量497.5 ppm，0~420 秒時期間總產氣量578.7 ppm；在功率1000W 的情況下， CH_4 產氣量在0~180 秒期間為317.8 ppm，0~300 秒時期間總產氣量581.2 ppm，0~420 秒時期間總產氣量649.0 ppm；在功率1200W 的情況下， CH_4 產氣量在0~180 秒期間為462.7 ppm，0~300 秒時期間總產氣量685.3 ppm，0~420 秒時期間總產氣量799.1 ppm。

表 2 微波電漿(N₂)處理土壤(1g)之 CH₄ 總產氣量

(unit: ppm)

時間 (s) \ 功率 (W)	800 W	1000 W	1200 W
180 s	254.2	317.8	462.7
300 s	497.5	581.2	685.3
420 s	578.7	649.0	799.1

圖 12 微波電漿(N₂)處理土壤(1g)之 CH₄ 總產氣量

上述數據顯示同一功率條件下，隨著反應時間加長，產氣量隨之上升。若以相同反應時間之產氣量觀察，當功率越高時，實驗樣品因為能夠快速進行反應，使得 CH₄ 能夠在短時間內反應並產生，在1200W 的功率的情況下，實驗樣品反應最為快速，相較於其他功率條件，能有較佳的 CH₄ 產氣量。

表3 與圖13 為2g 土壤透過 N₂載氣的微波電漿系統處理後的 CH₄產氣量，在功率800W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為342.7 ppm，0~300 秒時期間總產氣量548.2 ppm，0~420 秒時期間總產氣量783.6 ppm；在功率1000W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為457.5 ppm，0~300 秒時期間總產氣量729.9ppm，0~420 秒時期間總產氣量875.3 ppm；在功率1200W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為667.1 ppm，0~300 秒時期間總產氣量866.8 ppm，0~420 秒時期間總產氣量975.7 ppm。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

表 3 微波電漿(N₂)處理土壤(2g)之 CH₄ 總產氣量

(unit: ppm)

時間 (s) \ 功率 (W)	800 W	1000 W	1200 W
180 s	342.7	457.5	667.1
300 s	548.2	729.9	866.8
420 s	783.6	875.3	975.7

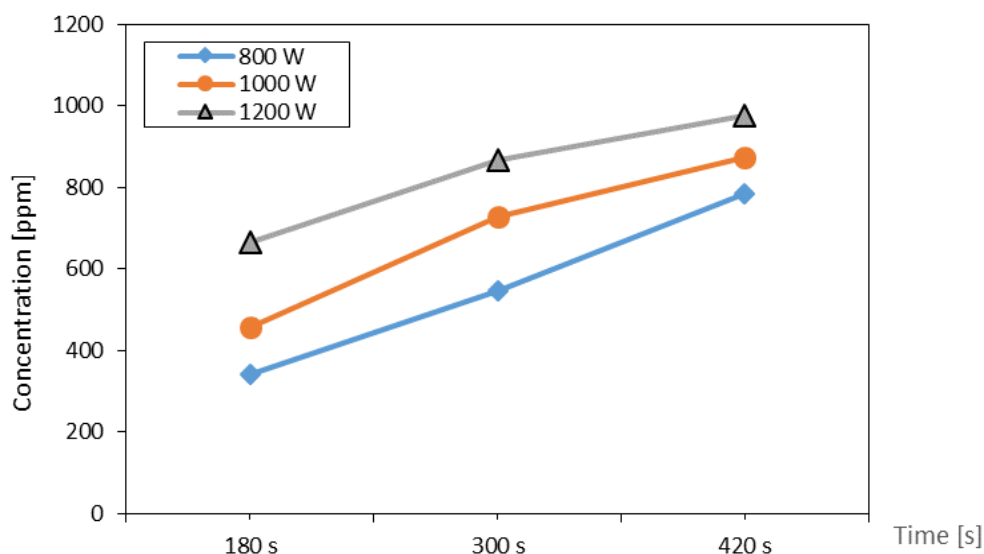


圖 13微波電漿(N₂)處理土壤(2g)之 CH₄ 總產氣量

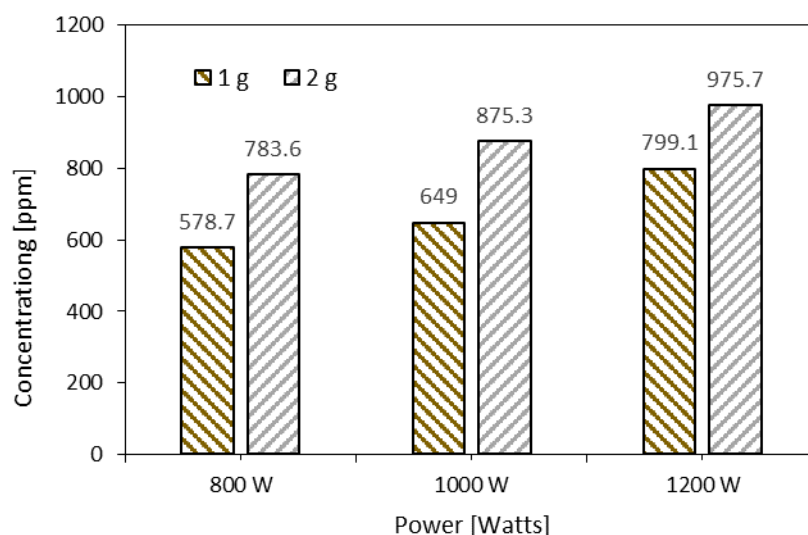
檢視以2g 土壤進行之實驗結果，一樣可以發現不論在800W、1000W 或 1200W 何種功率條件下，反應時間越長，產氣量越高；另外在不同反應時間，操作功率越大，產氣量也跟著上升。

表4 以及圖14 為使用 N₂載氣，微波電漿處理系統在420秒時，不同重量土壤的 CH₄ 總產氣量。在功率800W 下，1公克的 CH₄總產氣量為578.7ppm，2公克的 CH₄總產氣量為783.6ppm。功率1000W 下，1公克的 CH₄總產氣量為649.0ppm，2公克的 CH₄總產氣量為875.3ppm。功率1200W 下，1公克的 CH₄總產氣量為799.1ppm，2公克的 CH₄總產氣量為975.7ppm。

表 4 微波電漿(N₂)處理不同重量土壤之 CH₄ 總產氣量

(unit: ppm)

重量 (g) \ 功率 (W)	800 W	1000 W	1200 W
1g	578.7	649.0	799.1
2g	783.6	875.3	975.7

圖 14 不同重量土壤使用微波電漿(N₂)之 CH₄ 總產氣量

從上述數據可得知，當電漿功率不變的情況下，隨著載體重量的增加，CH₄的總產氣量會隨之提升，可推論若處理的土壤越多，經微波電漿處理系統後所產生的總 CH₄量也會因而提高。

三.載氣為 Ar 之實驗結果

表5 與圖15 為1g 土壤透過 Ar 載氣的微波電漿系統處理後的 CH₄產氣量，在功率800W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為5.42 ppm，0~300 秒時期間總產氣量7.85 ppm，0~420 秒時期間總產氣量11.79 ppm；在功率1000W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為6.39 ppm，0~300 秒時期間總產氣量9.23 ppm，0~420 秒時期間總產氣量14.65 ppm；在功率1200W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為11.05 ppm，0~300 秒時期間總產氣量20.36 ppm，0~420 秒時期間總產氣量35.45 ppm。

表 5微波電漿(Ar)處理土壤(1g)之 CH₄ 總產氣量

(unit: ppm)

時間 (s) \ 功率 (W)	800 W	1000 W	1200 W
180 s	5.42	6.39	11.05
300 s	7.85	9.23	20.36
420 s	11.79	14.65	35.45

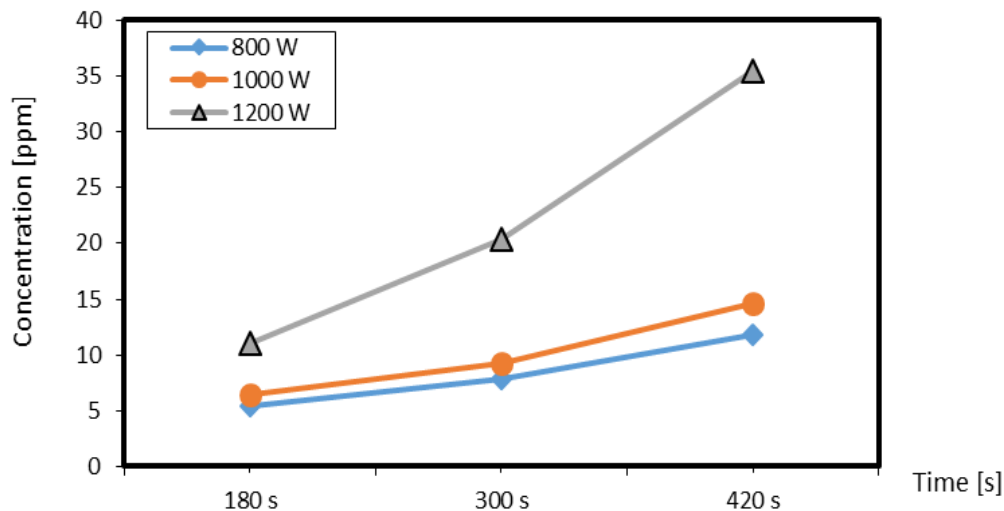
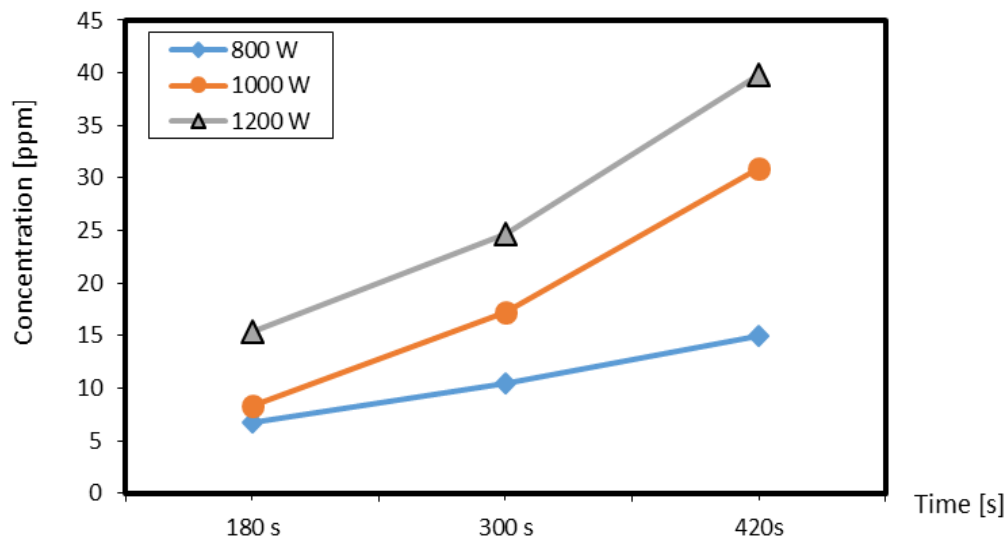
圖 15 微波電漿(Ar)處理土壤(1g)之 CH₄ 總產氣量

表6 與圖16 為2g 土壤透過 Ar 載氣的微波電漿系統處理後的 CH₄產氣量，在功率800W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為6.71 ppm，0~300 秒時期間總產氣量10.5 ppm，0~420 秒時期間總產氣量15.04 ppm；在功率1000W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為8.39 ppm，0~300 秒時期間總產氣量17.26ppm，0~420 秒時期間總產氣量30.87 ppm；在功率1200W 的情況下，CH₄產氣量在0~180 秒期間為15.42 ppm，0~300 秒時期間總產氣量24.67 ppm，0~420 秒時期間總產氣量39.80 ppm。

表 6 微波電漿(Ar)處理土壤(2g)之 CH₄ 總產氣量

(unit: ppm)

時間 (s) \ 功率 (W)	800 W	1000 W	1200 W
180 s	6.71	8.39	15.42
300 s	10.5	17.26	24.67
420 s	15.04	30.87	39.80

圖 16 微波電漿(Ar)處理土壤(2g)之 CH₄ 總產氣量

分析上述數據，不論載體重量，反應時間加長，產氣量是隨之提高的，另外顯而易見，當功率越高，實驗樣品越快速進行反應，CH₄ 產氣量越高。

表7 以及圖17 為系統改使用 Ar 載氣，反應在420秒時，不同重量土壤的 CH₄ 總產氣量。在功率800W 下，1公克的 CH₄總產氣量為11.79ppm，2公克的 CH₄總產氣量為15.04ppm。功率1000W 下，1公克的 CH₄總產氣量為14.65ppm，2公克的 CH₄總產氣量為30.87ppm。功率1200W 下，1公克的 CH₄總產氣量為35.45ppm，2公克的 CH₄總產氣量為39.80ppm。



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

表 7 微波電漿(Ar)處理不同重量土壤之 CH₄ 總產氣量

(unit: ppm)

重量 (g) \ 功率 (W)	800 W	1000 W	1200 W
1g	11.79	14.65	35.45
2g	15.04	30.87	39.80

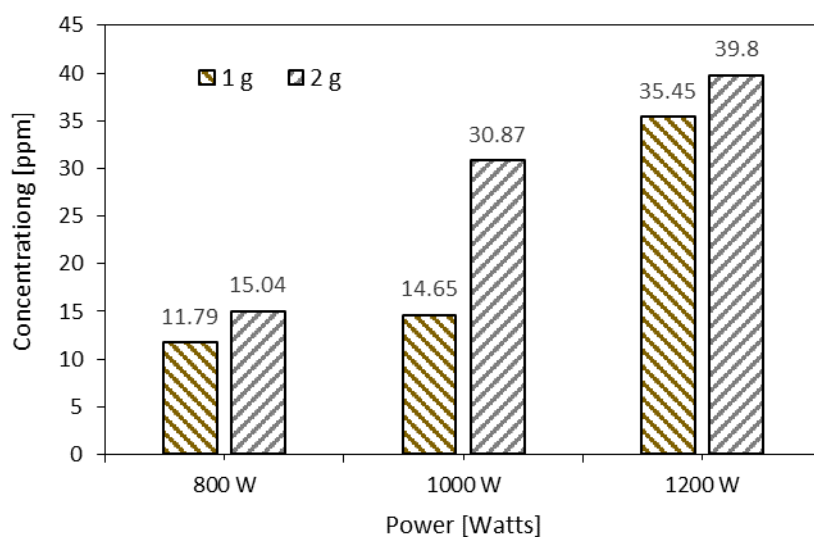


圖 17 不同重量土壤使用微波電漿(Ar)之 CH₄ 總產氣量

使用 Ar 為載氣的數據亦可看出，跟 N₂載氣的結果趨勢相同，當相同電漿功率時，隨著載體重量增加，CH₄總產氣量會跟著提高。

當比較不同載氣的實驗數據，取2g 土壤在420秒時的產氣量數值，繪圖如圖 18，兩者在不論功率多寡的情況下，產氣量均有著明顯的差距。

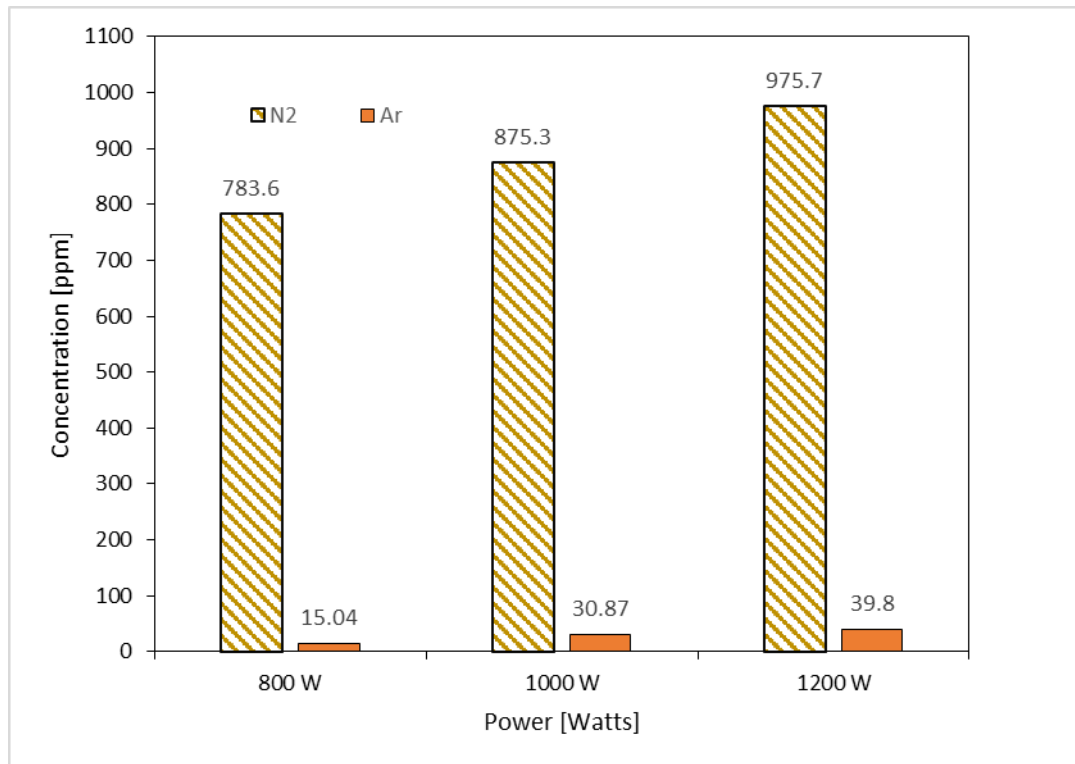


圖 18 使用不同載氣時微波電漿系統之 CH₄ 總產氣量

推測因 Ar 為惰性氣體，在微波電漿系統中要激發 Ar 使其形成電漿態需要較多能量，也才能增加碰撞頻度進行反應，故相同操作條件下產生的電子數遠低於 N₂載氣者，造成使用 Ar 載氣狀況下 CH₄ 氣體的總產量遠低於 N₂載氣狀況。

四.結論

(一)、本次研究實驗所使用的室外土壤透過批次實驗，於2g 土壤、載氣為 N₂、功率1200W 以及420秒的情況下有著最大的 CH₄總產氣量，總產氣量為 975.7 ppm。

(二)、本研究中顯示隨著電漿功率的提升(由800W 提高至1200W)，同樣品土壤的 CH₄產氣量會隨之提升。電漿功率越高、能量越大，氣體反應速率越快，功率決定熱解有機污染物之能量，操作功率越高，總產氣量越高。實驗結果顯示微波電漿功率確是實驗之關鍵操作因子。

(三)、本研究中顯示當功率相同，不論土壤重量或總反應時間為何，使用



N₂做為電漿載氣比起 Ar 來說產氣量會比較高。實驗結果顯示載氣是電漿處理系統中影響產氣量的最大因素，氮氣電漿具有較集中的電漿火炬、較高的能量與電子密度，可推論氮氣電漿較氬氣電漿能有較好的處理效果。

五.建議

(一)、本研究的所有實驗數據可做為後續針對甲苯土壤實驗的空白值，藉以消除室外土壤本體有機物干擾與操作系統誤差。

(二)、因目前使用的電漿設備為實驗室規模，針對經濟效益尚無法明確有效評估。

(三)、若能將處理對象分類為純無機物土壤、純無機物土壤外加有機污染物、含有機物土壤、含有機物土壤外加有機污染物，以進行反應優先順序之探討，對於各基質之個別貢獻將可更加明確，提供適切之整治政策。

(四)、未來如進行實質應用，建議更進一步針對碳氫合成氣進行檢測分析，若能預防甲苯與苯乙烯等有毒合成氣產生，更有助益於實場商業化。



第六章 參考文獻

- [1] 張尊國(2002)。台灣地區土壤污染現況與整治政策分析，國立臺灣大學生物環境系統工程系。
- [2] 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治網，油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊(民國96年)。檢自 <http://sgw.epa.gov.tw/public/>
- [3] 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治網，土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引(民國104年)。檢自 <http://sgw.epa.gov.tw/public/>
- [4] 梁書豪、簡華逸、郭育嘉、楊宗翰、高志明。土壤及地下水整治技術發展簡介，國立中山大學環境工程研究所。
- [5] Fang, M.D., Lee, C.L., Jiang, J.J., Ko, F.C., and Baker, J.E. (2012). Diffusive exchange of PAHs across the air-water interface of the Kaohsiung Harbor lagoon, Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 110, 179-187.
- [6] Jiang, J.J., Lee, C.L., Fang, M.D., Ko, F.C., and Baker, J.E. (2011). Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in sediments of southwest Taiwan: Regional characteristics and potential sources. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 815-823.
- [7] Mazzoni, L., & Janajreh, I. (2017). Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19446-19457.
- [8] Sanlisoy, A., & Carpinlioglu, M. (2017). A review on plasma gasification for solid waste disposal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(2), 1361-1365.
- [9] Shie, J.-L., Chen, L.-X., Lin, K.-L., & Chang, C.-Y. (2014). Plasmatron gasification of biomass lignocellulosic waste materials derived from municipal solid waste. *Energy*, 66(Supplement C), 82-89.
- [10] Grill, A. (1994). *Cold plasma in materials fabrication*, IEEE Press, New York.
- [11] 李灝銘(2001)。以低溫電漿去除揮發性有機物之研究。國立中央大學博士論文。桃園縣。
- [12] Moisan and Zakrzewski (1991). Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 24, 1025.
- [13] Wang, Y. F., You, Y. S., Tsai, C. H., Wang, L. C. (2010). Production of Hydrogen by Plasma-Reforming of Methanol. *Int. J. Hydrogen Energy*, 35, 9637-9640.



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

- [14] Yoon, S.J., Yun, M. Y., et al. (2013). Hydrogen and syngas production from glycerol through microwave plasma gasification. *Int. J. Hydrogen Energy*, 38, 14559-14567.
- [15] Sekiguchi, H., and Mori, Y. (2003). Steam plasma reforming using microwave discharge. *Thin Solid Films*, 435, 44-48.
- [16] 林聖凱(2005)。以微波電漿火炬製備可見光化光觸媒之研究。中原大學碩士論文。桃園市。
- [17] 何俊翰(2019)。利用微波電漿處理有機廢溶劑。中原大學環境工程學系碩士論文。桃園市。
- [18] 郭芳汝(2014)。熱電漿重組二氧化碳與生質焦油-以甲苯模擬為例。國立宜蘭大學環境工程學系碩士班碩士論文。宜蘭縣。
- [19] 洪梓彬(2009)。常壓微波電漿轉化乙醇產氫之研究。國立高雄應用科技大學化學工程與材料工程系碩士論文。高雄市。
- [20] 劉永銓、韓坤佑、徐添財、Liu, Yung-chuan、Han, Kun-yu、She, Ten-chai (民92)，應用新型式微波電漿火炬反應器破壞揮發性有機物之研究，*興大工程學刊*，14:1卷頁31-38。
- [21] 賴俊諾、陳華雋、楊博名、張頊瑞、陳上權、林淵淙，利用電漿技術降低廢食用油生質柴油/含水丁醇/柴油之混合燃料污染減量之研究，*中華民國環境工程學會2015空氣污染控制技術研討會*，桃園市，台灣，Nov 13-14，2015。
- [22] 陳雅雯(2019)。利用微波電漿系統處理台灣養殖廢棄保麗龍。中原大學環境工程學系碩士論文。桃園市。



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

110年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：111年3月10日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
研究主題	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他		
申請機構系所	中原大學環境工程學系	專案主持人	游勝傑
專案名稱	以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一)學術面

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出發表名稱)
項目							
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	0	0		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著(本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	1		
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治

(二)產業面

項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或 專利、技術轉移相 關詳細資料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明					
			新型/設計					
			合計					
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系(件數)						
	C 產 學 研 合 作	6.促成合作 研究	件數					
金額(仟元)								
7.促成投資		件數						
		投資金額(仟元)						
8.促成取得 業界科專		件數						
		業界投資金額(仟元)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(三)政策面

項目		目標達成程度	申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。(簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限)

有機物污染土壤整治處理與清除條件，受限於技術限制而無法順利進行處理，因此經常合併使用整治技術，而增加處理成本。本計畫案所發展微波電漿(Microwave plasma)之方法，用以處理用以處理有機物污染土壤，透過磁控管(Magnetron)產生微波源，於常溫環境下產生高能量電子，相比起其他電漿源，微波電漿的氣體解離率及電漿密度、操作壓力範圍廣、快速且均勻地加熱、操作時不需使用電極等優點，微波電漿整體處理過程相較其他技術而言，其不會產生二次污染物，且處理成本相較熱處理法來的低。

因此，本研究以室外土壤進行空白實驗，再以不同載氣與電漿功率進行試驗，利用微波電漿技術針對受土壤進行處理，探討該技術用於受有機物污染土壤整治之可行性，該處理技術將為受有機物污染土壤提供新的整治方向，提供土基會做為未來針對整治受有機物污染土壤之另一技術選擇。





行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：游勝傑 NO：E3	
計畫名稱	以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 計畫的執行狀況、研究流程及方法已於報告中具體說明。 2. 本計畫的後續執行工作項目及內容已在 P.42 中說明。 3. 本報告中已說明預定的工作項目與已完成的項目，且計畫執行進度與原預定進度相符，執行進度並無落後。 4. 本報告書中所呈現的研究內容（& 成果）與原計畫目的相符。 (1) 整體而言，本計畫的研究成果符合原計畫書的預期。 (2) 若能討論操作成本當更具實務意義。		謝謝委員指教。 謝謝委員指教。 謝謝委員指教。 謝謝委員指教。 謝謝委員指教。 感謝委員建議。本計畫宥於實驗設備組裝及測試期程影響，對於多項實驗參數及操作規劃未臻細緻完善。若未來能獲接續計畫，當對操作成本需求資訊妥善記錄，以期對於實廠應用能有務實貢獻。	
(3) 建議討論操作條件與污染土壤物化特性的關係。		感謝委員建議。本研究設計之操作參數包含載氣系統功率、反應時間、土壤重量，以室外土壤進行試驗，研究結果較著重於系統設備之操作參數與產氣量之關係。若未來有持續性計畫，將思考不同處理對象，包含土壤及污染物等參數變化，以規劃完整型實驗，提供實場整治的具體方案。	



<p>(4)建議討論影響產氣量的關鍵因子。</p>	<p>感謝委員建議。本研究之實驗結果顯示，使用 N_2 載氣比 Ar 載氣的產氣量高且加大系統功率、反應時間、土壤重量，亦都可獲致較高的產氣量。惟從目前之實驗紀錄尚未獲得完整反應（S 型）曲線，僅能羅列定性之影響參數。</p>
<p>(5)建議討論污染物的環境宿命。</p>	<p>感謝委員建議。簡略補充有機污染物之環境流佈及環境宿命說明於第三章文獻探討中。</p>
<p>5. 依據本計畫的研究成果所提出的討論與建議合理，研究成果的實務可行性則尚待評估。</p>	<p>感謝委員建議。受限本計畫的實驗範圍，依目前數據尚無法評估對於實場應用的具體可行性。</p>
<p>6. 本報告書已說明本計畫的學術產出（研討會論文），也因為有研究人員參與，已達人才培育的目標。</p>	<p>謝謝委員指教。</p>
<p>7. 本計畫並未說明專利申請與技術轉移的成果。</p>	<p>感謝委員建議。本計畫之實驗內容仍屬前期試驗，尚需更多更完整的實驗數據，以評估專利及技轉之效益。</p>
<p>8. 本計畫的執行對國內土水產業與研發有其效益。</p>	<p>謝謝委員指教。</p>
<p>委員二 該研究建置一套微波電漿系統設備，針對受有機物污染之土壤進行試驗。 工作項目有規劃探討去除有機污染物的能力，但實驗結果僅展示以室外（應為無污染）土壤經微波電漿不同操作參數下，土壤有機質被破壞轉成 CH_4 之總產氣率。若能測試實際污染土壤，或者外加污染物，以土壤污染物之去除率為指標，或是評估降低污染至符合管制標準之操作參數更能符合土基會科研計畫之目標。 以下為實驗結果之建議 1. CH_4 生成是否為主要指標？有機質被轉成 CO_2 或其他氣體也是污染去除之呈現？</p>	<p>謝謝委員建議。本計畫受到系統設備組裝及測試期程影響，僅嘗試以 CH_4 做為處理系統產氣之分析。若未來有衍生性實驗規劃，可藉由學理探討、文獻佐證，及檢測</p>



	分析電漿系統之合成氣成分，相互論證指標物質，以供作為實場整治時之簡易驗證。
2. 測試之室外土壤起始C之%？可以計算C平衡？（被轉換成CH ₄ 、其他含C有機與無機化合物、土壤殘留C之%）。	謝謝委員建議。本計畫僅嘗試找出系統設備之操作參數與產氣量之關係，未考量到處理對象之影響，實為設想不周，委員建議或可做為後續延伸計畫之探討。
3. 土壤中C之去除機制（直接破壞、脫附成氣體後裂解等等）。	感謝委員建議。補充有機污染物的降解說明於第三章文獻探討中。
4. 本技術耗能資訊，是否可以由W以及秒計算能量。	感謝委員建議。本研究組裝之微波電漿系統，除電漿供應源外，尚包含載氣淨化設備、冷水機…等多項用電設備，計畫執行期間未有針對用電之記錄保存，無法取得能耗分析所需資訊，還請委員見諒。
5. 屬前期試驗之初步成果，無法研判。	謝謝委員指教。
委員三	
1. 本計畫的主題及研究目的都是探討「微波電漿進行有機物污染土壤的處理」，但報告中並未說明試驗土壤的來源與所含污染物，是否合於計畫規定，請說明。	感謝委員建議。藉由本計畫進行實驗，其研究結果獲致N ₂ 載氣比Ar載氣的產氣量較高；系統功率、反應時間、土壤重量，都與產氣量呈正相關...等初步結論，可作為未來執行微波電漿進行有機物污染土壤的處理之實場試驗操作參數之變因探討依據，仍有其指標性的參考價值。
2. 試驗土壤的來源、性質與污染物應加以了解並說明（期中報告已有審查委員建議）。試驗採用兩種重量（1g、2g）及三種處理時間（180s、300s、420s），請說明試驗設計的緣由（包括是否能經由此試驗設計獲得最佳操作條件）。	感謝委員建議。本計畫係參考文獻中所執行之操作參數，決定以載氣、系統功率、反應時間、土壤重量為實驗操作因子，並以實際獲致之實驗數據進行探討，採用之土壤重量與反應時間係考量自組系統之設備操作範圍，希望可先取得定性的初步結論。
3. 以微波電漿處理土壤時，土壤的量越多、時間越長或電漿功率越高，產氣量也越多是不經實驗即可獲知的結果。故而應該對不同土壤重量、處理時間	感謝委員建議。由於本研究係自行組裝微波電漿系統，也希望先期能確認該系統之效能，未有足夠時間評估及執行不同處理



及處理功率所得到的產氣量差異（濃度或比例）進行比對、統計與評析。	對象（如無機土與有機土）之比較，敬請委員海涵。
4. 承上，請說明本試驗所得結論「2 g 土壤、載氣為氮氣、功率為 1200W，以及 420 秒的情況下有著最大產氣量 975.7 ppm」，是否為最佳參數及結果（受自有設備所限，最高功率為 1200W，但土壤重量及處理時間已經是最大限值嗎？）。亦即，若以此操作條件處理污染土壤，可以達到整治的目的嗎？請說明。	感謝委員建議。本計畫嘗試提出以電漿技術處理受有機污染之土壤，目前受限於實驗室規模之模組，僅完成定性的操作參數確認，尚無法定義最佳參數，惟測試結果顯示有可再深究之價值。
5. 預定進行有機物污染土壤的處理，但試驗土壤的污染物不明。此外，試驗結果的評析有待加強。	感謝委員指教。
<p>委員四</p> <p>1. 請回覆期中「空白實驗的土壤來源與特性，實驗設計各項操作條件與參數。」</p> <p>2. 實驗結果顯示三種微波電漿功率的差異，且為實驗關鍵參數，建議應說明未來實場可應用的最適建議操作參數，且目前僅呈現三組數據，難以判斷後續進一步研究之最適參數範圍，建議補充說明。</p> <p>3. 建議後續應分別就純無機土壤、有機土壤與污染土壤進一步分析，請定義純無機土壤、有機土壤及建議後續研究方向與控制條件範圍。</p>	<p>謝謝委員指教。本計畫之實驗內容均說明於第四章中。本研究建置一套微波電漿系統設備，以室外土壤為空白樣品利用微波電漿系統針對受有機物污染之土壤進行試驗，操作因子包含載氣、系統功率、反應時間、土壤重量。</p> <p>感謝委員建議。本計畫期間因自行組裝系統設備，在操作實驗部分著力較少，僅以比較方式嘗試找出參數影響之方向性，未能完整涵蓋操作範圍，故對於找出最適操作參數有一定困難。</p> <p>感謝委員建議。後續若有持續性衍生計畫，建議處理對象分類為純無機物土壤（如蒙脫土）、純無機物土壤外加有機污染物（如甲苯）、含有機物土壤（如培養土）、含有機物土壤外加有機污染物；控制條件如反應時間則建議可再延長，以期獲致完整反應之數據以利進行探討。</p>
委員五	



1. 建議提供測試土壤之相關物化性質等。	謝謝委員指教。本計畫因設想不周，未能於進行實驗前，針對實驗土壤進行完善分析，故無法提出相關資訊。
2. 建議說明電漿氣流之流量(速)與空間速度等資料。	感謝委員建議。本實驗未規畫執行氣流速(量)量測，故無法提供相關資料。
3. CH ₄ 之產氣量(穩)以濃度表示可能會失真。	感謝委員建議。實驗設計以同樣容積之氣體採樣袋進行產氣收集，雖無法獲知確切之產氣總重量，但可得定性之初步結論。
4. 雖然處理 2g 的土壤比起 1g 的土壤會產生較多的 CH ₄ ，但以效率而言，可能在實驗條件下，反而有效果，建議增加深入討論。	感謝委員建議。比較 1g 的土壤及 2g 的土壤之數值，初步發現產氣倍率不一致。關於土壤重量之討論可能還需更多實驗數據進行分析，後續若有持續性衍生計畫，建議可擴增該項參數之操作範圍，以利探討。
5. 未來應繼續研究最佳操作參數與能源效率，方可評估其實場應用性。	謝謝委員指教。





行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告

☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：游勝傑 NO：E3	
計畫名稱	以微波電漿處理法進行有機物污染土壤之整治		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一</p> <p>1. 計畫執行的現況、研究流程及方法已說明(初步成果顯示：“…N₂載氣比Ar載氣的產氣量高出許多；使用功率越高產氣量越多；隨著處理系統的反應時間越長，產氣量也隨著增加；增加土壤重量，產氣量也跟著變多…”)，此觀察為一般傳統上較為常見的現象，此特性與土壤處理成效的關係為何？建議討論。又如何應用於土壤整治？建議討論。</p> <p>2. 計畫後續執行的工作項目已於P.33中說明。</p> <p>3. 依期中報告中的說明，本計畫執行進度與預定進度相符。</p> <p>4. 研究內容與原計畫書所述的計畫目的相符。</p> <p>5. 根據研究內容所提出之討論與建議合理。本報告屬於期中報告，具體的研究成果與依研究成果所提出的建議尚未明確，尚待期末報告提出合宜的建議(尤其建議對本計畫的研究成果與土污基金會的施政策略的符合程度多加說明討論)(模擬土壤污染的污染特性與模擬情境建議說明)。</p> <p>6. 系統的可能操作方式，期末報告時建議討論說明。</p>		<p>感謝委員建議。本研究建置一套微波電漿系統設備，以室外土壤為空白樣品利用微波電漿系統針對受有機物污染之土壤進行試驗，其研究結果顯示，使用 N₂ 載氣比 Ar 載氣的產氣量高且加大系統功率、反應時間、土壤重量，亦都可獲致較高的產氣量。若將上述參數規劃細緻化實驗，以獲得完整脫附曲線，即可掌握整治效率，對於執行實廠整治之時間及經濟成本應能有一定貢獻。</p> <p>謝謝委員指教。</p> <p>謝謝委員指教。</p> <p>謝謝委員指教。</p> <p>謝謝委員指教。</p> <p>感謝委員建議。本計畫報告之第四章研究方法與過程，其中包含實驗之操作與控制參數說明。</p>	



7. CH ₄ 產氣…等等的系統機制，建議說明。	感謝委員建議。關於微波電漿系統之合成氣相關資訊彙整於第三章文獻探討中。
8. 已有初步的研究成果，有研究人員參與，符合計畫的目標之一--人才培育。	謝謝委員指教。
9. 依據本計畫的研究成果(與執行)，期末報告中，建議在政策與社會經濟發展效益方面能多加說明。	感謝委員建議。本計畫之期末報告第五章結果與討論除了羅列實驗研究成果外，惟針對整治政策與經濟效益，因僅屬實驗室規模，尚無法明確有效評估。
委員二	
1. 有依照計畫書執行。	謝謝委員指教。
2. 審查委員建議納入考量。	謝謝委員指教。
委員三	
1. 初步實驗顯示，無論何種載氣，提高電漿功率、土壤重量及反應時間都會增加產氣量，請說明如何以此初步成果訂定未來的最佳試驗參數條件。	感謝委員建議。藉由本計畫執行實驗，其研究結果獲致 N ₂ 載氣比 Ar 載氣的產氣量較高；系統功率、反應時間、土壤重量，都與產氣量呈正相關...等初步結論，對於未來執行實場試驗時，可作為操作參數之變因探討依據。
2. 若要以甲苯做為土壤有機污染物進行未來的實驗，請說明微波電漿處理系統對甲苯溶液的處理效果，若無相關文獻可供參考，建議先進行溶液處理試驗，視其效果再以土壤為介質進行實驗。	感謝委員建議。參考利用電漿分解有機物之研究實驗結果，並彙整相關資訊於第三章文獻探討中。
3. 微波電漿系統對土壤中原存的有機物質與有機污染物間的反應優先順序為何？土壤中若含高量有機質是否會影響電漿的處理效率，建議予以釐清。	感謝委員建議。有鑑於本計畫規劃之研究範圍未列入土壤原存有機物質之影響，故無法提供電漿系統對於土壤原存有機物質與外來有機污染物間的反應優先順序。若未來有持續性衍生計畫，建議可採納該構想，於實驗規劃時，將處理對象分類為純無機物土壤、純無機物土壤外加有機污染物、含有機物土壤、含有機物土壤外加有機污染物，以期進行反應優先順序之探討。



<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 請以預定進度及查核點說明期中報告達成狀況。 2. 應說明空白實驗的土壤來源與特性，實驗設計各項操作條件與參數。 3. 微波電漿技術應用於分解有機污染物的文獻比較應加強。 4. 初步實驗結果，未能說明電漿功率、CH₄、Ar 之產氣量、反應時間等參數，如何應用於後續實驗規劃？ 	<p>謝謝委員指教。本計畫之工作進度及過程均說明於第四章中。</p> <p>感謝委員建議。</p> <p>感謝委員建議。依委員建議，彙整運用電漿技術分解有機污染物之相關研究報告，說明於第三章文獻探討中。</p> <p>感謝委員建議。初步實驗結果已完成空白試驗，後續嘗試以土壤外加有機污染物(甲苯)模擬受有機污染之土壤進行相關參數之實驗，以比較電漿系統對外來有機污染物之分解能力，作為針對整治受有機物污染土壤之另一技術選擇依據。</p>
<p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 已完成系統建置與空白試驗。 2. 未來將進行添加樣品(人工樣品)之測試，可考慮除甲苯外之其他有機污染物之測試。 3. 除 CH₄，可考慮監測其他產物如 CO、CO₂。 	<p>謝謝委員指教。</p> <p>感謝委員建議。因本計畫之研究期程，僅完成目前測試，若未來有持續性衍生計畫，將考慮納入測試具代表性之有機污染物。</p> <p>感謝委員建議。受限於本計畫之實驗系統監測設備，後續若有持續性衍生計畫，即可擴增涵蓋其他產物之監測規劃。</p>

