



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

開發可降解 SVE 尾氣之低能耗
可見光催化商業模組
期末報告(定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：中原大學／環境工程系所
專案主持人：游勝傑 教授
專案執行期間：107 年 01 月 10 日起至
107 年 11 月 30 日止

中華民國 107 年 12 月 印製





107 年度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書

一、專案基本資料表

申請編號：

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"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗	
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 雅 玟 / 江 政 傑		職等／職稱		教 授 / 助 理 教 授	
專案 名稱	中文	開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組					
	英文	Development of a low-energy and visible-light-driven photocatalytic commercial module for degradation of SVE exhaust					
	關鍵字	SVE 尾氣、可見光、光催化、商業模組					
執行期程		自 民 國 1 0 7 年 0 1 月 1 0 日 起 至 民 國 1 0 7 年 1 1 月 3 0 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	
專任助理		姓名：馮慧蕙 E-mail：adorist58@gamil.com				專線：03-2654909 手機：0939-873514	
經 費 分 析 總 表	專案預估總經費		第一年 申請金額		第二年 申請金額		編列說明
	1.	人事費用	301,000				(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	679,000				(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	50,000				(差旅與租賃費用)
	5.	雜項費用	40,000				(1~6 項相加之 5%為限)
	6.	行政管理費	50,000				(1~5 項相加之 10%為限)
	專案計畫申請總金額		1,120,000				總金額：1,120,000

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請時向本署專簽說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：_____

日期：_____





- 一、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）

目前土壤常見的污染可以分成兩大類，第一類為石化類碳氫化合物，第二類則是含氯有機溶劑污染。空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法仍為重要的選擇處理方法之一，但對於尾氣端的處理仍是一大挑戰，為防止此法之土壤氣體污染直接排放進入大氣環境，常經活性碳吸附處理後排放，以確保排放符合氣體標準，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能。

本計畫(107年)團隊提出對SVE尾氣降解之低能耗可見光催化商業模組之開發計劃案，本計劃欲採用106年開發之可見光催化劑直接於現場將SVE法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。107年下半年，本團隊完成了光催化劑之各項參數實驗，透過改變不同的濕度及光源以將本團隊所開發之La-TiO₂光催化劑提高至最佳效率，結果顯示環境濕度為60%時甲苯之去除率可達到23.21%，但增加過多的濕度反而會造成去除率的下降，其原因為過多的水分子會導致甲苯在被光催化劑降解前先行與水分子進行化學反應，最終附著於La-TiO₂表面造成降解效果之下降，本團隊也針對商業化模組以實驗最佳參數進行成本估算，本商業化模組去除1g甲苯之成本約為2,005元，雖本研究之商業化模組成本較高，但根據實驗結果顯示本商業化模組能長時間持續使用，因此本商業化模組應用於實際場址之污染整治是可行的。



中文摘要

當土壤受到油氣污染時多以氣體抽除法進行整治，該法為防止土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備，經活性炭處理後排放，以確保排放符合氣體標準，該尾氣處理方式需要添加活性炭吸附劑。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑將 SVE 法尾氣進行催化降解，並將殘存的尾氣再透過活性炭進行吸附。由於使用“可見光催化催化+吸附膜組”，既較一般光催化劑節省能源，又減少傳統方法對大量活性炭的依賴，大大降低了尾氣處理之成本，降低空氣污染風險。

107 年下半年，本團隊完成了光催化劑之各項參數實驗，透過改變不同的濕度及光源以將本團隊所開發之 La-TiO₂ 光催化劑提高至最佳效率，結果顯示不同的濕度對於 La-TiO₂ 去除甲苯效率有顯著的影響，當環境濕度為 60% 時甲苯之去除率可達到 23.21%，此結果是由於水分子會以化學吸附之方式吸附於 La-TiO₂ 之活性點位上，因此可進一步解離成氫氧自由基，但當環境濕度過高時反而會使 La-TiO₂ 對甲苯去除效率下降，在環境濕度 80% 時甲去除率僅剩 18.8%，其原因為過多的水分子會導致甲苯在被光催化劑降解前先行與水分子進行化學反應，最終附著於 La-TiO₂ 表面造成降解效果之下降。

本團隊也針對商業化模組進行了成本估算，以光催化模組使用 4 片玻璃纖維棉作為光催化劑載體及吸附模組使用 10g 之活性炭進行估算，本商業化模組去除 1g 甲苯之成本約為 2,005 元，雖然本研究之商業化模組成本較高，但根據實驗結果顯示本商業化模組能長時間持續使用，因此本商業化模組應用於實際場址之污染整治是可行的。



Abstract

At present, soil vapor extraction (SVE) has been widely applied as an in-situ remediation of groundwater contaminated by petroleum hydrocarbon. In order to prevent the emission of contaminated gas, the pumped polluted gases were adsorbed by activated carbon at tail gas treatment unit before their release in the atmosphere, which prevents the pollutant gases being discharged directly into the atmosphere. However, it is feasible to use activated carbon in SVE method, because of its expensive cost, adsorption oversaturation problem and high-energy consumption. In our study, it is planned to develop the use of visible-light-driven catalyst to degrade toluene of SVE process, and then the remaining exhaust gas will be adsorbed through activated carbon. Due to the use of the “photocatalysis modual+ adsorption modual”, compared with the general photocatalyst, it not only saves energy, but also reduces the amount of activated carbon in the traditional method. It greatly reduces the cost of exhaust gas treatment and the risk of air pollution.

In the second half of 107 years, we completed the preparation of the adsorption module, which was used for adsorption of the residual exhaust gas completely after photocatalysis module. The adsorption efficiency of toluene with different weight of activated carbon was studied. The results showed that the amount of activated carbon in different layers could effectively adsorb toluene gas in the adsorption module. In order to further clarify the removal efficiency of toluene when the photocatalytic module is combined with the adsorptive module, toluene removal tests were carried out on the photocatalytic module and the adsorptive module. The test results showed that the removal efficiency of toluene in visible light was 80% with two modules, which is 35% higher than photocatalytic modules alone in visible light. Moreover, no deactivation occurred after two hours. Therefore, the above results prove the feasibility of combining the two modules. Then, the performance of the module under ultraviolet light will be tested. It is estimated that when the catalytic module is combined with 5g activated carbon module, the removal efficiency of toluene can reach more than 95%.



目錄

中文摘要	II
ABSTRACT	III
目錄	IV
第一章 前言	1
第二章 研究目的	3
第三章 文獻回顧	4
3.1 我國土壤地下水受油氣污染現況	4
3.1.1 加油站類型事業單位可能洩漏源及洩漏原因分析	5
3.1.2 我國現有部份油氣污染控制廠址	7
3.1.3 我國現有分部加油站整治污染廠址	8
3.2 土壤整治技術	9
3.2.1 土壤氣體抽除法	11
3.2.2 生物通氣法	13
3.2.3 低溫加熱脫附法	15
3.2.4 空氣注入法	17
3.2.5 現地化學氧化法	20
3.2.6 雙相抽除法	23
3.3 土壤氣體抽除法(SVE)介紹	27
3.3.1 污染物移除機制	28
3.3.2 土壤氣體抽除法(SVE)設備元件說明	29
3.3.3 本場址 SVE 尾氣處理說明	31
3.4 光催化原理簡介	32
3.4.1 光催化之發展	35
3.4.2 半導體種類	36
3.4.3 奈米材料理論	37
3.4.4 二氧化鈦晶型結構	38
3.4.5 改質二氧化鈦成為可見光催化劑	40
第四章 研究方法及步驟	43



4.1	研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	45
4.2	光觸媒製備	46
4.2.1	實驗藥品	46
4.2.2	儀器設備及型號	47
4.2.3	製備鏽摻雜二氧化鈦	48
4.2.4	光催化玻璃纖維布載體製備方法	49
4.3	光催化模組之開發	50
4.3.1	光催化性能測試	50
4.3.2	污染廠址選擇及現場污染物調查	51
4.3.3	光催化模組設計	51
4.3.4	光催化模組效益評估	52
4.4	吸附模組之開發	53
4.4.1	吸附模組效益評估	54
4.5	組裝“光催化+吸附”多模塊的商業模組	55
4.5.1	商業化模組設計	55
4.5.2	商業化模組的優化和綜合性能評估	55
第五章	結果與討論	56
5.1	二氧化鈦物化性質分析	56
5.1.1	XRD 分析	56
5.1.2	FT-IR 分析	58
5.1.3	SEM 表面形貌分析	59
5.1.4	BET 分析	60
5.2	光觸媒效能測試	61
5.2.1	不同光源對於降解甲苯之比較	61
5.2.2	不同濕度對於降解甲苯之比較	62
5.3	光催化模組測試	63
5.4	吸附模組測試	68
5.5	商業化模組測試	70
5.5.1	可見光條件下模組測試結果	70



5.6 商業化模組成本分析	72
第六章、結論與建議	73
6.1 結論	73
6.2 建議	74
參考文獻	75
附錄	78
附錄 1 107 年度專案成果績效自評表	1
附錄 2 期末報告書審查意見表	5
附錄 3 期中報告書審查意見表	9
附錄 4 構想書審查意見表	14
附錄 5 計畫書審查意見表	24
附錄 6 會議記錄	28



表目錄

表 3.1 台灣地區土壤污染案例統計表.....	4
表 3.2 油品洩漏可能原因.....	6
表 3.3 台灣地區油氣污染控制場址中污染物種類.....	7
表 3.4 台灣油氣污染整治場址及污染物種類.....	8
表 3.5 土壤處理比較.....	10
表 4.1 藥品清單.....	46
表 4.2 實驗用儀器型號表.....	47
表 4.3 矽摻雜二氧化鈦光觸媒之硝酸矽水合物添加量及其摻雜比例	48
表 5.1 BET 測定結果.....	60
表 5.2 製備四片光催化玻纖布所需前驅物之成本分析	72



圖目錄

圖 3.1 空氣注入法適用性評估.....	18
圖 3.2 土壤抽氣搭配空氣注入法示意圖.....	27
圖 3.3 常見 SVE 系統示意圖.....	29
圖 3.4 移動式推車 SVE 設備主要組成圖.....	30
圖 3.5 為光催化原理圖.....	33
圖 3.6 在 PH=7 的中性溶液中，發生於二氧化鈦表面之氧化還原反應.....	33
圖 3.7 半導體之能階間距分佈圖.....	36
圖 3.8 TiO_6 八面體.....	38
圖 3.9 TiO_6 八面體連接方式.....	39
圖 3.10 銳鈦礦(ANATASE)和金紅石(RUTILE)的晶體結構圖.....	39
圖 3.11 光生電子和空穴的產生、分離和複合.....	41
圖 3.12 二氧化鈦氧空位示意圖.....	41
圖 4.1 研究方法三部曲框架圖.....	43
圖 4.2 鍺摻雜二氧化鈦製備流程圖.....	48
圖 4.3 光催化玻纖布載體製備流程圖.....	49
圖 4.4 光催化降解 BTEX 之反應流程之設計.....	50
圖 4.5 光催化商業化模組設計圖（圖左）及實物圖（圖右）.....	51
圖 4.6 活性碳吸附模組設計.....	53
圖 4.7 吸附模組實際使用正面圖.....	54
圖 4.8 吸附模組設計實際使用側面圖.....	54
圖 4.9 土壤廢氣之實場商業模組設計圖.....	55
圖 5.1 不同鍛燒溫度之鍺摻雜二氧化鈦 XRD 分析圖.....	57
圖 5.2 (A)純 TiO_2 及(B)1 WT% LA/ TiO_2 FTIR 圖.....	58
圖 5.3 商用 P25 及 1 WT% LA/ TiO_2 SEM 圖.....	59
圖 5.4 不同光源下 1 WT% LA/ TiO_2 及 P25 對甲苯之去除率.....	61
圖 5.5 1wt% LA- TiO_2 在不同環境濕度下對甲苯去除率.....	62
圖 5.6 可見光暗箱吸附圖.....	65



圖 5.7 紫外光暗箱吸附圖	65
圖 5.8 清洗前紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖	66
圖 5.9 清洗後紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖	66
圖 5.10 可見光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖	67
圖 5.11 光催化比較之甲苯濃度變化圖	67
圖 5.12 不鏽鋼網格置入數量比較圖	69
圖 5.13 活性碳置入重量比較圖	69
圖 5.14 可見光下商業化模組及吸附模組之甲苯濃度變化比較圖	71





第一章 前言

有機污染一直是地下水最主要的污染來源，目前常見的污染可以分成兩大類，第一類為石化類碳氫化合物，其污染來源大部分為加油站地下油槽或是大型儲槽洩漏，由於地震造成管線鬆脫或是由於腐蝕造成管線與儲槽洩漏，皆容易導致土壤與地下水污染，第二類則是含氯有機溶劑污染，在過去許多工場以含氯有機溶劑作為脫脂劑，但因缺乏環保觀念隨意傾倒或操作不慎導致洩漏而不自知，致使其污染土壤與地下水。

石化產業的有機污染物有部分可以被生物分解，一般分解狀況與分子結構有關，低碳數以及直鏈型的有機物容易被生物分解，高碳數或單環、多環化合物則較不容易被生物分解。當土壤與地下水受到這類化合物污染時，常見的處理方法包括：空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法、化學氧化法、加強生物處理法、抽出處理法。

其中化學氧化法雖然可以有效處理地下水中有機污染物，但對於土壤中的污染物則因為無法確認是否與污染物接觸，致使處理效果較差，且加入強化劑進入地下水中對周遭生態或環境可能產生破壞，如土壤中的物質可能受到氧化產生其他物質，又或是土壤中的微生物可因強氧化劑加入而死亡。

加強生物處理法對於土壤中污染物的處理效果較差，雖然屬於較環保的處理方式，但因生物處理較難控制，往往需耗費相當長的時間，除非整治時程不受到限制，因此大部分公司不願意採用此種處理方法。地下水抽出處理法，在過去較常被使用，但由於抽水水量無法有效控制，經常會有抽不到水的狀況，假設無法找到形成「非水相液體(NAPL, Nonaqueous Liquid Phase)」之位置，處理效果將會無法控制，在另一方面，大量抽出地下水其相關之處理費用會增加，這也是主要的缺點之一，目前使用抽出處理法，除了處理有機物外，另一個重要的目的在控制地下水流動，避免污染物移出管制範圍外。

基於上述理由，將空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法處理受有機物污染場址，視為重要的處理程序之一，但此處理方法有一個缺點為只能針對揮發性較高的有機物進行處理，對於揮發低的有機物相對處理效率較差，如果遇到形成LNAPL(Light Nonaqueous Liquid Phase)之污染狀況，可預期獲得一定的處理結果，若污染物屬於含氯有機溶劑，則處理更加困難，大部分含氯有機溶液比重皆比水重，容易以DNAPL(Dense Nonaqueous Liquid Phase)的形式存在於地下水中，不但不容易以上述方法處理，氯含量較高的有機溶劑如三氯乙烷、四氯乙烯等也不容易以微生物進行分解，在此情況下使用化學氧化的機會將增加。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

化學氧化程序中的氧化劑包括過錳酸鹽、Fenton 試劑、臭氧及過硫酸鹽，在過去較常使用過錳酸鹽做為氧化劑，但由於容易形成二氧化錳沉澱導致管線阻塞，Fenton 試劑需要酸性環境較能夠發揮效用，臭氧則須現場製造，因此近年來使用過硫酸鹽的機率逐漸增加，但如前所述，使用氧化劑容易破壞現地生態且對於土壤中的有機物處理效率較差。

對於受含氯有機溶劑污染場址，空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法仍為重要的選擇處理方法之一，為防止此氣體抽除法之土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備進行處理，經活性碳吸附處理後排放，以確保排放符合氣體標準，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能，對於土壤抽除法之尾氣端處理仍是一大挑戰。

因此，本計畫擬發展利用可見光催化設備直接連於現場將 SVE 法尾氣端進行光催化降解，不需讓尾氣端的氣體經由活性碳吸附後排放，使用本光催化裝置即可達到效果，由於本計畫擬採用低耗能的光催化設備，需使用可見光進行光催化，因此需採用可吸收可見光之光催化劑，將與一般 P25 等市面販售的光催化劑進行必較，也因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。

光催化技術係利用光之能量來使觸媒價軌域能帶和傳導能帶間發生電子轉移，進而產生電子-電洞對(conduction-band electron and valence-band hole)，在水中時，將會使觸媒附近之水分子或游離出的氫氧根離子(OH^-)產生氫氧自由基(OH radicals , $\cdot\text{OH}$)，這些氧化力極強的氫氧自由基可以有效的礦化或是分解水中的化學物質。目前土壤污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。



第二章 研究目的

在土壤與地下水污染整治程序中 AS 與 SVE 均為重要的整治程序，本研究目的，係開發光催化模組處理技術能直接應用於土壤地下水污染場址，受 SVE 法處理後的尾氣端的光催化降解。

由於發展新的吸附劑主要考慮原因乃使用活性碳來吸附逸散出的有機污染物，雖然可以獲得高吸附容量，但活性碳製作成本高，往往使污染復育的操作成本增加，且有機物只能吸附於活性碳表面，過去曾利用吸附劑奈米鈦管，並利用有機物質改質表面，使表面性質由親水性變為疏水性，奈米鈦管合成過程簡單，且具有高比表面積，在過去使用 AS 與 SVE 的過程中遭遇的另一問題為水蒸氣對有機物吸附所造成的干擾。

因此尾氣端的處理上是整套土壤氣體去除法的關鍵，透由使用低耗能之可見光觸媒進行光催化的降解，其低耗能以及高經濟價值是為具有突破現有技術的可能性。

考慮目前使用空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法時，抽出的氣體大部分以活性碳進行吸附，在操作過程中常因活性碳成本高，往往需要花費昂貴的操作費用，若能降低成本，則可使此計畫所獲得之成果更有實用性，因而在此在本研究一併考慮發展成本較低廉的光催化設備。綜合上述內容，本研究計畫可以歸納出以下主題，其內容如下：

1. 建立光催化降解 BTEX 氣體之模組及最佳光觸媒之塗佈方法。
2. 瞭解油氣相關之揮發性有機氣體之光催化降解效果。
3. 建立光催化商業模組之最佳設計結構及裝配方式。
4. 針對該光催化商業模組，從材料設計、模組設計、模組參數、耗能等方面進行各參數優化，並將之設計為可拆卸更替之商業化模組。
5. 進行光催化商業模組於實際污染場址 SVE 尾氣光催化之可行性評估。
6. 完成一套光催化 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組，並完成測試評估報告。
7. 完成實際污染場址進行 SVE 法尾氣測試，並進行有機污染物降解測試和報告。



第三章 文獻回顧

大型石化貯槽及加油站如因管線老舊或地層下陷等原因，將會導致地下水受到油氣污染，目前油氣地下水污染土壤多以氣體抽除法進行整治，該法為防止土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備，經活性炭吸附處理後排放，以確保排放符合氣體標準，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性炭，且活性炭回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性炭吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。目前土壤地下水污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。

3.1 我國土壤地下水受油氣污染現況

設立歷史悠久之大型石化儲槽，可能因儲槽、管線老舊腐蝕失修、地層下陷變動及操作管理不當等原因，致儲槽、管線破裂毀損，儲槽中儲存物質滲漏污染土壤或地下水，地下儲槽有可能成為地下水污染潛在來源。行政院環保署於民國 90 年至 92 年陸續辦理大型儲槽地下水潛在污染源調查計畫，初步建立台灣地區大型儲槽區之概況資料及完成污染潛勢調查工作，期能及早發現問題防止地下水體遭受油品或污染物之污染。由其調查之結果可看出污染物主要有三氯乙烯、四氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、酚類、五氯酚、汞、柴油等如表 3.1 所示：

表 3.1 台灣地區土壤污染案例統計表

污染場址及來源	污染物	污染型式	污染對象	污染範圍	污染影響
桃園縣八德市 RCA 廠	三氯乙烯、四氯乙烯	操作不當滲漏	工業用地	六千立方米土方	污染地下水
台灣氯乙烯公司頭份廠	二氯乙烯、氯乙烯	操作不當滲漏	工業用地	廠區與鄰近地區	
桃園楊梅東北亞公司	酚類		工業用地	廠區與鄰近地區	污染地下水
中國石油化學開發公司安順廠	五氯酚、汞	操作不當滲漏	工業用地	0.3 公頃	污染地下水
中油苓雅寮儲運所	柴油	操作不當滲漏	工業用地	廠區與鄰近地區	

資料來源：(台灣地區土壤污染現況與整治政策分析)



第三章 文獻回顧

另國內站齡超過十年以上之加油站，可能因儲槽、管線老舊腐蝕失修、地層下陷變動及操作管理不當等原因，致儲槽、管線破裂毀損，儲槽中儲存物質滲漏污染土壤或地下水故加油站有可能成為地下水污染潛在來源，行政院環保署為掌握加油站地下儲油槽系統運作情形，預防土壤及地下水污染，確保土地及地下水資源永續利用，並落實土水法及相關法規之規定，於民國九十年至九十二年陸續辦理加油站地下水潛在污染源調查計畫，初步建立台灣地區加油站之概況資料及完成污染潛勢調查工作，期能及早發現問題及防止地下水體遭受油品或污染物之污染。經過調查，受油品污染之加油站地下水中常見苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)、二甲苯(Xylenes)等四種揮發性有機碳氫化合物。其中甲苯(Toluene)，乙苯(Ethyltoluene)，二甲苯(Xylene)對人體中樞神經系統危害甚鉅。BTEX 常見於石油及天然氣生產所，加油站，地上儲油槽(Above-ground storage tanks)，和地下儲油槽(Underground Storage Tanks)等與汽油和石油工業產品相關的環境。

3.1.1 加油站類型事業單位可能洩漏源及洩漏原因分析

1.卸油口及卸油管線

卸油口及卸油管線附近常因卸油溢滿或卸油處理不當造成污染，卸油管線如發生銹蝕，卸油過程中亦將造成油品洩漏。

2.油槽

國內加油站每座大都配置 4 至 5 個地下油槽，深度大都位於地下 5 公尺內；除有卸油管線連接卸油口外，亦有輸油管線連接加油機，油槽設有人孔，供站方以油尺進行人工量油、緊急情況時抽油或日常維護用。測漏管大都設於儲槽區，以監測油槽旁土壤氣體。

3.輸油管線

輸油管線大都位於地下 1 公尺內，連接油槽與加油機，一旦管線接合處發生鬆脫現象，將造成油品洩漏。以往調查資料顯示管線區污染潛勢較高，如欲確實掌握加油站污染潛勢，對輸油管線經過區域之調查工作將不可忽視。

4.泵島(或稱為加油島)

泵島為加油機設置區域，地下亦有輸油管線經過，其連接加油機之接點為



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

最易發生洩漏之區域。

另各加油站可能洩漏分析如表 3.2 所示，可分為操作管理或設備裝置不當卸油過程中發生洩漏及溢滿情形地下油槽及管線腐蝕洩漏其他原因等，其說明詳見表 3.2。

表 3.2 油品洩漏可能原因

主要原因	說明
操作管理或設備裝置不當	<p>加油過程之疏忽導致油品洩漏地面，進而污染土壤。</p> <p>加油機未裝設盛油盤，導致維修人員於更換加油槍濾心、閥門、墊片等零件時，殘留油品直接滴落加油機下方土壤。</p> <p>站方人員進行油槽人孔或陰井清洗作業時，將含有油漬或油花之積水直接倒入排水溝內。</p>
卸油過程中發生洩漏及溢滿情形	<p>油罐車於卸油過程中或結束後，部分殘留油品洩漏於地面，並經由相關傳輸途徑(如未緊閉之測漏管)污染土壤。</p> <p>加油站常因油量計算錯誤而使得卸油過量，或卸油過程中因站方與卸油人員之協調錯誤或疏忽造成卸油溢滿。</p>
地下油槽及管線腐蝕洩漏	<p>因施工不當使得鋼筋與油槽或油管相連接，造成油槽或管線外包覆物質破損而加速腐蝕。</p> <p>電鍍或管線包覆施工不良，使管線外露與土壤接觸而腐蝕。</p> <p>雖然目前大部分油槽採用犧牲鎂陽極等陰極防蝕措施，惟若因施工不當使得鋼筋與油管或接地網相連接，將造成鎂陽極消耗迅速。</p> <p>若上述陰極防蝕系統未設置檢測點，將無法得知鎂陽極消耗速率及是否有效，造成防護措施之盲點。</p>
其他原因	<p>長期承受車輛重壓及震盪，導致油管接頭脫落與油品洩漏。</p> <p>因地震等天然災害造成油槽晃動傾斜及管線斷裂脫落，造成洩漏。</p> <p>油槽組出油口端沉油泵頭內部銜接處之 O 型環破損老化，造成泵體內油品溢漏至人孔底部，再由空隙滲漏至土壤中。由於此處之油品滲漏量甚少，不易由總量管制察覺，惟長時間滲漏之結果亦會造成嚴重污染。</p>

(資料來源：土基會)



3.1.2 我國現有部份油氣污染控制廠址

環保署土基會每年會進行全台灣污染控制與整治場址調查，目前我國現有油氣污染控制場址地如表 3.3 所示，由表中可看出各加油站土壤或地下水污染為苯、二甲苯、乙苯、總石油碳氫化合物/苯、甲苯、萘、甲基第三丁基醚、TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28)。

表 3.3 台灣地區油氣污染控制場址中污染物種類

場址名稱	土壤/地下水污染物
台灣中油股份有限公司忠孝東路加油站	苯;總石油碳氫化合物/苯;甲基第三丁基醚;TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28)
台灣優力豐富站	苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;萘
土城加油站	苯;總石油碳氫化合物/苯;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物
育昇加油站	苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯;萘;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物
北嶺加油站	乙苯;總石油碳氫化合物;苯;甲苯;二甲苯/苯;萘;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物
台亞岡山交流道加油站	苯;總石油碳氫化合物/二氯甲烷;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物;萘
上源加油站股份有限公司上源加油站	苯;甲苯;二甲苯;總石油碳氫化合物
台灣中油股份有限公司五股加油站	苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物
士香加油站股份有限公司	苯;甲苯;二甲苯;二甲苯/苯;甲苯
台亞湖口北上加油站	苯;總石油碳氫化合物/苯;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物
台亞湖口南下加油站	苯;總石油碳氫化合物/萘;TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28)
寶群加油站有限公司	苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯
台亞台鳳加油站	總石油碳氫化合物;苯/苯;甲基第三丁基醚
台灣中油股份有限公司油品行銷事業部東部營業處(北埔油庫)	二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯

(資料來源:土基會)



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

3.1.3 我國現有分部加油站整治污染廠址

控制場址經初步評估後，有危害國民健康及生活環境之虞時，所在地主管機關應報請中央主管機關審核後公告為土壤、地下水污染整治場址（以下簡稱整治場址），並於中央主管機關公告後七日內將整治場址列冊，送各該直轄市、縣（市）政府、鄉（鎮、市、區）公所及地政事務所提供閱覽，目前我國現有油氣污染整治場址如表 3.4 所示，其中常見之污染物有苯、甲苯、二甲苯、乙苯、總石油碳氫化合物/苯、甲苯、三氯乙烯。

表 3.4 台灣油氣污染整治場址及污染物種類

場址名稱	土壤/地下水污染物
統一精工小北加油站	苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;三氯乙烯
嘉仁加油站股份有限公司所屬嘉仁加油站	苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯;總酚;萘
永信加油站股份有限公司永信加油站	總石油碳氫化合物;苯/苯
南昇加油站	苯;二甲苯;總石油碳氫化合物/苯;總酚
統一精工左營加油站	苯;總石油碳氫化合物/苯
大旗楠加油站股份有限公司大旗楠加油站	苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯
竹東鎮明星段 593 之 1 及 594 之 1 地號(二重埔加油站)	苯;甲苯;二甲苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;總酚;萘;TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28)
屏東縣佳冬鄉昌北段 1188 地號	苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;萘

(資料來源:土基會)



3.2 土壤整治技術

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]。

依其對污染物之處理程度差異又可以分成不移動化或阻絕技術、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、界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。在進行油品類儲槽系統整治技術選取之前，須了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金錢。以下簡介我國環保署編撰手冊摘述美國環保署編製之超級基金場址整治措施選擇原則之提示文件內容[3]。

油氣整治技術分類如下所列：

1. 土壤整治技術：土壤氣體抽除法、土耕法。
2. 離地處理法：抽出處理法、開挖處理法。
3. 現地生物法整治技術：生物通氣法、生物堆法、自然衰減法、生物曝氣法、現地地下水生物整治法、生物漱洗法。
4. 現地物理法整治技術：低溫加熱脫附法、空氣注入法、雙相抽除法、井內氣提法。
5. 現地化學法整治技術：化學氧化法、界面活性劑及共溶劑淋洗法、電動力法。
6. 其他：滲透性反應阻牆法、植物復育法。

以下就幾種常用之技術進行介紹，如表 3.5 所示。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

表 3.5 土壤處理比較

項目	優點	缺點
土壤氣體抽除法	1. 易與其他技術結合運用 2. 可用於建築物下面與其他不可開挖之所	1. 其尾氣處理費用較昂貴 2. 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。
生物通氣法	1. 土壤處理費用低 2. 不須處理污染尾氣	1. 處理受土壤成分的限制，在低透水性、黏土質高的土壤層，不適用。
低溫加熱脫附法	1. 技術門檻低 2. 處理污染土壤量大	1. 現地處理面積須足夠大，離場處理的土壤運輸費用高
空氣注入法	1. 操作空間小 2. 處理費用便宜	1. 無法降解 LNAPAL 2. 適用場址少
現地化學氧化法	1. 處理效率快 2. 運作干擾小 3. 可氧化較難分解的油類污染物	1. 評估氧化速度難 2. 有健康風險以及場址作業安全之考量
雙相抽除法	1. 可以與其他整治技術併行 2. 處理設施運作之空間需求與時間較小	1. 處理費用高 2. 操作條件複雜



3.2.1 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。本技術利用真空抽氣，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，被抽除土壤氣體可進行回收或經處理後排放。本技術於操作時，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

土壤氣體抽除法可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：

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

(5) (4) 缺點：



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

(6) 污染物濃度降低 90% 以上不易達成。

- a. 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。
- b. 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。
- c. 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。

(7) 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。此外，系統運作中亦有可能抽出含污染物之地下水，亦須妥善加以處理。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

無論使用何種處理方法，多會用到 SVE 系統，也多需要選擇設置適當之空氣污染防制設備來處理 SVE 系統排放之污染物，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。目前土壤地下水污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。



3.2.2 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。其處理程式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。

土壤層中原本即可能存在有一些現地微生物，部分微生物本身可能可以利用有機污染物做為生長基質，而產生代謝污染物的作用，進而分解污染物質，達到總污染量下降的目的。但生物分解作用有其必要、合適的環境限制條件，例如溫度、濕度、氧氣、污染物與生物接觸途徑等，若沒有適當的環境，微生物可能無法直接利用，或是大量利用有機污染物做為分解基質，其中一項重要的影響因數就是營養鹽。因為微生物生長所必須之碳源，可以由有機污染物提供，但是其他生長代謝所需的物質，例如氮、磷、微量元素等，就必須從外面提供足夠的量，否則土壤層環境中並不會存在足量的這些物質。

生物通氣法現地馴養微生物的目標種類，主要為好氧性微生物，也就是生物分解的代謝過程中，微生物必須利用氧氣做為電子接受者，而以污染物做為電子提供者，完成完整的降解程式。自然土壤層中的原始氧濃度可能不足以達到促進生物大量分解污染物的需求，因此，土壤層中的氧濃度也成為一項相當重要的因數，而生物通氣法的土壤層通氣作用，正好提供了一個良好的通氣環境。

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（揮發性相對高），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。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

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

- (1) 簡單可得之工具器材，容易設置。
- (2) 操作的空間較小。
- (3) 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。
- (4) 每噸土壤處理費用約 45~140 美元，較其他地面處理程式便宜。
- (5) 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。
- (6) 可能不需要昂貴的尾氣處理費用。

4.缺點

- (1) 濃度太高的成份，可能對於微生物造成毒性。
- (2) 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。
- (3) 土壤若有分層，恐造成效能降低。
- (4) 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。至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，須符合國內相關空氣污染防制法令。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施



之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

3.2.3 低溫加熱脫附法

1. 原理

低溫加熱脫附法(Low-Temperature Thermal Desorption)常以英文縮寫 LTTD 簡稱。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：一、熱揮發(thermal volatilization)二、熱脫附(thermal stripping)三、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：一、焚化：設置焚化器(incinerator)，將污染物焚化成二氧化碳及水。二、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。三、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。四、吸附：設置活性碳吸附設備(carbon adsorption unit)吸附氣體中之污染物，將其移除。若用焚化法、觸媒氧化法可將有機物直接分解成無機性碳源後排放，但冷凝法及活性碳吸附法則必須再進行廢水、廢棄物等型態之處理。焚化產生之熱能，可以利用熱交換器回收，但焚化產生之粒狀污染物，必須加以蒐集處理，例如設置集塵袋等。

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。低溫加熱脫附法處理完成之乾淨土壤，因已經熱交換，因此土壤溫度已降至一般環境溫度，惟其必須依政府規定或整治計畫書規劃，回填原址，或是送交其他合格處理單位辦理後續處置。若要回填至原址，則必須注意是否再視需要添加水分、營養份等，以增加土壤肥力，提昇再利用之價值。

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



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

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℃，最高不超過 650℃ 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℃ 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

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。
- (5) 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)。
- (6) 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

- (1) 必須挖除土壤，但一般限制在地表以下深度 7.6 公尺以內。
- (2) 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。
- (3) 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。



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制法令。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2ppm 與 2ppm，且排放之氣體若有臭味（或厭惡性異味），亦須符合相關標準規定，否則恐有違法之虞。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。

3.2.4 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，可採用圖 3.1 所示的初步篩選、細部評估、系統設計、操作及監控計畫等四個流程來評估。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

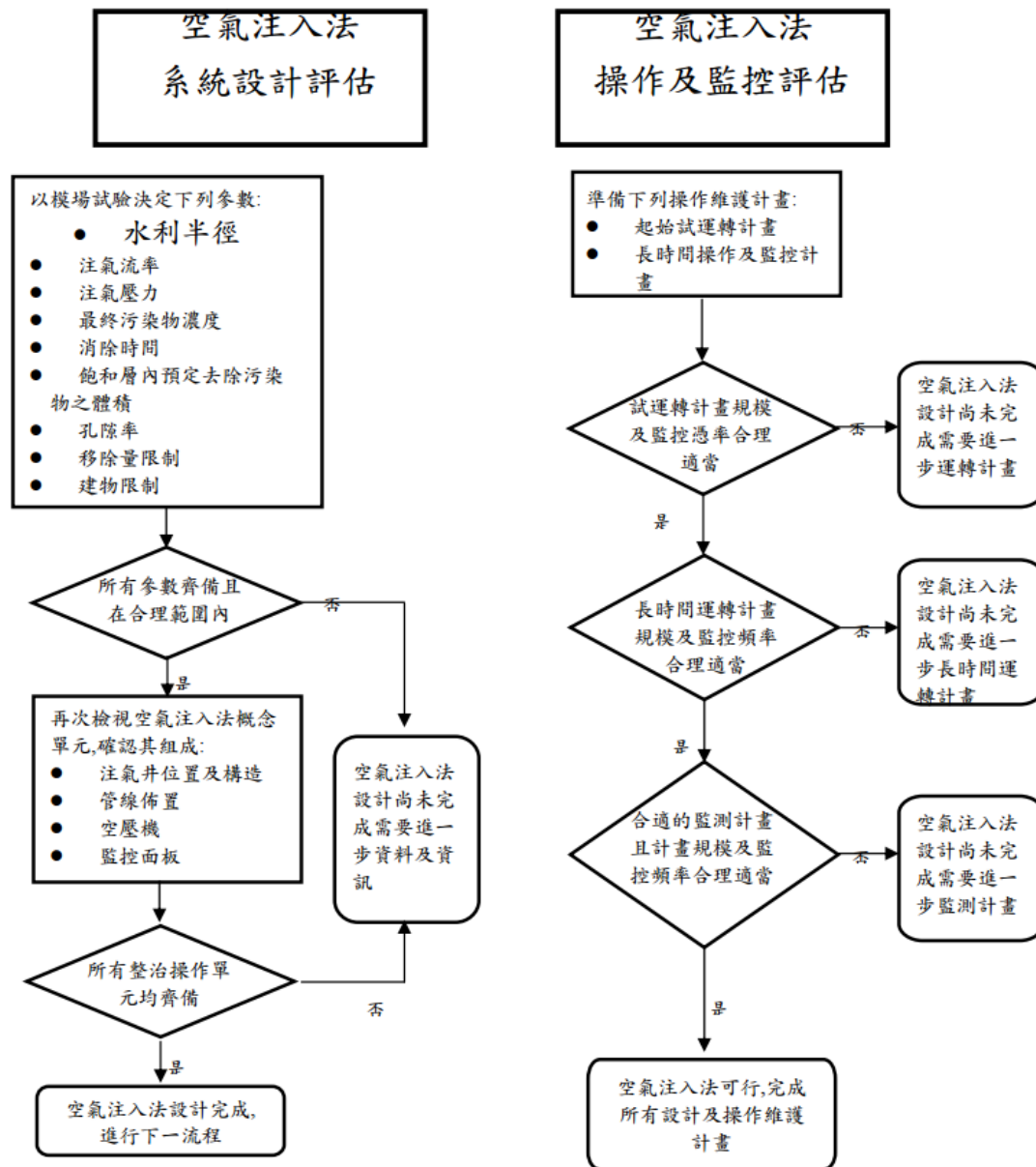


圖 3.1 空氣注入法適用性評估

3.優點

- (1) 簡單可得之工具器材，容易設置。
- (2) 操作空間較小。
- (3) 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。
- (4) 每噸土壤處理費用約 20~50 美元，較其他地面處理程式便宜。
- (5) 不須移除、處理、儲存、處置遭受污染的地下水。
- (6) 可以 SVE 加強處理效能。



4.缺點

- (1) 若有自由相浮油存在，不能同時處理，必須先移除浮油。
- (2) 不能處理遭特殊地質局限之污染團。
- (3) 土壤若有分層，恐造成效能降低。
- (4) 一些化學性、物理性、生物性的交互作用尚不清楚。
- (5) 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。
- (6) 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]。至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，須符合國內相關空氣污染防制法令。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之空氣污染防制設備，可供國內業者選擇尾氣處理設備之參考：

- (1) VOC 濃度大於 2,000ppmv：建議使用熱氧化法。
- (2) VOC 濃度介於 100 至 2,000ppmv：建議使用觸媒氧化法。
- (3) VOC 濃度介於 35 至 100ppmv：建議使用顆粒活性碳（GAC）吸附。
- (4) VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放。

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防制設備，以處理 SVE 系統排放之污染物，並定期更換活性碳等耗材以維持處理功能正常，避免造成二次污染。



3.2.5 現地化學氧化法

1. 原理

現地化學氧化法，顧名思義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。本手冊將介紹各種現地常用之化學氧化劑，這些氧化劑曾被廣泛應用於廢水處理程式，現逐漸被利用於土壤及地下水污染之現地處理。現地化學氧化法之特點為處理時間較快，相對於生物整治法而言，需要的反應時間較短。然而，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，可以根據需求來加以選擇。例如，有的氧化劑雖然反應較慢，但可以緩慢持續與污染物接觸反應，提供較長的接觸時間，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，那麼有可能會消耗大量的化學藥劑，造成成本的浪費。又例如 Fenton 氧化劑（過氧化氫）可能不適用於含有大量碳酸鹽的地下水，因為過氧化氫的氫氧自由基，在尚未與地下水中油品反應之前，即與碳酸鹽離子進行反應耗盡，造成浪費耗損與效率降低。相反地，含有大量碳酸鹽的地下水，則有助於高錳酸鹽類氧化物對於油品的氧化作用。

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，快速且有效率。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：(1)避免發生浮油與氧化劑產生劇烈的氧化作用而發生危險。(2)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[5]。

在多重整治方法併同處理的整治趨勢下，現地化學氧化法在應用時機上，往往扮演一個先趨的角色，亦即在整治初期，先以現地化學氧化法控制污染擴大趨勢，爭取整治時間，後續再以生物整治方式，將剩餘之污染量移除，因為氧化劑於地下水殘餘的結果，會持續形成高溶氧狀態，提供微生物分解代謝過



第三章 文獻回顧

程中所需之電子接受者。現場的化學處理必須考慮化學物質的宿命(fate)，也就是該物質於土壤中的傳輸、擴散及反應等。於應用化學處理時，必須特別注意所加的化學藥劑可能含有害性化學物質，而且所添加的量也可能很大，這些都是現場處理前必須考慮的環境影響因素。就 Fenton 氧化法而言，因為過氧化氫於處理過程中用量較大，但是在自然環境中會被分解為氧氣及水[15]，其所添加的 Fe^{2+} 催化劑是自然界含量頗高的化學物質，因此相較於高錳酸鉀及臭氧而言，其對環境的衝擊較小。所以如用過氧化氫加鐵催化的 Fenton-like 法處理受有機污染之土壤及地下水之改善方式，亦成為後續現地化學氧化法發展的核心。

3.優點

- (1) 污染物可以在現地被破壞移除。
- (2) 處理效率較為快速。
- (3) 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。
- (4) 可以氧化 MTBE 等油品類較難分解污染物。
- (5) 減少操作及監測成本。
- (6) 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。
- (7) 對於場址運作干擾最小。

4.缺點

- (1) 初設成本及總成本可能較高。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 在處理數週至數月後，溶解性的水中污染物濃度可能回升。
- (5) 污染團結構及範圍可能在施作數週之後改變。
- (6) 化學藥劑之使用，有健康風險以及場址作業安全之考量。
- (7) 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。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

(8) 化學藥劑有可能浪費在與土壤層中其他物質作用而消耗。

(9) 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

一、過氧化氫

1. 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
2. 增加污染團結構改變的風險。
3. 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。
4. 需要現地儲槽。
5. 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。

二、高錳酸鹽

1. 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性土壤層氧化污染。
2. 可能產生不被預期產生的有害副產物。
3. 需要現地儲槽。
4. 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。

三、臭氧

1. 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。
2. 增加污染團結構改變的風險。
3. 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。
4. 需要現地氣體產生機。
5. 可能產生不被預期產生的有害副產物。
6. 需要現地儲槽。



3.2.6 雙相抽除法

1. 原理

雙相抽除法亦稱為多相抽除法(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[17]，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[18]。

抽除之各種型態之污染物，經處理之後排放或廢棄、回收。雙相抽除法在不飽和土壤層中，由於土壤氣體遭不斷的抽除，造成不飽和層趨向真空的狀態，而也因回收井附近之抽氣作用，使得污染區以外之遠方乾淨土壤氣體引入，造成通氣氣流之現象，持續補助整治區之土壤層供氣供氧，產生類似生物通氣法之作用，如此可以加強不飽和層土壤層之生物降解作用。雙相抽除法特別適用於油品類污染之場址，尤其是在自由相之浮油尚未移除之前，並不適合直接利用生物或化學方法進行整治的場址。因此，在污染場址採取多重處理方法併用原則下，針對有浮油層的場址，雙相抽除法往往優先於其他整治程式，被選擇來處理地下環境中之污染物。在系統的設計上，大致可分為單泵與雙泵兩種。單泵與雙泵的差異在於前者採用單一泵同時從回收井中回收浮油與地下水，後者則是一組泵抽取浮油，另外有一組泵抽取地下水同時提供必要的水位洩降。單泵系統適用於具有低到中等程度透水性的地質，其設置成本低也較容易，其抽取量一般藉於 5gpm 到 20gpm 之間，抽取方式則是藉液位元偵知器做間歇性的抽取。由於任何的泵型式，在抽取過程中均會造成乳化現象，致使溶解相之濃度升高，所以地表上都必須設置油水分離與水處理設備。至於雙泵系統，其主要目的是最佳化洩降錐的程度以達到最高的浮油回收效能，同時讓油水混合的狀況減至最低，因此這種系統採用一組泵只抽取地下水以製造所需之洩降錐，第二組泵則只抽取浮油。抽取地下水的抽取量需經過適當的調整以控制洩降之深度，抽除浮油的部分則採用油類偵知器作為啟動與關閉泵的機制。藉由平衡地下水與浮油之抽取量，即可以將乳化現象減至最低，甚至可以達到不需要油水分離設備的程度。

2. 適用時機及環境介質

使用雙相抽除法的適用性評估詳圖 10.2-1 所示。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。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

雙相回收抽除系統的適用條件包括：

- (1) 低到中等的透水性地質(<10-3 cm/s)或較薄的浮油厚度(<15cm)。
- (2) 地下水位介於 1.5 到 6 公尺。
- (3) 傳統的抽出法或回收溝技術不適用。
- (4) 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：

- (1) 在低滲透性地質特性場址中，整治較有效。
- (2) 操作空間較小。
- (3) 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）。
- (4) 增加污染地下水之抽除速率。
- (5) 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。
- (6) 在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。

缺點：

- (1) 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。
- (2) 在地下水水位變動較大之區域難以處理。
- (3) 處理抽除之土壤氣體或是分離油、水兩相之經費可能較高。
- (4) 在地面上，必須設置能夠處理大量地下水的設備。
- (5) 須有特殊的機器設備以及有經驗的操作及試驗技術。



(6) 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：

- (1) 廣泛適用於各種條件之地質狀況，機具設備較容易獲得。
- (2) 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）。
- (3) 對於地下水位變化較大的區域有較大的彈性運用空間。
- (4) 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。在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。

缺點：

- (1) 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。
- (2) 氣體處理需要較多的經費。
- (3) 分離油、水兩相，經費可能較高。
- (4) 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」。至於抽除之土壤氣體經處理後排放的尾氣，必須符合國內相關空氣污染防制法令。依環保署「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

以污染物苯、甲苯及二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 及 2 ppm，且排放之氣體若有臭味（或厭惡性異味），亦須符合相關標準規定，否則恐有違法之虞。

由上述技術評估可看出，無論使用何種處理方法，多會用到 SVE 系統，也多需要選擇設置適當之空氣污染防制設備來處理 SVE 系統排放之污染物，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。目前土壤地下水污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。



3.3 土壤氣體抽除法(SVE)介紹

本研究已於3.2節略述土壤氣體抽除法(Soil vapor extraction, 以下簡稱SVE)，本節將針對本擬測試場址之土壤氣體抽除法進行介紹。

土壤氣體抽除整治技術，係以去除不飽和層土壤中的揮發性有機物(Volatile organic compounds, VOCs)為目標。該整治技術適用於受高揮發性化學物質污染土壤之整治，此整治技術已於國內廣泛應用。

由於SVE主要原理為利用真空抽氣，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，並使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動而被抽出，有許多別稱，像是土壤通氣、土壤真空抽除、真空抽除、地表下通氣等。此外，為了提昇土壤氣體抽除成效與強化污染傳輸速率(transport rate)，SVE往往搭配會其他輔助整治技術，常見之搭配整治技術(如現地加熱法、蒸氣注入等)，土壤抽氣搭配空氣注入法示意圖詳圖3.2。

SVE的處理速率，往往隨著地層透氣性(air permeability)、污染物濃度、尾氣處理系統(offgas treatment system)特性等因素的作用，而在不同場址有顯著不同[13]。

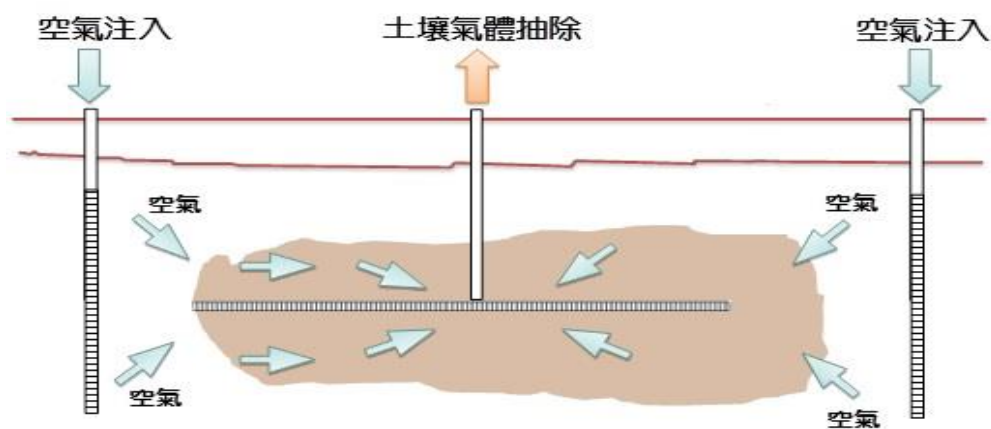


圖 3.2 土壤抽氣搭配空氣注入法示意圖



3.3.1 污染物移除機制

SVE 係利用垂直/水準井或溝渠，於抽取空氣時所引發的壓力梯度變化 (pressure gradient)，進而提昇土壤中 NAPL 及溶解於孔隙水中之污染物揮發作用，及土壤表面污染物的脫附速率 (desorption rate)。以 SVE 去除 VOCs 的機制，包含水準對流 (advection)、揮發 (volatilization)、脫附 (desorption)、生物降解 (biodegradation) 與擴散作用 (diffusion) 等 [14]，以下將針對主要影響 SVE 處理成效的作用，包含水準對流及擴散作用進行說明：

1. 水準對流

使用 SVE 從土壤抽走空氣後，揮發性有機物揮發成為氣相的污染物，將伴隨著大量空氣移動至滲透性較高的區域，這種過程稱為水準對流。通常而言，低滲透性區域的水準對流作用相對較低。

理論上，當污染物可完全揮發，並存在於相互連接的土壤孔隙中時，可達到最高的去除率。因此，當污染物的去除受水準對流率限制時，就污染移除原理而言，應可直接增加空氣流量 (airflow rate) 提昇去除率。然而，往往受其他污染物特性或污染物存在型態的限制。如增加空氣流量，亦無法移除揮發率有限的 NAPL 或水相污染物；或無法提昇土壤顆粒表面的污染物脫附作用等。

2. 擴散作用

利用經氣體抽除後孔隙間污染物氣體濃度降低，與尚未有完成抽氣部份之污染濃度，所產生的濃度梯度變化，誘使高濃度污染物區域將隨著空氣擴散往低濃度的方向移動，稱之為擴散作用。然而，擴散作用通常遠比水準對流慢，尤其在滲透性較低的區域，污染去除率會受較大的限制。

曾有研究顯示土壤溼度對 VOCs 於土壤管柱 (soil column) 中擴散的影響，研究證實當污染物在濕沙中的移動時間比乾沙高出 2~3 倍。這樣的延遲作用，歸因於孔隙水 (pore water) 的分配效應 (effect of partitioning)。例如，在汽油或燃油的污染場址，其 LNAPL 污染物會殘留在地下水位與毛細作用帶附近，亦即污染物累積於飽和層的地下水位變動區間內的濕度變化。由於土壤孔隙體積為定值，當 LNAPL 佔據該區間的孔隙後，將與氣體抽除作用競爭流動位置，導致未飽和帶的擴散作用延遲。因此，濕度往往成為該類型場址的傳輸機制限制。



3.3.2 土壤氣體抽除法(SVE)設備元件說明

典型的 SVE 系統如圖 3.3 所示，由一或多個抽取井(extraction well)、氣液分離器(air/water separator)，及鼓風機(blower)或真空泵(vacuum pump)所組成，也可能包含一或多個空氣入口或注入井、地表上的不透水鋪面，及空氣或水流處理系統。使用 SVE 時需要依據污染物特性(例如揮發性)，及土壤性質(例如透氣性與地層結構)進行系統設計。本技術指引將該整治技術常見使用設備彙整如下：

- 一、 井場系統：抽氣井、井頭設施
- 二、 管線系統：抽接管線、流量計、球閥、壓力錶
- 三、 抽氣主系統：鼓風機、氣/液分離器、空氣過濾芯
- 四、 二次污染防治設備：尾氣處理系統、廢液處理系統
- 五、 操作監測設備：PID/FID、主動式空氣採樣箱、採氣袋
- 六、 其他：不透水鋪面(impermeable cap)

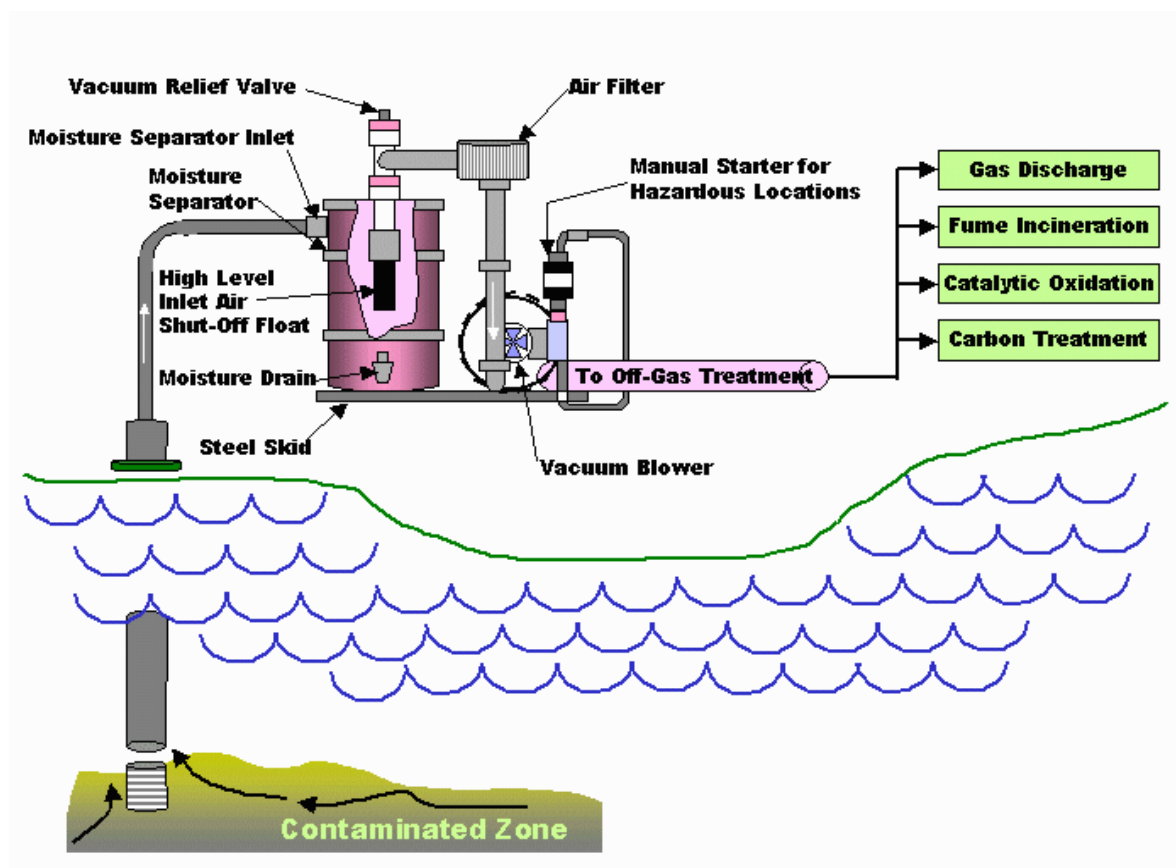


圖 3.3 常見 SVE 系統示意圖



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

一般現地整治常將 SVE 整治設備以移動式推車型式進行組裝，方便運輸以及現地進行位置轉換，移動式土壤氣體抽除設備主要組成如圖 3.4 所示，主要設備如下說明：相關設備規格初步說明如下：

1. 鼓風機
2. 微粒過濾器(inlet air filter)
3. 出口消音器(discharge silencer)
4. 氣液冷凝分離槽(moisture separator)
5. 液位開關(level switch)
6. 其他裝置：氣體流量計、移動式推車、控制箱、稀釋閥控制閥、液位開關

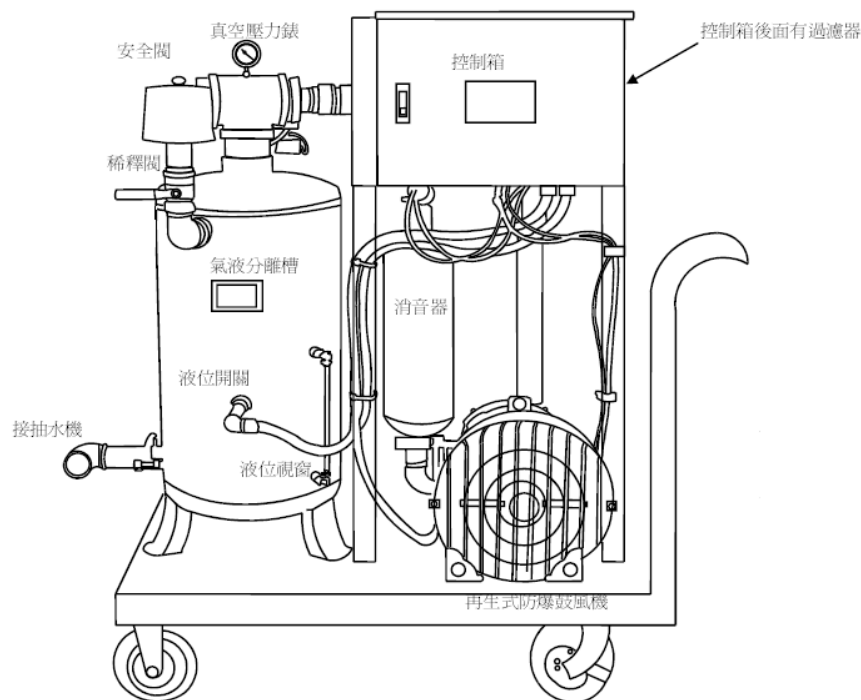


圖 3.4 移動式推車 SVE 設備主要組成圖



3.3.3 本場址 SVE 尾氣處理說明

抽除氣體進入氣液分離桶後，將土壤氣體中的液體蒐集並排出，可能造成鄰近水體的污染，而抽出氣體的排放亦可能造成場址鄰近大氣的污染。因此，為了避免二次污染的產生，應加裝二次污染防治設備，包含尾氣處理設備及廢液處理設備。依照長期地下水水位監測結果顯示，本場址地下水水位約 9m，本計畫最深抽氣井設置深度為 6m，因此截至目前操作結果，均無土壤氣體中的液體抽出之情況，故二次污染防治工作著重於尾氣處理設備。

土壤氣體抽除法操作期間，為防止土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備，經活性碳吸附處理後排放，並定期每月以 PID/FID 進行監測，以確保排放符合氣體標準。藉由密集之尾氣監測頻率，掌握最佳活性碳之更換時機，避免造成空氣之二次污染。尾氣排放標準則是延續前控制計畫所提之 35ppmV，若尾氣 PID/FID 監測結果高於 35ppmV 將立即更換活性碳。而本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，且由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。



3.4 光催化原理簡介

光催化是一種在光的照射下，自身不起變化，卻可以促進化學反應的物質，就象植物的光合作用中的葉綠素。光觸媒的材料多種多樣，但是最為著名和研究最為徹底的是納米二氧化鈦。光觸媒在太陽光的照射下能產生羥基自由基、超氧自由基等活性物種，因而具備抗菌、除臭、油污分解、防黴防藻、空氣淨化的作用[6]。

光觸媒【Photocatalyst】是光【Photo=Light】+觸媒(催化劑)【catalyst】的合成詞。光觸媒是一種在光的照射下，自身不起變化，卻可以促進化學反應的物質，光觸媒是利用自然界存在的光能轉換成為化學反應所需的能量，來產生催化作用，使周圍之氧氣及水分子激發成極具氧化力的 OH⁻及 O₂⁻自由負離子。幾乎可分解所有對人體和環境有害的有機物質及部分無機物質，不僅能加速反應，亦能運用自然界的定律，不造成資源浪費與附加污染形成。

半導體光催化劑大多是 n 型半導體材料（當前以為 TiO₂ 使用最廣泛）都具有區別於金屬或絕緣物質的特別的能帶結構，即在價帶(Valence Band, VB)和導帶(Conduction Band, CB)之間存在一個禁帶(Forbidden Band, Band Gap)。由於半導體的光吸收閾值與帶隙具有式 $K=1240/E_g(\text{eV})$ 的關係，因此常用的寬頻隙半導體的吸收波長閾值大都在紫外區域。當光子能量高於半導體吸收閾值的光照射半導體時，半導體的價帶電子發生帶間躍遷，即從價帶躍遷到導帶，從而產生光生電子(e⁻)和電洞(h⁺)。此時吸附在納米顆粒表面的溶解氧俘獲電子形成超氧負離子，而電洞將吸附在催化劑表面的氫氧根離子和水氧化成氫氧自由基。而超氧負離子和氫氧自由基具有很強的氧化性，能將絕大多數的有機物氧化至最終產物 CO₂ 和 H₂O，甚至對一些無機物也能徹底分解[7]。圖 3.5 為光催化原理圖。

可作為環保光觸媒之半導體材料其能階間距需位於太陽光能量範圍內，如此材料內的價電子在光的照射下，可被激發至導電帶，藉此同時產生還原與氧化能力。圖 3.5 為常見半導體之能階間距分佈圖。如前述，二氧化鈦是已知很好的一個光觸媒[19]，由圖 3.6 可知，二氧化鈦在 PH=7 中性溶液中，吸收光線(380nm, 3.2eV)所產生之電洞其氧化電位相對於標準氫電極(SHE)為+2.53V，如果說該電洞與水起反應，可產生氫氧根自由基(•OH)，電洞所餘之氧化還原電位則僅略小於+2.53V，由圖 8 可知此時之電洞與氫氧根自由基之氧化能力均強於臭氧(+2.07)。臭氧由於其氧化能力，已廣泛被應用於環保與除菌方面，二氧化鈦經光激化後，可顯現更強的氧化能力，此為二氧化鈦可作為環保光觸媒使用的主要原因之一。



第三章 文獻回顧

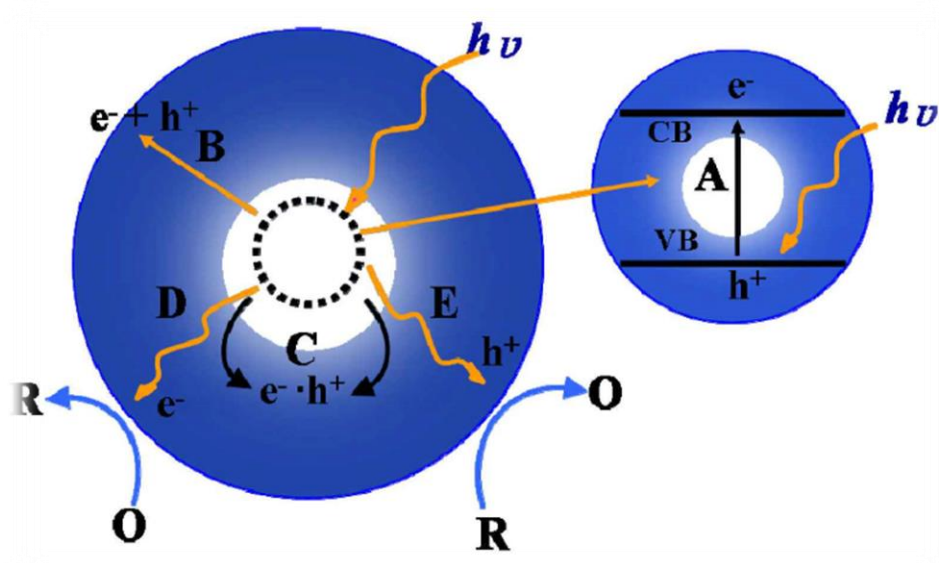
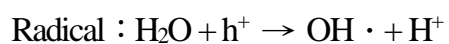
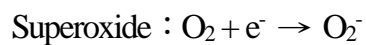
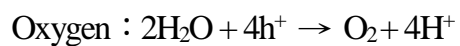
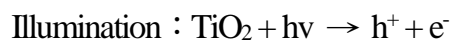


圖 3.5 為光催化原理圖

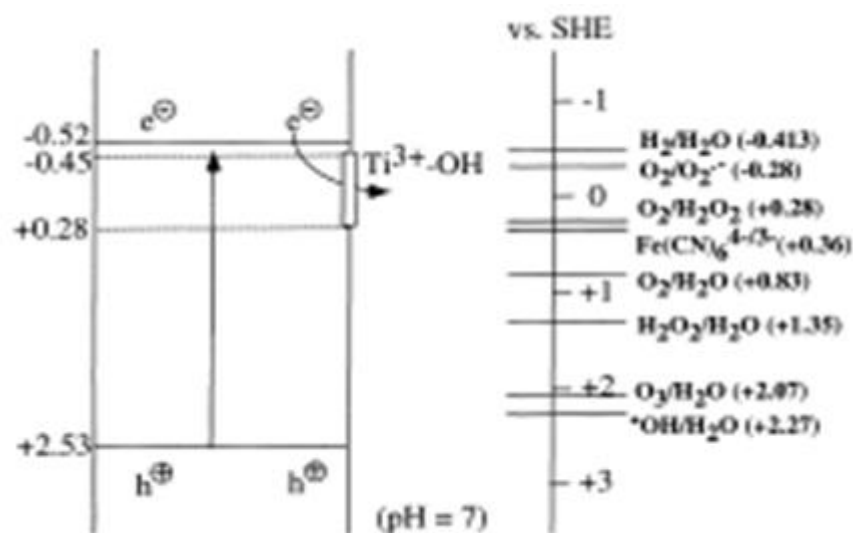


圖 3.6 在 PH=7 的中性溶液中，可發生於二氧化鈦表面之氧化還原反應



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組



3.4.1 光催化之發展

光觸媒於 1967 年被當時還是東京大學研究生的藤島昭教授發現。在一次試驗中對放入水中的氧化鈦單結晶進行了光線照射，結果發現水被分解成了氧和氫。這一效果作為「本多-藤島效果」(Honda-Fujishima Effect)而聞名於世，該名稱組合了藤島教授和當時他的指導教師----東京工業大學校長本多健一的名字[20]。

由於是藉助光的力量促進氧化分解反應，因此後來將這一現象中的氧化鈦稱作光觸媒。這種現象相當於將光能轉變為化學能，以當時正值石油危機的背景，世人對尋找新能源的期待甚為殷切，因此這一技術作為從水中提取氫的劃時代方法受到了矚目，但由於很難在短時間內提取大量的氫氣，所以利用於新能源的開發終究無法實現，因此在轟動一時後迅速降溫[21]。

1992 年第一次二氧化鈦光觸媒國際研討會在加拿大舉行，日本的研究機構發表許多關於光觸媒的新觀念，並提出 應用於氮氧化物淨化的研究成果。因此二氧化鈦相關的專利數目亦最多，其它觸媒關連技術則涵蓋觸媒調配的製程、觸媒構造、觸媒擔體、觸媒固定法、觸媒性能測試等[22]。以此為契機，光觸媒應用於抗菌、防污、空氣淨化等領域的相關研究急劇增加，從 1971 年至 2000 年 6 月總共有 10,717 件光觸媒的相關專利提出申請。二氧化鈦 TiO_2 光觸媒的廣泛應用，將為人們帶來清潔的環境、健康的身體。

物體之長度為 10^{-6} 米稱為微米 (Micrometer; μm)， 10^{-9} 米稱為奈米 (Nanometer; nm)。各種應用材料也將由微米逐漸進入奈米時代。奈米材料由晶粒 1~100nm 大小的粒子所組成。粒徑極為微細，具有極大的比表面積，且隨著粒徑的減少，表面原子百分比提高[23]。在表面上由於大量原子配位的不完全而引起高表面能的現象。表面能量佔全能量的比例大幅提高，使奈米材料具吸附、光吸收、熔點變化等特性。利用奈米超微粒子技術與特性[24]，研發出材料本身在反應時完全不參與作用，卻可促進並提高反應能量，以催化目標反應的觸媒技術已運用於環境清潔作用上，促使有害或有毒物質加速反應成為穩定而無害物質，達到環保效果[25]。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

奈米二氧化鈦光觸媒是一種在光的照射下，自身不起變化，卻可以促進化學反應的物質，就象植物的光合作用中的葉綠素。TiO₂ 光觸媒在太陽光或室內紫外光的照射下能產生抗菌、除臭、油污分解、防黴防藻、空氣淨化的作用[26]。

3.4.2 半導體種類

目前廣泛研究的半導體光觸媒大多數都屬於寬禁帶的 n 型半導體化合物，如硫化鎘(CdS)、二氧化錫(SnO₂)、二氧化鈦(TiO₂)、氧化鋅(ZnO)、硫化鋅(ZnS)、硫化鉛(PbS)、三氧化鉬(MoO₃)、鈦酸鋇(SrTiO₃)、五氧化二釩(V₂O₅)、三氧化鎢(WO₃)、二矽化鉬(MoSi₂)等。這些半導體中 TiO₂、CdS、ZnO 的催化活性最高，但 CdS、ZnO 在光照時不穩定，因為光陽極易腐蝕而產生 Cd²⁺、Zn²⁺，這些離子對生物有毒性，並對環境有害[27]。下圖 3.7 為常見半導體之能階間距分佈圖。

二氧化鈦為一具能帶間隙(band gap) ~ 3.2 eV 的半導體物質，填滿電子的價帶是 O 的 2p 軌域組成而未填電子的傳導帶則為 Ti 的 3d、4s 和 4p 軌域所組成。其中傳導帶比較低能量的部分的主要貢獻者為 Ti 3d 軌域。二氧化鈦光催化材料是當前最有應用潛力的一種光觸媒[28]。它的優點是：光照後不發生光腐蝕、耐酸鹼性好、化學性質穩定、對生物無毒性、來源豐富(世界消費量為 350 萬噸)、能隙較大，產生光生電子和電位的電位高，有很強的氧化性和還原性；另外，二氧化鈦為白色粉末，根據需要，可製成白色或無色塊體和薄膜[29]。以二氧化鈦作為耐久性的光觸媒已經被應用在處理各種環境問題上[30]。

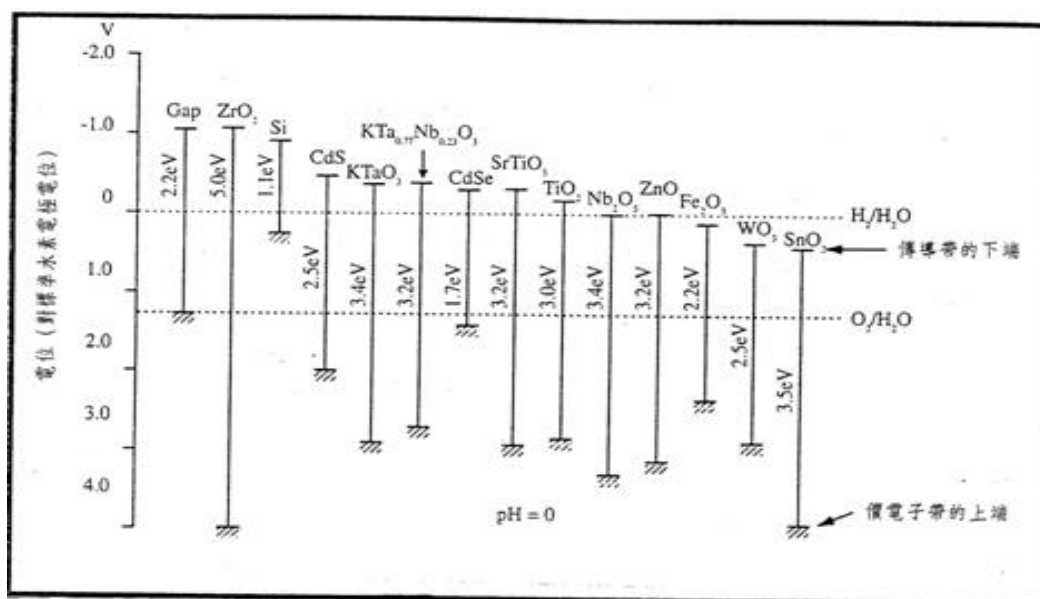


圖 3.7 半導體之能階間距分佈圖



3.4.3 奈米材料理論

奈米材料是指組成材料的基本單位，在三維空間中至少有一維在一百奈米以下，而一奈米的長度相當於十億分之一公尺。製造奈米材料的方法通常分為兩種，一種是由上而下 (top down)，是把一個巨觀的材料經外力作用，例如研磨方式，把它的尺寸由上而下減至奈米尺度範圍內；另外一種方式則是由下而上 (bottom up)，是以一種從小到大的方式產生奈米材料，例如化學反應生成等方法，把分子或原子狀態的物質，利用成核、結晶的途徑合成具有奈米尺度的材料[7]。

奈米碳管為例，奈米碳管是一種由碳原子所組成，且直徑僅有數個奈米大小的碳纖維，而不同直徑的奈米碳管會具有金屬和半導體兩種不同的性質，其軸向的硬度甚至高於鑽石，但徑向卻呈現完全不同的可撓性，可見奈米碳管是一種極為特殊的材料。另外，奈米碳管的抗張強度是鋼的一百倍，並可做為顯微探針等用途。此外，奈米材料因具有較高的表面能量，故使得奈米粒子的熔點與燒結溫度都比常規材料低，例如奈米鉛粒子的熔點是絕對溫度 288 K，比常規鉛粒子的 600 K 低了許多。除此之外，奈米材料常常具有與巨觀材料不同的光學性質，例如巨觀的金屬材料通常具有不同顏色的金屬光澤，但是奈米尺寸下的金屬材料幾乎都呈現黑色，這表示奈米金屬微粒對可見光的反射率相當低，導致其外表呈現黑色[31]。

奈米表面效應是奈米材料相當重要的一個特性，當粒子達到奈米尺度時，其表面原子占有所有原子的比例變高，導致粒子表面能量升高，因此奈米粒子具有較巨觀材料大的表面活性[32]。又因為表面原子的總數增加，使得奈米材料的比表面積大幅增加。這種表面能升高與比表面積增加的現象，稱為奈米表面效應。在實際產業應用方面，以化學機械研磨所使用的氧化鈾粉體為例，當氧化鈾粉體達到奈米等級之後，可以使被研磨的表面更加平坦化；在積層陶瓷電容方面，當其燒結體的粒徑在奈米等級時，介電常數可大大地提升；而在鋰離子二次電池方面，使用奈米等級的粉體當陰極材料時，電池所表現出來的電容量也會有明顯的提升[8]。



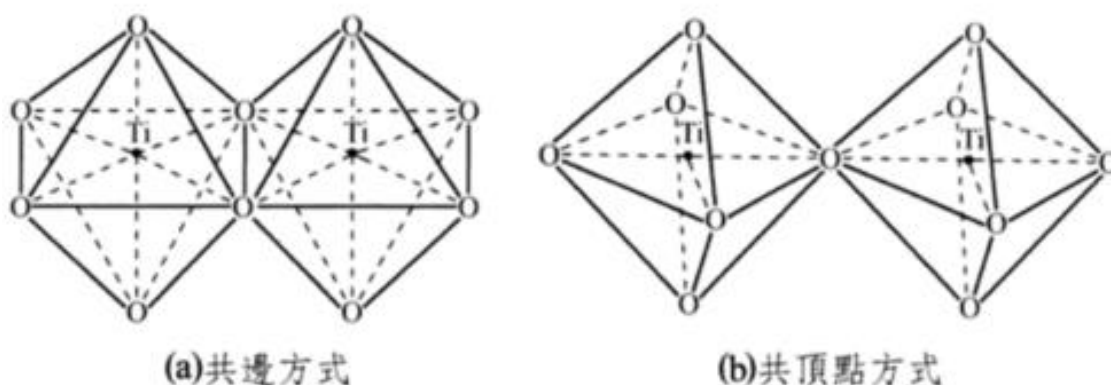
3.4.4 二氧化鈦晶型結構

二氧化鈦有 3 種晶型結構，分別為銳鈦礦(Anatase)、金紅石(Rutile)、板鈦礦(Brookite)。這些結構的共同點是，其組成結構的基本單位是 TiO_6 八面體，如圖 3.8。這些結構的區別在於，是由 TiO_6 八面體通過共用頂點還是共邊組成骨架，如圖 3.9。銳鈦礦和板鈦礦是二氧化鈦的低溫相，而金紅石是相對穩定的高溫相，在 $500\text{-}600^\circ\text{C}$ ，銳鈦礦和板鈦礦會轉變為不可逆的金紅石相。不同晶相還具有尺寸相關的穩定性，例如金紅石在 35 nm 以上是最穩定的晶相；銳鈦礦在 11 nm 以下是最穩定的晶相；而板鈦礦在 $11\text{-}35\text{ nm}$ 範圍內是最穩定的晶相。

氧化鈦晶胞(grain cell)的結構取決於 TiO_6 八面體是如何連接的[33]。銳鈦礦結構是由 TiO_6 八面體共邊組成，而金紅石和板鈦礦結構則是由 TiO_6 八面體共頂點且共邊組成。板鈦礦實際上可以看做是一種四面體結構，而金紅石和板鈦礦則是晶格稍微有畸變的八面體結構，其中又以銳鈦礦和金紅石最為常見。圖 3.10 為銳鈦礦和金紅石的晶體結構圖。



圖 3.8 TiO_6 八面體





第三章 文獻回顧

圖 3.9 TiO_6 八面體連接方式

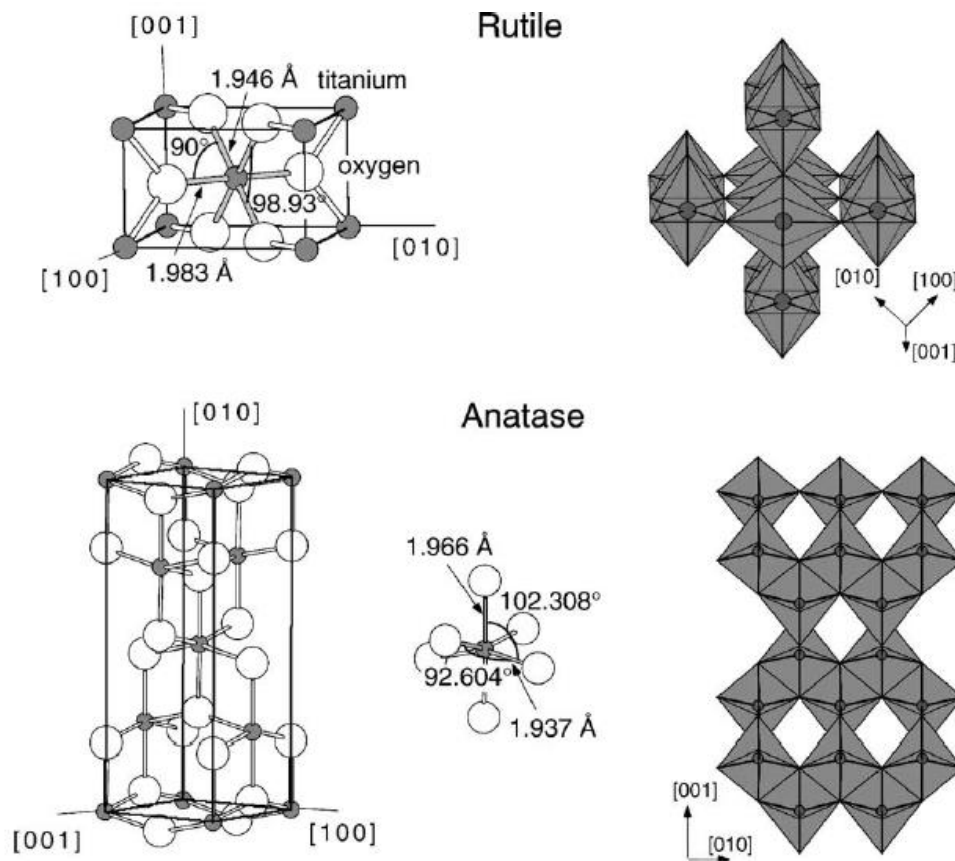


圖 3.10 銳鈦礦(Anatase)和金紅石(Rutile)的晶體結構圖



3.4.5 改質二氧化鈦成為可見光催化劑

由於二氧化鈦的能隙較大(3.2eV)，所以必須利用紫外光(波長小於 387 nm)激發才具有光催化效應，幾乎無法吸收可見光，紫外光佔陽光約 5%，而可見光佔陽光的 48%，這限制了二氧化鈦的應用[33]。半導體光催化的機制是：在一定波長的光激發後，價帶上的電子被激發，越過能隙進入導帶，同時在價帶上產生相對應的空穴。這些光生電子空穴對有一定能量可以自由遷移，但是光生電子和空穴都不穩定，極易複合，當沒有俘獲劑存在的時候，光生電子和空穴便簡單的複合並釋放熱能[9]。因此抑制光生載流子的複合，提高介面電子轉移速率常數是改善光催化性能的有效方法。利用離子摻雜來提高二氧化鈦的光催化性能，其主要原因有以下三點：

1. 引入中間能級，降低二氧化鈦的能隙

一方面由於摻雜金屬元素的 d 軌域和二氧化鈦晶格中 Ti 離子的 d 軌域的導帶重疊，使二氧化鈦導帶寬化下移，使能隙變窄，而使改質的二氧化鈦能吸收可見光，吸收光譜紅移，從而使光催化劑對可見光的響應。另一方面陰離子的摻雜產生的摻雜能級與二氧化鈦的價帶發生重疊，相當於使二氧化鈦的價帶變寬上移，而使其能隙變窄。或者，一些金屬元素摻雜後，和二氧化鈦形成氧化物固溶體，這些金屬能隙比二氧化鈦要窄，從而吸收可見光。

2. 成為電子和空穴的淺勢捕獲阱，抑制光生電子和空穴的複合

在二氧化鈦中引入一些摻雜物能在二氧化鈦能隙中引入供體(donor)和受體(acceptor)等雜質能級，對二氧化鈦本征激發產生的光生載流子起到了俘獲阱的作用[10]。適量的淺勢俘獲阱可以促進受激載流子在二氧化鈦粒子內部的擴散過程，延長受激載流子的壽命，大大減少電子空穴對的表面複合，增強光催化劑的光催化活性，如圖 3.11。

如摻雜金屬離子，因為金屬離子是電子的有效接收體，可以捕獲導帶中的電子，而金屬離子對電子的爭奪，使得光生電子和空穴的分離，減少了二氧化鈦表面光生電子與光生空穴的複合，從而使二氧化鈦表面在光輻射作用下產生更多的氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)提高催化活性[11]。但如果摻雜量過大，過多的俘獲阱易造成受激載流子在遷移的過程中失活[34]。

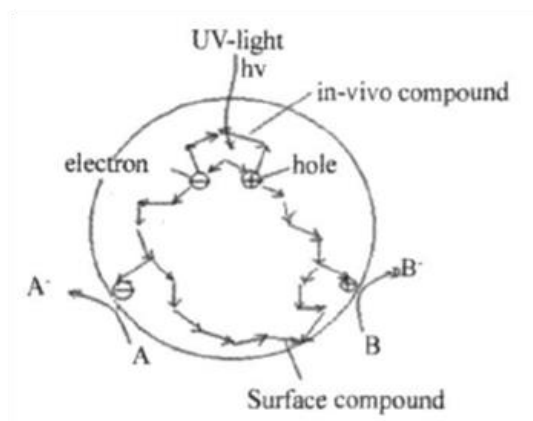


圖 3.11 光生電子和空穴的產生、分離和複合

3. 造成晶格缺陷，增加氧空位

金屬離子進入二氧化鈦晶格內，取代了原來鈦原子的位置，或非金屬原子摻雜取代氧原子的位置，從而產生了局部晶格畸變或形成了新的氧空位，這些作用均會對晶型轉變產生一定的作用。例如 Y^{3+} 、 Eu^{3+} 摻雜到二氧化鈦中取代晶格位置上的 Ti^{4+} ，這樣二氧化鈦晶格中將缺少一個電子，為了平衡電價，必然在近鄰位形成氧空位，同時 Ti^{4+} 被還原為 Ti^{3+} 。若F摻入二氧化鈦後進入晶格並取代氧，則產生氧空位。氧空位和 Ti^{3+} 還原中心可以充當反應活性位置，固體表面氧空位數量的增加將使表面光化學過程紅移至可見光區。圖3.12為二氧化鈦氧空位示意圖[35]。

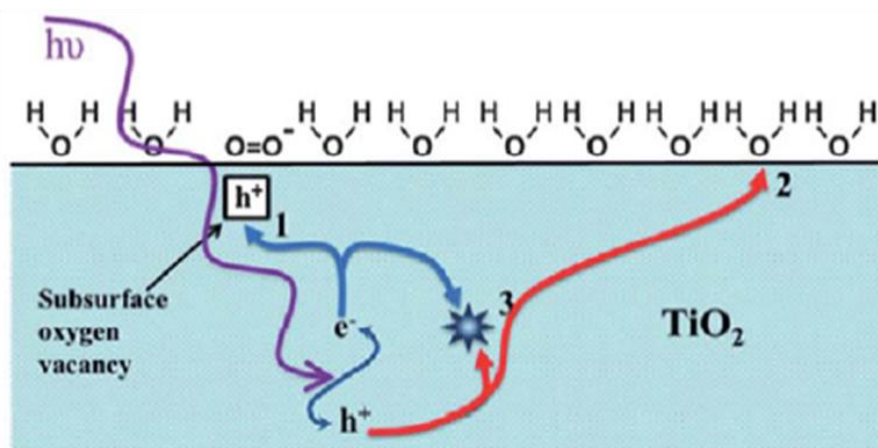


圖 3.12 二氧化鈦氧空位示意圖

改質二氧化鈦一般可分成金屬摻雜、非金屬摻雜、雙元素共摻雜(co-doped)以及三元素共摻雜(tri-doped)，其中三元素共摻雜改質二氧化鈦的報導很少，且對其機制的報導更少，以下為不同摻雜類型的介紹：

4. 金屬摻雜



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

金屬摻雜二氧化鈦被認為是第二代光催化劑，具有提高光催化活性，甚至部分金屬摻雜產生了顯著的可見光活性。由於金屬離子的差異，一些條件下金屬離子並沒有摻雜進入晶格，而是以單質或氧化物形式分散在二氧化鈦奈米粒子晶格表面形成複合結構。而金屬摻雜二氧化鈦的光催化活性影響因素非常複雜，與摻雜元素的d電子構型、摻雜物濃度、在晶格中形成的電子能級、摻雜物質的分佈、電子受體濃度以及光強等因素均有關。二氧化鈦常見的金屬摻雜元素有Fe、Cr、Cu、Au、W、Co等[13]。

稀土元素又稱鑷系元素，亦屬於金屬元素的一種，而稀土元素在中國擁有豐富的礦產資源，成礦條件優越，儲量位居世界之首。稀土離子具有4f電子，易產生多電子組態，其氧化物也具有多晶型、吸附選擇性強、電子導電性和熱穩定性好等特點[34]，由於其特殊的電子層結構和較大的離子半徑，在二氧化鈦中摻雜後會引起晶格膨脹，而適度的晶格膨脹有利於光生載流子的分離，許多研究針對稀土元素對二氧化鈦進行改質，並且有顯著提高二氧化鈦的光催化活性，常見利用於改質二氧化鈦的稀土元素有La、Ce、Er、Pr、Gd、Nd、Sm、Eu[12][36]。

5. 非金屬摻雜

非金屬摻雜二氧化鈦被認為是使二氧化鈦產生可見光響應的最有效方法之一，因此被稱為第三代催化劑。非金屬摻雜二氧化鈦的研究始於2001年Asahi在Science發表的氮摻雜的報導，隨後摻雜元素幾乎涉及所有非氫和非惰性元素的非金屬元素。非金屬摻雜可以取代二氧化鈦中的 O^{2-} ，並且能減小能隙的寬度，提升二氧化鈦在可見光吸收的範圍，增強光催化活性。二氧化鈦常見的非金屬摻雜元素有N、S、C、F、B、P等[13]。

6. 雙元素共摻雜

利用雙元素來摻雜改質二氧化鈦是很常用的一種方法，利用共摻雜離子間以不同機制協同作用(Synergistic effect)來提高二氧化鈦的光催化活性，它可以取各摻雜離子的優勢來互補，不僅提高了紫外光下的光催化效率，也使二氧化鈦吸收光譜擴展到紫外光區，提高了其在可見光下的光催化能力。常見的雙元素共摻雜有金屬與金屬(metal-metal)共摻雜、非金屬與非金屬(non metal-non metal)共摻雜、金屬與非金屬(metal-non metal)共摻雜[14]。



4. 第四章 研究方法及步驟

本計畫由中原大學環境工程學系執行，規劃以一年時間完成商業化光催化模組之開發以及污染場址實廠測試。

前期(106 年)計畫本團隊已經完成了可見光催化劑的製備和物理、化學性質特性分析，並利用有機物光催化降解反應體系進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，獲得了良好的光催化效果，目前這一步本研究團隊已經積累了一定的研究成果。現階段欲將光催化模組及吸附模組結合使用，以減少光催化劑及吸附劑之消耗，使其擁有更長的使用壽命，並和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析。在這些研究基礎之上，本計畫案接下來要完善優化商業化模組。因此，從光催化模組組裝、現場測試結果反饋並完善優化、商業化模組成品這三個角度來看，研究方法如圖 4.1 所示，主要分為三大部分，最終綜合評估商業化模組參數，並安裝 BTEX 之即時監測裝置，對地下揮發性有機污染氣體進行即時監測，運行綜合效率評估，每日去除的總有機物含量等進行計算。使其具有商業化、多功能化應用價值。

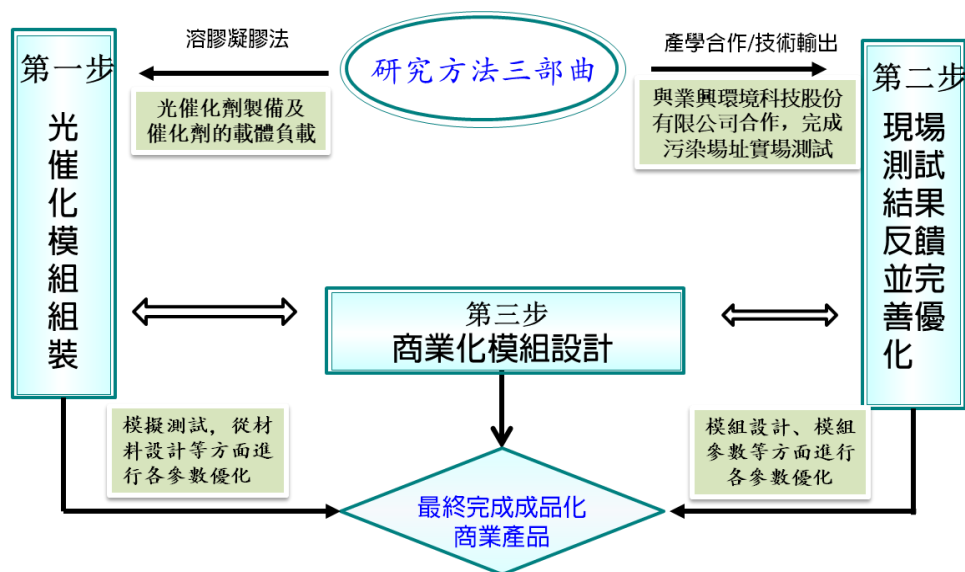


圖 4.1 研究方法三部曲框架圖

第一部分：製作商業化光催化模組

利用溶膠凝膠法合成二氧化鈦光觸媒，並以硝酸鋇水合物做為鋇源，利用紫外光與可見光活性測試並選出最佳鋇摻雜二氧化鈦。再以一定的優化比例負載於玻璃纖維棉上製備以高比表面積的催化複合材料。之後，將光觸媒均勻分佈在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽中，將污染物氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃度通入光催化反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

當污染物濃度以及光觸媒吸附達平衡則打開光源，光源為(UV-vis)紫外到可見光範圍，接著使氣體流入長寬高分別為 28.5cm、17 cm、15 cm 之容量 7L 之吸附反應槽，透過設計使污染物充分與吸附劑接觸，反應時間為 2 小時，在腔體內的停留時間為 2 min，最後將反應後之氣體通入固定式光離子偵測器 (PIDScan) 測定該濃度，評估光催化去除待測污染物效率。最後完成光源、催化載體的填充和設備各部件的組裝，針對實場 SVE 尾氣降解端的設備進行製作，設計兼具經濟、低耗能以及低污染的光催化模組。

第二部分：現場測試結果反饋並完善優化

本計畫結合中原大學環境工程學系以及某科技股份有限公司共同執行，以一年時間完成實驗室規模光催化模組之開發以及污染場址實場測試。圖 4.2 所示為本研究計畫之實驗架構，本計畫擬前半年於實驗室開發商業化測試模組，並以實驗室訂購標準氣體進行光催化及吸附效能測試，隨後選擇去除效率之最佳光觸媒及吸附劑量，再於後半年完成污染廠址測試，並於某公司協助操作之實際污染場址進行 SVE 法尾氣測試，隨即進行光催化效能評估，但由於合作之顧問公司因尚未取得污染場址之操作許可，因此後半年改為以實驗室設備對商業化模組使用參數進行優化。

第三部分：商業化模組成品

針對空氣中揮發性有機污染物例如甲苯、苯及丙酮進行可見光條件下的光催化降解實驗，利用市售 P25、純二氧化鈦、鏽摻雜二氧化鈦並塗佈於多孔性載體後進行效能比較，並選擇其最佳適合條件。通過模擬測試，從材料設計、模組設計、模組參數等方面進行各參數優化，最終完成成品化商業產品，對揮發性有機物去除率達到 75 % 以上。



第四章 研究方法及步驟

4.1 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作項目												
光催化商業模組												
實驗室標準有機氣體光催化測試												
一定的優化比例負載於多孔載體上（三氧化二鋁、活性炭、分子篩等）												
光催化模組進行負載載體後的有機物去除效率評估												
探討循環時間，揮發性有機物去除率												
從材料設計、模組設計、模組參數、耗能等方面進行各參數優化，並將之設計為可拆卸更替之商業化模組												
期中報告						※						
期末報告												※
工作進度估計百分比 （ 累 積 數 ）	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	95%	100%



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

4.2 光觸媒製備

光催化研究中所涉及的光催化材料大多在微奈米級，相對於大尺度的材料，本研究之光觸媒物質粒徑小且均勻分布的奈米材料，表現出更好的物理和化學特性，這對於材料的性能改善非常重要。目前，奈米二氧化鈦的合成方法有許多種，其中主要的合成方法有：溶膠-凝膠法(Sol-gel method)、水熱和溶劑熱法(Hydrothermal method and Solvothermal method)、微乳液法(Microemulsion method)等，本計劃案擬採用溶膠-凝膠法。

4.2.1 實驗藥品

本研究所使用的藥品如下：

表 4.1 藥品清單

藥品	公司
鈦酸四異丙酯	鑫明化工儀器有限公司
硝酸釷水合物	鑫明化工儀器有限公司
無水乙醇	鑫明化工儀器有限公司
硝酸	鑫明化工儀器有限公司



4.2.2 儀器設備及型號

表 4.2 實驗用儀器型號表

儀器設備及型號	
TVOC偵測器	GDS- PIDScan800
零氣發生器	Sabio-MODEL 1001
電子天平	SQP
純水機	ELGA purelab flex
高溫烘箱	德記儀器有限公司DX-20
馬弗爐	DENG YNG, DF-40
磁石攪拌機	德記儀器有限公司HJ-6
超聲波震盪水浴器	KQ-400KDB
Mass Flow Controller	Brooks
反應艙	英特玻璃訂製儀器公司
350 W氬弧燈	昌盛光電股份有限公司
Philips TUV TL Mini	荷蘭皇家飛利浦電子公司
Philips TL T8 18W	荷蘭皇家飛利浦電子公司
東亞FL20D18	中國電器股份有限公司
水平搖晃震盪機	利政科技
傅立葉紅外光譜儀	Magna-IR 750
紫外-可見漫反射光譜	A Varian Cary 100
掃描式電子顯微鏡(SEM)	Hitachi S3000N Hi-SEM
HITACHI SEM附元素分析系統	SEM-EDX
比表面積分析儀	Gemini 2390
X光粉末繞射儀(XRD)	Bruker, D8 ADVANCE ECO
新加坡固定式VOC氣體監測儀	PIDScan 800



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

4.2.3 製備釷摻雜二氧化鈦

如表 4.3 所示，釷摻雜製備二氧化鈦的方法其中區別在於：在反應催化劑中添加特定重量百分比之稀土金屬萃取物，0.5 wt%(0.932g)、1 wt%(1.864 g)、3 wt%(5.592g)、5wt%(9.32g)，使用實驗室等級標準品硝酸釷六水合物，可以在穩定的化學系統之中，盡可能地保持溶膠凝膠體系之穩定，首先將 50 毫升之乙醇和 10 毫升之鈦酸四丁酯均勻混和，形成反應前驅液；將 4.5 毫升之濃硝酸(5M)與 4.5 毫升之去離子水均勻混和，再加入 x 克重之硝酸釷六水合物，此為溶膠凝膠催化劑；將溶膠催化劑滴加到劇烈攪拌中之反應前驅物之中，反應一段時間後，逐漸生成透明凝膠；在反應兩小時後，將溶液倒入密閉容器靜置於 60°C 烘箱中並且陳化 12 小時，使其凝膠鍵結更加穩固，而後再將樣品置於室溫下過夜，得半透明濃稠狀之二氧化鈦溶膠；將溶膠樣品倒出，於 80°C 乾燥 12 小時，取出研磨後，最後置入高溫爐中 400°C 鍛燒 2 小時(升溫速率設定為 70°C/min)；經研磨後，即可得到具銳鈦礦及金紅石混合晶相之釷摻雜二氧化鈦，可參考圖 4.3。

表 4.3 釷摻雜二氧化鈦光觸媒之硝酸釷水合物添加量及其摻雜比例

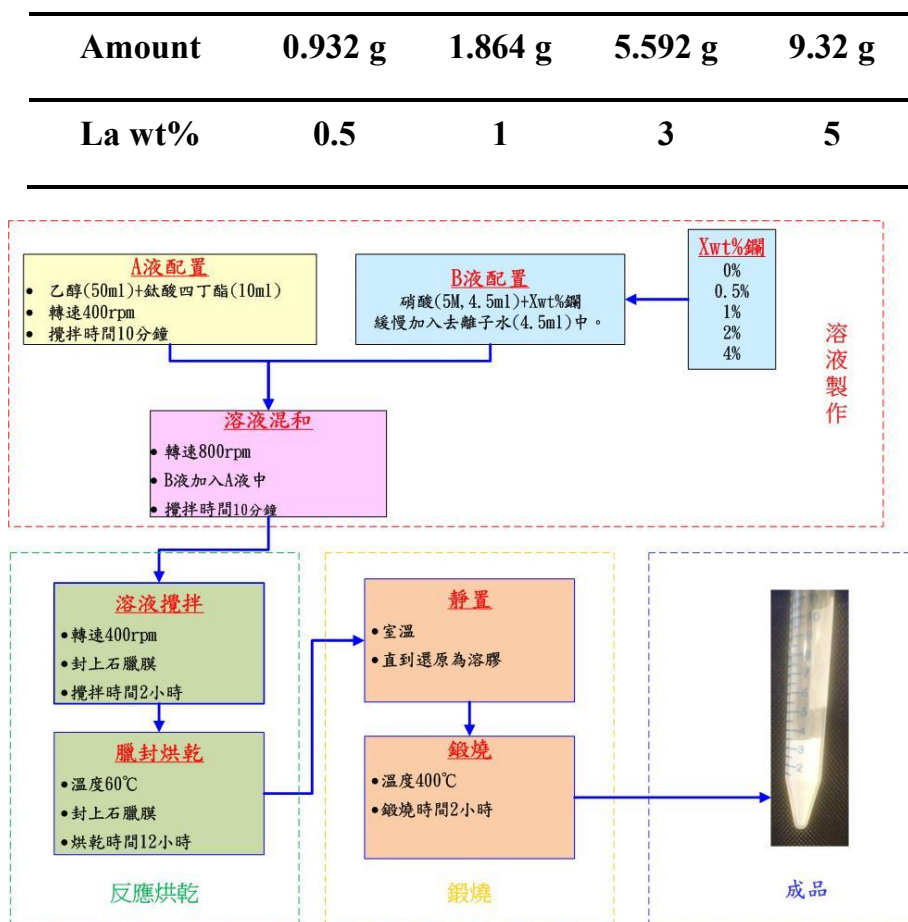


圖 4.2 釷摻雜二氧化鈦製備流程圖



4.2.4 光催化玻璃纖維布載體製備方法

本計畫採定玻璃纖維布(後稱玻纖布)作為光觸媒之載體，而其使用之鑷摻雜二氧化鈦至被方法與上述方法相似，首先將長度 200 公分乘 48 公分長之玻纖布進行進行，切割裁切為 50 公分乘 48 公分類正方形布。

其次將 50 毫升之乙醇和 10 毫升之鈦酸四丁酯均勻混和，形成反應前驅液；將 4.5 毫升之濃硝酸(5M)與 4.5 毫升之去離子水均勻混和，再加入 x 克重之硝酸鑷六水合物，此為溶膠凝膠催化劑；將溶膠催化劑滴加到劇烈攪拌中之反應前驅物之中，反應一段時間後，逐漸生成透明凝膠；在反應兩小時後，將溶液倒入密閉容器靜置於 60°C 烘箱中並且陳化 12 小時，使其凝膠鍵結更加穩固，而後再將樣品置於室溫下過夜，得半透明濃稠狀之二氧化鈦溶膠；將 50 公分乘 48 公分類正方形布浸入溶膠中，浸泡 50 分鐘，其後置入烘箱以溫度 80°C 烘乾之，其後置入高溫爐中 400°C 鍛燒 2 小時(升溫速率設定為 70°C/min)，最後用超音波震盪機進行清洗，洗去其上揮發性有機溶劑，可參考圖 4.3。

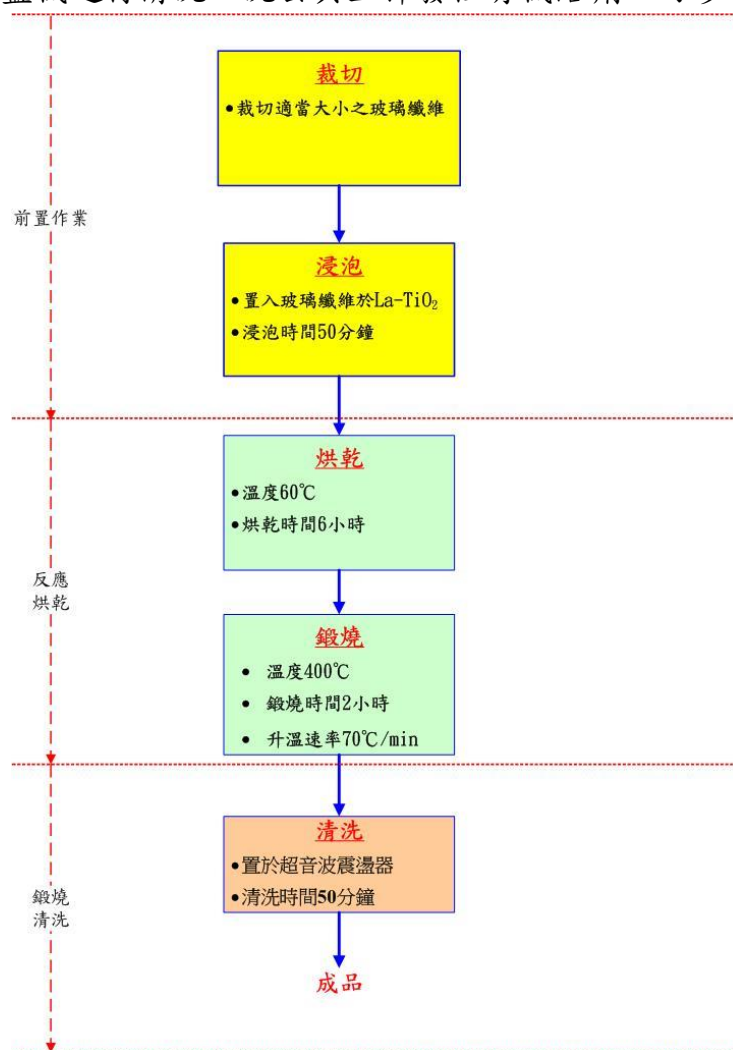


圖 4.3 光催化玻纖布載體製備流程圖



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

4.3 光催化模組之開發

4.3.1 光催化性能測試

本計畫前半年開始以光觸媒製備為主，光觸媒材料之光催化性能以光催化降解 BTEX 揮發性有機氣體加以評估，光催化降解 BTEX 之反應流程如圖 4.4 所示。本研究經過一個光催化降解甲苯的反應系統進行去除空氣污染物之光催化反應，如下圖所示，一開始先吸取外部空氣經由零氣發生器經高溫處理，將空氣中多餘的雜質燒掉，產出新鮮之空氣，再和標準甲苯氣體鋼瓶進行混合，質子流量器控制污染物濃度以及流量，再經加濕器模擬環境濕度(濕度 0~80 度)，通過光催化反應器進行光催化反應，其中反應槽內甲苯濃度皆由 PIDScan 800 紀錄儲存，再經由電腦導出所需的數據值，最後反應完之廢氣經由抽氣系統吸附回收，以避免多餘的污染氣體排放至環境進行污染。

本系統使之管線皆採用 1/2” 之鐵氟龍管(PTFE)，使 Swagelok 式氣體接頭；採用用明陽特殊氣體公司提供之標準氣體氣瓶，來源氣使用 800ppm 甲苯高濃度氣瓶；使用零級空氣產生器，製備稀釋用途之零級空氣(乾燥且純淨之空氣)；使用 Brooks 之質量流量控制器及控制裝置，以準確控制空氣出流量，以及廣達電子所製作之氣體流量控制裝置；使用石英材質並填充石英球，作為自製之氣體混和槽，其中使用石英球可在混和槽內讓氣體產生物理擾動，將氣體充分混和；使用不鏽鋼及石英玻璃鑄造之氣體反應槽，總槽體之體積為 4.5 升；其中額外使用紅外線及紫外線之特定波長濾波片各一片；使用鐵氟龍三通接頭作為 TVOC 採樣分析口；使用 Thermo Fisher Scientific 公司所供應之一氧化氮分析儀；使用新加坡 GDSGDS- PIDScan800 分析 TVOC。

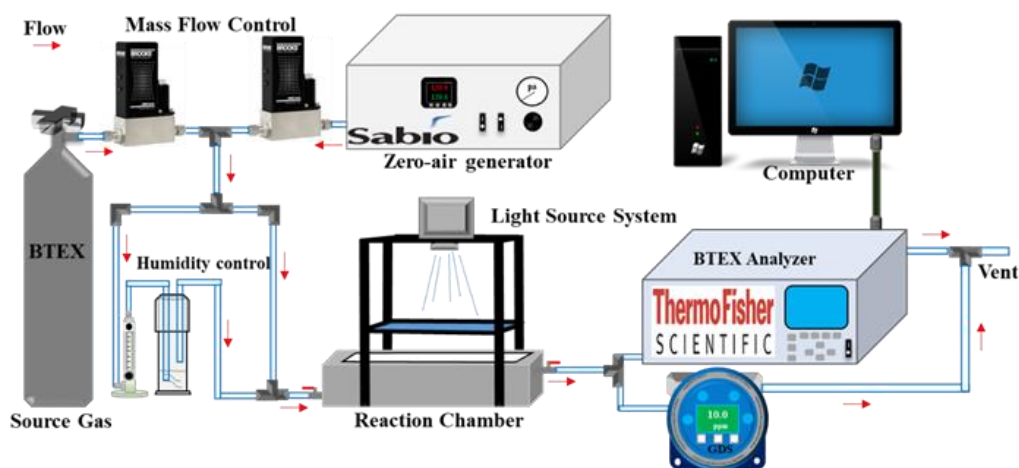


圖 4.4 光催化降解 BTEX 之反應流程之設計



4.3.2 污染廠址選擇及現場污染物調查

依目前公告為地下水污染控制場址及整治場址資料，顯示油品類污染為國內常見之污染類型，其污染指標一般均採 BTEX(苯 Benzene、甲苯 Toluene、乙苯 Ethylbenzene、二甲苯 Xylenes；簡稱 BTEX)，BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)是眾所皆知的污染物，大多數芳香烴對人類有潛在毒性、突變或致癌作用。

107 年前期要對選定的污染廠址（加油站）進行調查，利用 SVE 技術進行抽樣調查並進行色譜分析，分析主要揮發性有機物的成分組成及含量。具體講，需要再不同溫濕度環境中，分析 VOCs 成分有何不同，有助於後期進行實驗室二元或三元有機污染氣體的降解適應，並在不同溫濕度情況下進行光催化實驗效果測試。

4.3.3 光催化模組設計

光觸媒製備完成後需評估其光催化降解待測污染物性能，將光觸媒置入在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽，如下圖 4.5，表示其容量 6785.84mL，本模組使之管線皆採用 1/2”之鐵氟龍管(PTFE)，使用 Swagelok 式氣體接頭經由質子流量器設定甲苯氣體濃度以及流量(3L/min)，設定其停留時間為 2.23 mins，在經由浮子流量計調整所需要模擬環境的濕度(濕度 0~80%)氣體流速以及污染物濃度至 15ppmV，使用鐵氟龍管連於反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，使之甲苯氣濃度達 15ppmV，後在黑暗條件下（約 30 分鐘）進行光觸媒吸附污染物之調查，再將紫外光燈（Philips TL T8 18W）、可見光(東亞 FL20D18)開啟，反應時間為 120 分鐘，最後將反應後之氣體透由固定式 VOC 氣體監測儀分析計算污染降解程度與降解曲線，評估光催化去除待測污染物效率。

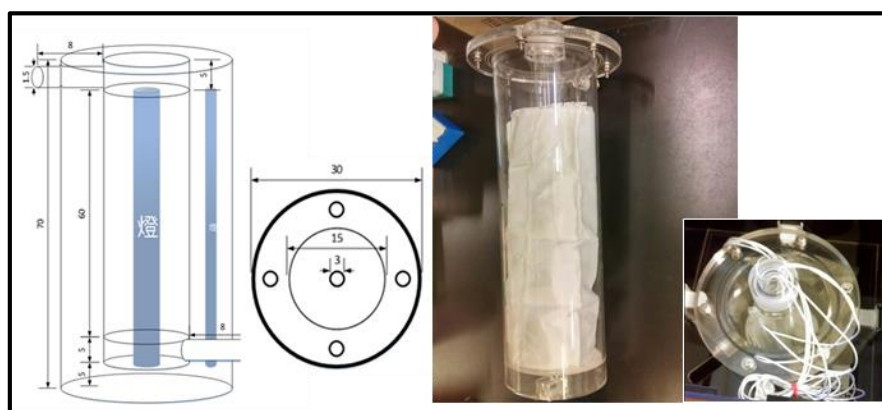


圖 4.5 光催化商業化模組設計圖（圖左）及實物圖（圖右）



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

4.3.4 光催化模組效益評估

光觸媒製備完成後需評估其光催化降解 BTEX 性能，將 0.1g 光觸媒均勻塗布在直徑 9.5 cm 之圓形玻璃盤上，接著置入光催化反應槽中，將 BTEX 氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃度通入反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，當污染物濃度達到平衡時則打開光源，光源為可見光或者紫外光，反應時間為 2 小時，最後將反應後之氣體通入 TVOC 偵測器測定該濃度，評估光催化去除 BTEX 效率。



4.4 吸附模組之開發

在完成光觸媒製備後，本計畫研究重心為開發吸附模組，透過在光催化模組後端的吸附模組將殘存之尾氣進行吸附處理，吸附模組設計如圖 4.6 所示，本模組設計為長 30.5cm、寬 19cm、高 20cm 之壓克力模組，模組使用方式為將活性碳平均放置於長 28.5cm、寬 17cm、網格大小 0.1cm 之不鏽鋼網狀載體上，接著將載體裝置於模組中長 0.5cm、寬 0.4cm 之凹槽處固定，最後將模組鎖緊密封後通入吸附氣體進行測試。

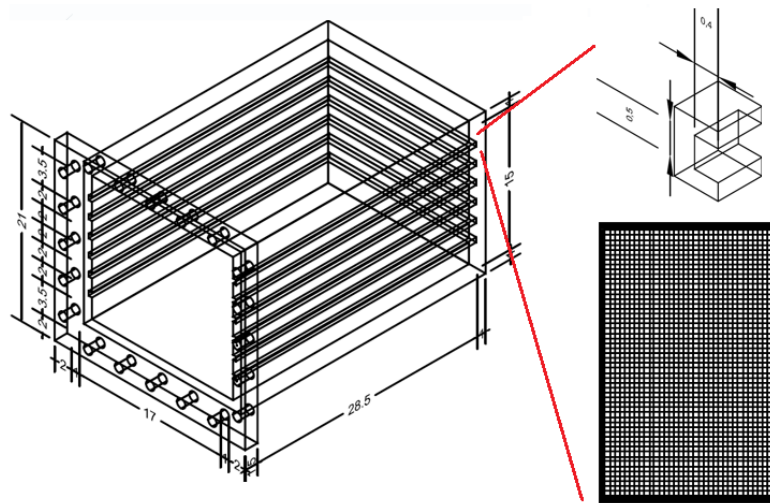


圖 4.6 活性碳吸附模組設計



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

4.4.1 吸附模組效益評估

吸附模組製備完成後須評估不同數量活性碳製入後吸附 BTEX 性能，如圖 4.7、圖 4.8 所示，將所需重量之活性碳平均分布於不鏽鋼網狀載體上，接著透過質量流量計調整 BTEX 氣體流速及污染物濃度並透過氣體分流直接將氣體通入 TVOC 偵測器中，待其濃度達到平衡時再將氣體通入反應艙中，反應時間為 2 小時，最後透過 TVOC 偵測器測定之濃度評估吸附模組吸附 BTEX 效率。



圖 4.7 吸附模組實際使用正面圖



圖 4.8 吸附模組設計實際使用側面圖



4.5 組裝“光催化+吸附”多模塊的商業模組

為在商業上具有應用性和價值意義，本研究進行“光催化+吸附”相輔相成的多模塊組裝模式，在安裝上本研究使用“隨插即用”的模式，如圖 4.9 所示。

“一方面，光催化劑可以徹底降解有機污染成分；另一方面，在光催化活性不足情況下，活性炭吸附可以起到暫時的吸附的作用，這樣更加有利於本研究再生催化劑的動作或者更換新的催化劑。透過 TVOC 偵測器，進行綜合效率評估、每日去除的總有機物含量等進行計算。

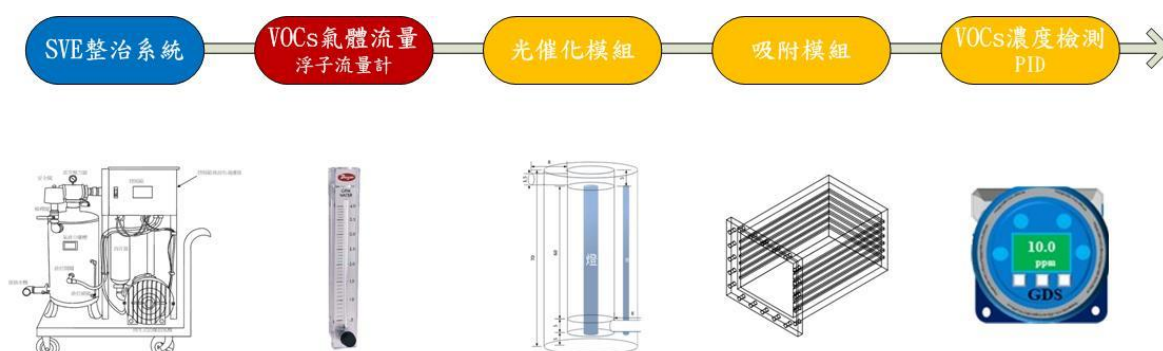


圖 4.9 土壤廢氣之實場商業模組設計圖

4.5.1 商業化模組設計

商業化模組未達到其使用方便性，將使用“隨插即用”的模式，透過質量流量計使進氣量降低至能在模組中充分進行反應之流量，接著使氣體流入至光催化模組中進行反應，經過光催化模組降解後殘存之污染物再透過後端之吸附模組進行吸附，最後透過透過 TVOC 偵測器進行綜合效率評估、每日去除的總有機物含量等進行計算。

4.5.2 商業化模組的優化和綜合性能評估

針對空氣中揮發性有機污染物例如甲苯、苯及丙酮進行可見光條件下的光催化降解實驗，利用市售 P25、純二氧化鈦、鏽摻雜二氧化鈦並塗佈於多孔性載體後進行效能比較，並選擇其最佳適合條件。通過模擬測試，從材料設計、模組設計、模組參數等方面進行各參數優化，最終完成成品化商業產品，對揮發性有機物去除率達到 75 % 以上，接著透過吸附模組進行殘存揮發性有機氣體的吸附，最終對揮發性有機物去除率可達到 X% 以上。



第五章 結果與討論

5.1 二氧化鈦物化性質分析

本章節旨是利用不同表徵分析手段針對二氧化鈦、釩摻雜二氧化鈦進行分析。分析項目包括 X 射線衍射儀(XRD)、傅立葉紅外光譜儀(FT-IR)、掃描式電子顯微鏡(SEM)、比表面積分析儀(BET)。

5.1.1 XRD 分析

本實驗利用不同鍛燒溫度 1 wt%La/TiO₂ 二氧化鈦進行 XRD 特性分析。根據資料庫(JCPDS No.21-1272)，其 2θ 特徵峰在 25.28、37.86、48.09、53.94、62.78、70.03、75.73°，而 600°C 主要晶型結構為金紅石相，原因為高溫所引起的相轉變，根據波峰強度越強，而結晶性越好之觀點，代表二氧化鈦結晶性最好的為鍛燒溫度 600°C，其次為 500°C，而 400°C 結晶性最差，圖 5.1 為不同鍛燒溫度之釩摻雜二氧化鈦 XRD 分析圖，由結果得知，釩摻雜二氧化鈦在鍛燒溫度為 400°C 及 500°C 皆有明顯銳鈦礦相，而在 600°C 則出現少量金紅石相，但仍然以銳鈦礦相為主，可以得知，釩元素摻雜能夠抑制銳鈦礦轉變為金紅石，更能提高光催化活性，另外也可以得知，釩摻雜二氧化鈦半峰寬皆比純二氧化鈦寬，所以推估釩摻雜能夠使晶粒尺寸變小，增加催化劑本身之表面積，為影響光催化活性的主要因子之一，因此本實驗依據 400°C 作為往後之鍛燒溫度。

而根據謝樂(Scherrer)公式可以估算晶粒大小，即可推導出特徵峰半峰寬越寬，晶粒大小就越小，由結果得知純二氧化鈦鍛燒溫度越高，平均晶粒大小越大。

謝樂公式：

$$D = k\lambda/(\beta\cos\theta)$$

D：粒徑大小(nm)

k：常數值 1(球形為 0.89)

λ：X 射線波長(1.5405 Å)

β：衍射峰半高寬

θ：衍射角

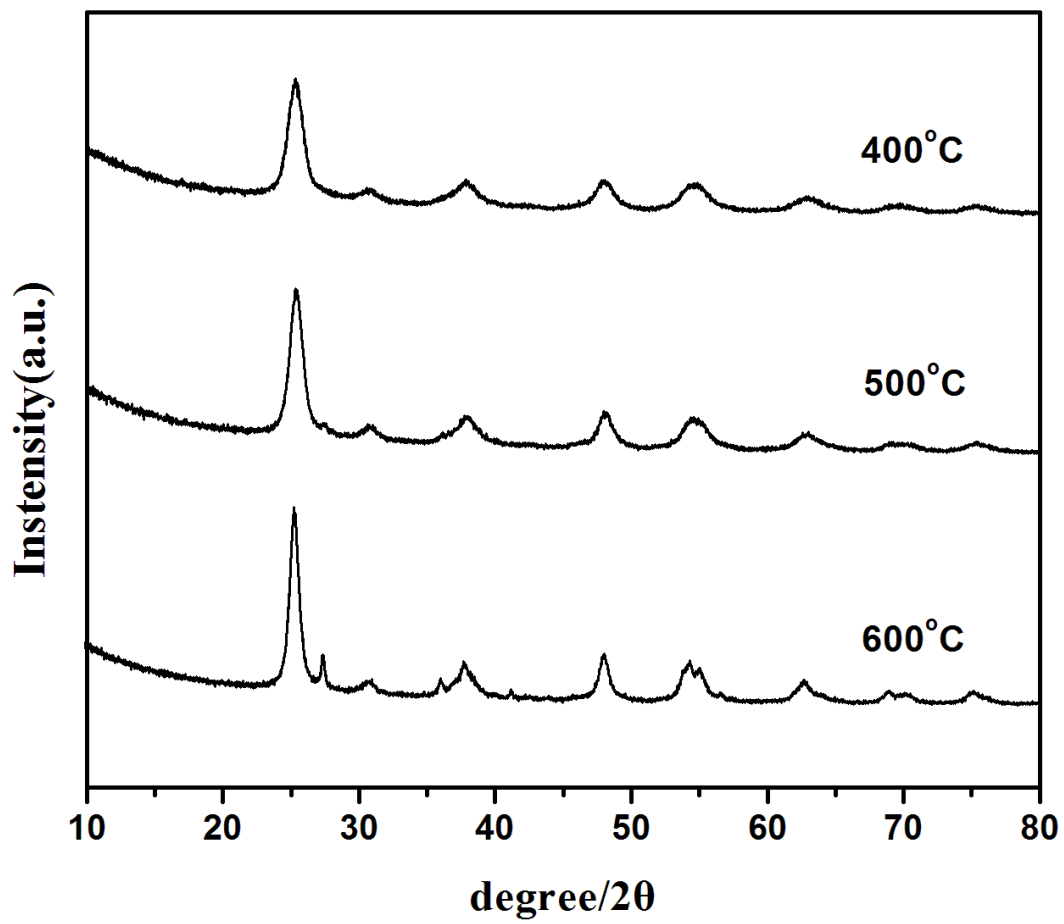


圖 5.1 不同鍛燒溫度之銅摻雜二氧化鈦 XRD 分析圖



5.1.2 FT-IR 分析

使用傅立葉轉換紅外線光譜儀來進行 La/TiO₂ 之透射分析，其原理為利用紅外線與分子間作用所產生的振動並記錄為紅外線光譜圖，以鑑定分子官能基。本研究紅外線波數範圍為 4000~500 cm⁻¹，紅外線來回掃描 35 次，鑑定純二氧化鈦及 1 wt% La/TiO₂ 的特性。

本實驗利用純二氧化鈦、1 wt% La/TiO₂ 之最佳鏷摻雜二氧化鈦進行 FT-IR 特性分析。圖 5.2 為二氧化鈦 FT-IR 光譜圖，根據文獻指出，特徵峰在 1620-1710 cm⁻¹ 和 2800-3760 cm⁻¹ 分別為水分子中羥基基團之拉伸振動及彎曲振動，此兩個羥基基團特徵峰強度越強，代表樣品中水含量較多，由此可以判斷，(b) 鏷摻雜二氧化鈦水含量最多，其次為圖 5.2(a) 純二氧化鈦水含量最少，所以根據光催化機制推估，鏷摻雜二氧化鈦受光照激發後，能產出較多量的 ·OH，進而影響光催化活性。根據文獻指出，特徵峰接近 480、520 及 670 cm⁻¹ 分別為銳鈦礦及金紅石之典型 Ti-O-Ti 振動，由圖 5.2(a)(b) 可知，二氧化鈦皆屬於銳鈦礦型，可由 XRD 結果圖證明。

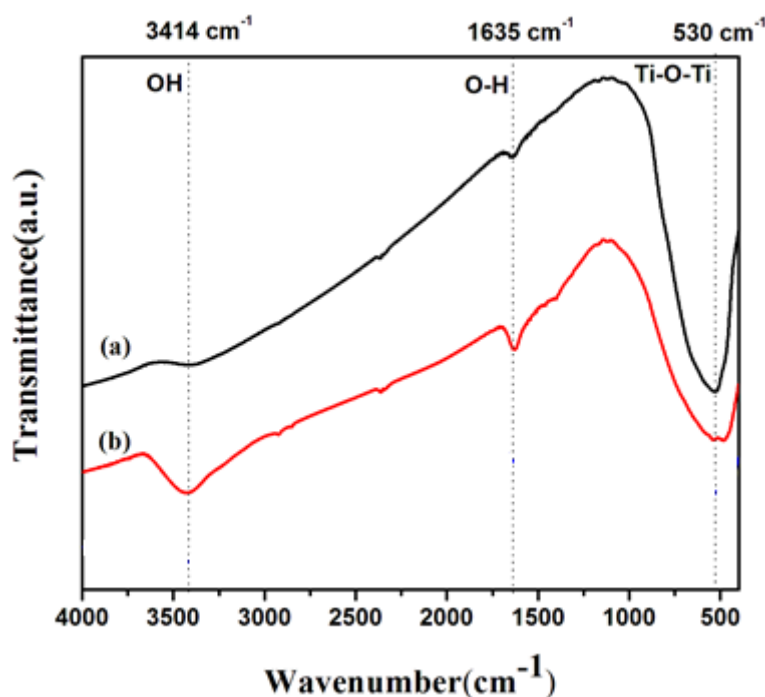


圖 5.2(a) 純 TiO₂ 及 (b) 1 wt% La/TiO₂ FTIR 圖



5.1.3 SEM 表面形貌分析

為了觀察製備之 La/TiO_2 表面形態並且與商用 P25 進行比較，本階段以掃描式電子顯微鏡來進行觀測，放大倍率為 10k 倍及 20k 倍，為商用 P25 及 1 wt% La/TiO_2 SEM 圖，可以看到商用 P25 的表面形貌為細小顆粒，而 1 wt% La/TiO_2 則呈現較為大顆粒，這是由於經含鋇粉末具有黏性所導致表面形貌的改變，而在粒子大小的部份，兩者有明顯的差異，如圖 5.3。

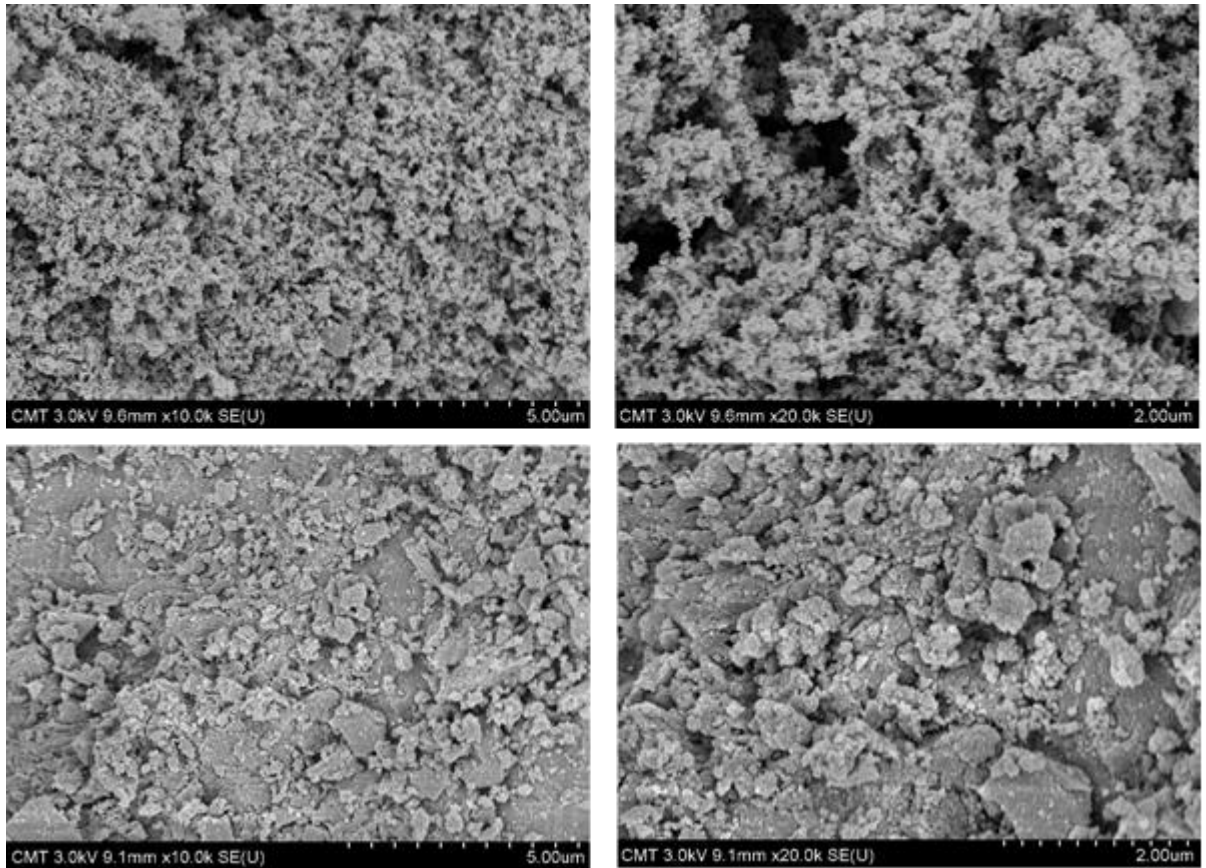


圖 5.3 商用 P25 及 1 wt% La/TiO_2 SEM 圖

- (a)為商用 P25 10k 倍 (b)為商用 P25 20k 倍
(c)為 1 wt% La/TiO_2 10k 倍 (d)為 1 wt% La/TiO_2 20k 倍



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

5.1.4 BET 分析

本實驗利用市售、1 wt% La/TiO₂ 最佳鑷摻雜二氧化鈦進行 BET 比表面積分析，如表 5.1。說明摻雜後之二氧化鈦比表面積及孔洞體積明顯增加，有助於增加催化劑與污染物的接觸機率，以提高去除污染物之效果。所以鑷摻雜二氧化鈦具有較高之比表面積(101.90 m³/g)。

表 5.1 BET 測定結果

	P ₂₅	1 wt% La/TiO ₂
Surface Area(m ³ /g)	56	101.90
Pore Volume(cm ³ /g)	0.25	0.19
Pore Size(nm)	17.5	5.47



5.2 光觸媒效能測試

本節探討以鍺摻雜二氧化鈦對甲苯降解之光催化測試，甲苯初始濃度為 15ppm，光源為 Philips TL T8 18W(UVA)、Philips TUV TL Mini(UVC)、350W 之氙燈，實驗時間設定 30 分鐘，透過紫外光測試光觸媒性能。以下會針對不同光源、不同催化劑以及不同濕度對於降解甲苯的探討。

5.2.1 不同光源對於降解甲苯之比較

圖 5.4 為不同光源下 1 wt% La-TiO₂ 及市售光催化劑(P25)對甲苯之去除率，其使用之光源為 Philips TL T8 18W(UVA)、Philips TUV TL Mini(UVC)及 350W 之氙燈，甲苯標定濃度為 15ppm，進氣流量為 3L/min。

由實驗結果可得知 P25 在可見光下對甲苯幾乎不會有降解效果，而 1 wt% La-TiO₂ 在可見光下可達到 18%之甲苯去除率，因此可得知將鍺元素添加進二氧化鈦中是可以有效提升二氧化鈦於可見光下對甲苯去除效果。

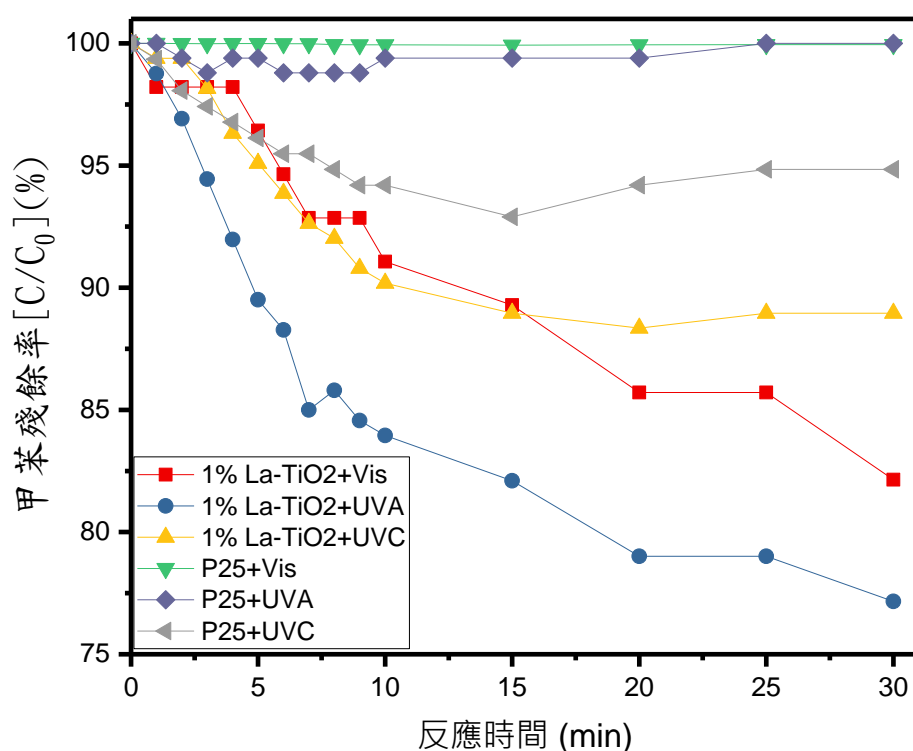


圖 5.4 不同光源下 1 wt% La/TiO₂ 及 P25 對甲苯之去除率



5.2.2 不同濕度對於降解甲苯之比較

本實驗的尾氣端會吸引環境的空氣與其中的尾氣結合，一起被活性碳吸附，當我們更改用本研究的光催化設備時，濕度會是一個需要考量的因素，台灣的環境濕度為 60~80% 的區間，因此實驗所選擇的溼度為 0%、60%、80%，並使用 Philips TL T8 18W，並透過波長為 320~400nm 之 UVA 紫外光照射附有光催化劑之玻璃皿，甲苯標定濃度為 15ppm，進氣流量為 3L/min。

圖 5.5 為 1 wt% La-TiO₂ 在不同環境濕度下對甲苯去除率，由實驗結果可得知，不同的環境濕度會對 1 wt% La-TiO₂ 降解效率造成影響，其中將解效果最佳之環境濕度為 60%，其降解效率可達 23.21%，最次者為 80%，降解效率僅 18.8%，由實驗結果可得知增加環境濕度可增加本光催化劑對甲苯之降解效果，其原因為水分子會以化學吸附之方式吸附於 La-TiO₂ 之活性點位上，因此可進一步解離成氫氧自由基，進而達到增加去除效率之效果，然而加入過多的水分子卻會導致甲苯在被 La-TiO₂ 降解前先與水分子結合而產生化學反應，最終附著於 La-TiO₂ 表面造成降解效果之下降。

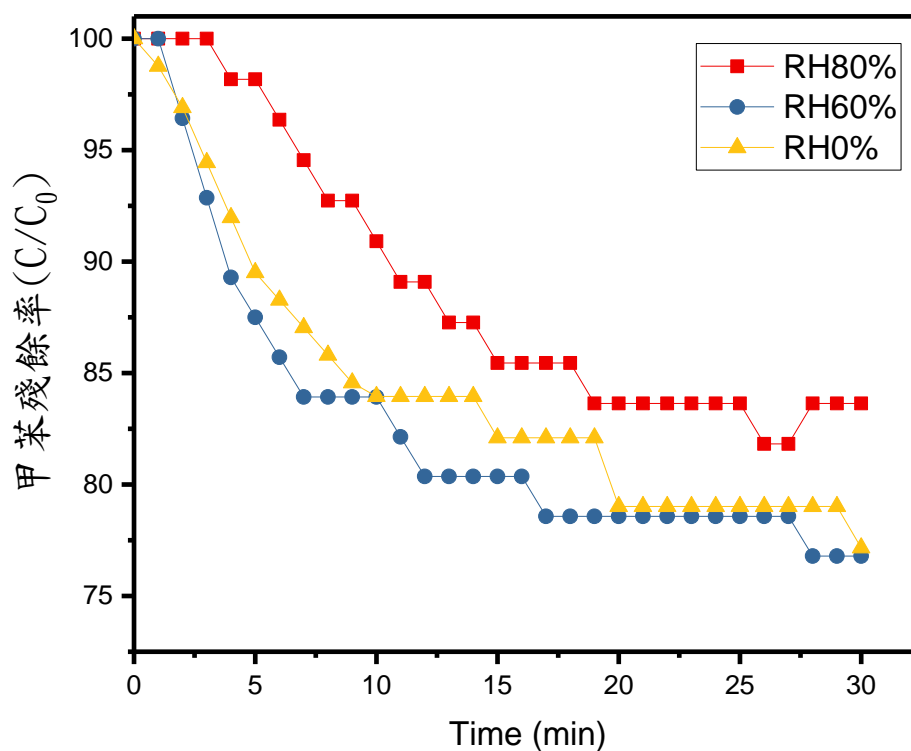


圖 5.5 1wt% La-TiO₂ 在不同環境濕度下對甲苯去除率



5.3 光催化模組測試

本節將討論光催化玻纖布對於降解甲苯氣體之實驗結果，其降解環境設定是在濕度 60% 的環境下，採用 1wt% La/TiO₂ 鍍摻雜光觸媒，將觸媒附著於玻纖布上，將載體置入模組中，以外圍四道燈管及中央柱的燈管為光源照射中間的槽體，其使用 UVA 紫外光燈管(波長為 320~400nm)照射或是東亞 FL20D18 T8 燈管，標定甲苯氣體濃度為 15ppmV，進氣流量為 3L/min；將氣體導入模組中央的反應槽中，進行三十分鐘的暗箱吸附，再進行兩小時的連續實驗，進行最佳化的光源測試。

為了排除光催化反應空間與光催化載體(此為玻纖布)對光催化氧化甲苯的影響，本研究使用紫外光照射通以穩定流速及濃度之甲苯反應艙中，定時量測、記錄甲苯之濃度，而從此圖單獨以光源照射乾淨的反應艙後，經過半小時之暗箱作業後，甲苯氣體濃度維持不變，另一方面，使用光源照射空白乾淨的載體亦不會影響甲苯氣體的濃度，故本研究所使用之反應艙體及載體不會影響光催化氧化甲苯氣體的能力。

圖 5.6~圖 5.7 為暗箱吸附圖，為了排除材料及光催化材料載體對於氣體的吸附性能，故將光催化材料與載體放置在遮蔽光源(全黑)的反應艙中並通以固定濃度的甲苯氣體，從圖中能發現不同的光催化材料及載體在遮蔽光源(全黑)的反應箱中，30 分鐘皆不會影響甲苯氣體的濃度，濃度記錄圖顯示無任何濃度改變發生，甲苯濃度維持 100% 不變，故排除本研究所用之玻璃纖維對甲苯氣體吸附之問題。

圖 5.8 為清洗前紫外光光催化玻纖布降解甲苯之濃度變化圖，使用飛利浦 TL 18W 之 UVA 紫外光燈管，透過 UVA(波長 320~400nm)照射在附有光觸媒之載體，而從途中發現所製備之光催化玻纖布(後續皆稱玻纖布)皆可降解並氧化甲苯，其中四片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 50.68%，三片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 59.09%，二片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 54.45%，一片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 29.93%，其中以三片玻纖布的效果較佳。但在實驗的過程中，發現玻纖布受到有機揮發物的污染，因此，後續用超音震盪機做清洗表面的動作，並再次測試其玻纖布的效能，觀察數據光催化玻纖布的活性確實能保持其再現性。

圖 5.9 為清洗後紫外光光催化玻纖布降解甲苯之濃度變化圖，使用飛利浦 TL 18W 之 UVA 紫外光燈管，透過 UVA(320~400nm)照射在附有光觸媒之載體，而從途中發現所製備之光催化玻纖布(後續皆稱玻纖布)皆可降解並氧化甲苯，



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

其中四片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 91.03%，三片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 94.84%，二片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 86.46%，一片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 88.71%，其中以三片玻纖布的效果較佳。發現其清洗過後玻纖布的效能反而提升，其可能性在於玻纖布的表面在製程上仍有揮發性有機物附著其上，遮住光觸媒微觀表面的活性點位，導致光化學反應效率不穩定甚至有失去活性的狀況，因此在清洗玻纖布過後，其上附著之揮發之有機物被移除，使載體微觀表面之活性點位恢復功能，並有有效的運作。

圖 5.10 為可見光光催化玻纖布降解甲苯之濃度變化圖，使用東亞 FL20D18 T8 燈管照射在附有光觸媒之載體，而從途中發現所製備之光催化玻纖布皆可降解並氧化甲苯，其中四片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 54.32%，一片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 6.72%，其中以四片玻纖布的效果較佳。

圖 5.11 為光催化比較圖，透過不同光源與不同數量光催化玻纖布來比較與評估最佳化條件，圖中從上到下 6 條曲線分別為：1. 紫外光下使用 3 片未經超音波震盪機清洗過之玻纖布，2. 紫外光下使用 1 片未經超音波震盪機清洗過之玻纖布，3. 紫外光下使用 3 片已經過超音波震盪機清洗過之玻纖布，4. 紫外光下使用 1 片已經過超音波震盪機清洗過之玻纖布，5. 可見光下使用 4 片已經過超音波震盪機清洗過之玻纖布，6. 可見光下使用 1 片已經過超音波震盪機清洗過之玻纖布。其中可以看出降解效果最佳之組合為在紫外光下置入 3 片已經過超音波震盪機洗淨之玻纖布，其降解效率最終可達到 90%以上。而在可見光下，4 片塗覆有光催化劑的玻纖布，效率可達到 55%。此數據可成為未來進行商業化模組及實場測試所需參數之依據。



第六章 結論與建議

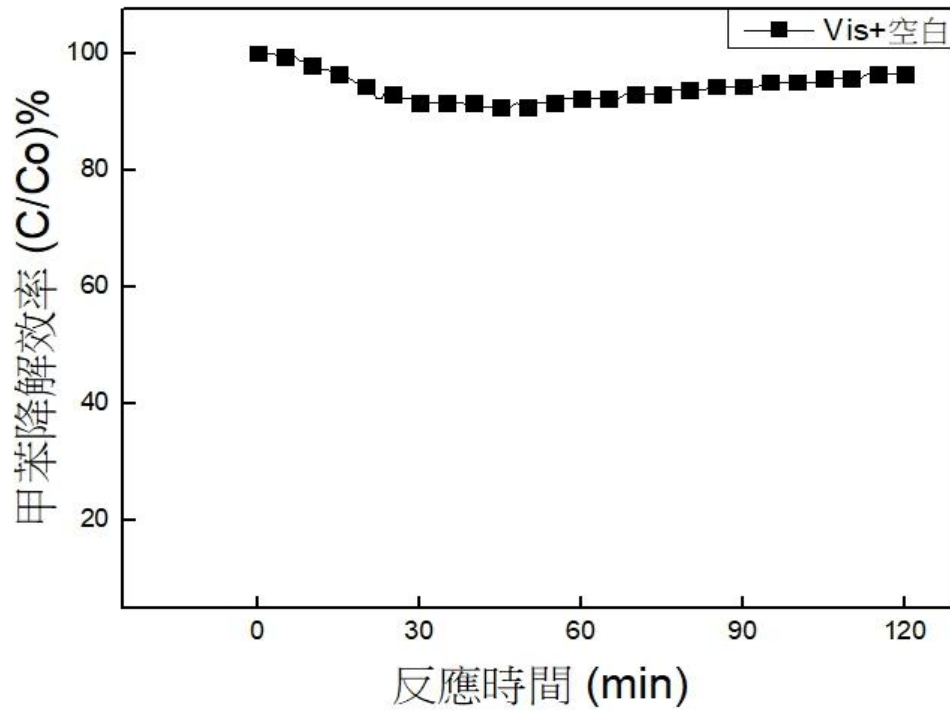


圖 5.6 可見光暗箱吸附圖

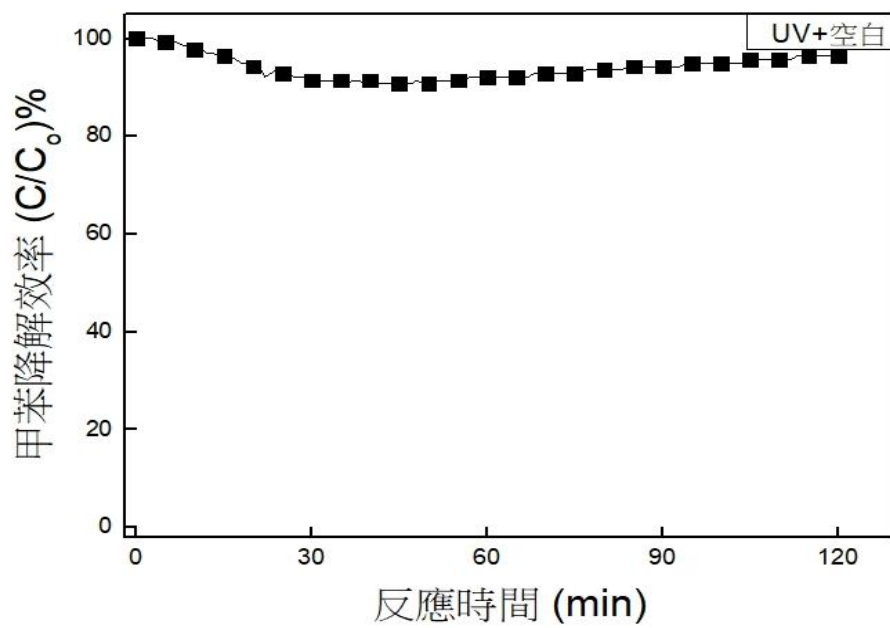


圖 5.7 紫外光暗箱吸附圖



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

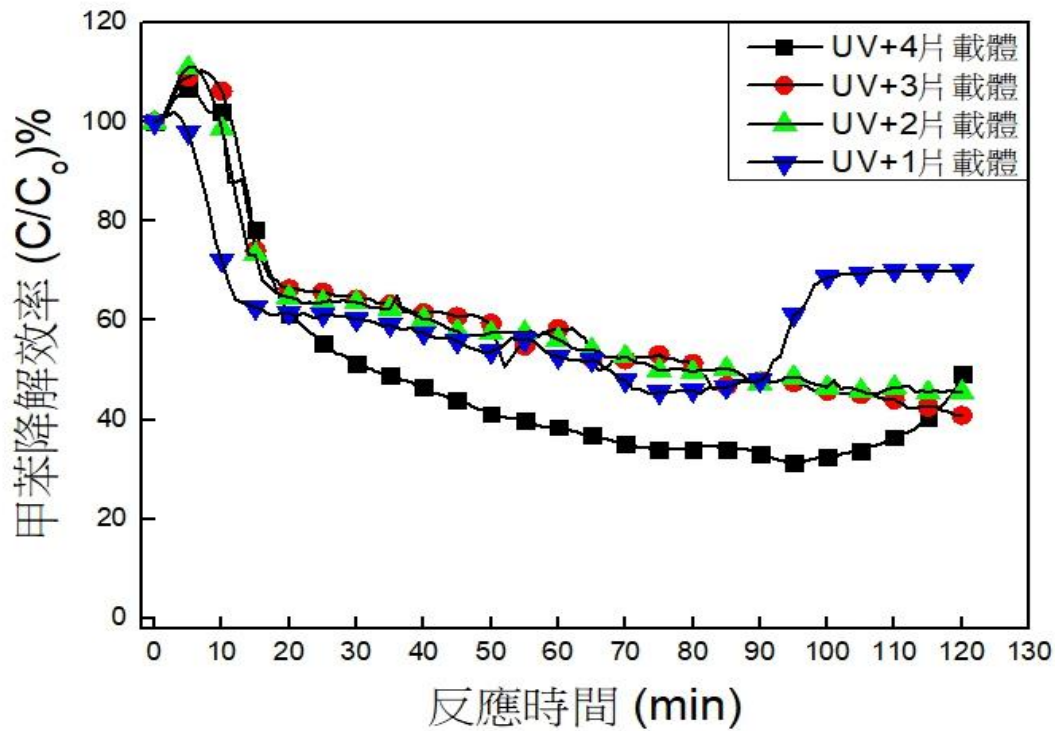


圖 5.8 清洗前紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖

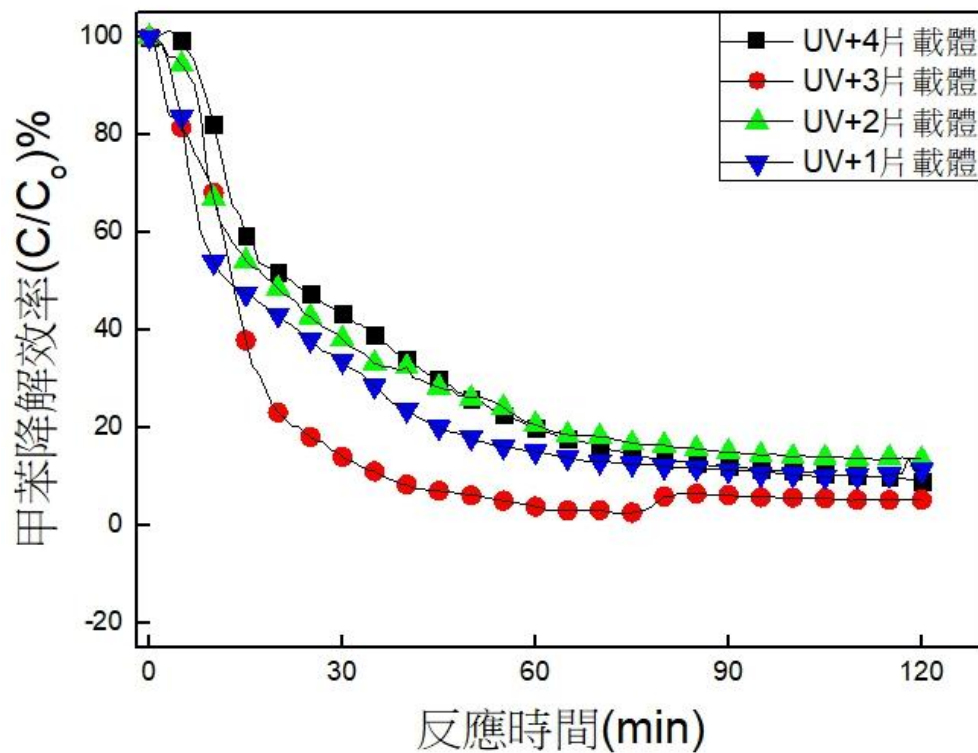


圖 5.9 清洗後紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖



第六章 結論與建議

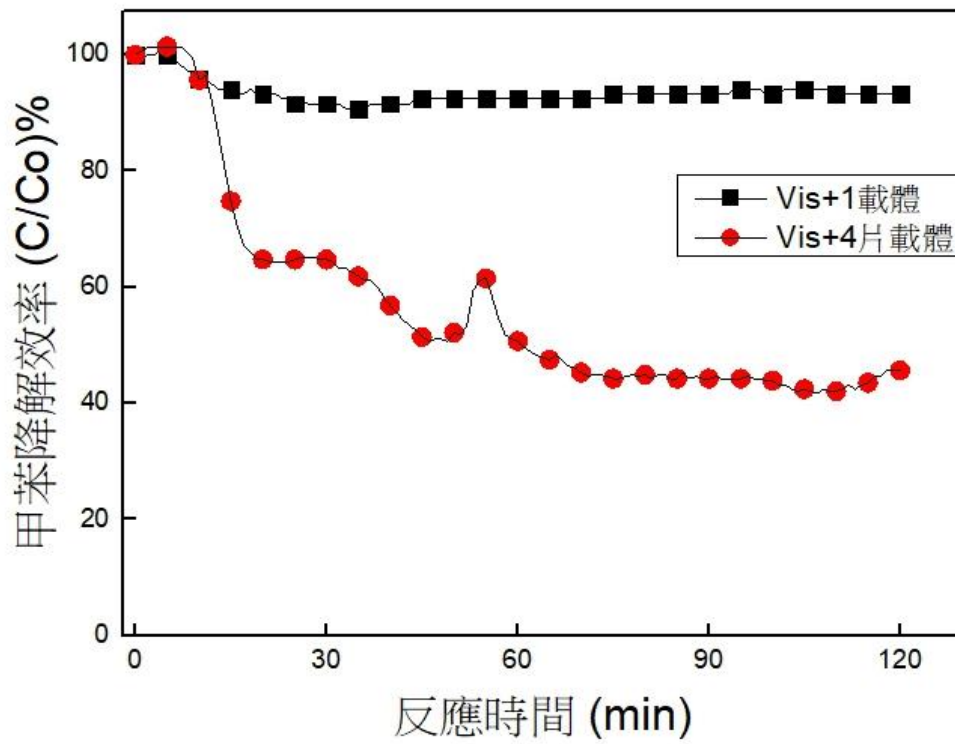


圖 5.10 可見光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖

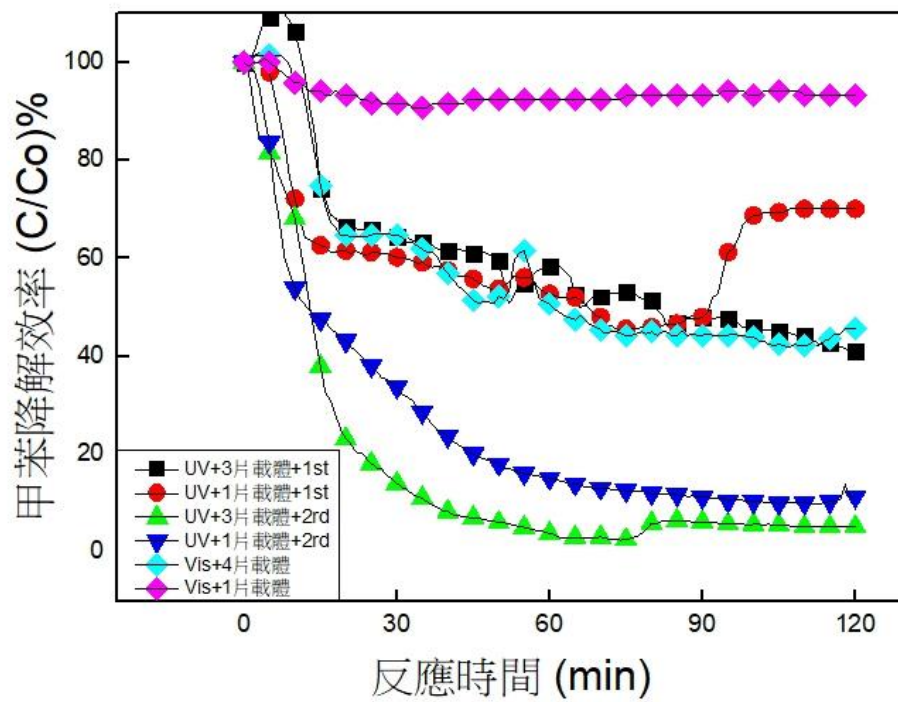


圖 5.11 光催化比較之甲苯濃度變化圖



5.4 吸附模組測試

本節將討論活性碳吸附模組對於降解甲苯氣體之實驗結果，其降解環境設定均為常溫常壓，此參數設定是由於考慮到實際場址使用時，較難控制其溫度及壓力，通入之甲苯濃度為 15ppm，測試時使用的活性碳均為市售之活性碳，將活性碳至於網狀載體上，並將載體置入模組中之凹槽處，其中模組設計規格為長 28.5cm、寬 17cm、高 15cm，活性碳載體規格為大小 1mm 之不鏽鋼網，模組中設計有 6 個凹槽處可供網狀載體固定，可依通入氣體濃度調整放置數量。

為測試本模組置入不同層數活性碳對甲苯的影響，本研究首先將 90g 之市售活性碳至於各層載體，並將穩定流速及濃度之甲苯通入反應艙中，定期測量並記錄甲苯濃度之變化，圖 5.12 為不鏽鋼網狀載體置入數量降解甲苯之濃度變化圖，於實驗結果可觀察到，雖然置入 6 層不鏽鋼載體的吸附效果可達到近 100%，但即使只置入 1 層也可達到高達 90% 的吸附效果，因此後續研究決定先探討不同重量之活性碳對甲苯濃度影響。

為測試不同重量對甲苯濃度之影響，故只先採用一層載體，分別將 90g、45g、20g、10g、5g 之活性碳至於載體上，圖 5.13 為不同重量之活性碳置入單層載體降解甲苯之濃度變化圖，由實驗結果可看出，45g 及 20g 對於甲苯的吸附效果是近乎一樣的，而 10g 及 5g 之活性碳置入量並可看出較大的差異性，從圖中能發現，10g 及 5g 之活性碳置入量於實驗前 5 分鐘內便已漸漸失去吸附能力，於本次實驗結束時甲苯吸附效率僅分別剩下 32% 與 46%，但由於本模組處理的是以透過光催化模組先進行光催化處理後之殘存氣體，因此後續組成商業化模組測試時將使用 10g 活性碳進行吸附。



第六章 結論與建議

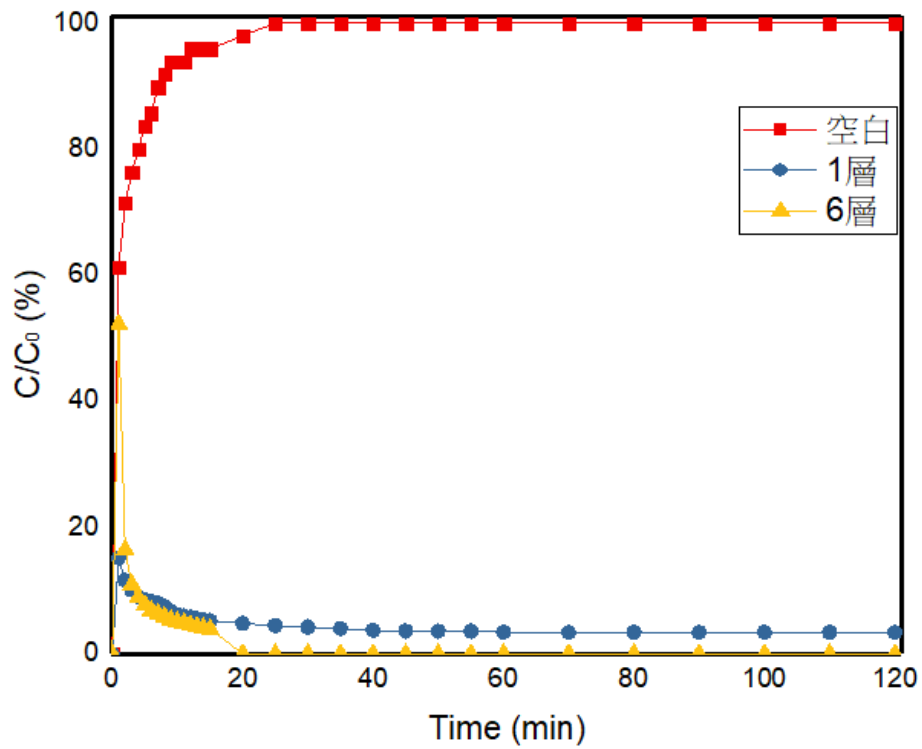


圖 5.12 不鏽鋼網格置入數量比較圖

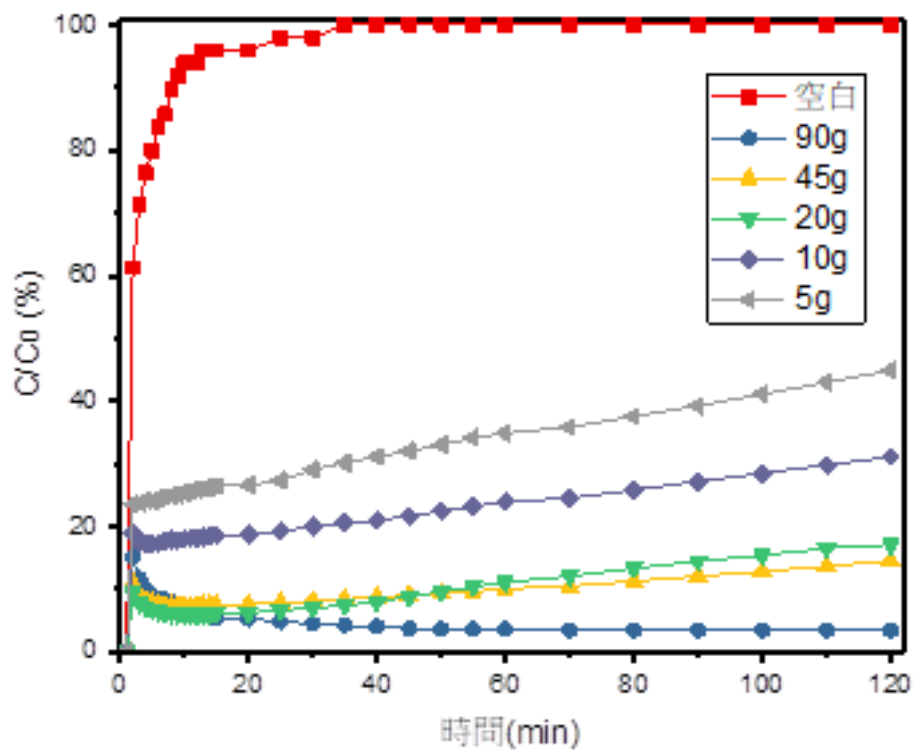


圖 5.13 活性碳置入重量比較圖



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

5.5 商業化模組測試

本節將討論光催化模組及吸附模組共同使用下之實驗結果，考慮實際場址的氣體參數較不穩定的原因，本次實驗之環境參數均為常溫常壓，甲苯濃度為 15ppm，光催化模組採用的玻璃纖維棉數量為 4 片，吸附模組則是採用單層且活性碳重量為 10g 或 5g 分別在可見光和紫外光下進行吸附。

5.5.1 可見光條件下模組測試結果

圖 5.14 為各模組之甲苯濃度變化比較圖，光催化模組使用光源為東亞 FL20D18 T8 之可見光燈管，光催化載體為使用超音波震盪機清洗過後之玻纖布，玻纖布置入數量為 4 片；吸附模組使用不鏽鋼網狀載體，載體置入數量為 1 片，使用之活性碳為 10g，由實驗結果可看出本商業化模組能大幅延長活性碳使用壽命，於上節吸附模組活性碳使用量之研究可得知，在僅使用 10g 活性碳時吸附模組在短暫時間便達到吸附最大量，之後吸附效率變逐漸降低，但與光催化模組結合後，置入 10g 之活性可持續吸附長達 2 小時以上，且甲苯去除效率可達到 80%，同時也比只使用光催化模組降解效果提高了 35%，因此可得知將兩模組結合之構想是可行的。

這裡需要特別說明的是，(1) 實際上，圖 5.14 中三個模組的起始點是一致的都是已經平衡在 15ppm 之後開始進行實驗的。之所以會出現商業化模組和吸附膜組看似初始濃度不一致，原因是因為實驗之前，在整個系統氣體平衡不能直接接入吸附膜組，若吸附模組比照光催化模組直接使污染氣體通入艙體待其穩定的話，原置於吸附模組內之活性碳便會在污染濃度達到設定值之前開始吸附，進而造成實驗誤差，因此在進行吸附模組實驗時，本團隊會先將污染氣體繞過吸附模組艙體直接導入檢測儀器，待其污染濃度到達設定值再將污染氣體通入吸附模組（這個時間差大致是 5 秒左右），因此不同模組間的污染物進氣濃度均是相同的，均是從 100% 開始降解。(2) 從圖 5.12 可以看出，單一光催化模組在 120 min 時，已經出現上升趨勢，而商業化模自 50 min 後，就一直保持 80% 的去除效果，進一步驗證了商業化模組的可行性。



第六章 結論與建議

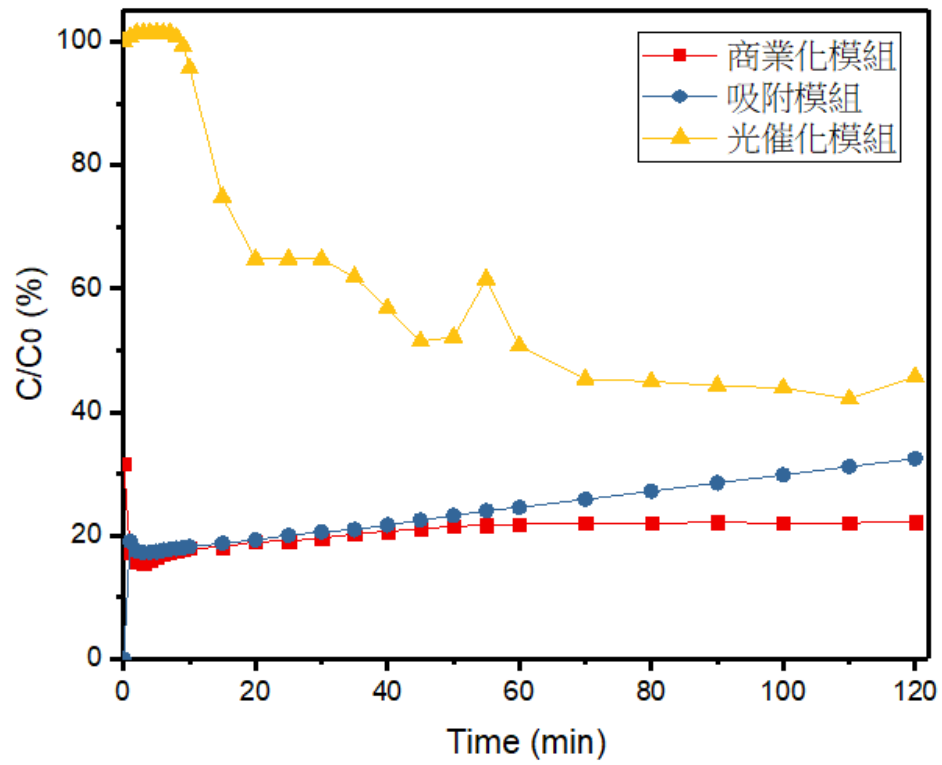


圖 5.14 可見光下商業化模組及吸附模組之甲苯濃度變化比較圖



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

5.6 商業化模組成本分析

本節將討論商業化模組使用成本之估算，估算參數如表 5.2 及表 5.3，根據實驗結果顯示，本商業化模組中之光催化模組最佳參數為置入 4 片玻纖布最為光催化劑載體，據估算一片玻纖布之成本為 625.85 元，而吸附模組使用之活性炭為坊間所售之再生活性碳，其成本為 0.3 元/克，以上節所設計之實驗參數估算，整體商業化模組之使用成本約為 2506.4 元，而透過將 15ppm 之污染物濃度進行單位換算可得知本實驗污染物濃度為 15mg/L，因此將其乘上實驗所設計流量可得知每分鐘污染物重量為 45mg，在將污染物重量乘上實驗時間 2 小時則可得到實驗中整起污染物重量為 5.4g，又因本商業化模組於可見光下甲苯之去除效率可達到 80%，因此本商業化模組去除 1g 之甲苯成本約為 2,005.12 元。

表 5.2 製備四片光催化玻纖布所需前驅物之成本分析

	用量	單位價格	總價(元)
鈦酸四丁酯	50mL	7.75 元/mL	388 元
99%乙醇	250mL	1 元/mL	250 元
硝酸(5M)	22.5mL	18 元/L	0.405 元
硝酸鋁六水合物	9.932g	51.4 元/g	510.51 元
電費	25 度	2.5 元/度	62.5 元
		總計	1,211.415 元

表 5.3 製備一片光催化玻纖布所需成本分析

	用量	單位價格	總價(元)
光催化劑	80.63mL	3.76 元/mL	303.15 元
玻纖布	1 片	315 元/片	315 元
電費	3 度	2.5 元/度	7.5 元
		總計	625.85 元



6 第六章、結論與建議

6.1 結論

本研究乃建構利用低耗能可見光進行 SVE 尾氣降解之光催化模組，並利用吸附模組進行殘存尾氣之吸附，利用此商業化模組進行模擬實場之研究，改善 SVE 尾氣排放之單環芳香烴等類所引發的空氣污染；本研究先以含浸法將二氧化鈦前驅物均勻塗布在玻纖布上，用以增進光催化劑與空氣污染物之反應面積，接著透過吸附模組進行殘存尾氣之吸附及減少更換光催化劑之空窗期，最後討論此商業化模組在實場上之應用範圍，並持續追蹤後續可進行研究之實場。本研究結論如下：

1. 透過 XRD 及 FTIR 圖譜清楚說明，本合成方法所合成之物質確實為鈦摻雜之二氧化鈦，並且鈦摻雜能改變改變其光吸收範圍，並提高光催化性能。
2. 測試結果顯示，光催化模組當配 10g 活性炭時，在可見光下可甲苯去除效率為 80%。這比單獨使用光催化模在可見光下效率提高了 35%。而且催化效果在兩小時之後，仍未發生失活現象。因此上述結果證明了兩模組結合構想的可行性。
3. 根據成本估算結果，本團隊所製備之光催化玻璃纖維棉成本一片約為 625.85 元，吸附模組活性碳使用量可依據污染物濃度進行調整，而平均每克甲苯之處理成本約為 2,005 元，雖然本研究之商業化模組成本較高，但根據實驗結果顯示本商業化模組能長時間持續使用，因此本商業化模組應用於實際場址之污染整治是可行的。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

6.2 建議

本研究提出後續建議如下：

1. 尋找並評估其他生物質活性碳種類用以代替商業活性炭，以達到降低本模組實際使用之成本。
2. 由於本年度合作之實際場址因其尚未通過環保署許可，因此本年度並無法將商業化模組實際應用於實場，未來將持續進行實場之測試。
3. 針對不同的 SVE 抽除設備元件之條件，進行擴大進氣之流量，讓本商業化模組能夠真正取代現有 SVE 尾氣處理設備，並對不同抽除之氣體進行處理。



7 參考文獻

1. 張尊國，台灣地區土壤污染現況與整治政策分析，財團法人國家政策研究基金會 (2002)。
2. 土壤及地下水污染整治基金管理會，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，行政院環境保護署 (2007)。
3. 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，台灣產業服務基金會。
4. 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網，行政院環境保護署。
5. 楊政憲，環保新尖兵——二氧化鈦光觸媒之簡介，國立臺灣大學環境工程學研究所(2013)。
6. 高濂，鄭珊，張清紅，奈米光觸媒(2004)。
7. 王國至，應用二氧化鈦/聚苯胺複合物去除甲醛之研究，中原大學生物環境工程學系碩士論文(2014)。
8. 林榮良，TiO₂ 光催化原理和應用例子， Journal of the Chinese Chemical Society, 60, 457-461 (2002)。
9. 范崇政，肖建平，丁延偉，奈米 TiO₂ 的製備與光催化反應研究進展，科學通報，46， 265-273 (2001)。
10. 徐松梅，高朋召，石宗利雙元素摻雜改性二氧化鈦的研究進展，Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 27, 777-781 (2008)。
11. 劉亭亭，李鳴童，稀土摻雜改性奈米 TiO₂ 光催化性能，Chemical Engineer (2011)。
12. Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, K. and Taga, Y. (2001). Visible-light photocatalysis in nitrogendoped titanium oxides. science 293: 269-271.
13. Banisharif, A., Khodadadi, A.A., Mortazavi, Y., Anaraki Firooz, A., Beheshtian, J., Agah, S. and Menbari, S. (2015). Highly active fe₂o₃-doped tio₂ photocatalyst for



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

- degradation of trichloroethylene in air under uv and visible light irradiation: Experimental and computational studies. Applied Catalysis B: Environmental* 165: 209-221.
14. Andrew Mills, S.L.H. (1997) *An overview of semiconductor photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 108, 1-35.
 15. Jr., J.T.Y.(2009) *Photochemistry on TiO₂: Mechanisms behind the surface chemistry. Surface Science*, 603, 1605–1612
 16. Vainshtein B K, F.W.M., Indenbom V L. (1994) *Structure of Crystals. Berlin:Mac-millan India Ltd.*
 17. Buchanan Relva C, P., Taeun. (1997) *Materials Crystal Chemistry. New York: Marcel Dekker, Inc.*
 18. Akira Fujishima, X.Z., Donald A.Tryk. (2008) *TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. Surface Science Repor*, 63, 515-582.
 19. Diebold, U. (2003) *The surface science of titanium dioxide. Surface Science Reports*, 48, 53-229.
 20. Diana V. Wellia, Q.C.X., Mahasin Alam Sk, Kok Hwa Lim, Tuti Mariana Lim, Timothy Thatt Yang Tan. (2011) *Experimental and theoretical studies of Fe-doped TiO₂ films prepared by peroxo sol–gel method. Applied Catalysis A: General*, 401, 98-105.
 21. Ye Cong, J.Z., Feng Chen, Masakazu Anpo, Dannong He, Preparation. (2007) *Photocatalytic Activity, and Mechanism of Nano-TiO₂ Co-Doped with Nitrogen and Iron (III). Journal of Physical Chemistry C*, 111, 10618-10623.
 22. Xiaoyong Wu, S.Y., Qiang Dong, Chongshen Guo, Huihui Li, Takeshi Kimura, Tsugio Sato. (2013) *Synthesis of high visible light active carbon doped TiO₂ photocatalyst by a facile calcination assisted solvothermal method. Applied Catalysis B: Environmental*, 142-143, 450– 457.
 23. Swati Sood, A.U., Surinder Kumar Mehta, A.S.K. Sinha, Sushil Kumar Kansal. (2015) *Efficient photocatalytic degradation of brilliant green using Sr-doped TiO₂ nanoparticles. Ceramics International*, 41, 533-5540.



第七章 参考文献

24. Xuefeng Wang, H.J., Yanduo Liu, Mengdie Gao. (2015) Rapid microwave-assisted hydrothermal synthesis of Sm, N, and P tridoped anatase-TiO₂ nanosheets from TiCl₄ hydrolysis. *Materials Letters*, 147, 72-74.
25. Margarita Sanchez-Dominguez, G.M.-M., Maria J. Rodriguez-Vargas, Claudia C. Ibarra-Malo, Arturo A. Rodriguez-Rodriguez, Andrea V. Vela-Gonzalez, S.A. Perez-Garcia, Ricardo Gomez. (2015) Synthesis of Zn-doped TiO₂ nanoparticles by the novel oil-in-water (O/W) microemulsion method and their use for the photocatalytic degradation of phenol. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 3037–3047.
26. Ye Cong, J.Z., Feng Chen, and Masakazu Anpo. (2007) Synthesis and Characterization of Nitrogen-Doped TiO₂ Nanophotocatalyst with High Visible Light Activity. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 6976-6982.
27. Yanfang Shen, T.X., Hao Du, Huazi Jin, Jianku Shang, Ke Yang. (2009) Phosphorous, nitrogen, and molybdenum ternary co-doped TiO₂: preparation and photocatalytic activities under visible light. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 50, 98-102.
28. Xiaoyang Pan, M.-Q.Y., Xianzhi Fu, Nan Zhang and Yi-Jun Xu. (2013) Defective TiO₂ with oxygen vacancies: synthesis, properties and photocatalytic applications. *The Royal Society of Chemistry*, 5, 3601–3614.
29. Wonyong Choi, A.T., and Michael R. Hoffmann. (1994) The Role of Metal Ion Dopants in Quantum-Sized TiO₂: Correlation between Photoreactivity and Charge Carrier Recombination Dynamics. *The Journal of Physical Chemistry*, 98, 13669-13679.
30. R. Asahi, T.M., T. Ohwaki, K. Aoki, Y. Taga. (2001) Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science*, 293, 269-271.
31. Yuchao Chai, L.L., Ke Zhang, Bin Zhao, Dannong He. (2014) Efficient visible-light photocatalysts from Gd-La codoped TiO₂ nanotubes. *Ceramics International*, 40, 2691–2696.



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

附錄



附錄 1 107 年度專案成果績效自評表

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

107 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：2018 年 8 月 5 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"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗
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	計畫主持人	游 勝 傑
專案名稱	開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組		
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「結案達成數」欄位中。(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文						
		(2)研討會論文						
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	1	0	1	100%	
		(2)研討會論文						
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告						
		(2)研究報告	1	1	0	1	100%	
	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)	(1)已開發技術						
		(2)技術平台						



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

項目 \ 目標達成程度			申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
	數)							
B 人才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2	2	0	100%	
		(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)						

(二) 產業面

目標達成程度			申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 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)
項目								
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已發明						
		核准新型/設計						
		合計						
		申請發明						
		申請新型/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	件數						



項目 \ 目標達成程度			申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 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)
	(應用技 術)	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)						



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預 估數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 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)						



附錄

附錄 2 期末報告書審查意見表

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

審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：游勝傑	
計畫名稱	開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
成果績效自評已全數達成，期中報告審查意見均有回復。		謝謝委員對本團隊執行進度的肯定。	
本研究顯示鑷摻雜之 TiO ₂ 搭配活性碳模組，可提高甲苯去除率，確定能提高光催化性能。		謝謝委員的肯定。	
但成本效益評估，每克甲苯之處理成本約為 14,919 元，優點是可長時間持續使用，商業化模組之實用可行性，仍有待評估。		謝謝委員的建議，商業化模組成本評估之部分已於定稿中補充，因目前本計畫合作之顧問公司尚未獲得實際污染廠址操作許可，因此成本效益評估目前只能依據實驗室所做之效能測是進行評估，經重新評估後，本商業化模組每客甲苯之處理成本約為 2,005 元，由於成本效益與使用時間有高度關聯，因此未來進行實際廠址之長效實驗後才可準確對商業化模組進行成本效益評估。	
委員二			
計畫進度達成原訂目標。		謝謝委員對本團隊執行進度的肯定。	
計畫基本資料表，專案主持人未簽名註記日期請修正。		謝謝委員的指正，本計畫將於期末報告定稿中補上。	
計畫成果已發表之國外期刊論文，請於備註發表處。		謝謝委員的建議，本計劃成果已於 Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 中投稿，投稿題目為 Recovery of Rare Earth Elements from Waste Permanent Magnet (WPMs) via Selective Leaching using the Taguchi method，投	



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

	稿作者為 Achmad Chusnun Ni' am (倪川森), Sheng-Jie You(游勝傑), Ya-Fen Wang(王雅玢)。
商業化模組去除 1g 甲苯之成本高達 14,919 元，宜朝降低成本研究。	謝謝委員的建議，商業化模組成本評估之部分已於定稿中補充，因目前本計畫合作之顧問公司尚未獲得實際污染廠址操作許可，因此成本效益評估目前只能依據實驗室所做之效能測是進行評估，經重新評估後，本商業化模組每克甲苯之處理成本約為 2,005 元。
委員三	
報告書第四章研究方法及步驟係原計畫書內容，但實際計畫執行之方法與步驟與原計劃之框架不同，應修正期末報告以實際執行之內容為準。	謝謝委員的指正，本團隊已於定稿中進行修正
有關所估算商業化模組去除一公克甲苯成本約為 14,919 元，說明不夠精準明確，是否為製造標準模組之設置成本，之後續操作成本應如何估算？	謝謝委員的建議，商業化模組成本評估之部分已於定稿中補充，因目前本計畫合作之顧問公司尚未獲得實際污染廠址操作許可，因此成本效益評估目前只能依據實驗室所做之效能測是進行評估，經重新評估後，本商業化模組每客甲苯之處理成本約為 2,005 元，而本商業化模組僅需在各單元失去活性後更換耗材，因此實際使用時操作成本並不會有帶大的增加。
商業化之產品，必須要有與現有最常用同功能商品之功效、設置成本、操作成本之比較說明。	謝謝委員的意見，由於土壤污染整治方法眾多，且各個方法所適用領域均不相同，因此本商業化模組並無法與其他整治方法進行比較，而 SVE 法之尾氣原先是使用大量活性炭進行吸附，本法成本較活性炭成本高，但由於與活性炭可串聯使用，可延長活性炭使用壽命，大幅降低尾氣逸散的風險。
委員四	
計畫成果確實已達研究目的各項成果。	謝謝委員對本團隊執行進度的肯定。
合成的物質確實為鑷摻雜的二氧化鈦，確實提高光催化性能。	謝謝委員的肯定。



附錄

利用光催化模組與活性碳載體，去除甲苯污染物可達 80%，顯示其模式之效益。	謝謝委員對本團隊研究成果的肯定。
很可惜未能找到污染場址且成本太高，仍需後續之研究。	謝謝委員的意見，本團隊將持續與本計畫合作之顧問公司進行討論，現階段因該公司的操作許可並未核發，因此沒有辦法進行實際廠址操作，預計於下年度進行實際污染廠址測試。
建議將專案成果績效自評表及審查意見回覆表放報告最後面。	謝謝署內的意見，本團隊將進行修改。
建議期末報告通過。	謝謝委員對本計畫書的肯定。
委員五	
本案擬開發低能耗可見光催化商業模組直接在現場進行 SVE 尾氣之降解。	謝謝委員的意見，因目前本計畫合作之顧問公司尚未取得對污染廠址之操作許可，因此本年度並沒有辦法進行實際廠址之測試，預計於下年度進行實際廠址測試。
實驗結果顯示，甲苯的去除率會隨著濕度而改變(最佳濕度為 23.21%)，建議補充說明未來實際應用時，如何控制最佳濕度。	謝謝委員的意見，因實際場址濕度會隨著時間而有所變化，而台灣平均濕度約為 60%左右，因此本商業化模組於我國使用時通常並不需要特別調整其濕度，但若環境濕度過高時雖會導致處理下率下降，但差距並不大，因此實際應用時若硬將濕度控制於 60%會造成其使用成本增加，故於高濕度國家本團隊傾向於不特別調整濕度，但於其他濕度較低之國家使用時，僅需增加一些簡單的溼度調整設備便可將污染物控制於最佳濕度。
建議未來可以進一步改善塗佈方法，例如增加塗佈光催化劑的濃度及浸泡時間等。	謝謝委員的意見，未來本團隊未來將對玻璃纖維布之浸泡時間進行研究
建議未來可以進一步探討光催化劑在玻纖布上的塗佈厚度的處理效率之影響。	謝謝委員的意見，由於玻纖布是以浸泡之方式將光催化劑塗佈固定，因此若多次進行浸泡恐導致原先以塗佈於玻纖布之光催化劑再次掉落至溶劑中，固本團隊目前未有研究此項參數之計畫。
在實驗的過程中，發現玻纖布受到有機揮發物的污染。建議進一步評估洗淨效率，與催	謝謝委員的意見，因催化模組之在使用性本團隊計畫於整體光催化劑均失效後再進行評



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

化模組的可再使用性。	估，但由於長效實驗較難於實驗室中進行，故光催化模組之可再使用性將於未來於實際場址中進行測試。
委員六	
5.6 節商業化模組成本分析除需考量材料費外，建議應將後續操作維護及耗材更換等費用納入考量，並與其他尾氣處理方法(如活性碳吸附法等)比較，以更為務實的探討本研究成果於實場應用之可行性與優勢。	謝謝委員的意見，因目前本計畫合作之顧問公司尚未取得對污染廠址之操作許可，因此本年度並沒有辦法進行實際廠址之長效測試，未來進行實際廠址之長效測試後才可確切知道本商業化模組之使用壽命，並對整體使用成本進行更精確之估算
圖 5.4、5.5 之皆以去除率作為 Y 軸，與圖 5.6~5.14(Y 軸為降解效率)之表示方法不同，建議應統一圖表之呈現方式。	謝謝委員的指正，本團隊已於定稿中進行修正
由圖 5.13 之 Y 軸數值似有錯誤(應為 20、40、60...)，請再確認。	謝謝委員的指正，本團隊已於定稿中進行修正
本計畫除因故未能執行實場試驗外，相關執行成果已大致符合第二章所提之研究目的，建議後續可持續辦理實場試驗，確認商業化模組之實際效能，以利本尾氣處理技術的推廣與應用。	謝謝委員的意見，本團隊預計於下年度進行實際廠址測試



附錄

附錄 3 期中報告書審查意見表

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

審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：游勝傑	
計畫名稱	開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
績效自評表皆為空白，且勾選為「申請階段」，顯有誤植，請改正。論文發表如有落後，請改正。		謝謝委員的意見，已經根據您的建議在修正版中作了相對應的修正。	
本報告無工作執行甘特圖，無法比對進度是否符合，請改正。		謝謝委員的意見，已經在計畫書修訂版中增加了工作執行甘特圖，詳見第 46 頁 4.1 中。	
本案採開發降解 SVE 尾氣之光催化模組，並利用吸附模組吸附殘存尾氣，已有初步成果，確定鑰參雜之 TiO ₂ 能提高光催化性能。		謝謝委員對本團隊執行進度的肯定。	
後續務請完成成本效益評估，以增加實用可行性。		謝謝委員的建議，其效益分析與經濟發展將於期末報告中作出明確且具體的結論。	
委員二			
期中報告欠缺工作進度及甘特圖未知預定期中查核點。		謝謝委員的意見，已經在計畫書修訂版中增加了工作執行甘特圖，詳見第 46 頁 4.1 中。	
專案基本資料表請簽名加註日期。		謝謝委員的意見，已經在計畫書修訂版中增加了簽名並加註日期。	
自評表執行期程請改為期中，並填內容。		謝謝委員的意見，已經根據您的建議在修正版中作了相對應的修正。	
已經完成光催、吸附及商業化模組測試，建議期末除進行成本評估，建議增加耐久評估。		謝謝委員的肯定和意見，下半年工作中我們會針對模組的運行成本進行評估並評價其使用時長的耐久性。	
委員三			



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

本計畫係開法商業化模組之產品，後續應著重成本估算及與現有 SVE 尾氣處理設備之功能與成本效益比較。	謝謝委員的意見，後續計劃執行過程中會著重成本估算及成本效益評估。
委員四	
利用光催化模組配 10 克活性碳時，在可見光下可將甲苯去除達 80%，此比單獨使用光催化模組在可見光下提高效率 35%。初步結果證明研發之兩模組結合構想之可能性。	謝謝委員對本計劃執行成果的肯定。
本研究合成之物質確實為鏷摻雜之二氧化鈦，確實可提高光催化性能。	謝謝委員對本計劃的肯定。
已達到期中計畫查核點之工作。	謝謝委員對本團隊執行進度的肯定。
委員五	
本案擬開發低能耗可見光催化商業模組進行 SVE 尾氣之降解。	謝謝委員對本計劃書的肯定。
Page 61, 5.4.1BET 分析，說明摻雜後之二氧化鈦比表面積及孔洞體積明顯增加。惟跟據表 5.1，參雜 La 的孔洞體積小於 P25，請確認。	謝謝委員的建議，“孔洞體積明顯增加”應屬於誤植，已經在文中做了相應修改。
承上，建議補充孔徑分布數據。	謝謝委員的意見，樣品的 N2 吸附脫附孔徑分佈圖會在期末報告中完整呈現。
建議補充玻纖布的規格及光催化劑在上的塗佈方法。	謝謝委員的意見，關於玻纖布的規格及光催化劑的塗佈方法已經在第 50 頁第 4.2.4 章節中具體描述到。
建議補充光催化劑在玻纖布上的塗佈厚度。	謝謝委員的意見，因為我們的塗佈方式採用浸泡，所以每一次的厚度可能都會有一點差異，這裡估算一下，玻纖布表面積為 $48\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 2\text{ cm} = 4800\text{ cm}^2$ ，溶膠體積為 500 cm^3 （但每 70 ml 溶膠製程中有 50ml 之乙醇及 4.5ml 之去離子水，這兩種種溶液均會在鍛燒過程中完全揮發，因此厚度為體積/表面積*粉體佔據之百分比= $500/4800 \times 0.21 = 0.021\text{ cm}$ 。



附錄

吸附模組為平面網狀，建議可以考慮採用柱狀模組。	謝謝委員的意見，考慮到製作流程以及易於活性炭層數或量的更換，我們採用平面網狀，之後如果進行新的模組構建組裝，會考慮用柱狀模組。
建議模組效率的評估方式改為排放氣體的濃度。	謝謝委員意見，因為氣體催化降解文獻中多採用效率式評估法，以利於直觀看整體效率。所以我們採用去除效率評估。
在實驗的過程中，發現玻纖布受到有機揮發物的污染。建議進一步評估洗淨效率，與催化模組的可再使用性。	謝謝委員意見，玻纖布原材料因為在其本身過程中就帶有一定量的 VOCs，所以我們對其進行清洗後在進行塗佈
委員六	
本研究目的係為開發低能耗之可見光催化模組，前期（106 年）計畫亦已完成可見光催化劑（鏽摻雜二氧化鈦）製備方法的開發與初步試驗，惟 p. 62 所述及之光催化模組測試結果仍以紫外光做為主要測試條件，似未能符合本計畫預期目標？	謝謝委員意見，光催化模組之可見光條件下測試效果，均有在圖 5.8，圖 5.9 以及圖 5.12 中描述。之所以紫外光和可見光條件下都進行測試，是為了比較在兩種光源下的差異，以作參考。
p. 62 光催化模組測試僅針對催化劑載體（玻纖布）之最適數量進行試驗，尚未能考量污染物濃度、反應時間、進氣流速及流量、濕度、其他化學物質的存在與其他操作條件對於整體處理效能之影響，惟現地實際使用上皆可能面臨前述因子之干擾，現階段試驗結果似未能符合本計畫開發商業化模組之目的？	謝謝委員的意見，之所以以 15 ppm 為初始濃度來降解甲苯，是因為我們已污染廠址的實際污染濃度作參考，來進行模擬的，後續根據需要會在進行其他濃度的測試。在描述降解過程中，均是以反應時間做圖的。根據實驗經驗，本實驗室也曾做過丙酮這一類揮發性有機物降解，該催化劑對丙酮同樣有很好的去除效果。在下半年過程中，會針對環境濕度影響，模擬測試濕度對降解甲苯的影響。
吸附模組之目的係為補足原光催化模組之處理效能，p. 67 測試結果顯示於層數最多且使用量最大之條件下具有最佳的效果，惟後續試驗並未採用此一最佳化條件，似與原規劃目的不同？另此測試僅針對單一次污染物吸	謝謝委員的意見，本研究進行的是“光催化+吸附”相輔相成的多模組組裝模式，在安裝上本團隊使用“即插即用”的模式，以光催化模組為主，以吸附模組為輔。P67 中是對活性炭單獨模組吸附甲苯的評估，目的是為了了解不



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

<p>附能力進行評估，尚未能考量污染物濃度、反應時間、進氣流速及流量與最大吸附容量等對於整體吸附效能之影響，現階段試驗結果似未能測試出一最佳化條件？</p>	<p>同活性炭量對甲苯吸附值域。當光催化不能完全處理甲苯時，後端最少可需要多少活性炭的量來解決剩下殘餘的甲苯。最大化減少活性炭的使用量，減小整體的成本。此外，根據之前的實驗成果，本實驗室也曾做過丙酮這一類揮發性有機物降解，該催化劑對丙酮同樣有很好的去除效果。在下半年過程中，會針對環境濕度影響，模擬測試濕度對降解甲苯的影響。</p>
<p>P. 70 圖 5.12 不同模組之起始濃度不盡相同，如何相互比較之？另由試驗結果可知，單一光催化模組之降解幅度（100%降至 40%）遠高於商業化模組（30%降至 15%），且其於試驗期間內污染度濃度有持續下降之趨勢，反觀商業化模組則有些微上升之趨勢，似與內文所述結果不符？</p>	<p>謝謝委員的意見。(1) 實際上，圖 5.12 中三個模組的起始點是一致的都是已經平衡在 15ppm 之後開始進行實驗的。之所以會出現商業化模組和吸附膜組看似初始濃度不一致，原因是因為實驗之前，在整個系統氣體平衡不能直接接入吸附膜組，若吸附模組比照光催化模組直接使污染氣體通入艙體待其穩定的話，原置於吸附模組內之活性炭便會在污染濃度達到設定值之前開始吸附，進而造成實驗誤差，因此在進行吸附模組實驗時，本團隊會先將污染氣體繞過吸附模組艙體直接導入檢測儀器，待其污染濃度到達設定值再將污染氣體通入吸附模組（這個時間差大致是 5 秒左右），因此不同模組間的污染物進氣濃度均是相同的，均是從 100%開始降解。(2) 從圖 5.12 可以看出，單一光催化模組在 120min 時，已經出現上升趨勢，而商業化模自 50min 後，就一直保持 80%的去除效果，進一步驗證了商業化模組的可行性。</p>
<p>本研究目的係為開發較低成本之尾氣處理技術，惟可見光催化劑的製備過程中有使用到貴金屬（鉑），且吸附模組中亦有使用一般方</p>	<p>謝謝委員的意見，關於 La 摻雜的問題，現階段我們實驗室已經成功地從廢棄熒光粉中回收了鉑元素，再之後規模畫的過程中，會使用</p>



附錄

法常見之活性碳，為利於比較評估本技術之可行性與優勢，建議後續應估算整體設置及後續操作維護成本，並與其他尾氣處理方法比較之。	回收的鋁進行摻雜，減少成本的同時達到資源循環再利用的目的。本研究進行的是“光催化+吸附”相輔相成的多模組組裝模式，在安裝上本團隊使用“即插即用”的模式,以光催化模組為主，以吸附模組為輔。本計劃下半年將估算整體設置及後續操作維護成本，並與其他尾氣處理方法進行比較。
---	---



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

附錄 4 構想書審查意見表

107 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

構想書審查意見表

專案主持人	游勝傑 教授	專案主題	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它
服務單位	中原大學 環工系		
專案名稱	開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
宜對 SVE 可處理之濃度範圍應評估此技術效果。		目前實驗室模組最大可處理的污染氣體流量是 3L/min，甲苯初始濃度在 15 ppmv，而 SVE 瞬間可抽出的氣體流量為 100L/min，揮發性有機氣體濃度在 ppm 級別，所以目前這個是本實驗執行過程中遇到的最大問題。接下來會考慮繼續增加模組規格或者使用高比表面積的負載物來負載催化劑，使其增加反應單位面積上的活性位點。並考慮使用“催化+吸附”聯用技術解決該問題。	
建議本技術可延長活性碳時間與本技術(光催化模組)之時間有效性(替換)應說明。		目前實驗室的模組模擬實驗，可以降解甲苯達 94.84% (模組中增加了催化劑的量)，長達 2 小時未失去活性，以目前的數據顯示，長效型的光觸媒有很大的機會發展出來。光催化氧化過程中，對於揮發性有機物降解，一般終產物是 CO ₂ 和水，不會吸附於催化劑表面。而對於 NO _x 來講，終產物硝酸鹽附著在催化劑表面，當催化劑表面沉積過量時會降低催化劑的活性，只要通過水洗滌方式即可將硝酸鹽洗滌下來，而硝酸鹽屬於無害離子，很容易被植被和微生物吸收利	



附錄

	用，在自然界形成氮循環。對於該商業化裝置，本研究採取隨插即用的模組設計，可以通過模組拆卸、洗滌、更換來解決催化劑失活問題。
建議本技術可先以加油站作測試。	考慮到大型石化貯槽及加油站多導致土壤受到油氣污染，針對石油產品揮發性半揮發性有機物（VOCs / SVOCs）污染土壤，本計劃案是以某加油站作為實測地點的。本計畫與業興公司協助操作之實際污染廠址進行 SVE 法尾氣測試，將 SVE 法處理後尾氣之排放經過流量計控制流量通入，將氣體導入模組中進行光催化反應，最後將光催化反應後之氣體排出到大氣中，期間將會進行氣體採樣，利用 GC/MS 測定反應前後之氣體濃度，最後評估其光催化性能以及持續性，探討該模組之可利用性。
建議優先技術為何？(量化評估之)及 SVE 處理量為何？	本研究欲進行“光催化+吸附”相輔相成的多模組組裝模式，在安裝上本團隊使用“即插即用”的模式，以光催化模組為主，以吸附模組為輔。一方面，光催化劑可以徹底降解有機污染成分；另一方面，在光催化活性不足情況下，活性炭吸附可以起到暫時的吸附的作用，這樣更加有利於再生催化劑的動作或者更換新的催化劑。本研究未來可安裝 BTEX 監測傳感裝置，進行綜合效率評估、每日去除的總有機物含量等進行計算。
宜評估此技術目前雖可延長活性碳，但加入光催化模組之時間替換性？操作環境影響？	謝謝委員的意見本研究將於本計畫過程中評估相關問題。為在商業上具有應用性和價值意義，本研究欲進行“光催化



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

	<p>+吸附”相輔相成的多模塊組裝模式，在安裝上本研究使用“即插即用”的模式，以光催化模組為主，以吸附模組為輔。“一方面，光催化劑可以徹底降解有機污染成分；另一方面，在光催化活性不足情況下，活性炭吸附可以起到暫時的吸附的作用，這樣更加有利於本研究再生催化劑的動作或者更換新的催化劑。安裝 BTEX 監測傳感裝置，進行綜合效率評估、每日去除的總有機物含量等進行計算。</p>
光觸媒之塗裝之技術是否穩定？鏽之純度 摻雜二氧化鈦技術穩定性？	<p>謝謝委員的意見。在 106 年試驗中，本團隊進行光觸媒初步塗佈實驗，試驗了兩種載體，一是玻璃球，二是玻璃纖維布，並對兩者塗佈後的塗佈結果進行了多組失重測試。結果顯示，玻璃球因為表面光滑不利於光催化劑的塗佈。而採用玻璃纖維塗佈時，沒有明顯失重，且光催化活性良好。另外，本實驗有成熟的鏽摻雜 TiO₂ 製備技術，採用凝膠溶膠的製備方法，之後摻雜煅燒，樣品具有良好的穩定性。</p>
宜評估 SVE 尾氣濃度與光催化處理效應？	<p>本計畫(107 年)本團隊提出對 SVE 尾氣降解之低能耗可見光催化商業模組之開發計劃案，本計劃欲採用 106 年開發之可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。另本團隊於本年度擬將上述光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染</p>



附錄

	場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 % 以上。
委員二	
本計畫為延續性計畫。	謝謝委員的意見。本計畫案從計畫內容來看，屬於延續性計畫案。第一年(106年)本團隊已經完成了可見光催化劑的製備和物理、化學性質特徵分析，並利用有機物光催化降解反應系統進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，且已獲得了良好的光催化效果，現階段正利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析。本計畫(107 年)本團隊提出對 SVE 尾氣降解之低能耗可見光催化商業模組之開發計畫案，本計劃欲採用 106 年開發之可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。另本團隊於本年度擬將上述光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 % 以上。
前期成果宜簡要說明，並說明前期成果的特殊性與應用瓶頸，並藉此說明本年度計畫的研究重點。	謝謝委員的建議，本團隊已於本申請書補上並說明本年之重點，其他低濃度有機廢棄處理技術之競爭優勢。
整體工作內容分量多，由於計畫書中未說明目前團隊可見光光觸媒開發進展，是否	目前實驗室模組最大可處理的污染氣體流量是 3L/min, 而 SVE 瞬間可抽出的氣



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

<p>已經具有可見光光催化觸媒製造技術、且經長期測試？另，目前市面上已有多種低濃度有機廢氣處理技術，包括光催化技術，建議後續應說明本計畫技術之優勢。</p>	<p>體流量為 100L/min,所以目前這個是本實驗執行過程中遇到的最大問題。接下來會考慮繼續增加模組規格或者使用高比表面積的負載物來負載催化劑，使其增加反應單位面積上的活性位點。並考慮使用“催化+吸附”聯用技術解決該問題。第一年(106 年)本團隊已經完成了可見光催化劑的製備和物理、化學性質特徵分析，並利用有機物光催化降解反應系統進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，且已獲得了良好的光催化效果，現階段正利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析。本計畫(107 年)本團隊提出對 SVE 尾氣降解之低能耗可見光催化商業模組之開發計劃案，本計劃欲採用 106 年開發之可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。另本團隊於本年度擬將上述光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 %以上。</p>
<p>原計畫是”可見光”，本計畫是否仍是以可見光為光源。</p>	<p>本計劃會仍舊以可見光為光源。本研究的亮點在於本研究製備的催化劑在可見光下即可降解揮發性有機污染物，與一般市售的 P25 只能吸收紫外光對比，利用可見光作為光源，可以節約 35%-50%</p>



附錄

	的能耗。
SVE 所產出的氣體以揮發性有機物與水氣為主，干擾因子建議探討。	考慮到在實際情況中，污染氣體組成複雜且易受到環境濕度和溫度影響，所以本研究要進行多組分混合揮發性有機污染氣體的光催化模組實驗，並且分析不同溫度和濕度情況下，光催化模組的降解效率。
本計畫屬實務技術開發，且為延續性計畫，宜與既有技術就經濟性與實務應用操作性以及穩定性加以評估討論。	謝謝委員的意見。第一年(106 年)本團隊已經完成了可見光催化劑的製備和物理、化學性質特徵分析，並利用有機物光催化降解反應系統進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，且已獲得了良好的光催化效果，現階段正利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析。本計畫(107 年)本團隊提出對 SVE 尾氣降解之低能耗可見光催化商業模組之開發計劃案，本計劃欲採用 106 年開發之可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。另本團隊於本年度擬將上述光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 %以上。
委員三	
本計畫目標、架構、內容合理且可執行性。	謝謝委員的肯定。本團隊已於第一年(106年)已經完成了可見光催化劑的製



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

	<p>備和物理、化學性質特徵分析，並利用有機物光催化降解反應系統進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，且已獲得了良好的光催化效果，現階段正利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析。從經濟可行性上來講：首先，本研究的亮點在於製備的催化劑在可見光下即可降解揮發性有機污染物，與一般市售的P25只能吸收紫外光對比，利用可見光作為光源，可以節約35%-50%的能耗。其次，本研究欲進行“光催化+吸附”相輔相成的多模塊組裝模式，在安裝上使用“即插即用”的模式，以光催化模組為主，以吸附模組為輔。並在實驗後期進行商業模組的成本分析，評估其經濟可行性。</p>
委員四	
<p>商業化模組成品之規劃，建議宜有相關成品之規範(或規格)說明，其中至少包括處理容量或模組化設計參數之說明。</p>	<p>相關規範已於本申請書中補充。光催化劑均勻塗布在高度 267 mm、直徑 37 mm 中空玻璃管內側，在中空處置入燈管作為光源，將 SVE 法處理後之尾氣通入該模組中進行光催化反應，再以一定的優化比例負載於多孔載體上（三氧化二鋁、活性炭、分子篩等）製備以高比表面積的催化複合材料。之後，將光觸媒均勻分佈在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽中，將污染物氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃度通入反應槽中，之後進行光催化降解實驗。光源為(UV-vis)紫外到可見光範圍，反應時間為 1 小時，在腔體內的停</p>



附錄

	留時間為 2 min，最後將反應後之氣體通入固定式光離子偵測器（PIDScan）測定該濃度，評估光催化去除待測污染物效率。
光催化劑活性特性之說明，以及失活後之再生或處理處置之方案規劃，均宜有進一步之說明。	光催化氧化過程中，對於揮發性有機物降解，一般最終產物是 CO ₂ 和水，不會吸附於催化劑表面。而對於 NO _x 來講，終產物硝酸鹽附著在催化劑表面，當催化劑表面沉積過量時會降低催化劑的活性，只要通過水洗滌方式即可將硝酸鹽洗滌下來，而硝酸鹽屬於無害離子，很容易被植被和微生物吸收利用，在自然界形成氮循環。對於該商業化裝置，本研究採取隨插即用的模組設計，可以通過模組拆卸、洗滌、更換來解決催化劑失活問題。
污染場址之尾氣濃度，是否有應用之限制條件或範圍？是否會影響光催化之成效？	考慮到在實際情況中，污染氣體組成複雜且易受到環境濕度和溫度影響，所以本研究要進行多組分混合揮發性有機污染氣體的光催化模組實驗，並且分析不同溫度和濕度情況下，光催化模組的降解效率。目前實驗室模組最大可處理的污染氣體流量是 3L/min，而 SVE 瞬間可抽出的氣體流量為 100L/min，所以目前這個是本實驗執行過程中遇到的最大問題。接下來會考慮繼續增加模組規格或者使用高比表面積的負載物來負載催化劑，使其增加反應單位面積上的活性位點。並考慮使用“催化+吸附”聯用技術解決該問題。
光催化劑之製備成本效益分析，建議宜加入於計畫內容中予以討論，以確認未來商	根據委員的建議。107 年計畫案中會對光催化劑之製備成本效益分析，建議宜



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

業化應用之可行性。	加入於計畫內容中予以討論，以確認未來商業化應用之可行性。
本署審查意見	計畫單位回覆
請說明本年度計畫與 106 年度之差異性。	<p>第一年(106 年)本團隊已經完成了可見光催化劑的製備和物理、化學性質特徵分析，並利用有機物光催化降解反應系統進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，且已獲得了良好的光催化效果，現階段正利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析。本計畫(107 年)本團隊提出對 SVE 尾氣降解之低能耗可見光催化商業模組之開發計劃案，本計劃欲採用 106 年開發之可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。另本團隊於本年度擬將上述光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 %以上。</p>
請說明光催化設備之生命週期。	<p>目前實驗室的模組模擬實驗，可以降解甲苯達 94.84% (模組中增加了催化劑的量)，長達 2 小時未失去活性，以目前的數據顯示，長效型的光觸媒始有很大的機會發展出來。對於該商業化裝置，本研究採取隨插即用的模組設計，可以通過模組拆卸、洗滌、更換來解決</p>



附錄

	催化劑失活問題，採用該方法改善、延長光催化設備的生命週期。
--	-------------------------------



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

附錄 5 計畫書審查意見表

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

107 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

專案主持人：游勝傑	服務單位：中原大學環工系	研究類 02
專案名稱：開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組		
委員一		
本研究雖加裝 BTEX 監測傳感裝置，但其準確度與污染物去除率宜加以評估。	謝謝委員建議，本團隊將在之後的試驗中對加裝的傳感裝置進行污染物去除的準確度評估。	
本研究已執行多年補助計畫建置相關研究基礎，其耗材及人事費用偏高宜建議調降。	謝謝委員建議，由於本實驗涉及實驗材料開發，材料物理化學特性鑑定，材料光催化性質測試，實驗裝置的商業開發以及後期需要與廠商共同合作加油站附近的模廠測試評估等多個環節，所以預算的費用偏高，根據委員的建議，相關人事費與耗材費均於修正計畫書中調降。	
委員二		
主持人(執行團隊)的學術研究能力與技術發展能力足以勝任本計畫	謝謝委員對本團隊的肯定。	
主持人(執行團隊)近五年研究與技術發展績效佳	謝謝委員的肯定。	
本專案對未來土壤及地下水污染整治工作推動的貢獻仍待本計畫未來執行成果的呈現與說明	謝謝委員的對該計劃內容的肯定。	
本專案預估之成果績效主要為論文發表(研討會或期刊論文)(本計畫本年度擬執行現場試驗，其成果仍待研究結果的驗證)	謝謝委員的意見，本專案預估成果除了 SCI 論文發表以外，還會開發出具有商業應用價值的 SVE 尾氣治理模組和模廠測試報告，用來驗證本實驗成果。	
本研究計畫書撰寫具體	謝謝委員對本計畫書的肯定。	



附錄

本研究計畫書所擬定的研究方法可行	謝謝委員的對該計劃擬定研究方法的肯定。
本研究計畫書所擬定的研究內容與所預期的研究成果，對未來土壤或地下水污染場址整治的實場應用性仍待說明(計畫書中對研究成果的實務應用性的說明仍待驗證)。	謝謝委員的建議，本計劃案嘗試製備光催化商業化模組產品，未來可能會被廣泛應用於加油站附近等土壤受到污染地區，並加裝安裝物聯網即時監測裝置，對地下揮發性有機污染氣體 BTEX 進行即時監測，運行綜合效率評估，每日去除的總有機物含量等進行計算，並通過設置污染氣體閾值來自動控制光催化降解裝置的啟動與關閉。本執行團隊將安裝上述預期目標嚴格執行實驗進度，完成研究成果的驗證。
本研究計畫書的文獻蒐集尚完整，對國內外本研究領域現況了解	謝謝委員對本計畫書的肯定。
本研究專案執行期限合理	謝謝委員的肯定。
本研究計畫書中對研究的預期成果已說明	謝謝委員對本計劃案預期成果的肯定。
本計畫屬延續性計畫	謝謝委員的建議，本計劃案計劃申請為延續性專案，在 107 年計劃按中將現在的催化模組與吸附模組結合研製成商業化模組，進行進一步應用，實現技術轉移。
本研究計畫對預期成果的呈現說明以學術發表為主，對實務應用性的具體仍待驗證	謝謝委員的建議，在 107 年計劃按中將現在的催化模組與吸附模組結合研製成商業化模組，進行進一步應用，將學術成果進行技術轉移，實現應用性和事務應用的驗證。
建議評估經濟性(尤其與既有的類似設施的操作維護費比較)	謝謝委員的意見，本團隊將於計劃案執行過程中，對材料的成本和既有的類似設施的操作維護費進行比較。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

本研究計畫已依原計畫構想書的審查意見修正	謝謝委員的肯定。
委員三	
本計畫雖申請屬研究計畫，但實際上將於執行過程中有配合某選定之污染場址，配合進行實場之測試，具有發展為實際商品之規劃與企圖，甚佳。	謝謝委員對本計畫書的肯定。
實場測試需遵守原先已核准之改善計畫書	謝謝委員的意見，關於測試的部分會在後期執行過程中遵照原先已核准的改善計劃書完成。
委員四	
計畫書中對於文獻研究之彙整相當完整，惟均未註明來源出處，其中 3-2 節至 3-4 節之內容，應予以加註來源。	謝謝委員的意見，本團隊已在修正版中作了相對應的加註。
前期研究係利用光催化纖維布進行測試，然本研究則改以其他溶膠凝膠合成法製備 TiO ₂ 觸媒，如何整合不同之光催化劑之成果？宜有完整之論述。	謝謝委員的意見，本計劃案 TiO ₂ 的合成方法一直採用的是溶膠凝膠合成法，之後將製備好的光催化劑塗佈在比表面積較大的不織布和玻璃纖維上進行光催化降解測試。
光催化劑製備之成品品質穩定性如何確認？另光催化降解污染物之試驗條件規畫，亦應予以確認與說明。	謝謝委員的意見，(1) 本團隊在 106 年的計劃案中，採用循環測試法對光催化劑的穩定性進行了長達 180 小時的催化活性測定。實驗證明，180 小時後，催化活性依舊有較好的表現。(2) 實際實驗過程為將光催化劑均勻塗布在高度 267 mm、直徑 37 mm 中空玻璃管內側，在中空處置入燈管作為光源，將 SVE 法處理後之尾氣通入該模組中進行光催化反應，再以一定的優化比例負載於多孔載體上（三氧化二鋁、活性炭、分子篩等）製備以高比表面積的催化複合材料。之後，將光觸媒均勻



附錄

	分佈在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽中，將污染物氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃度通入反應槽中，之後進行光催化降解實驗。光源為(UV-vis)紫外到可見光範圍，反應時間為 1 小時，在腔體內的停留時間為 2 min，最後將反應後之氣體通入固定式光離子偵測器 (PIDScan) 測定該濃度，評估光催化去除待測污染物效率。
商業化模組設計規範，除尺寸大小外，應有功能設計參數，以及污染物之預期去除效率等功能指標，方能確認計畫之成效。	謝謝委員的意見，目前實驗室模組最大可處理的污染氣體流量是 3 L/min, 而 SVE 瞬間可抽出的氣體流量為 100 L/min, 對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 %以上。
本署意見	
雜項費用不得編列汽車修繕費。	謝謝署內的意見，本團隊將進行修改。
請補上專任助理薪資對照表。	謝謝署內的意見，鑒於最終經費有所刪減，本計畫案不再編寫專任助理。
請將意見回覆表置於計畫書首頁後。	謝謝署內的意見，本團隊未來將意見回覆表置於計畫案首頁。



開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

附錄 6 會議記錄

開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組

107 年科研模場專案訪談

- 一. 會議時間：107 年 05 月 01 日(星期二) 上午 11 時 40 分
- 二. 會議地點：中原大學環境工程學系 3 樓 306 會議室
- 三. 出席人員：土基會代表共 3 人（組長、組員 A、組員 B）；
游勝傑，康菲，楊宗翰
- 四. 紀錄人：康菲
- 五. 簡報報告人：游勝傑
- 六. 報告事項：107 年科研模場專案訪談
- 七. 與會代表意見：

1.組長提問與建議

- (1) 問題 1：為什麼四片玻璃纖維布的催化效果不及三片的效果？

游勝傑：這個與空氣流動有關，越多的填充劑，空氣阻力越大。填充劑過多會影響空氣流動的效果。並且催化效果與比表面積有關，不一定是催化劑越多，催化效果越好。

- (2) 問題 2:光催化模組規格是多少？

游勝傑：本實驗設計的光催化模組直徑為 19cm，高 70 公分，氣體停留時間 2.33 min，氣體流速 3L/min。

- (3) 問題 3:現場測試時，如何與 SVE 聯用？

游勝傑：計劃案後期會直接將組裝好的“催化+吸附”模組嫁接在土壤整治中的 SVE 設備的後面，進行污染氣體的降解與吸附。



附錄

(4) 問題 4: 整套模組的成本如何？

游勝傑：整套模組的成本會在本次計劃案的後續過程中進行估算。目前我們是希望光催化劑能夠延長活性炭的壽命。

(5) 問題 5: 實場整治的部分，是否如執秘所說需要環保署提供資料？

游勝傑：去年合作的業興公司已經完成了整治，今年我們仍在檢索合適的污染廠址，希望環保署提供相關污染廠址，利於後續實場整治的進行。

2. 組員 A

(1) 問題 1：怎樣清洗玻璃纖維布？

康菲：目前實驗室階段，我們採用水洗後在烘乾即可達到清洗的效果。

(2) 問題 2: 在催化反應體系中如何控制加濕，多少濕度時效果最好？

游勝傑：我們在催化評價裝置中安裝了濕度調節器（如簡報第五頁所示），目前 40%-60% 濕度時，可以達到比較好催化降解效果。但是，在實際廠址污染氣體降解時，情況會比較複雜，濕度也較難控制。

八. 決議與結論：

1. 後續實驗後，要評估整套模組的成本估算。
2. 環保署將協助提供相關污染廠址，利於後續實廠整治的進行。

九. 會議結束（下午 12 時 10 分）

- 十. 實驗室參訪：土基會於會議結束後，參訪中原大學環境工程學系 413 實驗室光催化模組、吸附模組以及催化評價裝置。