



## 行政院環境保護署

110 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

# 以光催化技術處理地下水中含氯有機 污染物-光纖模組及綠能系統開發 (第一年) 期末報告(定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署  
專案執行單位：國立屏東科技大學／環境工程與科學系  
專案主持人：陳冠中 教授  
專案執行期間：110 年 03 月 19 日起至  
111 年 02 月 28 日止

中 華 民 國 111 年 02 月 印製



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 type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗 |  |
| 研究主題   |           | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 預防 <input type="checkbox"/> 自訂                                         |           |           |                  |                                                                        |  |
| 申請機構系所 |           | 國立屏東科技大學環境工程與科學系                                                                                                                                                   |           |           |                  |                                                                        |  |
| 機構地址   |           | 91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號                                                                                                                                                |           |           |                  |                                                                        |  |
| 專案主持人  |           | 陳冠中                                                                                                                                                                |           | 職等/職稱     |                  | 教授                                                                     |  |
| 協同主持人  |           | 謝文博                                                                                                                                                                |           | 職等/職稱     |                  | 經理                                                                     |  |
| 專案名稱   | 中文        | 以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發                                                                                                                                    |           |           |                  |                                                                        |  |
|        | 英文        | The Use of Photocatalytic Technology to Treat Chlorinated Organic Pollutants in Groundwater-Development of Optical Fiber Module and Green Energy System.           |           |           |                  |                                                                        |  |
|        | 中文關鍵字     | 光催化透水性反應牆、模組化、含氯有機物、現地整治、綠能系統                                                                                                                                      |           |           |                  |                                                                        |  |
|        | 英文關鍵字     | Photocatalytic water permeable reaction wall, modular, Chlorinated Organics, On-site remediation, Green energy system                                              |           |           |                  |                                                                        |  |
| 執行期程   |           | <input type="checkbox"/> 1 年期 <input checked="" type="checkbox"/> 2 年期 <input type="checkbox"/> 3 年期<br>自 民 國 1 1 0 年 0 3 月 1 9 日 起<br>至 民 國 1 1 2 年 0 2 月 2 8 日 止 |           |           |                  |                                                                        |  |
| 專案主持人  |           | 姓名：陳冠中 E-mail：kcchen@mail.npust.edu.tw 專線：(08)770-3202#7039<br>手機：0988-096-249                                                                                     |           |           |                  |                                                                        |  |
| 專任助理   |           | 姓名：陳慶榮 E-mail：chingrung00@gmail.com 專線：08)770-3202#7082<br>手機：0934-070-639                                                                                         |           |           |                  |                                                                        |  |
| 經費分析總表 | 專案預估總經費   |                                                                                                                                                                    | 110 年度金額  | 111 年度金額  | 編列說明             |                                                                        |  |
|        | 1.        | 人事費用                                                                                                                                                               | 778,504   | 901,790   | (1~5 項相加之 50%為限) |                                                                        |  |
|        | 2.        | 貴重儀器使用含維護費                                                                                                                                                         | 10,000    | 10,000    | (與計畫實驗相關)        |                                                                        |  |
|        | 3.        | 消耗性器材與主要費用                                                                                                                                                         | 902,500   | 1,259,000 | (與計畫主體相關)        |                                                                        |  |
|        | 4.        | 其它研究相關費用                                                                                                                                                           | 57,600    | 62,400    | (含差旅與租賃費用)       |                                                                        |  |
|        | 5.        | 雜項費用                                                                                                                                                               | 24,123    | 26,700    | (1~6 項相加之 5%為限)  |                                                                        |  |
|        | 6.        | 行政管理費                                                                                                                                                              | 177,273   | 225,989   | (1~5 項相加之 10%為限) |                                                                        |  |
|        | 專案計畫申請總金額 |                                                                                                                                                                    | 1,950,000 | 2,485,879 | (多年期計畫請列全程經費)    |                                                                        |  |

執行單位：國立屏東科技大學

單位負責人：戴昌賢

專案主持人：\_\_\_\_\_ (簽名及蓋章) 日期：\_\_\_\_\_



**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 02 月 19 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 type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗                                    |
| 研究主題   | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 預防 <input type="checkbox"/> 自訂 |       |                                                                                                           |
| 申請機構系所 | 國立屏東科技大學<br>環境工程與科學系                                                                                                       | 計畫主持人 | 陳冠中                                                                                                       |
| 專案名稱   | 以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發                                                                                            |       |                                                                                                           |
| 專案執行期程 | <input type="checkbox"/> 1 年期 <input checked="" type="checkbox"/> 2 年期 <input type="checkbox"/> 3 年期                       | 查核點   | <input type="checkbox"/> 申請 <input checked="" 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。

**(一) 學術面**

| 項目 \ 目標達成程度                      |                  |           | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術<br>產出發表日期、發表處、發<br>表名稱、影響指數等) |
|----------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------------------|
| A<br>學術<br>產<br>出<br>及<br>活<br>動 | 1.國內投稿<br>(篇數)   | (1)論文     | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (2)研討會論文  | 1         | 0         | 1         | 100%      |                                                 |
|                                  | 2.國外投稿<br>(篇數)   | (1)期刊論文   | 1         | 0         | 0         | 0%        | 本團隊規劃於第二<br>年度(111 年度)成果<br>彙整後進行投稿             |
|                                  |                  | (2)研討會論文  | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  | 3.報告<br>(篇數)     | (1)技術報告   | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (2)研究報告   | 1         | 0         | 1         | 100%      |                                                 |
|                                  | 4.專著 (本數)        |           | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  | 5.辦理學術<br>會議(場數) | (1)研討/說明會 | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (2)成果發表會  | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (3)論壇     | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
| 6.研發改良<br>技術(項數)                 | (1)已開發技術         | 0         | 0         | 0         | 0%        |           |                                                 |
|                                  | (2)技術平台          | 0         | 0         | 0         | 0%        |           |                                                 |
| B<br>人<br>才<br>培<br>育            | 7.研發人員<br>(人數)   | (1)碩士     | 2         | 2         | 2         | 100%      |                                                 |
|                                  |                  | (2)博士     | 1         | 1         | 1         | 100%      |                                                 |
|                                  | 8.研究團隊<br>(個數)   | (1)跨領域團隊  | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (2)跨機構團隊  | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (3)形成研究中心 | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
|                                  |                  | (4)形成實驗室  | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                                 |
| 9.其他指標<br>(請自行命名)                |                  |           |           |           |           |           |                                                 |



## (二) 產業面

| 目標達成程度      |                  |            |       | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案<br>達成率 | 備註                                |
|-------------|------------------|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| 項目          |                  |            |       |           |           |           |           |                                   |
| A 智慧財產權     | 1.專利<br>(件數)     | 已核准        | 發明    | 0         | 0         | 0         | 0%        | 於 111 年後半年度與國立屏東科技大學研發處及相關單位進行評估。 |
|             |                  |            | 新型/設計 | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  |            | 合計    | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 申請中        | 發明    | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  |            | 新型/設計 | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  |            | 合計    | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
| B 研發技術轉移    | 2.先期技術<br>成果移轉   | 件數         |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 授權金(仟元)    |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 衍生利益金(仟元)  |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             | 3.技術移轉<br>(專利)   | 件數         |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 授權金(仟元)    |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 衍生利益金(仟元)  |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             | 4.技術移轉<br>(應用技術) | 件數         |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 授權金(仟元)    |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 衍生利益金(仟元)  |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             | 5.可移轉<br>產業技術    | (1)技術(件數)  |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
| (2)品種/系(件數) |                  | 0          | 0     | 0         | 0%        |           |           |                                   |
| C 產學研合作     | 6.促成合作<br>研究     | 件數         |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 金額(仟元)     |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             | 7.促成投資           | 件數         |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 投資金額(仟元)   |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             | 8.促成取得<br>業界科專   | 件數         |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
|             |                  | 業界投資金額(仟元) |       | 0         | 0         | 0         | 0%        |                                   |
| 9.其他指標      |                  |            |       |           |           |           |           |                                   |





## (三) 政策面

| 目標達成程度        |                      |        | 申請預<br>估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案<br>達成率 | 備註 |
|---------------|----------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|
| 項目            |                      |        |           |           |           |           |    |
| A<br>服務便<br>民 | 1.技術服<br>務           | 次數     | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
|               |                      | 收入(仟元) | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
|               | 2.諮詢服<br>務           | 次數     | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
|               |                      | 收入(仟元) | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
| B<br>政策<br>推動 | 3.協助政<br>府制定<br>(件數) | (1)政策  | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
|               |                      | (2)法規  | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
| C<br>技術<br>效益 | 4.整治技術提升(%)          |        | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
|               | 5.整治成本降低(%)          |        | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
|               | 6.提升能源效率(%)          |        | 0         | 0         | 0         | 0%        |    |
| 7.其他指標        |                      |        |           |           |           |           |    |

### 三、請依學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200 字為限)

#### 學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

本技術藉由光纖系統將光催化技術直接應用於處理受污染之地下水，歷年研究成果顯著，擬由本計畫執行成果，發表 1 篇國際 SCI 論文和 1 篇國內研討會論文。計畫將由本系博士生、碩士生參與執行，培養我國土壤地下水污染處理人才。

#### 產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)

本模場試驗計畫與國內具有地下水污染處理豐富實務經驗之裕山環境工程股份有限公司(以下簡稱裕山公司)組成合作團隊，由國立屏東科技大學陳冠中教授之研究團隊負責光催化處理系統相關之設備設置、操作及採樣，污染物分析由台灣檢驗科技股份有限公司，並由井帝鑿井公司協助使用之監測井和簡易/處理井維護。本計畫邀請裕山公司擔任協同主持人，與該公司研討光纖系統設置，有培育新興環保技術工程人才之效益。另一方面，本團隊已於上年度與本校研發處及創新育成中心進行專利或技術轉移評估，為專利申請或技轉作準備。

#### 政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染場址管理等政策及法規研訂之參考)

本技術符合綠色處理技術之要求，除可以降低處理時之能源消耗外，並可以減少化學藥劑之運送和使用，降低二次污染發生之機率，可以做為綠色環保技術推廣，且經前期計畫初步評估，所需成本較目前所採用之現地處理技術低廉。本期研究將以改質光觸媒進行可見光(太陽光)光催化試驗，研究成果可以做為使用太陽光作為光纖光催化光源和系統能源之參考，具有成本效益。



**行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會**  
**110 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 ☐申請計劃書

☐期中報告 ☐期末報告

**審查意見回覆對照表**

|                                                                               |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 計畫年度                                                                          | 110                             | 專案類型                                                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗                                                     |  |
| 計畫主持人                                                                         | 陳冠中                             | 研究類別                                                                                                                                                                                                                                             | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 預防 <input type="checkbox"/> 自訂 |  |
| 計畫名稱                                                                          | 以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發 |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
| 專案連絡人                                                                         | 陳慶榮                             | 連絡專線                                                                                                                                                                                                                                             | (08)770-3202 #7082                                                                                                         |  |
| 委員審查意見                                                                        |                                 | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                            |  |
| <b>委員一</b>                                                                    |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
| 1. 光催化包括引入光線及催化接觸，接觸及分屬被動式，光源在地下水是否由於孔隙介質影響而傳輸距離有限，在設置的困難度與有效範圍是否受限，微生物是否受影響。 |                                 | 謝謝委員意見。<br>光纖系統藉由地下水流動接觸進行處理，過去年度受限於單井試驗，雖處理成效顯著，惟仍須進行有效性驗證。因此本團隊已在 110-111 年度計畫選定現有之多井場址進行試驗，以反應牆之概念進行實際操作，並分析污染物濃度降解情形，透過多井試驗成果驗證來評估處理有效範圍；至於在系統設置上，本年度將進行系統模組化，提升其設置之便利性。此外，根據過去之研究，光催化對於微生物必然會有影響，惟本處理技術並無藥劑殘留之問題，現地污染處理後系統撤除不再照光，微生物應可回復無虞。 |                                                                                                                            |  |
| <b>委員二</b>                                                                    |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
| 1. 主題符合徵求範疇。                                                                  |                                 | 謝謝委員意見。                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |  |
| <b>委員三</b>                                                                    |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
| 1. 執行團隊已執行類似計畫多年。<br>2. 前期模場試驗的瓶頸建議說明，本計畫與前期計畫除了綠能之外的主要差異為何，建議說明。             |                                 | 1. 謝謝委員意見。<br>2. 本技術之特性需藉由多井設置才能有「面」的處理效果，過去年度受限於計畫經費，僅能以單井進行處理，惟由研究成果仍可看出其效果顯著。因此，本年度所選之場址已現有三口處理井和五口觀測井設置，可以進行多井效果之驗證，對於未來技術應用和推廣非常重要。此外，本處理系統係用各種材料自行組裝而成，複雜且需要技術，因此本年度將進行系統模組化，以利於現場組裝、設置、保養維護，模組化不但可以降低使用之技術門檻，利於推廣應用，亦能確保系統操作之正確性和處理效果。    |                                                                                                                            |  |
| <b>委員四</b>                                                                    |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
| 1. 是一新技術應用且運用國內發展之再生能源技術進行土水應用。<br>2. 對於模場的狀況瞭解清楚。                            |                                 | 1. 謝謝委員意見。<br>2. 謝謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                            |  |



|                                                   |            |
|---------------------------------------------------|------------|
| 3. 研究團隊與產業界的合作相當緊密。                               | 3. 謝謝委員肯定。 |
| 4. 主持人已在歷年結案報告呈現本技術成效。                            | 4. 謝謝委員肯定。 |
| <b>委員五</b>                                        |            |
| 1. 無進一步意見。                                        | 1. 謝謝委員。   |
| <b>委員六</b>                                        |            |
| 1. 可行！                                            | 1. 謝謝委員鼓勵。 |
| <b>委員七</b>                                        |            |
| 1. 團隊長期進行光催化處理系統，本次以模場配合於太陽光電減少化學藥劑之運送與使用，成果值得期待。 | 1. 謝謝委員鼓勵。 |



# 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

## 110 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    ☒申請計劃書

☐期中報告    ☐期末報告

**審查意見回覆對照表**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計畫年度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 110                             | 專案類型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗                                                     |
| 計畫主持人                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 陳冠中                             | 研究類別                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 預防 <input type="checkbox"/> 自訂 |
| 計畫名稱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |
| 專案連絡人                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 陳慶榮                             | 連絡專線                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | (08)770-3202 #7082                                                                                                         |
| 委員審查意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                 | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                            |
| <b>委員一</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |
| 1. 無                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                 | 1. 謝謝委員。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                            |
| <b>委員二</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |
| 1. 可應用關鍵技術宜確認。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                 | 1. 謝謝委員意見。模場現地處理採用之關鍵技術以覆鍍光觸媒光纖之光催化技術為主，並將再於研究報告中敘明。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |
| <b>委員三</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |
| <p>一、主持人與計畫執行團隊</p> <p>1. 主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。</p> <p>2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。(延續性)</p> <p>二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義</p> <p>1. 本專案計畫對國內地下水污染整治工作的發展具有貢獻。</p> <p>2. 本計畫書撰寫具體(延續性)，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。</p> <p>3. 本計畫的成果具有潛在的實場應用性。</p> <p>4. 本計畫為多年期模場試驗計畫，具計畫延續性。</p> <p>5. 主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的模場(或研究)研究計畫，之前的專案執行績效佳。</p> <p>6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境。(例如：土壤質地)與應用限制條件(例如：純相的影響)</p> <p>7. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境及該情境下與其他可行整治工法的成本效益比較(原計畫書中說明：“…此外，本處理系統係用各種材料自行組裝而成，複雜且需要技術，因此本年度將進行系統模組化，以利於現場組裝、設置、保養維護，模組化不但可以降低使用之技術門檻，利於推廣應用，亦能確保系統操作之正確性和處理效果…”)，本計畫已執行多年，因此，建議本研究應提供一套可行與因應現場實務操作上具操作可行性的 SOP，並以本計畫加以驗證。</p> |                                 | <p>一、主持人與計畫執行團隊</p> <p>1. 謝謝委員肯定。</p> <p>2. 謝謝委員肯定。</p> <p>二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義</p> <p>1. 謝謝委員肯定。</p> <p>2. 謝謝委員肯定。</p> <p>3. 謝謝委員肯定。</p> <p>4. 謝謝委員肯定。</p> <p>5. 謝謝委員肯定。</p> <p>6. 謝謝委員意見。本研究團隊於 107 年度進行噸級土壤箱試驗時，使用屏科大校園內之土壤進行測試，土壤質地經過分析為黏質壤土；而 108-109 年度於新開寮模場進行現地處理試驗時，當地之土壤主要為卵礫石層。以上試驗結果顯示，本技術對於不同質地之土壤，適用性良好，極具發展潛力，而本年度計畫中將再進一步確認技術之應用限制條件。</p> <p>7. 謝謝委員意見。本計畫將改善前期系統組裝之流程，並針對模組化後之系統於現場實務和操作，提供一套可行之施作 SOP，藉以提升操作可行性，並</p> |                                                                                                                            |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 透過本專案進行驗證。                                                                                                                               |
| <b>委員四</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                          |
| 1. 是一新技術應用且運用國內發展之再生能源技術進行土水應用；<br>2. 對於模場的狀況瞭解清楚；<br>3. 研究團隊與產業界的合作相當緊密；<br>4. 主持人已在歷年結案報告呈現本技術成效。                                                                                                                                                                                                                               | 1. 謝謝委員肯定。<br>2. 謝謝委員肯定。<br>3. 謝謝委員肯定。<br>4. 謝謝委員肯定。                                                                                     |
| <b>委員五</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                          |
| 1. 與環保科技公司合作，執行方法明確可行。<br>2. 結合太陽光電並不能強調為綠色整治，可不可行可另為探討。                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1. 謝謝委員肯定。<br>2. 謝謝委員意見。本光纖光催化技術屬綠色整治主要係指不灌注或使用化學藥劑，採用低能耗光源進行污染處理。本計畫後續將再針對技術與綠色整治之相關性進行說明。而有關於本計畫中，處理系統結合太陽光電之執行成果、可行性和相關建議，將依委員之建議作探討。 |
| <b>委員六</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                          |
| 1. 實作時的效率衰減與系統耐變度分析最好能更仔細。                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1. 謝謝委員意見。本計畫將藉由不同操作條件之測試進行更進一步之系統效率和應用探討。                                                                                               |
| <b>委員七</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                          |
| 1. 本專案對未來土壤及地下水污染整治貢獻度佳。                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1. 謝謝委員鼓勵。                                                                                                                               |
| <b>委員八</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                          |
| 1. 與業界合作，具實務可行性。<br>2. 自評成果宜強化。                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1. 謝謝委員肯定。<br>2. 謝謝委員鼓勵。由於新技術之開發具有較多之不確定性，本團隊將努力於研發成果之呈現，期能展現在自評成果中。                                                                     |
| <b>委員九</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                          |
| 1. 經費總表不一致問題(1)p.56 人事費金額不一致，(2)p.60 其他研究相關費用，建請修正<br>2. (一)人事費用：<br>(1)考量預算有限及預計計畫執行期程建議以編列11個月為上限、計畫主持人月支酬金統一酌調為15,000元/月、協同主持人月支酬金統一酌調為10,000元/月。<br>(2)p.56 專任助理：計算費用有誤。<br>3. p.58 消耗性器材及主要費用，部分品項建議參考前年度實際核銷金額修正並酌減。<br>4. p.60 差旅費，雜費原編列11,658元，應依據差旅雜費400元/日，共24日編列。<br>5. p.62 雜項費用建議(1)碳粉匣統一編列2個為上限，(2)文具費用統一最高編列5,000元 | 1. 謝謝委員意見。已修正。<br>2. 謝謝委員意見。<br>(1)已依委員意見調整完成。<br>(2)已完成修正。<br>3. 謝謝委員意見。已將耗材費用修正並酌減。<br>4. 謝謝委員意見。已修正。<br>5. 謝謝委員意見。已按照建議修正完成。          |





# 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

## 110 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 ☐申請計劃書

☒期中報告 ☐期末報告

**審查意見回覆對照表**

|                                                                                                                |                                 |                                                                                                                 |                                                                                                                            |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 計畫年度                                                                                                           | 110                             | 專案類型                                                                                                            | <input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗                                                     |  |
| 計畫主持人                                                                                                          | 陳冠中                             | 研究類別                                                                                                            | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 預防 <input type="checkbox"/> 自訂 |  |
| 計畫名稱                                                                                                           | 以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發 |                                                                                                                 |                                                                                                                            |  |
| 專案連絡人                                                                                                          | 陳慶榮                             | 連絡專線                                                                                                            | (08)770-3202 #7082                                                                                                         |  |
| 委員審查意見                                                                                                         |                                 | 計畫單位回覆                                                                                                          |                                                                                                                            |  |
| <b>委員一</b>                                                                                                     |                                 |                                                                                                                 |                                                                                                                            |  |
| 1. 成果績效自評表當中有關產業面與政策面項目不宜全部空白。                                                                                 |                                 | 1. 謝謝委員意見。已修正。                                                                                                  |                                                                                                                            |  |
| 2. 本計畫之協同主持人為土水業界之從業經理，相關許多的工作已有配合實施之多年經驗，應思考技術的轉移以及專利的申請。                                                     |                                 | 2. 謝謝委員意見。本團隊將於 111 年後半年度與國立屏東科技大學研發處及相關單位進行評估。                                                                 |                                                                                                                            |  |
| 3. 目前已經完成模場作業前的場地整理以及器材設備的整備工作。                                                                                |                                 | 3. 謝謝委員意見。                                                                                                      |                                                                                                                            |  |
| <b>委員二</b>                                                                                                     |                                 |                                                                                                                 |                                                                                                                            |  |
| 1. 模場實驗部分目前期中已完成現場整理及電力配置，已製作完成石英光纖及光觸媒系統硬體。已完成執行一次薄膜界面探測作業 MIP 實驗，但未找到污染熱點，而光纖光催化系統需針對污染熱點進行後續實驗。後續仍有相當多的工作量。 |                                 | 1. 謝謝委員意見，現階段確實有許多前置作業需要進行，也因此試驗現場之既有井已多年未使用，為確保試驗系統不受其他因素干擾，能有效驗證處理效率，因此在整理方面花費較多心力，後續本團隊將開始進行系統試驗，並全力符合計畫工作量。 |                                                                                                                            |  |
| 2. 後續報告應呈現原規劃之太陽能蓄電搭配太陽能聚光系統之實際運作情形，討論不穩定之太陽能是否達到所須之相關供電參數。                                                    |                                 | 2. 謝謝委員意見，本團隊將於期末報告針對綠能設備進行討論與說明，補充於 4.5 節。                                                                     |                                                                                                                            |  |
| <b>委員三</b>                                                                                                     |                                 |                                                                                                                 |                                                                                                                            |  |
| 1. 本計畫之重點應為「光纖模組及綠能系統開發」，建議強化該二重點之研發內容說明。                                                                      |                                 | 1. 謝謝委員意見。                                                                                                      |                                                                                                                            |  |
| 2. 建議加強說明報告圖 19 及圖 21 有關「多層次光纖透水性反應牆」之設置規劃。                                                                    |                                 | 2. 謝謝委員意見，該章節已加強「多層次光纖透水性反應牆」說明，並詳細說明於 3.4.2 節光纖光催化系統技術。                                                        |                                                                                                                            |  |
| 3. 綠能系統開發建議加強說明圖 20 之儲電與聚光配置方式，以佐證系統開發可不必接用市電。                                                                 |                                 | 3. 謝謝委員意見，本團隊已對試驗系統所需耗電進行計算，並與綠能設備所提供耗能進行估算，說明補充於 4.5 節。                                                        |                                                                                                                            |  |
| <b>委員四</b>                                                                                                     |                                 |                                                                                                                 |                                                                                                                            |  |
| 1. 報告中描述之現場施作進度合理，背景資訊收集合理。                                                                                    |                                 | 1. 謝謝委員。                                                                                                        |                                                                                                                            |  |
| 2. 期末提供成本效益分析。                                                                                                 |                                 | 2. 謝謝委員意見，將於期末報告提供初步成本效益評估。                                                                                     |                                                                                                                            |  |

**委員五**

- |                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| 1. 本期中報告有依委員審查意見修正執行。                                | 1. 謝謝委員意見。 |
| 2. 有依進度執行已完成現場整理作業及處理系統方面完成模組化系統設計與製作，期待期末報告時提出最佳成果。 | 2. 謝謝委員。   |



# 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會 110 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 ☐申請計劃書

☐期中報告 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計畫年度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 110                             | 專案類型                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗                                                     |
| 計畫主持人                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 陳冠中                             | 研究類別                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 預防 <input type="checkbox"/> 自訂 |
| 計畫名稱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                            |
| 專案連絡人                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 陳慶榮                             | 連絡專線                                                                                                                                                                                                                                                                                              | (08)770-3202 #7082                                                                                                         |
| 委員審查意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                 | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                            |
| <b>張尊國 委員</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                            |
| 1. 專案成果績效自評表中若達成數目為零者，結案達成率不宜以 100 % 表達。<br>2. 經由自行研發裝配之光纖催化系統進行實驗，證實可達相當良好之處理成效，成果具有推廣之潛力。<br>3. 受限於地下水層孔隙介質之阻擋，光線的傳播距離有限，以及光觸媒靠接觸才能產生效果以致影響範圍有限，應探討本技術的有效範圍以及佈設方法，以利將來實場之應用。                                                                                                                                                                                  |                                 | 1. 謝謝委員意見。已修正。<br>2. 謝謝委員肯定。<br>3. 謝謝委員意見。在先前研究以 2 mm 光纖進行有效範圍試驗可得知為半徑 2.5 cm，而且光纖直徑越大反應半徑就越大。另外，在光纖系統實場佈設時，以分層鋪設法增加反應距離，但因本場址污染層較一般地下水層深厚，所以未來若應用於一般場址，分層鋪設法之光纖光催化技術將可更明顯有效運用。                                                                                                                   |                                                                                                                            |
| <b>曾昭衡 委員</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                            |
| 1. 模場實驗結果方面，目前僅得到 5 組實驗結果，及氯離子在實驗前後濃度提升的結論，並無其他更明確及嚴謹的量化關係。後續需強化數據之收集及分析，及探討 DOC 及地下水濁度對去除效率之影響。<br>2. 模場實驗專案宜提供成本分析供後續應用參考。但期末報告的成本資料僅簡略描述光源機 5 萬，其他設備 10 萬，貨櫃屋 10 萬的資料，尚缺人力，分析，耗材等，目前所呈現的成本，未來應用參考價值不高。宜補充未來應用時，單位面積需用的合理人力，分析，耗材等數量，估算符合實際應用情境的成本分析。<br>3. 4.5 節綠能設備規劃目前呈現的是 120Ah 電池滿載情況下可供電超過 24 小時。但亦須評估 390 W 之太陽能板，能否於冬季日照時數最短時，能否利用不穩定之太陽能提供每日足夠的所須電能。 |                                 | 1. 謝謝委員意見。本研究計畫已累積 3 年的實驗數據，證實對於模場公告之含氯有機污染物有良好的處理效果。受限於採樣的時間限制，以及整地與確認井體環境清洗等工作，未來會再考量現場之工作負荷以及其他相關水質項目之重要性。<br>2. 謝謝委員意見。本年度專案針對光纖光催化技術進行初步成本評估，在第二年度待技術設備模組與試驗結果較完整之後，將會更進一步詳細進行評估，並呈現於報告中。<br>3. 謝謝委員意見。本前置試驗規劃主要先以小規模方式進行，後續若運用於現場會將蓄電規模放大，可增加蓄電量，以提供系統穩定所需電能，未來會持續進行綠能系統測試，進而使整體系統設備規劃更加完善。 |                                                                                                                            |





|                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>李育明 委員</b>                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1. 請補充說明「裕山公司」在本計畫之角色扮演，並請適度說明前一階段之試驗或整治作業情形。<br>2. 有關場址之相關說明，由於地下水水位、流速與流向變異情形較明顯，建議區分「hydrogeology 水文地質」與「geohydrology 地質水文」進一步描述場址特性，以釐清地下水流場對污染物傳輸之影響。<br>3. 請釐清「光纖模組」或「光纖模組化」是否涉及模組選項或組合搭配？ | 1. 謝謝委員意見。裕山公司協助提供本試驗場址之背景資料，與協助本團隊進行 MIP 試驗分析，另外，已將前一階段之試驗與整治作業情形補充於 1.1 節之研究緣起。<br>2. 謝謝委員意見。受限於經費以及技術研發之目的，本團隊將以資料蒐集的方式，參考模場其它相關研究結果，納入參考文獻和資料中。<br>3. 關於模組化方面，本團隊原先利用較傳統方式(熱縮套)進行覆膜光纖之組裝，而目前我們使用之零組件可將塑膠光纖與覆膜石英光纖直接進行串接，大大增加操作方便性，另外，許多扣環方面的使用，也提高設備之穩固性與便利性，本模組化之主要目的為使用者在操作時，可透過一連串之扣環組裝，將系統光源，導光塑膠光纖與覆膜石英光纖，以及採樣袋及負重的部分進行簡易扣接，即可進行操作，本團隊在今年度已經完成模組化之主要部件串接方法規劃，未來也會繼續強化相關細部模組之組合搭配。 |
| <b>鄭明典 委員</b>                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1. 光催化搭配綠能是個合理選項，適合長期操作。                                                                                                                                                                         | 1. 謝謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>鄒燦陽 委員</b>                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1. 專案基本資料表中請補英文關鍵字及第二年(111 年)金額。<br>2. 第一年執行期間是否有需檢討之事項，若有請補列，並請增補下年度之工作規劃內容撰述。<br>3. 建議事項是否有，若有亦請補列，及於下年度執行前研提精進及創新作為？成本效益分析？以及未來實作之可行性？                                                        | 1. 謝謝委員意見。已補充英文關鍵字與第二年度金額於專案基本資料表中。<br>2. 謝謝委員意見。在試驗方面，本團隊需持續對驗證結果作滾動式檢討，詳細內容已列於第五章 結論與建議進行補充說明，另已補列第二年度工作規畫於 3.8 節工作進度甘特圖。<br>3. 謝謝委員意見。因本團隊第一年放大模場至反應牆系統試驗，因此數據量還尚未提出具體建議，未來(111 年度)系統試驗將持續進行數據蒐集，在下一年度將提出操作建議事項說明與未來創新作為之方向，以及詳細之成本效益分析，並評估未來實作之可行性評估。                                                                                                                                  |



|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4. 期末報告請依署規定格式編寫。                     | 4. 謝謝委員意見。已修正完成。                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 5. P.84 由上而下第八行地下水流向，豐、枯水期之流向請予以轉正。   | 5. 謝謝委員意見。已修正完成。                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 6. 和裕山公司之合作關係為何？106 及 107 之處理成因及結果為何？ | 6. 謝謝委員意見。裕山公司承接屏東縣環保局之計畫，長年於本場址進行背景資料蒐集，故本團隊於背景資料蒐集方面，都與裕山公司進行研究討論，另外裕山公司提供本團隊 MIP 分析之技術。另外，本場址的主要關切污染物(1,1 二氯乙烯)分布範圍相當廣泛(約 3.6 平方公里)，且深度大(深度 80 公尺仍檢出地下水之 1,1 二氯乙烯超過管制標準)，因此為解決此問題，裕山公司於 106 年在本場址進行生物處理之現地試驗，但效果不佳，主要因素為其利用營養劑營造厭氧環境的效果不佳導致，而裕山公司評估其主要原因為本場址地下水層厚、傳輸快及營養劑易擴散流失等特性，屬具挑戰型場址。 |



## 摘要

本系統對受污染地下水之處理構想，係由透水性反應牆概念所設置之光纖光催化系統，經由內部光源照射至光纖表面之光觸媒後產生氫氧自由基( $\cdot\text{OH}$ )與地下水中之污染物反應，達到去除污染物和整治污染場址之效果。本研究專案在多年的基礎成果下，已經開發至現地試驗之光纖光催化系統，驗證系統對於地下水污染具有改善成效。本期專案(110-111 年度)係延續前期模場專案，將處理範圍擴大至新場址以多口系統井進行試驗與驗證，透過觀測井探討其污染處理成效。本計畫已完成現地模場整理與水位調查，結果顯示近期地下水水位高度在 5-6 月變化較為劇烈，由地表下 40 m 上升至 10 m 水位，並且已完成歷年水質與現有場址之調查。透過歷年資料得知，場址主要污染以 1,1 二氯乙烯為主，近五年污染濃度最高在 107 年枯水期為 0.16 mg/L。本專案於 110 年度已完成現場整理作業，包括整地作業、除草作業、井體維護，以及相關電力配置。在處理系統方面，完成模組化系統設計與製作，且已完成封篩管設計與改良，以及可見光與紫外光之光源系統設計並完成製作。

光纖光催化試驗系統方面，由試驗 B 至 F 結果，證明光纖光催化系統之處理段可有效處理地下水之污染物，並由單井或下游之驗證得知。另一方面，在光纖光催化系統處理過後，確實有生成氯離子，這代表此系統於地下水污染層確實進行光催化降解作用。而 DOC 方面，可能受到土壤中有機物質不穩定的釋出，導致濃度準確性較差，但整體 DOC 之分析仍顯示出系統對於 DOC 具有去除效率，也代表地下水中之有機污染物受到去除。另外，本團隊已完成綠能系統測試與電力供應試算，有利於後續 111 年度計畫執行。

關鍵詞：光催化透水性反應牆、模組化、含氯有機物、現地整治、綠能系統



## Abstract

The proposed photocatalytic optical fiber system for polluted groundwater treatment was based on the concept of permeable reactive wall. By illuminating the photocatalysts coated on the optical fiber, the system can produce hydroxyl radicals to react with pollutants, decrease their concentration, and remediate the polluted field. We have developed an in-situ photocatalytic optical fiber system and have verified that the system can effectively treat groundwater pollution. This two-year project (2021-2023) continues our previous field study and expands the treatment from one single well to multiple wells. This time we use observation wells to evaluate the performance of our system on pollutants removal from contaminated groundwater. We have completed the land leveling and groundwater level measurement at this stage. The groundwater level raised dramatically from -40 m to -10 m in June 2021. We also reviewed the groundwater quality from past years. According to the historical data, the primary pollutant in the groundwater in the study area is 1,1 dichloroethylene. In the past five years, its highest level was 0.16 mg/L in the dry season in 2018. We have mowed the grass, maintained the well body, and installed the electrical system in the study site. We have designed and made the new module regarding the photocatalytic optical fiber system. The sealing tube and the light source, including visible and ultraviolet, have been redesigned, improved, and made.

Regarding the efficiency of the new photocatalytic optical fiber system, the results of test B to F test show that the system effectively decreased the chlorinated organic pollutants. This was proved by examining the concentration of contaminants in test wells and downstream wells. Another proof was the increase of chloride concentration after groundwater treatment by the tested system. The release of organic matter from the soli might influence the DOC concentration in the groundwater. However, the analysis showed that the system could decrease the DOC level in the treated groundwater, implying the removal of organic pollutants. In the end, we have preliminarily tested the solar energy system and calculated its power supply, which is beneficial to our further study plan in the second year.

Keywords: photocatalytic permeable reactive barrier, modularization, chlorinated organic matter, in-site remediation, green energy system



## 目錄

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| <b>第一章 前言</b>        | <b>6</b>  |
| 1.1、研究緣起             | 6         |
| 1.2、研究目的             | 9         |
| <b>第二章 文獻回顧</b>      | <b>10</b> |
| 2.1、含氯有機物            | 10        |
| 2.1.1、特性與應用          | 10        |
| 2.1.2、健康風險           | 13        |
| 2.1.3、污染情形           | 16        |
| 2.2、土壤和地下水污染處理技術     | 17        |
| 2.3、含氯有機物光催化處理技術     | 20        |
| 2.3.1、光纖種類與應用        | 22        |
| 2.3.2、光觸媒種類          | 23        |
| 2.3.3、無機樹脂覆膜技術       | 24        |
| 2.4、近期相關光纖光催化成果應用    | 28        |
| <b>第三章 材料與方法</b>     | <b>31</b> |
| 3.1、試劑與藥品            | 31        |
| 3.2、分析方法             | 31        |
| 3.2.1、被動式採樣袋試驗說明     | 31        |
| 3.2.2、含氯有機物分析方法      | 32        |
| 3.2.3、氯離子分析方法        | 32        |
| 3.2.4、總有機碳分析方法       | 33        |
| 3.2.5、數據之品保品管(QA/QC) | 33        |
| 3.2.6、檢量線製備          | 33        |
| 3.2.7、方法偵測極限         | 33        |
| 3.2.8、樣品重複分析         | 34        |
| 3.3、現地調查方法           | 34        |
| 3.3.1、地質調查作業         | 34        |





|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.2、場址流速流測定.....                                        | 35        |
| 3.3.3、薄膜介面探測作業.....                                       | 36        |
| 3.3.4、環境背景資料調查.....                                       | 36        |
| 3.3.4.1、地理及地形.....                                        | 36        |
| 3.3.4.2、氣候.....                                           | 37        |
| 3.3.4.3、地質與土壤.....                                        | 37        |
| 3.3.4.4、地表水系.....                                         | 37        |
| 3.4、污染整治方法規劃.....                                         | 37        |
| 3.4.1、試驗模場場址說明.....                                       | 37        |
| 3.4.2、現地模場整理情形說明.....                                     | 40        |
| 3.4.3、光纖光催化系統技術說明.....                                    | 43        |
| 3.5、模場試驗規劃說明.....                                         | 49        |
| 3.6、覆膜光纖製備與成份特性分析.....                                    | 52        |
| 3.7、反應途徑及中間產物.....                                        | 53        |
| 3.8、工作進度甘特圖.....                                          | 55        |
| <b>第四章 結果與討論.....</b>                                     | <b>57</b> |
| 4.1、現地模場之水文地質.....                                        | 57        |
| 4.2、模場地下水位及水質情況調查.....                                    | 62        |
| 4.3、薄膜介面探測作業(MIP)試驗.....                                  | 70        |
| 4.4、應用光纖光催化於現地試驗結果.....                                   | 74        |
| 4.4.1、光纖光催化系統模組化及成本初評說明.....                              | 74        |
| 4.4.2、應用光纖光催化於現地對於受污染之地下水中含氯有機物之影響.....                   | 78        |
| 4.4.3、應用光纖光催化於現地對於受污染之地下水中 DOC 及 Cl <sup>-</sup> 之影響..... | 86        |
| 4.5、綠能設備應用規劃說明.....                                       | 88        |
| <b>第五章 結論與建議.....</b>                                     | <b>90</b> |
| <b>參考文獻.....</b>                                          | <b>92</b> |



## 表目錄

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 表1 氯化乙烯類化合物之基本物化特性.....              | 12 |
| 表2 常見氯化乙烯類有機溶劑用途和對人體相關症狀.....        | 14 |
| 表3 氯化碳氫化合物地下水污染管制標準.....             | 15 |
| 表4 IC分析儀器設定條件.....                   | 32 |
| 表5、模場試驗場址基本資料.....                   | 38 |
| 表6、模場井群基本資料.....                     | 40 |
| 表7、模場試驗設置參數說明.....                   | 51 |
| 表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表.. | 65 |
| 表9、地下水含氯有機物測定結果(系統井) .....           | 80 |
| 表10、地下水含氯有機物測定結果(觀測井) .....          | 83 |
| 表11、處理井地下水中氯離子與溶解性有機碳測定結果.....       | 87 |



## 圖目錄

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 圖1 氯化乙烯類化合物結構式.....              | 11 |
| 圖2 離子層析儀之標準分析圖譜.....             | 33 |
| 圖3、現地土壤地質採樣圖.....                | 34 |
| 圖4、地質剖面圖.....                    | 35 |
| 圖5、MIP系統組成示意圖.....               | 36 |
| 圖6、本年度模場配置圖-T00239及周遭灌注/觀測井..... | 39 |
| 圖7、新舊試驗場址範圍示意圖.....              | 39 |
| 圖8、現地模場整地作業(整理前) .....           | 41 |
| 圖9、現地模場整地作業(整理後) .....           | 41 |
| 圖10、現地除草作業.....                  | 41 |
| 圖11、現地整理作業.....                  | 41 |
| 圖12、現地模場貨櫃搬移作業.....              | 42 |
| 圖13、現地模場電力設置作業.....              | 42 |
| 圖14、現地模場系統/觀測井之洗井作業.....         | 42 |
| 圖15、水中光源機設計測試.....               | 45 |
| 圖16、石英光纖光強度測試.....               | 45 |
| 圖17、光纖光催化系統整體組裝實體圖.....          | 45 |
| 圖18、光纖光催化處理段實體圖(紫外光) .....       | 46 |
| 圖19、覆膜石英光纖發光實體圖(紫外光) .....       | 46 |
| 圖20、光纖光催化處理段實體圖(可見光) .....       | 46 |
| 圖21、覆膜石英光纖發光實體圖(可見光) .....       | 46 |
| 圖22、光纖光催化系統放置處理井施工圖.....         | 46 |
| 圖23、系統現場施工圖.....                 | 47 |
| 圖24、封篩管頂部設計示意圖.....              | 47 |
| 圖25、封篩管設計實體圖.....                | 47 |
| 圖26、光纖光催化系統應用於處理井之整體示意圖.....     | 48 |
| 圖27、光纖透水性反應牆設置示意圖.....           | 49 |



|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 圖28、光纖光催化系統結合綠能(太陽光源/光電)概念示意圖..... | 50 |
| 圖29、光纖光催化反應牆系統應用於現地處理示意圖.....      | 50 |
| 圖30、以不同覆鍍法之光纖結構圖.....              | 53 |
| 圖31、TCE降解反應途徑.....                 | 54 |
| 圖32、工作進度甘特圖.....                   | 56 |
| 圖33、數值模式模擬範圍分布圖.....               | 57 |
| 圖34、本計畫範圍之水文地質概念模型圖.....           | 58 |
| 圖35、歷年設置地下水監測井地質調查資料.....          | 58 |
| 圖36、公告污染場址區域地質剖面線.....             | 59 |
| 圖37、公告污染場址區域地質剖面圖.....             | 59 |
| 圖38、公告污染場址區域範圍3D地質概念圖.....         | 60 |
| 圖39、屏東縣地質分布圖.....                  | 61 |
| 圖40、林邊溪北岸各農場地質剖面圖.....             | 61 |
| 圖41、新開寮模場地下水流場分佈圖.....             | 62 |
| 圖42、現地模場水位測量圖.....                 | 63 |
| 圖43、MIP組裝及現場作業.....                | 72 |
| 圖44、108年度MIP分析結果.....              | 72 |
| 圖45、109年度MIP分析結果.....              | 73 |
| 圖46、110年度MIP分析結果.....              | 74 |
| 圖47、光纖光催化系統整體示意圖.....              | 76 |
| 圖48、光纖光催化系統整體組裝3D模擬及實體圖.....       | 76 |
| 圖49、光纖光催化模組化套件實體圖.....             | 77 |
| 圖50、系統結合太陽能綠能設備測試實體圖.....          | 89 |



# 第一章 前言

## 1.1、研究緣起

近年來有關地下水污染及整治案例之相關議題備受關注，造成地下水污染之原因，主要是由於各種事業廢水和生活污水，在未經妥善處理下，即排放到環境中，或是由於部分埋設於地下之化學儲存桶槽，因老舊破損或受外力而導致破裂洩漏。這些廢污水或是化學物質滲入土壤或被注入地下後，容易造成土壤和地下水受到污染。目前現有針對地下水處理整治之處理場所，不外乎現場(on-site)與離場(off-site)兩種，其中現場處理又可分為現地(in-situ)和離地(ex-situ)處理；處理方式則包括生物處理、物理/化學處理、和整治列車(treatment train)等。以化學方法進行現場處理為例，常以添加化學藥劑之方式去除地下水中之有機污染物或無機污染物，但是在實際應用上可能有最佳加藥劑量不易控制的問題，劑量使用太低恐使污染物之去除效果不佳，無法達到預期處理成果，倘若添加過量，又有發生二次污染之虞。而離場處理主要是指將受污染之地下水抽出後，運送至廢水場處理，利用專業的廢水處理技術和設備去除污染物質，但是，相對地其處理成本較現場處理昂貴。因此，在不需要大規模開挖和盡量降低化學藥劑使用量之前提下，研發效果穩定和高效率之新穎地下水現地處理技術有其必要性。含氯有機物包含最常見之三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)為工業上常用之一種有機溶劑，主要用途包括作為金屬表面油脂去除溶劑、油脂類物質之萃取溶劑、或是製冷劑等。TCE 對於人體健康之影響包括吸入 TCE 會影響中樞神經系統，導致頭暈、頭痛、精神錯亂、面部麻痺等症狀。亦可能引起腎臟、肝臟、子宮頸和淋巴系統產生腫瘤。由於 TCE 屬於重質非水相液體(dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)，排放到環境中容易積存在地下水層底部，整治較為困難。

目前以光催化進行土壤及地下水現地污染整治之研究極為有限，主要是由於土壤層遮蔽了光線，使其應用受限，故以抽出處理法(pump and treat)將受污染之地下水抽運到地面廢水處理設施處理為主。光催化技術(photocatalytic technology)為常應用於環境污染處理上之一種高級氧化技術，近年來，光催化技術因光觸媒製備技術之提升而受到極大關注。光催化技術係利用光之能量來使光觸媒之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，光觸媒附近之水分子或游離出的氫氧根離子( $\text{OH}^-$ )會產生氫氧自由基(hydroxyl radicals,  $\cdot\text{OH}$ )。這些氧化力極強的 $\cdot\text{OH}$  可以有效的礦化或是分解水中的化學物質。由於 $\cdot\text{OH}$  的選擇性低，且可以破壞大多數的有機化合物，適合應用在各類含有複雜有機物





之廢污水處理。而在光觸媒的製備技術上，目前以複合金屬觸媒為主要的研發重點。複合金屬觸媒之製備方法以覆鍍技術為例，包括了含浸法(impregnation)、浸鍍法(dip coating)和濺鍍法(sputtering)等，這些方法可以將光觸媒覆鍍於固態載體上，避免奈米級、微米級或粉狀觸媒於處理過程中發生流失、逸散之情形，免除額外增設觸媒回收處理設備，來回收逸散至處理水中之光觸媒。光催化技術之要件除了光觸媒之外，另一要件即為光源。過去光催化技術鮮少應用於地下水現場之現地處理，主因在於所需之光源無法穿透土壤達到受污染之地下含水層。若希望以光催化技術應用在處理受污染之地下水時，則必須利用新穎的透光和光傳輸材料來解決光催化反應所需之光源問題。光纖(optical fiber, OF)近年來被大量運用於電信和資訊工程之資訊傳輸，主因在於光纖具有高導光特性，能長距離無失真地傳送訊號。另一方面，光纖也逐漸應用在部分的照明裝飾上，著眼於傳遞和延伸光能量。因此，以光纖作為光的導體，將光線由地表傳遞到土壤含水層中，使得於地下水層中進行現地的光催化反應能夠實現。以塑膠光纖為例，將光纖表層之 PVC 和鐵氟龍層剝除後，即形成透光表面，將光觸媒覆鍍在透光的光纖上，當光線傳輸到透光段，由光纖內部的光線向外照射到其表層之光觸媒時，所產生之 $\cdot\text{OH}$ 即可與地下水中之有機污染物進行光催化反應，達成去除污染物之效果。而在光源部分，由於發光二極體(light-emitting diode, LED)製備技術已經成熟，成本逐漸降低，且具有發光效率高、使用壽命長和耗電量少等優點，因此，以覆膜光纖光催化技術搭配節能之 LED 光源，進行光催化處理受污染之地下水，極具有研究和開發之價值。

根據本研究團隊 103 年度和 105 年度接受環保署土污基管會補助截至目前之研究成果顯示，覆膜光纖光催化可以有效地降解實驗室中模擬地下水中之 TCE，然而，由於在進行光觸媒覆度於光纖上之準備工作時，必須先將光纖外層之包膜(cladding)剝除，大幅降低了光纖光傳導強度之距離。因此，本團隊於 106 年度研發光纖覆膜液進行覆膜光纖試驗，研究結果顯示使用覆膜液進行觸媒覆鍍光纖可有效提升表面附著力以及均勻性，並增加覆膜光纖光催化有效長度，同時延長光觸媒附著於光纖上之使用時間。107 年度則將過去的 bench-scale 土壤箱試驗放大成噸級的土壤箱試驗，以進一步模擬未來於實場應用時可能面對之問題，以及初步評估和比較處理成效。108-109 年度進行現地模場試驗，先針對模場之流速流向進行調查，並定期以薄膜介面探測儀(membrane interface probe, MIP)分析模場之多井，優先找到污染熱點再進行光催化處理試驗。在處理井之光纖光催化系統測試上，於 108 年度試驗結果可以發現，該系統放置於污染層當中進行處理，皆可有效去除地下水中之污染物，四種污染物幾乎皆達到 100%去除效率。109 年度測試不同光觸媒、光源種類、以及光纖





支數等進行一系列試驗，探討不同操作條件對於地下水中含氯有機物之去除效率，系統試驗結果顯示，以可見光作為光源，以  $\text{N-TiO}_2$  作為光纖上覆鍍之光觸媒，可以達到最佳的含氯有機污染物去除效率，證實本系統能有效處理高地下水流速之污染含水層，而對於較低流速之污染場址，亦應有良好處理效果。

而自民國 89 年起，屏東縣新埤鄉新開寮地區經區域性監測井採樣調查發現，該地區地下水受到不明污染源之含氯有機物污染，經行政院環境保護署(以下簡稱環保署)及屏東縣政府環境保護局(以下簡稱環保局)啟動多項調查計畫與管制作為，包括：歷年不斷增設地下水水質監測井，每年至少 2 次地下水質調查等作業，以了解新開寮地區地下水污染範圍與程度；並於 93 年公告新開寮地區為地下水使用限制地區，進行相關管制作業，亦針對周邊區域蒐集相關環境資料，以及周邊可疑污染場址訪查，俾利釐清污染來源。該區域地下水中主要污染物為 1,1-二氯乙烯(超過管制標準)及 1,1,2-三氯乙烯(超過監測標準)，早期雖曾經檢測出四氯乙烯、三氯乙烯等污染物，但於近年監測已低於監測標準。由於本區域地下水含水層較厚、靠近林邊溪及鄰近區域可能有多處污染來源不明確之場址，造成污染來源調查困難，於多年調查過程中，亦對於後續管制作業逐漸建立主軸，並評估以監測式自然衰減方式進行。由於新開寮地區較靠近屏東平原東側，亦即位於屏東沖積平原之上游區，整體含水層厚度約達地表下 200 公尺，另由於該地區幅員廣闊，污染物以 DNAPL 為主，造成整治難度甚高，因此暫以監測自然衰減方式為主。而近年來的監測資料顯示，污染範圍已有往下游移動之趨勢，對於較下游人口稠密之區域(包括：崙東社區及更下游之潮州鎮區域)可能逐漸產生影響。因此，環保局採更積極之管制作為，近年來進行攔阻系統模場試驗，藉由田野調查、地下水水質監測、攔阻系統模場先導試驗、風險評估及整體後續管制措略擬定等工作，擬定更完善的管制策略，評估攔阻系統及自然衰減模式的可行性，作為未來整治技術採用之依據。

本團隊開發之模場試驗，係以光纖光催化透水性反應牆(permeable reactive barriers, PRB)技術，實際應用至現地模場進行地下水中污染物處理。我們以過去的研究成果和經驗作為基礎，採用之現地地下水處理應用模式為：先在受污染場址挖設處理/監測井，透過MIP分析出污染地下水之熱點位置，再將光觸媒覆膜光纖伸入預定處理深度之受污染之地下含水層，之後開啟燈源進行光催化反應，當受污染之地下水流過PRB時，污染物將被光催化產生之氫氧自由基分解，原先規劃以下游之監測井採樣進行處理效果之驗證。



## 1.2、研究目的

本研究之目的為開發適合現地應用之光催化處理受污染之地下水處理技術，並且由於擁有施工開挖面積極小、不添加化學藥劑、耗能較低、以及適合各種土地面積規模使用等優點，有助於廣泛應用於現地地下水有機物污染整治，並能夠符合綠色整治技術之條件。本年度規劃調查模場處理井附近地下水水質現況，並透過裕山環境顧問公司長年深入調查場址污染，將彙整場址歷年地下水及水文地質資料，以釐清場址污染範圍，並掌握地下水流向，以確保處理技術之成效驗證。本團隊於 108 年度設計一套適合應用於地下水層較厚之水中光源機，可將光源有效延伸至地下水污染層，降低光損失。在現地試驗方面，本研究以模場之流速流向進行試驗調查，並針對處理井進行 MIP 分析，優先找到污染層及熱點。試驗以被動式採樣袋進行井中污染物濃度空白分析，得到背景資料確認後，再以光纖光催化系統應用至現地試驗並進行含氯有機物之處理效果探討，試驗最後進行總有機碳與氯離子濃度之影響調查。

本模場計畫(執行期間 110-111 年度)係以現地污染場址整治進行試驗，結合先前年度研究成果，利用無機覆膜液搭配噴霧塗佈法增強光纖覆膜效率及光觸媒均勻分佈性，以分層嵌入工法建立 PRB。本研究之目的為開發適合現地應用之光催化處理受污染之地下水處理技術，並以受 TCE 污染之地下水受污染使用限制區作為模場試驗位置，進行處理效能評估。110 年度之計畫首先完成新場址(1)實驗設備購買、組裝和測試；(2)整體系統設置設計和組裝；(3)施工架設：含整地施工、貨櫃安裝、電源設置等。並且定期進行場址各井之污染物處理效果評估和濃度監測。監測結果將統整後評估後作為後續光纖光催化系統處理位置之依據。另外，新場址進行系統初步處理試驗，完成處理結果分析，並於新場址初步探討光纖光催化反應牆系統(多井)之處理效率。另外，後續年度將完成水中與地上光源機進行光纖光催化系統試驗之處理效率評估，並完成光纖光催化系統結合綠能之研究開發測試，以及光纖光催化系統應用模組化，藉以提升後續實場應用之效率及設備維護可靠性。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1、含氯有機物

#### 2.1.1、特性與應用

含氯有機物並為存在於自然環境中之物質，而是屬於人為製造之化合物，因其化學穩定性高和毒性高，在環境中較不易因物理、化學和生物作用而降解，其污染源大部分是因工廠為妥善處理這些含氯有機物溶劑及其廢棄物所導致，甚至非法棄置或掩埋等，從而進入土壤地下水環境中，從而造成對人體健康和環境生態的危害。四氯乙烯為典型的 DNAPL，比重較水大且低溶解度的關係，容易積累在地下水層底部。如表 1 所示、四氯乙烯分子量為 165.8 g/mol、沸點為 121 °C 分子式  $C_2Cl_4$ ，分子結構如圖 1 所示，外觀為無色液體、有類似乙醚的氣味，且因具有高揮發性、高穩定性、不可燃等特性(維基百科, 2022)，而被廣泛運用於工業作為乾洗劑、金屬去脂劑、溶劑、熱交換液體等。三氯乙烯(TCE)如表 1 所示，分子量為 131.4 g/mol、沸點為 87.2 °C、分子式為  $C_2HCl_3$ ，分子結構圖 1 所示，外觀為無色液體和類似氯仿的氣味，且對神經有麻痺的作用，能在工業製程中作為製造氯乙烯和氯乙酸的原料、樹脂、瀝青、煤焦油、醋酸纖維素、硝化纖維素、橡膠和塗料等的溶劑(維基百科, 2022)。像 TCE 在工業上常應用於脫脂、電子零件清洗及乾洗等製程中，或用於咖啡製作過程中去除咖啡因、以及用作為一些殺蟲劑(pesticides)、樹脂(resins)、顏料(paints)、油漆、印刷油墨、工業塗料、脫漆劑、潤滑油、膠粘劑中之成分，應用之產業別包括電子，國防，化工，鐵路，汽車，船，製鞋，食品加工，紡織，乾洗等行業(Doherty, 2000a)。TCE 本身不具有腐蝕性(noncorrosivity)、且具不燃性和便於回收利用，因此在許多製程上很受歡迎(Doherty, 2000b)。由於 TCE 密度高於水，被歸類為重質非水相液體(Dense Non-aqueous Phase Liquid, DNAPL)，一旦進入到土壤和地下水中，將存在於地下水層的底部，其在地下水層中的移動困難，溶解度不高，長期存在於地下水中可能造成生物累積(bioaccumulate)和濃縮(bioconcentrate)作用，而難以整治(Caliman et al., 2011)。屬於此類常見之污染物尚包括四氯乙烯(tetrachloroethylene, PCE)、二氯甲烷(methylene chloride)、氯仿(chloroform)及酚(phenol)等。

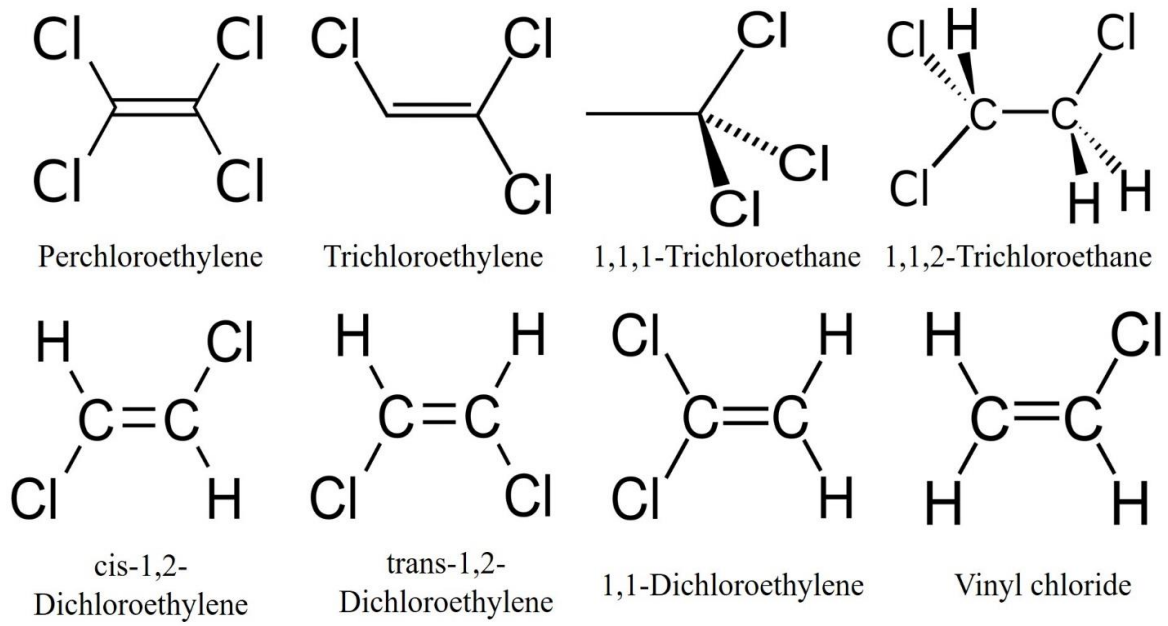


圖 1、氯化乙烯類化合物結構式(維基百科，2020)

表 1、氯化乙烯類化合物之基本物化特性

| 項目                             | 化合物/特性                         |                                 |                                               |                                               |                                  |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 污 染 物                          | PCE                            | TCE                             | 1,2-DCE                                       | 1,1-DCE                                       | VC                               |
| CASRN                          | 127-18-4                       | 79-01-6                         | 540-59-0                                      | 75-35-4                                       | 75-01-4                          |
| 分子式                            | C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl |
| 分子量(g/mole)                    | 165.8                          | 131.4                           | 96.9                                          | 96.9                                          | 62.5                             |
| 沸點(°C)                         | 121                            | 87.2                            | 順 60.2 / 反 48.5                               | 31.6                                          | -13.37                           |
| 液體比重( g/mL at 20 °C)           | 1.623                          | 1.464                           | 順 1.28 / 反 1.26                               | 1.218                                         | 0.911                            |
| 水中溶解度(g /mL 、25 °C)            | 0.015                          | 0.011                           | 順 0.035/反 0.63                                | 幾乎不溶                                          | 0.11                             |
| 辛醇-水分配係數(Log K <sub>ow</sub> ) | 3.40                           | 2.42                            | 1.48~2.09                                     | 1.66~2.13                                     | 1.52                             |
| 外觀/氣味                          | 無色揮發液體<br>/ 微甜味                | 無色揮發液體<br>/ 類氯仿甜味               | 無色揮發液體<br>/ 醚或氯仿味、微<br>苦辣                     | 無色揮發液體<br>/ 醚或氯仿味、微<br>苦辣                     | 無色氣體<br>/ 窒息性醚味、甜<br>味           |

資料來源:行政院環保署網站毒理資料庫；USEPA, 2019。





## 2.1.2、健康風險

一般在居住環境或工作場所中，民眾可能經由呼吸、攝食、飲水、皮膚接觸或是長期的接觸等管道攝入含氯有機物，若在體內濃度過高，可能會造成中樞神經病變，且具有致癌性和致基因突變性(International Agency for Research on Cancer, IARC)(2014)。在一份美國國家科學研究委員會(National Academy of Sciences) 2006 年的報告「Assessing the Human Health Risks of Trichloroethylene」中亦指出，含氯有機物普遍為一種致癌性(carcinogenic)、神經系統(neurological)和生殖(reproductive)毒素。當人體短時間、低濃度的接觸，可能對人體器官造成過敏現象或產生刺激感，一旦受到高濃度的接觸，不論是吸入、食入、或是長期暴露，則可能造成人體臟器或神經系統之傷害。

對人體產生的相關症狀如表 2 所示，四氯乙烯(PCE)為脂溶性物質，當進入人體後容易囤積在人體的脂肪中難以代謝和排出，一部分則會經由呼吸作用排出體外或轉換成三氯乙酸和三氯乙醇後由尿液排出(Köppel et al., 1988)。Dzubow et al., 2009 探討 PCE 對人體影響，其中包括吸入、攝入、皮膚接觸和嬰兒由胎盤和母乳等途徑，母體受孕前後經 PCE 污染後相關症狀有生育能力下降、生殖激素的改變、胎兒體重下降、出生缺陷等症狀，而成年人影響則有噁心、頭痛、無食慾、暈眩、昏迷不清等症狀嚴重者皆致死。一般而言，以常見之 TCE 為例，其則具有生殖細胞致突變性和致癌性等毒性特徵，當 TCE 經洩漏或不當處理釋放至環境中，人們可能經由食入、吸入、皮膚接觸等途徑進入人體內並被吸收並分布於全身，而累積於脂肪等組織。當人體暴露在濃度 100 ppm TCE 會對中樞神經造成神經毒性，進而產生頭暈、嗜睡、混亂、視覺模糊等症狀，而在濃度 1000 ppm 中會導致死亡、心律不整、和肝的損傷(ATSDR, 2007)。



表 2、常見氯化乙烯類有機溶劑用途和對人體相關症狀

| 污 染 物   | 用 途                                                                           | 相 關 症 狀                                                                                                                                                                                                                               |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PCE     | 乾洗劑、金屬去脂劑、溶劑、熱交換液體、電子變壓器內絕緣液體和冷卻氣體、修正液(如立可白)。                                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 刺激感、噁心、頭痛、無食慾、暈眩、失去意識、紅腫起泡、流淚。</li> <li>2. 長期曝露傷害肝、腎、抑制中樞神經，並會造成心律不整、肺水腫、記憶力衰退、手腳顫抖和麻痺。</li> <li>3. 可能會造成皮膚刺激、乾燥、剝落等，甚至引發肺炎、皮膚癌、子宮頸癌。</li> </ol>                                            |
| TCE     | 金屬之清洗、去油脂、製造氯乙烯和氯乙酸的原料、樹脂、瀝青、煤焦油、醋酸纖維素、硝化纖維素、橡膠塗料和漆的製造或是溶劑。農業用途為殺蟲劑或殺真劑的添加物等。 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 刺激感、噁心、頭痛、暈眩、失去意識、視覺異常、皮膚炎。</li> <li>2. 嘔吐、腹瀉、心臟衰竭、肺出血、神經系統損害及失明。</li> <li>3. 長期曝露會造成成肝損害。</li> <li>4. 可能造成神經系統損害、顫抖、焦慮、心跳數減慢和失眠。</li> <li>5. 暴露在 100~630 ppm 會使男性性能力降低、女性月經不規則。</li> </ol> |
| 1,2-DCE | 使用於萃取劑、合成有機物、香水和耐熱塑膠的製造。                                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 刺激感、噁心、頭痛、暈眩、失去意識、紅腫、噁心、虛弱、顫抖、角膜雲狀花紋。</li> <li>2. 重複曝露會使血球數量降低。</li> </ol>                                                                                                                  |
| 1,1-DCE | 作為塑膠產品和氯化乙酸產品之中間化學體、合成纖維物質。                                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 刺激呼吸道，醉酒症狀、昏迷、噁心、虛弱、顫抖、角膜雲狀花紋。</li> <li>2. 重複暴露傷害肝、腎和使血球數量降低。</li> <li>3. 傷害肺造成支氣管炎。</li> </ol>                                                                                             |
| VC      | 塑料業的重要原料，主要用於生產聚氯乙烯樹脂、醋酸乙烯、偏氯乙烯、丙烯酸酯等其他單體共聚物，也可用作冷凍劑。                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 暈眩、輕微麻痺、輕微視覺障礙、麻木感和四肢刺痛感。</li> <li>2. 暴露在 8,000~10,000 ppm 造成麻醉、影響中樞神經系統、窒息甚至死亡。</li> <li>3. 胃腸出血、肝腫大及影響視覺和聽覺。</li> <li>4. 長期暴露引起肝臟血管肉瘤，且腦、肺、中樞神經、血液、淋巴等相關癌症。</li> </ol>                    |

資料來源:行政院環保署網站毒理資料庫；USEPA,2019



以下為幾個含氯有機物污染造成人體危害之案例文獻，Goldberg et al. (1990) 在美國西南部進行流行病學研究時發現，如果父母親居住在受到 TCE 污染的地區或在使用 TCE 的場所工作至少 1 個月，或是母親懷孕的頭三個月在上述場所居住或工作，攝取當地的飲用水，則 TCE 造成之影響與心臟病發病率和畸形兒出生率呈現正相關。該研究調查也顯示，受到 TCE 污染的水井，其水中 TCE 濃度高達 239 ppb，而這些 TCE 係由使用 TCE 作為導彈零件去脂之工廠所排放出來。Saillefait et al. (1995)亦發現，當使用全胚胎(whole embryo)暴露在 TCE 或相關化合物(包括代謝物)之環境下，會造成胚胎發育異常或毒性。Johnson et al. (1998)的研究則顯示，TCE 的代謝分解產物可能會導致哺乳動物的心臟畸形。Sonnenfeld (1998)則評估居住在受到 TCE 污染水井社區對於母親和嬰兒的影響，調查 1968 年到 1985 年之間出生的嬰兒和其之後的健康情形，並發現社區的水井中，TCE 的濃度曾有一段時期高達 1,400 ppb。而 Bove et al. (2002)則在統計許多研究案例發現，當居民使用受 TCE 污染的水源，會導致出生孩童的心臟有先天性的缺損。

目前我國環保署對於地下水中的 TCE 及其他氯化碳氫化合物之管制標準如表 3 所示(地下水污染管制標準，2013)。其中，第一類為飲用水水源水質保護區內地下水之管制標準，第二類則為第一類以外之地下水管制標準。

表 3、氯化碳氫化合物地下水污染管制標準(單位：mg L<sup>-1</sup>)

| 氯化碳氫化合物                                 | 第一類    | 第二類   |
|-----------------------------------------|--------|-------|
| 四氯化碳 (Carbon tetrachloride)             | 0.0050 | 0.050 |
| 氯苯 (Chlorobenzene)                      | 0.10   | 1.0   |
| 氯仿 (Chloroform)                         | 0.10   | 1.0   |
| 氯甲烷 (Chloromethane)                     | 0.030  | 0.30  |
| 1,4-二氯苯 (1,4-Dichlorobenzene)           | 0.075  | 0.75  |
| 1,1-二氯乙烷 (1,1-Dichloroethane)           | 0.85   | 8.5   |
| 1,2-二氯乙烷 (1,2-Dichloroethane)           | 0.0050 | 0.050 |
| 1,1-二氯乙烯 (1,1-Dichloroethylene)         | 0.0070 | 0.070 |
| 順-1,2-二氯乙烯 (cis-1,2-Dichloroethylene)   | 0.070  | 0.70  |
| 反-1,2-二氯乙烯 (trans-1,2-Dichloroethylene) | 0.10   | 1.0   |
| 總酚 (phenols)                            | 0.014  | 0.14  |
| 四氯乙烯 (Tetrachloroethylene)              | 0.0050 | 0.050 |
| 三氯乙烯 (Trichloroethylene)                | 0.0050 | 0.050 |
| 氯乙烯 (Vinyl chloride)                    | 0.0020 | 0.020 |
| 二氯甲烷 (Dichloromethane)                  | 0.0050 | 0.050 |
| 1,1,2-三氯乙烷 (1,1,2-Trichloroethane)      | 0.0050 | 0.050 |



### 2.1.3、污染情形

根據 1997 年美國毒性物質及疾病登記署(Agency for Toxic Substances and Disease Registry)的公眾健康報告指出，以 TCE 為例，其為一優先毒性污染物(priority toxic pollutant)。在 USEPA 的美國國家優先整治表(National Priorities List of the United States)確認的 1428 個最嚴重有害廢棄物場址(the most serious hazardous waste sites)之中，可以在其中的 861 個廠址發現受到 TCE 的污染(ATSDR, 1997)。Moran et al. (2007)進行美國本土地下水樣品調查分析，從 1985 年到 2002 年採集 5000 餘口井，發現存在有 55 種揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)，包括有 TCE、perchloroethene (PCE)和 1,1,1-三氯乙烷等污染物，且其濃度大於或接近最大污染限值(Maximum Contaminant Level, MCL)的比例較其他有機污染物為高。另外，研究學者研究地下水 VOCs 污染發現，在其採樣的 65%樣品中，可以測得 VOCs 存在，其中又以 chloroform、toluene、1,2,4-trimethylbenzene 和 PCE 最常被發現。在 1.2%的樣品中，VOCs 濃度超過 MCLs 之管制標準，VOCs 包括了 dibromochloropropane、1,2-dichloropropane、ethylene dibromide、PCE、TCE 和 1,1 -dichloroethene (Rowe et al., 2007)。

我國有關地下水受到含氯有機物污染之案例，以美國無線電公司(RCA)桃園廠場址公告為地下水污染整治場址最具代表性。調查顯示該場址地下水中之含氯溶劑包括 1,1-二氯乙烯、氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯等均超過地下水污染管制標準。而根據財政部關稅總局之統計資料(統計資料庫查詢系統，2022)，並且從環保署土污基管會的統計資料(列管場址查詢系統，2022)，對於上述四種污染物進行調查，可以發現，在 1,1-二氯乙烯方面，我國自 2017 年至 2021 年 11 月(初步值)總計進口 1,1-二氯乙烯約 2 公噸，但光是 2016 年就進口 907 公噸，這代表在 2017 年度前具有大量進口且使用，這也是此污染物為本場址主要污染物原因，另一方面，在全國目前 82 個地下水污染列管場址中，有 7 個受到 1,1-二氯乙烯之污染，污染範圍從 0.0714 ~ 7.17 mg/L。在氯乙烯方面，自 2017 年至 2021 年 11 月(初步值)總計進口約 425,397 公噸，有 15 個地下水受到氯乙烯污染。氯乙烯污染物被檢測濃度範圍介於 0.0301 ~ 13.3 mg/L。在三氯乙烯方面，自 2017 年至 2021 年 11 月(初步值)總計進口約 327 公噸，有 23 個之地下水受到三氯乙烯污染，三氯乙烯污染物被檢測濃度範圍介於 0.0510 ~ 18.7 mg/L。在四氯乙烯方面，自 2017 年至 2021 年 11 月(初步值)總計進口約 333 公噸，有 8 個之地下水受到四氯乙烯污染，四氯乙烯污染物被檢測濃度範圍介於 0.0676 ~ 18.9 mg/L。



## 2.2、土壤和地下水污染處理技術

有關去除地下水中含氯有機物之傳統處理方法，多半採用 pump-and-treat 技術。其原理為將受污染之地下水抽出至地表，並以地上處理設施處理抽出之污染地下水；且設置容易、成本低和技術門檻低等優點；但此技術也因(1)疏水性污染物溶解於水中的速率緩慢，導致污染物無法隨地下水快速且有效地抽出、(2)土壤吸附污染物的脫附速率緩慢，在停止抽水後污染物的濃度會在緩慢的升高和(3)污染物從水力傳導性低的區域擴散到水力傳導性高的區域緩慢等因素(Rodrigues al., 2020)，使該技術難以完整修復污染地下水水體。Linek et al. (1998)使用粒狀活性炭(granular activated carbon, GAC)處理地下水中 TCE，但是 GAC 僅有吸附 TCE 的作用，並無法分解 TCE，且 GAC 會因吸附飽和而必須要頻繁的更換，導致成本太高而不經濟。同時，如果使用 GAC 吸附或是使用氣提(air-stripping)的方式處理 TCE 的話，並沒有辦法真正的解決污染問題，而只是將污染物轉到另一個相而已(National Research Council, 2005)。另一方面，研究學者將土壤及地下水污染之處理技術依照處理地點的不同，大致分為現地(in situ)、現場(on site)和離地(ex situ)三種。其中，對於有機污染物如氯化碳氫化合物(chlorinated hydrocarbon，包括 TCE、PCE 等)、多環芳香族碳氫化合物(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、甲基第三丁基醚(methyl tertiary-butyl ether, MTBE)、BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene 和 xylenes)和內分泌干擾物質(endocrine disrupting chemicals, EDCs)之處理技術，則需視污染物之特性來加以適用。一般而言，對於上述有機污染物之處理技術包括：土壤氣體抽除法(soil vapor extraction)、界面活性劑沖排技術(surfactant flooding)、現地氧化法(in situ oxidation)、電熱及電動法(electrical heating and electrokinetic methods)、生物復育法(bioremediation)、反應牆整治法(reactive barrier walls)、植生復育法(phytoremediation)、吸附吸收法(adsorption/absorption)、固化/穩定化(solidification/stabilization)和熱處理法(thermal treatment)等(Caliman et al., 2011)。

以氧化處理技術為例，過去在國內的相關研究上，以臭氧化技術運用在土壤和地下水污染整治的研究並不多見。然而，從國外學者發表的研究成果可以發現，對於具有穩定性、水中溶解度低、低揮發性和高分子量等之污染物，如 PAEs 和 PAHs，則以臭氧( $O_3$ )處理為一可行之處理技術(Masten and Davies, 1997; Choi et al., 2002; Kim and Choi, 2002; Kong et al., 2003; Goi and Trapido, 2004; Haapea and Tuhkanen, 2006; O'Mahony et al., 2006; Javorska et al., 2009)。Masten and Davies (1997)以  $O_3$  處理受 PAHs 污染之土壤，目標污染物-菲(phenanthrene)和芘(pyrene)之去除率最高分別可達 95%和 91%。Choi et al. (2002)研究  $O_3$  在土壤中之傳輸效果，研究結果顯示， $O_3$  可以去除不飽和土壤中的 phenanthrene 和柴油有機污染物。





Kim and Choi (2002)研究以  $O_3$  處理不飽和土壤中的非揮發性 PAHs，他們在報告中指出，雖然  $O_3$  可以有效的處理土壤中的 phenanthrene，但是  $O_3$  傳輸的範圍受到土壤中有機質含量的影響。Goi and Trapido (2004)指出， $O_3$  氧化和 Fenton 法都可以有效的處理受 PAHs 污染的土壤。Haapea and Tuhkanen (2006)使用整治列車方法，以土壤沖洗、臭氧化接續生物處理的方法處理受 PAHs 污染的土壤，對於 PAHs 土壤含量 1200 mg/kg 進行整治處理之後，去除率可以達到 90%，並且符合土壤污染的處理標準。O' Mahony et al. (2006)的研究也顯示， $O_3$  處理效果與土壤的性質和成分有關，當土壤中水分含量越低時， $O_3$  對於土壤中的 PAHs 去除效果越好，土壤中黏土成分越高也會降低  $O_3$  處理效果，最佳處理效果可以達到 85%。Javorska et al. (2009)以  $O_3$  處理受多氯聯苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)污染之土壤，研究結果顯示， $O_3$  能夠有效的處理剛受到 PCBs 污染的土壤，同時土壤中有機質含量較少時，處理效果越佳，該研究亦認為以  $O_3$  進行 PCBs 土壤污染處理是一環境友善的整治技術(environmental friendly remediation technology)，因為在研究中發現，處理過程中，植物的生長並沒有受到影響，但是土壤的有機質含量和 pH 值有些許改變。另一方面，單獨臭氧化在處理天然水中的 TCE 時，由於水中的碳酸鹽(carbonates)成分干擾，而降低  $\cdot OH$  的氧化速率。Beltran et al. (1999)研究發現，若在相同的處理條件之下，臭氧化處理純水中的 TCE 與處理天然水中的 TCE，處理效果分別為 68.8% 和 24.6%。他們同時建議以  $O_3/H_2O_2$  的方法處理水中的 TCE 可達到最佳的處理效果。Yasunaga and Hirotsuji (2008)兩位學者也發現， $O_3/H_2O_2$  可以比臭氧化產生更多的  $\cdot OH$ ，因此，其處理 TCE 之去除效率比單獨使用  $O_3$  處理可高出 40%。Jung et al. (2003)則在研究時發現，使用 c-rays 搭配臭氧化處理時，可以促進  $O_3$  的分解，產生更多的  $\cdot OH$ ，有效的降解地下水中的 TCE 和 PCE。而 Fujita et al. (2004)使用 high silica zeolites ( $SiO_2/Al_2O_3 = 30$  and 3000)和  $O_3$  處理水中的 TCE，結果發現，silica zeolites 可以有效吸附 TCE 和  $O_3$ ，並且促進 TCE 之氧化分解反應。在 Fenton 法方面，結合各種技術使  $H_2O_2$  轉化為氫氧自由基( $OH\cdot$ )，如：使用 Fenton 試劑( $H_2O_2$  與  $Fe^{2+}$ )或 Fenton-like 試劑( $H_2O_2$  與  $Fe^{3+}$ )等方式去除污染物，而 Fenton 試劑反應過程中對 pH 值較敏感，在低 pH 條件時  $H^+$  對  $HO\cdot$  的清除作用增強，導致 Fenton 試劑的氧化能力降低，因在高或低 pH 條件下 Fenton 無法有效地將污染物氧化(Yang et al., 2020)。近年來過硫酸鹽(Persulfate, PS)，也被廣泛應用於現地化學氧化法中，因為與上述氧化劑相比，它在地下環境中較容易處理且更具活性，且能在地下水中做遠距離得輸送(Bacocchi et al., 2014；Ranc et al., 2016)。過硫酸鹽自生成活性氧物質(Reactive oxygen species, ROS)過程緩慢，所以需要使用外部因素進行激發，可藉由紫外光(UV)、光、熱和過渡金屬等來提高對污染物降解效率(Rayaroth et al., 2020)。



在生物處理技術研究方面，使用微生物的生長和活性等特性，此技術可在飽和層區域針對污染物進行生物性分解，且能有效的降解溶解在地下水及吸附在含水層中的有機物成分，使受污染之土壤和地下水進行清除工作(Zouboulis et al., 2019)。在國內方面，劉紹文(2004)以生物反應牆法探討微生物去除地下水中 TCE 和氯乙烯(Vinyl chloride, VC)之效果發現，在實驗設計之條件下，TCE 和 VC 之去除率最高可分別達到 94%和 60%。高志明(2006)教授之研究團隊在 2006 年利用整治列車系統，處理受 DNAPL 污染之地下水，以 TCE 為目標污染物，第一階段以界面活性劑進行沖排(surfactant flushing)，第二階段之整治採用高錳酸鉀氧化及第三階段採用生物整治牆系統，處理過後之 TCE 濃度可符合地下水管制標準。該團隊 2009 年之研究重點在於設計生物透水性整治牆和研發可緩慢釋放碳源、氮源及營養物質之基質，以加速 TCE 之生物降解。其中合成之基質為結合蔬菜油(慢速分解基質)、糖蜜(快速分解基質)及生物可分解界面活性劑(simple green 和卵磷脂)，使蔬菜油乳化為較易擴散之乳化型釋氮基質，以期長期提供微生物共代謝好氧或厭氧還原脫氯所需之碳源或氮源(高志明，2009、2010)。2010 年則以上述研究為基礎，進行現地整治模廠試驗，研究結果顯示注入之基質可形成透水性反應牆，以防止 TCE 向下游傳輸擴散，且 TCE 濃度可降低至符合法規標準(簡華逸，2010)。此外，王鴻博(2007)教授之研究團隊研發以新型分散性奈米鐵微粒注入受含氯揮發性有機物污染之土壤中進行現地整治試驗，研究結果發現，目標污染物 PCE 和 TCE 有大於 95%之清除效率。楊金鐘(2007)教授研究團隊以 TCE 為目標污染物，採用添加可溶性澱粉作為分散劑之奈米鐵懸浮液，注入含有受 TCE 污染之飽和土壤水平管柱，處理結果發現最佳效果可達近 99%之去除率。

陳志榮(2003)學者以不同之介面活性劑(Tween 80, TX100, SDS)進行土壤淋洗試驗，探討處理受 TCE 污染之石英砂和地下水層砂之效果。實驗結果顯示，在含有 1%及 3% TCE 之石英粗砂與細砂中，以 1%淋洗劑淋洗管柱中之 TCE，回收率以 TX100 為最佳，若改用地下水層粗砂及細砂，則以 Tween8 為最佳，顯示在不同的受污染介質中，必須要考量採用適合的淋洗劑。劉嘉庭等學者(2011)則研發可緩慢釋放碳源及營養鹽之乳化型釋碳基質，結合生物透水性反應牆進行現地處理，加強場址內 TCE 之生物還原脫氯作用。研究結果發現，其研發之乳化型釋碳基質具有長時效供應現地微生物生長基質功能，可以加強還原脫氯效率，達到在污染場址降解 TCE 之目的。張書奇和楊書豪(2012)兩位學者研究以椰子油混合棕櫚油包覆奈米過氧化鈣，成功地在管柱中傳輸並去除 TCE，顯示當乳化液在土壤地下水中傳輸時能將通過路徑與附近之 TCE 重新分布至乳化液中，可增加 TCE 之生物可及性及可能更佳直接回收去除率。另一方面，其他學者也利用不同藥劑進行地下水處理，富含磷聚合物(HAP/C-S-H)是一種有效、低成本和環





保來處理受重金屬污染土壤和地下水的方法，Liu et al., 2021 使用從廢水中回收之 HAP/C-S-H 修復受銅污染的土壤和地下水，在土壤地下水中經過 28 天后 76.3% 的銅可被 HAP/C-S-H 固定，得知固定後的土壤酸鹼中和能力增加，直到接近中性的 pH 值銅的溶解將會顯著降低。

## 2.3 含氯有機物光催化處理技術

近年來對於含氯有機物光催化處理研究之論文發表，有逐年增加之趨勢，研究對象主要以氣相中之含氯有機污染物為主，水相中的討論及研究較少。Yokosuka et al. (2009)以氮改質之  $\text{TiO}_2$  (N-doped  $\text{TiO}_2$ )和 UV 以及可見光進行氣相 TCE 之降解研究，結果顯示，N-doped  $\text{TiO}_2$  觸媒有以在可見光的照射之下，有效的降解 TCE，並且能夠重複使用，並維持至少 4 個月的處理效果。Tashiro et al., 2019 研究溶膠-凝膠法製備 Cu- $\text{TiO}_2$  經 200、400、600 度鍛燒後使用可見光燈源降解氣態 TCE，光觸媒在反應器中暗吸附 180 min 達到吸附平衡後，使用 300 W Xe 燈、波長 422 nm、光強度  $72 \text{ mW cm}^{-2}$  進行光催化活性研究。研究結果表示，200 度鍛燒觸媒在可見光燈源降解下 TCE 的去除率達 100%，TCE 在降解過程中轉換為  $\text{CO}_2$ 。另外，在水相光催化處理方面，林明志和黃文鑑(2010)兩位學者則應用光催化程序，處理水中之微量三氯甲烷及二氯乙烯。研究結果發現，所使用之觸媒 ZnO 及  $\text{TiO}_2$  單獨吸附三氯甲烷及二氯乙烯之去除率均介於 30 - 40% 之間，若使用 UV254 搭配 ZnO 及  $\text{TiO}_2$  進行光催化處理，則對於兩種氯化物之去除率可大幅提升至 60 - 80%。其中，以 UV254 搭配  $\text{TiO}_2$  之氧化處理效果較佳，且對於二氯乙烯有較強之氧化力。由於光催化 TCE 所產生的副產物主要為 DCAC，因此，Nishikiori et al. (2010)特別對於光觸媒  $\text{TiO}_2$  與 DCAC 之反應進行研究，結果發現，當觸媒表面為疏水性質(hydrophobic)時，DCAC 會被轉變成為 dichloroacetic acid (DCAA)，UV 光可以將 DCAA 再繼續降解為光氣、 $\text{CO}_2$  和 CO。當觸媒表面為親水性質(hydrophilic)時，DCAC 則主要被轉變成為二氯醋酸根陰離子(dichloroacetate anion)，之後則會再被降解為氯仿(chloroform)。而其他光催化研究也有發現相同結果，Mohseni (2005)將  $\text{TiO}_2$  (Degussa P25)覆鍍在二氧化矽微粒的表面，以不同波長之 UV 光線(254 nm, 365 nm 或 185/254 nm)照射含有 TCE 之氣體，探討光解(photolysis)和光催化(photocatalysis)對於氣相中 TCE 之去除效果。研究結果發現，使用光觸媒可以得到最大的 TCE 去除效果( $6 \text{ kg TCE/m}^3/\text{hr}$ )，以  $\text{O}_3$  配合 UV 光解亦可達到相同之處理效率。TCE 處理後所產生之主要副產物為光氣(phosgene,  $\text{COCl}_2$ )和氯乙醯氯(dichloroacetyl chloride, DCAC)。當使用光催化處理時，則無 DCAC 產生，但是有微量的 chloroform 和 carbon tetrachloride 被偵測到。另外，其他研究成果也有顯示，Rashid and Sato (2011)探討以 UV 和 US 處理模擬地下水中之 TCE、PCE 和 TCA 時發現，以結合 UV 和 US 的處理效



果為最佳，並且在 26 分鐘就可以達到最好的處理效果，對於 TCE 之去除效率分別為 UV 47%、US 8%和 UV/US 55%。Parshetti and Doong (2011)兩位學者則以 Fe/TiO<sub>2</sub> 作為光觸媒，探討在有鎳的存在下以 UV 光催化去除 TCE 和二氯酚 (Dichlorophenol, DCP)。研究結果發現，在實驗條件下，TCE 和 DCP 皆能夠備有效地脫氯，且其效率優於使用奈米零價鐵。加氫脫氯反應(hydrodechlorination)和·OH 連鎖反應為主要的脫氯機制，鎳的存在加強了 TCE 和 DCP 的光脫氯作用。Suarez et al. (2011)則提出相對溼度的大小，會影響 TCE 光催化的降解效果。另外，Rashid and Sato (2012)利用紫外光(ultraviolet, UV)和超音波(ultrasound, US)處理以 0.761 mM TCE 和 0.603 mM PCE 配製而成之模擬地下水，將總 VOCs 濃度控制在 100 mg L<sup>-1</sup>，處理結果發現，對於 TCE 和 PCE 之處理效果依序為 UV/US > UV > US，其中，以 UV/US 對 TCE 之去除效果在 30 分鐘左右可達到 70%，對於 PCE 可以達到 87%。Alcantara-Garduno et al. (2008)則發現，以醋酸(acetic acid)沖洗和 O<sub>3</sub> 氧化處理，可以有效去除土壤中的 TCE。當土壤中腐植酸(humic acid)濃度低於 8 mg L<sup>-1</sup> 時，TCE 可以在 0-25%濃度的醋酸溶液中被 O<sub>3</sub> 分解。

在光觸媒厚度影響方面，Seyama et al. (2012)以 TiO<sub>2</sub> 和 WO<sub>3</sub> 作為光觸媒，進行 TCE 降解之動力學研究，銳鈦礦奈米晶體的 TiO<sub>2</sub> 大小約 3.9 nm，WO<sub>3</sub> 則為 17.6 nm 大小的圓球顆粒。研究結果發現，TiO<sub>2</sub> 之光催化活性約為 WO<sub>3</sub> 的 2.1 倍，反應溫度對於 TiO<sub>2</sub> 的光催化效果並沒有影響，但是對於使用 WO<sub>3</sub> 作為光觸媒，則隨著溫度的增加而氧化速率提高。當將 WO<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 以 molar ratio 1:2 混合作為光觸媒時，可以得到 TCE 最佳的處理效果。San Vicente et al. (2012)將 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 雙層覆鍍於玻璃上，在 UVA 的波長光照射下，評估其自淨作用之效率，以甲基藍和 TCE 作為目標污染物。研究結果顯示，TCE 之去除效果與 TiO<sub>2</sub> 膜的厚度有關，對於甲基藍之去除則以 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 雙層較為佳。在環境污染物濃度影響方面，Farooq et al. (2009)則以 UV 和 TiO<sub>2</sub> 探討在不同的 TCE 初始濃度、TiO<sub>2</sub> 濃度和反應時間下，對於水中 TCE 之去除效果。結果發現，粉狀 TiO<sub>2</sub> 之光催化效果較粒狀 TiO<sub>2</sub> 為佳，以粒狀 TiO<sub>2</sub> 作為光觸媒時，水深最高可以達到 45 mm 仍然對 TCE 有去除效果。對 TCE 之去除效率隨著 TCE 初始濃度或是 TiO<sub>2</sub> 濃度增加而增加，在各實驗條件下，TiO<sub>2</sub> 0.7 g 和 TCE 濃度 35 µg/L 可達到最佳光催化去除效果。

在光催化技術之發展上，除了各式的光反應器之外，過去 10 年來，隨著光纖材料的發展，也開始有些學者將光纖應用到光催化反應上。目前之光纖應用在光催化反應，仍以氣相介質處理為多，根據近幾年的研究顯示，以光纖製作之光反應器多半應用在溫室氣體 CO<sub>2</sub> 處理之研究。國內吳紀聖教授團隊(Nguyen and Wu, 2008)利用光纖反應器，探討將 CO<sub>2</sub> 轉化為碳氫化合物，作為一種新的可再生能源。他們將 Cu-Fe/TiO<sub>2</sub> 觸媒覆鍍在光纖(optical fibers)表面，以 UVA 和 UVC 之



波長作為光源，讓 UV 光通過光纖的傳送，到達光催化反應之觸媒表面，在反應的過程之中，空氣中所存在的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  反應生成甲烷(methane,  $\text{CH}_4$ )和乙烯(ethylene)。Nguyen et al. (2008)亦採用不同的材料來覆鍍  $\text{TiO}_2$  觸媒表面，以光纖反應器探討轉換  $\text{CO}_2$  的效果，所使用之覆鍍材料為  $\text{RuII}$  (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) $_2$  -(NCS) $_2$  ( $\text{N}_3$  dye)，所使用之光源為聚集之太陽光。研究結果顯示，使用  $\text{N}_3$ -dye-Cu (0.5 wt%) – Fe (0.5%)/ $\text{TiO}_2$  覆鍍在光纖表面，使用光照強度為  $20 \text{ mW/cm}^2$ ，經過光纖反應器之處理後， $\text{CH}_4$  產率為  $0.617 \mu\text{mol/g-cat h}$ 。另外有類似的研究，也已經發表(Wu et al., 2008; Wang et al., 2010)。

顧洋教授團隊(Ma et al., 2008)則以  $\text{TiO}_2$  光觸媒覆鍍之光纖反應器，在不同的 UV 光強度和不同的丙酮(acetone,  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )初始濃度下，探討對於空氣中  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  之處理效果。其實驗結果發現，增加 UV 光強度或降低  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  的初始濃度，皆可以提高  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  的礦化效果，而光纖反應器之光量子產率(apparent quantum yield)為傳統光反應器的 2 到 3 倍。Zhu et al. (2014)等學者使用流體化床光纖光催化反應器(fluidized-bed-optical-fibers photocatalytic reactor, FBOFPR)處理氣體中的 TCE 污染物，以  $\text{TiO}_2$  作為光觸媒，在實驗設定之操作條件下，TCE 初始濃度為 303.32 ppm 的氣體經過 FBOFPR 處理，去除率可以達到 87%。而綜合以上的研究結果顯示，光催化對於 TCE 具有良好的處理效果，配合光纖材料作為光催化進行現地處理地下水中 TCE 污染物之處理技術，值得做更進一步之研究且極具有發展之潛能。本研究之成果，將可以作為未來以光纖將光源直接導入地下水層，進行光催化處理地下水污染之技術研究和發展基礎。

### 2.3.1、光纖種類與應用

光導光纖(簡稱光纖)因訊號傳導的損失較電纜低，並且價格便宜，因此目前主要作為資訊傳輸工具使用，最近也應用於裝飾以及娛樂用途。光纖結構主要可分為中芯(core)以及外皮(clad)兩層，中芯材質主要以石英、玻璃以及壓克力為主，而外皮材質為塑膠，Joo 等學者(2003)研究以石英光纖(quartz optical fibers, QOFs)與塑膠光纖(plastic optical fibers, POFs)進行光催化去除三氯乙烯之研究，實驗結果證明，以二氧化鈦做為光觸媒覆鍍於光纖表面，在波長 300nm 以上之 UVA 光源照射下，塑膠光纖即可達到良好的光催化效率，並且具有低成本的優勢。另外，在光源傳輸方面，當光源進入光纖後，光源會藉由外皮反射，進而在內部傳輸。因此光纖傳輸種類目前大致可分為端點光纖以及側光光纖兩種，當光源在內部進行全反射時，稱之為端點光纖。若光纖之外皮會使固定比例之光源射出，另一部分進行反射，稱為側光光纖，若將光纖運用於光催化實驗中，光纖所包覆之外皮在許多研究的前處理會將其剝除或是浸泡於醇類溶掉，再將觸媒覆鍍於光纖管上，即可應用於光催化處理程序去除污染物(Joo et al., 2003)。





利用光纖作為光源的載體照射觸媒，進而進行光催化反應的研究，主要會探討光源強度、覆鍍次數、光纖管的數量，以及觸媒添加劑量的比較。學者 Jinyu et al. (2012)以側光光纖發出之光源，照射  $\text{Ag}^+/\text{TiO}_2$  觸媒進行光催化反應，結果顯示，當觸媒劑量由  $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  上升至  $1.167 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  在處理時間 8 小時後，對於亞甲基藍之光催化處理效率將會由 20% 提升至 97%。並且研究顯示，當所有操作條件相同時，光纖支數為 300 支進行光催化實驗，在 7.5 小時處理時間後，去除效率為 80%，當光纖支數增加至 500 支後，光催化處理效率最終達到 95%，作者表示，當光纖的數量增加，光傳輸容量也相應增加。學者再進一步以相同燈源，改變其功率(100、200、300W)，進而增加其燈源光照強度，通入側光光纖管(Side-glowing Optical Fiber, SOFs)，觸媒以  $\text{Ag}^+/\text{TiO}_2$  粉末添加於處理溶液中進行光催化反應，當功率由 100W 提高至 300W 時，其去除效率由 68% 增加至 97%。由結果可以得知，當提供較強之光照強度，可以增加光子能量進而激發觸媒產生電子電洞對，因此增加污染物之去除效率。

### 2.3.2、光觸媒種類

二氧化鈦(titanium dioxide, Degussa P-25,  $\text{TiO}_2$ )為目前廣泛所使用之光觸媒，其優點為無毒性、抗菌、防污、脫臭、環境淨化等用途。二氧化鈦之晶相結構以金紅石(rutile)、銳鈦礦(anatase)與板鈦礦(brookite)為主，Kim et al. (1999)以  $\text{TiOCl}_2$  為起始反應物，實驗發現非晶相之二氧化鈦將溫度升高至  $400^\circ\text{C}$  可以獲得銳鈦礦之晶相，再持續升高溫度至  $650^\circ\text{C}$  開始有金紅石之相態產生，由此可知，改變反應溫度條件可以得到不同的金紅石與銳鈦礦比例，另外，觸媒的晶相也會影響到光催化效率，Puddu 等學者(2010)以 sol-gel 法，在  $100 - 800^\circ\text{C}$  進行奈米級  $\text{TiO}_2$  觸媒製備，在 UVA 的波長照射之下去除空氣中的 TCE。製備後的觸媒大小約 5.8 - 75.8 nm，表面積為  $4.3 - 498 \text{ m}^2/\text{g}$ 。銳鈦礦  $\text{TiO}_2$  在 UVA 的照射之下，其處理效果優於市售的  $\text{TiO}_2$  (Degusa P-25)，但是如果， $\text{TiO}_2$  之主要成分為金紅石(rutile)或混雜銳鈦礦/金紅石時，則處理效果明顯不佳。Arconada 等學者(2009)蒐集分析過去的 TCE 光催化研究發現， $\text{TiO}_2$  觸媒具有較多的孔隙與和 TCE 有較大的接觸面積，可以有效的提高 TCE 的降解速率，當  $\text{TiO}_2$  觸媒備製之時，以  $450^\circ\text{C}/1 \text{ h}$  之燒結下表面積和晶相兩個條件之間達到平衡，可以得到最佳處理效果之觸媒。

二氧化鈦之能隙大小為  $3.0 \sim 3.2 \text{ eV}$ ，在紫外光的照射下會形成電子電洞對(conduction-band electron and valence-band hole)，使周圍之氧氣及水分子激發成具強氧化力的氫氧自由基( $\cdot\text{OH}$ )，達到有機污染物質分解和去除之效果(鄭智鴻，2006)。而  $\text{TiO}_2$  光觸媒許多研究指出，二氧化鈦光觸媒可在可見光波長被激發，使觸媒內的價電帶和傳導帶發生電子轉移效果。為了增加觸媒光催化處理效率，許多學者研究在光觸媒製備過程中皆朝向摻雜不同元素或是改變其鍛燒溫度的



研究方向(Wang et al., 2004)，針對  $\text{TiO}_2$  觸媒進行改質，使  $\text{TiO}_2$  光觸媒能夠更有效利用可見光波長來進行光催化反應。學者 Zhao et al.(2013)添加氮以及氟於  $\text{TiO}_2$  中進行改質後，激發波長範圍為 400-500nm，屬於可見光波段，因此更容易受到激發，進而增加光催化處理效率。另外許多學者也對於光觸媒改質技術進行研究，Yu 等學者(2010)先將 Pt、Ag、Cu 等金屬覆鍍在  $\text{TiO}_2$  上作為光觸媒，探討在室溫下進行光催化對於空氣中 nitric oxide (NO)的處理效果。結果發現，三種光觸媒之中以 Pt/ $\text{TiO}_2$  光觸媒有最好的 NO 去除效果，再將 Pt/ $\text{TiO}_2$  覆鍍到光纖表面，以連續式光纖反應器進行 NO 之處理，結果發現，以甲烷作為還原劑時，NO 之轉換效率為 10%，而當有水氣和氧存在時，轉換效果可達到 90%。以氫作為還原劑則可以達到 85%之轉換效果。Yeung 等學者(2009)則使用三種不同的奈米級  $\text{TiO}_2$  觸媒(nano- $\text{TiO}_2$ 、titania-silica aerogel 和 nanotextured  $\text{TiO}_2$  film)，發現在光催化的條件下，均可以有效地產生  $\cdot\text{OH}$  去除氣相中的 TCE，同時讓受測之微生物不活化。Ola 等學者(2012)以 1wt% Pd/0.01 wt% Rh- $\text{TiO}_2$  作為光觸媒覆鍍在光纖上，成功的將  $\text{CO}_2$  轉換成 methane、methanol 和 acetaldehyde。Banisharif 等學者(2015) 研究 Fe- $\text{TiO}_2$  對三氯乙烯(trichloroethylene,TCE)去除效率探討，該研究將含有 0.1 wt % Fe- $\text{TiO}_2$  分別在 100、200、300、400 度鍛燒，且用波長 254 nm、365 nm 及 3 種可見光（分別為紅光、綠光、藍光）將 500 ppm 的 TCE 進行降解。研究結果表示，0.1 wt% Fe- $\text{TiO}_2$  在 100 度鍛燒下且燈源波長為 254 nm 的條件下，TCE 的去除效果最佳，TCE 的去除率約為 97 %。另外，在近期研究也持續對複合光觸媒效率進行探討，Volhard et al., 2021 利用磷酸鋇結合  $\text{TiO}_2$  (SrPP/ $\text{TiO}_2$ )，發現在海水中經過 5 小時亞甲基藍會被完全降解，由此可知多磷酸鹽殼會置換海水中的  $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{Sr}^{2+}$  陽離子使多磷酸鹽塗層溶解從而釋放出具有光催化活性的  $\text{TiO}_2$  來降解海水中的亞甲基藍、甲基丙烯酸甲酯、對苯二甲酸和乙烯醇。Wang et al., 2021 利用  $2\text{Bi}_2\text{O}_7$  (Sr 0.6 Bi 0.305 ) (SBO)催化劑作為  $\text{TiO}_2$  的活性點位，通過水熱法在  $\text{TiO}_2$  表面形成  $2\text{Bi}_2\text{O}_7/\text{P25}$  (SBO/P25)。研究結果顯示使用 SBO/P25 光催化劑降解亞甲基藍(MB)的光催化性能達到  $3.42 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  (可見光)比純 P25 高 5.26 倍。由上述文獻可知，複合材料在水處理中具有良好的可見光吸收性能與穩定性。

### 2.3.3、無機樹脂覆膜技術

樹脂可分為天然樹脂與合成樹脂兩大類，天然樹脂其來源來自多種植物，特別是松柏類植物的烴(碳氫化合物)類的分泌物。大自然中原只有天然樹脂這一種，但隨著化工的發展，有很多由人工合成的聚合物產生，當中有些聚合物的化學性質及物理性質會和天然樹脂很相似，因此，聚合物會被稱為合成樹脂。因為樹脂具有特殊的化學結構，並且於商業上可以作為乳膠漆和膠合劑等材料使用，因此樹脂具有較高的商業價值。它是多種高分子化合物的混合物，所以有不同的





熔點。無機樹脂是經由製備而成，其特點是製作簡易，並且製作方便、安全、成本低。目前已廣泛運用於建築、裝潢粘結劑或增稠劑。並且許多研究對於各類樹脂進行結構上的探討，林建宏(2013)學者以混練法製備 ABS 樹脂/奈米二氧化鈦複合材料之物質性質、機械性質與熱性質實驗結果得知，經由 FTIR 與 ESCA 測試，發現 ABS/奈米氧化鈦奈米複合材料之粒徑分析中奈米氧化鈦(未改質和改質)都在奈米規範；另外，在 XRD 測試可以看到晶相結構；在 FE-SEM 和 TEM 具有的良好分散性能，在物理性質方面有效提升；在機械性質測試拉力、抗張、硬度和耐磨耗，皆有效提升 4%以上，耐衝擊有下降 20%以上；在熱性質，耐熱性提高效果更加顯著的增加 10 度以上。而樹脂材料也運用於 LED 燈之封裝技術上，黃任賢(2013)學者研究指出，為了提升 LED 的光萃取效率，開發一具有高折射率之封裝材料是相當重要的。因此研究利用濕式研磨法製備穩定分散之奈米二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )粉體。我們將  $\text{TiO}_2$  粉體添加至矽樹脂封裝材料當中，嘗試利用  $\text{TiO}_2$  粉體來調整矽樹脂封裝材料之折射率。研究結果顯示，當  $\text{TiO}_2$  添加量提高時可以有效提升複合材料之折射率。同時整體封裝材料之熱傳導係數也會因此提升。此現象有助於改善 LED 之發光效率及長期穩定性。張文華(2005)等學者以矽酸鈉溶液及鹼性溶液混合配製成不同模數比( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ )之溶液，將其製成無機聚合樹脂(geopolymer resin)，可嘗試作為混凝土結構物補強之黏著劑，研究結果發現，傳統的環氧樹脂脂具不透氣性，使得水氣無法順利排除，導致混凝土內部孔隙壓力遽增而產生爆裂現象，而自行研發之無機樹脂( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) 硬化後為一種類似沸石之多孔架狀結構，透氣性良好，且具有製作簡單、耐高溫、抗酸鹼腐蝕等優點，若將上述研究結果特點運用於光催化之光觸媒覆膜液配製，將有利於光催化之透氣性處理水中之有機污染物，增加其接觸機會，以達到去除污染物之效果。

另一部分，許多研究也針對樹脂與光觸媒進行合成，探討對於氣體或水體污染物之光催化去除效果，並且針對摻配參數進行探討。Ooka et al. (2009)研究利用二氧化鈦柱雲母粉末搭配聚乳酸類樹脂捏合並模塑成片啞鈴形式，燈源選用 UVA(波長 365 nm)進行光催化反應去除乙醛及甲苯屋氣體污染物之效率，實驗操作條件調整觸媒添加量從 0.2 wt%~10 wt%。實驗結果顯示，光催化去除兩種氣體污染物效率最佳為 1 wt%~3 wt%，若再增加觸媒添加量，將降低光催化之去除效率。SHIBATA et al. (2007)以  $\text{TiO}_2$  搭配樹脂探討在不同溶質溶劑之重量百分比(1 wt%、5 wt%、10 wt%)的條件下，實驗以 UVA(波長 360 nm)作為實驗光源處理時間 2、4、6 小時測量光催化之抗真菌效果，研究結果顯示，5 wt%之混和樹脂/ $\text{TiO}_2$ (AP- $\text{TiO}_2$ )之白色念珠菌存活細胞數降至最低，這也代表著 5 wt% AP- $\text{TiO}_2$  之光催化效果最好，實驗結論建議不可添加過量  $\text{TiO}_2$ ，否則會抑制光催化效果。Dongliang et al. (2009)利用摻雜碳的二氧化碳觸媒與多孔性材質的樹脂做結合，探



討結合後對污染物 rhodamine B(羅丹明 B)染料之光催化去除效率之影響，實驗結果顯示，當使用市售之 Degussa P-25  $\text{TiO}_2$  粉末、添加多孔性樹脂之自製摻碳二氧化鈦粉末(RN<sub>700</sub>A<sub>550</sub>)與不添加多孔性樹脂之自製摻碳二氧化鈦粉末(N<sub>700</sub>A<sub>550</sub>)三者比較下，以可見光與紫外光作為燈源，結果皆以 RN<sub>700</sub>A<sub>550</sub> 光催化去除效果最佳，結果顯示，使用多孔樹脂作為觸媒之結合劑應用於光催化系統中將有效提升光催化之表面積，進而增加光催化效率。Xie et al. (2011)利用樹脂顆粒作為基底，以硫化鎘與硫化鈉不同之摻雜比例覆鍍於樹脂顆粒上，實驗光源利用 350W 之氙燈，並使用濾光器控制波長於 420 nm 以下進行光催化反應，探討對於污染物 rhodamine B(羅丹明 B)染料之光催化去除效率，實驗結果證明，在 5 個小時的可見光照射下，可達到 90%之去除效率，而其中又以 Cds 劑量為 97.4 mg/g 最佳，若再提高添加劑量，將會降低光催化效率，研究結果表示，當可見光通過樹脂基體時，有一個有效的覆鍍厚度。若超過臨界厚度，將對於光催化效率有負面影響。並於實驗結果證明，將 Cds 沉積於樹脂顆粒上，透過沉積時間及利用溶質溶劑比所調整之沉積表面密度，在適當範圍下，將可有效提升光催化效率。

聚乙烯醇(PVA)是一種水溶性聚合物，廣泛的運用於工業上作為偏光膜，或其他高透明度之功能用透光膜，而在近期許多研究，顯示聚乙烯醇已被廣泛運用作為光催化觸媒載體，主要當 PVA 膠體與觸媒進行相互作用，聚合物和觸媒顆粒之間的化學鍵合被認為是相當有效且結構性穩定的。根據研究指出，聚乙烯醇/ $\text{TiO}_2$  組合物在廢水處理中具有良好的光催化效率(Song et al., 2014)。而 Ren et al. 在 2015 年研究使用聚乙烯醇/二氧化鈦(PVA/ $\text{TiO}_2$ )光催化劑薄膜。研究結果發現 PVA/ $\text{TiO}_2$  薄膜對於污染物 bezafibrate 具有有效的光催化活性和良好的循環利用穩定性。PVA/ $\text{TiO}_2$  薄膜的光催化效率隨著再利用周期增加而增加。實驗與其他固定化  $\text{TiO}_2$  組合物(浮石/ $\text{TiO}_2$  和多孔玻璃珠/ $\text{TiO}_2$ )和 P25 懸浮液，在長期光催化處理條件下，PVA/ $\text{TiO}_2$  薄膜並無發現流失  $\text{TiO}_2$ ，因此可證明具有可回收性。Liu et al., 2015 研究以水熱法製備具有增強可見光光催化活性的聚乙烯醇/二氧化鈦(PVA/ $\text{TiO}_2$ )奈米複合膜。自製 PVA/ $\text{TiO}_2$  奈米複合材料即使在高  $\text{TiO}_2$  含量(高達 40 wt%)條件下，在可見光照射下也表現出高的光學透明度。並實驗以甲基橙(MO)和無色苯酚作為污染物，進行光降解測定光催化活性，實驗結果顯示 PVA/ $\text{TiO}_2$  奈米複合膜具有增強可見光光催化活性和優良的循環穩定性。研究再進一步以紫外-可見光透射光譜進行觀察，即使在高達 40 wt%之  $\text{TiO}_2$  含量下，薄膜整體在可見光區具有高透明度，研究指出這現象表明奈米尺寸的  $\text{TiO}_2$  顆粒均勻分散在 PVA 基體中。與純 PVA 薄膜相比，PVA/ $\text{TiO}_2$  奈米複合膜在紫外光波段具高吸收以及高透明度，進而提高有機污染物光降解及光利用效率。Zayed et al., 2021 研究以 PVA/ $\text{Cu}_2\text{O}$  的奈米光催化複合材料，對亞甲基藍(MB)、孔雀石綠(MG)、4-硝基苯



酚(4-NP)和活性紅(RR)進行氧化和還原。計算出氧化速率常數 MB 為  $3.85 \times 10^{-3}$ 、MG 為  $2.57 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ，而 4-NP 和 RR 的減少分別為  $7.5 \times 10^{-3}$  和  $6.23 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 。由於不需要過濾、沉澱、離心等，使複合材料回收更容易。由此可知 PVA/Cu<sub>2</sub>O 薄膜可以多次重複使用不會顯著降低其催化活性。

另一方面，聚四氟乙烯(PTFE)在許多聚合物中具有優異的化學穩定性、耐熱性、良好的機械強度與耐侵蝕性等特性，使其作為抗腐蝕塗料、燃料電池複合膜、微電子封裝用等材料運用，並廣泛運用於生物醫學及空間應用(Chen et al., 2014; Dong et al., 2014)，Huang et al., 2017 研究以聚四氟乙烯與 ZnO 組成的新型光催化多孔薄膜，實驗結果發現 PTFE/PVA/ZnO 複合膜可使 ZnO 顆粒均勻地固定在超細 PTFE 纖維表面，使 ZnO 觸媒可均勻分散，避免直接添加 ZnO 顆粒而導致聚集而產生沉澱。PTFE/ZnO 膜也表現出良好的自淨能力。在 3 小時紫外光照射後，纖維薄膜之滲流通量回收率達 94% 以上。先前研究以溶膠凝膠法製備具有可見光激發能力之新型氟摻雜 TiO<sub>2</sub>/硅藻土(FT/DE)複合材料。FT/DE-1.0%(1.0% 氟含量)複合材料在可見光的照射下，降解羅丹明 B(RhB)的光催化活性與 FT-1.0%(含 1.0% 含氟摻雜 TiO<sub>2</sub>)及純 TiO<sub>2</sub> 觸媒相比，光催化之反應速率常數分別提升 4.4 倍和 26.1 倍，由實驗結果得知，添加氟元素皆可有效提升光催化活性(Li et al., 2017)。另外，Umadevi et al., 2014 研究也針對氟元素的添加對於光催化效率進行探討，研究中指出當氟摻雜於 TiO<sub>2</sub> 奈米薄片進行合成，以 XRD、FTIR 和 UV-DRS 研究證實氟摻雜在 TiO<sub>2</sub> 中，XRD 結果發現由於氟取代，顆粒尺寸減小。摻雜氟的 TiO<sub>2</sub> 奈米薄片比純 TiO<sub>2</sub> 奈米薄片具有更高的光催化活性，這可歸因於較小的晶體尺寸，良好的晶相相位及較窄的能隙使得可被可見光所激發。經由以上先前研究結果得知，若添加具有氟元素之聚四氟乙烯溶液作為覆膜液添加劑，將可有效增加光催化之穩定性及活性，另外，陳貞夙於 2004 研究報告中指出二氧化鈦折射率較高(2.496)，其能隙寬度較窄，並且 TiO<sub>2</sub> 的缺陷較多，容易吸收入射的光子，此外 TiO<sub>2</sub> 通常在低溫結晶，因此晶界所造成的缺陷，將會造成光損失(光散射或是光吸收)。因此，本研究主要以較低折射率之 PTFE(1.35 - 1.38)作為添加劑，以降低二氧化鈦之折射效果，提升反射回光纖內之光源，並經由添加量之控制，得到本光催化系統之發光長度之最佳 PTFE 添加劑量。另外，有研究利用四乙氧基矽烷 (TEOS) 經水解形成二氧化矽，分散在金屬基材上的保護塗層中，可以防止腐蝕性介質的滲透。Jia et al., 2021 使用了丙二酚 A 二環氧甘油醚 (BADGE) 和環氧樹脂通過溶膠-凝膠法製備成無機的二氧化矽奈米粒子用於防腐應用的有機無機混成材料。為了增加塗層的功能性，添加了光催化劑氧化鋅 (ZnO) 塗層光降解。使用掃描電子顯微鏡 (SEM) 和紫外-可見光譜 (UV-vis) 等分析製造的奈米顆粒和塗層。此外，在塗層中加入 ZnO 對甲基橙有光降解作用，效率可達 55%。





## 2.4 近期相關光纖光催化成果應用

近幾年學界對於光纖運用於光催化處理作為傳輸光源媒介已逐漸開始討論，此技術由原先的空氣污染處理技術，延伸至水相處理，各研究針對光纖光催化所存在的不確定因素進行研究且探討，並在研究結果皆證明光纖運用於光催化技術可有效將光源延伸至不易光源穿透之污染位置，進行光催化處理程序，一些研究已經指出光纖運用於光催化處理程序可以有效地去除水相中的污染物，達到光催化效果。Xu et al., 2008 研究一種新的光纖反應器(optical fiber reactor, OFR)，該光纖反應器採用側光光纖(side-glowing optical fibers, SOFs)，將  $\text{TiO}_2$  塗覆在 SOFs 上，利用 OFR 收集太陽光，對四氯苯酚 (4-chlorophenol, 4-CP) 進行光催化降解，研究結果表示在陽光照射 8 h 後，4-CP 降解約 79 %。Chu et al., 2012 研究側光光纖 side-glowing optical fibers (SOFs) 降解 20 ppm 亞甲基藍做為研究目標，使用可見光燈源，並改變不同條件來研究其降解。研究結果發現，最適合的反應條件為  $1.167 \text{ gL}^{-1} \text{ Ag}^+/\text{TiO}_2$  和 7 %  $\text{Ag}^+$  結合  $\text{TiO}_2$ ，使用 500 根 SOF，在 300 W 可見光照射 8 h 下，光催化降解效率約 97 %。Athanasίου et al., 2016 以二氧化鈦奈米材料與改質超過濾薄膜作為結合，並利用光纖延伸光源進入薄膜孔洞中進行光催化反應。研究結果指出，此結合系統在水相處理方面，除了有效降解水中污染物外，這種多功能光催化反應器利用於水分解(氫氣生產)，或是在空氣領域進行二氧化碳轉化和空氣淨化，將可運用於大量研究和商業用途的潛在應用。另外，在光源傳導方面，許多研究以石英材質作為介質，Lin et al., 2015 研發使用石英玻璃纖維為芯，矽橡膠塗層的光纖(side-glowing optical fibers, SOF)，以聚合物輔助水熱沉積法(polymer assisted hydrothermal deposition, PAHD)將摻雜鐵  $\text{TiO}_2$  塗覆於光纖表面上，研究中，在 UV 和可見光照射下使用不同比例摻雜鐵  $\text{TiO}_2$  覆膜光纖光催化降解羅明丹 B (RHB) 以觀察光催化效率。實驗結果顯示，5 % 摻雜鐵  $\text{TiO}_2$  且在  $\text{pH}=6$  之降解效果可獲得最佳的光催化活性。Barton et al., 2016 研究以塗覆二氧化鈦奈米顆粒之石英光纖，進行光催化，並評估光纖側面激發的光催化活性。實驗以亞甲基藍作為污染物的情況下，光催化效率獲得了約  $1.55 \pm 0.13 \text{ min}^{-1} \text{ g}^{-1}$  的一級速率常數。研究結果已經證明二氧化矽纖維適於將激發光引導到數十厘米之塗層距離上。使得光催化處理程序可延伸至光線較無法穿透之污染位置。另外，也有研究利用 LED 燈源進行光纖光催化處理水中污染物，研究使用光催化劑塗層塑料光纖(POF)對水中三氯乙烯(TCE)光催化降解的影響。以兩個發光二極管(LED)為光源  $\text{TiO}_2$  和  $\text{ZnO}$  為光催化劑，實驗結果表明，光催化劑層的厚度增加與塗層時間的增加會導致 TCE 的降解效率降低。光強度的增強有助於提高光催化處理效率。用  $\text{TiO}_2$  包覆 POF 在鹼性溶液中降解 TCE 有更高的降解效率，在  $\text{pH} 10$  的溶液中一次性塗覆光催化劑可以達到最佳 TCE 去除率(Chen et al., 2019)。



在光纖光催化的覆膜光觸媒方面，許多研究透過各種工法將光觸媒覆膜固定於光纖上，Lin et al., 2017 研究目的是分析固定化的  $\text{TiO}_2$ -Fe 和  $\text{TiO}_2$ -rGO 納米複合材料在不同的操作條件下的光降解性能，採用聚合物輔助水熱沉積(PAHD)法塗覆光觸媒於光纖上，實驗結果不同光源測試的結果表明， $\text{TiO}_2$ -rGO 可增強光催化性能，主要歸因於光激發電子-空穴對的結合速率降低，但對於  $\text{TiO}_2$ -Fe 納米複合材料，較窄的帶隙將有助於提高光催化活性。因此研究最後指出， $\text{TiO}_2$ -rGO 在紫外光照射下對藥物具有較高的光催化活性，而  $\text{TiO}_2$ -Fe 則更適合可見光氧化。Tugaoen et al., 2018 評估了  $\text{TiO}_2$  光觸媒固定於石英光纖上，以 UV-LED 作為照射燈源進行光催化處理。研究指出光有效傳遞到含有污染物之處理水與光催化劑是主要目前光催化處理的一大障礙，而光觸媒造成光滲透性差，需要處理後在進行過濾分離催化劑也是一大問題。替代方案是將光催化劑沉積在固定基板上並將光傳遞到附著的催化劑的表面上。在研究中， $\text{TiO}_2$  塗覆的石英光纖耦合到發光二極管(OF/LED)，研究目的改善光傳輸障礙。在 OF/LED 反應器中研究設計因素和機理包括：(i)耦合光纖搭配之 LED 光源數量的影響，以及(ii)使用捆綁在單個 LED 上的多根光纖。探討從光纖到  $\text{TiO}_2$  塗層的光傳輸機制。研究以對氯苯甲酸(pCBA)在反應器中進行了實驗。根據 pCBA 的降解動力學，確定氧化和電能(EEO)的定量效率( $\Phi$ )。使用  $\text{TiO}_2$  塗層的光纖束降低了能量傳遞光子的需求並增加了可用的表面積，從而提高了  $\Phi$  和增強的氧化污染物去除性能(EEO)。實驗探討不同光纖支數對於光催化反應動力學之影響。實驗結果顯示，以在不同光纖支數(1、3、15 支)光纖搭配 1 顆 LED 燈源的操作條件下，以 15 支光纖搭配 1 顆 LED 燈源可以獲得最佳的反應動力學。因此實驗結果證明，單一光源使用之光纖數量對於光催化效率是重要關鍵因素。Kim et al., 2017 以浸鍍法改質塑膠光纖(plastic optic fiber, POF)表面，將  $\text{TiO}_2$  沉積於光纖表面上，並透過光催化降解亞甲基藍(MB)與 4-氯苯酚(4-CP)並氧化還原六價鉻( $\text{Cr(VI)}$ )試驗觀察光催化效率。實驗結果顯示，MB 降解效率會隨著  $\text{TiO}_2$  負載量的增加而提升，並溶液 pH 增加和 MB 初始濃度降低將會提升光催化效率。並且 POF/ $\text{TiO}_2$  顯示出比石墨烯(graphene oxide, GO)之 POF/ $\text{TiO}_2$ /GO 更好的光催化活性，此研究在最後表明，POF/ $\text{TiO}_2$  之光催化處理程序對於水處理是可行的。Lopes et al., 2018 研究將可見光藉由光纖傳導至地下環境，增加地下環境氧氣的量。將直徑為 5 毫米塗有白色聚合物的塑料光纖通過放射狀放置在柱子的中心，並連接到人工可見光源 150W，搭配光生物反應器，觀測氧氣變化。實驗證據證明了使用放射狀發射光纖將光傳輸到地下並由於對光刺激的微生物反應而增加 DO 的可行性。Paredes et al., 2019 將  $\text{TiO}_2$  固定在聚偏二氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)雙層的中空纖維膜兩種類型的水基體中的光催化處理過程中，目的去除 8 種特定的藥物。研究將 90 根中空纖維放置在反應器內部的石英管周圍，使用  $\text{TiO}_2$  固定在中空纖維膜上，將目標藥物加入水





中，進行光催化並分析。研究結果指出，與常規懸浮催化劑相比，負載型光觸媒的應用可以在光催化處理過程中提高這些化合物的光轉化率。結果表明，負載型催化劑可以輕鬆地重複使用，而不會降低效率，並且無需使用其他分離系統(例如薄膜處理)進行回收，其應用將逐漸成為一種有前途的選擇。並且有研究也證明可在搭配光纖系統可在太陽光下進行光催化處理，學者使用光催化塗層光纖在地下與濁水光催化降解污染物方法。將光催化劑  $\text{TiO}_2$  P25 奈米粒子覆鍍在聚合物光纖(POF) 上，並在人造陽光下評估系統的光催化性能。利用污染物環丙沙星(CIP) 評估光催化效率及其可重複使用性。結果顯示  $\text{TiO}_2$ P25 在人造陽光下 72 小時後可達到 95% 的降解效率，實驗重複三次後降解效率降低了 11%，顯示材料的可重複使用性並證實  $\text{TiO}_2$ /PVDF 塗層在光催化應用的可行性(Teixeira et al., 2018)。

在光纖光催化應用方面，為了提升光源延伸距離與利用效率，有學者研究探討兩種不同形式的光能(折射光和漸逝波)對光催化劑噴塗之光纖的相互作用。通過合成不同的  $\text{TiO}_2$  塗層石英光纖 ( $\text{TiO}_2$ -QOFs) 並進行分析。研究發現將光纖上的二氧化鈦分佈降低至  $0.034 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ ，增加光纖表面和二氧化鈦塗層之間的平均間距至 114.3 nm，會使光進入  $\text{TiO}_2$ -QOFs 時的折射光大幅降低，91% 在光纖表面的光是漸逝波。其中會產生 24% 的漸逝波不會被二氧化鈦吸收並返回到光纖中，從而使降解水中污染物(卡馬西平)的量子產率提高 32%。通過控制光催化劑塗層結構，可最大限度地利用漸逝波來激活光催化劑，是提高光催化中光利用的有效策略(Song et al., 2021)。而許多研究也改變光纖型式藉以提高光催化效率，Zhong et al., 2019 研發以新型紫外光-可見光之光催化中空光纖(hollow optic fiber, HOF) 與  $\text{TiO}_2$  進行複合材料研究，以提高光催化活性降解 4-氯苯酚(4-CP)。研究中利用  $\text{Er}^{3+}:\text{YAlO}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (EYST)組成的  $\text{TiO}_2$  複合物作為光纖塗層，此材料於光纖介面顯示出良好的光傳輸能力，研究結果顯示，當 EYST 塗層厚度為 10 和 160  $\mu\text{m}$ ，pH 為 6.0，溫度為 55  $^\circ\text{C}$  時，可獲得最佳的光催化活性。另一方面，在最新期的研究，Almansba et al., 2021 為了實驗規模擴大至工業規模，利用光纖紡織品可以提提高的光催化性能及光纖紡織品表面的光分佈均勻，此研究使用新型光纖紡織品光催化探討對水中氟美康 FLU(抗生素)與勝客敏 CET(抗組胺)的去除效果。針對化學物質降解和礦化進行探討，得知其對 FLU 與 CET 降解率分別為 97% 與 68%。



## 第三章 材料與方法

### 3.1、試劑與藥品

1. 去離子水(DIW, 超純水機, Barnstead)。
2. 鹽酸(Hydrochloric acid, HCl 35~37%, SHOWA)。
3. 硫酸(Sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ACS reagent, 純度95-97%, Sigma-Aldrich)。
4. 硝酸(Nitric acid, HNO<sub>3</sub>, 純度60%, SHOWA)。
5. 氫氧化鈉(Sodium hydroxide, NaOH, J. T. Baker)。
6. 甲醇(methanol, CH<sub>3</sub>OH, 純度99.9%, HPLC等級, ECHO)。
7. 奈米碳管(Carbon nanotube, CNT, 95+%, OD 50-80 nm, L 10-20 μm)。
8. 硝酸鋅(Zinc nitrate hexahydrate, Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, 純度99%, SHOWA)。
9. 二氧化鈦觸媒含有70%銳鈦礦結晶(Anatase)及30%金紅石結晶(Rutile), 顆粒大小為20-30 nm。(Titanium oxide, 21 nm, Degussa P-25)。
10. 氮改質二氧化鈦觸媒(N-doped TiO<sub>2</sub>, N-TiO<sub>2</sub>)粉末製作：實驗使用之光觸媒為自製，製作方法參考 Sheydaei et al. (2021)與 Asiri et al. (2014)文獻自行合成。
11. N-TiO<sub>2</sub>/ZnO/CNT 粉末製作：觸媒製作方法參考 Mitróová et al. (2010)與 Khan et al. (2018)文獻進行改良，而光觸媒製備採共沉澱法及濕式浸漬法自行合成。
12. 無機樹脂(主成分為二氧化矽(SiO<sub>2</sub>), 為無限豐富無機材料實驗室試驗提供，具有環保無毒、微透氣性及結合力之特性)
13. 聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene preparation 60 wt% dispersion in H<sub>2</sub>O, Aldrich)

### 3.2、分析方法

本研究分析之水質項目主要包括污染場址所公告之含氯有機物、溶解性有機碳(dissolved organic carbon, DOC)、氯離子(Cl<sup>-</sup>)、水質分析項目包括 pH、溶氧(dissolved oxygen, DO)、水溫、濁度、導電度、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝酸鹽氮(NO<sub>3</sub>-N)、亞硝酸鹽氮(NO<sub>2</sub>-N)，皆遵照環保署環境檢驗所(以下簡稱環檢所)公告之標準方法進行。而分析之樣品將依照環檢所「PA101-檢測環境檢驗品質管制指引通則」進行數據校驗及品質管制。此外，為避免分析樣品間的污染分析任何一批樣品時，每十個樣品應執行一空白試驗，少於十個樣品時每批至少應執行一次空白試驗。空白試驗含儀器空白與試劑空白試驗。回收率測定範圍要求落在 15%誤差範圍內。採集樣品及分析方法分述如下。

#### 3.2.1、被動式採樣袋試驗說明

本研究使用被動式採樣袋進行揮發性有機物採集，使用流程如下：

1. 將採樣緩緩垂放置監測井中，放置至預定採樣深度，可根據污染物特性做多深



度採樣袋放置。

2. 將懸掛繩固定在監測井井蓋，將井蓋蓋回井口。等待 14 天後即可取出採樣袋採樣(註)：14 天為環保署環檢所採樣方法「監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法 NIEA W108.50C」所規範。
3. 緩慢拉動懸掛繩，使採樣袋緩緩上升取出。
4. 取出取樣管，將取樣管對折，用以控制取樣流速。
5. 小心將取樣管刺入採樣袋，使得袋內水樣流出，穿刺位置盡量接近採樣袋底部，使水樣完全流出。
6. 控制取樣管內樣品流速，使水樣緩慢流速樣品瓶。

依據「水質檢測方法總則(NIEA W102.51C)」規定，揮發性有機物(VOCs)以 40 mL 褐色直口玻璃瓶盛裝樣品，瓶蓋內附鐵氟龍墊片。不得以擬採之水樣預洗，加鹽酸使水樣之 pH<2，裝樣後不得含有氣泡，暗處 4°C 冷藏，若水樣中含有餘氯，則於每瓶水樣中添加 25 mg 抗壞血酸。最長保存期限為 14 天。

### 3.2.2、含氯有機物分析方法

將被動式採樣袋採集(3.2.1 章節)之樣品進行後續分析，本試驗之含氯有機物分析方法皆透過台灣檢驗科技股份有限公司(SGS)進行分析，分析方法採用行政院環保署環境檢驗所公告「NIEA W785.56B/水中揮發性有機化合物檢測方法-吹氣捕捉/氣相層析質譜」進行含氯有機物之分析，分析項目包括 1,1,2-三氯乙烷、1,1-二氯乙烯、四氯乙烯，以及三氯乙烯，分析方法皆按照環檢所規定。

### 3.2.3、氯離子分析方法

水樣中氯離子濃度分析係用以評估含氯有機物經光催化分解之處理效果，以及光纖光催化系統處理後對於水中氯離子濃度之影響。實驗分析方法採用環檢所公告之「W415.52B-水中陰離子檢測方法-離子層析法」進行分析。處理水樣經過 0.45 µm 濾紙過濾後，以離子層析儀(Ion chromatography, IC) (DIONEX ICS-2000) 進行分析。IC 儀器分析設定條件為：移動相 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0.27 M)、NaHCO<sub>3</sub> (0.03 M)；流速 1.5 mL min<sup>-1</sup>；管柱 AS12A(如表 4)，分析圖譜如圖 2。

表 4、IC 分析儀器設定條件

| 分析項目            | 移動相                                      | 流速<br>(mL/min) | 管柱    |
|-----------------|------------------------------------------|----------------|-------|
| Cl <sup>-</sup> | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (0.27 M) | 1.5            | AS12A |
|                 | NaHCO <sub>3</sub> (0.03 M)              |                |       |

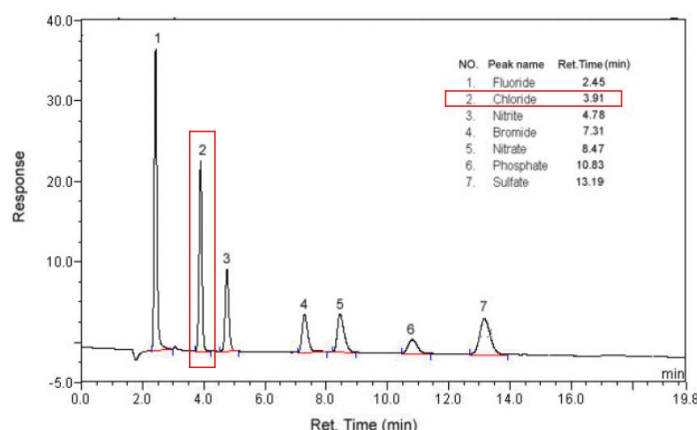


圖 2、離子層析儀之標準分析圖譜(資料來源：環檢所 NIEA W415.52B。)

### 3.2.4、溶解性有機碳分析方法

DOC 之分析係用以評估在不同操作條件下，光催化對於礦化含氯有機物之效果。實驗分析方法採用環檢所公告之「W530.51C-水中總有機碳檢測方法－燃燒/紅外線測定法」進行分析。水樣經過 0.45  $\mu\text{m}$  濾紙過濾後，並以磷酸將水樣酸化至 pH 2 以下吹氮(purge)後以總有機碳分析儀(TOC Analyzer) (Shimadzu TOC-VCSH) 進行分析，故實際上量測之濃度為非揮發性溶解性有機碳(Non-purgeable dissolved organic carbon, NPDOC)。

### 3.2.5、數據之品保品管(QA/QC)

而分析樣品將依照行政院環保署環境檢驗所「PA101-檢測環境檢驗品質管制指引通則」進行數據校驗及品質管制。此外，為避免分析樣品間的污染分析任何一批樣品時，每十個樣品應執行一空白試驗，少於十個樣品時每批至少應執行一次空白試驗。空白試驗含儀器空白與試劑空白試驗。回收率測定範圍應要求落在 15% 誤差範圍內。

### 3.2.6 檢量線製備

樣品分析前皆會配製符合樣品濃度之檢量線範圍，濃度包含 5 點以上之分布點，依配製檢量線濃度與儀器對應之訊號值、面積值、吸光值等，經計算後求得線性迴歸之決定係數( $R^2$ )必須大於或等於 0.995，實驗步驟如以下所示。

### 3.2.7 方法偵測極限

以檢量線最低點之濃度分析三次，求其標準偏差，接著配製 7 個上述標準偏差 3 倍之濃度點，各分析一次，求 7 次值之標準偏差，方法偵測極限即是此標準偏差之 3 倍。





### 3.2.8 樣品重複分析

每次實驗分別取樣兩次，各個樣品的分析次數為兩次，故樣品分析為四重複，依方法所提供之相對標準偏差，以確保儀器分析之精確度和數據的可信度。

## 3.3、現地調查方法

本模場試驗計畫與裕山公司合作，初期從污染場址之環境調查著手。首先以現地既有監測井進行污染物濃度分析，了解水文流向、流速等條件，判斷於重點位置設置監測井進行監測之重要性。主要工作將進行場址特性調查，說明如下：

本團隊於試驗初期進行場址特性全面性調查，為使光纖系統之設置位置更加合適，將針對場址之地質特性、土壤特性、地表水文、地下水文進行調查，以了解其對於污染物分佈和流向之影響。本團隊採用「地質調查作業」及「薄膜介面探測法」方法，進行土壤及地下水污染潛勢分析，經由快速、非破壞及節省經費調查技術，深入了解土壤及地下水疑似污染之污染情形，本團隊於 108-109 年度於現地進行定期監測水位，發現本場址豐枯水期水位劇烈變化，而污染團的位置變化將是污染驗證之一大挑戰，本團隊於 110-111 年度持續搭配定期的 MIP 檢測與持續性的背景採樣，並進行滾動式檢討。

### 3.3.1、地質調查作業

過去鄰近模場地區之鑽探結果顯示，該地區以礫石層為主，鑽井作業較為困難，必須使用鑽堡作業，且地面下 80 m 尚未觸及到不透水層，顯示自由含水層厚度>80 m。於本模場於 108-109 年度所鑿兩口井，作業亦進行鑿井鑽探工作，以確認現地的實際狀況，以及將要進行整治的深度。本研究在 108-109 年所設置之兩口井進行不同深度之取樣並且作後續地質分析(圖 3)，可以得知 0-5 m 為黏土夾砂，6-12 m 為黑粗砂夾礫石，13-60 m 為棕色中細砂，地質剖面如圖 4 所示。



圖3、現地土壤地質採樣圖



| 至地表下深度(公尺) | 地表           | 土壤柱狀圖 |
|------------|--------------|-------|
| 0 ~ 6      | 黏土夾砂 5M      |       |
| 6 ~ 12     | 黑粗砂夾礫石 12M   |       |
| 12 ~ 18    | 棕色中細砂 60.00M |       |
| 18~24      |              |       |
| 24 ~ 30    |              |       |
| 30 ~ 36    |              |       |
| 36 ~ 42    |              |       |
| 42 ~ 48    |              |       |
| 48 ~ 54    |              |       |
| 54 ~ 60    |              |       |

圖4、地質剖面圖

### 3.3.2、場址流速流向測定

本場址於 108-109 年度試驗針對本場址進行流速流向測定，探討本場址流速流向之基本資料，所使用之儀器為流速流向儀(Geotech, AquaVision Colloidal Borescope)，搭配 notenbook 進行監測，使用電腦軟體進行分析(AquaLITE 流速流向分析軟體)，測定過程如下：

1. 量測監測井內水位及記錄。
2. 確認監測井資料之篩管位置，並換算電纜線長度。
3. 將流速流向儀之感測器放置於井內之篩管位置處，並將感測器電纜固定。
4. 儀器連接電腦進行連線及相關參數設定。
5. 由電腦確認感測器之指北儀校正完成後，即啟動感測器，持續進行井內周圍之膠體粒子移動軌跡變化，偵測約 30 分鐘待數值穩定，藉此計算分析地下水流速及流向。
6. 操作人員將電腦顯示之流向及流速分析結果讀值進行記錄。

由先前試驗結果得知，測得流速分別為 0.0223、0.0450、0.0400 cm/min，地下水流向分別為東北向西南、北北西向南南東及東北向西南方向流動。由裕山環境工程公司所提供整體流場評估報告中提到，枯水期時，地下水流向大致為東向西流動，豐水期時地下水流向為東北向西南方向流動，由此結果看出整體流場往下游之潮州方向前進。



### 3.3.3、薄膜介面探測作業

本研究使用薄膜介面探測作業系統(Membrane Interface Probe, MIP)(圖 5)，其主要組成爲薄膜介面鑽頭、載流氣體管線、密閉室、加熱系統、半透膜、及末端所連接之分析儀器等。爲於探測地下環境污染物濃度時，能同時評估土壤物理特性，目前亦有將土壤孔隙水導電度量測系統(Electrical Conductivity Measuring System, EC)整合在一起的特殊鑽頭(如圖 5 所示)。MIP 系統之分析原理主要係將嵌入不銹鋼鑽頭表面之半透膜加熱至 100 至 120°C，此時土壤/地下水中的揮發性有機污染物經過半透膜進入密閉室，並由載流氣體將污染物帶至地表的偵知器進行定量分析，提供場址調查取得與深度對比的有機污染物相對濃度。主要特色為在直接貫入過程進行連續性紀錄及分析，故可以藉由適當的佈點規劃，清楚描繪出場址之三維污染濃度分布，有利於後續光纖透水性反應牆之架設位置合適性。

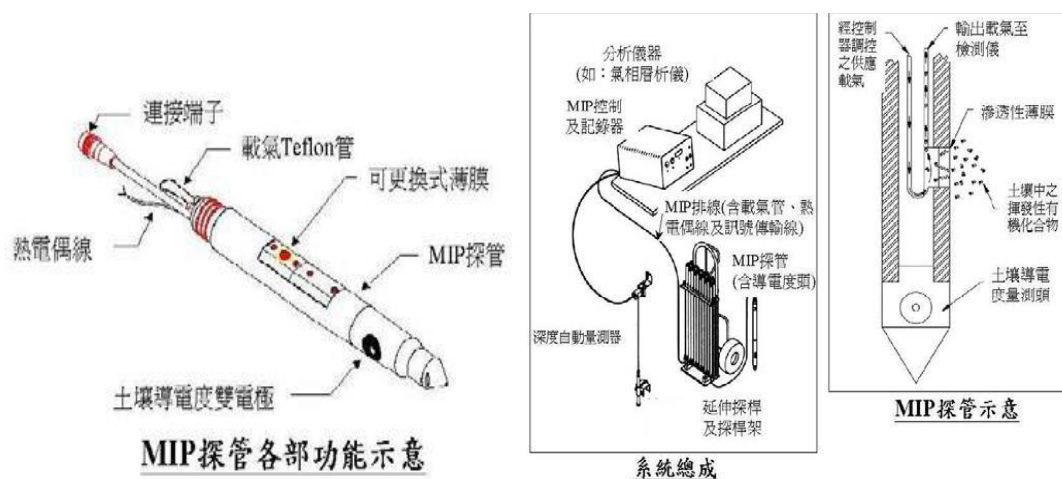


圖 5、MIP 系統組成示意圖(Geoprobe Inc.)

### 3.3.4、環境背景資料調查

#### 3.3.4.1、地理及地形

屏東縣位於臺灣南端，東有大武山山脈，接連臺東縣界，西臨高屏溪與高雄市毗鄰，西南臨臺灣海峽，南臨巴士海峽，北至高樹鄉與高雄市分界。屏東縣全縣面積大約有2,775 平方公里，南北長112 公里，東西寬47 公里。其最東邊為霧台鄉雄峰山頂，以中央山脈與臺東為界，最西邊為琉球嶼西端，最南邊為恆春鎮七星岩南端，最北則為高樹鄉舊寮北端。屏東縣境內地形大致上可分為屏東沖積平原地區、中央山系南端高山地區、恆春半島地區等三區，東為中央山脈南段，為本縣全境之屏障；西部平原則連接高屏溪流域。而新開寮地下水使用限制地區（簡稱本場址）位於屏東沖積平原，係由高屏溪、東港溪、旗山溪、荖濃溪、隘寮溪、林邊溪等網狀河流沖積而成，沖積層主要以礫、砂、及黏土等地層所構成。





### 3.3.4.2、氣候

屏東縣是臺灣緯度最低的縣市，屬於熱帶性氣候。屏東縣氣溫平地區域南北之差異不大，年平均24.4度，惟平地與山區之差異則較顯著，年平均氣溫差異達5.3度，又冬季(1月，7.2 度)與夏季(7月，7.9度)之平均氣溫差。屏東縣內全年雨量大部份集中於5至9月間，每年6月至10月多颱風，夏季雨量以雷雨與颱風雨為主，尤以在8 月雨量最多。而平地及丘陵地於10月至隔年4月雨量甚少。山地5月至9月為真正雨期外，自10月至隔年4月降雨量亦不少。

### 3.3.4.3、地質與土壤

潮州斷層帶由北至南作為山地與平地之分界，斷層以西為屏東平原，以東為中央山脈南部大武地壘，在地形上屬於一種左移逆斷層。屏東縣的地質主要包括：硬頁岩板岩千枚岩夾砂岩，板岩、千枚岩石夾英岩質砂岩，黑色片岩、綠色片岩、砂質片岩等岩性。本計畫場址多為土、砂、礫之地質分佈。

### 3.3.4.4、地表水系

屏東縣地表水資源豐富，其主要河川有高屏溪、東港溪及林邊溪，次要河川有率芒溪，枋山溪、楓港溪、四重溪、保力溪及港口溪等六條。本計畫場址屬於林邊溪水系，林邊溪發源於大武山區，向南流經屏東縣境內，而由林邊出海，河川長度約42.2 公里，也是屏東縣平原地區主要灌溉水源之一。林邊溪豐水期可引用之水量並不多，枯水期逕流量幾乎全潛伏為地下水，估計有40 百萬立方公尺之蘊藏量。

## 3.4、污染整治方法規劃

### 3.4.1、試驗模場場址說明

本年度模場所在之污染管制區域基本資料如表 5 所示，該區域位於屏東縣新埤鄉新開寮社區東南側，屬於屏東沖積平原，主要由礫、砂、及黏土等地層所構成。民國 90 年屏東縣環保局執行「辦理潮州鎮新開寮地區疑遭非法棄置掩埋場污染地下水調查監測計畫」，在新開寮區域內多口監測井檢出 1,1-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯等揮發性含氯有機污染物，並於 108 年 11 月 13 日最新公告新增六筆地號(共 52 筆地號)，列為地下水受污染限制使用地區，公告事項之污染情形主要為 1,1-二氯乙烯濃度(0.0825-0.202 mg/L)超過地下水污染管制標準(0.07 mg/L)。近幾年環保局陸續增加該地區間測井數量，且每年定期監測地下水關切污染物濃度變化，目前發現污染範圍有持續擴大的現象。本團隊已經向屏東縣環保局申請使用該地區做為本次模場試驗之場址，經會同環保局承辦和台糖股份有限公司屏東區處承辦完成現勘，決議使用新埤鄉萬隆段 73 地號





作為模場用地。本團隊於 110 年 01 月 26 日收到環保局同意備查公文，隨即於 110 年 01 月 26 號函文至台糖股份有限公司屏東區處，洽請出具土地使用同意書，獲得台糖租地使用之同意。本模場試驗專案場址為新場址(位於新埤鄉萬隆段 73 地號)，包括既有監測井 T00239 及其周圍既有觀測井及灌注井(共計 8 口)。

表 5、模場試驗場址基本資料

|                       |                                                                                                             |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 模場名稱                  | 新開寮模場                                                                                                       |
| 主管機關                  | 屏東縣政府環境保護局                                                                                                  |
| 場址座標                  | TWD97，X： <u>208585</u> ，Y： <u>2490811</u>                                                                   |
| 場址地址                  | 屏東縣新埤鄉                                                                                                      |
| 場址地號                  | 屏東縣新埤鄉萬隆段 6、12 至 25、27、47、73、98 至 104、109、118、120 至 131、142、185、216 至 223 地號及潮州鎮崙新段 202、228、235 地號、共 52 筆地號 |
| 場址種類                  | 其他                                                                                                          |
| 場址面積(m <sup>2</sup> ) | <u>704,030.78 m<sup>2</sup></u>                                                                             |
| 場址列管狀態                | 地下水受污染限制使用地區                                                                                                |
| 土壤污染物                 | 無                                                                                                           |
| 地下水<br>污染物            | 1,1 二氯乙烯<br>四氯乙烯<br>三氯乙烯<br>1,1,2-三氯乙烷                                                                      |

根據先前的調查資料顯示，本區地層以礫石層為主要組成，鑿井時困難度高。此外，本區位於大潮州人工湖的下游地區，地下水流速較快，約可達每天 20-35 cm，同時過去鑿井鑽探結果發現，即使鑽探深度達到 80 m，仍未觸及不透水層，顯示本區之自由含水層厚度>80 m。豐水期之地下水位高度約為 15-20 m，而枯水期之地下水位高度約下降至地下 35 m 或以下，如欲能夠持續進行受污染地下水之處理，對於地下水處理系統之設置為一極大的挑戰，然而由於本技術不須灌注化學藥劑，因此較傳統之化學藥劑灌注法適合於本區域採用。

本年度計畫將模場設置於監測井 T00239 所在地，使用其周遭之灌注井與觀測井作為試驗對象(如圖 6 所示)，本年度使用之模場(新場址)位於舊場址之下游位置，使用模場新舊試驗場址範圍示意圖如圖 7 所示。新場址租借範圍總面積為 280 m<sup>2</sup>，模場移至舊模場之下游除了配合近年現地調查之污染團往下游移動外，亦藉現有之監測井/灌注井/監測井進一步驗證透水性反應牆之設計概念和處理成效。上述 T00239 監測井附近 8 口井群，各井深度至 80 m，約為第一含水層厚度。由於本計畫區域之枯豐水期地下水位變化大，開篩深度則以既有監測井 T00239 井



篩區間為原則，因此井篩範圍至少 50 m。8 口井包括：4 吋灌注井 3 口以及 2 吋觀測井 5 口，井篩深度約為 32~80 m；井場型式方面為隱藏式之灌注井與觀測井(模場井群基本資料如表 6 所示)。本團隊於 110 年度採用多套光纖光催化處理系統，以光纖光催化系統施作於 WW1~WW3 之系統井(原灌注井)形成一道反應牆，與下游 OW2~OW5(觀測井)，利用系統井與觀測井進行前後效果驗證。

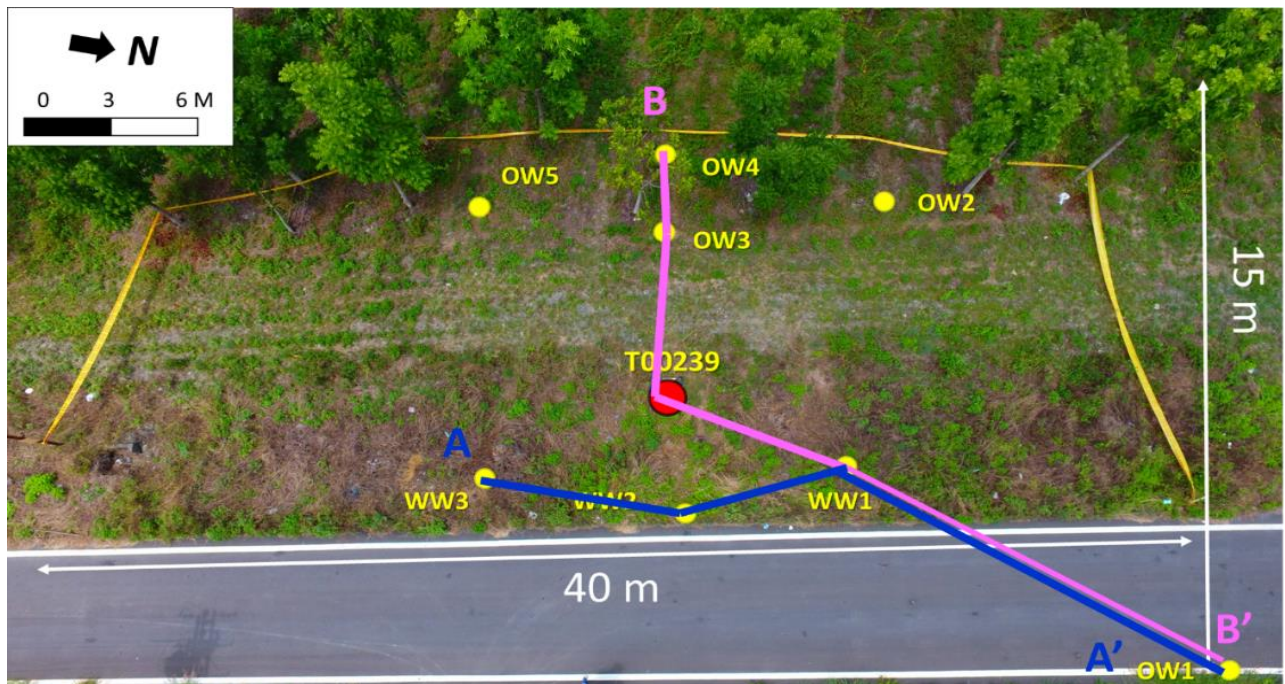


圖 6、本年度模場配置圖-T00239 及周遭灌注/觀測井

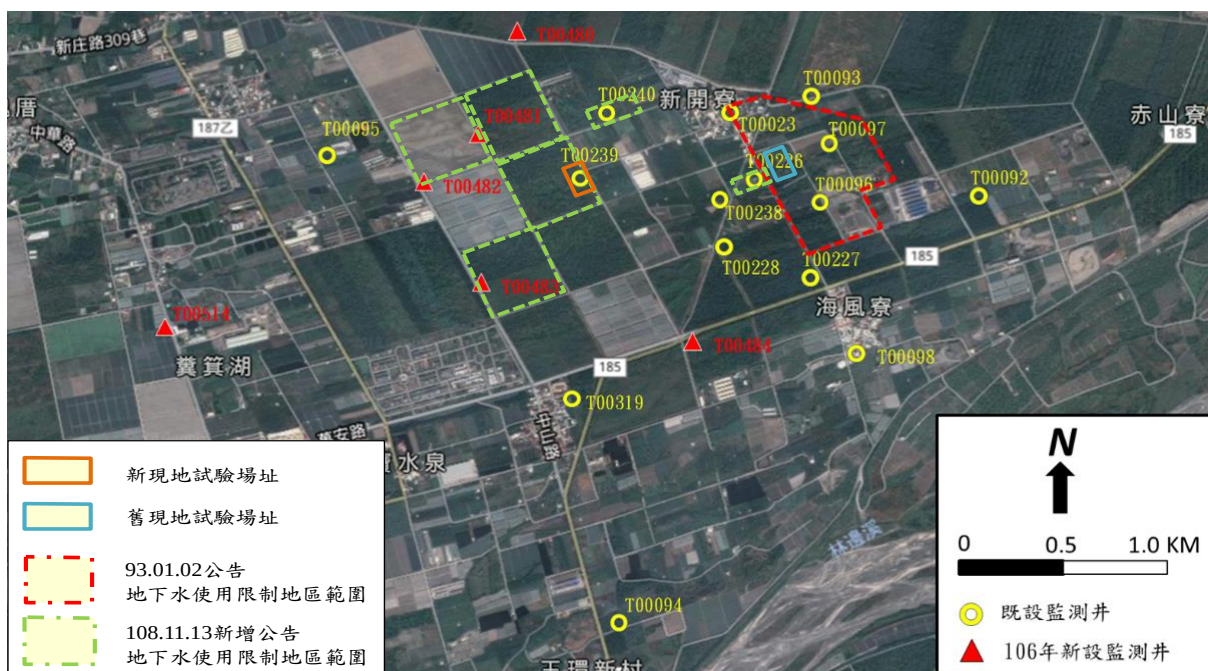


圖 7、新舊試驗場址範圍示意圖





表 6、模場井群基本資料

| 井號  | 井徑<br>(吋) | 井深<br>(m) | 開篩深度<br>(m) | 井頂高程<br>(m) | 設井水位<br>深度(m) | 水力傳導<br>係數<br>(m/s)   | 設井<br>功能 |
|-----|-----------|-----------|-------------|-------------|---------------|-----------------------|----------|
| WW1 | 4         | 80.02     | 32.02~80.02 | 46.901      | 20.48         | $7.48 \times 10^{-6}$ | 灌注井      |
| WW2 | 4         | 80.08     | 32.08~80.08 | 47.212      | 20.55         | $1.36 \times 10^{-5}$ | 灌注井      |
| WW3 | 4         | 80.37     | 32.37~80.37 | 47.15       | 20.51         | $1.08 \times 10^{-5}$ | 灌注井      |
| OW1 | 2         | 80.45     | 32.45~80.45 | 47.071      | 20.47         | $7.37 \times 10^{-6}$ | 背景觀測井    |
| OW2 | 2         | 80.63     | 32.63~80.63 | 46.545      | 20.03         | $6.90 \times 10^{-6}$ | 觀測井      |
| OW3 | 2         | 80.51     | 32.51~80.51 | 46.422      | 19.94         | $6.30 \times 10^{-6}$ | 觀測井      |
| OW4 | 2         | 80.45     | 32.45~80.45 | 46.467      | 19.95         | $7.33 \times 10^{-6}$ | 觀測井      |
| OW5 | 2         | 80.5      | 32.5~80.5   | 46.526      | 20.01         | $8.77 \times 10^{-6}$ | 觀測井      |

### 3.4.2、現地模場整理情形說明

本研究場址為裕山公司於106年執行之計畫所選位址，須優先進行整理方可進行後續系統試驗，整理前後之比較如圖8與9。首先，本團隊進行模場位置除草作業(圖10)，將現場雜草，以及枯木等等異物進行排除，並利用工具將現場土地整平(圖11)，並將需要操作，有利於後續試驗以及操作上方便性。因新場址位置在舊場址之下游，因此現場整理完成後，已經將貨櫃吊掛至新場址放置(圖12)，以備後續試驗系統設備存放，因後續現場須架設光源機或其他貴重儀器，或光纖及其他器材需使用，為防止天氣因素不穩，故放置於貨櫃屋進行操作及保存，再者，因後續試驗系統需要使用電力，因此在現場進行電力設置(圖13)電力供應完善之後，使後續光源機及其他試驗使用儀器機台時，在電源供應上是穩定的，有利於試驗進行。另一方面，因裕山公司在先前計畫中，針對此新場址進行藥劑灌注之生物處理，因此在灌注井(本試驗作為系統井使用)方面，可以發現許多先前藥劑的殘渣，此殘渣可能會有造成系統試驗效率驗證方面的疑慮，以及可能會造成設備污染或者損壞之可能，因此本團隊為確保試驗順利進行，在計畫初期，即投入長時間進行井體清洗，利用加壓抽水馬達與沉水馬達進行持續抽洗，由圖31可以發現，當未清洗之地下水(圖14左)與清洗過後(圖14右)具有明顯之差異，若未清洗之地下水，不只呈現混濁狀，並且帶有些許顆粒物存在，因此本團隊在系統試驗前，持續清洗至小於濁度5 NTU以下，並且透過溶解性有機碳之測定，判別此井體環境不會造成系統試驗效率之影響，再開始進行後續試驗。





圖 8、現地模場整地作業(整理前)



圖 9、現地模場整地作業(整理後)



圖 10、現地除草作業



圖 11、現地整理作業





圖 12、現地模場貨櫃搬移作業



圖 13、現地模場電力設置作業

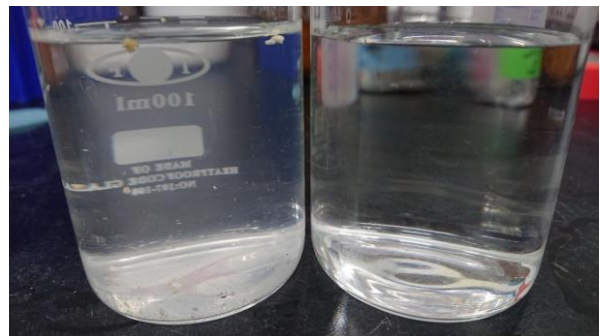
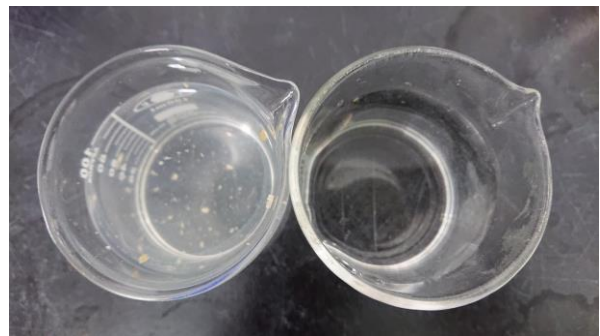


圖 14、現地模場系統/觀測井之洗井作業



### 3.4.3、光纖光催化系統技術說明

本計畫於 110-111 年度以現地污染模場作為試驗對象，利用本團隊開發之新穎光纖光催化技術進行污染處理，根據過去歷年的研究成果，110 年度所提出為兩年期之模場試驗計畫，將延續 108-109 年度在現地模場之試驗成果，持續進一步將本技術進行開發。依據貴署補助之 107 年度模擬現地污染場址整治-噸級土壤箱處理之試驗結果，本計畫所提之模場系統將採用 POF 進行光源引導傳輸，而以光催化效果較佳之 QOF 進行受污染含水層之 TCE 處理。光觸媒覆鍍將採用 105 和 106 年度分別研發之噴霧塗佈法(spray coating)和無機覆膜液進行覆膜光纖之製備，再以 107 年度使用之分層嵌入工法建立現地 PRB 系列處理井。本模場試驗計畫將與裕山公司組成合作團隊，進行現場光催化系統設置、地下水處理、系統模組化研發、光電綠能與系統結合等工作，現場所採樣品，含氯有機污染物將委託台灣檢驗科技股份有限公司分析，其他水質項目由屏科大團隊自行分析。本光纖光催化處理技術之特點在於可以在污染場址現地進行污染控制和處理、開挖面積小、沒有添加化學藥劑、可視需要使用多種光源和以 PRB 之形式應用於現地處理，提供現有之現地和離地處理外的另一個創新處理技術選擇。本處理系統符合綠色處理技術之要求，除能源消耗較低外，與化學藥劑灌注相比，可減少化學藥劑之運送和使用，減少二次污染發生之機率，可做為綠色環保技術推廣，且初步評估之成本較目前所採用之抽取處理法低廉。本技術之模場試驗計畫執行，能更確實了解現地應用之情形，並加以檢討改善，以符合實際應用需求。故本技術之創新研發，對於未來土壤及地下水整治工作，不但重要且有其必要性。

本試驗之光纖光催化技術關鍵重點在於光源以及光纖設計與設置方式，本團隊測試後發現，塑膠光纖經長傳輸後會損耗嚴重(尤其以模場地下水層 30-80 m 較深的條件，與一般場址不同)，導致光強度不足以激發後續光催化用之石英光纖，因此本團隊設計一款水中光源機，可與封篩管進行套接，一同進入污染地下水層，並在封篩管的上方進行照射，將光源近距離導入處理段的光纖當中。因此，本團隊設計 LED 水中光源機(如圖 15 所示)，分別為可見光(400-800 nm)與紫外光(395 nm)，功率皆為 50W，並測量其光強度(如圖 16 所示)，其水中光源機可達到防水效果，並且可將光源放至最接近污染層的地方，並透過光纖傳導，傳輸至處理段(約 1 m)，其設計概念為達到光催化在水中應用的可行性，達到降低光催化在水中因光遮蔽的難題而無法應用的可能。本光纖光催化系統實體圖組裝如圖 17 所示，圖 17 左為整體組裝完成之系統，而圖 17 右為塑膠光纖不同長度(作為分層鋪設使用)，依據本研究之 107 年度成果，進行分層鋪設光纖的方式，塑膠光纖於水中光源機延伸出至處理層，將以不同的長度進行延伸，以達到後端發光源之石英光纖處於不同深度之處理位置，因此較厚之污染層之場址，皆可透過分層鋪設





進行處理。塑膠光纖長度分別為 78、88、98、108、118 cm，直徑為 6 mm，共五段，此塑膠光纖為端點光纖，因此只有端點頭尾透光，將光源傳導至處理段之石英光纖，石英光纖長度皆固定 30 cm(直徑 6 mm)，各段石英光纖與塑膠光纖之連接處，為有利後續施工速度與便利性，本團隊利用光纖接頭進行串接上的改善，使塑膠光纖與石英光纖可有效串接，作為發光段以及覆膜光觸媒之位置約 25 cm，每次噴塗光觸媒覆膜前皆需進行光強度測試，經每次測試結果(石英光纖發光測試，紫外光方面如圖 18 與 19 所示，可見光方面如圖 20 與 21 所示)，石英光纖於發光段(20 cm)可從側邊，在紫外光方面，可發出  $5-10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  之光強度，可見光燈源的部份，可發出 10-15 LUX 之光強度，而實際系統施工圖如圖 22 與 23 所示。而整組系統放置污染水層約 30-40 m 處(會隨著定期 MIP 分析與水位監測進行污染層確認)，陸地上只需串接氣管供應氣體，以及連接水中光源機之電源。

本團隊考慮到污染場址地下水層深厚，並且新場之井開篩位置於 32-80 m，為確認現場污染水層及熱點流動情形，因此，本團隊將定期進行 MIP 分析，利用此儀器找出實際受到污染的水層位置，並針對污染熱點進行有效光催化處理。在上述的前提下，本團隊設計並利用封篩管限縮上下流動的污染水，針對熱點進行處理。首先在封篩管頂部進行設計(圖 24)，封篩管頭部主要有 8 孔(以防水接頭設計)，主要構造為周圍的五大孔，外徑 20 mm，內徑為 6 mm，可供光纖插入，中間部位為支撐架(6 mm)，此支撐架是用以拉繩綁緊後可放下井中進行試驗使用，另一孔為打氣孔，主要為了將封篩管氣囊進行打氣，使氣囊膨脹後可壓住地下水井篩，使水流截斷，另一孔則留為備用孔，封篩管設計實體圖如圖 25 所示，本團隊考慮在先前年度之封篩管所使用材質(PP 材料)與五孔光纖之間連接上會有耗損的問題，以及對地下水之有機物可能會造成破壞，因此今年度之封篩管統一改良成不銹鋼材質。另外，本試驗是以被動式採樣袋進行採樣，將採樣袋懸吊於封篩管下方之處理段位置(光纖分佈區約 1 m)，另一方面，在處理段下方距離 5 m 位置再懸吊另一個被動式採樣袋，此視為未處理段，目的為本研究後續可進行單井內成效評估(如圖 26 所示)，故在放入光纖於上下封篩管中時，同時使用被動式採樣袋進行即時採集，此方式可驗證在處理過後之處理井中污染物濃度變化。此外，本團隊透過另外一種驗證方式，於系統井 WW1~WW3(原灌注井)設置三套光纖光催化系統同時試驗，形成反應牆概念之處理方式，本團隊原規劃透過上游背景觀測井(OW1)與下游觀測井(OW2~OW5)進行上下游成效驗證，但因 OW1 設置於路旁，經評估放置方面有施工安全性疑慮，因此決議透過系統井與觀測井進行成效驗證。此系統前端為光源機，光源以塑膠光纖進行傳導之後，經由封篩管的防水接頭連接，進入上下封篩管中間位置之石英光纖，將光源導入石英光纖中，可將石英光纖設計為分層光催化的概念，使污染熱點之水層可有效受到處理。

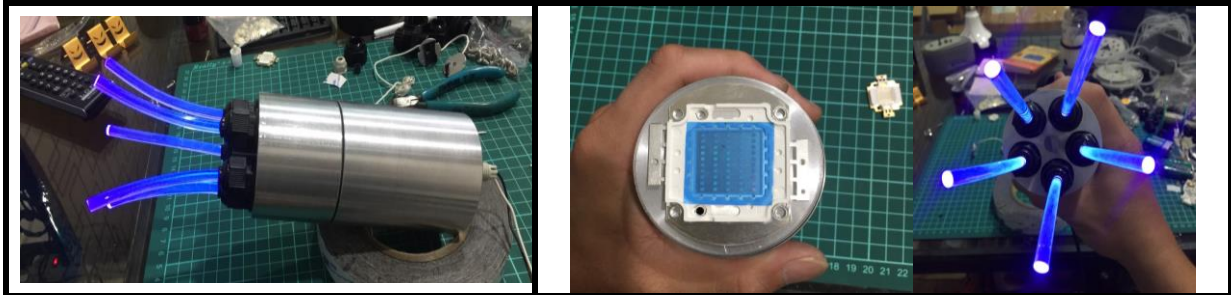


圖 15、水中光源機設計測試



圖 16、石英光纖光強度測試

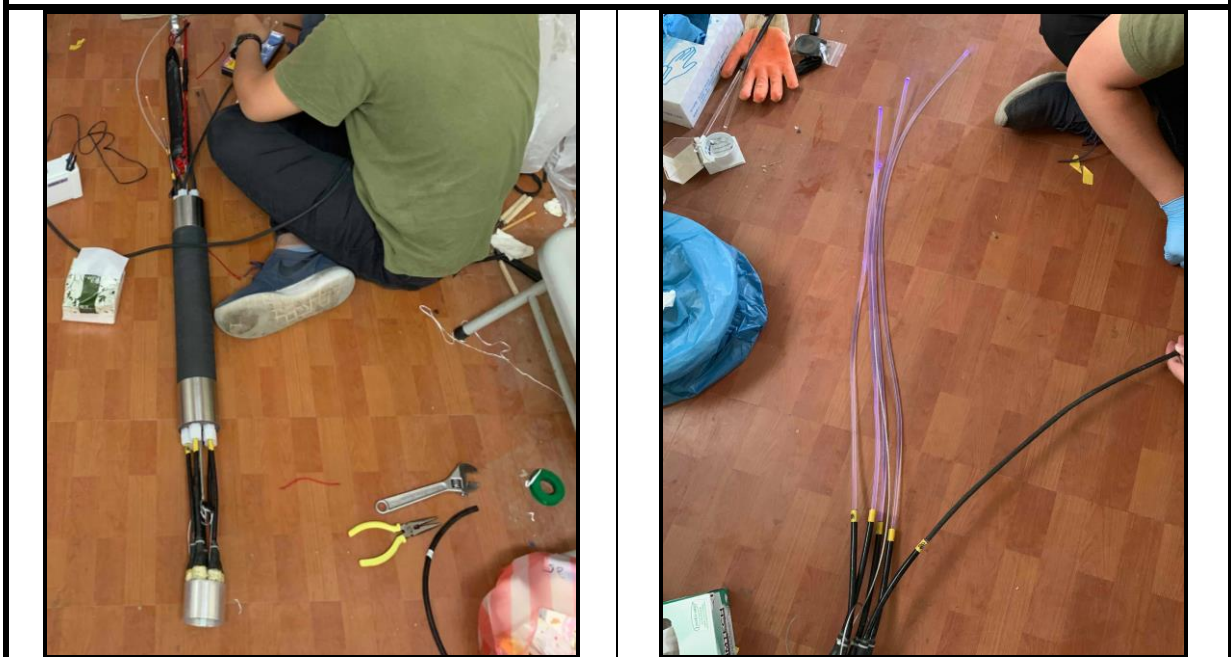


圖 17、光纖光催化系統整體組裝實體圖



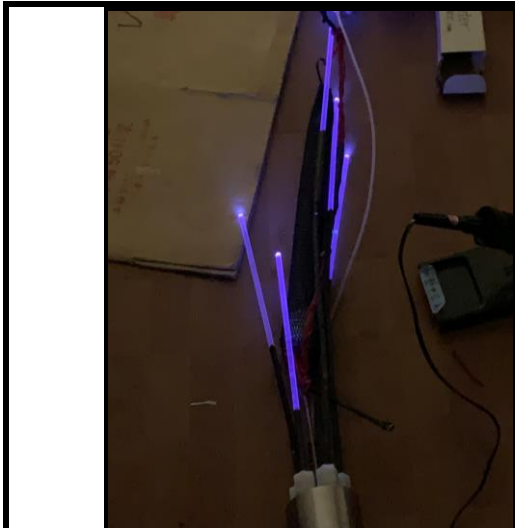


圖 18、光纖光催化處理段實體圖(紫外光)

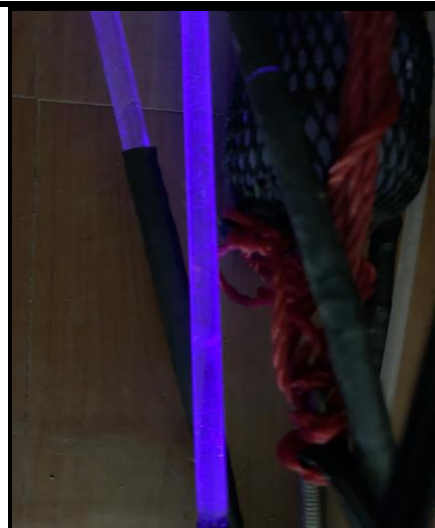


圖 19、覆膜石英光纖發光實體圖(紫外光)

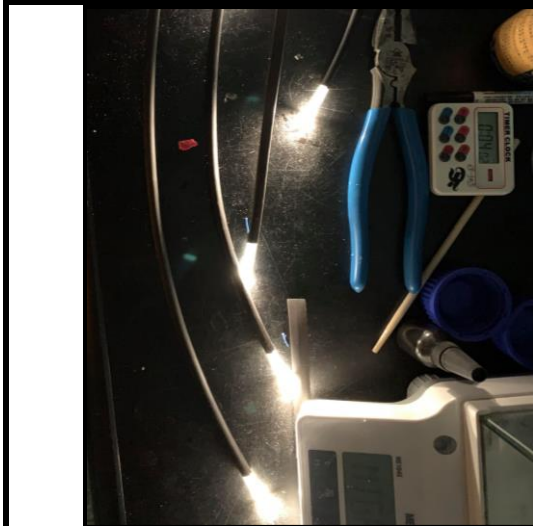


圖 20、光纖光催化處理段實體圖(可見光)

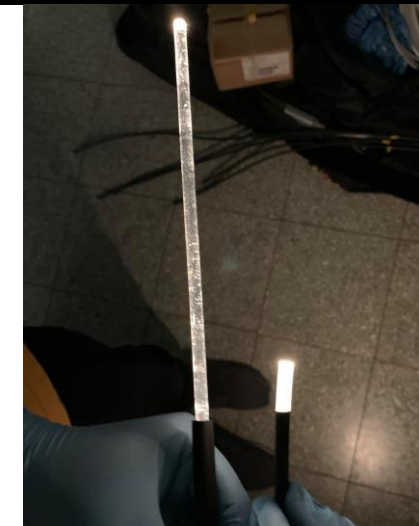


圖 21、覆膜石英光纖發光實體圖(可見光)

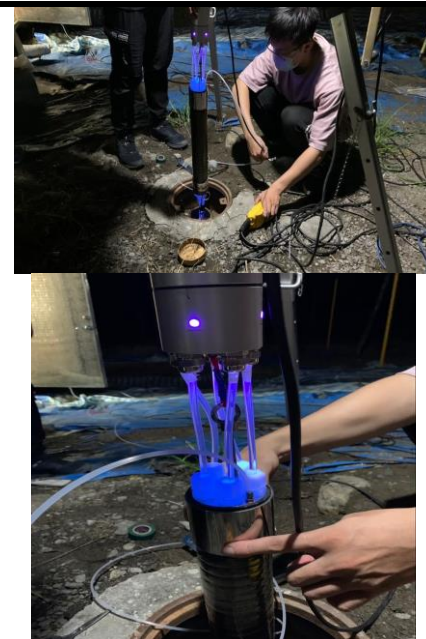


圖 22、光纖光催化系統放置處理井施工圖



圖 23、系統現場施工圖

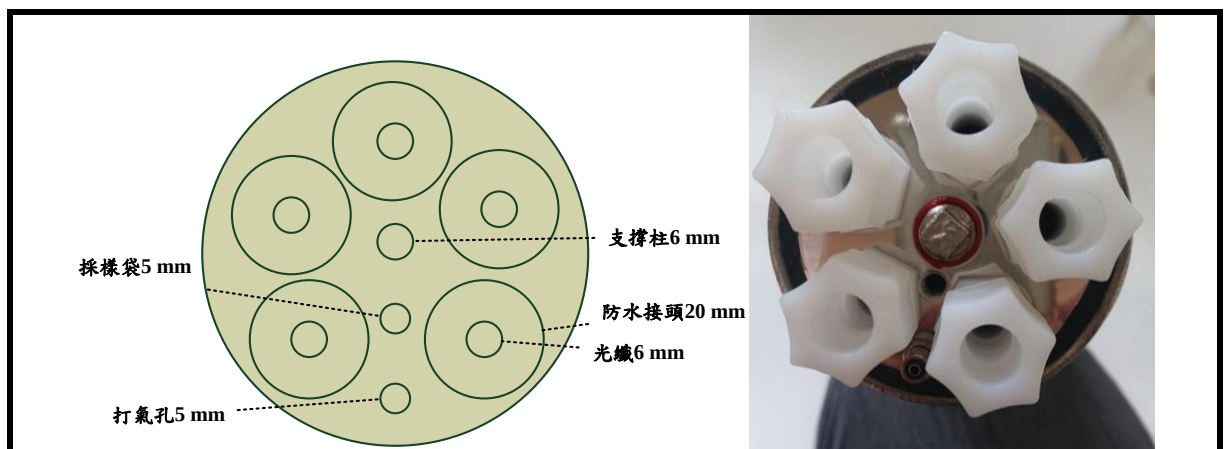


圖 24、封篩管頂部設計示意圖



圖 25、封篩管設計實體圖

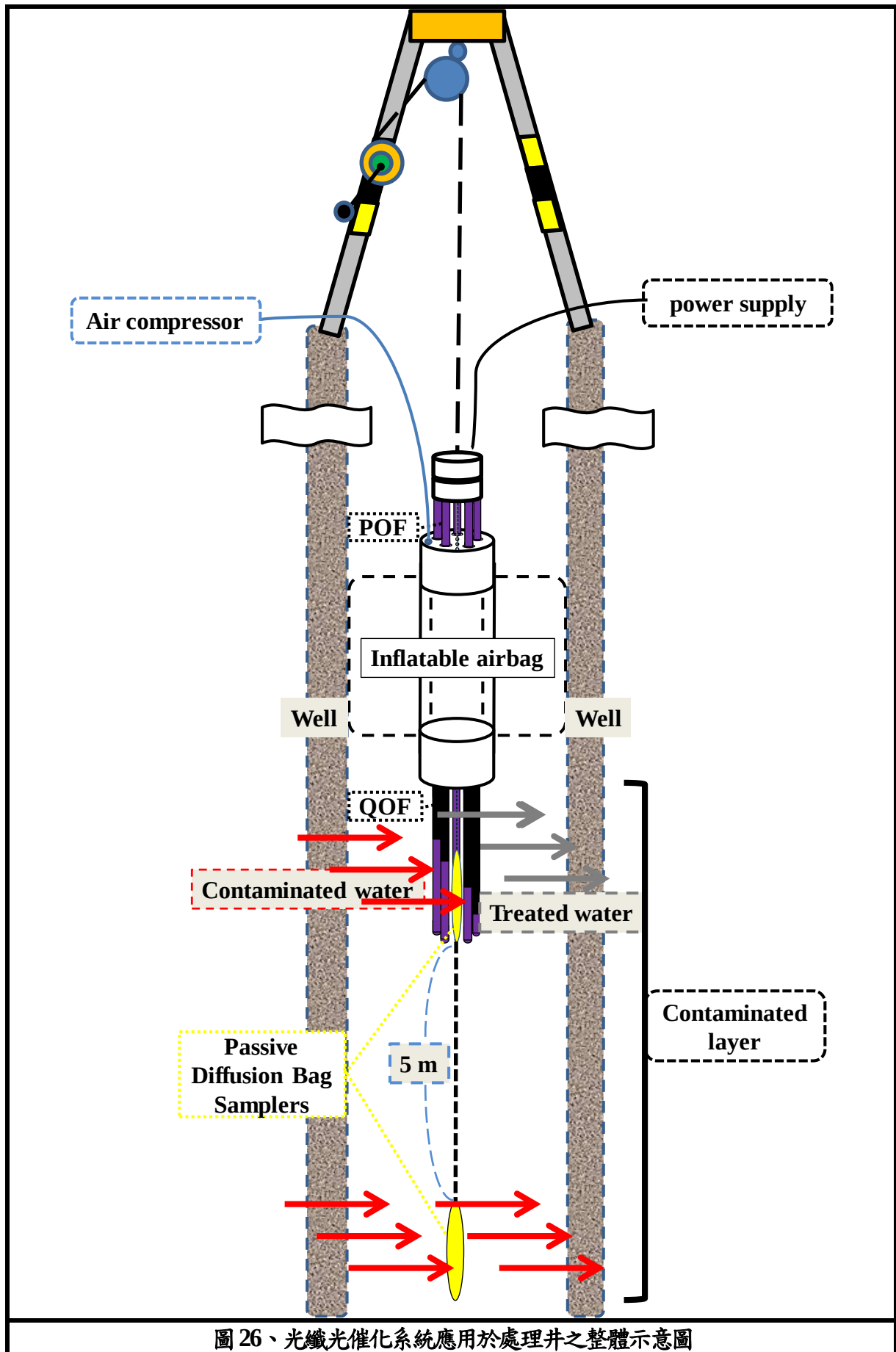


圖 26、光纖光催化系統應用於處理井之整體示意圖





### 3.5 模場試驗規劃說明

由本團隊前期之模場專案(108-109 年度)執行結果顯示，以光纖光催化系統應用於受含氯有機物污染之地下水現地處理具有極高的可行性，因此，本團隊將於新場址(T00239)周邊進行多口試驗井之光纖光催化試驗，首先以上下游的方式，觀察系統效果，本團隊透過新現地之三口系統井(原灌注井)與上下游之觀測井，在系統處理的過程期間，同時在上下游進行採樣，測得濃度將可作為成效之驗證。在第一年度期間開發模組化的光纖光催化設備，便於現地組裝使用，同時，亦將設計適合光纖光催化系統之太陽光聚光設備，測試以太陽光作為光源之處理效能。由於太陽光僅有有限的時間可以提供光催化系統使用，考量沒有太陽光時的光源和電源供應問題，因此，將嘗試進行太陽光電模組設備的設置，以解決光源和電源之需求。新模場由於既有之系統井和觀測井地設置方式，比較符合本處理技術之透水性反應牆的設置概念(如圖 27 所示)，將是本兩年期模場計畫的重點。

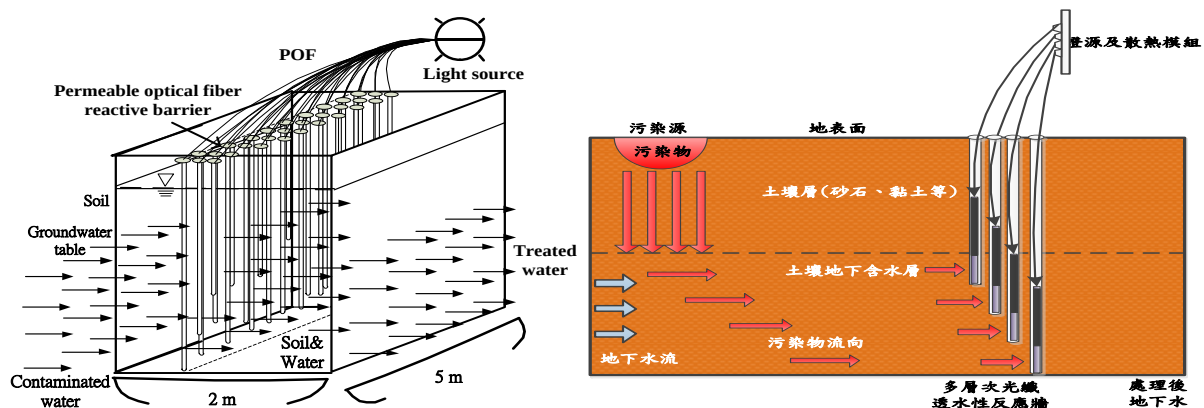


圖 27、光纖透水性反應牆設置示意圖

本系統於現地將以多層式鋪設進行(設計概念可參閱 3.4.3 節之光纖光催化系統技術說明)，新場址之整治區塊之規模為 7 m × 40 m 之面積大小，設置之系統井為 4 吋井三口，觀測井 2 吋井五口。本專案預計將於第一年與第二年皆持續評估多井(新場址)的處理效果和影響，並同時進行單井驗證(處理段與未處理段濃度比較)。在系統光源部分，因考量現地場址深度和光源傳輸因素，本團隊研發一套水中光源機，可將光源機放入水中，於接近污染層上方直接導入光源，而 110-111 年度本團隊將嘗試使用地上光源機進行光源長距離傳輸，評估其應用於光纖光催化系統之處理效率。另一方面，本團隊將於此專案結合太陽能之綠能概念(示意圖如圖 28 所示)，主要可分為兩個部份，第一，設計利用聚光系統將太陽光收集後直接聚集照射於光纖管中，傳導至污染熱點進行光催化處理；第二，利用太陽能板進行蓄電，以備於在沒有太陽光照射時，可以啟動電源，直接導入節能型可見光 LED 光源進行照射，以達到長時間持續現地處理之需求，使本光纖光催化技術結合綠能，達到永續應用之未來發展，目前此兩項技術皆處於規劃階段，本團隊將持續評估可行性。本團隊為提高本技術未來應用性，預計於本專案期間建置





模組化系統，提升組裝及零組件更換之方便性，有利於本技術未來應用於實場之效率與可行性(光纖光催化反應牆系統應用於現地處理示意如圖 29 所示)。

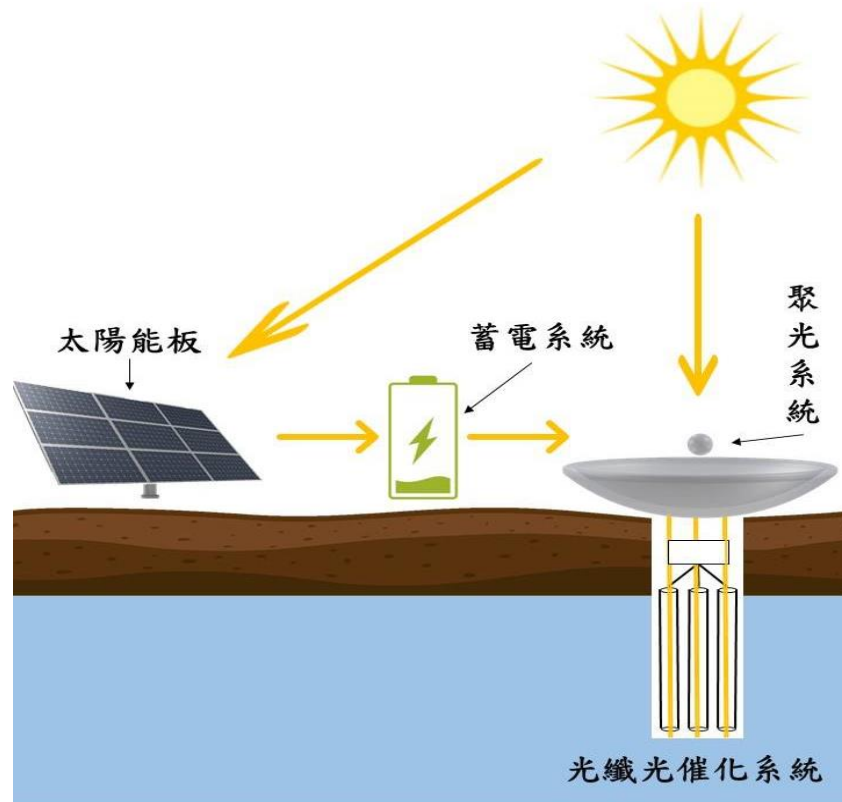


圖 28、光纖光催化系統結合綠能(太陽光源/光電)概念示意圖

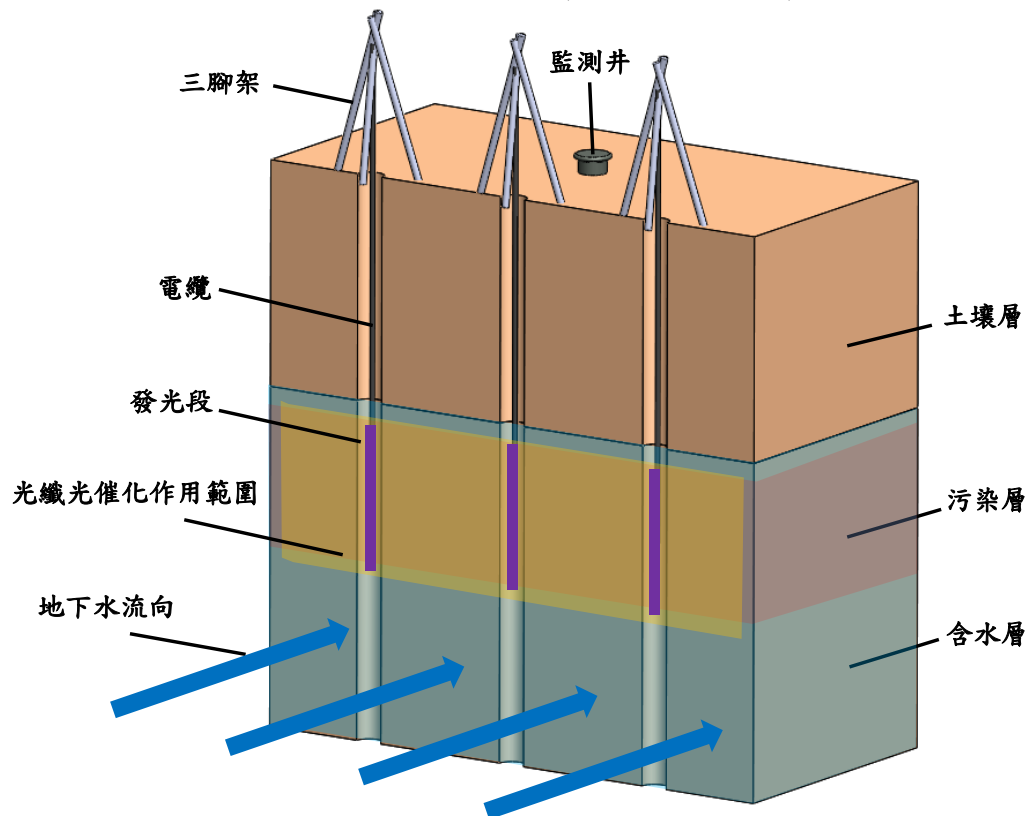


圖 29、光纖光催化反應牆系統應用於現地處理示意圖



本系統整體設置規劃說明如表 7 所示，在現地試驗處理井方面，處理井深度為 80 m，新場址之系統/觀測井開篩位置約為 30-80 m，本研究將以光纖光催化系統搭配封篩管進行試驗，使用封篩管之主要目的為控制光纖光催化系統針對污染熱點進行處理，在試驗前將採用薄膜介面探測法(MIP)，使用 MIP 確認污染物熱點所在深度，再利用封篩管進行充氣，將光纖系統固定於污染水層進行處理，使地下水層之受含氯有機物污染地下水與覆膜光纖進行光催化反應，而定期 MIP 分析與持續的空白背景試驗採樣主要是為了避免此場址之豐枯水期水位變化劇烈所造成的污染熱點移動，並確保試驗處理於污染熱點水層。試驗條件為採用不同光觸媒與光源進行光催化處理，處理深度與被動式採樣袋則以 MIP 試驗結果放置，以進行採樣分析。本研究將使用 POF 與 QOF 光纖，QOF 光纖之材質為二氧化矽(99.99%)，未透光部位外層將包覆反光膜，使光源全反射於光纖內，以達到發光之光觸媒反應部位。兩種光纖皆為直徑 6 mm，POF 主要目的為傳導光源，QOF 主要作為反應段之覆膜光纖使用，試驗為達分層處理，在傳導光源之 POF 以不同長度進行分佈，而反應段之 QOF 則固定長度為 30 cm。光纖於試驗前將以 deionized distilled water (DDI)清洗數次。

表 7、模場試驗設置參數說明

| No. | 工作項目   | 模場試驗設置參數                                                                        |
|-----|--------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 反應牆規模  | 以新場址之處理/監測井，進行多口井之系統試驗                                                          |
| 2   | 反應井數量  | (2)新場址：多井試驗觀察光纖光催化系統處理效率<br>(1)以 4 英吋之標準井作為光纖反應井                                |
| 3   | 反應井規格  | (2)開篩深度 60 m(舊場址)、80 m(新場址)<br>(3)開篩位置 30-60 m(舊場址)、32-80 m(新場址)                |
| 4   | 光纖種類   | (1)POF 做為端點導光介質<br>(2)QOF 作為反應棒，外層包覆光觸媒<br>(1)POF & QOF 直徑：6 mm                 |
| 5   | 光纖規格   | (2)POF 長度：78~118 cm<br>(3)QOF 長度：30 cm，                                         |
| 6   | 光纖設置   | 以封篩管進行固定，五孔                                                                     |
| 8   | 光源種類   | 紫外光、可見光                                                                         |
| 9   | 觸媒種類   | N-TiO <sub>2</sub> 或 N-TiO <sub>2</sub> -ZnO/CNT                                |
| 10  | 光纖支數   | 視處理效果採 1~5                                                                      |
| 11  | 綠能設備   | 太陽能蓄電搭配太陽能聚光系統                                                                  |
| 12  | 水質分析項目 | pH, DO, 水溫, 濁度, 導電度, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N |
| 13  | 定期監測項目 | 地下水水位、流速流向、MIP 檢測                                                               |
| 14  | 後續監測分析 | 1,1-二氯乙烯、四氯乙烯、三氯乙烯、1,1,2 三氯乙烷、<br>溶解性有機碳、氯離子                                    |



### 3.6、覆膜光纖製備與成份特性分析

本研究使用 POF 與 QOF 光纖。QOF 光纖中芯之材質為二氧化矽(99.99%，購自西德科技)，未透光部位外層將包覆反光膜，使光源全反射於光纖內部，以達到發光之光觸媒反應部位。兩種光纖皆為直徑 6 mm，POF 主要目的為傳導光源，QOF 主要作為反應段之覆膜光纖使用，試驗為達分層處理，在傳導光源之 POF 以不同長度進行分佈，分別為 78、88、98、108、118，共五段，而反應段之 QOF 則固定長度為 30 cm，其中的 5 cm 作為與 POF 之連接處使用，其餘 25 cm 則作為覆膜光觸媒與反應段使用。光纖於試驗前以 Deionized distilled water (DDI)清洗數次。實驗所使用之覆膜光纖製備方法採用市售之小型噴槍進行，先以乙醇作為稀釋劑，搭配  $\text{SiO}_2$  無機樹脂覆膜液，配製溶質溶劑比 0.5 wt% 之  $\text{TiO}_2$  光觸媒懸浮溶液並以超音波震盪和攪拌，再以 HCl 調整至 pH 4.5，置入噴槍之容器中，將光纖懸提空中，以噴槍將  $\text{TiO}_2$  溶液均勻噴塗於光催化反應部位。在覆膜液方面，研究依據 106 年度成果，以最佳覆膜條件(無機樹脂 25:75、分層覆鍍、20 mL PTFE/L、0.5 wt%  $\text{TiO}_2$  或 N- $\text{TiO}_2$ )進行噴霧塗佈(分層覆鍍法示意圖如圖 30B 所示)，後將光纖置於 50°C 下烘乾 12 小時靜置冷卻備用。在光觸媒特性分析方面，研究氮改質  $\text{TiO}_2$  與 Degussa P25  $\text{TiO}_2$  利用場發式電子顯微鏡與元素分析儀(field-emission scanning electron microscopy, FE-SEM/EDS)以及擴散反射光譜儀(spectrophotometer with diffuse reflectance spectra, DRS)等設備觀察覆膜光纖之表面變化和計算光觸媒能隙(energy gap)，並利用 X 光繞射儀(X-ray diffractometer, XRD)進行觸媒晶相結構之觀察，以上觸媒試驗結果皆呈現於 107 年度模場試驗計畫報告中。各組試驗進行前，會先使用 UVA meters(CHY 732, 可量測波長 320 nm ~ 400 nm)與 Illumination meter(DX-200)監控石英光纖側光之光強度，以確保光纖之品質穩定性。

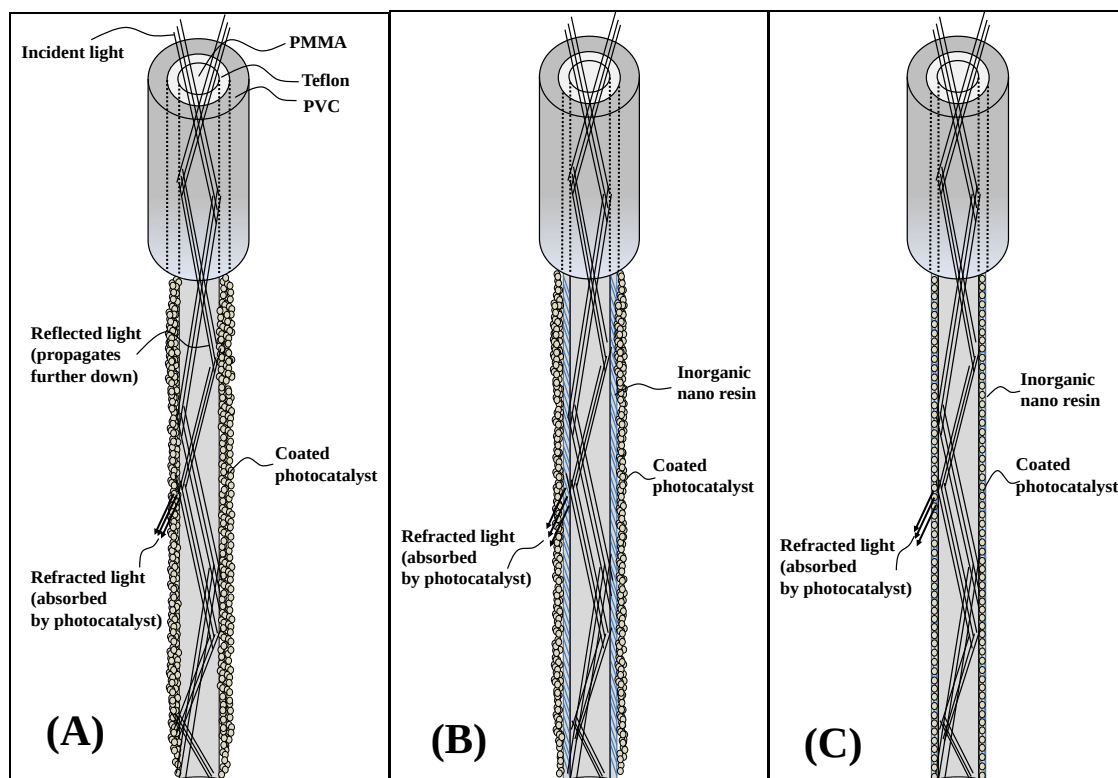
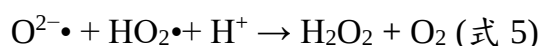
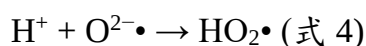
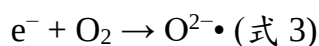
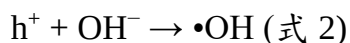


圖 30、以不同覆鍍法之光纖結構圖(a)浸鍍法與噴霧塗佈法、(b)以無機奈米樹脂覆膜液先包覆於光纖外層，再以噴霧塗佈法覆鍍  $\text{TiO}_2$  觸媒、(c)以無機奈米樹脂覆膜液與  $\text{TiO}_2$  觸媒混合後，以浸鍍法方式進行覆鍍

### 3.7 反應途徑及中間產物

本實驗光催化反應去除 TCE 之反應途徑推估如下列所示(式 1~8)，當觸媒接受可激發之光源，受到激發後，在觸媒表面會產生電子電洞對(式 1)，而電洞會與水中或觸媒表面之  $\text{OH}^-$  反應產生氫氧自由基(式 2)，另外電子會與水中氧氣產生超氧自由基(式 3)，然而水中  $\text{H}^+$  再與超氧自由基反應生成  $\text{HO}_2\cdot$ (式 4)，而式 5 與式 6 則是持續在觸媒發生反應，然而，反應中  $\cdot\text{OH}$  與電洞( $\text{h}^+$ )具有強氧化能力，將 TCE 氧化後形成副產物(式 7、式 8)。







由於光催化 TCE 所產生的副產物主要為 DCAC，因此，Nishikiori 等學者(2010)特別對於光觸媒  $\text{TiO}_2$  與 DCAC 之反應進行研究，結果發現，當觸媒表面為疏水性質(hydrophobic)時，DCAC 會被轉變成為 dichloroacetic acid (DCAA)，UV 光可以將 DCAA 再繼續降解為光氣、 $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}$ 。當觸媒表面為親水性質(hydrophilic)時，DCAC 則主要被轉變成為二氯醋酸根陰離子(dichloroacetate anion)，之後則會再被降解為氯仿(chloroform)。將主要二氧化鈦光催化三氯乙烯之反應途徑整理如圖 31 表示。由上述得知，在最終產物方面，會生成氯離子( $\text{Cl}^-$ )，因此測量  $\text{Cl}^-$  濃度變化作為一個參考依據，以評估後續系統處理成效。

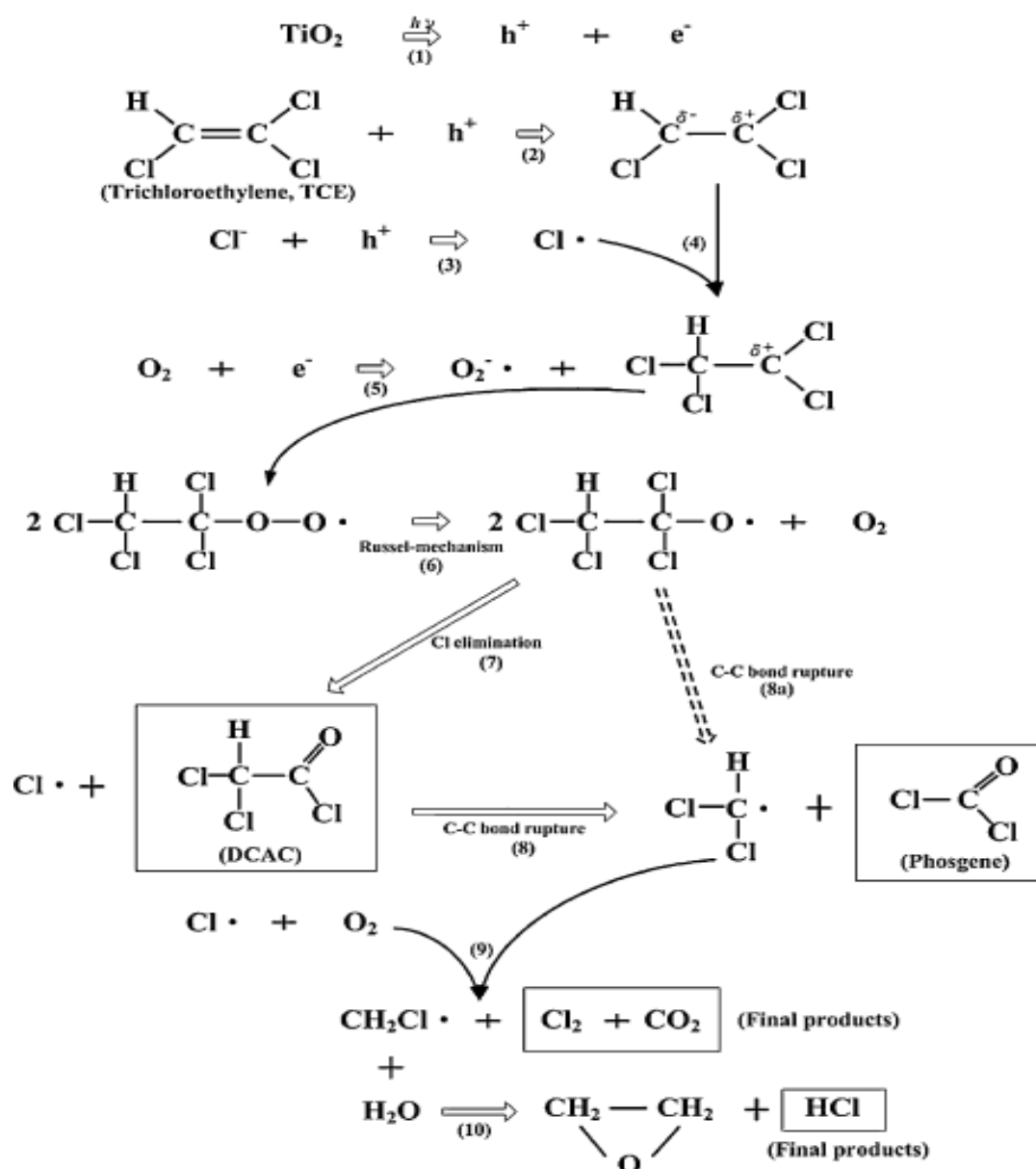


圖 31、TCE 降解反應途徑(Nishikiori et al., 2010)



### 3.8、工作進度甘特圖

本研究於 110 年度使用新場址，因先前裕山顧問公司在此場址之灌注井進行灌注藥劑的相關試驗，故本團隊在開始系統試驗前，必先確保整體井體環境之完善，包括井篩通暢與井中水質進行量測。試驗前置作業除了現地整理相關工程與系統設備準備之外，本團隊持續在現場進行清洗系統井(原灌注井)與觀測井，在經過幾次清洗後，發現需要較長時間的洗井作業，方可使內部水質達到可以進行試驗的標準。另外，本團隊今年將封篩管進行重新設計與改良，並且已經完成 MIP 分析兩組，找出目前污染層位置，有利於後續背景採樣與系統試驗操作。本團隊於現地定期監測水位，於計畫初期 3-5 月份，因正值為枯水期，因此現場水位大約 40 m，而後續隨即進入梅雨季節，水位發生劇烈變化(升至 20 m)，而污染團的位置變化是污染驗證之一大挑戰，由 108-109 年度污染層位置變化結果得知，當水位劇烈變化初期，污染層位置將分散範圍較廣，但後續水位較長時間穩定後(約 1-3 個月)，污染層位置約分佈於淺水位(15-20 m)，因此，本團隊持續搭配定期 MIP 檢測進行滾動式檢討(工作進度甘特圖如圖 32 所示)。

本模場試驗計畫第一年度(110 年)完成事項敘述如下：

1. 完成現場整理作業，包括整地作業、除草作業、井體外觀維護，以及後續現場帆布鋪設，現場貨櫃設置與相關電力配置，利於後續施工作業。
2. 完成模組化系統設計，並已完成製作，如下列所示：
  - (1)導光用之集束塑膠光纖
  - (2)光纖光催化所使用之石英光纖
  - (3)完成現地處理所需之光觸媒製備(N-TiO<sub>2</sub> 或 N-TiO<sub>2</sub>-ZnO/CNT)。
  - (4)完成封篩管設計與改良。
  - (5)完成可見光與紫外光之光源系統設計並完成製作。
3. 完成系統井(WW1~WW3)之內部清洗作業及基本水質監測。
4. 完成現地模場定期 MIP 分析(兩組)及水位調查。
5. 完成新場址各監測井之污染物濃度監測，監測結果將統整後評估後作為後續光纖光催化系統處理位置之依據。
6. 完成系統處理試驗，完成處理結果分析，並於新場址初步探討光纖光催化反應牆系統(多井設置)之處理效率。
7. 完成 111 年度預計使用之太陽能設備初步試驗，並討論太陽能是否達到所須之相關供電參數。

關於未來(111 年度)工作規劃方面，本團隊將持續蒐集系統試驗之成果進行驗證，並進一步使用綠能設備與光纖光催化系統進行結合，以提供未來特殊現場施作與節能使用，進而提升系統未來發展之可行性。

| 工作項目                      | 年月 | 110                                                                                                                                       |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 111 |     | 備註 |
|---------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|
|                           |    | 3                                                                                                                                         | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 1   | 2   |    |
| 場址調查工作                    |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 場址先導試驗                    |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 器材與光源機設備購買與安裝<br>(光源機&綠能) |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 污染物濃度監測                   |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 整治系統設置及試車(系統模組化)          |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 現地之光纖光催化反應牆系統之處理          |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 處理結果分析                    |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 污染改善驗證                    |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| ※期中報告撰寫                   |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| ※期末報告撰寫                   |    |                                                                                                                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |
| 工作進度估計百分比(%累積數)           |    | 10                                                                                                                                        | 20 | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 95  | 100 |    |
| 預定查核點                     |    | 110 年度<br>1. 完成新場址污染場址調查工作。<br>2. 完成新場址先導試驗。<br>3. 完成場址各項所需系統設備購買及安裝設置等(光源機&綠能)。<br>4. 新場址進行系統初步處理試驗，完成處理結果分析，並進行初步探討光纖光催化反應牆系統(多井)之處理效率。 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |    |

圖 32、工作進度甘特圖



## 第四章 結果與討論

本模場位於新開寮，因其特殊地質水文因素，地下水深度遠高於一般，因此，於歷年資料顯示，此現地模場之地下水位變化相當劇烈，流速較快，而本團隊於108年度開始持續針對其新開寮場址進行水位監測，可以發現在每年6-9月連續降雨期間，水位會由約40 m上升至最高15.80 m(約為每年9月份)，並由9月至10月期間，下雨頻率降低，使水位上升至25.85 m，並於每年5月開始，水位降至最低約為40 m左右，該時期為枯水期。而本年度(110年度)研究由4月份開始進行試驗階段，試驗初期為枯水期，而5月底開始，已進入梅雨季節(豐水期)，近期降雨豐沛，因此預估水位上升會相當劇烈，最高根據紀錄可達到15-20 m之水位，代表此地下水層在豐枯水期變化相當劇烈，因此，本團隊在此場址進行試驗，污染層之掌握須密切關注。由本研究水位調查與定期流速流向調查發現，此場址特性較為特殊，地下水水量變化劇烈及流速較快之因素也使調查難度增加，若能有效將污染層掌握與克服驗證上的困難，將有利於未來各模場試驗，因此，本模場相當適合作為探討現地處理技術開發的場地，故本團隊於110年度持續執行下列調查與試驗，對光纖光催化系統未來應用於這類困難型的模場進行探討。

### 4.1、現地模場之水文地質調查

本計畫工作區域為新開寮地區，依據過去相關研究之調查與評估成果，本計畫劃設數值模式區之矩形範圍如圖33所示。新開寮公告地下水受污染限制使用地區，本計畫於圖中簡稱「地下水限制區」。模式區東西長7.2公里，南北長5.6公里，包括：大潮州人工湖、林邊溪及東港溪流域。

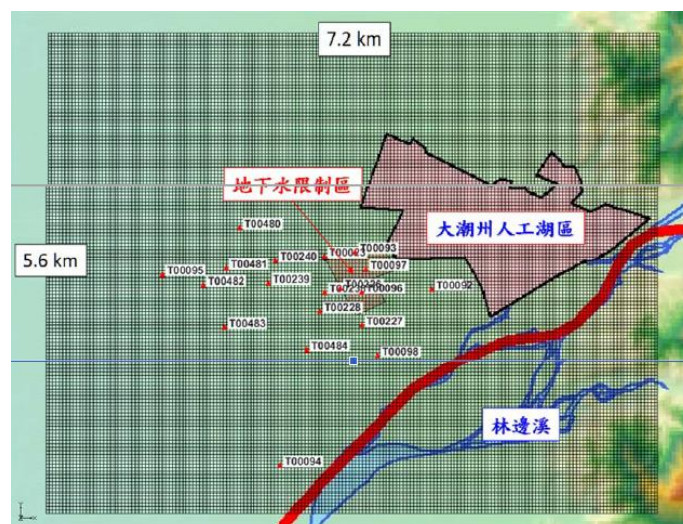


圖33、數值模式模擬範圍分布圖(裕山環境工程，2018)

依據研究區範圍與水文地質分層，配合本計畫地下水污染檢測結果及相關水文條件資訊，可概略繪出水文地質概念如圖34所示。源(source)包括：地面補注、





河川補注與湖泊補注，匯(sink)主要為地下水之抽水。1,1-二氯乙烯(1,1-DCE)污染目前在深度80公尺內皆有發現，主要在於此地區無顯著阻水層，污染容易透過地下水往深處擴散。

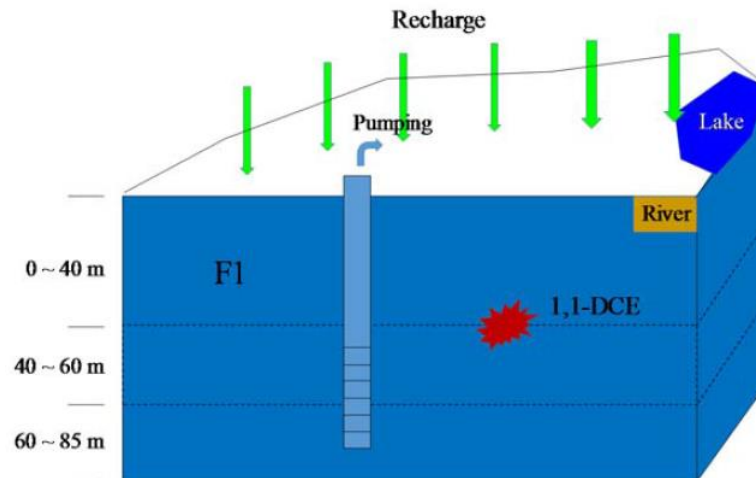


圖34、本計畫範圍之水文地質概念模型圖(裕山環境工程，2018)

本團隊與長期調查新開寮模場之裕山顧問公司合作，經彙整調查下，歷年於新開寮地區之調查計畫中(91、92 及99年)，總共設置10 口地下水質監測井，根據其中7口設井地質資料(如圖35)繪製地質剖面分布圖(如圖36)、地質柵狀圖(如圖37)及3D 概念圖(如圖38)，由圖中可得知地表下50公尺地質主要以礫石層為主，場址東南方之礫石層粒徑較大逐漸往西北方向延伸變小，較明顯之黏土層主要出現於場址之西北側(深度約地表下20公尺左右)。依據T00095地質鑽孔之資料，黏土層厚度約10公尺，黏土層厚度往東南方向大幅遞減，於T00098鑽孔之黏土層厚度約30 cm，於T00093設井之黏土層厚度僅約10 cm，黏土層厚度變化極大，依據本團隊所蒐集之林邊溪北岸地質資料研判，本計畫場址區域極可能為林邊溪沖積扇第一及第二含水層之區分點。

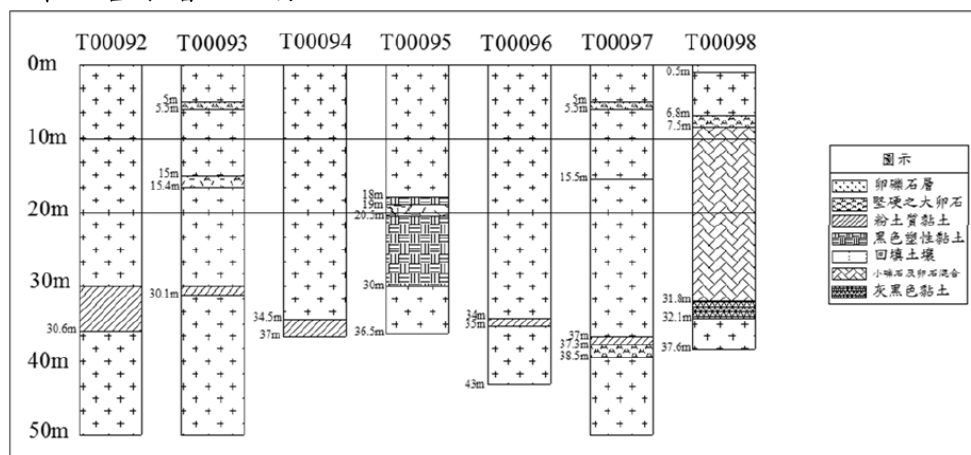


圖35、歷年設置地下水監測井地質調查資料(屏東縣環保局，2018)



註:黃色框線代表計畫場址區域範圍，紅色線代表地質剖面線。

圖36、公告污染場址區域地質剖面線(屏東縣環保局，2018)

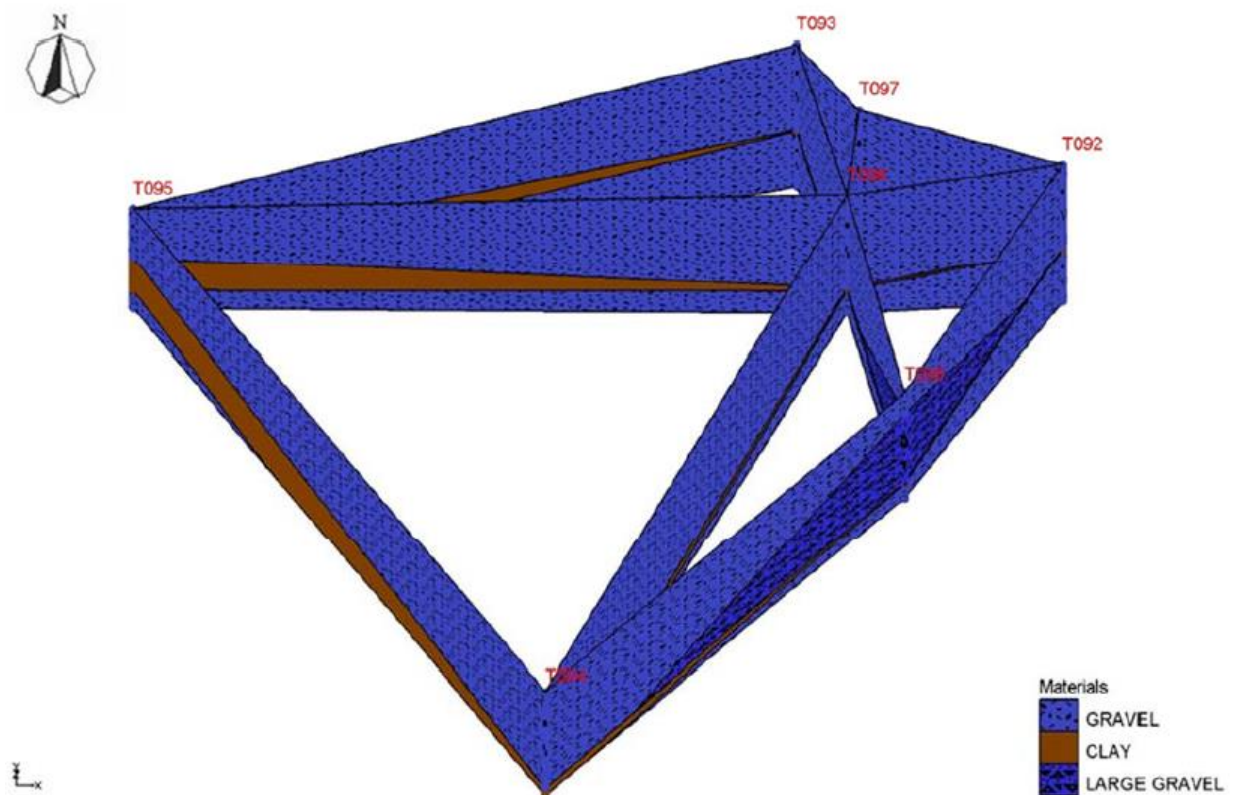


圖37、公告污染場址區域地質剖面圖(屏東縣環保局，2018)

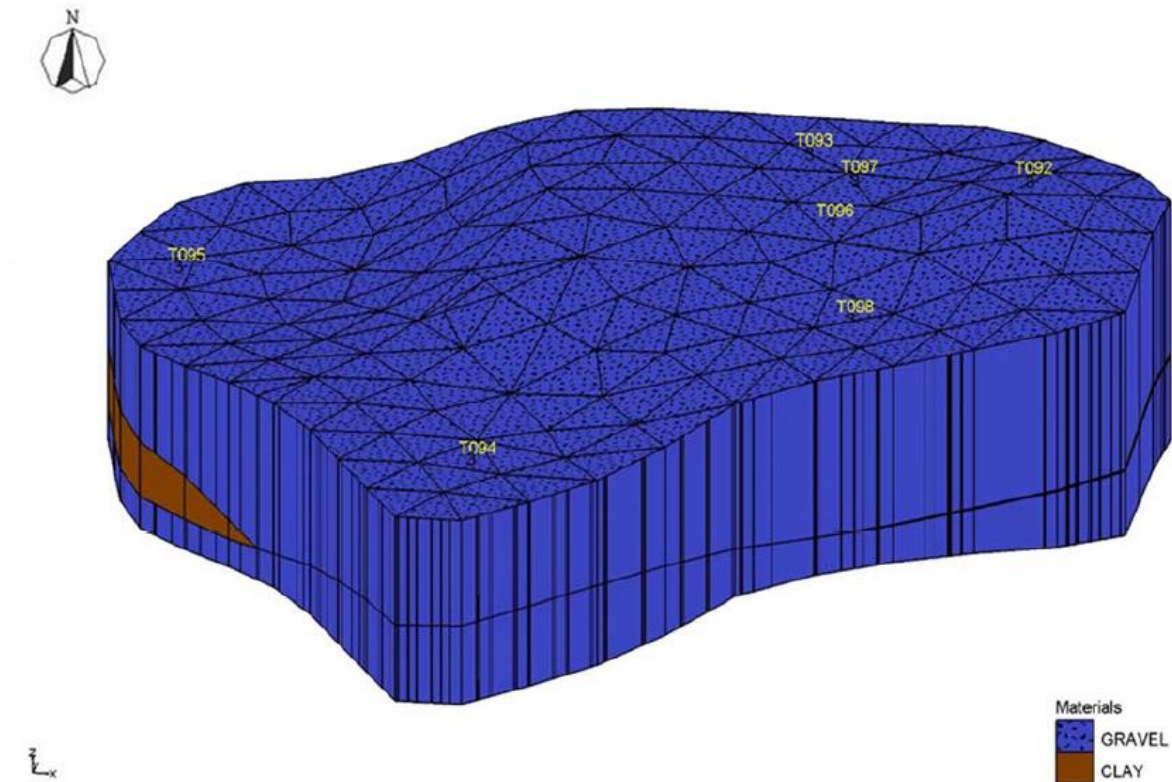
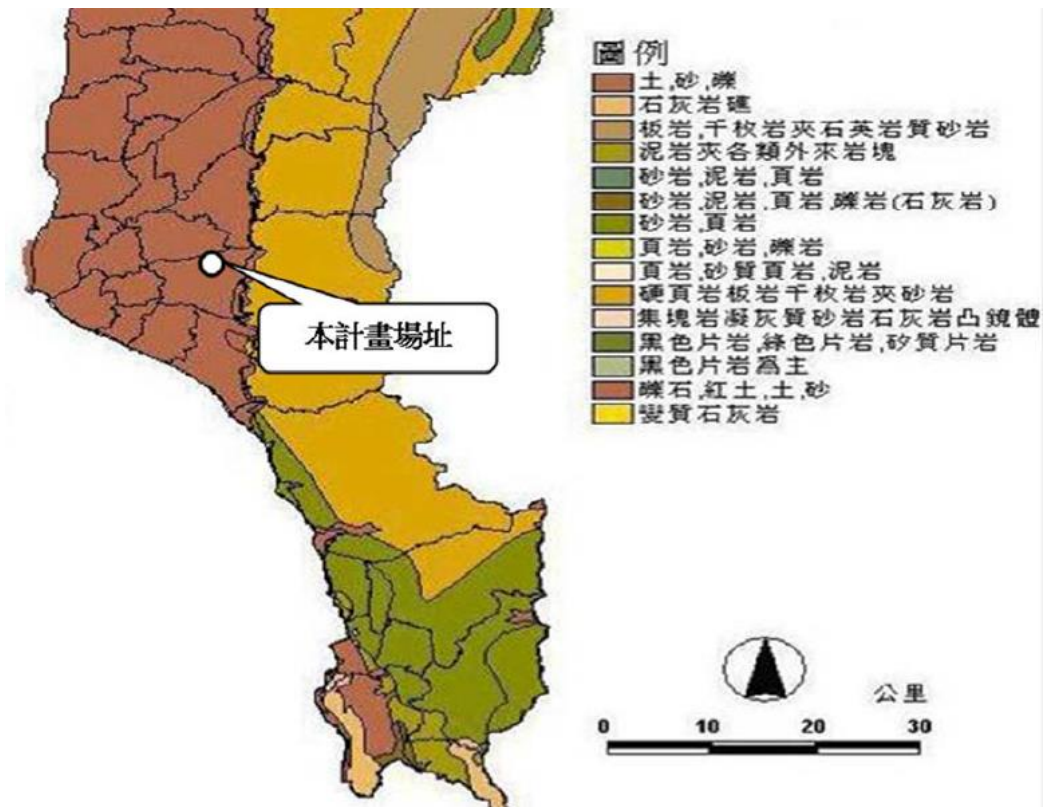


圖38、公告污染場址區域範圍3D地質概念圖(屏東縣環保局，2018)

屏東縣的地質主要包括：硬頁岩板岩千枚岩夾砂岩，板岩、千枚岩石夾英岩質砂岩，黑色片岩、綠色片岩、砂質片岩等岩性(如圖39所示)。本計畫場址區域位於林邊溪右岸並鄰近南岸農場，所蒐集本計畫區域內台糖各農場之水文地質資料可知(圖40)，林邊溪北岸地質由東向西主要由礫石層偶夾黏土層組成，至南岸農場之後(約於新開寮區域)開始於地表下10餘公尺處出現較明顯之灰色黏土層並往西逐漸遞增，開始區分為第一及第二含水層，此地質現象與場址區域地質調查結果相同；而構內農場之灰色粉土質黏土之厚度約60公尺左右，往西逐漸遞減，於三西和農場及東港間逐漸變為砂層與黃泥夾黃色黏土互層。本計畫區域約於地表下30至37公尺左右有一厚度約1公尺且不連續性之黏土層。而新開寮地區第一阻水層深度達地表下約80公尺，主要為卵礫石層所組成，粒徑較大，淘選良好，透水係數為佳至中級(約 $1 \times 10^{-5}$ 至 $10^{-4}$  公尺/秒)。

關於地下水流場方面，本計畫範圍之枯水期地下水位平均約位於地表下30至50公尺左右，豐水期地下水位約位於地表下20至40公尺左右，豐、枯水期水位變動約10至20公尺。枯水期地下水流向大致為東向西流動，而豐水期地下水流向大致為東北向西南方向流動。





註:本圖由右至左代表萬隆、南岸、建興、構內、三西和農場至東港。

圖39、屏東縣地質分布圖(經濟部中央地質調查所)

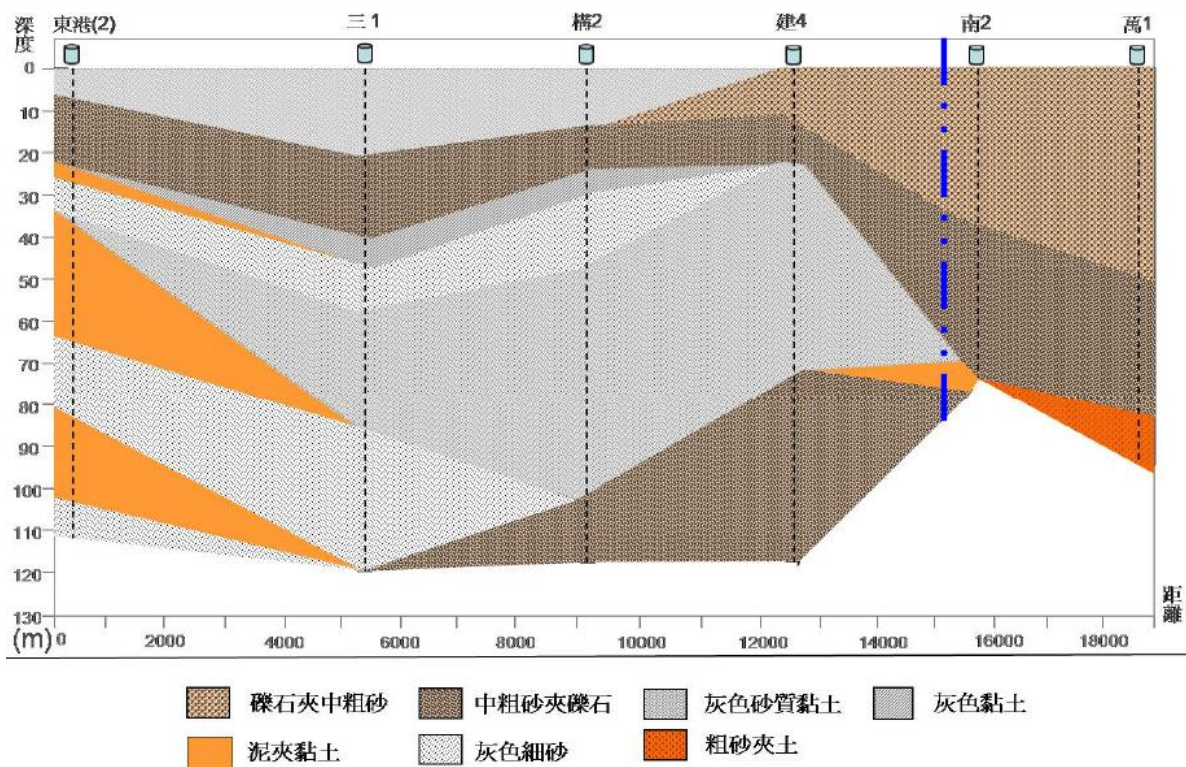


圖40、林邊溪北岸各農場地質剖面圖(屏東縣環保局, 2018)





## 4.2、模場地下水位及水質情況調查

本計畫場址位在紅點標示區域，為本試驗場址設置系統/觀測井所在位置(圖41)。由裕山公司提供新開寮模場地下水流場分佈圖可以發現，其豐枯水期之地下水流向變化有些許不同，豐水期地下水流向大致為東向西流動，而枯水期地下水流向大致為東南向西北方向流動，但整體來說還是往下游潮州方向流動。本團隊在進行試驗方面，將光纖光催化系統設置於三口系統井(WW1~WW3)後，受污染之地下水流經過此道光催化反應牆而受到處理，另外，在下游處進行四口觀測井(OW2~OW5)進行採樣，此三者相距皆約為3 m，在成效驗證方面，具有兩種方式，第一，透過單井之處理段與未處理段進行比較，其次，透過系統井與觀測井相互驗證方式，可以有效驗證光纖光催化系統之成果。另一方面，因此場址之水位變化大，由上期現地試驗(108-109年度)結果可以發現，於枯水期季節場址周邊地下水水位範圍在35~40 m區間，而豐水期降雨豐沛，因此水位上升會相當劇烈，最高紀錄可達到10-15 m之水位，代表豐枯水期地下水位變化相當劇烈。另外，透過較長時間連續監測水位變化，並依據連續量測結果繪製區域等水位圖，結果如圖42所示，由圖可以發現，今年度之地下水水位由5月枯水期，水位最低達約40 m，到5-6月進入梅雨季節，期間持續性豪大雨，水位劇烈變化，甚至在110年度的高強度降雨導致水位最高升至約8 m，而隨著10月豐水期雨季的結束，11月後降雨量顯著的減少，地下水水位相對也下降許多(水位26.57 m)。而本團隊透過水位量測，釐清區域之豐、枯水期變化，以確實掌握並了解污染層與水位變化之關係，也認知此場址之特殊性，包括水位變化劇烈，以及豐枯水期流向可能稍微改變，因此透過單井與上下游驗證之雙軌方式同時進行，以及持續性的滾動式檢討，有利試驗系統成效驗證。

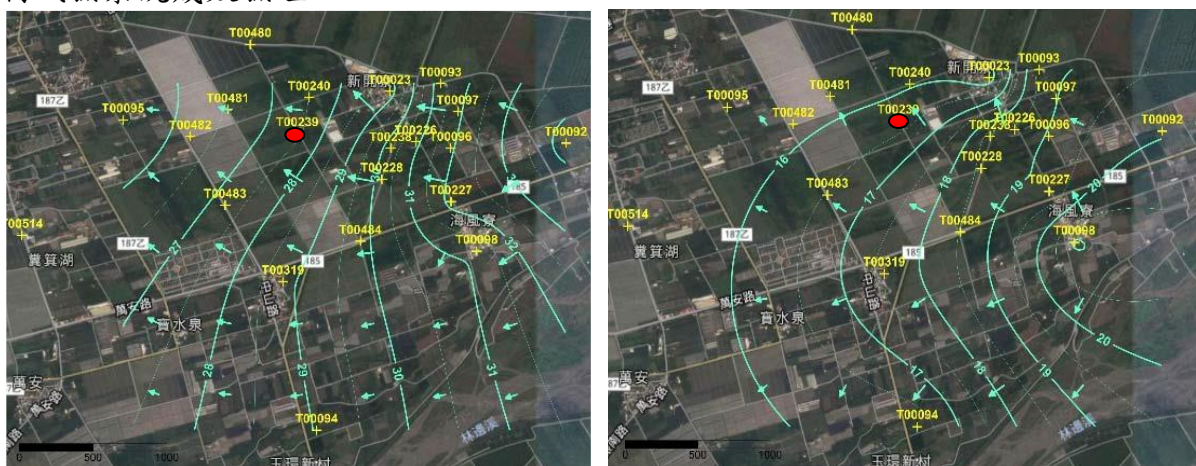


圖41、新開寮模場地下水流場分佈圖(資料來源：裕山公司)  
(左：豐水期；右：枯水期；紅點為模場位置)

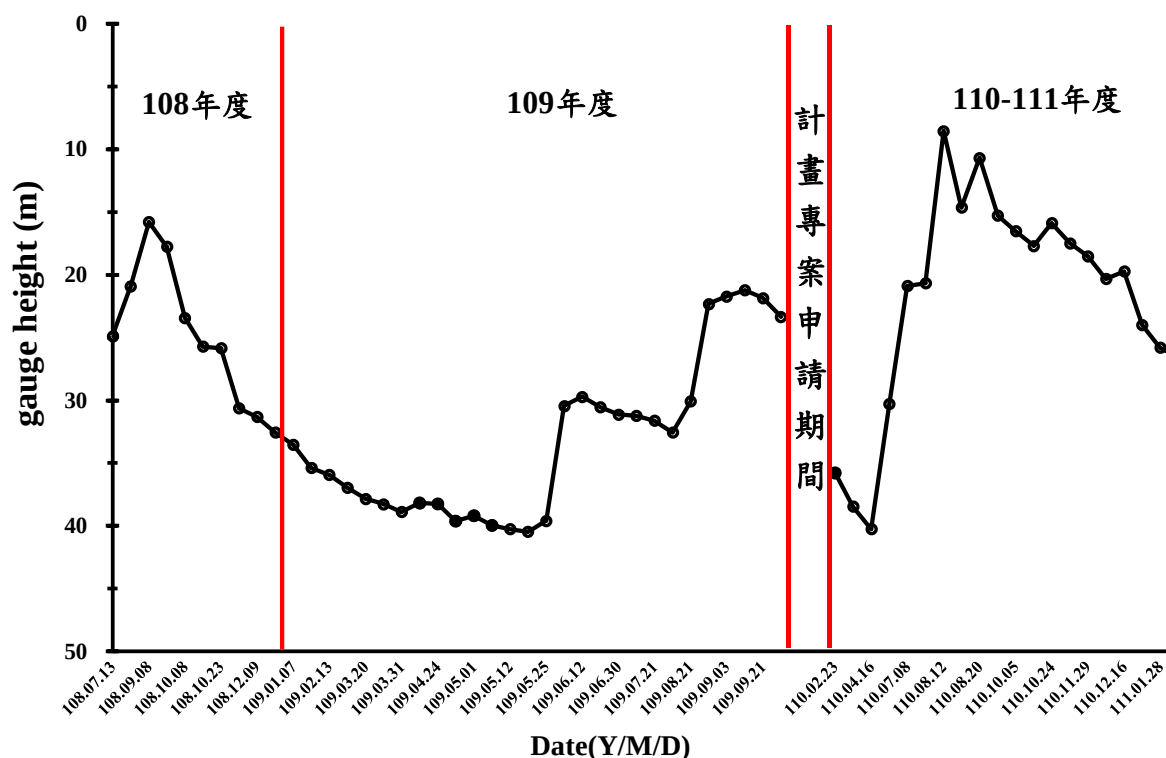


圖42、現地模場水位測量圖

另一方面，本計畫現地模場所鄰近既有監測井為T00239，其T00239-1為淺井(井深40 m)，而T00239-2為深井(井深80 m)，經過裕山公司所提供之歷年資料可以發現，在106與107年期間，於T00239-2、OW1(上游之背景觀測井)，以及OW3(下游之觀測井)，所測得之1,1二氯乙烯、1,1,2三氯乙烷、三氯乙烯、四氯乙烯濃度如表8(1)所示，在T00239-2方面，106年之污染物所測得的濃度範圍依序為0.09~0.14 mg/L、0.02~0.03 mg/L、皆小於0.01 mg/L，以及小於0.01 mg/L與ND，在107年度方面，1,1二氯乙烯測得最高濃度為0.16 mg/L，其餘污染物濃度範圍與106年相似，另外，在上下游之觀測井測得濃度可以發現，其污染物皆主要以1,1二氯乙烯為主，濃度最高可達0.14 mg/L。另一方面，由歷年資料發現，1,1二氯乙烯大部分皆超過管制標準(>0.07 mg/L)，而由更早歷史紀錄可以發現，本場址最高濃度於105年枯水期為0.190 mg/L，主要污染物種皆為1,1二氯乙烯。

另外，本團隊透過歷年水質與本年度所測得之水質進行比較，以了解清洗井體的乾淨程度，評估是否會影響光纖光催化系統之處理效率。濁度表示水對光的反射及吸收性質，當光線無法穿過水體時，水質可能是骯髒不潔的，這種水稱為濁度水。濁度來源有黏土、砂土、淤泥、無機及有機微粒、浮游生物、細菌等，濁度影響外觀、光的透過，進而影響水生植物的光合作用，魚類的生長與繁殖也將受到影響，並且會干擾消毒作用。水中之總氮主要包括硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、凱氏氮(凱氏氮為氨氮與總有機氮之和)。硝酸鹽為各種型態中最穩定的含氮化合物。



物，也是含氮有機物經氨化及硝化作用後之最終氧化產物(氨氮→亞硝酸鹽氮→硝酸鹽氮)。在溶氧量足夠的水體之無機氮，通常以硝酸鹽( $\text{NO}_3^-$ )佔較大比例。亞硝酸鹽可經氧化而生成硝酸鹽，在缺氧環境下，亦可受微生物的作用而還原為氨氣。氮化合物之存在被認為係有機物之存在，一般蛋白性氮、氨氮的存在表示污染時間較短，而硝酸鹽氮則表污染時間較長。通常未被污染水中的亞硝酸鹽氮自然濃度很低，約 0.01mg/L 左右，是為水中植物的營養鹽之一。當亞硝酸鹽氮濃度過高、異常或變化過劇時，常為水域生態環境惡化之表徵。

本團隊針對T00239-2與OW1兩口井進行水質歷年資料探討，由106年度與107年度之裕山公司提供資料顯示，地下水之pH值約落在6.6至7.3區間，導電度範圍為445~475 ms，溶氧方面為1.4~8.3 mg/L，DOC則為0.2~30.9 mg/L。而與本團隊在110年度所採樣之系統井(WW1~WW3)與下游觀測井(OW2~OW5)，進行五次水質採樣之日期分別是10/05、10/18、11/12、11/29、12/17，期間經歷了豐水期進入枯水期之過程，由表8(2)-表8(4)數據結果進行比較可以發現，若以OW1作為水質數據比較基準的話，此上游觀測井在106與107年度數據，與今年度(110年度)觀測井(OW5)與系統井(WW1~WW3)，大部份水質參數皆落在以往範圍正常區間，但在濁度方面，各口井之數值呈現相當不穩定之情況，範圍落在0.29-162 NTU，由此可以發現，其井體內之地下水濁度並不穩定。另外，在其他的水質分析項目中，110年測量數據結果得知，DOC、氨氮、亞硝酸鹽氮之數值，在各口井範圍分別落在3.2-105.8 mg/L、0.108-1.655 mg/L和ND，亞硝酸鹽氮在WW2只有兩次測得低濃度的0.009 mg/L和0.014 mg/L。另一方面，硝酸鹽氮測得濃度皆與OW1相比較低，由此可以發現，當氨氮存在較高之水體，表示污染時間較短，這也有可能是今年強降雨所造成水位變化之影響，將土壤中之污染物質大量沖刷，導致釋出到地下水中，因此氨氮濃度才會與往年相比提高許多，本團隊後續將持續監測水質變化狀況，以了解各種可能影響系統成效之環境因子。

表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(1)

| 檢驗<br>項目       | 井號        | T00239-2    |             |             |             |             |             | OW1         |             |             |             | OW3         |             |             |             |             |
|----------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                | 年度        | 106         |             |             | 107         |             |             | 106         |             | 107         |             | 106         |             |             | 107         |             |
|                | 月/日<br>單位 | 10<br>/12   | 11<br>/16   | 12<br>/14   | 01<br>/11   | 03<br>/19   | 10<br>/12   | 11<br>/16   | 12<br>/14   | 01<br>/11   | 03<br>/19   | 10<br>/12   | 11<br>/16   | 12<br>/14   | 01<br>/11   | 03<br>/19   |
| 1,1-二<br>氯乙烯   | mg/L      | <u>0.09</u> | <u>0.14</u> | <u>0.13</u> | <u>0.16</u> | <u>0.15</u> | <u>0.14</u> | <u>0.13</u> | <u>0.12</u> | <u>0.13</u> | <u>0.12</u> | <u>0.13</u> | <u>0.13</u> | <u>0.11</u> | <u>0.11</u> | <u>0.13</u> |
| 1,1,2 三<br>氯乙烷 | mg/L      | 0.02        | 0.03        | 0.03        | 0.03        | 0.02        | 0.02        | 0.02        | 0.02        | 0.03        | 0.02        | 0.02        | 0.02        | 0.02        | 0.02        | 0.03        |
| 三氯<br>乙烯       | mg/L      | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   |
| 四氯<br>乙烯       | mg/L      | ND          | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   | <0.0<br>1   |

註：斜線加底線為超過管制標準



表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(2)

| 檢驗項目 | 井號        | T00239-2 |          |          |          |          |
|------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|      | 年度        | 106      |          |          | 107      |          |
|      | 月/日<br>單位 | 10/12~13 | 11/16~17 | 12/14~15 | 01/11~12 | 03/19~20 |
| pH   |           | 7.2      | 7.3      | 7.2      | 7.2      | 6.6      |
| 導電度  | ms        | 498      | 458      | 477      | 451      | 575      |
| 水位   | m         | 22.006   | 20.882   | 23.592   | 24.731   | 29.861   |
| 溶氧量  | mg/L      | 5.6      | 8.3      | 2.3      | 4.2      | 2.0      |
| 濁度   | NTU       | -        | -        | -        | -        | -        |
| DOC  | mg/L      | 0.4      | 0.3      | 0.3      | 2.0      | 30.9     |

表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(3)

| 檢驗項目  | 井號                       | OW1(背景觀測井) |       |       |       |       | OW5(觀測井) |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 年度                       | 106        |       |       | 107   |       | 110      |       |       |       | 111   |       |       |       |
|       | 月/日                      | 10/12      | 11/16 | 12/14 | 01/11 | 03/19 | 10/05    | 10/18 | 11/12 | 11/29 | 12/17 | 01/07 | 01/28 | 02/11 |
|       | 單位                       |            |       |       |       |       |          |       |       |       |       |       |       |       |
| pH    | -                        | 7.3        | 7.2   | 7.3   | 7.2   | 7.2   | 7.7      | 7.4   | 7.3   | 7.4   | 7.2   | 6.75  | 7.03  | 7.19  |
| 導電度   | ms                       | 497        | 445   | 468   | 523   | 487   | 358      | 443   | 319   | 395   | 447   | 305   | 407   | 546   |
| 水位    | m                        | 22.16      | 21.07 | 24.33 | 25.90 | 29.93 | 16.52    | 16.55 | 17.47 | 18.52 | 19.73 | 24    | 25.8  | 26.57 |
| 溶氧量   | mg/L                     | 5.7        | 8.2   | 4.8   | 6.0   | 4.6   | 7.2      | 4.1   | 7.3   | 1.6   | 3.8   | 6.0   | 5.1   | 4.2   |
| 濁度    | NTU                      | -          | -     | -     | -     | -     | 162      | 34.8  | 7.36  | 21.3  | 63.7  | 7.07  | 23.10 | 17.04 |
| DOC   | mg/L                     | 0.3        | 0.2   | 0.4   | 0.2   | 0.2   | 8.2      | 4.3   | 8.0   | 33.2  | 9.0   | 7.9   | 6.9   | 7.3   |
| 氨氮    | mg/L<br>(MDL:0.01 mg/L)  | <0.05      | <0.05 | <0.05 | ND    | <0.05 | <0.05    | <0.05 | <0.05 | 1.384 | 0.604 | 0.561 | 0.307 | 0.382 |
| 亞硝酸鹽氮 | mg/L<br>(MDL:0.007 mg/L) | ND         | ND    | <0.02 | 0.02  | 0.04  | ND       | ND    | ND    | ND    | <0.02 | ND    | ND    | ND    |
| 硝酸鹽氮  | mg/L<br>(MDL:0.04 mg/L)  | 7.67       | 8.05  | 9.81  | 13.1  | 9.51  | 1.93     | 1.89  | 2.05  | 0.101 | 0.233 | 0.304 | 0.380 | 0.140 |

註: ND : Not Detected



表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(4)

| 檢驗項目  | 井號                       | WW1 系統井(灌注井) |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 年度                       | 110          |       |       |       |       | 111   |       |       |
|       | 月/日                      | 10/05        | 10/18 | 11/12 | 11/29 | 12/17 | 01/07 | 01/28 | 02/11 |
|       | 單位                       |              |       |       |       |       |       |       |       |
| pH    | -                        | 6.6          | 5.5   | 6.4   | 6.2   | 6.0   | 6.3   | 6.21  | 6.73  |
| 導電度   | ms                       | 310          | 481   | 229   | 323   | 420   | 283   | 385   | 500   |
| 水位    | m                        | 16.52        | 16.55 | 17.47 | 18.52 | 19.73 | 24.00 | 25.80 | 26.57 |
| 溶氧量   | mg/L                     | 7.9          | 4.8   | 3.4   | 3.7   | 2.9   | 2.1   | 1.76  | 1.2   |
| 濁度    | NTU                      | 118          | 154   | 124   | 34.3  | 76.5  | 61.0  | 57.6  | 43.8  |
| DOC   | mg/L                     | 35.5         | 106   | 68.7  | 77.6  | 88.7  | 9.86  | 8.36  | 15.9  |
| 氨氮    | mg/L<br>(MDL:0.01 mg/L)  | 0.979        | 1.655 | 0.930 | 0.532 | 0.415 | 0.023 | 0.052 | 2.183 |
| 亞硝酸鹽氮 | mg/L<br>(MDL:0.007 mg/L) | <0.02        | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | <0.02 | ND    |
| 硝酸鹽氮  | mg/L<br>(MDL:0.04 mg/L)  | 0.265        | 0.681 | 0.527 | 0.430 | 0.505 | 0.219 | 0.233 | 0.734 |



表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(5)

| 檢驗項目  | 井號                       | WW2 系統井(灌注井) |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 年度                       | 110          |       |       |       |       | 111   |       |       |
|       | 月/日<br>單位                | 10/05        | 10/18 | 11/12 | 11/29 | 12/17 | 01/07 | 01/28 | 02/11 |
| pH    | -                        | 7.2          | 6.5   | 7.3   | 7.5   | 6.8   | 6.5   | 6.9   | 8.0   |
| 導電度   | ms                       | 375          | 56.2  | 287   | 390   | 487   | 304   | 431   | 387   |
| 水位    | m                        | 16.52        | 16.55 | 17.47 | 18.52 | 19.73 | 24.00 | 25.80 | 26.57 |
| 溶氧量   | mg/L                     | 8.0          | 1.9   | 2.7   | 1.7   | 3.6   | 6.4   | 4.4   | 5.9   |
| 濁度    | NTU                      | 23.3         | 14.6  | 59    | 67.0  | 15.5  | 26.7  | 30.7  | 31.8  |
| DOC   | mg/L                     | 3.20         | 7.50  | 8.69  | 28.9  | 7.69  | 13.6  | 10.6  | 18.7  |
| 氨氮    | mg/L<br>(MDL:0.01 mg/L)  | <0.05        | 0.123 | 0.241 | 0.244 | 0.119 | 0.062 | 0.076 | 0.049 |
| 亞硝酸鹽氮 | mg/L<br>(MDL:0.007 mg/L) | ND           | ND    | 0.009 | 0.014 | ND    | ND    | 0.013 | ND    |
| 硝酸鹽氮  | mg/L<br>(MDL:0.04 mg/L)  | 2.162        | ND    | 0.212 | ND    | 0.147 | 0.935 | 0.731 | 0.824 |





表8、新現地模場系統/灌注井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(6)

| 檢驗<br>項目 | 井號                       | WW3 系統井(灌注井) |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|--------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 年度                       | 110          |       |       |       |       | 111   |       |       |
|          | 月/日                      | 10/05        | 10/18 | 11/12 | 11/29 | 12/17 | 01/07 | 01/28 | 02/11 |
|          | 單位                       |              |       |       |       |       |       |       |       |
| pH       | -                        | 6.2          | 7.1   | -     | 7.0   | 7.5   | 6.7   | 7.3   | 7.8   |
| 導電度      | ms                       | 318          | 473   | -     | 396   | 474   | 311   | 359   | 420   |
| 水位       | m                        | 16.52        | 16.55 | 17.47 | 18.52 | 19.73 | 24.00 | 25.80 | 26.57 |
| 溶氧量      | mg/L                     | 7.7          | 4.4   | -     | 2.1   | 7.8   | 5.4   | 5.7   | 5.4   |
| 濁度       | NTU                      | 34.46        | 0.290 | -     | 41.60 | 154.3 | 74.00 | 66.19 | 64.00 |
| DOC      | mg/L                     | 73.8         | 3.4   | -     | 51.5  | 12.8  | 10.9  | 20.4  | 28.4  |
| 氨氮       | mg/L<br>(MDL:0.01 mg/L)  | 0.828        | <0.05 | -     | 1.389 | 0.068 | 0.039 | ND    | 0.032 |
| 亞硝鹽氮     | mg/L<br>(MDL:0.007 mg/L) | <0.02        | ND    | -     | ND    | ND    | ND    | 0.015 | ND    |
| 硝酸鹽氮     | mg/L<br>(MDL:0.04 mg/L)  | 0.251        | 2.005 | -     | 0.355 | 0.298 | 0.093 | 0.072 | 0.434 |

### 4.3、薄膜介面探測作業(MIP)試驗

本計畫利用 MIP 進行井中地下水揮發性有機污染物探測，MIP 組裝及現場作業如圖 43 所示，MIP 探測器主體為直徑約 3.8 公分、長 30 公分之金屬體，其上有金屬與高分子聚合物所組成之半透性薄膜，藉由加熱薄膜與地下水中之揮發性有機物接觸，激化後進入薄膜內部，由偵測器內部氮氣攜帶至地面上移動式實驗車內，並由鹵素偵測器(Halogen Specific Detecto, XSD)進行分析，以瞭解地下水污染情形。本計畫配合現地地表裝設之懸掛系統裝置，將 MIP 探測器置入井中，MIP 由地面控制器使薄膜加溫至 100~121℃，驅使地下水中有機氣體被激化並滲透進入 MIP 探測器表面之半透性薄膜，藉由 MIP 內部之載流氣體(通常為氮氣)將有機氣體傳送至 XSD 分析，每 1.5 公分一組 XSD 之偵測分析數據。於置入過程開始時，確認訊號線與 XSD 之聯結，並開啟氮氣(流量通常為 45 至 65 mL/min)，將定位器歸零(即從地面開始為零)，並開始置入動作。置入深度由定位器持續紀錄，同時地下水中之揮發性有機物持續透過薄膜進入加溫室並由氮氣傳送至 XSD，樣品由 MIP 薄膜擴散進入樣品室到傳輸至 XSD 之延遲時間通常在 30~45 秒間，惟亦取決於深度與氮氣之流量。



由先前舊場址兩口井之 MIP 進行此新開寮場址之污染層之變化與水位之關係，研究於 108 年 07 月 13 日與 108 年 10 月 23 日進行本試驗處理井之 MIP 試驗，利用此儀器找出實際受到污染的水層位置。兩次測量時水位相近，分別是 24.87 m 與 25.85 m，因此兩次 MIP 測量水位大約從 25 m 至 60 m 範圍進行測量，其測量結果如圖 44 所示，在 07 月 13 日所測結果(圖 44 左)，可以發現污染層大約分佈在 25-34 m 區間，再繼續往下測量皆無訊號值產生，代表當時污染物分佈皆在淺層位置，而井的開篩深度為 30-60 m，這也代表污染物會隨著水位的變化，向上進行擴散。另一方面，由 10 月 23 日 MIP 測量結果得知(圖 44 右)，污染熱點大概分佈在 29-36 m 以及 40-48 m 這兩段地下水層，而其中又以 40-48 m 的污染訊號較為強烈。於 109 年度，於 04 月 15 日測量結果得知(圖 45A)，污染熱點大概分佈在 40-45 m 水層，而當時水位深度為 38.18 m，而 05 月 20 日測量結果(圖 45B)，污染熱點大概分佈在 40-48 m 水層，06 月 30 日測量結果(圖 45C)，污染熱點大概分佈在 44-52 m 水層，08 月 07 日測量結果(圖 45D)，污染熱點大概分佈在 33-51 m 水層，09 月 21 日測量結果(圖 45E)，污染熱點大概分佈在 22-52 m 水層。此 108-109 年度 MIP 試驗結果可以發現，污染層主要在地下水的淺層位置，在此段地下水層經由劇烈水位變化(豐枯水期轉換)的情況下，可能會造成污染物的移動，使污染物熱點分佈於不同深度，如 6 月 30 日剛開始造成水位變化，因此污染熱點尚未在淺水位的地方發現，而 08 月 07 日與 09 月 21 日皆出現水位上升後，污染層分佈範圍變廣之情形。

由裕山公司之歷年資料可以發現，於 106 年 10 月 5~15 日調查新開寮區域地下水污染層，調查針對 T00239(介於系統與觀測井中間)進行 MIP 調查，其探測深度從地表下至 55 m，探測結果顯示，其 XSD 之電壓值較高(約 64,000 至 69,000 V 間)反應位於 30 至 40 m 間(淺水位)，並且由上而下有依序遞減情形。因此本團隊於 110 年 7 月 16 日進行第一次 MIP 試驗(測量深度至水位 60 m)，由實驗結果可以得知(圖 46A)，當時水位約為 21 m，測量後發現污染訊號出現位置相當廣泛，大約落在 22-55 m 皆有出現污染訊號。另外，在 110 年 12 月 02 日進行第二次 MIP 試驗，如圖 46B 所示，當時水位約為 20 m，污染訊號範圍出現在 23-55 m，但與降雨機率較大的 7 月相比，可以發現在枯水期 12 月之污染訊號較 7 月集中於上方(20-30 m)。由 110 年度之水位變化可以發現，從枯水期(水位 40 m)，因氣候因素所造成短時間豪大雨，而導致水位提高至 20 m(最高至 8 m)，因此由結果可以推論，水位上升初期，污染將停留於原先之水位高度，隨著時間變化，會漸漸分佈較廣(深至淺)，而當水位達到一個穩定高度後，污染熱點會再分佈於淺水位，此試驗與推論結果與 108-109 年度模場試驗結論相同。此原因主要是新開寮場址較為特殊，地下水層較為深厚，可以達 80 m 深，豐枯水期間的水位變化非



常劇烈，以上原因也是導致抓取污染熱點深度極具挑戰性的主要原因。



圖43、MIP組裝及現場作業

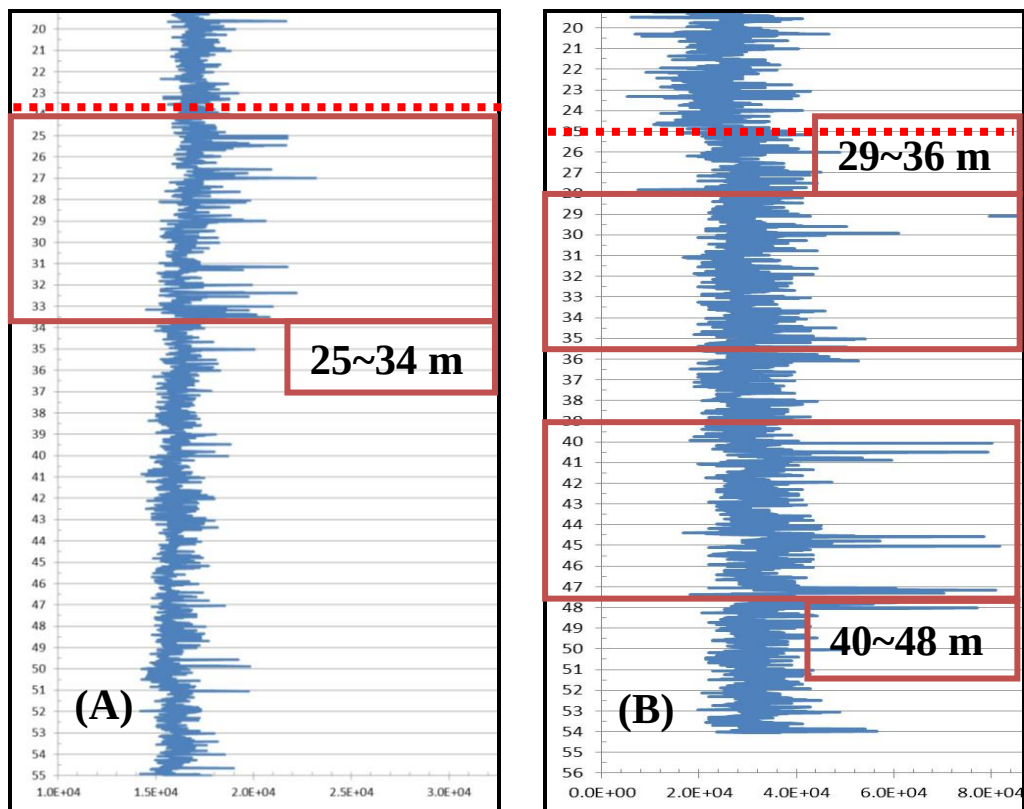


圖 44、108 年度 MIP 分析結果，測量時間(A) 108/07/13，(B) 108/10/23。

(Y 軸為地下水深度 m，虛線為水位處)



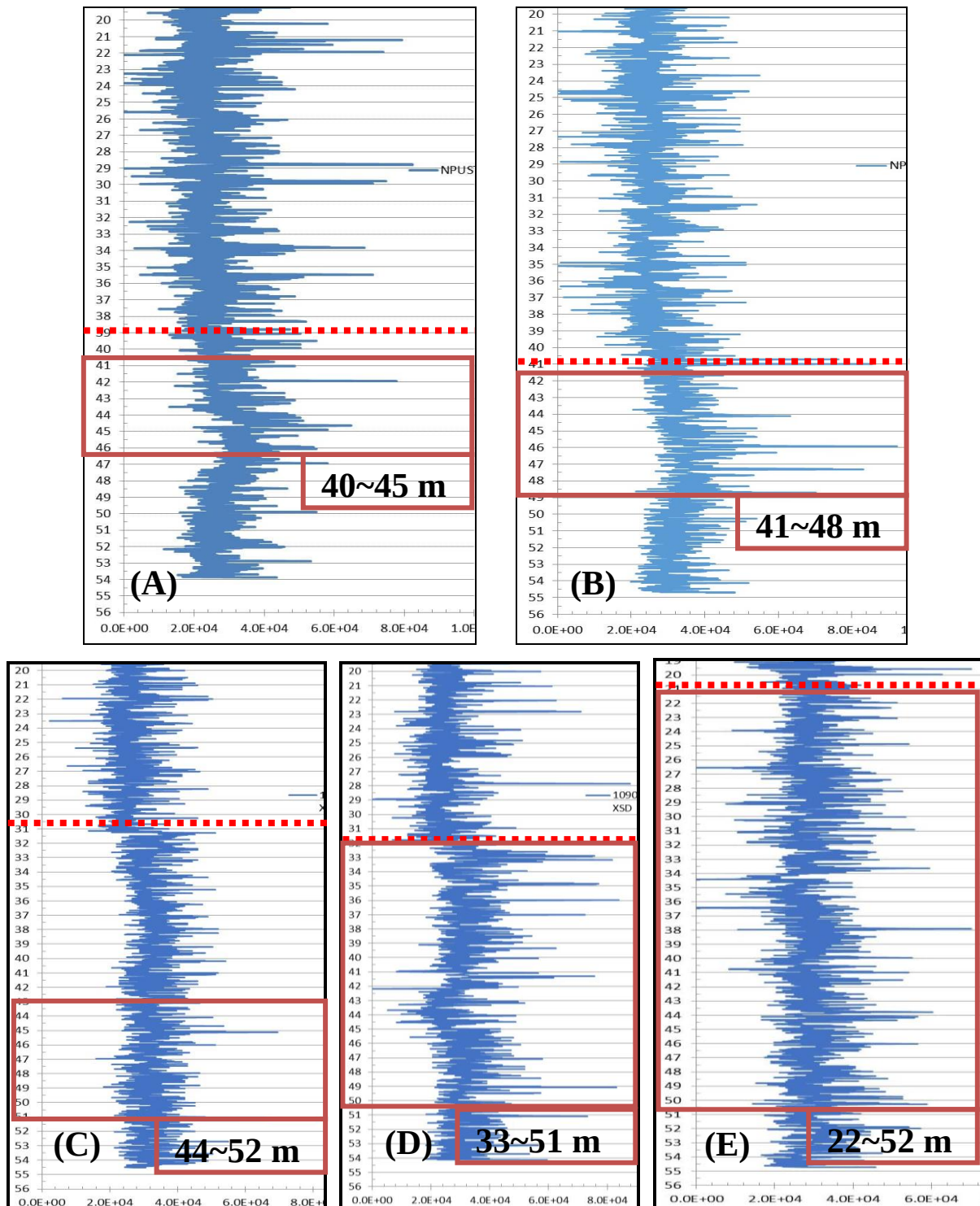


圖 45、109 年度 MIP 分析結果，測量時間(A) 109/04/15，(B) 109/05/20，(C) 109/06/30，(D) 109/08/07 和(E) 109/09/21。(Y 軸為地下水深度 m，虛線為水位處)



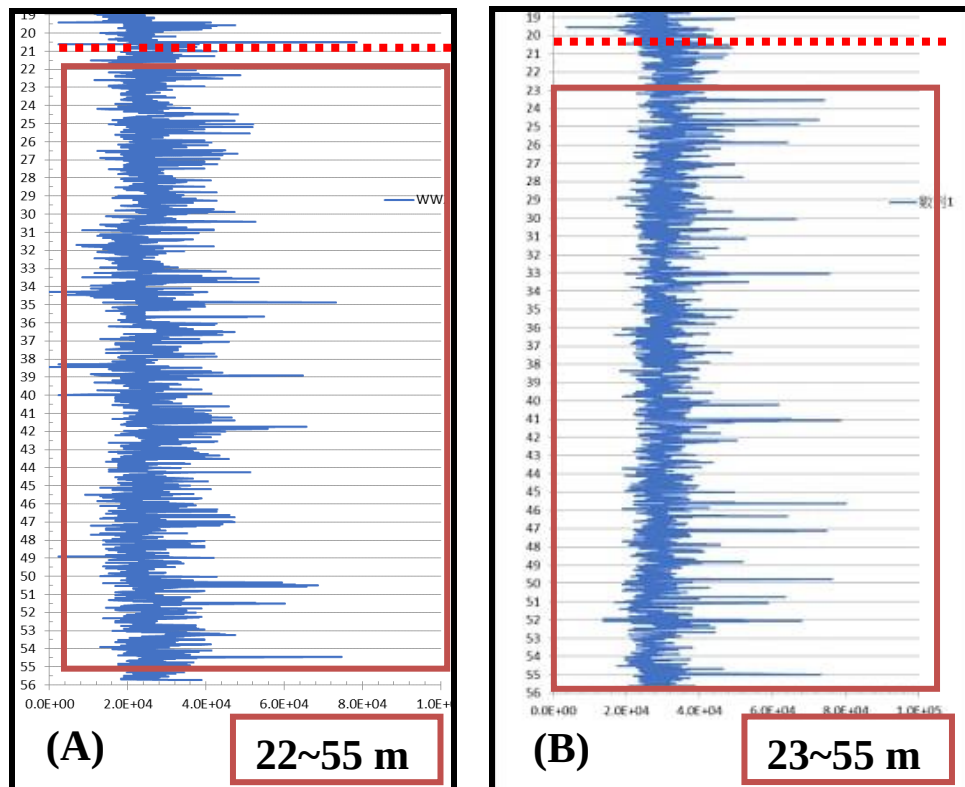


圖 46、110 年度 MIP 分析結果，測量時間(A) 110/07/16 和(B) 110/12/02。

(Y 軸為地下水深度 m，虛線為水位處)

#### 4.4、應用光纖光催化於現地試驗結果

##### 4.4.1、光纖光催化系統模組化及成本初評說明

本試驗之光纖光催化技術關鍵重點在於光源以及光纖設計與設置方式，本團隊測試後發現，所購得之塑膠光纖經長傳輸後會損耗光傳輸強度(以模場地下水層 30-80 m 較深的條件)，導致光強度激發光催化之光觸媒覆膜石英光纖較差，因此本團隊設計一款水中光源機，可與封篩管進行套接，垂吊進入污染地下水層，並在封篩管的上方進行照射，將光源近距離導入處理段的光纖當中。本團隊設計之 LED 水中光源機，光源分別為可見光(400-800 nm)與紫外光(395 nm)兩種，功率皆為 50W，其水中光源機可達到防水效果，並且可將光源放至最接近污染層的地方，透過光纖傳導至處理段，其設計概念為達到光催化在水中應用的可行性，降低光催化在水中因光遮蔽而無法應用的情形。

本光纖光催化系統應用於處理井之整體示意圖可參閱圖 26 所示，原先是將儀器懸吊於三腳架上，再進行後續的系統懸吊，但本團隊為了未來可能會大範圍施作，因此將所有連接材質更換為鋼索，只需利用俗稱小金剛的懸吊機將光催化設備放置下去井內，再將鋼索固定於井口，即可將井蓋蓋上進行內部處理，提升設備安全性及未來大面積施作之可行性。懸吊系統方面，由上而下分別為水中光



源機、封篩管(內含塑膠光纖)，再來是處理層(石英覆膜光纖)，試驗期間為驗證系統處理污染物之效率，故於覆膜石英光纖中間，放置一口被動式採樣袋，試驗時間一組為 14 天。與過去年度不同的是，今年度不將處理層以上下封篩管進行間隔，主要原因為方便後續光纖光催化系統在現地使用之便利性，因此只在處理段上方設置封篩管，並進行氣管串接，使系統可以穩固固定於處理深度(請參閱 3.4.3 節或圖 26)，以上為整組光纖光催化系統結構，實體圖組裝如圖 47 與圖 48 所示，而整組系統放置在污染水層約 30-40 m 處(定期以 MIP 進行分析污染熱點確認與水位監測，以作為調整處理設備之水深位置設定)，地面上只需串接氣管供應氣體，以及連接水中光源機之電源。另一方面，依據本研究之 107 年度成果，進行分層鋪設光纖的方式，塑膠光纖於水中光源機延伸出至處理層，以不同的長度進行延伸，以達到後端發光源之石英光纖處於不同深度之處理位置。塑膠光纖長度分別為 78、88、98、108、118 cm，直徑為 6 mm，共五段，此塑膠光纖為端點光纖，只有頭尾進行導光，將光源傳導至處理段之石英光纖，石英光纖長度皆固定 30 cm(直徑 6 mm)，各段石英光纖與塑膠光纖之連接處，本團隊為有利未來現地處理時容易組裝使用，針對系統模組化進行研究，在各單元間串接上進行改良，成果如圖 49 所示。首先，本團隊利用光纖接頭進行塑膠光纖與石英光纖之串接，未來在覆膜光纖製備完成後，可有利於後續覆膜光纖利用與更換維護，其光纖接頭之串接位置大約 5 cm，因此石英光纖約 25 cm 進行覆膜。另外，本團隊透過各類扣環、電源連接器，與鋼索進行整體系統連接，大大提高在系統組裝上之便利，減少耗損之工時。

在試驗模場設備操作成本初估方面，本團隊所使用的光纖光催化系統包含石英/塑膠光纖、水中光源機(自行設計)等，粗估成本約 5 萬元，遠低於一般市售商業化之光源機。另外，其它周邊設備包括：封篩管一副、各種線路、吊掛系統(小金剛)、打氣機、噴槍等，合計約 10 萬元。在現地放置設備及器材之貨櫃屋 10 萬元，而依 108-110 年統計用電顯示，單口井進行光催化試驗的話，模場平均每月耗電量介於 20 度~50 度之間(其中包含在現場準備時使用之電力)，每月電費約 33 元~80 元，在監測/處理井方面，單一 4 英吋標準井以平均地下水流速 47 cm/day 計算，使用目前的系統處理，每天處理之水量約為 47 L，以上為初步成本評估。今年度進行單井及多井試驗(反應牆)進行處理測試之實際成本，待未來本團隊持續收集更多現場數據後，再做進一步完整評估。

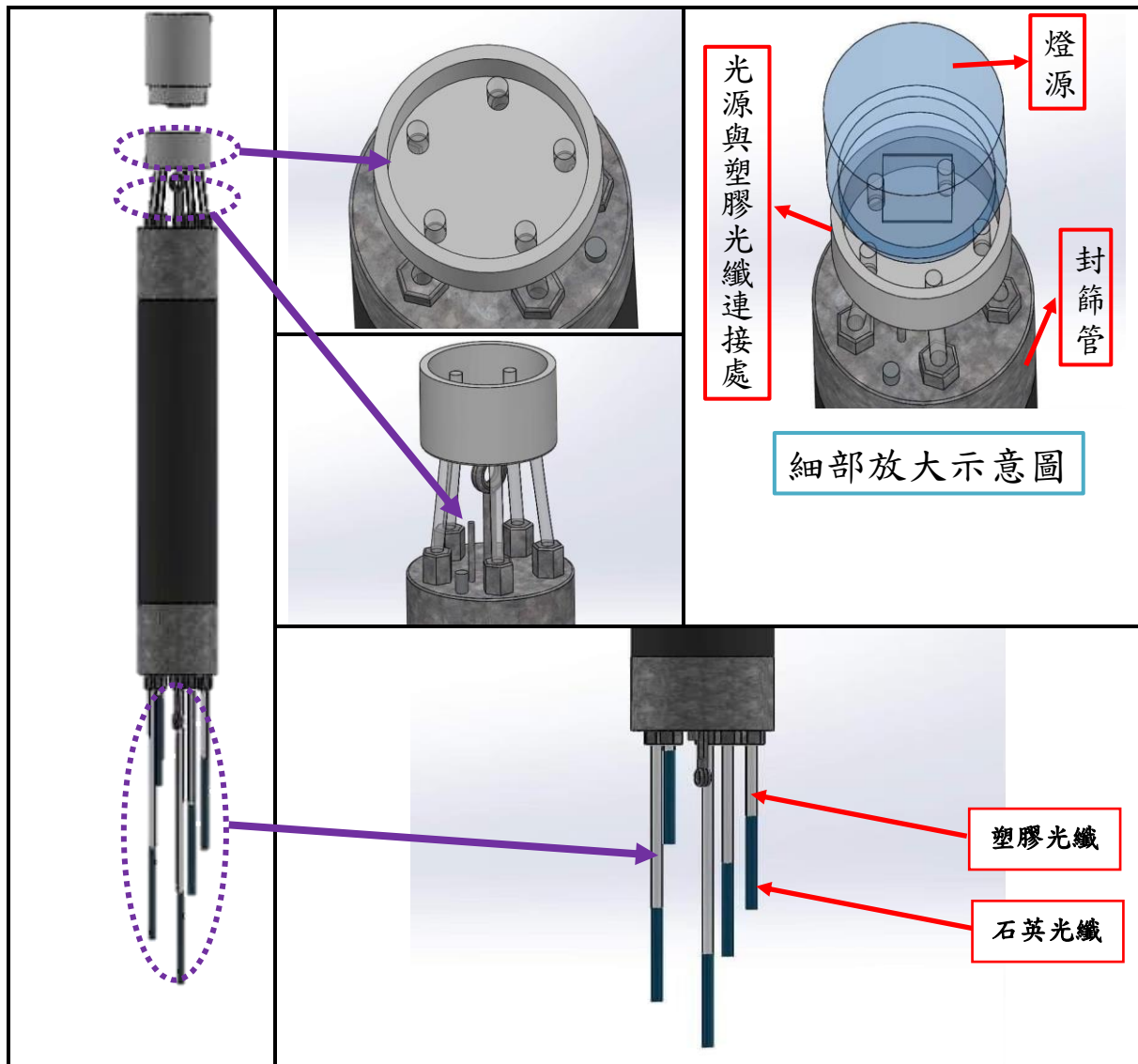


圖 47、光纖光催化系統整體示意圖

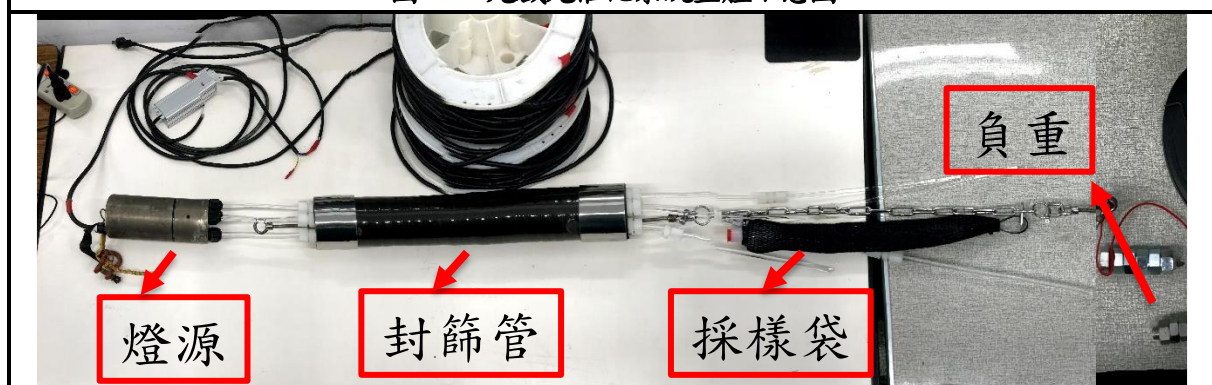


圖 48、光纖光催化系統整體組裝 3D 模擬及實體圖



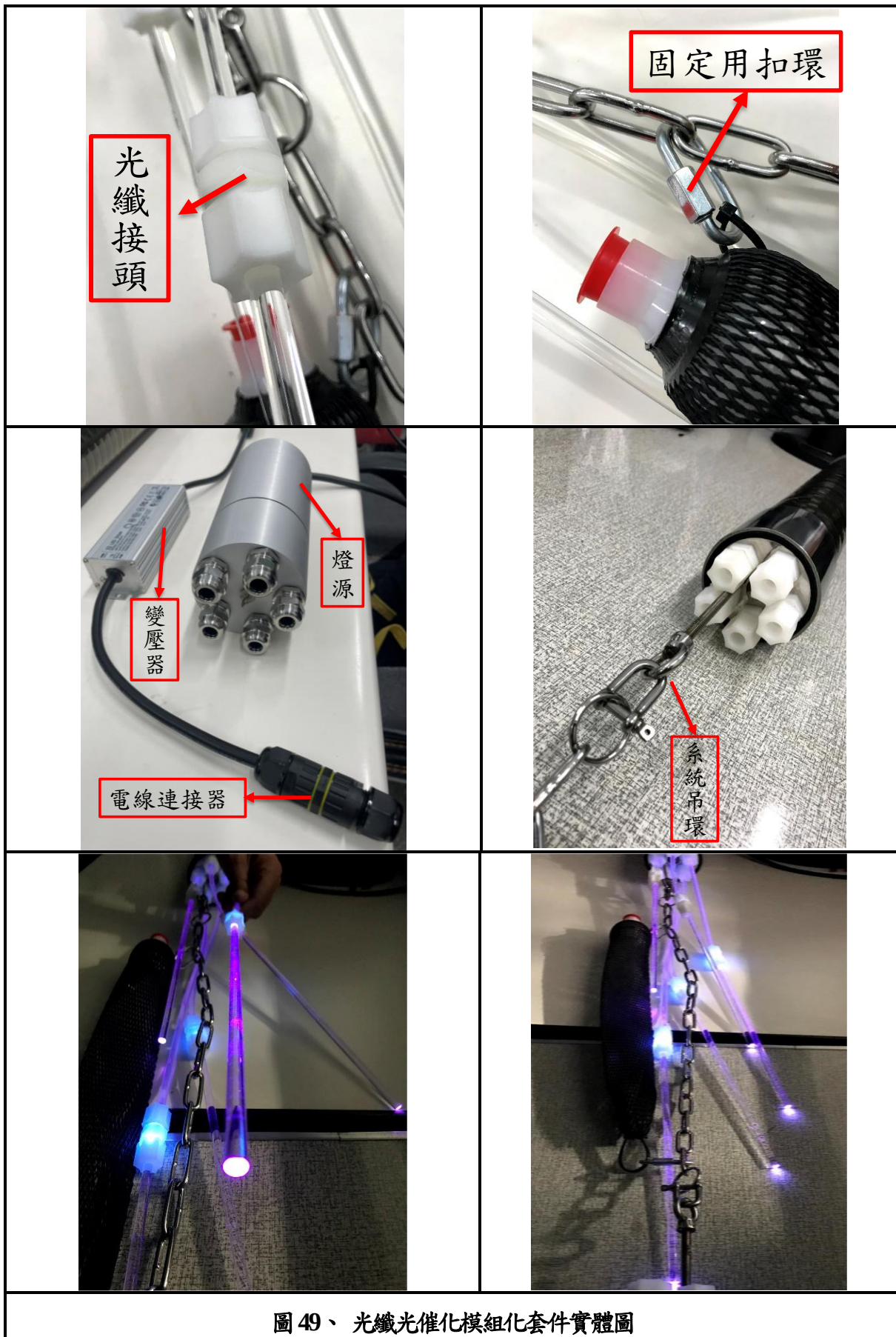


圖 49、光纖光催化模組化套件實體圖





#### 4.4.2、應用光纖光催化於現地對於受污染之地下水中含氯有機物之影響

本試驗探討光纖光催化系統應用於現地之可行性，針對受污染之地下水中含氯有機物進行處理，於 110 年度，首先以 P25  $\text{TiO}_2$  作為對照組進行試驗，探討以商業化光觸媒種類在放大試驗規模之處理成效。另一方面，本團隊進一步以最新方法製備 N- $\text{TiO}_2$ ，其製備程序較先前簡易，但效果更加提升(製備方法可參閱 3.1 節)，有利於未來放大試驗之光觸媒應用。在上述光觸媒基礎下，本團隊利用可見光與紫外光 LED 作為試驗燈源，探討光纖光催化對於現地含氯有機污染物之處理效果。本團隊在進行系統試驗前，先在 110 年 07 月 16 日 110 年 12 月 02 日分別進行 MIP 試驗，由試驗結果可以得知，因今年度豪降雨的因素，導致水位長時間處於高水位(20 m 以上)，因此，在污染物分佈上，依各水層位置皆有出現污染訊號，而 12 月份那次 MIP 試驗，可以發現污染物往上集中的現象(20-30 m)，因此後續試驗本團隊為達統一性，一律將處理段位置設置於 30-32 m 井開篩位置處。

在試驗方面，使用系統井(WW1、WW2、WW3)和觀測井(OW2、OW3、OW4、OW5)進行光催化處理效果分析。首先，本團隊針對兩口系統井(WW1、WW2)進行空白試驗(為試驗 A)，探討地下水在未放光纖光催化系統前含氯有機物濃度。接下來，本團隊以 WW1、WW2，以及 WW3 三口系統井進行系統試驗探討，首先，利用 UV light/ $\text{TiO}_2$  進行系統試驗(為試驗 B)，另外則是 Visible light/N- $\text{TiO}_2$ (為試驗 C)與 UV light/N- $\text{TiO}_2$ (為試驗 D)，並以 ZnO/CNT 之改質觸媒進行之試驗為 Visible light/N- $\text{TiO}_2$ -ZnO/CNT(為試驗 E)與 UV light/N- $\text{TiO}_2$ -ZnO/CNT(為試驗 F)之系統試驗，上述試驗結果如表 9 所示。另外，在觀測井方面，該井群位於系統井下游，因此透過觀測井群之含氯有機物測量，即可知道地下水污染物通過系統井反應牆後之濃度變化，其對應系統試驗同步進行，因此觀測井數據相對應於系統試驗，其結果如表 10 所示。在上述系統井與觀測井中，本團隊在每口井同時放置兩種深度之被動式採樣袋，分別位於系統處理段(30m)、系統空白段(35m)，而四口觀測井也相對應放置兩種深度，藉以了解系統處理段與系統空白段(未處理)之污染物濃度，也可透過此方式，在單井中看出濃度差異，有利後續成效驗證。

試驗結果如表 9 所示，在試驗 A 方面可以發現，尚未放置光纖光催化系統之系統井，在兩種深度的測量之背景濃度得知，以 1,1-二氯乙烯為例，濃度皆高於監測標準甚至管制標準，濃度範圍落在 0.0692 mg/L - 0.102 mg/L，而其他污染物種濃度偏低。本團隊進一步以試驗 B 至 F 進行探討，首先以單井進行效率驗證探討，可以發現在系統試驗條件下，系統井之處理段濃度皆較空白段低，各種污染物去除效率普遍平均落在 40-80%，1,1,2-三氯乙烷方面，並且最高可達到 93%，而 1,1-二氯乙烯去除效率也最高可達到 98%，另外，TCE 與 PCE 濃度皆較低。另一方面，若以多井試驗作為驗證，試驗 B 以觀測井探討比較污染物濃度變化，



其結果顯示於表 10，以主要污染物種 1,1-二氯乙烯為例，可以發現 OW2 兩種深度之污染物濃度皆較高，而 OW3 與 OW4 之 30 m 污染物濃度皆比 35 m 低，OW5 的污染物濃度也較高(達管制標準)。另一方面，以試驗 C 進行試驗可以發現，在單井驗證方面(表 9)，1,1,2-三氯乙烷方面，在 WW1 發現最高去除效率 89%，而 1,1-二氯乙烯去除效率也可達到 59%，另外，TCE 與 PCE 濃度皆較低，但可以看出處理段濃度皆較低。而試驗 C 以觀測井探討比較污染物濃度變化，其結果顯示於表 10，以主要污染物種 1,1-二氯乙烯為例，可以發現 OW2、OW3 與 OW4 之 30 m 污染物濃度皆比 35 m 低，可有效呼應前端處理段之去除效率，而 OW5 的污染物濃度也較高(達管制標準)。另一方面，由另一種光觸媒(N-TiO<sub>2</sub>-ZnO/CNT)進行之試驗可以發現，在試驗 E 與 F 的觀測井方面，30 m 污染物濃度皆比 35 m 低，可以由此得知，經系統井之處理段(30 m)的處理效果皆可達到管制標準下，並且與未處理段(35 m)相比，在下游觀測井具有去除成效。總結上方試驗結果，可以由試驗 B 至 F 試驗結果得知，確實可有效證明光纖光催化系統之處理段可有效處理地下水之污染物，並由單井或上下游之雙軌驗證得知。



表 9、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

| 試驗別 | 試驗條件                           | 井編號 | 樣品編號       | 地下水污染         | 深度                    |               |                |
|-----|--------------------------------|-----|------------|---------------|-----------------------|---------------|----------------|
|     |                                |     | 檢驗項目       | 管制標準<br>(第二類) | 處理段<br>(30 m)         | 空白段<br>(35 m) | Removal<br>(%) |
| A   | blank                          | WW1 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | <0.0100               | 0.0160        | NA             |
|     |                                |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0692</b>         | <b>0.0976</b> |                |
|     |                                |     | 三氯乙烯       | 0.050         | <0.0100               | 0.00247       |                |
|     |                                |     | 四氯乙烯       | 0.050         | <0.0100               | ND            |                |
|     |                                | WW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | —                     |               | NA             |
|     |                                |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         |                       |               |                |
|     |                                |     | 三氯乙烯       | 0.050         |                       |               |                |
|     |                                |     | 四氯乙烯       | 0.050         |                       |               |                |
|     |                                | WW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0121                | <0.0100       | NA             |
|     |                                |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0968</b>         | <b>0.102</b>  |                |
|     |                                |     | 三氯乙烯       | 0.050         | 0.00114               | <0.0100       |                |
|     |                                |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | <0.0100       |                |
| B   | UV light<br>/ TiO <sub>2</sub> | WW1 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00678               | 0.0175        | 62%            |
|     |                                |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0608</b>         | <b>0.111</b>  | 45%            |
|     |                                |     | 三氯乙烯       | 0.050         | 0.00102               | <0.0100       | NA             |
|     |                                |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | <0.0100       | 100%           |
|     |                                | WW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00831               | 0.0122        | 32%            |
|     |                                |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0683</b>         | <b>0.0895</b> | 24%            |
|     |                                |     | 三氯乙烯       | 0.050         | 0.00141               | 0.00176       | 20%            |
|     |                                |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | ND            | NA             |
|     |                                | WW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | <0.00100<br>(0.00043) | ND            | NA             |
|     |                                |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | ND                    | ND            | NA             |
|     |                                |     | 三氯乙烯       | 0.050         | ND                    | ND            | NA             |
|     |                                |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | ND            | NA             |

註：1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 9、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

| 試驗別 | 試驗條件                                 | 井編號 | 樣品編號       | 地下水污染         | 深度                    |               |                |
|-----|--------------------------------------|-----|------------|---------------|-----------------------|---------------|----------------|
|     |                                      |     | 檢驗項目       | 管制標準<br>(第二類) | 處理段<br>(30 m)         | 空白段<br>(35 m) | Removal<br>(%) |
| C   | Visible light<br>/N-TiO <sub>2</sub> | WW1 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00199               | 0.0183        | 89%            |
|     |                                      |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0516</b>         | <b>0.124</b>  | 59%            |
|     |                                      |     | 三氯乙烯       | 0.050         | <0.00100<br>(0.00078) | <0.0100       | NA             |
|     |                                      |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | <0.0100       | NA             |
|     |                                      | WW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0125                | 0.0142        | 12%            |
|     |                                      |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0780</b>         | <b>0.0805</b> | 4%             |
|     |                                      |     | 三氯乙烯       | 0.050         | <0.00100<br>(0.00053) | 0.00184       | 71%            |
|     |                                      |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | ND            | NA             |
|     |                                      | WW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0108                | ND            | NA             |
|     |                                      |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0647</b>         | 0.00328       | NA             |
|     |                                      |     | 三氯乙烯       | 0.050         | 0.00147               | ND            | NA             |
|     |                                      |     | 四氯乙烯       | 0.050         | 0.00199               | 0.0183        | 89%            |
| D   | UV light<br>/ N-TiO <sub>2</sub>     | WW1 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.005                 | 0.0173        | 71%            |
|     |                                      |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0797</b>         | <b>0.125</b>  | 36%            |
|     |                                      |     | 三氯乙烯       | 0.050         | 0.00118               | <0.0100       | NA             |
|     |                                      |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | <0.0100       | NA             |
|     |                                      | WW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0121                | 0.0126        | 4%             |
|     |                                      |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0705</b>         | <b>0.0986</b> | 28%            |
|     |                                      |     | 三氯乙烯       | 0.050         | 0.00130               | 0.00185       | 30%            |
|     |                                      |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | ND            | NA             |
|     |                                      | WW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00242               | 0.0114        | 79%            |
|     |                                      |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | 0.00779               | <b>0.0719</b> | 89%            |
|     |                                      |     | 三氯乙烯       | 0.050         | ND                    | 0.00214       | NA             |
|     |                                      |     | 四氯乙烯       | 0.050         | ND                    | ND            | NA             |

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位:mg/L





表 9、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

| 試驗<br>別 | 試驗<br>條件                                                | 井編<br>號 | 樣 品 編 號    | 地下水污染         | 深度            |               |                |
|---------|---------------------------------------------------------|---------|------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
|         |                                                         |         | 檢驗項目       | 管制標準<br>(第二類) | 處理段<br>(30 m) | 空白段<br>(35 m) | Removal<br>(%) |
| E       | Visible<br>light<br>/N-TiO <sub>2</sub><br>-ZnO/C<br>NT | WW1     | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00238       | 0.0124        | 81%            |
|         |                                                         |         | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0745</b> | <b>0.122</b>  | 39%            |
|         |                                                         |         | 三氯乙烯       | 0.050         | ND            | <0.0100       | NA             |
|         |                                                         |         | 四氯乙烯       | 0.050         | 0.00109       | <0.0100       | NA             |
|         |                                                         | WW2     | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0103        | 0.0120        | 14%            |
|         |                                                         |         | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0707</b> | <b>0.0741</b> | 5%             |
|         |                                                         |         | 三氯乙烯       | 0.050         | ND            | ND            | NA             |
|         |                                                         |         | 四氯乙烯       | 0.050         | 0.00112       | 0.00145       | 23%            |
|         |                                                         | WW3     | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0109        | 0.00197       | NA             |
|         |                                                         |         | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0717</b> | 0.00900       | NA             |
|         |                                                         |         | 三氯乙烯       | 0.050         | ND            | ND            | NA             |
|         |                                                         |         | 四氯乙烯       | 0.050         | 0.00196       | 0.00044       | NA             |
| F       | UV light<br>/N-TiO <sub>2</sub><br>-ZnO/C<br>NT         | WW1     | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00164       | 0.0121        | 86%            |
|         |                                                         |         | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0697</b> | <b>0.101</b>  | 31%            |
|         |                                                         |         | 三氯乙烯       | 0.050         | ND            | <0.0100       | NA             |
|         |                                                         |         | 四氯乙烯       | 0.050         | 0.00091       | <0.0100       | NA             |
|         |                                                         | WW2     | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.0128        | 0.0133        | 4%             |
|         |                                                         |         | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | <b>0.0717</b> | <b>0.0858</b> | 16%            |
|         |                                                         |         | 三氯乙烯       | 0.050         | ND            | ND            | NA             |
|         |                                                         |         | 四氯乙烯       | 0.050         | 0.00130       | 0.00167       | 22%            |
|         |                                                         | WW3     | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050         | 0.00084       | 0.0120        | 93%            |
|         |                                                         |         | 1,1-二氯乙烯   | 0.070         | 0.00132       | <b>0.0953</b> | 98%            |
|         |                                                         |         | 三氯乙烯       | 0.050         | ND            | ND            | NA             |
|         |                                                         |         | 四氯乙烯       | 0.050         | ND            | 0.00226       | NA             |

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 10、地下水含氯有機物測定結果(觀測井)

| 對應系統<br>試驗別 | 日期  | 樣品編號       | 地下水污染<br>管制標準(第二類) | 深度(m)         |               |
|-------------|-----|------------|--------------------|---------------|---------------|
|             |     | 檢驗項目       |                    | 30            | 35            |
| B           | OW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00253       | 0.0122        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | <b>0.0841</b> | <b>0.0877</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00059       | 0.00117       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.0124        | 0.0147        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0483        | <b>0.0988</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00107       | 0.00157       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW4 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.0132        | 0.0158        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0667        | <b>0.0908</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00050       | 0.00143       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW5 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.0133        | 0.0112        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | <b>0.0701</b> | 0.0672        |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00162       | 0.00145       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
| C           | OW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00557       | 0.0118        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0476        | <b>0.0720</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | 0.00130       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.0122        | 0.0137        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0220        | <b>0.0795</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00048       | 0.00106       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW4 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00962       | 0.0132        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0482        | 0.0485        |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00044       | 0.00068       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW5 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00968       | 0.0138        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | <b>0.0746</b> | 0.0593        |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00165       | 0.00101       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 10、地下水含氯有機物測定結果(觀測井)

| 對應系統<br>試驗別 | 日期  | 樣品編號       | 地下水污染<br>管制標準(第二類) | 深度(m)         |               |
|-------------|-----|------------|--------------------|---------------|---------------|
|             |     | 檢驗項目       |                    | 30            | 35            |
| D           | OW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00635       | 0.0116        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0414        | <b>0.0968</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | 0.00137       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             | OW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00824       | 0.0129        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0210        | <b>0.118</b>  |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | <0.0100       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | <0.0100       |
|             | OW4 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00981       | 0.0126        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0478        | <b>0.103</b>  |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | <0.0100       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | <0.0100       |
|             | OW5 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.0105        | 0.0112        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0375        | 0.0763        |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | 0.00079       | 0.00189       |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
| E           | OW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00583       | 0.0124        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0324        | <b>0.0657</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | 0.00134       |
|             | OW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00697       | 0.0129        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0173        | <b>0.0807</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | 0.00115       |
|             | OW4 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00892       | 0.0151        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0330        | <b>0.0795</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND            | 0.00123       |
|             | OW5 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.0105        | 0.0115        |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | <b>0.0509</b> | <b>0.0824</b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND            | ND            |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | 0.00105       | 0.00191       |

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 10、地下水含氯有機物測定結果(觀測井)

| 對應系統<br>試驗別 | 日期  | 樣品編號       | 地下水污染<br>管制標準(第二類) | 深度(m)                |                     |
|-------------|-----|------------|--------------------|----------------------|---------------------|
|             |     | 檢驗項目       |                    | 30                   | 35                  |
| F           | OW2 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00653              | 0.0147              |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0356               | <b><u>0.120</u></b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             | OW3 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00528              | 0.0141              |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0123               | <b><u>0.130</u></b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             | OW4 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00903              | 0.0155              |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | 0.0367               | <b><u>0.128</u></b> |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             | OW5 | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.050              | 0.00875              | 0.0107              |
|             |     | 1,1-二氯乙烯   | 0.070              | <b><u>0.0819</u></b> | 0.101               |
|             |     | 三氯乙烯       | 0.050              | ND                   | <0.0100             |
|             |     | 四氯乙烯       | 0.050              | 0.00155              | <0.0100             |

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位:mg/L





#### 4.4.3、應用光纖光催化於現地對於受污染之地下水中 DOC 及 Cl<sup>-</sup>之影響

本模場試驗為了解並驗證光纖光催化系統對於地下水污染改善成效，因此透過溶解性有機碳(DOC)與氯離子(Cl<sup>-</sup>)生成進行探討。試驗以最佳覆膜條件(無機樹脂 25:75、分層覆鍍、20 mL PTFE/L、0.5 wt% N-TiO<sub>2</sub>)進行探討。實驗以 6 mm 直徑之石英光纖進行覆膜後，進入污染層中進行光催化，光纖光催化系統操作時間為 14 天，取樣後進行後續分析。由去年度(109 年度)在舊模場之試驗結果可以得知氯離子生成方面，五組試驗分別生成 0.047、0.024、0.100、0.027、0.088 mg/L 之氯離子。在 DOC 方面，各測得 DOC 濃度去除效率依序分別為 15、4、7、56、53%。而 110 年度結果(表 11)得知，試驗 A 在 WW1、WW2、WW3、OW5 四口井所測得氯離子濃度依序為 1.47、1.41、1.07、1.78 mg/L，DOC 方面為 35.51、3.210、73.76、8.210 mg/L，而在 B 試驗前四口井的氯離子濃度範圍落在 1.85-2.98 mg/L，而在 B 試驗結束後測量，氯離子濃度範圍落在 2.75-3.35 mg/L；另外，DOC 方面，只有 WW1 之去除效果較明顯，由 105.8 降至 68.70 mg/L，其他濃度變化皆不大。而在 C 試驗前，四口井的氯離子濃度範圍落在 1.98-3.03 mg/L，而在 C 試驗結束後測量，氯離子濃度範圍落在 3.10-4.48 mg/L；另外，DOC 方面，只有 WW1 之無去除效果，WW2 由 28.90 降至 7.690 mg/L，WW3 由 51.50 降至 12.77 mg/L，OW5 由 33.23 降至 9.040 mg/L。綜上所述，此試驗結果在氯離子方面，在試驗前後確實濃度提升，其他學者研究指出，含氯有機物受到光催化之處理，氯離子會隨著光照時間的增加而提高，這也表示確實有受到光催化之降解(Alexander et al., 2008；Choo et al., 2008)，研究結果顯示，在光纖光催化系統處理過後，確實有生成氯離子，這代表此系統於地下水污染層確實進行光催化降解作用。而 DOC 方面，雖然可能受到土壤地下水有機物質不穩定釋出 DOC，導致濃度無法準確，但整體趨勢確定在試驗是具有 DOC 之去除效率，這也代表地下水中之污染物受到去除。

表 11、處理井地下水中氯離子與溶解性有機碳測定結果

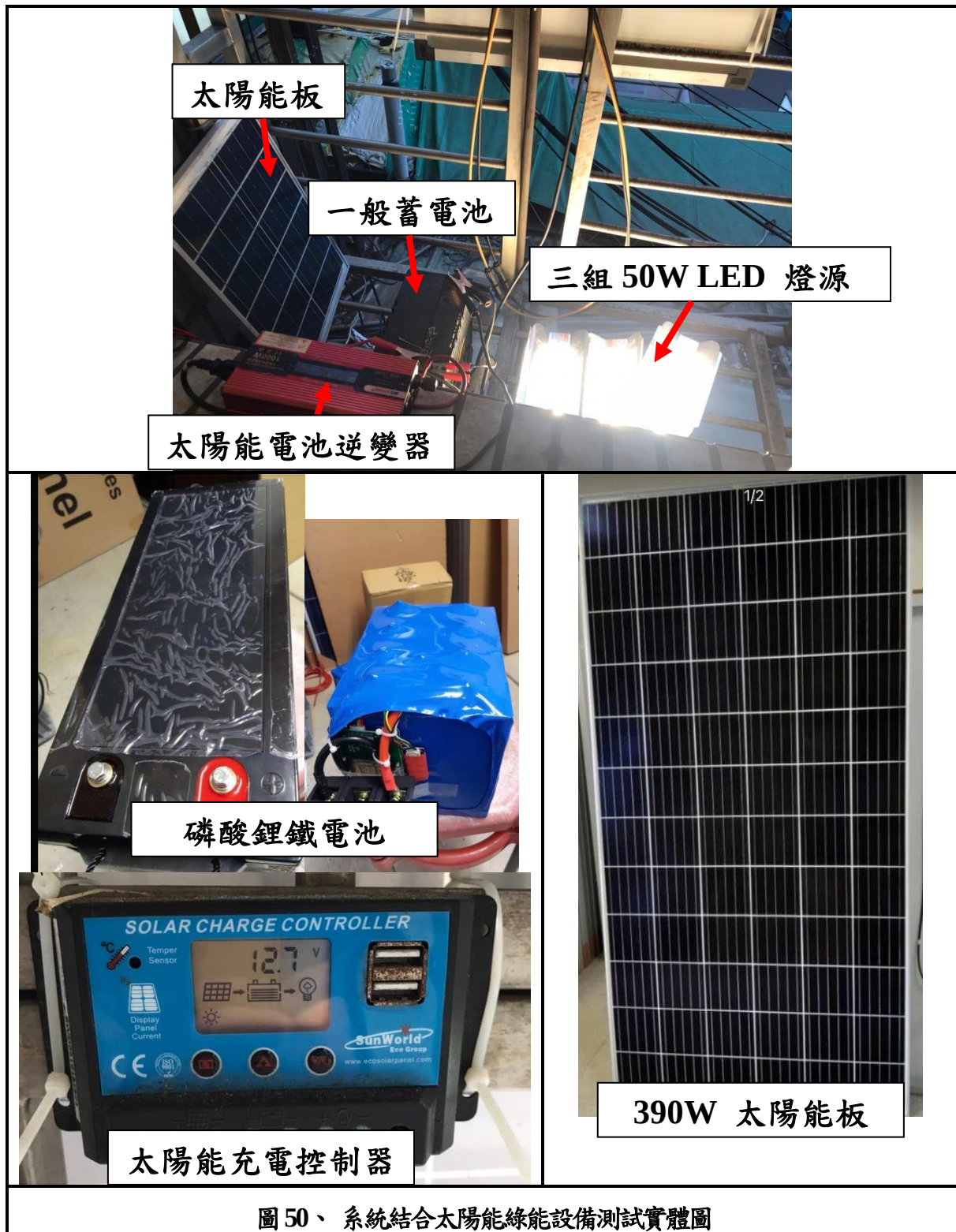
| 年度  | 日期    | 試驗別      | Chloride ion (mg/L) |      |      |      | Dissolved organic carbon (mg/L) |       |       |       |
|-----|-------|----------|---------------------|------|------|------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|     |       |          | WW1                 | WW2  | WW3  | OW5  | WW1                             | WW2   | WW3   | OW5   |
| 110 | 10/05 | A(blank) | 1.47                | 1.41 | 1.07 | 1.78 | 35.51                           | 3.210 | 73.76 | 8.210 |
|     | 11/11 | B 後      | 2.75                | 3.35 | -    | 3.26 | 68.70                           | 8.690 | -     | 7.980 |
|     | 12/17 | C 後      | 3.10                | 3.07 | 4.48 | 3.43 | 88.67                           | 7.690 | 12.77 | 9.040 |
| 111 | 01/07 | D 後      | 1.95                | 1.79 | 1.99 | 3.46 | 9.860                           | 13.57 | 10.87 | 7.880 |
|     | 01/28 | E 後      | 2.70                | 2.28 | 2.30 | 3.98 | 8.362                           | 10.35 | 20.38 | 6.945 |
|     | 2/11  | D 後      | 3.14                | 2.23 | 2.77 | 2.96 | 15.86                           | 18.68 | 28.35 | 7.321 |

註:「後」：代表試驗後之濃度變化



## 4.5、綠能設備應用規劃說明

隨著全球能源需求的急劇增加，太陽能的有效利用是一個重要的議題。有學者研究使用太陽能集中輸送系統 (ECoSEnDS)其針對採光和可持續處理廢水作設計。EcoSEnDS 由雙反射鏡太陽能聚光器和純石英光纖束製成。該學者利用的太陽能設備可以集中相當於 813 個 60 W 白熾燈泡或 149 個 15 W LED 燈源的光能，若使用適當之光催化劑可作為光催化系統持續降解廢水中的污染物，實驗結果顯示在一小時內就可完全光催化降解亞甲藍基藍(Roy et al., 2021)。本團隊於此專案結合太陽能之綠能概念，主要可分為兩個部份，第一，設計利用聚光系統將太陽光收集後直接聚集照射於光纖管中，傳導至污染熱點進行光催化處理；第二，利用太陽能板進行蓄電，以備於在沒有太陽光照射時，可以啟動電源，直接導入節能型可見光 LED 光源進行照射，以達到長時間持續現地處理之需求，使本光纖光催化技術結合綠能，達到永續應用之未來發展，目前此兩項技術皆處於規劃階段，本團隊在 110 年度首先針對太陽能蓄電(供電)系統進行探討，本團隊預先測試系統結合太陽能綠能設備測試(圖 50 所示)，首先以三組 50 W LED 燈源進行試驗，搭配小型太陽能板與一般車用蓄電池進行組裝，確定白天供電上無虞，後續將評估(或視屆時適合之設備)以 390W 之太陽能板(長寬:2 m ×1 m)，搭配 120AH 磷酸鋰鐵電池進行供電。根據試算所得，目前使用之 50W LED 可見光與紫外光之電壓及電流，皆是 36V 與 1.5A，若以現場本年度實際的處理情況來計算，三組燈源系統共需要 4.5 A，以蓄電能力為 120Ah 之蓄電池來試算，供電能力可達到 26.67 h (暫忽略電力傳輸過程損耗不計)，因此在供電上可以足夠提供系統所需。由於本模場所提之兩年期計畫，係將綠能設備之設計和評估安排在第二年(111 年度)，因此目前先做初步之設備評估，作為後續系統設計之參考，並將於 111 年度進行綠能系統之完整設計和現地實際測試報告。







## 第五章 結論與建議

在第一年(110 年度)之模場先導試驗方面，本團隊針對場址位於所在地之屏東，進行地理及地形、氣候、地質與土壤、地表水系，以及模場所在地之新開寮水文地質進行調查，且在進一步測量本計畫之場址之地下水水位，以及模場在先前裕山公司所測量之污染物濃度調查及水質比較。關於地下水流場方面，本計畫範圍之枯水期地下水位平均約位於地表下 30 至 50 公尺左右，豐水期地下水位普遍約位於地表下 10 至 30 公尺左右(110 年度豐水期最高至 8 m)，豐、枯水期水位變動約 10 至 20 公尺。豐水期地下水流向大致為東向西流動，而枯水期地下水流向大致為東南向西北方向流動。而本年度測得水位在 5-6 月豪大雨時期，迅速由水位 40 m 提升至 20 m，可見此場址之水位變化劇烈。另一方面，本計畫現地模場所設置鄰近既有監測井 T00239，經裕山公司 106 與 107 年調查結果得知，現地地下水污染主要物種為 1,1 二氯乙烯、四氯乙烯、三氯乙烯，以及 1,1,2 三氯乙烷，而 1,1 二氯乙烯大部分皆超過管制標準(>0.7 mg/L)，最高濃度於 107 年枯水期為 0.16 mg/L。本計畫於期中進度已完成現場整理作業，包括整地作業、除草作業、井體外觀維護，以及後續現場帆布鋪設，利於後續施工作業，並且完成現場貨櫃與相關電力配置。

本團隊為有利未來現地模場試驗，針對系統模組化進行研究，在各類單元間之串接上探討，首先，利用光纖接頭進行塑膠光纖與石英光纖之串接，未來在覆膜光纖備製完成後，可有利於後續覆膜光纖利用與更換維護。另外，本團隊透過各類扣環、電源連接器，與鋼索進行整體系統連接，大大提高在系統組裝上之便利，減少耗損之工時。另一方面，本團隊於本年度使用新場址，因先前裕山顧問公司在此場址之灌注井進行灌注藥劑的相關試驗，因此本團隊在開始系統試驗前，必先確保整體井體環境之完善，包括井篩通暢(洗井)與井中水質進行量測。在地下水水質方面，可以發現大部份水質參數皆落在以往範圍正常區間，但在濁度、DOC、氨氮之數值較高，氨氮濃度較高之水體，表示污染時間較短，這也有可能是今年強降雨使水位變化產生之影響，將土壤中之污染物質大量沖刷，導致物質釋出到地下水中，使氨氮濃度與往年相比提高許多。本團隊後續將持續監測水質變化狀況，以了解各種可能影響系統成效之環境因子。另一方面，本團隊定期進行井中地下水 MIP 分析，由 110 年度所進行兩次之分析結果可以得知，因南部 110 年從 5 月底開始間歇有豪大雨或降雨日數較長之情形發生，導致至 110 年底都處於高水位(約地表下 20 m)，導致測得之含氯有機物之污染訊號分佈相當廣(約 20-50 m)，但與降雨機率較大的 7 月相比，可以發現在枯水期 12 月之污染訊號較 7 月集中於上方(20-30 m)。由上述推論，水位上升初期，污染將停留於原先之水位高度，隨著時間變化，會漸漸分佈較廣(深至淺)，而當水位達到一個穩定



高度後，污染熱點會再分佈於淺水位，此試驗與推論結果與 108-109 年度模場試驗結論相同。

在光纖光催化試驗系統方面，可以由試驗 B 至 F 系統試驗結果發現，可有效證明光纖光催化系統之處理段可有效處理地下水之污染物，並由單井或上下游之多井雙軌驗證得知。另一方面，本團隊持續進行試驗 D(UV/N-TiO<sub>2</sub>)之系統試驗，預計於 111 年 01 月 07 日試驗結束收樣，後續會將完整數據結果呈現於修訂稿中。此外，本團隊持續進行改質觸媒種類的探討(N-TiO<sub>2</sub>-ZnO/CNT)並進行現地試驗，以期後續更有效率利用太陽光進行光纖光催化系統處理。在光纖光催化系統處理過後，經過分析可以確認氯離子濃度的提高，代表此光催化系統於地下水污染層確實進行光催化降解作用。在 DOC 方面，雖然可能受到土壤地下水有機物質不穩定釋出 DOC，但整體趨勢顯示 DOC 之去除效率，這也間接代表地下水中之污染物受到去除。最後，本團隊為有利 111 年度綠能設備能夠有效結合光纖光催化系統，故先利用小規模太陽能板與一般蓄電池搭配三組 50 W LED 燈源進行先期測試，結果經過試驗與數據試算後，太陽能綠能系統搭配 LED 燈進行之測試可以提供光催化系統所需要之自主電源，主因是 LED 為省電且具有長時間發光效率的燈源種類，相當適合應用於長時間處理之污染場址，在配合之聚光系統方面，本團隊持續在進行研發中，結果在第二年度(111 年)完整報告及呈現。最後，在操作建議方面，本團隊發現在試驗過程中，出現場址之地下含水層持續釋出的浮渣物質，以及井體老舊，內部出現異物干擾，皆導致 WW3 系統井施作不順利，因此在單井或多井可以發現，不論是 WW3 之處理段與空白段，亦或是對應其下游之 OW5 觀測井，其濃度數值皆無法完善說明，本團隊將依此進行滾動式改善。



## 參考文獻

- Alcantara-Garduno, M.E., Okuda, T., Nishijima, W. and Okada, M. (2008) Ozonation of trichloroethylene in acetic acid solution with soluble and solid humic acid. *Journal of Hazardous Materials* 160(2-3), 662-667.
- Almansba, A., Kane, A., Nasrallah, N., Maachi, R., Lamaa, L., Peruchon, L., Brochier, L., Brochier, C., Béchohra, I., Amrane, A., Assadi, A. A. (2021) Innovative photocatalytic luminous textiles optimized towards water treatment: Performance evaluation of photoreactors. *Chemical Engineering Journal* 416, 129195
- Arconada, N., Duran, A., Suarez, S., Portela, R., Coronado, J.M., Sanchez, B. and Castro, Y. (2009) Synthesis and photocatalytic properties of dense and porous TiO<sub>2</sub>-anatase thin films prepared by sol-gel. *Applied Catalysis B-Environmental* 86(1-2), 1-7.
- Asiri, A. M., Al-Amoudi, M. S., Bazaid, S. A., Adam, A. A., Alamry, K.a., Anandan, S., (2014) Enhanced visible light photodegradation of water pollutant over N-, S-doped titanium dioxide and n-titanium dioxide in the presence of inorganic anions. *Journal of Saudi Chemical Society* (2014) 18, 155-163.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (1997) Public Health Statement for Trichloroethylene, <http://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=171&tid=30>.
- ATSDR, (2007) Case Studies in Environmental Medicine, TRICHLOROETHYLENE (TCE) TOXICITY, Course: SS3056
- Athanasidou, D. A., Romanos, G. Em., Falaras, P. (2016) Design and optimization of a photocatalytic reactor for water purification combining optical fiber and membrane technologies. *Chemical Engineering Journal* 305, 92-103.
- Baciacchi, R., D'Aprile, L., Innocenti, I., Massetti, F., Verginelli, I., (2014). "Development of technical guidelines for the application of in-situ chemical oxidation to groundwater remediation." *Journal of cleaner production*, Vol. 77, pp. 47-55.
- Banisharif, A., Khodadadi, A. A., Mortazavi, Y., Firooz, A. A., Beheshtian, J., Agah, S., Menbari, S., (2015) Highly active Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped TiO<sub>2</sub> photocatalyst for degradation of trichloroethylene in air under UV and visible light irradiation: Experimental and computational studies. *Applied Catalysis B: Environmental*. 165, 209–221.
- Barton, I., Matejec, V., Matousek, J. (2016) Photocatalytic activity of nanostructured TiO<sub>2</sub> coating on glass slides and optical fibers for methylene blue or methyl orange decomposition under different light excitation. *Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry* 317, 72-80.
- Behnajady, M.A., Modirshahla, N. and Hamzavi, R. (2006) Kinetic study on photocatalytic degradation of C.I. acid yellow 23 by ZnO photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 133, pp. 226–232.



- Beltran, F.J., Gonzalez, M., Rivas, J. and Acedo, B. (1999) Aqueous degradation of VOCs in the ozone combined with hydrogen peroxide or UV radiation processes. 2. Kinetic modeling. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* 34(3), 673-693.
- Bove, F., Shim, Y. and Zeitz, P. (2002) Drinking water contaminants and adverse pregnancy outcomes: A review. *Environmental Health Perspectives* 110, 61-74.
- Brown Dzubow, R., Makris, S., Siegel Scott, C., Barone Jr, S., (2010). "Early lifestage exposure and potential developmental susceptibility to tetrachloroethylene." *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology*, Vol. 89, No. 1, pp. 50-65.
- Caliman, F. A., Robu, B. M., Smaranda, C., Pavel, V. L. and Gavrilescu, M. (2011). Soil and groundwater cleanup: benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13(2): 241-268.
- Choi, H., Lim, H.N., Kim, J., Hwang, T.M. and Kang, J.W. (2002) Transport characteristics of gas phase ozone in unsaturated porous media for in-situ chemical oxidation. *Journal of Contaminant Hydrology* 57(1-2), 81-98.
- Chen, K.-C., Y.-H. Wang and Y.-C. Lu, (2011) Treatment of polluted water for reclamation using photocatalysis and constructed wetlands. *Catalysis Today*, Vol. 175, No. 1, pp. 276-282.
- Chen, H., Lin, Q., Xu, Q., Yang, Y., Shao, Z., Wang, Y., (2014) Plasma activation and atomic layer deposition of TiO<sub>2</sub> on polypropylene membranes for improved performances of lithium-ion batteries. *Journal of Membrane Science* 458, 217-224.
- Chen, C.J., Wu, C.C., Hsieh, L.T., Chen, K.C. (2019) Treatment of Trichloroethylene with Photocatalyst-Coated Optical Fiber. *Water* 2019, 11, 2391.
- Chu, J., Zhong, L., (2012) Photocatalytic Degradation of Methylene Blue with Side-glowing Optical Fiber Delivering Visible Light. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 20(5), 895-899.
- Doherty, R.E. (2000a) A history of the production and use of carbon tetrachloride, tetrachloroethylene, trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane in the United States: Part 1 - Historical background; Carbon tetrachloride and tetrachloroethylene. *Environmental Forensics* 1(2), 69-81.
- Doherty, R.E. (2000b) A history of the production and use of carbon tetrachloride, tetrachloroethylene, trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane in the United States: Part 2 - Trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane. *Environmental Forensics* 1(2), 83-93.
- Dongliang, H., Xiangju, M., Yanchun, T., Lin, Z., Fengshou, X., (2009) Synthesis of carbon-doped TiO<sub>2</sub> using porous resin and its excellent photocatalytic properties. *Chinese journal of catalysis* 30(2), 83-85.
- Elovitz, M.S. and von Gunten, U. (1999) Hydroxyl radical ozone ratios during ozonation processes. I-The R-ct concept. *Ozone-Science & Engineering* 21(3), 239-260.





- Euवानanont, C., Junin, C., Inpor, K., Limthongkul, P. and Thanachayanont, C. (2008) TiO<sub>2</sub> optical coating layers for self-cleaning applications. *Ceramics International* 34(4), 1067-1071.
- Farooq, M., Raja, I.A. and Pervez, A. (2009) Photocatalytic degradation of TCE in water using TiO<sub>2</sub> catalyst. *Solar Energy* 83(9), 1527-1533.
- Fujita, H., Izumi, J., Sagehashi, M., Fujii, T. and Sakoda, A. (2004) Decomposition of trichloroethene on ozone-adsorbed high silica zeolites. *Water Research* 38(1), 166-172.
- Goi, A. and Trapido, M. (2004) Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: The fenton reagent versus ozonation. *Environmental Technology* 25(2), 155-164.
- Goldberg, S. J., Lebowitz, M. D. and Graver, E. J. (1990) An association of human congenitalcardiac malformations and drinking water contaminants. *J Am CollCardiol* 16:155–64.
- Haapea, P. and Tuhkanen, T. (2006) Integrated treatment of PAH contaminated soil by soil washing, ozonation and biological treatment. *Journal of Hazardous Materials* 136(2), 244-250.
- Hasan, M.M., Haseeb, A.S.M.A., Saidur, R., Masjuki, H.H. and Hamdi, M. (2010) Influence of substrate and annealing temperatures on optical properties of RF-sputtered TiO<sub>2</sub> thin films. *Optical Materials*, 32(6), 690-695.
- HHS (U.S. Department of Health and Human Services) (1997) Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Trichloroethylene. U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. 1997.
- Huang, Q.-L., Huang, Y., Xiao, C.-F., You, Y.-W., Zhang, C.-X. (2017) Electrospun ultrafine fibrous PTFE-supported ZnO porous membrane with self-cleaning function for vacuum membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, 534, 73-82.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2014) Trichloroethylene. Volume 106. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol106/mono106-001.pdf>
- Ikhlaq, A., Brown, D. R. and Kasprzyk-Hordern, B. (2012) Mechanisms of catalytic ozonation on alumina and zeolites in water: Formation of hydroxyl radicals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 123–124(0), 94-106.
- Javorska, H., Tlustos, P., Komarek, M., Lestan, D., Kaliszova, R. and Szakova, J. (2009) Effect of ozonation on polychlorinated biphenyl degradation and on soil physico-chemical properties. *Journal of Hazardous Materials* 161(2-3), 1202-1207.
- Johnson, P.D., Dawson, B.V. and Goldberg, S.J. (1998) Cardiac teratogenicity of trichloroethylene metabolites. *Journal of the American College of Cardiology* 32(2), 540-545.



- Joo, H., Jeong, H., Jeon, M. and Moon I., (2003) The use of plastic optical fibers in photocatalysis of trichloroethylene. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 79, 93-101.
- Jinyu, C. and Lei, Z., (2012) Photocatalytic Degradation of Methylene Blue with Side-glowing Optical Fiber Delivering Visible Light. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(5), 895-899.
- Jia Z., Hong R. (2021) Anticorrosive and photocatalytic properties research of epoxy-silica organic-inorganic coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 622, 126647.
- Joo, J.C., Ahn, C.H., Jang, D.G., Yoon, Y.H., Kim, J.K., Campos, L. and Ahn, H. (2013) Photocatalytic degradation of trichloroethylene in aqueous phase using nano-ZnO/Laponite composites. *Journal of Hazardous Materials*, 263, 2, 569-574.
- Jung, J., Yoon, J.H., Chung, H.H. and Lee, M.J. (2003) Comparative study of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> effects on radiation treatment of TCE and PCE. *Chemosphere* 51(9), 881-885.
- Köppel, C., Lanz, H.J., Ibe, K., (1988). "Acute trichloroethylene poisoning with additional ingestion of ethanol—concentrations of trichloroethylene and its metabolites during hyperventilation therapy." *Intensive Care Medicine*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-76.
- Khan, J., Ilyas, S., Akram, B., Ahmad, K., Hafeez, M., Siddiq, M., & Ashraf, M. A. (2018). ZnO/NiO coated multi-walled carbon nanotubes for textile dyes degradation. *Arabian journal of chemistry*, 11(6), 880-896.
- Kim, S.J., Park, S.D., Jeong, Y.H., (1999) Homogeneous precipitation of TiO<sub>2</sub> ultrafine powders from aqueous TiOCl<sub>2</sub> solution. *J. Am. Ceram. Soc.*, 82, 927.
- Kim, J. and Choi, H. (2002) Modeling in situ ozonation for the remediation of nonvolatile PAH-contaminated unsaturated soils. *Journal of Contaminant Hydrology*. 55(3-4), 261-285.
- Kong, S.H., Kwon, C.I. and Kim, M.H. (2003) Ozone kinetics and diesel decomposition by ozonation in groundwater. *Korean Journal of Chemical Engineering* 20(2), 293-299.
- Krishnakumar, B. and Swaminathan, M. (2011) Influence of operational parameters on photocatalytic degradation of a genotoxic azo dye Acid Violet 7 in aqueous ZnO suspensions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 81: 739-744.
- Kim, S., Kim, M., Lim, S. K., Park, Y. (2017) Titania-coated plastic optical fiber fabrics for remote photocatalytic degradation of aqueous pollutants. *Journal of*
- Linek, V., Sinkule, J. and Janda, V. (1998) Design of packed aeration towers to strip volatile organic contaminants from water. *Water Research* 32(4), 1264-1270.
- Liu, X., Chen, Q., Lv, L., Feng, X., Meng, X. (2015) Preparation of transparent PVA/TiO<sub>2</sub> nanocomposite films with enhanced visible-light photocatalytic activity, *Catalysis Communications*, 58, 30-33.



- Lin, L., Wang, H., Luo, H., Xu, P. (2015) Enhanced photocatalysis using side-glowing optical fibers coated with Fe-doped TiO<sub>2</sub> nanocomposite thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 307-308, 88-98.
- Lin, L., Wang, H., Jiang, W., Mkaouer, A.R., Xu, P. (2017) Comparison study on photocatalytic oxidation of pharmaceuticals by TiO<sub>2</sub>-Fe and TiO<sub>2</sub>-reduced graphene oxide nanocomposites immobilized on optical fibers. *Journal of Hazardous Materials*. 333, 162-168.
- Li, C., Sun, Z., Ma, R., Xue, Y., Zheng, S. (2017) Fluorine doped anatase TiO<sub>2</sub> with exposed reactive(001) facets supported on porous diatomite for enhanced visible-light photocatalytic activity, *Microporous and Mesoporous Materials*, 243, 281-290.
- Liu, Y., Zhang, R., Sun, Z., Shen, Q., Li, Y., Wang, Y., Xia, S., Zhao, J., Wang, X., (2021) Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate recovered from phosphorus-rich wastewater. *Environmental Pollution* 272, 115978.
- Lopes, M.L., Delgado, A.G., Guo, Y., Dahlen, P., Westerhoff, P. (2018) Optical fiber-mediated photosynthesis for enhanced subsurface oxygen delivery. *Chemosphere*. 195, 742-748.
- Ma, C.M., Ku, Y., Wang, W. and Jeng, F.T. (2008) A new optical fiber reactor for the photocatalytic degradation of gaseous organic contaminants. *Reaction Kinetics And Catalysis Letters* 94(2), 199-206.
- Masten, S.J. and Davies, S.H.R. (1997) Efficacy of in-situ ozonation for the remediation of PAH contaminated soils. *Journal of Contaminant Hydrology* 28(4), 327-335.
- Mitroova, Z., Koneracká, M., Tomašovičová, N., Timko, M., Jadżyn, J., Vávra, I. Éber, N., Fodor-Csorba, K., Tóth-Katona, T., Vajda, A. and Kopčanský, P. (2010). Structural transitions in nematic liquid crystals doped with magnetite functionalized single walled carbon nanotubes. *Physics Procedia*, 9, 41-44.
- Mohseni, M. (2005) Gas phase trichloroethylene (TCE) photooxidation and byproduct formation: photolysis vs. titania/silica based photocatalysis. *Chemosphere* 59(3), 335-342.
- Moran, M.J., Zogorski, J.S. and Squillace, P.J. (2007) Chlorinated solvents in groundwater of the United States. *Environmental Science & Technology* 41(1), 74-81.
- Mohapatra, D.P., Brar, S.K., Daghrir, R., Tyagi, R.D., Picard, P., Surampalli, R.Y., Drogui, P., (2014) Photocatalytic degradation of carbamazepine in wastewater by using a new class of whey-stabilized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> and ZnO. *Science of the Total Environment* 485-486, 263-269.
- National Academy of Sciences (2006) Assessing the Human Health Risks of Trichloroethylene.  
[http://www.epa.gov/region7/cleanup/chicago\\_heights/pdf/ar/000040393284.pdf](http://www.epa.gov/region7/cleanup/chicago_heights/pdf/ar/000040393284.pdf)



- National Research Council (2005) Contaminants in the Subsurface, Source Zone Assessment and Remediation, Committee on Source Removal of Contaminants in the Subsurface, National Research Council, Washington, DC.
- Nguyen, T.-V. and Wu, J.C.S. (2008) Photoreduction of CO<sub>2</sub> in an optical-fiber photoreactor: Effects of metals addition and catalyst carrier. *Applied Catalysis A-General* 335(1), 112-120.
- Nguyen, T.-V., Wu, J.C.S. and Chiou, C.-H. (2008) Photoreduction of CO<sub>2</sub> over Ruthenium dye-sensitized TiO<sub>2</sub>-based catalysts under concentrated natural sunlight. *Catalysis Communications* 9(10), 2073-2076.
- Nishikiori, H., Tagahara, M., Mukoyama, L. and Fujii, T. (2010) Photocatalytic degradation of dichloroacetyl chloride adsorbed on TiO<sub>2</sub>. *Research on Chemical Intermediates* 36(8), 947-957.
- Ola, O., Maroto-Valer, M., Liu, D., Mackintosh, S., Lee, C.-W. and Wu, J.C.S. (2012) Performance comparison of CO<sub>2</sub> conversion in slurry and monolith photoreactors using Pd and Rh-TiO<sub>2</sub> catalyst under ultraviolet irradiation. *Applied Catalysis B-Environmental* 126, 172-179.
- O'Mahony, M.M., Dobson, A.D.W., Barnes, J.D. and Singleton, I. (2006) The use of ozone in the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soil. *Chemosphere* 63(2), 307-314.
- Ooka, C., Iida, K., Harada, M., Hirano, K. and Nishi, Y. (2009) Prevention of photocatalytic deterioration of resins using TiO<sub>2</sub> pillared fluoromica. *Applied Clay Science*, 42, pp. 363-367.
- Parshetti, G.K. and Doong, R.-a. (2011) Synergistic effect of nickel ions on the coupled dechlorination of trichloroethylene and 2,4-dichlorophenol by Fe/TiO<sub>2</sub> nanocomposites in the presence of UV light under anoxic conditions. *Water Research* 45(14), 4198-4210.
- Paredesa, L., Murgolob, S., Dzinunc, d, H., Dzarfan Othmanc, M.H., Ismailc, A.F., Carballaa,, M., Mascolob, G. (2019) Application of immobilized TiO<sub>2</sub> on PVDF dual layer hollow fibre membrane to improve the photocatalytic removal of pharmaceuticals in different water matrices. *Applied Catalysis B: Environmental*. 240, 9-18.
- Puddu, V., Choi, H., Dionysiou, D.D. and Puma, G.L. (2010) TiO<sub>2</sub> photocatalyst for indoor air remediation: Influence of crystallinity, crystal phase, and UV radiation intensity on trichloroethylene degradation. *Applied Catalysis B-Environmental* 94(3-4), 211-218.
- Pozan, G.S. and Kambur, A. (2014) Significant enhancement of photocatalytic activity over bifunctional ZnO–TiO<sub>2</sub> catalysts for 4-chlorophenol degradation. *Chemosphere* 105, 152-159.
- Rashid, M.M. and Sato, C. (2011) Photolysis, Sonolysis, and Photosonolysis of Trichloroethane (TCA), Trichloroethylene (TCE), and Tetrachloroethylene (PCE) Without Catalyst. *Water Air And Soil Pollution* 216(1-4), 429-440.





- Rashid, M.M. and Sato, C. (2012) Degradation of Trichloroethylene and Tetrachloroethylene in Simulated Groundwater in a Flow-Through Photosono Reactor. *Journal of Environmental Engineering-Asce* 138(12), 1179-1185.
- Ranc, B., Faure, P., Croze, V., Simonnot, M., (2016). "Selection of oxidant doses for in situ chemical oxidation of soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 312, pp. 280-297.
- Rayaroth, M.P., Oh, D., Lee, C.-S., Kang, Y.-G., Chang, Y.-S., (2020). "In situ chemical oxidation of contaminated groundwater using a sulfidized nanoscale zerovalent iron–persulfate system: Insights from a box-type study." *Chemosphere*, Vol. 257, No. Issue, pp. 127117.
- Ren, M., Frimmel, F. H., Braun, G. A. (2015) Multi-cycle photocatalytic degradation of bezafibrate by a castpolyvinyl alcohol/titanium dioxide (PVA/TiO<sub>2</sub>) hybrid film, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 400, 42-48.
- Rosenfeldt, E.J. and Linden, K.G. (2007) The R<sub>OH,UV</sub> Concept to Characterize and the Model UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Process in Natural Waters. *Environmental Science & Technology* 41(7), 2548-2553.
- Rowe, B.L., Tocalino, P.L., Moran, M.J., Zogorski, J.S. and Price, C.V. (2007) Occurrence and potential human-health relevance of volatile organic compounds in drinking water from domestic wells in the United States. *Environmental Health Perspectives* 115(11), 1539-1546.
- Rodrigues, R., Betelu, S., Colombano, S., Tzedakis, T., Masselot, G., Ignatiadis, I., (2020). In Situ Chemical Reduction of Chlorinated Organic Compounds, *Environmental Soil Remediation and Rehabilitation*. Springer, pp. 283-398.
- Roy, J.S., Morency, S., Dugas, G., Messaddeq, Y. (2021) Development of an extremely concentrated solar energy delivery system using silica optical fiber bundle for deployment of solar energy: Daylighting to photocatalytic wastewater treatment. *Solar Energy* 214 (2021) 93–100.
- Saien, J. and Khezrianjoo, S. (2008) Degradation of the fungicide carbendazim in aqueous solutions with UV/TiO<sub>2</sub> process; optimization, kinetics and toxicity studies. *Journal of Hazardous Materials*, 157: 269-276.
- Saillehfait AM, Langonne I, Sabate JP. (1995) Developmental toxicity of trichloroethylene, tetrachloroethylene and four of their metabolites in rat wholeembryo culture. *Arch Toxicol* 70:71–82.
- San Vicente, G., Morales, A., German, N., Suarez, S. and Sanchez, B. (2012) SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Antireflective Coatings With Photocatalytic Properties Prepared by Sol-Gel for Solar Glass Covers. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme* 134(4).
- Seyama, T., Adachi, K. and Yamazaki, S. (2012) Kinetics of photocatalytic degradation of trichloroethylene in aqueous colloidal solutions of TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> nanoparticles. *Journal Of Photochemistry And Photobiology A-Chemistry* 249, 15-20.



- Sheydaei, M., Ayoubi, B., (2021) Nitrate reduction through the visible-light photoelectrocatalysis and photoelectrocatalysis/reverse osmosis processes: Assessment of graphene/Ag/N-TiO<sub>2</sub> nanocomposite. *Journal of Water Process Engineering* 39 (2021) 101856.
- Sonnenfeld N. (1998) Volatile Organic Compounds in Drinking Water and Adverse Pregnancy Outcomes. Interim Report. United States Marine Corps Base Camp Le Jeune, North Carolina. Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Song, Y., Zhang, J., Yang, H., Xu, S., Jiang, L., Dan, Y. (2014) Preparation and visible light-induced photo-catalytic activity of H-PVA/TiO<sub>2</sub> composite loaded on glass via sol-gel method, *Applied Surface Science*, 292, 978-985.
- Song, Y., Ling, L., Westerhoff, P., Shang, C. (2021) Evanescent waves modulate energy efficiency of photocatalysis within TiO<sub>2</sub> coated optical fibers illuminated using LEDs. *Nat Commun* 12, 4101 (2021).
- Suarez, S., Arconada, N., Castro, Y., Coronado, J.M., Portela, R., Duran, A. and Sanchez, B. (2011) Photocatalytic degradation of TCE in dry and wet air conditions with TiO<sub>2</sub> porous thin films. *Applied Catalysis B-Environmental* 108(1-2), 14-21.
- SHIBATA, T., HAMADA, N., KIMOTO, K., SAWADA, T., SAWADA, T., KUMADA, H., UMEMOTO, T. and TOYODA, M. (2007) Antifungal effect of acrylic resin containing apatite-coated TiO<sub>2</sub> photocatalyst. *Dental Materials Journal*, 26(3), pp. 437-444.
- Tashiro, K., Tanimura, T., Yamazaki, S., (2019) Photocatalytic degradation of gaseous trichloroethylene on porous titanium dioxide pellets modified with copper(II) under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*. 377, 228–235.
- Teixeira, S., Magalhães, B., Martins, P. M., Kühn, K., Soler, L., Lanceros-Méndez, S., Cuniberti, G., (2018) Reusable Photocatalytic Optical Fibers for Underground, Deep-Sea, and Turbid Water Remediation. *Global Challenges* 2018, 2, 1700124.
- Tugaoen, H.O., Segura, S.G., Hristovski, K., Westerhoff, P. (2018) Compact light-emitting diode optical fiber immobilized TiO<sub>2</sub> reactor for photocatalytic water treatment. *Science of the Total Environment*. 613-614, 1331-1338.
- Umadevi, M., Parimaladevi, R., Sangari, M. (2014) Synthesis, characterization and photocatalytic activity of fluorine doped TiO<sub>2</sub> nanoflakes synthesized using solid state reaction method, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 120, 365-369.
- USEPA (2001) Sources, Emission, and Exposure for Trichloroethylene and Related Chemicals, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Vasanth Kumar, K., Porkodi, K. and Selvaganapathi, A. (2007) Constrain in solving Langmuir-Hinshelwood kinetic expression for the photocatalytic degradation of Auramine O aqueous solutions by ZnO catalyst. *Dyes and Pigments*, 75: 246-249.



- Volhard, M.-F., Christ, J. J., Blank, L. M., Jüstel, T. (2021) Seawater activated  $\text{TiO}_2$  photocatalyst for degradation of organic compounds. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 16,100251.
- Wang, T.M., Zheng, S.K., Hao, W.C. and Wang, C. (2002) Studies on photocatalytic activity and transmittance spectra of  $\text{TiO}_2$  thin films prepared by r.f. magnetron sputtering method. *Surface and Coatings Technology*, 155(2–3), 141-145.
- Wu, C., Yue, Y., Deng X., Hua, W., Gao, Z., (2004), Investigation on the synergetic effect between anatase and rutile nanoparticles in gas-phase photocatalytic oxidations, *Catalysis Today*, 93-95, 863.
- Wert, E.C., Rosario-Ortiz, F.L., Drury, D.D. and Snyder, S.A. (2007) Formation of oxidation byproducts from ozonation of wastewater. *Water Research* 41(7), 1481-1490.
- Wu, J.C.S., Wu, T.-H., Chu, T., Huang, H. and Tsai, D. (2008) Application of optical-fiber photoreactor for  $\text{CO}_2$  photocatalytic reduction. *Topics in Catalysis* 47(3-4), 131-136.
- Wang, Z.-Y., Chou, H.-C., Wu, J.C.S., Tsai, D.P. and Mul, G. (2010)  $\text{CO}_2$  photoreduction using  $\text{NiO}/\text{InTaO}_4$  in optical-fiber reactor for renewable energy. *Applied Catalysis A-General* 380(1-2), 172-177.
- Welderfael, T., Yadav, O. P., Taddesse, A. M. and Kaushal, J. (2013). Synthesis, characterization and photocatalytic activities of Ag-N-codoped  $\text{ZnO}$  nanoparticles for degradation of methyl red. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia* 27(2): 221-232.
- Wikipedia, Trichloroethylene. <http://en.wikipedia.org/wiki/Trichloroethylene>, Retrieved October 17, 2014.
- Wu, C. (2014) Facile one-step synthesis of N-doped  $\text{ZnO}$  micropolyhedrons for efficient photocatalytic degradation of formaldehyde under visible-light irradiation. *Applied Surface Science* 319, 237-243.
- Xie, Y., Zhang, S., Pan, B., Lv, L. and Zhang, W. (2011) Effect of Cds distribution on the photocatalytic performance of resin-CdS nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 174, pp. 351-356.
- Xiao, S., Zhao, L., Leng, X., Lang, X., Lian, J., (2014) Synthesis of amorphous  $\text{TiO}_2$  modified  $\text{ZnO}$  nanorod film with enhanced photocatalytic properties. *Applied Surface Science*, 299, 97-104.
- Wang, X., Hu, C., An, H., Zhu, D., Zhong, Y., Wang, D., Tang, C., Sun, L., Zhou, H. (2021) Photocatalytic removal of MB and hydrogen evolution in water by  $(\text{Sr}_{0.6}\text{Bi}_{0.305})_2\text{Bi}_2\text{O}_7/\text{TiO}_2$  heterostructures under visible-light irradiation. *Applied Surface Science* 554,148920.
- Xu, J., Ao, Y., Fu, D., Lin, J., Lin, Y., Shen, X., Yuan, C., Yin, Z., (2008) Photocatalytic activity on  $\text{TiO}_2$ -coated side-glowing optical fiber reactor under solar light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 199, 165–169.



- Yang, L., Yu, L.E. and Ray, M.B. (2008) Degradation of paracetamol in aqueous solutions by TiO<sub>2</sub> photocatalysis. *Water Research*, 42, pp. 3480–3488.
- Yang, H., Li, G., An, T., Gao, Y. and Fu, J. (2010) Photocatalytic degradation kinetics and mechanism of environmental pharmaceuticals in aqueous suspension of TiO<sub>2</sub>: a case of sulfa drugs. *Catalysis Today*, 153, pp. 200–207.
- Yasunaga, N. and Hirotsuji, J. (2008) Efficient decomposition of trichloroethylene (TCE) in groundwater by ozone-hydrogen peroxide treatment. *Ozone-Science & Engineering* 30(2), 127-135.
- Yang, Z.-H., Verpoort, F., Dong, C.D., Chen, C.W., Chen, S., Kao, C.-M., (2020). "Remediation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using optimized in situ chemical oxidation system: Batch and column studies." *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.138, pp.18-26.
- Yeung, K.L., Leung, W.K., Yao, N. and Cao, S. (2009) Reactivity and antimicrobial properties of nanostructured titanium dioxide. *Catalysis Today* 143(3-4), 218-224.
- Yokosuka, Y., Oki, K., Nishikiori, H., Tatsumi, Y., Tanaka, N. and Fujii, T. (2009) Photocatalytic degradation of trichloroethylene using N-doped TiO<sub>2</sub> prepared by a simple sol-gel process. *Research on Chemical Intermediates* 35(1), 43-53.
- Yu, Y.-H., Su, I.H. and Wu, J.C.S. (2010) Photocatalytic reduction of NO pollutant using an optical-fibre photoreactor at room temperature. *Environmental Technology* 31(13), 1449-1458.
- Zayed, M. F., Eisa, W. H., Anis, B. A., (2021) Gallic acid-assisted growth of cuprous oxide within polyvinyl alcohol; a separable catalyst for oxidative and reductive degradation of water pollutants. *Journal of Cleaner Production* 279, 123826.
- Zhao, C., M. Pelaez, X. Duan, H. Deng, K. O'Shea, D. Fatta-Kassinos and D. D. Dionysiou, (2013) Role of pH on photolytic and photocatalytic degradation of antibiotic oxytetracycline in aqueous solution under visible/solar light: Kinetics and mechanism studies. *Applied Catalysis B: Environmental*, 134–135, 0, 83-92.
- Zhu, R.S., Che, S.A., Liu, X.B., Lin, S.X., Xu, G.L. and Ouyang, F. (2014) A novel fluidized-bed-optical-fibers photocatalytic reactor (FBOFPR) and its performance. *Applied Catalysis A-General* 471, 136-141.
- Zhong, N., Chen, M., Luo, Y., Wang, Z., Xin, X., Rittmann, B. E. (2019) A novel photocatalytic optical hollow-fiber with high photocatalytic activity for enhancement of 4-chlorophenol degradation. *Chemical Engineering Journal* 355, 731-739.
- Zouboulis, A.I., Moussas, P.A., Psaltou, S.G., (2019). "Groundwater and soil pollution: bioremediation.
- 四氯乙炔，維基百科，自由的百科全書，檢索於 2022 年 01 月 09 日，  
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9B%E6%B0%AF%E4%B9%99%E7%83%AF>





三氯乙烯，維基百科，自由的百科全書，檢索於 2022 年 01 月 09 日，  
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E6%B0%AF%E4%B9%99%E7%83%AF>

王鴻博，2007，新型分散性奈米鐵微粒在土壤介質中傳輸之現地模場研究，  
EPA-96-04-005，行政院環境保護署補助計畫。

列管場址查詢系統，行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會，  
<http://sgw.epa.gov.tw/public/default.aspx>，查詢日期：2022 年 01 月 01 日。

統計資料庫查詢系統，財政部關稅總局海關進出口統計，  
[https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30\\_LIST](https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30_LIST)，查詢日期：2022 年 01 月 01 日。

地下水污染管制標準，2013 年 12 月 18 日行政院環境保護署環署土字第  
1020109478 號令修正發布。

林明志，黃文鑑，2010，應用光催化程序分解水相微量氯化有機物之研究，中華  
民國環境工程學會 2011 土壤與地下水研討會，屏東。

林建宏，陳景祥，2013，以混練法製備 ABS 樹脂/奈米二氧化鈦複合材料之研究，  
碩士論文，中國文化大學，台北。

高志明，2006，利用整治列車系統處理受 DNAPL 污染之地下水，  
EPA-95-U1U4-001，行政院環境保護署計畫。

高志明，2009，以乳化型釋氮基質之整治牆技術處理受含氯溶劑污染之地下水，  
EPA-98-U1U4-04-001，行政院環境保護署補助計畫。

高志明，2010，以乳化型釋氮基質之整治牆技術處理受含氯溶劑污染之地下水，  
EPA-98-U1U4-04-001，行政院環境保護署補助計畫。

涂秀娟，2007，奈米級零價鐵懸浮液之應用性探討：不同環境氣氛下對於水溶液中  
TCE 之降解反應途徑與成效、在土體中之傳輸現象及菌落數之影響，碩士  
論文，國立中山大學，高雄。

屏東縣政府環境保護局，2018 年 12 月，屏東縣地下水受含氯污染使用限制地區  
應變必要措施之阻絕評估計畫，期末報告

張書奇，楊書豪，2012，以釋氧乳化液進行地下水中三氯乙烯移除之研究，中華  
民國環境工程學會 2012 土壤與地下水研討會，桃園。

張文華，鄭大偉，吳傳威，2005，以飛灰製成無機聚合樹脂應用於混凝土補強之  
可行性研究，第十屆海峽兩岸環境保護學術研討會，台中。

陳志榮，2003，界面活性劑淋洗受三氯乙烯污染地下水之研究，碩士論文，國立  
屏東科技大學，屏東。

陳貞夙，2004，應用於生醫檢測之光波導氧化物薄膜製備及其光學常數之調控，  
工業技術研究院委託學術機構研究計畫期末報告。



黃任賢，黃瑞雄，李秋萍，2013，高折射率矽樹脂/二氧化鈦複合材料於發光二極體之應用，台灣中油綠能科技研究所，高雄。

楊金鐘，2007，綠色奈米技術之開發及應用：環境友善性奈米級零價鐵模擬現地整治土壤/地下水污染技術開發及應用，EPA-96-U1U1-02-102，行政院環境保護署補助計畫。

鄭智鴻，2006，量身訂做的二氧化鈦光觸媒之合成及應用，碩士論文，國立成功大學，台南。

劉紹文，2004，生物反應牆祛除地下水中三氯乙烯和氯乙烯之研究，碩士論文，國立中央大學，中壢。

劉嘉庭，郭育嘉，邱漢瑜，何曉蓉，高志明，2011，利用乳化型釋碳基質提升三氯乙烯污染地下水之生物降解效率，現地模場試驗，中華民國環境工程學會2011土壤與地下水研討會，台南。

簡華逸，2010，應用現地生物整治技術處理受三氯乙烯污染之地下水，博士論文，國立中山大學，高雄。