



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

以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性

海洋生物復育環保磚之研究

期末報告(定稿)

主辦單位：  行政院環境保護署
專案執行單位： 中華醫事科技大學／環境與安全衛生工程系
專案主持人： 郭益銘
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 3 月 印製



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究
主持人：郭益銘
期末報告(定稿)



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告 審查意見回復對照表

計畫年度	110年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它		主持人：郭益銘 NO：E6
計畫名稱	以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 計畫的執行狀況、研究流程及方法已於報告中具體說明。 2. 本計畫的後續執行工作項目及內容已在 P.60 中說明。 3. 本報告中已說明預定的工作項目與已完成的項目，且計畫執行進度與原預定進度相符，執行進度並無落後。 4. 本報告書中所呈現的研究內容（& 成果）與原計畫目的相符。 (1) 整體而言，本計畫的研究成果符合原計畫書的預期。 (2) 報告中說明：「...污染土壤...送至磚窯廠代為處理...」，此污染土壤的處理（再利用）方式已有實廠執行數年，且是目前國內實際污染土壤離場處理（再利用）的實務作為，也累積了豐富的實場經驗，建議將其實務成效加以討論。 (3) 製磚產品的吸水率需在15%以下 (CNS)（表5.6,符合，且頗佳），但本研究成果的成效之一是 B-3的吸水率為60%（因為用途不同，高孔隙反而是本產品(B-3)的特色），但 B-3的強度（或是 B-2)是否適當？建議討論。 5. 依據本計畫的研究成果所提出的討論與建議合理，研究成果的實務可行性則尚待評估。 6. 本報告書已說明本計畫的學術產出（研討會論文...等），也因為有研究人員參與，已達人才培育的目標。		1. 謝謝委員指教。 2. 謝謝委員指教。 3. 謝謝委員指教。 4. (1)謝謝委員指教。 (2)本次所配合處理之磚窯業者已經完成水庫淤泥等廢棄再利用之申請。 (3)由於目前對於珊瑚復育盤並無強度規範，因此本次僅以類似燒結製程中之 CNS382標準做為參考，實際仍需觀察投入後珊瑚復育狀況。 5. 謝謝委員指教。 6. 謝謝委員指教。 7.本計畫屬於可行性基礎研究，暫無規劃專利與技術移轉，未來可再評估朝此技術發展。 8. 謝謝委員指教。	



7. 報告中未說明本計畫的專利申請與技術轉移的成果。 8. 本計畫的執行對國內土水產業與研發有其效益。	
委員二 1. 目前已有許多紅磚製成之油污染土壤熱處理場，但土壤經熱處理後雖已無油污染，但土壤性質已經改變，故有必要開發循環再利用這些土壤之產品。 2. 該研究將油品污染土壤與不同配比之製磚原料(黏土、砂土)及碎玻璃共同混拌製磚，藉由紅磚燒結程序燒製海洋復育環保磚之燒製，研究成果已經確認證再生環保復育磚之置放於海水中無溶出污染與結構穩定性。 3. 建議補充魚類躲藏空間復育磚為三角形磚體，珊瑚復育磚為圓柱狀貫通式體之相關資訊(文獻)。以使本開發產品更具實用價值。 4. 請補充以吸水率做為結構內孔隙及合珊瑚附著及扎根生長指標之相關資訊(文獻)，以使本開發產品更具實用價值。	1. 謝謝委員指教，已針對委員意見進行修正。 2. 謝謝委員指教，已針對委員意見進行修正。 3. 請參考期末報告 p.19 人工魚礁手冊，而其中有提到，廢棄軍艦沉入海洋後其中空間可有利魚類躲藏。 4. 請參考 p.19 香港大學太古海洋研究所，3D 列印陶瓷材料人工礁盤，由於陶瓷屬多孔性材質，本研究利用廢玻璃之燒結後特性製成相近之結構以取代陶土之使用。
委員三 1. 本計畫已完成預訂的試驗項目且獲得預期成果。 2. 本案與廠商合作共同開發生物環保磚且有實際產品產出，建議研擬擴大應用的可行性。	1. 謝謝委員指教。 2. 後續將對可行性再進行探討。
委員四 1. 中英文摘要過於簡略，建議在摘要部分應明確說明研究目的、內容、結果的簡述，及後續可推廣的應用策略。 2. 請彙整整體實驗的影響因子、操作參數、應用設計的主要條件，作為本研究的主要成果產出，並可作為後續合作或模廠實驗的基本資料。 3. 建議提供經濟效益評估。 4. 跨團隊合作是否，申請技術轉移？	1. 謝謝委員指教，已經針對建議做修正。 2. 謝謝委員指教，相關內容請參考六、結論。 3. 謝謝委員指教，相關經濟效益評估請參考結案報告中六、結論。 4. 謝謝委員指教，本計畫屬於可行性基礎研究，暫無規劃專利與技術移轉，未來應可再評估朝此技術發展。

**委員五**

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. TCLP 基本上是判定(事業)廢棄物是否為有害廢棄物之標準，應用於資源化產物之論述宜小心。2. 此資源化產物應用於海洋生物後育，建議團隊進一步討論海水基質對污染物質溶出之影響。3. 建議可進行小規模之現地試驗。 | <ol style="list-style-type: none">1. 謝謝委員指教。2. 由於目前人工魚礁並無明確規範，而在海污法及海拋廢棄物中，無明確說明檢測規範，因此僅利用 TCLP 先於實驗室測試磚體是否會有污染物質之溶出。3. 由於海水浸泡及現試驗需較長時間，將評估討論後進行。 |
|--|---|



一、專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究型 ☐ 模場型	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他					
申請機構系所		中華醫事科技大學/環境與安全衛生工程系					
機構地址		台南市仁德區文華一街89號					
專案主持人		郭益銘		職等／職稱		教授	
協同主持人				職等／職稱			
專案名稱	中文	以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究					
	英文	Sintering of oil-polluted soil and bottom mud into porous marine-ecological-restoration bricks					
	關鍵字	recovery, brick, ecological-restoration, sintering, total petroleum hydrocarbons					
執行期程		自民國 110 年 03 月 19 日起 至民國 111 年 02 月 28 日止					
專案主持人		姓名：郭益銘		E-mail： kuoyiming@gmail.com		專線：06-2674567 #860 手機：0910-980-521	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)		專案預估經費		第一年金額		編列說明	
		1.	人事費用	192,880		1.計畫主持人8,000元 x11.61月=92,880元 (工作項目：計畫流程、最佳實驗參數確認及執行進度確認) 2.臨時人員薪資625小時 x 160元/小時*1人=100,000元 (工作項目：協助執行計畫內容與其他雜項事務協助) (1~5項相加之50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	--		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	259,120		1.實驗室消耗性器材：塑膠樣品瓶、玻璃器皿、壓克力容器、擦拭紙、秤量紙等。 2.分析用氣體：乙炔、笑氣等。 3.實驗用溶液與藥品：金屬分析用標準品、TCLP 萃取溶液、硝酸、鹽酸等。	
		4.	其它研究相關費用	--		(含差旅與租賃費用)	
		5.	雜支費用	15,000		資料影印(含期中期末報告)、辦公室事務文具用品、碳粉匣、郵資等	



				(1~6項相加之5%為限)
	6.	行政管理費	33,000	總申請經費*7% (1~5項相加之10%為限) (1~5項相加之10%為限)
	7.	自籌款	--	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助金額(1~6項)		500,000	總金額：500,000
	計畫總金額(1~7項)		500,000	總金額：500,000

專案主持人 (簽名及蓋章)：_____ 日期：



二、研究成果摘要

(一)中文部分：

近年來土壤污染場址整治多以現地處理為主，其耗時甚長，若以焚化處理則有二次污染之虞。本研究以磚窯實廠之高溫燒製程序，高溫分解油品污染土壤之有機物，不須添加額外能源。

本研究進行油品污染土壤與製磚原料(黏土)混拌，燒結成海洋復育環保磚，探討不同配比燒製出環保磚之強度及再利用性，並針對油品污染土壤及燒製產出之海洋復育環保磚進行金屬含量、毒性溶出測試及總碳氫化合物(TPH)分析，藉由分析可了解其藉由紅磚燒製技術可達到之處理效果。

經實驗結果顯示，以紅磚燒製技術處理油品污染土壤可大幅去除TPH，土壤TPH原污染濃度為3,068 mg/kg，經燒結紅磚之TPH含量均低於25 mg/kg，且其品質均可達到CNS 382之三種磚標準，以油品污染土壤添加15%其強度與吸水率表現最佳(抗壓強度495 kgf/cm²，吸水率2.81%)，抗壓強度為法規規範之3倍，吸水率標準為之1/5，透過28天之海水浸泡實驗後，抗壓強度並無顯著變化，顯示該磚體並未因海水浸泡導致磚體結構強度降解，而針對海水水質亦無明顯變化，顯示該海水環境並無受到污染之虞。

針對試驗磚、實廠磚及珊瑚復育盤對金屬含量分析後可以發現其重金屬含量皆為接近偵測極限，顯示其對海洋環境影響甚微，故可考慮進一步較大規模實驗，以推廣其進一步使用範疇。



二、研究成果摘要

(二)英文部分：

In Taiwan, the transportation vehicles are mainly fueled by gasoline. In 2020, there are 2,478 gas stations and most of them are old ones and have a high risk of oil leaching. Among them, 51 gas stations were declared as pollution remediation sites. Recently, the remediation technologies for the pollution sites are usually in-situ ones. These remediation processes consume much time and have limited effect. Incineration has high operation cost and high potential of secondary pollution. In this study, a sintering process in brick-kiln will be conducted to decompose pollutants in soil without adding extra energy.

We mixed polluted oil, clay, and cullet with different ratios and sinter them into porous ecological-restoration bricks. The physical strength and TPH level of bricks were measured to evaluate the effect of sintering process. In addition, the feasibility of the sintering process to treat polluted soil will also be evaluated. In addition, sintered bricks will be immersed in seawater to evaluate their leaching behaviors and physical property in the ocean to ensure the safety of the ecological-restoration bricks.

The results show that the sintering process greatly reduced the TPH levels from 3,068 mg/kg to 25 mg/kg. The quality of sintered product with a soil addition percentage between 5% to 20% met the criteria of CNS 382. Among them, the sintered brick with 15% of soil addition had the optimal physical property (compression strength = 495 kg/cm², water absorption rate = 2.81%) which were much better than the regulated standard. After immersing in seawater for 28-day, there was not any significant variation of compression strength and water quality.

According to the analysis results of ecological-restoration bricks, the metal leaching concentrations were near the detection limits, indicating that the influence on the sea was slight. Therefore, the experiments for a large scale can be taken into consideration.



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

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01月10日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究型 ☐ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	中華醫事科技大學/ 環境與安全衛生工程系	專案主持人	郭益銘
專案名稱	以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

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

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後 半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出發表名稱)
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	1	0	1	100%	“以高溫燒結處理 油品污染土壤可行 性之評估”已投稿 於國內學報
		(2)研討會論文	1	0	1	100%	以循環技術將受油 品污染土壤轉製成 海洋復育環保磚之 研究
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0	100%	目前數據均已彙整 完畢，擬開始撰寫 SCI 論文，預計半 年內可完成撰寫。
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著(本數)						
	5.辦理學術 會議(場 數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
	6.研發改良 技術(項 數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					



項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後 半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學 術產出發表名稱)
B 人才 培育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士						
		(2)博士						
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊						
		(2)跨機構團隊	1	1	1	100%	目前本團隊已與建 州窯業及琪登藝術 公司形成跨機構研 究團隊	
		(3)形成研究中心						
		(4)形成實驗室						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

(二) 產業面

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原 因或專利、技術 轉移相關詳細資 料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明				
			新型/設計				
			合計				
		申 請 中	發明				
			新型/設計				
			合計				
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數					
		授權金(仟元)					
		衍 生 利 益 金(仟 元)					
	3.技術移轉 (專利)	件數					
		授權金(仟元)					
		衍生利益金 (仟元)					
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數					
		授權金(仟元)					
		衍 生 利 益 金(仟 元)					
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)					
		(2)品種/系(件數)					



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
項目							
C 產學研合作	6.促成合作研究	件數	1	-	-	100%	目前已與建州窯業規劃科技部產學計畫提案，預計6月送件
		金額(仟元)	200		-	100%	0
	7.促成投資	件數					
		投資金額(仟元)					
	8.促成取得業界科專	件數					
		業界投資金額(仟元)					
9.其他指標(請自行命名)		(請自填)					

(三) 政策面

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



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

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)

本研究案為初步試驗研究，目前已將於本研究之初步成果撰寫並預計於11月時發表於國內研討會，共計2篇，另將研究結果投稿於國際期刊，共計1篇。

產業面(如何作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)

本研究案係結合兩間廠商共同合作，以共同開發生物復育環保磚，共計產出生物復育環保基座(魚礁)1件、珊瑚礁復育基座1件。

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、污染址管理等政策及法規研訂之參考)

本研究係針對油品污染土壤進行研究，其具有高溫裂解特性，藉由本研究技術之開發，即可將油品污染土壤送至磚窯廠代為處理，以既有之能源即可共同處理，以減少傳統之熱處理法能源消耗，且磚窯廠分布全台，於經濟效益方面對於運輸費用有大幅降低之空間，並藉由本研究之技術開發，可開創油品污染土壤之去化選擇，降低處理費用，使該污染物處理更為快速。



目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	V
一、前言.....	1
二、研究目的.....	2
三、文獻回顧.....	5
3.1 油品種類及性質	5
3.1.1 BTEX.....	6
3.1.2 甲基第三丁基醚(MTBE).....	7
3.1.3 總石油碳氫化合物	8
3.2 土壤整治技術	9
3.2.1 土壤整治熱處理技術	11
3.3 黏土-水系統	13
3.3.1 黏土之乾燥	13
3.4 紅磚應用	15
3.4.1 紅磚製造流程	15
3.4.2 紅磚之組成及影響	15
3.4.3 紅磚之燒成	16
3.4.4 紅磚品質及檢驗	17
四、研究方法與過程.....	21
4.1 研究方法	21
4.2 研究過程	28
4.3 實驗儀器	30
4.3.1 微波消化器	30
4.3.2 火焰式原子吸收光譜儀(AA).....	31
4.3.3 XRF 元素分析儀.....	32



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

4.3.4 高溫熔融爐	33
4.3.5 材料試驗機	34
4.3.6 沉水馬達	35
4.4 實驗過程	36
4.4.1 試驗磚製胚	36
4.4.2 珊瑚礁基座製胚及燒製	37
4.4.3 生物復育試驗磚之浸泡	39
五、結果與討論	41
5.1 進料物質分析	41
5.2 模具設計與製作	43
5.3 生物復育試驗磚燒製	46
5.4 珊瑚復育盤燒製	49
5.5 生物復育試驗磚分析	50
5.6 珊瑚復育盤之金屬元素分析	54
5.7 生物復育試驗磚之海水環境影響分析	56
5.8 實廠可行性驗證	58
六、結論	60
七、參考文獻	62



圖目錄

圖3-1黏土礦物含水類型示意圖	14
圖3-2黏土乾燥過程示意圖	14
圖3-3紅磚製造流程圖	15
圖3-4固相燒結之反應階段(陳宜晶，2004)	18
圖3-5 3D 列印陶盤.....	19
圖3-6無性生殖斷片固定	20
圖3-7有性生殖方式	20
圖4-1建洲窯業實廠設備照片	22
圖4-2建洲窯業實廠設備照片(續).....	23
圖4-3琪登藝術公司既有設備、產品與構想圖	24
圖4-4研究流程圖	27
圖4-5 CEM 微波消化器	30
圖4-6火焰式原子吸收光譜儀	31
圖4-7XRF 分析儀.....	32
圖4-8高溫熔融爐外觀	33
圖4-9高溫熔融爐內部構造	33
圖4-10材料試驗機	34
圖4-11試驗倉內部構造	34
圖4-12 MA AP-600沉水馬達.....	35
圖4-13OKUMA-1200L 沉水馬達.....	35
圖4-14試驗磚製胚	36
圖4-15試驗磚研磨	36
圖4-16生物復育基座之填充	37
圖4-17生物復育基座之乾燥後脫模	37
圖4-18生物復育基座	38
圖4-19試驗磚浸泡示意圖	39



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

圖4-20試驗磚之浸泡試驗	39
圖4-21試驗磚之浸泡試驗	40
圖5-1試驗磚木製模具	43
圖5-2魚礁模具組合示意圖	44
圖5-3生物復育環保磚模具	44
圖5-4珊瑚礁盤石膏臘膜	45
圖5-5珊瑚復育盤燒製。	45
圖5-6生物復育試驗磚	47
圖5-7生物復育試驗磚(續).....	48
圖5-8珊瑚復育盤	49
圖5-9實廠生物復育磚燒製成品	59
圖5-10實廠生物復育磚與珊瑚礁盤結合	59



表目錄

表3-1土壤污染管制標準	5
表 3-2NBTEX 物理化學基本特性	6
表 3-3苯與 MTBE 物化性質比較	7
表 3-4石油產物碳數及蒸餾溫度	8
表 3-5常用之土壤污染整治技術方法分類表	10
表 3-6 CNS382之磚物理性質特質	17
表4-1生物復育環保磚之混拌配比	26
表4-2珊瑚礁復育基座混拌配比	26
表5-1油品污染土壤之 TPH 分析	41
表5-2進料物質金屬元素分析(n=3)	42
表5-3試驗磚個階段材積 (n=3)(Average)	46
表5-4珊瑚礁盤吸水率	49
表5-5試驗磚之 TPH 分析(n=3)(Average)	50
表5-6試驗磚之特性分析	51
表5-7CNS382普通磚標準	51
表5-8試驗磚之金屬元素分析(n=3)	52
表5-9試驗磚之 TCLP 分析(n=2).....	53
表5-10珊瑚復育盤之金屬元素分析(n=3)	54
表5-11珊瑚復育盤之 TCLP 分析(n=2).....	55
表5-12海水浸泡後強度變化表	56
表5-13海水環境之海水監測狀況(31日)	57
表5-14實廠磚之金屬元素分析	58





一、前言

台灣主要交通工具為燃油汽機車為主，截至2020年台灣既有之加油站統計數量為13間經營實體和其他業者，總計有2,482家加油站(經濟部工業局,2021)，其中不乏早期建置後持續使用至今的老舊加油站場址，且至2021年7月，仍有38家加油站公告為控制場址或整治場址。近年來對於污染場址之整治方式多選擇現地處理之方法，包含土壤淋洗、土壤氣體抽除(SVE)、現地化學氧化(ISCO)及生物復育，而現的處理之方式耗時長，且處理效果有限，日後隱患高，若以焚化處理則為處理成本高，且有二次污染之風險存在，故目前油品污染土壤之整治技術上無低成本之技術。

另一方面，台灣早期之建築市場主要以磚砌建築為主，而近年因高樓林立，主要之建築市場改為鋼筋混凝土建築，其中最大衝擊者為磚窯業者，對於該產業已有不少同業退出市場，而紅磚市場仍需持續營運，若完全市場將影響建築成本，持續營運又可能造成生產成本提升，導致利潤下降，故近年積極開創各種廢棄物代處理之摻配技術，藉此方式進行轉型，開創新的經營模式，其中以富含高熱值，性質單純的廢棄物較為磚窯業者所接受。

綜合上述之狀況，本研究構思以磚窯業者共同處理油品污染土壤為最佳之處理管道，而近年海洋污染之狀況導致珊瑚白化現象日亦嚴重，若能將三者共同銜接，除油品污染土壤可獲得較為便捷之去化管道，亦可創造產業之處理收益，又可達到保育環境之成效，及為最佳之去化流程。故本研究將以不同配比進型油品污染土壤、製磚原料(黏土、砂土)及碎玻璃共同混拌製磚，藉由紅磚燒結程序進行海樣復育環保磚之燒製，並藉由相關分析確認燒製可行性，以認證再生環保復育磚之可行性與安全性。



二、研究目的

根據經濟部能源局全球資訊網統計資料顯示台灣目前有2,482家加油站(經濟部能源局,2020)，其中地下儲槽均有可能因為管線老舊而具有洩漏污染土壤之風險，其中已有許多場址均有整治之狀況，根據行政院環保署統計目前仍有38家加油站屬公告控制或整治場址(環保署,2021)，如何處理該類型污染為目前重要之議題。而海洋污染導致珊瑚白化現象亦日趨嚴重，故海洋生態復育亦為重要之議題。

本研究以受油污染土壤或底泥作為標的物，結合多孔性材料製作與紅磚燒製技術，將受油品污染土壤或底泥燒製成生物復育環保磚，以作為海洋生物復育之媒介，於燒製過程中不需額外能源添加，以既有燒製能源即可處理受油品污染土壤或底泥，更可進一步應用至海洋生物復育，以達到油品污染土壤處理與海洋生物復育之目的。

其中整治污染土壤，須先知道其特性，而污染土壤通常具有下列特性(林三虎,2020)：

- (1)累積性：土壤與底泥間之孔隙對污染物具有吸附性，若污染物係長期洩漏，將在土壤與底泥中逐漸累積，導致濃度升高，其危害亦隨之日增。
- (2)移動性：土壤與底泥所除之吸附污染物會隨地下水流動而擴散，導致範圍擴大。
- (3)危害性/低警覺性：土壤與底泥之污染物通常透過作物吸收，經食物鏈進入人體；通常均為長時間累積，故發現時均已累積相當長之時間。
- (4)整治困難：確定地下污染之範圍及嚴重性甚為困難，故整治時間與經費亦甚高。

而油品污染特性又依比重分為比水輕溶於水的液態體與比水重不溶於水的液態體兩類，前者可能經由揮發、毛細管流、擴散、吸附等方式分別進入空氣、土壤中，後者則沉於水體底部而吸附或滲入構成阻水層之土壤進而造成污染狀況發生。污染土壤依照處理原理可分為物理化學法、電化學或熱處理法及生物法。



研究目的

近年而言油污染土壤整治多半以固化及掩埋處理受總石油碳氫化合物污染之土壤，少數為非焚化之熱處理，本研究擬結合磚窯廠，以高溫燒結處理作為處理受油污染之土壤與底泥，流程如圖1所示，污染土壤或底泥可於練土時混合沙土與黏土，一起製成磚胚，乾燥與窯燒後便可成為紅磚，不需添加額外能源。

本研究計畫目的係在原有之燒製紅磚製程中，不添加額外能源或原物料，在處理受油品污染土壤之同時，添加回收之廢玻璃與之結合，將廢棄物與污染土壤之轉質為多孔性海洋生物復育環保磚，直接將資源循環再利用，冀望能將該多孔性材質環保磚能應用於海洋生態復育，實踐環境永續經營的理念。

本實驗室於2020年之中華民國環境工程學會第32屆環工年會上發表「紡織污泥循環再製紅磚之研究」、「以焊材製程污泥作為製磚原料之研究」及「鋁陽極處理製程污泥燒製紅磚之研究」共計3篇論文發表，對於運用廢棄物燒結製磚已有相當成果，紡織亦屬有機污泥之一類，與本研究之標的物同為有機污泥，具有高熱值之特性，整體而言運用油污染土壤進行混辦燒結亦可達到製磚之目的，而本研究係將其燒結成適合復育之燒結體，與製磚之型態相仿，應屬可行之試驗。

本研究團隊結合兩間具有高溫燒製實務之優質公司，透過模具客製化與燒結溫度調整，可調整海洋生物復育環保磚的大小形狀，以個別適合不同海放區域之性質，磚體燒結設計將會著重於生物復育功能為主要目的進行。初步將以三角型磚體為基座為燒結製造方向，此三角基座主體將是魚類躲藏空間；另將設計圓柱狀貫通式珊瑚復育植栽磚體結構，此部分將著重於珊瑚及藻礁之復育為主。本次研究之珊瑚復育植栽未來可與三角基座結合也可提高與海底之接觸高度，以防止沉積現象。本研究不管是基座或是復育植栽結構都將以油污土壤結合回收玻璃方式進行製磚燒結方式，以達到污染土壤處理效果及廢棄物去化，生物復育之環境永續發展為目的。

本研究藉由計畫之工項，期望達到可達到以下目標：

(一)資源循環，永續發展：

在不增加額外能源與原物料之前提下，處理油污染土壤與底泥，並將之再製成海洋復育環保再生磚。

(二)去化資源，創造再生：

近年較常見之玻璃再利用仍以透明玻璃為主，而茶玻璃與綠玻璃及其他



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

高科技製程所產生之玻璃，其再利用管道仍有限，計畫將以有色玻璃為主要標的物質，增加其去化管道。

(三)增加收益，產業延續：

近年來，由於房屋建造型態之變遷，磚窯業逐漸淪為夕陽產業，而磚窯燒製過程中所使用之熱能若能兼進行廢棄物處理，則可增加磚窯業之收入，且不需添加額外燃料，使產業能永續發展。

(四)提升性質，強化復育：

本研究合作廠商琪登藝術公司現有之多孔隙玻璃燒製技術，燒製玻璃之保水能力較佳，其孔隙率於藻礁之附著有著極佳之優勢，而添加入油品污染土壤，由於內含有機物，更可提升其燒製後之孔隙率，提供生物復育所需空間。

(五)海洋復育，生態多元：

本研究從廢棄物與污染土壤再製成之復育魚礁，預計未來可應用於海洋生態復育，透過多孔性海洋復育環保磚供於魚群棲息，亦可供藻類附著，確認其可行性後，可與珊瑚礁基座進行結合，藉由珊瑚礁移植，促使生態多元化。



三、文獻回顧

3.1 油品種類及性質

石油是一種碳氫化合物組成之物質，主要化學成分包含脂肪族、芳香族、瀝青及樹脂等碳氫化合物，除此外含有氮氧及硫化合物，成分包含4大類(陳建國,2015)：(1)飽和烴類，包括正烷類、支鏈烷類(2)芳香烴類，如苯、甲苯、二甲苯(3)樹酯類(4)柏油類。

石油碳氫化合物是一種混合物，含各種化學物質且皆對人體有一定之程度危害，一般石油碳氫化合物中主要污染物有兩大類，一維 BTEX(苯、甲苯、二甲苯)另一為 MTBE(甲基第三丁基醚)，為容易掌握石油碳氫化合物之概況。

依我國土壤及地下水污染整治法規定，場址之土壤污染或地下水污染來源明確，其土壤或地下水污染濃度達土壤或地下水污染管制標準者，直轄市、縣(市)主管機關應公告為土壤、地下水污染控制場址。其標準如表3-1所示。

表3-1土壤污染管制標準

管制項目	管制標準值
苯(Benzene)	5 mg/kg
甲苯(Toluene)	500 mg/kg
乙苯(Ethylbenzene)	250 mg/kg
總石油碳氫化合物(TPH) (Total petroleum hydrocarbons)	1000 mg/kg



3.1.1 BTEX

苯、甲苯、乙苯、二甲苯四種污染物簡稱BTEX，此四種化學物質為常用的有機溶劑，大多油品中存在此四種化學物質，BTEX具有高揮發性、低沸點及不易溶於水之特性，其物理化學特性如表3-2所示，若誤食、呼吸皮膚接觸等，造成慢毒性、致突變性、致畸胎性及對人體免疫系統干擾抑制，其中苯更證實有生物毒性、致癌性及突變性等，美國環保署已將BTEX列為129種優先列管污染物之一(阮國棟、簡惠貞,1994)。

表 3-2NBTEX 物理化學基本特性

名稱	苯	甲苯	乙苯	二甲苯
分子式	C_6H_6	C_7H_8	C_8H_{10}	$C_6H_4(CH_3)_2$
沸點(°C)	80	111	135.2	144.4
熔點(°C)	5.53	-95	-95	-25.2
溶解度(mg/L)	1,780	500	150	150
蒸氣壓(mmHg)	76	22	7	5
亨利常數 (Pa·m ³ /mole)	562	673	864	493
沉積物-水分配係數 (K _{oc})	97	242	622	570
辛醇-水分配係數 (K _{ow})	135	540	1,410	1,320

資料來源：(史盟秀,2001)



3.1.2 甲基第三丁基醚(MTBE)

甲基第三丁基醚是近年來被高度關切的有機污染物，由於具有高辛烷值、低成本，加入汽油中可轉移和分佈等物理化學性質，故廣泛地被使用，MTBE 具備高水溶性、低分配係數、生物難分解性，因此常在都市中空氣、地表水、逕流水及地下水都曾被檢測到 MTBE 的存在，且已被美國環保署認定為對動物具有致癌性。美國各州自2000年起陸續全面禁用 MTBE 或降低 MTBE 可添加比例上限，其中密西根州、明尼蘇達州、科羅拉州已全面禁用，加州則於2003年起 MTBE 逐漸減量，而我國毒性化學物質管理亦將 MTBE 列管為第四類毒性化學物質，苯與 MTBE 物理化學性質比較如表3-3所示。

表 3-3 苯與 MTBE 物化性質比較

名稱	苯	MTBE
蒸氣壓(mmHg)	76	245
亨利常數(Pa·m ³ /mole)	0.23	0.022
溶解度(mg/L)	1,800	51,000
沉積物-水分配係數 (KOC)	98	11
降解能力	高	低

資料來源：工業技術研究院,2003



3.1.3 總石油碳氫化合物

總石油碳氫化合物(TPH)之涵蓋範圍為含碳數 C_6 到 C_{40} 等之石油碳氫化合物，係由原油分餾過程而得知產品，主要成分為脂肪族及芳香族化合物，屬於非極性之疏水性有機化合物，其中 C_6 到 C_9 的範圍屬低碳數烷，為汽油類(TPH-g)， C_{10} 到 C_{40} 的範圍屬高碳數烷，為柴油類(TPH-d)，如表3-4所示。

表 3-4 石油產物碳數及蒸餾溫度

名稱	碳數分佈	蒸餾溫度(°C)
汽油	$C_6 \sim C_{10/12}$	30~200
石腦油	$C_8 \sim C_{12}$	100~200
煤油	$C_{12} \sim C_{15}$	150~250
柴油	$C_{13} \sim C_{27}$	160~400
重燃料油	$C_{19} \sim C_{40}$	315~540
潤滑油	$C_{20} \sim C_{40}$	425~540

資料來源：工業技術研究院,2003



3.2 土壤整治技術

針對污染場址進行處理時需依污染物特性找出最適合處理的方法，評估污染類型、污染總量及釋出時間，其次則要確認污染物的污染方式與範圍，在進行可能的風險評估，最終方能判定場址的整治方式。

以目前國內外常見之土壤整治方式以污染物與場址相對位置可分為三類：現地、現場、離地；以實施方法主要可分成生物整治技術及物理/化學整治法兩種類別(李承熹,2017)：

(一) 生物整治技術

通常是利用以污染物為食物的微生物進行清理工作，此法的費用較為便宜，但時間成本較高，且成效較難保證，主要有生物復育(Bioremediation)、監測式自然降解(Monitored Natural Attenuation)、植物復育(Phytoremediation)、生物堆法(Biopile)、生物通氣法(Bioventing)。

(二) 物理/化學整治法

物理/化學方法的原理，是利用污染物或被污染介質之物理化學特性，達到破壞、分離或穩定污染物的目的，此法的經費甚高、其效果佳、耗時短。主要於化學方法有化學去鹵素法(Chemical Dehalogenation)、化學氧化法(Chemical Oxidation)、透水性反應牆法(Permeable Reactive Barriers)、固化與穩定化(Solidification/Stabilization)、玻璃化法(Vitrification)、現地淋洗法(In-Situ Flushing)、土壤清洗(酸洗)(Soil Washing)；物理方法有活性碳吸附法(Activated Carbon Treatment)、氣提法(Air Stripping)、阻絕法(Capping)、破碎法(Fracturing)、焚化法(Incineration)、現地熱處理(In-Situ Thermal Treatment Method)、抽取處理法(Pump and Treat for Groundwater)、土壤開挖(Soil Excavation)、土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction and Air Sparging)、熱脫附(Thermal Desorption)。

表 3-5常用之土壤污染整治技術方法分類表

現地化學法		電化學或熱處理法		生物法	
現地	離地	現地	離地	現地	離地
固化 (Solidification)	固化 (Solidification)	電動移除法 (Electro-Kinetics Separation)	玻璃化 (Vitrification)	植物穩定法 (Phyto- Stabilization)	土耕法 (Land Farming)
添加土壤改良劑 (Soil Amendments)	土壤清洗 (Soil Washing)	玻璃化 (Vitrification)	燃燒法 (Incineration)	植物移除法 (Phyto- Remediation)	衰減 (Field-Scale Attenuation)
土壤氣體萃取 (Soil Vapor Extraction)	化學溶劑萃取 (Solvent Extraction)		熱解法 (Pyrolysis)	土耕法 (Land Farming)	植物穩定法 (Phyto- Stabilization)
深耕翻轉/混合稀 釋法 (Attenuation)	化學氧化 (Chemical Oxidation)		熱脫附法 (Thermal Desorption)		土壤改良 (Soil Amendments)
土壤清洗 (Soil Flushing)	不同粒徑分離 (Particle-Size Segregation)				

資料來源：(李承熹,2017)



3.2.1 土壤整治熱處理技術

台灣之廢棄物主要處理途徑為熱處理為主，直接掩埋為輔，其中以土壤處理技術而言，除生物技術及氣體抽除外，其次較為嚴重之污染場址均使用熱處理技術進行整治，其熱處理又可細分為現地熱處理、熱解法、高溫焚化法及熱脫附，其分述如下(李承熹,2017)：

(一) 現地熱處理法(In-Situ Thermal Treatment)

現地熱處理是將高溫蒸氣注入，或是利用電阻加熱、熱傳導加熱、電波頻率、高溫熱空氣或熱水的方式，將熱導入受污染土壤中，促使土壤或地間水溫度提升，以使污染物更容易溶解、揮發或移動，以利於整治。熱處理法可應用於建築物底下不適合開挖之地區、地下水面下、無法開挖之深層污染區等，只要熱能可以被傳誦到的深度均可適用。熱處理法通常對受油品污染之地下水具有良好的處理效果，但該法可能會改變現地微生物型態，變成有利於嗜熱性微生物生長，且可能會造成污染物往更深層地區移動或擴散，故使用上須小心。

(二) 熱解法(Pyrolysis)

熱解作用的原理是在缺氧的環境中將污染的有機化合物加熱分解，並將污染物質轉化為無害之氣體、飛灰與底灰。熱解作用通常發生在溫度高於430°C(約800 °F)的環境下，並將有害的污染有機物質轉變成氣體、少量液體和固體剩餘物，如焦炭，其中含有碳和飛灰，並產生許多易燃的氣體，包括一氧化碳、氫氣和甲烷等，和其他的碳氫化合物，這些熱解作用下所產生的氣體需要經由空氣污染防治設備處理後才可排放。

(三) 高溫焚化法(Incineration)

高溫焚化法是利用旋轉窯焚化爐進行焚收，旋轉窯焚化爐主要包括微傾(傾斜度5度以下)可轉動的爐體、二次燃燒室及空氣污染防治設備。污染土壤或廢棄物則由較高的爐體一端進入，在爐內水平移動並通過爐體，以至少攝氏800°C以上高溫直接將污染物焚化破壞，處理後的土壤或廢棄物灰爐於較低的一端排出；二次燃燒室用以延長廢氣滯留時間，使污染物可被充分燃燒破壞。空氣污染防治設備通常包括驟冷段、填充式吸附塔(packed power absorbers)、集塵器(precipitator)及其他處理設備。焚化效率與爐內氣體的擾動、溫度及滯留時間有關，此方法對污染物的破壞去除率可達99.99%或更嚴格的破壞去除效率。藉由焚化法亦可減少需要運至掩埋場處理的廢棄物數量，達



到減容減重之效果。

(四)熱脫附法(Thermal Desorption)

熱脫附技術為近物理性整治法的一種，為各項有機污染的土壤整治技術中，處理種類最為廣泛且去除效率高，深具發產潛力，是近來積極發展之污染場址處理技術。熱脫附法主要將附著於固體物質之有害性有機污染物揮發，脫附後的有機物需要利用其他系統再處理。熱脫附系統包括廢棄物先處理及進料單元，熱脫附室、排氣冷凝、分離及處理系統。熱脫附系統將污染物自土壤中分離出來，再熱脫附室加熱，將水分、有機物及部分金屬揮發，藉著氣流或真空系統將揮發後的水分及污染物送入廢氣處理系統，熱脫附法系統的設計旨在揮發污染物，而非氧化，因此，依熱脫附的操作溫度可分為兩類：高溫熱脫附(high temperature thermal desorption, HTTD)及低溫熱脫附(low temperature thermal desorption, LTTD)。

熱脫附法為近年較為常見之物理性整治法，其優點為(洪千嫻,2008)：

- 1.現場(on-site)或離場(off-site)的技術及設備上取得容易，已經商業化(如美國)。
- 2.非常快速的處理時間，商業化系統處理量可達25 噸/小時之土壤。
- 3.處理大量土壤十(大於765立方公尺)，具有競爭優勢，每噸土壤處理費用約30~70 美元，但不包括離場(off-site)的高濃度油品污染。
- 4.可以快速處理主污染區(hot spot)的高濃度油品污染。
- 5.可以簡單的和其他技術再進行結合處理，例如空氣注入法等。
- 6.經處理之土壤可以回填原場址，或是作為原污染場址以外地方之其他填土用途。

其熱脫附法之缺點為：

- 1.必須挖除土壤，且一般限制在地表以下深度7~8公尺以內。
- 2.現地處理必須有足夠的設備設置空間(大約2,000平方公尺以上)。
- 3.離場(off-site)處理方式的土壤運輸費用較高。
- 4.處理地下水面以下之含水層土壤者，必須以抽水方式先降低地下水位。



3.3黏土-水系統

原物料所含水量狀況，會影響後續燒製的結果，因此水分存在的狀況值得深討。黏土礦物中水以四種形式存在(Norton et al.,1970)：吸附水、收縮水、孔隙水、晶格水。一般狀況在溫度100℃左右，黏土礦物的吸附水就會脫離，隨著溫度上升，收縮水、孔隙水也會跟著脫除，當溫度達到550℃之後，黏土礦物層與層間的結晶水，也會隨著溫度而逸失(田晉瑋,2014)。以下將介紹四種存在形式，亦可如圖3-1所示：

1.吸附水：

黏土表面因帶有負電，為了中和其電荷，表面會吸附著水分子，其中第一層水緊緊圍繞在填土顆粒表面，厚度較薄，稱為吸附水層，因所受之引力極大，故不易去除。黏土顆粒表面的吸附作用而形成在顆粒表面的水化薄膜，又稱為薄膜水。

2.收縮水：

在第一層吸附水層外圍，其水分子可移性較大，故稱之為自由水(Free water)層。在乾燥過程中因黏土顆粒相互接近合併收縮所去除之水分，因此又稱為收縮水。

3.孔隙水：

存在於黏土顆粒間的孔隙中，又稱為粒間水，因可以自由流動，所以亦屬於自由水。孔隙水並不與顆粒固體直接結合，因此在乾燥過程中容易被去除。

4.晶格水：

以水分子形式存在於黏土礦物晶體架構單元層之間的水，稱為晶格水，也有人稱之為結構水。只有在相當高的溫度下才能部分或全部脫水。

3.3.1黏土之乾燥

當黏土乾燥時，會伴隨某些程度的收縮。在乾燥初期黏土顆粒藉由水的薄膜彼此圍繞及分開，如圖3-2所示之水分分布狀況。當乾燥水分去除十顆粒間格收縮，乾燥期間水分子排除速率的控制是收縮的關鍵。在實體內部區域的乾燥是靠水分子擴散到表面的蒸發完成。若蒸發速率大於擴散速率，表面會比內部乾燥更快，因此伴隨著高的缺陷形成機率。表面蒸發速率應與水的擴散速率接近，比面才不會產生龜裂。蒸發速率可由溫度、濕度、及氣流速率加以控制。

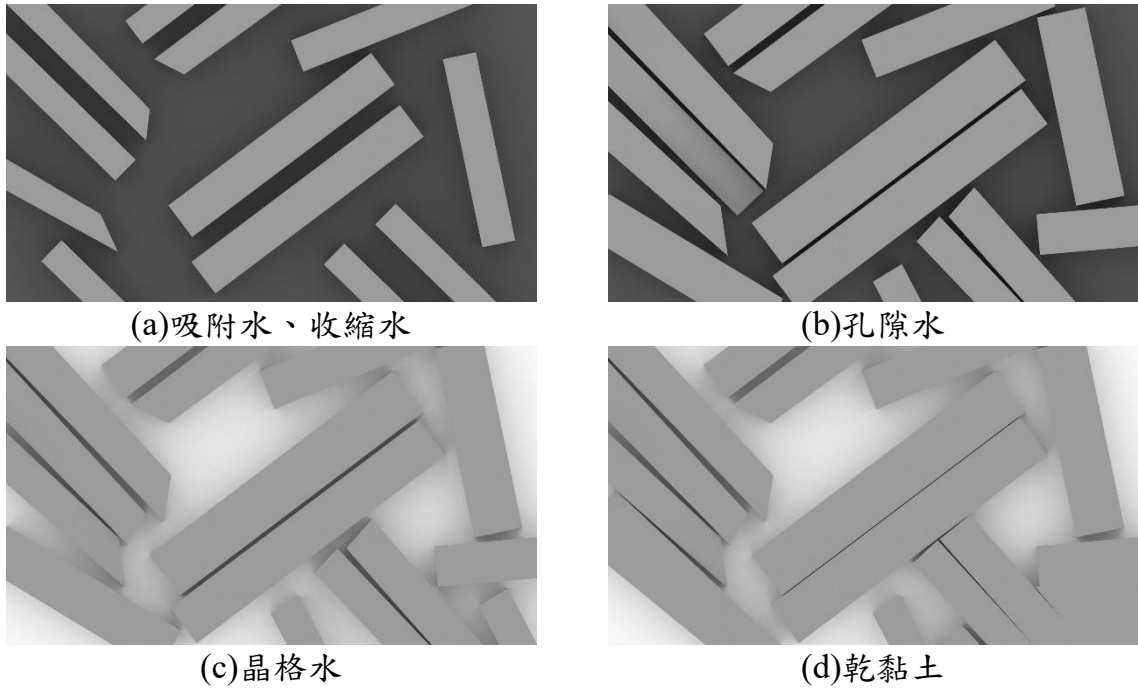


圖3-1黏土礦物含水類型示意圖

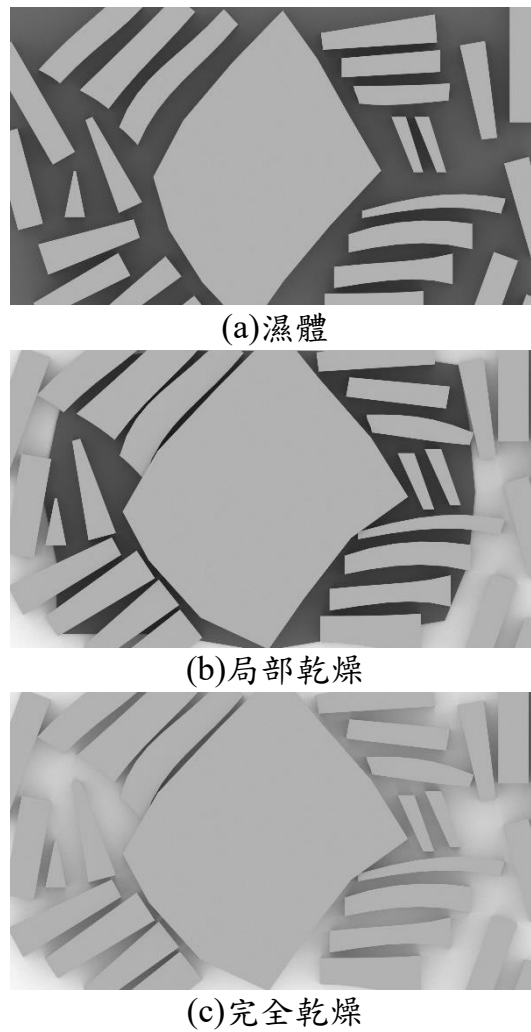


圖3-2黏土乾燥過程示意圖



3.4紅磚應用

3.4.1紅磚製造流程

紅磚是傳統建築的主要材料，現在多應用於庭園造景、高級別墅外的磚牆、社區營造、公園等；紅磚係以黏土為原料燒製而成，亦可使用符合中央目的事業主管機關再利用規定之再生材料作為原料。傳統燒磚製程如圖3-3所示其說明如下述(陳品親,2014):

- 1.練土:將土淋濕後，再輸送於練土機中攪拌，讓泥土能水分適中且軟硬合度，以利易雕塑成型。
- 2.製坯:將長土條輸送到切磚機器，切成磚胚。
- 3.疊磚:磚胚切好後，機器會自動夾放到台車上，將磚一層一層疊上去。
- 4.乾燥:將磚胚推送至乾燥區利用窯燒之熱氣乾燥。
- 5.入窯:利用推送機，將堆疊磚胚之台車推入隧道窯內。
- 6.窯燒:在隧道窯內，溫度及燃料之投放，均採自動控制。
- 7.出窯:當冷卻到一定程度時，即可自窯內搬出燒好的磚成品。



圖3-3紅磚製造流程圖

3.4.2紅磚之組成及影響

磚礦物組成中主要為石英、長石、氧化鐵、雲母等四種主要黏土礦物。長石礦物在試驗結果中，所佔比較少，這是因為長石礦物易風化，發生水解和水化作用有關；另一方面長石中的矽鋁氧化物會因被水分解而成為含水的矽酸鹽類，生成黏土中的主要礦物質。而紅磚之化學成份組成則有 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 等十種較多量之氧化物，其餘尚有微量的物質會於試驗過程中散失，使各成分所佔百分比之和不到100%。各氧化物含量以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 三者之氧化物所佔的比例最大，且對磚製品的生產及品質有決定性的影響。

1. SiO_2 等矽酸鹽礦物:是燒結製品原料中的主要成分，含量要保持在55%~70%之間。超過時，原料的塑性太低，成型困難，而且燒成時會發生晶型轉變產生體積膨脹等變化，引起製品強度的降低。
2. Al_2O_3 等鋁酸鹽礦物：在製磚原料中的含量最好在10%~25%之間， Al_2O_3 等鋁



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

酸鹽礦物焙燒過程中由於玻化溫度較高，會大幅提升燒成溫度，在製磚原料中含量過低時，會降低燒成溫度和燒成範圍，嚴重影響製品的強度，不抗折；但過高就必然要提升燒成溫度，加大燒成煤耗量，會使磚的顏色變淡。

3. Fe_2O_3 等鐵礦物：是製磚原料中的著色劑和玻化劑，含量保持在3%~10%之間。太高時會降低製品的耐火度，使磚顏色更紅。

3.4.3紅磚之燒成

磚窯在燒坯過程中，溫度控制主要分兩階段，第一階段是小火要緩慢加溫除去胚體中水分並注意磚胚收縮，第二階段則是燒結緻密的磚體，依據實際操作的經驗，500℃是紅磚在加熱與冷卻時的一個重要溫度臨界點，也是兩階段的分野，加熱溫度至此磚坯已散失黏土原有物理性，是不會再溶解於水中，不過此時因結晶行為的變化，加熱不可過快，否則易使磚坯體積膨脹過快而破裂，這時的磚坯因燒結不足而易脆，同樣當磚冷卻至此溫度時，由於磚坯之黏土結晶組成正在重新改變，如冷卻太快磚過度收縮一樣容易爆裂，但低於500℃時，此現象則不易發生。磚坯在窯中大多加熱至900℃即算燒成，因為此時黏土已硬化、緊密化、耐壓程度強，如果溫度再上昇，黏土可能產生玻璃化，熔溶成水，所以黏土另一特性就是在熔溶前，黏土顆粒成為緻密狀且堅硬，所以要燒成順利就是時間和溫度兩者必須要控制得當(王惠君,2000)。



3.4.4紅磚品質及檢驗

建築用普通磚品質試驗項目及方法係參照 CNS382對產品種類之說明，如表3-6所示，為所有品質試驗項目皆應符合所對照國家標準之規定。CNS382之標準適用於以粘土為主要原料燒製而成，用於構築窯爐、土木、建築等用途之普通磚。

表 3-6 CNS382之磚物理性質特質

種類	抗壓強度 (kgf/cm ²)	吸水率 (%)	等級判別摘要
一等磚	>300	< 10	須燒製良好，形狀整齊，稜角正確，色澤一致，無彎曲裂紋。
二等磚	>200	< 13	須燒製良好，陵角方正，表面尚平，輕微裂紋。
三等磚	>150	< 15	須燒製良好，形狀尚完整，無顯著之裂紋。

資料來源：經濟部標準檢驗局,2012



3.4.5 製磚機制-燒結

燒結係為透過高溫促進原子運動，使顆粒與顆粒結合而產生高強度的行為，藉由顆粒間表面能量之不同，使燒結過程中之顆粒緻密化(densification)、晶粒長大(grain growth)及晶界形成(grain boundary formation)的過程，透過這些過程形成具有高強度特性之材料(侯宗佑，2014)。

原子運動過程因燒結體組成成分的不同，而有不同之移動路徑及方式，影響原子移動路徑之因子可分為本質特性，如燒結體成分及顆粒粒徑、操過特性如溫度、時間、壓力、氣氛等，個因子間須互相搭配才能得到最佳燒結條件。磚塊燒製屬於固相燒結(solid phase sintering)(陳宜晶，2004)：

(一)固相燒結：固相燒結之各階段示意圖如圖3-4所示，大致可分為三個階段：

- (1)開始階段：顆粒間的接觸點或面轉變成晶粒結合，即通過形核、長大等原子遷移過程形成燒結頸。在這階段中，顆粒內的晶粒不發生變化，顆粒外型也基本未變。但是，燒結體的強度和導電性卻由於顆粒結合面之增大而有明顯的增加。
- (2)中間階段：燒結頸長大階段，為決定燒結體性質的重要階段。在本階段中，原子向顆粒黏結面大量遷移而使燒結頸擴大，顆粒間距離縮小，形成連續的孔隙網絡。因晶粒長大，晶界越過孔隙移動，而被晶界掃過的地方孔隙大量消失。
- (3)最終階段：閉孔隙球化和收縮階段，多數孔隙被完全分離，閉孔隙數大為增加，孔隙形狀趨於球形且不斷縮小。此時，燒結體仍可緩慢收縮，但係因小孔消失和孔隙數量減少。此階段可延續很長的時間，但仍會殘留少數隔離小孔隙。

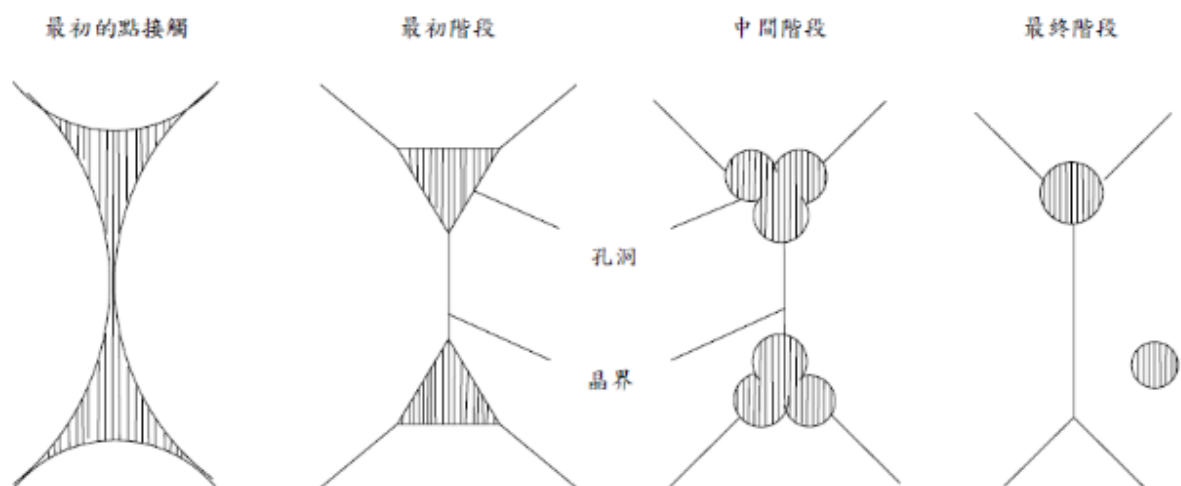


圖3-4固相燒結之反應階段(陳宜晶，2004)

(二)土壤與黏土成份燒結之可能機制

受污染土壤、燒磚原料及黏土和水混拌之後，由於內含水份，製磚前必須先



靜置原料數天。

另外，由於燒結過程當中牽涉晶相之變化，土壤中之CaO與MgO將會和SiO₂與Al₂O₃結合生成CaSiO₃或MgSiO₃或CaAl₂SiO₆與MgAl₂SiO₆等結晶相(上述均為常見之火成岩)。

3.5 生物復育環保磚應用

根據人工魚礁完全手冊(漁業署，2012)，人工魚礁設置目的為是將天然或人造結構體投置於適合的海域，以改善或營造海洋生物之棲息環境，而達到培育生物資源增進漁業經營的目的，而所使用礁體種類包括：水泥礁、船礁、鋼鐵礁、電桿礁、輪胎礁等。

因此人工魚礁使用再利用資材製造仍為少數，根據山野博哉(2016)研究指出因海水溫度上升而導致珊瑚白化件數有增加之趨勢，故珊瑚礁的復育及保育也是世界面臨的一項問題，而目前珊瑚復育使用材料多半是陶瓷材料(香港大學太古海洋研究所，2020)，根據香港大學海研所之研究利用3D 列印方式列印陶盤詳細如圖3-5所示，主要可提高與海底高度避免沉積傷害，陶盤複雜紋路以防止海流傷害幼體珊瑚。此外根據“日本的珊瑚”一書第五章(藤原秀一・大森 信)中提到珊瑚復育目前採用之方式分別為以珊瑚斷片做移植的無性生殖以及使用陶瓷、貝殼、陶器等材料讓珊瑚於產卵時附著於表面的有性生殖兩種，見圖3-6、3-7所示。



圖3-5 3D 列印陶盤



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

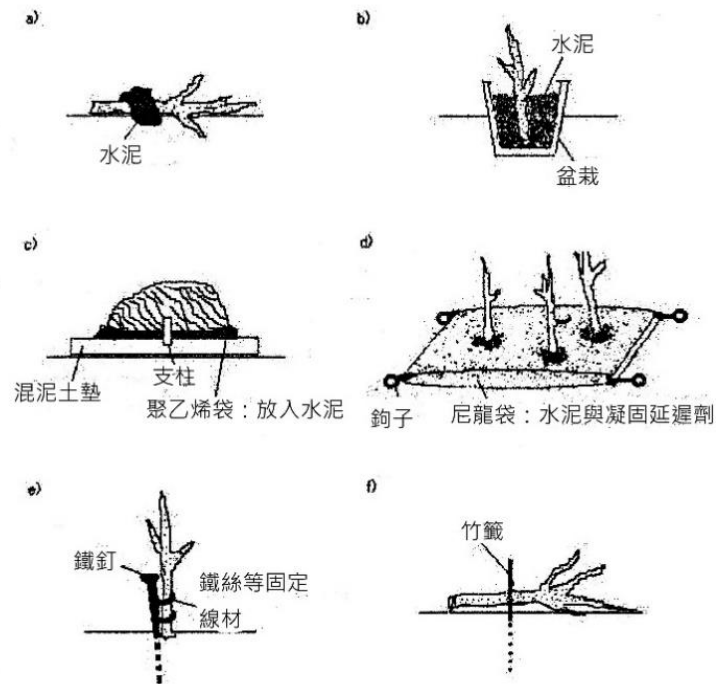


圖3-6無性生殖斷片固定

(資料來源，大久保 奈弥，大森 信，2001)

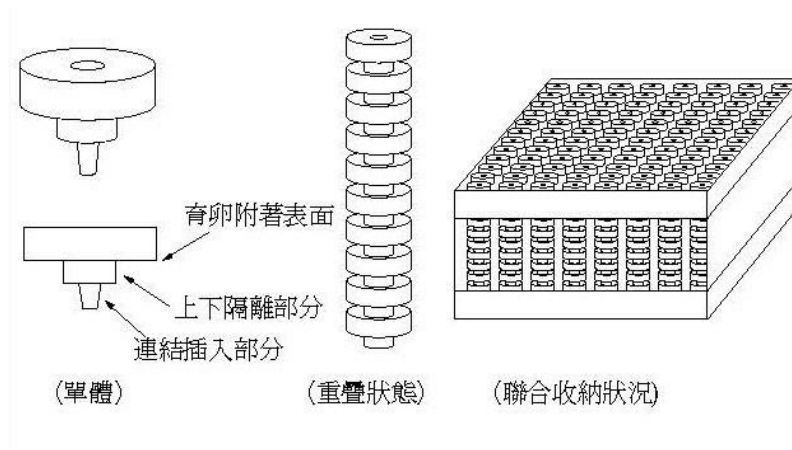


圖3-7有性生殖方式

(資料來源，岡本，野島，2003)



四、研究方法與過程

4.1 研究方法

本研究以不同原物料配比進行高溫燒結試驗，製成海樣生物復育環保磚，其流程如圖4-3所示，以油品污染土壤、黏土及廢玻璃作為環保復育專之原物料，以不同原物料添加配比進行測試，於實驗室利用高溫熔融爐模擬實廠燒結程序，在應用到實廠燒製，希望藉由高溫燒結程序處理受油品污染之土壤或底泥，結合廢玻璃將之轉質為生態復育磚，以協助海洋生態維持生物多樣化。

本研究將與建洲窯業及琪登藝術公司進行合作，建洲窯業燒製紅磚經驗長達40年之久，本研究透過紅磚之高溫燒結過程分解油品污染土壤中之污染物，並與黏土及回收之玻璃砂混拌，本程序不須額外提供處理能源之消耗，且混拌物質更可減少原本砂土之用量，最終產品亦為可用於海洋生物復育之環保磚，可說符合永續發展之概念。本計畫將於實驗室做先期實驗，建洲窯業除可提供實驗室所用之原物料，亦為本研究最終實廠驗證之合作對象，其建洲窯業既有之設備如圖4-1所示。

琪登藝術公司為國內模具製作之知名公司，近年以廢玻璃燒烤製成多孔隙之再生花盆技術，成功開創新穎廢玻璃之再利用方向，經該技術燒製而成之玻璃，其孔隙率高。對於本研究而言，與該項技術結合，藉由油品污染土壤之窯燒特性，可將大部分之土壤有機物去除，亦增加土壤之去化方向，一併達到生物復育環保磚之生產，琪登藝術公司既有之設備如圖4-2所示，初期於實驗室進行試驗，後續藉由建洲窯業將本研究實廠化，其製成生物復育環保磚試體。



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究



1.一次供料機



2.一次碎土機



3.檢石機



4.二次供料機



5.二次研土機

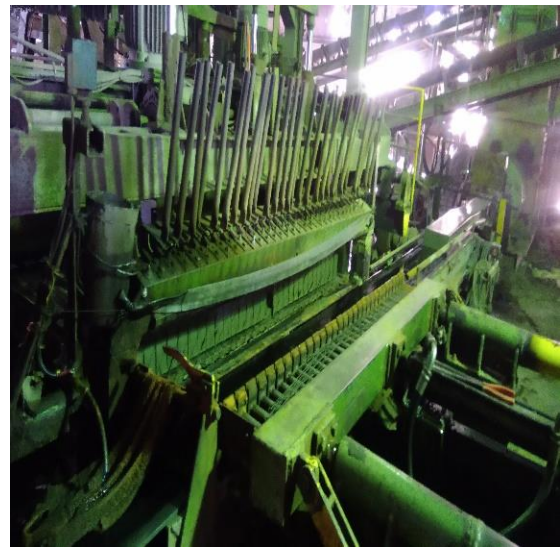


6.攪拌機

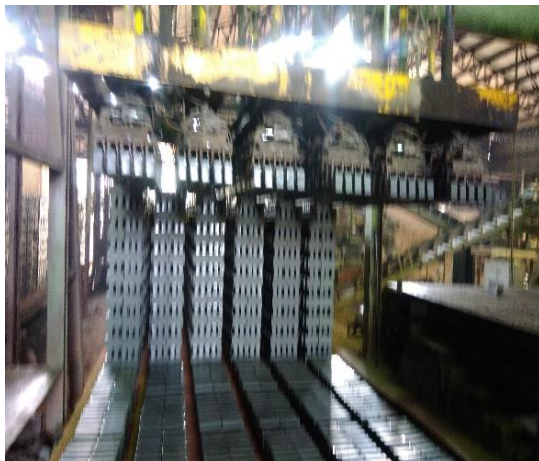
圖4-1建洲窯業實廠設備照片



7.製磚機



8.切磚坯機



9.疊磚(夾坯)機



10.乾燥窯



11.隧道式燒成窯



12.洗滌塔

圖4-2建洲窯業實廠設備照片(續)



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

建州窯業廠內有完整之製磚設備，一次供料機、一次碎土機將原料先均勻破碎，並有撿石機，將大顆粒之石頭剷除，避免其影響製磚程序之進行，當進料均勻後，再以二次供料機進行供料，並進行二次研磨，使原料粒度能達到細粒徑之要求，之後再以攪拌機進行攪拌，使不同之物料能夠均勻混拌於其內原料。

在均勻混料後，則可進入製磚機進行製磚程序，將攪拌後之原料從製磚機擠出，再以線切割之方式，於切磚胚機處進行裁切，再將切好之磚胚，投過疊磚機以整齊方式排放於窯烤車之上，靜置3-4天後，再進入乾燥窯進行乾燥，將水份蒸發去除後，再進入隧道式燒成窯將磚胚製成紅磚。

為避免燒磚製程中產生酸性氣體或懸浮微粒進入到空氣中，污染大氣，磚廠設置有洗滌塔針對煙道氣進行洗滌，滌氣後之煙道氣可符合環保署所規範之煙道氣排放標準。



圖4-3琪登藝術公司既有設備、產品與構想圖

圖4-3為琪登藝術公司既有設備、產品與構想圖，琪登藝術公司有自己專屬之工作室，可針對不同需求之模具進行製造，以供後續燒製成型所需，而廠內配置有高溫電弧烘燒窯，可加溫至900-1100 °C進行產品燒製，本計畫係將回收之廢玻璃研磨成細砂狀態，將細玻璃沙放置於模具之內，再將模具放入高溫烘燒窯內加熱融化，冷卻之後便可製成計畫所需之魚礁外觀，再搭配建州窯內所燒製成之基座，便可組合成計畫所需之魚礁。



本研究主要可分為4個階段，包含進料物質分析、實驗室燒結試驗、燒結體檢測分析及實廠燒結試驗，詳細流程圖如圖4-4，4階段其分述如下：

第一階段，進料物質分析：

本研究之主要標的物係為油品污染土壤，主要係探討紅磚之燒結程序是否可作為油品污染土壤之去化方向，油品污染主要之污染物為總石油碳氫化合物為主，係為本研究之標的物，其他非石油碳氫化合物土壤污染(例：含氯污染物、含苯污染物)均不在本研究範圍內。於第一階段主要針對進料物質包含油品污染土壤、製磚原料(黏土)及廢玻璃進行分析，於油品污染土壤部分主要針對 TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) 進行分析及重金屬分析，於黏土與廢玻璃部分，主要針對金屬含量進行分析，以探討後續之金屬轉移及探討是否可能有重金屬溶出之可能性。

第二階段，實驗室燒結試驗：

欲達到本研究之目的，首先須於實驗室進行試燒，包含分析用燒結體與實際燒結體之試燒，於分析用燒結體與三角行基座之試燒部分，主要係由建洲窯業長期經驗技術累積所提供指導，本研究將以不同配比進行混拌，其混拌配比如表4-1所示。

於珊瑚礁復育基座部分，其混拌燒結配比如表4-2所示，主要之技術來源係由琪登藝術公司提供，藉由廢玻璃之多孔性材料燒製技術，將可供珊瑚礁進行繁殖，達到珊瑚礁之復育。

第三階段，燒結體檢測分析：

於實驗室完成燒結體燒製後，實驗室將針對燒結體進行分析，包含金屬含量分析、強度測試、溶出分析及模擬海洋環境溶出試驗等。各實驗分析項目分別說明如下：

1. 金屬含量分析：分析固體物質之金屬含量。
2. 毒性特性溶出試驗：評估原料與產品是否為有害事業廢棄物。
3. 磚體強度測試：分析浸滯前後磚體產品之強度。
4. 海洋溶出模擬試驗：預計取用台灣西岸安平出海口之海水進行海水模擬，藉由長時間循環流動針對本研究所製成之魚礁進行溶出試驗，將魚礁置於容器內，該容器之海水為循環流動之狀態，將針對浸泡魚礁過不同時間之海水進行金屬溶出與 pH 值分析，亦針對該循環水其他離子進行水質監測。



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

5.總石油碳氫化合物(TPH)分析：分析處理前後土壤與底泥之總碳氫化合物之含量，以確保其整治效果。

第四階段，實廠燒結試驗：

於實驗室完成試體燒結試驗後，確認無其他污染之虞，可進行實廠燒結驗證，藉由模具塑型製胚後進入磚窯實廠進行窯燒驗證，其中三角形基座將於建州窯業進行，而貫通式圓柱將於琪登藝術公司進行，分別燒製完成後，再合併組成大型之生物復育環保磚，再進行相關檢測，以確定其無危害性。

表4-1生物復育環保磚之混拌配比

試程名稱	油品污染土壤或底泥	黏土
A-1	5	95
A-2	10	90
A-3	15	85
A-4	20	80

表4-2珊瑚礁復育基座混拌配比

試程名稱	油品污染土壤或底泥	玻璃砂	黏土
B-1	5	75	20
B-2	10	70	20
B-3	15	65	20
B-4	20	60	20



研究方法與過程

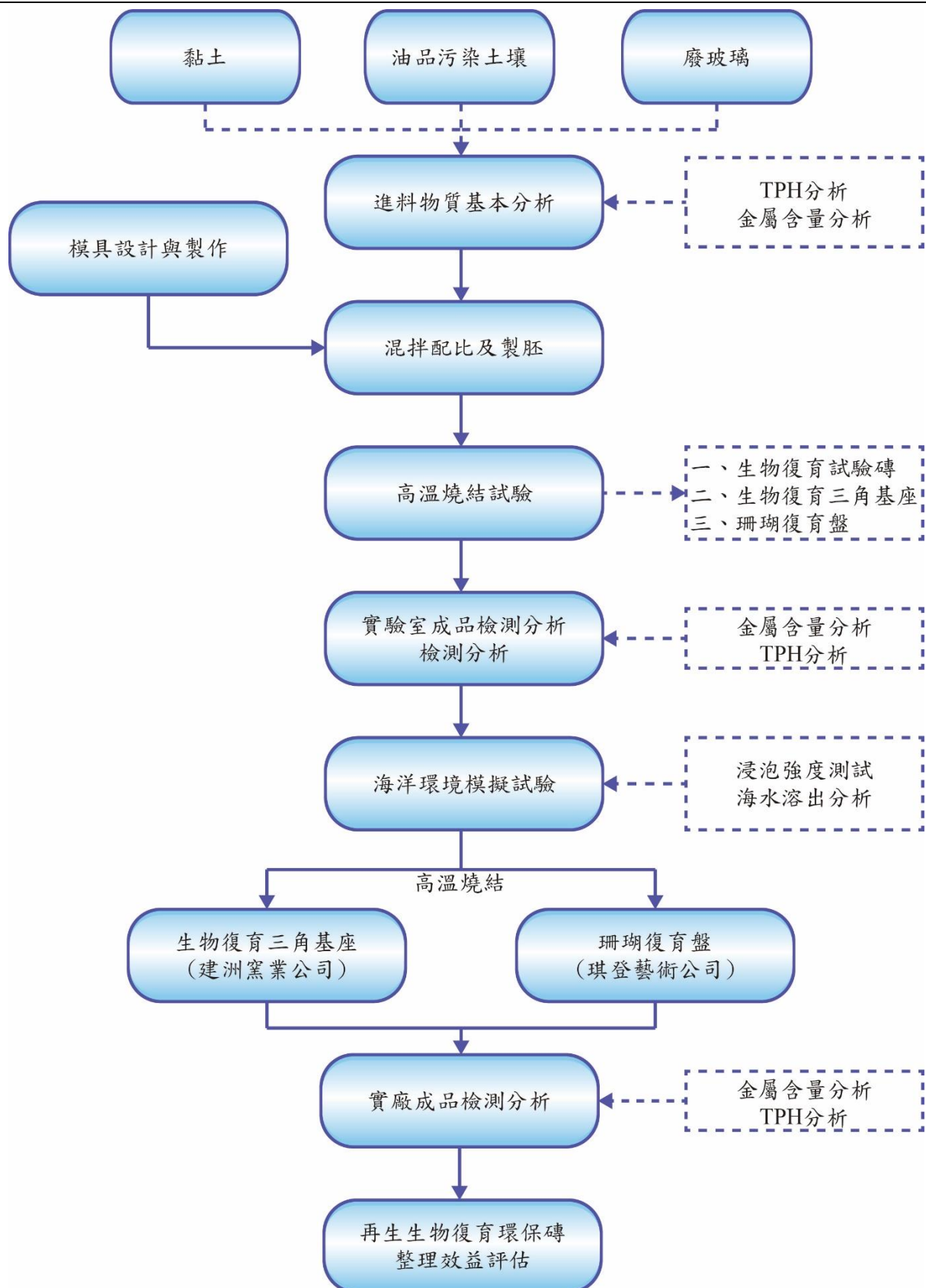


圖4-4研究流程圖



4.2 研究過程

本研究目前已完成進度為100%，如表4-3所示，現階段已完成針對進料物質進行分析、模具製作與測試、混拌配比製磚項目及磚頭特性分析。針對各項完成事項分述如下：

1. 進料物質分析與前處理

本研究之進料物包含：黏土原料、油品污染土壤。首先主要先以 XRD 進行分析，確認進料物質所含之金屬元素及比例，之後以 AA 進行定量分析；TPH 部分主要參照 NIEA M155.02C/NIEA M194.00C/NIEA S703.62B 之標準方法進行分析。

為參照磚窯實廠之作業程序，本研究之進料物質前處理係將黏土原料與油品污染土壤進行破碎後以30 mesh 篩網進行過濾，使樣本小於 0.6 mm，致使樣本於混拌時能均勻分布。

2. 模具製作與測試

本研究主要產出為海洋復育環保磚及復育珊瑚礁盤，本研究之模具製作於環保磚部分，於測試部分，主要使用5立方公分之模具進行填充，之後由建洲窯業指導脫模及燒製紅磚，於復育環保磚部分，係由琪登藝術公司製作，以木模進行製作；珊瑚礁盤部分，主要係由琪登藝術公司以該多孔性玻璃燒製技術進行製作，以免脫蠟技術進行燒製。

3. 試驗磚燒製

為符合儀器試驗標準，本研究所使用之試驗機械為，其試驗體之體積為5立方公分之試體，本研究依該規格進行製作，模具係由琪登藝術公司協助製作，如圖5-3所示；於燒製部分，首先以本研究預定之配比進行混拌填模，之後進行靜置，其中會有些微收縮，收縮後可方便脫模，之後進行風乾約7日，之後以105°C 進行烘乾，此部分模擬實廠乾燥窯，約為1日後即進窯進行燒結，燒窯部分，本研究於實驗室以可控升溫進行燒製。

4. 環保磚特性分析

本研究針對燒結試驗磚進行特性分析，包含強度及吸水率，TPH 減量分析，金屬元素分析。



研究方法與過程

表4-3研究進度及預期完成之工作項目

年月		110 年 3 月	110 年 4 月	110 年 5 月	110 年 6 月	110 年 7 月	110 年 8 月	110 年 9 月	110 年 10 月	110 年 11 月	110 年 12 月	111 年 1 月	111 年 2 月	備 註
工作項目														
1.進料物質檢測與分析				1-1										
2.模具設計與製作				2-1										
3.混拌配比及高溫燒結試驗							3-1							
4.實驗室燒結體分析							4-1			4-2				
5.海洋環境模擬試驗										5-1				
6.實驗數據實廠應用										6-1		6-2		
7.整體效益評估													7-1	
工作進度估計百分比 (累 積 數)		7 %	13 %	20 %	26 %	37 %	42 %	49 %	57 %	76 %	85 %	93 %	100 %	
預定查核 點	期中	1-1針對進料之油污染土壤進行 TPH 檢測分析、金屬元素分析，共計分析2次。 1-1黏土、砂土之金屬元素分析，共計分析2次。 2-1環保磚模具製作1件 2-1環保珊瑚礁基座模具製作1件。 3-1進行油品污泥混拌製磚產出油污染土壤添加量5%、10%、15%及20%之環保試驗磚，每配比共計產出2塊，共計8塊。 3-1進行油品污泥混拌製作珊瑚礁基座燒製，其油污染土壤添加量為5%、10%、15%及20%，美添加量產出2塊，共計8塊。 4-1針對環保磚進行吸水率及強度試驗，4個配比，共計4次。 4-1針對環保磚進行 TPH 檢測分析、金屬元素分析，共計分析2次。												
	期末	4-2針對珊瑚礁基座進行金屬元素分析，共計2次。 5-1進行環保磚之浸泡與不同浸泡時間之強度分析，其浸泡時間為7、14、21、28天，共計分析4次。 6-1以實驗室數據進行實廠燒製試驗，並產出2環保復育基座。 6-1進行珊瑚礁基座與實廠燒製復育基座結合。 6-2進行實廠成品之金屬元素分析、TPH 分析，共計1次。 7-1探討復育磚燒製對整治與磚窯產業之效益。 7-1整理本研究實驗相關數據並撰寫研究報告。												



4.3 實驗儀器

4.3.1 微波消化器

本研究使用之消化設備為 CEM 公司 MARS-6 之微波消化器(如圖4-5所示)，最大操作功率為1,800 W、最大負載壓力800 psi、最高溫度260°C，並具有緊急洩壓安全防護設備，本儀器適用環境檢驗所公告 NIEA W312.51C 之標準方法，主要係針對 EVA-Oligomer、脫色材料進行金屬含量分析之前處理設備，配合輔助消化之無機酸為 HF、HNO₃、HCl 及 H₂SO₄。



圖4-5 CEM 微波消化器



4.3.2 火焰式原子吸收光譜儀(AA)

本研究使用之火焰式原子吸收光譜儀為 Agilent Technologies Inc.之儀器，型號為50 AA(Atomic Absorption Spectrometer)，如圖4-6所示，樣本經前處理後(通常為消化處理)，由儀器之霧化系統霧化後，以載流氣體送入火焰中，在適當火焰條件下進行原子化。由中空陰極燈管或無電極放電燈管所產生的特性光，穿過火焰時被原子化後之特定金屬元素所吸收，經由單光器分光處理後，由偵測器測量特性光的強度變化量，再換算求得樣品中待測金屬元素的濃度。



圖4-6 火焰式原子吸收光譜儀



4.3.3 XRF 元素分析儀

本研究使用之手持式元素分析儀(XRF)係為 Thermo Fisher Scientific Inc.的 Niton XL3t XRF，操作電壓為50 kV，可依不同模式量測：合金、礦物土壤、塑料、塗料等。因為僅能於單一角度下進行掃描，於本研究上僅作為金屬分析項目之參考及檢量線之配置參考，實際之定量分析仍以 AA 進行。手持式元素分析儀如圖4-7所示。



圖4-7XRF 分析儀

(源自 <https://www.thermofisher.com>)



4.3.4 高溫熔融爐

本研究使用之高溫熔融爐為正上儀器公司電器式熱熔融爐，型號為 CMF-30H，操作電壓220 V、電流20 A、最高溫度1,500 °C。其外觀如圖4-8所示，內部構造如圖4-9所示，其利用6跟材質為 SiC 碳化加熱棒作為熱源的提供，底部則設置一氧化鋁板，以避免坩鍋破裂時熔液直接損壞耐火材。於本研究主要係進行三成分分析使用。



圖4-8高溫熔融爐外觀



圖4-9高溫熔融爐內部構造



4.3.5材料試驗機

本研究所使用之材料試驗機為高鐵精工所製的試驗機如圖4-10及4-11所示，型號為KT-7001-8，主要可分析之材料規格為5 cm × 5 cm × 5 cm，以上頂式油壓進行，於本研究中主要分析試驗磚之抗壓強度。



圖4-10材料試驗機



圖4-11試驗倉內部構造



4.3.6 沉水馬達

本研究為模擬魚礁置於水域環境之水循環，本研究即以試驗磚之100倍之海水量進行浸泡試驗磚，其過程針對水質進行分析，其使用之沉水馬達如圖4-12及4-13所示，以 MA AP-600，其流量為300 L/hr，主要用於針對不同配比之試驗磚對於水質之影響；OKUMA-1200L 沉水馬達為本研究進行浸泡實驗之水質循環主要之設備，藉以水質流動達到水質平衡及減少改變。



圖4-12 MA AP-600沉水馬達



圖4-13OKUMA-1200L 沉水馬達



4.4 實驗過程

4.4.1 試驗磚製胚

本研究係由木模具進行混拌填充製胚，如圖4-14所示，首要將所需之比例進行混拌，之後即進行模具填充，之後進行脫模修整如圖4-15，可仿效實場之擠壓機與切割機，之後即進行靜置後進行燒結。



圖4-14試驗磚製胚



圖4-15試驗磚研磨



4.4.2 珊瑚礁基座製胚及燒製

本研究於完成試驗磚之燒製，即進行生物復育環保礁之燒製，以木製模具進行填充，如圖4-16所示，於內模具表面鋪上一層塑料模可減少模具拆卸之摩擦，避免模具於燒結前產生龜裂，靜置約5日後可達到乾燥如圖4-17，即效仿磚窯廠之乾燥步驟，後進行脫模燒製如圖4-18。



圖4-16 生物復育基座之填充

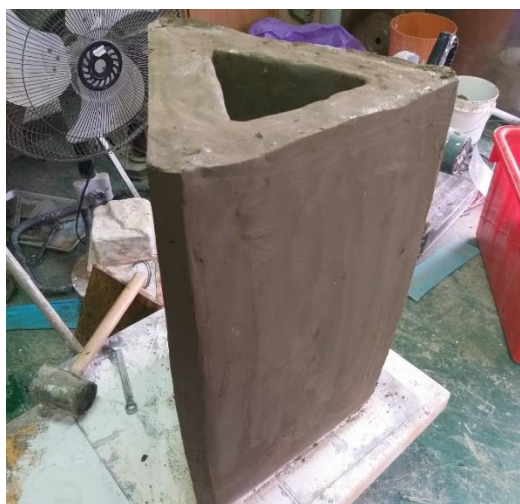


圖4-17 生物復育基座之乾燥後脫模



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究



圖4-18生物復育基座



4.4.3 生物復育試驗磚之浸泡

本研究之試驗磚之浸泡主要分為兩個部分：1.試驗磚對水質之影響、2.試驗磚受海水浸泡後之強度試驗。試驗磚對水質之影響之實驗方式如圖4-19、4-20所示，將沉水馬達放置於磚頭旁，之後進行水質循環。本研究之磚頭浸泡強度之實驗照片如圖4-21所示，將各配比之磚頭置於容器，後於7日、14日、21日、28日，各取一批次4個配比之樣本進行抗壓強度分析。

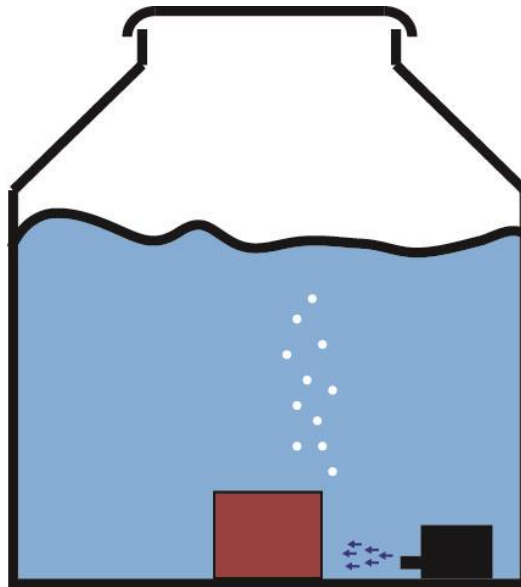


圖4-19試驗磚浸泡示意圖



圖4-20試驗磚之浸泡試驗



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究



圖4-21試驗磚之浸泡試驗



五、結果與討論

5.1 進料物質分析

本研究之主要標的物係為南部某受石油碳氫化合物污染場址之土壤，配合紅磚原料混拌(黏土或砂土)進行燒結製成生物復育環保磚，首先針對進料物質進行分析，其土壤污染之濃度如表5-1所示，主要於 C₆~C₉之分析結果為 2,309 mg/kg、C₁₀~C₄₀之濃度為 759 mg/kg，依此結果顯示，本研究之標的物主要屬低碳數汽油污染(75.3%)，且有部分柴油、燃料油等高碳數碳氫化合物污染(24.7%)；於金屬元素分析部分如表5-2所示，經結果顯示油品污染土壤之主要之污染為 Al (17,600 mg/kg)，其次為 Fe (17,200 mg/kg)，兩者濃度相當，且兩種金屬皆屬地殼元素其餘元素均屬微量，無明顯重金屬之污染狀況。

於製磚原料部分，本研究主要以黏土進行混拌摻配，經分析結果顯示，黏土之主要元素為 Fe (38,700 mg/kg)，其次為 Al (34,600 mg/kg)，均為紅磚燒結之主要影響元素，後續將針對燒結物進行金屬流佈狀況評估。

表5-1 油品污染土壤之 TPH 分析

樣本名稱	C ₆ ~C ₉ (mg/kg)	C ₁₀ ~C ₄₀ (mg/kg)	TPH (mg/kg)
油品污染土壤	2,309	759	3,068



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

表5-2進料物質金屬元素分析(n=3)

元素	黏土		油品污染土壤	
	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)
Al	34,600	0.51	17,600	0.7
Ca	4,000	10.3	3,900	0.6
Cd	3.1	5.7	3.6	4.9
Cr	73.8	0.2	13.3	1.8
Cu	39.9	9.7	19.5	4.7
Fe	38,700	0.3	17,200	0.51
K	3,140	16.8	11,900	22.9
Mg	357	10.9	3,160	25.4
Pb	46.0	10.3	47.1	6.7



5.2 模具設計與製作

(一) 生物復育環保磚試驗磚

為配合本研究之試驗機械體積限制，於此部分主要以木材質治具進行組合，如圖5-1所示，其方式係由底板、短邊板兩片、長邊板兩片組合，以破緊工具進行固定，之後進行填料以達到磚胚製作。



圖5-1 試驗磚木製模具

(二) 生物復育環保磚

依計畫申請之構想進行製作，主要由製作寬60 cm之三角形基座，以中間空洞作為魚棲息處，其模具以三片外板進行製作，中間以三角型水泥塊作為填充，之後進行填料，如圖5-2、圖5-3所示。

(三) 珊瑚礁復育盤

除生物復育環保磚之燒製，作為油品污染土壤。於本研究中亦使用多孔性材料燒製技術製作珊瑚礁養殖用珊瑚礁盤，後續將附著於生物復育環保磚上，共同進行生物復育，主要以蠟模進行製做，藉由較難處理之有色玻璃進行燒製，其外觀如圖5-4、圖5-5所示。



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

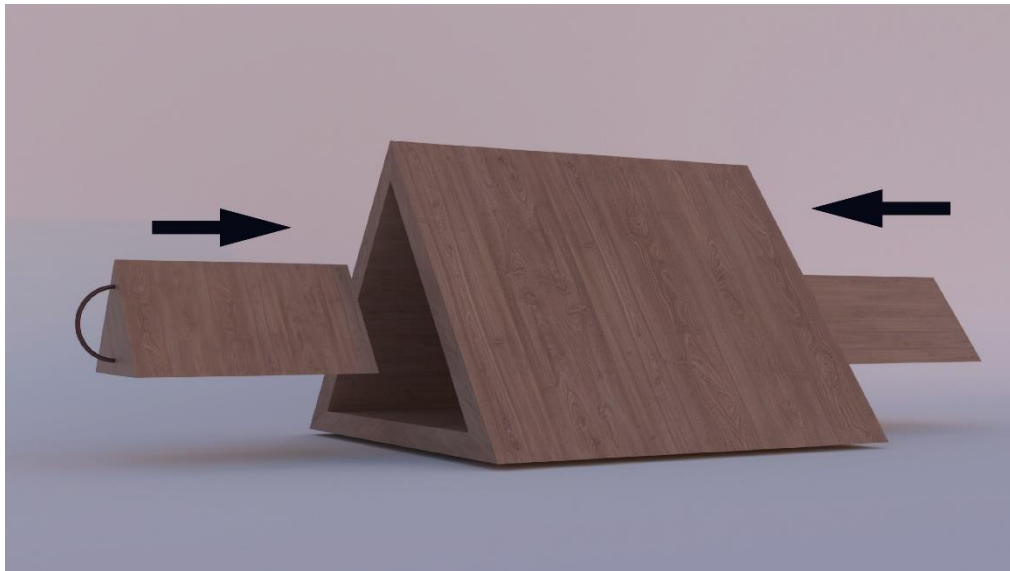


圖5-2魚礁模具組合示意圖



圖5-3生物復育環保磚模具



圖5-4珊瑚礁盤石膏臘膜



圖5-5珊瑚復育盤燒製。



5.3 生物復育試驗磚燒製

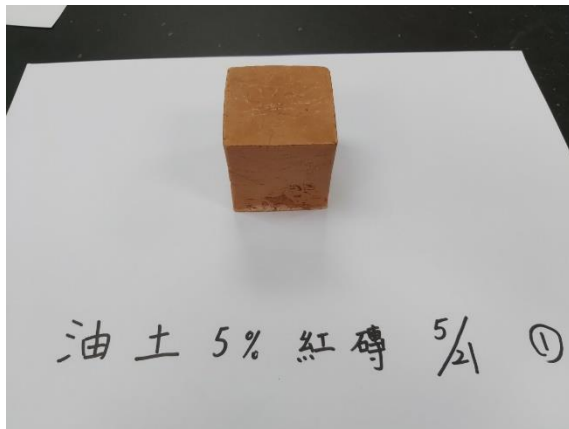
本研究主要針對欲燒製成三角復育基座之配比進行試驗磚燒製，主要之燒製係將欲使用之配比以125 cm³之模具進行製胚，之後進行靜置風乾脫模，其經不同階段將會進行不同比例的收縮，主要於製胚後進行風乾脫模，之後進入105°C 烘箱進行脫水，其試驗磚之材積重量如表5-3所示，油品污染土壤混拌製磚，可以達到明顯之體積縮減，於重量之縮減部分，樣本重量皆以200g 進行填充。結果顯示，燒結後其均有重量之減少，以油品土壤添加量20%之灼燒減量為多，以紅磚之燒製技術共同處理油品污染土壤均有良好的減容減重之效果，後續配合磚品之再利用即可輔佐油品污染土壤之去化。其試驗磚燒結之外觀如圖5-6、圖5-7所示。

表5-3試驗磚個階段材積 (n=3)(Average)

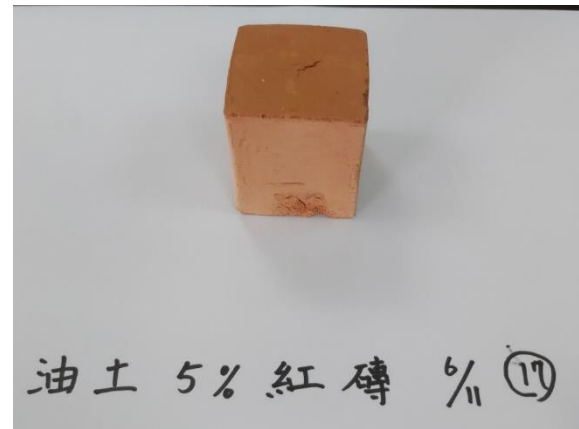
分析項目	A-1 (5%)	A-2 (10%)	A-3 (15%)	A-4 (20%)
風乾後體積 (cm ³ /收縮率)	96(23%)	96(23%)	95(24%)	94(25%)
脫水後體積 (cm ³ /收縮率)	96(23%)	96(23%)	95(24%)	94(25%)
燒結後體積 (cm ³ /收縮率)	87(30%)	87(30%)	86(31%)	86(31%)
燒結後重量 (g)	171.8	167.6	160.6	159.3



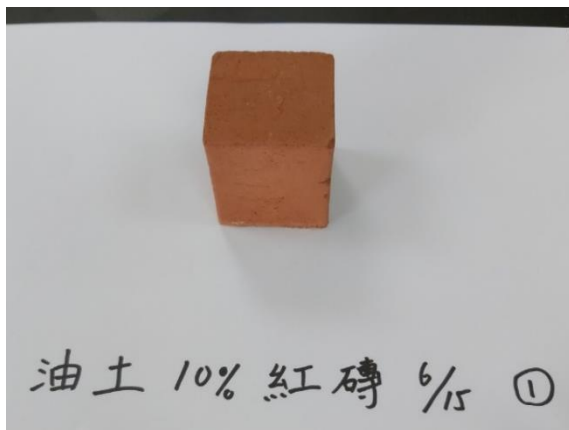
結果與討論



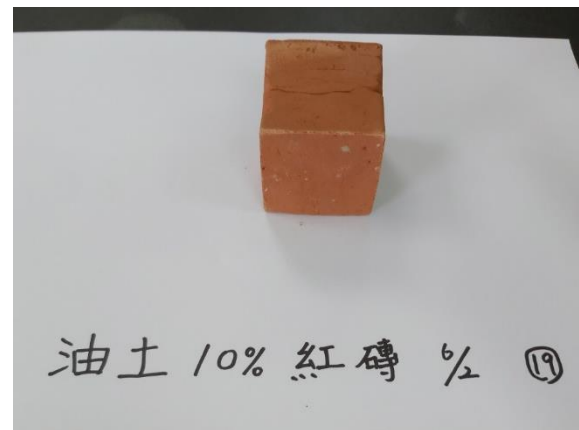
A-1(5%)-1



A-1(5%)-2



A-2(10%)-1

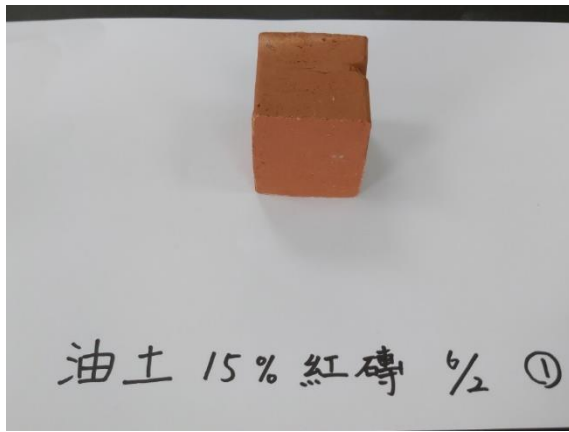


A-2(10%)-2

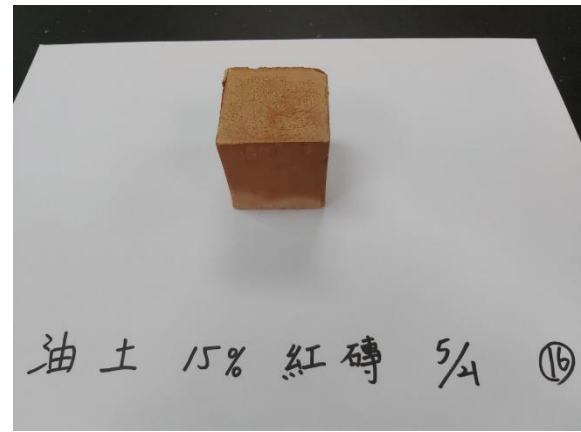
圖5-6生物復育試驗磚



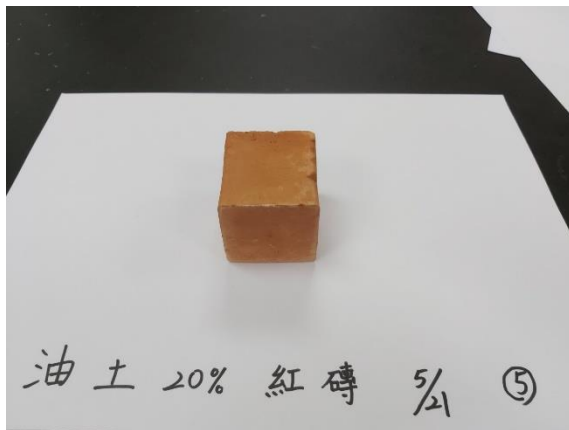
以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究



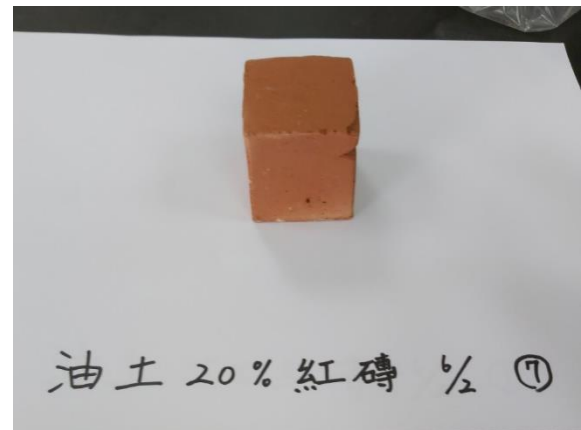
A-3(15%)-1



A-3(15%)-2



A-4(20%)-1



A-4(20%)-2

圖5-7生物復育試驗磚(續)



5.4 珊瑚復育盤燒製

本研究與琪登藝術公司合作，該珊瑚復育盤由琪登藝術公司依所提供配比燒製如圖5-8，燒製後送至實驗室進行分析，根據表5-4顯示，吸水率以 B-3 配比為最高可達60%，表示結構內孔隙較多較為適合珊瑚附著及扎根生長之環境。

表5-4珊瑚礁盤吸水率

分析項目	B-1	B-2	B-3	B-4
吸水率 (%)	5.89	22.4	60.1	4.77



B-1



B-2



B-3



B-4

圖5-8珊瑚復育盤



5.5 生物復育試驗磚分析

本研究主要係針對油品污染土壤混拌製磚原料燒製生物復育環保磚，於燒製過程除油品污染之總石油碳氫化合物之破壞，另需針對金屬之流佈進行分析，經結果顯示，經燒結後之試驗磚，其 TPH 均大幅破壞，以20%之添加配比之破壞效率為最高，其 TPH 為22.9 mg/kg，其他之配比亦有明顯之處理效果(如表5-5所示)。而金屬元素分析部分，其燒結後主要之元素為 Fe 為主，為36,300~38,200 mg/kg，因黏土添加量佔比較高，仍與黏土之成分差異甚小，其次為 Al(30,100~37,000 mg/kg)(如表5-8)。

本研究之目的雖為燒製生物復育之魚礁基座，為探討其作為紅磚使用之可行性，故針對燒結之試驗磚進行抗壓強度與吸水率分析，除可評估作為紅磚之可行性，亦可對於後續浸泡試驗作為比較之參考，其結果如表5-6所示，各試程均有良好的吸水率表現，均低於5%符合1種磚之標準(標準如表5-7所示)，於抗壓強度部分以油品污染土壤添加15%之抗壓強度表現尤佳，其餘均符合3種磚之抗壓強度標準，另外針對試驗磚以毒性溶出測試後結果如表5-9所示，Cd、Cu、Pb 雖有微量溶出但皆符合毒性溶出之規範，對海洋環境影響較小。

表5-5試驗磚之 TPH 分析(n=3)(Average)

分析項目	A-1(5%)	A-2(10%)	A-3(15%)	A-4(20%)	實廠磚
C6~C9 (mg/kg)	ND	ND	ND	ND	ND
C10~C40 (mg/kg)	10.17	9.80	10.02	8.57	9.43
TPH (mg/kg)	24.5	24.1	24.3	22.9	23.4

備註：

1.ND：低於儀器偵測極限。

2.MDL：C6~C9=14.3 mg/kg，C10~C40=7.58 mg/kg。

3.報告處理方式：TPH = 低碳數測值(以 MDL 計或以實際值計算)+高碳數(以 MDL 計或以實際值計算)。

TPH = ND，代表低碳數與高碳數測值均低 MDL



表5-6試驗磚之特性分析

分析項目	A-1(5%)	A-2(10%)	A-3(15%)	A-4(20%)
抗壓強度 (kgf/cm ²)	151	214	495	418
吸水率 (%)	2.03	2.73	2.81	4.38

表5-7CNS382普通磚標準

品質標準	1種磚	2種磚	3種磚
抗壓強度 MPa (kgf/cm ²)	30.0 (300)以上	20.0 (200)以上	15.0 (150)以上
吸水率 (%)	10以下	13以下	15以下

表5-8試驗磚之金屬元素分析(n=3)

元素	A-1(5%)		A-2(10%)		A-3(15%)		A-4(20%)	
	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)
Al	30,100	20.43	30,100	4.83	32,500	17.02	37,000	14.43
Ca	5,160	22.9	4,930	22.1	4,830	13.04	4,870	12.11
Cd	3.20	9.05	3.09	10.94	2.64	12.45	2.64	10.01
Cr	72.4	4.10	76.5	2.49	72.3	5.10	73.9	4.82
Cu	55.3	7.14	43.0	2.17	42.5	3.17	42.0	2.42
Fe	36,300	1.64	37,100	2.21	36,300	1.08	38,200	3.58
K	12,200	4.08	11,700	688	12,000	6.13	12,600	4.12
Mg	951	15.36	688	11.46	748	27.08	893	6.67
Pb	258	61.7	64.0	2.98	65.7	7.26	59.3	6.54



結果與討論

表5-9試驗磚之 TCLP 分析(n=2)

元素	A-1(5%)	A-2(10%)	A-3(15%)	A-4(20%)	實廠磚
	Average (mg/L)	Average (mg/L)	Average (mg/L)	Average (mg/L)	Average (mg/L)
Cd	0.02	0.02	0.02	0.02	0.18
Cr	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.03	0.03	0.03	0.03	0.69
Pb	0.16	0.20	0.20	0.18	ND

5.6珊瑚復育盤之金屬元素分析

本研究之珊瑚復育盤係由琪登藝術公司依所提供之配比燒製而成，而其金屬元素分析如表5-10所示，以 Al(1,537~8,316 mg/kg)、Ca(41,215~50,963 mg/kg)、Fe(5,695~9,125 mg/kg)、K(6,944~7,369 mg/kg)為最高，但此四種元素多屬於地殼元素對環境影響較小，其他金屬元素含量較少對環境污染之風險也較低，另外針對珊瑚復育盤以毒性溶出測試後結果如表5-11所示，僅 Cd、Cu、Pb 有微量溶出但皆符合毒性溶出之規範，對海洋環境影響較小。

表5-10珊瑚復育盤之金屬元素分析(n=3)

元素	A-1(5%)		A-2(10%)		A-3(15%)		A-4(20%)	
	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)	Average (mg/kg)	RSD(%)
Al	1,537	31.8	2,568	29.5	8,316	22.3	4,116	97.3
Ca	50,963	2.07	42,284	10.0	41,215	1.55	45,306	5.16
Cd	3.57	22.4	3.24	13.3	3.32	11.4	3.66	10.4
Cr	56.7	7.10	54.9	8.38	59.5	4.48	56.9	8.13
Cu	175	2.26	176	5.30	166	0.75	175	0.86
Fe	5,695	2.41	6,337	4.33	9,125	0.72	6,113	4.24
K	6,944	1.65	7,034	3.67	7,369	4.10	7,100	3.15

Mg	644	38.8	1,018	73.8	1,446	9.72	603	19.6
Pb	212	29.7	156	11.6	157	4.69	165	3.91

表5-11珊瑚復育盤之 TCLP 分析(n=2)

元素	B-1	B-2(10%)	B-3(15%)	B-4(20%)
	Average (mg/L)	Average (mg/L)	Average (mg/L)	Average (mg/L)
Cd	0.26	0.28	0.26	0.21
Cr	ND	ND	ND	ND
Cu	3.56	5.35	5.26	4.73
Pb	0.05	0.11	0.04	0.09



5.7 生物復育試驗磚之海水環境影響分析

本研究針對海水浸泡後之磚體強度變化及水質變化進行一個月之監測，透過浸泡天數的不同觀察磚體是否會因處於海水環境下被侵蝕而導致磚體結構被破壞，由表5-12顯示浸泡天數28天之磚體 A-2試程仍有410 kgf/cm²之抗壓強度，表示磚體強度結構沒有因處於海水環境之下而快速衰退的狀況發生

另根據表5-13之水質監測顯示，在磚體浸泡31日期間內整體海水之 pH、Do、導電度皆無明顯變化，由此可發現海水環境並無因浸泡磚體導致水質有所改變之情況發生。

表5-12 海水浸泡後強度變化表

浸泡天數	分析項目	A-1(5%)	A-2(10%)	A-3(15%)	A-4(20%)
7 天	抗壓強度 (kgf/cm ²)	328	218	350	280
	吸水率 (%)	11.2	11.6	11.5	12.4
14 天	抗壓強度 (kgf/cm ²)	237	182	231	309
	吸水率 (%)	14.3	14.8	15.0	11.4
21 天	抗壓強度 (kgf/cm ²)	150	115	200	327
	吸水率 (%)	15.0	11.3	10.2	11.4
28 天	抗壓強度 (kgf/cm ²)	322	410	267	356
	吸水率 (%)	12.1	12.0	11.9	11.8



結果與討論

表5-13海水環境之海水監測狀況(31日)

樣本	A-1(5%)				A-2(10%)				A-3(15%)				A-4(20%)			
分析 項目 日期	pH	Do	溫度	導電度	pH	Do	溫度	導電度	pH	Do	溫度	導電度	pH	Do	溫度	導電度
9/28	8.04	6.12	31.4	52.1	8.13	6.19	31.2	51.8	8.15	6.52	31.4	51.8	8.15	6.16	31.4	51.8
9/29	8.09	5.94	32.5	51.7	8.11	5.86	32.6	51.9	8.11	5.99	32.6	51.8	8.17	6.25	31.9	52.1
9/30	8.03	6.44	32.6	51.9	8.02	6.05	32.8	52.1	8.06	6.35	32.8	51.9	8.05	6.33	32.8	52.3
10/1	8.03	6.36	31.9	52.3	8.07	6.38	32.0	52.0	8.05	6.20	32.0	52.1	8.07	6.25	32.1	51.9
10/2	8.11	6.66	31.8	52.5	8.04	5.54	32.5	52.3	8.07	5.80	32.5	52.1	8.13	6.23	31.7	53.1
10/3	8.11	6.14	32.3	52.5	8.00	6.45	32.4	52.1	8.14	6.40	32.1	52.1	8.12	5.94	31.5	53.2
10/4	8.12	5.80	31.0	52.6	8.02	6.36	32.0	52.3	8.16	6.07	31.7	52.2	8.12	6.10	32.2	53.3
10/5	8.11	6.72	32.1	52.5	8.05	6.53	32.1	52.1	8.15	6.09	32.1	52.2	8.11	5.32	32.4	53.3
10/6	8.06	6.61	32.2	52.7	8.00	6.28	32.4	51.9	8.12	6.07	32.4	51.9	8.10	5.47	30.9	52.3
10/7	8.02	6.58	30.7	52.2	8.00	6.11	30.8	52.1	8.06	6.09	30.9	52.0	8.08	6.02	31.6	52.4
10/8	8.07	6.79	31.8	52.2	7.99	5.96	31.8	52.0	8.11	6.03	31.9	51.9	8.06	6.08	31.0	52.4
10/9	8.05	6.82	28.8	51.7	8.03	6.98	29.5	52.0	8.03	6.36	29.6	51.9	8.03	6.59	29.1	52.8
10/10	8.16	6.59	28.6	51.7	8.18	6.41	28.6	51.7	8.23	5.97	28.5	51.4	8.19	7.01	28.6	51.5
10/11	8.19	6.75	28.2	51.7	8.19	6.38	28.6	51.6	8.23	6.65	28.4	51.4	8.19	6.81	28.6	51.4
10/12	8.17	6.79	28.6	52.4	8.16	6.48	28.3	51.6	8.22	6.77	28.4	51.3	8.18	8.19	28.2	51.4
10/13	8.22	6.82	29.1	52.3	8.20	6.87	29.3	51.6	8.24	6.73	28.3	51.3	8.19	7.42	27.7	51.4
10/14	8.17	6.91	29.3	52.6	8.17	6.98	28.8	51.2	8.23	6.20	28.8	51.4	8.16	6.65	28.7	51.3
10/15	8.01	7.10	29.5	52.3	8.00	7.15	29.5	52.0	8.03	6.32	29.5	51.9	8.03	6.82	29.5	52.8
10/16	8.13	7.23	30.0	52.3	8.03	6.58	29.9	52.0	8.07	6.58	29.9	52.0	8.15	8.27	29.9	52.9
10/17	8.08	7.34	29.8	52.4	8.03	6.78	30.3	52.1	8.05	6.51	30.5	52.0	8.11	6.89	29.4	52.5
10/18	8.12	6.99	29.5	52.1	8.07	6.66	29.5	52.5	8.11	6.43	29.4	51.3	8.14	6.49	29.6	52.1
10/19	8.14	7.55	28.9	52.3	8.15	7.11	28.9	51.3	7.96	6.66	30.2	51.6	8.16	6.22	29.9	51.7
10/20	8.12	6.97	29.0	52.1	8.12	6.99	29.1	52.6	8.33	6.33	28.6	52.1	8.19	6.90	30.0	52.2
10/21	8.11	6.00	29.4	51.7	8.06	6.47	29.3	52.7	8.25	6.11	29.9	51.6	8.13	7.43	28.9	51.4
10/22	8.09	6.77	28.8	51.6	8.10	6.81	28.6	51.7	8.13	6.28	28.1	51.9	8.08	6.34	29.3	51.9
10/23	8.10	6.75	29.3	51.2	8.04	7.19	29.1	52.8	8.31	6.06	28.4	51.1	8.16	7.60	29.6	51.6
10/24	8.17	6.82	27.8	51.4	8.00	6.56	27.7	51.4	8.23	6.21	28.9	51.6	8.05	7.14	29.7	52.1
10/25	8.16	6.98	29.7	51.6	8.12	6.81	28.6	51.2	8.09	6.33	28.3	51.3	8.17	6.88	28.7	52.3
10/26	8.13	6.79	28.8	51.7	8.11	7.00	28.8	50.9	8.18	6.15	29.4	51.8	8.03	8.13	29.7	51.7
10/27	8.15	6.58	29.5	52.5	8.08	6.91	29.0	51.7	8.25	6.40	28.7	52.2	8.19	7.09	28.9	51.3
10/28	8.12	6.61	30.0	52.2	8.16	6.67	29.9	52.3	8.21	6.29	30.1	51.5	8.12	6.75	30.1	52.3

備註：

Do 單位：mg/L

導電度單位：mg/cm

溫度單位：℃



5.8實廠可行性驗證

本研究中利用模具將其磚體燒製成三角基座其外觀如圖5-9、圖5-10，以利魚類棲息、珊瑚及藻礁復育之功能，其外型對於抗壓強度測試規格並無法符合測量機械之要求規格且 CNS382僅作為有相同燒結性質概念之紅磚強度參考並非投放人工魚礁之依據，因此實廠燒結磚體將著重於金屬分析是否與實驗室數據之數據相符為主要重點研究。

根據表5-14之金屬元素分析數據顯示，在實廠燒結磚中除了 Al 之數據有較實驗室數據高以外，其餘金屬元素分佈皆與實驗室試驗磚相同且差異性較小，而根據表5-9顯示毒性溶出測試中也與實驗室數據相同，表5-5 THP 分析數據皆與實驗室數據相同，表示本研究於實廠驗證後具有實廠化之可行性。

表5-14實廠磚之金屬元素分析

元素	Average (mg/kg)	RSD(%)
Al	1,7525	54.6
Ca	2,509	2.07
Cd	3.57	22.4
Cr	66.1	10.9
Cu	33.1	4.2
Fe	32,674	3.1
K	7,285	2.6
Mg	1,377	71.5
Pb	134	2.0



圖5-9實廠生物復育磚燒製成品



圖5-10實廠生物復育磚與珊瑚礁盤結合



六、結論

本研究已完成之工作項目為：油品污染土壤之檢測與分析、製磚原料之檢測與分析、模具之製作及燒製及燒結體之檢測與分析。

依計畫預定本研究之後續工作項目如下：

1. 珊瑚礁盤之檢測與分析

本研究主要係探討以油品污染土壤結合多孔性材料燒製技術(琪登藝術公司技術)進行珊瑚礁盤之燒製，創造珊瑚礁復育空間，並藉由魚礁基座結合，以防珊瑚礁之浪擊與復育空間移動，本研究已完成珊瑚礁盤之燒製，根據珊瑚礁盤之金屬元素分析，金屬元素含量以 Al(1,537~8,316 mg/kg)、Ca(41,215~50,963 mg/kg)、Fe(5,695~9,125 mg/kg)、K(6,944~7,369 mg/kg)、Mg(644~1,446 mg/kg)五種元素為高而此5種於元素多屬地殼元素，其他元素含量較少，且以毒性溶出測試後僅 Cd、Cu、Pb 有微量溶出且皆符合毒性溶出之規範，因此對海洋環境影響較小。

2. 魚礁於海水環境之浸泡環境試驗

本研究以紅磚特性做為燒結體之參考標準，本次為4個試程之抗壓強度分別為 A-1(151 kgf/cm²)、A-2(214 kgf/cm²)、A-3(495 kgf/cm²)、A-4(418 kgf/cm²)為燒製後直接進行抗壓強度測試，另外針對浸泡7天、14天、21天、28天均會在燒至四種配比進行浸泡及抗壓強度測試，而透過海水環境浸泡實驗顯示，浸泡28天之後抗壓強度試程 A-2仍有410 kgf/cm²，表示磚體並無因海水環境侵蝕導致結構快速破壞之情況發生。

而浸泡磚體時海水環境之影響，根據實驗結果顯示，試程 A-1~A-4之磚體浸泡31日期間海水環境之 pH、Do、導電度皆無明顯之變化，故海水環境並無因投入礁體而有所改變。

3. 實驗室實驗數據實廠應用

本研究於實驗室完成試驗與分析後進行實廠驗證，本研究以紅磚特性 CNS382為參考標準，在 A-1~A-4試程中抗壓強度皆可達到3種磚以上，浸泡實驗中4個試程皆無明顯結構破壞之問題產生，而4個試程中毒性溶出測試中僅 Cd、Cu、Pb 有微量溶出對海洋環境影響較小，故摻配比 A-4(20%)可摻配較多油污染土壤，此摻配比會為實廠應用較好之摻配比。

4. 實廠燒結體分析

於實廠燒結體完成產出後，本研究團隊對實廠燒結體進行分析，在金屬元素分析上除了 Al 元素實廠燒結有較實驗室數據高以外，其餘元素多與實驗室數據差異較小，而毒性溶出測試與 THP 分析皆與實驗室數據相同。



5.魚藻礁結合

珊瑚復育盤落至水體底部，常因較強之暗流影響將造成復育計畫失敗，故本研究將產出之珊瑚礁盤與復育魚礁基座進行結合，透過結合方式將珊瑚復育盤固定於基座上，提高與海洋底部距離，避免沉積物掩蓋過珊瑚復育盤影響珊瑚及藻礁生長，以達到更有效之復育效果。

6.計畫整體與經濟效益評估

本研究針對油品污染土壤可有效增加一再利用之去化管道並結合珊瑚復育磚對珊瑚及藻礁之海洋復育有更好之發展性，而磚窯產業更可針對後續更進一步對油品污染土壤進行研究紅磚燒結之可行性，以受油品污染土壤代替原料砂土之使用，能有效降低原料使用量降低成本支出，以創造有效之循環經濟，環境永續發展。



七、參考文獻

1. Aursen K. L., White T. J., Cresswell D. J. F., Wainwright P. J. and Barton, J. R., (2006) "Recycling of an industrial sludge and marine clay as light-weight aggregates." , *Journal of Environmental Management* , 80(3), pp.208-213.
2. Araújo A.S.F., Monteiro R.T.R. & Carvalho E.M.S. (2007). "Effect of composted textile sludge on growth, nodulation and nitrogen fixation of soybean and cowpea." *Bioresource Technology*., 98(5), pp.1028-1032.
3. Balasubramanian j., Sabumon P. C., Lazar, J. U. & Llangovan R. (2006). "Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. " *Waste Management*, 26(1), pp.22-28.
4. Chen, H. J., Yang, M. D., Tang, C. W. and Wang, S. Y., (2012) "Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments. *Construction and Building Materials*, 28, pp.387-394.
5. Edson V.C.Rosa., Luciana, Mater., Maria M. Souza-Sierra., Leonardo R. Rörig., Luciane M. Vieira. & Claudemir M. Radetski.(2007). Textile sludge application to non-productive soil: Physico-chemical and phytotoxicity aspects. " *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 68(1), pp. 91-97.
6. Manhong Huang., Liang Chen., Donghui Chen. & Saijie Zhou.(2011). " Characteristics and aluminum reuse of textile sludge incineration residues after acidification." *Journal of Environmental Sciences*, 23(12), pp.1999-2004.
7. Norton F. H. (1970). *Fine Ceramics : Technology and applications*, New York : McGraw-Hill Book.
8. Ramakrishnan, V., Ramesh, K. P., Bang. S. S. (2001) Bacterial Concrete [C]. Proceedings of SPIE, 4234, Smart Materials, Alan R. Wilson, Hiroshi Asanuma, Editors, pp.168-176.
9. Rita Kant.,(2012). *Textile dyeing industry an environmental hazard.*, University Institute of Fashion Technology, Panjab University, Chandigarh, India.
10. Riganti, V., Fiumara, A. and Odobez, G. B.,(2007) "The use of industrial sludges as raw materials in the cement industry." *Waste Management & Research*, 4(3), pp.293-302
11. 工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心，2003。土壤中總石油碳氫化合物檢測之研究。EPA-92-E3S4-02-01。
12. 王惠君，2000。磚材生產過程與材質之調查研究。國科會研究計畫：



- NSC89-2218-E-011-045。
13. 史盟秀，2001。BTEX 在幾種台灣主要土壤中之吸附與降解。國立屏東科技大學，環境工程與科學系，碩士論文。
 14. 行政院環保署土壤及地下水污染整治網，2021。列管場址查詢。
<https://sgw.epa.gov.tw/ContaminatedSitesMap/Default.aspx>。
 15. 李承熹，2017。熱處理整治對土壤力學性質之影響。國立高雄大學，土木與環境工程系，碩士論文。
 16. 阮國棟、簡惠貞，1994。健康風險曝露評估準則之建立。工業污染防治，第50期，pp.1-18。
 17. 林三虎，2020。水洗處理油品污染土壤之個案研究。崑山科技大學，環境工程研究所，碩士論文。
 18. 洪千嫻，2008。加油站土壤中總石油碳氫化合物污染整治成效之研究：不同案例之探討。國立中興大學，環境工程學系，碩士論文。
 19. 陳品親，2014。轉爐石燒結成紅磚產製技術之研究。正修科技大學，營建工程研究所，碩士論文。
 20. 陳建國，2015。以微波加熱處理土壤中總石油碳氫化合物之研究。崑山科技大學，環境工程研究所，碩士論文。
 21. 經濟部能源局，2021。加油站經營實體統計表。
 22. 行政院環保署，2019。重點事業廢棄物統計。
 23. 行政院環保署，2014。污泥處理現況檢討及因應策略。
 24. 曾凱弘，2015。紡織污泥應用於高壓冷結地磚之研究，國立中興大學，台中市。
 25. 張倩菱，2012。產業污泥骨材的最適化燒結配比與裂縫修補研究，國立中央大學，桃園市。
 26. 王靜逸，2007。淨水污泥再利用技術及用途評估之研究，國立交通大學，桃園市。
 27. 顏聰，2012。自來水淨水污泥再利用成輕質骨材之可行性研究，台灣自來水公司委託研究計畫報告。
 28. 顏聰、陳豪吉等，2005。水庫淤泥輕質骨材之產製及輕質骨材混凝土之產業化應用，國家科學委員會，產學合作研究期中成果報告。
 29. 陳盈霖，2009。金屬污泥電漿熔融及港灣污泥燒結製磚評估，輔英科技大學。



以受油污染土壤與底泥燒結製成多孔性海洋生物復育環保磚之研究

30. 王惠君、宋聖榮、劉永中，2001。磚材生產過程與材質之調查研究，台北，第 03-07 頁。
31. 大森 信，2016，連結式サンゴ幼生着床具は最良の Coral babe magnet ではない：すぐれたサンゴ幼生の着生基盤についての考察，日本サンゴ礁学会誌。
32. 大久保 奈弥¹，大森 信²，2001，世界の造礁サンゴの移植レビュー，¹東京工業大学生命理工学部生体 システム専攻，²阿嘉島臨海研究所。
33. 香港大學太古海洋研究所，2020，3D列印陶瓷材料人工礁盤，<https://www.swims.hku.hk/3d-reef-tiles/>。
34. 漁業署，2012，人工魚礁完全手冊。