109年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號+名稱	06 301
作品中文名稱	綠屋頂栽培介質:生物炭陶粒之開發與應用
作品英文名稱	Development of Biochar Ceramsite as a Novel Green Roof Substrate

參賽學校：_____國立台灣大學_____

指導老師：_____ 鄭智馨___教授_____

團隊成員：_____劉宇祥、朱毅豪_____

作品摘要

本方案利用農業有機廢棄物與水庫底泥的結合，藉由低溫燒結方式生產生物炭陶粒，作為一種新型的綠屋頂栽培介質資材。創作資材不僅提供可行的水庫與農業廢棄物處理方案，生物炭陶粒均較現行商業栽培資材，呈現較佳的吸水、保肥與作物生長能力。整體而言，生物炭陶粒除了提供綠屋頂栽培介質資材外，亦具備其他環境效益，就如(i)減少水庫底泥問題與農業廢棄物露天焚燒的碳排放，(ii)經炭化的生物碳可以提供長時間的固碳效果，(iii)土壤與水質改良能力，以及(iv)優美外觀可以供嗜好民眾在栽培使用。

設計構想

台灣的廢棄物處理問題

水庫底泥為目前台灣許多水庫面臨的問題。以石門水庫為例，根據經濟部水利署北區水資源局(2018)統計，截至106年11月止，累積淤積量已達10,713萬立方公尺，淤積率約34.66%，年平均淤積量為235萬立方公尺。水庫底泥質地為黏質壤土，可以作為輕質骨材、磚塊或是陶器等用途。若將其用於生產生物炭陶粒，便不需要仰賴進口，並可將每年產生之水庫淤積物化為可利用資源。

為製作輕質栽培資材，可以在原料中添加有機質作為發泡劑以增加成品孔隙率，這些添加物同樣可以以有機廢棄物作為原料。台灣每年產生大量的農業廢棄物，其中生物性農業廢棄物便是優質來源。根據行政院農業委員會(2018)統計，在民國107年生產的生物性農業廢棄物約為4,983,143公噸，其中植物性的農業廢棄物占2,461,738噸。

動機

綠屋頂是一種藉由在建築屋頂種植植栽，達到綠化效果的建築工法，具有減少溫室熱島效應、增加二氧化碳吸收等功能，在氣候變遷的現今，其重要性漸漸被重視，並已獲得政府的一些政策支持，如《臺北市綠建築自治條例》、《臺北市新建建築物綠化實施規則》等。

其中，薄層式綠屋頂由於具有低維護管理、低承載需求、成本低廉等特性，因此被廣泛利用於屋頂綠化。為了承載量需求，薄層式綠屋頂通常使用輕質的材料作為介質。目前常使用的介質如火山岩、發泡煉石性質上就非常適合，然而其缺點也是不可忽視的，包括碳足跡、能耗、當地環境衝擊、水分及養分持留能力差。然而，在台灣本地早有大量可以利用的材料，卻被作為廢棄物處理，每年不僅消耗大量的成本，也成為環境問題，因此本團隊嘗試用水庫底泥和農業廢棄物，製成新型生物炭資材，來取代現行的發泡煉石，在保證其現有的輕質以及易排水特性之外，亦改善上述缺點。

界定問題

台灣可用於綠屋頂的輕質栽培資材，例如發泡煉石，儘管十分符合綠屋頂使用之需求，然而卻有以下幾個缺點：1.碳足跡高。台灣大部分陶粒需要仰賴進口，90%的發泡煉石來自中國，也有部分來自歐洲，在運輸過程中都產生大量碳足跡。 2.高能耗。1200°C燒結的燒結溫度，有機質以及黏土中不同的化學成分會分解和燒失，會產生大量的溫室氣體，如：二氧化硫、二氧化碳等 3.環境衝擊。這類栽培介質的原料為黏土礦物，為不可再生資源，使用這些材料造成了潛在的環境影響。 4.水分與養分的持留能力極差。實際使用上需要替植物頻繁灌溉以及施用肥料或搭配有機介質使用，對台灣本就緊缺的水資源產生更大的壓力，徑流的肥料或有機物殘渣亦造成水質惡化，增加環境養護的成本。

設計內容

現行發泡煉石作為栽培介質有以下幾大缺點：仰賴進口、能耗高、環境衝擊、保水保肥能力差。因此本團隊嘗試製作新型栽培資材，具有以下優勢：(i)採用在地材料製作，有效降低產品跨國運輸產生的碳足跡。(ii)用低溫氣氛燒結(<1,000°C)，本作為發泡劑的有機質在缺氧環境下形成生物炭，不僅降低能耗及減少溫室氣體排放，亦得以發揮額外的保水保肥能力。(iii)生物炭本身帶有一定的氮、磷、鉀等植物所需的元素，可減少作物的肥料施用。

產品市場規劃

表一、產品市場規劃

市場研究

台灣的園藝發泡煉石以進口為主，因其輕質且不易孳生蟲害的特性，常用於薄層綠屋頂的主要介質，然缺乏保水保肥能力，需要大量人力物力建置高頻率的灌溉施肥系統。

目標市場

承包綠屋頂工程的園藝公司

▼

有園藝嗜好的民眾

▼

進行環境教育的場域及活動對象

競爭優勢及定位

優勢	高保水保肥能力、低製作成本、解決本土廢棄物問題
劣勢	密度較發泡煉石為高
機會	政府積極推動水庫底泥資源化
威脅	複合介質可能可達到類似效果

特色清單

民眾端	節省肥料施用、可降低養護頻率、新產品選擇
政府端	易推廣、增加水庫使用壽命、增加廢棄物處理
環境端	減少焚燒之空氣汙染、降低肥料造成的水質汙染、提供固碳能力

作品介紹與材料說明

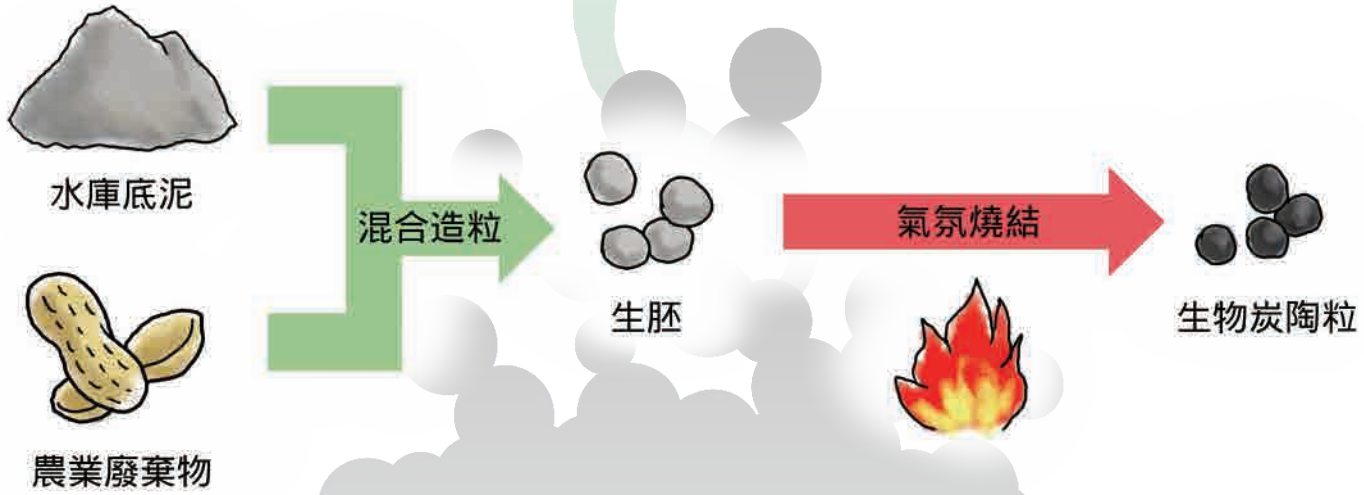
使用材料

1. 本產品的主體為水庫底泥。以石門水庫底泥為範例，與水庫方連絡後，從五號沉沙池取得樣本，以怪手挖掘表面以下一公尺以內的底泥，並去除明顯的草莖。
2. 作為添加物的農業廢棄物則因種類而異，以花生殼為例，取自彰花雲林一帶之花生農，價格約為每公斤5元。

製作流程

如圖一所示，大致上分為兩個步驟：

1. 生胚製作
   將水庫底泥、有機農業廢棄物研磨成粉末，將兩者與水混合成黏土狀，再利用造粒設備製成特定大小之生胚。底泥與農業廢棄物的混合比例，以及造粒大小可依需求
2. 做調整。
   低溫燒結
   將製成之生胚放入高溫爐內進行低溫氣氛燒結，燒結後，生胚中的有機成分經熱裂解轉化為生物炭，而熱裂解產生的氣體及損失體積提供了成品的孔隙結構，使本產品成為具多孔性並且含有生物炭之輕質陶粒資材。成品外觀如圖二所示。



圖一、生物炭陶粒製程示意圖。

圖二、在各種製程條件下生產之生物炭陶粒。

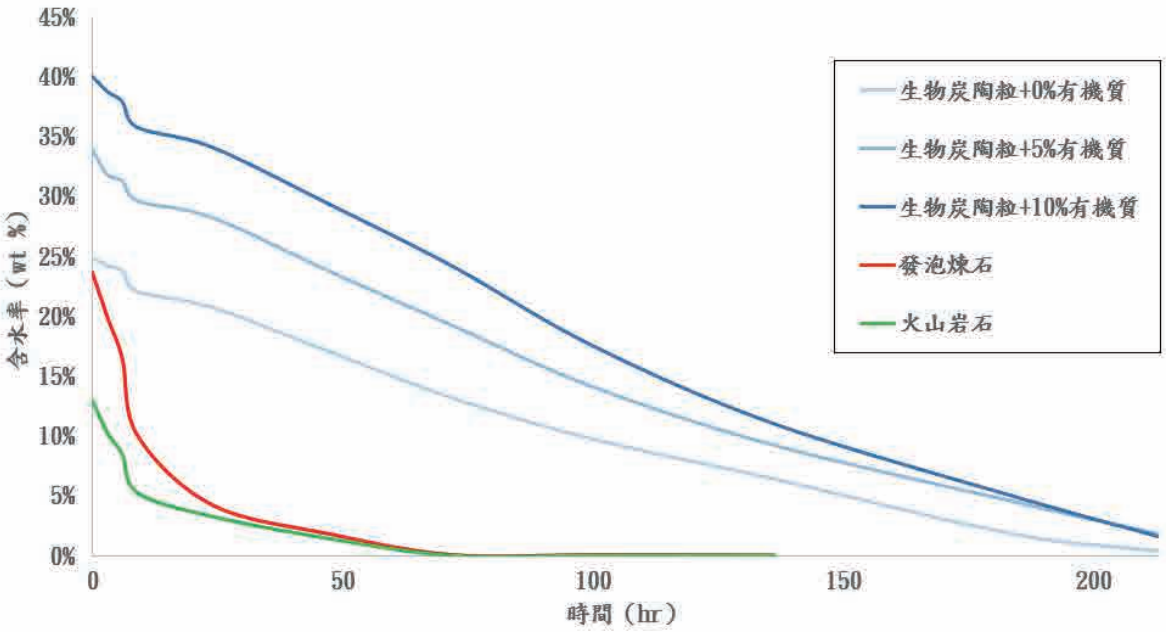
操作範例-性質試驗

我們以有機質添加量0~10%的生物炭陶粒為例，測量它們的基本性質，與兩種現行無土栽培介質(發泡煉石、火山岩石)做對照，在基本性質的表現(表一)，我們可以看到生物炭陶粒具有高養分含量，特別是在兩種無機態氮的部分。由於氮是植物生長最需要的養分，能夠減少額外的肥料使用量，並且可能對綠屋頂建立初期具有正面的幫助。

而在保水能力方面，在先前測試中，我們得知生物炭陶粒的永久凋萎點大約是8%左右，兩種介質則為1%。我們在實驗室環境下，以28°C的溫度，間隔一定時間測量各種介質的含水量，得到他們的水分-時間曲線(圖四)。從圖中可以看出，生物炭的保水能力高於兩種商用無土栽培介質，兩種介質在48小時內達到永久凋萎點，而生物炭陶粒則可維持100小時以上。在都市屋頂環境植物常會面臨缺水的壓力，因此我們預期生物炭陶粒所提供的保水能力可以對植物的生長產生正面的助益

表一、生物炭與兩種現行無土栽培介質之基本性質。

	生物炭陶粒 +0%有機質	生物炭陶粒 +5%有機質	生物炭陶粒 +10%有機質	發泡煉石	火山岩石
pH	8.8	9.4	9.4	6.5	8.6
C(%)	0.4	1.2	2.9	0.1	0.2
NH_4^+ (mg/kg)	4.9	10.2	10.1	0.1	ND
NO_3^- (mg/kg)	85	105.6	114.9	14.5	29.7
P (mg/kg)	2.6	5	5.3	3.6	24.3
K^+ (cmol/kg)	0.9	0.8	1	0.2	0.6
Mg^{2+} (cmol/kg)	0.7	0.8	0.8	0.1	0.8
Ca^{2+} (cmol/kg)	5.2	5.9	5.8	0.6	5.7



圖四、生物炭資材與兩種商用資材(發泡煉石、火山岩)之保水能力比較。

操作範例-盆栽試驗

. 為了進一步測試本產品的性能，實際使用生物炭陶粒作為無土栽培介質，並以兩種現行商用資材(發泡煉石、火山岩石)為對照組，進行為期四個月的萬壽菊(Tagetes erecta)栽培試驗。實驗條件如下：(i)每天給予固定水量(ii)未添加任何形式肥料(iii)於全光照之溫室中種植，其最終結果如表二與圖五所示。從圖中可以看出本產品對於植物生長有極大的改善，不僅苗高明顯增加，葉子的生長也更為茂盛，與傳統素材做對比，平均的乾重更增加了6到12倍之多，足以證明本產品在實際運用上的優勢。

本產品適用於從小型盆栽到戶外大範圍耕作等各種環境，不須額外處理即可直接種植植株，如圖六所示，萬壽菊地上部及根系發展狀況皆良好。但陶粒介質間空隙大，不適合直接用於種子育苗，實施時建議將種苗培育至適當大小再行移盆。另外，生物炭呈鹼性，因此特別適合改善台灣多數酸性土壤的田地，但較不適合種植本就偏好酸性環境之植物。

表二、傳統無土栽培資材與生物炭陶粒種植萬壽菊(Tagetes erecta)之苗高與乾重比較。

	生物炭陶粒	發泡煉石	火山岩
苗高(cm)	47.17	18.78	16.45
乾重(g)	2.25	0.18	0.37

圖五、萬壽菊(Tagetes erecta)栽植於發泡煉石(左一)、火山岩石(左二)與三種生物炭陶粒之生長狀況比較。

圖六、生物炭資材實施範例。左圖為地上部生長情況，右圖根部生長情況。

創作特點與創意說明

依需求彈性調整產品特性

由於生物炭陶粒性質與燒結溫度高度相關，可以透過製程中對溫度的調整來改變最終產品的性質，當本產品作為栽培介質或土壤改良劑時，以低燒結溫度製備，可提供更高的養分與水分持留能力；而未來若擴展應用範圍至淨水濾材，則可以提高燒結溫度，可生產有效吸附重金屬及部分有機汙染物之生物炭陶粒。

硬體設備門檻低，現行廠商可以直接投入製造

生物炭陶粒製程簡便，在幾大主要環節中，現行設備做微幅修改即可達到相應效果。(i)在原料製備上，僅需添置絞碎機，製成有機農業廢棄物粉料；(ii)造粒方面則完全不須機器設備上的改動，僅需調整添加水分比例，讓造粒變得順暢；(iii)而燒結方面，亦不需增添設備，僅需減少空氣流量，使爐內形成還原環境即可。低硬體設備前期投資，可以讓廠商不用承擔過高的投資風險，快速回收成本，亦方便政府推廣此種新型資材至市場。

100%廢棄物永續利用

生物炭陶粒的原材料，可使用但不限於水庫底泥和有機農業廢棄物，亦可採用其他種類的矽酸鹽礦物，如：河川疏濬泥沙、自來水廠淨水污泥。其中淨水污泥每年亦有約200,000噸的產量，可配合經濟部推動之《經濟部事業廢棄物再利用管理辦法》來進行生產。發泡劑則可以替換為其他種類之有機廢棄物，如稻稈、稻殼、木屑等。由於生物炭陶粒可以100%由各式廢棄物所製成，因此可達到永續利用的目的。

兼顧低能耗與美觀實用性

生物炭陶粒之燒結溫度約在600°C至1,000°C之間，較現行發泡煉石的1,100°C至1,400°C為低，依窯爐種類不同，可以減少瓦斯或電力的使用，降低製作過程中的碳足跡。同時成品根據有機廢棄物混合比例不同，呈現灰白至烏黑色，整體來看十分美觀，不僅適合用於農業用途，亦可作為桌上小盆栽的底材，與植物一同提供種植者身心療癒的感受 。

作品應用範圍與發展潛能

應用範圍

1. 基於無土栽培技術的多方面應用

由於本產品為兼具保水、保肥能力之輕質材料，特別適合用於具有需要適應乾旱氣候以及低承重需求的薄層式綠屋頂，並且可用於諸如花卉、蔬菜、園藝植物等任何無土栽培系統，並可依照實施地點氣候與環境及目標植物生理需求調整成品性質。

2. 土壤改良

本產品具有改善土壤性質的能力。將它作為土壤添加劑，在黏重的土壤中可以增加土壤孔隙度，改良透氣及導水性質；添加在砂質土壤中則可提高保水及保肥能力；亦可以改善土壤pH值，調整酸性土壤至植物適合之生長範圍。另外，使用養分含量高的產品可以作為土壤中的緩釋肥料，增加土壤的肥力。

3. 淨水濾材

由於生物炭陶粒性質與燒結溫度有高度相關，因此可以透過製程上調節燒結溫度達到調整最終產品特性的目的。當提高燒結溫度時，成品養分含量較低但吸附能力較高，可以吸附水中的重金屬離子及其他無機或有機汙染物，固定在材料中以達到淨水效果，因此可作為良好的濾材，應用於汙水處理等方面。

圖五、生物炭陶粒應用範圍概念圖。

未來發展潛能

1. 開發迅速、擴展潛能高

生物炭陶粒介質無須精密儀器，額外裝設的設備少，只需在民間廠商既有製程中做少量修改即可生產，由於額外的硬體成本少，入門門檻低，因此推廣較為容易，預期可提高業界廠商的投資意願。

由於本產品僅需修改製程條件便可生產出各種具有獨特性質的產品，可最小化設備的更動，在不增加額外硬體成本的情況下，企業仍可迅速訂定商業策略，因應市場需求生產特定功能的商品，具有良好的市場適應能力和競爭力。

2. 產學合作

由於較低的生產成本以及100%台灣本土廢棄物再利用的特性，在未來可以作為推廣中小學環境教育的教材。學生們實際操作種植，透過實際互動及體驗增加學員的成就感，並以生物炭為切入點，搭配節能減碳的課程，增加學生們的環境意識。

其他

工作分配

表三、參與人員工作分配表。

人員	工作
全體	企劃書撰寫、資料蒐集
劉宇祥	視覺設計、市場規劃
朱毅豪	栽培試驗、圖片繪製

成本說明

表四、每立方公尺 之 能源以及耗材成本

項目名稱	價格
電費*	8kw × 3.3hr × 3元 × 0.8(非連續加熱)× 10.27(體積) = 650元
交通運輸**	60元
40L氮氣鋼瓶	267元
總計	977元

*以46cm*46cm*46cm電爐計算

**以35噸車/ 20立方米載運量計算

表五、可能需求的附加設備

項目名稱	價格
大型磨粉機	~100,000元(依需求量可選擇不同產量之機台)

參考文獻

經濟部水利署北區水資源局。(2011)。石門水庫淤泥利用處理規劃及設計成果報告。經濟部水利署北區水資源局。

經濟部水利署北區水資源局。(2018)。107-108年度石門水庫排洪排砂對下游河道生態及沖淤影響研究。經濟部水利署北區水資源局。

行政院農業委員會。(2018)。綠色國民所得帳農業固體廢棄物歷年表。行政院農業委員會農業統計資料查詢。取自https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/common/Download.aspx

台灣綠屋頂暨立體綠化協會http://www.greenroof.org.tw/