

# 114 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 生物循環
作品中文名稱	循環利用蛋殼為一種產製活性碳之綠色觸媒
作品英文名稱	<b>Recycling of eggshell as a green catalyst for producing activated carbon from biomass</b>

參賽學校：國立屏東科技大學

系所名稱：生物資源研究所/環境工程與科學系

指導老師：蔡文田

團隊成員：林育全、汪嘉慧、賀培綺

## 一、作品中、英文摘要

### 中文摘要

鑑於蛋殼經高溫(>800°C)鍛燒後會產生二氧化碳(CO<sub>2</sub>，最重要的溫室氣體)，本創新作品係利用其作為稻殼製備成活性碳過程中之活化氣體使用，將生物無機廢棄物及農業剩餘資材轉化為高附加價值之氧化鈣及活性碳，實現自然資源的永續利用。主要結果顯示，在適當稻殼/蛋殼配比及碳化溫度下所製得的碳材相對於無蛋殼下可超過 60%以上的孔洞特性增加，且具有一定比率的中孔洞特性；此外，於稻殼蛋殼比 1:6 時所產製的碳材最高比表面積值接近 600 m<sup>2</sup>/g。故本創意實作碳材產品涵蓋「綠色負碳材料」、「生物循環經濟」與「責任消費與生產」。

### 英文摘要

In light of the fact that eggshell (EG) generates carbon dioxide (CO<sub>2</sub>, the most significant greenhouse gas) upon high-temperature calcination (>800°C), this innovative study utilized the released CO<sub>2</sub> as the activating gas in the process of converting rice husk (RH) into activated carbon. By transforming agricultural residue and bio-inorganic waste materials into high-value-added products—namely calcium oxide and activated carbon—this work contributed to the sustainable utilization of natural resources. The main findings showed that the resulting carbon products with over 60% increase in pore properties can be obtained under the proper conditions of EG/RH ratio (ratio of EG to RH) and carbonization temperature. Furthermore, the highest surface area of approximately 600 m<sup>2</sup>/g can be achieved at a ratio of 1 to 6. In brief, the innovation-implemented carbon products covered green carbon-negative material, bio-circular economy and responsible consumption & production.

## 二、設計構想（包含構想來源）及運作說明

### 1. 背景

根據最新農業統計年報資料顯示[1]，近幾年產生之雞蛋介於 77-89 億顆(表 1)，若以 113 年國內共產出雞蛋 89.41 億顆；每一顆雞蛋約產生雞蛋殼 10 g 推估，國內約產出 9 萬公噸雞蛋殼。就其產生源而言應大多來自液蛋食品工廠、家禽畜牧場、糕餅店、速食連鎖餐飲店、一般早餐店等，這些生物無機廢料目前於「農業事業廢棄物再利用管理辦法」並沒有將其列為再利用項目[2]，除少數液蛋食品工廠有將其再利用為填充或鈣質材料外，目前多直接送至焚化爐高溫處理，由於雞蛋最主要化學組成為碳酸鈣( $\text{CaCO}_3$ )，此種處理不僅耗能且高溫燃燒排放出溫室氣體二氧化碳( $\text{CO}_2$ )，但若能予以回收再利用，則廢棄物也可成為有價的資源或產品。[註：焚化爐燃燒溫度約  $850^\circ\text{C}$  適為碳酸鈣分解為氧化鈣之鍛燒溫度[3]]。

稻殼是台灣每年產量超過 30 萬公噸的重要農業副產品[4]。其主要成分超過 80% 為木質素纖維，並含有 15-20% 二氧化矽灰分。目前國內對稻殼的利用多集中於較低層次的用途，如墊料、育苗媒介、堆肥、飼料原料及薪材或輔助燃料。然而，稻殼真正的潛在價值在於其木質素纖維成分可用來生產碳材料，例如生物炭和活性碳。近年來，政府推動的「5 + 2」產業創新政策中的「新農業」及「循環經濟」理念，旨在透過資源再利用，積極推廣農業廢棄物的循環使用及有機農業，進而有效減輕廢棄物造成的污染問題，促進資源的有效利用，形成一種「從搖籃到搖籃」的新型生物經濟模式。

活性碳生產技術已相當成熟，原料多以椰子殼或煤為主，而由於其本身具有優異的孔洞與吸附特性，故廣為各項工業與民生產業所採用。例如脫色、排氣、脫臭、純化、去毒、除氯、回收氣相中揮發性有機物及有機物逸散之控制、氣體分離及液相系統中有機物之吸附等用途。依財政部關稅署統計的資料[5]，國內活性碳進口量節節上升，113 年國內活性碳進口量與其總值分別約為 2.5 萬公噸與

新台幣 17 億元，遠超過國內可生產量，顯示市場因高科技及民生產業使用量增加而擴大。但傳統上生產活性碳多使用國外進口椰子殼且屬於高耗能及較高污染程序之工廠製造。

表 1. 國內雞蛋生產顆數 [1]

年度	雞蛋顆數(千顆)
108	7,695,925
109	8,172,963
110	8,327,354
111	8,242,194
112	8,002,960
<b>113</b>	<b>8,941,093</b>

## 2. 動機與目的

目前對於碳捕集與封存技術有許多類型，其中之一為透過生物礦化作用所形成殼類物質，包括水域貝類及陸域家禽類動物，是近年來較受矚目的封存技術。以蛋殼為例，其原理是利用蛋雞在成長過程中，因生物呼吸作用大氣中  $\text{CO}_2$  易溶於微鹼性血液之特性，使其成為游離態的碳(碳酸根離子)，再吸取水中鈣離子或飼料中鈣元素進行固化(礦化)作用成碳酸鈣(少部分會形成碳酸鎂、磷酸三鈣)，即鈣結晶化形成柵欄狀的硬質構造，最後沉積在蛋殼中 [6-8]，由於蛋殼上有許多氣孔，故具有多孔結構。圖 1 為雞蛋的固碳作用示意圖。

活性碳生產程序中通常是分為物理活化與化學活化二大類，兩者之程序及所產製活性碳特性比較如表 2 所示。在物理活化程序中係使用水蒸氣或  $\text{CO}_2$  氣體於約  $750-950^\circ\text{C}$  左右溫度下進行氣化反應 (Partial gasification)，故又稱為氣體活化，水蒸氣活化程序需藉鍋爐產生高溫水蒸氣，較耗能源但氣體便宜； $\text{CO}_2$  活化程序則能源消耗較低，但氣體成本高且會排放未反應部分至大氣中而增加溫室氣體。化學活化程序則是利用浸漬化學藥品(常用之化學藥品活化劑有磷

酸、氯化鋅與鉀鹽)於約 500°C 左右溫度反應下而得，又稱為藥品活化，但仍需進一步以酸洗或水洗來除去殘留的活化劑或雜質等，故會產生大量的廢水，因此商業化製造程序大多使用物理活化方法生產活性碳。由上說明，CO<sub>2</sub> 活化程序有其優勢，但如何尋求 CO<sub>2</sub> 氣體來源是可再生的，是本構想之設計動機。

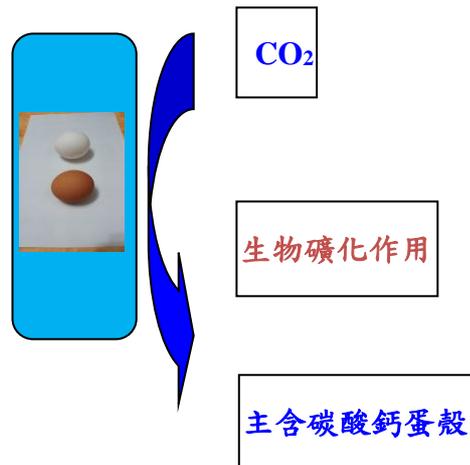


圖 1. 雞蛋的固碳作用(生物礦化作用)

表 2. 物理活化程序與化學活化程序之比較

主要活化條件/缺點	物理活化程序	化學活化程序
活化劑	水蒸氣、CO <sub>2</sub>	磷酸、氯化鋅、鉀鹽
程序步驟	二段式(先碳化/再活化)	一段式(碳化/活化同步進行)
操作溫度	700-1000°C	400-700°C
比表面積	較低	較高
孔洞體積	較低	較高
微孔比	較低	較高
影響孔洞特性程序參數	活化氣體種類與劑量、活化溫度、持溫時間	活化藥劑種類與含浸率、活化溫度、持溫時間
缺點	活化爐體投資與燃料成本較高	活化藥劑與衍生廢酸液處理成本較高、殘留少量活化劑

### 3. 創意構想來源

本創意企劃是指導教授從事農業木質廢渣產製活性碳(CO<sub>2</sub> 物理活化)研究之際，再加上實驗室團隊中學生熱愛蛋類製品，經查蛋殼可燒結產出氧化鈣(CaO)與 CO<sub>2</sub>，而 CO<sub>2</sub> 又是溫室氣體，故本企劃同時結合木質纖維素所含生質能源利用與碳質轉化為活性碳，以及蛋殼再利用於氧化鈣生產與其過程中所衍生 CO<sub>2</sub> 為製造活性碳之活化氣體；同時考量高溫鍛燒產製氧化鈣及物理活化產製活性碳之溫度相當(約 850-950°C)，故可利用高溫鍛燒的熱能於物理活化，且氧化鈣本身為一種蓄熱材料。

## 三、 作品材料說明

### 1. 製作流程

本創意實作初期實驗流程係由一般餐飲店所取得的雞蛋殼，以稀醋酸液含浸以利剝除蛋殼膜。然後藉由不同配比(0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5)與稻殼搭配，以小型垂直式碳化爐進行 850-950°C 碳化(停留時間 30 min，每批次稻殼 2.0 g)；所產製碳材產品進行其物化分析(比表面積分析為主)，以驗證蛋殼渣是否具有物理活化劑之功能；初步結果顯示在 950°C 下所產製碳材產品之特性較佳，表示蛋殼此時才能將 CO<sub>2</sub> 完全釋出。圖 2 為後期本系統摘要流程；首先以研磨機將乾燥之蛋殼破碎成粉體，藉由垂直固定床式高溫鍛燒/活化設備系統(圖 3)進行 950°C 碳化(停留時間 30 min，每批次稻殼 1 g、蛋殼 1 g - 6 g)，產製氧化鈣與活性碳產品(圖 4-7)，並產製僅炭化無添加蛋殼及 CO<sub>2</sub> 之生物炭(BC)對照組及無添加蛋殼並通鋼瓶氣體(CO<sub>2</sub>)活化之活性碳對照組，最後進行產品特性分析(以比表面積分析為主)，以驗證不同配比蛋殼粉體高溫鍛燒後所產生 CO<sub>2</sub> 具有活化劑之功能程度。創意實作期間之所產製碳材特性分析，孔洞特性分析係使用指導教授實驗室之表面積-孔洞分析儀器(Model: ASAP 2020 Plus; Micromeritics Co., USA)，表面多孔性微結構係委託學校貴重儀器中心之掃描式電子顯微儀器(Model: S-3000N; Hitachi Co., Japan)。

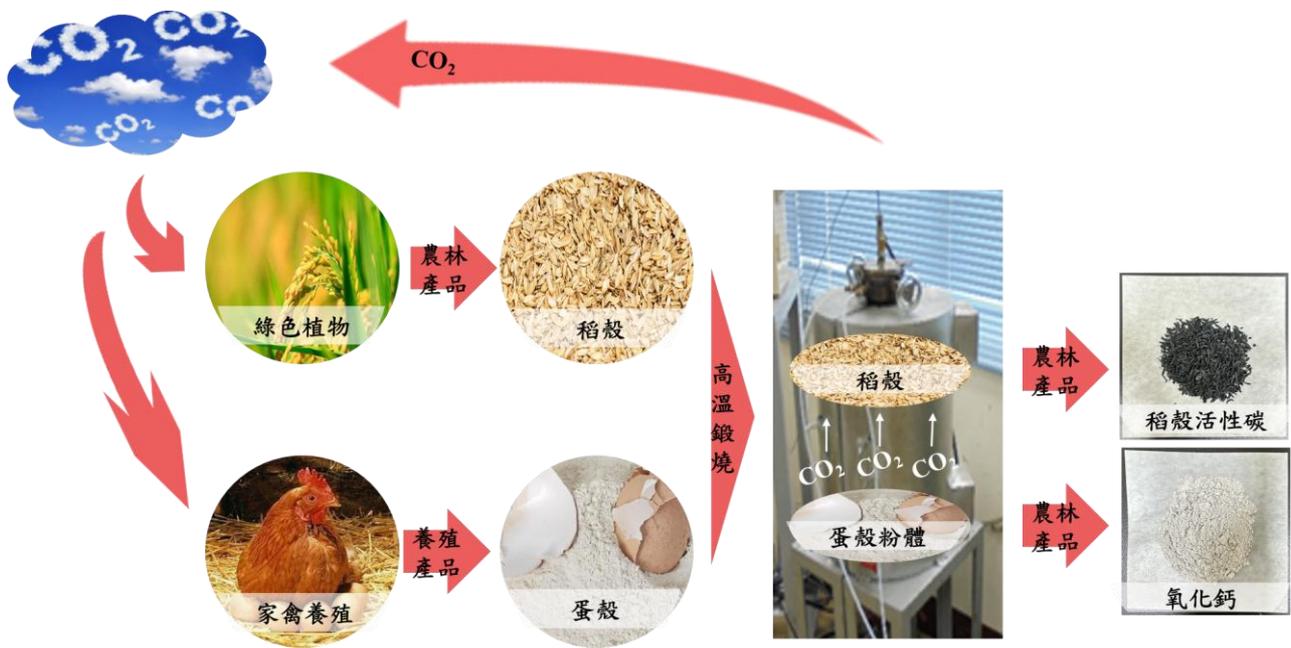


圖 2. 系統流程圖



圖 3. 垂直固定床式高溫鍛燒/活化設備系統之實體照片



圖 4. 蛋殼及蛋殼粉體之實體照片



圖 5. 稻殼之實體照片

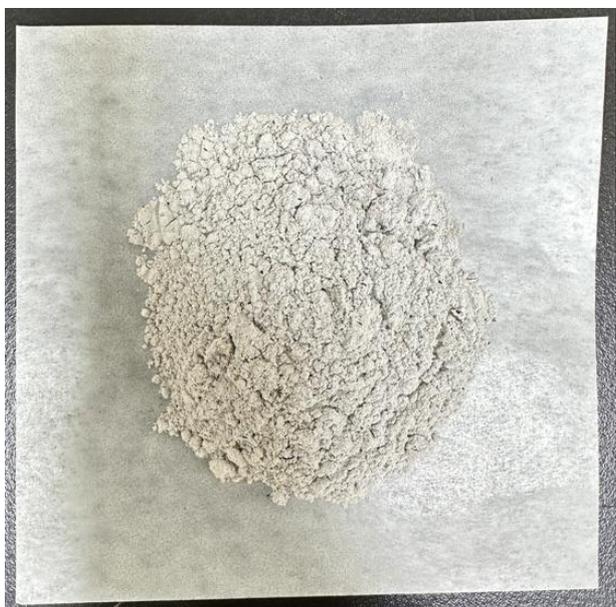


圖 6. 氧化鈣產品照片



圖 7. 稻殼活性碳產品照片

## 2. 實驗數據與分析

表 3 為所產製稻殼活性碳[編碼為 RH 稻殼、E 蛋殼、BC 生物炭(未添加蛋殼且僅通入氮氣)、AC 活性碳(未添加蛋殼且有通入 CO<sub>2</sub>)、950 溫度、30 停留時間、1:2 稻殼蛋殼比例]之 BET 比表面積值(最常使用之比表面積測量方法，為利用 Brunauer-Emmett-Teller 方程式所計算得到)。從表中數據可以看到，蛋殼劑量為重要之影響因子，未添加蛋殼組(RH-BC-950-30)，其 BET 值僅為 327.3 m<sup>2</sup>/g，

而蛋殼添加越多，所得 BET 值越高，表示所釋放的 CO<sub>2</sub> 越多，其活化作用越顯著，而於稻殼蛋殼比 1:6 時有最高之 BET 值 575.5 m<sup>2</sup>/g，與一般使用鋼瓶氣體(CO<sub>2</sub>)活化所製得之稻殼活性碳(RH-AC-950-30) BET 值相近(623.0 m<sup>2</sup>/g)，表示以蛋殼粉體高溫鍛燒後所產生之 CO<sub>2</sub> 氣體具有活化生物炭(BC)之功能。

圖 8 為所製稻殼碳材之等溫吸脫附曲線圖，顯示等溫吸脫附曲線圖同時具有 Type I 及 Type IV 孔洞特徵[9]，分別表示具有微孔洞(孔洞直徑或寬度小於 2.0 nm)及中孔洞(孔洞直徑或寬度介於 2.0 ~ 50.0 nm)之特性；前者微孔洞特徵可由於甚低相對壓力(P/P<sub>0</sub>)下有極高的吸附量，後者中孔洞特徵則於相對壓力(P/P<sub>0</sub>)約 0.4 下開始出現吸附曲線與脫附曲線分離，即所謂的”遲滯迴路(Hysteresis loop)”。

圖 9 為所製稻殼碳材之孔洞分布曲線圖，驗證了所產製的稻殼炭具有微孔洞(孔洞直徑或寬度小於 2.0 nm)及中孔洞(孔洞直徑或寬度介於 2.0 ~ 50.0 nm)之特性；前者微孔洞特徵可於 2.0 nm 下有極高的吸附量，後者中孔洞特徵則於 2.0-5.0 nm 左右。

圖 10-13 為所製稻殼碳材之表面微結構圖(SEM)，從圖 10 可看出生物炭對照組其表面較為光滑，而圖 11.13 BET 值較高之活性碳對照組及所製稻殼碳表面則可看出具有孔洞結構之特性。

表 3. 所產製稻殼活性碳之 BET 比表面積值

稻殼活性碳	BET 表面積 (m <sup>2</sup> /g)	稻殼活性碳	BET 表面積 (m <sup>2</sup> /g)
RH-E-950-30-1:1	355.8	RH-E-950-30-1:5	537.0
RH-E-950-30-1:2	390.2	RH-E-950-30-1:6	575.5
RH-E-950-30-1:3	397.7	RH-BC-950-30	327.3
RH-E-950-30-1:4	451.9	RH-AC-950-30	623.0

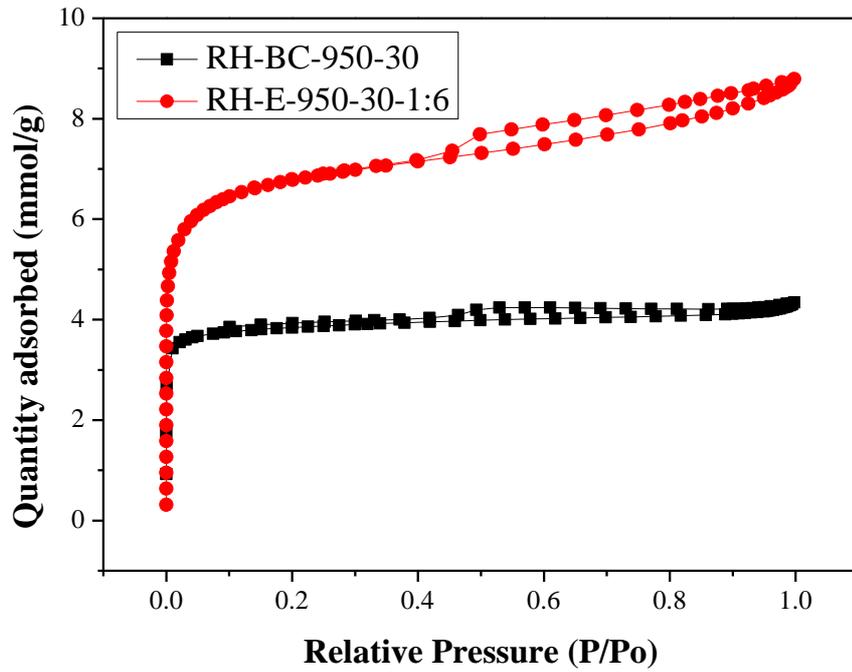


圖 8. 所製稻殼碳材之等溫吸脫附曲線圖

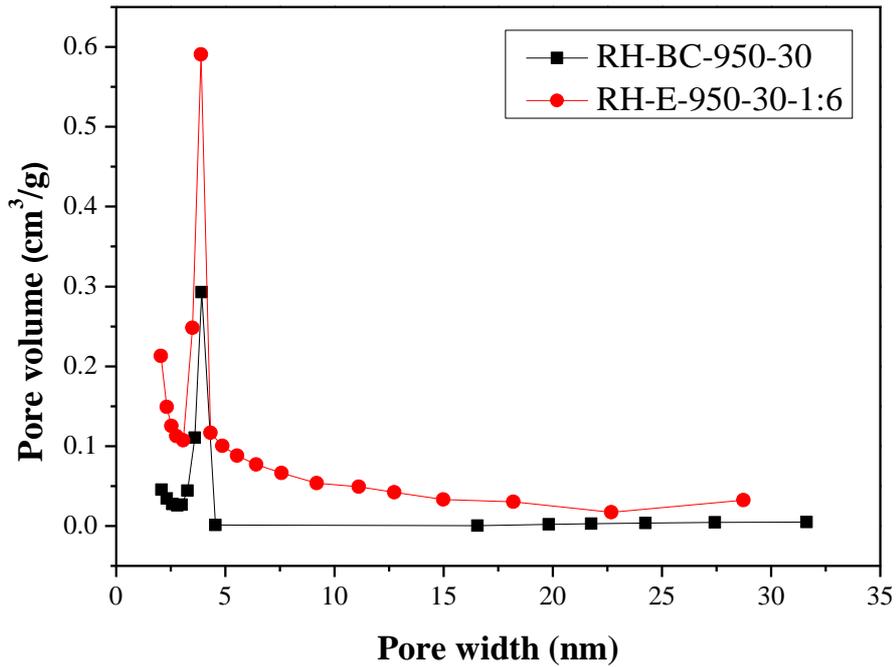


圖 9. 所製稻殼碳材之孔洞分布曲線圖

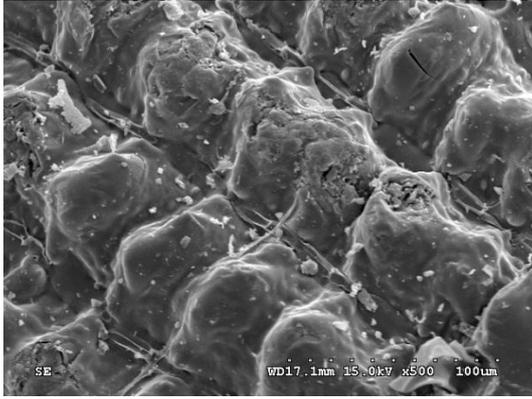


圖 10.RH-BC-950-30

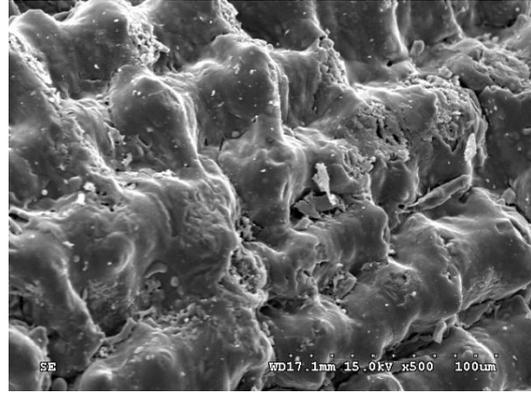


圖 11.RH-AC-950-30

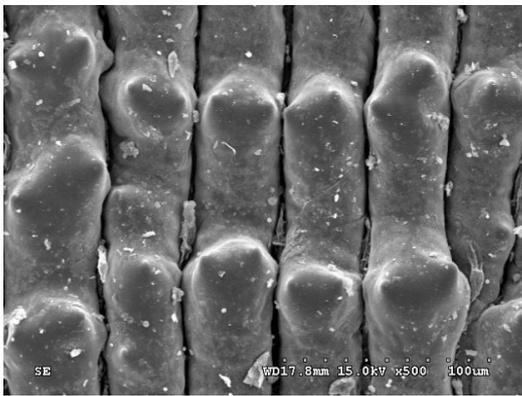


圖 12.RH-E-950-30-1:1

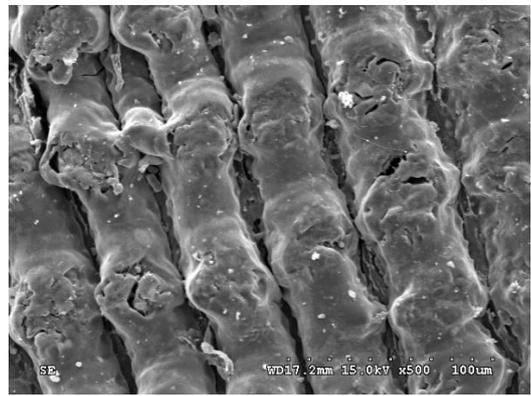


圖 13.RH-E-950-30-1:6

#### 四、 創作特點與創意說明

鑑於目前蛋殼較無高值化之再利用處理方式，且國內市售稻殼生物炭之孔洞特性表現並不顯著，為提升其應用潛力，本創意研發作品旨在運用臺灣生產之農業剩餘物蛋殼及稻殼，依循綠色製程原則，將其轉化為具類氧化鈣及活性碳特性之材料。此舉不僅有助於提高農業副產物之附加價值，亦可擴展其於工業與民生領域之應用，進一步實現增匯、減碳、固碳與資源永續循環之目標。本研究創新地結合農業無機資源與循環經濟概念，將高溫鍛燒蛋殼所釋放之  $\text{CO}_2$  導入稻殼活化過程，成功製備氧化鈣及具高比表面積之稻殼活性碳。此方法除可減少傳統製程中對高純度鋼瓶  $\text{CO}_2$  之依賴外，亦展現負碳排特性，顯示其作為一種綠色環保材料之潛力。[註]

## 五、 作品應用範圍及發展潛能

### 1. 蛋殼鍛燒產出**氧化鈣**產品之實用價值計有

#### (1)一般性應用領域

- ✓ 乾燥劑(脫水劑)
- ✓ 自熱劑
- ✓ 土壤營養鈣劑(酸化土壤調節劑)
- ✓ 廢水處理調節劑
- ✓ 廢氣脫硫劑
- ✓ 養殖水質濾料
- ✓ 飼料添加劑

#### (2)特殊性/高值性應用領域

- ✓ 殺菌劑
- ✓ 機能性涼爽紡織品添加劑
- ✓ 制酸劑
- ✓ 儲熱材料
- ✓ 生物鈣質補充劑

### 2. 稻殼**活性碳**應用範疇及發展潛能有

#### (1)一般性應用領域

- ✓ 乾燥劑(脫水劑)
- ✓ 脫色精煉劑(食品助劑)
- ✓ 天然食用色素(食品助劑，製程溫度須超過 800°C)
- ✓ 吸附劑(廢水/廢氣)
- ✓ 脫臭劑(淨氣)

- ✓ 淨水劑 (飲用水/自來水)
- ✓ 土壤改良劑
- ✓ 固態燃料
- ✓ 建築材料
- ✓ 動物飼料添加劑

(2) 特殊性/高值性應用領域

- ✓ 殺菌劑
- ✓ 觸媒/藥物釋放載體
- ✓ 儲能電極(超級電容器/燃料電池)碳材料
- ✓ 解毒劑(防毒面具、中毒解劑)
- ✓ 儲能(氫、甲烷)吸附材料
- ✓ 溫室氣體(二氧化碳、甲烷)吸附材料
- ✓ 腸胃(脹氣)緩和劑

## 六、工作分配

本作品製作團隊成員包括三位學生(生物資源研究所:林育全;環境工程與科學系:汪嘉慧/賀培綺)及一位指導教師(生物資源研究所:蔡文田),個別工作項目及分配如下所述(◎:表示於該工作項目之分配):

作品製作工作項目	林育全	汪嘉慧	賀培綺	蔡文田
相關文獻蒐集及彙整	◎	◎	◎	◎◎
稻殼取得及前處理(曬烘乾/去除雜質)	◎◎	◎	◎	
蛋殼取得及前處理(曬烘乾/破碎/篩分)	◎◎	◎	◎	
蛋殼高溫鍛燒及稻殼炭化活化	◎	◎◎	◎◎	
稻殼活性碳孔洞特性分析(BET比表面積)	◎	◎◎	◎◎	
稻殼活性碳孔洞特性分析(SEM)	◎◎	◎	◎	
決賽作品說明書撰寫及校閱	◎◎	◎	◎	◎◎
決賽作品海報製作及校閱	◎	◎◎	◎◎	◎◎
作品介紹影片製作	◎◎	◎◎	◎◎	

## 七、本創意作品與永續發展目標相關性說明

1. **SDG-2** 主要與農業生產有關，以消除飢餓，達成糧食安全，改善營養及促進永續農業。
  - ✓ 本作品所為使用農業剩餘資材，使廢棄物永續循環再利用。
2. **SDG-3** 主要與人類健康福祉有關，以控制及預防疾病或毒性物質濫用，達成環境品質免於污染，並促進醫療環境及產業。
  - ✓ 本作品所產製出的高孔洞稻殼活性碳產品具有高吸附容量，故具有解毒或吸除毒素之能力，可應用於醫藥領域。
3. **SDG-6** 主要與合於安全衛生之飲用水有關，以改善水源水質，並減少水污染，達成廢水處理、回收，以及再使用。
  - ✓ 本作品產製出的稻殼活性碳產品具有高孔洞，故具有吸除水及廢水中有害物質，可應用於作於吸附劑。
4. **SDG-12** 主要述及永續性的消費與生產，透過回收與再使用，以消除或減少廢棄物的產生，實現自然資源的永續管理及有效率的使用。
  - ✓ 本作品所使用的材料源於家禽養殖所產生之廢棄物及農業剩餘資材，將其轉化為高附加價值之氧化鈣及活性碳，實現自然資源的永續利用。
5. **SDG-13** 係採取緊急措施以因應氣候變遷及其影響，故須強化氣候變遷調適能力，以促進永續農業。
  - ✓ 本作品係再利用地方性之廢棄物及農業剩餘資材於氧化鈣及高孔洞活性碳產製，可促進地方社區人民之氣候行動。



## 八、本創意作品與十二項關鍵戰略相關性說明

1. **關鍵戰略 3-前瞻能源/關鍵戰略 4-氫能**：以地熱發電、生質能及海洋能為發展重點。
  - ✓ 本作品廢棄物裂解所產生之高熱值氣體(含**氫氣**及一氧化碳)熱能可熱回收轉化為蒸氣或**氫氣**作為清潔能源使用。
2. **關鍵戰略 6-碳捕捉利用及封存**：以開發低成本 CO<sub>2</sub> 捕捉技術、推動 CO<sub>2</sub> 再利用創新技術及建立 CO<sub>2</sub> 封存場域為發展重點。
  - ✓ 本作品將蛋殼經高溫鍛燒後產生之 CO<sub>2</sub> 再利用作為活性碳製備過程中之活化氣體使用。
3. **關鍵戰略 8-資源循環零廢棄**：以資源循環永續利用的思維，透過廢棄資源材料化、燃料化及肥料化的方式，減少原生物料的使用。
  - ✓ 本作品將廢棄蛋殼及稻殼再利用為高價值之氧化鈣及活性碳。
4. **關鍵戰略 9-自然碳匯**：以增加森林、土壤、海洋三大碳匯為主要措施，其中土壤碳匯包含推廣農業剩餘資材再利用。
  - ✓ 本作品將農業剩餘資材稻殼再利用為高附加價值之活性碳。
5. **關鍵戰略 10-淨零綠生活**：以 6 大面向推動，其中包含減碳商業模式及低碳產品開發。
  - ✓ 本作品將廢棄蛋殼及稻殼再利用為高附加價值之氧化鈣及活性碳，此為零碳排產品開發技術。



## 參考文獻

- [1] 農業部農業統計資料查詢 <https://agrstat.moa.gov.tw/sdweb/public/book/Book.aspx> (accessed on 8 May, 2025)
- [2] 農業部，「農業事業廢棄物再利用管理辦法」，Available online: <https://law.moj.gov.tw/> (accessed on 19 Jan. 2025).
- [3] Tsai WT, Tsai CH (2024), New trends in food-related waste valorization with relevance to Taiwan's sustainable development goals. *Trends in Food Science and Technology*, 147, 104424.
- [4] 「綠色國民所得帳農業固體廢棄物歷年表」，Available from <https://agrstat.moa.gov.tw/sdweb/public/common/Download.aspx>; Accessed on 19 Jan. 2025.
- [5] 財政部關稅署「海關進出口統計」  
<https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30>，accessed on 8 May. 2025。
- [6] 徐恆文、陳威丞、張名惠、周揚震，”鈣迴路捕獲二氧化碳技術”，臺灣能源期刊，第一卷(103年)、第二期，pp. 145-155。
- [7] 談駿嵩、王志盈，”二氧化碳捕獲”，科學發展，510期(2015年6月)，pp. 32-37。
- [8] 蘇明德，”鈣的自述”，科學發展，570期(2020年6月)，pp. 44-51。
- [9] Lowell S, Shields JE, Thomas MA, Thommes M (2006), *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Springer, Dordrecht, the Netherlands.