

# 115 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	碳圍觀止
作品中文名稱	借熱捕碳：以廢熱再生循環DAC系統
作品英文名稱	Borrowing Heat to Capture Carbon: A Waste-Heat-Driven Activated Carbon Regeneration DAC System

參賽學校：國立臺灣大學、國立宜蘭大學

指導老師：劉雅瑄 教授

團隊成員：郭芷晴、張閎歲、黃婕閔

## 目錄

作品示意圖.....	1
1. 摘要.....	2
1.1 中文摘要 .....	2
1.2 英文摘要 .....	2
2. 設計構想.....	3
3. 作品材料及說明.....	5
3.1 模型建立 .....	5
3.2 MRP 光敏樹脂合成.....	5
3.3 活性炭活化.....	5
3.4 反應設計 .....	6
4. 創作特點及創意說明.....	7
5. 作品應用範圍及發展潛能.....	9
5.1 解決問題與技術價值 .....	9
5.1.1 CCS 捕捉.....	9
5.1.2 設備技術 .....	9
5.2 發展潛能 .....	9
5.2.1 成本估算 .....	9
5.2.2 應用潛力.....	10
5.2.3 發展優劣.....	10
6. 工作分配.....	12
實作成品照片.....	13
參考資料.....	14

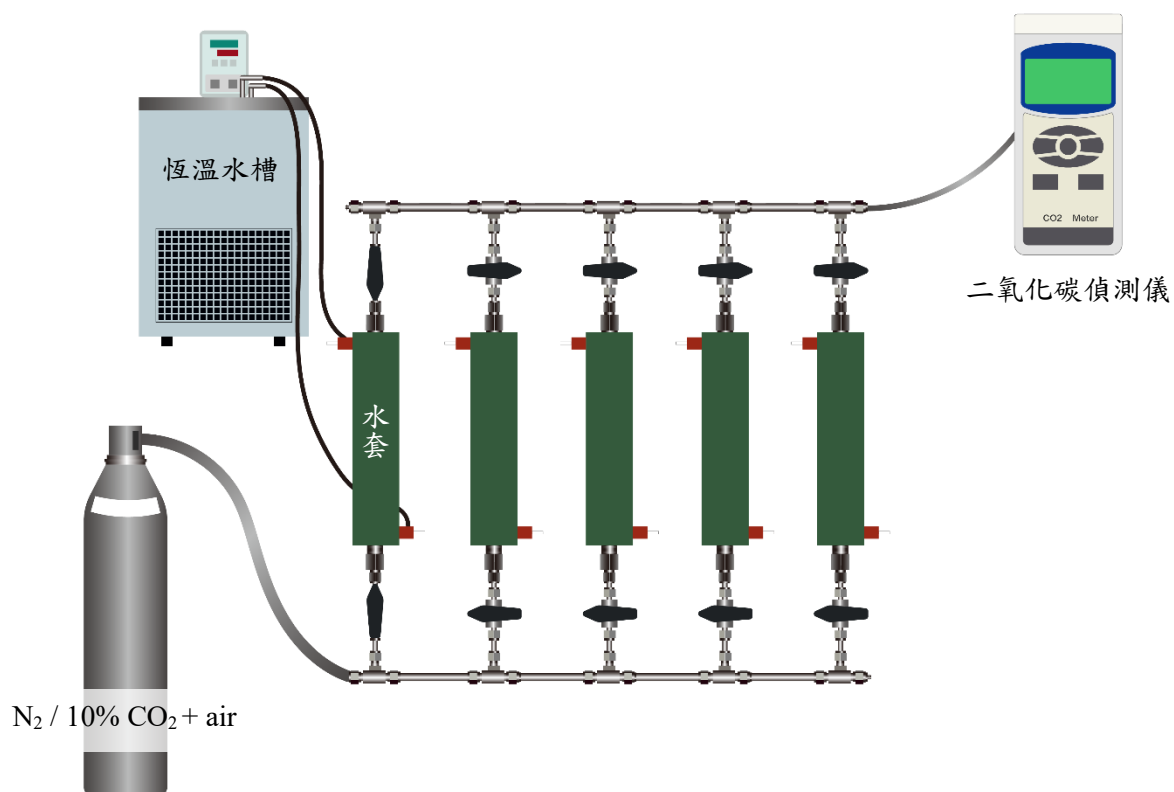
## 圖目錄

圖 1、不同濃度的 CO <sub>2</sub> 會造成的影響 .....	3
圖 2、借熱捕碳系統概念圖 .....	4
圖 3、本作品列印模型圖 .....	5
圖 4、實驗流程示意圖 .....	6
圖 5、DAC 示範規模示意圖 (上)實驗架設示意圖 (下) 實際管柱圖 .....	6
圖 6、實場應用概念圖 .....	7
圖 7、本作品與前人研究之差異 .....	8
圖 8、本作品商業模型分析 .....	11
圖 9、本作品 SWOT 分析 .....	12

## 表目錄

表 1、活性碳比較表 .....	7
------------------	---

### 作品示意圖



本作品以 5 支管柱、恆溫水槽、加溫水套、N<sub>2</sub> 氣體鋼瓶、10% CO<sub>2</sub> 及空氣混合氣體鋼瓶以及二氧化碳偵測儀所組成。其中，每支管柱 22 cm，可放 10 至 12 顆 3D 列印活性碳單元進行吸附及再生循環。

## 1. 摘要

### 1.1 中文摘要

本作品一套示範規模之 DAC 碳捕捉系統，結合吸附再生技術與冷氣廢熱再利用，將室內 CO<sub>2</sub> 集中回收並應用在滅火器。系統以空調廢熱作為再生熱源，降低額外能耗，具實際應用潛力。此外，本裝置亦具有永續教育推廣之附加價值。

### 1.2 英文摘要

This study develops a pilot-scale DAC carbon capture system that integrates adsorption-desorption technology with air-conditioner waste-heat recovery. The system captures indoor CO<sub>2</sub> and concentrates it for potential use in fire extinguishers. By using waste heat from air conditioning for regeneration, additional energy consumption is reduced, thereby enhancing practical applicability. Furthermore, the system also offers added value for sustainability education.

## 2. 設計構想

根據環境部室內空氣品質資訊網，台灣每人每天約有 80% 至 90% 的時間處於室內環境，而室內空氣品質 (Indoor Air Quality, IAQ) 的優劣，可直接影響工作品質與效率 (環境部大氣環境司，2026)。承前述，室內空氣品質也是教育空間中的重要議題 (Honan *et al.*, 2024)。其中，教室內二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 濃度常被視為通風狀況的重要指標。CO<sub>2</sub> 濃度建議標準約 1,000 ppm (ASHRAE, 2016; Chen *et al.*, 2024; Health Canada; 2020)，一般教室內的二氧化碳濃度大約在 400 至 1,000 ppm，然而在教學現場，由於學生人數密集與通風不足，甚至可能達到 1,500 ppm 以上 (王瀚陞，2023；張淑嬪，2024; Allen *et al.*, 2016)。近年研究顯示，過高的 CO<sub>2</sub> 濃度不僅反映空氣品質不佳，也與學生的認知表現及學習效率下降有密切相關，可能導致包括注意力降低、反應速度變慢及錯誤率增加等問題 (Dedesko *et al.*, 2025; Haverinen-Shaughnessy & Shaughnessy, 2015; Wargocki *et al.*, 2020; Wargocki & Wyon, 2013)。因此，學生的注意力不佳、學習效果差可能不是因為老師的教學方式有問題，而是來自室內空氣中的 CO<sub>2</sub> 含量增加。圖 1 為不同濃度的 CO<sub>2</sub> 會造成的影響。

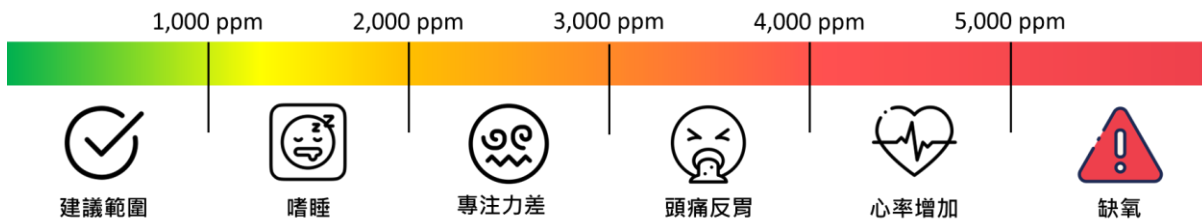


圖 1、不同濃度的 CO<sub>2</sub> 會造成的影響 (重繪參考自 <https://www.benq.com/zh-tw/education/edtech-blog/why-benq-air-quality-sensor-matter-classroom.html>)

而與二氧化碳最為相關的議題，便是氣候變遷所帶來的影響，目前各國皆致力於發展如何降低大氣中不斷升高的二氧化碳濃度。根據《臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫》，碳捕捉的成本偏高，約 50 ~ 70 美元/噸，然而，在碳捕捉的方法中，又以直接空氣捕捉 (Direct Air Capture, DAC) 的成本為最高。雖然有成本較高之缺點，但 DAC 可在任何地點運作，並直接從大氣中提取二氧化碳之優勢，故為現今關鍵的負碳技術之一。DAC 技術在使用風扇將欲處理空氣通入後，因大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度極低，故捕捉材料需具足夠結合力，此也導致再生過程需要能量的輸入 (Custelcean, 2022)。DAC 技術中，可依照吸附劑種類分為固體吸附 (Solid DAC, S-DAC) 以及液體吸附 (Liquid DAC, L-DAC) 兩大類 (An *et al.*, 2023)。其中，固體吸附劑有吸附容量較高的優勢，且可以物理吸附或化學吸附與吸附劑表面作用，其缺點在於製造與維護費用偏高，且吸附劑壽命會大幅影響年度營運成本，若更換頻繁可能造成顯著負擔 (Mennitto *et al.*, 2025)。再生方面，固體吸附劑主要透過變溫吸附或變壓吸附釋放 CO<sub>2</sub>，但普遍存在熱傳導較差、孔隙水分可能冷凝而增加能耗等問題 (Custelcean, 2022; Mennitto *et al.*, 2025)。不過，固體吸附技術仍具備重要優點，例如相較液體溶劑其再生溫度需求較低、操作方式更具彈性，並且在適當材料與流程設計下仍可展現良好的 CO<sub>2</sub> 捕捉潛力 (Mennitto *et al.*, 2025)。

本團隊則延續前人的研究，並且加以改良。設計陣列式的吸附管柱，並以 3D 列印塊材進行填充，以達直接空氣捕捉之效果，同時亦可切換閥件，達到連續吸附、再生之效果。本作品將**吸附設備模組化**，除了可達到更好的吸附效率外，當任一零件或是活性碳塊材需要更換時，亦可在不中斷

吸附的情況下進行。除此之外，我們將此模組套用在教室空間中，可利用冷氣所排放的廢熱對水進行加熱，使活性炭再生，達到捕碳效果同時也解決廢熱的問題。本團隊所設計的 DAC 系統在教室內二氧化碳濃度逐漸增加之時，將二氧化碳濃度降低，解決二氧化碳濃度升高的問題，避免學生學習狀態下降，維持學習效率。這樣的設計是非常好的教學現場示範規模，可作為碳捕捉最佳的實場應用，相較於工廠規模的 DAC 系統，本作品更大的價值在於將 CCS 呈現在學生、一般大眾面前，而非企業報告上的一個數據。而呈現的效果有 IAQ 的控制 (IAQ 是少數可同時影響 E 與 S 的指標)、即時 CO<sub>2</sub> 數據以及環境保護、社會責任與公司治理 (Environmental, Social, and Governance, ESG) 展示。圖 2 為本作品的概念圖。

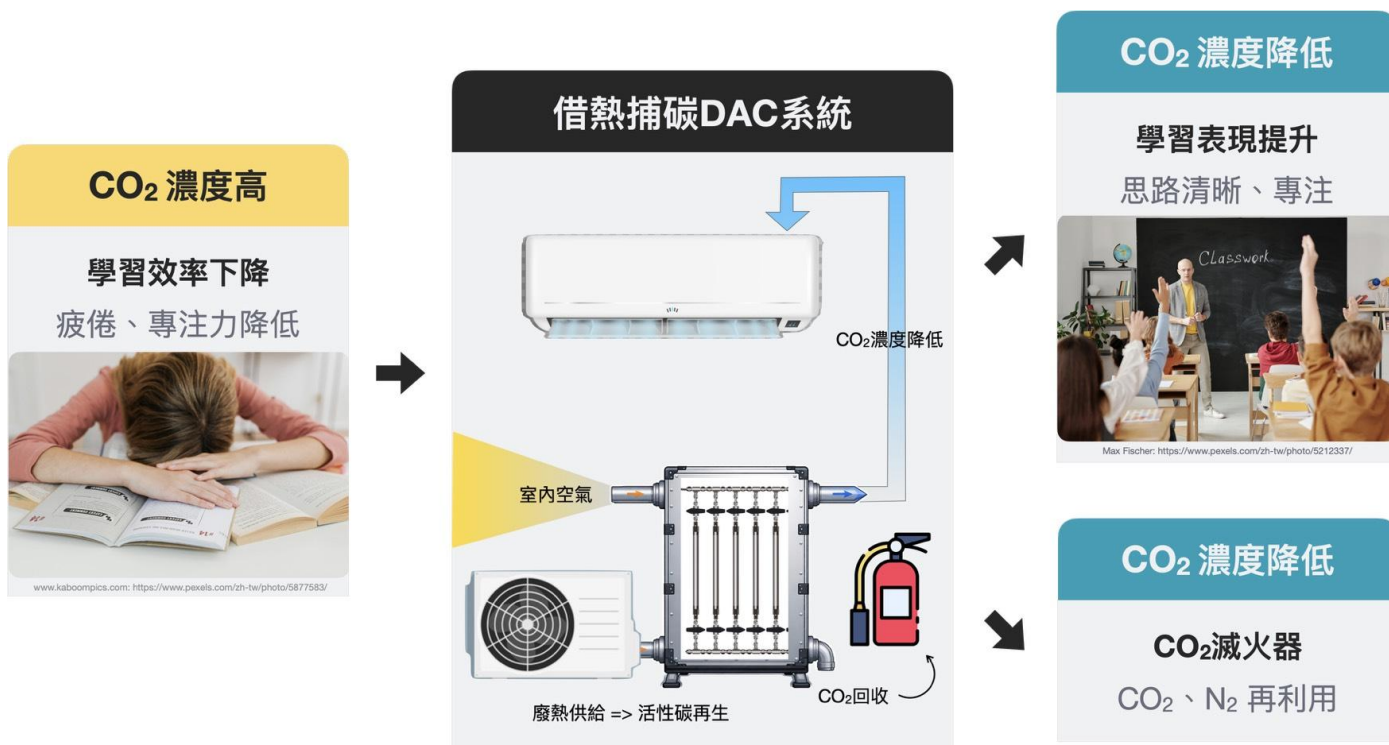


圖 2、借熱捕碳系統概念圖

### 3. 作品材料及說明

#### 3.1 模型建立

本作品利用 MSLattice 模型建模之 Gyriod 結構，為貼合商用吸附的圓管柱之設計，如圖 3，其晶格可提供每單位體積最高的比表面積、不間斷的光滑曲線及最小壓降 (Jivrakh *et al.*, 2024)。使用 4K 高解析度 (3,840 x 2,160 像素) 之 3D 列印機台，並藉由 405 nm 波段光束逐層固化樹脂，使材料有高可控性及精細度。

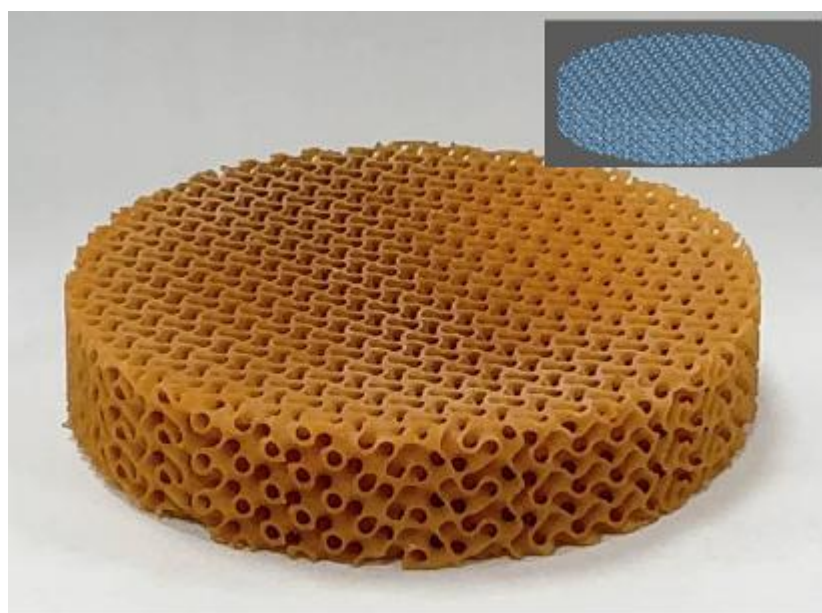


圖 3、本作品列印模型圖 (吳翊寧, 2025)

#### 3.2 MRP 光敏樹脂合成

間苯二酚與六亞甲基四胺 (間苯二酚的 25wt%) 均於混合後，加熱攪拌合成為間苯二酚-甲醛樹脂 (Resorcinol-formaldehyde resin, RF)。接著加入甲基丙烯酸和對苯二酚，生成間苯二酚-甲醛樹脂丙烯酸酯 (Methacrylate Resorcinol Phenolic Polycondensate, MRPP) 預聚物。最後將 MRPP 預聚物、單體 HDDA 及光起始劑 TPO 均勻混合，得到 MRPP 光敏樹脂。

#### 3.3 活性碳活化

MRPP 光敏樹脂倒入 3D 列印機台列印及清潔完畢後，放入鍛燒管式爐以物理方式使用  $N_2$  進行碳化，聚合物在高溫且缺氧環境下熱裂解，其非碳元素會以揮發性物質或焦油去除，此時聚合物具多孔性質但由於產生之副產物可能阻塞孔隙，故吸附能力不高，需要再進一步  $CO_2$  活化，去除孔洞中碳氫化合物使比表面積充滿奈米孔隙，此步驟可讓材料提升孔隙率及比表面積，如圖 4。

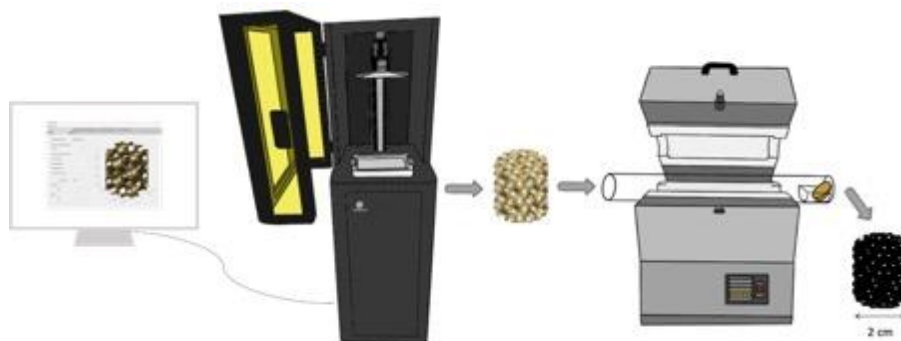


圖 4、實驗流程示意圖 (吳翊寧, 2025)

### 3.4 反應設計

本團隊研發設計，訂製 5 支不鏽鋼管柱，並於每一管放入 10 個 3D 列印單元，將模擬教室空氣由一側通入，另一側則連接二氧化碳檢測儀，確認直接空氣捕捉的效率，當第 1 支管柱的捕捉效率降低，則切換氣閥，使得模擬空氣通往第 2 支管柱，同時以溫度 80 至 100°C 之水浴，使第 1 支不鏽鋼管柱中的 3D 列印單元再生。如此一來，便可以透過調整氣閥及水浴，達成連續不間斷的直接空氣捕捉。圖 5 為裝置示意圖，恆溫水槽為模擬冷氣廢熱所產生的活性碳再生用熱水。圖 6 則是實場操作的概念圖，為本作品應用於實場的情境，利用冷氣排放熱源，進行管柱內活性碳的再生。

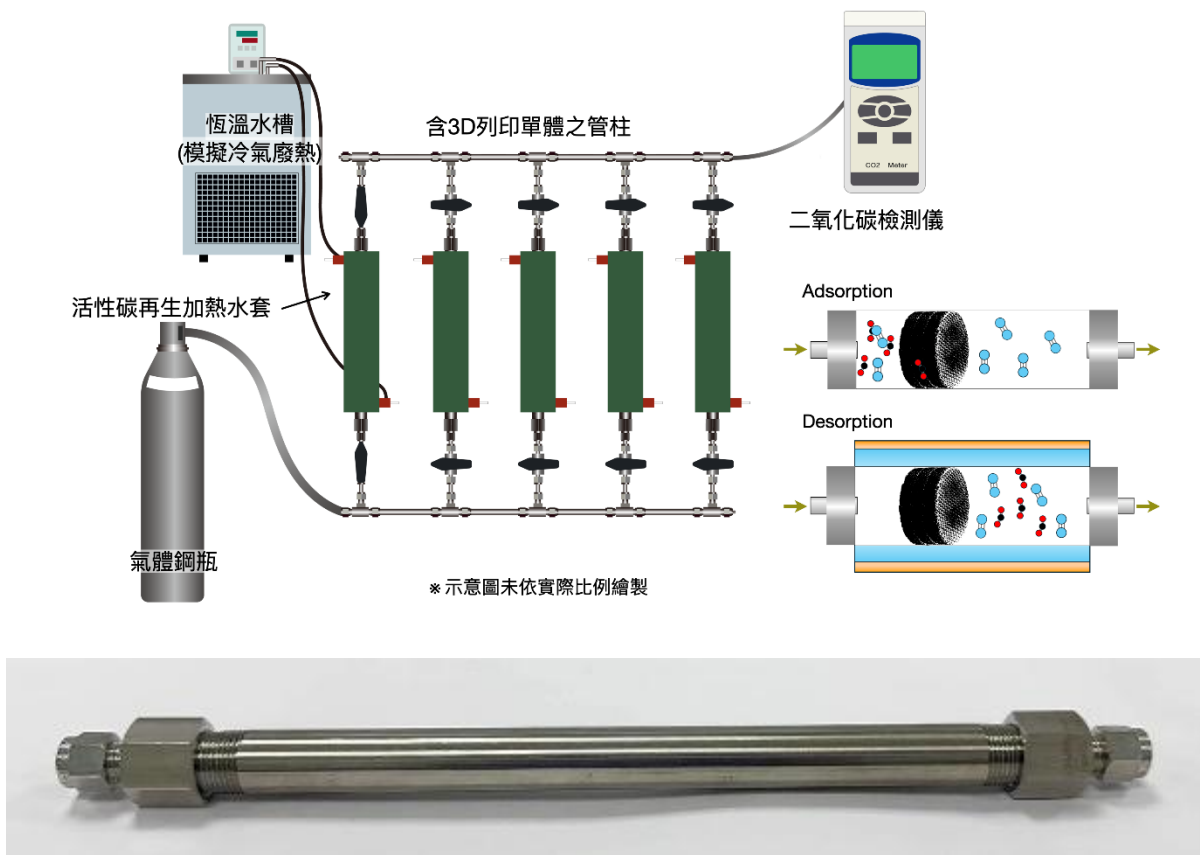


圖 5、DAC 示範規模示意圖 (上)實驗架設示意圖 (下) 實際管柱圖

1. 管柱陣列：將 5 支管柱以不鏽鋼管及閥件組裝成陣列系統。
2. 恆溫水槽：模擬冷氣廢熱所提供的熱能，將水加熱並且以水套 (water jacket) 的方式，使管柱內的 3D 列印活性碳再生。
3. 氣體鋼瓶：模擬教室氣體—10%二氧化碳 + 空氣；再生載硫氣體—N<sub>2</sub>。
4. 二氧化碳檢測儀：檢測出氣口的二氧化碳濃度，以確認吸附效果。

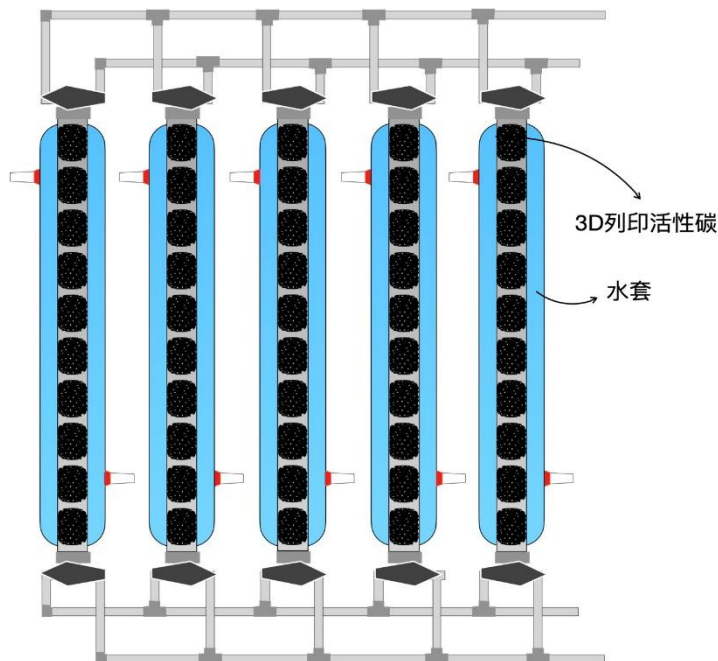


圖 6、實場應用概念圖

#### 4. 創作特點及創意說明

目前多數商用多孔材料皆以粉末形式製造，以實廠應用而言，粉末狀的吸附劑在吸附塔中，會有堵塞的問題使氣流無法順利通過，除了顯著壓降以外，粉末也容易逸散造成管線污染或吸附劑損失 (表 1)。因此，使用前須將活性碳進行造粒處理，產製成顆粒狀的型態，然而顆粒狀吸附劑填充後可能導致流體流動受阻，而有高壓降、低熱傳、低質傳、機械磨損、結構可調性變差以及粉末流失等問題 (Rezaei & Webley, 2009)。

表 1、活性碳比較表 (Świątkowski *et al.*, 1999; Inagaki *et al.*, 2014)

類型	粉末	粒狀	纖維	3D 列印
尺寸	10~100 μm	1~3 μm	10~20 μm	可調整
BET (m <sup>2</sup> /g)	700~2000	600~1200	700~2500	1755.5 (本團隊)
平均孔徑	< 2 nm	微孔到大孔 <sup>註</sup>	< 40 nm	< 2 nm
特性	密度、硬度和磨損指數較低	吸附速率慢、選擇性有限	體積密度小、黏合劑易阻塞	客製化尺寸、熱質傳效果好

註：微孔 (< 2 nm)、中孔 (2~50 nm)、大孔 (> 50 nm) (IUPAC)

本團隊之研究室由鄒昇和 (2024) 及吳翊寧 (2025)，結合光敏樹脂及 3D 列印進行研究，透過 3D 列印技術的高精度、多功能性以及客製化設計等特性，進行 3D 列印結構、大小以及吸附效率，並探討 3D 列印活性碳塊材應用於直接空氣捕捉之效用，同時亦參加 2024 年氣候變遷創意實作競賽獲得金獎肯定。

而本作品則應用前人所設計的 3D 列印活性碳，設計出陣列式的吸附管柱，將活性碳填充於管柱中，實現活性碳塊材應用在直接空氣捕捉之商品設計 (圖 7)。本設計可透過切換氣體閥件方向，達到連續吸附、並且再生之效果。本作品將吸附設備模組化，除了可達到更好的吸附效率外，當任一零件或是活性碳塊材需要更換時，亦可在不中斷吸附的情況下進行。除此之外，我們將此模組套用在教育場所中，可利用冷氣所排放的廢熱對水進行加熱，進行活性碳再生，達到捕碳效果同時也解決廢熱的問題。另外也有將碳捕捉視覺化，可作為很好的環境永續、環境教育的重要素材。



圖 7、本作品與前人研究之差異

## 5. 作品應用範圍及發展潛能

### 5.1 解決問題與技術價值

#### 5.1.1 碳捕捉與再利用 (CCU)

本作品將碳捕捉與再利用 (Carbon Capture and Utilization, CCU) 概念從傳統大型工業場域，轉至日常室內環境的一套小型示範規模的碳捕捉系統。透過活性碳將教室內低濃度 CO<sub>2</sub> 移除，並經再生程序將 CO<sub>2</sub> 集中釋放與收集，將捕捉到的二氧化碳再經過壓縮製成滅火器做應用。此外，本陣列系統結合冷氣廢熱再利用，將原本排放至室外之熱能回收，用於吸附材再生程序，提升整體能源使用效率。此設計不僅驗證低濃度 CO<sub>2</sub> 回收之可行性，亦提供未來建築內部碳管理與碳資源化利用 (Carbon Utilization) 之潛力，對於推動淨零碳排與環境永續具有前瞻性意義，且具有很高的永續教育價值。

#### 5.1.2 設備技術

本作品團隊設計一套活性碳吸附與再生之 CO<sub>2</sub> 處理設備系統，結合冷氣廢熱回收加熱水套使活性碳再生技術，提升能源利用效率。系統透過氣閥切換，使單一管柱可在吸附與再生間切換輪流運作，降低設備複雜度與空間需求；同時，脫附氣體導流與碳捕捉系統，可確保操作安全性，並且將捕捉下來的碳再利用。整體設備具備模組化、可擴展及易於整合於既有空調系統之特性，展現創新之室內空氣品質改善與碳回收整合技術潛力。

## 5.2 發展潛能

### 5.2.1 成本估算

本團隊依據原型機實際運作參數，結合台灣電力公司公告之電力費率與能源署碳排放標準，進行嚴謹之技術經濟分析。評估結果顯示，本裝置在能耗控制與捕捉成本上具備極高之商業競爭力。

#### (1) 基礎運轉參數設定

- 裝置最大負載 (Max Load)：250 W (0.25 kW)。
- 單次實驗週期 (Cycle Time)：1.5 小時。
- 電力費率基準：NT\$ 1.68 / kWh (參考台灣電力公司時間電價/低壓電力優惠費率)。
- 碳排放係數：0.494 kg CO<sub>2</sub>e / kWh (依據經濟部能源署 2023 年公布之電力排碳係數)。

#### (2) 營運成本分析

經計算，本裝置單次完整吸附與脫附循環之總能耗僅為 0.375 度 (kWh)。

- 單次運轉電費成本： $0.375\text{kWh} * 1.68\text{NT\$} / \text{kWh} = 0.63\text{NT\$}$
- 效益說明：單次實驗之能源成本低於新台幣 1 元，顯示本模組化設計極適合進行高頻率、低成本的重複驗證與規模化部署，大幅降低了初期研發與未來商業推廣的門檻。

為確保技術之環保效益，本計畫引入「避免成本 (Cost of Avoided CO<sub>2</sub>)」概念進行評估。

- 裝置間接碳排放量：單次運轉產生約 0.185 kg CO<sub>2</sub>e ( $0.375\text{kWh} * 0.494$ )
- 淨負碳門檻：只要單次實驗捕捉量超過 0.185 kg，本裝置即達成「淨負碳 (Net Carbon Negative)」之技術指標，對環境產生實質之減碳貢獻。

### (3) 單位捕捉成本 (Levelized Cost of Capture)

依據實驗測得之工作吸附量 0.521 mmol/g，換算約 2.29 wt% 推算：

- 單次標準捕捉量：約 0.0229 kg CO<sub>2</sub> (以 1 kg 吸附床層計算)。
- 每公斤捕捉成本：0.63 NT\$ / 0.0229 kg = 27.5 NT\$ / kg
- 每噸捕捉成本 (國際通用指標)：換算約為 NT\$ 27,500 / ton (約 858 USD/ton)

本裝置以極致的低能耗打破碳捕捉的經濟壁壘，更透過「分散收集、集中轉化」的策略，打造出具備高度商業擴充性與真實淨負碳效益的微型循環經濟模式。

### 5.2.2 應用潛力

本技術具備廣泛且跨領域的應用潛力，涵蓋以下四大層面：

1. 教育空間與其他高密度室內環境應用：本系統可應用於教室、圖書館與辦公室等高密度的環境，提供及時吸附室內累積 CO<sub>2</sub> 之解決方案。可在不增加冷氣負荷的狀況下改善室內空氣品質，提升專注力。
2. 智慧建築與低碳冷氣系統：本系統可裝載在原有的冷氣設備上，作為建築內部的 CO<sub>2</sub> 管理模組，並且結合冷氣廢熱，用於活性碳再生，對於追求節能與低碳轉型的智慧建築，本作品可作為提升能源效率與室內空氣品質之關鍵技術。
3. ESG、淨零建築與碳管理工具：在全球淨零排放與 ESG 評估趨勢下，本技術可作為建築層級之碳管理工具，透過 CO<sub>2</sub> 捕捉量之量測與系統化管理，提供具體且可量化之減碳指標。結合室內空氣品質改善與碳回收功能，不僅可提升建築環境品質，亦可作為企業與機構履行碳責任與永續發展目標之實務工具。
4. 教育示範與環境科學應用：本作品具備良好之視覺化與操作性，可作為環境教育與工程教學之示範平台，讓學生直接觀察 CO<sub>2</sub> 濃度變化、吸附與再生過程及能源再利用機制，強化對碳循環與永續發展議題之理解。特別適用於高中、大學及科學教育場域，作為結合理論與實務之教學工具，提升學習動機與跨領域整合能力。

### 5.2.3 發展優劣

#### 商業模式 (Business Model)

參考商業模式圖 (Business Model)，本作品具有極高的可行潛力。本作品重要價值並非捕碳量之多寡，而在於改善室內 CO<sub>2</sub> 提升專注力及健康、即時碳捕捉量(可量測及展示)作為 ESG 的實踐、教育現場的展示以及碳中和的具象化。

以下針對四大導向進行討論 (圖 8)：

一、需求導向：本作品設計以示範規模，實現在教育現場、研究單位甚至綠建築，視覺化應用之直接空氣捕捉系統。將碳捕捉視覺化呈現在一般生活中，提供顧客技術以及模組化設計，並且在長時

間操作下，亦可進行部分單元的維修及更換，填充於管柱中的活性碳塊材，可以在後續找尋到更高效率吸附結構後進行置換升級。主要通路可透過直接銷售，或是以示範模組的學研合作方式吸引潛在客戶。碳捕捉作為達到 2050 淨零排放之手段，為現今不論科技業、化工、石化產業或是電廠欲實踐之目標，本作品之規模雖不致工廠等級，卻是可以作為環境教育之最佳方案，示範碳捕捉之實踐，並且降低室內二氧化碳含量，達到提升專注力之效果。

二、價值導向：本作品所使用的 3D 列印塊材相較於傳統粉末狀活性碳，有低壓降以及低能耗的優勢。除此之外，也因為使用 3D 列印技術，塊材本身孔道結構可經客製化調整達到顧客所需的目標。而透過管柱陣列的模組化設計，達到連續吸附以及再生亦為本作品的優勢，且這樣的設計又有利於隨時進行部分汰換、更新以及升級，為本作品之價值所在。最重要的是，本作品利用冷氣廢熱進行活性碳再生，達到減碳的作用。且改善室內空氣品質、提供視覺化碳捕捉效率，可同時進行環境教育，成為 ESG、永續校園的範本。

三、供給導向：本作品所擁有的重要資源為光敏樹脂配方、3D 列印設備以及參數，除此之外，模組化陣列、管柱的設計以及再生條件皆可隨目標而調整。而可以將本作品價值放大的關鍵夥伴則可分為提供光敏樹脂材料的供應商以及 3D 列印設備廠商，前者可提供大量且穩定材料，後者則可提供技術上協助。學研單位除了可作為示範場域，也可以成為技術交流與設備最佳化之合作對象。最後，政府單位對於示範規模之補助，可作為本作品規模化生產與推廣之重要推手。

四、財務導向：本作品主要成本來自於若干面向，首先，材料成本包含調配樹脂之樣品，活化製成的消耗以及管柱與陣列系統等硬體設備；3D 列印設備以及維護；人力成本則有藥品配製、活化流程操作以及碳捕捉流程中確保進行之系統維護人力等。最後，本作品可以提供的收入來源繁多，首先，3D 列印技術的交流、樹脂配方的授權、活性碳塊材銷售以及價值最高的管柱以及模組化系統之設計，皆為本作品之優勢以及價值。

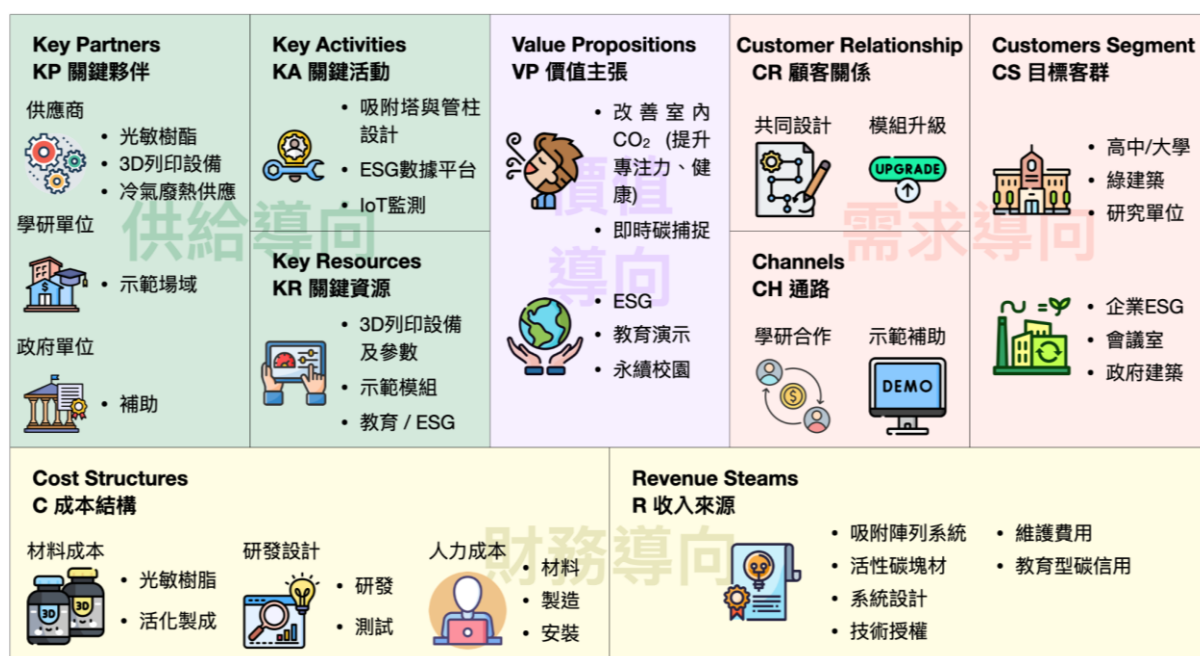


圖 8、本作品商業模型分析

### 強弱危機分析 (SWOT 分析)

將本作品進行 SWOT 分析，結果如圖 9 所示。本作品之優勢 (Strengths) 為材料擁有吸脫附能耗低且系統具有易擴充、易維修之特性，且示範規模可使一般無法實際體驗的碳捕捉視覺化，在講求 ESG 的市場以及教育現場，有很好的優勢。劣勢 (Weaknesses) 則為本作品在大規模生產之成本及良率尚無法確定，且因尚在實驗階段，故捕碳效率較低，且需控溫設備以達到再生的效果，然若進入實場階段，則有機會使用冷氣所產之廢熱而使劣勢轉為優勢。而目前全球淨零排放、碳費制度以及吸附劑的應用延伸，以及企業與政府對 ESG、校園永續的推廣，使本作品有很好的機會 (Opportunities)。最後，本作品的威脅 (Threats) 來自市場競爭激烈、CCS 補助與碳費可能仍有變化，且廢熱來源可能不穩定，以及有成本很低的替代方案可取代。

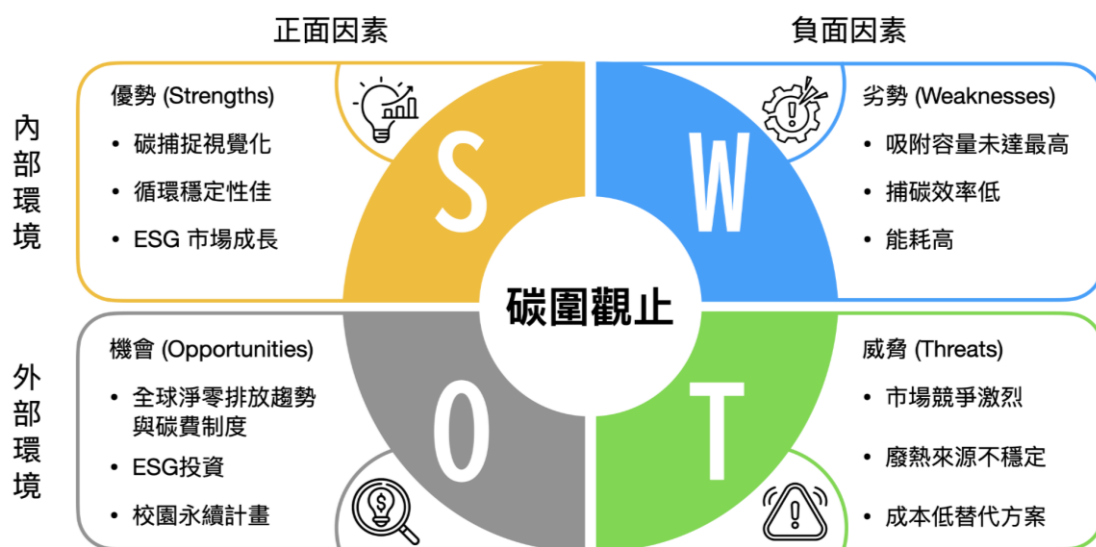


圖 9、本作品 SWOT 分析

## 6. 工作分配

組員姓名	工作事項
郭芷晴	作品說明書、實驗架設、影片
張閱歲	作品說明書、實驗架設、影片
黃婕閔	實驗架設、影片

破圍觀止

實作成品照片



## 參考資料

- An, K., Li, K., Yang, C.-M., Brechtel, J., & Nawaz, K. (2023). A comprehensive review on regeneration strategies for Direct Air Capture. *Journal of CO2 Utilization*, 76, 102587. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102587>
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A Controlled Exposure Study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Chen (2016) Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ANSI/ASHRAE Standard 62.1. American National Standards Institute and American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers. Available from: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standardsand-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>.
- Chen, H.-L., Chih, P.-S., Chuang, K.-J., Chuang, H.-C., & Chang, L.-T. (2024). Changes in indoor air quality in public facilities before and after the enactment of Taiwan's Indoor Air Quality Management act. *Indoor Air*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/5898087>
- Custelcean R. (2022). Direct Air Capture of CO2 Using Solvents. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 13, 217–234. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092120-023936>
- Dedesko, S., Pendleton, J., Young, A. S., Coull, B. A., Spengler, J. D., & Allen, J. G. (2025). Associations between indoor air exposures and cognitive test scores among university students in classrooms with increased ventilation rates for covid-19 risk management. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 35(4), 661–671. <https://doi.org/10.1038/s41370-025-00770-6>
- Haverinen-Shaughnessy, U., & Shaughnessy, R. J. (2015). Effects of classroom ventilation rate and temperature on students' test scores. *PLOS ONE*, 10(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136165>
- Health Canada (2020). Residential Indoor Air Quality Guidelines: Carbon Dioxide. Ottawa, Canada.
- Honan, D., Gallagher, J., Garvey, J., & Littlewood, J. (2024). Indoor air quality in naturally ventilated primary schools: A systematic review of the Assessment & Impacts of CO2 Levels. *Buildings*, 14(12), 4003. <https://doi.org/10.3390/buildings14124003>
- Jivraikh, K. B., Varghese, A. M., Ehrling, S., Kuppireddy, S., Polychronopoulou, K., Al-Rub, R. K. A., ... & Karanikolos, G. N. (2024). 3D-Printed zeolite 13X gyroid monolith adsorbents for CO2 capture. *Chemical Engineering Journal*, 497, 154674
- Inagaki, M., Kang, F., Toyoda, M., & Konno, H. (2014). *Advanced materials science and engineering of carbon*. Butterworth-Heinemann.
- Karanikolos, G. N. (2024). 3D-Printed zeolite 13X gyroid monolith adsorbents for CO2 capture. *Chemical Engineering Journal*, 497, 154674
- Mennitto, R., Blom, R., Dörr, M., Rosental, M., & Rettenmaier, N. (2025). Solid sorbents for Direct Air Capture: A technological and environmental perspective. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 50, 101195. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2025.101195>
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., & Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*, 173, 106749. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749>

Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, 59, 581–589.

Rezaei, F., & Webley, P. (2009). Optimum structured adsorbents for gas separation processes. *Chemical Engineering Science*, 64(24), 5182–5191. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.08.029>

Świątkowski, A., Deryło-Marczewska, A., Goworek, J., & Biniak, S. (1999). Study of adsorption equilibria in the systems ternary liquid mixtures–modified activated carbons. *Journal of Colloid and Interface Science*, 218(2), 480–487. <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6439>

王瀚陞 (2023)。校園內室內二氧化碳濃度動態分析。〔碩士論文。國立中正大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/8r66yb>。

吳翊寧 (2025)。以 3D 列印技術製備規模化高比表面積活性碳直接空氣捕捉二氧化碳之研究。〔碩士論文。國立臺灣大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/4bd6v3>。

張淑嬪 (2024)。校園教室內二氧化碳的排放量。〔碩士論文。國立中正大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/x9874c>。

環境部大氣環境司。室內空氣品質資訊網 - 認識室內空品。 (2026). [https://iaq.moenv.gov.tw/indoorair/introduction\\_importance.aspx](https://iaq.moenv.gov.tw/indoorair/introduction_importance.aspx)