

出國報告（出國類別：實習）

二氧化碳薄膜分離及材料效能評估技術

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鄭錦榮、化學監主任

派赴國家：澳洲

出國期間：105 年 11 月 13 日至 105 年 11 月 24 日

報告日期：106 年 01 月 23 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：二氧化碳薄膜分離及材料效能評估技術

頁數 28 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人事處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鄭錦榮/台電綜合研究所/化學與環境研究室/化學師/02-80782246

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：中華民國105年11月13日至105年11月24日 出國地區：澳洲

報告日期：中華民國106年01月23日

分類號/目

關鍵詞：二氧化碳薄膜分離、中空纖維薄膜

內容摘要：（二百至三百字）

台電公司為最主要的電力供應者，不可避免排放大量的二氧化碳，因而如何因應日趨嚴重的溫室效應，並提出適切的二氧化碳減量策略，實為本公司應肩負的社會責任和義務。有效減少二氧化碳的排放並利用，對其進行分離、回收、提純工作具有重要意義，目前綜研所化學與環境研究室已發展固態及液態吸附法，考慮耗能吸附與脫附效率的問題，利用薄膜分離二氧化碳，一直是國外研究的重點，被認為是未來能大幅降低二氧化碳捕獲費用的希望。為配合台中電廠碳捕捉試驗場的規劃，聚合物薄膜是目前唯一商品化的薄膜，在高濃度二氧化碳與水蒸氣存在下具穩定性，與傳統的化學吸附法和深冷分離法相比，薄膜法分離二氧化碳具有一次性投資較少；設備緊湊，占地面積小；能耗低；操作簡便；維修保養容易等優點。因而，從實際效果和發展前景看，薄膜分離法具有明顯優勢，缺點只應用低於 150°C 的操作溫度。本次實習分別赴澳洲墨爾本大學化學和生物分子工程系 Peter Cook CO₂CRC 研究中心及新南威爾士大學化學工程系 CO₂CRC 研究中心，研習(1)建立二氧化碳薄膜分離及材料效能評

估技術。(2)高分子薄膜堅韌且易於製造和操作，能改善二氧化碳的分離性能，目前的研究方向多朝向使用耐熱性高分子，尋求適當材料的評估與應用。(3)探討高效能的高分子薄膜，建立薄膜氣體分離產能和分離效率評估技術。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

摘 要

台電公司為最主要的電力供應者，不可避免排放大量的二氧化碳，因而如何因應日趨嚴重的溫室效應，並提出適切的二氧化碳減量策略，實為本公司應肩負的社會責任和義務。有效減少二氧化碳的排放並利用，對其進行分離、回收、提純工作具有重要意義，目前綜研所化學與環境研究室已發展固態及液態吸附法，考慮耗能吸附與脫附效率的問題，利用薄膜分離二氧化碳，一直是國外研究的重點，被認為是未來能大幅降低二氧化碳捕獲費用的希望。為配合台中電廠碳捕捉試驗場的規劃，聚合物薄膜是目前唯一商品化的薄膜，在高濃度二氧化碳與水蒸氣存在下具穩定性，與傳統的化學吸附法和深冷分離法相比，薄膜法分離二氧化碳具有一次性投資較少；設備緊湊，占地面積小；能耗低；操作簡便；維修保養容易等優點。因而，從實際效果和發展前景看，薄膜分離法具有明顯優勢，缺點只應用低於 150°C 的操作溫度。本次實習分別赴澳洲墨爾本大學化學和生物分子工程系 Peter Cook CO2CRC 研究中心及新南威爾士大學化學工程系 CO2CRC 研究中心，研習(1)建立二氧化碳薄膜分離及材料效能評估技術。(2)高分子薄膜堅韌且易於製造和操作，能改善二氧化碳的分離性能，目前的研究方向多朝向使用耐熱性高分子，尋求適當材料的評估與應用。(3)探討高效能的高分子薄膜，建立薄膜氣體分離產能和分離效率評估技術。

從 CO₂ 煙氣進行，薄膜工廠分離試驗採用商品 Air Products PRISM 和螺旋纏繞 Dow Filmtec®NF3838 / 30FF，兩種薄膜目前已被製造大規模模組，可以容易地轉換到未來的大規模碳捕獲過程。煙道氣內 CO₂ 高效能轉移至微藻系統，澳洲墨爾本大學結合 (K₂CO₃) 溶劑吸收及 (PDMS) 中空纖維薄膜分離，應用在捕獲二氧化碳微藻培養，最高的體積 CO₂ 通過，完全避免傳統的 CO₂ 吸收極限，不需要溶液接收或捕獲脫附操作，並將其轉化為富含脂質的生物質。複循環機組(CC)中使用的天然氣及氣化複合循環機組 (IGCC) 中煤炭的 CO₂ 預燃燒捕獲相對更容易，因為比煙道氣中的 CO₂ 後燃燒捕獲更高的 CO₂ 濃度和升高的壓力，薄膜分離在這兩種方法中都具有巨大的潛力。

目 次

| | |
|---|----|
| 行政院及所屬各機關出國報告提要..... | 3 |
| 摘 要..... | 5 |
| 目 次..... | 7 |
| 一、目的..... | 8 |
| 二、研習內容..... | 11 |
| 2.1 澳洲墨爾本大學化學和生物分子工程系 PETER COOK CO2CRC 研究中心 | 11 |
| 2.1.1 奈米多孔碳薄膜對熱裂解溫度和操作溫度的性能影響..... | 12 |
| 2.1.2 聚乙醚乙醚酮薄膜在硫化濕煙道氣流中溫度對 CO ₂ 滲透性能的影響 | 14 |
| 2.1.3 聚醯亞胺薄膜中的水蒸氣滲透 | 14 |
| 2.1.4 CO ₂ 吸附在單乙醇胺的薄膜複合材料和微孔薄膜接觸器的比較 | 15 |
| 2.1.5 含 CO ₂ 煙氣進行薄膜工廠分離試驗..... | 16 |
| 2.1.6 橡膠狀聚合物薄膜用於從合成氣中分離 CO ₂ 的性能試驗 | 18 |
| 3.1.7 煙道氣內二氧化碳高效能轉移至微藻系統 | 18 |
| 2.2 澳洲新南威爾士大學化學工程系 CO2CRC 研究中心 | 19 |
| 2.2.1 CCS 經濟學研究工作 | 19 |
| 2.2.2 封存工程..... | 21 |
| 2.2.3 近期的研究..... | 23 |
| 三、心得與感想 | 27 |
| 四、引用資料..... | 28 |

一、目的

1. 台電公司為最主要的電力供應者，不可避免排放大量的二氧化碳，因而如何因應日趨嚴重的溫室效應，並提出適切的二氧化碳減量策略，實為本公司應肩負的社會責任和義務。有效減少二氧化碳的排放並利用，對其進行分離、回收、純化工作具有重要意義，目前綜合研究所化學與環境研究室已發展固態及液態吸附法，考慮耗能吸附與脫附效率的問題，利用薄膜分離二氧化碳，一直是國外研究的重點，被認為是未來能大幅降低二氧化碳捕獲費用的希望。為配合台中電廠碳捕捉試驗場的規劃，聚合物薄膜是目前唯一商品化的薄膜，在高濃度二氧化碳與水蒸氣存在下，具穩定性，與傳統的化學吸附法和深冷分離法相比，薄膜法分離二氧化碳具有一次性投資較少；設備緊湊，占地面積小；能耗低；操作簡便；維修保養容易等優點。因而，從實際效果和發展前景看，薄膜分離法具有明顯優勢，缺點只應用低於 150°C 的操作溫度。本次實習分別赴澳洲墨爾本大學化學和生物分子工程系 Peter Cook CO₂CRC 研究中心及新南威爾士大學化學工程系 CO₂CRC 研究中心，研習(1) 建立二氧化碳薄膜分離及材料效能評估技術。(2) 高分子薄膜堅韌，且易於製造和操作，能改善二氧化碳的分離性能，目前的研究方向多朝向使用耐熱性高分子，尋求適當材料的評估與應用。(3) 探討高效能的高分子薄膜，建立薄膜氣體分離產能和分離效率評估技術。
2. Peter Cook Centre 是墨爾本大學世界級的碳捕集和封存 (CCS) 研究中心，執行的研究為澳大利亞碳捕集和封存增強技術，合作夥伴包括溫室氣體技術合作研究中心 (CO₂CRC)，Rio Tinto 和維多利亞州政府國家發展，商業和創新部 (DSDBI)，產出提供下一代技能和研究與開發服務於 CCS 研究。在墨爾本大學已經組建了一支非常強大的二氧化碳捕獲專家團隊，該中心的成立將促進大學二氧化碳儲存研究的開發和擴展，以及與 CCS 有關的跨學科研究。本次拜訪主要為薄膜系統項目負責人 Sandra Kentish 教授，Kentish 教授是墨爾本大學化學和生物分子工程系的教授和系主任。研究重點是薄膜分離技術，用聚合物和奈米多孔碳膜於氣體分離，以及在乳品加工和海水淡化中的用途。她是溫室氣體

技術 (CO₂CRC) 薄膜技術 CRC 學科領導，還在超聲波分離過程中應用研究，她的工業經驗包括九年的石化，攝影和紙漿和造紙工業。Kentish 教授發表了超過 120 篇，她是化學工程師協會的會員，澳大利亞能源研究所和澳大利亞薄膜協會會員。

3. 澳洲新南威爾士大學化學工程系 CO₂CRC 研究中心應用於減少溫室氣體排放的二氧化碳分離薄膜，用薄膜程序的天然氣淨化可以與用於小規模或中等規模操作的傳統方法，即高達 4000 萬標準立方英尺進料/天 (SCFD) 競爭。綜合氣化複合循環機組 (IGCC) 中的 CO₂ 預燃燒捕獲相對更容易，因為比煙道氣中的 CO₂ 後燃燒捕獲更高的 CO₂ 濃度和升高的壓力，薄膜分離在這兩種方法中都具有巨大的潛力。用於氣體分離的中空纖維 (HF, Hollow fiber) 薄膜由於其高的表面積與體積比 (填充密度) 和用於高壓操作條件的自支撐而具有優於其它薄膜組件設計的優點，使用具有優異氣體分離性質的市售聚合物材料製造中空纖維膜對於在可持續性能和薄膜系統的更好設計方面的程序評價是至關重要的。

二、行程概要

本案開會及研習期間含往返行程共 12 天，即自民國 105 年 11 月 13 日至同年 11 月 24 日止。其行程概要簡述如下：

| 參訪機構名稱 | 地點 | 詳細工作內容 |
|-----------|-------|-----------------------|
| 澳洲墨爾本大學 | 澳洲墨爾本 | 研習建立二氧化碳薄膜分離及材料效能評估技術 |
| 澳洲新南威爾士大學 | 澳洲雪梨 | 研習建立二氧化碳薄膜分離及材料效能評估技術 |

二、研習內容

2.1 澳洲墨爾本大學化學和生物分子工程系 Peter Cook CO2CRC 研究中心

Peter Cook Centre 是墨爾本大學世界級的碳捕集和封存 (CCS) 研究中心，執行的研究為澳大利亞碳捕集和封存增強技術，合作夥伴包括溫室氣體技術合作研究中心 (CO2CRC)，Rio Tinto 和維多利亞州政府國家發展，商業和創新部(DSDBI)，產出提供下一代技能和研究與開發服務於 CCS 研究。

該中心以 Peter Cook 先生，CBE，FTSE 教授的名字命名，他是一位國際知名的碳捕獲和儲存研究專家，也是澳大利亞 CCS 研究和開發的先驅。他在地質儲存領域卓越的地位和全球聲譽使他成為中心的顧客。該中心處於獨特和有利的地位，建立在過去十年中，通過二氧化碳捕集和循環監測項目的傑出成就和動力。在墨爾本大學已經組建了一支非常強大的二氧化碳捕獲專家團隊，該中心的成立將促進大學二氧化碳儲存研究的開發和擴展，以及與 CCS 有關的跨學科研究。

本次拜訪主要為薄膜系統項目負責人 Sandra Kentish 教授，Kentish 教授是墨爾本大學化學和生物分子工程系的教授和系主任。研究重點是薄膜分離技術，用聚合物和奈米多孔碳膜於氣體分離，以及在乳品加工和海水淡化中的用途。她是溫室氣體技術 (CO2CRC) 薄膜技術 CRC 學科領導，還在超聲波分離過程中應用研究，她的工業經驗包括九年的石化，攝影和紙漿和造紙工業。Kentish 教授發表了超過 120 篇，她是化學工程師協會的會員，澳大利亞能源研究所和澳大利亞薄膜協會會員。



圖 1：澳洲墨爾本大學 Peter Cook CO2CRC 研究中心參訪

2.1.1 奈米多孔碳薄膜對熱裂解溫度和操作溫度的性能影響⁽¹⁾

在減緩全球的溫室效應，採用捕獲和儲存二氧化碳 (CO₂) 的技術設計，被認為有必要將在短期內發揮重要的 CO₂ 減排作用。奈米多孔碳薄膜 (NPC) 適合作為 CO₂ 捕集的新一代氣體分離薄膜的希望。澳洲墨爾本大學化學與生物

分子工程學院 CO₂ CRC Peter Cook CCS 研究中心利用聚糠醇 (PFA, From polyfurfuryl alcohol) 製備 NPC 的薄膜探討在各種熱解溫度的性能影響。以正電子湮滅壽命光譜 (PALS) 和廣角 X 射線繞射 (WAXD) 儀器分析，結果孔徑減小，而孔隙率隨著熱解溫度的增加而增加。薄膜性能結果支持隨著熱解溫度的增加，滲透率亦顯著增加，這與孔隙率的增加有關。混合氣體性能測量還顯示操作溫度從 35°C 增加到 200°C，CH₄ 滲透性增加，這可能與增加擴散速率有關。然而，隨著操作溫度的升高，選擇性減少，降低了 CO₂ 的滲透性。CO₂ 滲透性小量的變化，可能與氣體在碳表面上在較低的操作溫度下較強的吸附相關。有趣的是，無論原來的熱解溫度或在較高的操作溫度下的選擇性是相似的，而滲透性保持與該熱解溫度相關。

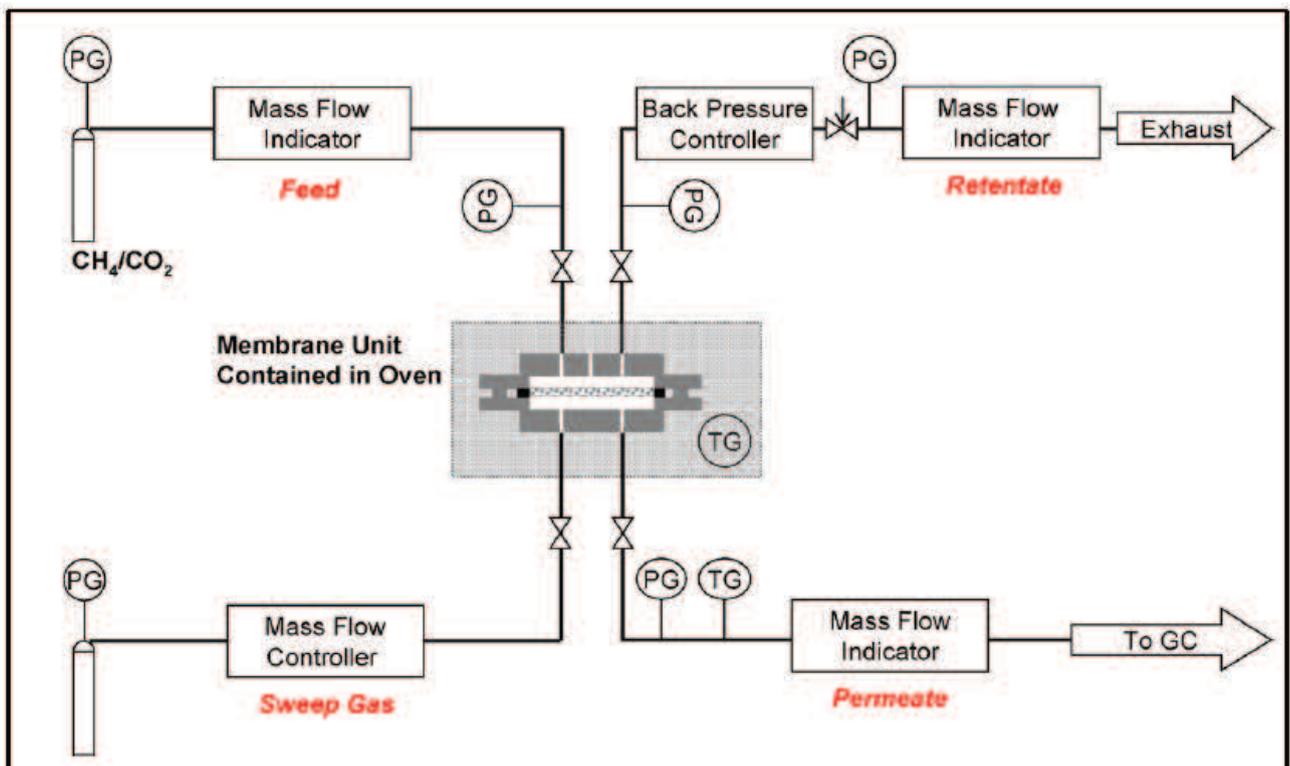


圖 2：用於測量由 PFA 製成的製造的 NPC 膜的混合氣體分離性能的恆壓可變容積 (CPVV) 設備

2.1.2 聚(乙醚乙醚)酮薄膜在硫化濕煙道氣流中溫度對 CO₂ 滲透性能的影響⁽²⁾

薄膜技術可從電廠煙道氣流中回收高純度水。澳洲墨爾本大學在這項研究中，利用(IEC 1.6meq / g 和 1.9meq / g)兩種不同離子交換容量的聚(乙醚乙醚)酮 (SPEEK, Sulphonated Poly (Ether Ether) Ketone) 薄膜，探討溫度對水蒸汽和 CO₂ 滲透性能的影響。發現兩種滲透性隨著水活性的增加而增加，由於水的濃度增加時水的溶性增加。(IEC1.9meq / g) SPEEK 薄膜較 (IEC1.6meq / g) SPEEK 薄膜具更高的水滲透性和選擇性。當濕度大於 50%，溫度升高至 50°C 時，水蒸汽和 CO₂ 滲透性也隨著溫度增加而升高，這是由於增加滲透分子的擴散。然而，隨著溫度進一步增加，發生水和 CO₂ 的滲透性明顯下降。減少歸因於形成填充聚合物中的自由體積，並阻礙分離的擴散的水簇群分子。這種擴散的減少，加上隨著溫度的增加溶解度的降低導致性能下降。

2.1.3 聚醯亞胺薄膜中的水蒸氣滲透⁽³⁾

研究進料水蒸氣對混合氣體薄膜分離系統的影響是具有相當實際的重要性。水蒸氣可以使薄膜增加可塑性，它可以與其他氣體物種競爭吸附，並且它可以在其滲透時形成簇群。在研究工作中，修改混合氣體滲透系統用於精確測量滲透性能的聚醯亞胺 2,2'-雙(3,4'-二羧基苯基, (2,2^L-bis(3,4^L-dicarboxyphenyl) hexafluoropropane dianhydrid)，六氟丙烷二酐-2,3,5,6-四甲基 - 1,4- 苯二胺 2,3,5,6-tetramethyl-1,4-phenylenediamine (6FDA-TMPDA) 和聚(3,3', 4,4'-二苯甲酮四羧酸二酐二氨基苯基, poly(3,3^L-4,4^L-benzophenone tetracarboxylic-dianhydride diaminophenylindane)(Matrimid® 5218)，在 35°C 下暴露於加濕 CH₄ 這種方法以進一步評估聚合物在加濕混合物中的滲透性能的 CO₂ 和甲烷在 35 °C 在大氣壓和升高的進料壓力。水蒸氣滲透性在 2 和 7.5bar 總進料壓力下，從 3200 增加到 3900 Barrer 和從 20,000 至 27,000 Barrer，分別為 Matrimid 和 6FDA-TMPDA 的水位增加，反映了水蒸氣溶解度增加以及由於存在而可能的增加塑性和聚集效應的水蒸氣。相反，CH₄ 和 CO₂ 的滲透性，由於競爭性水吸附而下降。

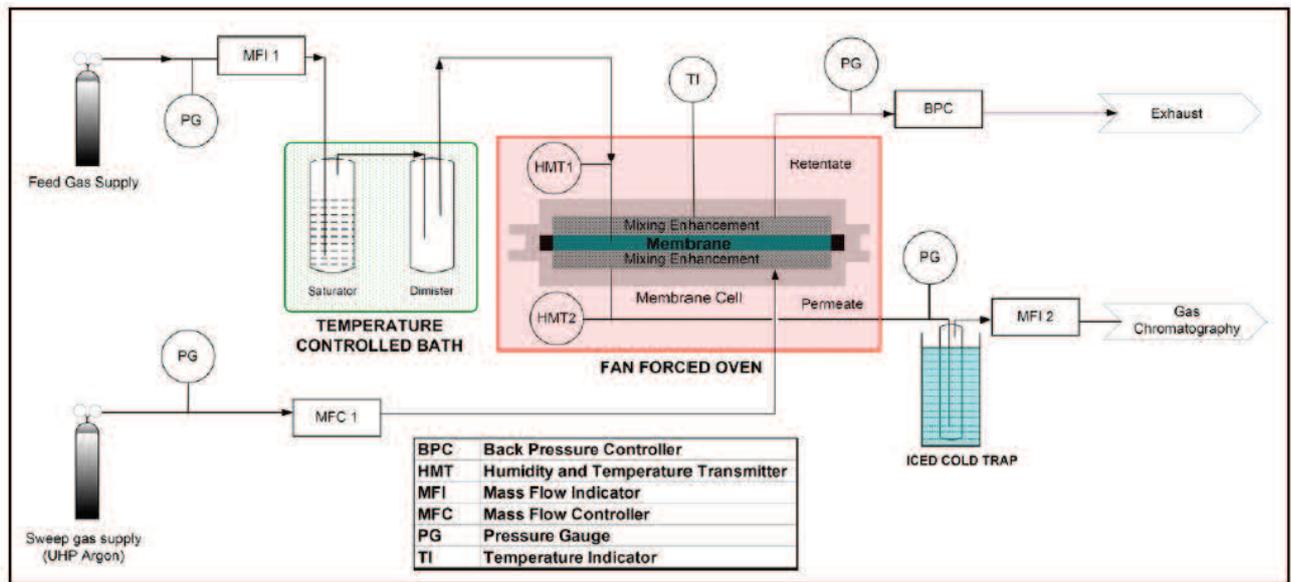


圖 3：水蒸汽滲透裝置

2.1.4 CO₂ 吸附在單乙醇胺的薄膜複合材料和微孔薄膜接觸器的比較⁽⁴⁾

薄膜氣體溶劑接觸器顯示出碳捕獲的潛力，因為其結合了溶劑和薄膜技術的優點。澳洲墨爾本大學利用三個複合薄膜接觸器被試用於單乙醇胺 (MEA, Monoethanolamine) 溶劑吸收 CO₂。這些是通過在多孔 PP 載體上塗布緻密的聚 (1-三甲基甲矽烷基-1-丙炔) (PTMSP, poly (1-trimethylsilyl-1-propyne))，由微孔聚合物 (PIM-1) 和 Teflon AF1600 製備聚合物的固定在 PP 載體。發現在操作 1 小時後，PTMSP 和 PIM-1 薄膜接觸器提供了最高的總傳質係數，而 Teflon AF1600 性能較低。基於質量傳遞電阻計算通過薄膜的 CO₂ 滲透性的比較顯示，與氣體滲透性測量所預期的相比，PTMSP 和 PIM-1 都顯著阻礙了 CO₂ 的性能。這是由於存在水和 MEA 被吸附在無孔層內，阻礙了 CO₂ 通過兩個薄膜的遷移。重要的是，對於 PTMSP 和 PIM-1 薄膜，水隨時間從緻密層遷移到多孔載體中並潤濕孔。Teflon AF1600 緻密層耐水和 MEA 吸附，因此通過該層的 CO₂ 滲透與從氣體滲透性測量所預期的相當。同樣重要的是，在操作 10 小時後，未觀察到總體轉移係數的變化，這表明 Teflon AF1600 能夠防止水潤濕多孔 PP 載體。因此，對於薄膜複合膜接觸器對 CO₂ 分離有效，緻密層必須具有高 CO₂ 滲透性及耐水吸收性。

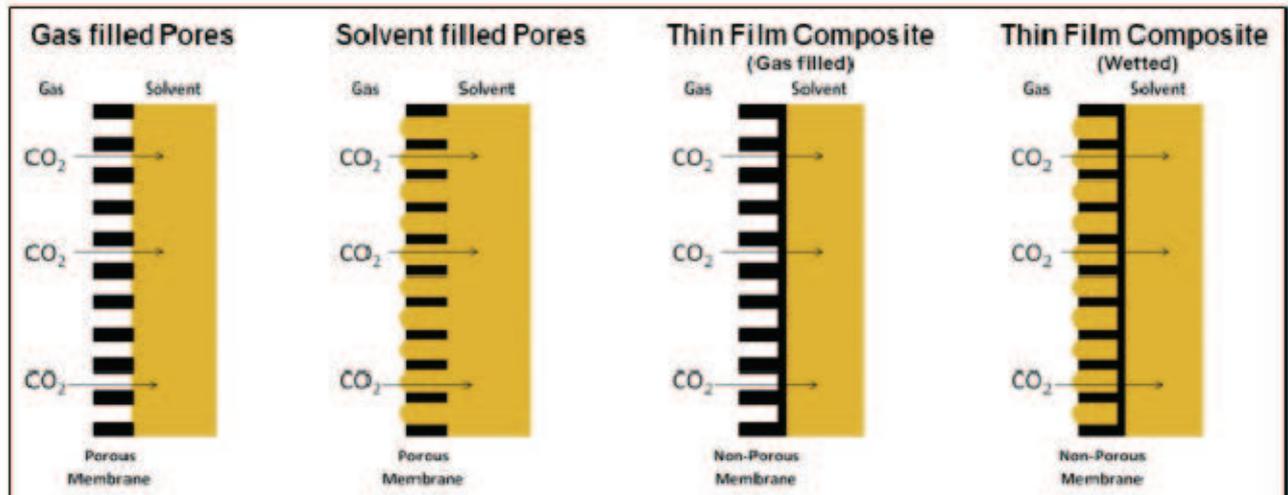


圖 4：充氣多孔薄膜接觸器和具有乾燥和潤濕多孔載體的薄膜複合膜接觸器的示意圖

2.1.5 含 CO₂ 煙氣進行薄膜工廠分離試驗⁽⁵⁾

燃燒後碳捕獲是 CO₂ 與煙道氣的選擇性分離，以減少碳排放和限制人為氣候變化。已顯示薄膜氣體分離對於該分離過程是可行的，並且當與低溫分離組合時在經濟上與已建立的溶劑吸收技術競爭。理想情況下，薄膜應具有高 CO₂ 滲透性和高 CO₂ / N₂ 選擇性; Merkel et al 建議需要 1000 GPU 的 CO₂ 滲透性和 20 以上的 CO₂ / N₂ 選擇性。這些聚合物薄膜是令人感興趣，因為它們已經天然氣脫硫的商業化應用。另一種是設備的傳輸薄膜應用，顯示已獲得顯著高於常規聚合物薄膜的滲透性和選擇性的潛力。這是因為 CO₂ 與移動或固定載體物質反應，並且在反應狀態下攜帶穿過薄膜。在大多數情況下，促進的機制需要薄膜用水飽和。然而，儘管在實驗室已經開發了許多高性能聚合物薄膜和促進的傳輸薄膜，但是在燃燒後捕獲對這兩種類型的薄膜的工業試驗工廠研究很少。是因為尚未進行以中試規模測試所需的規模將薄膜材料製造成中空纖維或螺旋捲繞模組，並且部分地缺少可用於後燃燒捕獲的薄膜試驗裝置。在後燃燒捕獲中的薄膜的另一個關鍵問題是通過模組的壓力損失。煙氣僅在環境壓力下可用，並且大多數工人表示，在滲透側抽吸真空比壓縮該進料更有效。然而，在

這種情況下，模組上的任何壓降直接影響跨薄膜壓力比，並因此影響可實現的分離。

澳洲墨爾本大學用於燃燒後 CO₂ 捕集的薄膜氣體分離試驗裝置，其是溫室氣體技術 (CO₂ CRC) H3 項目的合作研究中心的一部分，該項目是關於維多利亞褐煤燃燒的燃燒後 CO₂ 捕集試驗發電廠。特別地，分別研究兩個薄膜組件。第一個是空氣產品 PRISM 模組填充非對稱玻璃狀聚合物中空纖維，最初設計用於空氣分離。第二種是在設計用於奈米過濾應用的螺旋纏繞模組中的商業薄膜複合聚醯胺薄膜 (Dow NF3838 / 30FF)，在先前顯示的在濕潤進料條件下作為促進的傳輸薄膜。重要的是，兩種薄膜目前被製造為大規模模組，因此可以容易地轉換到未來的大規模碳捕獲過程。

含 CO₂ 煙氣進行 Air Products PRISM 和螺旋纏繞 Dow Filmtec®NF3838 / 30FF 薄膜工廠分離試驗，通過 CO₂ 滲透和選擇性，PRISM 薄膜在操作的初始小時中顯著下降，反映競爭吸附效應和濃度極化。或者，濕氣流能夠促進運輸 NF3838 / 30FF 薄膜的操作機理和 CO₂ 滲透性和選擇性與乾薄膜相比顯著增加。標準相關性能夠薄模擬通過模組交阻的壓力下降。



圖 5：CO₂CRC H3 在薄膜模組工廠現場試驗

2.1.6 橡膠狀聚合物薄膜用於從合成氣中分離 CO₂ 的性能試驗⁽⁶⁾

澳洲墨爾本大學在燃燒之前從合成氣中分離二氧化碳，橡膠聚合物膜評估合成氣分離二氧化碳的能力，特別是氫，具有合理的選擇性。這裡，三種橡膠狀聚合物膜的氣體分離性能，聚二甲基矽氧烷 (PDMS)，交聯聚乙二醇 (PEG) 和聚 (醚-b-醯胺) (PEBAX 2533)，在暴露於真實的未移動的合成氣時，作為 CO₂ CRC Mulgrave 的一部分捕獲項目。在低溫下，所有三個薄膜都能夠從合成氣中分離 CO₂；然而其他合成氣組分的競爭吸附顯著改變它們的性能。對於 PDMS 在合成氣條件下相比，CO₂ 滲透性降低到純氣體滲透性，但是在合成氣的存在下改善了 CO₂/H₂ 和 CO₂/N₂ 選擇性。這導致該薄膜的良好的 CO₂ 分離性能。然而超過 24 小時的暴露性能有所下降。相比之下，PEG 和 PEBAX 膜都表現出差的二氧化碳暴露於合成氣時的分離性能。特別地，觀察到的低 CO₂/H₂ 選擇性，表明兩種薄膜暴露於合成氣時具有差的選擇能力。

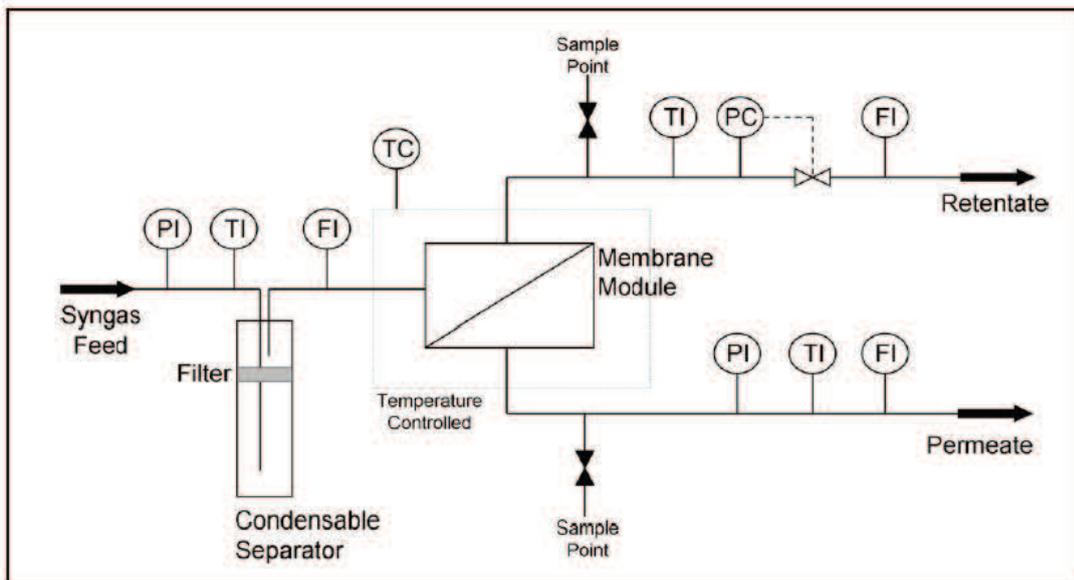


圖 6: CO₂CRC Mulgrave 橡膠狀聚合物薄膜用於從合成氣中分離 CO₂ 試驗流程

3.1.7 煙道氣內二氧化碳高效能轉移至微藻系統⁽⁷⁾

澳洲墨爾本大學結合溶劑吸收及薄膜脫附，應用在捕獲二氧化碳微藻培養，並將其轉化為富含脂質的生物質。在系統中，二氧化碳被吸收到碳酸鉀溶劑中，並且該氣體直接脫附到微藻，介質通過非多孔聚二甲基矽氧烷 (PDMS,

non-porous polydimethyl siloxane) 中空纖維膜。這個單步驟方法提供了將碳輸送到微藻的成本的範例變化，作為非常大的再沸器能量需求的標準碳捕獲溶劑再生，避免了能量與氣體壓縮相關。具體地，使用 20 wt % 的碳酸鉀溶劑與 0.2、0.5 和 0.7 wt % CO_2 負載，作為將 CO_2 遞送至鹽的微藻(*Chlorella* sp. Microalgae) 培養物的機制，以各種控制條件變化，觀察微藻的成長速度，使用 0.5 和 0.7 負載的碳酸鹽溶液，有高體積產率 ($0.38\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$) 和生物質濃度 (1.8g L^{-1}) 最高的體積通過，完全避免傳統的碳吸收極限。該系統已經證明了生成利用的生物燃料的潛力，從發電廠煙道氣產生的二氧化碳，具有最小的依附能量的需求。

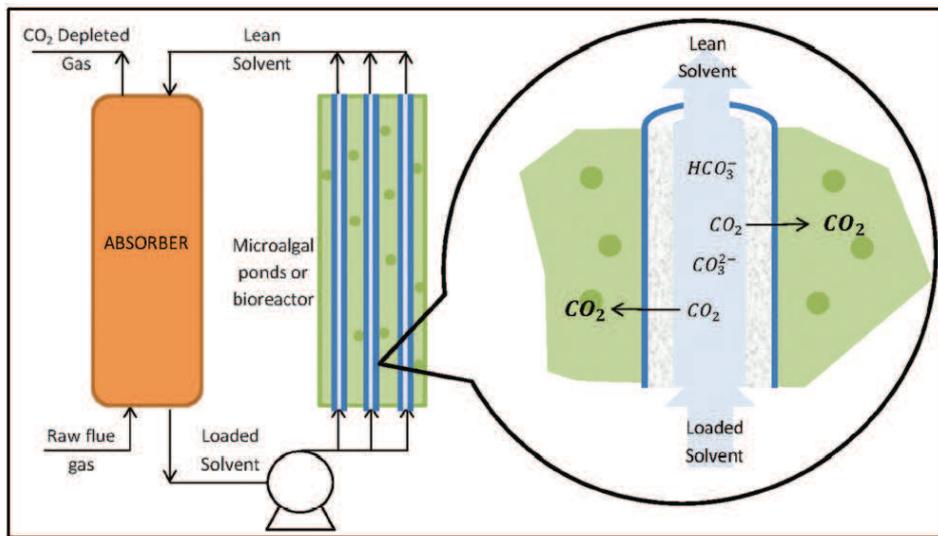


圖 7：透過泵通過微藻管道池或光生物反應器， CO_2 從燃燒煙道氣吸收到 K_2CO_3 溶劑， CO_2 脫附到微藻培養基中，並耗盡溶劑返回到吸收器，不需要溶液接收或捕獲脫附操作處理。

2.2 澳洲新南威爾士大學化學工程系 CO₂CRC 研究中心

2.2.1 CCS 經濟學研究工作

新南威爾士大學 CO₂CRC 研究中心基於健全科學和整合 CCS 系統的經濟評估作為高度優先事項，雖然政府專注於廣泛的經濟範圍建模和評估，公司專注於新投資背景下的具體特定項目及評估，CO₂CRC 的作用是通過提供目標技術和系統範圍評估，CO₂CRC 處於無與倫比的地位，能夠匯集各國政府和業界

需要的必要技術信息，以支持這種篩選經濟評估，並利用它來為公眾辯論和決策提供信息。

對 CCS 技術和系統的經濟評估允許對不同捕集和燃料選擇進行相對比較，以改造現有發電操作或開發新工廠。還可用於影響政策激勵措施和正在考慮的措施的決策，以確保固定能源部門長期採用低排放技術。這些評估中需要詳細考慮的因素包括運營成本和資本成本的影響，改造後的可售電力，水消耗率和建造 CCS 工廠的原材料成本(例如鋼鐵，水泥)。

| | |
|--------|------------------------|
| 捕獲經濟 | 來源 (煤，氣，鐵和鋼，水泥，煉油廠...) |
| | 技術(包括 CO2CRC 捕獲研究) |
| 經濟模式 | 整合捕獲、傳輸、封存 |
| | 傳輸路線優化 (資源- 匯合) |
| 儲存經濟 | 傳輸及儲存經濟 |
| | 貫注 (與封存研究結合) |
| CCS 系統 | 資源- 匯合 (中心) 經濟學 |
| | 替代品比較 |

表 1：UNSW 的 CO2CRC 經濟學團隊的研究範圍

集中的經濟評估包括從資源至匯合的全套 CCS 途徑和技術，包括二氧化碳運輸選擇，井的優化和二氧化碳純度考慮，建模工作的結果也用於支持 CCS 決策。UNSW 的 CO2CRC 通過與其業界和研究合作夥伴 (包括 ABARE，CSIRO 和 IEA) 合作已開展的工作，促進能源選擇和系統的宏觀經濟建模與替代能源方案之間的比較。

雖然工業界對特定項目進行自己的經濟評估，但是當它尋求獨立的經濟建議和評估時，它將受益於增強的經濟研究成果的可用性和更多的技術研究人員。這種增加的經濟建模和研究工作也為金融機構和排放交易參與者提供了有利的市場支持。

借助優先的技術和經濟研究計劃，CO2CRC 能夠滿足政府和金融部門對 CCS 技術和系統日益增長的興趣。通過提供關於 CCS 的準確和高質量的技術和經濟信息，UNSW 的 CO2CRC 經濟學團隊協助 GCCSI，NLECC 和其他組織如克林頓基金會的工作，鼓勵採用低排放技術，反過來，融資和投資 銀行部門，因為他們與公司合作開發可直接促進 2020 年二十大型 CCS 項目 G8 目標的銀行可持續發展項目。

該團隊已經開發了一種計算經濟模型來估計 CCS (ICCSEM) 的總成本，捕獲組件的模型目的在開發，設計和描述主要 CO₂ 捕集的關鍵技術。存儲組件目的在改進 CO₂ 壓縮機，運輸路線，平台和注入井工程的設計。該模型的測試版已發布，由 CO2CRC 贊助商進行內部審查，並正在商業化的過程中。此外，成員通過磋商和報告向 CO2CRC 合作夥伴和外部各方提供支持和建議，包括 Latrobe Valley，Sydney 氣田和 Abadi 油田開發 CCS 的可行性研究工作。

2.2.2 封存工程

尋找合適的地點來封存接近排放源的二氧化碳通常是 CCS 項目中最大的不確定性。CO2CRC 的早期工作是澳大利亞具有非常大的理論存儲潛力，並確定了一些大型，高質量的封存庫。封存主要位於附近的鹽水層。然而，對於許多發電機和其它高二氧化碳排放的工業，目前還沒有清楚地識別附近的封存地點。為了向這些排放者提供可靠的經濟有效的地質封存選擇，並使政府能夠有效地規劃其緩解基礎設施戰略和監管制度，需要更好地了解 and 更準確地模擬沉積構造，地質力學行為和可能的流體流動潛在地點，以及開發管理二氧化碳注入和封存的適當技術和策略，並通過監測和驗證為監管機構和社區提供信心，以顯示二氧化碳封存是安全的。CO2CRC 開展了一系列應用研究項目，在實驗室和現場以及通過試點和示範項目調查這些問題，目前 UNSW 的研究重點包括：

(1) 了解鹽水含水層中的 CO₂ 封存

IPCC，IEA，CO2CRC 和其他研究機構的工作清楚地說明，大規模地質封存二氧化碳的最重要的機會是鹽水含水層。這種含水層普遍存在，並

發生在世界的大多數沉積盆地，包括澳大利亞，儘管如此，關於非限制含水層中關鍵儲層參數的分佈的可用信息量以及鹽水含水層內可能的 CO₂ 行為是非常有限的。動態模型的應用也常常受限於缺乏良好的靜態模型。

有人擔心將 CO₂ 注入鹽水含水層可能導致鹽水排入淡水含水層或對其他資源產生不利影響，危及包括淡水，石油，天然氣或地熱在內的重要資源顯然是需要避免的。但與此同時，除非我們能夠使用鹽水含水層儲存，否則 CCS 將無法達到充分的緩解潛力，因此必須制定選項，盡量減少對含水層資源的任何影響，同時優化二氧化碳封存機會。需要理解鹽水含水層中 CO₂ 封存的近場和遠場效應，作為評估 CO₂ 對其他資源的影響的基礎，並作為有效管理鹽水含水層中大規模 CO₂ 封存的基礎。

計畫使用含水層系統和豐富的數據記錄，預測鹽水層中的封存，例如在澳大利亞，新西蘭和其他地方，這項工作是與相關聯邦和國家當局密切合作完成的，以便充分獲取現有數據，並在必要時獲取樣品。該研究隨後將轉移到其他 CO₂CRC 項目中，記錄的一些沉積系統及其定義良好的架構，CO₂ 羽流對其他資源的近遠場影響，並製定了封存管理戰略在不同的地質環境中，Otway 數據也用於評估含水層系統和二氧化碳封存，包括地熱數據。

(2) 封存層的預測模型

目前，存在非常少的封存位點，其中已注入 CO₂ 的量使得可以在商業上有意義的規模測試預測模型。此外，迄今為止已經運行的少數通常具有商業信心限制，這嚴重限制了在一系列實驗條件下注入 CO₂ 到測試模型的程度。CO₂CRC Otway 項目是獨一無二的，因為它是目前世界上唯一的地點，在地質上受到嚴格約束的研究條件下，有可能注入成千上萬噸的二氧化碳。該項目旨在利用現有的 Otway 設施，改進對一系列封存庫類型和各種捕集機制的預測建模，並將 Otway 的學習擴展到潛在的封存地點。

與 Huff n' puff 相關的工作包括：

- 確定不同氣體和氣體組成對封存的影響

- 制定關鍵的模擬靈敏度指南
- 制定減少關鍵陷阱機制的的不確定性範圍的方法
- 測試和驗證 Otway 網站（以及潛在的其他網站）的模擬預測，其他活動包括：
 - 制定開發異質和低滲透封存的戰略
 - 將建模與孔隙實驗和成像的數據集成
 - 使用現場實驗驗證故障穩定性
 - 將 Otway 的經驗擴展到從長期的研究到示範和商業網站的其他封存網站的測試和驗證，因為網站可用並且額外的資源允許。

2.2.3 近期的研究

(1) 新建灌注計算工具

數值模擬可用於確定鹽水地層的注入性，但是它們非常耗時，UNSW 的 CO2CRC 封存工程團隊開發了一種軟件工具，可預測 3-D 矩形儲層的最大注入量，該軟件基於儲層滲透率，初始壓力，厚度和面積的數據。數值模擬考慮了多井注入效應，如壓力干擾，具有注入和儲層參數的任何組合的地層的注入性通過內插來確定，該工具使用戶能夠輸入一組儲層參數和預期的總注射速率及找到所需的井數，還可以對任何給予的輸入參數範圍執行 Monte Carlo 分析。

(2) 用於減少溫室氣體排放的二氧化碳分離薄膜

二氧化碳，主要來自用於能源的化石燃料的燃燒，是人類活動排放的最常見的溫室氣體。雖然燃煤發電站仍然是澳大利亞和世界上一一些主要經濟體的主要能源來源，但 CO₂ 捕集和封存是減少溫室氣體排放的必然選擇之一。CO₂ 分離和捕集可以在特定的工業中進行，例如天然氣程序，因為大多數天然氣資源含有比允許的管道規格更高的 CO₂ 含量，用薄膜程序的天然氣淨化可以與用於小規模或中等規模操作的傳統方法，即高達 4000 萬標準立方英尺進料/天（SCFD）競爭。整合氣化複循環發電機組（IGCC）中的 CO₂ 預燃燒捕獲相對更容易，因為比煙道氣中的 CO₂

後燃燒捕獲更高的 CO_2 濃度和升高的壓力，薄膜分離在這兩種方法中都具有巨大的潛力。

用於氣體分離的中空纖維 (HF, Hollow fiber) 薄膜由於其高的表面積與體積比 (填充密度) 和用於高壓操作條件的自支撐而具有優於其它薄膜組件設計的優點，使用具有優異氣體分離性質的市售聚合物材料製造中空纖維膜對於在可持續性能和薄膜系統的更好設計方面的程序評價是至關重要的。目前在新南威爾士大學 UNESCO 薄膜技術中心的研究重點包括：

- (2.1) 製造用於從天然氣中去除 CO_2 的中空纖維薄膜：選定的聚合物材料，中空纖維中的微觀結構的發展及其質量傳輸能力受薄膜製造過程中使用的條件和程序的影響，UNESCO 研究使用市售的聚醯亞胺材料 Matrimid® 來確定在製造過程中影響相轉化過程的因素，並評價它們對中空纖維薄膜氣體分離性能的影響。檢查聚合物紡絲原液組成，孔隙流體組成，紡絲原液和孔隙流體流速，氣隙長度和擠出速率的參數，以產生最佳的薄膜選擇性和 CO_2 滲透性，中空纖維的 CO_2/CH_4 選擇性為 60， CO_2 滲透性為 15GPU，正在進行評價。通過控制製造條件的基材，可以為不同的應用，生產具有不同選擇性和滲透值的纖維。

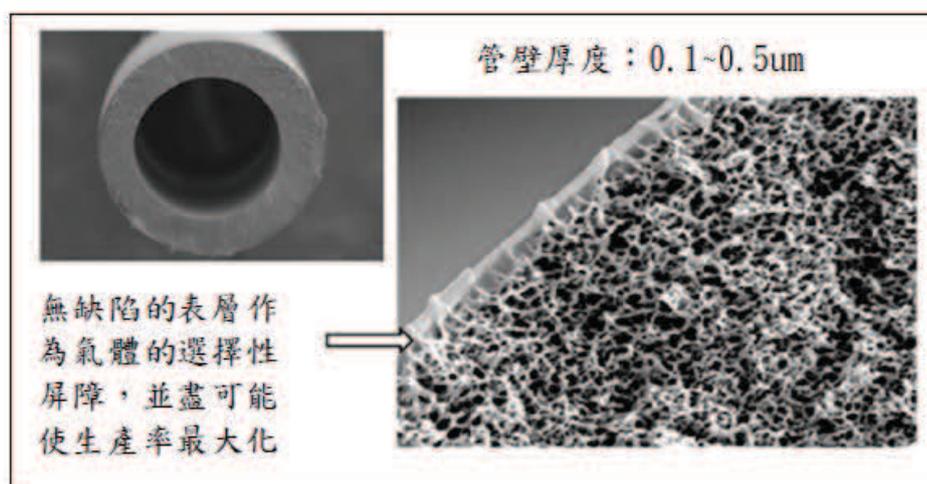


圖 8：通過優化紡絲參數製造的高選擇性 Matrimid® 纖維

(2.2) 評價和理解薄膜增塑和老化，以實現可持續的薄膜性能：除了製造具有優異分離特性的中空纖維薄膜外，由於 CO₂ 吸附到薄膜的聚合物結構中，引起的塑化通過降低選擇性和增加滲透性而影響薄膜性能。這反過來影響可持續薄膜性能。UNESCO 研究採用結節結構模型描述聚合物薄膜結構中的 CO₂ 吸附過程，使用具有不同選擇性的薄膜的氣體吸附測試來區分 Henry's 和 Langmuir 吸附等溫線，建模工作能夠預測不同薄膜對增塑的響應，實驗數據與模型預測一致。應用類似的方法分析混合氣體分離試驗的競爭吸附，模擬和實驗結果談明，具有較低選擇性的薄膜具有更強的競爭吸附。因此，對於具有更高選擇性的薄膜，增塑可能不那麼深，探討諸如熱退火的後處理用於抑制塑化，滲透結果說明熱退火能夠穩定內部製造的 Matrimid 中空纖維薄膜的性能。

(2.3) 製造具有高滲透性和對於從發電廠捕獲 CO₂ 的選擇性的低成本薄膜：為了使氣體分離薄膜對於來自發電廠的 CO₂ 的後燃燒捕獲具有競爭性，薄膜必須具有高 CO₂ 滲透性和高 CO₂ / N₂ 選擇性，這是因為待處理的煙道氣流的大體積和相對低的驅動力和 CO₂ 濃度。UNESCO 研究建立在製造用於從天然氣中去除 CO₂ 的高選擇性聚合物薄膜的研究能力，並且製造具有改善的 CO₂ 滲透性同時保持良好選擇性的聚合物薄膜。使用市售的聚合物材料，初始工作集中於鑄造緻密薄膜，用於評價塗料配方，凝結介質和空氣暴露時間對微觀結構和分離特性的影響。將採用最佳條件製造中空纖維薄膜，用於評估 CO₂ 滲透和選擇性，使用類似於在預燃氣流中發現的那些的配製氣體混合物。探討具有添加劑的薄膜的製造，以便獨立地改善選擇性或滲透性。該研究的結果將為在燃燒前和燃燒後氣流中選擇用於 CO₂ 捕獲的聚合物材料薄膜製備方案提供有用的信息。

(3) 監控

監測項目的目的是整合衛星雷達和光學遙感技術。實現對 CCS 場址的最佳選擇，以及在大面積 CO₂ 注入之前，期間和長期對地面高程和植被條件的微妙變化的監測。將要開展的活動包括：(a)長系列衛星圖像的 CCS 站點穩定性評估，(b)利用衛星雷達和光學遙感技術進行 CCS 現場監測，以識別和定位 CO₂ 洩漏，以及監測結果與反演建模預測之間的比較，(c)遙感和地/地下勘測結果之間的比較。

預期成果包括最佳 CCS 場址選擇指南和一套針對 CCS 監測的衛星遙感軟件。這些成果將分別基於衛星遙感結果和方法，這些結果和方法經過來自兩個 CCS 場址的實地調查數據驗證，一個在中國，另一個在澳大利亞。該項目將為未來的監測計劃提供良好的基礎，以支持澳大利亞，中國和國際上的 CCS 行動，並協助社區接受該技術。

該項目是建立在對中國和澳大利亞的地下採煤和地下水開採監測地表面位位移進行 10 多年的廣泛研究，最近在澳大利亞的 Otway CCS 現場和 Weyburn CCS 現場的 CO₂ 注入加拿大。

三、心得與感想

- (1) CO₂ 捕集和封存是減少溫室氣體排放的必然選擇之一。
- (2) 聚合物薄膜是目前唯一商品化的薄膜，在高濃度 CO₂ 與水蒸氣存在下具穩定性，與傳統的化學吸附法和深冷分離法相比，薄膜法分離 CO₂ 具有一次性投資較少；設備緊湊，占地面積小；能耗低；操作簡便；維修保養容易等優點。
- (3) 澳洲墨爾本大學化學和生物分子工程系 Peter Cook CO₂CRC 研究中心及新南威爾士大學化學工程系 CO₂CRC 研究中心，在 CO₂ 捕獲分離方面皆以薄膜法分離 CO₂ 為主要研究工作。
- (4) 薄膜必須具有高 CO₂ 滲透性和高 CO₂ / N₂ 選擇性，這是因為待處理的煙道氣流的大體積和相對低的驅動力和 CO₂ 濃度。從奈米多孔碳薄膜、聚(乙醚乙醚) 酮薄膜、聚醯亞胺薄膜、單乙醇胺薄膜、橡膠狀聚合物薄膜、聚醯亞胺中空纖維薄膜測試，薄膜的製造和操作、分離性能及效能評估揭露於各項研究中。
- (5) 從 CO₂ 煙氣進行，薄膜工廠分離試驗採用商品 Air Products PRISM 和螺旋纏繞 Dow Filmtec®NF3838 / 30FF，兩種薄膜目前已被製造為大規模模組，可以容易地轉換到未來的大規模碳捕獲過程。
- (6) 煙道氣內 CO₂ 高效能轉移至微藻系統，澳洲墨爾本大學結合 (K₂CO₃) 溶劑吸收及 (PDMS) 中空纖維薄膜分離，應用在捕獲二氧化碳微藻培養，最高的體積 CO₂ 通過，完全避免傳統的 CO₂ 吸收極限，不需要溶液接收或捕獲脫附操作，並將其轉化為富含脂質的生物質。
- (7) 複循環發電機組(CC)中使用的天然氣及整合氣化複循環發電機組 (IGCC) 中煤炭的 CO₂ 預燃燒捕獲相對更容易，因為比煙道氣中的 CO₂ 後燃燒捕獲更高的 CO₂ 濃度和升高的壓力，薄膜分離在這兩種方法中都具有巨大的潛力。

四、引用資料

1. Clare J. Anderson^a, Steven J. Pasb^c, Gaurav Arora^d, **Sandra E. Kentisha**, Anita J. Hill^{b,e}, Stanley I. Sandler^d, Geoff W. Stevens^a, *Journal of Membrane Science*, 322 (2008) 19–27.
2. Hirra Azher, Colin Scholes, Shinji Kanehashi, Geoff Stevens, **Sandra Kentish**, *Journal of Membrane Science*, 519(2016)55–63.
3. George Q. Chen, Colin A. Scholes, Greg G. Qiao, **Sandra E. Kentish**, *Journal of Membrane Science*, 379 (2011) 479– 487.
4. Colin A. Scholes^a, **Sandra E. Kentisha**, Geoff W. Stevens^a, David deMontigny^b Cooperative, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 42 (2015) 66–74.
5. Colin A. Scholes, Abdul Qader, Geoff W. Stevens, and **Sandra E. Kentish** , University of Melbourne , VIC , Australia, *Greenhouse Gases Science and Technology*.
6. Colin A. Scholes, Joannelle Bacus, George Q. Chen, Wen X. Tao, Gang Li, Abdul Qader, Geoff W. Stevens, **Sandra E. Kentish**, *Journal of Membrane Science*, 389 (2012) 470– 477.
7. Qi Zheng, ab Gregory J. O. Martin^b and **Sandra E. Kentish**, *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9, 1074.