
負碳技術：二氧化碳捕獲封存及再利用
Negative Emissions Technologies: CO₂ Capture,
Storage and Utilization (CCSU)

談駿嵩

清大化工系榮譽退休教授

國科會負碳領域召集人

2023, 12, 11

淨零碳排

- **碳中和(Carbon Neutrality)**: CO₂排放量 = 移除量，可使用抵換做為移除手段。
淨零碳排(Net Zero Carbon Emission)，CO₂排放量 = 移除量，但不可使用抵換做為移除手段；
淨零排放(Net Zero Emission)，除CO₂外還包括其他溫室氣體甲烷、CFC、N₂O、PFCs及SF₆等。
- **負碳排技術是能除去的碳比排放出的碳還多的技術**。其中幾項技術包括：
 - CCSU包括生質能加上碳捕獲封存再利用(**BECCSU**)及直接空氣捕獲封存再利用(**DACCSU**)、
 - 碳匯
 - ✓ 森林碳匯(綠碳): 大規模造林及再造林(Massive Afforestation and Reforestation)
 - ✓ 海洋碳匯(藍碳): 除紅樹林、海草床、潮汐鹽沼、海藻等一些碳權外，尚帶建立方法學
 - ✓ 土壤碳匯(黃碳): 尚待建立基線盤查、驗證機制、生物/農業廢棄物增匯機制等之方法學
 - ✓ 礦物及建材吸碳。

發電方式	煤	油	天然氣	太陽光電	水力	風力、核能
碳排係數(公克/度電)	820	700	490	48	18	12

國內目前的綠電憑證只包括：風電、太陽光電、生質能、水力及地熱，但SRF不在其內。

基於自然的解決方案 (Nature Based Solution, NBS) 之負排放技術 (Negative Emissions Technology, NET) 涉及領域多且範圍廣，當前知識欠缺系統性專門研究及跨部門資源協調整合。

類型	全球減碳潛力 (每年 10 億噸 CO ₂)	減碳成本 (美元/噸 CO ₂)
造林和再造林 (Afforestation, reforestation)	30 - 20	3- 30
森林管理 (Forest management)	1 - 2	3- 30
濕地，泥炭地和沿海棲息地復原 (Wetland, peatland and coastal habitat restoration)	0.4 - 20	10 -100
土壤固碳 (Soil carbon sequestration)	1 - 10	NA
生物炭 (Biochar)	2 - 5	Up to 200
生物質利用加碳封存 (BECCS)	10	100 - 300
海洋施肥 (Ocean fertilization)	1 - 3	10 - 500
礦化封存 (Mineral Sequestration)	-	50 - 300
海洋酸化 (Ocean acidification)	40	70 - 200
直接空氣捕獲 (Direct air capture)	0.5 - 5	200 - 600
低碳混凝土 (Low-carbon concrete)	>0.1	50 - 300

- CDM網站將方法學分為五大類: 大型方法學、大型植林與再造林方法學、小型方法學、小型植林與再造林方法學及碳捕存方法學。
- 可促進範疇二產業與範疇一公司間的合作。

國際碳價及進口關稅

- **歐盟碳市場**：在COP26後，2021年12月歐洲碳價超過90歐元/噸，2023年2月又超過100歐元/噸，**預估到2025年時可能會超過170歐元/噸，2030年時更可能會超過255歐元/噸**。
- **中國**碳價平均起價為50元人民幣/噸，預計到2025年將升至71元人民幣，2030預估會升至93元人民幣；2018與2019年度的交易量達到21.9億元人民幣。

歐盟之碳邊境調整機制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)，鼓勵產品在生產國就進行減碳，最新通過的CBAM執行期程，分為以下階段：

- 2023年10月1日起：CBAM上路試行，僅要求進口商提交碳排放相關數據，尚不需繳納費用。
- 2026年1月1日**：過渡期結束，實施付費制的CBAM。初期僅涵蓋五大高碳排產業，**鋼鐵、水泥、化肥、鋁及電力**，視情況評估是否擴大，**最新協議希望納入氫氣、部分鋼鐵下游產品（如螺絲、螺栓等）、一些化學前驅物（Precursors），以及特定條件下的範疇二「間接排放」**。
- 2034年：EU ETS免費配額全部取消，CBAM全面實行、擴及其他產業。

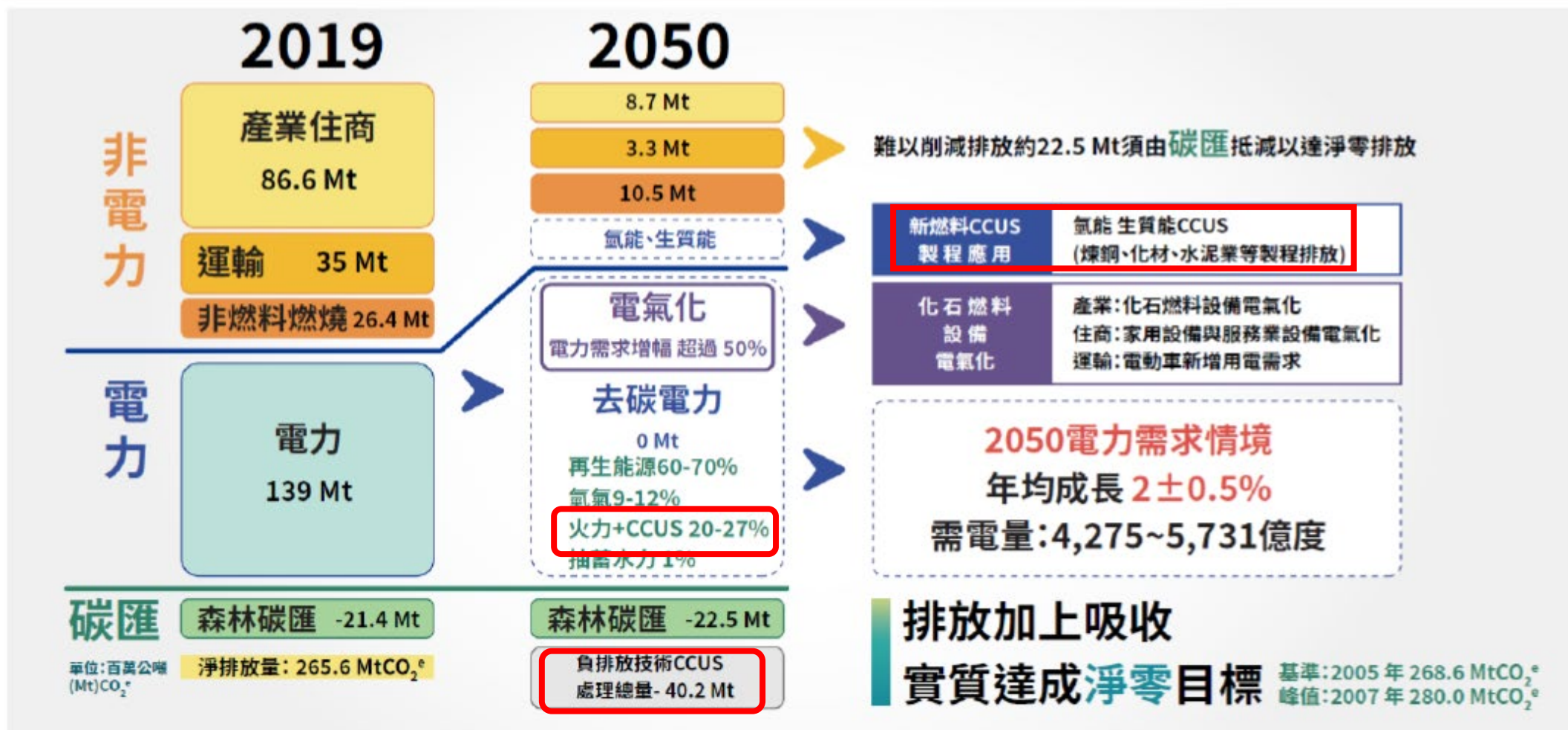
美國之清潔競爭法案(Clean Competition Act, CCA)，日前已完成二讀。**若通過，美國將於2024年開始徵收碳稅**，課徵的對象包含美國當地生產製造及從其他國家進口的產品。

- 2024至2025年：凡碳含量低於基準之產品無需繳納碳稅；若碳含量超過基準，對超出部分徵收55美元/噸的碳稅，並每年調升5%。
- 2026至2027年：產品範圍向下游延伸，若進口加工產品中含有500磅為CCA徵收碳稅的產品對象，亦須被徵收碳稅。
- 2028年後：若進口加工產品中含有100磅為CCA徵收碳稅的產品對象，就須被徵收碳稅
- 徵收碳稅的產品對象包括：**能源密集型的初級產品，包括化石燃料、精煉石油產品、石化產品、化肥、氫氣、己二酸、水泥、鋼鐵、鋁、玻璃、紙漿、紙張和乙醇**。

CCSU之國際政策

- 歐美日韓等國為加速建立自主的技術，都提供配套激勵的政策與研究經費，以**美國**為例，在稅負抵減45Q中，2022年8月將用於CCS的每噸50美元補助提升到85美元，DAC用於CCS每噸180美元，用於CCU每噸130美元，即使美國將來碳費徵收55美元，產業仍有至少30美元的補助。
- **歐洲大型公司**如BASF, Total, ExxonMobil, Borealis, INEOS等之間的合作，並配合塑膠回收再利用與循環經濟，共同推動CCSU。
- **英國**於2020年11月18日提出的10項減碳政策，其中之一的CCUS，會於2025前投入10億英鎊，希望在2030年後，每年捕獲CO₂一千萬噸；另一項為2030年時生產5 GW的低碳氫氣，氫氣的生產會與再生能源及CCUS密切的結合。
- **日本**於2019年發布啟動3項具體行動，其中重要行動之一為實現碳循環，當年亦發佈碳循環技術路線圖，除CCS技術外，亦訂出CCU技術中之產品及其成本目標。
- 由於台灣並沒有稅負抵減的政策，即使開發出與美國相同水平的技術，在成本考量下就不具競爭力。除稅負抵減外，各國也都提供超過數億美元的研發經費，在這些情況下，未來國內需求甚般的負碳技術可能都需自國外引進，如此國內各產業的成本必會因此而增加。

臺灣2050淨零轉型路徑



2030年CCUS目標176~460萬噸，且需進入示範階段，亦即單一CO₂捕獲廠每年需捕獲1.8~18萬噸

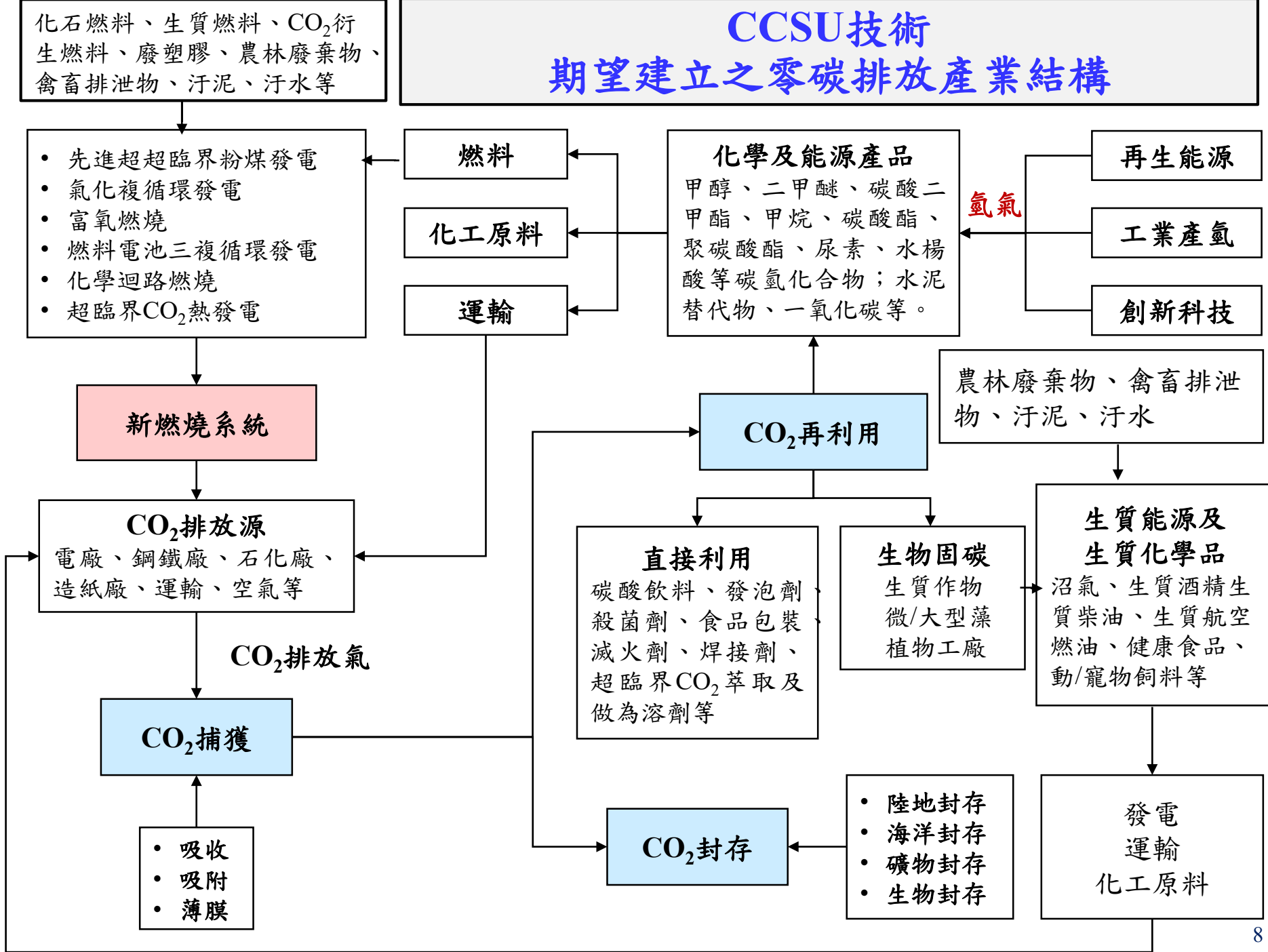
台灣2022年CO₂排放量約2.6億噸，佔全球排放總量的0.81%；進口能源依存度為97.8%，即使未來大力發展再生能源，但以化石燃料產生之能源仍會佔有相當的比例。

臺灣2050淨零轉型之12項關鍵戰略



國科會今年5月時成立淨零科技方案推動小組，透過5項淨零科技領域：永續及前瞻能源、低(減)碳、負碳、循環與人文社會科學，期望以跨部會協作方式達成國家2050淨零碳排目標。

CCSU技術 期望建立之零碳排放產業結構

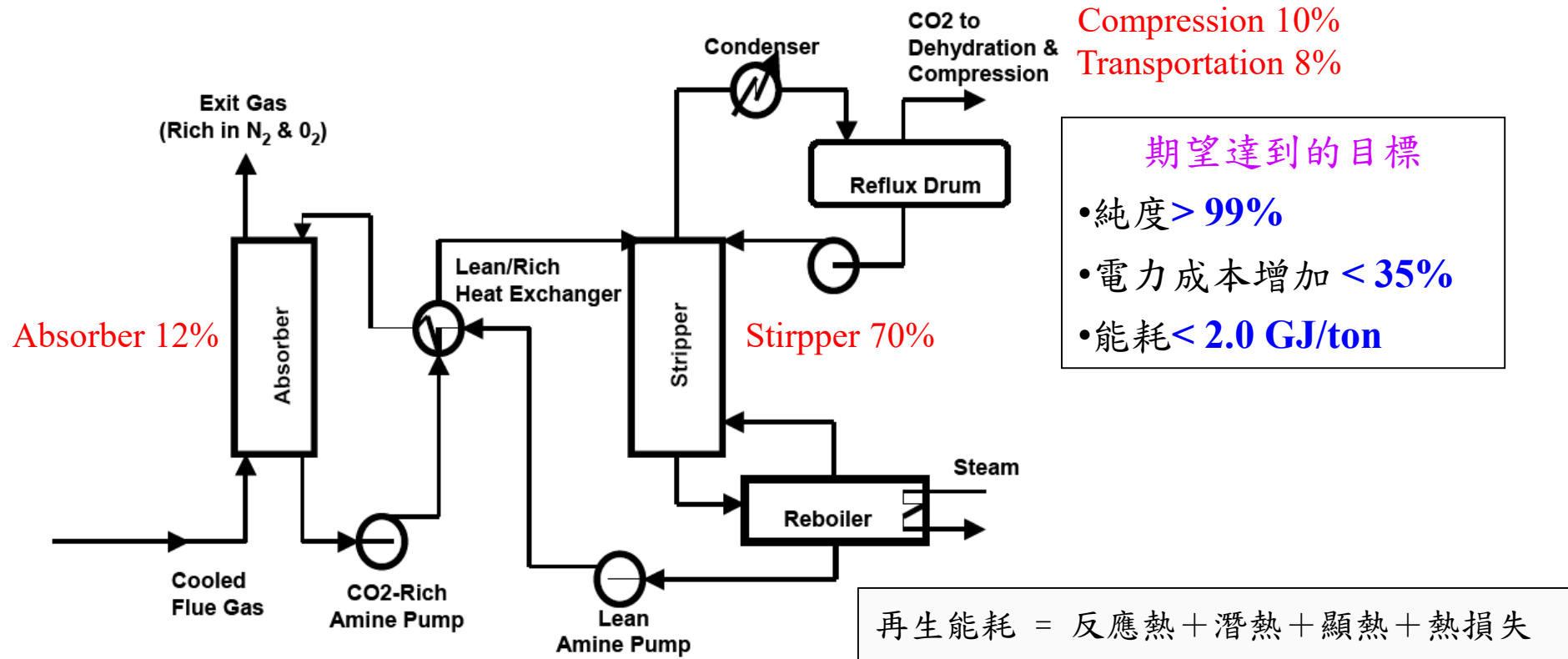


CO₂排放源

CO ₂ 排放源	CO ₂ 濃度(mol %)	所需的功 (kJ/mol CO ₂ capture)
Natural Gas (power)	3~5	10.7~12.7
Coal (power)	10~15	7.8~11.3
Ethylene production	7~12	9.4~12.8
Cement production	14~33	5.2~12.6
Iron and steel production	20~27 (16~42)	5.3~6.4 (3.7~7.1)
Hydrogen production	30~45, >98	0-4.0
Ammonia processing	>98	0
Natural gas processing	96~99	0
Ethanol (Fermentation)	96~99	0

- CO₂捕獲效率與成本會因處理氣體中CO₂的濃度不同而有所不同。
- 全球目前大部分之CO₂捕獲工廠，其CO₂來源主要來自天然氣田、合成氣或產氫廠，因此CO₂濃度很高，甚至超過95%，但燃煤電廠之CO₂含量只有10~15%，因此捕獲成本會更高，也因此2020年時全球自燃煤電廠捕獲CO₂的量只不過240萬噸；而台灣現又欲將燃煤電廠改為燃氣電廠，但燃氣電廠中CO₂含量只有3~5%，其更難在低成本下捕獲CO₂。
- 自燃煤及燃氣電廠捕獲CO₂的成本分別為自天然氣田、乙醇或產氫廠工廠中捕獲CO₂成本的3~4倍及5.5~7倍，因此必須開發高效率、低能耗之捕獲技術。

CO₂捕獲：化學吸收法(液相) (可能是2030前最主要之CO₂捕獲技術)



Typical Amine Absorption Unit for CO₂ Recovery from Flue Gas



化學吸收法之研發方向

吸收劑配方

- 吸收劑之組成: 增進吸收速率及吸收量、降低腐蝕性以增加吸收劑濃度、降低黏度、降低氧氣溶解度、低蒸氣壓、減少補充量、降低再生能耗等
- 抗氧、降低SO_x 及NO_x 影響等以增加使用壽命
- 吸收劑包括醇胺、Amino Acid、離子液體、添加奈米顆粒之Nano Fluid等

製程及操作

- 設備與操作: 吸收塔中填充物、再生塔、高速旋轉塔 (RPB)、進入再生塔之前處理等, 增加氣液接觸面積、增加質傳和熱傳速率、降低吸收塔體積、結合熱泵及再生能源、降低再生能耗等。

比較基礎

- CO₂捕獲量/體積/時間
- 純度 (水含量需低以避免壓縮機及輸送管件之腐蝕)
- 能耗 (需使用再生能源)
- 捕獲成本

國外CO₂捕獲工廠(均使用Amine類吸收劑之化學吸收法)

計畫	國家	運轉時間	用途	年捕獲量 (百萬噸/年)	經額 (百萬美金)	註
Sleipner	挪威	1996	CCS	0.9	100	北海油田
Boundary Dam	加拿大	2014	EOR	1	1,400	全球第一座燃煤電廠之捕獲
Petra Nova	美國	2017	EOR	1.6	1,000	美國第一座燃煤電廠之捕獲
Japan CCS	日本	2016	CCS	0.1	300億日元，年運作費60億日元	

國內自燃煤鍋爐之CO₂捕獲工廠

計畫	技術	捕獲量	投入經費	狀態
中鋼、清大	在RPB中進行化學醇胺吸收，在PB中再生	0.1 噸/天		停止運作
台塑石化、清大	在RPB中進行化學醇胺吸收，在PB中再生	2.2 噸/天	約3,500萬	停止運作
長春、清大、工研院	在兩個串聯之RPB中進行化學醇胺吸收，在RPB中再生	0.175 噸/天	約1,800萬	運轉中
台塑、成大、工研院	在PB中進行羧酸鉀吸收，在PB中再生，另以CO ₂ 與氫反應生成甲烷	0.1 噸/天	1.7億	計畫進行中
台電中火減碳園區	化學醇胺吸收	6 噸/天	約9.2億	剛完成招標

國外CO₂捕獲工廠(均使用Amine類吸收劑之化學吸收法)

計畫	國家	運轉時間	用途	年捕獲量 (百萬噸/年)	經額 (百萬美金)	註
Sleipner	挪威	1996	CCS	0.9	100	北海油田
Boundary Dam	加拿大	2014	EOR	1	1,400	全球第一座燃煤電廠之捕獲
Petra Nova	美國	2017	EOR	1.6	1,000	美國第一座燃煤電廠之捕獲
Japan CCS	日本	2016	CCS	0.1	300億日元	年運作費60億日元

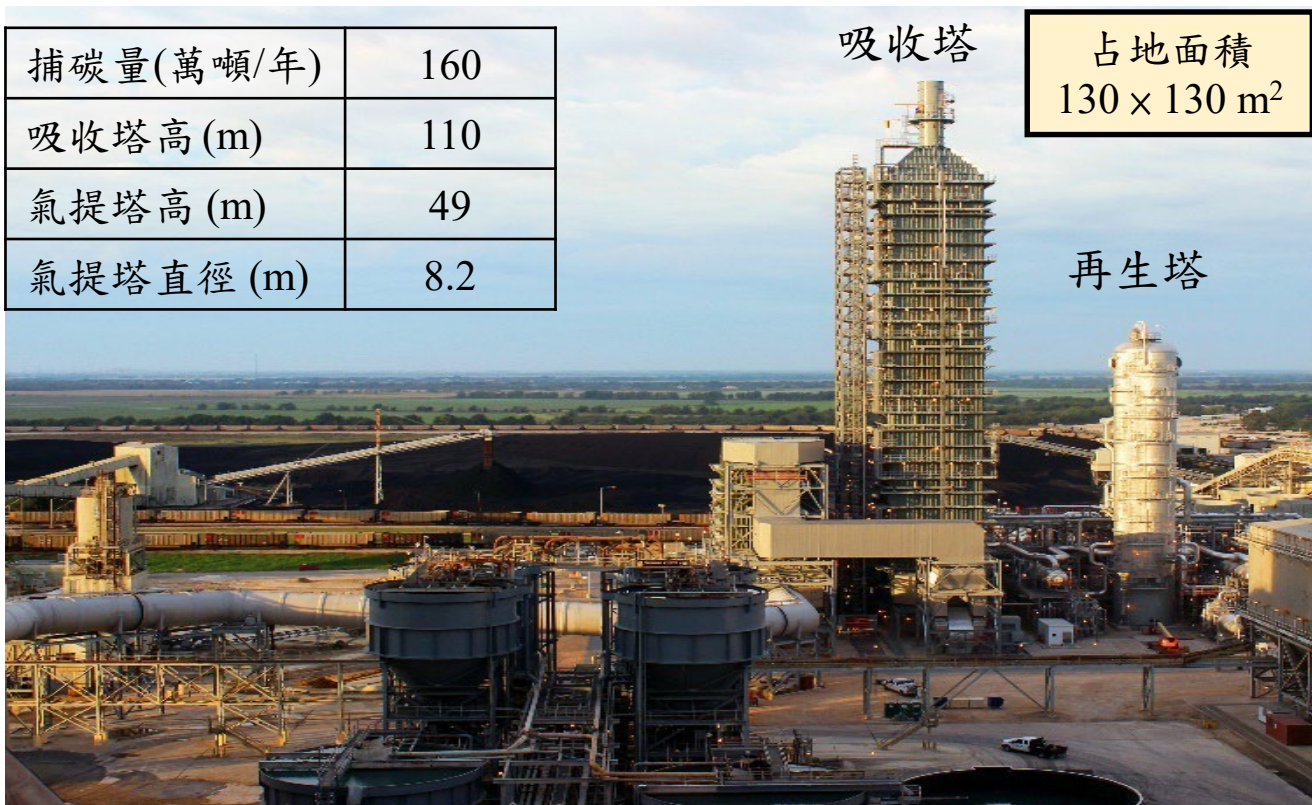
Petra Nova CO₂捕獲工場(2023, 9, 15復工)

捕碳量(萬噸/年)	160
吸收塔高(m)	110
氣提塔高(m)	49
氣提塔直徑(m)	8.2

吸收塔

占地面積
130 × 130 m²

再生塔



國內大碳排公司通常沒有足夠的土地進行大規模的捕碳，若以每年捕獲CO₂ 一百萬噸的工廠來看，要達到在2050年CCSU的貢獻度為4,020萬噸，需40座捕獲工廠，因此

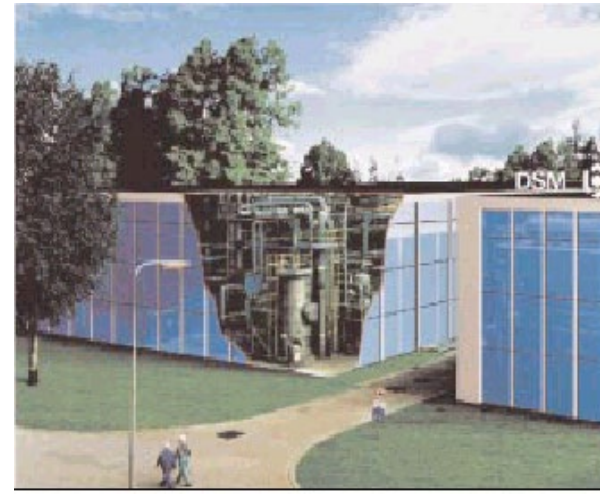
- 產學研界急需開發出不要占地大的捕碳技術，
- 進行跨業及跨領域的整合，由多家碳排工廠共同建立一大規模的捕獲工廠以處理各工廠排放氣，
- 政府出面協助解決捕獲工廠用地的問題。

製程強化(Process Intensification)

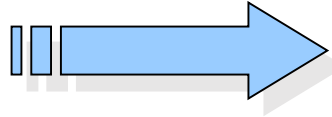
傳統化學工廠



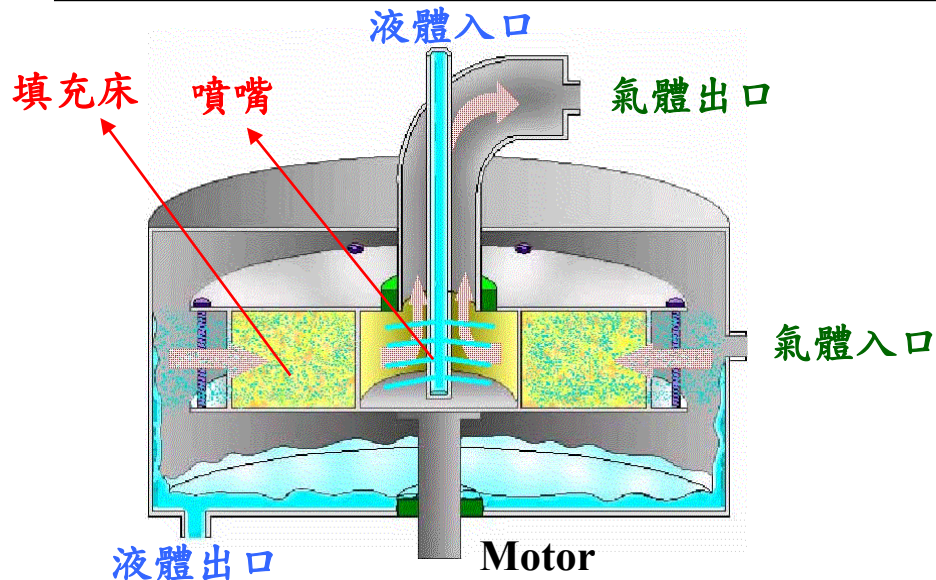
期望的未來化學工廠



製程強化及創新技術



製程強化包括開發具經濟可行性的創新設備和技術，能大幅降低現有設備尺寸，且能增進生產力、降低能源消耗及廢棄物的產生，製程強化可從化學、反應、混合、機械等著手。

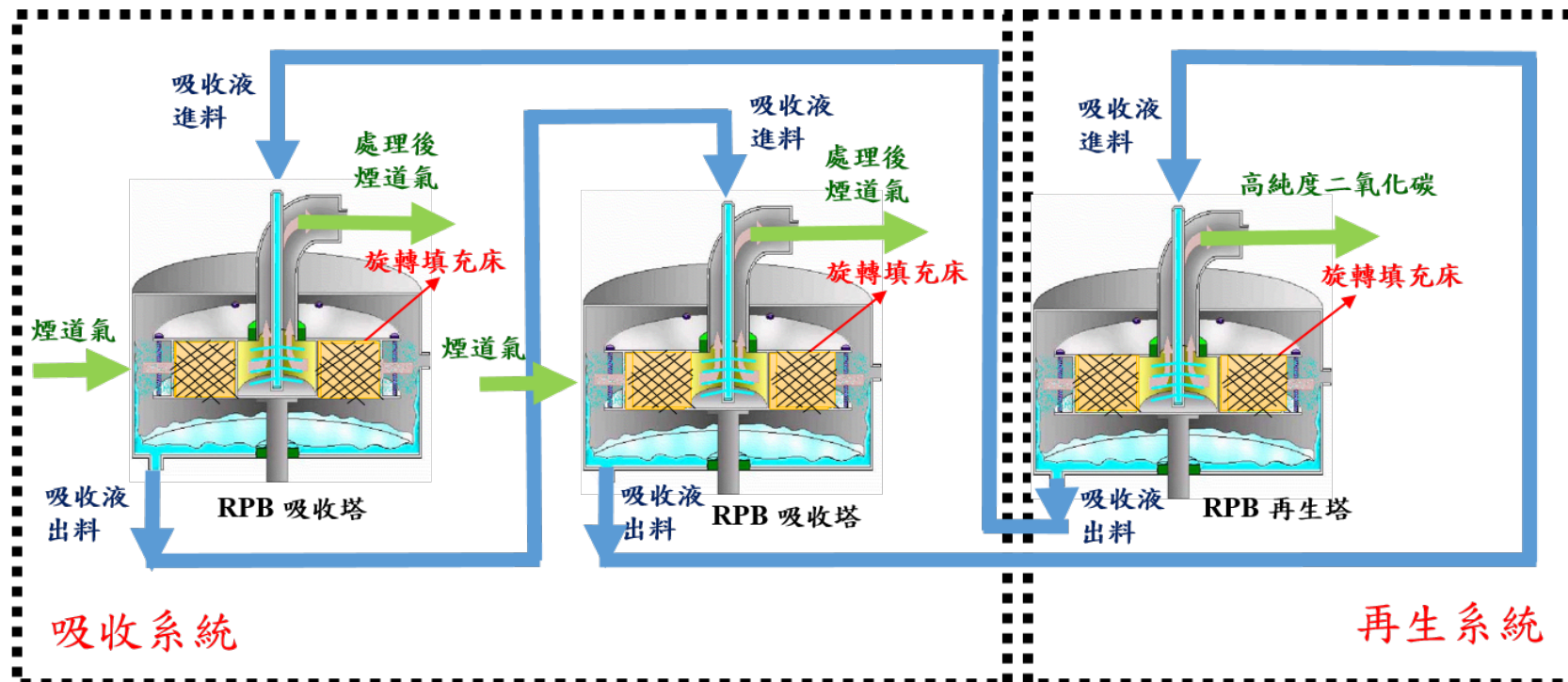


超重力(High Gravity, Hige)技術是在一高速旋轉床中，液體與氣體採逆流或交錯流的方式進行接觸。由於在強大離心場作用下，不但可避免溢流現象，且由於液體分散成薄膜或小液滴，大幅提升氣液接觸面積，也使得質傳速率比傳統固定床操作下可提升數倍到數百倍之多。



清大自行開發之CO₂ 捕獲製程

- 所開發的化學吸收製程是使用兩個高速旋轉床(RPB)進行吸收，一個RPB進行再生，目的是取代傳統固定床(PB)面臨的問題。
- 吸收液中含有自行開發之吸收劑配方，其連續通過兩個RPB，含有CO₂之氣體則分別進入此兩個RPB，吸收是在擬穩態下進行CO₂之捕獲，第二個RPB出口的吸收液進入第三個RPB進行再生。製程之操作條件為：氣液進料及吸收塔之溫度為50 °C、氣液流量比200、再生壓力2 atm、再生溫度120 °C、轉速1200 rpm。



與國際自燃煤電廠捕獲CO₂試驗及示範工廠之比較

位置	吸收塔	單位時間單位吸收塔體積之捕獲量(公斤/小時/立方公尺)
台塑麥寮試驗工廠(2015清大配方，1.6 噸/天)	PB	63
台塑麥寮試驗工廠 (2015清大配方，1.6 噸/天)	RPB	223.1
長春大發廠試驗工廠 (2020清大配方，0.175 噸/天)	RPB	607.9
清大實驗室 (2020清大配方，0.01噸/天)	RPB	580.1
清大實驗室 (2021清大配方，0.01 噸/天)	RPB	820.3
國外試驗及示範工廠(2016，10~300 噸/天)	PB	30 ~140

PB：Packed Bed 固定填充床；RPB：Rotating Packed Bed 旋轉填充床；國外工廠的數據是2016年的，這幾年吸收劑若有精進，捕獲量一定是會增加，惟因採用PB形式，增加量會受到限制。

- 實驗室 → Bench → 試驗工廠 (1 ~ 10噸/天) → 示範工廠1 (50噸/天) → 示範工廠2 (500噸/天) → 商業化(> 3,000噸/天)；
掌握到放大關鍵技術，不但可增加技術的競爭力，同時可因技轉而獲得碳權。
- 到2030年能實施TRL>7的CO₂捕獲，捕獲成本低於\$45/噸CO₂，到2050年能實施TRL>8的CO₂捕獲，捕獲的CO₂可接近100%，捕獲成本能低於\$36/噸 CO₂。



CO₂捕獲：吸附技術(固相)

固體吸附

- 新型吸附劑開發：Zeolite, Activated Carbon, Mesoporous Molecular Sieve, Carbon Nano Tube, Metal Oxides, Hydrotalcites, Carbon Fiber, Metal Organic Framework (MOF), etc.
- 吸附劑中嫁接或含浸化學吸收劑
- 製錠技術
- 低耗能脫附方式 (壓力PSA、真空VSA、溫度TSA、電流ESA等方式)
- 最佳化製程
- 開發同時能進行吸附與轉化反應的dual-function 觸媒

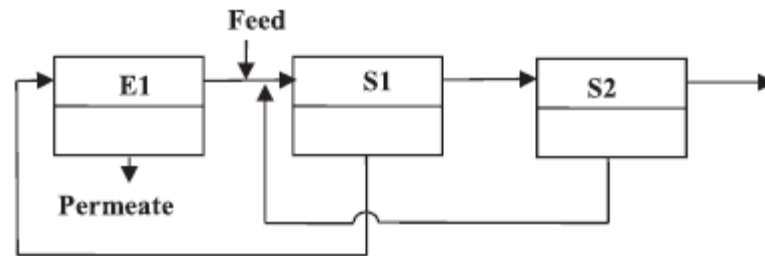
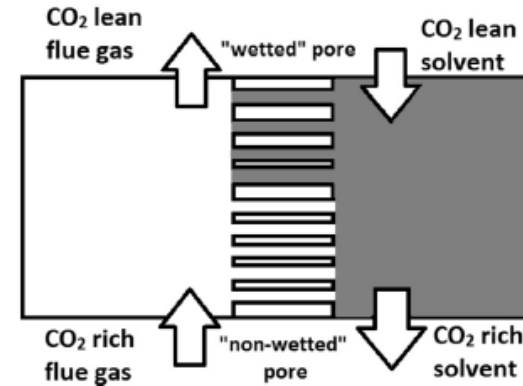
特別適用於水泥及鋼鐵產業捕獲CO₂之製程

- 鈣迴路捕獲CO₂製程是於600~700°C的溫度下以CaO吸附CO₂生成CaCO₃，於850~950°C的溫度下脫附所吸附之CO₂，使CaO反覆使用。
- 以鹼性廢水配搭轉爐石捕獲熱風爐排放氣中之CO₂。



CO₂捕獲：薄膜技術

- 使用薄膜時，希望薄膜具高CO₂ 穿透率及選擇率、耐溫、良好之機械性質等。
Kinetic diameter: CO₂ 3.3Å, N₂ 3.64Å, O₂ 3.46Å, CH₄ 3.80Å
- 斥水性高分子薄膜 (配搭吸收液)
- 無機膜(分子篩配搭吸收液)
- 無機膜中嫁接吸收劑
- 高分子/無機複合膜 (可使離子及電子通過)
- 不同製程之開發
- 最佳化製程



挑戰：

- 提高CO₂/N₂ 之選擇率(例如高於65)，CO₂ 穿透率(高於10⁻⁶ mol/m²/s/Pa)，及降低成本(由\$68降至\$48/ton CO₂，接近MEA \$36~60/ton CO₂)
- 需經長時間操作以掌握雜質(SO₂, H₂S, NH₃, H₂O, Fly Ash)對捕獲效率影響之程度。
- 提高薄膜使用次數及穩定性以降低操作成本

CO₂ 封存

- 封存

生物封存、礦物封存、海洋封存(只能封存於海床下)、地底封存(油氣田回收(Enhanced Oil Recovery, EOR)、甲烷回收(Enhanced Coal Bed Methane Recovery)、鹽水層(Saline Aquifer)，據估計台灣陸域地質可封存28億噸、西部平原區及沿海鹽水層可封存約459億噸之CO₂。

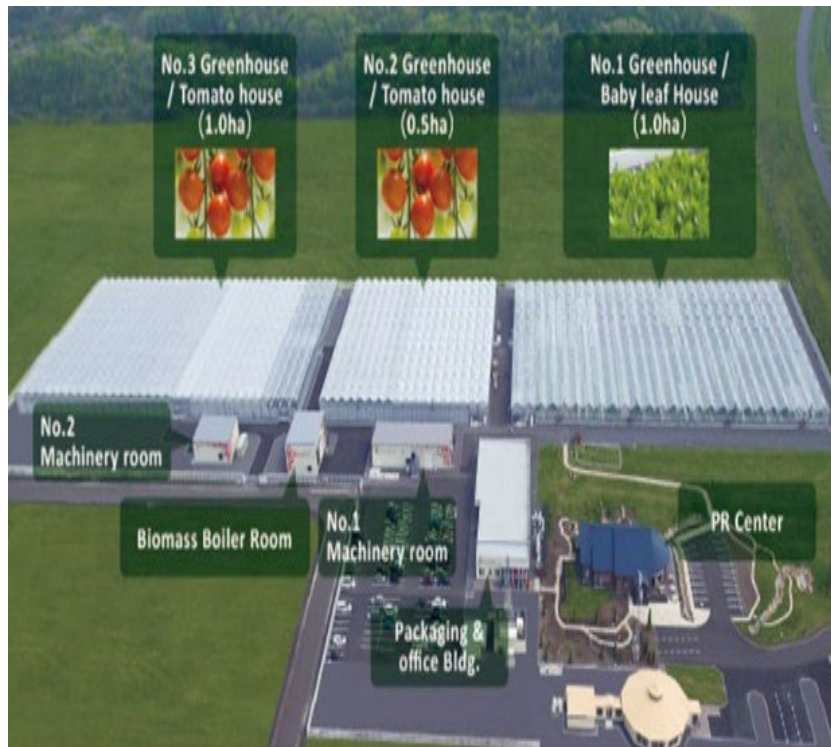
- 現今全球雖有135個CO₂封存項目(較2020增加71個)，但大部份項目是用於EOR，只有挪威Sleipner自1996起每年將捕獲的100萬噸CO₂封存於地下鹽水層中，至今尚無洩漏情事發生；另日本Japan CCS自2016起將每年捕獲的10萬噸CO₂封存於近海海床下鹽水層中，在2019停止封存以監測是否洩漏，歷經北海道地震並未發現洩漏情事，也因此鹽水層中封存，無洩漏是需加以驗證的項目。
- CO₂封存面臨的問題: 環評、封存場址資料、輸送管線、鑽井法規、注入成本、安全評估、後續監控、地震影響、人民接受度、財稅等。
- 雖然CCS較不會改變現有之產業結構，惟會有環境與民眾的疑慮，因此CCS發展速度會受到影響。



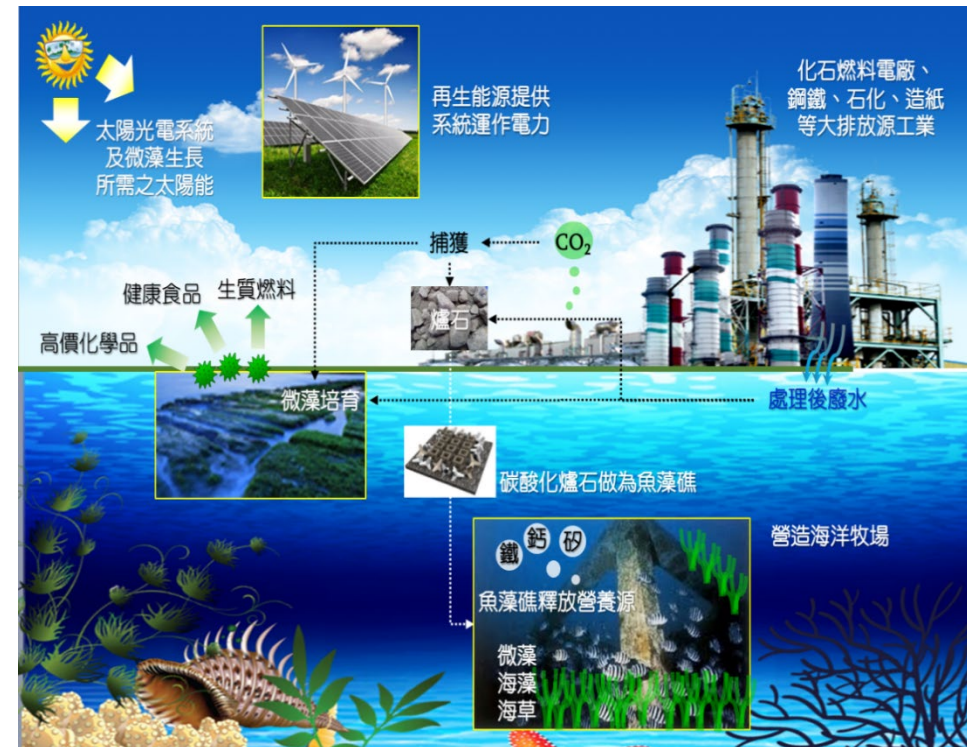
CO₂再利用

- CO₂再利用可分為：**直接利用**、**轉化成化學或能源產品**
- **直接利用**：碳酸飲料、殺菌劑、滅火劑、焊接劑、推進劑、**超臨界CO₂綠色溶劑**(萃取、反應、發泡、清洗、染色、微粒製備、地熱介質、壓縮儲能等應用)、**燃料電池**、**植物工廠**(溫室栽培)、**海洋牧場**、**生產微藻**、**建築材料**等

植物工廠

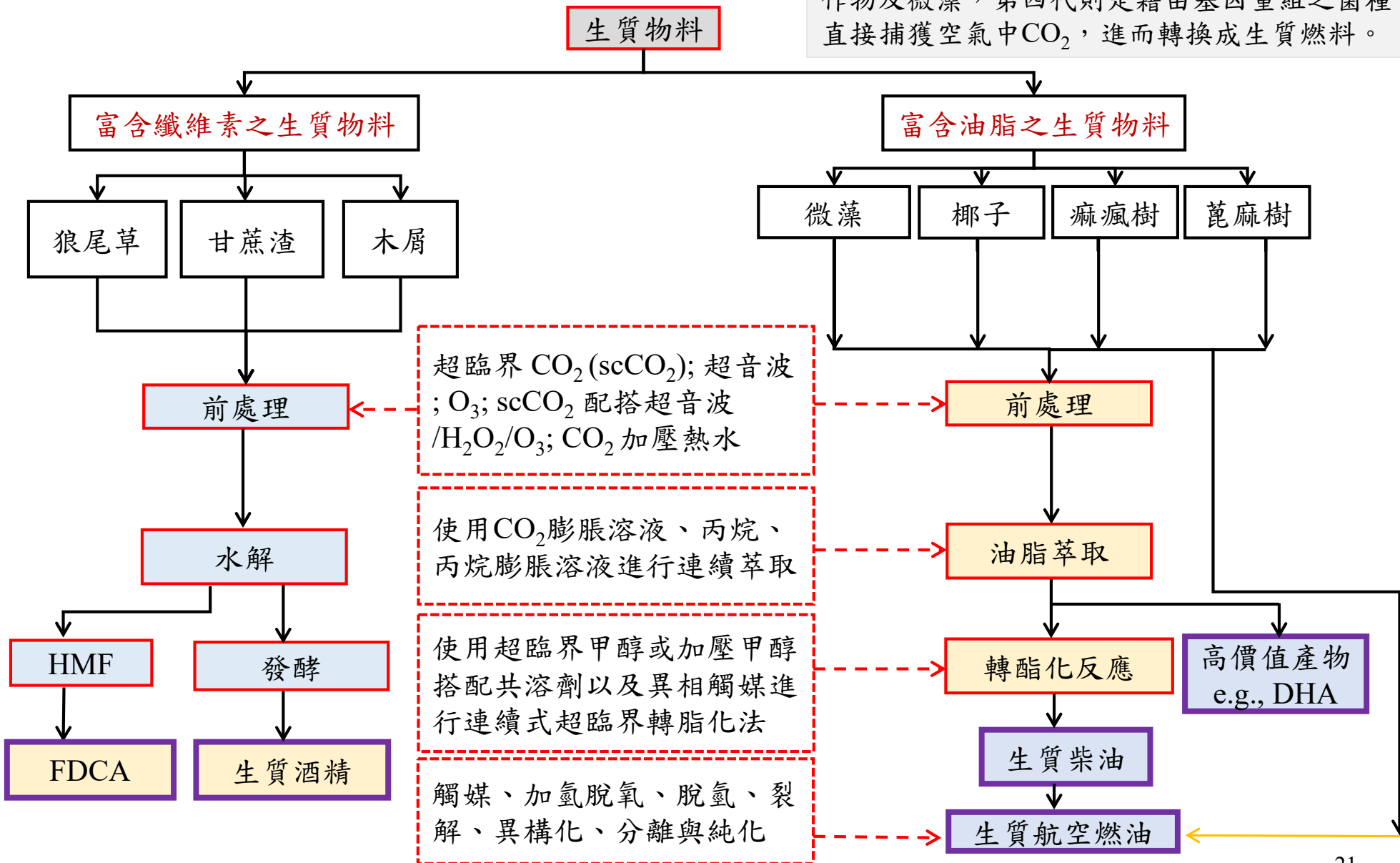


海洋牧場



轉換生質物料生成燃料/化學品

第一代是糧食作物，第二代與第三代是非糧食作物及微藻，第四代則是藉由基因重組之菌種直接捕獲空氣中CO₂，進而轉換成生質燃料。





• 轉化成化學產品

- 目前全球已有以CO₂生產尿素、水楊酸、碳酸酯、多元醇(NIPU之前驅物)等化學品(全球每年消耗約1億1千6百萬噸)，只是使用的CO₂量有限。
- 現台灣已有以CO₂為原料生產之化學品如碳酸乙烯酯、聚碳酸酯及醋酸，年產值達220億元新台幣，每年共消耗約20萬噸CO₂，完全符合碳循環經濟之概念。

• 轉化成能源產品

- 以CO₂做為碳源生產如甲醇、二甲醚、碳酸二甲酯、甲酸、甲烷、CO、合成氣(乾式重組)等，若這些能源產品取代化石燃料，因其市場需求量大，估計到2050時，這些能源產品可使用近30億噸的CO₂，符合碳循環經濟之概念及趨勢。
- 若要以CO₂做為碳源生產碳氫化合物，氫的來源(成本)即相當重要，此外亦需開發高效率的觸媒。
- 以生物技術，例如藉由代謝工程、基因等產生之大腸桿菌、藍綠菌或其他細菌，將CO₂轉化成化學或能源產品，是值得重視的研究項目。

氫氣生產之方式

產生氫氣方式：煤氣化、天然氣重組、甲烷裂解、電解水等。

Gray (灰氫)	H ₂ 由天然氣經蒸氣重組所生產，但也會產出不少的副產品CO ₂ 。 CH ₄ + H ₂ O → CO + 3H ₂ ΔH = +206 kJ/mol H ₂ (濕式重組) CO + H ₂ O → H ₂ + CO ₂ ΔH = - 41 kJ/mol H ₂ (WGS)
Blue (藍氫)	H ₂ 是由天然氣經蒸氣重組所生產，但在重組中產生的CO ₂ 會經由CCS加以處理以實現淨零CO ₂ 之排放。 CH ₄ + CO ₂ → 2CO + 2H ₂ ΔH = +247 kJ/mol H ₂ (乾式重組)
Green (綠氫)	H ₂ 經由再生能源的電力電解水而產生的，水電解產氫方法：鹼性電解產氫、質子交換膜電解產氫、固態氧化物電解產氫及其他電解方法 H ₂ O → 0.5 O ₂ + H ₂ ΔH = +286 kJ/mol H ₂
Turquoise (藍綠氫)	經由甲烷熱分解產生H ₂ ，但產生的碳是固體而不是氣體化合物。 CH ₄ → C + 2H ₂ ΔH = +37 kJ/mol H ₂

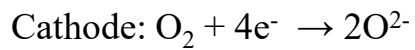
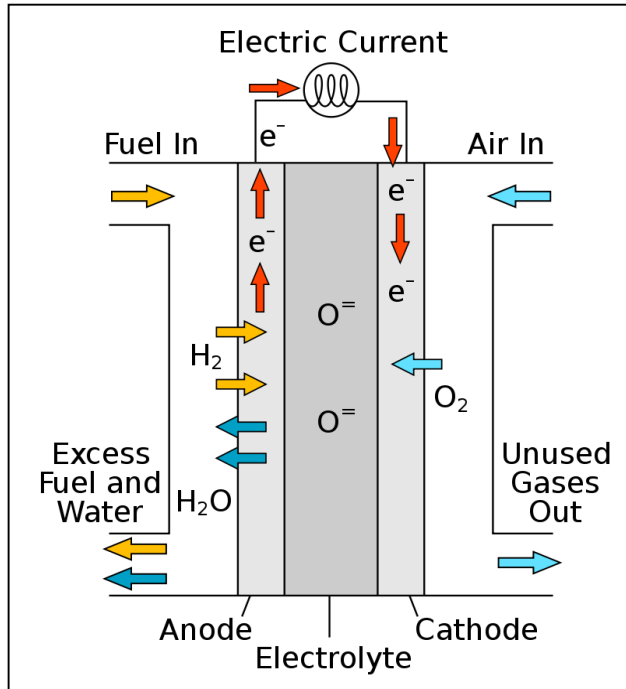
- 藍色及綠色氫的成本不低，目前遠高於最低成本的灰色氫；至於藍綠氫的成本，未來可能會進一步的降低成本而成為氫氣主要來源之一。
- 以綠氫與CO₂反應所生成甲醇，即是諾貝爾化學獎得主 Olah教授所提倡的**甲醇經濟**。
- 台灣目前的規劃是在2050年時，自產藍綠氫171萬噸(氫氫佔氫總產量61%，藍氫佔37%)、進口氫235萬噸、氨315萬噸(全進口)。

未來技術朝向多功能的方向發展

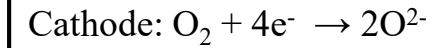
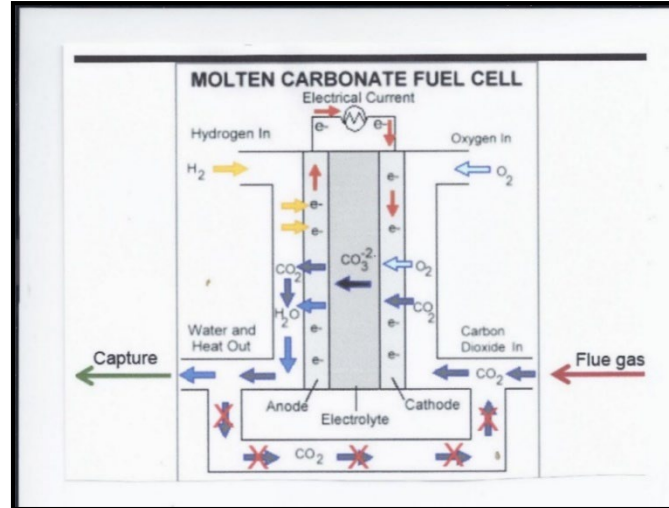
例一、開發能在捕獲CO₂時，同時能將CO₂轉化成化學產品。

例二、燃料電池。

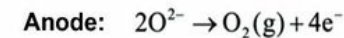
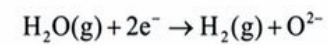
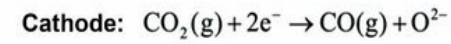
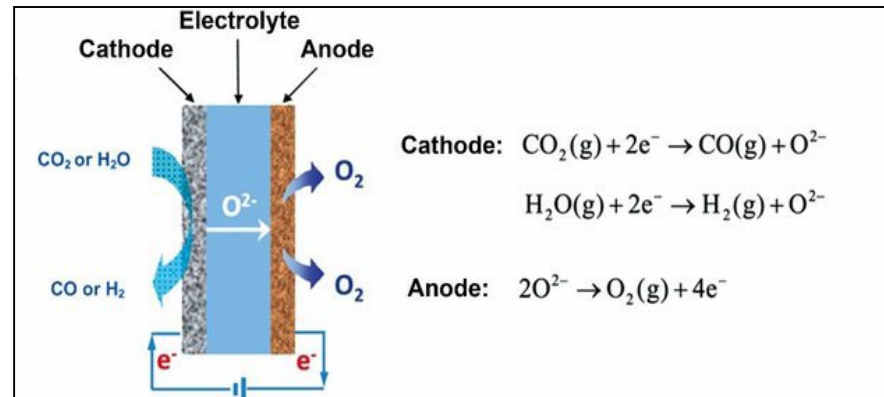
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)



Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC)





結語

- 台灣97.8%能源依賴進口，因此化石燃料在未來20年可能仍是電力主要來源之一，若要達到2050年淨零碳排的目標，就必須藉助負碳排CCSU技術，包括BECCSU及DACCSU，特別是BECCSU。
- 由於CCSU技術在國際上現仍處在開發階段，未來顯見的是，誰掌握到具低成本的關鍵技術誰就具更高的競爭力，如果CO₂捕獲的成本過高，後續之封存及再利用的成本就不可能會低，也因此國內必須儘快建立經由LCA及TEA評估出的自主CCSU技術，使之能具較低的碳足跡及水足跡。
- 基於以CO₂製得部分化學品因市場有限，不可能再大量生產而影響市場價格，因此未來CCU的發展，應注重能源產品(包括生質能及氫能)，只是能源化學品如甲醇、甲烷等，全球都還在研發階段，因此在2030前，建議選定的標的，一是直接使用CO₂，例如超臨界CO₂、微藻、生質能、海洋牧場、加速風化等，另一是製備不需使用氫氣為主的化學品，如Polyol、NIPU等。另CCUS成本與氫氣、再生能源、循環經濟等有密切的關聯性，因此需有效的加以結合，
- 對於屬非直接排放CO₂的範疇二及範疇三產業，例如半導體、光電、封裝、面板、金融、保險、服務等，除進行自身減碳方案外，亦可與直接排放CO₂的公司合作CCSU。為能促進合作，需要在國內加速CCS/CCU碳權的授予，如此方能有效利用CCSU達成淨零碳排的目標。



謝 謝 聆 聽
敬 請 指 正

