



二氧化碳捕獲封存及再利用

CO₂ Capture, Storage and Utilization (CCSU)

談駿嵩

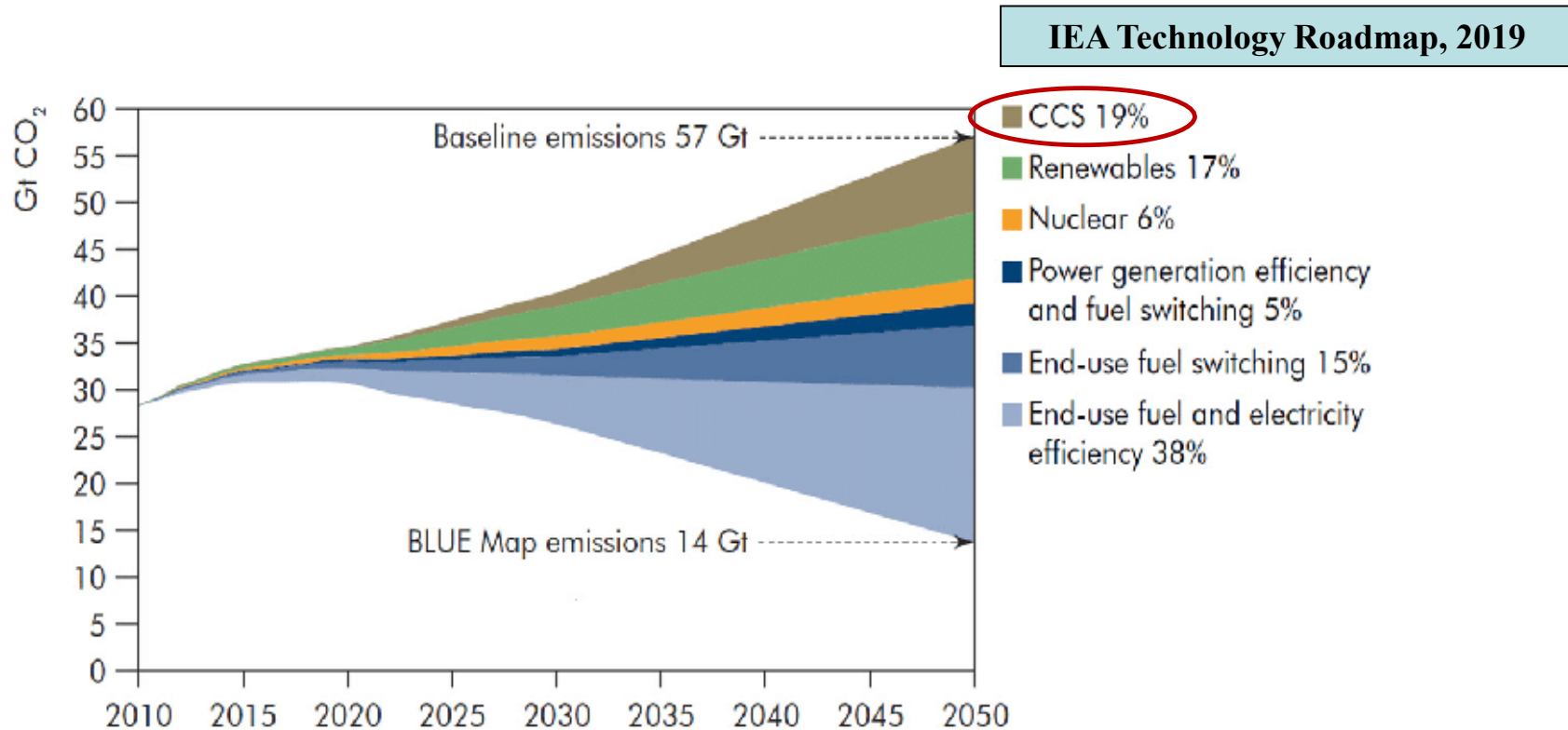
清大化工系榮譽退休教授

台灣碳捕存再利用協會理事長

2021, 3, 12



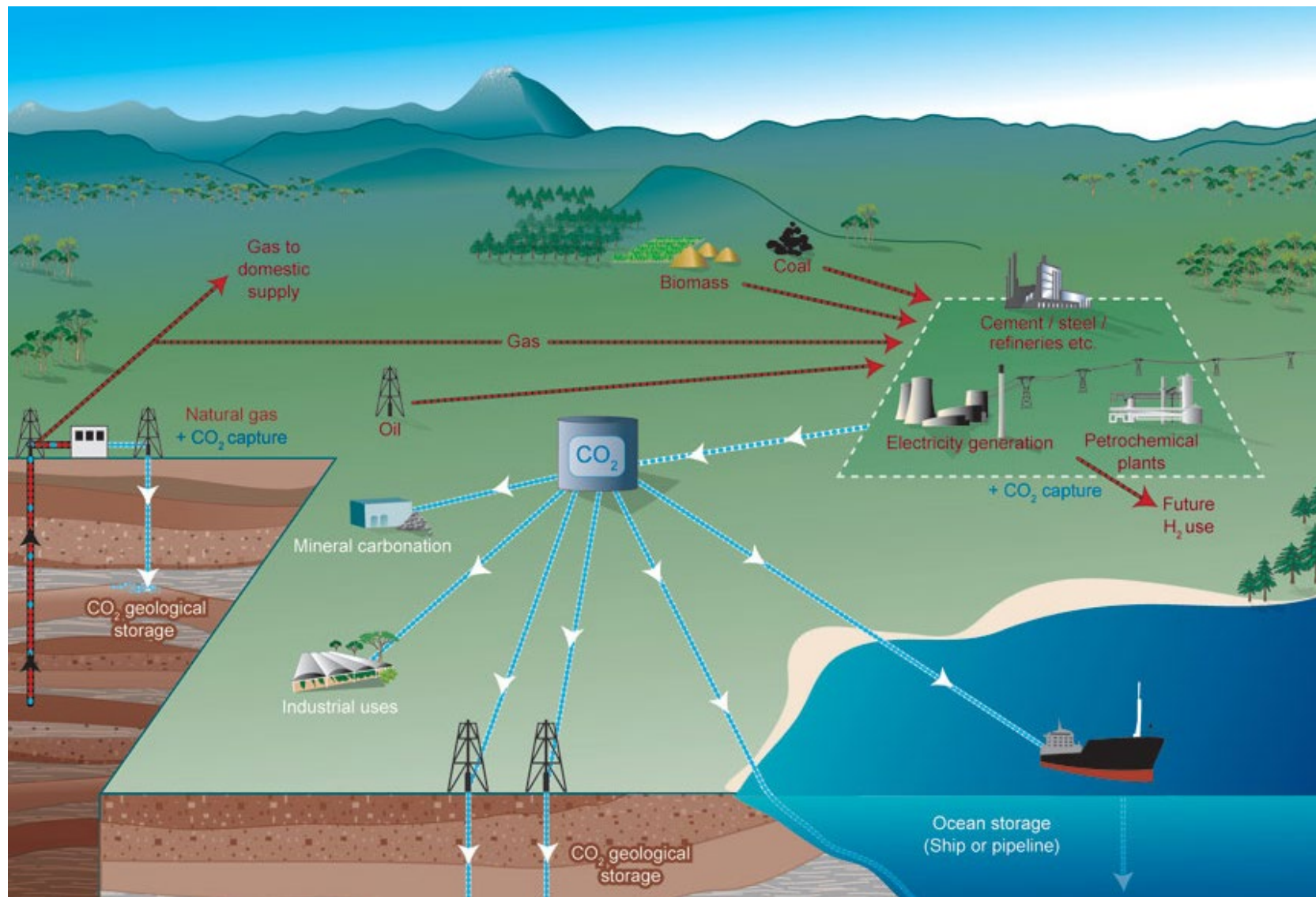
- 為防止暖化，全球升溫應控制在最大 2°C 範圍內並致力於 1.5°C 內，大氣中溫室氣體 CO_2 濃度需要穩定在**450 ppm**左右。
- 在2050年，能源有關之 CO_2 排放量要控制在140億噸，需削減430億噸 CO_2 （2019年全球排放量已達330億噸，較2018增加約7億噸）。



- 台灣若要達到溫管法訂定的2050年減碳目標，在2009年時推估CCSU 貢獻度要至少15.7%，相當於約1千8百萬噸之 CO_2 。
- 台灣所提出的減量行動方案，包括節能、淨煤、能源、碳匯和碳權經營等政策，到2030年時仍有相當大的缺口，因而CCSU有提早推動之必要性。



二氧化碳捕獲、封存及再利用示意圖 (CO₂ Capture, Storage and Utilization)





CCSU之國際政策

- **歐洲綠色新政**已於2019年12月11日正式揭示2050年要達到碳中和，2030年時需減碳50%~55%。
- **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。
- **美國 Sustainable Development Solutions Network USA**針對六項碳排放部門(包括電力、交通運輸、建築、工業生產、土地利用及材料等部門，幾佔美國CO₂排放的全部)於2020年10月27日提出America's Zero Carbon Action Plan (ZCAP)，其中四項策略之一即為CCS。另**美國總統拜登**於2021年2月26日宣佈將2021年碳排放社會成本訂在每噸51美元，取代川普政府所訂的每噸1美元。
- **中國大陸**在十五(1991至1996年)起即將CCUS納入，十三五中之目標為五年內CCS達到10至20百萬噸CO₂，另CCUS未來目標訂在2030及2050年達到累積減碳效果分別為1.6億噸及150億噸。
- **日本**於2019年3月28日發布啟動3項具體行動，其中重要行動之一為實現碳循環，當年6月7日即發佈碳循環技術路線圖，以加速CCUS的實用化。除捕獲及封存技術外，CCU技術又分為CO₂的直接利用和將碳轉換成化學品、燃料、礦物等技術，並設定出2030年和2050年以後的各產品的成本目標。



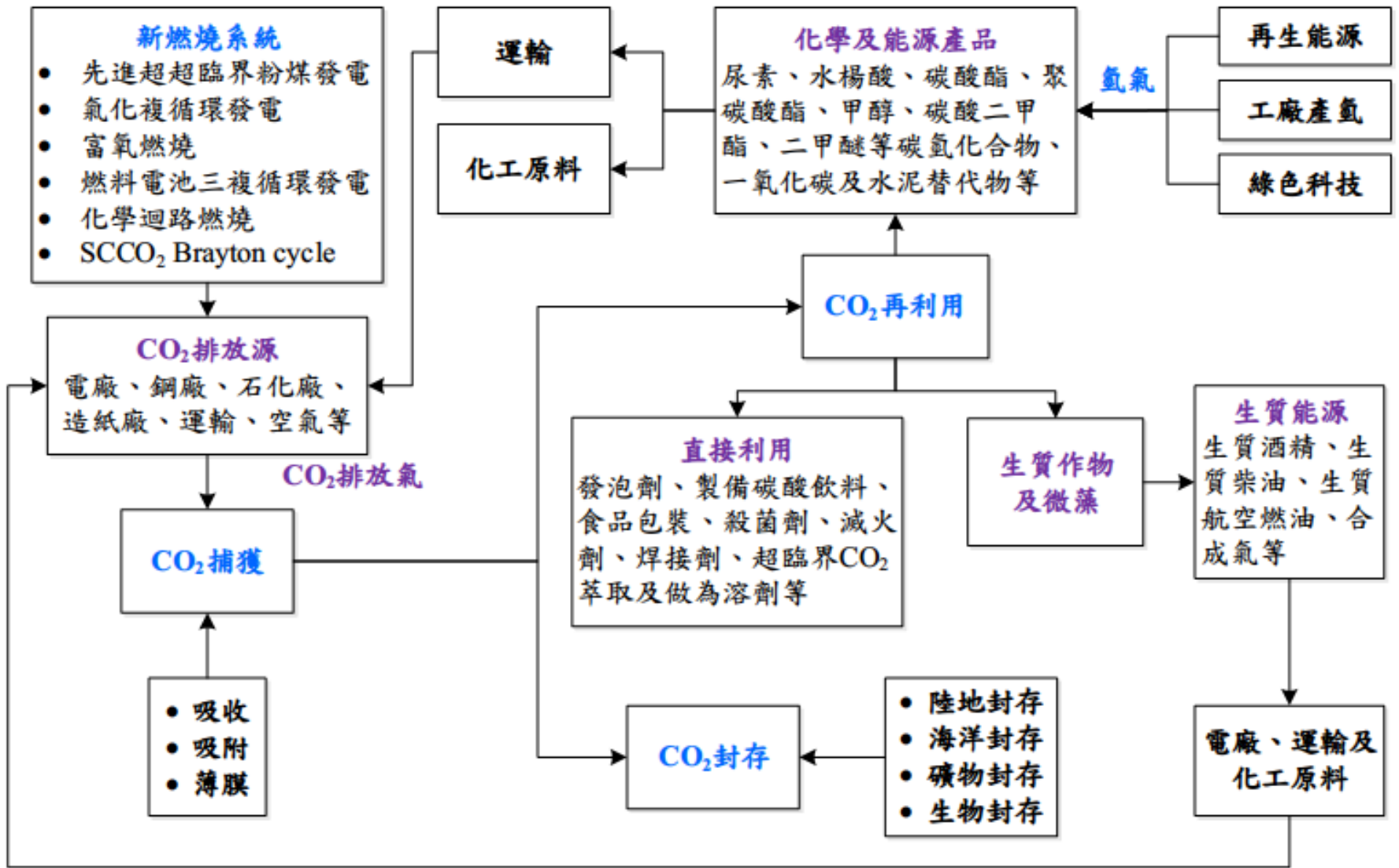
國際碳價

• 歐盟碳市場

- 2020年12月7日這週因歐盟27國領導人就2030年減排55%的目標達成一致，受該消息影響，歐洲碳價應聲上漲，再破30 歐元/噸的關口，12月31日到32.08 歐元/噸(碳權交易)，**預估到2025年會超過75 歐元/噸。**
- 瑞士碳市場於2020與歐盟碳市場完成了連接。瑞士碳市場可以使用歐盟碳配額進行抵消。瑞士原計畫於3月及11月舉行兩次拍賣，希望拍賣70萬噸配額，但受疫情影響，取消了3月份的拍賣，在11月2-4日的拍賣中，9萬噸配額以23.31歐元/噸的價格全部成交。由於2020整年拍賣總量的大幅減少，這一拍賣成交價相比2019上漲了近40%。
- **韓國碳市場** 2020年12月11日，韓國碳價上漲至22.1美元/噸。韓國交易所稱，2020年1-9月，該交易所的碳排放權交易金額高達5,300 億韓元(約4.8億美元)，名列全球第二，較2015年開業時猛增48.8倍,日均交易量達到9.14萬噸，較開業時猛增16.9倍。
- **紐西蘭碳市場** 2020年12月7日至12月11日，紐西蘭碳價上漲至26.9美元/噸。
- **美國區域溫室氣體減排行動(RGGI)**中以拍賣為主，每季舉行一次拍賣，2020年拍賣基價設定于2.32美元/噸。2020年12月RGGI碳市場舉行本年度第四次拍賣，拍賣1,624萬噸配額，成交價格7.41美元/噸，較去年同期上漲32%。
- **中國**碳價的平均起價為 50 元人民幣/噸，預計到 2025 年將升至 71 元人民幣，到 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。



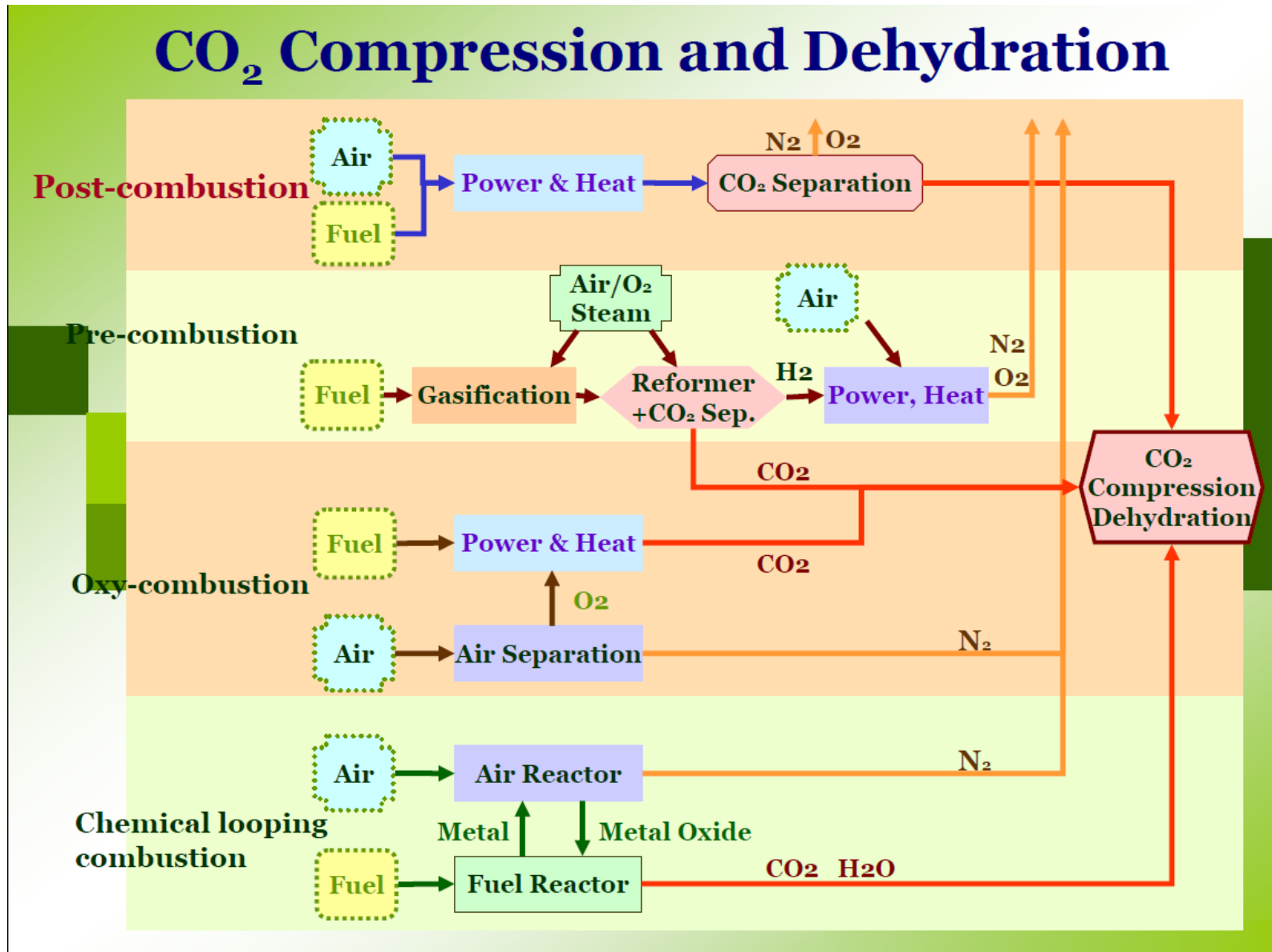
期望之零碳排放產業結構





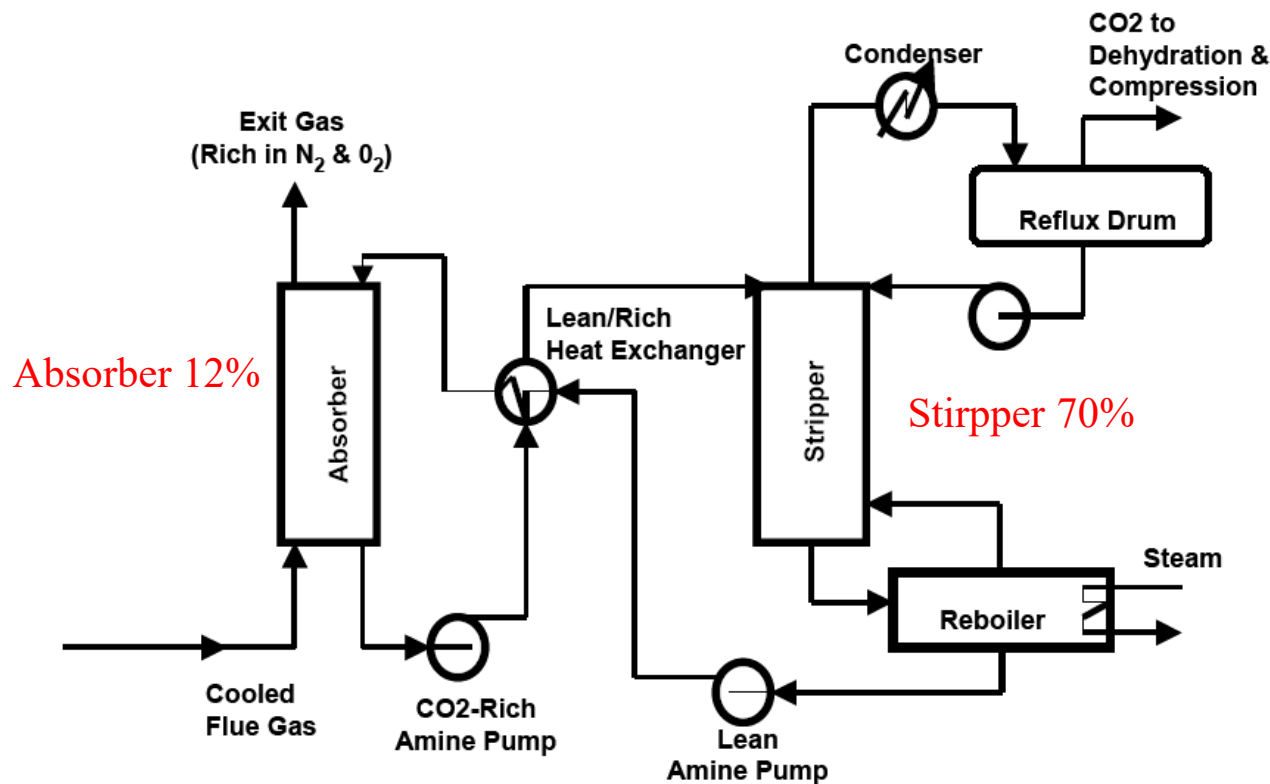
發電製程中之CO₂排放

CO₂ Compression and Dehydration



CO₂捕獲：化學吸收法(液相)

(可能是2030前最主要之CO₂捕獲技術)



Compression 10%
Transportation 8%

期望達到的目標

- 純度 > 99%
- 電力成本增加 < 35%
- 能耗 < 2.0 GJ/ton

Typical Amine Absorption Unit for CO₂ Recovery from Flue Gas

Fluor Daniel, ABB Lummus and Mitsubishi等公司具有licensed製程，在全球約有36座大型捕獲工廠中利用MEA, KS-1, or other proprietary amines為吸收劑。



化學吸收法之研發方向

吸收劑配方

- 吸收劑配方中之組成 (增進吸收速率及吸收量、降低黏度、降低氧氣溶解度等)
- 降低腐蝕及揮發性 (增加吸收劑濃度、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

製程及操作

- 高效率操作：吸收塔中填充物、再生塔、高速旋轉塔 (RPB) 等，以增加氣液接觸面積、增加質傳和熱傳速率、降低吸收塔體積等。
- 最佳化製程操作條件

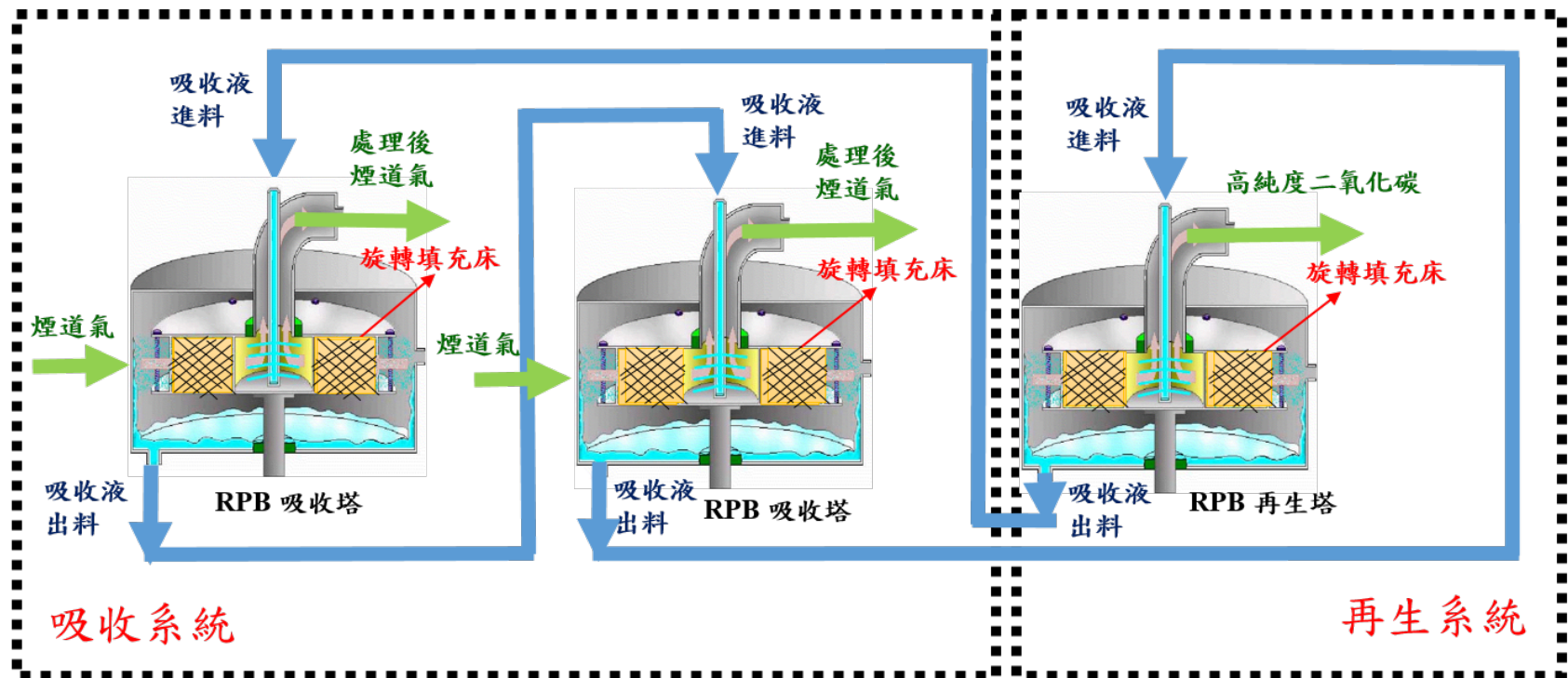
比較基礎

- CO₂ 捕獲量/體積/時間
- 純度
- 能耗
- 捕獲成本



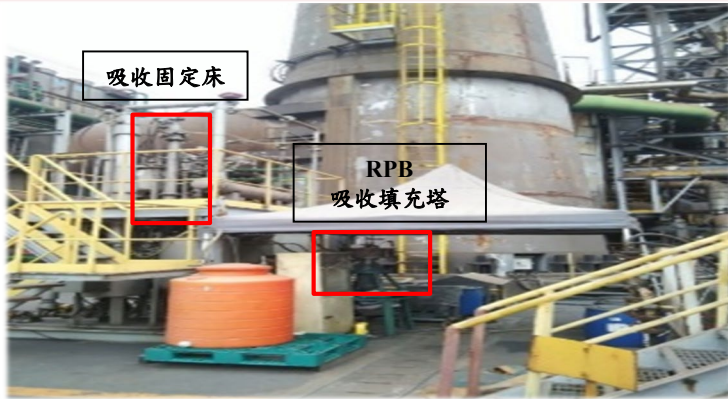
清大自行開發之CO₂捕獲製程

- 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。

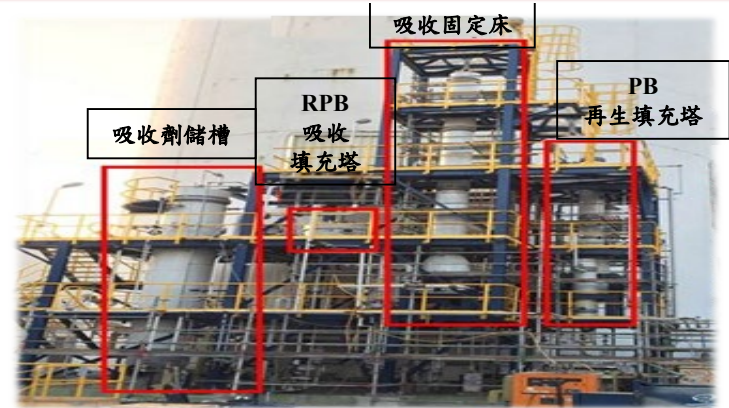




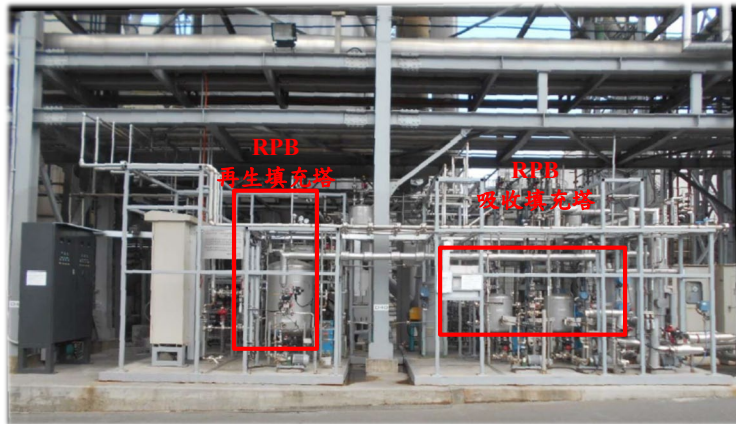
清大建立之CO₂捕獲試驗工廠



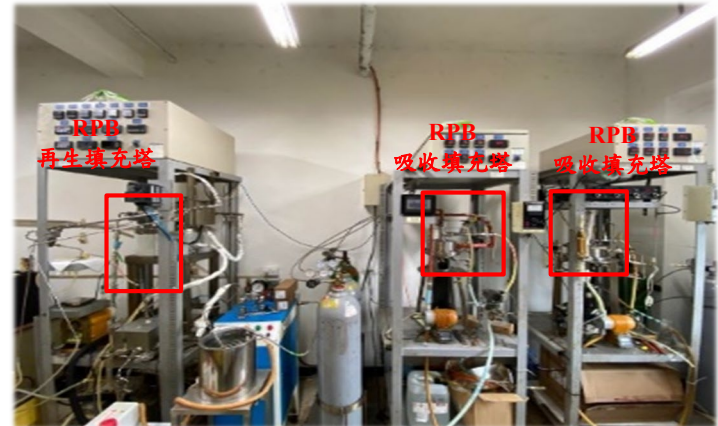
曾建立於中鋼公司，每日可捕獲0.1噸(4公斤/h)的CO₂，旋轉床體積只需固定床的1/3。



曾建立於台塑石化麥寮廠，每日可捕獲1.6噸的CO₂ (67公斤/h)，再生能耗 < 3.0 GJ/ton of CO₂



建立於長春化工，每日可捕獲0.175噸CO₂ (7.3公斤/h)，且再生能耗 < 2.8 GJ/ton of CO₂。



建立於清大實驗室，每日可捕獲9公斤CO₂，可測試新吸收劑配方並得到最佳操作條件。



全球 CO₂ 捕獲工廠之比較

位置	吸收塔	每小時捕獲量 ($\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$)	每日捕獲量 ($\frac{\text{kg}}{\text{day}}$)	單位捕獲量 ($\frac{\text{kg}}{\text{hr} \cdot \text{m}^3}$)	捕獲 100 tons CO ₂ 所需吸收塔體積(m ³)
美國 (Austin)	PB	125	3000	79.3	52.5
加拿大 (Regina)	PB	42	1000	58.9	70.7
丹麥 (Esbjerg)	PB	1000	24000	30.5	136.6
義大利 (Brindisi)	PB	2500	60000	30.7	135.5
中國 (Miyun)	PB	114	2700	41.5	100.4
中國 (Changchun)	PB	100	2400	129.9	32.1
波蘭 (Jaworzno)	PB	50	1200	63.5	65.6
澳洲 (Hazelwood)	PB	1042	25000	42.1	99
荷蘭 (Maasvlakte)	PB	250	6000	94.2	44.2
美國 (RSAT)	PB	300	7200	135	30.8
台塑石化試驗工廠	PB	55	1320	63	66.1
台塑石化試驗工廠	RPB	55	1320	223.1	18.7
長春大發試驗工廠	RPB	7.3	175	607.9	6.8
清大實驗室	RPB	0.4	9.4	580.1	7.2

- 目前全球CO₂捕獲工廠幾乎都使用固定床(PB)，在台塑之捕獲工廠中是使用1個RPB床吸收、1個PB再生，在長春則是使用2個串聯的RPB床進行吸收、1個RPB再生。
- 比較中可顯示清大所建立之試驗工廠較全球CO₂捕獲工廠之效率為佳，特別是試驗工廠中捕獲效率與實驗室相當，顯示可進行放大設計



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, Carbon Fiber, etc)
- Metal Organic Framework (MOF)
- 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

工業捕獲CO₂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

- 新型高分子薄膜 (具高CO₂ 穿透率及選擇率、耐溫、良好之機械性質等)
- 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)
- 製程更新
- 最佳化製程

挑戰：

1. 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)
2. 提高薄膜使用次數及穩定性以降低操作成本
3. 實驗室與實廠操作仍有很大差距，欠缺長時間操作及雜質(SO₂, H₂S, NH₃, H₂O, Fly Ash)影響之相關資訊



CO₂ 封存

- 封存

- 生物封存

- 礦物封存

- 海洋封存

- 地底封存：油氣田回收(Enhanced Oil Recovery)、煤床甲烷回收(Enhanced Coal Bed Methane Recovery)、鹽水層 (Saline Aquifer)，據估計台灣鹽水層可儲存約90至680 億公噸之CO₂

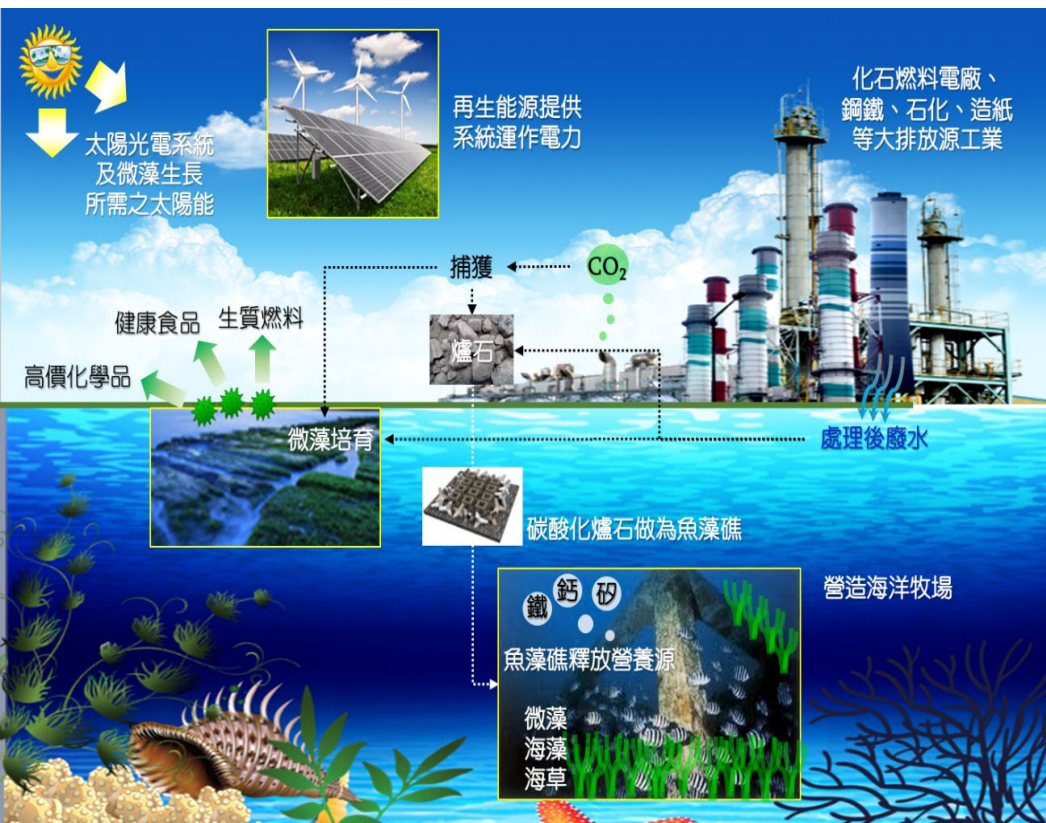
- 現今全球有43個大型CO₂封存項目，其中已有18個大型地質封存的設施(規模由1.0至8.4百萬噸)正運轉中，另5個興建中，20個在規劃或計畫興建中，大多實際運轉的設施是將捕獲的數百萬噸CO₂進行EOR，經數年運轉尚無洩漏情事發生。
- 現今需要更多的CCS計畫進行陸域封存，無洩漏即為非常需要實際數據加以驗證的一個項目。
- CO₂封存面臨的困難與問題: 損失10~40%之電力、研發成本、政府及產業的決心、封存場址資料、鹽水層中之安全評估、後續監控、地震影響、人民接受度、法律規範等。



CO₂再利用

- CO₂再利用可分為：**直接利用及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、微粒製備等應用)、**植物工廠(溫室栽培)**、**海洋牧場**、**生產微藻**等

海洋牧場概念



- 於離岸處以太陽光電、潮汐或風力發電等供應能源，進行廢水處理和CO₂捕獲。
- 使用捕獲之CO₂處理鋼廠中廢棄的轉爐石做為海底之人工魚礁。
- 將處理過含有巨藻生長所需礦物質的廢水及捕獲之CO₂與人工魚礁接觸藉以培育巨藻，如此可進行周邊海域之生態復育；另亦利用處理過之廢水和CO₂於岸邊或海水表面培育微藻。
- 藉由綠色溶劑-超臨界CO₂，處理微藻以獲得高價保健品化、學品或生質能源，如葉黃素、生質燃油等。
- 此具減碳、降低汙染、使用再生能源、產生化學品或生質能源以及提供海洋生物棲息等功能，建立一符合生態之產業。



CO₂再利用：轉化成化學或能源產品

• 轉化成化學產品

- 目前全球已有以CO₂生產尿素(氮肥)、水楊酸(藥物添加劑)、碳酸酯(塑膠)等化學品(全球每年消耗約1億1千6百萬噸)，其中又以尿素生產量為最大，佔CO₂使用量的99%以上，但這些產品消耗的CO₂有限。
- 現幾乎只有台灣以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27萬噸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等，若這些能源產品取代化石燃料，其市場需求量可觀且具下列優點：
 1. 從火力發電廠排放氣中捕獲之CO₂做為原料，可降低電廠之碳排放量。
 2. 轉化之能源產品可作為燃料，降低對化石燃料之依賴。
 3. 再利用產品市場需求大，相對地降低原生產者之阻力。
 4. 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。



氫氣生產之定位及成本

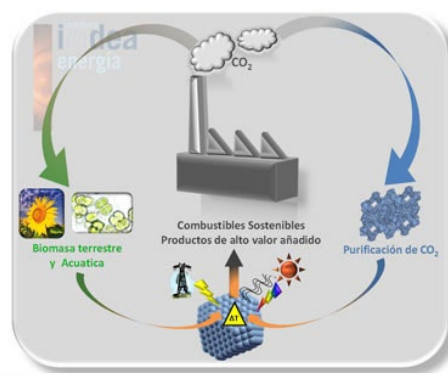
Hydrogen Color	Production method
Gray (灰色)	H ₂ 是由天然氣經蒸氣重組所生產，也會產出相當數量的副產品CO ₂ 。
Blue (藍色)	H ₂ 是由天然氣經蒸氣重組所生產，但在重組中產生的CO ₂ 會經由CCS加以處理以實現淨零CO ₂ 之排放。
Green (綠色)	H ₂ 是經由來自可再生能源的電力電解水而產生的。
Turquoise (藍綠色)	經由甲烷熱分解產生H ₂ ，雖然也會產生碳，但產生的碳是固體而不是氣體化合物。

- 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而成為最低成本的氫氣來源。
- 以綠色氫與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，也是現所謂的「永續性運輸用有機燃料, SOFT」概念。



結語

- 化石燃料在未來二十年中仍可能是電力主要來源，就經濟部**減煤與增氣**之主軸來看，其實就是**減碳**，因此必須捕獲及處理CO₂。就國內環境來看，**CO₂捕獲**已具研發能量，**CO₂封存**因民眾疑慮仍待宣導與溝通，因此**CO₂再利用**是值得大力推動的途徑。
- 各國**為達碳中和/淨碳排放的目標**，都很重視**CCSU技術的開發**，因此CCSU非常有可能於未來十年內，形成一新興產業。基於CCSU技術在國際上仍處在發展階段，國內現投入研發尚不算太晚。未來趨勢很明顯的是，誰掌握到關鍵技術，誰就具有更高競爭力，此外這些技術也可應用到各產業中而提升競爭力。
- 建議政府及主要排放源產業積極投入CCSU，惟需先建立政策、法規、金融、財政、教育等之配套措施。



謝謝聆聽
敬請指正

