
負碳技術與碳循環經濟

談駿嵩

清大化工系榮譽退休教授

國科會負碳領域召集人 (2023-2024, 1)

國發會負碳工作圈CCSU小組召集人 (2021-2022)

國家型能源計畫減碳淨煤主軸召集人 (2014-2019)

I、背景說明

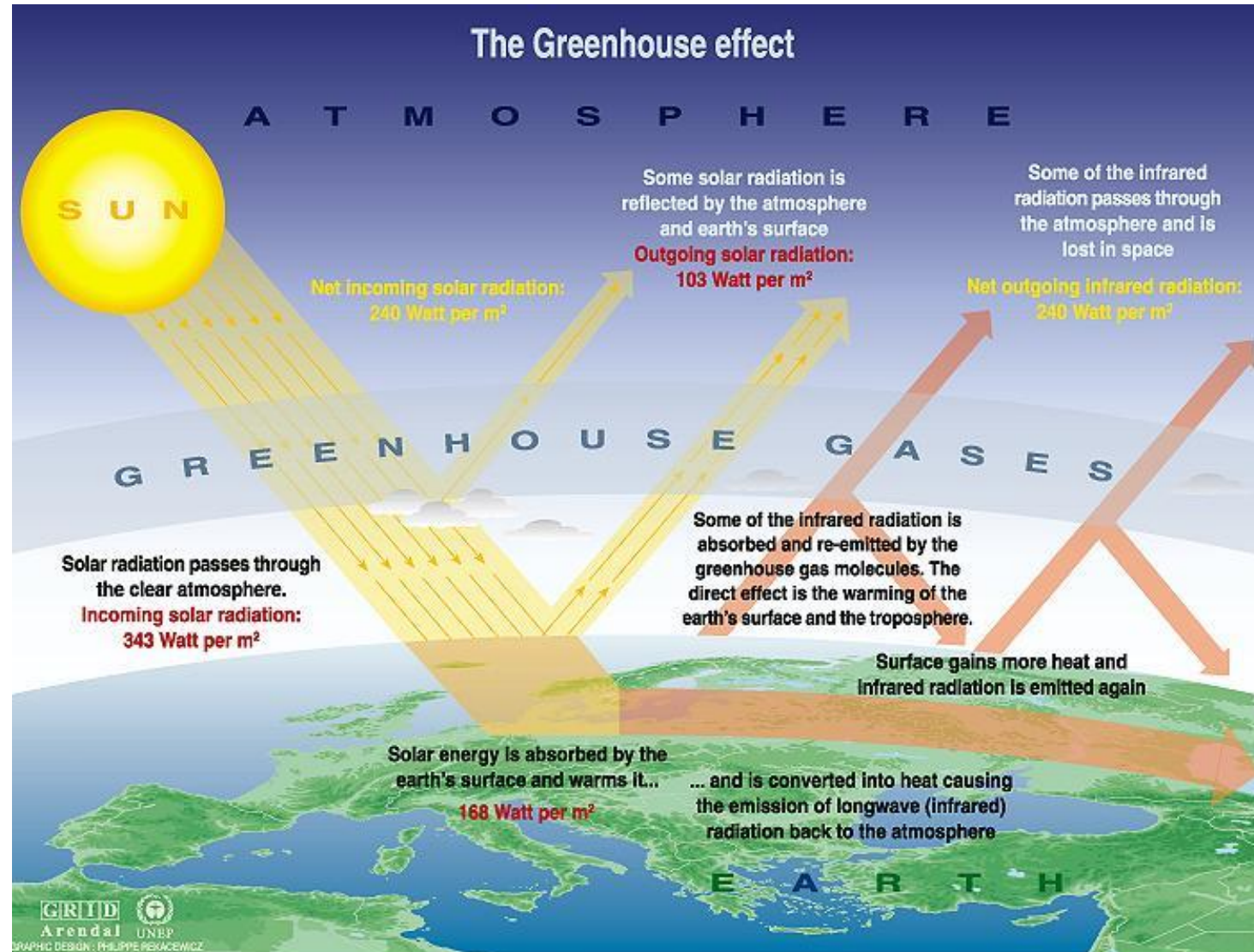
II、全球減碳目標及作法

III、CO₂捕獲封存與再利用技術

IV、結論

民國113年5月31日

I、背景說明



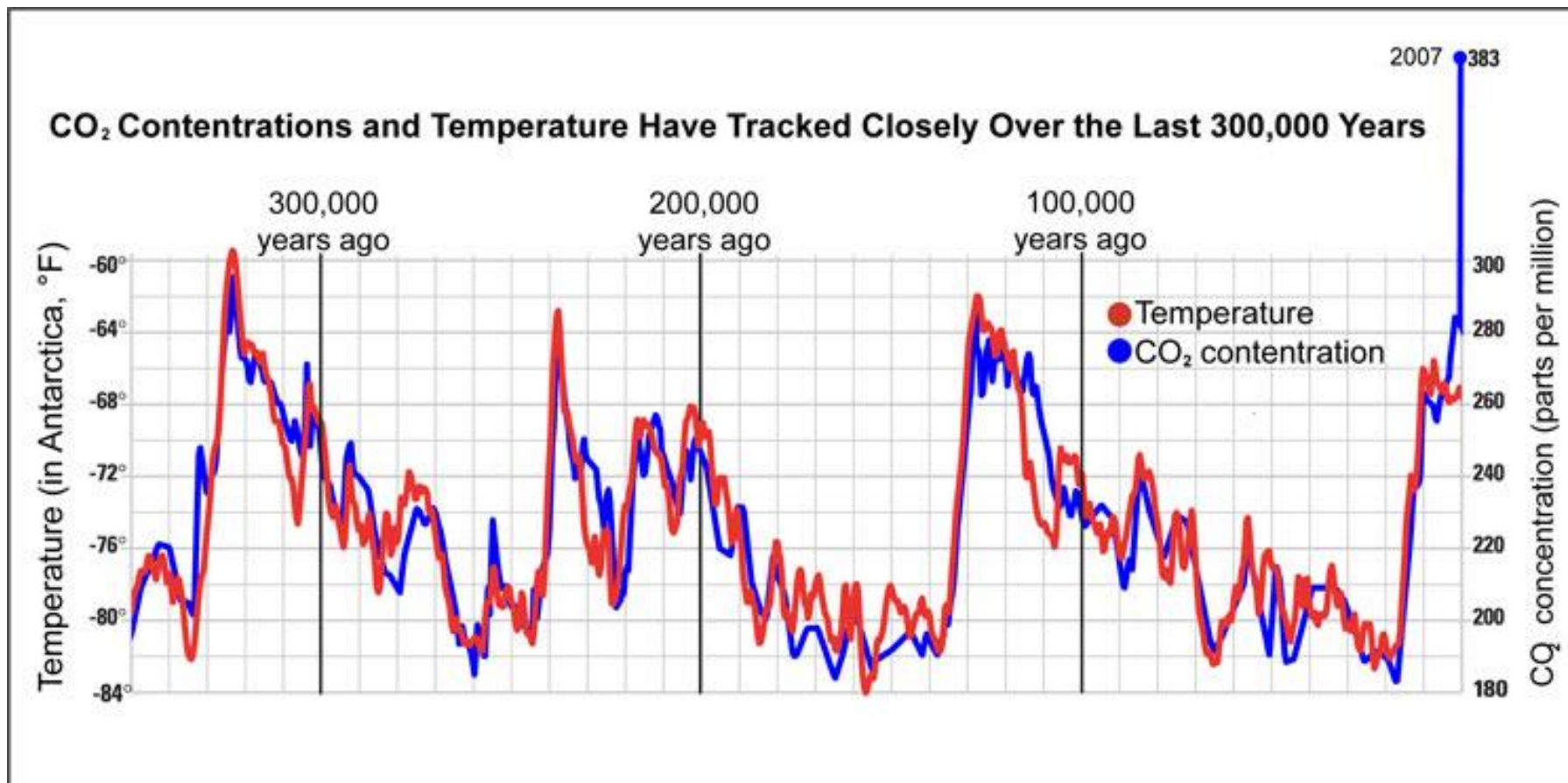
Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography; United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

溫室氣體

| | 工業革命前 大氣中濃度 | 現在大氣中 濃度 | 存留壽命 (年) | 每年增加率 | 有效幅射強度 (相對於等重之CO ₂) |
|------------------|----------------|---------------------------|-------------|-------|------------------------------------|
| CO ₂ | 280 ppm | 414.72 ppm (2022/6/23) | 50-200 | 1.03% | 1 |
| CH ₄ | 715 ppb | 1895.7 ppb (2021) | 12 | 0.45% | 25 |
| CFC-11 | 0 | 231.86 ppt (2016/1) | 45 | 4% | 4,750 |
| CFC-12 | 0 | 515.20 ppt (2016/1) | 100 | 4% | 10,900 |
| N ₂ O | 270 ppb | 334 ppb (2021) | 114 | 0.06% | 298 |
| PFCs | 0 | | 2600-10000 | | 7,390-17,700 |
| SF ₆ | 0 | 10 ppt (2019) | 3,200 | 4.07% | 22,800 |

資料來源：<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

溫度與CO₂之變化

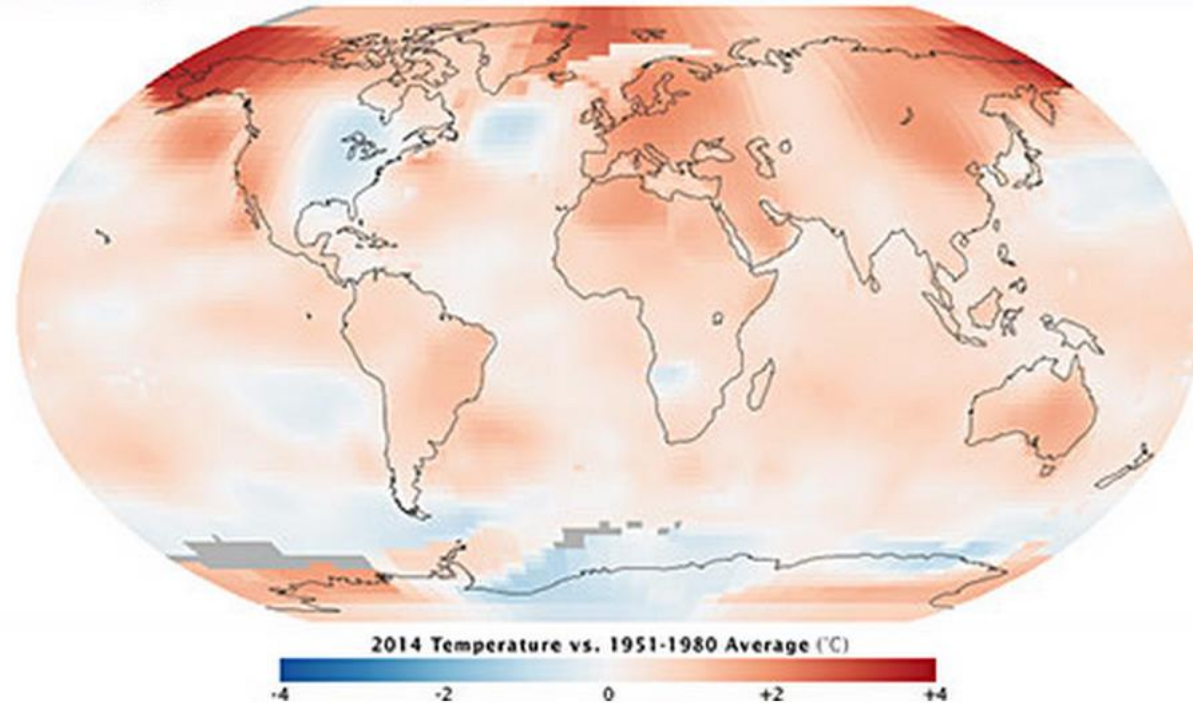


1980

2012



2014 Temperature Anomaly



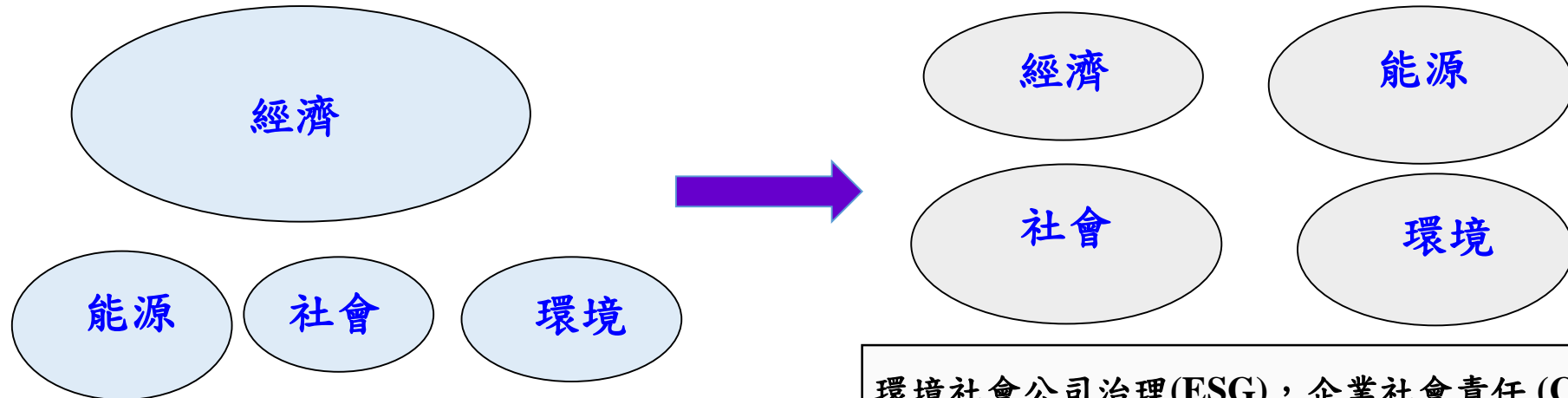
2014年平均氣溫與1951~1980平均值之比較

國際減碳相關法規與會議

- 1988年聯合國成立「政府間氣候變化專門委員會」(IPCC)，1992年聯合國通過「氣候變化綱要公約」(Framework Convention on Climate Change, FCCC)，當年6月於巴西里約舉行「地球高峰會議」，共155國簽署。
- 1995年於柏林舉行第一屆締約國大會 (Conference of the Parties, COP)，之後每年舉辦一屆，1997年12月於日本京都舉行第三屆締約國大會 (COP3)，2005年2月16日京都議定書正式生效，此議定書只管制已開發之39個國家。
- 2015年於巴黎舉行COP21，並於2016年正式通過巴黎協定，此協定於2023年開始，每5年檢討成效，該協定現已取代京都議定書，並將減碳義務擴大到整個世界。
- 2022年於埃及夏姆錫克舉行的締約國大會，已是第27屆，今年11月會在杜拜舉辦COP28。

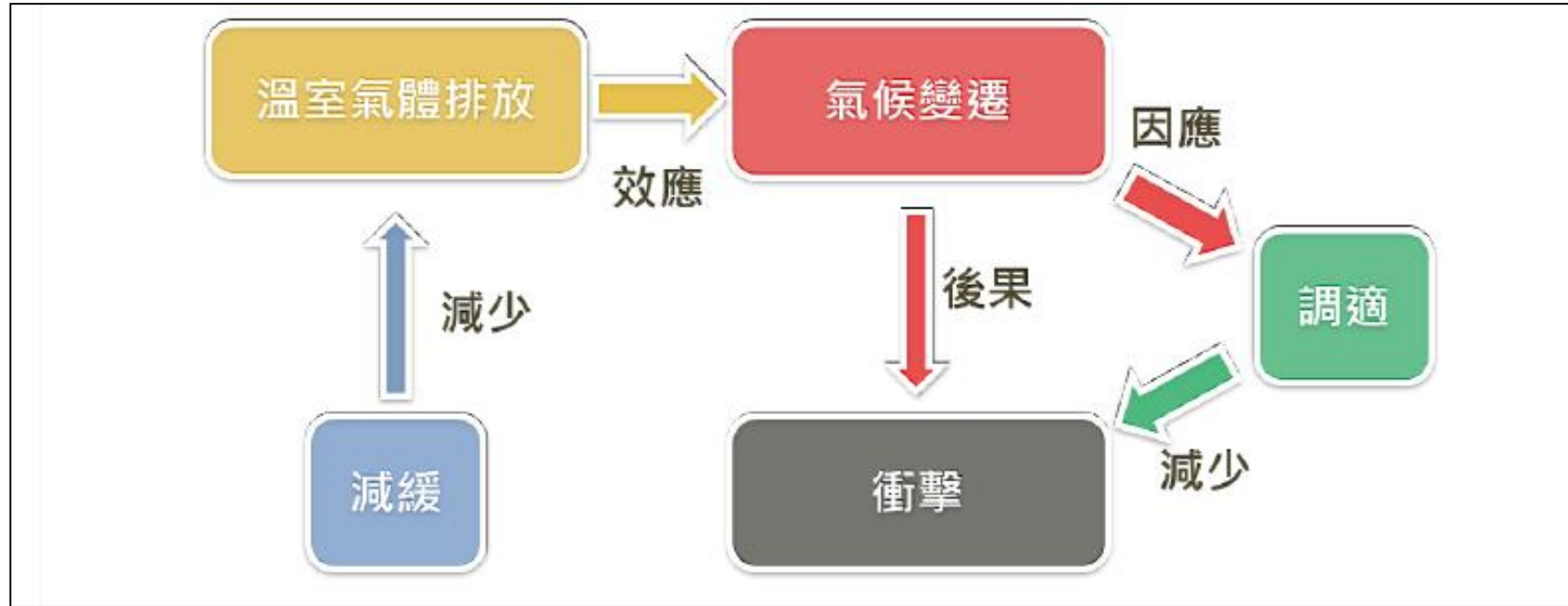
永續發展 (Sustainable Development)

3E (economics, energy and environment) + S (social responsibility)



環境社會公司治理(ESG)，企業社會責任(CSR)

國際因應氣候變化策略



減緩策略著重於削減造成氣候變遷的原因，**調適策略**則著重於妥善處理氣候變遷所造成的衝擊。

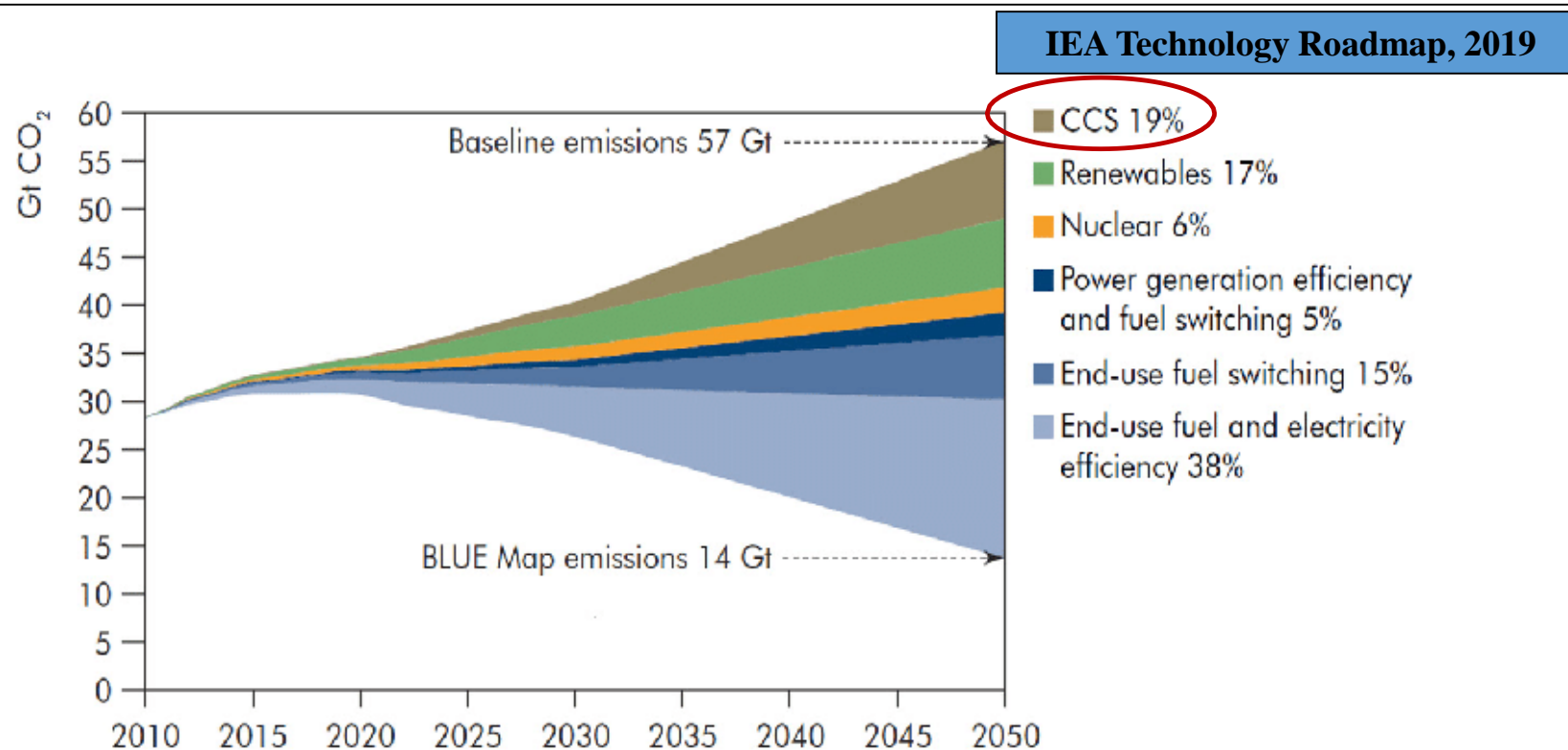
減緩策略包括：節約能源、提高能源效率、開發新興與再生能源、開發溫室氣體減量技術、推動循環經濟等

調適策略包括：重新規劃國土、改變生活概念與型態、改變城市基礎設施、重視水資源、加強調適教育等。

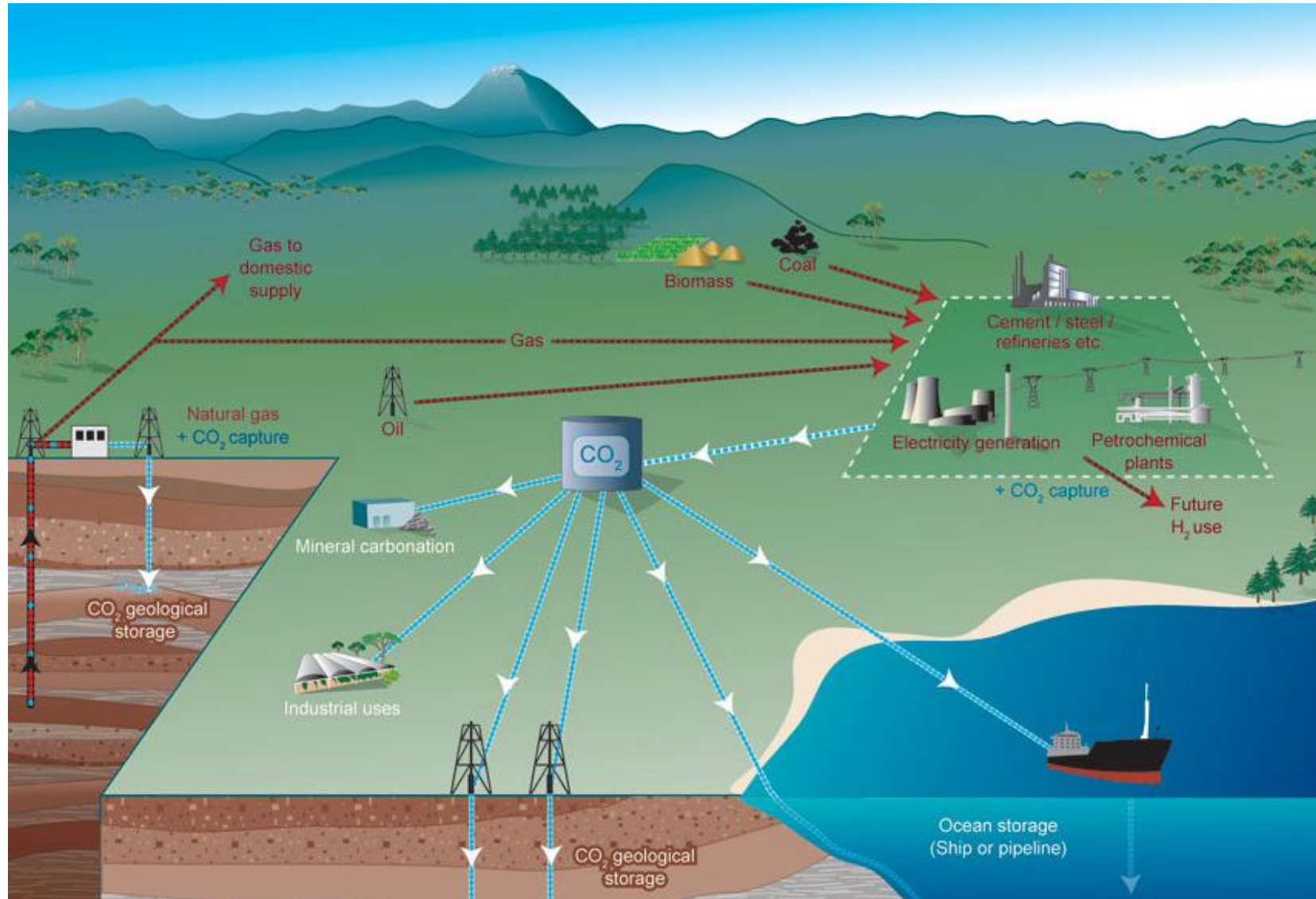
溫室氣體減量之機制: 市場機制、法規機制、自願性協議、研究發展和示範、國際合作。

II、全球減碳目標及作法

- 為防止暖化，巴黎協定中已要求至本世紀末全球氣溫增幅應低於 1.5°C ，並期望全球在2050年時實現零碳排。在今年3月IPCC的報告中指出，在2020時已增溫到 1.1°C 。
- 依據國際能源總署(IEA)的報告，若要達到溫度控制在 2.0°C 內的目標，2050年時全球 CO_2 排放量要由推估的570億噸降至140億噸；顯然要控制在 1.5°C 內，需付出更多的努力，2022年全球排放量已達368億噸。
- 2021年IEA預估2035年時，CCSU的貢獻度需40億噸；2050年時，CCSU的貢獻度需76億噸，方能使全球升溫控制在 2°C 範圍內。



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



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。
- **負碳技術**是能除去的碳比排放出的碳還多的技術，其中包括：
 - 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/自然的解決方案 (Nature-Based Solution, **NBS**)
 - ✓ 森林碳匯(綠碳): 大規模造林及再造林 (10~20噸/公頃/年)
 - ✓ 海洋碳匯(藍碳): 除紅樹林(12~25噸/公頃/年)、海草床(~15噸/公頃/年)、潮汐鹽沼(3~24噸/公頃/年)、海藻等一些已有碳權外，其他尚待建立方法學已獲得碳權
 - ✓ 土壤碳匯(黃碳): 尚待建立基線、盤查、驗證、生物/農業廢棄物增匯機制、方法學等
 - ✓ 礦物及建材吸碳

- 國內目前的**綠電憑證**包括：風電、太陽光電、生質能、水力及地熱，但SRF不在其內。
- 基本上**生質物**是屬碳中和，因吸收大氣中的CO₂的量會等於在生質作物成長以及最後燃燒時所放出來的CO₂，但若將燃燒生質物的過程中將排放的CO₂加以捕獲，再加以封存或利用，就屬負碳。
- 生質燃料是可與其他化石燃料**混燒**，可以減少使用化石能源，因此可減少CO₂的排放。
- 生質燃料中的氮及硫含量較化石燃料低，因此也可降低SO_x及NO_x的排放。

淨零科技方案推動小組負碳領域 - 目標與規劃

自然碳匯2030年之目標為增加135.75萬公噸CO₂當量之碳匯量，各碳匯增匯量分別為：

1. 森林碳匯：75.8萬公噸CO₂e。
2. 土壤碳匯：25.95萬公噸CO₂e。
3. 海洋碳匯：34萬公噸CO₂e。

- 第一階段：搭配科技計畫，盤點負碳領域相關計畫，提出114年度優先投入之科技項目。
- 第二階段：辨認2030年前應積極推動之關鍵議題，其包括：
 - CCS整合布局及社會溝通。
 - BECCUS淨零產業。
 - 深化森林、土壤、海洋等碳匯之基礎研究、建立基線及方法學等

科技研發

1. 掌握生質能之來源，如不與糧爭地之農林作物(包括進口)、藻類、農林廢棄物、禽畜糞、廢水、污泥等。
2. 完備BECCUS技術路徑以利產業推進。
3. 宜由業界出面，建立產學研界之整合示範場域。
4. 發展生質化學品及材料，以優先導入製造業材料之應用。

產業應用

1. 國際航空組織已要求使用永續航空燃料之比例及時程，應加速提升自產量能。
2. 微藻類能作為生質燃料來源，同時能配搭綠能及天然氣進口等作為冷能去化，巨/大藻亦可開發作為經濟動物飼料或保健食品原料，取代進口飼料。

- 歐洲綠色新政已於2019年正式揭示2050年要達到碳中和，歐洲議會2020年通過將2030年溫室氣體排放量(相比1990年)從原40%的減排目標提高到60%。歐洲議會還否決了可依靠森林和草原等碳匯來實現2030年氣候目標的提議，而且否決將發展中國家的碳減排專案納入歐盟的氣候目標，亦即歐盟2030年的目標應該只依賴歐盟國內的減排。
- 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(2001至2005年)起即將CCUS納入，十三五中之目標為五年內CCS達到2千萬噸CO₂，2060達到碳中和，另也訂定2030及2050年CCUS的目標。
- 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。

主要國家之CCSU策略及作法

• 美國

- 2010年美國成立一橫跨14個聯邦部會之機構，此機構由DOE及EPA部長共同領導。此機構就技術發展、法規及管理、教育及公眾認知等方向加以推動CCSU。
- 美國EPA自2011年起將已視為污染物的CO₂以清潔空氣法進行管理，雖無罰則，但規定新設及既有工廠都需要申請排放許可。
- 45Q稅負抵減條款，於2022年8月將用於CCS的每噸50美元提升到85美元、DAC用於CCS每噸180美元、用於CCU每噸130美元，其中包括EOR，另2021年也公布將於5年內投入超過120億美元於CCSU研發與基礎建設上。

• 中國

- 曾提出GreenGen計畫，其與美國FutureGen的操作模式差異在於，FutureGen仰賴私人企業的出資，而GreenGen則是由國營事業全力的投入。
- 中國原擬2012年起徵收碳稅，但目前以碳交易為主，就8個碳排放市場進行交易試點，並為企業設定“半強制的(half-mandatory)”的溫室氣體排放目標。

• 歐盟

- 歐盟透過創新基金，目標在2030年前投資約380億歐元於創新潔淨技術，該基金2021年首次成功徵求的7個計畫中，有4個為CCS相關計畫；2022年有7個CCUS計畫獲得資助。
- 大公司如BASF, Total, ExxonMobil, Borealis, INEOS等之間的合作，並配合氫能、生質能、塑膠回收再利用與循環經濟，共同推動CCSU。

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，之後更曾超過100歐元/噸，原預估到2025年時可能會超過170歐元/噸，但2024年因俄烏戰爭、通膨、能源價格變動等因素，2月平均碳價跌倒59歐元/噸，預估2024平均為71歐元/噸，較2023年平均85歐元/噸為低，未來是否會繼續下跌有待觀察
- **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，執行期程如下：

- 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、螺絲等）、一些化學前驅物，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。

台灣減碳目標及作法

- 2015年通過溫室氣體減量及管理法(溫管法)，其中訂定2050年時CO₂排放量為2005年的一半，亦即2050年時，CO₂的排放量需減少1億2,245萬噸。惟規劃溫管法時沒有碳中和之考量，因此CO₂排放量需更加減少，方有可能達到碳中和。溫管法已於2023年2月15日正式修改為氣候變遷因應法，其中第39條與CCSU有關，並明訂環境部為CO₂封存之中央目的事業主管單位。
- 於2015年發佈自主減碳承諾(INDC)，2030年CO₂排放減至2005年的20%，其中能資源整合 + 地熱發電 + 碳捕存合計600萬噸，惟依據IEA之數據及評估來看，2030年台灣在CCSU上的貢獻度約需400萬噸。
- 減碳相關法規包括：
 - ✓ 技術相關：能源管理法、再生能源發展條例
 - ✓ 管理監督：氣候變遷因應法
 - ✓ 經濟財源：環保署目前規劃首波將針對年排放2.5萬噸的電力與製造業徵收碳費(可能512間企業)。
- 現也有學者提出碳稅、碳權、減碳基金、綠色金融等方式與負碳技術如CCSU的配搭，希望能促使非直接排放CO₂的公司能與直接排放的公司合作以共同減碳。

政府機構減碳之研究架構

- **2008-2019 國科會國家型能源計畫**

六項主軸：節能、替代能源、智慧電網、離岸風力及海洋能源、地熱及天然氣水合物、**減碳淨煤**。

三項小組：能源科技策略、能源政策之橋接與溝通、國際合作。

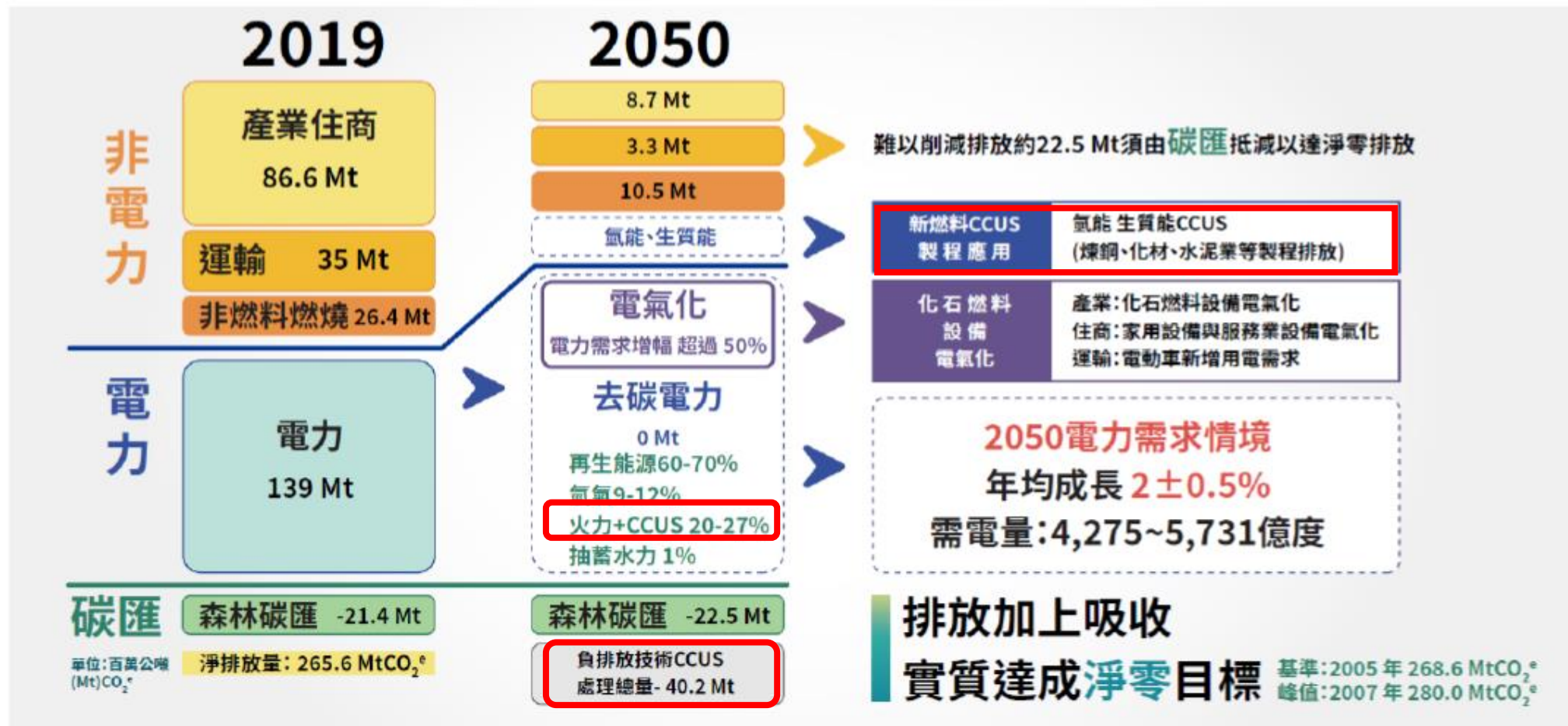
- **2021-2022國發會五大工作圈**

去碳能源、產業能源效率、綠運輸及運具電器化、**負碳技術**、治理。

- **2023國科會五大領域**

永續及前瞻能源、低(減)碳、**負碳**、**循環**、人文社會科學

臺灣2050淨零轉型路徑



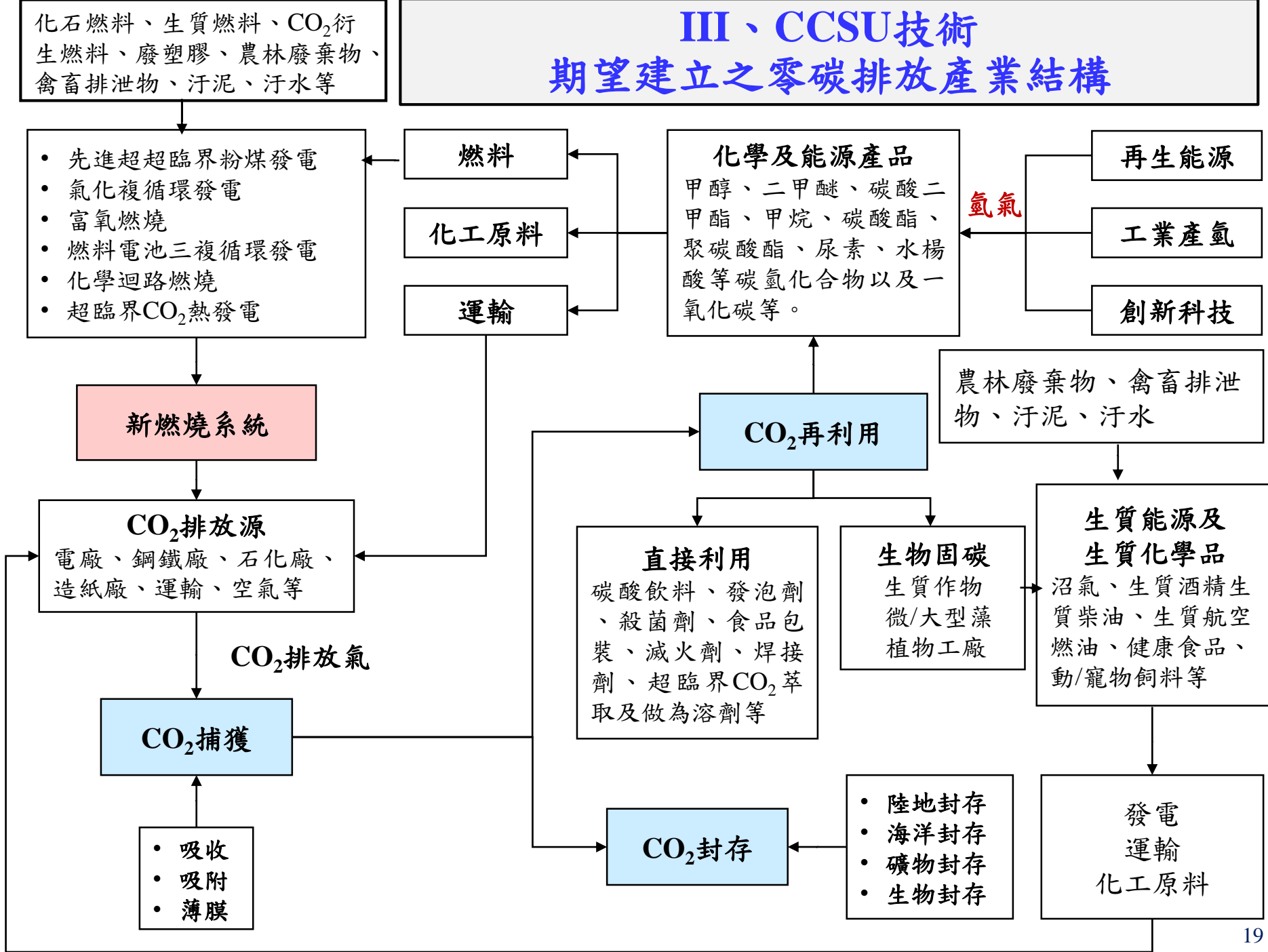
2030年CCUS目標176 - 460萬噸，且需進入示範階段，亦即單一CO₂捕獲廠每年需捕獲1.8~18萬噸

台灣2019年CO₂排放量為2.56億噸，佔全球排放總量的0.76%，全球排名第22位；又進口能源依存度達97.8%，雖然台灣2025年期望之能源佔比為再生能源20%、燃氣發電50%、燃煤發電30%、核能0%，因此以化石燃料產生之能源仍佔有相當高的比例。

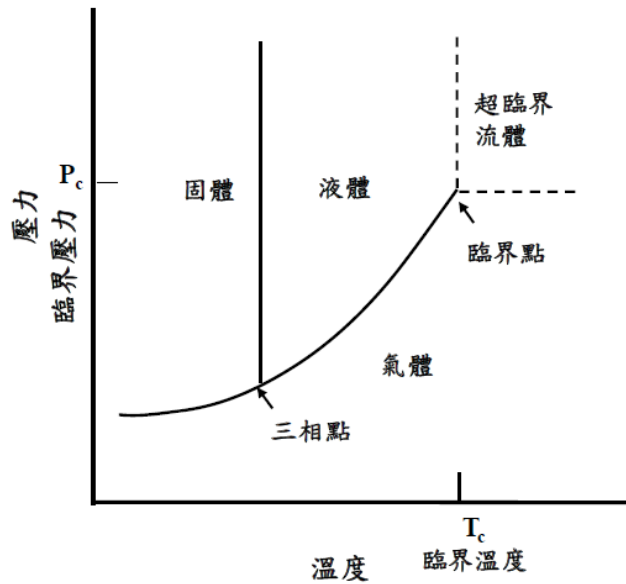
臺灣2050淨零轉型之12項關鍵戰略



III、CCSU技術 期望建立之零碳排放產業結構



超超臨界流體發電(Ultra Supercritical USC)



- 水的臨界溫度 $374\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，壓力 218 atm ，由於超臨界水pH值很低，具強腐蝕性
- 超臨界(SC)/超超臨界(USC) 燃煤發電技術為目前全球燃煤發電廠發展之趨勢，SC/USC 發電技術不僅能提高發電效率，更能達到降低 CO_2 的排放量。
(蒸氣參數：亞臨界(Sub): $540\text{ }^{\circ}\text{C}/180\text{ atm}$ 、SC: $560\text{ }^{\circ}\text{C}/250\text{ atm}$ 、USC: $600\text{ }^{\circ}\text{C}/300\text{ atm}$)
- 更進一步的燃煤發電技術為Advanced USC， $700\text{ }^{\circ}\text{C}/445\text{ atm}$ 。
- 台電已於2012年進行桃園林口(3座 800 MW USC)與高雄大林(2座 800 MW USC)電廠燃煤機組更新擴建計畫 ($600\text{ }^{\circ}\text{C}/245\text{ atm}$)。

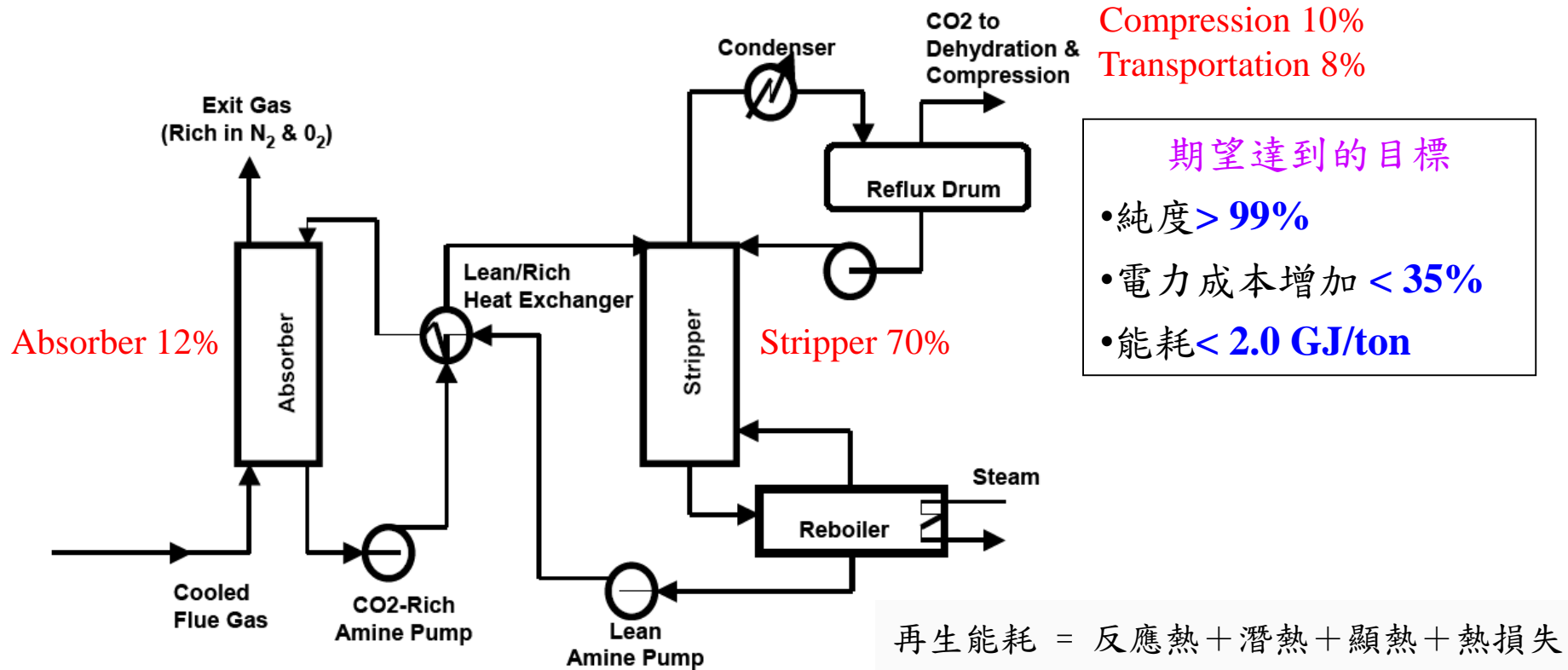
| 以超超臨界為基準(配搭CCS) | 亞臨界 (Sub) | 超臨界 (SC) | 超超臨界(USC) |
|-------------------|-----------|----------|-----------|
| 發電效率 | 0.74 | 0.86 | 1 |
| CO_2 之排放 | 1.36 | 1.16 | 1 |
| 建造費用 | 1.07 | 1.03 | 1 |
| 發電費用 | 1.11 | 1.05 | 1 |

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

過去研發示範案例資金的分配約為，CO₂捕獲成本佔73%，壓縮11%，運輸3%，封存8%，監測5%，就此換算CCS全鏈條成本佔了90%左右，運輸和封存約佔10%左右。

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、進入再生塔前之前處理等，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、廢熱及再生能源、降低再生能耗、使用離峰電力再生等。

比較基礎

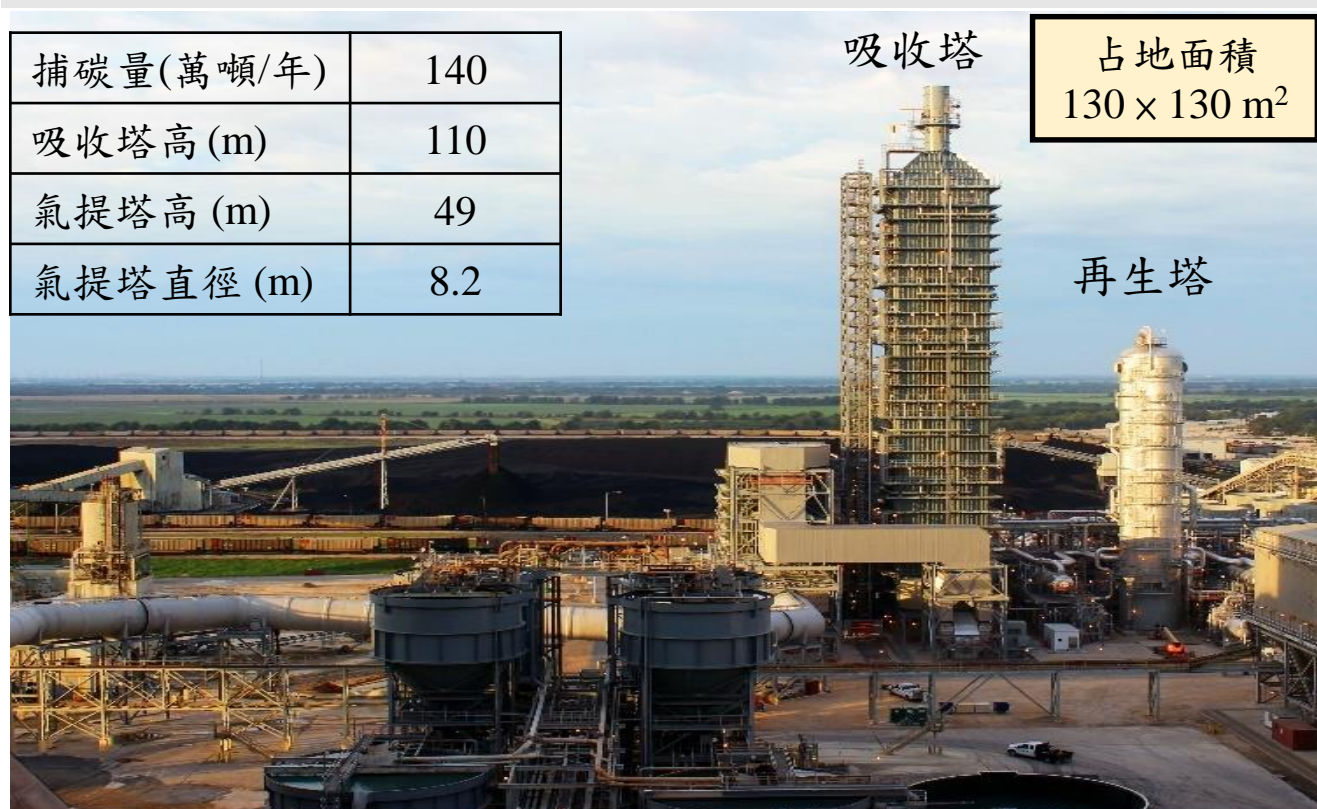
- CO₂捕獲量/體積/時間
- 純度(水含量需低以避免壓縮機及輸送管件之腐蝕)
- 能耗(需使用再生能源)
- 捕獲成本

國外大型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 (萬美金) | 註 |
|---------------------|------------|-------------|------------|-----------------|-------------|---------------------|
| Sleipner | 挪威 | 1996 | CCS | 0.9 | 100 | 北海油田 |
| Boundary Dam | 加拿大 | 2014 | EOR | 1 | 140 | 全球第一座燃煤電廠之捕獲 |
| Petra Nova | 美國 | 2017 | EOR | 1.6 | 100 | 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) | 140 |
| 吸收塔高(m) | 110 |
| 氣提塔高(m) | 49 |
| 氣提塔直徑(m) | 8.2 |



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4,020萬噸，需40座捕獲工廠，因此建議：

- 產學研界急需開發出不要占地大的捕碳技術(製程強化技術);
- 進行跨公司、跨產業及跨領域的整合(共同減量)，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，或非碳排公司投入資金於大碳排公司以獲得減碳額度(例如碳權);
- 政府出面協助解決捕獲工廠用地的問題，並加以整合CCSU、氫氣、廢塑膠處理等問題，增加經濟效益。

製程強化(Process Intensification)

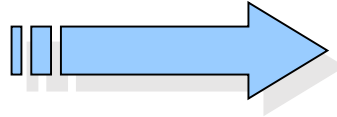
傳統化學工廠



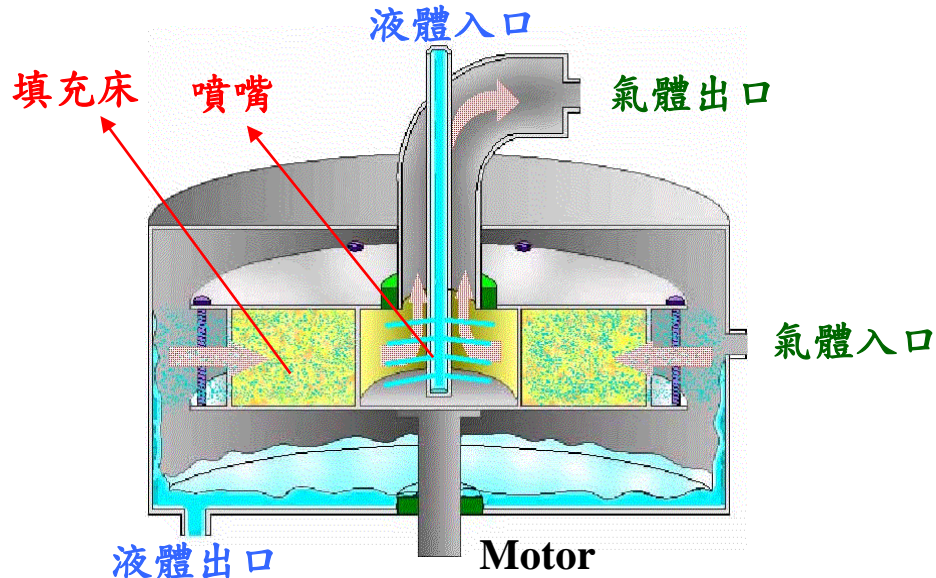
期望的未來化學工廠



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。

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清大製程與配方，1.6噸/天) | RPB | 223.1 |
| 長春大發試驗工廠(2020清大製程與配方，0.175噸/天) | RPB | 607.9 |
| 清大實驗室(2020清大製程配方，0.01噸/天) | RPB | 580.1 |
| 清大實驗室(2021清大製程配方，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)

- 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)
- 開發同時能進行吸附與轉化反應的dual-function 觸媒

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
- 高分子薄膜 (配搭吸收液)、無機膜中嫁接吸收劑、無機膜配搭吸收液、無機/高分子複合膜
- 不同製程與操作之開發

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
- 需經長時間操作以確認薄膜之穩定性以及掌握雜質如SO₂, H₂S, Fly Ash等對捕獲效率影響之程度。

CO₂ 封存

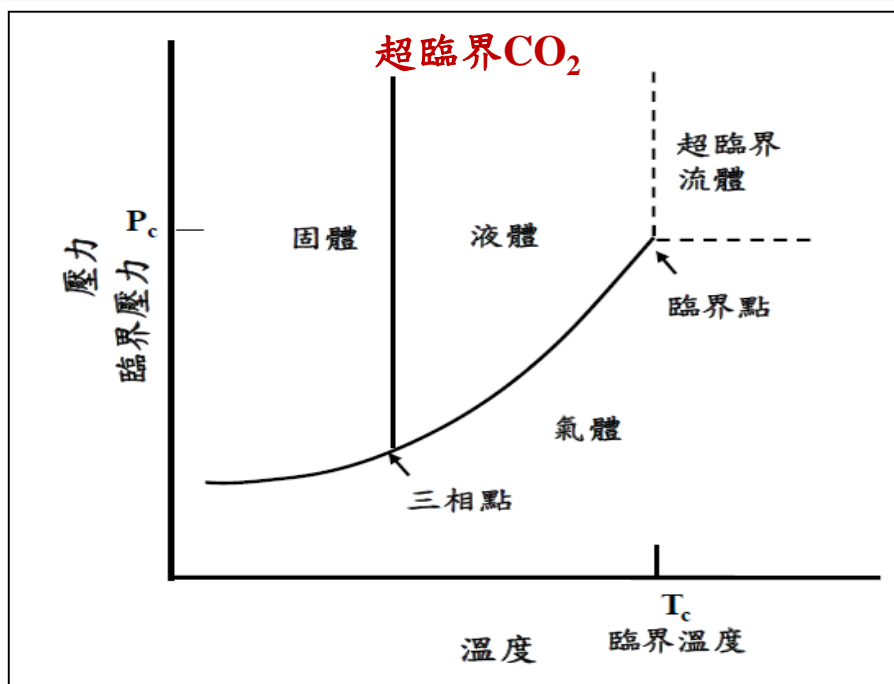
- 封存

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。

- 至2023年7月底，全球有41個商業規模的CCS專案正在運作中，每年CO₂捕獲量為4,900萬噸；另有26個設施建設中，325個設施處於開發階段，整體總捕獲能力會擴大至3.61億噸，較2022年增加50%。
- 現今大部份CO₂封存項目是用於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，目前國內的想法是以沙盒推動CCS。

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**、**海洋牧場**、**生產微/巨藻**、**建築材料**等



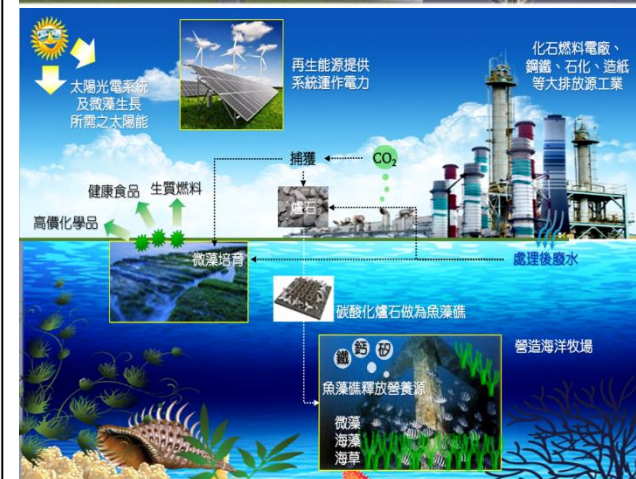
- 超臨界CO₂密度與水相近、黏度與氣體相近、幾無表面張力、對有機物的溶解度可藉由溫度及壓力而改變
- 超臨界CO₂及CO₂膨脹溶液屬綠色溶劑

植物工廠

- 需CO₂、水及陽光/特定波長的LED於室內專業土壤中栽種不同季節的蔬果
- 依國外資料顯示，約3,000坪的植物工廠即可獲利

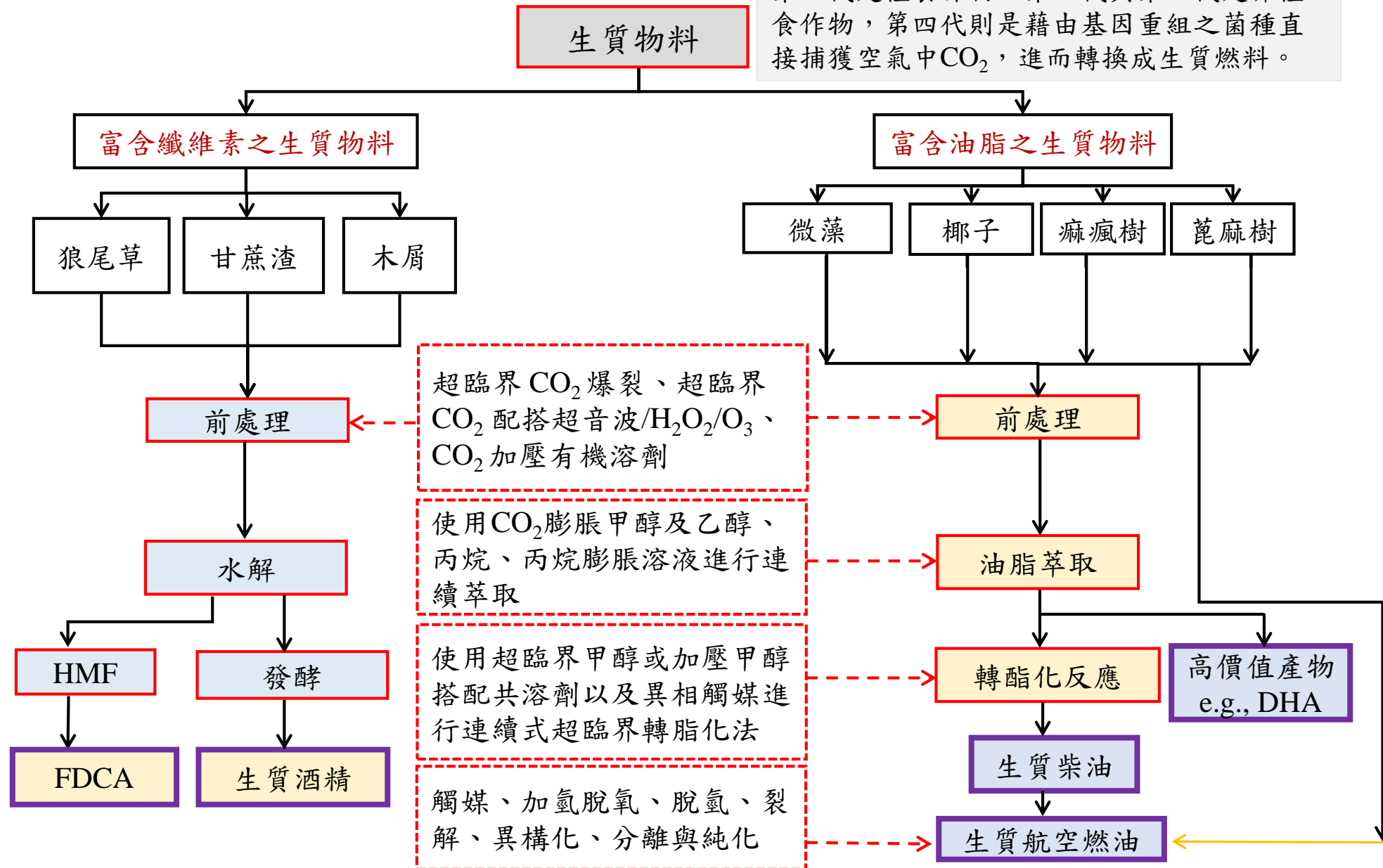
海洋牧場

- 藉由再生能源的電力進行CO₂捕獲及廢水處理，將捕獲之CO₂處理廢棄的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以吸引魚群的棲息
- 使用捕獲之CO₂培育微藻及巨藻





第一代是糧食作物，第二代與第三代是非糧食作物，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。



生質柴油

- **選擇微藻之原因**：一公頃中使用CO₂所培育微藻所生成生質燃料遠較棕櫚及麻瘋樹等為高、較石化柴油對環境的衝擊為小、為國際認可之生質燃油來源等。
- **面臨的問題**：油脂含量、水份含量、破壁、皂化、轉酯化時之攪拌等，**解決方案**：使用CO₂膨脹醇類萃取、轉酯化中使用高壓醇、添加其他植物油、引入觸媒等。

永續航空燃油 (SAF)

- 「國際航空運輸協會」要求航空業使用永續航空燃油，在2050年時，碳排放量較2005年減少50%。目前歐盟航空使用SAF僅為總量的0.05%以下，歐盟要求要增加SAF的混合比例，從2025年的2%逐漸增加到2050年的63%，因此2030年時將需要約230萬噸SAF，到2050年將需要2,860萬噸。
- 2022年已有45萬航班使用永續航空燃油，雖然價格高於石化燃油的3倍以上。
- 生質燃油對比石化燃油含有**較高之H/C及較低的硫含量**，但含有**較高的氧**，影響到黏度、酸性等，因此要由加氫去氧(HDO)以降低氧含量，使生質航空燃油前驅物中含有較多的Octadecane (C₁₈)。
- 生質航空燃油主要組成包括C₇, C₈, C₁₀, C₁₂, C₁₃, C₁₄ and C₁₅, **iso/normal alkane 比值**介於1.0到1.5間，為達到要求，需進行氫化、加氫去氧、去氫、裂解、異構化、分離純化等步驟，因此**溶劑、觸媒、操作變數的掌控、能耗、碳足跡**等皆需就不同的生質原料加以探討。

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、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(現每年需求約1億噸，到2050時可能會增加到5億噸)、二甲醚、碳酸二甲酯、甲酸、甲烷、CO、合成氣(乾式重組)、生質燃油(Power to Liquid, PtL)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**。

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，特別是BECCSU。
- 至於自然碳匯，可努力增加我國自然碳匯能量，例如以捕獲之CO₂培育微藻與巨藻、由不與糧爭地或進口之農林作物做為生質能及生質化學品之來源、從生質能中獲得生質碳、加強土壤與海洋等碳匯之基礎研究以建立基線及方法學。
- 由於CCSU技術在國際上現仍處在發展階段，國內現投入尚不算太晚，未來顯見的是，如果CO₂捕獲成本過高，後續之封存及再利用的成本就不可能會低。由於國外各國除稅負抵減外，也都提供超過數億到數十美元的研發經費，在這情況下，未來國內需求的負碳技術可能都會因成本考量而自國外引進，如此國內減碳成本受制於人，也因此國內必須建立具較低碳足跡及水足跡的CCSU技術。
- 在CO₂捕獲上，應儘快於國內建立自主的示範CO₂捕獲工廠(每日捕獲至少60噸的CO₂)，以進行長時間操作加以驗證技術的可行性及估算出捕獲成本。由於國內公司通常沒有足夠的土地進行大規模的捕碳，因此政府需出面解決捕獲工廠用地的問題以利整合碳排公司的共同減量，此外也需同時推動CO₂封存及再利用的項目，如此未來方能在國內建立完整的CCS及CCU產業鏈。

結語(續)

- 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，除能源產品外亦需特別注重在氫能及國際上有目標的永續航空燃油，由於碳氫能源化學品如甲醇、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/巨藻、生質能、海洋牧場、加速風化、藍氫等，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，
- 對於較屬於非直接排放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，要達淨零碳排除自身節能及使用再生能源外，亦需借助負碳技術，因此可行之道即是與屬於範疇一直接排放CO₂的公司合作CCSU以進行共同減量。為能促進範疇二或範疇三與範疇一產業的合作，需要在國內加速CCS/CCU碳權的授予，如此方能有效利用CCSU達成淨零碳排及ESG的目標。



謝 謝 聆 聽
敬 請 指 正

