

## 第四章 製造業減碳

### 本章小節

4.1 前言

4.2 鋼鐵業

4.3 水泥業

4.4 石化業

4.5 電子業

4.6 小結

## 4.1 前言

從國內的溫室氣體排放情況來看<sup>430</sup>，我國 2019 年製造部門的排放量約 149.6 Mt CO<sub>2</sub>eq，約占我國 2019 年總排放量 287.1 Mt CO<sub>2</sub>eq 的 52.1%，其排放來源包含製程排放、電力消費排放與燃料燃燒排放三類，以電力消費排放達 63%為最多，其占比請參見圖 4.1.1 左半部。若就我國製造部門的四大產業：石化、電子、鋼鐵與水泥業來看，四者的總排放量為 112.2 Mt CO<sub>2</sub>eq，占製造部門排放量 75%，及占全國總排放量 39.1%。

為減少製造部門的碳排，各大企業已持續全面改善能源效率，且部分業界導入人工智慧應用於製程或能源管理系統，提升效率並減少能耗。在減碳的大趨勢下，我國製造業對綠電需求必然持續上升。此外，石化、鋼鐵、水泥等產業亦有可觀的燃料燃燒排碳，此部份短期可以燃氣代替燃煤，長期以（進口）綠氫取代或搭配 CCUS 以落實去碳化。各大企業應結合國內學研界能量，積極投入開發及引進相關技術。

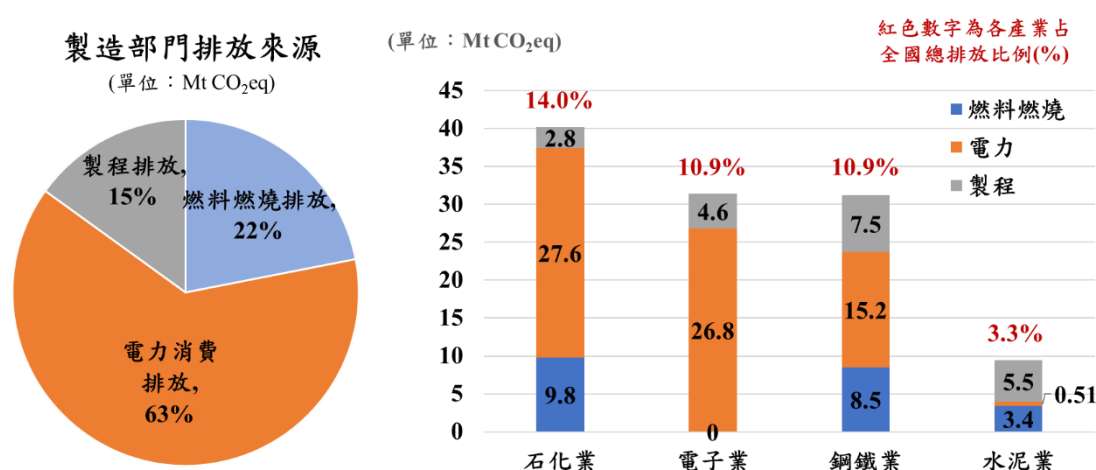


圖 4.1.1 我國製造部門與四大產業排放現況

<sup>430</sup> 經濟部(2021) 製造部門 2050 淨零排放路徑方向性評估報告。行政院淨零排放專案工作組 4 月 1 日會議簡報（資料未公開）。

## 4.2 鋼鐵業

### 摘要

鋼鐵業長久以來支持我國工業發展的需求，其製程特性為能源使用密集度高且碳排量亦高，因此將是我國為達 2050 淨零排放目標時應強化減排的關鍵產業，建議我國鋼鐵業朝下述方向發展：

1. 積極加速零碳製程之引進與開發，在燃料使用上提升天然氣占比，或以碳中和天然氣或氫氣替代現有天然氣使用，並在設備汰換時考量零碳需求與碳定價之衝擊，為鋼鐵業的低碳轉型展開長程布局。
2. 氫能煉鋼及直接還原鐵等技術可降低鋼鐵製程中的碳排，建議國內產業密切關注其技術發展並進行小規模測試，同時考量進口還原鐵或半成品鋼材，亦關注合成氣利用技術及 CCUS 技術的發展，以利適時導入。
3. 以材料循環促進鋼鐵再生的作法，除了可減少採礦階段所造成的碳排，也可降低天然資源的消耗，建議提升廢鋼回收再利用比例，並妥善處理電爐煉鋼製程衍生的廢棄物，確保除了減少碳排、提升資源效率外，亦可兼顧環境保護。

### 4.2.1 前言

鋼鐵是「工業之母」，長久以來支持工業與技術的研發，更是帶動關聯產業發展的驅動力量。雖鋼鐵產品具有生命週期長及 100% 的可回收性，但其製程特性為能源使用密集度高且碳排量亦高。因此，如何從製程中降低碳排為各國因應氣候變遷的重要任務。歐盟於 2021 年 7 月 14 日正式公布碳邊境稅調整機制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 內容，鋼鐵亦列在公告管制項目之中，所以鋼鐵製程中碳利用效率好的國家，有助於提升未來在全球市場上的競爭力。對我國而言，鋼鐵業是支持我國工業發展的關鍵要素，確有必要持續強化產業內的各項減碳措施，不僅回應環境保護與經濟發展的趨勢變化，同時也為達成我國 2050 淨零排放的目標貢獻一己之力。

參採我國經濟部統計資料<sup>431,432</sup>，我國 2020 年鋼鐵業生產量為 56.95 Mt，包含鋼鐵冶鍊業、鋼鐵鑄造業、鋼鐵軋延及擠型業，以及鋼鐵伸線業，同一年度國內的自用量為 56.64 Mt，可看出鋼鐵業的生產量多為滿足我國本身自用的需求。就進出口方面，2020 年的進口量（含復進口）為 12.26 Mt，出口量（含復出口）為 12.57 Mt，且該年度主要的出口國前三名為：中國(2.22 Mt)、越南(1.62 Mt)及美國(1.35 Mt)。我國鋼鐵業在 2019 年度的排放量約 31.2 Mt CO<sub>2</sub>eq<sup>433</sup>，占全國總排放量 10.9%及占我國製造部門排放量 20.9%（其中，製程排放約占二成四、電力消費排放占四成九，以及燃料燃燒排放占二成七）（圖 4.2.1）。

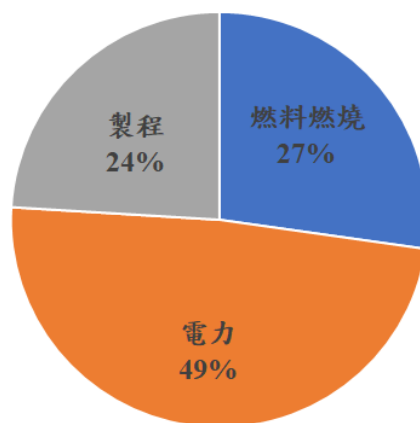


圖 4.2.1 鋼鐵業排放來源比例圖<sup>434</sup>

由鋼鐵業製程與碳排關聯性的研究可知<sup>435</sup>，全球鋼鐵業在過去一個世紀（1900 年至 2015 年）之間約生產 45 Gt 鋼，共排放了 140 Gt CO<sub>2</sub>eq，占此期間全球溫室氣體排放量約 9%。雖鋼鐵製程效率顯著提高了約 67%，但被年鋼鐵產量增加 44 倍所抵銷，因此年排放量淨增加 17 倍；而在前述的研究文獻中，學者

<sup>431</sup> 經濟部統計處(2021) 工業產銷存動態調查產品統計。

<https://dmz26.moea.gov.tw/GMWeb/investigate/InvestigateDA.aspx>

<sup>432</sup> 財政部關務署(2021) 海關進出口統計綜合查詢。關港貿單一窗口。

<https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30>

<sup>433</sup> 同前揭註 430。

<sup>434</sup> 同前揭註 430。

<sup>435</sup> Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y. et al. (2021) Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. Nat Commun 12, 2066.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>

亦指出在鋼鐵業製程的四大階段之排放比例，依序為採礦 13.3%、煉鐵 42.2%、煉鋼與鑄鐵 28.4%及軋鋼 16.1%<sup>436</sup>（請參見附錄 4A）。鋼鐵冶煉的過程不僅高耗能也是高碳排，依國際能源總署(IEA)報告的推估，每公噸的粗鋼約造成 2 公噸二氧化碳排放<sup>437</sup>，碳排放密集度很高。然而對產業的發展而言，鋼鐵材料及製品是不可或缺的。因此，面對 2050 淨零排放的目標，鋼鐵業會面臨高度的挑戰  
438,439,440：

1. 冶煉製程仍須使用化石燃料：鋼鐵製程中的重要設備高爐仍以化石燃料（如鐵礦、煉焦煤及石灰石等）燃燒為主，燃燒過程中會產生大量的二氧化碳排放。如改以電爐煉鋼，雖可以採用綠電來減少碳排，但冶煉的成本相對增加，且某些高品質的鋼鐵材料仍無法從電爐煉鋼獲得。
2. 鋼鐵冶煉製程複雜度高：由於製程是一個連續的過程且具有高度整合性，因此針對單一設備或階段可以彈性調整的幅度有限，即任一製程階段的改變，皆會連帶影響其他階段的技術參數設定等問題。雖然透過製程的改善來減碳是根本性的作法，因此需要從上游到下游全方位的調整配合，其所投入成本亦相當的昂貴。
3. 設備造價不菲且使用週期長：鋼鐵業資本密集，設備使用週期可達 40 年，若推動產業轉型希望改採低碳技術或汰換設備，對業者而言恐將產生沉沒成本，因此短期作法恐僅為改造或調整現有設備，來逐步降低碳排放密集度。
4. 考量市場競爭及低利潤率：鋼鐵市場已呈現高度商品化且競爭激烈，投入原料的成本高度影響生產成本，尤其是鐵礦石、廢鋼及能源，約占生產總成本的 60~80%。新興製程技術雖可減少碳排，但如果增加的生產成本超過鋼鐵生產的利潤時，將削弱企業競爭力，也會降低業者採用的意願。

---

<sup>436</sup> 同前揭註 435。

<sup>437</sup> IEA (2020) Iron and Steel Technology Roadmap.

<sup>438</sup> 中技社(2014) 鋼鐵產業的價值鏈與競爭力。 [https://www.ctci.org.tw/media/3012/專題報告2014-08\\_鋼鐵產業的價值鏈與競爭力-全文.pdf](https://www.ctci.org.tw/media/3012/專題報告2014-08_鋼鐵產業的價值鏈與競爭力-全文.pdf)

<sup>439</sup> IEA (2020) Energy Technology Perspectives 2020. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

<sup>440</sup> 同前揭註 437。

整體而言，鋼鐵業減碳除了從技術面著手，針對碳排高的冶煉製程，思考如何從製程能效提升、設備改造汰換之外，從源頭原料投入面應也有可著力之處。後文將分別就減碳選項及創新案例，進一步說明及初估鋼鐵業減碳的方法與潛能。

#### 4.2.2 鋼鐵業全球減碳趨勢

參採國際能源總署的研究報告可知，鋼鐵業的全球減碳趨勢在2030 年以前，多以傳統製程搭配 CCUS 技術進行減碳為主要的技術選項<sup>441</sup>，此外尚有綠色製程與能源效率提升；部份國家/地區改用生質能、氫能等替代燃料（圖 4.2.2）。在2030 年以後，導入創新技術以改善製程將為達成減碳的主要方向（如氫還原煉鐵技術、電解鐵相關技術）。另外，比較全球鋼鐵業的各項減排技術<sup>442</sup>，二氧化碳直接排放累積減排量（2020 年至 2050 年）貢獻最大者為提升材料效率(material efficiency)，包括如廢鋼回收再利用等，其次為技術效能(technology performance)的提升（圖 4.2.3）。

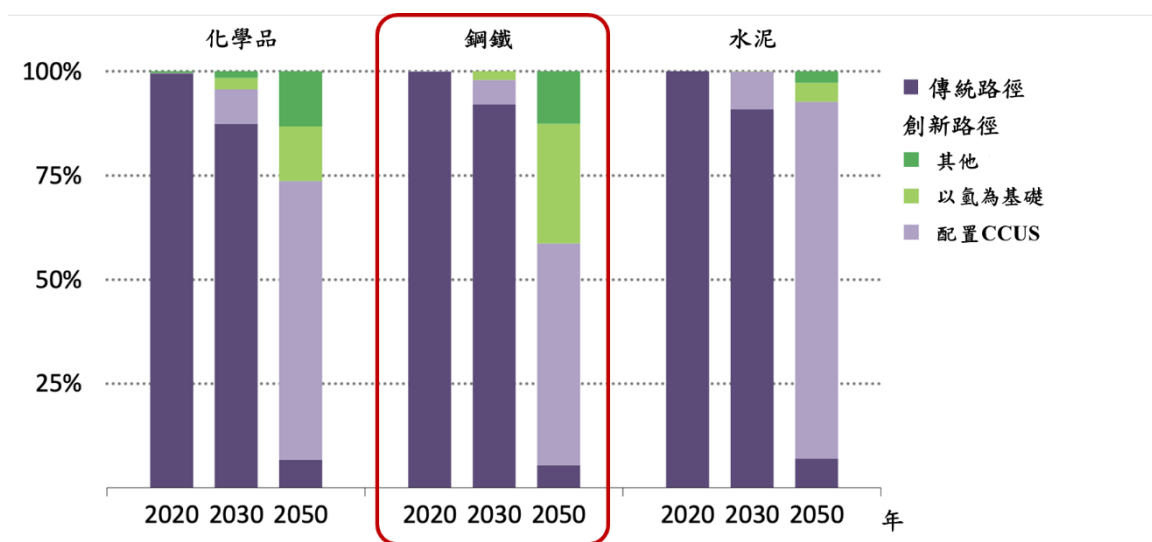


圖 4.2.2 鋼鐵業生產技術之全球減碳趨勢<sup>443</sup>

<sup>441</sup> IEA (2021) Net zero by 2050 : a roadmap for the global energy sector.  
[https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf)

<sup>442</sup> 同前揭註 437。

<sup>443</sup> 同前揭註 441。

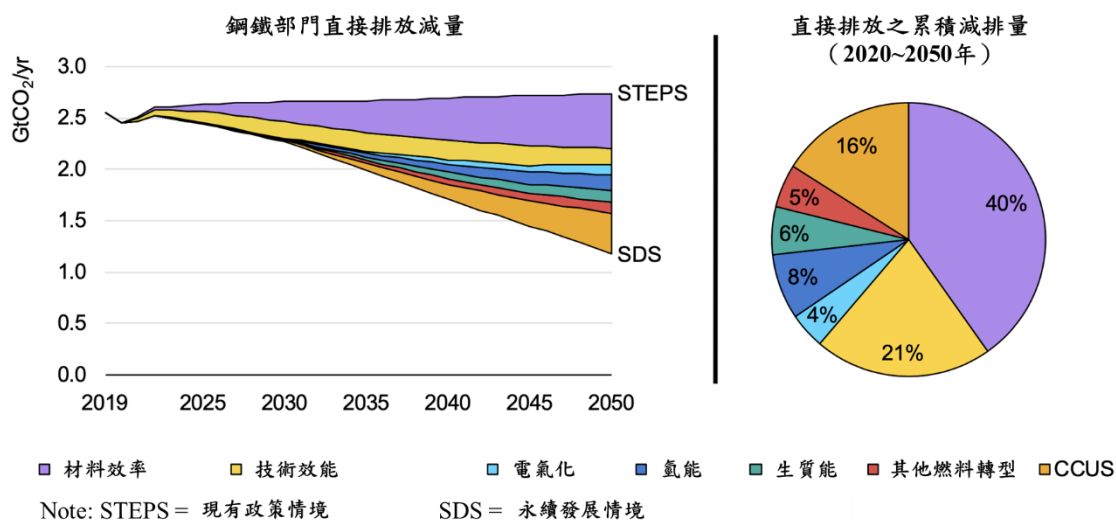


圖 4.2.3 全球鋼鐵業二氧化碳直接排放累積減量比例  
(2020 年至 2050 年，按減排技術)<sup>444</sup>

進一步來看，由於各國鋼鐵業的發展程度不同，因此有必要視不同區域及不同類型基礎設施使用年限，來規劃採用適合的減碳措施。若是產業設備普遍較老舊的國家或區域，或可提高設備汰換比例以提升效能來減碳；但在產業設備較新穎的國家，採用更節能、碳密集度更低技術將是較符合成本效益的作法。

## 4.2.3 鋼鐵業減碳選項分析與創新案例

### 1. 減碳選項分析

經由前述對鋼鐵業製程的說明分析，以及該產業所貢獻給製造部門的碳排比例來看，我國如欲達成 2050 淨零排放的目標，宜分別就鋼鐵業的三大排放源（圖 4.2.4），來分析可採取的減碳選項<sup>445,446</sup>。

<sup>444</sup> 同前揭註 437。

<sup>445</sup> 同前揭註 439。

<sup>446</sup> 同前揭註 437。



圖 4.2.4 鋼鐵業減碳創新技術

- (1) 在燃燒排放上，主要因高爐使用煤炭、煤氣、重油等化石燃料煉鐵，再以轉爐煉鋼的過程中所造成的碳排，因此，改採替代燃料，如天然氣、綠氫等，將可有效地降低碳排量。但此選項面臨的問題為製程主要設備的更新調整，對產業而言是一項相對高成本的投入，也是難以快速推動改變的主因。
- (2) 製程排放主要是在高爐煉鐵時，煤炭產生之焦爐氣（多為 CO 及 H<sub>2</sub>），此氣體亦為還原劑，以促進氧化鐵還原成為生鐵（反應式為  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$ ；在更高溫時反應式為  $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ ）。因此，如何研發還原技術以帶動製程創新，並取代原本焦爐氣造成的碳排，成為技術精進的重點。如高爐氫能煉鋼是以氫能作為高爐的熱能來源，或是以氫能煉鋼、電解煉鋼產出直接還原鐵，皆是國際各大鋼鐵廠研發中的技術與潛在的減碳方案。另外，在減少製程碳排上，目前常見的為效能提升的最佳可行技術(Best Available Techniques, BAT)，如煉鐵製程的熱回收、高爐的能效提升，以及電（弧）爐進料的碎料預熱等。
- (3) 電力消費排放上，則以電（弧）爐與軋鋼等電力需求為大，因此，以材料循環的思維，提升材料使用效率，促進廢鋼回收再利用並增加電（弧）爐的產量。最後，在廠內各項製程或燃燒造成的碳排亦可搭配 CCUS 技術來進行碳

捕捉，並規劃後續的碳儲存或再利用。

## 2. 創新技術與案例

透過前述對鋼鐵業減碳選項的分析可知，在冶煉製程上的技術創新，將是產業本身可積極達成減碳的關鍵作為，另外則是從鋼鐵業整體的角度，與石化工業聯產，以及善用國內天然資源產出無碳化的鋼鐵行銷全球，與夥伴國家共同達成2050淨零排放的目標。以下分就技術創新與合作創新二大面向分別簡述。

在技術創新上，綜整國際能源總署、國際再生能源總署(IRENA)的研究報告，歸納主要的新興技術項目如下：

- (1) 氫還原煉鐵技術：此研發技術嘗試以氫取代碳作為還原劑以還原氧化鐵。由於  $H_2$  分子與  $CO$  相比，其尺寸更小且擴散進鐵礦石的速度是  $CO$  的 5 倍，所以可有更佳的還原速度，再加上氫與氧反應的產物是水( $H_2O$ )，亦可減少碳排。但氫氣還原鐵礦石的過程是吸熱反應，因此，滿足氫氣還原鐵礦石之熱需求，是氫還原煉鐵技術的核心研究內容<sup>447</sup>。
- (2) 氫電漿熔煉還原：產生的方式可經由直流或交流電在兩個或更多個電極間放電，使電子在電場中加速獲得極高的動能，進而碰撞(collision)氣體分子或原子，使其產生游離(ionization)反應。因此，在氫電漿熔煉還原(Hydrogen plasma smelting reduction, HPSR)的製程中，是透過電弧電漿反應器，促成電子和氫分子的碰撞產生激發態氫( $H$ 、 $H^+$ 、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$ )，再還原鐵礦石進行冶煉。由此可知，電弧區氫離子化程度是影響鐵礦石還原率的主要因素，與傳統的鐵礦石碳熱還原(carbo-thermic reduction of iron ores) 的技術相比，氫電漿熔煉還原在熱力學和動力學方面具有優勢，更可減低碳排<sup>448</sup>。
- (3) 電解煉鐵技術：電解煉鐵是以電解還原鐵礦石，即直接以電解從鐵礦石

<sup>447</sup> 中技社(2013) 臺灣鋼鐵業的挑戰與機會。https://www.ctci.org.tw/media/3033/專題報告 2013-08 臺灣鋼鐵業的挑戰與機會.pdf

<sup>448</sup> Naseri Seftejani, M.; Schenk, J. (2018) Fundamentals of Hydrogen Plasma Smelting Reduction (HPSR) of Iron Oxides, A New Generation of Steelmaking Processes. In Proceedings of the 7th Asia Steel International Conference 2018, Odisha, India, 6–9 February 2018.

( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  或  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 中還原鐵，產物為純金屬的鐵與氧氣，若能採用綠電，此研發技術將對減少碳排有相當的助益。此技術在溫度設定上有不同的研發方向，其中高溫電解煉鐵是將鐵礦石引入電解槽加熱到熔融態（ $1,600^\circ\text{C}$  左右），再選用不同的無碳惰性陽極並通電電解。過程中，帶負電的氧離子移動到帶正電的陽極生成氧氣，而帶正電的鐵離子移到帶負電的陰極被還原為元素鐵。另一種則為低溫電解煉鐵，是將鐵氧化物粒子加入特殊配方之低溫（ $110^\circ\text{C}$ ） $\text{NaOH}$  鹼性電解液中再通電電解，此時帶正電的鐵離子將在陰極沉澱 449,450。

在產業合作創新上，參考德國鋼鐵大廠蒂森克虜伯(thyssenkrupp)公司所推動的 Carbon2Chem 計畫，分析以鋼鐵及石化工業聯產可達成的減碳成效。另外，也將探究澳洲的 Green Steel 計畫如何透過生產綠色鋼鐵進行全球貿易，不僅維持本國經濟發展，同時有助於各國鋼鐵業的減碳。

- (1) Carbon2Chem 計畫：德國是歐盟最大的鋼鐵生產國，也是全球第七大鋼鐵生產國，鋼鐵業對德國的汽車、機械的供應鏈相當重要。化工產業對民生的日用產品而言亦是不可或缺，化學製品在日常生活中隨處可見。因此，德國蒂森克虜伯公司從鋼鐵及石化工業聯產角度出發，提出 Carbon2Chem 計畫，嘗試將煉鋼過程中產生的廢氣，即所謂的冶金氣(metallurgical gases)進行再利用。這些氣體含有氮、氫，以及二氧化碳，再經過加工形成合成氣(synthesis gases)，亦即是甲醇、氨或聚合物的前驅物(precursors)，也是燃料、化肥或塑料的基礎成份<sup>451</sup>。Carbon2Chem 計畫是首次將煉鋼過程中產生的氣體用於化學品生產的原材料，此技術雖已開發多時，但如要擴大規模成為產業的解決方案，推估尚需市場誘因及 15 年左右的研發過程。此技術同時減少總體碳排，有機會達成幾乎無碳排的鋼鐵生產，根據蒂森克虜伯公司的推估，全球

---

<sup>449</sup> Worldsteel (2021) Fact sheet: Electrolysis in ironmaking. World Steel Association AISBL. <https://www.worldsteel.org/publications/position-papers/climate-change-policy-paper.html>

<sup>450</sup> 同前揭註 447。

<sup>451</sup> Thyssenkrupp (2021) Carbon2Chem: when emissions become valuable substances. thyssenkrupp AG. <https://www.thyssenkrupp.com/en/stories/carbon2chem-when-emissions-become-valuable-substances>

約有 50 家鋼鐵廠符合推動 Carbon2Chem 計畫的條件，且該公司已逐步向各廠洽談合作的可能性。雖然製程的冶金氣中已經存在的氫氣足以合成氨，但仍須要生產額外的氫氣來製造甲醇，所以 Carbon2Chem 計畫中也將採用電解水產氫以滿足化學品生產所需。因此，考量大型工業設施（如鋼廠和化工廠）會有大量電力需求的特性，未來也將改由從再生能源獲得綠色電力來符合減碳的需求。但從另一方面來看，大型工業設施同時也可作為能源緩衝區，即在風能和太陽能所產出的電力有剩餘時，啟動化學品生產流程以充分使用剩餘的綠電，在作法上可將鋼廠製程氣流分為二部分，一部分用於鋼鐵生產要求，另一部分則用於化學品生產，透過負載管理策略，不僅可有效利用綠電，也可協助穩定電網的供應<sup>452</sup>。就技術應用的場域而言，除了鋼鐵業，該技術亦可移轉至其他二氧化碳密集型產業使用，提升減碳的成效。然臺灣是否有綠電剩餘的條件，仍是未知。

- (2) Green Steel 計畫<sup>453</sup>：澳洲生產了全球 38% 的鐵礦石和 18% 的冶金煤，為鋼鐵生產所需的兩種主要原料的出口國，但澳洲本身只生產全球 0.3% 的鋼鐵。依據 2020 年的統計，全球粗鋼產量為 1,878 百萬噸，澳洲產量為 5.5 百萬噸，排名 29。就現況而言，澳洲的原料出口成本低，將關鍵原料運往亞洲市場的成本更低。以澳洲冶金煤為例，總成本增加不到 10%，所以收益會較販售鋼鐵產品高。再者，若將原料留在澳洲生產鋼鐵，本地的高工資等因素將會大幅提高冶煉的成本。澳洲再生能源豐富，可用來製造綠氫，但運送氫氣比運送冶金煤的成本更高，也就是與在澳洲使用氫氣的成本相比，運送到亞洲市場的氫氣成本幾近翻倍，所以澳洲雖可用再生能源製氫，但氫氣出口成本高，成為推動減碳的挑戰，也讓澳洲思考在當地製氫後最佳用途。因此，結合前述冶煉的需求，將綠氫用在煉鋼上來生產綠色鋼鐵(Green Steel)出口，建立“Green Steel Export Pathways”，不僅成本遠低於直接運輸氫至國外，更可協助夥伴國家降低該國在鋼鐵業上的碳排放量。澳洲 Green Steel Export Pathways

---

<sup>452</sup> Thyssenkrupp (2021) The Carbon2Chem® project. thyssenkrupp AG.  
<https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/content-page-162.html>

<sup>453</sup> Wood, T., Dundas, G., and Ha, J. (2020) Start with steel. Grattan Institute.

採三種路徑出口綠色鋼鐵與氫氣，以支援澳洲貿易夥伴對鋼鐵冶煉的需求，分別是：

- Pathway 1：以出口半成品鋼材為主，即鐵礦石在豎爐(shaft furnace)中加熱但未達熔化的階段時，注入還原劑氣體(reductant gases,  $H_2 + CO$ )生產直接還原鐵(DRI)，接續精煉與鑄造成半成品鋼材後再出口。
- Pathway 2：以出口直接還原鐵為主，各進口國再將其精煉成鋼。
- Pathway 3：以出口氫氣為主，即將澳洲產的氫氣運往各鋼鐵進口國，該國可使用氫氣冶煉。

這三種不同路徑的經濟效益高低，取決於需要鋼材等資源的國家，在當地生產時的工資以及在當地製造氫的成本而異。以 pathway 1 為例，如對於日本或韓國等工資相對較高的國家來說，從澳洲進口鋼材是同時具有經濟與減碳的效益。我國未來亦會趨向工資高，勞力缺的狀況。故前兩路徑都有可能。至於進口氫，則更是發電的重要選項。

#### 4.2.4 政策建議

各項創新技術的研發為鋼鐵業降低碳排帶來了新的契機，經由前述對各項鋼鐵業減碳措施的探討評估，嘗試歸納並建議我國鋼鐵業在 2050 年前可積極投入的減排方向以及可能面臨的挑戰，簡要分述如下：

在燃料使用上提升天然氣占比，或以碳中和天然氣或氫氣替代現有天然氣使用，是鋼鐵業者推動淨零排放的首要措施，如改用綠氫為替代燃料，減少碳排的成效將更為顯著。雖氫能燃燒渦輪技術要 2030 年後才成熟，但業者已評估在現有高爐的噴氫量操作上著手研發與測試，日後若改為全氫燃燒時，方能有足夠操作數值以供高爐重建參採。再加上高爐重建成本費用相當可觀，為使低碳轉型帶來的衝擊減少，事先的相關研發及實廠測試須即早啟動。

在創新製程上，因製程中的高爐煉鐵除了燃燒放熱外，也有還原作用，所以可考量以氫來作為還原劑，目前各鋼鐵大國已紛紛投入高爐氫能煉鋼及直接還原鐵等技術研發，我國產業亦密切關注且小規模測試中。另外，須考量進口還原鐵或半成品鋼材，亦須關注合成氣利用技術及 CCUS 技術的發展，以利適時導入。

最後，提升廢鋼回收再利用比例亦是具潛力的減碳措施，雖然電爐煉鋼製程須妥善處理電爐石/渣、集塵灰（含戴奧辛及鋅鉛等重金屬）等污染物，但以材料循環來促進鋼鐵再生的作法，不僅可抑制採礦階段可能造成的碳排，同時更可降低天然資源的消耗。

為因應氣候變遷，產業的淨零減碳勢在必行，透過製程技術的創新研發將可降低對鋼鐵業的衝擊，使其在推動減碳的同時亦能提升生產效率，讓零碳的鋼鐵產品帶動循環經濟模式，並形塑能源轉型的未來。

## 4.3 水泥業

### 摘要

水泥生產是屬於高碳排、高耗能的產業，水泥是混凝土的主要原料，主要用於建造住宅、學校、醫院及相關基礎設施中，水泥和混凝土在製造過程中產生的二氧化碳占全球碳排放量約 7%，隨著全球人口數量和都市發展不斷加速，基礎設施建設對於混凝土的需求不斷增加，預計全球水泥產量在 2050 年將增加 12% 至 23%。要在水泥製程中減少碳排放是很困難的一件事情，原因在於水泥製作過程中的化學反應與高溫煅燒中會不斷釋放出二氧化碳，使得水泥業的高耗能與環境永續發展相互矛盾。然而，追求 2050 年達到淨零排放已經是全球的共識，而我國水泥業者也參與全球水泥相關協會，共同承諾 2050 年水泥及混凝土要達到碳中和的願景目標，以下幾點是提供給水泥業為達減碳排放目標的政策建議。

1. 鼓勵水泥廠商可透過廠房改造將老舊設備更新為先進節能設備，也可直接建造新的廠房和使用新製程技術來提升能源使用效率。
2. 進行社會溝通並修改相關燃料限制法規，以生質能、廢棄物燃燒取代部分燃煤，可減少煤炭燃料的使用，也能減少天然資源的耗用，惟須同步進行空污改善。
3. 引進及研發替代原料與新型水泥。
4. 鼓勵水泥業積極投入碳捕捉、封存與再利用技術的發展，並且提供相關基礎設施協助廠區低碳電力來源的供應，如：天然氣、氫能、再生能源等。

### 4.3.1 前言

水泥業的主要製程可分為以下四個階段，礦石採掘、生料研磨、熟料燒成與水泥研磨，在水泥製程中主要的碳排放源是在熟料燒成階段，包含燃燒排碳與製程排碳<sup>454</sup>。根據 2019 年溫室氣體排放量的統計資料，水泥業的碳排放量約為 940

---

<sup>454</sup> 經濟部工業局(2017) 低碳綠色製程技術選用評估彙編。

萬公噸，在燃燒排碳的部分，主要是使用煤炭作為燃料在窯爐、旋轉爐燃燒提供熱，碳排放量為 335.6 萬公噸（排碳占比為 36%），而在熟料製程排碳的部分，水泥生料在高溫中進行煅燒，進而生成氧化鈣與二氧化碳，製程碳排放量為 550.8 萬公噸（排碳占比為 59%），其中有 90%以上的碳排放都是在生產熟料過程中造成的，如圖 4.3.1 所示<sup>455</sup>。透過上述水泥業製程與碳排放源的分析，可知水泥業是溫室氣體排放量較大的產業之一，為達到 2050 淨零排放的目標，水泥業應該聚焦在以下幾個面向進行轉型，包含替代燃料、替代原料與循環材料、設備節能技術與創新技術等<sup>456</sup>。

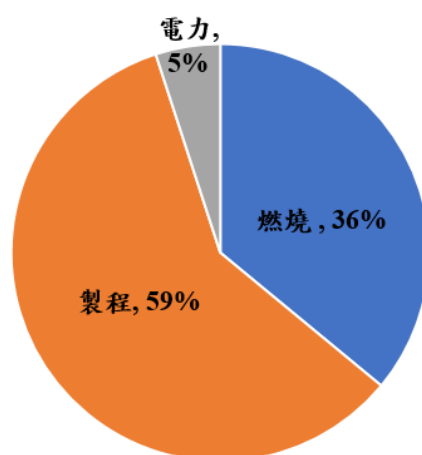


圖 4.3.1 水泥業排放來源比例圖

依據國際能源總署(IEA)的研究報告指出水泥業占全球二氧化碳排放量約 7%<sup>457</sup>，水泥業從採礦、輸送、煅燒、燃料每個製程階段都會產生二氧化碳，有 60%的碳排放是來自水泥生產使用的原物料分解，其餘 40%則來自於化學反應所需要的高溫能量<sup>458</sup>。而水泥是建築與基礎建設所需的必要材料之一，可預期開發中國家的持續建築需求和大規模的基礎建設，對於水泥的需求會顯著的逐年增加

<sup>455</sup> 經濟部能源局(2018) 2019 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。

<sup>456</sup> 國家發展委員會(2022) 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

<sup>457</sup> IEA (2018) Technology Roadmap-Low-Carbon Transition in the Cement Industry.  
<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.

<sup>458</sup> 周宜雄、周麗芳(2019) 認識水泥與水泥永續製造。

<sup>459</sup>。全球的水泥業者都承認水泥業的大量碳排放是造成氣候變遷加劇的關鍵因素。因此，水泥業要承諾達到 2050 淨零排放的目標，可從以下幾個面向進行減碳的評估。首先，可從製造面進行能源效率的提升，改善水泥熟料製程的配方，研發使用低碳燃料或導入綠氫產生製程所需的高溫；環境面上積極開發碳捕捉再利用的技術，研發前瞻負碳技術與生物固碳技術，透過循環經濟的概念將廢棄物導入水泥窯製程中；在經濟法規面，各國都在訂定碳關稅，政府宜研判減碳貿易所帶來水泥業的市場衝擊，並且提出國內法規修訂與未來與國際經貿談判的指引。

### 4.3.2 水泥業全球減碳趨勢

作為全球使用最為廣泛的建築材料，隨著經濟的成長，在過去 20 年來需求量上升了 2.4 倍，如今水泥業在每年生產了超過 40 億噸的水泥，然而該產品在製造過程中的化學反應以及熱燃燒皆需要大量的能源，也使其成為全球前三大二氧化碳排放工業<sup>460</sup>，其中中國是最大的水泥生產國，水泥產量占了全球的 55%，每年的二氧化碳排放量就有 12 億噸，其次則為印度，占比為 8%<sup>461</sup>。而在全球水泥需求的推估上，根據國際能源總署(IEA)在 2021 年發表的全球能源部門 2050 淨零排放路徑圖報告(Net zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector)中可知，雖然水泥需求會隨著經濟的發展導致需求增加，但因 2050 年全球經濟發展將會逐漸趨緩，因此國際上對於水泥的總體需求量大致與現今相當<sup>462</sup>，然而因水泥業在全球總碳排量仍占有極高比例，為了達到巴黎協定控制升溫 2°C 甚至是聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2018 年設定的升溫 1.5°C 願景，使得該產業承受極大的減碳壓力<sup>463</sup>。歐盟理事會在 2021 年 6 月通過歐洲氣候法，確立在未來 10 年內碳排放量的政策目標，根據碳邊境調整機制(CBAM)中的規定，水泥屬於碳密集型產品，若進口至

---

<sup>459</sup> 同前揭註 457。

<sup>460</sup> CDP (2018) Cement companies must more than double efforts to meet Paris climate goals

<sup>461</sup> US Geological Survey, Cement Statistics and Information

<sup>462</sup> 同前揭註 441。

<sup>463</sup> IPCC (2018) Global Warming of 1.5°C

歐盟市場必須購買憑證，須要申報進口產品的碳排放量<sup>464</sup>，2022 年 6 月歐洲議會批准 CBAM 預計在 2027 年開始實施<sup>465</sup>。

眾多的國際組織以及企業為了實現 2050 淨零排放目標，皆提出相關的推動策略。首先，世界企業永續發展委員會(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)提出了包含提高熱能與電能效率、燃料替代、熟料替代與創新技術四部分的低碳轉型技術途徑<sup>466</sup>；全球水泥及混凝土協會(Global Cement and Concrete Association, GCCA)則提出了六項推動策略減少化石燃料、使用再生能源、碳捕捉及利用技術、減少混凝土中熟料含量、混凝土回收再利用、以及計入混凝土回收利用與吸收二氧化碳的減碳量<sup>467</sup>；英國礦物產品協會(Mineral Products Association, MPA)甚至提出透過電力脫碳技術與先進製程、低碳水泥及混凝土、生質燃料與氫能、碳捕捉及封存技術等手段，超越淨零碳達到負碳排目標<sup>468</sup>；而歐洲水泥協會(CEMBUREAU)則提出透過降低生產、替換熟料、氫氣和電氣化、運輸碳中和、熱效率提升、碳捕捉及封存以及混凝土再炭化的方式來達到目標<sup>469</sup>。目前水泥業在減碳策略上，不僅在能源使用效率的改進、化石燃料取代、替代燃料比例、熟料替代、碳捕捉技術、發展低碳水泥等製程技術的改善著手，更是已經逐漸擴大到整個產品生命週期的減碳設計概念，包含生產、使用、拆除以及回收等概念的使用，甚至是希望透過混凝土再碳化以及建築物除熱能等技術的發展來達到淨零排放的目標。

---

<sup>464</sup> European Commission (2021) European Climate Law

<sup>465</sup> Climate Leadership Council (2022) European Parliament Passes CBAM.  
<https://clcouncil.org/blog/european-parliament-passes-cbam/>

<sup>466</sup> IEA(2018) Cement technology roadmap plots path to cutting CO<sub>2</sub> emissions 24%

<sup>467</sup> GCCA (2019) Concrete future Roadmap to netzero

<sup>468</sup> MPA (2019) MPA Cement Sustainable Development Report 2019

<sup>469</sup> CEMBUREAU (2020) Recarbonation - How concrete locks up and stores carbon dioxide – permanently

### 4.3.3 水泥業減碳選項分析與創新案例

水泥在生產過程中，熟料生產 1 公噸須要耗熱 3,140 MJ 與耗電 92 kWh（以台灣水泥公司為例），對於排放二氧化碳都有直接的關係<sup>470</sup>。根據國際能源總署制訂水泥技術路徑圖，以實現 2050 年全球二氧化碳減半的目標<sup>471</sup>，對水泥業提出以下策略來減少二氧化碳的排放，(1)提升熱能與能源效率，(2)使用替代燃料與廢棄物，(3)替代原料與新型水泥，(4)大規模的碳捕捉、再利用與封存。

#### 1. 減碳選項分析

##### (1) 提升熱能與電能效率

對於新建的水泥廠可採用最新的工業製程技術，加強整體能源耗損的優化與設備的維護，而對於水泥舊廠在多元可行性評估下進行節能設備的改造，例如加裝餘熱發電系統、變頻調控設備、智慧化電源管理系統等。而研發流體化床技術產生更高的熱能效益、新型粉磨設備與助磨劑以降低研磨機的電能消耗、提升旋窯的能源效率都是水泥製程中可降低二氧化碳排放的重要可行路徑。

##### (2) 使用替代燃料與廢棄物

水泥業主要是使用煤炭、石油焦、燃料油等其他化石燃料作為提供水泥窯熱源的燃料，欲取代生產中所使用的燃料，此類物質必須有高熱值方可提供高溫例如：廢棄物的熱值可達 2,000 kcal/kg、半導體產業常使用的異丙醇、光阻液等，汽車業的廢棄輪胎，其燃燒熱值可達 8,970 kcal/kg<sup>472</sup>。另外，也可使用綠氫、天然氣、生質能、再生能源來取代目前水泥製程中的煤炭燃料，在改善製程中可使用低碳電力，可大幅降低溫室氣體的排放。另外，可使用純氧氣燃燒法在水泥窯中使用氧氣代替空氣，將可產生相對乾淨的二氧化碳，有利於碳捕捉後的再利用的前置處理。

---

<sup>470</sup> 劉毅弘、潘子欽(2021)。台灣水泥業單位產品能源使用分析。燃燒季刊，114，61-74。

<sup>471</sup> 同前揭註 441。

<sup>472</sup> 鄭為珊、丁俊元、陳建緯(2018)。循環經濟的發展與應用—水泥篇。科學月刊，543，21-29。

### (3) 替代原料與新型水泥

一般水泥成分主要是由氧化鈣、氧化矽、氧化鋁和氧化鐵所組成，分別取自於大理石、黏土、矽礦與鐵礦砂等原料，因此只要含有鈣、矽、鋁、鐵元素的廢棄物都可成為水泥的替代原料，可積極尋求各種水泥替代原料以落實循環經濟，降低水泥生產過程天然資源的使用。以含鈣元素的廢棄物為例，如高爐石、脫硫渣、還原渣，石材切割泥等；而含有矽的廢棄物如廢鑄砂、淨水污泥、半導體廠的研磨污泥；含有鋁的廢棄物如化工廠廢氣濾料、電廠底灰等；而含有鐵的廢棄物如銹屑、鐵渣等。

熟料是水泥的主要成分，在與石膏混合研磨後，加水反應可逐漸硬化，然而有些礦物組成與熟料相似，例如從鋼鐵業細高爐的爐渣，火力發電廠產生的煤灰（廢渣）、天然火山灰材料等。因此，可研發新膠結材料配方以降低排碳強度，透過添加多種礦物（爐石、飛灰等）以降低熟料的使用，例如石灰石煅燒粘土膠結物（LC3 水泥）的熟料成分僅占 50%，可減少生產熟料量。這些材料可以部分替代水泥中的熟料<sup>473</sup>，因此可減少熟料的使用，減少與熟料生產相關的程序、燃料和電能等，減少二氧化碳排放。在混凝土的減碳策略中可透過預鑄工法提前在廠區內完成構件，提升水泥使用效率，另外，預拌混凝土的再碳化也可以持續自然吸收約 20%製程所排放的二氧化碳總量。由於氯離子會加速混凝土中鋼筋的腐蝕作用，會造成混凝土材料發生膨脹或剝落而增加鋼筋暴露之程度，將危及結構物的耐久性與安全性。因此，根據 CNS 61 卜特蘭水泥標準，針對水泥中氯離子的含量在 2022 年已進行法規修訂，由原本的 200 ppm 放寬至 240 ppm，相較於日本(350 ppm)和歐洲(600~1000 ppm)的標準仍然是最嚴格的<sup>474</sup>；另外，根據 CNS 3090 預拌混凝土中的規定，新拌混凝土的水溶性氯離子含量不得高於 0.15 kg/m<sup>3</sup><sup>475</sup>。然而，可以預期未來將使用更多的工業廢棄物透過循環再利用的概念進行生產替代水泥與新型混凝土，對於氯離子標準後續勢必須要再放寬。

<sup>473</sup> Fennell, P.S, Davis, S.J., & Mohammed, A. (2021). Decarbonizing cement production, *Joule*, 5, 1305-1311.

<sup>474</sup> 經濟部標準檢驗局(2022) 國家標準 CNS 61 「卜特蘭水泥」之簡介。

<sup>475</sup> 內政部營建署(2016) 施工中建築物混凝土氯離子含量檢測實施要點。

#### (4) 大規模的碳捕獲、再利用與封存

透過碳捕獲、再利用與封存是目前全球認為有助於減少溫室氣體排放至大氣層的新興技術，而針對水泥業所對應適合的二氧化碳捕獲技術如下，後燃燒捕獲技術是屬於製程末端的碳捕獲措施，在水泥熟料製程中不會有太大變動，較適合用於水泥爐窯的改良及新建爐窯，相關技術包含化學吸附法、薄膜技術、鈣循環（碳酸鹽迴圈）、礦石吸附等。捕獲後的再利用可透過創新技術將二氧化碳轉化為有價值的化學原料，例如直接利用二氧化碳使用在食品和飲料工業、二氧化碳轉化為化學品與生質燃料等<sup>476</sup>。

## 2. 創新案例

- (1) 墨西哥 Cemex 開發出全球第一個碳中和預拌混凝土，最多可減少 70%的碳足跡，而剩餘的 30%則使用碳抵銷的手段<sup>477</sup>。無機聚合材料(Geopolymer)，可在室溫下利用鹼性配方液溶出礦物或廢棄物表面之矽、鋁離子，經聚合、脫水、硬化後形成 Si-O-Al 之三維結構<sup>478</sup>，鍵結以共價鍵為主，且聚合過程中不會排放出二氧化碳，因此具減碳效益。
- (2) 加拿大 Carboncure Technologies 開發創新的二氧化碳固碳技術，將捕捉的二氧化碳注入混凝土中，二氧化碳會跟水泥中的鈣離子發生化學反應，形成奈米級的碳酸鈣，然後嵌入混凝土中，可使混凝土更加堅固，也同時實現封存二氧化碳，目前已經可應用在預混料、預製混凝土與砌作水泥等產品中<sup>479</sup>。
- (3) 日本三菱投資開發可吸收二氧化碳的混凝土(CO<sub>2</sub>-SUICOM)<sup>480</sup>，透過外加劑及二氧化碳固化方法，可應用於煉鋼廠、發電廠及水泥廠等製程（例如煤灰

---

<sup>476</sup> 林海珍(2019) 碳捕捉、封存及再利用之國際產業與政策趨勢。科技政策觀點，國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心。

<sup>477</sup> CEMEX (2021) Integrated Report, Mexico.

<sup>478</sup> 鄭大偉(2020) 無機聚合材料與鹼激發材料有何不同。土木水利，47，10-12。

<sup>479</sup> Carboncure Technologies (2021, Decmber 2) Carbon Removal with CarbonCure Concrete: A Permanent Storage Solution. <https://www.carboncure.com/carbon-removal/carbon-removal-with-carboncure-concrete-a-permanent-solution/>

<sup>480</sup> Higuchi, T., Morioka, M., Yoshioka, I., & Yokozeki, K. (2014) Development of a new ecological concrete with CO<sub>2</sub> emissions below zero. Construction and Building Materials, 67, 338-343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.029>

和高爐礦渣)來吸收二氧化碳。

- (4) 美國加州大學洛杉磯分校研究團隊(Carbon Built)開發一種新的水泥配方，配方中引入矽酸鹽，大幅減少對卜特蘭水泥的需求，而增加煤灰等廢料的使用。在固化過程中，二氧化碳從煙道氣流（例如在發電廠或水泥廠）直接注入混凝土混合物中，然後在混合物中進行化學轉化並永久儲存溫室氣體。研究結果顯示，透過固化技術將二氧化碳嵌入混凝土中，可減少混凝土的碳足跡至少 50%以上，而且可生產出與傳統製程一樣堅固的混凝土材料<sup>481</sup>。Carbon Built 團隊在 2021 年 4 月獲得 NRG COSIA Carbon XPRIZE 競賽優勝。
- (5) Solidia 的混凝土製程技術可使水泥生產中的二氧化碳排放量減少 30-40%，再加上混凝土的固碳過程中再捕獲 240 公斤二氧化碳，合計相當於水泥質量的 24%，使得 Solidia 的系統可以將水泥和混凝土的碳足跡最高減少 70%<sup>482</sup>。以下是從水泥製程到混凝土製程技術的說明：(A)在水泥製造技術使用較少的石灰石與較低的窯爐燃燒溫度生產，可有效的減少碳排；(B)在 Solidia 混凝土固化技術，透過混合水泥、聚合體、沙子、水形成混合物，並與二氧化碳反應形成耐用的基體。固化過程中每 1 噸的水泥可捕獲 300 公斤的二氧化碳，並使其永久轉化為碳酸鈣。
- (6) 歐盟 Horizon 2020 支持低碳排放石灰與水泥計畫(LEILAC)，海德堡水泥公司與澳大利亞技術供應商 Calix 聯手開發了一種突破性的煅燒爐，可以直接分離和捕獲石灰石轉化為熟料時釋放的二氧化碳<sup>483</sup>。此煅燒爐無須使用化學藥品，也不須要對目前的水泥工廠進行任何改建，煅燒爐設備僅代替水泥廠中的預熱塔或石灰廠中的石灰窯。新型煅燒爐使用直接分離反應器概念進行間接加熱，煅燒熱量不會直接與石灰石接觸，而是透過超高強度鋼的熱表面

---

<sup>481</sup> Prentice, D., Mehdipour, I., Falzone, G., Raab, S., Simonetti, D. & Sant, G. (2022, February 2) Field Demonstration of the Reversa™ Mineral Carbonation Process Using Coal and Natural Gas Flue Gas Streams. REWAS 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles.

<sup>482</sup> Meyer, V., Sahu, S., & Dunster, A. (2019, June 24-26) Properties of Solidia Cement and Concrete, ILCCC, London, UK.

<sup>483</sup> Hills, T.P., Sceats, M., Rennie, D., & Fennell, P. (2017) LEILAC: Low Cost CO<sub>2</sub> Capture for the Cement and Lime Industries, Energy Procedia, 114, 6166-6170.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1753>

間接引入 1,050°C或更高溫度的熱能，由於無須與其他燃燒氣體混合，所以捕捉到的二氧化碳濃度可達 95%。未來煅燒爐中加熱器可使用任何形式的燃料或熱源，如生質燃料、電力、氫能等。

#### 4.3.4 政策建議

水泥業中的二氧化碳主要排放源在於燃料、製程以及運輸過程中的碳排放，大部分的減碳措施會集中在提高能源使用效率與發展低碳替代燃料。由於在水泥製程中，透過化學反應產生熟料階段也會產生二氧化碳副產物。因此，發展替代熟料的新型水泥以及碳捕捉技術也是重要的減碳手段。在提升能源使用效率部分，我國與他國大多是利用建設新廠並使用新製程技術或進行節能設備的改造來減少碳排放量（請參見附錄 4B）。而在燃料替代部分，國外水泥業者常採用如天然氣、廢棄物燃料、太陽能直接加熱等的燃料替代方案，甚至提出使用綠氫的概念，但由於我國水泥廠大多位於東部，因此若要採用這些方案則須個別解決相關問題，例如在使用天然氣為燃料時，將須克服東部天然氣基礎設施不足問題；而使用廢棄物燃料也有空氣污染以及廢棄物輸送至東部的疑慮。而在未來大量的再生能源系統布建下，有部分燃料替代方案可考量將相關設備直接轉型為電氣化設備，並積極進行社會溝通及修改相關法規，以生質能或廢棄物燃燒取代部分燃煤，並同步進行當地的空污改善。而在熟料替代部分，則可透過爐渣或替代原料開發新型水泥製品，才有助於減少碳排放。目前我國對於水泥與混凝土有著氯離子含量的標準限制，在使用爐渣作為替代原料時將可能因為氯含量以及金屬含量的增加而使得產品無法通過標準，此外作為替代材料的爐渣因雜質過多須再處理的過程是否會因此增加碳排，須要更深入的研究。國際上認為能夠大幅減碳的碳捕捉及封存技術，是我國技術研發投入較少的項目。目前碳捕獲的技術現況可使用吸附與固化方式，將捕捉率由 20%提升至 90%以上；而預期在 2050 年前將可使用直接分離法、低溫製程的技術來提升碳捕捉的效率（詳見本建議書章節 3.3），其中相較於碳捕捉技術具有示範場域，而碳封存技術則受限於封存場地與經費，個別廠商是無法發展的，須要透過國家力量投入並結合民間力量方有機會成功的推動。

## 4.4 石化業

### 摘要

石化業在我國製造業中的總排碳居首，並以化學原料與化學製品業及油氣煉製加工業為主要的排碳來源，主因為依賴化石燃料燃燒供熱進行高溫、高耗能製程，並以原油作為原料往下游產製輕油、大宗石化原料與塑膠製品，加上使用電力仍多為化石燃料來源。因此石化業將是我國達 2050 淨零排放目標時應強化減排的關鍵產業，相關建議如下：

1. 儘速投入發展替代燃料（如生質能、綠氫）、替代原料技術（生質來源塑膠、材料循環技術等）以及蒸汽裂解裝置電氣化等，並透過國際合作取得石化業蒸汽裂解裝置電氣化與綠氫相關技術，使其於 2030 年至 2050 年之間逐漸普及。
2. 開發創新製程技術提升產率達成減碳的效果（2030 年以前輕油催化裂解、提升觸媒轉化率等技術，2030 年至 2050 年發展輕烯烴生產技術）。
3. 持續推動石化業產業轉型並提供轉型設備的投資誘因，如提供稅收抵減、補助、補貼、獎勵或透過綠色金融相關投融資工具之協助等。
4. 儘速啟動有關研發去碳燃氫技術（包括裂解去碳、碳再利用），並在 2030 年至 2050 年之間持續研發去碳燃氫技術使之成熟並降低成本，詳見 2.6 去碳燃氫章節。

### 4.4.1 前言

石化業在我國製造業中的總排碳居首，從 2019 年我國前 20 大排放企業（排除電力產業）中，石化業占了其中的 7 家<sup>484</sup>。2019 年石化業的溫室氣體排放達到 40.2 Mt CO<sub>2</sub>eq<sup>485,486</sup>，約占製造部門排放量 26.9%（其中，電力使用占石化業

<sup>484</sup> 行政院環境保護署國家溫室氣體登錄平台(2021) 溫室氣體排放量申報暨盤查登錄資料。  
[https://ghgregistry.epa.gov.tw/ghg\\_rwd/Main/Examine/Examine\\_2](https://ghgregistry.epa.gov.tw/ghg_rwd/Main/Examine/Examine_2)

<sup>485</sup> 同前揭註 430。

<sup>486</sup> 經濟部工業局(2021) 水泥業淨零排放策略及路徑。行政院低碳產業工作圈（水泥業）討論

排放約 7 成，燃料約占 2 成<sup>487</sup>，製程則為其餘不到 1 成)(圖 4.4.1)。若檢視目前燃料燃燒的主要排碳，則是以鍋爐燃油為主<sup>488</sup>。

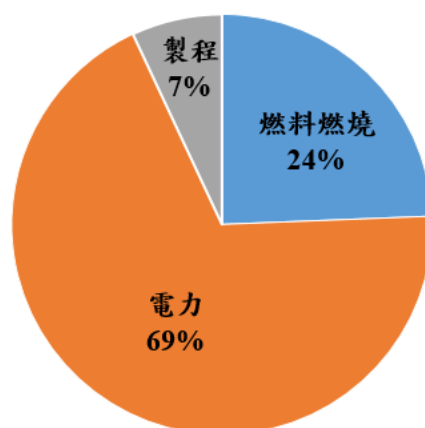


圖 4.4.1 石化業排放來源比例圖<sup>489</sup>

進一步從國際分析數據來檢視石化產業鏈(附錄 4C)中的溫室排放量比例，油氣開採業占 9.61%、油氣煉製加工業占 19.99%、化學原料與化學製品業占 59.02%，以及化工製品業占 11.38%<sup>490</sup>。以化學原料與化學製品業與油氣煉製加工業為主要的排碳來源產業別。油氣煉製加工業的主要排放源，是來自於汽電共生的電力、流化催化裂化、甲烷蒸汽重組器、原油常壓蒸餾、真空蒸餾與輕油裂解爐<sup>491</sup>(如表 4.4.1)。

會議簡報(2021 年 5 月)(資料未公開)。

<sup>487</sup> 目前排放範疇未包含上游煉油業，故會低估燃料燃燒排碳。

<sup>488</sup> 台灣產業服務基金會(2020) 產業綠色技術提升計畫(3/4)。

<https://www.moeaidb.gov.tw/ctrlr?PRO=filepath.DownloadFile&f=executive&t=f&id=15530>。

<sup>489</sup> 同前揭註 430。

<sup>490</sup> World Resources Institute (2015) 石化行業溫室氣體排放資料管理及核查關鍵技術研究。

<https://wri.org.cn/research/study-key-technologies-greenhouse-gas-emissions-data-management-and-verification>

<sup>491</sup> Concawe (2018) Concawe review. [https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Concawe-Review-27-1\\_webfile.pdf](https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Concawe-Review-27-1_webfile.pdf)

表 4.4.1 油氣煉製加工業內的主要排放源<sup>492</sup>

| 主要排放程序  | 主要排放程序（英文）                         | 作用                                         |
|---------|------------------------------------|--------------------------------------------|
| 電力      | Combined Heat and Power Plant, CHP | 汽電共生                                       |
| 流化催化裂化  | Fluid Catalytic Cracker, FCC       | 進一步轉化高分子量烴類為汽油等                            |
| 甲烷蒸汽重組器 | Steam Methane Reformer, SMR        | 產氫                                         |
| 原油常壓蒸餾  | Crude Distillation Unit, CDU       | 取出不同沸點油品                                   |
| 真空蒸餾    | Vacuum Distillation Unit, VDU      | 取出不同沸點油品                                   |
| 輕油裂解爐   | Heat pyrolysis furnaces            | 燃料燃燒產生高溫蒸汽，裂解生產乙烯，同時會產生氫氣跟甲烷(但可再送至裂解爐供熱之用) |

化學原料與化學製品業因為是從石化原料生產出各種不同化學品或是原料，因產品之生產關聯複雜，較難拆解碳排主要來源，而且排碳來源也會因生產的化學品種類而有不同。歐盟以主要塑膠原料來檢視整個產業生命週期之排碳，絕大多數排碳是在製造階段產生（從煉油至化學品階段），其次是轉換階段（化學品至塑膠產品階段），最後才是棄置或回收階段<sup>493</sup>。

至於將塑膠進一步轉換為最終製品上，有各種不同成型技術，包括射出成型(injection mould processing)、吹氣成型(blow mould processing)、拉伸中空成型(stretch blow moulding)、壓延成型—硬片(calendering, rigid sheets)、塑料薄膜的擠製(extrusion of plastic film)、塑料管材的擠製(extrusion of plastic pipes)、聚合物發泡加工(polymer foaming processing)熱成型壓延(thermoforming with calendering)等（表 4.4.2），可以看到依照歐盟數據分析，這些成型技術的排放主要為電力的使用。

<sup>492</sup> 同前揭註 491。

<sup>493</sup> Dils, E. (2021) Greenhouse gas emissions and natural capital implications of plastics (including biobased plastics). ETC/WMGE Report 3/2021, European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/greenhouse-gas-emissions-and-natural-capital-implications-of-plastics-including-biobased-plastics>

表 4.4.2 塑膠轉換成型技術與溫氣氣體排放來源<sup>494</sup>

| Conversion technology and key contributing processes                                                                                                                                             | Greenhouse gas emissions<br>(kg CO <sub>2</sub> e/kg product) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Injection mould processing (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)<br>Heat, district or industrial, natural gas (Europe excluding Switzerland)                                   | <b>0,962</b><br>0.620(64%)<br>0.220 (23%)                     |
| <b>Blow mould processing (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)<br>Solid bleached board                                                                                            | <b>0.917</b><br>0.720 (78%)<br>0.120 (13%)                    |
| <b>Stretch blow moulding (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)                                                                                                                    | <b>1.140</b><br>1.060 (93%)                                   |
| <b>Calendering, rigid sheets (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)<br>Steam, in chemical industry (Europe)                                                                        | <b>0.322</b><br>0.210 (66%)<br>0.070 (21%)                    |
| <b>Extrusion of plastic film (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)<br>Heat, district or industrial, natural gas (Europe excluding Switzerland)<br>Waste plastic, mixture (Europe) | <b>0.416</b><br>0.280 (67%)<br>0.030 (8%)<br>0.030 (8%)       |
| <b>Extrusion of plastic pipes (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)<br>Heat, district or industrial, other than natural gas (Europe)                                              | <b>0.294</b><br>0.210<br>0.050                                |
| <b>Polymer foaming processing (RER)</b><br>Electricity, medium voltage (RER)<br>Heat, district or industrial, other than natural gas (Europe)                                                    | <b>0.513</b><br>0.330 (64%)<br>0.180(36%)                     |
| <b>Thermoforming with calendering (Europe)</b><br>Electricity, medium voltage (Europe)                                                                                                           | <b>0.642</b><br>0.420 (66%)                                   |

綜整前述分析，石化業淨零排放轉型主要面臨幾項困境：

#### 1. 石化業製程大幅依賴化石燃料及化石燃料之電力

目前石化業之上游煉化業多依賴燃燒供熱進行高溫、高耗能製程，例如煉油時使用之蒸汽裂解裝置(用於生產大多化學品組成的乙烯、丙烯和 BTX 芳香烴)以及其他大型裝置的運作溫度接近 1,000°C，會損耗相當比例化石燃料並產生大量碳排。若能夠供應適合且充足的無碳燃料，或是將現有能源密集型的熱化學途徑與製程進行替代或改善，對於順利達成淨零排放轉型將有較大助益，但燃料轉

<sup>494</sup> 同前揭註 493。

換調整使對應之生產製程設備亦須要同步置換。但因石化業上游設備多半為大型、昂貴且長生命週期資產，若要使其提前退役，會產生鉅額懲罰成本，也會讓廠商在短期進行設備轉換誘因較低。

因石化業在上游煉油業傳統多依賴台灣電力公司供應電力與廠區自行投入之汽電共生電力，且中下游製程中多半須要電力透過各種成型技術製成塑膠產品，但因目前電力生產仍以化石燃料來源為主，故此部分碳排若要有效降低，仍須要提升產業整體使用無碳電力之比例。

## 2. 石化業原料仰賴化石燃料之原油

石化產業現有生產過程主要依賴原油為原料，再往下游產製輕油、生產大宗石化原料與最終製成塑膠製品。碳源雖然被留在製品中，但製造過程中常需高溫高壓的反應條件，且產品消費使用後進行焚燒時，仍會有大量碳排釋放到空氣中，故需要有低碳或無碳的原材料替代傳統石化原材料來源，方能對於降低碳排有所助益。

## 3. 石化產業為我國主要出口產業，產業減碳轉型不易

就我國 2021 年油品供給(自產)中，極高比例(63%)為生產運輸相關油品(車用汽油、柴油、燃料油、航空燃油)<sup>495</sup>且為上游煉油業主要營收來源(圖 4.4.2)，而在 2050 淨零排放趨勢下輕型載運具將朝向大部分電動化之下(圖 4.4.3)，對於油品的相關需求可能銳減，雖然有利整體邁向淨零排放目標，但因此亦可能影響上游煉油產業的營收與就業機會之穩定。

---

<sup>495</sup> 經濟部能源局(2021) 能源統計手冊(個別能源)。3-08 石油產品供給報表下載。  
[https://www.esist.org.tw/upload/3-08.%E7%9F%B3%E6%B2%B9%E7%94%A2%E5%93%81%E4%BE%9B%E7%B5%A6\(110\).xlsx](https://www.esist.org.tw/upload/3-08.%E7%9F%B3%E6%B2%B9%E7%94%A2%E5%93%81%E4%BE%9B%E7%B5%A6(110).xlsx)

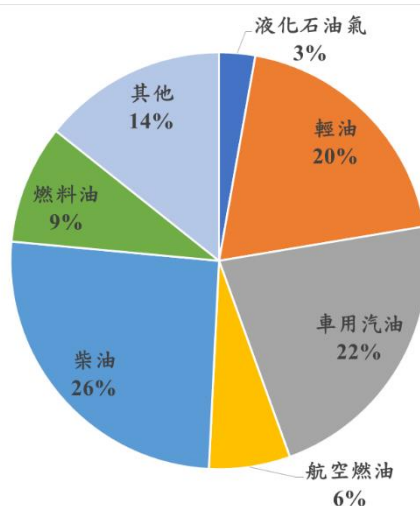


圖 4.4.2 我國 2021 年石油產品生產量比率（自產）<sup>496</sup>

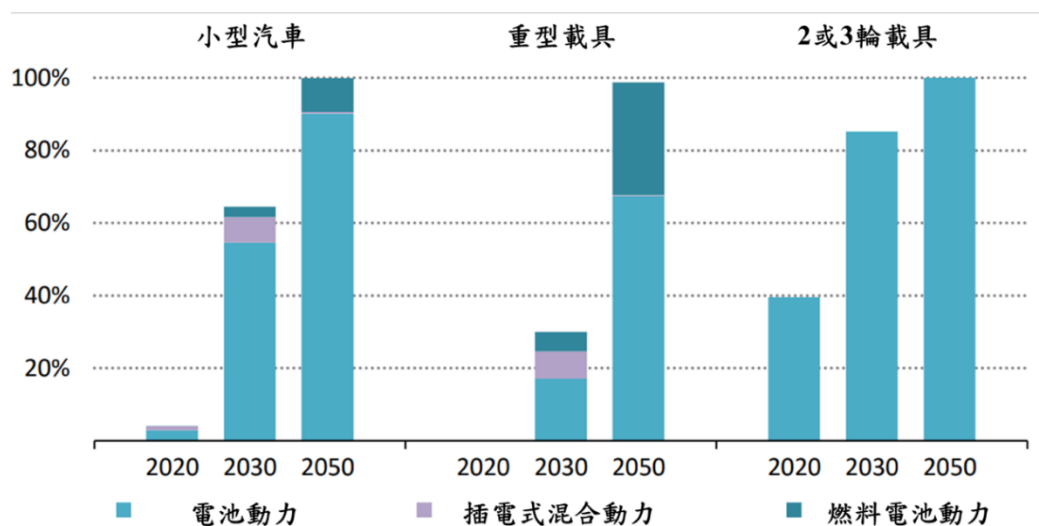


圖 4.4.3 2050 淨零排放下不同類型載具銷售的占比推估<sup>497</sup>

石化業油品供給中一項主要產品為輕油(naphtha)(20%)，生產的主要目的是為提供中游生產的原料(種類與比例如圖 4.4.4)。檢視石化原料的產銷狀況，2020 年全年國內主要石化原料生產量 2,780 萬公噸(27.8 Mt)，出口量為 1,055 萬公噸(10.55 Mt)，進口量 474 萬公噸(4.74 Mt)，出口量占生產量之 38%，亦即超過 3 成

<sup>496</sup> 同前揭註 495。

<sup>497</sup> 同前揭註 441。

以上的石化原料是供作出口用途<sup>498</sup>，而此部分也是整體產業鏈中，溫室氣體排放最高的區塊（化學原料與化學製品業占 59.02%）。因此，若產業能夠降低以出口導向之傳統石化原料生產，朝向低碳高價值化產業方向轉型，以維持基本需求的石化原料自給自足為目標，對於達成我國淨零排放轉型將有相當大比例之助益，但過程須要透過配套降低對產業就業的影響與衝擊。此外，石化業有經濟規模之特性，即成本效益與產量大小高度相關，降低產量恐無法維持經濟效益，此為一大挑戰。近年來倡議之直接裂解原油產製化學品(Crude Oil to Chemicals, COTC)為一可能的解方選項，將討論於後。

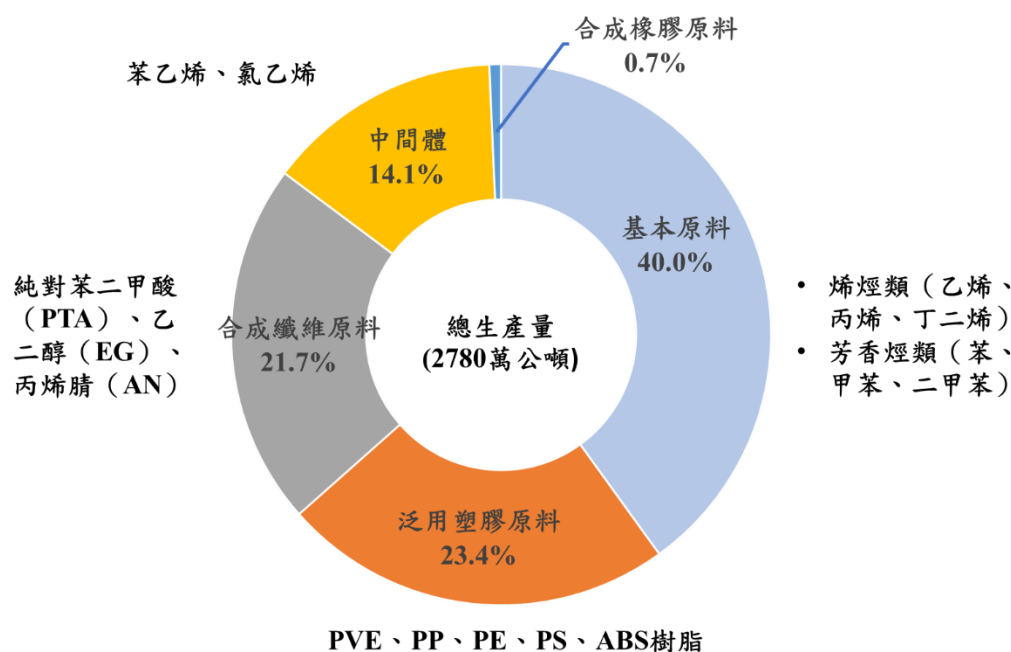


圖 4.4.4 2020 年我國主要石化原料生產量結構<sup>499</sup>

#### 4.4.2 石化業全球減碳趨勢

彙整國際智庫報告的觀點（圖 4.4.5），在 2030 年以前，全球多使用現有的技術進行減碳，例如減少對初級化學品的需求（如：回收和再利用塑料、有效地

<sup>498</sup> 行政院主計總處(2021) 行政院主計總處國情統計通報(2021)。2021 年 4 月第 064 號。  
<https://www1.stat.gov.tw/public/Data/1412165523KIDMI9KP.pdf>

<sup>499</sup> 同前揭註 498。

利用氮肥)、提高資源與能源效率等；估計在 2030 年以後，會多使用創新技術進行減碳創新製程（如：電氣化生產）、使用廢棄物或生質原物料（植物脂肪、糖、木質素、澱粉、玉米或藻類）及以綠電電解產製之氫做為原料或材料，甚至是應用二氧化碳捕獲、再利用與封存技術來減少碳排<sup>500,501</sup>。

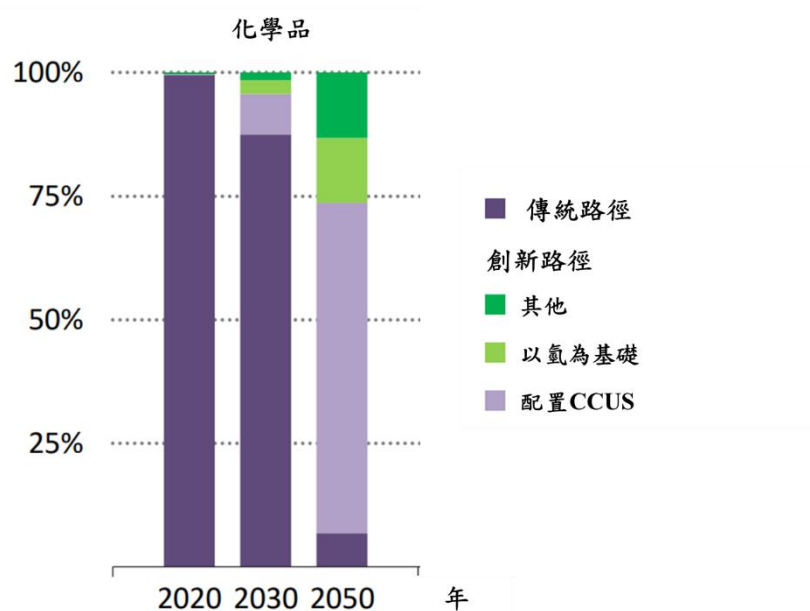


圖 4.4.5 可提供化學品減碳貢獻的中長期減碳選項類型<sup>502</sup>

此外，塑膠產品中化石來源的碳也預期將逐漸被可再生碳取代（圖 4.4.6）。以 2018 年原生的塑膠產量為 3 億 6,400 萬噸(364 Mt)，回收利用僅有 3,600 萬噸(36 Mt)；智庫報告則是預估 2050 年全球塑膠需求將達 12 億噸(1,200 Mt)，其中 7 億 5 千萬噸(750 Mt)來自回收利用，僅 4 億 5 千萬噸(450 Mt)為原生塑膠生產，並且其中部分會來自可再生的碳（生物質/ CO<sub>2</sub> 循環利用生產）<sup>503</sup>，因此實際化石來源的碳可以大幅降低。

<sup>500</sup> 同前揭註 441。

<sup>501</sup> 勤業眾信(2021) 2030 減碳展望：石油、燃氣與化學產業。  
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/tw/Documents/energy-resources/rp2030-carbon-reduction-outlook.pdf>

<sup>502</sup> 同前揭註 441。

<sup>503</sup> nova-Institut GmbH (2020) The future of the chemical and plastics industry: Renewable Carbon.  
<https://renewable-carbon.eu/news/the-future-of-the-chemical-and-plastics-industry-renewable-carbon/>

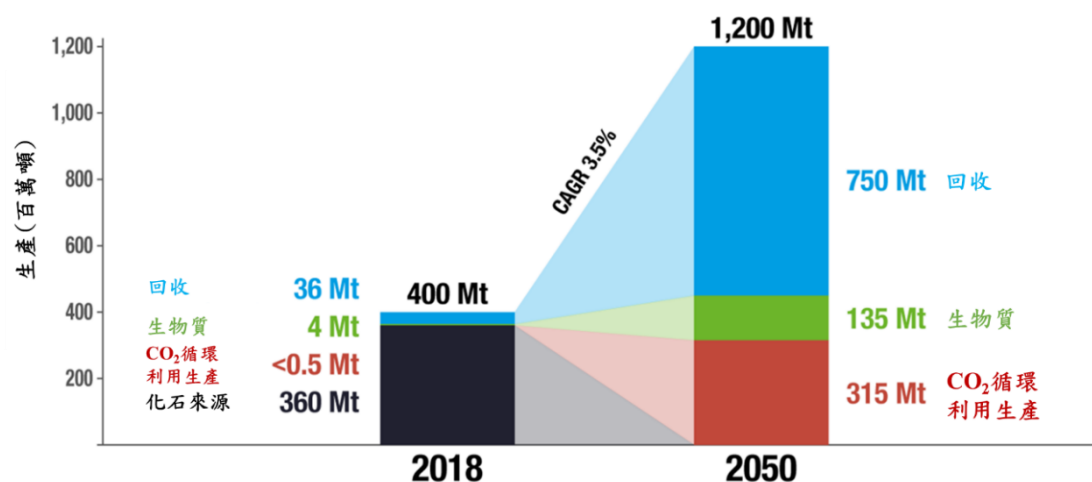


圖 4.4.6 2050 年世界塑膠生產與碳原料推估<sup>504</sup>

### 4.4.3 石化業減碳選項分析與創新案例

#### 1. 減碳選項分析

彙總國際相關報告內容，歸納石化業減碳選項大致可區分為七大面向（圖 4.4.7）：替代燃料、替代原料、創新製程、效能提升、材料循環、去碳技術與其他創新<sup>505,506,507</sup>。



圖 4.4.7 石化業減碳選項類型

<sup>504</sup> 同前揭註 503。

<sup>505</sup> 同前揭註 439。

<sup>506</sup> Saygin, D., & Gielen, D. (2021). Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector. *Energies*, 14(13), 3772. <https://doi.org/10.3390/en14133772>

<sup>507</sup> 同前揭註 501。

### (1) 替代燃料<sup>508</sup>

- A. 氫做為燃料：以再生能源供應電解氫作為燃料，亦可以用生產的綠氫進一步生產甲醇或產氨；產氨部分，澳洲規劃了兩個 60~160 MW 電解槽之中型示範計畫（德國、英國與美國皆有規劃）；產甲醇部分則是有冰島 George Olah (4 kt/y) 甲醇先導工廠利用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)廢棄氣體用於甲醇製造。
- B. 透過生質氣化產生的氣態燃料。
- C. 製程所需熱源以電氣化進行取代：例如德國 BASF 使用甲烷無氧裂解生產氫技術（去碳燃氫），正在先期先導工廠中透過電加熱甲烷生產氫氣和固體碳的方法進行測試，目標是到 2030 年建設完成工業規模工廠。

### (2) 替代原料<sup>509</sup>

- A. 使用合成碳氫化合物進料，主要透過再生能源電解並在催化劑下利用碳源合成碳氫化合物原料，替代初級石化產品（以熱化學和電化學製程）。
- B. 利用生質原料產生塑膠、甲醇、乙醇以及氨等。例如乙醇脫水產製乙烯，有巴西的 Braskem plant (0.2 Mt/y)與印度的 India Glycols plant (0.175 Mt/y)。
- C. 使用生物性製程（應用替代性生物性製程生產替代性單體），例如以木質素進行 BTX 生產，已有荷蘭利用 BioBTX technology 成功進行試量產；2018 年比利時與德國共六個夥伴的 ALIGN project 也已經將三項木質素萃取製程放大規模。
- D. 其他原料替代：例如利用甲醇產製烯烴類或 BTX，以中國在 2013 年有三個 BTX 示範工廠投產，多個商業規模的示範項目正在發展中。

### (3) 創新製程

包括蒸汽裂解裝置電氣化【詳見後述 2.創新案例(1)】、甲烷氧化耦合技術生

---

<sup>508</sup> 同前揭註 439。

<sup>509</sup> 同前揭註 439。

產乙/丙烯【詳見後述 2.創新案例(2)】、輕烯烴生產技術【合成氣直接轉製輕烯烴【詳見後述 2.創新案例(3)】以及電化學轉換製程【詳見後述 2.創新案例(4)】。此外，由日本千代田化工建設公司(Chiyoda Corporation)開發的輕油催化裂解(naphtha catalytic cracking)製程，與傳統熱分解製程相比，可讓丙烯產收率提高至 2 倍，並在綜合能源效率上達到 88%，相較傳統製程僅為 73%，可節省 15%的能源<sup>510,511</sup>。同時，將輕油進行催化裂解的第一家商業工廠（產能 40 kt/y）則是由位於韓國的 KBR 工廠運行中<sup>512</sup>。

#### (4) 效能提升<sup>513</sup>

這部分包括能效技術改造、全系統效率措施例如機電系統和製程熱級聯(cascading)或熱整合，以及實施新節能製程技術。未來可以朝擴散能效最佳實務方向努力，並可以透過與 ICT、感測器結合，運用人工智慧與大數據配合方式作為效能提升的創新手段。

#### (5) 材料循環

主要是可以朝向循環經濟方向前進，透過減少對初級化學品需求（回收再利用塑膠、有效利用氮肥）以及建構化學品與熱回收循環系統（產業內，或與其他產業合作，或將焚化後的高度能量回收）。例如透過回收塑料（機械性回收/化學性回收）可降低與乙烯相關的廢棄物碳排，與減少對原生乙烯生產的需求。但利用化學回收將塑料重新變成類似原本品質之單體，目前僅適用於特定的聚合物（例如尼龍）。使用無氧裂解塑料廢料作為蒸汽裂解裝置的原料仍在應用研究階段。此外，也可以透過延長終端產品的生命週期，使其變得更耐久並降低供應鏈中材料的損耗，來提升材料的使用效率而減少對原生材料的需求<sup>514,515</sup>。

---

<sup>510</sup> 材料世界網(2020) 新開發輕油催化裂解製程，丙烯產收率倍增、省能源 15%。  
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=43934>

<sup>511</sup> NEDO (2019) 高付加価値オレフィン製造プロセスの開発。千代田化工建設株式会社。  
<https://www.nedo.go.jp/content/100890969.pdf>

<sup>512</sup> 同前揭註 439。

<sup>513</sup> 同前揭註 439。

<sup>514</sup> IEA (2018) The future of petrochemicals:towards more sustainable plastics and fertilisers.  
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>

<sup>515</sup> 同前揭註 439。

## (6) 其他創新

國際 SHELL、BP 與 BASF 等石化/化工大廠因應淨零排放趨勢，紛紛投入再生能源、氫能與電動車相關投資，以及開創新興營運模式，如直接裂解原油產製化學品(Crude Oil To Chemicals, COTC)【詳見後述 2.創新案例(5)】。

## (7) 去碳技術

對於使用燃料，可以透過去碳燃氫技術（包括裂解去碳、碳再利用，詳見 2.6 去碳燃氫技術）來避免既有燃料使用所形成的碳排；至於在製程中無法藉由前述替代原料、創新製程、效能提升或材料循環等手段降低排放之部分，則可考慮利用傳統 CCUS 技術、直接空氣捕獲技術與增加自然碳匯等方式，達到去碳的目的（詳見第 3 章碳匯、零碳與負碳科技）。

另針對電氣化、替代燃料、替代原料以及其他新興創新模式技術，對應的技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL)以及預計技術可獲時程則是如圖 4.4.8 所示<sup>516</sup>。在生物性製程部分，目前應用替代性生物製程生產替代性單體正處於開發試驗階段，替代性單體比乙烯分子更類似於生物原料分子，可在蒸汽裂解更低的溫度下生產，因此可降低燃料燃燒排放與廢棄處置階段的排放；電化學製程是應用電化學程序產製單體，可以利用零碳電源驅動化學反應，透過電化學製程可提供更高、更精準的化合物生產，目前也在實驗室開發階段。

---

<sup>516</sup> 同前揭註 439。

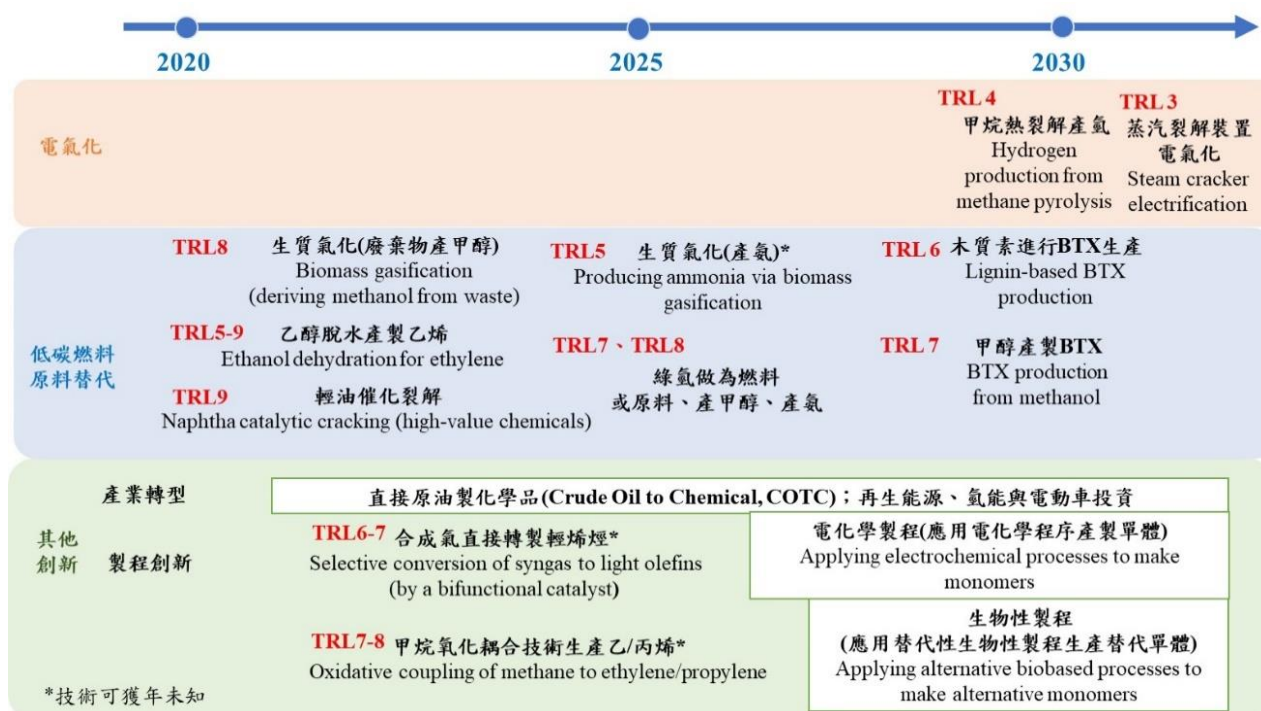


圖 4.4.8 石化產業可以參考之國際減碳策略與創新技術<sup>517,518</sup>

## 2. 創新案例

### (1) 蒸汽裂解裝置電氣化

蒸汽裂解裝置是整個石化價值鏈中最大的二氧化碳排放源之一，如果讓蒸汽裂解裝置轉電氣化方式利用綠電（來自再生能源）進行裂解（圖 4.4.9），可改善傳統蒸汽裂解爐因高溫燃燒化石燃料產生的排碳問題。也因為具有減碳潛力，自 2019 年開始，六家國際石化公司－BASF、Borealis、BP、LyondellBasell、SABIC 和 Total 聯合發起「未來裂解裝置聯盟(Cracker of the Future Consortium)」，探索利用再生能源電力操作輕油或天然氣蒸汽裂解裝置來生產基礎化學品。目前 BASF、沙特基礎工業公司(SABIC)與林德集團(Linde)針對蒸汽裂解裝置（電加熱

<sup>517</sup> 同前揭註 439。

<sup>518</sup> McKinsey (2018) Decarbonization of industrial sectors: the next frontier. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/how%20industry%20can%20move%20toward%20a%20low%20carbon%20future/decarbonization-of-industrial-sectors-the-next-frontier.pdf>

無氧裂解爐) 合作開發試產設備<sup>519</sup>，希望透過電力的使用讓現基礎化學品生產達到淨零排碳，並申請歐盟創新基金與德國資金中，若獲得批准，即可於 2023 年開始啟動試產<sup>520</sup>。

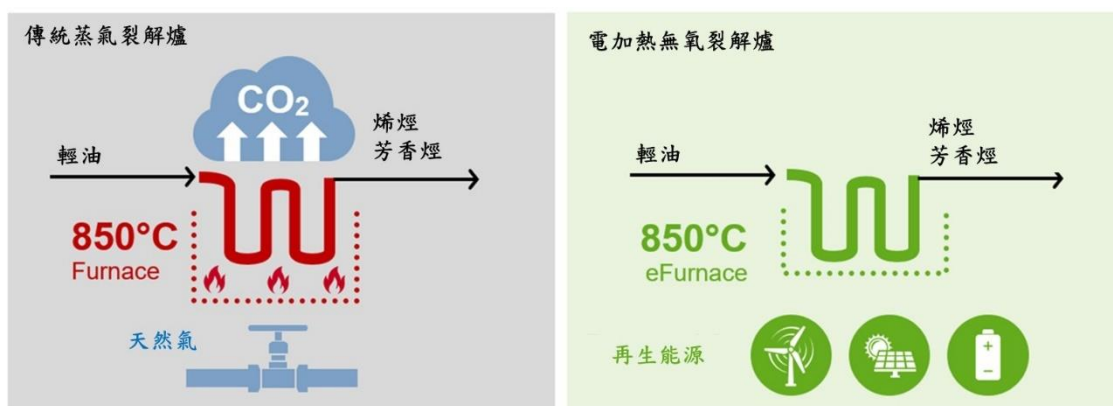


圖 4.4.9 BASF 欲利用綠電加無氧裂解爐來改善傳統蒸汽裂解爐之碳排放問題<sup>521</sup>

## (2) 透過甲烷氧化耦合技術生產乙烯、丙烯

美國 Siluria 公司的創新製程 Gemini™，主要透過甲烷氧化耦合技術 (Oxidative Coupling of Methane, OCM)，利用天然氣生產乙烯及丙烯 (圖 4.4.10)，與傳統輕油裂解生產乙烯相比，在成本、溫室氣體排放與節能上皆有所優化<sup>522</sup>。此技術的重大突破是成功開發了創新的奈米線觸媒，其活性為傳統觸媒的 100 倍以上，可在低於傳統蒸汽裂解法的操作溫度 (200~300°C 與 5~10 個大氣壓)，將甲烷高效轉化成乙烯<sup>523</sup>。OCM 製程另外的好處是進料具有彈性，甲烷可來自天然氣或是生質來源的甲烷，氧氣可為純氧或是富含氧的空氣，製程裝置也不需太大幅度改造，故可利用既有設備，特別對於天然氣資源豐富的國家是一個可行

<sup>519</sup> BASF(2021) 聯合新聞稿—巴斯夫、沙特基礎工業與林德攜手打造全球首座電加熱蒸汽裂解爐。 <https://www.basf.com/cn/zh/media/news-releases/global/2021/03/p-21-165.html>

<sup>520</sup> BASF (2021) BASF, SABIC and Linde join forces to realize the world's first electrically heated steam cracker furnace. <https://www.basf.com/tw/en/media/news-releases/global/2021/03/p-21-165.html>

<sup>521</sup> 同前揭註 520。

<sup>522</sup> 王尚博(2019) 生產烯烴新技術對石化產業影響。石化產業高值化推動專案。臺灣綜合研究院。 [https://www.pipo.org.tw/Hr/article\\_more?id=31](https://www.pipo.org.tw/Hr/article_more?id=31)

<sup>523</sup> 同前揭註 522。

的選項<sup>524,525</sup>。但我國因天然氣幾乎全仰賴進口，若要發展此創新技術，勢必要克服進口天然氣供給穩定性的挑戰，未來也必須針對天然氣應用進行通盤考量與評估。

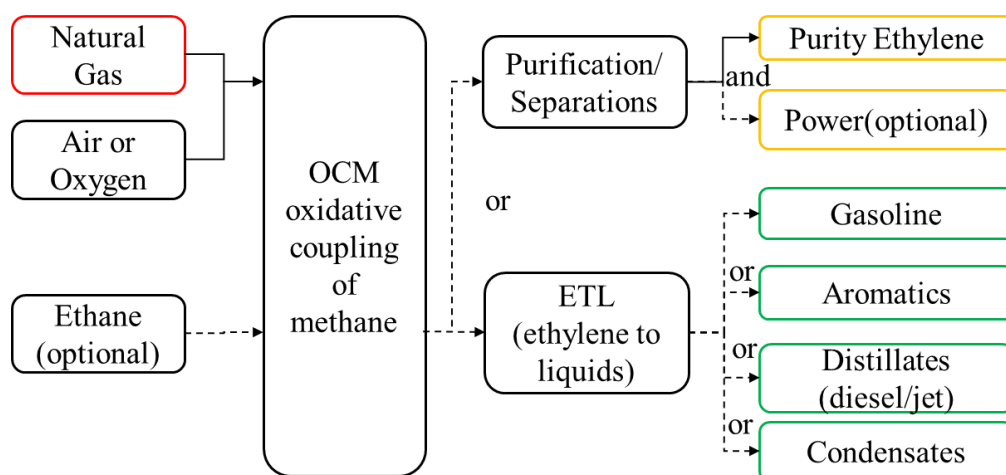


圖 4.4.10 美國 Siluria 以天然氣為進料生產乙烯/丙烯高效低排放製程<sup>526</sup>

### (3) 合成氣直接轉製輕烯烴（OX-ZEO 製程）

以合成氣直接轉製輕烯烴為近年興起的技術，主要是避免依賴傳統石油原料，另以煤、天然氣或是生質資源為來源，透過合成氣來生產輕烯烴（圖 4.4.11）。其中，中國科學院大連化學物理研究所於 2016 年發表於美國科學(Science)期刊的一項創新技術<sup>527</sup>為氧化物-沸石(Oxide-Zeolite, OX-ZEO)製程，與其他透過中間產物（如甲醇和二甲醚等）之合成氣間接轉製輕烯烴技術相比，主要是透過所開發出之 OX-ZEO 雙功能奈米觸媒，讓合成氣（含 CO 與 H<sub>2</sub>）以直接轉化途徑形成低碳烯烴（如圖 4.4.11 紅線所示），並可達到高選擇性反應<sup>528</sup>。該製程可改良傳統的高耗水和高耗能的水煤氣轉換製氫過程。2019 年此技術並在中國延長石油

<sup>524</sup> Siluria (2020) Overview . <https://siluria.com/Technology/Overview>

<sup>525</sup> 同前揭註 522。

<sup>526</sup> 同前揭註 524。

<sup>527</sup> Jiao, F., Li, J., Pan, X., Xiao, J., Li, H., Ma, H., Wei, M., Pan, Y., Zhou, Z., Li, M., Miao, S., Li, J., Zhu, Y., Xiao, D., He, T., Yang, J., Qi, F., Fu, Q., & Bao, X (2016). Selective conversion of syngas to light olefins. Science. 2016 Mar 4;351(6277):1065-8. doi: 10.1126/science.aaf1835.

<sup>528</sup> 陳綠蔚、林茂文及林金柱主編(2019) 當前煉油石化面臨的挑戰與因應。中技社。  
<https://www.ctci.org.tw/8838/publication/10798/42506/>

集團所屬榆能化公司進行工業試驗<sup>529</sup>。

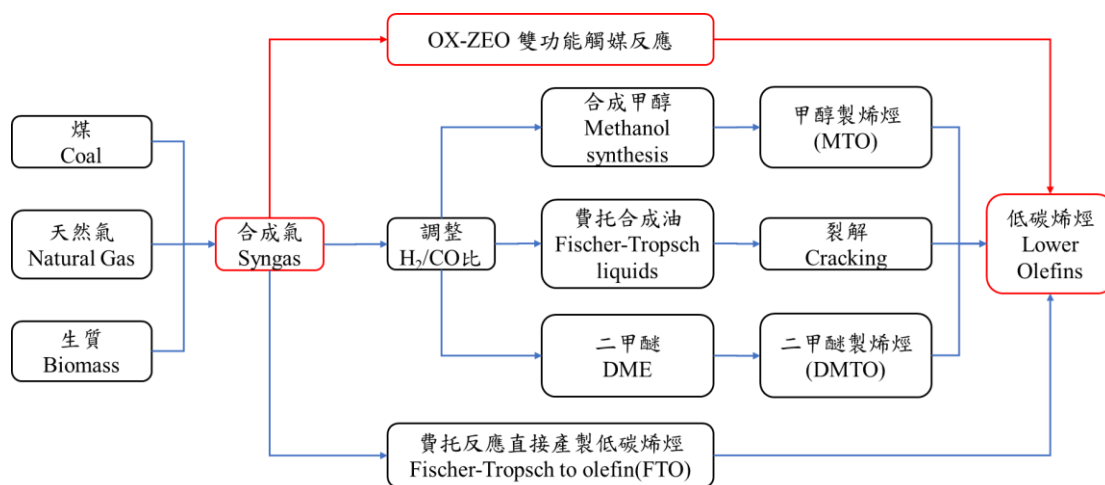


圖 4.4.11 合成氣直接轉製輕烯烴中，OX-ZEO 之合成氣直接轉化製程<sup>530</sup>

#### (4) 以電化學轉換製程將二氧化碳循環利用生產化學原料<sup>531</sup>

以二氧化碳和水作為材料，透過電催化轉換反應可將二氧化碳還原成單碳、雙碳、甚至三碳的化學原料。二氧化碳還原可直接經由電催化反應達成、或電解水產生氫氣，再將氫與二氧化碳（來自工廠煙道氣排放）合成化學原料（例如乙烯、乙醇）或是轉換為合成燃料並加以利用的模式；其中合成燃料可以進行長時間的能源儲存，並在需要的時候提供給家庭、運輸等使用（圖 4.4.12）。若所使用的電力是來自再生能源則幾無碳排，加上可使用並消耗工廠排放的二氧化碳作為生產原料，故認為此種運作模式可以達到淨負排碳的效益，建議可以成為廠商未來打進市場的潛力策略之一，可用以取代目前重要化工產品主要依賴的能源密集型熱化學途徑（高溫和高壓過程）。不過該等技術若要相較石化原料生產途徑具有經濟上的競爭力，仍須要電化學轉換的效率達到至少 60%，且再生能源的電力

<sup>529</sup> 中國科學院(2019) 煤經合成氣直接製低碳烯烴技術完成工業中試試驗。  
[https://www.cas.cn/zt/kjzt/2019ndldsx/zyzh/202001/t20200113\\_4731128.html](https://www.cas.cn/zt/kjzt/2019ndldsx/zyzh/202001/t20200113_4731128.html)

<sup>530</sup> 同前揭註 528。

<sup>531</sup> Luna, P. D., Hahn, C., Higgins, D., Jaffer, S. A., Jaramillo, T. F., & Sargent, E. H. (2019) What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes? Science 364, 350. doi: 10.1126/science.aav3506

價格在每度電（kWh，千瓦小時）低於美金 4 分。

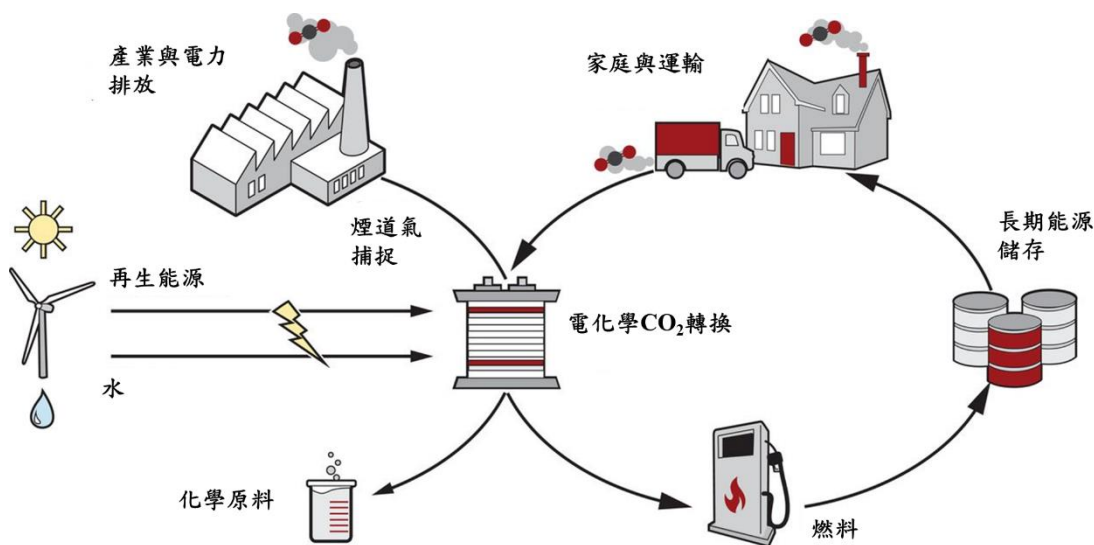


圖 4.4.12 以電化學方式將廢棄碳排轉為化學原料或合成燃料之循環利用模式<sup>532</sup>

## (5)產業轉型

在淨零排放趨勢下，國際石化與化工大廠紛紛以產業轉型作為主要策略，包括投資再生能源、電氣化、循環經濟，以及開創新興營運模式如直接裂解原油產製化學品。以下簡述之：

### A. 直接裂解原油產製化學品(Crude Oil To Chemicals, COTC)

COTC 技術為利用原油裂解直接生產烯烴和芳烴等化學品，非透過傳統以乙烷/或輕油(naphtha)為原料的方式生產。其分類包括：直接原油裂解（2014 年商轉）、增強化學品生產（2019 年商轉）、以及原油複合式裂解（2025 年商轉）等<sup>533</sup>。關於此種營運模式之轉型，顧問公司 Deloitte 認為總市值達 7,000 億美元、超過 650 家大宗化學品上市公司將被大規模商業化的 COTC 工廠所顛覆。COTC 的主要特點在於省略傳統原油煉製生產輕油過程，使製程簡化，化學品轉化率可提升至 40%~80%且具有減碳潛力（表 4.4.3）。但煉油與石化整合可能會因兩者

<sup>532</sup> 同前揭註 531。

<sup>533</sup> 陳育誠(2021) 全球直接原油製化學品(COTC)建廠技術發展。工業技術研究院產業科技國際策略發展所。刊登於材料世界網。<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=45755>

規模差異大而有挑戰，因此 COTC 通常是應用於新建的煉油與石化工廠中。在產業進展方面，2014 年 ExxonMobil、Aramco/ Sabic JV、Aramco 與 Chevron Lummus Global (CLG) 共同合作在新加坡建立乙烯產能為 100 萬噸/年之 COTC 裝置<sup>534,535,536,537</sup>。

表 4.4.3 直接裂解原油產製化學品營運模式與傳統生產方式的比較<sup>538</sup>

| 傳統生產                                           | COTC 技術                                             |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 原油轉換成化學品比例約為 15~25%                            | 原油轉換成化學品比例約為 40%~80%                                |
| 煉化一體建廠<br>(Refinery-Petrochemical-Integration) | 煉化一體廠區所生產的產品將以化學品為主體，而各種燃料油與潤滑油為附加產出(減產，亦符合電動車發展趨勢) |
| 蒸汽裂解                                           | 直接原油裂解<br>原油複合式裂解<br>製程簡化，提升效率，減少碳排                 |

## B. 投資再生能源

SHELL 公司在歐盟資金挹注下，與英國儲能和潔淨燃料公司/電解槽製造商 ITM Power 在德國威賽林的萊茵蘭能源和化工園區(Rhineland Energy and Chemicals Park)，建造世界最大(10 MW)氫電解廠 Refhyne，完工後每年可生產約 1,300 噸(1.3 kt)綠氫，成為工業領域綠氫供應商，電解槽再生能源來自離岸風電，未來將與當地公共運輸公司和其他產業成為整合性產業，試行供應<sup>539</sup>。德國 BASF 集團則預計投入高達 40 億歐元投資大型離岸風場，利用再生能源電力替代天然氣等化石燃料<sup>540</sup>。英國 BP 公司的 2050 淨零排放轉型願景中，設定 2030

<sup>534</sup> 同前揭註 533。

<sup>535</sup> 同前揭註 533。

<sup>536</sup> 同前揭註 522。

<sup>537</sup> 同前揭註 501。

<sup>538</sup> 范振誠(2020) 原油直接製造化學品來襲。工業技術研究院產業科技國際策略發展所。刊登於經濟部技術處網頁。

[https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu\\_id=13545&it\\_id=305](https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=305)

<sup>539</sup> REFHYNE (2022) Project overview. <https://refhyne.eu/>

<sup>540</sup> BASF (2021) BASF presents roadmap to climate neutrality. <https://www.basf.com/global/en/who-we->

年石油與天然氣產量降低 40%，綠色能源投資增加 10 倍，達 50 億美元；再生能源增至 50 GW<sup>541</sup>。

### C. 電氣化

英國 BP 公司將電氣化作為主要減碳策略之一，目前已與福斯汽車集團合作，善用 BP 零售（加油站）地點便利性優勢，來擴展、加速電動車充電設施部署，開發廣泛的超級充電網絡，並設定目標至 2030 年擴大全球公共電動車充電網絡至 70,000 多個<sup>542</sup>。

### D. 循環經濟

德國 BASF 集團在德國路德維希港工廠建構了循環經濟重要示範，藉由封閉循環(close the loops)一體化綜合生產，區內不同製程工廠間所需能資源均可透過管線互通有無，約 9 成廢棄物可被再利用（如：製氨過程產生的 CO<sub>2</sub>，藉管線運往加工廠生產汽水），剩餘 1 成無法直接利用，則燃燒產生熱能供其他製程使用，未來逐步也會以再生能源或回收廢棄物為替代化石燃料<sup>543</sup>。

---

are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2021/basf-presents-roadmap-to-climate-neutrality.html

<sup>541</sup> BP (2021) BP sustainability report.

<https://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/reporting-centre-and-archive/quick-read.html>

<sup>542</sup> BP (2021) Volkswagen Group and bp to join forces to expand ultra-fast electric vehicle charging across Europe. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/vw-group-and-bp-join-forces-ultra-fast-ev-charging-europe.html>

<sup>543</sup> BASF (2021) Circular economy at BASF. <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy.html>

#### 4.4.4 政策建議

石化業將是我國為達 2050 淨零排放目標時應強化減排的關鍵產業，本政策建議書提出以下建議：

1. 儘速投入發展替代燃料（如生質能、綠氫）、替代原料技術（生質來源塑膠、材料循環技術等）以及蒸汽裂解裝置電氣化等，並透過國際合作取得石化業蒸汽裂解裝置電氣化與綠氫相關技術，使其於 2030 年至 2050 年之間逐漸普及

##### (1) 以生質能、氫能、電氣化技術替代燃料

目前石化業上游煉化業多依賴燃燒供熱進行高溫、高耗能製程，會損耗相當比例化石燃料並產生大量碳排，因此須要透過供應適合且充足的無碳燃料，像是生質能或是綠氫等，來進行化石燃料的替代，以降低因燃料使用所造成的碳排。再者，目前已見國際石化大廠聯合研發投入蒸汽裂解裝置電氣化，並投資綠氫作為燃料等相關技術。但相關技術投資門檻較高，我國則尚未啟動相關研發計畫，因此為能及早布局相關技術取得先機，可以投入發展蒸汽裂解裝置電氣化，並透過國際合作取得石化業蒸汽裂解裝置電氣化與綠氫相關技術。

##### (2) 發展生質原料及生物製程(bio-based processing)技術替代原油

因石化產業現有生產過程主要依賴原油為原料，再往下游產製輕油、生產大宗石化原料與最終製成塑膠製品。碳源雖然被留在製品中，但製造過程中常需高溫高壓的反應條件，且產品消費使用後進行焚燒時，仍會有大量碳排釋放到空氣中，為解決上述問題，以生質原料及生物製程取代高碳排之石油及傳統化工製程以生產大宗化學品及航空燃油為國際趨勢。雖此領域在國內學術界已研發多年，但業界尚待起步，且須持續投資才能收效。過去國外成功的案例包括：1,3-PDO、1,4-BDO、lactic acid、ethylene、PLA、1-Butanol、isobutanol、succinic acid 等，近年亦開發 terephthalic acid、ethylene glycol、diacids、diamines 等塑膠單體並製成生物基質塑膠(bio-based plastics)。

初期生質原料以糖為主，研發以糖為原料生產各項化學品之生物製程，後續

則開發以纖維素為原料取代糖之技術。未來生質原料可進口、生物製程則可輸出。此外，以甲烷（天然氣及廢棄物掩埋氣主成分）為原料，並開發生物製程將甲烷轉化為其他化工原料亦是努力之方向。

我國過去的生物製程發展在生產食品添加劑（如：味精），飼料（如：胺基酸）及抗生素有不少的應用實例。近年代謝工程及合成生物學快速發展，基因編輯技術之細胞工廠已可將微生物改造成可生產各種化學品。我國發展中的技術已有數項領先世界，不過這些技術仍未能商業化。主因是我國化工業界在生技方面的研發動能不足，原因之一是國內生技人才大多傾向投入醫藥研發，因此使化工領域的生技研發較為弱勢。我國若有意解決石化業高碳排之問題，產官學研各界須合力投入特定化學品之生物製程，利用代謝工程及合成生物學技術，取代傳統化工製程及石化原料。不過實際轉型上，高單價之食品添加劑，染料、香料等可為短期目標，但卻可藉之培養工業生技實力，日後可以接力來達成 2050 淨零排放目標。

## **2. 開發創新製程技術提升產率達成減碳的效果（2030 年以前輕油催化裂解、提升觸媒轉化率等技術，2030 年至 2050 年發展輕烯烴生產技術）**

石化業的製程非常多元，除了燃料或原料之替代技術外，仍有賴許多創新製程技術的開發，來使產率提升並達成節能減碳的效果。例如輕油催化裂解製程，目前已具有相當的技術成熟性，故利用創新的觸媒技術提升觸媒轉化率，相較傳統熱分解製程，達到提升產率同時節省能源的效果；而合成氣直接轉製輕烯烴技術雖然目前技術仍未完全達到成熟階段，但亦能夠透過新型觸媒的輔助，改良傳統高耗水、高耗能的水煤氣轉換製氫過程，故投入此類創新製程技術之開發可以對減碳效果具有一定程度的貢獻。

## **3. 持續推動石化業產業轉型並提供轉型設備的投資誘因，如提供稅收抵減、補助、補貼、獎勵或透過綠色金融相關投融資工具之協助等**

目前石化產業有超過 3 成以上的石化原料是供作出口用途，而此部分也是整體產業鏈中，溫室氣體排放最高的區塊。因此若石化產業能夠降低以出口導向之

傳統石化原料生產，朝向低碳高價值化產業方向轉型，以維持基本需求的石化原料自給自足為目標，對於達成我國淨零排放轉型將有相當之助益。此外，因石化業有經濟規模之特性，即成本效益與產量大小高度相關，降低產量恐無法維持經濟效益，故可考慮將直接裂解原油產製化學品(Crude Oil to Chemicals, COTC)作為可能的轉型解方選項。此外，因既有石化業上游設備多半為大型、昂貴且長生命週期資產，若要提前退役，懲罰鉅額成本會讓廠商裹足不前。故在轉型所需的高資本投資設備，政府則可以透過一定的投資誘因，如提供稅收抵減、補助、補貼、獎勵或透過綠色金融相關投融資工具之協助等，來促進廠商舊有設備的汰換。

#### 4. 儘速投入研發 CCUS 技術、去碳燃氫技術

碳捕獲及再利用基本上是傳統化工程序，儲存則與石油探勘有關。故 CCUS 技術是屬於廣義的石油化工技術，也是目前石化工業界最能切入的減碳技術。二氧化碳的捕獲是 CCUS 中最成熟的技術。在石化業可從煙道氣中捕獲二氧化碳。二氧化碳再利用則須還原反應，一般是以氫為還原劑，故須考量綠氫的來源。目前二氧化碳主要是用來生產醋酸，因此仍須開發更多產品，以消化捕獲下來的二氧化碳，未能利用的部份則注入油井中封存。臺灣現有可供封存的場域不多，須要另尋解方。詳細內容可另見 3.3 CCUS 章節。

去碳燃氫技術或可提供另一解決之道，惟須考量成本增加之幅度。此一技術若開發成功，可將碳氫化合物裂解成氫和碳，純碳另可開發多種高價利用以助成本回收，詳細內容可另見 2.6 去碳燃氫章節。

## 4.5 電子業

### 摘要

2019 年我國電子業溫室氣體排放量占全國排放量的 10.9%，其中含氟氣體之碳排當量約占總排放量的六分之一，使用能源造成的碳排放則超過直接排放的 3 倍。從碳排比率最高的電力使用來看，電子業在 2020 年的用電量就達到我國總用電量的 22.6%，且該用電占比在未來將持續成長。故我國電子業淨零轉型受限於含氟氣體的不易替代性、國內綠電不足，以及國際碳排計算機制對製造國較不利的衝擊甚鉅。電子業製程對含氟氣體的依賴在可預見的未來應該不會改變，即使導入足以降低碳排當量的含氟氣體替代品，單一品項從實驗至量產約仍需 7 年。另一方面，未來數年之內，電子業用電量應會持續高於我國所能提供的綠電量，而國際碳排計算機制對出口國十分不利，電子業新產品為消費國帶來的節能效果應被重視。本政策建議書的建議如下：

1. 聯合世界其他國家電子業，遊說並施行產品生命週期排碳盤查，突顯電子業生產端的節碳貢獻。藉此制定更靈活的碳管理機制。
2. 投資各式零碳電力開發，包括風力、太陽能、地熱、海洋能等，以加速其產業化發展進程。
3. 積極開發或導入各式節能減碳技術，如利用人工智慧提升效能及節能導向之潔淨室監控與製程優化。

### 4.5.1 前言

2019 年我國電子業溫室氣體排放量占製造業排放量的 21.0%（占全國排放量的 10.9%）；排碳量最高企業包括電子業的台灣積體電路製造公司（全國第 7 名）、群創光電公司（第 12 名）、友達光電公司（第 13 名）、聯華電子公司（第 16 名）、台灣美光晶圓科技公司（第 17 名）等。我國的電子產業主要由半導體與

光電兩個子產業所構成，近年溫室氣體排放總量<sup>544</sup>如圖 4.5.1 所示，與 2013 年相比，2019 年直接溫室氣體排放（範疇一）僅微幅增加，使用能源造成的排放（範疇二）則顯著下降，顯示企業在減排推動上有一定成效。

圖 4.5.2 是半導體製程概覽<sup>545</sup>，其中以深綠、淺綠、橘色，分別標示出各段製程的能耗程度；長晶、氧化/擴散爐、佈線、摻雜/擴散爐、熱處理屬於高能耗製程，晶圓磨切屬中能耗，上光阻、蝕刻、去光阻、晶粒切取、晶粒黏接、導線接合、封裝等則屬低能耗製程。針對電力消費觀察可發現（圖 4.5.3），製程工具用電占比最高，超過 40%，其他用電占比超過 3%者依序有冷卻器(27.2%)、潔淨室(7.4%)、氮氣(6.6%)、辦公區(3.0%)、超純水(3.0%)<sup>546</sup>等。光電業主要產值貢獻來自薄膜電晶體液晶顯示器，其製程主要分為三階段，分別為前段 array(薄膜電晶體)製程、中段 cell(面板組裝)、後段 module(模組)製程，電力耗用主要來自製程(39.3%)、空調(24.2%)與空壓系統(20.2%)（圖 4.5.4）<sup>547</sup>。

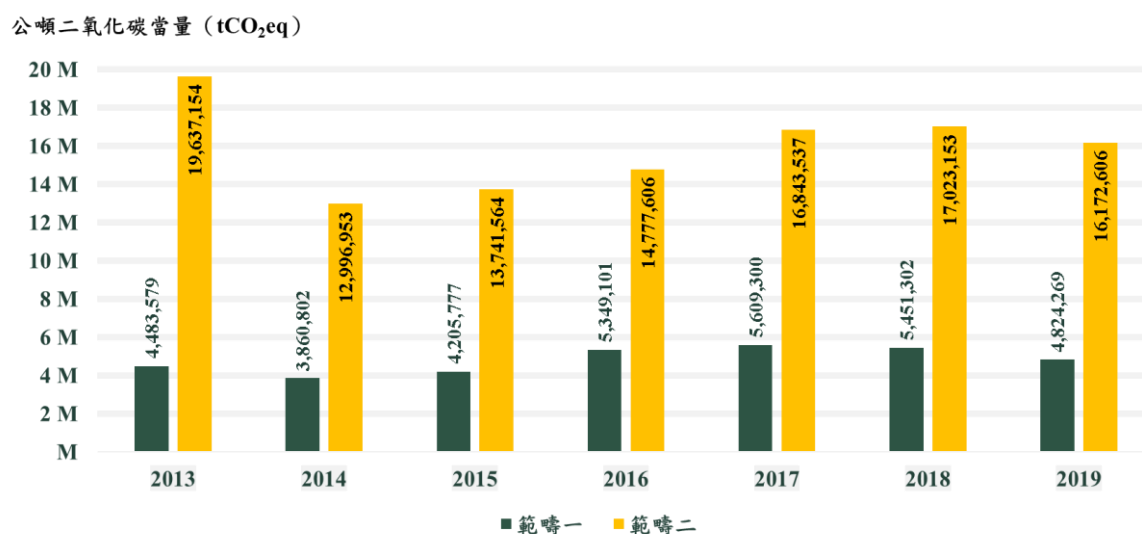


圖 4.5.1 我國電子業歷年溫室氣體排放

<sup>544</sup> 行政院環境保護署國家溫室氣體登錄平台，排放量申報暨盤查登錄公開資訊及查詢。

<sup>545</sup> Gopalakrishnan, B., Mardikar, Y., & Korakakis, D. (2010) Energy analysis in semiconductor manufacturing. *Energy Engineering*, 107(2), 6-40.

<sup>546</sup> Hu, S. C., & Chuah, Y. K. (2003) Power consumption of semiconductor fabs in Taiwan. *Energy*, 28(8), 895-907.

<sup>547</sup> 經濟部工業局(2020) 光電業低碳製程技術編彙。

<https://ghg.tgpf.org.tw/Resources/ResourcesLectureNums?id=0b731df449ee475597f805f95516acd0>



圖 4.5.2 半導體製程

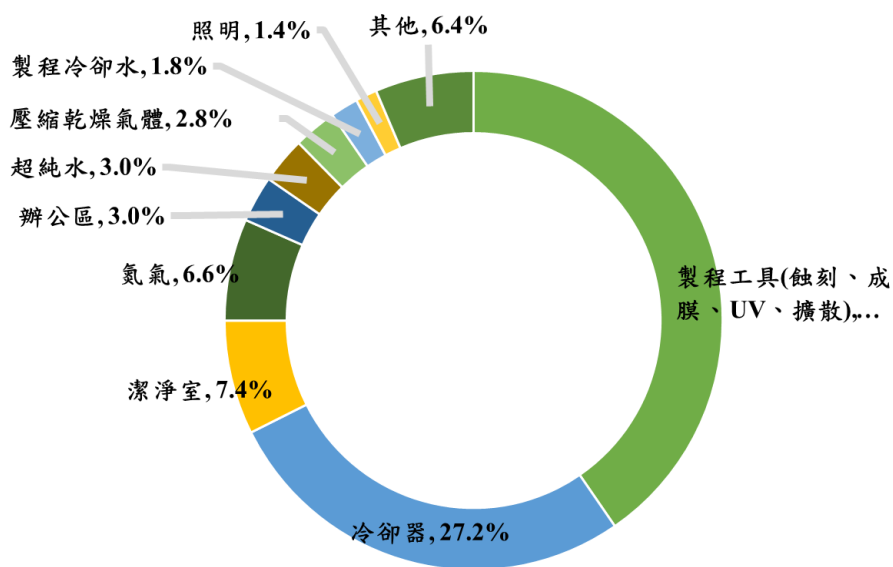


圖 4.5.3 半導體產業電力消費結構

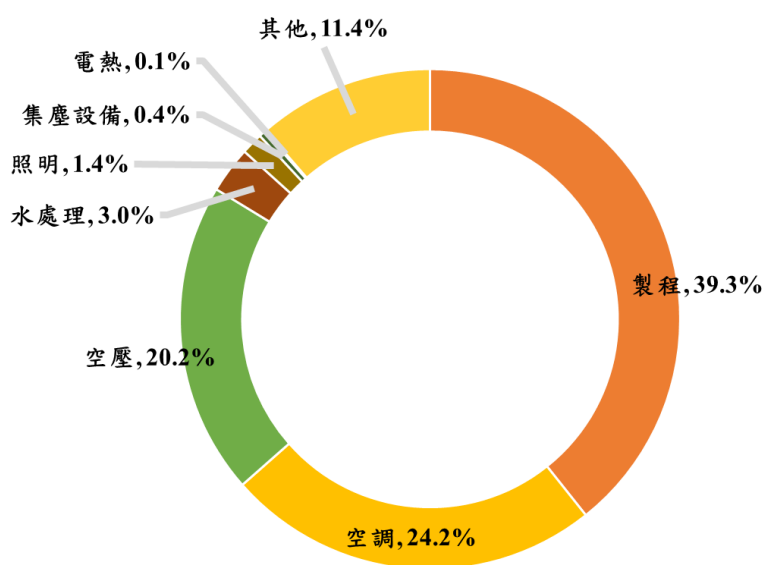


圖 4.5.4 光電產業電力消費結構

除了能源的使用，電子業的溫室氣體排放來源還有含氟氣體；全氟碳化物（如四氟化碳、六氟乙烷、八氟丙烷等）、六氟化硫、三氟化氮用於化學氣相沉積製程腔體的清潔與乾式蝕刻，過去因認為氫氟碳化物不會破壞臭氧層，被用作新型冷媒（如代號 R32 的二氟甲烷）。然而這些含氟氣體卻有比二氧化碳更高的溫室效應<sup>548</sup>（表 4.5.1），圖 4.5.5 是我國電子業歷年含氟氣體排放情況<sup>549</sup>，其中全球暖化潛勢最高且使用量很大的六氟化硫，排放量大致呈現下降趨勢，取而代之的全氟碳化物微幅成長，另外，三氟化氮與氫氟碳化物則大致持平，但整體的排放所造成的溫室效應仍十分可觀，如前所述含氟氣體排放量換算成二氧化碳當量約占電子業總排放量的六分之一。

表 4.5.1 含氟氣體與二氧化碳暖化潛勢比較

| 氣體種類                                    | 大氣壽命（年） | 百年全球暖化潛勢 <sup>550</sup> |
|-----------------------------------------|---------|-------------------------|
| 二氧化碳                                    | -       | 1                       |
| 二氟甲烷(CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )   | 5       | 550                     |
| 四氟化碳(CF <sub>4</sub> )                  | 50,000  | 5,700                   |
| 八氟丙烷(C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )    | 2,600   | 8,600                   |
| 八氟環丁烷(c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> ) | 3,200   | 10,000                  |
| 三氟化氮(NF <sub>3</sub> )                  | > 500   | 10,800                  |
| 六氟乙烷(C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )    | 10,000  | 11,900                  |
| 六氟化硫(SF <sub>6</sub> )                  | 3,200   | 22,200                  |

<sup>548</sup> Houghton, J. T., Ding, Y. D. J. G., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., ... & Johnson, C. A. (2001) Climate change 2001: the scientific basis. The Press Syndicate of the University of Cambridge.

<sup>549</sup> 行政院環境保護署（2020 年 10 月）2020 我國國家溫室氣體排放清冊報告。  
[https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/tw\\_nir\\_2020.php](https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/tw_nir_2020.php)

<sup>550</sup> 例如二氟甲烷的全球暖化潛勢為 550，則 1 公斤二氟甲烷排放的二氧化碳當量為 550 公斤。

公噸二氧化碳當量 (tCO<sub>2</sub>eq)

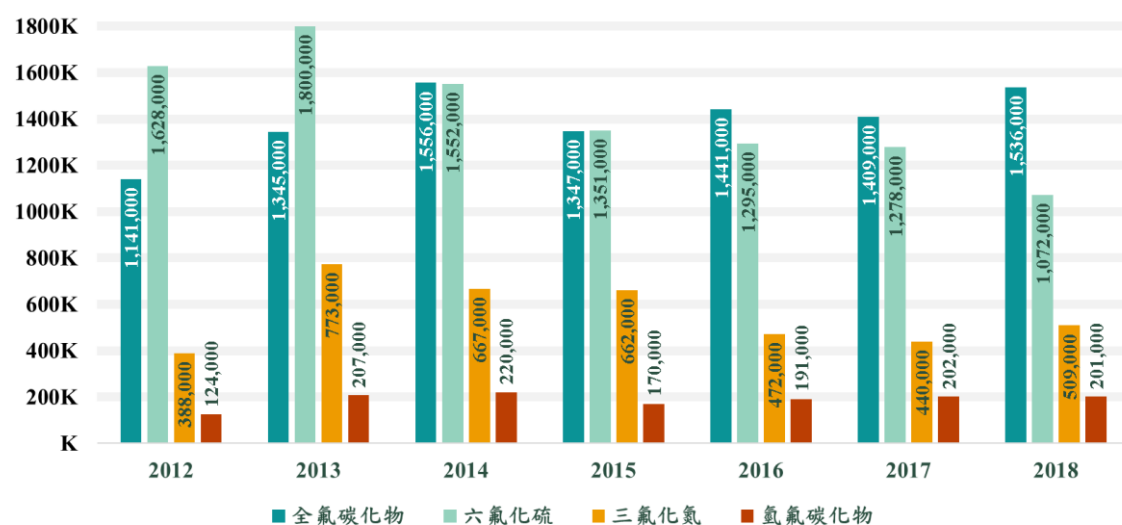


圖 4.5.5 我國電子業歷年含氟氣體排放

## 4.5.2 電子業全球減碳趨勢

透過世界半導體產業協會(World Semiconductor Council, WSC)的運作，半導體業是第一個共同訂定全球溫排目標的產業。WSC 在 1999 年發佈第一次自願性含氟氣體減排協議，參與成員（美國、歐盟、日本、韓國、臺灣半導體產業）以自身 1999 年排放為基準，目標在 2010 年減排 10%，最後以減排 32%超越原目標。WSC（新成員包括中國半導體產業）在 2011 年發佈第二次自願性含氟氣體減排協議，以 2010 年總體排放為基準，目標在 2020 年，將標準化排放率(normalized emission rate, NER)下降 30%（以每單位晶圓排放量 kgCO<sub>2</sub>eq/cm<sup>2</sup> 作為 NER 的共同量測標準）。上述減排目標的達成，係透過每年檢討新廠製程最佳化，與經常性更新、公開製程最佳化減排手冊，並在每年的 WSC 聯合聲明中，報告達成進度。最新資料顯示，2020 年 NER 下降 22.9%<sup>551</sup>。

聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)的清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)執行委

<sup>551</sup> World Semiconductor Council (2021) Joint statement of the 25th meeting of the World Semiconductor Council. <http://www.semiconductorcouncil.org/public-documents/joint-statements-from-prior-wsc-meetings/>

員會陸續認可了一系列的減碳方法論(CDM Methodologies)<sup>552</sup>。CDM 允許締約之已開發國家透過協助開發中國家進行 CDM 計畫，抵減國內排放以達到承諾的減排目標。CDM 公開的方法論中，運用於電子業的方法論可分為：(1)含氟溫室氣體控制、處理與替代，(2)製程能效改善，(3)建築物能效提升，(4)資源循環利用。CDM 主要成效在於敦促各國政府提出減量承諾、設定減量成效認定基準、規範，並著手推動溫室氣體減量。以我國為例，行政院環境保護署就參酌 CDM 等規範而提出了抵換專案與先期專案兩類減量專案。抵換專案以 CDM 或行政院環境保護署認可的方法論為認定基準，依減量方法執行可取得減量額度，先期專案以「公告排放強度」為認定基準，當排放源之實際排放強度優於行政院環境保護署公告的排放強度，則可取得減量額度。在 CDM 的倡導下，一方面各國產業積極引入最新減量技術及管理方式，以取得減量額度，同時政府亦可藉由建立減量案例的資料庫，對減量政策進行分析與管理。

### 4.5.3 電子業減碳選項分析與創新案例

#### 1. 減碳選項分析

我國電子業淨零轉型主要困難包括：(1)含氟氣體的不易替代性；(2)國內綠電不足；(3)國際碳排放計算方式對製造業導向國家不利。由圖 4.5.5 可以看到，溫室效應潛勢最高且 2013 年以前使用量占比最大的六氟化硫，其使用量雖然已經明顯下降，未來也可能以溫室效應更低的材料取代，但要從目前的使用量減至 2050 淨零排放的目標的確是一個十分困難的工作。我國政府目標在 2025 年再生能源發電占比達 20%，但光是電子零組件製造業（涵蓋半導體製造業、被動電子元件製造業、印刷電路板製造業、光電材料及元件製造業、其他電子零組件製造業）一個產業，在 2020 年的用電量就達到我國總用電量的 22.6%<sup>553</sup>，且該用電占比歷年持續成長，造成電子業離 2050 淨零排放目標越來越遠的窘境。雖然電

<sup>552</sup> UNFCCC (2022) CDM Methodologies. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>

<sup>553</sup> 台灣電力公司(2021) 歷年行業別用電按月統計資料。 <https://data.gov.tw/dataset/31966>

子產品的碳排放主要在製造的時候產生，國際碳排放也是以此為計算標準，但事實上消費端共同承擔一定程度的責任才較為合理；目前的碳排放計算標準對製造業導向的國家顯然不利。

減碳選項除了前一小節 CDM 方法論歸納出來的(1)含氟溫室氣體控制、處理與替代、(2)製程能效改善、(3)建築物能效提升、(4)資源循環利用等減碳選項之外，由於電子業使用能源造成的碳排放超過直接排放的 3 倍（見圖 4.5.1），因此最為有利的減碳選項其實是提升綠電的使用比例。綠電的使用可透過自主發電或購買憑證與碳權。以台灣積體電路製造公司為例，其在 2018 年透過購買再生能源、再生能源憑證、碳權的方式，100%抵銷多國海外據點的二氧化碳排放；2020 年底達成全球辦公室 100%使用再生能源，2021 年完成 1.2 GW 再生能源購電協議(Power Purchase Agreement,PPA)契約簽訂；2020、2021 年自主裝設的太陽能板裝置容量則將分別新增 416 kW、227 kW。

在含氟溫室氣體方面，主要因為製程材料的替換牽涉大量製程參數的調校、試誤、實驗過程對設備機台的損害，為一整套的研發過程，並非字面上的替換如此簡單。以聯華電子公司為例，其早在 1999 年成立溫室氣體減量小組，實驗在製程中以八氟丙烷大量取代六氟乙烷（全球暖化潛勢比較見表 4.5.1），於 2006 年才將研發成果正式投入生產，不僅成功減碳，每年也節省超過數千萬的成本。2009 年聯華電子公司在杜邦公司建議下，也採用暖化潛勢較高但總用量需求較低的八氟丁烷；以 2020 年為例，相較於 1999 年，聯華電子公司的晶圓產能變為 3.6 倍，溫室氣體排放量卻只有 25%<sup>554</sup>。相信將來新的替代材料還會繼續被開發出來，這些技術進展也將是減少直接溫室氣體排放的選項。

能源效率改善方面，以台灣積體電路製造公司為例，其 2020 年持續落實「相同製程技術量產 5 年後，生產能效提升 1 倍」的生產計畫。透過節能做法的實施，導入節能元件與智慧節能設備，使得 16 奈米以上的成熟製程生產能效提升

---

<sup>554</sup> 黃煒軒(2021)《減碳模範生》高耗能、高污染產業裡的永續好戲 他們克服先天不利環境 逆勢衝出 ESG 佳績。今周刊。1267，66-70。

1.8 倍；10 奈米製程與其後的 7 奈米製程，都在量產第 4 年後，將生產能效提升 1.4 倍，提早達到過去定下的 2030 年目標<sup>555</sup>。上述節能做法，包括運用智慧節能設備（如人工智慧節能最佳化控制製程冰水系統），導入製程空調系統節能技術、空壓系統節能技術、冷卻水塔散熱風扇效率提升技術；節能元件則如能夠進行熱回收的熱泵等<sup>556</sup>。

資源循環利用部分，手段包括成立零廢製造中心、運用資源再生活化設備、進行水資源管理、產製再生產品<sup>557</sup>。台灣積體電路製造公司的零廢製造中心，將製程中原本被視為廢棄物的副產物，純化為工業級或電子級產品。這些副產物包括了電子級異丙醇、人造螢石等，不但能供自身使用，還能作為商品提供其他產業。資源再生活化設備，則用於將原本被視為廢棄物的副產物轉製為工業級產品。資源再生活化設備的產出包括工業級硫酸銨、矽泥、銅等，同樣可供自身再利用或作為商品售出。水資源管理則可透過 ISO 46001 水資源效率管理系統，提升回收水量，並減少高耗能之超純水產製。友達光電公司通過 UL 3600 循環係數認證，不斷提升再生產品所占營收比例。

## 2. 創新案例

### (1) 極紫外光微影(extreme ultraviolet lithography, EUV)技術使用綠氫

臺南有一座全球最大的超純氫氣低碳生產設備，供應了台灣積體電路製造公司在南部科學園區的 EUV 設備所需要的氫氣<sup>558</sup>。EUV 設備以每秒 5 萬次雷射光束轟擊懸空墜落的錫液滴，以形成錫電漿，電漿放出的 EUV 則由反光鏡集中用於曝光顯影。過程中須注入氫氣與錫反應成氣態的氫化錫，以避免錫在反光鏡上冷凝成膜使其霧化。法國液空集團(Air Liquide)和臺灣遠東新世紀集團合資成立的亞東工業氣體公司氫氣廠，將在兩年內達到完全採用綠電，電解超純水產出氫

---

<sup>555</sup> 台灣積體電路製造公司(2021) 109 年度企業社會責任報告。  
<https://esg.tsmc.com/csr/ch/resources/documents.html>

<sup>556</sup> 經濟部工業局(2019) 半導體業低碳製程技術彙編。

<https://ghg.tgpf.org.tw/Resources/lecture?id=e2d61c527f544928a98b68fc87c45995>

<sup>557</sup> 友達光電公司(2021) 2020 企業社會責任報告書。<https://csr.auo.com/tw/download/c1>

<sup>558</sup> 劉光瑩（2021 年 4 月 15 日）台積電先進製程的未來 藏在一座台南的氫氣廠。天下雜誌。  
取自 <https://money.udn.com/money/story/5612/5389183>

氣。與傳統天然氣產氫比較，單是一座以綠電電解產氫的氫氣廠，每年可以減少約 8,000 公噸的碳排放；五座綠電電解產氫的氫氣廠的減碳量就相當於 100 萬棵樹的固碳量。

## (2) EUV 設備導入大數據分析提升能效

EUV 微影設備耗電量是傳統 DUV 微影設備的 10 倍以上。EUV 微影設備在使用的過程中，須要使用到特殊的反射鏡；過去 EUV 每一次反射就會損失 30% 的能量，一次微影製程平均需要 10 次以上的反射，真正用於微影的光能僅剩不到 2%。台灣積體電路製造公司對 EUV 的反射原理與耗能情況進行了大數據分析，進而找出 EUV 耗能主要因素—反射與脈衝效率。2020 年首先透過程式的修改，將 EUV 脈衝能量最佳化；同時也對反射結構進行了重新設計，將反射率增加 3%。當進一步對 EUV 所使用的二氧化碳雷射系統放大器，進行運轉數據的分析則可以發現，雷射脈衝的頻率由固定轉為變頻，可將雷射能效提升 10%。結合上述改良，台灣積體電路製造公司將 EUV 微影設備的整體能效提升了 5%。

## (3) 透過硫酸銨廢液除水結晶系統改良，大幅提升廢液處理量能

台灣積體電路製造公司的硫酸銨廢液除水結晶系統主要有三項改良：(a) 自動化沖洗機制、(b) 數位化儀表、(c) 板熱設備。自動化沖洗機制可保持固液分離的效能，避免製程路徑被堵塞；數位化儀表用於監控除水結晶系統的離子濃度，以穩定液體蒸發量；板熱設備能夠加速循環的升溫速度，減少停機保養次數，降低停機造成的產能損失。藉由上述改良，硫酸銨廢液處理量能大幅提升了 400%，月平均處理量由 2020 年上半年的 400 公噸，增加至下半年的 2,000 公噸。台灣積體電路製造公司減少委外處理的硫酸銨廢液，自 2018 年起已累計超過 15,800 公噸，工業級硫酸銨結晶產出量達到 4,200 公噸；回收再利用與減少廢棄物清運的效益，已超過新臺幣 3,500 萬元。硫酸銨廢液年處理量預計在 2022 年可達 6 萬公噸，工業級硫酸銨結晶的年產能可達 15,000 公噸，創造超過新臺幣 1.3 億元的效益。除此之外，電子業在資源及廢棄物循環再利用及處理方面亦有許多付出與努力(Box 4.5.1)。

#### Box 4.5.1 電子業在 ESG 方面的其他努力<sup>559</sup>

- **NBA 廢液回收再利用系統**

光阻塗佈機經連續生產使用，光阻會結垢在機台表面；過去使用黃光製程中稀釋光阻的溶劑(edge bead removal, EBR)來清潔機台表面的光阻結垢。友達光電公司發現，原來用於黃光製程基板邊緣洗淨的乙酸正丁酯(n-butyl acetate, NBA)，由於對光阻具有非常好的溶解力，清洗基板邊緣後的 NBA 廢液可以用來取代 EBR，而減少 EBR 的使用量。

- **配向液循環使用**

將配向液塗佈以對液晶螢幕的液晶進行配向後，會剩下大量殘液；過去作法是將殘液交由合格處理廠進行焚化。而友達光電公司針對塗佈後殘液的污染度進行把關，保障殘液純度與品質，經合作廠商以嚴謹的程序驗證，使殘液回收加工後能重新做為配向液使用。以 2020 年為例，殘液回收利用比率達到 13%，相當於 29.8 噸配向液的年再利用量。

- **面板 PE 膜回收造粒**

友達光電公司將液晶面板回收取出 PE 膜後，將 PE 膜交由回收廠造粒處理再製為垃圾袋，使得原本的事業廢棄物得以再製為新商品，對有限資源進行重複利用、降低消耗，創造價值並減少對環境帶來的負擔。

#### 4.5.4 政策建議

為達到 2050 淨零排放目標所需的手段包括：(1)使用綠色能源、(2)提升能源效率、(3)碳捕捉利用封存與導入負碳技術、(4)製程溫室氣體減排、(5)投資綠電及交易碳權。要提升綠能直接發電占比，發展新的綠能技術（如地熱、氫能等，參見第三章）就變得很重要。能效提升則須要從廠房、設備等方面進行改良；碳捕捉封存、負碳技術、製程溫室氣體的減排與替換，都待新研發成果的實現。除了直接發電，綠色能源亦可來自購買碳中和能源、憑證與碳權；我國目前的綠能供應已趕不上企業需求，建立企業可取得碳權的機制須要政府的參與。

本建議書的政策建議包括：(1)聯合世界其他國家電子業，遊說並施行產品生命週期排碳盤查，突顯電子業生產端的節碳貢獻，藉此制定更靈活的碳管理機制；(2)投資各式零碳電力開發，包括風力、太陽能、地熱、海洋能等，以加速其產業

<sup>559</sup> 同前揭註 557。

化發展進程；(3)積極開發或導入各式節能減碳技術，如利用人工智慧提升效能，及節能導向之潔淨室監控與製程優化。碳管理機制方面，我國政府目前決定暫緩開放碳權交易<sup>560</sup>，使得企業少了一個量化減碳技術投資成效或轉換抵減的機制；若電子業能將產品生命週期排碳盤查結果清楚明確地呈現，幫助政府釐清碳權價值及流向，將有助於我國碳管理機制的制定。另外，推動不適耕作農地設置太陽能是改善我國綠電不足的重要手段之一，但環評時間成本過大，相關配套也要先行完善；有關碳權部分會在第七章作詳細討論。零碳電力與節能減碳技術開發方面，不論是新興或未成熟之潔淨能源技術、碳捕捉封存技術、負碳技術等，為了達成 2050 淨零排放的目標，政府都有義務分擔民間的研發風險，甚至要有國家層級的策略投入研發，結合學研單位和業界成立減碳國家隊一起努力，才能提升 2050 淨零排放達標的機率。

---

<sup>560</sup> 孫文臨(2021) 立委關切碳交易機制 環署定調碳權非屬金融商品。<https://e-info.org.tw/node/232506>

## 4.6 小結

我國 2019 年製造部門的排放量約 149.6 Mt CO<sub>2</sub>eq，約占總排放量的 52.1%，其排放來源包含製程排放、電力消費排放與燃料燃燒排放，其中以電力消費排放達 63% 為最多。而我國製造部門排放量前四大產業為石化、電子、鋼鐵與水泥業，四者的總排放量為 112.2 Mt CO<sub>2</sub>eq，占製造部門排放量 75%，且占全國總排放量 39.1%，因此製造部門減碳作為是我國達成淨零排放願景的重要一環。

以製造部門排放量前四大產業而言，**鋼鐵業**製程特性為能源使用密集度高且碳排量亦高，可積極加速零碳製程之引進與開發，並在燃料使用上先提升天然氣占比，再以碳中和天然氣或氫氣替代天然氣使用。此外，投資綠氫煉鋼及直接還原鐵等技術，及以材料循環促進鋼鐵再生等作法，都可以明顯地降低鋼鐵製程的碳排。

**水泥業**由於製程中的化學反應與高溫煅燒耗能又高碳排，因此減少碳排相當具挑戰性，水泥廠商可透過廠房改造將老舊設備更新為先進節能設備、採用新製程技術等提升能源使用效率，來達成碳中和的目標；此外，進行社會溝通並修改相關法規，轉以生質能、廢棄物燃燒取代部分燃煤，可減少煤炭燃料的使用及天然資源的耗用，惟須同步進行空污改善才可維持正面的效益；再者，引進及研發替代原料與新型水泥，並由政府積極支持水泥業投入碳捕捉、封存與再利用技術的發展，並布建相關基礎設施協助廠區低碳電力來源的供應，如天然氣、氫能、再生能源等。

**石化業**在我國製造業的排碳量居首，其中以化學原料、化學製品業及油氣煉製加工業為主要的排碳來源，其碳排的主因為使用化石燃料燃燒供熱以進行高溫、高耗能製程，又以原油作為原料產製供應鏈下游所需要的輕油、大宗石化原料與塑膠製品，加上使用電力仍多來自化石燃料燃燒發電，故應儘速啟動去碳燃氫技術（包括裂解去碳、碳再利用）相關研發工作；加速投入發展替代燃料（如生質能、綠氫）、替代原料技術（生質來源塑膠、材料循環技術等）以及蒸汽裂解裝置電氣化等，並透過國際合作取得石化業蒸汽裂解裝置電氣化與使用綠氫相關技

術，使其於 2030 年至 2050 年間逐漸普及，亦須開發創新製程技術與持續推動石化業轉型並提供相關設備的投資誘因，如稅收抵減、補助、補貼、獎勵或透過綠色金融機制提供相關投融資工具等以協助產業轉型。

2019 年我國**電子業**溫室氣體排放量占全國排放量的 10.9%，其中含氟氣體之碳排當量約占總排放量的六分之一，而使用能源造成的碳排則超過直接排放的 3 倍。從碳排占比最高的電力使用來看，電子業在 2020 年的用電量就達到我國總用電量的 22.6%，且在未來將持續成長。我國電子業之淨零轉型將受限於含氟氣體的不易替代性、國內綠電不足以及國際碳排計算機制對製造國較不利等因素的影響，故未來可聯合他國電子業，遊說並施行產品生命週期排碳盤查，突顯電子業生產端的減碳貢獻，藉此制定更靈活的碳管理機制；此外，投資各式零碳電力開發，包括風力、太陽能、地熱、海洋能等，並協助進行社會宣導；同時也要積極開發或導入先進節能減碳技術，如利用人工智慧提升效能及節能導向之製程優化。