

本月專題

工業低碳生產現況與趨勢

李宥儒¹、蕭維哲²、李佩玲³、江國瑛⁴

摘要

依據國際能源總署 2018 年全球二氧化碳排放報告顯示，2016 年全球燃料燃燒二氧化碳排放總量達 323.1 億公噸，較 1970 年增長一倍，展現產業高度依賴化石燃料。2016 年全球工業部門二氧化碳排放總量超過 60 億公噸，占全球二氧化碳總排放量 19%，其中鋼鐵、其他金屬與礦物、化學與石化等產業排放二氧化碳排放量最高(65%)，為未來工業部門減碳脫碳的重點產業。

現階段低碳生產的發展路徑受到限制，其原因歸納 5 項：1.原物料使用造成溫室氣體排放、2.工業製程仰賴高溫熱能、3.工業製程深度整合、4.工業製程設備生命週期長、5.終端產品的價格敏感度高。然而工業部門仍可透過其他方式來減少溫室氣體排放：1.效率提升、2.電氣化結合零碳電力、3.燃料及原料替代、4.需求面要求、5.碳捕捉利用與封存技術、6.其他低碳生產技術創新。

在國內產業結構調整下，電子業 GDP 占製造部門比例，已由 94 年 35.2% 提升至 107 年 51.3%，鋼鐵、石化、水泥等能源密集產業則由 14.3%略降至 13.9%。能源消費結構亦隨國際趨勢朝電氣化發展，電力消費占總能源消費比率，由 94 年 41.7%提升至 107 年 52.6%；電力使用所排放的溫室氣體占比，已從 94 年 62.6%上升至 107 年 75.1%。

針對我國產業後疫情時期研提七項低碳生產推動做法分別為：1.推動智慧化能源管理提升能源使用效率、2.加速設備汰舊更新、3.擴大低碳燃料替代、4.擴大區域能資源整合、5.推動使用綠電、6.協助產業開發碳權、7.回應供應鏈減碳要求。

¹財團法人台灣綠色生產力基金會助理工程師

²財團法人台灣綠色生產力基金會副工程師

³財團法人台灣綠色生產力基金會經理

⁴財團法人台灣綠色生產力基金會協理

一、前言

2015 年聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)於巴黎召開第二十一次締約國會議(COP21)，決議以巴黎協定(Paris Agreement)接續即將於 2020 年到期的京都議定書(Kyoto Protocol)，建立具法律效力的典章制度，以約束締約國溫室氣體排放相關行為，抑制全球暖化氣候問題的加劇。

2016 年 11 月 4 日生效的巴黎協定確立下列三項氣候目標，並將加強各締約國對此公約的執行力度：

- (一)以工業革命前的氣候水準為基準，控制全球平均氣溫於 2100 年時升溫幅度在攝氏 2 度之內，且努力追求低於攝氏 1.5 度；
- (二)提高適應氣候變化不利影響的能力，並以不威脅糧食生產的方式，增強氣候抗禦能力及溫室氣體朝低排放方向發展；
- (三)使資金流動符合溫室氣體低排放與氣候適應型發展的路徑。

為因應此國際減碳趨勢，我國於 2015 年通過「溫室氣體減量及管理法」，以 2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量 50% 以下為國家長期減量目標，並以 5 年為一期訂定階段管制目標逐步推動。

工業部門為全球經濟發展動力，亦為全球溫室氣體排放的主要來源之一，鑑於疫情對我國經濟發展影響，經濟成長動能已由民間投資轉為政府支出，並對碳排放產生影響，參考國際做法法在推動經濟發展的同時，應引領產業朝低碳生產降低溫室氣體排放，促使產業在政府投入及協助中持續邁向低碳化，讓後疫期時代的經濟活動能夠有低碳排的作為。

二、下世代減碳脫碳國際趨勢

(一)工業部門排碳特性

1. 產業高度依賴化石燃料

依據國際能源總署(International Energy Agency, IEA) 2018 年全球二氧化碳排放報告顯示，2016 年全球燃料燃燒二氧化碳排放總量達 323.1 億公噸，較 1970 年增長一倍，且自 2013 年突破 320 億公噸後，已逐漸放緩成長速度，如圖 1 所示。

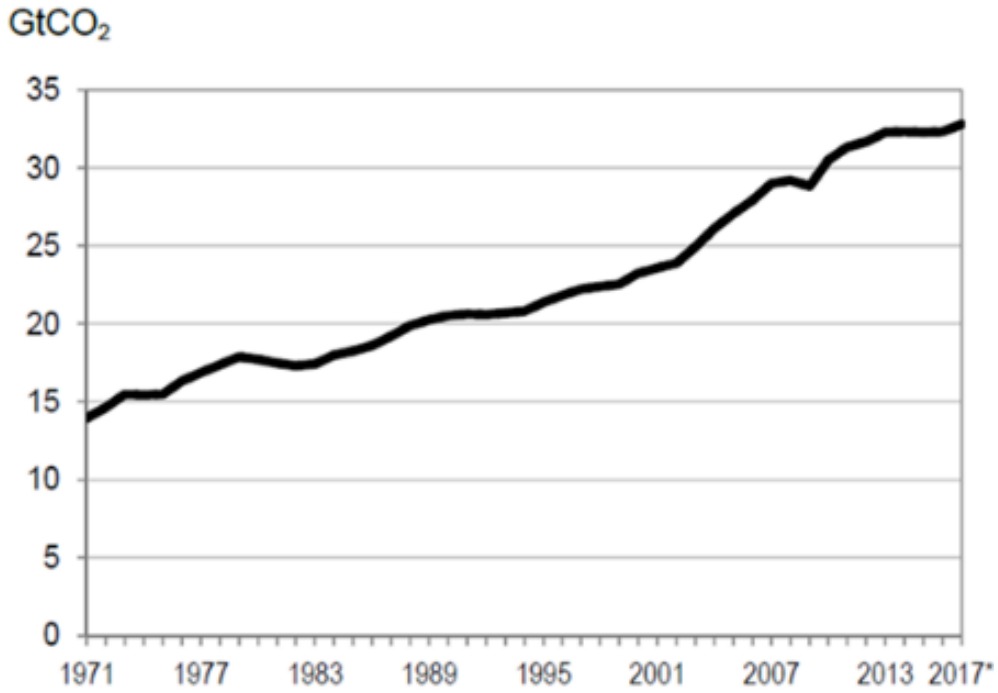


圖 1 全球燃料燃燒二氧化碳排放總量趨勢

資料來源：IEA(2018)

若依部門別排序，能源部門為最主要的二氧化碳排放源(占 42%)，其次為交通運輸部門(占 24%)及製造部門(占 19%)；如將能源部門排放量重新分配至其他能源消費部門，則製造部門躍居第一，占 36%，其次為建築部門(占 27%)及交通運輸部門(占 25%)，如圖 2 所示，且以使用煤炭造成的二氧化碳排放量最多(占 44%)，如圖 3 所示。

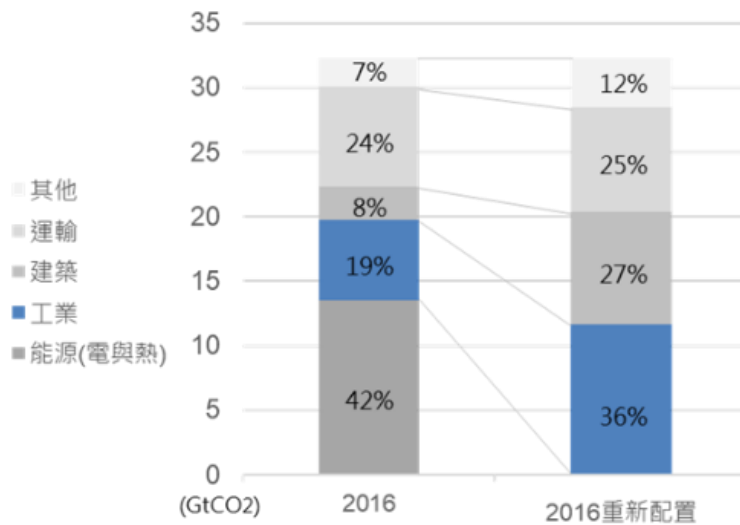


圖 2 2016 年全球二氧化碳排放量-依部門別分類

資料來源：IEA(2018)

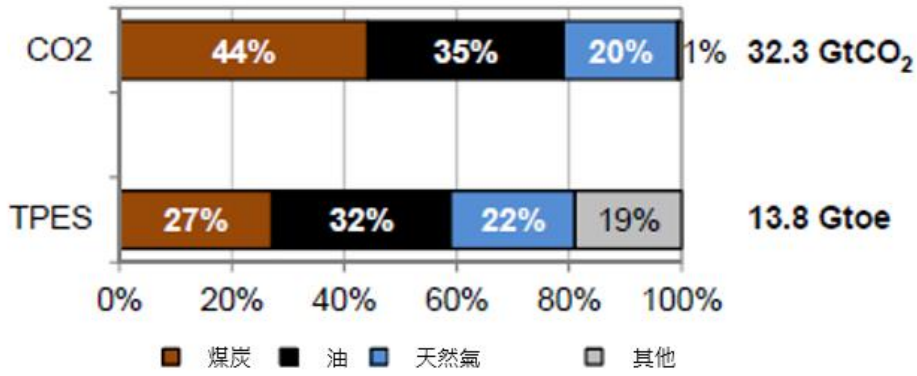


圖 3 2016 年初級能源供應總量(TPES)及其二氧化碳排放量

資料來源：IEA(2018)

2.鋼鐵、石化、水泥等產業為主要排放源

2016 年全球工業部門二氧化碳排放總量超過 60 億公噸，占全球二氧化碳總排放量 19%，若依產業別進一步細分，鋼鐵、其他金屬與礦物、化學與石化等產業排放占比最高，如圖 4 所示，三者合計占工業部門 65% 二氧化碳排放量，為未來工業部門減碳脫碳的重點產業。

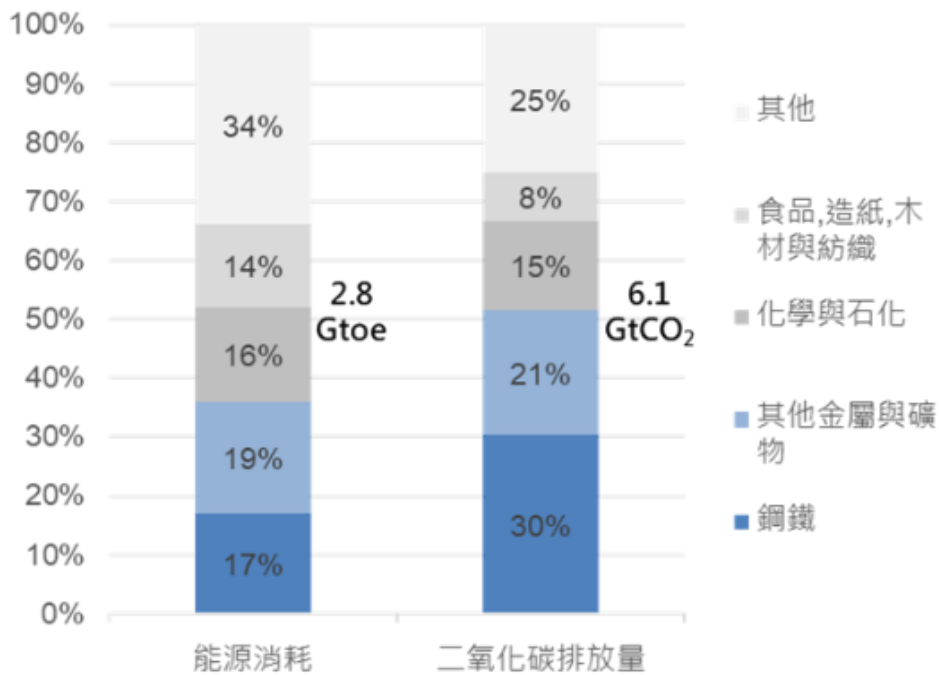


圖 4 2016 年全球工業部門能源消費及排碳量

資料來源：IEA(2018)

3. 產業難以降低排碳的限制因素

據 IEA 統計資料，若要達成巴黎協定的減碳目標，除推廣與強化各項節約能源行動及溫室氣體管理規範外，電力與工業部門的低碳生產技術創新推動是重要關鍵。

原則上，工業部門應可與建築、運輸部門一樣，受惠於零碳電力技術的提升與普及，然而，對於高度依賴煤炭等化石燃料的工業部門而言，現階段低碳生產的發展路徑卻受到限制，其原因歸納如圖 5，說明如下：

(1) 原物料使用造成溫室氣體排放

根據國際研究機構麥肯錫公司(McKinsey & Company)估計，水泥、鋼鐵、石化(乙烯生產)等製造部門二氧化碳排放有 45%來自原物料，無法透過燃料轉換來降低排放，只能藉由製程技術的改變創新來減少或取代原物料投入，進而達成減碳目的。如：水泥生產過程主要使用的原料為石灰岩、黏土及頁岩，其主要化學成分為碳酸鈣，經過旋窯高溫加熱產生氧化鈣主產品並排放二氧化碳。



圖 5 工業部門低碳生產轉型的限制因素

資料來源：財團法人工業技術研究院產業科技國際發展所(2019)

(2)工業製程仰賴高溫熱能

根據麥肯錫公司估計，高溫熱能需求大的產業(如水泥、鋼鐵、石化等)，約 35%溫室氣體排放來自燃燒化石燃料產生高溫熱能的過程，若能使用零碳電力或潔淨能源(如：氫能)替代化石燃料，改變熱能產生方式，則可大幅降低溫室氣體排放；惟目前受限於電熱效率與改變生產製程衍生的成本問題，尚無法利用零碳電力或潔淨能源取代傳統高排碳的化石燃料。

(3)工業製程深度整合

如前所述，藉由改變能源投入(如：零碳電力或潔淨能源)來達成減少溫室氣體排放，就目前工業生產技術而言仍屬困難，除涉及電熱效率外，亦因工業製程深度整合問題影響，例如：單一設備或流程之變動恐牽涉前、後製程需隨之變動，因牽涉範圍極廣，使得製程能源投入轉換問題更加複雜。

(4)工業製程設備生命週期長

一般而言，工業製程尤其是鋼鐵、石化、水泥等能源密集產業之機具、設備，在定期維護情況下多能運轉超過 40 年以上，因此，如欲針對既有工廠進行生產製程調整或設備汰換，皆涉及高額投資的廠區改造或重建問題，因而增加執行難度。

(5)終端產品的價格敏感度高

前述能源密集產業之產品，如：水泥、鋼鐵、乙烯等，多為全球性貿易商品，銷售狀況深受價格因素影響，如採用低碳生產技術、設備，勢必增加生產成本，進而對產品之價格競爭優勢造成影響。因此，對工業部門業者而言，推動低碳生產的誘因較低。

(二)工業部門減碳脫碳路徑

雖然目前工業部門低碳生產創新技術發展受限於製程特性及設備造價等因素影響，不若建築部門與運輸部門之發展快速，然而工業部門仍可透過其他方式來減少溫室氣體排放，如圖 6 所示，說明如下：

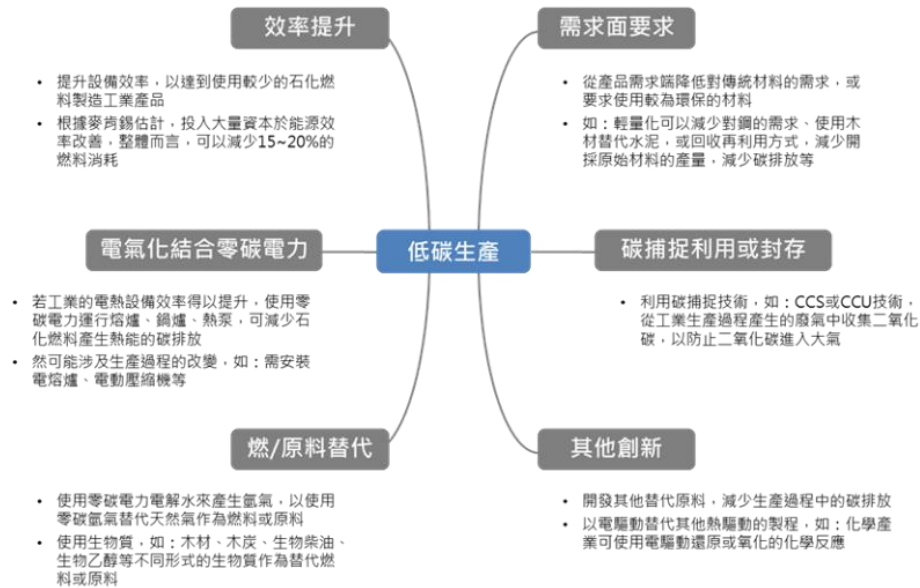


圖 6 工業部門減碳脫碳路徑

資料來源：財團法人工業技術研究院產業科技國際發展所(2018)

1. 效率提升

隨著工業生產技術發展與環境永續觀念普及，除了鼓勵能源密集產業進行轉型升級、加速製程改善與設備汰舊換新，或導入最佳可行技術，以提升製程設備運轉效率外，近期自動化與數位化技術的快速發展，也成為能源密集產業低碳生產轉型的解決方案之一。

2. 電氣化結合零碳電力

由 IEA 發布的相關資料顯示，製造部門溫室氣體排放主要來自化石燃料的使用，因此，透過改用零碳電力或潔淨能源(如氫能)作為動力來源，將可大幅降低使用化石燃料產生的溫室氣體排放。

然而，零碳電力作為傳統化石燃料的替代品，其可取得性與價格直接影響業者採用意願與生產成本。由於各地地形、氣候條件不盡相同，各類可再生自然資源的取得成本也因地而異。而零碳電力的生產成本受到發電技術成熟度，以及輸送、分配、存儲等基礎建設是否完備等影響，導致各地區的零碳電力價格不一。

除了電價以外，電力供應的穩定性及可靠性，也影響業者是否採用製程電氣化對策。當零碳電力來源是間歇性或不穩定時，製造業者需設置電力

儲存設備，以穩定電力供應，如此將提高製程電氣化的佈建成本，或業者必須更有效率地調配零碳電力的使用。

3. 燃料及原料替代

國際上，能源密集產業已逐漸使用低碳燃料取代傳統化石燃料，如：巴西之鋼鐵產業多為小型高爐生產之獨立企業，目前發展出使用生質燃料(木炭)做為部分能源投入及還原劑使用，以減少焦炭使用產生的溫室氣體排放。

而水泥業在熟料製程因對高溫熱能需求量大，以往多使用煤炭作為熱能投入，但近年來因循環經濟發展已廣泛使用回收廢棄物，如：廢輪胎、廢油泥、再生油、建築廢料等，取代部分燃料或原物料投入，不僅降低生產成本、減少溫室氣體排放，且因旋窯高溫製程可破壞分解大部分有害的有機物質，故成為先進國家水泥業者普遍採取的低碳生產技術。

4. 需求面要求

高度依賴傳統化石燃料的能源密集產業，其終端產品，如：水泥、鋼鐵、乙烯等，多屬價格敏感度高的商品，市場競爭力深受價格因素影響，故廠商主動進行會提高成本的低碳生產改善之意願較低。

然而由於消費者針對環境永續的意識抬頭，從消費者、下游廠商向上要求生產者之製程必須低碳，或原物料應為環境友善物質，藉由政策制定驅動低碳生產消費的法規與誘因機制，並以此增加市場對此類商品的價格接受度，將有助於改善目前製造部門低碳生產進展緩慢的問題。

5. 碳捕捉利用與封存技術

除了從原料、燃料、製程等溫室氣體排放源進行原料替代、燃料轉換或技術提升，以達到減碳、脫碳目的外，碳捕捉利用與封存技術(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)也是近年來各國積極投入開發的減碳技術之一。CCUS 技術係指從工業製程產生的廢氣中捕集二氧化碳，再將捕獲的二氧化碳封存在地下，或再利用作為其他工業製程原料，以防止二氧化碳直接進入大氣。

將二氧化碳長期儲存於地下地質結構中，屬創新的減碳技術，2017 年 4 月美國德州的 Petra Nova Holdings 公司開始運行 CCS 計畫，將燃煤電廠發電鍋爐廢氣，利用化學吸收法捕捉並濃縮至 99% 二氧化碳濃度，再透過地下管線輸送至鄰近油田使用，除可增加油田產油量，提高 CCS 技術的經濟效益外，並將二氧化碳永久封存在地層深處之砂質岩層中，是 CCS 技術的一大進展。

6. 其他低碳生產技術創新

前述低碳生產發展路徑或低碳創新技術，依目前應用情形來看，多屬小規模、區域型的試驗生產計畫，因各項技術在應用上仍存在資源的侷限性，或需耗費更多能源，故尚無法成為全球普遍性應用。

然而，這些技術的持續發展可成為其他更前瞻低碳生產技術的奠基石，如：高溫裂解電爐技術、電解還原煉鐵技術、水泥業石灰石原料替代技術、二氧化碳原料石化煉製技術等，在未來將可協助工業部門朝減碳脫碳路徑大幅躍進。

三、後疫情時期推動產業低碳生產

(一) 產業低碳生產推動現況

1. 工業部門減碳成果

在產業結構調整下，電子業 GDP 占製造部門比例，已由 94 年 35.2% 提升至 107 年 51.3%，鋼鐵、石化、水泥等能源密集產業則由 14.3% 略降至 13.9%。工業部門能源消費結構亦隨國際趨勢朝電氣化發展，電力消費占總能源消費比率，由 94 年 41.7% 提升至 107 年 52.6%；電力使用所排放的溫室氣體占比，已從 94 年 62.6% 上升至 107 年 75.1%，如圖 7 所示。

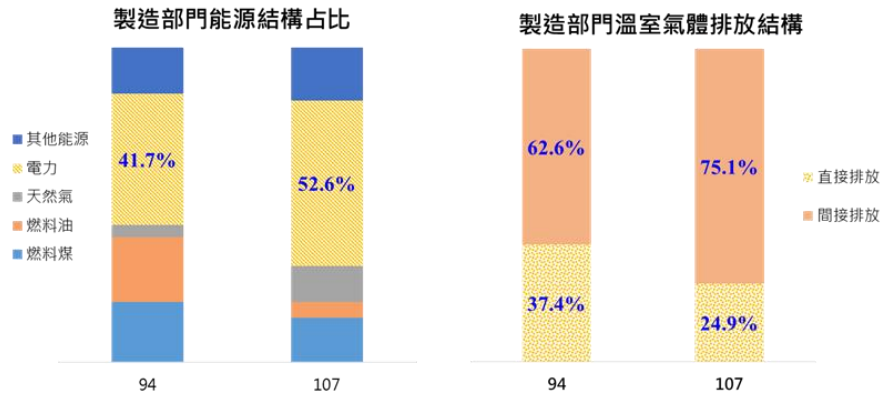


圖 7 工業部門能源結構及溫室氣體排放結構占比變化

燃料使用部分亦持續轉向低碳能源，工業部門化石燃料使用所造成的直接溫室氣體排放，占全國比例已從 94 年(基準年)17%下降至 107 年 12%；其中，燃煤已下降 20.1%，燃料油已下降 74.1%，如圖 8 所示。

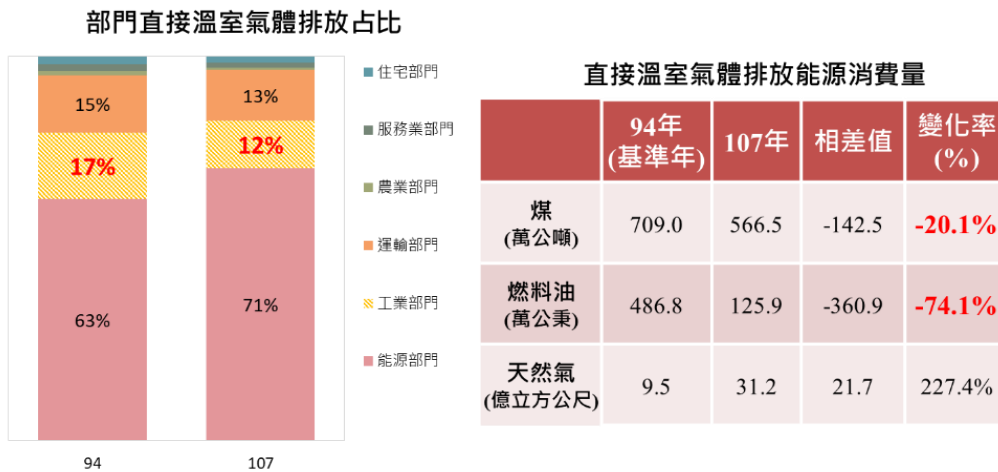


圖 8 工業部門燃料使用及溫室氣體排放占全國比變化

近 10 年工業部門溫室氣體排放成長已顯著趨緩，工業部門 94 年每賺 1 千元排碳 33 公斤，107 年排碳降至 19 公斤，每賺 1 千元的排碳量已減少 43%，如圖 9 所示。

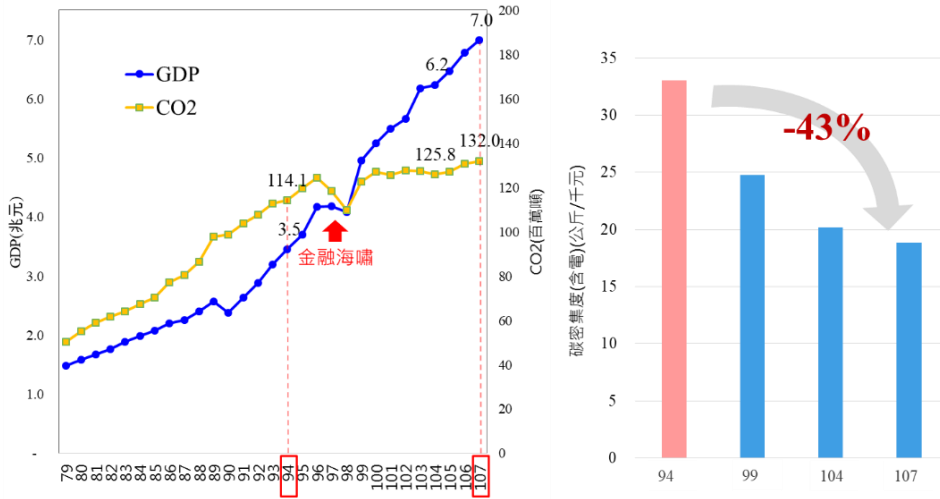


圖 9 工業部門 GDP 及溫室氣體排放趨勢

2.各產業減碳成果

產業自 94 年響應政府推動節能減碳，至 108 年累計已投入金額新台幣 666 億元，累計減碳量 1,470 萬公噸 CO₂；其中，回收年限達 7 年以上的減量措施，由 2014 年 108 件(占比 11%)，增加到 107 年 427 件(占比 29%)，件數增加 4 倍，如圖 10 所示。

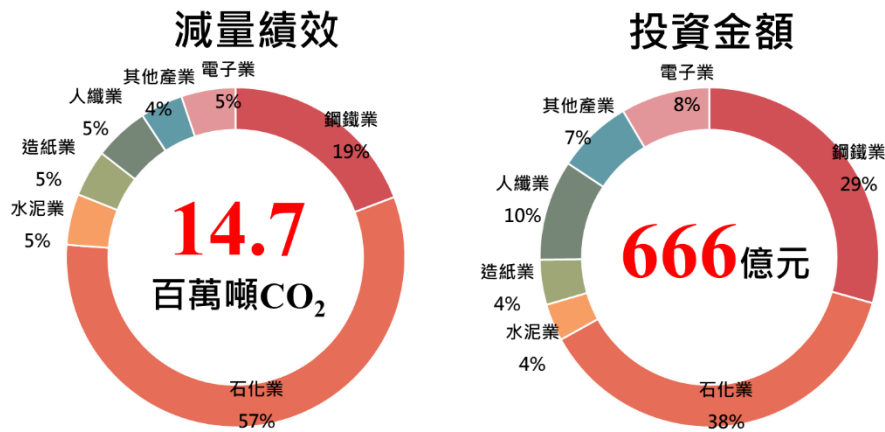


圖 10 各行業減碳成果

半導體及面板產業亦致力於含氟溫室氣體減量(削減率 87%)，領先全球及日本(80%)、韓國(64%)；其中，台灣亦是半導體先進製程及面板生產單位面積用電量全球最低的國家，如圖 11 所示。

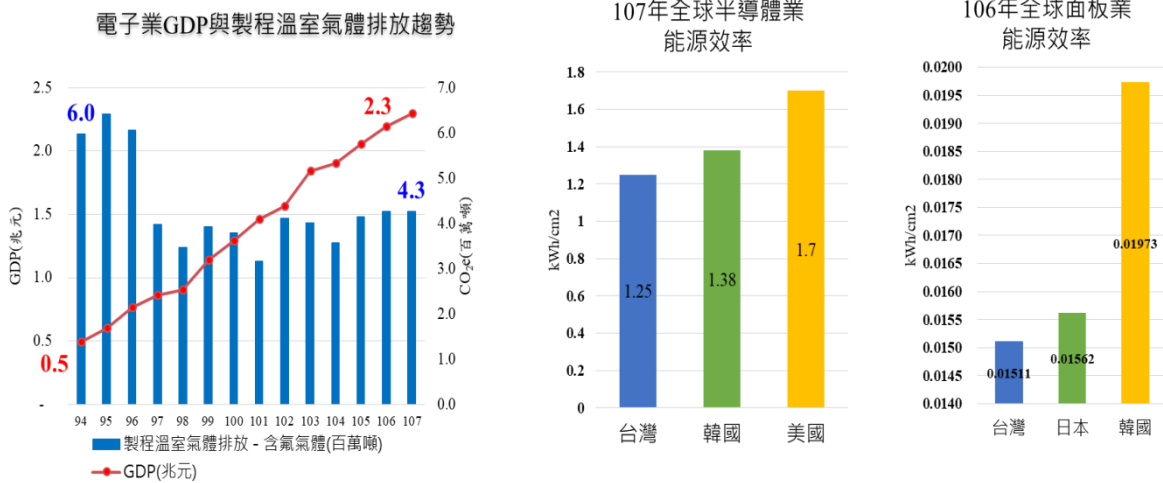


圖 11 電子業減碳成果

(二) 產業低碳生產推動做法

鑑諸工業部門全球減碳脫碳趨勢，並參酌國外先進國家相關策略做法，針對我國產業後疫情時期研提七項低碳生產推動做法。考量低碳創新技術目前多屬小規模、區域型的試驗生產計畫，尚無法為全球普遍性應用，且因其涉及製程整合改善與設備造價昂貴等問題，常使廠商裹足不前，故將結合產業公協會、業者及各領域專家，進行廣泛意見交流與溝通討論，藉由產業溝通強化政府與產業之對話，逐步導入政策工具協助產業減碳。

(三) 推動智慧化能源管理提升能源使用效率

依據國際能源總署(IEA)2019 年統計資料指出，2050 年如欲達成永續展情境的減碳目標，仍以提高能源使用效率可達成 37%減碳貢獻最高，發展再生能源之減碳貢獻 32%次之，如圖 12 所示。顯示能效提升乃是眾多低碳生產技術中，最具潛力與經濟效益者。

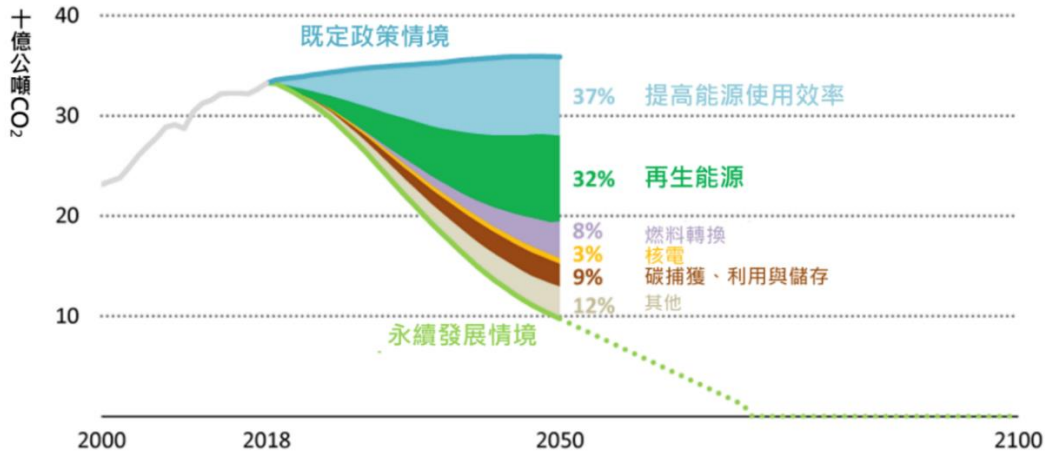


圖 12 邁向永續發展情境目標之減碳貢獻度

資料來源：IEA(2019)

1. 加速設備汰舊更新

針對老舊設備，協助導入高效率節能設備並提供相關補助，加速廠商進行製程改善與設備汰舊換新，同時加強研議製程電氣化、氫能源、碳捕獲利用與封存等技術，評估導入國內產業應用之可行性，為下世代產業技術進行布局。

2. 擴大低碳燃料替代

環保署於 107 年 9 月發布「鍋爐空氣污染物排放標準」，既設鍋爐自 109 年 7 月 1 日起須符合新標準規定值。經濟部工業局自 107 年輔導工廠進行燃料轉換，將既有燃油或燃煤鍋爐改造或汰換成燃氣鍋爐，以降低空氣污染物及二氧化碳排放。107~108 年合計補助 1,698 座工業鍋爐進行設備汰換，全國累計完成改善合計共 2,539 座，鄰近有天然氣管線之工廠多已改用天然氣燃料。

鑒於國內目前已有業者提供液化天然氣陸運供應服務，未來將加強液化天然氣陸運供應服務之推廣應用，協助偏遠地區工廠或產業聚落設置液化天然氣儲槽與氣化裝置，以低碳之天然氣替代，降低溫室氣體與空氣污染物排放。

3.擴大區域能資源整合

經濟部工業局自 98 年起推動產業園區能資源整合，將各工廠多餘的能源與資源藉由媒合與鏈結之方式使其成為鄰近工廠可再使用之能資源，以達到能源與資源循環利用、提升能資源使用效率、減少溫室氣體排放及創造環境經濟效益。至 108 年累計已推動 29 個產業園區及 8 處產業聚落，完成 125 項能資源鏈結，總鏈結量 469 萬公噸，減少重油使用 33.9 萬公秉，溫室氣體減量 105.6 萬公噸 CO₂，促進投資金額新台幣 29.5 億元。

4.推動使用綠電

目前國內已有部分縣市政府訂定自治條例要求轄內企業使用一定比率之綠電，產業園區開發環評審查亦有要求承諾使用一定比率綠電的案例，另一波來自供應鏈及投資者要求之 RE100 係由氣候組織(The climate Group)與碳揭露專案(Carbon Disclosure Project, CDP)共同發起的全球性再生能源使用倡議行動。RE100 是以大型跨國企業為對象，積極推動企業活動包括生產、營運等需以百分之百使用再生能源為目標。依據 RE100 年度報告顯示，至 2018 年底全球共有 155 家企業包括蘋果、微軟等大型跨國企業加入此倡議行動，承諾最晚於 2050 年前使用 100%再生能源 (The Climate Group, 2018)。

5.協助產業開發碳權

總量控制與交易體系是一種有價值的工具，它能以比其他政策選項更具成本效益的方式來減少溫室氣體排放，意即同樣的成本可以實現更大規模的減排量，即成本有效性。為建構產業發展與減碳雙贏的基礎環境，將協助工廠依循溫管法下的抵換專案制度規範，將節能減碳措施轉換為有價之碳額度；同時，透過微型抵換專案示範推動、減碳專案技術推廣及夥伴關係開發等方式，逐步建構製造部門減碳有價化合作平台，促進跨部門合作，以發掘及穩定製造部門碳權供應來源，期強化減碳誘因機制，進而活絡國內碳交易市場。

6. 回應供應鏈減碳要求

經濟部工業局將參考科學基礎減量目標倡議(Science Based Target initiative, SBTi)，依據國內產業現況與需求，開發適合我國產業廠商使用之減碳目標設定與路徑規劃工具，並輔導工廠依製程現況與未來營運規劃，截至 109 年 3 月全球已有 854 家企業提出減碳承諾，350 家通過 SBTi 審定，其中包含 9 家我國企業。

企業為回應消費者對綠色永續之要求，紛紛發行企業社會責任(CSR)報告書，並積極參與相關獎項選拔，以凸顯企業綠色永續形象。有鑑於此，後續亦將協助企業將低碳生產相關作為列入 CSR 報告書，公開承諾擔負減量責任，並依承諾逐步落實減碳工作。

四、結語

COVID-19(新型冠狀肺炎)疫情造成全球經濟衰退，各行各業均受波及，我國製造業者雖於疫情爆發初期，受惠於中國大陸封城停工之轉單效應，但後續因歐美各國疫情擴散，造成消費性商品需求下降，亦因此而遭受巨大衝擊。雖然目前針對全球疫情控制與影響時程尚無定論，但面對未來疫情消除與經濟復甦時所帶動之生產製造需求增加，其產生的碳排放如何降低，必須預先因應。未來期望透過跨部會合作及協助，持續強化產業減量責任，在合理可行前提下給予產業緩衝時間，並提供經濟誘因配套，以推動產業低碳轉型、提升國際競爭力。

參考文獻

1. 2018 年中華民國國家溫室氣體清冊報告，行政院環保署。(2018)
2. 研析國外低碳生產推動策略與措施，財團法人工業技術研究院產業科技國際發展所。(2019)
3. EIA (2018), International Energy Outlook 2018.
4. EIA (2019), International Energy Outlook 2019.