

台灣工業部門減碳潛力分析

核能研究所綜計組研發策略研究室

廖偉辰 2021 年 6 月

我國溫室氣體減量目標，104 年通過溫室氣體減量及管理法，目標為 2050 年較基準年(2005 年)減量 50%，106 年公布第一期溫室氣體階段管制目標，設定 2020 年溫室氣體排放量較基準年減量 2%，2025 年較基準年減量 10% 及 2030 年較基準年減量 20%。至於工業部門溫室氣體排放量，行政院環保署 107 年公布 105 至 109 年間之溫室氣體排放管制總當量，工業部門占比為 51.6%。台灣大約 90% 的溫室氣體排放來自二氧化碳排放，而約 50% 二氧化碳排放來自工業部門，由此可知工業部門減碳在全國溫室氣體減量行動中扮演重要的角色，因此本研究用 TIMES 模型模擬減碳情境，並以二氧化碳減量稜鏡圖提出工業部門之減碳策略建議。

工業部門碳排放及減碳技術介紹

根據 2019 年我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析[1]，工業部門 2019 年二氧化碳排放量為 126.52 百萬噸，佔全國排放量 258.72 百萬噸的 48.9%，遠高於能源部門的 37.53 百萬噸(14.51%)、運輸部門 36.2 百萬噸(13.99%)、住宅部門 28.38 百萬噸(10.97%)、服務業 27.03 百萬噸(10.45%)、農業部門 3.06 百萬噸(1.18%)。目前工業部門二氧化碳燃料燃燒排放約 75% 來自化學材料製造業(28.49%)、電腦通信及視聽電子產品製造業(22.8%)、金屬基本工業(含鋼鐵)(14.88%)、非金屬礦物製品製造業(含水泥)(8.12%)。1990 年起工業部門電力使用排放比例逐年增加，1990 年為 40.33%，至 2019 年為 74.2%，如圖 1 所示，依此趨勢，未來電力使用排放應會持續維持高占比。

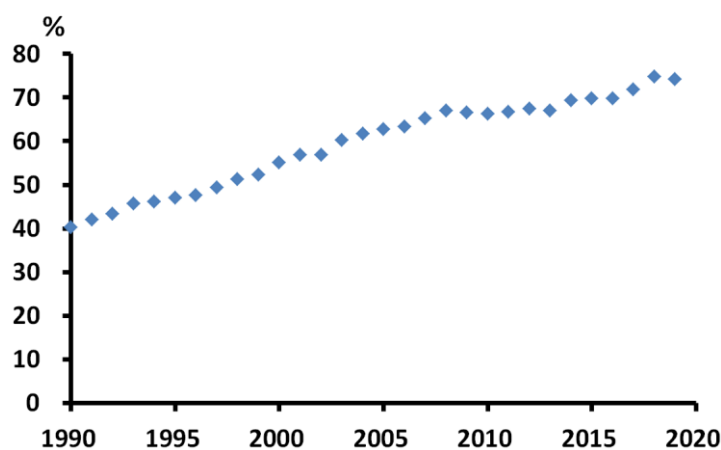


圖 1 歷年工業部門電力使用二氧化碳排放占比

工業部門電力使用排放(間接排放)的 70% 在馬達驅動系統，由此可知馬達驅動系統為工業部門重要的減碳技術，工業馬達驅動系統主要可拆解為四部分，分別為變速驅動裝置(VSD)、馬達(motor)、終端使用設備(End-use device)、其他系統措施(Others system-wide measures)，如圖 2 所示，終端使用設備是由馬達驅動的泵浦、風扇、壓縮機等；變速驅動裝置就是一般常聽到的變頻器，在不同的工業程序中可控制馬達於適當轉速，避免過快而造成不必要的耗電；其他系統措施為閥件、管件等，若更換較光滑流線的配件或是選擇合適管件並進行動線設計，可減少流體摩擦進而降低馬達轉速達省電效果。政府非常重視馬達單體節電，在

106 年至 109 年所推動的新節電運動方案中，將馬達最低能效標準(MEPS)提升至 IE3，如此促進 IE3 馬達市場占比由原本的 2.9% 提升至 100%，進而節電 12.5 億度，此外也協助開發 IE4 馬達。但實際上除了馬達單體之外，必須考慮整體馬達系統節電率才有可能達到 15% 以上，其中其他系統措施占整體系統節電量的 60%，成本也最低[2-4]。

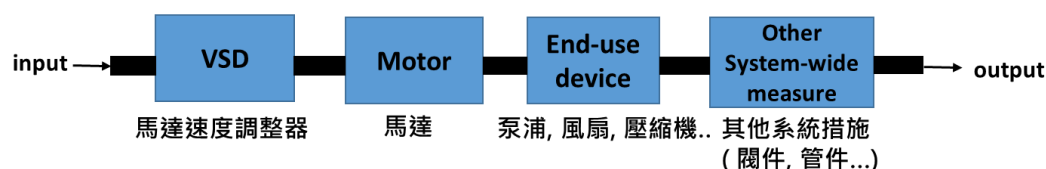


圖 2 工業馬達驅動系統示意圖[4]

燃料燃燒排放(直接排放)約 60% 來自鍋爐，鍋爐在工業部門使用相當普遍，主要作為重要的熱能生產裝置。目前工業鍋爐以燃煤鍋爐為主，排碳量大但具經濟效益，提升能源效率為其減碳手段。近期空汙問題嚴重，政府為降低 PM2.5 等懸浮物，通過經濟部補助直轄市縣市政府辦理工業鍋爐改善作業要點，補助工業鍋爐改用燃氣鍋爐，目前估計全國工業鍋爐約 3,800 座，其中周遭有天然氣管線及減壓站者約 2,000 座(約占 50%)，故本研究保守估計全國有 40% 的工業燃煤鍋爐周遭有天然氣管線及減壓站。政府推動置換燃氣鍋爐是為了降低懸浮物，但同時也可降低碳排放量，因此亦為一重要減碳技術。另外，國外正積極推動生質煤鍋爐技術盼能減少對煤炭的需求，根據 Godina et al.[5]的估算結果，生質煤的成本高於燃料煤的成本，木質顆粒(Wood Pellets, WP)約為 177 美元/噸，焙燒生質物顆粒(Torried Biomass Pellets, TBP)為 214 美元/噸，它們是台灣進口燃料煤成本(78 美元/噸[6])的 2.2 至 2.7 倍。儘管價格昂貴，但具有明顯的減碳效果，因此，生質煤鍋爐未來將是達到嚴峻的減碳目標之重要減碳技術。但此技術面臨最大問題為國內生質煤料源不足，因此本研究保守假設 2030 年可取代 10% 的燃煤鍋爐，2050 年為 30%。

此外，本研究也依據國內外相關文獻[7-11]，盤點出國內鋼鐵、水泥、造紙業主要減碳技術，並連同上述馬達驅動系統、鍋爐列於表 1，並計算各技術的減碳成本，燃煤鍋爐能效提升、高爐效率改善、高爐直接鑄造、高爐爐頂氣循環、電爐效率提升、水泥熟料生產製程控制和能源管理、水泥高效率冷卻機、造紙熱化學紙漿(CTMP)之減碳成本為負值，這表示使用這些技術減碳具成本效益，而這些技術目前也已經被使用。國外這幾年均致力於發展取代高爐煉鐵部分的技術，如：直接還原、熔融還原等，其中以直接還原技術中的 MIDREX 已在一些國家有小規模生產生鐵，此技術需要使用大量的天然氣，生產一單位生鐵用量為現有高爐煉鐵技術的 10 倍以上，因此適合天然氣產量豐富的地區使用，而台灣天然氣幾乎全靠進口，且大部分必須用於燃氣發電廠，因此本研究評估台灣並不具發展該技術的條件。大約 10 年前碳捕存(CCS)技術前景頗被看好，但目前該技術發展緩慢，因此本研究並未考慮此技術。

表 1 工業部門低碳技術及說明

技術種類	項目	減碳成本(NT/ton)		說明
		2030	2050	
馬達驅動系統	石化馬達驅動系統	446.26	383.67	• 包含馬達、變速驅動器、終端使用設備、其他系統措施相較於現況，2030 年節電率 10%、2050 年 20%
	鋼鐵馬達驅動系統	426.53	371.14	
	其他馬達驅動系統	351.63	320.96	
	電子電機空調	229.20	162.19	
	電子電機空壓	163.42	120.40	
	電子電機製程	294.97	245.77	
鋼鐵業	高爐效率改善	-2,279.28	-2,765.88	• 這些技術目前已經開始使用 • 電爐效率提升包含直流電電弧爐、改善製程控制、燃燒加氧、廢鋼預熱
	高爐直接鑄造	-2,081.88	-2,120.36	
	高爐爐頂氣循環	-1,540.96	-1,561.75	
	電爐效率提升	-1,886.42	-2,486.20	
水泥業	水泥熟料生產製程控制和能源管理	-376.83	-386.69	• 這些技術目前已經開始使用
	水泥高效率冷卻機	-130.31	-140.17	
鍋爐	燃煤鍋爐能效提升	-1,036.33	-1,137.21	• 2030 年 70% 燃煤鍋爐以能效提升為減碳手段，20% 以燃氣鍋爐取代，10% 採用生質煤鍋爐 • 2050 年 40% 以燃氣鍋爐取代，30% 採用生質煤鍋爐，30% 採燃煤鍋爐能效提升
	燃氣鍋爐	3195.9	3516.99	
	生質煤鍋爐	3,430.85	1,501.20	
造紙業	熱化學紙漿 (CTMP)	-1,144.22	-578.91	• 未來造紙業最主要減碳技術，2030 年滲透率 10%，2050 年 30%

TIMES 模型工業部門排放結果

The Integrated MARKAL-EFOM System(TIMES)模型是一種應用線性規劃（Linear Programming）方法的能源技術系統分析工具，是在滿足所有限制條件之下，如全國減碳目標、工業減碳技術限制、再生能源裝置量上限等，整體系統最小成本下的所有技術組合。本研究使用 TIMES 運跑不具減碳目標的參考情境及減碳情境，圖 3 為參考情境與減碳情境工業部門二氧化碳排放量，由圖 3(a)顯示參考情境中電力使用排放占比遠高於燃料燃燒排放，每年均在 70% 以上，而在減碳情境中為達到減碳目標需要大量降低電力使用排放，至 2050 年占比為 58%，明顯低於參考情境的 73%，有此可見降低電力使用排放是工業部門減碳的關鍵。

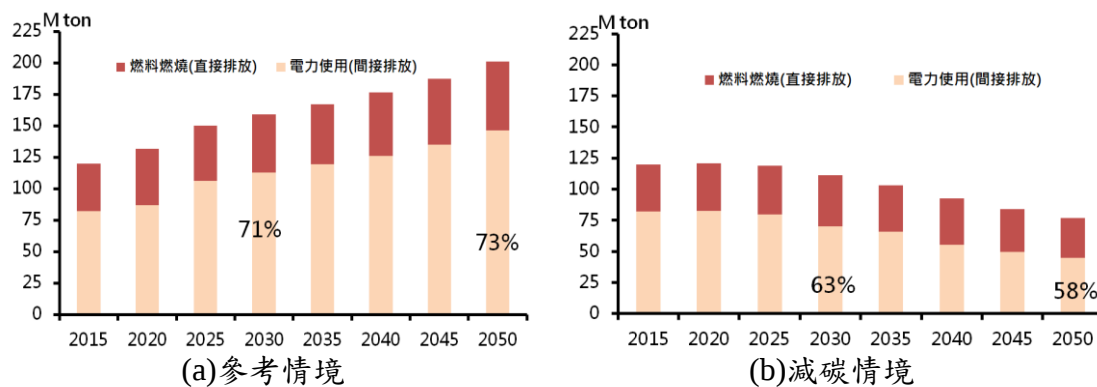


圖 3TIMES 模型工業部門二氧化碳排放

工業部門減碳稜鏡圖分析及策略建議

完成減碳情境運跑後，可得到達全國減碳目標下工業部門排放量，本研究以減碳稜鏡圖探討如何由參考情境過渡到減碳情境以達到此工業部門排放量，如圖 4。參考情境排放量(紅線)上方為具成本效益自動由 TIMES 選擇出現於參考情境之技術，根據稜鏡圖的結果，碳減的貢獻主要來自工業低碳技術、低碳電力和能源服務需求抑低及其他手段。

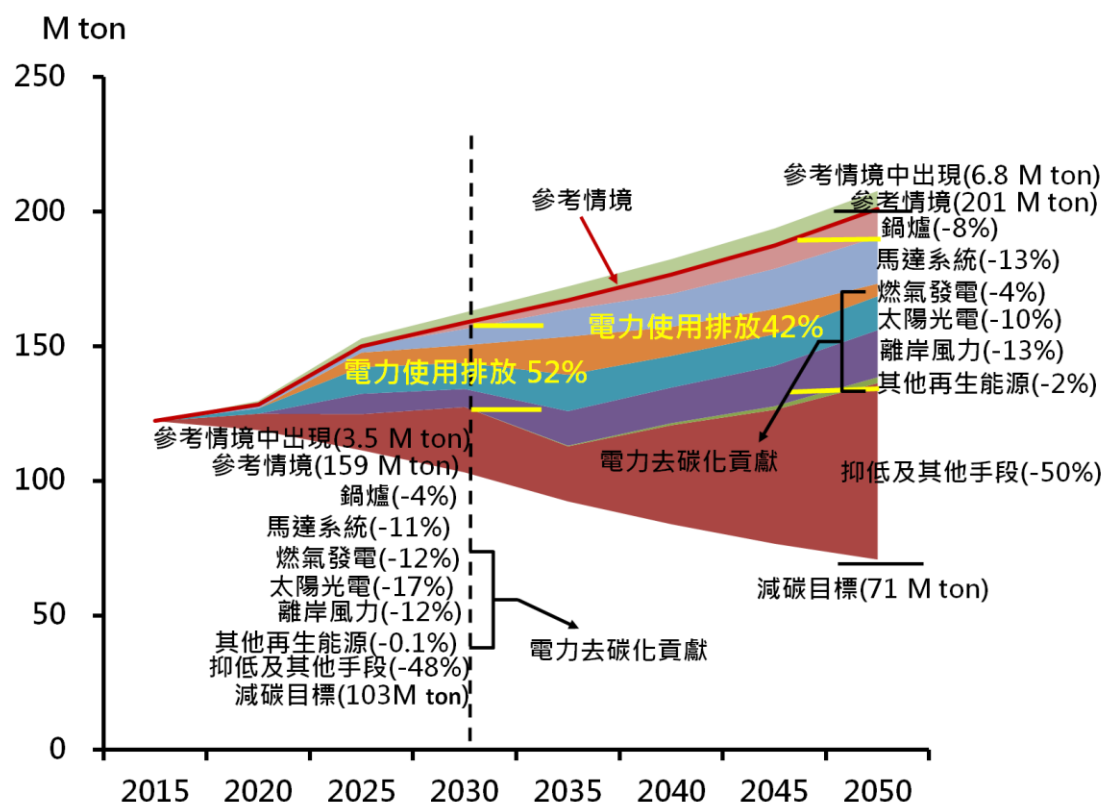


圖 4 工業部門減碳稜鏡圖

主要的工業低碳技術（馬達驅動系統和鍋爐）的減碳是有限的，到 2030 年占 15%，到 2050 年為 21%。值得注意的是，馬達驅動系統可以減少碳排放，但不能自行導致深度去碳，因此必須導入電力入去碳技術，例如燃氣、太陽光電、離岸風電。到 2030 年，包括馬達驅動系統和電力去碳在內的用電所產生的減碳貢獻將約為 52%，到 2050 年將達到 42%，這遠超過上述低碳工業技術的貢獻。此外，還必須配合抑低能源服務需求及其他手段才可以達到減碳目標。

技術變革可能會進一步減少能源服務需求，例如通過自動駕駛減少道路的擴建，因此減少水泥的需求。此外，通過產品的回收或再利用可以減少二氧化碳排放，基於再生產品的生產材料通常比原始材料的生產消耗更少的能源和原料，例如，由廢鋼生產鋼鐵所需能量僅為原鋼鐵生產的四分之一。對於長期的深度去碳，如何設計更具創新性和可行性的策略，並結合再生能源的擴展將是最重要的。2020 年國際再生能源署(IRENA)第十屆大會中部長級氫問題圓桌會議，各國參與者均有共識認為綠色氫具有加速能源轉型及創造更廣泛的全球去碳之潛力，而台灣未來極具發展綠色氫的潛力，在政府積極發展離岸風電的政策之下，未來可利用秋、冬季節過多的離岸風電生產綠色氫用於鋼鐵、化學等難以減排的製造業去碳，例如用於鋼鐵業直接還原鐵。

圖 5 是主要國家和全球總體的工業用電密集度，結果顯示，台灣為 663MWh / GDP（百萬美元），比全球總體高出約 80%，約為義大利、日本、美國等國的 3 倍，瑞士的 6.4 倍，與越南、印度、中國、俄羅斯同屬於工業用電密集度最

高的國家，也就是說工業 GDP 非常依賴用電。圖 4 顯示未來欲達全國減碳目標勢必降低能源服務需求以降低工業用電排放，降低用電排放對於工業部門的二氧化碳減排很重要，但這同時也會降低工業 GDP 並影響全國的經濟發展，目前工業部門占台灣整體 GDP 的 36%。這也是台灣的工業減碳策略與其他大多數國家不同的原因，建議規劃從目前高耗電型轉向高附加價值型的產業結構，例如光學儀器，醫療儀器和其他精密工業。如果能夠如此，那麼未來將可以降低工業用電量以達到減碳目標，而同時也不會影響經濟發展。

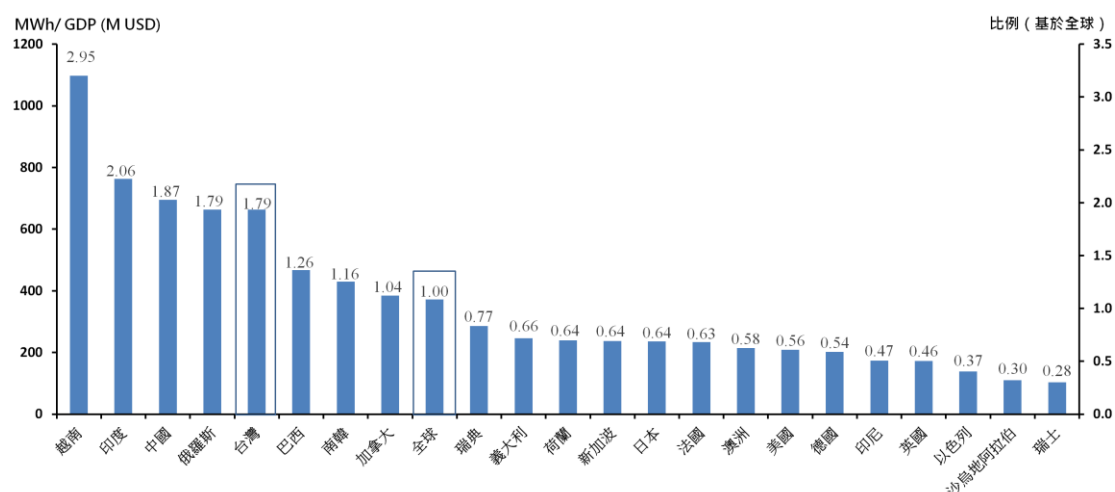


圖 5 主要國家和全球總體的工業用電密集度(2017 年)[12-14]

結論

本研究利用減碳稜鏡圖探討工業部門減碳，結果顯示：(1) 主要低碳工業技術馬達驅動系統及鍋爐所減少的二氧化碳排放是有限的；(2) 必須導入電力去碳技術，例如燃氣、太陽光電、離岸風力發電；(3) 為達到嚴峻的減碳目標，必需再大幅度減少能源服務需求和採取其他措施。本研究提出了透過回收利用或再利用來減碳，以及使用綠色氫於難以減排的製造業。顯然，減少能源服務需求可以有效地減少電力消耗和二氧化碳排放，但這會影響經濟的發展，因此建議規劃從目前高耗電型產業結構轉向高附加價值型，為環境保護和經濟增長創造雙贏的局面。

參考文獻

1. 經濟部能源局，2019 年我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析 (2020)
2. IEA，World Energy Outlook (2016)
3. IEA，Energy-Efficiency Policy Opportunity for Electric Motor-Driven Systems (2011)
4. 核研所，工業馬達驅動系統節電分析 (2017)
5. Godina R, Nunes L J R, Santos F M B C, Matias J A O. Logistics Cost Analysis between Wood Pellets and Torrefied Biomass Pellets: The Case of Portugal. 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management
6. 經濟部能源局，能源統計月報 (2021)
7. IEA, World Energy Investment Cost (2014)
8. ETSAP, Iron and Steel (2010)
9. 行政院國家科學委員會、國立台灣大學人文社會高等研究院、財團法人中華經濟研究院、財團法人台灣經濟研究院，台灣溫室氣體減量進程與綠能產業發展政策之基礎研究：台灣溫室氣體減量成本曲線期末報告 (2012)
10. 黃韻勳、張憶琳，以能源效率模型評估我國水泥業的製程節能潛力，台灣能源期刊，第 2 期，227-242 (2015)
11. ETSAP, Pulp and Paper Industry (2015)
12. IEA. Data and statistics.
<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=Electricity%20final%20consumption%20by%20sector>
13. THE WORLD FACTBOOK
<https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/gdp-composition-by-sector-of-origin/>
14. World Economic Outlook
<https://knoema.com/nwnfkne/world-gdp-ranking-2020-gdp-by-country-data-and-charts>
<https://knoema.com/sxesqmf/world-gdp>