

本月專題

利用邊際減量成本曲線計算行業減碳潛力

黃韻勳¹

摘要

邊際減量成本曲線(MACC)具學理基礎，採由下而上的分析方式，能釐清各項能源技術在達成節能減碳目標下的貢獻與成本，為政策制定提供有效的參考依據。MACC 已廣泛應用於全球、國家、城市層級及各產業部門，並逐漸延伸至能源密集產業(如：水泥業)的節能減碳潛力推估。本文以台灣水泥業為案例，嘗試運用 MACC 進行節能減碳潛力評估。分析結果顯示，至 2025 年時水泥業的節能潛力為 71,399 公秉油當量，占 2018 年能源消費的 6.05%，減碳潛力為 441,855 公噸，占 2018 年碳排放的 3.88%。其中，多數節能減碳潛力具成本效益。相較其他國家，我國水泥業因節能技術設置率高、旋窯的投資相對保守，整體節能減碳潛力略低，惟在替代燃料與碳捕捉再利用方面具發展空間。建議未來若能納入更多前瞻技術與 AI 相關資料，並延長評估期程至 2050 年，將有助於規劃水泥業邁向淨零排放的技術藍圖。

一、前言

過往分析產業的節能減碳潛力方面，可分為由上而下(Top-down approach)與由下而上(Bottom-up approach)兩大類方法；其中，由上而下方法主要將全國的能源消費區分為不同產業，再估算各產業下的能源消費與可實現的節能減碳潛力。由下而上的方法則針對節能減碳技術發展與設定有細緻的描述，確認出各產業的主要節能減碳技術，並個別估算出每種技術之節能減碳量，加總後可得到該產業的總節能減碳量。相對於由上而下，由下而上的方法之主要優點為可直覺顯示哪些技術為節能減碳量的主要貢獻者，並且能夠建立基準情境和不同情境下的節能減碳潛力估算，藉由估算結果

¹ 國立成功大學資源工程系副教授

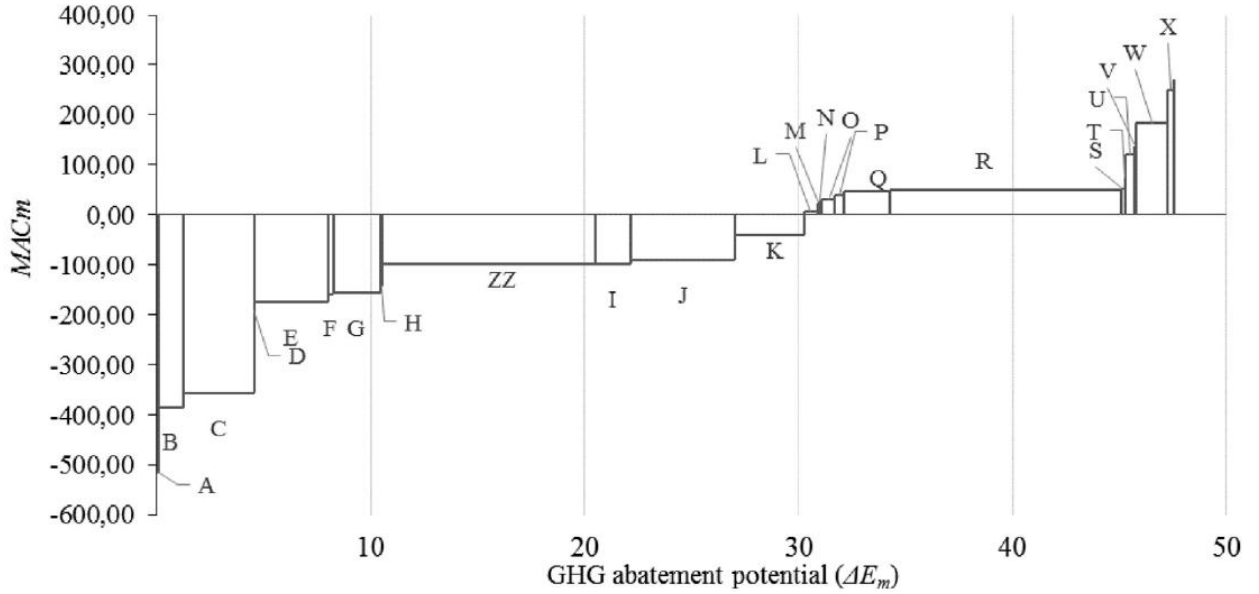
可使決策者清楚了解未來該針對那些節能減碳技術進行改善以提高能源效率及降低溫室氣體排放，適用於細產業別的節能減碳潛力估算，由於本文之目的為計算行業別的節能減碳潛力，故著重於由下而上的方式。

在由下而上的方式中，目前國際研究在尋找最具效益的節能減碳組合時，普遍的作法係評估產業中各項可能的節能減碳技術(措施)之節能減量潛力與成本投入，故節能供給曲線(Energy Conservation Supply Curves, ECSC)或邊際減量成本曲線(Marginal Abatement Cost Curve, MACC)已廣泛應用於國內外推估國家別、產業別、甚至公司別之節能減碳潛力，以作為政府、企業與相關決策者研擬未來能源發展策略的重要依據。基此，本文首先針對邊際減量成本曲線之理論進行介紹，並探討國際間邊際減量成本曲線在各部門與產業的相關應用，接著以我國水泥業為應用案例，盤點出水泥業製程可應用之節能減碳技術，計算水泥業減碳潛力及減碳成本，最後提出結論與建議。

二、 邊際減量成本曲線之理論

邊際減量成本曲線的內涵，為各種減量技術在某一年的減量潛力和單位減量成本，依照單位減量成本之高低排序，表現出各類技術的個別減量潛力和個別減量成本，若將個別技術的減量潛力加總後，可得到總減量潛力。圖 1 為邊際成本減量曲線的概念圖，由圖 1 顯示邊際減量成本曲線係由許多直條所組成，每個直條表示一種技術，共包含 26 種技術。其中，直條的寬度代表該技術在該年度可減少的排放潛力(如：二氧化碳減量潛力)，而直條的高度代表該措施在特定年度每處理 1 公噸二氧化碳所需花費的成本(單位二氧化碳減量成本(\$/tCO₂))，若減量成本為負值，表示該技術具成本有效性。

此顯示若要繪製出邊際減量成本曲線(或節能供給曲線)，則必須計算出減量潛力(或節能潛力)作為橫軸，並計算出單位減量成本(或節能成本)作為縱軸，再將每個技術的單位減量成本(或單位節能成本)由小到大加以排序。針對節能與減量潛力，以及單位節能與減量成本之計算公式分別說明如下：



資料來源：Ponz-Tienda et al. (2016)

圖 1 邊際減量成本曲線概念圖

(一) 節能潛力

$$ES_i = (ELES_i + FULES_i) \times PR_i \quad (1)$$

式(1)中，下標 i 表示各類節能減碳技術； $ELES_i$ 為技術 i 的每生產一公噸原料或產品的節電潛力(Electricity savings potential, GJ/t)； $FULES_i$ 為技術 i 的每生產一公噸原料或產品的節省燃料潛力(Fuel savings potential, GJ/t)； PR_i 為技術 i 每年的原料或產品產量(Production, t/year)； ES_i 為技術 i 的節能潛力(Energy savings potential, GJ/ year)，包含節電潛力與節燃料潛力之加總。

(二) 二氧化碳減量潛力

$$CA_i = (ELES_i \times ELEEF + FULES_i \times FULEEF) \times PR_i \quad (2)$$

式(2)中， $ELEEF$ 為電力排放係數(Electricity emission factor, tCO₂/GJ)； $FULEEF$ 為燃料排放係數(Fuel emission factor, tCO₂/GJ)，在各產業中若節省的燃料是煤炭，則乘上煤炭排放係數，若是燃料油或天然氣，則乘上燃料油或天然氣的排放係數。 CA_i 為技術 i 的二氧化碳減量潛力(CO₂ abatement)，分別由單位節電量乘上電力排放係數，加上單位節燃料量乘上燃料排放係數，再乘上總產量，即可得到減少的二氧化碳總量。

(三) 單位節能成本

單位節能成本的公式可表示如式(3)所示：

$$C_{\text{spec},i} = \frac{ANF \times NPV_i}{ES_i} \quad (3)$$

式(3)中， NPV_i 為技術 i 的淨現值(Net present value)，計算公式可參照式(4)； ANF 為年金現值因子(Annuity factor)，計算公式可參照式(5)。

$$NPV_i = \sum_{t=\text{baseyear}}^{L_i} (I_i + O\&M_i - B_i) \times (1 + r)^{-t+\text{baseyear}} \quad (4)$$

式(4)中， I_i 為技術 i 的投資成本(Investment cost)； $O\&M_i$ 為技術 i 的運維成本(Operation and maintenance cost)； B_i 為技術 i 的所帶來的年均效益，效益之計算可參照式(6)； r 為折現率(Discount rate)； baseyear 為模式設定的基準年； L_i 為技術 i 的生命週期(Lifetime)。

$$ANF = \frac{(1 + r)^L \times r}{(1 + r)^L - 1} \quad (5)$$

$$B_i = [(ELES_i \times P_e) + (FULES_i \times P_f)] \quad (6)$$

式(6)中， P_e 為電力價格(NTD/GJ)； P_f 為燃料價格(NTD/GJ)。換言之，執行技術 i 帶來的效益(B_i)，包含可節省的電力費用、燃料費用等。若將式(4)代入式(3)，可將式(3)重新改寫為式(7)，計算過程如下所示：

$$\begin{aligned} C_{\text{spec},i} &= \frac{ANF \times NPV_i}{ES_i} = \frac{NPV_i}{\left(\frac{ES_i}{ANF}\right)} = \frac{\left(I_i + \frac{O\&M_i}{ANF} - \frac{B_i}{ANF}\right)}{\left(\frac{ES_i}{ANF}\right)} \\ &= \frac{(I_i \times ANF + O\&M_i - B_i)}{ES_i} \end{aligned} \quad (7)$$

利用式(7)即可算出每項技術的單位節能成本。

(四)單位減量成本

單位減量成本(Specific CO₂ abatement cost)的概念與單位節能成本相似，不過將分母的節能量置換為二氧化碳減量，可表示為式(8)所示。

$$C_{\text{spec,CO}_2,i} = \frac{ANF \times NPV_i}{CA_i} = \frac{(I_i \times ANF + O\&M_i - B_i)}{CA_i} \quad (8)$$

綜言之，由上述式(1)、式(2)、式(7)、式(8)可分別計算出各種技術的節能潛力、二氧化碳減量潛力、節能成本與減量成本。以二氧化碳減量潛力作為橫軸，而單位減量成本作為縱軸，可繪製出邊際減量成本曲線。若以節能潛力作為橫軸，而單位節能成本作為縱軸，則可繪製出節能供給曲線。

三、 邊際減量成本曲線之相關應用

(一)邊際減量曲線於各部門之應用

由於 1970 年代遭遇兩次石油危機，導致能源價格高漲，使各國開始體認到節約能源的重要性，因此美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)的 Meier 於 1982 年完成的博士論文中首次提出節能供給曲線(ECSC)(Meier, 1982)，以公式計算出單位節能成本，再將每個節能技術(或措施)的單位節能成本由小到大排序，藉由所計算出的單位節能成本(縱軸)與節能潛力(橫軸)，即可繪製出節能供給曲線。從 1980 年代開始，節能供給曲線逐漸在能源領域中廣泛應用。而從 1990 年代開始，由於氣候變遷開始成為聯合國討論之重要議題，故逐漸引發國際關注，思考如何以更為成本有效的方式進行減碳。因此，節能供給曲線逐漸被調整為邊際減量成本曲線(MACC)，兩者的概念相同，不過在邊際減量成本曲線中改以減量成本作為縱軸，減量潛力作為橫軸，透過邊際減量成本曲線可快速提供政策制訂者各項技術(或措施)之減量潛力及減量成本排序，作為後續政策規劃之參考。

如前所述，1990 年代邊際減量成本曲線開始逐漸被應用於氣候變遷、能源效率、環境污染排放物等領域，但由於文獻眾多，故此處僅針對近十五年(2010~2025 年)應用邊際減量成本曲線於能源與環境領域的國際文獻進行彙整，以瞭解此方法的最新應用情況，彙整結果如表 1 所示。

表 1 邊際減量成本曲線之文獻彙整

文獻	應用區域	應用範疇
Sarofim et al. (2010)	美國	空氣懸浮粒子黑碳
Moran et al. (2011)	英國	農業部門溫室氣體
ESMAP (2012)	巴西、中國、印度、印尼、墨西	各部門二氧化碳

文獻	應用區域	應用範疇
	哥、波蘭、南非	
Hoffmann et al. (2012)	全球	海運部門二氧化碳
Dedinec et al. (2013)	馬其頓	運輸部門溫室氣體
EPA (2013)	全球	非 CO ₂ 的溫室氣體排放
Schwarz et al. (2013)	韋爾斯(上奧地利州)	熱能、電力與運輸部門的溫室氣體
Wächter (2013)	奧地利	各部門二氧化碳
Garg et al. (2014)	印度古吉拉特邦	住宅部門電力與二氧化碳
Promjiraprawat et al.(2014)	泰國	住宅與建築部門二氧化碳
Xiao et al. (2014)	中國	建築部門二氧化碳
Dequiedt and Moran (2015)	法國	農業部門豆類作物二氧化碳
Peng et al.(2016)	中國	公路客運汽車二氧化碳
Timilsina et al.(2017)	亞美尼亞與喬治亞	建築部門二氧化碳
Peng et al.(2018)	中國各區域	火力電廠二氧化碳
Harmsen et al. (2019)	全球	非 CO ₂ 的溫室氣體排放
Sapkota et al. (2019)	印度	農業部門二氧化碳
Sotiriou et al.(2019)	塞普勒斯	各部門二氧化碳
Johnsson et al.(2020)	瑞典	工業部門二氧化碳捕捉與儲存(CCS)
Chen et al.(2020)	中國	電力部門二氧化碳
Liu and Song (2021)	全球	多情境下二氧化碳
de Oliveira et al. (2022)	全球	海運部門二氧化碳
Xiong et al.(2023)	全球	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O 等溫室氣體
Longva et al.(2024)	全球	海運部門二氧化碳
Zhang et al.(2025)	中國各城市	各城市二氧化碳

資料來源：本研究彙整

由表 1 顯示，邊際減量成本曲線應用區域可包含全球、單一國家及國家

中的各區域或各城市，應用範疇則可涵蓋整體部門、農業部門、運輸部門、工業部門、能源與電力部門、住宅部門、商業部門、海運部門等。不僅可用於探討二氧化碳的減量成本與減量潛力，亦可應用於非二氧化碳的其他種類溫室氣體、空氣懸浮微粒、氮氧化物等。邊際減量成本曲線除發表於學術期刊的論文外，近年再度受到矚目的原因係為 2006 年麥肯錫公司與瑞典 Vattenfall 效用公司合作發展的全球溫室氣體減量成本曲線，希望能領先全球提出一套一致性資料，以作為全球減量成本的估算基礎，在 2007 年完成第一版的全球溫室氣體減量曲線(McKinsey & Company, 2007)，2009 年繼之發表第二版(McKinsey & Company, 2009)；麥肯錫公司同時持續推廣邊際減量成本曲線之應用，與許多國家的研究團隊共同建立該國的邊際減量成本曲線，使得此方法被廣為應用。此外，邊際減量成本曲線同時也被多個國際組織或政府機構所採用，如：世界銀行應用此方法估算 7 個開發中國家的減碳成本與潛力(ESMAP, 2012)，美國環保署亦用於分析全球非二氧化碳的溫室氣體排放減量 (EPA, 2013)、英國能源與氣候變遷部(Department of Energy & Climate Change, DECC)應用於評估電力部門可行的減量潛力。綜言之，邊際減量成本曲線具學理基礎，且採「由下而上」的評估方式，針對各項技術的發展與成本進行設定，可有效釐清在達成預定的減量目標下，各類節能減碳技術之減量貢獻與所需花費成本。

(二)邊際減量曲線於產業別之應用- 以水泥業為例

邊際減量成本曲線除應用於國家層級的節能減碳潛力估算外，近年來亦逐漸應用於產業別(如：耗能產業)的節能減碳潛力推估，包含：水泥業、造紙業、鋼鐵業、石化業及紡織業等。由於本文後續以我國水泥業為應用案例估算減碳潛力，故以下主要針對邊際減量成本曲線於水泥業之應用進行說明。

Worrell et al.(2000)探討美國水泥業的節能減碳潛力，盤點了 30 項能源效率技術，並應用節能供給曲線進行估算。分析結果顯示，具成本效益之節能與減碳潛力分別占 1994 年美國水泥業能源消費與二氧化碳排放量的 11% 與 5%。此外，設定混合水泥產量增加，對於技術節能潛力不會產生太大的變化，但具成本效益的節能潛力將增加至水泥業能源耗用量的 18%，二氧化碳排放量亦將減少 16%，此顯示混合水泥的使用為美國水泥業提高能源效率和減少二氧化碳排放量的關鍵。

Hasanbeigi et al.(2010a)水泥業為泰國能源耗用最大的產業之一，同時也造成顯著的二氧化碳排放。此研究採用節能供給曲線，估算 2008 年泰國水泥業具成本效益和技術可行的節電潛力分別為 2 億 6,500 萬度及 16 億 9,700 萬度，占 2005 年泰國水泥業電力使用的 8%及 51%。在節省燃料潛力方面，2008 年泰國水泥業具成本效益和技術可行的節省燃料潛力分別為 17,214 TJ 及 21,202 TJ，占 2005 年泰國水泥業燃料使用的 16%及 19%。此外，政策分析結果顯示，最有效的政策組合為自願協議計畫下替水泥業導入能源相關的二氧化碳稅，不僅會達到顯著的節能量，而所支付相關的財政獎勵金額亦可透過二氧化碳稅收加以補償。

Hasanbeigi et al.(2010b)調查了中國山東省 16 個新懸浮預熱器和預煅燒窯的水泥廠。首先，使用水泥標竿管理和節能工具(BEST-Cement)將各工廠能源使用與國內外最佳標竿(Benchmark)進行比較。分析結果顯示，如果被調查的工廠在每噸水泥生產所消耗之能源可達到國內最佳標竿水準，可節省 12%能源耗用，若可達到國際最佳標竿水準，可節省 23%能源耗用。接著採用節能供給曲線進行估算，16 個水泥廠在 2008 年具成本效益和技術可行的節電潛力分別為 3 億 7,300 萬度及 16 億 9,700 萬度，占 2008 年此 16 個水泥廠電力使用量的 16%及 40%。在節省燃料潛力方面，2008 年技術可行的節省燃料潛力為 7,949 TJ，占 2008 年此 16 個水泥廠燃料使用的 8%，所有節省燃料潛力皆具成本效益。

Hasanbeigi et al.(2013)中國在 2010 年的水泥產量為 18.68 億公噸，約占當年度全球水泥產量的一半。此研究盤點 23 項適用於中國水泥業的能源效率技術，應用節能供給曲線以估算節能減碳潛力。分析結果顯示，中國水泥業在 2010 至 2030 年間具成本效益的節電潛力約為 2,470 億度，可減少 1 億 3,800 萬噸二氧化碳排放量；同時期的技術可行之節電潛力約 2,720 億度，可減少 1 億 5,300 萬噸二氧化碳排放量。此外，2010-2030 年間具成本效益的燃料節約潛力為 4,106 PJ，可降低 3 億 8,400 萬噸二氧化碳排放量。換言之，中國水泥業在此 20 年的累計節能量，約相當於 2007 年拉丁美洲初級能源供給量的 30%或巴西初級能源供給量的 70%。

Morrow(2014)印度為全球第二大的水泥生產國，2010 年的水泥產量為 1.68 億噸，但同時也耗用了 700 PJ 的燃料和 147 億度的電力。該研究盤點出 22 種適用於印度水泥業的能源效率技術，應用節能供給曲線以估算節能

減碳潛力。分析結果顯示，印度水泥業於 2010 至 2030 年間具成本效益的節電潛力約為 830 億度，可減少 8,200 萬噸二氧化碳排放量；同時期的技術可行之節電潛力約 890 億度，可減少 8,800 萬噸二氧化碳排放量。基於所預測的燃料價格，2010-2030 年間具成本效益的燃料節約潛力為 1,029 PJ，可降低 9,700 萬噸二氧化碳排放量。此外，該研究亦對折現率進行敏感性分析，以評估此參數變化對分析結果之影響。

Tesema and Worrell(2015)水泥業為衣索比亞經濟體中成長最快的產業之一，2010 年的耗能量已達 7PJ。該研究首先將 8 個營運中的水泥廠及 12 個興建中的水泥廠與國際最佳標竿進行比較，比較結果顯示衣索比亞水泥廠的能源密集度相當高；以營運中的水泥廠而言，平均電力密集度與燃料密集度相較於國際標竿，分別高出 34%與 36%，顯示具有相當高的節能減碳潛力；接著盤點出 26 項能源效率技術，並使用節能供給曲線估算節能減碳潛力。分析結果顯示，針對 8 個營運中的水泥廠，在 2010 年具成本效益節電潛力與節省燃料潛力分別為 1,100 萬度及 1.2 PJ，可減少 10 萬噸的二氧化碳排放。此外，至 2020 年將有 20 個水泥廠(包含興建中的 12 個水泥廠)，具成本效益節電潛力與節省燃料潛力分別可達到 1 億 5,900 萬度及 7.2 PJ，將導致 60 萬噸的二氧化碳減量。

Zuberi and Patel(2017)水泥業能源使用占瑞士最終能源消費的 9%，亦為瑞士溫室氣體排放的主要貢獻者，2014 年約排放 270 萬公噸的二氧化碳。此研究藉由節能供給曲線以估算瑞士水泥業的節能減碳潛力。分析結果顯示，經濟性(具成本效益)之節能與減碳潛力分別占 2014 年水泥業最終能源消費與二氧化碳排放量的 14%與 13%，總投資成本約為 1.2 億瑞士法郎(約為 1.15 億美元)。此外，亦針對關鍵參數進行敏感度分析，若能源價格上漲 50%且課徵二氧化碳稅 84 瑞士法郎/噸二氧化碳(約 80 美元/噸二氧化碳)，將使得水泥業的碳捕獲與封存技術具經濟可行性，可大幅減少二氧化碳排放。

Mossie et al.(2023)針對衣索比亞水泥廠的節能減碳潛力進行分析。首先採用水泥業基準與節能工具以評估個別水泥廠的能源使用效率，並與最佳標竿進行比較。分析結果顯示，所有被調查的水泥廠之能效皆偏低，平均節能潛力達 36%，顯示在能源效率方面仍有顯著改善空間。接著盤點出 28 項節能措施，並透過節能供給曲線進行估算節能減碳潛力。分析結果指出，這些措施在經濟可行的情況下，每年約可節省 9,900 萬度的電力(約占各廠

年用電量的 11.5%)及節省燃料約 2.7 PJ (約占年燃料使用量的 12.5%)。此外，這些具成本效益的燃料節省措施每年平均可減少二氧化碳排放量約 25.4 萬公噸，相當於總排放量的 5%。該研究亦針對關鍵參數進行敏感度分析，以評估對估算結果之影響。

由上述文獻顯示，邊際減量成本曲線(或節能供給曲線)已應於美國、泰國、中國、印度、瑞士、衣索比亞等國之水泥業，甚至可應用於某個省分(如：中國山東省)，不僅可估算技術可行的節能減碳潛力，亦可進一步探討哪些節能減碳措施具有成本效益。

四、應用邊際減量成本曲線計算行業減碳潛力-以水泥業為例

(一)資料來源與設定

應用邊際減量成本曲線時，首先須確認為水泥業的各類節能減碳技術。由於水泥在原料採掘運送到水泥廠後，在生產製程上可區分為生料製備、熟料燒成及水泥製備等三大製程，各製程下包含不同的耗能設備與可採用的節能減碳技術。故在確認水泥業節能減碳技術方面，本文參考國際水泥業重要文獻，包含：國際能源總署所發佈的水泥業技術藍圖、歐盟水泥業的最佳可行技術文獻、勞倫斯柏克萊國家實驗室所發佈的水泥業提高能源效率機會與水泥業邊際減量成本報告及相關國際期刊論文。同時，參考國內工研院綠能所能源查核輔導團隊所發佈之報告「耗能產業能源效率指標之建立與輔導計畫」及綠色生產力基金會所執行之「水泥業減量潛力及成本評估結果」，藉由交叉對比上述國內外重要的參考文獻後，針對三大製程中的耗能設備，彙整出主要的節能減碳技術。不過這些技術不一定皆可適用於台灣水泥廠，故再透過實際訪廠，詢問這些節能減碳技術各水泥廠是否已採用或未來可能採用，最後選出重要的節能減碳技術共 18 項，其單位節能量(節電量或節燃料量)、投資成本及運維成本彙整如表 2 所示。

表 2 水泥業各項節能減碳技術之單位節能量與成本

製程	技術中文名稱	單位節 燃料量 (GJ/t)	單位節 電量 (GJ/t)	投資 成本 (NTD/t)	運維 成本 (NTD/t)
生料製備	選粉機與分級機效能提昇	0	0.0183	66	0
	生料調和系統效能提昇	0	0.0096	111	0
	生料磨更換為豎磨	0	0.0396	238.5	0
	生料磨排風機更換為變頻驅動	0	0.0012	1	0
熟料燒成	高溫廢熱發電回收	0	0.1109	132	8.1
	低溫廢熱發電回收	0	0.0799	99	8.1
	安裝有機朗肯循環溫差發電	0	0.03	159	11.67
	增加旋窯預熱器的段數	0.079	-0.003	600	0
	熟料生產的製程最佳化控制	0.15	0.0085	30	0
	更換燃燒系統噴嘴	0.29	0	30	0
	替換為高效率冷卻機	0.27	-0.011	95.75	0
	旋窯排風機更換為變頻驅動	0	0.0178	6.9	0
	熟料冷卻排風機更換為變頻驅動	0	0.0004	0.4	0
水泥製備	增設滾壓機用作球磨機的預磨	0	0.0879	150	0
	水泥磨更換為高效率研磨技術	0	0.07	362	0
	水泥磨排風機更換為變頻驅動	0	0.0005	0.36	0
其他	燃料轉換	-0.003	-0.07	60	1.11
	增設二氧化碳捕獲與再利用系統	-0.34	-3.05	240	40.2

註：1.增加旋窯預熱機段數雖可減少燃料使用，但耗電量卻會增加；同樣替換為高效率冷卻機可回收更多熱量，但相對的較為耗電，故單位節電量為負值。而使用燃料轉換及增設二氧化碳捕獲與再利用系統皆會增加耗電量與燃料使用，故單位節燃料量與節電量皆為負值。

2.GJ 為 gigajoule 的縮寫；t 為 ton 的縮寫

(二)估算結果

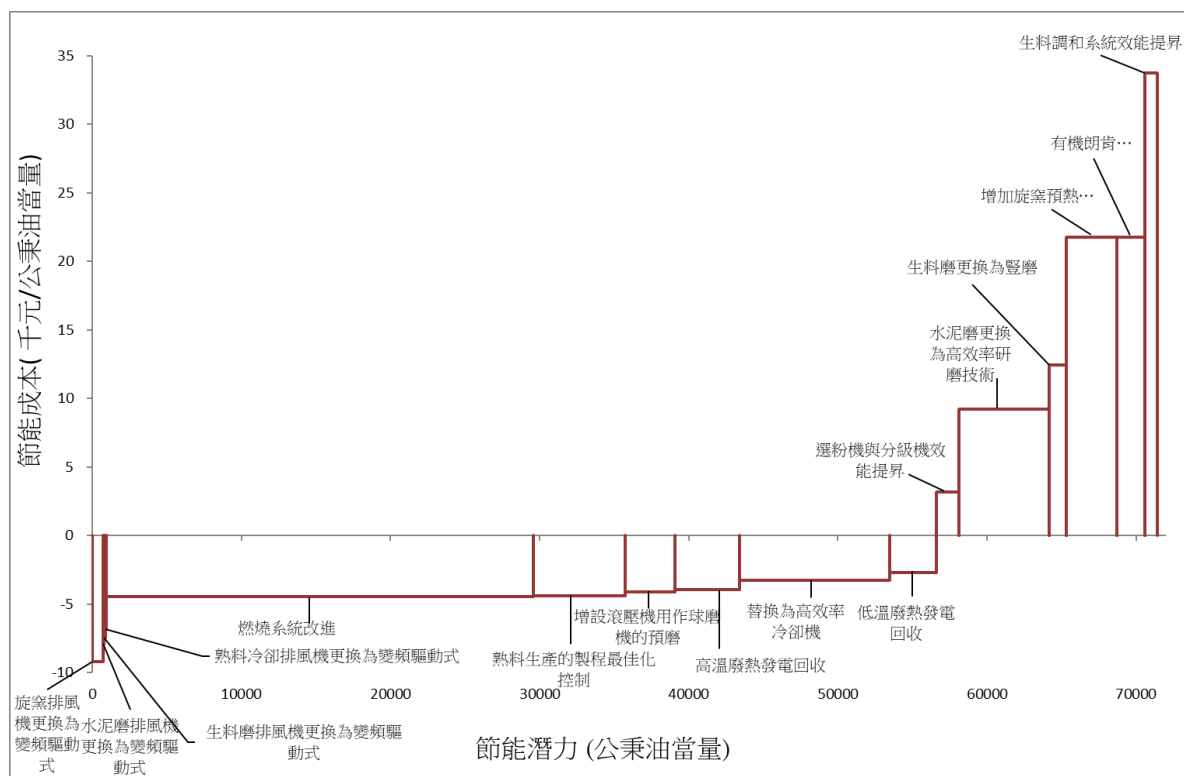
完成模式參數設定後，本文設定 2018 年為基準年，應用邊際減量曲線估算我國水泥業於 2018 年至 2025 年的累積節能減碳潛力及成本，估算結果彙整如圖 1 與圖 2 所示，茲說明如下：

至 2025 年技術可行的節電潛力與節燃料潛力分別為 22,883 及 48,516 公

秉油當量，節能潛力(節電量+節燃料量)合計為 71,399 公秉油當量，約占 2018 年水泥業能源消費的 6.05 %。此外，至 2025 年具成本效益的節電量占整體節電量的 51.2%，具成本效益的節燃料量占整體節燃料量的 92.5%。以節電量而言，將水泥磨更換為高效率研磨技術為節電量貢獻度最大的技術，至 2025 年時約貢獻 6,062 公秉油當量的節電量。在節省燃料量方面，更換燃燒系統噴嘴、替換高效率冷卻機以及熟料生產的製程控制和能源管理為我國水泥業主要可運用的主要節燃料技術選項，至 2025 年分別貢獻了約 28,615、10,519 與 5,844 公秉油當量的節燃料量。

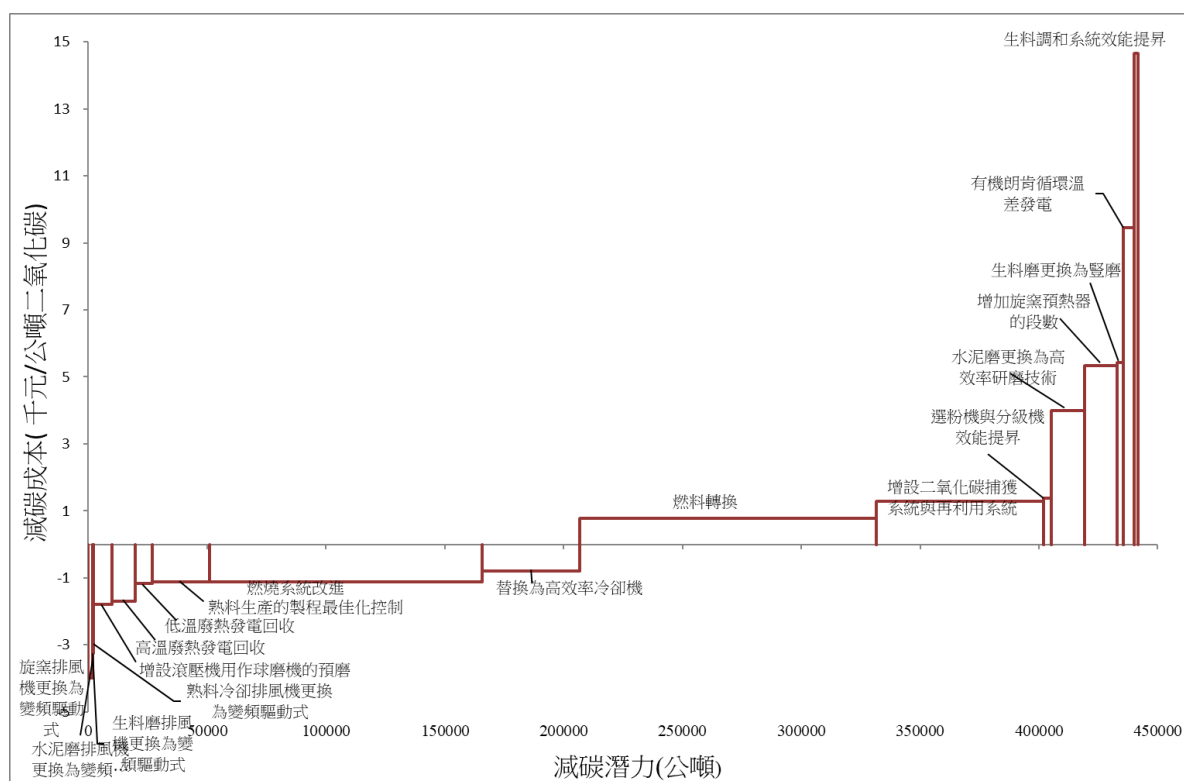
由於減碳量的計算係由節電量與節燃料量分別乘上電力排放係數與燃料排放係數，因此會與節電與節燃料量的大小息息相關，不過在燃料轉換與增設二氧化碳捕獲與再利用系統此兩項技術，雖然會增加耗電量與燃料使用，但卻可顯著減少二氧化碳。分析結果顯示，燃料轉換、更換燃燒系統噴嘴、增設二氧化碳捕獲系統與再利用系統、替換為高效率冷卻機、熟料生產的製程最佳化控制為減碳量貢獻度最大的五項技術，至 2025 年分別貢獻 124,942、114,542、70,080、41,120、24,154 公噸的減碳量，整體技術可行的減碳量約為 441,855 公噸，占 2018 年水泥業排碳量的 3.88%。

在單位減碳成本方面，旋窯排風機更換為變頻驅動、水泥磨排風機更換為變頻驅動、生料磨排風機更換為變頻驅動、熟料冷卻排風機更換為變頻驅動同樣為單位減碳成本最低的四項技術。在負減碳成本中，減碳量貢獻程度最大的技術為更換燃燒系統噴嘴，單位減碳成本為-1.11 千元/公噸。此外，燃料轉換技術雖然減碳量比更換燃燒系統噴嘴來得高，不過由於其相對的投資成本亦較高，導致單位減碳成本為 0.78 千元/公噸，顯示此技術雖然技術可行，但並不具成本效益。在增設二氧化碳捕獲系統與再利用系統方面，減碳為 1.29 千元/公噸，同樣不具成本效益。整體而言，至 2025 年具成本效益的減碳量占整體減碳量的 46.8%。



資料來源：本研究繪製

圖 1 以節能供給曲線估算我國水泥業的節能潛力與成本



資料來源：本研究繪製

圖 2 以邊際減量成本曲線估算我國水泥業的減碳潛力與成本

分析結果顯示，我國水泥業的節能減碳潛力相對偏低。主要原因可歸納如下：

首先，許多節能技術在國內水泥業的設置率已相當高，因此可進一步提昇的空間相對有限。以設置廢熱發電系統為例，超過八成的熟料生產皆已設置廢熱回收系統。此外，短期旋窯之改善投資較為保守：在水泥生產的耗能中，超過 80% 為熱能耗用，其主要耗能設備為旋窯，故旋窯效率提昇扮演重要角色。因此若要在熟料製程的能源效率上再做大幅度的改善，最根本的作法為更換為高效率的旋窯。但是目前政府的水泥業發展政策基於環境生態保護，水泥應以供應國內建設需求為主，禁止水泥窯爐之新設或擴增。再者旋窯投資金額龐大，且既有旋窯產能利用率並不高，故水泥業者於旋窯的投資相對保守。基此，在短期內的節能減碳技術亦不考慮高效率旋窯技術，造成所估算的節能減碳潛力相對偏低。

雖然節能潛力能大幅提昇的空間有限，不過在減碳潛力方面，與國外水泥業相比，在燃料轉換(使用替代燃料)及增設二氧化碳捕獲與再利用系統方面，未來存在較多可擴大利用的空間。其中，廢棄物回收作為替代燃料不僅可達到降低生產成本、減少煤炭使用及削減二氧化碳排放之目的，目前已成為先進國家水泥業普遍採用的節能減碳策略之一。若能透過跨產業間聯合減廢機制的推動，更有助於未來的能資源整合，顯示水泥業可在循環經濟系統中扮演重要核心。

依據「台灣水泥業能源效率與替代燃料使用分析」，我國水泥業燃料替代率使用最多的水泥廠僅 4.2%，推估整體產業應不及 1%，比起 IEA 統計全球平均 5.6% 低，比歐盟國家平均 41% 與日本的 16.9% 差距更大，顯示仍存在很大的進步空間。未來水泥業可在現有基礎上擴大資源循環的能量，參考先進國家之作法，如：建置完整的廢棄物物質流資料庫，詳細定義其範圍、類別、條件等，充份掌控廢棄物之流向與流量；並積極推動產業共生。此外，應持續化解當地居民與環團對廢棄物處理之存疑。

此外，目前我國僅有台灣水泥和平廠裝設鈣迴路二氧化碳捕獲示範系統，並結合微藻固碳養殖技術，將捕獲的二氧化碳進行再利用之驗證。但由目前分析結果顯示碳捕獲系統的單位減量成本並不具有成本效益。不過在計算效益時，目前並未考量出售二氧化碳的收入。未來若可透過碳排放交易，

將捕獲的二氧化碳認證為碳權在市場上交易，將使得二氧化碳捕獲與再利用系統更具經濟可行性，有利於水泥業擴大系統設置，進一步減少二氧化碳排放。

五、結論與建議

節能供給曲線與邊際減量成本曲線具學理基礎，且採由下而上的評估方式，針對各項能源技術的發展與成本進行設定，故可有效釐清在達成預定的節能減碳目標下，各類能源技術之節能減碳貢獻與所需花費成本，可作為決策者制定節能減碳政策之重要參考依據。

目前邊際減量成本曲線應用區域包含全球、單一國家及國家中的各區域或各城市，應用範疇則可涵蓋整體部門、農業、運輸、工業、電力、住宅、商業、海運部門等，近年來亦逐漸應用於產業別(如：水泥業)的節能減碳潛力推估。由文獻彙整顯示，節能供給曲線與邊際減量成本曲線已應於美國、泰國、中國、印度、瑞士、衣索比亞等國之水泥業，甚至可應用於某個省分(如：中國山東省)，不僅可估算技術可行的節能減碳潛力，亦可進一步探討哪些節能減碳措施具有成本效益。

本文嘗試將節能供給曲線與邊際減量成本曲線應用於行業別的節能減碳潛力估算，並以台灣水泥業做為案例分析，然而受限於資料可取得性，目前僅分析至 2025 年。估算結果顯示，至 2025 年的節能潛力(節電量+節燃料量)為 71,399 公秉油當量，占 2018 年水泥業能源消費的 6.05%；其中，具成本效益的節電量占整體節電量的 51.2%，具成本效益的節燃料量占整體節燃料量的 92.5%。減碳量約為 441,855 公噸，占 2018 年水泥業碳排的 3.88%。

目前所估算的我國水泥業節能減碳潛力與其他國比較相對偏低，主要原因包含：我國水泥業在節能減碳技術的設置率已相當高；既有旋窯產能利用率不高，投資相對保守。惟在減碳量方面，與國外水泥業相比，在燃料轉換(使用替代燃料)及擴大二氧化碳捕獲與再利用系統方面，未來具發展潛力。

若未來前瞻節能減碳技術與人工智慧技術之資料可取得，可進一步納入節能供給曲線與邊際減量成本曲線，並將分析期程延長至 2050 年，探討達成水泥業淨零減碳的關鍵技術組合。

參考文獻

1. Chen, L. J., Fang, Z. H., Xie, F., Dong, H. K., & Zhou, Y. H. (2020). Technology-side carbon abatement cost curves for China's power generation sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25, 1305-1323.
2. Dedinec, A., Markovska, N., Taseska, V., Duic, N., & Kanevce, G. (2013). Assessment of climate change mitigation potential of the Macedonian transport sector. *Energy*, 57, 177-187.
3. Dequiedt, B., & Moran, D. (2015). The cost of emission mitigation by legume crops in French agriculture. *Ecological Economics*.
4. de Oliveira, M. A. N., Szklo, A., & Branco, D. A. C. (2022). Implementation of maritime transport mitigation measures according to their marginal abatement costs and their mitigation potentials. *Energy Policy*, 160, 112699.
5. EPA (2013). *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 2010-2030*.
6. ESMAP (2012). *Planning for a Low Carbon Future: Lessons Learned from Seven Country Studies*. Knowledge Series 011/12, Energy Sector Management Assistance Program – The World Bank, Washington DC, USA.
7. Garg, A., Shukla, P. R., Maheshwari, J., & Upadhyay, J. (2014). An assessment of household electricity load curves and corresponding CO₂ marginal abatement cost curves for Gujarat state, India. *Energy Policy*, 66, 568-584.
8. Harmsen, J. H. M., van Vuuren, D. P., Nayak, D. R., Hof, A. F., Höglund-Isaksson, L., Lucas, P. L., Nielsen, J. B., Smith, P., & Stehfest, E. (2019). Long-term marginal abatement cost curves of non-CO₂ greenhouse gases. *Environmental Science & Policy*, 99, 136-149.
9. Hasanbeigi, A., Menke, C., & Therdyothin, A. (2010a). The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: the case study of Thai cement industry. *Energy Policy*, 38(1), 392-405.
10. Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., & Lan, W. (2010b). Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. *Energy*, 35(8), 3461-3473.
11. Hasanbeigi, A., Morrow, W., Masanet, E., Sathaye, J., & Xu, T. (2013). Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement

- industry in China. *Energy Policy*, 57, 287-297.
12. Hoffmann, P. N., Eide, M. S., & Endresen, Ø. (2012). Effect of proposed CO₂ emission reduction scenarios on capital expenditure. *Maritime Policy & Management*, 39(4), 443-460.
 13. Johnsson, F., Normann, F., & Svensson, E. (2020). Marginal abatement cost curve of industrial CO₂ capture and storage— a Swedish case study. *Frontiers in Energy Research*, 8, 175.
 14. Liu, N., & Song, F. (2021). Marginal abatement cost of carbon emissions under different shared socioeconomic pathways. *Sustainability*, 13(24), 13693.
 15. Longva, T., Eide, M. S., Endresen, Ø., Sekkesæter, Ø., Helgesen, H., & Rivedal, N. H. (2024). Marginal abatement cost curves for CO₂ emission reduction from shipping to 2050. *Maritime Transport Research*, 6, 100112.
 16. McKinsey & Company (2007). *Pathways to a Low-carbon Economy: Version 1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*.
 17. McKinsey & Company (2009). *Pathways to a Low-carbon Economy: Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*.
 18. Meier A (1982). *Supply Curves of Conserved Energy*. California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
 19. Moran, D., Macleod, M., Wall, E., Eory, V., McVittie, A., Barnes, A. & Moxey, A. (2011). Marginal abatement cost curves for UK agricultural greenhouse gas emissions. *Journal of Agricultural Economics*, 62(1), 93-118.
 20. Morrow III, W. R. (2014). *Assessment of Energy Efficiency Improvement and CO₂ Emission Reduction Potentials in India's Cement Industry*.
 21. Mossie, A. T., Khatiwada, D., Palm, B., & Bekele, G. (2023). Investigating energy saving and climate mitigation potentials in cement production—A case study in Ethiopia. *Energy Conversion and Management*, 287, 117111.
 22. Peng, B. B., Fan, Y., & Xu, J. H. (2016). Integrated assessment of energy efficiency technologies and CO₂ abatement cost curves in China's road passenger car sector. *Energy Conversion and Management*, 109, 195-212.
 23. Peng, J., Yu, B. Y., Liao, H., & Wei, Y. M. (2018). Marginal abatement costs of CO₂ emissions in the thermal power sector: A regional empirical analysis from

- China. *Journal of Cleaner Production*, 171, 163-174.
24. Ponz-Tienda, J. L., Prada-Hernández, A. V., & Salcedo-Bernal, A. (2016). The problem of ranking CO₂ abatement measures: A methodological proposal. *Sustainable Cities and Society*, 26, 306-317.
25. Promjiraprawat, K., Winyuchakrit, P., Limmeechokchai, B., Masui, T., Hanaoka, T., & Matsuoka, Y. (2014). CO₂ mitigation potential and marginal abatement costs in Thai residential and building sectors. *Energy and Buildings*, 80, 631-639.
26. Sapkota, T. B., Vetter, S. H., Jat, M. L., Sirohi, S., Shirsath, P. B., Singh, R., Jat, S. H., Smith, P., Hillier, J., & Stirling, C. M. (2019). Cost-effective opportunities for climate change mitigation in Indian agriculture. *Science of the Total Environment*, 655, 1342-1354.
27. Sarofim, M. C., DeAngelo, B. J., Beach, R. H., Weitz, K. A., Bahner, M. A., & Zapata Figueroa, A. M. (2010). Marginal abatement cost curves for US black carbon emissions. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 7(S1), 279-288.
28. Schwarz, M., Goers, S., Schmidthaler, M., & Tichler, R. (2013). Measuring greenhouse gas abatement costs in Upper Austria. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5(3), 246-266.
29. Sotiriou, C., Michopoulos, A., & Zachariadis, T. (2019). On the cost-effectiveness of national economy-wide greenhouse gas emissions abatement measures. *Energy policy*, 128, 519-529.
30. Tesema, G., & Worrell, E. (2015). Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia. *Energy*, 93, 2042-2052.
31. Timilsina, G. R., Sikharulidze, A., Karapoghosyan, E., & Shatvoryan, S. (2017). Development of marginal abatement cost curves for the building sector in Armenia and Georgia. *Energy Policy*, 108, 29-43.
32. Wächter, P. (2013). The usefulness of marginal CO₂-e abatement cost curves in Austria. *Energy Policy*, 61, 1116-1126.
33. Worrell, E., Martin, N., Price, L. (2000). Potentials for energy efficiency improvement in the U.S. cement industry. *Energy* 25(12), 1189-1214.
34. Xiao, H., Wei, Q., & Wang, H. (2014). Marginal abatement cost and carbon reduction potential outlook of key energy efficiency technologies in China's

building sector to 2030. *Energy Policy*, 69, 92-105.

- 35.Xiong, W., Tanaka, K., Ciais, P., Johansson, D. J., & Lehtveer, M. (2023). emIAM v1. 0: an emulator for Integrated Assessment Models using marginal abatement cost curves. *EGUsphere*, 2023, 1-39.
- 36.Zhang, Y., Zhu, X., Liu, D., Shan, Y., & Wu, Y. (2025). Marginal abatement cost of urban emissions under climate policy: Assessment and projection for China's 2030 climate target. *Sustainable Cities and Society*, 124, 106319.