

2050 淨零之軌跡與行動路徑專題

水泥業淨零轉型精進策略

蔣本基*、李志賢**、張章堂***、陳耀德****、簡又新*****

摘 要

為因應企業及社會各界需求，提升台灣企業永續之層次，本研究以國際永續表現傑出之水泥產業為對象，彙整國內外水泥產業因應淨零之氣候行動發展相關資訊，進行標竿對照，提供國內水泥業參考，並檢視國內水泥業現階段執行困難及提供精進建議，以持續推動國內水泥業達成淨零排放目標，邁向永續發展。

【關鍵字】淨零轉型、淨零碳排、風險評估、標竿產業

*	國立臺灣大學環境工程學研究所	名譽教授
**	崑山科技大學環境工程系	教授
***	國立宜蘭大學環境工程系	講座教授
****	國立台北大學商學院企業永續發展研究中心	諮詢顧問
*****	財團法人台灣永續能源研究基金會	董事長

一、前言

政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）預估全球暖化超過攝氏 1.5 度會導致某些區域更容易出現極端溫度，降水頻率、強度、降雨量的增加；某些地區旱災的頻率與強度增加。為預防上述情況發生，自第 21 屆氣候變化綱要公約會議（COP21）過後，各國建立淨零排放目標共識，讓地球的升溫被限制在攝氏 1.5 度以內。

我國長期致力於因應氣候變遷，減緩與調適雙響進行，在回應國際間的 2050 淨零排放的倡議下，於 2022 年 3 月 30 日提出我國 2050 淨零轉型的 12 項關鍵戰略，前 5 項為能源轉型，包括風/光電、氫能、前瞻能源（地熱及海洋能等）、電力系統與儲能、節能；4 項技術轉型，包括碳捕捉利用及封存、運具電動或與無碳化、資源循環零廢棄、自然碳匯；社會轉型，包括淨零綠生活、綠色金融、公正轉型（國發會，2021）。

因此，為因應企業及社會各界需求，提升台灣企業永續之層次，本文以國際永續表現傑出之水泥產業為對象，彙整國內外水泥產業因應淨零之氣候行動發展相關資訊，進行標竿對照，並檢視國內水泥業現階段執行困難及提供精進建議，提供國內企業參考，以促進國內企業持續推動並達成淨零排放目標，邁向永續發展之道。

二、GCCA 2050 水泥與混凝土業淨零路徑

水泥行業是全球最大的二氧化碳放源之一，約占全球溫室氣體總排放量的 8%。全球水泥和混凝土協會（Global Cement and Concrete Association, GCCA）成員含近 40 個全球知名水泥企業，其中如中國建材、Holcim Group、HeidelbergCement（現已更名 Heidelberg Materials）、UltraTech Cement、台灣水泥、亞洲水泥等，皆是 2020 年產能占全球前 20 名的大廠，2020 年曾召集其會員企業與該行業領導者，一同承諾 2050 年生產碳中和混凝土和水泥，以符合全球氣候目標，加速實現二氧化碳減量，並發佈了水泥業 2050 年淨零路徑圖報告——《concrete future——The GCCA 2050 cement and concrete industry Roadmap for net zero concrete》（GCCA, 2021）。報告詳細闡述了水泥業將如何與建築環境利害關係人與政策制定者合作，使水泥和混凝土行業全面

脫碳，並為世界提供淨零水泥和混凝土。

GCCA (2021) 發佈該行業永續框架指南，其中要求水泥業的 7 項商業行為準則，包含：職業健康與安全、法規遵循、公平競爭、反貪腐、社區議和、人權及環境。

上述環境議題在水泥業的生產製造過程與其價值鏈上的衝擊主要表現為：

- 能源消耗與碳排放：水泥生產是一個能源密集型過程，需要大量的化石燃料。高能耗的水泥生產過程將導致大量溫室氣體排放，並加劇氣候變遷。
- 空污與廢棄物產生：水泥生產除了導致二氧化碳和其他溫室氣體之排放，還會產生大量空氣污染物和廢棄物，包括粉塵、顆粒物和其他污染物。若無法執行妥當之末端處理，將對環境和人類健康產生負面衝擊。
- 用水：水泥生產需要大量耗水，用於生產製程和抑制揚塵。高用水量會給當地水資源帶來壓力，尤其在缺水地區。
- 循環經濟與土地利用：水泥生產原材料的開採會對生態系統和生物多樣性產生重大影響。與水泥生產相關的土地利用變化可能導致森林砍伐、水土流失和棲息地破壞。

更具里程碑的是 GCCA (2021) 提出淨零路徑圖將淨零目標的達成分為第一期 (1990-2020)、第二期 (2020-2030)、及第三期 (2030-2050) 3 個階段，以 7 個主題之關鍵行動達成 2050 淨零目標，路徑圖與關鍵行動貢獻百分比如圖 1 所示：



圖 1 各主題之關鍵行動達成 2050 淨零目標，路徑圖與關鍵行動貢獻百分比

GCCA 報告亦指出，2020 至 2030 年是淨零轉型的關鍵 10 年，GCCA 及其會員企業將通過以下行動和措施加速減少二氧化碳排放：

- 增加熟料替代——包括粉煤灰、煅燒粘土、粒狀高爐礦渣和碎石灰石。
- 減少化石燃料、增加替代燃料的使用
- 提高混凝土生產效率
- 提高混凝土項目設計和施工期間混凝土使用的效率，包括回收再利用
- 技術和創新投資
- CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）技術和基礎設施開發

此外，GCCA 將透過合作，努力建立政策框架，以實現 2050 淨零與 2030 年二氧化碳減碳里程碑，即相較 2020 年，每立方公尺混凝土之排放強度降低 25%，每立方公尺水泥之排放強度降低 25%。

GCCA 最後指出，2050 淨零路徑報告的重點在於：正確的政策以及建築環境利害關係人和政府的支持是實現淨零路徑的重要因素；不同區域或國家的組織的減碳實際途徑不盡相同；會員企業應根據他們在價值鏈中的位置做出相應貢獻。與之相對應的是會員企業須承擔以下責任：

- 提出路徑圖中確定的實現淨零混凝土所需的政策
- 根據組織所處水泥和混凝土價值鏈中的位置，為淨零混凝土做出貢獻
- 根據組織在水泥和混凝土價值鏈中的地位以及迄今為止的脫碳進展，為一系列 2030 年里程碑和目標做出貢獻
- 定期報告進展

三、水泥業淨零碳排策略與技術

3.1 水泥業淨零減碳策略

水泥業淨零排放策略主要有 5 大面向，優化設計策略為使用新興科技與工程技術，如 3D 和 AI 技術，導入機器人和自動化，使整個系統產生優化；循環材料策略為廢棄

物資源再利用、研發與使用綠色的水泥，同時對環境友善，最重要的能達到減碳目的；能源轉換策略為提升能源效率、使用綠色能源如風力、太陽能等；製程精進主要為汰換老舊設備、製程優化等；減排技術策略為積極發展 CCUS，做到碳的捕集、封存、利用（SBTi（2021）、BORAL（2022）、Buzzi Unicim（2022）、CEMEX（2022）、Heiderberg（2022）、HOLCIM（2022）、Votorantim Cimentos（2022））；淨零策略 5 大策略詳述如下：。

（一）優化設計（BORAL, 2022；Buzzi Unicim, 2022；Heiderberg, 2022；HOLCIM, 2022）

1. 使用 3D 列印、用 AI、機器人、區塊鏈、IoT、3D 列印及量子計算
2. 優化水泥窯熱效率
3. 減少過度設計，提高施工的數位化程度，更好地匹配材料或材料特性（工程安全係數和物流優化）
4. 提高材料性能通過優化固體顆粒在新拌砂漿和混凝土中的粒徑分布，使用強度促進劑提高膠凝劑的早期抗壓強度，提高耐久性
5. 進鋼筋預應力或後張力的工程設計，以及鋼筋混凝土中部分空心 / 優化的結構件
6. 使設計和施工效率符合現行標準和規定。通過對混凝土樓板幾何結構和體系的選擇，混凝土柱間距的選擇和混凝土強度的優化等
7. 綜合優化混凝土強度、鋼筋含量和熟料含量

（二）循環材料（BORAL, 2022；HOLCIM, 2022；Votorantim Cimentos, 2022）

1. 逐年降低熟料水泥比
2. 開發綠色水泥商品 ECOPlanet、Susteno、Vertua®
3. 使用 SCMs 如飛灰、高爐爐渣集礦區覆土等、石灰石、煤灰、礦渣、火山灰、鍛燒黏土等；替代粘合劑的減排潛力，技術成熟度 / 水泥基替代的石灰石 - 熟化粘土 - 水泥的良好技術性能 / 用脫碳原料替代窯爐中的部分石灰石
4. 替代建築材料。砂漿和混凝土可以用不同的材料代替（少用混凝土）。
5. 一般材料（粉煤灰、GGBS（Ground granulated blast-furnace slag powder）、磨碎

的石灰石和其他材料都可以加入)

6. 增加循環性：通過改進施工方法和使用先進的建築技術來減少浪費
7. 為脫碳而回收（取決於運輸距離）
8. 從空間共享中強化使用

(三) 能源轉換 (BORAL, 2022 ; Buzzi Unicim, 2022 ; CEMEX, 2022 ; Heiderberg, 2022 ; HOLCIM, 2022 ; Votorantim Cimentos, 2022)

1. 加速使用高生物質的替代燃料
2. 採購清潔電力
3. 改進為最佳可行技術：基於窯爐的能源效率
4. 提高電氣效率，包括電壓和功率優化，以及使用改進的設備
5. 混凝土在建築中使用時可以提高能源效率和熱效率

(四) 製程精進 (Buzzi Unicim, 2022 ; Heiderberg, 2022 ; HOLCIM, 2022)

1. 使用綠色原料如鍛燒黏土
2. 添加副原料如水泥窯灰之加速碳化技術
3. 與低碳水泥製造技術廠商合作
4. 參加歐盟計畫 LEILAC (Low Emissions Intensity Lime and Cement) ，發展創新熟料，從製程中分離及捕捉 CO₂
5. 使用新穎熟料，如低溫熟料、低碳熟料
6. 提高熟料生產效率，以獲得耐用性和抗压强度 (減少熟料)
7. 在粘合劑利用方面優化混凝土生產 (減少水泥)

(五) 減排負碳 (CEMEX, 2022 ; Heiderberg, 2022 ; HOLCIM, 2022)

1. 優先發展 CCUS 及其他新技術
2. 發展其他負碳技術
3. 二氧化碳吸收技術的發展：水泥粘合劑 (碳酸氫鹽) 吸收大氣中的二氧化碳

4. 替代能源的發展：

- (1) 二次燃料和生物質。水泥廠可以有益地利用低級生物質，如農業殘留物
- (2) 水泥窯的電氣化有可能消除直接的燃料燃燒排放，並且在電價足夠低的情況下，使直接捕獲 CCS 的成本與聯合 CCS 相當
- (3) 來自非初級材料的替代燃料
- (4) 通過對電力供應的間接排放達到電網脫碳

3.2 水泥業脫碳技術

3.2.1 水泥業脫碳技術原理 (Bataille et al. 2018)

水泥業脫碳技術，其方法及原理說明如下：

(一) 設計效率

1. 原子經濟
2. 觸媒作用
3. 能源效率的設計
4. 可再生原料的利用
5. 實施污染預防

(二) 能源效率

1. 提升至最有效技術
2. 熱效率
3. 電效率

(三) 燃料轉換

1. 可替代燃料
2. 廢棄物燃料
3. 生物燃料
4. 天然氣
5. 可再生能源
6. 氫氣

3.2.2 脫碳技術措施及績效

本研究蒐集近年來國外有關脫碳技術措施及績效，除對應 3.1 節的淨零排放 5 大策略，並系統性分類成 4 大面向：設計效率、能源與生產效率、材料與施工效率、排放效率等，如表 1 所示。

表 1 脫碳技術

策略	具體措施	具體績效	文獻參考
設計效率	減少過度設計，提高施工的數字化程度，更好地匹配材料或材料特性（工程安全係數和物流優化）	混凝土中的 PC 的二氧化碳排放量減少 < ~ 6%，產品中的混凝土排放量減少 < ~ 13%	Pamenter and Myers (2021)
	提高材料性能通過優化固體顆粒在新拌砂漿和混凝土中的粒徑分佈，使用強度促進劑提高膠凝劑的早期抗壓強度，提高耐久性	減少 < ~ 4% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	改進鋼筋預應力或後張力的工程設計，以及鋼筋混凝土中部分空心 / 優化的結構件	減少 < ~ 2% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	使設計和施工效率符合現行標準和規定。通過對混凝土樓板幾何結構和體系的選擇，混凝土柱間距的選擇和混凝土強度的優化等	在 2030 年和 2050 年分別減少 7% 和 22% 的二氧化碳排放量	GCCA (2021)
	綜合優化混凝土強度、鋼筋含量和熟料含量	減少 20% 的二氧化碳排放	Kourehpaz and Miller (2019) Karlsson et al. (2020)
能源和生產效率	改進為最佳可得技術：基於窯爐的能源效率	減少 ~ 2% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	提高電氣效率，包括電壓和功率優化，以及使用改進的設備	減少 ~ 1% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	混凝土在建築中使用時可以提高能源效率和熟效率	減少 ~ <20% 的操作加熱和 / 或 ~ <5% 的冷卻需求	Pamenter and Myers (2021)
	提高熟料生產效率，以獲得耐用性和抗壓強度（減少熟料）	熟料強度為 ~ 0.1 公斤 PC 熟料 / 公斤混凝土	Pamenter and Myers (2021)
	在粘合劑利用方面優化混凝土生產（減少水泥）	在 2030 年和 2050 年分別減少 5% 和 14%	GCCA (2021)

策略	具體措施	具體績效	文獻參考
材料和 施工效率	材料替代：SCMs 替代粘合劑的減排潛力，技術成熟度	換 PC 熟料，減少 ~ 25% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021) GCCA (2021) Habert et al. (2020)
	水泥基替代的石灰石 - 熟化粘土 - 水泥的良好技術性能	減少 15~30% 的二氧化碳排放	
	替代建築材料。砂漿和混凝土可以用不同的材料代替（少用混凝土）	減少 <4% 的二氧化碳排放	
	用脫碳原料替代窯爐中的部分石灰石	減少 2% 的二氧化碳排放	
	一般材料（粉煤灰、GGBS、磨碎的石灰石和其他材料都可以加入）	到 2030 年和 2050 年，熟料粘結劑係數分別從目前的 0.63 降低到 0.58 和 0.52；2030 年和 2050 年分別用 1% 和 5% 的水泥替代波特蘭熟料水泥	
	增加循環性 通過改進施工方法和使用先進的建築技術來減少浪費	減少 < ~ 1-2%。二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021)
	為脫碳而回收（取決於運輸距離）	+1 至 -3% 的脫碳潛力	
從空間共用中強化使用	到 2050 年減少 <3% 的二氧化碳排放		
排放效率	CCUS 和相關基礎設施的發展： CCUS 是淨零碳路線圖的基石，CCUS 技術在 2030 年以後將變得重要控源的排放、來自公司消費、採購系統和生產過程的間接排放	到 2050 年捕獲和利用 / 儲存 1.7 億噸二氧化碳	GCCA (2021)
	二氧化碳吸收技術的發展： 水泥粘合劑（碳酸氫鹽）吸收大氣中的二氧化碳	減少水泥生產中 7-25% 的二氧化碳排放	Pamenter and Myers (2021) GCCA (2021) Habert et al. (2020)

策略	具體措施	具體績效	文獻參考
	替代能源的發展。 1. 二次燃料和生物質。水泥廠可以有益地利用低級生物質，如農業殘留物 2. 水泥窯的電氣化有可能消除直接的燃料燃燒排放，並且在電價足夠低的情況下，使直接捕獲 CCS 的成本與聯合 CCS 相當 3. 來自非初級材料的替代燃料 4. 通過對電力供應的間接排放達到電網脫碳	減少 11% 的二氧化碳排放 減少 23% 的二氧化碳排放 減少 5% 的二氧化碳排放 2030 年和 2050 年分別減少 54% 和 100% 的二氧化碳（與 2020 年相比）；減少 15% 的二氧化碳排放量	Pamentner and Myers (2021) GCCA (2021) IEA (2018)

四、脫碳供應鏈推動策略

強化供應鏈之脫碳行動可使面對客戶群的企業大幅提升排碳效益，遠高於企業僅針對自身之操作及能源部分減碳量，因此屬於供應鏈上游端企業需積極因應此趨勢。食物（農業）、建築（營建）、時尚、快速消費品、電子（電器）、汽車、專業服務、船運等 8 種行業之供應鏈排碳量貢獻了全球碳排放量的 50% 以上；主要供應鏈之脫碳僅會增加 1~4% 終端消費者負擔，因超過 40% 以上的減碳可採用現有及可負擔的技術和策略，例如循環經濟、系統效益提升以及綠能。（World Economic Forum, 2021）

4.1 脫碳供應鏈推動策略

供應鏈之脫碳有其困難度，包括資訊不透明、法規不完整、客戶群壓力不足。具體之推動策略如下（World Economic Forum, 2021）：

1. 建立脫碳供應鏈透明度

建立價值鏈排放基線與供應商交換數據，並設定減碳目標，公開報告進度；公司應藉供應鏈或企業淨零的專家小組，針對二氧化碳排放進行優化，以實現淨零目標。

- 建立一個全面的排放基本線，依實際需求進行計算供應鏈的排放
- 第一步，將其採購支出與全球排放因子數據庫相匹配

- 第二步，按地點對供應商進行細分，並根據供應商經營的區域進行具體估算
- 當供應鏈排放的透明度已經建置，公司應公開減碳目標或淨零目標

2. 優化淨零減碳能量

重新思考產品的永續性設計，並規劃永續性價值鏈 / 採購策略；公司應在其價值鏈設定規劃中考慮排碳問題，重新思考其 “生產或購買” 的決定，宜優先選擇當地市場的物流，以減少碳排放。

- 公司對舊產品應降低供應商運營中的碳足跡，並增加回收利用比例
- 公司應開發永續性設計產品使用更環保的材料，減少浪費，降低產品差異，提高回收，改善維修，並將製造技術轉換為低碳技術

3. 吸引供應商參與合作

整合碳排指標納入採購標準及追蹤績效，並與供應商合作，共同處理碳排議題；供應商為減少碳排做出財務承諾，公司可通過共同投資、承購協議或聯合去碳化倡議來分擔風險。

- 為供應商制定採購標準幫助解決上游排放問題。有 2 種主要方法：
 - A、強制實施標準：公司可定義一套優先標準，並要求其供應商在投標中使用之
 - B、要求供應商制定標準：公司允許供應商設定一套具體、可衡量、可實現和適當的減排目標
- 企業採購綠色電力推動可再生能源，公司可以簽署直接或虛擬的電力購買協議（PPA，vPPA）或直接投資於新的可再生能源項目的捆綁證書

4. 推廣生態系服務

參與企業部門倡議，提出最佳實務、認證、可追溯性、政策宣傳等作為，並擴大價值鏈參與者的規模，強化需求方的承諾；需求方承諾可鼓勵對去碳化技術的投資，促進建立合作計畫和對綠色工業化學原料及物流運輸解決方案的需求。

- 公司主管應積極整合相關部門，為氣候行動制定部門級目標，推動整個部門和相應的供應鏈的組成和發展，並緩解對競爭力的擔憂
- 標竿產業可進行跨業合作，提高價值鏈的去碳功能
- 合作成員可以共同投資於擴大碳捕獲和封存技術的中心計畫，促使計畫成為其行業中

去碳化的主要工具之一

- 為綠色解決方案共享信息，創造市場，並簽署承購協議，使綠色解決方案更具經濟效益

5. 激勵公司管理機制

引入低碳治理，調整內部激勵機制，賦予組織權力；公司應建立「淨零轉型」高階組織，將碳排納入採購標準和決策中 -- 將組織中的管理目標和激勵措施與碳排目標相一致。

- 籌組「跨職能採購委員會」，整合碳排與採購、物流、質量和其他職能工作
- 在採購方面，公司應該建立技術團隊，與供應商探討如何落實淨零轉型目標，進行教育培訓
- 內部管理應將內部目標、資金分配和激勵措施與淨零目標保持一致

4.2 營建產業脫碳供應鏈

就脫碳而言，因為二氧化碳本身是一個非常穩定的物質，它是經過高溫然後氧化的產物，因此二氧化碳若再減量和處理，基本上是違反熱力學的原理；就供應鏈而言，甲工廠的廢棄物能不能變成乙工廠的原料，從廢棄物資源回收的角度，減量回收再利用應該是可行的；再將此理念轉換至水泥產業供應鏈，在水泥的生產過程、混凝土使用在施工工地當生命周期結束時剩下廢土，廢土可思考成為再利用的建築材料，再跟二氧化碳結合的再利用，因此從供應鏈角度，水泥業應該與營建工程業結合。

對於脫碳的措施，須從幾個面向思考，如設計效率、能源效率、燃料轉換方面和CCUS。土木或建築工程師在設計的時候要考慮到安全的係數以外，而從節能減碳的角度來講，就是資源不要浪費，設計如何優化就顯得特別重要，其次就是在材料選擇方面，如水泥與鋼筋混凝土能夠變成預拌混凝土，或者是讓整個混凝土和鋼筋應力壓力結合在一起，達到讓整個營建系統優化。能源和生產效率的方面，可使用最佳可行的技術，提高電氣使用效率、添加黏合劑等。圖 2 為包含水泥業、鋼鐵業及營建業的脫碳供應鏈示意圖。

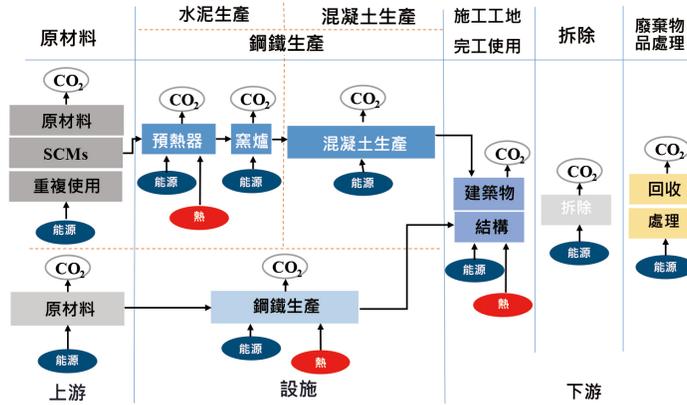


圖 2 營建產業脫碳供應鏈

財務相關脫碳供應鏈優化模式的組成架構如表 2 所示，模式涵蓋短中長期程；目標函數財務成本為主，碳排放減量與能源節約量為輔；限制條件式為 5 大減量策略；所需的參數主要有設計效率、熟料水泥比、碳排密集度及 CCUS 減碳技術等；風險管理包含轉型風險及實體風險的情境分析；一目標函數的多目標模式的解有優化解及折衷解；除應用在水泥業外，未來將擴展至其他產業。此模式可同時彈性選擇 1~3 目標，如碳排放減量最大化、能源節省最大化與財務成本最小化。在模式所需的參數已知下，配合減碳的 5 大策略，以及考慮到聯合國 IPCC 與國際能源總署 IEA 的氣候風險情境等限制條件下，所得的結果可供各產業決策者在未來淨零路徑規劃的參考。

表 2 財務相關脫碳供應鏈優化模式

模式架構					
期程	短期	中期	長期		
目標	1. 碳排減量		2. 能源節約		3. 財務
限制條件	1. 設計	2. 循環材料	3. 能源轉換	4. 製程精進	5. 減排與負碳
參數	設計效率	熟料水泥比	燃料與電力	碳排密集度	CCUS 及其他
情境分析	轉型風險 (STEP/SDS/NZE)			實體風險 (RCP 2.6/RCP 4.5/RCP 8.5)	
模式解	單一優化解			折衷解	
應用	水泥業			其他	

4.3 營建工地減碳管理

前節介紹資訊工程技術應用於工地設備的多項技術，均取得了良好的效果（表 3）。施工現場的整體規劃也極為重要。勞動力的分配和具體車輛的規劃對當前的節能減碳目標也有很大的影響。

表 3 工地減能減碳管理方法

	應用資訊技術	效益	應用領域	來源
勞動力優化	<ul style="list-style-type: none"> ◆數據處理 ◆遺傳演算法 ◆資料定義語言 	根據現場施工過程、燃料隱性排放因數、勞動活動等因素創建二氧化碳排放模擬模型。使用相關演算法進行勞動力分配，減少二氧化碳排放。在加拿大蒙特利爾的實際現場測試中，整體二氧化碳排放量減少了 21.7 %	各類施工現場	Li et al., 2017
車輛調度	<ul style="list-style-type: none"> ◆蟻群優化 ◆數據處理 	蟻群優化技術用於優化施工車輛在不同點之間的路徑。實現最短路線，減少油耗和二氧化碳排放		Choi et al., 2018
建築機械系統優化	<ul style="list-style-type: none"> ◆自組織映射 ◆數據處理 ◆粒子群優化 ◆多重權重變化模型 	提出的工程設備優化系統在實際情況下可以減少隧道施工機械系統的碳排放約 20%	隧道施工現場	Song et al., 2022
施工過程優化	<ul style="list-style-type: none"> ◆建築訊息模型 ◆蟻群優化 	通過優化建築施工過程，這種方法可以顯著減少建築施工過程中的能源消耗和碳排放，同時還可以提高建築結構施工的效率	建築施工現場	Tabrizikahou et al., 2021

1. 溫室氣體排放的實時監測和可視化研究

本文提出了 1 種關於資訊物理系統（CPS）的監控系統。通過氣壓傳感器、定位模塊等設備監測工地各種設備的溫室氣體排放。由於絕大多數溫室氣體是由建築工地大型機械的電力和燃料消耗產生的，結合前一階段相關機械的數據採集，結合相應的溫室氣體排放因子，即可計算出溫室氣體排放總量，最後再將各類數據經過採集和計

算後，需要展示在用戶的電腦桌面或其他便攜設備上，並將其可視化，輔助施工現場節能減排工作（Liu et al., 2020）（圖 3）。

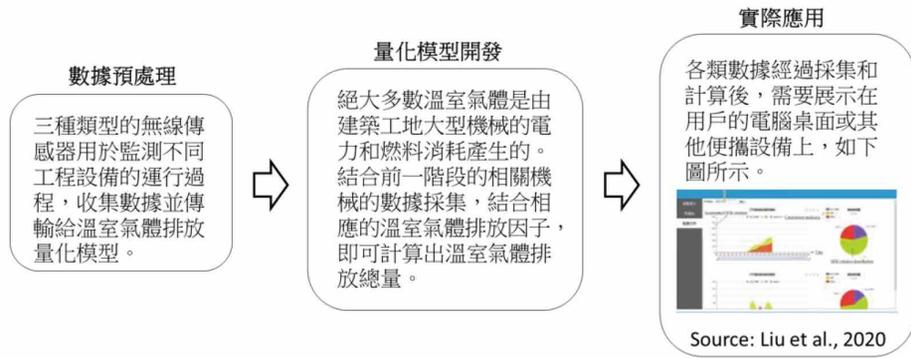


圖 3 溫室氣體排放的實時監測技術流程

2. 道路施工設備的最佳駕駛模式

道路施工設備是施工中不可或缺的設備，由於使用柴油等燃料，排放大量溫室氣體，污染環境。同時，該設備的油耗也很大，造成經濟上的浪費。因此，研究道路施工設備的最佳驅動方式，減少其排放次數，可以減少環境污染，降低能源消耗，有利於永續發展。

資訊技術的發展和應用，為道路施工設備最佳驅動方式的研究提供了便利。利用機器學習、數據挖掘、優化算法等技術，對大量運行數據進行分析處理，找出與排放相關的特徵和模式，進而優化設備的驅動方式，減少排放次數（圖 4）。

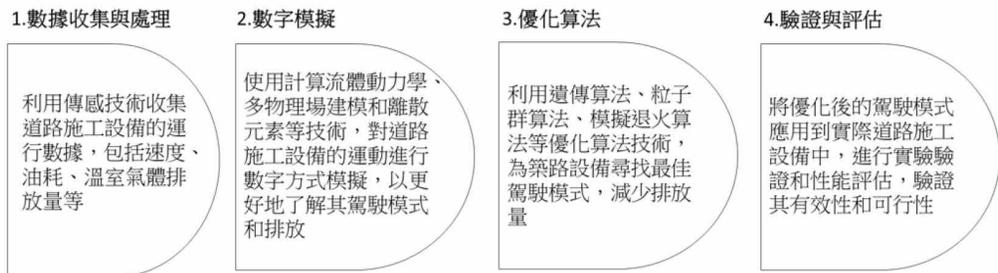


圖 4 道路施工設備的最佳駕駛模式技術流程 (Barati et al., 2017)

3. 節能減碳新興技術

隨著公眾環保意識的不斷增強，有關碳排放的法律法規也在不斷實施。在建築行業，對能源效率更高的工程機械的需求也越來越大，有關工程機械減碳技術，主要發展的 4 大設備，包括挖掘機、工程車、施工設備及鑽挖機，詳如表 4 所示。

表 4 工程機械減碳技術

應用的設備	應用資訊技術	效益	應用領域
挖掘機	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 計算機模擬建模 ◆ 數據處理 ◆ 加速的近端梯度算法 	將建立的液壓挖掘機虛擬樣機模型與虛擬操作員仿真結果相結合，得到省油的挖掘機設計和人員操作模式 (Bender et al., 2017)	建築施工現場
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 數據處理 ◆ 支持向量機 ◆ 反向傳播神經網絡 ◆ 邏輯回歸 	通過採集挖掘壓力訊號，利用 3 種機器學習模型智能判斷其工作階段，從而幫助提高挖掘機效率和節能控制 (Shi et al., 2020)	
各種工程車	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 數據處理 ◆ 強化學習 	基於強化學習的能源管理框架 (HCV)，並將其應用於現場的大型工程機械，以提高機械的燃油效率。實驗表明該框架可節省 5.9% 的燃料消耗 (Zhang et al., 2022)	各類施工現場
道路施工設備	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 數據處理 ◆ 普通最小二乘法 ◆ 多元線性回歸 	通過優化駕駛方式，如減少急加速急剎車、適當控制行駛速度等，可以顯著降低施工設備的排放和油耗，提高燃油效率 (Barati et al., 2017)	道路施工現場
隧道鑽挖機	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 數據處理 ◆ 數據收集 ◆ 智能控制 	通過對掘進機的技術採集和分析並優化多個系統，對系統進行智能控制，降低隧道鑽挖機的能耗，提高其能源利用效率 (Grishenko et al., 2014)	隧道施工現場

五、水泥業淨零轉型精進策略

建立適當年限的短（5 年內）、中（10 年內）、長期（20 年內）風險管理策略，除鑑別氣候風險流程外，宜有管理氣候風險流程並納入整體風險的管理制度，定期滾動式檢討，並適時調整；可參考 CEMEX 淨零路徑與目標（如圖 5）。

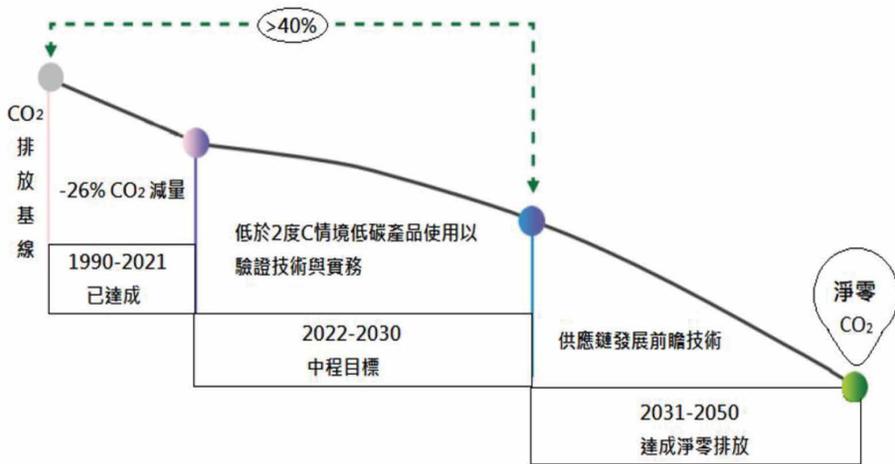


圖 5 CEMEX 淨零路徑與目標 (CEMEX, 2022)

轉型風險因子宜再加入剛通過的氣候變遷因應法相關措施，未來水泥產品相關法規、標準的修正；實體風險尤重水資源（水災、缺限水）失衡衝擊；加強 CCS（carbon capture and storage）技術研發，宜 CCUS、BECCS（Bio-energy with carbon capture and storage）雙轡進行（如表 6 所示）；宜設定多種情境的轉型風險（BAU、2°C、1.5°C）與實體風險（樂觀、穩定、悲觀）分析，著重量化對財務的影響，並輔以實際案例說明。如 4.2 節所述，此模式可同時選擇 1~3 個目標，在模式所需的參數已知下，如減碳的五大策略、IPCC 與 IEA 的氣候風險情境等限制條件下，所得的優化結果可供營建業或其他產業在未來淨零路徑規劃的參考。

表 6 建構財務相關脫碳優化模式

模式架構					
期程	短期	中期	長期		
目標	1. 碳排減量		2. 能源節約		3. 財務
限制條件	1. 設計	2. 循環材料	3. 能源轉換	4. 製程精進	5. 減排與負碳
參數	設計效率	熟料水泥比	燃料與電力	碳排密集度	CCUS 及其他
模式解	單一優化解			折衷解	
應用	水泥業			其他	

GCCA 全球水泥及混凝土協會淨零策略指引包括：設計與營建效率、混凝土生產效率、水泥與膠結材節約、熟料生產節約、CCUS、電力的脫碳、及 CO₂ 碳匯：再碳酸化等策略。研究過程中與國內水泥業召開多次諮商會議，其中，台灣水泥公司提出永續發展減碳 7 大策略包括：應用替代原物料、應用替代燃料、碳捕獲、碳匯造林、技術改善、餘熱發電、及再生能源鏈等；亞洲水泥公司提出淨零精進策略如下：

1. 循環經濟：替代能源

- 利用含非碳酸鹽形成存在之氧化鈣物料作為替代原料
- 解決廢棄物處理問題，亦可降低溫室氣體排放

2. 循環經濟：替代燃料

- 使用含生質份或碳排因子較低且具高熱值之物料作為替代燃料
- 減少傳統化石燃料造成之高碳排問題，也協助處理工業廢棄物

3. 碳捕捉再利用

- 開發工業副產品再碳酸化技術，以工業副產品捕捉工廠排碳，製造人造粒料或 SCM
- 將粒料或 SCM 供給下游混凝土廠，整合上下游產業鏈

4. 產品轉型：低碳水泥

- 調整各水泥型別組成，降低碳排
- 在產品創新及國家標準更新雙軌並進下，訂出產品結構轉型規劃，以具體實現產品減碳目標
- 目前已量產：洋房牌墾砌水泥、卜特蘭石灰石水泥

5. 提高能源使用效率

- 改善生產製程，提高用電效率及熱效率。如：風車系統變頻控制改善、預熱機風道改善等
- 建立 ISO 50001 能源管理系統，透過系統性的能源管理，持續計畫性的推動節能措施

6. 廢熱發電系統

- 利用旋窯系統排氣之高溫廢熱，通過鍋爐產生高壓蒸氣驅動渦輪發電機發電，將熱能回收轉換產生電力

7. 再生能源系統

- 響應國家再生能源政策，規劃於 2023 年度建置太陽能發電系統，合計裝置容量 3.8MW 借鏡 GCCA、美國及歐盟，國際皆以水泥業結合混凝土業及營建業為一體達成淨零；效率才是企業追求的目標，政府應以排放強度規範企業碳排而非以總量，水泥是被動為滿足建設需求而生產之產業，企業與政府兩者目標才能一致。水泥業淨零轉型精進策略如下：

1. 建立氣候行動夥伴關係，建構綠色脫碳供應鏈

- 積極與利益相關客戶合作，制定節能標準和節約措施，按照相關國際標準（ISO14064-1、ISO50001 等）進行生產，推動綠色供應鏈的轉型升級
- 制定指導方向和計畫，針對原料供應商訂定減碳目標，為脫碳供應鏈建立材料標準、市場秩序和碳定價機制
- 建立透明的供應鏈排放和問責制度，關注市場平台監管和各行業碳排放數據的公開，在採購標準和決策中引入綠色供應鏈績效管理系統

2. 推廣數位轉化技術，優化系統決策功能

- 進行系統性的碳盤查，盤查直接、間接與價值鏈間的溫室氣體排放範疇，通過碳中和自動化管理和操作，提高生產過程的效率
- 利用物聯網（IoT）、網絡物理系統（CPS）和數字孿生等數位科技，評析減碳技術，提供最佳能源管理策略
- 推動綠色工廠的轉型及系統優化，提升能源和原料利用率技術，利用工程、環境、經濟和能源（4E）評估，優化系統決策功能

3. 發展節能儲能創能技術，增進能源使用效能

- 發展節能設備及廢氣回收 / 廢熱回用創技術；開發綠色材料，增加使用回收材料的比例，減少電力和熱能的消耗
- 提升綠能使用比例，減少原材料的碳足跡，降低電力碳排放係數；政府提供適當獎勵措施，鼓勵相關業者設置創能與儲能設施
- 精進生物質剩餘資源（廢棄物）循環再生、處理技術及管理措施，並建置生物質廢棄物能資源化之脫碳供應鏈

4. 強化永續生產與消費理念，實現低碳循環經濟

- 建立公司「低碳清潔生產」發展政策，強調永續生產和消費與循環經濟理念，俾使資源效率最大化和環境影響最小化
- 建立經濟循環商業模式 --RESOLVE（再生、分享、優化、循環、虛擬化、交換），實現低碳循環經濟
- 完善「生產者延伸責任准則」，建立生命週期、永續物料管理計畫；建立透明的供應鏈制度，實現永續生產與消費的願景

5. 建構自然碳匯評估系統

- 整合以自然為本思維，投入自然碳匯負碳技術驗證（包含 MRV）與示範，包括土壤碳匯（千分之四倡議）、生質能源碳捕獲技術及生物炭高值化等，提升自然碳匯效益
- 建立土壤碳匯監測方法學及自然（森林與農作物）碳匯推估模式，建構自然為本的永續碳匯系統
- 研發土壤固碳改良劑，建構綠色碳匯基礎設施，發展推廣生質能技術應用，提升自然碳匯量能。
- 建立生質廢棄物收集運輸、前處理加工、能源生產等淨零供應鏈，加強農業剩餘資源飼料化、肥料化、能源化及材料化等多元利用，並完善農工交流合作機制
- 整合綠色、低碳及環保等相關憑證，加速生質能再生能源憑證，健全綠色金融制度，獎勵生質能源產業措施，增加農業循環經濟及淨零之誘因

六、結語

6.1 結論

水泥業淨零轉型精進策略包含：建立氣候行動夥伴關係，建構綠色脫碳供應鏈；推廣數位轉化技術，優化系統決策功能；發展節能儲能創能技術，增進能源使用效能；強化永續生產與消費理念，實現低碳循環經濟；建立氣候金融與相關科技機制；及建構自然碳匯評估系統。此外，水泥業針對自身以及供應鏈上下游的碳排放情況，建立碳排基線，加深對產品碳足跡的瞭解，在自身減排的同時，督促供應商進行減排。

6.2 建議

建立適當年限的短（5 年內）、中（10 年內）、長期（20 年內）風險管理策略，除鑑別氣候風險流程外，宜有管理氣候風險流程並納入整體風險的管理制度，定期滾動式檢討，並適時調整；宜設定多種情境的轉型風險（BAU、2°C、1.5°C）與實體風險（樂觀、穩定、悲觀）分析，著重量化對財務的影響。

針對不同升溫路徑進行分析並制定公司相關應對政策，並依據當前政策、新興監管、技術、法律、聲譽及市場 6 個面向進行風險評估。針對不同地區的急性與非急性氣候危害進行情境分析並制定相關預防作法。

供應鏈潛力開發，達成供應鏈淨零，未來宜執行之工作包括導入循環經濟（減少使用初級原料）、製程效率提高（減少能資源使用）、使用再生能源（擴大再生電力來源）、運用再生熱能（擴大再生熱能來源）、採用創新製程（擴大製程創新）、自然為本的解決方案（永續林／農業）、使用綠色燃料（交通電動化、氫化）以及碳捕集（碳捕集與封存）。

致 謝

本論文得已順利完成，首先感謝台灣永續能源基金會簡又新董事長提供研究經費，其次再感謝研究期間出席座談會提供寶貴資訊及建議事項的專家學者包括：環境部資源循環署賴瑩瑩署長、臺灣科技大學顧洋講座教授、成功大學航空太空工程學系陳維新教授、中山大學環境工程研究所高志明教授、台灣混凝土學會何長慶理事長、水泥公會康福山總幹事、台灣水泥公司黃健強副總經理、邱鈺文協理、亞洲水泥公司花蓮廠張志鵬總廠長、陳志賢首席副廠長、及亞東預拌混凝土股份有限公司金崇仁總經理等在此一併致謝。

參考文獻

- 國發會，2050 淨零排放 12 項關鍵策略，https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=6BA5CC3D71A1BF6F，2021
- Bataille, C., Åhman, M, Neuhoff, K., Nilsson, L.J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriquez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., Rahbar, S. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement, *Journal of Clean Production* 187, 960-973, 2018.
- Buzzi Unicim, Holcim, Our Journey to Net Zero, 2022.
- Cemex, <https://www.cemex.com/sustainability/future-in-action/sustainable-products-and-solutions>, 2022.
- Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 (11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>, 2020.Global Cement and Concrete Association, *Climate and Energy*, 2021.
- Global Cement and Concrete Association, The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, <https://gccassociation.org/concretefuture/>

- wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf, 2021.
- Göransson, L., Roadmap for decarbonization of the building and construction industry: A supply chain analysis including primary production of steel and cement. *Energies* 13, 4136. <https://doi.org/10.3390/en13164136>, 2020.
- Habert, G., Miller, S.A., John, V.M., Provis, J.L., A. Favier, A., Horvath, A. and Scrivener, K.,
- Holcim, <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2022-04/08042022-holcim-climate-report-2022.pdf>, 2022.
- Holcim, Holcim's Net Zero Journey, 2022.
- Heidelberg, <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-24-05-2022>, 2022.
- IEA, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018.
- IPCC, AR6 WG1 SPM-16, 2021.
- Karlsson, I., Rootzén, J., Toktarova, A., Odenberger, M., Johnsson, F. and Kourehpaz P, Miller SA, Eco-efficient design indices for reinforced concrete members. *Mater*
- SBTi, SBTi Corporate Net-Zero Standard, 2021.
- Struct 52:1–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1398-x>, 2019.
- Pamenter, S. and Myers, R.J., Decarbonizing the cementitious materials cycle: A whole-systems review of measures to decarbonize the cement supply chain in the UK and European contexts. *Journal of Industrial Ecology* 25, 359–376. <https://doi.org/10.1111/jiec.13105>, 2021.
- Votorantim Cimentos, <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2022-04/08042022-holcim-climate-report-2022.pdf>, 2022.
- World Economic Forum, Net-Zero Challenge: The supply chain opportunity, 2021.

