

環境管理規劃類

## 水泥業 2050 年淨零排放路徑圖 計算方法學研析

陳志賢\*、曾昱中\*\*、邱子杰\*\*\*、陳志宗\*\*\*\*

### 摘 要

因地球溫度不斷升高，為避免極端氣候持續惡化，減少二氧化碳的排放是唯一解方。為因應減碳的潮流，世界各產業紛紛提出 2050 年淨零排放路徑圖。根據統計，水泥業二氧化碳排放約占全球的 7~8%，因此水泥業被視為亟需減碳的產業，但同時因水泥的主要原料—石灰石，在煨燒成為水泥熟料的過程中，會分解並無法避免地釋放出二氧化碳，此製程排放為水泥業排放的主要來源，約占整體排放的 60%，造成水泥業成為減碳困難的產業。

由於水泥業為減碳困難產業，故必須在執行減碳措施同時，也要制定長期產業減碳目標，以利追蹤各項措施效益及彈性調整策略達到 2050 年淨零排放的目標。水泥產業常見的減碳措施為使用替代原燃料、生產低碳水泥、研發新膠結材料、發展 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 新創技術。本文介紹水泥業如何以科學方式設定上述措施減碳目標及使用的的方法學，其中方法學參考全球水泥和混凝土協會 (Global Cement and Concrete Association, GCCA) 淨零路徑圖的各減碳措施，考量國內水泥業實際情況，更有利於追蹤減碳目標。期待透過本文能使各界更能了解水泥業減碳的未來方向，並提供各產業參考，攜手邁向 2050 淨零排放。

【關鍵字】淨零排放路徑、水泥業、循環經濟、低碳水泥

---

- \* 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠
- \*\* 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠
- \*\*\* 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠
- \*\*\*\* 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠

首席副廠長  
研究室副研究員  
研究室工務員  
研究室助理工程師

## 一、前言

水泥主要應用為混凝土材料組成的一部分，其中混凝土由於其具有可塑性、隔熱、耐火、強度及具經濟性，為世界上使用最多的建築材料。混凝土材料中水泥占的重量比例約為 10%，雖占比不大，但水泥材料之溫室氣體排放量卻達整體混凝土的 9 成以上，並且約占世界排碳 8%。由於全球氣溫不斷升高，造成氣候變遷、冰川融化……持續惡化，世界各國開始重視淨零排放議題。政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 報告中指出，全球暖化幅度需控制至 1.5 °C (IPCC, 2018)，若超過 1.5 °C 將導致極端氣候事件（如乾旱、暴雨等）的頻率和強度增加；且隨著極地冰川和海冰的融化，以及海水因升溫而膨脹，海平面將上升，可能導致洪水淹沒、土地流失和社會緊急狀況。水泥業身為重大排碳產業，故為各國所關注的減碳重點產業。

而水泥之所以為重大排碳產業，其原因為製造水泥熟料之原料—石灰石在高溫煅燒時會發生脫酸反應，必然會產出二氧化碳，故被視為減碳難度較高的產業。故為達到淨零排放，水泥業除了持續精進於減碳技術，亦須制定長期產業減碳目標及措施，以利追蹤各項措施效益及彈性調整策略達到 2050 年淨零排放的目標。

## 二、水泥製程介紹

水泥的製造從原料的採掘到最終的水泥成品，每一步都需要經過精密的操作和嚴格的控制。隨著水泥製造流程導入循環經濟，物料的複雜性不斷提升，但為了實現更高效及環保的生產，各大水泥企業積極進行技術創新和生產流程優化。水泥製造通常分為以下幾個階段：

### 1. 原料採掘

水泥製造的第一步為原料的採掘。水泥的主要成分來自石灰石、黏土，石灰石是含有高碳酸鈣的一種天然礦物，是水泥中重要的成分之一。石灰石容易在我國東部沉積岩的地質中被找到，並利用專業的採礦設備及爆破的技術，將石灰石開採出來，以備後續的加工和利用。同時黏土也是另一個重要的原料，主要包含矽、鋁等成分。黏

土通常也需要從相應的礦場取得。與石灰石一樣，這些黏土礦石在經過一系列的採掘、分選等過程之後，將成為水泥原料中的一部分。擁有優良的石灰石與黏土採集技術，可為後續的生產過程提供基礎。

### 2. 生料研磨

透過調配石灰石、黏土..等原料，確保其成分均勻符合水泥生產要求。同時送入破碎機進行破碎形成生料，此步驟的成分調配為熟料燒成重要基礎。

### 3. 熟料生產

利用旋窯上升熱氣流快速將生料中石灰石(主要成分為碳酸鈣)加熱分解脫去二氧化碳(脫酸)，形成具有活性之氧化鈣。經煨燒脫酸之生料進入旋轉窯後，在高溫下，約有 1/4 材料形成熔融態，此時氧化鈣與氧化矽、氧化鋁及氧化鐵等氧化物，結合「燒成」水泥熟料礦物，即矽酸三鈣(Tricalciumsilicate,  $C_3S$ )、矽酸二鈣(Dicalciumsilicate,  $C_2S$ )、鋁酸三鈣(Tricalciumaluminum,  $C_3A$ )、鋁鐵酸四鈣(Tetracalciumaluminoferrite,  $C_4AF$ )。在國內，供給預熱機及旋轉窯熱量之燃料多為煤炭，在旋轉窯內火焰溫度可高達 1,600 ~ 1,800 °C，將生料以約 1,450 °C 之高溫下燒結成為熟料礦物。旋轉窯出口處為使熟料迅速冷卻形成高活性結晶相，會透過冷卻機將水泥熟料自旋轉窯落口的 1,200 °C 高溫，冷卻至約 100 °C。

### 4. 水泥研磨

水泥研磨製程為將水泥熟料、調節水泥凝結時間的石膏(約 5%)，另依不同水泥種類的國家標準規定，可添加不同比例之材料(如石灰石、飛灰、水淬高爐爐渣、矽質材料或卜作嵐材料等)，於水泥磨中進行成品「研磨」，出磨後之成品即為水泥，輸送至水泥庫進行儲存及發貨。

水泥的製造為一資源密集的過程，需要大量的原材料和能源。隨著全球對永續發展和環保需求的增加，水泥產業正積極尋求方法減少碳排放並採用更低碳的製造方法，有助於降低水泥業對環境的衝擊，並為未來的永續發展鋪路。

### 三、水泥業減碳技術

在了解水泥生產的製程後，讓我們再以碳排放的角度切入生產製程，其中「熟料生產」為主要的碳排放來源，又可分為製程排放及燃料排放。製程排放為水泥原料石灰石經高溫煅燒後脫酸造成 CO<sub>2</sub> 排放，為不可避免之排放，約占整體排放 60%；另一燃料排放為熟料生產的熱源提供，一般以煤碳、重油當作燃料，約占整體排放 35%；其餘 5% 為設備及辦公室使用的外購電力排放。

因應排放特性，可制定不同時期減碳策略。初期以最佳可行技術為主，如；循環經濟降低熟料排放係數、生產及推廣低碳水泥，降低水泥中熟料比例、製程熱效率改善，並開始研發 CCUS 新創技術；中期為開發新膠結材料應用於低碳水泥，大幅度取代水泥中熟料；後期透過以上既有技術及成熟之 CCUS 新創技術來達成淨零排放目標。以下介紹水泥業各項重要減碳措施：

#### 1. 循環經濟

循環經濟對於水泥行業熟料生產排放而言，有相當大的貢獻。如前述所提，熟料生產排放主要分為製程排放及燃料排放，水泥業透以下 2 種循環經濟模式分別減少以上兩種排放：

##### (1) 替代原料

透過加入非碳酸鹽類之含鈣工業副產品或廢棄物取代天然石灰石，減少製程排放。而工業副產品或廢棄物通常為轉爐石、還原渣等，透過使用以上物料不僅能減少碳排，也能降低副產品或廢棄物去化問題。

##### (2) 替代燃料

透過使用生質及非生質之廢棄物通常為塑膠片、油泥、木屑、SRF(Solid recovered fuel) 等，取代煤炭、重油作為燃料使用，降低燃料排放。

#### 2. 製程改善

傳統的節能措施，係著眼於直接減少熟料生產的耗熱量，進而降低高碳排燃料之使用，係為直接而有效的方法。投入製程改良、設備妥善維護，根據歐洲水泥協會 (The

European Cement Association, CEMBUREAU) 的預估，2050 年因製程熱效率改善，熟料耗熱可低至 3,150~3,250 (MJ/t-clinker) (CEMBUREAU, 2020)。

### 3. 生產及推廣低碳水泥

接續 2 項熟料的減碳措施，我們來談談水泥中熟料比例的使用策略。目前全球水泥中熟料的比率平均值約為 80%，此與我國大宗使用的卜特蘭水泥中熟料占比 93%，兩者約有 13% 的差距。其原因在於我國預拌混凝土業者習慣於使用卜特蘭水泥，鮮少使用熟料占比較低之水硬性混合水泥。依據 ASTM C150 標準，卜特蘭水泥中非熟料添加物已可達 10% (5% 石灰石及 5% 無機製程添加劑，如飛灰、高爐石、矽質原料等)，ASTM 標準中亦有石灰石水泥規範及墘砌水泥規範；EN 標準也針對不同工程特性用途的水泥，規定不同之熟料占比。為接軌國際趨勢，雖然我國已修訂 CNS 15286 水硬性混合水泥規範，增加了混合水泥種類，可降低水泥中熟料比例，但因公共工程施工綱要規範限制及混凝土廠使用習慣，仍較少廠商願意使用水硬性混合水泥。因應此狀況，除努力推行規範修訂，還需持續向下游廠商進行環境教育及推廣活動，讓低碳水泥逐漸取代卜特蘭水泥，使我國水泥中熟料比率得以大幅度下降。

### 4. 開發新膠結材料

因為矽酸鹽水泥的成功，全球水泥業對於投入新低碳膠結材料製造的腳步較為緩慢。客戶的習慣、法規限制、投入成本考量影響了創新的發展。因水泥業為資本密集產業，單套系統投入設備資金可達數十億元台幣，大幅調整現行生產製程，對於任何水泥廠都是需要思考的重大風險，再加上法規及客戶端的保守特性，新低碳膠結材料要發展到實際可應用之歷時仍過長，對於水泥業減碳發展將是重大阻礙，但仍存在巨大減碳潛力。透過推動碳費、減碳財務投資計畫、政府支持、大眾理解及議題討論，加速新低碳膠結材料的發展，是突破僵局的可能方向。近十年全球對於新低碳膠結材料之研究仍持續發展當中，可期待的技術方案如：富矽酸二鈣-硫鋁酸鹽水泥 (Belite calcium sulfoaluminate, BCSA)、活性富矽酸二鈣水泥 (Reactive belite-rich Portland cement, RBPC)、石灰石煨燒高嶺土水泥 (Limestone calcined clay cement, LC<sup>3</sup>)、鹼激發材料 (Alkali-activated materials) 等。開發新低碳膠結材料的目的是在於降低生產所需溫度以及降低熟料鈣含量以減少碳排、或以反應性輔助膠結材料

(Supplementary cementitious materials, SCMs) 搭配較少量的矽酸鹽熟料達到性能要求，進而降低單位膠結材料的二氧化碳排放。

#### 5. CCUS 發展碳捕捉利用及封存技術

CCUS 描述了從二氧化碳排放源或大氣中捕獲二氧化碳，並將其再利用或儲存，使大氣中的二氧化碳濃度降低之過程。目前備受關注的碳捕捉技術主要包括：

- (1) 利用碳酸鈣與氧化鈣在不同溫度區間轉換藉此捕獲的鈣迴路法 (Calcium looping)
- (2) 提升燃燒過程中助燃氣體之氧氣濃度，增加後端二氧化碳捕捉效率的富氧燃燒法 (Oxyfuel)
- (3) 利用醇胺藥劑的化學吸收捕獲法 (Amines-based capture)
- (4) 使用選擇性薄膜兩側不同壓力差捕獲法 (Membrane carbon capture)
- (5) 使用天然礦物或廢棄混凝土吸附再碳酸化 (Mineral carbonation)

因水泥及混凝土產業與營建產業息息相關，亦有研究指出，使用高二氧化碳分壓進行破碎混凝土的再碳酸化實驗，依據不同粒徑、配比、水灰比等因素，吸收量可提高至熟料製程排放的 60~80%。捕獲後二氧化碳可進行利用或儲存，例如向油田注入二氧化碳提高採油量、做為養殖藻類碳源、製造生質燃料、飼料，或直接打入穩固地層中進行地質封存等。但直到今日 CCUS 技術仍所費不貲，目前每噸二氧化碳捕捉成本從 50~70 歐元不等。隨著技術和科學的進步，預期未來幾年隨著相關創新技術發展成熟，碳捕捉成本可望進一步降低，推估未來每噸二氧化碳捕捉成本可能降低到 40 歐元以下。雖然如此，對於碳密集度極高的水泥業而言，捕碳成本仍然相當高，CCUS 之技術成本相較於水泥生產現有成本結構仍有相當大之衝擊。大多數捕獲技術仍處於研究階段，目前難以預測各種不同的 CCUS 技術，在接下來的幾十年裡將如何發展。這很大程度上取決於政治邊界條件，例如：能源稅、關稅、碳稅、低成本再生能源的可用性、儲存運輸條件，以及捕獲後二氧化碳的應用狀況等。目前 CCUS 還需要更多技術及經濟的可行性調查。然而，不依靠 CCUS 在水泥業實現淨零排放是極度困難的，除非水泥燒成有重大突破，可完全不使用石灰石及傳統化石燃料作為水泥製

造之原燃料，故 CCUS 依舊是實現水泥及混凝土淨零排放不可或缺的最重要途徑。2017 年聯合國環境署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 針對可行性低碳水泥基材料的研究報告指出 (UNEP, 2017)，自 2009 年 IEA/WBCSD 發布水泥減碳路徑圖至今 (IEA and WBCSD, 2009)，已經陸續開發出更多可行及相較 CCUS 便宜、基於熟料的解決方案，其成本遠低於 CCUS，並可在中短期內被應用而顯著影響全球二氧化碳排放，而不會讓水泥業減碳變得過於昂貴。CCUS 仍是解決方案重要的一塊拼圖，其技術進展及運作成本是 2050 年水泥業是否能達成淨零排放的關鍵。

### 四、水泥業淨零排放路徑介紹

為使水泥業能夠於 2050 年完成淨零排放的目標，世界上各組織及水泥公司紛紛提出淨零排放路徑分享給水泥同業參考。除了提供建議的減碳目標外，還提供了水泥業建議的減碳策略，為水泥業減碳提供明確的方向，以下為全球水泥和混凝土協會 (Global Cement and Concrete Association, GCCA) 及歐洲水泥協會淨零排放路徑圖介紹：

#### 1. GCCA 淨零排放路徑圖介紹 (GCCA, 2021)

GCCA 是由全球水泥及混凝土製造商組成的組織，會員廠占全球水泥行業總產量的 80%。從 2020 年開始，他們提出了基於氣候氣溫的升幅控制在 1.5 °C 《水泥及混凝土淨零排放路線圖》以內，描述了水泥行業達到 2050 年淨零排放目標的措施，並提供了實用的執行建議。

GCCA 的淨零排放路線圖重點在於熟料生產效率、水泥和膠結材料生產效率、混凝土生產效率、設計與施工、發展碳捕捉利用及封存技術 (CCUS)、電力脫碳、自然再碳酸化，並估計了這些措施在 2050 年的貢獻。為了監控淨零排放的進展，GCCA 設定了 2030 年的里程碑目標。以 2020 年為基準，他們設定在 2030 年時，混凝土排放強度需減少 25%，水泥排放強度需減少 20%。

GCCA 建議水泥業在 2020~2030 年內實施以下措施：

(1) 減少化石燃料的使用，增加替代燃料的比例

水泥業利用循環經濟，透過使用低碳替代燃料或生質燃料取代傳統燃料煤炭，可在生產階段減少化石燃料的使用及相應排放。以實現水泥業的能源轉型。

(2) 增加熟料的替代原料使用，包括飛灰、煨燒黏土、水淬高爐爐渣粉和石灰石粉。

通過生產低碳水泥，持續增加使用 SCMs 取代部分高碳排熟料，降低單位水泥碳排放。因火力發電之式微及煉鋼行業的低碳轉型，飛灰及水淬高爐爐渣可預期將逐漸減少，但其仍將於這十年間持續發揮重要角色。而近年大量被討論的煨燒黏土、石灰石及回收混凝土細粉等新興輔助性膠結材料的導入，也將促使熟料比例（熟料因子）持續下降。

(3) 在營建設計及施工過程中提高混凝土的生產效率及使用效率，包括混凝土的再利用。

在混凝土及設計施工方面，透過優化建築設計及提高混凝土生產效率，並進一步加工及使用回收材料，可以從源頭減少水泥及混凝土的使用。

(4) 加大對科技及創新技術的投資

在這十年間，水泥行業急需相關製程的新技術發展，如電力燒窯、氫能燒窯、新類型熟料及膠結材料製程等，現在就應立即開始投資，替進入 2030 年時做好準備。

(5) 發展碳捕捉利用及封存技術和基礎設施

CCUS 技術目前仍處於百家爭鳴的情況，但就技術的角度而言是可行的，惟其成本仍過高，每捕捉一噸的二氧化碳可能需要花費至 80~90 歐元的費用，這在成本上足以讓多數水泥廠裹足不前。GCCA 提出應在政策上與制定者及利害相關者合作，才可能順利推動 CCUS 的技術發展，並部署未來規模化所需要之基礎設施。

(6) 建立政策架構，以實現淨零混凝土的生產

GCCA 也強調水泥產業及價值鏈中，公共政策、相關法規及標準可造成的核心作用。這需要水泥業者、政策制定者及政府的共同努力，一同推動有利低碳水泥及混凝土的生產政策及市場需求。

2. 歐洲水泥協會淨零排放路徑圖介紹 (CEMBUREAU, 2020)

CEMBUREAU 在 2020 年發布的淨零排放路線圖，請參閱圖 1，說明了以 1990 年單位水泥排放量為基礎，扣除至 2017 年排放強度的下降量後，再透過 5C 減碳技術達到淨零排放。5C 分別為熟料、水泥、混凝土、營造及(再)碳化 (Clinker, Cement, Concrete, Construction, re-Carbonation, 5C)。

目標在 2030 年前，依循《巴黎協定》2 °C 的情境，水泥生產二氧化碳排放量對比於 1990 年應減少 30%、下游混凝土產業鏈減少 40%，設定與全球一致之 2050 年達成淨零排放目標。在熟料減排部分，2017 年歐洲水泥旋轉窯替代燃料占所需燃料的 46%，其中 16% 為生質燃料，並計畫持續擴大生質燃料使用，2030 年及 2050 年目標將分別達 30%、50% 生質燃料使用率。同時使用替代原料取代石灰石、持續提高熟效率、發展新型態熟料、發展碳捕捉利用及封存技術，盡可能降低熟料排放。在水泥減排部分，則採行生產低熟料配比水泥、發展新型態低碳水泥材料及提升電力使用效率，降低水泥中熟料用量及間接排放。混凝土措施及營建設計階段之減碳措施，則以降低水泥使用及盡可能回收物料再利用之概念執行。最後自然發生的混凝土再碳酸化亦持續有減碳貢獻，在 IPCC 第 6 次評估報告中 (IPCC 6th Assessment Report, IPCC AR6)，被納入碳移除的計算中。根據瑞典環境研究所 (Swedish Environmental Research Institute, IVL) 數據顯示，在一般情況下，混凝土再碳酸化減碳量每年可達使用水泥之製程排放的 23%。相當於水泥製造排放總量的 8%。

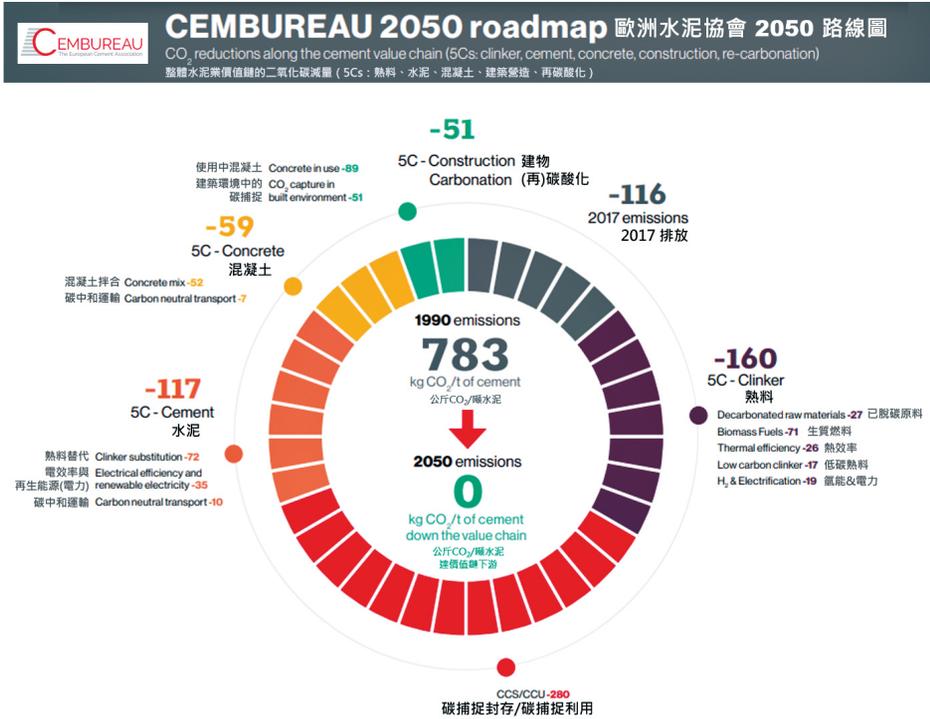


圖 1 歐洲水泥協會減碳路徑圖 (CEMBUREAU, 2020)

筆者認為我國水泥業可參考上述措施因地制宜發展國內水泥業短、中、長期減碳措施。初期以最佳可行技術為主，如：力行循環經濟降低熟料排放係數、生產低碳水泥降低水泥中熟料比例，降低直接排放、改善生產能耗降低間接排放，並持續關注及投入新創減碳技術之開發；中期持續放大上述減碳措施，開發新輔助性膠結材料應用於低碳水泥，以求更大幅度地降低單位水泥排放；後期則在減碳措施皆已成熟完備的情況下，全力導入碳捕捉利用及封存技術來達成淨零最後的一哩路。目前我國已與國際接軌，訂定國家標準 CNS 15286 水硬性混合水泥，可供國內業者依循，利用成本較熟料低的 SCMs 取代水泥熟料研發混合水泥。現已有國內廠商開發二元混合水泥，如：卜特蘭石灰石水泥、卜特蘭高爐爐渣水泥…等，未來可預期亦將有三元混合水泥，即水硬性混合水泥 (IT 型)，出現於市場上。混合水泥能在具備相同或更加的性質表現下，有較低的單位水泥碳排放。國外已有熟料比例僅占 50% 之三元混合水泥，如：石灰石煅燒黏土水泥 (Limestone calcined clay cement, LC<sup>3</sup>)，據國外研究顯示，該種水泥中

後期強度發展即與一般卜特蘭水泥相當，但單位水泥碳排放量可降低 40%。惟國內市場環境、下游業者使用習慣、法規、稅則等針對混合水泥之使用仍處於轉型過渡階段，尚需各界共同努力。

## 五、國內水泥業碳排放計算

混凝土是全球使用量最大的建材，而其中排放最多二氧化碳的原料便是水泥。如何在水泥製造過程中大幅降低碳排放的重要性不言而喻。筆者在研究各國國際組織的淨零排放路徑圖後發現，GCCA 及 CEMBUREAU 的路徑圖範圍涵蓋了混凝土、水泥及營建業，過於廣泛，難以由單一公司實行。為實現各產業的淨零目標，每個產業都需要有自己的淨零路徑圖，以清楚了解各製程的改善情況。在水泥廠的製程邊界內，主要的減碳措施包括：降低單位熟料的碳排放、開發新型低碳膠結材料、降低水泥中的熟料比例等。這些措施需要明確的減碳目標來逐步實現淨零。以下是 1 家水泥公司的碳排放計算範例，其程序和項目參考了 GCCA 淨零路徑圖及國內水泥業的 SBTi 目標盤查經驗。如圖 2 所示，首先，設定碳排放邊界，建議選擇具有營運控制權的設施，以水泥生產工廠為例。其次，收集生產工廠的大型排放源資料，主要包括熟料生產排放（製程排放和燃料排放）及電力間接排放。第三，計算熟料排放係數，分為製程排放及燃料排放。第四，計算水泥電力排放係數，通過用電量除以水泥產量得出。通過以上 3 個參數及水泥中熟料比例，可計算出各類水泥的排放強度。詳細計算方法及公式如下：

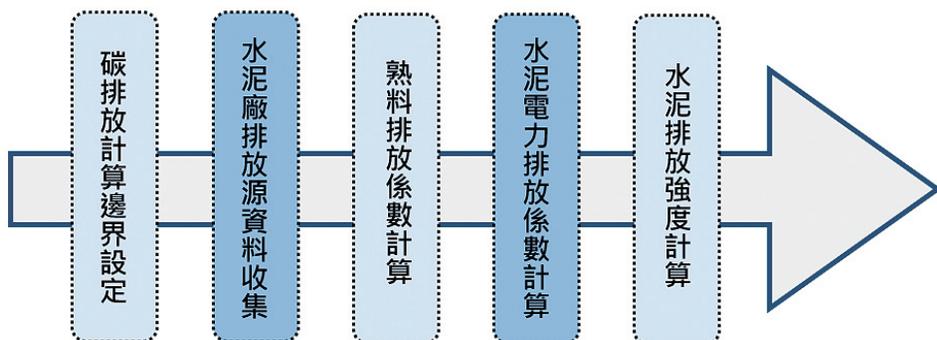


圖 2 水泥碳排放強度計算步驟

## 1. 碳排放計算邊界設定

在這個步驟中，設定須納入碳排放計算的邊界。本章節的主要目的是評估減碳措施的有效性，因此筆者建議以實際具有運營控制權的設施作為邊界。以下以水泥生產工廠為邊界作為範例，不考慮混凝土及營建業的減碳。

## 2. 水泥廠排放源資料收集

本文為使讀者能夠更清楚了解水泥業的排碳計算，故採重大排放源：熟料生產、水泥研磨、電力間接排放進行評估。石灰石、黏土副原料等原料採掘、使用，上下游產品運輸、使用等 ISO 14064 劃分之類別 4~6 排放因評估複雜且相較排放量較低在本文中暫且不納入範例，後續可依照各公司策略選擇評估。

### (1) 熟料生產製程

需考慮熟料生產製程之「製程排放」、「燃料排放」，且水泥業可能使用大量循環經濟物料，故通常會需要熟料、替代原料、傳統燃料、替代燃料的相關數據以進行下一步計算。需蒐集資料包含：

- a. 熟料產量 [ton]
- b. 熟料 CaO、MgO 成分 [%]
- c. 年度熟料耗熱 [MJ/(t-clinker)]
- d. 替代原料種類
- e. 替代原料用量 [ton]
- f. 替代原料 CaO、MgO 成分 [%]
- g. 傳統燃料種類 ( 燃煤、重油 .. 等 )
- h. 傳統燃料用量 [ton]
- i. 傳統燃料單位重量熱值 [MJ/ton]
- j. 傳統燃料碳排放係數 [t-CO<sub>2</sub>/MJ]
- k. 替代燃料種類
- l. 替代燃料用量 [ton]
- m. 替代燃料單位重量熱值 [MJ/ton]
- n. 替代燃料碳排放係數 [t-CO<sub>2</sub>/MJ]

## (2) 水泥研磨製程

水泥研磨製程屬於水泥生產的最後端製程，此製程為透過熟料、石膏、石灰石及礦物摻料共同研磨成成品水泥。此步驟所需資訊，有利於追蹤低碳水泥生產所降低熟料用量情形。需收集資料包含：

- a. 水泥生產總量 [ton]
- b. 各型別水泥產量 [ton]
- c. 熟料入磨用量 [ton]
- d. 各型別水泥中熟料比例  $[(t\text{-clinker})/(t\text{-cement})]$

## (3) 電力間接排放

水泥生產工廠電力能源耗用所造成之碳排放，可依照各工廠對於電力能源之規劃投資（如：綠電設備建置、購買綠電憑證等）、各型別水泥研磨條件等情況進行資料收集。建議蒐集資料包含：

- a. 工廠總用電量 [kWh]：旋窯、生料、預熱機、水泥磨、辦公室等系統耗電量
- b. 綠電用電量 [kWh]
- c. 餘熱回收發電量 [kWh]
- d. 外購電力度數 [kWh]
- e. 外購電力排放係數  $[\text{kg-CO}_2/\text{kWh}]$
- f. 各型別水泥研磨耗電量  $[\text{kWh}/t\text{-cement}]$

## 3. 熟料排放係數計算

熟料中氧化鈣 (CaO)、氧化鎂 (MgO) 主要由碳酸鈣 (CaCO<sub>3</sub>) 及碳酸鎂 (MgCO<sub>3</sub>) 受熱分解後提供，分解過程將伴隨產生二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 排放，若使用非碳酸鹽類之含鈣物料作為替代原料，煅燒時則不會產生二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)。以此概念，先透過熟料中的 CaO、MgO 成份回推出皆以碳酸鹽類 (CaCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>) 作為原料所伴隨產生之二氧化碳排放，再扣除替代原料中 CaO、MgO 可取代的二氧化碳排放當量，計算可得製程排放。

而燃料排放可透過各燃料使用比例計算出各燃料供熱比例後，乘上相應之單位熱值排放係數，加總得到燃料排放因子 (tonCO<sub>2</sub>/MJ)，再乘上年度熟料耗熱 (MJ/t-clinker)，得到燃料排放。以上 2 係數相加可得熟料排放係數。

(1) 製程排放 (替代原料若為碳酸鹽物料，則不適用以下算法)：

$$\begin{aligned} \text{製程排放} \left[ \frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] &= \\ &= \frac{\left\{ \left( \text{熟料產量} [ton] \times \text{熟料 CaO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{CaO \text{ 分子量}} \right) + \right.}{\text{熟料產量} [ton]} \\ &\quad \left. \left( \text{熟料產量} [ton] \times \text{熟料 MgO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{MgO \text{ 分子量}} \right) \right\}}{\left\{ \left( \sum_{i=1}^n \left( \text{替代原料}_i \text{ 用量} [ton] \times \text{替代原料}_i \text{ CaO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{CaO \text{ 分子量}} \right) \right) + \right.} \\ &\quad \left. \left( \sum_{i=1}^n \left( \text{替代原料}_i \text{ 用量} [ton] \times \text{替代原料}_i \text{ MgO} [\%] \times \frac{CO_2 \text{ 分子量}}{MgO \text{ 分子量}} \right) \right) \right\}} \\ &\quad \text{熟料產量} [ton] \end{aligned}$$

(2) 燃料排放：

$$\text{燃料排放} \left[ \frac{t - CO_2}{t - clinker} \right] = \text{年度熟料耗熱} \left[ \frac{MJ}{t - clinker} \right] \times \text{燃料排放因子} \left[ \frac{t - CO_2}{MJ} \right]$$

$$\text{燃料排放因子} \left[ \frac{t - CO_2}{MJ} \right]$$

$$\sum_{i=1}^n \left( \text{燃料}_i \text{ 供熱比例} [\%] \times \text{燃料}_i \text{ 碳排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{MJ} \right] \right)$$

$$\text{燃料}_i \text{ 供熱比例} [\%] = \frac{\text{燃料}_i \text{ 用量} [ton] \times \text{燃料}_i \text{ 單位重量熱值} \left[ \frac{MJ}{ton} \right]}{\sum_{i=1}^n (\text{燃料}_i \text{ 用量} [ton] \times \text{燃料}_i \text{ 單位重量熱值} \left[ \frac{MJ}{ton} \right])}$$

燃料<sub>i</sub> 包含傳統燃料及替代燃料。

(3) 熟料排放係數：

$$\text{熟料排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{clinker}} \right] = \text{製程排放} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{clinker}} \right] + \text{燃料排放} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{clinker}} \right]$$

#### 4. 水泥電力排放係數計算

此處假設工廠總用電扣除餘熱發電及綠電來源後，皆向台灣電力公司購買電力，且各型水泥研磨單位水泥所需耗電量相同。

$$\text{水泥電力排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{Cement}} \right]$$

$$= \frac{(\text{水泥工廠總用電量 [kWh]} - \text{餘熱發電量 [kWh]} - \text{綠電 [kWh]}) \times \text{台電電力排放係數} \left[ \frac{\text{kg} - CO_2}{\text{kWh}} \right] \times 0.001 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{kg}} \right]}{\text{水泥產量 [ton]}}$$

#### 5. 水泥排放強度計算

因考慮水泥業屬於產量隨經濟波動之產業，產量隨經濟起伏波動，若水泥排放強度持續降低，而產量提高，若以總碳排放角度無法看出水泥業對減碳的努力，而透過單位水泥排放將能明確了解水泥各製程減碳改善的成效。

以下為各型別水泥排放強度計算方法：

$$\begin{aligned} \text{水泥排放強度} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{Cement}} \right] &= \text{熟料排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{clinker}} \right] \\ &\times \text{水泥中熟料比例} \left[ \frac{t - \text{clinker}}{t - \text{Cement}} \right] \\ &+ \text{水泥電力排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{Cement}} \right] \end{aligned}$$

透過以上的計算可以明確分析出各製程排碳量，找出尚可減碳之製程，並採取相應的措施。根據製程排放公式可發現若持續增加替代原料、減少天然石灰石的使用，

將可大幅度減碳；而使用單位熱值碳排放較低之替代燃料作為供熱來源，則可降低燃料排放，兩者並行達到降低熟料排放係數之目的。由水泥排放強度公式可見，除了降低熟料排放係數，另須降低水泥中的熟料比例以及水泥生產過程中耗電量。降低水泥中熟料比例可透過生產低碳水泥來達成，而降低水泥電力能源排放則需由各公司針對能源轉型努力。針對水泥生產，降低各排放源的排放量須針對水泥生產及銷售做全面規劃佈局，提高產品和產業的可持續性，滿足對環保的社會需求。碳排放數據將替我們在制定減排策略及淨零路徑時提供重要的參考。

## 六、國內水泥業淨零路徑評估

在上一章中，我們透過分析水泥生產工廠的碳排放情況，釐清水泥生產過程所涉及的排放源。在此基礎上，我們可透過圖 3 步驟規劃自身淨零排放路徑：

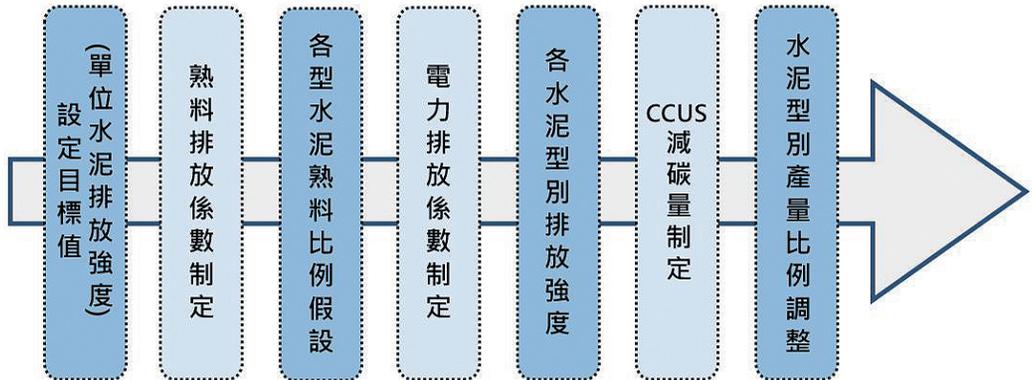


圖 3 淨零排放路徑評估方法步驟

淨零排放路徑評估方法步驟詳述：

### 1. 設定目標值 (單位水泥排放強度)

首先需要初步設定年度目標，在路徑評估流程進行到最後時，若發現原先訂定目標遙不可及，可再檢討重新訂立具有挑戰性但可達成之目標值。

年度目標的訂定將在企業或工廠的減碳野心與實際可執行技術之間拉扯，數值十分難以決定。為此，筆者提供幾個方案作為訂定方法參考：

- (1) 參與科學基礎減量目標倡議 (SBTi)：透過申請參加此全球性倡議，與其工作小組合作、溝通，訂定科學基礎減碳目標。
- (2) 參考國家發展委員會 (國發會) 所提供的指標：依溫室氣體減量及管理法制定三期目標，皆以 2005 年作為基準年，第一期為 2020 年相較基準年減碳 2%，第二期為 2025 年相較基準年減碳 10%，第三期為 2030 年相較基準年減碳 20%。
- (3) 參考 GCCA 發布之水泥業減碳路徑圖；以 2020 年排碳為基準，2030 年相較基準年減碳 20%。

這 3 者可視為水泥業碳排放的重要參考。一旦確定了年度指標，便可以著手制定具體的減碳計劃。這將涉及降低熟料排放係數、促進低碳水泥生產及 CCUS 新創技術等減碳技術。參考以上資料，範例設定各年度目標：相較基準年，水泥生產工廠在 2025 年減碳目標值 8%、2030 年減碳目標值 20%、2040 年減碳目標值 50%、2050 年達到淨零排放。

## 2. 熟料排放係數制定

根據歐洲水泥協會統計，2020 年熟料排放係數為 0.825 噸 CO<sub>2</sub>/噸熟料 (CEMBUREAU, 2023)。熟料排放係數依各公司或工廠使用替代原料、替代燃料的狀況而異，目前國內水泥業在循環經濟物料使用量方面相較國際水泥廠較低，這一定程度上影響了我們的熟料排放係數，致使國內熟料排放強度遠高於此數值。為了實現這一目標，需要政府、學者專家、水泥業共同研商循環經濟的策略，以提升循環經濟物料用量。在訂定熟料排放係數目標值時，應考慮自身工廠情況及發展策略，著眼點可包含：

- (1) 往年及未來預估的循環經濟物料種類：利用物料成分 (氧化鈣、氧化鎂) 來評估替代原料的減碳效益；若物料作為替代燃料，則應考量單位熱值的碳排放係數，以利減少燃料排放。
- (2) 未來循環經濟設備投資：因傳統之水泥生產設備未具有使用替代原燃料之設計，造成使用量無法提升。而透過編列設備投資將大幅提高物料使用量，可將改造後預估能提升之使用量列入評估，如：進料口設計、燃燒爐體改造等。

(3) 製程熱效率改善：熱效率改善可減少燃料的使用，同步減少傳統燃料以及替代燃料的使用量。

公司或生產工廠可透過考量以上幾點，利用第五章所列公式，估算自身製程排放以及燃料排放，訂出各年熟料排放係數目標。值得一提的是，在 GCCA 所提路徑圖中，所有可行措施皆執行的狀況下，2050 年熟料排放係數值為 0.475。筆者在此特別提出此值，旨在提醒公司或生產工廠訂定目標時，應注意兼顧挑戰性與可達成的合理性。

通過以上方式訂定目標，不僅可得到熟料排放係數目標，也能追蹤製程排放、燃料排放狀況，隨時做出調整。列舉範例於表 1，為 1 水泥廠通過以上方法設定之製程排放、燃料排放、熟料排放係數目標值。

表 1 熟料排放係數目標

項目	單位	2019	2020	2021	2022	2025	2030	2040	2050
製程排放係數	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.548	0.540	0.537	0.526	0.507	0.472	0.402	-
燃料排放係數	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.344	0.335	0.330	0.330	0.314	0.290	0.243	-
熟料排放係數	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.892	0.874	0.867	0.856	0.820	0.762	0.645	0.475

### 3. 各型水泥熟料比例假設

(1) 在水泥生產過程中，不同類型的水泥產品熟料比例的設定是至關重要的。要設定各類水泥中的熟料比例，需要考慮以下幾個關鍵因素：

- 現行國家標準：國內市面上大宗水泥產品皆有相對應的國家標準，其中規範了熟料以及添加物的比例限制，如：CNS 61 卜特蘭水泥、CNS 13512 壩砌水泥、CNS 15286 水硬性混合水泥等。
- 自身公司或工廠生產低碳水泥的種類及條件：考量各廠原料取得難易度（如：用於水硬性混合水泥之原料石灰石、水淬高爐爐渣、卜作嵐材料）、水泥品管條件（如：研磨配比）等，進行各型水泥熟料比例評估。

接續前述範例，假設各型水泥熟料比例為：卜特蘭水泥 91%、水硬性混合水泥 (II 型) 83%、壩砌水泥 75%、水硬性混合水泥 (IT 型) 50%。

#### 4. 電力排放係數制定

在制定水泥的電力排放係數時，需要綜合考慮以下幾個關鍵因素：

- (1) 公司在製程節能方面的投資：企業在提高生產效率和減少能源消耗方面所做的投資，是影響電力排放係數的重要因素。
- (2) 公司在再生能源方面的投資或策略：企業在使用太陽能、風能等再生能源方面的投入和策略規劃，將直接影響其電力排放係數。
- (3) 能源署預估的年度電力排放係數：使用政府或能源機構提供的電力排放數據，可以作為制定公司電力排放係數的基礎。
- (4) 生產低碳水泥的種類及條件：不同類型的水泥生產可能需要調整產品的細度，這會影響研磨過程中的電力消耗。
- (5) CCUS 技術的投資：碳捕捉利用及封存技術在國際上仍處於初期階段。

根據各種路徑圖分析，應用 CCUS 技術將增加電力消耗。因此，公司在此技術上的投資也需納入電力排放係數的考量。由於水泥電力排放係數考慮因素較為複雜，對於能源間接排放影響有消有長，故範例假設 2025、2030、2040 年電力排放與基準年相同做計算，而 2050 年因全面轉型為綠色能源，無電力排放。

#### 5. 各水泥型別排放強度

經前述步驟設定，可計算得出各目標年的各型水泥排放強度，公式參考前一章水泥排放強度計算：

$$\begin{aligned}
 \text{各型水泥排放強度} & \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{Cement}} \right] \\
 & = \text{熟料排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{clinker}} \right] \\
 & \times \text{各型水泥熟料比例} \left[ \frac{t - \text{clinker}}{t - \text{Cement}} \right] \\
 & + \text{水泥電力排放係數} \left[ \frac{t - CO_2}{t - \text{Cement}} \right]
 \end{aligned}$$

實際範例參考表 2，為 1 水泥廠通過以上方法訂定之各年度各型別水泥排放強度目標。

表 2 各型水泥排放強度目標

項目	單位	2019	2025			2030			2040			2050		
		卜特蘭水泥	塊砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	卜特蘭水泥	塊砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥	塊砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥	塊砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.910	0.750	0.830	0.910	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500
單位熟料碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.892	0.820			0.762			0.645			0.475		
-單位熟料製程排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.548	0.507			0.472			0.402			-		
-單位熟料燃料排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.344	0.314			0.290			0.243			-		
單位水泥電力排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.054	0.054			0.054			0.054			0		
各型別單位水泥碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.866	0.670	0.735	0.801	0.626	0.687	0.435	0.538	0.590	0.377	0.356	0.394	0.238

## 6. CCUS 減碳量制定

CCUS 為水泥業為實現淨零的最後一哩路，目前全世界皆在積極開發相關技術中。CCUS 的減碳量應視各公司或生產工廠技術發展情況制定，不同技術對於碳捕捉有不同效率以及技術成熟度。根據 GCCA 評估，在 2050 年，整體碳排放之 30~40% 將透過 CCUS 技術捕捉。

範例假設 2030 及 2040 年 CCUS 減碳約占 2019 總碳排 1%、5%，並在 2050 年利用成熟的 CCUS 技術捕捉最佳生產條件下仍會發生之碳排放，達成淨零排放。

## 7. 水泥型別產量比例調整

在路徑評估流程的最後一步，設定各型別水泥的產量，搭配前些步驟所設定數值，計算出整體的水泥排放強度，並與第一步設定之目標相比較，檢視整體路徑是否為一可達成之規劃。

根據 GCCA 文獻，未來混凝土用於營建的量會增加，但混凝土中的水泥量將會降低，兩因素將會使水泥量難以估計。筆者認為我國已屬已開發國家，公共建設或民間建築數量增消已趨於穩定，因此國內水泥總產量或用量未來將持平或微幅降低，但國內水泥市場產品結構將發生變化。公司或生產工廠在規劃水泥產量時，可參酌考慮：

- (1) 公司於市場的產品規劃：散裝或袋裝產品種類及產銷量
- (2) 國內法規及市場接受度預期：施工規範、貨物稅、使用產品習慣、營建商對低碳建材需求…等

由於熟料為水泥主要排放源，隨淨零排放趨勢，低熟料比例的低碳水泥將會成為主流，最終目標為生產 50% 熟料之水硬性混合水泥，並具有與卜特蘭水泥相同之性能，為減碳效益及性能兼具之水泥產品。本文範例將水泥總產量設定與基準年相同，而生產不同型別水泥有不同的熟料比例，使每個目標年的熟料產量不同，以下為對各型別水泥產量比例設定作演示范例：

1. 2025 年：因目前公共工程施工綱要規範尚未完善，且目前混凝土廠普遍習慣使用卜特蘭水泥，低碳水泥處於推廣階段，故設定卜特蘭水泥約佔總產量 80~90%。
2. 2030 年：參酌 GCCA 路徑圖，預估 2030 年全球水泥中熟料比例將會達到 0.58。此時假設水硬性混合水泥 (IL 型) 已完全取代卜特蘭水泥，並開始生產 50% 熟料占比之水硬性混合水泥 (IT 型)。
3. 2040 年：水硬性混合水泥 (IT 型) 逐漸取代卜特蘭石灰石水泥成為主要水泥種類，估計其將佔總產量 50%。
4. 2050 年：水硬性混合水泥 (IT 型) 成為主流水泥產品，約佔產量 70%。
5. 壩砌水泥：參考 2022-2023 年台灣水泥年報，國內各水泥廠之袋裝水泥產量約佔總產量的 15%，故壩砌水泥最高比率為 15%。

在設定完各型別水泥產量比例後，計算整體的水泥排放強度，實際範例參考下列公式、表 3 及表 4。

各型水泥排碳量：

各型水泥排碳量  $[t - CO_2]$

$$= \text{各型水泥排放強度} \left[ \frac{t - CO_2}{t - cement} \right] \times \text{水泥總產量 [ton]}$$

$$\times \text{各型水泥產量比例 [%]}$$

整體水泥排放強度：

$$\text{水泥排放強度} \left[ \frac{t - CO_2}{t - cement} \right]$$

$$= \frac{\text{各型水泥排碳量總和} [t - CO_2] - \text{CCUS 減碳量} [t - CO_2]}{\text{水泥總產量 [ton]}}$$

表 3 各製程年度減碳目標 (2019 年及 2025 年)

項目	單位	2019	2025		
		卜特蘭水泥	塊砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	卜特蘭水泥
水泥總年產量	ton-cement	3000,000	3000,000		
各型別水泥年產量	ton-cement	3000,000	60,000	150,000	2790,000
水泥各型別生產佔比	percent	100.0	2.0	5.0	93.0
各型別水泥熟料產量	ton-clinker	2730,000	45,000	124,500	2538,900
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.910	0.750	0.830	0.910
水泥中平均熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.910	0.903		
單位熟料碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.892	0.820		
- 單位熟料 製程 排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.550	0.507		
- 單位熟料 燃料 排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.340	0.314		
單位水泥電力排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.054	0.054		
水泥年度總碳排放	ton-CO <sub>2</sub>	2598,714	2385,076		
各型別水泥年度碳排放	ton-CO <sub>2</sub>	2598,714	40,181	110,297	2234,598
各型別單位水泥碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.866	0.670	0.735	0.801
CCUS	ton-CO <sub>2</sub>	0	0		
單位水泥碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.866	0.795		
減碳百分比(含CCU)	percent	-	8.0		

表 4 各製程年度減碳目標 (2030 年、2040 年及 2050 年)

項目	單位	2030			2040			2050		
		煆砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥	煆砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥	煆砌水泥	卜特蘭石灰石水泥	三元混合水泥
水泥總年產量	ton-cement	3000,000			3000,000			3000,000		
各型別水泥年產量	ton-cement	411,000	2574,000	15,000	450,000	1050,000	1500,000	450,000	450,000	2100,000
水泥各型別生產佔比	percent	13.7	85.8	0.5	15.0	35.0	50.0	15.0	15.0	70.0
各型別水泥熟料產量	ton-clinker	308,250	2136,420	7,500	337,500	871,500	750,000	337,500	373,500	1050,000
水泥中熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500	0.750	0.830	0.500
水泥中平均熟料比例	kg-clinker/kg-cement	0.817			0.653			0.587		
單位熟料碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.762			0.645			0.475		
- 單位熟料製程排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.472			0.402			-		
- 單位熟料燃料排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-clinker	0.290			0.243			-		
單位水泥電力排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.054			0.054			0		
水泥年度總碳排放	ton-CO <sub>2</sub>	2005,376			1296,428			0		
各型別水泥年度碳排放	ton-CO <sub>2</sub>	257,199	1767,634	6,530	242,093	619,035	565,235	160,313	177,413	498,750
各型別單位水泥碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.626	0.687	0.435	0.538	0.590	0.377	0.356	0.394	0.238
CCUS	ton-CO <sub>2</sub>	25,987			129,936			1006,693		
單位水泥碳排放	ton-CO <sub>2</sub> /ton-cement	0.668			0.432			0		
減碳百分比(含CCU)	percent	22.8			50.0			100.0		

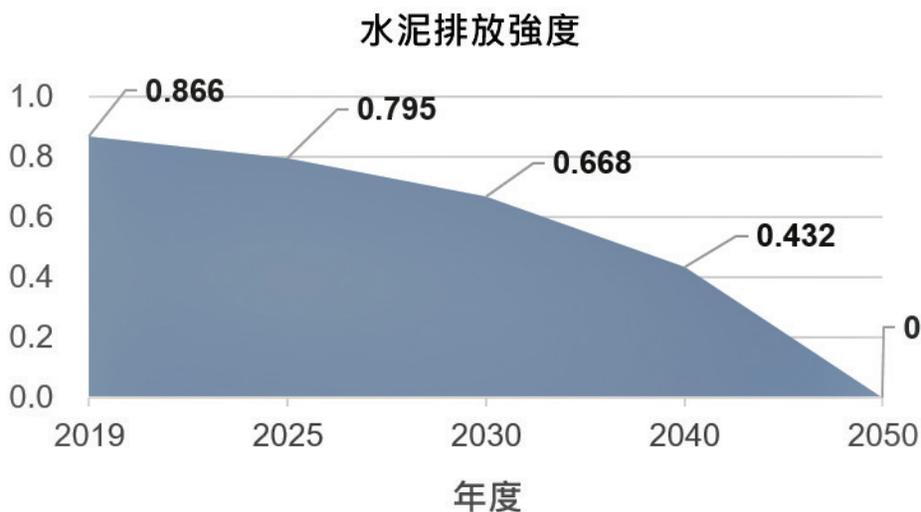


圖 4 2019 年至 2050 年淨零排放路徑圖

通過以上數據及假設，再透過各水泥種類之比例調整，使水泥碳排放強度接近設定減碳量，可取得各年度各製程減碳目標，並可以此數據做出該水泥廠之 2050 淨零排碳路徑圖如圖 4。以上步驟可清楚規劃水泥各製程所分配到的減碳目標，通過以上目標對水泥廠排碳進行管理、追蹤，一步步達成淨零排放目標。而若因外部環境因素

影響導致無法達成目標時，如：低碳水泥因規範及客戶習慣銷售量未達預期，則需透過強化各項減碳措施降低熟料排放係數，來達成目標值或對於減碳路徑圖作出調整，以達到 2050 淨零排放目標。

## 結語

本文介紹了水泥業減碳的重要性及相關措施，了解到水泥業是一個重要的產業，但同時也是一個高碳排放的產業。因此，減少水泥業的碳排放是非常必要的。本文提供了一些減碳措施，包括使用替代原燃料、生產低碳水泥、研發新膠結材料、發展 CCUS 新創技術等，這些措施可以幫助水泥業實現減碳目標。

為達到 2050 年淨零排放的目標，透過科學方法設定減碳目標及措施，可以提高產品和產業的可持續性，滿足對環保的社會需求，並更好地了解水泥業各製程的碳排放。本文提供了淨零排放路徑圖評估過程，清楚規劃水泥各製程所分配到的減碳目標，通過以上目標對水泥廠進行管理，一步步達成淨零排放目標。這份路徑圖的制定和實施，將提供我們明確的方向以完成淨零排放的目標，並透過碳排放計算方法學持續追蹤各製程是否達成減碳目標。此外，在未來減碳壓力越來越大的情況，水泥業需要克服各方困難和挑戰，例如：水泥業是一個資本密集型產業，調整現有的生產製程需要大量的投資，這對於任何水泥廠都是一個重大的風險。法規和客戶的保守特性也會對新低碳膠結材料及低碳水泥的發展產生影響。為推行循環經濟及低碳水泥，尚需政府、國內專家學者與水泥業共同努力透過政策及規範的修訂，創造利於水泥業推行減碳策略的環境，為環境保護和可持續發展作出貢獻。筆者透過以水泥業為範例拋磚引玉，提供各產業參考，將淨零路徑圖的概念應用到其他產業中，淨零排放不僅為水泥業的責任，還需透過各產業共同努力，才能實現世界淨零排放的目標。

## 參考文獻

- CEMBUREAU (2020), Cementing the European Green Deal-Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, [https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap\\_final-version\\_web.pdf](https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf)
- CEMBUREAU (2023), CEMBUREAU KEY FACTS&FIGURES, <https://cembureau.eu/media/lfqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf>
- GCCA (2021), 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>.
- IEA and WBCSD (2009), Cement Technology Roadmap 2009, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/897b7ad9-200a-4314-b870-394dc8e6861a/CementTechnologyRoadmap-CarbonEmissionsReductionsupto2050.pdf>
- IPCC (2018), Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C approved by governments, <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/>.
- UNEP (2017), Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/25281>.