



水泥產業循環經濟分享

台灣水泥低碳研發中心資深副理 / 張耀元

台灣水泥低碳研發中心資深協理 / 邱鈺文

關鍵字：循環經濟、替代燃料，替代原料，低碳建材

摘要

本文將介紹水泥產業於循環經濟上之分享，水泥產業利用水泥窯來協同處理廢棄物當作替代原料和替代燃料，減少水泥製程中的碳排，並促進循環經濟的推展。本文介紹相關國內外水泥業在替代原燃料上之趨勢及處理廢棄物近況，以及簡述目前台泥集團協同處理替代原燃料之現況。更進一步敘述台泥集團除了使用替代原燃料來持續精進循環經濟外，同時也發展台泥低碳建材。

壹、前言

為減緩氣候變遷帶來之潛在危機，聯合國及各國政府與非政府組織積極研擬各種

減量策略。在2015年的聯合國氣候變化綱要公約第21次締約方大會(Conference of the Parties, COP)上通過了《巴黎協定》，旨在控制全球暖化，其目標是確保全球平均氣溫較前工業化時代升高不超過 2°C ，並努力限制在 1.5°C 以內[1]。隨著時間的演變，現今的氣候變化反而更為嚴峻，根據世界氣象組織的全球氣候狀態(State of the Global Climate)初步報告，2023年將創下有紀錄以來最熱的一年，升溫幅度高於之前創下紀錄的2016年，2023年全球氣溫將比工業化之前的均值高了 1.4°C [2]，如圖1所示。在此背景下，2023年COP 28會議上宣讀決議文件並獲得一致通過，近200國承諾「進行能源系統轉型、脫離化石燃料(Transitioning away from fossil fuels in energy systems)」，並以公正、



有序且公平的方式，以科學為基礎，在這關鍵的10年加速行動，以利在2050年實現淨零排放。」[3]

綜觀國際間的水泥產業，紛紛向減碳及減少氣候衝擊的永續發展之路前進，歐洲水泥協會制定了歐洲水泥業邁向2050年低碳經濟的方向，日本水泥協會也推出了循環型社會，邁向低碳經濟之發展目標。而國際能源總署(International Energy Agency, IEA)與世界企業永續發展委員會 (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)在2009年共同發展出全球水泥業的節能減碳技術藍圖，提出至2050年的四項節能減碳策略，包含提升能源效率、提高燃料替代、增加原料替代及發展碳捕捉與儲存，此藍圖也作為

IEA進行後續歷次能源技術展望報告中情景模擬的重要依據，該藍圖如圖2所示[5]。國際間水泥產業當前的節能減碳作法以提升能源效率及增加燃料替代與原料替代為主，而長期減碳則著重於碳捕捉與儲存技術[6]。

隨著全球人口和城市化程度的上升，以及對於基礎設施建設的需求，加大水泥和混凝土供給的壓力，同時要求減少水泥生產的碳足跡。考量各國宣布的碳減排承諾和能源效率目標，到2050年，水泥行業在全球的直接CO₂排放量將僅能增加4%，但預計同期水泥產量將增長12%，因此將需要採取更大膽的行動來實現全球氣候目標。由IEA與WBCSD的水泥可持續性倡議(Cement Sustainability Initiative, CSI)發展出的技術

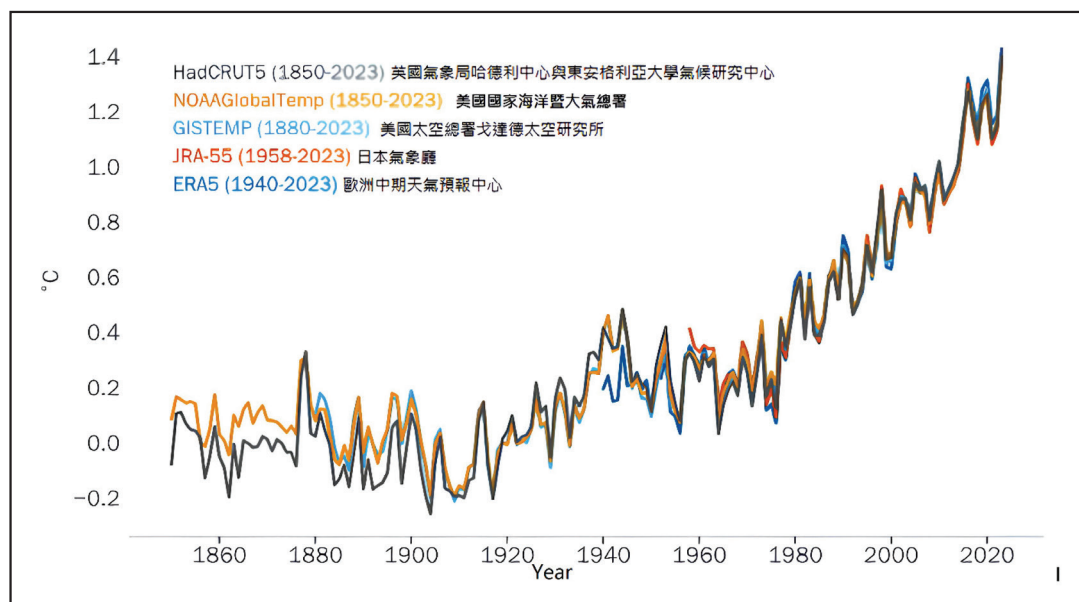


圖 1 全球平均溫差值（與 1850-1900 年平均值相比）[4]

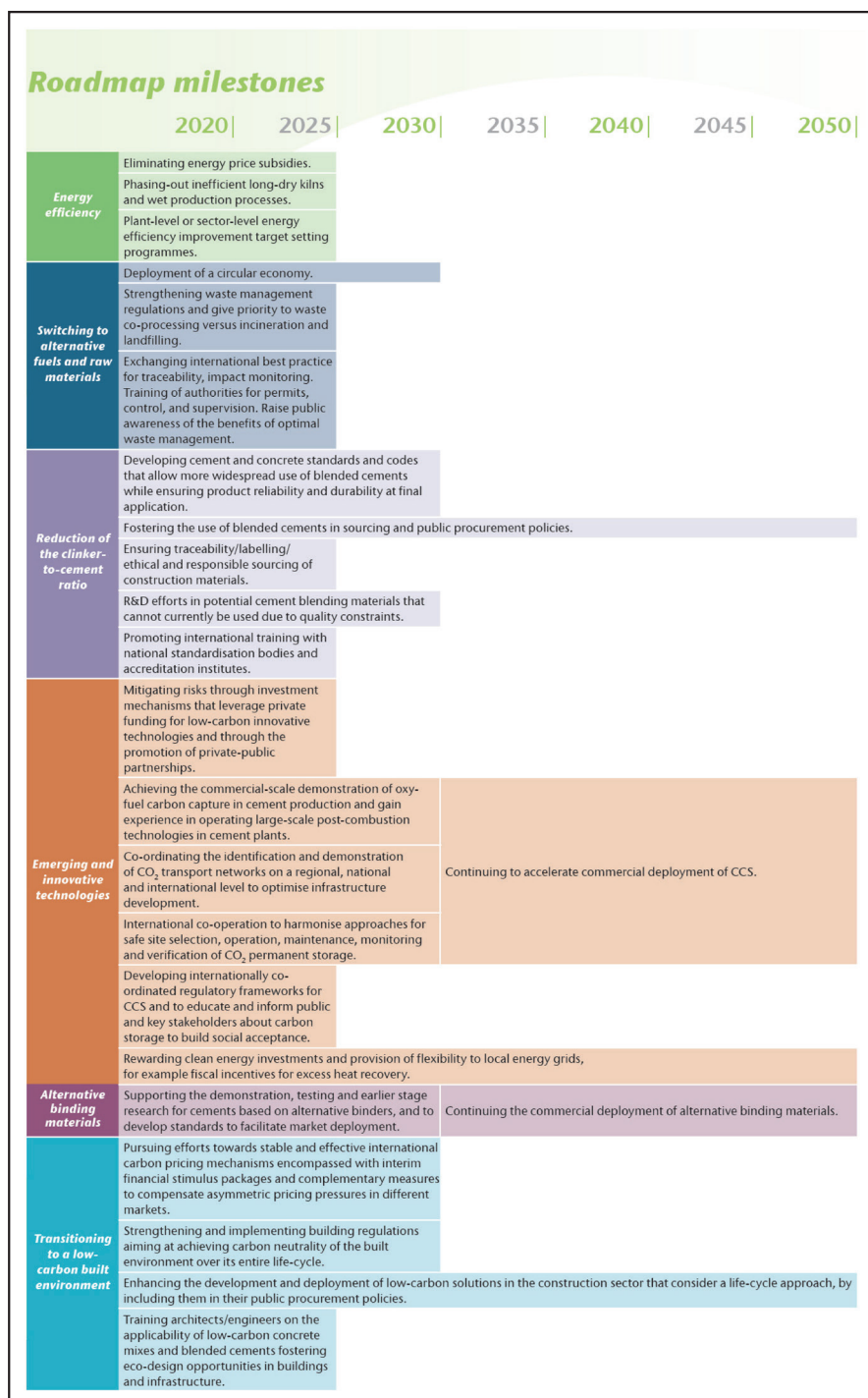


圖 2 水泥業的節能減碳技術藍圖 [5]



藍圖，為水泥行業制訂了一項戰略，使水泥產量提升與相關直接CO₂排放脫鉤，藉由提高能源效率，減少碳密集型燃料的使用，降低熟料與水泥的比例，並實施創新技術，例如：碳捕捉[7]。

對照當前我國水泥業的發展，經濟部早在2010年底即制訂「水泥工業發展策略與措施」[8]，逐年降低水泥外銷比例，在節能減碳上鼓勵水泥製程採用最佳可行技術，推動熱能與電能效率提升、輔導業者使用替代燃料與替代原料，並進行碳捕捉試行計畫，訂

定水泥工業主要設備之最低能效標準，逐步淘汰不符標準之設備，這些節能減碳策略與國際趨勢相互呼應，協助國內水泥業朝向永續發展與循環經濟的方向邁進[6]。

依據我國現行政策方向，各產業必須嚴格控制各種廢棄物污染，同時將廢棄物轉化為再生資源，讓台灣邁向循環經濟的時代，其中水泥業在循環經濟上，扮演著積極角色。現今隨著環保意識抬頭與產業結構調整，國際間水泥產業也逐漸轉型，紛紛導入循環經濟的概念。藉由水泥窯三高特性：(1)

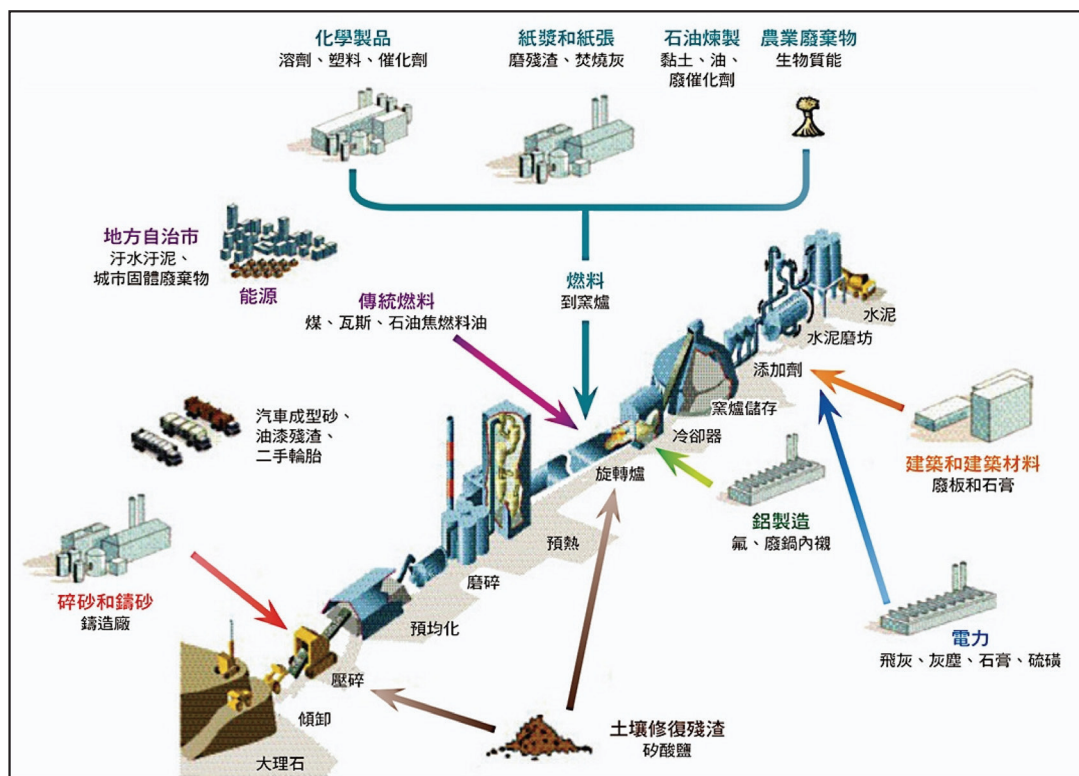


圖 3 水泥的製程特性與協助處理廢棄物的示意圖 [10]



高溫度；(2)高滯留時間；(3)高擾流的特性讓物料燃燒完全，實現零廢棄、零污染及零排放的目標。因此以水泥窯1,300度以上的高溫協助處理生活與事業廢棄物，可同時解決廢棄物掩埋問題，並且相關的廢棄物可做為水泥製程中的替代原料或燃料，顯見水泥旋窯具備協助處理廢棄物的優點[9]。圖3為水泥的製程特性與協助處理廢棄物的示意圖[10]。

替代燃料的使用是一種減排技術，用替代燃料如可替代的化石燃料（煤或焦炭）來加熱水泥窯。混合燃料比煤的碳排放強度小20% ~ 25%。水泥窯特別適合使用替代燃料的原因有兩點：替代燃料的能源成分是化石燃料的替代品；其中的無機部分，其灰可與熟料相結合。使用替代燃料排放的CO₂比傳統固體燃料更少。生命週期分析表明：(1)以這些廢棄物作為替代燃料被燃燒，可減少CO₂排放；(2)使用替代燃料還可減少不必要的垃圾填埋。

水泥行業使用的典型替代燃料有：

- 預處理過的工業和城市固體垃圾（生活垃圾）
 - 廢棄輪胎
 - 廢油和溶劑
 - 塑膠、紡織品和紙質廢渣
 - 生物質：動物骨粉；原木、木條和木屑；回收的木材和紙；農業廢棄物，如稻殼和鋸末；下水道污泥；生物質農作物
- 以廢舊輪胎為例，據估計每年全球產生

10億個廢舊輪胎。水泥窯可以使用整個或切碎的輪胎作為燃料，目前美國和日本的使用量最多。輪胎比煤的熱值更高，在可控環境下燃燒，其排放不高於其它燃料。一些應用案例表明，使用輪胎替代化石燃料可減少NO₂、SO₂和CO₂的排放，且重金屬殘渣可被封固在熟料中。

據IEA資料顯示，在技術層面上，使用更多的替代燃料是可行的。部分歐洲國家水泥行業的平均燃料替代率超過50%。水泥生產過程中與燃料相關的CO₂排放占到33%，因此使用替代燃料減少CO₂排放的潛力巨大。

國外相關文獻顯示，在技術上水泥窯可以100%的使用替代燃料，但於實際操作中還存在一些限制。大多數替代燃料的物理和化學性質與傳統燃料有明顯不同，像是水泥行業可以很容易地使用某些替代燃料（如肉骨粉和木屑），但有許多替代燃料使用起來仍有技術上的困難，如：低熱值、高水分、含高氯或其它微量元素的物質，另外仍有一些揮發性金屬必須嚴格管理。但是，文獻也提及，比起技術上的困難，高替代率的實現也容易面臨法規的障礙，如：

- (1) 廢棄物管理條例的影響尤為明顯：只有當地方法規嚴格限制垃圾填埋和焚燒，並允許廢棄物可控收集和處理替代燃料的地區才會有高燃料替代率。
- (2) 當地廢棄物收集供應鏈必須發達。
- (3) 替代燃料價格很可能會隨碳排放價格的



升高而上漲，這會使水泥行業以可接受的價格獲得大量生物質燃料變得愈來愈困難。IEA預估到2030年，替代燃料的價格將達到傳統燃料成本的30%，預計於2050年達到70%時，水泥行業使用替代燃料仍是經濟可行的[5]。

本文將對水泥窯協同處理廢棄物之減碳策略進行介紹，分別對國內外水泥業在替代原燃料上之趨勢及處理廢棄物近況進行說明，以及介紹台泥集團協同處理替代原燃料之實況和針對營建廢棄物處理之發展。

貳、全球水泥業使用替代原燃料趨勢

全球水泥業耗用近2%全球能源用量，約占整體工業部門的5%。水泥業排放CO₂總量占全球5%，一個現代化的水泥廠，約有63%的CO₂從石灰石煅燒階段排放，33%從旋窯的燃燒及4%從其下游產線排放。由於水泥廠旋窯運轉溫度高達1,300°C以上，且煙氣與物料有充分滯留、混合與擾流，適合處理焚化爐無法燃燒的許多廢棄物，並替代生產熟料所需的燃料或原料。許多的研究顯

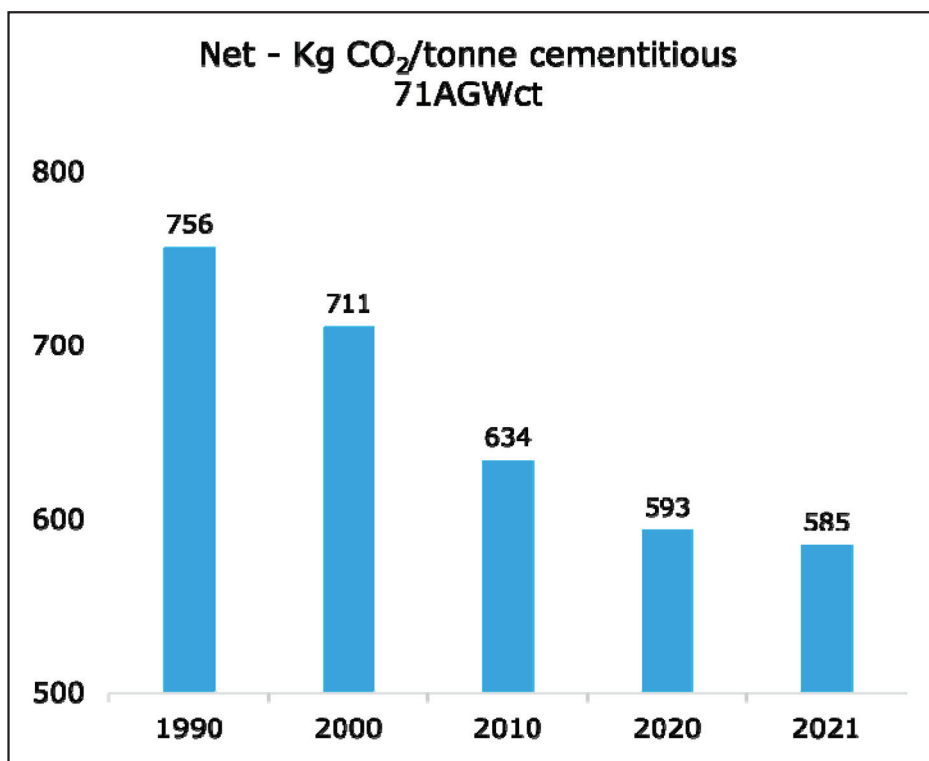


圖 4 2021 年水泥產業的 GNR 數據 [12]



示，水泥旋窯使用廢輪胎為替代燃料不會顯著影響各種的污染排放。國際能源總署出版的全球水泥業的節能減碳技術藍圖中更把燃料替代列為長期節能減碳的重要策略，如圖2所示。依據歐洲水泥協會(European Cement Association, CEMBUREAU) 的報導，2019年歐盟的水泥燃料替代率已達 46%，該協會更預測，於2050年使用替代燃料，預估可減少27% 的二氧化碳排放。近年，在歐洲已有34%的替代原料用於生產熟料，總數約達1450萬噸，以減少採礦及碳排放[11]。

根據全球水泥和混凝土協會(Global Cement and Concrete Association, GCCA) 統計2021年Getting the Numbers Right (GNR)資料，2021年水泥產業的GNR 數據如圖4顯示[12]，自1990年以來，每噸水泥的 CO_2 排放量減少了23%；使用替代燃料的比例從1990年2%變成2021年的20%，增幅10倍以上，如圖5所示。2021年GCCA統計水泥業使用替代燃料的情況如圖6和圖7，其中替代燃料可分成以工業廢棄物製成的燃料以及生物質燃料，圖6顯示工業廢棄物製成的燃料中[12]，以廢棄物衍生燃料(Refuse Derived Fuels, 簡稱RDF)29%占比最多，其次是輪胎19%。圖7顯示在生物質燃料方面，以農業剩餘資材及其有機物33%占比較多[12]。

我國政府從2020年開始推動固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)的使用，期望

造紙業、紡織業、水泥業和氣電共生業等業者能逐漸改使用SRF來當作替代燃料，進而減少煤炭使用。根據臺灣生質能協會統計，現有SRF使用模式可分為兩種：(1)外購SRF供廠內設施使用；(2)自廠廢棄物自行製造SRF供廠內設施自行再利用，其統計結果如下：

- a. 2023 年 SRF 使用許可量 496,010 公噸，相較於 2022 年 395,215 公噸增加 100,795 公噸，增幅為 25.50%。
- b. 2023 年自行再利用廠之 SRF 許可用量為 209,381 公噸，2021、2022 年實際用量分別為 62,357 公噸及 103,841 公噸，使用量為 2023 年許可量之 29.78% 及 49.59%。
- c. 2023 年外購 SRF 廠使用 SRF 許可量為 286,629 公噸，2021、2022 年實際用量分別為 42,157 公噸及 79,267 公噸，使用量為 2023 年許可量之 14.71% 及 27.65%。
- d. 總 SRF 許可量為 496,010 公噸，實際市場僅能供給量為 183,108 公噸，總供給率為 36.92%。

由此可以看出目前實際SRF市場的總供給率偏低，不足以鍋爐業者或是水泥業者的使用。SRF量能不足也將成為水泥業使用替代燃料來減碳及促進循環經濟的一大限制。

參、台泥公司協同處理替代原燃料之現狀

水泥是建築工程中主要的材料之一，主要由石灰石、黏土、矽砂、鐵渣四種礦物原料經混合、研磨、燒結後成為熟料，再添加石膏研磨成為水泥。因地球天然資源有限，

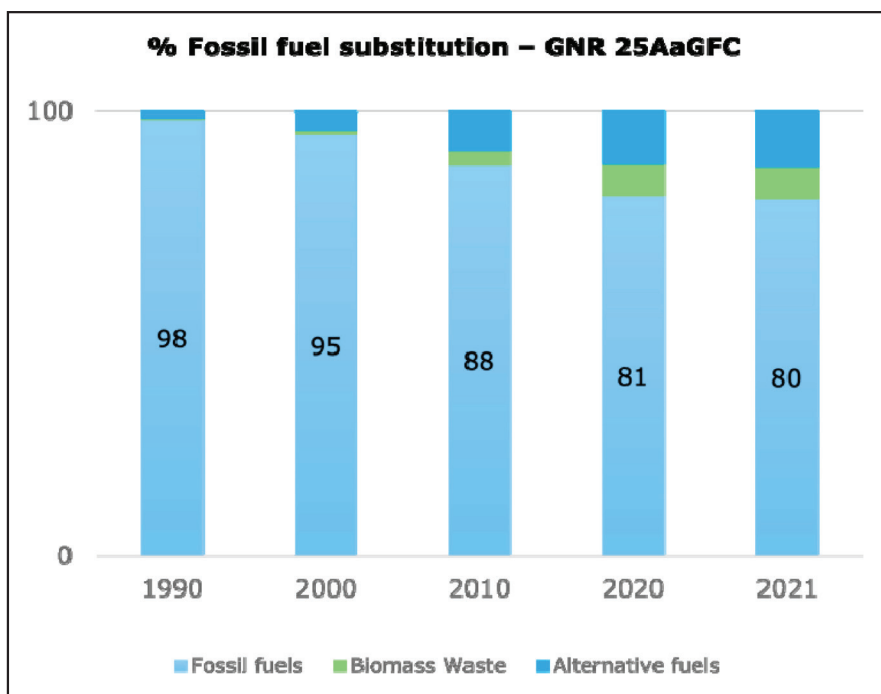


圖 5 GNR 數據對替代燃料使用比例之趨勢 [12]

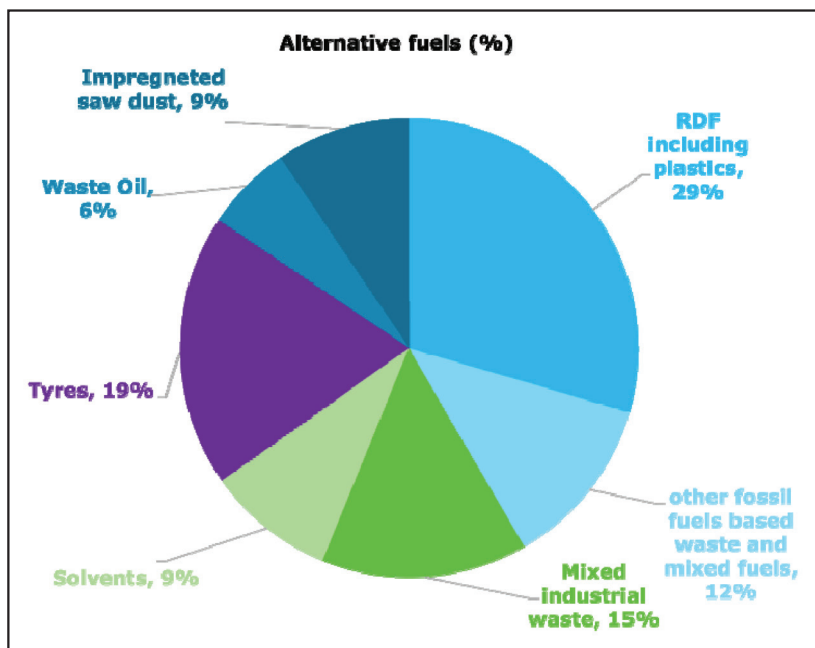


圖 6 以工業廢棄物製成替代燃料的種類佔比 [12]



圖 7 以生物質燃料製成替代燃料的種類佔比 [12]



圖 8 台泥循環經濟模式於水泥製程中添加替代原燃料之示意圖



台泥公司（以下簡稱台泥）以減少天然原料之開採與購買為目標，全力研究替代原燃料之使用方案，並且努力實踐。台泥不斷從流程中改善採礦技術、優化運輸方式、研發碳捕捉技術、發展循環經濟資源再利用工作，從減少碳排放量、協助處理工業廢棄物再利用著手，為環境永續盡一份心力。圖8為台泥循環經濟模式，協助處理工業廢棄物於水泥製程中當作替代原料和替代燃料之示意圖。

跨產業共生循環經濟推動水泥減碳，協助處理十大產業廢棄物、城市廢棄物（生活垃圾）與農林剩餘資材，同時替代原料（石灰石）與替代燃料（煤），減少二氧化碳排放，直接減少水泥熟料的碳排放量，根據台泥的ESG報告書所揭露的數據，2022年台泥協助各企業處置廢棄物共計110.1萬噸，相當於

台灣整體事業廢棄物總量之5.3%，2022年台泥協助處理各行各業廢棄物百分比如圖9。

台泥協助半導體、鋼鐵、電廠、淨水廠、建材等產業與政府，將事業廢棄物與生活垃圾無害化、資源化利用，使其成為水泥製程替代原料，減少石灰石、黏土、矽與鐵渣等天然資源的開採與使用，部份則可當替代燃料減少煤炭使用，降低水泥生產製程排碳。根據台泥ESG統計數據，108年至111年台灣兩廠替代原料使用比例從19%增加至23%，替代燃料從109年開始起步，熱值替代率從0.21%增長至4.08%。

台泥在循環經濟的路上不斷努力，持續研究規劃可投入使用的替代原燃料，利用水

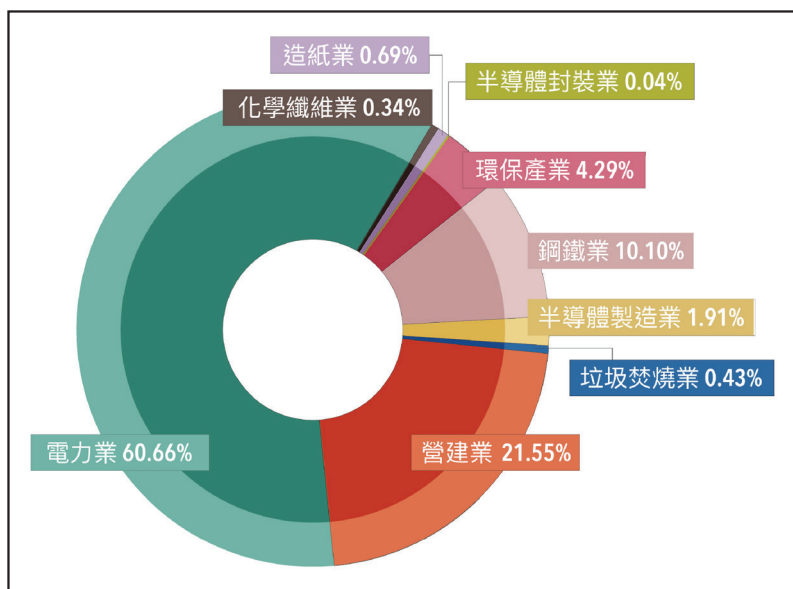


圖9 2022年台泥協助處理各行各業廢棄物百分比

泥窯的特性，將更多的廢棄物無害化，進而達到減碳的目標，成為最佳的「城市淨化器」。例如：台泥花蓮和平水泥專業區，設廠之初即考量循環經濟模式，採港廠電合一運營模式，最佳化資源使用效益，如圖10所示。生產水泥所需燃料與鐵渣、石膏、爐石等原物料皆由和平港輸入，製成之水泥產品亦由和平港運輸至西部各港口水泥接收站，不僅節省運輸費用，亦減少因公路運輸增加碳排而對環境造成之衝擊。此外，發電過程中產生之廢棄物可分為飛灰及底灰等兩種煤灰物質，台泥將電廠產生煤灰全部供做和平水泥廠生產水泥原料，不僅避免造成海洋汙染，同時達到資源全部再利用之目的。

台泥2018年導入BS 8001循環經濟，為全

世界首家通過認證之水泥業，並於2022年以「邁向碳中和路徑之替代原燃料減碳驗證」為主題，通過BS 8001:2017組織執行循環經濟框架指引第3次驗證，獲最佳化驗證等級LEVEL 4，如圖11所示。台泥以三大核心指標朝向碳中和之路邁進，不斷精進可作為循環經濟之事物，協助解決社會上環保問題讓廢棄物再利用，做為水泥業的替代原料和替代燃料，減少水泥製程的碳排放。

肆、台泥公司低碳建材之發展

您知道全球近40%碳排來自營建及建築業嗎？根據國際能源署(IEA)統計，營建及建築業的溫室氣體排放約占全球40%，如圖12所示，其中27%來自建築能源使用，另13%

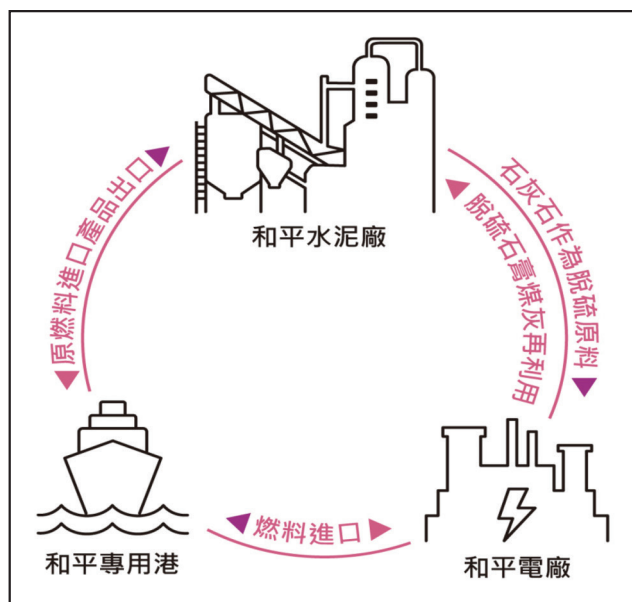


圖 10 台泥花蓮和平水泥專業區採港廠電合一運營模式之示意圖

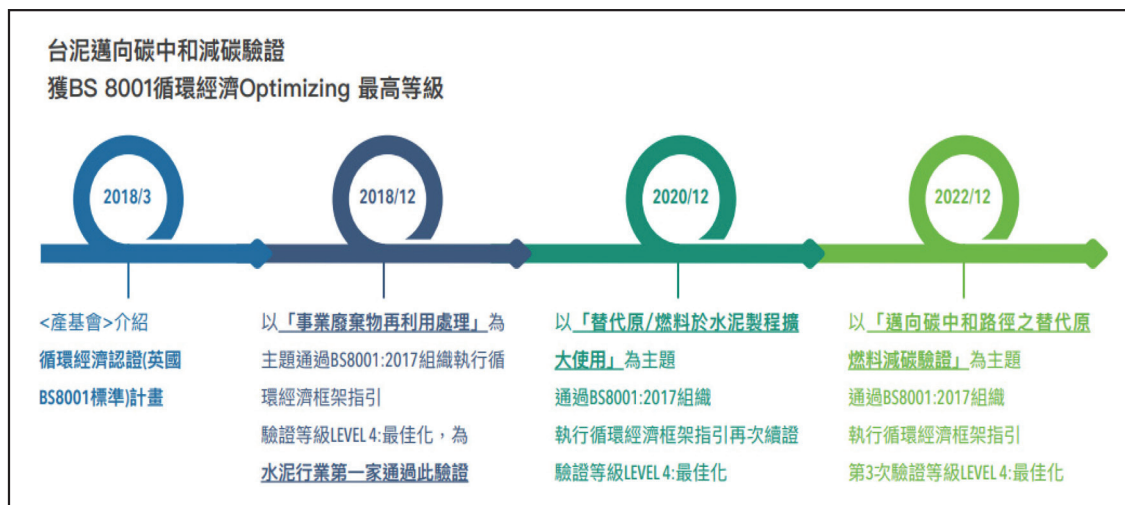


圖 11 台泥邁向碳中和減碳驗證之取得 BS 8001 循環經濟之歷程

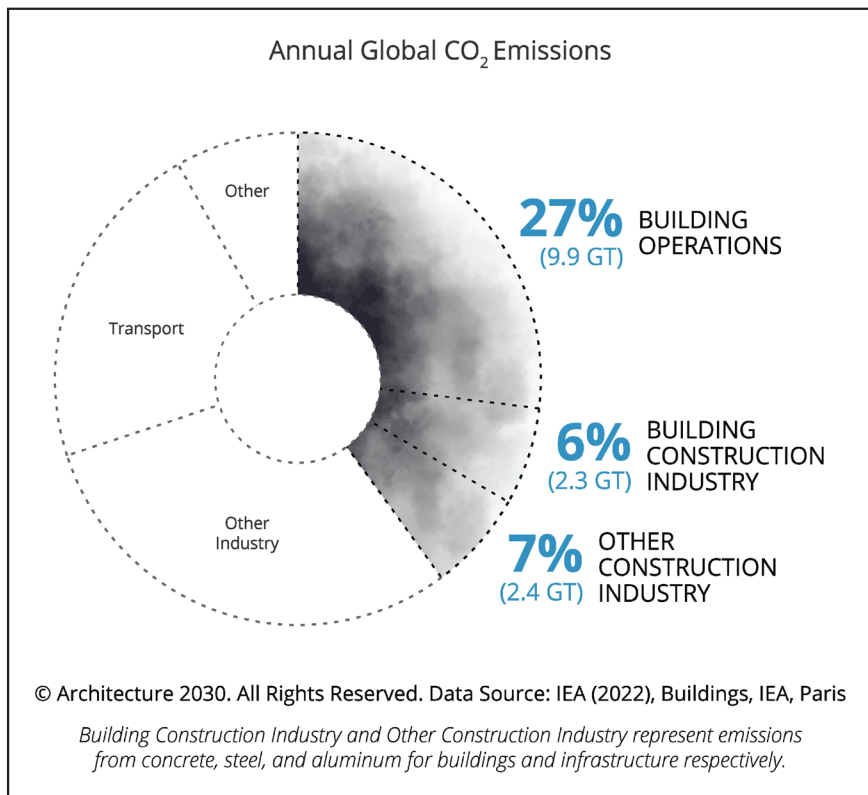


圖 12 營建和建築所產生的碳排 [14]

來自建材的製造、運輸與施工[13]。建築能源使用稱為營運碳排，建材的部分稱為蘊含碳排。而以往建築節能政策只關注於營運碳排，卻忽略對蘊含碳排的減少。在台灣2050的淨零路徑(如圖13)中，建築這一區塊也受到特別重視，其路徑規劃在2050年時，100%的新建建築物及超過85%建築物為近零碳建築[14]。

現今台灣的建築物已逐漸進入到混凝土使用年限50~70年的階段，陸陸續續出現老宅翻新和都市更新等社會議題。對於老宅翻新和都市更新，不管是拆除重建或是簡易翻新，或多或少都會有營建廢棄物的產生，而這些營建廢棄物如何妥善去化是台泥所關注之焦點。在綠建築評估手冊中有提到[15]，

由於台灣使用高密度的鋼筋混凝土，營建廢棄物之處理問題將會是種負擔，台灣的鋼筋混凝土建築物每平方米樓板面積，在施工階段約產生0.314 m³之建築廢棄物、0.242 m³之剩餘土方，在日後拆除階段也會產生1.32公斤的固體廢棄物。且因許多不肖廠商隨意傾倒營建廢棄物，造成河川公地嚴重污染，產生不容忽視的社會問題。

GCCA也對於2050年水泥混凝土碳中和提出七大方針中[16]，如圖14，除了水泥業積極使用替代原燃料外，開發低碳建材也是重要指標。其七大方針為：(1)熟料生產減量、(2)水泥及膠結料減量、(3)混凝土生產效率、(4)電力脫碳、(5)再碳酸化、(6)設計與建築效益及(7)碳捕獲與利用/儲存(CCUS)。其

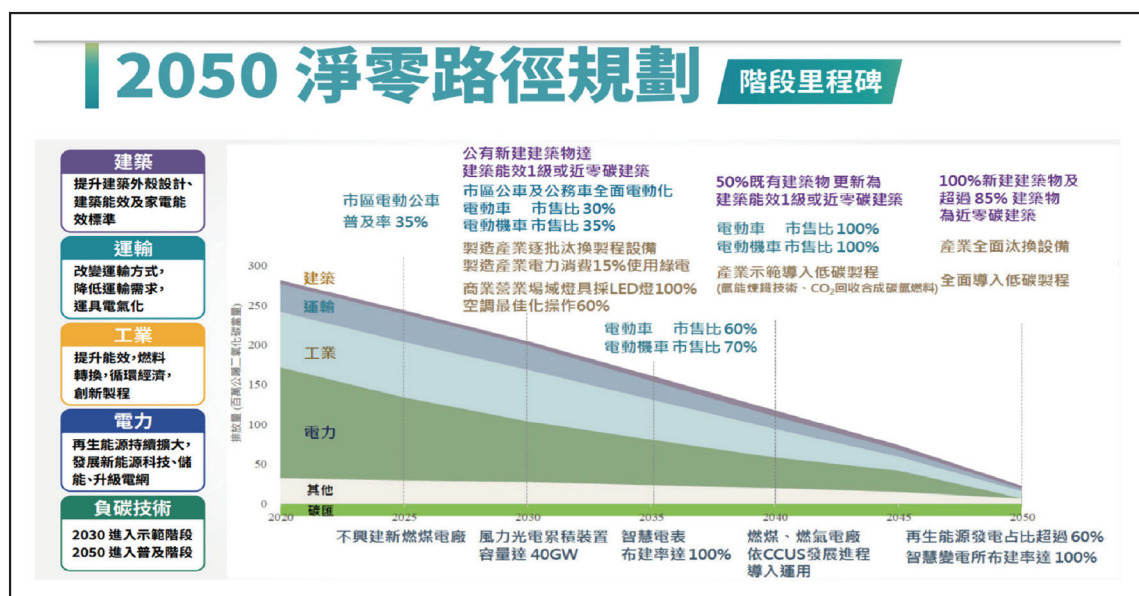


圖 13 台灣 2050 的淨零路徑圖 [15]



中水泥及膠結料減量、混凝土生產效率和設計與建築效益，即在探討降低建築物的蘊含碳排，包含了建材、運輸、施工、修繕及廢棄階段產生的排放。

台泥藉由其企業三大核心：低碳建材、資源循環、綠色能源，除了著重於利用水泥窯來進行協同處理廢棄物，促進資源循環外，近期也持續發展淨零城市所需之低碳建材，協助台灣營建與建築業在2050年淨零路徑更有動力。圖15為台泥低碳新能源整合方案，從建築最一開始的設計階段即可採用台泥的低碳建材，到建築使用階段時的能源利用，則可採用台泥的綠色能源規劃，建築物

到達使用年限後所產生的營建廢棄物，台泥又可利用水泥業資源循環的特色，來延續建築物的新生命，同時減碳及減少營建廢棄物的產生。

台泥的低碳建材有：低碳水泥、低碳混凝土及創新高價值化建材-超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC)。台泥低碳水泥為新開發的卜特蘭石灰石水泥。卜特蘭石灰石水泥已是目前歐洲使用最普遍的水泥（占比34%），台泥所開發的卜特蘭石灰石水泥可完全取代卜特蘭I型水泥，且早期強度更強，減碳效果更佳。台泥低碳混凝土有：210~420 kgf/cm²系列的低碳混凝土，以及210~420 kgf/cm²系列的卜特蘭石灰

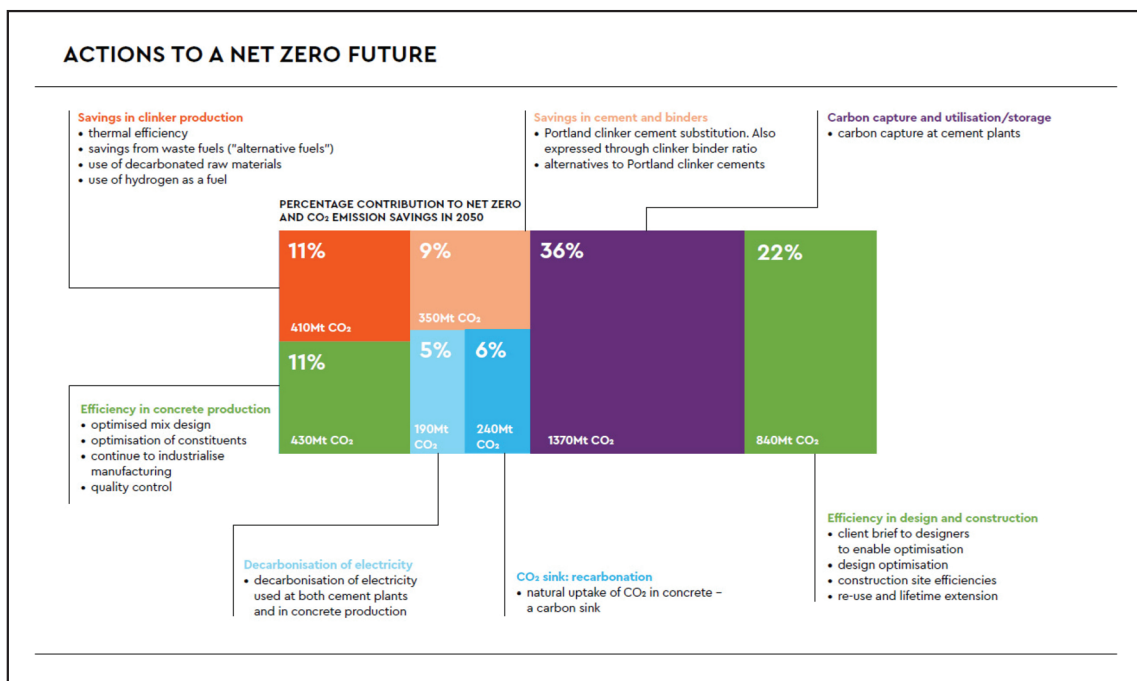


圖 14 GCCA 所提供 2050 水泥混凝土中和的七大方針 [16]

石水泥混凝土。新開發的石灰石水泥混凝土相較低碳混凝土的優勢有：坍度相當、工作性優、早期強度更高、施作性佳更能減碳。依據低碳(低蘊含碳)建築評估手冊的計算公式，以一棟建築物地上14層、地下3層的條件試算，使用取得碳標籤的台泥低碳混凝土可以降低該棟建築物的碳排30%。

現階段台泥也與國際接軌，跟國際水泥同業朝著營建廢棄物中廢棄混凝土塊再利用之研究方向，讓建築物拆除時所產生的混凝土塊或是廢棄的混凝土塊重新回到水泥或混凝土製程，且不會影響水泥或混凝土的質量，並減少這些現階段僅能當作用於路面鋪面之控制性低強度回填材料(Controlled Low

Strength Material, CLSM)的廢棄物混凝土塊。另外，國際上對廢棄混凝土塊再碳酸化的利用十分重視，研究顯示在混凝土的生命週期內可吸收5% ~ 20%水泥生產過程中排放的CO₂，並且在二次或回收壽命期間可額外吸收5% ~20% CO₂，故如何將這廢棄混凝土有效地重新回到水泥或混凝土製程將會是一大課題。這對水泥和混凝土的生產除了可以減碳外，更可以減少環境問題，讓廢棄的混凝土塊更安全及更透明化的處理，不造成二次污染。

台泥不斷精進綠色低碳建材的產品開發，協助營建和建築業達到2050年淨零建築，而使用台泥低碳建材所減少的碳排，將

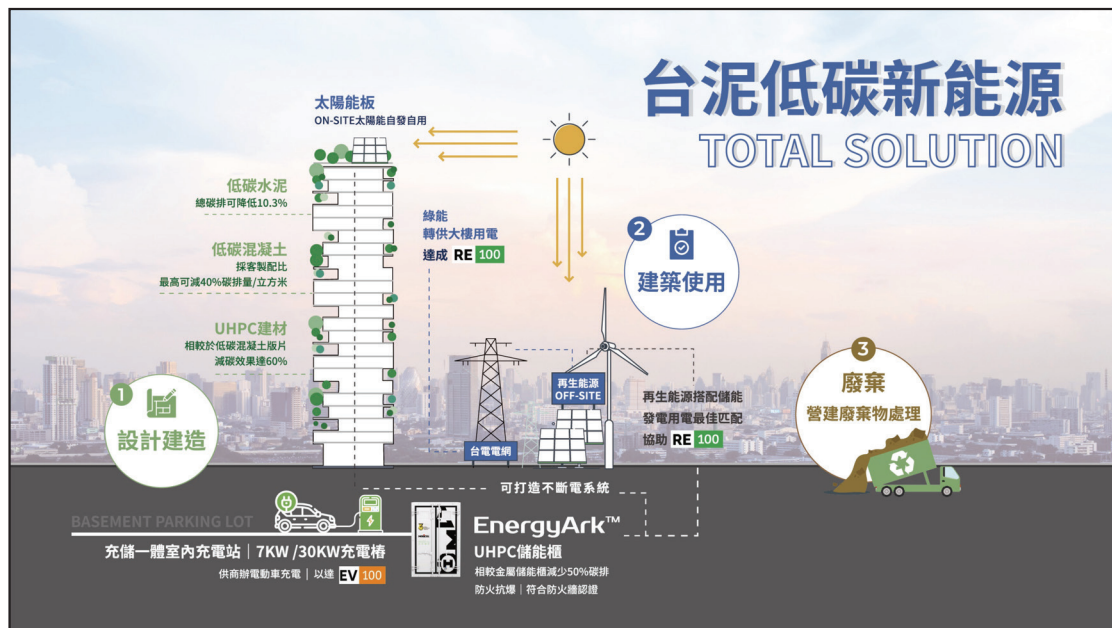


圖 15 台泥低碳新能源整合方案之示意圖



有助於未來台灣政府或國際趨勢碳經濟的利用，讓企業共同減碳，打造一低碳循環永續與韌性的城市。

伍、結論

水泥業協同處理可以協助循環經濟的發展外，也可以拉長水泥和混凝土應用於建物的生命週期，減少建築和營建所產生的碳排放。而台泥以三大核心指標朝向碳中和之路邁進，不斷精進可作為循環經濟之事物，協助解決環保問題，促進廢棄物再利用化，作為水泥業的替代原料和替代燃料，減少水泥製程的碳排放。進而生產出更多低碳建材，為營造和建築業建構低碳建築物，共同為2050淨零建築而努力，建構循環永續與韌性的城市基礎，延續與地球之共融美好。

9. 循環經濟：循環經濟的發展與應用－水泥篇 鄭 珊 丁 俊元 陳建緯臺灣綜合研究院 <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sgGQ.htm>
10. World Business Council for Sustainable Development, 2014, <https://www.wbcsd.org/>
11. 水泥製造業 BAT 技術燃料及原料替代 - 工研院綠能所 范光錢
12. <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
13. <https://architecture2030.org/why-the-building-sector/>
14. https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76
15. 綠建築評估手冊
16. <https://gccassociation.org/concretefuture/actions-to-a-net-zero-future/>

參考文獻

1. <https://rsprc.ntu.edu.tw/zh-tw/m01-3/climate-change/1834-cop28.html>
2. <https://e-info.org.tw/node/237271>
3. <https://www.cop28.com/en/about-cop28>
4. World meteorological organization, 2023
5. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, Published: 5 Apr 2018、<https://webstore.iea.org/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
6. 黃啟峰、范光錢、楊秉純、我國水泥產業之節能策略及作法、機械新刊、9、74-88、2017.08
7. IEA, International Energy Agency (2009), Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050., <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
8. 經濟部工業局，水泥工業發展策略與措施，民國 100 年 2 月