

循環經濟的發展與應用—— 水泥篇

鄭為珊、丁俊元、陳建緯

水泥業可在循環經濟中扮演廢棄物再利用的角色，例如利用產業廢棄物做為水泥業的原物料、燃料，使廢棄物料可因再利用回到良性的資源循環。

水泥業在經濟發展中扮演的角色與沿革

泥作就像建築的彩妝，是基礎工程重要的環節，更是各國經濟建設發展的重要角色。水泥施作的範圍包含一般住宅的牆壁和地板，牆壁的部分包含粉刷打底、貼磚和砌牆，地面則是磁磚黏貼、地坪鋪整等部分。其餘水泥的運用尚有大型公共建設工程，如軌道建設、水環境整治、城鄉都更等，顯見水泥產業在經濟發展中扮演角色的重要。

國內水泥產業緣起於

1915 年日本淺野水泥株式會社高雄廠，直到 1946 年改組為國營台灣水泥公司。1953 ~ 1974 年是擴建期，透過開放民營吸引私人公司加入。1975 ~ 1980 年適逢政府十大建設政策帶動下游營建業蓬勃發展，爾後歷經進口、產業東移、卜特蘭水泥反傾銷案等，至今已有百年的歷史，我國水泥業上下游產業鏈已成熟穩固。



水泥產業在經濟發展中扮演的角色（圖片來源：臺灣綜合研究院，2017）



我國水泥產業的歷史沿革（圖片來源：臺灣綜合研究院，2017）

水泥業關聯效果與區域經濟

水泥有笨重、容易變質的產品特性，較不利於長程運輸或進口，且從生料磨、旋窯設備，生、熟料庫建置到銷售至客戶端所需的運籌系統，都需大量資本投入，使得水泥業因產品特性、資本密集及運輸成本高而容易形成區域寡占型產業。

然而水泥業也是對區域經濟有重要貢獻的產業，包含上游礦石原料採取，如最大宗的原料用大理石、黏土等，以及鋼鐵冶煉業的副產品（如爐渣等）與來自電廠的飛灰、脫硫石膏等做為原料使用。從本業水泥生產維運，到下游水泥應用端的土木工程、營建工程、道路鋪設、橋梁工程等建材原料，以及中間所需配合的運輸業，形成完整的水泥產業鏈。而自水泥產業東移後，其生產所需投入的原料及其他要素大多源自東部宜花地區，經製成水泥產品後供應全國使用。

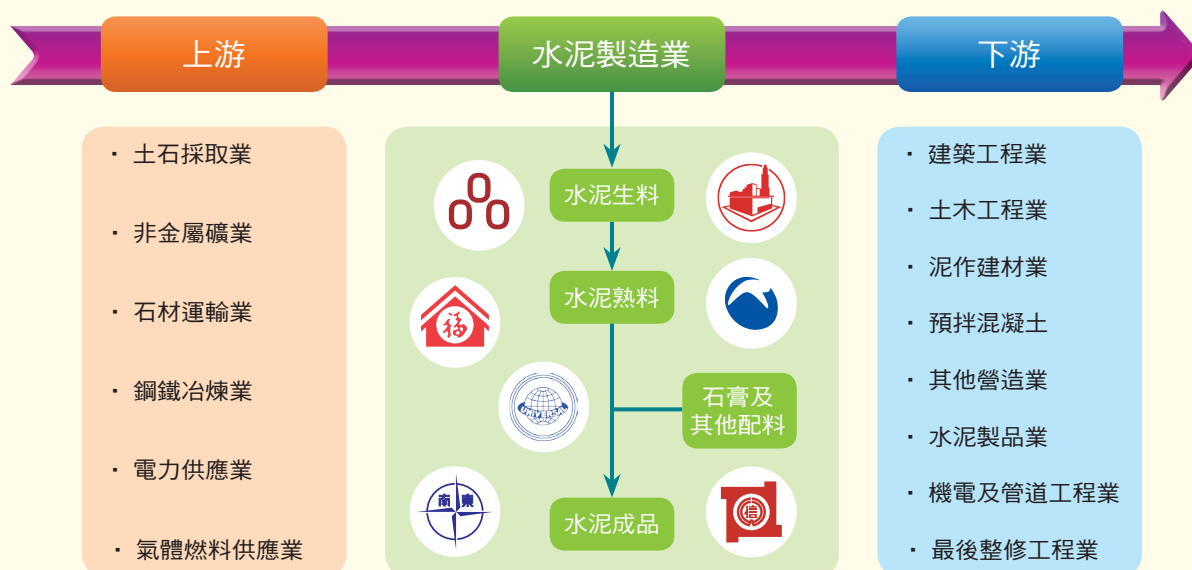
水泥業在循環經濟中扮演的角色

隨著環保意識抬頭與產業結構的調整，國際間水泥產業也逐漸轉型，並導入循環經濟的概念。藉由水泥窯連續不停窯的製程特性，以 1,500 度以上的高溫協助處理生活與事業廢棄物，同時解決廢棄物掩埋問題，而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。

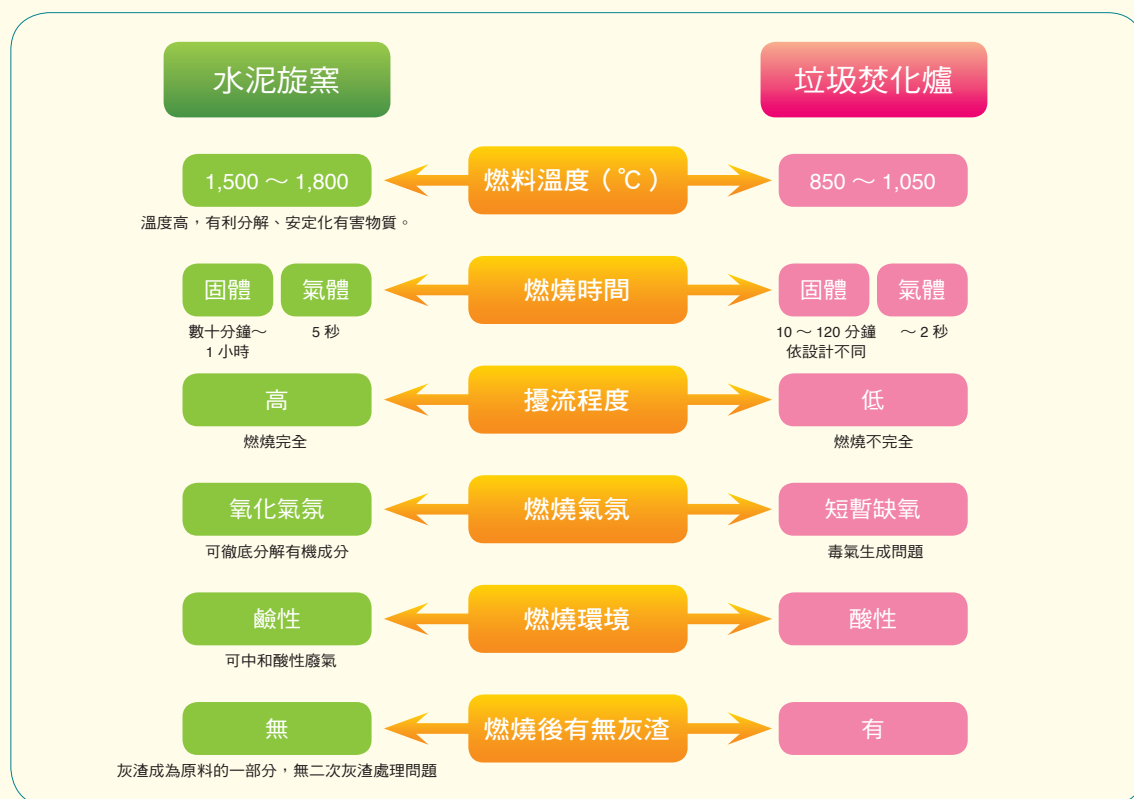
在替代原料方面，一般卜特蘭水泥主要由氧化鈣、氧化矽、氧化鋁和氧化鐵 4 種氧化物所組成（本文簡稱鈣、矽、鋁和鐵）。而這 4 種成分取自富含氧化鈣的大理石，以及富含其餘 3 種成分的黏土、矽礦、鐵礦砂等原料。因此，只要含有鈣、矽、鋁和鐵 4 種元素的廢棄物，便可用來替代大理石、黏土、矽礦和鐵礦砂，減少天然礦石的開採。

舉例而言：含有鈣的廢棄物如氣冷爐石、脫硫渣、還原渣，石材切割泥等，可用

隨著環保意識抬頭與產業結構的調整，
國際間水泥產業也逐漸轉型，並導入循環經濟的概念。



水泥業的產業鏈圖（圖片來源：臺灣綜合研究院，2017）



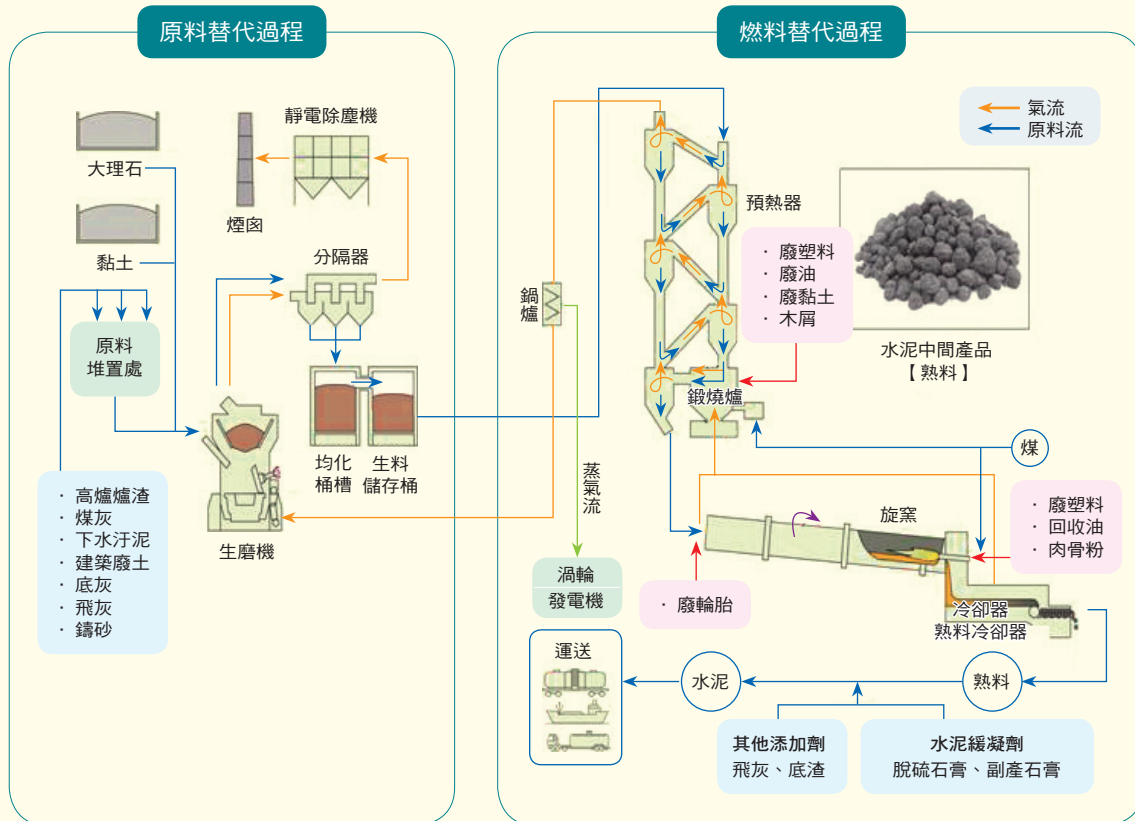
運用水泥旋窯協助處理廢棄物的特點（圖片來源：臺灣綜合研究院，2017）



有別於替代原料運用廢棄物的元素來替代，替代燃料是運用廢棄物的「熱值」達到同時處理廢棄物及降低燃煤成本的雙重效用。水泥業主要使用煤炭、石油焦、重油、燃料油、天然氣與其他氣體，以及其他化石燃料等做為水泥的燃料，而國內水泥業者在燃料的使用上則以燃煤為主。替代燃料的原理是把廢棄物透過水泥窯高溫燒結循環處理，若這類廢棄物的熱值達

業別	項目
汽車業	廢輪胎、鑄砂
造紙業	製紙汙泥、燃燒灰
化學業	廢溶劑、廢塑料、催化劑
石油業	廢觸媒、黏土、廢油
建築業	建築廢土、建築廢材、石材汙泥
電力業	煤灰、排煙脫硫石膏
鋼鐵業	煉鋼礦泥、煉鋼轉爐石、高爐爐石、電弧爐煉鋼爐渣、集塵灰
光電業	廢玻璃、廢溶劑、廢異丙醇、廢光阻液、氟化鈣汙泥
其他	鋁渣、底渣、飛灰、下水汙泥、淨水汙泥、動物屍體、生活廢棄物

24 科學發展 2018年3月 | 543期



替代原料、替代燃料導入水泥製程循環再利用的過程。（圖片來源：1. 日本水泥協會網頁 http://www.jcassoc.or.jp/cement/2eng/e_01a.html（最後瀏覽日期：2017/08/08）；2. 台綜院修改繪製。）

2,000 kcal / kg 以上，就可充當輔助燃料取代生產中使用的燃料。如此不僅能有效降低對環境的影響，也能減少天然資源的耗用。

再者，半導體產業在生產過程中會產生許多液態廢棄物，如廢溶劑、異丙醇、廢光阻液等。這些易燃性事業廢棄物可提供熱值做為水泥窯的替代燃料，並利用窯中較長的滯留時間充分去除有毒廢棄物二次污染的危機。另外，常見的汽車業廢輪胎，若直接棄置荒野容易使內部積水，直接燒毀更會釋放戴奧辛及硫化物，因此國際上普遍把廢輪胎做為水泥窯的替代燃料，因廢輪胎的燃燒熱值可達 8,970 kcal / kg，較燃煤 6,500 kcal / kg 為高。

1 公噸輪胎相當於 0.7 公噸燃油或 1.5 公噸燃煤（輪胎淨發熱量介於 32 ~ 34 百萬焦耳 / 公斤），燃燒後殘留的飛灰則僅是燃煤的十分之一，水泥窯的高溫也可使廢輪胎完全燃燒，去除戴奧辛等空氣污染問題。燃燒所產生的硫化物也可與水泥生料中的鈣元素結合，穩定其揮發量。

值得一提的是，經過前處理程序做為替代燃料的「生活廢棄物」，進入水泥窯後產生的灰渣可以直接再進入旋窯系統，再次做為水泥替代原料混合加以利用，使資源充分循環再利用。

國際上水泥業者普遍利用其他產業如發電廠、鑄造廠等所產生的事業廢棄物，做為替代原料或替代燃料。

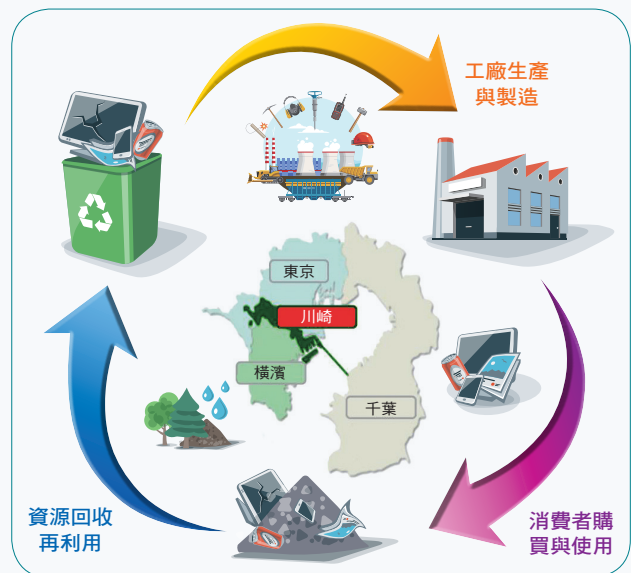
國外水泥業發展循環經濟的作為

國際上水泥業者普遍利用其他產業如發電廠、鑄造廠等所產生的事業廢棄物（飛灰、高爐石、廢輪胎等），做為替代原料或替代燃料。目前歐洲部分水泥廠替代燃料比率超過 50%，整體約為 20%；北美、日本則使用廢棄物替代約 10% 的化石燃料。循環經濟的推動使水泥產業降低單位耗能，更讓國家的生活與事業廢棄物可因再利用而回到良性的資源循環，同時能降低源頭採礦量，發揮點石成金的功效。以下介紹國外水泥產業發展循環經濟的情形。

日本 日本川崎在歷經百年工業化後也面臨環境汙染問題，當地發起「川崎市生態城市計畫」，目的是打造一個資源循環使用的社會，在發展工業與振興沿海市鎮的同時兼顧環境保育。川崎市規劃利用京濱東北工業區內水泥、鋼鐵、石化等多元產業集成的特性，把 A 企業的事業廢棄物轉化為 B 或 C 企業的替代能資源，如此充分使生態城市中的能源或資源做最有效率的循環再利用。

德國 早期德國水泥生產主要是運用化石燃料當作能源，其中又以褐煤為大宗。近年來，德國水泥替代燃料比率增長迅速，主要原料是各類廢棄物如廢木材、廢輪胎、生活及工業廢棄物等，平均一年可運用約 303 萬公噸的廢棄物。

此外，德國水泥業近期更推動廢棄建築混凝土的回收作業。德國水泥公會表示，在建築拆卸過程中，粉碎的混凝土可當作碎石和沙子的替代原料，預估回收的廢建築材料可取代所需的礦產資源約 5% 至 10%，不僅能有效降低礦產原料消費，也能促進產業資源循環再利用。



日本川崎發展循環經濟的情形（圖片來源：臺灣綜合研究院，2017）

美國 美國使用可燃性廢棄物當作替代燃料的過程分為兩部分：其一是可燃性廢料的收集、儲存、加工、混配與運輸；其二是水泥廠內儲存、攪拌、燃燒與環境監控的燃燒應用，整體廢棄物循環流程都需嚴格管控。

美國廢棄物處理技術由各州環保局與美國國家環境保護局研發，近年的研究證實水泥旋窯能利用可燃性廢棄物做為替代燃料以生產水泥，可減輕廢棄物對環境帶來的負擔，並達到節約能源及實現廢棄物循環再利用的願景。美國水泥業使用可燃性廢棄物做為替代燃料的比率逐年攀升，主要有廢輪胎、廢塑膠包裝物、回收的液態燃料、動物脂肪、汙泥等，其中又以廢輪胎使用比率最高。

歐盟 歐盟於 2015 年開始推動「歐盟循環經濟行動計畫」，以減少廢棄物與碳足跡，目前已由傳統的線性經濟逐漸朝向

水泥製程與循環經濟的關聯

廢棄物來源	廢棄物種類	循環用途	循環角色
事業廢棄物	氟化鈣 煤灰（飛灰、底灰） 水淬高爐石 營建混合物 電弧爐煉鋼爐渣 無機性汙泥 脫硫石膏	替代原料	<ul style="list-style-type: none"> 含有鈣、矽、鋁和鐵 4 種元素的廢棄物，能替代大理石、黏土、矽礦和鐵礦砂，減少天然礦石的開採。 事業廢棄物是運用廢棄物的「熱值」，達到同時處理廢棄物及降低燃煤成本的雙重效用。
	廢溶劑 廢塑膠 廢輪胎	替代燃料	
生活廢棄物	垃圾焚化爐灰渣	替代原料	<ul style="list-style-type: none"> 生活廢棄物做為替代燃料後所產生的灰渣也可循環利用做為水泥的替代原料，同時解決垃圾掩埋場不足的問題。 利用生產過程所產生的餘熱發電，達到節能減排的目的。
	生活垃圾	替代燃料	
熱能回收	旋窯熱氣	廢熱發電	

資料來源：1.台灣區水泥工業同業公會（2016）
2.工研院「耗能產業能源效率指標建立與輔導計畫」（2015）。

循環經濟的方向發展。2012 年歐盟 28 國的水泥業累計使用約 9,800 萬公噸的替代燃料，替代率約為 36%。

根據歐盟水泥協會和永續能源與氣候顧問公司 ECOFYS 於 2016 年的報告指出，歐洲水泥業正積極提高替代燃料率，中期目標可望達 60%，預估約可減少 1,020 萬公噸碳足跡。歐盟有成熟的廢棄物基礎設施，能有效促進水泥業的替代燃料比率，其生活及事業廢棄物的收集、分離具有規模性與便利性，未來期望把 60% 的廢棄物替代燃料比率提升至 95%。

國內水泥業發展循環經濟現況

跟隨世界的潮流，我國水泥產業也已著手發展循環經濟。以下介紹我國水泥業協助廢棄物處理的情形。

在替代原料方面，2015 年重點事業廢棄物的產量依序是煤灰（28.07%）、水淬高

爐石（15.76%）、營建混合物（7.98%）、電弧爐煉鋼爐渣（5.65%）及無機性汙泥（4.97%）。其中的煤灰、水淬高爐石、電弧爐煉鋼爐渣等，可做為水泥窯中的替代原料，如水泥、混凝土等產品的材料及添加物。

在替代燃料方面，國內把廢輪胎經由破碎設備處理後的破碎輪胎片，送至水泥廠做為替代燃料使用。高溫處理後的鋼絲氧化為氧化鐵，又可替代水泥製程的部分鐵礦砂，直接做為水泥製程中的替代原料，不僅同時減少燃煤使用量與源頭開採量，更可降低空氣污染排放量。

國內水泥產業循環經濟的發展仍處於起步階段，近年來在全球循環經濟浪潮的推波助瀾下，積極在採礦、製程、減排、研發上朝綠色經濟發展。未來國內協助處理廢棄物的趨勢除了替代原料及替代燃料外，將會擴大至其他可再生產品等非初次開採的原燃料，逐步把水泥產業轉型為推動循環經濟的標竿產業。



國內主要業者發展循環經濟與降低碳足跡的現況（圖片來源：臺灣綜合研究院，2017）

水泥業發展循環經濟的藍圖

目前國內循環經濟發展正處於萌芽階段，本文借鏡國際做法，嘗試以區域涉及的範圍，整理出水泥業循環經濟的發展藍圖，可分為企業層級、工業園區及國家層級 3 大層面。

企業層級 主要是著眼於個體廠區或產業內獨自運作企業的循環經濟。例如：在主要原料運輸路線中，可利用帶運機下坡輸送礦石的位能來轉換發電，在個體運載過程中巧妙地整合採礦、工務、電儀等部門；或是在個體廠區內，結合灌溉分離政策，把地下水用於製程的冷卻或再循環利用，與處理後排入農田水利會排水圳路，循環利用水資源。

工業園區 是指區域內的生活與事業廢棄物做為水泥製程的替代原料或替代燃料循環再利用。國內除了規劃中的花蓮「盤式燃燒爐」的可行性評估外，尚有港、廠、電三合一的運作模式。這種模式規劃把生產水泥所需的燃料與大部分原物料（鐵渣、石膏、爐石等）交由東部港口輸入，製成的水泥產品也透過東部港口運輸至西部各港口水泥接收站，如此可避免對環境造成的潛在衝擊、節省運送費用，同時增加港口的吞吐量。而電廠在燃煤製程中所產生的煤灰，也可當作水泥的原料。

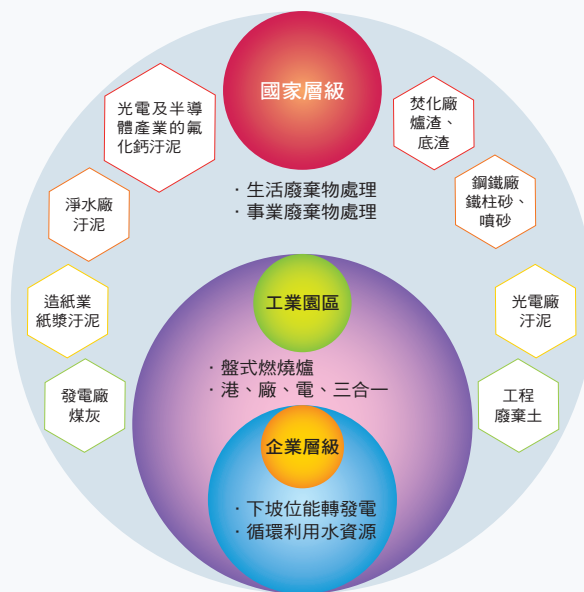
此外，在水泥生產過程中所產生的石灰粉，也能做為電廠脫硫的原料。再者，脫硫產出的脫硫石膏，也可做為水

泥生產添加的成分之一。如此形成一個良性迴圈，達到資源全部再利用的目的。

國家層級 由於國內部分縣市難以落實「一縣市一垃圾焚化爐」的政策，使得這些沒有焚化爐的縣市，只能依據我國廢棄物清理法第 28 條規定，委託其他縣市共同處理生活和事業廢棄物。這種在國內「跨區」協助處理全國性的生活與事業廢棄物的方式，是目前國外水泥業在循環經濟中所扮演的角色，也是本文所定義「國家層級」層面的循環經濟，更是未來國內水泥產業發展循環經濟的方向。

過去工業革命為求繁榮發展，產品由原料生產、消費耗用到最後廢棄汙染，生命週期由搖籃到墳墓的單向線性消耗模式推演至今，人們開始面臨環境、資源與發展需求如何兼顧的問題，因此綠色經濟、低碳經濟、循環經濟等概念應運而生。把原先線性經濟壽終正寢的產品重新再生利用，同時研發低耗能、高效率的製程，創造更多的附加價值。

隨著環保意識抬頭，國際間水泥產業的發展也逐漸轉型，把原本是線性經濟的水泥業導入循環經濟發展。日本、德國、歐盟等國家藉由水泥窯高溫、連續不停窯的製程特性，協助處理生活與事業廢棄物，不僅有效降低煤的消耗與二氧化碳的產生，同時解決廢棄物掩埋問題，有效促進資源循環再利用。而國內水泥產業自日治時期發展至今，產業鏈業已成熟健全，近來國際上循環經濟聲浪高漲，台灣必須借鏡國外克服現況，投入能資源整合設備，有計劃地發展循環經濟。



水泥業循環經濟的發展藍圖（圖片來源：臺灣綜合研究院 2017）

考量未來 5 + 2 產業創新計畫、前瞻性基礎建設，甚至未來全國性的都更計畫，長期而言，水泥需要維持穩定的供給量。因此，水泥產業的存在有其必要性。然而產業的轉型必須付出一定的代價，未來水泥業導入循環經濟的技術研發、資本投入與人才培訓都需要投入龐大的資金，且需國內產官學研共同積極努力。期待台灣接軌國際環保計畫後，能夠更具體落實經濟永續發展與環境保護同生同榮的願景，共創更多綠色商機。

鄭為珊、丁俊元、陳建緯

臺灣綜合研究院