



應用循環經濟評估臺灣水泥製造業 協同處理一般廢棄物之發展

陳映竹 / 國立臺北大學自然資源與環境管理研究所 副教授

臺灣地狹人稠且能資源有限，積極創造再生能源已列為國家重點發展政策。目前國內部分縣市面臨垃圾去化管道之問題。水泥製造業之窯體高溫環境特別適合發展協同處理技術，本初步研究結果發現，水泥製造業協同處理一般廢棄物有 4.23 kg CO₂-eq/kg 的溫室氣體減量成果，總節省成本可達美金 26.98 百萬元。

依據臺灣廢棄物清理法定義，廢棄物可分為「一般廢棄物」與「事業廢棄物」兩類，其中「一般廢棄物」俗稱為「生活垃圾」，國際常稱為「都市固體廢棄物」(municipal solid waste, MSW)。臺灣一般廢棄物年產量自 1988 年近 900 萬公噸逐年降低至今 2016 年近 750 萬公噸(環保署, 2017)，可見相關廢棄物源頭減量及再利用之政策成效。臺灣現有營運中 24 座垃圾焚化廠，其每座設計容量介於 50 ~ 1,800 公噸/天，總設計容量為 24,650 公噸/天，足夠處理國內產生之一般廢棄物量。其中，設計容量大於 1,000 公噸/天之焚化廠大多座落於五都及人口密集之縣市，其他縣市恐面臨垃圾去化管道之問題，原因包括經濟成本考量、政治因素、市場機制等因素。臺灣一般廢棄物之含水率約 50% 且濕基低位發熱量 (lower heating value, LHV) 高於 2,000 kcal/kg (環保署, 2017)，其性質屬適合以熱處理之原料。

歐盟建議之廢棄物管理層級，依序優先為源頭減量 (avoidance)、再使用 (reuse)、再利用 (recycle)、能源回收

(energy recovery) 以及最終處置 (disposal) 5 個層級 (圖 1)。廢棄物轉製能源 (waste-to-energy, WTE) 層級介於「源頭減量」及「最終處置」之間，為廢棄物無法「源頭減量」時建議之處理技術。歐盟定義之廢棄物轉製能源 (waste-to-energy, WTE) 包含「協同處理 (co-processing)」、「焚化具備能源回收 (R1)」以及「焚化不具備能源回收 (disposal; D10)」3 類 (ECOFYS, 2016)。上述 24 座垃圾焚化廠皆具備能源回收設備，總設計值可年產 558.5 百萬瓦之能源，發電量高達 31 億度電，除可提供廠內利用，還可返售台灣電力公司賺取利潤。然而，臺灣「協同處理」之發

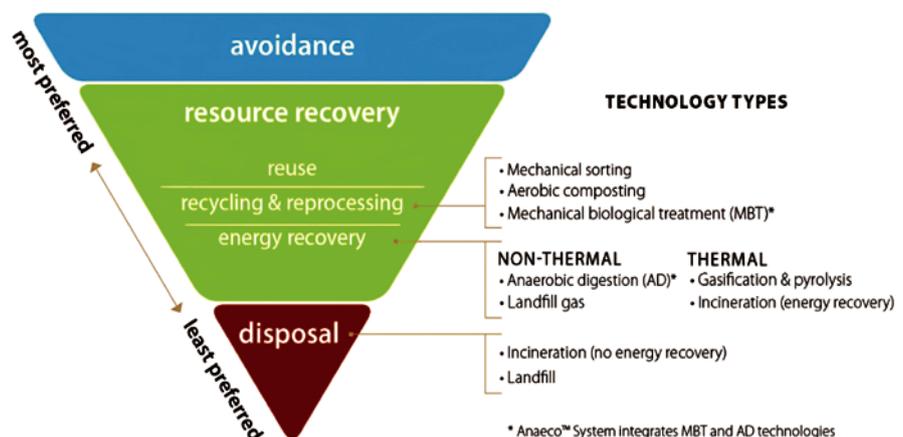


圖 1 歐盟廢棄物管理層級

展卻仍處於試驗階段，國際上水泥製造業協同處理一般廢棄物已實施多年，且成效評估多屬對環境具正面效益。舉例來說，紐西蘭和瑞士應用水泥窯協同處理一般廢棄物的替代率已高達 83% 和 43% (Murray and Price, 2008)，鄰近臺灣之日本及北京的替代率也分別為 15.5% 和 60%。臺灣應順應此國際趨勢，著手研究並提出適合我國國情之水泥製造業協同處理一般廢棄物之處理方法，提供相關策略建議。

協同處理定義為應用廢棄物替代原生(燃)料，減少資源及非再生化石能源之使用 (Stafford *et al.*, 2015)。水泥製造業屬於高耗能、資源之產業，其窯體之高溫環境特別適合發展協同處理技術。水泥製造業常使用煤炭、石油焦以及天然氣等化石燃料，提供熱能給窯體升溫 (Rahman *et al.*, 2015)。面臨化石燃料之非再生性、成本高漲等問題，迫使國際水泥製造業者趨向於應用替代燃料 (alternative fuel, AF) 替代部分化石燃料，以達循環經濟並兼顧環境保護之目標。目前一般廢棄物 (MSW)、肉骨粉 (meat and bone animal meal, MBM)、下水污泥 (sewage sludge, SS)、生質能 (biomass)、廢棄輪胎 (end-of-life tyres, ELT) 於水泥窯中協同處理之發展已相當普遍 (Kara, 2012)，其中部分學者提出一般廢棄物作為替代燃料於水泥窯中協同處理仍具相當多元且可期待之發展 (Rahman *et al.*, 2015)。

臺灣水泥製造業歸屬於「非金屬礦物製造業」的水泥及水泥製品製造業中。2015 年營運中家數為 32 家，提供 2,468 人就業機會 (工業技術研究院, 2017)。2016 年臺灣水泥產量僅 1,213 萬公噸 (占全球不到 0.3%)，其中台灣水泥公司年產量 6,300 萬公噸，全球排名第 8 名 (含國內外產量) (工業技術研究院, 2017)，可見台灣水泥製造業位居全球水泥市場之重要性。然而，水泥製造業面臨之挑戰包括「減緩氣候變遷 (abate climate change)」、「改善廢棄物管理 (improved waste management)」以及「實現循環經濟 (achieve a circular economy)」 (ECOFYS, 2016)。鑑此，本研究團隊收集相關文獻，以臺灣某水泥廠之公開資料為例，評估一般廢棄物於 5 種替代率之情境下作為替代燃料之「溫室氣體減量」及「節省成本」成果 (表 1)：(1) 文獻回顧得知煤炭的熱值為 26.75 MJ/kg，一般廢棄物

之熱值為 13.15 MJ/kg (Wagland *et al.*, 2011)。因此一般廢棄物作為替代燃料率愈高，其溫室氣體排放量愈少，最高溫室氣體減量 4.23 kg CO₂-eq/kg，假設以 2016 年通過之「溫室氣體減量與管理法」罰則中最高每公噸新台幣 1,500 元之價格估算溫室氣體減量效益，節省金額高達美金 18.13 百萬元。(2) 一般替代燃料可接受的價格為美金 24 元 (Kara, 2012)。案例水泥製造業每年花費約新台幣 11.54 億元於採購煤炭作為燃料，若替代部分為一般廢棄物，其可節省高達美金 8.85 百萬元之成本。加總節省之燃料成本及碳稅成本，總節省成本可高達美金 26.98 百萬元。

表 1 本研究評估一般廢棄物作為替代燃料之「溫室氣體減量」及「節省成本」成果

替代燃料	替代率 (%)	溫室氣體排放量 (kg CO ₂ -eq/kg fuel)	節省燃料成本 (USD)	節省碳稅成本 (USD)	總節省成本 (USD)
一般廢棄物	0	8.14	0	0	0
	35	5.88	3,259,842	6,679,650	9,939,492
	50	5.24	4,656,907	9,542,400	14,199,307
	75	4.42	6,985,367	14,313,650	21,299,017
	95	3.91	8,848,130	18,130,600	26,978,730

依據上述研究初步成果，發現水泥製造業可謂為落實「以循環經濟落實溫室氣體減量」之示範產業。全球水泥製造業排放的溫室氣體量占人為排放溫室氣體量之 5~6%，主要來自燃燒過程及石灰石鍛燒過程 (Benhelal *et al.*, 2013; Garcia Gusano *et al.*, 2015)，其導致 4% 的全球暖化現象加劇 (Wall *et al.*, 2009)。IPCC 建議之排放係數為製造每噸水泥熟料 (clinker) 會產生 520 公斤溫室氣體 (IPCC, 2006)。減少水泥製造業的溫室氣體排放可從「改變使用化石燃料種類」、「應用替代燃料」或「改善窯體運作管理」3 個方向著手 (Kajaste and Hurme, 2016)。使用一般廢棄物取代化石燃料可有效減少溫室氣體排放 (Mokrzyckia *et al.*, 2003; Genon and Brizio, 2008; Hashimoto *et al.*, 2010; Cheung *et al.*, 2006)，本研究計算結果也有 4.23 kg CO₂-eq/kg 的「溫室氣體減量」成果。相關研究預估從水泥製造業著手減量 10% 之溫室氣體排放，2050 年可減少 0.4 千兆公噸的溫室氣體排

放，減緩全球暖化效應 (Kara, 2012)。

2015 年歐盟執行委員會接受一項循環經濟之行動計畫，其指出產品的生命週期需要納入更多的循環經濟思維與行動，如製造二次再生的產品。在協同處理製造水泥之過程中，結合替代燃料與傳統化石燃料以獲得所需之能量，可減少成本支出並降低環境衝擊，如英國每年製造 100 萬公噸水泥熟料的成本約 213.1 百萬歐元 (García-Gusano, 2015)，本研究以一般廢棄物作為替代燃料也有高達美金 26.98 百萬元的「節省成本」成果。此外，二氧化碳捕捉與貯存技術 (CO₂ capture and storage) 之建設成本約為 300 百萬歐元，每捕捉 1 公噸的二氧化碳約再支出 24~75 歐元的成本 (Benhelal *et al.*, 2013)。國際預估 2020 年每 1 公噸碳稅價錢介於 20~47 歐元 (van den Broek *et al.*, 2011)，本研究引用 2016 年通過之「溫室氣體減量與管理法」罰則中最高每公噸新台幣 1,500 元之價格估算溫室氣體減量效益，其略高於國際預估價格。然而，水泥廠之建設成本變動彈性不大的情況下，從營運與維護 (operational and maintenance, O&M) 成本著手降低經濟衝擊，是比較容易執行且具顯著效果的。

本報導及初步研究成果，試以循環經濟角度評估臺灣水泥製造業協同處理一般廢棄物之發展，其不僅有助於「溫室氣體減量」及「節省成本」，也可解決廢棄物去化管道之問題，減緩臺灣目前面臨之環境挑戰與困境。然而，相關技術發展及潛在之環境成本、污染仍須更進一步之研究確立，以達兼具環境保護與經濟發展之雙贏局勢。

參考文獻

- 工業技術研究院 (2017)。水泥業在循環經濟角色的探討，2017 水泥業提升能源效率研討會，台北。
- 行政院環境保護署 (2017)。環保統計年報。行政院環境保護署，台北。
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A. (2013), Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *J. Clean. Prod.* 51, 142-161.
- Cheung, W.H., Choy, K.K.H., Hui, D.C.W., Porter, J.F., McKay, G. (2006), Use of municipal solid waste for integrated cement production. *Dev. Chem. Eng. Mineral Process* 14, 193-202.
- ECOFYS (2016), Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU. ECOFYS, Netherlands.
- García-Gusano, D., Cabal, H., Lechon, Y. (2015), Long-term behavior of CO₂ emissions from cement production in Spain: scenario analysis using an energy optimization model. *J. Clean. Prod.* 99, 101-111.
- Genon, G., Brizio, E. (2008), Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. *Waste Manage.* 28, 2375-2385.
- Hashimoto, S., Fujita, T., Geng, Y., Nagasawa, E. (2010), Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: a cement production case study for Kawasaki. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 704-710.
- IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, NY.
- Kajaste, R., Hurme, M. (2016), Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *J. Clean. Prod.* 112, 4041-4052.
- Kara, M. (2012), Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resour. Conserv. Recycl.* 68, 21-28.
- Mokrzyckia, E., Uliasz-Boche czyk, A., Sarna, M. (2003), Use of alternative fuels in the polish cement industry. *Appl. Energy* 74, 101-111.
- Murray, A., Price, L. (2008), Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Report No: LBNL-525E.
- Rahman, A., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Sharma, K.S. (2015), Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel* 145, 84-99.
- Stafford, F.N., Viquez, M.D., Labrincha, J., Hotza, D. (2015), Advances and challenges for the co-processing in Latin American cement industry. *Procedia Mater. Sci.* 9, 571-577.
- van den Broek, M., Veenendaal, P., Koutstaal, P., Turkenburg, W., Faaij, A. (2011), Impact of international climate policies on CO capture and storage deployment illustrated in the Dutch energy system. *Energy Policy* 39, 2000-2019.
- Wagland, S.T., Kilgallon, P., Coveney, R., Garg, A., Smith, R., Longhurst, P.J., Pollard S.J.T., Simms, N. (2011), Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor. *Waste Manage.* 31, 1176-1183.
- Wall, T., Liu, Y., Spero, C., Elliott, L., Khare, S., Rathnam, R. et al. (2009), An overview on oxyfuel coal combustion – state of the art research and technology development. *Chem. Eng. Res. Des.* 87, 1003-1016. 