

# 以能源效率模型評估我國水泥業的製程節能潛力

黃韻勳<sup>1\*</sup> 張憶琳<sup>2</sup>

## 摘 要

全球暖化現象日益惡化，國際間要求工業部門節能減碳的聲浪隨之增高。以全球工業部門而言，非金屬礦物業的能源消費量僅次於鋼鐵與石化業，約占全球工業部門總能源消費的12%；其中，水泥業占非金屬礦物業能源消費的70~80%。在溫室氣體排放方面，全球水泥業2000年的排放量約10億噸，但2010年的排放量已超過15億噸，成長幅度相當顯著。以臺灣而言，2013年水泥業的能源消費為1,902,572公秉油當量，占工業部門總能源消費量的4.37%，全國總能源消費量的1.66%；能源密集度方面，2012年非金屬礦業的能源密集度為41.16公秉油當量/百萬元新臺幣，在耗能產業中僅次於石化業，顯示其為能源密集度相當高之產業。為有效降低水泥業的能源消費並提升能源效率，有必要確認出製程的主要能源效率技術，並針對這些技術的節能潛量進行估算。本文使用能源效率模型評估我國水泥業至2035年的節能潛力，水泥業製程的主要節能技術與擴散率主要透過訪廠與專家意見，技術節能量則以國際標竿與國內外案例為主。節能技術中共篩選出18項主要技術，分別估算水泥業未來的節電與燃料節能潛力，以作為政府訂定工業部門節能量目標與研擬節能策略時之參考。

**關鍵詞：**水泥業、能源效率模型、節能潛力

## 1. 前 言

全球水泥的需求量在過去10年間(2002年至2012年)約成長一倍，年平均成長率為7.4%；其中，中國大陸為主要成長來源(International Cement Review, 2013)。水泥需求上升導致所使用的能源與溫室氣體排放亦不斷增加，就全球工業部門而言，非金屬礦物業的能源消費量排名第三位(僅次於鋼鐵業與石化業)，約占全球工業部門總能源消費的12%；其中，水泥業占非金屬礦物業能源消費的70~80% (IEA, 2014)。在溫室氣體排放方面，全球約有5%的溫室氣體排放來自於水泥業，其中約50%排放為製程排

放(鍛燒過程)，其餘50%則為能源使用排放。全球水泥業在2000年的排放量約10億噸，但在2010年的排放量已超過15億噸，成長幅度相當顯著。依國際能源總署(IEA)推估，即使盡力導入減量措施，由於水泥需求增加造成其排放量仍將持續成長，預估至2050年時將占全球排放量的9~10%。

以我國而言，2013年的水泥消費量為1,224萬公噸，約占全球消費量的0.316%。水泥業產製過程中使用的能源主要為燃煤、電力及燃油等3類，依據能源平衡表(經濟部能源局，2014)資料顯示，2013年我國水泥業的燃煤耗用量為1,345,847公秉油當量、燃油耗用量為83,465公

<sup>1</sup> 工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心 研究員

<sup>2</sup> 工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心 資深研究員

\*通訊作者, 電話: 03-5914745, E-mail: abshung@itri.org.tw

收到日期: 2015年01月04日

修正日期: 2015年04月15日

接受日期: 2015年04月28日

秉油當量、電力耗用量為473,260公秉油當量，合計能源消費共1,902,572公秉油當量，約占工業部門總能源消費量的4.37%，全國總能源消費量的1.66% (經濟部能源局，2014)。在能源密集度方面，2012年非金屬礦業的能源密集度為41.16公秉油當量/百萬元新臺幣，在耗能產業中僅次於石化業，顯示其為能源密集度相當高之產業。

由此背景顯示，為有效降低能源消費並提升能源效率，有必要針對水泥業的節能潛量進行評估，確認產業製程的主要能源效率技術，並了解這些能源效率技術可能的設置時程與節能潛力。本文利用由下而上(Bottom-up)的能源效率模型，以技術面為出發點，評估我國水泥業廠商未來可能設置的能源效率技術，據以估計水泥業至2035年的節能潛力。其中，水泥業製程的主要節能技術與擴散率主要透過訪廠與專家意見，技術節能量則以國際標竿與國內外案例為主。在節能技術中共篩選出18項主要技術，分別估算節電與燃料節能潛力，以作為政府訂定工業部門節能量與研擬節能策略時之參考。

在我國既有水泥業文獻方面，著重於水泥需求預測(吳美珍及陳家榮，2009)、水泥業二氧化碳排放因素分析(張翊峰等，2008；陳彥尹等，2008)、水泥業溫室氣體盤查工具建置(蘇茂豐等，2005)、水泥業經營效率(余惠芳等，2008)、水泥產業發展分析(蔡麗紅，2008；劉蘭萍及余騰耀，2001)，但較少探討水泥業節能技術與潛力，目前僅見呂錫民(2010)由最佳可行技術(Best Available Techniques, BAT)的觀點，假定現有的水泥業製程技術若皆更換為BAT，估算我國水泥業節省電能與熱能之潛力，此方法雖然淺顯易懂，但卻忽略了各技術之實際應用情況，意即並非所有的水泥廠皆可採用BAT。基此，本研究主要貢獻在於：盤點出水泥業於我國可應用之節能效率技術；其次，透過訪談國內水泥業者代表和廠內專家，確認出各項技術於廠內實際應用的可行性和可設置

率，最後使用具有學理基礎的能源效率模型，在不同情境的設定下，分別估算水泥業節電與燃料節能潛力，為國內第一篇使用能源效率模型以評估水泥業未來的節能潛力。

本文共分為6節，除第1節為前言外；第2節為水泥業製程與我國水泥業現況；第3節說明本研究採用的能源效率模型；第4節為資料來源與參數設定；第5節為模型分析結果；最後則提出本研究之結論。

## 2. 水泥業製程與我國水泥業現況

### 2.1 水泥業製程

水泥在原料採掘運送到水泥廠後，在生產製程上可分為生料製備、熟料燒成及水泥製備等三大部分，茲將製程與其主要耗能設備概述如下：

#### 2.1-1 生料製備

製造水泥需要四大主要原料(礦產)，石灰石、矽砂、黏土與鐵渣，將這些原料以一定比例混合(約80%為石灰石)，再以滾壓機進行研磨，此研磨過程會持續至生料被磨成細粉，研磨後的細粉會先經過分類機篩選，若粒子細度不足則須予以分離並再度送回滾壓機研磨，生料被磨成細粉後將被送進生料桶儲存。此階段主要消耗能源為電能，主要耗能設備為刮料機、滾壓機、選粉機、生料磨及靜電集塵器等。

#### 2.1-2 熟料燒成

生料桶的粉狀原料隨後被送至預熱機預熱，預熱器可分為數個階段，分布的溫度亦不同。出預熱機後進一步送出旋窯中進行鍛燒，鍛燒主要將石灰石的碳酸鈣成分分解為氧化鈣並釋放出二氧化碳。旋窯溫度可高達1,500°C，使得原料呈現半熔融狀態，稱之為熟料。同

時旋窯也以每分鐘2~3轉的轉速將原料均勻混合。此階段製程主要消耗能源為熱能，主要使用的燃料為煤炭，亦可使用廢棄物作為替代燃料，主要耗能設備為預熱機、旋窯、熟料冷卻機、排風扇、煤磨等。

### 2.1-3 水泥製備

熟料被冷卻機冷卻到150~300°C後，再送去熟料庫儲存。冷卻的熟料與石膏以96~98：4~2的比例混合後，再研磨成標準細度後，即成為水泥，可由水泥車直接運送或由分袋包裝後加以出售。此階段主要消耗能源亦為電能，主要耗能設備為滾壓機及水泥磨。

除上述的生產製程外，部分水泥廠有裝設廢熱回收發電設備，主要將預熱機及冷卻機排出的廢熱導入鍋爐，以產生蒸汽用於推動汽輪機及發電機。所產生的電力可提供廠內自用，亦為一般水泥廠常採用的節能技術。綜上所述，水泥製程主要分為生料製備、熟料燒成及水泥製備等三大部分，亦為後續能源效率模型所區分的製程種類，而各製程中的主要耗能設備，則作為後續挑選主要能源效率技術的依

據。

## 2.2 我國水泥業現況

依據臺灣區水泥工業同業公會所發布的臺灣區水泥工業概況2014年版，我國2013年以石灰石為原料生產之國產水泥公司計有台灣水泥等9家業者，共設立12個廠，18座窯爐(如表1所示)；目前國內之旋窯總產能已由2009年之2,401萬公噸降至2013年的2,216萬公噸。其中，台灣水泥共有蘇澳、和平與花蓮三個廠，年設計產能可達949.4萬噸(占比42.8%)，2013年的生產量為795.5萬噸，排名第一；亞洲水泥有新竹與花蓮兩個廠，年設計產能達502萬噸(占比22.7%)，2013年的生產量達507.6萬噸，排名第二。

若由長期趨勢來看，水泥業在民國75年(1986年)至102年(2013年)的生產、消費、外銷、內銷、進口量可彙整如圖1所示。國內水泥業自民國75年起，由於政府推動重大工程及民間建築業繁榮景氣刺激下，水泥消費量由1,133萬公噸勁升至民國82年的2,719萬公噸(最高峰)，成長幅度高達2.4倍。同時期業者亦積極

表1 我國水泥廠旋窯之年產能與實際產量

水泥廠		各旋窯年產能 (萬噸熟料)			設計年產能 (萬噸)	產能占比 (%)	2013年產量 (萬噸)
台泥	蘇澳廠	72.6	158.4		949.4	42.8	795.5
	和平廠	280	280				
	花蓮廠	158.4					
亞泥	新竹廠	100			502	22.7	507.6
	花蓮廠	105.6	138	158.4			
環球	阿蓮廠	80			80	3.6	31.9
東南水泥高雄廠		108.9			108.9	4.9	36.5
欣欣水泥嘉義廠		80			80	3.6	6.4
信大水泥南聖湖廠		71	85		156	7.0	82.4
幸福水泥東澳廠		120	80		200	9.0	89.5
潤泰水泥冬山廠		100			100	4.5	75.4
正泰水泥高雄廠		40			40	1.8	32.3
合計(9家12廠)		共18座			2,216.3	100	1,657.5

資料來源：臺灣區水泥工業同業公會，2014。

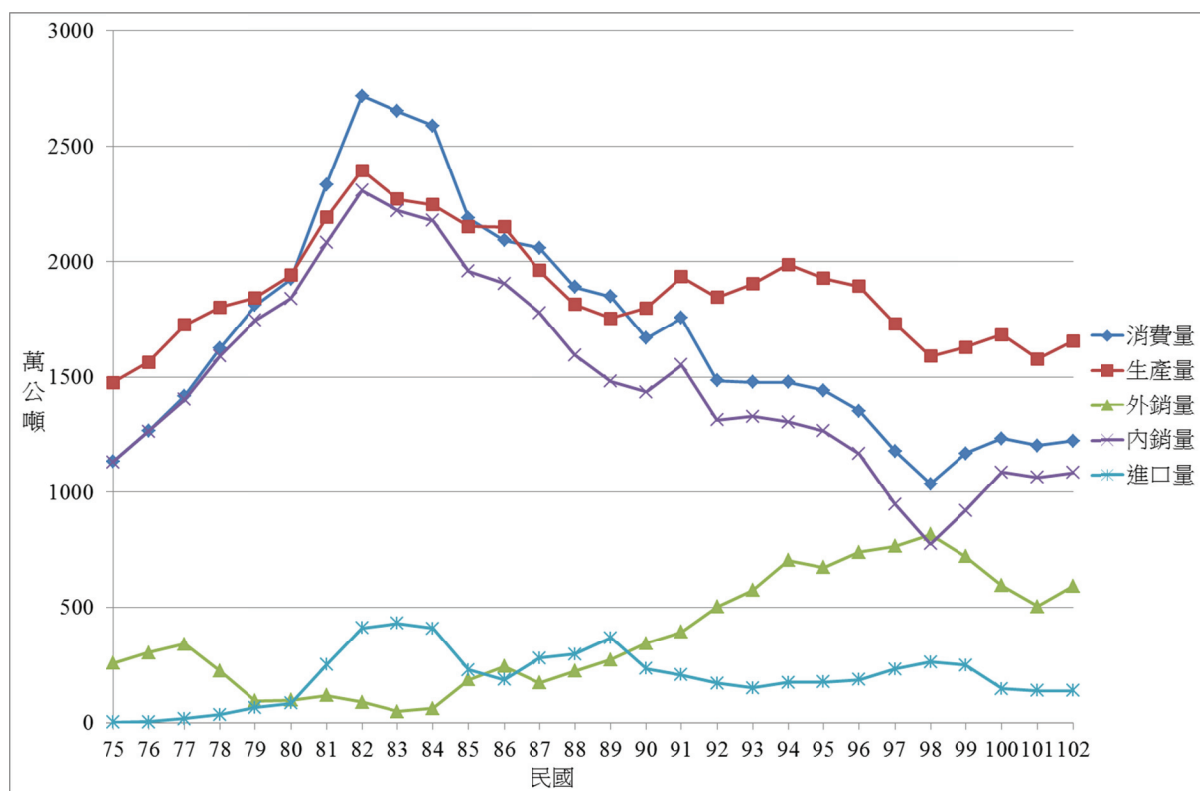


圖1 民國75年至102年之水泥產銷統計圖  
資料來源：本研究整理。

投入生產，國內產量由75年的1,477萬公噸，成長到82年的2,395萬公噸，發展可謂相當快速。惟自民國83年以後，建築業景氣逐漸滑落，水泥需求亦日趨薄弱，87年起更因亞洲金融風暴造成景氣蕭條，致使國內水泥消費量下滑，至民國88年水泥消費量已降為1,892萬公噸。而自90年起，臺灣高鐵及機場捷運等工程將逐年陸續開工，對減緩水泥消費之下滑有所助益，故於91年國內水泥消費有小幅成長。而98年金融海嘯造成景氣衰退而再次導致水泥消費快速下降，但近年已緩慢回升。

在水泥進口方面，自民國77年政府取消水泥進口關稅後，進口量即逐年上升，至民國83年達到最高峰為430萬公噸，隨後由於進口成本升高及國內水泥需求下降，進口量陸續下滑，民國86年進口量僅為184萬公噸。爾後又因亞洲金融風暴影響，東南亞各國紛以低價大量輸出水泥，民國88年水泥進口量復又上升至295萬公噸，自民國90年之後進口量約在140~250萬公

噸間波動。而在出口方面，水泥生產以供應內需為主，出口原只用於平衡產銷。但近年來因國內市場供過於求，業者為降低庫存壓力，乃積極拓展外銷，民國88年水泥外銷量僅為223萬公噸，但至民國98年已成長至817萬公噸，外銷量逐年增加，致使外銷比例在民國98年已超過50% (51.38%)。

### 3. 能源效率模型

FORECAST (Forecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool)模型為歐盟進行能源效率與相關技術趨勢變化，以及各項能源效率政策的主要評估工具。該模型由歐盟合理使用能源計畫(The EU's Intelligent Energy – Europe Programme)所支持，應用於整個歐盟區域及各國家級能源效率相關議題。近年主要的應用領域包含：歐盟工業部門至2030年的節能潛力(Eichhammer *et al.*, 2009)、歐盟



工業部門的減量成本曲線(Fleiter *et al.*, 2009)、德國長期氣候變遷情境分析(Schlomann *et al.*, 2011)、德國高耗能產業節能潛力與成本分析(Fleiter *et al.*, 2011; Fleiter *et al.*, 2012)、歐盟能源效率政策對服務業電力需求之影響評估(Jakob *et al.*, 2012; Jakob *et al.*, 2013)、土耳其能源效率政策對住宅部門電力需求之影響評估等(Elsland *et al.*, 2014)。工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心為協助我國政府研析能源效率提升策略，以達成節能減碳目標，於2013年開始與德國Fraunhofer 系統與創新研究所(Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Fraunhofer ISI)合作，建構臺灣版的能源效率模型。該模型以FORECAST為基礎，結合工研院能源查核資料庫，並將我國工業部門各產業的本土化資料與各項節能技術建置至模型內。以下說明模型的理論基礎與情境設定：

### 3.1 模型理論架構

此能源效率模型為一個由下而上(Bottom-up)的模型，以工業部門為例，模型架構可分為三層(如圖2所示)。在第一層中主要將工業部門分為各個次產業，如：造紙業、水泥業、鋼鐵業等；第二層則區分該產業下的主要製程(Production Processes)，以水泥業為例，主要製程可區分為生料製備、熟料燒成及水泥製備三項主要製程；第三層為該製程下主要的能源效

率技術(Energy Efficiency Technologies, EET)，以生料製備為例，主要能源效率技術包含：豎磨機、高效選粉機和分級機、高效生料預均化系統等。在模型中每個製程都可用單位耗能來加以表示，而能源效率技術主要在降低該製程的單位耗能。此模型稱之為Bottom-up的原因在於節能量係由下往上加總，首先計算各能源效率技術的節能量，彙整該製程的所有能源效率技術則可獲得該製程的總節能量，而加總該部門所有製程的節能量可得到部門節能量，最後加總各部門後，即為整體工業部門之節能量。

除解釋模型架構外，模型中主要計算節能量與成本的數學式亦說明如下(Fleiter *et al.*, 2012)：

首先為各能源效率技術之節能量(Energy Savings, ES)估算，此節能量會受到該技術之單位節能量(saving potential, sp)、能源效率技術相對於起始年的擴散程度( $\text{Diff}_t - \text{Diff}_{\text{startyear}}$ )以及相關製程之產量(Industrial Production, IP)所影響。如式(1)所示：

$$ES_{t,p,EET,d,ec,c} = sp_{EET,c,ec} \times (\text{Diff}_{t,EET,d,c} - \text{Diff}_{t=\text{startyear},EET,c}) \times IP_{t,p,c} \quad (1)$$

其中，下標 $t$ 為年度； $p$ 為製程；EET為能源效率技術； $d$ 為情境； $c$ 為國家； $ec$ 為能源載具。此外，Diff (Diffusion)為各能源效率技術的擴散率，可由過去技術擴散經驗、設備使用期

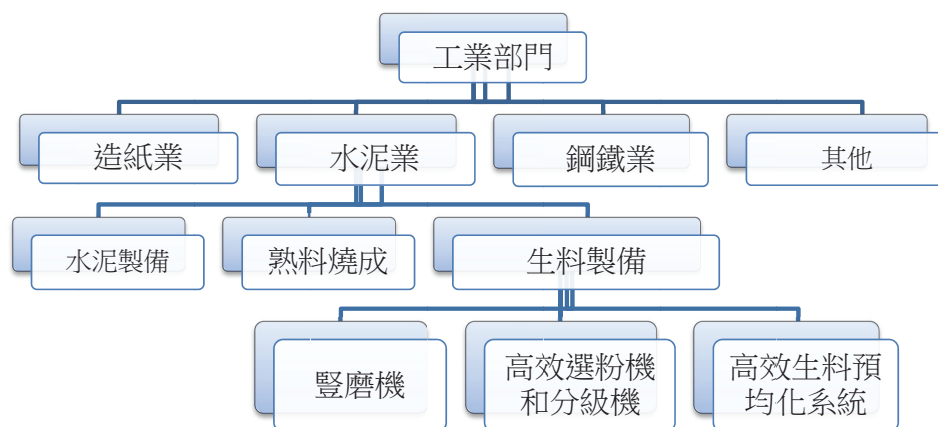


圖2 能源效率模型之三層架構  
資料來源：本研究整理。

限及成本等進行外生假設，或由回收年限為估算基礎由模型進行內生擴散率的計算。

而整個製程別的能源需求(Energy Demand, ED)則依據製程產量(IP)與該製程的單位耗能(Specific Energy Consumption, SEC)相乘後，得到該製程的總能源消耗，再減去該製程下所有能源效率技術的節能量後，即可獲得該製程最終的能源需求量，如式(2)所示：

$$ED_{p,t,d,c,ec} = IP_{t,p,c} \times SEC_{t=startyear,p,ec,c} - \sum_{EET=1}^n ES_{t,p,EET,d,ec,c} \quad (2)$$

在成本(Cost)估算方面，能源效率技術的單位成本(c)為年度總成本(C)除以年度節能量(ES)，如式(3)所示：

$$C_{t,EET,c} = \frac{C_{t,EET,c}}{\sum_{ec=1}^n ES_{t,EET,ec,c}} \quad (3)$$

而在式(3)的年度總成本(C)包含投資成本( $C^I$ )、營運成本( $C^R$ )、節能成本( $C^E$ )及減少碳排放成本( $C^C$ )，如式(4)所示：

$$C_{t,EET,c} = C_{t,EET,c}^I \times \frac{(1+r)^{L_t} EET \times r}{(1+r)^{L_t} EET - 1} + C_{t,EET,c}^R - C_{t,EET,c}^E - C_{t,EET,c}^C \quad (4)$$

## 3.2 模型情境設定

除計算節能量外，在能源效率模型中主要可考量四種主要情境(如圖3所示)，分別為：能源效率停滯情境(Frozen efficiency diffusion)、企業自發性情境(Autonomous diffusion)、成本效益情境(Cost-effective diffusion)及技術發展潛力情境(Technical diffusion)。四種情境的定義說明如下(Fleiter *et al.*, 2011; Fleiter *et al.*, 2012)：

1. 能源效率停滯情境：此情境假定未來能源需求僅受到生產量(生產結構)改變而變化，但沒有任何能源效率的進步，主要是作為估算其他情境的比較基礎。
2. 企業自發性情境(或稱Business as usual (BAU) 情境)：考量產業自發性進行能源效率設備之更換，所形成的緩慢能源效率提升發展之情境，為成本效益情境的下限。
3. 成本效益情境：此情境為模擬企業依據回收年限之投資決策的節能情境。回收年限愈長，節能潛力愈接近企業自發性情境；回收年限愈短，則節能潛力愈接近技術發展潛力情境。
4. 技術發展潛力情境：產業在不考慮成本效益

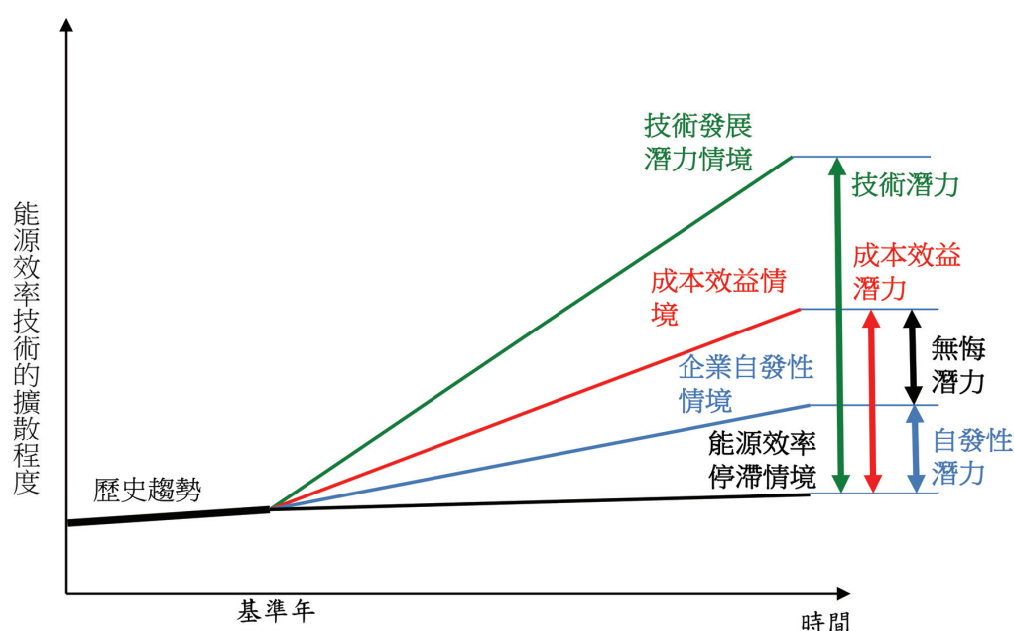


圖3 能源效率模型之情境與其節能潛力關係示意圖  
資料來源：Fleiter *et al.*, 2011; Fleiter *et al.*, 2012

下採用所有可能在廠區應用的節能技術，所形成的理論能源效率提升情境。

綜言之，本研究之能源效率模型可考量能源效率停滯、企業自發性、成本效益以及技術發展潛力四大類情境，代表因衝擊不同所引起的不同的技術(措施)擴散程度，進行各情境節能潛力分析，主要可評估不同強度的政策下節能潛力的差異。

## 4. 資料來源與參數設定

### 4.1 能源效率技術之篩選與說明

在能源效率模型中，首先須確認的為製程分類與各製程下的主要能源效率技術。在所述水泥業製程說明，已確認出水泥業三大製程。在確認水泥業能源效率技術方面，本文經由參考國際水泥業重要文獻，包含：國際能源總署(IEA)所發布的水泥業技術藍圖(IEA, 2009)、歐盟水泥業的最佳可行技術文獻(European Commission, 2013)、勞倫斯柏克萊國家實驗室所發布的水泥業提高能源效率機會(Worrell, 2008)與水泥業節約能源供給曲線文獻(Hasanbeigi *et al.*, 2010; Hasanbeigi *et al.*, 2013)，以及相關國際期刊論文(Worrell *et al.*, 2000; Madloul *et al.*, 2011; Hasanbeigi *et al.*, 2012; Madloul *et al.*, 2013)，藉由交叉對比上述國際文獻後，並針對製程中的主要耗能設備，整理出能源效率技術共38項，但國外文獻所提及之技術不一定適用於臺灣水泥廠，故再透過實際訪廠，詢問此38項技術各水泥廠是否已採用或未來可能採用，最後彙整出重要的能源效率技術(共18項)，其單位節能量(節電量或節省燃料量)彙整如表2所示。以下概要說明水泥業三大製程下各能源效率技術之特性：

在生料製備方面，傳統水泥廠以球磨機磨碎生料，但效率較差也較為耗電，故一般在更新設備的過程中會在球磨機前加裝滾壓機作為預磨(能源效率技術1)，以減少耗電。新型的水

泥廠則會使用更為省電的豎磨機(能源效率技術2)並搭配高效率選粉機(能源效率技術3)，以達到最佳的節能效果。不過這兩項能源效率具互斥性，亦即在一套生料磨中只能選擇「增設滾壓機用作球磨機的預磨」或「設置豎磨機」。而高效選粉機和分級機可有效分離過大的粒子，以避免重複滾壓，減少電能消耗。生料混合的均勻程度與水泥品質及旋窯燃燒效率密切相關，可採線上控制的方式以確保均勻混合，許多水泥廠亦採取採用重力式均一穩定化圓庫使生料配料均一及穩定化(能源效率技術4)。

在熟料燒成方面，主要設備為旋窯，旋窯應盡可能在設計的操作點下運作，故應輔以製程最佳化與自動化控制系統以減少耗能(能源效率技術6)。旋窯內的燃燒系統為影響旋窯效率高低之重要因素，改進燃燒系統(能源效率技術7)，旨在最佳化燃燒空氣和燃料的混合，以避免火焰與過多的空氣反應，節省燃料使用。舊型的傳統預熱器只有1~2段，若採用4~5段的預熱器，則在進入旋窯前，不僅生料預鍛燒程度可提升30~40%，產能也會增加，並可縮短旋窯長度20~30%，段數越高則可省下的燃料越多，燃燒效率也越好(能源效率技術11)，唯一缺點是會造成耗電量增加。在現今的技術中已有6段式預熱器，不過臺灣現今的水泥廠皆為2000年前所設立，因此最新採用的預熱器只有5段式。綜言之，我國水泥廠預熱器段數皆介於4段式與5段式，有些廠址因受限於高度限制(如：飛航高度限制)因此廠區內僅能設立4段式的預熱器。

從旋窯排氣口、熟料冷卻系統和窯預熱器系統排出的廢熱，則可拿來作為預熱空氣或送至廢熱鍋爐進一步發電，以節省廠內的生產耗電量(能源效率技術8、9)。廢熱鍋爐所排出的廢棄亦可回收作為生料、燃料煤烘乾使用。此外，水泥旋窯運轉時窯體表面溫度約達300°C，目前大部分採用風冷降溫，大量的熱能直接散發到大氣中，不僅浪費大量的熱能，也造成了窯體周圍的高溫，因此可安裝有機朗肯循環

表2 水泥業各項能源效率技術之單位節能量

製程	技術中文名稱	技術英文名稱	單位節燃料量(GJ/t)	單位節電量(GJ/t)
生料製備	1. 滾壓機用作球磨機的預磨	Roller press as pre-grinding to ball mill	0	0.0294
	2. 豎磨機	Vertical mill	0	0.0396
	3. 高效選粉機和分級機	High-Efficiency Classifiers and Separators	0	0.0183
	4. 高效生料預均化(調和)系統	Efficient homogenization of materials	0	0.0096
	5. 變頻驅動式生料磨排風機	Adjustable speed drive for raw mill fans	0	0.0012
熟料燒成	6. 熟料生產的製程控制和能源管理	Process control and energy management in clinker making	0.15	0.0085
	7. 燃燒系統改進	Combustion system improvement	0.29	0
	8. 高溫餘熱發電	High temperature heat recovery for power Generation	0	0.1109
	9. 低溫餘熱發電	Low temperature heat recovery for power Generation	0	0.0799
	10. 有機朗肯循環溫差發電	Organic Rankine Cycle (ORC)	0	0.03
	11. 增加旋窯預熱器的段數	Increasing Number of Preheater Stages in Rotary Kilns	0.079	-0.003
	12. 高效率冷卻機	Efficient clinker cooler	0.27	-0.011
	13. 燃料轉換	Fuel switch	0	0
	14. 變頻驅動式旋窯排風機	Adjustable speed drive for kiln fans	0	0.0178
	15. 變頻驅動式熟料冷卻排風機	Adjustable speed drive for clinker cooler fans	0	0.0004
水泥製備	16. 滾壓機用作球磨機的預磨	Roller press as pre-grinding to ball mill	0	0.0879
	17. 變頻驅動式水泥磨排風機	Adjustable speed drive for finish grinding	0	0.0005
	18. 新興粉磨技術	Advanced grinding technology	0	0.07

註：1. 增加預熱機段數雖可減少燃料使用，但耗電量卻會增加；同樣使用高效率冷卻機可回收更多熱量，但相對的亦較耗電，故單位節電量為負值。

2. GJ為gigajoule的縮寫；t為ton的縮寫

資料來源：Worrell *et al.*, 2000; Worrell, 2008; IEA, 2009; Hasanbeigi *et al.*, 2010; Madlool *et al.*, 2011; Hasanbeigi *et al.*, 2012; European Commission, 2013; Hasanbeigi *et al.*, 2013; Madlool *et al.*, 2013; 本研究彙整。

(Organic Rankine Cycle, ORC)溫差發電技術(能源效率技術10)，回收窯表面的熱損失加以發電，但目前仍在試驗階段，預期未來可有較顯著的效果。在熟料的冷卻過程中，目前主要使用四種類型的冷卻機：軸式、旋轉式、行星式與往複式爐排冷卻機。往複式爐排冷卻機因處理能力大及具有高效熱回收，故可比其它類型的冷卻機回收更多的熱量，新型態的旋窯皆使

用往複式爐排冷卻機(能源效率技術12)。

在水泥製備方面，由於水泥產品品質上要求比較細的粒度，故皆會採用球磨機進行產品研磨，但為節省能源，會在球磨機前加裝滾壓機進行預磨(能源效率技術16)，使水泥研磨的耗電量降低。在研磨技術發展上，包含新興的非機械式粉碎技術(如：超音波)，但此技術仍在研究與發展階段，預計2025年後才可望商業



化(能源效率技術18)。此外，在熟料製備中，亦有一些仍在研發中的技術，如：流動化床窯爐，可將目前常見的旋轉窯爐改為固定式流動化床窯爐以減少能源使用，不過由於我國目前基於環境生態保護及水泥應以供應國內建設需求為主等理由，禁止水泥窯爐之新設或擴增(經濟部，2011)，故在研究中並不納入更換窯爐的能源效率技術。

在水泥廠中另一個主要的設備則為排風機，從原料與生料製備(能源效率技術5)、熟料燒成(能源效率技術14、15)至最終水泥的研磨(能源效率技術17)等，都需要許多排風機，排風機使用變頻驅動不僅可節省電能，更能減少維修費用。在燃料轉換方面，廢棄物衍生燃料、廢輪胎、塑膠燃料等也可被使用作為燃料，越來越多水泥廠使用廢棄物做為燃料，除可節省能源(煤炭)用量外，由於水泥旋窯的其

燃燒溫度高達1500°C，故在處理這些廢棄物時並不會產生戴奧辛。

## 4.2 能源效率技術之擴散率

確認水泥業涵蓋的主要能源效率技術與單位節能量後，接著所需的參數即為這些技術的應用現況與未來的設置情況(擴散率)。此部分主要透過訪談國內各家水泥業者代表與廠內專家，確認出各項技術於各水泥廠內實際應用的狀況與未來的可設置率，再把個別廠商的設置率乘上各廠商產能占水泥業產能之占比，相加後即可得到這些能源效率技術在整體水泥業的設置比率，彙整如表3所示；此亦為國外能源效率模型取得技術擴散率時，最常使用的方式。

## 4.3 製程之產量

在設定未來水泥業製程之產量時，在生

表3 水泥業各項能源效率技術之設置比率

製程	技術名稱	能源效率技術設置比率(%)						
		現況	BAU情境				技術發展潛力情境	
		2013	2020	2025	2030	2020	2025	2030
生料製備	滾壓機用作球磨機的預磨	20.7	20.7	23.0	26.0	23.6	26.1	27.8
	豎磨機	43.7	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	60.6
	高效選粉機和分級機	61.6	78.4	78.4	78.4	78.4	84.1	92.0
	高效生料預均化(調和)系統	46.6	46.6	51.6	60.6	51.6	69.5	81.3
	變頻驅動式生料磨排風機	51.3	56.9	62.6	70.5	64.9	78.4	89.1
熟料燒成	熟料生產的製程控制和能源管理	78.4	78.4	78.4	78.4	84.1	89.1	92.0
	燃燒系統改進	24.5	32.4	40.4	46.0	40.4	51.6	65.0
	高溫餘熱發電	81.3	81.3	81.3	81.3	87.0	92.0	96.0
	低溫餘熱發電	81.3	81.3	81.3	81.3	87.0	92.0	96.0
	有機朗肯循環發電	10.8	10.8	15.8	15.8	15.8	28.1	40.4
	增加旋窯預熱器的段數	4.0	4.0	9.1	9.1	9.1	16.3	25.7
	高效率冷卻機	81.3	84.1	87.0	89.5	87.0	92.0	96.0
	燃料轉換	9.0	9.0	17.9	26.9	22.4	35.8	48.1
	變頻驅動式旋窯排風機	70.0	70.0	73.8	77.5	75.7	81.3	92.0
	變頻驅動式熟料冷卻排風機	24.5	37.9	51.3	56.9	51.3	70.5	84.1
水泥製備	滾壓機用作球磨機的預磨	81.3	81.3	81.3	81.3	87.0	92.0	96.0
	變頻驅動式水泥磨排風機	51.3	56.9	62.6	70.5	64.9	78.4	89.1
	新興粉磨技術	0.0	0.0	6.1	12.3	12.3	24.5	37.9

資料來源：Worrell *et al.*, 2000; Worrell, 2008; IEA, 2009; Hasanbeigi *et al.*, 2010; Madloul *et al.*, 2011; Hasanbeigi *et al.*, 2012; European Commission, 2013; Hasanbeigi *et al.*, 2013; Madloul *et al.*, 2013; 本研究彙整。

料製備與熟料燒成製程，所需估算的為熟料的年產量；而在水泥製備製程下則為水泥的年產量。先使用過去20年的熟料與水泥的歷史數據，透過以趨勢外推法(Trend extrapolation)估算出未來趨勢，並參考政府所發布的產能上限(經濟部，2011)與水泥公會之專家意見加以修正，以獲得未來的熟料與水泥產量，如表4所示。總體而言，未來的水泥業產量呈現逐年下降之趨勢。

5. 模型分析結果

經由在前述模型所需的參數進行設定後，即可使用能源效率模型估算不同情境下我國水泥業至2035年的節電與節燃料量潛力，茲將模型結果說明如下：

在企業自發性(BAU)的情境下，我國水泥業各項能源效率技術之節能量估算結果可彙整如圖4所示。以節電量而言，更換豎磨機和高效選粉機和分級機在2020年前為水泥業主要可運用的節電技術選項，分別可提供1,220與1,198公秉油當量的節電量。有機朗肯循環溫差發電系統，由於目前僅在試驗階段，預期至2025年時此技術發展可較為成熟，而推廣至其他的水泥廠，故在2035年時節電量可達1,827公秉油當量，而新興粉磨技術則預期在2025年商業化後可進入市場，逐漸成為節電量最大的技術，至2035年時約可貢獻5,637公秉油當量的節電量。

在節省燃料量方面，燃料系統改進技術和更換高效率冷卻機為水泥業主要可運用的節燃料技術選項，在2020、2025年與2035年分別貢獻了約8,934、16,729、27,622以及2,982、5,584與10,119公秉油當量的節燃料量。此外，

根據能源效率模型推估，我國水泥業在BAU情境下的未來節能趨勢；以節電量而言，2020年、2025年與2035年節電量約占水泥業當年能源消費的0.15%、0.34%與0.88%；燃料節約量則分別為當年度水泥業燃料消費量的0.78%、1.68%與2.91% (彙整如表5所示)。整體水泥業能源節約量(節電量+節燃料量)在BAU情境下約可達14,271 (2020年)、28,588 (2025年)與50,940 (2035年)公秉油當量。

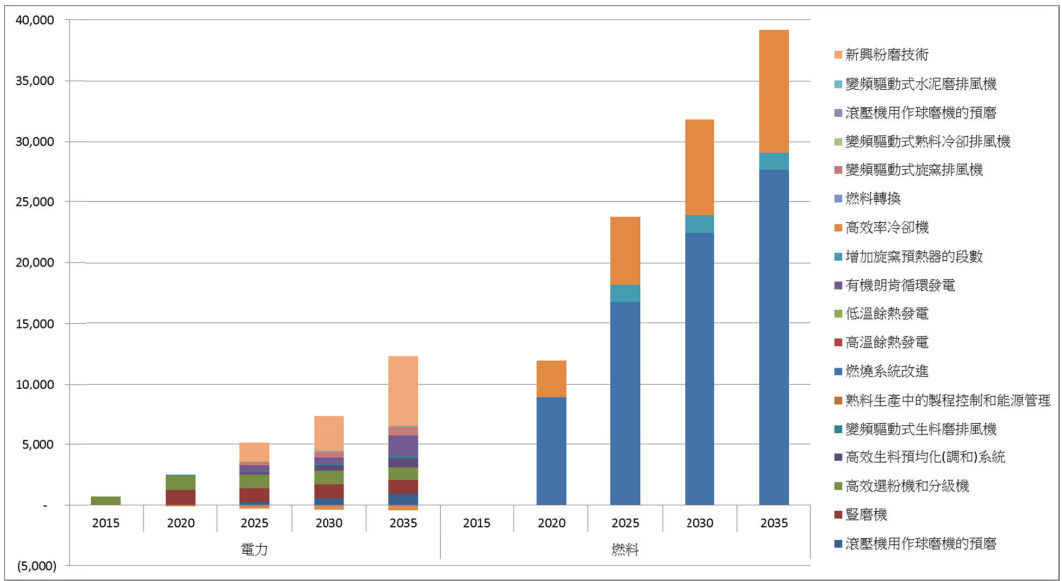
而在技術發展潛力情境下，我國水泥業各項能源效率技術之節能量估算結果可彙整如圖5所示。以節電量而言，在一些規模較小的水泥廠中，仍未裝設水泥預磨設備與餘熱發電系統，故水泥製備中裝設滾壓機作為預磨以及熟料燒成的高溫餘熱發電、低溫餘熱發電，在技術發展潛力情境中，可扮演重要的節電技術，2020、2025與2035年分別貢獻1,831、3,313、5,397與2,449、4,306、7,287以及1,765、3,104、5,252公秉油當量的節電量。而新興粉磨技術在技術發展潛力情境下仍然為節電量貢獻最大的技術，至2035年時約可貢獻11,795公秉油當量的節電量。

在節省燃料量方面，燃料系統改進技術、更換高效率冷卻機以及熟料生產的製程控制和能源管理為水泥業主要可運用的節燃料技術選項，在2020、2025年與2035年分別貢獻了約17,867、28,621、54,920與5,964、10,485、17,743以及3,313、5,825、11,378公秉油當量的節燃料量。此外，根據能源效率模型推估，我國水泥業在技術發展潛力情境的未來節能趨勢，以節電量而言，2020年、2025年與2035年節電量約占水泥業當年能源消費的0.87%、1.70%與3.53%；燃料節約量則分別為當年度水

表4 水泥業各製程之產量 單位：百萬公噸

	2013	2020	2025	2030	2035
生料製備	16.09	14.65	13.72	13.59	13.24
熟料燒成	16.09	14.65	13.72	13.59	13.24
水泥製備	14.99	13.82	13.32	12.82	12.38

資料來源：本研究整理



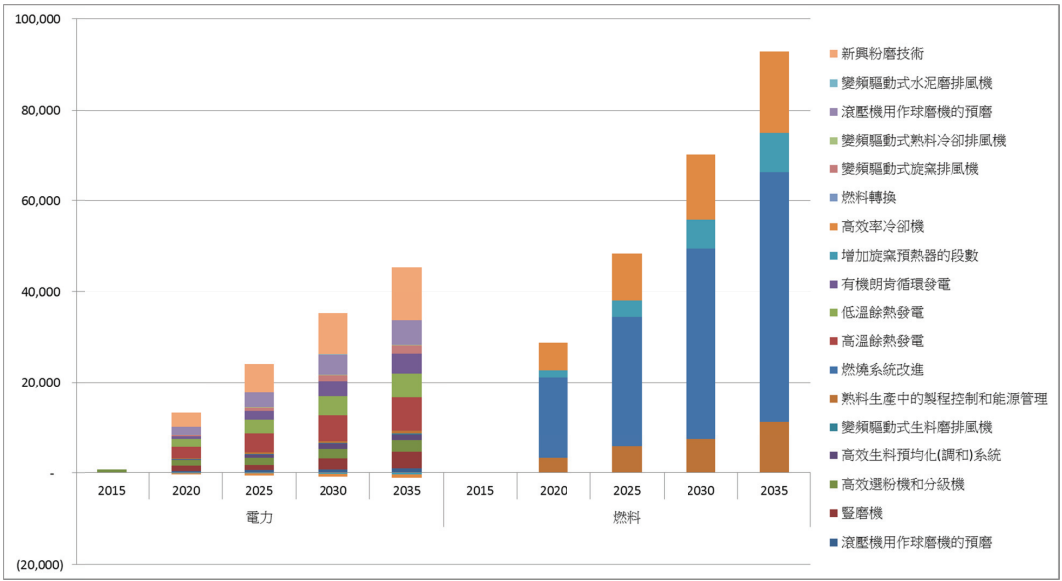
單位：公秉油當量

圖4 BAU情境下技術別之節能量  
資料來源：本研究整理繪製

表5 BAU情境下製程別之節能量與占比 單位：公秉油當量

製程/能源別	電力					燃料				
	2015	2020	2025	2030	2035	2015	2020	2025	2030	2035
生料製備	677	2,444	2,731	3,365	3,993	0	0	0	0	0
熟料燒成	0	-99	550	696	2,119	0	11,915	23,772	31,855	39,149
水泥製備	0	10	1,536	2,950	5,679	0	0	0	0	0
總計	677	2,355	4,816	7,011	1,1791	0	11,915	23,772	31,855	39,149
占當年水泥業能源消費之比例	0.04%	0.15%	0.34%	0.50%	0.88%	0.00%	0.78%	1.68%	2.29%	2.91%

資料來源：本研究計算



單位：公秉油當量

圖5 技術發展潛力情境下技術別之節能量  
資料來源：本研究整理繪製

泥業燃料消費量的1.91%、3.52%與7.38% (彙整如表6所示)。總體水泥業能源節約量在技術發展潛力情境下約可達41,816 (2020年)、71,881 (2025年)與137,327 (2035年)公秉油當量。

綜合上述模型分析結果，本文所估算水泥業至2035年的節電量，在BAU情境下約占水泥業當年能源消費的0.88%，即使在技術發展潛力情境下，亦僅達3.53%；而至2035年的節燃料量，在BAU情境下約占水泥業當年能源消費的2.91%，即使在技術發展潛力情境下，僅約為7.38%，相較於其他主要水泥供應國，此節能量並不高，主要原因可歸納如以下幾點：

1. 在水泥製程的耗能，約80%為熱能耗用，主要為旋窯所使用的煤炭；20%為電能耗用，主要為水泥磨系統、生料磨系統與旋窯系統的耗電。由於八成為熱能耗用，且集中於旋窯系統，故旋窯的能源效率扮演重要的角色。以我國而言，現有的旋窯幾乎已為NSP (New Suspension Preheater)窯或RSP (Reinforced Suspension Preheater)窯，但皆為2000年以前所製造，有些舊窯爐甚至於1970~1980年代所製造。即使同樣為NSP窯，但新窯的燃燒效率與預熱器等級皆比舊窯的製程高出許多，因此若要在熟料製程的能源效率上再做大幅度的改善，最根本的作法為更換旋窯。但是旋窯投資金額龐大，再者目前政府的水泥業發展政策明確，基於環境生態保護，水泥應以供應國內建設需求為主，禁止水泥窯爐之新設或擴增，故水泥業者幾

乎不可能再更換或新設旋窯，故在本文中的能源效率技術中亦不考慮新式與更高效率的旋窯，因此所造成的節能量並不顯著，故即使在技術發展潛力情境，至2035年節燃料量僅約占水泥業當年能源消費的7.38%。

2. 此外，在國際間普遍採用的節能策略一將能源效率較低的濕式或半濕式製程轉換為較具效率的乾式製程，以及在舊有的旋窯中加裝預熱器與預鍛燒器。以水泥業主要供應國在1990~2010年間單位耗能(每生產1公噸水泥所耗用的能源)的變化趨勢而言，在2000~2007年間除德國與美國外，大多數國家的水泥業單耗呈現下降趨勢，主要由於將水泥製程由濕式轉為較具效率的乾式製程，以及在舊有的旋窯中加裝預熱器與預鍛燒器，尤其以中國(每年平均下降率為5%)最為顯著(Enerdata, 2013)。因臺灣早已無濕式製程設備，全部水泥廠的製程皆已為乾式製程，且都有加裝預熱器與預鍛燒器，因此無法透過這些策略再大幅提高水泥業的能源效率。

3. 如前所述，水泥業可供節能的製程改善項目包含冷卻系統改善、熟料燒成控制自動化、提升預熱器段數、裝置廢熱回收發電裝置、使用預磨設備或豎磨機、採用高效率選粉機、風車裝置變速設備、配料與生料之均一穩定化、燃料轉換、研磨技術的改進等，而一般以生料及熟料研磨設備使用預磨或豎磨、提升預熱器段數，以及裝設廢熱發電設備之節能效益較為顯著。但依據實地訪廠結

表6 技術發展潛力情境下製程別之節能量與占比 單位：公秉油當量

製程/能源別	電力					燃料				
	2015	2020	2025	2030	2035	2015	2020	2025	2030	2035
生料製備	677	2,994	4,130	6,523	8,799	0	0	0	0	0
熟料燒成	0	5,118	9,855	14,370	18,376	0	28,701	48,470	70,145	92,886
水泥製備	0	5,003	9,426	13,477	17,267	0	0	0	0	0
總計	677	13,115	23,411	34,369	44,441	0	28,701	48,470	70,145	92,886
占當年水泥業能源消費比例	0.04%	0.87%	1.70%	2.59%	3.53%	0.00%	1.91%	3.52%	5.28%	7.38%

資料來源：本研究計算



果，在生料研磨設備使用預磨或豎磨的設置比率已達65%，在熟料研磨使用預磨設備的設置比率更高達81%，裝設廢熱發電設備的設備比率亦高達81%，此顯示國內水泥業在能源效率技術的設備設置率已經相當高，因此未來進一步可提高能源效率技術設置率的空間相對有限。

然而若與國外水泥業相比，在使用替代燃料方面，則存在較多可擴大利用的空間。由於廢棄物回收作為替代燃料不僅可達到降低生產成本、減少煤炭使用及削減二氧化碳排放之目的，目前已成為先進國家水泥業普遍採用的節能減碳策略之一(IEA, 2009)。目前可當作水泥業替代燃料的廢棄物包括廢輪胎、廢油泥、再生油、廢溶劑、建築廢料、廢棄物衍生燃料等。水泥業由於生產製程(經過高溫燃燒，可分解大部分有毒的有機物質)的特性，若能透過跨產業間聯合減廢機制的推動，更有助於未來的能資源整合。

我國目前執行上的主要問題，在於部分的地方環保單位及民眾對水泥廠燃燒廢棄物存有疑慮，導致無法擴大使用。因此未來若能針對水泥業使用這些廢棄物作為燃料時，所產生的相關環境影響作詳細評估，並加強溝通與宣導以降低民眾抗爭壓力，才有機會進一步擴大使用替代燃料的比例。

## 6. 結 論

全球暖化現象日益惡化，國際間要求工業部門節能減碳的聲浪隨之增高。以全球工業部門而言，非金屬礦物業(主要為水泥業)的能源消費量僅次於鋼鐵與石化業。以臺灣而言，2013年水泥業的能源消費占工業部門總能源消費量的4.37%，全國總能源消費量的1.66%；能源密度方面則僅次於石化業。為有效降低水泥業的能源消費並提升能源效率，故有必要確認出主要能源效率技術，並針對這些技術的節能潛量進行估算。

本文利用Bottom-up的能源效率模型，在不同情境的設定下，分別估算水泥業節電與燃料節能潛力。依據模型估算結果，在BAU情境下，2020年、2025年與2035年的節電量約占水泥業當年能源消費的0.15%、0.34%與0.88%；燃料節約量則分別為當年度水泥業燃料消費量的0.78%、1.68%與2.91%。而在技術發展潛力情境下，2020年、2025年與2035年節電量的約占水泥業當年能源消費的0.87%、1.70%與3.53%；燃料節約量則分別為當年度水泥業燃料消費量的1.91%、3.52%與7.38%。

相較於其他主要水泥供應國，我國水泥業之節能量並不顯著，主要原因包含：政府政策禁止水泥窯爐之新設或擴增，故模型不考慮新式、高效率旋窯技術；我國全部水泥廠皆已為乾式製程；我國水泥業在能源效率技術的設備設置率已經相當高，未來進一步提高能源效率技術設置率的空間相對有限。惟與國外水泥業相比，在使用替代燃料方面，則存在較多可擴大利用的空間。廢棄物回收作為替代燃料不僅可達到降低生產成本、減少煤炭使用及削減二氧化碳排放之目的，目前已成為先進國家水泥業普遍採用的節能減碳策略之一，若能透過跨產業間聯合減廢機制的推動，更有助於未來的能資源整合。目前執行上的主要問題，在於地方環保單位及民眾對水泥廠燃燒廢棄物存有疑慮，導致無法擴大使用。因此未來若能針對水泥業使用這些廢棄物作為燃料時，所產生的相關環境影響作詳細評估，並加強溝通與宣導以降低民眾抗爭壓力，才可望進一步擴大使用替代燃料的比例。

## 誌 謝

本研究承能源局能專經費之支持，特此致謝，不勝感激；亦感謝評審所提供之評論與寶貴意見。此外，模型建置時感謝德國Fraunhofer系統與創新研究所提供的諸多協助。

## 參考文獻

- 余惠芳、黃玉娟、姚文成 (2008)，「我國水泥業受傾銷前後之經營效率比較研究- DEA 方法之應用」，華人前瞻研究，4(2): 53-80。
- 呂錫民 (2010)，「水泥產業節能技術與潛力」，機械月刊，39(3): 92-105。
- 吳美珍、陳家榮 (2009)，「臺灣水泥需求預測模式之建構」，臺灣鑛業，61(2): 7-24。
- 張翊峰、陳人豪、張家鳳、余元傑、李沛鈴 (2008)，「臺灣地區水泥業CO<sub>2</sub>排放變動效果因素分析--投入產出結構分析法之應用」，嘉南學報，34: 343-357。
- 陳彥尹、吳榮華、黃韻勳 (2008)，「臺灣耗能產業二氧化碳排放驅動力之研究」，鑛冶，52(3): 40-52。
- 經濟部 (2011)，水泥工業發展策略與措施。
- 經濟部能源局 (2014)，能源平衡表。
- 臺灣區水泥工業同業公會 (2014)，臺灣區水泥工業概況 2014。
- 劉蘭萍、余騰耀 (2001)，「水泥產業永續經營之路」，永續產業資訊，8: 19-35。
- 蔡麗紅 (2008)，「水泥產業發展與產業布局分析」，戰略暨產業研究，2(3): 4-7。
- 蘇茂豐、謝禎檣、陳仁亮、蘇進興 (2005)，「我國產業溫室氣體盤查工具之建置--以水泥業為例」，環境工程會刊，16(1): 24-29。
- Eichhammer, W., Fleiter, T., Schlomann, B., Faberi, S., Fioretta, M., Piccioni, N., Lechtenböhmer, S., Schüring, A., Resch, G. (2009), Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA countries, Report for the European Commission Directorate-General Energy and Transport.
- Elsland, R., Divrak, C., Fleiter, T., Wietschel, M. (2014), Turkey's strategic energy efficiency plan - an ex ante impact assessment of the residential sector," *Energy Policy*, 70: 14-29.
- Enerdata (2013), Global Energy Efficiency Trends 2013.
- European Commission (2013), Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.
- Fleiter, T., Eichhammer, W., Hagemann, M., Hirzel, S., Wietschel, M. (2009), "Costs and potentials of energy savings in the European industry- a critical assessment of the concept of conservation supply curves," *ECEEE Summer Study 2009*, La Colle Sur Loup.
- Fleiter, T., Schlomann, B., Hirzel, S., Arens, M., Hassan, A., Idrissova, F., Reitze, F., Toro, F.A., Rohde, C., Eichhammer, W., Cebulla, F., Jochem, E. (2011), "Where are the promising energy-efficient technologies? A comprehensive analysis of the German energy-intensive industries," *ECEEE Summer Study 2011*, Presquîle de Giens.
- Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., Eichhammer, W. (2012), "Energy efficiency in the German pulp and paper industry- a model-based assessment of saving potentials," *Energy*, 40 (1): 84-99.
- Hasanbeigi A., Menke C., Therdyothin A. (2010), "The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: The case study of Thai cement industry," *Energy Policy*, 38(1): 392-405.
- Hasanbeigi A., Price L., Lin E. (2012), "Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8): 6220-6238.
- Hasanbeigi A., Morrow W., Masanet E., Sathaye J.,

- Xu T. (2013), "Energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction opportunities in the cement industry in China," *Energy Policy*, 57: 287-297.
- International Cement Review (2013), Global Cement Report 10th Edition.
- IEA, International Energy Agency (2009), Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050.
- IEA, International Energy Agency (2014), World Energy Statistics and Balances.
- Jakob, M., Fleiter, T., Catenazzi, G., Hirzel, S., Reitze, F., Toro, F. (2012), "The impact of policy measures on the electricity demand of the tertiary sector of the European Union: an analysis with the bottom-up model FORECAST," *International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings*, Frankfurt.
- Jakob, M., Catenazzi, G., Fleiter, T. (2013), "Ex-ante estimation of the EU Ecodesign Directive's impact on the long-term electricity demand of the tertiary sector," *ECEEE Summer Study 2013*, Presqu'île de Giens.
- Madloul N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahim N.A. (2011), "A critical review on energy use and savings in the cement industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4): 2042-2060.
- Madloul N.A., Saidur R., Rahim N.A., Kamalisarvestani M. (2013), "An overview of energy savings measures for cement industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19: 18-29.
- Schlomann, B., Fleiter, T., Hansen, P., Horn, M., Matthes, F.C., Gores, S. (2011), "Impact of energy and climate policies until 2030- a detailed bottom-up modelling approach," The International Energy Program Evaluation Conference (IEPEC), Paris.
- Worrell, E., Martin, N., Price, L. (2000), "Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry," *Energy*, 25(12): 1189-1214.
- Worrell, E. (2008) Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Cement Industry, Lawrence Berkeley National Laboratory.

# Potentials for Energy Efficiency Improvement in Taiwan's Cement Industry - A Bottom-up Model-based Assessment

Yun-Hsun Huang<sup>1\*</sup> Yi-Lin Chang<sup>2</sup>

## ABSTRACT

Climate change and global warming as the main human societies' threats are fundamentally associated with energy consumption and GHG emissions. The industrial sector, representing 28.3% and 38.5% of global energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, respectively, has a considerable role to mitigate global climate change. The non-metallic minerals industry is the third largest industrial energy user, accounting for about 12 percent of global industrial energy consumption. The cement industry absorbs most of the energy consumption of the non-metallic minerals industry (around 70-80 percent). In terms of greenhouse gas emissions, the cement industry contributes about 5% to global anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions, making the cement industry an important sector for CO<sub>2</sub>-emission mitigation strategies. Energy consumption in the cement industry accounted for 4.37% of industrial energy demand in Taiwan in 2013. Energy intensity of the non metallic mineral industry is estimated as 41.16 KLOE/million NTD, second to the petrochemical sector in the energy-intensive industries. It is therefore essential to understand the energy efficiency potentials in the cement industry. A bottom-up model-based assessment is utilized to conduct a scenario analysis on the available energy saving potentials up to year 2035 in Taiwan's cement industry. Intensive literature reviews and interviews with experts and manufacturers are performed on the energy efficiency technologies and their applications in the production lines. The technology-specific model is then used to analyze the energy saving potentials for Taiwan's cement industry. 18 energy efficiency technologies allocated to respective process are assessed, while the potential energy savings for fuels and electricity are estimated. It has to be emphasized that the significant saving potentials cannot be fully realized without solid incentive policies.

**Keywords:** Cement industry, Energy efficiency model, Energy saving potential

---

<sup>1</sup> Researcher, Industrial Economics and Knowledge Center, Industrial Technology Research Institute

<sup>2</sup> Senior Researcher, Industrial Economics and Knowledge Center, Industrial Technology Research Institute

\* Corresponding Author, Phone: +886-3-5914745, E-mail: abshung@itri.org.tw

Received Date: January 4, 2015

Revised Date: April 15, 2015

Accepted Date: April 28, 2015