

溫室氣體

結合清潔發展機制促成台灣煉鐵業擴產 之研究

林正乾*

摘要

本文研究結合京都議定書中的清潔發展機制促成台灣煉鐵業擴產之可行方案，提出以種植快速生長的能源作物造林，並使用成熟的能源作物製造生質能碳(木碳)，利用生質能碳的高還原性與低雜質含量取代由煤碳提煉出的焦煤煉鐵，藉能源作物吸收並固定大氣中的二氧化碳，並利用生質能碳煉鐵，可以在不增加國內二氧化碳排放下達成煉鐵業擴產的目的，利用能源作物造林並可解決島內因為加入世界貿易組織而產生農地休耕荒廢的問題。

【關鍵字】生質能、碳化、煉鐵、清潔發展機制

*國立勤益技術學院資訊與電能研究所 副教授

一、前　　言

預期國際鋼價將持續維持 10 年以上的榮景，國內包括中鋼、中龍及台塑公司相繼宣佈大型煉鋼鐵廠的投資計畫。煉鋼鐵過程中會釋放大量的二氧化碳，大型煉鋼鐵廠的設立將加重國內因應國際降低二氧化碳排放的壓力。

傳統上從鐵礦中提煉生鐵，是在高爐中進行。加入高爐中煉製生鐵之主要原料為鐵礦石、焦炭與石灰石。高爐加入焦炭主要的作用為供給反應及熔解所須的熱量並作為還原劑。在高爐中煉鐵，其總反應可表示如下式：



藉由焦炭還原氧化鐵礦成含鐵量約 98% 生鐵(raw iron)的冶煉過程，伴隨產生大量二氧化碳，此二氧化碳的排放約佔整個煉鐵製程二氧化碳總排放的 90%。

台灣溫室氣體排放量居全球第 22 位，約占世界排放總量 1%^[1]，其中鋼鐵工業的二氧化碳排放量約佔台灣總排放量 15%，已是全國最大的二氧化碳排放部門，若再加上上述大型煉鋼鐵廠的開發，台灣可能因二氧化碳排放過高，成為國際貿易制裁的對象。台灣鋼鐵業除了持續研發或引進節約能源新技術與新製程，更因積極地找出取代焦炭的還原劑，以徹底解決鋼鐵工業高二氧化碳排放所產生的氣候變遷問題。

限制全球溫室氣體排放量的京都議定書於 2005 年 2 月 16 日生效，管制的溫室氣體中二氧化碳約佔 80%，二氧化碳因此是最大宗的溫室氣體，二氧化碳排放減量成為國際間最重要環境課題之一。

巴西是世界八大產鋼鐵國家，但其二氧化碳總排放/GDP 水準卻遠低於其它主要產鋼鐵國家，推究其原因在於巴西政府政策性的導引，補貼種植甘蔗生產質酒精，鼓勵能源作物造林以生產木碳煉鐵，以及早期以水力為主的發電結構。巴西蘊藏豐沛的鐵礦但缺乏煤礦，加上政府早期採取財政的優惠措施，在 1980 年代以前巴西有 80% 的煉鐵使用生質能木碳做為還原劑，若再加計造林固定二氧化碳的效果，用生質能木碳取代焦炭做為煉鐵的還原劑，是一兼顧經濟發展與環境保護的技術，值得鋼鐵業深入探討並採用。

二、內容

2.1 清潔發展機制(CDM)

清潔發展機制 (Clean Development Mechanism, CDM), 是京都議定書所規範的三種彈性機制之一，已開發國家可藉合作計畫以資金援助或技術移轉等方式，協助開發中國家減少二氧化碳的排放，而後者則透過清潔發展機制將多餘的配額賣給前者。舉例來說，已開發國家若要減量一噸的二氧化碳，可以選擇在本土透過限制排放達成減量，或與發展中國家進行 CDM 合作，以購買取得不足得二氧化碳配額，圖 1 為清潔發展機制如何執行二氧化碳減量的示意圖。

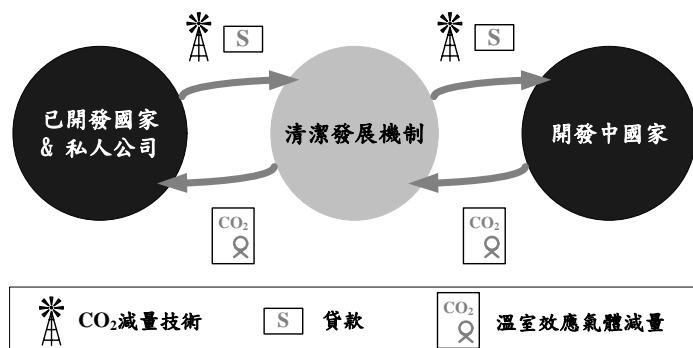


圖 1 彈性清潔發展機制進行二氧化碳減量示意圖

儘管台灣不是京都議定書的締約國，卻無可避免必須面對國際社會對溫室氣體減量的要求；政府應該積極參與較不具政治色彩的清潔發展機制，不僅可抑制國內氣體減量，還能坐擁龐大市場商機。對於國際處境困難的台灣，CDM 最大的好處在於合作對象並不侷限於國家身份，只要是合法個體，包括政府、私人企業及國際組織都能參與 CDM 投資，因此可透過民間或共同組織如世界貿易組織 (WTO)、亞太經合會 (APEC) 成員身份參與。

2.2 木碳(charcoal)應用於煉鐵業

木碳的生產是一項古老的工藝，遠追溯自銅器時代，人類就已知道如何利用木碳來冶煉金屬，直到 18 世紀初業者開始掌握使用由煤碳提煉的焦煤來冶煉金屬

的技術之前，木碳一直都是人類治煉金屬的最主要還原劑。

巴西是世界上最大的木碳產國，在 2002 年的木碳總生產量是 1200 萬噸，所生產的木碳在頂盛時期(1980 年代以前)，該國有 80%的煉鐵業使用生質能木碳做為還原劑。除了因為該國蘊藏豐富的鐵礦及熱帶雨林但缺乏煤礦的客觀事實外，巴西政府為鼓勵使用自產的再生能源所採取的優惠財政措施亦功不可沒，換句話說巴西早在京都議定書討論的 30 年前就曾實施類似的乾淨生產機制，在國內藉補助鼓勵大量造林，使得鋼鐵業購買許多林地並積極開發林業科技及造林，同時衍生出世界最大的生質能碳化工業^[2]。

因為生質能碳含有非常低量的硫或汞，挪威的鐵砂工業願意用高於焦煤(煤碳碳化的產物)兩倍的價格進口木碳來提煉矽砂中的矽^[3]，生質能碳比石墨碳的純度還高，顆粒化的生質能碳之導電度甚至超過顆粒化的石墨。生質能碳因為比焦煤純度高，使用生質能碳提煉出的鐵純度因此較高，精煉業者的接受度非常高，享有較佳的價格。圖 2 是焦煤煉鐵製程與生質能碳煉鐵製程的示意圖，在焦煤煉鐵製程中，原料煤在焦炭廠(coke plant)碳化得到的焦炭，在高爐(blast furnace)中鐵砂與顆粒化的焦炭交替投入，爐底鼓入的熱空氣與焦炭反應形成一氧化碳，藉此還原性的一氧化碳將鐵砂中的鐵提煉出，鐵液則從底部流出。生質能碳煉鐵的製程中，還原鐵礦所需的碳是由生質作物如尤加利樹在碳化窯(Carbonizer)中碳化所得，後續在高爐中煉鐵的程序則與焦炭煉鐵完全一樣。

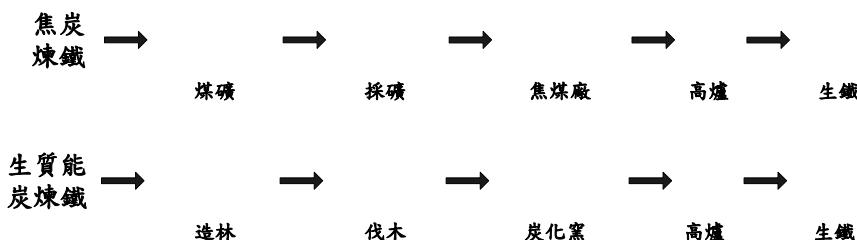


圖 2 焦炭煉鐵與生質能碳煉鐵製程的示意圖

然而從 1980 年代以後，約是第二次石油危機的 10 年後，世界的石油價格因為供需失調而有巨大的降幅，煤碳的價格也因為採礦技術的精進、石油與天然氣的

競爭與煤碳的高污染特性而有更顯著的跌幅，造成原來使用生質能碳提煉鋼鐵的業者，紛紛轉向使用焦煤提煉鋼鐵，巴西政府也因為國內財政困難停止提供補貼使用再生能源，更讓巴西鋼鐵業者大幅降低造林面積，並且進行轉換使用焦煤的煉鐵製程，迄今巴西使用生質能煉鐵的比例已降到 40% 不到的低水準。

2.3 鋼鐵業結合林業的清潔發展方案

因為京都議定書訂有森林吸存及碳排放權交易制度，與農業及林業部門有密切關係，造林、植林及行光合作用的大宗作物的排放淨值成為可交易的財貨，近幾年巴西或玻利維亞的鋼鐵業者接受聯合國或大型碳基金(carbon fund)金融貸款，大量種植由基因工程培育出生長快速的樹種，從事熱帶雨林恢復的造林，不但能固定空氣中的二氧化碳，並且可以有效的復育污染過的土壤或地下水，對空氣品質的改善與環境視覺的提昇也有很大的幫助，植樹成熟後並可做為能源的用途。

巴西鋼鐵業者藉應用京都議定書中清潔發展機制，投入造林以換取二氧化碳排放權，並持續或恢復使用生質能碳煉鐵^[4]。台灣本島內亦可利用清潔發展機制的精神來進行二氧化碳減量。

根據農委會林業試驗所估計，林齡 7 至 11 年的柳杉每公頃每年吸存量 591 公噸，林齡 13 至 23 年的台灣人工林每公頃二氧化碳吸存量 281 公噸，而且每公頃吸存量相當於減少 1.46 美元的空氣淨化成本，種樹植林因此具有一定經濟價值。若將步入光合作用效率低的成熟植樹砍伐做有經濟價值的利用，如傢俱或能源上的應用，藉合理的利潤將可有效地提高永續造林的誘因。

2.4 生質能碳的技術現況與挑戰

生質能碳是將有機的生質能在高溫缺氧的條件下碳化產生，而碳化製程是將有機的生質能(碳氫化合物)置於高溫中性(inert)的環境(碳化窯)中，藉由高溫熱裂解反應使得殘留固體的含碳量比例增加。碳化過程中有許多的反應同時進行，如脫氫反應(dehydrogenation)、凝結(condensation)、水汽反應(water gas shift)、聚合反應(isomeriation)等。碳化製程中的最終熱裂解高溫對生質能碳的含碳量有決定性的影響，例如當最終的熱裂解溫度是 950°C，生質能碳的含碳量約達 90%wt；如果最終的熱裂解溫度是 1,900°C，生質能碳的含碳量則可達到 99%wt 以上，常用來當做

電極的石墨就是在此高溫的條件下產生的。

儘管西元前 4,500 年人類就發現木碳生產的原理，然而木碳或較廣義的生質能碳的生產技術卻仍然相當的原始而沒有效率。根據聯合國糧農組織(FAO)為了要有效的利用森林資源與降低製碳時的環境汙染，在 1983 年出版的木碳生產技術研究報告中指出^[5]，生質能置入碳化爐進行碳化過程，在大約 500°C 的最終碳化溫度下，現有的碳化技術約可達到 8% 到 25% 的收碳率，再則生質能受限於體積，通常使用批次式生產，而批次生產的生質能碳約需要 10 到 15 天的生產週期。現有的生質能碳化技術皆有生產週期長、收碳率低與所需人力多的缺點，造成生質能碳的價格居高不下，不利冶金業的利用，圖 3 是傳統生質能碳化窯的示意圖。

圖 3 傳統生質能碳化窯示意圖

為了彌補生質能碳生產週期長與收碳率低的特性，過多在熱帶雨林珍貴的樹木也被砍伐下來製碳，使得生質能碳業成為成為熱帶雨林或森林的殺手之一；再加上生質能製碳的技術落後，碳化製程產生的碳化氣體沒有有效的處理或利用，任意排放到大氣中，成為生質能碳生產國家主要的空氣污染來源，生質能製碳因此一直被認為是高耗能與高污染的產業。

生質能碳雖然較焦煤具有含雜質量低與活性高的優點，但生質能碳的低生產效率及高污染排放，造成生質能碳價格昂貴與負面的社會印象，才是限制冶金業沒

有大量採用生質能碳當做冶煉金屬還原劑的主要原因。使用生質能碳取代煤碳能有效的控制二氧化碳排放的問題並且可以在兼顧環境保護的同時促進鋼鐵業與經濟發展，因此如何提升生質能碳的生產效率與降低生質能碳化的高污染排放，是生質能碳生產與研發業者的重要課題，也是鋼鐵業者應該正視的問題。

除了發展生產效率高的生質能碳化技術外，農林部門造林政策的配合也是生質能碳產業是否能永續經營的重要關鍵之一。過去台灣的林業政策主要是以復育珍貴樹種、水土保持與林材利用的目的為主，以能源或二氧化碳減量為目的的努力則不多見，目前京都議定書中特別強調可以用具有吸收二氧化碳的碳匯(carbon sink)效果的森林與綠地，折抵溫室氣體的排放。厚植森林將大氣中的二氧化碳轉化成有機生物量貯存，減少大氣中二氧化碳量之環境對策，備受各國政府的重視，在先進國家內亦展開有關碳林業的計畫(carbon forestry project)。

台灣若能效法巴西將能源作物(快速生長樹種)的造林亦納入國家的林業計畫，則不但在能源作物培育生長期間可以成為吸收二氧化碳的碳匯，而且在取代焦煤煉鐵的過程中，還可以在不增加二氧化碳排放的條件下增加全國鋼鐵的產出，而人造林有機生物量的能源利用所創造的營收，則可以在相對較短的週期(3~5 年)裏，回收投入造林的部份人力與肥料成本。

2.5 先進的生質能碳化技術介紹

因為生質能碳化造成森林被砍伐與污染氣體排放的負面印象，先進國家的研究者投入提高生質能碳化生產效率研究的並不是很多。夏威夷大學的Anal教授所提出的超高壓碳化製程^[6, 7]，藉間接加熱的方式將生質能的溫度提高到碳化溫度，而生質能因為碳化而產生的碳化氣體則在本製程中滯留於碳化窯內，碳化窯因為是完全的密閉因此造成窯內的高壓，因為碳化氣體與生質能碳的充分接觸，本製程是唯一能接近約 40% 理論產碳率(theoretical carbon yield)的生質能碳化程序，但因為超高壓(15~20 大氣壓)的條件難以維持，設備的成本非常高，很難將此製程商業化，而且本製程採用間接加熱因此製碳週期恐怕會比傳統製程還要長，較無商業化的潛力。

另外一個具有高產碳率與低生產週期的生質能碳化技術，則已由本文作者研

究發展出並尋求業者合作量產中^[8]，示意圖如圖 4，此新型的碳化系統延用傳統的批次式生質能碳化土窯或磚窯，但碳化所需的熱量由一創新的生質能氣化/燃燒爐提供，生質能氣化/燃燒爐在土窯外部氣化並燃燒生質能燃料成高溫的排氣(1,000 °C~1,300°C)，藉著調整空氣進入量可控制燃燒排氣在缺氧的微還原條件，此高溫但不含氧氣的排氣以高速且分散地方式噴入土窯內，土窯內的溫度分佈非常均勻，窯內溫差不超過 60°C，將生質能的溫度提高到碳化的溫度(550°C)約需要 6 個小時，相對的傳統土窯或磚窯製程燃燒並犧牲部份土窯內的生質能碳則約需要 160 個小時的時間才能碳化完成。本系統大幅改善傳統製碳窯均溫性較差、收碳率較低、加熱速度慢及高溫碳化條件不易達到的缺點，是一值得商業化的技術。

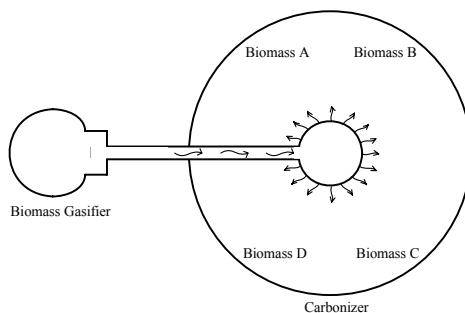


圖 4 生質能氣化燃燒爐與生質能碳化窯結合示意圖

三、結論

本文研究建議用京都議定書的彈性清潔發展機制，促成台灣煉鐵業擴產之可行方案。利用生質能碳取代從煤碳碳化所得的焦煤來提煉鋼鐵，是國際上認可且可行的二氧化碳減量方案，此舉可促成台灣煉鐵業擴產而不會造成二氧化碳減量的負擔，但是利用生質能碳來還原鐵礦的重要前題是農林部門造林政策的配合，以及生質能碳生產技術的提升與成本的下降。生質能碳的生產與利用是一傳統且在未沒落中的技術，但在氣候變遷的全球壓力下，利用生質能碳煉鐵可以顯著降低台灣二氧化碳排放，並可以使鋼鐵業朝向永續發展邁進。