

投稿類別:工程技術類

篇名:

以碳足跡觀點探討水泥產業降低溫室氣體排放量之可行性

作者:

楊婷婷。市立南港高工。綜合高中三年孝班。9912008。

徐宜玟。市立南港高工。綜合高中三年孝班。9912105。

指導老師:

孫德昌老師

吳煥昌老師

## (一)壹●前言:

人類肆無忌憚的消費地球，使我們的環境日漸失衡，地球溫度急遽上升、臭氧層破洞等等，都造成自然生態上嚴重的浩劫——特別是地球暖化的議題，使大家開始關心節能減碳，我們的生活中似乎時時刻刻都在製造溫室氣體，其中的二氧化碳排放量更是與我們息息相關。碳是如何來的?對我們究竟有哪些負面的影響?近年來延燒的減碳話題，顯示碳足跡更值得進一步探討，如果能把產品產生的二氧化碳總量呈現給消費者，不但對商業是種良性的競爭，對地球更是件好事，但該如何計算?準則又何在?令人不由得想一探究竟。

土木工程是開疆闢土的產業，有破壞、有建設。傳統建材耗費許多資源，造成環境被大量破壞，近年來相關單位無不積極發展綠建材，即所謂的環保建材，因此我們想以被廣泛使用的營建材料「水泥」為例，探討它的碳足跡與可行之減碳機制。

## (二)貳●正文：

### 一、全球暖化

現今地球暖化已到了岌岌可危的地步，氣候異常、溫度逐年上升、冰山漸融、平均海面升高。根據國家研究委員會（US National Research Council）估計這種與日俱增的溫度可能使平均海水面在 2100 年以前上升至 1.4 公尺。反映出陸地面積減少，諸多海拔較低的國家、小島，即將消失，甚至滅亡。

針對跨政府氣候變遷小組(IPCC)所提供的主要工業溫室氣體排放參數，如圖 1，可知二氧化碳的比例占環境溫室氣體最大量，也最具有研究溫室氣體的代表性和對環境所產生的衝擊性，因此本報告就主要以水泥工業之二氧化碳排放量作為研究對象。

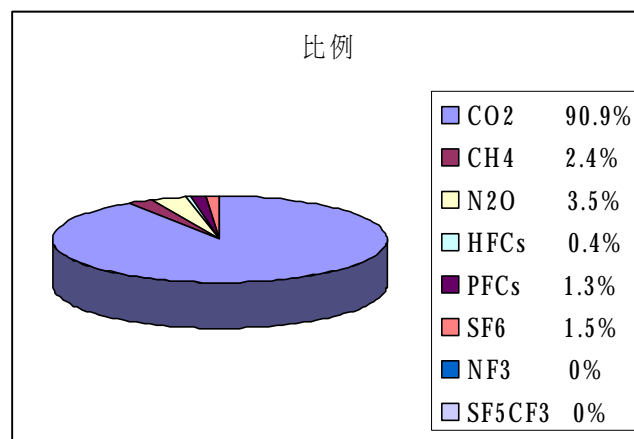


圖 1 系統溫室氣體排放參數 (作者自製)【10】

### 二、碳足跡

#### (一)介紹碳足跡

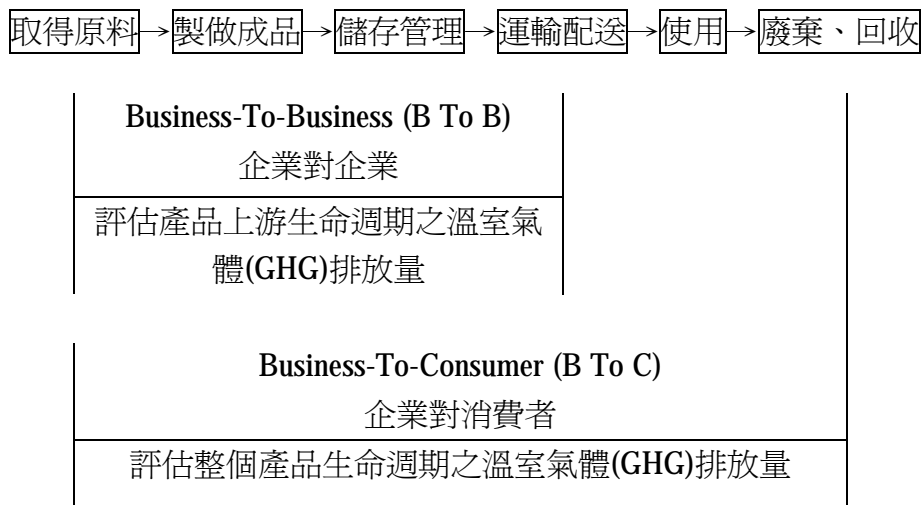
碳足跡是指產品的整體生命週期所產生出溫室氣體之排放總量，簡單來說就是從產品

以碳足跡觀點探討水泥產業降低溫室氣體排放量之可行性

開始生產到銷毀之一切過程中所排出的碳總合。破除「有煙囪才有汙染」的觀念。各國爲了顯示碳排放量，而製作碳標章，經過嚴謹盤查而提供可信度高的計算基礎，使產品公告之碳足跡是令人確信、透明且準確無誤的。

爲了抑止日漸嚴重的全球暖化現象，英國標準協會(BSI)發展出 PAS 2050 (Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services)，目的爲提供業界計算、估算各項產品的碳足跡，並藉由各產品階段分析的經驗值來判斷溫室氣體的排放量。PAS 2050 標準中，將碳足跡的計算區分爲兩種模式:B To B 及 B To C。B To B 是從生產端到輸配端，亦即從企業到企業。B To C 是進行完整的生命週期，也就是從企業到消費者，如表 1。

表 1 B To B 及 B To C 的過程 (作者自製)【8】



PAS 2050 是英國 BSI 自認爲全球第一個有能力計算碳足跡的公開基準，它針對所有產品訂出具有公信力的計算標準，依據其標準，碳足跡的計算須包括產品生命週期中關於能源使用、製作過程、環境有害物的逸散、倉儲使用、運輸、土地耗損、農業排放與製造過程，以及廢棄物處理時所產生的溫室氣體排放量，運用此計算出碳足跡再貼上碳標籤。排碳數據都要經過認證才具公信力，不是廠商自己說了算，未來，若沒有碳標章的產品，光是碳稅的成本就很難使產品行銷於市場。PAS 2050 訂出之計算步驟如表 2。

表 2 PAS 2050 碳足跡之計算過程 (作者自製)【8】

| 步驟               | 內容   |
|------------------|--|
| 1.製作生命週期流程圖      | 由產銷雙方、消費者共同利用歷史經驗進行評估，將產品或事業體予以定義其生命週期流程。  |
| 2.確立溫室氣體之邊界及優先順序 | 此部分最難取得共識，產品從原料取得之起始端，到產品生命週期之結束端，稱爲邊界。其中排碳量低於生命週期總排碳量 1%之項目不需納入，但所有排除總量不得超過總排碳量之 5%。                |
| 3.蒐集資料           | 利用企業調查與 GIS 等技術，蒐集產品所有產銷及遙遠資訊，以及排放係數(每單位 CO <sub>2</sub> 當量)兩項資料，並將搜集過程及結果之準確度經公開確認後，成爲眾人可據以計算之參考模式。 |

|           |  |
|-----------|--|
| 4.碳足跡基本公式 | 「各項活動的碳足跡=各項活動數據(質量/容積/千瓦小時/公里) × 排放係數」並將其予以加總。【8】                     |
| 5.分析其不確定性 | 每項產品之活動項目林林總總，非列為 PAS 2050 強制計算之項目，廠商有權依照第 2 步驟之規範，自行決定是否要對各項活動內容進行分析。 |

例如：「家電用品排碳量=耗電度數×0.785 (0.785 即為此活動之排放係數)

開車的排碳量=油耗公升數×0.785

飛機的排碳量=短途 200 公里以內=公里數×0.275

中途 200-1000 公里=55+0.105×(公里數-200)

長途 1000 公里以上=公里數×0.139」 【12】

## (二)碳中和

碳中和之目的為計算並抵銷產生二氧化碳所需的經濟成本，此為人們對地球暖化進行反思後的自省與自律，並由此產生了碳稅及碳交易之概念。

## (三)碳封存

碳封存是將碳存於自然界中，可將其封存在森林、海洋或地底，需注意已封存的二氧化碳是否會回到大氣。2050 年之前，全球碳封存計劃牽涉到減少破壞森林、加強熱帶森林天然更新和世界性造林，雖可封存 60~87 億噸的碳，但是緩不濟急。將碳封存於海洋中可分為：

- 1.注射二氧化碳到海底深處:注射至海面 800m 以下，使二氧化碳變成液體，建議注射到 1000~1500m，這樣可確保大部份二氧化碳停留在海中，或是注射到更深層的海底窪穴(3000~4000m)形成二氧化碳湖泊，永遠封存於海洋底部
- 2.加強吸收大氣中的二氧化碳:(1)二氧化碳溶於寒冷與高濃度的海水中，並沉積底部稱為溫鹽環流(大海洋輸送帶)，最後釋出於大氣中，但約 1000 年(2)利用浮游植物以太陽能行光合作用吸收表面的二氧化碳，再由浮游動物吃掉，最後被魚類所消耗，當其死亡後，遺體 30%的二氧化碳會沉入海底約 100 年，被分解後再回到表面；地底則因二氧化碳擠壓，使油井可加強回收油或甲烷。

## (四) 碳稅、碳交易

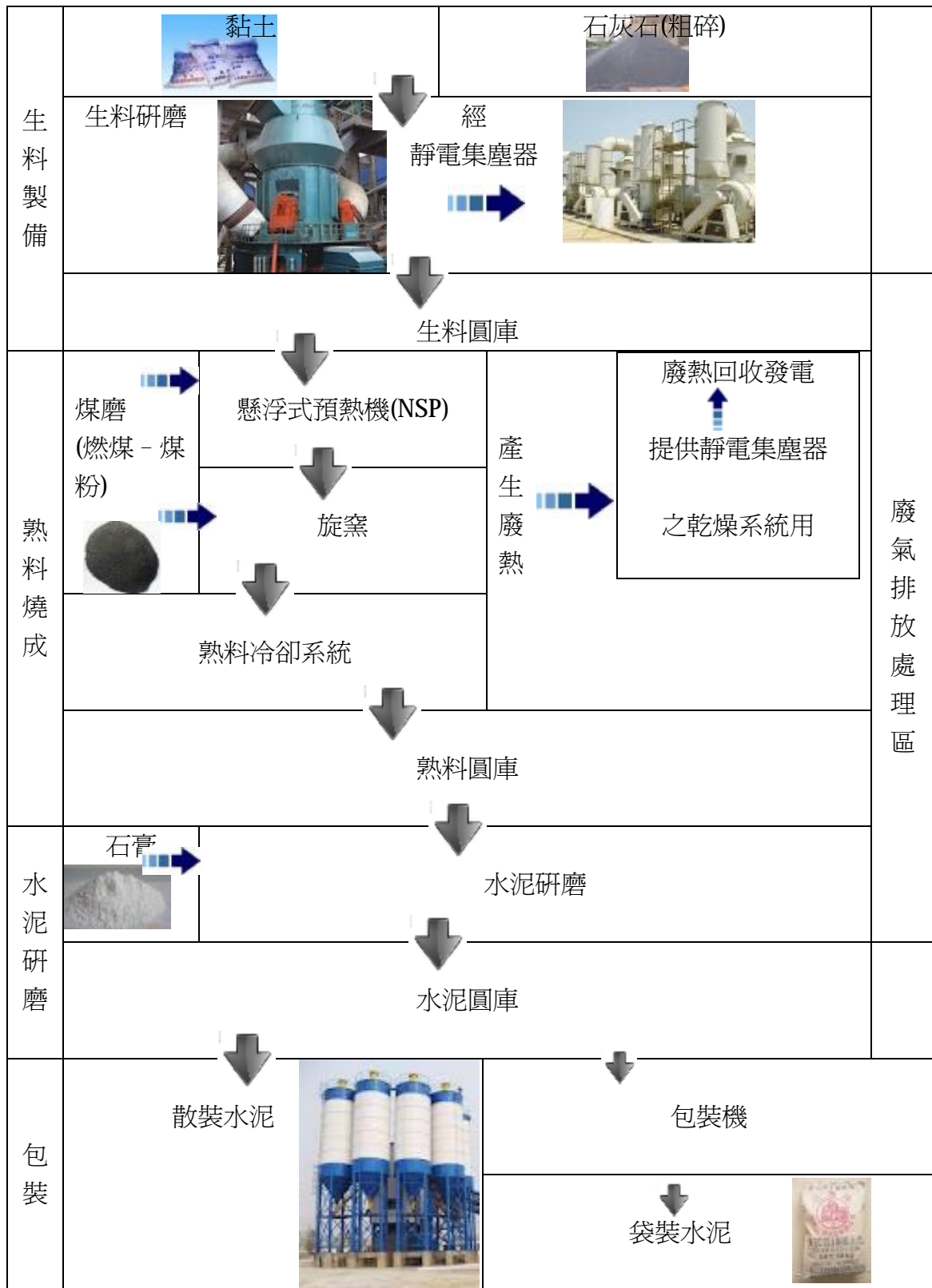
碳稅是針對排放到大氣中的碳予以課稅，因不同的燃料含碳量高低不同，訂出每公噸碳的排放價格，藉此鼓勵各工業減少使用高排碳能源（如煤炭、石油），改用低碳或非碳能源（如天然氣、太陽能），進而減少溫室氣體排放，若產生的碳低於世界規定標準，為獎勵降低排碳量，低於規定的 CO<sub>2</sub> 排放量將成為你所擁有的碳權，可用來賣給排碳量超過標準的企業，以上的方式也就是所謂的碳交易。

## 三、水泥之製造

### (一)製造流程

深入瞭解碳足跡後，我們以水泥為例，探討製造過程中為何會產生數量龐大的二氧化碳，而這些二氧化碳是否能有碳中和之機制，以下先介紹水泥生產製造流程，如表 3

表 3 水泥製造流程 (作者自製)【11】



把壓成碎塊的石灰石和黏土混合拌勻後，再磨成更細小的粉狀(第一研磨)，即為所謂的生料研磨，再經旋窯，以 1450°C 高溫燃燒成粒狀的熟料，將熟料加入石膏(2~4%)後，再加以研磨成細緻的粉末狀(第二研磨)，整個過程稱為「二磨一燒」。

### (一)水泥製造產生二氧化碳的主因

水泥的製造與運輸為產生二氧化碳的主因。製造水泥需耗費大量的能源，近年來水泥業能源的耗費，約佔製造業總能源的 5%，但其產值卻僅有製造業的 1%，若以水泥的第一大主原料石灰石來看：一莫爾碳酸鈣產生一莫爾的氧化鈣和二氧化碳( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ )，就算還沒開始製作水泥，其產生的二氧化碳便不可忽視。表 4 為水泥混凝土碳排放情形，因此降低水泥比例亦即減少熟料，可有效減少碳排放量。水泥的四大熟料為  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{C}_4\text{AF}$ ，如表 5。每一熟料的化學反應中皆含有氧化鈣( $\text{CaO}$ )，在水泥量相同的狀況下，減少石灰石，熟料勢必減少，因而降低二氧化碳的排放量。

表 4 水泥混凝土各材料單位碳排放分析圖 (作者自製)【1】

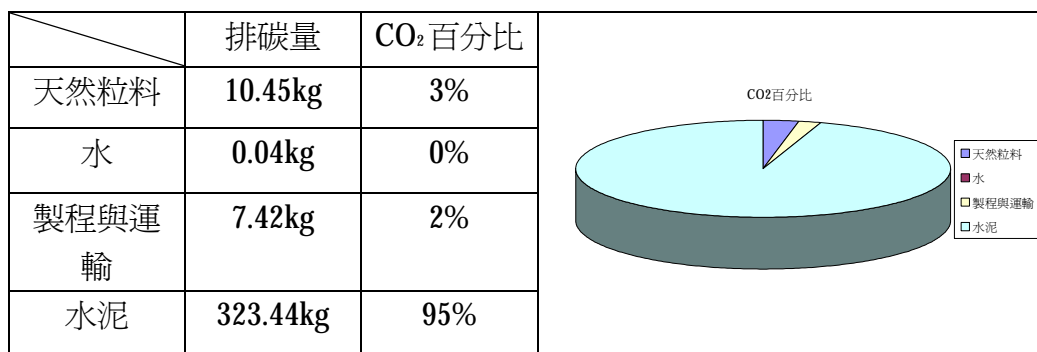


表 5 水泥熟料四大化學成分【11】

| 簡寫                    | 化學式   | 化學名稱  |
|-----------------------|---|-------|
| $\text{C}_3\text{S}$  | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      | 矽酸三鈣  |
| $\text{C}_2\text{S}$  | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      | 矽酸二鈣  |
| $\text{C}_3\text{A}$  | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$                             | 鋁酸三鈣  |
| $\text{C}_4\text{AF}$ | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 鋁鐵酸四鈣 |

### (二)生料粉磨系統

水泥既稱為二磨一燒，表示除了煨燒過程會大量耗能之外，大型之模具也必將造成能量的消耗，目前國內所使用之研磨系統大致可分為下列數種：

- 1.開路粉磨系統:物料通過機器就是產品，流程簡單成本低，但是易產生過粉磨現象。

- 2.閉路粉磨系統:物料磨後經過篩選，過粗則再磨，可減少過粉磨現象、提高產量、細度易控制，惟成本較高
- 3.聯合粉磨系統:物料經過預粉磨後，選出其中細料進入球磨機終粉，最後再將符合要求的成品篩選出來，此方式之產量與耗能皆優於閉路粉磨系統，但成本更高。

(三)依設備使用方式分爲:

- 1.輥壓機-球磨機聯合粉磨系統:先輥壓後球磨，物料輥壓後經過篩選，最後進入球磨機進行終粉磨，此法比立磨-球磨系統效率更高且級配和表面形狀接優良。
- 2.立磨-球磨機聯合粉磨系統:先立磨再球磨，指物料在終粉前先立磨，然後選擇符合標準的細料進行球磨，效率最高且級配和表面形狀皆良好。
- 3.球磨機粉磨系統:單以球磨機爲主達到終粉磨的目的。
- 4.臥式輥磨粉磨系統:一種新式設備，效能與輥壓機相似而產量更大。用於取代球磨機，但其磨粉原理出來之成品與立磨終粉成品類似，所以並不理想。
- 5.輥壓機終粉系統:比立磨效能高，但和立磨系統類似，產品級配和表面並不理想。
- 6.立磨終粉系統:單用立磨達到最終粉磨效果，比球磨效能更高，但產品是以擠壓方式生成，級配並不理想，且表面形狀不利於水泥水化和提供強度。

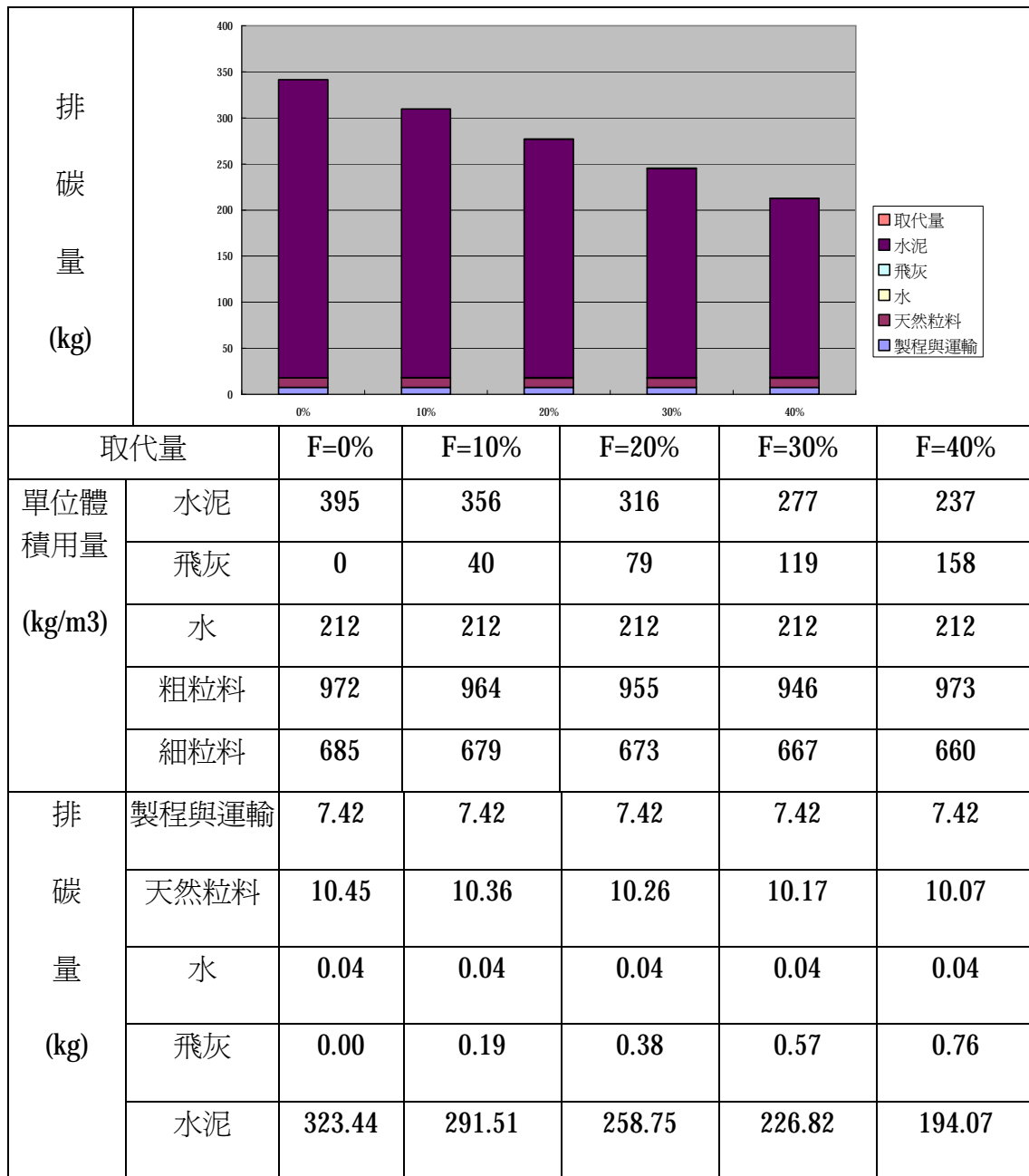
(四) 減少熟料:添加耗能產業之工業廢棄物，又稱爲卜作嵐材料。

- 1.飛灰:爲燃煤火力發電廠的副產物，以靜電集塵器收集，如圖 2。飛灰代替部份水泥——以飛灰取代等重量或等體積的水泥(一般多採前者)，其最多約取代 30%。在 28 天齡期前強度較普通混凝土低，約 3 個月齡期就可能趕上或超過。此種方法可減少混凝土水化熱，提高長期強度和耐久性，但須注意其早期強度對結構物的影響，表 6 爲參考公共工程飛灰使用手冊中飛灰取代部分水泥配比數據和不同飛灰取代水泥混凝土單位碳排放分析。



圖 2 燃煤飛灰【2】

表 6 不同飛灰取代水泥之配比數據與水泥製品單位碳排放量 (作者自製) 【1】



2.水淬爐石:為煉鋼廠在煉鐵過程所生產之副產物,具有良好的強度及抗海水、抗硫酸鹽侵蝕的能力,其晚期強度亦較佳,亦可降低水化熱,耐久性亦佳。

水淬爐石(亦稱高爐爐渣、高爐石)粉取代部份水泥,其最多約略70%,假定水淬爐石粉取代率為B,如表7中,當取代到60%水泥時,1m<sup>3</sup>再生水泥混凝土可減少179.34kg-CO<sub>2</sub>,相當於減少68.73L的柴油。



圖2 水淬爐石粉 【2】



表7是我們由水泥公會所提供之資料自行整理製作，其各種替代率之減碳量計算方式其實很簡單，179.34 kg-CO<sub>2</sub>是排碳量第一欄與排碳量第七欄之總差值，即

$$(7.42+10.45+0.04+323.44) - (7.42+10.07+0.04+0.76+194.07)=179.34 \text{ kg}$$

第一欄為100%水泥，爐石替代率0%。第七欄為40%水泥，爐石替代率60%。使用工業廢料爐石替代水泥方案，最多竟可產生52%之驚人減碳效果。

表7 水淬爐石取代水泥配比之單位碳排放分析 (作者自製)【1】

| 排<br>碳<br>量<br>(kg)         |       |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                             | 取代量   | B=0%   | B=10%  | B=20%  | B=30%  | B=40%  | B=50%  | B=60%  |
| 單位體積用量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 水泥    | 395    | 356    | 316    | 277    | 237    | 198    | 158    |
|                             | 水淬爐石粉 | 0      | 4      | 79     | 119    | 158    | 198    | 237    |
|                             | 水     | 212    | 211    | 209    | 208    | 206    | 205    | 203    |
|                             | 粗粒料   | 973    | 975    | 977    | 986    | 990    | 995    | 999    |
|                             | 細粒料   | 685    | 685    | 689    | 695    | 698    | 701    | 704    |
| 排<br>碳<br>量<br>(kg)         | 製程與運輸 | 7.42   | 7.42   | 7.42   | 7.42   | 7.42   | 7.42   | 7.42   |
|                             | 天然粒料  | 10.45  | 10.50  | 10.55  | 10.60  | 10.64  | 10.69  | 10.74  |
|                             | 水     | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   |
|                             | 水淬爐石粉 | 0.00   | 2.43   | 4.80   | 7.23   | 9.60   | 12.03  | 14.40  |
|                             | 水泥    | 323.44 | 291.51 | 258.75 | 226.82 | 194.07 | 162.13 | 129.38 |

(三)叁●結論：

經過以上四項策略，我們從行政院環保署年報中，發現我國水泥工業之排碳量，由 95 年經濟部估計一公斤水泥約產生 0.5 公斤的二氧化碳，至今已改善到一公斤產生約 0.4 公斤的二氧化碳，顯見使用綠能概念，依可使百年傳統產業達到相當可觀之減碳效果。在研究這篇論文時，發現水泥工業為世界公認第二大的溫室氣體污染源，其所排放之二氧化碳量僅低於石化工業，但研究中也發現，世界各國皆已將減低水泥工業排碳量列為國家發展重點目標，我國雖起步較晚，較鄰近國家日本之節能減碳速率大為落後，但由前向經濟部數據中，我國仍只有效利用多項技術與方法，將水泥製造過程的排碳量降低約 10~15%。在此，我們利用課堂上所學，配合文獻分析並親赴兩家水泥廠實際訪問，對於降低水泥製造過程之排碳量，得到幾項可行有效的方法：

- 1.經由機器不斷改良，在研磨生料時，選用的不同形式之研磨系統，可以互相搭配進而達到不同的能量消耗量與品質，其中以聯合粉磨系統較為優良且產量亦高，但其缺點是成本偏高。
2. 研磨熟料時，也應嘗試將不同的機器混合使用，找出最符合經濟效益並使成品符合標準的設備，以輥壓機-球磨機聯合粉磨系統較佳，其次為立磨-球磨機聯合粉磨系統，不但效能高而且級配和表面形狀皆良好。
- 3.利用工業廢料卜作嵐材料製成的水泥即為混合水泥，可依其配比降低二氧化碳排放量，但其取代量依 CNS 規定除了高爐水泥可取代 70%外水泥，其餘廢料僅能取代 30%，這些卜作嵐材料應含較多的矽酸和鋁酸可和鹼反應，因而避免粒料和鹼反應造成混凝土體積膨脹、破裂等健性(體積安定性)不佳之現象。混合水泥的晚期強度較強，較適用於需長期強度的地方，若要使用早期強度較佳的混凝土應研發或再改良以便適用於所需之處。
- 4.旋窯煨燒為一高度耗能的製造階段，昔日旋窯所需燃燒的高溫約為 1870°C，而至今已將其所需燃燒的溫度降至 1450°C，雖已降低不少耗能，但其所需之能量仍相當龐大，若能以現行科技將旋窯經過改良使其耗能再降低，則二氧化碳的排放量便可減少許多，水泥工業也可能不再是位居第二的高耗能產業。

為了節能減碳而改良機器、廢物利用，雖可使水泥所排放的二氧化碳降低許多，然而其所排放之二氧化碳總量仍不可忽視，因此，各國仍需全心投入減碳行動。

透過這次研究讓我們更瞭解「土木工程」，是個高污染源的事業，要如何減少對人類生存環境之衝擊，對於土木工程將是個極具挑戰性的問題。我們從當初的懵懂無知，到現在對碳足跡的認識，從水泥原料、製造過程、排放之廢棄物等，深深瞭解到碳的排放與我們的生活都息息相關。從遠處觀之，這或許也是我們這個傳統行業的發展契機，若能掌握契機，再創產業榮景且符合時代效益，誰能說我們不能再成為明日產業。

(四)肆●文獻回顧:

- 1.張木彬，國立中央大學 環境工程研究所 碩士論文——台灣地區水泥製造業NOX 與CO<sub>2</sub> 排放特性及DeNOX 設施成效探討，2007。
- 2.林志忠，國立中央大學 土木工程學系 碩士論文——公共工程使用再生材料落實節能減碳初步探討，2010。
- 3.陳碩彥，工業廢棄物再利用於營建工程粒料策略之研究國立中央大學土木工程研究所，2004
- 4.潘彥任，廢棄混凝土不同再利用方式 減碳效益評估之研究，國立中央大學營建管理所碩士論文，2010。
- 5.馮炳勳，「台灣水泥業因應二氧化碳排放減量策略之研究」，國立成功大學資源工程研究所博士論文，2006。
- 6.行政院環保署，環保署產業溫室氣體盤查管理技術手冊，2007
- 7.行政院環保署，九十七年度資源回收再利用年報，2009
- 8.行政院環保署，產品與服務碳足跡計算指引，2010
- 9.Godfrey Boyle、Bob Everett、Janet Ramage，能源系統與可持續發展，五南圖書出版有限公司，2010年5月初版一刷
- 10.跨政府氣候變遷小組(IPCC)，溫室氣體排放參數，2007
- 11.洪國珍，旭營工程材料課本，旭營文化事業有限公司，2010年9月四版一刷
- 12.林永富，環保經驗推動分享，基隆市海洋保護協會，2008年10月13日
- 13.百度百科 <http://baike.baidu.com/view/2695736.htm>，水泥粉磨，2012年8月

臺北市立南港高工 101 學年度第 1 學期 小論文 寫作比賽交件表

|                    |    |   |            |    |
|--------------------|----|---|------------|----|
| 小論文之題目<br>(或篇名、主題) |    |   |            |    |
| 類別<br>(請勾選)        |    | <input type="checkbox"/> 1 工程技術類 <input type="checkbox"/> 2 化學類 <input type="checkbox"/> 3 文學類 <input type="checkbox"/> 4 史地類 <input type="checkbox"/> 5 生物類 <input type="checkbox"/> 6 地球科學類 <input type="checkbox"/> 7 法政類<br><input type="checkbox"/> 8 物理類 <input type="checkbox"/> 9 英文寫作類 <input type="checkbox"/> 10 家事類 <input type="checkbox"/> 11 海事類 <input type="checkbox"/> 12 健康/護理類 <input type="checkbox"/> 13 商業類 <input type="checkbox"/> 14 國防類<br><input type="checkbox"/> 15 教育類 <input type="checkbox"/> 16 資訊類 <input type="checkbox"/> 17 農業類 <input type="checkbox"/> 18 數學類 <input type="checkbox"/> 19 藝術類 <input type="checkbox"/> 20 體育類 <input type="checkbox"/> 21 觀光餐旅類 |            |    |
| 班別                 | 學號 | 姓名  | e-mail     | 手機 |
|                    |    |   |            |    |
|                    |    |   |            |    |
|                    |    |   |            |    |
| 指導老師<br>姓名         |    |   | 指導老師<br>簽章 |    |

※ 可以自行影印填寫※ (若以小組為單位報名，請填寫在同一張)

臺北市立南港高級工業職業學校專業作品著作權切結書

本人所交之作品：\_\_\_\_\_ 之小論文，保證作品為本人之創作，如非本人之作品，或作品有抄襲、侵害他人著作權、涉及其他不法情事，經查屬實時，本人均同意接受學校校規與相關法律所作之處分，若已獲獎，則自願交回所獲之獎項(含校內外獎狀及獎品)，絕無異議。

切結人 學生簽章 1. \_\_\_\_\_ 2. \_\_\_\_\_ 3. \_\_\_\_\_

中華民國 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

-----以下免填-----

評審評分表

| 編號 | 評語與建議 (此區塊學生請勿填寫)   | 分數 |
|----|---|----|
|    | ※優點： <input type="checkbox"/> 題目適切 <input type="checkbox"/> 文字流暢 <input type="checkbox"/> 資料多元 <input type="checkbox"/> 架構完整。<br>※缺點： <input type="checkbox"/> 封面格式錯誤 <input type="checkbox"/> 內文格式不合規定 <input type="checkbox"/> 內文排版不佳<br><input type="checkbox"/> 圖表未標示名稱 <input type="checkbox"/> 錯字過多 <input type="checkbox"/> 文字不通順 <input type="checkbox"/> 內容不完整<br><input type="checkbox"/> 引註資料錯誤 <input type="checkbox"/> 缺乏引註資料 <input type="checkbox"/> 整段抄襲。<br>※其他建議： |    |