

出國報告（出國類別：實習）

煤炭與生質材料共同氣化之模擬

服務機關：台灣電力公司 台中火力發電廠

姓名職稱：林裕展 機械值班主任

派赴國家：加拿大

出國期間：102年6月17日至7月6日

報告日期：102年7月31日

摘要

煤炭之存量預估還可用 200 年左右，其價格較低，長期價格亦較穩定，因此在國內能源的使用上扮演著重要角色。可是煤炭的直接燃燒會產生溫室效應和環境污染等棘手的問題。煤炭氣化已經發展超過 200 年，煤在特定設備內，在一定溫度及壓力下，使煤中有機質與氣化劑發生一系列化學反應，將固體煤轉化為含有 CO 、 H_2 、 CH_4 等可燃氣體和 CO_2 、 N_2 等非可燃氣體。煤炭氣化提供了一個多用途和潔淨煤的方式，將煤炭轉換成電能、氫氣和其他有價值的能源產品。長期而言，台灣應積極投入第二代的生質燃料的研究，和歐美等先進國家一樣積極尋求以非食用作物做為生產生質燃料之原料。計算流體力學是 21 世紀流體力學領域的重要技術，使用數值方法在電腦中對流體力學的控制方程式進行求解，在工程領域 CFD 方法已經得到廣泛的應用。此次計畫是要使用挾帶床氣化爐為模型來發展一個數值模擬方法。格點的建構關係著結果的合理性與運算所需時間。格點的密度及分佈也很重要，格點越密所得之結果將會越精確，但所需的運算時間亦會更久！故，如何在精確性與運算時間之間取得平衡點是一個相當重要的課題。挾帶床氣化爐使用單一噴嘴易使燃料和空氣混合後之噴入速度太快，燃燒太激烈，不利合成氣之產生。為解決此一問題，因此在噴嘴之外增加一氧氣注入環(孔)。此一構型改變後，發現可以產生合成氣。汽化爐內之最高溫度隨著注入氧量的增加而升高。而整體的合成氣產生量則與之相反。另外，此一構型之汽化爐之一氧化碳產生量最高，而甲烷之產量幾乎為零。若將所注入之氧氣換成蒸氣，所得之氫氣及甲烷量將有所增加，而一氧化碳之產量則降低，而整體的合成氣產生量則是增加的。

目次

第一章、目的

第二章、氣化技術發展概況

第三章、氣化技術應用概況

第四章、生質材料（燃料）應用概況

第五章、工程解析軟體解決問題的基本步驟

第六章、範例練習題-Tutorial 14

第七章、幾何模型與假設

第八章、數學上的統治方程式與擾流模型

第九章、最佳格點的選擇

第十章、練習題(一)

第十一章、練習題(二)

第十二章、過程與心得

第十三章、致謝

第一章、目的

石化燃料 (fossil fuel) 是目前世界上使用最多也是最主要能源來源；然而，全球石油及天然氣的存量預估只剩 40-60 年左右，而且其價格也一直飆漲，國際能源總署(IEA)亦有提出全球原油供需失衡的警告。因此，煤炭 (coal) 成了減少石油及天然氣使用的最佳選擇，因其存量預估還可用 200 年左右，而且其價格較低，長期價格亦較穩定，因此在國內能源的使用上扮演著重要角色。可是煤炭的直接燃燒會產生溫室效應 (greenhouse effect) 和環境污染等棘手的問題。因此，如何將煤炭的使用效率提升與潔淨的利用(或轉換成為潔淨的能源)，對煤炭消耗量超過 6,000 萬公噸 (2006 年) 的台灣是一個重要的課題。先進國家皆投入大量的資源研究發展將煤炭轉換成潔淨能源，其中以氣化技術 (gasification technology) 最具優勢，亦為各先進國家發展之重點。

為了減低上述問題及增加石化燃料使用效率，再生能源 (renewable energy) 的使用在近年來一直被重視。生質材料 (biomass) 是一種重要的再生能源來源。生質能 (biomass energy) 係指利用生質材料 (biomass)，經特殊的方法轉換後所獲得之可用能源，如電與熱。根據國際能源總署 (International Energy Agency) 的統計資料 (IEA, 2003) 顯示，目前生質能為全球第四大能源，僅次於石油、煤及天然氣，同時也是目前最廣泛使用的一種再生能源。依據行政院「再生能源發展條例」，我國生質能定義為「指農林植物、沼氣及國內有機廢棄物直接利用或經處理所產生之能源」，因此生質物可泛指由生物產生的有機物質，例如木材與林業廢棄物如木屑等；農作物與農業廢棄物如黃豆、玉米、稻殼、蔗渣等；工業有機廢棄物如有機污泥、廢塑橡膠、廢紙等。而大部份上述之生質材料亦可被氣化 (gasification) 後再加以轉化使用。

此計畫的目的是希望能發展出一套數值方法來預測煤炭和生質材料的氣化特徵與現象。

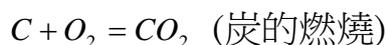
第二章、氣化技術發展概況

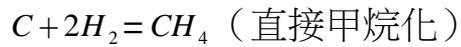
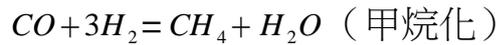
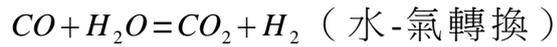
煤炭氣化 (coal gasification) 已經發展超過 200 年了，到了西元 1940 年代還一度成為主流工業項目之一。在第二次世界大戰期間，德國人利用煤炭氣化技術將煤炭轉化成軍方所需的液態燃料。另外，因實施種族隔離政策的南非，在 20 世紀 1950 年代國際社會對其實行石油禁運，面對石油缺乏的窘境，並未使得南非的能源供應出現吃緊現象，其主要原因是，南非擁有當時世界上最先進的「煤炭氣化」技術。

煤炭氣化是指煤在特定設備內，在一定溫度及壓力下，使煤中有機質與氣化劑(如蒸汽／空氣或氧氣等)發生一系列化學反應，將固體煤轉化為含有 CO 、 H_2 、 CH_4 等可燃氣體和 CO_2 、 N_2 等非可燃氣體的過程。煤炭氣化時，必須具備 3 個條件，即氣化爐、氣化劑、供給熱量。氣化過程發生的反應包括煤的熱解、氣化和燃燒反應，煤的熱解是指煤從固體變為氣、固、液 3 體產物的過程。煤炭氣化之所以為潔淨能源，是因為煤炭氣化中 H_2 含量在 40% 以上，分離後得到各種純度的 H_2 ， H_2 是當今人類最理想的潔淨能源， H_2 可儲、可輸性好，不僅是高能燃料，且使用方便、清潔衛生，在自然界中形成「水→氫→水」自然循環，符合人類可持續發展的需要。

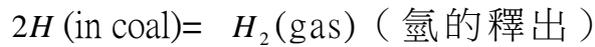
煤炭氣化一般是在溫度 730-1600°C 左右，壓力約 1-68 個大氣壓下進行。將固態的煤轉化為氣體產物之反應非常的複雜，以下為一些主要的反應過程：

放熱反應 (exothermic reaction)：

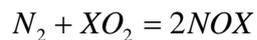
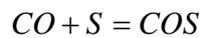
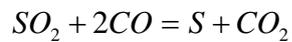
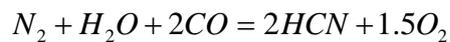
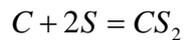
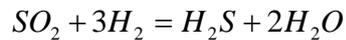
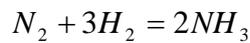
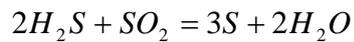
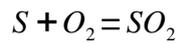




吸熱反應 (endothermic reaction) :



其他元素之反應 :



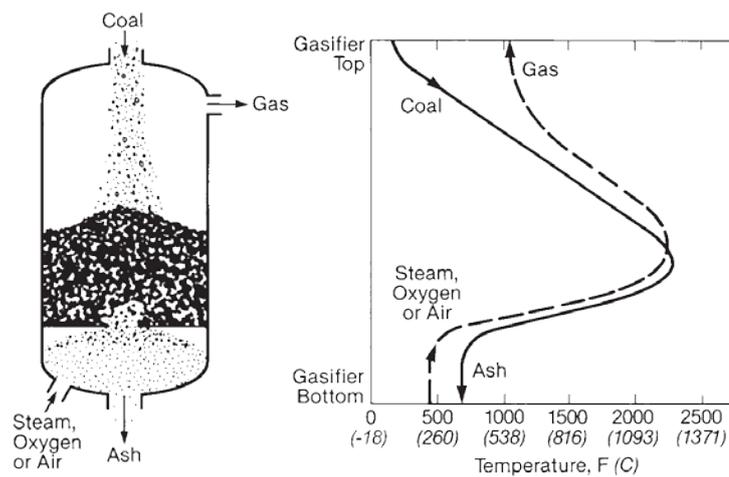
煤炭在高溫高壓情況下，先經熱分解生成焦炭及揮發性氣體，在氣化爐內焦炭和水蒸汽、 CO_2 、 H_2 、 O_2 產生化學作用。在缺氧條件下，焦炭在氣化爐內做不完全燃燒，生成的可燃性氣體主要為 H_2 、 CO 及 CH_4 。煤炭氣化時之氧化劑、壓力、溫度及進料方式（氣化爐的形式）等，

決定了合成氣中含 H_2 、 CO 及 CH_4 此三種氣體成分之多寡，以及合成氣之熱值。當氧化劑為空氣時，因空氣中含有大量的氮，所生程之合成氣為低熱值，當氧化劑為氧時則會生程中熱值之合成氣，如果適當改變製程使得 CH_4 的含量提高，則可製成高熱量之合成天然氣，且可以使用管路輸送。

氣化爐 (gasifier) 的分類，一般可區分成三種：

A. 移動床或固定床 (moving/fixed bed)

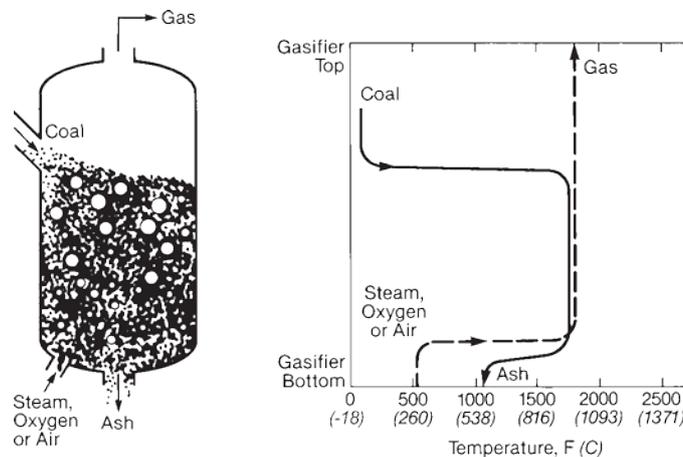
移動床 (如圖一所示) 內固體原料之粒徑約 5-0.635cm，操作溫度範圍約 430 ~ 1540 °C，操作壓力範圍約 2410~3100kPa。此型氣化爐之特色為：會產生瀝青 (tar) 和油 (oil) 之類的碳氫化合物 (hydrocarbon)、對於較細的煤粒處理能力有限、需要特殊的步驟去處理煤的結渣、可以產生相當高量的氣態甲烷及較低的氧化劑需求。第一座全尺寸的移動床煤炭氣化爐建於西元 1936 年，總共建了 164 座。



圖一 Moving-Bed Gasifier

B. 流體化床 (fluidized bed)

流體化床 (如圖二所示) 內固體原料之粒徑 $< 0.5\text{cm}$ ，操作溫度範圍約 $870 \sim 1038^\circ\text{C}$ ，其最大缺點為運轉溫度範圍小，通常需低於煤灰之熔點避免爐渣 (clinker) 產生導致流動化停滯現象產生，並高到避免產生焦油之溫度範圍內。第一座的煤炭氣化爐就是流體化床氣化爐，於西元 1926 年的德國 Leuna 正式運轉。然而，低的容量和高昂的操作成本限制了此類型氣化爐的發展。

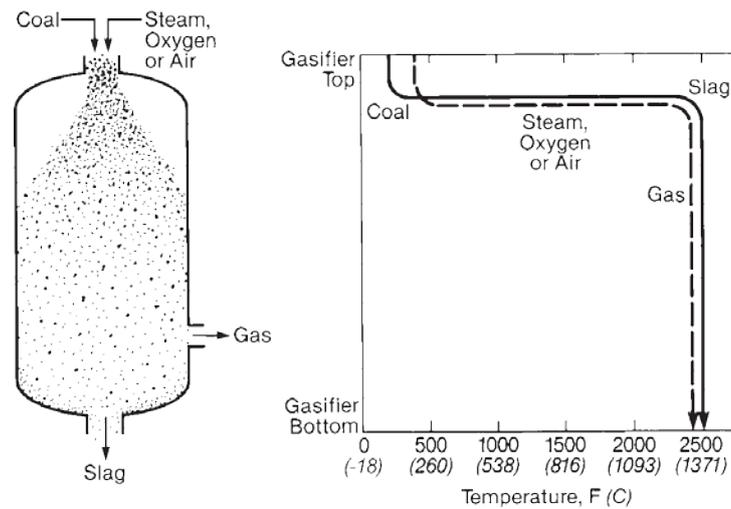


圖二 Fluidized-Bed Gasifier

C. 挾帶床 (entrained bed)

挾帶床 (如圖三所示) 內固體原料之粒徑 $< 0.013\text{cm}$ ，操作溫度範圍約 $930 \sim 1650^\circ\text{C}$ ，氣化爐內溫度十分均勻，氣體和煤粒之間幾乎沒有溫度差異，且固、氣混合情況優於移動床和流體化床，為發電用機組主要採用之氣化爐形式。此型氣化爐之特色為：幾乎所有的煤源皆可使用，和結渣特性與煤粉細度無關、需要一套熱回收系統、運轉於高溫結渣 (slagging) 區間、較高的氧化劑需求、需要特殊

的步驟去避免融熔的煤渣騰帶（carryover）至下游的熱回收區。第一座商業化的挾帶床氣化爐建於西元 1949 年的法國。挾帶床氣化技術具有較高的效率，可使用燃料範圍較廣等優點，因此成為世界各國發展之重點。本次計畫所要模擬的即是此型氣化爐。



圖三 Entrained-Flow Gasifier

第三章、氣化技術應用概況

氣化技術之應用大致可分成三個方向：合成氣轉換液態燃料、產氫及氣化複循環發電。

A. 合成氣轉換液態燃料

利用氣化技術將合成氣轉換成液態甲醇製程（liquid phase methanol）及二甲基醚，為一提高氣化複循環發電（IGCC）整體經濟效益之技術。其是利用觸媒將煤炭氣化產生之合成氣中之氫、一氧化碳與二氧化碳轉化製成甲醇或二甲基醚。其反應溫度約為 225~270°C，壓力約為 725~1450 psig。所產生之甲醇產品經蒸餾純化後純度可達 99.85wt%，可最為化工原料使用。未經蒸餾純化之甲醇純度約 98wt%。液態甲醇製程非常適合與氣化複循環發電（IGCC）搭配，在電廠尖峰時段全力發電，在離峰時段則將多餘之合成氣轉換成甲醇。

F-T 燃料之技術最初是由德國科學家 Franz Fischer 及 Hans Tropsch 於西元 1923 年所發展出來的，其製程是將合成氣轉化成烷類和烯類之碳氫化合物。經過此製程之轉化可得許多已經商業化之產品如：汽油、柴油及石蠟。經 F-T 轉化技術所產生之燃料基本上不含硫及芳香族或環鏈碳氫化合物，故不具毒性也不會危害環境。

B. 合成氣產氫

此技術基本上是先利用氣化程序，將煤炭氣化成以一氧化碳與氫氣為主之合成氣，其中一氧化碳與氫氣的組成與燃料品質及進料方式有關，以煙煤為例，以乾粉進料方式，所產生之 CO 約佔 50~60%， H_2 約佔 25~35%。若以煤水漿方式進料，則所產生之 CO 約佔 40~50%， H_2 約佔 30~40%。為產生較多之 H_2 ，會利

用水蒸氣與 CO 反應轉化成 H_2 ，同時生成 CO_2 ，稱為水轉化反應（water shift reaction），再利用氣體分離裝置將 H_2 與 CO_2 分離而得到所需之 H_2 。

利用氣化技術產出氫氣，提供未來汽車和燃料電池之用，可能是目前最有彈性的技術之一。氫氣和其他氣體可以做為渦輪發電機的燃料，或做為其他產品的原料。

C. 氣化複循環發電

氣化複循環發電（integrated gasification combined cycle, IGCC）的方式是將煤炭氣化後，產生的粗煤氣（raw gas）經過燃氣淨化系統（gas clean up system）除塵（particulate removal）、脫硫（sulfur removal）及除去含氮物質後變成乾淨的合成氣（syngas）（基本上是將固態燃料轉換成氣態燃料），再將此乾淨的合成氣送至複循環發電機組發電。故，簡單的來說，氣化複循環發電技術可視為氣化爐、空氣分離系統（air separation unit）、燃氣淨化系統和複循環發電機組（combined cycle）等四種系統之整合。由於氣化複循環技術是將燃料先轉化成合成氣，相較於粉煤燃燒鍋爐所產生之大量煙氣而言，合成氣的體積小了許多，故其除塵、脫硝與脫硫效率比傳統電廠高出許多。其中所脫下來的硫亦可當成副產品加以出售。

IGCC 最早是由美國發源，然後推廣至歐洲、及亞洲等地區。在電廠裝置容量上，已從 1984 年之 120MW 發展至 1995 年運轉之 250MW 及 2000 年之 500MW 以上之規模。在燃料的使用上來看，最早由美國及荷蘭的示範廠以煤炭為原料，近年則使用煉油廠及工業廢棄物如石油焦、塔底油、污泥（Sludge）及垃圾衍生燃料。此乃在於 IGCC 優越的環保特性，故可使用含有高硫份及重金屬的燃料，而使其燃料多元性。

IGCC 技術是利用高效率之複循環發電機組，其整廠熱效率約為 40~43%。目前尚未被大量使用之主要原因為經濟上的考量，但若未來考慮 CO_2 的減量、捕捉與封存等與環保問題 (SO_x 、 NO_x 、粉塵與有毒物質等的排放)，IGCC 將較目前的燃煤發電主流：傳統的粉煤鍋爐更有競爭力。

日本的 IGCC 示範廠坐落於 Nakoso，裝置容量 250MW，該廠自 2001 年設計規劃，2004 年開始興建，2007 年開始運轉。其煤炭消耗量約 1700 MT/day，其燃燒系統能燃燒大量低熱值燃料，淨效率 42.4% (LHV)，尤其在污染排放控制上更是優異，其煙氣中： $SO_x \doteq 1$ ppm (O_2 16% basis)、 $NO_x \doteq 3.4$ ppm (O_2 16% basis)。

煤炭氣化提供了一個多用途和潔淨煤的方式，將煤炭轉換成電能、氫氣和其他有價值的能源產品。將煤炭轉換成潔淨能源，為達此目標，先進國家皆已投入大幅研發資源發展。國際間之發展趨勢主要如下：

- (1)提高氣化複循環發電廠之競爭性，如降低設置成本、增加可靠度至與粉煤鍋爐相當、提高效率等。
- (2)煤炭氣化之多元化應用，除發電外亦可生產優質液態燃料(如 F-T 燃料、甲醇、二甲基醚等)，以及產氫等。
- (3)高效率、零排放之未來電廠，即結合 IGCC、燃料電池、產氫技術、 CO_2 移除及封存(Sequestration)等。不但要有高效率，亦要可用率高且具價格競爭性，也要有極佳的環保優勢，達到零排放的最終目標。

第四章、生質材料（燃料）應用概況

化石燃料原本為古老的生質燃料（bio-fuel），但是因其所含的碳已經離開碳循環太久了，所以並不被認為是種生質燃料。生質燃料是泛指由生物質組成或萃取固體、液體或氣體。生物質能最常見於種植植物所製造的生質燃料，或者用來生產纖維、化學製品和熱能的動物或植物。也包括生物可分解的廢棄物(Biodegradable waste)製造的燃料。生質燃料的另一種定義是「至少 80%的體積，由十年內生產的有機活體物質所提煉出的燃料」。

只要是植物，或者曾經是植物，都可以被用來生產生質燃料，包括了芒草、麻、玉米、柳樹、甘蔗和棕櫚樹…等。太陽的能量經過植物光合作用的轉化，以化學能的形式存於植物中。光合作用將大氣中的碳轉化成有機物質，而有機物質在死亡或被氧化後會再以二氧化碳的形式回歸於大氣。這循環相對的所需的時間較短，而作為燃料的植物可以很快地不斷地重複種植生產。因此使用生物質能作為燃料依然可以維持大氣中碳含量的平衡。而化石燃料會將碳帶離循環並儲存起來，直到再回歸大氣中，增加大氣中的碳含量。生質燃料的另一個優於大部分化石燃料的好處便是它可被生物分解，倘若不小心被潑灑到自然環境，也較不容易造成環境污染。而目前生質燃料最重要的意義是期望能夠減少全球二氧化碳的排放。另外，對於天然資源匱乏的國家而言，發展生質燃料可降低對能源進口的依賴、促進能源多元化及帶動生質能源產業發展。

第一代的生質燃料產自於可以食用的生物體，例如：玉米、黃豆以及甘蔗等。這類生質燃料是許許多多可行方案中最容易達成的技術，例如在美國，就有 180 座左右以玉米製造酒精（乙醇）的工廠。然而，此舉會造成穀物需求量的增加，使得食品與動物的飼料價格上漲。而且，如果將種植、採收和處理製造時所產生溫室氣體考慮進來，第一代的生質燃料其實沒有原先期待的那麼環保。此第一代的生質燃料之轉換技術多屬生物/化學

轉換（bio-/chemical conversion）。

第二代的生質燃料是以纖維素為原料，也就是以植物中不可食用的部分來製造生質燃料，此法可避免第一代的生質燃料技術所衍生的問題。其可使用的原料有：鋸木屑、建築用木材廢料、穀類的莖（稻草）麥類的桿以及所謂的「能源作物」...等。這類原料產量充足且價格低廉，而且不會影響糧食生產。常見的能源作物有柳樹、高粱、芒草和甘蔗等，它們生長速度快，肥料和水等需求量低。有些甚至可以種在被汙染的土地上，例如柳樹，其輪種週期相當短，生長時還可淨化被重金屬汙染的土地。

大自然演化出纖維素的目的是為了賦予植物骨架，想要取出潛藏其中的能量，必須先將纖維素分解成較小的分子，再提煉成所需的燃料。其分解方法可依所需溫度分成：低溫分解法（50~200°C），高溫分解法（300~600°C）及極高溫分解法（>700°C）。目前最先進的技術，是使用高溫分解法（較適用於木材），在高溫下將轉換成合成氣，再利用德國科學家於 1920 年代開發出來的費托合成法（FTS）轉化成柴油、汽油或乙醇等燃料。此法的第一個步驟即是本文要討論的主題：氣化。上述的技術已有實例：卡達於西元 2006 年建造了一座 FTS 工廠，每天可生產 3 萬 4 千桶液態燃料，但造價高昂（16 億美元），是此技術發展最大阻礙。英國殼牌公司投資加拿大已於 2005 年使用麥桿生產乙醇。此第二代的生質燃料之轉換技術多屬熱轉換（thermal conversion）：如氣化（gasification）、裂解（pyrolysis）方式。

另有一種方法，是利用無氧的環境，在 300~600°C 的溫度下將生質材料轉換成類似煤的固體和生質原油，其成本相當低，但所得之原油酸性極強，能量密度偏低，不適用於現今的汽/柴油引擎。另外還有一種新的生質燃料技術，是以脂肪來製造燃料，其是使用屠宰過程中產量龐大又價廉的副產品：豬油與蔬菜油一起製成生質柴油。

還有一種固態廢棄物衍生燃料（RDF-5），係將生質物／廢棄物經破

碎、分選、乾燥、混合添加劑及成型等過程而製成錠型燃料，其主要特性為大小、熱值均勻（約為煤的三分之二）、易於運輸及儲存，可將其直接應用於發電鍋爐等作為主要燃料或與煤炭混燒。此一技術目前國外發展以日本最為發達，主要以處理都市廢棄物為主。

台灣在 1988 年的「第一次全國能源會議」後決議積極尋求潔淨能源，並以酒精汽油及生質柴油（bio-diesel）為發展重點。利用廢食用油提煉生質柴油；鼓勵休耕農地種植大豆、向日葵及油菜等能源作物產製生質柴油。現階段商業化的生質柴油製程係以化學觸媒的鹼製程為主。另外，以甘蔗及甘藷生產生質酒精，調製成汽油酒精。上述兩種酒精汽油及生質柴油皆屬第一代的生質燃料。長期而言，台灣應積極投入第二代的生質燃料的研究，和歐美等先進國家一樣積極尋求以非食用（non-edible）作物做為生產生質燃料之原料。其中以木纖維素為原料（例如：蔗渣、稻桿、木屑）製造酒精之技術最為可行，不但可解決生產酒精之原料問題，亦可解決農業廢棄物無法適當處理之問題。

第五章、工程解析軟體解決問題的基本步驟

計算流體力學（Computational Fluid Dynamics，簡稱 CFD）是 21 世紀流體力學 領域的重要技術之一，使用 數值方法 在電腦中對流體力學的控制方程式進行求解，從而可預測 流場 的流動。目前在工程領域 CFD 方法已經得到廣泛的應用。這些技術廣泛用於 工程 設計或者分析和 流體 交互作用的設備，例如車輛，飛行器，泵，化學裝置和通風系統等等。

使用工程解析軟體解決問題的基本步驟如下：

1. 定義所使用之模型目標（modeling goals）：
 - A. 你期待的結果是什麼？及此模型會以何種方式被使用？
 - a. 模型選項為何？
 - b. 哪些物理模型需要被考慮進來？
 - c. 哪些化簡題目的假設是一定要做的？
 - d. 可以做的化簡題目的假設有哪些？（幾合型狀圓弧的地方是否可以用直角取代？不重要的管路相交是否可忽略？）
 - e. 需要特殊的模型功能嗎？（2D or 3D，3D 模型所需耗費的資源相對上比 2D 模型高出許多）
 - f. 需要使用使用者定義的函數（user-defined functions）嗎？
 - B. 需要精確到哪種程度呢？（格點越密越精確）
 - C. 想要得到結果要耗費多久的時間？（格點越密越耗時）
 - D. 可以被計算的區間之起點與終點在哪裡？

- a. 有所有的邊界條件 (boundary condition) 的資訊嗎?
 - b. 這些邊界條件的種類與所知的資料相符嗎?
 - d. 可以將定義的計算範圍延伸至已知資料 (data exist) 的地方?
- E. 可以將問題簡化或近似成 2D 或軸對稱 (axisymmetric) 的題目嗎? (可以減少一半的計算量)
2. 建立模型的幾何外型 (geometry) 及格點 (mesh):
- A. 所建立的幾何形狀與格點是否能被所採用的軟體接受? (繪圖軟體與解析軟體需相容)
 - B. 依照幾何形狀的複雜程度來決定所選用的格點種類? (三角形或四邊形。基於格點對稱原則, 一般優先考慮使用正交格點)
 - C. 在定義的各個不同區間內, 其格點的解析度應為何? 是否能和其幾何形狀配合? 或哪些區域需要較高的格點梯度 (gradient)? (一般而言, 在有邊界條件的地方格點要密一點)
 - D. 所使用的電腦是否有足夠的記憶體? (格點越多所需之記憶體越大)
 - E. 繪圖時一般是以: 點→線→面 (2D) →體 (3D) 的步驟成型。
 - F. 格點的繪製亦是依: 點→線→面 (2D) →體 (3D) 的步驟; 而且, 相鄰的兩格點之縮放比例以不超過 2 倍為原則。

3. 設定運算器 (solver) 及物理模型 (physical models)。
 - A. 讀入及檢查格點。
 - B. 選擇所需的數值運算器 (例如：密度基準運算器：多用於高速可壓縮流、壓力基準運算器：多用於低速不可壓縮流，不穩定的...等)。
 - D. 選擇適當的物理模型 (例如：擾流 (turbulence)、燃燒 (combustion)、多相 (multiphase) ...等)。
 - E. 定義材料的性質 (流體、固體、混合物、煤...等)。
 - F. 指定操作條件。
 - G. 指定所有邊界區間上的邊界條件。
 - H. 提供一個初始狀態。
 - I. 設定計算器的控制項目。
 - J. 設定收斂 (convergence) 監視器。
 - K. 流場初始化。
4. 計算及檢查所得之解 (solution)。
 - A. 考慮週到的守恆方程 (conservation equation) 才有辦法得到收斂的解 (converged solution)。
 - B. 解答的精確程度取決於：適當和精確的物理模型、格點的解析度和獨立性 (independence)。
5. 檢視及儲存所得之結果 (results)
6. 如果有需要的話，修正數值或物理模型的參數

第六章、範例練習題-Tutorial 14

工程分析軟體 ANSYS Fluent 提供了一系列的 Tutorial Guide 作為初學者的入門練習，其中的 Tutorial 14 即非常適合此一計畫（氣化爐）的練習及學習。其內容如下所示：

Problem Description

The cylindrical combustor considered in this tutorial is shown in Figure 14.1. The flame considered is a turbulent diffusion flame. A small nozzle in the center of the combustor introduces methane at 80 m/s. Ambient air enters the combustor coaxially at 0.5 m/s. The overall equivalence ratio is approximately 0.76 (approximately 28% excess air). The high-speed methane jet initially expands with little interference from the outer wall, and entrains and mixes with the low-speed air. The Reynolds number based on the methane jet diameter is approximately 5.7×10^3 .

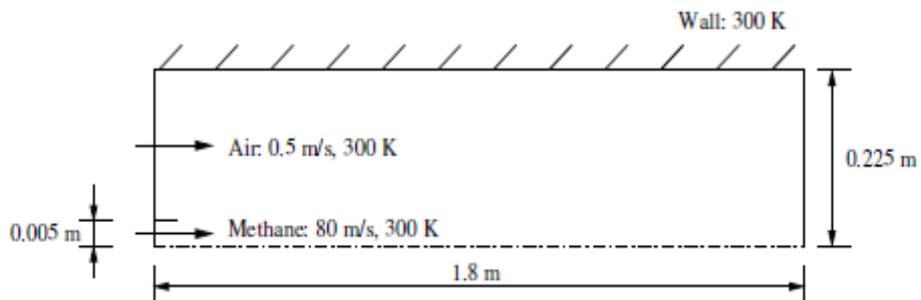
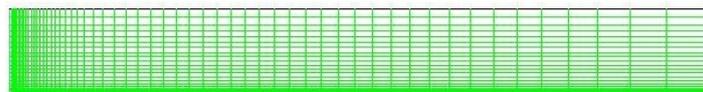


Figure 14.1: Combustion of Methane Gas in a Turbulent Diffusion Flame Furnace

其格點圖如下所示：



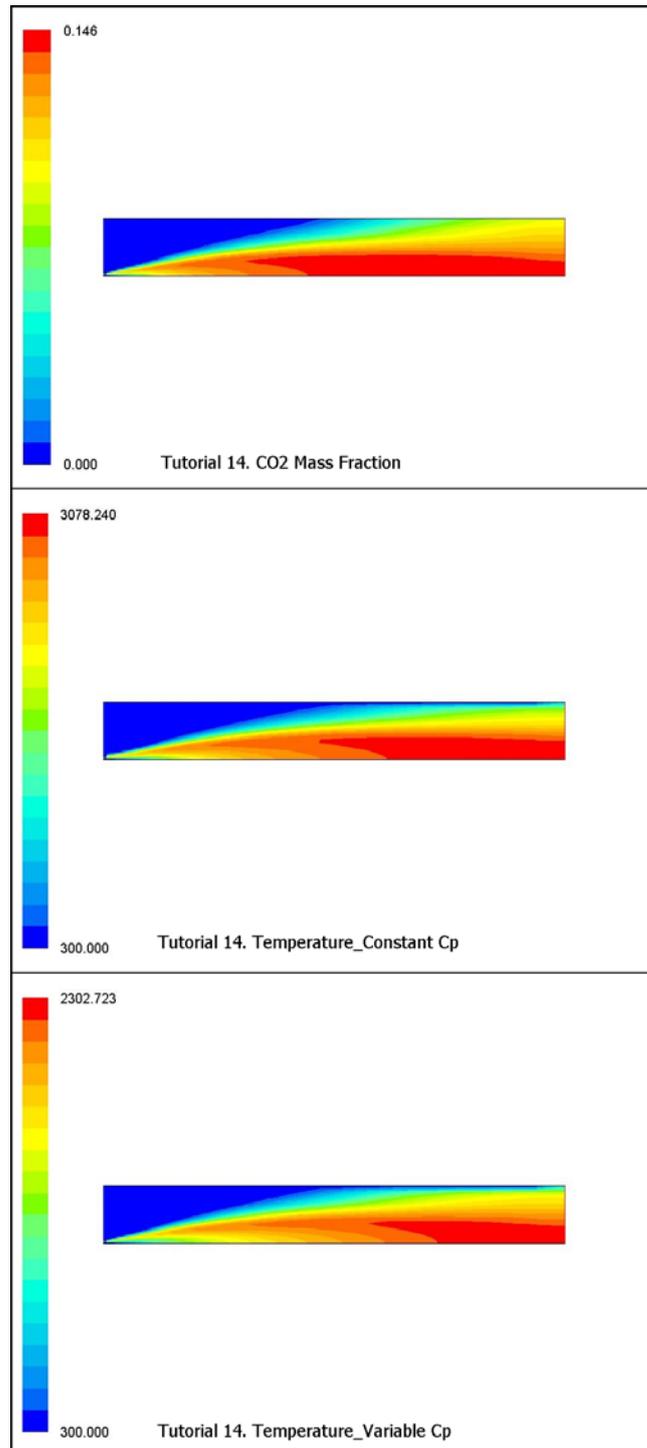
Mesh of Tutorial 14.

經由此一練習題的導引過程可以學到：

- ✧ 如何使用物理模型 (physical models)、選擇材料的性質 (material properties)、替不同的化學成分混合物及其反應之擾流定義邊界條件。
- ✧ 初始化程式及使用壓力模式計算器求解燃燒模擬。
- ✧ 比較以定值之比熱或變值之比熱所求出之解。
- ✧ 使用繪圖功能將計算結果畫成圖形。
- ✧ 預測 thermal NO_x 及 prompt NO_x 之生成。

此一工程分析軟體功能相當強大，但相對的亦相當的複雜。光是使用說明書就有 2070 頁，其他功能說明亦有好幾百頁，想要學習特定的領域或特定的功能，找到相近或是類似的 Tutorial 例子是相當的重要學習捷徑，一味地從頭到尾研讀使用說明書不僅浪費時間效果亦有限。當然，找到一位好的老師指導是最佳的選擇。

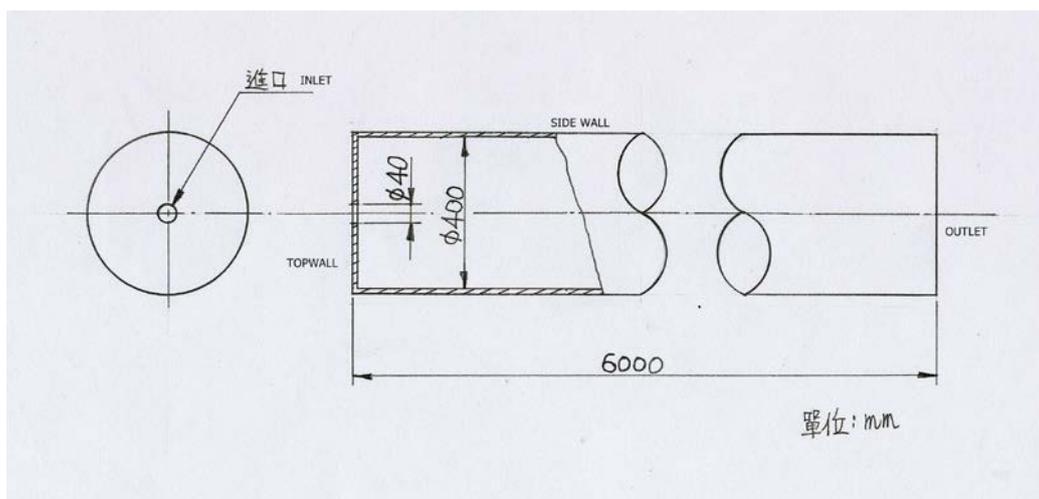
其所得結果如圖四所示，分別為 CO_2 分布圖、定壓比熱之溫度分布圖及變壓比熱之溫度分布圖。



圖四、Tutorial 14 所得之結果(以圖形表示)

第七章、幾何模型與假設

此次計畫是要使用挾帶床氣化爐（entrained-flow gasifier）為模型來發展一個數值模擬方法。第一個練習的簡圖如圖五所示。其燃料及空氣的進口在圓柱體側邊的正中央，直徑為 4 公分，氣化爐本體直徑 40 公分，長度 6 公尺。



圖五、夾帶床氣化爐模型(練習一)

為了將實際的物理現象化簡成可解析的問題，因此必須做一些假設：

1. 流場必須是穩定的（steady）、軸對稱的（axisymmetric）、不可壓縮的（incompressible）和擾動的（turbulent）。
2. 氣化爐內流體的輻射（radiation）及因質量產生的作用力（body force）應加以忽略。
3. 不考慮諸如 SO_x 及 NO_x 等空氣污染物的形成。
4. 氣化爐的壁溫假設是均勻的。

因為是軸對稱的假設，故可以將實體為三維的圓柱體簡化成二維的情況加以模擬，仍保有以三維方式分析的正確性，但可大幅減低運算的複雜性與時間。

第八章、數學上的統治方程式與擾流模型

如第七章圖五中所示的幾何模型與假設，將使用數值方法來加以模擬此一：二維的、穩定的、不可壓縮的、擾動的並伴隨燃料注入反應的情況。由此，一個穩定的、時間平均的（steady-state time-averaged） Navier-Stokes 方程式、能量方程式及 species 方程式將需要被加以計算。另外，標準擾流模式亦須加以考量。上述之統治方程式如下所示。

Governing equation :

Continuity	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_{ij}) = S_m$
Momentum	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) + S_j$
Energy	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u'_i T'} \right) + S_h$
Species	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_j}{\partial x_i} - \rho \overline{u'_i Y'_j} \right) + S_r$

Turbulence model :

Kinematic viscosity	$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$
Kinetic energy	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon$
Dissipation rate	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} G_k \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$
Heat conductivity	$\rho c_p \overline{u'_i T'} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} = -c_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$
Diffusion coefficient	$\rho \overline{u'_i Y'_j} = -\rho D \frac{\partial Y}{\partial x_i} = -\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial Y}{\partial x_i}$

Constant

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε	Pr_t	Sc_t
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.85	0.7

得利於工程分析軟體的快速發展，現今已不需手算如此複雜的方程式，但在使用上仍須具備相當的數學能力。

第九章、最佳格點的選擇

格點 (mesh) 的建構關係著結果的合理性與運算所需時間。由於所建構的氣化爐精簡化後為一長方形，故選用四邊形格點來建構最為適合。另外，格點的密度及分佈也很重要，格點越密所得之結果將會越精確，但所需的運算時間亦會更久！故，如何在精確性與運算時間之間取得平衡點是一個相當重要的課題。另外，若想要提高運算結果的精確度，在與邊界條件相鄰的地方之隔點越密越好。

基於上述之理由，先建立一組格點密度較稀疏之網格加以計算，求出結果。然後再逐步將有邊界條件處之格點加密，個別運算求出結果，再加以比較之，若相鄰兩格點數之結果極為相近，則表示不需再增加格點密度了。如圖六所示為所要計算之不同格點密度之格點圖。

先以下列邊界條件來計算在不同格點數下之結果來做比較，用以決定日後真正計算時使用的格點數為何。

TOP WALL : 絕熱 ($heat\ flux=0$)

SIDE WALL : 等溫 ($T=1700K$)

OUTLET : 等壓 (10 個大氣壓)

INLET : $COAL\ FLOW=0.02185\ kg/sec$, $AIRFLOW=0.025\ kg/sec$

所使用之煤之煤質分析如下：

近似分析 (proximate analysis, wt. %):

Moisture=5.35

Volatile Matter=32.99

Fixed Carbon=55.77

Ash=5.89

元素分析 (ultimate analysis, wt. %, dry ash free)

$$H=4.93$$

$$C=67.5$$

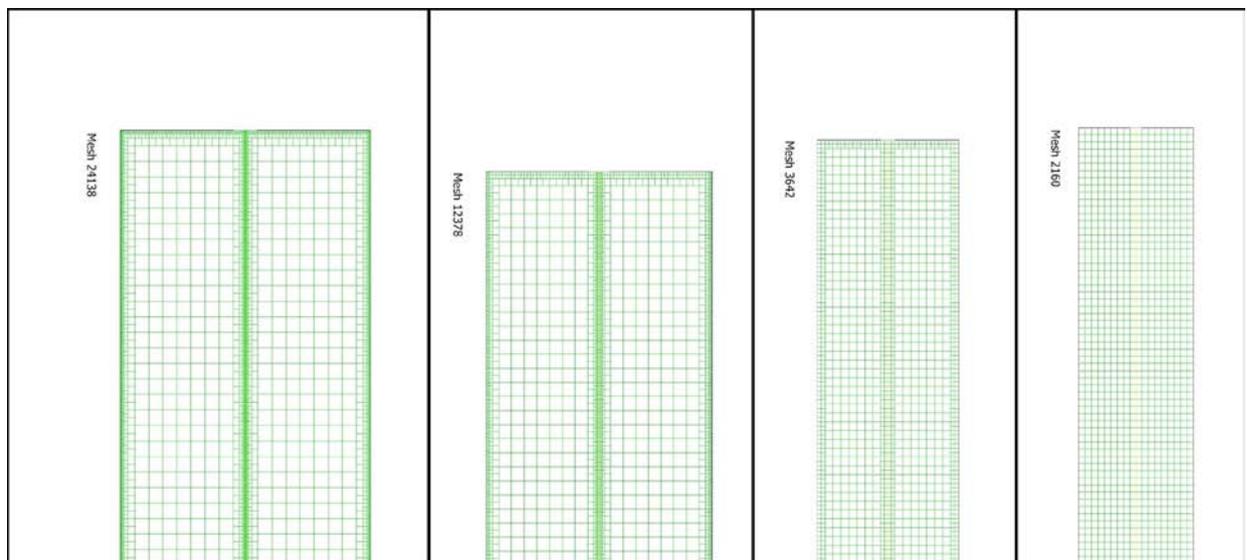
$$O=26.08$$

$$S=0.31$$

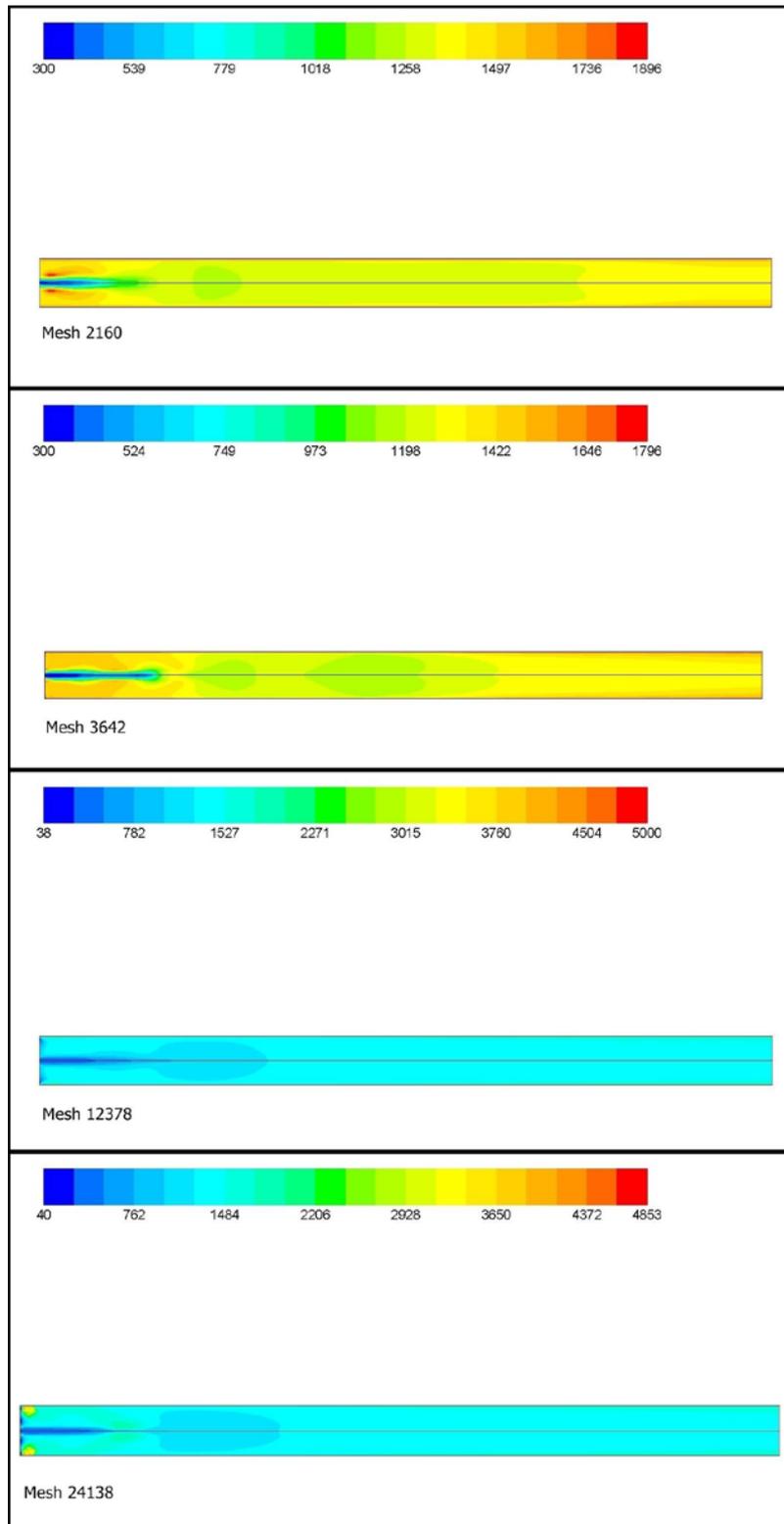
$$N=1.18$$

圖七所示，為在不同格點密度下，使用前述的邊界條件及煤質經計算後所得之結果（溫度分佈圖）。比較 mesh=12378 及 mesh=24138 兩者所得之結果，可以發現兩者之差異已經很小，但所需的計算時間 mesh=24138 是 mesh=12378 的三至四倍以上。因此，藉由此方法可以判斷出 mesh=12378 基本上已經符合精度上的要求。

除非有特別的需求與考量，一味的提高格點數是不智的，雖然精度會有所增加，但所增幅度有限，卻會多花費好幾倍以上的計算時間。



圖六、不同格點密度之格點圖



圖七、不同格點密度之格點圖經計算後之結果（溫度）

第十章、練習題(一)

以圖五所示的模型為基礎，將台中電廠使用之煤質代入分析。如表一及表二所示。所得結果如圖八所示。

試驗報告							
委託單位：台中發電廠(環化組)				報告編號：10F0366			
委託品名：中7機組粉煤機性能測試煤				受託編號：01100373			
委託編號：101-36				收件日期：101年10月11日			
委託地址：台中市龍井區龍昌路1號				報告日期：101年11月12日			
試驗項目	測試值				測試方法	TAF認可範圍	
	1	2	3	4			
氮 (%，乾基)	1.52	1.47	1.59	1.54	ASTM D5373-08	未經認可	
碳 (%，乾基)	72.83	74.46	74.78	74.90	ASTM D5373-08	未經認可	
氫 (%，乾基)	4.88	4.70	4.90	5.03	ASTM D5373-08	未經認可	
總硫分 (%，乾基)	0.67	0.66	1.05	0.41	ASTM D4239-11	0.11-4.69	
灰分 (%，乾基)	5.37	3.49	2.90	2.61	ASTM D5142-09	2.57-30	
氧 (%，乾基)	14.73	15.22	14.78	15.51	ASTM D3176-09	未經認可	
總熱值 (kcal/kg，風乾基)	5994	6081	6104	6171	ASTM D5865-11a	3000-10000	
灰分 (%，風乾基)	4.65	3.01	*2.49	*2.25	ASTM D7582-10	2.57-30	
內含水分 (%，風乾基)	13.33	13.73	14.21	13.86	ASTM D7582-10	0.5-30	
揮發分 (%，風乾基)	37.36	37.61	37.54	38.40	ASTM D7582-10	22.29-50	
固定碳 (%，風乾基)	44.66	45.65	45.76	45.49	ASTM D3172-07a	0-90	
總硫分 (%，風乾基)	0.58	0.57	0.90	0.35	ASTM D4239-11	0.11-4.69	
易磨性指數 (HGI)	43	45	44	48	ASTM D409-11	41-97	
總水分 (%，到達基)	17.51	17.20	17.32	16.50	ASTM D3302-10	2-50	
氣乾水分 (%，到達基)	4.82	4.02	3.62	3.07	ASTM D3302-10	2-50	
總熱值 (kcal/kg，到達基)	5705	5836	5883	5982	ASTM D5865-11a	3000-10000	
淨熱值 (kcal/kg，到達基)	5396	5536	5574	5670	ASTM D5865-11a	3000-10000	

表一、中七機粉煤機性能測試煤

試驗報告

委託單位：台中發電廠(環化組)

報告編號：10F0428

委託品名：中6機大修前效率試驗煤

受託編號：01120200

委託編號：101-43

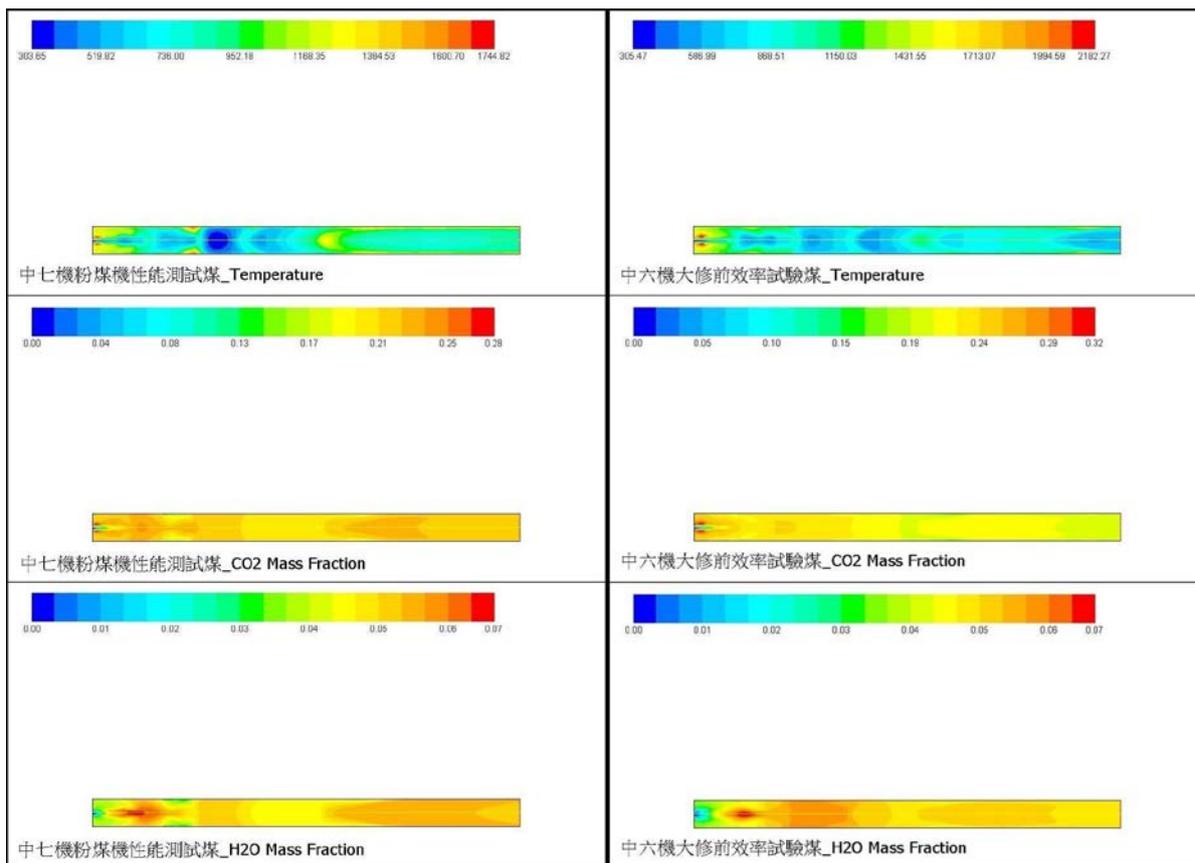
收件日期：101年12月10日

委託地址：台中市龍井區龍昌路1號

報告日期：101年12月24日

試驗項目	測試值	測試方法	TAF認可範圍
	#6大修前		
氮 (%，乾基)	1.43	ASTM D5373-08	未經認可
碳 (%，乾基)	72.87	ASTM D5373-08	未經認可
氫 (%，乾基)	4.65	ASTM D5373-08	未經認可
總硫分 (%，乾基)	0.52	ASTM D4239-11	0.11-4.69
灰分 (%，乾基)	6.07	ASTM D5142-09	2.57-30
氧 (%，乾基)	14.46	ASTM D3176-09	未經認可
總熱值 (kcal/kg，風乾基)	5650	ASTM D5865-11a	3000-10000
灰分 (%，風乾基)	5.05	ASTM D7582-10	2.57-30
內含水分 (%，風乾基)	16.76	ASTM D7582-10	0.5-30
揮發分 (%，風乾基)	36.04	ASTM D7582-10	22.29-50
固定碳 (%，風乾基)	42.15	ASTM D3172-07a	20-90
總硫分 (%，風乾基)	0.43	ASTM D4239-11	0.11-4.69
總氮含量 (%，風乾基)	0.006	ASTM D6721-01	未經認可
總水分 (%，到達基)	21.41	ASTM D3302-10	2-50
氣乾水分 (%，到達基)	5.59	ASTM D3302-10	2-50
總熱值 (kcal/kg，到達基)	5334	ASTM D5865-11a	3000-10000

表二、中六機大修前效率試驗煤



圖八、練習(一)所得之結果

表三、以圖五所示的模型所得之分析結果

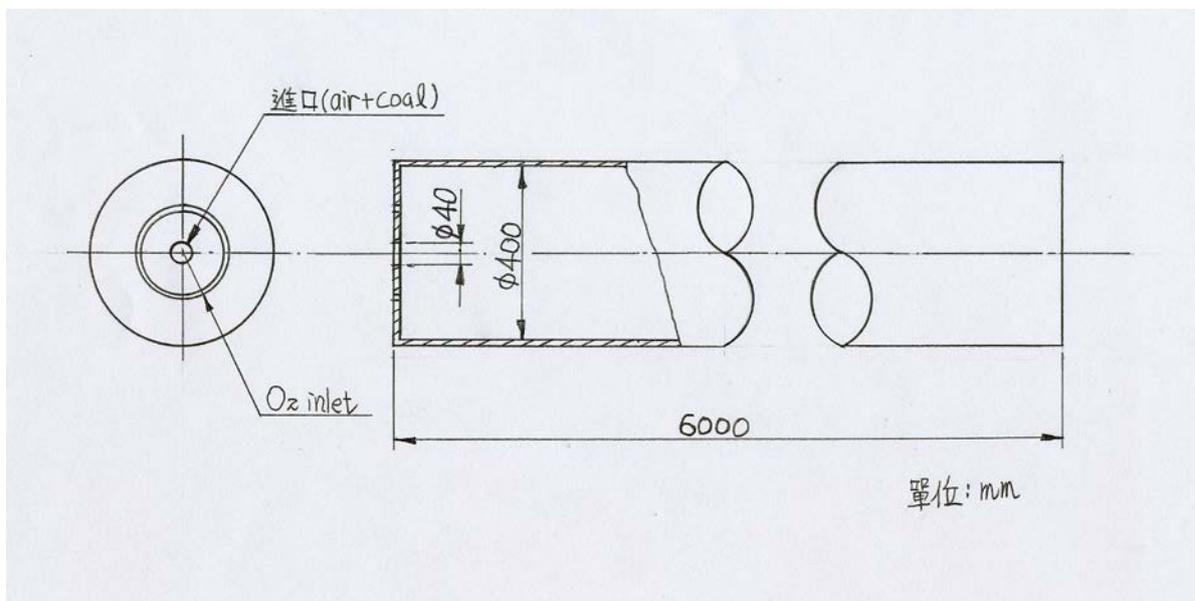
	最高溫度(K)	二氧化碳	水蒸氣	甲烷	氫氣	一氧化碳
中七機粉煤機性能測試煤	1744	0.2771293	0.06621527	0	0	0
中六機大修前效率試驗煤	2182	0.321373	0.06536192	0	0	0

經由分析計算所得之結果發現，此一模型(單一噴嘴)所得之溫度有偏高之現象，而且無法產生想要之合成氣(甲烷、氫氣及一氧化碳之混合物)，只產生大量二氧化碳和水蒸氣。

表示此一模型並不理想，單一噴嘴易使燃料和空氣混合後之噴入速度太快，燃燒太激烈，不利合成氣之產生。

第十一章、練習題(二)

為解決練習(一)中因單一噴嘴造成燃燒太激烈之問題，因此在噴嘴之外增加一氧氣注入環(孔)，如圖九所示。此一構型改變後，仍然使用相同的煤質加以計算，發現可以產生合成氣。

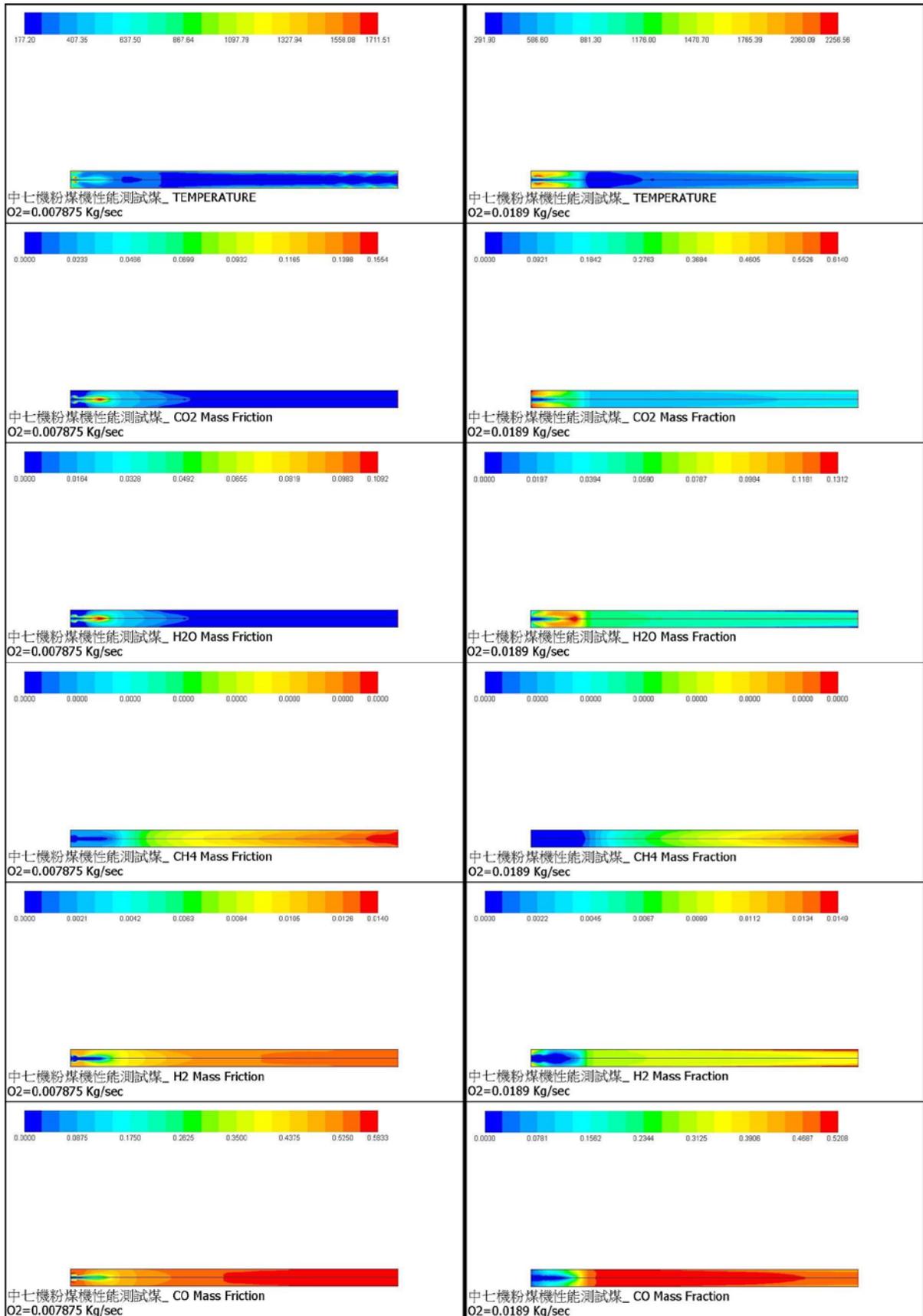


圖九、修正後的汽化爐型

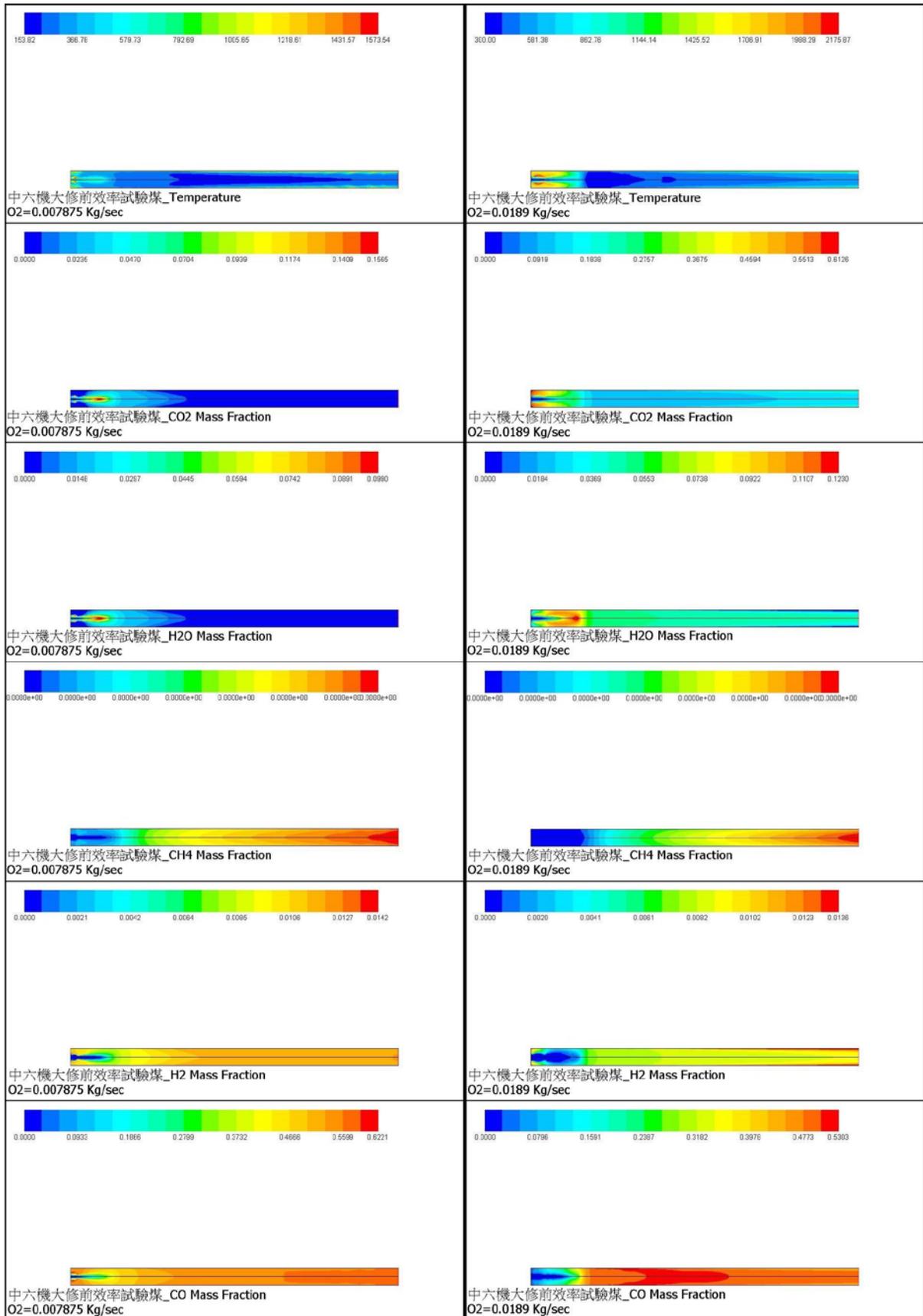
表四、中七機粉煤機性能測試煤變化注入氧量所得之結果

注入氧量(Kg/sec)	最高溫度(K)	二氧化碳	水蒸氣	甲烷	氫氣	一氧化碳
0.007875	1711	0.1553	0.1092	0	0.0139	0.5832
0.00945	1568	0.1753	0.1189	0	0.0133	0.6693
0.011025	1592	0.1975	0.1285	0	0.0135	0.6335
0.0126	1826	0.2767	0.1323	0	0.0142	0.6498
0.014175	2000	0.3822	0.1326	0	0.0149	0.6136
0.01575	2116	0.4691	0.1346	0	0.0151	0.6133
0.017325	2279	0.5698	0.1343	0	0.0156	0.5503
0.0189	2243	0.6139	0.1311	0	0.0149	0.5208

表四中所示為中七機粉煤機性能測試煤變化注入氧量所得之結果。可以很明顯的發現汽化爐內之最高溫度隨著注入氧量的增加而升高。而整體的合成氣(甲烷、氫氣及一氧化碳之混合物)產生量則與之相反。另外，此一構型之汽化爐之一氧化碳產生量最高，而甲烷之產量幾乎為零。



圖十、中七機粉煤機性能測試煤計算所得之結果



圖十一、中六機大修前效率試驗煤計算所得之結果

表五、中六機大修前效率試驗煤變化注入氧量所得之結果

注入氧量(Kg/sec)	最高溫度(K)	二氧化碳	水蒸氣	甲烷	氫氣	一氧化碳
0.007875	1573	0.1565	0.0989	0	0.01416	0.6221
0.00945	1521	0.1794	0.1068	0	0.01224	0.5998
0.011025	1500	0.1980	0.1154	0	0.01355	0.6241
0.0126	1751	0.2735	0.1213	0	0.01304	0.6191
0.014175	1868	0.3671	0.1235	0	0.01360	0.6160
0.01575	1981	0.4512	0.1230	0	0.01395	0.5837
0.017325	2162	0.5349	0.1204	0	0.01383	0.5585
0.0189	2175	0.6125	0.1229	0	0.01364	0.5303

表五中所示為中六機大修前效率試驗煤變化注入氧量所得之結果。可以很明顯的發現汽化爐內之最高溫度隨著注入氧量的增加而升高。而整體的合成氣(甲烷、氫氣及一氧化碳之混合物)產生量則與之相反。另外，此一構型之汽化爐之一氧化碳產生量最高，而甲烷之產量幾乎為零。此一結果與表四中之中七機粉煤機性能測試煤變化注入氧量所得之結果幾乎相同。上述結果如圖十、圖十一及圖十二所示。

若將所注入之氧氣換成蒸氣，其結果如圖十三所示。所得之氫氣及甲烷量將有所增加，而一氧化碳之產量則降低，而整體的合成氣(甲烷、氫氣及一氧化碳之混合物)產生量則是增加的。

此一練習中所使用之邊界條件如下：

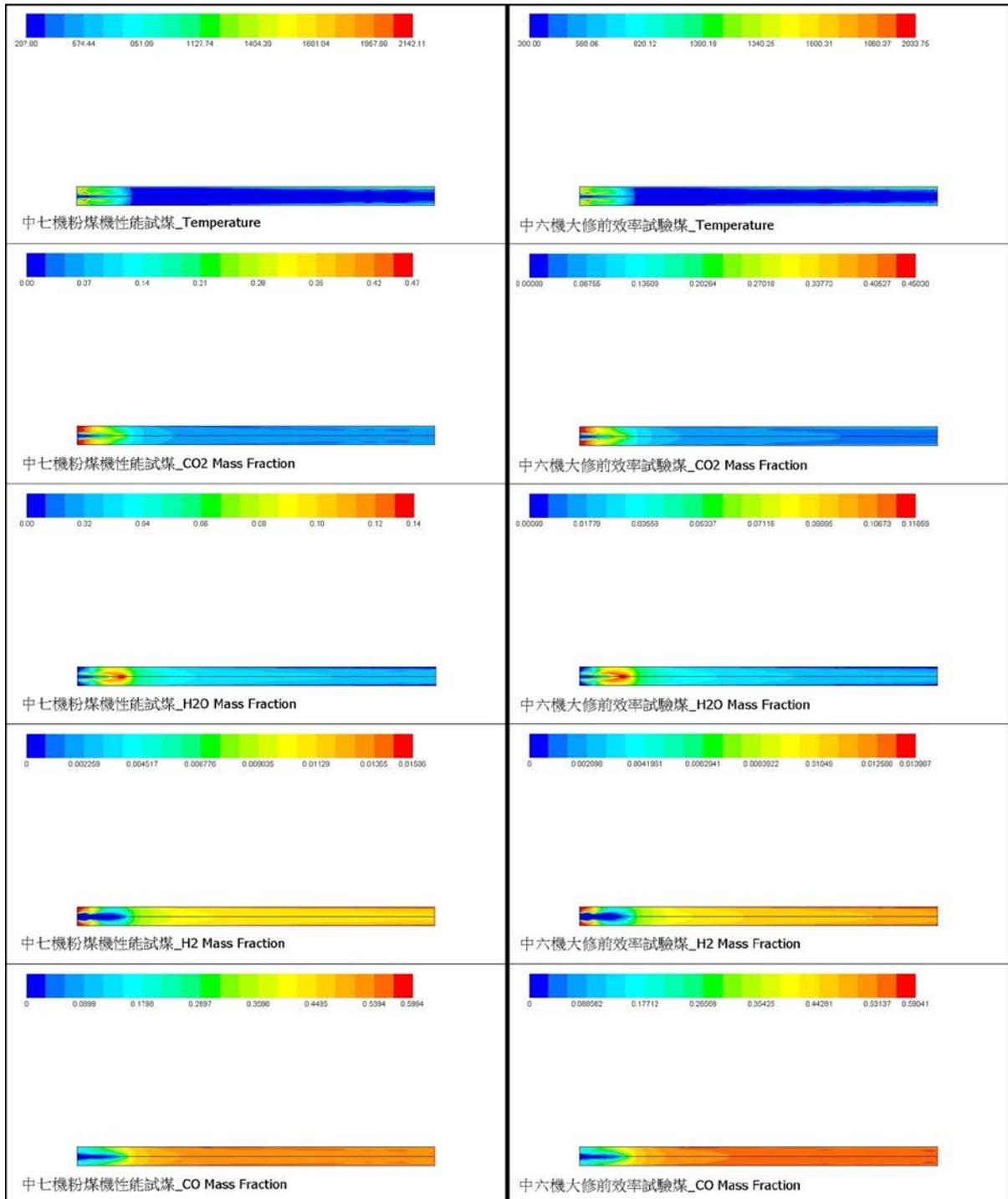
Inlet air : 0.025 Kg/sec

In O₂ : 如表五及表六中變化

Out wall : 1013250 Pa

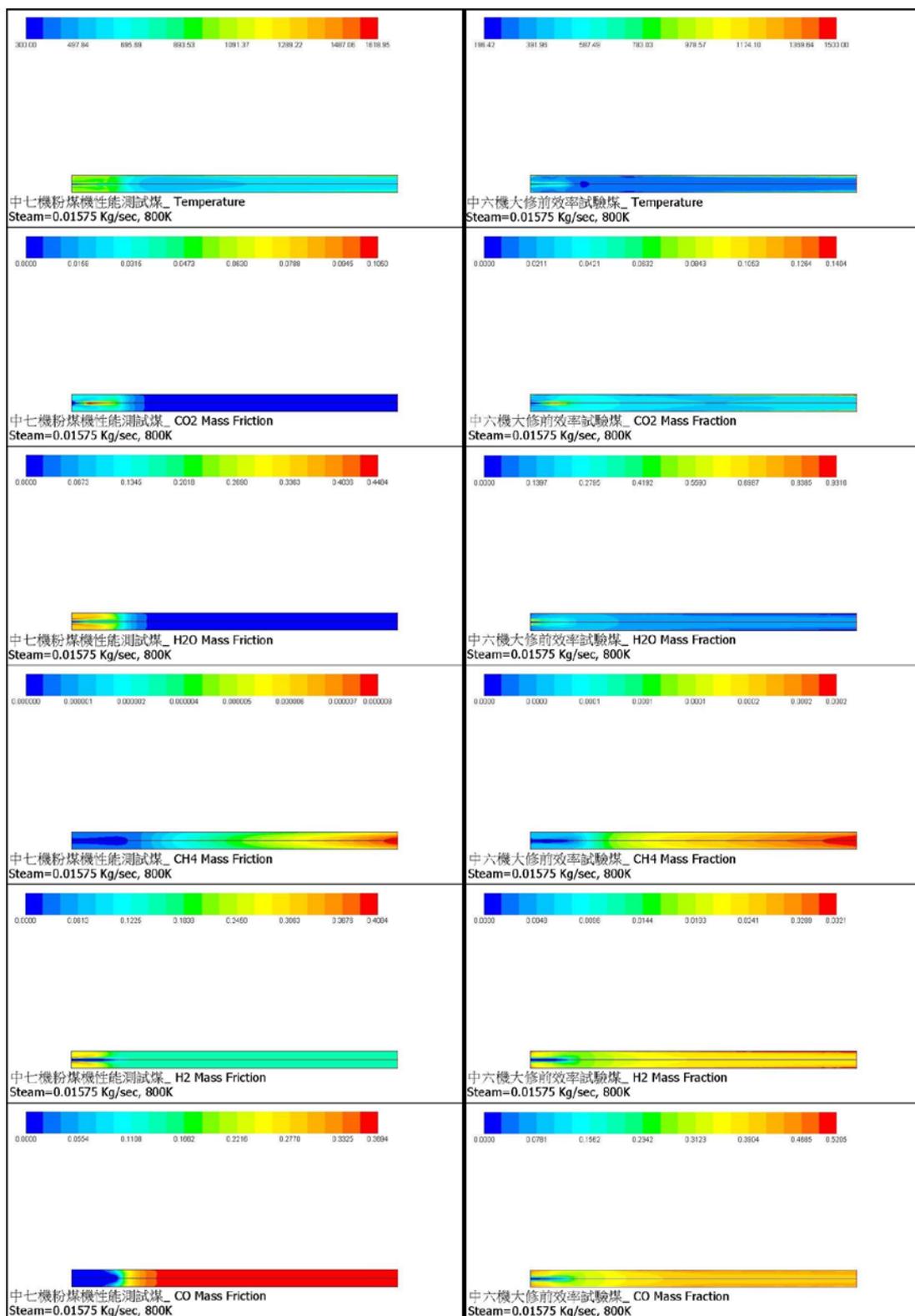
Side wall : 1500K

Coal flow : 0.023Kg/sec



圖十二、在相同情況下中七機粉煤機性能測試煤與中六機大修前效率試驗煤之計算結果比較

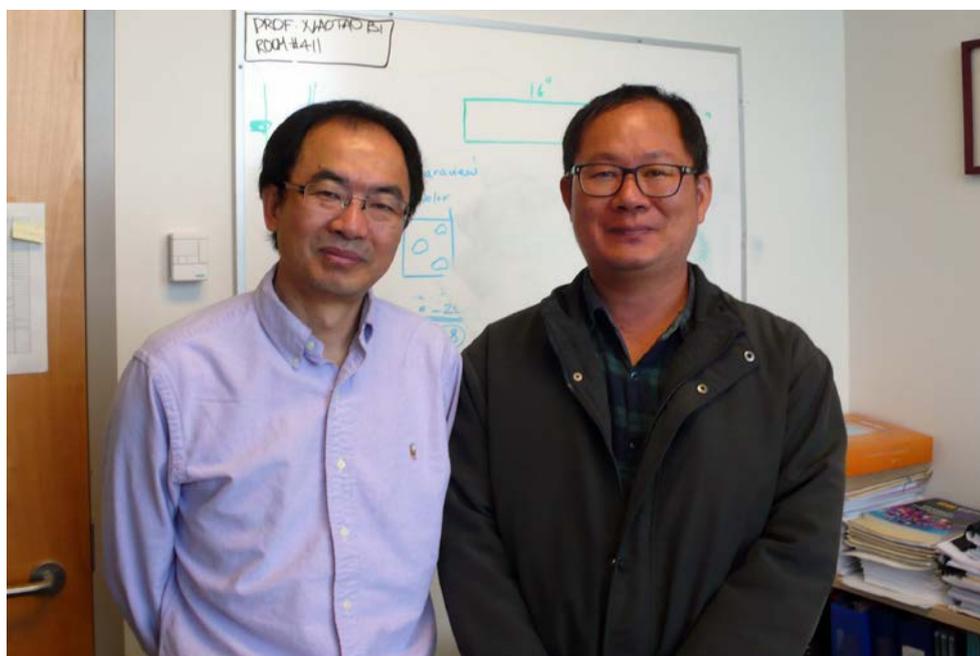
圖十三、中七機粉煤機性能測試煤與中六機大修前效率試驗煤注入蒸氣後的結果比較



第十二章、過程與心得

此次出國實習的機構是加拿大英屬哥倫比亞大學的化學與生質材料工程學系(Department of Chemical & Biological Engineering)。加拿大英屬哥倫比亞大學(University of British Columbia, 簡稱 UBC), 是一所公立大學, 主要校區位於溫哥華市區, 是加拿大知名的高等教育機構之一, 在國際上也享有盛譽。依據英國《泰晤士專上教育增刊》2012 年排名: 加拿大第 2 名、世界第 30 名。此學校除了在學術上表現優異外, 校園更是美麗, 到處都是綠草與參天的樹木, 其校園本身就是一個景點。

此次的實習是拜訪 Professor Xiaotao Bi 及其所領導的氣化研究小組, 經由他們的指導實際的操作與設定程式, 循序漸進的完成此次的實習主題「煤炭與生質材料共同氣化之模擬」。經實際的操作之後, 驗證了使用工程分析軟體是可以達成氣化模擬之功能的: 不論是單純使用煤炭或生質材料或其兩者共同氣化皆能順利模擬其穩態(steady state)下的狀況。



照片一、與 Professor Xiaotao Bi 合影於研究室



照片二、拍攝於化學與生質材料工程學系正門口

此種計算流體力學的模擬和一般所認知的電廠機組模擬器有著截然不同的功能。電廠機組模擬器是一種操作上的模擬，有著固定的操作盤面，所有參數皆於建造時設定完成，用於訓練值班人員實際的操作流程與緊急操作步驟。而此種計算流體力學的模擬則是一種數學分析工具，沒有專設的操作盤面，分析前需將所要分析的條件參數全部設定完成後再啟動計算功能讓程式計算，直到回歸分析出所要的答案為止。然而，所有的設定都有其數學與物理學上的意義，想要正確的決定出適合的參數要有相當的學術基礎，因此，一般而言都是攻讀博士學位的研究生才能使用到得心應手。此種模擬方法可以用於探討氣化爐的幾何構型最佳化、各種不同成分燃料最佳氣化條件研究等領域上。

另外，基於學術倫理與尊重智慧財產權的觀念，許多的計算結果與參數設定並未在此報告中公開，對於有興趣的同仁可以和本人聯絡。

加拿大本身天然資源豐富，特別是森林資源。因此，第二代生質能源

最關鍵的氣化爐研究及生物質培燒一直是其發展的重點。相對於台灣，目前還沒有真正引進第二代生質能源相關應用技術於實際生產生質燃料或應用於發電系統。然而，未來對於日益嚴格的環保要求及減少碳排放的壓力下，發展第二代生質能源技術是無可避免的選擇，對於台電公司而言，即是引進氣化複循環發電（integrated gasification combined cycle, IGCC）技術。複循環發電機組之運轉及維護台電公司已經很有經驗，現在只差氣化爐的部分，因此對於這部分的人才培育及技術取得公司應及早規劃。發展第二代生質能源技術除了可以實際上減少碳排放之外，亦是讓外界人士了解台電公司對於能源多元化、環保及綠色能源等議題上是十分用心且主動積極的，對公司形象應有正面的助益。

102年6月17日	往程		
102年6月18日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	模型及格點建立 Model and mesh establish.
102年6月19日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	範例練習題實作 Tutorial Guide- Tutorial 14
102年6月20日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	幾何模型與假設(練習一) Modeling and Assumptions(ex. 1)
102年6月21日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	參加氣化小組例行研討會議 Participate the meeting of gasification
102年6月22日	假日		
102年6月23日	假日		
102年6月24日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	邊界條件及物理模型制定及討論 Boundary conditions and physics model establish and discussion.

102年6月25日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	程式設定 Program setup. 最佳格點選擇 Optimal meshing discussion
102年6月26日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	模擬計算-練習一 Calculation-ex1.
102年6月27日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	模擬計算-練習一 Calculation-ex1.
102年6月28日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	參加氣化小組例行研討會議 Participate the meeting of gasification
102年6月29日	假日		
102年6月30日	假日		
102年7月1日	加拿大國慶日 (加拿大國定假日) Canada Day		練習一之結果分析 Ex1. solution analysis
102年7月2日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	模擬計算-練習二 Calculation-ex2.
102年7月3日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	模擬計算-練習二及結果分析 Calculation-ex2. and solution analysis
102年7月4日	THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA 加拿大英屬哥倫比亞大學	DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING, 化學與生質材料工程學系 Professor Xiaotao Bi	模擬計算-生質材料及結果分析 Calculation-biomass and solution analysis
102年7月5/6日	返程		

第十三章、致謝

此次的出國實習計畫，感謝前任陸廠長的推薦與經濟部評審們的支持才能獲選，亦感謝現任鄭廠長及廠裡許多長官及同仁的支持才能順利成行。同時，感謝國立成功大學洪振益教授及國立台南大學陳維新教授提供許許多多的協助與支持。到了加拿大則感謝 Professor Xiaotao Bi 及其氣化小組的指導與協助才能讓此次實習計畫順利執行。謝謝所有曾經對此計畫提供協助的所有人們。

參考資料:

1. 2007 年能源科技研究發展白皮書，第三篇 我國重點能源科技研發動向及策略 第二節 氣化技術 pp342-358
2. 生質能暨生質燃料技術，作者：明道大學 施敏惠
3. ANSYS FLUENT-GETTING START GUIDE，Chapter 2
4. ANSYS FLUENT-TUTORIAL GUIDE，Tutorial 14 Modeling Species Transport and Gaseous Combustion
5. 煤炭氣化發電之能源優勢，工業技術研究院 能源與資源研究所，潔淨能源組 燃料應用研究室，作者：徐恆文
6. STEAM 41, Chapter 18. Coal Gasification
7. 以草煉油，科學人，2009年6月號，作者：George W. Huber、Bruce E. Dale，翻譯：甘錫安，pp 36-43
8. 我國推動生質燃料之政策方向與國際趨勢研析，石油市場雙周報，2007年8月號，作者：國立成功大學資源工程學系 黃韻勳、吳榮華
9. 兼顧糧食供應與環境保護之生質燃料發展，石油市場雙周報，2008年5月號，作者：台灣綜合研究院研究二所所長 許振邦
10. 氣化技術發展，能源資訊網 <http://emis.erl.itri.org.tw>
11. 生質物經前處理後與煤炭共同氣化現象之數值模擬，作者：國立成功大學機械工程學系 洪振益、陳致融、許偉澤、廖振業、鄭允銓
12. 生質燃料發展之省思，作者：工研院 IEK IT IS 計畫分析師 謝志強