

出國報告（出國類別：其他）

## 赴美加機構參訪生質能熱化學轉化技術與洽談國際能源科技合作

服務機關：核能研究所

姓名職稱：李灝銘 副工程師

派赴國家：美加

出國期間：102年12月4日~102年12月17日

報告日期：103年1月13日



## 摘要

本行至美、加兩國知名的生質物熱化學轉化技術之學術單位與公司，參訪三所大學 University of British Columbia、IOWA State University 及 University of California, Davis 及一間公司 West Biofuels LLC，上述機構均表達技術合作與人員交流的願意，但雙方之權利義務等細節，須進一步洽談。在國際研發趨勢上，目前生質物氣化技術的主流為流體化床，裂解技術則有流體化床及螺旋床兩種，技術可行性都已獲確定，但如何高效率且穩定運轉仍存在相當技術門檻，國外在這些方面的發展期程與經驗遠多於我國，與國際接軌並汲取實務經驗，可縮短我國生質能熱化學轉化技術之發展與產業化期程。生質物的原料與集運成本佔熱化學轉化技術的比重相當高，美國規劃以移動式或區域式的生質能濃縮裝置（如裂解或焙燒）來降低此費用；台灣農業殘餘物分散，可考慮以此模式來降低農業殘餘物的集運成本，以利我國生質再生能源之推動。就生質能熱化學轉化技術而言，結合裂解與氣化兩技術是可行的選項，生質物在現地或區域中心先裂解，裂解油再快速運至氣化中心，氣化後供熱、電、化學品等多聯產利用，如此可降低生質物集運費用，也可避免裂解油不穩定的問題。

# 目 錄

摘要.....	i
一、 目的.....	1
二、 過程.....	1
三、 心得.....	3
四、 建議事項.....	15

## 一、 目的

此行之主要目的，乃至美、加兩國知名的生質物熱化學轉化技術之學術單位與公司，瞭解他們的研發情況並洽談國際合作之可能性，拜訪單位包括三所大學 University of British Columbia (UBC)、IOWA State University (ISU)及 University of California, Davis (UCD)及一間公司 West Biofuels LLC，建立國際科技交流人脈管道，為未來之技術諮詢、國際合作、技術引進扎下根基，加速我國生質能科技之發展。

## 二、 過程

本次行程 12 月 4~17 日共 14 天，過程中在 12 月 8 日遇到美國暴風雪，導致當天班機數次延遲並取消，原訂 IOWA State University 行程被迫縮短一天，其餘行程如原訂計畫執行，詳如表 1 及圖 1 所示。

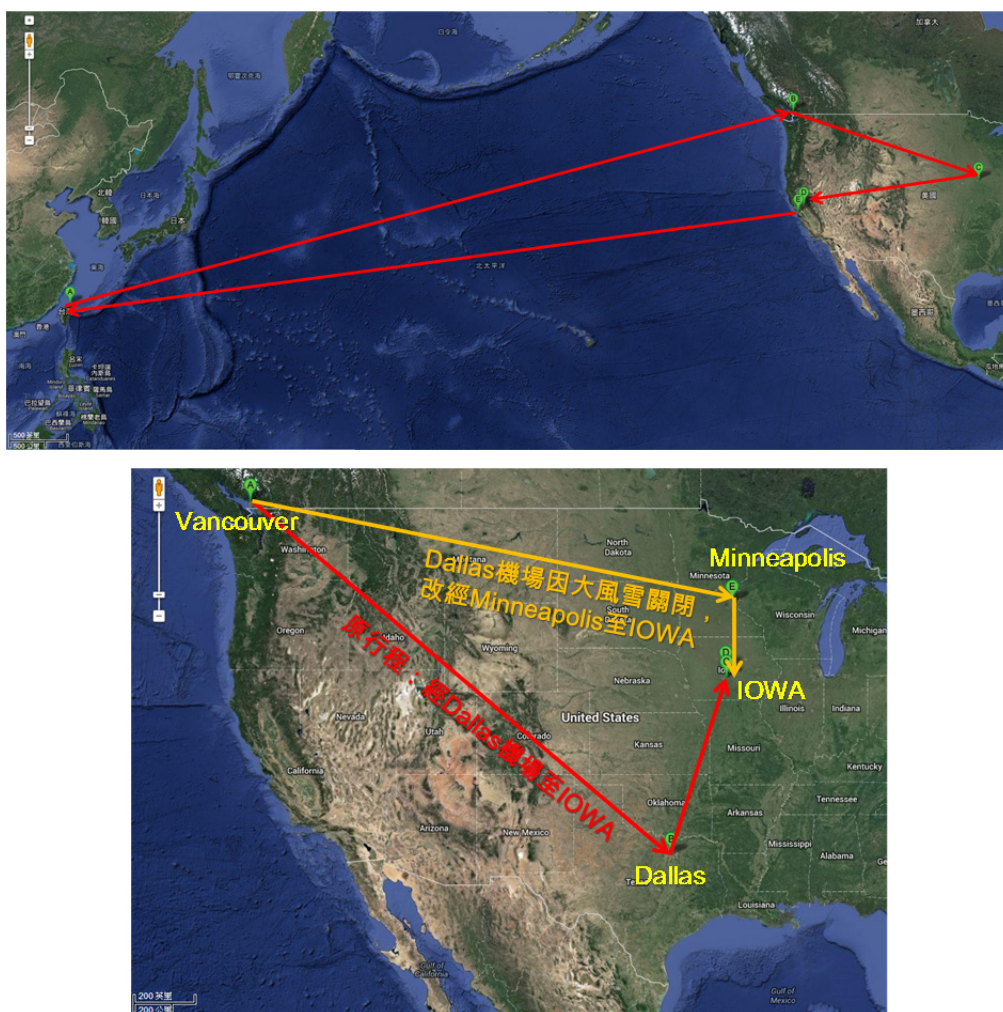


圖 1：公差地點示意

表 1：行程說明

日期	原訂行程	新行程
12/04 (三)	飛機去程(桃園—溫哥華)	
12/05 (四)	UBC 參訪開會	
12/06 (五)	UBC 參訪開會	
12/07 (六)	資料整理	
12/08 (日)	飛機 (溫哥華—達拉斯—Des Moines)	飛機(溫哥華— Minneapolis—Des Moines) <b>第一次班機取消</b> ：遇美國大雪風暴，導致轉機點達拉斯，取消當天的大半飛機。在溫哥華機場改航班，由 American Airlines 改成 Delta Airlines，轉機點改成 Minneapolis。 <b>第二次班機取消</b> ：原訂 15:25 由 Minneapolis 機場起飛的班機 (DL5041)，連 5 次宣告延後，在晚上 20:45 附近宣布班機因機械故障取消。Delta Airlines 重新劃位被排在隔天晚上 21:00。當晚被迫夜宿 Minneapolis 機場附近的旅館。
12/09 (一)	車程 ISU 參訪開會	飛機(Minneapolis—Des Moines) 車程(Des Moines—Ames)
12/10 (二)	ISU 參訪開會	
12/11 (三)	車程 飛機(Des Moines—達拉斯—沙加緬度)	ISU 參訪開會 車程(Ames—Des Moines)、飛機 (Des Moines—達拉斯—沙加緬度)
12/12 (四)	West Biofuels LLC 參訪開會	
12/13 (五)	West Biofuels LLC 參訪開會	
12/14 (六)	車程、資料整理	
12/15 (日)	University of California, Davis 參訪、飛機	
12/16~17 (一/二)	飛機回程(沙加緬度—舊金山—桃園)	

### 三、心得

#### (一) The University of British Columbia (UBC)

UBC 世界大學排名 30 幾，為加拿大第二名的高等研究學府。本次主要接洽對象為 Department of Chemical and Biological Engineering 的 Prof. Xiaotao Bi（畢曉濤）。Prof. Bi 大陸清華大學畢業，在 UBC 取得博士學位，畢業幾年後回系擔任教職至今。師承 Prof. John Grace，Prof. Grace 為流體化床界的國際知名學者，榮聘加拿大研究講座。

此行獲邀在系上進行一場演講，講題為 Plasma-assisted Gasification for Electricity Generation and Biofuels Production，共有教授、研究員、博士後及博碩士等約 30 人參加。會後討論熱烈，特別是在電漿效益與經濟性；另外由於 UBC 與核研所一樣都建有中型的氣化模場，多人詢問系統設計與實務操作的問題，台上下互動熱烈。

在 UBC 參觀 High Head Lab 及 Pulp & Paper Centre。High Head Lab 照字面翻譯是高頭實驗室，所謂「高頭」是指要抬高頭才看的到天花板的意思，實驗室挑高約三層樓，適合架設模場規模設備。裡面設備很多（如 reformer、biomass pyrolysis reactor、Syngas to Fuels、de-NO<sub>x</sub> reactor、Bio-pellet testing chamber、及 Chemical looping system 等），提供學校內老師與研究生共用，主要設備中較大的兩個設施為 Chemical looping system 與 Bio-pellet testing chamber。

Chemical looping system 由空氣與燃料兩個反應器串接而成，照片如圖 2 正中央所示，空氣反應器為快速流體化床（高 6 m、內徑 0.04 m、SS309 最高耐溫 970°C），燃料反應器為氣泡式流體化床（高 2 m、內徑 0.13 m、SS316 最高耐溫 870°C），迴路介質視應用而異，CO<sub>2</sub> 捕獲應用時採用 CaCO<sub>3</sub>/CaO，燃燒應用時採用 NiO/O<sub>2</sub>，氣化應用時採用橄欖石或砂/熱，整合氣化與 CO<sub>2</sub> 捕獲應用時採用天然吸附材如 CaCO<sub>3</sub>/CaO+熱。

Bio-pellet testing chamber 是為了瞭解與解決 woody 或農業殘餘物之 pellets，在儲存與運送長時間下，可能產生的有害廢氣問題。過去十年，歐洲的 biomass pellets 是淨輸出，但隨著歐盟戮力推動再生能源的驅動下，歐盟自己不敷使用，近年開始由加拿大與美國等國家進口。由於船運時間冗長，曾發生船員疑似吸入



貨倉空氣導致身體不適的案例，因此建造 Bio-pellet testing chamber 測試各種 pellets 在各式環境條件下的微量氣體釋放行為，相關研究持續進行中。



圖 2：UBC 大學的 High Head 實驗室

在 Pulp & Paper Centre 內，UBC 正在興建一座新的雙床式流體化氣化系統（如圖 3）。雙床式流體化床的原理，一床進行燃燒反應、一床進行氣化反應，燃燒床的燃料來自氣化床的未燃碳；氣化床所需的熱，由在燃燒床被加熱的熱傳介質供應，熱傳介質如細砂在兩床間交交流動，達到系統單一燃料、自給自足之目的。優點是碳利用率高與熱效率高，缺點是系統與自動控制較複雜。



圖 3：UBC 大學 Pulp & Paper Centre 的雙床氣化系統



此外，UBC 剛於 2012 年 9 月興建完成一座生質物氣電共生示範系統（參見圖 4），投資金額 3 千萬美金（約相當 9 億新台幣），生質物處理量 50 t/d，預計產出 2 MWe 電力與 3 MWt 熱，目的是降低 UBC 的碳足跡，並作為校內生質物氣化相關研究之研發平台，由加拿大溫哥華當地公司 Nexterra Systems Corporation 承做。Nexterra 公司的氣化爐屬於最成熟的上流式固定床氣化爐，從技術角度而言，研發價值不高；但從實務面而言，卻是個很好的平台，透過長期操作與經驗累積，掌握與瞭解生質物氣化技術的操作 Q&A，並有機會讓技術與效率提昇。此研發投資模式，可謂產官學研均贏，產業得以獲利與技術提昇，官方可以發展與推廣再生能源，學研界可以訓練出專業人才並且讓研發與實務結合，值得我國學習。

根據 Nexterra 公司網站(<http://www.nexterra.ca>)宣稱，他們的氣化技術已擁有超過 15 萬小時以上的商轉紀錄，正常運轉時間>90%，可提供 2~40 MWt 熱規模的氣化爐，或 2~12 MWe 的電力規模。Nexterra 公司也宣稱，在美國及加拿大已有 7 個商轉計畫，並已成功銷售 1 個計畫給英國。

### UBC Living Laboratory – Bio Refinery

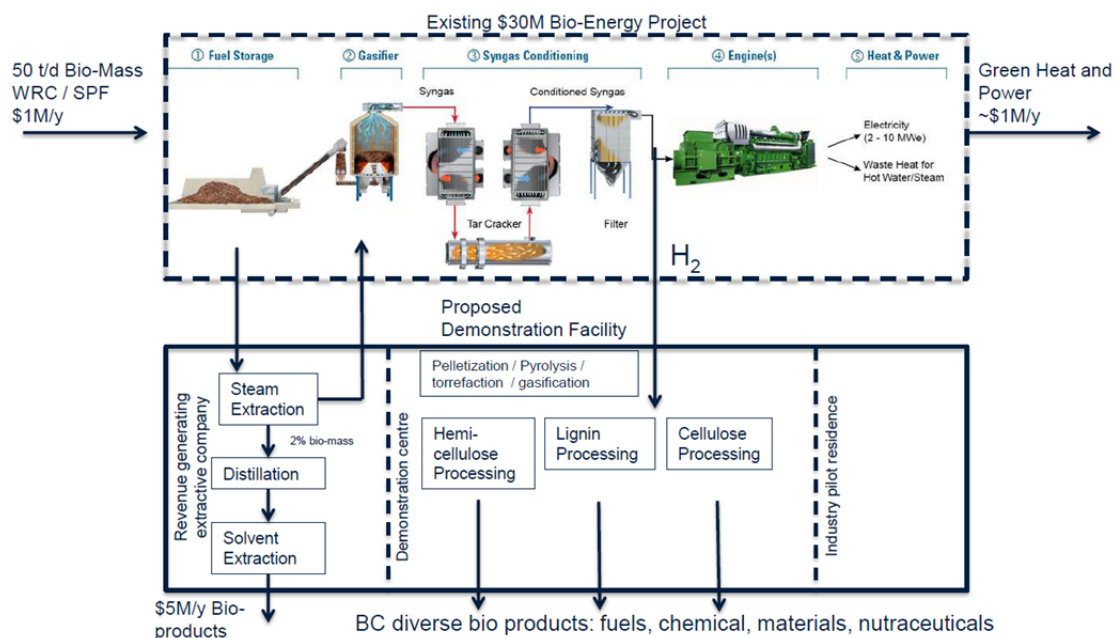


圖 4：UBC 於校內興建中的 50 t/d 生質物氣電共生示範系統

## (二) IOWA State University (ISU)

IOWA 州為美國農業重鎮，該州之第一代生質酒精產量佔了美國 2/3 以上，州政府非常重視生質能之發展，投入大量研發資金；最近 5 年 ISU 在生質能研發上獲得 8 千萬美金(約 24 億台幣)的研究資金補助，成立了生物經濟中心(BEI, Bio-Economy Institute)，組織架構如圖 5 所示，整合全校資源進行生質能研發，ISU 宣稱累積有 50 年以上的生質物熱化學轉化研發經驗。本次主要接洽對象為 ISU 大學 Department of Mechanical Engineering 的 Prof. Song-Chang Kong (龔長青)，Prof. Kong 為台灣人，在美國取得博士並留在美國擔任教職至今，負責 ISU 生質能計畫之 CFD 技術、生質物流體化氣化技術、生質物快速裂解技術、生質能源工程經濟分析等。

ISU 大學綜合全校研發能量與資源，成立生物經濟研究所(Bio-Economy Institute, BEI)，轄下有生物世紀研究農場(Bio-Century Research Farm, BCRF)與生物再生研究實驗室(Bio-Renewable Research Lab, BRRL)等兩個單位。

BRRL 位於一棟全新的建築物，房舍與設備新穎，裡面有許多實驗室規模的生質物熱化學轉化技術之設備，例如：流體化床反應器、螺旋反應器(auger reactor)、自由落體反應器(free-fall reactor)、氣化爐等，供研究生進行基礎科學研究之用。

BCRF 擁有大面積農地與廠房，如圖 6 所示，從農作物植種、收割、集運、現地處理、農業殘餘物破碎/打包、貯存、解包、再破碎等農業活動，到氣化、裂解、纖維酒精製造等 pilot-scale 模廠測試，進行生質物熱化學轉化的完整開發工作。

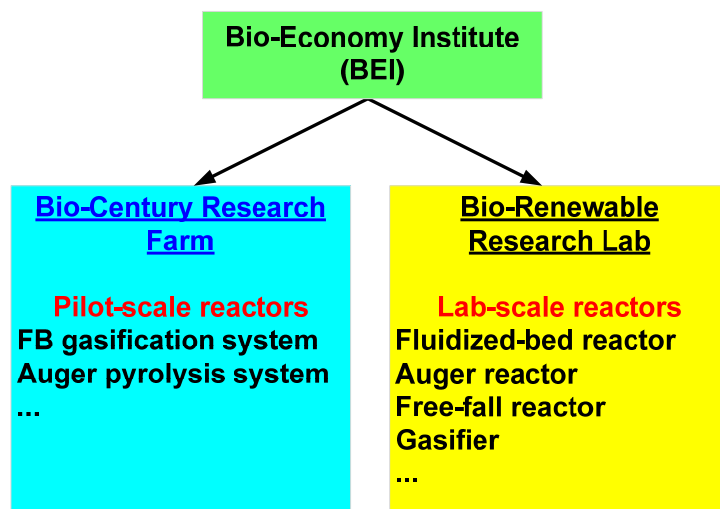


圖 5：ISU 校內的生質能研發組織架構

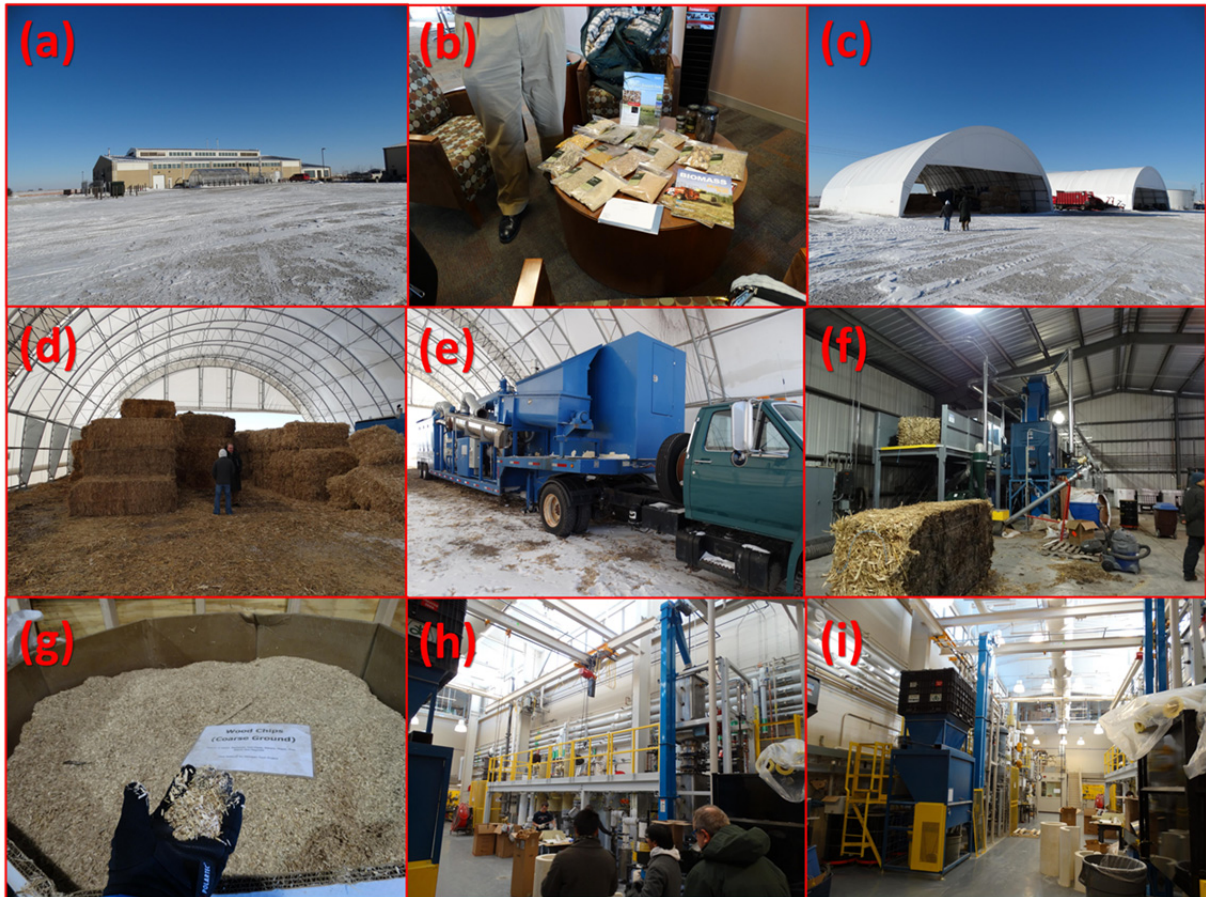


圖 6：ISU 的生物經濟研究所(BCRF)

(a) BCRF 主建築、(b)生質物樣品、(c)戶外農業殘餘物貯存場、  
 (d)貯存場內照片、(e)移動式農業殘餘物破碎車、(f)固定式農業殘餘物破碎裝置、  
 (g)農業殘餘物破碎料、(h)螺旋快速裂解模場、(i)流體化床氣化模場。

圖 7 為 ISU 的生質物流體化床模場，全系統都可遠端進行圖面監控。在氧氣與蒸汽的氣化模式下操作時，生質物處理速率可達 20 kg/h，後端串接一系列的冷凝裝置與靜電集塵器，用以收集並分析焦油組成。在裂解模式下操作，可收集不同階段的裂解油，提供進一步生物油精煉之用。

圖 8 為流體化床裂解實驗系統與螺旋快速裂解實驗系統。Prof. Kong 認為氣化已是成熟技術，因此 ISU 目前的研發重心擺在生質物裂解技術，雖然目前裂解油的品質仍不佳，卻是值得研發也可以切入的點。ISU 擁有流體化床與螺旋床兩套生質物裂解系統，Prof. Kong 認為螺旋床裂解系統較好，因為其熱媒介質為固體，所需的惰性攜流氣體較流體化床裂解系統少非常多，有利後端的裂解油收集及裂解氣體的淨化處理。目前 ISU 已針對螺旋快速裂解技術進行放大，正在



興建一套 pilot-scale 系統，如圖 6g 所示。本次回國也攜回 ISU 螺旋快速裂解實驗所用的生質物與熱媒介質，如圖 9，生質物為長度 0.75~1.0 mm 的紅橡木(red oak)木屑；熱媒介質為圖中黑色小圓點，為工業產品，直徑 0.7 或 1.0 mm 的小鋼丸。



圖 7：ISU 的 20 kg/h 生質物流體化床氣化模場與監控系統



圖 8：ISU 的流體化床裂解實驗系統(左)與螺旋快速裂解實驗系統(右)

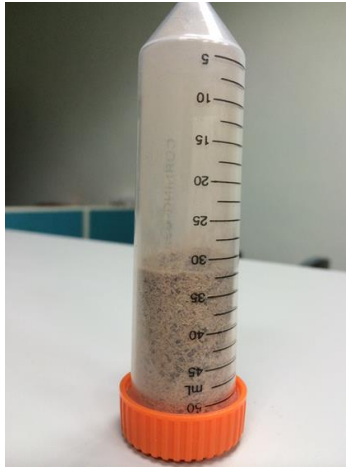


圖 9：ISU 螺旋快速裂解實驗時用的生質物與熱煤介質

圖 10 為 ISU 的裂解油氣化系統與自由落體熱模系統。自由落體熱模系統用以瞭解生質物或裂解油在反應過程中的即時反應，有助瞭解暫態反應過程中的物理與化學行為，屬於基礎研究之設備。

裂解油氣化系統，是以裂解油為原料進行氣化，原意在降低生質物或農業殘餘物的集運成本。根據美國評估，生質物的原料與集運成本約佔熱化學轉化技術的 40%~60%，降低集運成本至為重要；規劃以移動式或區域式的生質能濃縮裝置來達此目的，如焙燒或快速裂解。因此，ISU 除了研發固態進料的生質物氣化技術外，目前正積極發展裂解油氣化技術。



圖 10：ISU 的裂解油氣化系統(左)與自由落體熱模系統(右)



### (三) University of California, Davis (UCD)

UC-Davis 的前身為 UC-Bakery 的農學院，美國加州政府基於發展加州豐富的農業資源，因而特別將其獨立成為農業專業學校。根據 2013~2014 年世界大學科系排名(QS World University Rankings by Subject)，UCD 在農業與園林領域 (Agriculture & Forestry) 排名全球第 1 名。本次接洽對象為 Department of Biological and Agricultural Engineering 的 Prof. Bryan Jenkins，目前為該校之特聘教授，並為該校的能源研究所所長。Prof. Jenkins 在生質能研發上的傑出成果，曾獲得美國能源部的 Outstanding Achievement Award 及歐盟的 Linneborn Prize。我獲邀在系上 Seminar 進行演講，講題為 Plasma-assisted Gasification for Electricity Generation and Biofuels Production，當天與會的該系教授們、博士後研究員及博士生等近 20 人，會後討論熱烈。

圖 11 為 UCD 的生質物流體化床實驗裝置。UCD 校方對工安要求極為嚴苛，陸續被要求加裝許多防爆及尾氣處理裝置，導致此系統的測試與開發被延後。目前的測試重點在於流體化介質種類的影響，另外焦油淨化技術也有著墨。焦油淨化技術採用濕式洗滌法，吸收劑採用生質柴油，焦油濃度可降低 2~3 個數量級，合成氣經淨化後可直接導入鍋爐產生熱水或壓力蒸氣，或直接導入改裝內燃發電機進行發電。



圖 11：UCD 的生質物流體化床實驗裝置

生質物的熱化學轉化技術中，氣化途徑是公認較成熟的技術，產製出的油品也較佳。傳統的固定床式生質物氣化爐，技術上非常成熟，但合成氣品質不佳且熱值較低，較不適合應用於燃料或化學品之合成，但可用於熱利用、發電或氣電共生(Combined Heat & Power, CHP)。對燃料或化學品合成而言，進步型的生質物氣化爐，如雙床式流體化、攜流式、電漿輔助氣化等，具有合成氣  $H_2/CO$  比較高、焦油較少、碳利用率較高等優勢，但技術仍尚未成熟、且技術掌握在國外少數大廠手中，壓抑了生質物氣化技術的產業化進程。隨著氣化技術的研發進展與應用實例的增加，未來氣化技術的固定成本可望降低。

裂解途徑是現階段技術中，油品質量轉化率較高且製程控制較容易，但缺點包括：油品熱值偏低、酸性高、含水率高、含硫及含氮量高、金屬與灰份含量高、品質不穩定會變質等缺點，不易在先進國家直接使用。目前的研發方向，朝向進一步加氫處理，或作為氣化之進料。生質裂解油加氫處理雖可將油品升級，轉製成汽油、柴油、航空油等高級油品。但裂解油加氫處理，不僅增加了成本，同時降低了整體質量轉化率，抵消了裂解技術之高質量轉化率與低生產成本的優勢，技術之後續發展有待觀察。

#### (四) West Biofuels LLC

West Biofuels LLC 位於加州 Woodland，成立於 2007 年，為私人投資公司，該公司與奧地利的維也納大學 Dr. Reinhard Rauch 團隊技術合作，致力發展雙床式流體化氣化技術，公司願景為將此技術成熟化並產業化。

本次接洽對象為 Dr. Matthew Summers 與 Dr. Chang-Hsien Liao (廖昌賢)。Dr. Summers 為公司執行長(CEO)。Dr. Liao 台灣出生，在美國取得博士學位後留在美國工作至今，為公司的主要技術開發人員，專長包括機械工程、自動控制、Aspen Plus 程序模擬、循環式流體化床技術等。

West Biofuels LLC 的雙床式流體化氣化示範系統，目前已進入第二階段的放大工程，設計生質物處理量提升至 5 ton/d 等級，相當於  $MW_{th}$  規模。筆者參訪時，全系統只差進料系統及監控系統尚未完成，該公司希望下個月能完工並開始試車，如圖 12 及圖 13 所示。圖 14 為工廠外觀照片，為 3 個廠房的結合體，雙床式流體化氣化示範系統位在最左邊的廠房內。



雙床式流體化氣化示範系統，乃一床燃燒、一床氣化，燃燒床的燃料來自氣化床的未燃碳，氣化床所需的熱來自燃燒床的熱傳介質（或流體化介質），熱傳介質在兩床之間循環流動。West Biofuels LLC 的熱傳介質選擇既有商業產品，現場看到 Carbo Econoprop 40/70 及 Carbo HSP 30/60 兩種，屬氧化鋁系列，其物理化學性質如表 2 所示。

尾氣處理部分，合成氣經熱交換熱回收並降溫後，先經袋式集塵器（選用 PTFE 濾袋），移除粒狀物與少量焦油；再經以生質柴油為吸收液的填充式洗滌塔，將焦油濃度降至  $100 \text{ mg/Nm}^3$  以下；最後導入柴油引擎發電機進行發電(250 kW<sub>e</sub>)，過剩的合成氣導到直火燃燒器。其中柴油發電機後端，串接三元觸媒轉換器(Three-Way Catalyst)或選擇性觸媒還原反應器(Selective Catalytic Reduction, SCR)，以降低氮氧化物(NO<sub>x</sub>)與一氧化碳(CO)等空氣污染物，實測結果兩者濃度均可低於 10 ppm。



圖 12：West Biofuels LLC 的雙床式生質物流體化氣化模場系統

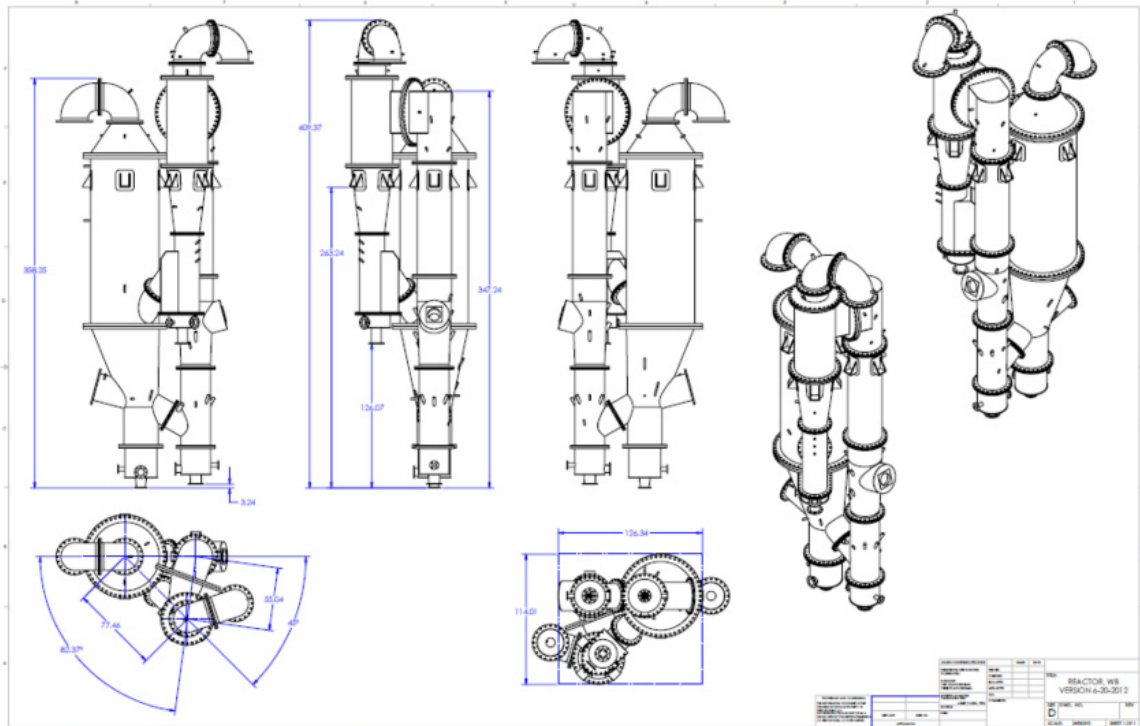




圖 13：West Biofuels LLC 雙床式生質物流體化氣化模場系統之設計構造圖示



圖 14：West Biofuels LLC 工廠廠房外觀

表 2：West Biofuels LLC 流體化床採用兩種熱傳介質的物化性質

<b>Media</b>	<b>Carbo Econoprop 40/70</b>	<b>Carbo HSP 30/60</b>
<b>Photo</b>		
<b>Typical Sieve Analysis (microns)</b>		
<b>600 - 710</b>	–	<b>3%</b>
<b>425 - 600</b>	<b>1%</b>	<b>70%</b>
<b>300 - 425</b>	–	<b>25%</b>
<b>250 - 425</b>	<b>97%</b>	–
<b>212 - 250</b>	<b>2%</b>	–
<b>250 - 300</b>	–	<b>2%</b>
<b>Median Particle Diameter [microns]</b>	<b>334</b>	<b>430</b>
<b>API Crush Test</b>		
<b>% by weight fines generated @ 5,000 psi</b>	<b>0.6</b>	–
<b>@ 7,500 psi</b>	<b>2.0</b>	–
<b>@ 10,000 psi</b>	–	<b>0.6</b>
<b>@12,500 psi</b>	–	<b>1.3</b>
<b>@15,000 psi</b>	–	<b>2.3</b>
<b>Typical Additional Properties</b>		
<b>Roundness</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>
<b>Sphericity</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>
<b>Bulk density, g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1.56</b>	<b>2.0</b>
<b>Apparent Specific Gravity (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2.70</b>	<b>3.56</b>
<b>Absolute Volume (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>0.37</b>	<b>0.28</b>
<b>Solubility in 12/3 HCl/HF acid (% weight loss)</b>	<b>1.7</b>	<b>3.5</b>
<b>Chemistry (weight %)</b>		
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>48</b>	<b>83</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>48</b>	<b>5.0</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>2</b>	<b>3.5</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>1</b>	<b>7.0</b>
<b>other</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>

#### 四、 建議事項

- (一) 本行訪問美、加兩國知名的學術單位與公司，瞭解最新的生質物熱化學轉化技術的研發與產業現況，建立國際科技交流人脈管道，未來可視國內技術與政策需要，進一步國際合作或技術引進。本次參訪之國外機構均表達技術合作與人員交流的願意，但雙方之權利義務等細節，須進一步洽談。
- (二) 目前生質物氣化技術的主流為流體化床，裂解技術則有流體化床及螺旋床兩種，技術可行性都已獲確定，但如何高效率且穩定運轉仍存在相當技術門檻，國外在這些方面的發展期程與經驗遠多於我國，與國際接軌並汲取實務經驗，可縮短我國生質能熱化學轉化技術之發展與產業化期程。
- (三) 生質物的原料與集運成本約佔熱化學轉化技術的 40%~60%，美國規劃以移動式或區域式的生質能濃縮裝置（如裂解或焙燒）來降低此費用。台灣農業殘餘物分散，可考慮以此模式來降低農業殘餘物的集運成本，以利我國生質再生能源之推動。
- (四) 就生質能熱化學轉化技術而言，若希望在 3~5 年內產業化，結合裂解與氣化兩技術是可行的選項，生質物在現地或區域中心先裂解，裂解油再快速運至氣化中心，氣化後供熱、電、化學品等多聯產利用，如此可降低生質物集運費用，也可避免裂解油不穩定的問題。