

出國報告（出國類別：進修）

進修「溫室氣體捕集、儲存與應用」
博士學位

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：楊明偉 化學研究專員

派赴國家：美國

出國期間：96年12月31日至98年12月30日

報告日期：100年2月15日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：進修「溫室氣體捕集、儲存與應用」博士學位

頁數 21 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人資處/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

楊明偉/台電公司/綜合研究所/研究專員

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：96 年 12 月 31 日至 98 年 12 月 30 日

出國地區：美國

報告日期：100 年 2 月 15 日

分類號/目

關鍵詞：二氧化碳、最佳化、溫室氣體、電廠

內容摘要：在全球氣候溫暖化日益嚴重的情形下，如何減少二氧化碳等溫室氣體排放一直是受大眾關切的議題。台灣電力公司一方面須提供國內穩定的電力供給，一方面亦要面對減少排放溫室氣體排的要求。因此，如何提出適切的二氧化碳減量策略，為台灣電力公司經營上即刻所要面臨的問題。研究電廠二氧化碳排放控制技術，可有利於相關研究計畫的推行與完成，亦可提供台灣電力公司相關單位業務上的參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

摘要	i
1. 任務目的.....	1
2. 過程.....	2
2.1 研修課程內容.....	2
2.2 研究內容.....	3
2.3 博士論文研究內容.....	11
3. 心得與感想.....	18

1. 任務目的

因執行 96 年「菁英留學計畫推動方案」選派從業人員赴國外進修博碩士學位方案，於 96 年 12 月 31 起奉派出國兩年進修「溫室氣體捕集、儲存與應用」博士學位。

在全球氣候溫暖化日益嚴重的情形下，如何減少二氧化碳等溫室氣體排放一直是受大眾關切的議題。台灣電力公司一方面須提供國內穩定的電力供給，一方面亦要面對減少排放溫室氣體排的要求。目前台灣電力公司二氧化碳排放量約占全國三分之一。因此，如何提出適切的二氧化碳減量策略，為台灣電力公司經營上即刻所要面臨的問題。進修有關電廠二氧化碳排放控制技術，可有利於相關研究計畫的推行與完成，亦可提供台灣電力公司相關單位業務上的參考。

電廠煙氣中二氧化碳捕集與儲存技術開發與建立、利用相關之物理化學與生物科技等方式將二氧化碳固定、或轉化成有用物質或產生能源等，為本次進修研究方向。另對各國研究單位積極進行之各類二氧化碳固定、轉化與儲存技術現況和成果深入瞭解。於進修期間希能切實瞭解各研究單位之發展與利用現狀，俾配合本公司以往開發之二氧化碳吸收與固定之相關技術，以達成減少排放的目標。並建立與國際合作研究管道以降低二氧化碳排放與溫室效應，以利推行本公司電廠溫室氣體排放控制技術。

2. 過程

2.1 研修課程內容

於伊利諾理工學院進修博士學位需修畢博士班全部 84 學分、通過博士資格考試、通過專業能力考試 (comprehensive exam)、提出並通過博士論文計畫、組成博士論文考試委員會後送給學校審議、提出博士論文及完成最後學位考試等必需事項。已於 99 年 12 月完成博士論文撰寫與審核等所有規定事項順利取得博士學位。

進修課程中包含一些化工系之核心課程如：包含化工計算技術 (Computnl Techniques)、高等熱力學 (Advanced Thermodynamics)、高等程序控制、高等化學反應工程學的研習。

化工計算技術內容為各種數值分析的應用與原理，其內容包含回歸分析、有限差分法、流力與熱傳分析等應用。內容針對每種化工程序之特性選用不同方法來分析，並且了解其誤差來源與避免誤差之方法。對於進行相關程序之設計與評估有很大幫助。

高等熱力學研習內容為物質熱力學性質的推估與模式之建立，熱力學可以瞭解一個新程序是否可行，並對於物質的基本狀態做較準確的推估。課程中亦介紹統計熱力學，從物質的最基礎運動狀態的能量分布等，來推估在不同溫度壓力下的性質，經課程介紹後對於如何進行物質相圖與熱含量等熱力學圖表之繪製與分析有更好的瞭解。

高等程序控制內容為各種程序控制技術的應用與原理，其內容包含線性控制系統、模式預測控制系統等高等控制應用。內容針對常見化工程序之特性選用不同方法來分析，並且設計合適的控制策略與操作方式，並以程序的動態回饋評估與更新控制參數，對於進行相關程序之設計與評估有很大幫助。課程也包含了專題研析，在專題中進行供應鏈的預測與管理，將傳統化工控制技術擴展至不同領域，這個專題對於將來進行風力發電預測有所助益。

高等化學反應工程學研習內容為物質動力學性質的推估與模式之建立，動力

學可以瞭解新程序需要何類反應器來進行，並對反應器內產物濃度與溫度分布等狀態做較準確的推估。課程中的方法可以避免複雜反應中雜質產生過多，相對提高產物純度與獲利。

2.2 研究內容

2.2.1 電業二氧化碳減量之選項

二氧化碳的大量排放被認為是造成全球溫暖化現象的主要原因之一，目前全球二氧化碳的排放量大概是 7 GTC/year，估計在 2030 年至 2050 年間全球二氧化碳的排放量會達目前的兩倍。目前人類的主要經濟活動幾乎都是依賴燃燒碳來獲得能源的供給，所以要大量減少二氧化碳的排放並且不影響經濟持續的成長是相當困難的事。並非所有二氧化碳的排放源都可有效回收；一些分散式的排放源如：汽機車等較不具備可回收的特質。因為針對每一個小型排放源，進行回收工作的成本太高，經濟上而言是不可行的。而火力電廠的二氧化碳排放，因為是排放量很大的單一排放源，較具備可回收規模。在火力電廠進行二氧化碳的回收與分離工作的成本，遠比在分散式排放源還低。所以，目前關於二氧化碳的捕集與回收研究多是針對火力電廠來進行；如何進一步降低二氧化碳回收的成本與能源需求是大家所關切的議題。

因為在電廠進行二氧化碳的捕集與回收一定會使用許多能源，因而降低電廠可生產之電力。另一方面，所有民生與工業用戶都需要穩定的電力供給，電力業者又須充分提供電力給市場無法降低電力生產，所以如何提高熱效率與進行高效率的熱回收程序，以補足二氧化碳捕集與回收程序的能量損失也是相當重要的研究方向之一。不論進行提高熱效能與進行二氧化碳的捕集與回收工作，都需投入相當的人力與時間，相關設備也需要逐一的改善與更新，預期會需要相當大的資金投入，未來的電價預期會大幅上升。

但是，如果考量到環境變遷，二氧化碳的回收與儲存又是相當急切的事，許

許多多燃燒汽油的運輸工具也排放大量二氧化碳；但是在這些交通工具上進行二氧化碳的回收是相當不實際的事情。當碳排放量受到管制時這些燃油交通工具都有可能切換至電驅動車輛，屆時，電力業者須提供更多的電力以滿足大眾需求。如何提供更多電力並且降低二氧化碳的總排放量，是電力業者不得不深思的重要議題。

然而，根據目前相關研究報告顯示，現有的電廠要進行大規模的二氧化碳捕集與儲存，會使得發電成本大幅上升，依據目前售電的價格來看，經濟上仍是不符成本的。

因為電廠從興建至退休多數長達 50 年以上，目前電廠不可能大幅修改或者更新來降低二氧排放，電力業者因為已投資大量資金於現有電廠上，也不會輕易重建。相關的基礎建設如：輸配電設備與線路也很難於短時間內更新。不論新能源發電的成本何時可以取代傳統電廠，以既有輸配電設備來傳輸新能源依舊是件困難的任務。預期，以新能源取代燃燒化石燃料的電廠的速度可能相當緩慢。也就是說，低碳發電技術還要很久才會佔能源供給量的大部分。

一般預期，需要 20 至 30 年的研發，才可能使二氧化碳捕集與儲存技術達到可行，並達經濟規模。在這段時間中，台灣電力公司如能發展相關技術進行低碳排放的發電並且順利切換至新能源發電對公司的永續經營極有助益。

2.2.2 高壓流體化床燃燒與二氧化碳捕集

高壓流體化床燃燒幾乎可以達到完全燃燒，灰中的未燃碳極少。因為所有可燃成分完全燃燒，表示可用熱能幾乎可以被完全利用，熱效率較一般燃煤電廠高一些。因為燃燒容器是處於高壓下所以容器的材料需要更耐腐蝕，以往因為材料強度與抗腐蝕特性不足，所以這一類的燃燒鍋爐很少被應用；但是由於近年來材料科學大幅發展，已逐漸克服材料特性不足的問題，又使這類鍋爐的應用再度受到重視。

高壓流體化床燃燒 (PFBC) 與 IGCC 燃燒效率相當，但是因為 PFBC 是直接將燃料在高壓下燃燒所以可用的燃料類型較多，設備也較 IGCC 簡單許多，不需要複

雜的操作程序，對發電業者是良好的選項之一。PFBC 典型的燃燒環境為 860°C、10-20 atm，除直接加熱蒸汽推動汽渦輪機外，高壓高熱的燃氣可再經過氣渦輪機獲得額外電力。整個程序中，約有 80% 的電力來自汽渦輪機，約 20% 的電力來自氣渦輪機。由於操作簡單，其可用率 (availability) 通常大於 83%，此一數據顯示 PFBC 在可靠性上遠比 IGCC 優良；在動態操作上也可因應負載變動快速調整操作條件。

為因應更加嚴格的環保要求，使得 PFBC 越來越受到重視，PFBC 高壓的燃燒環境使氮氧化物 (NO_x) 的生成更為不易，所以煙氣中幾乎不會生成 thermal NO_x。

針對煙氣中的硫氧化物 (SO_x)，PFBC 目前是利用石灰石於燃燒中注入燃燒室內，或以外加的吸收塔以石灰石液來進行硫氧化物吸收工作。然而，直接在燃燒室內注入石灰石粉對熱能的利用是比較有利的吸收途徑，適度調整燃燒時的 Ca/C 比率更可移除 99% SO_x。

PFBC 的二氧化碳捕捉與回收程序被認為是比傳統燃煤鍋爐容易進行，因為 PFBC 產生的煙氣是在高壓下，相對的二氧化碳分壓也比傳統燃煤鍋爐的煙氣為高，所以可以使得回收二氧化碳的操作成本大幅降低，目前許多研究都是著重在如何利用高壓煙氣的特性來降低回收二氧化碳的成本。

本項研究工作已進行有關 PFBC 燃氣二氧化碳的分離回收可行性評估，藉由收集有關文獻發現，高溫型固體吸收劑的吸收與脫附溫度適合運用於 PFBC 燃氣二氧化碳的分離回收。在適宜的操作下，可以進行長效的吸收程序。另外，為減少二氧化碳封存前壓縮程序的能量消耗，可使用能量交換裝置，將燃氣的高壓交換給分離後的二氧化碳。經初步計算評估發現大致可降低操作成本約 30%。

對於 PFBC 能否符合將來碳捕捉電廠的低成本與高耐用性要求，後續研究將著重在如何提升固態吸收劑的效能或開發新式樣的二氧化碳吸收劑。整合電廠熱能利用於高溫型二氧化碳固體吸收劑的吸收與脫附程序來進行 PFBC 燃氣二氧化碳的分離回收，被視為是大幅減少操作成本的關鍵。

2.2.3 燃料氣化與高溫型固態氧化物燃料電池熱能整合運用研究

高溫型固態氧化物燃料電池 (SOFC) 由於電化學反應特性，而具有很高的熱效率，被視為是未來發電的重要選項之一。因為高溫型固態氧化物燃料電池所產生的高溫燃氣溫度還相當高 ($>650^{\circ}\text{C}$)，燃氣中仍含有不少熱值。如何進一步整合高溫燃氣進行餘熱發電，是高溫型固態氧化物燃料電池用於電業的成功關鍵，初步的構想，是利用 SOFC 產生的餘熱，直接加熱工作流體達到高溫以推動汽渦輪機發電 (如圖 1 所示)。

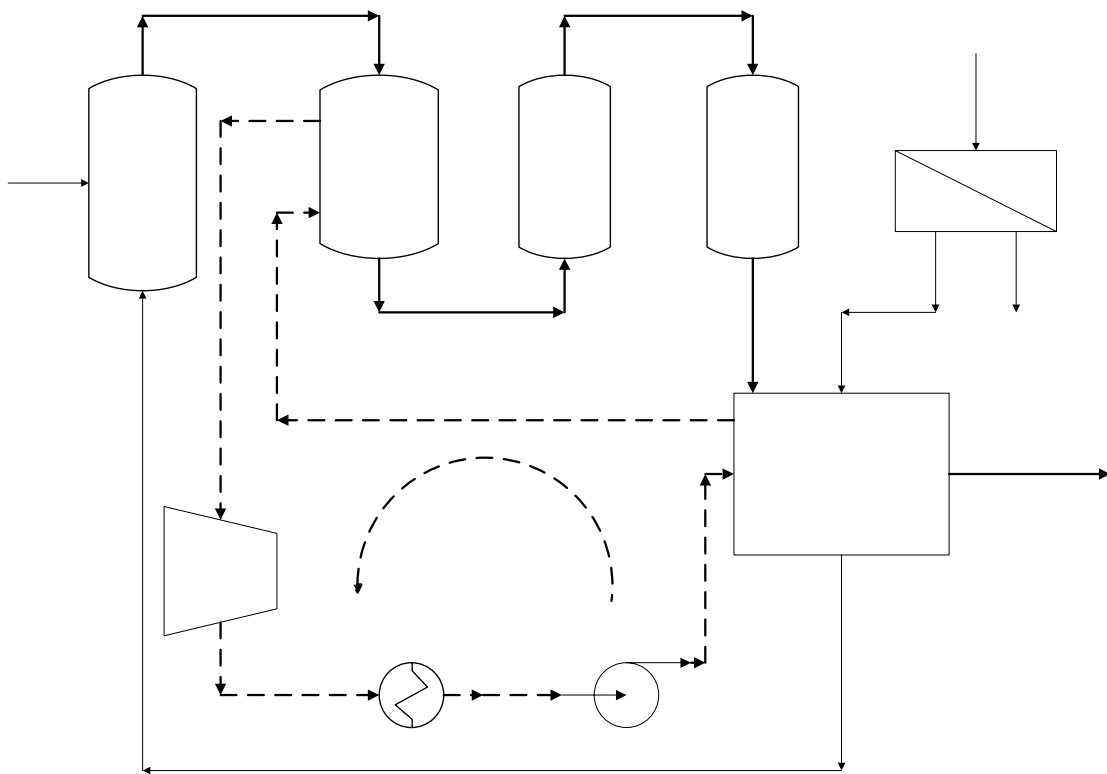


圖 1 高溫型固態燃料電池整合氣渦輪發電流程

本項研究工作分為兩項：1. 針對 SOFC 內氣流與材料進行熱流分析。2. 整合 SOFC 與 Rankine Cycle 進程序最佳化評估。這種新式 SOFC 與氣渦輪整合設計可有效利用所有熱能，並降低回收二氧化碳所需的能量。然而，此種操作須結合不同工作溫度之工作流體，以充分利用其廢熱。如利用圖 2 流程所示的二種流體分階段利用其餘熱，經初步計算分析其熱效率可達 75%，如此可大大減少每單位電力所產生的二氧化碳量，對於燃氣中二氧化碳的捕集與再處理極有助益。

Hot Sy

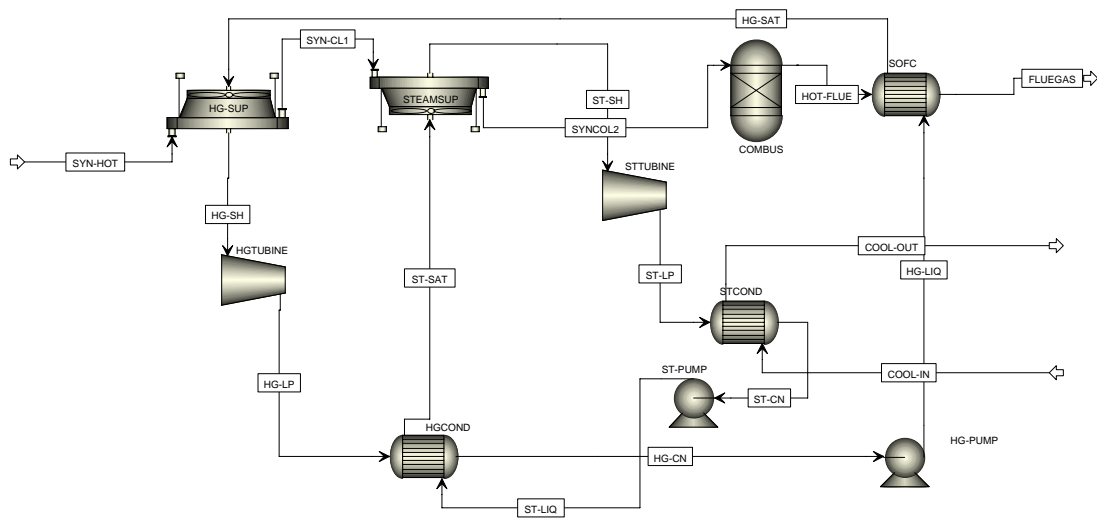


圖 2 高溫型固態燃料電池整合二元工作流體發電流程

2.2.4 燃料氣化與富氧燃燒技術熱能整合運用研究

進行純氧燃燒程序之改善研究，研究利用各種再生能源製造純氧供給電廠燃燒用。純氧燃燒可大幅提升燃氣中二氧化碳的濃度，所以不需經過複雜的捕集程序就可進行二氧化碳的儲存與再利用，減少捕集程序大約可降低 70% 的費用。另外，因為煙氣中沒有氮氣所以沒有任何熱量被消耗在加熱氮氣上，故純氧燃燒時全部的熱能都可以被運用因此大幅提高了熱效率（圖 3）。

富氧燃燒的火焰溫度高於一般燃燒技術，所以在發電應用上具有獨特的優勢。由於純氧大幅提高了燃燒端的溫度，富氧燃燒技術即使燃燒熱值較低的燃料也可得到相當高的熱效率，提高了火力發電廠選用不同燃料的可能性，除了常用的煤炭與燃料油外亦可利用生質燃料、都市與工業廢棄物、農業廢棄物等各類低熱值燃料。

由於其煙道氣中幾乎不含氮氣，使得煙道氣的總排放量大幅降低，所以相關的環保設備（如：SCR、ESP 與 FGD）的容量亦可以大幅降低，減少固定資產的投

資與相關營運費用支出。降低煙道氣的總排放量亦同時減少了排釋至環境中的廢熱，更多的熱能可以被電廠內的熱循環運用並增加了蒸汽循環的效率，電廠的總發電量可以同時提高。

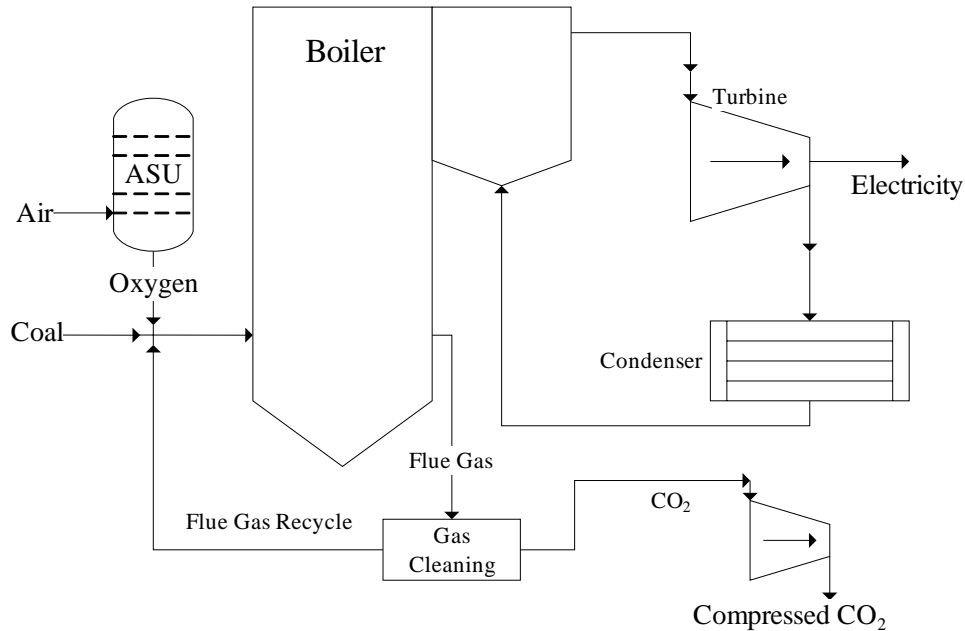


圖 3 富氧燃燒發電流程

另一方面，使用富氧燃燒技術的電廠由於煙氣中幾乎沒有氮氣，使得電廠二氧化碳的回收與捕集難度大幅降低。這類煙氣通常只需分離其中的水分，與一些具腐蝕性雜質後就可以直接儲存。由於不需要複雜的二氧化碳分離與捕集程序，使得二氧化碳的分離程序具有相當的可行性。富氧燃燒電廠的二氧化碳回收程序中，無需利用大量的化學吸收劑與熱能，可大量減少回收程序的成本與燃料。與一般火力發電廠相比，富氧燃燒電廠每單位燃料可產生較多的發電量。

但是，自然界中並沒有純氧存在，富氧燃燒電廠需要利用空氣分離單元 (Air Separation Unit, ASU) 將純氧自空氣中分離出來。空氣分離單元需耗費相當多的電力 (210 kW h/ton O₂)，電廠部份的發電量須用於驅動空氣分離單元，減少了可輸出的淨發電量。其次，一般的鍋爐材料不適用於富氧燃燒的高火焰溫度，更高性能的鍋爐材料也將提高總體發電成本。新的材料需要能在高溫下使用，並且具有相當的抗蝕能力。

目前相當多的研究為了避免高溫燃燒鍋爐的高成本，取而代之的是以煙氣再循環來降低火焰溫度。煙氣再循環是利用已除去 SO_x 後的煙氣，再循環至燃燒區和燃料混合燃燒。雖然火焰溫度可以因而降低；但煙氣再循環的缺點是：大量除硫後的冷煙氣重複進行著加熱與降溫程序伴隨而來的熱損失。由於經過煙氣除硫程序前煙氣溫度需預先降低才可進入除硫反應器內，這部份的熱能很難再利用，因而部分煙氣中的熱能將無法用於蒸氣發電循環中。

因為富氧燃燒將使總煙氣量大幅減少，相對的也會使煙氣中硫氧化合物的濃度提高。此高濃度的硫氧化物於燃燒區中，極易產生具高腐蝕性物質並且會對鍋爐材料造成危害，所以再循環煙氣宜先除去當中的硫氧化物再回流至燃燒區為宜。除硫後的再循環煙氣混合燃燒可以控制整體煙氣中硫氧化合物的濃度低於危害界限，但是再循環煙氣的相對低溫卻是不利於發電廠的熱循環。

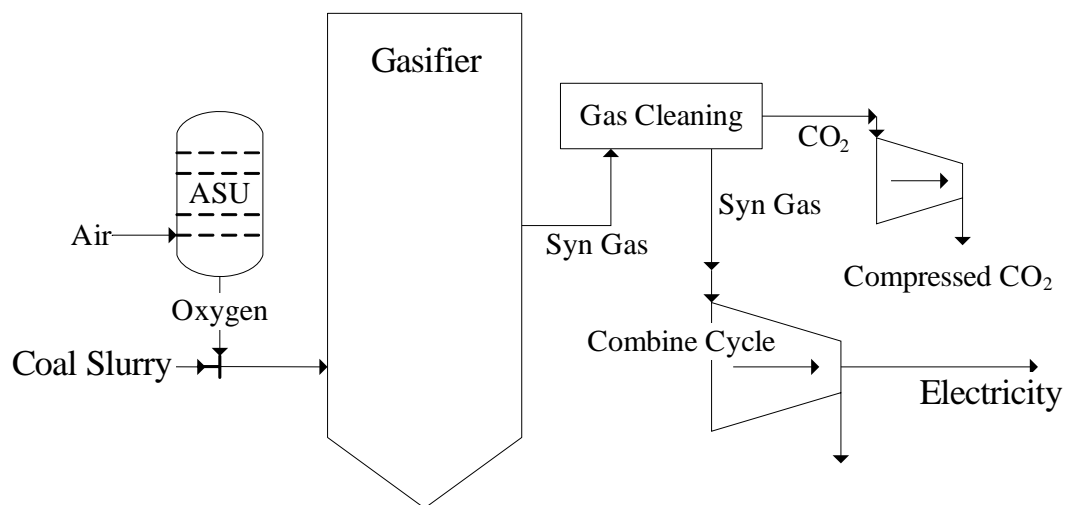


圖 4 煤炭氣化發電流程

由質能平衡的觀點來看，如果能在不降低煙氣的溫度下除去其中的硫氧化物，全部的熱能將可以再次循環至鍋爐內應用於發電。以目前的技術進行高溫除硫程序相當不易，所以還是利用慣有之低溫除硫程序來除去煙氣中的硫氧化物，以至於富氧燃燒電廠的效率無法進一步提升。另一種可行性的方案是利用煤

炭氣化程序於高溫下將煤炭直接氣化為合成氣，煤炭內的硫化合物於氣化爐內大部份會轉化成硫化氫而非硫氧化合物，高溫下捕集硫化氫比高溫下捕集硫氧化合物容易（圖 4）。

本研究工作主要是分析煤炭氣化程序，如何結合富氧燃燒技術進行，並已提出了一個新的方案：煤炭混合再循環的煙氣和部分氧氣進入氣化爐內氣化。不同於以往，此一新的氣化程序進料中不需要有水，所以避免了部分煤炭的熱值消耗於水的汽化上，再循環的煙氣內的二氧化碳取代了水，提供了還原性的環境以促使氣化反應發生。空氣分離單元所製造的純氧，可同時用於氣化爐與燃燒鍋爐，降低了設備投資與操作成本。但是新的程序還有一些技術無法克服，本研究工作就是提出一些構想並且評估其效率與成本等。

2.2.5 風力發電預測與儲能技術整合運用

能源需求會隨人口成長、經濟發展而繼續增加，電力需求也將隨之成長；在可見的未來，地球蘊藏的化石燃料終將耗盡。電力業者在有限的資源下，如何能提供永續不斷的能源來維持經濟的發展一直是相當重要的課題，再生能源是其中一個重要的能源選項。

但是，電力需求卻與再生能源供給特性無法密切配合，再生能源通常無法配合電力供給需求來適時調度。以風力發電而言，風力發電機在有風時會產生電力供給電網；然而當時的電力供給量卻不一定符合當時的電力需求量。為了平衡電網的供給與需求，電網操作者需要及時調度其他可資調度機組適時升載或降載以平衡整個電網。通常可調度的機組，包含一些可快速升載或降載的氣渦輪機，但是調度這些機組升載或降載時必然會損失一些熱效率（integrated loss）。電網中再生能源供給比率增加，所需的調度量與 integrated loss 亦會隨之增加。

所以，要擴大利用風力發電等再生能源的比例，首要的問題是需要解決電力供給與需求不能配合的情況。電力業者對於電力需求端的預測與瞭解，已經進行許多相關研究並有相當多資料累積，但是卻十分缺乏再生能源及時供給量的預估能力。如何準確預測風力發電的即時供給量，是現階段中重要的工作之一。在這

個研究子題下，將運用實際風速觀測資料，發展一模型來預測未來短暫時間內風速與風力發電機的出力變化。

有了準確的風能預測模型後，可再引進能量儲存設備如：電池、壓縮空氣儲存與抽蓄水庫儲存等方式。引進能量儲存設備的好處，可以在再生能源供給大於需求時儲存過剩的電力，並於再生能源供給低於需求時再將儲存能量釋放出來轉化成電力供給。研究項目將以壓縮空氣儲存為重點，評估在特定情況下所需的儲存設施的大小與體積。

所發展的風力預測模型將配合先進的控制與預測技術，適時調節發電量與儲存量以期達到穩定的能源供給，並且降低設備裝置容量的需求與相關設備之成本。期於評估後，風力發電與儲能技術可以完全配合前述富氧燃燒電廠操作。如此，風力發電的不確定性對電網的影響將可減少，也可以大幅開展再生能源利用的可能性。

利用再生能源製造純氧不會造成額外的二氧化碳排放，富氧燃燒電廠所產生的二氧化碳排放量將大幅減少。因為將風力發電轉換成純氧或壓縮空氣輸送，對電網幾乎沒有衝擊也不會影響現有的輸配電網路。將風力發電轉化成化學能或機械能儲存與輸送將減少電網建設的投資，儲存後的化學能或機械能可資調度亦有助於減少熱損失。

2.3 博士論文研究內容

因為石油等化石燃料的蘊藏量逐漸降低，大眾日常使用的液體與氣體燃料將越來越不易取得。這部分的能源需求預估將轉嫁至電力需求上，根據美國 EIA 的預估至 2030 年全球電力需求將擴大為 2005 年的兩倍。其中燃煤發電至 2030 年依然是最大的電力來源，預估將佔電力來源的 46%。雖然燃煤發電成本相對較低，但是燃煤電廠所排放的大量二氧化碳可能會引起全球暖化效應，在抑低二氧化碳排放的要求下，預期再生能源會被大量的安裝以供應大量的電力，預期在 2015 年由再生能源所供應的電力將會成為第二大的電力來源。

然而，因為風能與太陽能等再生能源是天然資源無法隨意調度，再生能源的

供給與電力的需求常常無法配合。目前電網的設計是傾向生產多少電能就要準確的用掉，電網內幾乎沒有任何儲能設施，這對再生能源的利用是相當不利的。電網內的再生能源既然無法隨意調度，那可調度的傳統電廠就要對映再生能源的供給來調度；當再生能源供給量大時，傳統電廠的輸出就要隨之降低。

但是，目前電廠的設計與最佳化都是根據其最大輸出功率來設定；也就是說，當電廠不是在其最大輸出功率下操作是較無效率且不符經濟需求的。部分的熱效率也就在這種電廠動態操作下被消耗了，這種因再生能源加入電網系統後所引起的整合性損失會隨再生能源加入電網的比率增加而增加。DOE 的一項研究顯示，目前的電網僅可容忍 20% 的電能來自再生能源，但是整合性損失會使成本增加至少 10%。超過 20% 再生能源供給是目前的電網無法容忍的，將造成電網操作的困難。因此，當再生能源供給量超過目前電網的容忍上限後，額外的能量儲存裝置或新的電網設計就很重要。

新的電力傳輸網路雖已被討論多年，但是新的網路建設需要多年才能完成，而且費用將會比現今的網路系統高出許多；所以電力傳輸網路一直沒有更新與重建的計畫。另一方面，受限於當今能量儲存裝置的低效能與高價格，所以能量儲存裝置目前仍然無法大量的被引進電網。在減少二氧化碳排放的要求下，新式發電廠(如 IGCC 與 Oxy-combustion 等)預期將會逐漸被引進供電網路中；這些 IGCC 與 Oxy-combustion 電廠都使用了大量的純氧，而純氧的製造程序卻是相當耗能的程序。因此，論文研究的主題在於如何改善純氧的製造程序，使其可以同時兼具儲能與傳遞能源的雙重功效(圖 5)。

Energy Carrier Opportunities: Transportation

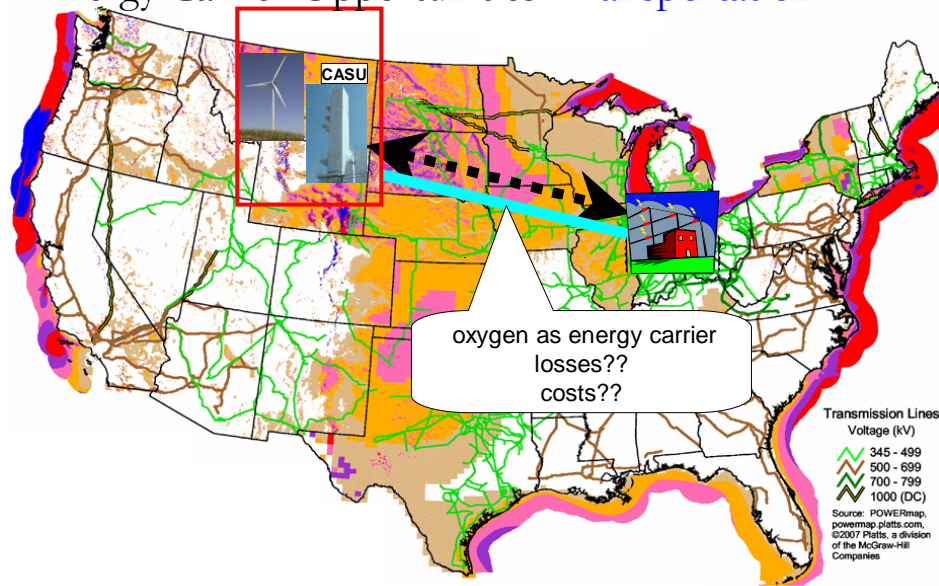


圖 5 以再生能源生產氧氣之構想

博士論文進行如何改良新式發電廠（如 IGCC 與 Oxy-combustion 等），使其可以同時兼具發電與儲能的雙重功效之相關研究，利用本項研究工作開發之最佳化程序，電力公司可針對不同市場條件下，如何配比電網中不同發電（各種燃煤發電、wind 與 solar 等可再生能源）與相關之儲能程序等裝置容量大小，以達到最大經濟收益並且滿足該市場內的用電需求，並且達到降低二氧化碳排放量與其捕捉程序的能耗。

研究之最佳化程序可以針對不同市場特性，來調適其配置各項技術內容與操作策略，以確保電力公司的投資可以得到預期的收益。對於具有漸歇特性且不可調度的再生能源如何與傳統電網結合，亦可藉由這類最佳化程序整合達到更大的收益。

本項論文研發之最佳化程序可同步進行收益最大化與成本最小化兩項工作，和以往文獻中的不同處，此一最佳化程序是根據全面性的市場資訊（如：電力需求、設備成本與電價等）來決定操作策略與各項設備的大小。

由電網的需求曲線來看電力需求並不是一直維持在最高峰，通常在一天內會有一個用電高峰與一個用電最低點。也就是說，在用電需求最低點時電廠的輸出

可能高於電力需求，因此會有過剩電力產生。對於利用純氧的 IGCC 與 oxy-combustion 電廠，其空氣分離單元 (ASU) 將消耗大量電能。如可利用離峰時的過剩電力驅動 ASU，並於用電尖峰時降低或關閉 ASU 的負載，可提高該電廠於需求尖峰時的淨輸出。

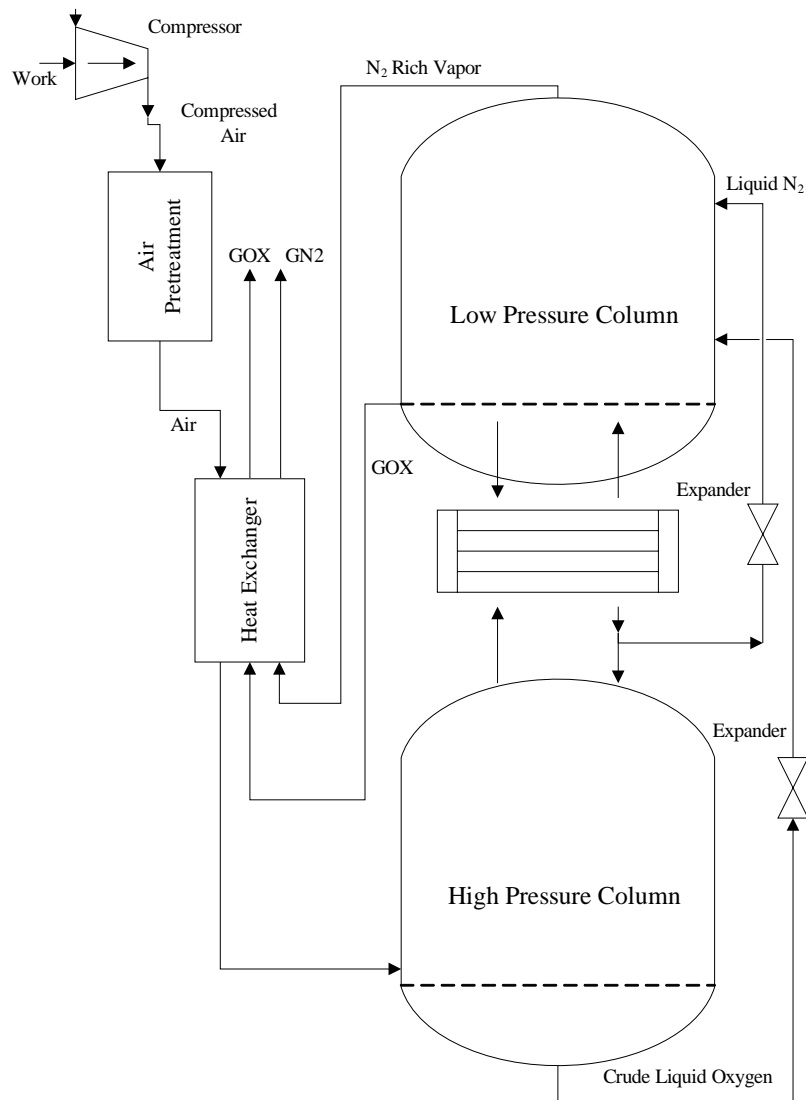


圖 6 以 ASU 製造氧氣流程圖

目前的 ASU 是利用低溫蒸餾的方式，將空氣中的氧氣分離出來 (圖 6)。進料空氣經過一系列壓縮與膨脹的過程，逐步降溫並冷凝成液態空氣後，送進低溫蒸餾塔分餾成純氧與純氮。在高度熱整合的操作下，整個程序中並沒有利用其他冷

媒，所有的冷能都是由低溫的產品交換給進料空氣；因此，整個系統熱平衡需要較長時間。通常需要數小時至一天的時間產品純度才可以符合需求；所以整個 ASU 系統是無法忍受動態操作的。

傳統上，ASU 系統僅可於設定的產量下操作，無法於用電尖峰時降低 ASU 的負載或於離峰時提高 ASU 的負載。然而，依據本研究的方法加裝壓縮空氣能量儲存裝置於 ASU 之壓縮單元和蒸餾單元間，即可進行 ASU 的動態調控。如此，當電網正處於用電尖峰時，這些具備儲存設施的電廠就可調低 ASU 用電量，並將這些多出來的電能轉輸出至電網。反之，電網用電需求降低時，這些電廠可調高 ASU 儲能程序之用電量，儲存下來的能量可轉成尖峰時刻 ASU 的動力來源。以這樣的操作方式，可以減少整個電廠的總設計容量，電廠之裝置成本及燃料用量就可以降低。

因此，依本研究加裝能量儲存裝置的 IGCC 與 oxy-combustion 電廠就可以具有動態調控其淨輸出的能力；而這種動態調控能力是以往這種電廠所無法達成的。因為新式的設計將幫助電廠提高獲利能力，直接降低的設置新式電廠的障礙。

預期在降低二氧化碳排放的壓力下，此一新式的操作能力會為電力事業帶來更多機會，依據電力需求的特性來設計新式電廠，將會是下一階段電力業者的重點工作。在降低二氧化碳排放的壓力下，新式電廠設計能力將會是電業的機會，優良的設計能力以結合合適的技術，來進行二氧化碳捕捉與儲存工作，不一定會降低電廠的獲利能力。

將電廠與相關之能量儲存設施結合是一項複雜的工作，必須滿足電廠與能量儲存設施的動態操作特性，同時需兼顧電網的需求特性。相關設備之大小、成本與位置等因素都要一併考慮；因此本項研究提出一個全新的最佳化方式（圖 7）。其特點為，依據市場的動態特性最大化電力業者的收益能力。這個最佳化程序，可同時找出各項裝置最合適的容量大小、操作策略和設備排程等決策資訊。

在研究報告中以實際的電力需求、電價、設備價格和設備操作能力與操作限制等資訊，針對 IGCC 和 oxy-combustion 電廠、煉鋼廠等範例來進行最佳化分析。研究結果發現，結合能量儲存裝置於動力廠內，可以提升各廠之獲利能力 2% 至 9% 不等。明顯的，電廠加入這種儲能程序是可提高獲利能力，可提升各業者裝置

儲能裝置之意願，並降低設置相關設施的障礙。

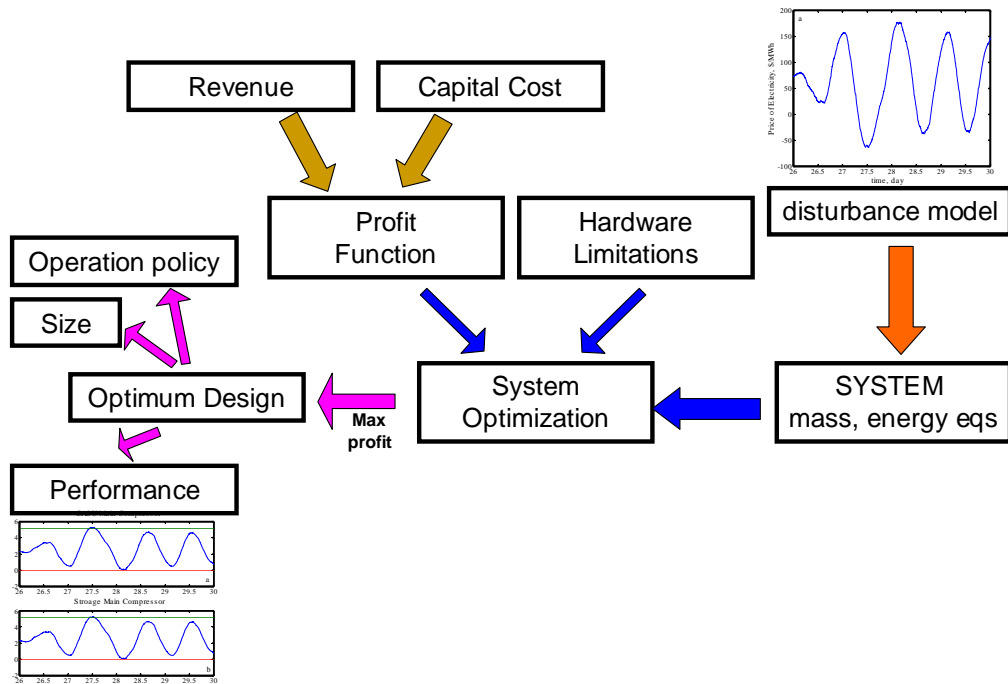


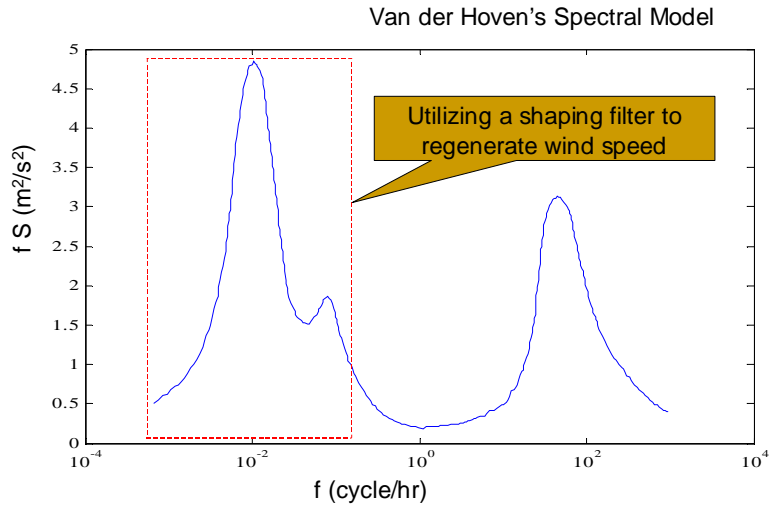
圖 7 根據市場資訊之最佳化程序

研發之最佳化程序亦可用於電網內各種形式電廠、再生能源和儲能設施的配置分析；以降低整體成本並可滿足電網之需求。根據電網的動態用電特性，和再生能源的動態供給特性，來進行最佳化工作亦可提升再生能源之設置率。此種依據市場資訊之最佳化程序，可提供經營者有用的決策資訊，預先於設置相關設施前了解設施設置後預期之獲利能力，並且，因為此最佳化程序同時提供了操作策略，也大幅降低調控各項設施的困難度。

未來研究方向將續進行純氧製造程序之改善研究，並結合利用風力發電製造純氧供給電廠燃燒用。結合風力發電、壓縮氣體儲存、純氧燃燒、與煙氣再循環等技術以提升電廠獲利能力並降低二氧化碳捕集之成本。預期工作包含風力發電預測模式（圖 8）、ASU 操作模式（包含壓縮氣體儲存）、純氧輸送模式、風力發電電力傳輸模式、純氧燃燒程序模式等。並利用開發的各項模式來分析最佳方案。

(a)

Cryogenic ASU and Compressed Air Storage: Wind Speed Simulation



(b)

Cryogenic ASU and Compressed Air Storage: Wind Speed and Power Simulation

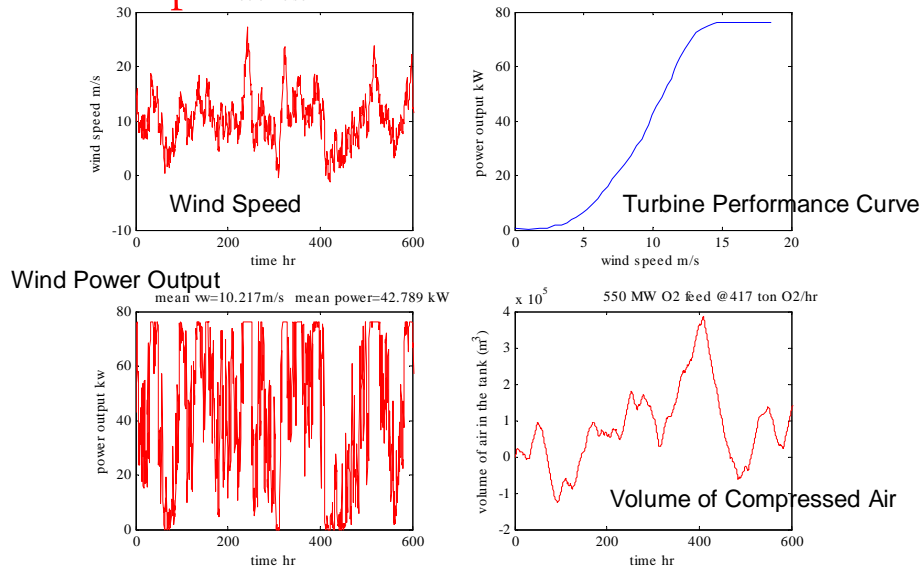


圖 8 以風力發電製氧之構想。(a) Van der Hoven' s Spectral Model 解析，(b) 利用研發之最佳化程序分析以風力製氧之可行性

3. 心得及建議

因為二氧化碳捕獲與儲存工作會耗費電廠許多能量，其中壓縮程序所使用的壓縮機會增加該電廠之廠內用電量。然而，如捕獲之二氧化碳最終是將送往地下做永久儲存，及時壓縮是不需要的。換言之，其壓縮工作可於離峰時，利用電網多餘的電力來進行壓縮程序。

如此一來，具備此種新式設計的二氧化碳壓縮程序之 IGCC 電廠之總燃煤量，將比相同的淨輸出而不具備此種新壓縮程序之傳統 IGCC 電廠還少。減少燃煤量，亦同時減少了每單位淨輸出電量所產生之二氧化碳總量，降低整個電廠用於二氧化碳捕集與儲存工作之總耗能（圖 9）。

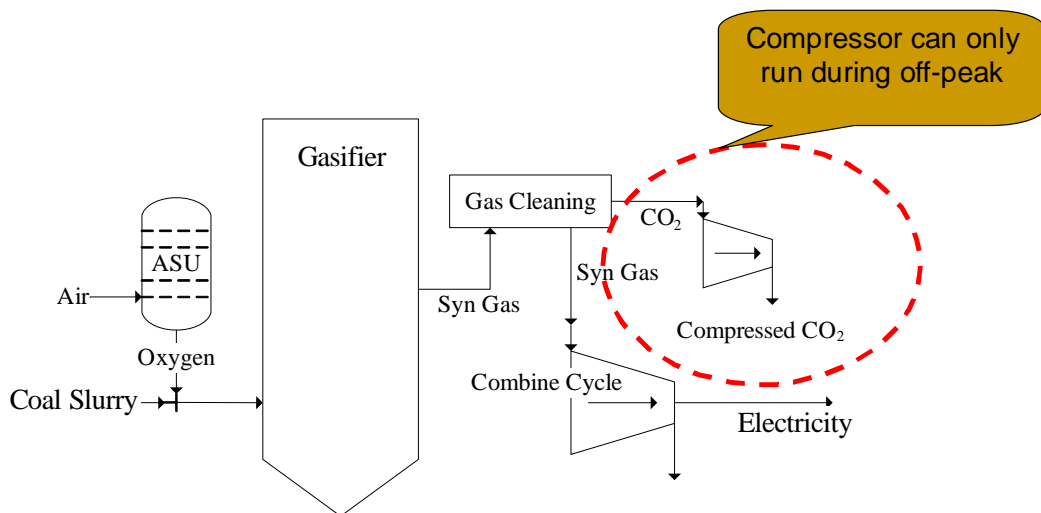


圖 9 IGCC 電廠以二氧化碳壓縮程序儲能應用

與前述之 IGCC 電廠相同，oxy-combustion 電廠（如圖 10）與進行燃燒後捕集二氧化碳之傳統燃煤電廠之二氧化碳壓縮工作也可於離峰時，利用電網多餘的

電力來進行壓縮程序，以降低電廠之總燃煤量，並降低整個電廠用於二氧化碳捕集與儲存工作之總耗能。

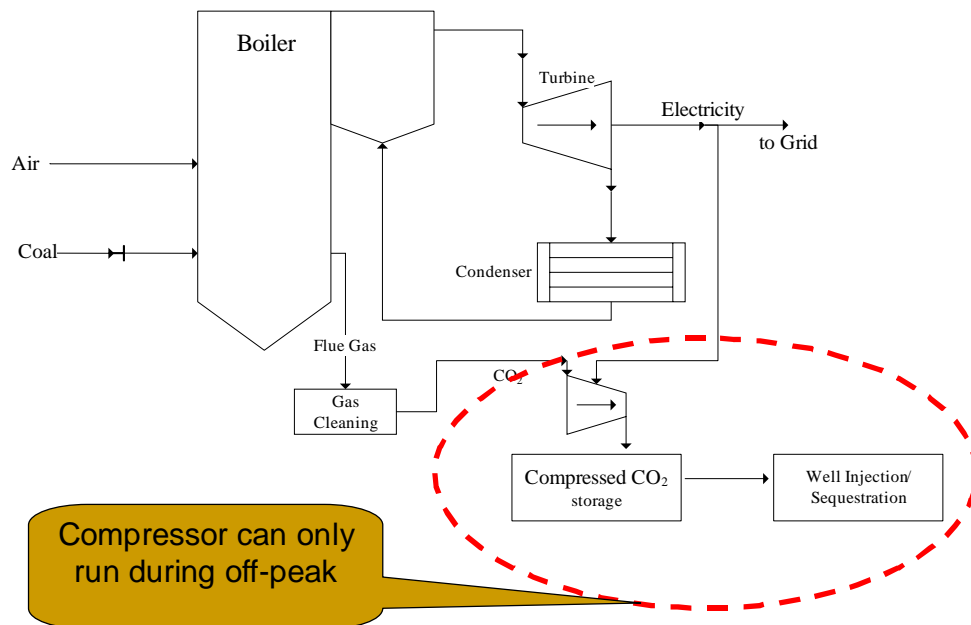


圖 10 Oxy-combustion 電廠以二氧化碳壓縮程序儲能應用

論文所研究的最佳化程序，將可用於前述之二氧化碳捕集與壓縮工作最佳化工作，結合壓縮空氣能量儲存設備於 IGCC 或 oxy-combustion 電廠內，也可使這些電廠具備動態調控其輸出之能力，如此，這些原本用於提供基載電力的電廠，也可用於提供尖峰用電。這些以煤炭為燃料的電廠具備動態調控能力後，預期可部分取代一些高成本的燃氣與燃油電廠，以降低整個電網發電之成本。由於具備動態調控輸出之能力，將使發電量能完全配合及時用電需求，對於調度上的困難也可大幅降低。

值得注意的是，結合壓縮空氣儲存設備之 IGCC 或 oxy-combustion 電廠在動態調控輸出時，並未改變煤燃燒量與蒸汽產生量，故原先電廠設定之熱平衡關係並未改變，其熱效率在動態調控過程中不會有損失。不同於其他能量儲存裝置，壓縮空氣是直接供給 ASU 作為原料，其能源轉換效率將近 100%，僅取決於儲存空

氣之壓力大小。其他能量儲存裝置如電池等，在儲存電能與釋放電能兩步驟中均會產生顯著之能量損耗。

論文研究的最佳化程序已為這些複雜的工作提供一條明顯的途徑。在其最佳化決策過程中已充分考慮了市場的動態情資、針對市場的需求提供充分電力給市場、選擇高效能低成本的供電途徑、選定各市場供電網路中發電與儲能設備的大小等。將這些最佳化工作整合成一個步驟，大幅降低系統整合的困難，並可降低重複配置過多設備於電網內造成投資成本的浪費。

同樣的想法也可用於電廠二氧化碳的捕集與儲存工作上（圖 11），電廠產生的二氧化碳亦可針對市場需求進行儲存或回收再利用等工作。對經營者而言，何時該儲存？何時該再利用？多少該儲存？多少該再利用？一直是很難的問題，這些問題直接影響了公司的獲利能力。我們如何能回答這些問題？在保障電業能獲利的前提下，決策過程最終還是取決於市場需求上，根據各項產品的價值（如：電力、二氧化碳、二氧化碳再利用產生之產品與燃料等）來調控生產量的比例，以期最大化公司的獲利是所有經營者期望的事。

而 CCS 工作可以看成是儲能選項之一，當 CCS 加進電網後對於具間歇性再生能源有正面助益，來自再生能源的供電比率可望大幅提升（圖 11）。如此一來，電廠 CCS 工作為電業所帶來的獲利減少危機，將可轉化成電業再發展的機會。電廠所生成的二氧化碳或許可以是有價的資源，不再是一種負擔。雖然二氧化碳依然會產生，但是調控 CCS 程序用於儲能上，可以改善傳統電網不利儲能的缺失，使發電供給與用電需求在動態上可以調控成一致。

供電網路的改良已被研討多年，然而由於改善工程投資龐大一直未能被實現；並且電力用戶的用電行為也幾乎無法調控。牽涉到龐大用戶端的控制與最佳化工作，是一件龐大而困難的工作；在發電端的調控與最佳化工作，相對而言就比較簡單了，以發電與儲能程序整合來滿足廣大電力用戶的電力需求，可能是較低成本並且可行的途徑之一。

Role of CCS in Power Industry

Driven by Power Market

Focused on Revenue/Reliability

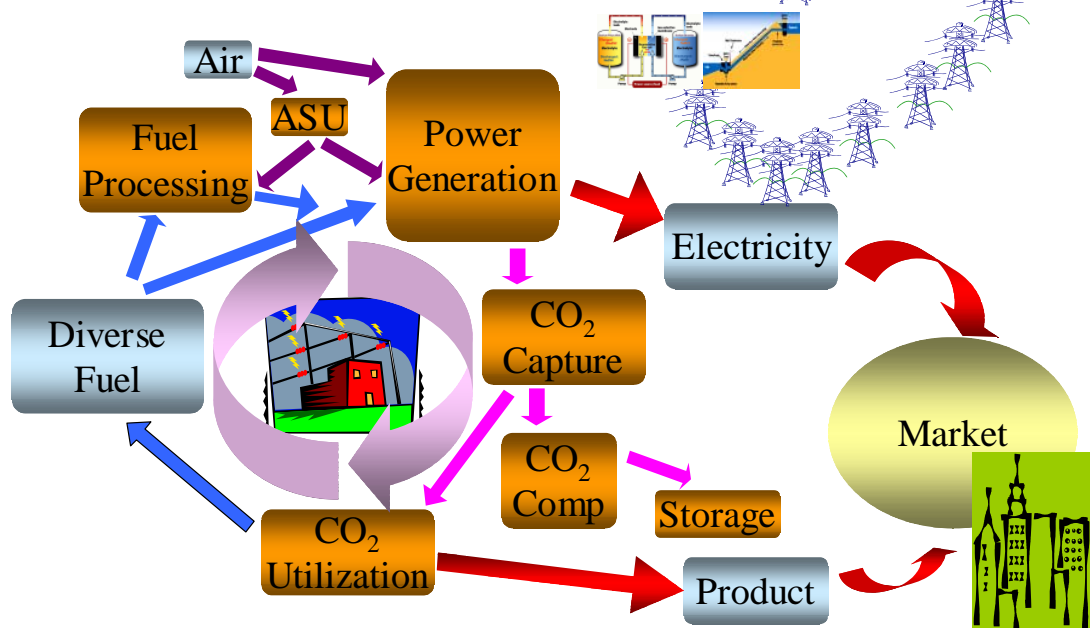


圖 11 根據市場情資最佳化電廠二氧化碳捕集與儲存工作

前往美國進行研究與進修過程中遇到相當多困難和挑戰，往往在短時間中就需要找出答案，反覆的經歷這些考驗使生活充滿了挑戰，學習在時間的壓力作出正確的決策，才有辦法將研究工作逐一完成。伊利諾理工學院在創新思考上有其獨特點，研究所相當重視研究內容在實際利用上。

創新研究的價值，最終將取決於其產出成品的市場價值。能獲得市場認同，並且可以幫助業者獲利的產品才是成功的產品與發明。進行研究工作，還需同時考量研發之程序與產品的市場定位，研發的方向應以客戶需求為依歸。如何提升公司的獲利能力，並且滿足廣大電力用戶的需求，來進行以後的研究工作將是未來努力的方向。