

出國報告（出國類別：實習）

碳捕集規劃設計研討及實習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：機械設計專員許思強

派赴國家/地區：義大利/米蘭

出國期間：112年11月11日至112年11月22日

報告日期：113年1月15日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：碳捕集規劃設計研討及實習

頁數 33 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

許思強/台灣電力公司/營建處/專員/(02)2366-6932

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：112 年 11 月 11 日至 112 年 11 月 22 日

派赴國家/地區：義大利/米蘭

報告日期：112 年 1 月 15 日

關鍵詞：碳捕集(carbon capture)、化學吸收法(chemical absorption)

內容摘要：(二百至三百字)

近年配合政府及國際之環保目標，台灣公私部門皆戮力推動減碳。本公司為政府重點減碳部門，尚無實際碳捕集、封存經驗，為因應即將辦理減碳技術園區之安裝運維，故須至國外廠商實習相關專業技術。

本次計畫前往 Termokimik 公司位於義大利米蘭總部，進行碳捕集技術規劃階段至運轉維護階段的可行性及成本分析之專業技術研習；其中從頭說明捕集製程原理，並介紹目前各地碳捕集試驗廠運轉案例；並委請該公司安排，參訪其規劃於 Brindisi Sud 電廠之 8,000 tCO₂/y 試驗場，現地考察各設備及輔助系統設置，進一步探討未來本公司案場設計。

摘要

近年配合政府及國際之環保目標，台灣公私部門皆戮力推動減碳。本公司為政府重點減碳部門，尚無實際碳捕集、封存經驗，為因應即將辦理減碳技術園區之安裝運維，故須至國外廠商實習相關專業技術。

本次計畫前往 Termokimik 公司位於義大利米蘭總部，進行碳捕集技術規劃階段至運轉維護階段的可行性及成本分析之專業技術研習；其中從頭說明捕集製程原理，並介紹目前各地碳捕集試驗廠運轉案例；並委請該公司安排，參訪其規劃於 Brindisi Sud 電廠之 8,000 tCO₂/y 試驗場，現地考察各設備及輔助系統設置，進一步探討未來本公司案場設計。

目次

摘要.....	i
目次.....	ii
圖目錄.....	iii
表目錄.....	iv
壹、目的.....	1
貳、過程.....	3
參、研習內容.....	4
一、 碳捕集製程規劃設計技術實習.....	4
1. Termokimik Corporation 公司介紹.....	4
2. 碳捕集技術探討.....	8
3. 燃燒後化學吸收技術探討.....	11
4. 化學吸收法.....	15
(1) 碳酸鹽吸收法.....	15
(2) 醇胺吸收法.....	16
(3) 吸收程序.....	17
二、 碳捕集廠管路及設備施工檢驗技術實習.....	19
1. Centrale ENEL Federico II 電廠碳捕集設備實習.....	19
2. 台中減碳技術園區小規模碳捕集廠設備(下稱減碳園區).....	26
肆、心得及建議.....	32
參考資料.....	a

圖目錄

圖一	TKC 公司米蘭總部正門及俯瞰圖	6
圖二	TKC 公司位於克洛尼奧工廠之正門及俯瞰圖	6
圖三	與 TKC 公司會面進行簡報	7
圖四	參觀 TKC 公司總部之控制模擬中心	7
圖五	三種主要碳捕集技術大致流程	10
圖六	物理吸附法製程圖	11
圖七	薄膜吸收法製程圖	12
圖八	於 TKC 總部實習(化學吸收法).....	14
圖九	碳酸鹽捕集製程圖(熱碳酸鉀法)	15
圖十	商用化學吸收製程	17
圖十一	於 TKC 總部實習(溶液過濾系統).....	18
圖十二	抵達 Brindisi Sud 電廠	19
圖十三	Brindisi Sud 試驗廠啟用	20
圖十四	Brindisi Sud 試驗廠之 3D 圖.....	20
圖十五	由電廠四號機煙道氣管路引接試驗廠	21
圖十六	試驗廠運轉測試時程規劃	21
圖十七	濕式靜電集塵系統	22
圖十八	捕集設備流程圖	22
圖十九	吸收塔/脫附塔	23
圖二十	化學溶液儲槽	24
圖二十一	現場控制中心	24
圖二十二	溶劑系統手動緊急設施	24
圖二十三	於 Brindisi Sud 電廠內討論規劃	25
圖二十四	減碳園區預計規劃區域	26
圖二十五	減碳園區案目前製程規劃	28
圖二十六	討論減碳園區案規劃	28
圖二十七	減碳園區案目前規劃(捕集製程區)	29
圖二十八	尼德勞森試驗廠	31
圖二十九	尼德勞森試驗廠製程圖	31
圖三十	尼德勞森試驗廠 MEA 與 GUSTAV200 試驗結果(90%捕集率下)	31

表目錄

表一	三種主要碳捕集技術優劣比較	10
表二	燃燒後捕集主要技術概述	11
表三	減碳園區案招標文件需求	27
表四	尼德勞森碳捕集試驗廠設計參數	30

壹、目的

二氧化碳是環境暖化中重要的議題，雖其對溫室效應之貢獻不如水蒸氣，但因其吸收了絕大部分地球表面熱輻射可穿透水蒸氣之波長 12-15 μm 的能量，並且是隨人類工業發展而增強的。目前大氣中的二氧化碳濃度已自工業革命前的 280ppm 提升至今年 6 月高達 424ppm，此段期間全球溫升已超 1.1 $^{\circ}\text{C}$ ，並有極高的機率在十年內突破 1.5 $^{\circ}\text{C}$ ，造成大量物種滅絕/瀕絕。

國際能源署在 2020 年特別發表了針對碳捕捉利用及封存 (Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage) 的專刊，其中便提及碳捕集與封存能「間接或直接的對全球能源系統幾乎所有部門作出減碳貢獻」，為緩解氣候暖化作出重要貢獻；在國際能源署同年的能源展望報告中，將此技術與「再生能源發電為基礎的電氣化 (Renewables-based electrification)」、「生質能源 (Bioenergy)」及「氫能 (Hydrogen)」，並列為未來能源轉型的四大支柱。

不單單是他有減碳的功能，而是要憑目前的能源轉型或電動車等發展情形推估，如不針對既有的工業或能源業排放做減排，是毫無可能在「不對經濟有重大影響下」達成目前任何國際間的減碳目標—即便是最寬鬆的；並且，CCS 可以很好的「改裝 (Retrofit)」在既有的廠房上，讓既有的工業廠不必為了達成減碳目標而提早退役、建立新廠，而是能在原廠的生命週期中用較少的資金降低其生產過程的碳排放。然而，碳捕捉不是一個全新出現的技術，但目前大規模的運用多在化石能源業、化工製程廠或建材產業；在能源部門運用仍有偌大的潛力，如化石燃料電廠的減碳，甚至是被稱「負碳排」的生質能電廠 (BECCS) 及配合未來氫能需求，提供「由灰變藍」的低碳氫氣製造。

這也是為什麼我們要開始做配合政府及國際之環保目標，在台灣公私部門皆戮力推動減碳時，本公司更為政府重點減碳部門，在大力發展再生能源外，也亟力推動發展電廠碳捕集及封存，尤其在較高碳排放的燃煤電廠。配合本公司即將執行小規模碳捕集試驗案，本次請碳集公司協助安排，至義大利規劃設計專業廠商 Termokimik Corporation Impianti e Procedimenti Industriali s.p.A.（下稱 TKC）實習，希望藉此行了解（一）國際顧問廠商實際規劃、管理工程之經驗及（二）工程實際設備施工檢驗之技術；以期未來工程順利執行及優化管控，防範風險於未然。

貳、過程

項次	時間	前往機構	工作內容
-	1121111-1121112	去程（台北－米蘭）	
1	1121113-1121114	Termokimik Corp.	碳捕集製程規劃設計技術實習 I
2	1121115-1121116	Centrale Termoelettrica ENEL Federico II	碳捕集廠管路及設備 施工檢驗技術實習
3	1121117-1121120	Termokimik Corp.	碳捕集製程規劃設計技術實習 II
-	1121121-1121122	返程（米蘭－台北）	

參、研習內容

一、碳捕集製程規劃設計技術實習

1. Termokimik Corporation 公司介紹

本次參訪義大利 TKC 公司，首先由該公司的銷售經理 Matteo 主持，會同技術經理 Massimo、製程工程經理 Alberto、製程技術經理 Roberto、工程師 Mario、Virginio 及 Davide 進行簡報，介紹該公司的沿革、規模及業務範圍。

TKC 公司自 1938 年創立已有 85 年的歷史，其設立之初的專攻領域是船用的動力系統；戰後，義大利及鄰近各國開始亟需重振民生工業，TKC 公司慢慢開始轉型，成為從機械製造、設廠規劃、設計製程、工廠運維至統包整合（Turnkey）一系列皆有涉及的工程顧問角色。提供的服務可細分為研發、實驗測試、示範場址建立、製程開發、可行性研究、設備製造、建廠、試運轉及人員訓練等。

總公司約占地 9,000 平方公尺，位於米蘭市 Crescenzago 地鐵站附近，而在克洛尼奧(Cologno Monzese)則也有一占地 10,000 平方公尺的試驗工廠。目前該公司主要依工程業務分為三大區塊：廠房、水處理及廢棄物處理(含焚燒發電)，近年尤其在既有廠房的空汙防制、脫硫脫硝上多有涉入，並且在許多水處理、氣體處理設備是世界供應商中的佼佼者。該公司另有一負責客戶服務領域的獨立部門，由有建廠、試運轉及運維實際經歷的多領域工程師組成技術團隊提供服務，如客戶提出要求，技術人員到現場指導操作設備及調試等運維協助；此外，也可配合開辦培訓課程，多半會在其總公司安排，提供合格的講師、教材、教學場地及模擬設施，進行理論與實際操作的訓練。

在對方介紹所經營的各項業務之際，也順道逐層就總公司大樓做導覽，在會議室旁就有一間類船艙風格的純木裝潢房間，懸掛著一個標誌性的舵輪及陳列著獲得的獎項，以及過往設計過的引擎及廠區模型。各層分別是個個設計部門，看得出員工幾乎都是有設計能力的資深工程師，在其設計部門時，該公司一並展示了其建模時使用的 AVEVA E3D 軟體；採以 3D 直接繪製，可讓廠區管路及儀表 (P&ID)圖及建築結構圖整合，多部門同時進行作業並避免衝突。工程師 Virginio 補充，一般在現勘期間他們會先使用儀器做雷射掃描做點狀雲的全現況諸元建模 (3D Laser scanning as-built modelling with point clouds)，並可匯入軟體做底圖建置；這在既有廠房的工程中相當重要，也是 TKC 公司在承攬規劃許多既有廠房之空汙改善及既有系統更新設備專案時設計的利器。

之後，在技術經理 Massimo 帶領下，我們走進總公司後方一個工作坊式的控制模擬中心，裡面有幾台用模擬現場監控訊號的控制盤。經理表示，當設計部門配置完廠區的 P&ID 後，公司會實際到此接線模擬測試，以時刻確認設計的品質，避免到現場適配監控訊號時出現沒有預期到的問題；平時該地方也提供工程師自行用來做設計的討論及實驗，精進本質學能。



圖一 TKC 公司米蘭總部正門及俯瞰圖



圖二 TKC 公司位於克洛尼奧工廠之正門及俯瞰圖



圖三 與 TKC 公司會面進行簡報



圖四 參觀 TKC 公司總部之控制模擬中心

2. 碳捕集技術探討

所謂碳捕集與封存(CCS)誠如其字面上的意思，便是將工業生產過程中產生的二氧化碳盡可能捕獲下來並進行長期貯存，避免直接排放至大氣造成地表溫室效應，主要可分為捕捉、運輸及封存三個階段。

依照目前的技術，碳捕捉可降低約 90%的二氧化碳排放，經暫存處理後再將捕捉的二氧化碳運輸，可送入自然形成的高壓岩層中所找到適合封存的結構，並在附近投入長期監控的設備確保貯放的穩定，完成整個過程。而其中，氣體的運輸在化工產業已有較多經驗及成熟技術；在封存方面，早在 1952 年便有將二氧化碳及碳酸水注入地層以增加石油產量的技術(二氧化碳灌注增產法，Carbon dioxide flooding)，並於 1970 年代後蓬勃發展並廣泛的使用在化石能源(Enhanced Oil/Gas/Coal Bed Methane Recovery, EOR/EGR/ECBM)產業中，惟以往的 CO₂ 係以購買取得。在 CCS 過程中，捕集階段的成本占約 60~70%，而 CO₂ 的購買也佔增產法的成本大宗（以 EOR 為例約 65%）；因此不論是為減碳而封存或是用來勵產，現今發展重點皆集中在亟欲降低成本的捕集階段。

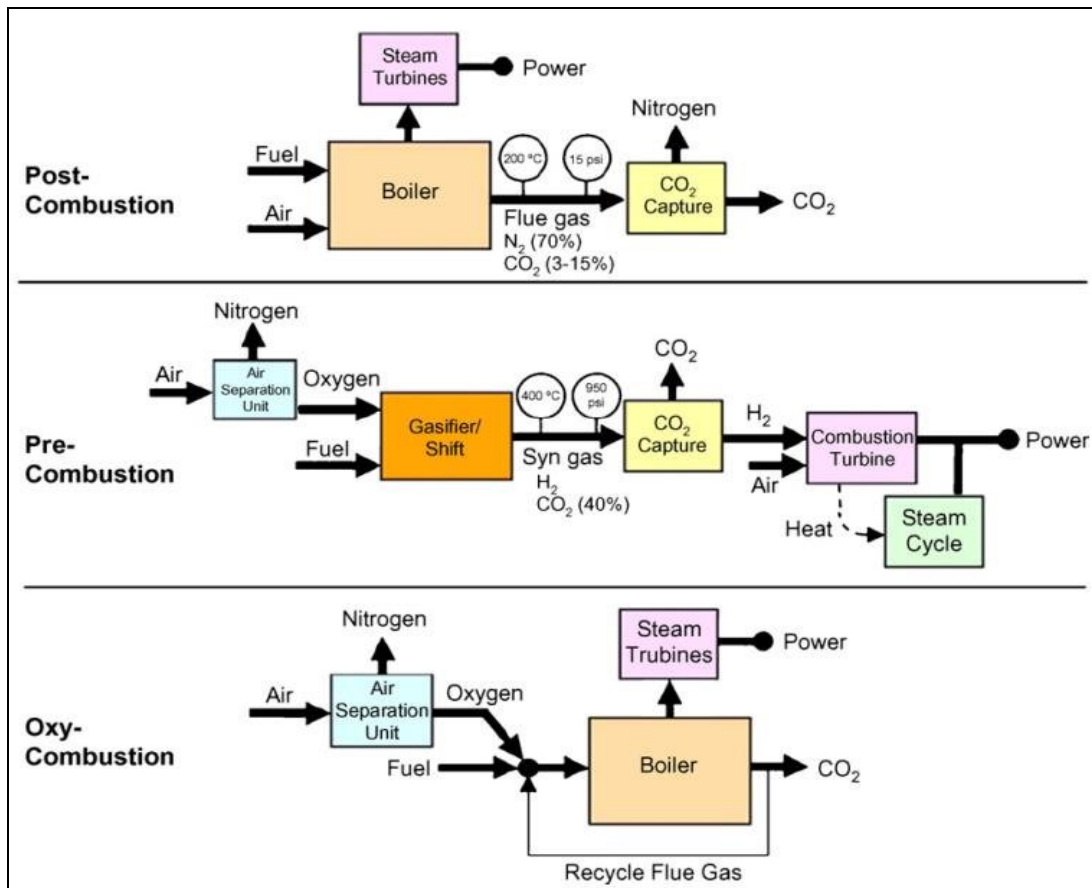
目前捕捉二氧化碳（在火力電廠等燃燒製程）的方法依介入將碳分離與燃燒的階段可分為燃燒後(Post-combustion)、燃燒前(Pre-combustion)及富氧燃燒(Oxy-fuel)。燃燒後捕集誠如前述所說，燃料仍先經過燃燒發電，二氧化碳直到在煙道氣(Flue Gas)階段才分離出來，因煙道氣量大且比起內含二氧化碳濃度較低(如燃煤機組約 10~15%、燃氣機組約 5~8%)，一般需使用較耗能的化學吸收技術，並在建置系統時需考量通入的大量氣體，設備及占地需較大。不過這些缺陷也無法讓其

他方法取代燃燒後捕集可改裝於既有電廠的最大優勢。

燃燒前捕集主要係指先以氣化(Gasification)處理的方式，將包含化石燃料等有機燃料在高溫下(700°C~1000°C)不完全燃燒產生出含一氧化碳 CO 及氫氣 H₂的合成氣(Syngas)，也就是燃煤電廠中的氣化複循環(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)技術，再將合成氣通以中低溫水蒸氣與其發生水煤氣轉化反應，將 CO 充分氧化為 CO₂，便可在進入燃燒階段前就分離出燃料的碳，剩下的氫氣成為乾淨的發電燃料。在合成氣完全反應下，二氧化碳濃度可達 30~40%，故可採成本較低的物理吸收來收集，且綜合捕捉率達到 85~90%。但氣化反應及轉化反應的耗能及初始建置的成本頗高，除技術上仍有很大的進步空間，在相同排放下有更高的對應成本，導致 IGCC 電廠發展也遠不如天然氣複循環電廠(NGCC)，目前世界上沒有商轉中的案例。

而富氧燃燒是非常好理解的，將空氣通入低溫分離設備(Air Separation Unit)，去除佔空氣中大部分(~78.1%)的氮氣(N₂)，取得 90~95%以上濃度的富氧助燃氣用來燃燒化石燃料，增加燃燒效率外也大幅減少燃燒中氮氧化物(NO_x)的產生，獲得「乾淨」且大幅減量的煙氣；且依燃燒氣體的處理程度，煙道氣中的二氧化碳濃度可以高達 80~98%，大大減少捕獲二氧化碳的「純捕集」成本。惟製氧過程相當耗能，且富氧燃燒的極高溫(理論可達 2800°C)在現有的鍋爐技術(<1700°C)無法實現，距離技術成熟還有很長的距離。

也因此，未來本公司即將執行的減碳計畫係以燃燒後捕集為主，本次實習前往的廠址也是燃煤電廠的燃燒後捕集設備。



圖五 三種主要碳捕集技術大致流程

捕集方式	優勢	劣勢
燃燒後捕集 Post-combustion (PCC)	<ul style="list-style-type: none"> • 可以改裝於既有電廠 • 技術成熟、研發成本較低(溶劑) • 能量成本較低(約 15~20%機組能量) 	<ul style="list-style-type: none"> • 處理氣體 CO₂ 濃度低 • 處理大量低壓氣體，需建置大型輸送系統及熱交換、飼水等輔助系統 • 化學吸收過程耗能大且消耗溶劑
燃燒前捕集 Pre-combustion	<ul style="list-style-type: none"> • 較 PCC 省水 • 建置成本較 PCC 低 • 處理器替高壓高濃度(~45%)可用物理吸收法捕捉 CO₂ • 能量成本較低(約 15~20%機組能量) 	<ul style="list-style-type: none"> • 仍需建置 CO₂ 純化設備 • 前置程序複雜耗能，氣化需製氧 • 目前氣化複循環 IGCC 機組極少
富氧燃燒 Oxy-fuel combustion	<ul style="list-style-type: none"> • 理論捕集效率最高(~98%) • 製氧技術成熟 • 後處理氣體量少，規模尺度小 	<ul style="list-style-type: none"> • 需大量製氧(ASU)，耗能高 • 仍處發展階段初期，研發成本高 • 能量成本最高 • 燃燒後 CO₂ 有潛在洩漏問題

• 除上列外還有其他方式如化學循環燃燒(Chemical looping combustion)等

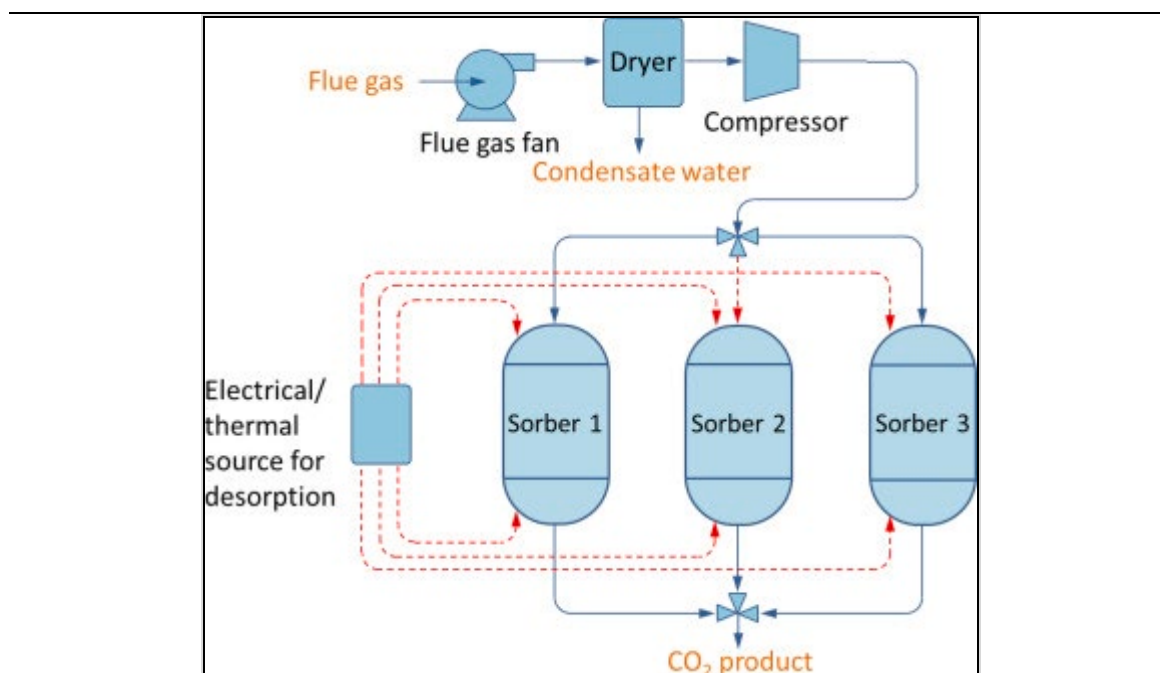
表一 三種主要碳捕集技術優劣比較

3. 燃燒後化學吸收技術探討

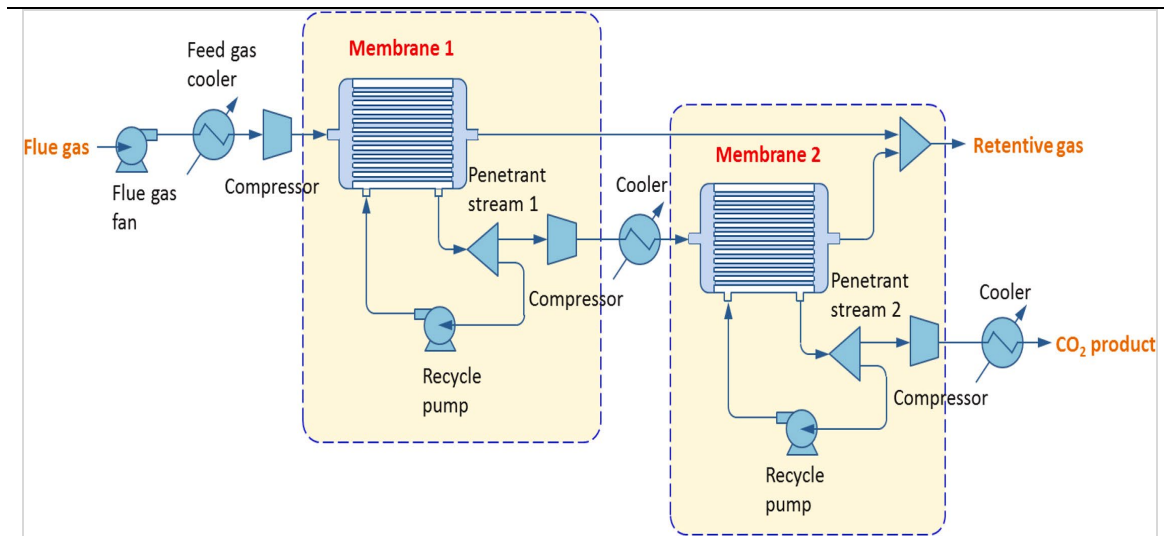
除了以捕捉階段的方式分類，也有以於氣體中擷取二氧化碳分子手段的分類。目前發展中的有吸收法(物理、化學)、吸附法(物理、化學)、薄膜分離、低溫冷凝及微藻固碳等，而前三者是目前較成熟且可實現大尺度的技術。

	使用技術	利用性質(主要)	使用設備/材料/溶劑/吸附劑
燃燒後捕集 Post-combustion	吸收 Absorption	化學(熱/鍵結)	· 醇胺、氨水、鹼液、離子液等
		物理(溶解度)	· 甲醇、NMP、DEPG 等
	吸附 Adsorption	化學(熱/鍵結)	· 胺基材(嫁接、浸漬等)，金屬氧化物及金屬鹽等
		物理(壓力)	· 碳基材、沸石、介孔 SiO ₂ 、金屬有機框架等
	薄膜分離 Membrane	篩分、擴散、 傳輸	· 高分子聚合物(配合吸收劑使用)
	低溫冷凝 Cryogenic	物理(相變化)	· 冷媒(LNG/其他冷劑)
微藻固碳 Microalgal fixation	生物化學	· 酵素(水解酶催化)、碳酸酐酶	

表二 燃燒後捕集主要技術概述



圖六 物理吸附法製程圖



圖七 薄膜吸收法製程圖

物理吸收法一般使用甲醇(Rectisol)、DEPG(Selexol)、NMP/NM2P(Purisol)或碳酸丙烯酯(Fluor Solvent)等酸性氣體去除(acid gas removal)劑來去除處理氣體中的CO₂及H₂S，因為藉以凡德瓦力吸引分子，利用溶解度(高壓低溫下溶解度大，反之則小)的變化來捕碳及還原，需要使處理氣體在高壓下(依溶劑 2~15MPa)且二氧化碳分壓高的情形才有可利用的捕獲率，而燃燒後產生的煙道氣量相當大且接近常壓，再利用大型加壓設備及建置大規模耐壓管路設備並不現實。

化學吸收法是目前最常見的技術，以鹼性溶劑與處理氣體酸性中和的化學反應方式抓下CO₂，產生對溫度敏感的不穩定鹽結構，以在後續加熱程序中還原。使用溶液如醇胺類(乙醇胺 Monoethanolamine, MEA、N-甲基二乙醇胺 N-methyldiethanolamine, MDEA、二乙醇胺 Diethanolamine, DEA 等)、碳酸鉀或鹼液、離子液體等。一般設置如洗滌塔結構的吸收塔(absorber/absorption column)，可在常溫常壓下使煙道氣與溶劑充分接觸、反應，故在燃燒後捕集為使用最大宗，然而其需面對溶液的熱裂解、蒸發流失以及鹼性溶液在製程中常有的腐蝕問題，並且在再生程序需加溫故耗能較高。

吸附法是目前正在研究的方向之一，相較吸收法的優勢是耗能較低，且使用吸附劑(Sorbent)量較小，成本較低。其使用的關鍵是選擇性、吸附量限制及反覆再生後吸附材的穩定性等問題。化學吸附法一般以胺基嫁接或浸漬化合物作吸附材，吸附時如同化學吸收法產生化學反應，故選擇性較高，而因吸收產生化學鍵，再生時也須加熱還原。

物理吸附法是以利用碳基吸附材(Carbon-based adsorbents)、沸石(Zeolites)及金屬有機架構(Metal-organic frameworks, MOFs)，是利用二氧化碳分子與吸附材的凡得瓦力或靜電力等弱交互力捕捉，故還原(脫附)過程耗能更少；部分吸附材也因此選擇性較差，而 CO₂ 及 N₂ 因分子運動直徑接近而使用篩撈法無法分別，影響吸附量，同時如活性碳、沸石等吸附材碰到水氣會堵塞孔洞，大幅降低吸附效率。合成沸石(Synthetic zeolites)可調整矽氧化物及鋁氧化物發的比例及結構，是可期待的研究方向。吸附及脫附則依吸附材有不同適合程序，一般物理吸附適用變壓吸附(Pressure Swing Adsorption, PSA)及真空吸附(Vacuum Swing Adsorption, VSA)，高壓吸附而降壓脫附；化學吸附法則使用高溫脫附的變溫吸附(Temperature Swing Adsorption, TSA)。

薄膜分離法主要使用聚合物(Polymeric)材料，以薄膜兩側的壓差來驅動氣體的滲透，可省去還原過程的能耗，對壓力的要求也不高；但如同固體吸附一般，在 CO₂ 分壓大、氣體成分單純時更適用(如合成氣的 CO₂/H₂ 分離或者石化業的 CO₂/CH₄ 分離)，目前研究著重在材料本身的選擇性(以燃燒後煙道氣來說是 CO₂/N₂)及多層設計優化上，也用將其與化學吸收劑配合的使用，仍有發展潛力。

冷凝法是將常壓煙道氣通過乾燥系統，將氣體降至 CO₂ 凝華點(~78.5°C)附近，再以液態冷媒接觸繼續降溫並為 CO₂ 提供「成核點」(nucleation site, 提供局部結構密集的表面加速相變化)，降至-120°C 以下時，超過 90%的二氧化碳分子在液態冷媒間成為小固體顆粒，再將此混合物進行固液分離；冷媒及其他低溫物則可循環回系統初階做冷卻劑節省能源，而 CO₂ 則可以在輸送過程以加壓液輸送；但在大規模的使用中，降溫設備大且運維費用昂貴。

微藻固碳則是利用藍綠菌的各種形式如藍綠藻、紅藻及矽藻等對強大的光合作用效率(可達陸生植物 10~50 倍)、環境適應性及複製生長速度。並且用此方式不用做氣體的先處理，微藻在有其他一般煙道氣組成如 SO_x, NO_x 下不影響對 CO₂ 的吸收。但這項技術仍處在實驗室/較小規模的階段，仍需克服光照、可控生長及與其他生物間影響等問題。以下僅就本次實習案址所使用的化學吸收法做探討。

	PROs	CONS
Amine washing	<ul style="list-style-type: none"> - Industrial scale plant already in operation - Operating parameters suitable for coal fired combustion conditions 	<ul style="list-style-type: none"> - Flue gas pre-treatment needed - Solvent require special handling
Hot potassium washing	<ul style="list-style-type: none"> - Industrial scale plant already in operation in Oil and Gas - Not dangerous solvent 	<ul style="list-style-type: none"> - Operating condition not suitable for coal combustion flue gas
Calcium looping	<ul style="list-style-type: none"> - dry technology 	<ul style="list-style-type: none"> - still under development

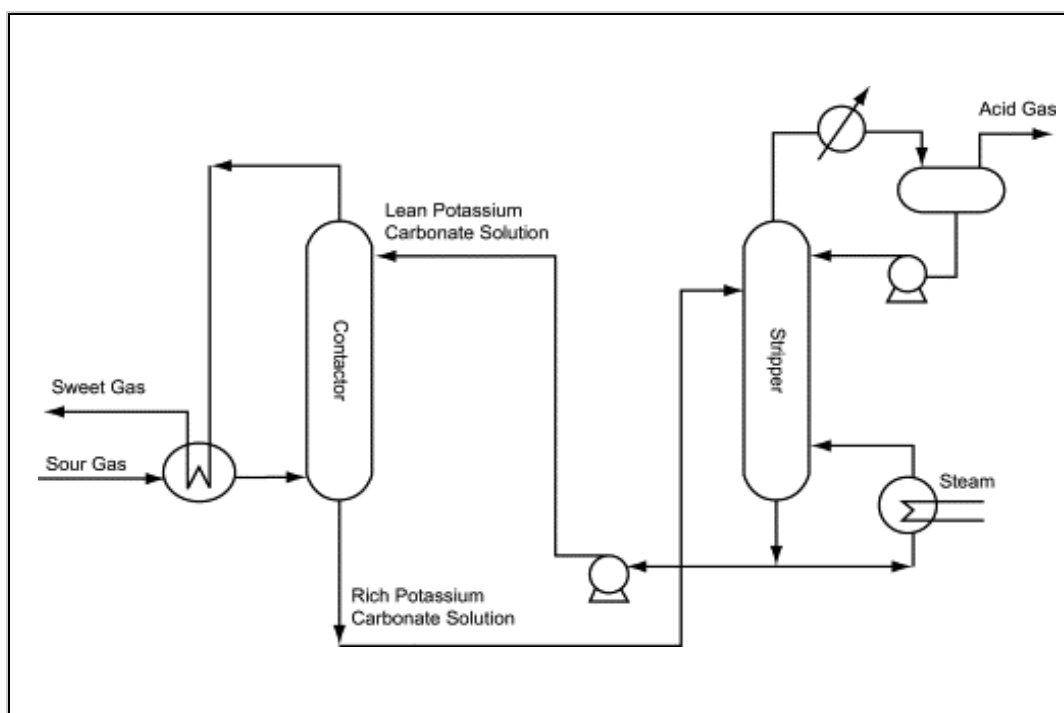
圖八 於 TKC 總部實習(化學吸收法)

4. 化學吸收法

前段提到各種吸收技術的適用情境，本段就目前燃燒後捕集最多使用的化學吸收法做介紹，並以較常使用的吸收劑醇胺溶液及碳酸鹽溶液法分別說明。

(1)碳酸鹽吸收法

碳酸鹽類溶液(主要指活性較高的碳酸鈉及碳酸鉀)很早就被用在去除 H_2S 及 HCN 等分子的氣體去酸化製程中，最常用在純化天然氣或合成氣，如傳統的熱碳酸鉀法、加入催化劑加速吸收的 *Catacarb process* 或優化後的本菲爾德法(*the Benfield process*)等；其原理即是溶於水中的碳酸根吸收二氧化碳成為碳酸氫根的可逆過程，但共同使用的限制是必須在 CO_2 有較高的分壓下才能捕捉，且如需達較大規模的製程，溶劑成本高。

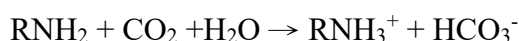


圖九 碳酸鹽捕集製程圖(熱碳酸鉀法)

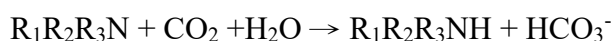
(2)醇胺吸收法

醇胺吸收法是以醇胺水溶液作為溶劑來吸收 CO₂，由於可以簡單地作製程放大、溶劑選擇性及吸收度高且較為便宜等優勢，是目前商業製程中最廣泛及成熟的碳捕集方式，也是本次實習重點。

化學吸收法使用之醇胺溶液濃度須顧及捕集容量比(處理氣/溶劑)及化學反應效率故不能太低，又不能太高造成過強腐蝕性，多約於 20~40%間。可用於捕碳的醇胺依原氨分子(NH₃)上被取代的氫可分為一級胺(Primary, RNH₂)、二級胺(Secondary, R₁R₂NH)及三級胺(Tertiary, R₁R₂R₃N)；一級胺及二級胺溶劑以大多以溶液中的胺基捕捉 CO₂ 形成胺基甲酸根(Carbamate)，僅有少部分結合為碳氫酸根(Bicarbonate)：



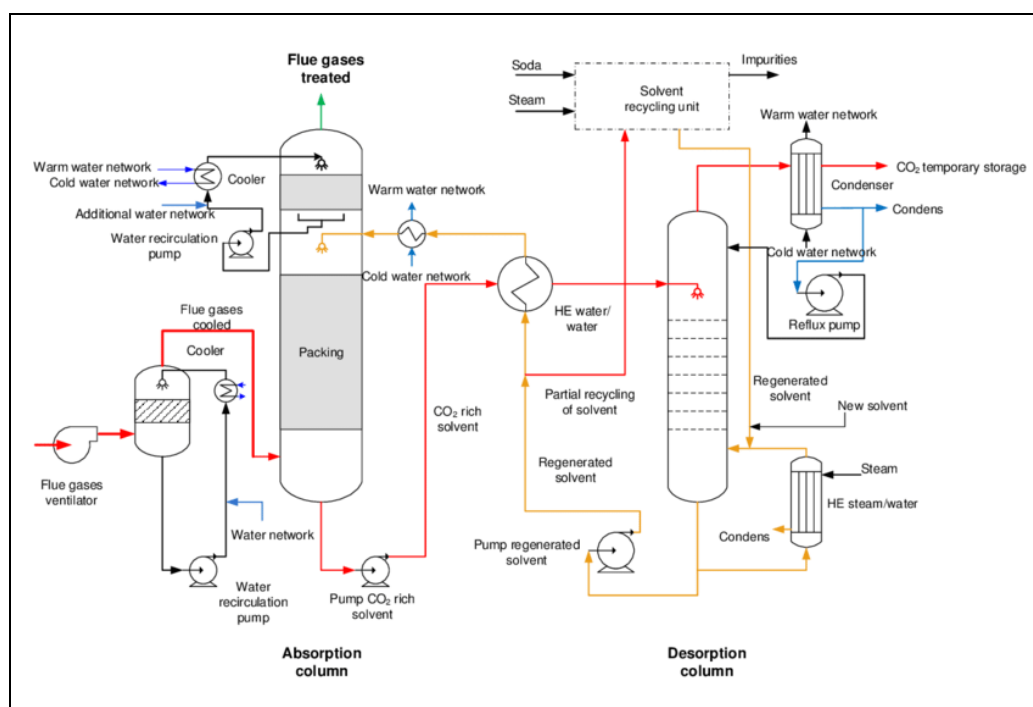
而三級胺則以溶液中的氫氧根捕捉 CO₂ 形成碳酸氫根；再生反應則反之。



由反應式可看出每莫爾的 CO₂ 負載雖以下列三級胺較高，但 Carbamate 形成反應速率較快，效率較高，卻也因放熱較大以致再生過程需要用更多能量，各有所長。除以上三類外，也有環胺、多元胺或其他結構製造空間位阻的胺類適合使用，在碳捕集製程選用時，必須綜合考量較低的溶劑腐蝕性、裂解速度、黏度、蒸氣壓及製造成本等因素搭配，目前市面上商用醇胺類溶劑都是多種不同胺不同濃度並以各種比例製備。

(3)吸收程序

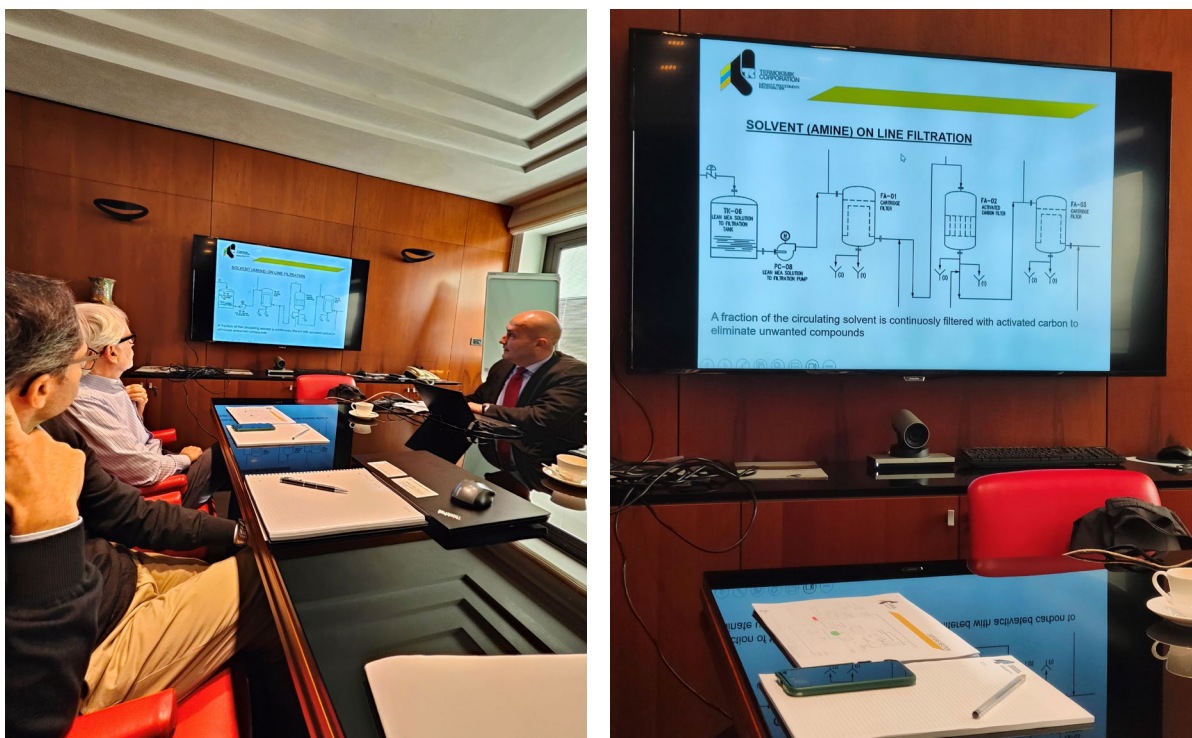
為使吸收劑效率更好，煙道氣一般需經過 FGD(Flue Gas Desulfurization，煙氣脫硫設備)、SCR(Selective Catalytic Reduction，選擇性觸媒還原)及其他洗淨設備預處理，過濾掉顆粒物及硫化物、氮化物，並使其盡可能冷卻後，由下通入吸收塔；未吸收二氧化碳的溶液(或稱貧液，lean solution)則從上方通入並經分佈器均勻灑下，在吸收塔內並有多層密緻網格的構造填充(Packing)，盡可能在增加氣液分子接觸表面積下又能減少阻抗，不使液體或氣體滯留於塔內，而吸收塔上部通常會有水洗段，利用冷凝方式留住溶劑，盡量避免溶劑隨煙氣排放耗損。經重力流至塔下的溶液經吸收過程，成為充滿不穩定鹽類的富液(rich solution)，再將其通入再生/脫附塔(recovery/stripper column)流經層層的再分布版及填充材，進行「加熱蒸餾」；最終於塔端可蒐集到高純度的氣態 CO₂(與部分溶劑、水蒸氣，須經冷凝循環送回塔)，而塔底則獲得再生完成的吸收劑，再泵送至吸收塔使用。



圖十 商用化學吸收製程

此程序主要的能量損失發生在再生階段的加熱，包含脫附塔製程所需的熱及用來回收再生製程中產生的熱穩定胺鹽(Heat stable amine salts, HSAS，設置加熱回收器 Reclaimer 通以氫氧化鈉並加壓加溫至 8bar，160°C)，熱源在電廠主要使用蒸氣廢熱；而吸附階段發生放熱反應，故溶劑在吸收塔的起始溫度降低有助吸收效率；因此，系統通常將脫附塔下方輸送回吸收塔的「經再生反應後的熱貧液」(近 100°C)與吸收塔下方的中溫富液(約 50°C)先做熱交換，回收廢熱減少耗能。

另除再生塔的加熱外，較大尺度的程序中吸收塔也常裝設中冷設備，提高吸收效率；穩定運轉後，吸收塔上端的溶液起使溫度約落在 40°C，而在脫附塔上端約為 70~80°C。而為維持捕集效率及最小化溶液劣化，一般在儲存醇胺的儲槽也會配有活性炭過濾系統，去除掉過程中產生的雜質。



圖十一 於 TKC 總部實習(溶液過濾系統)

二、碳捕集廠管路及設備施工檢驗技術實習

1. Centrale ENEL Federico II 電廠碳捕集設備實習

在 TKC 總部實習相關原理後，由該公司安排下前往位於布林迪西省(Brindisi, Italy)，由義大利國家電力公司(Ente nazionale per l'energia elettrica, Enel)營運的費德里可二世電廠(Federico II；也被稱布林迪西南部發電廠，Brindisi Sud)。此電廠占地 270 公頃，自 1991 年竣工，1993 至 1997 年開始運轉，目前有裝置有 4 台 660MW 的燃煤機組共 2,640MW 的裝置容量，於運轉時年排放超過 1,400 萬噸 CO₂(2006)，是義大利最大碳排的電廠。世界自然基金會(World Wildlife Fund, WWF)在 2007 年 5 月「骯髒三十(Dirty Thirty)」報告中依據每度電的二氧化碳排放比將此電廠(840gCO₂/kWh)排名全歐洲第 25「骯髒」，提出可以利用 CCS 等方式來降低碳排。2011 年歐洲環境署(European Environment Agency, EEA)出版「歐洲工業設施的空污成本」中，將此電廠列為義大利第 1，全歐第 18 的污染源。

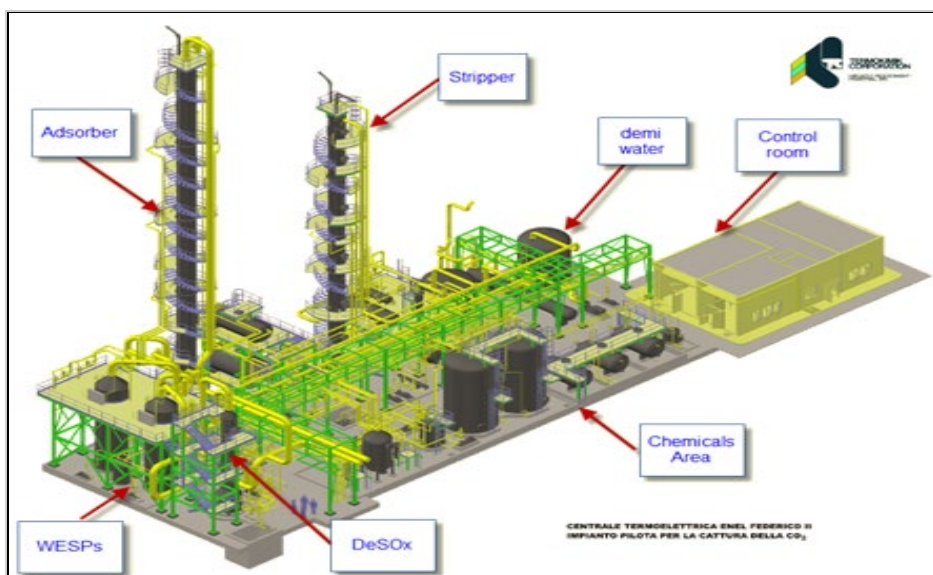


圖十二 抵達 Brindisi Sud 電廠

正因如此，2008 年義大利國家電力公司 Enel 與國家碳化氫公司(Ente nazionale Idrocarburi, Eni)簽訂了碳捕集與封存的戰略合作協議，共同執行義大利第一個 CCS 計畫，包含 Enel 公司在 Brindisi Sud 電廠建造二氧化碳捕捉及液化的示範廠，而 Eni 公司則在皮亞琴察省科爾泰馬焦雷(Stogit, Cortemaggiore)的廢棄氣井試驗 CO₂ 灌注。2011 年，Brindisi Sud 電廠的碳捕集示範廠正式在歐盟能源執委奧廷格(Günther Oettinger)、義大利環境保護部長普雷斯蒂吉亞科莫(Stefania Prestigiacomo)及當地省長市長等人出席下啟用。



圖十三 Brindisi Sud 試驗廠啟用



圖十四 Brindisi Sud 試驗廠之 3D 圖

本示範廠是引接電廠四號機組既有的 FGD 下游，預計處理 10,000Nm³/h 的煙道氣，並以 85%~90%捕集率每小時抓下 2.5 噸，每年 8,000 噸、純度大於 99%的二氧化碳；而實際運作範圍可適應最小 3,000 至最大 12,000Nm³/h 的流量，並於 2011 年、2012 年分別進行了 4,000 小時及 3,000 小時的連續運轉測試，實際捕集量約 2 tCO₂/hr。



圖十五 由電廠四號機煙道氣管路引接試驗廠

	2008	2009	2010	2011	2012
Basic Engineering	■				
EPC Contract Award	★				
Detailed Engineering	■	■			
Civil works		■			
Mechanical and Electrical Constructions		■	■		
Equipment testing			■		
Start-up			★		
Commissioning			★		
Experimental tests - MEA (20% - 30%)				■	
Experimental tests - Innovative Solvents				■	■

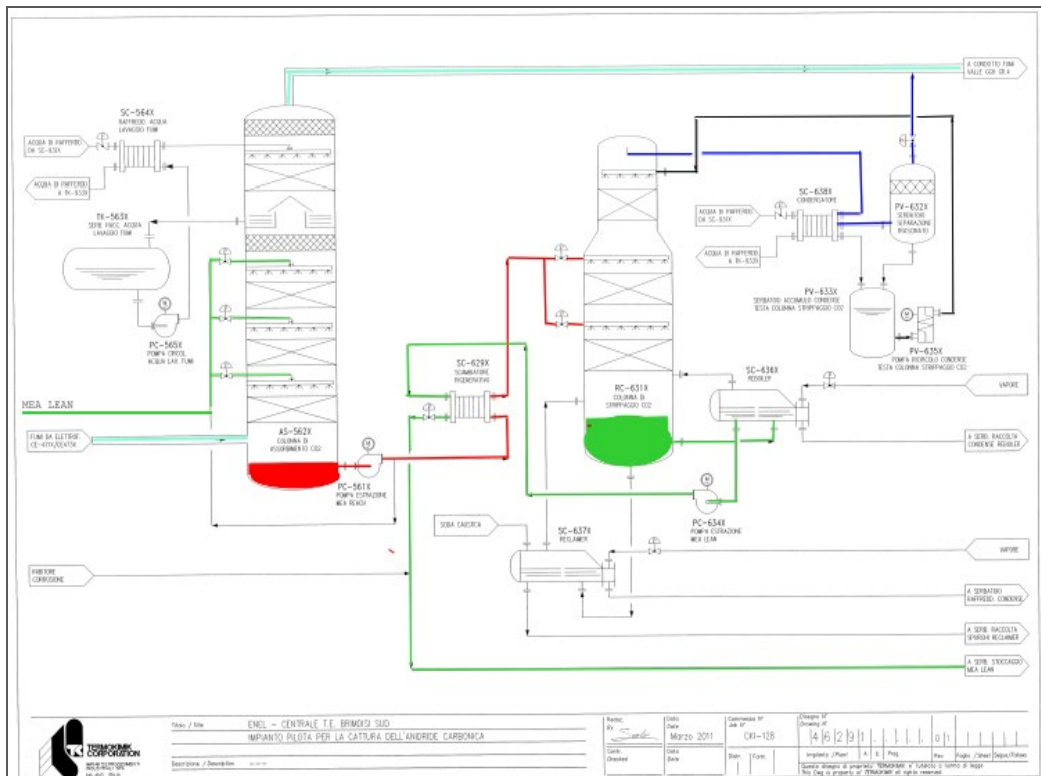
- 2011 → 4000 hr continuous operations; 8000 ton of separated CO₂
- 2012 → 3000 hr continuous operations; 6000 ton of separated CO₂

圖十六 試驗廠運轉測試時程規劃

而自煙道氣引接後，將陸續經過灰石(limestone, CaCO_3)再次脫硫、濕式靜電集塵系統(Wet Electrostatic Precipitators, WESPs)後，才進入吸收塔等捕集設備。而除主設備外，試驗廠還包含溶劑儲槽、冷凝系統、冷卻水系統、排水系統(開路及閉路)、消防系統及控制系統等。



圖十七 濕式靜電集塵系統



圖十八 捕集設備流程圖

本廠的吸收塔是內徑 1.5 公尺，由三層結構化填充材(structured packing)組成總高共 22 公尺的圓柱結構，溶劑使用量在測試期間可依煙道氣流量調整在 20~80m³/h；自脫附塔經板式熱交換器後通來的貧液另經冷卻系統及過濾器，塔上端也有設置一冷卻循環降低溫度。吸收塔周圍有設置環繞而上的步行樓梯，並在各層填充構造間設有取樣口；經處理過後的氣體則經上方洗滌段後接回至煙囪排放。

脫附塔內徑同為 1.2 公尺，內部填充三層隨機式填充材(random packing)，總高 10 公尺，操作壓力約在 2.5bar，在塔底除了將貧液泵送回吸收塔的系統外，也有利用電廠廢熱來回收(Reclaimer)再生過程產生的熱鹽及脫附塔加熱之再沸器(Reboiler)使用；富液經加熱後逆反應陸續脫出 CO₂，由上端進入冷凝系統及分離器後，CO₂ 輸送至液化系統，溶液泵送回塔頂端分布器。



圖十九 吸收塔/脫附塔



圖二十 化學溶液儲槽



圖二十一 現場控制中心



圖二十二 溶劑系統手動緊急設施

此示範廠自 2011 運轉至 2013 年試驗完畢後大部分停止運行，一部分因三年的試驗已達成目的，計畫沒有編列之後的資金；另一方面是歐洲後來大量推行以煤改氣，義大利政府經濟勞動部與環境部也在 2019 年聯合提出國家能源政策 (Piano nazionale Integrato per l'Energia e il Clima, PNIEC)，定於 2025 年前關閉國內的燃煤電廠，Enel 公司也預計將此電廠改建為總容量 1,680MW 的天然氣複循環機組（雖在之後各環保團體又在供電無虞的情況下，支持燃煤機組俟年限屆齡後即停役而反對原址改建燃氣機組）。在此背景下，電廠燃煤機組已鮮少滿載運轉，煙道氣沒有穩定供應；惟在 2022 年爆發俄烏戰爭後歐洲制裁俄國天然氣，此電廠才又短暫的運行約一年，參訪時此電廠也並無實際發電，三部機組待命而一部正進行歲修。



圖二十三 於 Brindisi Sud 電廠內討論規劃

2. 台中減碳技術園區小規模碳捕集廠設備(下稱減碳園區)

台電公司近年除原先了穩定供電的職責外，也站在節能減排的風口浪尖；身為國營能源公司，確有承擔試驗碳捕集廠之義務，考量化石燃料仍為基載電源，故以碳捕集技術導入本公司既有電廠是可行的權宜之計。本公司自 97 年即開始作二氧化碳捕集技術之研究及試驗，107 年全方位評估廠址開發、經濟效益至營運規劃開始規劃減碳技術園區，並於 110 年開始招標台中減碳技術園區捕及設備採購代安裝及運維測試案，今(112)年 10 月決標，由 TKC 公司負責設計。

承前所述，燃煤機組因其煙道氣二氧化碳含量較高，較具增設減碳設備的效益；本公司目前的燃煤機組分別位在林口、台中、興達及大林電廠，其中台中電廠是最大的單一排放源。而本公司之前為研究地下封存，已針對碳封存儲集層(砂岩層)厚度較厚、地震危害潛勢較低及地殼較穩定(變動率低)作調查，得到台中至彰化濱海的台西盆地最為適宜，另也已於 2010 至 2013 年間於原彰工電廠預定地內作鑽井測試；綜合以上原因，本試驗廠址選於台中電廠。



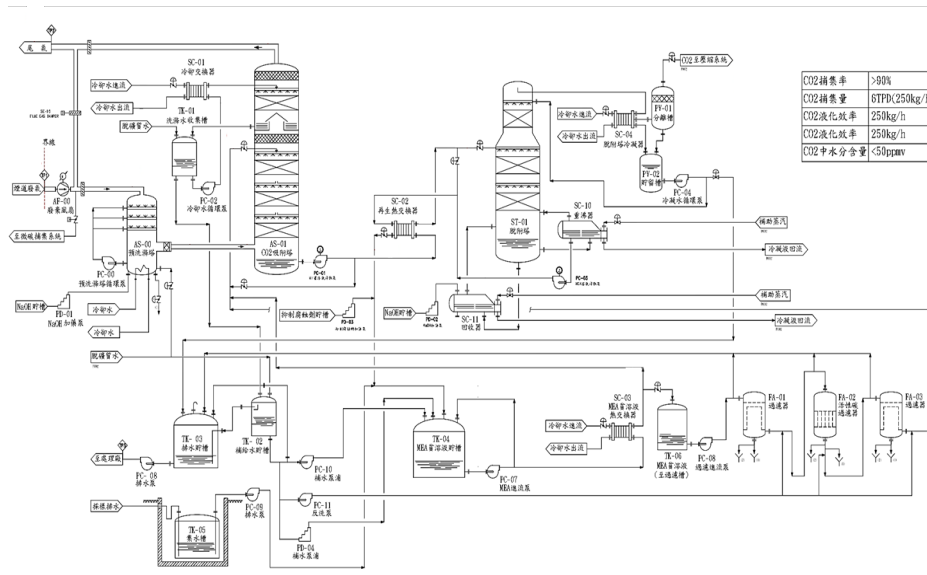
圖二十四 減碳園區預計規劃區域

本計畫預計使用九號機煙道氣，引接自 FGD 脫硫設備之後、再熱器(flue gas reheater, FGR)之前，額定流量 1,000~1,100Nm³/h(13~15% CO₂)，處理過後之尾氣回流點亦同。主要設備包含煙道氣風扇、預處理設備、吸收塔(含水洗段)、貧富液熱交換器、脫附塔、加熱回收器、溶劑儲槽、CO₂液化系統及儲槽及輔助系統。

捕集	需求規格	排放尾氣	需求規格
CO ₂ 捕集率	≥ 90%	醇胺溶劑殘留	< 1ppmv
額定捕集量	≥ 6TPD(250kg/h)	NH ₃	< 3ppmv
CO ₂ 液化量	≥ 250kg/h	NO _x	No Increase
負載調節能力	50~110%	Particles	< 10mg/m ³
CO ₂ 純度	> 99.5%	能量效率	
含水量	< 50ppmv	特定再沸器功率	< 3MJ/kgCO ₂

表三 減碳園區案招標文件需求

煙氣自 FGD 後經風扇引流至洗滌塔，以氫氧化鈉預洗滌，稍降溫至 40~50°C 後自塔底送入吸收塔。本案吸收塔以三層可調式填充材以供日後調整，並預留多採樣點。在吸收反應過程中煙氣溫度將稍微提升至 60~70°C，再經至少三段水(酸)洗處理捕捉溶液蒸氣及洗去其他雜質，尾氣循環回原九號機排氣系統 FGR 之前；而吸收 CO₂ 後之富液(約 45°C)自吸收塔底泵送經貧富液熱交換器後進入脫附塔。脫附塔有三個同樣可調整之填充段及取樣點，富液自頂段分布器流下與其蒸氣完整接觸，底部連接再沸器，將留滯底部溶劑再加熱並送回塔內。脫附之 CO₂ 自頂部進入冷凝循環，分離出水蒸氣後(回送至塔)，將二氧化碳降溫送至壓縮機進入純化系統及儲槽。本案由於無法使用電廠之廢熱蒸氣，再沸器之熱須由新設電熱鍋爐提供飽和蒸汽，再沸器所需之蒸氣溫度約為 130°C，再生器約為 180°C。

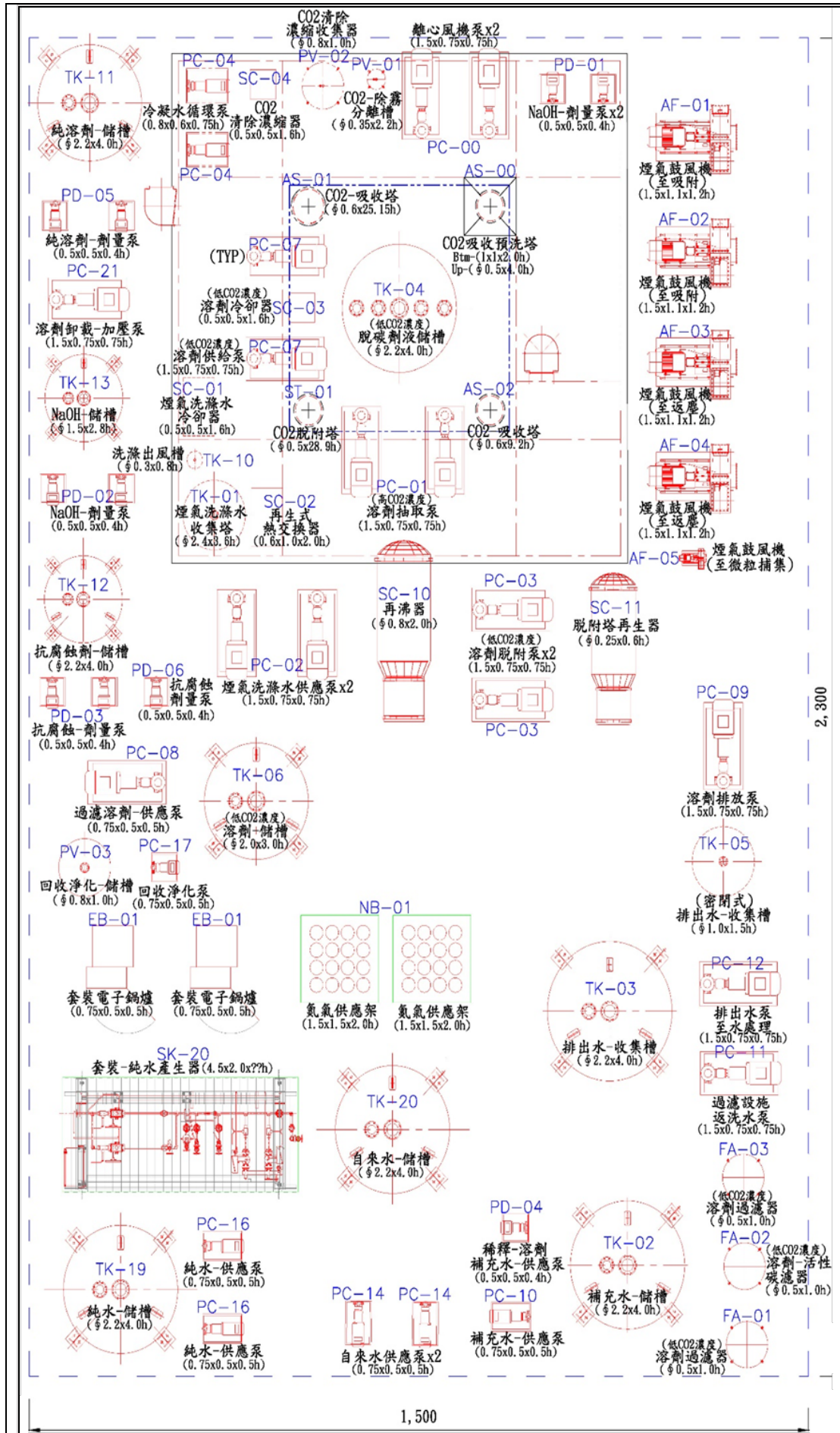


圖二十五 減碳園區案目前製程規劃

配合本案規定之吸收比率、吸收量及填充材量，目前 TKC 公司規劃吸收塔直徑雖僅 60 公分，高度卻須超過 30 公尺之高，故將水洗段分開設置，主塔約 26 公尺，副塔約 9.5 公尺；而脫附塔之直徑 50 公分，高度約為 29 公尺。三塔外觀與 Brindisi Sud 廠址同設置旋轉樓梯，各層填充材及分布器設有取樣點；並與煙道氣之預洗滌塔(高 6 公尺含下部邊長 1 公尺矩形及上部直徑 60 公分圓柱)以 2x2 排列，因應台灣地震及颱風頻繁，外部可能會加以結構支撐包圍；此外，因九、十號機輸煤廊道通過上方，TKC 公司也特別考慮施工機具及設備進場的問題。



圖二十六 討論減碳園區案規劃



圖二十七 減碳園區案目前規劃(捕集製程區)

而本案目前預計使用的技術是巴斯夫公司(BASF)的 OASE[®] blue 製程，該製程首次試驗係由林德集團(The Linde Group)、巴斯夫及萊茵發電(RWE Power)合作，於德國尼德勞森褐煤電廠(Kraftwerk Niederaußem)建置，2009 年起運轉的小型試驗廠。試驗廠取用電廠 K 區 1,000MW 的「1 號優化褐煤技術」機組 (Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik, BoA1)之 FGD 處理後煙道氣。

設計參數(FGD 後、進入吸收氣前)			
煙道氣流量	1,550Nm ³ /h	煙道氣 SO ₂ 濃度	93mg/Nm ³
煙道氣溫度	65 °C	煙道氣 O ₂ 濃度	5.0%
煙道氣 CO ₂ 濃度	14.2%	最大捕集量	7.2TPD
煙道氣 NO _x 濃度	190mg/Nm ³	可用性	~97%

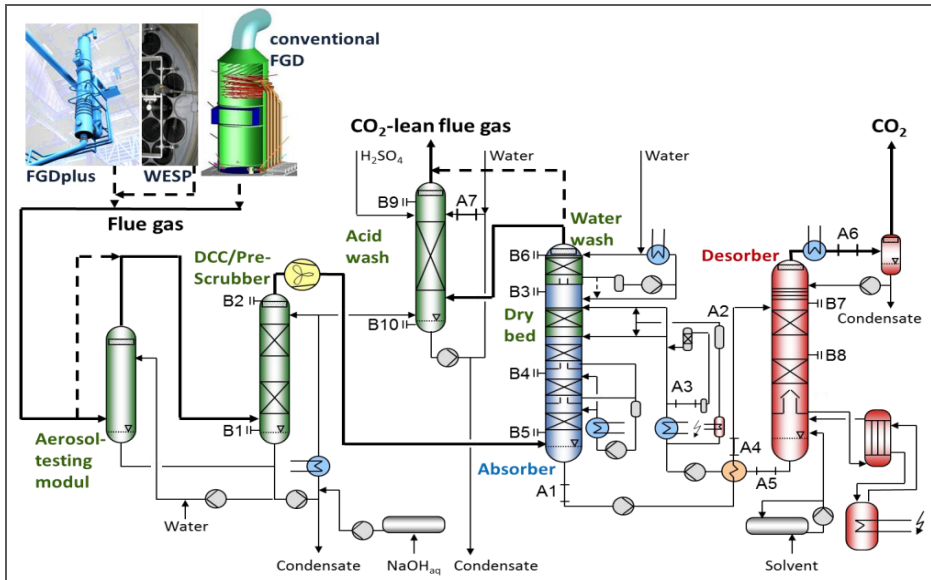
表四 尼德勞森碳捕集試驗廠設計參數

在試驗中，設備先自 2009 年 7 月以 MEA 進行了 5,000 小時的運轉試驗後，於 2010 年 1 月接著進行了當時溶劑代號「GUSTAV200」(後來的 OASE[®] blue)的 4,000 小時運轉試驗。該試驗廠共裝有約 285 個測試點，首先先記錄個別溶液在 40 個條件，分別兩小時的穩態運行的實驗數值，以驗證實驗誤差足夠小，並且能在達成 90%捕捉率下，找出等壓下的再生能耗－循環速率曲線，結果合理。

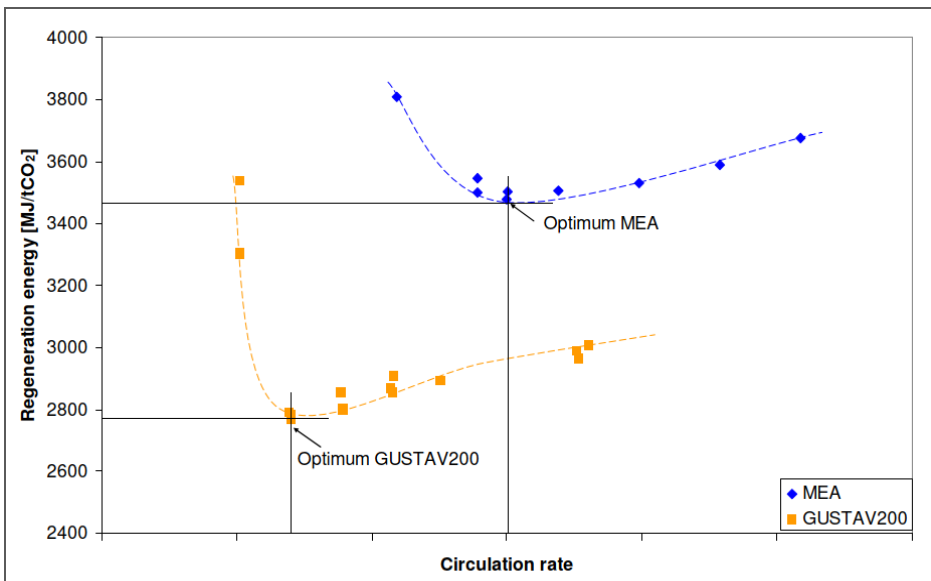
利用在 1.5~2.0bar 間調整脫附塔持壓及調整循環次數，在 90%捕捉率下找出兩種溶液製程的最小能耗，結果顯示 GUSTAV200 相對 MEA 可減少 20~25%之能耗(3.48MJ/kgCO₂ vs 2.8MJ/kgCO₂)，並且其再生過程對熱的反應敏感，可以再不調整再沸氣供應溫度下達成比 MEA 高的表現；此外也在本試驗中，測試出 OASE[®] blue 溶劑之降解率較傳統 MEA(~0.6kg/tCO₂)為低(<0.3kg/tCO₂)。目前此製程總試驗時數已超過 55,000 小時，也為三星重工(SHI)、海德堡材料(Heidelberg Materials)等大廠所應用；如設計及施工無缺失，應可達公司本次採購案之需求。



圖二十八 尼德勞森試驗廠



圖二十九 尼德勞森試驗廠製程圖



圖三十 尼德勞森試驗廠 MEA 與 GUSTAV200 試驗結果(90%捕集率下)

肆、心得及建議

依我國「2050 淨零轉型」之目標路徑，碳捕集與封存設備須在 2030 年前貢獻四百萬噸；在 2050 年貢獻超過四千萬噸的減排(加裝 CCS 設備之火力發電廠將佔 20-27%的發電量)才可達成，這表示我們沒有太多的時間進行試驗，就須開始進行大規模的設置。目前本公司方開始第一個實際加裝於既有機組煙氣的試驗廠，或可投入更多資源學習設置經驗及培育專業儲備人才，從使本公司乃至國內相關產業具備達成轉型目標之能力。

與當地工程師交流過程，了解到歐洲有許多地區在試驗廠成功過後，並未進行更大規模之 CCS 設置，主因是財政支持不足且缺乏開發誘因。有研究報告指出 CCS 的「活躍投資」案例自 2010 年的 77 案至 2017 年降至 37 案；而預計自 2009 年至 2021 年開發的 42 個計畫僅有 20 個有發展實際出的 CCS 能力。原因可歸咎於這段時間的天然氣價格降超過 40%(俄烏戰爭前)，其他再生能源的成本也在同期間大幅下跌不等，也因此，僅存的 CCS 廠幾乎皆是用以激勵油氣生產使用。

綜上，若本國在未來勢必要執行更多、規模更大的碳捕集，我們必須有長遠的計畫保證其可持續執行。由於 CCS 對私企是純增加成本而非有機會獲利的投資，政府可導入激勵廠商建置相關政策及補助；而公共工程上，除應把握機會與積極與國外相關廠商進行交流，在採購上畢竟國內廠商缺乏實績，必要時也可開放資格、提供誘因，以免工務程序過於耗時，落後國際發展腳步而拖延達成目標之期程。

本人這次赴義大利執行實習，與有規劃碳捕捉試驗廠實務經驗之廠商及發電廠了解技術層面、規劃期間的介面分工及試驗過程的發現，收穫頗豐。參訪 TKC 公司時，看到人少質精的規劃公司，幾乎每一位員工都具有獨立設計及溝通能力，並且依照業主需求到廠提供技術指導；而參訪碳捕集廠，則是第一次看到流程圖上的各設備實地安裝及連接方式，讓我對各設備的尺度及施工順序等更有概念。期許自己也建議同仁都能在公務上把握與專業廠商交流機會，持續精進專業知識及技能，並且設計單位應多至現場瞭解施工檢驗，以在專案管理及工程推動上順利進行。

參考資料

- [1] He, D., Di, W., Yao, G., & Jin, F. (2018). *Recent Advances in Fixation and Hydrogenation of Carbon Dioxide*. Presented at the 2nd International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science (AEECS2018), Zhuhai, China. [doi:10.2991/aeecs-18.2018.2](https://doi.org/10.2991/aeecs-18.2018.2)
- [2] Song, C., Liu, Q., deng, S., li, H., & Yutaka, K. (2019). Cryogenic-Based CO₂ Capture Technologies: State-of-the-Art Developments and Current Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 265–278. [doi:10.1016/j.rser.2018.11.018](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.018)
- [3] Moser, P., Schmidt, S., Sieder, G., Garcia, H., Stoffregen, T., & Stamatov, V. (2011). The Post-Combustion Capture Pilot Plant Niederaussem - Results of the First Half of the Testing Programme. *Energy Procedia*, 4, 1310–1316. [doi:10.1016/j.egypro.2011.01.188](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.01.188)
- [4] Moser, P., Wiechers, G., Stahl, K., Stoffregen, T., Vorberg, G., & Lozano, G. (2017). *Résumé of the 10-Year Joint Development Program of BASF, Linde and RWE Generation at the Post-Combustion Capture Pilot Plant at Niederaussem*. Presented at the 4th Post Combustion Capture Conference (PCCC4), Birmingham, Alabama, USA.
- [5] Martin-Roberts, E., Scott, V., Flude, S., Johnson, G., Haszeldine, R. Stuart, & Gilfillan, S.(2021). Carbon Capture and Storage at the End of a Lost Decade. *One Earth*, 4(11), 1569–1584. [doi:10.1016/j.oneear.2021.10.002](https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.10.002)
- [6] Ben-Mansour, R., Habib, M.A., Bamidele, O.E., Basha, M., Qasem, N.A.A., Peedikakkal, A., Laoui, T., & Ali, M. (2016). Carbon Capture by Physical Adsorption: Materials, Experimental Investigations and Numerical Modeling and Simulations – A Review. *Applied Energy*, 161, 225–255. [doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.011)
- [7] Dutcher, B., Fan, M., & Russell, A.G. (2015). Amine-Based CO₂ Capture Technology Development from the Beginning of 2013—A Review. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(4), 2137–2148. [doi:10.1021/am507465f](https://doi.org/10.1021/am507465f)