



中鋼在循環經濟的創新作為與未來展望－鋼化聯產

中國鋼鐵股份有限公司研究員 / 王俊修
中國鋼鐵股份有限公司工程師 / 賴志敏

關鍵字：鋼化聯產、碳捕捉與再利用、碳中和、循環經濟

摘要

面臨日益嚴重的氣候變遷與環境議題，鋼鐵產業推展減碳工作已刻不容緩。「鋼化聯產」為跨鋼鐵和石化兩大產業「碳資源整合」之新合作減碳模式，為可行之循環經濟兼具減碳效益之實踐方案。鋼化聯產已列為中鋼公司減碳之中期方案，規劃分三階段推展，已於2022年完成第一階段鋼化聯產先導工場建置，建立關鍵之生產技術，現同步規劃第二階段示範場之推展作業，目標於2030年減碳24萬噸，最終目標於2040年前實現大規模應用，年減碳目標290萬噸。藉由鋼化聯產之創新方式，中鋼將持續實踐循環經濟之理念。

前言

過去數十萬年間地表的二氧化碳濃度約略維持在300 ppm以下[1]，然而自18世紀工業革命以來，耗用了大量石化燃料造成環境中的二氧化碳濃度不斷升高，大自然的碳循環平衡已被打破，二氧化碳濃度已達400 ppm以上[2]，且未見緩和，根據經濟合作暨發展組織（Organization for Economic Cooperation and Development, OECD）的報告指出，若不積極減少溫室氣體排放，2050年溫室氣體的總濃度將會攀升至700 ppm，到了2100年更可能會超過1000 ppm[3]；如今，海平面高度已較1880年高出20 cm以上[4]，若不積極減少碳排放，極端的預測結果指出，到了2100

年，海平面上升高度將超過至少1 m以上，全世界低窪的沿海區域將被海平面所淹沒[5]，威脅到人類之生存權，全球面臨著日益嚴重的氣候變遷與環境議題，減碳已刻不容緩。

目前已有許多國家宣示2050年達到碳中和，並有許多積極之政策作為如：將溫室氣體管理入法、進行碳定價[6]、徵收碳邊境稅[7]等，此碳中和趨勢將直接衝擊企業之競爭力及生存，如何降低產品碳排強度為目前企業之重要課題。鋼鐵產業為全球最主要的碳排放行業之一，肩負著重要的減碳責任，IEA建議鋼鐵業實踐大規模減碳需仰賴氫能煉鐵及碳捕捉、再利用與封存（Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS）[8]。CCUS是國際間競相發展之淨零排放重點技術，IEA預期碳捕捉量將於2030年成長至16億噸、2050年進一步擴大至76億噸；其中95%

的量作封存處置，5%的量為再利用。

一貫化作業鋼廠在冶煉過程會伴隨著副產燃氣產生，如煉焦爐乾餾焦炭過程所產生之焦爐氣（COG）、高爐還原鐵礦煉製鐵水時所產生之高爐氣（BFG）、以及轉爐吹煉鋼液時產生之轉爐氣（LDG），生產流程如圖1所示。為了提高能源使用效率，這些副產燃氣目前多回收用於燃燒作為能源供應，如製程供熱或於動力工場進行氣電共生，而80%以上碳源最終是依附於副產氣中排放。副產燃氣碳濃度高，故若能於燃燒前進行捕碳再利用，則有機會成為應用CCUS之減碳路徑。

焦爐氣、高爐氣、轉爐氣主要成分為氫氣、一氧化碳、二氧化碳、甲烷等，詳如表1所示。焦爐氣氫氣濃度約60%，而高爐氣和轉爐氣內之一氧化碳濃度分別達23%及

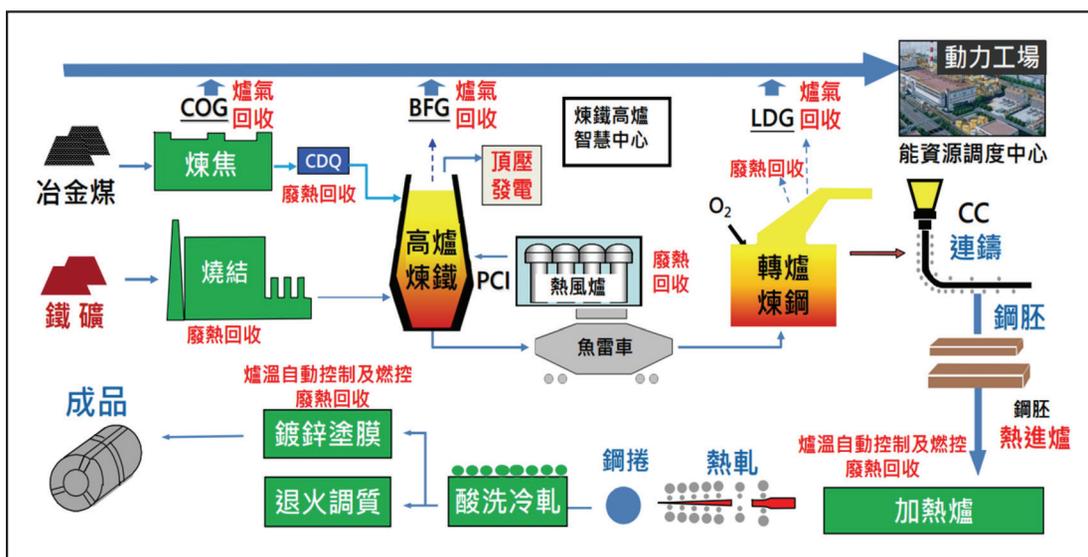


圖 1 中鋼一貫作業生產流程示意圖



表 1 副產燃氣組成表

	焦爐氣 (%)	高爐氣 (%)	轉爐氣 (%)
H ₂	60	4	1
CO	6	23	60
CO ₂	2	23	21
N ₂	3	50	18
CH ₄	26	-	-
C _n H _m	3	-	-

60%，副產燃氣中以高爐氣量體最大，而可燃之成分以一氧化碳為主，意味著目前一貫作業鋼廠係以一氧化碳作為主要燃料。然而一氧化碳熱值低且碳排高（一氧化碳之碳排係數為天然氣和目前電力碳排係數3倍），事實上並不適合做為燃料，所幸一氧化碳具有一定經濟價值，若可提取上述副產燃氣中之一氧化碳供石化業做為原料進行高值化應用，而能源缺口則導入低碳燃料或是電力，則可達到減碳及創造經濟價值之效果，此為鋼鐵業與石化業聯合生產之「碳資源整合」應用概念，稱為「鋼化聯產」。鋼鐵和石化

業皆是碳排強度高的重工業，將鋼鐵和石化產業之碳資源進行整合應用為創新之雙贏策略，為鋼鐵企業提供了一種循環經濟耦合發展的模式，所帶來的社會效益亦不容忽視。本報告將針對此創新循環經濟之模式「鋼化聯產」進行說明，並介紹中鋼於此領域之規劃與目前發展近況。

一、鋼化聯產介紹

傳統石化製程須仰賴進口石化原料以合成化學品，以常見的甲醇或碳醋酸為例，CO或CO₂為生產此類化學品所需之原料，石化廠須設置產氣製程將石化原料（如石油、天然氣、煤等）進行氧化裂解生成CO或CO₂，以合成所需之化學品，如圖2傳統石化路徑所示。然而一貫作業鋼廠冶煉過程與石化廠之產氣製程非常相似，副產燃氣富含CO/CO₂（如高爐氣和轉爐氣），可取代傳統石化產氣製程，改由鋼鐵冶煉過程產出之CO/CO₂

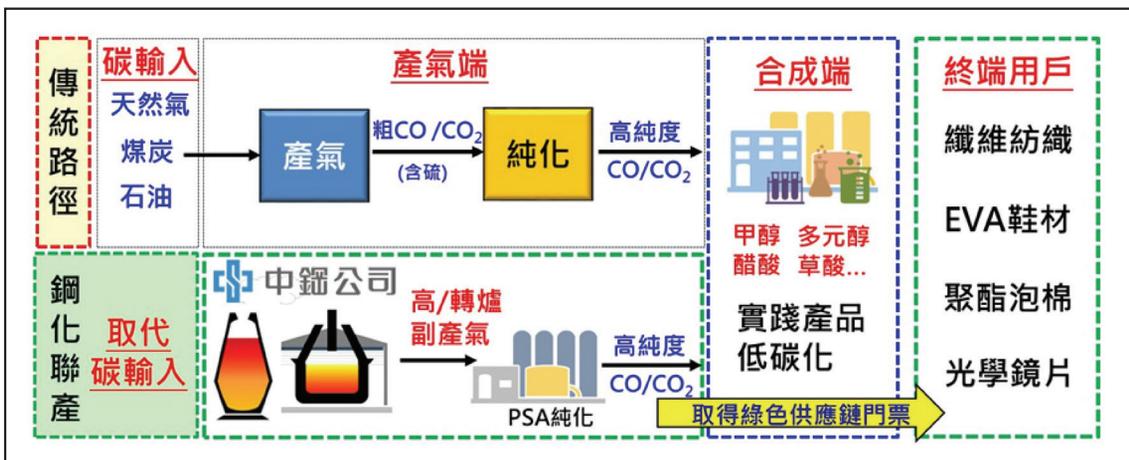


圖 2 鋼化聯產與傳統石化路徑比較

供應化工廠（如圖2鋼化聯產路徑所示），此替代路徑即為鋼化聯產之生產合作模式。藉由此碳資源整合方式，除可讓鋼鐵廠減碳之外，亦可協助石化業降低對石化原料之依賴，且產氣端製程之取代亦可降低石化原料生產之碳排，使兩產業產品低碳化，創造跨產業整合之減碳及共利雙贏格局。鋼化聯產有機會為短期內可協助鋼鐵與石化兩大碳排產業減碳之方略，藉由碳資源整合實踐循環經濟理念，創造新低碳經濟產業鏈，化減碳危機為轉機。

近年來已有許多鋼廠發展鋼化聯產成功之商轉案例，如中國達鋼利用焦爐氣和轉爐氣生產甲醇（50萬噸/年）和二甲醚（20萬噸/年）、石橫特鋼利用轉爐氣生產甲酸（20萬噸/年）和草酸（5萬噸/年）、晉南鋼鐵生產乙二醇（30萬噸/年）、首鋼和比利時ArcelorMittal分別利用轉爐氣及高爐氣生產乙醇4.5萬噸/年和6.6萬噸/年，湛江寶鋼則由COG取氫供中科煉化進行煉油應用、韓國浦項鋼廠（POSCO）利用COG取氫與韓國OCI化學公司合作進行雙氧水之合成等，顯示鋼化聯產應用已具備技術及經濟之可行性。

除商轉之案例外，亦有許多研發中之專案，特別是針對二氧化碳再利用，如德國鋼廠ThyssenKrupp之Carbon2Chem專案，主要係將鋼廠副產氣中之一氧化碳和二氧化碳轉化成尿素、甲醇與甲烷等，並以相關技術做為公司未來對外減碳服務業務之基礎。

ArcelorMittal公司提出鋼廠副產燃氣高值化之減碳應用研發計畫，如與陶氏化學公司（Dow chemical）合作發展CO合成石腦油（Naphtha）作為聚合物原料之Steel2Chem計畫、與科思創（Covestro）等公司合作發展CO/CO₂合成聚氨酯之Carbon4PUR計畫。日本鋼廠Nippon Steel則是研發二氧化碳捕捉及再利用之技術，主要與學界合作，目前仍處於實驗室研發階段，如與日本富山大學（Toyama University）合作開發二氧化碳合成甲醇及柴油技術及合成對二甲苯技術、與大阪市立大學（Osaka City University）合作開發二氧化碳合成聚碳酸酯技術。日本鋼廠JFE主要是發展二氧化碳轉換為甲醇、甲烷之技術，如與日本碳捕捉與再利用CCR（Japan's Carbon Capture & Reuse）研究會開發的CO₂合成甲烷技術、與地球環境產業技術研究機構（Research Institute Of Innovative Technology For The Earth, RITE）合作開發CO₂合成甲醇技術。而JFE預計於東京都三鷹市及調布市的焚化爐展開二氧化碳捕獲裝置實場驗證，規劃用於合成甲烷及甲醇。此研發專案皆是將鋼廠排放之碳源轉換為化學品之概念，亦屬於鋼化聯產之應用概念，由這些發展方向不難看出鋼鐵業發展CCU之重點將擺在副產燃氣之應用，顯現鋼化聯產對於鋼鐵業減碳之重要性。

二、鋼化聯產之發展機會

中鋼公司多年來致力於推展循環經濟，區域能資源整合就是非常成功之案例。中鋼



廠區地處高雄小港臨海工業區，周圍有許多石化、鋼鐵等公司，恰可利用地利條件之優勢，以管線輸送中鋼熱回收產生之蒸汽至合作廠家，這種資源整合的模式讓合作公司不需再額外花費原料成本或投資重複性的生產設備，並可讓中鋼公司的廢熱或製程得以最大化利用，共創區域性減碳及降成本之雙贏模式。中鋼公司亦產多項工業用氣體與工業區內鄰近工廠互通，同時亦從中油、中石化等購入燃料、氫氣等，不僅提高能源使用效率、減少資源耗用、降低區域內污染排放及達到溫室氣體減量等目的，亦有效降低環境衝擊和改善環境品質。

鋼化聯產實施的必要條件是鋼鐵和石化廠必須緊鄰，中鋼所處臨海工業區恰具此條件，周圍圍繞許多石化廠，此為國外鮮少有的地利條件優勢。中鋼拓展前述理念和經驗到碳循環，規劃建立「區域碳資源整合-鋼化聯產」，與周圍石化業合作，藉由管輸供應CO/CO₂作為生產所需的碳原料，並經合成為化學品，例如甲醇、醋酸…等，達成固碳效果。此外，臨海工業區周圍有洲際碼頭，具有物料進出口之便，以及政府未來於此區新材料循環園區之規劃，以台灣完整的石化上下游產業鏈體系及技術優勢，有機會在此地區構建成新低碳供應鏈體系，協助石化業轉型，後續鋼化聯產放大應用之機會可期。

中鋼公司已於2021年2月成立「節能減碳及碳中和推動小組」，並擬訂鋼化聯產為

公司減碳策略。中鋼分三階段推動鋼化聯產，第一階為建立「鋼化聯產先導工場」，此階段主要是與工研院合作建立相關鋼化聯產生產技術，預計減碳量達4900噸/年。第二階段規劃於2030年前建立「鋼化聯產示範工場」，目標減碳量為24萬噸/年；第三階段配合新材料循環園區之規劃，期望2040年擴大規模建立「鋼化聯產商業場」，目標減碳量為290萬噸/年，相當於7,450座大安森林公園的二氧化碳吸納量，並協助石化業形成低碳化學品產業鏈，盼透過兩大產業攜手，掌握減碳新商機，共同朝淨零碳排的目標邁進，「既做環保同時創造利益」，化減碳危機為轉機與商機。

三、中鋼公司於鋼化聯產進展

3-1 關鍵技術介紹

「鋼化聯產」之應用關鍵為鋼廠副產氣內之一氧化碳分離純化技術。目前已可商轉的一氧化碳純化技術有變壓吸附法（Pressure swing adsorption, PSA）、化學吸收法、膜分離法與深冷法等四種[9]。其中的膜分離法無法取得高濃度品質之一氧化碳，而冷凝法不適用於分離含有氮氣的氣源，故只有PSA和化學吸收法是可行之技術。然而化學吸收法是利用含銅的離子吸收劑，雖可獲得高濃度一氧化碳，但具有高腐蝕、廢水處理及吸收液之硫化物耐受性差與投資成本高之問題[10]。近15年因PSA吸附劑技術有所突破，可

表 2 一氧化碳分離純化技術比較表

	深冷法	膜分離法	化學吸收法	變壓吸附法
分離原理	利用沸點差異	利用分子大小差異	利用化學親和性差異	利用不同壓力下的飽和吸附能力差異
生產成本	中	低	高	中
CO 純度	>99%	~90%	>99%	>99%
技術限制及問題	氮氣/CO 無法分離	雜質限制	雜質限制、廢液處理及腐蝕問題	廢吸附劑處理
鋼廠副產燃氣分離適用性	不適用(氮氣濃度過高)	不適用(CO 產品濃度不足)	可適用	可適用

以低成本方式產出高濃度品質的一氧化碳，故PSA已逐漸成為此技術的主流，相關技術比較整理如表2。

吸附劑選用為PSA分離一氧化碳之關鍵，PSA是藉由與一氧化碳具有親和性之物質（如分子篩、沸石、金屬有機骨架等）作為吸附劑[11]，於適當的加壓環境條件下，透過分子間作用力（如凡得瓦力或靜電力），將一氧化碳分子由氣體中捕捉到吸附劑上，當吸附飽和時將壓力轉至常壓或真空，讓捕捉的一氧化碳自吸附劑上脫附，達到分離純化及再生吸附劑的效果[12]。若氣體中富含氮氣，一般分子篩對於一氧化碳和氮氣之分離選擇率並不高，通常需要經過兩段PSA製程方可產出高純度一氧化碳，但通常一氧化碳之回收率都不高。為提高一氧化碳和氮氣之分離選擇率，利用單價銅改質之吸附劑為目前較可行之材料[13]，單價銅對於一氧化碳具有弱化學性吸附，可大幅提高選擇率，此類改質吸附劑於富含氮氣下，依然可得到純度98%以上的一氧化碳，

及回收率大於90%之效能[14]。

除吸附劑外，PSA另一關鍵技術為操作程序之設計。PSA最簡單的操作程序為二塔四步驟，主要源自Skarstrom Cycle[15]，步驟包含加壓、產氣、逆向減壓和沖洗步驟。後續為提高產氣濃度及回收率，或是針對強吸附相提純之需求，PSA開始出現“多塔、多步驟”之操作及設計方式[16]，目前常見的增進操作方式有[17]：(1)真空脫附：利用抽真空的方式來代替低壓沖洗，增加強吸附性物質的回收；(2)同向減壓：此步驟的主要目的為提高塔內強吸附物質在固相及氣相的濃度，可在進行逆向減壓步驟時得到含較高濃度強吸附物質的產物，並間接提高弱吸附物質的回收率；(3)強吸附物質的高壓潤洗（Rinse）：利用含高濃度強吸附成份的氣體在高壓下沖洗吸附塔，增加強吸附物質的產物濃度。中鋼公司於鋼化聯產合作屬於扮演供氣之角色端，掌握PSA技術為所需之關鍵工作，故中鋼公司成立公司級專案計畫進行相關技術



研發，並結合工研院團隊及學界技術能量，以厚實所需之基盤技術。

3-2 實驗室基盤技術建立

中鋼公司於實驗室建立雙塔PSA實驗平台（如圖3）所示，用於篩選及比較吸附劑性能，並建立吸附劑之PSA操作程序資料庫，探討最適之操作條件。本設備具測試氫氣、一氧化碳、二氧化碳和氮氣四道混合氣體之功能，可用於模擬副產燃氣之組成，測試變壓吸附法用於副產燃氣一氧化碳或二氧化碳之分離效果；設備硬體規格處理氣量可達20 LPM、壓力10 bar、管柱加溫可達500°C，能實現在線活化之功能。吸附管柱直徑為1吋，長度為1m，以填充分子篩5A之吸附材約可充填1kg之樣品。設備上產和下產閥區皆設有管線串接，可實現最完整的PSA操作程序，包含加壓、吸附、平衡、正逆向解吸、抽真

空、吹清、潤洗（置換）等步驟，實驗平台並備有線上分析儀，可同時分析H₂/CO/CO₂/CH₄等氣體，可隨時掌控操作程序對分離後產品純度之影響，了解吸附劑對不同操作程序的影響。

中鋼公司已利用實驗平台及相關分析儀建立完整的吸附劑操作資料庫方法，步驟包含(1)基本物性分析（如比表面積、孔洞型態和粒徑等）、(2)活化程序（使用前之激活方式）、(3)操作特性（包含等溫吸附和PSA操作動態程序等）、(4)更換條件（老化指標定義及再生等）。目前已依據副產燃氣之條件篩選出適合之捕碳吸附劑，捕碳量隨著二氧化碳分壓提高而變大，以2 bar分壓為例，二氧化碳吸附量可達63.9 g/kg，如圖4所示，此動態吸附量占靜態吸附量之比例為96%，可充分使用吸附空間，而依據平衡選擇性（Equilibrium selectivity） α_{AB} 之定義[18]，



圖3 雙塔 PSA 實驗設備平台圖



CO₂/CO吸附量比值大於40，具有良好的分離效果，實驗室測試利用此吸附劑以最適化條件分離高爐氣之二氧化碳，二氧化碳出口濃度可達90%，同時回收率可達95%以上。

利用相同評估方式，目前亦完成PSA-CO₂吸附劑篩選和操作資料庫之建立。圖5之結果顯示，調節操作壓力由1 增加至8 bar，

當操作壓力達4 bar以上時，方可滿足產品氣CO濃度大於98.5%之品質要求，且須操作於60°C，方具有好的再生效果。

為建立PSA製程之最適化技術，中鋼公司利用商用製程模擬軟體（Aspen Adsorption）建立六塔CO₂-PSA及五塔CO-PSA物理模型。Aspen Adsorption根據PSA

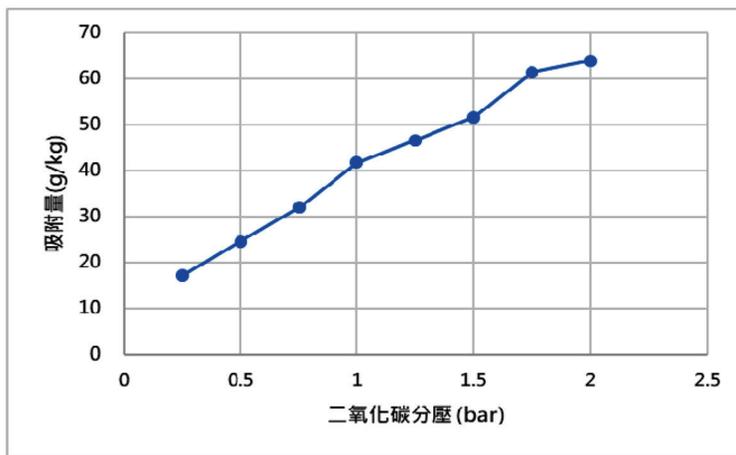


圖 4 PSA-CO₂ 吸附劑隨不同分壓之動態吸附量

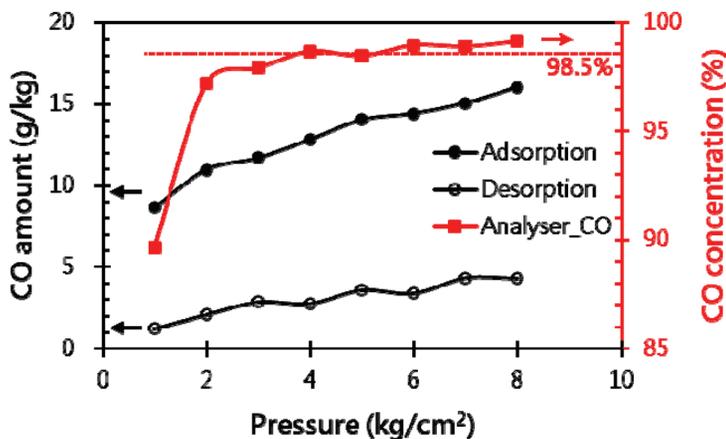


圖 5 操作壓力對 CO 產氣品質影響



分離理論，對各個成份在吸附塔內流動相（氣體）、固定相（吸附劑）及相邊界處的質量、動量與能量傳遞過程進行微元化分析（differential element analysis），建立成份的質能平衡方程式。在設定裝置相應的參數、吸附劑參數及邊界條件後，即可利用適合的數學方法對這些偏微分方程式進行疊代求解。中鋼公司已依據實驗結果建立模擬所需之參數，並參照相關文獻[18-20]進行模型建置，及建立PSA-CO₂所需之操作程序，包含吸附、三段均壓、逆向放壓、吹驅及終升壓等步驟（圖6為所建立之模型例）；與PSA-CO操作程序包含吸附、三段均壓、抽真空、置換、均壓降壓、逆向放壓及終升壓等步驟。此動態模擬技術可成功解析槽內氣體吸附黑箱狀況，用於製程操作參數優化及進行硬體操作極限模擬，模擬的誤差小於10%。

3-3 鋼化聯產先導工場介紹

中鋼公司已依鋼化聯產三階段規劃完成第一階段鋼化聯產先導工場建置，並於2022年12月落成啟用，相關全場配置如圖7所示。先導工場製程流程順序依序為：前處理（除塵、降溫和脫硫）、PSA分離二氧化碳、脫氧、PSA分離一氧化碳，並利用分離之CO/CO₂合成甲醇。中鋼公司建置此場域的主要目的為確認由高爐氣和轉爐氣取一氧化碳和二氧化碳之技術可行性，並作為媒合與石化業合作研發之平台，及開發與驗證更先進之CCU技術，以推廣鋼化聯產之應用。

鋼化聯產先導工場相關流程與規格對應圖7說明如下：

1. 高爐氣或轉爐氣由中鋼公司公用管架引入

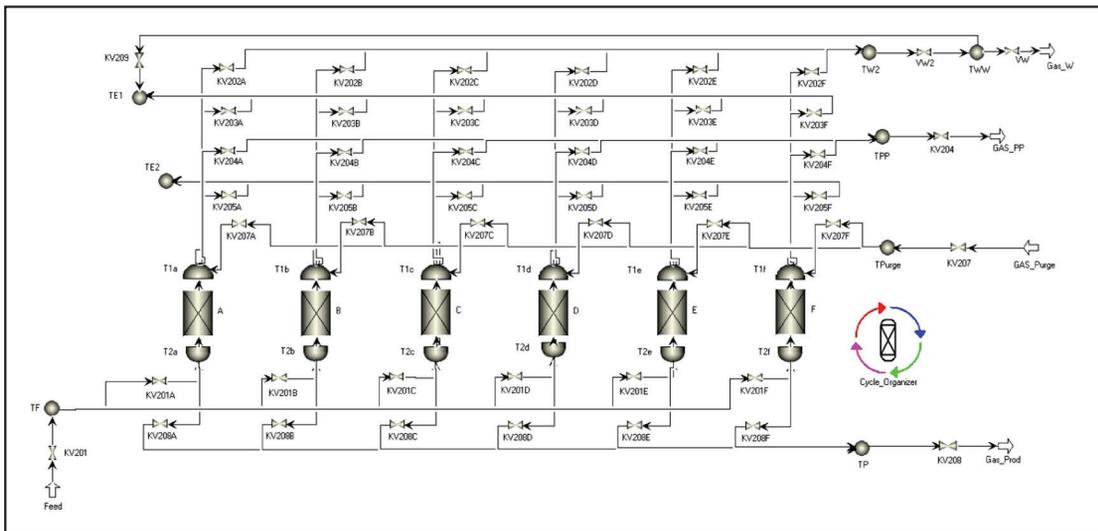


圖 6 六塔 PSA-CO₂ 模型例

- 水洗塔（圖 7 編號 1）進行除塵及降溫，藉由原料氣增壓機（圖 7 編號 2-1）加壓至工作壓力，進入兩段之脫硫設備，先將有機硫水解成硫化氫（圖 7 編號 3-1），最後再將無機硫吸附轉化成單質硫（圖 7 編號 3-2），最終總硫須脫除至 0.1 ppm 以下。
2. 接續進入六塔 PSA-CO₂ 設備（圖 7 編號 4），進行變壓吸附二氧化碳捕捉分離，預計可年捕捉 1700 噸二氧化碳，回收率可達 95% 以上。
 3. 脫除 CO₂ 後之氣體送至除氧塔單元（圖 7 編號 5），將微量的氧氣去除（降低至 100 ppm 以下），以避免氧氣毒化 PSA-CO 之吸附劑。除氧方式是藉由觸媒轉化，利用

大量的 CO 和微量的氧氣反應成二氧化碳以去除爐氣內的氧氣。

4. 脫氧後之氣體送至五塔 PSA-CO 設備（圖 7 編號 6），進行變壓吸附一氧化碳捕捉分離。捕捉一氧化碳之吸附劑係以真空泵（圖 7 編號 7）抽真空產製一氧化碳產品氣，一氧化碳產品氣則會送至脫油塔（圖 7 編號 8）進一步脫除真空泵軸封或置換氣壓縮機所帶出之油氣，以確保一氧化碳產品氣品質。
5. 最終一氧化碳產品氣會送至儲槽（圖 7 編號 9），一部分供置換氣壓縮機（圖 7 編號 2-2）當 PSA-CO 置換程序使用，預計一氧化碳產品氣純度可達 98.5% 以上，以轉爐氣進料估計一氧化碳之年產能為 4900 噸。

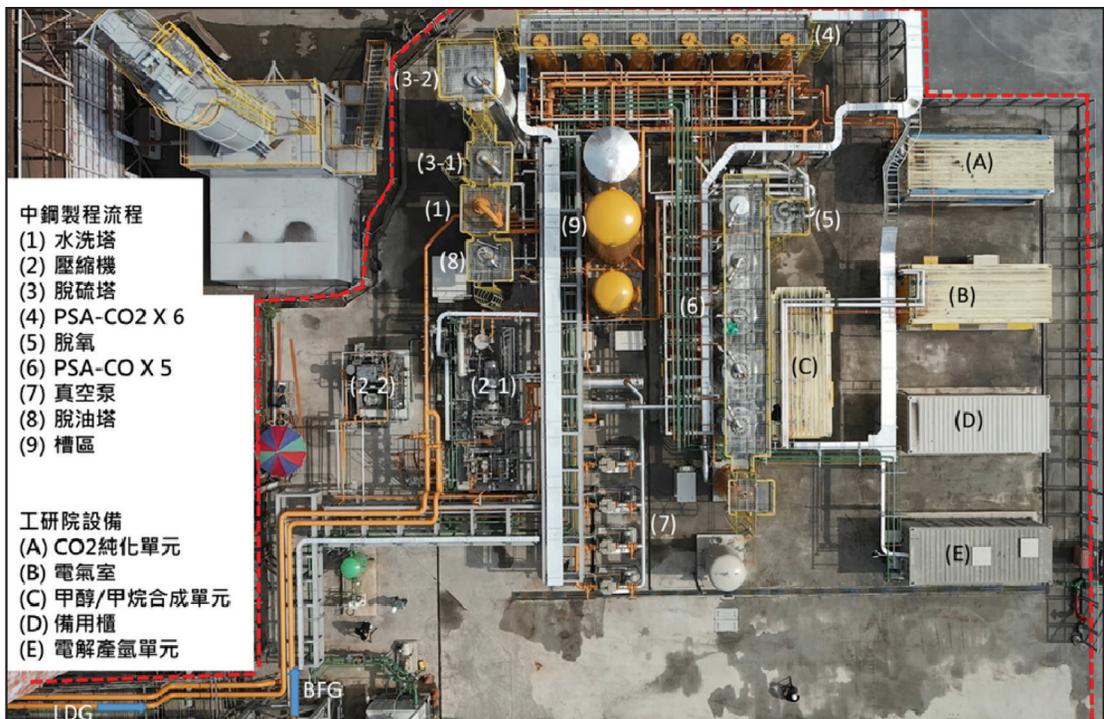


圖 7 鋼化聯產先導工場俯視圖



6. 圖 7 之編號 A~E 為與工研院合建之設備，包含將二氧化碳送至工研院設備 TSA（變溫吸附）提純設備（圖 7 編號 A），將二氧化碳進一步提純至 99%；配合電解產氫設備（圖 7 編號 E），將其產出之氫氣與一氧化碳產品氣一同送至化學品合成設備（圖 7 編號 C）製作成甲醇，以進行 CCU 之技術驗證。

先導工場已於 2023 年初完成高爐氣與轉爐氣之操作性能驗收，產品一氧化碳濃度分別可達 99.1% 和 99.4%，一氧化碳回收率 85% 以上，產品氣內之總硫小於 0.05 ppm，氧濃度小於 20 ppm。

3-4 鋼化聯產節能生產技術建立

中鋼未來將由混合氣提取一氧化碳進行鋼化聯產應用，因混合氣係由高爐氣和轉爐氣混合而成，一氧化碳濃度會因轉爐吹煉狀況而有所波動，須適時進行操作調整以確保能於最低能耗運轉。分析中鋼混合氣 CO 和 CO₂ 之濃度變化狀態，CO₂ 之濃度變化不大，約落於 20%，而 CO 濃度會於 20~30% 間震盪，變化較大，故須找出最適之 PSA 之操作壓力。

測試混合氣於不同操作壓力區間之結果，結果顯示在操作壓力大於最適操作壓力時，一氧化碳產品氣濃度皆可達 98.5% 以

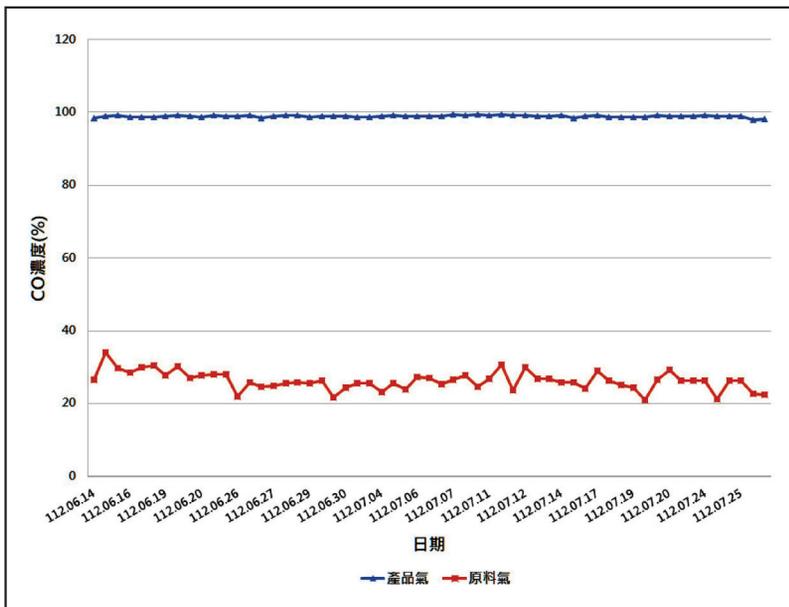


圖 8 1000 小時最適參數連續運轉結果

上，回收率亦可達85%以上；在操作壓力小於最適操作壓力時，CO產品氣濃度達98.5%以上及回收率大於85%之兩項條件無法同時滿足。以最適之操作壓力和PSA時序設定條件，進行1000小時運轉之結果如圖8所示，測試結果顯示混合氣進氣CO平均濃度為26.2%，一氧化碳產品氣出口平均濃度為98.9%，回收率達86.6%，品質輸出穩定。其他微量之組分如：總硫濃度約為30 ppb、氫氣小於0.1%、二氧化碳和氮氣總合小於1.5%，可符合化學品合成需求。

為掌握來源混合氣之一氧化碳濃度以即時進行節能調整，依據先導工場之結果，及運用物理關係與限制、數學統計與機器學習建立鋼化聯產先導工場產氣模型，可預測未來1小時進入工場一氧化碳之混合氣濃度以及一氧化碳產品氣之品質。產氣量模型採用累積進氣量、壓縮機壓力、尾氣一氧化碳濃度與吸附程序等變數，搭配梯度提升演算法建立一氧化碳產氣量模型，建模結果顯示建模

區間的平均絕對誤差為4.74%，預測區間的平均絕對誤差為5.33%；產品氣濃度合格率預測採用進氣量、進氣一氧化碳濃度、壓縮機壓力、PSA時序、尾氣濃度、產品氣量等變數，將建模數據分為訓練組與測試組，設定一氧化碳濃度大於98.5%為品質合格標準，以訓練組數據搭配神經網路模型，並設定損失函數為二元交叉熵(binary cross entropy)，建立品質分類（合格顯示為1與不合格顯示為0）模型，以測試組數據的品質分類預測結果，分類正確比例達91.4%，相關模型預測結果如圖9所示。

利用上述品質模型及先導工場製程完成可視化介面建構，如圖10所示。可視化介面除可提供操作人員未來一小時預測資訊外，並可即時顯示製程參數和歷史資料，供操作人員預判及調整應用，以達操作節能效果。以生產一氧化碳產品流量210 Nm³/h為例，先導工場以預測工具預測進氣一氧化碳濃度變化進行操作調整，節能效果可達29%。

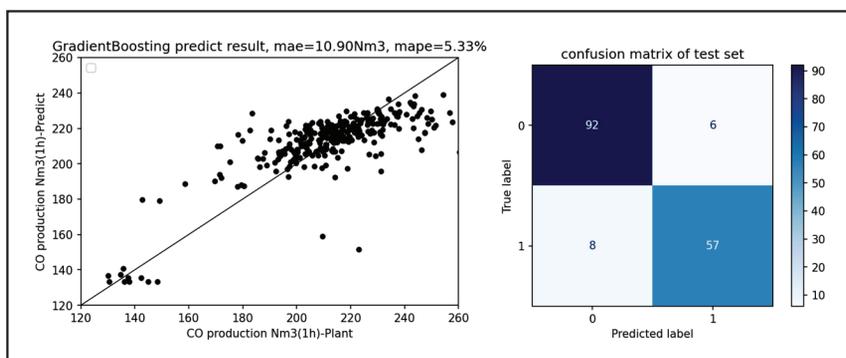


圖9 產品預測結果，(左圖)氣量預測結果、(右圖)品質合格率預測結果



因應混合氣濃度之波動情形，建立先導工場動態調節之節能操作方式，已成功找出最適操作壓力，每立方米CO之生產能耗可因此降低10%，另視進氣CO濃度之改變動態調整操作參數，最高可具降能耗29%之潛力。以鋼化聯產未來第二階段示範工場年產製30萬噸一氧化碳計算，預期調降操作壓力後每年可節電約1,960萬度，加上每年若可以應用預測模型動態調整1,000小時，可再節電428萬度，共具有每年7,164萬元之降成本潛力。

3-5 鋼化聯產示範工場之推動

示範工場係中鋼規劃鋼化聯產的第二階段進程，將是台灣第一套鋼化聯產示範產線，計畫於中鋼廠內興建CO分離純化示範工場，透過管輸方式將所生產的高純度CO送達興建於臨海工業區內的化工廠使用。示範工場以廠內副產燃氣BFG（高爐氣）混合氣作

為原料氣，並經變壓吸附製程（PSA）分離及純化CO達純度98.5%以上，可滿足下游化工廠產製低碳醋酸需求，並可進一步落地應用於傢俱、服飾、鞋材及太陽能模組封裝膠…等更下游端之產品。

四、結論

在碳中和的趨勢和壓力下，減碳已不再單純只是環境面的問題，而是牽涉到企業是否能永續營運。中鋼公司作為台灣最大之鋼鐵公司，有責任帶動產業進行低碳轉型。鋼廠副產燃氣富含具有再利用價值之一氧化碳和二氧化碳，藉由鋼化聯產之跨產業碳資源整合應用，有機會創造大規模減碳效果及新循環經濟之應用。中鋼公司目前已將鋼化聯產列為公司重要減碳方案，並分三階段循序漸進推展相關工作，現階段已完成第一階段先導工場建置及相關技術建立，同時與多家

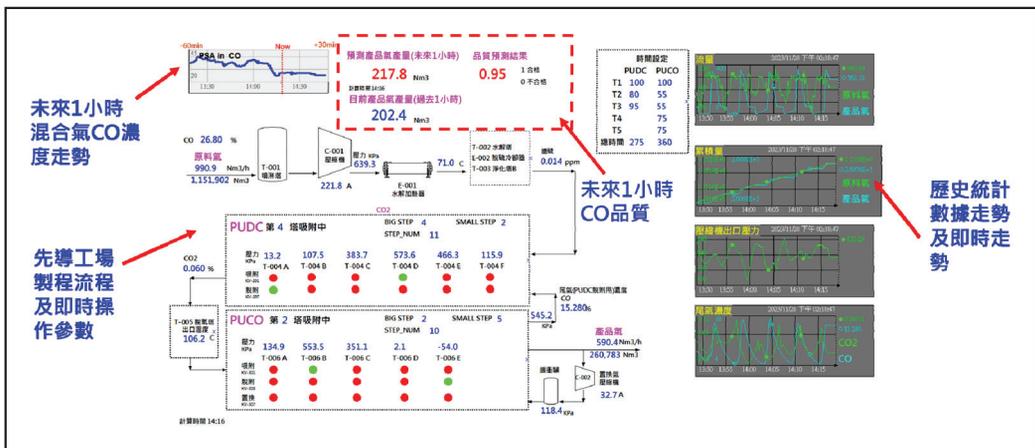


圖 10 先導工場產品氣量與品質預測模型可視介面工具

化工廠洽談合作，朝第二階段示範場應用邁進，期望未來能擴大應用，為既有的鋼鐵與石化產業減碳及創造新的碳循環經濟產業貢獻一分心力。

參考文獻

1. R. Lindsey, Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide, the Climate.gov of the National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020.
2. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, the Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021.
3. OECD Environmental Outlook to 2050: Climate Change Chapter, Organization for Economic Cooperation and Development, 2011.
4. Climate Change: Global Sea Level, the Climate.gov of the National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021.
5. Aslak Grinsted, et al., The Transient Sensitivity of Sea Level Rise, *Ocean Science*, 2021, 17, 181-186.
6. State and Trends of Carbon Pricing 2021, The World Bank, 2021.
7. W. L' Heudé, A, et al., Carbon Border Adjustment Mechanism for the European Union, *Trésor Economics*, 2021, 280.
8. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, International Energy Agency, 2021.
9. 李麗，一氧化碳分離提純方法研究，山西化工技術資料，2018年
10. Young Lim, Techno-economic Comparison of Absorption and Adsorption Processes for Carbon Monoxide (CO) Separation from Linze-Donawitz Gas (LDG), *Korean Chemical Engineering Research*, 2016
11. Xiaozhou Ma, Jelco Albertsma, and Dieke Gabriels et al., Carbon monoxide separation: past, present and future, *Chem. Soc. Rev.*, 2023, 52, 3741.
12. 蕭暉翰、王清海、談駿嵩，以吸收與吸附捕獲 CO₂ 技術的發展現況，*工業材料雜誌*，2017，365 期，71-78。
13. N. N. Dutta and G. S. Patil, Developments in CO separation, *Gas. Sep. Purif.*, vol. 9, no. 4, pp. 277-283, 199
14. Y. B. Chen, P. Ning, Y. C. Xie, Y. H. Chen, H. Sun and Z. Y. Liu, "Pilot-Scale Experiment for Purification of CO from Industrial Tail Gases by Pressure Swing Adsorption," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 16, pp. 715-721, 2008.
15. R. T. Yang, "Gas Separation by Adsorption Process," vol. 1, London: Imperial College Press, 1997.
16. B. Kottitum, et al., Optimization of a Six-Step Pressure Swing Adsorption Process for Biogas Separation on a Commercial Scale, *Applied Science*, 2020, 10, 4692.
17. 周正堂，用變壓吸附程序濃縮含有水汽之氯化合成氣中氫氣及捕獲二氧化碳，國科會研究成果報告，2011年
18. Fei Gao, et.al, "Adsorption separation of CO from syngas with CuCl@AC adsorbent by a VPSA process", *RSC Adv.*, 2018.
19. Shuna Li, Huawei Yang, and Donghui Zhang, "Enrichment of CO from syngas with Cu(I)Y adsorbent by five-bed VPSA", *Chem. Sci. Eng.*, 7(4), 472-481, 2013.
20. 李淑娜，Cu(I)Y 吸附劑的製備及其應用，天津大學化工學院學位論文，2013.