

卷首語

光陰荏苒，第十三屆理監事即將圓滿地完成四年期的任務，在此除了要特別感謝全體會員熱心的支持與指教外，也要向會務工作同仁長年的辛勞表達由衷的謝忱。本次召開的第十四屆第一次會員大會深切地盼望當選的新任理監事秉持過往協會的服務精神，繼往開來，再創新局。

為有效改善國內空氣品質，行政院環保署於106年4月13日發布有關改造或汰換燃油鍋爐的補助辦法，以期能減少鍋爐及加熱設備於燃燒過程所產生之空氣污染物排放。協會對於此一辦法相當關注，特於106年9月12日舉辦二場研討會，並邀請台中市環保局貴賓蒞會與業界進行政策與實務方面的交流，透過現場深入的說明，讓業者在節能減碳的工作推動方面都能夠有進一步的認知與行動。能源與環保議題一直是協會致力的重點，今後更當藉助專業經驗，協助業者來完成政府各項攸關國計民生的工作。

本期刊載專文內容包括：生質物焙燒技術之發展與研究、沼氣發電系統最佳化技術與實例說明、鍋爐及熱交換器用鋼管材料標準及檢測方法之研析、合成氣在淨煤技術領域之應用及發展趨勢、鍋爐因補充水水質嚴重異常而衍生同質性大量破管的案例探討、鍋爐爐頂管檢測規劃與執行案例分享、有效降低霧霾前趨物之鍋爐硫氧化物減量技術產業化應用以及離心式空壓機漏油原因分析與改善。上述主題對於能源技術開發、空氣污染防治、鍋爐鋼管材料檢測以及鍋爐運轉中異常案例探討等都有具體的介紹，咸信讀者必可獲得秉讀之益。

最後再次感謝各位學者專家和會員先進的不吝賜稿，讓這期鍋爐知識得以順利地出刊，且提供諸多寶貴的實務經驗分享同業，其行足堪欽佩。另刊載內容中如有疏漏之處，尚祈賢達敬予指正為荷。

台灣省鍋爐協會 理事長 汪清港

2018.5.1

目 錄

- ◎生質物焙燒技術之發展與研究…………… 楊子岳、萬皓鵬、張瑩璽 3

 - ◎沼氣發電系統最佳化技術與實例說明
…………… 徐英綺、李志杰、蔡宗原、林依杏、洪宗良 19

 - ◎鍋爐及熱交換器用鋼管材料標準及檢測方法之研析…………… 楊福正 37

 - ◎合成氣在淨煤技術領域之應用及發展趨勢
…………… 周揚震、徐恆文、萬皓鵬 57

 - ◎鍋爐因補充水水質嚴重異常而衍生同質性大量破管的案例探討
…………… 宋朝鐘 71

 - ◎鍋爐爐頂管檢測規劃與執行案例分享…………… 顧宏基 85

 - ◎有效降低霧霾前趨物之鍋爐硫氧化物減量技術產業化應用
…………… 沈政憲、萬皓鵬、黃志峰、溫增文、徐恆文 93

 - ◎離心式空壓機漏油原因分析與改善… 張進發、賴定弘、李信龍 107
-
-

本刊內容已刊載於本會網頁，請進
台灣鍋爐協會網站（www.tbva.org.tw）
點進“刊物報導”進入覽閱

生質物焙燒技術之發展與研究

楊子岳、萬皓鵬、張瑩璽

工業技術研究院綠能與環境研究所

新能源技術組

摘要

世界各國致力於再生能源開發，生質能源應用屬碳中和，為再生能源發展重要的一環，於世界各國中，生質電力與生質熱能供應，占有一定的重要性。生質物焙燒技術為近期國際上研究重要的議題，其固態產物生質煤之特性與化石煤炭相近，可替代煤炭使用，具二氧化碳減量之效能。本文主要藉由介紹國內外焙燒技術發展現況與國內連續式焙燒先導系統發展情形，以提供國內推動生質能熱電應用與發展之參考。

一、前言

(一)國際生質能發展現況

生質能 2015 年初級能源供應 (Total Primary Energy Supply, TPES) 約達 13,647 Mtoe，生質能 (生質物能、廢棄物能) 約占總初級能源供應 9.7%，僅次於石油、煤及天然氣，為目前全球第四大能源[IEA, 2017]。在最終能源消費中，2015 年生質能占總最終能源消費 14.1%，其中傳統生質能應用占 9.1%，生質能發電 0.4%、工業供熱 2.5%、建築 (住商) 供熱 1.2% 及運輸用燃料占 0.8% [REN21, 2017]。

生質能在各消費部門中占比如圖 1 所示，傳統生質能應用在建築部門熱能應用占 20.5%、先進生質能應用則占 2.8%；在工業熱利用方面，先進生質能利用占工業熱利用約 7.3%，至於在電力、運輸用部門中，先進生質能利用占比約 2~3%，由目前應用情形中，生質能於熱利用 (建築與工業) 占比較高。另外，隨著生質能技術進步與普及化，估計傳統生質能利用比例將逐漸降低，將由先進生質能應用取代。

未來生質能利用展望，依據 IRENA 估計，全球生質能初級能源需求將由 53 EJ (2010) 增加至年 108 EJ (2030)，其中用於熱電、運輸用約占 58%，其餘 (42%) 將用於工業及建築部門[IRENA, 2014]。

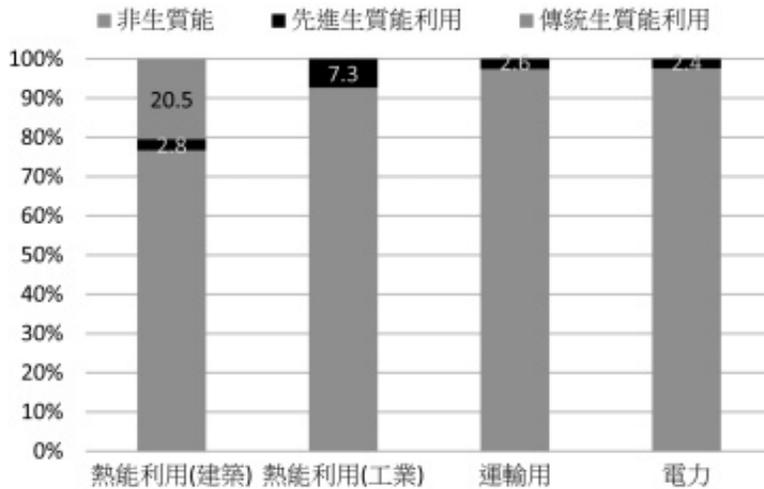


圖 1 2015 年全球最終能源消費部門生質能使用情形

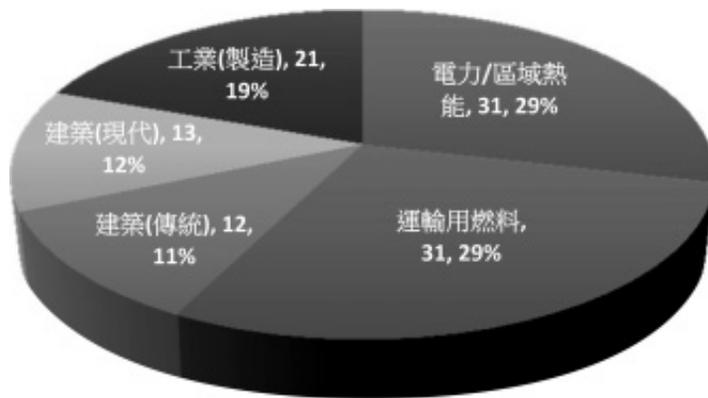


圖 2 2030 年全球初級能源供應預估[IRENA, 2014]

(Traditional biomass 通常為發展中國家、偏遠地區低效率的用於炊煮、供熱，且非商業應用；Modern biomass：以較永續、有效率的的方法產生燃料，並應用於熱、電或運輸工具等)。

(二) 國內生質能推動現況

2009 年我國公佈「再生能源發展條例」，為推動再生能源重要的法源依據。生質能為我國再生能源發展條例中所認定項目之一，依據生質料源種類來源，區分為生質能及廢棄物發電。國內生質能（物）發電主要以農林資材（如：蔗渣）、黑液及沼氣發電稱之，廢棄物發電主要以都市垃圾或一般事業廢棄物為主，於焚化爐中燃燒產生電與熱。目前（統計至 2018 年 1 月）國內生質物與廢棄物發電裝置容量，共計 727 MW。在發電量部分，2017 年總發電量約占當年度全國總發電裝置容量 1.35%，在再生能源總發電之占比，僅次於慣常水力發電 2%，國內各燃料類別發電占比如圖 3。

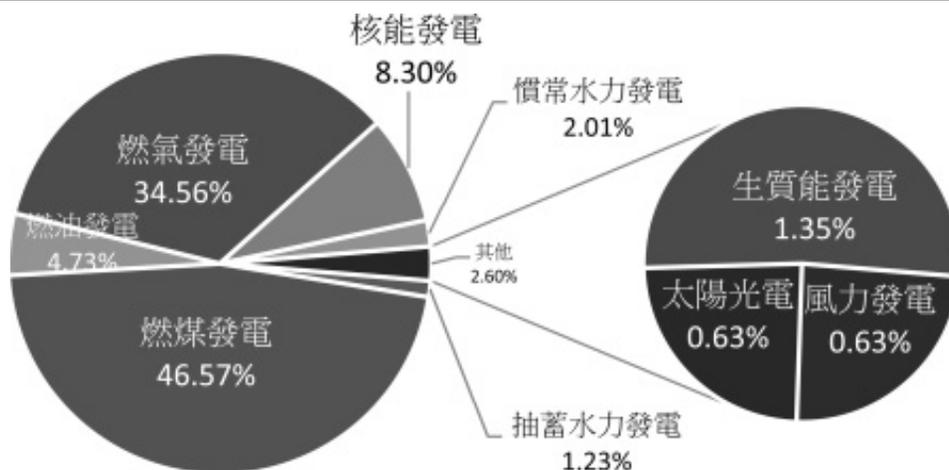


圖 3 2017 年國內各發電類別占比[經濟部能源局能源統計月報]

因應國內永續、減碳與能源轉型情勢，經濟部於 2015 年 1 月 26 日～27 日舉辦「103 年全國能源會議」，以「未來電力哪裡來」做為主軸，並以「需求有效節流」、「供給穩定開源」及「環境低碳永續」等議題，尋求我國電力政策的共識，其中再生能源在供給穩定開源議題中扮演重要角色[全國能源會議專題網站]。

為積極推廣再生能源發展，政府多次滾動檢討與提昇再生能源推廣目標，2010 年提出 2030 年再生能源設置目標達 10,858 MW，2014 年提升 2030 年推廣目標至 13,750 MW，現階段配合能源轉型規劃，更提昇 2025 年再生能源發電量將占總發電量 20%[經濟部能源局網站]，依據能源轉型白皮書重點推動方案之規劃，2025 年生質能目標 813 MW，相較於現況 727 MW，尚需增加 86 MW，需要更有效率的生質能技術研發與更多生質物能源化利用，始可達成，對於國內生質發電利用上仍是重要的挑戰。

二、焙燒技術簡介

生質物於熱電應用上，料源蒐集、運輸、儲存及與既有系統相容性，為實務應用上的挑戰，為克服上述挑戰，通常透過生質物的能源密度（單位體積所含的熱值）與均質化，以降低生質燃料應用成本，擴大生質燃料應用與普及。

在眾多生質能轉換技術中，生質物焙燒技術（Torrefaction）為產生固態均質、高熱值生質燃料技術，為近期國際固態生質燃料技術研發的重點。生質物焙燒屬於熱化學轉換（Thermo-chemical）技術，係在常壓、缺氧的環境下，於溫度 250～300°C 環境下，將生質物經過數分鐘至數小時反應，降低生質物水分含量及降低生質物中氫、氧含量，藉此提升產物單位重量熱值與單位體積熱值。

圖1為焙燒程序熱值提昇概念圖。生質物在缺氧條件下在250~300°C焙燒處理後，約產生70 wt.%固體物及30 wt.%焙燒氣體，其中固體產物-生質煤之熱值含量約占原生質物90%，故產出之生質煤（Bio-coal）熱值高於原生質物約30%。

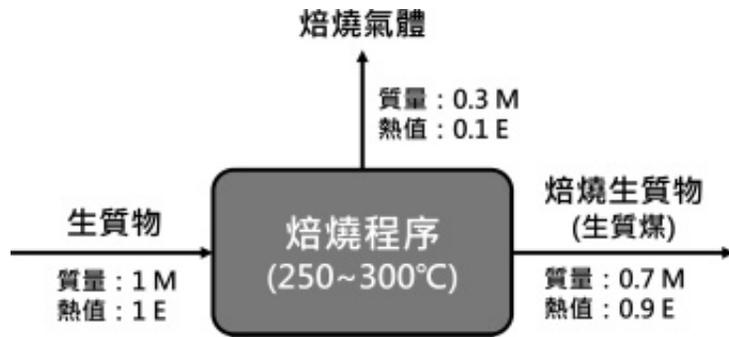


圖4 焙燒程序中質量與能量平衡圖[Bergman, 2005]

生質物焙燒可提升能源密度，係與生質物中木質素（Lignin）、纖維素（Cellulose）及半纖維素（Hemicellulose）等組成有關。Bergman et al.認為焙燒溫度250°C時，半纖維素、纖維素及木質素會反應成部分揮發物及碳化聚合物，造成質量的下降，隨著溫度持續增加時，纖維素及木質素會大量反應與碳化，這些反應使得焙燒後生質物能量密度提高，此為焙燒技術受到重視重要因素[Bergman, 2005]。

生質物焙燒後固態產物稱為生質煤，表1為生質煤與其他燃料比較。生質煤熱值約20-24 MJ/kg（4,800~5,700 kcal/kg）、單位體積能量密度15.0-18.7 GJ/m³、含水率1-5%，且生物可分解性低、疏水性及可磨性（HGI）等特性，均較未焙燒之生質物（如木材）佳，其特性更接近煤炭，實務應用上亦與既有燃煤系統相容性高，且在運儲上具有降低成本之優勢，因此深具替代煤炭使用之潛力。

表1 典型焙燒生質物（生質煤炭）與其他燃料特性比較[Kleinschmidt, 2011]

	木材	木質 顆粒燃料	焙燒生質 物顆粒	木炭 (Charcoal)	煤炭 (Coal)
含水率 (wt.%)	30-45	7月10日	1月5日	1月5日	10月15日
熱值 (MJ/kg)	9月12日	15-16	20-24	30-32	23-28
固定碳 (%)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
體密度 (kg/m ³)	200-250	550-750	750-850	~200	800-850
體積能量密度 (GJ/m ³)	2.0-3.0	7.5-10.4	15.0-18.7	6-6.4	18.4-23.8
可磨性指數 HGI	--	20~25	25-52	--	45-70

三、國際焙燒生質煤之技術應用

(一)傳統生質燃料應用與挑戰

傳統固態生質燃料（如木片、木屑或顆粒燃料）與煤炭混燒，可替代煤炭使用已是成熟的技術，且已廣泛使用於工業熱應用。然而，傳統生質燃料於既有燃煤發電系統中與煤炭混燒比例仍然有限，此為煤炭和生質物彼此間性質上的差異所致，特別是燃煤發電廠中需將生質物磨成粉狀，因為生質物堅韌的結構，使燃煤電廠的磨煤機混摻生質燃料比例受到限制。另外，目前經常用於電廠的顆粒燃料，另需設置儲存設施，並且需要小幅度修改製程設備，此為生質顆粒燃料應用於燃煤電上另一個限制。

為增加生質燃料於電廠中混摻/混燒比例，開發新技術是必要。焙燒後生質物（生質煤），增加可研磨性、熱值、疏水性及能源密度，因而成為重要選項。此外，生質煤相對於原生質物具有產品高熱值、穩定性高、均質化與輸水性等優點，在儲放與運輸上具有優勢，尤其針對遠距離運送更有運儲經濟效益。

(二)先進國家焙燒技術發展

近幾年，生質物焙燒技術發展主要在歐洲（荷蘭）及北美，主要係市場需求導引或具生質料源供應上的優勢。表 2 為現階段國際領先公司焙燒技術研發現況[IEA, 2015]，各國發展焙燒製程產能約 30,000~80,000 噸/年之示範場或商轉廠（commercial demonstration phase），其中規模最大者為美國 Solvay（FR）/ New Biomass Energy 公司所開發 Screw reactor 技術，生質煤年產量可達 8 萬公噸/年，至今也生產超過 7.5 萬噸生質煤供測試[New Biomas 網頁]。

目前各先進國所開發焙燒反應器，主要包括有螺旋式、旋轉窯式、輸送帶式、移動床式、多層床式及流體化床式焙燒反應器等，其中在螺旋式與旋轉窯式反應器，因其處理彈性大、設備簡單、技術相對較成熟，已有商業化規模系統（產能 2 萬噸/年以上）。除焙燒反應器技術持續精進外，焙燒製程熱整合也是焙燒系統的重點，主要為體生焙燒氣體循環/燃燒之熱能整合利用，以降低生質燃料產製成本[Kleinschmidt, 2011]。

我國環保署為解決國內生質廢棄物處理問題，曾委託工研院開發本土連續式焙燒先導系統，以期可應用在廢棄物處理兼顧能源化應用。本文即介紹國內開發連續式焙燒系統，驗證自行開發本土焙燒系統之可行性，可做為國內生質煤技術發展之參考。

表 2 國際焙燒技術研發情形 [IEA, 2015]

公司	技術	廠址	產能 (噸 / 年)	規模	備註	相關網址
Clean Electricity Generation (UK)	Oscillating bed	Derby (UK)	30,000	商業化規模	可用	https://cegeneration.com/torrefaction/
Solvay (FR) / New Biomass Energy (USA)	Screw reactor	Quitman (USA/MS)	80,000	商業化規模	可用	http://newbiomass.com/2016/10/new-biomass-energy-acquires-solvays-interest-in-the-mississippi-torrefaction-plant/
Torr-Coal B.V. (NL)	Rotary drum (Torr@Coal)	Dilsen-Stokkem (BE)	30,000	商業化規模	可用	http://www.torrcoal.com/en
Topell Energy (NL)	Fluidised bed	Duiven (NL)	60,000	商業化規模	封存	--
ANDRITZ	Rotary drum	Austria	10,000 (1 T/H)	示範系統	2011 年建置	https://www.andritz.com/resource/blob/22358/161d4d687fdcbbc4dd5a56f89317d5c/pp-powerspectrum-01-2013-web-data.pdf
	Moving bed	Denmark	10,000 (1 T/H)	示範系統	2012 年建置	--
Airex (CAN/QC)	Cyclonic bed (CarbonFX torrefaction technology)	Bécancour (CAN/QC)	16,000	示範系統	可用	http://www.airex-energy.com/en/biocoal
Agri-Tech Producers LLC (USA/SC)	Screw reactor (Torre-Tech® 5.0)	Allendale (USA/SC)	13,000 (5 T/H)	示範系統	可用	http://www.agri-techproducers.com/
BioEndev (SWE)	Dedicated screw reactor	Holmsund, Umea (SWE)	16,000	示範系統	可用	http://www.bioendev.se/the-company/projects/idu/
Baltania OÜ	Clean Electricity Generation 發展之技術	Vägari, Estonia.	15,000 (供應 1.1 MWe 系統)	示範系統 (投資金額 5,300 萬美元)	2017/11 宣布 建置	http://biomassmagazine.com/articles/14876/dutch-firm-invests-53-million-in-estonia-biocoal-plant

四、國內焙燒技術發展

(一) 國內焙燒技術發展情形

生質煤在運用上具有多項的優點，因此國內部分學研單位也投入焙燒技術研發與學理探討，包括：中研院徐遐生院士、臺灣大學張慶源教授團隊、駱尙廉教授團隊、林法勤教授團隊、成功大學陳維新教授團隊、中興大學吳耿東教授團隊，及工研院團隊等，其中中研院超級烘焙高溫熔鹽生物炭技術、台大張慶源教授及工研院團隊，至今也完成焙燒先導系統設計、建置與測試，對於生質煤技術已累積了商業化系統的能量。

生質物焙燒處理容規模彈性大（如旋轉窯式）、處理速率快，適合國內產製生質燃料，未來推廣應用上，也可輸出至其它國家（如料源豐厚東南亞地區），表3為對於國內發展焙燒技術之優劣分析，可提供國內焙燒技術與產業發展之參考。

表3 國內發展焙燒技術優劣分析

優勢 - 內部	劣勢 - 內部
<ul style="list-style-type: none">- 國內對於廢棄物 / 生質物前處理、造粒、裂解、RDF-5 混燒應用等已有相關技術與經驗。- 可與國內既有技術能量、機械產業相聯結。- 開發中小型焙燒系統，可適用於料源較分散的區域。	<ul style="list-style-type: none">- 對焙燒技術、混燒應用經驗少，目前僅有學術研究及小型工程化驗證。- 燃煤議題受到爭議，以生質煤替代煤炭，於其他空污排放之效益未明。
機會 - 外部	威脅 - 外部
<ul style="list-style-type: none">- 可廣泛用於都市垃圾、農工廢棄物，提升廢棄物能源化利用效率（熱效率及發電效率）。- 應用於燃煤電廠、汽電共生廠、工業鍋爐，替代煤炭，具減碳效益。- 相關經驗可複製應於海外市場（生質料源豐富地區，如東南亞）。	<ul style="list-style-type: none">- 農林廢棄物收運成本高，生產成本遠高於煤炭售價，不利推廣。- 國外已有大型準商轉廠或商轉廠建置、運轉能力。

(二) 連續式旋轉窯焙燒系統介紹

為開發自主性生質物焙燒技術，並應用於廢棄物處理，行政院環保署委託工研院開發連續式焙燒先導系統，以做為廢棄物能源化應用之參考。工研院依據國內生質物特性、國內相關設施的技術成熟度等因素，開發旋轉窯式連續先導型焙燒系統，並進行相關測試。以下就針對焙燒系統與相關測試進行說明。

先導型焙燒系統設計生質物進料量為 45 kg/hr，因生質物通常含水率較高（50% 以上），為有效提升焙燒系統效率，因此系統設計上，生質物需先進行乾燥後，再進行焙燒，以降低整體焙燒生質物能耗。因此先導焙燒系統主要包括乾燥、焙燒、供熱及熱交換單元、機電整合控制系統等單元，整體的流程示意圖與設備如圖 5 及圖 6 所示。

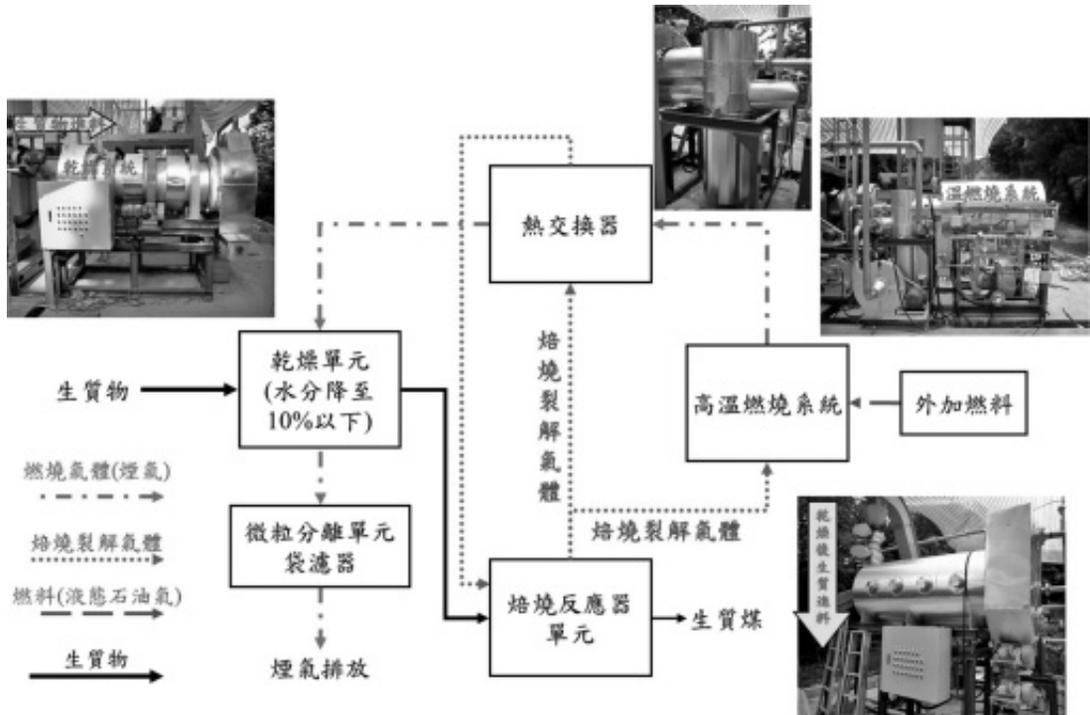


圖 5 工研院先導型焙燒系統流程示意圖



圖 6 工研院生質物乾燥與焙燒先導系統

(三)生質物焙燒測試

為驗證連續式焙燒先導系統，工研院針對進行不同生質物（如柳杉木與混合料源顆粒燃料）焙燒測試，透過先導系統操作與測試，掌握國內焙燒工程化技術，可做為商業化推動之參考。以下為相關試驗結果與說明：

1. 柳杉木焙燒

依據工研院所建置連續式焙燒先導系統，以普及性較高的柳杉木做為進料，並進行二批次測試與操作驗證，其中包括焙燒程度高與焙燒程度低之測試，相關測試條件如表 4 所示。

於焙燒焙燒程度高（柳杉焙燒-1）測試中，柳杉木進料量 37.5 kg/hr，乾燥系統出口溫度約 101~125°C，主要用於乾燥生質物，使得生質物進入焙燒單元中的含水率 < 5%，降低生質物進入焙燒單元所需的熱源需求，而焙燒系統出口則控制在溫度 330~360°C，並控制停留時間在 30~40 分鐘，主要用於降解生質物中半纖維素與纖維素，提升生質煤的熱值，乾燥單元與焙燒單元出口溫度溫度控制情形如圖 7，由溫度趨勢顯示，可穩定控制乾燥與焙燒單元之溫度，可顯示連續式焙燒系統操作具相當穩定性。

表 4 生質物焙燒系統測試（柳杉木焙燒）

生質物料		柳杉焙燒 -1 (焙燒程度高)	柳杉焙燒 -2 (焙燒程度低)
進料尺寸		約 10 mm	
乾燥 系統條件	乾燥系統入口溫度 (°C)	322~332	254~288
	乾燥系統出口溫度 (°C)	101~125	80~118
	生質物進料速率 (kg/hr)	37.5	30
	乾燥系統停留時間 (min)	30	30
焙燒 系統條件	焙燒系統入口溫度 (°C)	350~393	272~294
	焙燒系統出口溫度 (°C)	330~360	179~255
	焙燒系統停留時間 (min)	30~40	30~40
系統產能	生質煤生產速率 (kg/hr)	7.83	19.25
	生質煤熱值 (MJ/kg)	29.3	20.52
	生質煤產能 (kWth)	63.73	109.73
效益	固態物產率	20.90%	64.30%
	能源產出 / 能源投入	1.52	3.54

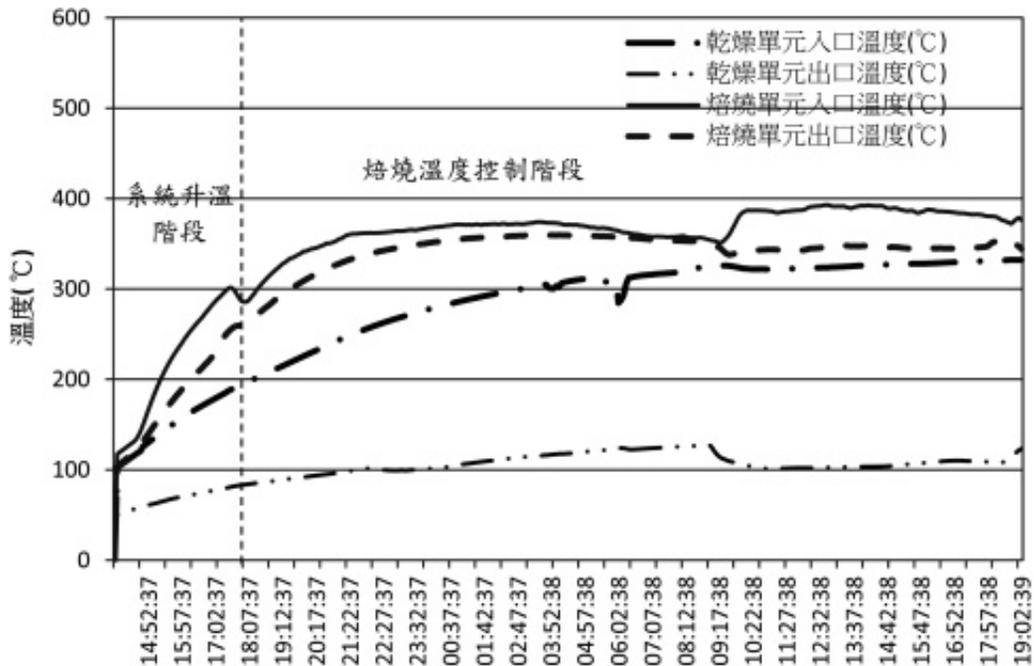


圖 7 生質物乾燥、焙燒單元連續測試溫度變化情形（柳杉焙燒-1）

於第一次焙燒柳杉測試中，因溫度控制在較高的範圍（約 360°C ），使得生質物裂解（焙燒）程度明顯，氣態產物（油氣）產生較多，本次測試生質煤產率約21%（生質煤重量/生質物進料重量），焙燒產物外觀如圖8；另，於第二次焙燒柳杉木測試中（柳杉焙燒-2），在較低的焙燒溫度（約 240°C ），與相同的焙燒時間下，第二次焙燒生質煤產率則提升至60%以上。

表5為二次不同焙燒條件下產物特性分析結果。焙燒前柳杉木水分17.2 wt.%、灰分0.3 wt.%、可燃分82.5 wt.%，低位熱值3,723 kcal/kg。而第一次焙燒後產物水分1.4 wt.%、灰分1.5 wt.%、可燃分97.1 wt.%，低位熱值6,602 kcal/kg，其中低位熱值較柳杉原料提升近77%。另，由元素分析中焙燒產物含碳量由43.7 wt.%提升至71.6 wt.%，驗證本次焙燒測試碳化程度較高。

於第二次柳杉焙燒產物分析中，生質煤水分2.0 wt.%、灰分0.4 wt.%、可燃分97.6 wt.%，低位熱值4,515 kcal/kg，相較於原柳杉木熱值亦提昇近20%，其碳含量也達51%，此輕度焙燒柳杉生質煤可符合IWPB（Initiative Wood Pellets Buyers）工業用顆粒燃料熱值規格，具直接應用於工業鍋爐之潛力。

觀察二次焙燒產物C/H與C/O原子數比值，相較於原始生質物（柳杉）有增加的趨勢，相關資訊也驗證焙燒後產物與煤炭較為相近，此於文獻資料趨勢一致。

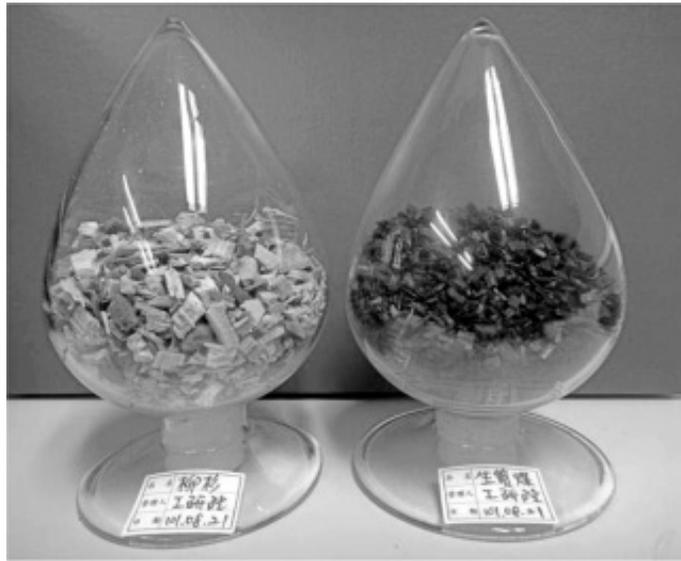


圖 8 柳杉木焙燒前後外觀

表 5 柳杉焙燒前後特性分析

分析參數	柳杉 (焙燒前)	柳杉 (焙燒 1)	柳杉 (焙燒 2)
低位熱值 (kcal/kg)	3,723	6,602	4,515
水分 (wt.%, wb)	17.2	1.4	2.0
灰分 (wt.%, wb)	0.3	1.5	0.4
可燃分 (wt.%, wb)	82.5	97.1	97.6
C (%)	43.7	71.6	51.5
C/O (原子數比)	1.73	5.87	1.73
C/H (原子數比)	0.58	1.1	0.78
HGI	--	--	23.0

註：一般煤炭 C/O 原子數比值>5、C/H 原子數比值>10

2. 顆粒燃料焙燒測試

除以傳統生質料源（木材）進行焙燒，配合國內多元生質料源特性，工研院團隊亦針對稻稈與菇包廢料混合顆粒燃料（7：3），進行焙燒測試（稻稈與菇包廢料為國內較豐厚的生質料源），以建立本土多元料源生質物焙燒技術。

混合顆粒燃料進料速率約28.3 kg/hr（含水率約18.1 wt.%），焙燒單元入口溫度約284~303°C、出口溫度約215~256°C、停留時間約30~40 min。經測試，生質煤生產速率平均約16.4 kg/hr，固態物產率約58.2%（因進料含水率較高，使得固態產率較低）。

顆粒燃料焙燒產物外觀如圖 9、產物特性如表 6，其中水分 1.6 wt.%、灰分 14.5 wt.%、可燃分 83.9 wt.%，其低位熱值達4,398 kcal/kg，已較焙燒前熱值（2,907 kcal/kg）提升約50%，此熱值可符合 IWPB 顆粒燃料工業用熱值規格（約4,000 kcal/kg），且焙燒產品 HGI 達42.45，與台電 HGI 燃煤規格相近，故焙燒後產物（生質煤）可直接用於燃燒系統（如工業鍋爐、汽電共生廠、燃煤電廠）與煤炭混燒。至於焙燒後產物之 C/H 與 C/O 原子數比值相較於焙燒前之顆粒燃料，亦有顯著提升情形，此結果與相關文獻報導趨勢相同。

透過混合料源造粒與焙燒程序，除可將燃料均質化與提升熱值，有利於燃燒應用外，對於國內農林資材量少、種類多之情形，可透過本程序概念，依農產時序，對不同生質料源規劃適當的混摻造粒比例與焙燒，對於國內生質燃料供應穩定化供應將有一定的助益，可做為農林剩餘資材熱電利用之參考。

綜上，依據柳杉木與顆粒燃料（稻稈與菇包廢料）之焙燒測試，在溫度控制在約300°C條件下進行乾燥與焙燒，可提昇生質燃料低位熱值與 C/H、C/O 原子數比值，使其特性更接近於煤炭，經乾燥與焙燒後之固態產物，其低位熱值也高於4,000 kcal/kg，可直接用於工業鍋爐（對燃燒影響亦較低），對於系統的相容性與混摻比例，預期可高於原生質物料，此將有助於提昇自主生質料源能源化利用。

表 6 混合顆粒燃料焙燒前後物種特性分析

項目	焙燒前	焙燒後
低位熱值 (kcal/kg)	2,907	4,398
水分 (% , wb)	18.1	1.6
灰分 (% , wb)	11.4	14.5
可燃分 (% , wb)	70.5	83.9
C (%)	33.5	48.9
C/H	0.58	0.82
C/O	1.47	2.27
HGI	--	42.45



圖 9 顆粒燃料焙燒前後外觀

(四) 生質煤與煤炭混摻研磨測試

為瞭解農林廢棄物（木材及混合顆粒燃料）產製生質煤於既有粉煤鍋爐混燒之相容性，亦針對生質煤（木材）於雷蒙式磨煤機（圖 10）進行研磨評估。

本研磨煤機可控制研磨粉煤的顆粒大小，通過 200 mesh（74 μm ），並且符合原始 GTI 設計要求的標準 70 % 以上通過 200 mesh。本項評估以研磨量



圖 10 雷蒙式磨煤機設備圖

40 kg/hr 為基礎，進行不同生質煤與煤炭重量混摻比例，以瞭解不同混合比例下能耗情形與磨煤後粒徑之變動，以做為生質煤混摻研磨應用之參考。

圖 11 為柳杉生質煤（輕度焙燒之生質煤）與煤炭混摻研磨之結果，研磨系統進料速率控制在 40 kg/hr，測試結果中，單以煤炭進行研磨時，系統能耗約 149.4 kWh/ton，隨著生質煤混摻比，單位研磨進料量能耗有明顯提昇之情形，當生質煤混摻比值達 15%，能耗提升約 16.1%，比對生質煤之 HGI 值 23.04，與台電煤炭 HGI 規範 50 有些差異性（代表此輕度焙燒生質煤較不易研磨），故在混摻研磨上，會造成系統能耗會有提升之情形，觀察其研磨後重量平均粒徑（ D_{50} ）

(表 7)，在混摻比 $<10\%$ 時，其平均粒徑與純煤炭研磨時相近，然而生質煤混摻比大於 15% ，其研磨後平均粒徑明顯較高。若以進入粉煤系統為考量，柳杉經輕度焙燒後，其與煤炭混摻比在 10% 以內，在能耗上與研磨粒徑上對於系統影響會較低。

在混合顆粒燃料生質煤研磨方面，由研磨測試結果顯示（如圖 12），顆粒燃料生質煤混摻比例 $5\sim 50\%$ 時，系統研磨能耗增加情形並不明顯，推測與顆粒燃料 HGI 42.45（此可能因造粒前須將生質物破碎，有利於 HGI 數值增大，即較容易研磨成粉狀）與煤炭相近，實際與煤炭研磨上，對於系統能耗增加並不明顯，觀察其研磨後平均粒徑，於生質煤研磨比 20% 以下時，仍可控制平均粒徑約 $60\mu\text{m}$ 以下，當混摻比達 50% 時，研磨後平均粒徑則達 $128\mu\text{m}$ （表 8）。透過本測試，顆粒燃料生質煤混摻比 20% ，在系統能耗及研磨後粒徑上，對於研磨系統影響會較低。

綜合上述生質煤與煤炭混摻研磨測試結果，柳杉生質煤與煤炭混摻研磨測試中，單位重量研磨能耗隨著生質煤混摻比例增加而有提升之情形，研磨後粒徑亦隨混摻比例增加而有增加之情形，考量研磨能耗與研磨後粒徑，輕度焙燒後柳杉生質煤與煤炭混燒比可在 10% 以下，此結果與國際上目前混摻生質燃料比例之建議相符。

至於在稻稈/菇包廢料顆粒燃料生質煤與煤炭混摻研磨測試中，在混摻比 50% 以下，混摻比例與單位進料之研磨能耗影響不高，若單考量研磨粒徑與能耗等因子，顆粒燃料在輕度焙燒後生質煤與煤炭混燒比可在 20% 以下。至於在高混摻比對於燃燒之影響則有待後續進一步研究。

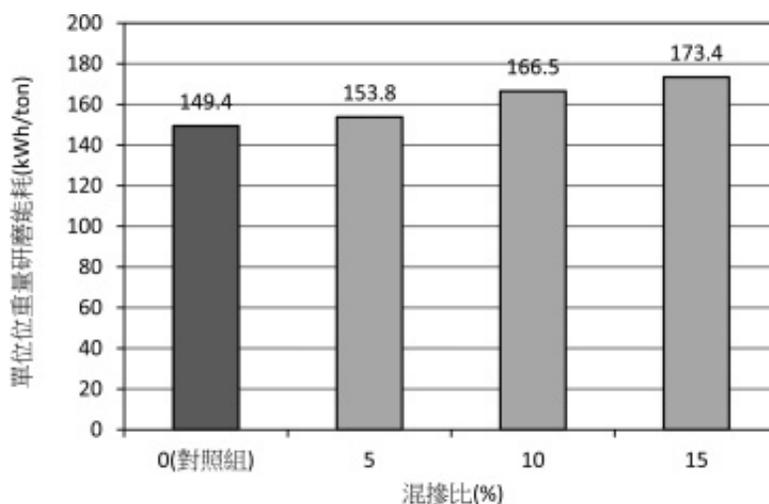


圖 11 柳杉生質煤與煤炭混摻研磨能耗結果

表 7 柳杉生質煤與煤炭混摻研磨後之平均粒徑

混摻比 (%)	0	5	10	15
研磨後平均粒徑 (μm)	32.6	28.0	31.2	82.2

註：混摻比：生質煤/（生質煤+煤炭）

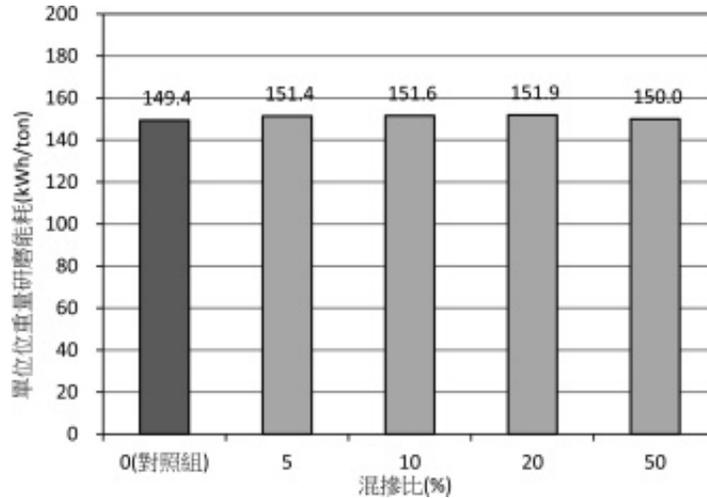


圖 12 顆粒燃料生質煤與煤炭混摻研磨能耗結果

表 8 顆粒燃料生質煤與煤炭混摻研磨後之平均粒徑

混摻比 (%)	0	5	20	50
研磨後平均粒徑 (μm)	32.6	58.0	55.8	127.7

五、結論

我國面臨能源轉型與溫室氣體減量等議題，再生能源為達成相關政策與環境永續重要的手段，而生質能源利用相較於其他再生能源，可提供穩定熱能與電力供應，為國內發展的重要項目之一。我國生質料源分散特性，發展中小型生質能熱電系統，可解決料源蒐集上之問題，亦可解決有機廢棄物處理問題，是促進循環經濟發展重要的一環。

生質物焙技術為近期國際上發展的固態生質燃料技術，因其熱值高、疏水性、抗生物分解等特性與煤炭相近，使用上，與既有燃煤系統相容性高於傳統生質燃料，故可高比例替代煤炭使用。本文介紹國內研發自主性的焙燒技術，驗證連續式操作系統之可行性，並可用於處理國內農林剩餘資材，提升生質物

熱值，相關技術亦可衍生應用於處理生質廢棄物，兼具廢棄物處理與提供生質燃料之多重效益。因焙燒技術處理規模與生質物種類彈性大，適用於國內生質料源特性，並可以分散生產、集中利用方式加以推動。

六、參考文獻

- Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., Kiel, J. H. A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power station - Biocoal, No. ECN-C-05-013, ECN.
- IEA Bioenergy Task 32: Status overview of torrefaction technologies, 2015. IEA Bioenergy IEA, 2017. Key World Energy Statistics. International Energy Agency.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) 2014. Global Bioenergy - Supply and Demand Projections - A Working Paper for REmap 2030.
- Kleinschmidt, C. P. 2011. Overview of international developments in torrefaction, KEMA Nederland BV, Getting from www.bioenergytrade.org/mobile/320/downloads/grazkleinschmidtpaper2011.pdf
- New Biomas 網頁：<http://newbiomass.com/> (造訪日期：2018.04.09)
- REN21 2017. Renewables 2017 Global Status Report.
- 全國能源會議專題網站：http://103年全國能源會議.tw/news_in.php?id=QD48PyomJTI5QCgrIyVeKw== (造訪日期：2018.04.09)
- 經濟部能源局統計月報：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/SubMenu.aspx?menu_id=135&sub_menu_id=366 (造訪日期：2018.04.10)
- 經濟部能源局網站：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=7691 (造訪日期 2018.04.10)
- IEA, 2017. Key World Energy Statistics. International Energy Agency.
- REN21 2017. Renewables 2017 Global Status Report.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) 2014. Global Bioenergy - Supply and Demand Projections - A Working Paper for REmap 2030.
- 經濟部能源局統計月報：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/SubMenu.aspx?menu_id=135&sub_menu_id=366 (造訪日期：2018.04.10)
- 全國能源會議專題網站：http://103年全國能源會議.tw/news_in.php?id=QD48PyomJTI5QCgrIyVeKw== (造訪日期：2018.04.09)
- 經濟部能源局網站：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=7691 (造訪日期 2018.04.10)

沼氣發電系統最佳化技術與實例說明

徐英綺、李志杰、蔡宗原、林依杏、洪宗良
工業技術研究院 中分院、行政院農業委員會沼氣發電推動計畫辦公室

一、前言

隨著科技發展的進步及環境保護意識抬頭，綠能、廢棄物再利用成爲國際趨勢，而沼氣具備可儲存性、產量穩定等優點，且沼氣供應無須仰賴進口，有助於實現能源自主，因此成爲政府大力推展的綠能產業之一。105年行政院第3511次會議中決定，再次推動養豬場沼氣發電，並提供相關設備補助，且於106年提高沼氣發電躉購費率爲5.0087元/度，107年更提高爲5.0161元/度，顯示政府對於沼氣發電之重視與推動決心。

沼氣產自廢水處理中的厭氧消化過程，因此畜牧場與工業廢水系統，若經過厭氧處理皆有沼氣產生，因此可依場內沼氣產量與能源需求，設計相關沼氣再利用系統，供應穩定綠能。由於沼氣具備氣體燃料之特性，除進行發電以外，亦可以鍋爐燃燒供應熱水與蒸氣，或於畜牧場中以沼氣燃燒保溫燈，進行畜舍保溫。不論進行何種再利用形式，工研院中分院沼氣發電推動辦公室皆提供完整輔導，協助進行效益評估，系統規格與設備供應商建議[1]。

而沼氣發電相對於其他再利用形式，具備較高之技術門檻與資金投入，亦具備最高之收益，因此爲協助業者提高沼氣發電效益，協助尚未建置沼氣發電系統之業者，以實測沼氣產量進行系統規劃設計，避免錯誤設計與過度投資影響收益[2]。針對已建置沼氣發電系統之業者，提供系統最佳化輔導，協助業者提升系統效能、建立操作標準方法與確保設備使用年限。因此本文針對沼氣發電系統最佳化技術進行介紹，並提供相關效益提升實例進行說明，期盼幫助業者了解沼氣再利用之效益與價值，提升國內沼氣再利用之比率，實踐循環經濟與環境永續之目標。

二、沼氣發電系統介紹

沼氣發電原理爲：沼氣於內燃機燃燒，推動發電機而產生電能。國內沼氣發電於民國80年左右開始推動，當時由農委會輔導養豬場進行沼氣再利用與沼氣發電，但當時沼氣發電機運行一年左右便紛紛故障，主因爲沼氣中含有硫化氫與水份，以及沼氣供應不穩定的關係。硫化氫會造成金屬腐蝕，導致沼氣發電機的損壞；水份會造成發電機引擎熄火，與燃燒不穩定而產生震動。沼氣供應不穩定容易

使發電機頻繁熄火，磨損機械;為避免前述情形發生，沼氣生成後需要進行脫硫、脫水與穩壓處理才可進入發電機，以下按照處理順序（如圖1流程）進行詳細介紹：

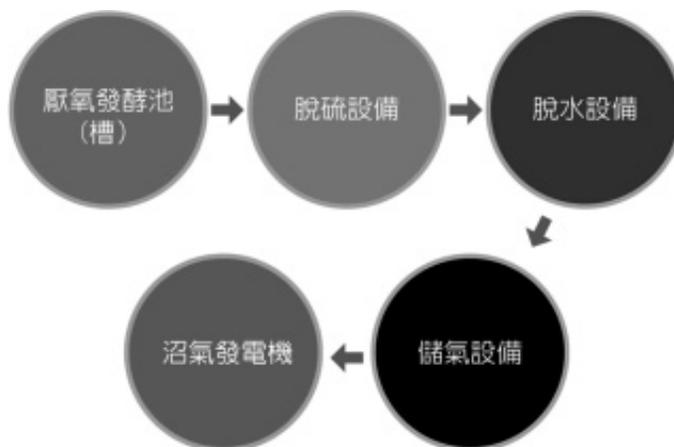


圖 1 沼氣發電系統簡圖

• 厭氧發酵槽

工業與畜牧業廢水處理系統中，厭氧消化階段是沼氣產生的來源。厭氧消化為利用微生物在缺氧環境下，進行有機物分解轉化成沼氣，於畜牧廢水處理中，厭氧消化對於有機質與懸浮固體去除率達 88 % 以上[3]，顯示厭氧消化對於廢水處理之重要性。

為維持良好厭氧發酵環境，需隔絕空氣產生缺氧環境，以利厭氧消化菌之生長，因此於畜牧業中常使用覆皮式厭氧發酵槽或水泥密封式厭氧槽，工業界以水泥密封式厭氧槽與不鏽鋼桶槽式厭氧槽較為常見。

• 脫硫設備

脫硫設備的使用有其必要性，否則硫化氫隨著沼氣進入發電機，會造成燃燒室、排氣系統的腐蝕，進而使發電機引擎損壞，產生更高的維修費用。本團隊於國內各牧場與工業廢水系統，實測沼氣中硫化氫濃度，範圍為 500-8,000 ppm 之間，而各廠牌發電機對於硫化氫濃度容許上限一般低於 200 ppm，因此脫硫為必要的前處理流程，才可使硫化氫濃度符合發電機要求，確保相關系統使用壽命。

常見的脫硫設備依吸附材料不同，可分為：固體吸收式、液體吸附式與生物吸收式三種（可參考表 1），以建置成本而言，固體吸收式最低，液體吸收式次之，生物吸收式最高。固體吸收式是使用顆粒狀氧化鐵、石灰來吸附硫化氫，達成脫硫效果，需定期更換氧化鐵以維持脫硫品質。液體吸附式是將沼氣通過洗滌塔，利用硫化氫溶於水的特性進行吸附，洗滌塔的水若循環使用，需定量

投入鹼液進行酸鹼中和，以維持脫硫品質。生物脫硫法為使用硫氧化菌，將硫化氫轉化為固體硫或是硫酸根，將沼氣中硫化氫去除[4]。

表 1 常見脫硫方法比較表

吸附材料	固體吸收式	液體吸附式	生物吸收式
原理	氧化鐵、石灰可與硫化氫進行氧化反應，去除硫化氫。	利用硫化氫可溶於水之特性進行硫化氫去除。	硫氧化菌可將硫化氫轉為固體硫或是硫酸根，將沼氣中硫化氫去除。
成本比較	低	中	高
優點	建置成本低廉、操作簡便	脫硫效果穩定	生物處理環保且無額外廢棄物產生
缺點	需定期更換氧化鐵以維持脫硫品質	以鹼液進行酸鹼中和產生鹽類易堵塞管路	脫硫效果受溫度影響

• 脫水設備

由於沼氣自厭氣槽中生成，因此富含水分，再加上厭氧發酵過程中會產生熱，使得沼氣溫度高於室溫，夾帶更多水氣，因此沼氣管路經常有積水；若未進行脫水，水氣將造成點火失敗與燃燒不完全，導致發電機產生震動。

目前脫水設備採用冷凝的方式將沼氣中的水分去除，一般常見方法為：冷卻法與固體吸附法。冷卻法是將冷媒加壓降溫後，冷媒透過熱交換器進行沼氣降溫，使沼氣飽和蒸汽壓下降，而使水分冷凝降低濕度，此原理與家用除濕機之原理相同。固體吸附法是使用乾燥劑將水吸附，常見乾燥劑如：矽膠、活性氧化鋁[5]，當乾燥劑吸附水分達飽和後，再取出烘乾去除水分，可重複使用。

• 儲氣設備

每台發電機對於燃料供應壓力皆有要求，當壓力不穩定時發電機會產生劇烈震動、輸出功率不足等問題；當沼氣壓力低於壓力下限，發電機將會停機，將容易導致引擎磨損。

儲氣設備的目的在於儲存，並提供發電機穩定壓力的燃氣，可依照空間狀況與發電機需求，採用高壓鋼瓶或高分子膠皮袋進行儲氣，高壓鋼瓶可加壓儲存鋼瓶體積 7 到 10 倍的沼氣，可耐強風、較不易損壞，但建置成本較高。而高分子膠皮袋建置成本較低，內部沼氣壓力略高於大氣壓力，因此需占用的空間較大，且需另外保護與固定才能防範強風破壞。

• 沼氣發電機

下圖 2 為沼氣發電機的外部構造圖，沼氣發電機可簡單分為：引擎、發電機、控制系統、排氣系統、燃氣系統、散熱系統等部分。沼氣發電機為燃氣引擎，與燃油的汽車引擎類似，僅燃料供給系統不同。常見的沼氣發電機屬於內燃機式引擎，內燃式引擎之燃燒行為在汽缸內進行，利用燃燒時產生的爆發力推動活塞而產生機械能。活塞於汽缸內往復上下移動，活塞帶動曲桿產生旋轉動能，如圖 3 所示，而轉動電磁鐵而產生電能。

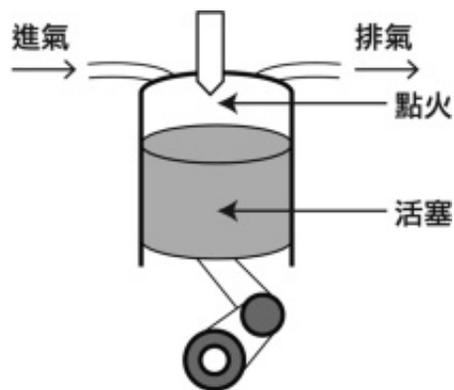


圖 3 往復式內燃機簡圖

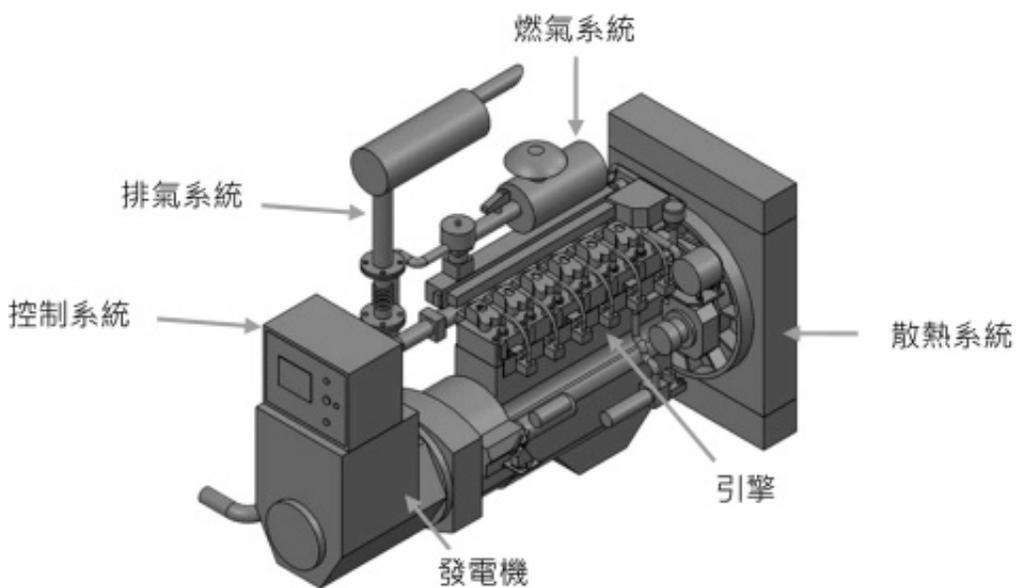


圖 2 沼氣發電機外部構造圖

三、沼氣發電系統最佳化技術

系統最佳化並不單只提高產電效益，同時需提高系統穩定度與設備使用壽命，因此沼氣產量、沼氣品質、脫硫效能與產電量，皆需依據每一環節進行效能檢測，並依檢測結果進行系統調教，以提高系統效益，以下就各項目進行說明。

(一) 厭氧系統效能提升技術

厭氧系統為沼氣產生的源頭，可視為沼氣發電系統之心臟，當沼氣產量不足或不穩定，後端系統將無法穩定運轉。而沼氣產量多寡影響沼氣發電之效益，

沼氣產量高、沼氣中甲烷濃度高，將具備較佳之燃燒效益。因此提升沼氣產量與品質為厭氧系統效能優化之重點。

厭氧消化是在缺氧環境下，利用厭氧微生物將廢水中的有機物分解轉化成沼氣，厭氧消化反應可分成三個階段：水解、酸化，和甲烷化。第一階段水解，為水解菌將有機物，如蛋白質和脂質，藉由水解作用轉化成簡單之有機酸、脂肪酸。第二階段酸化，將水解反應產生的產物如乳酸及醇類，藉由產氫乙酸菌作用轉化為乙酸、氫氣及二氧化碳。第三階段甲烷化，為藉由甲烷菌將氫氣、二氧化碳、乙酸生成甲烷[7]。因此，沼氣是由酸生成菌與甲烷生成菌同時作用所形成的產物，如下圖4所示。因此微生物行厭氧消化分解效能，即影響沼氣產量與沼氣品質，其中影響為生物生長之關鍵因數為：厭氣槽水力停留時間、化學需氧量（Chemical Oxygen Demand, COD）、pH 值、氧化還原電位與溫度，以下分別進行說明：

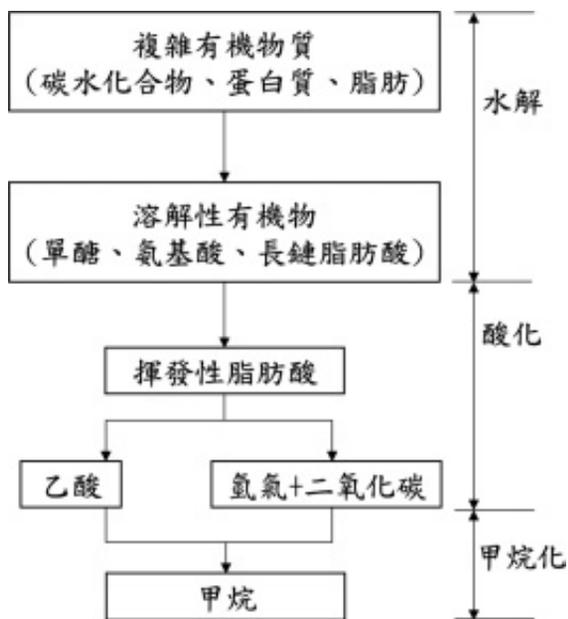


圖4 有機物質在厭氧消化過程中的降解途徑

• 厭氣槽水力停留時間

厭氣槽微生物需要足夠反應時間，消耗有機物而產生沼氣，因此廢水流入厭氣槽體至流出槽體所需的時間，則定義為水力停留時間，一般以（天）為單位。計算厭氣槽水力停留時間，即厭氣發酵槽有效容積除上每日污水量可得知。若以三段式廢水處理系統進行評估，較為理想之厭氣槽水力停留時間為10日以上。

• 化學需氧量

廢水中之有機質為微生物生長所需之養分來源，在厭氧消化過程中，一部分有機質供應微生物生長的養分，另一部分則被轉換成沼氣，而有機質被消化分解的量，正比微生物活性。通常廢水處理設施之有機質濃度以化學需氧量表示，因此藉由量測厭氧發酵槽進流與出口之化學需氧量，即可判讀厭氧消化槽體中反應進行狀態。

- **pH 值**

pH 值為判斷液體為酸性或鹼性的單位，與水中所含之氫離子濃度有關。微生物生長有其最適之 pH 值範圍，而厭氣環境最適之 pH 值範圍在 6.8~7.2 間，當 pH 值超過此範圍，厭氧消化反應會受到嚴重的抑制，降低沼氣的生成，因此測定厭氣槽中 pH 值範圍，亦為確認厭氣槽效能之重要環節。

- **氧化還原電位**

氧化還原電位為量測水體中之電壓變化，以單為 mV 表示，當氧化還原電位低時，表示槽體呈現還原態，有大量的還原態的物質，如 NH₃ 和 H₂S 等出現，當氧化還原電位高的時，則呈現氧化態。微生物細胞內生物化學反應，產生特定氧化還原物質，各有其特定氧化還原電位範圍，因此量測水體的氧化還原電位，可判定目前進行之反應機制。當氧化還原電位為 -200 ~ -250mV，表示專性厭氧菌開始出現生長，當氧化還原電位為 -300 ~ -600mV 則為產甲烷菌的最適生長狀態。為判斷厭氣槽是否進行厭氧消化反應，本團隊使用氧化還原電位分析儀 (Hach MTC101) 進行分析。

- **溫度**

溫度是決定厭氧消化反應速率的重要參數，厭氧消化溫度可將其分為三個範圍，低溫 (20°C 以下)、中溫 (20°C~45°C 之間) 及高溫 (45°C ~60°C 之間)。高溫發酵的效果最佳，中溫次之，低溫最差。但高溫發酵需持續加溫以維持溫度，增加了運行成本，故厭氣發酵的過程多選擇中溫發酵或是常溫發酵的方式進行，而國內養豬場廢水系統以中溫發酵為主。

厭氣消化反應牽涉微生物生理，因此受較多環境因子影響，因此進行厭氧系統效能量測，需採不同量測方法進行效能解析，並依據現場水質特性與氣候進行判斷，提供對應效能最佳化建議，協助業者提高沼氣產量與品質，提高沼氣發電效益。

(二) 脫硫系統效能提升技術

脫硫設備之目的為降低沼氣中硫化氫濃度，以避免硫化氫造成設備酸蝕而損壞。儘管脫硫設備型式不同，但可以利用硫化氫去除率與沼氣流量定義脫硫效能。硫化氫去除率定義沼氣中硫化氫濃度減少百分比，如下式(1)所示：

硫化氫去除率 (%)

$$= \frac{\text{脫硫前硫化氫濃度 (ppm)} - \text{脫硫後硫化氫濃度 (ppm)}}{\text{脫硫前硫化氫濃度 (ppm)}} \times 100\% \dots\dots(1)$$

當硫化氫濃度藉由脫硫降低越多，硫化氫去除率越高。而單由硫化氫去除率

判斷脫硫設備效能，無法完整描述脫硫效能，因脫硫設備處理的沼氣量多寡，使硫化氫吸附量有所差異。因此進行脫硫效能量測，需實地量測脫硫前後沼氣硫化氫濃度、沼氣流量，以此數值進行脫硫效能判讀，進行設備運轉參數調整，或耗材更換頻率依據，以維持硫化氫濃度符合沼氣發電系統之標準。以下就硫化氫濃度量測與沼氣流量量測方法進行細部介紹：

• 硫化氫濃度量測

本團隊利用沼氣成分分析儀（Geotech BIOGAS 5000）進行硫化氫濃度量測，如圖 5 (a) (b)。沼氣成分分析儀可量測甲烷（CH₄）、二氧化碳（CO₂）與氧氣（O₂）三者比例以及硫化氫（H₂S）之濃度。其中 CH₄ 和 CO₂ 感測方式為雙光束非分散式紅外線吸收法（Dual-beam Non-Dispersive Infrared Absorption Method），其量測原理屬於非分散式紅外線式（Nondispersive infrared, NDIR），CH₄ 與 CO₂ 可量測比例範圍皆為 0~100%；O₂ 及 H₂S 則利用電化學傳感器進行感測，其中可量測 O₂ 到 0~25% 的比例，H₂S 則能檢測 0-10,000ppm 的濃度範圍。並為確保量測不受到流場擾動影響，依據「檢查鑑定公私場所空氣污染物排放狀況之採樣設施規範」之採樣孔設置規範，自製沼氣成分採樣器，維持採樣位置與管徑變化、彎管、出口等擾流位置距離 8 倍管徑，減少擾流影響量測結果，減少量測產生之誤差。

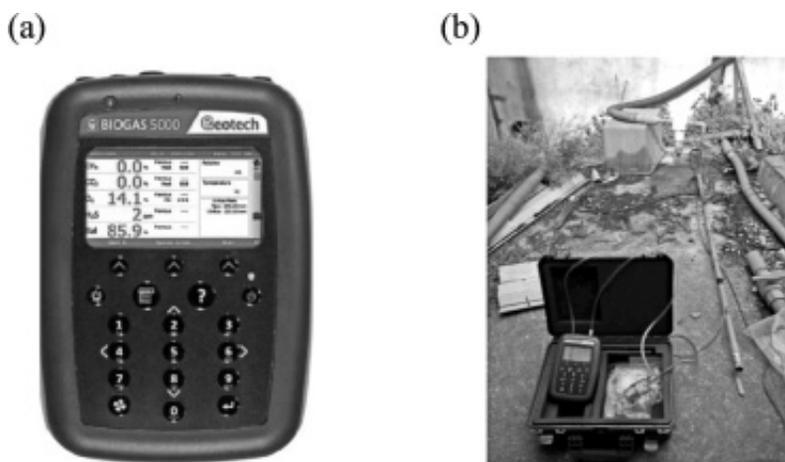


圖 5 (a) 沼氣成分分析儀與；(b) 沼氣成分量測實況

• 沼氣流量量測

本團隊採用熱質式流量計（VA500）進行沼氣流量量測（如圖 6 所示），流量偵測器體為甲烷（CH₄）、量測溫度範圍-30°C至 80°C、流量量測範圍 2m³/hr 至 600m³/hr，其原理為利用流量計尾端兩根 A、B 探棒溫差變化量換算成電子訊號，

當流體流過兩根探棒將帶走探棒熱能而產生溫差，流體流動速度與溫度差有對應關係，因此可以溫度差推算流體流速。沼氣流速與流量之換算方法如下式(2)：

$$\text{沼氣流量}(m^3/hr) = \text{沼氣流速}(m/s) \times \text{沼氣流通截面積}(m^2) \times 3600(s/hr) \dots\dots(2)$$

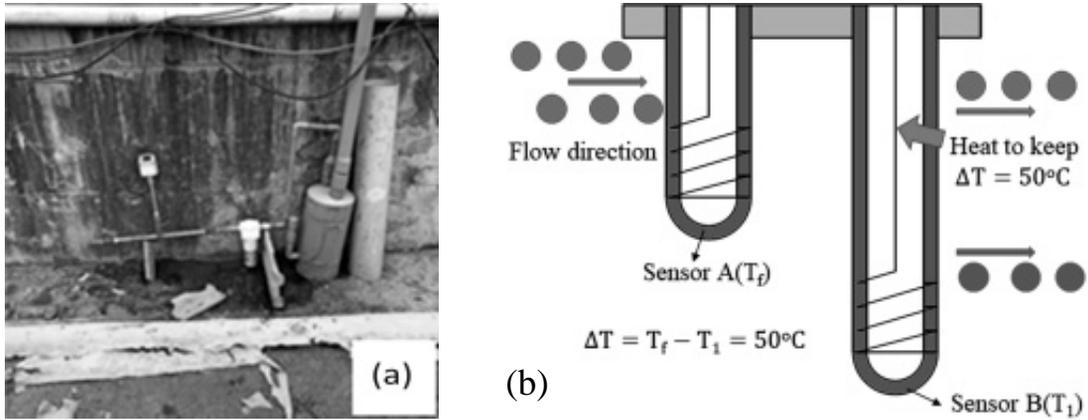


圖 6 (a) 氣體流量計；(b) 熱質式流量計示意圖

沼氣流量計讀值對於流場擾動非常敏感，因此同樣為避免擾流干擾，依據「檢查鑑定公私場所空氣污染物排放狀況之採樣設施規範」之採樣孔設置規範，自製沼氣流量計採樣管，確保採樣口距離彎管、管徑變化處 8 倍直徑以上，以求量測準確性。由於流量計使用探棒熱量損失進行流量估算，因此當沼氣含水量高時，探棒產生之冷凝水珠將影響讀值準確性，對此將於沼氣流量計前加裝洩水器，使沼氣進行初步凝結與排水，減少量測誤差與設備損害的可能。

(三) 沼氣發電機效能提升技術

發電機運轉效能可分為兩個部分檢視，分別為「電力品質」與「燃料轉換效率 (fuel conversion efficiency)」[8]，電力品質的優劣代表電力系統中的電壓、電流波形及頻率是否正常，當遭遇電力品質不良時，用戶端將發生電燈閃爍、精密儀器故障等問題，因此不論何種再生能源設備，皆需符合一定電力品質規範，才可進行併網售電，因此電力品質好壞為審視發電機效能的第一步。燃料轉換效率代表發電機將燃料轉換成電能的轉化效率，若以汽車作比喻，燃料轉換效率則為油耗表現，代表每公升的燃料可以跑多遠的距離。因此在沼氣發電系統中燃料轉換效率，代表每立方米沼氣可產生多少電能，當燃料轉換效率越高，代表同樣沼氣量能產生更多的電能，擁有更高之經濟效益。因此進行發電機效能提升將進行「電力品質」與「燃料轉換效率」之量測，並進行系統最佳化調整，以下分別詳細論述：

• 電力品質量測

所有再生能源進行併網售電，電力品質皆需符合「台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點」[9]、「台灣電力股份有限公司電壓閃爍管制要點」[10]及「電力系統諧波管制暫行標準」[11]之規範，電力品質規範項目如頻率、電壓變動率、功率因數、諧波電流失真率與閃爍等等，各項限制與物理意義簡述於表 2。

為確認沼氣發電系統符合台電電力品質標準，依據規範選用電力分析儀進行量測。電力品質量測標準流程為，將電力分析儀與沼氣發電機組之三相電源系統正確連接，如圖 7 所示，並進行長時間發電機電力品質之紀錄，所需監測時間至少為 2 小時，一般進行電力品質觀察之時間長度為 1 週[12]。

表 2 電力品質規範項目之簡介

頻率	台電系統之基頻為 60Hz，若欲併聯售電，則售電業者同樣需提供 60Hz 之電力以維持電網穩定。
電壓變動率	電壓變動率是電壓電源接受負載所產生電源電壓變動的大小。一個理想的電壓源，是不受負載大小而改變其電源電壓，所以電壓源受負載電壓改變愈小愈佳，台電規範電壓變動率需小於 3%。
功率因數	功率因數定義為有效功率與其視在功率（ apparent power ）的比值。有效功率為電力系統在特定時間作功的表現值，視在功率是電壓和電流有效值的乘積。台電規範再生能源發電設備之功率因數需達 90-95%。
諧波電流失真率	諧波為電力系統中之非線性設備所引起的波形畸變。一旦發生諧波失真，將可能造成電力設備跳電、電子元件因過電流而燒毀或壽命減少。
閃爍	電力系統中光感度的閃爍，會造成視覺不舒適的感覺，原因源於電力系統中快速變動的負載及運轉中大幅變動所致。台電規範每秒鐘變化 10 次之等效電壓最大值需小於 0.45%。

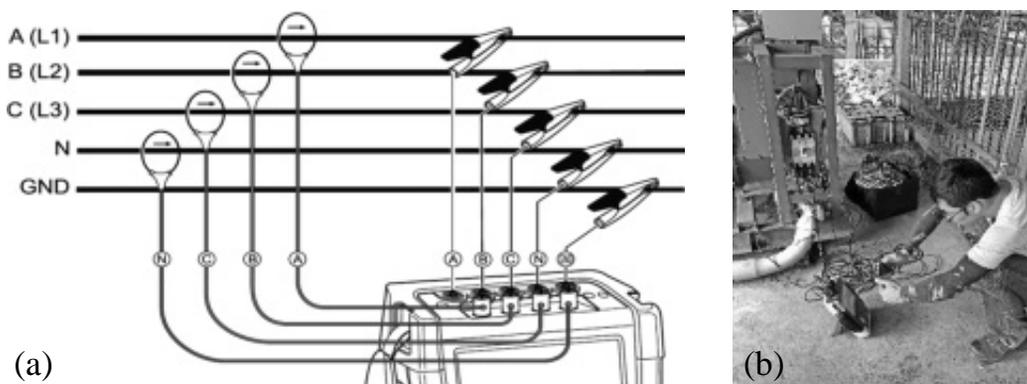


圖 7 (a) 電力分析儀於三相電源系統之量測連接示意圖[12]

(b) 電力分析儀實測照片

電力分析儀可量測項目有：電壓、電流、頻率、諧波（Harmonics）、閃爍（Flicker）、驟降（Dips）、增長（Swells）與干擾（Interruptions）等攸關電力品質項目，如圖 8 所示。而電力分析儀除用於監測電力品質外，也可進一步對發電機產電量進行長時間紀錄，以用於後續發電機效能估計，此將於「燃料轉換效率量測」詳細說明。

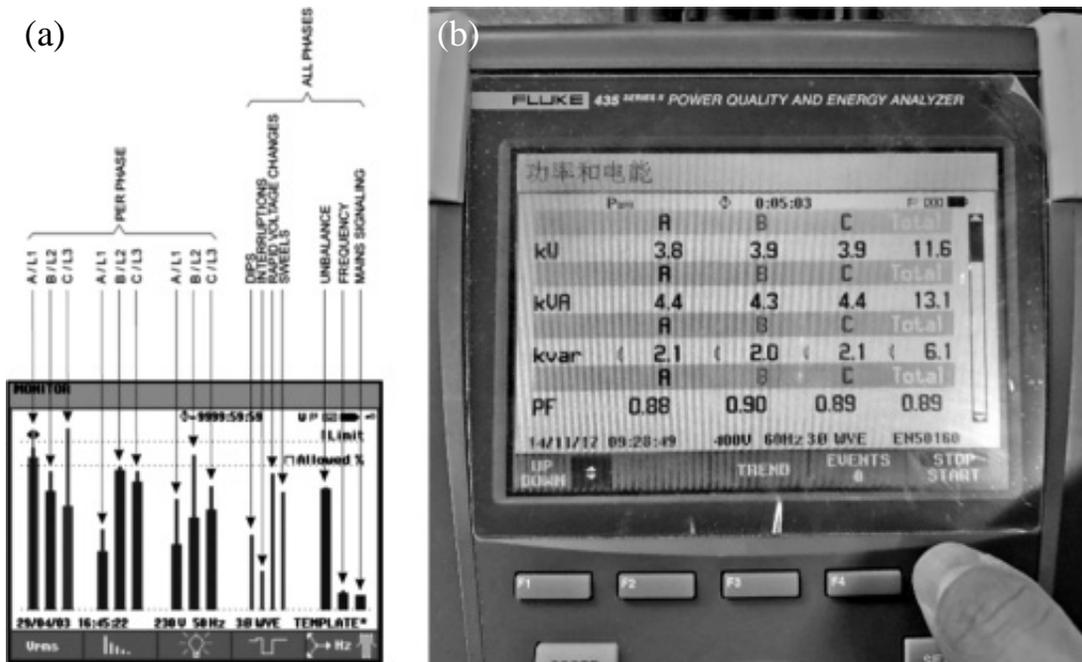


圖 8 (a) 電力分析儀之監測結果示意圖[12]； (b) 實測結果

• 燃料轉換效率量測

發電機效能是指輸入能量轉換成輸出功的效率，對於沼氣發電機而言，其輸入能量為沼氣燃燒的熱能，而輸出功為產生之電能（圖 9），因此沼氣發電機效能代表發電機將沼氣燃燒能轉換成電能之效率，即單位燃料轉換效率（fuel conversion efficiency）[8]，沼氣發電機效能公式如式(3)所示。沼氣發電機效能高，代表消耗相同的沼氣量，可產生更高的電能，提高發電經濟效益。然而發電效能受燃料與空氣比值、點火角度、發電機械摩擦力耗損及熱散失等影響，因此當沼氣發電機未經過適當之調校與保養，將影響發電效能。本團隊藉由輸出電能與沼氣燃燒熱焓計算各牧場沼氣發電效能，以協助業者進行優化與調整，維持沼氣發電機高效能運轉並提高收益。



圖 9 沼氣發電機能量轉換關係示意圖

$$\text{沼氣發電機燃料轉換效能} = \frac{\text{輸出能量}}{\text{輸入能量}} = \frac{\text{輸出電能}}{\text{輸入沼氣燃燒熱焓}} \dots\dots\dots(3)$$

由式(3)可知計算沼氣發電機燃料轉換效能，需量測輸出電能與輸入沼氣燃燒熱焓量，輸出電能得以使用電力分析儀進行記錄，電力分析儀掛接於沼氣發電機之三相輸出電源上，進行電壓與電流紀錄如圖 10 所示，將輸出電壓與電流經公式(4)計算可得出輸出電能 (MJ)。輸出電能以單位百萬焦耳 (MJ) 進行計算，為與沼氣燃燒熱焓使用相同單位，即可得出無因次之燃料轉換效能。

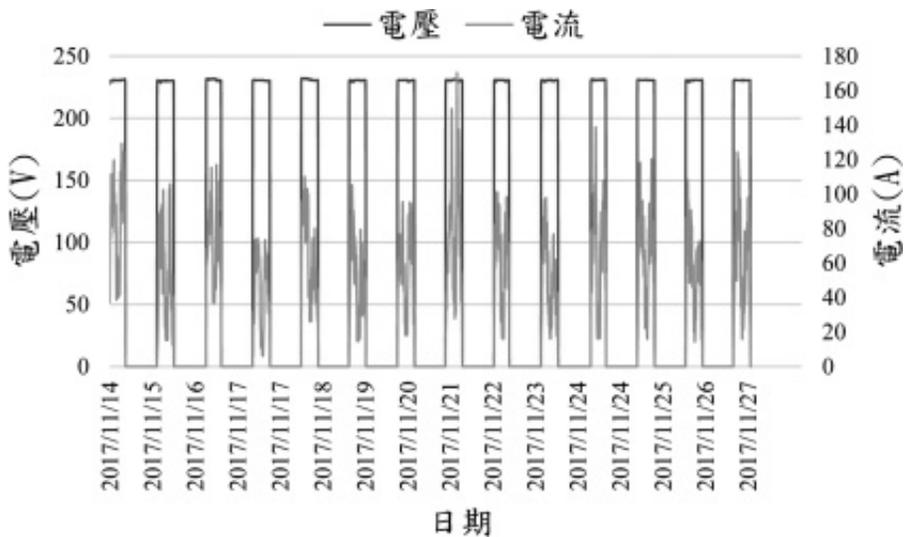


圖 10 沼氣發電系統電壓與電流記錄圖

$$\text{輸出電能 (MJ)} = \int \text{電壓 (V)} \times \text{電流 (A)} \times 10^{-6} \times \text{取樣時間 (s)} \dots\dots(4)$$

輸入沼氣燃燒熱焓 (MJ) 代表，沼氣完全燃燒所釋放之化學能，沼氣其主要組成為甲烷 (CH₄) 約佔 55-65 %，其次為二氧化碳 (CO₂) 約佔 30-45 %，少

量硫化氫 (H₂S) 與水氣[13]。甲烷、氨氣、硫化氫與氫氣皆可經燃燒釋放化學能，由於氨氣與氫氣濃度極小，其對於熱能貢獻可忽略不計，而硫化氫需經過脫硫系統進行去除，發電機容許硫化氫濃度一般需低於 200 ppm，同樣忽略硫化氫之熱能貢獻，因此沼氣燃燒熱焓主要由甲烷燃燒所產生。藉由甲烷濃度量測與發電機沼氣消耗量量測，可計算出沼氣燃燒熱焓，公式如式(5)所示：

$$\begin{aligned} \text{沼氣燃燒熱焓 (MJ)} = & \int \text{沼氣消耗量 (m}^3/\text{s)} \times \text{沼氣中甲烷比例} \\ & \times \text{甲烷熱值 (MJ/m}^3) \times \text{取樣時間 (s)} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

經長時間紀錄輸出電能與輸入沼氣燃燒熱焓，可計算出沼氣發電機燃料轉換效能，而本團隊實測三間國內牧場沼氣發電機，其燃料轉換效能於 15-23 % 之間，此效能差異除發電機本身機械摩擦、熱散失所產生之耗損，尚可藉由調整空燃比、點火時間與進行沼氣純化而獲得提升。燃料轉換效能每提高 1 %，則輸入每立方米沼氣則增加約 0.06 度電能，因此沼氣發電機之燃料轉換效能最佳化，有助於提高產電量並增加效益。

四、效能提升實例

國內已建置沼氣發電系統或具備厭氧系統之場域，因應各案場之樣態與業者需求不同，提供客製化效能優化服務，以下就部分案例進行說明。

(一) 厭氧系統效能提升實例

A 案場具備三組厭氧發酵槽體，沼氣經脫硫系統後以鍋爐進行燃燒再利用，業者欲評估進行沼氣發電之效益，委託本團隊進行沼氣產率量測，分別進行兩次量測共計兩天。使用沼氣流量計量測總沼氣產率，並以溫度計量測厭氣槽與戶外溫度，並利用紀錄器進行長時間紀錄，取樣頻率為 30 秒，量測結果如下表 3 所示。由於厭氧菌對於溫度相當敏感，厭氣槽體溫度影響厭氧消化反應速率，進而影響沼氣產量。經長時間溫度量測記錄，可看出戶外溫度變化，對於厭氣槽出口水溫影響甚小，顯示厭氣槽體具備良好絕熱特性，有助於減少戶外溫差對厭氧發酵之影響。而厭氣槽體溫度與沼氣產率之關聯如下圖 11 所示，本案場之厭氣槽體溫度變化範圍約 2°C，顯示場內厭氣槽體溫度控制相當穩定，而厭氣槽體溫度升高有助於沼氣生成，以量測結果分析厭氣槽體溫度升高 1°C，沼氣產量可增加 12.3 %，溫度提高對於沼氣產量提升相當明顯，因此建議提高厭氣槽體操作溫度，以獲得較高之經濟效益。

表 3 A 案場厭氧系統效能量測結果

	平均戶外溫度 (°C)	平均厭氣槽 出口水溫 (°C)	平均沼氣流量 (m ³ /hr)	當日沼氣累積量 (m ³)
第一次量測	39.3	42.4	75.3	1,807
第二次量測	31.6	41.3	64.6	1,550
平均	35.24	41.8	69.9	1,679

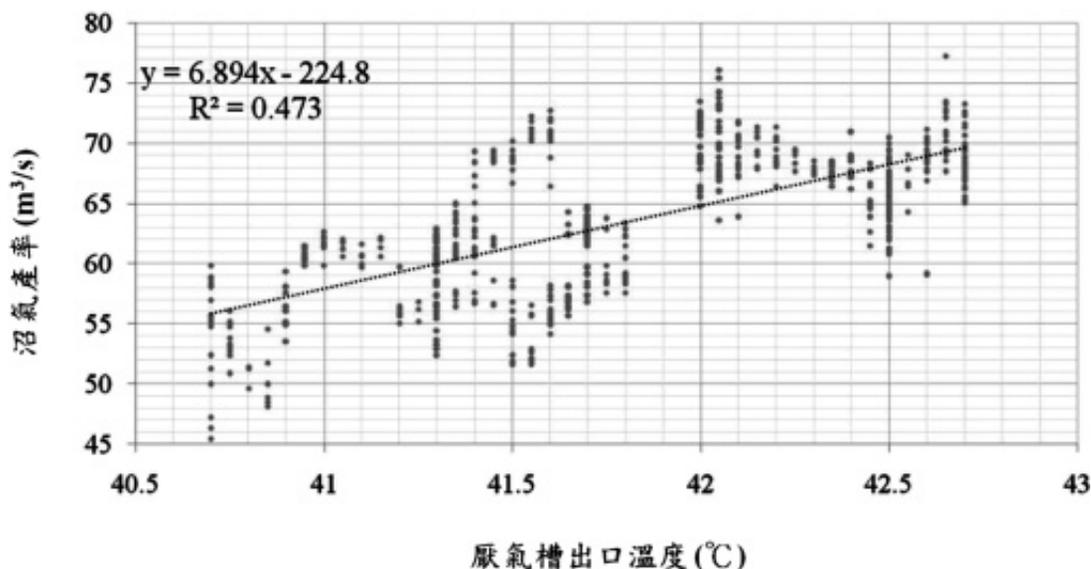


圖 11 厭氣槽出口溫度與沼氣產率關聯圖

(二)脫硫效能提升實例

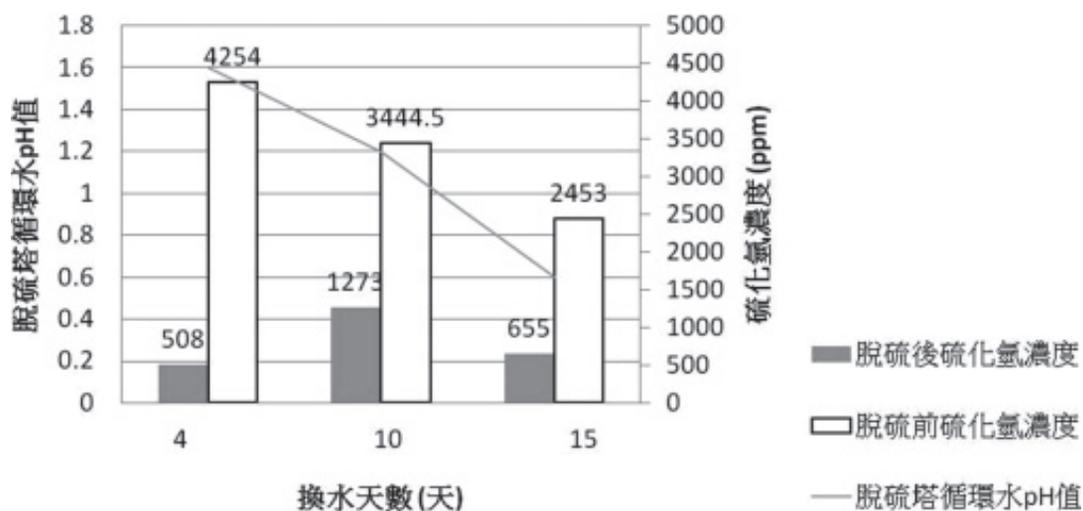
B 案場具備兩組脫硫系統，完成脫硫程序後進入儲氣系統暫存，供應沼氣發電機使用。B 案場之兩組脫硫系統皆採用水洗吸收式脫硫系統，脫硫塔內水以循環方式重複利用。水因吸附硫化氫而使 pH 降低，由於水對於硫化氫之吸附能力逐漸達飽和，使得硫化氫去除率下降，而須進行循環水更換作業。業者委託本團隊評估脫硫系統效能與循環水更換頻率，以訂定脫硫系統操作標準方法，確保脫硫後硫化氫濃度符合系統需求，減少設備受酸蝕之危害，延長設備使用壽命。

經實測 B 案場之兩組脫硫系統，經換水後 4、10、15 天，沼氣中硫化氫濃度，與經脫硫後硫化氫濃度變化，並進行脫硫塔循環水 pH 值測量，量測結果如下表 4 所示。脫硫系統 I 經換水後第 4 天，脫硫後沼氣硫化氫濃度約 500 ppm，已超過沼氣發電機組允許之 200 ppm 濃度限制，將提高沼氣發電系統受酸蝕之風險。脫硫系統 II 經換水後第 15 天，仍維持脫硫後硫化氫低於 100 ppm 之濃度，維持 99 % 硫化氫去除率。檢視兩組脫硫系統處理沼氣量，脫硫系統 I 平均每日

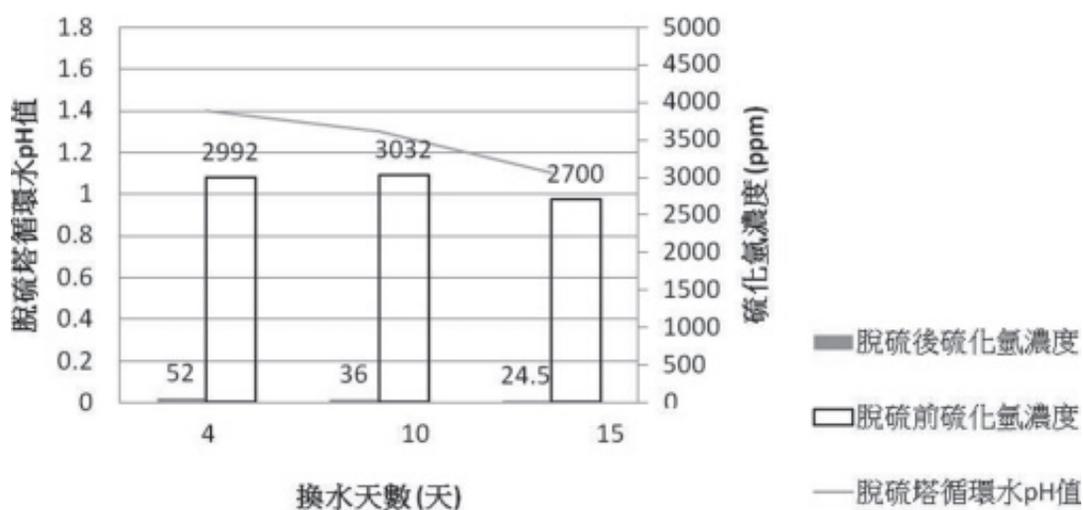
處理沼氣量為 1,700 m³，而脫硫系統 II 平均每日處理沼氣量為 800 m³，經脫硫效能量測，可確認脫硫系統 I 實際處理量已超過系統負荷，需減少處理量或進行脫硫系統運轉參數調整，例如提高循環水更換水頻率，或以鹼液提高循環水 pH 值，維持循環水對於硫化氫之吸附能力。脫硫系統 II 依據量測結果，處理量尚有餘裕，可配合業者未來系統擴充，沼氣產量提高時進行沼氣脫硫處理。

表 4 B 案場脫硫系統效能量測結果

B 案場脫硫系統 I



B 案場脫硫系統 II



(三)沼氣發電機效能提升實例

C案場具備兩組沼氣發電機，1號沼氣發電機為備用機組，視沼氣產量啟動發電，2號沼氣發電機為常備機組供應場內自用電，因應場內用電負載需求，發電機進行附載調整，因此輸出電能與沼氣消耗量也隨之改變。發電機附載調整將產生額外能源損耗，而發電機處於低負載下，發電機燃料轉換效率也較差，因此協助業者進行發電機組效能檢測，提供發電系統調整參考依據。

為評估沼氣發電機效能，進行沼氣發電機產電量與沼氣消耗量量測，2號沼氣發電機產電量量測紀錄結果如下圖 12 所示，2號沼氣發電機配合廠內用電需求，每日運轉約 8 小時，而產電量配合廠內用電量進行調整，因此輸出電能非定值，也直接影響發電機沼氣消耗量，因此沼氣消耗流速也隨之改變。以 C 案場 1 號與 2 號發電機之沼氣消耗量與發電量，計算單位沼氣產電量 (kWh/m³) 與燃料轉換效能 (%)，如下表 5 所示。1 號沼氣發電機因沼氣量不足而發電時數短，因此發電機燃料轉換效能僅 11.1%，備用發電機組啓用時機可協助進行最佳化控制，透過實測廠內沼氣生成量，調控 1 號機組與 2 號機組運轉時間，維持發電機穩定運轉，並避免發電機過熱與過載，而影響機組使用壽命。2 號沼氣發電機每日穩定運轉約 8 小時，目前燃料轉換效能為 20.0%，建議可調整為以額定附載進行售電，減少低附載之能量損耗，高效能運轉提高產電量，並透過售電獲得收益，將縮短設備投資回收年限，提升沼氣發電效益。

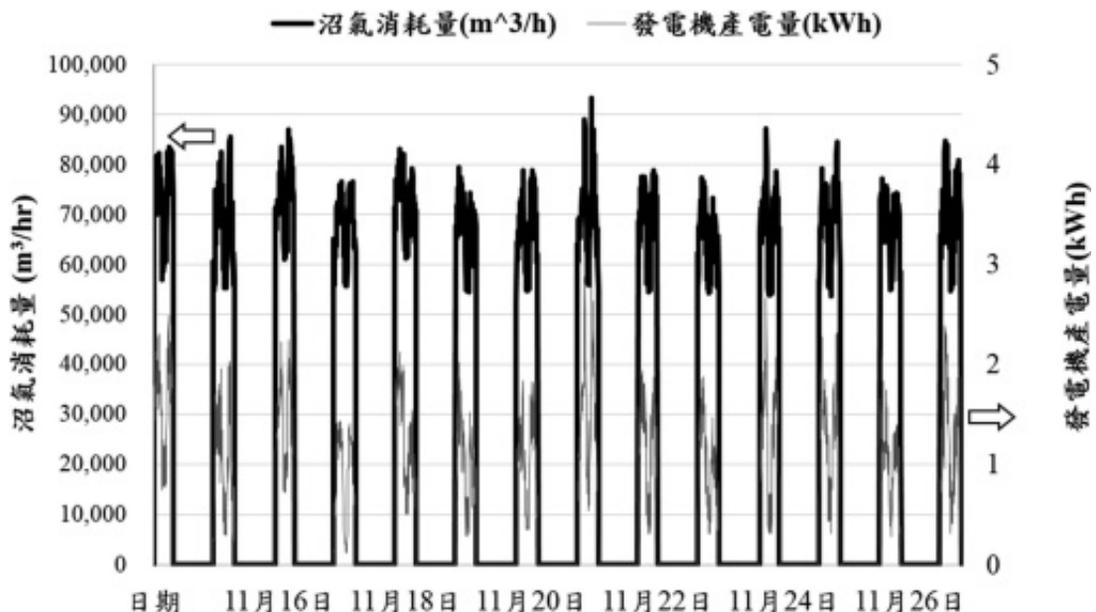


圖 12 C 案場 2 號沼氣發電機產電量與沼氣消耗量紀錄結果

表 5 C 案場 1、2 號沼氣發電機效能量測結果

C 案場 1 號沼氣發電機效能量測結果			
發電機規格 (kW)	累積總產電量 (kWh)	累積總沼氣消耗量 (m ³)	單位沼氣產電量 (kWh/m ³)
30	15.4	34.6	0.4
甲烷成分比例 (%)	燃燒能 (MJ)	電能 (MJ)	燃料轉換效能 (%)
69	499.3	55.4	11.1
C 案場 2 號沼氣發電機效能量測結果			
發電機規格 (kW)	累積總產電量 (kWh)	累積總沼氣消耗量 (m ³)	單位沼氣產電量 (kWh/m ³)
120	1,657.90	2,232.80	0.7
甲烷成分比例 (%)	燃燒能 (MJ)	電能 (MJ)	燃料轉換效能 (%)
64	29,909.30	5,968.50	20

五、結論

沼氣發電相較於風力與太陽能，具備更高之能源穩定性，且可藉由沼氣儲存進行能源儲存，使沼氣發電具備相當優勢，亦為政府綠能推動之重點項目，因此許多業者紛紛投入沼氣發電系統建置，因此。本團隊協助業者進行系統效能評估，並以技術輔導，協助效能提升與最佳化，提高沼氣發電效益。

本文將沼氣發電系統之厭氧發酵、脫硫系統與沼氣發電機之效能檢測方法進行說明，而因應不同案場之現況與業者需求，提供客製化效能優化輔導，協助已建置沼氣發電系統之業者保持高效能運轉，成為沼氣發電成功範例，以奠定沼氣發電穩健基礎，協助沼氣發電推展。

六、參考資料

- [1] 洪宗良、李志杰、徐英綺（民 107）。畜牧場沼氣發電不用愁農委會委託專業團隊提供完整服務（頁 12-15）。畜產試驗所，畜產報導，211。
- [2] 徐英綺、李志杰、洪宗良（民 107）。正確評估沼氣發電效益避免投資浪費（頁 16-18）。畜產試驗所，畜產報導，211。
- [3] 郭猛德、蕭庭訓、王政騰（民 97 年）。養豬三段式廢水與污泥處理技術（頁 29-38）。台灣畜產試驗所，畜牧半月刊，81。
- [4] 蘇忠楨（民 99 年）。養豬場沼氣生物脫硫系統研究，行政院農業委員會，簡自：<http://tagis.coa.gov.tw/pages/Data/Ref/12.pdf>。

-
- [5] 陳宏市（民 100 年）。油氣的處理及加工。科學發展，465 期，簡自：<https://scitechvista.nat.gov.tw/goto/d7548af0a1f0aa03f7489e5d72f0169699290da4c75d38ba98bf2be97ec0e246.htm>。
- [6] 曾逸敦（民 105 年）。汽車學原理與實務。五南圖書出版公司。
- [7] Khanal, Samir Kumar, Anaerobic biotechnology for bioenergy production : principles and applications, John Wiley & Sons, pp.74, 2011.
- [8] Heywood, J. B. Internal combustion engine fundamentals, 1988.
- [9] 台灣電力股份有限公司（民 105 年）。再生能源發電系統併聯技術要點。
- [10] 台灣電力股份有限公司（民 97 年）。台灣電力股份有限公司電壓閃爍管制要點。
- [11] 台灣電力股份有限公司（民 82 年）。電力系統諧波管制暫行標準。
- [12] Fluke Corporation. Three Phase Energy and Power Quality Analyzer Users manual, 2012.
- [13] S.S. Kapdi, V.K. Vijay, S.K. Rajesh, Rajendra Prasad. Biogas scrubbing, compression and storage : perspective and prospectus in Indian context. Renewable Energy, v.30, 1195-1202, 2005.



鍋爐及熱交換器用鋼管材料標準及 檢測方法之研析

楊福正／軍備局生產製造中心

摘要

鍋爐及熱交換器用鋼管大致可區分為碳鋼、合金鋼及不銹鋼等材質，本文係參考中華民國國家標準 CNS 7379〔鍋爐及熱交換器用碳鋼鋼管〕、CNS 7381〔鍋爐及熱交換器用合金鋼鋼管〕及 CNS 7383〔鍋爐及熱交換器用不銹鋼鋼管〕為主進行研究分析，研究之範疇在於鍋爐及熱交換器用碳鋼、合金鋼鋼管及不銹鋼鋼管，諸如鍋爐用之水管、煙管、過熱器管、空氣預熱管及化學工業、石油工業用之熱交換器管、凝結器管、觸媒管等，惟未含蓋不銹鋼鋼管、加熱爐用鋼管及低溫熱交換器用鋼管。探討著重於特別品質要求如硬度、高溫降伏點或降伏強度，檢測方法包括超音波檢測、渦電流檢測及腐蝕試驗等，另也針對化學成分、檢測特性、規格可差、外觀、製造方法、試驗、檢驗等進行彙整及歸納研析，研究結果希提供業界參考運用。

一、前言

鑑於鍋爐相關中華民國國家標準對於不同材質的鍋爐及熱交換器用鋼管均個別制訂其標準，對使用者而言並無良好便利性，本文係將鍋爐及熱交換器鋼管範圍定義、種類、化學成分、機械性能、檢測特性、規格可差、外觀、製造方法、試驗、檢驗等，依據中華民國國家標準 CNS 7379〔鍋爐及熱交換器用碳鋼鋼管〕、CNS 7383〔鍋爐及熱交換器用不銹鋼鋼管〕、CNS 7381〔鍋爐及熱交換器用合金鋼鋼管〕、CNS 2608〔鋼料之檢驗通則〕、CNS 12620〔鋼管渦電流檢測法〕、CNS 10436〔鋼料沃斯田體晶粒度試驗法〕、CNS 2111〔金屬材料拉伸試驗法〕、CNS 2112〔金屬材料拉伸試驗試片〕、CNS 2925〔規定極限值之有效位數指示法〕、CNS 3158〔軋製或鍛製鋼料之製品分析法及其許可差〕及 CNS 13403〔無縫及電阻鐸鋼管超音波檢測法〕等標準，融合成一份具實用性之文件，期有助於鍋爐或熱交換器業（使用）者、採購人員或養護人員參考運用。

二、鍋爐及熱交換器用鋼管簡介

鍋爐及熱交換器用鋼管可依其製造材質不同區分成碳鋼鋼管、不銹鋼鋼管及合金鋼鋼管等三種，鋼管之概述如下：

(一)研究範圍：

本研究之範疇在於鍋爐及熱交換器用碳鋼鋼管、合金鋼鋼管及不銹鋼鋼管，例如鍋爐用之水管、煙管、過熱器管、空氣預熱管及化學工業、石油工業用之熱交換器管、凝結器管、觸媒管等，惟未含蓋加熱爐用鋼管及低溫熱交換器用鋼管。鋼管之特別品質要求如硬度、高溫降伏點或降伏強度，檢測方法則有超音波檢測、渦電流檢測及腐蝕試驗等，另對 U 形彎管亦有特別要求。

1. 種類符號歸納：鍋爐及熱交換器碳鋼鋼管及合金鋼鋼管之種類符號分類較為單純，分類表如表 1 及 2 所示，不銹鋼鋼管種類則有 38 種，分類表如表 3 所示。

表 1 碳鋼鋼管種類符號表

種類符號	舊符號
STB340	STB35
STB410	STB42
STB510	STB52

表 2 合金鋼鋼管種類符號表

分類	種類符號
鉬鋼鋼管	STBA12
	STBA13
鉻鉬鋼鋼管	STBA20
	STBA22
	STBA23
	STBA24
	STBA25
	STBA26

表 3 不銹鋼鋼管種類符號表

類別	種類符號	類別	種類符號	類別	種類符號	
沃斯田體系	304TB	沃斯田體系	317LTB	肥粒體系	405TB	
	304HTB		321TB		409TB	
	304LTB		321HTB		409LTB	
	309TB		347TB		410TB	
	309STB		347HTB		410TiTB	
	310TB		836LTB		430TB	
	310STB		890LTB		430LXTB	
	312LTB		XM15J1TB		430J1LTB	
	316TB		A304LTB		436LTB	
	316HTB		316LTB		444TB	
	316LTB		沃斯田體系 肥粒體系		329J1TB	XM8TB
	316TiTB				329J3LTB	XM27TB
	317TB				329J4LTB	

2. 特別品質要求：特別品質要求可適用於買方要求時，製造商依指定項目實施檢測，惟僅限直管，U 型彎管另有補充說明。

(1) 硬度：

- ① 鋼管之硬度標準詳如表 4。
- ② 試片須自管端切取適當長度。
- ③ 硬度試驗方法依 CNS 2114〔洛氏硬度試驗法〕之規定，每個試片在其橫截面上或內側面上測取三點之硬度，但管厚在 2 mm 以下者不作硬度試驗。又電阻銲鋼管須在銲接部位及熱影響區以外位置作硬度試驗。
- ④ 硬度試驗結果須符合鋼管硬度標準表之要求。
- ⑤ 供試樣採取方法與試片數量標準須與拉伸試驗相同。
- ⑥ 重驗：依以下規定判定合格與否。
 - a. 所採試片如加工不良或具有與品質無關之瑕疵，該試片應作廢，另取其他試片代替，或自原鋼料中另行採取試片，供作試驗。
 - b. 機械性能試驗之結果，如部份與規定不符，而其他各項符合時，可自同組試樣取二倍原規定之試片，再行試驗其不符合之項目。
 - c. 試驗操作如有錯誤應另取樣重試。
 - d. 拉伸試驗，試片拉斷之位置若在標點以外，或距鄰近標點之距離小於標點間距離四分之一，且所得伸長率數值不合要求時，此項試驗得視為無須自原鋼料中另取試片重作試驗。
 - e. 經熱處理之鋼件〔或鋼料〕試片，試驗結果與規定不符時，得再行熱處理試驗之，其試片數量與原規定相同，但重複熱處理以二次為限。

(2) 高溫降伏點或降伏強度

- ① 鋼管之高溫降伏點或降伏強度及試驗溫度須由買賣雙方協議之。
- ② 試片及試驗方法依 CNS 5336〔鋼及耐熱合金鋼高溫拉伸試驗法〕之規定，若試片形狀不易依此試驗法採取時，其形狀由買賣雙方協議之。
- ③ 供試樣採取方法及試片數量，在同一爐鋼製品中，取供試樣切取各試驗溫度所需之試片各一個。

(3) U 形彎管之要求：買方要求 U 形彎管時，製造廠商應依規定實施之。

- ① 製造方法依下列要求，U 形彎管各尺寸示意圖如圖 1，圖中 R：彎曲半徑； D_n ：標稱外徑； D_1 ：彎曲部外徑； t_n ：標稱厚度； t_1 ：彎曲部最小厚度； p ：兩直管中心線間距離； P ： $p + D_n$ ； l ：直管部分長度； L ： $l + R + D_n/2$ 。
 - a. 用冷彎法製造之 U 形彎管，其彎曲半徑須為鋼管外徑之 1.5 倍以上。
 - b. 彎曲部分一般不須熱處理，如買方要求時，另行協議之。
- ② 彎曲部分不可有使用上有害之缺陷。
- ③ 鋼管彎曲部分之尺度許可差詳如表 5 要求，彎曲後之長度許可差詳如表 6 要求。

表 4 鋼管硬度標準表

材質	種類符號	洛氏硬度 HRB 〔 3 個點之平均值 〕
碳鋼	STB 340	77 以下
	STB 410	79 以下
	STB 510	92 以下
合金鋼	STBA12	80 以下
	STBA13	81 以下
	STBA20、STBA22、STBA23、STBA24、STBA25	85 以下
	STBA26	89 以下
不銹鋼	304TB、304HTB、304LTB、309TB、309STB、 310TB、310STB、316TB、316HTB、316LTB、 316TiTB、317TB、317LTB、321TB、321HTB、 347TB、347HTB、A304LTB、A316LTB、 836LTB、409LTB、410TiTB、430TB、430LXTB、 430J1LTB、XM8TB、XM27TB	90 以下
	329J1TB、329J3LTB、329J4LTB	HRC 29 以下
	890LTB、405TB、409TB、410TB 436LTB、444TB、XM15J1TB	95 以下
	312LTB	96 以下

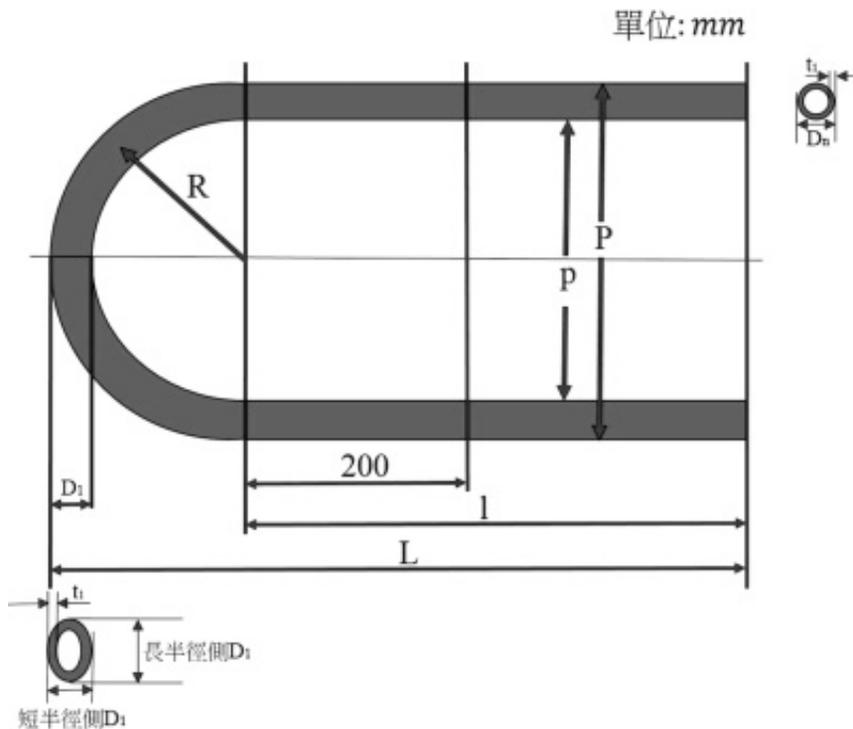


圖 1 U形彎管各尺寸示意圖 (單位: mm)

表 5 彎曲部分之尺度許可差

外徑變化率 ($D_1 - D_n$) / $D_n * 100\%$		厚度減少率 ($t_n - t_1$) / $t_n * 100\%$	p 或 P 之許可差 (mm)
短半徑側	長半徑側		
($D_n/4R$) * 100% 以下 最小值 0.5 mm	($D_n/8R$) * 100% 以下 最小值 0.5 mm	($D_n/2.5R$) * 100% 以下	±1.5

表 6 彎曲之長度許可差

長度	長度 (L 或 l) 許可差 mm
彎曲後之直管長 7m 以下	+7 0
彎曲後之直管長超過 7m	+10 0

④彎曲部分之尺度測定：將同時進行加工彎曲之同一尺度鋼管，自彎曲半徑最小之 U 形彎管中取樣一支，在彎曲部位測取兩正交方向之外徑，並在其圓周上四點測取厚度後，計算外徑變化百分率及厚度減少百分率。

(二)化學成分分析：

- 鋼管之化學成分分析：化學成分分析之一般事項及試樣之取樣法參考 CNS 2608〔鋼料之檢驗通則〕之規定。
- 分析方法：分析方法參考的標準有 CNS 11069〔鐵及鋼中碳定量法〕、CNS 11013〔鋼鐵中矽定量法〕、CNS 11014〔鋼鐵中錳定量法〕、CNS 11015〔鋼鐵中磷定量法〕、CNS 11387〔鐵及鋼中硫定量法〕、CNS 11302〔鐵及鋼中鉻定量法〕、CNS 11389〔鐵及鋼中鉬定量法〕、CNS 10006〔鐵及鋼之光電式發光光譜分析法〕、CNS 11072〔鐵及鋼之螢光 X 射線分析法〕及 CNS 11206〔鐵及鋼原子吸光光譜分析法〕等。
- 鍋爐及熱交換器碳鋼鋼管、合金鋼鋼管及不銹鋼鋼管之成分分析法如表 7、表 8 及表 9 所示。

表 7 碳鋼鋼管化學成分分析表 (單位：%)

種類符號	C	Si	Mn	P	S
STB340	≤ 0.18	≤ 0.35	0.3~0.6		
STB410	≤ 0.32	≤ 0.35	0.3~0.8	≤ 0.035	≤ 0.035
STB510	≤ 0.25	≤ 0.35	1.0~1.5		

表 8 合金鋼鋼管化學成分分析表（單位：％）

種類符號	C	Si	Mn	P/S	Cr	Mo
STBA12	0.1~0.2	0.1~0.5	0.3~0.8	≤ 0.035	-	0.45~0.65
STBA13	0.15~0.25	0.1~0.5	0.3~0.8		-	0.45~0.65
STBA20	0.1~0.2	0.1~0.5	0.3~0.6		0.5~0.8	0.45~0.65
STBA22	≤ 0.15	≤ 0.5	0.3~0.6		0.8~1.25	0.45~0.65
STBA23	≤ 0.15	0.5~1.0	0.3~0.6		1.0~1.5	0.45~0.65
STBA24	≤ 0.15	≤ 0.5	0.3~0.6		1.9~2.6	0.87~1.13
STBA25	≤ 0.15	≤ 0.5	0.3~0.6		4.0~6.0	0.45~0.65
STBA26	≤ 0.15	0.25~1.0	0.3~0.6		8.0~10.0	0.90~1.10

表 9 不銹鋼鋼管化學成分分析表（單位：％）

種類符號	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	其他
304TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	8~11	18~20	-	-
304HTB	0.04~0.1	≤ 0.75	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	8~11	18~20	-	-
304LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	9~13	18~20	-	-
309TB	≤ 0.15	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	12~15	22~24	-	-
309STB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	12~15	22~24	-	-
310TB	≤ 0.15	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	19~22	24~26	-	-
310STB	≤ 0.08	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	19~22	24~26	-	-
312LTB	≤ 0.02	≤ 0.80	≤ 1.0	≤ 0.03	≤ 0.015	17.5~19.5	19~21	6~7	Cu:0.5~1,N:0.1
316TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	10~14	16~18	2~3	6~0.25
316HTB	0.04~0.1	≤ 0.75	≤ 2.0	≤ 0.03	≤ 0.03	11~14	16~18	2~3	-
316LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	12~16	16~18	2~3	-
316TiTB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	10~14	16~18	2~3	Ti: ≥ 5*C%
317TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	11~15	18~20	3~4	-
317LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	11~15	18~20	3~4	-
321TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	9~13	17~19	-	Ti: ≥ 5*C%
321HTB	0.04~0.1	≤ 0.75	≤ 2.0	≤ 0.03	≤ 0.03	9~13	17~20	-	Ti:4*C%~0.6
347TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	9~13	17~19	-	Nb: ≥ 10*C%
347HTB	0.04~0.1	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.03	≤ 0.03	9~13	17~20	-	Nb:8*C%~1
836LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	24~26	19~24	5~7	N: ≤ 0.25
890LTB	≤ 0.020	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.04	≤ 0.03	19~23	19~23	4~5	Cu:1~2
XM15J1TB	≤ 0.08	3.0~5.0	≤ 2.0	≤ 0.045	≤ 0.03	11.5~15	15~20	-	-
329J1TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 0.04	≤ 0.03	3~6	23~28	1~3	-
329J3LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 0.04	≤ 0.03	4.5~6.5	21~24	2.5~3.5	N:0.08~0.2
329J4LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 0.04	≤ 0.03	5.5~7.5	24~26	2.5~3.5	N:0.08~0.2
405TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	11.5~14.5	-	Al:0.1~0.3
409TB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	10.5~11.75	-	Ti:6*%~0.75
409LTB	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	10.5~11.75	-	Ti:6*%~0.75
410TB	≤ 0.15	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	11.5~13.5	-	-
410TiTB	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	11.5~13.5	-	Ti:6*%~0.75
430TB	≤ 0.12	≤ 0.75	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	16~18	-	-
430LXTB	≤ 0.3	≤ 0.75	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	16~19	-	Ti或Nb : 0.1~1
430J1LTB	≤ 0.025	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	16~20	-	N: ≤ 0.025 Ti,Nb,
436LTB	≤ 0.025	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.6	16~19	0.75~1.25	Zr8*(C%+N%)~0.8

種類符號	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	其他
444TB	≤0.025	≤1.0	≤1.0	≤0.04	≤0.03	≤0.6	17~20	1.75~2.5	Cu:0.3~0.8
XM8TB	≤0.008	≤1.0	≤1.0	≤0.04	≤0.03	≤0.6	17~19	-	Ti:12*%~1.1
XM27TB	≤0.010	≤0.40	≤0.4	≤0.03	≤0.02	≤0.5	25~27.5	0.75~1.5	N: ≤0.015,Cu:
A304LTB	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.03	8~12	18~20	-	≤0.2,Cu+Ni: ≤0.5
A316LTB	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.03	10~14	16~18	2~3	

(三) 機械性能分析：

本文所分析之機械特性包括：拉伸試驗特性、壓扁試驗特性、擴管試驗特性、及展平試驗特性，茲就各項特性分析如下：

1. 拉伸試驗特性：碳鋼、合金鋼及不銹鋼鋼管之抗拉強度、降伏點或降伏強度及伸長率須符合表 10、表 11 及表 12 的要求。

(1) 試片：自鋼管縱向切取試樣後，加工成 CNS2112〔金屬材料拉伸試驗試片〕所規定之 11 號、12A 號、12B 號或 12C 號之任一種，但自動電弧銲鋼管、雷射銲接鋼管及電阻銲接鋼管之 12 號試片須取自不含銲接部位之部份。

(2) 試驗方法：依 CNS2111〔金屬材料拉伸試驗法〕之規定進行試驗。

表 10 碳鋼鋼管機械性能分析表

種類符號	抗拉強度 N/mm ² (kgf/mm ²)	降伏點或 降伏強度	伸長率		
			外徑 ≥ 20mm	20mm > 外徑 ≥ 10mm	10mm > 外徑
			11 號試片 12 號試片	11 號試片	11 號試片
STB340	≥ 340 (35)	≥ 175 (18)	≥ 35	≥ 30	≥ 27
STB410	≥ 410 (42)	≥ 255 (26)	≥ 25	≥ 20	≥ 17
STB510	≥ 510 (52)	≥ 295 (30)	≥ 25	≥ 20	≥ 17

表 11 合金鋼鋼管機械性能分析表

種類符號	抗拉強度 N/mm ² (kgf/mm ²)	降伏點或 降伏強度	伸長率		
			外徑 ≥ 20mm	20mm > 外徑 ≥ 10mm	10mm > 外徑
			11 號試片 12 號試片	11 號試片	11 號試片
STBA12	≥ 380 (39)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA13	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA20	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA22	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA23	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA24	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA25	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 30	≥ 25	≥ 22
STBA26					

表 12 不銹鋼鋼管機械性能分析表

種類 符號	抗拉強度 N/mm ² (kgf/mm ²)	降伏點或 降伏強度	伸長率		
			外徑 ≥ 20mm	20mm > 外徑 ≥ 10mm	10mm > 外徑
			11 號試片 12 號試片	11 號試片	11 號試片
304TB	≥ 520 (53)	≥ 201 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
304HTB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
304LTB	≥ 480 (49)	≥ 175 (18)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
309TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
309STB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
310TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
310STB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
312LTB	≥ 650 (66)	≥ 300 (31)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
316TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
316HTB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
316LTB	≥ 480 (49)	≥ 175 (18)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
316TiTB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
317TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
317LTB	≥ 480 (49)	≥ 175 (18)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
321TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
321HTB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
347TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
347HTB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
836LTB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
890LTB	≥ 490 (49)	≥ 215 (22)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
XM15J1TB	≥ 520 (53)	≥ 205 (21)	≥ 27	≥ 30	≥ 35
329J1TB	≥ 590 (60)	≥ 390 (40)	≥ 10	≥ 13	≥ 18
329J3LTB	≥ 620 (63)	≥ 450 (46)	≥ 10	≥ 13	≥ 18
329J4LTB	≥ 620 (63)	≥ 450 (46)	≥ 10	≥ 13	≥ 18
405TB	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
409TB	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
409LTB	≥ 360 (37)	≥ 175 (18)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
410TB	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
410TiTB	≥ 410 (42)	≥ 245 (25)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
430TB	≥ 410 (42)	≥ 245 (25)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
430LXTB	≥ 360 (37)	≥ 175 (18)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
430J1LTB	≥ 390 (40)	≥ 205 (21)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
436LTB	≥ 410 (42)	≥ 245 (25)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
444TB	≥ 410 (42)	≥ 245 (25)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
XM8TB	≥ 410 (42)	≥ 205 (21)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
XM27TB	≥ 410 (42)	≥ 245 (25)	≥ 12	≥ 15	≥ 20
A304LTB	≥ 485 (49)	≥ 170 (18)	≥ 35	≥ 35	≥ 35
A316LTB	≥ 485 (49)	≥ 170 (18)	≥ 35	≥ 35	≥ 35

2. 壓扁試驗特性：鋼管在兩平板間壓縮至下列公式計算之距離 H 時，其管壁不得有傷痕或裂痕產生。

$$H = (1 + e) t / (e + t / D)$$

其中，

H：兩平行板之距離（mm）

t：鋼管厚度（mm）

D：鋼管外徑（mm）

e：依鋼管材質而定之常數，碳鋼 STB340 鋼管及沃斯田體系鋼管為 0.09；碳鋼 STB410 鋼管及合金鋼管為 0.08；碳鋼 STB510 鋼管、沃斯田體·肥粒體系鋼管及肥粒體系鋼管為 0.07；

3. 擴管試驗特性：將沃斯田體·肥粒體系鋼管及肥粒體系鋼管擴張至鋼管外徑之 1.14 倍，沃斯田體系鋼管則擴張至鋼管外徑之 1.2 倍，碳鋼及合金鋼管則將鋼管則擴張至鋼管外徑之 1.2 倍之鐘形口徑，不得有傷痕或裂痕產生。但鋼管外徑超過 101.6mm 時，僅買方要求適用。

(1) 試片：自鋼管端部切取適當長度鋼管作為試片。

(2) 試驗方法：在常溫下，用夾角 60 度之錐形工具，擴張試片管端成規定尺度之鐘形口徑，檢查其表面是否有傷痕或裂痕產生。

4. 展平試驗特性：其電阻銲鋼管之銲接部位不得有傷痕或裂痕產生。

(1) 試片：自鋼管端部切取長度 100mm 之鋼管作為試片。

(2) 試驗方法：自試片銲接部位相反側縱向鋸開，展開後再行壓平，檢查銲接部位是否有傷痕或裂痕產生。

三、鍋爐及熱交換器用鋼管檢測方式

(一) 超音波檢測

探傷感度之品級定為 CNS 13403 規定感度區分 UA 或 UC，超音波檢測時不得有相同或超過該總對比試片之人工缺陷信號，每一鋼管均須經超音波檢測，超音波檢測法概述如下：

1. 一般要求：

- (1) 超音波檢測之範圍、位置及比率得依相關規章、標準、合約或雙方協議訂定之。
- (2) 檢測人員應具備合約要求之資格或足夠的相關知識、技能及經驗。
- (3) 其他有關規定 CNS 11051〔脈波反射式超音波檢測法通則〕辦理。

2. 檢測時機：

- (1) 檢測時機區分銲接後、軋延後、熱作加工後、冷作加工後、熱處理後、研磨後、水壓試驗後及特別要求實施時。
- (2) 檢測時機之選擇應依合約或視實際要求實施。

3. 檢測裝備：

- (1) 超音波檢測儀：超音波檢測儀必須為脈波反射式視像顯示系統。
- (2) 換能器：應具有檢出比較規塊中之人工瑕疵的能力。
- (3) 直束換能器：超音波直束換能器必須為縱波直束，用於水浸法，其公稱頻率為 2 (2.25) MHZ 或 5 (4) MHZ。其晶體尺寸為 10~25mm，若為長方形晶體，則應有相當之截面積。
- (4) 斜束換能器：超音波斜束換能器必須為橫波斜束，其公稱頻率為 2 (2.25) MHZ 或 5 (4) MHZ。在薄壁管件檢測時，可用較高之頻率。其在管軸方向之晶體長度為 8~25mm。
- (5) 傳送機構、自動警報裝置或記錄裝置應提供足夠的能力，執行檢測操作及判定檢測結果。
- (6) 接觸媒質：一般以水為主。
- (7) 比較規塊所用的材料必須相同或相似於被檢物的音波特性、尺寸及表面狀況等。

4. 系統查核及評鑑時機：

- (1) 應至少在完成檢測工作與每 8 小時連續執行檢測時，對檢測靈敏度查核一次。
- (2) 定期之系統特性評鑑至少每三個月一次，或超過三個月未使用而在使用前校準之。
- (3) 儀器修護後或影響螢幕水平線、螢幕垂直線、增幅線性、雜訊比及鑑別力等特性時。
- (4) 新購入且使用前，對系統評鑑之建立時。
- (5) 其它特別指定時。

5. 裝備校準至少應依下述規範實施校準：

- (1) 螢幕水平線：應依 CNS 11224〔脈波反射超音波檢測儀系統評鑑〕第 5 節之規定，其合格基準為每一底面回波位置最大偏差值應在 2% 水平全尺度以內。
- (2) 增幅線性：應依 CNS 11224 第 7 節之規定，其合格基準為回波高度之最大偏差值減最小偏差值不得超過 8% 之全尺度。
- (3) 鑑別力：應依 CNS 11224 第 9 節規定，其合格基準為鑑別力不得超過 2.5 個波長。

6. 表面處理：檢測面上任何妨礙掃描及音波傳送之銲濺物、鬆脫銹皮、油漆等，應予以清除，必要時得以研磨或以適當的方式處理之。

7. 檢測技術

(1) 檢測方法可為水浸法、局部水浸法、水膜法或直接接觸法。

(2) 一般斜束換能器之折射角如表 13 所示。必須選用適當的折射角以確保可檢出比較規塊之內、外表面的人工瑕疵。

(3) 以直束換能器執行斜束檢測時，參考表 13 調整直束換能器得適當的折射角，以確保可檢出比較規塊之內、外表面的人工瑕疵。

(4) 瑕疵檢測掃描間距：旋轉管或旋轉換能器之掃描距離為 50mm 以下。

8. 檢測程序：

(1) 表面狀況：所有檢測面上不得有銲濺物、灰屑、油脂及鬆脫銹皮等，以確保最佳耦合狀況。

(2) 檢測範圍設定：依管壁厚選用適當的射束路程，一般為 0.5~5 跨距。

(3) 檢測靈敏度：一般檢測靈敏度設定如表 14 所示，依其加工方法及檢測管件而定。每次檢測靈敏度必須調整至人工瑕疵回波達到足以評估瑕疵信號之程度。

表 13 斜束換能之折射角

管壁厚對外徑之比值	折射角
$t/D \leq 2.3\%$	70°、60°、45°
$2.3\% < t/D \leq 5.8\%$	60°、45°、40°
$5.8\% < t/D \leq 13\%$	45°、40°
$13\% < t/D \leq 20\%$	40°、35°

表 14 超音波檢測檢測靈敏度

區分	人工瑕疵種類〔凹槽深度〕			應用
	方形槽 (公稱厚度)	V 形槽 (公稱厚度)	貫穿槽 (孔徑)	
UA	5%	5%	--	用於鍋爐、熱交換器之冷作無縫鋼管，或買方特別指定時。
UB	8%	8%		壓力配管用碳鋼鋼管 (STPG) 以外之熱作無縫鋼管，或買方特別指定時。
UC	10%	10%	3.2 mm	配管用碳鋼鋼管 SGP 以外之電阻銲接管、壓力配管用碳鋼鋼管 (STPG) 以外之熱作用無縫鋼管，或買方特別指定時。
UD	12%	12%	4.0 mm	配管用碳鋼鋼管 SGP 以外之配管用鋼管及鍋爐、熱交換器用鋼管之試驗。
UE	15%	15%	5.0 mm	配管用碳鋼鋼管之試驗。

附註：1. 人工瑕疵原則上以方型槽為標準，若 V 型槽或貫穿孔與方型槽有對應關係時才可使用。
2. STPG 參考 CNS4626、SGP 參考 CNS6445。

-
9. 顯示評估：若管件之顯示訊號均未超過比較規塊之人工瑕疵回波訊號時，則應判定合格。
 10. 檢測紀錄應至少包括下列項目：
 - (1) 檢測日期。
 - (2) 鋼管型式及尺寸。
 - (3) 超音波檢測儀型式。
 - (4) 檢測頻率。
 - (5) 換能器型式。
 - (6) 檢測方法〔水浸法、水膜法或直接接觸法〕。
 - (7) 檢測靈敏度及比較規塊。
 - (8) 接觸媒質。
 - (9) 檢測人員姓名。

(二) 渦電流檢測

1. 一般要求事項須符合下列要求：

- (1) 渦電流檢測之檢測方法、位置、範圍、比率及接受基準應依有關規章、標準、合約或買賣雙方協議訂定之。
- (2) 檢測人員應具備合約要求之資格或足夠的相關知識、技能及經驗。

2. 檢測時機：

- (1) 檢測時機區分銲接後、軋延後、熱加工後、冷加工後、熱處理後、研磨後、水壓試驗後及特別要求實施時。
- (2) 檢測時機之選擇應依合約或視實際要求實施。

3. 檢測裝備：

主要包括電子裝置、線圈、記錄器、自動標誌系統、機械驅動裝置及磁飽和裝置等，其中自動標誌系統、驅動裝置視需要而定，檢測裝備對於被檢物在相同條件下應具有再現性且不得造成被檢物損傷。

- (1) 電子裝置：須具備能產生所選定頻率之交流電能力，激發線圈之電路；接收信號顯示器等，且有可調整之增益、相位、濾波、衰減等功能。在檢測時，為便於偵檢信號超出設定的靈敏度基準之能力，可加裝警鈴、閃光訊號等。
- (2) 線圈：應依被檢物的特性，選擇適當的線圈型式及尺寸，線圈的型式可分為外繞式線圈、內繞式線圈及探頭線圈等三種。
- (3) 記錄裝置：用以記錄由電子裝置輸出之信號，其速率一般為可調式，以調整適當的鑑別能力。
- (4) 自動標誌系統：連續自動概測時，標識系統之啓動開關與警示系統連線，當信號超出設定靈敏度基準時，即在被檢物上自動噴漆，且啓動開關設有

延時裝置，配合驅動速度，以提供顯示評估的正確位置。

- (5)磁飽和裝置：對被檢物接近線圈部分得提供一個穩定且強大之磁場，以消除被測檢物因磁性不均所成影響。磁飽和裝置可為永久磁鐵型或電磁鐵型。
- (6)機械驅動裝置：應能被檢物以均勻速度及最小震動通過線圈，以便獲得最佳的檢測效果。

- (7)比較規塊：用於校準檢測裝置及檢驗條件，其材料應具有與被檢物相同或相似之成分、形狀、尺度表面情況及熱處理條件，且有足夠之長度及不干擾檢測之瑕疵。人工瑕疵間的距離或瑕疵至邊緣的距離，以能獲得良好的鑑別力為原則。人工瑕疵的型式區分為方形槽、V型槽及貫穿孔等三種。

4. 裝備標準依CNS 13405〔渦電流檢測系統綜合性能評鑑〕執行校正及評鑑，其評鑑時機如下：

- (1)定期之儀器評鑑必須確保渦電流檢測系統之檢出能力及短時間再現性均能符合檢測要求，評鑑週期依照有關規章、標準、合約或買賣雙方協議訂定之。均無指定時，至少每三個月一次，或經過三個月未使用而在使用前評鑑之。
- (2)儀器修護後。
- (3)儀器購入時。
- (4)其它特別指定時。

5. 表面處理須符合下列規要求：

- (1)檢測區域有影響檢測之油脂、滑油、銹蝕或異物等，應清除乾淨，被檢物的保護層或其他組件妨礙到檢測時亦應清除。
- (2)被檢物表面的粗糙度足以損壞線圈或產生的渦電流比實際所產生的渦電流大時，則檢測區域應在容許的範圍內減低其粗糙度。
- (3)被檢物表面應經適當處理，使其表面狀況不會蒙蔽或混淆瑕疵之檢測為原則，例如銹皮、金屬粉粒等。
- (4)被檢物表面瑕疵〔例如：碰撞傷痕、異物混入等可經由目視檢驗出者〕，可依相關規範處理後再實施檢測。

6. 檢測技術：

(1)探頭線圈渦電流法須符合下列要求：

- ①迴轉式掃瞄法以單一或多個探頭線圈與被檢物相對旋轉方式掃瞄。
- ②直線式掃瞄法以單一或多個探頭線圈與被檢物相對韓線方式掃瞄。
- ③其他掃瞄法，包括適合規範、合約要求的其他掃瞄法。
- ④探頭線圈渦電流法具有高靈敏度，對表面瑕疵如裂縫、疤痕、鐸冠過高或不足等，有高速的檢驗分析能力。

(2)外繞式或內繞式線圈渦電流法須符合下列要求：

- ①外繞式線圈掃瞄法為以被檢物貫穿線圈產生相對運動、以進行全面掃瞄。
- ②內繞式線圈掃瞄法為以線圈貫穿被檢測物內徑，產生相對運動，以進行全面掃瞄。
- ③差異式線圈可消除被檢物的一些外在干擾，例如：溫度的變化、直徑的變動等，能自動的補償。
- ④絕對式線圈無法自動補償外在干擾，其靈敏度較差，主要用於縱向的瑕疵檢測，初步檢測及特定直徑的檢測。
- (3)掃瞄方法：合約未規定或須全面檢驗時，以外繞式線圈渦電流掃瞄為之。
- (4)檢測頻率以 0.5KHz~500KHz 為主。
- (5)邊緣效應：檢則時管端可能受邊緣效應影響而造成無關顯示，其影響範圍可用特殊之比較規塊決定，在此比較規塊之一端或兩端製作一連串間隔 12.7 mm 等距的人工瑕疵。當儀器依檢驗規範校準後再以線圈由端點通過比較規兩次，檢視儀器上的螢幕顯示，在均勻信號顯示之前即為邊緣效應影響範圍。
- (6)靈敏度設定：檢測靈敏度應調整至能檢測出比較規塊上的人工瑕疵為原則。一般可依表 15 來選用適當的靈敏度要求。

表 15 超音波檢測檢測靈敏度

區分	人工瑕疵種類〔凹槽深度〕			用途說明
	方形槽 (深度)	V 形槽 (公稱厚度)	貫穿槽 (孔徑)	
EV	0.15t 0.20t	0.1t 0.125t	1.0 mm 1.2 mm	買方特別指定之用於鍋爐 熱交換器之冷作自動電弧 銲接不銹鋼管。壓力配管用之碳鋼鋼管 (STPG) 除外。
	0.20t	0.125t	1.2 mm	買方特別指定時之厚度小於 3 mm 之銲接不銹鋼 管，惟鍋爐熱交換器用冷作加工自動電弧銲接不銹鋼 管除外。
EW	0.25t	0.15t	1.5 mm	買方特別指定時之厚度 3 mm (含) 以上之銲接不銹鋼 管，惟鍋爐熱交換器用冷作加工自動電弧銲接不銹鋼 管除外。 買方特別指定時之電阻銲接鋼管，惟配管用碳鋼除外。
EX	0.3t	0.20t	2.0 mm	買方特別指定時之熱作加工無縫鋼管，惟壓力配管用 碳鋼鋼管除外。
EY	0.40t	0.25t	2.5 mm	配管用碳鋼鋼管 SGP 以外之配管用鋼管和鍋爐、熱交 換器用鋼管之試驗。
EZ	0.50t	0.3t	3.0 mm	配管用碳鋼鋼管 SGP 之試驗。
附註：1. t 為管線之標稱厚度。 2. 方型槽為標準的人工瑕疵，若 V 型槽或貫穿孔與方型槽有對應關係時才可使用。 3. 上表適用於外徑小於 50.8 mm 之鋼管，僅 EZ 規格可適用於任何外徑。 4. STPG 參考 CNS4626、SGP 參考 CNS6445。				

7. 檢測程序須符合下列要求：

- (1) 執行檢測前，裝備應依合約或有關規範之要求，以比較規塊校準，其中應包括所臥擇頻率、線圈型式及比較規塊，且應瞭解被檢物材質、尺寸、表面情況及熱處理條件。
- (2) 靈敏度之校準時機如下：
 - ① 連續使用 8 小時或必要時。
 - ② 被檢物的材質、尺寸變更時。
 - ③ 對裝備有所懷疑時。
 - ④ 每次檢測完成時。
 - ⑤ 每次記錄媒體告一段落時。
- (3) 渦電流檢測程序應詳述下列項目：
 - ① 渦電流裝備之選用及操作程序。
 - ② 被檢物材質、尺寸、形狀、表面情況、熱處理條件及適用範圍。
 - ③ 使用線圈之大小、廠牌、型別、引線長度等。
 - ④ 檢測頻率。
 - ⑤ 選用之比較規塊。
 - ⑥ 校準程序靈敏度設定基礎。
 - ⑦ 接受基準。

8. 顯示評估須符合下列要求：

- (1) 顯示評估為被檢物的瑕疵，且超過所選定之比較規所設定之靈敏度基準時，即判定為缺陷。
- (2) 有下列情況應考慮重新實施檢測：
 - ① 任何作業上之錯誤時。
 - ② 顯示難以判定為瑕疵或無關顯示時。
 - ③ 裝備顯示不穩定，可能產生誤判時。
 - ④ 重新校準靈敏度衰減超過 3dB 時，當時至上次校準合格之時間內的所有被檢物應重新實施檢測。

9. 等級區分：依比較規上人工瑕疵之形狀區分等級為三類，每一類再依開槽方深度或孔徑大小分為 6 級，各類級區分如表 16、表 17 及表 18。管線瑕疵接受基準之訂定，應依合約或以上之等級區分，經買賣雙方協議規定之。

表 16 第一類（方型槽）等級區分表

級別	代號	方形槽深度
1	ES-15	0.15t
2	ES-20	0.20t
3	ES-25	0.25t
4	ES-30	0.3t
5	ES-40	0.40t
6	ES-50	0.50t

附註：t 為管線之標稱厚度。

表 17 第二類（V 型槽）等級區分表

級別	代號	V 形槽深度
1	EF-10	0.1t
2	EF-12	0.125t
3	EF-15	0.15t
4	EF-20	0.20t
5	EF-25	0.25t
6	EF-30	0.50t

附註：t 為管線之標稱厚度。

表 18 第三類（方型槽）等級區分表

級別	代號	貫穿孔孔徑（mm）
1	ED-10	1
2	ED-12	1.2
3	ED-16	1.6
4	ED-20	2
5	ED-25	2.5
6	ED-32	3.2

10. 檢測記錄須符合下列要求：

- (1) 瑕疵顯示之記錄得以照相、掃描、謄繪、記錄紙、磁帶或敘述等記錄之。

(2) 檢測記錄且含下列項目：

- ① 檢測日期。
- ② 被檢物名稱、材質、尺度、熱處理、表面情況及檢測範圍。
- ③ 檢測時間、被檢物的溫度。
- ④ 裝備廠牌、型別。
- ⑤ 探頭或線圈尺度、大小、型別、廠牌、及引線長度。
- ⑥ 檢測頻率和頻率數。
- ⑦ 掃瞄速度。
- ⑧ 掃瞄動作。如手動、機械帶動或遙控裝置。
- ⑨ 記錄裝置。

(三) 腐蝕試驗〔僅適用於不銹鋼鋼管〕

1. 耐腐性：買方特別指定時，鋼管晶界腐蝕試驗，依下列步驟實施。試驗時必須依 CNS 10170〔不銹鋼之 10% 草酸浸蝕試驗法〕實施 10% 草酸浸蝕試驗，以呈現其浸蝕組織後，依表 19 之規定再實施硫酸—硫酸鐵、65% 硝酸腐蝕試驗及硫酸—硫酸銅腐蝕試驗。其適用項目之選擇〔選取其中一項或多項試驗〕，可由買賣雙方協議之。

(1) 10% 草酸浸蝕試驗後浸蝕組織之判定須依表 19 之規定。

表 19 10% 草酸浸蝕試驗後浸蝕組織之判定表

種類符號	狀態	須實施硫酸—硫酸鐵腐蝕試驗之組織	須實施 65% 硝酸腐蝕試驗之組織	須實施硫酸—硫酸銅腐蝕試驗之組織
304TB	接件狀態 〔固溶處理〕	溝渠狀組織	溝渠狀組織、 針孔組織 II	溝渠狀組織
316TB 317TB			—	
304LTB 312LTB	敏化處理	溝渠狀組織	溝渠狀組織、 針 孔組織 II	溝渠狀組織
316LTB 317LTB			—	
321TB 347TB		—		

備考：10% 草酸浸蝕試驗後，若未呈現上表所列浸蝕組織者不需實施其它腐蝕試驗。

(2) 以硫酸—硫酸鐵腐蝕試驗所得之腐蝕速率依表 20 規定。

表 20 硫酸—硫酸鐵腐蝕試驗後浸蝕組織之判定表

種類符號	狀態	腐蝕速率 g/ (m ² ·h)
304TB 316TB 317TB	接件狀態 〔固溶處理〕	買賣雙方協議之
304LTB 312LTB 316LTB 317LTB	敏化處理	買賣雙方協議之

(3)以 65% 硝酸腐蝕試驗所得之腐蝕速率依表 21 規定。

表 21 65% 硝酸腐蝕試驗後浸蝕組織之判定表

種類符號	狀態	腐蝕速率 g/ (m ² ·h)
304TB	接件狀態 〔固溶處理〕	買賣雙方協議之
304LTB	敏化處理	買賣雙方協議之

(4)以硫酸—硫酸銅腐蝕試驗之彎曲面狀態依表 22 規定。

表 22 硫酸—硫酸銅腐蝕試驗彎曲面之狀態判定表

種類符號	狀態	彎曲面之狀態
304TB 316TB 317TB	接件狀態 〔固溶處理〕	不得有晶界之腐蝕裂痕
304LTB 312LTB 316LTB 317LTB	敏化處理	不得有晶界之腐蝕裂痕

2. 試片：自鋼管端部切取適當長度作為試片。

3. 腐蝕試驗方法依下列各標準實施之。

- (1) CNS 10170〔不銹鋼之 10% 草酸浸蝕試驗法〕
- (2) CNS 4763〔不銹鋼之硫酸—硫酸鐵浸蝕試驗法〕
- (3) CNS 4764〔不銹鋼之 65% 硝酸浸蝕試驗法〕
- (4) CNS 4766〔不銹鋼之硫酸—硫酸銅浸蝕試驗法〕

-
4. 試驗結果須符合腐蝕性之各表〔表 19 至表 22〕規定。
 5. 供試樣之採取方法及試片之數量除依標準本文規定外，若買方要求時，得自同一爐鋼永同時熱處理者各採取試片 1 個。

四、結論與未來研究方向

本文已針對鍋爐及熱交換器用鋼管之材質及檢測方法完成研究分析，茲歸納以下結論及未來研究方向建議：

- (一) CNS 中華民國國家標準之要求僅為基本條件，若有特殊需求可依實需及買賣雙方協議內容做適度的調整，惟應優先考慮安全性問題。
- (二) 任何檢測其均需花費成本，可委由相關專業實驗室執行，可節省建立實驗設備及維持成本外，若有採購驗收爭議時可避免球員兼裁判的疑慮。
- (三) 鍋爐及熱交換器用鋼管多屬零附件，可依需求檢討使用不同鋼材，惟材質之化學成分或機械性能標準不同，應謹慎應用。
- (四) 各附表之參考運用應注意特別備註說明，以避免引用不正確，造成判定錯誤。
- (五) 因本文篇幅限制仍有部份引用標準無法做詳盡地說明及介紹，未來將持續研擬實用題材進行研析，俾供產業界參酌應用。

五、參考文獻

1. 中華民國國家標準 CNS 2111 金屬材料拉伸試驗法，85 月 7 月 25 日修訂。
2. 中華民國國家標準 CNS 2112 金屬材料拉伸試片，94 月 2 月 5 日修訂。
3. 中華民國國家標準 CNS 2114 洛式硬度試驗法，100 月 8 月 10 日修訂。
4. 中華民國國家標準 CNS 2608 鋼料之檢驗通則，71 月 4 月 22 日修訂。
5. 中華民國國家標準 CNS 2925 規定極限值之有效位數指示法，57 月 10 月 23 日公布。
6. 中華民國國家標準 CNS 3158 軋製或鍛製鋼料之製品分析法及其許可差，97 月 1 月 14 日修訂。
7. 中華民國國家標準 CNS 4763 不銹鋼之硫酸—硫酸鐵腐蝕試驗法，75 月 7 月 22 日修訂。
8. 中華民國國家標準 CNS 4764 不銹鋼之 65% 硝酸腐蝕試驗法，75 月 7 月 22 日修訂。
9. 中華民國國家標準 CNS 4766 不銹鋼之硫酸—硫酸銅腐蝕試驗法，75 月 7 月 22 日修訂。
10. 中華民國國家標準 CNS 5336 鋼鐵及耐熱合金之高溫拉伸試驗法，86 月 10 月 1 日修訂。
11. 中華民國國家標準 CNS 7379 鍋爐及熱交換器用碳鋼鋼管，84 月 6 月 26 日修訂。

-
12. 中華民國國家標準 CNS 7381 鍋爐及熱交換器用合金鋼鋼管，84 月 6 月 26 日修訂。
 13. 中華民國國家標準 CNS 7383 鍋爐及熱交換器用不銹鋼鋼管，103 月 11 月 18 日修訂。
 14. 中華民國國家標準 CNS 10170 不銹鋼之 10% 草酸浸蝕試驗法，72 月 4 月 13 日公布。
 15. 中華民國國家標準 CNS 10436 鋼料沃斯田體晶粒度試驗法，89 月 5 月 18 日修訂。
 16. 中華民國國家標準 CNS 11051 脈波反射式超音波檢測法通則，74 月 3 月 26 日修訂。
 17. 中華民國國家標準 CNS 11224 脈波反射式超音波檢測儀系統評鑑，81 月 1 月 22 日修訂。
 18. 中華民國國家標準 CNS 12620 鋼管渦電流檢測法，100 年 8 月 10 日修訂。
 19. 中華民國國家標準 CNS 12674 縫滾筒彎曲試驗法，79 年 1 月 17 日公布。
 20. 中華民國國家標準 CNS 13403 無縫及電阻銲鋼管超音波檢測法，83 年 6 月 27 日公布。
 21. 中華民國國家標準 CNS 13405 渦電流檢測系統綜合性能評鑑，83 年 6 月 27 日公布。

合成氣在淨煤技術領域之應用 及發展趨勢

周揚震、徐恆文、萬皓鵬

工業技術研究院 綠能與環境研究所

一、前言

近百年來全球經濟快速發展，造成能源使用量大增及土地資源過度開發，使得化石能源經人類活動後，以二氧化碳的形式排入大氣，破壞全球碳循環。聯合國「政府間氣候變化專門委員會」（Intergovernmental Panel on Climate Change of the UN, IPCC）於2013年9月正式發表《第五次氣候評估報告》，報告中指出：工業革命後人類燃燒化石燃料和土地利用，使得每年碳排放量高達 89 億噸，其中大氣中碳含量的增加幅度高達41%。即使人類活動造成的年均碳排放量，相對地球自身龐大的碳循環而言還是微不足道。但自工業革命以來，人類活動的排碳量迅速增加。日積月累下來，已經對大自然的碳循環造成顯著的影響。因此《第五次氣候評估報告》中亦強調：「科學家比過去更確信人類活動造成全球暖化的現象」。

化石燃料因具有成本低廉、取得容易且應用技術成熟等優勢，因此在初級能源供應來源上扮演不可或缺的角色。以臺灣為例，在2016年的能源供給量約為145百萬公秉油當量，其中煤、煤產品、原油、石油產品及天燃氣等化石燃料即佔91%。使用這些化石燃料會造成大量的溫室氣體排放，並導致氣候變遷衝擊，嚴重影響全球的生態環境。因此世界各國均透過國際協議、政策措施及發展前瞻能源技術，在同時考量國家能源安全及經濟發展的前提下，減少各種能源使用對環境造成的影響。本文將由國際減碳策略及台灣能源發展政策，切入淨煤技術發展的重要性，並著重於燃燒前二氧化碳捕獲技術以及合成氣於先進發電技術及轉製燃料技術的發展趨勢。

二、臺灣能源相及減碳關政策

國際間針對溫室氣體減量的議題，於1997年通過《京都議定書》，該協議要求附件一國家訂定2005~2012年間的減量目標，並於2005年2月16日正式生效。隨後在2009年哥本哈根協議中，進一步要求各國應提出2020年量化減量目標，非附件一國家則需提出「國家適當減緩行動」（Nationally Appropriate Mitigation Actions, NAMAs）。2015年第21屆締約國大會（Conference of Parties, COP）於法國巴黎通過《巴黎協定》，設定控制全球溫升不超過攝氏2度之長期減量目標，規範各國每5年提交「國家自定貢獻」（Nationally Determined Contribution, NDC）。巴黎協定

於2016年11月4日生效，至今有122國批准，占全球溫室氣體排放80.28%，後續即使美國（17.9%）退出，亦不影響其效力。

國際能源署（International Energy Agency, IEA）於《2017能源技術展望》中推估全球不進行任何減碳措施的排碳及升溫情境（6°C Scenario, 6DS），結果顯示：到2060年時全球碳排放量為398億噸，會使得氣溫上升約6°C。若能施行提昇能源使用端效率、再生能源、燃料轉換、核能、碳捕獲及封存等目前全球可行之減碳措施，至2060年可減少308億噸二氧化碳排放量，可將氣溫上升控制在2°C（2°C Scenario, 2DS）。圖1為各項減碳措施對減緩全球暖化所做的貢獻，其中以提昇能源使用端效率、再生能源及碳捕獲及封存為貢獻度較大的減碳措施，可分別減少116億噸、110億噸及49億噸二氧化碳。若能進一步加強發展各項減碳措施之相關技術，可在2060年將氣溫上升控制在1.75°C（Beyond 2°C Scenario, B2DS），其中提昇能源使用端效率（140億噸）、再生能源（110億噸）及碳捕獲及封存（91億噸）仍為貢獻度最大的減碳措施。

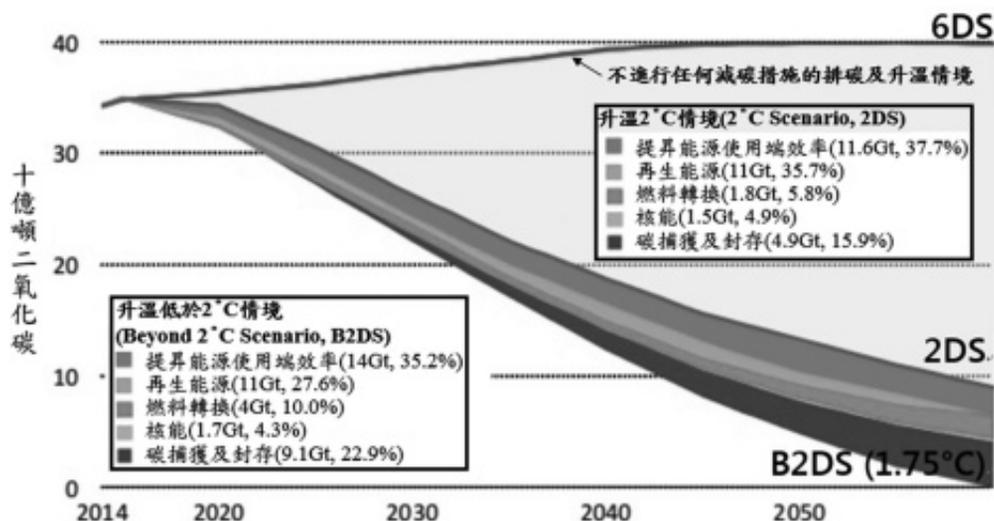


圖1 國際能源署推估各項減碳措施對減緩全球暖化所做的貢獻
（資料來源：IEA，2017）

臺灣地區自有能源匱乏，能源供給98%依賴進口。各項能源使用中，和民生基本需求及工業發展相關的電力供給系統為獨立系統，電力需即發即用，無法大量儲存。2016年工業部門的電力消費約為總用電量的53%，衍生出的產品外銷產值占我國GDP的六成。因此擁有穩定電力及具競爭力的電價，為我國經濟發展重要支柱。然而統計資料亦顯示臺灣發電部門對化石能源依存度高，2016年的燃煤（45.36%）、燃氣（32.36%）及燃油（4.24%）等化石能源使用量約占82%，使得發電部門的碳排放約占59%，衍生出大量溫室氣體排放對環境造成衝擊的問題。

臺灣為了因應國際間溫室氣體減量情勢，行政院於2015年7月通過《溫室氣體

減量及管理法》，訂定國家溫室氣體長期減量目標為：2050年溫室氣體排放量降為2005年排放量的50%以下，亦即扣除碳匯後之溫室氣體排放量減至1.33億噸二氧化碳當量。隨後於2015年9月的「國家自定貢獻」中，希望於2030年達到將溫室氣體排放降至排放基線（Business As Usual, BAU）50%的中程目標，此目標相當於將2005年溫室氣體排放量減量至80%以下，約為2.13億噸二氧化碳當量（扣除碳匯後）。我國的中長期溫室氣體減量目標如圖2所示。

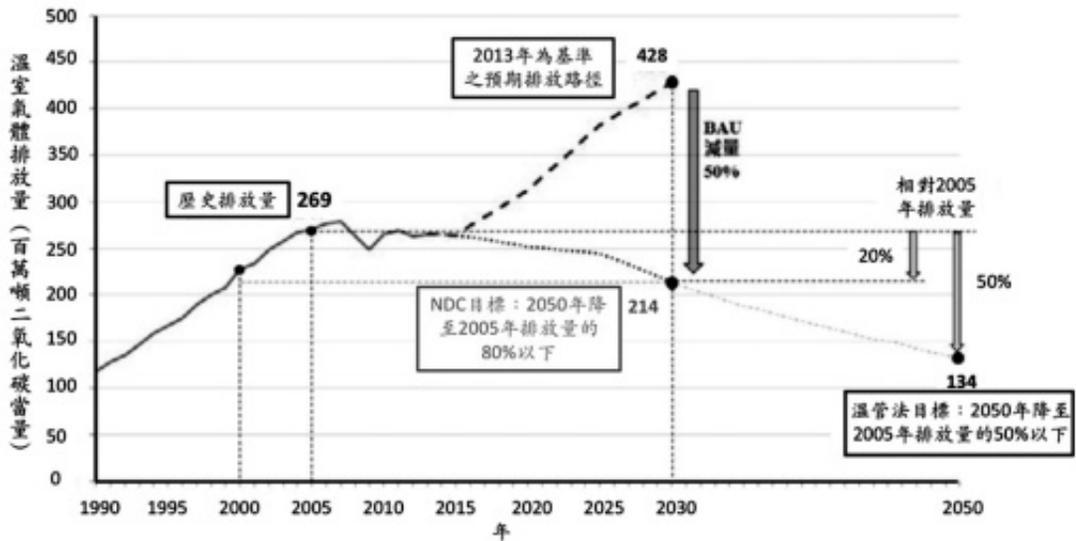


圖 2 我國的中長期溫室氣體減量目標（資料來源：行政院環保署，2015）

臺灣的能源結構易受國際能源情勢變遷衝擊，在國際能源價格波動、國內能源需求成長且全球減碳壓力漸增的狀況下，臺灣能源發展所面臨的挑戰較其它國家更為嚴峻。因此臺灣在「國家自定貢獻」中針對能源部門的減緩措施指出：我國除了在能源需求面推動全面積極節能外，在暫不考慮技術、成本效益可行性下，應以前瞻節能措施降低能源消費。此外在能源供給面應促使電力部門朝低碳發展，除了提高再生能源用量（2025年再生能源發電量占比達20%，約27,423 MW）及擴大燃氣發電外，電廠汰舊換新應採用最佳可行技術，並規劃推動智慧電網基礎建設，以提升我國整體電力供應穩定及供需效率。石油煉製部門將透過使用低碳燃料、提升設備效率、推動能源整合與管理、煉油廠汰舊換新採用最佳可行技術等，落實節能及提升能源效率的方式達到減碳目標。

為了建立低碳永續、高質穩定、效率經濟的能源體系，經濟部於2016年5月提出《新能源政策》，其中策略三提到臺灣應積極多元創能，促進潔淨能源發展。該項策略之推動措施除了積極擴大再生能源及低碳天然氣發電，以及布局新興能

源/氫能燃料電池外，亦針對現有燃煤發電機組改善；預期可降低現有火力發電場污染物排放，並將部分燃煤機組汰舊換新為超超臨界高效率機組。經濟部隨後在2017年4月訂定出《能源發展綱領》，作為國家能源發展之上位綱要原則，及國家能源相關政策計畫、準則及行動方案訂定之政策方針；其中於綱要方針「能源安全」中的「供給面多元自主低碳」提到：我國應視技術進展評估，導入淨煤及減碳相關技術，提高燃煤發電效率，減少煤炭利用之碳排放；並於綱要方針「環境永續」中提到「溫室氣體檢量」及「建構低碳環境」，指出訂定能源部門的溫室氣體階段管制目標時，應參考國際減碳發展趨勢、我國產業競爭力及減碳成本效益；同時推動能源結構低碳化，以逐步降低單位燃料使用之溫室氣體排放。

三、淨煤技術 (Clean Coal Technology, CCT)

在確保能源安全及穩定供應電力給民生及工業需求的前提下，尋求可全天穩定發電、低成本、高效率、多元的低碳能源及低碳排放的發電技術是深受挑戰課題。臺灣整體能源轉型路徑，將逐步增加再生能源與燃氣發電及降低燃煤比例，整體規劃如圖3所示。然而直至2025年臺灣能源結構中化石能源仍占80%，雖然燃氣發電可大幅降低發電過程產生硫氧化物、氮氧化物以及燃燒不完全的微小顆粒，並減少空氣汙染、酸雨、PM2.5等問題。但不管是燃氣或燃煤發電，仍會產生二氧化碳，造成全球暖化。因此減碳仍為政策、產業、國家及產業競爭力重要工作，在提昇電廠發電效率的同時，應導入淨煤及減碳技術，減少化石燃料使用所造成的汙染。

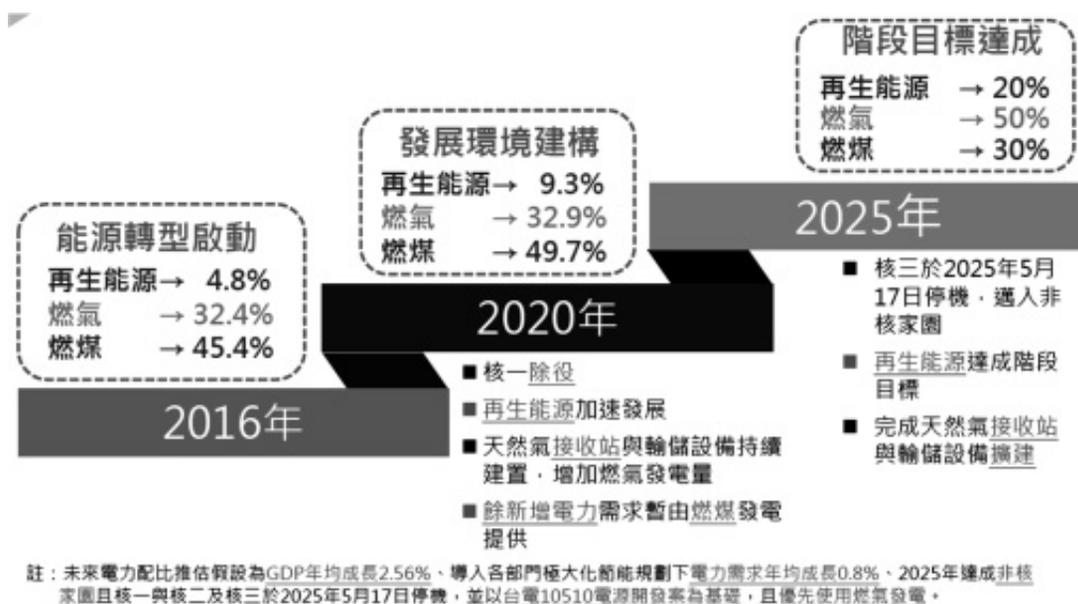


圖3 臺灣能源轉型路徑規劃 (資料來源：經濟部，2017)

淨煤技術是目前減少燃燒煤炭造成環境污染的可行方式之一，主要是將煤炭在其生命週期所造成的汙染以及傷害降到最低，包含：煤炭改質、提升煤炭燃料機具效率，以及發展碳捕捉與封存之技術。近年來各國致力發展先進發電技術及碳捕捉及封存技術等淨煤技術。其中逐步邁向商業化的先進發電技術包含超臨界（Supercritical, SC）發電技術、超超臨界（Ultra Supercritical, USC）發電技術、先進超超臨界（Advanced - Ultra Supercritical Power Generation Technology, A-USC）發電技術。傳統的發電機組是燃燒燃料將水煮沸，利用水蒸汽推動蒸汽渦輪發電機。若將蒸汽壓力及溫度提昇至臨界點以上，依據提昇程度由低到高，分別為超臨界、超超臨界及先進超超臨界發電。調高作業的溫度與壓力可提升效率，便能節省所耗燃料，進而降低發電時所伴隨的二氧化碳排放。此外，氣化複循環發電技術（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）雖亦屬先進發電技術，但由於該技術和碳捕獲與封存技術相關，將於文後再介紹。

碳捕捉及封存技術主要是將燃燒所產生的二氧化碳捕集後，選擇適當的場址進行注儲及封存。捕獲二氧化碳的方法，可依燃料轉換成熱能與電能的方式，區分為燃燒前捕獲、燃燒後捕獲及富氧燃燒三類，其流程如圖4所示。圖中所有流程都需要從大量氣流（如煙道氣、合成氣、空氣或未加工的天然氣）中分離出二氧化碳、氫氣或氧氣這個步驟，故捕獲技術的選擇需取決於整體製程所需的附加條件。目前電廠中使用的燃燒後和燃燒前系統可以捕獲 85%-95% 因發電產生的二氧化碳（Metz 等人，2005），若要達到更高的捕獲效率，其二氧化碳捕獲裝置的能耗、體積及成本也會相對提高。與同等未採用二氧化碳捕獲系統的電廠相比，二氧化碳捕獲和壓縮需要的額外能源損耗大約在原發電量的10-40%。

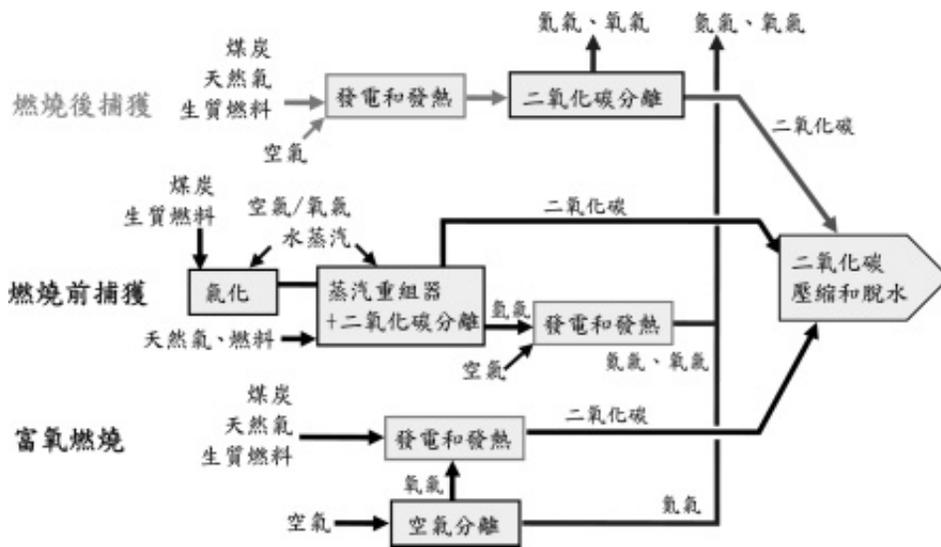


圖 4 主要的二氧化碳捕獲流程和系統的示意圖（改繪自 Metz 等人，2005）

燃燒前二氧化碳捕獲技術主要是提昇煤炭氣化技術之效能、可靠度及可用率，主要是在燃燒之前由源頭直接產生高濃度的二氧化碳。一般是利用氣化的技術將化石燃料轉換成以一氧化碳和氫氣為主的合成氣，若經過水氣轉移反應將合成氣中的一氧化碳轉化成二氧化碳和氫氣，再將二氧化碳分離後，可得到氫氣做為無碳能源，做為燃料電池或引擎等的燃料，亦可利用儲氫技術進行其他能源的利用。

燃燒後二氧化碳捕獲技術主要是藉由物理或化學吸收、薄膜分離、固體吸附、或者低溫分離等技術，捕獲一次燃料在空氣中燃燒所產生的二氧化碳。常見的燃燒後二氧化碳捕獲技術可分為化學及物理兩種方法，化學方法是指以吸收液中的化學物質和二氧化碳產生化學反應的化學吸收法，常見的吸收液為單乙醇胺；物理方式可再區分為以有機或無機液體（如：*propylene carbonate*、*dimethyl ether of polyethylene glycol* 及 *sea water*）的物理吸收法、以碳素系或沸石固體吸附劑的物理吸附法、以壓縮冷凝將二氧化碳液化或固化的低溫冷凝法、以及用聚醯胺樹脂或醋酸纖維素等作為分離介質的薄膜分離法。

富氧燃燒技術是以高於大氣中氧氣濃度的氧作為助燃劑的燃燒方法。富氧燃燒時少了空氣中的氮氣，可產生以水汽和二氧化碳為主的氣體，氣體中的二氧化碳濃度可達80%以上。因此不需要再經由二氧化碳捕獲或分離程序，就能直接把二氧化碳壓縮封存或再利用。

淨煤技術的發展是為了改善燃料品質，減少氮氧化物、硫氧化物、懸浮微粒及二氧化碳等污染物的排放，更希望能將煤轉化為更高效能的潔淨燃料。其中燃燒前二氧化碳捕獲技術可將煤炭轉化成合成氣或氫氣為主的產物，這些產物經過加工及分離後，除了作為提昇發電機組之蒸氣溫度及壓力的高品質的燃料外，亦可作為化學品及液態燃料的前趨物。因此本文將著重於燃燒前捕獲技術及其應用。

四、燃燒前二氧化碳捕獲程序

燃燒前二氧化碳捕獲程序示意圖如圖5所示，該程序首先將碳氫化合物或固態燃料（煤炭或固態生質燃料）等初級燃料（*Primary fuel*）經氣化反應，生成以一氧化碳和氫氣為主的合成氣（*Syngas*）。若將合成氣直接作為燃燒或發電的燃料，燃燒後所排放廢氣中二氧化碳濃度可達40-60%，可降低後續二氧化碳分離的成本（徐恆文，2007）。若將合成氣與水蒸汽進行水氣轉移反應（ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ），可進一步產生高純度的氫氣及15-60%二氧化碳（Metz 等人，2005），透過二氧化碳捕獲技術可將氫氣及二氧化碳分離，以利後續應用。

然而根據所選擇的氣化程序不同，燃燒前二氧化碳捕獲程序所生成的氣體除了氫氣外，亦可能含有微量甲烷、一氧化碳、二氧化碳、氮氣，若氣體中含碳化合物的濃度越低，表示該程序的二氧化碳減量效益越高。氣化技術是燃燒前二氧

化碳捕獲程序的關鍵技術之一，是一種把煤炭、石油、生質物等含碳的原料，在控制含氧量及高溫的條件下進行反應，轉換成以一氧化碳和氫氣的程序。常見的技術包含蒸汽重組法、部分氧化法、自熱重組法、煤炭氯化法。

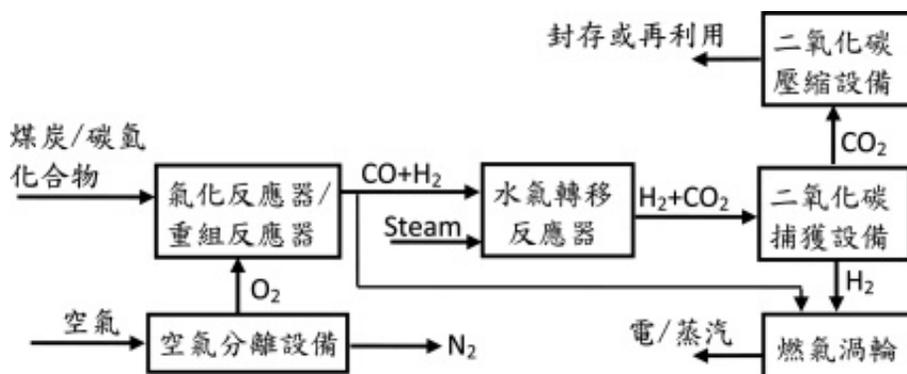


圖 5 燃燒前二氧化碳捕獲程序示意圖

蒸汽重組法製程主要是通入低碳石化原料和蒸汽，在 Ni 觸媒或添加 Cu、Zn 於不同載體上進行重組反應，產生以一氧化碳和氫氣為主的合成氣。蒸汽重組反應為強吸熱反應，其優點是所產生的氫氣濃度高，但蒸汽重組反應需操作在 800-900°C 的高溫，壓力在 7-48 大氣壓間，必須有傳熱面積大的熱交換器，因此系統體積較為龐大。此外，反應過程中所使用的鎳觸媒會受進料氣體中所含硫化物的毒化，所以低碳石化原料在進入重組器前要先脫硫，將硫含量降至 0.5ppm 以下。該製程不需要額外氧氣，反應溫度較其他合成氣製程低，所產生合成氣中的 H₂/CO 比例約在 3-5 之間。

部分氧化法主要是將燃料比完全燃燒理論劑量少的氧氣，在高溫（1250-1400°C）高壓（3-8MPa）下生成合成氣。該反應為放熱反應，可將內部反應所產生的反應熱，供作部分氧化反應所需的熱量。此外，和蒸汽重組法相較，部分氧化法的轉化效率較低，但可使用的燃料型態較廣（如天然氣、煤焦油及瀝青）。目前商業化的程序有 BASF、Texaco Process、Hydrocarbon Research 及 Shell Process 等方法，使用的原料則包括從甲烷到石油殘渣（一種質油）的全部烴類。該製程不需要觸媒，但需要氧氣參與反應。其系統佔地面積比蒸汽重組反應小，所產生合成氣中的 H₂/CO 比例約在 1.5-1.8 之間。

自熱重組法則是結合上述兩種技術，同時需要觸媒及氧氣參與反應，操作溫度約在 950-1050°C，適用於中小規模程序。該技術主要是在自熱重組器內，同時具有部分氧化及蒸汽重組法的功能。在絕熱條件下，利用部分氧化反應所產生之熱，做為蒸汽重組反應的熱源。因此藉由改善自熱重組器內的觸媒排列設計，達到增加熱傳的目的為目前研究的重點之一。和蒸汽重組法相比，自熱重組法可減少加熱燃料的使用，因而減少燃燒化石燃料所排放的二氧化碳。此外由於該程序可省

去體積龐大的熱交換器，因此可以縮小重組器的體積及建置成本。其系統佔地面積也比蒸汽重組反應小，所產生合成氣中的 H_2/CO 比例約在 1.5-2.5 之間。

煤炭氣化是指煤在特定溫度（730-1600°C）及壓力（0.1-7MPa）的氣化設備中，使煤炭中之有機質轉化為合成氣的過程。煤炭氣化後之合成氣組成會受到氧氣來源（純氧或空氣）、壓力、溫度及進料方式（乾粉或水煤漿）之影響，可能產生之反應如圖 6 所示。一般而言氣化過程包含熱解、燃燒、焦炭重組等反應：熱解反應為碳顆粒燃燒後釋放揮發物及產生焦炭（Char）的過程，該反應會造成煤炭 70% 的重量損失，並影響焦炭的結構及組成；所生成的揮發物、煤焦和氧氣進行燃燒反應，形成二氧化碳和一氧化碳，並於燃燒的過程中釋放出提供氣化反應所需的熱能；於燃燒反應所剩餘的煤焦及所產生的二氧化碳會接著和水蒸汽進行焦炭重組反應，產生一氧化碳和氫氣。隨著氣化反應的進行，會使得氣化爐內氣體組成達到平衡。

氣化爐（Gasifier）為氣化技術之核心，目前商業化的氣化爐依固體或液體燃料與氣體混合的方式及操作溫度範圍，可分成移動或固定床（Moving/Fixed bed）、流體化床（fluidized bed）、及挾帶床（Entrained bed）三種。移動床式氣化爐的發展歷史最久，其商業化應用技術亦較多，所使用的固體燃料粒徑較大，約 0.6-5 公分。流體化床氣化爐較適用 0.5 公分以下的固體燃料，操作溫度的範圍較小，一般需操作於煤炭的灰份熔點以下，但亦需高於焦油產生的溫度。挾帶床氣化爐適用粒徑較小之固體燃料（ $<13\mu m$ ），氣化爐的爐內溫度均勻，且氣固混合情形優於移動床氣化爐，為發電機組常用之氣化爐形式。

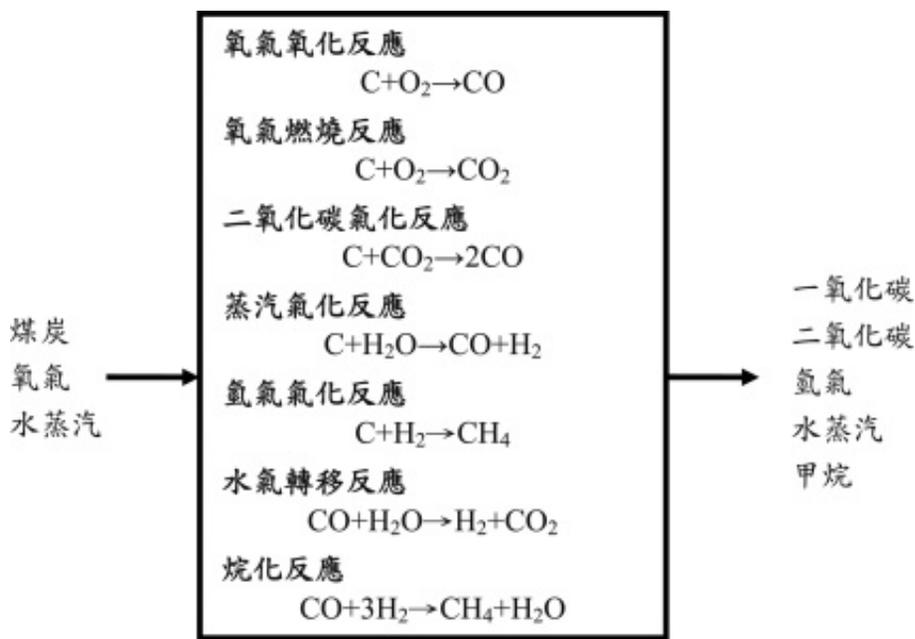


圖 6 氣化反應

五、燃燒前二氧化碳捕獲程序於先進發電技術之應用-氣化複循環發電技術 (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)

燃燒前二氧化碳捕獲技術之發展不單指環境控制技術，而是在控制二氧化碳排放的前提下，同時強調能源使用效益，並利用煤炭或碳氫化合物的轉化技術製造清潔能源。除了可以經將氣化後之合成氣用於生產氫氣及液態燃料外，亦可直接當作燃料及發展先進發電技術。燃燒前二氧化碳捕獲程序於先進發電技術之應用，主要是將合成氣在燃燒前先去除二氧化碳，以在燃氣渦輪機中產生電力，而不是在燃燒後再捕獲大量煙道氣中的二氧化碳。先進之淨煤發電技術以氣化複循環發電系統 (Integrated gasification combined cycle, IGCC) 最具代表性，不但要求低污染更強調高發電效率，期望該電廠之淨發電效率可達到40%以上 (HHV)。

氣化複循環發電系統乃是將煤炭或化石燃料氣化成合成氣，先經過淨潔技術除塵、除硫及除含氮物質後，再送至複循環發電機組先推動氣渦輪機發電，渦輪機的高溫尾氣再用於熱回收鍋爐，產生蒸汽推動蒸汽渦輪機發電。電廠主要是由氣化廠 (Gasification plant)、淨化系統 (Clean-up system)、空氣分離系統 (Air separation unit) 和複循環機組 (Combined cycle unit) 等部分所組成；其中複循環機組是氣化複循環發電廠的發電單元，主要包括氣渦輪機、廢熱鍋爐、汽輪機、發電機及各種輔機設備等。整合性氣化複循環發電技術之特色為可使用多種不同之燃料，如煤炭、重油、石油焦、焦油、殘渣油及瀝青等，大型發電用途的氣化複循環發電廠多以燃煤或石油焦為主 (余建成，2010)。

氣化複循環發電技術採取燃燒前處理的方式去除污染物，可克服了煤炭因直接燃燒產生的環境污染問題，使得其粒狀污染物的排放極低，除硫率及除氮率可達98%及90%。且因發電效率高 (約42-46%)，在產出相同單位電力下所二氧化碳排放遠低於燃煤電廠，因此具有高發電效率及環保性佳的特性。

肯珀計畫 (Kemper Project) 是使用美國密西西比州肯珀郡出產的褐煤為燃料 (褐煤是一種介於泥煤和瀝青煤之間的低階煤。整個密西西比州蘊藏了大約四十億噸的褐煤)，建立及操作運轉氣化複循環電廠的計畫 (如圖7所示)。此計畫主要由美國南方電力公司的分公司密西西比電力主導，於2010年六月進行破土儀式，並於2011年的上半年開始建造。隨後於2014年八月開始運作複循環發電機組，並於2016年七月開始投料進入氣化爐。計畫中燃料的平均熱值為 5290 btu/lb (4765-5870btu/lb)，約含水45.5% (42%-50%)、含塵12% (8.6%-17%) 及含硫1% (0.35%-1.7%)



圖 7 Kemper 氣化複循環電廠

肯珀計畫的主要方塊系統流程圖如圖8所示，含兩個輸送式氣化爐（Transport Gasifier, TRIG™）及兩個燃氣渦輪發動機（Siemens SGT6-5000F CTs）。TRIG™ 氣化爐是由美國能源部聯合南方電力公司和 KBR Inc.共同開發的煤氣化技術。該技術可利用褐煤進行氣化，轉換成潔淨氣體燃料，還能有效降低二氧化硫、二氧化氮、二氧化碳和汞的排放量，減少氣化過程對環境造成的衝擊。該系統預計可減少65%二氧化碳排放量，產生每 MWh 毛發電量（Gross electricity generation）捕獲 550 lb 二氧化碳，相當於一個同規模天然氣複循環發電站的排碳量。該系統每年可產生約380萬噸二氧化碳，可用於提高原油採收率（Enhanced oil recovery, EOR），同時會產生15萬噸硫酸及1.9萬噸氫。

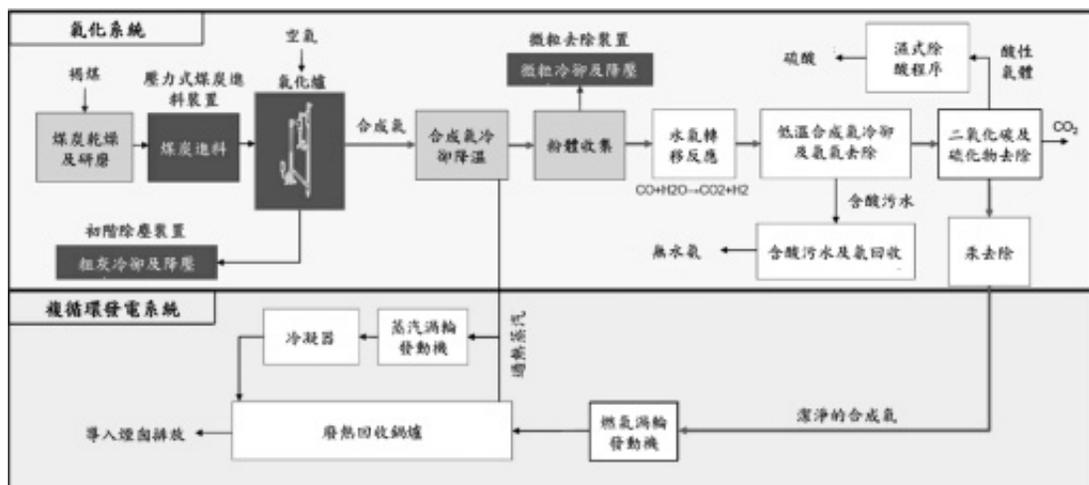


圖 8 Kemper 氣化複循環發電系統方塊流程圖

直到目前，該系統已建置完成，並於 TRIG™ 氣化爐內完成224天褐煤氣化測試，可操作於較大範圍的壓力、溫度、及褐煤進料速率，且已達到全系統操作運轉。氣化後富含氫氣的合成氣，可在兩個燃氣渦輪發動機發電；合成氣冷卻系統產生的過熱蒸汽，可用於蒸汽渦輪發動機發電。在此同時，該系統可同時產生二氧化碳、無水氨及硫酸。然而自 2010 年起，天然氣價格持續降低，使得該系統於 2017年6月停止運作（Operations suspended）。

在操作過程中歸納該系統目前仍存在的挑戰內容包含：

(一) 褐煤品質不一致

目前使用褐煤的含水量及粒徑常會超出該系統的設計範圍。此問題在經過改善後，每車進料褐煤的乾燥器已由三部降為兩部。

(二) 系統耐火泥碎裂

裝設於系統內的料封管（Seal leg）耐火泥，會在乾燥的過程碎裂，除了定期進行清除，需要進行進一步改善。

(三) 合成氣冷卻系統內的過熱器管線洩漏

合成氣冷卻系統內過熱器的 5 號盤管，因為設計的管線厚度不足以承受內部流體剪切力，造成系統漏氣。

(四) 酸性污水（Sour water）

合成氣水洗塔（Scrubber）會產生酸性污水，當較高褐煤進料量時，會使系統無法承受大量產生的酸性污水。此外酸性污水會造成水洗塔內部損害，應進一步改善系統內的煙囪塔盤（Chimney tray）。

(五) 產物純化系統內產生鹽類

當高褐煤進料率時，會產生酸性污水，造成氨純化系統內會產生銨鹽及亞硫酸氫鹽（Ammonium bisulfite salts），降低純化效率。應調整 pH 值，改善純化效能。

目前國際上正積極發展之淨煤發電技術，若要從應用發展潛力、能源效率及環保性能的觀點，確實達到減少電力部門所產生的二氧化碳排放，氣化複循環發電是具潛力的重要技術。若能克服技術及成本的問題，預期可成為國內外推廣的先進發電技術。

六、燃燒前二氧化碳捕獲程序於燃料及化學品合成之應用

燃燒前二氧化碳捕獲程序於液態燃料合成之應用，主要是在高溫和高壓下生成一氧化碳和氫氣後，經催化後合成液態碳氫化合物。合成氣於 2016 年的主要產

物及近年年均成長率（2011-2016）如表1所示。表中可知合成氣的主要應用是產製氨、甲醇、氫氣、費托燃料、氯化複循環電廠及合成天然氣，其中又以氨、甲醇及氫氣為大宗，分別生產1.8億噸、8.5千萬噸及4千萬噸。而自2011年至今的年均成長率則以甲醇居冠，共上升9.3%。合成氣原料的成本會直接影響後續衍生產品（如：甲醇、氨、尿素等）的生產成本。而世界各地的天然資源不同，會直接影響當地選擇何種合成氣生產的原料及製程。在天然氣價格持續上漲的區域（如：中國、印度、越南、美國、澳洲及印尼等地），開始發展劣質煤、生質物或廢棄物氯化來產生合成氣，以降低生產成本。另一種選擇則是以煤層氣（Coalbed methane）、緻密氣（Tight gas）、及頁岩氣（Shale gas）為原料生產合成氣。

表1 2016年合成氣市場及2011年至2016年年均成長率（Richard Hands, 2017）

合成氣衍生的產品或應用	2016 市場規模（百萬噸）	2011-2016 年成長速率（%）
氨	180	2.0
甲醇	85	9.3
氫氣	40	5.0
費托合成燃料	21	4.3
氯化複循環發電	~25	N/A
合成天然氣	~8	N/A

若以合成氣為原料轉製氨，2016年的總產量為1.8億噸，最終產物包含肥料（Fertilizer）、尿素（Urea）、硝酸氨（Ammonium nitrate）、磷酸一銨/磷酸二銨（Mono/di ammonium phosphate）、碳酸氫銨（Ammonium bicarbonate）、硫酸銨（Ammonium sulphate）及其他工業使用。這些產品需求以尿素佔最大宗，佔全部需求量的56%。若統計上述所有氨轉化產品的用途，這些產物最後作為農業肥料使用的佔比則為總產量可高達74%。

合成氣為原料轉製甲醇的第一座商業化示範廠，已由美國伊士曼（Eastman）化工公司之煤炭氯化廠於1997年4月在美國田納西州（Kingsport）正式運轉。直到2016年，合成氣轉製甲醇的年總產量為8.5千萬噸，其應用包含直接用於摻混汽油、甲基第三丁基醚/第三戊基甲基醚（Methyl tert-butyl ether, MTBE/Tertiary-amyl-methyl ether, TAME）、二甲醚（Dimethyl ether, DME）、生質柴油轉酯化（Biodiesel esterification）、甲醛（Formaldehyde）、乙酸（Acetic acid）及甲醇轉製烯烴類（MTO/MTP）。這些化學品最後應用於燃料的比例，佔總需求量的36%。其中又以中國過去十年來，對甲醇轉化燃油的成長速率最高。目前，世界上只有中國大規模採用焦爐煤氣製甲醇技術。焦爐煤氣製甲醇的關鍵技術，是將焦爐煤氣中的

甲烷及少量多碳烴轉化爲一氧化碳和氫氣。基本程序是將焦爐煤氣經低壓壓縮，然後進行有機硫加氫氣轉化爲無機硫，經脫硫後加壓催化部分氧化，使焦爐氣中的烴類進行轉化，產生一氧化碳和氫氣，再加壓合成粗甲醇，最後經過精餾產出產品甲醇。除了將合成氣轉甲醇作爲燃油，相較於其他甲醇轉化產品，甲醇轉化爲烯烴類於近年來亦有顯著成長，其成長趨勢預估如圖9所示。

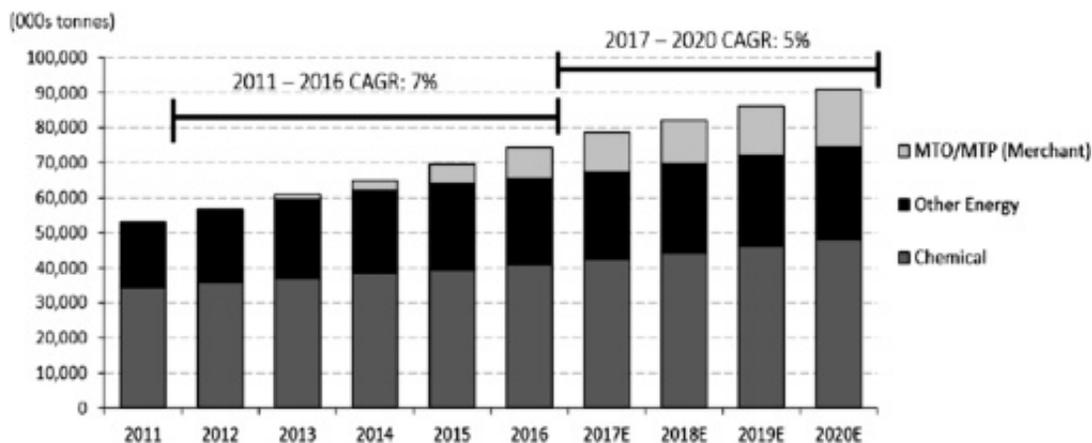


圖 9 甲醇轉化爲烯烴類成長趨勢預估

若以合成氣爲原料轉製氫氣，2016年的總產量爲4千萬噸，主要用於石化產業精煉製程中的氫化處理（hydrotreating）及加氫裂解（hydrocracking）。根據統計，幾乎所有精煉製程的氫氣都是來自於天然氣，因此有將近85%的精煉製程均設置於天然氣產地，以降低生產成本。

其他合成氣的應用，如：費托合成燃料、氣化複循環電廠、及合成天然氣，2016年的總需求量爲約爲5千4百萬噸。其中費托合成技術最初是由德國科學家 Franz Fischer 和 Hans Tropsch 所發展，其製程是以鈷、鐵或鎳爲基礎之觸媒，將合成氣轉化成直鏈烷烴、烯烴、少量芳香烴、水和二氧化碳。該技術可分爲低溫（Low temperature Fischer-Tropsch, LTFT）與高溫（High temperature Fischer-Tropsch, HTFT）兩類，低溫轉化的操作溫度及壓力約在220-260°C及10-45atm，以生產柴油爲主；高溫轉化操作溫度則約在320-350°C，操作壓力約25atm，可產生汽油、柴油、及烯烴化合物。目前產製費托燃料於南非、馬來西亞、卡達、中國及奈及利亞已有大型化應用。而氣化複循環電廠自1990及2000年以來，亦已有示範廠，但上述兩項應用因製備成本較高及石油價格降低的問題，使得這些技術無法普及運用。合成天然氣則是因爲成本及該技術環境衝擊的問題，亦無法達到商業運用的規模。

七、結語

全球能源需求及人口勢必持續增長，在此狀況下要兼顧能源安全及環境保護，勢必依據世界各國的擁有的資源及國情制訂能源及減碳政策。台灣目前的能源政策是「積極開發綠色新能源，希望在 2025 年再生能源發電量占總發電量的比例達 20%」，並希望能「建立低碳永續、高質穩定、效率經濟的能源體系」，在積極發展再生能源的同時，逐漸使用低碳燃料作為能源之用。然而能源結構轉移是一個漫長的路程，而在能源結構轉移的過程中，煤炭和化石燃料依然會是主要能源。為了維持產業之競爭力，同時兼顧二氧化碳減量，我國應及早進行二氧化碳捕獲技術之研發，以減少對經濟及產業發展所產生的衝擊。

在煤炭燃燒前可透過洗選技術改善煤炭品質，若要提高燃煤鍋爐的運作效率，可以使用煤炭氣化複循環的先進發電技術，將煤炭轉成合成氣後，推動氣渦輪發電機及蒸氣渦輪機進行發電，是目前具潛力的方式。燃燒前二氧化碳捕獲程序產生的合成氣亦可用來產製液態燃料，目前主要轉製燃料以甲醇為主，在未來化石能源逐漸枯竭的狀況下，石油及天然氣價格勢必不斷上升，同時帶動甲醇價格不斷攀升。此外過去合成氣轉製燃料研究均是以製程放大為主，但全球各區域的天然資源及對產品的需求量均不同，因此應考量原料成本、生產成本、運輸成本、系統建置成本等因素，設計產品的最適化的生產規模，方能創造該產品的最高價值。

八、參考文獻

- [1] 政府間氣候變化專門委員會，2013，第五次氣候評估報告（The Fifth Assessment Report）。
- [2] International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2017（2017）
- [3] 行政院環保署，2015，中華民國（臺灣）「國家自定預期貢獻」。
- [4] 經濟部，2017，能源轉型路徑規劃。
- [5] Metz, B.; Davidson, O.; de Coninck, H.; Loos, M.; Meyer, L. (eds.) (2005) . IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage; Cambridge University Press: New York, USA.
- [6] 徐恆文，「二氧化碳的捕獲與分離」，科學發展，413 期，pp.24-27（2007）。
- [7] 余建成，「先進發電技術與二氧化碳排放減量」，中興工程季刊，108 期，pp. 67-75（2010）。
- [8] Richard Hands, Syngas Market Drivers , 2017 Syngas Technologies Conference（2017）。

鍋爐因補充水水質嚴重異常而 衍生同質性大量破管的案例探討

宋朝鐘

一、前言

本文將以一座擁有兩部發電機組，其裝置容量各為66MW 的電廠（以下稱 C 電廠，一號機與二號機）為例，探討該廠兩座鍋爐同時發生同質性大量破管之肇因－補充水水質嚴重異常，並提供相關的水質管理與化學清洗心得分享。

在電力系統調度上，這兩部機組被列為第三順位的基載運轉機組，委託具有豐富運轉與維護經驗的外國公司做績效管理的工作，輪班運轉與經常性維護工作則由電廠內部員工與該公司修護處負責，大項的歲修或改善工程則發包委外執行。

兩座鍋爐是屬自然循環，平衡通風，再熱式鍋爐，設計壓力/溫度分別為 1,850psig/1000°F，鍋爐連續最大蒸發量為 450,024lbs/hr。本事故案例發生於 2016 年 9 月，兩座鍋爐會同時發生大量破管，檢討歸因為下列一連串的失誤所造成：

- (1)公司管理高層決策錯誤－為了節省水費支出，在未詳細評估可行性下，卻突然決定改變水源，而新水源之水質嚴重偏離既有水廠造水設備之設計規範。
- (2)績效管理團隊誤判肇因－生水水源改變後，補充水、給水及鍋爐水等一系列的水質均發生異常，卻誤信值班員報告，將鍋爐水 pH 異常升高，歸因於磷酸鹽加藥過量。
- (3)水處理設備操作人員專業知識不足、警覺性也不夠－連續十幾天補充水、給水及鍋爐水的水質均處於極端異常的狀態，鍋爐仍持續運轉。
- (4)未及時發現異常肇因，並掌握停爐化學清洗的時機。

本文內容將聚焦在下列心得分享：

- (1)闡述事故案例發生的經過與結果
- (2)鍋爐補充水、給水、與鍋爐水的管理
- (3)水質不佳對鍋爐的影響
- (4)鍋爐化學清洗的時機
- (5)鍋爐化學清洗的方式

二、事故案例發生的經過與結果

(一)公司管理高層決策錯誤

C 電廠所在地擁有兩家自來水公司，該廠的生水水源，長期由當地的甲自來水公司供應，水質尚屬良好穩定，亦符合 C 電廠造水設備（RO+EDI）的設計規範，但水價為乙自來水公司的二倍。該廠區日用水量約 6~8 萬加侖（包含約 4 萬 5 千加侖的日用鍋爐補充水）。為降低發電成本，決策高層並未周詳的評估乙公司的水質是否符合該廠 RO+EDI 的設計要求，以及乙公司水質的穩定性，貿然決定由乙公司供水，但乙公司的生水取自井水，每口井水的導電率（參考表 1）幾乎都超過該廠造水設備（RO+EDI）的設計容許值（400 μ S/cm），再加上該廠兩串造水設備的造水能力，事故發生前已接近飽和狀態，有一些耗材已需要更換或再生。生水由乙公司供應後，所造的補充水明顯超出限制值（參考表 2）。在改變水源約 2 個星期後，兩部鍋爐即陸續發生同質性的大量破管，停爐搶修時間最高達 21 天，發電損失慘重。

表 1 各水井之導電率季報表

水井編號	導電率 μ s/cm	水井編號	導電率 μ s/cm	水井編號	導電率 μ s/cm
A-1	610	M-20A	680	Y-1	529
A-3	600	M-21	828	Y-3	493
A-4	854	M-23	459	Y-4A	569
A-5	573	EX-11	616	Y-5	742
A-6	620	D-1	701	Y-7	603
A-8	542	D-2	689	Y-8	584
A-9	1586	D-4	613	Y-10	577
A-10	1348	D-6	637	Y-15	379
A-13	2100	D-7	643	F-15&16	459
A-14	1356	D-8	1330	F-18	438
A-15	992	D-11	683	F-19	1280
A-17	1127	D-12	416	F-20	1252
A-18	1560	D-14	567	AG-1	533
A-19	1886	D-15	721	AG-2A	453
A-21	1524	D-16	710	HGC-2	447
A-23	579	D-19	596	H-1	1137
A-25	552	D-20	629	SRSP	410
A-30	599	D-21	584	FENA	282
A-31	602	D-24	620	UGUM	119
A-32	572	D-25	425	NAS-1	843
M-4	483	D-26	795	GiAA-1	574
M-8	448	D-27	422	GiAA-2	521
M-18	536	EX-5A	600		

表 2 鍋爐水與補充水之水質分析表

標準 日期	一號機鍋爐水				二號機鍋爐水				一號凝結水槽				二號凝結水槽			
	pH	導電率 Conductivity	矽土 Silica	磷酸鹽 PO ₄	pH	導電率 Conductivity	矽土 Silica	磷酸鹽 PO ₄	導電率 Conductivity	矽土 Silica	磷酸鹽 PO ₄	導電率 Conductivity	矽土 Silica	導電率 Conductivity	矽土 Silica	
08/18/2016	10.47	75	380	1	9.1-9.4	79	310	0.8	8	0.8	8	---	---	---		
08/19/2016	10.37	93	215	0.7	10.43	78	170	0.97	6	0.97	6	---	---	---		
08/20/2016	10.53	109	253	0.6	10.42	90	227	0.4	30	0.4	30	---	---	---		
08/21/2016	10.63	190	243	0.5	10.61	165	213	0.37	60	0.37	60	20	20	20		
08/22/2016	10.81	205	253	0.57	10.58	172	223	0.5	51	0.5	51	20	20	20		
08/23/2016	10.92	348	295	0.57	10.67	208	233	0.6	51	0.6	51	20	33	20		
08/24/2016	10.98	335	460	0.5	10.57	195	244	0.47	39	0.47	39	20	32	20		
08/25/2016	10.98	404	471	0.6	11.05	344	400	0.65	71	0.65	71	407	44	333		
08/26/2016	10.91	362	463	0.77	10.8	268	319	0.6	89	0.6	89	523	47	745		
08/27/2016	10.97	511	270	0.67	10.97	430	253	0.6	96	0.6	96	673	54	795		
08/28/2016	11.15	594	247	0.63	11.03	424	193	0.6	129	0.6	129	981	63	525		
08/29/2016	11.13	620	206	0.7	11.01	371	167	0.57	95	0.57	95	598	81	711		
08/30/2016	10.8	321	141	0.57	10.92	351	135	0.6	71	0.6	71	621	57	537		
08/31/2016	11.5	1085	228	0.53	11.51	1194	171	0.56	281	0.56	281	770	173	675		
09/01/2016	11.69	351	363	0.6	11.52	2153	245	0.53	522	0.53	522	772	385	634		
09/02/2016		鍋爐破管停爐搶修			11.91	2678	233	0.9	537	0.9	537	1428	432	1594		
09/03/2016		鍋爐破管停爐搶修			11.81	2422	187	0.47	572	0.47	572	2059	483	1853		
09/04/2016		鍋爐破管停爐搶修			11.75	2543	193	0.7	565	0.7	565	1908	484	1885		
09/05/2016		鍋爐破管停爐搶修			11.66	1581	190	0.6	542	0.6	542	1814	539	2067		
09/06/2016		鍋爐破管停爐搶修			11.23	762	143	0.45	582	0.45	582	1781	345	1388		
09/07/2016		鍋爐破管停爐搶修				鍋爐破管停爐搶修			---		---	---	---	---		
09/08/2016		鍋爐破管停爐搶修				鍋爐破管停爐搶修			---		---	---	---	---		
09/09/2016		鍋爐破管停爐搶修				鍋爐破管停爐搶修			---		---	---	---	---		
09/10/2016		鍋爐破管停爐搶修				鍋爐破管停爐搶修			---		---	---	---	---		
09/11/2016		鍋爐破管停爐搶修			11.07	1046	508	0.4	0.92	0.4	0.92	2.5	1.31	9.5		
09/12/2016		鍋爐破管停爐搶修			10.72	482	144	1.9	0.48	1.9	0.48	5	0.62	15		
09/13/2016		鍋爐破管停爐搶修			10.64	133	203	0.7	0.55	0.7	0.55	19	0.61	14		
09/14/2016		鍋爐破管停爐搶修			10.31	81	165	0.25	0.37	0.25	0.37	8	0.38	18.5		
09/15/2016		鍋爐破管停爐搶修			10.16	81	233	0.2	0.35	0.2	0.35	16	0.33	6.67		
09/16/2016		鍋爐破管停爐搶修			10.21	63	410	0.23	0.25	0.23	0.25	10	0.31	10		
09/17/2016		鍋爐破管停爐搶修			9.95	39	533	---	---	---	---	---	---	---		
09/18/2016		鍋爐破管停爐搶修			9.7	32	577	---	---	---	---	---	---	---		
09/19/2016	11.09	454	697	0.13	9.82	31	576	---	---	---	---	---	---	---		
09/20/2016	10.36	190	751	0.17												

檢討：

- (1)乙自來水公司擁有 129 口井，生產中的則有 92 口。事故發生後，乙公司聲稱供給 C 電廠的水是選用導電率在 500 μ S/cm 以下的那 12 口井（編號 M-4、M-8...SRSP 等）供水，其中僅編號 Y-19 的那一口井，導電率略低於 C 電廠 RO+EDI 的設計容許值 400 μ S/cm，但亦高達 379 μ S/cm，其餘的 11 口井導電率均高於 400 μ S/cm。由 RO+EDI 的出口水質紀錄，合理懷疑乙自來水公司的供水，並非全部取自所謂的那 12 口井。
- (2)水中的雜質增加會提高水的導電率，高導電率的淡水表示水中的總溶解固體（TDS）含量高。
- (3)經水廠造水設備處理後的補充水，其導電率與 Silica 要求標準分別為 < 0.5 μ S/cm 與 < 20ppb，由甲公司供水時，導電率與 Silica 都能符合前述標準。惟改為乙公司供水時，導電率由 2 μ S/cm 升至 582 μ S/cm，Silica 則由 20ppb 升至 2,067ppb。嚴重汙染鍋爐管，導致鍋爐在短期間發生大量的同質性破管。
- (4)溶液的 pH 值和導電率，兩者之間是有一定的關係，但 pH 值並非為影響導電率的唯一因素。而強酸性（或強鹼性）溶液確具有高導電性。

甲、績效管理團隊誤判肇因

C 電廠鍋爐水的 pH 值，正常應控制在 9.1~9.4 間，但生水由乙自來水公司供給後，值班員發現兩部機的鍋爐水 pH 值異常升高（參考表 2），在 10.28 以上，自認為是磷酸鹽加過量所致（實際上鍋爐水的 PO₄ 濃度並無異常，參考表 2），於是報告績效管理團隊，管理團隊則直接指示，請其開大連續沖放閥，增加鍋爐沖放量，並停止加磷酸鹽，試圖降低 pH 值，但數日後仍未見 pH 值下降，還持續上升（最高曾達 11.91），才警覺到事態嚴重，進而查出補充水水質出了大問題，即 RO+EDI 對乙公司所供應的生水，無法造出好水，但為時已晚。

檢討：

- (1)兩部鍋爐的磷酸鹽注入管路是各自獨立的，且各鍋爐視需要才加藥，會兩部鍋爐同時過量，機率不大，第一時間應判斷另有其他原因，且顯然是共同肇因。
- (2)事實上，鍋爐的容積要比鍋爐連續沖放量要大很多，既使異常肇因排除（停止加磷酸鹽），短時間內也不可能將鍋爐水的 pH 值恢復正常，更何況水源水質持續不佳。

乙、水處理設備操作人員專業知識不足、警覺性不夠

不論鍋爐水、給水和補充水，值班人員每 8 小時都要記錄水質一次，如 pH、

導電率、Silica (矽土) 等，紀錄表顯示兩部機水質均明顯異常十幾天 (參考表 2)，且未見改善。

檢討：

C 電廠水廠造水、水質分析、加藥等工作，都是由同崗位的值班員來操作、監視、分析、紀錄，四班輪值，每班上班八小時，即有 4 名值班員身歷其境，但不論生水、補充水、給水與鍋爐水均同時明顯異常十幾天，而未見改善，顯然專業不足與警覺性不夠，需再教育再訓練。

丙、未及時發現肇因，並掌握停爐化學清洗的時機

鍋爐是發電機組的心臟，產生蒸汽的爐管，其總長度可能達數百公里之長，任何爐管若發生問題都會導致停爐，如果鍋爐用水受到嚴重污染，必須儘快停爐進行化學清洗，並找出肇因，採取必要的矯正措施，否則會導致同質性的破管持續發生。

檢討：

- (1) 根據前一次鍋爐歲修，兩部鍋爐切管取樣分析的結果，顯示一、二號鍋爐的爐管平均結垢物厚度分別為 25.2mg/cm^2 與 27.7mg/cm^2 ，均達到建議下次機組歲修時，鍋爐應安排化學清洗的水準，這次的水質異常無疑是雪上加霜。若與上上次歲修時取樣的分析結果比較，結垢物厚度是呈緩慢且穩定成長的趨勢。
- (2) 水質異常十幾天後，針對破管取樣分析，估計的結垢物厚度，一、二號機分別為 567.4mg/cm^2 與 813.57mg/cm^2 ，遠超過應採取化學洗的建議值。結垢物成份分析主要含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 Fe_2O_3 、 Cu ，這些結垢物成份都是熱的不良導體，會影響管壁的熱傳遞，導致爐管金屬劣化，終致過熱與管壁減薄。
- (3) 若能及早發現水質已嚴重異常，並斷然停爐採取鍋爐化學清洗，清除那些沉積附著在管壁上的水垢，並藉此在爐管內壁上再建立一層氧化層保護膜，則可避免破管事故擴大。

三、鍋爐水、給水與補充水之管理

(一) 鍋爐水 (Boiler water)

鍋爐水係指鍋爐內循環的水。

鍋爐用水必須是純淨且經處理過的，以抑制水垢的形成、腐蝕與雜質汙染蒸汽。有兩種很普遍的方法可用來最佳化鍋爐水化學。第一，水中的雜質可藉由淨化的補充水、冷凝水淨化器、去氧、與鍋爐水排放來達到最小化。第二，

加化學品來控制pH值、電化學電位和含氧濃度。除此之外，加化學品亦可抑制水垢的形成與腐蝕。正確的水化學控制可改善鍋爐的效率，並降低維護與零組件更換的成本。它亦可改善熱交換器、泵浦、汽機、蒸汽產生與使用、以及冷凝水循環等管路的性能與壽命。鍋爐水運轉限制值，請參考表3。

表3 鍋爐水限制值

鍋爐水限制值	汽水鼓操作壓力 (kg/cm ²)		
	61-100	101-165	165-205
總溶解固體 (ppm)	≤ 100	≤ 50	≤ 15
比導電率 (25°C) (μs/cm)	≤ 200	≤ 100	≤ 30
殘留磷酸鹽 (ppm)	≤ 5-20	≤ 5-10	≤ 2-6
pH 值 (25°C)	9.1-10	9.1-9.8	9.1-9.6
二氧化矽 (ppm)	< 0.02	< 0.02	≤ 0.01

總溶解固體 (Total Dissolved Solids, TDS) 是淡水來源中的總溶解固體的量。它包含通常可以通過2微米過濾器的有機物與無機物。實際上是可藉由導電率來衡量其大小。陽離子和陰離子會放出電荷，是"導電率"的來源。

導電率係指物質擁有電流的能力。大部分的時間水是可測到導電率的，並以μS/cm 為單位測量之。純水不具電荷，但含有礦物質和鹽的水則有。因此導電率與水中含鹽和礦物質的量有關。水中的含鹽量稱之為 TDS 或總溶解固體，以 ppm 來衡量之，也可轉換為 mg/L。

硬度係指水中鈣和鎂的含量。硬度溶液會具有導電率，並且以當量 CaCO₃ 單位表示其他的硬度值，以及以 ppm 為單位表示 TDS 值。

1. 鍋爐水之 pH 值控制

鍋爐運轉中應維持鍋爐水和給水的 pH 值。從 pH 值可以知道水的腐蝕性質，因為它顯示水質是鹼性的，中性的或酸性的。但是 pH 值並不顯示水中鹼性或酸性含量的數量。

pH 值的範圍是介於0到14。如果 pH 值在中間值 (pH =7)，那麼水質是中性的。如果 pH 值小於7，那麼水質就是酸性的，而 pH 值大於7，則水質是鹼性的。pH 值也表示氫離子和氫氧根離子的濃度。氫離子在酸性水中佔優勢，氫氧根離子則在鹼性水中佔優勢。

鍋爐水與給水的 pH 值，一般要求在7以上，介於8.5~9.8間，視使用爐管的金屬材料而定。保持鍋爐水呈微鹼性是控制鍋爐水腐蝕的主要因素。微鹼性的 pH 值會使鍋爐管表面形成一層氧化膜，保護爐管母材，防止更進一步的

腐蝕，並可使破裂的保護膜癒合。pH 值控制涉及氫氧化鈉與磷酸鈉鹽的加入量，應小心的控制其量。與大多數的鍋爐水處理一樣，加入超量的化學品，其對鍋爐的損害，遠大於加不足的量。因此，連續的監測 pH 值是鍋爐化學品控制製程的重點部分。

2. 鍋爐水高導電率

可能原因：

- (1) 鍋爐連續排放量太小
- (2) 冷凝器海水洩漏
- (3) 補充水（除礦水）水質不良
- (4) 補充水 pH 值太低

影響：

若持續一段時間，會導致爐管嚴重結水垢。

補救措施

- (1) 開大鍋爐連續排放閥
- (2) 增加磷酸鹽的量
- (3) 若確認係冷凝器洩漏，停機處理
- (4) 若連續充放閥以開啓卻無流量顯示，檢查連續排放閥是否出問題
- (5) 監視與控制補充水的水質

良好的鍋爐水處理須具備下列三個基本的要求：

- (1) 溶氧濃度必須加以控制，以降低會造成碳鋼管點蝕之氧腐蝕電荷形成的可能性，
- (2) 必須保持高 pH 值，足以使碳鋼一般腐蝕最小化，但不能高到會發生苛性攻擊，
- (3) 外部的處理系統應適當的將溶解固體與懸浮固體的進入降至最低的程度，和/或內部的處理系統必須用來控制這些物質。

(二) 鍋爐給水 (Boiler feed water)

鍋爐給水係指離開冷凝器熱井，經冷凝水泵、低壓加熱器、除氧器、高壓加熱器至鍋爐省煤器進口的水。

爲了保持鍋爐的完整性和性能，並提供合適汽輪機或製程純度的蒸汽，鍋爐給水必須經過淨化和化學處理。可供應的給水，其雜質的含量與性質，端視鍋爐的操作壓力、鍋爐設計、蒸汽純度要求、鍋爐水內部處理的類型、鍋爐水排放量、以及給水是否用於蒸汽減溫而定。給水控制的化學參數包括溶解固體、

pH 值、溶氧、硬度、懸浮固體、總或有機碳、油、氯化物、硫化物、鹼度、以及酸或鹼形成的趨勢而定。低壓鍋爐最少必須是軟化水，高壓鍋爐最少需除礦水。它必須沒有氧氣，基本上沒有硬度成分和懸浮固體。建議的給水限制值，如表 4 所示。使用高純度的水會最小化鍋爐水排放的需求，且會將整個蒸汽-水系統的夾帶、沉積與腐蝕等問題降至最低程度。

表 4 建議的給水限制值

壓力	汽鼓式鍋爐						貫流式鍋爐		
	15-300 0.1-2.07	301-600 2.08-4.14	601-900 4.14-6.21	901-1000 6.21-6.9	1001-1500 6.9-10.34	> 1500 > 10.34	AVT all	AVT* all	OT all
pH (所有鐵製加熱器)	9.3-10.0	9.3-10.0	9.3-10.0	9.3-9.6	9.3-9.6	9.3-9.6	9.3-9.6	9.3-9.6	8.0-8.5
pH (所有銅製加熱器)	8.8-9.2	8.8-9.2	8.8-9.2	8.8-9.2	8.8-9.2	8.8-9.2	8.8-9.2 **	8.8-9.2	NA
總硬度(CaCO ₃) ppm	< 0.3	< 0.2	< 0.1	< 0.05	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.001
氧 *** ppm	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	0.03-0.15
鐵 ppm	< 0.1	< 0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.005
銅 ppm	< 0.05	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.005	< 0.002	< 0.005	< 0.002	< 0.001
總有機物 ppm	< 1.0	< 1.0	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.200	< 0.200
陽離子導電度 μ S/cm	-	-	-	-	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.15	< 0.15
附註： * 全部的揮發物處理 (AVT) **AVT 不建議用於銅製循環和汽水鼓壓力低於 400psig 的低給水 pH 值者 *** 化學清除殘餘物之前先機械式除氧 ppm : mg/kg OT : Oxygen Treatment									

在這些準則的限制值內操作，並不保證會沒問題的運轉。有些給水的污染物包括鈣、鎂、有機物、碳酸鹽等，在濃度低於工業鍋爐常用檢測分析方法的下限時會產生問題。另外，操作員必須對給水化學和鍋爐運轉狀況的變化具敏感度，並且必須相應地進行調整。

(三) 補充水 (Makeup water)

補充水係指儲存水廠造水之凝結水槽（除礦水槽）至冷凝器熱井進口間的水。生水係指水廠進口的水。

鍋爐給水通常是蒸汽做功後所凝結的水、與新鮮補充進來的水的混合。對公共事業用鍋爐而言，大部分的蒸汽會凝結回收，僅需要 1-2% 的補充水。然而，有些工業用的循環，僅有少量甚至沒有回收的凝結水，所以可能多達 100 % 的補充水是需要。

補充水的化學要求，取決於回收蒸汽凝結量和品質。大部分的給水是未受污染的冷凝水，通常補充水的純度可低一些，只要凝結水與補充水的混合能符合鍋爐給水的要求即可。各類化學物質在給水中的濃度為凝結水與補充水濃度的加權平均值：

給水濃度 = (凝結水濃度 × 凝結水流量 + 補充水濃度 × 補充水流量) / 總給水流量

補充水淨化設備的選擇必須考慮水質的化學要求、生水的成分以及補充水要求的品質。所有的天然水都含有溶解與懸浮物質。雜質的類型和數量隨著來源而不同，如湖泊、河流、水井或雨水，以及水源的所在位置。源水中主要的溶解化學物質包括鈉、鈣、鎂等陽離子，以及碳酸氫鈉、碳酸鹽、硫酸鹽、氯化物、矽酸鹽等陰離子。有機物也豐富。

水淨化的第一步驟是懸浮物的凝結和過濾。在靜水中自然沉澱去除較粗的懸浮固體，需要沉澱的時間取決於粒子的比重、形狀與大小，以及沉澱池中的水流。沉澱和過濾可以藉由凝結加速（使用化學物質會造成小顆粒團聚，形成能更快沉澱的大顆粒）。典型的凝固化學品是明礬和硫酸鐵。凝結和沈澱後的水，通常會通過過濾器。水被氯化會殺死微生物，然後活性炭過濾器可以用來去除最後微量的有機物和過量的氯。

接著，可以使用不同的過程來移除水垢—從水中形成的成分（硬度礦物）。對於一些低壓的鍋爐，硬度礦物與水垢（形成礦物質）的移除是足夠的。對於其他的鍋爐，所有溶解固體的濃度必須減少或幾近消除。對低壓鍋爐而言，必須將去除的資金和運轉成本與殘留溶解固體和硬度相關的成本進行權衡。這些包括鍋爐水處理所增加的成本、鍋爐更頻繁的化學清洗、可能更多的鍋爐修理次數。對於高壓鍋爐，建議的除礦水質是要接近沒有任何的溶解固體，尤其是鍋爐操作壓力大於 1000psi（6.9MPa）者。

四、水質不佳對鍋爐的影響

縱使補充水、給水與鍋爐水的水質均控制維持在限制值以下，鍋爐經長期運轉，爐管內壁也會生成水垢，但成長的速度會非常的緩慢，也可藉由化學洗清除之。若水質偏離限制值越多，結垢的速率就會越快。若鍋爐管的內表面附著過量

的結垢物或沉積物，由於這些結垢物或沉積物的熱導係數很低，僅約為爐管管壁金屬的5%，在相同的運轉條件下，既相同的熱通量下，會使管壁的金屬溫度上升，即結垢愈厚管壁金屬溫度愈高，而發生高溫潛變，並加速爐管腐蝕，終致應力破壞或水測腐蝕破壞等機制的破管。故應適時的實施化學清洗，以清除這些結垢物或沉積物，使爐管金屬溫度回降至安全範圍內。又結垢愈厚管壁金屬溫度愈高，結垢的成長速率也會愈快，惡性循環。

五、鍋爐化學清洗的時機

隨著科技的進步，已大大地提升現代鍋爐的可靠度，也改善鍋爐給水的品質，基本上會減少許多公用事業用鍋爐化學清洗的需求，從而延長了鍋爐化學清洗的間隔時間。然而，即使遵循鍋爐水處理的標準去操作，鍋爐管水側的內表面（包括水牆，對流通路，供應管，集管，汽水鼓和省煤器等）也會積聚一些沉積物，但在正常的運轉操作條件下，這些聚積物的成長速率是緩慢的，並可安全的以化學清洗的方式清除之。但因冷凝器洩漏海水或其他突然的水質異常，所造成的負面影響，則難以預期。因此水質的管理與決定鍋爐化學清洗的時機，為鍋爐操作與維護人員必須去探討的課題。

(一)鍋爐化學清洗的目的

在於安全的去除鍋爐管內的沉積物。

(二)化學清洗的效益

鍋爐化學清洗可以：

1. 改善鍋爐的效率
2. 減少鍋爐破管的次數
3. 及鍋爐化學的穩定性

(三)化學清洗的危害

1. 對於維護人員是具危險性的，
2. 不當的化學清洗會對鍋爐造成嚴重損害，
3. 其他危害尚包括化學廢棄物（廢液）、環境損害和化學藥劑洩漏的風險。

(四)評估化學清洗風險

在決定採用化學藥劑清洗鍋爐時，要記住化學清洗是：

1. 昂貴的（以一座運轉壓力、溫度分別為 1850Psig, 1000°F 且連續最大蒸發量為 450,024lbs/hr 的離島鍋爐而言，化學清洗和廢液處理的估計成本分別約為新台幣

幣 1200 萬和 900 萬) ，

2. 對工作人員和設備具有潛在的危險性，
3. 有化學藥劑洩漏及汙染環境的風險，
4. 有廢液與廢棄物處理問題，
5. 耗時（約增加停爐時間一周）。

(五)鍋爐什麼時候要實施化學清洗

過去，最常見的準則是：

1. 以取樣爐管管內的沉積物的量

這是最常被採用的準則。通常在鍋爐歲修時，於鍋爐最高熱通量（Heat Flux）區域，截取 2 ~ 4 支水牆管當樣本，分別對其管內沉積物（以 mg/cm^2 表示）進行的分析，並以樣本管迎火面的沉積物平均值與表 5 進行比較。

表 5 建議鍋爐化學清洗指引（錄自 B&W STEAM 一書）

鍋爐運轉壓力 (psig)	水測迎火面沉積物重量 * (g/ft^2)
< 1000	20~40
1000~2000	12~20
> 2000	10~20

* 係以機械刮除火側單位面積沉積物的重量 ($1\text{g}/\text{ft}^2=1.07\text{mg}/\text{cm}^2$)

2. 以時間做基準

- (1)過去，有一些鍋爐業者是不管鍋爐運轉的時間，以及鍋爐管內沉積物的狀況，而是依據既定的時間表（自上次鍋爐化學清洗以來的間隔年數），進行鍋爐化學清洗。
- (2)基本上，這是較差的方式。因隨著時間的推移，沉積物不會以均勻的速率在鍋爐內管壁上形成。一般鍋爐化學清洗後，鍋爐管內會立即產生一層約 $3\sim 5\text{mg}/\text{cm}^2$ 的磁鐵礦 (Fe_3O_4) 保護膜，會抑制爐管母材的進一步腐蝕。隨著時間的推移，新的沉積物會聚集附著在這層保護層上面。這些沉積物通常來自鍋爐的給水。鍋爐的起動與停爐，可為鍋爐管壁增加大量的沉積物。因此鍋爐起停的次數比運轉小時數更能代表管內沉積物密度的預測指標。
- (3)以時間為基準的清洗方式，是不考慮自上次鍋爐化學清洗以來的水化學性質是好還是壞，或沉積物的量。這期間若水化學控制特別差，沉積物的量會異常的高。在這種情況下，應該增加清洗的頻率。反之亦然，化學清洗則可以延遲數年再實施。

3. 偶發的水質異常狀況

- (1) 這個標準經常被忽視，尤其是對那些按照既定的時間表做化學清洗的業者。如果鍋爐用水受到嚴重污染，則必須儘快在下一次停爐機會進行化學清洗，最好在重新起動鍋爐之前進行。
- (2) 最常見的污染事件是從冷凝管洩漏海水，或軟化水設備故障引起鍋爐水中的鈣硬度，污染的過程中會產生腐蝕電池，而導致爐管腐蝕和氫脆，在此情況下，爐管內壁損害的風險遠超過化學清洗的風險。

(六) 延後下一次清潔時間

1. 必要的鍋爐化學清洗是視鍋爐管壁上積聚的腐蝕產物而定。當鍋爐和給水系統所產生的腐蝕產物越多，設備越需要化學清洗。減少這些區域的腐蝕可以改善整個鍋爐的化學反應，延長清洗的時間間隔。
2. 在鍋爐起動時，鍋爐管壁上所建立的腐蝕產物大部分係來自鍋爐給水系統。改善鍋爐的封爐與起動的作法，可延長必要的鍋爐化學清洗。

(七) 只在需要時才實施鍋爐化學清洗

化學清洗是確保鍋爐安全和高效運轉的方法之一。但必須注意，只有在必要時才做鍋爐化學清洗。沉積物的量或因汙染而需化學清洗的技術準則，可用來決定何時鍋爐需做化學清洗。改善鍋爐水與給水化學，以及鍋爐封爐與起動的作法，可延長必要的化學清洗間隔時間。同樣地，這些技術與做法也可以節省一些錢，並有助於減少受迫性的停爐。

(八) 延後化學清洗的後果

1. 如果沉積物的量顯示已需要化學清洗，就是該做的時候了。拖延清洗在許多層面上是不利的，
2. 首先，對鍋爐管會造成的損害。沉積物下方的金屬腐蝕速率與金屬長期過熱之損害是指數的，而非線性的。延後已髒的鍋爐一年或兩年才做化學清洗會導致重大的損壞。
3. 第二，不會如想像的省錢。因為，清潔非常髒的鍋爐要比清潔剛達到“清潔建議”範圍的鍋爐要貴得多。如增加溶劑的成本，延長清潔管子的時間，更多的清潔步驟，延後機組啟動的時間，以及處理更多量的廢液，都是延後清洗的後果。

六、鍋爐化學清洗的方式

鍋爐化學清洗的方式可分為鹼洗與酸洗。

(一)當鍋垢成份中的 Fe_2O_3 與Cu的比值小於 1.8 時，即銅的含量太多時，易造成銅之回鍍現象，此時宜採用鹼洗方式。

(二) 酸鹼洗概略比較

鍋爐化學洗方式	鹼洗	酸洗
適用	貫流式、汽水鼓式鍋爐	貫流式、汽水鼓式鍋爐
洗淨成本	高	較低
循環溫度	高溫 150°C 循環時，鍋爐必須點火。	低溫 60-80°C (使用輔助蒸汽加熱)
循環	洗淨期間允許鍋爐再點火，容易形成自然循環，可提高洗淨效果。 可長時間循環，增進洗淨效果。 管路洩漏可暫時停止循環做處理。	
廢液處理	COD 高，不易化學處理，須採燃燒或蒸發方式處理。	COD 低易於化學處理
整體清洗時間	較長	較短
藥液	單種藥液就可除鐵、除銅及防銹膜建立，若藥液濃度不夠可隨時加藥。	
藥性	溫和，對人體的危害低，亦不會傷及設備造成洩漏、不會產生氫氣，無爆炸危險。	
對爐管母材的腐蝕率	低	高

(三)依 C 電廠抽樣檢測結果報告，氧化物以層狀結垢含鐵的氧化物為主，亦檢測出 Ca、Fe、Mg、Si、 $Ca(OH)_2$ 等，酸洗程序如檸檬酸等有機酸，可適合溶解鈣、鎂的碳酸物、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等結垢物。

七、結語

(一) C 電廠水廠 RO+EDI 設備是以甲自來水公司的水質當設計規範，改變生水的水源，應詳細評估其可行性，否則錯誤的決定，會因小失大，得不償失。

(二)鍋爐是發電機組的心臟，鍋爐管與其管內的水，就如同人的血管與血液，若要健康的活著，就必須保有乾淨清澈的血液（良好水質），否則出血性中風（破管）、動脈剝離（爐管內部水垢剝落）、血管堵塞（爐管長水垢）、高血壓（管壁腐蝕減薄承受高應力）…等心血管疾病會纏身。因此，水設備的操作，水質管理、監視、分析與異常矯正，需要訓練專業人員來擔任之。操作員亦必須對給水化學和鍋爐運轉狀況的變化具敏感度，並有能力進行相對應地調整。

(三)化學清洗是確保鍋爐安全和高效率運轉的方法之一。但必須注意，只有在必要時才做鍋爐化學清洗。以結垢物厚度或時間為基準來決定鍋爐化學清洗時機，適用於水質長期良好穩定，若因冷凝器漏海水和/或偶發的水質異常而需化學清洗的情況，應立即實施。

鍋爐爐頂管檢測規劃與 執行案例分享

顧宏基

一、前言

鍋爐爐管之維護，首重在爐管檢測機制，以期在爐管材質衰退、管壁腐蝕、薄化而瀕臨破管前，找出不良之爐管並更換之，達到「預防性破管」之目的，否則一旦鍋爐破管，除了造成巨大的經濟損失，嚴重者更將影響供電穩定。

一座鍋爐具有數以萬計以上的爐管，面對這些大量的爐管，如何在停機的短時間內進行有效地規劃並執行檢測工作，以找出鍋爐爐管潛在風險，一直是電廠大修時期執行鍋爐檢測工作時的最重要的課題。一般電廠鍋爐在大修時期所進行之爐管檢測工作，其檢測範圍的規畫，實務上除了參考鍋爐過去破管經驗為重要依據外，大多著重在鍋爐最高溫或高壓區域，例如過熱器或再熱器區等，因為此區域爐管是屬於破管高風險區域，也是最容易劣化的區域。而本文所探討的「爐頂管」在鍋爐內是相對較低溫與低壓的區域，對電廠而言，維護上較易被忽略，過去也鮮少有發生破管之事故，本文內容是以某電廠因發生大修機組之鍋爐，在執行鍋爐水壓試驗時，發生爐頂管破管，從而發現爐頂管的大量點蝕（Pitting）現象後，進行各部機水平展開檢查，最後發現某部機爐頂管點蝕嚴重的檢修過程，可做為一般鍋爐維護上的參考，也期待先進不吝給予指教。

二、發現及檢查經過

鍋爐的爐頂管用途，除了用來封閉整個鍋爐空間之外，也是輸送並加熱來自汽水鼓分離出來的飽和蒸汽，並引導其到下游的汽牆管進而進入一次過熱器，以逐漸提高蒸汽溫度。對於鍋爐而言，爐頂管區域的運轉溫度不在於極高溫區，依以往維護經驗，此區域也未列入高風險區域，因為此區域鮮少發生破管或材質劣化情形。

某電廠於該廠三號機大修結束，在進行該鍋爐水壓試驗查漏工作時，當鍋爐壓力升壓到 150kg/cm^2 後進行爐管查漏時，結果發現北起第 19 支爐頂管（材質 SA213-T11 2.25" OD×0.207" MW）靠東側位置發生破漏現象，高壓水不斷噴出（如圖1所示）。

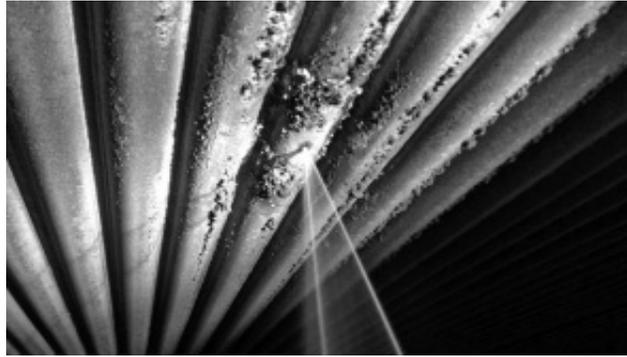


圖 1 鍋爐爐頂管破漏情形

維護部門於鍋爐水壓試驗結束後，立即對破漏之爐頂管進行切管檢查及更換爐管工作。經檢視切除之該支破漏爐頂管內部，結果發現該爐管內部管壁因嚴重點蝕（Pitting）致無法承受高壓爐水而穿透破管（參見圖 2）。依經驗，點蝕現象會發生在局部區域，因此該廠維護部門利用有限的時間內，對該支破管附近區域的爐管進行詳細檢查。

由於爐頂管內部之點蝕無法由爐管外表檢查出來，必須切管利用內視鏡逐一檢查，將曠廢時日，因此該廠採用「射線照相的方法」，對北起第 17 排至第 31 排爐管全面施以 γ -ray 射線照相（RT），再經對底片的判讀進行檢查（參見圖 3）。檢查結果發現北起第 18 支爐頂管也有點蝕嚴重現象，最後更換北起第 18、19 兩支爐管。

該電廠鍋爐之爐頂管區域運轉 20 多年來，未有該區域之爐管破管事故，一般文獻上也鮮有這方面的破管紀錄，但由該部機的經驗，該電廠維護部門已注意到爐頂管區域可能潛在有破管的風險，而且這個區塊是長久以來容易被忽視的部分，形成維護上的盲點，有必要水平展開，全面對各機組檢查，因此乃著手規劃，利用機組歲修期間，逐部機檢查鍋爐爐頂管區域。



圖 2 切除下之爐頂管火側內部可發現點蝕現象



圖 3 爐頂管射線照相底片顯示有點蝕之情形

三、檢測規劃的方法

該電廠一至四號機鍋爐為美國Foster Wheeler所設計製造，爐頂管共計有235支，為東西向水平方式排列，材質與管材規格為 SA213-T11 2.25"OD×0.207"MW，爐頂管位在鍋爐的位置如圖 4 所示。爐頂管是輸送來自汽水鼓的飽和蒸汽至分隔牆以及側汽牆及後汽牆，爐頂管前半部具有管翼，後半部爐頂管則以耐火泥塗覆，以防止爐內燃氣外洩，其詳細布置情形如圖5所示，在圖5中，虛線區域為規劃檢測之區域。

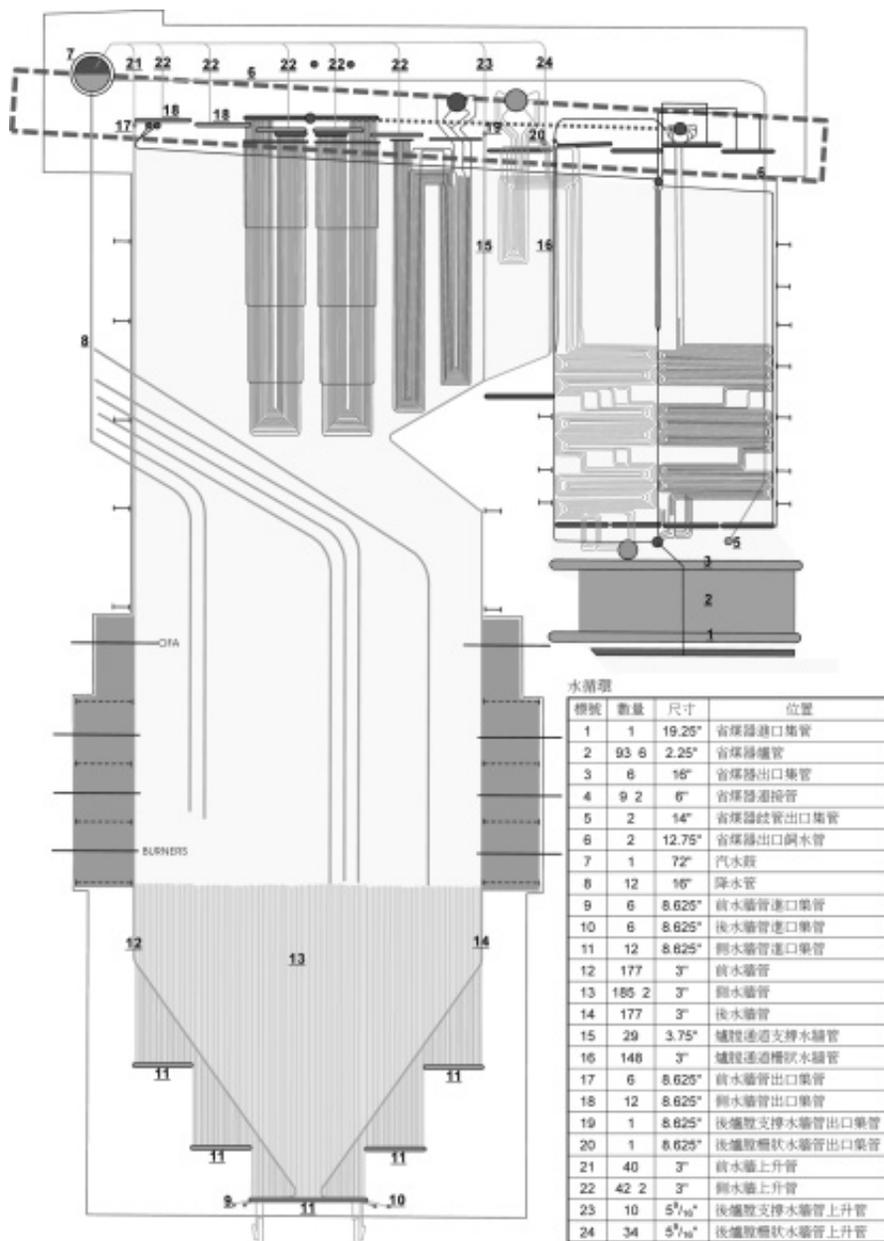


圖 4 爐頂管所在位置圖

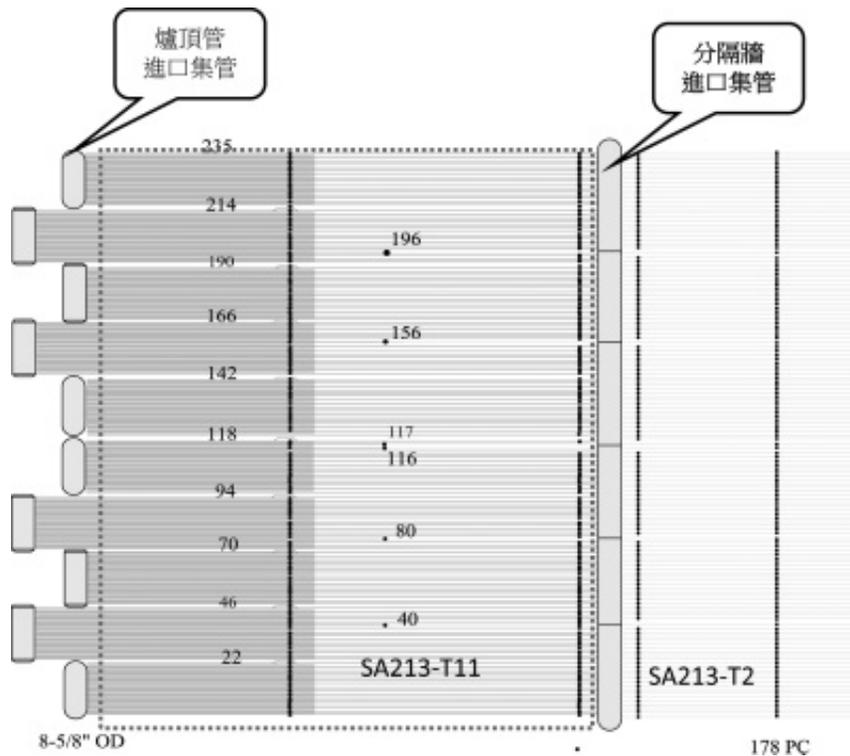


圖 5 爐頂管詳細佈置圖

至於檢測的選定方法，使用內視鏡、超音波材質衰減、射線照相檢查等方式均列入考慮，但經過評估後，仍認為採用射線照相的方式為最有效及快速的檢測方式，其原因如下：

1. 不須破壞爐管，可節省施作時間。
2. 經測試，超音波材質衰減檢測對於點蝕的現象可能無法完全掌握（無法以波形判讀），而且如以超音波材質衰減的方式檢測，爐管表面事先必須經過研磨處理，耗時更多。
3. 以射線照相檢測，爐管不須特別處理，可以正確且快速檢查。
4. 以射線照相檢測可在夜間實施，不影響白天其他工作的進行，節省工期。

以射線照相檢測爐管點蝕情形，雖然具有上述之優點，但需耗費為數龐大的底片以及人力去判讀結果為其缺點，因為爐管數量多達 235 支，而且每支爐管長度都超過 10 米以上，若使用射線照相全面檢測整支爐管，需花費數量相當可觀的底片以及人力去判片，因此如何有效的規劃檢測方法以及管理檢測點則是執行重點，以最少的底片使用量或人工判片量能得到最正確的檢查結果，期規劃方法如下：

1. 將全部爐頂管區域依東西向（前一後爐方向）劃分為 10 個區域，每個區域的爐管長度從 100cm~140cm 不等。

2. 因每張底片標準長度為 30cm，因此以每區中心線為基準，將底片中心線對準每個區域的中心線，即每個區域中心線左、右側各有 15cm 的底片長度（參考圖 6）。
3. 以此進行每個區域的 γ -ray 檢測，如果該區域的底片判片結果發現有問題，則該區域未檢測之其他部分再繼續進行射線照相檢測。

依上述方式規劃四號機鍋爐爐頂管檢測方法所耗用的底片約 1,650 張。

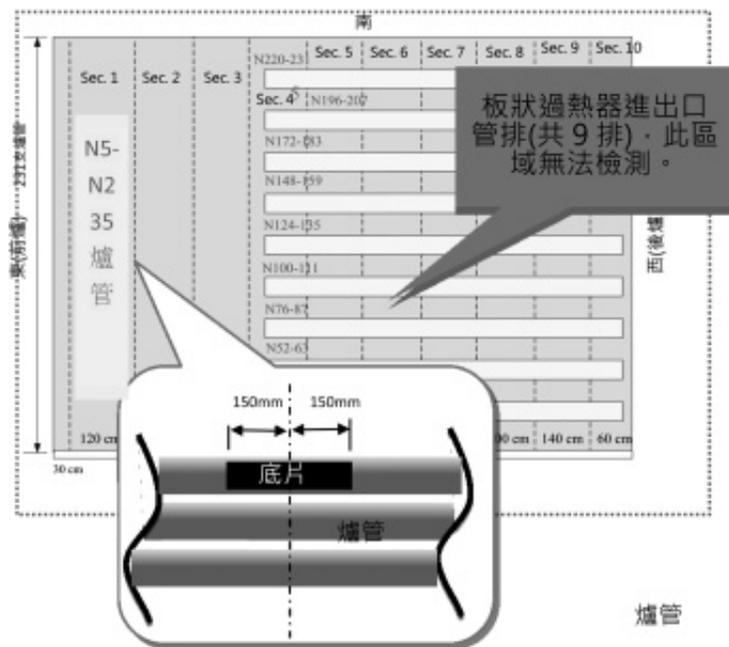


圖 6 爐頂管射線照相檢測規劃示意圖

四、結果與建議

該電廠四號機鍋爐爐頂管經以射線照相全面檢測，經判讀底片後發現四號機鍋爐爐頂管多處已發生嚴重的點蝕的現象（圖 7），進一步篩檢後，共計有 33 處必須立即更換爐管。將這些切除更換下來的爐管進行內部檢視，可發現爐管火側內部表面有（deposit）相當嚴重的沉積物（圖 8、圖 9），經切開爐管清除沉積物後，可發現爐管已腐蝕相當嚴重，有些甚至已經瀕臨穿透破管邊緣（參考圖 10、圖 11）。

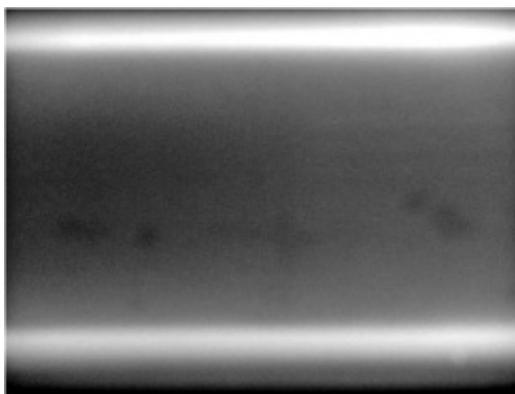


圖 7 射線照相判片顯示爐管點蝕的情形

推測腐蝕的機制應由於沉積物所引起的，因為在沉積物下方，將會因為發生所謂的”燈蕊式沸騰”(Wick Boiling, 圖 12) 的現象而使得介於沉積物下方與管壁之間的爐水因蒸發而產生濃縮現象，進而視當時爐水水質之化學情況，將對爐管產生強鹼性或強酸性的腐蝕。

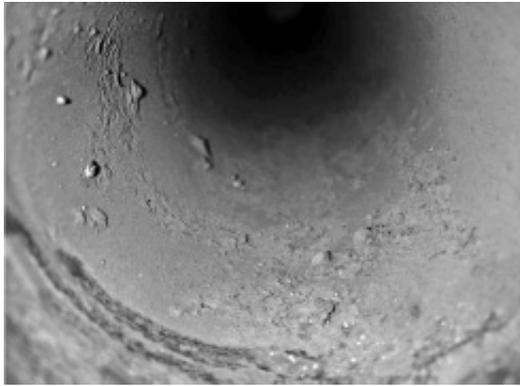


圖 8 爐頂管火側內部沉積物附著情形-1



圖 9 爐頂管火側內部沉積物情形-2



圖 10 爐頂管火側內部沉積物清除後之情形-1

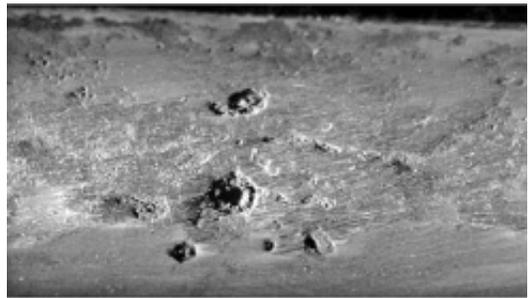


圖 11 爐頂管火側內部沉積物清除後之情形-2

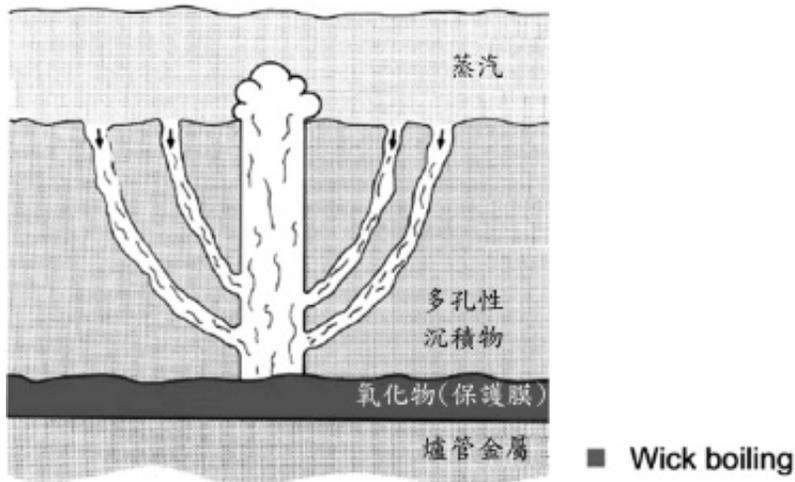


圖 12 燈蕊式沸騰現象說明

經將這些受損之爐管送台電綜研所進行金相分析，並利用 X-ray 繞射法（Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS）頻譜檢測沉積物內的組成元素，結果發現金相組織內的波來鐵僅輕微球化，劣化程度尚不明顯，但部份區域有 Pitting 凹坑存在，在管內結垢層方面，局部區域發現有外來之不同結構之鍋垢層堆積。

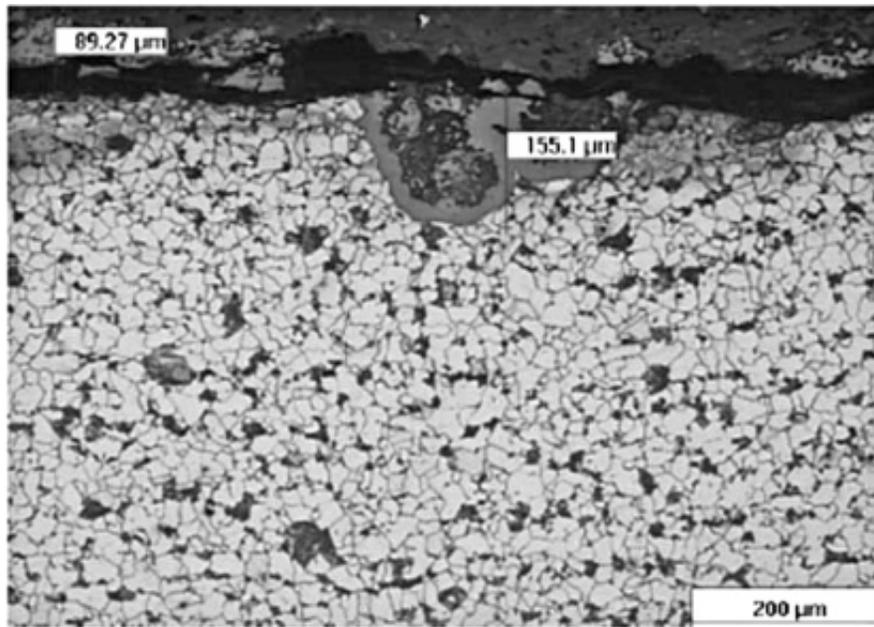


圖 13 爐管之金相照片

圖中管內結垢層約 69.27um，深坑（pitting）約 155.1um

以 EDS 分析沉積物內含有的成分，可發現許多雜質（圖 14），而爐頂管之所以附著這些沉積物，推測應與鍋爐汽水鼓發生 carry over 的現象有關。carryover 是鍋爐爐水中在汽水分離時，蒸汽夾帶水中的固體、液體、氣體等不純物質進入爐管內的現象，除了將造成在過熱器爐管表面形成一層薄的沉積物，可能導致爐管熱傳效率不佳甚至過熱破管等問題外，也會減少汽輪機葉片的動力輸出。

造成 carryover 現象，主要有機械、化學、設計、運轉等方面的問題所造成：

1. 機械方面，例如汽水分離器效率不佳，液態水無法避免的從汽水分離器洩漏等。
2. 化學方面，例如爐水固體、鹼性的濃度過高、油和其他有機污染物的存在，以及二氧化矽在高壓下蒸發。
3. 設計方面，汽水分離器負荷量過高和在蒸汽-水界面上的分離速度過快。
4. 運轉方面，汽水鼓水位過高。

建議經檢查鍋爐汽水鼓水位設定、汽水鼓汽水分離器、化學加藥情形或運轉模式等。

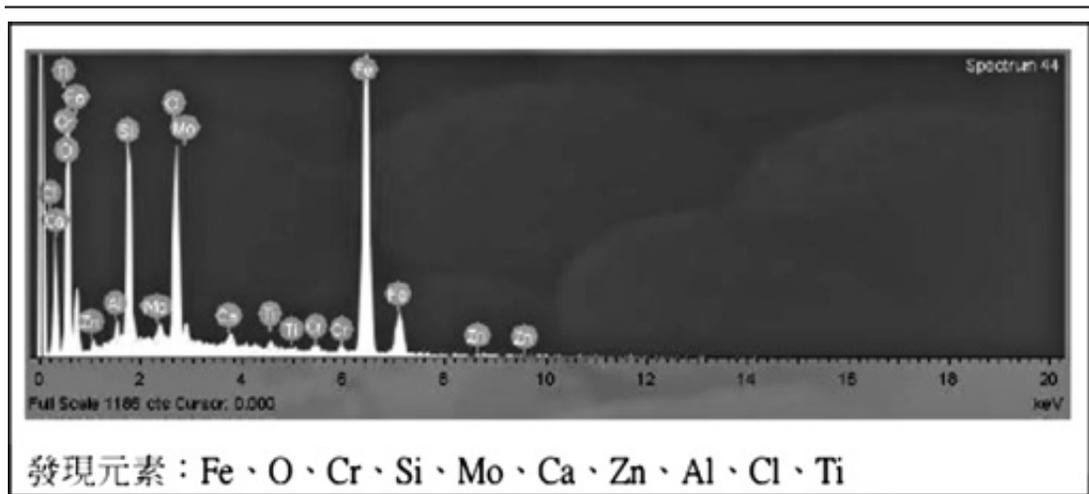


圖 14 以 EDS 分析沉積物內的成分可發現許多元素

五、結論

依該廠本次鍋爐爐頂管的檢測結果保守估計，應可減少或避免數次的破管事故，以每次破管事故所造成的發電損失估計約近億元計，則其創造的營運績效是相當大的。

面對爐管總長超過數百公里的鍋爐而言，要在有限的歲修時間內全面檢測完成實屬不易，即使規劃再詳細的檢測計畫，也難免有漏網之魚。一般的鍋爐爐管大修檢測多著重於爐內高溫高壓以及侵蝕較嚴重之區域，如過熱器、再熱器、熱回收區、水牆區域等等，雖然已可以掌控大部分的破管高風險區域，但也因此往往忽略了低風險區域的管控。本次的案例完全是現場工作人員依其工作經驗，自動發展出一套對於鍋爐爐頂管檢測的方法，本次的工作經驗特提供其他同業在鍋爐大修檢測時參考。

有效降低霧霾前趨物之鍋爐硫氧化物 減量技術產業化應用

沈政憲、萬皓鵬、黃志峰、溫增文、徐恆文
工業技術研究院綠能與環境研究所 新能源技術組 碳捕獲與封存應用計畫

摘要

工業化的快速發展，大量化石能源被用於鍋爐燃燒取熱或發電，燃燒後煙氣中含有酸性氣體（如硫氧化物（SO_x）、氮氧化物（NO_x）等）、粒狀物（塵粒/飛灰）等，若不經有效減量與控制，將會大量的排放到大氣造成環境污染。近年來氣候劇烈變遷，秋冬的低溫加上空氣流動速度減緩，造成天氣出現霧霾情形漸趨嚴重，嚴重影響空氣品質與民衆健康，因此大幅提升燃燒性能及降低空氣污染物排放，提高空氣品質，已是刻不容緩並顯得格外的重要議題。本文介紹工研院燃燒後酸性氣體減量技術，除可將酸性氣體（SO_x）移除95%以上，低於環保排放法規標準（SO_x 排放標準為60ppm）；粒狀物亦可移除99%以上，為大幅減少空氣污染物的排放與維護國內空氣品質有顯著的功效。本技術目前已技術移轉並結合國內廠商，協助國內大型鍋爐或燃燒系統之廢氣處理工程案，未來將會擴大使用行業，並結合循環經濟下的其他相關資源達到低排放標準，達成產業加值與環境升級之雙贏目標。

一、前言

人類的生活標準隨時代的變化與時俱進，從早期農業時代對於生活要求只求溫飽和活得好，進入工業時代後生活步調加快，生活上除了農業時期的要求外，增加了活得久的新要求；進入到目前工業4.0時代，對於生活與環境希望能夠活的更有品質，因此對於空氣和水在生活環境上的要求要能維持更乾淨，特別是針對近年來秋冬時期空氣品質的要求，因此有效的降低秋冬時期霧霾是目前國內相當重要的環保課題。

霧霾的產生除了來自自然界的自然生成以外，現今的霧霾和工業上所使用的化石燃料燃燒有著密切關係，人類自從在18世紀發起第一次工業革命，創立了以機械取代人力的時代，機械動力來源係以燃燒產生熱能轉換成蒸汽，推動了工業化的快速發展。然而為了提高機械化生產速率，人類大量的使用化石能源燃燒取

熱或發電提供動力來源，煙氣中的酸性氣體（如硫氧化物（SO_x）、氮氧化物（NO_x））等、粒狀物（塵粒/飛灰）等大量的排放到大氣中，慢慢累積在環境中造成日後污染現象的發生，例如：酸雨、霧霾等。

早期的工業污染防治主要是以降低化石燃料燃燒後，所產生的粒狀物（Dust, 黑煙）、酸性氣體（硫氧化物和氮氧化物為主）排放到大氣後所造成酸雨為主，這些氣體在大氣中經過複雜的化學反應，形成硫酸或硝酸氣懸膠，或為雲、雨、雪、霧捕捉吸收，降到地面成為酸雨[1]。1970年開始，清淨空氣方案要求環保機關訂定七種污染物在大氣中可被接受的濃度限值，包括：二氧化硫、一氧化碳、微粒、揮發性有機物、氮氧化物、光化學氧化劑與鉛[2]。近年來氣候的劇烈變遷，秋冬的低溫加上空氣流動速度減緩，造成天氣出現霧霾的情形漸趨嚴重，環保署空氣測站頻頻出現紅色警戒，嚴重影響空氣品質與大眾呼吸健康，因此需大幅提升燃燒排氣性能以降低空氣污染物排放，提高國內的空氣品質。

針對一般工業界主要的污染來源是經由燃燒後的煙氣產生，其中硫氧化物的產生主要是由燃料產生，而降低燃料中硫含量主要有兩種方式：1. 直接由燃料中去除硫分、2. 由燃燒後端裝設脫硫設備加以移除。石化油品中硫化物主要有硫化氫、硫醇、有機硫化物及環狀硫化物等硫化物，這些硫化物的存在會造成環保及設備腐蝕等問題，因此在煉製過程中會利用加氫脫硫由製程脫除，即可生產符合規範的低硫油品。而煤炭則可以透過選煤和洗煤方式降低含硫成分，不過這些前期處理方式，降低硫成分的效益還是會反應在燃料的價格上，加上國內的化石燃料幾乎99%都是經由國外進口，因此在選擇上都先以低硫燃料為主，然後再輔以有效的脫硫脫硝技術，以達到排放標準。本文主要介紹有效降低霧霾前驅物-硫氧化物主要處理技術方式。

二、PM2.5 來源

大氣中的成分除了相關主要氣體外，另外會有一些細懸浮微粒（particulate matter, PM）擴散在其中，這些細懸浮微粒依據大小可以細分為PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0}，其中PM₁₀主要是指粒徑在10微米（ μm ）以下之粒狀污染物，而PM_{2.5}稱為「細懸浮微粒」，主要是易吸附有毒害的物質，由於體積更小，PM_{2.5}具有更強的穿透力，可穿透肺部氣泡，直接進入血管中隨著血液循環全身。這些細懸浮微粒主要是在大地上經由人類日常活動所引起，包括：建築塗料業、工地粉塵、工業排放、燃燒排放、農業畜牧業、機動車輛…等，按照不同業別形成微粒釋放到大氣中。

細懸浮微粒可區分為原生性與衍生性細懸浮微粒。原生性細懸浮微粒主要包括：原生有機碳、元素碳、海鹽、土壤等，這些微粒經由光化學反應與擴散作用

後形成其他二次有機碳等其他衍生性細懸浮微粒，而其他主要的衍生性細懸浮微粒是指硫氧化物、氮氧化物、揮發性有機物（VOCs）與氨等，這些氣態前驅物在大氣中經過複雜化學反應形成細懸浮微粒，如圖1所示。

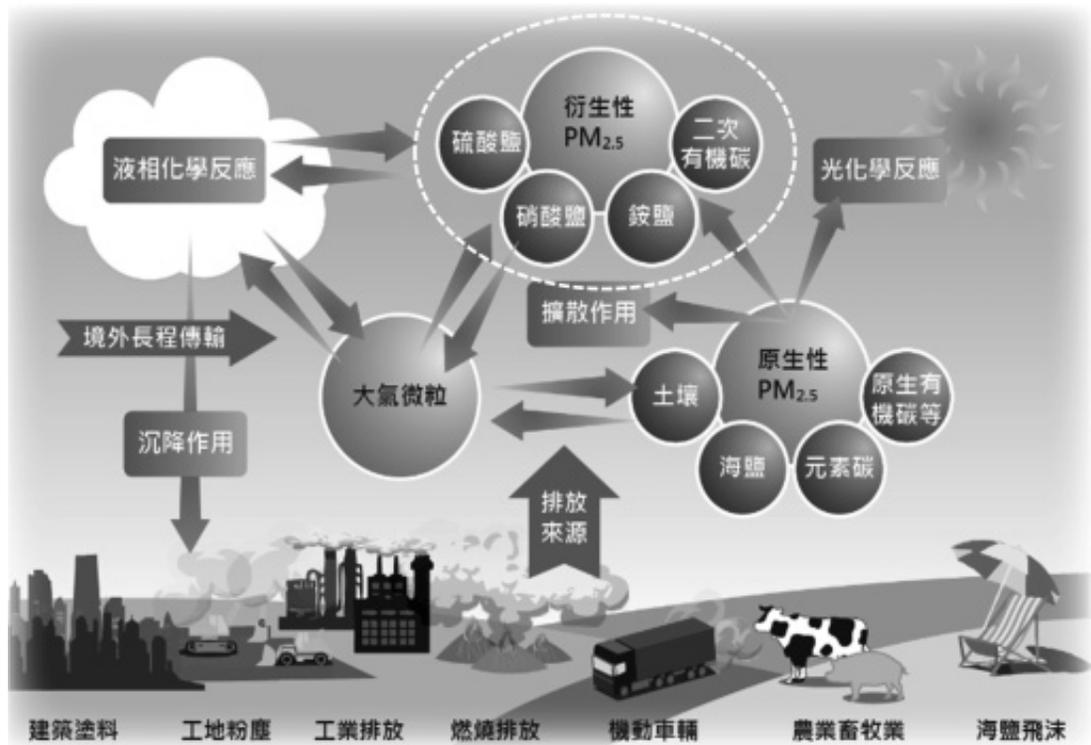


圖 1 大氣中細懸浮微粒主要的形成路徑（圖／擷取於環保署官網[3]）

細懸浮微粒以來源區分，可包括境內產生與境外移入兩類，依據相關研究分析結果顯示，如圖2所示，40%主要是經由境外移入，60%則是由國內自行產生，其中在固定污染源上（工業污染）約占 18.6%；另一份研究報告針對境內污染源再加以區分，其中製造業在整體境內排放約占 24.8%，而電力燃氣供應業則占約 18.6%，台灣因為地狹人稠細懸浮微粒對於空氣品質的影響相當大，因此政府主管機關針對境內污染源積極進行減排限制，希望能夠有效抑制細懸浮微粒的形成，因此有效處理SO_x、NO_x、VOCs與氨所衍生的細懸浮微粒是相當重要課題。

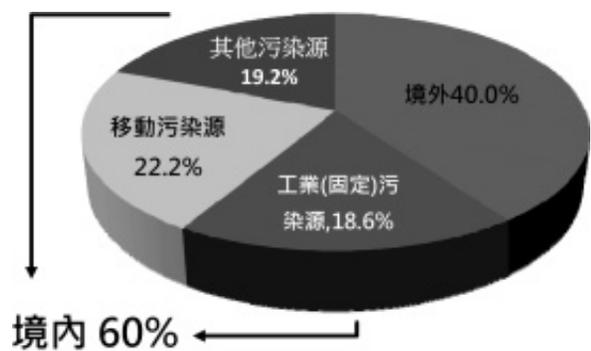


圖 2 國內空氣污染 PM_{2.5} 來源分析[4]

三、空氣污染物排放之控制技術

一般針對固定污染源進行空氣品質控制系統（Air Quality Control System, AQCS）之規劃為不可或缺的一環，其中 AQCS 主要包括脫硝、脫硫及除塵等相關設備，依據相關電力設施空氣污染物排放標準與固定污染源最佳可行污染控制技術，彙整燃煤與燃氣機組空氣污染物排放標準，如表1所示。

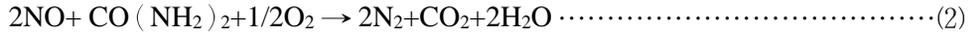
表 1 燃煤/燃氣設備空氣污染物排放標準[5]

燃煤機組			
管制污染物	電力設施 / 空氣污染物排放標準		固定污染源 / 最佳可行控制技術
	既有機組	新設機組	
			104/05/26 公告修正
SOx (ppm)	60	30	≤ 25ppm 或脫硫效率≥ 96%
NOx (ppm)	70	30	≤ 30ppm 或脫硝效率≥ 90%
PM (mg/Nm ³)	20	10	10
燃氣機組			
管制污染物	電力設施 / 空氣污染物排放標準		固定污染源 / 最佳可行控制技術
	既有機組	新設機組	
			104/05/26 公告修正
SOx (ppm)	8	8	≤ 8ppm 或脫硫效率≥ 90%
NOx (ppm)	40	10	≤ 10ppm 或脫硝效率≥ 80%
PM (mg/Nm ³)	10	10	10

針對氮氧化物排放目前主要的處理方式為：鍋爐內採用低 NOx 燃燒器，或後端利用催化反應將 NOx 分解成 N₂和 H₂O，包括：選擇性觸媒還原系統（Selective Catalytic Reduction, SCR）與選擇性非觸媒還原系統（Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR），前述方法均可有效減少氮氧化物排放到大氣中。選擇性觸媒還原系統是指利用觸媒，以 TiO₂ 為擔體，活性物為鈰、鉬、鎢之金屬氧化物，使還原劑與 NO 等污染物還原成 N₂ 與 H₂O，考量安全性及成本，一般使用的還原劑氨水濃度在 20%~25% 之間。選擇性非觸媒還原系統則是指在沒有觸媒的作用下，在適合脫硝反應的溫度區間（760~1090 °C）內噴入還原劑，如氨（NH₃）或尿素（CO（NH₂）₂）水溶液，將煙氣中的氮氧化物還原為無害的N₂及H₂O，其中若以NH₃為還原劑時主要反應為[6]：



若以尿素為還原劑時：



在硫氧化物(SO_x)排放控制方面，排煙脫硫技術(Flue Gas Desulfurization, FGD)之應用已有將近八十年左右的歷史，為一種持續在進步與使用有效的技術，一般根據使用吸收劑及反應物的狀態區分為濕式、半乾式及乾式三類；若再依產生之反應物是否經由再生程序回收吸收劑，則可分成再生及不再生二類。使用之吸收劑大致可分成鈉基(如NaOH, Na₂CO₃)、鎂基(MgO, Mg(OH)₂)、鈣基(CaO, CaCO₃)等三大類[7]。早期國內相關工業燃燒煙氣排放除硫技術主要是由外商工程公司規劃設計(日本/美國)結合國內工程公司進行建置，為了扶植國內產業排煙脫硫處理能力，工研院陸續完成濕式與半乾式除硫技術開發，如圖3所示，並且也陸續完成在國內產業實廠上的建置與驗證，可依據不同產業需求，完整開發設計脫硫處理技術，同時能夠擁有濕式脫硫技術和半乾式除酸除塵技術(Semi-Dryer Absorber, SDA)是國際上少數能夠完全整合除酸脫硫技術單位。以下針對脫酸技術依濕式、半乾式脫硫除塵技術分述如下：

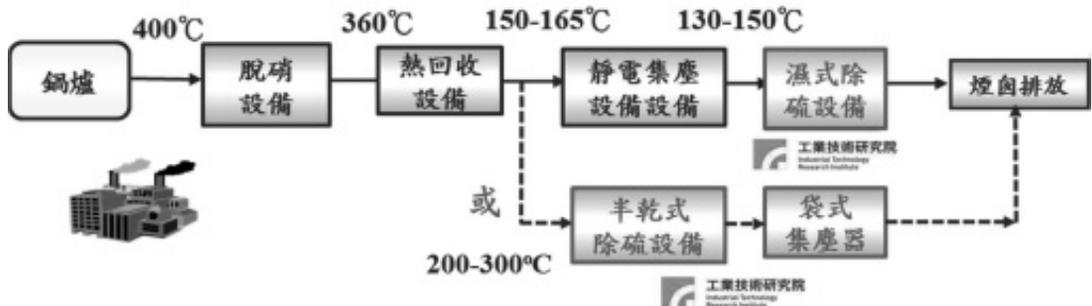


圖3 工研院濕式與半乾式除硫技術流程

(一)濕式排煙脫硫技術(Flue Gas Desulfurization)

濕式排煙脫硫技術主要以氣液反應為主，藉由液滴表面與氣態硫氧化物接觸反應達到除硫效果，因此處理程序主要分為四個步驟，包括：煙氣冷卻與洗滌、SO₂與吸收劑反應、副產物處理、煙氣排放前再加熱，如圖4所示[7]。濕法排煙脫硫技術優點：反應速度快、脫硫效率高(一般>90%)、技術成熟、適用不同大小規模，及可處理硫氧化物高濃度之煙氣。此技術的缺點，包括：洗滌後煙器需要再加熱，否則當氣候溫度偏低時會出現白煙，形成所謂「鄰避效應」；此外耗水量較大，故應再結合製程上其他回收水源作為用水，以降低對原水的需求。綜合上述相關技術特性，濕法脫硫技術在市場上較為成熟，在眾多的脫硫技術中，一直占有主導地位[8]。

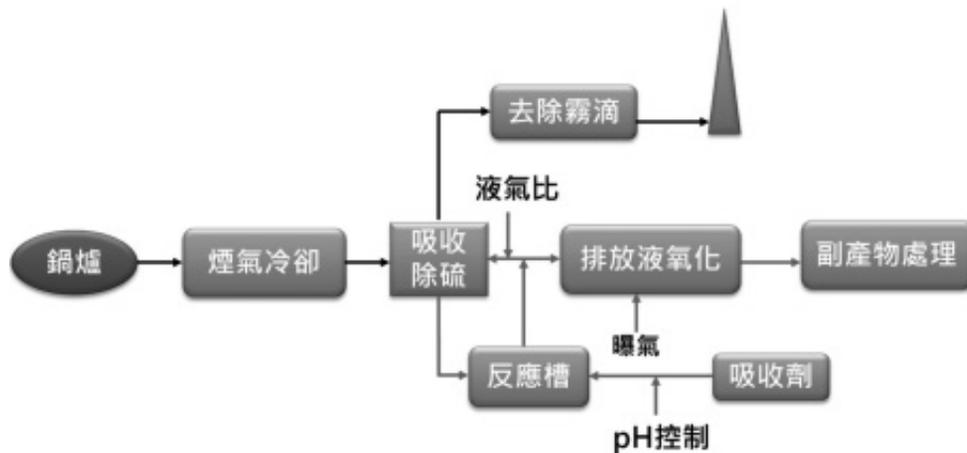


圖 4 濕式除硫主要步驟流程圖[7]

各種濕式除硫技術主要原理和步驟相似，唯所使用吸收劑不同或成本因素造成除硫程序有所差異，工研院主要在濕式除硫技術是以鎂系-氫氧化鎂除硫法為主，主要是簡化氧化鎂脫硫方法，利用氧化鎂與水消化（Slaking）反應生成氫氧化鎂漿液（ $Mg(OH)_2$ slurry），再將此漿液與煙氣成分中 SO_2 反應產生 $MgSO_3$ 漿液，再經濃縮乾燥得亞硫酸鎂及硫酸鎂，經由加熱分解成 SO_2 與氧化鎂， SO_2 進一步製造硫酸，而氧化鎂吸收劑回收再利用。其主要化學反應如下所示：



若亞硫酸鎂或硫酸鎂不回收使用，即(6)和(7)式不發生，而直接經由廢水處理後排放，可簡化為氫氧化鎂除硫法，整體製程如圖 5 所示。濕式脫硫技術適用於低於 500 噸/時規模之蒸汽鍋爐或汽電共生鍋爐，而且操作簡單、吸收劑成本較低、除硫效率高。

此外，鈉系吸收劑-氫氧化鈉之主要使用方式為溶液（40%）方式直接噴注於吸收塔內與 SO_2 進行反應，系統主要化學反應：



整體流程圖如圖 6 所示，適用製程與優點：適用於 <30T/hr 中小型鍋爐及小規模製程，而且程序簡易、操作簡單、佔地小、除硫效率高。

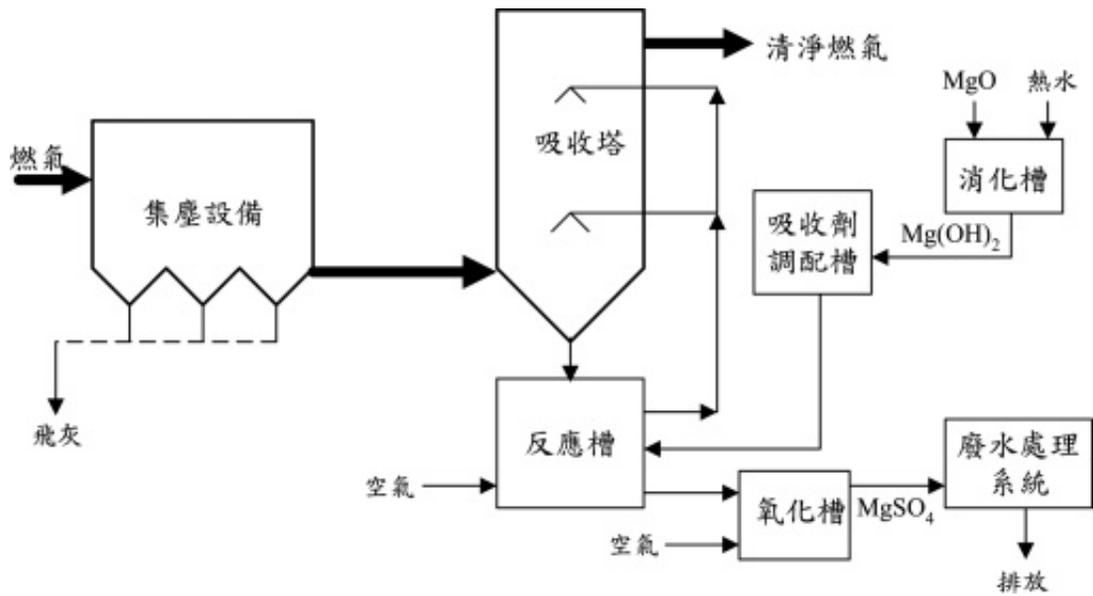


圖 5 氫氧化鎂排煙脫硫系統流程示意圖[7]

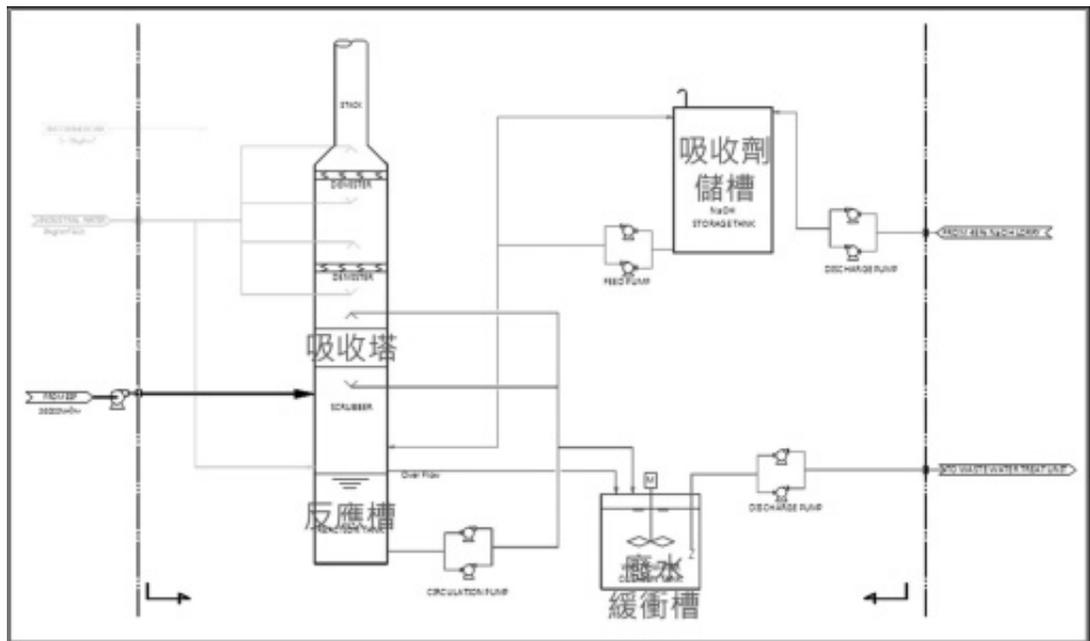


圖 6 氫氧化鈉系之排煙脫硫系統流程

一般工廠選擇適當的濕式排煙脫硫程序，需經過主客觀各種因素考量，目前國內企業多數採用濕式排煙脫硫系統。依系統使用的吸收劑概略分出鈣系（石灰石法）、鎂系（氫氧化鎂法）、鈉系（氫氧化鈉法）等程序；若依實際應用區分，國內大型發電廠大都採用石灰石法；汽電共生廠規模在 40T/hr~ 500T/hr，則普遍採用氫氧化鎂法；少數因特殊廠或規模在 40T/hr 以下以汽電共生廠及少許的熱煤鍋爐則採用氫氧化鈉法，三種不同吸附劑之濕式排煙脫硫系統比較，如表 2 所示。

表 2 濕式排煙脫硫系統之不同吸收劑比較

除硫程序 項目	石灰石系統 (CaCO ₃)	氫氧化鎂系統 (MgO)	氫氧化鈉系統 (NaOH)
除硫效率	>90%	>95%	>95%
設備投資成本*	1.5 ~ 2.0	1.2 ~ 1.4	1.0 (設定值)
吸收劑成本 (NTD/kg)	低 (1 ~ 2)	中 (7 ~ 8)	高 (6 ~ 7 at 45%)
優 勢	<ul style="list-style-type: none"> • 操作成本較低 • 廢水可完全回收利用 • 產生石膏副產物 	<ul style="list-style-type: none"> • 流程簡單，易操作維護 • 除硫效率高 	<ul style="list-style-type: none"> • 流程最簡單，易操作維護 • 除硫效率高
劣 勢	<ul style="list-style-type: none"> • 程序技術難度較高 • 輸送設備易磨蝕 • 操作不當易結垢堵塞 	<ul style="list-style-type: none"> • 廢水須再生方可回收 • 輸送設備易磨蝕 	<ul style="list-style-type: none"> • 操作成本高 • 篩板孔徑小時易結垢 • 廢水須再生方可回收
適用程序	• 大型發電廠	• <500T/h 汽電共生廠	• 中小型燃油鍋爐

*註：在相同煙氣處理氣量下，將鈉系（氫氧化鈉系統）設備投資成本設為基準值 1.0 下，再和其他鈣系與鎂系處理設備成本比較分析。

(二)半乾式除硫 (Semi-dry Absorber) 技術

相較於濕式脫硫技術，半乾式除酸除塵技術的主要優點，在於沒有廢水的產生。半乾式脫硫系統，包括吸收塔及粉塵收集器，吸收塔可再細分為吸收劑調配系統，乾燥器 (Dryer)，及霧化器 (Atomizer)，系統流程如圖 7 所示。

半乾式脫硫程序係先將吸收劑調配於系統中，一般使用粉體氧化鈣（鈣系）為主或使用鈉系-氫氧化鈉溶液（40%），調製成漿液或溶液狀態，漿液固體含量約 20~40wt%。吸收劑藉著泵由調配系統送入霧化器，在吸收塔中，利用霧化器將吸收劑漿液 (NaOH、Ca(OH)₂、Mg(OH)₂) 霧化成直徑約數十微米的液滴，這些液滴再與廢氣接觸，產生酸鹼中和反應，霧化主要目的可增加液體表面積，因而增加煙氣與液滴接觸面積，提高吸收效率，液滴與煙氣在吸收塔接觸方式可為同向流 (cocurrent) 或逆向流 (counter-current)，接觸過程中，液滴

吸收煙道熱量，水份開始蒸發，同時煙氣中 SO_2 被液滴吸收並反應，生成亞硫酸及硫酸鹽副產品。主要化學反應式如下所示：



煙氣進入乾燥塔溫度約 130°C ，而煙氣出口溫度高於接近絕熱飽和溫度約 $11\sim 17^\circ\text{C}$ ，由於反應溫度高於露點（dew point） $15\sim 20^\circ\text{C}$ ，液滴因水份蒸發而成爲乾燥之固體粉體，大顆粒粉體因重力而掉落至塔底，小顆粒粉體則隨煙氣排出乾燥塔至粉塵收集器，除去大部份微粒再排放，所收集反應生成物呈乾粉狀，不需廢水處理，且可視情況做資源回收或回收循環使用，粉塵收集器可選用靜電或袋濾式集塵器。

由於半乾式脫硫系統受限於反應與乾燥過程，故較適合於低硫燃料使用，若後段除塵設備採用袋濾式集塵器會再增加吸收煙氣中 SO_2 之功能效率可達 $10\sim 20\%$ ，因而使半乾式除硫效率達 95% 以上，而且系統在露點以上操作，排氣無白煙問題，目前工研院在此技術主要是推廣在玻璃熔爐業和相關焚化爐業使用，其燃燒設備燃料主要以天然氣爲主，以往主要以供應空氣燃燒爲主，近年來爲達到高效率燃燒玻璃熔爐業廠商已陸續更換爲純氧燃燒，可以達到提高反應溫度與有效降低煙氣處理量之優點。

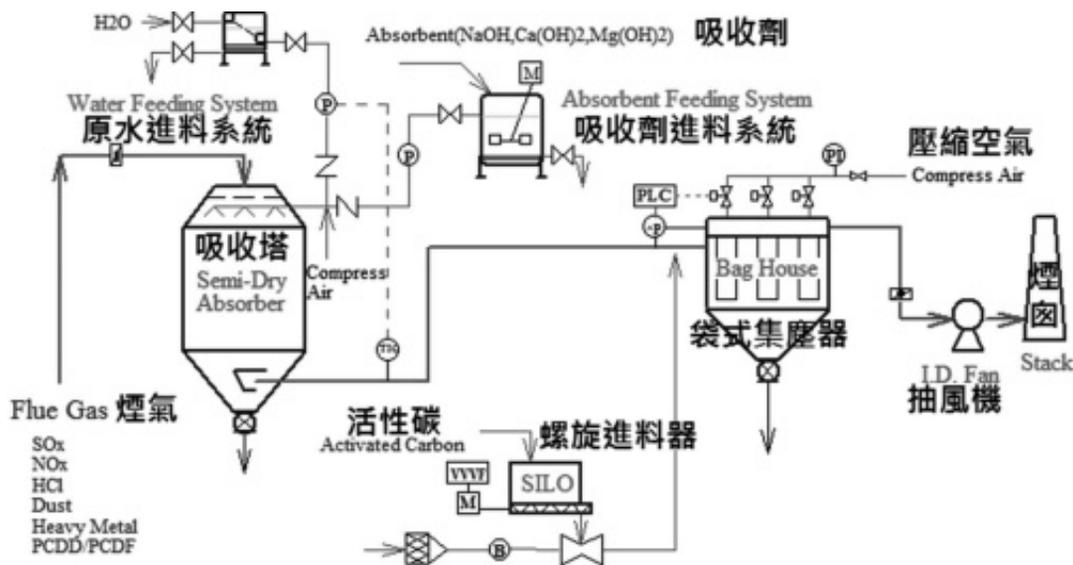


圖 7 半乾式排煙脫硫系統流程圖

四、除硫技術產業應用成果

工研院除硫技術主要專注於處理酸性廢氣與微塵去除領域，利用簡單的酸鹼中和學理來達到處理酸性氣體的目的。藉由酸性氣體的去處，可以再進一步去除霧霾的前驅物（NO_x、SO_x），達到降低PM_{2.5}排放。除硫技術依據煙氣排放情形與產業的需求，可利用濕式脫酸除塵技術或半乾式脫酸除塵技術。兩者最大差異在於入口溫度、產物型態以及有無水汽的排放等，皆能有效處理酸性氣體，提供一個完整的解決方案，綜前所述，可將工研院兩項技術之特色及主要推廣實績簡述如下：

(一)濕式脫酸除塵技術（FGD）：

1. 100%工研院自有技術
2. 擁有消化系統配置方法自有專利技術
3. 可在既有系統中提升性能改造
4. 系統有良好的降載率（30%~100%）
5. 設置成本相對低且佔地面積小

本技術已成功落實產業化，自推廣以來大幅提升國內技術自主性，服務對象包括國內相關石化、造紙、化纖與化學集團企業等，積極創造國內外產業商業價值。

本項技術並擁有關鍵專利技術-「粉體消化系統方法（專利案號：064900036）」，該專利主要特色為藉由下料倉抽風機提供卸料區之負壓環境，以解決乾燥環境下之卸料區之粉體在卸料過程中所產生粉塵逸散之問題，及藉由消化槽抽風機提供消化區之負壓環境，以解決潮濕環境下之消化區之粉體在進料過程中所產生粉塵逸散之問題，並藉由兩區做完整的結合使粉體消化方法達到低廉的操作成本和簡化作業流程，以維持操作環境安全衛生，確保氧化鎂粉體配置過程順暢，不堵塞且有效防止粉塵逸散，如圖 8 所示，相關服務推廣實績如表 3 所示。



圖 8 氧化鎂配置及消化系統

表 3 工研院濕式除硫技術在國內推廣實績

項次	服務公司	(年度) 技術服務內容	工業爐型式
1	A 化工	(81) 新建脫硫系統設計規劃	燃油鍋爐
2	B1 酒廠	(82) 新建脫硫系統設計規劃	燃油鍋爐
3	B2 酒廠	(82) 新建脫硫系統設計規劃	燃油鍋爐
4	B3 酒廠	(82) 新建脫硫系統設計規劃	燃油鍋爐
5	C 興業	(87) 新建脫硫系統設計規劃	燃煤鍋爐
6	C 興業	(88) FGD 系統霧滴飄出改善	燃煤鍋爐
7	D 一廠	(83) 粉塵逸散改善	粉塵逸散改善
8	E 苗栗廠	(87) 增設粉塵防治設備及程序改善	粉塵逸散改善
9	F 彰化廠	(88) 增設粉塵防治設備及程序改善	粉塵逸散改善
10	F 龍德廠	(89) 新建消化系統規劃設計	粉塵逸散改善
11	G 新埔廠	(89) 新建脫硫系統設計規劃	粉塵逸散改善
12	F 麥寮廠	(90) 新建消化系統規劃設計	粉塵逸散改善
13	F 新港廠	(91) 新建消化系統規劃設計	粉塵逸散改善
14	H 煉油廠	(95) 增設粉塵防治設備及程序改善	粉塵逸散改善
15	I 麥寮廠	(95) 脫硫系統設計規劃、監造、試車	燃油鍋爐
16	J 岡山廠	(96) 焙燒爐廢氣處理系統統包建造	燃油鍋爐
17	K 和平電廠	(94) 脫硫系統性能提昇及除霧器改善	燃煤鍋爐
18	K 和平電廠	(96) 一號機脫硫系統性能提昇評估	燃煤鍋爐
19	M 電廠	(98) 電廠除汞試驗煙氣脫硫設備建構	燃煤鍋爐
20	N 系統公司	(100) 委託 FGD 相關技術諮詢服務	—
21	P 公司	(102) 製程排氣脫硫系統規劃設計	燃油鍋爐
22	Q 紙業	(102) 新建脫硫系統規劃設計	燃煤鍋爐
23	R 新屋廠	(104) 新建脫硫系統規劃設計	燃煤鍋爐
24	Q 花蓮廠	(104) 移遷及整合脫硫系統規劃設計	燃油鍋爐
25	S 桃環科	(106) 新建脫硫系統規劃設計	燃油鍋爐

(二) 半乾式除酸除塵處理技術 (SDA) :

1. 吸收劑漿液 (NaOH, Ca(OH)₂, Mg(OH)₂)
2. 除酸效率>95%
3. 系統在露點以上操作, 排氣無白煙問題即無鄰避效應
4. 反應生成物呈乾粉狀, 不需廢水處理, 且可視情況做資源回收
5. 酸性氣體處理效率高 (SO_x>95%、HCl>99%、HF>99%、B₂O₃>99%)。

國內玻璃業者過去長期仰賴國外技術等國外廠商，工研院團隊以半乾式除酸除塵技術，取代國外脫酸集塵技術，有效處理排氣污染，並落實技術本土化。本技術自民國 84 年設置於日商 A 公司玻纖廠使用至今，該處理設備經過 20 年的有效使用後，已經在 104 年持續委託本院繼續進行系統更新，並且燃燒方式由空氣燃燒轉換成純氧燃燒，處理後排放效果更佳，顯示本技術處理結果不僅能夠符合法規規定外，最重要的是產品設計與操作可靠度相當高，足以證明本技術之優越性。本技術已簽約執行計畫共計 35 件，包括：焚化爐（14 件）、玻璃熔爐（18 件），及研究委託案（3 件）等。近年來，因為民衆對於環境高標準的需求，特別是對於煙氣在一般常溫下處理後需要完全無白煙（Opacity=0 %），故本技術亦越受業者的青睞，目前已完成之服務實績如表 4 所示。

綜合前述工研院所服務之產業改善案例，每年約已減少 8,109 噸/年 SO_x 排放，粗估約佔全台 SO_x 排放 6.7%，針對 SO_x 的年減少量再利用硫酸鹽（衍生）對環境 PM_{2.5} 濃度水平之平均貢獻比例，估算出對應減少 1,946 噸/年 PM_{2.5} 產生[9]。

表 4 工研院半乾式除硫技術在國內推廣實績

工程名稱	系統設備（關鍵技術）
A 玻璃熔爐（鈉系）廢氣處理系統	控溫系統 + 袋式集塵機
B 玻璃熔爐（鈉系）廢氣處理系統	半乾式除酸系統 + 袋式集塵機
C 電子玻纖熔爐（#2）廢氣處理系統（空氣燃燒系統）	半乾式除酸系統 + 二次冷風控溫系統 + 袋式集塵機
C 電子玻纖熔爐（#1）廢氣處理系統（全氧燃燒系統）	
C 電子玻纖熔爐（#2）廢氣處理系統（全氧燃燒系統）	
E 電子玻纖熔爐廢氣處理系統	半乾式除酸系統 + 降溫水控溫系統 + 二次冷風控溫系統 + 袋式集塵機
E 電子玻纖熔爐廢氣處理系統（全氧燃燒系統）	
E 電子玻纖熔爐廢氣處理系統（全氧燃燒系統）	半乾式除酸系統

五、結論

有效降低固定污染源（工業燃燒、鍋爐等）霧霾前驅物排放是國內主管機關與產業共同目標，工研院將積極協助政府落實管制，促使產業 VOCs、SO_x、NO_x、NH₃減量，並且積極發展更有效率處理技術，讓產業能夠更符合法規，共同促使固定汙染源霧霾前驅物降低。本文所述之 SO_x 處理技術已經能夠針對酸性氣體汙染物達到 >95%、處理後 SO_x 排放可低於環保排放法規標準（60ppm）、粒狀物 >99% 以上的高效率處理效果，對大幅減少空氣汙染物的排放與維護國內空氣品質均有所貢獻。

六、參考文獻

- [1] 酸雨的危害，[tp://e-info.org.tw/issue/environ/waterp/2001/waterp01050101.htm](http://e-info.org.tw/issue/environ/waterp/2001/waterp01050101.htm).
- [2] Cunningham Cunningham，環境科學概論，譯者：白子易、莊順興，高立圖書公司，2006，2/e，ISBN：9789861573069
- [3] 空氣品質改善維護資訊網，行政院環境保護署，http://air.epa.gov.tw/Public/suspended_particles.aspx
- [4] 蔡鴻德，楊鐸行，黃星富，”空氣污染防治新作為”，國土與公共治理學刊，第五卷 第三期，106年9月
- [5] 蔡顯修，劉源隆，吳政宏，郭泰鈞，廖逸飛，"興達與大潭電廠空污排放減量及最佳可行控制技術研究"，台電工程月刊，Vol.834，2017.02
- [6] <http://www.crown-tech.com.tw/edcontent.php?lang=tw&tb=2&id=15>
- [7] 排煙脫硫技術手冊，工研院綠能所
- [8] 原文網址：<https://kknews.cc/zh-tw/news/k3qqq2q.html>
- [9] Hodan W. and Barnard W. Evaluating the Contribution of PM2.5 Precursor Gases and Re-entrained Road Emissions to Mobile Source PM2.5 Particulate Matter Emissions, Prepared by MACTEC Under Contract to the Federal Highway Administration, 2004



離心式空壓機漏油原因 分析與改善

張進發、賴定弘、李信龍

一、背景

本廠裝共設置有4部 COOPER (CAMERON) 公司產製之 TA100M5R3SB 型離心式空壓機，供燃煤鍋爐吹灰空氣使用，自該型空壓機裝機試運轉以來，各台皆出現空壓機機殼多處接合面及轉軸軸封處滲、漏油情況，期間雖經運轉參數及裝配之調整，此問題仍無法獲得緩解，雖空壓機本身效能不受影響，然潤滑油洩漏後之溢散，除增加保養人員負擔、造成環境髒汙外，亦容易產生工安隱憂，故該型空壓機漏油問題之探討與改善，一直是本廠空壓機維護人員的頭號目標之一。

二、TA100M5R3SB 型空壓機設計概述

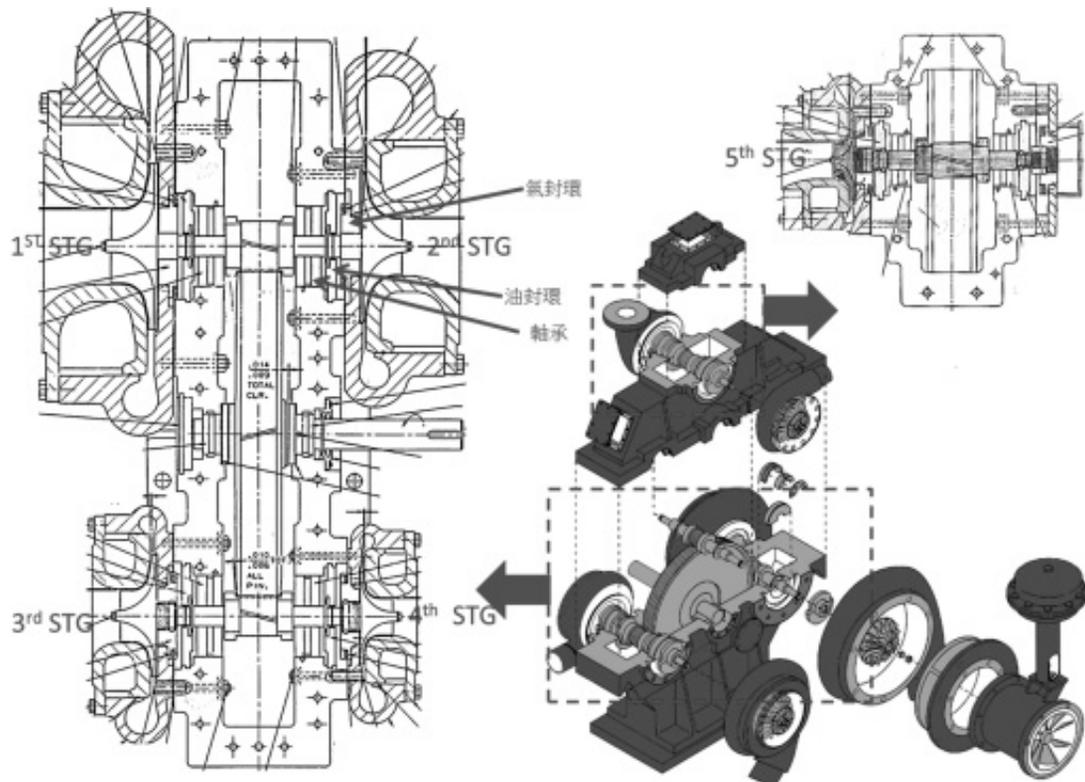


圖 1 TA100M5R3SB 構造示意圖

TA100M5R3SB 為五段壓縮、水冷、離心式空氣壓縮機，採用 3500HP (3 ϕ 、60Hz、6.6KV) 馬達驅動，進口設計容量為 1563m³/hr，額定出口壓力為 366.2psig，馬達輸入轉速為 1800RPM，第一、二級與第三、四級葉輪分別為同軸設計，第五級葉輪單獨設置，透過馬達驅動齒輪箱中之之 BULL GEAR，進而帶動與其相連之各段轉軸，其各軸之轉速分別為：24320 RPM (第一、二級)、31268 RPM (第三、四級)、39086RPM (第五級)，其構造示意圖如上圖 1。

三、漏油可能之原因探討

(一)內部密封機構不良

一般而言，離心式空壓機皆設置有內部密封機構，目的在避免空壓機齒輪箱及軸承室內部的潤滑油流進葉輪側，造成壓縮空氣混油，或葉輪側壓縮後之空氣向空壓機齒輪箱及軸承室洩漏；TA100M5R3SB 空壓機之內部密封機構為常見之迷宮型密封環設計（如下圖 2），其原理是在轉軸上沿軸向（洩漏方向），設若干個依次排列的環形迷宮齒，因為齒與齒之間構成一連串的截流間隙與膨脹室，當介質在通過這些曲折間隙的期間，不斷的交互產生節流、膨脹過程，使其穿透能量衰減，進而達到減少洩漏的目的；雖然迷宮型密封機構因轉子和機殼間存在間隙，具有無需潤滑並允許熱膨脹等優點，但可能因為齒環磨損、間隙調整不良而無法達到預期的密封效果，另有相關的研究指出，當介質流經迷宮型密封機構齒間的環形腔室時，在其內部產生的圓周向流動，將大幅減少其阻漏效果。由下圖 2 可知，如氣封環密封不良，則葉輪出口產生之壓縮空氣，可能大量的沿軸向侵入至軸承、齒輪箱內，造成機殼及油槽內壓力上升，負壓系統失效，油氣竄出滲漏。

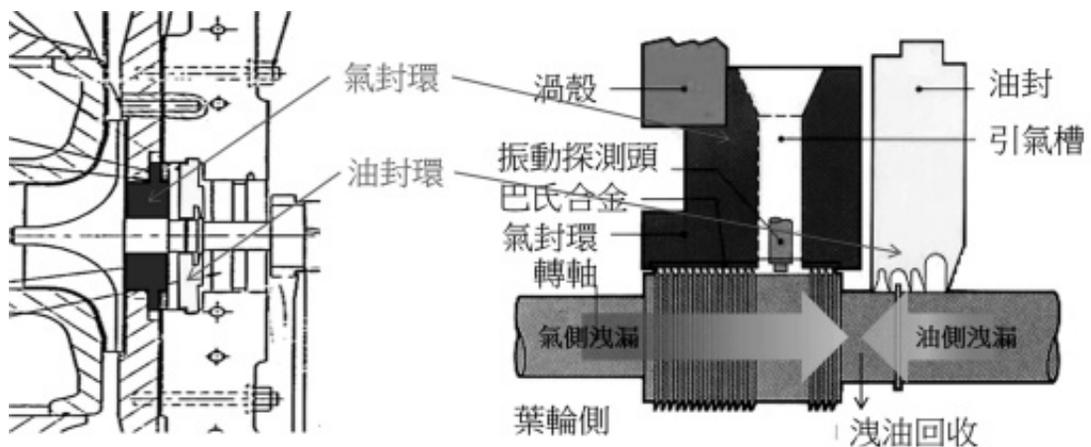


圖 2 TA100M5R3SB 內部密封機構（氣封環、油封環）示意圖

因壓縮機出口空氣未經冷卻時可達 120°C 以上，如因氣封不良致使壓縮後之空氣洩漏進入軸承室、齒輪箱中，勢必造成該段軸承溫度、潤滑油溫度、齒輪箱壓力因而上升，然就檢修前、後運轉紀錄顯示，滲漏情形不一的 4 台 TA100M5R3SB 型空壓機，其各數據並無明顯差異，且查核此型空壓機之拆檢維護紀錄，各段之氣封齒環不僅外觀良好，其與轉軸之間隙值亦皆保持在原廠維護手冊之標準值內，甚而為確保其密封效果，間隙值皆調整在標準值之下限，而經數次更換氣、油封盤新品並逐步調降間隙值後，雖對滲、漏油稍有改善，但仍無顯著效果。

(二)機體接合面密封不良

因機體潤滑油滲漏位置，有一大部分是出現在齒輪箱上、下蓋接合面之非特定位置，故拆檢期間亦曾檢查接合面狀況，除了確保表面皆未出現侵蝕、腐蝕等受損情形外，同時搭配紅丹塗覆後之試裝配，確認接合面具有全面性的貼合；由於本型空壓機之齒輪箱上、下蓋接合面間未設計有止漏配件（如 ORING、PACKING 等），故為加強此處之密封能力，維護人員曾先後嘗試使用兩型耐高溫 SILICON（下表 1），塗覆於接合面間作為止漏措施，其最高耐用溫度皆遠高於機體運轉時齒輪箱 CASING 所測得之最高金屬溫度（~95°C），經塗覆後實測結果，此做法之短期成效良好，其中 LOCTITE SI 587 雖耐溫較低，但其防油、防蝕特性更適合用於空壓機齒輪箱機殼端蓋，止漏成效及保持期亦較 LOCTITE SI 596 顯著提高，在未有其他改善下，約可維持 6 個月之運轉不出現滲漏，雖仍無法維持長期止漏，但此測試結果顯示，機體接合面的密封設計及 SILICON 的選用，皆是影響空壓機機體密封成效的顯著原因。

表 1 兩型耐高溫 SILICON 規格比較

	LOCTITE SI 587	LOCTITE SI 596
顏色	藍色	紅色
硬化型式	濕氣硬化、 室溫硫化 (RTV) 硬化	室溫硫化 (RTV) 硬化
接著時間	30 分鐘	
完全硬化溫度	25 (°C)	
完全硬化時間	24 小時	
特性	提升防油、防蝕能力	----
應用技術	矽膠	
適用溫度範圍	-59 to 260 (°C)	-59 to 316 (°C)

(三)油槽負壓不足

目前市售中、大型離心式空壓機普遍設計有油槽負壓系統，使油槽及其相通之齒輪箱內維持輕微之負壓環境，目的在降低油氣向外逸散並確保油系統回油順暢，TA100M5R3SB 型空壓機亦設計有油槽負壓系統，其構造示意圖如下圖 3 所示，一個透過外部壓縮空氣驅動之射流泵（JET PUMP）裝設於油槽及油細霧濾網間之管路，當壓縮空氣流經射流泵內部噴嘴時，因喉部氣流加速產生捲吸效果形成負壓區域，進而將機殼內的油氣抽出，而混合後之油氣則經由油細霧過濾器濾除大部分油滴後排出。

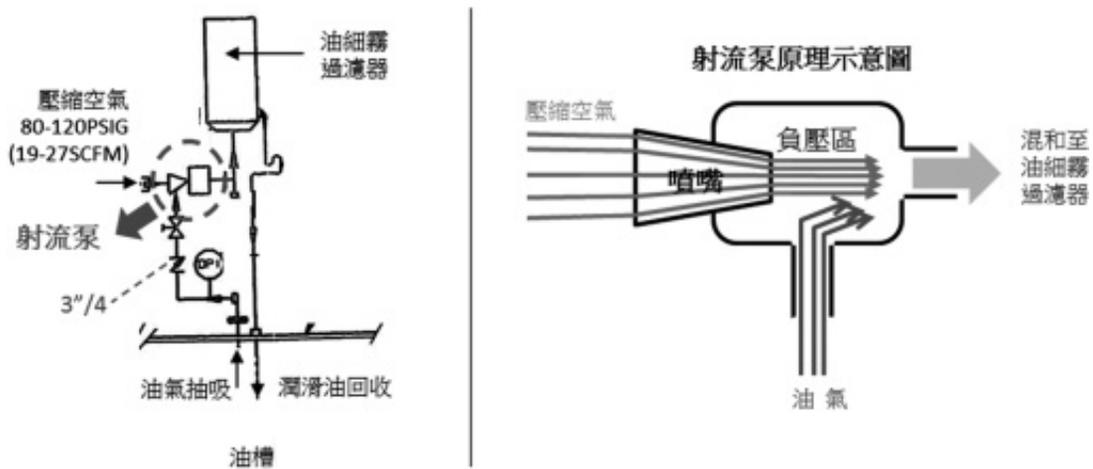


圖 3 TA100M5R3SB 負壓系統構造及射流泵（JET PUMP）原理示意圖

依據 TA100M5R3SB 型空壓機設計規範，其負壓系統須能夠使空壓機齒輪箱機殼內保持 $-6\sim-12\text{Kpa}$ 之負壓環境，目前本廠用於驅動射流泵之氣源壓力約為 103PSIG，而空壓機全載運轉下齒輪箱內部之環境壓力僅約為 -1Kpa ，遠不及其設計規範。因前述氣封盤間隙值皆已保持在規範允許之下限，故推測造成油槽負壓不足的原因，並非為壓縮後之高壓空氣竄入齒輪箱機殼內所致，可能原因為：

1. 抽吸管路、油細霧濾網堵塞

由上圖3可知，如抽吸管路堵塞，則機殼內部油氣將無法透過負壓系統宣洩，導致壓力上升，如油細霧濾網堵塞則射流泵下游背壓增加，將使得噴嘴出口的流速下降影響抽吸效果；經維護人員拆檢同時油洗抽吸管路，確認無堵塞，並嘗試將裝設於細霧過濾器內的6支濾心抽除4支，然空壓機全載運轉下，齒輪箱內部之負壓值仍未獲得有效的提升。

2. 負壓系統抽吸量不足

在確認管路通暢的前提下，如欲提升既有負壓系統之抽吸效果，唯有加大射流泵容量或驅動氣源壓力，但必須特別注意的是，因為射流泵管路與油槽相通，故用於驅動氣源之空氣品質需特別要求，一般壓縮空氣如未經處理，內部所含之水分可能汙染油槽或造成噴嘴結垢、髒堵，因而本廠採用空氣品質較高之儀用空氣作為射流泵驅動氣源，惟其氣源壓力設定已達 103PSIG 上限，且為顧及機組主要控制設備所需之儀用氣源，固而不宜提升射流泵負壓系統之容量。

為釐清「負壓不足」是否為造成空壓機漏油之原因，本廠維護人員改採用「油槽抽氣扇」設計，取代既有之射流泵抽氣機構及油細霧過濾器，並配合抽氣扇進口尺寸，將原抽吸管路由 3/4 吋加大為 4 吋，其配置方式及抽氣扇規格如下圖4、5所示。

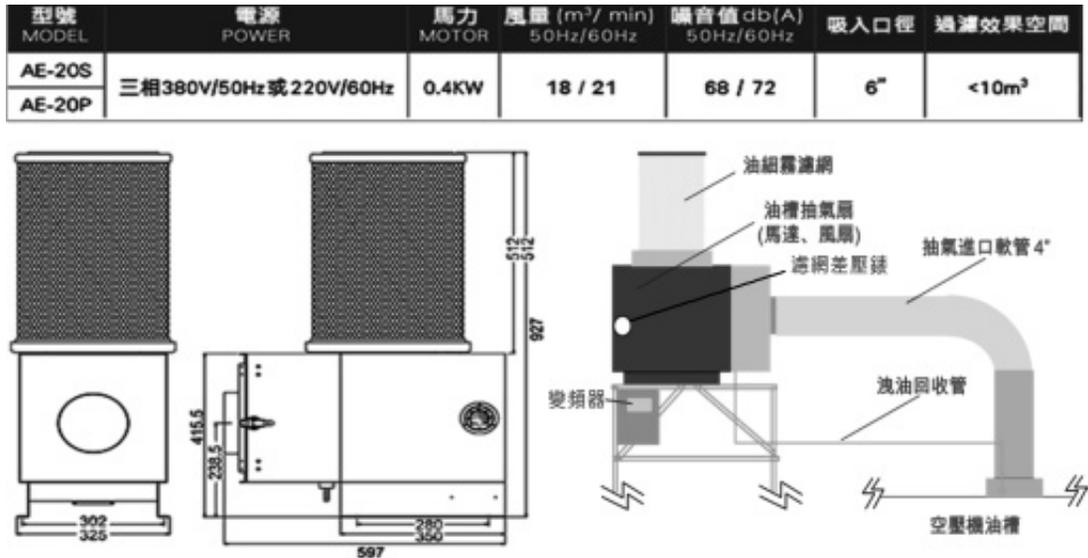


圖 4 油槽抽氣扇負壓系統規格及配置示意圖

此抽氣扇與主馬達起、停信號連鎖，不須額外之儀用氣源並具備前置過濾桶，可先粗濾進口油氣中 $>2\mu\text{m}$ 之油霧，連同後段因風扇離心效果而分離之油滴，收集回收至空壓機油槽，而出口之高效率油細霧過濾器，可進一步將 $>0.3\mu\text{m}$ 之油霧捕捉、收集，避免影響環境空氣，此外改良後之油槽抽氣扇設有變頻轉速控制功能，藉此可調整馬達轉速，控制風扇進口風量將機殼內壓力調整在適當範圍；經裝設後實測，空壓機全載運轉下，抽氣扇轉速僅須70%時，其齒輪箱內部之壓力值即可保持在-10Kpa，負壓系統容量大幅提升。

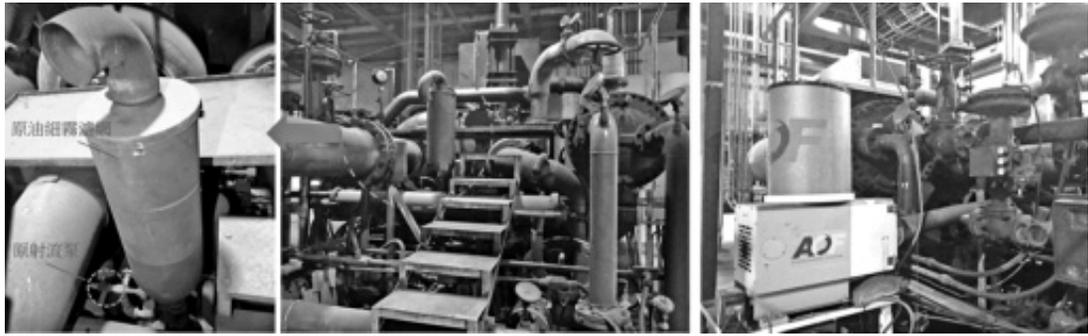


圖 5 原設計之射流泵管路（左）、改良後之油槽抽氣扇（右）

經改良2部 TA100M5R3SB 型空壓機之油槽負壓系統，使空壓機運轉時，齒輪箱可維持在-10 Kpa 負壓後，空壓機機體漏油改善成效顯著，已運轉近1年仍未出現先前發生的嚴重滲、漏油問題，而齒輪箱端蓋的滲油情形也有明顯改善，其中搭配塗覆耐高溫 SILICON 檢修後之機組，已完全無出現漏、滲油問題。

四、結論

由於本型空壓機自裝機以來即出現漏油問題，原先對內部密封裝置磨損、間隙過大導致齒輪箱內壓力上升的懷疑，在經過調整及量測確認後已被排除，推測該型機組原配置之射流泵及抽吸管路，因容量不足造成負壓效果不如預期設計效果，而齒輪箱內部的油氣在高溫下，因無法獲得足夠的宣洩而自轉軸處、接合面向外逸散，進而造成機體多處漏油或滲油；此外因機組潤滑方式為噴淋式，油滴在受到齒輪、轉子高速切線撞擊後，獲得更大的動能，加強其向機殼內壁面之沖擊、竄流能力，當齒輪箱接合面無止漏配件（如ORING、PACKING等）下，如無塗覆有效且防油之SILICON作為止漏措施，則潤滑油易在端蓋及接合面處滲漏，經本廠人員改善負壓抽氣容量及接合面止漏措施後，現空壓機的漏油問題已獲得解決。

五、參考文獻

- [1] COOPER TA100M5R3SB 操作維修技術手冊。
- [2] 楊兆亮「離心式空壓機密封失效故障分析與改進」濟南鮑德氣體有限公司，山東濟南。2017
- [3] 李燕坡，王吉鵬，曹彥恒「離心式壓縮機密封技術的應用綜述」河南煤業化工集團煤氣化公司義馬氣化廠。2011



台灣省鍋爐協會 出版書刊一覽表

書 名	定價 (元)
◎ 甲級鍋爐操作人員安全衛生教育訓練教材	800
◎ 乙級鍋爐操作人員安全衛生教育訓練教材	600
◎ 小型鍋爐操作人員特殊作業訓練教材	250
◎ 第一種壓力容器操作人員訓練教材	300
◎ 高壓氣體特定設備操作人員安全衛生教育訓練教材	550
◎ 固定式起重機操作人員訓練教材	360
◎ 荷重在一公噸以上之堆高機操作人員訓練教材	240
◎ 安全閥檢測及設備壓力試驗訓練教材	400
◎ 熱媒鍋爐	400
◎ 鍋爐知識	每期 200

郵政劃撥 0028277-1

戶名：台灣省鍋爐協會

