

燃燒

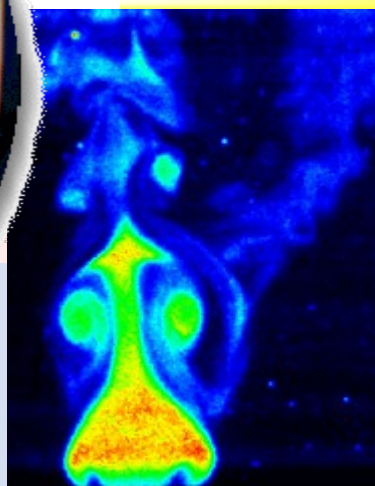


中華民國燃燒學會
The Combustion Institute of R.O.C

季刊

Combustion Quarterly

114



中華民國一百一十年八月

Vol. 30, No. 3

燃燒季刊

Combustion Quarterly

第三十卷 第三期 中華民國一百一十年八月出版

Vol.30, No.3

Aug 2021

目錄

CONTENTS

編輯札記	3
江鴻龍、侯順雄	
台化公司 PTA 廠精進空污防制設備之成效	4
王信凱、王勝文、江明家、沈大為、黃溢銓	
以官能基化奈米碳管作為奈米鉑觸媒之載體的特性研究	9
江右君、吳帛軒、岳恆屹、林俊宇、楊景松	
環境 PM2.5 自動監測與火災溯源應用	24
陳莉沂、李興旺、楊逸群、黃美芳、周妙鳳	
火炸藥廢料應用高效率蒸氣發電系統之設計概念	37
陳頤專、黃信彰、羅瑋皓、邱維振、簡大為、 吳承祖、林士淵、陳昆煜、李耀文	
燃料電池系統長期運轉組件失效分析與優化策略評估	47
詹彥信、楊証皓、張勳承、張文昇、李鈞函	
台灣水泥業單位產品能源使用分析	61
劉毅弘、潘子欽	
工業都會區之環境大氣有害空氣污染物濃度特徵	75
蔡欣汝、陳致廷、王家麟、戴忠良、陳宜佳、劉文治	
歐盟循環經濟推動進程暨創新合作平台	89
蘇靜惠、薛欣達、張祖恩	
徵稿說明	112

編輯札記

自工業革命以來，機器大量取代人力，全球皆依賴燃燒化石燃料之方式取得動力與電力。燃燒化石燃料將排放巨量溫室氣體於大氣中，而這些溫室氣體會導致全球暖化，進而造成氣候變遷的危機，也會對人類的健康和全球生態造成危害。因此，開發觸媒材料及控制污染物排放成為全球發展的重要議題。降低污染、改善生態環境及生活品質，並且追求資源的永續利用及發展，才是對於現今最重要的考驗。本期共刊登八篇專業論文，分別來自大專院校、工研院、中山科學研究院、企業等單位之研究成果。

台塑企業總管理處安全衛生環保中心王信凱高級工程師的團隊，說明有關台化公司提升純對苯二甲酸廠排放製程廢氣 VOCs 的處理效率，分別於麥寮及龍德園區由原採用觸媒式焚化爐優化為蓄熱式焚化爐之效益。由於蓄熱式焚化爐具熱回收效率高、燃料耗用低以及操作溫度高等特性，經實際檢測結果，排放減量達 66.0%；元智大學機械工程系江右君副教授與大學部學生，將奈米碳管利用檸檬酸氧化或高分子(Polybenzimidazole, PBI)包覆，再以反微胞法於其表面沉積奈米 Pt 粒子，強化交互作用力，使得 PBI 及其衍生物成為高溫質子交換膜燃料電池操作上最具潛力的高分子材料之一；中國鋼鐵公司新材料研究發展處陳莉沂研究員的團隊，利用 PM_{2.5} 自動監測技術，探討於 2021 年 2 到 4 月監測期間，高雄臨海工業區之 PM_{2.5} 質量濃度與元素成份濃度趨勢變化與排放來源；中山科學研究院陳頤專小組長的團隊探討廢火炸藥高效率蒸氣發電系統之設計概念，根據衍生燃料棒的敏感程度設計鈍感燃料棒(正常模式)和敏感燃料棒(真空模式)兩種燒藥模式，有助於提升廢火炸藥蒸氣發電的可行性；工研院綠能與環境研究所詹彥信研究員的團隊利用失效模式與影響分析(FMEA)與系統熱質能分析方法進行燃料電池系統長期運轉組件失效分析與優化策略評估，系統模擬結果證明，FMEA 分析手法可適用於系統長期運轉之組件失效分析與優化策略之評估；工研院綠能與環境研究所劉毅弘研究員和潘子欽資深研究員分析台灣水泥業單位產品能源使用情形，並與國際水泥主要生產國進行單位產品能源使用比較，分析結果可作為持續推動能效指標與提升節能之參考；工業研究院綠能與環境研究所蔡欣汝研究員的團隊，以臨海工業區為範疇，針對柴油車密集區監測 HAPs，解析工業都會區之 HAPs 物種特徵，研究顯示柴油車密集區域仍會受到固定源工廠排放 HAPs 影響；國立成功大學永續發展研究所薛欣達副研究員的團隊，以歐盟過往公布的大型科研計畫，鎖定循環經濟相關政策進行分析比較，執行 Horizon 2020 計畫所建置的創新合作平台作法，希冀該平台創新思維能帶給國內相關學者做為參考。

本期的內容相當精彩及多元化，每篇皆是學者和研究員們辛苦研究後的結晶，閱讀過程絕對是一場知識的饗宴，也請本刊讀者繼續支持及踴躍投稿本期刊，共同推動燃燒與能源科技之知識分享及研究交流。

副總編輯 江鴻龍
總編輯 侯順雄

台化公司 PTA 廠精進空污防制設備之成效

The Effectiveness Evaluation for the Advanced Air Pollution Control Devices Installed in Formosa Chemicals & Fibre Corporation's Purified Tere-phthalic Acid Plant in Taiwan

王信凱¹、王勝文²、江明家³、沈大為⁴、黃溢銓⁵

Hsin-Kai Wang, Sheng-Wen Wang, Ming-Chia Chiang,

Ta-Wei Shen, Yi-Chuan Huang

台塑企業

Formosa Plastics Group

摘要

近年來環境議題持續受到各界重視，為提升台灣空氣品質，減少民眾受到空氣污染暴露影響，國內近年石化上下游之工廠多投入各項環保設備之改善措施，以及提升空污防制設備效能。台化公司為提升純對苯二甲酸廠排放製程廢氣中 VOCs 的處理效率，分別於麥寮及龍德園區由原採用觸媒式焚化爐(CTO)優化為蓄熱式焚化爐(RTO)，由於蓄熱式焚化爐熱回收效率高、燃料耗用低之特性，以及操作溫度高，對於空氣污染物處理效率較高，經實際檢測結果，VOCs 排放濃度由 100 ppm 降至 34 ppm，減量達 66.0%。

關鍵字：純對苯二甲酸廠、蓄熱式焚化爐、醋酸甲酯

Abstract

In the past few years, environmental issues continue to receive attention from the public; hence, most of the petrochemical producers from in Taiwan invest heavily in the improvement of environmental protection equipment, especially in air pollution control devices for achieving better performance. In order to elevate the treating efficiency of volatile organic compounds (VOCs) in tail gas of purified tere-phthalic acid plants, Formosa Chemicals & Fibre Corporation has introduced regenerative thermal oxidizers (RTO) to replace outdated catalytic thermal oxidizers (CTO) in both Lungder and Mailiao branches. RTO has strengths in high heat recovery efficiency, low fuel consumption, and better air pollution removal performance brought by high operational temperature; therefore, the VOC concentration in tail gas has reduced to 34 ppm from 100 ppm (removal rate increased 66%).

Keywords: Purified tere-phthalic acid plant, Regenerative thermal oxidizer, Methyl acetate.

¹ 台塑企業總管理處安全衛生環保中心，高級工程師

E-mail: whsinkai@fpg.com.tw

² 台灣化學纖維股份有限公司麥寮 PTA 廠，副廠長

³ 台灣化學纖維股份有限公司麥寮 PTA 廠，副課長

⁴ 台灣化學纖維股份有限公司麥寮 PTA 廠，工程師

⁵ 台塑企業總管理處安全衛生環保中心，副總經理

一、前言

台灣化學纖維股份有限公司(以下簡稱台化公司)於台灣雲林麥寮及宜蘭龍德園區，設置純對苯二甲酸(Purified Tere-phthalic Acid, PTA)廠，合計年產能可達 170 萬噸，其生產之 PTA 為聚酯產品(Polyester)之主要原料，聚酯產品應用範圍極廣，從紡織纖維用品、飲料瓶、工業絲、膜類製品、工程塑膠、塗料樹脂、增塑劑等，皆有使用。

台化公司麥寮及龍德 PTA 廠分別於 1997 年及 2002 年建廠時，即以最佳可行控制技術(Best Available Control Technology, BACT)設置空氣污染防治設備，麥寮及龍德 PTA 廠均設置二座低壓觸媒式轉化器(Catalytical Thermal Oxidizer, CTO)，可確保空氣污染物排放濃度可符合環保署「揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」之規定。惟隨著國際間對空氣品質日漸重視，台灣環保署亦逐步加嚴固定污染源排放標準，未來石化相關工廠排放揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOCs)的控管勢必更加嚴格，因此台化公司 PTA 廠致力於環境保護，將其中一座 CTO 設備汰換為三塔式蓄熱式焚化爐(Regenerative Thermal Oxidizer, RTO)，並將另一座 CTO 進行優化，以提升 VOCs 排放濃度之處理效率。由於麥寮及龍德 PTA 廠精進空污防制設備方式均相同，本篇文章將以麥寮 PTA 廠進行說明。

二、台化公司 PTA 廠製程與尾氣特性說明

(一)PTA 廠製程說明

台化公司 PTA 廠製程主要有二個化學反應，一為對二甲苯在含有鈷錳溴離子觸媒之醋酸溶劑中進行氧化反應，另一為 4-羧基苯甲醛在鈰觸媒下進行氫化反應，產品為 PTA；說明如下(如圖 1)：

1. 對二甲苯的氧化反應：

以對二甲苯為原料，醋酸鈷、醋酸錳溴化物為觸媒，醋酸為溶劑，混合加入空氣進行氧化反應，生成對苯二甲酸。因生成物中尚含有部份之氧化中間物及副產物，會影響成品品質，尚不適合作纖維級原料，這些不純物主要是 4-羧基苯甲醛，含有這些不純物之對苯二甲酸，通稱為粗對苯二甲酸(Crude Tere-phthalic Acid, CTA)。

2. 4-羧基苯甲醛的氫化反應：

粗對苯二甲酸之純化主要是將其所含之不純物 4-羧基苯甲醛於高溫高壓下，以鈰為觸媒用氫氣轉化成對甲苯甲酸，然後利用對甲苯甲酸在水中溶解度較高的特性，經結晶分離操作將之去除。

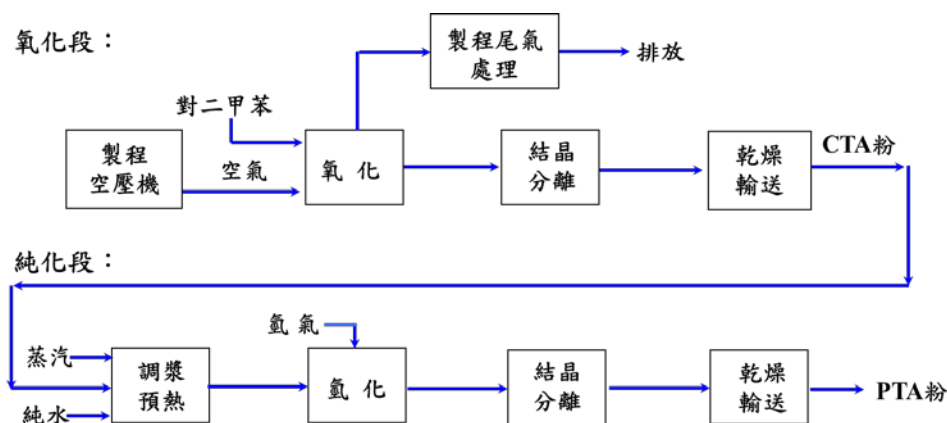


圖 1.台化公司 PTA 廠製程說明

(二) PTA 廠製程尾氣流程與組成

製程生產運作過程中，氧化塔反應所須的氣體，經空壓機壓縮後，送入氧化塔反應，製程尾氣經高壓吸收塔洗滌回收後，再到膨脹機做功回收動力，最後由 CTO(操作溫度控制在 370~450°C)處理排放。製程尾氣組成主要為 VOCs、一氧化碳(Carbon Monoxide, CO)及醋酸甲酯(Methyl acetate, MA)，經 CTO 防制設備處理後，VOCs 排放濃度符合環保署法範之排放標準(150 ppm)[1]，且 MA 特徵物種之排放濃度亦低於嗅覺閾值(180 ppm)[2]，如表 1。

表 1. PTA 廠 CTO 防制設備處理製程尾氣之排放濃度

製程尾氣組成	VOCs	CO	MA
處理前濃度(ppm)	1,920	2,910	1,330
CTO 處理後濃度(ppm)	100	171	13
去除效率	94.8%	94.1%	99.0%

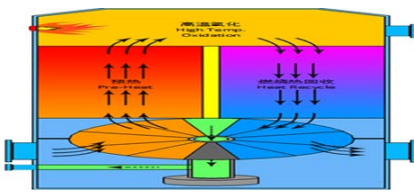
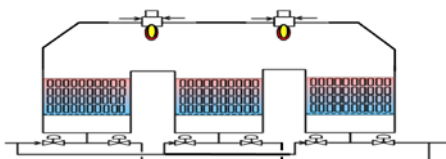
三、台化公司 PTA 廠精進空污防制設備

早期 RTO 防制設備技術尚未成熟，有洩漏之工安疑慮，因此國內 PTA 廠設廠時多採用 CTO，近年隨著 RTO 技術進步，其回收熱能技術及安全性大幅提升，且可大幅降低操作成本，操作溫度高(850~920°C)，可提高製程尾氣排放濃度之處理效率(CTO 及 RTO 設備比較如表 2)，另為確保 RTO 設備可達到最大效益，經評估各型式 RTO 之熱回收效率、燃料耗用性及對空氣污染物去除效率等項目[3~5]，台化公司選定目前國際最新穎技術之三塔式 RTO(如表 3)，並於 2019 年 7 月完成後正式運轉；台化公司 PTA 廠為台灣同業中唯一使用三塔式 RTO 設備[6,7]。

表 2. CTO 及 RTO 設備比較

項目	CTO	RTO
操作溫度	370°C~450°C	850°C~920°C
去除效率	VOCs：95%	VOCs：98%
燃料費用	7,482 仟元/年	2,278 仟元/年
觸媒/蓄熱材 更換費用	白金觸媒更換(5 年壽命) 費用：4,551 仟元/年	蓄熱材(每年耗損 20%) 費用：1,920 仟元/年
運轉成本	12,033 仟元/年	4,198 仟元/年
比較說明	1. VOCs 去除效率>95%，可符合 環保署廢氣排放法規。 2. 使用管式熱交換器僅做一次 廢熱回收(68%)，燃料耗用高。	1. 由於 RTO 操作溫度高，VOCs 去除效率較高(>98%)。 2. 使用蓄熱陶瓷，熱回收效率高 (95%)，燃料耗用低。

表 3. 旋轉式 RTO 與三塔式 RTO 設備之比較

項目	旋轉式 RTO	三塔式 RTO
圖示		
運轉 模式	1. 入/出氣閥為單一顆旋轉式閥體。 2. 位於爐體下方，採旋轉水平 切換。	1. 入/出氣閥為各別獨立閥體。 2. 位於爐體兩側，獨立切換。
設備優/ 缺點	1. 旋轉閥密封件材質為彈性碳鋼 複合材料，長期運轉密封性會 變差。 2. 氣體轉動閥與定子間以石墨 密封環止漏，長時間運轉易產生 偏擺，密封環磨耗不均產生 微洩漏。	塔式焚化爐碟片與閥座為金屬 材質耐腐蝕，在高溫下操作金屬 密封效果較好。
處理 效率	>98 %	>98%

將空污防制設備由 CTO 精進為三塔式 RTO 後，VOCs 排放濃度由 100 ppm 降至 34 ppm，減量 66.0%；CO 排放濃度由 171 ppm 降至 54 ppm，減量 68.4%；

MA 排放濃度由 13 ppm 降至 8 ppm，減量 38.5% (如表 4)，顯示三塔式 RTO 對污染物減量結果，較 CTO 更具成效，另由於 RTO 操作溫度(850~920°C)較 CTO(370°C~450°C)高，由 CO 排放濃度結果顯示燃燒較為完全，且可節省燃料達 69.6%(RTO 操作之燃料費用為 7,482 仟元/年，CTO 為 2,278 仟元/年)，對於節能減碳有正面助益。

表 4. CTO 及 RTO 設備之排放濃度比較

製程尾氣組成	VOCs	CO	MA
原 CTO 之排放濃度(ppm)	100	171	13
精進三塔式 RTO 之排放濃度(ppm)	34	54	8
減量比率	66.0%	68.4%	38.5%

四、結論

1. 台化 PTA 廠建廠設置 CTO 防制設備，其空氣污染物排放濃度已可符合法規。
2. 精進三塔式 RTO 防制設備後，對 VOCs、CO 及 MA 之排放濃度，較 CTO 更具去除成效。
3. 台塑企業對於環保設備投入一直秉持著高度重視，未來將持續評估國際最新污染防制技術，以達友善環境及善盡企業責任。

五、參考文獻

1. 揮發性有機物空氣污染管制及排放標準，行政院環境保護署，2013。
2. 安全資料表(乙酸甲酯)，勞動部職業安全衛生署，網址：
<https://ghs.osha.gov.tw/CHT/intro/MSDS.aspx?casno=7D79CFB4E2E3F70CC75D7E699FF4333D>。
3. 揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，經濟部工業局，2007。
4. 葉代啟，工業揮發性有機物的排放與控制，科學出版社，北京，2017。
5. 張銘恩，兩種蓄熱式焚化爐應用於半導體製程廢氣處理之效能比較，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2019。
6. 石化業不明異味及臭氣前驅物溯源改善管制成效檢討會，行政院環境保護署，2020。
7. 空品區固定污染源污染減量推動及六輕工業區污染改善計畫，行政院環境保護署，2020。

以官能基化奈米碳管作為奈米鉑觸媒之載體的特性研究

Characterization of Platinum Nanocatalysts Deposited on Functionalized Carbon Nanotubes

江右君¹、吳帛軒²、岳恆屹³、林俊宇⁴、楊景松⁵

Yu-Chun Chiang, Pai-Hsuan Wu, Heng-I Yueh, Chun-Yu Lin, Ching-Sung Yang

元智大學機械工程學系

Department of Mechanical Engineering, Yuan Ze University, Taoyuan, Taiwan

摘要

本研究將奈米碳管(Carbon nanotubes, CNTs)予以檸檬酸氧化或高分子(Polybenzimidazole, PBI)包覆，再利用反微胞法於其表面沈積奈米 Pt 粒子。利用 CNTs 的表面官能基化，改善與奈米 Pt 粒子的界面鍵結，強化交互作用力。檸檬酸氧化為常見表面稼接含氧官能基的方法；PBI 及其衍生物已發現為高溫質子交換膜燃料電池操作上最具潛力的高分子材料之一，因其質子傳導能力除了利用運載機理外，亦可透過跳躍機理。研究發現，Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNTs 之 Pt 平均粒徑分別為 2.55 ± 0.58 和 3.51 ± 0.80 nm。沈積在 PBI-CNT 表面之 Pt 的結晶化程度較佳，但 Pt/cCNT 之抗氧化能力優於 Pt/PBI-CNTs。奈米 Pt 之表面化態分佈明顯受到基材表面改質的影響；Pt/cCNT 之 Pt 粒子以金屬 Pt 最多(52.2 at. %)，但 Pt/PBI-CNT 則以 Pt (II)為主(73.5 at. %)、且有極低的 Pt(IV)殘留。Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNT 之電化學活性面積(ECSA)分別約為 51 和 56 m²/g，優於商用 Pt/C 樣本；Pt 的利用率可達 46 % (Pt/cCNT)和 70 % (Pt/PBI-CNT)。循環操作 600 圈後，ECSA 的衰減率分別約為 8 % (Pt/cCNT)、9 % (Pt/PBI-CNT)、和 75 % (Pt/C)。研究結果顯示，檸檬酸氧化或 PBI 包覆 CNTs 均可使 Pt 有效發揮其電化學活性和耐久性，可能因 Pt 離子和表面含氧官能基或 PBI 分子形成配位所致。而 Pt/PBI-CNT 的電化學活性稍佳，可能係來自 Triple-phase boundary 奈米結構的形成。

關鍵字：奈米碳管、官能基化、觸媒、材料特性分析、電化學活性

Abstract

In this study, carbon nanotubes (CNTs) were functionalized using citric acid (denoted as cCNT) or polybenzimidazole (denoted as PBI-CNT) and Pt nanoparticles were then deposited on the functionalized CNTs by means of a colloidal process. To improve the interfacial interactions between Pt nanoparticles and the CNTs through the functionalization of CNTs. Citric acid oxidation is a commonly used method for introducing the surface oxides.

-
- ¹ 元智大學機械工程學系，副教授
E-mail: ycchiang@saturn.yzu.edu.tw
- ² 元智大學機械工程學系大學部學生
- ³ 元智大學機械工程學系大學部學生
- ⁴ 元智大學機械工程學系大學部學生
- ⁵ 元智大學機械工程學系大學部學生

PBI and its derivatives are some of the most promising candidates for high temperature proton exchange membrane fuel cells since the proton transfer occurs not only by the vehicle mechanism but also by the hopping mechanism. The results showed that the average sizes of Pt nanoparticles were 2.55 ± 0.58 nm (Pt/cCNT) and 3.51 ± 0.80 nm (Pt/PBI-CNT). The Pt nanoparticles deposited on PBI-CNT exhibited excellent crystallization, while the resistance to oxidation of Pt/cCNT was better than Pt/PBI-CNT. The chemical states of Pt were dependent on the functionalization of CNTs. Metal Pt was predominant in Pt/cCNT, but the Pt (II) was the most abundant chemical state in Pt/PBI-CNT with a low content of Pt (IV). The values of the electrochemical surface area (ECSA) were 51 (Pt/cCNT) and 56 (Pt/PBI-CNT) m^2/g , much better than that of one commercial Pt/C sample. Moreover, the Pt utilization efficiency were 46 % for Pt/cCNT and 70 % for Pt/PBI-CNT, respectively. The degradation of ECSA values after 600 cycles was 8% for Pt/cCNT or 9 % for Pt/PBI-CNT, much excellent than that of the commercial Pt/C (75%). It was believed that the long fibrous structure of CNTs and strong interactions between Pt particles and CNTs were of great significance for exerting the electroactivity of Pt particles. Moreover, the coordination of the Pt ions with the surface oxides or PBI molecules could be responsible for the high electroactivity and utilization. The high ECSA of Pt/PBI-CNT could also be attributed to the formation of triple-phase boundary.

Keyword: Carbon nanotubes; Functionalization; Catalyst; Characterization; Electrochemical activity

一、前言

燃料電池具有能源轉換效率高、功率密度高、低污染排放等優點；其中，質子交換膜燃料電池(Proton exchange membrane fuel cells, PEMFCs)因體積小、組成簡單、且效能佳，受到特別的關注。PEMFCs 的電化學性能主要受限於觸媒的活性、利用率、和耐久性。電極上的觸媒在氫氧化反應(hydrogen oxidation reaction, HOR)和氧還原反應(oxygen reduction reaction, ORR)之活性表現，顯著受到觸媒粒子的形狀、大小、和分散程度的影響。Pt/Carbon black (Pt/C)是目前 PEMFCs 效率最高、且商品化成熟的觸媒。雖然 Pt 有極佳的催化活性、化學安定、交換電流密度高，但全球 Pt 的天然資源有限、且成本高，因此提升 Pt 的活性、利用率和耐久性乃亟待努力的方向。[1]

好的觸媒載體需具備下列特性[1]：(1)導電性佳、(2)與觸媒的交互作用佳、(3)比表面積大、(4)具中孔性結構，導致離子聚合物(ionomer)和高分子電解質可使觸媒粒子接近反應物，建立極佳的三相邊界系統、(5)排水能力佳、(6)抗腐蝕、(7)容易回收貴金屬觸媒等。因為 Carbon black 在一般 PEMFCs 之操作條件下，易出現腐蝕現象；因此，許多其他碳材已被探討作為 Carbon black 之替代選擇的可行性，例如：高表面積碳[2-3]、摻雜 boron 的碳[4]、奈米碳管(carbon nanotubes,

CNTs)[5-7]、奈米碳纖維[8]、CNTs/碳紙[9-10]、石墨碳奈米籠[11]等。

由於導電性高、化性穩定、和比表面積-體積比高，CNTs 已被嘗試取代碳黑且被視為具有潛力的 PEMFCs 之觸媒載體。為了改善 CNTs 與 Pt 奈米粒子間的交互作用，在 CNTs 表面加入含氧官能基團為常見的表面改質方法[7]。例如： H_2SO_4 、 HNO_3 、 KMnO_4 、 H_2O_2 、ozone gas 或 citric acid 等均可修飾 CNTs 表面，稼接如： $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{CO}$ 和 $-\text{OSO}_3\text{H}$ 等含氧官能團[12-21]。這些基團可作為成核位置，提供貴金屬觸媒粒子沈積。

碳材的 Citric acid (檸檬酸)氧化為一簡單且有效的改質技術，與 H_2SO_4 、 HNO_3 氧化的碳材比較，檸檬酸氧化可產生較多的含氧官能基團[18]；因此，可於其上沈積較多的奈米 Pt 粒子。Lin et al. [19]也發現，將 Pt 沈積在檸檬酸氧化的 CNTs 表面，其電化學活性的耐久性優於商用 Pt/C 觸媒。Guo et al. [20]觀察到檸檬酸與 Pt 的莫耳比為 2: 1 時，Pt 可均勻分散在載體表面、且平均 Pt 粒徑大小為 3.82 nm。文獻研究發現檸檬酸的羧基陰離子可吸附在金屬粒子的表面，發揮疏水或庫倫效應，因此檸檬酸也可視為穩定劑[20, 22]。

另一個表面修飾的方法是在 CNTs 表面包覆一層高分子，此乃非破壞性的官能化技術，可保留 CNTs 原有的電化學剛度[23]。Polybenzimidazole (PBI)及其衍生物為高溫 PEMFCs 操作最具潛力的高分子材料之一，因其質子傳導能力除了利用運載機理 (vehicle mechanism) 外，亦可透過跳躍機理 (hopping mechanism)[24]。其中，質子傳導是由水分子經由運載機理所驅動。Okamoto et al. [25]在 CNTs 表面包覆一層 PBI 分子，命名為 PBI-CNT，所包覆之 PBI 的厚度約 2.1 nm (CNTs 半徑約 15 nm)、含量約 23 wt. %；接著將 Pt 粒子沈積在表面。研究發現，CNTs 先包覆一層 PBI 可使 Pt 粒子均勻分散且固定在 CNTs 表面，Pt/PBI-CNT 之平均粒徑約 4.0 ± 1.8 nm。Pt 粒子沈積的比例可由 41 % (未包覆)提高至 58.8 % (包覆 PBI)，由 Far-IR 光譜中出現 Pt-N 的鍵結峰，可推測 Pt 沈積比例的改善係來自 Pt 離子和 PBI 分子間的配位所造成。PBI 除了透過 π - π 交互作用包覆在 CNTs 表面外，PBI 也可視為 Pt 離子的吸收器，利用與 PBI 上芳香環氮的配位，提高 Pt 的沈積比例。因此，PBI 也可提高觸媒載體的 N 含量，N 原子的添加一般認為可改善 ORR 的催化活性[23]。

進一步利用循環伏安法(Cyclic voltammetry, CV)量測結果顯示，Pt/PBI-CNT 的電化學活性面積(Electrochemical surface area, ECSA)約 $44 \text{ m}^2/\text{g}$ ，而 Pt/CNT 的 ECSA 僅 $22.5 \text{ m}^2/\text{g}$ [25]。由此結果推測，沈積在 PBI 膜上的 Pt 應相當接近 CNTs，使 Pt 與 CNTs 間產生電子傳遞現象；但 Pt 粒子仍需曝露在電解質相。此界面結構亦即所謂的理想三相邊界結構(Triple-phase boundary, TPB, structure)，所謂的三相為電子傳遞路徑、質子傳導路徑和氣相反應物，此三相均接觸到氧化還原位置，因此可有效提高觸媒效率。其形成機制為 Pt 粒子先沈積在 PBI 膜表面，接著貫穿至 PBI 膜內部，最後在 CNTs 表面形成緊密接觸結構。Pt/CNT 和 Pt/PBI-CNT 的化學表面積(Chemical surface area, CSA)分別為 58.1 和 $71.1 \text{ m}^2/\text{g}$ 。因此，Pt/CNT 的利用率(ECSA/CSA)為 39 %，而 Pt/PBI-CNT 的利用率則可提高至 62 %，商用

Pt/C 的利用率約僅 54.8 % [26]。

Fujigaya et al. [24]發現，將 Pt 沈積在包覆 pyridine-containing PBI (pyPBI)之 CNTs 上所形成之 Pt/pyPBI-CNT 的電化學活性可達 $51.6 \text{ m}^2/\text{g}$ ，高於 Pt/PBI-CNT 的電化學活性($44.0 \text{ m}^2/\text{g}$)。Matsumoto et al. [27]將 PBI-CNT 先含浸磷酸(Phosphoric acid, PA)，再於其上沈積 Pt 以形成 Pt/PA-PBI-CNT，並以此作為高溫 PEMFC 的陰陽極觸媒(Pt loading: $0.45 \text{ mg}/\text{cm}^2$)。由單電池測試結果發現，在 120°C 、氫氣(陽極)和空氣(陰極)流率分別為 100 和 $200 \text{ ml}/\text{min}$ 、未加濕條件下，以 Pt/PA-PBI-CNT 為觸媒之 MEA 的尖峰能量密度大約是以 Pt/CNT 為觸媒之 MEA 的 2 倍。此結果顯示，在 CNTs 表面的 PA-PBI 層扮演聚電解質(ionomer)的角色，可各別傳遞質子進出陰陽極的 TPB 位置。Luo et al. [28]將 Pt 沈積在包覆 PyPBI 之 CNTs 表面，其將包覆 PyPBI 之 CNTs 取代碳紙作為氣體擴散層，多孔的 CNTs 結構可作為提供氣體反應物的通道，同時疏水的表面也有助於移除反應生成水。

提升催化活性、利用率和耐久性為電化學觸媒量產應用的前題，為探討 CNTs 表面氧化和高分子包覆改質對 Pt/CNT 之材料及電化學特性之影響，因此本研究於商購 CNTs 表面進行檸檬酸氧化或 PBI 包覆，以修飾 CNTs 之表面性質。許多高分子(例如：poly(styrene sulfonate), polypyrrole 等)已被嘗試用來改善 CNTs 的表面性質，以改善貴金屬的附著性和電化學活性。基於 PBI 是高溫 PEMFCs 之膜材的原料，故本研究選用 PBI 作為修飾 CNTs 表面性質的高分子。接著利用反微胞法於 CNTs 表面沈積奈米 Pt 粒子，比較 CNTs 不同改質方法下，附著在表面之 Pt 觸媒的材料和電化學特性的差異。

二、研究方法

2.1 奈米碳管的表面修飾

本研究使用商用多壁奈米碳管(Multi-walled CNTs)作為 Pt 觸媒的基材，CNTs 係購自力準國際企業有限公司。由於純 CNTs 的表面化性相當安定，可能導致 Pt 粒子不易沈積或容易產生團聚現象；因此，本研究將碳管表面予以氧化或高分子處理。選用強度較弱的檸檬酸(Citric acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)作為氧化劑，期望在表面官能基化的過程中可避免碳材表面結構的破壞。氧化流程是先將 200 mg 的 CNTs 加入 3 ml 檸檬酸水溶液中(1.6 mM)，以超音波振盪處理 15 min，接著再利用磁石持續攪拌 1 hr。接著放入 300°C 已預熱好的 Muffle furnace 中處理 30 min，即完成氧化程序。此檸檬酸氧化的 CNTs 樣本，稱為 cCNT。

鑑於高溫 PEMFCs 之膜材使用 PBI，因此本研究選用 PBI 作為包覆 CNTs 的高分子材料，其化學結構如圖 1 所示。PBI 的合成步驟係參考 Brock et al. [29]提出的方法。使用 4,5-Imidazole dicarboxylic acid 和 3,3'-diaminobenzidine 作為原料，加入石蠟油(paraffin oil)，並加入 dodecylbenzenesulphonic acid sodium salt 作為相分散劑。在氫氣下，緩慢加入 Polyphosphoric acid。將溫度緩慢升高至 170°C ，維持 12 h；再將溫度升高至 240°C ，維持 4 h。分散液之顏色將逐漸變成棕色，直至反應結束將變成黑色。收集固體顆粒產物後，使用 n-hexane 洗除殘留的石蠟油，再利用濃硫酸和碳酸氫鈉溶液洗滌、烘乾，即完成 PBI 粉體合成。接著

取適量 PBI 粉體溶解在 N,N-Dimethylacetamide (DMAc) 中，加入 CNTs，利用超音波震盪使 CNTs 均勻分散在溶液中。離心移除溶液，以 DMAc 洗除未鍵結的 PBI，將產物置於真空烘箱(75 °C)中乾燥 24 h，所得到的產物命名為 PBI-CNT。

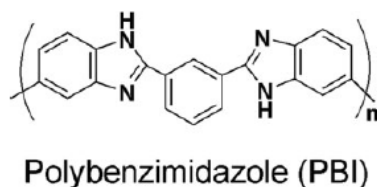


圖 1. PBI 的化學結構

2.2 Pt 奈米粒子沈積

本研究利用反微胞法(Reverse micelle)[7]將奈米 Pt 粒子(20 wt.%)沈積在 cCNT 和 PBI-CNT 表面。選用 $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 為 Pt 的前驅物，其反應過程牽涉到 PtCl_6^{2-} 離子的相轉移以及後續的還原反應。合成流程如下：取 3 ml 的 $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 水溶液(0.08 M)，加入 4 ml 四辛基溴化銨(tetra-n-octylammonium bromide, ToAB, $\text{N}(\text{C}_8\text{H}_{17})_4\text{Br}$)甲苯溶液(0.18 M)。在室溫下劇烈攪拌 30 min，使水溶液中的 PtCl_6^{2-} 離子轉移到甲苯中；其中 ToAB 扮演相轉換催化劑的角色。將橙色有機層取出，加入 0.12 ml 的十二烷基硫醇(1-dodecanethiol, DDT, $\text{n-C}_{12}\text{H}_{25}\text{SH}$)，DDT 作為封端劑，利用超音波振盪器處理 30 min，形成微乳化溶液。接著加入適量 cCNT 或 PBI-CNT，並持續振盪 1 hr，使 CNTs 均勻分散在溶液中。接著將 10 ml 甲酸钠(Sodium formate, HCOONa)水溶液(0.25 M)以一滴一滴的方式滴入上述混合液中(60 °C、磁石攪拌)，滴完後持續攪拌 2 hr，以還原 Pt 離子。以濾紙過濾移除溶液後，收集固體物。利用乙醇洗除過量的十二烷基硫醇(DDT)，再利用大量的去離子水(80 °C)去除殘留的甲酸钠。清洗好的產物先在 100 °C 烘箱中乾燥 24 hr 後，置於管狀高溫爐內，在氫氣中以 800 °C 熱處理 2 hr；所合成之樣本命名為 Pt/cCNT 或 Pt/PBI-CNT。圖 2 為本研究的樣本製備流程示意圖。

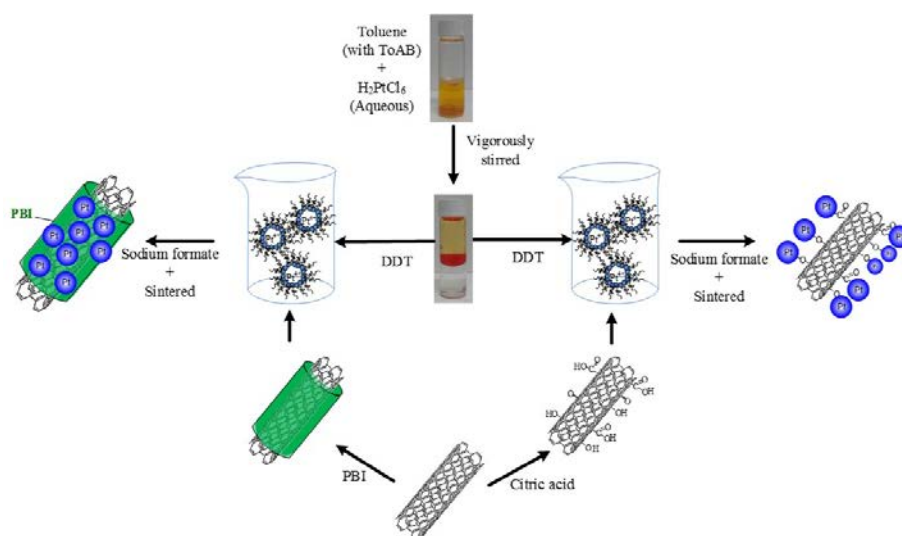


圖 2.本研究的樣本製備流程示意圖

2.3 材料特性分析

本研究利用穿透式電子顯微技術(Transmission electron microscopy, TEM, Hitachi H7100, 200 kV)，將樣本分散後滴於銅網上，觀察碳載體的內部結構和 Pt 粒子的大小與分佈。使用 X 光繞射光譜技術(X-ray diffraction, XRD, Rigaku, Japan, TTRAX III)，分析材料的結晶程度，X 光的靶材為 Cu K α ，波長為 0.154056 nm。熱重分析法(Thermalgravimetric analysis, TGA, TA Instrument 5100)則用於探討樣本的抗氧化能力，實驗過程是在空氣(60 sccm)環境下、以 10 °C/min 的速率升溫，紀錄重量隨溫度的變化。X 光光電子能譜技術(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, PHI 5000 VersaProbe, Ulvac-PHI)用以分析樣本的表面元素組成及化態等，使用 Al K α 為 X-ray 之光源(1486.6 eV)。

2.4 電化學特性分析

本研究利用循環伏安技術(Cyclic voltammetry, CV)，以循環伏安儀(CH Instrument, Model 611C)所得到的 I-V curves 來探討觸媒樣本的電化學活性。在觸媒樣本之漿料配製上，觸媒及 Nafion 的重量比設定在 3：1，加入異丙醇及少量的去離子水，以超音波振盪器處理 4 hr 即可得觸媒漿料。其中，Nafion(陽離子導體)係來自 Nafion dispersion (DuPont, DE-520, 5 wt. %)。電化學活性量測是使用傳統三電極電池：以飽和甘汞電極 (Saturated calomel electrode, SCE)為參考電極，Pt wire 為輔助電極，觸媒樣本為工作電極。使用 glassy carbon 作為工作電極(直徑 5 mm)載台，清洗乾淨且風乾後，使用微量滴管將適量觸媒漿料小心滴在 glassy carbon 上，經自然風乾後，即完成工作電極製作。電解質為 H₂SO₄ (0.5 M)、掃描電位範圍自 -0.2 ~ 1.0 V、掃描頻率為 20 mV/s。掃描次數設定為 600 cycles、解析度為 0.001 V，全程在氮氣環境下操作。

三、結果與討論

3.1 材料特性分析

Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNT 之 TEM 影像和 Pt 粒徑大小之分佈，示如圖 3a-d。檸檬酸氧化並不會破壞奈米碳管原有結構，奈米 Pt 粒子可均勻沈積在 cCNT 表面，未出現顯著團聚現象。Pt/PBI-CNT 之影像可清楚觀察到 CNTs 表面包覆一層 PBI 薄膜，而 Pt 粒子均勻分佈在基材表面。Pt/cCNT 之 Pt 粒徑介於 1 ~ 5 nm，平均為 2.55 ± 0.58 nm，而 Pt/PBI-CNT 之 Pt 粒徑介於 1 ~ 7 nm，平均為 3.51 ± 0.80 nm。此結果顯示，以 cCNT 為 Pt 載體，可使 Pt 平均粒子較小。可能原因為：檸檬酸氧化導致碳管表面加入含氧官能基，此含氧官能基在碳管表面可作為配位基，有利於捕集含有 Pt⁴⁺的反微胞。如此，即可在碳管表面固定且均勻分散反微胞。一旦加入還原劑後即可使 Pt 還原且均勻分佈在碳管表面，亦可避免 Pt 粒子出現聚集。而 PBI 在 CNT 表面可能具有類似含氧官能基的作用機制，PBI 分子與 Pt 離子間產生配位，使 Pt 還原且均勻分佈在碳管表面。可能因 PBI 包覆是全面性的，非特定的活性點位，導致 PBI-CNT 表面附著之 Pt 離子反微胞，在還原後之 Pt 平均粒子稍大。商用 Pt/C (Johnson Matthey, JM)之 TEM 影像和 Pt 粒徑大小之

分佈也顯示在圖 3e-f，作為比較之用。可發現 Pt/C 之 Pt 粒徑介於 0 ~ 4 nm，平均為 2.10 ± 0.48 nm，小於以 CNTs 為載體之 Pt 粒徑大小。

各樣本的 XRD 分析圖譜示如圖 4，在 $20 \sim 26^\circ$ 之繞射峰，為類似石墨結構的特徵峰 C(002)，來自碳載體。不論經檸檬酸氧化或包覆 PBI 高分子，CNTs 之結晶程度均優於 Carbon black。由圖 4a-b 之圖譜可發現在 cCNT 和 PBI-CNT 上沈積之 Pt 粒子的結晶化程度佳。各樣本在 $2\theta = 39.8^\circ$ 、 46.2° 、 67.5° 、和 81.3° 時，均可清楚觀察到 Pt(111)、Pt(200)、Pt(220)、和 Pt(311) 等 Pt 的特徵峰，呈現典型的 Pt 面心立方(f.c.c.)結構。而沈積在 PBI-CNT 上之 Pt 的繞射峰最窄，也暗示在 Pt/PBI-CNT 樣本上的平均 Pt 粒子最大。

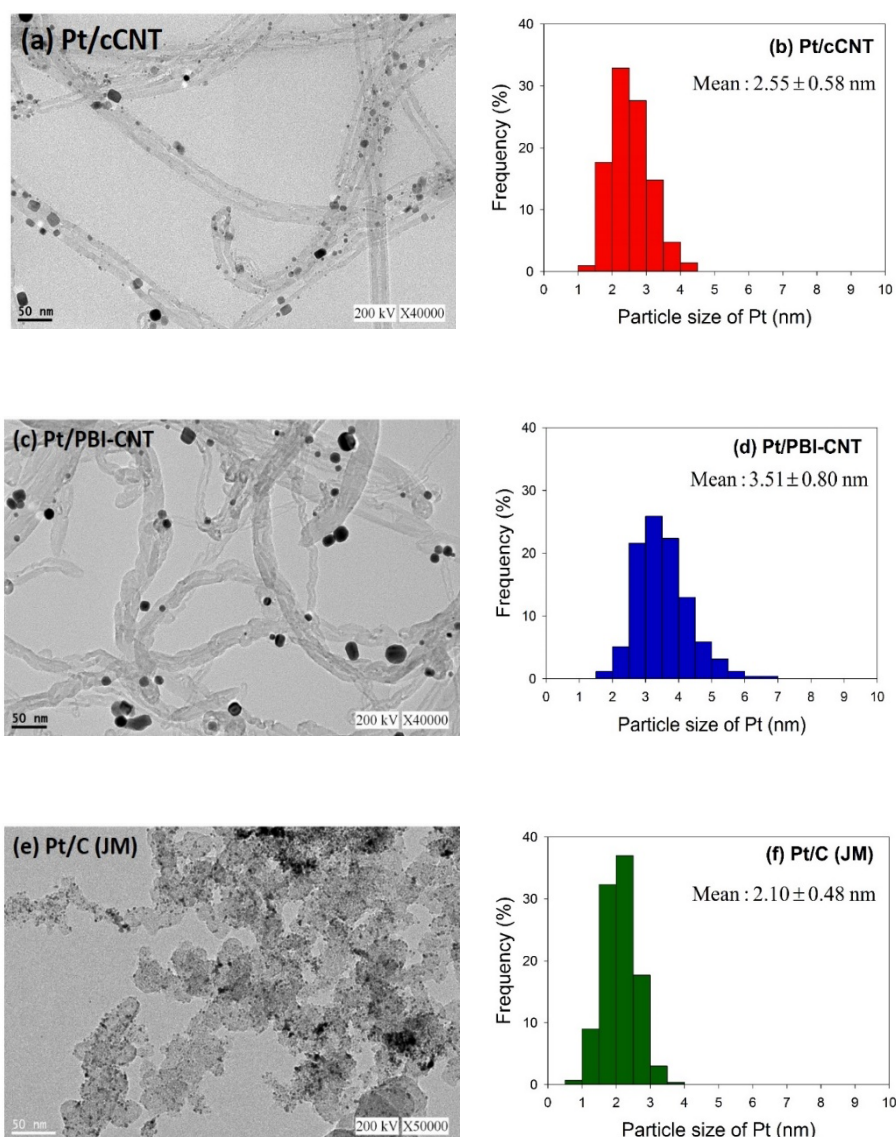


圖 3.觸媒樣本之 HRTEM 影像

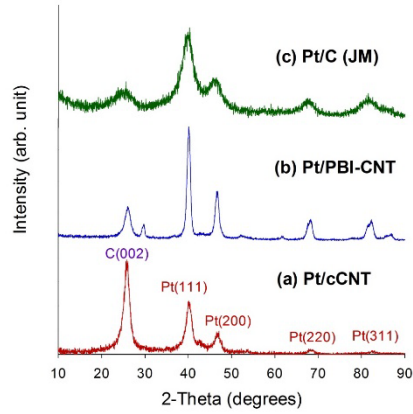
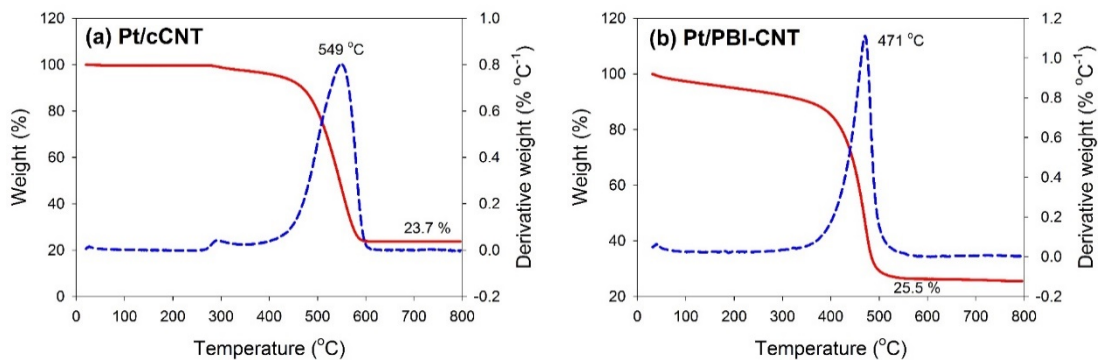


圖 4.觸媒樣本的 XRD 分析結果

圖 5 為各樣本的 TGA 和 DTG (differential thermogravimetry) 分析圖譜，可發現 Pt/cCNT 觸媒大約在 549 °C 出現最大質量損失(圖 5a)；Pt/PBI-CNT 之最大質量損失溫度發生在 471 °C (圖 5b)，商用 Pt/C 則發生在 414 °C (圖 5c)。雖然 cCNT 和 PBI-CNT 之最大質量損失溫度可達 648 和 596 °C (未顯示於此)，而 PBI 及其衍生物的最大質量損失約發生在 500-650 °C 之間 [24-25]。由 TGA 結果可發現 cCNT 之抗氧化能較佳，但 Pt 粒子的沈積會降低樣本的穩定性，使樣本的抗氧化能力稍降。而 PBI 的包覆，也會降低 CNTs 的抗氧化能力。各樣本在 800 °C 處理後的殘留量分別為 2.2 (cCNT)、23.7 (Pt/cCNT)、8.8 (PBI-CNT)、25.5 (Pt/PBI-CNT) 和 20.4 wt.% (Pt/C)；因為基材本身會有灰份殘留(可能為金屬觸媒、或其他不純物等)，因此 Pt/cCNT 或 Pt/PBI-CNT 的殘留量高於理論值(20 wt.%)。在樣本均勻分佈的假設下，可估算 Pt 的含量分別約為 22 (Pt/cCNT) 和 18 (Pt/PBI-CNT) wt.%。



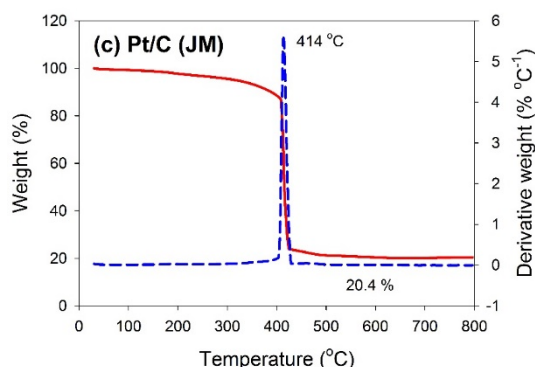


圖 5.觸媒樣本之熱重分析(TGA)結果

XPS 全能譜圖可顯示各樣本最外部表面(表面至數個原子層的深度)的元素組成，如圖 6a 所示。各樣本表面均出現 C1s、O1s、和 Pt4f；Pt/PBI-CNT 樣本還觀察到 N1s peak，應是來自 PBI 分子的貢獻。圖 6b 則比較了各樣本之元素組成比例(atomic ratio, at. %)。Pt/cCNT 之載體雖然經過檸檬酸氧化，但僅有少量氧原子被偵測到，可能是製程經過 800°C 熱處理所致。PBI 的包覆，則使 Pt/PBI-CNT 含有 4 at.% N。而 XPS 分析得到的表面 Pt 含量似乎與 TGA 的結果不一致，推測可能原因為 XPS 是表面分析技術，無法反應整體樣本的實際現象。XPS 分析結果亦顯示，PBI 除了透過 π - π 交互作用包覆在 CNTs 表面外，PBI 也可視為 Pt 離子的吸收器，利用與 PBI 之芳香環氮的配位，提高 Pt 的沈積比例[25]。而 Pt/PBI-CNT 和 Pt/C 之表面氧原子含量明顯較高，因此抗氧化能力較差，與 TGA 分析結果相符。

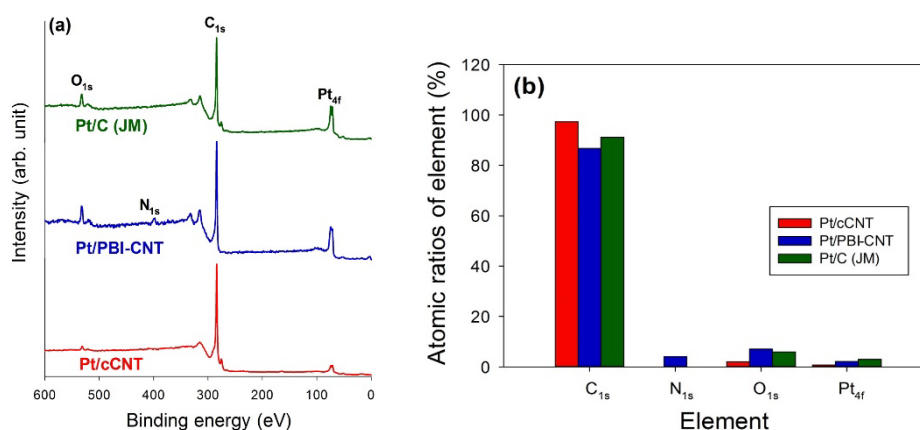


圖 6.各樣本之(a)XPS 全能譜圖、(b)各元素的原子比

表 1 為各樣本之 XPS C 1s peak 高解析分析圖譜之官能基擬合分析結果，最多可解析出 7 種官能基團[30]。由表中可發現，C (sp^2)和 C (sp^3)是樣本表面最主要的官能基團。C (sp^3)/C (sp^2)之比值，依序為 Pt/cCNT > Pt/PBI-CNT > Pt/C，顯示檸檬酸氧化可能會破壞 CNTs 的石墨化結構。所有的樣本均含有 -COOH 基團；

以 Pt/PBI-CNT 最多。但 $\pi \leftrightarrow \pi^*$ 基團在 Pt/PBI-CNT 中並未被觀察到，可能是 CNTs 被 PBI 薄膜包覆所致。XPS O 1s peak 之高解析分析結果，示如表 2，可解析出 5 種含氧官能基團[31]。三樣本最主要的含氧官能基團均為-O-C=O 或-OH；Pt/cCNT 有較高比例的-C=O；Pt/PBI-CNT 和 Pt/C 則有較高比例的 C-O-C 或 C-O-R。

表 1. 各樣本之 XPS C 1s peak 之高解析分析結果(原子百分比，at.%)

Binding energy (eV)	Functional groups	Pt/cCNT	Pt/PBI-CNT	Pt/C (JM)
284.6	C (sp ²)	48.7	50.5	50.7
285.4	C (sp ³)	37.9	32.8	26.7
286.0	-OH	—	—	7.4
287.6	C=O	—	7.2	—
288.8	-COOH	3.8	9.5	6.5
290.6	Carbonates	1.4	—	0.7
291.6	$\pi \leftrightarrow \pi^*$	8.3	—	7.9

表 2. 各樣本之 XPS O 1s peak 之高解析分析結果(原子百分比，at.%)

Binding energy (eV)	Functional groups	Pt/cCNT	Pt/PBI-CNT	Pt/C (JM)
531.1	C=O	35.6	18.7	18.6
532.3	R-O-C=O, O=C-NH ₂ , O=C-O-C=O, -OH, R-O-R	36.3	30.3	27.8
533.3	R-O-C=O, O=C-O-C=O	5.4	26.0	26.6
534.2	-COOH	13.5	12.4	21.7
536.1	H ₂ O	9.1	12.6	5.3

圖 7a 為 Pt/PBI-CNT 之 XPS N 1s peak 的高解析分析圖譜，可解析出 5 種含氮官能基團，分別為 aromatic N-imines、pyridine-like structures、pyrrolic or amine moieties、pyridine-N-oxides、和 shake-up satellites [31]，各官能基之含量原子比示如圖 7b。主要含氮官能基團為五元環的 pyrrolic or amine moieties (54.5 at.%) 和六元環的 pyridine-type structures (29.2 at.%)；此乃 PBI 結構的特徵。

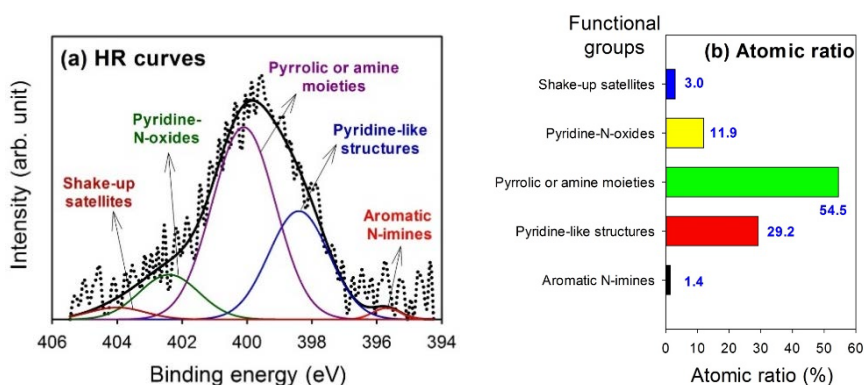


圖 7. Pt/PBI-CNT 之 XPS N 1s peak 的 (a) 高解析分析圖譜、(b) 各官能基之含量比

三樣本之 XPS Pt 4f 高解析分析結果，示如圖 8 和表 3，共解析出 3 組 doublets。

出現在 71 和 74.35 eV 的 doublet 代表金屬 Pt (Pt^0)；在 72.4 和 75.75 eV 的 doublet 代表非晶質 Pt^{2+} 離子 (Pt(II))，例如： PtO 或 Pt(OH)_2 [32]；74.9 和 78.25 eV 的 doublet 代表 Pt^{4+} 離子 (Pt(IV))。可發現三種 Pt 化態的比例，在 Pt/cCNT 和 Pt/C 較接近，而 Pt/PBI-CNT 則出現不同的分佈。在 cCNT 上所還原沈積的 Pt 粒子的化態主要為 Pt^0 (52.2 at. %)，依序分別為 Pt(II) (22.2 at. %)和 Pt(IV) (25.6 at. %)；Pt/C 上的 Pt 化態分佈類似， Pt^0 約占 53.2 at. %。但 Pt/PBI-CNT 則以 Pt(II) 為主 (73.5 at. %)，其次為 Pt^0 (22.9 at. %)， Pt(IV) 僅 3.6 at. %。此結果顯示，對於 Pt/PBI-CNT，前驅物的 Pt^{4+} 幾乎完全被還原為 Pt^{2+} (居多)和 Pt^0 。反之，對於 Pt/cCNT 和 Pt/C，約有 1/4 的 Pt^{4+} 前驅物仍未被還原。推測 CNTs 表面包覆的 PBI 薄膜，使 Pt 離子和 PBI 分子間形成配位鍵，使 Pt 可以安定地附著在載體表面。

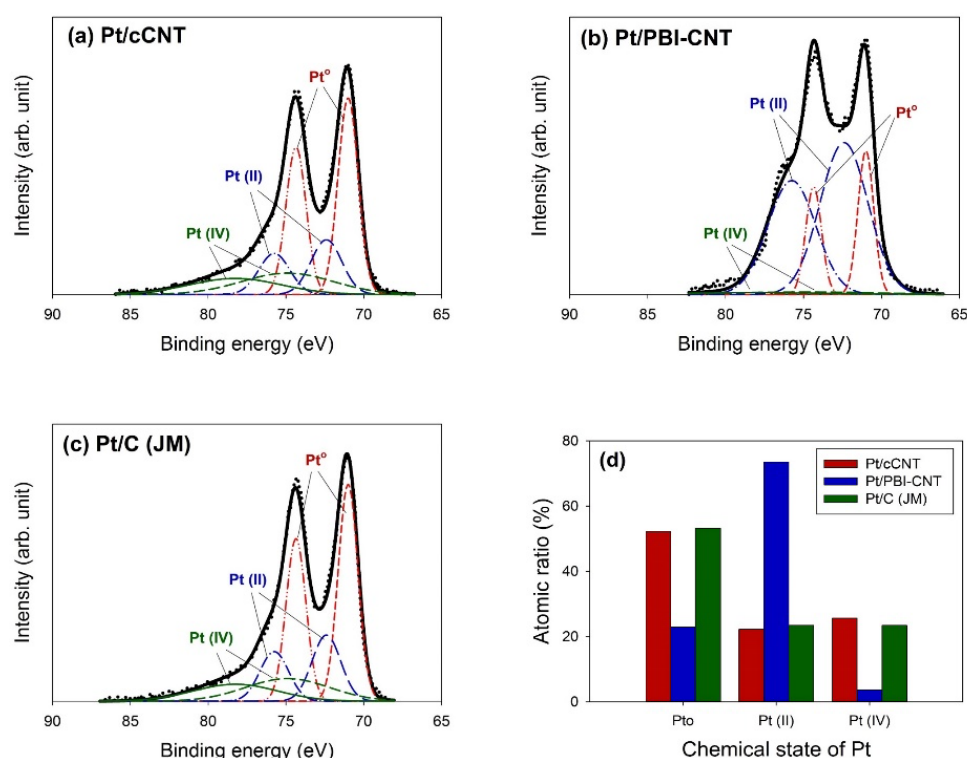


圖8.各樣本的XPS Pt4f高解析分析結果：(a) Pt/cCNT、(b) Pt/PBI-CNT、(c) Pt/C (JM)、(d)不同Pt化態的原子比

表 3.各樣本之 XPS Pt 4f peak 之高解析分析結果(原子百分比，at.%)

Sample	Binding energy (eV)					
	Pt ⁰		Pt (II)		Pt (IV)	
	71.0	74.35	72.4	75.75	74.9	78.25
Pt/cCNT	29.8	22.4	12.7	9.5	14.6	11.0
Pt/PBI-CNT	13.1	9.8	42.0	31.5	2.1	1.5
Pt/C (JM)	30.4	22.8	13.4	10.0	13.4	10.0

3.2 電化學特性分析

Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNT 之循環伏安圖譜示如圖 9a-b，圖 9c 也顯示了商用 Pt/C (JM)樣本之循環伏安圖譜，作為比較之用。可發現在- 0.2 ~ 0.1 V 範圍出現典型的氫氣吸附-脫附峰；0.1 ~ 0.5 V 為電雙層區；0.5 ~ 1.0 V 為表面 Pt 氯化物之形成和還原峰。相較於 Pt/PBI-CNT 和 Pt/C，Pt/cCNT 之電雙層較窄；顯示 Pt/PBI-CNT 和 Pt/C 之工作電極可儲存較多的電荷，特別是 Pt/PBI-CNT。Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNT 均在第 100 圈後才出現最大的伏安圖，將以此計算作為基準活性。所得之 Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNT 的 ECSA 分別約為 51 和 56 m²/g，顯示 Pt/PBI-CNT 的電化學活性優於 Pt/cCNT；而商用 Pt/C 之 ECSA 則僅有 45 m²/g。圖 9 也顯示了 CV 的長效測試結果(30th ~ 600th cycles)，可據此判斷樣本之電化學活性的耐久性。各圈之 ECSA 的計算結果，與最大 ECSA 比較後估算活性衰退比例，示如圖 9d。在 600 cycles 後，ECSA 的衰減率依次為 Pt/cCNT (8%) ~ Pt/PBI-CNT (9%) < Pt/C (75%)。此研究結果顯示，利用反微胞法所合成的樣本均具有極佳的電化學活性和耐久性；Pt/PBI-CNT 之電化學活性稍高，但二者的電化學耐久性相似。Pt 的利用率(η)可利用 ECSA 除以化學表面積(chemical surface area, CSA)來求得。CSA (m²/g)定義為 $6 \times 10^3 / (\rho \cdot d)$ ，其中， ρ 為 Pt 的密度(= 21.45 g/cm³)、 d 為 Pt 的平均粒徑(nm) [20]。計算結果可發現，Pt 的利用率(η)分別為 46 % (Pt/cCNT)、70 % (Pt/PBI-CNT)、和 34 % (Pt/C)；顯示以官能基化的 CNTs 作為 Pt 載體，特別是 PBI-CNT，可提升 Pt 的利用率。

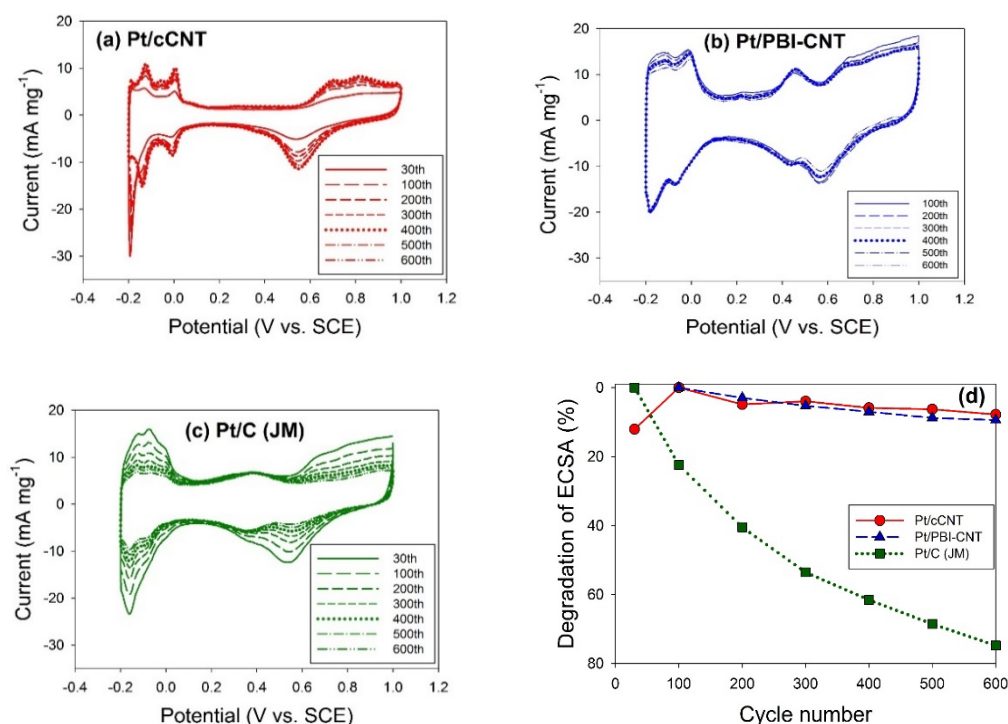


圖9. 觸媒樣本之循環伏安曲線(a-c)和ECSA的衰退情形(d)

四、結論

本研究利用反微胞法於 CNTs 表面沈積奈米 Pt 粒子，其中 CNTs 經過檸檬酸氧化或 PBI 包覆。與商用 Pt/C 比較，Pt/cCNT 和 Pt/PBI-CNTs 之 Pt 平均粒徑稍大；但有較佳的結晶程度和較高的抗氧化能力。不過，PBI 的包覆使得 Pt/PBI-CNTs 之抗氧化能力較 Pt/cCNT 稍差。奈米 Pt 之表面化態分佈，明顯受到基材表面改質的影響。Pt(IV)含量較低、Pt(II)含量較高者，具有較大的電化學活性面積。由循環伏安法分析結果發現，Pt/PBI-CNT 和 Pt/cCNT 之電化學活性面積(ECSA)分別約為 56 和 51 m^2/g 。在循環操作 600 圈後，ECSA 的衰減率均可低於 10%，明顯優於商用 Pt/C。研究結果顯示，檸檬酸氧化或 PBI 包覆 CNTs 均可使 Pt 有效發揮其電化學活性和耐久性。

五、參考文獻

1. Sharma, S. and Pollet, B.G., Support materials for PEMFC and DMFC electrocatalysts—A review, *J. Power Sources*, Vol. 208, pp. 96–119, 2012.
2. Calvillo, L., Lázaro, M.J., García-Bordejé, E., Moliner, R., Cabot, P.L., Esparbé, I., Pastor, E. and Quintana, J.J., Platinum supported on functionalized ordered mesoporous carbon as electrocatalyst for direct methanol fuel cells, *J. Power Sources*, Vol. 169, pp. 59–64, 2007.
3. Wang, Y., Song, S., Maragou, V., Shen, K.P. and Tsiakaras, P., High surface area tungsten carbide microspheres as effective Pt catalyst support for oxygen reduction reaction, *Appl. Catal.*, Vol. B89, pp. 223–228, 2009.
4. Acharya, C.K., Li, W., Liu, Z., Kwon, G., Turnera, C.H., Lane, A.M., Nikles, D., Klein, T. and Weaver, M., Effect of boron doping in the carbon support on platinum nanoparticles and carbon corrosion, *J. Power Sources*, Vol. 192, pp. 324–329, 2009.
5. Wang, X., Li, W., Chen, Z., Waje, M. and Yan, Y., Durability investigation of carbon nanotube as catalyst support for proton exchange membrane fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 158, pp. 154–159, 2006.
6. Cui, S.K. and Guo, D.J. Highly dispersed Pt nanoparticles immobilized on 1,4-benzenediamine-modified multi-walled carbon nanotube for methanol oxidation, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 333, pp. 300–303, 2009.
7. Lin, J.F., Kamavaram, V. and Kannan, A.M., Synthesis and characterization of carbon nanotubes supported platinum nanocatalyst for proton exchange membrane fuel cells, *J. Power Sources*, Vol. 195, pp. 466–470, 2010.
8. Calvillo, L., Gangeri, M., Perathoner, S., Centi, G., Moliner, R. and Lazaro, M.J., Effect of the support properties on the preparation and performance of platinum catalysts supported on carbon nanofibers, *J. Power Sources*, Vol. 192, pp. 144–150, 2009.
9. Kamavaram, V., Veedu, V. and Kannan, A.M., Synthesis and characterization of platinum nanoparticles on *in situ* grown carbon nanotubes based carbon paper for

- proton exchange membrane fuel cell cathode, *J. Power Sources*, Vol. 188, pp. 51–56, 2009.
10. Saminathan, K., Kamavaram, V., Veedu, V. and Kannan, A.M., Preparation and evaluation of electrodeposited platinum nanoparticles on in situ carbon nanotubes grown carbon paper for proton exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp., 3838-3844, 2009.
 11. Zeng, M., Wang, X.X., Tan, Z.H., Huang, X.X. and Wang, J.N., Remarkable durability of Pt-Ir alloy catalysts supported on graphitic carbon nanocages, *J. Power Sources*, Vol. 264, pp. 272-281, 2014.
 12. Chiang, Y.C., Lin, W.H. and Chang, Y.C., The influence of treatment duration on multi-walled carbon nanotubes functionalized by H₂SO₄/HNO₃ oxidation, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 257, pp. 2401–2410, 2011.
 13. Cuentas-Gallegos, A.K., Martinez-Rosales, R., Rincon, M.E., Hirata, G.A. and Orozco, G., Design of hybrid materials based on carbon nanotubes and polyoxometalates, *Opt. Mater.*, Vol. 29, pp. 126–133, 2006.
 14. Moreno-Castilla, C., Carrasco-Marin, F., Maldonado-Hodar, F.J. and Rivera-Utrilla, J., Effects of non-oxidant and oxidant acid treatments on the surface properties of an activated carbon with very low ash content, *Carbon*, Vol. 36, pp. 145–151, 1998.
 15. Haydar, S., Moreno-Castilla, C., Ferro-Garcia, M.A., Carrasco-Marin, F., Rivera-Utrilla, J., Perrard, A. and Joly, J.P., Regularities in the temperature-programmed desorption spectra of CO₂ and CO from activated carbons, *Carbon*, Vol. 38, pp. 1297–1308, 2000.
 16. Lu, C. and Chiu, H. Chemical modification of multiwalled carbon nanotubes for sorption of Zn²⁺ from aqueous solution, *Chem. Eng. J.*, Vol. 139, pp. 462–468, 2008.
 17. Ramírez-Meneses, E., Montiel-Palma, V., Chávez-Herrera, V.H. and Reyes-Gasga, J.. Decoration of single-walled carbon nanotubes with Pt nanoparticles from an organometallic precursor, *J. Mater. Sci.*, Vol. 46, pp. 3597–3603, 2011.
 18. Poh, C.K., Lim, S.H., Pan, H., Lin, J. and Lee, J.Y., Citric acid functionalized carbon materials for fuel cell applications, *J. Power Sources*, Vol. 176, pp. 70-75, 2008.
 19. Lin, J.F., Adame, A., Kannan, A.M., Development of durable platinum nanocatalyst on carbon nanotubes for proton exchange membrane fuel cells, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 157, pp. B846-B851, 2010.
 20. Guo, J.W., Zhao, T.S., Prabhuram, J. and Wong, C.W., Preparation and the physical/electrochemical properties of a Pt/C nanocatalyst stabilized by citric acid for polymer electrolyte fuel cells, *Electrochim. Acta*, Vol. 50, pp. 1973–1983, 2005.
 21. Jiang, L. and Gao, L., Modified carbon nanotubes: an effective way to selective attachment of gold nanoparticles, *Carbon*, Vol. 41, pp. 2923–2929, 2003.
 22. Özkar, S. and Finke, R.G., Nanocluster formation and stabilization fundamental

- studies: ranking commonly employed anionic stabilizers via the development, then application, of five comparative criteria, *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 124, pp. 5796–5810, 2002.
23. Fujigaya, T. and Nakashima, N., Fuel cell electrocatalyst using polybenzimidazole-modified carbon nanotubes as support materials, *Adv. Mater.*, Vol. 25, pp. 1666–1681, 2013.
 24. Fujigaya, T., Okamoto, M. and Nakashima, N., Design of an assembly of pyridine-containing polybenzimidazole, carbon nanotubes and Pt nanoparticles for a fuel cell electrocatalyst with a high electrochemically active surface area, *Carbon*, Vol. 47, pp. 3227–3232, 2009.
 25. Okamoto, M., Fujigaya, T. and Nakashima, N., Design of an assembly of poly(benzimidazole), carbon nanotubes, and Pt nanoparticles for a fuel-cell electrocatalyst with an ideal interfacial nanostructure, *Small*, Vol. 5, pp. 735–740, 2009.
 26. Wang, J.J., Yin, G.P., Zhang, J., Wang, Z.B. and Gao, Y.Z., High utilization platinum deposition on single-walled carbon nanotubes as catalysts for direct methanol fuel cell, *Electrochim. Acta*, Vol. 52, pp. 7042–7050, 2007.
 27. Matsumoto, K., Fujigaya, T., Sasaki, K. and Nakashima, N., Bottom-up design of carbon nanotube-based electrocatalysts and their application in high temperature operating polymer electrolyte fuel cells, *J. Mater. Chem.*, Vol. 21, pp. 1187–1190, 2011.
 28. Luo, F., Ling, Y., Zhang, Q., Yu, X., Liu, Q. and Yang, Z., Carbon paper-free membrane electrode assembly fabricated from a Pt electrocatalyst supported on multi-walled carbon nanotubes, *J. Mater. Sci.*, Vol. 52, pp. 8412–8420, 2017.
 29. Brock, T., Sherrington, D.C. and Tang, H.G., Synthesis and characterization of polybenzimidazoles carrying additional pyridine and imidazole groups in the main chain, *Polymer*, Vol. 32, pp. 353–357, 1991.
 30. Soria-Sánchez, M., Maroto-Valiente, A., Álvarez-Rodríguez, J., Rodríguez-Ramos, I. and Guerrero-Ruíz, A., Efficient catalytic wet oxidation of phenol using iron acetylacetonate complexes anchored on carbon nanofibers, *Carbon*, Vol. 47, pp. 2095–2102, 2009.
 31. Chiang, Y.C., Lee, C.Y. and Lee, H.C., Surface chemistry of polyacrylonitrile- and rayon-based activated carbon fibers after post-heat treatment, *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 101, pp. 199–210, 2007.
 32. Liu, Z., Lee, J.Y., Chen, W., Han, M. and Gan, L.M., Physical and electrochemical characterizations of microwave-assisted polyol preparation of carbon-supported PtRu nanoparticles, *Langmuir*, Vol. 20, pp. 181–187, 2004.

環境 PM_{2.5} 自動監測與火災溯源應用

Atmospheric PM_{2.5} Automatic Monitoring and Fire Events Tracking

陳莉沂¹、李興旺²、楊逸群³、黃美芳⁴、周妙鳳⁵

Li-Yi Chen, Hsing-Wang Li, Yi-Cyun Yang, Mei-Fang Huang, Miao-Feng Chou

中國鋼鐵股份有限公司新材料研究發展處

China Steel Corporation, New Materials Research & Development Department

工業技術研究院量測技術發展中心

Industrial Technology Research Institute, Center for Measurement Standards

台灣堀場股份有限公司過程與環境部門

HORIBA TAIWAN, INC., Process and Environment Segment

摘要

本研究為利用 PM_{2.5} 自動監測技術，探討於 2021.02~04 監測期間，高雄臨海工業區環境之 PM_{2.5} 質量濃度與元素成份濃度變化趨勢與排放來源。另外，利用自動監測數據分析鄰近地區突發性火災事件期間，產生的 PM_{2.5} 質量濃度與元素濃度短時高值現象。結果顯示，該環境 PM_{2.5} 小時質量濃度變化範圍介於 12.0~86.8 g/m³，且以每日上午與凌晨時段容易發生空品不良情況，推測與上班尖峰交通排放及凌晨逆溫現象有關。另，由 PMF 受體模式結果顯示，該環境可鑑別出 5 個排放源，類別分別為燃煤、重油燃料、其他工業、交通排放與鋼鐵、地殼揚塵與二次氣膠。在鄰近區域火災事件期間，自動監測數據曾記錄到短時高值現象，且由異常增高之元素成份，加以確認火災事件來源特徵，如 Cr、K、Ca、Al、Si 為火災工廠木棧板悶燒或燃燒特徵；Zn、As、Pb、Si、K 為垃圾掩埋場燃燒特徵；Pb、Zn、Fe、Cu、As 為鋼鐵廠火災特徵。

關鍵字：PM_{2.5}、自動監測、PMF 受體模式、火災溯源

Abstracts

In this study, fine particulate matter (PM_{2.5}) was sampled and monitored by using automatic monitoring instrument at Kaohsiung Linhai Industrial Park from February 2021 to April 2021. The elemental concentrations was analyzed by online X-ray fluorescence (XRF). In addition, automatic observations have provided a high time resolution of the PM_{2.5} concentrations and elemental concentrations, which is available for analyzing the PM_{2.5} generated from nearby fire events. During the monitoring period, the PM_{2.5} concentrations ranged from 12.0 to 86.8 µg/m³, and the average levels of PM_{2.5} over 24-hour level standard (35 µg/m³) was 38%. The PM_{2.5} concentrations were highest in the morning and early morning, which can be resulted from the peak hour

¹ 中國鋼鐵股份有限公司新材料研究發展處，研究員

E-mail: 189621@mail.csc.com.tw

² 中國鋼鐵股份有限公司新材料研究發展處，研究員

³ 工業技術研究院量測技術發展中心，研究員

⁴ 台灣堀場股份有限公司過程與環境部門，專員

⁵ 台灣堀場股份有限公司過程與環境部門，經理

traffic and subsidence temperature inversion. Positive matrix factorization (PMF) was also used to apportion sources of PM_{2.5}, and five dominant sources of PM_{2.5} were identified: coal burning, heavy oil, other industries, traffic and metal processing, soil dust and secondary aerosols. Furthermore, PM_{2.5} generated by the regional fire events were also recorded by the automatic monitoring instrument, which showed an apparent high peak of PM_{2.5} and elemental concentrations after a period of time. And the peak element also showed the characteristic from different types of fire events, such as Cr, K, Ca, Al, and Si related to the wood-burning or smoldering, Zn, As, Pb, Si, and K related from the landfill fires, Pb, Zn, Fe, Cu, and As related to fire incident of steel plant.

Keywords: PM_{2.5}、Automatic Monitoring、PMF receptor model、Fire Event Tracking

一、前言

環境細懸浮微粒(PM_{2.5})排放源容易受到大氣擴散及氣流傳輸影響而變化迅速，但傳統手動監測技術，每一筆採樣長達 24 小時，且後續成份分析實驗相當耗時，故若能採取有效自動監測儀器，僅需要短時間即可獲得一筆數據，更能即時反映出環境排放源變化，進而訂定出更有效的環境改善應變策略。

自動監測器近年已廣泛地運用於空氣污染物監測工作。我國目前公告之周界空氣粒狀物標準自動監測方法有兩種，分別為貝他計(beta attenuation monitor, BAM)和震盪錐形微量天平(tapered element oscillating microbalance, TEOM)，此兩種技術均可進行 PM_{2.5} 質量濃度自動監測，且時間解析度可縮減至小時值[1]。此外，目前有許多文獻亦朝向使用 PM_{2.5} 自動成份分析技術，如氣膠化學成份分析儀(Aerosol Chemical Speciation Monitor, ACSM) [2]、氣膠質譜儀(Aerosol Mass Spectrometer, AMS) [3, 4]，或 PM_{2.5} 自動成份分析儀[5, 6]，分析微粒化學成份之逐時變化趨勢，再應用 PMF 受體模式解析環境 PM_{2.5} 來源[2, 3, 5, 6]。在微粒成份中，因金屬元素在大氣環境中穩定性高，不易隨傳輸擴散而產生變異，故常做為特定排放源之示蹤物(tracer)，如木材燃燒之示蹤元素為 Si、K、Cl、S[7, 8]；都市垃圾焚化為 Cd、Pb、Zn、As、Sb[9-11]；煉鐵燒結製程為 K 與 Cl[12]等，皆能輔以鑑定微粒排放來源。PM_{2.5} 自動監測除可應用紀錄一般環境 PM_{2.5} 逐時變化趨勢外，更可紀錄突發性火災空品事件，如工廠火災、森林野火等[13-14]，因悶燒或燃燒而產生 PM_{2.5} 可隨區域性風場變化傳輸，進而影響鄰近區域之環境空氣品質，故若能由鑑別不同火災源 PM_{2.5} 元素成份特徵，即可進行火災溯源應用。

本研究於高雄臨海工業區設置 PM_{2.5} 自動監測點，並記錄 2021 年 2 月至 4 月期間環境 PM_{2.5} 質量濃度與 15 項元素成份之小時濃度變化趨勢，且利用 PMF 受體模式分析該環境 PM_{2.5} 來源。而鄰近地區火災事件期間所產生的 PM_{2.5} 質量濃度與元素濃度短時高值現象，亦應用探討火災事件與異常增高元素之相關性，可做為火災空品事件之溯源參考指標。

二、實驗設備與研究方法

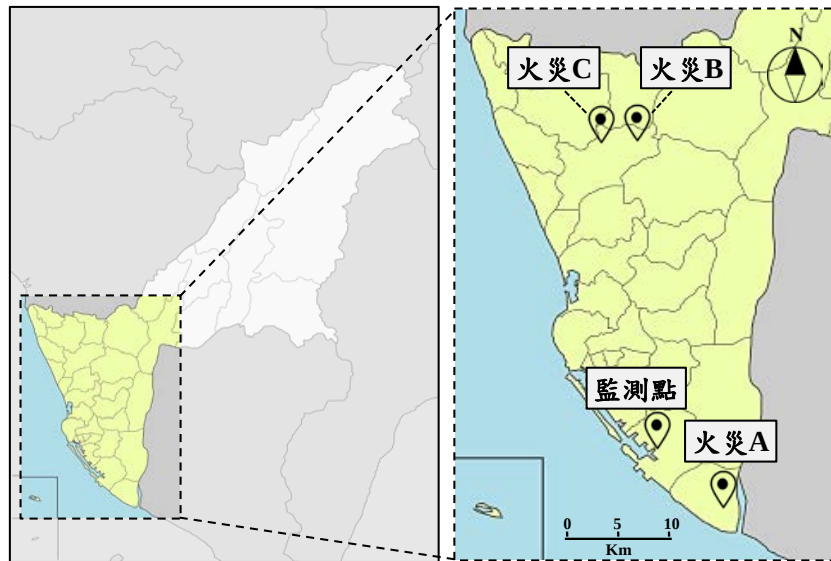


圖 1.PM2.5 環境監測點位

本研究於高雄臨海工業區內設置 PM_{2.5} 環境監測點，地理位置如圖 1。監測點設置於辦公大樓樓頂，監測期間之空氣品質數據包括 PM_{2.5} 質量與元素濃度及風速、風向等小時值監測數據。另，依一般與火災事件期間之 PM_{2.5} 環境監測情況分別進行討論：一般環境監測為 2021 年 2 月至 4 月期間，而火災空品事件則為分別紀錄(1) 2021 年 1 月 29 日晚點 8 點 29 分，發生在距離監測點東南東方 7 公里處之可塑劑化學工廠(火災 A)火災，影響製程主要為鄰苯二甲酸二辛酯(DOP)與苯酐(PA)之化學原料生產；(2) 2021 年 4 月 12 日晚點 7 點 08 分，在監測點北方距離 31.1 公里處之大型垃圾掩埋場(火災 B)產生垃圾自燃事件；及(3) 2021 年 5 月 9 日晚點 9 點，在監測點北北西方距離 31.8 公里處之鋼鐵廠(火災 C)之潤滑油槽起火燃燒。各火災地理位置如圖 1 所示。



圖 2.PX-375 自動監測儀

PM_{2.5} 自動監測透過 PX-375 自動監測儀(Horiba, Japan)，如圖 2，以 16.7 L min⁻¹ 採樣流量進行 PM_{2.5} 樣本採集，且樣本被採集至紙帶型濾紙上，由儀器自行移動紙帶，再依序以貝他射線衰減法(β -ray attenuation) 與非破壞性 XRF(X-ray fluorescence, XRF)自動量測 PM_{2.5} 質量與元素成份濃度。XRF 量測之 Al、Si、S、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Pb 元素成份濃度，均已由 NIST 標準參考品 SRM 2783 進行元素濃度定量校正，且方法偵測極限(MDL)分別為 Al (229.0 ng/m³)、Si (135.0 ng/m³)、S (23.2 ng/m³)、K (10.7 ng/m³)、Ca (138.8 ng/m³)、Ti (8.4 ng/m³)、V (0.8 ng/m³)、Cr (3.2 ng/m³)、Mn (3.2 ng/m³)、Fe (12.0 ng/m³)、Ni (2.0 ng/m³)、Cu (1.3 ng/m³)、Zn (0.9 ng/m³)、Pb (1.6 ng/m³)。本研究以每 2 小時分析一次之頻率進行 PM_{2.5} 質量與元素濃度分析，且所得元素濃度均扣除濾紙背景元素測值。另，監測點之環境風場變化為參考交通部高雄氣象站之逐時風速、風向觀測資料。

本研究使用美國環保署 PMF5.0 軟體進行 PM_{2.5} 來源解析[15]。PMF 運算時需要兩個檔案，一濃度矩陣檔案，一不確定性矩陣檔案。若物種濃度值低於 MDL 則需以 MDL 值的一半取代濃度，其不確定性則以 (5/6) × MDL 進行取代；若物種濃度值高於 MDL，其不確定性則以下列公式(1)計算，

$$Unc = \sqrt{(Error\ fraction \times Concentration)^2 + (0.5 \times MDL)^2} \quad (1)$$

其中，Concentration 代表濃度，MDL (Method Detection Limit) 代表檢測閾值，EF (Error Fraction) 代表誤差分數，即誤差佔所分析組分濃度的比例。在這個公式中，第一項(Error Fraction × Concentration)² 代表了與成份濃度相關的不確定度，經過幾次試算後定為 0.1；第二項(0.5 × MDL)² 代表了與成份濃度無關的不確定度，這裡僅考慮了檢測的影響。

依 PMF5.0 操作指示完成濃度與不確定性檔案輸入後，同時選定因子數(介於 1 到 999)，所謂因子即為可能的污染源。決定因子數後就可開始執行模式，得到最小 Q 值後，進行 Q 值與因子數的散布圖。當 Q 值忽然改變很大且後續變動不大時的因子數極為可能的污染源數目。

三、研究結果與討論

3.1 環境 PM_{2.5} 自動監測

首先，為確認 PM_{2.5} 之質量濃度自動監測具準確性，故與鄰近環保署高雄小港測站之 PM_{2.5} 測值做比較，比對時間為 2021 年 3 月 12 日至 3 月 31 日間，PM_{2.5} 質量濃度落在 13.5 至 54.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 並涵蓋到高、低濃度區間。圖 3 為 PM_{2.5} 質量濃度線性迴歸比對結果，線性迴歸斜率為 0.9，截距為 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相關係數為 0.98，除截距以外，其他參數接落在自動監測儀器等似性比對符合規定，顯示 PX-375 自動監測儀之 PM_{2.5} 分析具準確性。

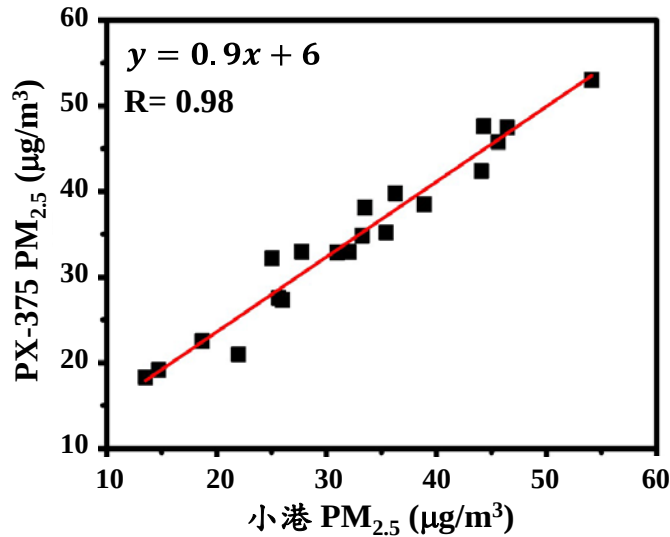


圖 3. PM_{2.5} 質量濃度線性迴歸結果

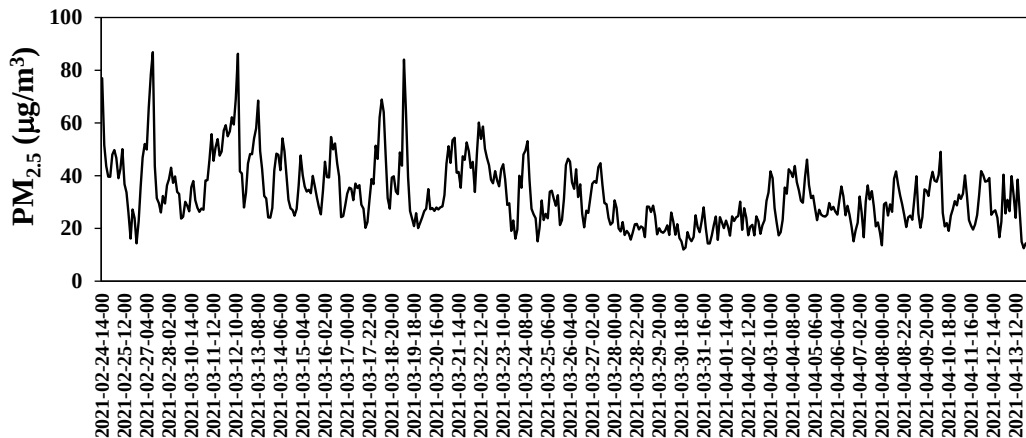


圖 4. PM_{2.5} 質量濃度時間序列圖

在 2021 年 2 月 24 日至 4 月 13 日連續監測期間，環境 PM_{2.5} 累積監測樣本數量共 462 件，篩除因不明人為操作造成停機與無元素分析值之樣本，共獲得有效質量濃度樣本數據共 458 件，有效元素濃度數據共 445 件。圖 4 為監測期間之 PM_{2.5} 質量濃度時間序列圖，PM_{2.5} 小時質量濃度範圍為 12.0~86.8 μg/m³，若以 24 小時 PM_{2.5} 質量濃度空品標準 35 μg/m³，空品不良(>35 μg/m³)情形占整體監測期間比率為 38%。由觀察 2 月 24 日至 3 月 26 日期間之環境風場，因多盛行東北風向，故當時台灣南部地區為下風處，有污染物累積情形，使空品不良機會增加；而 3 月 27 日後盛行東南風/南風，雲嘉南以南地區於此期間屬上風處，有較佳的擴散條件，使污染物不易累積，空品情況大致良好。監測點環境每日上午(06:00~12:00)、下午(12:00~18:00)、晚上(18:00~00:00)及凌晨(00:00~06:00)出現空品不良之時數占比，分別為 58%、33%、15%及 49%，顯示上午與凌晨將近 5 成時間，環境處於空品不良情況，推測多來自上班尖峰交通排放與人為活動造成，與凌晨出現逆溫現象[16]，難產生對流而造成擴散條件差，使環境濃度上升。

監測期間占比超過 0.5 % 的元素，依序為 S、Si、Al、Fe、K、Ca，分別占 4.2 %、1.8 %、1.6 %、1.3 %、0.7 %、0.6 %，多以地殼元素為主。而 Zn 與 Mn 元素雖然平均占比低於 0.5 %，但最大瞬時占比曾超過 0.5 %，如 Zn 為 5.7 % 與 Mn 為 1.1 %，此兩元素一般被認為受人為或工業活動影響大，表示有特定人為或工業行為進行中。另，比較元素測值與地殼自然豐度之差異，以確認若測值超過地殼自然豐度則表示有使用化石原料或人為行為發生。本研究使用 Al 元素濃度先做均一化（因 Al 除了穩定外，亦較不受人為活動影響再跟地殼自然豐度進行比較），而地殼自然豐度標準值則選擇以參考文獻之最高值為主(表 1)[17-21]，再將其乘上 1.5，避免分析時之不確定度造成判斷影響。表 2 為監測元素與地殼元素之豐度比較分析結果，表示方式為有效數據中，各元素超過地殼自然豐度的比例，並列出其最大濃度時之自然豐度倍數。結果顯示，S、Cu、Zn、Pb、As 皆明顯地超過地殼自然豐度，且其濃度為地殼自然豐度之 14~273 倍，表示元素來源與人為行為有關。另外，Fe、K、Mn、Ni、Ti 也都有超過地殼自然豐度的現象。

表 1.地殼自然豐度文獻參考值

文獻 元素	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
Al	8.13%	8.20%	8.2%	8.07%	8.23%
Si	27.72%	27.71%	27%	27.69%	28.2%
S	500 ppm	260 ppm	420 ppm	520 ppm	350 ppm
K	2.59%	2.10%	1.50%	2.58%	2.09%
Ca	3.63%	4.10%	5.0%	3.65%	4.15%
Ti	0.44%	0.56%	0.66%	0.62%	0.56%
V	100 ppm	160 ppm	190 ppm	-	120 ppm
Cr	100 ppm	100 ppm	140 ppm	350 ppm	102 ppm
Mn	1000 ppm	950 ppm	1100 ppm	900 ppm	950 ppm
Fe	5.00%	4.10%	6.3%	5.05%	5.63%
Ni	-	80 ppm	90 ppm	190 ppm	84 ppm
Cu	100 ppm	50 ppm	68 ppm	-	60 ppm
Zn	-	75 ppm	79 ppm	-	70 ppm
As	-	1.5 ppm	2.1 ppm	-	1.8 ppm
Pb	-	14 ppm	10 ppm	-	14 ppm

表 2.監測元素與地殼元素之豐度比較

元素	比例 (%)	自然豐度 倍數 (最大值)	元素	比例 (%)	自然豐度 倍數 (最大值)
S	100	55.1	K	28	1.8
Cu	91	14.2	Mn	21	5.2
Zn	74	272.9	Ni	11	3.7
Pb	50	120.2	Ti	2.2	1.6
As	42	114.9			
Fe	31	6.9			

因大部分監測元素皆有超過地殼自然豐度的現象，表示此段期間元素分析結果具人為活動的貢獻。

3.2 環境 PM_{2.5} 來源分析

為解析可能排放來源，本研究利用 PMF 受體模式對監測數據進行來源解析。由 PMF 結果模擬出環境中有 5 個排放因子，其指紋譜如圖 5 所示，在因子一中，有高比例 As、Pb 元素，推測來源與燃煤相關[22]；因子二有高比例 V、Cr、Fe、Ni、Cu 元素，其中 V、Ni 為重油燃料指標[23]，且該環境鄰近碼頭，時有大型輪船運輸原物料或產品進出與停泊，故與重油燃料排放相關；因子三為 Zn、Pb，推測工業活動有關[24]，但缺乏其他成份資料，難界定為何種工業製程，故命名為其他工業；因子四為 Fe、Mn、Zn、Ti 元素，推測與交通及鋼鐵排放相關[25,26]；因子五則以 Al、Si、K、Ca、Ti、Fe 之地殼元素與 S 元素之二次氣膠硫酸根成份相關[27]。圖 6 為各因子之日平均時間變化趨勢，因子一燃煤排放影響，多集中發生於凌晨 0 點至上午 10 點之間；因子二重油燃料與因子三其他工業較無明顯之趨勢，呈現偶發之高值；因子四交通及鋼鐵呈現每日兩波峰值，符合該區域交通流量狀況，可以更確定其與交通排放之關係；因子五為地殼揚塵與二次氣膠，無顯著變化趨勢。

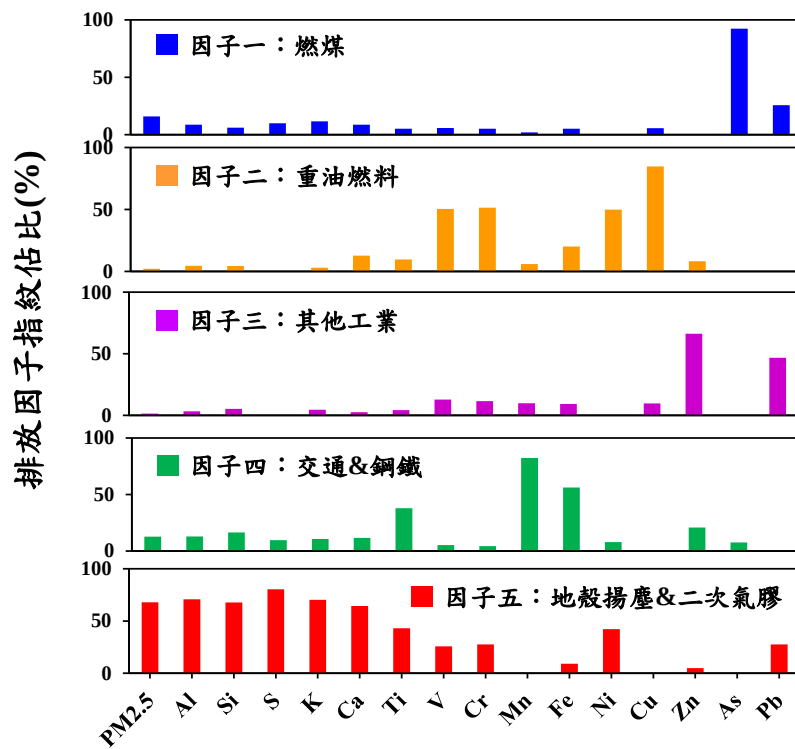


圖 5.PMF 排放因子指紋譜

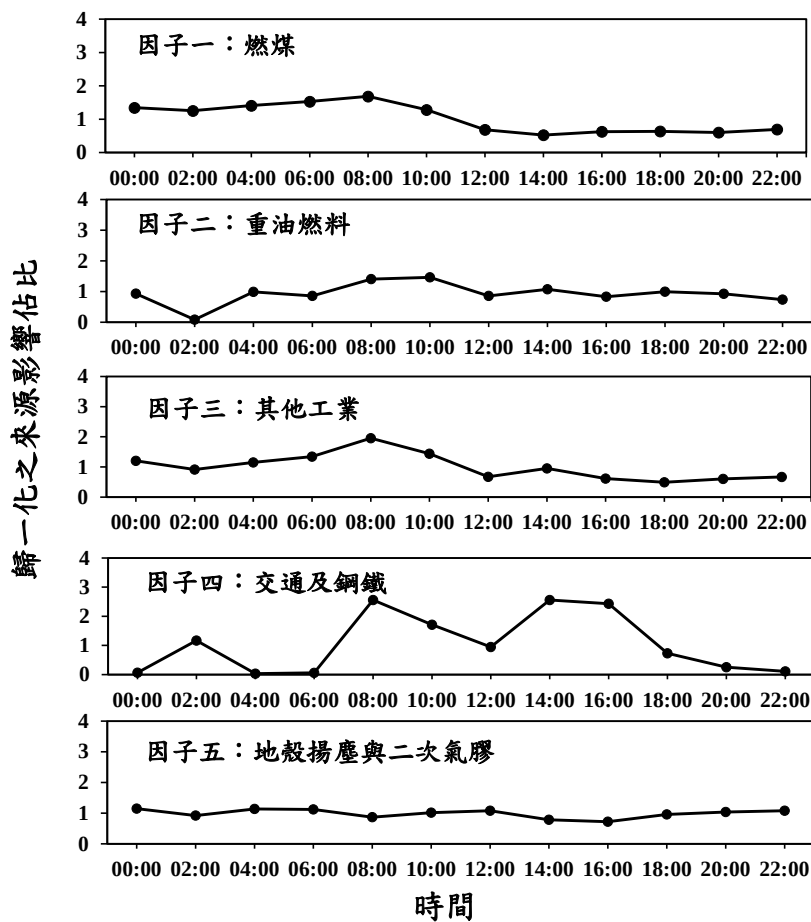


圖 6.各排放因子之日平均時間變化趨勢

3.3 火災溯源應用

火災溯源為在周界區域產生突發性之火災事件，致使環境空氣品質下降，即可透過 PM_{2.5} 自動監測之逐時質量濃度與元素濃度變化，推估影響環境空氣品質之來源與種類。本研究分別紀錄監測點周界區域之三件突發性火災事件，第一件在 2021 年 1 月 29 日晚點 8 點 29 分，位於監測點東南東方 7 公里處之可塑劑化學工廠火災(火災 A)，當時盛行東風且平均風速為 1.8 m/s，故於當晚 10~12 點逐步監測 PM_{2.5} 濃度高值為 58.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；第二件為在 2021 年 4 月 12 日晚點 7 點 08 分，位於監測點北方 31.1 公里處之大型垃圾掩埋場(火災 B)垃圾產生自燃，當時盛行西北風且風速為 2.6 m/s，故 4 月 13 日 0~2 點監測到 PM_{2.5} 濃度高值 40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；第三件為在 2021 年 5 月 9 日晚點 9 點，位於監測點北北西方 31.8 公里處之鋼鐵廠(火災 C)研磨油儲槽起火燃燒，當時盛行西北風且風速為 3.2 m/s，然因距離遠且大氣擴散條件佳，故於 5 月 10 日 0~2 點監測到 PM_{2.5} 濃度僅為 12.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

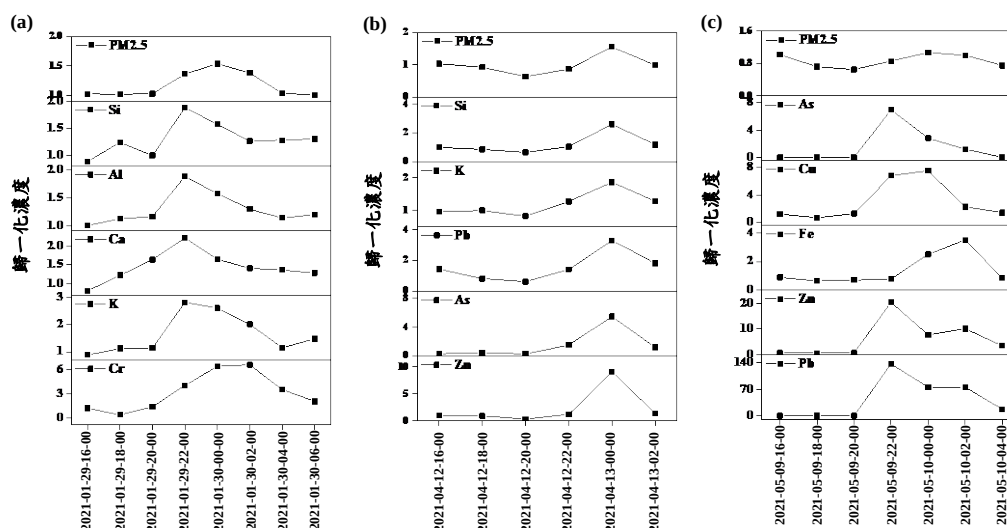


圖 7.(a)火災 A，(b)火災 B，(c)火災 C 事件 PM_{2.5} 濃度與元素濃度變化

火災悶燒或燃燒產生之 PM_{2.5} 會因距離及風向、風速變化而影響監測點區域之環境品質。圖 7 為比對火災發生前後之 PM_{2.5} 濃度與元素濃度變化，比較基準為使用當日火災事件發生前 6 小時之平均 PM_{2.5} 質量與元素測值做為環境背景濃度。圖 7(a)火災 A 點發生後，PM_{2.5} 與 Cr、K、Ca、Al、Si 之瞬時濃度均超過背景值 1.5 倍以上，顯示火災 A 發生後，造成鄰近區域之空氣品質影響，且由文獻亦可推測此類元素與木材燃燒與悶燒有關[7, 8]，應來自於火災工廠堆存之木棧板悶燒或燃燒所致；圖 7(b)火災 B 點因距離遠，故於事件發生後約 6 小時才見環境 PM_{2.5} 濃度與 Zn、As、Pb、Si、K 元素濃度分別超過背景值 1.5 與 2 倍以上，且排放元素符合文獻之垃圾焚燒元素指標特徵[9-11]；另，因火災 C 發生距離遠且大氣擴散條件佳，故監測點之 PM_{2.5} 濃度與背景值無顯著差異，圖 7(c)中元素提升超過背景值 2 倍以上之元素為 Pb、Zn、Fe、Cu、As，與一般常見鋼鐵元素指標相符[28]，顯示環境仍受到鋼鐵廠火災影響，而由上述火災溯源應用案例，

均可顯示周界區域產生突發性之火災事件，將可透過 PM_{2.5} 連續監測資料進行解析與記錄。

四、結論

1. 本研究利用 PM_{2.5} 自動監測儀在高雄臨海工業區內進行連續監測。於監測期間，累積質量濃度有效樣本 458 件，金屬元素有效樣本 445 件。監測期間空品不良情況約佔 38%，且以早上與凌晨之 PM_{2.5} 濃度偏高。
2. PMF 受體模式解析監測期間之環境 PM_{2.5} 排放源，分別有 5 個排放來源，其類別為燃煤、重油燃料、其他工業、交通&鋼鐵、地殼揚塵&二次氣膠。
3. 周界區域發生火災影響環境空氣品質，PM_{2.5} 自動監測在火災發生後依風場變化與距離影響，PM_{2.5} 質量與元素濃度同步產生短時高值。分析異常增高之元素成份，加以確認特殊火災事件之特徵，如 Cr、K、Ca、Al、Si 為火災工廠木棧板悶燒或燃燒特徵；Zn、As、Pb、Si、K 為垃圾掩埋場自燃特徵；Pb、Zn、Fe、Cu、As 為鋼鐵廠油品燃燒特徵。

五、致謝

本文感謝中鋼公司各級長官之支持及協助，使研究順利完成，特此敬致謝忱。

六、參考文獻

1. 行政院環境保護署環境檢驗所，空氣中粒狀污染物自動檢測方法-貝他射線衰減法(NIEA A206.11C)；行政院環境保護署環境檢驗所，空氣中粒狀污染物自動檢測方法-慣性質量法(NIEA A207.11C)
2. Ng, N. L., Herndon, S. C., Trimborn, A., Canagaratna, M. R., Croteau, P. L., Onasch, T. B., Sueper, D., Worsnop, D. R., Zhang, Q., Sun, Y. L., Jayne, J. T., An Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) for routine monitoring of the composition and mass concentrations of ambient aerosol. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 45, pp. 780-794, 2011.
3. Mohr, C., DeCarlo, P. F., Heringa, M. F., Chirico, R., Slowik, J. G., Richter, R., Reche, C., Alastuey, A., Querol, X., Seco, R., Peñuelas, J., Jiménez, J. L., Crippa, M., Zimmermann, R., Baltensperger, U., Prévôt, A. S. H., Identification and quantification of organic aerosol from cooking and other sources in Barcelona using aerosol mass spectrometer data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 12, pp. 1649-1665, 2012.
4. Canagaratna, M. R., Jayne, J. T., Jimenez, J. L., Allan, J. D., Alfarra, M. R., Zhang, Q., Onasch, T.B., Drewnick, F., Coe, H., Middlebrook, A., Delia, A., Williams, L. R., Trimborn, A. M., Northway, M. J., DeCarlo, P. F., Kolb, C. E., Davidovits, P., Worsnop, D. R., Chemical and microphysical characterization of ambient aerosols with the aerodyne aerosol mass spectrometer. *Mass spectrometry reviews*, Vol. 26, pp.185-222, 2007.

5. Asano, H., Aoyama, T., Mizuno, Y., Shiraishi, Y., Highly time-resolved atmospheric observations using a continuous fine particulate matter and element monitor. *ACS Earth and Space Chemistry*, Vol. 1, pp. 580-590, 2017.
6. Li, Y., Chang, M., Ding, S., Wang, S., Ni, D., Hu, H., Monitoring and source apportionment of trace elements in PM_{2.5}: Implications for local air quality management. *Journal of environmental management*, Vol. 196, pp. 16-25, 2017.
7. Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R., Chemical characterization of fine particle emissions from the fireplace combustion of woods grown in the southern United States. *Environmental Science & Technology*, Vol. 36, pp. 1442-1451, 2002.
8. Robinson, M. S., Chavez, J., Velazquez, S., Jayanty, R. K. M., Chemical speciation of PM_{2.5} collected during prescribed fires of the Coconino National Forest near Flagstaff, Arizona. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 54, pp. 1112-1123, 2004.
9. Wang, Y., Hao, W. W., Cheng, K., Zhi, G. R., Yi, P., Fan, J., Zhang, Y, Emission Characteristics and Chemical Components of PM_{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste. *Huan jing ke xue*, Vol. 39, pp. 3518-3523, 2018.
10. Hu, C. W., Chao, M. R., Wu, K. Y., Chang-Chien, G. P., Lee, W. J., Chang, L. W., Lee, W. S., Characterization of multiple airborne particulate metals in the surroundings of a municipal waste incinerator in Taiwan. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 2845-2852, 2003.
11. Christian, T. J., Yokelson, R. J., Cárdenas, B., Molina, L. T., Engling, G., Hsu, S. C., Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 10, pp. 565-584, 2010.
12. Tsai, J. H., Lin, K. H., Chen, C. Y., Ding, J. Y., Choa, C. G., Chiang, H. L., Chemical constituents in particulate emissions from an integrated iron and steel facility. *Journal of hazardous materials*, Vol. 147, pp. 111-119, 2007.
13. Griffiths, S. D., Chappell, P., Entwistle, J. A., Kelly, F. J., Deary, M. E., A study of particulate emissions during 23 major industrial fires: Implications for human health. *Environment international*, Vol. 112 pp. 310-323, 2018.
14. Mehadi, A., Moosmüller, H., Campbell, D. E., Ham, W., Schweizer, D., Tarnay, L., Hunter, J., Laboratory and field evaluation of real-time and near real-time PM_{2.5} smoke monitors, *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 70, pp. 158-179, 2020.
15. USEPA, 2014. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0. <https://www.epa.gov/airresearch/positive-matrix-factorization-model-environmental-data-analyses> (assessed 05.04.15).

16. Gramsch, E., Cáceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vásquez, Y., Rubio, M. A., Sánchez, G., Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM_{2.5} and black carbon concentration. *Atmospheric Environment*, Vol. 98, pp. 290-298, 2014
17. Elements Terrestrial Abundance,
<https://web.archive.org/web/20070410165310/http://davidddarling.info/encyclopedia/E/elterr.html>
18. Periodic Table of Elements, <https://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/>
19. Abundance in Earth's Crust, <https://www.webelements.com/periodicity/>
20. List of Periodic Table Elements Sorted by Abundance in Earth's crust, <https://www.science.co.il/elements/?s=Earth>
21. It's Elemental - The Periodic Table of Elements, <https://education.jlab.org/itselemental/index.html>
22. Dan, M. O., Zhuang, G., Li, X., Tao, H., Zhuang, Y., The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp. 3443-3452, 2004.
23. Corbin, J. C., Mensah, A. A., Pieber, S. M., Orasche, J., Michalke, B., Zanatta, M., Czech, H., Massabò, D., Buatier de Mongeot, F., Mennucci, C., El Haddad, I., Kumar, N. K., Stengel, B., Huang, Y., Zimmermann, R., Prévôt, A. S. H., Gysel, M., Trace metals in soot and PM_{2.5} from heavy-fuel-oil combustion in a marine engine. *Environmental science & technology*, Vol. 52, pp. 6714-6722, 2018.
24. Cheng, M. C., You, C. F., Cao, J., Jin, Z., Spatial and seasonal variability of water-soluble ions in PM_{2.5} aerosols in 14 major cities in China. *Atmospheric Environment*, Vol. 60, pp. 182-192, 2012.
25. Jeong, C. H., Wang, J. M., Hilker, N., Debosz, J., Sofowote, U., Su, Y., Noble, M., Healy, R. M., Munoz, T., Dabek-Zlotorzynska, E., Celo, V., White, L., Audette, C., Herod, D., Evans, G. J., Temporal and spatial variability of traffic-related PM_{2.5} sources: Comparison of exhaust and non-exhaust emissions. *Atmospheric Environment*, Vol. 198, pp. 55-69, 2019.
26. Sylvestre, A., Mizzi, A., Mathiot, S., Masson, F., Jaffrezzo, J. L., Dron, J., Mesbah, B., Wortham, H., Marchand, N., Comprehensive chemical characterization of industrial PM_{2.5} from steel industry activities. *Atmospheric Environment*, Vol. 152, pp. 180-190, 2017.
27. Ho, K. F., Lee, S. C., Chow, J. C., Watson, J. G., Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for fugitive dust in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 1023-1032, 2003.
28. Dai, Q. L., Bi, X. H., Wu, J. H., Zhang, Y. F., Wang, J., Xu, H., Yao, L., Jiao, L.,

Feng, Y. C., Characterization and source identification of heavy metals in ambient PM10 and PM2.5 in an integrated iron and steel industry zone compared with a background site. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 15, pp.875-887, 2015.

火炸藥廢料應用高效率蒸氣發電系統之設計概念

A Concept of Using Propellant and Explosive Wastes to Design a High-efficiency Steam Power Generation System

陳頤專¹、黃信彰²、羅瑋皓³、邱維振⁴、簡大為⁵、吳承祖⁶、

林士淵⁷、陳昆煜⁸、李耀文⁹

Yi-Chuan Chen, Sin-Jhang, Huang, Wei-Hao Lo, Wei-Chen Chiu, Ta-Wei Chien,

Cheng-Tsu Wu, Shih-Yuan Lin, Kun-Yu Chen, Yao-Wen Lee

國家中山科學研究院化學研究所

National Chung-Shan Institute of Science & Technology

摘要

「廢火炸藥高效率蒸氣發電系統」乃一種結合廢火炸藥與火力發電技術的獨特構想。我們將廢火炸藥製成衍生燃料棒，以求穩定燃燒。把燒藥室與鍋爐設計成圓錐曲線之型式，利用其特殊的光學性質聚集熱量，在短時間內加熱爐內的水，產生大量水蒸氣，傳給火力發電系統轉換成機械能與電能。為了解決工安與環保問題，我們引進大型真空幫浦與淨化裝置，適時抽換氣體，控制室內壓力，淨化溫室或有毒氣體。由於本系統可能需要建置於海邊，故為了保護鍋爐、燒藥室與水循環管線不受海水侵蝕，我們須增設海水淡化廠，將去除鹽分與雜質後的海水，透過水循環系統灌入鍋爐。若本系統將來研發成功，可望解決世界各國囤積廢火工品過多與發電能源短缺之問題。

關鍵字：廢火炸藥、蒸氣發電、衍生燃料棒、圓錐曲面、真空幫浦

Abstract

“High- Efficiency Steam Electric Generating System with the Abandoned Explosives(SEGSAE)” is an unique model combining the abandoned explosives with

¹ 國家中山科學研究院化學研究所推研廠組合小組 小組長

E-mail: yichuan0324@gmail.com

² 國家中山科學研究院化學研究所品保工程組

Email: hjang 09115@gmail.com

³ 國家中山科學研究院化學研究所推研廠組合小組 副小組長

Email: 49840020@stust.edu.tw

⁴ 國家中山科學研究院化學研究所匿蹤組

Email: a0931754@yahoo.com.tw

⁵ 國家中山科學研究院化學研究所推研廠組合小組

Email: bestbert369@gmail.com

⁶ 國家中山科學研究院化學研究所品保工程組

Email: x740611@hotmail.com

⁷ 國家中山科學研究院化學研究所品保工程組

Email: lin49924215@gmail.com

⁸ 國家中山科學研究院化學研究所品保工程組 技術師

Email: kunyuchen2@gmail.com

⁹ 國家中山科學研究院化學研究所品保工程組 技術師

Email: lances0518@gmail.com

thermal power generation. To burn stably, the abandoned explosives are made into refused derived fuel rods. Both boiler and burning chamber with the form of conic surface are designed to trap heat energy by special optical properties. It leads to heat water in boiler within several minutes and produce a lot of steam transmitted to thermal power system for transferring mechanical energy into electric energy. For industrial safety and environmental protection, vacuum pump and exhaust gas purifying equipment is used to exchange gas suitably, control the pressure in burning chamber and purify greenhouse or toxic gas. Because this system need to be built at the seaside, desalination plant is designed to distil out the salt and impurity in seawater for protecting boiler, burning chamber and water circulation tube from seawater erosion. Seawater can be poured into boiler through water circulation system after purification. If this system would be developed successfully, both hoarding too many abandoned explosives and energy shortage should be solved for the countries of the world.

Keywords: abandoned explosives 、 steam electric generating system 、 refused derived fuel rods 、 conic surface 、 vacuum pump

一、前言

近幾年的氣候變遷有極端化之趨勢，加上我國能源短缺，廢止核能發電成為未來政策目標，電量供不應求的問題將越來越顯著。尤其每年夏季可能面臨限電危機，必將嚴重衝擊經濟發展。因此我們亟需尋找強大而穩定的能源做為發電機運轉之動力。

根據台電 108 年度的資料統計，中華民國的發電量以火力發電的 79.2% 佔最大宗，其中包括燃氣的 38.2%、燃煤的 37.3%、燃油的 1.9%、汽電共生的 1.8%。其次是核能發電的 13.4%，最後是再生能源發電(含水力)的 6.0%。火力發電所用的燃煤主要仰賴印、澳等國進口，每年平均用量已高達 2800 萬公噸，而且有逐年增加之趨勢。

大凡國防工業處於蓬勃發展階段的國家，必定囤積為數可觀的廢火工品亟待銷毀。若能跟台電與軍方合作，結合現有的火力發電、衍生燃料製備技術，以及我們獨創的燃燒系統外形設計，充分利用火工品敏感易燃且高爆熱之特性，必能使國軍的廢棄彈藥成為極具發展性的發電能源，而且順便消化逾期或失效彈藥，可謂一舉兩得。

二、衍生燃料棒簡介

廢棄物衍生燃料(Refused Derived Fuel，簡稱 RDF)乃將廢火炸藥經由破碎、分選、乾燥、混合添加劑及成型等過程，將廢火炸藥中的可燃成分製成性質均勻的固態廢棄物衍生燃料。經此過程製成的衍生燃料已與原本的廢火炸藥大為不同，是一種具有高熱值、可儲存、性質均勻、燃燒穩定與低汙染等諸多優點的燃料，十分便於使用。TNT(2,4,6-三硝基甲苯)、RDX(環三亞甲基三硝胺)等皆是製備對象，只要摻入定量的膠合劑與固化劑，即可壓製出衍生燃料棒。RDF 可根據

其處理後特性的差異而分成 RDF-1~7 等七類，表 1 為美國 ASTM 協會對 RDF 的分類。

表 1.ASTM 對 RDF 的分類

類別	定義
RDF-1(MSW)	都市廢棄物直接作為燃料，但不含巨大廢棄物。
RDF-2(c-RDF)	廢棄物壓碎成粗顆粒，亦可經磁選回收金屬。 95wt%通過6-inch篩網。
RDF-3(f-RDF)	廢棄物經過進一步磨碎，並去除金屬、玻璃與其他無機物。 95wt%通過2-inch篩網。
RDF-4(p-RDF)	可燃物處理成粉狀。 95wt%通過0.035-inch 篩網。
RDF-5(d-RDF)	可燃物壓密成柱狀、球狀、磚塊狀或其他形狀。
RDF-6	可燃物處理成液狀(無分類標準)。
RDF-7	可燃物處理成氣狀(無分類標準)。

三、系統設計

根據熱力學第一定律，輸出能量絕不可能大於輸入能量。以燃煤火力發電為例，總發電效率約為 38%。因此我們提出一個大膽的假設，若將蒸氣鍋爐與燒藥室設計成特殊的幾何形狀，利用圓錐曲面的光學性質聚集熱量，並在鍋爐(Boiler)內壁與燒藥室(Burning Chamber)的特定範圍內塗佈絕熱材料，以防能量散失，則或許有助於提升熱機轉換效率。此外，為了確保作業安全與避免汙染，我們設計了若干道閘門(Gate)與耐溫防蝕管線，全程採自動化控制，如圖 3 所示。

燒藥室的外形有兩種設計。第一種，頂部(橙線)與左右兩側的閘門(藍線)皆為拋物面狀，底部(紅線)與前後兩側則為平面，底部的幾何中心恰為頂部與左右側之焦點，如圖 1 與圖 4 所示。由於燒藥室整體形狀為拋物面柱，因此訂 $\overline{F_{p1}F_{p2}}$ 為無數拋物線焦點之連線，稱為焦線，如圖 4 所示。以焦線為中心軸，挖一個直徑遠小於拋物面焦距的空心半圓柱(紫色半圓)，用來堆放衍生燃料棒。此外，為了再提升加熱效率並兼顧安全性，燒藥室頂部、左右與前後兩側建議採用高能量穿透率且耐高熱高壓之材料打造，而底部則選用高反射率、絕熱性極佳且耐高熱高壓之材料製作。根據拋物面的光學性質與材料特性，當衍生燃料棒燃燒時，熱輻射線打中拋物面壁，將有少部分射線平行對稱軸反射，其餘射線穿透燒藥室並加熱鍋爐。以本計畫的燒藥室設計而言，由於頂部與左右兩側皆為拋物面狀，而且共用焦線 $\overline{F_{p1}F_{p2}}$ ，故熱輻射線反射後的行進方式只有兩種：第一，打中底部平面並垂直向上反射；第二，打中左或右側拋物面狀之閘門並反射回焦線。前者有助於加熱鍋爐，後者則有回饋之功，給予剩餘的衍生燃料棒燃燒之能量。相關幾何參數與反射線分布概況分別如表 1 與圖 1 所示。只要適時從入口補充燃料，燃

燒反應便能持續進行。

然而，拋物面狀燒藥室有兩個小缺點。第一，熱輻射一定要經過底部平台的反射，才能循原路徑回到焦線上，故製作底部平台時需兼顧高反射率，避免造成過多能量散失。第二，對二維截面而言，熱輻射由焦線出發至返回焦線止，路徑長度皆有所不同，意味燒藥室頂部各處接收熱量的時間不一致，不利於均勻加熱。因此我們提出燒藥室外形的第二種設計，將頂部與左右兩側的閘門皆做成橢圓柱，兩條焦線剛好是裝藥槽的所在位置，如圖 2 與圖 5 所示。根據橢圓的光學性質，當衍生燃料棒燃燒時，熱輻射線打中橢圓柱壁，將有少部分射線反射到另一條焦線，其餘射線穿透燒藥室並加熱鍋爐。對二維截面而言，每條路徑長度皆等於橢圓長軸長，有利於均勻加熱。此外，每條熱輻射線均在兩條裝藥槽之間互相回饋，不會打中底部平台，因此底部平台不需考慮高反射率材料，只需重點強化裝藥槽的反射與絕熱效果，有助於節省成本。相關幾何參數與反射線分布概況分別如表 2 與圖 2 所示。

鍋爐外形為橢圓柱狀，燒藥室的頂部前後兩端設有傳熱棒(Heat Transfer Rod)，正好位於鍋爐的焦點 F_{e1} 和 F_{e2} 上，分別如圖 3~圖 5 所示。鍋爐的熱能來源除了熱源的熱輻射，亦包含傳熱棒的熱傳導。如上一段所述，任何通過焦點並打中橢圓壁的輻射線，皆會反射到另一個焦點上。我們利用這項幾何特性，使傳熱棒釋放的輻射能經由焦點與爐壁反覆反射，達到短時間內加熱沸騰而產生水蒸氣的功效。其相關幾何參數與反射線分布概況分別如表 3 和圖 3 所示。有鑑於此，傳熱棒須由高傳導率和高輻射係數之材料製成，鍋爐內壁需均勻塗佈能耐高溫高壓之絕熱層(Liner)。

接著要介紹的是其餘的機關設計與運作原理。拋物面柱狀燒藥室有閘門 G1、G2 與 G3 各 2 個，橢圓柱狀燒藥室則有 2 個 G1、G2 與 G3 各 4 個，分別連接衍生燃料棒製備系統、真空幫浦與廢氣淨化裝置、海水淡化廠等 3 處廠房，如圖 4 和圖 5 所示。連接真空幫浦與廢氣淨化裝置(Vacuum Pump and Exhaust Gas Purifying Equipment)的閘門 G2 剛好位於裝藥槽兩端上方，以便於就近抽換裝藥槽附近的氣體，其邊緣須高度氣密，以便在抽真空時使室內達到高真空度。G3 位於裝藥槽兩端，其邊緣須完全水密，以確保關閉時不會滲水。本系統有二種燒藥模式，我們可視燃料棒的敏感程度來決定採行何種模式。

正常模式

此模式適用於鈍感燃料棒。發電系統運轉時，至少要有一側的 G1 保持開啟狀態，G2 和 G3 則全部維持關閉狀態。點燃燃料棒後可從 G1 開啟的那一側進料，維持長時間的運作，以求穩定供電。進料時讓燃料棒經由兩個 G1 之間的斜坡滾入燒藥室，全數落進裝藥槽裡，以便得到最高的熱輻射率。在發電的同時須同步偵測室內氣壓，當氣壓達到安全上限時，真空幫浦須自動啟動，抽走室內的溫室或有毒氣體，另外進行淨化處理。燃料棒燃燒所產生的熱輻射會藉由上述燒藥室與鍋爐的幾何光學性質反覆加熱爐內的水，直到沸騰，產生大量水蒸氣，提供火力發電系統所需之動力。

待固體廢料累積達一定程度時，暫停進料與發電，清理廢渣槽(Drags Tank)。接著關閉 G1 和 G2，打開 G3 與水循環系統的閥門，使鍋爐的水湧進 G1 和 G2 之間的空間，以清潔爐壁，並順著管線送回海水淡化廠做淨化處理。經過淨化的純水與被淡化而去除鹽分的海水將一起被注入鍋爐內。同時可將真空幫浦設於「Purge」模式，以清除室內的懸浮微粒，並灌入新鮮空氣或適量氧氣。待恢復工作前再調至「Vent」破真空即可。

🌈 Purge：先抽氣(Pump)，再通入乾淨空氣(Vent)，如此重複3次後關閉閥門。

真空模式

此模式適用於較敏感的燃料棒。首先在裝藥槽內填滿衍生燃料棒，接著關閉 G1，打開 G2，將真空幫浦設於「Pump」模式，抽氣一段時間再封閉 G2「Sealed」，使室內保持低度真空，再點燃燃料棒開始發電。發電過程與正常模式相同。衍生燃料棒耗盡後，先開啟水循環系統以降溫，再將真空幫浦調至「Purge」模式，抽走室內高溫氣體與懸浮微粒，另外執行淨化處理。接著將真空幫浦調至「Vent」模式，打開裝藥槽底部閥門，使廢料流入廢渣槽。接著即可打開 G1，送入下一批燃料棒，重複上述程序。

火力發電系統所產生的電力，大部分傳輸給下游用戶，多餘的電力存於儲電站(Energy Storage Station)。此外，在熱-機-電轉換的過程中，必定伴隨著熱量散失，火力發電系統運轉時所逸散的熱能可回饋給彈藥分離裝置(Ammunition Separation Equipment)，使火炸藥突破熔點而與彈殼剝離。處於熔融態的火炸藥被傳送至衍生燃料棒製備系統(Manufacture System of Refuse Derived Fuel Rods)，經由粉碎、分選、乾燥、加工、成型等程序製作成高爆熱且低燃速的衍生燃料棒，再由專門的載具(Vehicle)運往燒藥室入口，執行上述燒藥發電程序。如此一來，一個循環發電體系就建構完成了。

表 1.拋物面柱狀燒藥室之幾何參數列表

參數名稱	頂部焦距	側門焦距	燒藥室最大高度	中央凹槽直徑
長度(任意單位)	2.5	1.6	2.8	0.6
參數名稱	底部寬度	燒藥室長度	燒藥室最大寬度	中央凹槽長度
長度(任意單位)	6.4	5.5	8.0	5.5

表 2.橢圓柱狀燒藥室之幾何參數列表

參數名稱	頂部焦距	側門焦距	燒藥室最大高度	中央凹槽直徑
長度(任意單位)	3.2	3.2	3.3	0.6
參數名稱	底部寬度	燒藥室長度	燒藥室最大寬度	中央凹槽長度
長度(任意單位)	6.8	5.5	6.8	5.5

表 3.鍋爐之幾何參數列表(僅供參考)

參數名稱	長軸長	短軸長	焦距 $\overline{F_{e1}F_{e2}}$
長度(任意單位)	7.3	4.8	5.5

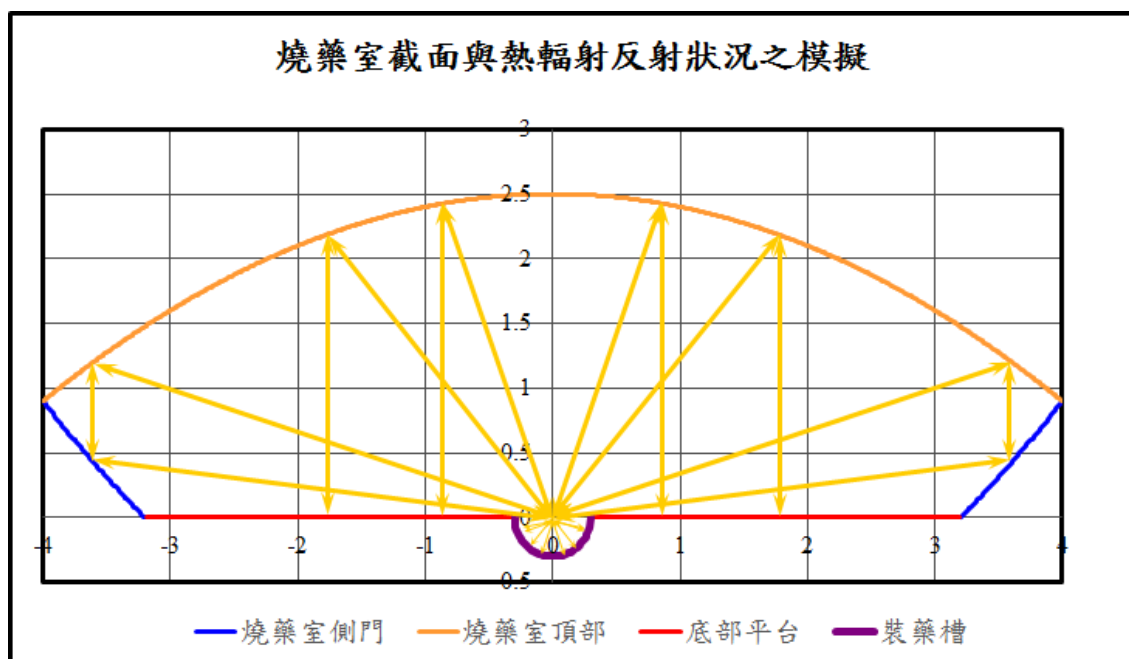


圖 1.拋物面柱狀燒藥室截面與熱輻射反射狀況之模擬圖

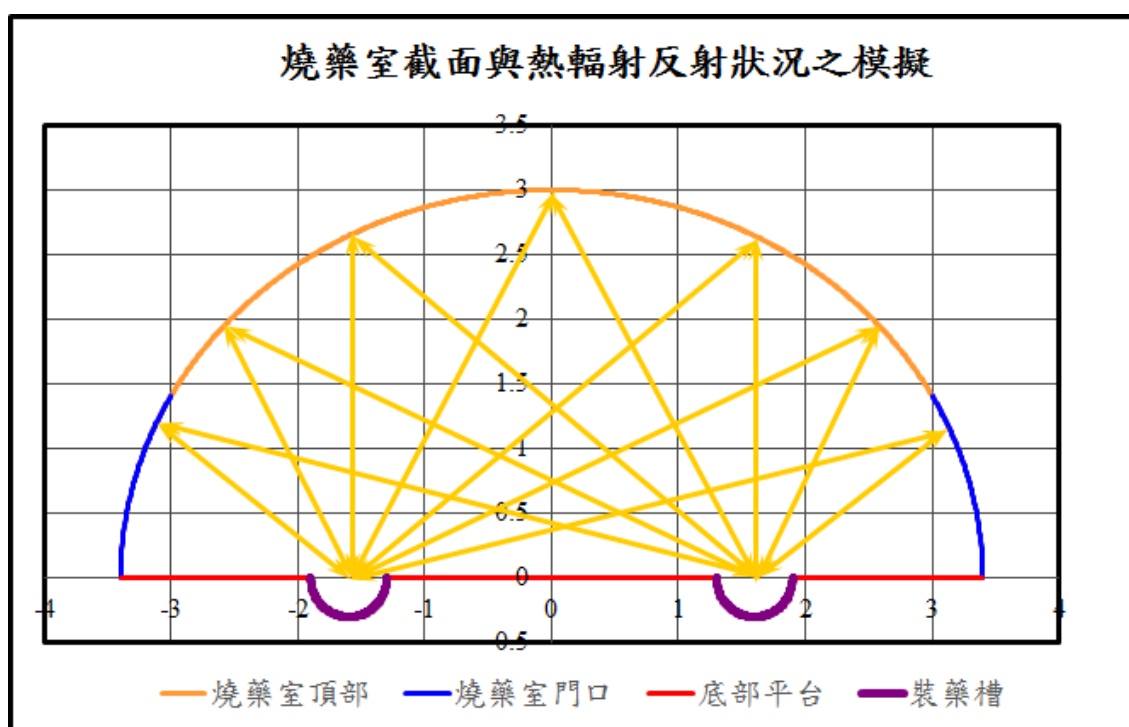


圖 2.橢圓柱狀燒藥室截面與熱輻射反射狀況之模擬圖

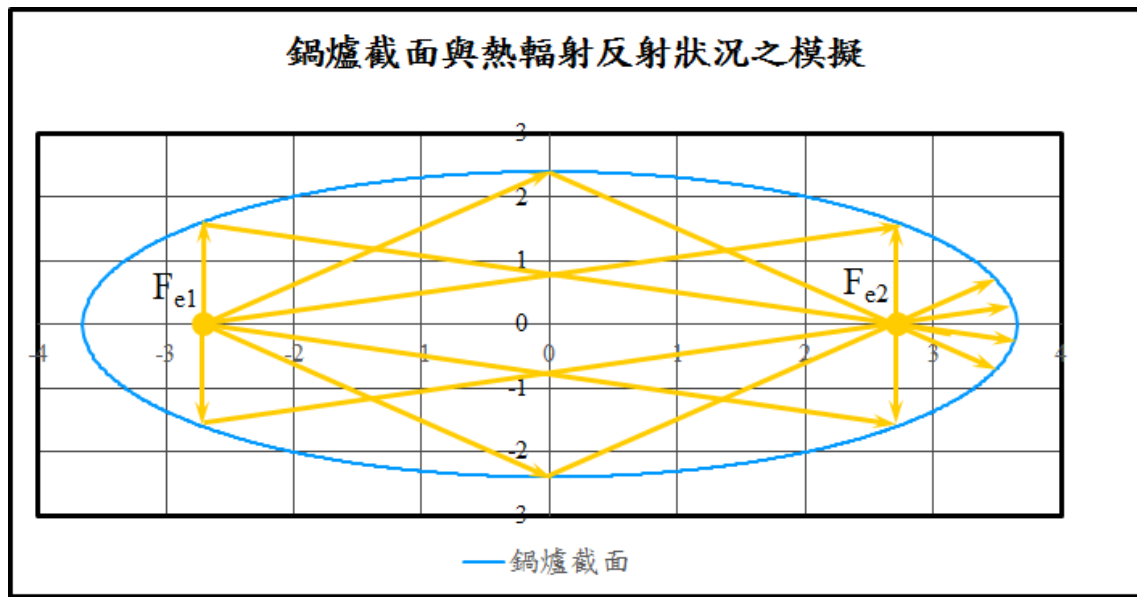


圖 3.鍋爐頂部截面與熱輻射反射狀況之模擬圖

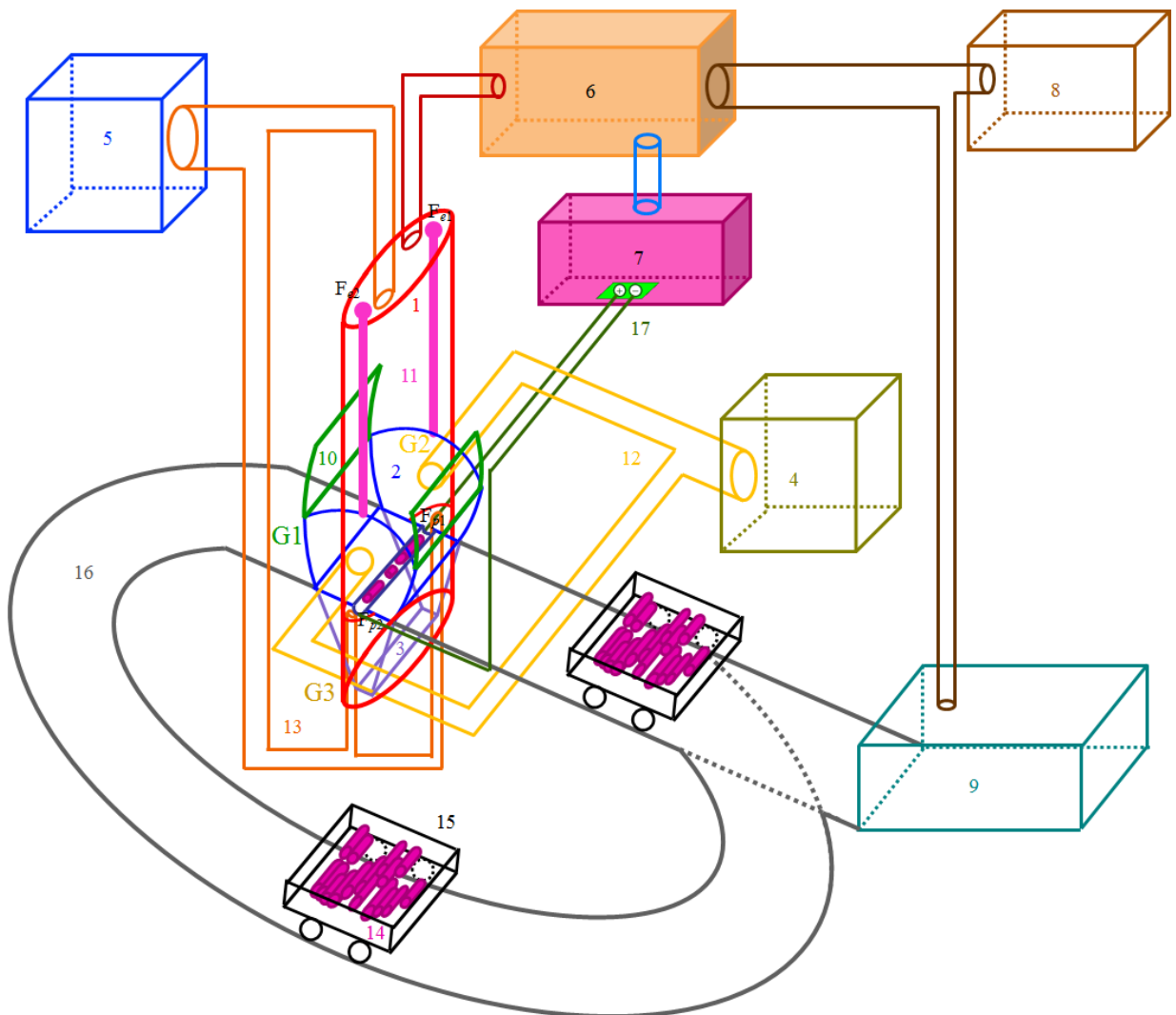


圖 4.配備拋物面柱狀燒藥室之廢火炸藥蒸氣發電系統配置示意圖

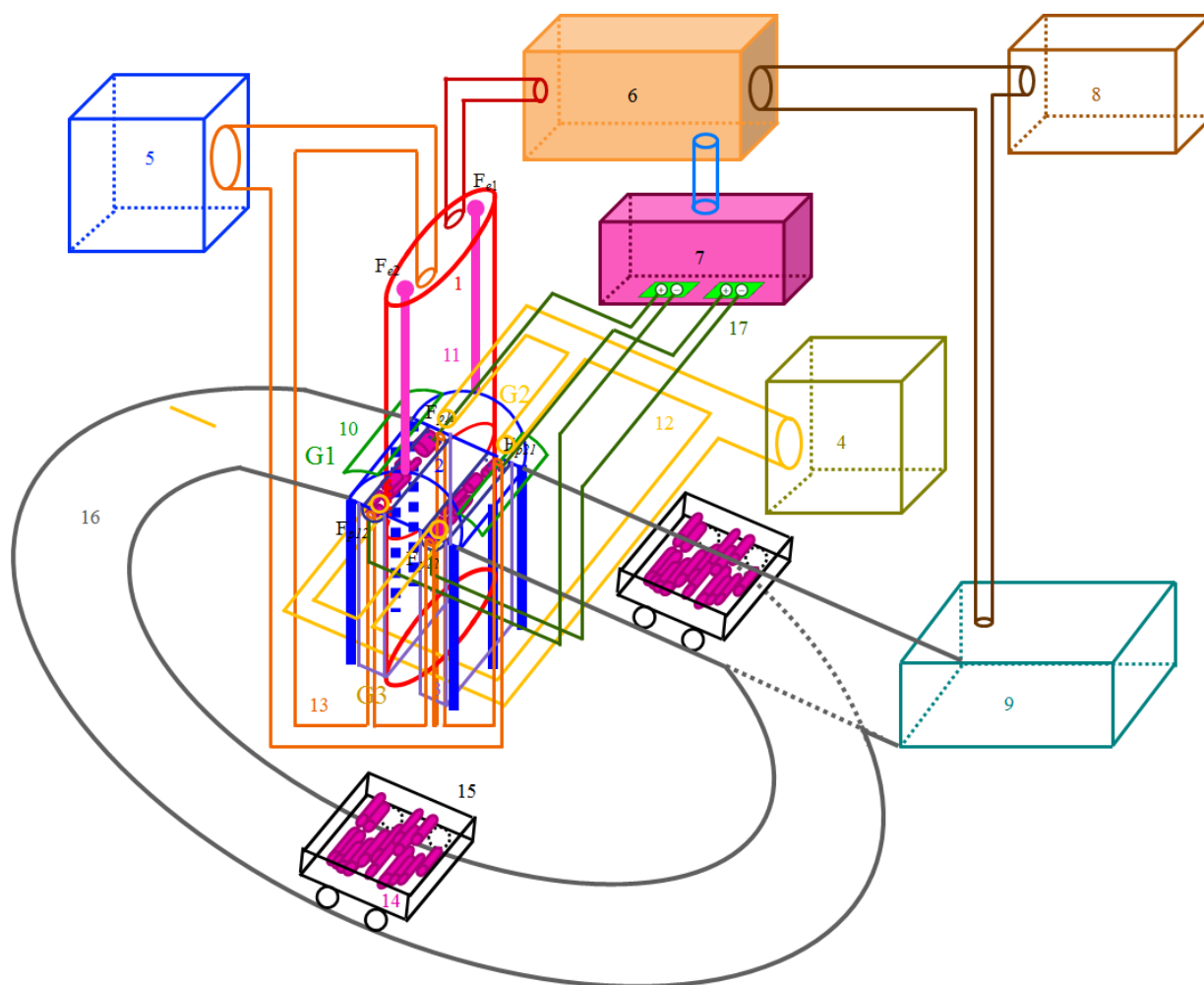


圖 5.配備橢圓柱狀燒藥室之廢火炸藥高效率蒸氣發電系統配置示意圖

1. 鍋爐(Boiler)
2. 燒藥室(Burning Chamber)
3. 廢渣槽(Drags Tank)
4. 真空幫浦與廢氣淨化裝置(Vacuum Pump and Exhaust Gas Purifying Equipment)
5. 海水淡化廠(Desalination Plant)
6. 火力發電系統(Thermal Power System)
7. 儲電站(Energy Storage Station)
8. 彈藥分離裝置(Ammunition Separation Equipment)
9. 衍生燃料棒製備系統(Manufacture System of refused derived fuel rods)
10. 燒藥室閘門(Gate of Burning Chamber)
11. 傳熱棒(Heat Transfer Rod)
12. 連通燒藥室與真空幫浦的石英管路(Quartz Tube Connecting Burning Chamber with Vacuum Pump)
13. 水循環系統的不鏽鋼管(Stainless Steel Tube of Water Circulation System)
14. 衍生燃料棒(refused derived fuel rods)

15. 載具(Vehicle)

16. 軌道(Track)

四、結論

廢棄物衍生燃料具有高熱值、可儲存、性質均勻、燃燒穩定、低汙染等諸多優點。我們可將燒藥室與鍋爐外形設計成圓錐曲面，包括拋物面柱與橢圓柱，以減少熱量散失，提升發電效率。此外，我們根據衍生燃料棒的敏感程度設計兩種燒藥模式。鈍感燃料棒適用於正常模式，敏感燃料棒則適用於真空模式。經過上述的系統設計，有助於提升廢火炸藥蒸氣發電的可行性。

五、參考文獻

1. Barry C. McCall, "AUTOCLAVE MELTOUT OF CAST EXPLOSIVES", Presented at Defense Explosives Safety Board, Doral Resort and Country Club, Miami, Florida, 16-18 August 1994
2. US Executive Order 13101, "Greening the Government through Waste Prevention, Recycling, and Federal Acquisition", 14 September 1998
3. T.Ganesh, P.Vignesh, G.Arun Kumar, "Refuse Derived Fuel To Electricity", ResearchGate, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Volume 2, Issue 9, September 2013
4. R.Sarc, K.E.Lorber, "Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs)", ScienceDirect, Waste Management, Volume 33, Issue 9, Pages 1825-1834, September 2013
5. Xianchao Zhou, Wei Liu, Peng Zhang, Wei Wu*, "Study on heavy metals conversion characteristics during refused derived fuel gasification process", ScienceDirect, Procedia Environmental Sciences 31 (2016) 514-519
6. O Nam-Chol, Won-Guk Kim, "Investigation of characterization of municipal solid waste for refused-derived fuel, a case study", Energy Sources, Volume 39, Issue 15, Pages 1671-1678, 13 September 2017
7. SilvanoTosti, Manuel A.Sousa, Giuliano Buceti, Luis M. Madeira, Alfonso Pozio, "Process analysis of refuse derived fuel hydrogasification for producing SNG", ScienceDirect, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 44, Issue 39, Pages 21470-21480, 13 August 2019
8. Mohammad Shumal, Ahmad Reza Taghipour Jahromi, Ali Ferdowsi, Seyed Mohammad, Mehdi Noorbakhsh Dehkordi, Amin Moloudian, Ali Dehnavi, "Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refused Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan- Iran): Environmental Impact and sustainable development", ScienceDirect, Renewable Energy, Volume 146, Pages 404-413, February 2020
9. 林國斌、吳宗永、葉早發、陸開泰、黃其清、黃國鑫、劉台傑、陳幸郎、許柏

- 鴻，燃燒逾限火炸藥發展氣電共生之可行性評估，第 20 屆國防科技學術研討會論文集，2011 年 11 月 18 日
10. 翟文嘉、李金樹、黃其清、劉台傑、徐懷德、朱正明，國軍逾限火炸藥製作衍生燃料之製程開發，第 21 屆國防科技學術研討會論文集，2012 年 11 月 23 日
 11. 林美玲，富含氫燃料影響高壓蒸氣發電鍋爐效益之研究，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程所，碩士論文，2006 年。
 12. 簡全基，流體化床蒸氣發電裝置之副產石灰改良酸性土壤，國立中興大學土壤環境學系，碩士論文，2003 年。
 13. 張庭維，火力發電新探與數位學習應用，國立高雄應用科技大學電機工程系，碩士論文，2016 年。
 14. 黃榮裕，架構導向火力電廠改建工程管理模型之研究，國立中山大學資訊管理學系，碩士論文，2012 年。
 15. 工業技術研究院，能源查核與節約能源案例手冊-火力發電，2012 年 12 月 29 日
 16. 財團法人台灣綜合研究院、天美時工程股份有限公司，汽電共生系統節能技術手冊，2014 年 11 月

燃料電池系統長期運轉組件失效分析與優化策略評估

Evaluation of Failure Analysis Method and Optimization Strategy for Fuel Cell System and Components in Long-Term Operation

詹彥信^{1*}、楊証皓²、張勳承³、張文昇⁴、李鈞函⁵

Yen-Hsin Chan, Cheng-Hao Yang, Shing-Cheng Chang,

Wen-Sheng Chang, Jun-Han, Li

工業技術研究院 綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology

Research Institute

摘要

由於燃料電池系統擁有高發電效率與低污染排放等特點，具有成為分散式發電系統之潛力，然而燃料電池系統需要克服壽命太短且發電成本太高等問題。因此，本研究透過使用 FMEA 手法與系統熱質能分析方法，探討燃料電池系統於長期運轉下，影響系統性能之關鍵因子，並且以系統數值模擬結果進行分析驗證。以空氣供應模組為例，FMEA 分析結果指出其風險優先數最高，為影響系統之重要關鍵因子，並且會間接影響熱箱模組之性能與壽命。本研究建立高溫燃料電池系統之數值模型，分析空氣模組失效對系統之影響，模擬結果當陰極空氣流量變化率達 20% 時，影響系統發電功率變化達 7%，且電堆與燃燒器溫度變化量達 20 °C，驗證空氣供應模組對於系統各組件性能之影響相當顯著，為系統長期運轉過程中，需要管控失效的高風險關鍵模組。系統模擬結果證明，本研究所使用之 FMEA 分析手法，可以用於系統長期運轉之組件失效分析與優化策略之評估。

關鍵字：燃料電池、失效模式與影響分析、熱質能分析、發電功率

Abstract

The fuel cell is a power generation system which has the characteristics of high electrical efficiency and low pollution emissions. Operating lifetime and cost are two main problems which should be facing for commercialize in the future. In order to evaluate the key factor of influence the performance and lifetime to fuel cell system, failure mode and effects analysis (FMEA) and thermodynamic analysis would be used and investigate in this research paper. Based upon on the simulation result, the

¹ 工業技術研究院 綠能與環境研究所 研究員

Email: YHChan@itri.org.tw

² 工業技術研究院 綠能與環境研究所 經理

Email: CHYang@itri.org.tw

³ 工業技術研究院 綠能與環境研究所 研究員

Email: S.C.Chang@itri.org.tw

⁴ 工業技術研究院 綠能與環境研究所 組長

Email: chang0719@itri.org.tw

⁵ 工業技術研究院 綠能與環境研究所 經理

Email: chunhanli@itri.org.tw

component of air supply is the key factor which would influence the system's performance and the lifetime of a hot box. Therefore, the simulation model of high temperature fuel cell system would be built to verify in this research. According to the result, when the flow rate of air has been changed in 20%, the rate of performance change of power generation the system is 7%, also the temperature of the stack and burner would be influenced and changed to 20°C. By the above result, the air supply module is an important and high risk module for fuel cell system during the long-term operation. Also the analysis method of FMEA has been confirmed that can be used to investigate the failure analysis and optimization strategy in fuel cell system for long-term operation.

Keywords: Fuel Cell, Failure Mode and Effects Analysis, Thermodynamic analysis, Power generation.

一、緒論

燃料電池屬於直接從化學能轉成電能的發電系統，其優勢在於高發電效率與低污染物排放等。近年來各國致力於零碳排放的研究，致使氫能燃料電池之相關研究備受關注。由M. M. Whiston[1]團隊之文獻可知，美國能源部(Department of Energy, DOE)認為固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)系統未來發展目標需朝向低發電成本與提升系統壽命為主要方向。此外，透過The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking(FCH JU)於2018的氫能報告[2]中可知，質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)於未來的發展目標在於提升發電效率與降低系統成本。由前述兩個文獻可知，目前主要的高低溫燃料電池系統主要發展方向為降低系統成本、提升系統效率與提升系統壽命。

由前述可知，如何提升系統壽命是各國學者目前專注的研究方向之一，而如何針對系統長時間運轉下進行燃料電池系統組件性能進行分析是一項重要研究。由L. Vichard團隊[3]的文獻可知，為了探討PEMFC電堆於長時間操作下性能的變化，故透過電化學阻抗頻譜儀進行電堆各極化阻抗的量測，而該團隊認為透過量測電堆的極化阻抗可以協助分析電堆於長時間運轉下之性能。然而，L. Vichard團隊發現，透過極化阻抗雖然可以了解PEMFC電堆的衰退狀態，但無法針對電堆性能衰退的原因進行分析。L. Mao團隊[4]則認為若需要針對電池進行性能分析時，除了針對性能進行量測外，也需要針對電池各入口的參數進行監控，並且與性能進行交叉比對，方能評估電池長時間下的電池性能與壽命。

上述的文獻雖然說明燃料電池堆於長時間運轉下，需要透過監控電堆的出入口進行性能衰退的評估，然而文獻中僅針對電堆的狀態進行分析，並未針對系統進行長時間運轉的性能評估。而R. Peters團隊[5]為了探討20 kW高溫燃料電池系統之運轉特性，將系統於不同操作條件下，運轉5000小時，並且探討系統的效率與功率變化。然而該團隊只針對系統迴路設計與實際運轉進行分析，並未針對組件進行壽命分析。另外，R. Deodath團隊[6]認為組件的故障分析表，可以用於改善系統迴路設計，提升系統運轉的穩定性與壽命，其證明藉由建立組件失效

分析或者故障分析表的手法，有助於進行系統迴路設計，且提升其運轉可靠性。

由前述文獻可知，若要針對系統進行長時間的組件失效與性能進行評估，除了透過系統迴路設計與性能量測外，也需要透過各組件的失效和故障分析進行系統的壽命評估。因此，本研究主要目標在於針對燃料電池系統於長時間運轉下，建立系統與組件的性能和壽命評估方式。而為了完整探討系統各組件對於系統長時間運轉性能的影響，本研究將使用FMEA評估手段，針對燃料電池系統從組件對於系統的影響進行分析，並且提出影響系統性能與壽命的主要影響因子，最後，搭配系統熱質能分析，驗證組件之操作參數對於發電系統的電功率與組件狀態的影響能力。

為了建立燃料電池系統及組件於長時間運轉下的失效分析與優化策略評估方法，本研究將採用FMEA手法與系統熱質能模擬，針對燃料電池系統進行性能影響因子的解析，其中將使用FMEA評估手段，探討燃料電池系統中各組件的失效風險因子，並且透過系統熱質能計算，探討該因子對於系統性能的影響。

為了瞭解燃料電池發電系統所需要之組件項目以及操作參數，需要先了解燃料電池發電系統之迴路，本研究將以SOFC與PEMFC系統作為燃料電池系統迴路分析之主要目標，其系統迴路分別如圖1與圖2所示。

圖 1.SOFC 系統迴路示意圖[10]

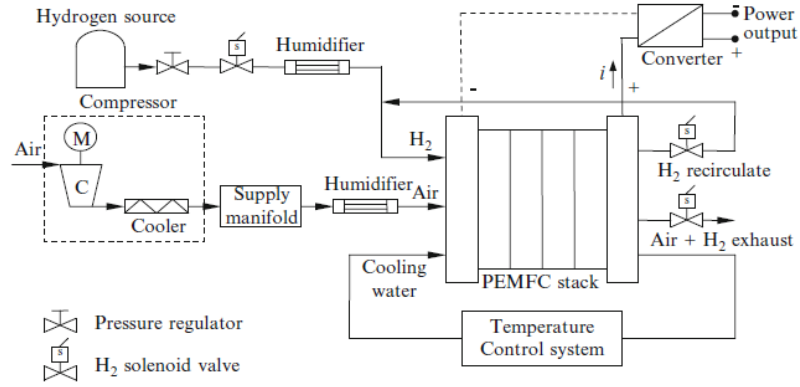


圖 2. PEMFC 系統迴路示意圖[11]

由圖1與圖2可知，SOFC與PEMFC系統最主要差異在於SOFC系統包含系統加熱需求的熱箱組件與模組，而PEMFC系統則需要考量電堆水循環模組與加濕模組，後續本研究將同時針對SOFC與PEMFC兩大系統進行系統模塊區分，以提供後續FMEA分析使用。

2.2 應用 FMEA 手法於燃料電池系統之評估步驟

由圖一與圖二可知，燃料電池系統需要透過主動件、被動元件與電堆等關鍵組件所組成，為了深入探討系統於長時間運轉過程中，影響組件壽命與性能之關鍵因子，本研究將透過FMEA分析手法進行燃料電池系統之風險評估。而整體FMEA分析流程，則是依據參考文獻[7-9]中各研究團隊對於系統各組件與燃料電池性能的影響能力，進行風險指數的分析，其相關評估步驟如下所示。

FMEA風險優先指數(RPN)評分與計算步驟：

1. 建立系統與組件之結構圖。
2. 分析各組件之風險優先指數(RPN)，如公式 1 所示。
3. 進行組件各指數(S, O, D)之評估的評分從 1~10。
4. 進行風險指數計算與原因分析。

$$RPN = \text{嚴重度}(S) \times \text{發生度}(O) \times \text{偵測度}(D) \quad (1)$$

2.3 燃料電池系統熱質能計算

為了驗證前述FMEA評估結果，本研究透過Matlab/Simulink中Thermolib模組，並且以SOFC高溫燃料電池系統為例，進行系統熱質能運算。除了透過軟體進行分析外，在熱平衡計算過程中，將針對系統進行各項組件之優化與模擬條件之假設，其各項組件之計算步驟與系統假設如下所示。

SOFC電堆性能計算方式

進行SOFC單電池之性能曲線計算時，將透過公式(1)之Bulter-Volmer equation評估單電池在不同負載下之電壓變化。

$$E(i) = E_0 - \eta_{Ohm} - \eta_{Act,a} - \eta_{Act,c} - \eta_{Con,a} - \eta_{Con,c} \quad (2)$$

其中， E_0 為開迴路電壓， η_{Ohm} 為歐姆阻抗， $\eta_{Act,a}$ 為陽極活化阻抗， $\eta_{Act,c}$ 為

陰極活化阻抗， $\eta_{\text{Con,a}}$ 為陽極濃度極化阻抗， $\eta_{\text{Con,C}}$ 為陰極濃度極化阻抗，其各阻抗之計算是透過Nernst equation進行評估，其計算公式將依據文獻[12]進行計算。

上述為計算SOFC之性能之方法，其中所有的計算參數與上述公式皆是參考文獻[12, 13]進行設計，詳細之參數如表1所示。

表 1.SOFC 單電池模組之相關模擬參數

Parameter	Value
Fuel cell operating temperature (K)	873, 973, 1073
Fuel cell operating pressure (atm)	1
Electrolyte conductivity (S m^{-1})	$50 \times 10^4 \times \exp(-10300/T)$
Anode conductivity (S m^{-1})	$(3.27 \times 10^6) - (1065.3 \times T)$
Cathode conductivity (S m^{-1})	$((8.855 \times 10^7)/T) \times \exp(-1082.5/T)$
Anode apparent diffusion coefficient ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	3.66×10^{-5}
Cathode apparent diffusion coefficient ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	1.37×10^{-5}
Cathode thickness (m)	30×10^{-6}
Electrolyte thickness (m)	17×10^{-6}
Anode thickness (m)	200×10^{-6}
Faraday's constant (C mol^{-1})	96487

燃料電池系統之熱質能模型

SOFC系統於運轉過程中，為了提供SOFC之高溫操作環境，需要透過燃燒供熱或者尾熱回收等方式，搭配熱交換器將高溫熱源與低溫流體進行熱交換。而為了計算各組件之間之熱交換過程，本文將參考文獻[14, 15]之計算步驟，以氣體流過熱組件當下熱容與系統熱交換效率等平衡態熱力學為基礎，計算各組件之熱能與氣體溫度變化，其中組件之熱交換效率計算如下公式(3)所示。

$$\varepsilon = \frac{C_h \cdot (T_{h,1} - T_{h,2})}{C_{\min}(T_{h,1} - T_{c,1})} = \frac{C_h \cdot (T_{c,2} - T_{c,1})}{C_{\min}(T_{h,1} - T_{c,1})} \quad (3)$$

其中， $T_{h,1}$ 與 $T_{c,1}$ 分別代表高溫氣體與低溫氣體之入口溫度， $T_{h,2}$ 與 $T_{c,2}$ 分別代表高溫氣體與低溫氣體之出口溫度， C_h 與 $C_{\min}$ 分別代表高溫氣體熱容量與高低溫流體中最低的熱容量。

透過前述之熱能與熱交換效率之計算，則可以針對系統中各熱組件之各個溫度進行計算，如下公式(4)(5)所示。

$$T_{h,2} = T_{h,1} - \frac{q}{C_h} \quad (4)$$

$$T_{c,2} = T_{c,1} + \frac{q}{C_c} \quad (5)$$

SOFC 系統內部化學反應說明

SOFC系統中，除了電堆會進行化學反應外，也需要考慮重組器與燃燒器之化學反應，因此本研究將針對燃燒器與重組器於運轉過程中所需要使用的化學反應與其反應能量進行說明，使兩個組件可再藉由氣體之間之熱交換達到熱交換的功效，以下為相關化學反應之公式，如公式(6)-(10)所示：



除了前述所介紹SOFC系統相關計算流程外，為了能夠完成系統內部數值計算，系統各組件內部所需要的材料模擬參數，將會參考文獻[15]中，SOFC系統之各項設計參數作為本文於數值計算中之依據，詳細之數值參數於下表 2 所示。

表 2.SOFC 系統模組之基本操作參數[15]

Parameter	Value
Number of SOFC stack in system	1
Activation area of single cell (cm ²)	121
Number of single cell in a stack	400
Fuel utilization of SOFC stack (%)	75
The efficiency of Anode heat exchanger (%)	80
The efficiency of cathode heat exchanger (%)	80

三、結果與討論

本研究主要針對燃料電池系統於長時間運轉過程中，提出影響系統性能與組件失效之關鍵因子，並且透過操作風險評估與系統熱質能分析之方式，探討當關鍵組件之性能失效時，對於系統發電功率及組件操作狀態影響。

3.1 運用 FMEA 分析法建立燃料電池系統風險評估模型

為了找出影響燃料電池系統於長時間運轉下之關鍵影響因子，本文將使用前述所介紹之FMEA分析手法，解析燃料電池系統功能與各模組之關聯性。首先，本研究將整合PEMFC與SOFC之系統，進行系統迴路模組化，並且透過系統模組結構圖，探討系統於運轉過程中，各模組與運轉功能之關聯性，其系統迴路圖如圖 3 所示，而系統運轉功能與模組關係圖如圖 4 所示。

由圖 3 可知，一個燃料電池系統總共可分為十個不同的模組，其主要在於維持系統正常運轉與安全保護等兩大項目，然而為了使本文所建立的系統可以更詳細的區分模組對於系統運轉功能的影響，因此透過系統組件與功能結構圖將系統運轉過程中所需要的各種操作功能與模組進行鏈接，其目的在於提供後續各模組風險評估時，可針對系統各種操作功能進行完整的風險評估，進而減少評估項目遺漏之可能性。由圖 3 與圖 4 可知，當系統運轉時，總共需要 10 種不同的操作功能，且每一項功能會同時需要 ≥ 1 個模組協助，因此可知燃料電池系統屬於多重耦合的發電系統，系統內部操作參數可能同時影響多個組件，故針對系統風險評估時，也需要針對模組在不同操作功能下進行評估，而其風險評估表如圖 5 所示。

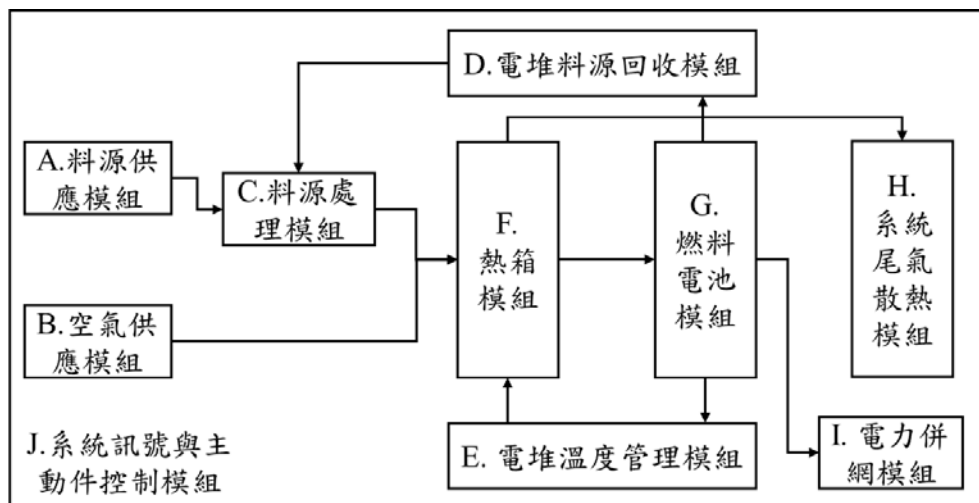


圖3.燃料電池系統模組迴路示意圖

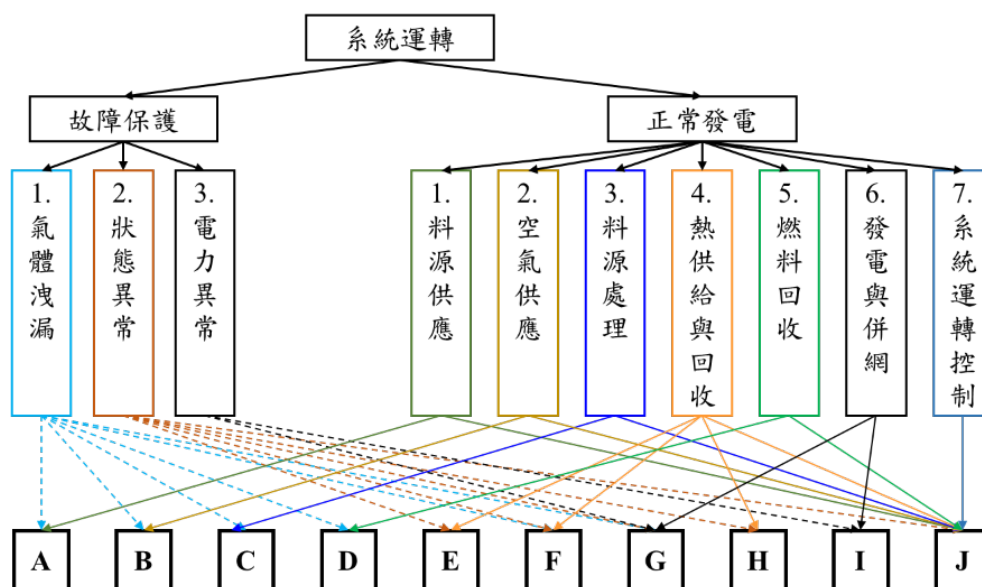


圖4.燃料電池系統模組與操作功能關係圖

由圖5可知，本研究根據圖3與圖4之系統模組與各模組功能進行系統級之全面性風險評估。並且依據前述公式(1)中，風險評估指數之計算方式，完成系統各模組於不同操作功能下之數值計算。透過圖5可知，燃料電池系統運轉過程中，空氣供應模組是影響系統操作安全的一大主要原因，其風險指數 ≥ 200 ，此外若以SOFC發電系統而言，空氣供應模組也會影響熱箱模組之運作進而提升熱箱模組的風險指數達210。此結果說明當燃料電池系統運轉時，空氣供應模組需要透過不同監控元件，進行長時間且連續之性能監控，進而評估該模組的壽命與組件性能對於系統發電功率的影響。除此之外，由圖5可以發現，在進行風險評指數評估時，幾乎所有模組都有 ≥ 100 的項目，而此結果代表，燃料電池系統於運轉過程中，雖然空氣供應模組是最需要被優先監控的項目，但是其他組件也都是需要被監控。

區塊	潛在失效模式	潛在失效效應	嚴重度	潛在原因/失敗機制	發生度	管制設計建議	難檢度	風險優先數
料源供應模組	調壓組件性能衰退，無法提供電堆所需求之操作壓力	燃氣壓力不足	6	系統管路與調壓組件異常	3	系統陽極入口壓力檢測	2	36
	流量控制模組失效，無法提供穩定之操作流量	燃氣流量不足	5	流量控制組件異常	5	系統陽極流量檢測	2	50
空氣供應模組	鼓風機因不純物的影響，導致性能衰退，無法提供系統足夠壓力或流量	空氣壓力不足	7	鼓風機異常	6	電堆陰極入口壓力檢測	4	168
		空氣流量不足	9	鼓風機異常	6	鼓風機流量檢測	5	270
	增濕模組因性能衰退或操作迴路設計不佳，導致無法提供電堆所需求濕度	空氣濕度不足	7	加濕模組異常	4	電堆陰極入口濕度檢測	4	112
料源處理模組	料源因重組觸媒失效，導致氣氣無法滿足系統使用需求	重組性能衰退	8	重組器性能衰退	4	料源氣體成分定期測試	5	160
	料源因純化模組性能衰退，影響氣源成份	純化性能衰退	7	純化性能衰退	4		5	140
	料源之升壓組件性能衰退，導致料源壓力不足	料源輸出壓力降低	7	料源增壓幫浦性能衰退	5	料源壓力檢測	3	105
電堆料源回收模組	料源回收與液氣分離裝置失效，燃料使用不完全	系統燃料使用率不完全	5	燃氣循環組件異常	6	幫浦輸出功率檢測，系統尾端燃氣濃度檢測	5	150
				液氣分離裝置失效	4	尾氣濕度檢測	5	100
電堆溫度管理模組	水循環模組失效，電堆溫度無法有效控制	水管路壓力與流量不足	8	水幫浦異常	4	水管路壓力量測，輸出功率檢測	3	96

區塊	潛在失效模式	潛在失效效應	嚴重度	潛在原因/失敗機制	發生度	管制設計建議	難檢度	風險優先數
熱箱模組	系統升溫及變載過程，空燃比改變導致燃燒不穩定	燃燒不完全或燃燒器熄火	7	燃燒組件操作異常	6	以火焰檢知器搭配燃燒器入口/出口溫度及壓力感測器監測	5	210
	重組轉化率低導致產氣量不足	系統發電效率降低	7	重組器運作異常	6	重組氣體取樣成分分析	4	168
	熱交換器性能衰退，導致無法提供系統足夠熱源	系統發電功率降低	7	熱交換器異常	2	以溫度感測器各管路出入口	3	42
	熱損失太高導致系統效率降低	系統發電效率降低		熱箱絕熱包覆效果不佳	7	熱傳儀監測熱箱表面溫度	2	98
			7	組件之間熱傳過高導致組件溫度不足	8	熱組件出、入口溫度感測器監測	2	112
燃料電池模組	電堆性能因長時間運轉而衰退，導致性能衰退	觸媒衰退	8	電堆MEA衰退	6	電堆溫度；氫氣偵測器；電壓；電流；功率監控	3	144
	流道板因長時間運轉而功能異常，電池性衰退	電堆結構異常	8	電池組流道功能異常	6		5	240
系統尾氣散熱模組	散熱迴路失效，導致系統排放溫度過高	散熱功率不足	5	散熱模組異常	3	散熱循環出入口溫度檢測	3	45
				抽水幫浦異常	4	循環水壓力檢測	3	60
電力併網模組	系統導線與逆變器性能衰退，導致系統輸出功率下降	系統輸出功率不足	6	逆變器性能異常	7	系統輸出功率與轉換效率計算	4	168
系統訊號與主動件控制模組	監控組件因長時間偵測，而功能失效	系統監控數據異常	9	組件與導線損毀	5	安全機制與備用模組設計	3	135

圖5.燃料電池系統FMEA分析表

由前述可知，本研究透過FMEA分析，計算燃料電池系統於長時間運轉下，各模組的風險指數，然而，為了進一步探討各模組所包含的組件，本研究針對各個模組可能使用之組件以表格分類的方式進行排序，如表 3 所示，其目的在於條列各個模組於系統長時間運行中所需要之組件，並且進行功能分類，進而可知各組件之主要控制變數與應變參數。由表 3 可知，燃料電池系統運轉過程中，主要受到 1.不同調壓閥進行系統壓力的調控；2.不同的幫浦針對料源與水流量和壓力的調控；3.鼓風機的轉速進行系統空氣供應與溫度的控制；4.以燃料電池堆與併網機進行系統電流與功率的控制，透過上述四點說明可知，燃料電池系統於長時

間運轉中，可分為主動控制模組與被動監控點位，而為了使系統於長時間運轉過程中可進行失效分析與優化策略的評估，本研究藉由圖 5 與表 3，進行系統控制變數與應變參數的建立，其結果如表 4 所示。由表 4 可知，系統中可透過控制模組進行主動控制且其能夠直接影響系統狀態的參數，被歸類為控制變數，而系統各狀態條件之被動監測的項目則是應變參數。藉由建立燃料電池系統之控制變數與應變參數表，可協助系統於長時間運轉過程中，建立完整的訊號監控模組，進而進行系統整體失效分析與系統優化策略的分析與驗證。而本研究也將透過參數表之建立，建立高溫燃料電池系統熱質能模型，並且以圖三FMEA分析結果中，風險優先指數最高的空氣供料模組進行驗證。

表 3.燃料電池系統各模組之組件說明表

類別	料源處理模組	料源供應模組	空氣供應模組	電堆料源回收模組	電堆溫度管理模組	熱箱模組	燃料電池模組	系統尾氣散熱模組	電力併網模組	系統訊號與主動件控制模組
燃料電池系統組件	脫硫器	調壓閥	鼓風機	氫氣泵	水泵	加濕器	燃料電池堆	水泵	DC/DA 逆變器	控制器
	燃料增壓泵	電磁閥	流量計	液氣分離器		重組器		散熱風扇		感測器
	重組器	流量計				燃燒器		熱交換器		控制程式
	PSA 純化器					熱交換器		熱水儲槽		
						絕熱殼件				

表 4.燃料電池系統控制變數與應變參數表

控制變數	應變參數
氣體壓力(barg)	氣體濃度(%)
流量計流量(lpm)	氣體壓力(barg)

電堆電流(A)	氣體濕度(RH%)
鼓風機/燃氣泵/水泵轉速比例(%)	氣體溫度(°C)
氣體閥門(On/off)	電堆溫度(°C)
	水溫度(°C)
	水壓力(barg)
	電堆電壓(V)
	電堆功率(W)
	BOP 功率(W)
	系統效率(%)

3.2 空氣供應模組對於高溫燃料電池系統性能之影響

根據前述小節可知，本研究已經針對燃料電池系統進行FMEA分析與建立系統長時間運轉之控制變數與應變參數表，並且由FMEA分析可知，燃料電池系統中鼓風機流量是影響系統長時間運轉之關鍵因子。故本小節透過熱質能分析的手法，比較不同的空氣操作參數對於SOFC發電系統之性能與組件溫度的影響。本次SOFC系統之迴路模型與操作參數，除了依據前述 2.3 節計算步驟外，並且使用過去本團隊所發表的SOFC系統迴路模型[16]，其中系統迴路圖如圖 6 所示，而SOFC陰極與陽極的基本操作參數如表 5 所示。由圖 6 與表 5 可知，本次主要針對SOFC發電系統中陰極空氣的流量進行改變，並且透過觀察系統發電功率與關鍵組件之溫度變化，進而探討當陰極鼓風機失效，導致空氣流量不穩定時，系統發電功率與關鍵組件溫度的變化。

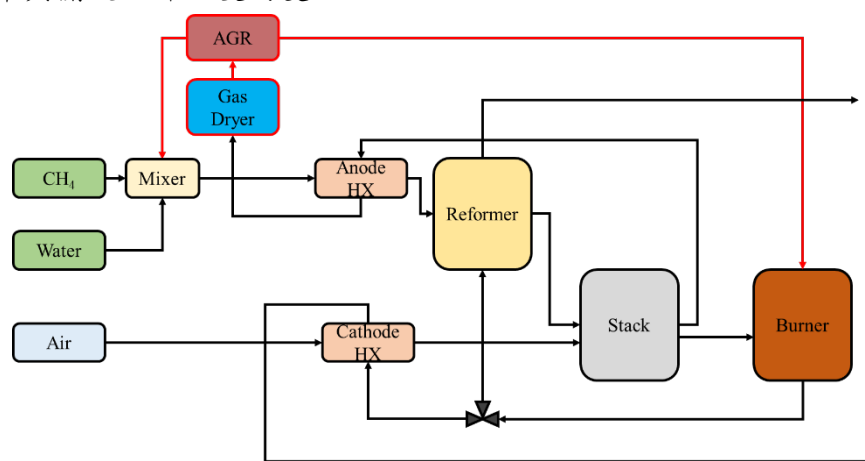


圖 6.SOFC 系統迴路圖[16]

表 5.SOFC 系統陰極與陽極操作參數表

Parameter	Value
甲烷 (陽極燃料) (nlpm)	28
水碳比 (陽極燃料)	2.5
空氣 (陰極氣體) (nlpm)	1600-2400
燃燒尾氣分流比例	0.8:0.2
燃料回收與去水比例(%)	70%；70%

本研究根據 2.3 小節計算步驟與表五操作參數，針對SOFC系統使用不同空氣流量進行熱質能分析，其結果如圖 7 所示。由文獻[16]可知，本次使用的SOFC發電系統之陰極空氣流量為 2000 nlpm，而此時系統的發電功率為 11.47 kW。此外，對於陰極鼓風機而言，若流量控制偏差 $\geq 10\%$ 以上，則會被認定功能衰退或者失效，故本研究透過改變陰極空氣流量 10%與 20%，進行系統發電功率與組件溫度變化的分析。由圖 7 可知，當陰極空氣流量減少 10%與 20%時，系統發電功率最大差異達 0.72kW，相當於 6.3%的功率變化量。其原因在於，當空氣流量減少時，其陰極空氣總熱傳量降低，進而使燃燒器的溫度上升，導致電堆的操作溫度上升，從 717°C 提升至 737°C。由此可知，當系統空氣流量減少 20%時，電堆的操作溫度會提升進 3%，並且影響系統發電功率。此外，當陰極空氣流量提升 10%與 20%時，系統發電功率最大差異達 0.83 kW，相當於 7.2%的功率變化量。而功率變化的原因，可歸咎於燃燒器溫度在空氣量提升後下降，導致陰極空氣入口溫度下降 20.2°C。由於陰極空氣入口溫度下降，進而使電堆溫度下降 22°C，最終導致系統發電功率衰退。

由前述的結果可知，當SOFC系統中，陰極鼓風機的空氣流量控制異常達 20%下，系統發電功率影響可達 7%，且關鍵組件的溫度也會受到 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的影響，其證明空氣流量會明顯影響系統性能與組件操作溫度，且驗證圖 5 中FMEA之分析結果，陰極空氣供應模組是影響系統操作性能與壽命之關鍵影響因子。此外，本研究透過熱質能分析結果可知，燃料電池系統於長期運轉過程中，系統控制參數需要被監控，並且除了監控主動件的操作性能外，也需要針對應變參數進行分析，進而提升控制變數精度與降低應變參數的變化率，提升燃料電池系統之長期運轉穩定性與壽命。

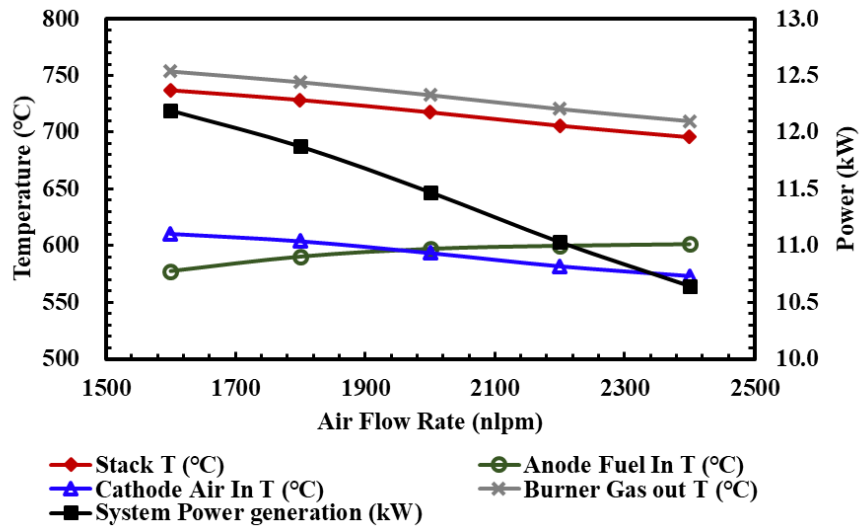


圖7.不同空氣流量對於系統發電功率與組件溫度影響

四、結論

根據前述章節之介紹可知，藉由 FMEA 分析，可以針對燃料電池發電系統進行長期運轉與系統優化策略的評估，而經過完成本研究，其相關重要之結論如下：

- (1) 本研究透過 FMEA 手法，成功針對燃料電池系統進行長期運轉之組件失效風險評估，其中空氣供應模組是風險指數最高的模組達 270，此外，空氣供應模組也會影響熱箱模組，使其風險指數達 210，故空氣供應模組需要被精準監控和優先進行改善。
- (2) 為了針對燃料電池系統進行長期運轉之失效分析與優化策略進行評估，本文藉由 FMEA 之結果與燃料電池系統組件表，建立系統長期運轉之監控參數，並且分成控制變數與應變參數，提供未來系統商針對燃料電池系統之組件性能與壽命分析之參考。
- (3) 最後，本文為了驗證 FMEA 與系統監控參數之功能性，透過系統熱質能分析，探討陰極流量對於系統性能的影響，發現當空氣流量變化量達 20%時，系統發電功率變化量達 7%，且電堆溫度變化量可達 20°C，說明空氣供應模組確實是影響系統運轉之關鍵因子。

五、誌謝

本研究承蒙經濟部能源局提供研究經費(計畫編號：110-D0111)，謹表誌謝。

六、參考文獻

1. M. M. Whiston, I. M. L. Azevedo, S. Litster, C. Samaras, K. S. Whitefoot, and J. F. Whitacre, "Meeting U.S. Solid Oxide Fuel Cell Targets", *Joule*, 3, 2053-5065, 2019.
2. The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, "Addendum to the Multi - Annual Work Plan 2014 – 2020", 2018.

3. L. Vichard, R. Petrone, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, “Long term durability test of open-cathode fuel cell system under actual operating conditions”, *Energy Conversion and Management*, 212, 112813-112812, 2020.
4. L. Mao, L. Jackson, B. Davies, “Investigation of PEMFC fault diagnosis with consideration of sensor reliability”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 16941-16948, 2018
5. R. Peters, L. Blum, R. Deja, I. Hoven, W. Tiedemann, S. Küpper, D. Stolten, “Operation Experience with a 20 kW SOFC System”, *FUEL CELLS*, 14, 489–499, 2014.
6. R. Deodath, J. Jhingoorie, C. Riverol, “Direct methanol fuel cell system reliability analysis”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 12032-12045, 2017.
7. M. Whiteley, S. Dunnett, L. Jackson, “Failure Mode and Effect Analysis, and Fault Tree Analysis of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 1187-1202, 2016.
8. S. Rastayesh, S. Bahrebar, F. Blaabjerg, D. Zhou, H. Wang and J. Dalsgaard Sørensen, “A System Engineering Approach Using FMEA and Bayesian Network for Risk Analysis—A Case Study”, *Sustainability*, 12, 77-94, 2020.
9. S. Rastayesh, S. Bahrebar, A. Sajjad Bahman, J. Dalsgaard Sørensen and Frede Blaabjerg, “Lifetime Estimation and Failure Risk Analysis in a Power Stage Used in Wind-Fuel Cell Hybrid Energy Systems”, *Electronics*, 8, 1412-1424, 2019.
10. R. J. Braun, “Advances in Chemical Engineering”, Burlington: Academic Press, 2012.
11. C. H. Li, X. P. Ji, Q. J. Zeng, Y. L. Wang, and X. D. Wu, “Modeling and Performance Analysis of a PEM Fuel Cell System”, Springer, New York, 2014.
12. S.H. Chan, K.A. Khor, Z.T. Xia, *Journal of Power Sources*, 93, 130-140, 2001.
13. M. Noponen, P. Torri, J. Göös, D. Chade, P. Hallanoro, A. Temmo, A. Koit, E. Õunpuu, *ECS Transactions*, 68 (1), 151-156, 2015.
14. H. A. Megren, “Advances in Natural Gas Technology”, InTech, Europe, 2012
15. C. H. Yang, S. C. Chang, Y. H. Chan and W. S. Chang, “A Dynamic Analysis of the Multi-Stack SOFC-CHP System for Power Modulation”, *energies*, 12, 3686-3702, 2019.
16. 詹彥信、楊証皓、張勳承、張文昇、李鈞函， “高溫燃料電池系統陽極尾氣回收對於系統性能之探討”，*燃燒與能源學術研討會*，2020。

台灣水泥業單位產品能源使用分析

Analysis of Energy Usage Per Unit Product of Taiwan Cement Industry

劉毅弘¹、潘子欽²

Yi-Hung Liu, Tze-Chin Pan

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology
Research Institute

摘要

單位產品能源使用分析可以應用來評估水泥業能源使用效率水準，可作為能源用戶設定節能目標與推動節能之參考依據。為了評估台灣水泥業單位產品能源使用情形，本研究藉由收集業者依據「水泥製造業應遵行之節約能源與能源效率指標規定」申報能源效率指標資料，整理統計分析水泥業單位產品能源使用數據，包括：生熟料系統電力使用、旋窯系統(熟料)熱能使用及水泥磨系統電力使用等。

經分析發現，2020 年水泥業熟料單位熱能使用平均值 771 百萬卡/公噸-熟料較 2019 年減少 2.3%。2020 年生熟料系統單位電力使用平均值 44.8 度電/公噸-熟料較 2019 年減少 3.0%。2020 年水泥單位耗電平均值 42.8 度電/公噸-水泥較 2019 年減少 1.8%。以生熟料系統單位熟料電力使用改善較多。2017-2020 年生熟料系統與水泥磨系統單位產品電力使用平均值均為逐年下降。藉由相關分析以了解台灣水泥業單位產品能源使用情形，並與國際水泥主要生產國進行單位產品能源使用比較，可作為水泥業者持續推動能效指標與提升節能之參考。

關鍵字：水泥業、單位產品能源使用、節能

Abstract

The analysis of energy usage per unit product can be applied to evaluate the energy efficiency level of the cement industry, and can be used as a reference for energy users to set energy-saving goals and promote energy-saving. In order to evaluate the energy usage of Taiwan's cement industry per unit product, this study used the collection industry to declare energy efficiency index data according to the "Energy Conservation and Energy Efficiency Index Regulations for Cement Manufacturing Industry", and collate and analyze the energy usage data per unit product of the cement industry. Including: the use of electricity in the raw clinker system, the use of thermal energy in the rotary kiln system (clinker), and the use of electricity in the cement mill system.

¹ 工業技術研究院 綠能與環境研究所，研究員
E-mail: david888@itri.org.tw

² 工業技術研究院 綠能與環境研究所，資深研究員、經理
E-mail: tpan@itri.org.tw

After analysis, it is found that the average thermal energy usage per unit of clinker in the cement industry in 2020 is 771 million calories/metric ton - decreased of 2.3% from 2019. The average electricity usage per unit of raw clinker system in 2020 was 44.8 kWh/metric ton-clinker decreased by 3.0% compared with 2019. The average electricity consumption per unit of cement in 2020 was 42.8 kWh/metric ton-cement decreased by 1.8% compared with 2019. The electricity usage of clinker in the raw clinker system has improved more. From 2017 to 2020, the average electricity usage per unit product of the raw clinker system and the cement mill system both decreased year by year. Through relevant analysis to understand the energy usage per unit product of Taiwan's cement industry, and compare the energy usage per unit product with the major international cement producing countries, it can be used as a reference for the cement industry to continue to promote energy efficiency indicators and improve energy conservation.

Keyword: cement industry, energy usage per unit product, energy conservation

一、前言

水泥是重要的基礎材料，應用層面廣，在台灣水泥主要使用於建築業與大型基礎建設。銷售情形受市場景氣影響明顯。

水泥業屬於傳統內需導向型工業，水泥比重高容易受潮而硬化，較不適合久存與長途運輸，以內銷比重占比較高。水泥業亦屬於資本密集產業，從購置土地、設廠、建置大型設備、採礦、操作管理及水泥運輸等，都需要投入大量資本，建置與操作營運管理需要一定的技術。具備熟料燒成水泥窯的水泥廠有限，水泥業整體產業相對穩定。

為了提高國際競爭優勢，台灣水泥業者投入中國水泥市場發展。中國持續推動水泥業供給側改革，化解過剩產能，水泥業整體更為健全平穩，產品產量保持增長，經濟效益逐漸顯現，整體趨勢有益於台廠於中國市場發展。

而在台灣，水泥業雖處於供過於求飽和狀態，然政府推出前瞻基礎建設計畫，加強推動公共建設，台商回流帶動部份建廠需求，以及營建業新建案與都更改建案，皆有利於水泥業成長。

水泥製程中生料準備、熟料燒成、水泥磨成等需要使用大量的熱能與電力，水泥廠持續追蹤單位產品能源使用，可以訂定能效指標，進行節能成效管理。能源使用效率與節能績效可以透過長期比較而更為清楚，可參照原始設計資料與操作記錄，每年訂定各單位產品能源使用指標，作為水泥生產的節能目標。除了自己廠的比較，進一步可參考其他廠單位產品能源使用表現較優數值，當做自我改善的目標，持續進行節能。

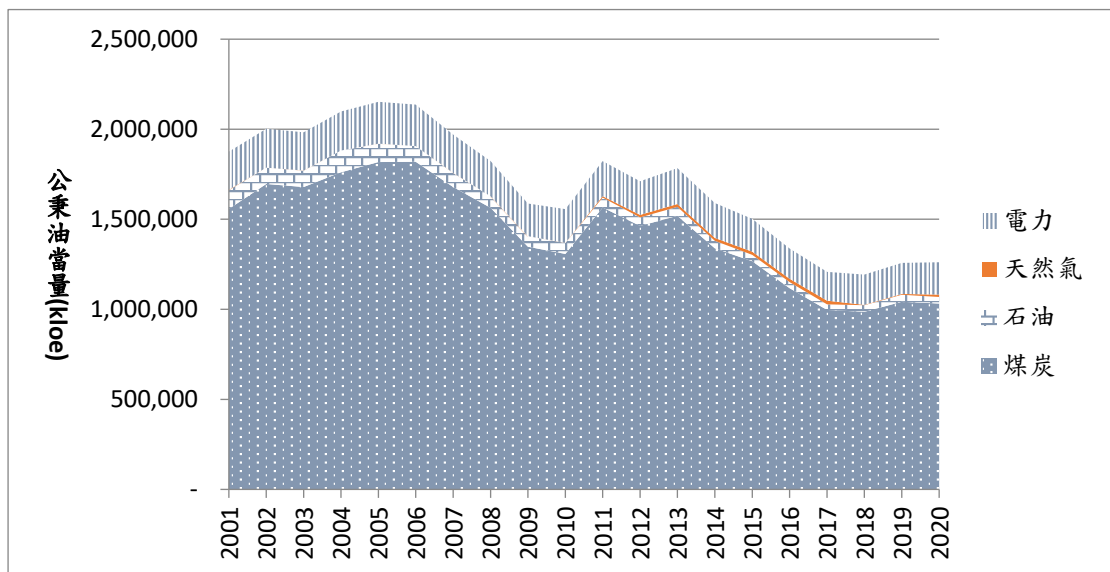
為了評估台灣水泥業單位產品能源使用情形，本研究藉由工業部門能源效率指標申報資料，整理分析水泥業單位產品能源使用數據，包括：生熟料系統電力使用、旋窯系統熱能使用及水泥磨系統電力使用等，以了解台灣 2020 年水泥業

單位產品能源使用情形，並與國際水泥主要生產國進行單位產品能源使用比較，可作為水泥業者持續推動能效指標與提升節能之參考。

1.1 水泥及水泥製品業能源消費趨勢

就非金屬礦物製品製造業之細行業來看，2020 年水泥及水泥製品業之能源消費占非金屬礦物製品製造業的 60%，為占比最大之細行業。2001 至 2020 年台灣水泥及水泥製品業能源消費趨勢呈兩波波浪趨勢。2020 年能源消費量為 126 萬公秉油當量，比前次 2010 年能源消費低點 156 萬公秉油當量還低(如圖 1)。第二波趨勢從 2013 年 178 萬公秉油當量下降至 2020 年 126 萬公秉油當量，此期間年均下降率約 3.7%，主要因為水泥與熟料產量逐年減少所致。2020 年水泥及其製品製造業能源消費較 2019 年增加 0.3 萬公秉油當量，煤炭減少 1.0 萬公秉油當量，石油減少 0.2 萬公秉油當量，天然氣增加 0.8 萬公秉油當量，電力增加 0.7 萬公秉油當量。

煤炭是水泥及其製品製造業主要能源消費，2020 年占 82%，其次為電力占 14%。石油占比 3%，天然氣為 1%。水泥業使用的主要能源為燃煤、電力及油等 3 種，燃煤主要供熟料燒成加熱時之燃料，電力則供應生料磨、水泥磨、熟料動力系統等用電所需，燃油用於旋窯點火與機器設備潤滑等。



註：天然氣占比較少，在圖內呈現於電力與石油間的交界

資料來源：[1]能源平衡表，經濟部能源局，2021；本研究整理繪圖。

圖 1.台灣水泥及水泥製品業能源消費趨勢

二、水泥業單位產品能源使用調查分析

2.1 產品簡介

目前台灣有產製的水泥主要為卜特蘭水泥，計有：卜特蘭第 I 型水泥、卜特

蘭第 II 型水泥、卜特蘭第 I 型低鹼水泥；混合水泥有高爐水泥。其中以卜特蘭第 I 型水泥為主要之產品，約占市場需求量的 90% 以上，混合水泥僅視客戶特殊需求而訂製生產。本文主要調查分析 2020 年生產 CNS61 卜特蘭水泥與熟料的單位產品能源使用。

2.2 單位產品能源使用邊界範圍

各水泥廠之熟料與水泥單位產品能源使用計算邊界係依據經濟部所公告「水泥製造業應遵行之節約能源與能源效率指標規定」所界定範圍。熟料單位產品能源使用邊界範圍包含生熟料系統之單位用電與旋窯系統之單位耗熱。水泥單位產品能源使用則為水泥磨系統之單位用電(如圖 2 所示)。

生熟料系統：原料倉儲開始至熟料入庫所使用之電能設備。

旋窯系統：生料進入懸浮預熱機至旋窯高溫燒成所使用之能源設備。

水泥磨系統：熟料出庫起至水泥成品入庫所使用之電能設備。

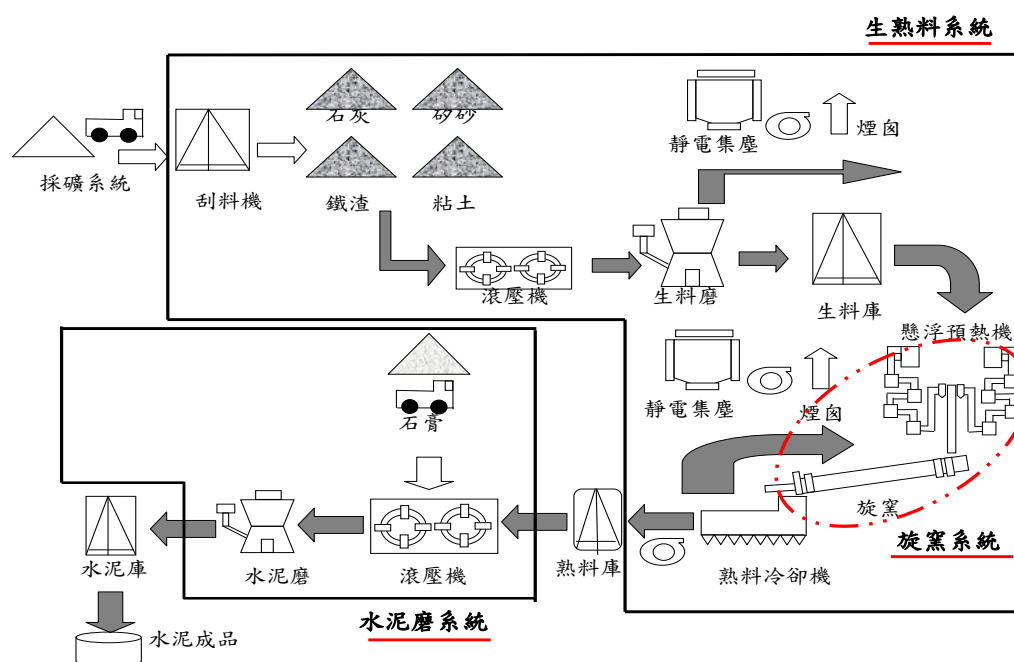


圖 2.生熟料與水泥單位產品能源使用邊界範圍[2]

2.3 生產工廠與產品

在熟料生產方面，台灣 2020 年生產熟料有運轉旋窯之工廠有 6 家。主要生產水泥有水泥磨運轉之工廠有 20 家。有運轉旋窯之 6 家工廠也有水泥磨運轉。2020 年台灣生產熟料與水泥的工廠家數與生產耗能如圖 3 所示。水泥業以水泥窯生產熟料耗能多，為 84.09 億 Mcal。以水泥磨生產水泥耗能为 7.19 億 Mcal。水泥窯生產熟料耗能約為水泥磨生產水泥耗能的 11.7 倍。

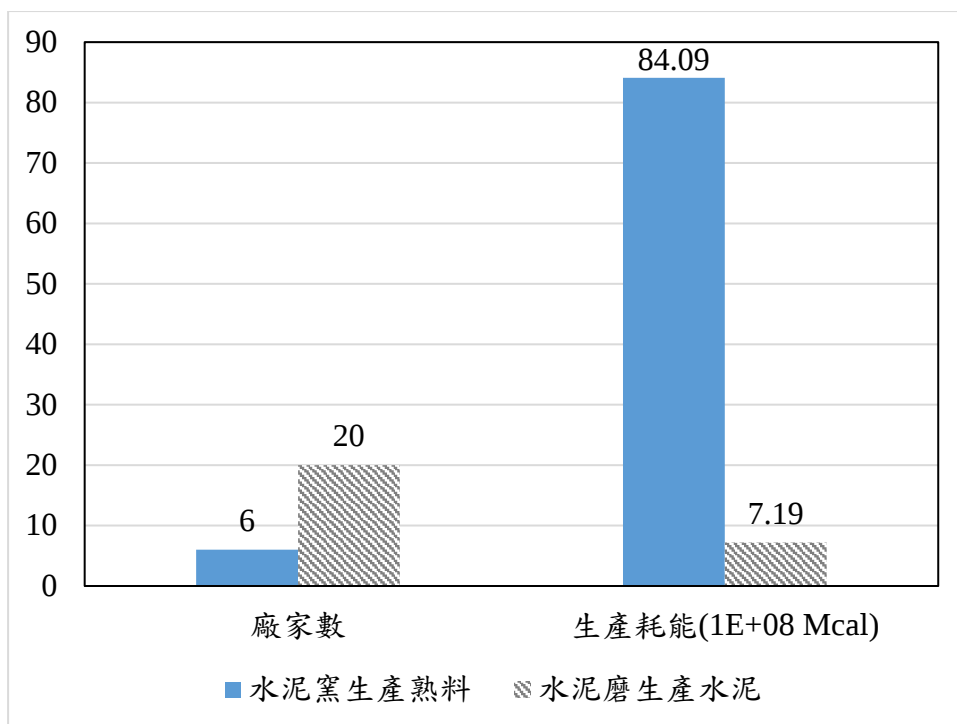


圖 3.2020 年台灣生產熟料與水泥的工廠家數與生產耗能

2.4 單位產品能源使用調查與分析方法

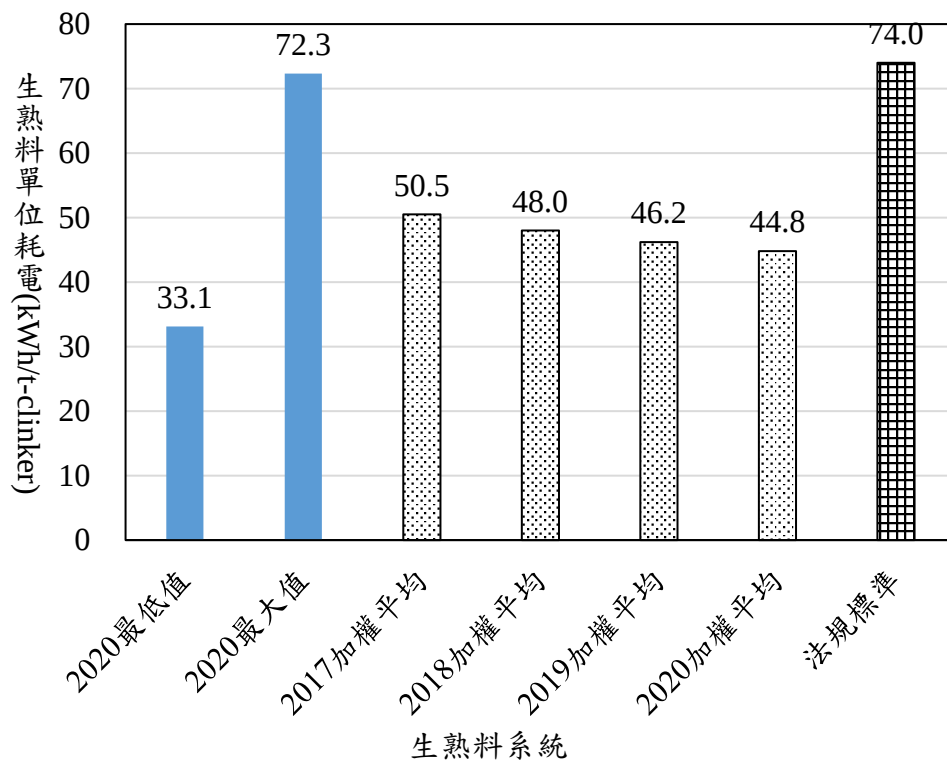
1. 調查方法：收集單位產品能源使用期間為業者依據「水泥製造業應遵行之節約能源與能源效率指標規定」申報 2020 年之生熟料系統(生料與熟料電力使用)與旋窯系統(熟料熱能使用)及水泥磨系統(水泥電力使用)之單位產品能源使用數據，整理相關之單位產品能源使用資料進行統計。若有不足之處，例如產品耗能的邊界範圍、資料漏填或不合理的部分，則安排電話訪查，請教廠方人員與確認。另外，也針對上列水泥廠依能源管理法第 9 條(能源用戶使用能源達中央主管機關規定數量者，應建立能源查核制度，並訂定節約能源目標及執行計畫，報經中央主管機關核備並執行之)申報能源查核資料，整理相關之單位產品能源使用資料，以做交叉比對分析之用。
2. 計算方法：由各廠申報或提供各產線之產量、電力與熱能使用等資料，依據能源換算基準，進行各廠各產線之單位產品能源使用加權平均(以產量進行加權)。為配合「水泥製造業應遵行之節約能源與能源效率指標規定」，因此熟料單位產品能源使用調查分析將與法規管制相同，採以生產線別來分析其單位產品能源使用(含電力與熱能)。

3. 能源換算基準：工廠有自己的熱值則依據工廠自行購入能源之熱值換算（例如煤炭），工廠若無自己的熱值則依據能源局所公告能源熱值換算基準來換算，例如電力 1 度=860 kcal，燃料油 1 L=9,600 kcal，煤 1 kg=6,080 kcal，柴油 1 L=8,400 kcal 等。

三、單位產品能源使用調查分析結果與討論

1. 生熟料系統單位耗電：2020 年台灣 9 條生熟料系統之單位耗電最低值 33.1 度電/公噸-熟料，加權平均值為 44.8 度電/公噸-熟料，低於 2017 至 2019 年加權平均值 50.5 至 46.2 度電/公噸-熟料，低於法規標準值 74.0 度電/公噸-熟料。由於推動與執行生熟料系統節電措施，2017-2020 年生熟料系統單位耗電平均值逐年下降，詳如圖 4 所示。

節電策略例如：生熟料單位耗電較低值有使用餘熱發電自發電，節省外購電力。水泥製程控制升級與現場馬達運轉機械設備(磨床、風扇、輸送帶或水泥窯旋轉)使用變頻驅動等，有助於節電。



資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；本研究整理。

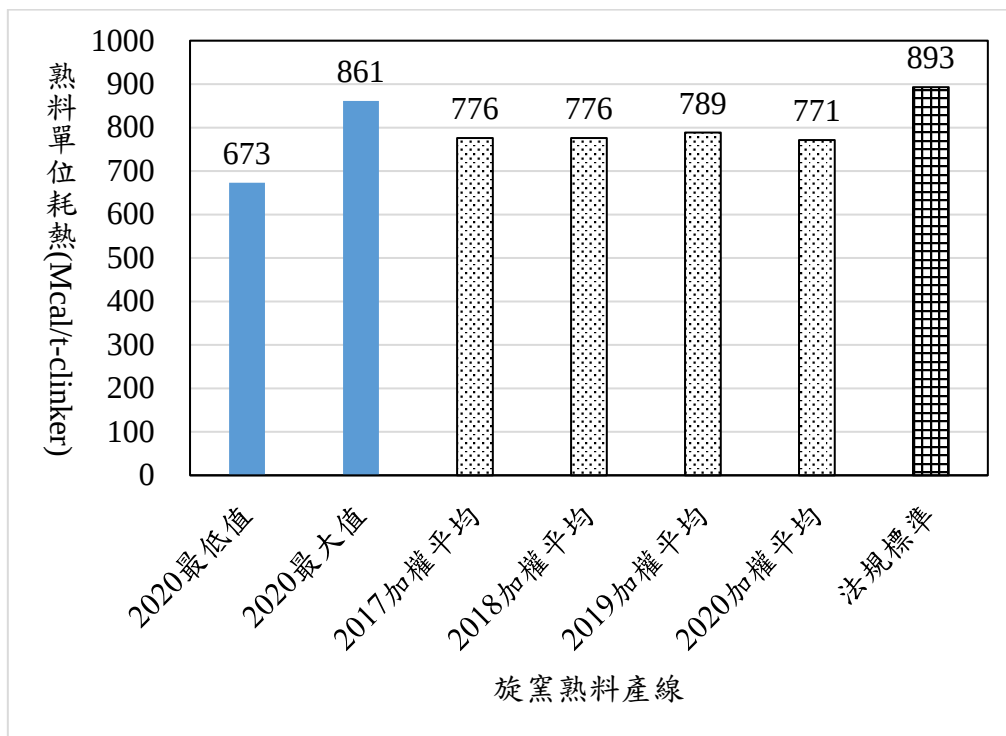
圖 4. 熟料單位耗電調查分析

2. 熟料單位耗熱(旋窯系統)：2020 年台灣 9 條旋窯系統之熟料單位耗熱最低值 673 百萬卡/公噸-熟料，加權平均值為 771 百萬卡/公噸-熟料，低於法規標準值 893 百萬卡/公噸-熟料，低於 2017 至 2019 年加權平均值 776

至 789 百萬卡/公噸-熟料，詳如圖 5 所示。2020 年熟料單位耗熱平均值較 2019 年減少 2.3%。

帶有預煅燒器、多級旋風預熱器的水泥窯是熟料生產節省熱能的技術。預煅燒器、多級旋風預熱器有助於熟料原料預處理，等於將原料熟化製程從水泥窯往前延伸，因而提升能源使用效率。

熱能有效規劃分配及再利用，有助於節省能源。水泥窯的熱能回收可用於發電、乾燥原料及預熱燃燒空氣。利用水泥窯煙氣的熱能進行餘熱發電，廠內具有較高熱能回收比例與效益。熱能亦可用於旋風預熱器以預熱原料，五級旋風預熱器已可獲得良好能源效率。用於冷卻熟料的空氣可用作二次燃燒空氣。

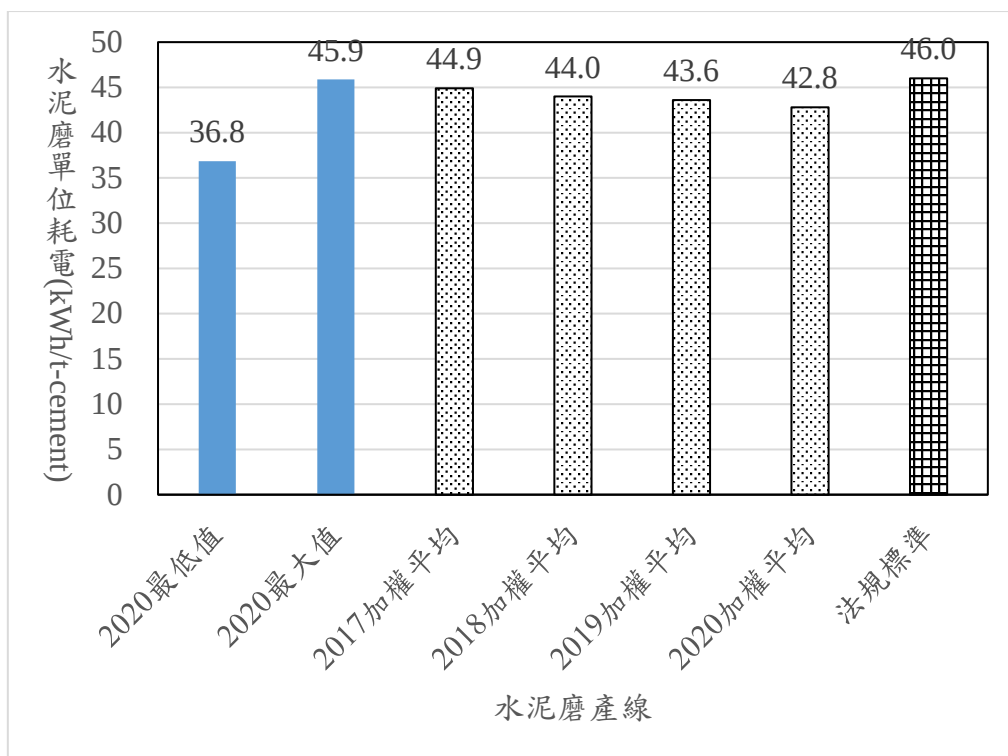


資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；本研究整理。

圖 5.熟料單位耗熱調查分析

3. 水泥單位耗電(水泥磨系統)：2020 年台灣 35 條水泥磨系統之水泥單位耗電最低值 36.8 度電/公噸-水泥，加權平均值為 42.8 度電/公噸-水泥，低於 2017 至 2019 年加權平均值 44.9 至 43.6 度電/公噸-水泥，低於法規標準值 46 度電/公噸-水泥。由於推動與執行水泥磨系統節電措施，2017-2020 年水泥單位耗電平均值逐年微幅下降，詳如圖 6 所示。

使用較節能的研磨設備如立式輥磨機，與傳統球磨機相比可獲得較高的電力節省。配合客戶需求，所需的水泥強度等級越高，水泥需要磨得越細，會增加用電，此時安裝高效研磨設備可實現現場節省電力。



資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；本研究整理。

圖 6.水泥磨單位耗電調查分析

4. 2017-2020 年生熟料系統與水泥磨系統單位耗電平均值均為逐年下降。2020 年生熟料單位耗電平均值較 2019 年減少 3.0%。2020 年水泥單位耗電平均值較 2019 年減少 1.8%。2020 年熟料單位耗熱平均值較 2019 年減少 2.3%。依據上述分析，水泥業單位產品能源使用結果綜合整理於表 1。

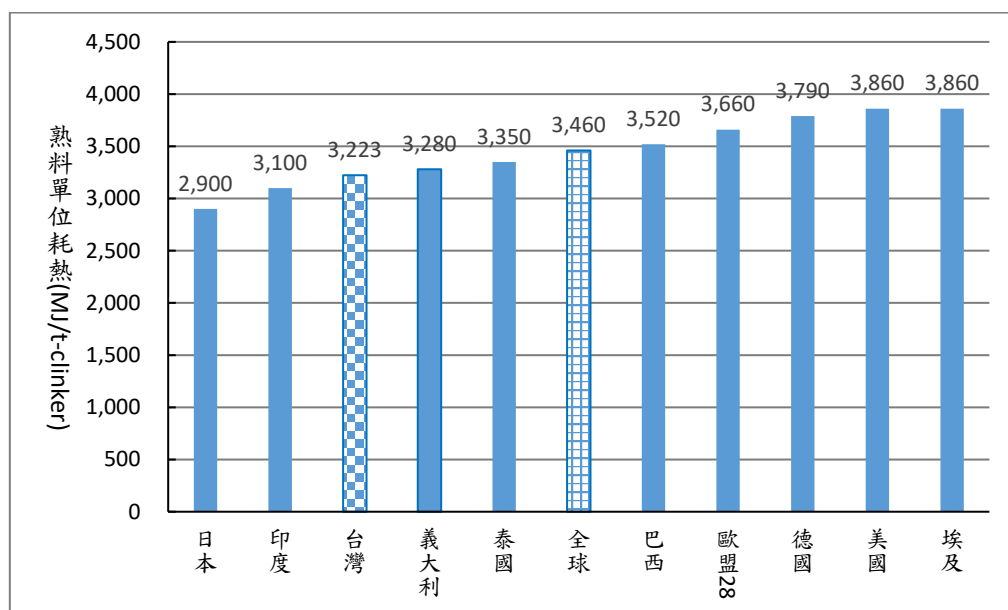
表 1.水泥業單位產品能源使用

產品耗能 (系統)	耗能 單位	2017 平均 值	2018 平均 值	2019 平均 值	2020 最低 值	2020 平均 值	2020 與 2019 平 均值比 較	法規 標準
生熟料單位耗電 (生熟料系統)	度電 /公噸 -熟料	50.5	48.0	46.2	33.1	44.8	-3.0%	74
熟料單位耗熱 (旋窯系統)	百萬 卡/公 噸-熟 料	776	776	789	673	771	-2.3%	893
水泥單位耗電 (水泥磨系統)	度電 /公噸 -水泥	44.9	44.0	43.6	36.8	42.8	-1.8%	46

資料來源：本研究整理。

四、單位產品能源使用國際比較

與水泥主要生產國進行單位耗能比較，結果如圖 7 所示。台灣 2020 年熟料生產單位耗熱為 3,223 百萬焦耳/噸-熟料(MJ/t-clinker)，僅次於日本的 2,900 MJ/t-clinker、印度的 3,100 MJ/t-clinker，優於全球平均 3,460 MJ/t-clinker。由於台灣於熟料燒成過程中，部份旋窯設有廢熱回收，且與日本一樣採用 4-5 級懸浮預熱器搭配旋窯，單位能源使用較為節能。

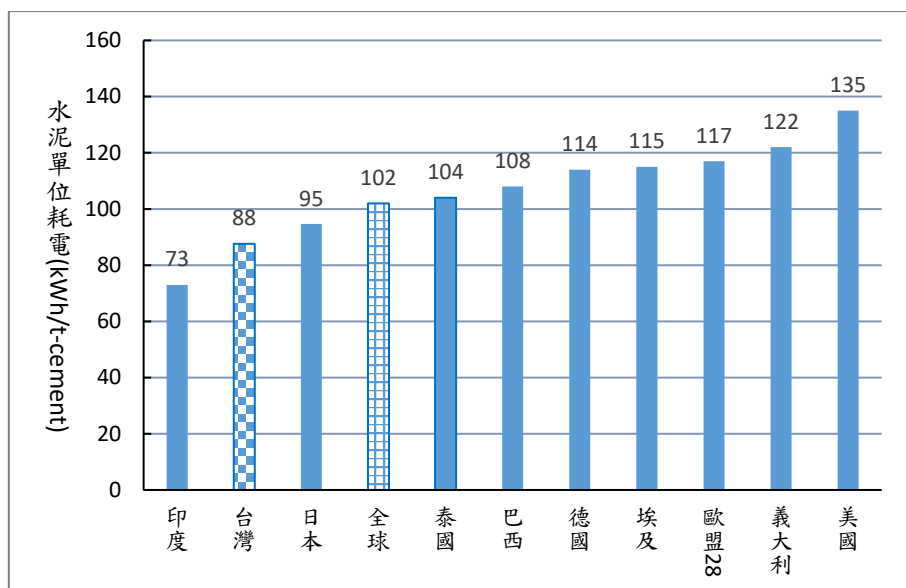


說明：台灣數據為 2020 年，其餘國家為 2019 數據。

資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；[4]Get Number Right, Global Cement and Concrete Association, 2021；[5]Energy consumption for cement production, Japan Cement Association, 2021。

圖 7.熟料單位耗熱國際比較

從水泥單位耗電來看，台灣水泥生產單位耗電為 88 度/噸-水泥(kWh/t-cement)，次於印度的 73 kWh/t-cement，優於日本的 95、全球平均 102 kWh/t-cement、泰國的 104 kWh/t-cement 及歐盟平均 117 kWh/t-cement。歐盟水泥比較耗電原因，是因為使用大量廢棄物替代燃料，需先做前處理的電力消費所致。如圖 8 所示。



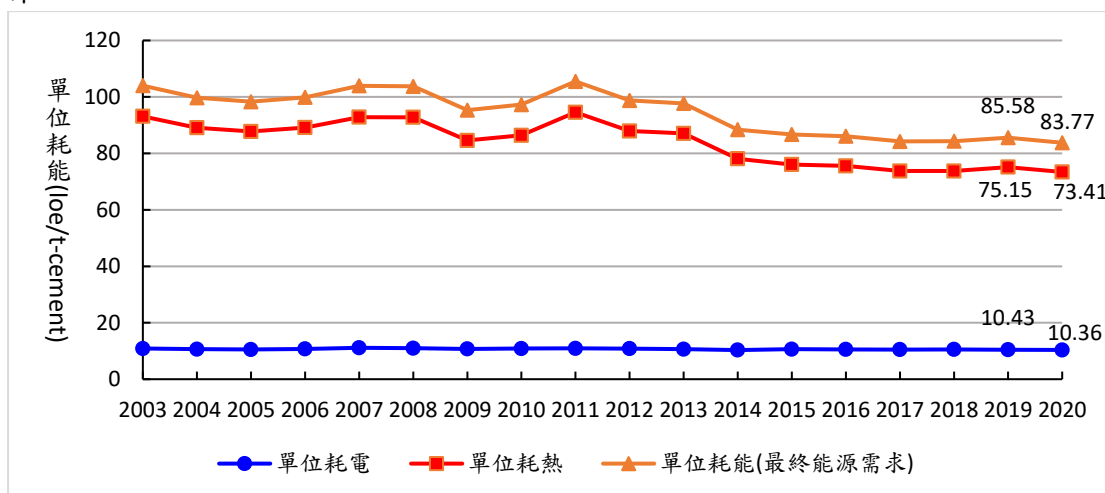
說明：台灣數據為 2020 年，其餘國家為 2019 數據。

資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；[4]Get Number Right, Global Cement and Concrete Association, 2021；[5]Energy consumption for cement production, Japan Cement Association, 2021。

圖 8.水泥單位耗電跨國比較

五、水泥業單位產品能源使用長期趨勢

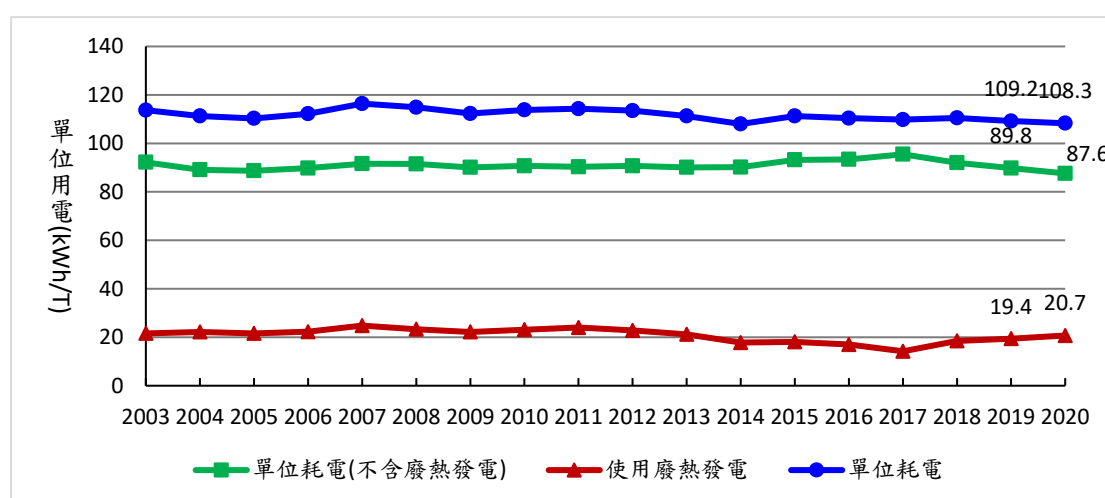
2003 年至 2020 年台灣水泥製造之單位耗能整體呈下降之趨勢，從 104 公升油當量/公噸水泥(loe/t-cement)下降至 83.8 公升油當量/公噸水泥，2004 年至 2020 年均下降 1.26%，其主要原因為政府推動產業能效指標，管制旋窯耗熱、生熟料系統與水泥磨系統耗電標準，水泥業界實施節能與節電措施，製程廢熱回收利用，有效降低單位耗能。此外，老舊水泥旋窯陸續停產，例如 2018 年東南水泥與亞泥新竹廠老舊旋窯停止運作，2019 年台泥蘇澳廠 3K 旋窯停窯，致水泥單位耗能長期趨勢下降。2020 年每噸水泥單位耗能(83.8 公升油當量/公噸水泥)較 2019 年(85.6 公升油當量/公噸水泥)略有減少。我國水泥生產單位耗能趨勢如圖 9 所示。



資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；[6]『生產性質行業能源查核申報』資料庫；本研究整理。

圖 9.台灣水泥生產單位產品能源使用趨勢

在電力使用上，台灣水泥業用電主要是在水泥磨系統與生熟料系統。2003 年至 2020 年台灣水泥製造之單位耗電呈微幅下降之趨勢，從 113.7 度(kWh)/公噸水泥下降至 108.3 度/公噸水泥，2004 年至 2020 年均下降 0.29%，其主要原因為政府實施為期十年之年平均節電率 1%，業界配合進行各項節電措施，致水泥單位用電持續下降，如圖 10 所示。



資料來源：[3]『能源效率指標申報』資料庫；本研究整理。

圖 10.台灣水泥生產單位用電趨勢

扣除廢熱發電，我國水泥業每噸水泥的淨用電量約維持在 89~95 度之間，廢熱發電占水泥單位用電約 15~20%，廢熱回收發電對水泥業用電成本非常的重要。對於廢棄物替代燃料使用，基於環保因素考量，近年來地方管制使用，因此廢棄物替代能源使用率低，廢熱發電量比例也相對較少。2020 年每噸水泥使用廢熱發電量(20.7 度/公噸水泥)較 2019 年(19.4 度/公噸水泥)略有增加。

六、水泥業使用替代燃料可節省燃煤使用

煤是廣泛使用於水泥生產的燃料，約佔台灣水泥熱能消耗的 82%。水泥業使用替代燃料可以節省燃煤使用。2020 年台灣水泥廠總燃料熱值約為 84 億 Mcal。以 5%~25%替代燃料熱量取代原燃煤熱量來推估替代燃煤量如表 2 所示。以 5%替代熱能比例，可替代熱能 4.2 億 Mcal，替代燃煤 6.9 萬公噸。台灣水泥大廠目前替代燃料可達 5%以上的熱能替代率，且持續發掘可用的替代燃料，後續替代率可再提升。

表 2.水泥業使用替代燃料替代燃煤使用量推估

替代熱能比例	5%	10%	15%	20%	25%
替代熱能 (1E+08 Mcal)	4.2	8.4	12.6	16.8	21.0
替代燃煤量* (萬公噸)	6.9	13.8	20.7	27.7	34.6

*煤的熱值以 6,080 kcal/kg 估計

日本旋窯燃燒系統使用之替代燃料例如：廢塑膠、木屑、廢油、廢活性黏土、回收油、廢輪胎及垃圾衍生燃料等，2019 年燃燒過程替代熱能的比例已經接近 20%[7]。德國水泥業具有更高的替代燃料使用比例，2019 年替代燃料占德國水泥業燃料熱能需求的 69%。水泥廠使用較高比例替代燃料的國家其政策著重於設定空氣污染排放限值與避免直接掩埋，而不是限制工業用替代燃料的種類或特性。使得水泥廠能夠運用最具成本競爭力且符合法規的替代燃料組合[8]。使用替代燃料有助於減少化石燃料使用，使用生質物替代燃料有助於減少二氧化碳排放。

可作為水泥窯中替代燃料，例如下列物質：

- 破碎的輪胎(膠片、膠粒、膠粉)
- 廢油與溶劑
- 廢塑膠、橡膠、紡織品、纖維及紙渣殘留物
- 都市固體廢棄物、固態衍生燃料
- 給水與污水處理污泥
- 生質物燃料例如：廢木材、木屑、農作剩餘物、蔗渣等。

引入具有管理制度的廢棄物收集、處理和加工，對於確保替代燃料的品質、避免有害物質的加入與排放，以及透過操作控制和監測系統對水泥廠的生產管理非常重要。大多數替代燃料的物理和化學性質與傳統燃料的物理和化學性質不同。雖然有些物質（如廢塑料、木屑）可以很容易地被水泥業使用，但其他可能會帶來技術挑戰，這些與替代燃料的低熱值、高含水率及高濃度的氯或其他微量物質有關。例如必須避免重金屬(例如汞、鎘)引入。需要預處理以確保替代燃料均勻組成與最佳燃燒[8]。

水泥業增加替代燃料的使用須考量的重點如：

- 廢棄物管理政策會影響替代燃料的可用性。如果地方有條件允許廢棄物收集與水泥窯的處理，則能促進替代燃料的使用。
- 廢棄物來源與供給量須足夠，廢棄物收集運輸需能配合到位。若能就近取材較好，台灣工業廢棄物以西部的量較多，而水泥窯則位於東部，須考量運

輸距離。

- 水泥廠協同處理廢棄物的社會接受度會有影響。儘管管理良好的水泥廠使用替代燃料的排放與產品規格符合標準，但人們還是會有協同處理的疑慮，須有透明資訊數據以佐證處理過程安全且產品規格符合標準。
- 留意行政程序所需時間。在許多情況，獲得使用替代燃料的許可涉及冗長的申請程序與不同的管理要求。
- 為了安全與清潔地使用替代燃料，必須評估與分類合適廠用的材料，且收集和處理過程應有標準程序。氣態替代燃料(例如固態材料氣化為可燃氣)較液態、固態更易於輸送與燃燒。

配合不同替代燃料，研究適當的水泥窯操作條件以確保完全燃燒是重要的。當替代燃料混合種類增加時，宜有資訊系統輔助試燒過程，以取得較佳操作參數。

七、結論與建議

7.1 結論

- (1)2020 年水泥業熟料單位熱能使用平均值 771 百萬卡/公噸-熟料較 2019 年減少 2.3%。2020 年生熟料系統單位電力使用平均值 44.8 度電/公噸-熟料較 2019 年減少 3.0%。2020 年水泥單位耗電平均值 42.8 度電/公噸-水泥較 2019 年減少 1.8%。以生熟料系統單位熟料電力使用改善較多。2017-2020 年生熟料系統與水泥磨系統單位產品電力使用平均值均為逐年下降。
- (2)水泥單位耗電國際比較優。台灣水泥生產單位耗電(生熟料系統與水泥磨系統)為 88 度電/公噸-水泥，次於印度 73 度電/公噸-水泥，優於日本 95、全球平均 102、泰國 104 及歐盟平均 117 度電/公噸-水泥。歐盟水泥比較耗電原因，是因為使用大量廢棄物替代原料與燃料，需先做前處理使得電力消費增加所致。
- (3)台灣 2020 年熟料生產單位耗熱為 3,223 百萬焦耳/噸-熟料(MJ/t-clinker)，次於日本 2,900、印度 3,100，優於全球平均 3,460 MJ/t-clinker。由於台灣於熟料燒成過程中，部份旋窯設有廢熱回收，且與日本一樣採用 4-5 級懸浮預熱器搭配旋窯，單位產品能源使用較為節能。
- (4)從 2003 至 2020 年台灣水泥製造之單位產品能源與電力使用整體呈下降之趨勢，其主要原因為政府推動產業能效指標，管制旋窯耗熱、生熟料系統與水泥磨系統耗電標準，水泥業界實施節能與節電措施，製程廢熱回收利用，有效降低單位產品能源使用。
- (5)2020 年水泥及水泥製品業能源消費量為 126 萬公秉油當量，比前次 2010 年能源消費低點 156 萬公秉油當量還低。2020 年水泥及其製品製造業能源消費較 2019 年增加 0.3 萬公秉油當量，煤炭減少 1.0 萬公秉油當量，石油減少 0.2 萬公秉油當量，天然氣增加 0.8 萬公秉油當量，電力增加 0.7 萬公秉油當量。煤炭是水泥及水泥製品業主要能源消費，2020 年占 82%，其次為電力占 14%。石油占比 3%，天然氣為 1%。

7.2 建議

(1)持續實施水泥業能源與能效查核，提供節能與節電技術諮詢：依據「水泥製造業應遵行之節約能源與能源效率指標規定」與「能源大用戶節電1%目標」，定期至現場查核，並提供必要的節能與節電措施方法討論諮詢及建議。

(2)提供多元節能誘因，鼓勵水泥廠加速更新老舊設備以提升能源效率：持續推動廢熱回收設備示範應用補助；強化節能動力設備補助推動；鏈結水泥廠與能源服務公司推動節能，促進節能與節電措施達成。

(3)水泥廠生產過程可朝綠色、低碳、智慧化等方向努力。

- 綠色化發展：例如運用水泥窯處理地方垃圾與工業廢料，逐步提高替代原料與燃料使用比例，兼顧水泥生產節能、環境保護及資源有效利用，促進節能減碳。
- 低碳化發展：例如水泥業導入鈣迴路碳捕獲程序、使用再生能源綠電，即是朝低碳良好發展。台泥和平廠的鈣迴路實驗廠每年可以捕捉 500 至 1,000 噸的二氧化碳，捕捉的碳用於微藻養殖以加值運用。

智慧化發展：數位化、網路化、智慧化將成為製造業的主要趨勢。運用大數據分析、網際網路及物聯網可以優化水泥廠生產與監督管理流程，提高服務能量與管理效率。

八、致謝

本研究感謝經濟部能源局經費之支持(工業部門能源查核與節能輔導推廣計畫，計畫編號：110-E0405)。

九、參考文獻

1. 能源平衡表(2001~2020 年)，經濟部能源局，2021 年 5 月更新，
https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=B_CH&menu_id=145
2. 經濟部公告「水泥製造業應遵行之節約能源與能源效率指標規定」附件一，經濟部，2012 年 9 月。
https://www.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/Law/Content.aspx?menu_id=1881
3. 『能源效率指標申報』資料庫，工業技術研究院，2021。
4. Get Number Right, Global Cement and Concrete Association, 2021, accessed at <https://gccassociation.org/gnr/>
5. Energy consumption for cement production, Japan Cement Association, 2021, accessed at http://www.jcassoc.or.jp/cement/2eng/e_01a.html
6. 『生產性質行業能源查核申報』資料庫，工業技術研究院，2021。
7. Use of wastes and by-products, Japan Cement Association, 2021, accessed at https://www.jcassoc.or.jp/cement/2eng/e_01d.html
8. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA & CSI, pp. 30-31, 2018.

工業都會區之環境大氣有害空氣污染物濃度特徵

Ambient Concentration of Hazardous Air Pollutants in an Urban Industrial Area

蔡欣汝¹、陳致廷²、王家麟³、戴忠良⁴、陳宜佳⁵、劉文治⁶

Hsin-Ru Tsai, Chih-Ting Chen, Jia-Lin Wang, Chung-Liang Tai,

Yi-Chia Chen, Wen-tzu Liu

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratory, Industrial Technology
Research Institute

國立中央大學化學所

Department of chemistry, National Central University

行政院環境保護署空氣品質保護及噪音管制處

Department of air quality protection & noise control, Environmental Protection
Administration

國立中央大學環境監測技術聯合中心

Center for Environmental Monitoring and Technology, National Central University

摘要

有害空氣污染物(Hazardous air pollutants, HAPs)因具有急毒性，且與居民健康直接相關，已成為世界先進國家管制重要項目。HAPs 來源可大致區分為固定污染源與移動污染源，本研究以臨海工業區為範疇，針對柴油車密集區監測 HAPs，了解移動污染源柴油車 HAPs 環境濃度，並蒐集臨海工業區特殊性工業區測站監測數據，解析工業都會區之 HAPs 物種特徵。於柴油車密集區利用離線(Off-line)與線上(On-line)方法，獲得 HAPs 環境濃度。離線檢測結果顯示監測所得 HAPs 物種主要為醛酮類(甲醛、乙醛)，另測得壬烷、三甲基苯較於都會區移動污染源高，顯示該地區排放源確為柴油車貢獻。比較臨海工業區之工業測站以及柴油車密集區之監測 HAPs 物種結果，於柴油車密集區測得較高濃度甲醛、乙醛 (5.26 ~ 17.4 ppm)，苯及乙苯則於工業區測站及柴油車密集區皆有測得；而重金屬物種不論固定源或柴油車監測結果皆低。此外，於柴油車密集區域測得非包括 1,2-二氯乙烷、氯乙烯、1,4-二氯苯、丁二烯等非柴油車排放物種，顯示柴油車密集區域仍會受到固定源工廠排放 HAPs 影響。為了解含氯物種以及丁二烯排放源，本研究以線上連續監測技術搭配風速與風向驗證，結果顯示可能來源為測站西北方之前鎮碼頭儲槽區。

關鍵字：有害空氣污染物、醛酮類化合物、柴油車、工業區

Abstract

Hazardous air pollutants (HAPs) have acute toxicity and are directly related to the

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所

² 國立中央大學化學所

³ 國立中央大學化學所

⁴ 行政院環境保護署空氣品質保護及噪音管制處

⁵ 行政院環境保護署空氣品質保護及噪音管制處

⁶ 國立中央大學環境監測技術聯合中心

E-mail: edwardliu@g.ncu.edu.tw

health of residents. They have become an important item of control in the world. The sources of HAPs including stationary source and mobile sources. This study monitors the HAPs concentration in the dense diesel vehicles areas (Kaohsiung Xiaogang District), and use stationary monitor site data in the Linhai Industrial Park to analyze the differences in HAPs concentration between stationary monitor site and diesel vehicle areas.

This study uses off-line and online on-line methods to evaluate the ambient concentration of HAPs emitted by diesel vehicles. The off-line test results show that the main pollutants emitted by diesel vehicles are mainly carbonyls (formaldehyde, acetaldehyde), and the measured nonane and trimethylbenzene are higher than the mobile pollution sources in the metropolitan area, indicating that monitor concentration of HAPs in dense diesel vehicles areas is really from diesel vehicles. Comparing the results of monitoring HAPs species at industrial monitoring stations and dense diesel vehicles areas, diesel vehicles mainly contribute formaldehyde and acetaldehyde species (5.26-17.4 ppm), stationary sources and diesel vehicles will all contribute benzene and ethylbenzene species. Concentration of heavy metal species in stationary monitor site and dense diesel vehicles areas are very low. In addition, non-diesel vehicle emission species measured in dense diesel vehicles areas, including 1,2-dichloroethane, vinyl chloride, 1,4-dichlorobenzene, and butadiene, indicate that pollutants measured in dense diesel vehicles areas will still be affected by HAPs emitted by stationary source. In order to understand chlorine-containing species and butadiene emission sources, this study used online monitoring methods and wind speed and wind direction to verify emission sources. The results showed that the sources from northwest of the Storage tank.

Keyword: Hazardous Air Pollutants (HAPs), Carbonyls, Diesel Vehicles, Industrial area

一、前言

有害空氣污染物(Hazardous air pollutants, HAPs)與居民健康直接相關，已成為世界先進國家管制重要項目，亦為我國對於空污改善重點項目之一。HAPs 來源可大致區分為固定污染源與移動污染源，以前者為例，現行法規「特殊性工業區緩衝地帶及空氣品質監測設施設置標準」已針對三大石化業特殊性工業區設立 HAPs 定期監測(手動採樣，每 6 天採樣一次)，已建立並累積較為完整之 HAPs 長期監測資料庫；移動污染源 HAPs 排放於現行研究數據多限於動力計測試結果，屬車輛尾氣排放直接數據，無法代表環境大氣濃度。為瞭解工業都會區環境大氣有害空氣污染物排放特徵，本研究乃以不同周界監測方式收集移動污染源(以柴油車為目標)排放 HAPs，期能了解柴油車 HAPs 環境濃度，並搭配既有臨海工業區特殊性工業區監測數據，解析固定污染源與移動污染源之重要 HAP 物種。監測作業以高雄臨海工業區及其附近小港漁會為地點；檢測有機性 HAPs、醛酮類

化合物、PM₁₀ 重金屬(砷、鉍、鎘、鉻、鉛、錳、鎳等)、TSP 之六價鉻等項目。

二、研究方法

2.1 固定污染源 HAPs 監測數據：特殊性工業區監測站

本研究蒐集臨海工業區 109 年特殊性工業區監測站之 D010~D017 監測站之 HAPs 物種監測數據進行解析；測站地點如表 1 及圖 1 所示，監測物種包含 5 項自動連續監測有害 VOCs、23 項人工操作監測有害 VOCs、6 項重金屬及戴奧辛，共計 35 項標的 HAPs 物種，如表 2 所示。所得監測數據以年平均濃度做為參考基準。

表 1.臨海工業區監測站設置地點及監測資料

測站編號	測站名稱	測站位置	緯度	經度	監測資料	
					連續	手動
D010	旗津國中	高雄市旗津區中洲二路 207 號	22.589	120.287	◎	◎
D011	明正社區活動中心	高雄市前鎮區南衙路 1 號	22.580	120.327	◎	◎
D012	二甲里活動中心	高雄市鳳山區林森路 379 號	22.599	120.339	◎	◎
D013	中山國中	高雄市小港區漢民路 352 號	22.566	120.357	◎	◎
D014	太平國小	高雄市小港區營口路 1 號	22.573	120.371	◎	◎
D015	新厝里活動中心	高雄市大寮區新三街 50 號	22.560	120.409	◎	◎
D016	大坪頂	高雄市大寮區義勇段 0937 地號	22.547	120.398	◎	◎
D017	頂厝里	高雄市林園區沿海路 4 段 217 號	22.503	120.38	◎	◎

註：高雄臨海與林園工業區共同設置之監測站。



資料來源：<https://aqmsopen.epa.gov.tw/>

圖 1.臨海工業區空氣污染物監測站分布圖

表 2.臨海工業區監測之有害空氣污染物種

揮發性有機物(VOCs)		PM 之重金屬(Heavy Metals)	醛酮類化合物(Carbonyls)
氯乙烯	氯甲烷	砷及其化合物	甲醛
1,3-丁二烯	1,4-二氯苯	鎳及其化合物	乙醛
丙烯腈	1,1-二氯乙烯	鉍及其化合物	丙烯醛
二氯甲烷	1,1,2,2-四氯乙烷	鎘及其化合物	
1,1-二氯乙烷	1,1,2-三氯乙烷	鉛及其化合物	
氯仿	乙酸乙烯酯	錳及其化合物	
1,2-二氯乙烷	苯(自動)*	六價鉻	
1,1,1-三氯乙烷	苯乙烯(自動)*		
四氯化碳	乙苯(自動)*		
1,2-二氯丙烷	甲苯(自動)*		
溴甲烷	二甲苯(自動)*		

*：(自動)為自動連續監測項目，其餘為手動監測項目

資料來源：<https://aqmsopen.epa.gov.tw/InfoPage/ItemList.aspx>

2.2 移動污染源有害空氣污染物監測作業

一、監測地點篩選

傳統檢測柴油車引擎方式為動力計密閉採樣，可獲得 100%單一柴油引擎排放結果，若要以周界採集為數眾多之柴油車排放，必須選擇固定污染源、移動污染源之汽、機車排放影響較少之監測點位。選址依據為 1.地點為柴油大貨、卡車為主之交通要道、2.往來柴油車輛非經過挑選、3.採集新鮮柴油車排放，採樣口需架設於道路旁且近地面(約一樓高度)、4.其它(如安全性、架設便利性等)。依據上述選址方法，初步評估最適合監測地點為高雄市臨海工業區轄內之小港區漁會；此區域為進出商港之柴油大貨車、卡車主要行車動線，鮮少汽、機車往來，地理位置如圖 2 所示，圖 3 為採樣點位圖，因部分儀器需要長時間(24 小時)擺放，考量到人員與設備安全性，挑選漁會矮牆內擺放；監測地點選擇一樓近地面處，目的為採集新鮮柴油車排放 HAPs。圖 4 為實拍台機路、光和路，顯示該處為大貨車、卡車進出港區要道，往來車輛以柴油車為主，可排除汽車、機車等「非柴油車輛」之排放干擾。



圖 2.有害空氣污染物環境濃度監測評估地點之地理位置圖



圖 3.小港區漁會採樣點位與電源供應位置



圖 4.採樣地點實拍高雄市台機路與光和路車流

二、檢測方法與檢測物種

傳統之有機性 HAPs 檢測方法為不銹鋼採樣筒與氣相層析儀搭配質譜儀 (GC-MS) 檢測，其優點為可達到極低之偵測極限 (<1 ppbv)，缺點為數據非連續、無法獲得逐時濃度、採樣耗費大量人力成本等。線上連續監測方法之優點為可提供個別有機性 HAPs 逐時濃度值，若規劃長期監測，可獲得全年 365 天監測數據，用以計算更具有代表性 HAPs 年平均濃度。此外，亦可同步定性未知污染物，

搭配氣象資料與受體模式，如正矩陣因子法(Positive Matrix Factorization, PMF)，可進行「源成分分析」，藉由濃度值回推污染源與掌握工業區 HAPs VOCs 即時排放，充分掌握「源」與「受體」關係。

為完整掌握柴油車排放 HAPs 環境濃度以及排放來源，本研究乃分別以傳統離線方法以及線上連續方法監測，以下分別說明兩方法檢測物種以及檢測儀器。

1. 離線方法

檢測物種乃參照美國聯邦環保署(US EPA)公告之都會區主要有害空氣污染物與加州南岸空氣品質管理局(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD)於 2012 年之多重有害空氣污染物暴露研究第四期(MATES IV)^[1]之聯集，獲得柴油車 HAPs 監測候選物種清單，如表 3 所示，共包括 10 個 VOCs、7 種 PM₁₀ 重金屬、3 種醛酮類化合物等 22 項 HAPs。表 4 為 HAPs 採樣監測項目與檢測方法，以環保署環境檢驗所公告標準方法為主；採樣頻率為每 12 天採集一次樣品，於 109 年 6 月 18 日開始執行，每 12 天採集一個樣品，至 12 月 21 日止，共採集 18 次(天)，108 組樣品。監測項目包括揮發性有機物（含完整 54 種光化臭氣前驅物、有害空氣污染物、工業區常見含氧 VOCs 等）、醛酮類化合物、PM₁₀ 重金屬、六價鉻等項目。

表 3. USEPA 都會區有害空氣污染物清單

揮發性有機物(VOCs)	PM 之重金屬(Heavy Metals)	醛酮類化合物(Carbonyls)
丙烯腈	砷及其化合物	甲醛
苯	鎳及其化合物	乙醛
1,3-丁二烯	鈹及其化合物	丙烯醛
氯仿	鎘及其化合物	
1,2-二氯乙烷	鉛及其化合物	
二氯甲烷	錳及其化合物	
氯乙烯	六價鉻	
1,2-二氯丙烷		
四氯乙烯		
三氯乙烯		

表 4. 本研究之 HAPs 監測項目與檢測方法

項目 測項	揮發性有機物 (VOCs)	醛酮類化合物 (Carbonyls)	重金屬(PM ₁₀) (Heavy Metals)	六價鉻 (Cr ⁶⁺)
檢測 項目	光化有機前驅物、有害空氣污染物等 108 種 VOCs	甲醛、乙醛等 16 種醛酮類化合物	砷、鈹、鎘、鉻、鉛、錳、鎳等 7 項	六價鉻 (Cr ⁶⁺)
檢測 方法	NIEA A715.15B	NIEA A705.12C	NIEA A208.13C NIEA A305.11C	NIEA A309.11B

項目 測項	揮發性有機物 (VOCs)	醛酮類化合物 (Carbonyls)	重金屬(PM ₁₀) (Heavy Metals)	六價鉻 (Cr ⁶⁺)
採樣 方法	不鏽鋼採樣罐 (預抽真空)	DNPH 收集瓶 吸收法	不同粒徑之採樣 濾紙(手動採樣)	無灰纖維 濾紙採樣
檢測 儀器	氣相層析質譜儀 (GC-MS)	液相層析儀 (HPLC-UV)	感應耦合電漿 質譜儀 (ICP-MS)	離子層析儀 紫外光/可見 光偵測器 (IC-UV/VIS)

2. 線上方法

本研究 HAPs 線上連續監測系統係採用熱脫附氣相層析質譜儀(Thermal Desorption Gas Chromatography Mass Spectrometry, TD-GC-MS)，儀器裝置如圖 5 所示。表 5 為標準氣體測試結果、檢量線線性與方法偵測極限，相對標準偏差(Relative Standard Deviation, RSD)與決定係數(Coefficient of Determination, R^2)，結果顯示 RSD 為 0.25-5.37%，檢量線 $R^2 > 0.9830$ ，顯示檢量線維持良好線性與重複性；方法偵測極限(MDL)範圍介於 0.19-0.97 ppbv，表示氣相層析質譜儀應用於線上連續監測時仍能維持良好的儀器偵測極限^[2]。



圖 5.自製線上熱脫附氣相層析質譜儀(TD-GC-MS)

表 5.本研究 HAPs 線上連續監測標氣測試結果、檢量線線性與方法偵測極限

中文名稱	英文名稱	RSD (%)	R^2	MDL (ppbv)
苯	Benzene	4.30	0.9996	0.52
甲苯	Toluene	1.52	0.9987	0.27
乙苯	Ethylbenzene	2.56	0.9987	0.36
間與對二甲苯	m,p-Xylene	5.37	0.9967	0.97
鄰二甲苯	o-Xylene	2.09	0.9980	0.50
苯乙烯	Styrene	3.58	0.9830	0.43
氯甲烷	Chloromethane	2.09	0.9989	0.25

二氯甲烷	Dichloromethane	2.80	0.9968	0.34
三氯甲烷(氯仿)	Trichloromethane (Chloroform)	1.59	0.9983	0.38
四氯化碳	Carbon Tetrachloride	1.12	0.9994	0.19
1,1-二氯乙烷	1,1-Dichloroethane	3.24	0.9995	0.39
1,2-二氯乙烷	1,2-Dichloroethane	0.25	0.9978	0.62
1,1,2-三氯乙烷	1,1,2-Trichloroethane	4.70	0.9979	0.56
1,2-二氯丙烷	1,2-Dichloropropane	3.16	0.9989	0.38
氯乙烯	Vinyl Chloride	2.04	0.9961	0.24
1,1-二氯乙烯	1,1-Dichloroethylene	2.07	0.9971	0.25
三氯乙烯	Trichloroethylene	4.12	0.9985	0.49
四氯乙烯	Tetrachloroethylene	3.35	0.9985	0.40

三、結果與討論

3.1 柴油車排放 HAPs 環境監測結果

圖 6 為 30 及 50 cm 油盤自由燃燒之質量損失率比較圖，燃料引燃 60 秒後其質量損失率達至最大值並趨於穩定，顯示出甲醇於自由燃燒 60 秒後呈現穩態燃燒，因此於穩態燃燒後噴撒泡沫及珍珠石能夠有較好觀察滅火效能的現象。表 3 為滅火測試觀察紀錄表，於不同油盤尺寸的滅火測試中使用濃度 3% 之水層膜泡沫雖能夠減弱火焰，但不能夠有效的撲滅火焰。若以珍珠石代替水層膜泡沫或結合兩者之測試，皆對於火焰有部分熄滅的效果，雖然不能夠完全將火焰熄滅，但能夠縮減燃燒範圍。

一、柴油車排放指標驗證

國內何氏(1999)研究指出汽油車與柴油車共有 VOCs 排放特徵為甲苯(Toluene)、苯(Benzene)、鄰間-二甲苯(m,p-Xylene)、1,2,4-三甲苯(1,2,4-Trimethylbenzene, 1,2,4-TMB)、對-二甲苯(o-Xylene)等；柴油車排放特徵為 VOCs 為 1,3,5-三甲苯(1,3,5-Trimethylbenzene, 1,3,5-TMB)、乙苯(Ethylbenzene)、壬烷(n-Nonane)等^[3]。本研究彙整柴油車監測結果與環保署萬華光化學監測站指標污染物比較濃度差異，藉以評估本次柴油車採樣監測結果與都會區交通源 VOCs 之差異，以 2019 年 6-10 月萬華站 VOCs 平均濃度作為比對依據。圖 6 為 2019 年 6-10 月萬華光化站與本研究 2020 年 6-10 月 VOCs 監測濃度值比較，結果顯示 VOCs 濃度值皆高於交通源為主之萬華光化站，柴油車指標物種 1,3,5-TMB、Ethylbenzene、n-Nonane 皆高於萬華站平均濃度，代表本次監測可確實採集柴油車主要排放 HAPs 與指標污染物。

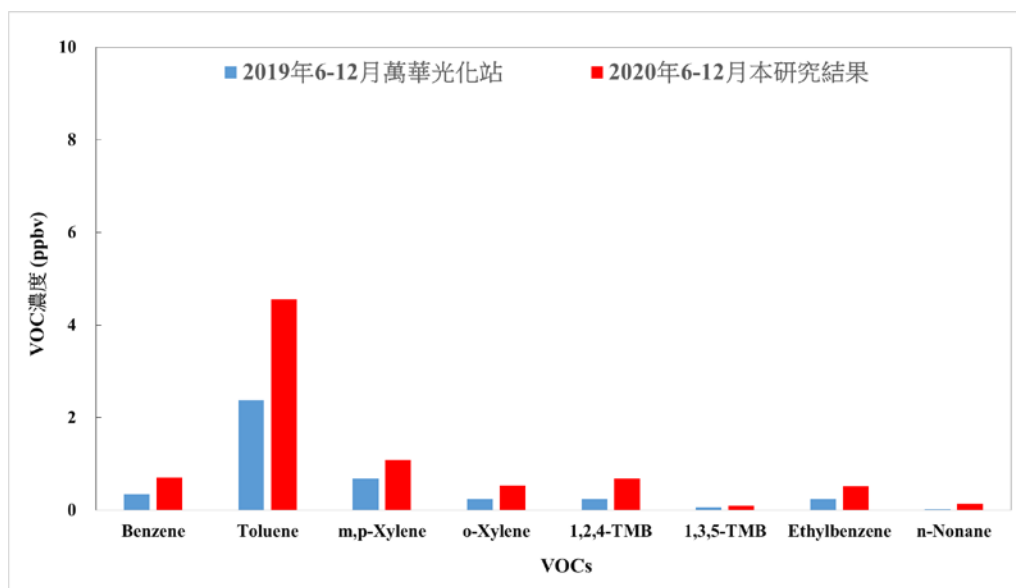


圖 6.萬華光化站與本研究 VOCs 監測濃度值比較

二、柴油車排放 HAPs 離線方法監測結果

參照國外文獻資料^[4]顯示柴油車依照噸數可區分為輕、中、重三種級別，三種噸數柴油車排放之 VOCs，皆以醛酮類化合物(Carbonyls)排放比例為最高(圖 7)，遠高於烷烴(Alkanes)、烯烴(Alkenes)與芳香烴(Aromatics)，國內文獻研究指出模式模擬結果顯示臨海工業區之小港區存在有顯著醛酮類化合物，甲醛為主要污染物^[5,6]。圖 8 為本研究柴油車周界採樣之空氣污染物群組濃度結果，與文獻結果呈現相同趨勢^[4]，醛酮類化合物排放比例最高，遠高於其他三組烴類(烷、烯與芳香烴)。綜整上述結果顯示本研究實測柴油車排放 HAPs 結果與先前文獻相符，採樣地點符合新鮮柴油車交通源採樣結果。

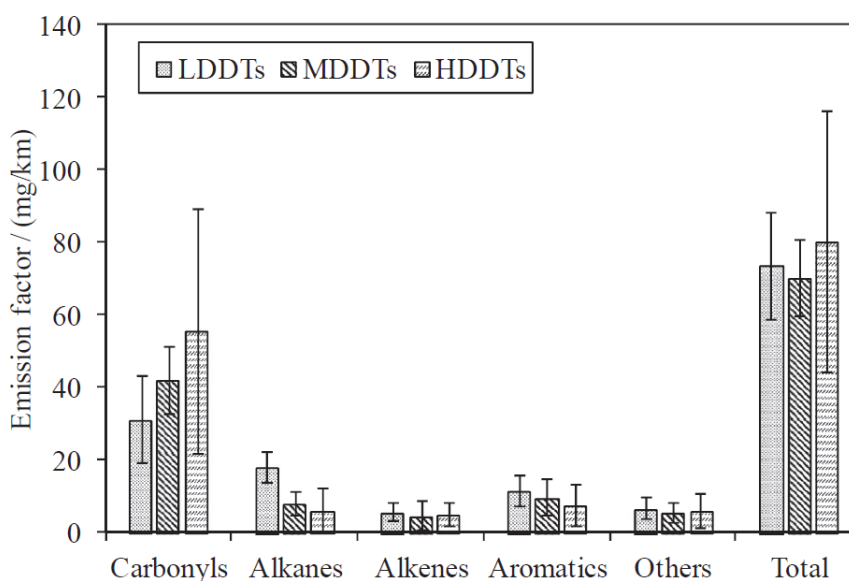


圖 7.文獻中不同噸數柴油車排放之空氣污染物群組^[8]

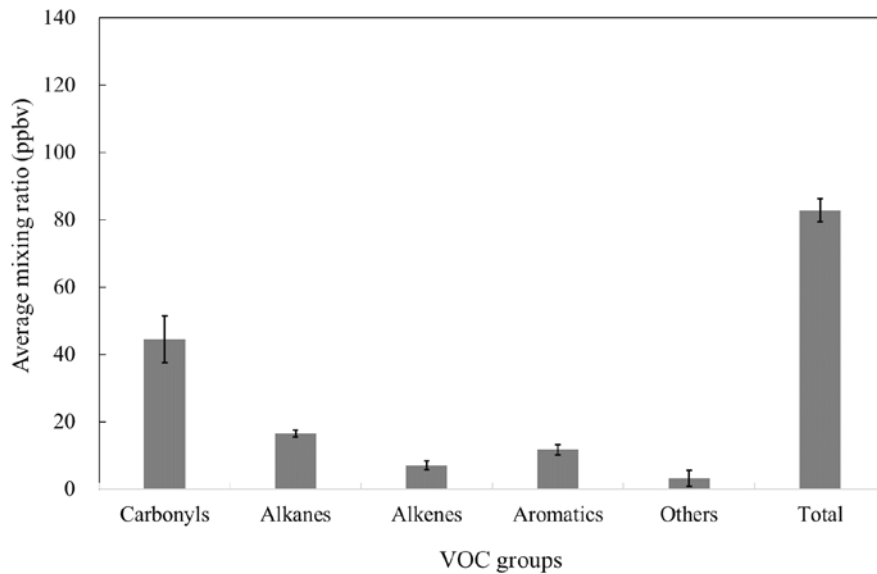


圖 8.本研究柴油車周界採樣之空氣污染物群組

3.2 工業測站以及柴油車密集區之 HAPs 監測濃度比較

為了解工業測站以及柴油車密集區之監測 HAPs 物種結果，蒐集 109 年林園工業區手動及自動測站監測數據，參照 106 年環保署委辦計畫^[7]「環境大氣有害空氣污染物監測數據品質要求參考指引」彙整各物種年均值，並與本研究柴油車密集區監測濃度平均值比較。

圖 9 為工業測站以及柴油車密集區之有機性 VOCs 及醛類監測濃度比較，工業測站苯與乙苯監測年均值濃度約 0.376~0.643 ppm，柴油車密集區域苯與乙苯監測平均濃度約 0.517~0.706 ppm，表示工業測站以及柴油車密集區域皆會貢獻苯與乙苯物種。其他含氯物種(1,2-二氯乙烷、1,4-二氯苯、氯乙烯)及丁二烯物種，於柴油車密集區域也呈現高濃度趨勢，約 0.007~0.322 ppm，表示即使位於柴油車密集區域仍受到固定源所排放有害空氣污染物影響。於醛類監測濃度比較結果，柴油車密集區域監測出高濃度甲醛、乙醛，約 5.26~17.4 ppm；工業測站監測則相對低，約 0.01~0.03 ppm，表示臨海工業區甲醛、乙醛環境濃度主要貢獻源為柴油車。重金屬部分(包括砷、鉍、鉛、鎘、鎳、六價鉻)，工業測站監測重金屬濃度為 0.026 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (鉍)~ 18.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (鉛)，柴油車密集區域監測重金屬濃度為 0.00001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (鉍)~ 0.124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (六價鉻)，顯示工業測站或柴油車密集區域環境大氣中重金屬濃度皆低。

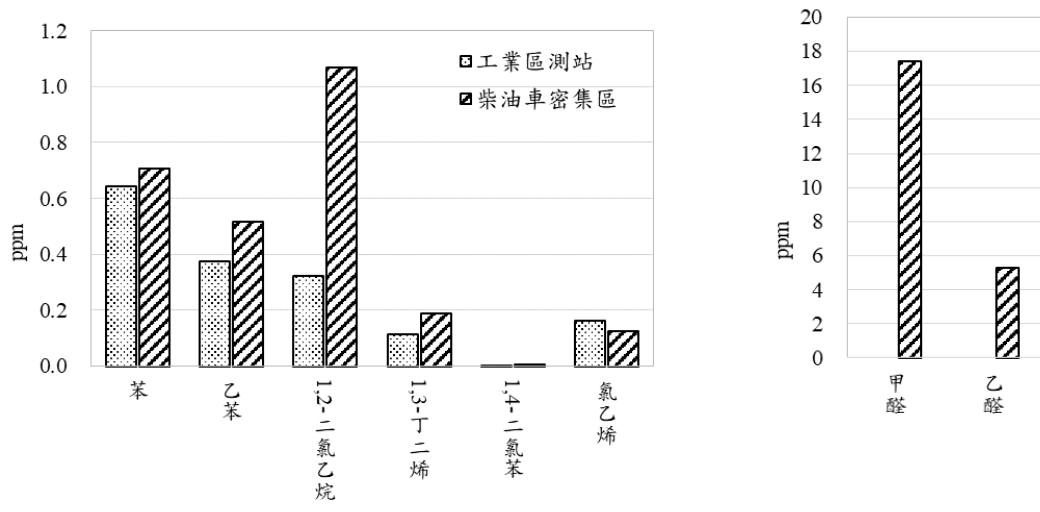


圖 9.工業測站以及柴油車密集區之有機性 VOCs 及醛類監測濃度比較

3.3 柴油車排放 HAPs 線上方法監測結果

依上述 3.2 部分監測結果，位於柴油車密集區域仍受到固定源所排放有害空氣污染物影響，包括其他含氯物種(1,2-二氯乙烷、1,4-二氯苯、氯乙烯)及丁二烯物種，故本研究以連續線上方法監測進一步解析排放來源。圖 10 為小港區漁會監測 1,2-二氯乙烷與氯乙烯逐時濃度圖，兩污染物濃度趨勢變化一致，絕對濃度值則是 1,2-二氯乙烷高於氯乙烯，顯示兩者可能來自於相同污染源，圖 11 為小港區漁會監測丁二烯逐時濃度圖，最高濃度為 11/21 09:00 之 9.7 ppb，除了 11/21 與 11/23 少數幾筆高值事件之外，其餘時間濃度值均 < 1 ppb。

為確認上述污染物高值好發時間，本研究取各污染物前 10% 高值繪製濃度風玫瑰圖(Pollution Rose Plot)，由於監測期間測站西北方之貨櫃站常有貨櫃堆疊，導致測站風速風向受到影響，本研究使用距離小港區漁會南南東方 3 公里之大林蒲監測站之風速與風向作為參考。圖 12 為小港區漁會 1,2-二氯乙烷、氯乙烯與丁二烯之前 10% 高值濃度風玫瑰圖，三種污染物高值皆好發於西北風盛行且風速較弱 (< 2.5 m/s) 時，少部份丁二烯與 1,2-二氯乙烷出現於風速更低 (< 2 m/s) 之西南風，氯乙烯高值則皆來自於西北風。綜整而論，主要污染源可能來自於小港區漁會西北方處之前鎮碼頭儲槽區。

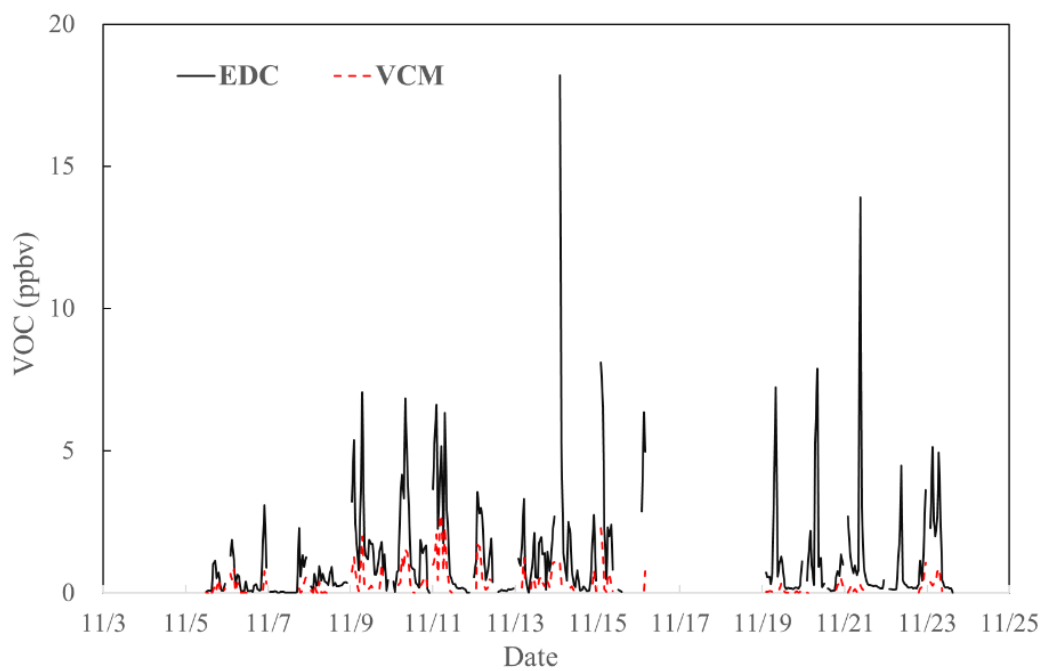


圖 10.小港區漁會 1,2-二氯乙烷(EDC)與氯乙烯(VCM)逐時濃度監測結果

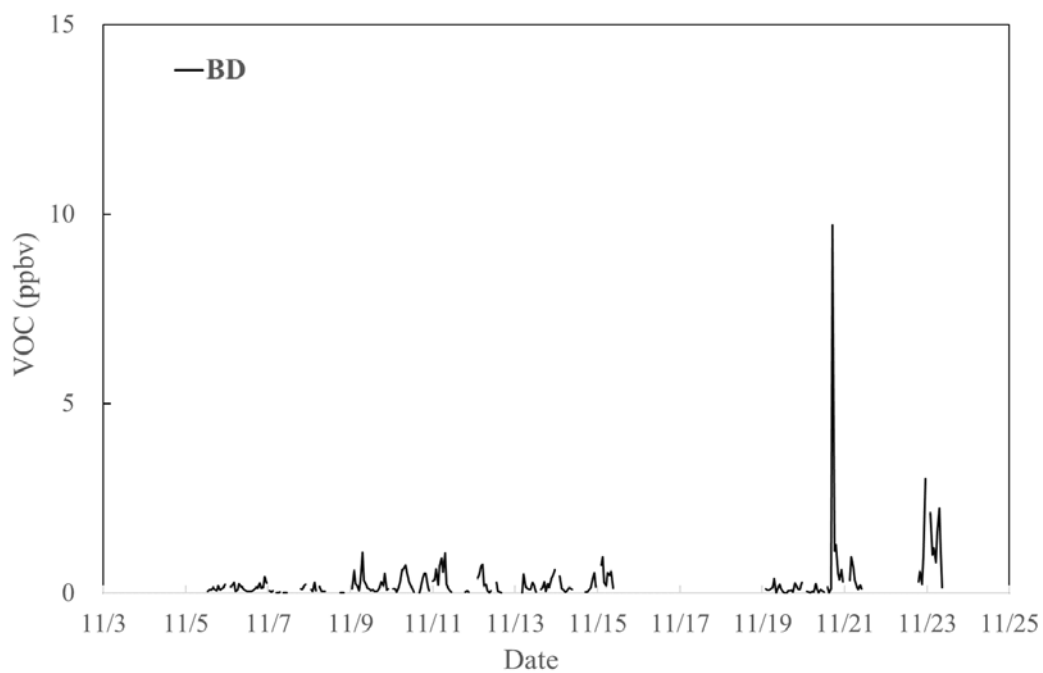


圖 11.小港區漁會丁二烯(BD)逐時濃度監測結果

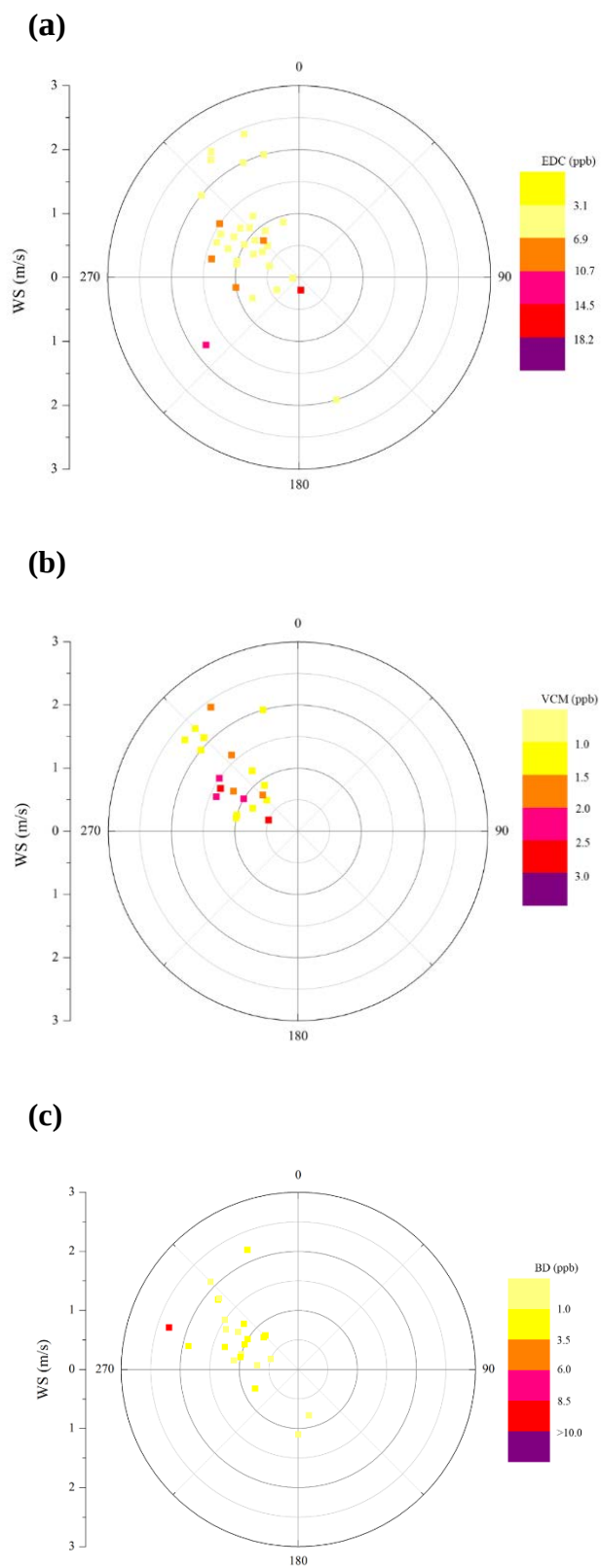


圖 12.小港區漁會(a)1,2-二氯乙烷、(b)氯乙烯、(c)丁二烯
前 10%高值濃度風瑰圖

四、結論

離線檢測結果顯示柴油車主要排放污染物以醛酮類(甲醛、乙醛)為主，另有測得壬烷、三甲基苯較於都會區移動污染源高，顯示該地區排放源確為柴油車貢獻。比較臨海工業區之工業測站以及柴油車密集區之監測 HAPs 物種結果，柴油車主要貢獻甲醛、乙醛物種(5.26 ~ 17.4 ppm)，固定源以及柴油車皆會貢獻苯與乙苯物種，固定源苯與乙苯物種濃度約 0.376~0.643 ppm，柴油車密集區域苯與乙苯濃度約 0.517~0.706 ppm；而重金屬物種不論固定源以及柴油車監測結果皆很低(0.00001 ~ 18.984 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，此外，柴油車密集區域測得非柴油車排放物種，包括 1,2-二氯乙烷、氯乙烯、1,4-二氯苯、丁二烯，濃度約 0.007~0.322 ppm，表示柴油車密集區域仍會受到固定源工廠排放 HAPs 影響。為了解含氯物種以及丁二烯排放源，本研究以線上連續監測技術搭配風速與風向驗證，結果顯示其污染來源指向性高，皆以西風-西北風為主，顯示可能來源為測站西北方之前鎮碼頭儲槽區。

五、致謝

本研究由行政院環境保護署 109 年度委託計畫「固定污染源有害空氣污染物減量推動及技術改善計畫」提供經費，謹此誌謝。

六、參考文獻

1. District, S.C.A.Q.M. Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin (MATES IV) Final Report; 2015.
2. 王家麟. 針對固定污染源鄰近周界或廠區建立有害空氣污染物連續監測系統 (MOST-107-EPA-F-006-001); 107 年環保署/科技部空污防制科技合作計畫, 2019.
3. 何文淵. 汽油車引擎廢氣揮發性有機物成份及光化反應潛勢. 國立成功大學, 1999.
4. Yao, Z.; Shen, X.; Ye, Y.; Cao, X.; Jiang, X.; Zhang, Y.; He, K. On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China. *Atmospheric Environment* 2015, 103, 87-93, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.028>.
5. Chen, S.-P.; Su, Y.-C.; Chiu, C.-J.; Lin, C.-H.; Chang, J.S.; Chang, C.-C.; Wang, J.-L. Inter-comparison of network measurements of non-methane organic compounds with model simulations. *Atmospheric Environment* 2015, 122, 94-102, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.033>.
6. Tsai, J.H.; Gu, W.T. Emission Characteristics and Risk Assessment in an Industrial Metropolitan Area in Taiwan using the AERMOD Model. *Adv. Geosci.* 2019, 49, 113-119, doi:10.5194/adgeo-49-113-2019.
7. 行政院環境保護署 106 年度計畫，固定污染源有害空氣污染物管制暨消費性產品揮發性有機物管制計畫，民國 107 年 1 月。

歐盟循環經濟推動進程暨創新合作平台

The Innovative Platform of EU Circular Economy Collaboration

蘇靜惠¹、薛欣達^{2*}、張祖恩³

Ching-Hui Su, Hsin-Ta Hsueh, Juu-En Chang

國立成功大學永續環境實驗所暨環境工程學系

Sustainable Environment Research Laboratories and Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University

摘要

歐盟向來積極推動循環經濟，主要目標在建構封閉式循環的經濟運作模式，將一般被視為廢棄物的物資，藉由重複利用（維修、翻新、回收）變成可再次使用的資源。歐盟除了優先擬定朝向循環經濟目標的相關法政策，也在實際推動中，不斷推出相關配套的子方案，以求達到預期目標。台灣承襲歐盟 2015 年的轉型潮流下，於 2016 年 11 月將「循環經濟」納為國內推動前瞻基礎建設及「五加二」產業創新方案，期望透過整合國內產學研能量方面，帶動經濟轉型動能。台灣在資源回收相關工作之成果執世界牛耳，與許多歐洲國家相仿，台灣人口稠密、資源缺乏，所以過去 20 年來投入相當大的努力在環保工作上，目前除了工業廢棄物再利用率高達 80%、資源再生產業產值 734 億元之外，已有許多成功的產業共生案例。然而，欠缺完善政策引導，亦或是現有做法過於分散，各有特定的預期目標，故有必要參考歐盟的合作平台做法，雖台灣與歐洲國家有地域上的差異考量，但仍可做為寶貴的資料參考。本文將梳理歐盟過往公布的大型科研架構計畫，接著鎖定循環經濟相關政策進行分析比較，最後說明所執行的 Horizon 2020 計畫所建置的創新合作平台作法，希冀該平台創新思維能帶給國內相關學者做為參考。

關鍵字：歐盟科研架構計畫；歐盟循環經濟計畫；循環經濟政策；創新合作平台

Abstract

The EU has always actively promoted circular economy with the main goal of building a closed-loop economic operation mode, turning materials generally regarded as waste into reusable resources through reuse (maintenance, refurbishment, recycling). In addition to prioritizing the formulation of relevant laws and policies towards the goal of circular economy, EU also continuously launches related supporting sub-programs in order to achieve the expected goals.

Following the transition trend of the European Union in 2015, Taiwan incorporated the "circular economy" as a domestic promotion of forward-looking infrastructure and "five plus two" industrial innovation plans in November 2016,

¹ 國立成功大學環境工程學系，碩士級專案研究助理

² 國立成功大學永續環境實驗所，副研究員
E-mail: adathen@mail.ncku.edu.tw

³ 國立成功大學環境工程學系，名譽教授

hoping to drive economic transformation through the integration of domestic production, education and research capabilities. Taiwan's achievements in resource recovery-related work are among the best in the world. Similar to many European countries, Taiwan has a dense population and lack of resources; therefore, in the past 20 years, plenty of efforts have been invested in environmental protection. At present, the recycling rate of industrial waste is as high as 80%. In addition to the output value of the resource recycling industry of NTD 73.4 billion, there have been many successful industrial symbiosis cases. However, there is a lack of comprehensive policy guidance, or the existing practices are too fragmented, and each has specific expected goals. Therefore, it is necessary to refer to the EU's cooperation platform practices. Although Taiwan and European countries have regional differences in consideration, this can still be valuable Information reference.

This article will comb the large-scale scientific research framework projects conducted by the European Union in the past, then analyze and compare policies related to the circular economy, and finally explain the implementation of an innovative cooperation platform granted by Horizon 2020. It is hoped that the platform's innovative thinking can be brought to relevant domestic scholars as beneficial reference.

Keyword: EU Framework Project, EU Circular Economy Project, circular economy policy, innovatice cooperation platform

一、歐盟環境政策發展

1.1 歐盟重要綠色環境政策

因應人類近百年來大量消耗能資源並造成環境污染與破壞，從 1990 年代起永續發展的觀念逐漸被世人討論與接受。歐盟是最早投入永續發展議題的區域，歐盟自 2006 年起陸續通過公告一系列指令如廢電子回收指令(WEEE)、有害物質禁用指令(RoHS)、使用能源產品(EuP)等，目的是持續地逐步推動實踐綠色產品的三個面向：可回收、無害化、省能源，已引起全球企業的正視。

歐盟是推動循環經濟最積極的組織，所提出的政策倡議創新且針對地域需求進行探討，歐盟有關資源效益、資源回收等主題的研究，一開始都圍繞著「綠經濟」、「生態創新」(Eco-Innovation)主題來進行討論。生態創新一詞在台灣較為陌生，其定義不一，但主要如下：

- 一、「在原有創新的定義上，再加上有助永續發展的條件，必須同時創造利潤以及減少環境負荷」(1992 World Business Council for Sustainable Development)
- 二、「是一種創新模式，透過降低環境影響、提升環境壓力的恢復力或達到天然資源更有效率及負責的利用，最終朝向永續發展的目標」。(Decision N° 1639/2006/EC establishing a Competitiveness and Innovation Framework Programme, European Commission, 2006)

- 三、「任何新穎或改進的商品、服務、程序、組織，致力減少天然資源(包含原物料、能源、水和土地)的使用，並降低整個生命週期中有害物質釋放的創新」(European Eco-Innovation Observatory, 2009)。

以下針對與循環經濟相關的重點政策發展由遠而近彙整概述。

2004 年 1 月：歐盟通過環境科技行動計畫(ETAP)

歐洲生態產業 10 幾年來以近 6% 的速度成長著，達到整體營業額 3190 億歐元(占 EU27 國 GDP 的 2.5%)。過去這幾年，生態創新已登上歐盟議程，從 2004 年 ETAP(Environmental Technologies Action Plan)開始，直到“Europe 2020”策略，在“Innovative Union”旗艦型創始活動中扮演領先地位。

ETAP 計畫強調希望藉由創新方式，研發生態永續與環境友善之技術，並傳遞企業之生態創新概念，以擴大生態創新市場的需求與接受度，促進工業部門永續發展，提高整體競爭力。歐盟委員會認為，ETAP 在歐盟永續發展策略中已扮演一個重要角色，該計畫可作為歐盟執委會與會員國間的環境政策溝通媒介，透過實際行動來督促會員國朝向共同的目標而努力。當時 28 個歐盟會員國中，有 22 個國家參與此計畫。歐盟強調，如何將成功的企業環境行動經營策略，有效地應用與橫向擴散是格外重要的。尤其在生態創新產業屬於需要關鍵性、獨特性的核心技術，來提供專業服務之產業，如何確保這些環保技術與概念能發揮的效益達到最佳化，將為永續經營的關鍵。為達此目標，許多討論中的政策/方案，如綠色採購(Green Procurement)之推動、標準化制度的落實，都有助於提升環境友善技術之接受度；從產業經營類別的面向來看，包括營造業、食品加工業、民營運輸業等皆需大力推廣環境友善技術的產業，附加在生態創新的經營所能帶來的環境效益，能明顯改善與減緩氣候變遷所造成影響。ETAP 中提出了 4 項需優先的行動，包括：

- 提高企業環境友善技術之需求度；
- 提供充足資金支援來促進生態創新產業的發展；
- 促進歐盟會員國之間的企業與技術經驗交換；
- 確保策略發展與知識資源能確實讓財政機構所掌握。

ETAP 之執行將使歐盟生態產業/技術蓬勃發展，當時預估該計畫執行後，歐盟將可擁有全球生態產業/技術市場三分之一的佔有率。在 2007 年，歐盟對該計畫已投資 2,270 億歐元，相當歐盟整體 GDP 值之 2.2%，創造 340 萬個就業機會，2020 年投資市場提升至 22 兆歐元。

2010 年 3 月：開始執行 10 年期歐盟策略 Europe 2020

Europe 2020 歐盟策略中，一共有七項旗艦型創始活動，其中一項創始活動為資源效率歐洲(Resource Efficient Europe)，旨在呼應生態創新，直接回應全球資源缺乏的挑戰，強調避免以資源使用的代價換取經濟成長，支持低碳經濟的推動，增加再生能源的使用，提升能源效率。據統計，單單資源(原料、水和能源)在效

能不彰的使用下，一年就花了歐洲企業 6300 億歐元。生態創新在 Europe 2020 “Innovative Union” 旗艦型創始活動也有明確地提到，將於行動策略承諾提供生態創新的支援，建立適合研究與創新的環境，確保創意得以被實現，以及創造工作機會與經濟成長。“An industrial policy for the globalisation era” 旗艦型創始活動包括永續供給和產業進程原物料管理的議題，針對中小企業，改善經濟環境，支持足以和全球競爭以及永續經營的企業發展。

2011 年：The Eco-Innovation Action Plan 逐漸取代 ETAP

早期歐盟一直在尋求綠經濟(green economy)的變革，兼顧環境、經濟、社會和創新以促進資源能有效地運用，其中資源有效利用和有回復力的生態系統是綠經濟的核心。近年來歐盟環境部努力朝向資源有效利用的方向邁進，同時也感嘆環境變遷深深影響我們的生態系統，造成自然棲息地大量物種的消失。當各國政府在尋找有效的方法來對抗氣候變遷和其他的負面環境影響的同時，也注意到生態創新可提升較低的成本環境目標實現的可行性。聯合國環境規劃署(UNEP)在『邁向綠色經濟：永續發展並脫離貧困之途徑』報告中指出，未來 40 年間，全球每年必須投資相當於全球 GDP 的 2%於綠色能源、綠建築、綠色運輸等重要領域，因此，各國無不紛紛在綠能產業投入人力、資金與技術，以提升未來產業的綠色競爭力。而後歐盟全力推動生態創新(Eco-Innovation) 相關研究工作，執行過的歐盟計畫例如 ECO-INNOVERA、ECOPOL、Eco-innovation Observatory、ECO-PRO、EcoAP 等等。

EcoAP (the Eco-Innovation Action Plan)生態創新行動計畫，是歐盟執委會 2011 年底提出的一個行動方案，已取代 ETAP，並建立一個新的生態創新行動方案給歐盟執委會，對歐洲經濟所有面向提供刺激，朝著更乾淨的科技、永續產品和服務邁進。EcoAP 涵蓋 7 個行動，尤其專注在市場供應及需求上、研究和產業上、政策及財務工具上。

行動一：環境政策和規範(Environmental Policy and Regulation)

行動二：資助示範計畫(Demonstration Projects)

行動三：標準化建立(Standards)

行動四：財務資助及中小企業協助(Funding and SME Support)

行動五：國際合作(International Cooperation)

行動六：技術及知識(Skills and Knowledge)

行動七：歐洲創新夥伴(European Innovation Partnerships)

按照全球資源限制及持續的競爭，生態創新對全球商業經濟利益是明顯的，綠經濟發展對生態創新及生態產業創造了永續市場。德國環境部和聯邦環境局早已預估世界“綠市場”在 2005 達到一兆歐元，較早預估的範圍還更廣，包含的範圍例如能源效能、永續流動性、物質效能和回收。根據同一份報告，在 2020 年前，綠經濟的價值將會加倍，特別是由於能源效能和水管理市場(ibid)顯著成長。圖 1 可了解歐盟國家在 2020 年生態創新表現的排名，前三名為盧森堡、芬蘭和丹麥。

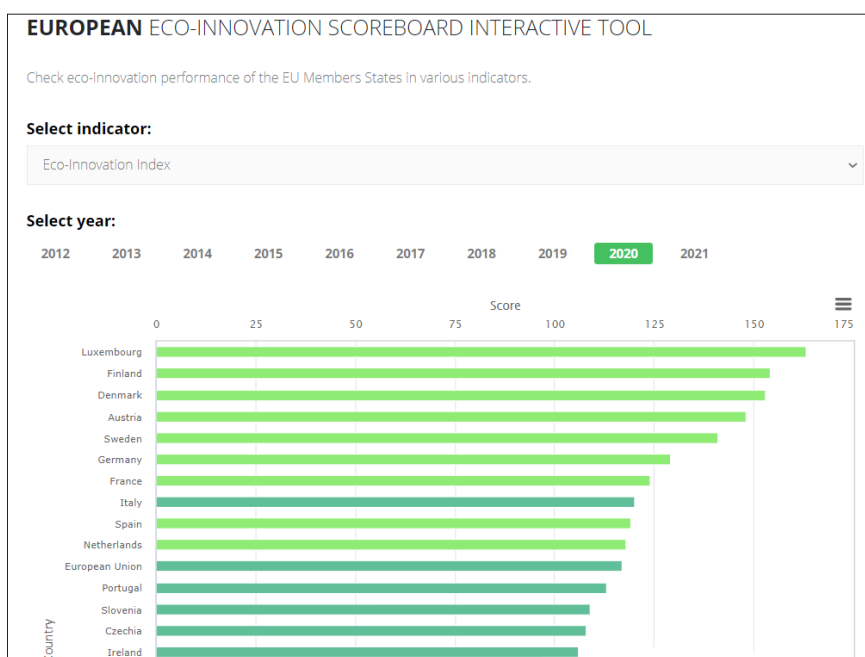


圖 1. 2020 年 Eco-Innovation Scoreboard

(圖片來源 https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/index_en)

EcoAP 生態創新行動計畫，其目標是推動生態友善型科技創新，減少對環境的破壞，促進經濟發展，增加就業，尤其專注在市場供應及需求上、在研究和產業上和在政策及財務工具上。即使現今歐洲「循環經濟」逐漸取代「生態創新」研究地位，但為生態創新所創立的方案及活動至今仍都被歐盟執委會框列在歐盟環境類官方網頁上，足見其仍有一定重要的參考性質。

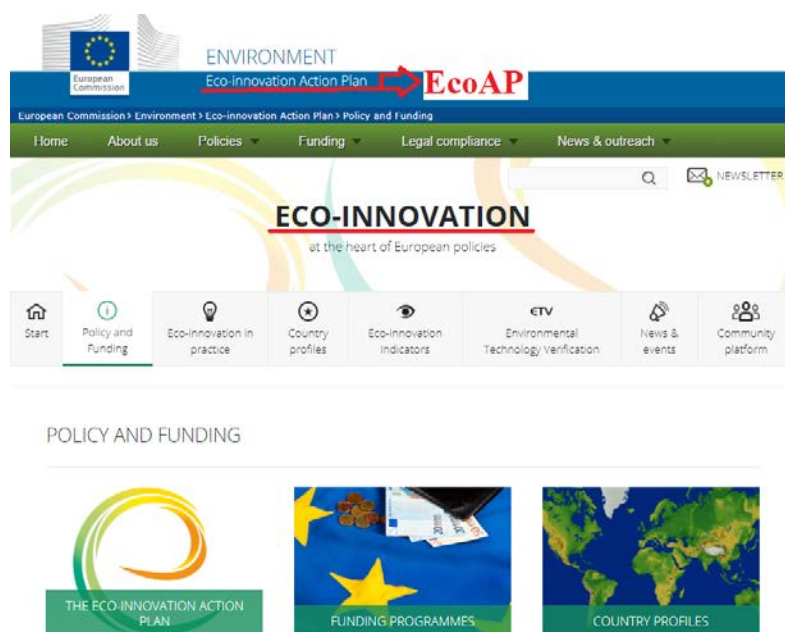


圖 2. 生態創新歐盟官方網頁

(圖片來源 https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-action-plan_en)

2012 年：成立歐洲資源效率平台(European Resource Efficiency Platform, EREP)

2012 年歐盟頒布歐洲資源效率宣言 (Manifesto for a Resource Efficient Europe)，提到全球資源與環境壓力日增，歐盟別無選擇，唯有朝資源效益和最終再生循環經濟轉型。歐盟並在當年成立歐洲資源效率平台(European Resource Efficiency Platform, EREP)。EREP 也在 2013 年提出歐洲循環經濟轉型的短期政策規劃。

2012 年歐盟執委會委託英國艾倫·麥克阿瑟基金會與麥肯錫公司提出〈邁向循環經濟〉報告，並於 2014 年 1 月在世界經濟論壇(WEF)發表後開始受到全球注目，內容提及全球推動循環經濟可在五年內創造 5 億美金的淨收益、10 萬個新工作，並避免 1 億噸的材料浪費。此外，還有讓全球每年省下 1 兆美元材料成本的潛力，以及在全球的重新製造業、歐洲的回收產業，創造超過 100 萬的潛在就業機會。

透過新產品開發、再製造和翻修，到 2025 年部分歐盟製造業可減少 6,300 億美元的原物料成本，「循環經濟」一詞並以此契機受到全球注目。

2015 年：歐盟正式提出循環經濟行動計畫 EU Circular Economy Action Plan

2015 年可視為國際社會創新氣候變遷因應策略及明確永續發展方向的新里程。此期間的最大盛事，莫過於巴黎協定生效，聯合國又揭示了永續發展目標(SDGs)，這使前幾年醞釀多時的循環經濟概念傾巢而出。

《歐洲執委會循環經濟行動計畫「封閉循環—循環經濟行動計畫」(Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy)》於 2015 年 12 月公佈，該計畫建立在《生態創新行動計畫 Eco-Innovation Action Plan (2011)》的基礎上，致力於未來可持續的創新活動，與歐洲 2020 策略資源效率倡議相關聯，並包括幾項具體優先主題(廢棄物、塑膠、食品、化學物質、水、營建與拆除、生物質、食品、原物料)的若干行動，和一些跨部門重要議題的作法(衡量架構和指標、產業共生和生態設計)、準則和規章 (GPP 和 CAM 標準、介面產品/化學品和廢棄物)、籌資方案(凝聚力基金(Cohesion funds)、Horizon2020、LIFE Programmes 等)。自歐盟執委會發佈循環經濟方案以來，在所有歐盟會員國和歐洲層級專門致力於資源效率的倡議案激增。基金資源以凝聚力基金最具代表性，其基礎是一套歐洲智慧化特定策略(European set of Smart Specialization Strategies，簡稱 S3)。然而，這些區域投資執行的成果在歐洲沒有得到充分的利用，在發展循環經濟的研究和創新方面取得的進展在整個歐盟各不相同，傑出的研究創新成果實際上沒有得到充分的提升及應用。此外，由於資源的分散以及缺乏一個國際合作的聯合平台，阻礙了投資在整合先期計畫的能力，並造成執行地區相對衝擊。

在《循環經濟行動計畫》中，歐盟執委會啟動了兩個利害關係人平臺：

- 支援循環經濟融資的平臺彙集了歐盟執委會、歐洲投資銀行(EIB)、金融市場參與者，使企業提高對循環經濟業務邏輯的認識，提升投資者對循環經濟計畫的了解；
- 歐洲循環經濟利害關係人平臺(ECESP)，由歐洲經濟和社會執委會(EESC)

運作，目標在發展與利害關係人展開政策對話，促進知識分享和最佳做法的宣傳。

再者，歐盟執委會透過持續執行《中小企業綠色行動計畫(Green Action Plan for SMEs)》，支援中小企業轉向循環經濟。然而，歐盟執委會也注意到，中小企業在採用這種策略和做法方面遇到比大企業更多的困難，原因在於：

- (1)這些中小企業的組織、技術和財務能力有限;以及
- (2)獲得(之前)融資的循環解決方法管道太少。

2017 秋季，歐盟地區及都會政策署(DG REGIO)在中小型企業中建立了支援行動，以促進中小企業的循環經濟-提供資產(如知識、網路和工具)，使中小企業能夠受益於循環經濟所帶來的優勢，包括成本的降低、收入的增加和環境性能的改善。採取循環經濟策略，預期能帶來極大的獲益。事實上，歐盟其他基金的整合也在過去幾十年支援了數以千計的中小企業，提高了資源效率、能源效率和製造及生產的創新。例如，由中小企業執行機構 (EASME) 資助的歐洲資源效率知識中心(European Resource Efficiency Knowledge Centre, EREK)已於 2017 年 1 月開始運作，它提供了一項自我評估工具，並提供網路和支援中小企業更多的機會。

歐盟循環經濟行動計畫 EU Circular Economy Action Plan，由七大面向規劃具體政策目標，七大面向如下：

- 產品(產品設計、製程)
- 消費
- 廢棄物管理
- 廢棄物資源化
- 創新/投資與其他平行措施
- 監督追蹤機制
- 優先領域（包含塑膠、剩食、關鍵原物料、營建/拆卸廢材、生質能）

2016 年歐盟頒布循環經濟配套方案 (The circular economy package, 2016-2019)，提出有關廢棄物的四項立法建議，針對 2015 年 CEAP 訂定 2025 及 2030 年目標，促使歐盟達成聯合國 2030 年永續發展目標。套案重點：

- 針對家庭和企業的廢棄物績效修訂立法提案，以刺激歐洲向循環經濟過渡，可增強歐盟全球競爭力，促進可持續的經濟增長並創造新的就業機會。
- 盤點以下歐盟指令：廢棄物指令、包裝與包材廢棄物指令、廢棄物掩埋指令、運輸工具報廢指令、電池蓄電池與廢電池廢蓄電池指令、廢電子電機設備指令等。

鑒於塑膠所衍生的問題日趨嚴重，歐盟於 2018 年針對塑膠發布「歐洲循環經濟塑膠戰略」(European Strategy for Plastics in a Circular Economy)，企圖改變

塑料與塑膠產品的設計、生產、使用及回收的方式，使歐盟能於 2030 年前達到回收所有塑膠包裝的目標。

2019 年：歐盟提出「歐洲綠色政綱」(The European Green Deal) 政策

在永續發展歷程中，歐盟一向扮演著關鍵的角色與功能。不僅倡議理念上領先全球，歐盟的永續協作與行動力尤甚。

歐盟執委會在 2019 年底提出了非常具有企圖心的「歐洲綠色政綱」(The European Green Deal) 政策，目標在 2050 年達成碳中和，涵蓋的政策領域包含：2030 生物多樣性策略、從農場到餐桌永續糧食策略 (Farm to Fork)、永續農業、乾淨能源、永續產業、建築和裝修、永續交通、降低污染、2030 氣候行動和綠色振興計畫。歐盟這些大刀闊斧、極具企圖心、獨步全球的政策方案和發展是全球關注的重點。

歐洲綠色政綱並大幅提升 2030 年前的預期減碳目標(從 40%調整至 50-55%，基準年為 1990 年)，期待歐洲在 2050 年前成為世界上第一個氣候中和大陸 (climate-neutral continent)，再度展現綠色轉型的雄心。



圖 3. 歐盟綠色政綱架構

(圖片來源：郭映庭(2020),「歐盟綠色政綱」行動路線圖重點)

歐洲綠色政綱的 10 大要點(陳文姿, 2019)

1. 歐洲「碳中和」：歐洲綠色政綱的首要目標。目標是在 2050 年使溫室氣體淨排放量達到零。
2. 循環經濟：2020 年 3 月提出新一期循環經濟行動計畫。
3. 建築裝修：這是綠色政綱的旗艦計畫之一。執委會主席馮德萊恩先前指出，歐洲的建築目前仍多以鋼筋和水泥為建造基礎，至少貢獻了 40% 的溫室

氣體！她認為歐盟需要開始思考使用自然建材，或以接近自然運作的原則，來打造永續建築，因此大力推廣一個包浩斯計畫（Bauhaus）（以簡潔、對稱、抽象、規則等概念發展出的建築設計）。

4. 零污染：目標是 2050 年實現「無污染的環境」。新措施包括建立「無毒環境」的化學策略。
5. 生態系統與生物多樣性：歐洲採取新措施解決生物多樣性喪失的主要驅動因素，包括解決土壤和水污染的措施，以及新的森林戰略。
6. 從農場到餐桌的策略：目的是建立「綠色、健康的農業」體系，包括大幅減少化學農藥、化肥和抗生素使用。「從農場到餐桌」及「生物多樣性策略」，兩者均強調整合性方法，以體現生態系統所提供的自然及服務價值，尤其在農業及糧食安全方面的重要性。
7. 運輸：目標在 2030 年代達到零排放。目標到 2025 年、在歐洲部署 100 萬個電動汽車公共充電點。「永續替代燃料」例如生物燃料和氫，將推廣於航空、航運和重型公路運輸等目前無法電氣化的產業中。
8. 經費：執委會提出了「公正轉型機制」，幫助最脆弱的地區和產業。
9. 研發與創新：「展望歐洲」（Horizon Europe）研究和創新計畫未來七年（2021~2027）的擬議預算為 1000 億歐元（2021 年最終通過預算為 955 億歐元），也將為綠色政綱做出貢獻。本文將於下個章節進一步介紹 Horizon Europe 計畫內容。
10. 對外關係：歐盟將動員外交資源支持綠色政綱。

綠色政綱中，特別針對循環經濟的內容有：

- 新的循環經濟行動計畫將於 2020 年 3 月提出。將包括一項規範：永續產品政策，減少材料消耗，並確保產品可重複使用和回收。
- 在新的循環經濟計畫下，將關注鋼鐵、水泥和紡織品等碳密集型產業。
- 2020 年所制訂新法規中，將使電池重複使用和回收。

2020 年 3 月：歐盟再次提出新一期「新的循環經濟行動計畫—為了一個更潔淨與有競爭力的歐洲」（New Circular Economy Action Plan - For a cleaner and more competitive Europe）

新循環經濟計畫將包括一項規範製造物品方法的永續產品政策，以減少原物料消耗，並確保產品可重複使用和回收。在新的循環經濟計畫下，鋼鐵、水泥和紡織品等碳密集型產業也將引起關注。預計將在 2030 年之前，利用循環經濟的產業發展提升歐盟 0.5% 的 GDP，並創造約 70 萬個就業機會，讓循環經濟未來成為產業的亮點與指標。

- 使永續產品成為歐盟的規範
- 授予消費者和公共購買者更多權力

- 確保減少浪費
- 使循環做法適用於不同人、不同地區和不同城市
- 優先領域有電子和 ICT、電池和車輛、包裝、塑料、紡織品、建築和建築物、食品、水和養分
- 領導全球在循環經濟方面的努力

最後，圖 4 臚列出歐盟重要綠色環境政策的推動進程。

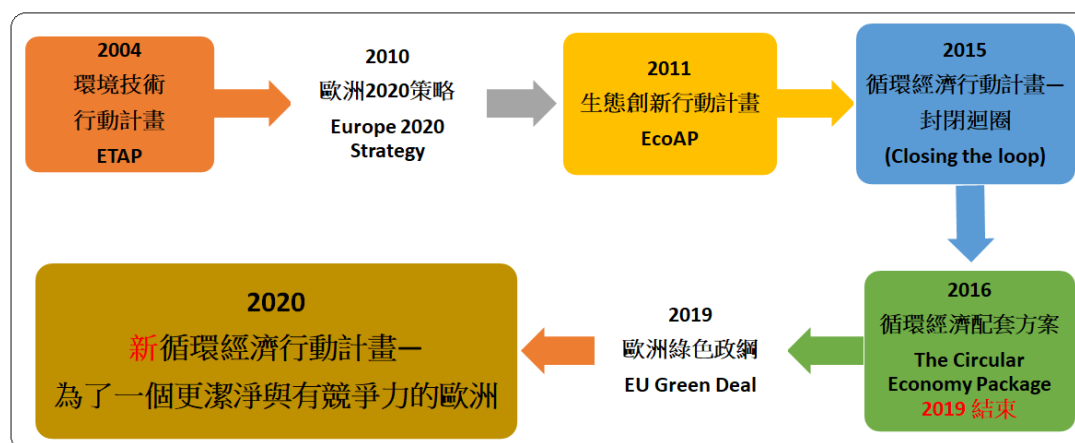


圖 4. 歐盟綠色政策推動進程一覽（自行整理）

1.2 歐盟大型科研架構計畫

為了讓歐洲科技站到世界頂端，並且打破公營、私營企業的交流障礙，增加雙方互動刺激產業技術創新，歐盟執委會過去幾十年規劃經費致力於增加歐盟地區的市場成長與工作機會，並減少政策上的繁文縟節，不讓創業家、科學家受制於冗長手續，而是將時間投資在更有價值的事情上，縮短創新進入市場的過程。所建立的歐盟大型科研架構計畫全名為：European Union's Fourth Framework programme，一般簡稱為 EU-FP，目前歐盟資料庫 Cordis 仍保留最早第三期(FP3)的資料。到 2014 年起，新一期計畫不再以 FP8 稱之，而是另外改名為 Horizon 2020，台灣一般稱為「展望 2020」。

台灣科技部為鼓勵國內研發團隊積極參與歐盟科研架構計畫，提升台灣創新研發能量，擴展國際學術視野，建立國際學術人脈並積極參與大型跨國多邊型研究案，從 FP7 起，在台灣各大學設置國家聯絡據點，協助國內學者相關合作諮詢、最新消息宣傳、歐方團隊媒合等服務，並提供計劃執行經費給參與的台灣團隊。



圖 5.歐盟 2007-2027 大型科研架構計畫（自行整理）

由圖 5 中可見歐盟投入的經費逐年遞增，但投件率也攀升，故通過率逐年降低。Horizon 2020 為延續 FP7 歐盟計畫之多邊合作科研計畫(FP8)，曾是歐盟規模最大的科研創新計畫，該計畫在 2014-2020 年這七年期間，投入除私人投資以外的、共計 770 億歐元的資金用於創新和研發。據報導，Horizon 2020 科研規劃幾乎囊括了歐盟所有科研項目，分基礎研究、應用技術和應對人類面臨的共同挑戰三大部分，其主要目的是整合歐盟各國的科研資源，提高科研效率，促進科技創新，推動經濟增長和增加就業。

2021 年原則上是新一期 Horizon Europe「展望歐洲」(FP9)啟動年，因受 COVID-19 疫情影響，原定 2020 年可定案的經費規劃，部分將改編列在解決疫情的急迫需要，此外 Horizon Europe 經費又因英國 2020 年正式脫歐而減少，原本粗估 2021-2027 年 7 年期可有 100 億歐元運用，直至 2021 年 5 月最終投票通過預算修正為 95.5 億歐元。Horizon Europe 旨在通過從衛生到民主的六種不同資金來源應對社會挑戰，五大任務如下：

- a. 包含社會移轉的氣候變遷調適
- b. 癌症
- c. 氣候中立及智慧城市
- d. 健康海洋/海岸及內陸水域
- e. 土壤健康及食物

Horizon Europe 還簡化了歐洲公私研發合作夥伴關係，並引入了研究任務，促進戰略領域的突破性發現和創新。該法律還規範了歐盟與第三國之間在研究和創新方面的國際合作，但要與希望參加歐盟研發計劃的每個國家達成個別交易。與英國，瑞士和以色列的談判正在進行中。其他國家，例如加拿大，日本或澳大

利亞也可以加入。

2021 年 6 月歐盟執委會通過了「展望歐洲」2021—2022 年首兩年主要工作計劃，擬投資 147 億歐元，資助氣候變化、數字化、環保、疫苗開發等領域。歐盟希望這些投資將有助於加速歐洲向更環保、數字化程度更高的歐洲轉型，並從新冠疫情中復甦，增強歐盟抵禦未來危機的能力。這 147 億歐元，約 58 億歐元將用於支持「歐洲綠色政綱」以及幫助歐盟到 2050 年成為世界上第一個氣候中和大陸的研究和創新。具體而言，這些資金將支持促進氣候變化科學進展的項目，以及減少溫室氣體排放和適應氣候變化的解決方案，以可持續和公平的方式促使歐洲加速向清潔能源過渡，幫助調整糧食系統，支持循環經濟和生物經濟，維持和加強生態系統中的自然碳匯，促進適應氣候變化。

最後，這項工作計劃將出資 19 億美元，幫助人們從新冠疫情中儘快恢復過來。根據 The Next Generation「下一代歐洲」計劃，這筆資金將有助於建設一個後新冠病毒時代的歐洲，能更好地應對當前和即將到來的挑戰。為此，Horizon Europe 計劃將資助使衛生系統現代化的項目，尤其是與疫苗開發有關的項目。

二、以歐盟需求為導向的創新合作循環經濟作法

2.1 循環經濟戰略研究與創新議程（SRIA）

循環經濟的推動，最基本的問題在於層級與範疇的界定；換言之，擬發展之循環經濟是基於哪一個層級的需求而出發的，所考慮的層級不同時，涉及的標的物、利害關係人及其權益關聯、溝通對象、以及發展動機自是不同，後續之重點課題的焦點和內容自當有別，更重要的是，實現循環經濟的實際效益也可能因層級之不同而異。

在地方、區域和國家層級的倡議和行動數量以倍數增加的情況下，要特別注意避免分散和重複。也因此，必須規劃一個具有協調一致有效的方法，搭配各類計畫主持人(Programme owners, POs)之間的可靠網絡，即以管理凝聚力基金的區域和國家計畫下計畫主持人為目標的系統啟用方法。

藉由一個新的計畫主持人平臺所管理的地區、國家及歐洲資金的策略性協調，來做為改善循環經濟籌資機制的基本推動力，進而加速循環經濟行動計畫以及中小企業綠色行動計畫。在循環經濟金融平臺的目標範圍內，歐洲投資銀行正在評估一個針對循環經濟計畫的新金融工具（基金）的發展。建立計畫主持人平臺和收集來自協調區域和國家計畫主持人，以及投入相關的其他主要利害關係人，以上種種，無疑是確保現有和未來的歐洲循環經濟融資必要的基礎。

根據初步的基準分析和利害關係人協商結果（包括工業界、中小企業、計畫主持人、研究技術組織和民間社會），再透過策略研究和創新議程 SRIA(Strategic Research and Innovation Agenda)，提出解決歐盟循環經濟發展的需要和優先事項，

將是組成計畫主持人平臺的初始建構要件。該平臺的設計將與上文提到的其他倡議具有內部聯繫和互補性（包括 ECESP、CE 財務平臺、EREK），以避免重複為原則，並發揮各自成果優勢，來提高最佳做法的效率和知識傳播。

本篇以 Horizon 2020 計畫-CICERONE 研究成果進行討論。CICERONE 為歐盟循環經濟主題之整合計畫，為有效的循環經濟規劃建立一個聯合平臺。共 14 個國家（台灣成功大學團隊唯一亞洲團隊），24 個計畫執行團隊參與。包括政府機構、研究 & 技術組織、民間社會、產業、創新中小企業、新創公司、城市和投資者。CICERONE 計畫歐方主持人 Ms. Cliona Howie 任職單位為歐盟 EIT Climate-KIC。Climate-KIC 是結合官方與企業資源以對抗氣候變遷的歐洲最大社群網絡，目標在透過教育與合作加速零碳經濟的過渡移轉。KIC 代表的是知識與創新社群(Knowledge and Innovation Community)。

該計畫彙集多位各類國際循環經濟計畫主持人、研究機構和其他利害關係人，為循環經濟研究整合分析，規劃建立一個交流平臺。未來平臺的優先設置和組織將由各循環經濟計畫主持人推動，以合作夥伴身份參與本計畫或透過利害關係人網絡建立合作關係。各國和各地區地域的多樣性將反映在合作關係中。這項工作將與循環經濟研究及技術組織密切合作進行，對於他們主要在創新科技方面的專長也有相當的助益。其中的協商機制還將確保所有利害關係人(民間社會、工業界、创新型中小企業、初創企業、城市、投資者、網路等)都能夠積極投入。

CICERONE 計畫將由初步的檢視評估工作，逐步深入地瞭解最新現況、相關計畫的利害關係人、現有的研究發展創新優先事項以及資金和法律機制。未來將制定一項優先順序排定方法，以協助目前成果的分析:諸如檢視共同作用、缺失部份和重複性，並制定改進的方法，對於最合適的最終版本將做為推動政策建議的基礎。後續也將按部就班依排定優先順序確切執行排定的工作。

整體來說，CICERONE 計畫包括建立策略研究和創新議程 (Strategic Research and Innovation Agenda, SRIA)，對有關循環經濟的聯合方案規劃事前影響評估，並制定政策工具組，以促進優先項目並促成決策者的意見採納。同時，也為各類循環經濟計畫主持人策劃平臺建立的基礎，並在現有情況中扮演其策略性角色。最終將發展出具體管理和可能的法律框架，及建立一個財務上可持續的模式。計畫要達成的關鍵目標是該平臺在 CICERONE 計畫執行結束後，仍會繼續維護提供資訊服務。

簡單來說，CICERONE 提出的循環經濟策略研究和創新議程(SRIA)，採取系統化的方法展開循環經濟相關研究和創新，做為歐盟地區關於循環經濟的策略指導文件，旨在解決歐盟地區相關問題,促進邁向循環經濟的移轉。

計畫路線圖

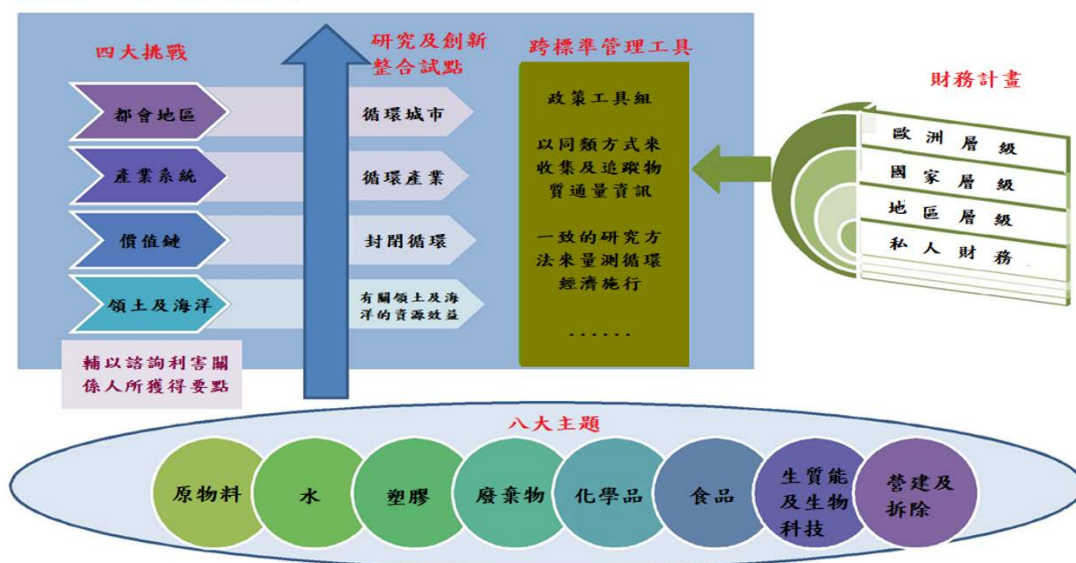


圖 6.SRIA 計畫路線圖 (自行整理)

圖 6 為 SRIA 計畫路線圖，構想係根據 2015 年頒佈的歐盟循環經濟行動計畫，優先挑選原物料、水、塑膠、廢棄物、化學品、食品、生質能及營建（2019 年綠色政綱列入營建類別後，SRIA 比照新增列此項），共計八大主題。考量各利害關係人著重點的差異，將其分為四個層級，稱為四大挑戰(challenge)。計畫將各挑戰著重的主題，結合成「創新領域」，並延伸為四個「聯合方案」(如圖 7)。



圖 7.SRIA 創新領域及聯合方案關聯圖 (自行整理)

計畫透過與利害關係人訪談、線上問卷、數場工作坊等，討論分析獲得下表重點總結：

表 1.四大挑戰與八大主題相互關聯性

挑戰	提出的重點
Urban areas 城市地區 (50 萬 ~150 萬人中型歐洲城市)	著重在城市的地理性、政治性及經濟的條件必須列入考量 廢棄物預防和管理；城市水資源管理與再利用；城市採礦；分享經濟；延長產品壽命-產品再利用；建設；食品廢棄物預防和穩定物價措施；公民意識 優先主題：水、塑膠、廢棄物、食品、建築
Industrial systems 產業系統	著重在重新思考生產過程及產品；數位科技；產業生產過程的去毒物化；重新思考整體價值鏈(從生態設計到廢棄物管理) 生態設計；產品和程序的生態創新；水循環；農產產業；冶金；製造；精益清潔技術；化學品；產業共生、商業模式 優先主題：原物料、水、廢棄物、食品、塑膠、化學物質、生物質、建築
Value chain 價值鏈	著重在國家層級的產品壽命結束及廢棄物管理；歐洲層級的設計階段及生產科技；資訊(與標準化、可追溯源頭及數位化有關)生態設計與產品生態創新；價值鏈溯源；可持續消費；重新使用；集合；回收；分享經濟 優先主題：原物料、塑膠、食品
Territory & sea 領土及海洋	著重在大型商業化、工業化、旅遊化的港口；港口及城市的相互關聯；國際貿易及廢棄物串流；港口的汙染行為；物流及資料管理 海洋垃圾；物質流動；垃圾填埋開採；可持續旅遊業 優先主題：原物料、水、塑膠、廢棄物、建築

由表 1 可看出塑膠主題均出現在所有挑戰類別中，據統計，歐洲國家有 46% 分類後的塑膠廢棄物被運往他處進行後續處理，但有多達 3 成以上的回收塑膠因無法處理，最終流入大海 (Breyer, 2020)。

挑戰 1 都會地區=>聯合方案 1：循環城市

目標 1:開發服務來滿足市民的需求並增加市民在廢棄物管理、城市裡回收及二手市場的參與度

目標 2:改善都會、郊區、有產業農業地區的資源管理(水及土壤)

挑戰 2 產業系統=>聯合方案 2：循環產業

目標 1:開發新技術、品質標準及分析法，用於新材料生產及資源廢棄物分類

目標 2:促成產業共生網絡並強化數位化，以便掌握產品、過程及系統的複雜性(例如:藉由開發及提升中小企業的夥伴關係，像是建立"利益聯盟")

目標 3:藉由提升新的/更好的設計及產品的使用，並且對已在循環中的材料有更好的再次使用，來喚起產業生態意識

目標 4:降低 100 家二氧化碳排放最汙染公司

挑戰 3 價值鏈=>聯合方案 3：封閉循環

目標 1:確保 Horizon Europe 的製造夥伴們有專注在循環經濟的重點優先項目

目標 2:提出在循環經濟環境下，對人類及環境健康的考量實質

目標 3:詳細說明並促成新政策及掌控資源管理系統草案的調適，加強利害關係人之間的合作及整體價值鏈的整合管理。並且透過逆向物流及提升年輕人之間的參與，來提升二次料的知識

挑戰 4 領土及海洋=>聯合方案 4：領土及海洋的資源效益

目標 1:設計及提升永續海上交通

目標 2:以長期的觀點，來提升港口及周圍地區有效資源使用

跨國聯合資金方案，是實現以高複製能力為特點的研究創新整合試點的一項寶貴工具，同時將實施四主要挑戰：城市地區、產業系統、價值鏈和領土及海洋。在利害關係人協商過程中可能會出現其他挑戰。對於每一個挑戰，考慮到循環經濟的優先主題，研究創新試點將先被界定。還將其擴展到所有挑戰的交叉治理試點（圖二中的一些示例）。各類計畫主持人將參與整個過程，以確定聯合籌資方案，充分涵蓋研究創新整合專案和貫穿各方面的治理工具。該專案將把國家和區域共同籌資方案的界定作為第一優先事項，以補充歐洲私人融資方案。

在 SRIA 的規劃下，應可比歐洲綠色政綱更能細部提出規劃及目標，SRIA 特別著重在 2015 年提出的歐盟循環經濟行動計畫中的化學品、生質能、塑膠、原物料及廢棄物的主題，雖然 2020 年提出的新歐盟循環經濟行動計畫，SRIA 沒有針對該行動計畫新增列的電子產品及紡織品的主題，但還是有與其關聯的活動。而今年啟動的 Horizon Europe 中，其五大任務中僅有「癌症」這項任務 SRIA 沒有涉獵到，其他任務均與 Horizon Europe 方向一致。

SRIA 也針對全球局勢變化，提出其關聯性，四大聯合方案針對 2020 年爆發的疫情提出政府應該注意的議題。

表 2.針對疫情四大聯合方案提出支注意議題

聯合方案	主題	注意議題
循環城市	化學品	• 城市廢水成分的變化（更高的表面活性劑濃度和化學副產品），因為更多地使用消毒劑，導致潛在的毒性以及對人類和水生環境的健康影響風險。
	水	• 由於需要經常清洗和消毒，用水量增加（額外消耗 25-96 升/天/人） • 由於熱水需求增加而造成的廢水 • 中水和雨水回用中的病毒傳播風險 • 病毒可能通過糞便、尿液和嘔吐物在污水中傳播（假

		設) • 在非法處置廢水中未經處理的污泥的領域需要謹慎關注處理廠
	廢棄物	• 家庭垃圾產生量增加，收集和分類不充分，廢棄物預防。生活垃圾衛生以防止污染
	塑膠	• 個人防護設備 (Personal Protective Equipment, PPE) 中的優質材料透過焚化的方式被浪費掉了。當前系統還意味著高管理成本、能源使用、高損耗優質材料。 • 循環熱處理（如氣化、熱解、消毒）技術相結合化學回收可以提供安全的處理和資源效率 = 經濟和環境雙贏
循環產業	化學品	• 由於貨物運送延遲、推遲學術研究和旅行限制/保持社交距離措施，延遲獲得 REACH 合規性和 ECHA 批准進入歐盟市場的化學品
	水	• 在流行病突發事件期間需要安全管理廢水、污水污泥和牲畜排放污水 • 必須謹慎管理廢水回用。絕不能在用於食品生產和其他相關應用的土地上重複使用或排放來自醫療機構的廢水
	廢棄物	• 應研究廢棄物收集、運輸、預處理和處理的各個階段，以評估運營商的任何風險，並開發創新技術以實現所有階段的安全管理。
	生質能	• 疫情導致對口罩和其他個人防護裝備的大量需求和需求，對廢棄物收集和管理造成巨大壓力
	原物料	• 提高關鍵供應鏈的彈性，以確保供應安全並減少中斷
	食品	• 從長遠來看，隨著糧食系統的不斷強化和生物多樣性的喪失，人畜共通疾病（疾病從動物傳染給人類）的發生可能性更大
封閉循環	化學品	• 自 2020 年 3 月以來，新的消毒劑生產商和供應商迅速湧入市場，加上歐盟市場上不合規的手部消毒劑數量增加（例如，缺乏危險標籤或所需的授權/許可）
	水	• 病毒（包括 SARS-CoV-2）在水環境中的持久性尚未得到很好的研究。已報告污水污泥中存在病毒，但沒有關於傳染性和持久性的數據 • 需要進一步研究在流行病危機期間實施循環技術和解決方案，並去除此類生物危害材料
	廢棄物	• 醫院/醫療廢棄物（例如一次性產品）包含無法回收的高質量材料 - 通常在醫院進行消毒，然後送往一般

領土及海洋的資源效益		廢棄物處理 • 循環解決方案：開發快速高效的消毒結合回收技術和技術，促進此類醫院/醫療廢棄物的安全循環系統
	原物料	• 提高關鍵供應鏈的彈性，以確保供應安全並減少中斷
	化學品	• 由於消毒劑、肥皂和其他清潔劑在戶外清潔的使用增加，而導致廢水質量下降和潛在危害的飲用水品質 • 在清潔等過程中限制灰塵和氣溶膠的措施，使用永續的清潔劑選擇有助於限制感染傳播
	水	• 不加區別地使用消毒劑（例如次氯酸鈉）可以對水生環境產生負面影響，加上非法廢水、未經處理的廢水和混合廢水的排放污水流放 • 遊輪上的中水回用和雨水收集由於病毒持續存在表面（例如陶瓷和塑料），可導致潛在的病毒傳播風險
	廢棄物及食品	• 醫療廢棄物普遍增加導致垃圾亂棄置和污染沿海地區和海洋，加劇了現有的海洋污染問題和微塑料 • 這也會影響海洋野生動物和海洋食物來源

目前歐洲集群、平台和倡議的相關治理和融資、籌資模式已經調查完畢，並將執行主軸整合起來，測試未來平台治理的進程及其可持續性和壽命。該平台的設計將與其他倡議具有內部聯繫和互補性，以避免重複為原則，並發揮各自成果優勢，來提高最佳做法的效率和知識傳播。

2.2 歐盟 Circular Cooperation Hub (EU CCH) 平台作法

CICERONE 主軸在透過系統分析，彙整過往研究成果與具體作為，進而廣泛地宣傳至決策者、產業界、公眾及利害關係人，最終建立一個歐洲協調整合平臺(如圖 8)，稱為 Circular Cooperation Hub (CCH)，它將確定循環經濟協調的研究創新的優先順序和途徑。這將導致更多的協同作用、結果分享、以及在研究和創新方面的公共投資回饋。該平臺將定期與利害關係人社群進行協商，邀請著名的研究組織，以便作出明智的決定，並執行議程中談定的挑戰性聯合行動。該平臺還將增加分享和促進研究成果，改善歐洲成員國和區域的公平競爭領域，並涉及青年、創意部門和資訊和通信技術。該平台儘可能適應歐盟各國，研究成果將對歐盟各國循環經濟治理方向，達到關鍵性的推動作用，加快歐洲循環經濟的變革。

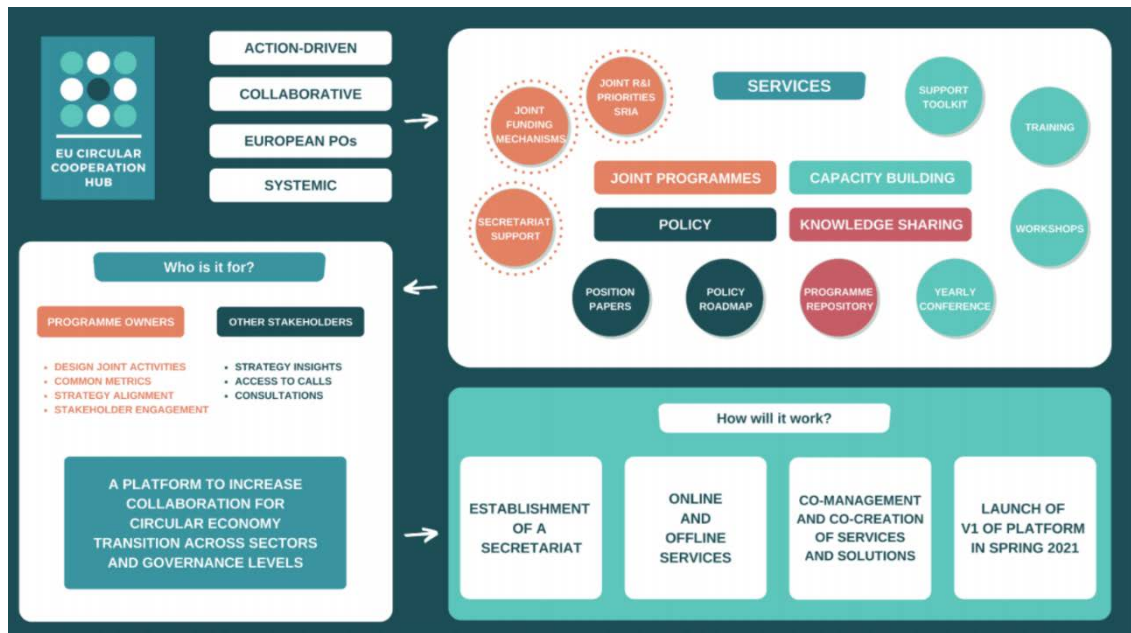


圖 8.歐盟 Circular Cooperation Hub (EU CCH)平台

(圖片來源 <https://cicerone-h2020.eu/wp-content/uploads/2021/02/EU-CCH-Concept.pdf>)



圖 9.EU CCH 提供服務類別

(圖片來源 <https://cicerone-h2020.eu/wp-content/uploads/2021/02/EU-CCH-Concept.pdf>)

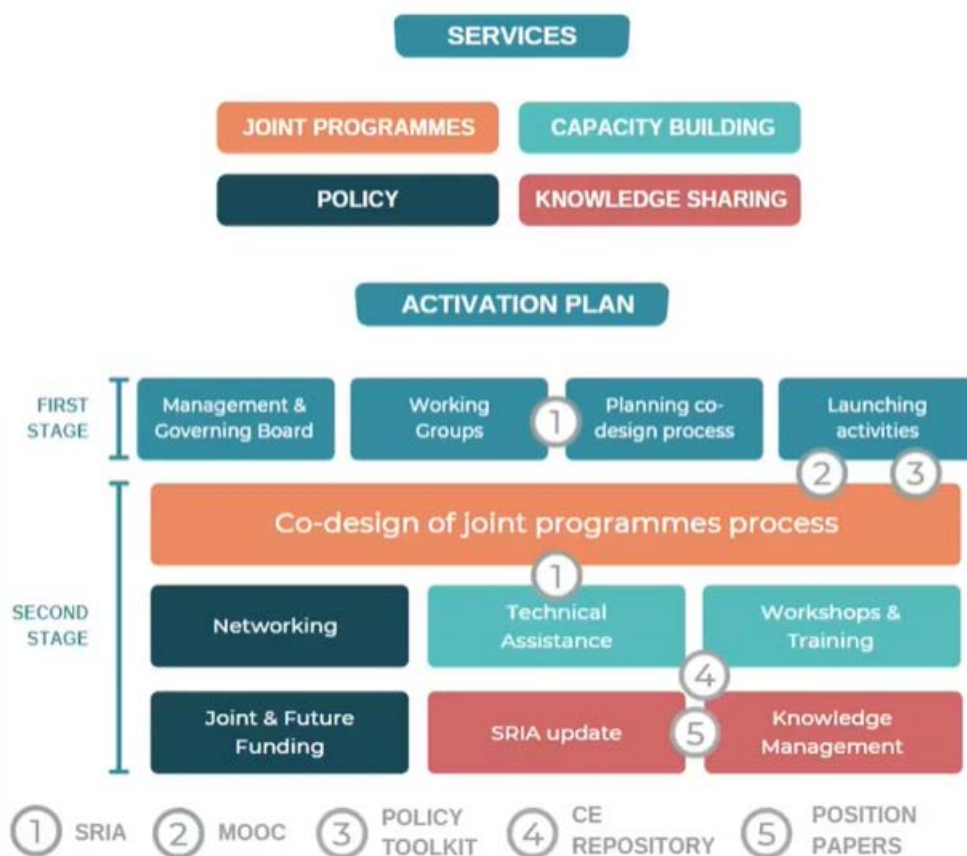


圖 10.EU CCH 服務啟動計畫

(圖片來源 <https://cicerone-h2020.eu/2021/03/04/call-for-declarations-of-intent-eu-circular-cooperation-hub/>)

CCH 有四個主要設計原則：1)行動為導向；2) 合作型；3) 歐洲計畫主持人；4) 系統性，強調為達到循環經濟的移轉，分散沒有整合的系統必不可行，唯有共同合作才能創造機會。

CCH 目前構想出的服務(如圖 9)是基於歐洲的計畫主持人們(programme owners, POs)會如何以合作型的模式採取行動，CCH 的服務要切中 POs 的需求，服務主要有四大類：1)聯合方案(出自 SRIA)；2)能量建立；3)政策；4)知識分享。而 CCH 主要的服務對象為 POs 及其他的利害關係人，要點緊扣「跨領域」、「合作型」，例如「策略性聯盟」，就可以涵蓋產業政策、氣候政策、環境政策、能源政策等，思考循環經濟政策是否能涵蓋各面向。

還有最重要的是，未來利用該平台的單位能最快組成合作團隊爭取歐盟執委會的經費來執行任務，例如復甦和韌性基金（Recovery and Resilience Facility，NextGenerationEU 的核心工具，共有 6,725 億歐元的貸款和贈款可用於支持成員國進行的改革和投資，可幫助歐盟從當前的危機中變得更強大、更具復原力。）

由圖 10 可見，CCH 啟動計畫分為兩個階段，並在不同階段內將 SRIA、磨課師課程、政策工具組、循環經濟資料庫及各階段報告安插於啟動計畫程序內。

預期的成果有:資源的流通、具制度化的過程及實際做法、更好的經費機會、新知識的應用,以及透過試驗法學習。開放性的諮詢服務或是資訊分享,將有助於各計畫主持人做重要決策參考。CCH 已於 2021 年 3 月末啟動,並尋求計畫所有者(即循環經濟計劃的資助者)表達參與該平台未來合作活動的興趣。

三、結果與討論

歐盟從生態創新行動開始,就已經發現相關的研究過於分散,各計畫主持人也有困難找到目標一致的團隊,導致研究經費運用不符效益,也因此,歐盟在近期鼓勵以平台合作的方式,來整合跨領域、跨文化、跨國境的研究資訊。目前 CCH 平台已獲歐洲 32 個機構同意簽屬意向書。

歐盟循環經濟計畫 CICERONE,企圖為有效的循環經濟規劃建立一個聯合平臺,知識傳播即為其中重要的工作,可為台灣在推展循環經濟提供策略的參考,循環經濟專法的進程,亦是國家層面產業成敗的關鍵之一,也因此各國競爭發展。現行歐盟對於循環經濟之相關政策擬定與法制配套等措施已趨成熟,台灣目前主要以「廢棄物清理法」及「資源回收再利用法」作為法源基礎,法律管制的精神仍依循舊有的線性思維。降低廢棄物的產生固然重要,但廢棄物實乃錯置的資源,該如何將垃圾轉化為黃金,變成可再利用的二次原料或使用材料,對於有限的地球資源來說日趨重要。

目前德國、法國、日本及中國等國家皆已訂定循環經濟專法,如德國《循環經濟和廢棄物處置法》、日本《促進循環型社會基本法》、中國《中華人民共和國循環經濟促進法》,運用法制規範導引綠色經濟轉型。台灣當然也不落人後,行政院於 2018 年 12 月通過「循環經濟推動方案」,由經濟部主責執行,並成立「循環經濟推動辦公室」,整合行政院環保署、農業委員會、內政部等各部會資源,由台糖、台灣中油、中國鋼鐵等大公司帶頭,結合各產業及創新設計服務公司,共同推動循環經濟,創造亮點案例。環保署也宣布「資源循環辦公室」與「氣候變遷辦公室」於今年 7 月 1 日正式成立,將從全面盤點政策法規、整合行政資源等,有效推動資源循環與溫室氣體減量措施,要讓未來的台灣以更永續的面貌參與國際,邁向資源全循環、落實淨零轉型。由此都可看出跨部會的合作平台,整合各單位的研究資源,將可完善的規劃綱領,創造出更大的效益。

四、結論

全球要邁向循環經濟的原因,乃是過往全球經濟的增長均是以自然資本的耗竭為代價。面對全球環境劇烈變遷,如何回應當前環境議題是非常重要的課題,舉凡能源的有效利用、新型生產技術開發、二氧化碳減量、水資源管理與運用、廢棄物回收再利用、綠建築與綠建材、環境污染整治、市場創新、政策創新等等,歐盟一直以來都是這個領域的先鋒者,除了研究上的創新,在相關政策推動更是領先全球。回顧聯合國或者歐盟早期的努力,生態創新(eco-innovation)直接回應上述議題的解答,歐盟各國無不努力投入生態創新的研發與生產,也有許多成功

的案例產生，而近年來由生態創新移轉至循環經濟的過程中，最關鍵的是如何確保各利害關係人，能夠獲得正確且有價值的資訊，以作為後續研發或政策擬定的重要參考。因此將資訊以有條理、有系統、以及有友善使用介面的媒介來傳播，是歐盟目前最極力推動的重點。

循環經濟的相關研究快速發展，不僅贏得產官學研相關部門的重視，也驅使業界開創新的商業模式，構思創新產品設計，採用潔淨生產技術，同時也強化了消費者轉向負責任的消費型態。循環經濟的目的並不僅僅在資源脫鉤和環境的衝擊脫鉤，更要建立在 5R(Reduce, Reuse, Repair, Refuse, Recycle)的基礎上，提升能源資源效率，應用潔淨生產技術，鼓勵負責任的消費型態，藉以緩和地球資源耗損與環境負荷。

五、致謝

本研究感謝科技部在經費之支助(編號：MOST 107-2923-I-006 -001 -MY3)

六、參考文獻

1. http://ec.europa.eu/research/environment/policy/etap_en.htm
2. http://ec.europa.eu/environment/etap/inaction/pdfs/1_en_act_part1_v5.pdf
3. http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/flagship-initiatives/index_en.htm
4. EC (2011) Communication from the Commission “Innovation for a sustainable Future - The Eco-innovation Action Plan (Eco-AP), available on http://ec.europa.eu/environment/etap/inaction/pdfs/1_en_act_part1_v5.pdf
5. <http://database.eco-innovation.eu>
6. <http://www.ecopol-project.eu/>
7. <http://www.eco-innovation.eu/>
8. <http://www.innovationseeds.eu/>
9. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/_en
10. https://ec.europa.eu/environment/strategy_en
11. 陳文姿(2019),「瞄準 2050 碳中和 歐盟綠色政綱出爐 強調「公正轉型」值得台灣借鏡」,環境資訊中心 <https://e-info.org.tw/node/221990>. Retrieval Date: 2021/06/25
12. 郭映庭(2020),「歐盟綠色政綱」行動路線圖重點：碳關稅、能源稅改、綠色轉型融資、氣候盟約,環境資訊中心 <https://e-info.org.tw/node/222594>. Retrieval Date: 2021/06/01.
13. EU. (2019). “The European Green Deal sets out how to make Europe the first climate-neutral continent by 2050, boosting the economy, improving people's health and quality of life, caring for nature, and leaving no one behind.” https://ec.europa.eu/neighbourhood-enlargement/news_corner/news/european-green-deal-sets-out-how-make-europe-first-climate-neutral-continent-2050_en.

Retrieval Date: 2021/06/01.

14. https://europa.eu/new-european-bauhaus/index_en
15. Mehreen Khan, "EU unveils plan to be carbon neutral by 2050." Financial Times (2019/12/11) . <https://insideclimatenews.org/news/11122019/europe-green-deal-plan-carbon-neutral-2050-border-adjustment-tax-just-transition/>. Retrieval Date: 2021/05/30.
16. <https://cordis.europa.eu/en>
17. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
18. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652000/EPRS_BRI\(2020\)652000_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652000/EPRS_BRI(2020)652000_EN.pdf)
19. Breyer, M., (2020) "Europe's Plastic Recycling is Getting Dumped in the Ocean," Treegugger, <https://www.treehugger.com/europe-s-plastic-recycling-is-getting-dumped-in-the-ocean-5070465>(accessed 16-07-2020)
20. Fetting, C. (2020). "The European Green Deal", ESDN Report, December 2020, ESDN Office, Vienna.
21. <http://cicerone-h2020.eu/context/>
22. <https://circularcooperationhub.eu/home>
23. <https://eufundingoverview.be/funding/recovery-and-resilience-facility>
24. 循環經濟推動方案 (2019) 行政院
25. World Summit on Sustainable Development, Rio+10, 2002

2021 徵稿說明

下列專欄，歡迎大家耕耘：

1. 專題研究--分為五大方向，分別為「能源發展與應用」、「動力設施與燃燒」、「防火與消防」、「燃燒科技發展」、「空污控制與生物效應」。
2. 燃燒科技交流--燃燒應用技術、新技術或新產品介紹、疑難討論與經驗交流、國內外相關研究機構介紹、國內外相關學會、機構、團體之動態等，相關研討會論文摘要或全文、燃燒現象照片等。
3. 燃燒論壇--開放討論基本燃燒現象、基本燃燒原理及燃燒詞彙定義等。
4. 即時資訊--政府相關政策、國內外相關科技資訊、研討會或相關活動訊息等即時之動態資訊。能源委員會、環保署、科技部、消防署等相關機構委託執行計畫之研究成果介紹等。
5. 其他--讀者意見迴響交流與燃燒相關之其他任何訊息或稿件。

來稿請寄本會【電子信箱】或

【71070 台南市永康區崑大路 195 號，機械工程系 侯順雄 教授 收

E-mail：sshou@mail.ksu.edu.tw；Tel：(06) 2727175 ext. 253】

投稿須知

1. 文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文文字之字型應為標楷體字，英文文字字型應為Times New Rome。
2. 題目：應力求簡潔且能充分表達論文之重要概念，請附中、英文題目各一式，英文題目請附於中文題目之後。
3. 作者：請附上中、英文之作者姓名、服務單位及職稱。作者之服務單位及職稱請以附註之方式書寫同一頁之末端，若作者為兩個人以上者，請以不同之符號標示之。
4. 摘要：以簡明扼要之方式表達論文之內容。無論以中文或英文撰寫，一律附上500 字以內之中、英文摘要各一份。英文摘要請置於中文摘要之後。
5. 字型大小：題目以16pt 黑體字，摘要、前言、文章內容之標題請以14pt 黑體字，作者介紹及文章內容以12pt 標楷體字書寫之。
6. 關鍵字：中英對照關鍵字，最多以5 個為限。
7. 圖表說明：圖說與表說應統一使用中文或英文，圖標題應在圖之下方；表標題應在表之上方。
8. 參考文獻：（列於正文之後，書寫時請依於文章中出現之先後順序排列）Combustion Quarterly Vol. 52 17 No. 2 May 2008
- (1) 書籍：作者，書名，出版社，出版地，頁數，年。
中文如：柯清水，石油化學概論，正文書局，臺北，pp. 183-191，1992。
英文如：Owen K, Coley T. Automotive Fuel Reference Book, 2nd ed., Society of Automotive Engineers, pp. 551-587, 1997.

- (2) 期刊論文：作者，篇名，期刊名稱，年，卷期，頁數。
中文如：葉江榮，鍋爐高溫腐蝕，*台電工程月刊*，第276期，pp. 10-18，1979。
英文如：Zhen, H. S., Leung, C. W. and Cheung, C. S., Emission of impinging swirling and non-swirling inverse diffusion flames, *Applied Energy*, Vol. 88, pp.1629–1634, 2011.
- (3) 研討會：作者，篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。
中文如：萬皓鵬，汽電共生系統效率提升技術，*2002 汽電共生系統技術研討會論文集*，經濟部能源委員會，pp. 84-91，91年4月。
英文如：Law CK. Dynamics of Stretched Flames, Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1381-1402, 1988.

燃燒季刊 2021年8月

發行單位：中華民國燃燒學會

發行人：楊授印

總編輯：侯順雄

副總編輯：江鴻龍、陳榮洪、蔡匡忠、蔡建雄（依姓氏筆畫排列）

編輯：王派毅、石心怡、朱力民、吳志勇、吳明勳、吳耿東、吳展維
吳澤松、李灝銘、李約亨、杜憲文、林洸銓、林育立、洪榮芳
許聖彥、郭振坤、劉永章、陳維新、楊授印、蔡欣倫、蘇崇輝
（依姓氏筆畫排列）

秘書：江佩蓉

發行地址：54041南投縣南投市文獻路2號
工業技術研究院中分院

電話：(049) 2345290

中華民國八十一年十二月創刊

中華民國一百一十年八月出版

局版台誌號第玖玖零捌號