

知識物件上傳表

計畫名稱：114 年度能源先期管理制度執行、查核與研究 (1/3)

上傳主題：熱回收應用與混氫、混氨發電機組試驗介紹分析

提報機構：台灣經濟研究院

提報時間：114 年 3 月 24 日

與計畫相關	1. <input checked="" type="checkbox"/> 是 2. <input type="checkbox"/> 否
國別	1. <input checked="" type="checkbox"/> 國內 2. <input type="checkbox"/> 國外：美、日、韓、新、中、德
能源業務	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 能源政策(包含政策工具及碳交易、碳稅等) <input type="checkbox"/> 2. 石油及瓦斯 <input type="checkbox"/> 3. 電力及煤碳(包含電力供應、輸配、煤炭、核能等) <input type="checkbox"/> 4. 新及再生能源 <input type="checkbox"/> 5. 節約能源(包含工業、住商、運輸等部門) <input type="checkbox"/> 6. 其他
能源領域	<input type="checkbox"/> 1. 能源總體政策與法規 <input type="checkbox"/> 2. 能源安全 <input type="checkbox"/> 3. 能源供需 <input type="checkbox"/> 4. 能源環境 <input type="checkbox"/> 5. 能源價格 <input type="checkbox"/> 6. 能源經濟 <input type="checkbox"/> 7. 能源科技 <input checked="" type="checkbox"/> 8. 能源產業 <input checked="" type="checkbox"/> 9. 能源措施 <input type="checkbox"/> 10. 能源推廣 <input type="checkbox"/> 11. 能源統計 <input type="checkbox"/> 12. 國際合作
決策知識類別	<input type="checkbox"/> 1. 建言 (策略、政策、措施、法規) <input checked="" type="checkbox"/> 2. 評析(先進技術或方法、策略、政策、措施、法規) <input type="checkbox"/> 3. 標竿及統計數據：技術或方法、產業、市場等趨勢分析 <input type="checkbox"/> 4. 其他：

重點摘述	<p>全球氣候的異常變遷為現今世界所面臨的最大挑戰，其帶來的影響日益明顯且深遠，相關極端氣候事件頻率的增加，如：颶風、洪水、乾旱和高溫等，這些變化不僅對自然資源產生了直接影響，更對人類的生活、安全與糧食帶來相當大的動盪，同時亦對經濟與社會穩定帶來了壓力。在這樣的危機下，如何減少二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)等相關溫室氣體的排放與其所帶來的氣候衝擊則為首要需解決之課題，而作為全球溫室氣體排放的主要來源之一的製造部門，更是扮演著至關重要的角色。因此，本文將針對熱回收技術的發展及原理應用進行相關的分析介紹，另外分享有關使用石化燃料的發電機組混氫、混氨燃燒的試驗結果，以期未來相關產業可持續於此試驗結果為基礎提升相關技術。</p>
詳細說明	<p>一. 前言</p> <p>近一、二十年來，全球都開始面臨了氣溫上升，氣候異常的氣候變遷的問題，而且是問題愈來愈加嚴重。因此全球各國也都開始重視此問題，並著手謀求解決。因此在 2016 年《巴黎協定》提出了，為確保全球平均升溫在 2°C 以內，2030 年減碳 50%，2050 年達到碳中和成為國際共識。為實踐這個目標而與世界同步，因此我國政府也於 2022 年 3 月公布了《2050 年淨零排放路徑及策略說明》，而就電力產業，就是朝低碳、零碳的方向發展，回顧自 1960 年左右開始，隨著產業的發展，因此也開發了大型的火力發電設備(廠)，提供產業及民生的電力需求。在 60 年代，由於油價低廉，因此業大量地使用重油燃料的 PC 鍋爐(燃煤鍋爐)作為動力的來源。但接著在 70 年代，國際發生了兩次能源危機，因此油價也大幅上揚，所以業者紛紛地改採用粉煤作為 PC 鍋爐作為動力的來源，形成一股以煤炭作為主流的發電趨勢，伴隨產業的蓬勃發展，低廉的煤炭為國家社會的經濟發展起了非常大的貢獻；但也同時帶來了相當的環境汙染，因此，改善空汙的環保議題應運而生，亦同時引起了社會對空汙改善的重視，希望在經濟發展的同時也可以降低空氣汙染的排放。</p> <p>於 20 世紀末，社會大眾也體認到雖然較為廉價的燃煤機組可以獲得較高酬的利潤，但是也會帶給環境上負面的影響，包括了空氣汙染及二氧化碳的排放。因此，為因應環保議題，電廠開始改採用天然氣為燃料的複循環發電機組，雖然在</p>

當時天然氣的價格相當高，而其效率也比燃煤蒸汽輪機的機組高得不多，但是希望在環境因素以及經濟因素兩者之間可以得到平衡發展。特別是發電產業的設備，其投資成本相當大，回收年限甚長，更需要兼容並蓄穩定的推展。

然而隨著天然氣的開採技術的進步，使得天然氣價格大幅降低，而複循環發電的技術亦相對進步下，使得包括氣渦輪機(GT)熱回收鍋爐及蒸汽輪機(ST)之效率顯著的提高，一組大型的複循環發電機組(2GT+1ST)其容量約可高達 1300MW，已經比一台大型的超臨界燃煤機組的容量更大，效率也增加了約 15~20%，且空污與二氧化碳的排放量僅為燃煤機組的大約一半而已，可說集所有的優點，因此在邁向碳中和的過程，高效能低碳的天然氣複循環機組就受到國際上絕大多數的使用者喜愛，也可以說是低碳發電產業的重要角色。而複循環發電設備中，熱回收鍋爐就擔任了一個至關重要的角色。在目前運轉中還未達到汰換更新年限的發電設備，包括燃煤的超臨界機組，以及天然氣複循環機組，前者因為燃燒煤炭，因此碳排放量較高，而後者則因為是較早期設計的機組設備，發電效率較低，與目前的機組相比約有 15~20% 的差異，由於發電業之碳排量相當大，因此這些仍運轉中的機組設備亦需要利用可能的技術加以改善，以達到減碳的目標，目前包括天然氣機組的注氫與燃煤機組的注氫，皆是值得我們關注的可行技術。

二. 熱回收鍋爐(HRSG) 發展與應用

1. 熱回收鍋爐

熱回收鍋爐係利用氣渦輪機或是燃氣(油)引擎發電作功之後所排放出來含有大量熱能的廢氣加以吸收利用，然後將鍋爐中的水(爐)管加熱之後變成高溫的蒸汽(或是熱水)，而高溫的蒸汽被利用來推動蒸汽輪機作功帶動發電機發電，如此的發電方式包括了前段的氣渦輪機-布雷登循環(Brayton Cycle)以及後段的蒸汽輪機-朗肯循環(Rankine Cycle)一般稱為複循環發電，這種發電方式利用了後段的熱回收鍋爐及蒸汽輪機來發電，可以使前段單循環之氣渦輪機發電發電效率提高約 5% 左右，至於在汽電共生機組其前段的氣渦輪機或燃氣(油)發電機再加上後段的熱回收鍋爐來產生製程蒸汽或熱水，整體的熱效率會達到 80~90% 左右，可以說不論是複循環發電或汽電共生機組的運用，皆透過熱回收鍋爐設備充分在利用熱能後，大大提高了發電效率或熱效率，不但減少空污的排放，亦減少製程二氧化碳的排放，對於節能減碳發揮相當大的功效，值得業界的關注。

(1) 熱回收鍋爐之分類

熱回收鍋爐依照氣渦輪機設計之排放廢氣流向，可區分為垂直式

熱回收鍋爐(Vertical HRSG)與水平式熱回收鍋爐(Horizontal HRSG)兩種類別：

a. 垂直式熱回收鍋爐(Vertical HRSG)

垂直式的設計是將鍋爐管線做水平配置，使氣渦輪的燃燒廢氣由下往上流動，這種設計所佔用的設備面積較小，對於廠域比較窄小者會比較合適，且其可藉由重力來排除冷凝物，減少管路內部的積水，有利於自然對流。

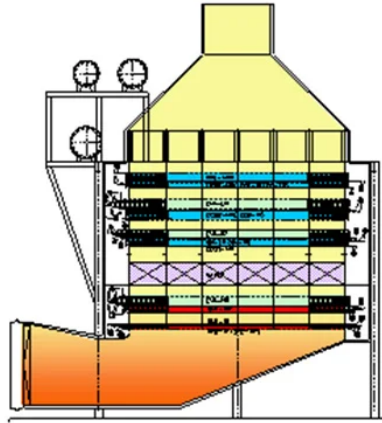


圖 1 垂直式熱回收鍋爐(Vertical HRSG)示意圖

b. 水平式熱回收鍋爐(Horizontal HRSG)

水平式的設計是將鍋爐爐管作垂直配置，使氣渦輪的燃燒廢氣以水平方式流動，這種設計所佔用的設備面積相對垂直式需要較大的爐管空間，但因空間需求較大，故於設備的工程施工上較為簡單及方便，而鍋爐設備整體的維護、檢查和保養等較為容易。

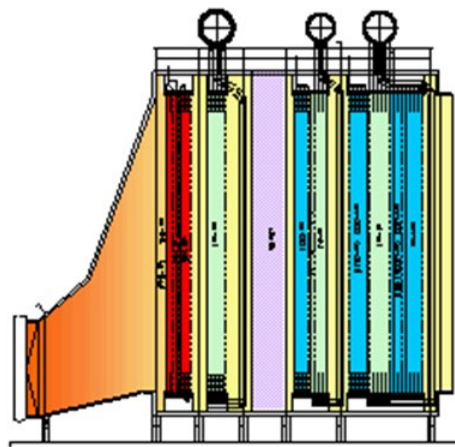


圖 2 水平式熱回收鍋爐(Horizontal HRSG)示意圖

綜觀兩種的設計方式，雖各自具有其特色及優點，但於選擇上除

(2) 熱回收鍋爐的蒸汽壓力分類

- 相對汽鼓式可有更好的負載變化，提高機組的運轉效率。
- 可提高高壓蒸汽的壓力，因此而隨之提高複循環機組的效率。
- 機組在變載運轉時，可以有較佳的穩定快速反應。
- 可以改善鍋爐高壓過熱器之金屬疲勞現象。
- 由於不需要高壓汽鼓，因此可以免除鍋爐之爐水連續沖放的需求，減少爐水沖放的熱能損失，以提升整體熱效率，但對於鍋爐水質之

品質要求相對較高。

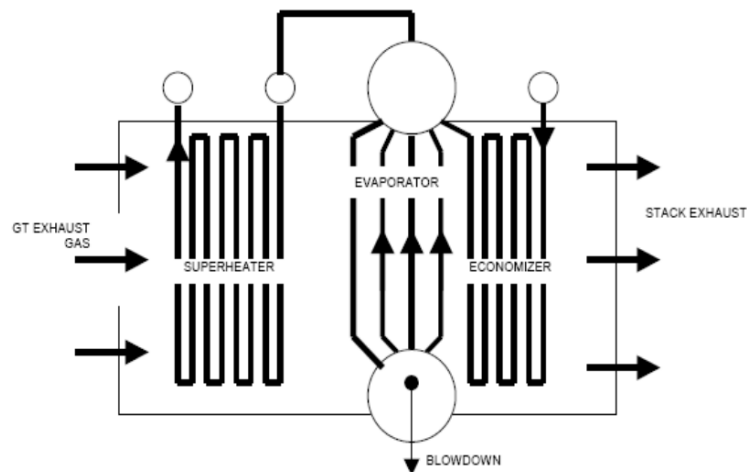


圖 4 汽鼓式 HRSG

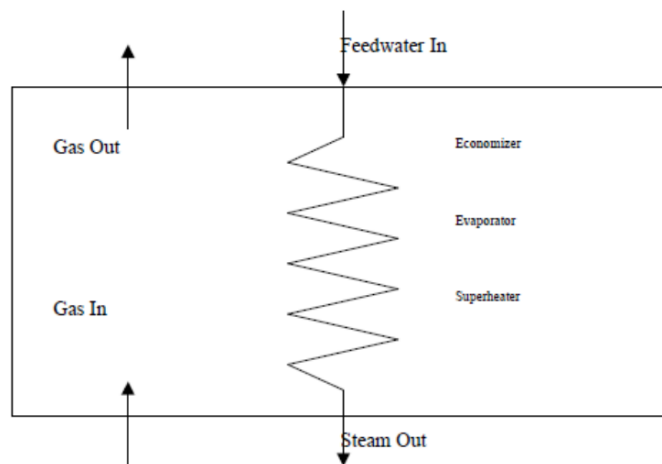


圖 4 貫流式 HRSG

2. 熱回收鍋爐之應用(複循環發電與汽電共生設備)

(1) 複循環發電機

複循環發電其包含了前段的氣渦輪機發電以及後段的熱回收鍋爐、蒸汽輪機發電的複合組合。於早期年代技術，氣渦輪機發電由於進氣溫度低，所以排氣溫度亦較低，所以僅單機運轉發電，未將氣渦輪機所排放的廢熱來加以利用。然而隨著氣渦輪機技術的演進，不僅容量逐漸增加，進氣溫度亦逐漸提升，故而引進了廢熱的利用技術，開發出熱回收鍋爐。以世界三大製造廠之一的日本三菱公司為例，其在 1961 年與美國西屋公司技術合作，於 1963 年開發出 730°C 級的 MW-171 氣渦輪機，接著於 1976 年開發出了 1000°C 級的 MW-171B 產品，另於 1984 年開發出進氣溫度達 1150°C 級的 MW-171D 產品，為當時世界第一台最高溫進氣的氣渦輪機組。在相關的技術經驗背景下，後續

於 1986 年自行獨立開發出 1250℃ 級的 MF-111 氣渦輪機，並停止了與西屋公司的技術夥伴關係，在掌握相關關鍵技術知識下，爾後更開發出更多容量更大，效率更佳的氣渦輪機設備，但也因進氣溫度的提升而有了熱回收的利用價值，而逐步發展出複循環的發電設備機組。

表 1 複循環機組之發展演變

	501A	501B	501D	501F	501G	501J	501J AC
商轉年分	1968	1973	1976~1 990	1992	1997	2010	
GT 單機容量	45	80	95~120	185.4	267.5	330	425
GT 進口溫度 (°C)	900	1000	1100	1400	1500	1600	1600
GT 排氣溫度 (°C)	474	486	513~58 4	613	601	635	649
GT(單機)效 率(%) (LHV)	27.1	29.4	31.2~3 4.5	37	39.1	42.1	44
複循環效率 (%) (LHV)	37.9	46.4	46.4~4 8.6	57.3	58.6	62.2	64.2

由表 1 可看出在複循環應用初期，氣渦輪機之 501A 的複循環機組效率較低，系因為由於氣渦輪機的進氣溫度 900℃ 至排氣溫度約 474℃ 其氣渦輪機的效率僅為 27.1%，故其熱回收效果有限，所以整體的複循環機組效率亦隨之較低，僅有 37.9%，就複循環後段(HRSG+ST)所增加的發電效率僅提升了 10.8%，整體效率未能達到 40%，由此可觀察到因進氣溫度較低，氣渦輪機排放廢氣中的熱能可利用率亦有限，故隨著技術發展於 1990 年代初期的氣渦輪機組 501D 級，其進氣溫度已可達約 1100℃，排氣溫度約為 540℃ 左右，但整體的複循環機組效率僅約 46~48% 左右，就複循環後段的部分僅提升約 17.4% 左右，仍未有明顯的效率提升。直至 1990 年代後期，因為天然氣開始被大量的開發使用，使得氣渦輪機的開發技術有了大幅的提升，進而陸續發開出如 501F、501G、501J 之相關設備，而氣渦輪機的進氣溫度也被提高至 1400~1600℃，排氣溫度來到 630~650℃ 之間，使得後段的熱回收鍋爐與蒸汽輪機可有效的回收再利用前段氣渦輪機之排放廢熱，同時，也因前段氣渦輪機的技术進步，其發電效率甚至可

達 44%，進而提高了整體複循環發電機組的發電效率，配合熱回收的利用使得整體複循環機組效率可達到約 64.2% 的效率表現，已有明顯的大幅進步，其主要便是熱回收技術與效能的提升才得以有如此高效率的表現，其對於發電產業而言發揮了很大的節能減碳效果。目前已有相關廠商已在開發進氣溫度 1700°C 級的氣渦輪機組設備，將期望可更有效提升複循環機組之發電效率，亦可更進一步的減低排碳，如圖 5、圖 6 所示氣渦輪機的進氣溫度提升將可減少二氧化碳的排放，同時提升機組發電效率。

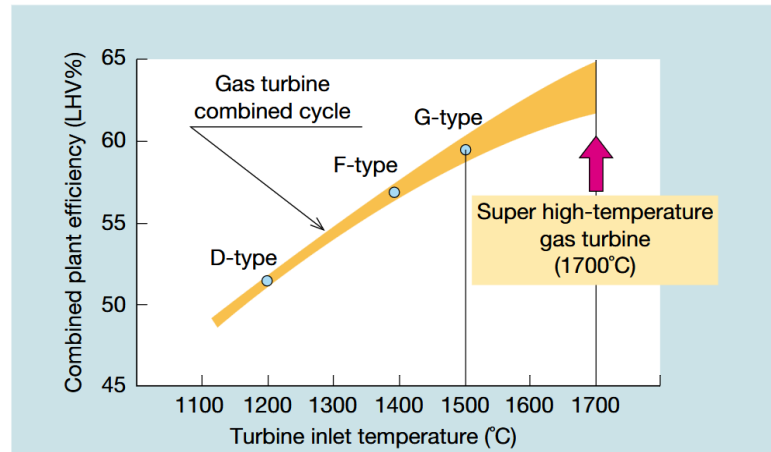


圖 5 進氣溫度與複循環機組效率關係

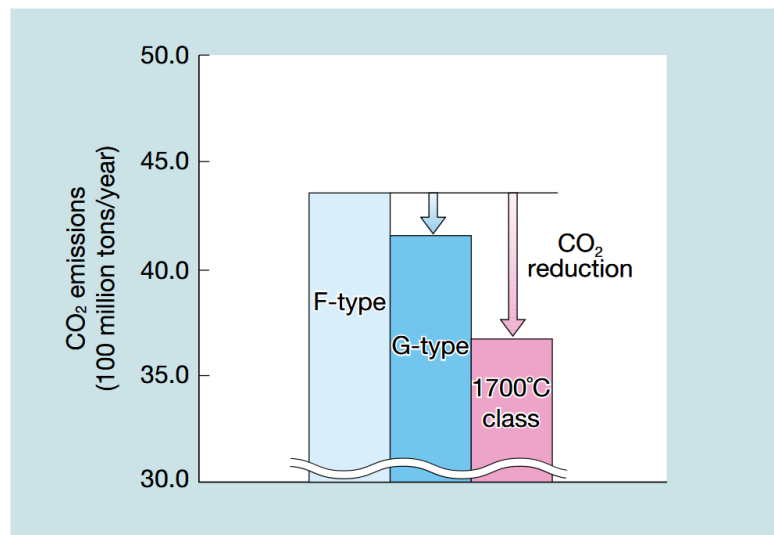


圖 6 進氣溫度與複循環機組效率碳排關係

(2) 汽電共生機組

汽電共生系統以往都是利用粉煤鍋爐產生之蒸汽推動蒸汽輪機，使其一方面可產生電力外，另一方面則利用汽輪機抽氣段依照廠內需求抽出蒸汽來提供工廠運作所需的製程蒸汽。然而在面臨節能減碳的趨勢下，利用燃煤的粉煤鍋爐亦與發電機組同樣需要轉型以適環

保節能的發展。汽電共生主要是以工廠在生產過程中所需要的製程蒸汽為主而產製蒸汽，並同時將多餘的蒸汽轉產生電力以達到能量的利用，故其與以電力生產為主的發電複循環機組規模容量將大不相同，而是以兼顧製程蒸汽需求與生產電力平衡下為運轉目標，其相對較著重於整體熱效率的利用，以目前的汽電共生系統而言，蒸汽需求規模較大的較合適以氣渦輪機搭配一部熱回收鍋爐來進行規劃，其發電容量約可達 30~40MW 左右。

三. 注氫或注氨之混燒發電試驗現況分析

在減少碳排方面，發電業者除一方面努力提高機組發電效率以減少燃料的使用量進而減少二氧化碳排放外，如何利用其他替代燃料來減少石化燃料的使用更是需積極發展探討的方向，目前全世界的天然氣氣渦輪機製造商(如：日本三菱、美國奇異、德國西門子)皆致力於發展氣渦輪機的混氫或是鍋爐混氨的燃燒技術，透過減少天然氣等石化燃料的使用量，可更直接在發電過程中更能有效的減少二氧化碳的排放量。台電公司擔負我國最重要的電力生產工作，亦積極的致力於混氫或混氨的燃燒技術發展，引進相關的先進設備與可行技術以達到減碳的目標，因此，在 2022 年 4 月與氣渦輪機製造商-西門子公司簽訂了「混氫技術合作備忘錄(MOU)」，目標於 2024 年完成興達電廠氣渦輪機組 GT3-3 的混氫 5%發電示範，目前該試驗已經達成混氫 5%燃燒滿載發電。而在混氨發電方面，台電則於 2022 年 11 月與日本三菱重工業集團簽署「燃煤混氨合作備忘錄(MOU)」計畫於林口電廠進行燃煤混氨 5%的發電示範，可望達到每年減少 9000 噸的碳排放量，並於 2024 年 2 月攜手日本 IHI 與住友商事簽署「大林電廠燃煤混氨技術合作備忘錄(MOU)」推動混氨發電計畫，計畫於 2030 年達成 5%混氨發電示範。三菱公司和 IHI 公司在混安減碳的方法並不相同，三菱所使用的方始是類似燃煤鍋爐所使用之降低 NO_x 排放的燃燒調整，而 IHI 公司則是在燃煤之燃燒器改新加氨氣噴嘴來混入氨氣，亦即是同時混氨與煤粉的燃燒氣，算是一種新設可燃燒氨氣與煤的燃燒氣。

1. 興達電廠混氫 5%燃燒試驗

本次試驗主要是藉由實際混氫燃燒來驗證發電過程中，二氧化碳與 NO_x 的排放濃度與原來專燃天然氣發電的差異情形，以供未來之混氨發電檢討改進，並藉以提高混氫的比例。試驗前的準備主要是進行卸氫端的管閥設備改善，以符合氫氣燃燒之材質要求，其氫氣油槽車卸載後配合相關壓力與溫度由管路送至與天然氣混合設備，再將混合氣體送至氣渦輪機組燃燒系統進行燃燒運轉，氣體壓力約 19kg/cm² 以配合興達機組，其試驗結果如下表所示：

表 2 興達電廠氣渦輪機 5%混氫滿載燃燒測試

	純天然氣	混氫 5%	差異
發電量	105.1MW	105.1MW	-
氣渦輪機效率 (%)	33.02	33.07	+0.05%
NOx 排放 (15%O ₂ ppm)	6.6	6.9	+0.3ppm
CO ₂ 濃度	3.51	3.45	
濃度修正後流量(Nm ³ /h)	32511.8	31872	-639.8Nm ³ /h
機組減排系數			-12.157g/kWh

滿載下混氫 5%運轉所得的相關結果，氣渦輪機效率增加 0.05%，NOx 排放量略增加 0.3ppm，評估應為氫的熱值較天然氣高的原因導致，而二氧化碳的排放量經量測之流量以及二氧化碳濃度與二氧化碳密度換算後，其排放量減少 1.278ton/h，確實得到減碳效果是一個成功的試驗，而減排系數一當時一小時的發電量 105.1MW 計算，減排系數為 12.157g/kWh。

2. IHI 燃煤機組混氫 20%驗證

氫氣的熱值和低熱值的煤炭相近，因此鍋爐廠家亦努力開發燃煤鍋爐混加氫氣取代煤炭的使用量以降低二氧化碳的排放量達成減碳。IHI 與日本捷能合作，於日本愛知縣的碧南火力電廠 4 號機組進行混氫可行性研究，並於 2024 年成功完成混氫 20%之實際驗證，為全球成功的首例。相關前期改善工程包括混氫噴嘴與相關管線的改造，另外於本體的煙道和環保設備亦作了相關改善工程。混氫燃燒試驗訂定了燃燒器相關設備的規範，運轉標準程序、燃燒特性、鍋爐性能、輔機設備的影響、氫氣設備的規範…等，於 2024 年 4 月 1 日開始為期 10 天的機組混氫滿載運轉測試，其測試結果如下表：

表 3 日本碧南電廠 20%混氫燃燒測試結果

	原專燃煤炭	混氫 20%燃燒
NOx(ppm, 6%O ₂)	134	106
SOx(ppm, wet)	502	397
CO ₂ (%, 6%O ₂ Dry)	13.4	10.8

從試驗結果可明顯發現相關排放廢氣之氮化物、硫化物與二氧化碳皆明顯降低。

	<p>四. 結語</p> <p>在努力邁向零碳的目標上，電力產業在電力能源的需求上，在尚未能全面綠能下仍須以低碳高效率的方式來提供國家社會所需的電力資源，因此應該以目前發電效率最佳的氣渦輪機組搭配熱回收鍋爐與蒸汽輪機而組成的複循環發電機組，來配合可能短時間急降的太陽能或風力發電設備調度匹配應用，另一方面亦待進氣溫度 1700℃ 級以上的高效率氣渦輪機組的開發，將對發電產業的減碳議題有大幅的助益；而在汽電共生組方面，則應致力於高效率的熱回收應用，其熱回收鍋爐於選擇上可考量選用有助燃燒器，以免除其製程蒸汽如產生因氣渦高而容量不足的困擾，值得業界評估使用且對於減碳可發揮相當大的效果。</p> <p>台電興達電廠之混氫 5%發電試驗已成功達成，亦是台灣首次混氫成功的例子，我們一方面希望在這個基礎上可以更精進的提升技術增加混氫比例，可以讓發電的天然氣用量減少，發揮更大的減碳效果；但另一方面也需要面臨為氫氣是一種不安定的活性氣體，因此一但應用到長時間的常態運轉設備機組時，氫氣的運輸與保存將是一大課題，除了運輸保存外，其對於材質會有氫脆化的問題，因此在混氫減碳發電時，必須審慎評估使用符合氫氣運轉條件之設備元件，以避免設備發生劣化無法使用的事件發生，另外，氫氣之熱值較天然氣熱值高出約有一倍之多，因此在混氫運轉比率增加後，如何控制 NO_x 之排放亦是需考量。而在混氫發電運轉方面雖然在台灣尚未有相關的試驗，但台電大林電廠亦與日本 IHI 公司簽署了合作備忘錄，期盼在日本碧南電廠試驗的基礎下可加速推動台灣混氫的示範目標以檢討碳排，且氫氣的生產、運輸相對於氫氣難度較低，故亦是一可待發展的技術及應用。</p>
參考資料	<p>[1] 大型廢熱回收鍋爐簡介 - 中華產業機械設備協會網站， https://www.cima.org.tw/expert/blog202107-04/</p> <p>[2] 排熱回收ボイラー（HRSG） 三菱重工業株式会社 パワー事業， https://power.mhi.com/jp/products/boilers/lineup/hrsg/</p> <p>[3] 燃料アンモニア燃焼バーナー・ボイラの商用機実証碧南火力発電所 4 号機でのアンモニア 20%燃焼実証試験， https://www.ihl.co.jp/technology/techinfo/contents_no/1200875_13491.html</p> <p>[4] Co-Generation Power Plant with High-Efficient Spark Ignition Lean-Burn Gas Engine 28AGS for Reduction of CO₂ Emissions， https://www.ihl.co.jp/en/technology/techinfo/contents_no/1199394_13586.html</p>
附件	

建檔者	施威廷/114 年度能源先期管理制度執行、查核與研究 (1/3)
-----	----------------------------------

註：1.請計畫執行單位上傳提供較具策略性的知識物件，不限計畫執行有關內容。

2.請計畫執行單位每季更新與上傳一次，另有新增政策建議可隨時上傳。

3.文字精要具體，量化數據盡量輔以圖表說明。