

出國報告（出國類別：實習）

先進燃氣渦輪機進氣系統/先進燃氣渦
輪機低氮氧化物燃燒器及減排技術研
習

服務機關：台灣電力公司 台中發電廠

姓名職稱：何孟翰 儀資維護專員

派赴國家/地區：德國 Munich

出國期間：113 年 10 月 20 日至 113 年 11 月 02 日

報告日期：113 年 12 月 12 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：先進燃氣渦輪機進氣系統/先進燃氣渦輪機低氮氧化物燃燒器及減排技術研習

頁數_27_含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

何孟翰/台灣電力公司台中發電廠/儀資維護專員/(04)2630-2123

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113/10/20-113/11/02

派赴國家/地區：德國 /Munich

報告日期：113/12/12

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

燃氣渦輪機組在台灣發電量中有日漸提高之佔比，為提高氣渦輪機機組的效能、降低汙染排放，透過與原設計廠家交流先進燃氣渦輪機原理、方法及控制系統，可提升本公司先進燃氣渦輪機組運轉維護技術。本次前往德國 Siemens Energy 公司研習先進燃氣渦輪機改善升級方案，可以掌握到相關之先進技術，有利於日後之運轉及維護工作。本報告將依序介紹燃氣渦輪機之簡介、未來願景、進氣系統、低氮氧化物燃燒方法、燃氣渦輪機升級方案及 Siemens Energy 公司之電力發展願景，最後為實習心得與建議。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目錄

壹、 目的.....	1
貳、 出國行程.....	1
參、 實習內容.....	3
一、 先進燃氣渦輪機之願景.....	2
二、 Siemens Energy 公司 SGT 系列燃氣渦輪機.....	5
三、 燃氣渦輪機進氣系統.....	7
四、 低氮氧化物的燃燒方法探討.....	10
五、 Siemens Energy 公司的先進燃氣渦輪機.....	17
六、 Siemens Energy 公司的簡介與未來願景.....	22
肆、 實習心得與建議.....	24
伍、 參考資料.....	26

壹、目的

目標：

燃氣渦輪機進氣設備是吸取大量空氣的關鍵設備。進氣系統對於渦輪機的性能和壽命而言至關重要，會直接影響機組的設備可用性、可靠性和盈利能力；而面對日漸嚴峻的環保法規，降低燃氣渦輪機之氮氧化物排放也有其必要。學習以上兩者的技術並吸取實務經驗，期能落實技術轉移，俾使日後機組之運轉、維護，帶來助益。

緣由：

燃氣渦輪機組在台灣發電量中有日漸提高之佔比，為提高氣渦輪機機組的效能、降低汙染排放，透過與原設計廠家交流先進燃氣渦輪機原理、方法及控制系統，可提升本公司先進燃氣渦輪機組運轉維護技術。在空汙相關法規日益趨嚴與大眾對空品要求意識抬頭的今日，更低的出口氮氧化物濃度是本公司所追求的目標也是無可迴避的責任。對燃燒器之保養、維護及調校工作，赴原廠實習可以掌握到相關之操作運維知識，有利於日後之運轉及維護工作，確有必要前往原廠研習。

貳、出國行程

前往國家：德國

出國期間：113 年 10 月 20 日至 113 年 11 月 09 日

起始日	迄止日	行程	工作內容
113.10.20	113.10.20	台北→德國 Frankfurt→德國 Munich	往程：(台北－德國 Frankfurt 機場－Munich)
113.10.21	113.11.01	德國 Munich	赴 Siemens Energy 公司旗 下各機構研習
113.11.08	113.11.09	德國 Munich→德 國 Frankfurt→台北	返程：(Munich－德國 Frankfurt 機場－台北)

參、實習內容

一、先進燃氣渦輪機之願景

燃氣渦輪機簡介

燃氣渦輪發動機（Gas turbine）是一種連續流內燃引擎。它的主要部件通常包括以下幾個部分：

壓縮機（Compressor）：壓縮機將大氣空氣壓縮到較高的壓力。這是燃氣渦輪發動機的第一個關鍵步驟，以確保後續的燃燒過程能夠正常進行。

燃燒室（Combustor）：燃燒室是燃氣渦輪發動機中的燃燒區域。在這裡，燃料被噴入高壓空氣中，並在點火後燃燒，產生高溫高壓的氣流。

渦輪（Turbine）：渦輪是由高溫高壓氣流驅動的部件。它連接到壓縮機的軸，使其能夠轉動。渦輪的轉動能量用於驅動壓縮機，同時也可以連接到其他設備，例如飛機的螺旋槳、發電機或者其他動力需求。

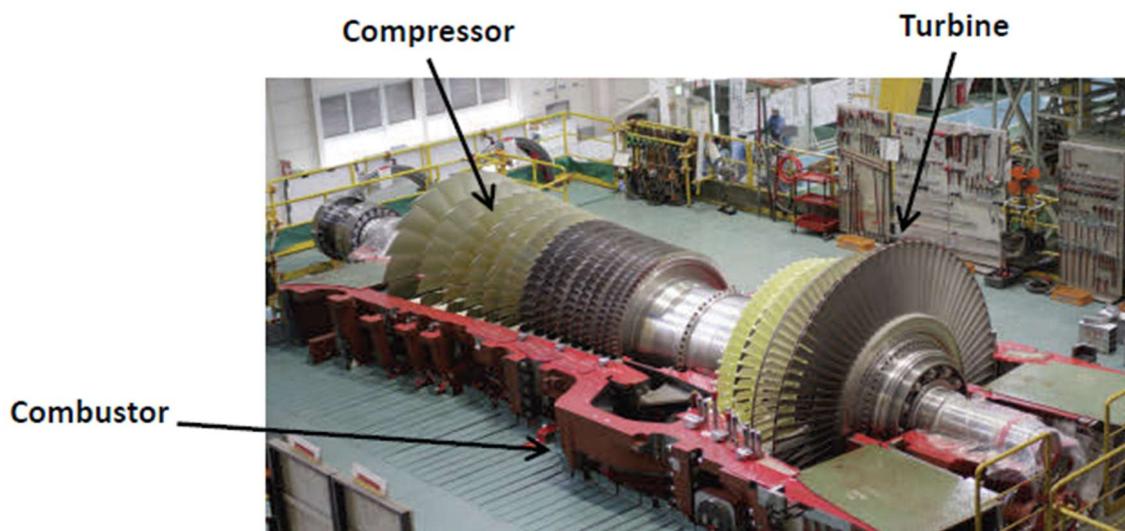


圖 1.奇異公司 Frame.9 燃氣渦輪機開蓋¹

複循環發電機組

複循環機組設備主要包括燃氣渦輪機（Gas Turbine/GT）、廢熱鍋爐（Heat Recovery Steam Generator/HRSG）及汽輪機（Steam Turbine/ST）。其中 GT 使用天

¹Courtesy of Business Wire/Mitsubishi Hitachi Power Systems Americas, Inc

然氣或 LNT 為燃料，將其噴入燃燒筒與壓縮空氣混合燃燒後，產生高溫高壓的燃氣來推動 GT 帶動發電機產生電力此為「布雷登循環 Brayton Cycle」；爾後將 GT 做功後的排氣餘熱排放於熱回收鍋爐並加熱飼水產生蒸汽，再推動另一汽輪機帶動之發電機產生電力，此為「朗肯循環 Rankine Cycle」；結合此兩種循環之發電機組便稱為「複循環發電機組 Combined Cycle Power Plant: CCPP」。

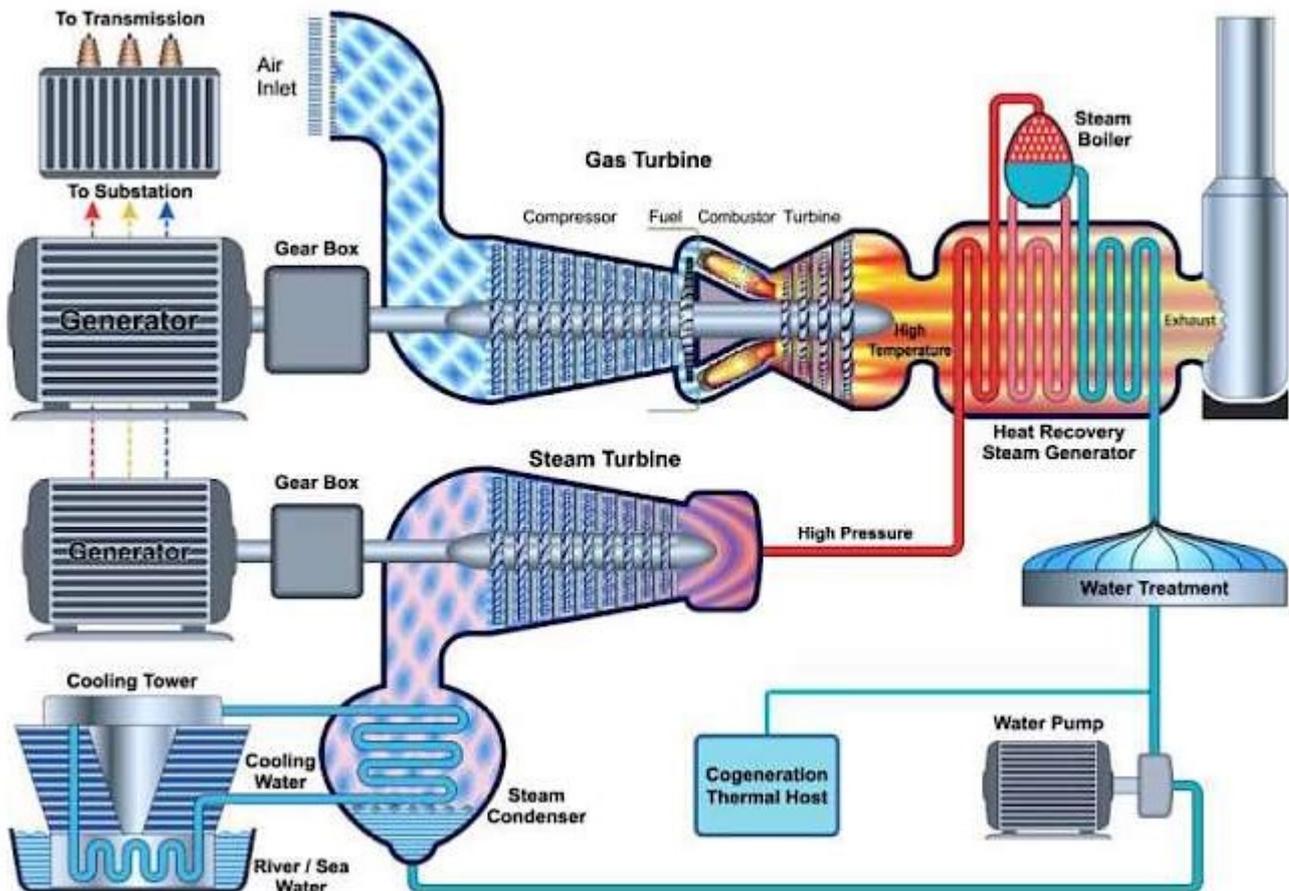


圖 2. 複循環發電機組簡圖²

先進燃氣渦輪機

由於技術的進步，先進燃氣渦輪機相較於傳統燃氣渦輪機，已能達成更高的壓力（高達 588 psia，約 40 Bar）、燃燒溫度（2700°F，約 1482°C）及更低的 NOx（排放量低於 9 ppm）。先進燃氣渦輪機的優勢可以很容易地量化：它們產生更多的功率、使用更少的燃料、提供更高的循環效率，並顯著降低排放水平。由於高壓縮比和燃燒溫度，先進燃氣渦輪機的效率非常高，達到 40%至 45%（單循環）。然而各廠家在現有基礎上仍致力達成以下更長遠的目標³：

²Combined-cycle gas turbines, <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-database/combined-cycle-gas-turbines-2022>

³The National Academies of SCIENCES. ENGINEERING. MEDICINE., *Consensus Study Report*

效率：提高複循環效率至 70%，單循環效率提高至 50%以上。

與可再生能源的相容性：減少渦輪啟動時間，改善燃氣渦輪在單和複循環中的效率，以滿足靈活的電力需求和與可再生能源和能量儲存系統整合相關的其他要求。

CO2 排放：在仍符合氮氧化物 (NOx) 排放標準的前提下，將 CO2 排放降至接近零。

燃料多樣性：使用於發電的燃氣渦輪能夠使用高比例（高達 100%）氫和其他不同成分的可再生氣體燃料。

如圖 3.所示，為了達成淨零碳排的目標，在燃氣渦輪機用於發電日益增長的時代，研發各種燃燒技術增進燃燒效率及降低溫室氣體排放至關重要，作為能源供應商我們有責任確保我們的技術和設備不僅能提供可靠的電力，還須減少對環境的影響，建立可持續的能源基礎。透過參訪國外頂尖燃氣渦輪機廠家，了解燃燒技術的變革，及先進的排放控制技術。因此職此行前往德國 Munich 參訪 Siemens 公司 SGT 系列燃氣渦輪機之改善方案，希望藉由認識相關技術並加以運用。

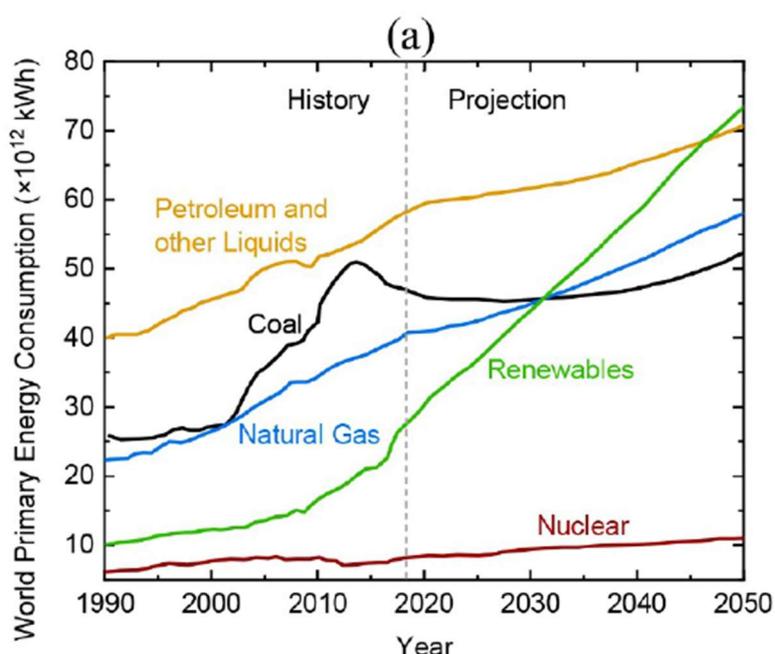


圖 3. 1990 至 2050 年全世界發電能源成長曲線歷史及預估⁴

HIGHLIGHTS: Advanced Technologies for Gas Turbines., 2020

⁴ U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2019, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2019; <https://www.eia.gov/ieo>

二、 Siemens Energy 公司 SGT 系列燃氣渦輪機

Siemens Energy 的燃氣渦輪機系列經過精心設計和調整，以應對不斷變化的市場環境，並滿足客戶的需求。這些渦輪機型號的功率範圍從 2MW 到 593MW 不等，適用於各種不同的應用場景，包含以下代表型號

工業級燃氣渦輪機 (Industrial Gas Turbines)：

SGT-50：這是一種 2 MW 的燃氣渦輪機，適用於連續發電、應急電源或聯合熱電等應用。該渦輪機具有低維護需求和高度可靠性，適合使用不同燃料，如低熱值氣體和液體燃料。

SGT-100：該渦輪機的發電功率範圍為 5.1 至 5.4 MW，適合石油和天然氣行業的應用，能夠使用多種氣態和液態燃料。

SGT-400：雙軸渦輪機，發電功率範圍在 10.5 至 14.3 MW 之間，適合海上和陸上應用，並具有最新的空氣動力和燃燒技術。

SGT-750：該渦輪機功率為 39.8 MW，設計靈活，適合石油和天然氣行業，能夠在低負載下保持高效率和低排放。

重型燃氣渦輪機 (Heavy-duty Gas Turbines)：

SGT5-9000HL：該公司的最大型機種，提供 593 MW 的發電功率，適合大規模發電廠的需求。

SGT6-5000F：功率為 215 至 260 MW，具有快速啟動和負載變化能力，適合峰值、中間負荷或基載操作。

航空衍生燃氣渦輪機 (Aeroderivative Gas Turbines)：

SGT-A05：這種 4.0 至 5.8 MW 的燃氣渦輪機具有高效能和快速啟動能力，適合分散式發電。

SGT-A35：提供 31.3 至 37.3 MW 的發電功率，具有高度靈活性，適用於石油和天然氣行業的動力驅動和發電應用。

這些燃氣渦輪機根據應用場景設計，具有高效能、靈活性以及多種燃料使用能力，適合不同的發電需求。

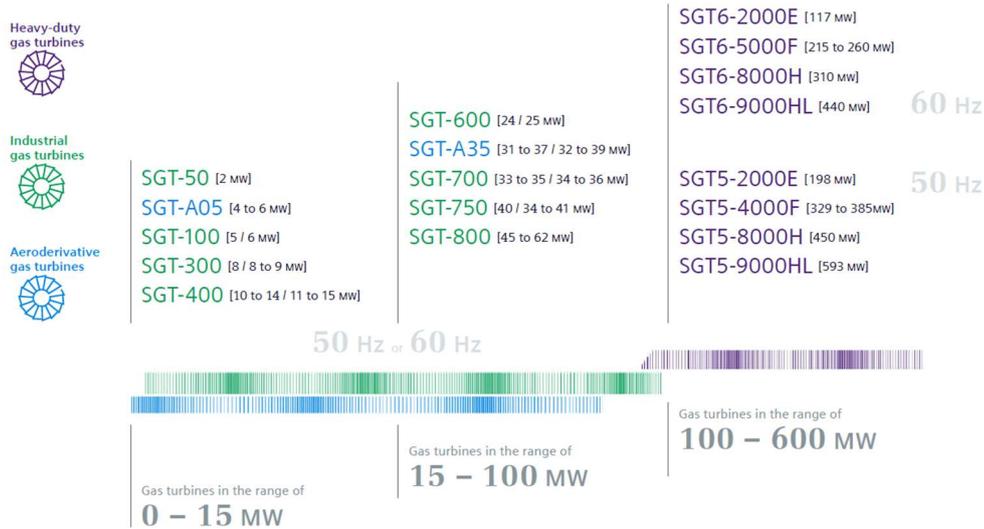


圖 4. Siemens Energy 公司各容量燃氣渦輪機綜覽

其中本公司興達發電廠建置 15 部 SGT6-2000E 燃氣渦輪機搭配 5 部 SST6-4000 汽輪機藉此達成複循環發電；皆採 3 對 1 匹配方式(3GT+1ST+1HRSG)，於 1998~1999 年間陸續商轉。單部機組容量為 445MW 總裝置容量共約 2200MW，佔公司整體裝置容量約 4.9%。

References: Heavy-duty gas turbines

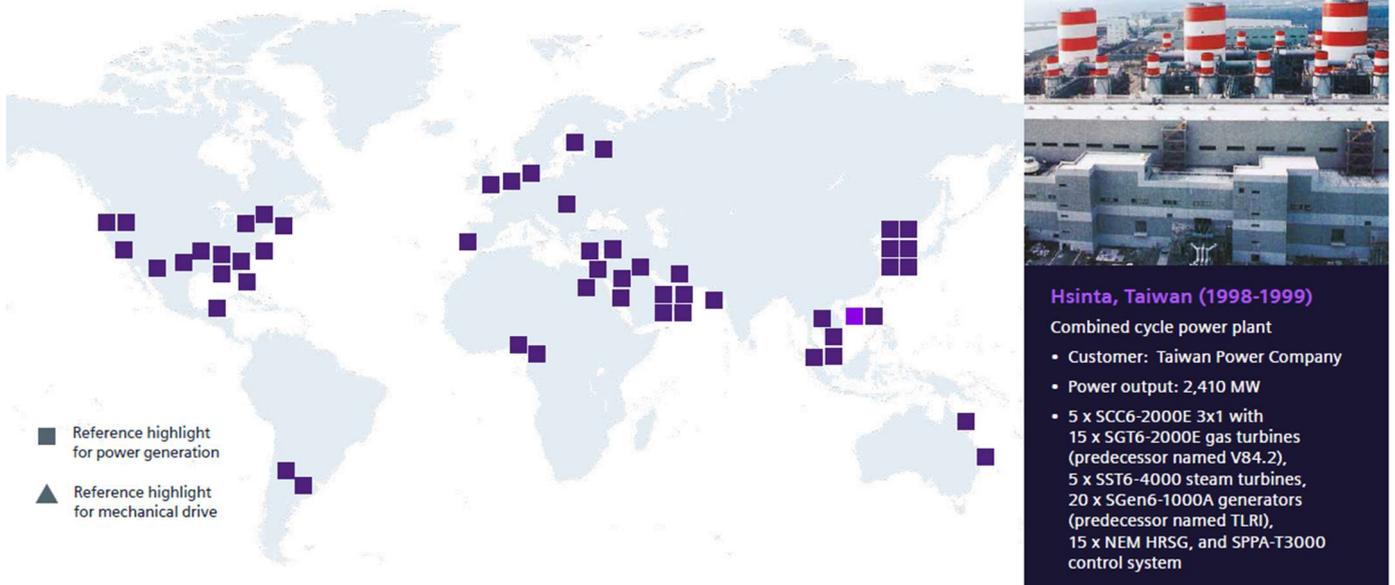


圖 5. Siemens Energy 公司重型燃氣渦輪機全球裝置簡圖-興達電廠

三、燃氣渦輪機進氣系統

進氣品質的重要性

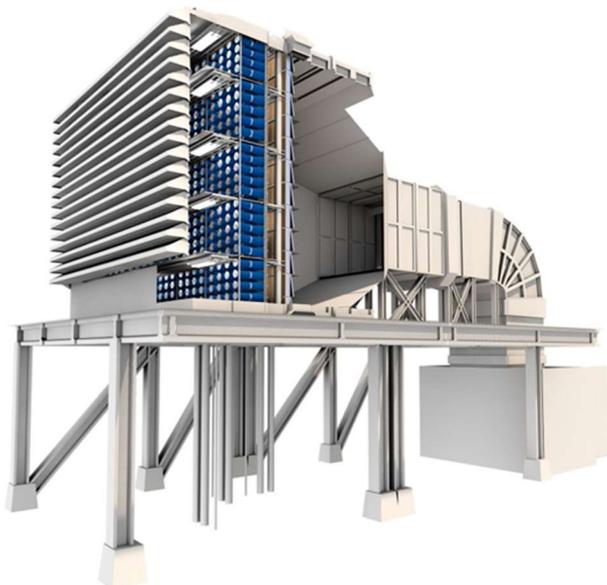


圖 6. 燃氣渦輪機進氣系統剖面簡圖⁵

由於空氣和燃料是燃燒的兩個主要來源，因此燃氣渦輪機吸入的空氣品質具有非常重要的影響。不良的空氣品質會損壞渦輪機葉片，並可能導致燃氣渦輪機熱部零件出現嚴重的過熱效應。

因此在燃氣渦輪機進氣部分安裝了精心設計且高效的進氣過濾系統。乾淨的空氣是軸流式空壓機效率更高、燃氣渦輪壽命更長的關鍵。進氣過濾系統在燃氣渦輪機的可靠性、維護成本及大修停機時間方面也具有關鍵影響。

空氣品質不佳會導致：

- **葉片結垢（Fouling）** 導致壓縮機效率降低。結垢是由非常微小的灰塵顆粒以及灰塵顆粒粘附到翼型件和環面表面引起的。引起結垢的顆粒通常小於 2 至 10 μm 例如煙霧、碳、油霧、海鹽等。
- **腐蝕（Corrosion）** 是由於吸入空氣中存在鹽分時金屬部件發生化學氧化而引起的。壓縮機部分的腐蝕稱為“冷腐蝕”，這是由於鹽、酸和腐蝕性氣體（例如氯和硫化物）的濕沉積造成的。
- **侵蝕（Erosion）** 是透過吸入空氣中灰塵顆粒的磨蝕作用「侵蝕」葉片材料的過程。侵蝕是一個不可逆的過程。顆粒會撞擊表面並去除極少量的金屬，從而累積地導致表面幾何形狀的變化。10 μm 或以上的顆粒會造成侵蝕。

⁵Air intake filtration system – most important for reliability of gas turbine power plant, <https://brinitiativeenergy.com/air-intake-filtration-system-most-important-for-reliability-of-gas-turbine-power-plant/>

如果以上三種現象（結垢/侵蝕/腐蝕）非常嚴重，可能會發生葉片損壞，進而導致燃氣渦輪機設備發生不可預見的停機。

燃氣渦輪機進氣過濾系統

空氣由大氣中先經過阻擋陽光、雨水沙塵的斜面後，進入過濾系統。過濾系統藉由以下四種機制將灰塵及鹽分等化學物質捕捉在過濾器中。

- **篩分 (Straining)**：透過比灰塵粒子還細緻的過濾介質直接攔阻
- **阻擋 (Impingement)**：高密度的灰塵粒子無法抵擋氣流慣性而直接被過濾介質阻擋在外
- **攔截 (Interception)**：灰塵粒子被過濾介質的吸引力所捕捉
- **擴散 (Diffusion)**：極小的灰塵粒子在氣流低速狀況下進行布朗運動，增加被過濾介質捕捉到的機率並且附著於其上

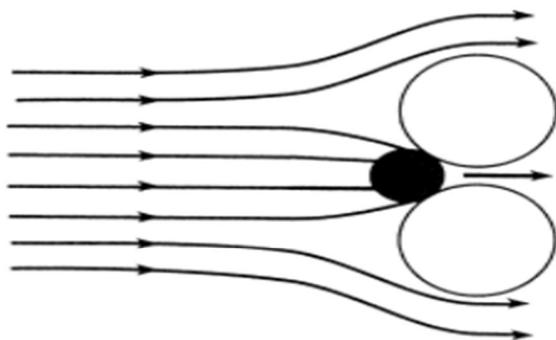


Figure 1: Straining.

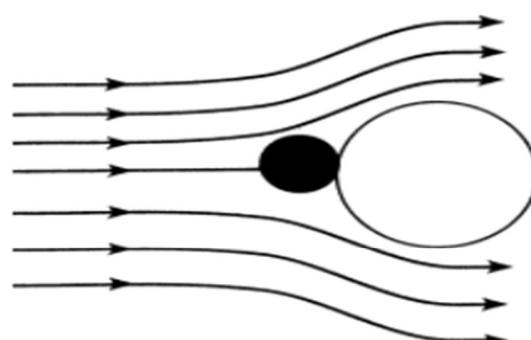


Figure 2: Impingement.

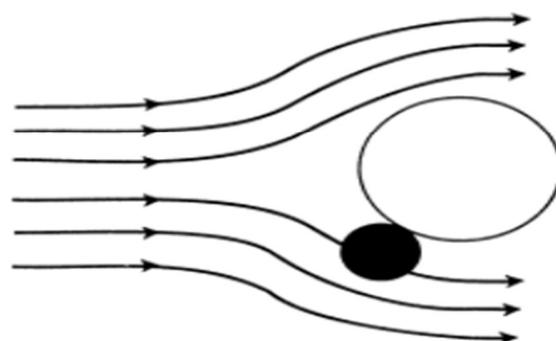


Figure 3: Interception.

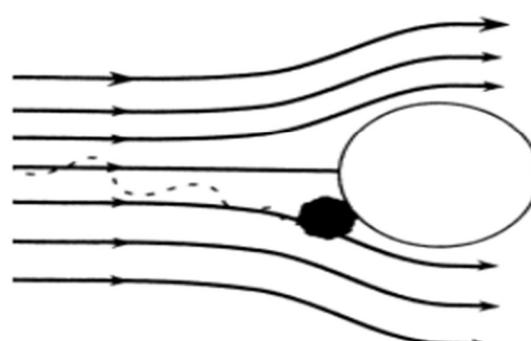


Figure 4: Diffusion.

圖 7. 四種過濾機制⁶

新過濾器最初通常允許更多的灰塵通過。隨著灰塵層在篩檢程式褶皺表面和內部生長，過濾變得更加有效。因此，為了更好地過濾，過濾器表面的一些灰塵層是不可避免的。然而，當灰塵層增長時，過濾器的差壓開始上升。因此，在所有燃氣渦輪進

⁶M.D Amir Abdullah, A.M Leman and A.H Abdullah, "Air Filtration Study to Improve Indoor Air Quality : Proposed Study", 3rd Scientific Conference on Occupational Safety and Health- Sci-Cosh 2014

氣過濾系統中，都安裝了「脈衝清潔（Pulse Cleaning）」系統。當差壓到達設定值時啟動將灰塵逆吹並蒐集。

下圖為一種燃氣渦輪機進氣過濾系統示意圖，外部空氣經過斜面後，先經過第一道過濾器（Pre-filter），再經過最終過濾器（Final Filter）所過濾完的空氣再經過降溫及擾流後即可送入作為燃氣渦輪機所用。

GAS TURBINE INLET AIR FILTRATION

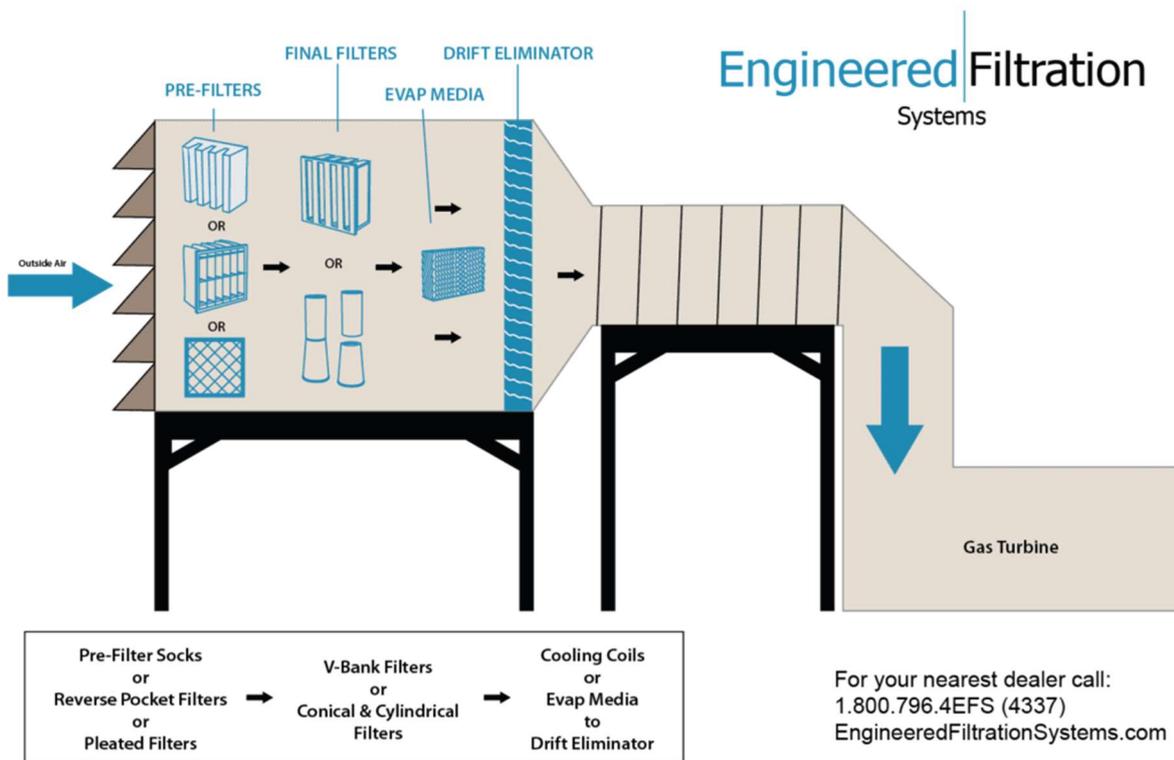


圖 8.燃氣渦輪機進氣過濾系統

燃氣渦輪機需要高效、穩定的進氣。保持高品質的進氣空氣對於燃氣渦輪機的運行效率、可靠性和排放控制至關重要，需採取適當的過濾、冷卻或加熱措施以確保空氣品質符合要求。

四、低氮氧化物的燃燒方法探討

現今，全球的電力需求正在增長，獲得可靠且可負擔的能源已成為一個關鍵問題。根據國際能源署（IEA）的報告，全球經濟將以每年約 3.5% 的速度增長，而全球人口將增加約 10 億人。根據這些預測，IEA 預計到 2040 年，全球能源需求將增加超過 30%。考慮到新安裝和退役的燃氣發電廠，預計在未來 25 年內將新增 6700GW 的電力⁷。而全球液化天然氣供應也將由 2022 年的 635 bcm 增長至 2030 年的 885 bcm，因此以液化天然氣為主要燃料的燃氣渦輪發電機將受惠並帶來更多成長契機⁸。

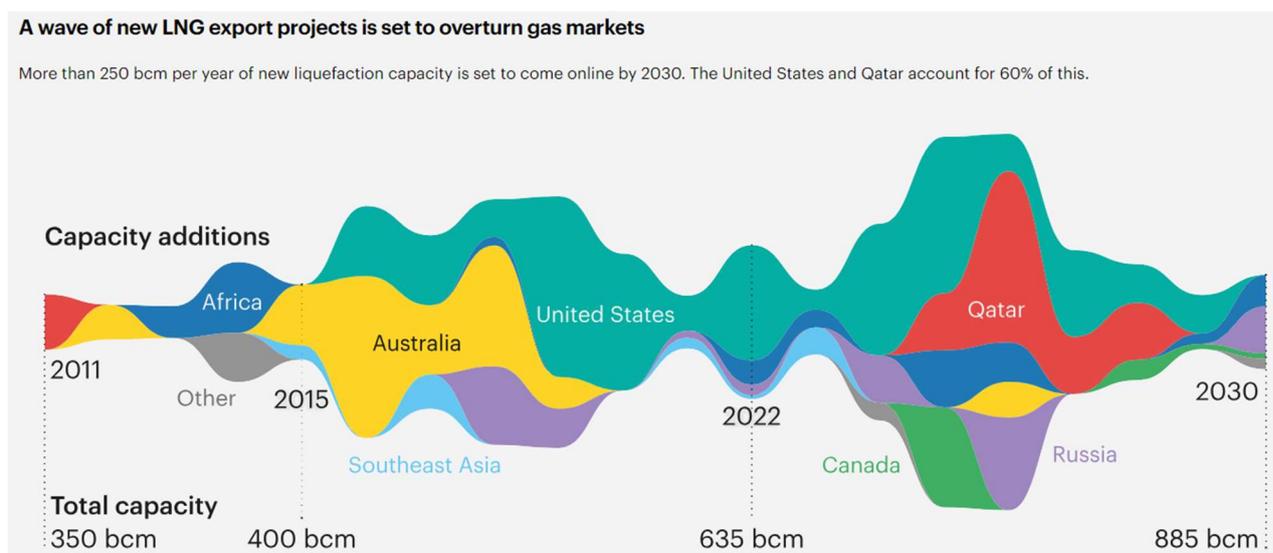


圖 9. 各國家及地區生產液化天然氣出口量預估

復循環燃氣渦輪機因其超過 50% 的效率而聞名，且在預混燃燒的條件下，NO_x 排放量更為低且仍有發展的潛能(10ppm 等級)。因此在裝設數量持續增長中的燃氣輪機市場，研究如何降低溫室氣體排放至關重要。

且由於嚴格的排放法規，驅使燃氣渦輪機燃燒器製造商研發環保燃燒器，並同時保持高效率 and 靈活的操作範圍。NO_x 排放被視為最嚴重的污染物之一。NO_x 的生成主要取決於燃燒溫度以及燃燒產物在高溫區域的滯留時間。雖然 NO_x 生成透過多種機制進行，但在燃燒器領域，熱 NO_x (Zeldovich mechanism) 機制是主要成因。即使燃燒溫度僅降低幾度⁹，也能顯著減少 NO_x 排放。對於相同的氧氣和氫氣比例，在火焰溫度為 1800 K 時，幾秒鐘內生成的熱 NO_x 量與火焰溫度提高到 2100 K 時在毫秒內生成的 NO_x 量大致相同。

⁷International Energy Agency, World Energy Outlook, 2017

⁸International Energy Agency, World Energy Outlook, 2023

⁹徐子賀, “高溫預混燃氣燃燒之 NO_x 平衡及生成速率分析”, 2000

基於上述減排原理，研究人員提出了多種技術來減少燃氣渦輪機的排放，從而促進乾淨能源生產。這些技術包括對現有燃燒系統的改進或發明新的燃燒器來控制排放。其中一些清潔燃燒技術已經應用於工業及電力生產，而其他技術仍在研究和開發中。這些技術包括火焰類型的變化、燃燒器設計、葉片材料、燃料多樣性。以下段落簡介幾種常用或是發展中的燃燒技術。

預混燃燒：不同的火焰類型具有不同的燃燒和排放特性，改變火焰模式會顯著改變產生的排放量。傳統的擴散火焰是燃料和空氣在燃燒室中邊混合邊燃燒的火焰因其穩定性，已被廣泛用於燃氣渦輪機的發電產業。然而，擴散火焰會在燃燒室內形成化學計量燃燒區（stoichiometric combustion zones），從而在燃燒室內產生高溫點，這會提高 NO_x 的排放量。預混火焰是指燃料和空氣在進入燃燒室之前就已經充分混合的火焰，預混火焰的燃燒溫度較低，因此 NO_x 排放量也較低，但火焰穩定性較差。將燃燒模式從擴散轉換為預混，可以防止燃燒室內形成化學計量燃燒區，因為反應物在燃燒室上游已經預混，這會導致燃燒溫度的降低，從而減少 NO_x 的排放。然而，反應物在燃燒室上游進行預混，若控制不良會影響火焰穩定性，這對發電機運轉產生不利影響。

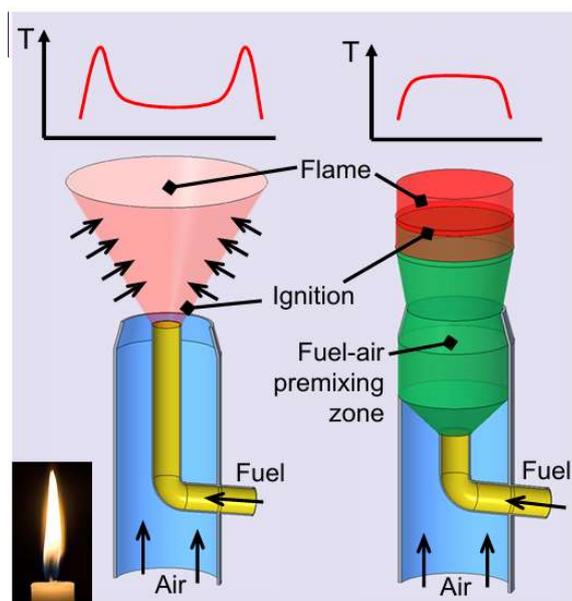


圖 10.擴散燃燒(圖左)與預混燃燒(圖右)之溫度曲線對比

無火焰分佈燃燒（Moderate and Intense Low-oxygen Dilution，MILD）是另一種通過控制燃燒室內火焰類型來控制排放的技術。這個技術的概念是通過混合進入的新鮮空氣、燃料和燃燒後的廢氣，在燃燒室內創造一個均勻且預熱的混合物，藉此消除化學計量燃燒區的產生，進而控制火焰溫度，並降低 NO_x 的排放。CDC 可以改善燃氣輪機燃燒室的性能，包括實現均勻的熱場、低 NO_x 和 CO 排放，以及提高燃燒穩定性¹⁰。

¹⁰Jianchun Mi, Pengfei Li, Feifei Wang, Kin-Pang Cheong, and Guochang Wang, "Review on MILD Combustion

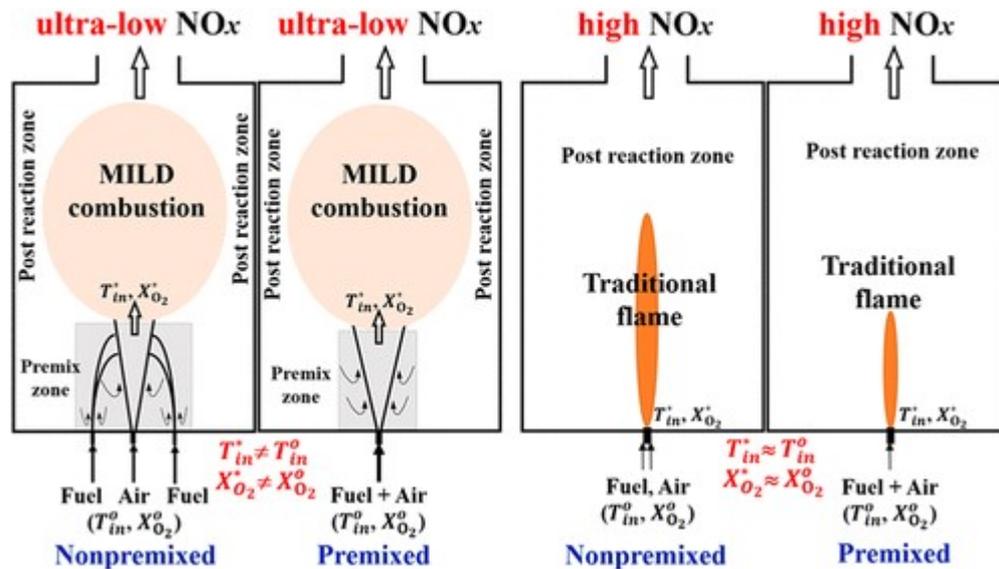


圖 11. MILD 燃燒在預混/非預混狀況下與傳統燃燒之對比⁷

貧油燃燒（Lean Blowout/Lean Burn）技術降低 NO_x 排放的原理主要依賴於燃燒溫度和燃料混合比的控制。在燃氣渦輪機中，NO_x 的生成與燃燒溫度密切相關，較高的溫度會促使 NO_x 的大量產生。LBO 技術通過採用稀燃（lean combustion），即減少燃料與空氣的混合比，由於燃料相對的減少，熱量減少又加以過量空氣的存在會增加火焰的熱散逸損失，因此火焰溫度會大幅度地降低，而火焰中溫度降低會造成燃燒化學反應速率變慢（火焰燃燒速度也相對地變慢），這樣可以抑制 NO_x 的主要生成機制（Zeldovich mechanism）。然而，這種稀釋燃燒策略會提高火焰的不穩定性、增加火焰熄滅的風險，這就是 LBO 挑戰的核心所在。在這種低燃燒熱釋放率（heat release rate）與高燃燒能量散逸損失（heat loss）的情況之下，貧油燃燒容易有局部燃燒熄滅（extinction）的現象產生；而較低的火焰燃燒速度也常常無法與流場中的流體速度相抗衡，因而產生火焰吹熄（blowout or blowoff）或燃燒不穩定的現象；這些現象包括火焰跳動、火焰吹熄與火焰閃動（flickering）等等，當這些局部熄滅、燃燒不穩定與吹熄現象出現時通常伴隨高 CO 與 UHC 之污染生成，所以貧油燃燒在應用上最大的問題就是如何讓火焰穩定地燃燒以及避免高 CO/UHC 的生成¹¹。

of Gaseous Fuel: Its Definition, Ignition, Evolution, and Emissions”, Energy & Fuels, 2021

¹¹趙怡欽, “貧油預混燃燒與燃燒不穩定”, 燃燒季刊第十三卷第二期中華民國九十三年五月出版

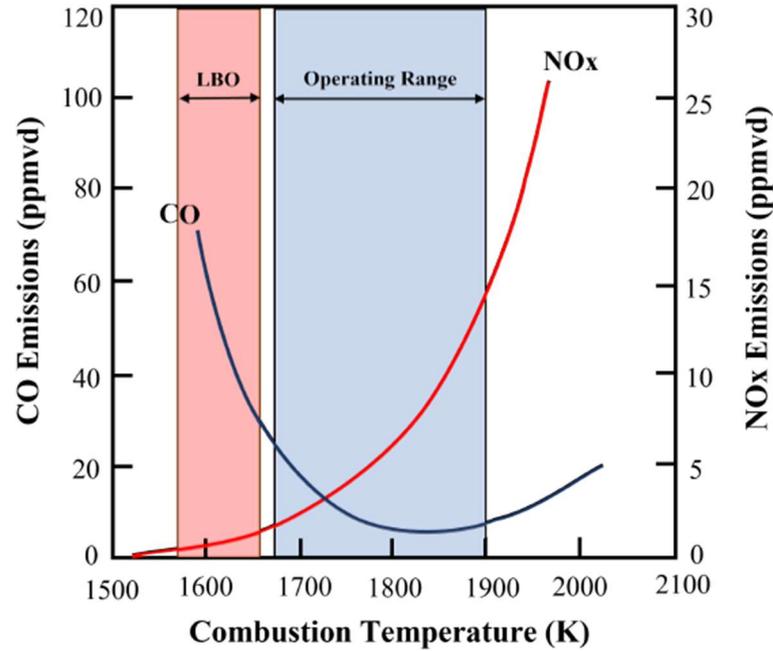


圖 12. 貧油燃燒 (LBO) 狀況下的 NOx 及 CO 生成曲線¹²

低旋流噴射器 (Low-Swirl Injector, LSI) 燃燒技術也是一種有效的 NOx 控制技術。低旋流燃燒技術利用了預混湍流火焰相同的波浪原理。在減少旋流流動的條件下，預混火焰在擴散流區域自由燃燒，形成懸浮的火焰波“駐波 (standing wave)”。火焰懸浮在一個火焰速度與氣體流速相同的位置，這樣可以產生更穩定的火焰，並減少火焰回火 (flashback) 和熄火的可能性。

目前技術中，富氧燃燒為最有可能實現零 NOx 排放，因為該技術利用純氧氣燃燒燃料，僅產生水 (H₂O) 和二氧化碳 (CO₂)。其中 CO₂ 在水凝結後被分離捕獲。同時，因為不含氮氣，氧氣濃度增加，能量作用在氧氣燃燒上，火焰相對穩定，並提升火燄溫度，增加燃燒效率，減少燃燒時的熱量散失，也能大幅減少煙氣量。因此，富氧燃燒具有高能源利用率、產物乾淨、所需處理的煙氣量少等優點。雖然富氧燃燒具有很多優點，但目前傳統使用的製造氧氣的方法，如深冷分離法、變壓吸附法、薄膜分離法等，所需的能量大，以及建置的成本較高，因此目前尚無法滿足大規模運轉富氧燃燒的需求。此外，富氧燃燒時，高含氧氣體的燃燒，導致燃燒器內火焰速度快、火焰溫度高，燃燒器在運轉時的高溫，無法適用於一般燃燒器，必須採用特殊設計及相關燃燒設備，避免設備因為高溫而使耐火材料受損¹³。

DLE (Dry Low Emission) 燃燒 技術的核心目標是減少燃氣渦輪機運行過程中的有害排放物，特別是 NOx 和 CO。DLE 燃燒機制的工作原理主要基於預混稀燃技術，

¹² Faqih, M.; Omar, M.B.; Rosdiazli, I.; Omar, B.A.A. "Dry-Low Emission Gas Turbine Technology: Recent Trends and Challenges". Appl. Sci. 2022, 12, 10922. <https://doi.org/10.3390/app122110922>

¹³ 李元亨, "二氧化碳捕獲技術介紹 (三): 富氧燃燒", 國立成功大學資源工程學系, 2017

透過在燃燒室前預先混合燃料和空氣，以降低火焰溫度並抑制 NO_x 的生成。

DLE 燃燒機制的幾個關鍵特徵包括：

預混燃燒：DLE 系統允許燃料與空氣在進入燃燒室前充分混合，這樣可以使火焰溫度降低，從而減少 NO_x 的生成。NO_x 主要是在高溫環境下產生，因此降低溫度是控制 NO_x 排放的主要手段。

分段燃燒：DLE 系統通常具有多個燃料注入點，主燃料注入點處消耗約 97% 的燃料，其餘 3% 的燃料被用於創建引導火焰，這有助於在低負載下保持燃燒穩定性。

渦流穩定器：渦流被引入燃燒室以創建必要的回流區，幫助穩定火焰。

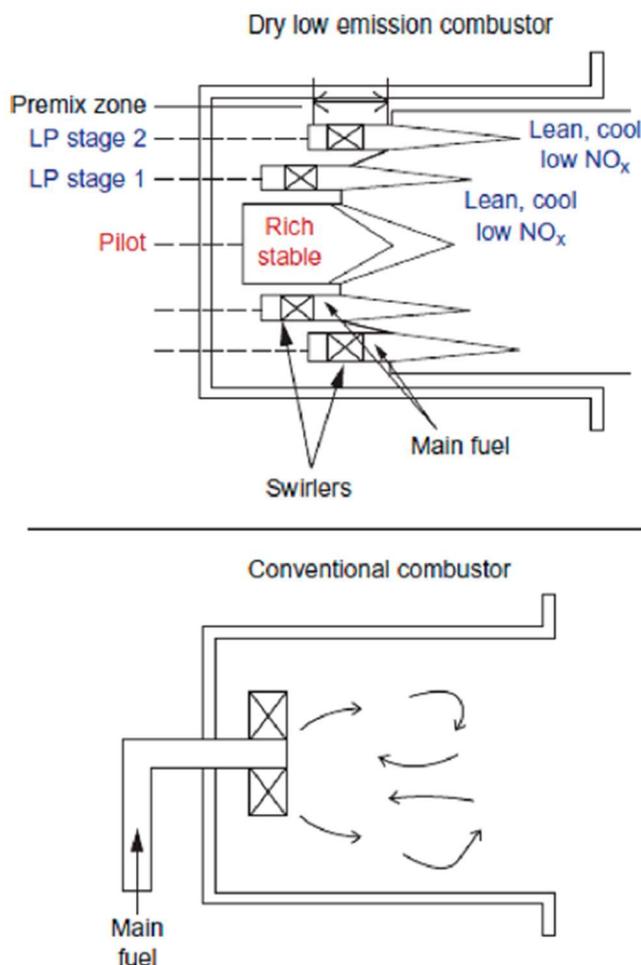


圖 13. 上為 DLE 燃燒器的預混燃料注入(外圈)及中間的引導燃料注入(Pilot)，下為傳統擴散式燃燒器¹⁴

DLE 技術的另一個挑戰在於燃燒不穩定性，如回火和自燃的風險。這些問題需要通過精確控制燃料空氣混合來解決，防止火焰在不合適的位置出現。通過這些技術，DLE 燃燒能夠在保持燃燒穩定性的同時顯著降低 NO_x 和 CO 排放。

¹⁴Medhat A. Nemitallah, Sherif S. Rashwan, Ibrahim B. Mansir, Ahmed A. Abdelhafez, and Mohamed A. Habib, "Review of Novel Combustion Techniques for Clean Power Production in Gas Turbines", Energy & Fuels 2018 32 (2), 979-1004

觸媒燃燒(Catalytic Combustion)是一種利用觸媒表面來進行燃燒反應的技術。其主要原理是稀燃燃料和氧氣的混合物在觸媒表面發生氧化反應，而非傳統的有火焰燃燒過程，因此相較於傳統的擴散燃燒(Diffusion Combustion)溫度較低。燃燒室的溫度被控制在 1500 度 C 以下，從而顯著減少 NO_x 生成，其特點有以下：

低排放：催化燃燒可實現 NO_x、CO 和未燃燒碳氫化合物(UHC)的極低排放。該過程將 NO_x 的排放量降低到個位數 ppm，對減少燃氣渦輪機的空氣污染非常有效。

無火焰不穩定性：由於燃燒發生在催化劑表面而無火焰，解決了像熄火和火焰不穩定這類問題。這使得燃燒過程在不同操作條件下更可靠。

高效率：催化燃燒系統節省了昂貴的排氣處理系統，如 SCR，並提供了高熱效率，能量損失極小。

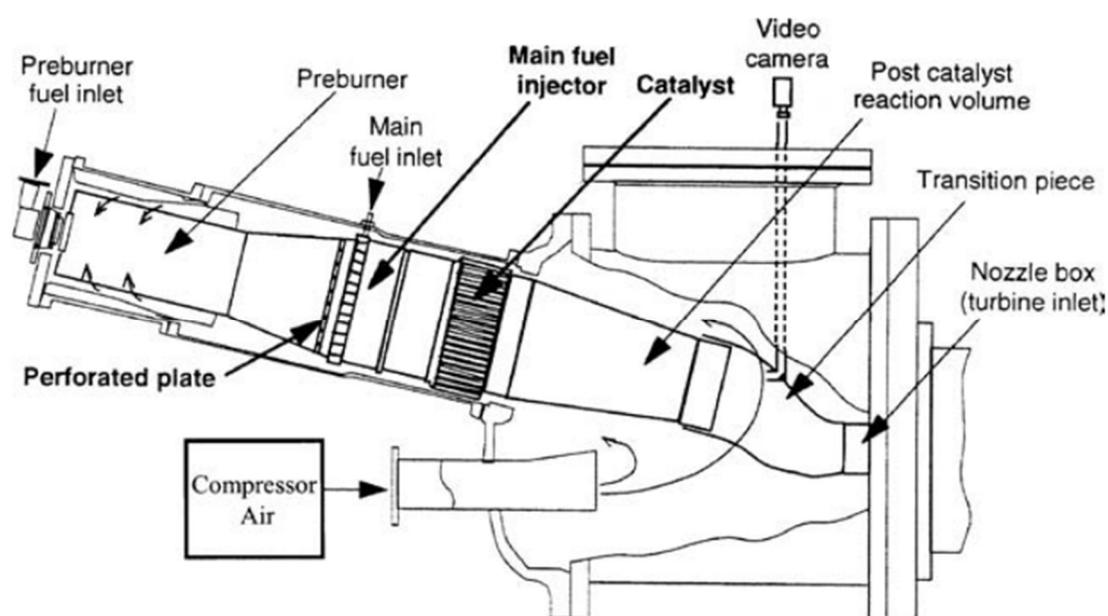


圖 14. 觸媒燃燒器示意圖¹⁵

燃燒器的設計影響了溫室氣體的排放。職此行研究了不同的燃燒器設計及其不同的燃燒和排放特性。並節錄整理如下表，然而仍有更多不同燃燒技術仍在學術界或是業界發展中，諸如穿孔板燃燒器以及環保燃燒器，後者包括環保渦流燃燒器(EV)、連續環保渦流燃燒器(SEV)和先進環保渦流燃燒器(AEV)，以及微混合燃燒器。技術繁多或是各種燃燒技術之混用，恕無法一一列舉。

燃燒技術	主要特點	優點	缺點
擴散燃燒	燃料與空氣在燃燒區內分離進入，反應發生於邊界	火焰相當穩定，操作範圍廣	高溫導致 NO _x 排放濃度高

¹⁵ Boyce, M. P. "Gas Turbine Engineering Handbook, 4th ed.;" Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2012

	區域		
預混貧油燃燒 (LBO)	燃料與空氣在預混區混合	在燃料比例稀薄 下能達成極低 NO _x 、CO 排放	燃燒區間不穩定， 難維持
無火焰分佈燃 燒 (MILD)	燃燒後熱廢氣與空氣、燃 料混合後循環進入燃燒室	低 NO _x 排放 無具體火焰型態 熱效率高	實現條件複雜，需 較高的氣體預熱與 回流設計
低旋流噴射器 (LSI)	在低漩流區域控制火焰的 速度和位置	低 NO _x 排放	相當仰賴燃燒器穩 定度及可靠度
富氧燃燒	去除空氣中的氮氣，僅使 用高濃度氧氣燃燒	零 NO _x 排放	分離氧氣成本高 燃燒溫度極高
DLE(Dry Low Emission) 燃 燒	主要為透過預混技術降低 燃燒溫度，並輔以少部分 非預混火焰來引導	低 NO _x 排放	在極低燃燒溫度 下，可能增加 CO 和未燃碳氫化合物 排放，並增加熄火 風險
觸媒燃燒 (Catalytic Combustion)	預混燃料於觸媒表面進行 氧化反應	極低 NO _x 排放 降低熄火風險 降低燃燒不穩定 性	考驗觸媒反應器之 耐用性及穩定性

表 1. 各新型燃燒方法歸納及比較

五、Siemens Energy 的先進燃氣渦輪機

SGT-4000F 燃燒器升級

Siemens Energy 公司以近年於數個機組進行的 SGT-4000F 燃氣渦輪機之燃燒器升級項目為例講解改善方式及其助益。其升級旨在提升燃燒效率、降低 NOx 排放、提升穩定性並增加燃料靈活性。做法為透過燃燒器更新及儀控的改善來達成。這些升級方案包含燃燒器硬體改良、兩階段操作模式 (2 Stage Operation)，以及冷卻空氣減少燃燒室 (CAR) 的應用。

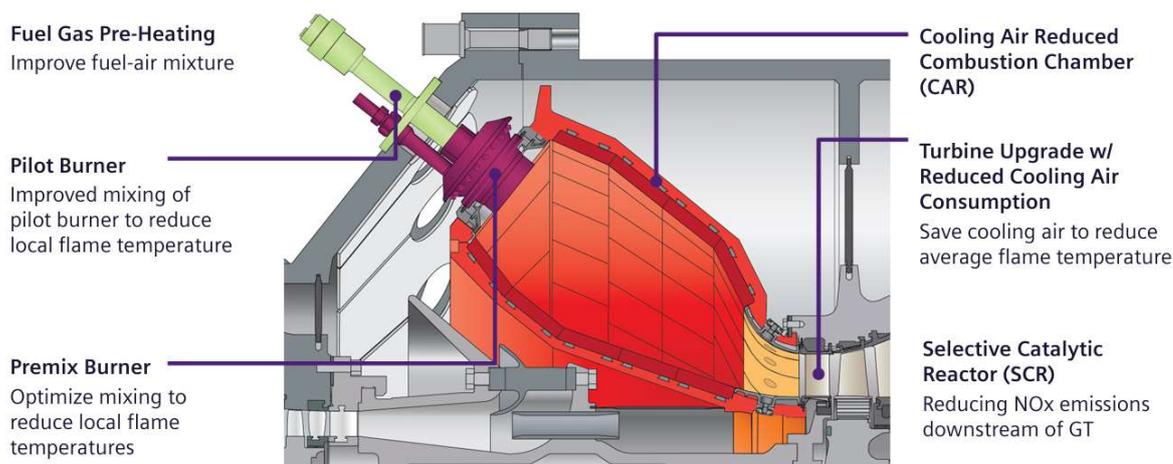


圖 15. SGT-4000F 燃燒器升級之主要變動¹⁶

燃燒器升級的核心在於引燃器和預混式燃燒器的設計革新。早期型號採用擴散式燃燒及擴散式引導火焰(Pilot)，而新式燃燒器則均改為預混式 (Pre-Mixed Pilot)，並結合優化噴嘴和燃燒器幾何形狀的燃燒器，大幅提升燃料與空氣的混合效率，降低火焰區域的溫度峰值，進而降低 NOx 生成。根據 Siemens Energy 的數據，燃燒器升級可使 NOx 排放量降低超過 40%。此外，新式燃燒器搭配兩階段操作模式，可進一步降低 NOx 排放並提升效率。

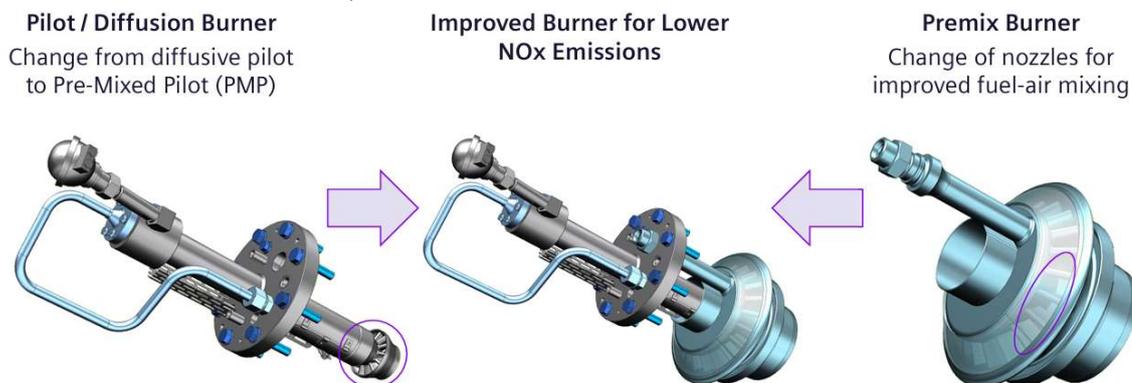
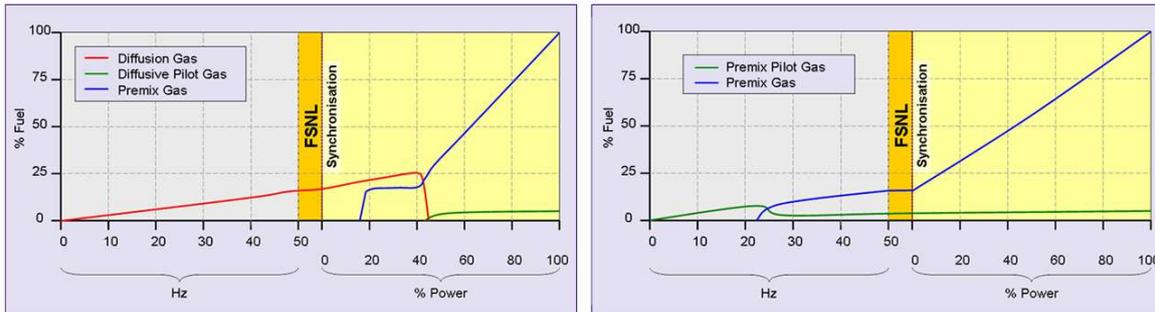


圖 16. 將擴散式引導火焰改為預混式(左)，原預混燃燒器則改善噴嘴設計(右)¹⁶

¹⁶ “Workshop Advanced GT Technology and Emmission reduction”, Siemens Energy 內部文件

傳統的燃氣渦輪機啟動三階段首先啟動擴散火焰並在併聯後再依序啟動預混火焰和預混式引導火焰，而在新型兩階段操作模式中，則省略了擴散火焰，直接以預混引導火焰啟動，並在升速過程中加入預混式燃燒器。由於預混式燃燒的 NOx 排放量較低，因此兩階段操作模式有助於降低整體 NOx 排放。此外，兩階段操作模式也具備節省燃料和升速能力的優勢。

SGTx-4000F 2-Stage Operation



3 Stage

- Ignition & synchronization in diffusion mode
- DM → PM switchover at 20-40% load

2 Stage

- Ignition with pilot line
- Acceleration & synchronization in PM

圖 17. 兩階段與三階段操作在升速及並聯後的對比¹⁶

冷卻空氣減少燃燒室 (Cooling Air Reduced) 則是透過減少燃燒室冷卻空氣消耗，將更多空氣導向燃燒過程，進而維持 NOx 排放且提升效能。CAR 燃燒室已在多個案例中得到驗證，並取得了顯著的 NOx 減排效果。此外，CAR 燃燒室也適用於燃料加入氫氣混合，以實現更多元的燃料配置。

Optimized Combustion Our Approach for High Amounts of H₂ Co-Firing & Low NOx



1. Cooling Air Reduced Combustion Chamber

- **Potential Benefits**
 - Cooling air reduction, allowing
 - H₂ admixture or
 - Reduced NOx (<15ppm) or
 - Higher performance at constant NOx
- **Scope**
 - Flame tube replacement including flame tube bottom
 - New mixing casing
 - No modification of combustion chamber shell



2. H₂ Optimized Burner

- **Potential Benefits**
 - Stable operation with H₂ admixture together with cooling air reduced combustion chamber
- **Scope**
 - Diagonal swirler exchange
 - Depending on H₂ content & natural gas specification, modified auxiliary systems & I&C adjustments are required

● Scope optimized according to emission limit & H₂ co-firing target

圖 18. CAR 升級所作的改動¹⁶

SGT-9000HL

在此次實習中，除了現場製造的導覽外，配合本公司興達、中火新等燃氣機組的增建，Siemens Energy 公司同時簡報了他們最先進的氣渦輪機型:SGT-9000HL。SGT-9000HL 於 2013 年開始研發設計，並於 2019 年起陸續在美國(60Hz；單循環)及英國(50Hz；複循環)進行實地功能驗證。

先進的 HL 級燃氣渦輪是基於 H 級燃氣渦輪改進而來，從而達成更高的出力與效率。主要透過五個關鍵領域的改進¹⁷：

- 壓縮機路徑
- 低排放燃燒系統
- 增強渦輪葉片冷卻
- 先進的熱障塗層 (TBC)
- 第四段渦輪葉片的冷卻

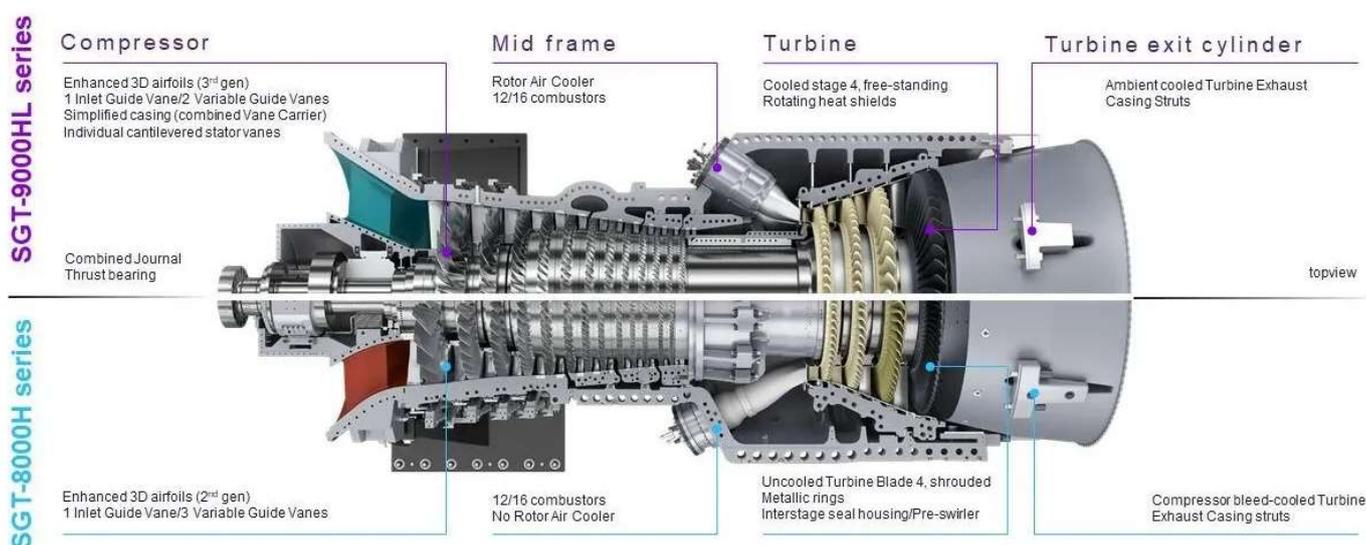


圖 19. HL 級燃氣渦輪基於 H 級燃氣渦輪改進的異同

值得一提的是，Siemens Energy 於美國北卡羅萊納州 Duke Energy 旗下的 Lincoln Combustion Turbine Station 所裝置的 SGT6-9000HL 燃氣渦輪機於 2022 年八月獲得金氏世界紀錄認證為全世界最大裝置容量的單循環燃氣發電廠 (410.9MW)¹⁸；2022 年十月更接連獲得 60Hz 燃氣渦輪發電廠 100.56 MW/min 升載速度的金氏世界紀錄。這在電網混合再生能源的今日至關重要，可以迅速填補再生能源發電的短缺，並在面對日益加劇的波動時提供電網穩定性。

¹⁷Hans Thermann and Gennadiy Afanasiev, "Siemens Energy HL-Class gas turbine sets World Records", Gas Turbine World, March 28, 2023

¹⁸Most powerful simple cycle gas power plant, world record in Lincoln County, North Carolina, <https://www.worldrecordacademy.org/2024/7/most-powerful-simple-cycle-gas-power-plant-world-record-in-lincoln-county-north-carolina-424319>, Jul 04, 2024

Table 1. SGT-9000HL simple cycle performance		
Gross ratings at ISO conditions. natural gas fuel. Data varies with site conditions and type fuel.		
Design Rating	50 Hz Plant	60 Hz Plant
Power output	593 MW	440 MW
GT ramp-up	85 MW/min	85 MW/min
Efficiency	> 43%	43.20%
Heat rate/kWh	< 8375 kJ	8333 kJ
	7947.9 Btu	7898.15 Btu
Turbine speed	3,000 rpm	3,600 rpm
Pressure ratio	24 to 1	> 24 to 1
Exhaust flow/sec	1,050 kg	760 kg
	2,315 lb	1,676 lb
Exhaust temp	670°C	675°C
	1238°F	1247°F
Emissions		
NOx with SCR	down to 2 ppm	down to 2 ppm
Without SCR	25 ppm	25 ppm
CO emissions	10 ppm	10 ppm

圖 20. SGT-9000HL 性能



圖 21. SGT-9000HL 部件吊裝¹⁹

使用 LES 模擬來開發新型燃燒器

Siemens Energy 致力於解決燃氣渦輪機中瞬態燃燒效應的複雜問題。這些效應包括燃燒過程中壓力和溫度的波動，這會影響渦輪機的效率、可靠性以及安全性。燃燒是一個動態過程，傳統的建模方法很難精確預測，而準確的預測對於優化渦輪機性能以及減少排放至關重要。

¹⁹Siemens Energy Facebook

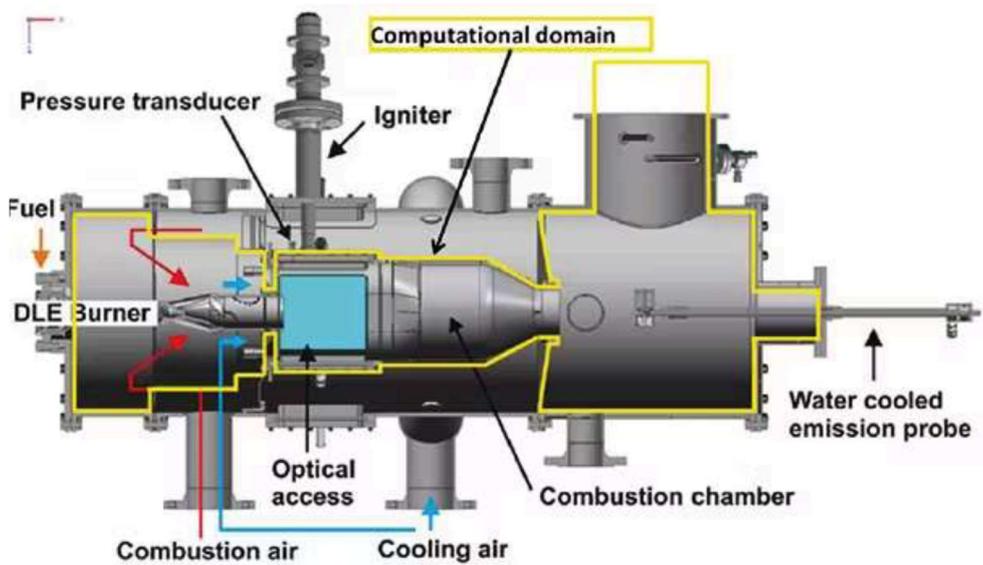


圖 22. 使用 LES 模擬燃燒的區域（黃框處）

為了解決這個問題，Siemens Energy 採用了 LES 模擬（Large Eddy Simulation）技術。LES 是一種先進的計算流體動力學（CFD）技術，能夠詳細模擬燃燒過程中的流動。通過利用 LES 可以更好地預測燃燒在不同條件下的行為，從而提供更準確可靠的設計。這種方法有助於驗證新型燃燒器的設計、降低燃燒不穩定性、提升效率，並實現更清潔的能源解決方案。

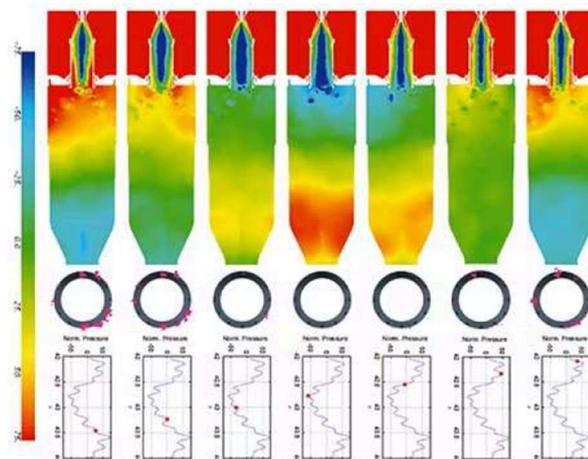


圖 23. 使用 LES 模擬各條件下的燃燒狀況

六、Siemens Energy 的簡介與未來願景

本次實習也介紹了 Siemens 公司的發展沿革，自 1847 年成立以來已歷經 177 年，期間不斷形塑個階段的工業革命，從電力、電子和資訊科技到數位化，持續推動產業的發展。如今，Siemens 已成為電氣化、自動化和數位化領域的領導者，在各領域都有卓越貢獻。其發展軌跡與未來願景供本公司做為未來參考與借鏡。

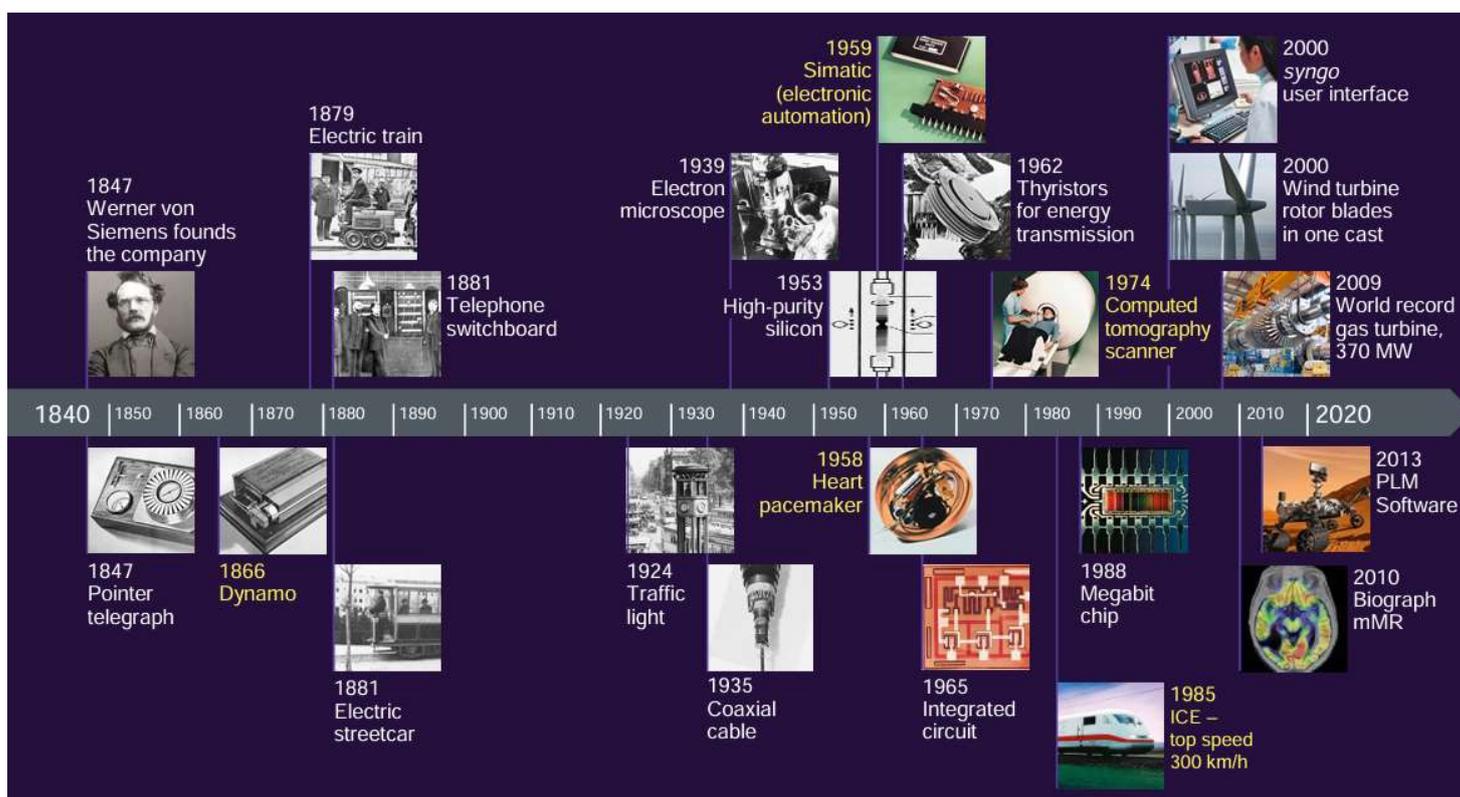


圖 24. Siemens 公司的發展歷程與重大科技貢獻

Siemens Energy 是 Siemens 集團旗下專注於能源業務的子公司，致力於成為全球能源領域的領導者。該公司的願景是支持客戶實現整個能源價值鏈的轉型，並為建設更永續的能源世界做出貢獻。

- 全球佈局：Siemens Energy 業務遍及 90 多個國家，擁有約 98,000 名員工，為全球約六分之一的電力生產提供技術支持。
- 研發投入：每年投入約 10 億歐元用於研發，以持續推動能源技術的創新。
- 公司架構：Siemens Energy 採用整合的能源技術公司模式，旨在提高客戶關注度、透明度和責任感。公司架構反映了這一目標，並支持其在整個能源價值鏈中為客戶提供服務。

Siemens Energy 的未來發展方向主要圍繞以下幾個關鍵領域：

- 永續發展：將永續發展作為其核心戰略，並制定了雄心勃勃的目標，包括在 2030 年實現自身運營的碳中和，到 2023 年在自身運營中使用 100% 綠色電力，以及到 2030 年將上游和下游排放分別減少 30% 和 28%。
- 數位化：Siemens Energy 積極擁抱數位化，並通過其 Omnivise 數位服務產品組合為客戶提供支援。Omnivise 涵蓋資產管理、效能管理和營運技術網路安全等領域，旨在幫助客戶降低維護成本、減少網路風險、提高效率 and 盈利能力，並減少意外停機時間和燃料成本。
- 混合電廠解決方案：Siemens Energy 認識到客戶對提高混合資產利用率的需求，並開發了 Omnivise 能源管理解決方案。該解決方案旨在管理發電資產的利用，以最大限度地提高經濟回報和盈利能力。Omnivise 能源管理透過建立能源系統的數位分身、虛擬化能源市場和儲備需求，並利用先進的最佳化技術，主動制定經濟最佳化的發電計劃。

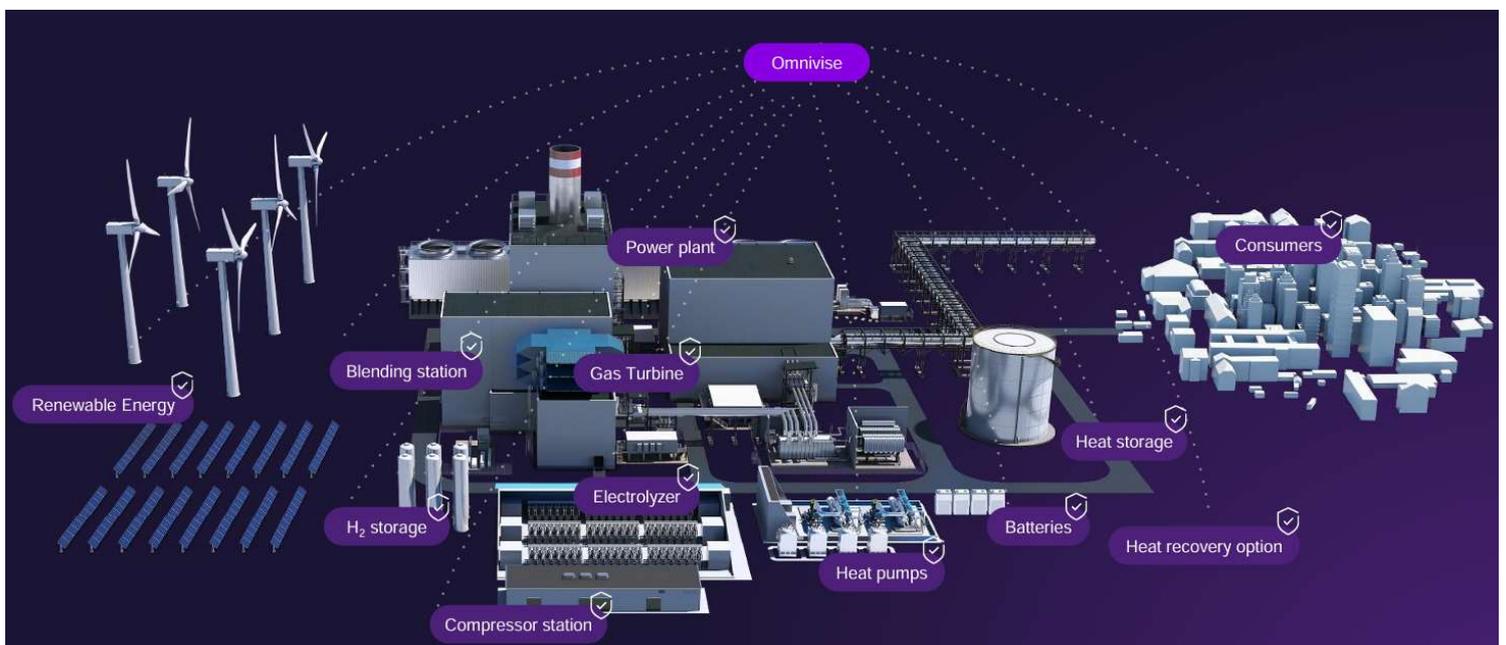


圖 25. Siemens Energy 公司的 Omnivise 願景，涵蓋電力的生產到使用

- 脫碳解決方案：提供涵蓋碳中和能源生產和使用的全面產品組合。這包括可再生能源、氫能儲存、電解槽、壓縮機站、熱泵和混合站等技術，以及燃氣輪機、熱儲存和電池等傳統能源技術。

Siemens Energy 致力於成為全球能源轉型的領導者，並通過永續發展、數位化和創新技術的應用，為建設更清潔、更可靠和更高效的能源未來做出貢獻。憑藉其全球影響力、深厚的技術積累和明確的發展戰略，有望在未來能源領域扮演重要角色。

肆、實習心得與建議

此次前往 Siemens Energy 實習，讓我深刻體會到該公司在燃氣渦輪機領域的技術實力和創新精神。研討會內容主要圍繞降低排放、提升效率和燃料靈活性等議題，並佐以實際案例分享該公司解決方案的成效。

在燃氣渦輪機升級方案方面，Siemens Energy 提供一系列解決方案，以滿足客戶對更高效能和更低排放的需求。研討會特別介紹了預混式燃燒器和預混式引燃器，透過優化燃料和空氣的混合，降低火焰溫度，有效減少 NOx 排放。此外，Siemens Energy 也分享了 LES 模擬技術，透過電腦模擬並驗證設計來提高燃氣渦輪機的效率。Siemens Energy 也分享了其燃氣渦輪機升級方案在全球的實際應用案例，特別是韓國和台灣電廠的經驗分享，如兩階段操作及冷卻空氣減少燃燒室（CAR）讓我印象深刻。這些案例證明了該公司解決方案的有效性和可靠性，也展現了其在燃氣渦輪機領域的技術實力。

Siemens Energy 公司強調永續發展是其核心戰略，並致力於協助客戶達成整個能源價值鏈的轉型。為此 Siemens Energy 積極投入研發，持續推動能源技術創新。此外，Siemens Energy 也提供 Omnivise 數位服務產品組合，涵蓋資產管理、效能管理和營運技術網路安全等領域，將發電業的上下游以數位孿生的概念模擬及預測，協助客戶應對能源轉型的挑戰。同時也積極開發新技術，例如混合氫氣燃燒器，並持續探索氫能應用於燃氣渦輪機的可行性。此外也持續投入儲能、儲熱、電網、風電及脫碳技術的研發，持續為潔淨能源目標努力。

此次實習讓我獲益良多，不僅深入了解該公司在燃氣渦輪機領域的最新技術和解決方案，更體會到對於永續發展的承諾和實踐。相信 Siemens Energy 將持續扮演能源轉型的領導者角色，為創造更潔淨、更可靠和更高效的能源未來貢獻心力。

經過此次研習後，筆者也提出些許建議，期望有助於提升發電效率和為了淨零碳排放目標做努力。燃燒器升級是降低 NOx 排放的首要任務。此次研習範例的 SGT-4000F 燃燒器升級方案，特別是預混式引導火焰（Pre-Mixed Pilot）和預混式燃燒器的組合，已被證實能有效降低 NOx 排放。專家也強調，透過改變噴嘴設計和優化燃料與空氣的混合，可以有效降低火焰溫度，進而減少 NOx 的產生。值得注意的是，韓國的案例顯示僅透過燃燒器升級，就能將 NOx 排放量降至 6 ppm，證明了這項技術的效力。

冷卻空氣減量燃燒室（CAR）是提升燃燒效率和氫氣混燒能力的重要技術。CAR 燃燒室透過減少冷卻空氣的使用量，可以提高燃燒效率並降低 NOx 排放。同時，CAR 燃燒室也為氫氣混燒提供了可能性，簡報中提到 CAR 燃燒室理論可達 40% 的氫氣混合比例。專家分享的經驗也顯示，CAR 燃燒室在實際應用中取得了顯著的 NOx 減排效果，並成功進行了 15% 氫氣混燒測試。以上兩項升級都可在已建置的燃氣渦輪機

組上進行，省去冗長的機組建置時間及高昂的費用。

最後，要感謝本廠各級長官及發電處長官的支持，同事幫忙分擔出國期間的工作，以及 Siemens Energy 公司協助安排參訪行程與技術指導，更要感謝許多公務出國的前輩熱心經驗分享，才能順利完成本次出國實習。



圖 26. 於 Siemens Energy 訓練中心前留影

伍、參考資料

1. Courtesy of Business Wire/Mitsubishi Hitachi Power Systems Americas, Inc
2. Combined-cycle gas turbines,
<https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-database/combined-cycle-gas-turbines-2022>
3. The National Academies of SCIENCES. ENGINEERING. MEDICINE.,
Consensus Study Report HIGHLIGHTS: Advanced Technologies for Gas
Turbines., 2020
4. U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2019, U.S.
Department of Energy, Washington, DC,USA, 2019; <https://www.eia.gov/ieo>
5. Air intake filtration system – most important for reliability of gas turbine power
plant,
<https://brinitiativeenergy.com/air-intake-filtration-system-most-important-for-reliability-of-gas-turbine-power-plant>
6. M.D Amir Abdullah, A.M Leman and A.H Abdullah, “Air Filtration Study to Improve
Indoor Air Quality : Proposed Study”, 3rd Scientific Conference on Occupational
Safety and Health- Sci-Cosh 2014
7. International Energy Agency, World Energy Outlook, 2017
8. International Energy Agency, World Energy Outlook, 2023
9. 徐子賀, “高溫預混燃氣燃燒之 NO_x 平衡及生成速率分析”, 2000
10. Jianchun Mi, Pengfei Li, Feifei Wang, Kin-Pang Cheong, and Guochang Wang,
“Review on MILD Combustion of Gaseous Fuel: Its Definition, Ignition,
Evolution, and Emissions”, Energy & Fuels, 2021
11. 趙怡欽, “貧油預混燃燒與燃燒不穩定”, 燃燒季刊第十三卷第二期中華民國
九十三年五月出版
12. Faqih, M.; Omar, M.B.;Rosdiazli, I.; Omar, B.A.A. “Dry-LowEmission Gas
Turbine Technology:Recent Trends and Challenges”. Appl.Sci. 2022, 12, 10922.
<https://doi.org/10.3390/app122110922>
13. 李元亨, “二氧化碳捕獲技術介紹 (三): 富氧燃燒”, 國立成功大學資源工程
學系, 2017

14. Medhat A. Nemitallah, Sherif S. Rashwan, Ibrahim B. Mansir, Ahmed A. Abdelhafez, and Mohamed A. Habib, “Review of Novel Combustion Techniques for Clean Power Production in Gas Turbines”, *Energy & Fuels* 2018 32 (2), 979-1004
15. Boyce, M. P. “Gas Turbine Engineering Handbook, 4th ed.”; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2012
16. “Workshop Advanced GT Technology and Emmission reduction” , Siemens Energy 内部文件
17. Hans Thermann and Gennadiy Afanasiev, “Siemens Energy HL-Class gas turbine sets World Records”, *Gas Turbine World*, March 28, 2023
18. Most powerful simple cycle gas power plant, world record in Lincoln County, North Carolina, Jul 04, 2024
<https://www.worldrecordacademy.org/2024/7/most-powerful-simple-cycle-gas-power-plant-world-record-in-lincoln-county-north-carolina-424319>
19. Siemens Energy Facebook