

出國報告（出國類別：實習）

高壓氣體絕緣開關設備 資料蒐集及運維等實習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：高毓均 電機工程師

派赴國家：瑞士

出國期間：114年8月30日至114年9月11日

報告日期：114年11月3日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

高壓氣體絕緣開關設備資料蒐集及運維等實習

頁數 31 含附件：☐是 ☒否

出國計劃主辦機關／聯絡人／電話

台灣電力公司／蔡晏筑／(02)-2366-7685

出國人員姓名／服務機關／單位／職稱／電話

高毓均／台灣電力公司／營建處／專員／(02)-2366-6965

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：114 年 8 月 30 日至 114 年 9 月 11 日

出國地區：瑞士

報告日期：114 年 11 月 3 日

關鍵詞：全球暖化潛勢、六氟化硫、氣體絕緣開關設備、環保絕緣氣體

內容摘要：(二百至三百字)

為因應全球淨零碳排趨勢及六氟化硫（SF₆）作為強效溫室氣體所帶來的減用壓力，開發非 SF₆之環保型高壓氣體絕緣開關設備（GIS）已是國際電業之重要課題，鑒於本公司對於此類新式環保型高壓氣體絕緣開關設備未曾使用過且規劃與設計方面仍缺乏相關經驗，故本次實習赴日立能源股份有限公司位於瑞士蘇黎世之總部及工廠，目標為系統性地蒐集並學習相關前瞻資料與應用知識。本報告聚焦於新式環保絕緣氣體之關鍵特性、使用情形、維護方式等技術與經驗，並期許藉由本次實地考察日立能源公司之環保型高壓氣體絕緣開關設備之資料蒐集，讓公司同仁能對此項設備能更深地認識。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網(<http://report.nat.gov.tw>)'

目錄

壹、	目的	1
貳、	行程規劃	3
參、	環保型絕緣氣體研習	5
一	日立能源公司簡介	5
二	傳統常見絕緣介質概要	6
三	環保型絕緣氣體概要	10
肆、	環保型高壓絕緣氣體絕緣開關設備研習.....	16
一	日立能源公司環保型氣體絕緣開關設備概要..	16
二	環保型絕緣氣體開關運維方式概要.....	21
三	工廠展示間及 EWZ Oerlikon 變電站觀摩	26
伍、	心得及建議	30
陸、	參考資料出處	31

壹、 目的

本次出國實習計畫的緣起，係基於全球能源轉型與環境永續的嚴峻挑戰，六氟化硫雖為高壓氣體絕緣開關設備中的優良絕緣介質，但其作為強效溫室氣體的特性已成為國際社會關切的議題。為此，歐盟已明確規範，將於 2030 年及 2032 年起，分別禁止新建中壓（24kV 至 52kV）及高壓（>52kV）SF₆ GIS 設備，此舉顯示非 SF₆技術的應用將是全球電網不可逆的趨勢。同時，我國「2050 淨零排放路徑及策略總說明」亦將推動含氟氣體削減措施，並將開發替代技術納入國家策略。鑑於國內目前尚未開發非 SF₆高壓氣體絕緣開關設備且本公司並未有完善之實務經驗，為確保國內電網技術能與國際先進國家同步接軌，取得環保替代氣體資料與實務經驗，已成為當前提升本公司技術水準的關鍵要務。本次實習的目標，即是盡早了解高壓氣體絕緣開關設備之新絕緣氣體規劃與設計理念，並讓本公司能在國內相關汰除六氟化硫法規正式頒布前提前做好準備。

本次實習赴日立能源公司位於瑞士蘇黎世總部與高壓氣體絕緣開關設備工廠，進行系統性研習與實地考察。具體學習範疇涵蓋：新絕緣氣體的使用情形與保護方式，掌握其特性、絕緣性能及設備中的安全運行要求，以及維護方式等實務經驗，吸收日立能源公司在非 SF₆開關設備的長期維護策略與操作規範。藉由蒐集相關資料並學習該公司的規劃設計實務經驗，期許能提供本公司未來制定技術規範之參考依據，並有助於未來評估

新絕緣氣體技術及將非 SF₆高壓氣體絕緣開關設備納入本公司採購規範之可行性，確保新一代電網設備既能符合國際環保趨勢，又能滿足國內電網運行的安全可靠要求，藉此推動本公司電網系統邁向綠色永續發展。

貳、 行程規劃

本次實習從 114 年 8 月 30 日至 9 月 11 日共計 13 天，赴日立能源公司位於瑞士蘇黎世之總部及工廠實地考察及交流，主要實習內容為環保型氣體絕緣開關設備之相關特性、絕緣性能、蒐集相關資料並吸收該公司的規劃設計實務經驗。

安排行程如下：

出國行程表		
日期	地點	工作內容
8/30~8/31		往程(台北-蘇黎世)
9/1~9/2	Hitachi Energy 總部 (蘇黎世)	1. 拜訪 Hitachi Energy 總部。 2. 非 SF ₆ 高壓氣體絕緣開關技術研討、交流與簡報會議。
9/3~9/4	Hitachi Energy 總部 及工廠 (蘇黎世)	1. 非 SF ₆ 高壓氣體絕緣開關應用、維護方式專案會議。
9/5~9/9	Hitachi Energy 工廠 EWZ Oerlikon 變電站 (地點：蘇黎世)	1. Hitachi Energy 非 SF ₆ 高壓氣體絕緣開關及工廠實習。 2. 觀摩 EWZ Oerlikon 變電站、實務經驗分享。 3. 觀摩客戶體驗中心/展示廳。
9/10~9/11		返程(蘇黎世-台北)

	圖 1 與日立能源公司 Marketing & Sales Manager Mr. Martin Camacho Mendoza 於日立能源公司門口合影
	圖 2 與日立能源公司 Area Sales Manager Mr. David Megrabian 於工廠之展示廳合影 後方設備為 EconiQ 系列 145kV SF₆-Free 高壓氣體絕 緣開關設備。
	圖 3 與日立能源公司 產品資深經理 李經理 於工廠之展示廳合影 後方設備為 EconiQ 系列 145kV SF₆-Free 高壓氣體絕 緣開關設備。

參、 環保型高壓絕緣氣體研習

一. 日立能源公司簡介

日立能源公司（Hitachi Energy）是全球電力設備領域的技術領導者之一，總部位於瑞士蘇黎世，其業務遍及全球約 60 多個國家和地區，擁有超過 5 萬名員工。公司的成立，是基於對電力行業長達逾百年的深厚積累與傳承，主要源自於其前身 ABB 的電網事業部（ABB Power Grids）。在日立集團於 2020 年完成股權收購後，公司於 2021 年正式更名，旨在結合日立的數位化能力與原有的電網技術優勢，共同推動全球能源系統的轉型，以建構一個更智能、更綠化的永續能源未來。

日立能源公司的產品範圍涵蓋了整個電力系統，從發電、輸電到配電。其核心業務專注於提供電力產品與後續服務，包括：高壓開關設備、變壓器、電網自動化與電力電子。在高壓領域，日立能源公司在氣體絕緣開關設備（GIS）的經驗相當豐富，並積極開發非 SF₆的環保型替代技術，以應對全球減排壓力。

作為全球能源轉型的推動者之一，日立能源公司不僅是高壓設備的重要製造商，更是全球公用事業、工業及基礎設施領域的重要夥伴，致力於提供永續且穩定的電力產品。特別是面對國際市場對六氟化硫的嚴格限制，日立能源積極投入非 SF₆環保型 GIS 設備的研發與

推廣，使其在環保型高壓開關領域取得了成熟的技術與實績，目前已
在全球多個國家及地區獲得廣泛應用。



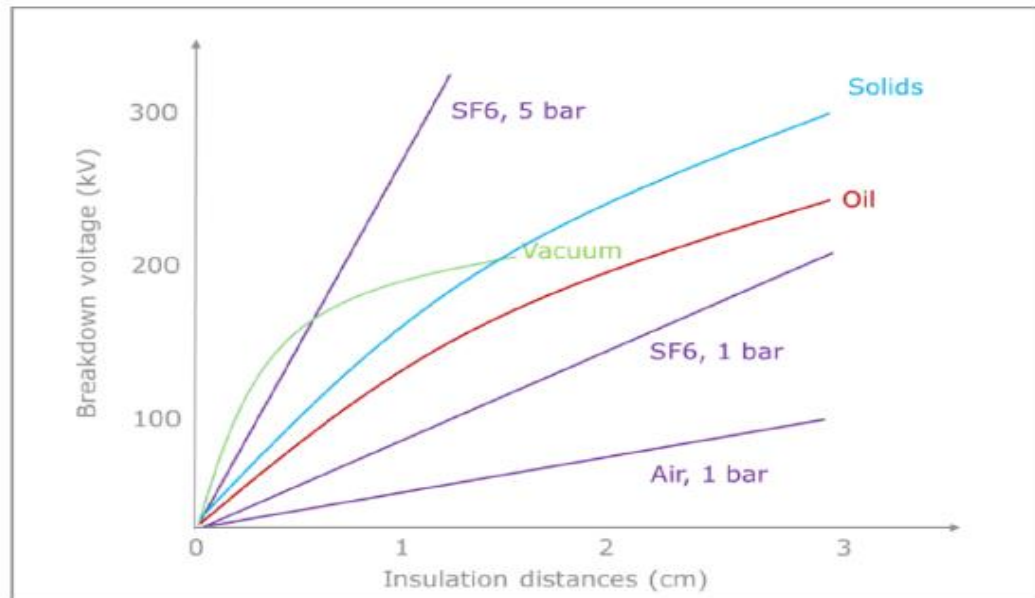
圖四 日立能源公司總部

二、傳統常見絕緣介質概要

(一)六氟化硫

六氟化硫氣體是一種人工合成的惰性氣體，因其在電氣工程中的
優異表現，近幾十年來，一直是高壓開關設備中的標準絕緣和滅弧介
質。其介電強度是傳統絕緣介質空氣的數倍，這直接導致了高壓電力
工程設計的革命性變革，催生了氣體絕緣開關設備。GIS 將所有高壓
組件（包括斷路器、隔離開關、接地開關等）封裝在接地金屬外殼
內，極大地減少了設備的佔用空間，使得變電站在城市中心、地下或
對景觀要求嚴苛的地區得以高效部署。更關鍵的是，SF₆在斷路器中的

滅弧能力相當出色，其卓越的熱傳導性及重組速度，能以極低的能量和時間快速熄滅數萬安培的電弧，保證了現代高壓電網的穩定性、快速響應性與運行安全。



圖五 各種絕緣介質強度比較

當增大絕緣距離時，不同絕緣介質的耐受電壓亦會隨之攀升(如圖五)，這也確立了開關設備的體積與額定電壓呈正比的基本設計原則。然而，各類介質在這一特性上表現迥異：例如 SF_6 等氣體的絕緣強度與絕緣距離幾乎維持線性對應，此特性賦予了氣體斷路器 GCB 藉由擴大設備體積和提高壓力來突破電壓極限的能力，其應用範疇已能涵蓋 1000kV 以上的特高壓領域。

儘管六氟化硫在絕緣能力上表現優異，但其對全球氣候變化的影響已構成一項無法迴避的巨大挑戰。六氟化硫氣體被聯合國氣候變化綱要公約列為六種主要溫室氣體之一，是目前已知的人造氣體中，全球暖化潛勢值（Global Warming Potential,GWP）最高者。經聯合國政府間氣候變遷專門委員會（IPCC）證實，其 GWP 值高達等量二氧化碳 CO₂ 的 22,800 至 23,500 倍，意即極微小的氣體洩漏，將對氣候暖化造成不成比例的巨大衝擊。更為嚴峻的是，六氟化硫在大氣中的生命週期極長，半衰期超過 1,000 年。這使得任何形式的排放都會造成長期的、累積性的環境負擔。雖然現代 GIS 設備的設計已將洩漏率降至極低，但在設備製造、安裝、運行和報廢回收的整個生命週期中，仍無法完全杜絕排放風險。面對六氟化硫 SF₆所帶來的嚴峻環境代價，國際的法規限制正在收緊，已從最初的自願減量轉向強制淘汰。歐盟最新的法規已明確規定新建中壓及高壓 SF₆設備的嚴格禁用時程，成為氣體絕緣開關轉型的主要驅動力。

另 GIS 設備中如存在微量的水氣 H₂O 和氧氣 O₂，在 SF₆經過消弧後與這些元素會發生進一步化學反應，生成極微量具有極低腐蝕性和毒性的最終分解產物，因此，GIS 氣體中的水氣含量是決定最終腐蝕性毒物生成量的關鍵因素，也是本公司必須嚴格控制的參數，一旦偵測到這些分解產物，亦需立即啟動相應的維護處理程序，故 SF₆雖可

做為開關設備絕佳的絕緣介質，同時亦可能成為環境破壞及影響設備之風險因素。

產物化學式	名稱	特性與毒性
SOF ₂	亞硫醯氟	與水氣反應的主要產物之一，為有毒氣體。
SO ₂ F ₂	硫醯氟	與氧氣反應的產物，劇毒，但產量通常少。
SO ₂	二氧化硫	有毒氣體，具刺激性和腐蝕性，會腐蝕設備金屬部件。濃度高時，也是判斷故障的指標。

表一 SF₆經過消弧後所產生之有害氣體

(二)真空 Vacuum

真空雖在微小絕緣距離內展現出出色的絕緣優勢，但其有效絕緣強度在約 1.5cm 處即達到上限。這項內在的物理瓶頸，嚴格限制了真空斷路器 VCB 透過絕緣距離來提升耐壓的能力，因此，目前 VCB 的應用主要鎖定在 145kV 級以下的中壓配電系統。

(三)空氣

空氣是一種極具環境優勢的絕緣介質，其最大優勢在於天然、無毒、不助燃，且 GWP 值為零，即便洩漏也完全不會產生溫室效應或有毒的電弧分解物（如 SF₆的分解產物），大幅簡化了氣體處理、回收程序與維護安全問題。由於其普遍性和極低成本，空氣成為戶外變電站和裸露高壓輸電線路的標準絕緣方式。然而，空氣的主要技術限制在於其介電強度較低，在標準壓力下僅約 3 kV/mm，遠不及 SF₆等專業

絕緣氣體。此低強度特性直接導致採用空氣絕緣的設備 AIS 在高壓系統中，必須透過極大的絕緣距離來確保耐壓能力，從而使得設備體積較龐大，佔地面積遠高於體積緊湊的氣體絕緣開關設備 GIS。

(四)絕緣油

在開關設備中，絕緣油主要應用於油浸式斷路器，其核心功能是絕緣與滅弧。絕緣油的介電強度遠高於空氣，能確保設備在高壓下的絕緣完整性。更重要的是，當斷路器分斷電流產生電弧時，絕緣油會迅速汽化分解產生高壓氣體，利用油氣流的強大冷卻和吹拂作用來快速熄滅電弧。然而，絕緣油的主要限制在於存在火災和爆炸風險，且電弧產生的碳化物會污染油質，需要頻繁的維護和淨化。由於這些安全與維護上的挑戰，絕緣油在現代電力系統的高壓開關設備中正逐漸被取代。

三. 環保型絕緣氣體概要

全球電力設備公司為應對六氟化硫 SF₆ 氣體高達 23,500 倍 CO₂ 的溫室效應潛能，已將無 SF₆ 技術列為電網排碳的首要目標。當前市場的發展趨勢呈現兩種方向：一種為 C4-FN 混合氣體路線，廠家有 GE、日立能源，另一種為潔淨氣體/乾燥空氣（N₂ 與 O₂ 混合物，本報告後統稱潔淨氣體），廠家有西門子公司與施耐德公司，C4-FN 混合氣體實現了高電壓等級開關設備的環保化與體積最小化，是解決電網輸電端脫碳問題的良好選擇。相反，潔淨氣體憑藉其零 GWP 值和極低成本

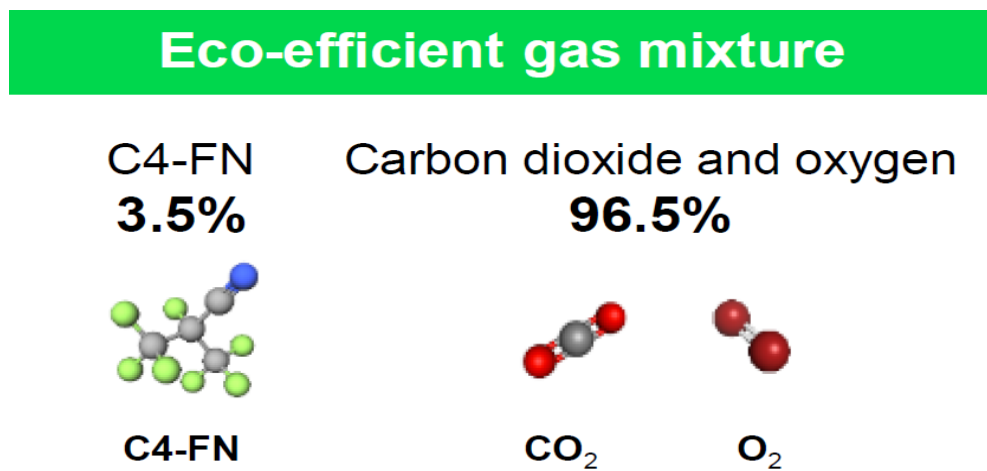
的絕對優勢，成為中壓配電網中的解決方案。因此，未來的電網將有可能是這兩類技術依據不同的電壓等級和地理環境要求，共同並存的局面，本報告後續亦將針對日立能源公司所採用之 C4-FN 環保絕緣氣體加以說明。

比較項目	六氟化硫 SF ₆	C4-FN 之混合氣體	潔淨氣體（N ₂ 與 O ₂ 混合物）
GWP（衡量溫室氣體造成全球暖能力的指標）	極高 (>23,500)	極低（仍屬於含氟氣體，約 400）	接近於 0
絕緣性能	最高	高（與 SF ₆ 相當）	中間
適用電壓	36kV~1,200kV	約 72kV~550kV	約<170kV
設備大小	最緊湊	最緊湊	體積較大（需較大佔地面積）

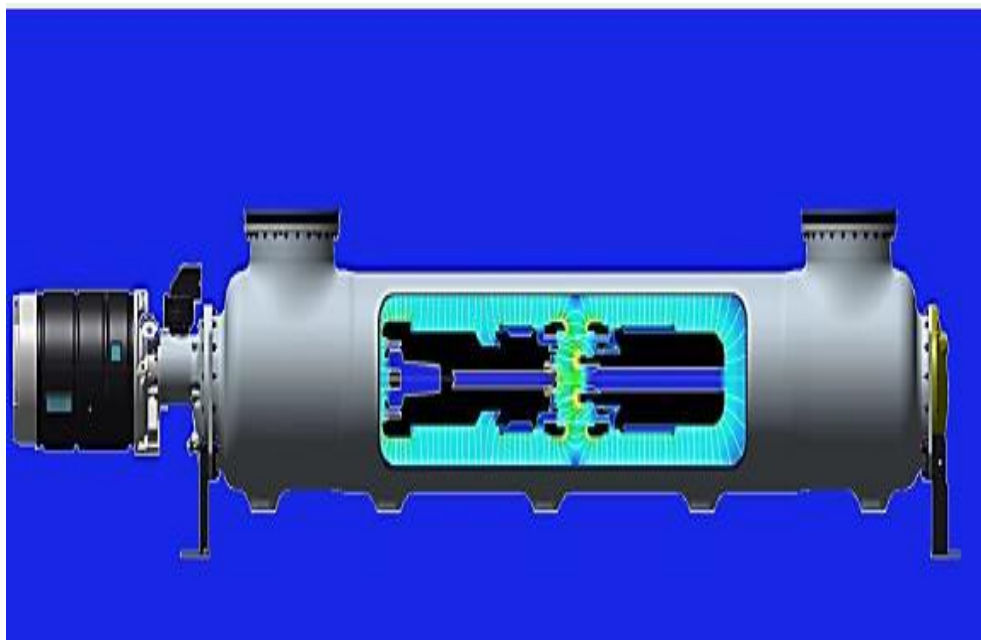
表二 六氟化硫 SF₆與兩種環保型絕緣氣體比較

EconIQ 是日立能源公司所推出的環保絕緣氣體高壓產品組合的品牌名稱，它不是單指一種氣體，而是一系列目標在顯著減少產品全生命週期碳足跡之開關產品。EconIQ 的核心技術是採用高性能的環保混合氣體 C4-FN 來替代具有極高 GWP 值的六氟化硫 SF₆。在氣體絕緣開關設備 GIS 中，設備的尺寸直接由內部使用的絕緣氣體決定，為了確保 EconIQ SF₆-FREE GIS 能維持與傳統 SF₆ GIS 設備相同的緊湊尺

寸，同時實現高電壓絕緣和消弧能力，EconIQ 選擇在 CO₂ 以及 O₂ 基礎上(96.5%)添加了少量的合成氣體 C4-FN，C4-FN 在混合物中的含量僅佔 3.5%，它可以在高壓開關設備中替代 SF₆，亦能使設備能夠保持與傳統 SF₆開關設備相同的性能、尺寸與可靠性。



圖六 日立能源公司 EconIQ 系列 SF₆-FREE GIS 所使用之氣體成分



圖七 EconIQ CB 消弧室示意圖

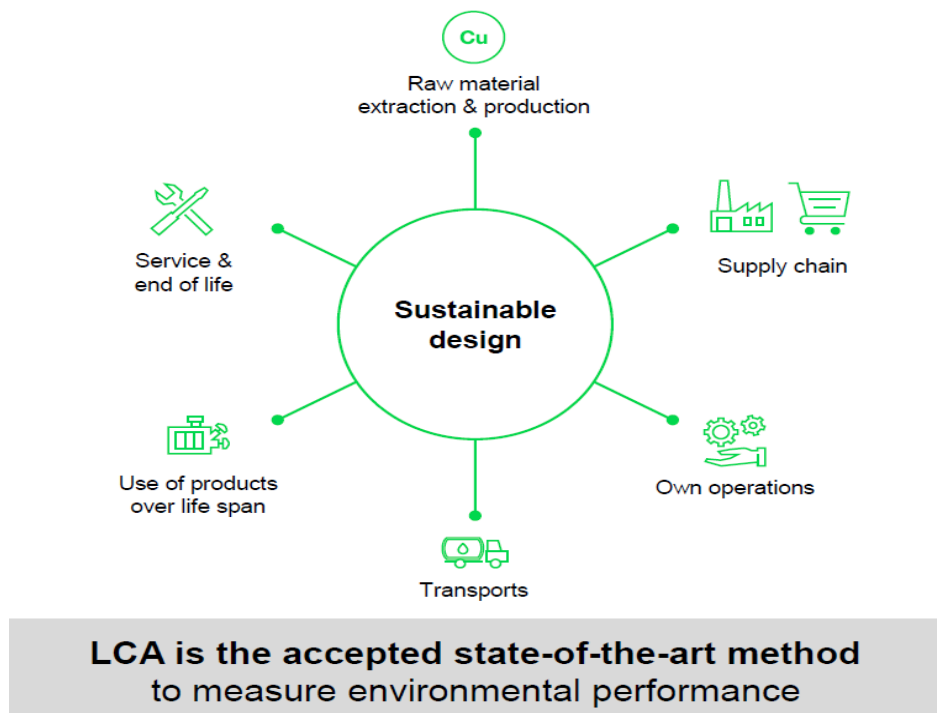
該混合氣體(3.5% C4-FN + 96.5% CO₂/O₂)有幾項特點：它不會在水、植物或土壤中累積，從根本上避免了對自然生態的長期污染。其在大氣中的壽命約為 30 年，遠低於 SF₆，並能迅速分解成自然界中已經存在的物質。即使發生意外洩漏，氣體也會從其密封外殼中逸出後，均勻地分散在大氣中，不會造成局部高濃度堆積的風險。在安全方面，EconIQ 混合氣體不被歸類為有毒物質，C4-FN 具有最低的 EU CLP（化學物質分類、標籤和包裝法規）分類，與許多家用清潔產品屬於同一類別。雖然純 C4-FN 在高濃度下被歸類為「吸入有害」，但由於該氣體在實際應用中是以高度稀釋的混合物形式使用，且僅限於受過訓練的人員遵循安全程序才能接觸，故極不可能發生高濃度接觸。透過低環境衝擊、低毒性的本質與嚴格的安全操作規範，新式環保氣體確保了操作人員和電力資產的雙重安全。

環保絕緣氣體的產生是為了能取代強效溫室氣體 SF₆，有效降低碳排放，在與日立能源公司同仁交流過程中，他們特別向我強調了「生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA)」的概念。「生命週期評估」是一種客觀的科學工具，目的在計算一個產品在整個生命週期中消耗的資源和排放的污染物，讓使用者能識別和量化產品對環境的影響，例如衡量溫室氣體排放量。

LCA 評估的範圍包括以下所有階段：

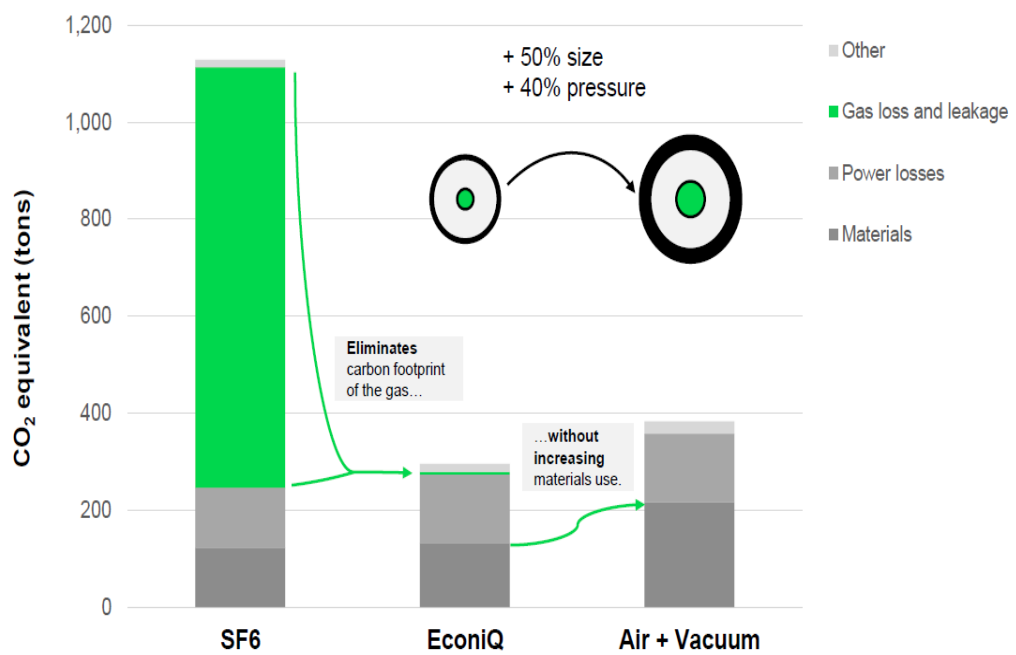
1. 原料提取：採集和加工所有必要的原材料。

2. 製造與生產： 產品的加工、製造、組裝、包裝。
3. 運輸與分銷： 原材料和成品的運輸。
4. 使用與維護： 產品在使用過程中的能耗、維修和清潔。
5. 廢棄處置： 產品壽命結束後的回收、再利用、焚燒或掩埋。



圖八 生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 示意圖

EconIQ 設備能夠消除 SF_6 洩漏所產生的巨大碳足跡，使其總 CO_2 排放量顯著低於傳統 SF_6 設備。若 C4-FN 混合氣體與潔淨氣體做比較，做為絕緣介質時雖然潔淨氣體洩漏所造成的碳排放量較低，但在高壓設備上以「生命週期評估」的觀點來看，因潔淨氣體其高壓設備上體積較大，將設備製造、運輸等階段一併納入評估，故整體碳排放量仍較使用 C4-FN 混合氣體的開關設備高。



圖九 高壓設備如 EconIQ 系列 420kV GIS 以生命週期評估檢視總碳排放量

肆、 環保型高壓絕緣氣體絕緣開關設備研習

一. 日立能源公司環保型氣體絕緣開關設備概要

(一). EconiQ 系列產品介紹

EconiQ SF₆-FREE GIS 設備的設計架構完全與傳統 SF₆ GIS 相同，其內部組件除了核心的斷路器、隔離開和接地開關之外，也完整具備了匯流排、用於測量與保護的比流器和比壓器，以及避雷器等所有必要的設備。這項技術確保了 EconiQ 能夠提供與傳統 GIS 完全一致的電力系統控制、保護與隔離功能。

日立能源公司在 SF₆-free 高壓技術領域已擁有超過 10 年的實務經驗，且 EconiQ 系列產品已在全球累積了多項使用實績，包括多項世界首創：

- 420 kV 斷路器：於 2022 年推出了全球首個 SF₆-free 420kV 斷路器。
- 420 kV 氣體絕緣開關設備：於 2022 年在德國提供了全球首個 SF₆-free 的 420 kV 氣體絕緣開關設備。
- 550 kV 斷路器：於 2024 年推出全球首個 SF₆-free 550kV 斷路器。

全球部署與規模化應用：

- 裝設總量： 全球範圍內已裝設 1,100 多套 EconiQ 設備。
- 線路長度： 累積的 EconiQ 氣體絕緣線路總長度超過 15 公里。
- 市場覆蓋： EconiQ 技術已被全球 26 國家/地區採用。

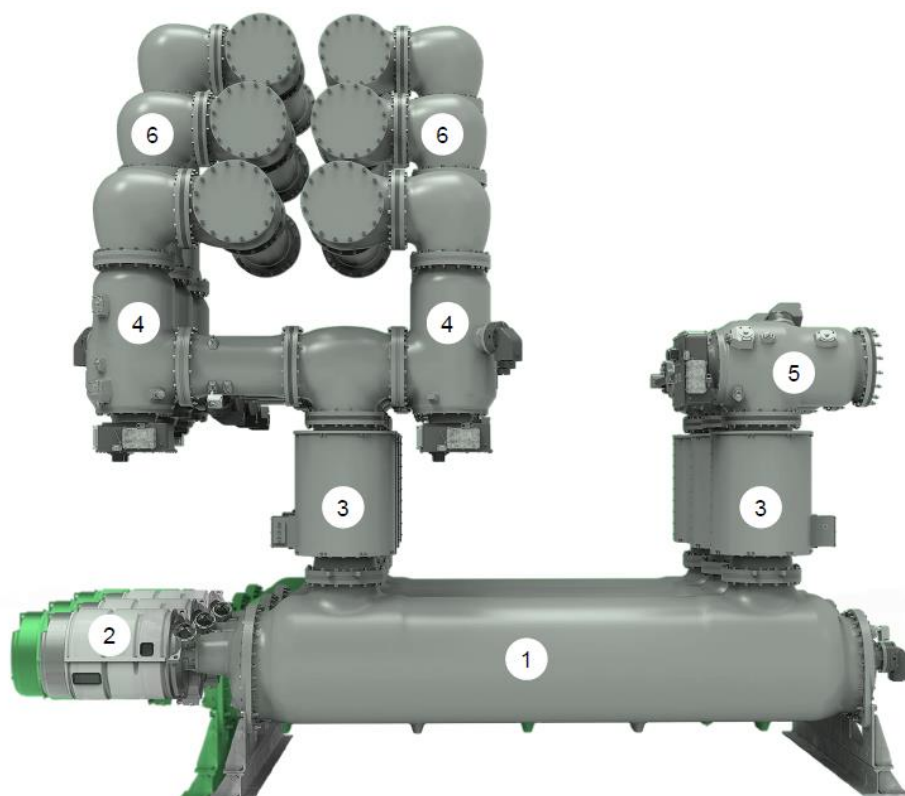


圖十二 使用日立能源公司 EconiQ 系列產品之國家

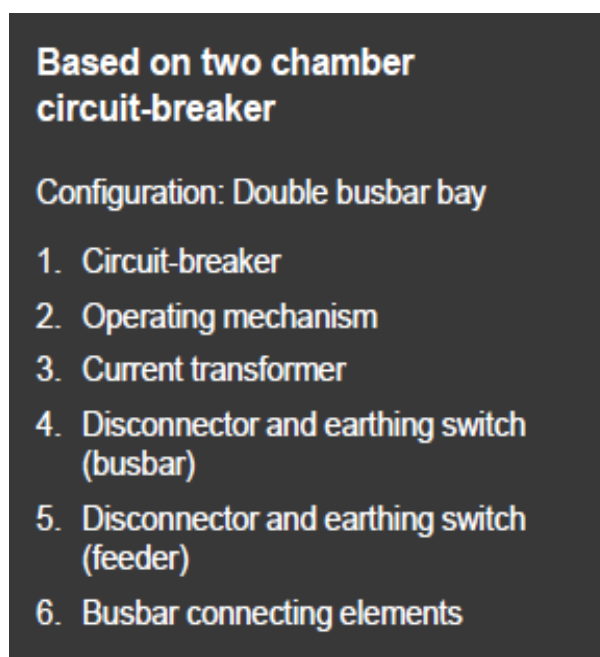
(二). EconiQ ELK-3,420kV

EconiQ ELK-3,420kV GIS 於 2022 年首次推出，這套設備為日立能源全球安裝數量最多的 ELK-3 系列，已證明其穩定性與安全性；另該設備採用每相獨立的機構，並結合精簡的內部設計，可有效減少故障點。根據 CIGRE((International Council on Large Electric Systems,大電力系統國際委員會)指出操作機構是高壓開關設備重大故障的主要來源，此種簡化設計可提升產品的可靠性和開關動作的精準性。

EconiQ ELK-3,420kV GIS 外型及其規格如下：



圖十三 EconIQ ELK-3,420kV GIS 外型圖

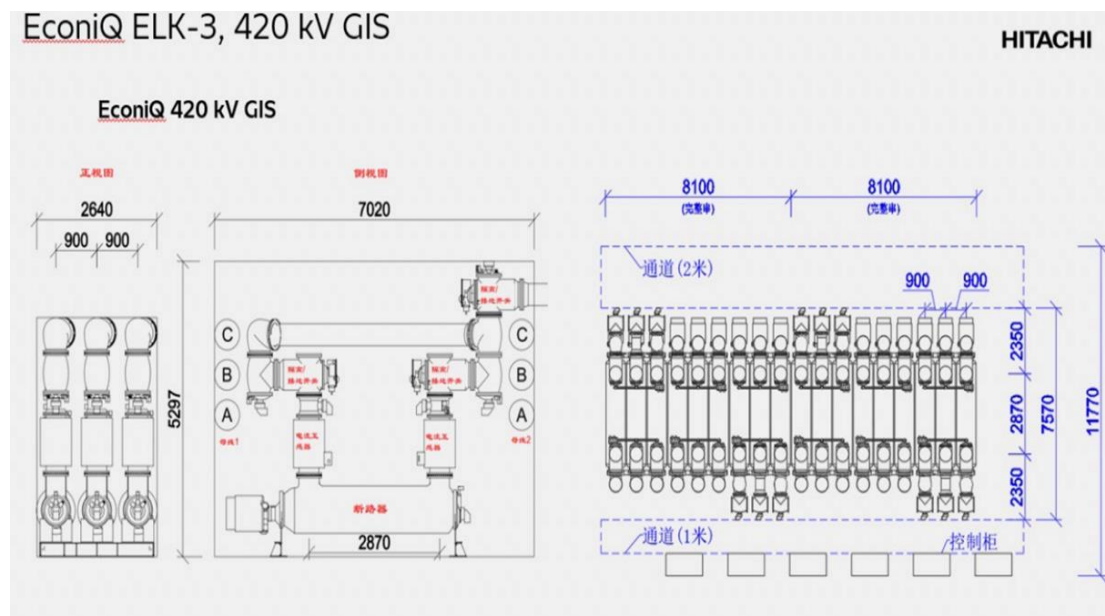


圖十四 EconIQ ELK-3,420kV GIS 設備對照圖

Main ratings		EconIQ ELK-3, 420 kV
Rated voltage	kV	420
Rated frequency	Hz	50 / 60
Rated short-duration power-frequency withstand voltage (1 min)	kV	650
Rated lightning impulse withstand voltage (1.2 / 50 μ s)	kV	1425
Rated switching impulse withstand voltage (250 / 2500 μ s)	kV	1050
Rated normal current (at 40 °C)	A	5000
Rated short circuit-breaking current	kA	63
Rated short-time withstand current (up to 3 s)	kA	63
Rated peak withstand current	kA	171
Circuit-breaker mechanical endurance class		M2 (10,000 CO)
Circuit-breaker electrical endurance class		E2
Circuit-breaker capacitive switching class (k=1.4)		C2
Ambient temperature range	°C	-30...+50
Installation		Indoor / outdoor

圖十四 EconIQ ELK-3,420kV 規格

針對台灣地狹人稠的地理條件， EconIQ ELK-3, 420 kV GIS 在消除 SF₆ 氣體以達成環保減碳的同時，仍能保持與傳統 SF₆設備相同的佔地面積，也確保未來同廠區設備擴充的空間彈性，下方圖為 EconIQ ELK-3,420kV GIS 之尺寸圖。



圖十五 EconIQ ELK-3,420kV GIS 尺寸圖

EconIQ 斷路器採用液壓-彈簧複合操作機構。該機構的設計目標是提供高壓斷路器所需的巨大操作動力，同時實現精準的動作控制。它利用彈簧作為能量儲存元件，而高壓液壓油則作為動力傳輸與控制媒介，液壓系統透過活塞將彈簧釋放的能量傳遞給斷路器觸頭，並利用油液幾乎不可壓縮的特性，在高速度動作的末端提供穩定的阻尼和緩衝。這種複合設計確保了操作機構在執行開合操作時，具有高動作一致性，並能精確控制觸頭運動的速度和停止位置，以滿足高壓系統對操作可靠性和長機械壽命的要求。



圖十六 EconIQ ELK-3,420kV 操作機構圖

二. 環保型絕緣氣體開關運維方式概要

隨著全球邁向淨零碳排，以及 SF₆ 這種強效溫室氣體所帶來的嚴格管制要求，一旦國內強制汰除 SF₆的法規正式生效，本公司即必須全面改用環保氣體絕緣開關。這項重大轉型不僅要求我們理解兩者絕緣氣體的特性差異，更關鍵的是，現場第一線人員能否迅速掌握新設備的維護流程與技術，亦將是面對開關設備轉型的重要課題。

在維護技術方面，SF₆氣體絕緣開關設備和 C4-FN 混合氣體的絕緣高壓設備擁有高度的共通性。這是因為兩種技術的設備架構和運行原理相似，使得運維人員過往累積的 SF₆氣體絕緣開關設備實務經驗與培訓，能夠以最小的努力轉移到 C4-FN 混合氣體絕緣開關設備上。除了氣體處理流程的細微差異外，設備的設計、安裝、調試和維護程序都保持高度一致，以下為 EconiQ 產品之運維上之特點：

(一) 外部差異極少

1. 結構與性能：設備的尺寸相似，整體架構與過往的 SF₆ GIS 設備相似。
2. 操作機制：開關裝置依賴相同的原理，因此使用相同類型的操作機構。
3. 一般差異性：兩種設備之間 C4-FN 與 SF₆的差異，並不比來自兩個不同製造商的 SF₆高壓設備之間的差異更大。

4. 對操作人員來說，想從設備外觀一眼看出高壓設備用的是 C4-FN 還是傳統的 SF₆，其實很難，因為它們外觀幾乎一樣。

只有幾個地方能看出差別：

(1) 設備名牌（銘牌）：機器上的標籤會清楚寫明裡面裝的是 C4-FN。

(2) 密度監測器：儀表上的壓力/密度表會特別顯示 C₄-FN 的讀數。

(3) 氣體接口：充氣或排氣的接頭螺紋會設計得不一樣，這樣就能確保操作人員不會不小心把 SF₆的管線接到 C4-FN 的設備上，避免兩種氣體混用或弄錯。

（二）氣體處理設備與培訓

儘管氣體處理的設備和程序非常明確，但仍必須遵循適當的培訓和流程，以確保操作的安全和效率。大多數提供 C4-FN 混合氣體處理設備的供應商，也同時提供 SF₆的產品，並確保相似的操作體驗和介面，以利操作人員知識與操作技術能平順轉移。

（三）氣體與設備監測、維護方法

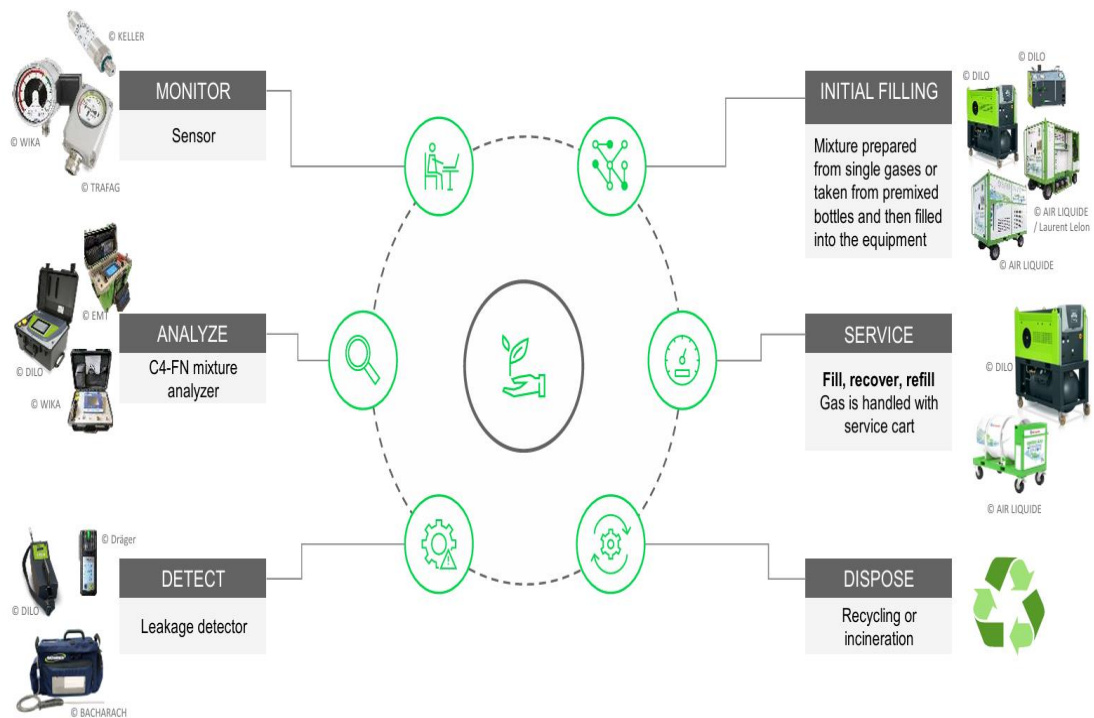
1. 氣體介質壓力可透過密度監測器或壓力感測器進行監測。
2. 局部放電 (Partial Discharge, PD)：可使用 UHF(特高頻) 方法進行監測。

3. 內部電弧故障：可安裝電弧偵測器，以便在發生內部電弧故障時識別受影響的隔間

4. 氣體品質可使用移動式分析儀進行測量，如須更詳細的氣體分析，可以採取與 SF₆設備相似的做法：將氣體樣本採集到小型氣瓶中，然後送至專業實驗室進行分析。

(四) 處理 C4-FN 混合氣體的程序

包括首次充氣、維護（如補氣或抽氣）和最終回收，在設備的整個生命週期中雖然次數不多，但都至關重要。所使用的氣體處理設備與處理傳統 SF₆的設備屬於同一類型，並且具備通用性。整體操作流程和 SF₆非常相似，操作人員接受專門訓練後可快速上手。



圖十 C4-FN 混合氣體氣體處理示意圖

1. INITIAL FILLING (初始填充): 將已預備好的混合物送注入設備。
2. SERVICE (維護): 涵蓋氣體的充填、回收提取、以及重新注氣作業。
3. DISPOSE (處置): 包含對氣體進行終端回收或銷毀。
4. MONITOR (監測): 使用感測器對氣體狀態進行持續性監控。
5. ANALYZE (分析): 使用 C4-FN 模組分析儀對氣體品質進行深入檢測。
6. DETECT (偵測): 利用洩漏檢測器執行洩漏點識別與定位。

另外關於 C4-FN 混合氣體的準備，原則上可區分為兩種常見做法：現場混合 (On-site mixing)，以及場外預先混合 (Off-site mixing)，這兩種方式可依照需求來選擇，無論採用哪一種方法，都不會影響高壓開關設備內最終氣體的品質。

1. 現場混合 (On-site Mixing)(如圖十一(a)):

非現場階段 (Off-site): 將 C4-FN、O₂ 和 N₂ 氣瓶準備好。

現場階段 (On-site): 使用氣體混合與灌氣設備 (Gas mixing and filling device) 在現場進行混合並直接灌入開關設備。

2. 非現場混合（高密度預混合氣體）（如圖十一(b)）：

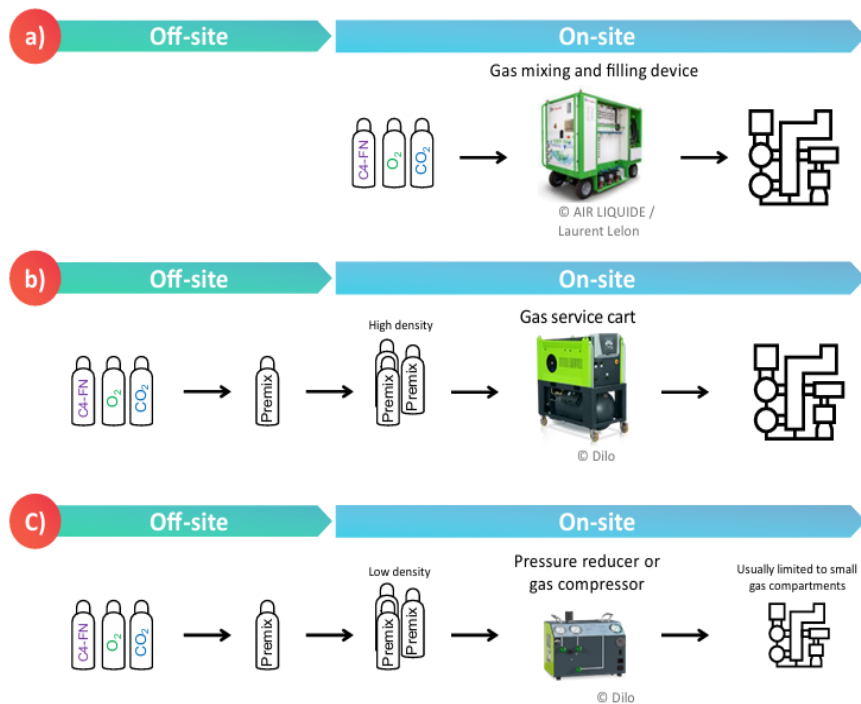
非現場階段 (Off-site)：C4-FN、O₂和 N₂ 氣瓶送到場
外，製備成高密度預混合氣體
(High-density Premix)。

現場階段 (On-site)：使用氣體維修車 (Gas service cart)
將高密度預混合氣體灌入開關設備。

3. 非現場混合（低密度預混合氣體）（如圖十一(c)）：

非現場階段 (Off-site)：將 C4-FN、O₂ 和 N₂ 氣瓶送到場
外，製備成低密度預混合氣體
(Low-density Premix)。

現場階段 (On-site)：使用減壓器或氣體壓縮機(Pressure
reducer or gas compressor) 將低密
度預混合氣體灌入開關設備。



圖十一 C4-FN 預製混合氣體示意圖

三. 工廠、展示間及 EWZ Oerlikon 變電站觀摩

(一). 工廠與展示間

日立能源公司的全球總部位於瑞士蘇黎世，而在總部旁邊就有生產 GCB 及 GIS 設備的工廠，類似一個小型園區，工廠端與總部端隨時可面對面溝通討論客戶之需求或者設計理念；在日立能源公司實習的這段時間，經常性地在總部與工廠間移動，確實深刻感受到兩者之間之緊密性。



圖十二 GIS 工廠外觀圖

GIS 工廠中不僅有 EconiQ SF₆-FREE GIS，同時也有傳統型 SF₆ GIS，工廠內部人員動線明確，環境整潔明亮，所有設備所需之元件擺放井然有序，這種對細節的嚴格管控，有助於提升設備組裝效率與測試品質，另外在實習過程中有幸參與日立能源公司客戶之 GIS 工廠

驗收測試 (FAT)，一同見證了產品的機械操作特性測試以及氣體密封與洩漏測試等重要試驗，在整個試驗過程中，工廠端的技術同仁不僅清晰地向客戶解釋了詳盡的測試數據與結果，亦更展現出高度的專業性。

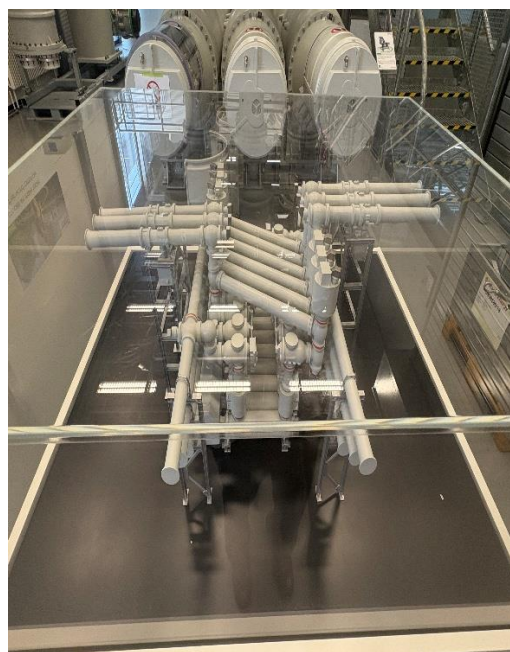
另外日立能源公司在工廠裡特別設置了一間 EconiQ 系列產品之展示間，此展示間專門用於供客戶和參訪人員觀摩實體 EconiQ 實體設備，親眼見證這些不含六氟化硫、具備高度環保效益的設備，下方圖十三為 EconiQ ELK-3,420kV GIS，在維持與傳統開關設備相同性能且為 420kV 超高壓設備之前提下能擁有如此緊湊之尺寸，EconiQ 在空間效益上表現優異，可供使用者在有限空間上更具擴充彈性。



圖十三 EconiQ ELK-3,420kV GIS 外觀圖



圖十四 EconiQ 420kV 設備展示牌



圖十五 EconiQ 展示模型



圖十六 EconiQ145kV GIS 外型



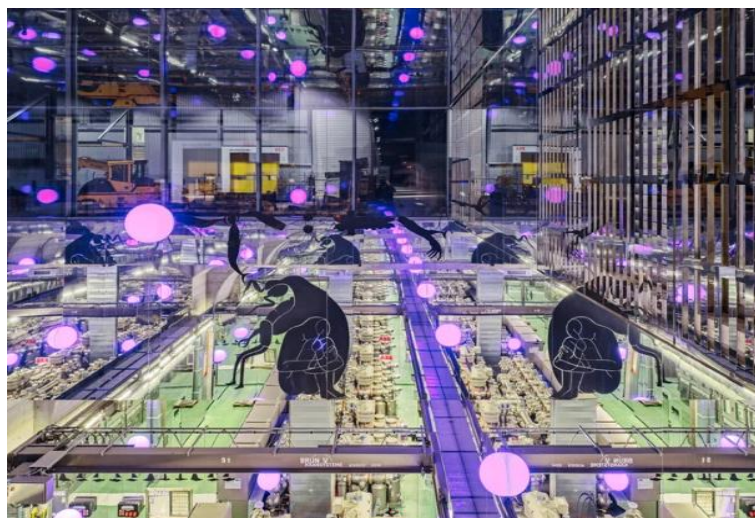
圖十七 數位變電站保護與監控示意圖

(二).EWZ Oerlikon 變電站

位於日立能源公司總部旁的 EWZ Oerlikon 變電站，不單單只是一個平凡的變電站，它最受矚目的地方是它裝設了全球第一個採用新型環保氣體的高壓氣體絕緣開關設備，而這設備就是由 ABB（現為日立能源公司的一部分）在 2015 年交付，其次，該變電站採用了三層地下化設計，將高壓設備（包括 GIS 和變壓器）埋入地下 15 公尺深處，並透過一樓的玻璃，將先進的電力設備、燈光、藝術裝置結合展示給公眾，是當地非常知名且具特色的變電站。



圖十八 EWZ Oerlikon 變電站



圖十九 EWZ Oerlikon 變電站內部

伍、心得與建議

非常榮幸能有機會到日立能源公司總部實習，這段時間獲益良多，特別是在新式絕緣氣體上有了更深入的了解，也對高壓開關設備的運作原理有更清楚的認識。除了技術面的學習之外，與日立能源公司同仁的交流更讓人印象深刻，他們不僅展現出高度的專業性，更讓我體驗到國際職場的氛圍與團隊合作文化，以及了解溝通在團隊中的重要性。

經過這次在日立能源總部的實習，更加體會到汰除 SF₆已是國際電力系統中明確且持續推進的趨勢，許多國家已積極投入新式環保絕緣氣體開關之應用，相較之下，台灣目前雖尚未有明確的相關法規公布，但面對全球減碳與淨零排放的潮流，我們仍應提前做好準備，建立對新式絕緣氣體開關設備的認識，並加強在規劃設計、運維與安全管理等面的能力。

氣體絕緣開關設備在本公司電力系統中被廣泛應用，若未來面臨設備轉型，勢必在技術、運維及管理層面都會經歷一段磨合的過程，希望這份報告，能讓公司同仁對於新式絕緣氣體開關設備建立初步概念，此外，若公司能善用現階段的時間，讓公司同仁多與相關設備廠商進行技術交流與經驗分享，相信將有助於提前掌握新式設備的特性與運作方式，降低未來轉型所帶來的衝擊，同時，透過與國際間的持續互動與資訊交換，也能使本公司在未來相關規範的編擬上更加完善，並與全球電力產業的發展方向保持一致，為後續的設備更新與永續轉型奠定更穩固的基礎。

陸、 參考資料出處

1. EconiQ high-voltage technology and innovation
(Hitachi Energy EconiQ 產品說明會資料)
2. Handbook C4-FN mixtures for high-voltage equipment (GE Vernova & Hitachi Energy)
3. Karsten Burges, Michael Döring, Charlotte Hussy, Jan-Martin Rhiemeier, Christian Franck, Mohamed Rabie, “Concept for SF6-free transmission and distribution of electrical energy,” Ecofys Germany GmbH, Berlin, 2018.
4. <https://www.ewz.ch/de/ueber-ewz/standorte-fuehrungen/unterwerk-oerlikon.html>