

出國報告（出國類別：實習）

定子線圈新式絕緣包覆設計技術 實習

服務機關：台灣電力股份有限公司電力修護處

姓名職稱：李展宇 電機工程師

派赴國家/地區：奧地利(維也納)、義大利(米蘭)

出國期間：114 年 6 月 8 日至 114 年 6 月 21 日

報告日期：114 年 8 月 13 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：定子線圈新式絕緣包覆設計技術實習

頁數 21 含附件：☐是 ☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力股份有限公司 /翁玉靜 /(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

台灣電力公司 /電力修護處 /李展宇 /電機工程師 /(03)328-1713#1111

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 6 月 8 日至 114 年 6 月 21 日

派赴國家/地區：奧地利/維也納、義大利/米蘭

報告日期：114 年 8 月 13 日

關鍵詞：B-stage、Resin Rich、聚酯雲母玻璃熱縮帶、內部電暈保護層（ICP, Internal Corona Protection）、Coil Manufacturing Machines、全自動線圈包紮機

內容摘要：（二百至三百字）

本次出國實習行程為期兩週，分別前往奧地利 Isovolta 公司與義大利 RIMAC 公司，針對絕緣材料製程與線圈製造設備進行深入交流與現場觀摩，於奧地利期間，透過實驗室與工廠實習，實地了解雲母帶製造流程、樹脂配方、物性檢測方法與材料應用特性，並針對導電帶、內部電暈保護（ICP）設計及熱壓製程進行技術討論。義大利實習重點則聚焦於繞線、包紮與熱壓等設備之模組化設計與操作介面，並就本公司已採購設備使用情況與改進方向進行雙向交流，行程中亦針對新式的線圈生產設備（如雙層半支型線圈成型機等等）提出相關問題討論，獲得具體技術回應。整體過程除獲得豐富技術知識與實務經驗外，亦透過交流提升了跨國合作的契機與默契，對本公司未來於線圈製成規劃、品保檢測等方面，具有高度參考與推進價值。

目次

一、	實習目的	1
二、	出國行程	2
(一)	Isovolta 公司實習（奧地利維也納）	2
(二)	RIMAC machine 公司實習（義大利米蘭）	11
三、	心得與感想	18
四、	遭遇之困難與特殊事項	20
五、	建議與討論	21
六、	致謝	21

本文

一、實習目的

本次出國實習行程為期兩週（6 月 8 日至 6 月 21 日），主要針對發電機絕緣材料與線圈製造設備進行深入交流與學習，第一週前往奧地利，參訪國際知名絕緣材料製造商 **Isovolta**，旨在瞭解絕緣雲母帶的完整製造流程與細節，深入掌握其材料特性及加工應用方式，透過此次實習，期望能了解雲母帶在實際使用過程中可能面臨的相關問題，以及不同應用場域下適合採用的產品類型，此外也同步了解當前市場上新型絕緣材料的發展趨勢與應用方式，提升本公司在材料選用與應用方面的前瞻視野。

在實習過程中，亦實地考察 **Isovolta** 之檢測實驗室，該公司近期積極拓展亞洲市場，根據客戶需求持續研發新產品，並擴充其材料測試能力，確保產品品質穩定，工廠內建置了完善的測試流程，包括耐壓測試、拉力測試、導電性測試、滲透性測試、環氧樹脂分析、耐溫測試等，所有材料皆須通過嚴格的品質檢驗後方可交付客戶，並同步提供完整的檢測數據與分析報告，**Isovolta** 亦重視客戶回饋，建立完善的反饋機制，針對客戶實際應用中遇到的問題，進行產品改良與技術優化。近期該公司與多家發電機線圈製造設備商展開合作，結合材料研發、設備製造與客戶需求，形成完整的產業解決方案，實現更系統性且高效的問題解決能力。

第二週則前往義大利，參訪發電機線圈製造設備廠商 **RIMAC machine s.r.l**，**RIMAC** 為國際知名的電機製造與修復設備供應商，專精於提供旋轉電機繞組製造、壓製與包紮等全自動化設備，由於 **RIMAC** 所提供之設備能有效針對絕緣帶及絕緣材料進行控制，故藉由本次實習去探討相關設備對於定子線圈絕緣品質的提升。本處有幸與 **RIMAC** 合作過，已採購其線圈成型機與自動包紮機等設備，故本次實習除了了解目前新型線圈製造設備，亦針對已購入之設備進行深入技術交流，探討操作過程中遇到的問題與改善方案，期望藉此全面提升線圈製造效率與品質層級。

透過本次兩週的實習行程，自絕緣材料到製造設備進行全面性的學習與交流，期能完整掌握國外發電機線圈製造領域的最新技術趨勢與產業應用，並將所學帶回應用於本公司現場生產與技術提升，為未來製程優化提增助力。

二、出國行程

時間	參訪公司	國家
第一週 114/06/08-114/06/14	ISOVOLTA AG	奧地利 (維也納)
第二週 114/06/15-114/06/21	RIMAC machine	義大利 (米蘭)

(一) Isovolta 公司實習（奧地利維也納）

在奧地利參訪 Isovolta 的行程中，首先由該公司代表介紹集團沿革與全球佈局。Isovolta 隸屬 Constantia Industries AG，以高低壓雲母絕緣材料聞名，為全球絕緣材料與複合材料領導廠商，廣泛服務於能源、航空、交通運輸、電子、音訊與化工等領域，旗下產品涵蓋高低壓絕緣材料、雲母帶、樹脂系統、預浸材料、音響用薄膜等，現已擴展至行動裝置聲學薄膜與微型揚聲器結構件，成功切入多家智慧型手機供應鏈；同時攜手義大利 RIMAC machines 等線圈設備製造商，研發自動調整張力控制與多層絕緣系統，提供發電機、風力與氢能機組「材料+設備」一站式解決方案。

旗下產品線涵蓋雲母帶、B-stage 樹脂帶、預浸材料、複合板及聲學膜層等，其中 B-stage 含樹脂雲母帶市占率居全球領先，憑藉 30-35 wt% 穩定樹脂含量與多元加工方式，在高壓旋轉電機與高速線圈製程中具備顯著競爭優勢，Isovolta 目前於歐、美、亞十三座生產與研發基地運營，服務能源、航空、交通運輸、電子、音訊、化工等二十餘產業，並透過客戶回饋機制及跨國實驗室，不斷優化材料性能與應用方案，展現強大的研發動能與市場適應力，Isovolta 致力於為客戶開發新型絕緣材料，並透過實驗室加以分析及管控其品質。

在 Isovolta 公司內部實習內容如下：

1、大型實驗室導覽

進入品質實驗室與技術研發中心進行深入交流與參觀，重點涵蓋以下項目：

(1)揮發性物質與樹脂含量檢測流程

揮發性含量：將雲母樣片置於 150 °C 恆溫烘箱 15 分鐘，以電子天

秤比較前後重量差，計算殘留溶劑百分比，確保乾燥後揮發物 $\leq 1\%$ ，避免後續加工起泡。

樹脂含量：利用 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 熱重分析儀（TGA）燃燒樣品，高溫下僅樹脂被熱解，僅剩下玻璃纖維與雲母保留，據質量損失推算樹脂比例，供製程工程師調整上膠量與烘乾曲線。

(2)材料物理特性測試

實驗室配置多項測試設備，執行厚度測試、耐壓強度、拉力強度、撕裂強度、柔軟度、彎曲剛性、導電性、滲透性與微觀結構分析等。

厚度與表面密度：依據 IEC 標準進行，厚度測試在固定壓力下以測厚儀量測，表面密度則以裁樣後秤重方式換算，每批允差控制在 $\pm 3\%$ 以內，確保塗佈均勻性與材料穩定度。

耐壓強度測試：將待測樣品置於高電壓檢測室，透過升壓變壓器均勻升壓至擊穿為止，測得瞬間擊穿電壓，以評估絕緣材料的層間耐壓能力與安全裕度。

拉力強度：使用拉力試驗機以恆定速率進行拉伸測試，記錄應變曲線與最大抗拉強度，確認絕緣材料於高速纏繞（ $\geq 200\text{ rpm}$ ）情況下仍能保持連續性、不發生斷裂。

柔軟度、彎曲剛性：以懸臂梁法來量測彎曲所需力矩，轉換為表面彈性模數，用以評估繞製過程中是否易產生皺摺或回彈變形。

表面電阻檢測（導電性）：採多點電極佈設進行電阻值量測，檢視導電層表面電位分佈是否均勻，以降低局部電場集中造成的局放風險。

滲透性：特別針對 VPI（真空壓力浸漬）系統需求，會進行滲透性測試與空氣流通性測試，確保材料在浸漬製程中能有效吸收樹脂、避免氣泡殘留，在固定壓差下測一定體積空氣通過試片所需時間，流速快代表孔隙率高，用以評估 VPI 浸漬時樹脂流通性。

微觀結構分析：利用光學顯微鏡與數位圖像分析觀察樹脂分佈、纖維排列與界面黏著狀況，辨識層間脫層、乾斑或碎裂等缺陷成因，並協助產品改善。

鋅含量滴定檢測：利用 EDTA 滴定法來測定材料中鋅含量（Zn），進而控制促進劑參與固化反應的活性與比例，是環氧樹脂系統配方控制的重要手段之一。將含鋅促進劑溶解後，滴定至指示劑變色並換算 Zn mg/m^2 ，以精準控制環氧酸酐體系固化速率，客製化進

行鋅含量分析（用於促進劑反應），以精準控制固化反應速度與最終交融效果。

2、雲母帶製造流程參觀

(1)B-stage 雲母帶製造技術

Isovolta 廠房占地逾 7 萬平方英尺，設置全自動上料架與張力平衡滾筒，確保白雲母（Muscovite）或金雲母（Phlogopite）雲母紙在 1 m 寬幅高速走帶時不產生裂紋，上料後通過樹脂浸潤槽，操作員依配方切換環氧樹脂、聚酯、矽樹脂等混合液，並以溶劑調整黏度，雲母紙與基材（PET 膜、玻璃布或玻璃纖維）合流後進入多段式溫控烘道：前段 80 °C 預熱、120 °C 揮發、中段 140 °C 或 160 °C 分級除溶，末段降至 110 °C 做「均熱」以避免瞬間氣泡沖破雲母結構，末端配置連續溫感與質量迴授訊號，調整樹脂固體含量目標 $28 \pm 2\%$ 。

(2)壓製與成品分析

乾燥後的雲母或基材複合體由直徑 250 mm 熱壓滾輪以 10 噸以上的壓力對夾，將玻璃布緊貼雲母面；線上雷射量測厚度，平均偏差約 $< \pm 0.03\text{ mm}$ ，裁切區配置雙軸 CNC 分條機（最窄 6 mm）與自動貼標機，每遇雲母帶接縫處時由光學探針標示，並同步記錄，供客戶可要求無接縫之需求。

為維持 B-stage 雲母帶活性，廠內架高式冷凍庫以 5 °C 恆溫儲存相關 Calmicaglas 等材料，可於 5 °C、50 %濕度下可保證至少 12 個月保存期。各品項依樹脂體系分區置於專用重力滑軌貨架，實施分區分層管理。部分材料用於「阻水層」、「中間填料」或「導電包覆層」等特殊應用，完成品最後須做樹脂均勻性、黏著剝離與拉伸試驗，並抽樣送往耐壓實驗室進行局部放電（PD）特性指標及耐電壓壽命曲線評估，以符合高壓旋轉電機等隔熱絕緣材料之質量門檻。

3、研發實驗與客戶合作

參訪 Isovolta 實驗室時，技術團隊展示各項針對不同應用的實驗設計與檢測系統，包括：

(1)局部放電（PD）測試：評估雲母絕緣系統在高壓下的起始放電電壓（PDIV）、放電成長速率及其在持續電場應力（含高頻波形）下

的耐久性，該測試有助於判定材料是否能滿足長期運行下的電氣可靠度，特別是針對局放易聚集的轉角、界面與絕緣重疊處。

- (2)絕緣壽命測試：建立不同樹脂體系(Epoxy-Novolac、Polyester-Imide)在各溫度下的壽命曲線，此數據用於推估材料使用年限並提供發電機絕緣系統安全係數的設計依據。
- (3)交直流耐壓：模擬實際運行中可能遭遇之過電壓情境，測試線圈主絕緣與導電層在施加交流或直流高壓時的介電耐受能力，確保線圈與導電包覆層在出廠前具備足夠耐電壓裕度。
- (4)機械應力模擬：預估運輸與運行期間之機械疲勞與電機耦合效應。
- (5)溫濕循環測試等：模擬戶外機組或高濕環境下的運行條件，以驗證絕緣材料的抗吸濕能力，驗證戶外發電機與潮濕環境機組之使用壽命。

Isovolta 表示部分關鍵客戶如 Siemens 對於材料測試要求極高，需達到特定電氣壽命標準，他們也依據實驗數據建議可考慮提升預熱溫度由 90°C 提升至 105°C，縮短 B-stage 樹脂黏度降至可流動狀態所需時間，另外調整壓力升壓節奏採分段升壓策略(先 2 MPa→3 MPa，再高溫固化)，可降低氣泡殘留並提升壓製密實度 12%，避免氣泡殘留，提高壓製密實度與導熱效率。



圖 1 耐壓實驗室



圖 2 多段式恆溫烘烤爐



圖 3 電氣特性測試實驗室



圖 4 部分放電及絕緣老化檢測



圖 5 自動手臂包帶機



圖 6 真空含浸爐

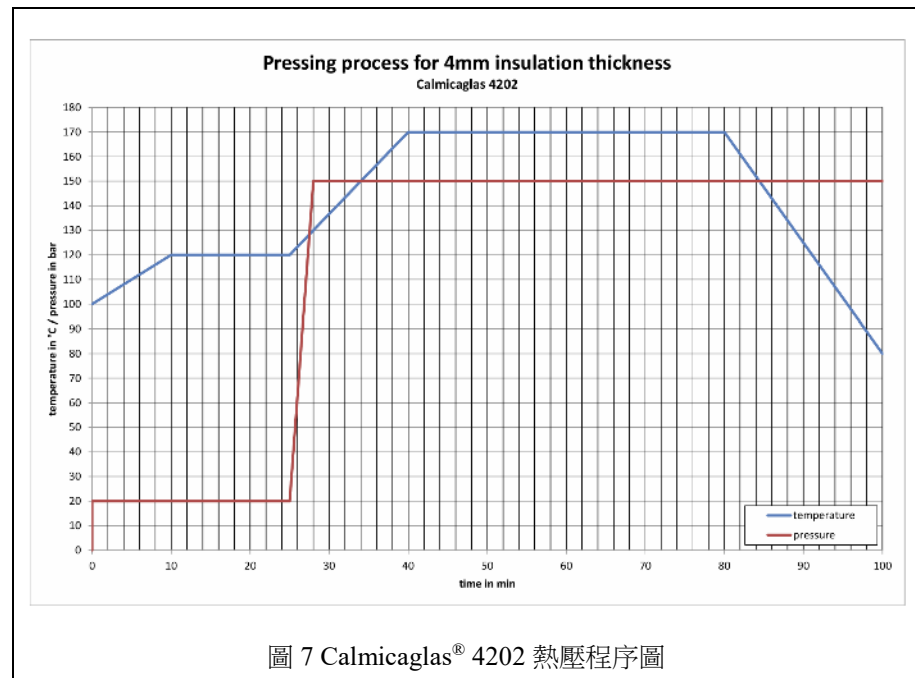
4、 新型態絕緣材料研討

(1) Calmicaglas® 4202：

相較於本處目前使用的 Calmicaglas® 3450 半支型定子線圈主絕緣雲母帶，Isovolta 提供目前包覆度更加穩定的 Calmicaglas® 4202，Calmicaglas® 4202 為採用三層結構之雲母絕緣帶，使用雙層玻璃絲布加強，結合雲母層以及環氧樹脂壓製而成，其縝密的排列可幫助雲母層避免脫離碎裂之現象，而雙層玻璃絲布的設計可提供更高的抗拉強度，使雲母帶包紮纏繞時更加服貼。

首先針對 Calmicaglas® 4202 雲母帶進行實際包紮示範，採用與 3450 同樣厚度的層堆疊纏繞結構，纏帶後厚度比 3450 小了約 0.3 mm，示範過程中強調材料之纖維排列均勻性與樹脂分佈狀況，纏繞時之張力與壓實性表現良好，膠層表面在加壓後顯現穩定的附著狀態，整體緊密度高且包覆平整，現場也即時以張力計測量壓力反應，並確認厚度壓縮預估與實測值一致。

而 Calmicaglas® 4202 的直部熱壓參數如下：溫度曲線於 100 分鐘內分三階段提升最終達 170 °C；壓力則同步由 0 提升至 90 bar。此熱壓曲線可作為未來實機製程參數之基準模型，亦可依據材料厚度比例調整溫壓速率。



(2) CONTAFEL® 4318 :

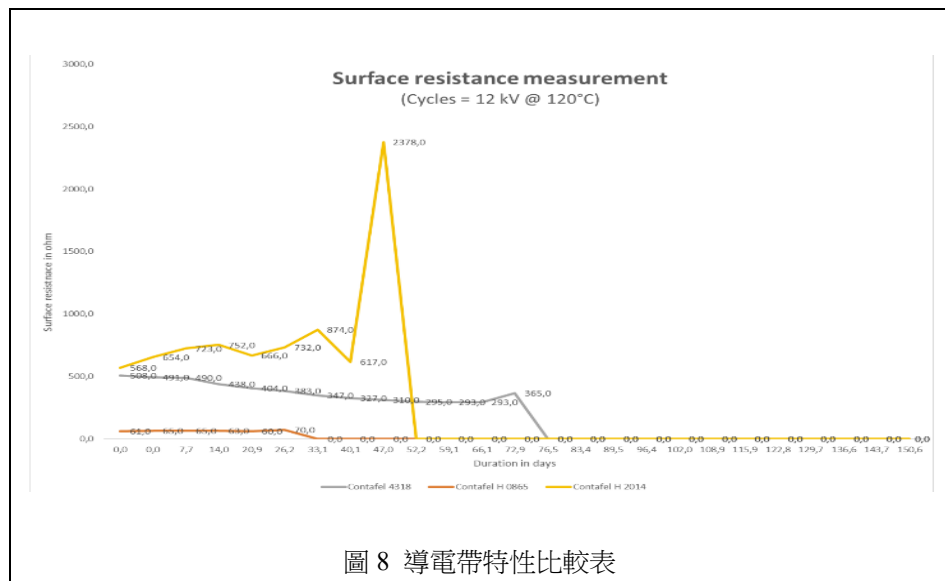
CONTAFEL® 4318 為一種非編織布聚酯纖維，內部浸潤含碳黑導電漆，具備高度柔軟性與吸附性，可應用於真空壓力含浸(VPI)雲母帶與樹脂預膠型(Resin Rich)雲母帶系統中，並支援最高至絕緣等級 Class H (180 °C) 環境，在實驗中表現出極佳的滲潤穩定性，在整個 VPI 流程中無清洗現象，顯示其與環氧體系的相容性極高。

根據表面電阻老化測試報告 (12 kV、120 °C，持續 150 天) 中，CONTAFEL® 4318 於整個測試週期中皆維持穩定表面導電值 (約 60–70 Ω)，無任何漂白現象或導電性劣化，表現遠優於其他材料如 CONTAFEL® H0865 與 CONTAFEL® H2014，兩者在中後期皆出現明顯的阻值波動與漂白損壞。尤其 H2014 約在 40–50 天內出現高達 2,378 Ω 的阻值尖峰，隨後快速跌 0，顯示材料可能經歷局部破壞或電擊穿。

此測試結果顯示 CONTAFEL® 4318 在高壓高溫環境下能夠提供穩定的電場分布與內外電暈保護，未來可望全面取代舊型半導體帶材料，提升線圈壽命與局放穩定性。該材料目前可提供寬幅卷材 (最大 950 mm) 與窄幅膠帶 (20 mm 以上)，便於包紮作業與線圈端部佈局調整。

在新型材料應用與比較的討論環節中，針對過去使用的不同來源雲母帶材料進行經驗分享，例如先前採購之雲母帶與目前材料之差異。與會人員普遍認為帶有表面披覆膜的材料，操作時手感較細膩，包覆

緊度與外觀品質均明顯優於早期的雲母帶。



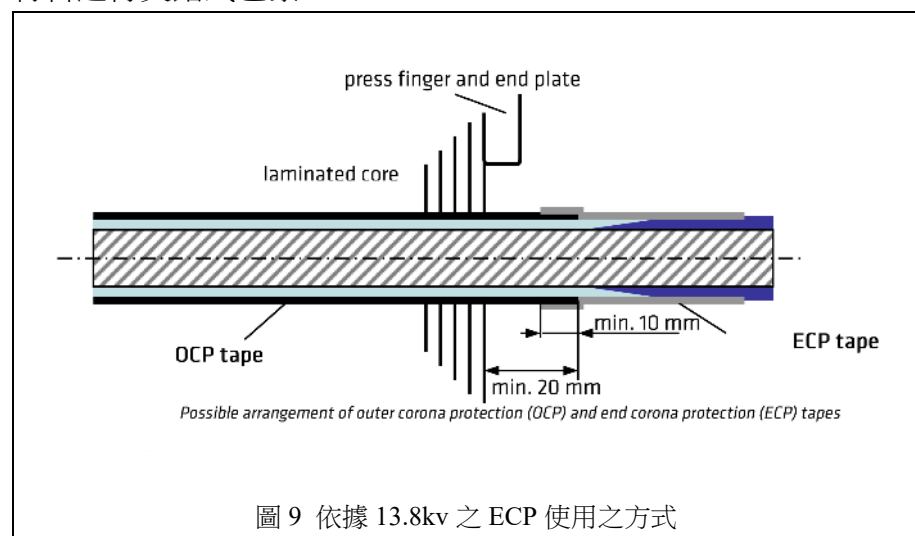
5、顧客回饋及研討

(1)額定電壓 13.8 kV 線圈絕緣結構與端部電暈保護層(End Corona Protection, ECP)使用探討：

會中並詳細討論 13.8 kV 線圈絕緣結構的建議做法。根據 Isovolta 提供之建議，ECP 包紮長度應使用以下公式：

$$\text{ECP 長度} = \frac{U_{\text{Test}}}{\lambda} + 2 \text{ cm} ; \text{其中 } 2 \leq \lambda \leq 3$$

並採用 1 層 50 %疊繞（共兩層）方式包覆定子線圈。針對 λ 的選擇 Isovolta 廠家建議可以 2.8 下去計算，會比較貼近本電力修護處使用上的需求，主絕緣部份可搭配 CALMICAFAFAB® 3417 等絕緣材料進行交錯式包紮。



而針對 ECP 的部分 Isovolta 推自家 EGSB 半導體性聚酯帶，EGSB 為一種應用於旋轉電機線圈的半導體絕緣包覆材料（Electrically Graded Semi-Conductive Band），主要用於外部電暈保護層，具備特定表面電阻與電場緩衝特性，而包紮的好壞也會間接影響局部放電數值。

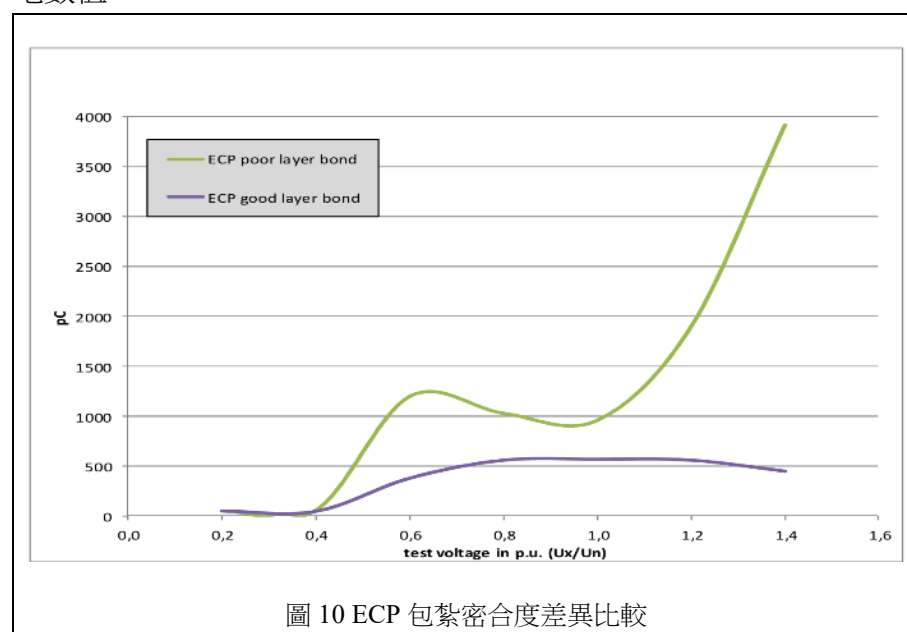


圖 10 ECP 包紮密合度差異比較

針對其相同性質材料型號（如 2709、2969、4308、0413、0483）進行以下性能測試後得到結論：

EGSB 材料呈非線性導電性質，具備電場緩衝特性，不同型號表現具差異性，建議依運轉額定電壓挑選最適型號（如高壓電場選 4308，強調穩定性高的選 0413）。

材料在半固化樹脂階段（B-stage）狀態時應確保導電連續性，完全固化（Full Curing）後亦須落於設計阻值，避免影響絕緣特性。

製程壓合品質對局部放電檢測數值影響重大，應加強貼合一致性，應力梯度模擬顯示重疊區配置合理有助電場緩降。

(2)內部電暈保護層（ICP, Internal Corona Protection）應用：

ICP 技術目前施作於額定電壓 15.75 kV 之 Roebel bar 形式的定子線圈，其技術為緩解導體與主絕緣之間的電場集中，減少局部放電特性，亦可依據不同電壓等級調整含導電聚酯膜的排列順序與厚度，其技術也漸漸應用於額定電壓 ≥ 6 kV 之定子線圈上。根據 Isovolta 技術報告 TR 2020-42 所示，該公司針對 Roebel bar 結構導體進行一系列 ICP 實驗，並比對有無 ICP 材料對電場分佈與擊穿位置的影響。

在實驗配置中，Roebel bar 兩側分別包覆具導電性之聚酯膜材，並在中間絕緣層內插導電膠層（VOTASTOP 2235），構成完整內部導電保護系統。試驗結果未使用 ICP 結構者，電場集中於導體階梯角落，於高電壓作用下容易形成局部放電熱點，並造成外部絕緣系統局部擊穿。

而在導入 ICP 系統後，內部電場明顯趨於均勻，局部放電區減緩，整體放電起始電壓提升約 18 至 23 %，有效延長整體絕緣壽命。材料部分推薦於導體邊角（尤其是彎折處）採用具柔軟性的導電墊層（如含碳黑墊布），搭配聚酯雲母帶以避免角落氣隙形成。

實驗同時進行多組 Roebel bar 整型測試，證實該 ICP 結構在標準 Roebel bar 線槽轉角區域具備良好的彎曲服貼性，且未出現脫層或鼓起現象，為後續在實機導入提供可靠依據。

此系統配置已作為建議架構之一，預計可搭配 CONTAFEL 4318 導電帶材料，共同建構出完整且穩定的局部放電防護系統。

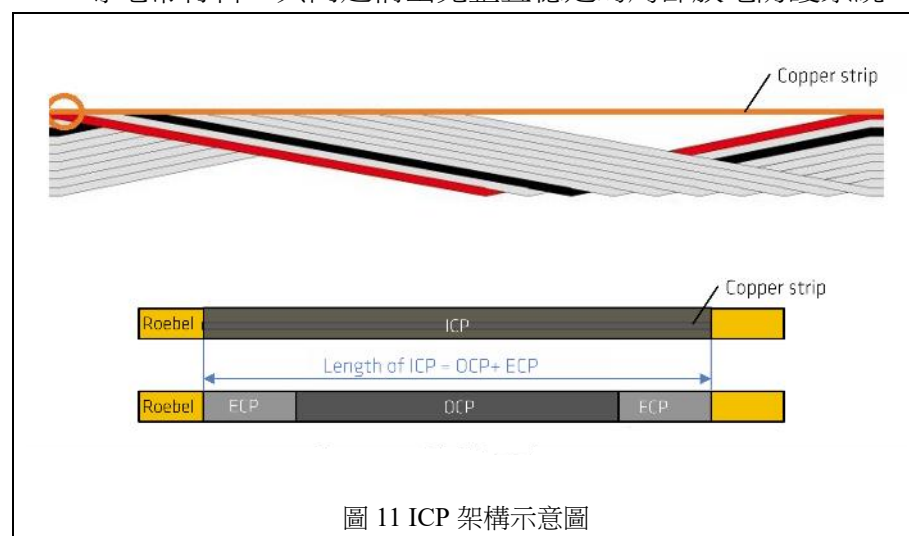


圖 11 ICP 架構示意圖

(3) CALMICA-FLEX® S 4214 使用心得分享：

本處在使用 CALMICA-FLEX® S 4214 絕緣材料時，遇到材料絕緣特性不穩定之狀況，本材料為線圈端部絕緣包紮材料，相較於原先使用的 CALMICAGLAS® 2005，可讓線圈端部更加有彈性，以利於線圈的安裝。在使用時本處使用的包紮方式先以 4214 包紮端部鼻頭處後，再以 2005 進行直部的包紮，此方式在介電因素測試分析時，有部分測試數據較原先全部使用 2005 的線圈來的差，研判是出現氣泡與空洞所影響。Isovolta 認為此包紮方式合理，而此現象多半與 2005 升溫過快有關，故建議可調整細膩控制溫度程序以避免樹脂過度外溢或分層。此外由於 4214 材料對張力與溫度變化敏感度較高，Isovolta 後續會針對不同張力進行模擬試繞與壓

製，並提供不同情況下的介電因素測試數據供本處參考。

(4)局部放電測試與絕緣材料壽命試驗：

最後 Isovolta 也簡要說明了針對目前台電所使用的材料進行絕緣老化與壽命測試安排，包括以 14 kV 電壓、140 °C 高溫條件進行長達 2,000 小時以上的壓製材料熱老化試驗，每 50 至 100 小時進行表面電阻與局放檢查，並記錄材料外觀劣化情況，以作為材料選型與壽命評估之基礎依據，如有發現異常會及時反饋並提供相關測試數據。

(二)RIMAC machine 公司實習（義大利米蘭）

第二週行程前往義大利瓦雷澤省 Malnate 市的 RIMAC 總部，展開為期兩日的製造設備參訪與技術交流。RIMAC 成立於 1985 年，是國際知名的電機製造與修復設備供應商，專精於提供旋轉電機繞組製造、壓製與包紮等全自動化設備，公司具備強大的客製化工程設計與製造能力，全球超過 50 個國家設有客戶據點，並於 2019 年取得 ISO 9001:2015 認證，擁有彈性的技術團隊與遠端支援能力。

除了其純熟的技術與具優質的品牌形象，RIMAC 公司也強調目前與 Isovolta 等絕緣材料製造廠有長期合作計畫，共同優化絕緣材料於包帶設備上的搭配應用。特別強調 RIMAC 所有包紮機模組皆可支援 VPI 與 Resin Rich 雲母帶材料系統，具備自動張力控制與多頭包紮疊繞模組，最大雲母帶張力可達 150 N，可適應導體、多匝線圈或 Roebel bar 等不同線圈結構。

在 RIMAC 公司內部實習內容如下：

1、 RIMAC 目前生產及製造過之商品：

(1)線圈製造設備（Coil Manufacturing Machines）：RIMAC 提供模組化與全自動化繞線機（Auto winding machines），可支援多導體同時繞製、張力獨立控制、角度校準與繞線結構記憶儲存，包帶頭設備（Taping heads）具備單軸及雙軸包紮功能，支援同步旋轉及線性貼合等功能，適用於大型線圈與 Roebel bar 結構，熱壓模組設備則配有加熱板、冷卻循環、壓力感測與行程微調系統，可應對 VPI 系統與 Resin Rich 系統之線圈製造技術的不同需求，且所有設備皆整合 HMI 控制面板與遠端診斷模組。

(2)導體加工設備（Bar Manufacturing Machines）：包含機械整型模組（Shaping Stations）、導體預壓設備與半自動填樹脂平台等，針對

大型水輪機、汽輪機或高壓氣渦輪電機用導體結構進行尺寸裁切、彎折、斜角修整、絕緣層堆疊與端部封膠作業。整型模組亦支援複合導體層層疊壓與交錯纏繞技術。

(3)轉子綁紮系統 (Rotor Banding Machines)：主要是使用在旋轉電機轉子上，可提供三軸數位控制機械手臂與高張力碳纖維纏繞包紮頭，可針對轉子端部進行絕緣層的纏繞，同時設置專用加熱系統可將膠帶區進行加熱，相容於任何預膠絕緣系統，應用在同步馬達、風力發電機轉子、混合動力車用電機等，而部分機型配備振動補償系統與壓力帶感測系統，確保轉子纏繞精度與均勻性。

(4)直流馬達修復機台與萬能整修模組：RIMAC 提供 DC 馬達專用之車削工具、開槽機、焊接系統與絕緣磨光模組，適用於中大型工業電機維修廠與鐵路車輛系統，亦可依據舊機型配件轉接特殊治具並導入標準化流程。

(5)永磁轉子生產設備 (PM Rotor Assembly)：針對永磁同步馬達生產線開發自動化磁鐵貼附、上膠、壓製成型、定位、極性檢測與組立之機台，並具備連續產線設計與模組化搬運平台，為高端車用馬達、風能發電機與儲能系統提供完整製程規劃。



圖 12 三軸自動線圈包紮機

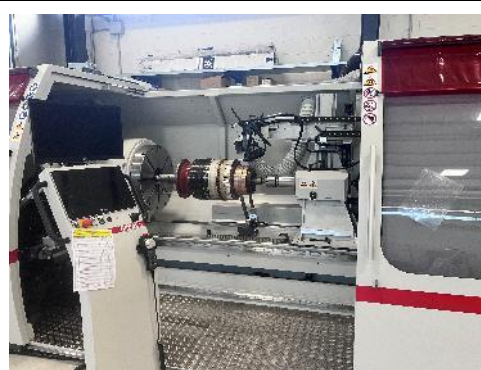


圖 13 DC 馬達製造萬用模組



圖 14 六缸型熱壓機



圖 15 Roebel bar 包紮機模組



圖 16 DC 馬達繞線機

圖 17 整齊明亮的廠房

2、大型熱壓機簡介

根據 RIMAC 設計規劃模組圖所示，大型熱壓機為一座搭載 12 缸油壓鋼柱的高容量大型熱壓設備，專為旋轉電機線圈壓製與成型所設計，該設備具備獨立的壓力控制與溫度控制系統，並配有分段式加壓模組與分段式溫控模組，可支援進階的壓製曲線規劃與微調，對於新型態之絕緣材料，可提供較佳的製程控制。

而本處熱壓機目前在製程中常見的「搓揉不均」等問題，此次實習期間，RIMAC 特別安排以一台正在調測中的 6 缸小型熱壓機進行實地模擬操作，實測兩大控制系統之獨立性與靈活性。

在壓力控制方面，透過 HMI 面板設定壓力曲線，模擬線圈材料進行壓製測試，發現機台具備極佳的壓力穩定性與反應精度，在實測過程中，能夠細部調整壓升速率與壓力保持時間，有效模擬出搓揉段的真實動作表現，並避免傳統熱壓機在搓揉段壓力難以控制所導致「鐵咬鐵」的壓板受損情況。此外亦可設定持續壓力時間，依材料回彈特性調整分段壓製排程。

在溫度控制方面，機台支援多區段獨立加熱控制，使用者可自訂各溫度區段的升溫速率與目標溫度，並設定微調幅度，針對 B-stage 材料進行預熱處理，此功能亦可依照操作者習慣與各類樹脂系統固化特性進行設定，使熱壓工作更加彈性且精準。

針對機台周邊配置部分，新機型亦配備了多項輔助設施，提升實作效率與操作安全性：

- (1)可調式線圈承載平台：採用滑軌結構與多軸移動設計，線圈放置高度與角度可依作業需求調整，無須再額外設置支撐結構，大幅提升設備操作靈活性與場地整潔度。
- (2)小型懸臂式天車：配置於熱壓機上方，用於搬運線圈及加熱鋼板，

有效減少人力搬運風險，並提升作業效率與現場安全。

透過本次實地操作與測試，對於本處後續熱壓機設定與製程改善提供具體參考依據，也顯示大型熱壓機在油壓控制、模組設計與設備整合方面具備相當成熟與彈性的客製能力，能夠精準對應本處現階段生產上所面臨的挑戰。

3、本次實習展示新形式設備：

(1)半支型線圈成型機（Roebel Bar Forming Machine）：

在本次與 RIMAC 的技術交流過程中，針對「半支型自動線圈成型機（Roebel Bar Forming Machine）」線圈製造設備進行交流與討論，該設備為針對旋轉電機定子線圈部分所開發之高效率成型模組，設計上具備雙層同時加工能力，可於同一工序內同步完成上線圈與下線圈之成型操作，大幅提升製程效率。

根據 RIMAC 所提供之設備技術資料與工程圖面，該機台總重約 17.4 公噸，採用落地型一體結構與全油壓驅動設計，成型區寬度約 950 mm，有效作業高度超過 2 公尺，控制介面可支援儲存發電機定子模型參數，並透過預先設定之電機幾何資料，自動導出線圈成型曲率與角度，快速建立符合機組規格的成型程序，相較傳統單支成型製作工法，本機台可有效對應發電機上下線圈的角度同步比對與微調，大幅減少人為誤差。

此外，透過一次完成上下線圈的同步成型，可縮短工序間物件搬運與線圈置放時間，並降低操作人員於彎折區域來回上下台階移動的作業風險，實際提升製程安全性，而設備本體亦可加裝成型後壓力維持模組、尺寸自動校準與模型參數記憶模組，以因應不同發電機的切換作業與參數儲存需求。

若未來能導入類似之半支型自動線圈成型機，預期可針對半支型定子線圈成型階段進行製程升級，具體改善人工作業安全、成型重複精度與切換效率，進一步提升整體生產效能與製程標準化程度。

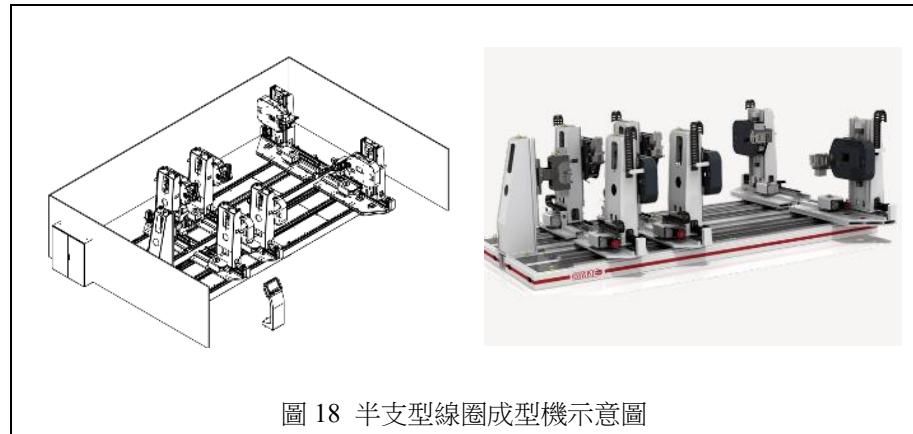


圖 18 半支型線圈成型機示意圖

(2) 線圈繞線成型機 (Loop Winding Machine) :

該機型專為電機繞組中常見之菱形線圈而設計，可支援中大型電機用多股扁平圓角銅線之繞製工法，依據 RIMAC 提供相關圖面資料，該設備目前規劃本體總重約 6,078 公斤，設有多軸自動放線架、主軸旋轉模組與同步導線整型模組，後方放線架之輪軸數可依使用需求彈性調整，從 4 軸起跳擴充至 10 軸或以上，支援多導體同時繞製與特殊夾盤煞車系統，特別適用於高壓線圈所需之雙股或多股並聯導線繞製需求。

針對此繞線機台，RIMAC 提出可於放線架與繞線機主軸之間加裝一組自動包紮模組 (Taping Unit)，該模組配備四服驅動升降系統，能依據線圈旋轉角度動態調整包紮帶角度，確保能緊貼線圈表面，該裝置可應用於線圈每匝層間絕緣或複合包紮結構，有效防止層間短路，亦為本處目前所欠缺之製造技術，若未來導入相關模組，將擴大本處在絕緣材料包覆工法上的設計自由度，提升絕緣結構多樣性與品質穩定性。

此外，機台配置一組整合式懸臂式小型天車模組，可協助使用者於繞線完成後安全吊取線圈，避免人員直接搬運造成的工安風險與設備損傷。此舉亦大幅提升整體製程流暢性與操作便利性。

未來若能導入類似之繞線成型機，不僅可擴展本處線圈結構與絕緣應用選項，也有助於推進線圈製程自動化與標準化，對於新型絕緣系統開發與可靠度提升極具價值。

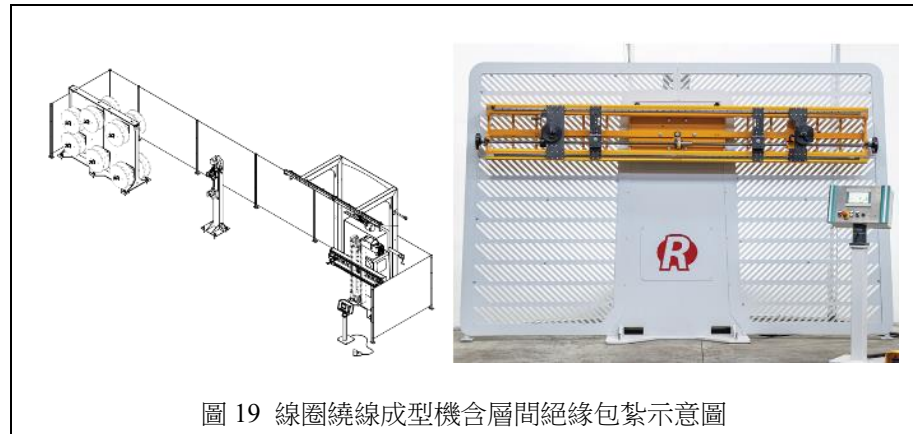


圖 19 線圈繞線成型機含層間絕緣包紮示意圖

(3)四軸式包紮機（4 axes Taping Machine）：

此次技術交流中也對於新型直部包紮機進行相關研討交流，屬於專為菱形定子線圈上下線圈一同包紮作業所設計之機型。

根據提供之圖面資料，此設備具備 1,658 公斤機體重量，最大可支援之線圈長度為 3,100 mm，機構設計包含一組主旋轉單元與四軸同步夾具系統，可分別固定並翻轉菱形線圈的上線圈與下線圈，配合中心軸驅動與可調式包紮帶角度，可實現上下線圈連續包紮作業，無需重新定位或切換參數設定，即可進行連續作業，顯著縮短換料時間與操作步驟，亦可升級電動伺服夾具，進一步強化位置記憶與壓力精度控制。

控制系統方面，本機台支援儲存多組發電機型號與線圈參數，含貼帶重疊率、膠帶張力、包紮速度與線圈定位角度等關鍵資訊，適用於多機型、小批量、客製化線圈製造需求，有效提升產線彈性與管理效率。

安全性方面，由於此設計可直接於同一工作平台內完成上下線圈包紮，作業人員不需頻繁搬動大型線圈至包紮機台，有效降低搬運風險與線圈碰撞可能性，也提升整體作業環境安全，預期將顯著提升菱形線圈包紮作業之靈活度與精確度，進一步強化整體線圈絕緣製程的品質穩定性。

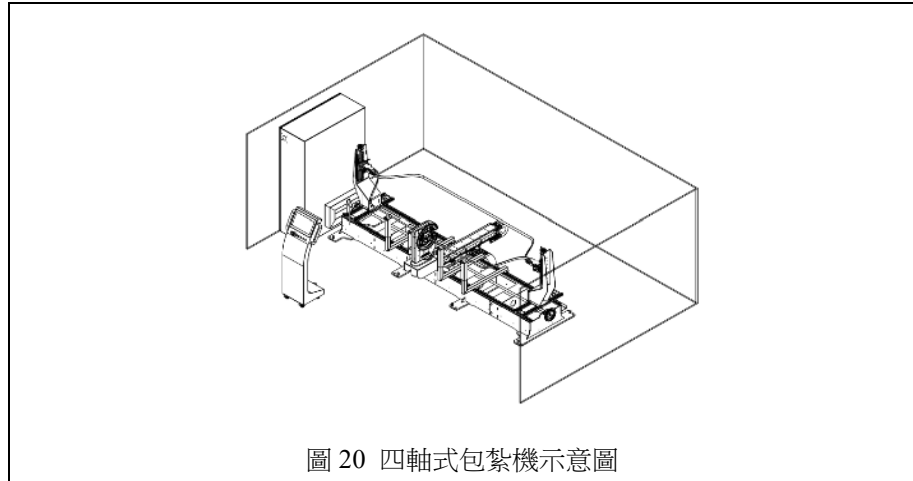


圖 20 四軸式包紮機示意圖

4、設備改良及顧客回饋：

在此次的技術座談中，針對本處現行已使用 RIMAC 之兩項設備：線圈包紮機（Coil Taping Machine）與線圈成型機（Coil Forming Machine）進行了深入交流，並探討使用過程中所遇到的技術問題、潛在優化空間，以及其他客戶對同型設備的使用經驗與客製化改進方向。

針對 Coil Taping Machine（線圈包紮機）的使用經驗與升級應用，分享了其他用戶近期提出的三項需求與技術改良案：

(1)熱風系統加裝建議

部分用戶反映在包紮 B-stage 絕緣帶時，若作業環境溫度偏低，會導致膠層回潮或貼合不均，影響最終包覆品質，為此開發了熱風輔助模組，可於包紮頭前端加裝一組 50–60 °C 的熱風吹嘴，於膠帶接觸前預熱帶材，促進膠層活化與服貼性提升。據說此機制成功減少包帶皺折與氣泡生成問題，適用於高黏性的聚脂雲母帶。

(2)拉力設定問題與結構改進

與本處使用經驗相符，亦有其他用戶回報包紮帶於高張力設定下容易破裂的狀況，該現象主要出現在高階纖維加強型膠帶上，其膠卷塑膠殼抗拉能力較低，在超過設定臨界點時易導致斷裂或變形，部分客戶已採用加裝額外的拉力控制盤以改善，但亦有許多使用者並無遭遇相同問題，推估可能與包帶材質、纏繞角度或實際操作設定差異有關。

(3)包紮頭自動更換模組

針對須頻繁更換包紮帶之客戶，RIMAC 研發出自動更換包紮頭系統（Automatic Taping Head Exchange），使用者可透過預設參數資

料庫選擇對應包帶結構與操作模式，並自動完成換頭與定位。此功能亦支援與教學操作模式連動，簡化設備參數建模流程，降低人為錯誤率，為有效推動生產數位化管理。

針對 **Coil Forming Machine**（線圈成型機）的回饋部分，由於該設備結構較為單純，整體運行穩定性良好，目前並未出現廣泛的使用問題。然而本處反映兩項特定狀況，**RIMAC** 亦提供說明與後續追蹤：

(1)人機介面蓄電系統電力不足

有使用者反映成型機面板在待機期間容易出現電力不足警告，導致系統重新啟動，對此 **RIMAC** 表示部分客戶已加裝 **UPS** 不斷電系統作為解決方案，該選項可於新機採購或後續維護時提出升級，確保介面穩定性與工作流程順暢。

(2)線圈夾具固定力道不足

本處實務上發現，在成型大型線圈時夾具定位效果不佳，難以維持角度與位置精度，**RIMAC** 回應目前其他用戶並無類似問題，研判差異可能來自機型配置，本處成型機部分氣壓控制迴路取代原設計的全油壓結構，可能導致夾具壓力不足。對此 **RIMAC** 提議由本處提供實際線圈樣件與包紮尺寸資料，其團隊將進行夾具模擬測試，以評估是否需強化夾緊機構或重新設計驅動元件。

綜上所述，透過本次雙向交流，不僅了解目前使用設備之設計規劃與可升級的項目，也掌握了其他用戶的創新應用案例與參數調教經驗。未來將依實務操作需求，持續與 **RIMAC** 協調相關優化模組與改善方案，確保設備在可靠度、安全性與產能上持續發揮最大效益。

三、心得與感想

第一週的奧地利參訪 **Isovolta** 總部，是一趟收穫豐富且啟發深刻的學習之旅，透過實地走訪實驗室與生產現場，深入了解絕緣材料從製程開發、性能檢測到品質控管的完整流程，尤其在雲母帶與 **B-stage** 絕緣材料方面，學習到許多先進技術與有效的製程管理方式。

在實驗室實習中，**Isovolta** 展示了多項針對絕緣帶的物理與電氣性能檢測設備，這些設備與測試手法對本處未來建立更完善的品管機制提供了寶貴的參考。同時透過工廠現場參觀，實際觀察到材料從樹脂浸潤、乾燥、層壓、分條到低溫保存的每一環節，特別是多段式溫控烘道與壓製設備的運作，對

材料加工過程有了更完整的理解與尊重。

此外本次實習也深入接觸到多項新式材料與包紮方式的實務經驗，CONTAFEL 4318 導電帶的長時穩定性與優異導電性能，為未來進行內外電量保護設計提供更佳選項，Roebel bar 結構中導體內層電場控制的應用案例，結合導電膜與絕緣雲母帶的排列方式，對電場均勻性與擊穿防護策略有更深入的認識。

綜合來說，這次奧地利的實習，不僅獲得豐富的專業知識與技術啟發，也體驗到不同社會文化所展現的價值與力量，期許將此次的實習轉化為未來實務上的創新與改善動力，回到公司後能進一步推動材料更新及製程優化，為本處的產品品質提升與生產效率改善貢獻心力。

第二週的義大利參訪 RIMAC 公司，是對製造設備、技術導入與產線優化深具啟發性的實務體驗，透過現地觀摩與技術人員深入對談，更全面理解設備供應商在支援客戶現場需求時所展現的彈性與專業，也深刻感受到設備創新對提升電機製造效率與安全性的關鍵影響。

在設備討論中，RIMAC 展現出極高的技術靈活度與回應能力，針對討論的設備如雙層線圈成型機、菱形繞線機結合自動包紮模組以及四軸翻轉式包紮機，均能提供實質設計圖面與操作模組，透過技術交流深刻體會到設備開發不再是單一的規格品，而是可以配合使用場域與生產目標，不斷優化與演進的開放式平台。

在針對現行設備使用經驗之檢討中，學習到其他線圈製造廠商的相關改良技術如加裝熱風模組、更換驅動結構或導入自動換頭技術來對應，這些都是本處未來有可能面對的問題，提早了解相關因應對策，此外也感受到 RIMAC 是個能開放地接受回饋，願意進行後續測試與材料分析的長期合作夥伴。另一方面，本處也可以透過 RIMAC 的相關設備得知，現在的設備都非常著重於「人機工學設計」與「作業安全」，對提升現場作業流暢性與人員安全都更加有保障，歐洲不愧是非常注重人權及勞工的國家。

綜合而言，此次義大利實習不僅拓展了對電機線圈製造設備的技術理解，更學習到與設備開發廠商之間如何進行有效溝通與技術共創，深刻體會到「標準化製程」與「客製化彈性」之間的平衡藝術，也從其他客戶的經驗中獲得許多可借鏡的思路。未來若能依此方向逐步導入新設備與改進方案，必能進一步提升本處在旋轉電機製造領域的效率、品質與工安表現。

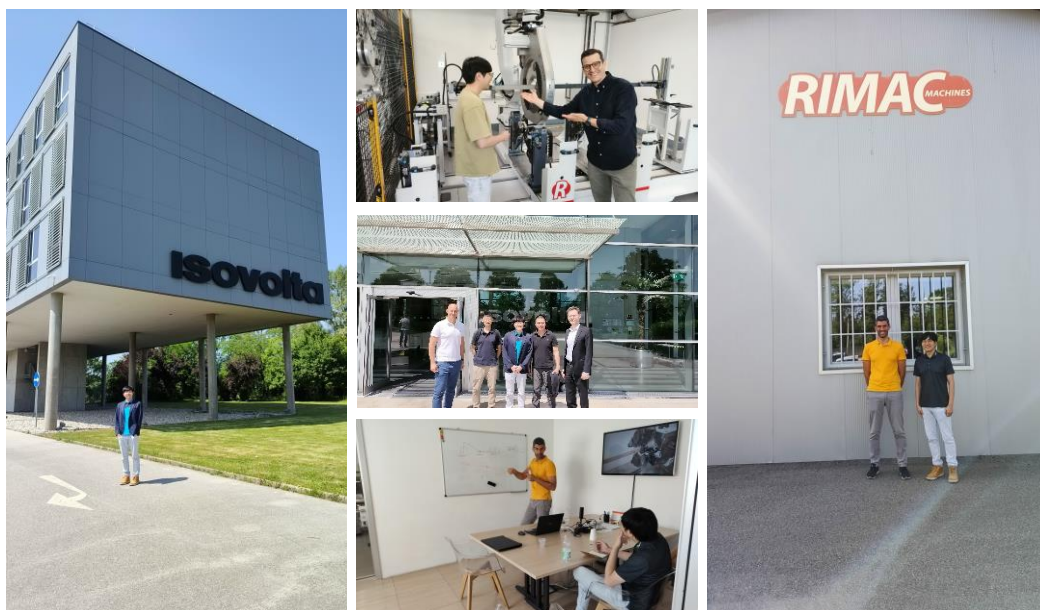


圖 21 此次實習合影照片

四、遭遇之困難與特殊事項

本次出國期間，除完成原訂實習與技術交流行程外，也因應地緣與文化背景，經歷了幾項令人印象深刻的特殊事件，並在溝通與生活面向上面臨部分挑戰，成為此行中意外但有價值的學習體驗。

在本次實習期間針對定子線圈新式絕緣材料的認識上，學習到許多關於絕緣材料的測試方式，由於本處所使用的絕緣方式以 **B-stage** 雲母帶包紮為主，故在介紹部分新式的 **VPI** 含浸形式的絕緣帶時，由於沒有實際使用該絕緣系統，在介紹時列顯陌生且有些專有術語無法及時融會貫通，不過也透過相關的簡介之後，對 **VPI** 含浸絕緣系統有更深入的了解，比如說滲透壓的計算、絕緣帶張力的設定以及真空壓力的設定等等。由於目前業界對於小型發電機多採用 **VPI** 含浸絕緣系統，因此透過此次實習能有助於日後進行發電機絕緣修復時能更加得心應手。

在熱壓機操作實習的部分，由於採用分段式控制溫度及壓力，與目前所使用之熱壓系統不同，故需要花時間理解其設計原理，只能說雖然增加了設備操作靈活度，同時也面臨操作人員需要長時間的訓練，因此如何兼顧會變成日後重要的議題探討。

五、建議與討論

本次實習歐洲材料與設備供應商，深化了對絕緣技術與線圈製程的理解。反思此實習之經驗建議可從以下四個方向持續精進：

(一)持續推動核心技術人才赴海外實習與交流

透過實習國際材料領導廠商，不僅可獲得第一手技術資料與製程經驗，更有助於打破原有視角限制，對製造品質、材料設計與自動化整合有系統性的理解，建議公司持續推動具潛力之工程師或技術人員赴國外進行技術交流與設備觀摩，並將出訪成果透過內部簡報、實際測試等方式，達成知識擴散與實務導入的雙重目標。

(二)持續推動關鍵設備模組化與技術優化

實習中觀察到多項設備已模組化並搭載新一代智能機械手臂，儼然成為新型設備設計主流，相較之下本處部分設備仍仰賴單一設定與人工切換，實有進步升級之空間，建議公司持續推動既有製程設備模組升級，優先針對老舊設備進行汰換，導入具備數位控制、參數記憶與自動調節功能之模組，逐步提升產線的穩定性與靈活性。

(三)導入材料實驗能力與數據導向的檢驗機制

實習中觀察到實驗室展示了材料檢驗與製程參數數據化的應用，建議本公司未來可依實務需求導入相關材料檢驗設備，可即時監控材料品質，有助於推動製程最佳化與可靠性改善。

六、致謝

很榮幸獲得副座、處長及各級長官青睞能有此次出國實習機會，特別感謝修護處電機工場呂經理家旭、Isovolta 公司技術部門經理 Philipp Halb 及 RIMAC 公司負責人 Marco Cattaneo 協助安排此次實習行程，也感謝各公司的工作人員在百忙之中協助介紹各式產品及技術，受益匪淺。