

出國報告（出國類別：實習）

葉片熱均壓製程設備點收
及運維之研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：鐘震洲；機械研究專員

派赴國家：瑞典

出國期間：108年9月18日至9月29日

報告日期：108年11月26日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：葉片熱均壓製程設備點收及運維之研習

頁數 16 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電 人資處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

鐘震洲/台灣電力公司/綜合研究所/機械研究專員/(02)8078-2219

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：108.9.18~108.9.29 出國地區：瑞典

報告日期：108 年 11 月 26 日

分類號/目

關鍵詞：熱均壓、預應力、金屬 3D 列印、高壓熱處理

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國研習，除了進行設備完成項目之清點紀錄外，並學習熱均壓製程之作業流程、主體設計與製造方式及最新應用知識。

熱均壓系統包含有壓力容器、框架、鉬或石墨加熱模組、控制模組、氬氣加壓模組、抽真空模組、戶外氣體蒸發加壓系統、緊急安全系統等，是一套安全、先進且高端的設備，將可有助於本所提升對電廠熱元件的服務品質。

除了學習系統的細部功能以外，本次實習亦針對熱均壓的產業應用有新的體悟，3D 列印件的配合應用、與熱處理的結合應用都是這幾年新的應用趨勢，本公司未來將可為電廠提供更優質的服務。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

目 錄

出國報告提要.....	I
目錄.....	II
一、 出國緣由、行程及主要任務.....	1
二、 Quintus 公司簡介.....	2
三、 壓力容器與保護框架主體的設計.....	3
四、 熱均壓作業之介紹.....	7
五、 熱均壓的最新應用.....	14
六、 心得與建議.....	16

一、 出國緣由、行程及主要任務

葉片熱均壓製程設備為本公司近一兩年內即將建置完成且開始進行相關研發及量產之重要設備。為確保設備未來建置後之運轉安全無虞，希望藉由此次至瑞典 Vasteras 之 Quintus Technologies AB 出國實習，除了進行設備完成項目之清點紀錄外，並學習熱均壓製程之作業流程、主體設計與製造方式及最新應用知識。本次出國期間自 108 年 9 月 18 日至 9 月 29 日，此次出國研習的重點如下：

- 一、 了解壓力容器與保護框架主體的設計及製造方式。
- 二、 學習熱均壓作業的流程。
- 三、 了解熱均壓的最新應用知識。

本次出國案件係應用 108 年度出國計畫第 78 號，出國核定書為 1080781 號，電人字第 1088098443 號函。

二、 Quintus 公司簡介

Quintus 公司的前身可追溯到 1950 年代，當時瑞典的 ASEA 公司是第一家將 Battelle Memorial Institute 提出之均壓技術(Isostatic pressure technology)商業化的公司。1970 年代時，ASEA 成為 ABB 集團子公司，主要負責均壓設備及鈹金成型設備等市場的開發。1999 年，ABB 的高壓事業部門被美國 Flow International 收購，所用的品牌名稱為 AVURE，並從 2005 年起，AVURE 成為獨立的公司，其高壓設備的產品包含食品及工業兩大不同領域的應用。至 2015 年時，為了反映其現有的繞線(Wire-winding)技術以及該公司現有的美國子公司的名稱，並增加客戶眼中增加食品及工業應用之間的距離，因此將工業部門另外再更名為 Quintus 至今。

自從 50 多年前交付第一套設備以來，Quintus 公司已賣出了超過 1000 套預應力鋼絲片纏繞式腔體及相關組件。屬於工業部門的 Quintus，專注於鈹金成型(Sheet metal forming)、熱均壓(Hot isostatic pressing)及冷均壓(Cold isostatic pressing)之技術。

熱均壓的常見應用包括鑄件缺陷修復，粉末固結以及異種金屬或合金的擴散結合。對於以鑄造製成之渦輪葉片而言，消除微縮孔、微裂紋、和重新調整材料的強化機制，為熱均壓設備最主要且重要之應用。

三、 壓力容器與保護框架主體的設計

針對熱均壓設備的壓力容器(Vessel)與保護框架(Frame)，全世界製造廠家的強化方式有兩種，一種是增加 Vessel 與 Frame 的鍛件厚度來抵抗高壓。另一種則是類似 Quintus 公司的技術，是利用鋼絲片預應力纏繞的方式(Wire-winding)，以強化 Vessel 與 Frame 的支撐壓力強度(如圖 1)。好處除了可將高壓容器主體及 Frame 輕量化外，另可達到”leak before break”的目的，意即萬一壓力超壓安全機制無動作、壓力容器主體或保護框架之材料壽命有非預期之提前失效時，因外部有以預應力纏繞多層之鋼帶強力固定住，使熱均壓設備只會發生洩漏壓力但不至於立即發生突然爆裂之情形。

由於本公司未來將建構的熱均壓設備是採用鋼絲片預應力纏繞的強化方式，對應 ASME 的規章是要採用 KG-311, ASME Code Section VIII, Division 3, 2017 edition 的建構準則來進行設計與製造。

因為熱均壓設備為超高壓力設備，作業過程之使用壓力最高可達到 207MPa。為確保安全，ASME 規章有規定設計壓力是使用壓力的 1.1 倍(即 228MPa)，而測試壓力是使用壓力的 1.25 倍(即 285MPa)。表 1 是壓力容器、保護框架及鋼絲片的材料種類及等級，可以發現這些材料的降伏強度至少在使用壓力的 4 倍以上。

根據原廠的說明，在設計使用鋼絲片纏繞的壓力容器與保護框架時，會將(1) 壓力容器；(2) 纏繞於壓力容器的鋼絲片；(3) 保護框

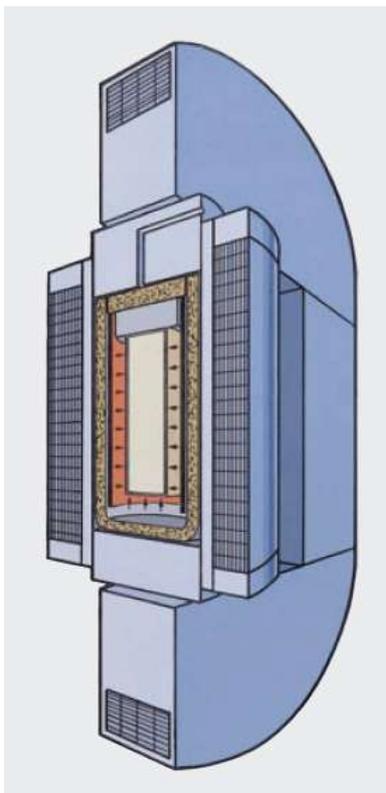


圖 1 Quintus 的鋼絲帶預應力纏繞剖面示意圖。

表 1 熱均壓設備主體之材料性質。

材料編號	Forging SA-723		SA-905
材料等級	Class 4	Class 2a	Class 1
應用於 HIP 的部位	Cylinder	Column Yoke Upper Closure Lower Closure	Wire
抗拉強度 (MPa)	1205	1000	1900
降伏強度 (MPa)	1105	895	1650
伸長率 (%) A ₅	12	13.5	---
伸長率 (%) A ₁₀	---	---	4
斷面縮率 (%)	35	43	---
衝擊能 (J)	38@0°C	33@0°C	---

架；(4) 纏繞於保護框架的鋼絲片 分別進行疲勞裂縫成長的計算與製造設計。譬如應力強度因子是以 $K_I = k \cdot \sigma \cdot \sqrt{(\pi \cdot a)}$ 來計算，而裂縫成長速度是以 $\frac{da}{aN} = C \cdot [f(R_K)] \cdot (\Delta K)^m$ 來計算。計算結果均有符合我們的安全要求，並依此設定的條件去進行 ASME 的設計、製造與水壓測試認證。

四、熱均壓作業之介紹

(一)機械動作

熱均壓設備在高壓製程作業中，是藉由保護框架(Column & Yoke)將上下封蓋(Upper & Lower Clouser)牢牢扣住。當需要開蓋吊出或吊入工件，保護框架會扣抓住上封蓋，並進行前後的移動。如圖 2 為高壓製程作業情況，圖 3 則為上封蓋移開桶槽的情況。

為了使加熱爐基座、加熱爐基座專用吊具及隔熱罩能只利用天車之橫向小車進行交換搬運的動作，以上幾個物件之置放座投影圓心須與壓力容器的投影圓心在同一直線上，且平行於天車橫向小車之移動方向。

其裝卸載工件之流程如下：

1. 使用原廠提供的加熱爐基座專用吊具，從熱均壓設備旁邊的置放座站之一抓取裝好工件之加熱爐基座，使成為一個合體。
2. 將合體後的吊具+基座以天車之橫向小車移至壓力容器上方，隨後並開始降低高度。通過容器壁上之導引塊向來使基座置中，並且以導向銷確保將基座放置在正確的位置，以正確插入下封蓋上的熱電偶和電源連接器。
3. 加熱爐基座專用吊具順利地向上脫離壓力容器，並放回置放座。
4. 將內含加熱器的隔熱罩以類似第 2 項的方式放進壓力容器，通過導向銷正確定位，此時工件被內含加熱器的隔熱罩罩住。

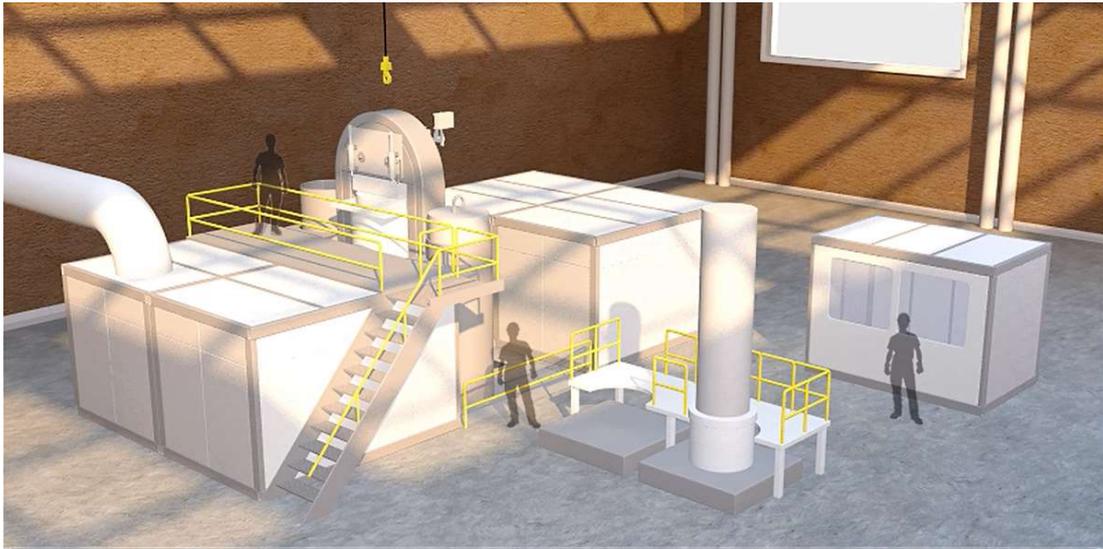


圖 2 熱均壓設備在高壓製程作業中，保護框架發揮作用之情形。



圖 3 熱均壓設備在準備作業中，保護框架需連同上封蓋一同移出。

5. 保護框架移回壓力容器位置，將上封蓋蓋回壓力容器，並以墊塊來填補上封蓋與保護框架之間的空間。
6. 開始一個循環的熱均壓製程。
7. 依上述反向順序進行工件的卸載(unloading)流程。

(二)控制系統

控制系統由幾個 PLC 組成，每個模組會有一個 PLC。而 PLC 和人機介面(HMI)之間的通訊是通過乙太網路完成的。控制系統具有遠端連接功能，原廠可以透過遠端連線進行設備的診斷及軟體故障排除。此外，控制系統在程序中包括互鎖功能，可以最大程度地減少操作員出錯的風險。通過原廠開發的軟體溫度控制器就可以在 PLC 內部執行加熱控制，無需外部控制器。

而熱均壓的運轉參數程式是可以在 HMI 中生成、儲存和檢索，當在運行運轉參數程式時，程式會被下載到 PLC 中。在製程過程中，HMI 只有將製程視覺化並記錄測量。

HMI 系統由兩台具有數據記錄功能的 PC 組成。這使系統變得有彈性且也確保系統安全，這意味著即使第一台 PC 發生故障，第二台 PC 也可以直接接手完成該週期。由這兩個 PC 所組成的人機界面 (HMI)，可將熱均壓過程和機器即時狀態視覺化呈現。HMI 系統可以顯示幾個不同的功能視窗及運轉參數訊息，例如壓力、各區熱墊偶溫度、水溫。如果系統運轉參數有異常，會發出警報提醒操作員進

行確認調整。

如圖 4 之 HMI 畫面，所有功能視窗均包含兩個固定顯示區域。螢幕上方區域是固定顯示日期、時間、熱均壓製程進度、製程參數、爐內真空或加壓壓力。而在螢幕下方區域，另一個固定顯示區域是用於切換功能視窗的顯示按鈕。以上的製程參數紀錄，可以獨立匯出 *.csv 格式，可以在 excel 軟體進行數據分析比對。

圖 5 的畫面顯示出氣體系統的狀態、氣閥的狀態，也顯示了氣體儲槽和壓力容器中的個別壓力。

(三)加熱系統

加熱爐底座是熱均壓設備的重要組成，它的底部有一個絕緣的基板以及連接數個不鏽鋼圓柱作為基腳。若工件製程溫度需求在 1250°C 以下，一般會使用鉬加熱器型之加熱爐底座。爐子內部所有加熱器(包含底座和側邊)的溫控熱電偶以及工件溫度監控熱電偶，都是從此底座進行插拔式的銜接。這些感溫線要避免在爐內高溫中受損，又要確保很可靠的銜接進行溫控，在現場看到一位老師傅正在工坊製作感溫線，感受到其高水準的製作技術。

為了使爐內所有工件加速且均勻達到溫度設定點，還有執行最後階段的快速冷卻功能。爐底裝有強制對流裝置。該風扇型的強制對流裝置可以變速運轉，專門開發用於在熱均壓容器的高壓環境中運行。通常在量產的時候，會準備至少兩組加熱爐底座，當一個底座在

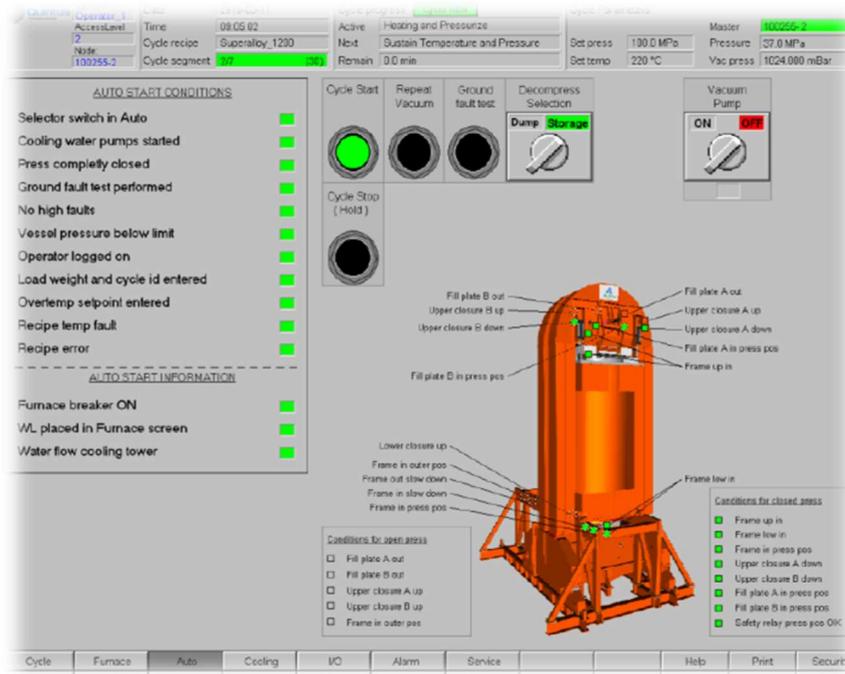


圖 4 熱均壓設備有關設備狀態之人機操作介面。

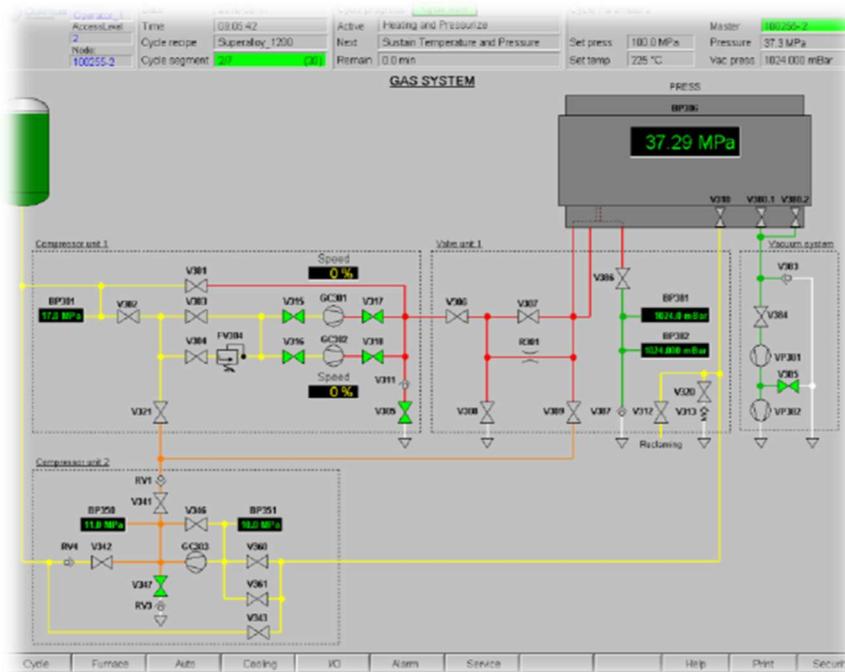


圖 5 熱均壓設備有關氣體系統之人機操作介面。

壓力容器內中進行熱均壓製程時，另一底座可以進行工件與夾治具的取放，可以最大程度地減少各爐次之間的周轉時間。

以鉬(Molybdenum)所製作的側邊型加熱器和底座型加熱器是全世界熱均壓設備的主力材料。因為其具有最高的形狀穩定性，對熱衝擊不敏感，並且具有出色的使用壽命。中大型熱均壓爐的側邊型加熱器通常是以條狀元件的形式依附在隔熱罩的內側，因為有能夠承受熱衝擊和高氣壓的特定 HIP 等級製成的陶瓷絕緣子，以隔絕側邊型加熱器與隔熱罩的直接接觸，所以系統發生接地故障(ground faults)的機率較低。側邊型加熱器分為 3 個獨立控制的加熱區，以在 HIP 製程的升溫階段和持溫階段達到最佳溫度均勻性。

(四)快速降溫系統

為了縮短生產週期，現今全世界的熱均壓系統均有快速冷卻系統。因 Quintus 的熱均壓是屬於 ASME 第 3.2 章節的繞鋼帶式壓力容器，有較薄的容器壁厚，可獲得良好快速冷卻性能的關鍵條件，可均勻被控制的快速降溫系統是集成在隔熱罩和加熱器底座中。如圖 6，帶有強制對流裝置的強制對流系統是快速降溫系統的關鍵要素，透過使裝置高速運行，熱氣體被迫離開熱源區(工件區域)，而來自隔熱罩外部已被冷卻的氣流被推送入熱源區以從工件中吸收更多能量。透過從隔熱罩外部推送可多可少的冷卻氣流來控制冷卻速率，可以來實現工件的降溫速度是可被控制的。

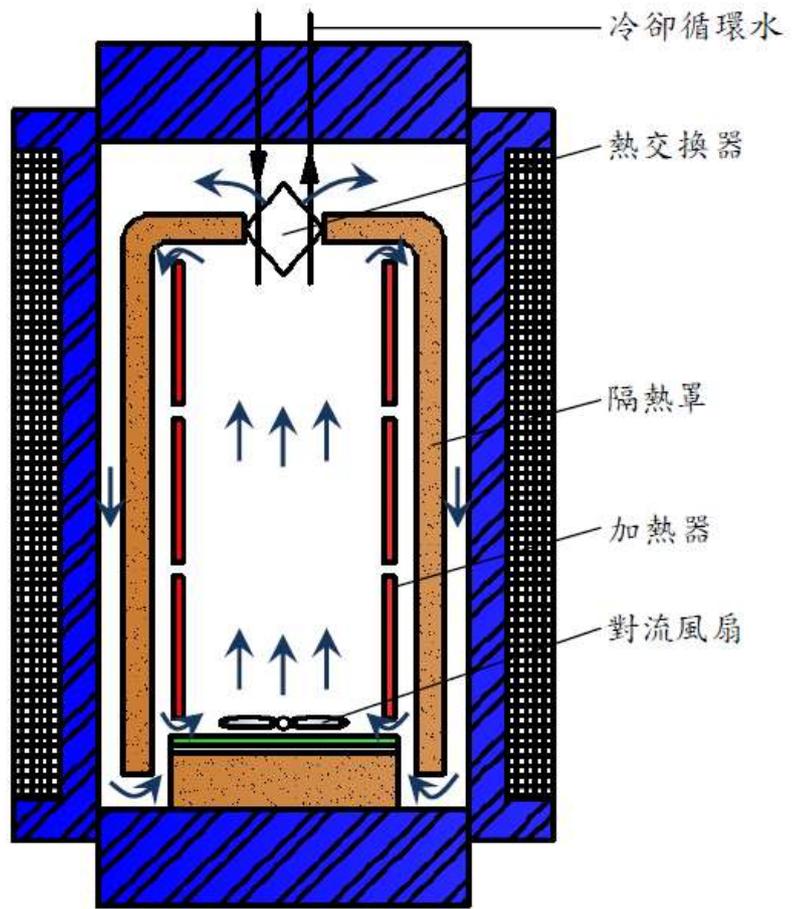


圖 6 熱均壓設備快速冷卻之循環示意圖。

五、 熱均壓的最新應用

在傳統上的認知，熱均壓製程主要的功能是将鑄件內部的微縮孔進行壓縮消除，提升鑄件的實質密度。也因為通常熱均壓的作業溫度是在固溶限溫度之上，若搭配後續的熱處理則可以提升機械性質。

在 Quintus 曾看過一件測試樣品，刻意在兩個圓柱的端面中心各鑽一個直徑和深度均約 5 mm 的盲孔，再將兩個圓柱有孔的端面靠在一起後進行圓周接縫處的全周銲接。銲接後的工件在完成熱均壓之後，可以從外觀清楚觀察到圓柱中間部位往內縮，切開來看可以發現原本裡面的孔幾乎都被壓縮消除了。但若是孔洞是在工件表面，因為孔洞內部與外部沒有壓力差，孔洞是不會被擠壓消除的。圖 7 是類似在描述以上的過程，因嘴巴造型等同於在工件表面的孔洞，終究是不會被擠壓消除的。

此外，近幾年粉床式的金屬 3D 列印蓬勃發展，由於成品緻密度還是金屬 3D 列印的致命傷，所以熱均壓設備剛好可以發揮它的功能來提高成品緻密度。也有將金屬粉末直接封在金屬外殼內，以熱均壓設備來製作 Near Net Shape (NNS) 的成品。以往為了獲得不管是 As cast / MIM / 3D Print / NNS 的成品，都須經過另外一套熱處理設備進行熱處理。近幾年 Quintus 有研究發現可以用具有快速冷卻功能的熱均壓設備來在高溫高壓環境下進行消除殘留應力、緻密化、固溶、時效等處理，如圖 8，稱之為 HPHT (High Pressure Heat Treatment) 技術。

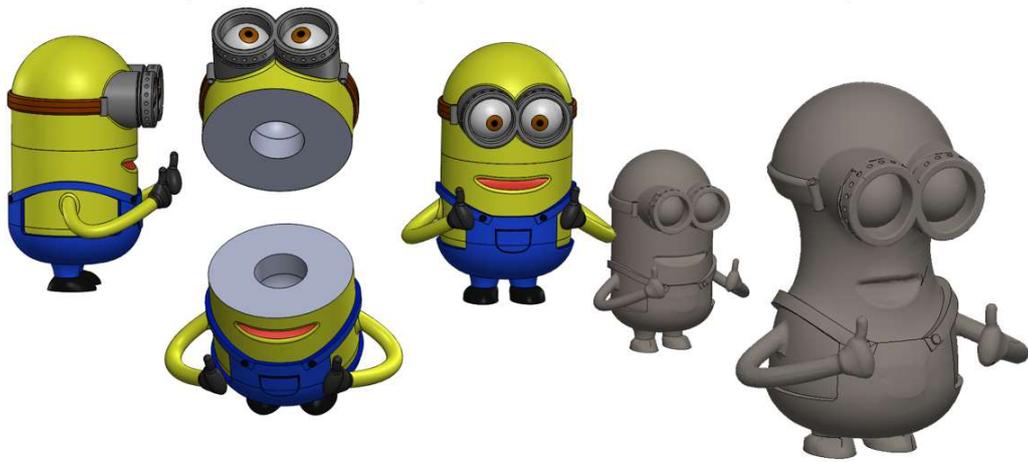


圖 7 工件內部與外部孔洞經熱均壓製程後之結果示意圖。

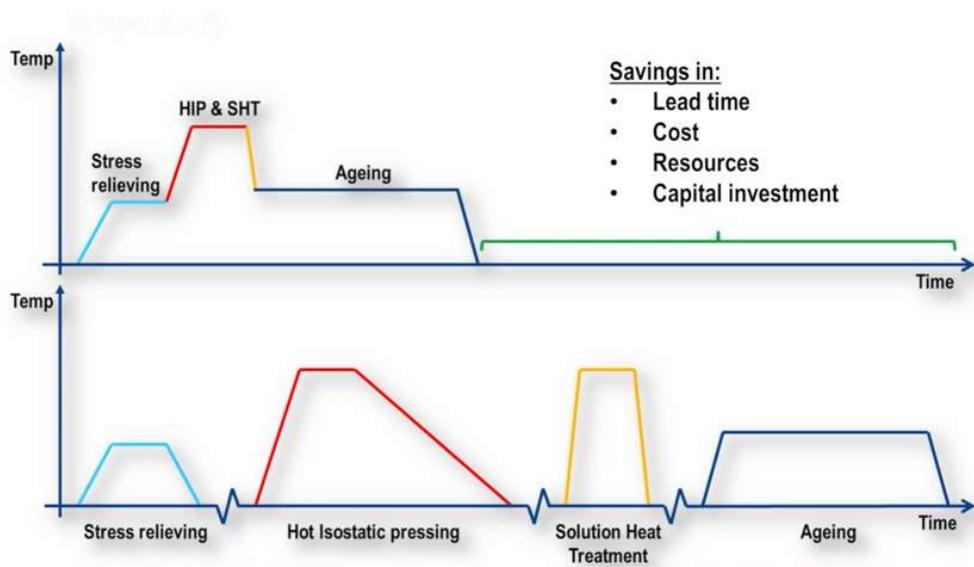


圖 8 High Pressure Heat Treatment 與傳統製程之比較。

[Quintus Technologies website]

六、心得與建議

本次出國研習，除了進行設備完成項目之清點紀錄外，並學習熱均壓製程之作業流程、主體設計與製造方式及最新應用知識。從前對於熱均壓設備不是很了解，只是覺得它是一個很危險的高溫高壓設備。但經過這幾年的文獻資料收集，並有幸親自到原製造學習了解後，覺得這是一個很安全、先進且高端的設備，將可有助於本所提升對電廠熱元件的服務品質。

此外，9年前亦曾拜訪過此 Quintus 公司。這家公司雖然產品都是一樣的熱均壓設備，但仔細觀察可以發現不管是製造或應用都有在持續進步或跟上新進製程趨勢。譬如模組化的系統、與 3D 列印件的配合應用、與熱處理的結合應用等。

相信未來不管是鑄件或 3D 列印件，本公司建立此熱均壓設備後一定可以在材料領域又跨進一大步，為電廠提供更好更優質的服務。