

出國報告（出國類別：實習）

## 超合金葉片之熱均壓處理技術之研究

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：鐘震洲；機械工程師

派赴國家：比利時、瑞典

出國期間：99年10月2日至10月15日





報告日期：99年11月23日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：超合金葉片之熱均壓處理技術之研究		
出國人姓名	職稱	服務單位
鐘震洲	機械工程師	台灣電力公司 綜合研究所
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他_____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：99年10月2日至99年10月15日		報告繳交日期：99年11月23日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 4.內容充實完備. <input checked="" type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input checked="" type="checkbox"/> 9.本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input checked="" type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。(99.11.4完成) <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他_____ <input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式:	

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報 告 人		審 核 人		單 位 主 管		主 管 處 主 管		總 經 理 副 總 經 理
-------------	---	-------------	---	------------------	--	-----------------------	---	---------------------------------

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：超合金葉片之熱均壓處理技術之研究

頁數\_\_\_\_ 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/機械工程師/(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：99年10月2日至10月15日 出國地區：比利時、瑞典

報告日期：99年11月15日

分類號/目

關鍵詞：葉片再生、熱均壓、高壓容器、快速冷卻、Hot Isostatic Pressing、HIP、SA-723

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國主要任務是分別至比利時、瑞典參訪兩家世界知名之熱均壓設備製造廠家，針對熱均壓技術於葉片再生之應用進行研討，並了解各廠家對於其熱均壓設備之設計理念及研發趨勢。

熱均壓(HIP)屬於先進高壓容器設備，其使用壓力至少可達200MPa，所以安全性永遠是製造廠家之優先設計重點，譬如須通過ASME之認證、容器與框架材質之選用、安全破斷碟盤之研發、預應力鋼絲纏繞技術之研發等，以保障熱均壓設備之使用安全無虞。

此外，由於熱均壓設備之價格不菲，為縮短HIP連續生產時之cycle time，製造廠家亦在降溫速度的研發上投入許多心力，此次參訪了解了兩家廠商於此方面之設計概念，除了有利於未來熱均壓設備之規劃外，亦可應用此概念於不同領域之製程開發。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

([http://open.nat.gov.tw/OpenFront/report\\_detail.jsp?sysId=C09903814#e](http://open.nat.gov.tw/OpenFront/report_detail.jsp?sysId=C09903814#e))

# 目 錄

出國報告審核表.....	I
出國報告提要.....	II
目錄.....	III
一、 出國緣由、行程及主要任務.....	1
二、 熱均壓技術於葉片再生之應用.....	3
三、 熱均壓處理及相關技術應用研習(比利時 EPSI 公司).....	5
四、 熱均壓處理及相關技術應用研習(瑞典 AVURE 公司).....	18
五、 心得及建議.....	29
六、 參考文獻.....	30

## 一、 出國緣由、行程及主要任務

### 出國緣由：

近年來國外葉片製造公司或研究中心，迅速發展熱均壓處理技術，並應用於氣渦輪機葉片或航太組件之舊品再生及新品製造。本所正進行氣渦輪機動靜葉片等組件之先進維修再生與新製研發工作。因此，希望經由此次出國了解國外先進熱均壓處理技術之發展(比利時 EPSI 公司、瑞典 AVURE 公司)，並學習相關技術，藉以提昇本所葉片再生鐸修技術及葉片新品製作之品質。此次出國研習之重點如下：

- (一)至先進國家研習超合金葉片之熱均壓處理技術，並學習其應用於渦輪機組件之經驗與成果，吸取相關經驗技術，以提昇本公司之葉片精密鑄造品質及新葉片之製造及水準。
  
- (二)藉由國外之技術與經驗交流，提升本所應用熱均壓處理技術於新葉片製造技術之研發水準，包括超合金葉片之鐸修再生及新葉片鑄造後之縮孔封孔技術，以降低電力組件再生及購置新品之成本，並增進本所對於各種渦輪機組件再生及製造之競爭力。

本次出國案件係應用 99 年度出國計畫第 62 號，出國核定書為 EE99132 號，電人字第 09909010501 號函。

## 出國行程及主要任務：

本次出國期間自 99 年 10 月 2 日至 10 月 15 日，主要的任務為參訪兩家世界知名之熱均壓設備製造商，針對熱均壓技術於葉片再生之應用進行研討，並了解各廠家對於其熱均壓設備之設計理念及研發趨勢。行程及工作內容概要說明於下表：

項次	起始日	迄止日	地點	前往機構	工作內容概況
1	991002	991003			往程（台北－Amsterdam－Antwerp）
2	991004	991005	比利時	EPSI 公司	超合金葉片之熱均壓處理及相關技術應用研習。
3	991006	991013	瑞典	AVURE 公司	1. Antwerp－Vasteras 2. 超合金葉片之熱均壓處理及相關技術應用研習。 3. 瞭解熱均壓處理設備之場地佈置及週邊需求，並研習熱均壓處理設備之作業流程及瞭解該設備之安全設計。
4	991014	991015			返程（Vasteras－Stockholm－台北）

## 二、 熱均壓技術於葉片再生之應用

### (一) 何謂熱均壓？

熱均壓(Hot isostatic pressing)處理，是將金屬工件放置於一個密閉的容器內，以容器內的電熱圈加熱，並利用高壓氣體壓縮機將惰性氣體灌入容器內，使容器內呈高溫高壓狀態。當爐內溫度足以軟化金屬工件時，因氣體壓力是從工件各方向均勻的施壓，可使工件表面達到緻密化、消除鑄件材料內部的氣孔或微縮孔，達到提高工件機械性質及延長疲勞壽命之目的。<sup>(1)</sup>

### (二) 粉末冶金之應用

熱均壓處理是一種結合高溫與高壓之技術，可以大幅強化零件的材質特性。有些粉末冶金之零件係採用低燒結溫度與高均壓的製程條件，控制其晶粒成長的方向、大小及密度，最後可以得到結構複雜且性能優異的零組件。

### (三) 改善鑄件性質

熱均壓製程可以縮小或消除鑄件的縮孔及內部的微細裂紋。譬如超合金葉片通常是以精密鑄造(Precision Casting)而成，精密鑄造相對於鍛造的好處是形狀設計自由度高(可設計空心鑄件)、尺寸精確及成本較低，但其機械性質相對較差，為了提升鑄件的機械性質，製造廠商通常會再將鑄造後之葉片投入熱均壓製程，以消除葉片內部的微縮孔及提升機械性質。

此外，超合金葉片於氣渦輪機(Gas Turbine)運轉幾萬小時後，外觀上可能會有絕熱塗層剝落、金屬材料龜裂的現象，目前技術上可以用雷射鐳修、研磨、噴鐳等技術來消除這些缺陷。不過葉片本身的材料組織因長時間在高溫運轉，晶界間可能會因高溫氧化、碳化物退化而產生孔洞，使用熱均壓製程可以消弭這些孔洞並恢復機械性質。

參考國內外文獻<sup>(1,2,3)</sup>的鎳基超合金之熱均壓製程參數，其溫度範圍約在 1100~1200°C 左右，壓力範圍約在 100~200MPa，因此本次出國參訪蒐集之 HIP 設備規格，最高使用溫度設訂在 1260°C，最高使用壓力設訂在 200 MPa。



人工關節



渦輪機動葉片

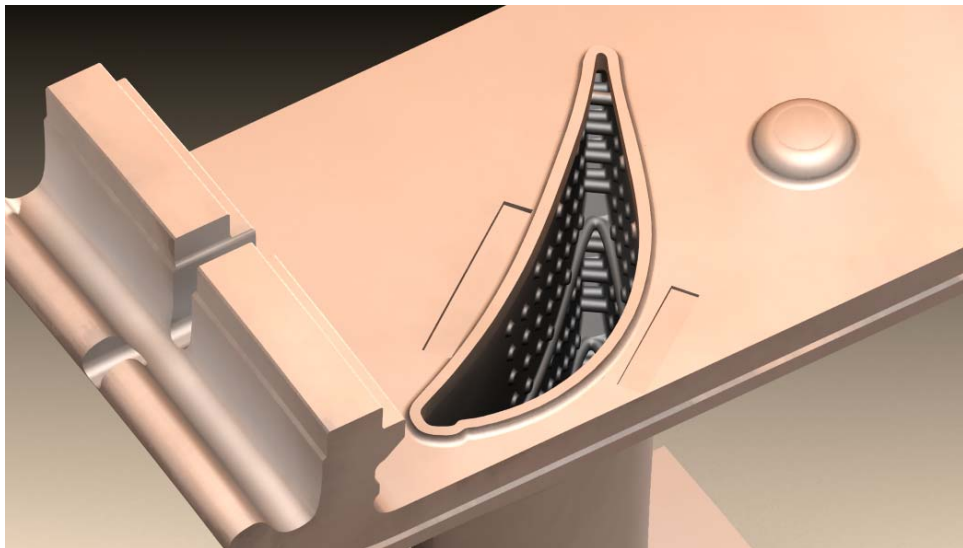


連桿



渦輪機熱段組件

Provided by AVURE company



渦輪機靜葉片內部空心且形狀複雜之設計



### 三、 熱均壓處理及相關技術應用研習(比利時 EPSI 公司)

#### (一) EPSI 公司簡介

EPSI (Engineered Pressure Systems International N.V.) 公司的前身為比利時的國營鍛造公司和位於美國麻州(Massachusetts)的工程壓力系統公司，此兩家公司都是隸屬於美國賓州(Pennsylvania)國營鍛造公司的子公司。自 1996 年 4 月起，此兩家子公司合併為 EPSI 公司，主要產品為冷均壓與熱均壓設備。

#### (二) 本次實習內容

##### 1. HIP 設備高壓容器主體之設計

EPSI 表示，該公司在設計各種尺寸之 HIP 設備高壓容器主體時，是依據 ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Section VIII, Division 3) 的規範內容為設計準則，且設計數據須經 ASME 審核認證後，始得進行後續之實體製造工作。製作過程及完成時，亦須依據上述之 ASME 規範進行檢驗工作，譬如試片之成份分析及機械性質測試、非破壞檢測、水壓試驗等，以確保產品安全無虞。

一般而言，熱均壓設備的高壓容器桶身(Vessel)大多是以圓柱中空體設計，上下兩端開口另以封閉蓋(End Closure)密閉，如圖 1 所示。EPSI 表示，若要設計使用空間  $\Phi 600\text{mm} \times L1500\text{mm}$ ，且使用壓力達 200MPa 的高壓容器，一般會選用 SA-723 材料，此材料為高強度鍛造合金鋼，其合金成分、機械性質如表 1、2 所示。

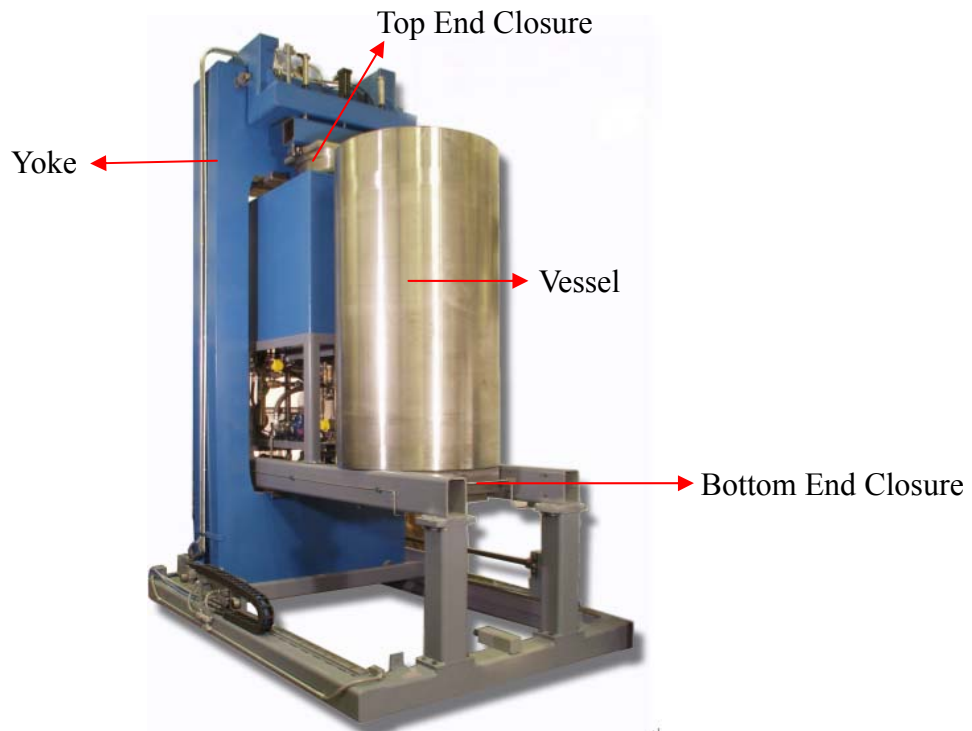


圖 1 EPHI 熱均壓設備高壓容器主體外觀

元素	成分(%)		
	Grade 1	Grade 2	Grade 3
C,max	0.35	0.40	0.40
Mn,max	0.90	0.90	0.90
P,max	0.015	0.015	0.015
S,max	0.015	0.015	0.015
Si,max	0.35	0.35	0.35
Ni	1.5-2.25	2.3-3.3	3.3-4.5
Cr	0.8-2.0	0.8-2.0	0.8-2.0
Mo	0.2-0.4	0.3-0.5	0.4-0.8
V,max	0.20	0.20	0.20

表 1 SA-723 材料成分

\*參考資料：ASME 2007 SECTION II, PART A

	Class 1	Class 2	Class 2a	Class 3 <sup>A</sup>	Class 4 <sup>B</sup>	Class 5 <sup>C</sup>
拉伸強度,min,Mpa	795	930	1000	1070	1205	1310
降伏強度,0.2% offset,min,Mpa	690	825	895	965	1105	1240
伸長率,2 in or 50 mm,min,%	16	14	12.5	13	12	10
斷面縮率,min,%	50	45	43	40	35	30

<sup>A</sup> Typical maximum section size of 255mm for open-ended vessels, or 180mm for blind-ended vessels.

<sup>B</sup> Typical maximum section size of 150mm for open-ended vessels, or 100mm for blind-ended vessels.

<sup>C</sup> Typical maximum section size of 100mm.

表 2 SA-723 機械性質

\*參考資料：ASME 2007 SECTION II, PART A

Vessel 有上下兩個封閉蓋，材質一般亦選用 SA-723 高強度鍛造合金鋼。上下封閉蓋都以斷面為 L 型之環圈 + 2 條 O-Ring 來阻擋 Vessel 內部高壓之洩漏，如圖 3 所示。

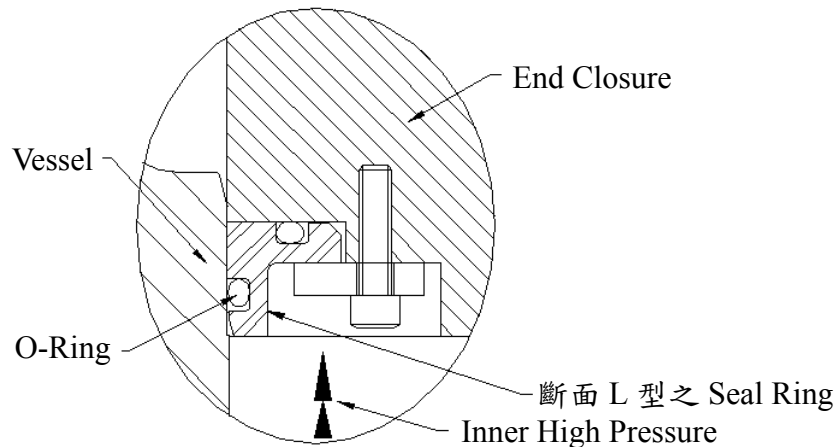


圖 3 End Closure 與 Vessel 密閉示意圖

#### (1) 上封閉蓋(Top End Closure)

設備在高溫運作時，為有效降低上封閉蓋之溫度，另外設計於上封閉蓋之上方連接一片金屬冷卻板，通以冷卻水來帶走熱量。金屬冷卻板的上方再連接油壓升降裝置，可使上封閉蓋準確地垂直進出 Vessel，以避免造成上封閉蓋側面與 Vessel 內側之磨損，如圖 4 所示。

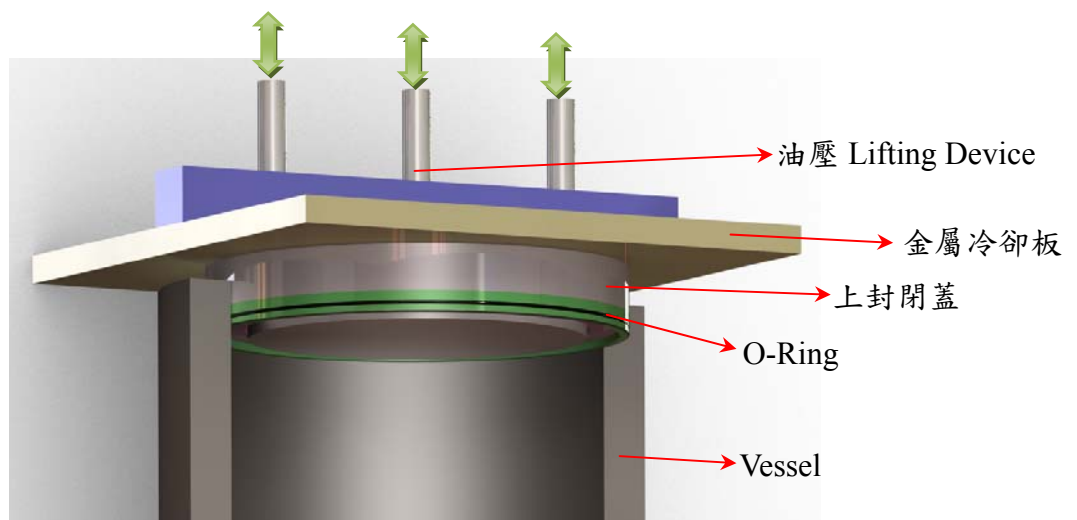


圖 4 上封閉蓋區域示意圖

## (2) 下封閉蓋(Bottom End Closure)

下封閉蓋除了有密閉 Vessel 的功能以外，Vessel 內部加熱模組之電熱元件(Heating elements)與感溫熱電偶(Thermal couple)亦須通過下封閉蓋特殊的連結裝置與外界的電纜線組相連接。除此外，Vessel 的洩壓閥亦裝設在下封閉蓋處，透過馬達與機構來控制閥門的開啟與關閉，如圖 5 所示。

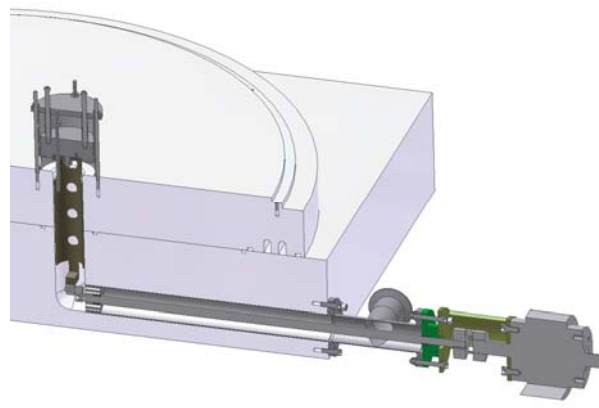


圖 5 下封閉蓋之洩壓機構

## 2. HIP 設備之加熱模組

一般而言，加熱模組包含有工件置放架、爐體、電熱元件、感溫熱電偶、隔熱罩等，在 Vessel 外組裝完成後才一併由天車吊入 Vessel 內，此加熱模組之電熱元件與感溫熱電偶會通過 Bottom End Closure 特殊的連結裝置與外界的電纜線組相連接，如此即可進行加熱及溫控之動作。

### (1) 爐體(Furnace Shells)

若 HIP 之最高使用溫度達 1600°C，廠商在設計爐體時會選用石墨(Graphite)材質；若最高使用溫度在 1260°C 左右，廠商在設計爐體時會選用鉬(Molybdenum)材質。

## (2) 電熱元件(Heating Elements)

廠商通常針對 HIP 的爐體設計 3 組以上的電熱元件，各電熱元件會根據電腦計算而有不同的即時加熱功率，以達到程式溫控及爐內均溫之目的。當其中 1 組電熱元件故障失效時，其餘 2 組電熱元件亦可即時補足加熱功率，以避免該批工件於熱均壓處理時失敗。

## (3) 感溫熱電偶(Thermo Couples)

在 3 組的電熱元件中，每組電熱元件在 6 點與 12 點鐘的位置各設置 1 組 S 或 C Type 的感溫熱電偶，其中 1 組感溫熱電偶是使用於溫度控制，另 1 組則是故障時緊急切換備用。

另外，針對工件端的即時溫度量測，廠商一般是提供 R Type 的感溫熱電偶連接座給客戶自行連接運用。

## (4) 隔熱罩(Mantle Heatshield)

隔熱罩的絕熱等級為 2000°C，且有提供適當的吊具及輔助定位銷，以便整組加熱模組在放入 Vessel 時能準確定位。



圖 6 HIP 加熱模組之電熱元件



圖 7 HIP 加熱模組之隔熱罩及吊具

### 3. HIP 設備之真空與加壓系統

#### (1) 真空系統 (Vacuum System)

為確保 HIP 處理時無污染物滲入工件，通常每次在升溫升壓前會先做抽真空的動作，以大量排出原本爐內的空氣、油份、水份。

真空系統包含有機械泵、下封閉蓋真空閥門、真空壓力錶、管路及洩壓閥等，考量氣體比重及抽真空效率，通常該真空系統會設置於窪坑及靠近 Vessel 處，所抽出的氣體會直接排入大氣。

在正常連續生產情況下，每次抽真空的效率應可在 30 分鐘內達到 100 microns 的真空度。

#### (2) 加壓系統 (Pressurization System)

加壓系統包含有氣體壓縮機、高壓訊號轉換器、可指示閥位之氣動控制閥、壓力限制閥、壓力控制及調節裝置、高壓安全破斷碟盤、氣體回收儲槽等裝置。

##### ① 氣體壓縮機：

一般而言，加壓系統是使用氬氣為加壓氣體。若最初設計之最高使用壓力為 200MPa 時，則所選用之氣體壓縮機之壓縮能力至少在室溫時須可達 200MPa。

##### ② 高壓訊號轉換器：

裝設在靠近桶身(Vessel)的位置，即時量測桶內壓力並轉換為數位訊號，傳送到 PLC 控制器作為自動控制使用之回饋訊號。

##### ③ 可指示閥位之氣動控制閥：

正常情況下，氣動控制閥經由 PLC 控制後，理論上閥位應轉至預期的位置。但為避免氣動控制閥經長期使用後，因機械動作不順而造成閥位不確實，故另在氣動控制閥加裝閥位指示器，將實際閥位位置傳回 PLC 控制器，以確保氣動控制閥有依照 PLC 的指令動作。

④高壓安全破斷碟盤：

考量安全原則，廠商於設備及管路適當位置安裝此高壓安全破斷碟盤(如圖 8)。在設備運轉時，只要碟盤承受超過一定的壓力，此碟盤即會破斷而使壓力立即宣洩，以避免因超壓造成人員傷害及設備損壞。

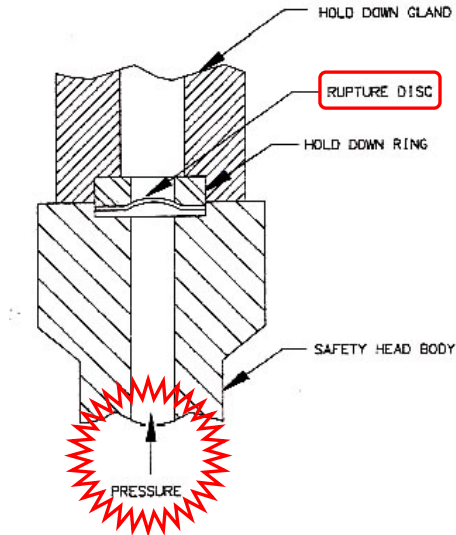


圖 8 高壓安全破斷碟盤

⑤氣體回收儲槽 (Bottle bank)

每批次 HIP 處理完之後，爐內的高壓氬氣可經由壓力平衡與壓縮機加壓方式回收於氣體儲槽。根據 EPSI 的經驗，每批次的回收率約在 60~80%左右，如果回收的氣體純度不足，可於下批次再與新鮮氣體混合加壓使用。



圖 9 氣體回收儲槽

#### 4. HIP 設備之冷卻系統

冷卻系統可分為兩部分來討論，一為配合工件製程的快速降溫需求，二為保護設備材料避免遭受高溫傷害之冷卻需求。

##### (1) 製程快速降溫需求

在 HIP 製程中，如何在產品品質無虞的情況下縮短每批次的 cycle time 是一個重要的議題。HIP 在高溫高壓持續一段時間後，工件須留滯於爐內待溫度降至攝氏兩百度左右時才可安全取出，為縮短這段冷卻時間，設備廠商經常投入大量資源去研究此快速降溫的方法。

EPSI 的概念是在加熱模組的底座設計一組噴嘴，在冷卻過程中持續的將高壓氬氣從噴嘴灌入爐內，使加熱模組內的熱氣產生對流(圖 10)，當熱氣流至 Vessel 內壁，即可用熱交換的方式將熱能由 Vessel 外的冷卻水牆(圖 11)帶出。

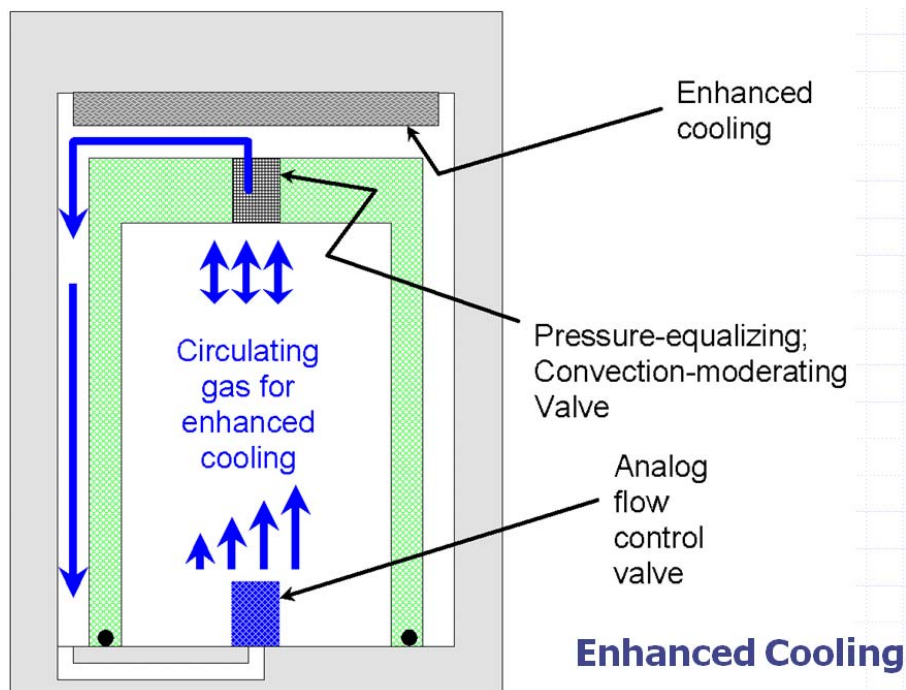


圖 10 加熱模組冷卻時之熱對流示意圖





圖 11 Vessel 之冷卻水牆

## (2) 保護設備材料之冷卻需求

為保護 HIP 爐體及高速迴轉機械之冷卻需求，HIP 系統都會設置冷卻循環迴路。

冷卻循環迴路分為內循環迴路及外循環迴路。內循環迴路包含有熱交換器、水儲桶、Vessel 爐壁冷卻迴路、Vessel Top & End Closure 冷卻迴路、高壓壓縮機冷卻迴路、真空泵浦冷卻迴路等。外循環迴路包含有熱交換器、冷卻水塔等。內循環迴路將設備產生的熱能攜出，經熱交換器將熱能轉移至外循環迴路，最後由冷卻水塔將熱能散出。

此外，於迴路上各設備的出水管位置均會加裝感溫器及水流偵測器，由人機介面操作系統監控其數值，以確保水溫及水流量在安全設定範圍內。

## 5. HIP 設備之控制系統

HIP 系統的所有 I/O 訊號及控制指令都由控制箱內的 PLC 負責監控，且會設置一台人機介面的 PC，將即時監控資訊顯示於螢幕，使用者除了可監視運轉狀態以外，亦可透過此人機介面修改參數條件。

### (1) Overview

此畫面的目的是提供一個目前 HIP 爐運轉的概況，譬如爐內各感溫點的溫度、爐內壓力、目前消耗功率、目前加熱程式的執行狀態等。

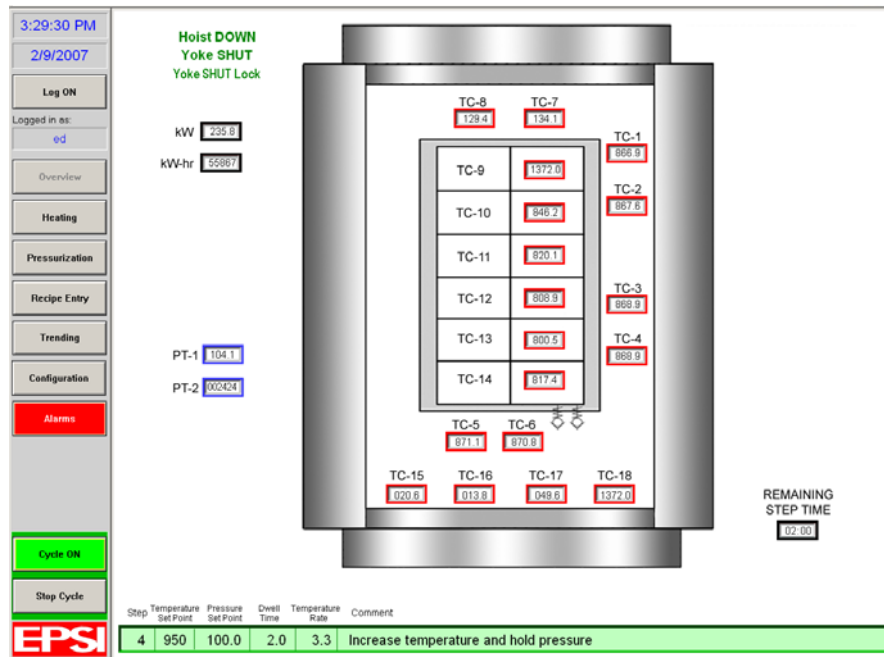


圖 12 Overview 畫面

### (2) Alarms

此畫面會顯示目前與歷史的警報訊息。

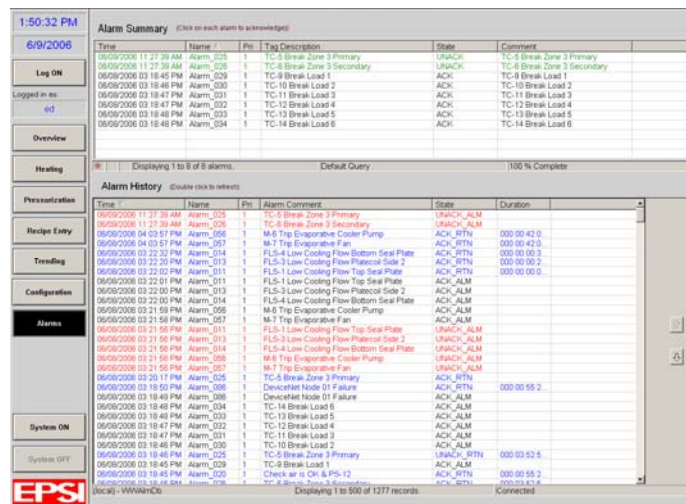


圖 13 Alarms 畫面

### (3) Heating

此畫面可讓使用者去調整溫度參數及顯示各區域的溫度狀況。使用者亦可透過此畫面去選擇使用那一支感溫 sensor。

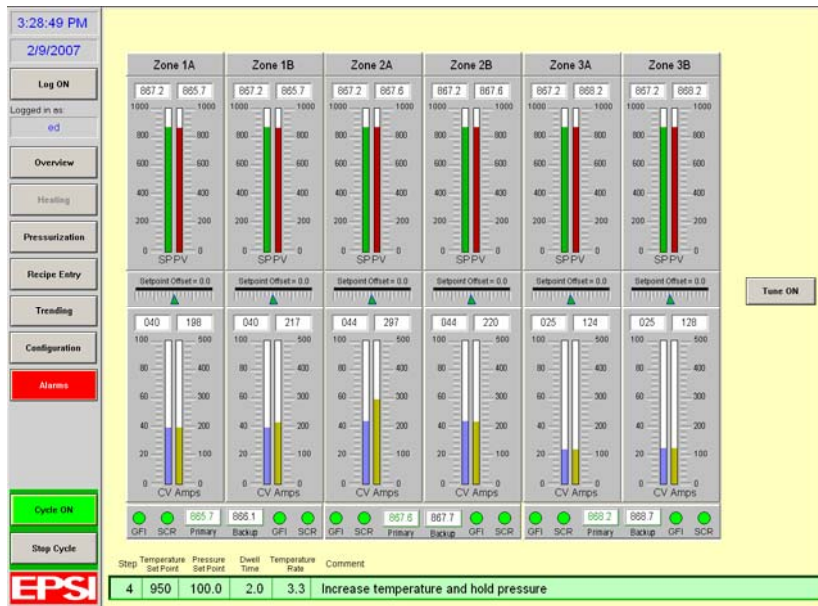


圖 14 Heating 畫面

### (4) Pressurization

此畫面會透過 P&ID (Piping and instrumentation diagram) 的方式來呈現 HIP 系統目前的狀態。包含水溫、水流狀態、爐壓、爐溫、上下封閉蓋狀態等，並可在安全互鎖前提下以手動方式操作各控制閥。

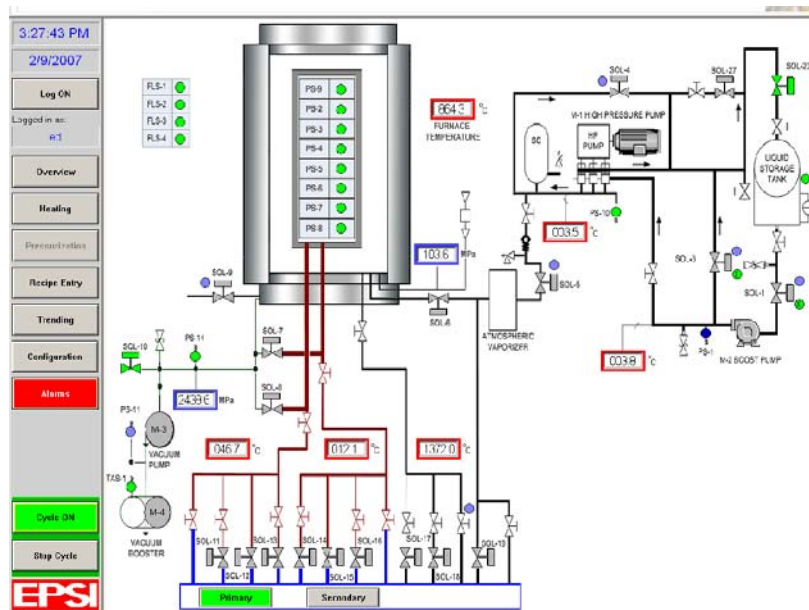


圖 15 Pressurization 畫面

### (5) Recipe Entry

此畫面可讓使用者以程序步驟的方式去輸入 HIP 的製程參數。

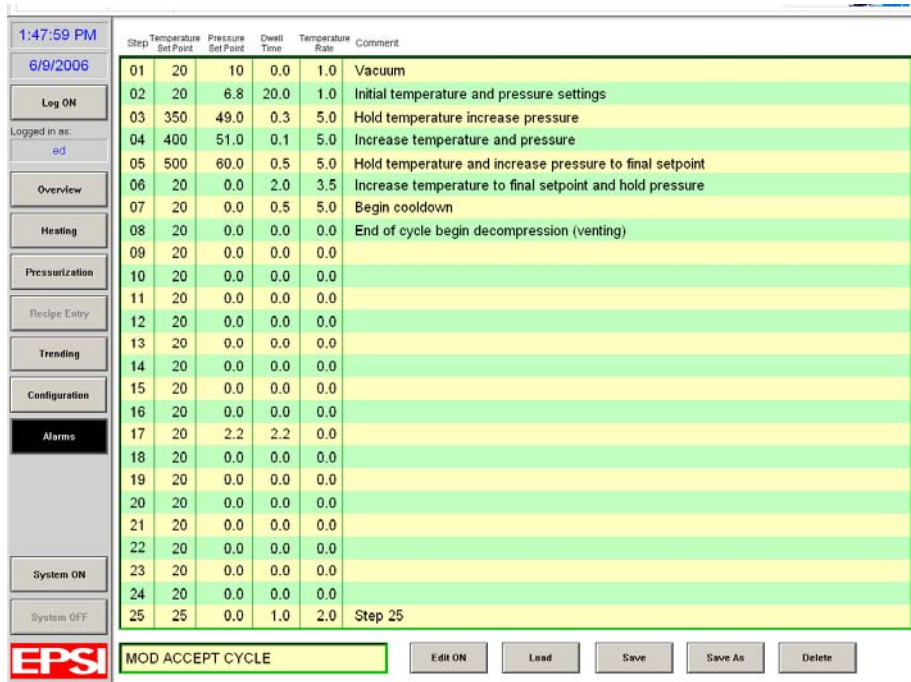


圖 16 Recipe Entry 畫面

### (6) Trending

此畫面可用線型的方式同時顯示最多 8 種不同的製程參數曲線，亦可將曲線儲存成 \*.csv 檔。

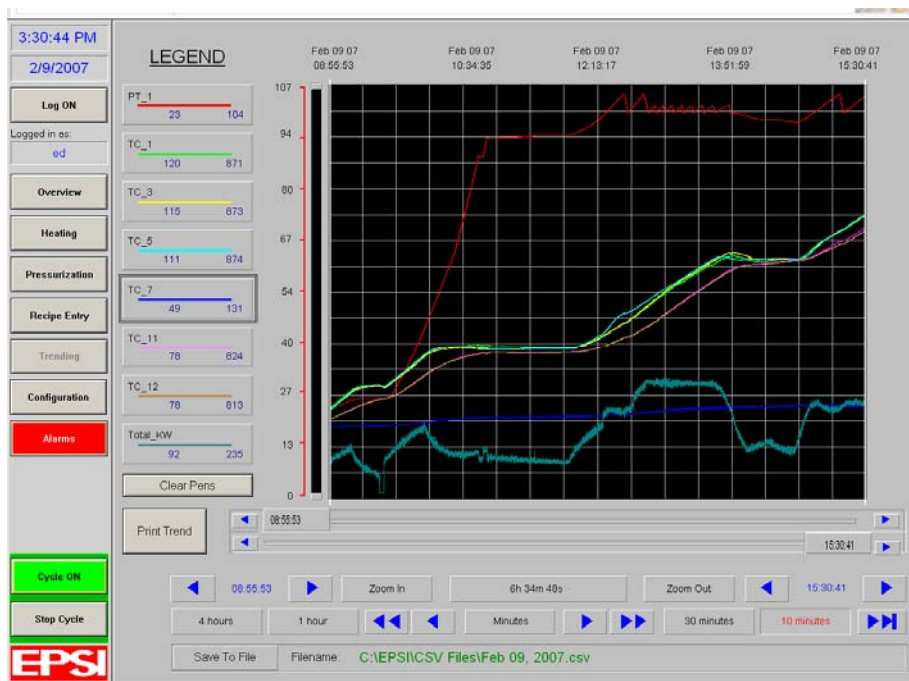


圖 17 Trending 畫面

## (7) Configuration

此畫面是用於特殊的參數設定，一般操作員無法進入，僅限擁有管理權限之人員進入修改。



圖 18 Configuration 畫面

#### 四、 熱均壓處理及相關技術應用研習(瑞典 AVURE 公司)

##### (一) AVURE 公司簡介

AVURE 公司的前身可追溯至 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 成為獨立的公司至今。自從 50 多年前交付第一套設備以來，AVURE 公司已賣出了超過 1000 套預應力鋼絲片纏繞式缸體及相關組件。

目前全世界最大的 HIP 設備為該公司生產，安裝於日本 MTC 公司，該公司稱之為 Giga-HIP。其總高度約 12.6m，重量約 600 噸，Vessel 內的工件空間為  $\Phi 2m \times H4.2m$ ，最高工作溫度為  $1350^{\circ}\text{C}$ ，最高工作壓力為 118MPa。

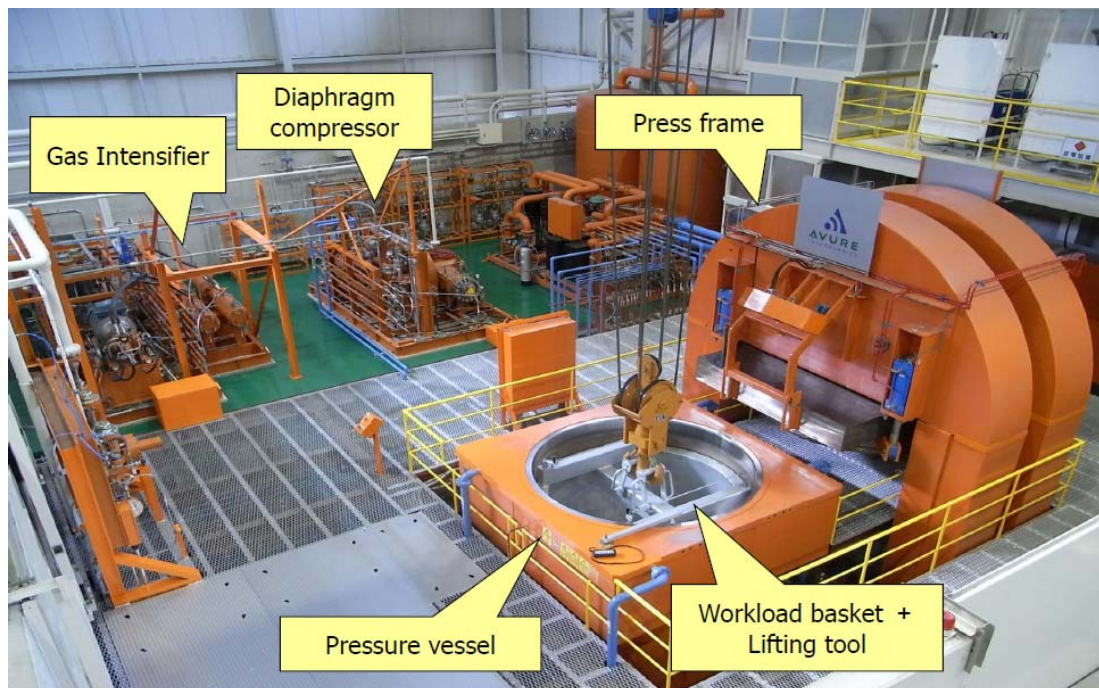


圖 19 目前全世界最大的 HIP 設備實景

## (二) 本次實習內容

### 1. HIP 系統佈置

HIP 系統除了高壓容器主體外，尚有其他重要的周邊設施。本公司若欲設置 HIP 系統，未必須如圖 20 所示建置二層樓，但至少須預留放置高壓容器主體的地坑，如此人員於地面操作時，才可離 Vessel 的上開口較近，以利天車吊掛作業安全，如圖 21、22 所示。

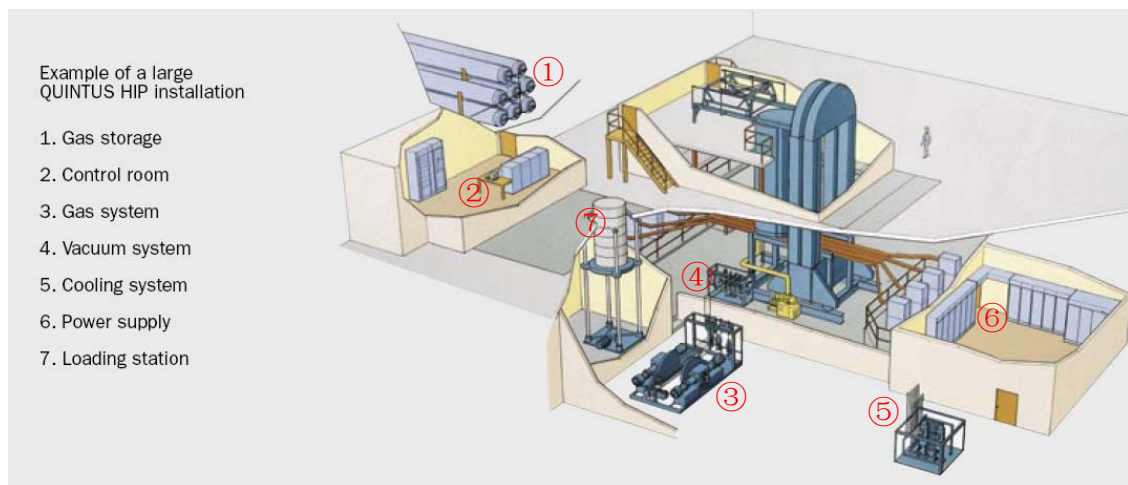


圖 20 AVURE 的 HIP 佈置範例



圖 21 以天車吊掛隔熱罩進出 Vessel



圖 22 人員於地面操作時與 HIP 主體的相對高度



## 2. HIP 設備高壓容器主體之設計

與 EPSI 公司一樣，AVURE 公司在設計各種尺寸之 HIP 設備高壓容器主體時，是依據 ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Section VIII, Division 3) 的規範內容為設計準則，且設計數據須經 ASME 審核認證後，始得進行後續之實體製造工作。AVURE 亦表示，若要設計使用空間  $\Phi 600\text{mm} \times L1500\text{mm}$ ，且使用壓力達 200MPa 的高壓容器時，一般會選用 SA-723 材料，此材料與 EPSI 公司相同。

針對高壓容器主體，一般 HIP 廠商是以增加 Vessel 與 Frame 的鍛件厚度來抵抗高壓。而 AVURE 公司擁有一項專利技術，是利用鋼絲片預應力纏繞的方式(Wire-winding)，以提升 Vessel 與 Frame 的支撐壓力強度(如圖 22 紅圈處)。好處除了可將高壓容器主體及 Frame 輕量化外，另外可達到”leak before break”的目的，意即萬一高壓容器主體或 Frame 發生微裂之情形，因有好幾層之鋼片強力固定住，使設備頂多發生洩漏壓力但不至於立即發生爆裂之情形。

此外，鋼絲片預應力纏繞式的 Frame 在承受 Top & Bottom End Closure 的擠壓力量時，亦不像傳統鑄件型 Frame 會在門柱(Column)與 Yoke 的轉角處(圖 23 箭頭)產生應力集中之問題，大幅提高設備使用之安全性。

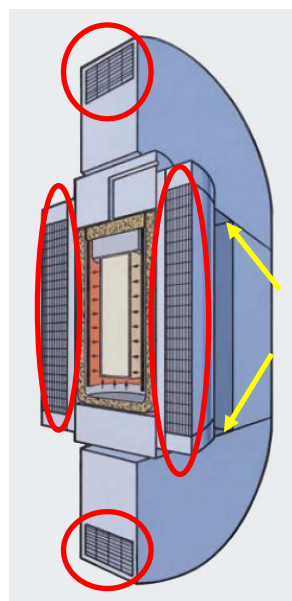


圖 23 AVURE 的鋼絲片預應力纏繞剖面示意

敝人實際參觀 AVURE 於瑞典 Vasteras 的工廠時，剛好親眼看到一套大型迴轉設備正在為一組 Frame 進行鋼絲片預應力纏繞的工作。

如圖 24 的示意圖，整組 Frame 固定於迴轉平台上，旁邊有一被固定應力拉緊的鋼絲片順著 Frame 迴轉時依序地貼附於 Frame 外圍。每當繞完一層時，作業員即於該層塗上一層特殊的膠，該膠有防止生鏽及固定的功用。然後再繼續纏繞下一層，以重覆的工法一直進行到所需要的層數，最後於 Frame 外圍鎖上金屬外罩，即完成該組 Frame 的鋼絲片預應力纏繞工作。

此外，於 Frame 的兩個側柱(Column)上，各有 2 個記號點，當 HIP 設備長期使用時，須定期量測記號點的間距，如果還在規定值範圍內，表示該組 Frame 變形不嚴重，還可以繼續安心使用。

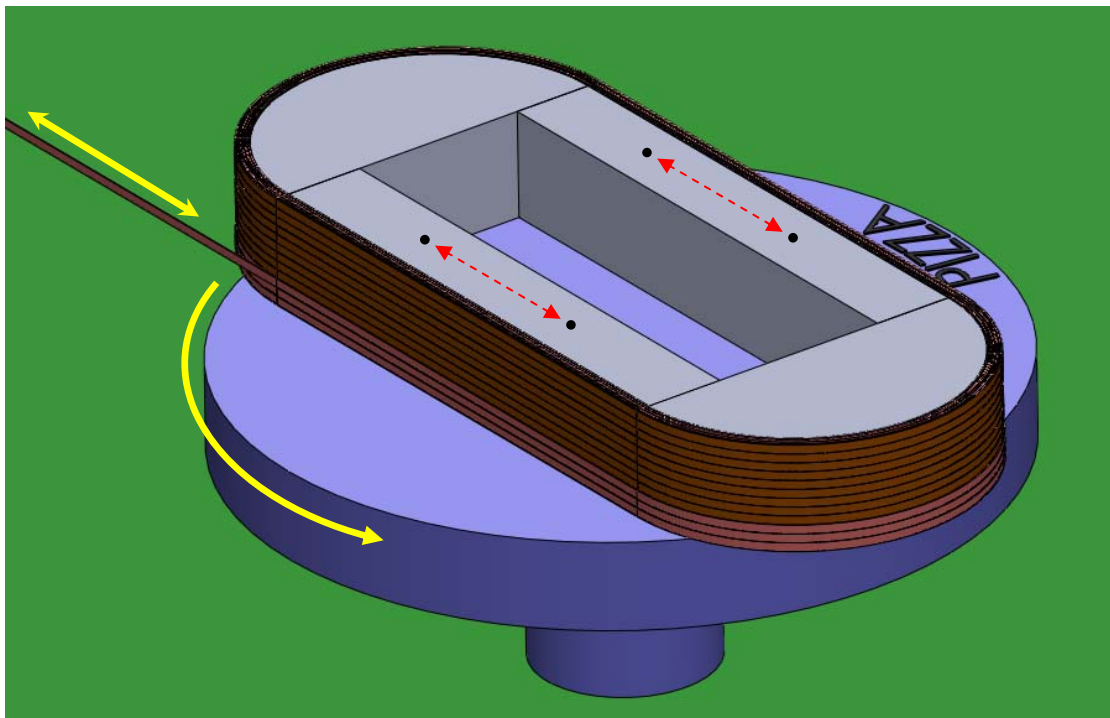


圖 24 Frame 進行鋼絲片預應力纏繞之示意圖

### 3. HIP 承受高壓時之支撐設計

圓柱型壓力容器承受高壓時，其 Vessel 部位所承受之應力可由以下公式描述：

$$\begin{aligned} \text{軸向應力 } \sigma_{\text{axis}} &= Pr/2t && (\text{其中 } P \text{ 為壓力，} r \text{ 為 Vessel 內徑，} t \text{ 為} \\ \text{環向應力 } \sigma_{\text{hoop}} &= Pr/t && \text{Vessel 壁厚}) \end{aligned}$$

藉由以上公式，將  $P \times$  安全係數視為材料發生降伏之臨界壓力， $\sigma$  視為材料之降伏強度，可算出符合使用安全之 Vessel 壁厚  $t$ 。

圓柱型壓力容器承受高壓時，其上下 End Closure 部位所承受之力可由以下公式描述：

$$F = P \times A \quad (\text{其中 } P \text{ 為壓力，} A \text{ 為 Vessel 之內圓截面積})$$

若有一熱均壓設備之 Vessel 內徑為 795mm，當操作壓力達 200MPa 時，其上下 End Closure 部位所承受之力量約為 10,130 Ton，再依此數據  $\times$  安全係數去設計支撐 End Closure 擠壓力量的 Frame 結構，如圖 25 所示。

$$F = P \times A = \frac{200 \times 10^6}{9.8} \times \pi \cdot \left( \frac{795}{2} \times 10^{-3} \right)^2 = 10,130,413(\text{kg}) \approx 10,130(\text{ton})$$

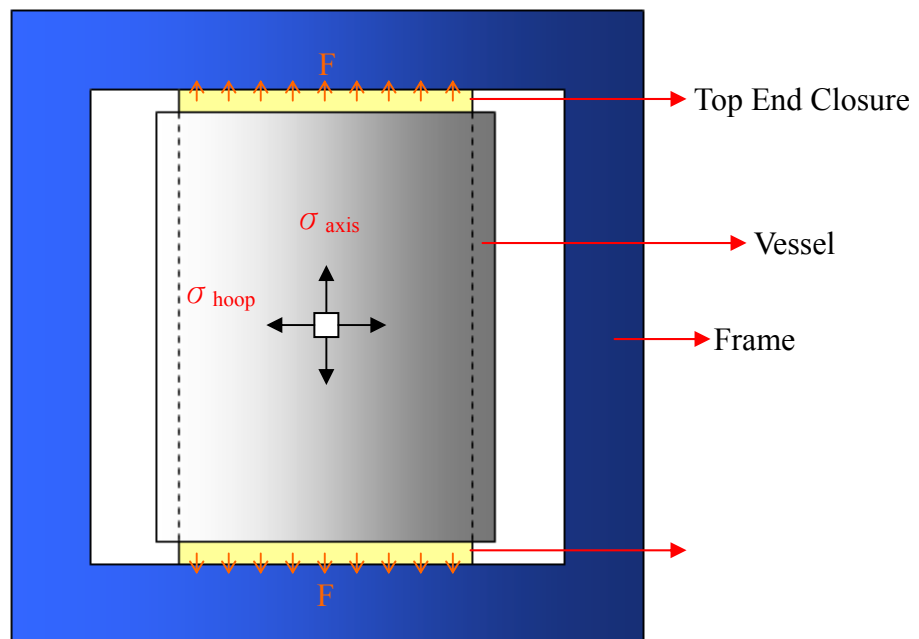


圖 25 Frame 受力示意圖

#### 4. HIP 設備之加熱模組

AVURE 公司的加熱模組類似於 EPSI 公司，包含有工件置放架、爐體、電熱元件、感溫熱電偶、隔熱罩等，亦在 Vessel 外組裝完成後才一併由天車吊入 Vessel 內。加熱模組之電熱元件與感溫熱電偶亦透過加熱爐底座(Furnace Base)上特殊的連結裝置與外界的電纜線組相連接，如圖 26 所示。

若最高使用溫度在 1260°C 左右，以成本考量廠商會建議爐體使用鉬 (Molybdenum) 材質。電熱元件的材質亦為鉬，通常會分為上中下 3 組。至於感溫熱電偶(TC)的設置，使用者可以將數個 TC 置於爐內工件附近，並將每個 TC 的位置輸入人機介面，如此電腦將可自動計算各區電熱元件需及時輸出多少功率，以達到爐內均溫之效果。

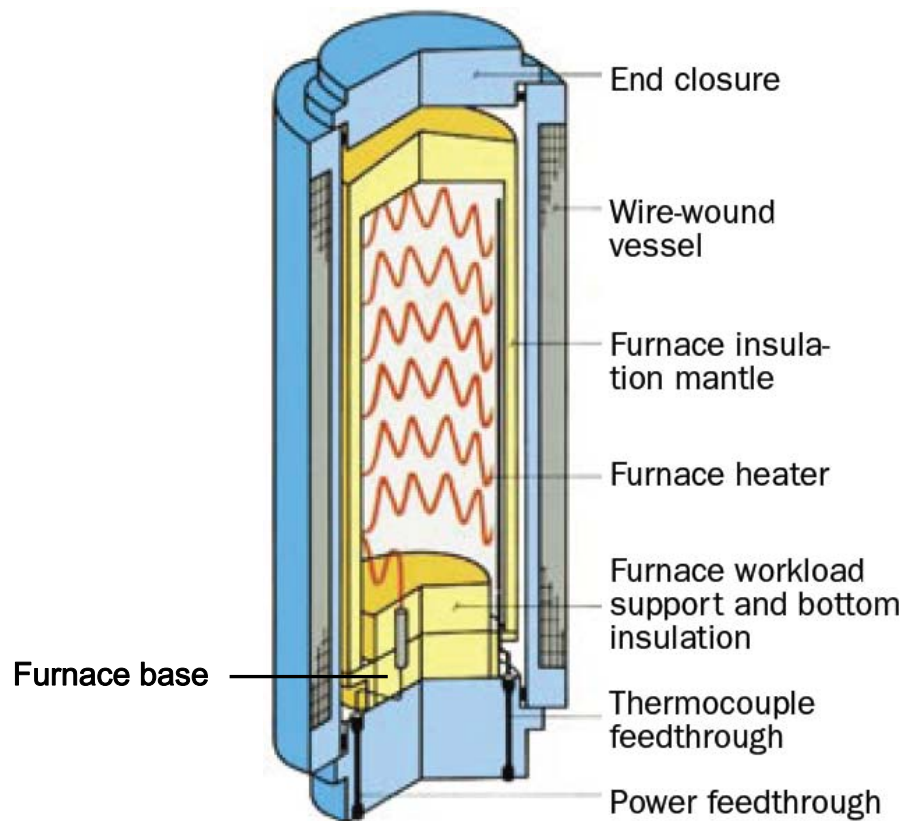


圖 26 HIP 之加熱模組及接線示意圖

## 5. Furnace Base 的材質選用

如果爐體及電熱元件之材質均為鉬，理論上操作溫度達 1400°C 是沒問題，但是如果考量 Furnace Base 的購置成本及材質特性，AVURE 提供了 3 種方案選擇，取決於最高使用溫度及是否須快速冷卻功能。

- (1) 使用溫度於 1260°C 以下時，Furnace Base 的材質可以選用不銹鋼，且可針對快速冷卻需求加裝對流風扇。此方案的優點是價格便宜，且不銹鋼材質不容易因稍微操作不慎而導致破碎。
- (2) 使用溫度於 1400°C 以下時，如果不須快速冷卻裝置，則 Furnace Base 的材質可以選用陶瓷(Ceramic)。此方案的缺點是陶瓷的價格高，且容易因稍微操作不慎而導致破碎。
- (3) 使用溫度於 1400°C 以下時，如果須快速冷卻裝置，則 Furnace Base 的材質可以選用鉬(Molybdenum)。此方案的缺點是鉬的價格亦高，且更容易因稍微操作不慎而導致破碎。

一般而言，如果有連續生產的需求，AVURE 建議可購置 2 組 Furnace Base。如此當其中一組於 HIP 爐內加熱使用時，另一組可於爐外先組裝好工件置放架，並擺好工件，以縮短每批次的 off-line 時間。

## 6. HIP 設備之快速冷卻裝置

針對 HIP 連續生產時縮短 cycle time 的需求，AVURE 亦提供快速冷卻的配備選擇，如同前一頁所提到，此快速冷卻裝置是在 Furnace Base 上加裝對流風扇(如圖 27)。

當程式進行到如圖 28 的第 6 步驟時，對流風扇與冷卻循環水開始啟動，藉著 Vessel 內部的氣流流動，迅速將工件熱能經熱交換器轉移至爐

外冷卻水塔，以達到快速降溫的目的。且只要降溫速度( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )是在規格範圍內，其快速降溫的速度是可以被程式控制的！

AVURE 公司表示，若要設計一快速冷卻裝置，使 500 kg 的鋼鐵在 HIP 爐內由  $1260^{\circ}\text{C}$  以  $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度降溫是可以輕易做到的。

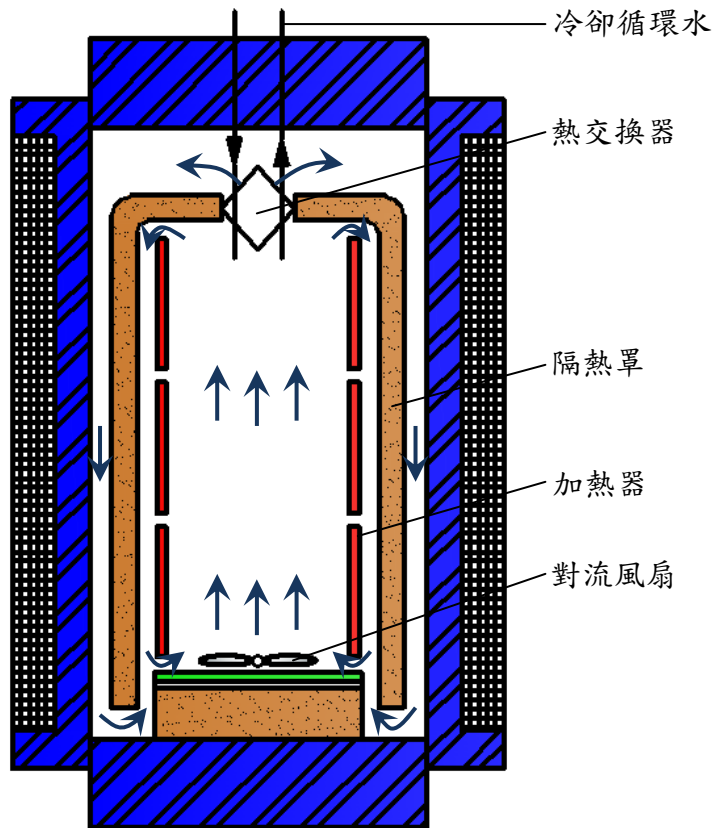


圖 27 HIP 設備之快速冷卻示意圖

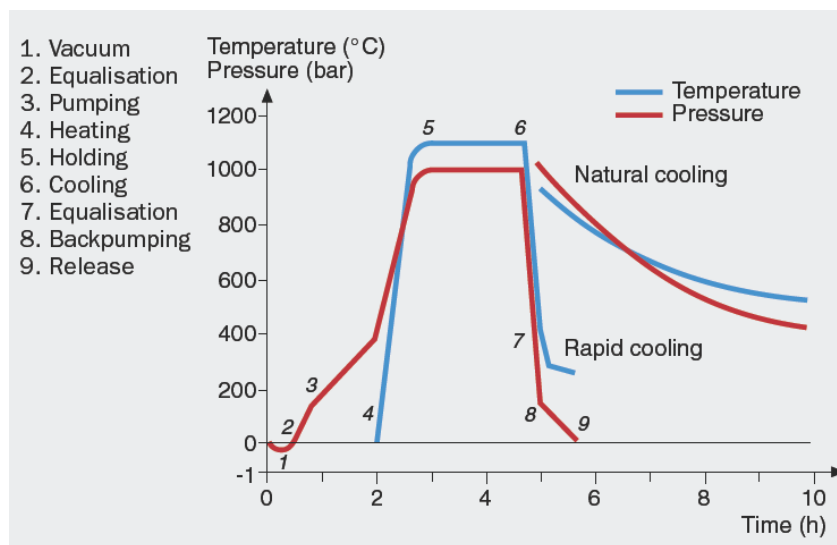


圖 28 快速冷卻與自然冷卻的曲線比較

## 7. 以 HIP 設備熱處理的可行性

AVURE 公司目前正在發展一項技術，或許未來不久快速冷卻的降溫速度可以達到  $1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ！此次拜訪 AVURE 公司時有幸能討論到 HIP 設備熱處理的可行性，以下是 AVURE 工程師給的一些啟發。

- (1) 一般金屬熱處理是可以藉由水淬、油淬、風冷或爐冷來得到不同的組織及硬度，既然 HIP 設備的降溫速度可以達到  $1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，是否可以將熱處理製程納入 HIP 製程呢？
- (2) 厚薄不一的金屬熱處理完後，最怕遇到應力集中的問題，此應力若沒有消除而去做機械加工的話，可能會遇到工件因應力釋放而產生變形甚至斷裂。
- (3) 今天若有 2 件如圖 29 的工件，於  $1100^{\circ}\text{C}$  時分別在爐外風冷( $100\text{km}/\text{hr}$ )及在 HIP 爐高壓狀態( $150\text{MP}$ )急速冷卻。由於在 HIP 爐內均溫性較好且高壓狀態時的 Young's module 較低，經 AVURE 評估計算，前者(爐外風冷)在薄區的應力可能是後者(HIP 爐急冷)的 40 倍之多，變形的情況會很嚴重。
- (4) 所以未來只要 HIP 設備的降溫速度夠快，或許在 HIP 設備做熱處理製程是一個不錯的選擇。

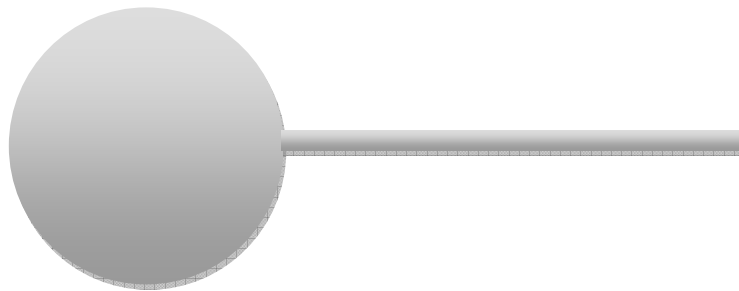


圖 29 厚薄不一的工件

## 8. HIP 設備停電時之緊急處理程序

HIP 設備若剛好在高溫運轉時遇到停電狀況，因為循環水泵無法運轉，爐體(Vessel)與封閉蓋(End Closure)的溫度會漸漸升高，為避免高溫造成設備損壞，AVURE 提出以下之處理程序。

- (1) 停電時，操作員應立即與電力負責單位連繫，如果確定 10 分鐘內可以恢復電力，則設備可以在 10 分鐘內不做處置，待電力恢復後可以繼續執行剛才中斷之程式。
- (2) 如果 10 分鐘內無法恢復電力，則須以廠內的壓縮空氣去驅動備用氣動泵，恢復冷卻循環水之流動，以降低爐體與封閉蓋的溫度。
- (3) 如果無足夠壓縮空氣或備用氣動泵失效，最後一道防線就是開啟連接水塔的管路手動閥，讓水塔內的水以重力自然流之方式冷卻爐體與封閉蓋。當然，水塔的尺寸大小於 HIP 建置時就必須依照設計書去設置，以保證緊急冷卻時有足夠的水用。



## 五、心得及建議

從前對於熱均壓的技術，只有從書本或論文裡大致了解其應用面，因為不了解該設備的設計概念，所以對其安全性會有所顧慮。很高興藉由這次難得的機會，可以同時參訪兩家世界級的熱均壓設備製造廠商，與設計工程師討論及實際參觀工廠後，初步了解熱均壓設備的內部構造，也從各廠家的設計概念裡，看見他們對產品安全的重視。

首先，這兩家廠商都是根據 ASME 的規章去設計高壓爐體及 Frame 結構。每一套新製造的熱均壓設備，從其設計階段開始到製造完成，每個重要步驟都須經客戶及 ASME 人員確認，最後經實際水壓測試、NDT 檢測完成後，才能獲得 ASME 的認證。

此外，由於氫氣的比重較空氣大，所以在設計 HIP 的專屬地坑(Pit)時，須特別留意通風性。最好是設計一強制送風管路，將室外新鮮空氣送入地坑，且地坑內也應設置相關的氣體濃度偵測器，以避免人員進入後因氧氣濃度過低而發生窒息事故。

未來本公司如果要發展超合金葉片之先進維修再生及新葉片鑄造後之縮孔封孔技術，勢必須針對熱均壓處理技術去做深入之研究。然而，在此之前，許多工作亦須陸續展開，譬如建築物的設計與建造、熱均壓設備的規格擬訂與製作、設備安全性規劃及操作人員教育訓練等項目，唯有確實做好每一環節的工作，才能使設備順利安裝完成，並讓研究人員在安全無虞的情況下去進行先進技術之研究。

## 六、 參考文獻

1. 張世賢, "Inconel 718 與 713L 超合金熱均壓製程參數及特性研究", 國立成功大學材料科學及工程研究所博士論文, 2006 年 6 月
2. M.T. Kim, D.S. Kim, O.Y. Oh, "Effect of  $\gamma'$  precipitation during hot isostatic pressing on the mechanical property of a nickel-based superalloy", Material Science and Engineering A 480 (2008) 218-225
3. G.Appa Rao, Mahendra Kumar, M.Srinivas, D.D. Sarma, "Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy inconel 718", Material Science and Engineering A 355 (2003) 114-125