

出國報告（出國類別：實習）

# 燃氣渦輪機破損分析及先進微型掃描 建模技術研究

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：新加坡、韓國

出國期間：102年4月14日至4月26日

報告日期：102年6月6日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：燃氣渦輪機破損分析及先進微型掃描建模技術研究

頁數 41 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：102 年 4 月 14 日至 4 月 26 日 出國地區：新加坡、韓國

報告日期：102 年 6 月 6 日

分類號/目

關鍵詞：燃氣渦輪機、破損分析、葉片設計、逆向掃描、參數設計

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國先至新加坡參加為期兩天的「燃氣渦輪機破損分析」課程，經驗豐富的講師 Dr. Mike Wood 從設計端與使用端的觀點來解釋為何破損分析是如此重要，並逐漸將課程導引至破損分析的方法及精彩的案例分享。

之後再繼續於新加坡 St. Hua 訓練機構學習 AxSTREAM 軟體的進階應用，學習如何利用 AxSlice 模組將既有的葉片進行效率分析前的葉形剖析，也從此次學習獲得寶貴的葉形設計概念。

最後前往南韓首爾的 SOLUTIONIX 公司，了解各式逆向設備的原理及應用層面，並針對未來微型掃描的可能性進行討論，其間亦與 Rapidform 軟體的工程師切磋渦輪機葉片逆向鋪面與正向參數設計各種可能方法。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

# 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、 燃氣渦輪機破損分析.....	3
三、 AxSTREAM 軟體實習.....	17
四、 微型掃描建模技術實習.....	25
五、 參考文獻.....	40

## 一、出國緣由、行程及主要任務

### 出國緣由：

近年來國內外迅速發展高效率之複循環燃氣渦輪機組，也因高溫高壓的運轉環境使渦輪機組件偶發生破損而導致停機事故發生。在面對破損分析時，本所須進行嚴謹且專業之調查及金相觀察，以正確提出破損肇因及改善對策。因此，希望經由此次出國學習國外專家對於燃氣渦輪機之各種破損原因分析，藉以提升本所對於燃氣渦輪機之破損分析能力。此外，鑒於本所熱段元件或葉片於再生或新製前有完整 CAD 圖檔需求，希望經由此次出國學習國外先進微型掃描建模技術之發展，以提升本所葉片或燃燒桶內部建模之技術能力。此次出國研習之重點如下：

- (一) 至新加坡 IBC Energy Training Academy 及 St.Hua 機構學習燃氣渦輪機之各種破損分析及葉片效率計算，收集並吸取國外專家之相關經驗技術，以提升本所之技術能力。
- (二) 至韓國首爾 SOLUTIONIX 公司學習先進之微型掃描建模技術，藉由國外之技術與經驗交流，提升本所應用各式掃描設備建立複雜模型之研發水準。

本次出國案件係應用 102 年度出國計畫第 12 號，出國核定書為 EE102023 號，電人字第 1028029482 號函。

### 出國行程及主要任務：

本次出國期間自 102 年 4 月 14 日至 4 月 26 日，主要的任務為了解國外先進燃氣渦輪機破損分析手法及微型掃描建模技術之發展，以應用於日後本公司發展燃氣渦輪機組件之破損分析技術及自製再生標準模型需求。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	1020414	1020416	新加坡	IBC Energy Training Academy	1. 往程(桃園－新加坡) 2. IBC Energy Training Academy 舉辦 2 天的專業課程，學習國外專家對於燃氣渦輪機各種破損情況之分析手法。
2	1020417	1020419	新加坡	St. Hua Pte Ltd	至 Axstream 軟體之訓練機構討論本所目前軟體應用之情形，並瞭解及學習 Axstream 軟體之進階應用。
3	1020420	1020426	韓國 首爾	Solutionix Korea, Inc.	1. 往程(新加坡－首爾) 2. 學習微型掃描建模技術，並與國外專家討論相關技術應用於本所深凹或深孔形狀工件之可行性。 3. 返程

## 二、燃氣渦輪機破損分析

### (一) IBC Asia 與課程主講人簡介

IBC Asia 是 Informa 於新加坡的分支機構，Informa 每年約舉辦超過 8,000 場的專業論壇或課程，亦出版過 2,100 種以上的訂閱型資訊服務，包含學術型期刊、即時新聞以及以結構化數據庫為主的商業情報。

Informa 在全球 40 個國家擁有 150 個以上的辦公室以及超過 8,000 名以上的員工，所提供的服務範圍包含藝術與人文社會科學、物理科學與技術、各種商業領域(譬如電信、海上貿易、能源)的金融和法律專業。

本次的課程題目為「Gas Turbine Failures Analysis」，由新加坡的 IBC Asia 主辦，歸類為能源類的訓練課程。本次課程邀請到在業界擁有超過 30 年實務經驗的 Dr. Mike Wood 擔任課程主講人，Dr. Mike Wood 為英國牛津大學冶金學博士畢業，目前在 ERA technology Ltd. 服務，曾經參與無數次運轉事故或虛驚事故調查，並分析事故原因及提出改善對策，其針對燃氣渦輪機破損分析的研究領域包含：

1. 空壓機葉片因設計或材料方面的問題所導致之損傷。
2. 葉片碟盤(Disc)因檢驗不完全所導致之損傷。
3. 渦輪機葉片因設計或材料方面的問題所導致之損傷。
4. 燃燒室(Combustor) 因設計或材料方面的問題所導致之損傷。

此外，Dr. Mike Wood 亦針對燃氣渦輪機組件擁有壽命評估之經驗，包含渦輪機葉片、葉片碟盤或轉子等關鍵組件，此種技術已被國際上很多電廠或設備 OEM 廠商認可。近 10 年來，Dr. Mike Wood 亦致力於氣渦輪機之壽命評估及破損分析之經驗傳承，於全世界各電廠或 OEM 廠商進行輔導與交流。

## (二) 課程規劃

### Day 1

1. Introduction to Gas Turbine Failures
2. Design and Degradation
  - (1) Why components degrade in service?
  - (2) How the designer deal with degradation?
  - (3) Examples of normal degradation
3. Failure analysis process
  - (1) What is a root cause analysis?
  - (2) Who is carry out the investigation?
  - (3) Investigation process and framework (Fishbone, Apollo, etc.)
  - (4) Tools of the investigation (mechanical, metallurgical, aerothermal)
4. Case Study: Design-related failures
  - (1) Coatings life shortfall
  - (2) Blade creep
  - (3) Disc rim cracking
  - (4) Combustion can cracking
  - (5) Compressor blades

### Day 2

1. Case Study: Operations-related failures
  - (1) Thermal fatigue of blades
  - (2) Blading corrosion
  - (3) Fouling from poor filtration
2. Case Study: Manufacturing and repair related failures
  - (1) Poor coatings
  - (2) Inappropriate heat treatments
  - (3) Inadequate repair workscope



- (4) Limitations from properties of repairs
- 3. Case Study: Maintenance and inspection-related failures
  - (1) Component overheating
  - (2) Compressor corrosion and inspection
  - (3) Compressor blade failures
- 4. Wrap up session: Applications and implications for the operator
  - (1) Modifying your inspection and maintenance approach
  - (2) Improving your asset management approach
  - (3) Identifying the implications for monitoring requirements

### (三) 課程重點節錄

#### 1. Introduction to Gas Turbine Failures

講師在這裡提供了兩個不同角色的觀點來看待燃氣渦輪機破損分析的重要性。

以電廠經營者的觀點，當事故發生時，會聯想到：

- (1) 是否須多花維護成本或是否因停機導致發電收入短收。
- (2) 所損失的金錢是否可以從保險公司或原廠收回？
- (3) 其他類似的機組是否易容易發生相同的破損問題？
- (4) 也許會引發政治或社會問題，譬如該發電系統是用於區域型熱儲系統(District heating schemes)或位於缺乏備載容量的地區。

以原廠製造端的觀點，當事故發生時，會聯想到：

- (1) 這是該機型設計或製造的問題嗎？如果是，這是大問題還是小問題？其他相同的機組也會發生嗎？
- (2) 有需要針對破損的問題重新變更機組設計？或僅只是發出輕微警訊通知給電廠使用者。
- (3) 這破損是否會導致立即的財務關聯？(譬如保固問題)
- (4) 是否會影響公司名譽及新機組的銷售結果？

除此外，根據荷蘭電力公司的經驗，燃氣渦輪機破損的肇因歸咎有 73%是屬於原廠設計錯誤、製造錯誤、維修設計錯誤或維修過程錯誤，僅有 2%是屬於電廠使用者的操作錯誤有關，因此面對破損問題發生時，事故鑑定工作是極重要的，攸關電廠與原廠的權益、名譽及金錢損失。

## 2. Design and Degration

一般而言，燃氣渦輪機組件在正常的運轉情況下，會隨著起停次數增加、運轉溫度變化、運轉時間增加而無可避免地逐漸發生損傷，譬如引起熱疲勞、低週疲勞、潛變、絕熱塗層等損傷。

然而，有些損傷的嚴重化情況並不是預期的，追究其原因有可能是當的操作或保養方式，甚至在機組的設計階段就未考慮周詳，選用不當材料或沒有保留較大的設計裕量，導致機組在未達到再生檢修期限前即發生嚴重事故。如圖 2-1 所示，優良的機組設計應該在再生檢修期限(運轉時數或起停次數)前，其機組損傷情況仍未達到維修底線(Repair limit) [1]。

在設計的階段，有時需要一個"折衷的設計"。以燃氣渦輪機葉片設計為例，若機組要有高效率表現，則葉片須運轉於高應力及高溫環境；若機組須要有高耐用性，則葉片須運轉於低應力及低溫環境。此外，不同的需求(Requirements)亦會影響不同的設計，如性能、起停次數、操作彈性、耐用性、可靠度、腐蝕環境、環保規定、設備成本等，設計團隊於一開始須於其中取得平衡點，以繼續進行後續的設計工作。圖 2-2 為 Alstom 的葉片設計方法[2]，(1)研究或蒐集各式葉形、表面塗層、母材材料等特性；(2)研究或蒐集各種負載下之機械性質、熱力性質、環境參數等特性；(3)衍生出材料變化規則或方程式；(4)計算材料於周期負載條件下累積的損傷程度；(5)衡量葉片損傷的尺度；(6)加入安全係數；(7)定義葉片檢查週期或建議的使用壽命。

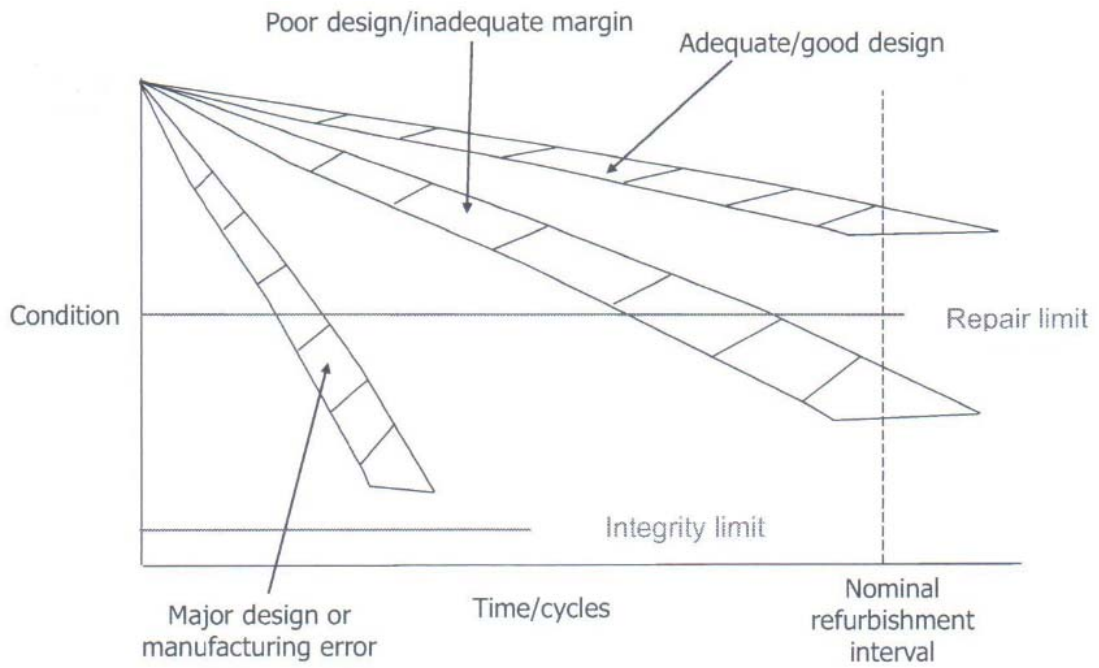


圖 2-1 燃氣渦輪機組件設計優劣對於機組損傷之影響程度[1]。

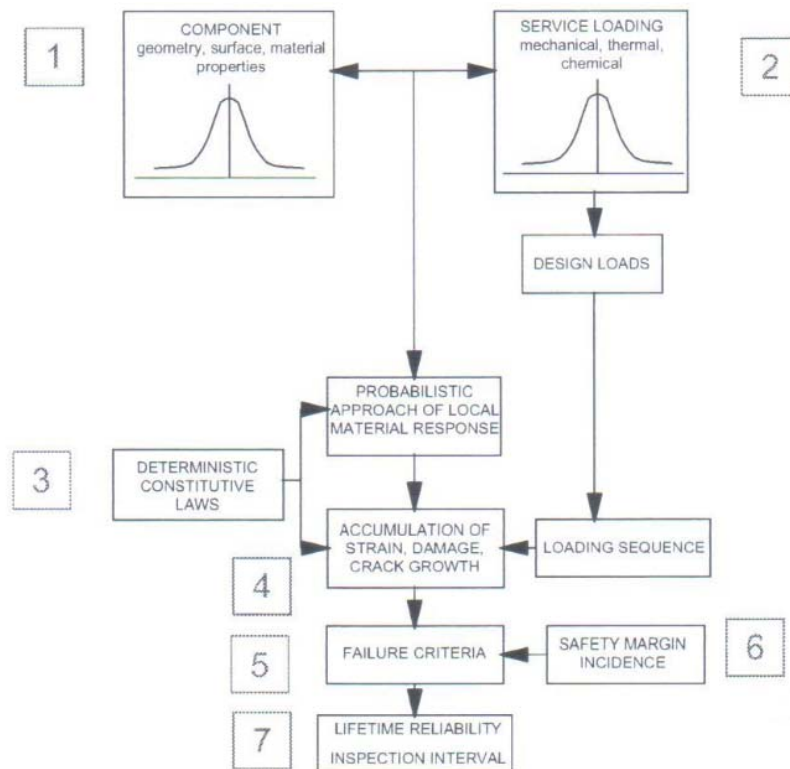


圖 2-2 Alstom 葉片設計方法[2]。

在燃氣渦輪機葉片設計過程中，亦須考慮高溫對於葉片材料的影響與因應對策。在設定葉片外部熱場的溫度時，通常是由平均燃氣溫度計算而來，亦可從 CFD 模擬得到。此外，考量 can-annular system 單一魚尾管的剖面溫度場非均勻分佈特性(圖 2-3)，第一級渦輪機葉片的葉面中段部位承受較高溫度，因此在設計冷卻通道(Cooling channel)或冷卻孔洞(Cooling hole)時，須加強葉面中段部位之冷卻效果[1]。在課程中亦提到一些參考的溫度數據，譬如工業用(發電用)第一級渦輪機動葉片的葉片母材可承受溫度約 750~950°C；航太用第一級渦輪機動葉片的葉片母材，於穩態飛行時之葉片母材溫度約 800~900°C，於起飛時之葉片母材溫度約 1000~1050°C；葉根溫度約 350~500°C；空心葉片之壁厚溫差約 50~100°C；末級渦輪機動葉片之運轉溫度約降至 500~700°C。為了使渦輪機葉片的母材溫度維持在上述的溫度區間，通常會從空壓段抽出相對低溫(300~600°C)之壓縮空氣，經由冷卻通道進入前幾級之動/靜葉內部，並由葉片表面之冷卻孔洞流出。早期冷卻孔洞的設計受限於鑄造技術，僅能以深孔放電技術從葉根通至葉片頂部；後來因空心葉片鑄造技術成熟，可在葉片內部設計複雜的冷卻流道，並於葉面部位使用雷射鑽孔技術產生各式形狀與不同流出角度之冷卻孔洞，如圖 2-4 所示[3]，使葉片表面生成薄膜冷卻(Film cooling)之效果。

燃氣渦輪機於運轉過程中，葉片將會承受不同種類之機械受力作用，譬如離心力與高溫所造成之潛變(Creep)、高速燃氣氣流造成葉片的 bending 與 twist 型式的變形、頻繁起停機所造成之熱應力(Thermal stress)與暫態應力(Transient stress)衝擊、迴轉頻率經過共振(Resonance)頻率的振動衝擊等。一般而言，在設計階段須評估上述機械受力作用與材料壽命關係，適時修改葉片幾何形狀、冷卻設計，甚至考慮變更母材或絕熱塗層材料。最後再考量安全係數，提出該葉片之運轉維修或汰換期限，以確保用戶端使用安全。

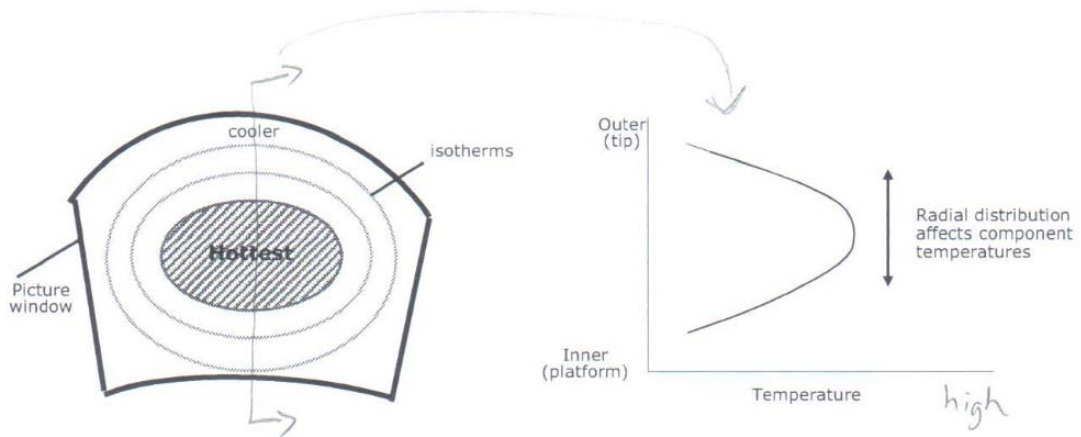


圖 2-3 魚尾管的燃氣溫度分佈與葉面溫度之關係[1]。

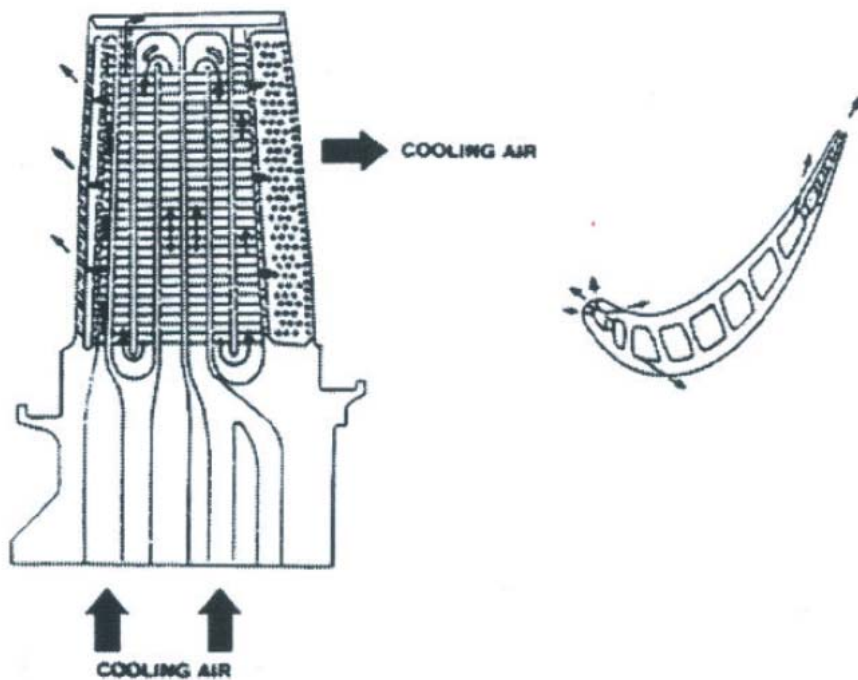


圖 2-4 Siemens-Westinghouse 501F 第 1 級動葉內部之冷卻流道 [3]。

舉例來說，葉片在未冷卻的情況下，在高溫環境及高速離心旋轉下，葉面的根部到頂部之受拉應力大小關係如圖 2-5(a) 所示，其高應力的位置靠近根部，如圖 2-6(b)所示是最易發生疲勞的地方。葉面的根部到頂部之溫度分佈如圖 2-5(b)所示，其最高溫的位置在中間部位，如圖 2-6(c)所示是絕熱塗層最易發生高溫氧化的地方。若將上述應力  $\sigma$  與溫度  $T$  之關係相結合，則可獲得圖 2-5(c)之高溫潛變壽命與位置關係圖，其最弱的位置在中間部位，如圖 2-6(a)所示是最易發生高溫潛變的地方[1]。

不同損傷形式會影響葉片不同的使用限制，譬如絕熱塗層為消耗(犧牲)材料，所以當絕熱塗層發生嚴重高溫氧化(腐蝕)時，會縮短該葉片之維修期限；當發生高溫潛變時，對材料而言是難以回復的損傷，所以會影響葉片之最終使用壽命；當發生熱疲勞龜裂(Thermal Fatigue Crack)時，母材龜裂的嚴重程度會影響葉片之維修期限及最終使用壽命。

探討潛變對材料壽命的影響，通常會定義安全的伸長率為材料的使用壽命。如圖 2-7，為葉片某局部位置的負荷時間與伸長率關係圖，對於等軸晶材料，通常會定義 0.5%伸長率的對應時數為安全上限，對於方向性結晶或單晶而言，通常可提升至 1%為上限。如果手中只有平均破斷(Rupture)的時間數據，則通常將安全上限定義在破斷時間的 1/4。

對於燃氣渦輪機組的設計理念，Alstom 公司曾經提出以下的觀點[1]："Allowable number of starts and operating hours for the machines of the whole fleet. It is based on lower bound material data, typical loading conditions and standardized operating conditions." 然而這是正常運轉情況下的評估數據，實際運轉時尚須考慮各種特殊因素，譬如基載型或尖峰負載型運轉、空氣環境是否有過多鹽類或汙染物、燃料成份、NO<sub>x</sub> 控制技術等。

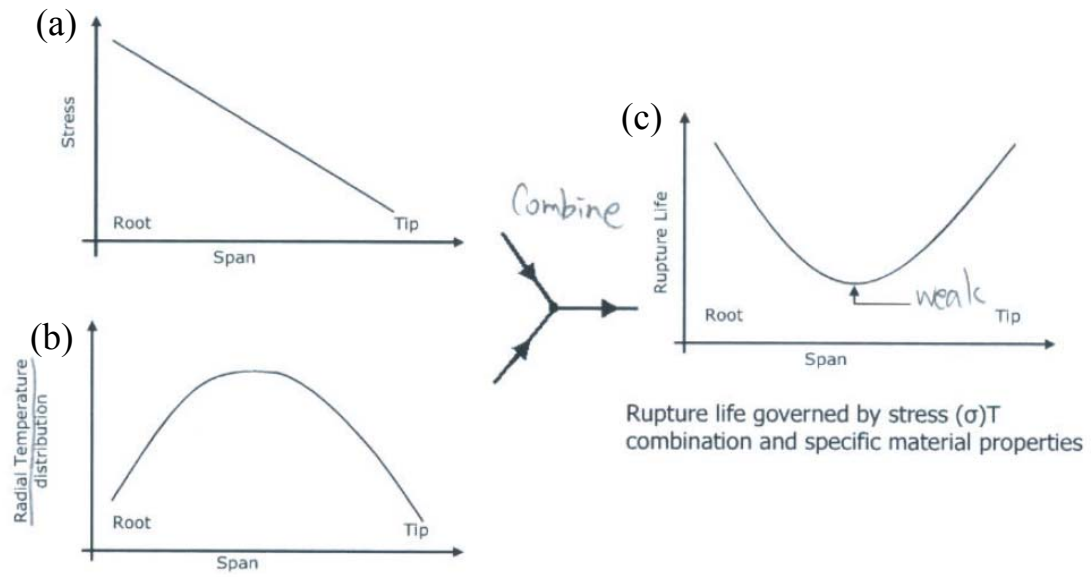
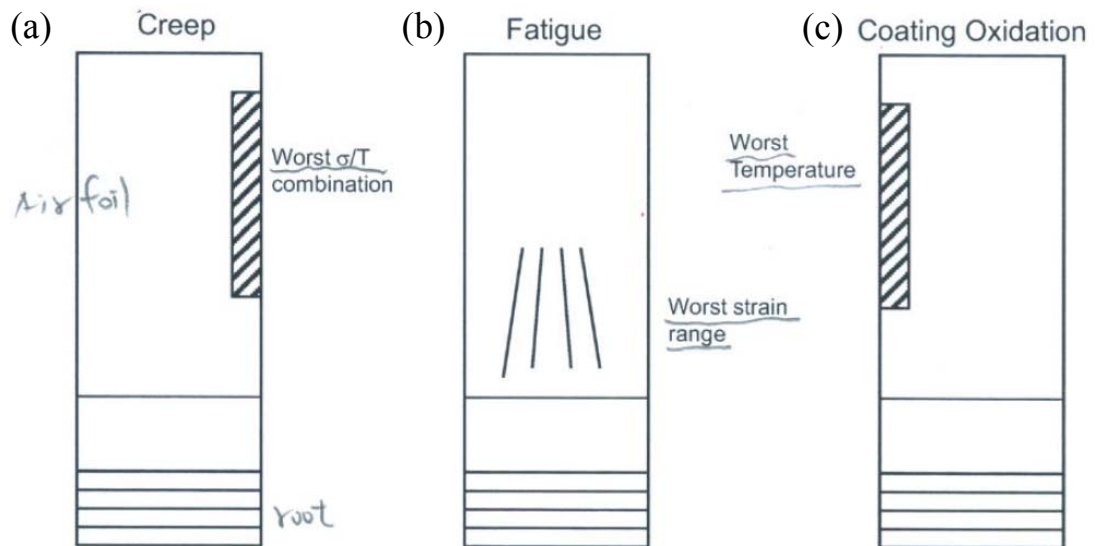


圖 2-5 葉片迴轉時，葉片根部到頂部所受離心力、溫度及潛變破斷壽命之關係圖[1]。



Critical locations differ in a specific blade for different damage processes  
This is purely illustrative: different blade designs will have different critical locations

圖 2-6 葉面上易發生高溫潛變、疲勞、絕熱塗層高溫氧化之位置示意圖[1]。

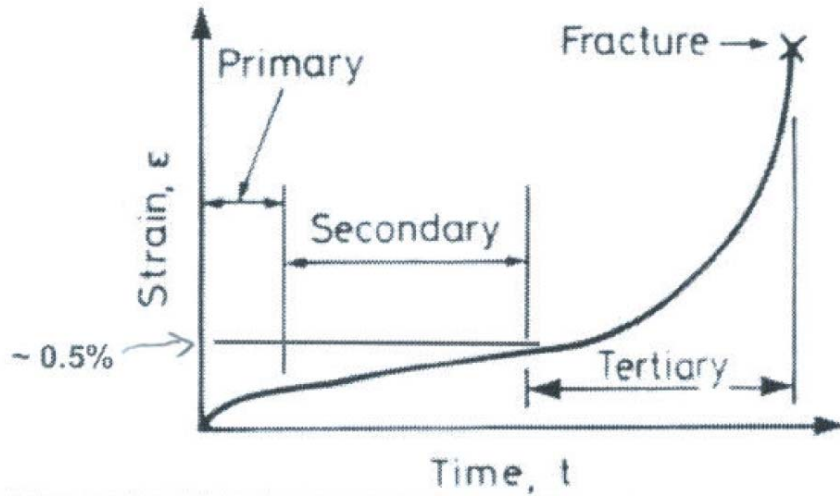


圖 2-7 葉片局部位置之固定負荷伸長率與時間之關係示意圖。



### 3. Failure analysis process

當燃氣渦輪機發生事故須進行事故調查時，調查員須保持開放的心態，以一個有系統的方法將所有可能的原因全部納進，並逐一地釐清與驗證，也必須要有一個很重要的觀念：破損分析須是獨立客觀的，不能淪為分攤責任的工具。

講師分享了一個面對事故以"RCA"的處理過程。R：Risk matrix，C：Collect data，A：Analysis to identify root cause(s)。

表 2-1 為風險矩陣的範例[1]，Likelihood 表示損傷發生的可能性，Consequence 表示損傷發生的後果(分為人員、資產、環境、信譽)，若初步評估結果落在靠右下顏色較深的格子，則表示此為高風險的損傷，須立即處理以防再次發生。

在收集資料階段，一開始先組成團隊，納入各種可用的分析技術與人力支援，並花一些時間去定義問題的所在，再開始收集資料。在事故發生後，在未抵達現場前一定要跟現場人員交代勿隨意清理現場，抵達現場後多使用相機去記錄所看到的情形，包含巨觀與微觀相片，亦可多比較破損件與非破損件的差異。此外，要收集各項機組監測數據的歷史資料，及機組維護的歷史報告。在過程中試著隨時整理筆記，紀錄何時做了甚麼事?何時發現了甚麼?以方便日後回想與思考。

課程中講師分享了 2 個常用思考與分析的方法：

#### (1) 5 個 Why：

面對眼前的問題，可以連續思考好幾個 Why 去找出最根本的問題在哪裡。譬如"我的渦輪機葉片壞了!" Why? "因為它腐蝕嚴重。" Why? "因為燃料很糟糕!" Why? "因為燃料沒有經過適當的檢驗。" Why? "因為要 cost down!" Why? "因為今年的預算被刪除了!"

#### (2) 魚骨圖

魚骨圖是由 Kawasaki shipyards 於 1960 年代發展出來的，針對工程上的問題，通常有 6 個 M 為主要問題的源頭，分別是

表 2-1 燃氣渦輪機破損分析前之風險矩陣範例[1]。

Consequence				Likelihood				
People	Assets	Environment	Reputation	Not Likely	Possible	Likely in 10 yrs	Likely in 1-2 yrs	Several times per yr
First Aid	Slight Damage	Slight Effect	Slight Impact					
LTI	Minor Damage	Minor Effect	Minor Impact					
Serious Injury	Local Damage	Local Effect	Local Impact					
Single Fatality	Major Damage	Major Effect	Major Impact					
Multiple Fatality	Massive Damage	Massive Effect	Massive Impact					

Machine、Method、Materials、Maintenance、Man (Operation)、Mother Nature (Environment)。圖 2-8 為典型空壓段葉片損傷的魚骨圖分析[1]。

#### (四) 課後心得及建議

本課程約 15 個學員，大部份來自東南亞地區(越南、泰國、印尼、新加坡)國家的電廠維護單位，有一個同學是來自新加坡當地的產物保險公司，問他為何來上這課程，他說他的業務是有關電廠機組運轉的保險，當發生事故時，電廠或設備原廠會提供事故報告給保險公司當作理賠的依據，所以老闆希望他能夠深入了解渦輪機破損分析這個領域，以後能針對事故報告內容提出保險公司的看法。

而對於我自己而言，很高興能有機會參加這難得可貴的課程，課程上講師與學員們一起使用一些渦輪機共通的專有名詞互相討論，講師也有介紹一些葉片噴銲相關的製程介紹，其中的設備與製程與我們單位目前正在使用的很相像，感覺非常棒也很感動。

協助電廠進行渦輪機破損分析是我們能源室的工作項目之一，目前敝人的經驗尚不足，很多東西都還要靠單位內的前輩指導與提醒，上了這課程後讓我重新體認到"處處是學問"這句話的含意，而且也發覺原來我們並不孤獨，全世界很多地方還是有我們這行共通的語言與志同道合的朋友。

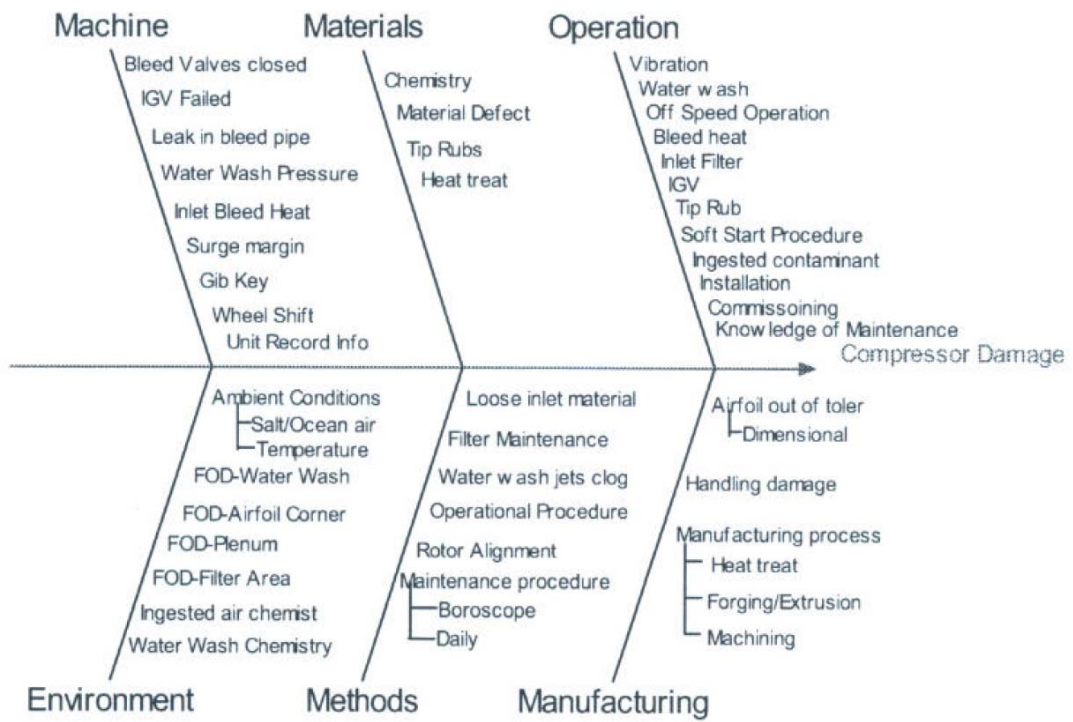


圖 2-8 典型空壓段葉片損傷的魚骨圖分析[1]。

### 三、 AxSTREAM 軟體實習

#### (一) ST. HUA PTE LTD 簡介

ST. HUA PTE LTD 為美國 SoftInWay 公司於新加坡地區之 AxSTREAM 軟體代理商，離地鐵裕廊東 EW24 車站約 3 分鐘路程(如圖 3-1)。該公司成立於 1997 年，主要業務為提供業界各式工程設計軟體(CAD/CAM/CAE)的實務應用及訓練服務。目前該公司有一位正在攻讀南洋理工學院博士班的員工，專責於 AxSTREAM 軟體的教學與業界應用諮詢服務。

#### (二) AxSTREAM 軟體簡介

AxSTREAM 是一個集合葉輪機設計、分析和最佳化的多功能專業軟體，其分析之對象包含軸流空壓機、離心空壓機、軸流渦輪機、徑流渦輪機、風機、風扇等多種葉輪迴轉機械。該軟體著眼於工程實際應用，並嵌入了豐富的經驗數據，運用 DOE 的最佳化方法提供葉片設計參數。

圖 3-2 為 AxSTREAM 軟體的系統功能示意圖，目前該軟體可提供葉輪迴轉機械的一維和二维初始設計、動力分析及最佳化，並可將最佳化的數據延伸至 3D 葉形設計及流體力學數值驗算，對於本所目前欲發展新製葉片之前段設計與軟體驗證有所助益。

#### (三) AxSTREAM 軟體實習

開啟軟體並開新檔案時，即會出現圖 3-3 的畫面，由此畫面可知該軟體的設計與分析對象如前述簡介，跟本公司有關的是

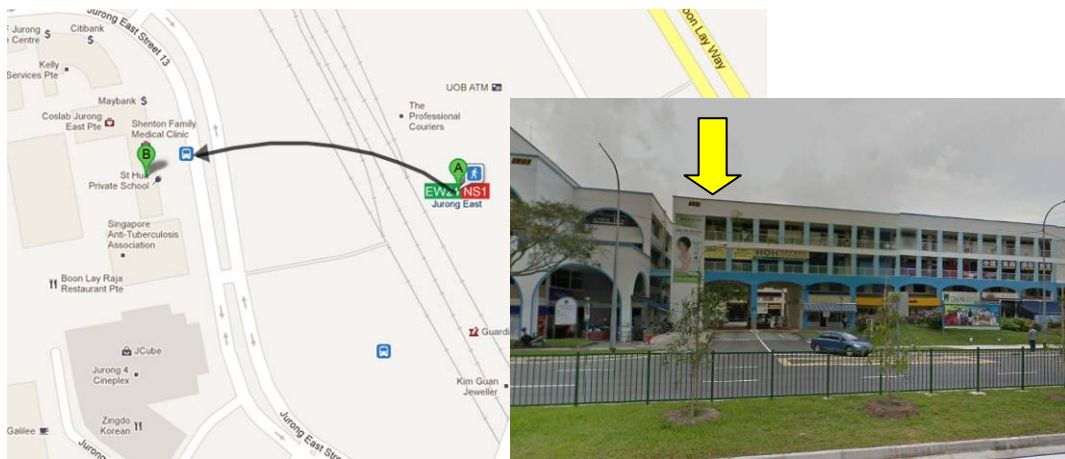


圖 3-1 新加坡 ST. HUA PTE LTD 公司的地理位置。(參考 google map)

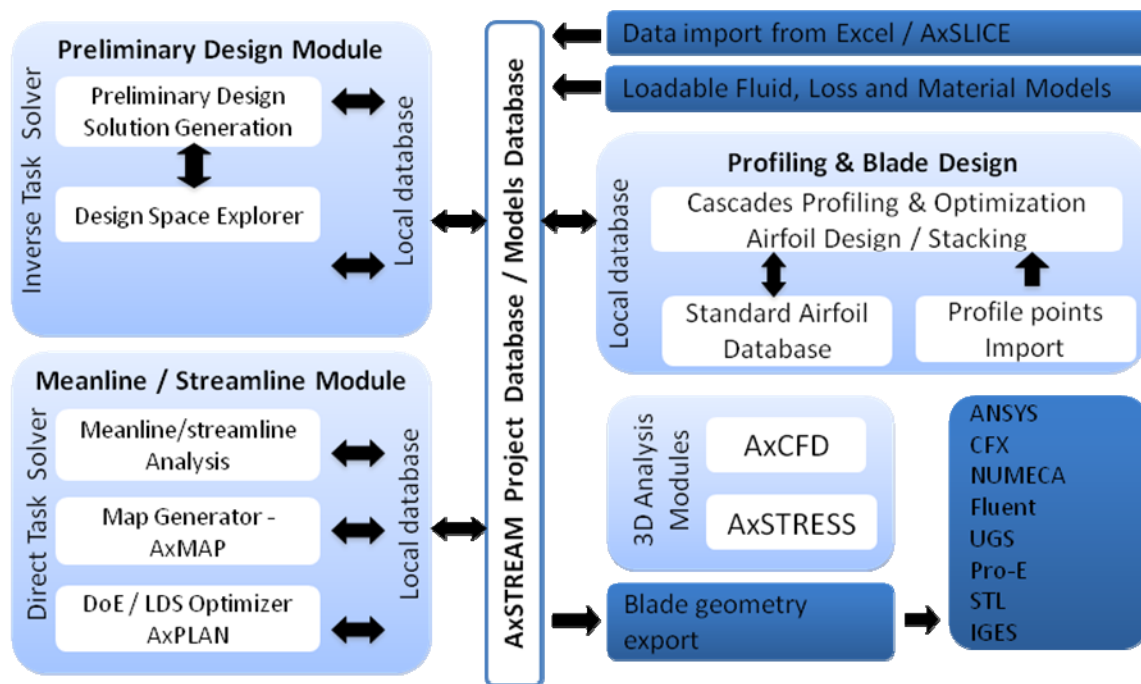


圖 3-2 AxSTREAM 軟體系統功能說明。

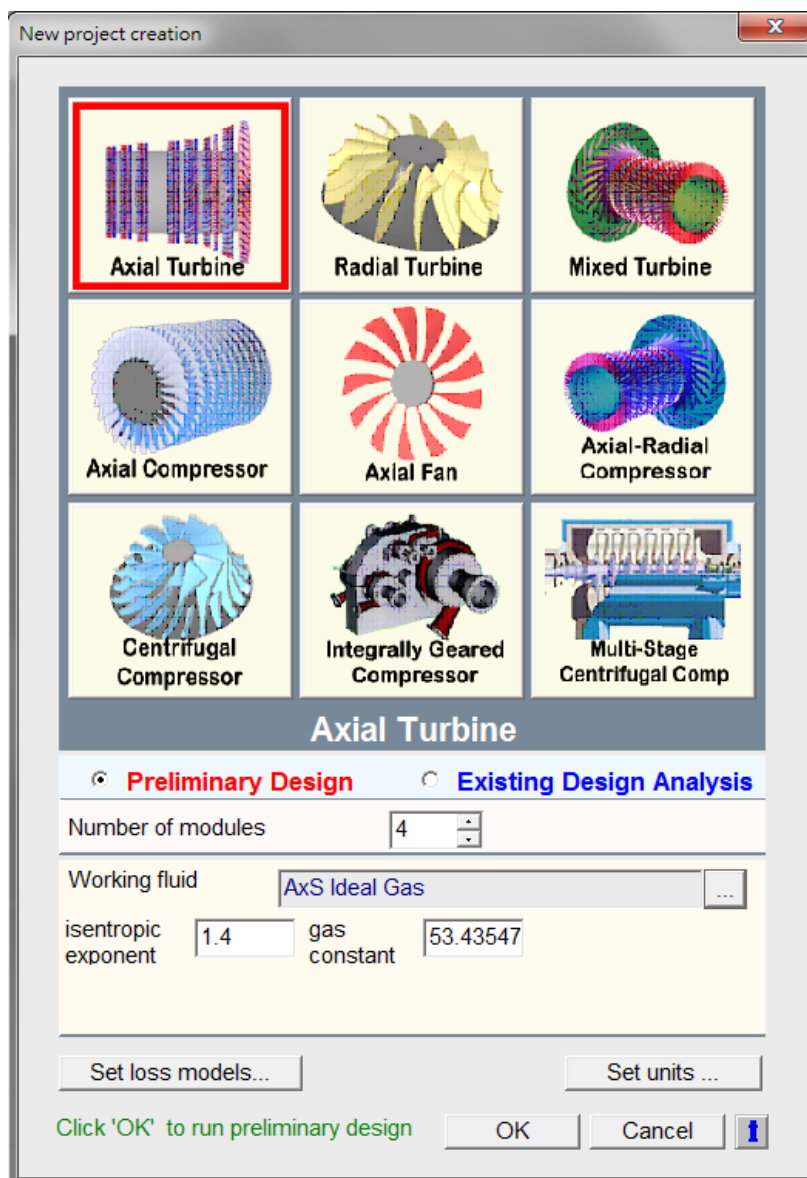


圖 3-3 AxSTREAM ver.3 的軟體啟動畫面。

分別點擊 "Select Shroud" 和 "Select Hub"，分別於右視窗定義設研究的對象共有四級葉片，則在 Number of modules 設為 4，選定工作流體後，按 "OK" 即可進入後續設計與分析頁面。

目前本單位希望從現行電廠運轉中的機組先行了解並以軟體模擬渦輪機的運轉效率，故在取得特定機組各級葉片的 3D 外形後，藉由本軟體的 AxSlice 模組進行葉面多層 Profile 的截取，最後再將 3D 葉形與 Profile 匯進 AxSTREAM 主程式中進行後續的流體路徑 (Flow Path) 及效率分析。

本次實習是先熟悉 AxSlice 模組，學習如何從既有的逆向掃描圖檔 (STL) 或曲面圖檔 (IGES) 進行 Profile 處理，以下進行大致的步驟介紹：

1. 點擊 AxSTREAM 主程式，出現如圖 3-3 之畫面，假設我們要分析的渦輪機共有 3 級動葉+靜葉，則在 Number of modules 的選項改 3，並點選 "Existing Design Analysis" 後按 "OK" 進入主程式畫面。
2. 於 "Tools" 下拉選單點選 "AxSlice" 模組，則進入如圖 3-4 之 AxSlice 主畫面。
3. 點選 "IGES" 的 ICON，將第 1 級靜葉的 3D 形狀匯入如圖 3-5，可利用滑鼠中鍵於左視窗進行模型縮放與旋轉之預覽，右視窗為 XZ 方向之葉形畫面。(如果圖檔為掃描檔，則點選 "STL" 的 ICON)
4. 須注意，所有要匯入的 3D 圖檔須事先將角度轉好，X 方向為 rotor 軸向，Z 方向為 rotor 徑向，且 Leading Edge (LE) 統一旋轉於左側。



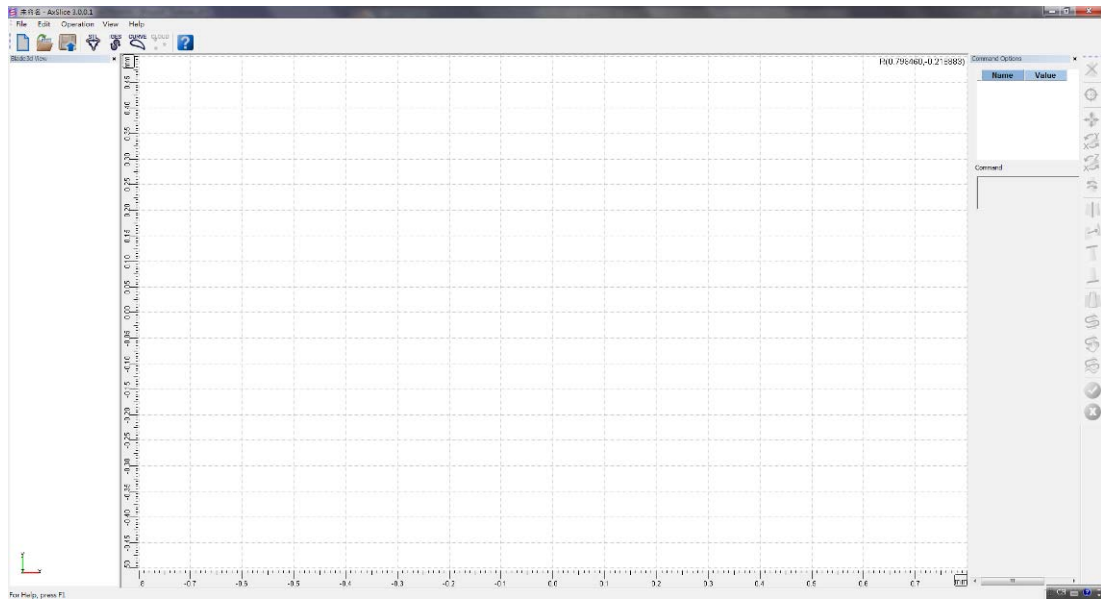


圖 3-4 AxSlice 模組之主畫面。

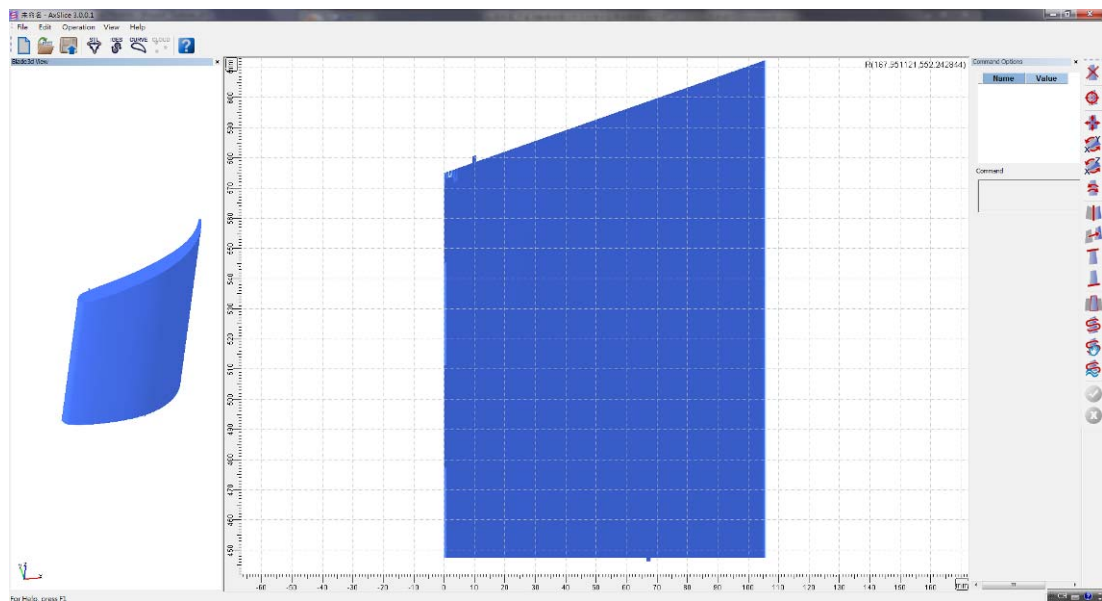


圖 3-5 第 1 級靜葉之葉形匯入 AxSlice 模組。

5. 分別點擊 "Select Shroud" 和 "Select Hub"，分別於右視窗定義 Shroud 和 Hub 的界線如圖 3-6。
6. 再分別重複 3~5 步驟，將其餘 1 動、2 靜、2 動、3 靜、3 動之葉片匯入，並分別定義 Shroud 和 Hub 的界線，完成後之畫面如圖 3-7。
7. 點選 "Autoslicing" 的 ICon，可進行自動切橫截面之程序，本次練習是預設切 5 層(包含 Shroud 和 Hub 層)，完成後之畫面如圖 3-8。
8. 每一個輪廓都可以用手動的方式進入編輯，編輯畫面如圖 3-9，左上角會同步顯示目前葉形輪廓的各種參數資訊。包含 Inlet metal angle、Outlet metal angle、Radius LE、Radius TE、Wedge angle LE、Wedge angle TE、Chord length 等。
9. 將此 AxSlice 模組存檔後，可於 AxSTREAM 專案中匯入上述檔案，一次將 6 個葉片的 3D 模型與截面圖形匯入，以利後續在 AxSTREAM 專案中進行流力數值驗算或最佳化處理，如圖 3-10。

#### (四) 課後心得及建議

目前本單位在建立葉片 3D 圖檔時，面對 2D 的 Profile，亟欲調整從以往的逆向方式改變為正向參數設計。而利用此 AxSlice 模組可以輕鬆獲得 2D 的 Profile 的各種參數資訊，對我們而言是一個實用的工具，之後亦可研究是否可在其他商用 CAD 軟體(譬如 Rapidform、Solidworks、Pro/E) 做到類似的功能。

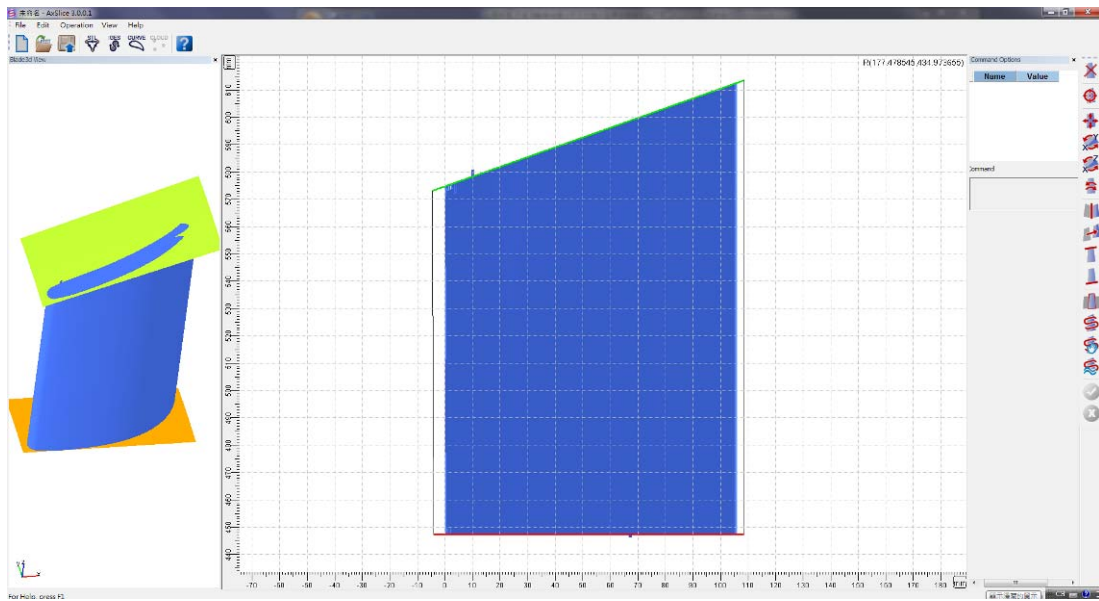


圖 3-6 定義第 1 級靜葉之 Shroud 和 Hub 的界線。

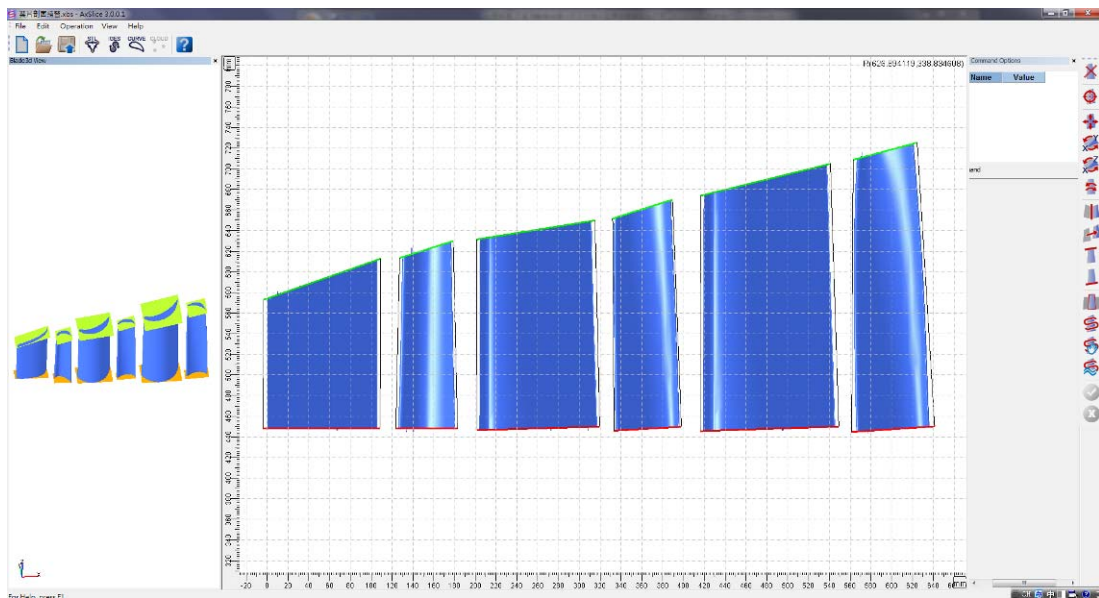


圖 3-7 匯入所有動靜葉之模型並定義 Shroud 和 Hub 的界線。

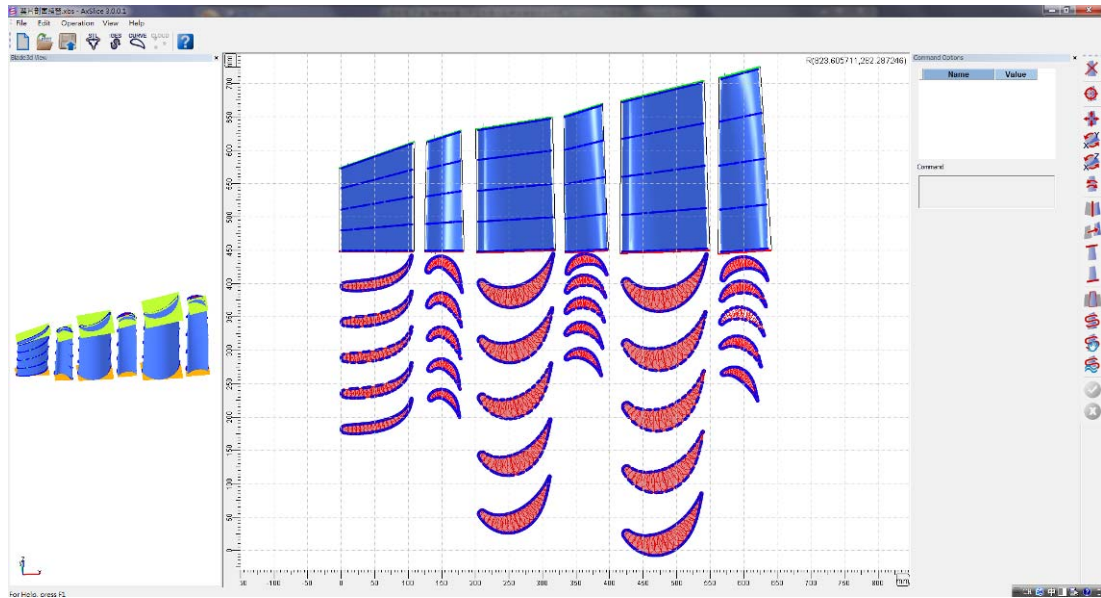


圖 3-8 自動切截面後之葉片 2D 輪廓圖形。

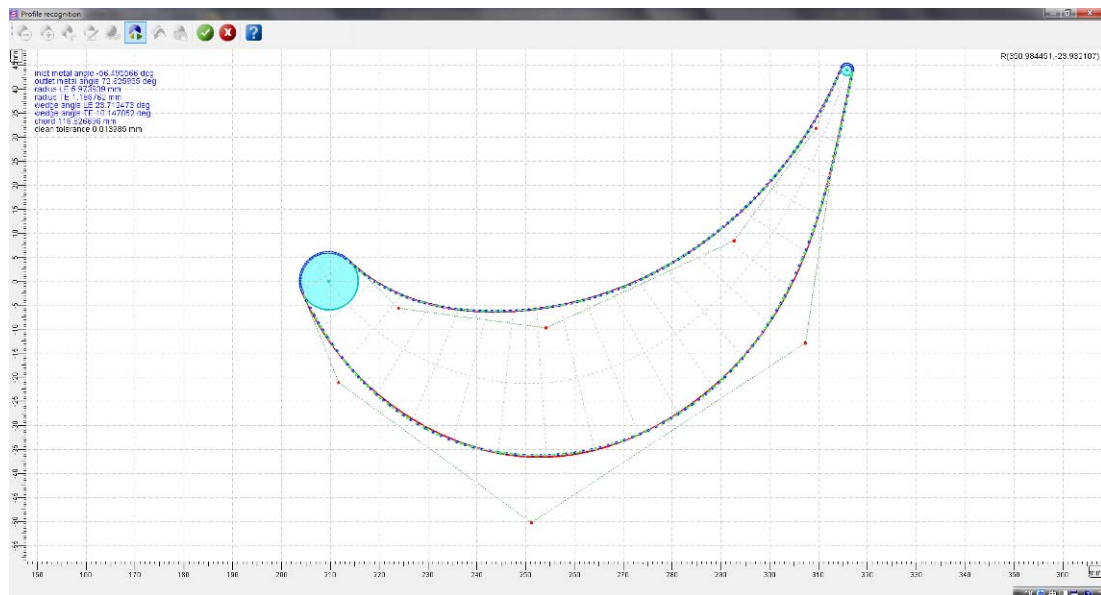


圖 3-9 針對單一輪廓進行手動曲線調整。

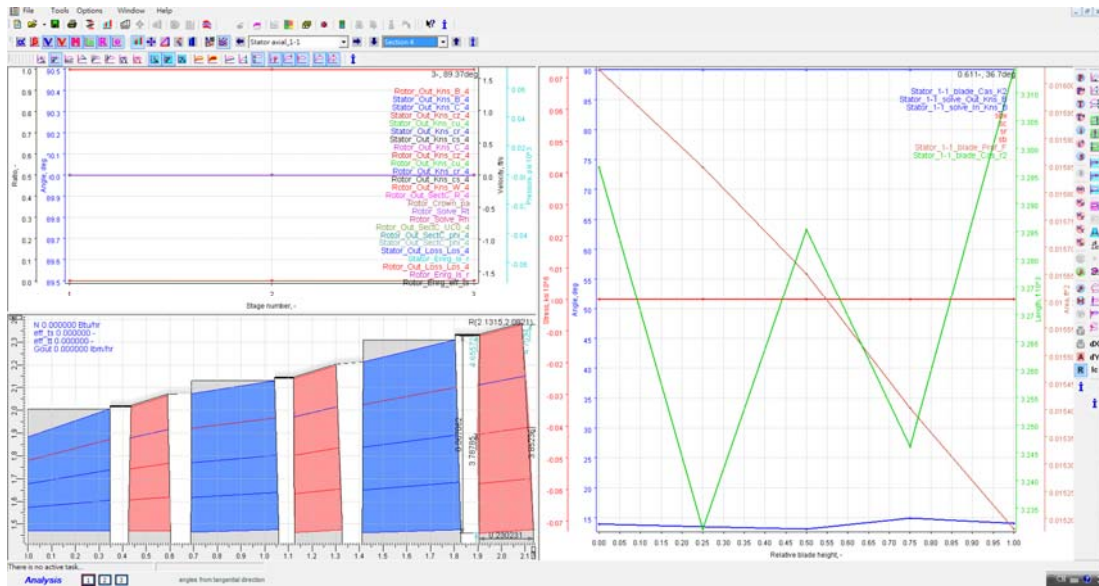


圖 3-10 將 AxSlice 檔案匯入 AxSTREAM 可進行後續分析。

## 四、微型掃描建模技術實習

### (一) SOLUTIONIX 簡介

SOLUTIONIX 公司成立於 2000 年，離南韓首爾的地鐵 206 新堂站約 3 分鐘步行路程，如圖 4-1、4-2。該公司以光學逆向掃描設備為其主力產品，目前精度較高之規格為 800 萬畫素鏡頭、500W 光源之光學掃描設備，亦有適合齒模、珠寶類等微小特徵工件之自動化掃描設備。

### (二) 掃描或量測技術發展現況

掃描(量測)設備可分為接觸式與非接觸式兩大類。有些設備歸類為接觸式，有些歸類為非接觸式，有些則是混合使用，常見先進的掃描(量測)設備有：

- 1、三次元量床(CMM)：外觀如圖 4-3，其精度最高，可達  $\mu\text{m}$  等級，但受限於床台大小，有工件尺寸的限制。因其每次碰觸只能量測單點的座標或沿物件邊緣拖曳得到 2D 輪廓線，故較適合做自動化、高精度要求之重複量測工作，而不適合做為複雜物件之逆向掃描工具。部分三次元量床可加裝線性雷射掃描測頭，可強化該設備於曲面掃描之能力。
- 2、手臂型掃描(量測)設備：外觀如圖 4-4，其精度略低於三次元量床，但方便攜帶與移動，工件尺寸較不受限制，一般較適用於現場大型工件之幾何量測。但因其關節長度限制，過寬或過高之工件之量測較麻煩，每次移動手臂基座時，須靠多點(一般為鋼珠球)定位重新找回工件座標，較費時費工。此類型之手臂一般可再加裝線性雷射掃描測頭，可強化該設



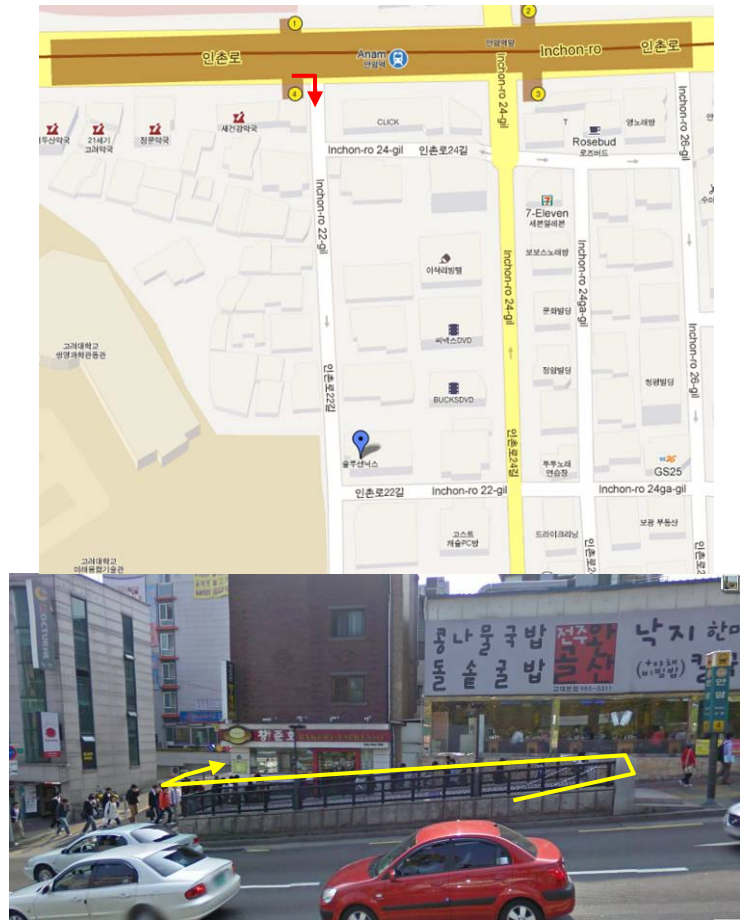


圖 4-1 南韓 SOLUTIONIX 公司的地理位置。(參考 google map)



圖 4-2 南韓 SOLUTIONIX 公司的建築物外觀。



圖 4-3 三次元量床外觀。



圖 4-4 手臂型掃描(量測)設備外觀。(FARO 官網)



備於曲面掃描之能力。

3、雷射追蹤定位量測設備：外觀與操作情形如圖 4-5，該設備以三角架固定工件附近，檢測人員手持特製鋼珠球，可利用雷射自動追蹤鋼珠球的球心位置，當鋼珠球碰觸工件表面時可逐一記錄球心的空間座標資訊。此種量測方法較適合大型工件的幾何量測，但不利於量測深窄型溝槽的部位(譬如圖 4-6 渦輪機轉子上各級相鄰動葉的深窄空間)，因鋼珠球無法以手持伸入且雷射追蹤會有死角。

4. 光學定位量測設備：

(1)數位單眼相片分析系統：本系統包含一台高規單眼相機、定焦鏡、比例尺、編碼標籤、圓形標籤及一套強大的運算軟體，如圖 4-7。在欲以光學掃描設備進行大型工件(譬如圖 4-6 轉子)之掃描前，可先將圓形標籤及編碼標籤混合黏貼於整個工件表面，再將比例尺放於工件旁，以單眼相機進行各種角度、各種遠近位置之拍攝，其中須包含數張比例尺的拍攝。之後再將相片檔傳至電腦進行軟體的運算，電腦會將所有的照片內的編碼標籤及圓形標籤進行反覆運算及分析，分析出各標籤的三度空間座標，以利後續光柵式掃描時可快速將任意部位之片段點雲資料歸到 3D 空間中之正確位置。此種作法不僅提高大型工件之光學掃描速度，亦可縮小疊圖運算之累積誤差。

(2)可移動式光學 CMM：包含 2~3 個高解析度 CCD 鏡頭、一組無線探測手把，如圖 4-8，該手把前端為紅寶石探球，尾部有數個不同的編碼標籤。在探球接觸工件按下量測鈕的同



圖 4-5 雷射追蹤定位量測情形。(FARO 官網)

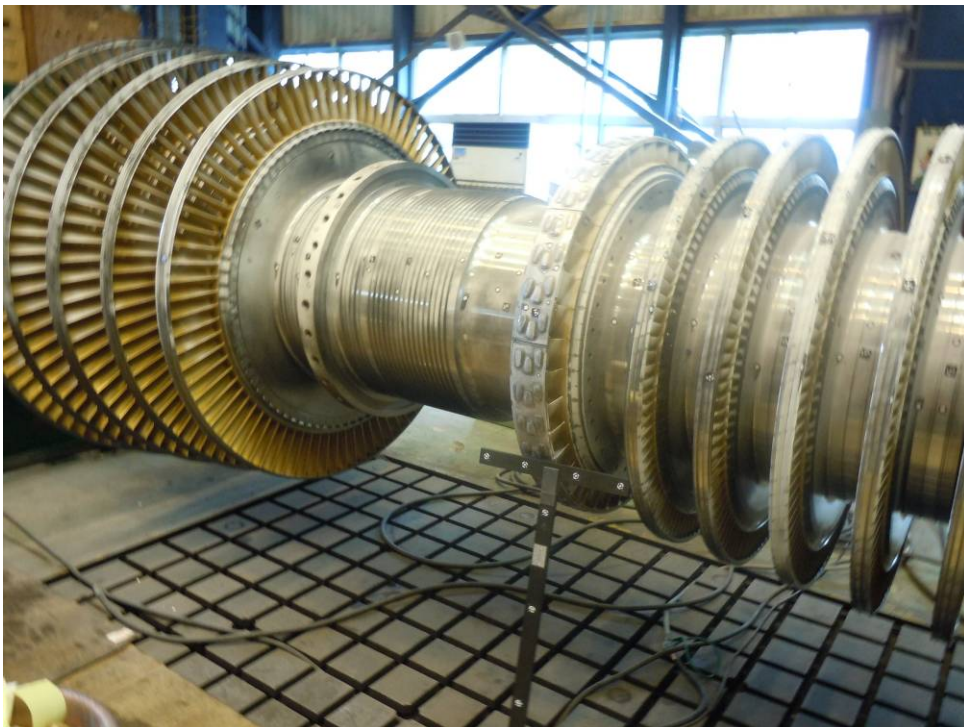


圖 4-6 渦輪機轉子上各級相鄰動葉為深窄空間。



圖 4-7 數位單眼相片分析系統之組成。(AICON 官網)



圖 4-8 可移動式光學 CMM 之組成。(AICON 官網)

時，2~3 組不同視角的 CCD 鏡頭會抓取手把尾部的定位標籤位置，並計算出紅寶石探球的球心座標。此種量測方法適合大型工件之 CMM 量測，也應可應用於類似圖 4-6 之深窄部位幾何量測或葉形取點工作。

5. 手持式雷射掃描設備：包含中間部位的雷射光源和兩側的 CCD 鏡頭，如圖 4-9，手持掃描器在物體前端來回移動，兩側 CCD 會以三角法即時偵測運算出雷射光範圍點雲資料的空間位置，靠著圓形定位標籤去重疊不同時間掃描的點雲資料。此種掃描方式目前在業界常跟光柵式掃描設備比較，各有其優缺點，但由於雷射所產生的干擾雜訊點會比較多，面對掃描精度要求較高的工件，可能用光柵式掃描設備比較適合。
6. 光柵式掃描設備：包含中間部位的白光(藍光)光源和兩側的 CCD 鏡頭，如圖 4-9，和手持式雷射掃描設備一樣，都需要圓形定位標籤去重疊不同時間掃描的點雲資料。使用者可以依工件大小及解析度需求，去更換不同焦距的 CCD 或調整 CCD 的間距與夾角，而得到單一掃描從 80mm\*80mm ~1300\*1300mm 之範圍。掃描範圍越小，解析度越好，掃描死角較小，但於大型工件使用時較耗時耗工。執行掃描時，中間光源會投射出數張不同寬度之黑白條紋光柵於被掃描物件上，兩側的 CCD 會根據黑白條紋的寬度及彎曲變化，以三角法去運算出點雲資料的空間位置。





圖 4-9 手持式雷射掃描設備。(實威網站)

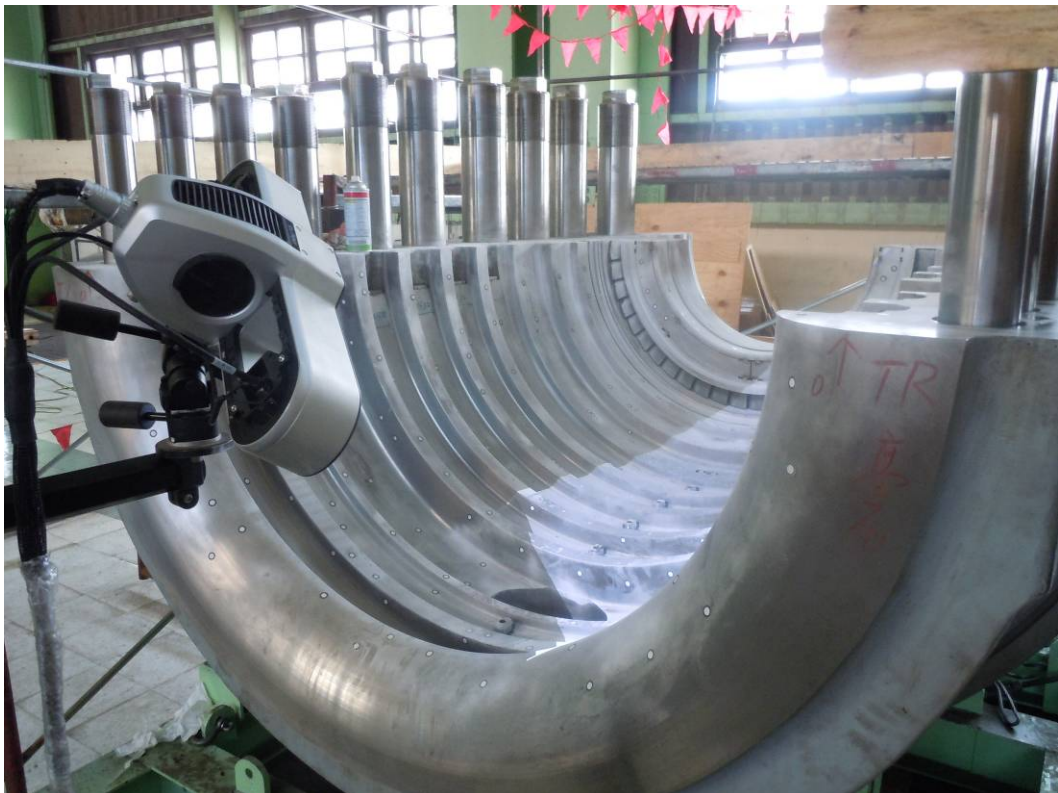


圖 4-10 大型工件以光柵式掃描設備實拍過程。

### (三) 微型掃描技術探討

目前本單位在進行氣渦輪機熱段組件自動化鉚修開發時，時常需將特定工件之外型掃描建檔，有些工件亦希望在不破壞的原則下，進行內部特徵的建立。此次拜訪 SOLUTIONIX，除了學習現行各式 3D 量測及掃描技術外，亦針對深孔或長筒狀內部掃描的技術進行討論。

如果不想破壞工件而可進行長筒狀工件內部冷卻孔的量測，以目前的技術可以應用可移動式光學 CMM 來完成。但若想進行內部曲面的掃描，目前市售的雷射或光學掃描設備均太大，無法深入長筒狀內部，但 SOLUTIONIX 的技術人員表示，或許未來幾年內研發成熟時，市場上有機會見到迷你且精度高的光學 3D 掃描器，或許可以符合我們目前的需求。

### (四) 建模軟體葉形正向參數設計實習

於 SOLUTIONIX 實習期間，該公司了解我們部門對於渦輪機葉片葉形正向參數設計的需求，特別邀請 3DS Rapidform 公司的工程師一起討論 Rapidform XOR 軟體的應用。

Rapidform XOR 是一套逆向與正向兼容設計的 CAD 軟體，適合針對逆向掃描後的 STL 圖檔進行曲面或實體的參數化設計。根據實測的結果，檔案大小在 300MB 左右的 STL 網格檔於 Rapidform XOR 的模型空間中尚可輕易縮放或旋轉，感受不出延遲的情形，蠻適合大型複雜工件的繪製。以下簡單敘述此次實習的內容：

#### 1. 葉片逆向鋪面設計：

針對逆向掃描後的葉形，若要重新建構平順的實體或曲面

圖檔，使用"鋪面"是最快的方法。首先將掃描後之 STL 圖檔匯入 Rapidform XOR 軟體中，並根據設計需求進行物件的對正 (Alignment)，對正好之後的 STL 模型如圖 4-11。之後再使用 "Region Group" 模組將 STL 網格根據曲率變化做顏色分類如圖 4-12。

顏色分類後即可針對各區域進行鋪面動作，因已知 LE 與 TE 端為導圓特徵，故不使用鋪面處理。經鋪面、裁切、縫合實體化、LE 與 TE 端導圓後，再開啟誤差比對功能如圖 4-13，其中綠色表示實體模形與 STL 模形的誤差在合格公差帶以內。

此種建模方式的優點是快速，但缺點是如果本身掃描圖形有缺陷或品質不佳，則鋪出之曲面亦會跟著扭曲變形。且未來如果想要針對造型做設計變更時，則幾乎會是一件不可能的任務。因此，理想的做法應該是參考 STL 模型，以草圖正向建模的方式去建構實體，如果草圖理可以再融入參數概念，則以後做設計變更時將會相對容易許多。

## 2. 葉片正向建模設計：

Rapidform XOR 有一個不錯的功能，就是在建草圖的時候可以用基準面去平移或旋轉剖切 STL 圖形，而在草圖平面得到一個粉紅色的參考輪廓(圖 4-14)，再用一些實體線條去重新繪製草圖，當中的草圖亦可加入限制條件與定義尺寸，如圖 4-15，以方便未來做尺寸的修改。

此外，該軟體還可以直接將模型樹的草圖與特徵步驟，以選擇性或全部的方式轉移至其他繪圖軟體(Solidworks、UG、Pro/E、Catia 等)，譬如我們希望於 Solidworks 完成葉形以外的

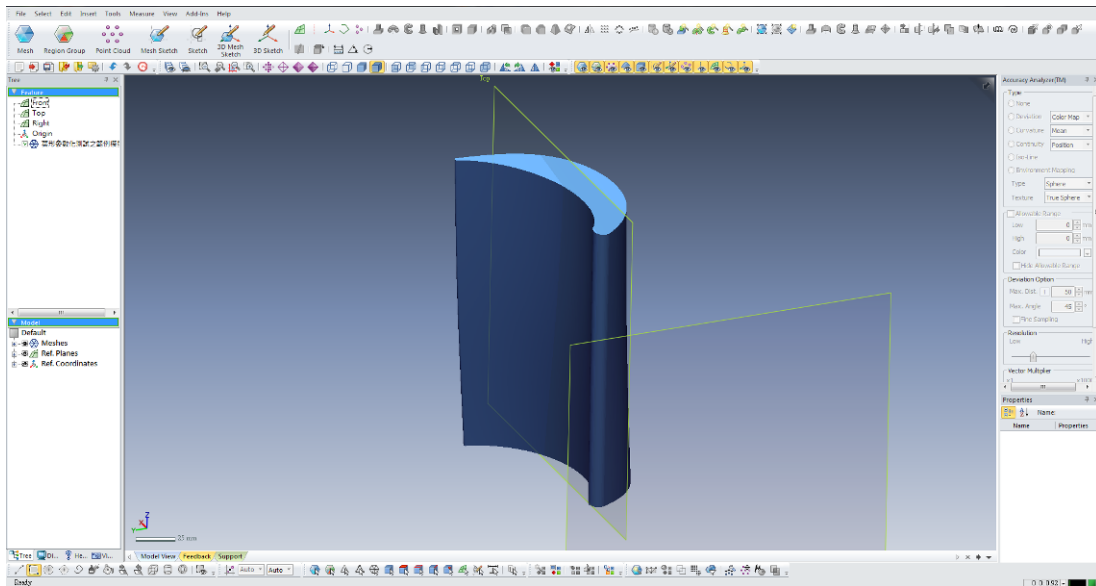


圖 4-11 STL 格式之葉形匯入 Rapidform 軟體並對正完成。

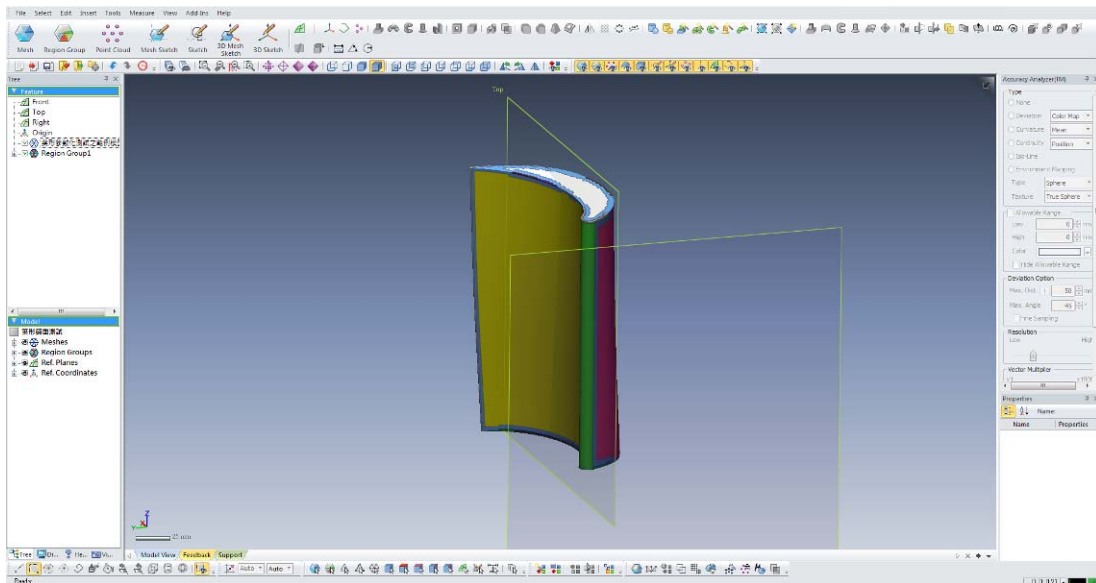


圖 4-12 STL 格式之葉形進行 Region Group 之曲率分類。



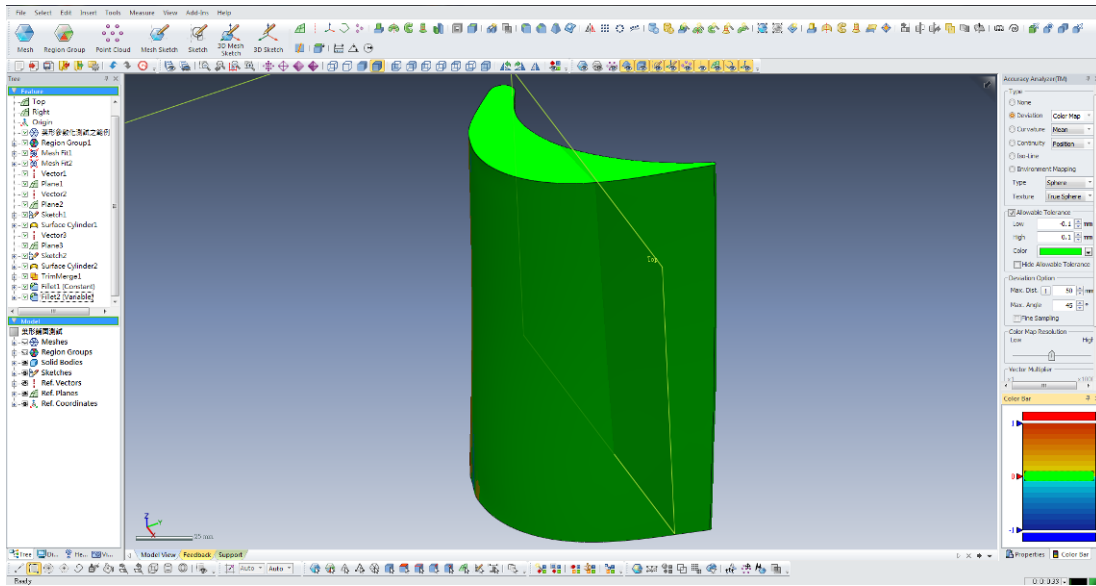


圖 4-13 鋪面完成的實體模型與 STL 模型之誤差比對。

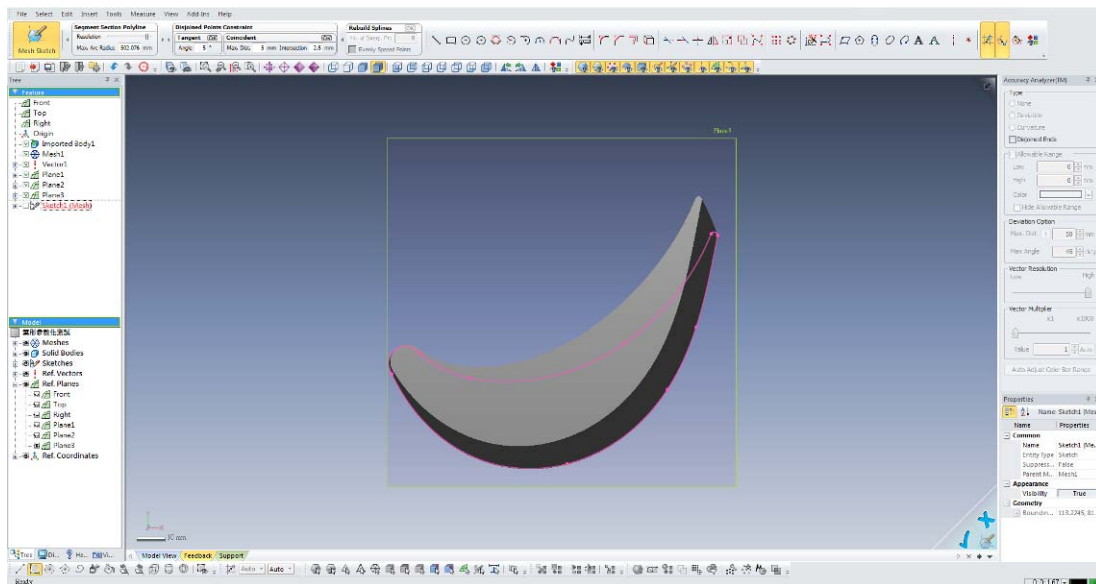


圖 4-14 粉紅線條 STL 圖檔與基準面相交之參考輪廓。

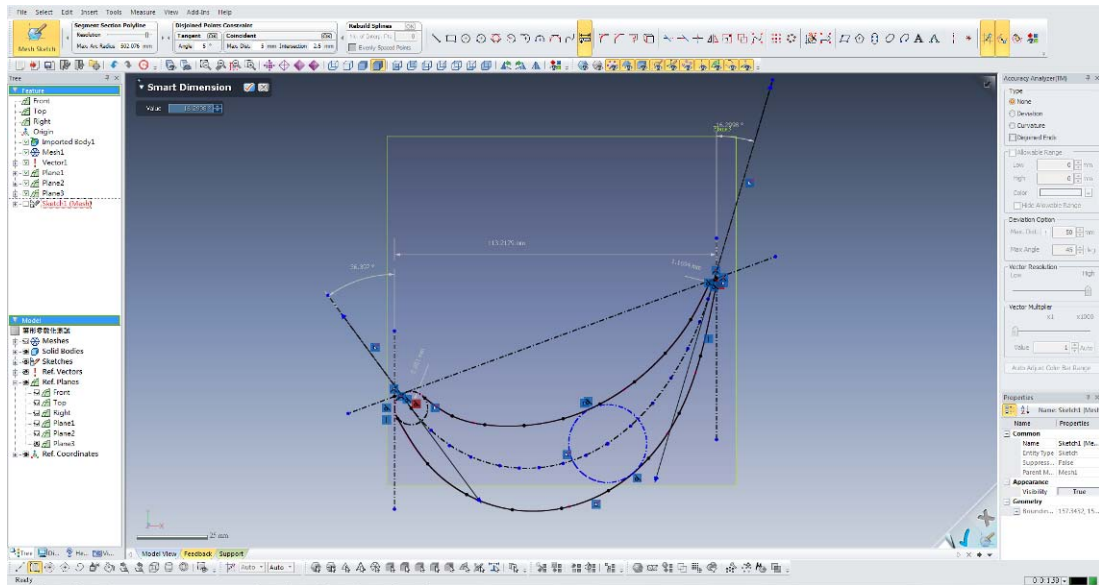


圖 4-15 參考粉紅線條並以參數方式建立葉形 2D 輪廓草圖。

其他設計但又想保有葉形的草圖參數，則可以用上述的方式，將圖 4-16 左上部的模型樹設計步驟全部轉移到 Solidworks 的模型樹，經調整後可獲得如圖 4-17 圓弧曲線參數化之葉形輪廓。

#### (五) 課後心得及建議

各式各樣的 3D 逆向工具，沒有那個絕對好，也沒有那個絕對不好，端看想要針對哪種工件做逆向而去做最佳的工具選擇，甚至要兩三種的逆向工具一起搭配才有好品質的逆向圖形。

而 3D 繪圖軟體也是一樣，各有其優缺點。多年前尚未接觸繪圖軟體時會有一個迷思，就是看別人都在用一些知名的繪圖軟體，就會覺得好厲害，好像任何東西都要經過那軟體畫圖才是最佳選擇。後來這幾年接觸了幾套 3D 繪圖軟體，覺得每套軟體都有其特色，有些強在逆向圖檔的處理、有些強在鋪面、有些強在參數設計，使用者最重要的是要有 2D 基本圖學與實務加工的概念，還要去仔細觀察或研究特殊工件的造型是否隱含一些原設計者的參數想法或設計規則，運用這些想法與規則再搭配 2~3 套不同特色的繪圖軟體，應可完成某些特殊工件的參數化建模。

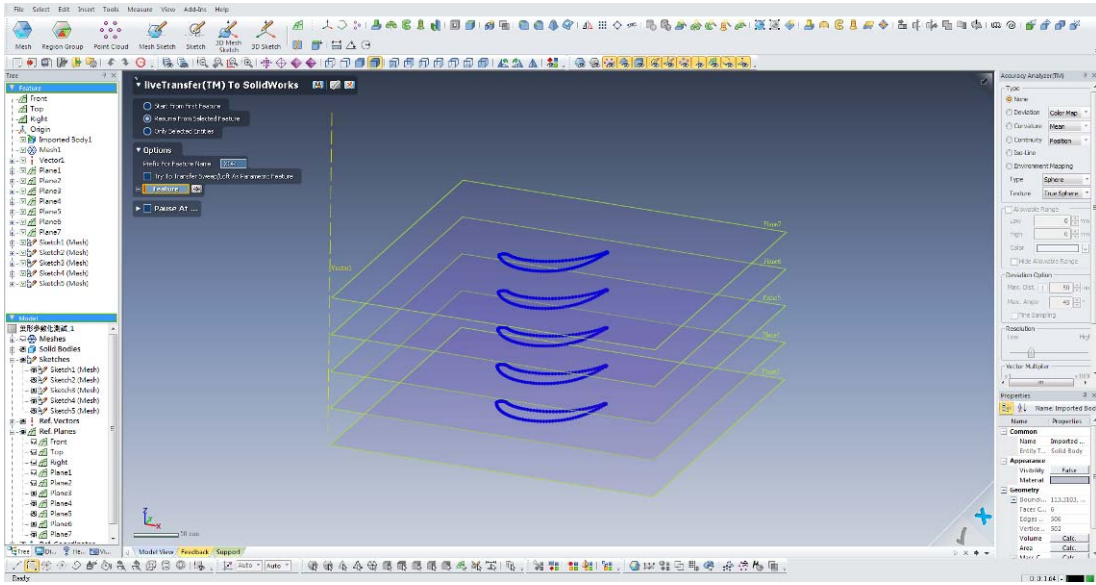


圖 4-16 於 Rapidform 將設計參數全數轉移至 Solidworks。

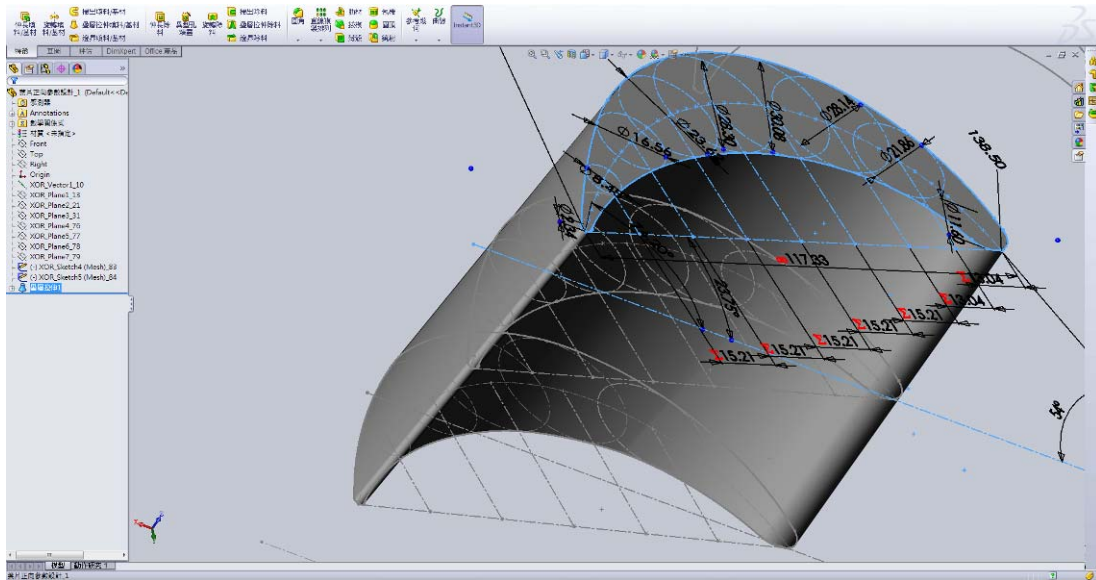


圖 4-17 於 Solidworks 調整參數並進行疊層拉伸。

## 五、參考文獻

1. Mike Wood, "Gas Turbine Failures Analysis", Singapore, April 2013.
2. Toupin T., GT field data management, PowerGen' 95 Asia, 1995.
3. Scalzo A. J., 1992.