

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：汽力機組效能再提升方法比較報告書

頁數 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳俊雄/台灣電力公司台中發電廠/汽機課/協辦輔機員/(04)26302123ext3151

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：93 年 7 月 26 日至 93 年 9 月 23 日

出國地區：日、美、英、德

報告日期：93 年 11 月 27 日

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞：

汽輪機 (Steam Turbine)

轉子 (Rotor)

噴嘴 (Nozzle)

靜葉環 (Diaphragm)

刷式汽封 (Brush Seal)

汽機改造 (Retrofit)

蒸汽通路檢測 (Steam Path Audits)

先進蒸汽通路設計 (Advanced Design Steam Path)

固體粒子沖蝕 (Solid Particle Erosion)

應力腐蝕破裂 (Stress Corrosion Cracking)

超音波探測 (Ultrasonic Test)

超淨鋼 (Super Clean Steel)

內容摘要：(二百至三百字)

本報告主要介紹目前世界上生產汽輪機 (Steam Turbine) 三大集團—日本東芝 (TOSHIBA)、美國奇異 (GE) 及位於英國與德國等歐洲地區的亞斯通 (ALSTOM) 汽機配件最新設計與製造等發展情形，透過生產廠家對於新產品開發與服役中機組改良建議情形，配合研習過程中參訪各廠家配件之生產工廠及產品組裝概況，並了解其對原廠與非原廠汽機實際改造的經驗，藉以作為本公司與本廠將來汽輪機改善的參考。

報 告 內 容

壹、國外公務之內容與過程：

- 一、公務任務
- 二、內容與過程

貳、國外公務之心得與感想：

一、東芝集團（日本）

- （一）沿革與營運現況簡介
- （二）汽輪機配件發展現況
- （三）東芝汽輪機改造解決方案
- （四）京浜事業所介紹

二、奇異集團（美國）

- （一）公司歷史與營運現況簡介
- （二）汽輪機配件發展現況
- （三）喬治亞電力公司與 BOWEN 電廠介紹
- （四）WORKSHOP & LABS 簡介
- （五）汽輪機改造建議。

三、亞斯通（ALSTOM）集團（英、德）

- （一）集團沿革與營運現況簡介
- （二）汽輪機配件發展現況
- （三）VSE 電力集團與 ENSDORF 電廠介紹
- （四）配件生產工廠介紹
- （五）汽輪機改造建議

四、無軸孔汽機轉子（Non-Center Bored Rotor）近期發展

五、超淨鋼轉子（Super Clean Steel Rotor）最新發展

參、研習之感想與建議。

壹、國外公務之內容與過程：

一、公務任務

汽機主要配件更新與改造方式研習

二、內容與過程

(一) 前言：

台中一～八號機運轉已有時日，汽輪機及其配件逐漸老舊，將陸續產生問題，其中一號機因外在顯現振動問題而發現葉片沖蝕（Solid Particle Erosion）等問題已於今年所做的改造（Retrofit）後獲得解決，提升效率達到甚至超過預期；其餘七部機將來同樣會隨著歲月消逝展開改善工作，為未雨綢繆計，勢必尋求最佳改善方案，故先行前往領導廠家研習最新配件設計與汽輪機改造方式為必要之前導作業。

綜觀目前世界上知名的汽輪機生產廠商屈指可數，而與本廠機型相同或相近的廠商更是寥寥無幾，儘可能於其中挑選幾家可製造相同或相容配件者，目的在保有或超越原來之效率水準並具備相當之可行性與可靠性，避免無謂風險產生，並確保配件供給之多樣性甚至價格彈性。

本次出訪廠商共有三家，分別為 TOSHIBA、ALSTOM、GE，位於日本、美國、英國及德國，訪問計畫除了解各廠家 Office 外也包含配件製造工廠與實際生產概況，此外，歐洲的 ALSTOM 另邀請本人參觀其座落於瑞士的辦公室與轉子製造工廠，而相關電廠與實驗室參觀更令人大開眼界，獲益匪淺。配合此次研習機會蒐集相關資料提供公司與本廠日後汽機改善的最佳選擇，亦可作為將來採購機組參考。

(二) 參訪廠家與研習期間：

| 參訪廠家 | 研習期間 |
|---------|-------------------|
| TOSHIBA | 93/07/26~93/08/04 |
| GE | 93/08/04~93/09/02 |
| ALSTOM | 93/09/03~93/09/22 |

貳、國外公務之心得與感想：

一、日本東芝（TOSHIBA）

（一）沿革與營運現況簡介：

東芝集團總部位於日本東京，是一家世界知名的企業集團，其產品種類函蓋範圍之廣不勝枚舉，以電子及電器產品較為人所熟知，以下為東芝簡介：

1. 成立時間：1875（Hisashige Tanaka 創建）
2. 總裁：Tadashi Okamura
3. 員工人數：166,000
4. 股份：486,702
5. 投資額：22 億 9 仟 1 佰萬美元
6. 銷售金額（2002）：470 億美元
7. 總資產：436 億 5 仟 8 佰萬美元
8. 製造工廠：25 座
9. 集團經營事業：
 - （1）無線通信公司
 - （2）數位媒體網路公司
 - （3）個人電腦及網路公司
 - （4）半導體公司
 - （5）顯示設備與配件控制中心
 - （6）工業動力系統與服務公司
 - （7）社會網路及次結構系統公司
 - （8）網路服務與內容控制中心
 - （9）東芝銷費者行銷公司
 - （10）東芝方案解決公司
 - （11）東芝醫療系統公司

以下二張照片是東芝集團位於東京的大樓及京浜事業所西分工廠 TGTC 公司：



2. 前述事業部門中工業動力系統與服務公司負責發電設備製造與售後服務，在 2002 年以裝機容量而言占有全世界 16 % 的市場，到 2004 年 3 月為止總裝機數為 1,793 部、總發電量為 134,372MW，多分佈於亞洲及中東地區，其所生產的機組可用率達到 99.9% ，計算公式如下：

$$\text{Availability} = \frac{\text{Service Hours}}{\text{Service Hours} + \text{Forced Outage Hours}}$$

(二) 動力部門近期發展

1. 最新的 H 系統 (1500 DEG. C CLASS COMBINED CYCLE PLANT) —目前成功裝設在 Baglan Bay, UK
 50 Hz : MS9001H, 480MW
 60 Hz : MS7001H, 400MW
 熱效率 : 60%

2. 裝置超臨界發電機組的經驗如下表：

| 機組名稱 | 發電量 | 運轉日期 |
|----------------|--------|---------|
| KAWAGOE#1 | 700MW | 06/1989 |
| KAWAGOE#2 | 700MW | 06/1990 |
| TSURUGA#1 | 500MW | 10/1991 |
| NOSHIRO#2 | 600MW | 12/1994 |
| REIHOKU#1 | 700MW | 07/1995 |
| HARAMACHI#1 | 1000MW | 07/1997 |
| NANAO OOTA#2 | 700MW | 07/1998 |
| SHIRIUCHI#2 | 350MW | 09/1999 |
| TACHIBANAWAN#1 | 1050MW | 06/2000 |
| TACHIBANAWAN#2 | 700MW | 07/2000 |
| TSURUGA#2 | 700MW | 10/2000 |
| KARITA SHIN#1 | 285MW | 07/2001 |
| CALLIDE#1 | 420MW | 08/2001 |
| CALLIDE#2 | 420MW | 03/2002 |
| HEKINAN#4 | 1000MW | 11/2001 |
| HEKINAN#5 | 1000MW | 11/2002 |
| TARONG#1 | 450MW | 01/2003 |
| REIHOKU#2 | 700MW | 07/2003 |

3. 世界上最長鋼製末級動葉片：

- (1) 東芝與奇異合作發展
50 Hz 48"及 60 Hz 40"
鋼製末級與 L-1,L-2 動
葉片
- (2) 世界最大全速末級轉動
面積
- (3) 藉由 3-D 電腦流體動力
學設計的高效率葉形



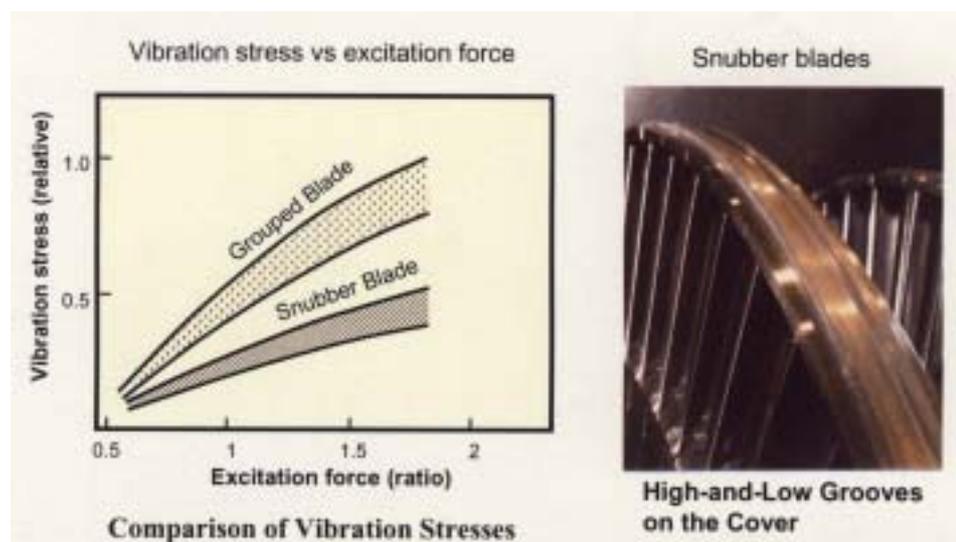
4. 緩衝式葉片 (Snubber Blades)：

葉片與環蓋為整體設計，
由單一鍛件加工而成，
特性如下：

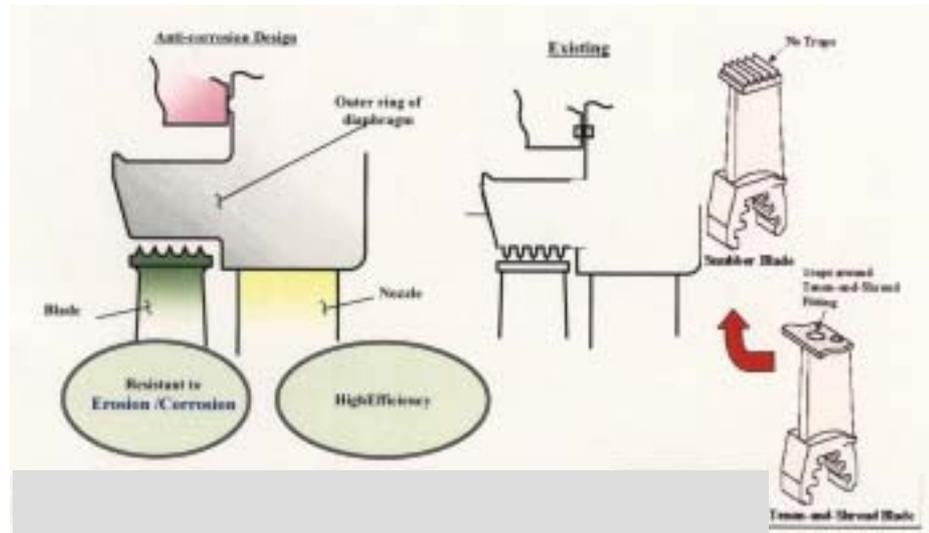
- (1) 360 度整圈連續接合
- (2) 葉間邊緣效應
- (3) 低振動應力
- (4) 抗腐蝕性
- (5) 增加葉尖汽封效果
- (6) 易於拆裝
- (7) 可以塗裝



其中降低振動應力效果與實裝圖可由下窺知：

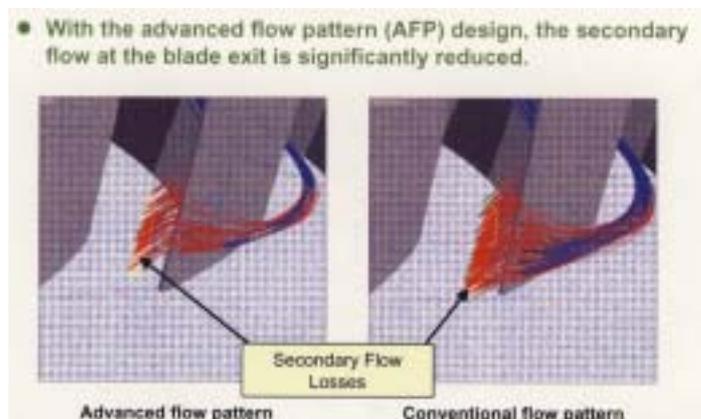


而對於新、舊型動、靜葉片組合之抗腐蝕性及增加葉尖汽封效果可藉下頁上圖了解：



5. 先進的流量模式（Advanced Flow Pattern）特性如下：

- (1) 完全透過電腦流體動力學（CFD-Computational Fluid Dynamics）進行三次元（3-Dimensional）黏性分析
- (2) AFP 葉形的確可增進效率
- (3) 新型徑向的葉形曲線與舊式相比可減低來自噴嘴葉面或動葉片葉尖及葉根的二次流損失如下圖：

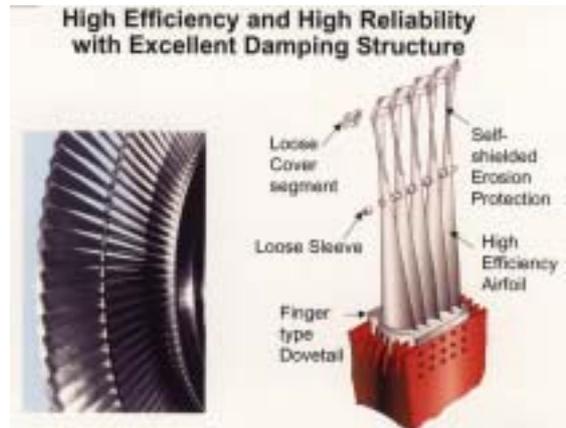


6. 綜合上述各項先進的動靜葉片改善設計如下圖所示：



7. 此外針對低壓段末級葉片新型設計重點如下所述：

- (1) 葉尖環蓋採用可拆卸的間隔塊。
- (2) 葉片切邊自體防蝕硬化處理。
- (3) 高效率葉形設計。
- (4) 葉間用可拆式套管定位。
- (5) 葉根使用新式指型鳩尾設計以強化結構。



右圖為其組合照片及示意：

8. 在售後服務方面則成功升級超過 90 組汽力機組，其中包括 OEM 與 Non-OEM 汽輪機、發電機與排氣環保設備等。

9. 東芝針對電廠因年久產生衰退的問題有下列解決方案：

- (1) 升級：本著先進科技增進可靠性及效率，主要改良汽機配件如主蒸汽閥零件、發電機、冷凝器及鍋爐等以提升蒸汽通路效率，其範圍包含：

- ▶ 汽輪機及其附屬設備
- ▶ 發電機及其附屬設備
- ▶ 主蒸汽閥 (MSV/CV, RSV/IV)
- ▶ 冷凝器
- ▶ 鍋爐及其附屬設備

- (2) 現代化：提供電廠運轉效益及降低維護成本，主在求得控制系統解決方案，以下舉例：

- ▶ 分散控制系統 (DCS)
- ▶ 調速器及勵磁系統 (D-AVR)
- ▶ 新式套裝服務，包括：
 - ◆ 動力系統分析
 - ◆ 最佳效用
 - ◆ 除硝 (De-Nox) 控制

- (3) 壽命延長：

- 透過電廠延壽計畫有效降低成本，其內容包括下列各項：

- ▶ 檢驗服務
- ▶ 電廠壽命評估
- ▶ 汽輪機改造
- ▶ 發電機靜子端繞線支架系統及修理
- ▶ 發電機靜子漏水偵測及修理
- ▶ 發電機靜子水量限制解決方式
- ▶ 發電機靜子及轉子重繞線
- ▶ 發電機勵磁系統更新
- ▶ 冷凝器改造
- ▶ 燃氣輪機受熱零件改造

● 東芝在發電機改造上已成功升級了 237 部如下表：

| 轉子部分 | 靜子部分 |
|----------------------------|--------------------------|
| 173 支 (包含 22 支 Non-OEM) | 64 支 (包含 6 支 Non-OEM) |

(4) 支援服務：東芝提供運轉及維護的支援服務以減輕風險，增加可靠性及安全性，其服務內容與機構有以下各項：

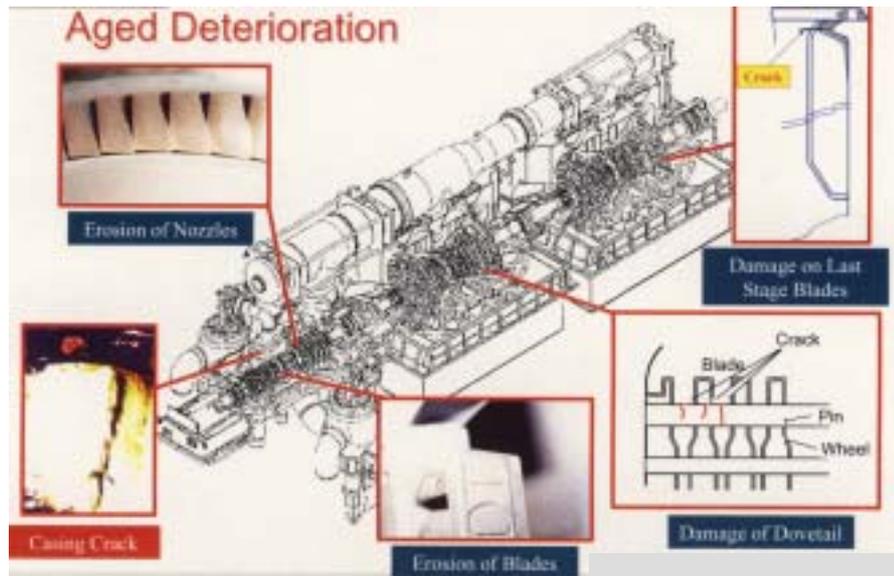
- ▶ 動力服務公司
- ▶ 風險基準維護服務
- ▶ 不間斷的服務承諾
- ▶ 遠端遙控監視服務
- ▶ 網路線上診斷
- ▶ 技術顧問服務
- ▶ 東芝工程學校

(三) 汽輪機改造解決方案

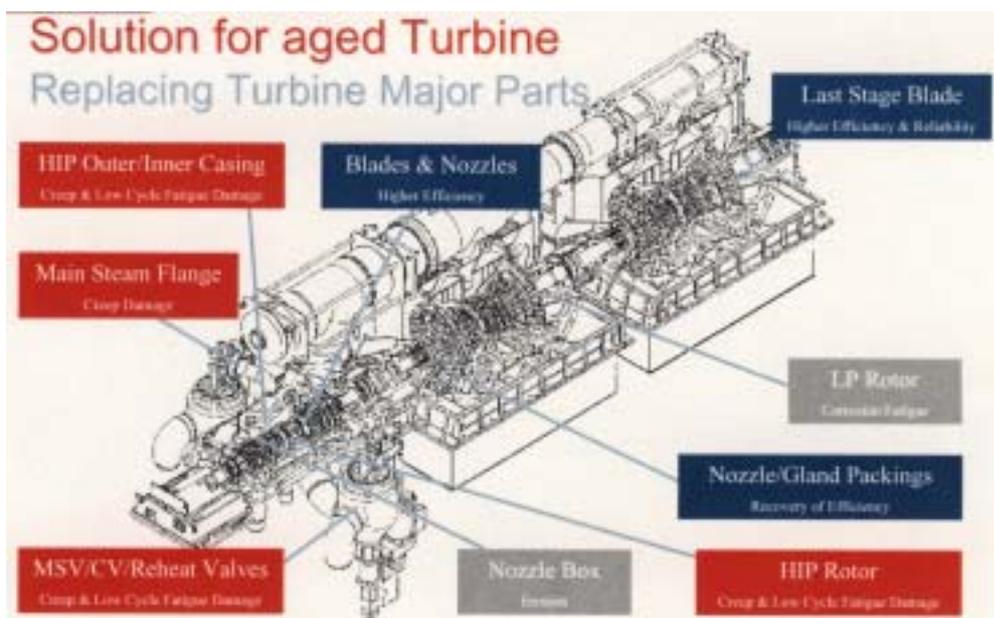
汽機因運轉日久易發生葉片及噴嘴沖蝕、外殼龜裂、低壓轉子末級葉片及葉根鳩尾巢損壞等問題，如下頁上圖所示：

其解決方式為更新主要零件包含：

1. 高中壓內外缸 (HIP Outer/Inner Casing) --解決因潛變及低週疲勞產生的損害
2. 葉片及噴嘴 (Blades & Nozzles) --提升效率



3. 主蒸汽法蘭（Main Steam Flange）--解決潛變損害
 4. 主蒸汽閥、控制閥及再熱閥（MSV/CV/Reheat Valve）--解決潛變及低週疲勞損害
 5. 噴嘴箱（Nozzle Box）--消除沖蝕問題
 6. 低壓轉子末級葉片（LP Rotor Last Stage Blades）--提高效率及可靠性
 7. 低壓轉子（LP Rotor）--解決腐蝕疲勞
 8. 噴嘴/格蘭迫緊（Nozzle/Gland Packings）--恢復效率
 9. 高中壓轉子（HIP Rotor）--解決潛變及低週疲勞損害
- 部品位置示意如下圖所示：



(8) 磁粉探傷裝置(Magnetic Particle Testing Device)3 台

(9) 熱處理爐 (Heat Treatment Furnace) 6 台

3. 以下為 TGTC 廠內幾項設備與操作照片：



火燄硬化設備施工



葉片表面研磨施工



加工中心機生產線



高速三次元測定機

二、 美國奇異 (GE)

(一) 公司歷史與營運現況簡介：

奇異集團不同事業部分別位於世界各地，它是自 1896 年在美國道瓊掛牌上市以來碩果僅存的一家，以下為其概略情況：

1. 成立時間：西元 1878 年由愛迪生 (Thomas A. Edison) 創建
2. 現任 (第 12 任) 總裁：Jeffrey R. Immelt (傑夫、伊梅特)
3. 員工人數：超過三十萬
4. 股東人數：400 萬人
5. 銷售金額 (2003)：1,342 億美元
6. 總資產：5,750 億美元
7. 集團經營事業範圍如下：

(1) 消費產品

- ◆ 密封黏膠
- ◆ 照明系列
- ◆ 家電製品

(2) 工業服務

- ◆ 先進材料事業部
- ◆ 消費暨工業系統事業部
- ◆ 能源事業部
- ◆ 設備服務事業部
- ◆ 醫療事業部
- ◆ 基礎工程事業部
- ◆ 保險事業部
- ◆ 美國國家廣播公司 (NBC)
- ◆ 交通運輸事業部

(3) 消費融資

- ◆ 奇異融資

(4) 企業金融

- ◆ 資產管理
- ◆ 設備融資

8. 上述部門中工業服務能源事業部 (GE ENERGY) 負責發電設備製造，火力發電設施於全球裝機容量至今已超過

450,000MW，能源事業部目前已由紐約州的 Schenectady 搬到南方大城—喬治亞州的亞特蘭大（Atlanta GA）。

(二) 汽輪機配件發展現況：

1. 新型式葉片設計 ICB (Integral Covered Buckets)：

這是一種沒有葉尖接榫的環片設計型式，每一級整圈都由一片片的葉片連續組成，單一葉片皆為整塊鍛造材料切削而成，新型葉片有以下效益：

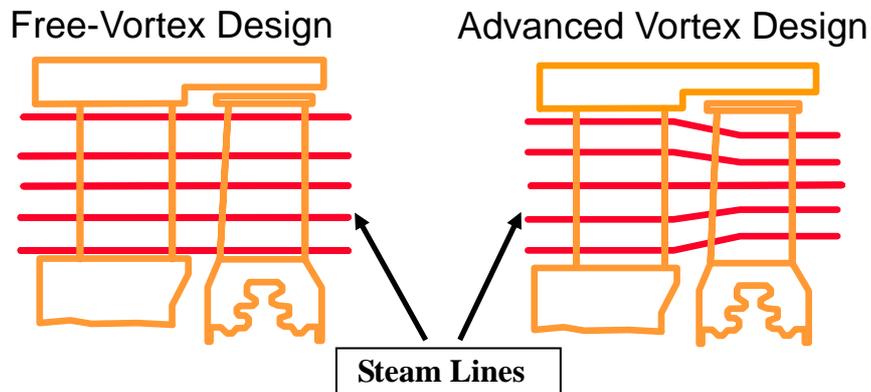
- (1) 改善蒸汽通路幾何形狀
- (2) 減少蒸汽洩漏
- (3) 易於拆裝維護
- (4) 增進輪機效率
- (5) 抑制切線振動



Integral Cover Buckets Buckets with Peened-on Cover

上圖為 ICB 與傳統葉片不同形狀外觀的組合照片，圖中左側為一體成形環蓋葉片，右側則為葉尖與環蓋具接榫的葉片。

2. 新式通路設計



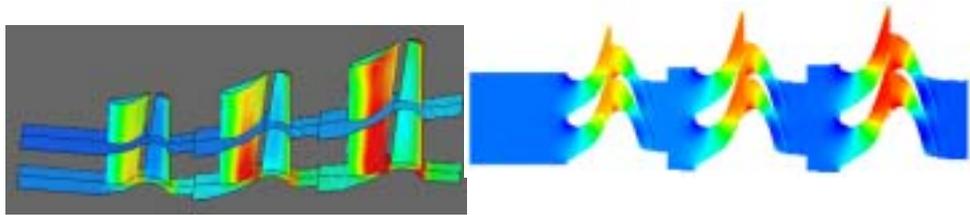
上圖右側為先進動靜葉形組合，蒸汽流線有集縮作用，可防止其向上或向下洩漏，減少因葉尖與葉根損失造成的效率下降，提升蒸汽作用在葉面的力量，左側則為傳統型態動靜葉組合，蒸汽流線沒有集縮效果，效率不如前者。

3. 多級數 CFD (Computational Fluid Dynamics) 分析

- (1) 由先進的三次元流量模型獲得最佳流量分佈
- (2) 新的空氣動力動靜葉片設計

(3) 最佳入射角以減少損失

(4) 下圖為多級動靜葉片組合蒸汽流模型：



4. 新形噴嘴型式如下：



(三) BOWEN 電廠簡介：

BOWEN 電廠位於喬治亞州一個名叫 Cartersville 的小鎮，距亞特蘭大市約二小時車程，參訪當日由 GE Energy Service 專案經理 Nhu D. Tran 陪同前往，並由該電廠一位工程人員帶領參觀發電機組，從底樓各類泵浦及冷凝器、加熱器等設備一直到汽機房。該電廠屬喬治亞電力集團內南方公司所有，全廠約有 400 名工作人員，廠內共有四部發電機組，兩部為 700MW、另兩部為 900MW，全為超臨界機組，總發電量超過 3,000 MW，鍋爐為 CE 製造、汽機為 GE 生產，因未臨海，使用淡水為冷卻媒介，每部機均有一座大型冷卻水塔，相當壯觀，水塔採自然循環空氣冷卻，冷卻水不足時會自動補充，水源來自附近河川，廠區沒綠化，僅為工廠型態，不似台中電廠公園化景色怡人；控制室空間亦顯狹小，不如本公司所屬發電單位這般寬敞。廠內最老機組運轉已超過 30 年，並未做過任何 Retrofit 工作，僅換過兩套控制系統。每年平均大約跳機 6 次，未發生過重大工安事故。下頁上圖為其廠區照片：



(四) WORKSHOP & LABS 簡介

奇異能源部門總部雖已南遷到亞特蘭大，其生產工廠仍位於紐約州 Schenectady，此地當年是奇異動力部門的大本營，占地廣闊，建築物林立，甚至有鍋爐設備及實驗室，可以想見當時奇異在當地繁榮的景象，期間由 GE Energy Service 亞洲區商務經理 Shan E.Zhao、專案經理 Nhu D.Tran 及 GE Power System 全球銷售 Leader George Kirby,P.E 陪同，參觀汽輪機及發電機轉子組裝工廠，由於奇異公司已將汽機配件生產轉移海外（如日本、墨西哥...等），故在美國國內無法見識配件製造工廠。於同一廠區內另有一汽輪機科技實驗室（Steam Turbine Technology Laboratory），此機構於 2000 年重新營運，負責人為 Kathi Bentzels 女士，實驗室內可進行各種組合配件及新型控制系統連結試驗，參觀時有許多研究人員與工程師正忙碌的從事相關測試。針對汽輪機相關的設備有下列幾項：

1. Wheel-Box Test Facility
2. Steam Turbine Test Vehicle
3. Low Pressure Development Turbine
4. Stationary Cell Test Facility

而此實驗室可進行以下的測試：

1. Aerodynamic & Aeromechanic Performance
2. Rotating Component Integrity Frequency Margins
3. Structural Damping
4. Exhaust Hood Efficiency

5. CFD Models & Flow Physics

6. Valve Testing

7. Air Turbine Testing

8. Generator Fan Testing

下圖左側是奇異公司於紐約 Schenectady 的 Office 與 Workshop；右側則為亞特蘭大能源部門 Office 照片：



此外，於 Schenectady 工廠附近的城鎮 Niskayuna 另有一處全球研究中心 GRC (Global Research Center)，專門從事各種新產品及材料研發，除了奇異本身產品外尚接受政府單位及民間委託業務，受委託研發項目多為商業性質，但該中心仍披覆神秘色彩，非經特殊安排不易進入參觀，這次能有機會與這所研究機構接觸實在是相當榮幸，當時由 GRC 能源事業部計畫經理 Bruce G.Norman 接待，不但介紹目前奇異在汽機方面的最新發展，如刷式汽封 (Brush Seal) 或調整型汽封 (Adjustable Seals) 的應用，還帶領我們參觀中心內部一間材料實驗室正在進行的各種新材料研發，例如燃氣輪機葉片噴焊陶瓷材質表層、單晶葉片培植熱處理…等，均為先進科技實際應用測試，巧的是在觀摩單晶葉片熱處理設備時正由一位早期成功大學礦冶系畢業赴美工作的台灣鄉親操作，與其用閩南語交談，顯得份外親切，在聽取研究人員介紹其所負責項目主要內容時可以看出其企圖心與積極熱切、興致勃勃的科學家特質。

在 Schenectady 附近還有奇異能源事業部售後服務部門 (GE Energy Service)，主要替客戶評估效率並進行改善，負責接待者為 Paul G. Albert、Michael Hlatky 及 Susan M. Stuhr，其中第一位曾赴國內進行本公司興達電廠改善後的

效率評估。奇異的 Thermal Performance Service (TPS) 可以承接下列服務項目：

- 1.熱效率保證測試服務—產品特性測試
- 2.複循環效率評估
- 3.燃氣輪機效率評估
- 4.蒸汽輪機與冷凝器效率評估
- 5.蒸汽通路檢測
- 6.冷凝器及真空系統檢測
- 7.廠效率評估
- 8.熱效率管理
- 9.顧客訓練
- 10.遠距離服務

除了上述熱效率評估服務以外，GE Energy Service 服務內容還包括蒸汽通路檢測 (SPA—Steam Path Audits)：

1. 含義：蒸汽通路配件量測與檢驗複循環效率評估
2. 檢測內容：
 - (1) 由汽機輸出、效率、熱耗率及燃料成本決定配件
 - (2) 對蒸汽通路配件維修與更新提供建議
 - (3) 在大修期間適時討論修護建議與實施選擇
 - (4) 提供數位照相紀錄
3. 效用：在恢復熱效率與維持可靠性
 - (1) 熱力方面評估：
 - ◆確認效率退化程度
 - ◆計算損失
 - ◆確做成本/效益結論
 - (2) 結構方面評估：
 - ◆透過配件目視檢驗確認失效機構
 - ◆建議配件更新與維修
4. 恢復效率 (最佳運轉維護測略)：
 - (1) 決定更新/維修優先順序
 - (2) 確認下次大修須維修/更新之配件
 - (3) 依照機件狀況建議運轉期間
 - (4) 確認本次大修更新/維修之配件

- (5) 建議維修方法(如焊接、切割及拋光等)
- (6) 節省燃料
- 5. 增進可靠性 (避免非計劃性大修):
 - (1) 依照預期的運轉期間建議維修次數
 - (2) 確認外來異物與固態粒子造成損害的來源
- 6. SPA 結構深入檢驗內容:
 - (1) 靜葉環部份:
 - ◆ 噴嘴及邊壁
 - ◆ 內/外環包含背面表層
 - ◆ 葉尖汽封條及其環座
 - ◆ 軸封迫緊及其環座
 - ◆ 汽封表面及軸/徑向擠壓銷
 - ◆ 汽缸靜葉環座
 - ◆ 靜葉環水平接合面
 - (2) 轉子部份:
 - ◆ 葉片、環蓋、汽封片群組
 - ◆ 接榫靜葉環水平接合面
 - ◆ 轉輪、平衡孔及配重溝槽
 - ◆ 轉軸迫緊與基面

(五) 汽輪機改造建議:

奇異公司面對舊式運轉中的機組提出以下兩項改造方案:

1. ADSP (Advanced Design Steam Path)

(1) 概要:

ADSP 是透過下列先進的電腦科技加以計算:

- ◆ CFD (Computational Fluid Dynamics)
- ◆ FEA (Finite Element Analysis)
- ◆ GE Energy, GE Aircraft Engine and GE Global Research Center

再結合下列先進製程以達到全面效率恢復與提升:

- ◆ 多軸加工中心機切削複雜形狀
- ◆ 改進配件位置控制方式
- ◆ 一體成型環蓋的動葉組合

(2) 效用: ADSP 可以減少下列造成汽機效率衰退因素:

- ◆ 葉尖與轉軸迫緊洩漏—40%

◆噴嘴與葉片表面粗度—15 %

◆噴嘴與葉片 SPE— 15%

◆通路沉積物 —15 %

◆噴嘴—15 %

(3) 奇異提供

ADSP 下列可以選擇的改善項目：

◆級數—不變

◆先進空氣動

力葉片及一

體成型環蓋葉片

◆全組靜葉環

◆高中壓段葉片防止固體粒子沖蝕標準塗層

◆刷式汽封

◆ Nozzle box –可留用舊有者或重新加工

(4) 奇異從事 ADSP 的經驗：

◆1995年第一部火力機組ADSP服役中

◆有47部火力機組向奇異購買ADSP服務，目前45部運轉中

◆ 1998年ADSP技術延伸至第一部核能機組

◆有20部核能機組向奇異購買ADSP服務，目前14部運轉中

(5) 第一部火力機組實施 ADSP 後第一次開蓋大修結果如下二圖所示：



其中左圖為運轉 8 年的結果，右圖為運轉 9 年的結果，兩者均為低壓段噴嘴葉片，從照片中可以看出

實施 ADSP 後對 SPE(Solid Particle Erosion) 具有優良抵抗能力，葉片表面幾乎沒有磨損。

2. DENSE PACK

(1) 理念：

- ◆增加反作用力水準
- ◆增加級數
- ◆減少軸徑
- ◆減少葉片數量
- ◆先進葉片設計
- ◆依據負載需求決定進汽方式

(2) 效用：

- ◆增進汽機容量：
 - ♣固定蒸汽流量有較高輸出
 - ♣鍋爐有額外容量則可增加輸出
- ◆改善效率：
 - ♣先進的蒸汽通路科技
 - ♣恢復因年久造成的損失
- ◆效率維持
 - ♣ SPE 損害極小化
 - ♣蒸汽路徑沉積物影響極小化
- ◆加強資產效用
 - ♣延長大修間隔期
 - ♣延長關鍵組件壽命

(3) 縮小軸徑的益處：

- ◆增加動靜葉片長度—改善方位比例減低二次損失
- ◆減少轉軸迫緊
圓周面積—
減少葉尖洩漏
- ◆減低轉輪切線
速度—降低
蒸汽速率可
減少葉尖損失
- ◆較高的反作用力設計—減少葉形損失

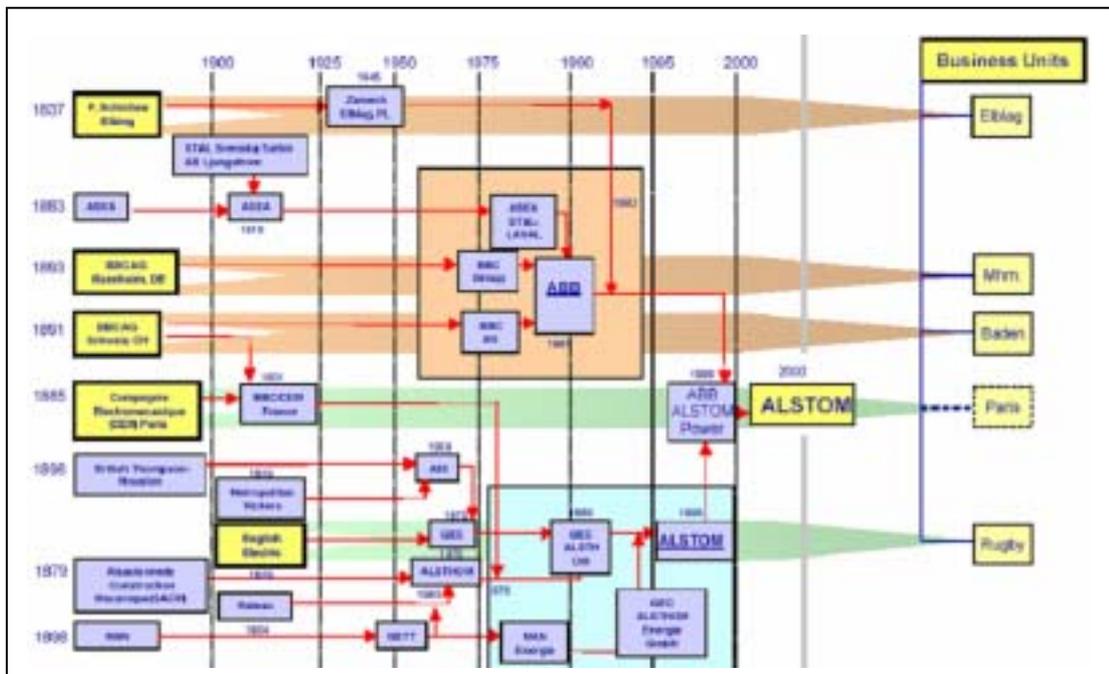


(4) 上圖為 DENSE PACK 靜葉環相片

三、 歐洲亞斯通 (ALSTOM)

(一) 沿革與營運現況簡介

ALSTOM 正式以此名稱現身產業界乃自 2000 年以後，幾乎與歐盟 (EUROPEAN UNION) 同步，但往前追溯最早出現 ALSTHOM 名稱在 1963 年，它由 1879 年成立的 SACM 延續而來，之後加入由 1910 年成立的 English Electric 延續的 GEC，AEI 於 1970 年加入 ALSTHOM，並由 1898 年成立的 MAN 加入，於 1976 年再投入 BBC/CEM France，於 1989 年改名為 GEC ALSTHOM，並於 1998 年再改為 ALSTOM 於 Rugby UK，次年與歐陸位於德國、瑞士及波蘭的 ABB 合併為 ABB ALSTOM Power，最後才更名為今日的稱呼。其演進歷史可參考下圖：



ALSTOM 目前在組織上有六大據點，分別位於瑞士 Baden、英國 Rugby、德國 Mannheim、波蘭 Elblag、法國 Paris 及美國 Richmond，這次參訪地點為前三者，也正是 ALSTOM 最大的三個據點。下頁上圖紅色圓圈所示即為其組織重要根據地，實際上除了歐洲各國以外，ALSTOM 於世界各地擁有 54 個製造中心、14 座實驗室、70 個服務中心及在 63 個國家有地區性組織。



至於 ALSTOM 集團經營事業有下列幾項：

1. 運輸工具生產，如電聯車及高速火車
2. 動力渦輪機系統，如發電用輪機
3. 船舶生產，如軍艦、郵輪
4. 動力系統環境保護，如排煙、排水污染控制
5. 動力系統售後服務，如汽機檢測、改善
6. 電力傳輸，如供電及輸配電線路架設

(二) 汽輪機配件發展現況

1. 轉子部份

轉子為裝置葉片的基地，內部體積龐大，外部表面積亦不小，故除了葉片以外依舊是整體轉動部份的重點，而 ALSTOM 在轉子材料選擇如下：

(1) 火力電廠單體 (monoblock) 及焊接 (welded) 之高、中壓段設計高溫鍛造：

◆1%CrMoV 鋼應用在 565°C 蒸汽進口

◆10%CrMoVNb 鋼應用在 540°C 以上的部份

(2) 高、低壓段結合一起鍛造：

2%CrMoWV 鋼應用於單體及焊接設計有最佳的潛變與韌性特質

(3) 火力電廠低壓段與核能電廠高、低壓段用低溫鍛造：

- ◆3.5%NiCrMoV 鋼可用於變化的拉力強度範圍自 540 至 780Mpa
- ◆3.5%NiCrMoV 超淨鋼應用在大於 320°C 絕熱環境可改善韌性降低導致轉脆破裂
- ◆2%Cr2%Ni Mo 鋼材應用在焊接件低壓段

2. 焊接式轉子 (Welded Rotor) 發展

ALSTOM 自 1920 年代開始應用此種轉子，1965 年開始應用於核能廠汽機轉子，目前有超過 200 支大型焊接式低壓轉子供應給核能汽機，實際上已有數千支焊接式轉子服役中，至今未發生斷裂。焊接式轉子在運轉上有下列行為產生：

- (1) 優秀的熱彈性、可快速啟動及高負載梯度
- (2) 大的慣性矩及增進穩定性

焊接式轉子在設計上有幾種優勢：

- (1) 高度延展性碳鋼。
- (2) 較小的鍛造尺寸致有優秀的冶金結構與較易被確認的材料性質。
- (3) 低應力水準及理想的應力分配。

下圖為進料檢驗程序中的低壓轉子碟盤照片：



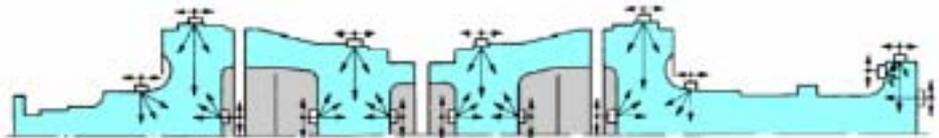
下頁上圖左方為於轉子生產工廠中進行粗胚鍛造的照片、右方則為將鍛造後的粗胚加工至接近標準尺寸的光滑表面照片：



焊接式轉子的超音波測試 (Ultrasonic Testing) :

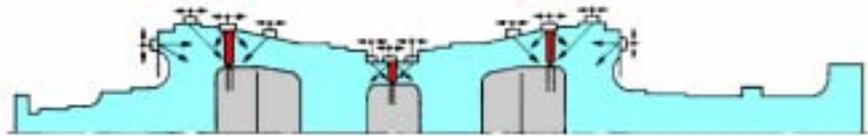
(1) 焊接前 :

來自鍛造工廠的轉子碟盤未焊接前分成數片，為求材料零瑕疵，對每一片碟盤均做百分之百超音波測試，包括自圓周及側面檢測，下圖為其示意：

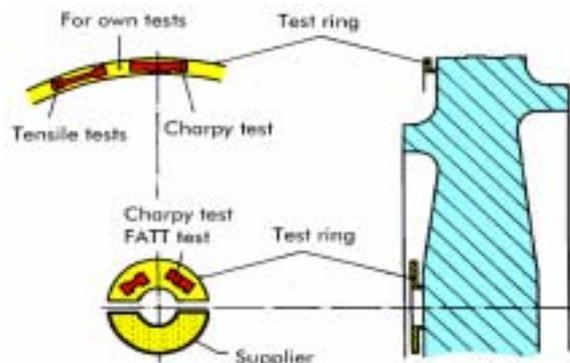


(2) 焊接後 :

此階段與焊接前相同仍實施 100% 測驗，但因碟盤端面已被包圍於轉子內部，無法做檢驗，只能做整體轉子的外部檢驗且重點在於焊道本身，下圖為針對焊道進行超音波測試之示意圖：



焊接式轉子碟盤除了做超音波測試外，在加工過程中預留某部份的材料進行各種機械性質測試，而所做的實驗乃依其所在位置實際運轉時面臨的應力



環境來決定項目，前圖為轉子碟盤預留機械性質測試試片與所做測試項目示意，其間包括拉力試驗、衝擊試驗及材質轉脆測試等。

(3) 下圖是焊接式轉子實際於測試站進行超音波測試的照片：



下圖為焊接式低壓轉子安裝 57"長末級動葉片 (LSB) 的實際照片：



焊接式轉子在緊縮碟盤結構上的技術益處：

- (1) 消除高碟盤鑽孔應力
- (2) 消除碟盤軸向鍵或榫的應力集中
- (3) 一般切線應力水準低於 35%
- (4) 不必要高強度材料

(5) 轉子材料降伏強度需求較低

(6) 有較高的應力腐蝕破裂 (SCC) 抵抗性

下圖為焊接式轉子生產工廠照片：



焊接式轉子把分散的碟盤一片片結合起來，其方式便是先垂直擺置並於接合面圓周用氣體鎢電弧焊 (GTAW—Gas Tungsten Arc Welding) 逐片焊接，(如下圖左側照片所示)，焊接時並未把焊縫填滿，而是在接下來的潛弧焊 (SAW—Submerged Arc Welding) 才完全填滿焊縫，潛弧焊時把轉子水平放置，其工作情形如下圖右側照片所示。

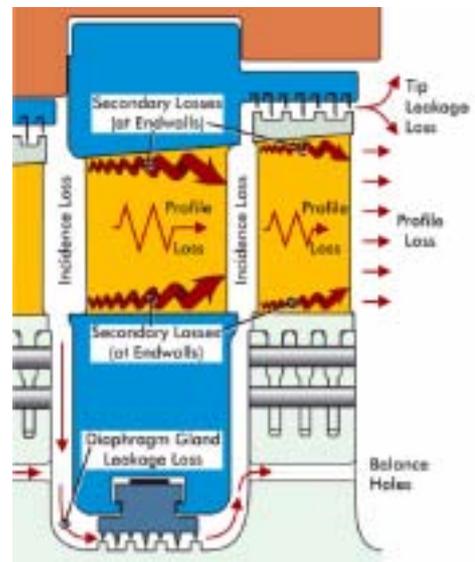


在第一步做完氣體鎢電弧焊接程序後並不是直接繼續進行潛弧焊接，而是必須經過垂直焊接後的熱處理 (如下頁上圖左側照片所示)，完成此階段之後才能接著實施潛弧焊接，且於潛弧焊接後亦須加以消除應力，此應力來自焊接時產生的熱量引起，也就是熱應力，下頁上圖右側照片即為應力釋放熱處理。



3. 動、靜葉片部份

汽輪機運轉蒸汽流經通路時動靜葉片之間會產生損失，就是級間損失，蒸汽在通路造成損耗的各種因素包括入射損失、靜葉環格蘭洩漏、動靜葉片二次損失、動葉片葉尖洩漏、平衡孔洩漏及動靜葉片的葉形損失等如右圖所示。為了改善這些不利於汽機效率的因素使降至最低，ALSTOM 對動葉片、靜葉環噴嘴及汽封均有先進的發展。經由這些改善對 1980s 年代晚期的汽機高、中壓段而言可獲得 5~6% 級間效率提升，老舊的機組將可得更高的效率。



(1) 動葉片部份：

在動葉片方面運用新科技設計外型如

◆三次元葉片設計 (3D Aerofoil Design)

◆一體成型預扭葉尖環蓋 (Integral Pretwisted

Shroud)

◆最佳的葉根插槽緊固方式 (Optimised Pinned Root Fastening)

以上設計都經過如下列所示之長期研發計畫：

- ◆電腦化評估
- ◆三次元電腦流體動力學計算
- ◆製造機器改良
- ◆輪機於空氣中效用測試
- ◆選擇最有效用的葉型
- ◆應用最長的葉片
- ◆汽缸空間的限制
- ◆葉根緊固應力



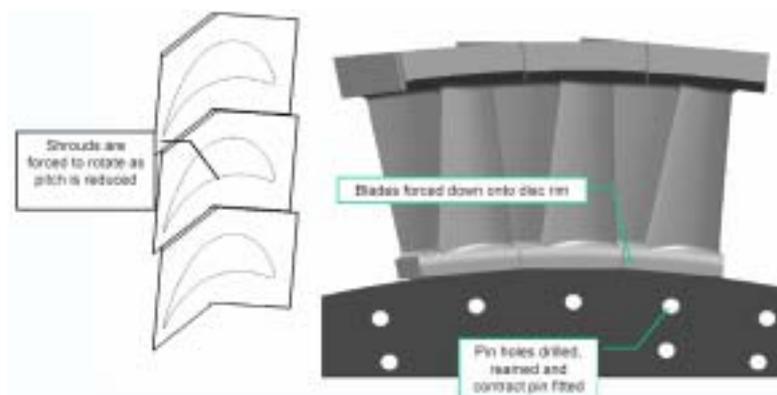
在葉尖環蓋方面的新設計：

- ◆汽封蒸汽流量由其他配件產生
- ◆葉片振動模數限制
- ◆比鉚接環蓋更安全
- ◆汽封鰭片正好適合葉尖及葉根表面
- ◆一體成型葉尖環蓋允許預先扭轉
- ◆更堅固的結構可改善振動特性
- ◆有較大尺寸的環蓋截距

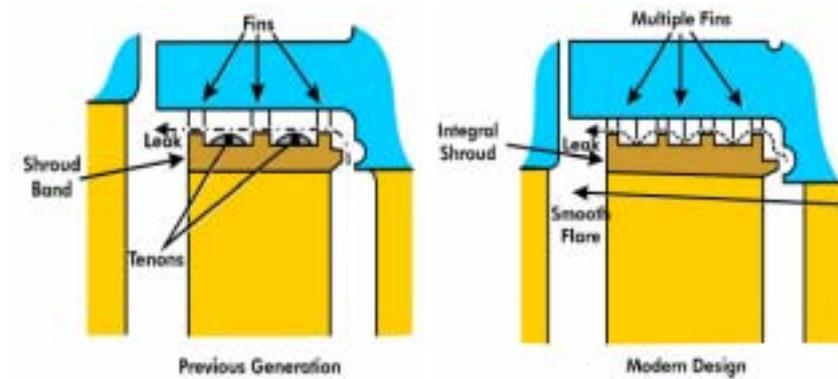
另在環蓋分析上注意以下各點：

- ◆使接觸應力最小，以達成振動一體化
- ◆尖端斷面剪應力最大以避免葉片塑性變形
- ◆組裝的幾何限制

其葉片與轉軸碟片結合正視圖及環蓋組合上視圖之示意如下：

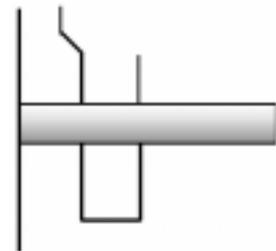


下圖左側為舊型動葉片尖端環蓋式樣，右圖則為新式設計：



有關葉根緊固分析如下圖及敘述：

- ◆轉子碟盤外側指根受來自單獨插銷剪力面的彎矩與拉力
- ◆根指間有單純拉力作用
- ◆外側插銷表面有剪力及彎矩
- ◆最佳應力分佈



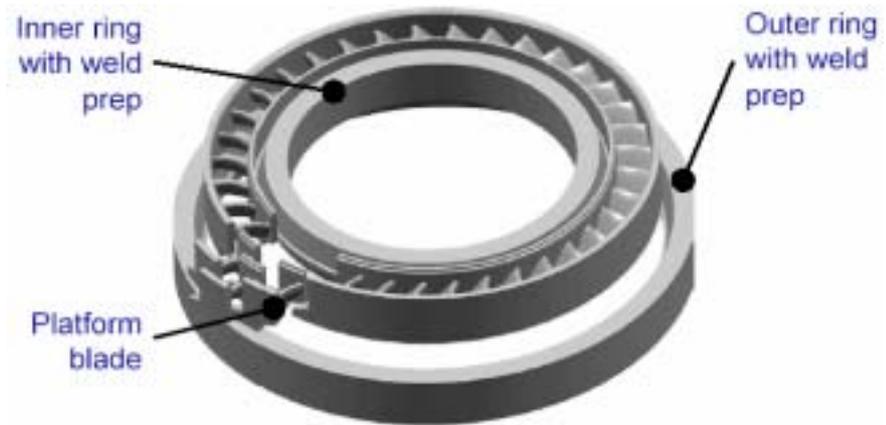
(2) 靜葉環噴嘴設計功能性：

- ◆維持整圈汽封性
- ◆減小轉子徑向間隙
- ◆增進效率
- ◆易於控制間隙與組裝
- ◆強固的機械設計
- ◆強壯葉片斷面
- ◆每圈允許較少的葉片數量
- ◆抵抗固體粒子沖蝕 SPE



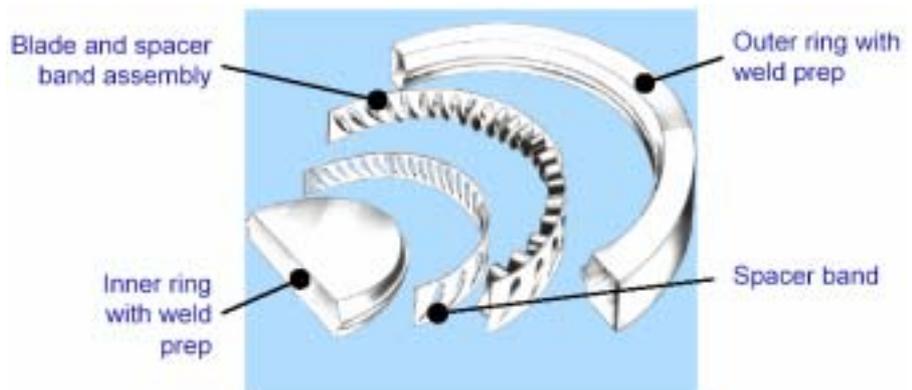
靜葉片設計概要與動葉片相似，也更具強度與效率，更能配合動葉片葉形，但不可拆卸，葉形如上圖。此種葉片應用於 Platform

Construction Diaphragm，其外觀示意如下圖。



除了上述型式外，ALSTOM 另外還發展了幾種不同的靜葉環如 Spacerband、Fillet welded、Solid nozzle Plates

及 Cast，其中末者主要為間隔環帶與葉片組合再焊上內、外環成為一個完整的靜葉環，右圖為其實際組合照片，下圖則為其大略示意。



靜葉環各項分析：

- ◆自組合壓力中心分成兩半，結合處反作用力大約為平均值兩倍。
- ◆最大偏向與最高負載在於接合面。
- ◆負載分佈導致最高應力。
- ◆靜葉環內圈垂直中心線受彎矩。
- ◆接合面葉片承受彎矩。
- ◆關鍵負載為靜態重量及力矩。
- ◆尤其在於變化如特殊啟動及溫度迅速變化時。
- ◆與蒸汽更多接觸但較外殼少。
- ◆靜葉環加熱與冷卻更快速。
- ◆壓力與關鍵負載組合的差膨脹。
- ◆壓力表面的鍵會產生磨擦力。

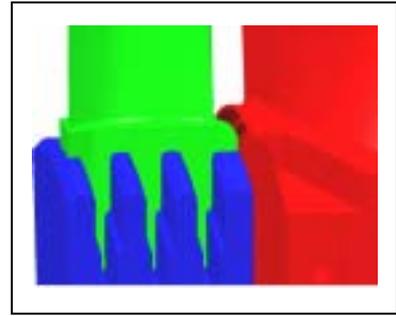
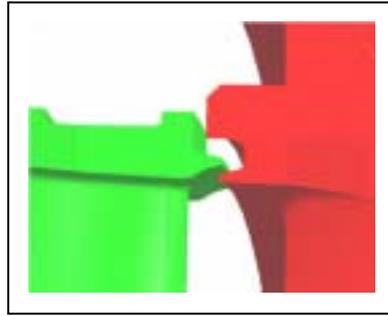
(3) 汽封部份：

- ◆高壓段葉尖使用填縫阻隔及刷式汽封、中壓段只採用填縫阻隔。
- ◆高、中壓段靜葉環格蘭均使用可彈回的格蘭間隔片。
- ◆高壓段軸向間隙採先進的遮蔽方式、中壓段則用一般導入方式。

下圖為刷式汽封照片、右圖則為此種汽封實際裝在靜葉環上的狀況



下頁上圖為軸向間隙遮蔽式汽封（左側是葉尖部份、右側則為葉根部份）：



4. 最佳外型的葉片科技組合：

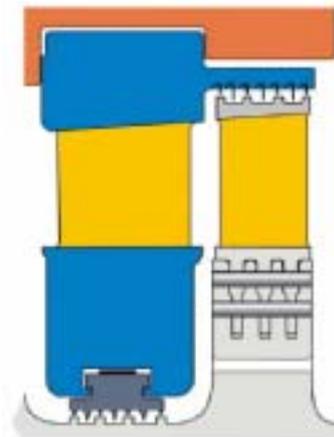
(1) 碟盤與靜葉環結構部份：

- ◆較低的軸向推力—有利於單進汽膨脹
- ◆靜葉環保持與轉子同心性
- ◆減少與轉子磨擦/徑向汽封損失
- ◆維持效率

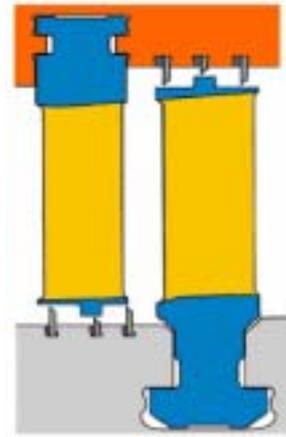
(2) 汽鼓型式的結構：

- ◆已經證實外型的簡單結構
- ◆降低製造成本並縮短前導時間
- ◆減少每級的軸向長度

5. ALSTOM 衝動式與反動式葉片組合型式如下示意圖：



衝動式葉片組合



反動式葉片組合

(三) VSE 電力集團與 ENSDORF 電廠介紹

在距德國曼哈姆不遠處有一小城 Saarlouis，車行約二小時，當天由 Jochem 帶領驅車前往，雖時值盛夏，但陰天下雨，故仍覺寒冷，與台灣氣候相差甚遠，城郊有一座電

廠叫 Ensdorf，緊臨 Saar River，這條河亦是其發電機組冷卻水來源，此廠隸屬於 VSE 電力集團，目前有一部機組正由 ALSTOM 進行改造活動，Mr Schröder 才會安排參觀，並由該廠 Project Manager 的 JÜRGEN JENAL 負責介紹，引領我們參觀電廠及介紹汽機改造過程與成果。

Ensdorf 電廠建有兩部機組，製造廠家為 MAN，均屬反動式機組，總發電量 430MW，其中一部機發電量 120 MW，安裝於 1963 年、另一部機發電量 310MW，安裝於 1971 年，由裝機年代看來已超過 30 甚至 40 年，十年前員工 350 人，但因精簡人員及多數工程外包關係，現在只剩 105 人，該廠運轉輪值狀況與本公司接近，四班三輪，但上班時段為日班由早上 6 點至下午 2 點、午班自下午 2 點至晚上 10 點、夜班則由晚上 10 點至早上 6 點。這次改造活動只針對低壓段，利用機組大修期間 40 天趕工進行，前置時間有 14 個月，分兩班制實施，每班工作 10 小時，據說前部機改造成果令人滿意，才會繼續第二部機的改善，也都委託 ALSTOM 進行。下圖為 Ensdorf 電廠外觀與汽機房照片：



(四) 配件生產工廠介紹

1. 英國 Rugby

ALSTOM 設在英國 Rugby 鎮上有一座 Workshop 及 Office，主要設計及生產衝動式 (Impulse) 汽渦輪機組，其廠房外觀照片如下頁所示，參訪此部門時 Steam Turbine Retrofit 銷售經理 Angus Grahamslaw 負責接待，並由同單位的 Alan Holmes 及 Tim Warr 與 Steam Turbine Retrofit

Engineering 的 Simon Glover、T G Shurrock 及 Dr Simon I.Hogg 作簡報，此外還由廠長 Steve Hill 帶領參觀生產工廠與設備，該廠年銷售額四千萬歐元，員工 212 人，服務內容有葉片修補、外觀恢復及汽機修改等工廠設備如下：



- (1) 焊接設備
- (2) 大型車床
- (3) 100 噸吊車
- (4) 轉子噴砂設備
- (5) 高速動平衡設備
- (6) 非破壞檢測設備
- (7) 30 噸&90 噸低速動平衡設備
- (8) 90 噸可移動式低速動平衡設備
- (9) 上圖為其工廠生產設備



其中高速動平衡設備，實際作業照片如左、規範如下：

- (1) 最高轉速
13,500rpm
- (2) 荷重 168 噸
- (3) 可容納 8m 直徑與 10m 長轉子



2. 德國 Mannheim (曼哈姆) Office 及 Bexbach Plant

ALSTOM 在離法蘭克福 (Frankfurt) 約 40 分鐘高速鐵路車程的曼哈姆 (Mannheim) 有 Office 及 Plant，初訪

曼哈姆時由 Steam Turbine Retrofit 部門的 Unit General Manager Karl Friedrich Schröder 負責接待，其間安排相關部門人員如 Dr. Rolf Hestermann 與 Michael Bertsch 做簡報；此外並由另一名年輕人 Proposal Manager Matthias Jochem 帶領驅車前往靠近曼哈姆一座名叫 Bexbach 的葉片工廠，車行約一小時，以下兩張照片左側為位於曼哈姆的廠區、右側為位於 Bexbach 的 Plant。



在 Bexbach Plant 生產線上 ALSTOM 有設計與製造反動式葉片最新的設備，參觀時由廠內 Head of Department Order Management 的 Alexandra Stöckle 全程陪同，除簡介該廠大略情況外也逐一介紹各種生產設備，此廠成立於 1971 年，廠房面積 9,000 平方公尺，員工人數 227 人（含 14 名見習生），2001 年資本額二千萬歐元，2003 年擴增為五千三百萬歐元，主要製造高品質的葉片，包括壓縮機葉片、蒸汽輪機葉片及燃氣輪機葉片等，以上產品不論在技術上與製造上均為 ALSTOM 的領導者，下圖為其廠房生產線照片：



該廠葉片設計與生產均已電腦化，經由設計專用軟體針對葉片的物理特性如幾何形狀、應力分析…等等得到最佳尺寸與形狀的葉形，此即高級的電腦輔助設計（CAD）；而這最佳設計可直接由設計人員下達指令給現場生產機器，驅動其對原料或半成品加工，這些機器全為電腦數值控制（CNC），這個電腦驅動過程即電腦輔助製造（CAM），連工件粗胚的幾何量測亦為自動執行。綜觀其生產型態可以說是 CAD 與 CAM 的最好註解，現場加工機器根本不需操作人員，幾乎是全自動生產，工件取送透過機械人（Robot）轉換，工作人員在製程中只負責監視加工機器的工作情況有無特殊狀況？另外就是整批鍛件原料及成品運送，也因此整體廠房看起來十分乾淨簡潔。

3. 瑞士 Baden（巴登）的 Office 及 Birr 的 Factory



Baden Office



Birr Rotor Factory

ALSTOM 在瑞士 Baden 火車站附近有一處集中辦公室，座落幾棟大型的建築物，造型十分現代，其間夾雜一間早年建築，據說已有幾百年歷史，上圖左側照片為其一隅，由照片中可以看出新舊雜陳但不失規律的建築排列，而生產汽機相關配件部門辦公大樓僅占其中一棟不算太新的大樓，造訪此地時由 Global Sales Retrofit General Manager Tobias Mettler 負責接待並簡報發電公司進行汽機改造利弊得失的各種商業行為衡量，Mettler 先生為 ALSTOM 汽機改造銷售部門的全球負責人，此外還

指示相關部門 Manager Engineering 的 Walter Lobmueller 介紹汽機從事改造的技術性問題，也安排研發部門主管 Project Leader Brendon Scarlin 為我介紹汽機設計過程，他服務於 Steam Turbine Development Department，非常專業，講解十分詳細；在拜訪 Baden 的 Office 後與 Mettler 先生共同駕車前往約二十分鐘外的 Birr 轉子生產工廠，下圖右側為其廠房外觀照片，這是一座對 ALSTOM 汽機部門來說相當重要且引以為傲的先進製造工廠，世界各國電力公司只要到歐洲訪問 ALSTOM 皆會被安排參觀此廠，我們造訪當天便有一團來自中國的訪問團同時在參觀，據悉本公司核能發電部門亦不乏相關業務人員被介紹此地，當天由該廠 Rotor Manufacturing 的 Sales and Order Manager Robert Lauer 帶領參觀，此廠之所以值得 ALSTOM 推薦主要是這裡專門製造焊接式轉子，不同於其他工廠使用 Monoblock 轉子，故需要更多的焊接與熱處理設備，還有超音波檢驗設備，廠內整齊清潔沒噪音，除了生產汽機轉子以外，這裡也負責生產發電機轉子。

（五）汽輪機改造建議

1. 汽機通路設計觀點（改造最佳範圍）

- （1）由熱力需求決定
- （2）額外機械限制
- （3）維修問題
- （4）成本加排程

2. 汽機 Retrofit 的意義：

- （1）更換整個輪機汽缸（包括高、中、低壓段）蒸汽通路主要目的在於增進輪機效率。
- （2）變更輪機硬體以增加熱效率。
- （3）以科技藝術角度更換既有汽輪機配件。

3. 汽機改造的商業觀點：

- （1）重視電力產出經濟性（不規則市場）
 - ◆增加效率
 - ◆增加動力輸出

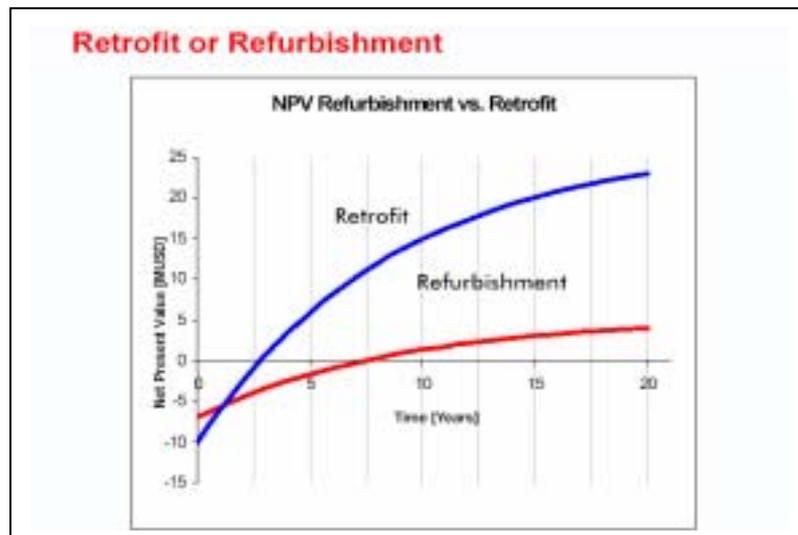
- ◆最佳可用性及可靠性
- ◆增加運轉彈性
- ◆最低維修需求
- ◆典型改造範圍包括高、中、低壓段模組
- ◆特殊更換內容如刷式汽封運用及增加級數

(2) 只重視電力產出（老舊電廠）

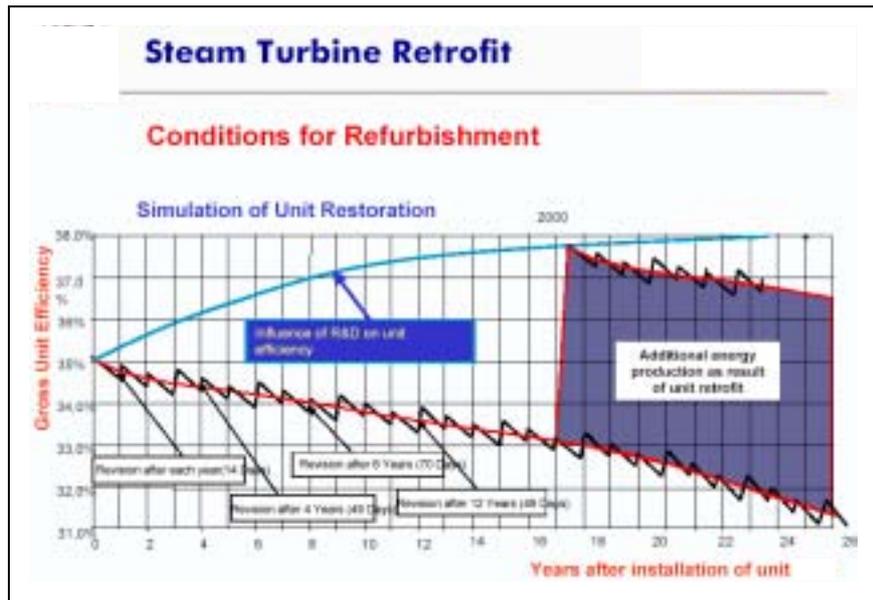
- ◆電力產出能力
- ◆排除一般性問題
- ◆加強可靠性
- ◆延長大修間隔
- ◆改造範圍包括低壓段模組及高壓段內缸與各主蒸汽閥
- ◆特殊內容如改變噴嘴設計及氮化物改善

4. 汽機改造與翻修經濟性比較

以下圖為例，汽機改造所費較多，故在初始階段淨現值（NPV—Net Present Value）的呈現上較汽機翻修來得低，但經過若干年運轉後其 NPV 會逐漸上升，超越翻修甚多。



此外若以機組效率而言，下頁上圖則說明了汽機在運轉一段期間之後（譬如 16 年）進行改造可以獲得較逐年或每兩年將舊機件翻修後回裝使用更高的效能，原因是原機組自裝機後到做改造的若干年中汽機配件的研究與發展已有長足的進步，雖說改造之後效率仍會逐步下降，但依舊可增加如圖中深色部份面積的效率。



5. ALSTOM 汽輪機改造經驗：

從 1996 年開始在北美汽機改造市場進行對非原廠機組的改造行動，共有 85 部機洽購，分屬於 22 家電力公司，其中超過 55 部汽機完成換裝，許多家公司還重複訂購或推薦友廠選用。

6. ALSTOM 在汽輪機改造上的成功因素：

- (1) 持續不斷的發展先進衝動式與反動式葉片科技。
- (2) 應用已經設計外表證實的先進葉形，如葉根固定及葉尖環片等。
- (3) 創新的蒸汽通路排列設計以配合既有機組的框架。
- (4) 實用的設計專業技術以確定能順利安裝並確保運轉安全。

7. ALSTOM 汽機改造時程表：

- (1) 投標過程與評估約 3~6 個月。
- (2) 設計與製造約 12~15 個月。
- (3) 現場安裝約 28~35 天。
- (4) 非原廠機組須在合約開始時先行赴現場測量。

8. 汽機改造的誘因：

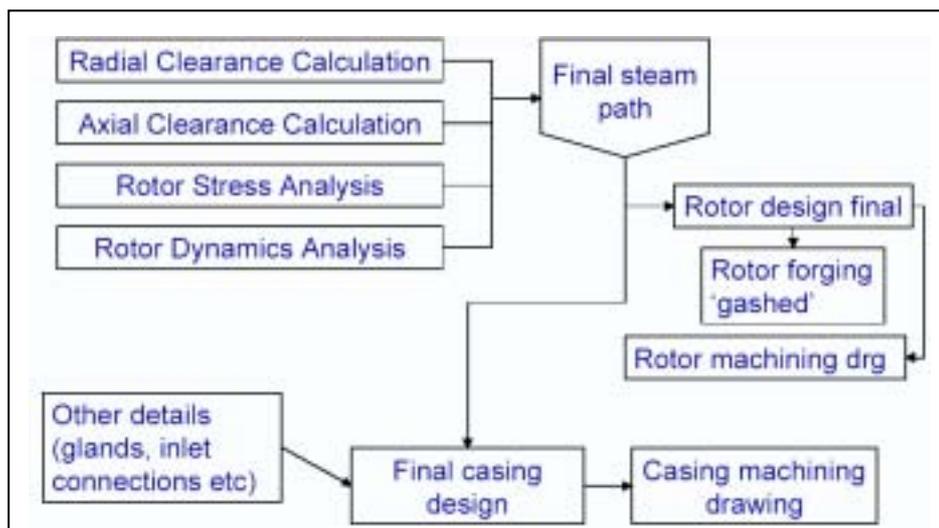
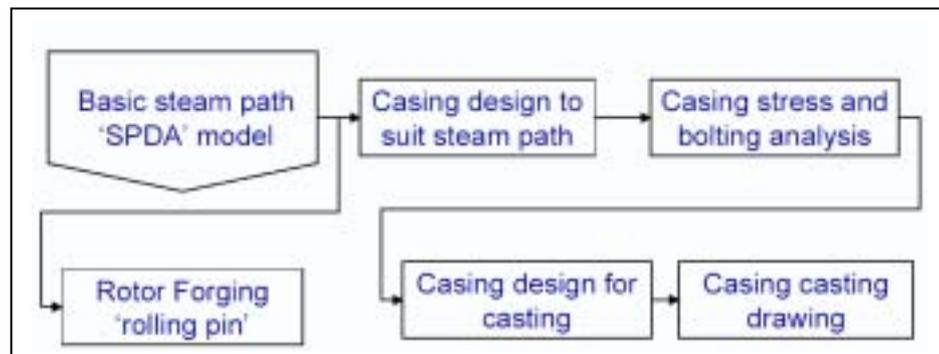
- (1) 增加汽機段效率，且於相同電力輸出下可節省燃料。
- (2) 自既有熱能輸入下可因環境保護設備需求電力的下降而提供額外的電力輸出容量。

- (3) 可以延長檢測或大修間隔期。
- (4) 減少運轉及維護成本。
- (5) 增加機組可用性及可靠性。
- (6) 增進部份負載效率與快速銜接負載能力。
- (7) 減少污染物排放。
- (8) 排除機械性問題。

9. 汽機經過改造的利益與追蹤紀錄：

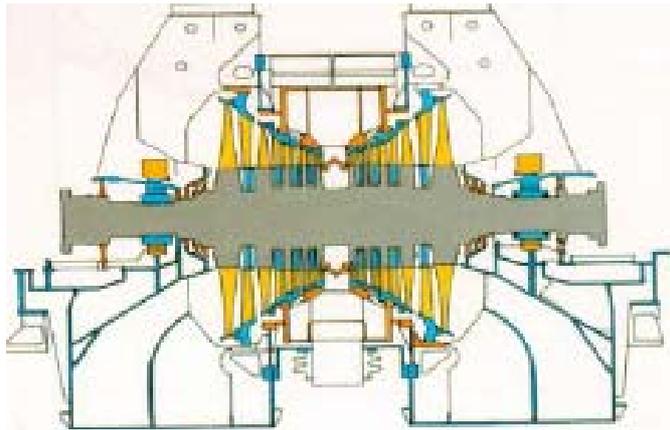
- (1) 本質上可增加並維持 2~8% 效率
- (2) 縮短改造的前置時間於 11~16 個月之間
- (3) 現場安裝期間可配合機組大修於 3 至 5 週內完成
- (4) 大修間隔期可超過 8 年
- (5) 機組可用率幾近 100%
- (6) 企業高度滿意並跟進使用
- (7) 改造後優良的投資報酬率，損益平衡點小於 3 年

10. 汽機改造設計基本步驟如下二簡示圖：



11. 汽機改造內容：

- (1) 汽缸內部 (下圖上)
- (2) 部份汽機改造 (下圖中)
- (3) 整個汽機更新 (下圖下)



四、無軸孔汽機轉子 (Non-Center Bored Rotor) 近期發展

(一) 汽機轉子中心鑽孔的理念：

1. 1990 年代以前

1960 年代以來轉子中心鑽孔的理由：

- (1) 當鍛件增加尺寸限制時製鋼過程須移除氫氣
- (2) 超音波檢驗 (UT) 尚未成熟，無法可靠地偵測出大型轉子中心的瑕疵
- (3) 大型鍛件中心的拉力與破壞韌性特質需被確定，一併測試鑽孔機
- (4) 必須除去非集中性的氣孔及因鍛造過程限制所產生的集縮瑕疵
- (5) 鑄錠有不良的分凝特性

1970 至 1980 年間製鋼、鑄錠設計、鍛造製程、熱處理及非破壞性檢查 (NDE) 發展有長足的進步，直到 1980 年代末期前述的關鍵技術都可滿足。

2. 1990 年代以後

- (1) 1990 年代早期經過多年製造有中心孔轉子的經驗決定放棄於大型鍛件中心強制鑽孔的要求
- (2) 現今鍛件只在不被接受的瑕疵或應設計限制要求
- (3) 無中心軸孔具有許多機械破裂評估的好處

(二) 轉子破裂分析：

1. 初始缺陷的疲勞裂縫成長

- (1) 原始缺陷在超音波檢測標準允收上限狀況下是假設存在的。
- (2) 實際缺陷假設是超音波檢測缺陷等效 FBH 大小的兩倍。
- (3) 缺陷假設存在於大部份高應力區。
- (4) 假設於轉子壽命中最大可能運轉起停次數因反覆應力 ($\Delta\sigma$) 引起疲勞造成缺陷成長。
- (5) 疲勞裂縫成長評估假設疲勞上限裂縫成長關係，疲勞裂縫成長/週期 = $C\Delta K^3$

ΔK 為裂縫應力強度的週期界限 $\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{r}$ 。

- (6) 轉子運轉壽命結束時裂縫尺寸 (r_f) 上限即可算出。

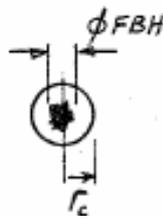
2. 脆性破裂的臨界裂縫深度

- (1) 假設轉子材料 FATT 是規範的最大允許值，材料破裂韌性在任何溫度下的 FATT 最小允許質。
- (2) 確認在結合低轉子溫度下低韌性及高應力造成最小的臨界缺陷尺寸等較差的運轉條件，例如快速冷啟動並做超速試驗。
- (3) 臨界裂縫深度即可算得 $r_{crit} = (K_{ic} / F \sigma_{max})^2$ 。
- (4) 避免轉子在運轉壽命期間發生脆性破裂的風險， r_f 必須小於 r_{crit} 。

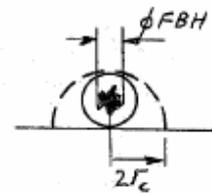
3. 有軸孔與無軸孔轉子破裂評估：

下圖左側為無軸孔轉子原始缺陷尺寸，右側為有軸孔轉子原始缺陷尺寸。

Unbored Rotor Centreline



Bore



其應力為 $\sigma = \sigma_c$

$\sigma = 2\sigma_c$

應力強度 $K = F \sigma \sqrt{r}$

$K = 1.13 \sigma_c \sqrt{r_c}$

$K = 1.26 \times 2 \sigma_c \sqrt{r_c}$

$= 3.56 \sigma_c \sqrt{r_c}$

裂縫成長速率 疲勞裂縫成長/週期 = $C \Delta K^3$

$C 1.44 \sigma_c^3 r_c^{3/2}$

$C 45.1 \sigma_c^3 r_c^{3/2}$

臨界破裂尺寸 $r_{crit} = (K_{ic} / F \sigma_{max})^2$

$r_{crit} = (K_{ic} / 1.13 \sigma_{max})^2$

$r_{crit} = (K_{ic} / 1.26 \times 2 \sigma_{max})^2$

$= (K_{ic} / 2.52 \sigma_{max})^2$

4. 下表為有軸孔及無軸孔轉子低壓段末級葉片各種應力水準及相關裂縫尺寸比較範例，由表中可以得知無軸孔轉子所受的離心應力及冷機、溫機啟動熱應力均為有軸孔轉子之半，故可接受較大的 FBH 等效直徑及初始瑕疵半徑，若為冷機啟動且做超速測試則在熱應力與總應力上依舊是有

軸孔轉子之半，因此能容忍的最小臨界裂縫半徑為其 5 倍左右。

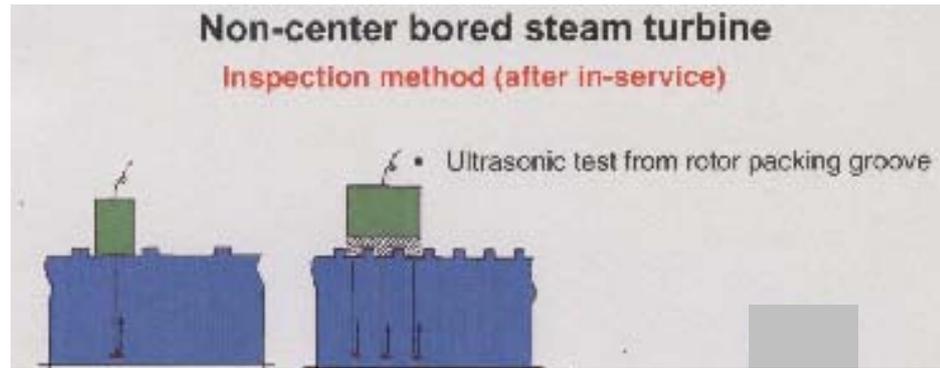
| | 有軸孔轉子 | 無軸孔轉子 |
|-------------------------------|----------|-------|
| 離心應力 (MPa) | 500 | 250 |
| 冷機啟動最大熱應力 (MPa) | 50 | 25 |
| 溫機啟動最大熱應力 (MPa) | 12 | 6 |
| 熱機啟動最大熱應力 (MPa) | 0 | 0 |
| FBH 等效直徑 (mm) | 2.0 | 6.0 |
| 初始瑕疵半徑 (mm) | 4.0 | 6.0 |
| 疲勞延伸瑕疵半徑 (mm) | 9.4 | 6.5 |
| 運轉中的臨界狀態 | 冷機啟動超速測試 | |
| 溫度 | 35 | 35 |
| 破裂韌性 (Mpa mm ^{1/2}) | 110 | 110 |
| 熱應力 (MPa) | 20 | 10 |
| 總應力 (MPa) | 720 | 360 |
| 最小臨界裂縫半徑 (mm) | 14.7 | 73.3 |

(三) 無軸孔轉子 (Non-Center Bored Rotor) 檢驗方法：

將感應探頭貼在轉子 (被測物) 表面，有時須要使用配合不同表面形狀的感應器，利用超音波探測 (UT - Ultrasonic Test)，在東芝超音波檢驗可以一台手提電腦同時監視 6 組探測器，易於機組現場安裝，機動性高。其動作原理乃利用超音波遇到被測物體內有瑕疵時會中斷並反射以得知裂紋或瑕疵位置與大小，早期發現問題才能在轉子發生斷裂前決定留用或更換以確保汽機運轉安全。其檢驗原理示意圖與器材實際相片如下頁上二圖所示：

(四) 無軸孔轉子益處

1. 給予固定尺寸瑕疵將伴隨較低的應力
2. 較低的應力集中因素
3. 較低的裂縫成長速率
4. 關鍵裂縫尺寸較小，因此可容許較大的初始缺陷



超音波探測儀器使用



超音波探測感應器

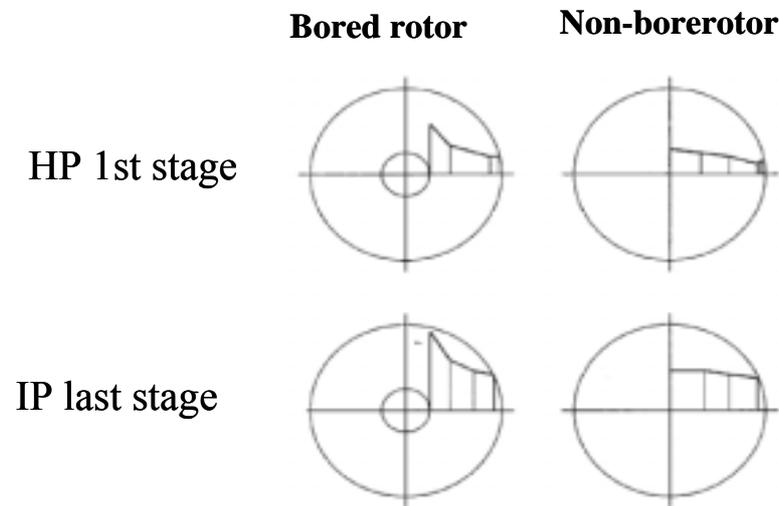
(五) 關於無軸孔轉子結論

現今使用之無軸孔汽機轉子於服役期間無需進行非破壞檢驗 (NDE – Non Defect Examination)，若要做此類測試只用超音波探測 UT，基本上目前由鍛造廠 (Forging Master) 製造的轉子已無軸孔，且在廠內已完成超音波檢驗，故出廠後不必再做檢驗，若於製程中配合汽機生產廠商檢測發現轉子內部有瑕疵，則在徵得雙方同意下於軸心鑽孔變成有軸孔轉子，其比例很小，約 0.49%，608 支轉子僅 3 支須鑽孔，鑽孔目的在去除內部雜質，但其所受應力將高出無軸孔轉子約一倍左右，相關應力比例圖示如下頁圖示，據東芝所述一支無軸孔轉子運轉時數可達 120,000 小時。對於無軸孔轉子有幾項簡單結論：

1. 基於以下兩項因素今日已可供應大型汽機無軸孔轉子鍛件：

- (1) 鍛造廠製程已被證明
- (2) UT 檢驗能力的強化

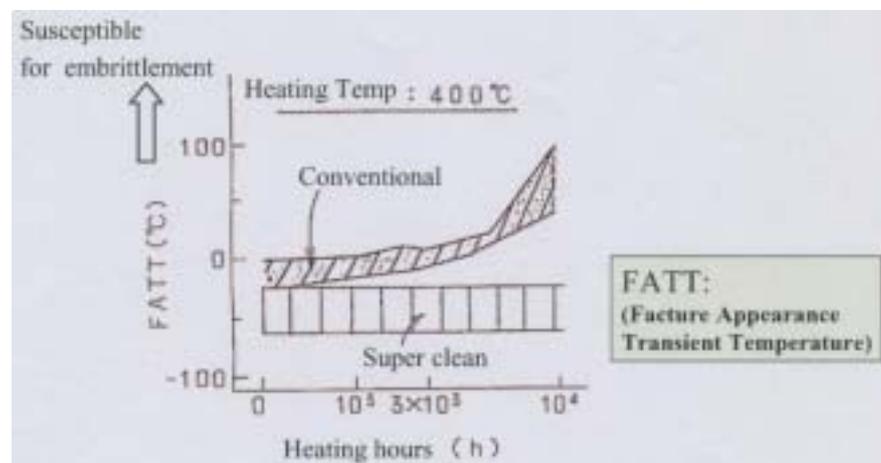
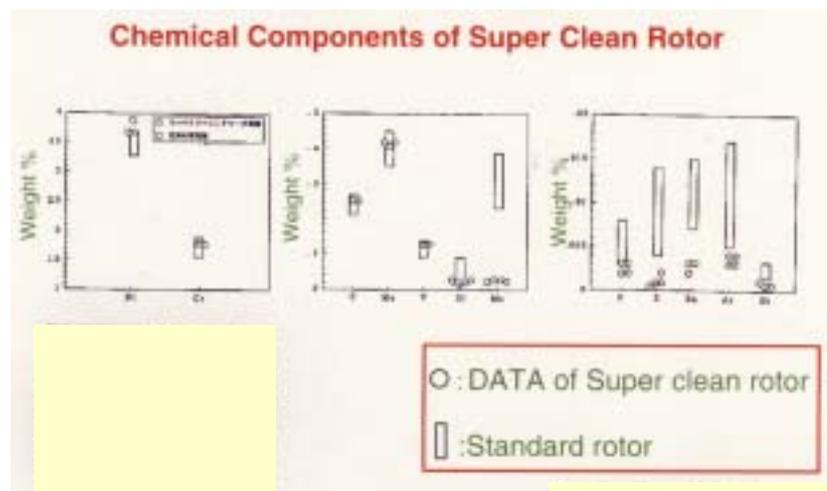
2. 一般而言由於單體鍛造的無軸孔轉子可增加運轉裕度與彈性故較受喜好。
3. 若滿足所有提供的設計標準則有軸孔轉子可被接受



五、超淨鋼轉子（Super Clean Steel Rotor）最新發展

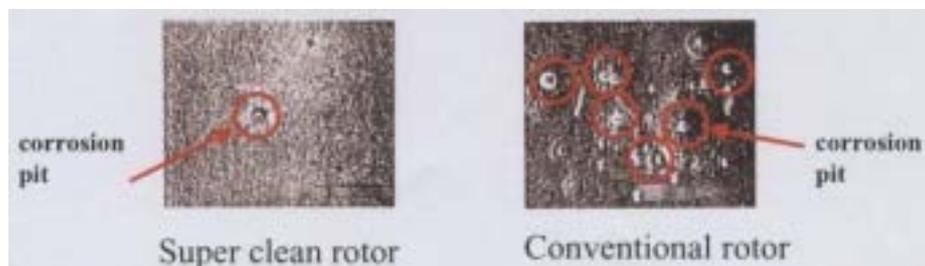
超淨鋼轉子為近期發展的新材料，主要應用於低壓段，雖說此種材質實際運用在商轉機組已有近二十年經驗，但多數為超臨界發電機組，且並非廣泛取代現有傳統材質轉子，東芝曾委託 JSW（Japan Steel Works）為其製作整支低壓段轉子，將之切成數段進行材質化驗，所得結果與標準相符，主要元素分布如下圖所示，其中 Ni、Cr、C、Mo、V 等主要元素含量均在標準值上限，至於不重要的雜質如 Si、Mn、P、S、Sn、As 及 Sb 等元素含量則在標準值下限，甚至幾近於零。故其鋼種大致稱呼為 3.5Ni-Cr-Mo-V 鋼，超淨鋼轉子有下列特性：

1. 在室溫下具高強度。
2. 超過 350°C 的高溫仍有穩定的機械性質。
3. 低壓段轉子葉片無需冷卻。



因其具備以上特性所以有以下效果：

- 1.最少有害雜質元素可以減少脆性，長期高溫運轉亦不會對脆化敏感，故蒸汽進口第一級葉片不必冷卻，可增進效率。上頁下圖為將一般轉子材料與超淨鋼材料一起加熱到 400°C，持續一段時間後發現傳統轉子材料對轉脆溫度逐漸敏感，而超淨鋼材料則相當穩定。
- 2.非金屬元素蘊含極少化可以減少腐蝕坑洞的核心，長期運轉亦不會對腐蝕敏感，故可抵抗腐蝕疲勞，即防止應力腐蝕破裂 (SCC - Stress Corrosion Cracking)，增進可靠性。下圖即為腐蝕實驗的結果：



- 3.目前東芝使用超淨鋼轉子的發電機組請參考下表：

| Reference list of super clean rotor | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|-------------|
| Unit | Steam Conditions | Output | Taking Over |
| KAWAGOE #1 | 31MPa 566/566/566°C | 700MW | 6/1989 |
| KAWAGOE #2 | 31MPa 566/566/566°C | 700MW | 6/1990 |
| HEKINAN #1 | 24.1MPa 538/566°C | 700MW | 10/1991 |
| NOSHIRO #2 | 24.1MPa 566/593°C | 600MW | 12/1994 |
| REIHOKU #1 | 24.1MPa 566/566°C | 700MW | 7/1995 |
| HARAMACHI #1 | 24.5MPa 566/593°C | 1000MW | 7/1997 |
| NANAO OOTA #2 | 24.1MPa 593/593°C | 700MW | 7/1998 |
| TACHIBANAWAN #1 | 24.1MPa 566/593°C | 700MW | 7/2000 |
| TSURUGA #2 | 24.1MPa 593/593°C | 700MW | 10/2000 |
| HEKINAN #4 | 24.1MPa 566/593°C | 1000MW | 11/2001 |
| HEKINAN #5 | 24.1MPa 566/593°C | 1000MW | 11/2002 |
| REIHOKU #2 | 24.1MPa 593/593°C | 700MW | 7/2003 |

ALSTOM 說明超淨鋼 (Super Clean 3.5NiCrMoV Steel) 發展於 1980s 年代，特性為介於 350°C 與 500°C 間強度不至降低，並曾針對此種轉子鋼材進行應力腐蝕破裂 SCC 實驗，材料主要供應商有二家，一是 VEW (Vereinigte Edelstahlwerk)；另一是 JSW，它們的產品經過一些汽機生產廠家、大學及研究機構評估

後較一般轉子材料長時間運轉下更能抵抗轉脆敏感性，且可改善延展性、韌性及潛變強度等機械性質。ALSTOM 試驗超淨鋼是否同時具有抵抗應力腐蝕破裂的能力時乃在環境上儘量模擬如汽機運轉環境之低溶氧量，且經過數千小時測試，發現應力腐蝕破裂幾乎都是由非金屬核心開始擴展，而成核過程需時 1000 至 3000 小時，若要發展成為工程尺寸的裂縫可能要 10000 到 30000 小時，產生應力腐蝕破裂的影響因素為材料強度、顯微組織、局部化學成份、環境狀態及施加的應力，當應力水準超過 900Mpa 時晶粒邊界開始破裂並增加具影響性的裂痕。實際上汽機所處環境極端複雜，無法於實驗室精確的複製，最終得到以下幾點結論：

1. 在中等應力強度時超淨鋼具有較現有鋼材更佳的抵抗應力腐蝕破裂初始發生的能力。
2. 超淨鋼於 700 至 900Mpa 區間較能抵抗應力腐蝕破裂乃因含有極低的 MnS 所致。
3. 若應力水準超過 900Mpa 則超淨鋼僅比現有鋼材稍具抵抗應力腐蝕破裂的效益。

參、研習之感想與建議

本次出差能有機會接觸近代及目前世界上幾個工業強國，參訪名列全球前三大的汽機製造廠家，真是相當榮幸，也要感謝各級長官給予出國研習的難得機會，期間每家公司均展示其最先進的設備與研發設計，尤其是位於歐洲的 ALSTOM，原本僅計畫走訪位於英國 Rugby 及德國 Mannheim 的 Office 與 Workshop，但因 ALSTOM 的主管們十分熱心，除了預定的行程外另介紹位於瑞士 Baden 的 Office 與 Birr 的 Workshop，其中英國 Rugby 專門衝擊式葉片汽機轉子的設計與生產；德國 Mannheim、瑞士 Baden 與 Birr 則是反動式系統設計與生產重鎮，瑞士更有獨步全球的焊接式轉子的生產設備，而 ALSTOM 也是現今世界上知名且較具規模廠家中生產反動式汽輪機者。

藉由本次研習行程了解三家大廠對汽機配件與整體蒸汽通路最新的設計，每家公司均不遺餘力積極地進行產品改善，尤其針對本廠目前最為需要的汽機改造更是全力以赴，因為世界上各先進國家電力發展需求已達相當水準，早年已裝置為數不少的發電設備，在電力需求沒有明顯提升下，新機組設立步調放緩，而舊機組卻逐漸老化，從而衍生出針對運轉數年甚或數十年的老機組進行改造的市場，這塊市場顯見存在龐大商機，致各家廠商均十分熱衷，投入相當多的人力物力爭食大餅，在歐美日各地已有相當多的機組完成改造，故此經驗與技術已然成熟。

本公司目前正面臨前述狀況，不論火力或核能機組均經十數年或數十年的運轉，紛紛遭遇效率下降及腐蝕沖蝕等問題，為了解決既有配件的劣化問題外更要進一步提升汽機效率，也就是本次遠赴國外出差的主要目的。因為汽機效率提升在原廠家已經過縝密的計算過程，並配合達到應有效率開發出各類先進幾何形狀與強韌材料的配件供客戶選用，故對於汽機生產廠商而言，類似本公司發電單位的角色乃是末端消費者，基於經濟性與技術水準，其提升效率之道只能選擇適合的原廠製造配件，別無他法。依此觀之，汽機效率提升之計究其根本亦僅止於維持汽機本體外殼不變下積極尋求最佳的改良方案，眼前已知興達電廠與台中電廠選用美國奇異公司的 ADSP，不但順利完成配件更新工作更達到預期效率提昇目的，有了相關經驗與信心之後將會產生強化效果繼續進行其他類似機組的改造活動。

本廠中一機今年完成 ADSP 工作，最主要是更換高中壓段轉子及

噴嘴，應用奇異公司最新型的動、靜葉片與刷式汽封防止洩漏，經過防蝕塗層的葉片可抵擋 SPE，透過新的通路設計可集中作功蒸汽，因而減少洩漏、提升效率。改造活動配合機組大修期間進行，低壓段保持原狀，高中壓段 ADSP 維持原來級數不變，由於本廠一至八號機全為奇異公司產品，因此在改造期間包括前置準備、現場安裝及完成測試均顯得順暢，而截至目前為止中一機運轉良好且新型式轉子、動葉與靜葉環噴嘴可以有比原來更長的壽命，可見既有機組實施改造並非不可行，反而值得推廣。

以這次參訪的三家公司，其從事汽機改造技術整體而言都具備一定水準，也都有實際改造經驗，因此不論是東芝、奇異或亞斯通皆有能力承接汽機改造工作。其中東芝並未給予新型改造設計特殊名稱，但仍不可忽視其能力，在配件生產方面有來自與奇異合作的設計技術，加上自行開發研究結果，在為非原廠機組更換配件上亦有不錯的替代性；亞斯通則強調適合性，針對機組運轉年齡及客戶不同的需求建議不同程度的改造，以符合經濟性為前提，但主要仍在增加配件強度，強調運轉彈性及延長壽命，大舉提升效率同時延長大修間隔期達十年以上，但須配合實施大幅度改造；至於奇異在汽輪機改造上大體分成兩部份，一是 ADSP；另一是 DENSE PACK。若只做簡單修改可選擇前者，留用原來的內外缸，抽換轉子及靜葉環，使用新型式動、靜葉片，可以恢復原有效率並延長汽機壽命；若要實質提升效率則可指定後者，DENSE PACK 除了使用新式動、靜葉片外，主要在增加轉子級數，可以減少每級葉片數量，增加葉片長度，出力比原來大上許多，但除抽換轉子及靜葉環外因級數增加既有內缸無法留用，僅能保留外缸，算是較大規模的改造，同樣的不只是效率提升，大修間隔期同樣可延長至十年以上。

以本次訪問行程參觀各廠家生產設備配合所收集資料加以分析可簡結如下表：

| 廠家名 | 優勢 | 配件生產 | 生產方式 | 非原廠機組改造能力 |
|-----|--------|--------------|--------|-----------|
| 東芝 | 擅長配件製造 | 與奇異合作 | 半自動化 | 可 |
| 奇異 | 研發能力強 | 國內設計 海外製造 | 運用他國資源 | 可 |

| | | | | |
|-----|----------|--------------|------|---|
| 亞斯通 | 研發與製造皆專精 | 自行設計 自行製造 | 全自動化 | 可 |
|-----|----------|--------------|------|---|

基於前述內容，本公司所屬各電廠發電機組可依各別條件如汽機廠牌、生產年代、發電量、運轉年齡、調度需求及目前或將來可能發生的問題…等等來決定改造內容，當然除了可行性外另一項重要因素就是財務或投資分析，因為汽機改造工程需求大量資金，決定以前必要分析財務狀況或計算投資報酬率，更細部者如運轉彈性與可靠性、日常及大修維護人力之成本、又如將來大修更換配件及配件庫存成本等均要詳加考慮，取得最佳平衡點，才能創造台電公司最大利益。