

壹、目的：

本公司核二廠一號機低壓汽機轉子，原為傳統式「套縮型」(Shrunk-on type) 轉子，此型轉子長年遭受「應力腐蝕龜裂」(Stress Corrosion Cracking, 簡稱 SCC) 問題困擾；為有效消弭此問題，本公司前已採購兩支具有抗 SCC 能力之新型低壓汽機轉子，也已於 95 年 #1EOC-18 配合機組大修進行低壓汽機轉子更新完成並經性能試驗 (Performance Test) 後，正式商業運轉。本次訓練及實習為與製造廠家學習和了解新型低壓汽機轉子設計觀念，相信對於組件維護技術的可靠度精進以及汽機熱工性能效率的充分利用有直接裨益。

貳、過程：

實習行程含往、返程共計 15 天，行程如下：

96.12.13~96.12.14 往程

96.12.15~96.12.25 新型低壓汽機轉子及組件維護可靠度精進與熱工性能提升技術
實習

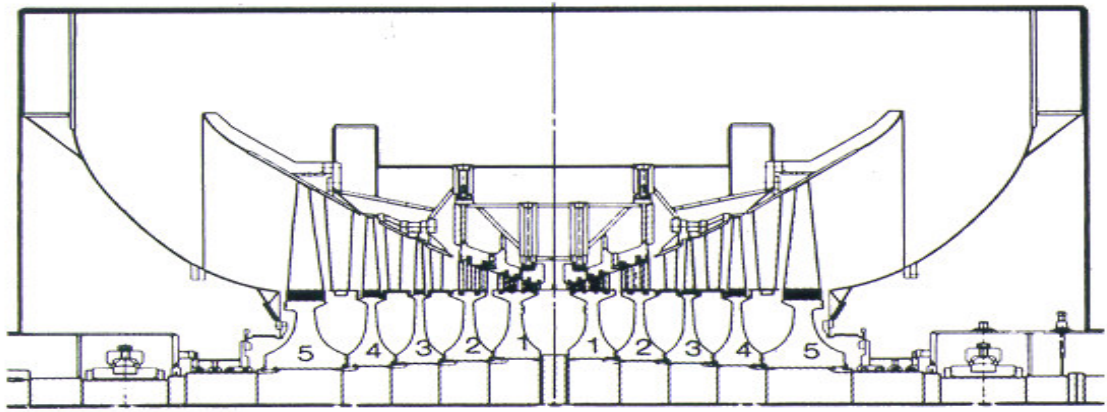
96.12.26~96.12.27 返程

此次行程由西門子亞太區客戶服務經理 Mr. Markus Spatz 及工程師 Mr. Patrick Kettschau 安排在製造廠實習轉子現場製造流程以及學習新型低壓汽機轉子設計觀念。實習內容，分述如下：

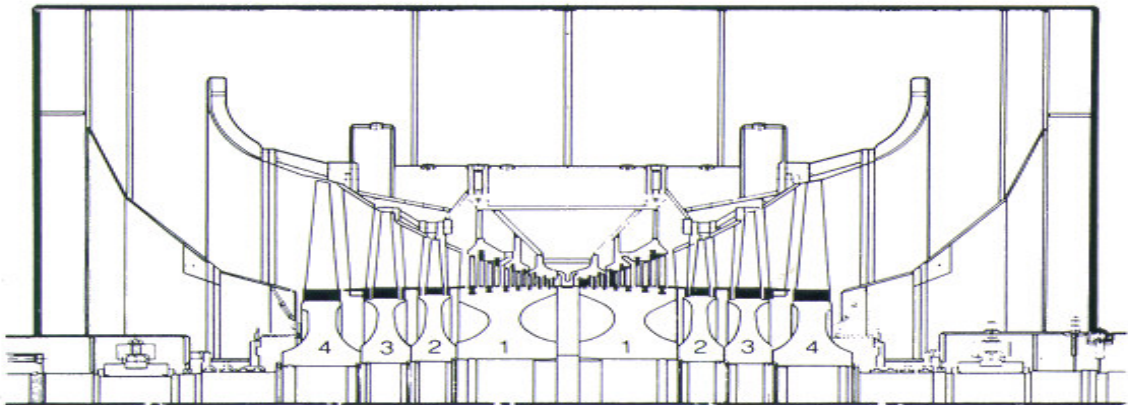
一、抗應力腐蝕龜裂 (SCC) 設計：

新型低壓汽機轉子係採用西門子 1995 年研發之 6 只 Disc 轉軸設計，左右兩邊各三只 Disc，兩邊各前二只，因其整體所承受應力較低，僅僅採用熱套縮方式固定，並無鍵及鍵槽的設計。兩邊各最末只 Disc 即採用進步型之鍵及鍵槽的設計。輪盤設計演變歷史如圖一所示。

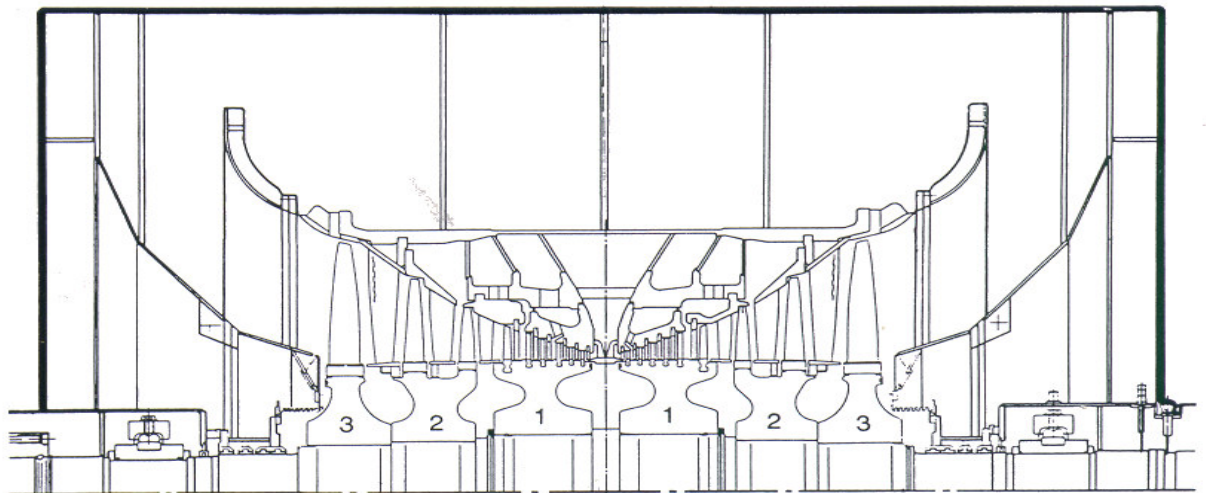
輪盤設計演變歷史



10-Disc Rotor - 1968



8-Disc Rotor - 1987

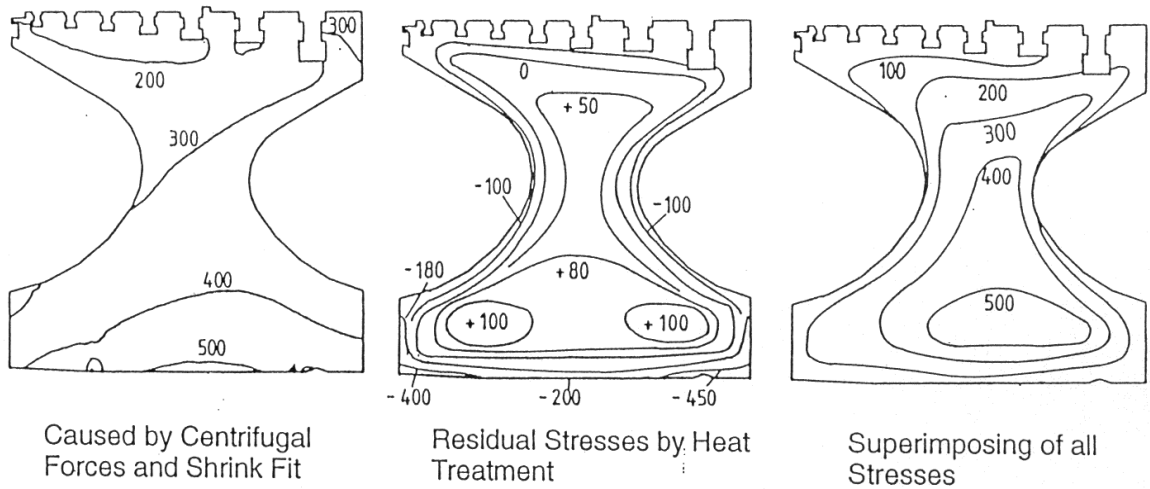
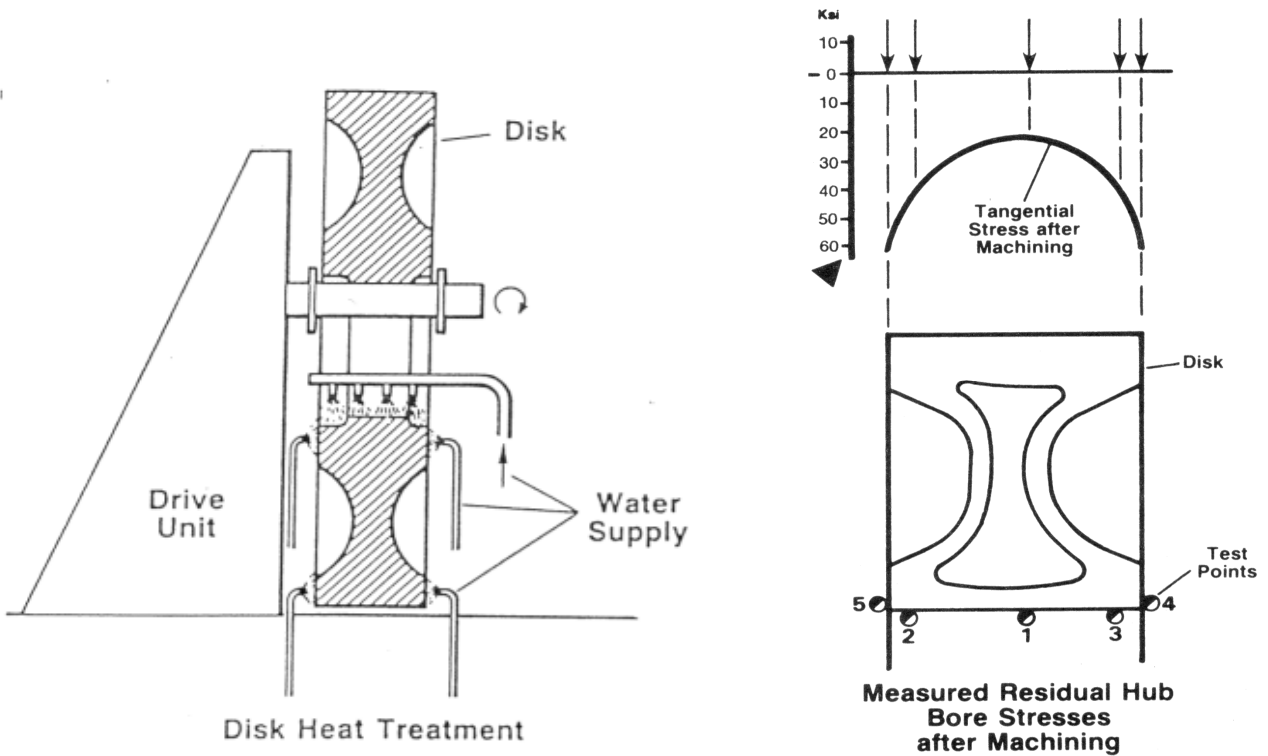


6-Disc Rotor - Since 1995

圖一

每只輪盤（Disc）皆採用特殊熱處理及珠擊（Shot-Peening）方式，來增加其表面壓應力。輪盤熱處理過程如圖二所示。

輪盤熱處理



圖二

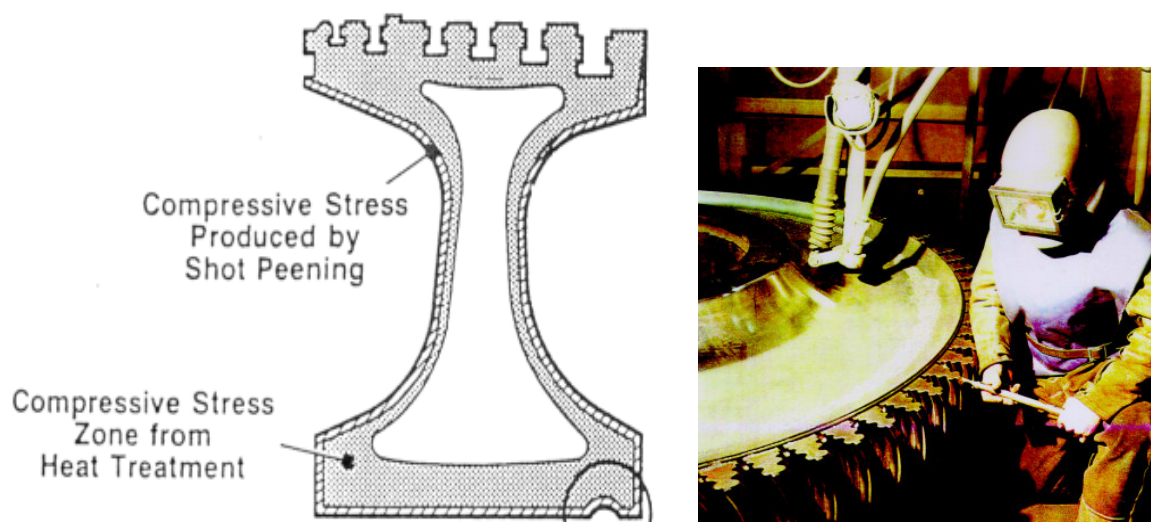
輪盤珠擊及軋軋

Disc #1: 在輪盤側表面上和葉片凹槽區域及進入狹槽處珠擊。

Disc #2: 在輪盤側表面上和填嵌塊凹槽處珠擊。

Disc #3: 無額外的珠擊，但須軋軋葉片凹槽。

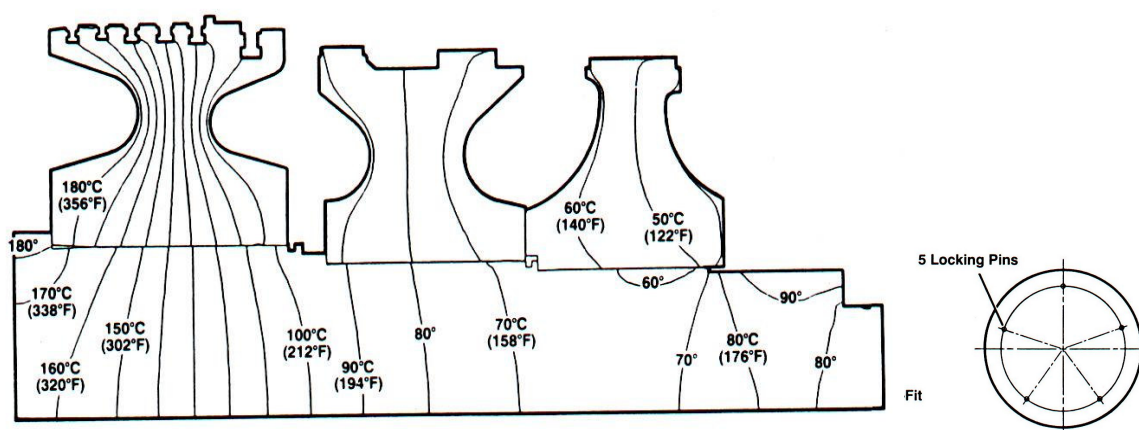
輪盤珠擊、軋軛如圖三所示。



圖三

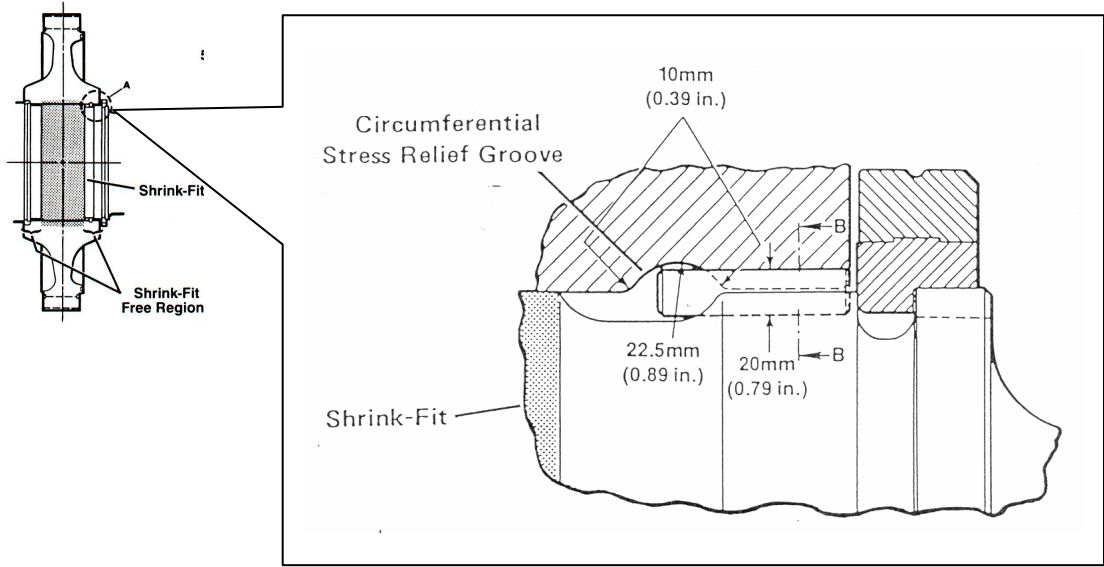
特殊鍵及鍵槽的設計：

- (1) 鍵及鍵槽置於輪盤之蒸汽下游 (Down Stream) 設計分佈在等溫線上，避免溫度梯度過大，如圖四所示。

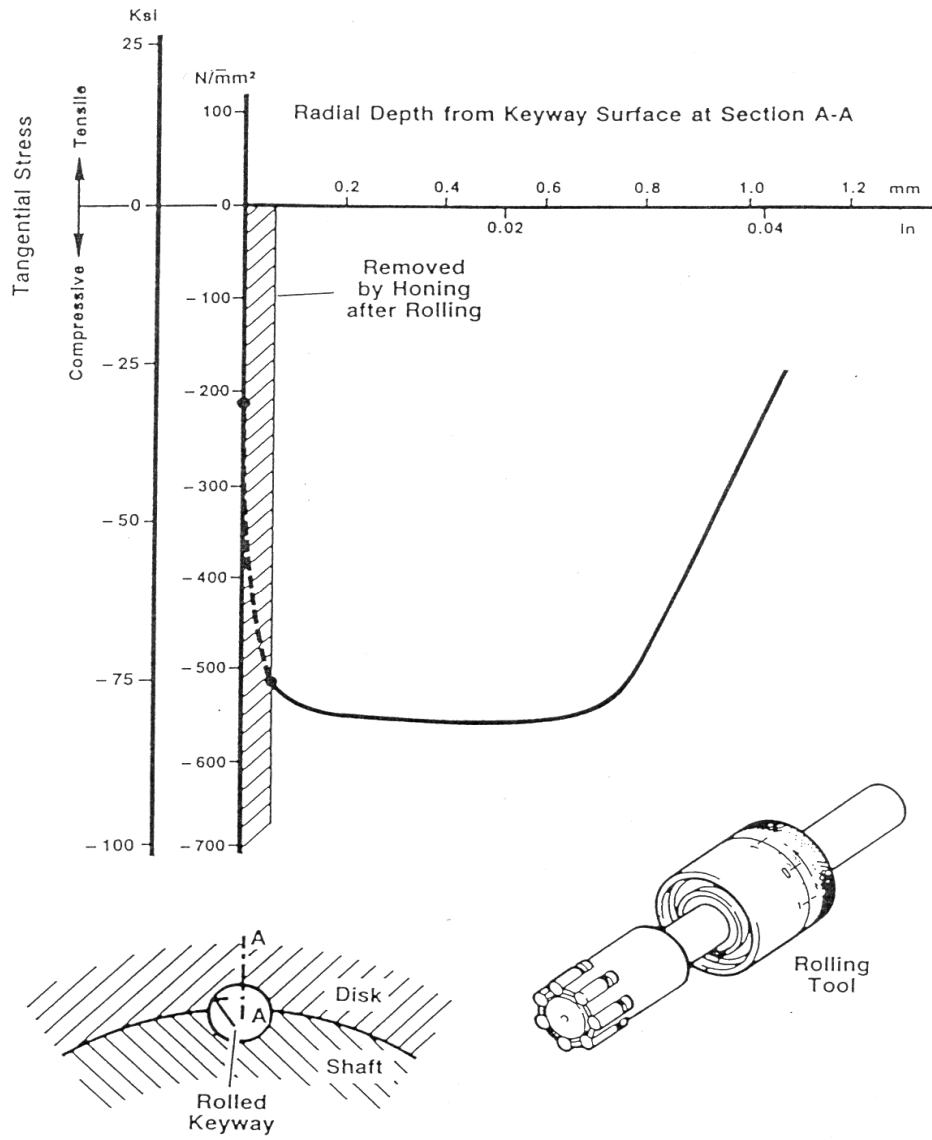


圖四 Isothermal Lines of Six-Disc LP Rotor

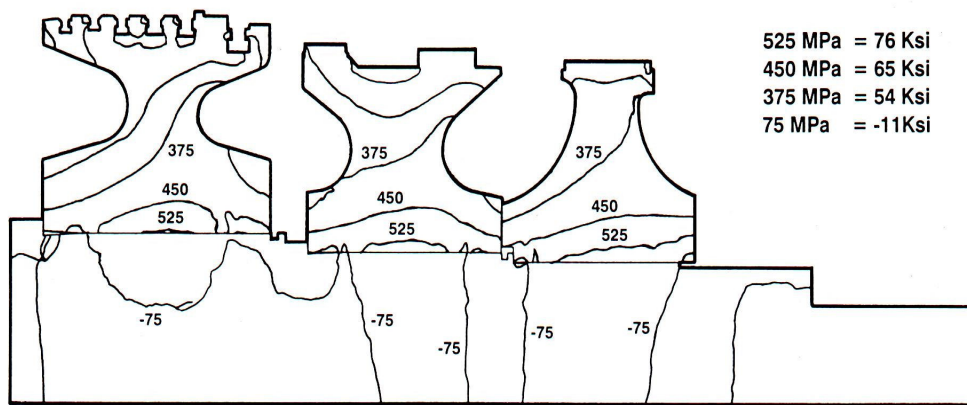
- (2) 輪盤熱套縮面積僅 60%，鍵及鍵槽區域不處在熱套縮範圍內，可避免高應力存在鍵及鍵槽區域。
- (3) 鍵槽為採用 Open Design，避免傳統 Close Design 因雜質 (Impurity) 所造成的腐蝕，此設計可以讓潛存之水汽 (Moisture) 或雜質不易累積，如圖五所示。
- (4) 鍵槽使用軋軛方式來增加表面壓應力，避免 SCC 之形成，如圖六所示；當額定轉數時，應力分佈如圖七所示。
- (5) 鍵槽為採用大型圓周式開槽，以降低加工應力。
- (6) 並軋軛轉子轉軸軸頸及鈍邊，如圖八所示。



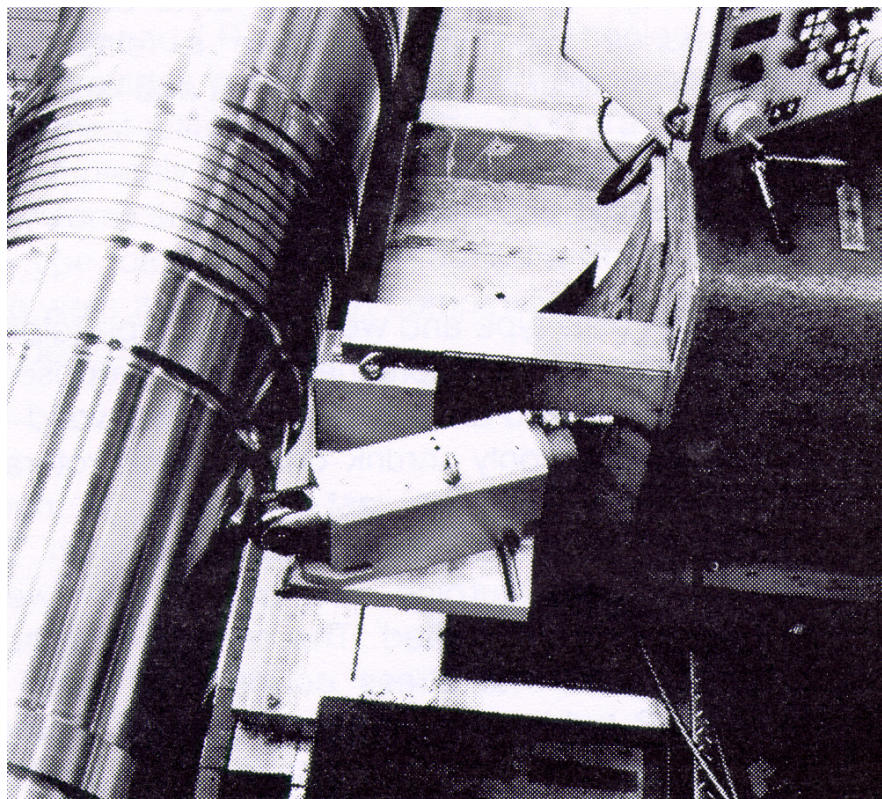
圖五



圖六 Keyway Rolling Process



圖七 Tangential Stresses at Rated Speed



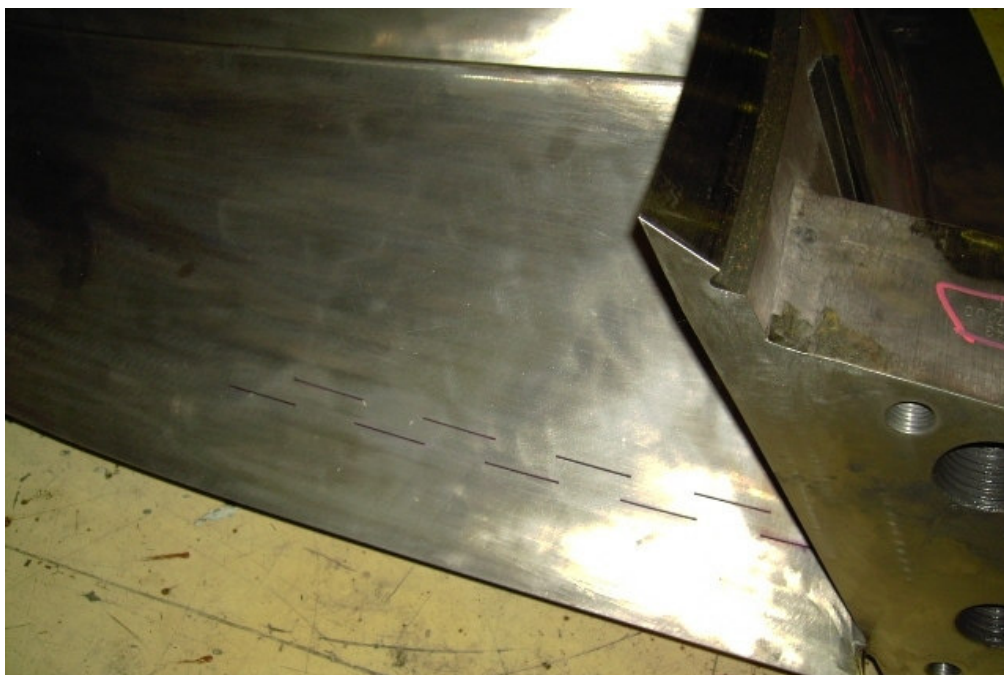
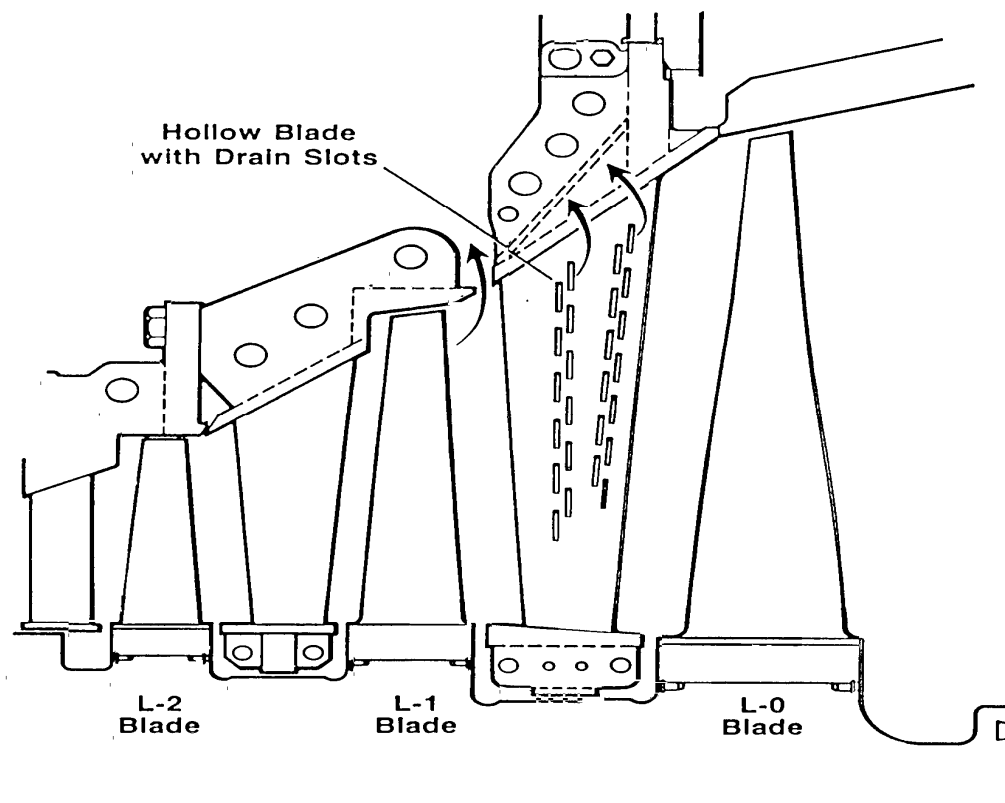
圖八

二、抗沖腐蝕特性（Erosion–Corrosion Resistant Features）：

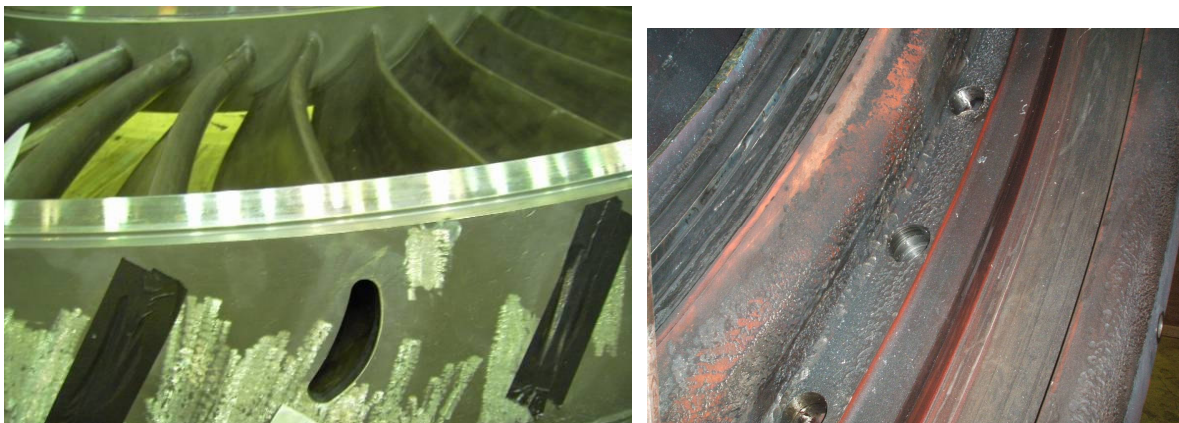
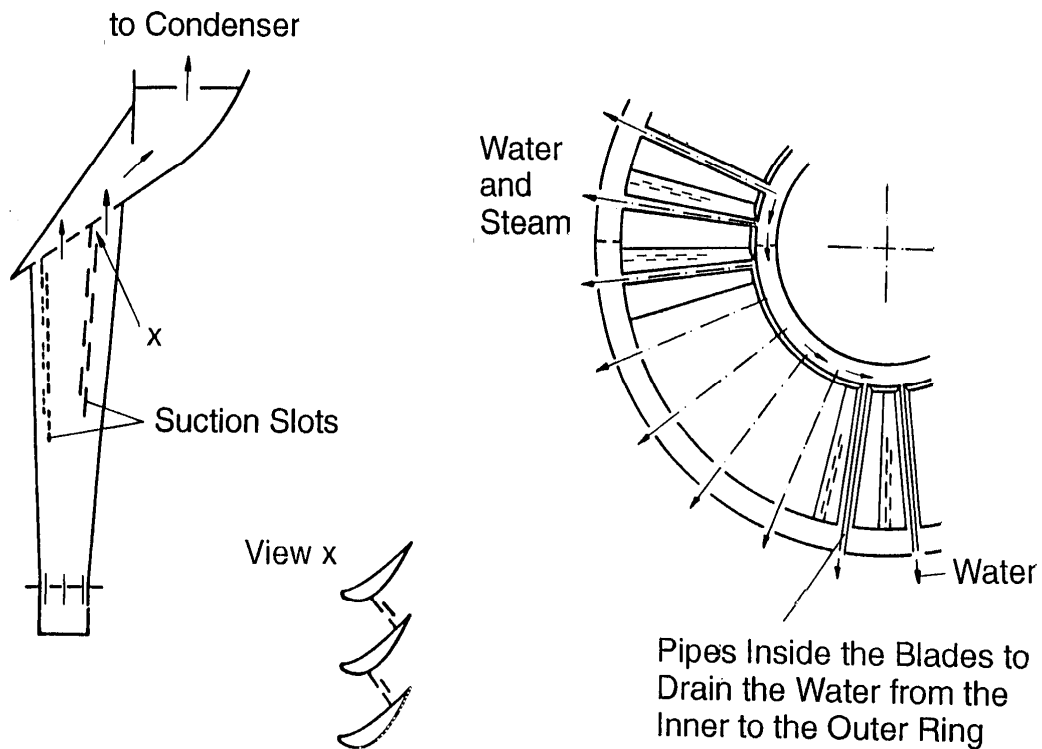
新型低壓汽機轉子對於沖腐蝕問題，設計上有以下幾種改善：

1. 採用抗沖腐蝕之材料。
2. 採用防沖腐蝕之塗層(非鎢鉻鈷合金或含鈷材料)。
3. 熱處理（末級葉片火焰硬化處理）。
4. 末級中空靜葉片開設洩水，如圖九所示。

5. 汽機內缸增設洩水槽，如圖十所示（Moisture Removal Slots）。
6. 蒸汽流經相關組件採用含鉻（Cr）材料以抗沖腐蝕。



圖九



圖十 L-0 Moisture Removal

三、提升 汽機熱工性能效率 之設計

汽機熱工性能 效率損耗主要來源：

1. 做功蒸氣流經動、靜葉片幾何形狀所形成之擾流損耗（含輪廓損耗及二次流損耗）。
2. 做功蒸氣經葉片根部及頂部間隙洩漏造成之損耗。
3. 做功蒸氣經轉軸軸封間隙洩漏造成之損耗。
4. 轉軸旋轉所形成風阻造成之損耗。
5. 蒸氣排放入主冷凝器之損耗。

為提升汽機熱工性能 效率，新型低壓汽機轉子針對效率損耗主要來源有下列各項改善。

(一) 動、靜葉片改善：

1. 採用 TX 型式的翼型：

為減少蒸汽流經葉片各部而產生的擾流，以電腦模擬蒸汽流經低壓汽機葉片之 3D 流場數學模型，研發出 TX 型式之翼型，如圖十一所示，此翼型具下列特點：

- (1) 具有較低的輪廓損耗 (Profile Loss)。
- (2) 葉片表面加工精度要求較高。
- (3) 具有最佳化葉片前緣 (Leading Edge Optimization)。
- (4) 具有最佳化葉片後緣 (Thin Trailing Edge Optimization)。
- (5) 具有最佳化截面積。

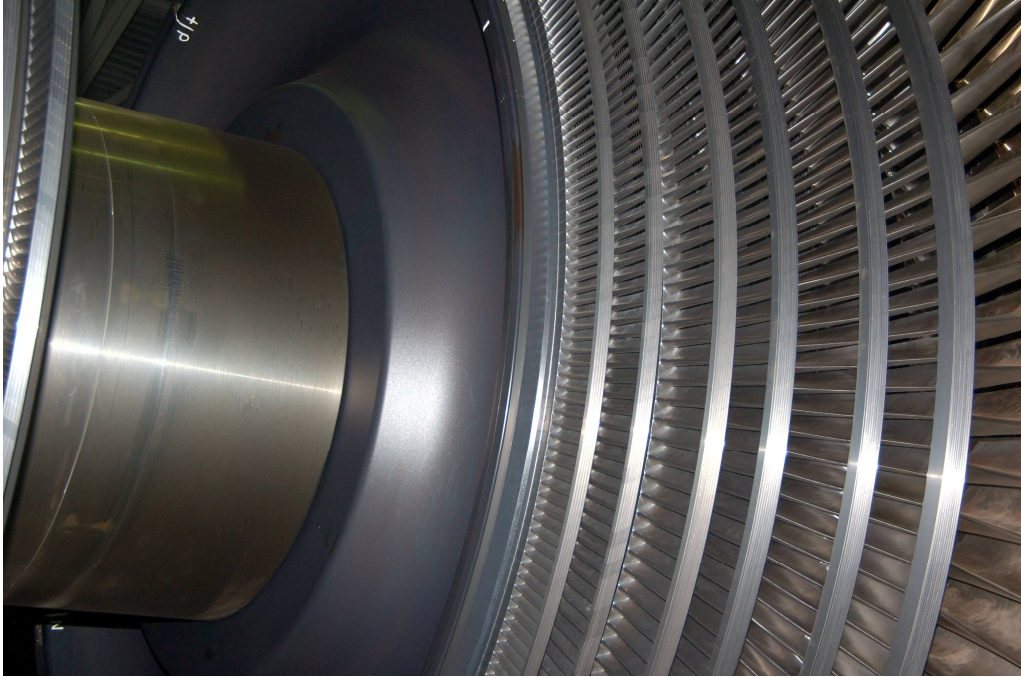


圖十一

2. 1~6 級動葉片採用 Integrally Shrouded Blade 設計，如圖十二所示。

採用 Integrally Shrouded Blade 設計之優點：

- (1) 葉片和護板 (Shroud) 為一體鍛造，可避免不必要的接合件。
- (2) 葉片和護板為一體鍛造，故兩者無接合間隙，可提供較佳阻尼值。
- (3) 相鄰葉片間彼此無任何聯結，單一葉片受力時不受相鄰葉片限制自由，如圖十三所示。
- (4) 葉片及護板為單一鍛件，故其遭受之局部應力亦較舊型轉子低。
- (5) 無鉚釘或電焊來固定護板，故單一鍛件品質易於管控。
- (6) 葉片產生之振動模態亦易於模擬掌握。



圖十二



圖十三

3. 末三級（7~9 級）動葉片採用 Free-Standing Blade 設計

採用 Free-Standing Blade 設計之優點：

- (1) 此種型式葉片產生之振動模態及特性可完全模擬掌控，可靠度高。
- (2) 葉片上無相關附屬配件（Tenon、Lashing Lug）阻礙蒸汽路徑，具有較佳做功性能，如圖十四所示。
- (3) 末級葉片前緣（Leading Edge）採用火焰硬化處理（Flame Hardening），

防止發生沖腐蝕現象。

(4) 葉片設計較舊型轉子為粗壯 故機組運轉時之運轉限制條件較舊型轉子為寬鬆，如圖十四所示。

①偏頻運轉範圍為額定轉速的 95%~103%。

②滿載運轉時，主冷凝器壓力可高達 8 In-Hg。

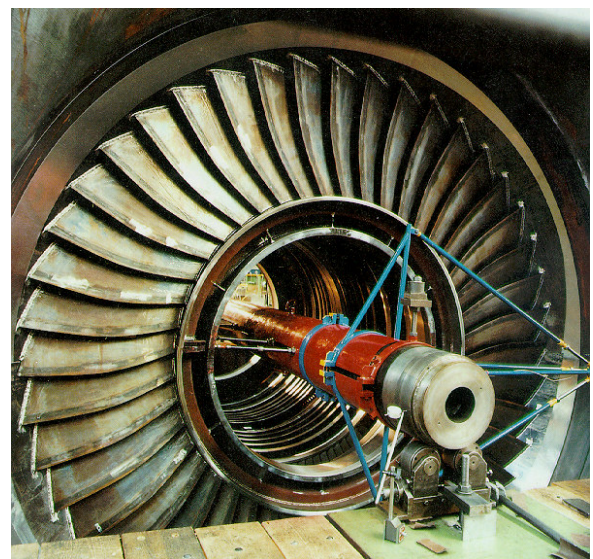
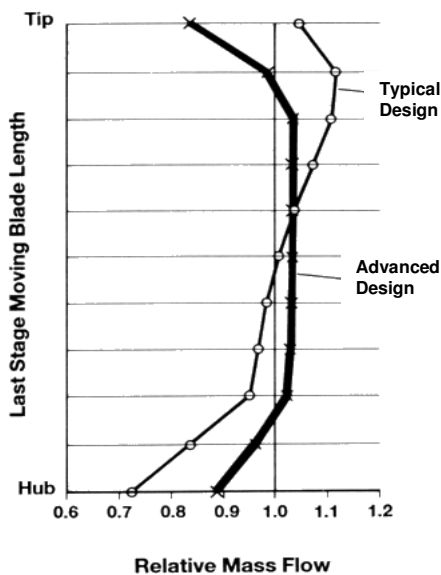
③排氣負載 (Exhaust Loading) 可於環型區域高達 18,000 lb/hr Per ft²。



Free-Standing Blade

圖十四

4. 靜葉片係採用 Tapered and Forward Leaning Blade 設計，使得動葉片蒸汽路徑上有較為平均分佈的質量流，質量損耗減少，增加汽機熱工性能效率，如圖十五所示。

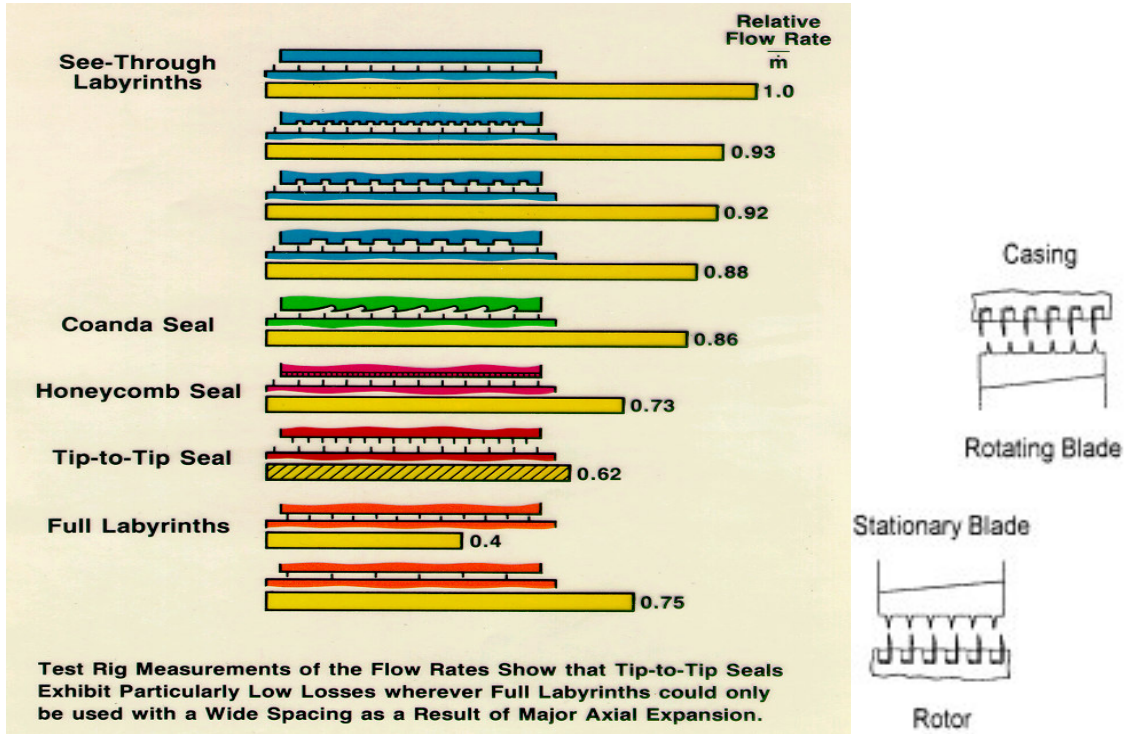


圖十五

(二) 汽封片改善：

新型低壓汽機轉子針對汽封洩漏率的改善：

在動、靜葉片頂部與根部增加汽封片數量，汽封設計採用汽封洩漏率較佳的 Tip-to-Tip 型式，如圖十六所示。註：因核能機組低壓汽機設計上熱膨脹量 (Thermal Expansion) 要求以及須維持低洩漏率，故採用 Tip-to-Tip 排列方式。



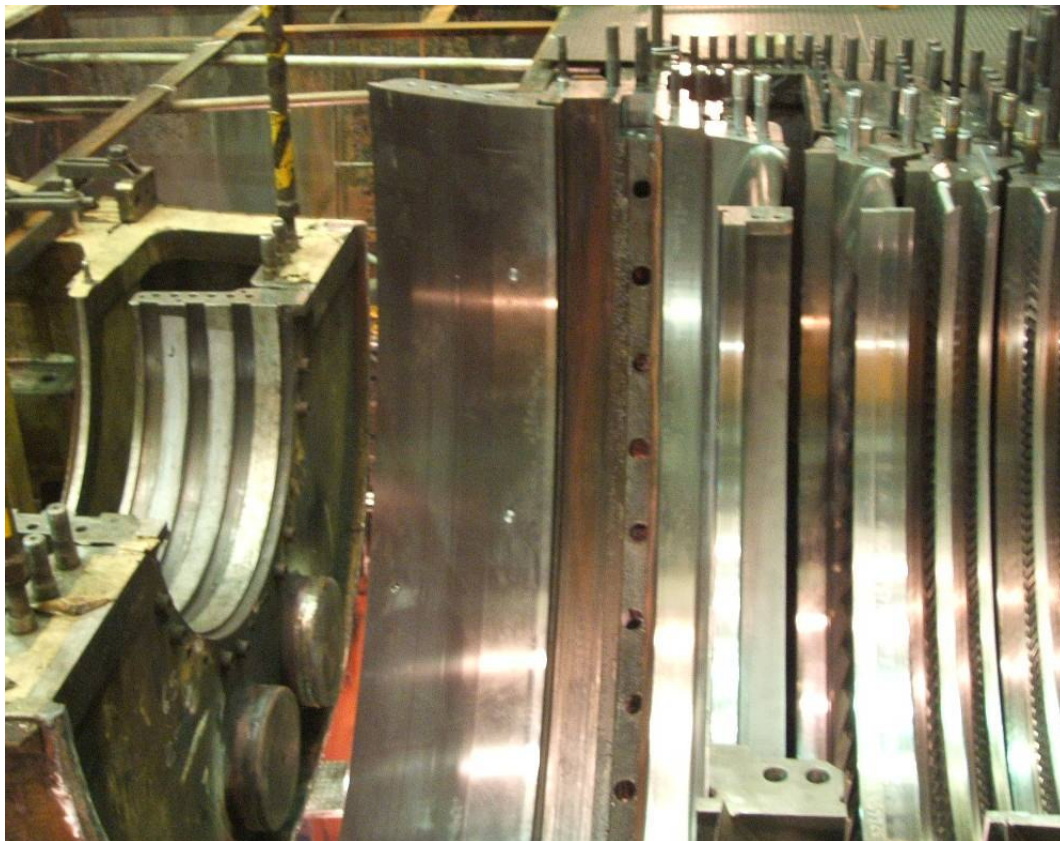
Stage Sealing Comparison



圖十六

(三) Flow Guide 替換：

Flow Guide 除須配合外缸及 Bearing Cone 之現有空間外，且須提供新型低壓汽機轉子末級葉片（46 英吋）之流場設計需求，因此原廠重新設計 Flow Guide 來替換原有 Flow Guide，如圖十七所示。此新設計 Flow Guide 配合新型低壓汽機轉子，不但減少 Hood Loose，相對能提昇汽機熱工性能效率。



圖十七

(四) 採用較原低壓汽機轉子長之末級葉片（46 英吋），充份利用蒸汽能量以減少蒸汽能量無謂的排放損耗，提昇汽機熱工性能效率。註：末級葉片排放區（Exhaust Area）約為 13.9 m²。

參、心得：

出國期間（96.12.13~96.12.27）實習過程中雖異常辛苦，但藉由此次難得出國機會，能夠到西門子公司轉子製造廠，現場實地研習轉子製造流程及學習新型低壓汽機轉子設計觀念，確實不虛此行。

尤其可以對於新型低壓汽機轉子設計理念更為清楚了解，知道近代機械製造技術的進步及電腦數值運算科技的快速和累積過去使用客戶長期所遭遇在維護上、運轉上問題之經驗回饋，而致力在設計上做出貢獻，而有實際的改善，也在其他現存運轉

核能機組有實績的驗證，因此進一步了解核二廠一號機已更新之低壓汽機轉子得標廠商西門子公司能夠信心滿滿符合採購合約功率提升要求，甚至超越以及建議低壓汽機開蓋週期為十年的原因。另外除了提高機組安全運轉的可靠度、節省了大修維護費用和工時，且因功率提升所增加的出力亦減少每度電的發電成本。

西門子公司在許多工業領域都是世界知名品牌，此次去到該公司位處在 Muelheim 的汽機轉子製造廠，發現廠房的佈置係按照轉子製造流程順序分區規劃，且各加工區域（工具、設備、原料）環境皆整理不紊、擺放有序，現場工作人員依循相關程序實事求是的工作態度，實有值得我們學習之處，願和大家共勉之。

肆、建議事項：

本人體認到原廠雖致力在設計上克服了許多維護及運轉曾發生之問題，但並不代表可以高枕無憂而掉以輕心。於維護和運轉上，目前的新轉子設備有不同的事項需要考量。因核二廠自 96 年起執行小幅功率提升案，不單是單一設備 upgrade 或整體機組 uprating，為持續維持機組出力的穩定，建議應與廠家密切維持設備和系統潛在問題之技術交流。