

公務出國報告（出國類別：其他）

日本核能電廠汽機技術發展

服務機關：台灣電力公司 核能技術處

姓名職稱：劉昌杰 主管汽機

派赴國家：日本

出國期間：97年12月08日至97年12月19日

報告日期：中華民國98年1月17日

出國報告審核表

出國報告名稱：日本核能電廠汽機技術發展		
出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
劉昌杰	主管汽機	核能技術處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <u>洽公</u> (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：97年12月08日至97年12月19日		報告繳交日期：98年1月17日
出國計畫主辦機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input type="checkbox"/> 4.內容充實完備。 <input 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 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 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。 <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：日本核能電廠汽機技術發展

頁數 26 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

劉昌杰／台灣電力公司／核能技術處／主管汽機／02-24902401#2040

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：97.12.08 ~ 97.12.19 出國地區：日本

報告日期：98.1.17

分類號/目

關鍵詞：日本、汽機

內容摘要：(二百至三百字)

日本三菱、東芝、日立等廠家之核電汽機技術發展，係針對提高汽機效率，及核電汽機之關鍵性問題，如應力腐蝕龜裂、水滴沖蝕、腐蝕疲勞、及核電汽機大型化等，改進汽機效能及可靠度。廠家綜合考量葉片外形效率及排水性、葉片結構阻尼能力與剛性、材料耐沖蝕性、轉子重量、製造加工方法、成本等因素，以最佳化設計，達到高效率及高可靠度汽機之需求。大型化汽機的低壓汽機長末級葉片持續開發中，除了著重穩流與效率提升之外，耐沖蝕與優良排水性亦將是未來葉片開發重點。

日立公司已確認濱岡五號機的新開發大型化汽機葉片脫落事件原因，提出解決方案。大型化汽機開發過程的完整測試驗證程序，極為重要。此次經驗，無論對日立公司或汽機業界或電力公司，都是很重要的工業發展資產。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

壹、 目的	1
貳、 出國任務及行程	1
叁、 國外公務內容紀要	2
一、日本核電汽機技術發展	2
(一) 核能與火力機組汽機的比較	2
(二) 三菱重工核電汽機技術發展概況	4
(三) 東芝核電汽機技術發展概況	6
(四) 日立核電汽機技術發展概況	9
(五) 日本核電汽機發展方向	11
二、日立公司對於濱岡核電廠五號機汽機葉片及轉子改善情形 ...	12
三、龍門計畫汽機啓動及效率測試規劃	16
肆、 心得與建議	20

壹、目的

- 一、節能減碳係當今全球重要能源議題及努力目標，汽輪發電機組之效率及可靠度提升，攸關電廠之營運效率，更可以對節能減碳有極大貢獻。日本汽輪發電機組廠家與美國奇異及西屋等合作，且因應核能發電機組大型化，不斷致力於開發大型化汽機新技術，提升現有汽機效率。本次赴日本考察汽機之設計、製造、安裝、運維等先進技術，以便掌握各廠家之新技術及未來發展，供增設機組及維護參考。
- 二、日立公司在發展核電汽機大型化過程中，曾於 2006 年日本濱岡核電廠五號機發生汽機葉片脫落事件，同時訪查汽機廠家日立公司對於葉片及轉子改善情形，以及後續汽機轉子開發與改進措施。
- 三、龍門計畫汽輪發電機組係由日本三菱重工設計製造，考察三菱重工期間，同時查訪及研討汽輪發電機組啟動測試及效率測試規劃事宜，俾利於機組測試。

貳、出國任務及行程

- 一、訪問三菱重工高砂製作所，考察三菱重工之核電汽機之技術發展，查訪及研討龍門計畫汽輪發電機組啟動測試及效率測試規劃事宜。(97.12.09~97.12.12)
- 二、訪問東芝公司京浜製作所，考察東芝公司核電汽機之技術發展。(97.12.15~97.12.16)
- 三、訪問日立公司日立製作所，考察核電汽機之技術發展，以及濱岡核電廠五號機汽機葉片及轉子改善情形。(97.12.17~97.12.18)

參、國外公務內容紀要

本次赴日本三菱重工、東芝、日立等主要汽輪發電機組廠家，考察日本核電汽機技術發展、訪查日立對濱岡核電廠五號機汽機葉片及轉子改善情形、及三菱重工有關龍門計畫汽機啓動及效率測試規劃，以下就日本核電汽機技術發展及訪查情形分述如後：

一、日本核電汽機技術發展

(一) 核能與火力機組汽機的比較

早期核電汽機之設計製造技術，多源自於火力電廠汽輪發電機組之經驗，然而核能機組汽機之運轉條件與火力機組有相當大差異，因此許多火力機組汽機之經驗，並不能完全應用在核電汽機上，而近期核電機組大型化發展，亦產生更多新的技術需求。以下就核能與火力機組汽機之運轉條件及設計考量，作概略之比較。

1. 汽機之運轉條件

核能機組汽機係運轉於飽和蒸汽狀態，通常認定為“濕蒸汽汽機”(wet-steam turbines)，而火力機組汽機使用過熱蒸汽；火力機組汽機蒸汽壓力遠高於核能機組汽機蒸汽壓力，二者之蒸汽容積有極大不同，因此也造成核能與火力機組汽機之設備大小有明顯差異。

核電汽機較大的蒸汽質量流率(mass-flow)及相對較低之蒸汽壓力，導致相當大之蒸汽容積流率(volumetric flow)，因而亦需有較大的汽機葉片直徑及長度。由於長葉片因素，為維持汽機葉片尖端轉速在合理限值內，核電汽機之轉速(1800 rpm for 60Hz)通常為火力汽機之一半，使用四極發電機 (four-poles generator)，火力汽輪發電機則為二極發電機 (two-poles generator)。

沸水式核電機組汽機之材料選用，尚需考慮長期輻射效應，以保護運轉維護人員健康，因此核能與火力機組汽機在材料選用上亦有相當大差異。

通常核能機組作為電力系統之基載電廠，火力機組則需應付較頻繁之負載變化，因此也影響核能與火力機組汽機之熱應力分析、生命週期評估及材料選用。

2. 汽機設計之挑戰

核能與火力機組汽機運轉條件不同，也衍生相當不同之破壞機制，核能與火力

機組汽機蒸汽流徑之相關破壞機制比較如下表：

破 壞 機 制	火力汽機	核電汽機
葉片及附件之潛變及疲勞破壞 (Creep and Creep-fatigue in Blades and Attachment)	次要項目	不易發生
固態粒子沖蝕 (Solid Particle Erosion)	關鍵項目	不易發生
表面沉澱 (Surface Deposition)	關鍵項目	不易發生
低壓汽機葉片疲勞破壞 (Fatigue in LP Blades)	關鍵項目	次要項目
高壓汽機葉片疲勞破壞 (Fatigue in HP Blades)	次要項目	次要項目
局部腐蝕 (Localized Corrosion)	次要項目	關鍵項目
腐蝕疲勞 (Corrosion Fatigue)	次要項目	關鍵項目
葉盤邊緣應力腐蝕龜裂 (Stress Corrosion Cracking in Disc-Rim Attachments)	關鍵項目	關鍵項目
葉片應力腐蝕龜裂 (Stress Corrosion Cracking in Blades)	次要項目	次要項目
水滴沖蝕 (Water Droplet Erosion)	關鍵項目	關鍵項目
水侵入汽機 (Water Induction)	關鍵項目	關鍵項目
流體激發腐蝕 (Flow-Accelerated Corrosion)	關鍵項目	關鍵項目
磨蝕 (Fretting)	次要項目	次要項目

水滴對轉動葉片之沖蝕(WDE, Water Droplet Erosion)是影響核電汽機可靠度之最重要因素之一，也是葉片構造設計之主要考慮因素。而水滴沖蝕之破壞力主要決定於蒸汽溼度及葉片圓周轉速，尤其葉片圓周轉速之影響更為明顯。核電汽機大型化的極大蒸汽容積流率(volumetric flow)，及較大的汽機葉片直徑及長度，更加深了水滴沖蝕之問題。

另外核電汽機的大型化也造成更複雜的製造加工程序，因此相對於大型火力汽機組，需要更大的加工機及製造廠房，也需要更新的製造技術。

(二) 三菱重工(MHI)汽機技術發展概況

三菱重工的汽機技術源自西屋公司，自 1980 年代 MHI 研發進步型 44 吋葉片，並於 1988 開發完成整體覆環式葉片(Integral Shroud Blade)，之後於 1997 年結束與西屋的合約關係，MHI 獨立發展其汽機技術。

MHI 技術發展及品質確保係透過三方面來達成：

- 研發中心的持續研發－成果：以 3D 動態流力設計之整體覆環式(Integral Shroud Blade)葉片，已於 1993 年起陸續應用於汽機。
- 完整的驗證－設置汽機實體測試設施，及廠內複循環發電廠（330 MW），藉此在實際應用前，可於廠內進行之各項測試、驗證及設計改進。
- 關鍵性組件自行製作－轉子加工及葉片製造均在 MHI 工廠自行製造。

現階段 MHI 汽機轉子及葉片開發應用現況如下：

1. 低壓汽機末級整體覆環式(Integral Shroud Blade, ISB)葉片構造與特性

整體覆環式(ISB)葉片，係以 3D 流場設計之高效率葉形。旋轉離心力使預先扭轉設計的葉片，回復未扭轉狀態，而葉片間之覆板(Shrouds)及避振器(Snubbers)相互接觸面，形成有效的阻尼力，其阻尼效果約可達到群組式葉片之 10 倍。在高蒸汽流運轉狀況，或低蒸汽流之偏離葉片空氣動力設計點，均可維持較低之振動力。葉片、覆板及避振器為一體鍛造而成，亦可增強葉片剛性。一體鍛造之整體覆環式葉片，提升葉片阻尼能力及剛性，對於避免葉片顫振相當有效。葉片經鍛造、車削及研磨加工成形，則以非接觸式 3D 量測裝置，確認葉片外形。

葉片根部採用大型化的直式側進式聖誕樹形，減低葉片在葉盤根部承受之離心應力，改善應力腐蝕環境。ISB 葉尖的護板及汽封片可減低蒸汽洩漏量及穩定流場。

2. 整體鍛造 Monoblock 轉子：

整體鍛件經 MHI 工廠自行研發各式切削刀具，車削加工而成。MHI 為加速其加工速率及精度，持續研發加工方法，例如改進葉盤根槽切削刀具，原先須經以 4 組車刀的車削程序，目前已改進為 2 組車削程序即可完成。

改採低降伏強度材料之 Monoblock 轉子，及側進式大型葉片根部及葉盤根槽，免除熱套縮安裝方式造成之應力，減低轉子及葉盤根槽應力，有效避免應力腐蝕龜裂。

大型汽機 Monoblock 轉子鍛件，製造不易，日本僅 2 廠家能製作，且產能有限，因此目前 MHI 已經應用焊接式轉子於火力汽機。

3. 驗證程序

對於新開發之葉片，先進行全尺寸葉片迴轉試驗，驗證轉子及葉片共振頻率，以超速測試，確認離心力對葉片根部所造成的應力。接著製造低壓汽機（全尺寸及 50%以上比例模型），於廠內汽機實體測試設施，進行各項實際及嚴苛運轉條件之負荷測試，量測葉片應力及流場，驗證蒸汽流場、汽機性能及葉片振動特性與應力等，以確認可靠度。經完整的驗證，才開始製造，應用於第一部機組。自 1978 年迄今依此驗證程序，已開發 11 組汽機末級葉片，均有優良的實際運轉經驗。汽機實體測試設施及測試範圍如下圖：

除了汽機實體測試設施之外，1997 年 6 月 MHI 又於高砂製作所設置啓用複循環發電廠（330 MW, GT-225MW, ST-105MW），同時持續於 1999-2001 及 2003 年分別將新開發之氣渦輪機（H 系列）及高效率汽機，安裝於此電廠，透過實際運轉驗證程序，驗證性能及可靠度，以加強其技術與研發。汽機廠家透過自有複循環發電廠，以實際應用與運轉經驗，驗證及回饋於其設備開發，的確有助於讓電力公司或電廠經營者，對其氣渦輪機或汽機之可靠度有較大信心。

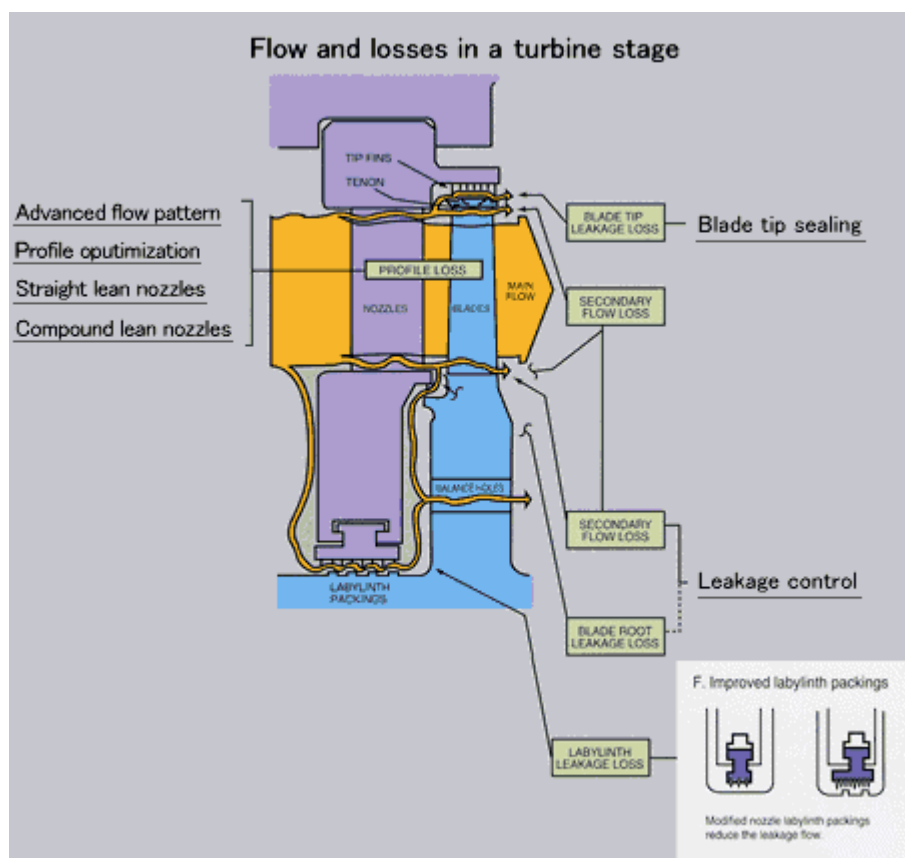
4. 新開發葉片之首次應用

完成新開發葉片之驗證程序，經過電廠經營者接受後，即應用於第一部機組。現階段最長者為 52 吋及 54 吋，52 吋首次應用於四國電力伊方三號機（890MW, 1995 運轉），54 吋首次應用於興建中之北海道 TOMARI 3T（912MW, 1500RPM, 預計 2009 商轉）。

MHI 持續開發 60 吋及 74 吋級低壓汽機末級葉片。

(三) 東芝公司汽機技術發展概況

1. 東芝公司汽機技術主要承襲美國奇異公司，其汽機技術和美國奇異公司相近。日本核能電廠之汽機，約 35% 為東芝公司設計製造。截至 2007 年 12 月為止，東芝公司汽機之總產能已達 152 GW，電廠機組數高達 1,800 部機以上。2003~2007 年在美國市場汽機佔有率，東芝連續 5 年居於首位。日本東芝公司提昇現有汽機之效率主要方式，如下圖：



- (1) 改進葉片外形，減少蒸汽流場之外形損失：

以最佳化外形設計 (Profile Optimization) 開發具有先進蒸汽流動模態 (Advanced Flow Pattern Stages) 的葉片。

傳統汽機葉片設計特性，係整個葉片高度範圍內具有相同之軸向蒸汽流速，而先進的葉片設計則將蒸汽流量儘量流經效率較高的葉片中間，減少蒸汽流經葉片頂部及底部因邊界層所造成之能量損失。動、靜葉片外形均採用複合傾斜式最佳化設計，扭轉帶彎曲的葉片，可將蒸汽流量集中在葉片中間，避免邊界層生成，減低蒸汽流邊界層分離渦流損失，減少摩擦損失及尾流損失等外形損失，提升葉片效率。

(2) 控制蒸汽洩漏

傳統汽機汽封片採單鰭式或雙鰭式（Single Fin or Tow Fins）汽封片設計，蒸汽止漏效果較差，東芝公司經多次改良及測試後，研發多鰭式或高-低鰭式汽封片設計，有效降低葉尖及葉根之蒸汽洩漏量。東芝公司新型汽機皆採用多鰭式或高-低鰭式汽封片設計。

a. 葉尖汽封控制蒸汽洩漏（Leakage Control - Blade Tip Sealing）：

以避振型葉片(Snubber Blades)整體覆板，配合多鰭式汽封片或高-低鰭式汽封片，可有效減少各級葉片間之蒸汽洩漏。

b. 改良式迷宮式汽封，減低葉根蒸汽洩漏

2. 為達成上述提升效率之目的，東芝開發之主要組件：

(1) 避振型葉片(Snubber Blades)

增強阻尼能力之避振型葉片(Snubber Blades)，葉片與覆板一體鍛造，有效抑制低葉片振動應力。同時可搭配多鰭式汽封片，減少各級葉片間之蒸汽洩漏。

目前避振型葉片尚未應用在低壓汽機末級葉片，未來將會應用於新開發之大型化末級葉片。

(2) 先進的末級葉片，葉片構造及特性：

以葉尖護板(Loose cover segment)及位於葉片中間部位之 Loose sleeve-and-lug，使整級葉片得以連續性的相互偶合一起。

提供極佳的阻尼效果，同時減少葉片之動態響應，有效抑制低葉片振動應力。

採用高強度耐沖蝕材料。

有效防止應力腐蝕龜裂及腐蝕疲勞。

仍採用指叉型葉根，便於既有葉片之更換。

(3) 末級葉片大型化

目前實際應用之低壓汽機末級葉片為 40 英吋及 48 英吋級，52 英吋低壓汽機末級葉片已完成開發，將首次應用於日本 OOMA 核電廠(1383MW, 建造中，預計 2012 商轉)。長達 70 英吋之低壓汽機末級葉片仍在開發中。

3. 有關日立公司提供之濱岡電廠#5 號機汽機 L-2 動葉片脫落事件經驗回饋

東芝研發新型汽機，除了運用計算分析之外，均作完整驗證測試，確保其可靠性。同時相較於日立提供之濱岡電廠#5 號機汽機，#5 抽汽管線僅有一抽汽管嘴，東芝汽機之抽汽管嘴較多，抑低棄載時由加熱器冷凝水閃化逆流引起之紊流，可有效減低葉片承受之振動力。

(四) 日立公司汽機技術發展概況

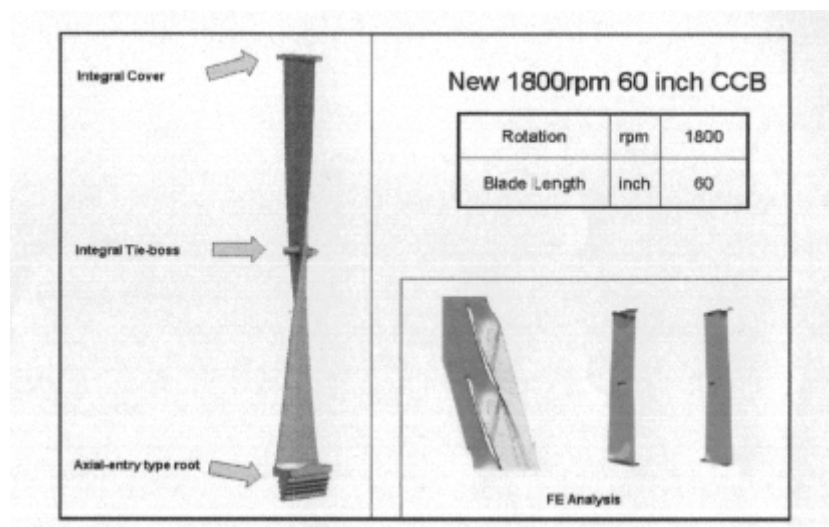
第一部核電汽機裝設於 1972 Karachi 核電廠，至今已超過 20 部核電汽機。最近於 2006 年完成者為日本志賀#2 號機 ABWR 核電廠汽機(60Hz, TC-6F-52 inch, 1358 MW, 主蒸汽溫度 543°F、再熱蒸汽 487°F)。目前只有日立公司有 52 吋級之 BWR 核電汽機運轉經驗。

經過 2006 年日本中部電力濱岡電廠#5 號機之汽機 L-2 動葉片脫落事件，日立已經新建立更完整的汽機測試設施，測試設施以實際汽機內部蒸汽流場及應力狀況，進行縮小比例之汽機測試。測試期間可進行各項模擬：蒸汽流場、離心力、飼水加熱器之閃化模擬，低負載、棄載等模擬。藉此模擬測試，確立及解決濱岡電廠#5 號機 L-2 等葉片設計問題；2009 年將更換濱岡電廠#5 號機之低壓汽機轉子（相關改進細節請參見本報告項次四、日立公司對於濱岡核電廠五號機汽機葉片及轉子改善情形）。

日立標準之 ABWR TC6F-52 汽機，L-2 葉片改採用具高阻尼能力之 Continuous Cover Blade (CCB)構造。同時也改進 L-2 葉片噴嘴，減少紊流；#5 抽汽管線由原先之 1 只抽汽管嘴增加為 2 只抽汽管嘴，以使棄載閃化逆流較均勻分布。

汽機大型化的設計工作持續開發中，日立公司將就提升汽機強度及可靠度、汽機效率、運轉維護便利性等三方面持續努力，其中葉片設計概述如下：

1. 末級長葉片：現正進行低壓汽機 60 英吋長末級葉片的開發工作，預計 2013 年可完成。60” L-0 動葉片將採整體覆環式構造設計，葉片中間部位則有整體減震裝置（採 Integral Tie-boss），增強葉片阻尼能力；葉根為側進式(Axial Entry)聖誕樹形（如下圖）。



2. 連續性覆環葉片 (Continuous Cover Blade, CCB)

日立持續發展的核電汽機葉片，採用 CCB 結構及側進式(Axial Entry)聖誕樹形葉根之葉片，以提升性能、強度及振動特性。此型葉片結構已於 1991 年起用於火力汽機，有相當優良的運轉特性及紀錄，以及極高的可靠度。

CCB 結構使相鄰的葉片彼此連結一起，改進葉片的振動特性，包含整體覆板(Integral shrouds, 日立稱 Cover)，及葉片中間部位間之支撐(mid-span support, 日立稱 Tie boss)，消除使用 Tie-wire 可靠度不足之問題。

CCB 葉片間之接觸面(Cover and Tie Boss)與葉片係一體構造，可減低應力集中。透過旋轉離心力，及葉片間接觸面之限制力，使預先扭轉設計的葉片，保持未扭轉狀態，形成連續的葉片環形組合。CCB 葉片將可運轉於相同之頻率模式，葉片振動模式單純，相對原以 Tie wire 束縛葉片的設計，每一葉片各有其自然頻率及振幅，屬複雜振動模式。

CCB 葉片結構有較佳阻尼，較少共振點，較穩定振動特性，減低共振應力，減低隨機共振應力，因而可抑制顫振。同時 CCB 構造可裝置具高-低之徑向鰭封片，加強迷宮式汽封效果，提升葉片各級效率。

(五) 日本核電汽機發展方向

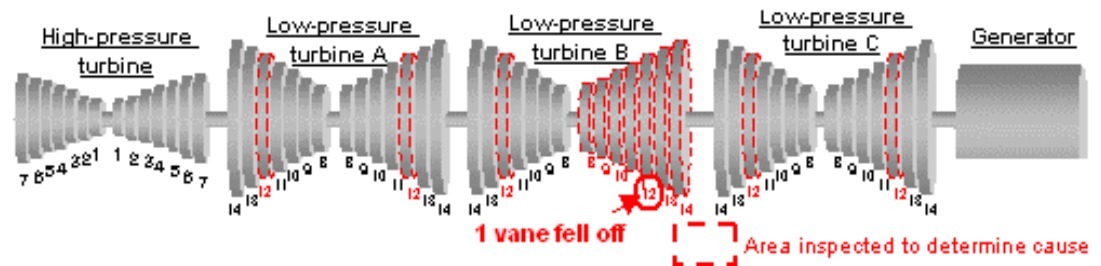
綜合三菱、東芝、日立等廠家之汽機技術發展現況，均係針對提高汽機效率，及核電汽機之關鍵性問題，如應力腐蝕龜裂、水滴沖蝕、腐蝕疲勞、及核電汽機大型化等，逐步發展新技術，改進汽機效能及可靠度，歸納如下：

1. 採用整體鍛造的 **Mono Block** 轉子，減少應力腐蝕龜裂，已完全應用於新機組。焊接式轉子，將會是廠家因應市場量的需求，所可能作的新選擇。
2. 以 3D 動態流體設計之複合傾斜式葉片，改進蒸汽流模態，減少蒸汽流場之葉片外形損失。
3. 運用葉尖整體覆板及葉片中間部位避振裝置，如 **Snubber, Loose sleeve-and-lug, Tie boss** 等，增強葉片阻尼能力。雖然部分廠家現階段仍採用自由式末級葉片，但增強阻尼能力之整體覆板構造亦將逐漸應用於末級葉片。
4. 聖誕樹形葉根相對於指叉形葉根有較佳的阻尼效能，但傳統聖誕樹形葉根承受離心力之能力相對較差，大型化的側進式聖誕樹形葉根，減低葉片在葉盤根部承受之離心應力，有效改善葉盤根部離心應力太高之問題，亦改善了應力腐蝕環境。面對汽機大型化所需高阻尼能力葉片，如何增進指叉形葉根的設計，增強阻尼能力，尚值得觀察。
5. 應用多鰭片及高-低鰭片汽封設計，加強迷宮式汽封效果，減低蒸汽洩漏量。
6. 核電汽機大型化，大蒸汽容積流率及較長的汽機葉片，更加深了水滴沖蝕之問題。採用耐沖蝕的葉片材料，以及持續改進葉片構造及外形，增進水滴排除效能，將是未來廠家技術研發之重點。
7. 持續開發低壓汽機末級長葉片，目前開發進度較領先者為三菱重工，60 吋及 74 吋級低壓汽機末級葉片，預計於 2009 年完成驗證程序。東芝 70 英吋長末級葉片仍開發中，另日立 60 英吋長末級葉片開發預計 2013 年完成。
8. 面對發電機組之需求及核電汽機的大型化，持續發展更新、更有效率的製造加工技術。
9. 藉由汽機實體測試設施，模擬各種汽機運轉狀況及更嚴苛之運轉狀況，進行完整的汽機實體驗證測試，確保汽機可靠性。

二、日立公司對於濱岡核電廠五號機汽機葉片及轉子改善情形

(一) 事件緣由及肇因分析：

日本中部電力公司濱岡核電廠五號機 ABWR Type—1,380MWe，2005/1/18 開始商業運轉，於 2006 年 6 月 15 日早上 8 點 39 分，汽機因振動過大而跳機，造成反應爐自動停機，無輻射外洩。停機檢查，6 月 19 日低壓汽機開蓋檢查，發現低壓汽機(B)發電機側第 12 級一根動葉片脫落掉到低壓汽機下缸。目視點檢與非破壞檢查的結果，第 12 級動葉片尚有 663 片葉片確認受損，其它各級均無損傷。



由損傷的動葉片根部安裝部位等的斷面觀察結果，確認有高覆變應力疲勞(high cycle fatigue)特有的海灘紋(beach mark)。經過日立公司及濱岡電廠確定、診斷問題，推定是無負載及低負載測試階段時紊流引起之隨機振動，及棄載時閃化逆流(Flashback)，共同引起之高覆變應力疲勞。

隨機振動是種不規則的振盪，在汽機無負載及低負載狀況，由蒸汽紊流所引起。依日立經驗，L-0 及 L-1 葉片常有明顯的隨機振動，因此葉片設計過程中已考慮此因素。然而 L-2 葉片通常不會有紊流引起之隨機振動，因此濱岡#5 號機汽機葉片設計上並未考慮隨機振動。經過日立以新設立之汽機測試設備，模擬驗證發現 L-2 葉片亦承受相當大的隨機振動力，此現象並未曾發生在其他日立生產的汽機。

閃化逆流(Flashback)現象：汽機棄載時 Combined Intermediate Valve (CIV)快速關閉，流入汽機之蒸汽量快速減少。同時汽機內蒸汽排放至高真空之冷凝器，汽機內壓力突降，飼水加熱器內壓力反而高於汽機，導致蒸汽由飼水加熱器逆流回汽機之，進而使飼水加熱器內壓力降低，而飼水加熱器內之冷凝水受到內部壓力降低而閃化成蒸汽，快速逆流回汽機。濱岡核電廠五號機#2 飼水加熱器抽汽正好位於 L-2 葉片上游側，同時只有一個抽汽孔，棄載時閃化逆流(Flashback)引起之振動力，相當集中作用在 L-2 葉片上。

爲了確認及解決問題，日立新設汽機測試設施，於 2007 年春季啓用，以進行實際之負載模擬測試。此設施如同簡單之縮小比例電廠，包含蒸汽產生器、汽機、冷卻塔、及相關輔助 BOP 設備等。以變頻馬達驅動汽機轉子，模擬低負載狀況；同時設置閃化筒槽，模擬飼水加熱器之閃化現象。測試設施以實際汽機內部蒸汽流場及應力狀況，進行縮小比例之汽機測試。測試期間可進行各項模擬：蒸汽流場、離心力、飼水加熱器之閃化模擬，低負載、棄載等模擬。

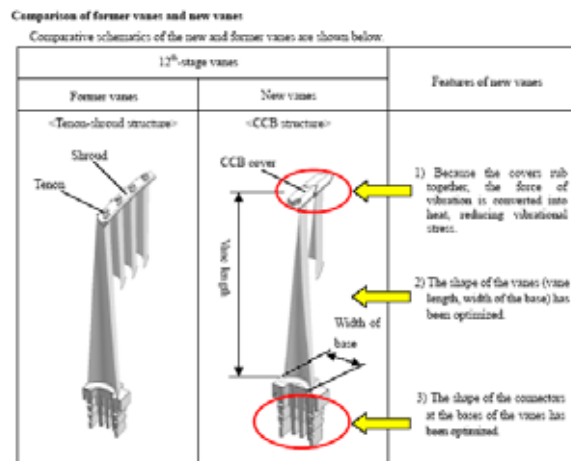
經日立以汽機測試設備模擬驗證發現，單獨低負載的紊流引起之隨機振動，及棄載時閃化高速回流(Flashback)，並不足以造成葉片嚴重破損。然而低負載的紊流引起之隨機振動，及棄載時閃化高速回流(Flashback)，會同時發生在低負載測試階段，造成葉片指叉型根部承受過大的應力，而此等應力在細部設計時並未考慮。

在汽機啓動測試階段，20% 負載之棄載試驗，及接續的無負載運轉，引起之隨機振動及棄載時閃化，二者合併造成的應力，導致 L-2 葉片指叉型根部產生初始疲勞裂痕，續經啓動測試階段，低負載運轉之隨機振動，及棄載測試時閃化高速回流的振動力，而造成疲勞裂痕逐漸由葉盤擴延至葉片，終致使葉片指叉根部的殘餘面積不足以承受葉片的離心力而破裂。

(二) 設計改進方式

由濱岡電廠之經驗，日立標準之 ABWR TC6F-52 汽機，L-2 葉片改採用具高阻尼結構，同時具適當之剛性，以承受低負載的紊流引起之隨機振動，及棄載時閃化逆流(Flashback)。改進方案經過縮小比例模型測試及全尺寸之轉動測試，日立已確認其可靠度，同時亦經日本政府及濱岡電廠核准。日立公司將更換濱岡電廠#5 號機的 3 台低壓汽機轉子，目前正在製造中，預計 2009 年的第四次大修更換轉子。汽機整體的設計改進如下：

1. L-1 及 L-2 葉片均改進爲具有 CCB 構造的覆環(葉片改進前後之對比如下圖)。



新葉片的結構設計係增加 Continuous Cover Blade (CCB)構造，增強阻尼能力（日立說明：阻尼能力為原設計之 10 倍），有效抑低振動。改進葉片外形（長度及根部平台寬度），以應用 CCB 構造；改進葉片根部，以支撐增加之葉片重量，減低葉片根部承受之振動力。

最後一級 L-0 動葉片仍維持原有之自由式葉片設計，以穿線(Tie Rod)方式構成葉片群組，未改採用 CCB 構造的覆環。(日立認為濱岡電廠#5 號機 L-0 動葉片已經是驗證過的設計，因此無須修改。若新的機組也可視客戶需求，採用 CCB 構造之 L-0 動葉片)

2. 改進 L-2 葉片噴嘴以減少紊流。
3. #5 抽汽管線由原先之 1 只抽汽管嘴增加為 2 只抽汽管嘴，以使高速閃化流較均勻分布。

(三) 濱岡#5 號機汽機事件及日立大型化汽機開發過程檢討

因為濱岡#5 號機係新開發之大型化汽機，蒸汽容積流率大增，且葉片增長，紊流情形更加嚴重，導致低負載時 L-2 葉片亦承受紊流引起之隨機振動，此點係日立開發此型汽機（TC-6F-52 inch, 1358 MW）時未充分考慮到的因素。

同時濱岡#5 號機#5 抽汽管線只有 1 只抽汽管嘴，且未設置動力止回閥，防止棄載時飼水加熱器內冷凝水的閃化逆流，高速閃化引起之振動力相當集中。

開發階段所做模型測試 Scale Test，只以額定負載測試，無法模擬低負載、無負載測試、或飼水加熱器之閃化逆流狀況，使得日立未能確實掌握汽機在機組啓動功率試驗階段，所必須承受之應力負荷。

本次事件，日本中部電力公司濱岡電廠受到設備損壞及衍生之發電損失，而日立亦遭受極大的衝擊，除了需面對日本中部電力於 2008 年 9 月之遞狀申請求償（向日立求償 418 億日圓及延遲損害賠償），其海外汽機市場之佔有率亦於 2007 年起明顯下滑。

(四) 核四低壓汽機設計現況檢討

由日立公司所確認之濱岡#5 號機汽機葉片脫落事件原因，及解決方案（採用 CCB 構造葉片增強阻尼，改進靜葉片減少紊流，增加抽汽管嘴），可瞭解：提高葉片阻尼能力，減少紊流，增加抽汽管嘴及均衡分部閃化流流量，是避免低負載及棄載時發生葉片顫振之關鍵因素。

三菱重工提供之核四汽機，已採用具高阻尼能力之整體覆環葉片，及改進的大型化聖誕樹形葉根，葉盤根部承受之離心力，及葉片振動力大幅降低。另外核四廠汽機相對於 L-2 葉片之第五號加熱器抽汽管，已設置動力輔助逆止閥，可有效防止汽機棄載時，閃化蒸汽逆流回汽機。同時 MHI 開發之低壓汽機末級葉片，經過廠內實體驗證測試，亦已實際應用在多部核能機組與火力機組汽機。因此核四廠汽機應當可有效防範類似濱岡#5 號機汽機因紊流及閃化蒸汽逆流所造成葉片顫振，衍生葉片破壞脫落之情況。

三、龍門計畫汽機啓動及效率測試規劃

(一) 汽機效率測試程序及後續規劃討論

經與 MHI 就汽機效率測試程序、程序書審查意見、測試儀器及工作項目等，逐項討論摘要如下：

1. MHI 將於測試階段就實際量測運轉參數，提出更新汽機側之熱平衡圖。依照原先 MHI 規劃以 Full scale 測試，按照現場實際量測數據(Group I)，送回日本 MHI 以計算機程式重新計算及更新熱平衡圖，需時較長，無法於三天內完成；如依照替代之測試方式，以修正係數(Correction Factor)修正，則可於測試後三天內完成。請 MHI 仍依原規劃辦理，按照現場實際量測數據，以計算機程式更新計算後再簡報測試結果。
2. 以現場實際量測數據(Group I)，所計算之 Group I 參數修正係數 C1，係相較於汽機熱耗率設計值，因此主蒸汽流率亦係以設計值為基準。
3. 初步規劃測試時程係於 30%, 50%, 75%, 90% Load 量取及紀錄流程參數，以核對確認儀器及數據擷取系統正常運作，且機組各相關系統正常運轉無洩漏；續於保證出力 1350 MW 及 100% Load 進行正式測試。MHI 說明若僅於保證發電能力 1350 MW 及 100% Load 進行測試，約一周可完成，日本電廠多以此方式進行。詳細測試時程將於測試前預備會議再詳談確定。
4. MHI 預計派測試代表約 2-3 人。
5. 檢討汽機效率試驗之量測儀器
 - (1) MHI 審閱 System P&ID，確認大部分測試參數可藉由廠內系統流程儀器量測取得，部分參數則需另裝設特殊儀器。本公司將依合約以租用方式，請 MHI 提供特殊儀器及數據擷取分析系統。
 - (2) RFP seal water supply and leakage 管線無適用之流量計，亦無法裝設限流孔來量測流率，MHI 將檢討核對是否採用設計流量值。
 - (3) 反應爐相關 P&ID 圖面及水位計儀器編號，由本公司送 MHI 參用。
 - (4) 飼水流量之量測管嘴尺寸及校正數據，需於測試前送 MHI 參用。
 - (5) 汽機效率試驗量測儀器清單，及適用之廠內系統流程儀器，將由 MHI 及本公司進一步審核確認。

(6) MHI 將提供特殊儀器規格及安裝說明。

(7) 特殊儀器將連接於數據擷取分析系統，至於廠內系統流程儀器數據如何擷取，MHI 將進一步研究確定。

6. 工作項目

(1) MHI 工作項目

- c. 提供測試程序書、測試流程、測試計算書、修正係數、儀器清單。
- d. 協助本公司選擇適當之測試點。
- e. 提供所需特殊測試儀器及數據擷取分析設備，與所需相關測試連結裝置。
(所需特殊測試儀器確定後，MHI 將盡快提出儀器租借費用，由本公司辦理租用程序)。
- f. 提供特殊儀器規格及安裝說明。
- g. 提供系統管閥隔離清單。
- h. 提供量測發電機出力方式。(汽輪發電機效率試驗測試程序書尚未明述，MHI 將增補)
- i. 派 2-3 位測試代表見證正式的測試程序及量測數據。
- j. 提出測試報告及簡報測試結果。

(2) 本公司工作項目

- a. 測試作業程序規畫，訂定測試先前作業流程。
- b. 提供相關 Systems P&ID 等圖面，供 MHI 協助選擇適當之測試點。(已提供)
- c. 核對 MHI 所建議之測試點，審查確認 Sec. 5.2 Calculation Procedure 及相關 Table 5-1, 5-2 等計算所需測試點是否有合適之廠內系統流程儀器，或可安裝儀器，(例如 RFP Seal Water Supply and Leakage Flow，若無法安裝適當儀器，MHI 建議採用設計值)。
- d. 審查確定所有須用特殊儀器與設備清單，辦理租用手續。
- e. 確認非屬 MHI 提供之量測儀器 (Flow measurement of condensate flow feed water pump inlet 及 Reactor Rod cooling water flow rate (CRD Driver flow)) 是否符合 ASME PTC-6 要求。

- f. 確認 Ejector Motive Steam Flow Rate 係依據其入口蒸汽條件及 Ejector 喉部面積比計算而得。
7. MHI 將按上述討論項目，就汽機效率測試程序書審查意見，測試程序及工作範圍再逐項檢討，正式提送本公司審核同意後，續修訂汽機效率測試程序書。同時提供特殊儀器與設備規格、清單及安裝說明，供本公司辦理租用及安裝。
8. 本處將審核確認汽機效率測試程序書，以及核對確認所選擇廠內系統流程儀器測試儀器，確定所有須另外安裝之特殊儀器與設備清單，續辦理租用手續。

(二) 熱平衡圖

1. Gland Steam Flow to RSV and ICV 未納入熱平衡圖(Heat Balance Diagrams)，MHI 將檢討納入。
2. 介面流程參數更新：MHI 將核對 CRD Drive Flow 參數影響，進一步決定是否須於此時更新熱平衡圖，或於測試時一併更新。其餘流程參數正確性由本公司再確認。
3. 依系統設計現況更新之熱平衡圖，MHI 將納入 Thermal Kits。

(三) 汽水分離再熱器(MSR)性能測試

1. MHI 將依照 SAM-25 更新 MSR 啟動測試程序書格式。
2. 除了程序書已包含之 100% Load MSR 性能測試數據，MHI 將再提供 30% & 75 % Load 之 MSR 性能測試數據及接受標準，併入測試程序書。
3. MSR 性能測試測試範圍包含 MSR, Drain Tank 及相關 Drain, Vent Piping System，其中 MSR 屬 MHI 提供之範圍，由 MHI 提供 MSR 之測試步驟及接受標準等，至於 Drain, Vent 部分係石威顧問公司設計範圍，由本公司負責編寫，整合完成整個系統功能測試。
4. 有關於啟動測試時如何驗證 MSR 第二級出口蒸汽溫度相對於汽輪發電機負載間之控制曲線，MHI 說明在 MSR 性能測試時，通常只確認在 100% 負載情況下之 MSR 出口蒸汽溫度，無須再確認部分負載相對應之 MSR 第二級出口蒸汽溫度。MSR 第二級出口蒸汽溫度相對於汽輪發電機負載間之控制曲線，係作為機組冷機啟動、熱機啟動及停機時，控制 MSR 第二級出口蒸汽溫度（亦即進入低壓汽機之蒸汽溫度）之依據。在 20% 負載時，低壓汽機進汽控制閥逐漸開啓，參照 MSR 第二級出口蒸汽溫度控制曲線，控制進入低壓汽機之蒸汽溫度須符合下列條件：

- (1) 低壓汽機進汽溫度階段變化需小於 28°C。
- (2) 低壓汽機進汽溫度溫升率需小於 56°C/hr。
- (3) 在 10% 負載以下，低壓汽機進汽溫度需小於 204°C。

按上述方式控制 MSR 第二級出口蒸汽溫度，得以減少低壓汽機之熱應力、扭曲或過熱，同時也可防止 MSR 熱變形。至 75% 負載時低壓汽機進汽控制閥全開，完成 MSR 第二級出口蒸汽溫度控制。

(四) 汽封蒸汽系統控制閥及警報設定

MHI 說明汽封系統控制閥及警報設定值，依照其試運轉部門之經驗及作法，在試運轉階段執行 Turbine Gland Seal System Preoperational Test Procedure (TS-05462-2)，需驗證並調校控制閥及警報設定值，無須訂定設定值上下限。若實際運轉量測參數與所需設定值不同，則需先行調校控制器，若經調校仍存在明顯差異，則進一步評估運轉參數是否可接受。

肆、心得與建議

- 一、本次赴日本三菱重工、東芝、日立等主要汽輪發電機組廠家考察，行前分別透過三菱重工業務經理與龍門計畫經理之安排，順利完成三菱重工高砂製作所與研發中心之參訪及測試計畫討論；西屋公司台灣代理部門之協助，安排參訪東芝公司位於橫濱之京浜製作所汽機工廠；以及日立公司龍門計畫廢料系統計畫經理之協助，安排參訪日立製作所，獲得與日立汽機部門專家討論，及查訪日立公司對於濱岡核電廠五號機汽機葉片及轉子改善情形機會。順利安排連續參訪三個主要汽機廠家，達成任務，實屬難得之經驗，亦需感謝各廠家之密切配合。
- 二、核能電廠汽機大型化，是發展的趨勢，也是技術挑戰，三菱重工、東芝、日立等廠家，汽機技術發展方向大致相同，均係針對提高汽機效率，及核電汽機之關鍵性問題，如應力腐蝕龜裂、水滴沖蝕、腐蝕疲勞、及核電汽機大型化等，以及提高生產效能及品質，逐步發展及改進汽機效能及可靠度。汽機葉片外形高效率及良好排水性、葉片結構高阻尼能力與剛性、葉片材料耐沖蝕、轉子重量、製造加工方法、成本等均是廠家設計需考慮之因素，彼此亦有矛盾之處，如何綜合考量設計製造高效率及高可靠度之汽機，的確是工程藝術的成果。
- 三、日立公司首次應用在濱岡#5 號機的新開發大型化汽機，發生葉片脫落事件，雖然對該公司的信譽及財務造成極大的衝擊，但日立也快速面對問題，同時建立更完善的測試設備，確認事件原因，承認設計研發疏失，提出解決方案。部分負載及暫態環境均是設計分析考慮及測試的重要因素，新開發大型化汽機的完整測試驗證程序，極為重要，是不可忽略的步驟。設備損壞即將修復，財務損失補償也終會獲得適當協議。此次失敗經驗，無論對日立公司或汽機業界或電力公司，都將是很重要的工業發展資產。一個曾經有失敗經驗的團隊，將更瞭解與懂得珍惜這寶貴的經驗，更是企業珍貴的資產，畢竟 “失敗為成功之母” 是前人智慧與經驗的傳承。
- 四、汽機葉片設計須考慮離心力、衝擊力（衝動式）、壓差作用力（反動式）及紊流作用力等。運轉中汽機葉片之應力變化決定於葉片幾何形狀及負荷，尤其以葉片根部與葉根槽間的接觸狀況影響最大，表面粗糙度、緊配度等最為關鍵。一般而言，很難亦不太可能精確估算葉片根部與葉根槽部位之應力，即便可以在某些條件下計算應力，但總易於在較尖角部位，發生應力集中。因此葉片材料選用及設計應力間，保有較大之合理設計餘裕，以及新葉片設計之實體模型測試，才是安全的保證。因此日本 NISA 對濱岡#5 號機汽機葉片脫落事件之報告，提出因應對策，亦特別提出新設計之葉片須進行實體模型測試。

五、按日本三菱重工所言，三菱重工、東芝、日立等廠家之電力部門，均屬年輕學子踏入社會之首選。因此在考察期間，除了會見廠家資深工程師之外，無論是技術研發部門或工廠內，均可見到許多年輕的工程師與技師。日立公司還特別強調，該公司無論業務量的多寡，始終會保持適當人力，維持技術之傳承與開發能力。近年來電力設備需求大增，由於長期保持技術與競爭力，該公司也才能適時因應市場需求，提供所需技術及設備。

相較於部分公司大幅擴充及大幅裁員的做法，日本公司著重長期耕耘與發展的穩健經營方式，相當值得參考。雖然日本因為二次大戰造成的社會人口結構斷層，深深影響日本國內經濟的興衰，但日本國際級公司，仍能持續保持人力與技術，維持國際競爭力與領導地位。反觀過去相當長一段時間，本公司幾乎未對外招募新人，新進人員大幅減少，形成嚴重的人力斷層，近年來才又加緊招募新人，已稍嫌緩不濟急。

社會人口結構斷層，可以深深影響經濟的興衰，同樣的企業的人力斷層，對於企業興衰也有相當深遠的影響。當今之金融海嘯與經濟風暴，也是投機行為與政策姑息衍生之暴起暴落現象，此種斷層式的經濟活動與發展，嚴重衝擊國家財政、企業經營、及人民的生活。在此全球性經濟危機期間，尤其顯現出政府部門及國營事業扮演社會與民間企業の後盾之重要性。就如同汽機葉片須有良好阻尼能力，化解外來的激發力，減低所需承受的振動力。國營事業經營也須有足夠的口袋深度，才能應付外在的劇烈變化，在財務上不僅產能規劃與設備投資要穩健，人力資源更需以穩健經營方式規劃。

六、在三菱重工、東芝、日立等廠區，所見儘是穿著整齊制服的員工，無論辦公室或工廠內皆然，此點應該是參訪過日本工業界普遍可見的現象。然而此次在三菱重工廠區，同時也可看到一群穿著三菱制服(不同顏色)的哈爾濱工業集團工程師，目前三菱與哈爾濱工業技術合作，合約中 2 部複循環機組由三菱製造，另授權哈爾濱工業在大陸生產 2 部機組。三菱重工將哈爾濱工業集團視為合作夥伴，工程師在廠區訓練期間，同樣穿著三菱重工制服，就如同團隊一般。

姑且不論哈爾濱工業為何能成為三菱重工的技術合作夥伴，台灣也曾建設如此多電廠，為何無法有如此機會，建立自己的汽機或相關工業，這些涉及政策與採購法令等複雜問題，並非談論重點。讓外賓的我感受良多的只是制服一件生活面的事情，相信身著三菱重工制服的哈爾濱工業工程師也有窩心的感受，當然他們心中也更期許自行生產製造氣/汽渦輪機的一天。

相形之下，公司近年來採用外聘顧問公司人力支援方案，不但沒有相同或類似的

制服，在薪資之外的各項對待也有差異。印象中核三施工處的約聘人力，在衣食住行各方面的對待，幾乎與正式員工沒有不同，施工期間大家共同努力的目標是一致的；直到工程結束，核四工程無法接續進行，需要精簡人力，遣散約聘人力，才明顯感受到差異。這些屬於工程後勤支援的點點滴滴，雖然相較於工程本體只是小事，然而團隊感的建立，也是由生活的每個環節開始的。如何讓各單位及外部支援人力，自然地融入團隊，應該是值得思考及力行的“小事”。

