

出國報告（出國類別：考察）

氣渦輪機熱元件再生 及自製技術研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李日輝 資深機械研究專員

派赴國家：南韓、美國

出國日期：105年10月06日至10月19日

報告日期：105年12月19日

出國報告審核表

出國報告名稱：氣渦輪機熱元件再生及自製技術研習		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
李日輝	資深機械研究專員	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)	
出國期間：105年10月6日至105年10月19日		報告繳交日期：105年12月19日
出國人員	計畫主辦	審核項目
自我審核	機關審核	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.內容充實完備.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6..送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7..送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8..退回補正,原因:
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(7) 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"/>	<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"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 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"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) .其他
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式:

報告人：  單位 主管  研(能) 副所長  管 處 總經理  副總經理：

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、審核作業應於報告提出後二個月內完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務報告資訊網為原則」。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：氣渦輪機熱元件再生及自製技術研習

頁數 59 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：

李日輝/台灣電力公司/綜合研究所/資深機械研究專員/(02) 8078-2217

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：105 年 10 月 06 日至 10 月 19 日 出國地區：南韓、美國

報告日期：105 年 12 月 19 日

分類號/目

關鍵詞：氣渦輪機，熱元件，燃燒筒，導火筒，葉片，噴塗層

內容摘要：(二百至三百字)

公司自力進行氣渦輪機熱元件再生多年，節省數十億維護費用。有鑑於近期公司委託三菱原廠再生M501G葉片，其總金額便超過10億台幣；並且未來幾年公司將有西門子Si3D葉片及501J等機組熱元件再生需求，充分顯示先進熱元件再生技術建立之迫切需求。

在國內用電屢創新高、備載容量亟待提升之下，政府亟思將氣渦輪機機組做為發電之主力，此時提高氣渦輪機組發電效率、延後熱元件更換週期並降低氮氧化物排放，以提高機組發電量，成為重要的解決方案之一。為順利研發西門子及三菱等公司先進機組熱元件再生技術，並提昇設計及自製能力，有必要派工作人員至國外具有氣渦輪機葉片及其他熱元件再生及設計與製造的公司研習，作為本公司推動相關計畫的基礎。

本研習參訪南韓Sung-il Turbine公司及美國GE Gas Turbine公司與PSM公司研習相關技術，作為本公司提升氣渦輪機熱元件再生技術及推動自製技術開發的基礎。

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

目 錄

出國報告審核表	I
出國報告書提要	II
目 錄	III
表 目 錄	V
圖 目 錄	VI
一、出國緣由、行程及主要任務.....	1
1、1 出國緣由.....	1
1、2 出國行程及主要任務.....	3
二、熱元件再生技術研習.....	4
2、1 動靜葉片再生技術.....	9
2、1、1 破損鐸補技術.....	9
2、1、2 塗層噴鐸技術.....	11
2、1、3 其他葉片再生技術.....	13
2、2 燃燒組件再生技術.....	14
三、熱元件設計及自製技術研習.....	17
3、1 動靜葉片性能提升設計.....	17
3、1、1 三菱公司葉片提升設計.....	20
3、1、2 GE 公司葉片提升設計.....	23
3、1、3 PSM 公司葉片提升設計.....	27
3、1、4 Sung-il 公司葉片提升設計.....	28
3、1、5 EPRI 噴塗層性能提升.....	34
3、2 燃燒組件性能提升設計.....	36

3、2、1 三菱燃燒組件提升設計·····	36
3、2、2 GE 公司燃燒組件性能提升設計·····	40
3、2、3 PSM 公司燃燒組件性能提升設計·····	44
3、2、4 Sung-il 公司燃燒組件材料提升及製造·····	51
四、心得及建議·····	54
五、參考文獻·····	56

表 目 錄

表 1 PSM 公司第一級動葉片噴塗層與原廠比較·····	30
表 2 PSM 公司第二級動葉片噴塗層與原廠比較·····	30
表 3 PSM 公司第三級動葉片噴塗層與原廠比較·····	30
表 4 PSM 公司第一級靜葉片噴塗層與原廠比較·····	31
表 5 PSM 公司第二級靜葉片噴塗層與原廠比較·····	31
表 6 GE 公司 501F DLN 與 7HA DLN 2.6+燃燒組件比較·····	43
表 7 PSM 公司燃燒組件與原廠比較·····	50

圖 目 錄

圖 1 三菱 M501F 氣渦輪機組熱元件長期運轉損傷的照片·····	5
圖 2 GE 公司氣渦輪機組熱元件再生製程·····	9
圖 3 PSM 公司動葉片鍍補照片·····	10
圖 4 Sung-il 公司動葉片再生製程照片·····	12
圖 5 動葉片重量平衡分析照片·····	13
圖 6 PSM 公司導火筒組裝驗證照片·····	15
圖 7 Sung-il 公司再生組件驗證照片·····	16
圖 8 三菱 M501F 第一級動靜葉片照片·····	18
圖 9 三菱公司之 M501F 一級動靜葉片性能提升方針·····	21
圖 10 三菱公司之 M501F 一級動葉較新型式葉片照片·····	22
圖 11 三菱公司 M501G 一級動靜葉片照片·····	22
圖 12 GE 公司 M501F 一級動葉片性能提升方案·····	24
圖 13 GE 公司動葉片壽命消耗比對系統·····	25
圖 14 GE 公司氣機段氣封組件設計·····	26
圖 15 PSM 公司 M501F 一級動葉片性能提升方案·····	29
圖 16 Sung-il 公司動葉片再生製程照片·····	32
圖 17 Sung-il 公司動葉片精密鑄造製程照片·····	33
圖 18 Sung-il 公司 GT11NM 動靜葉片精密鑄造照片·····	34
圖 19 EPRI 葉片噴鍍塗層性能提升案例·····	35
圖 20 三菱公司 M501F 燃燒組件設計構造圖·····	38

圖 21 三菱公司 M501G 燃燒組件設計構造圖·····	39
圖 22 GE 公司 M501G 燃燒組件設計構造圖·····	42
圖 23 GE 公司最佳混合比條件示意圖·····	43
圖 24 PSM 公司燃燒筒設計構造圖·····	46
圖 25 PSM 公司燃燒組件照片·····	47
圖 26 PSM 公司燃燒組件操作性能·····	48
圖 27 PSM 公司燃燒組件測試與機組運轉範圍示意圖·····	49
圖 28 PSM 公司燃燒組件運轉測試照片·····	50
圖 29 Sung-il 公司燃燒組件製造實績照片·····	52
圖 30 各公司燃燒組件材料可銲接性質圖·····	53

一、出國緣由、行程及主要任務

1、1 出國緣由

今年國內夏季用電量屢創新高之下，備載容量最低少於2%，亟待提升；加上政府欲將氣渦輪機機組發電做為供電之主力，此時提高現有之氣渦輪機機組發電效率、延後大修週期並降低氮氧化物排放，以提高單一機組總發電量，成為重要解決方案之一。欲提高氣渦輪機組發電效率、延後大修週期並降低氮氧化物排放，需要有更先進設計的熱元件，例如耐更高溫度、更長運轉週期的氣機段動靜葉片、燃燒筒及導火筒；以及燃燒溫度更高、燃料及空氣混合更均勻的燃燒筒及導火筒。

公司自力進行氣渦輪機葉片、燃燒筒及導火筒等熱元件再生多年，總計節省數十億維護費用，使維修更加自主、組件供應上更符時效。然而有些組件的再生仍須依賴原廠家，近期公司委託三菱原廠再生M501G葉片，其金額便已超過10億台幣；並且未來幾年公司將有西門子Si3D葉片再生需求；隨著燃氣溫度更高的三菱501J機組的建置，其熱元件自行再生的需求，將在數年後原廠保固期滿時產生，以上在在顯示先進熱元件，尤其是氣機段葉片、燃燒筒、導火筒等再生技術的建立需求之迫切。

為開發先進製程以提升熱元件的性質，達到耐更高溫度、更長運轉週期的需求，部分組件需要重新設計，為免長期花費巨額維護費並過度倚賴原廠，有必要參考國外公司製程及設計經驗以建立自主設計及自製能力。

本研習參訪韓國Sung-il Turbine公司及美國GE Gas Turbine公司與PSM公司研習相關技術，作為本公司提升氣渦輪機熱元件再生技術及推動

自製技術開發的基礎。雖然公司內有Alstom公司的GT 11NM氣渦輪機組6部，GE公司的7000EA氣渦輪機組11部，Siemens公司的V84.2氣渦輪機組21部，但以上機組皆建置超過20年，且燃氣的進氣溫度較低，因此本次的研習著重於燃氣的進氣溫度高於1400°C以上的三菱501F、501G機組動、靜葉片及燃燒筒與導火筒。

1、2 出國行程及主要任務

本次出國實習期間為105.10.06~105.10.19，共計14天。10月06日搭乘華航班機，於06日抵達南韓釜山市區，07日至10日參訪Sung-il Turbine公司，研習氣渦輪機熱元件再生技術，並拜訪南部電力公司總公司及釜山市的氣渦輪機發電廠，了解其運轉與維護情形；10月11日及12日自南韓釜山搭機前往美國亞特蘭大市；10月13日至15日於亞特蘭大市參訪GE公司，研習氣渦輪機熱元件再生及自製技術，並拜訪其全球遠端運轉監測服務中心；10月16日自亞特蘭大市搭機前往西棕櫚灘；10月17日於西棕櫚灘參訪PSM公司，研習氣渦輪機熱元件再生及自製技術，並了解其燃燒調校及全球遠端運轉監測服務。10月18日及19日為返程，自美國西棕櫚灘機場搭乘長榮班機返抵台北，詳細行程如下：

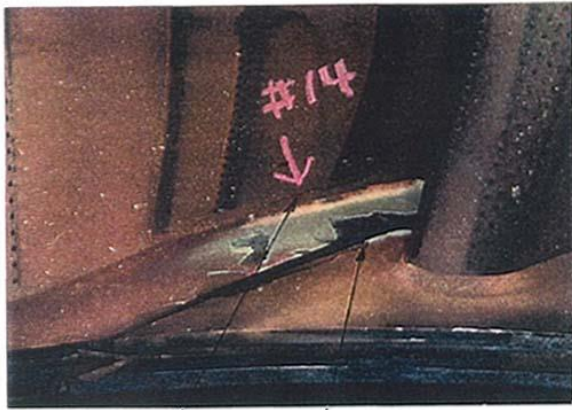
10/06	往程(台北→釜山金海機場)
10/07~10	Sung-il Turbine 公司(釜山市) 研習氣渦輪機熱元件再生技術
10/11~12	往程(釜山金海機場→台北→ 洛杉磯機場→亞特蘭大機場)
10/13~10/15	GENERAL ELECTRIC 公司(亞特蘭大) 研習氣渦輪機熱元件再生及自製技術
10/16	往程(亞特蘭大機場→西棕櫚灘機場)
10/17	PSM 公司(西棕櫚灘) 研習氣渦輪機熱元件再生及自製技術
10/18~19	返程(西棕櫚灘機場→甘迺迪機場→台北)

二、熱元件再生技術研習

氣渦輪機組件如動、靜葉片，燃燒筒、導火筒等長期在高溫 and 腐蝕環境下運轉，使基材發生嚴重的高溫氧化和熱腐蝕現象導致組件材料劣化甚至斷裂、大大降低組件之耐久性且影響機組運轉之可靠性。近年國內用電日益增加的情形下，為了填補發電之空缺，以燃燒天然氣之大型複循環機組增設了不少，其燃氣溫度從以往的900~1000°C提高至1400~1600°C，但相對加劇熱元件的疲勞、沖蝕、高溫氧化及腐蝕等劣化現象。為解決這些問題，材質的改進，合金介層及陶瓷絕熱塗層性質的提升，熱元件的冷卻效果，以及燃燒組件的燃料和空氣的混合與燃燒等的設計，都需要相對的提升。

圖1為三菱公司M501F氣渦輪機組動、靜葉片，燃燒筒、導火筒等熱元件長期運轉損傷的照片⁽¹⁾，出自三菱公司公元2000年的維護指南。由圖1(a)可見運轉28,000小時後，第一、二級靜葉在葉面與平台交接處以及平台邊緣發現有裂紋，平台的其他區域也有嚴重沖蝕與高溫氧化的現象；圖1(b)可見運轉24,000小時後，第一級動葉在葉面尾部及平台邊緣發現有裂紋，葉面底部有嚴重沖蝕現象，葉面尾部有高溫氧化的現象；圖1(c)可見運轉8,000小時後，燃燒筒筒身內面尾部發現有裂紋；圖1(d)可見運轉18,000小時以上時，導火筒銜接彎管處發現有裂紋，筒身內面尾部有嚴重沖蝕，筒身內外面有高溫氧化現象⁽¹⁾。

以上顯示當時的三菱M501F氣渦輪機組動、靜葉片，燃燒筒、導火筒，需要按照原廠建議的週期進行再生，而這些熱元件的性能確實有待提升。此次參訪的GE、PSM、Sung-il公司，其熱元件再生製程大同小異，以下藉由GE公司的再生製程⁽²⁾介紹各公司熱元件再生之異同。

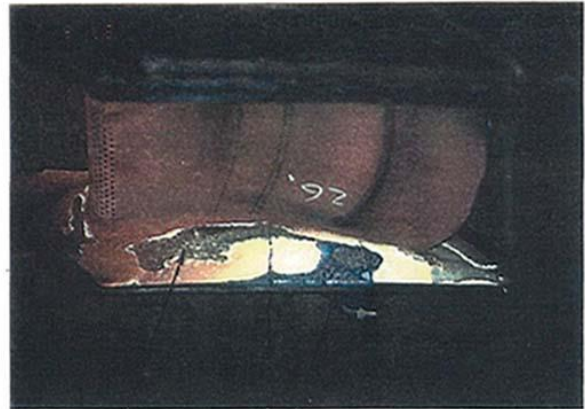


EOH = 28,000 Hrs.

Crack

Coating Wear
Crack
Oxidation

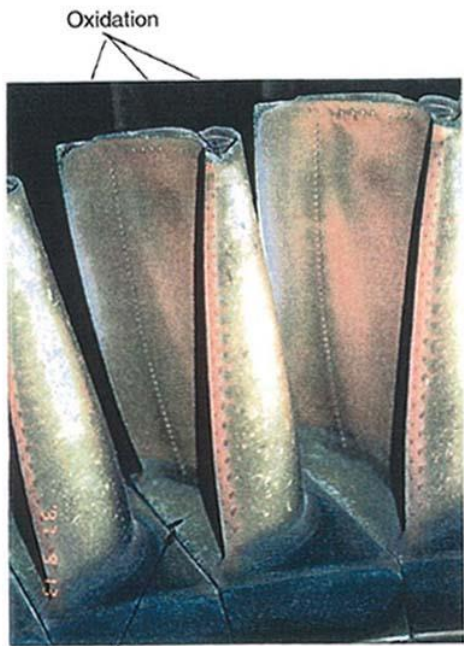
(a)



EOH = 28,000 Hrs.

Coating Wear

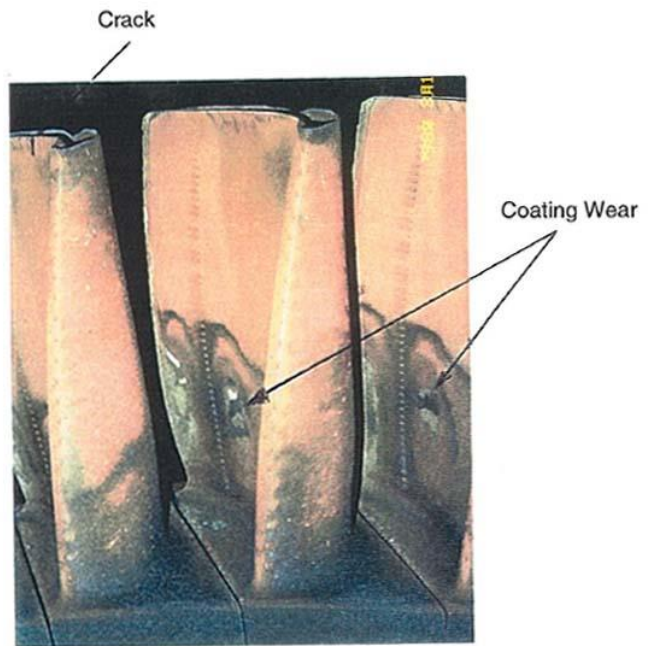
Oxidation
Crack



Oxidation

Crack

EOH = 24,000 Hrs.



Crack

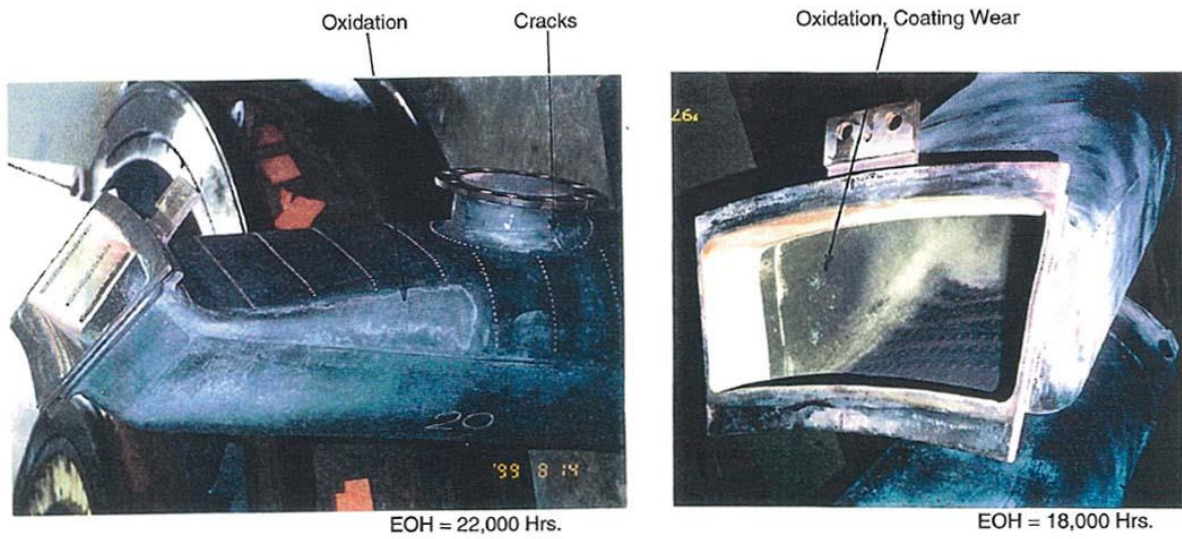
Coating Wear

EOH = 24,000 Hrs.

(b)



(c)



(d)

圖 1 三菱 M501F 氣渦輪機組熱元件長期運轉損傷的照片⁽¹⁾(a)靜葉片損傷 (b)動葉片損傷(c)燃燒筒損傷(d)導火筒損傷。

圖 2 為 GE 公司氣渦輪機組熱元件再生製程⁽²⁾。基本上各公司，其熱元件再生製程大致相同，只是歸類上的差異，或有部分製程並非三家公司都有採用，或是有採委外代工者。熱元件再生製程基本上概分為(一)來件檢查、(二)前處理、(三)破損銲修、(四)塗層噴銲、(五)後處理及成品檢查。介紹如下，

(一)來件檢查

來件檢查工作有材質檢測，目視檢查，熱影像檢查、螢光液滲檢測(FPI)、超音波檢測、渦電流檢測、X光檢測等非破壞檢測評估損壞情形，以及三次元尺寸量測、冷卻流道測試等等。

(二)前處理

前處理可能採用的去塗層方法包括噴砂、化學酸洗、鹽浴去塗層、打磨、氟化清洗(FIC)等等作業，其他還有超音波清洗以及靜葉片冷卻裝置即內膽銲回及氣封毛刷與蜂巢氣封等之取出。

(三)破損銲補作業

組件銲補作業有氬銲(TIG)、氣體保護銲(MAG)、雷射銲接、自動送料送粉的銲接及硬銲等，其他還有燃燒筒、導火筒彈簧片所需的點銲，以及銲接程序前後所執行的真空熱處理作業。

(四)塗層噴銲

噴銲製程包括大氣電漿噴銲(APS)與真空電漿噴銲(LPPS)等電漿噴銲製程及高速火焰噴銲(HVOF)。噴銲主要是在組件表面噴塗一層超合金塗層(NiCo-CrAlY)以及可能之真空熱處理作業、在超合金塗層上噴塗一層陶瓷絕熱塗層(TBC)，其他還有針對冷卻流道重建所進行的雷射或放電加工鑽孔、靜葉片冷卻裝置即內膽與氣封毛刷及蜂巢氣封等之重新置入。

(五)後處理及成品檢查

後處理包括冷卻流道測試、三次元尺寸量測、螢光液滲檢測、X光檢

測等非破壞檢測的最終確認，完成品三次元震動研磨或砂紙研磨打亮，葉片根部珠擊(Shot Peening)消除殘留應力，還有葉片重量平衡(Moment Weight)分析。

三家公司前處理的去塗層方法各有差異，採噴砂法者需處理廢砂等廢棄物，PSM 公司為求時效於廠內建置化學酸洗製程，須面對廢液處理，而 GE 公司使用水刀去塗層，40 分鐘便可除去一支動葉的塗層，但其設備費用高昂。對於氟化清洗作業，PSM 公司同樣為求時效於廠內建置氟化清洗製程，此製程需要高度的製程管控以防氟化氫外洩之危害。以上化學酸洗製程與氟化清洗製程，GE 公司採取委外代工，Sung-il 公司則考慮將氟化清洗製程委外代工。

從三菱重工業提供的資料顯示⁽³⁾：M501F 第一、二級動葉片之固溶熱處理溫度為 1210°C，持溫時間 2 小時後採氫氣冷卻，銲接後熱處理溫度則均為 1080°C，持溫時間 4 小時後採氫後採氫氣冷卻，由於 1210°C 的溫度非常接近材料的熔點溫度，因此 EPRI 提出警告⁽⁴⁾應該小心進行，以免於 1210°C 處理時葉片變形。

PSM 公司於廠內建置傳統漿料鍍鋁(Aluminum Slurry Coating)製程，以因應部分抗蝕性要求較低的葉片之需求。對於可能的化學沉積法(Cheical Vapor Deposition, CVD)在冷卻流道鍍鋁化層，以防止內孔冷卻流道腐蝕或發生裂紋，三家公司都表示鍍鋁與否屬於由客戶選擇的選項，若有需要應該都會採用委外代工的方式。

PSM 公司及 Sung-il 公司以三次元震動研磨進行完成品打亮；GE 公司則選擇以程式控制機械手臂用細砂紙研磨打亮完成品。PSM 公司並且建立了以珠擊消除葉片的根部殘留應力的技術與設備，主要用於處理空壓段葉片。三家公司都有動葉片重量平衡分析的技術。

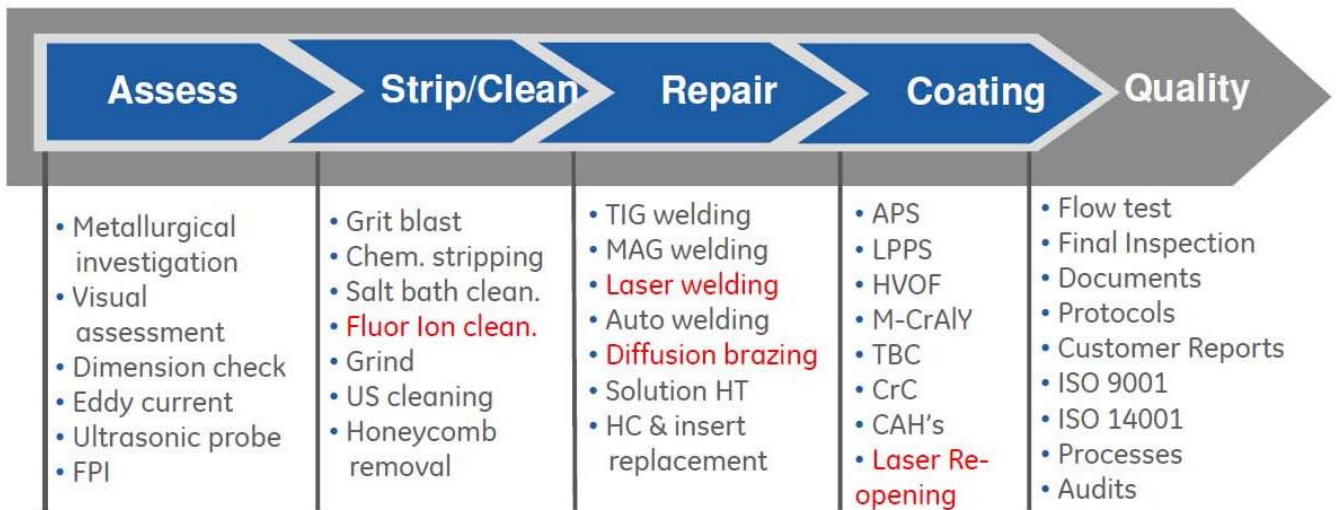


圖 2 GE 公司氣渦輪機組熱元件再生製程⁽²⁾。

以下針對動靜葉片再生技術及燃燒組件再生技術，列舉文獻內容及三家公司之作法說明之。

2、1 動靜葉片再生技術

2、1、1 破損鉚補技術

一般破損鉚補係以氬鉚或氣體保護鉚堆疊出局部的葉形，受損區域較大較嚴重者或運轉條件嚴苛之部位，以雷射同軸送粉堆疊出葉形，再進行後續的加工，達到最後所需的形狀，當然也包括對冷卻流道出口重建所進行的雷射或放電加工鑽孔。圖 3 為 PSM 公司動葉片鉚補照片⁽⁵⁾，圖 3 (a) 為葉片頂部進行局部鉚補後的照片，圖 3 (b) 為葉片噴塗後的照片。在此藉助圖 3 (b) 葉片噴塗後的照片，說明 PSM 公司在葉片受損嚴重情形的雷射鉚補方式，首先切除一定高度的葉片頂部，然後進行較大程度的鉚補堆疊，再將預先做好並完成鑽孔的頂蓋鉚上去，然後再完成更尾部的鉚補堆疊，並進行後續加工。

(a)



(b)



圖3 PSM公司動葉片鉚補照片⁽⁵⁾ (a) 葉片頂部局部鉚補 (b) 葉片噴塗後。

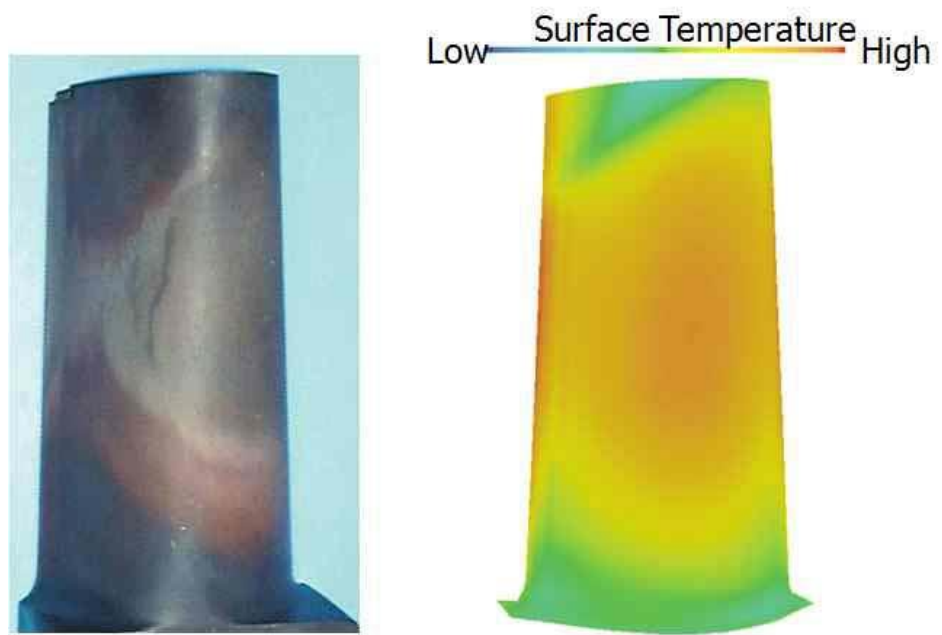
當葉片表面受嚴重高溫腐蝕，導致局部薄化時，需要在表面噴砂、超音波清洗除油脂後，塗覆以成份相近的硬鉲敷料，藉高溫真空硬鉲製程，使其擴散、融合得到相近於母材的機械性質⁽⁶⁾，如果是靜葉片較常發生的樹根狀、複雜而深的應力腐蝕，則需要藉由氟化氫清洗來徹底去除氧化層並活化表面，以便得到預期的硬鉲效果⁽⁶⁾。加拿大的 Liburdi Engineering 公司發展了一種稱為 LPM 的真空擴散接合技術，宣稱可以得到相對於底材 90% 強度以上的鉲與硬鉲接合⁽⁷⁾。

本公司經由評估將西門子V84.2第一級動葉片延用至50,000 EOH，而非原廠早年所建議的33,000 EOH；Sung-il公司同樣也以潛變破斷試驗，將葉片材料於982°C、142Mpa下進行試驗達95小時，符合42小時以上之要求，將7FA+e之動葉片，不經GE公司認可再生2次繼續使用。

2、1、2 塗層噴鉲技術

絕熱塗層噴塗有兩個方向，一是噴塗熱傳導佳、但絕熱性質低之塗層，其熱應力相對較低，但為達一定的絕熱降溫程度，噴塗厚度需較厚⁽⁸⁾；一是熱傳導較差、但絕熱性質佳之塗層，為達一定的絕熱降溫程度，所需噴塗厚度較小，但其熱應力相對較高，較易剝落⁽⁸⁾。圖4為Sung-il公司動葉片再生製程照片⁽⁹⁾，圖4(a)為Sung-il公司動葉片，以熱影像檢查的情形，可以顯示其溫度沒有異常的分布，內孔冷卻流道應無阻塞，圖4(b)顯示Sung-il公司執行動葉片再生時，將噴塗層擴及葉片頂端，該公司亦曾使用GE公司先進的塗層粉末，將7FA+e之動葉片塗層再生週期自8,000小時延長至12,000小時⁽⁹⁾。

(a)



(b)

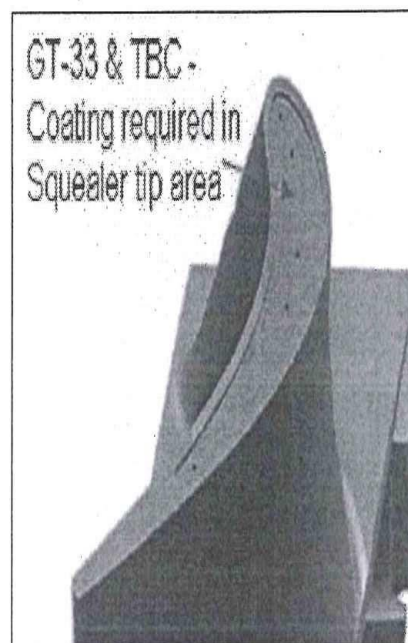


圖4 Sung-il公司動葉片再生製程照片⁽⁹⁾ (a) 葉面熱影像檢查 (b) 葉面頂部噴塗。

2、1、3 其他葉片再生技術

EPRI曾提出應考慮驗證葉片再生後內部冷卻流道是否發生裂紋，而Liburdi Engineering公司則提出需於再生時重鍍冷卻流道之鋁化塗層的建議⁽⁷⁾。葉片冷卻孔藉由化學氣相沉積鍍氧化鋁鍍膜，可以使葉片壽命得到延長，三家公司都將其列為由客戶選擇的選項。

根據文獻的報導^(10,11)，選擇單晶材料Rene 80，在其表面以漿料鍍鋁法鍍鋁或化學氣相沉積法鍍鋁，然後在1100°C下進行循環氧化試驗，結果化學氣相沉積鍍鋁可承受的循環氧化試驗數是漿料鍍鋁法的3.5倍，而漿料鍍鋁法可承受的循環氧化試驗數是原Rene 80材料的3倍，相比於Rene 80材料，化學氣相沉積鍍鋁可承受的循環氧化試驗次數遠遠高出原Rene 80材料許多。

葉片完成所有再生及非破壞檢驗程序後，為避免個別葉片重量差異，導致回裝後較大的振動，需要進行重量平衡分析，以便安排每支葉片的回裝，圖5即為動葉片重量平衡分析情形照片⁽⁶⁾。

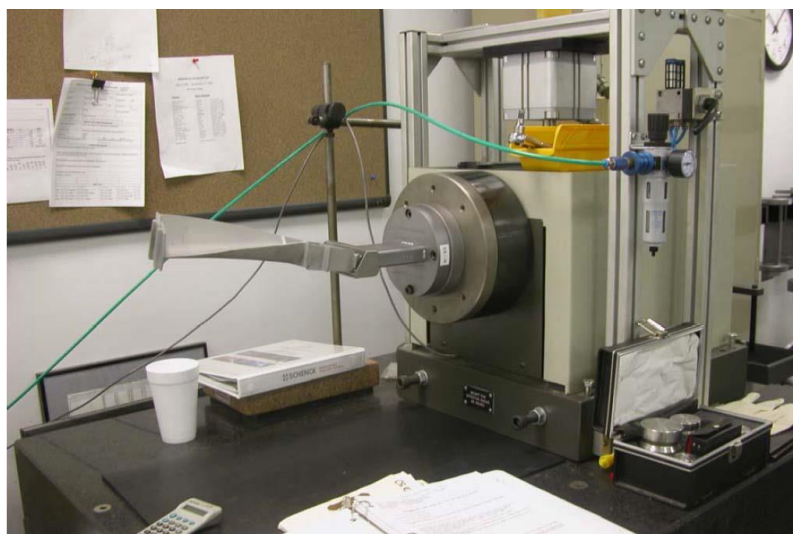


圖5 動葉片重量平衡分析照片⁽⁶⁾。

2、2 燃燒組件再生技術

燃燒組件再生工作在概念上與葉片再生類似，除了來件檢查、去塗層等前處理之外，不外乎破損銲修、塗層噴銲及成品檢查等。本公司的M501F及M501G燃燒組件，經過可攜式X光分析儀分析，是以Hastelloy X合金製造⁽¹²⁾。Hastelloy X合金屬固溶強化型鎳基超合金，較容易銲接⁽¹²⁾。再生燃燒內筒時，有時需要重新點銲彈簧片⁽¹²⁾。燃燒組件塗層噴銲主要是以大氣電漿噴銲設備執行，塗層同樣有鎳鈷或鈷鎳超合金介層及氧化鋯絕熱塗層，由於噴塗在筒身內表面，因此噴槍長度及其相對移動比較受限。

圖6為美國PSM公司導火筒再生後之組裝驗證照片，圖6(a)為個別導火筒組裝驗證之治具照片，圖6(b)則為整組導火筒組裝驗證情形照片。圖7為南韓Sung-il公司導火筒再生後之組件驗證照片⁽⁹⁾，圖7(a)為整組7FA+e導火筒組裝驗證情形照片，圖7(b)則為組件進行流量驗證測試的實驗室照片。PSM公司及GE公司有類似的流量驗證測試實驗室，三家公司的流量測試實驗，比較簡易而快速測出組件是否達一定程度的阻塞，但無法依照組件流量常數(Cv)受影響的程度。

(a)



(b)



圖6 PSM公司導火筒組裝驗證照片 (a) 單一導火筒驗證之治具 (b) 整組導火筒組裝驗證情形。

(a)



(b)



圖7 Sung-il公司再生組件驗證照片⁽⁹⁾ (a) 整組7FA⁺導火筒組裝驗證 (b) 組件流量測試。

三、熱元件設計及自製技術研習

3、1 動靜葉片性能提升設計

動、靜葉片性能的提升，不外乎葉片材料性能提升所得到的高溫潛變性質提升；葉片形狀與流道設計對葉片冷卻效果的提升；絕熱塗層性質與厚度的提升所得到的絕熱效果的提升。

圖 8 為三菱 M501F 舊型式第一級動、靜葉片照片。圖 8 (a)、(b) 為第一級動葉片照片，顯示葉面壓力側冷卻孔約 100 個，平台側面及葉片頂部也有一定數量的冷卻孔，但沒有自葉片穿越平台的冷卻孔，圖 8 (c)、(d) 為第一級靜葉片照片，顯示葉面有許多冷卻孔，穿越平台的冷卻孔，在壓力側有 19 個，在背壓側只有 4 個。

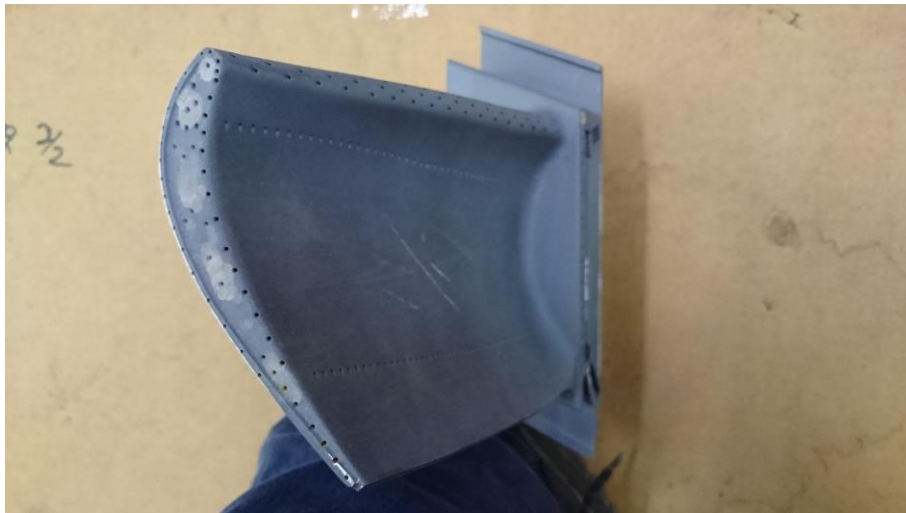
根據 EPRI 以 Ansys 軟體模擬分析 W501F 第一級動葉片⁽⁸⁾，在運轉時溫度的結果，第一級動葉片在葉面整個導翼端、部分的尾翼端以及部分的葉片頂部，溫度高達 1050°C，葉面區域也有高達 950°C，葉面一半高度的橫切面溫度分析顯示：部分葉片的內表面，尤其是接近尾翼端，其溫度高於 750°C；至於運轉時的應力分析結果，發生較大應力的位置為葉片根部、平台及尾部，而以背壓側的平台中間邊緣最高⁽⁸⁾。由於 M501F 及 W501F 動、靜葉片是通用的⁽⁶⁾，因此上述模擬分析結果，對葉片提升設計非常有參考價值。

以下就三菱公司、GE 公司、PSM 公司、Sung-il 公司葉片提升設計以及 EPRI 噴塗層性能提升分別介紹：

(a)



(b)



(c)



(d)

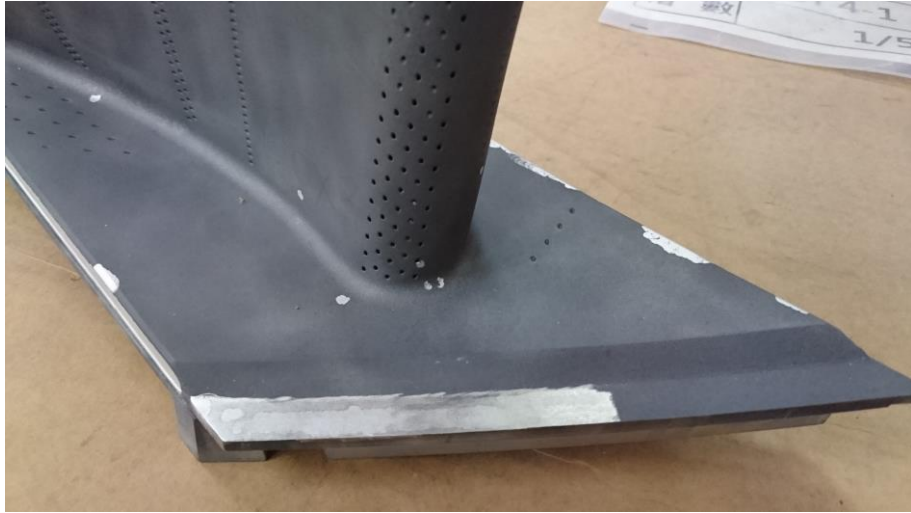


圖 8 三菱 M501F 第一級動、靜葉片照片。(a)、(b) 第一級動葉片
(c)、(d) 第一級靜葉片

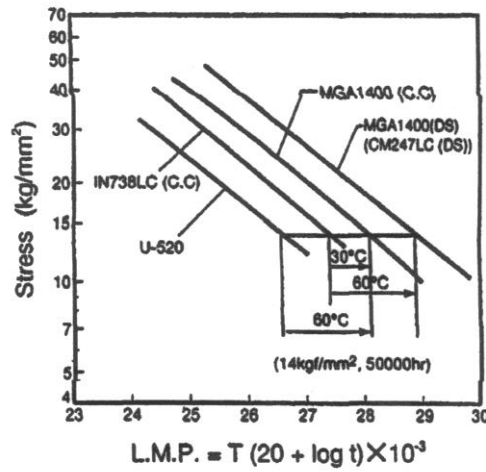
3、1、1 三菱公司葉片提升設計

圖 9 為三菱公司之 M501F 第一級動靜葉片性能提升方針^(13,14)。圖 9(a) 為葉片材料潛變性質提升示意圖，顯示三菱公司傳統鑄造的 MGA1400 動葉片材料，以相同的應力及運轉時間而言，其較 Inconel 738 材料多耐 30℃ 的燃氣溫度⁽¹³⁾。

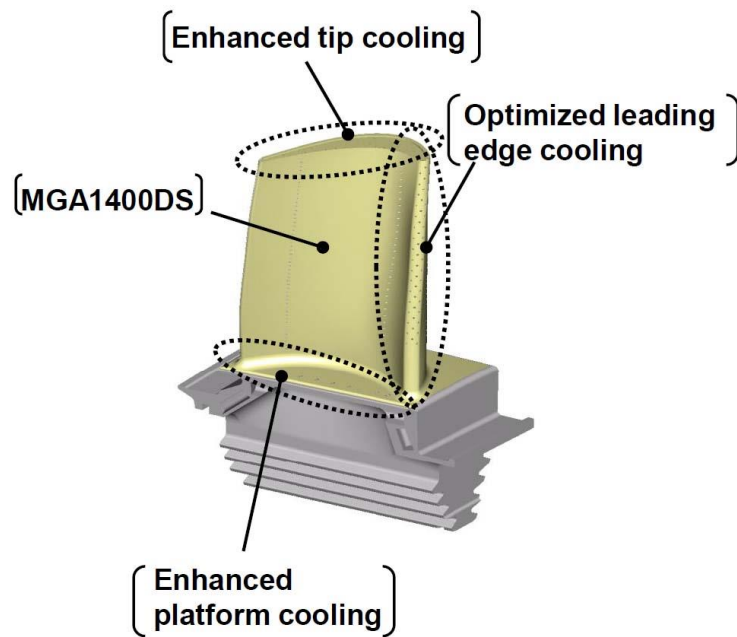
M501G 則採用定向凝固(Directional Solidification, DS)鑄造的 MGA1400 作為第一級動葉片材料，其又多耐 30℃ 的燃氣溫度⁽¹³⁾。圖 9 (b) 為第一級動葉片性能提升示意圖，顯示三菱公司除將動葉片材料提升為定向凝固的 MGA1400 外，主要是改善應力較高的葉片導翼端、平台及尾部的冷卻⁽¹⁴⁾，圖 9(c)為第一級靜葉片性能提升示意圖，顯示三菱公司除將靜葉片材料提升為定向凝固的 MGA2400 外，主要也是改善葉面及平台的冷卻⁽¹⁴⁾。圖 10 為 M501F 一級動葉較新型式葉片照片，可以發現其較圖 8(a)、(b) 的 M501F 一級動葉在平台壓力側多了 7 個穿越的冷卻孔。圖 11 為 M501G 一級動靜葉片照片，可以發現其較圖 8 的 M501F 一級動、靜葉在平台多了更多的穿越的冷卻孔。

關於 M501J 葉片葉面冷卻，三菱公司以蛇紋狀(Serpentine)遞延偏斜角度，使其具有全覆蓋式冷卻空氣薄膜(Full Coverage Film Cooling)，使其較 M501G 型之空氣冷卻技術多承受 50℃ 燃氣溫度⁽¹⁵⁾；至於其絕熱塗層，該公司以最先進的低熱傳導性(Low Thermal Conductivity)取代氧化鈮穩定型氧化鋯 (Yttria Stabilized Zirconia, YSZ)，其熱傳導性比原材質減少 20%左右，大約使葉片可多承受 50℃ 的 TIT 溫度⁽¹⁵⁾。

(a)



(b)



(c)

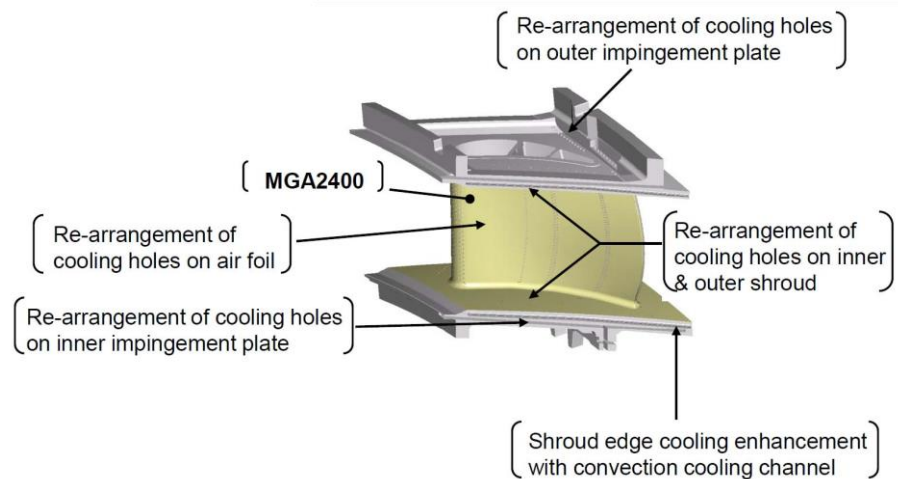


圖9 三菱公司之M501F一級動靜葉片性能提升方針^(13,14) (a) 材料性質提升 (b) 動葉片性能提升(c) 靜葉片性能提升。

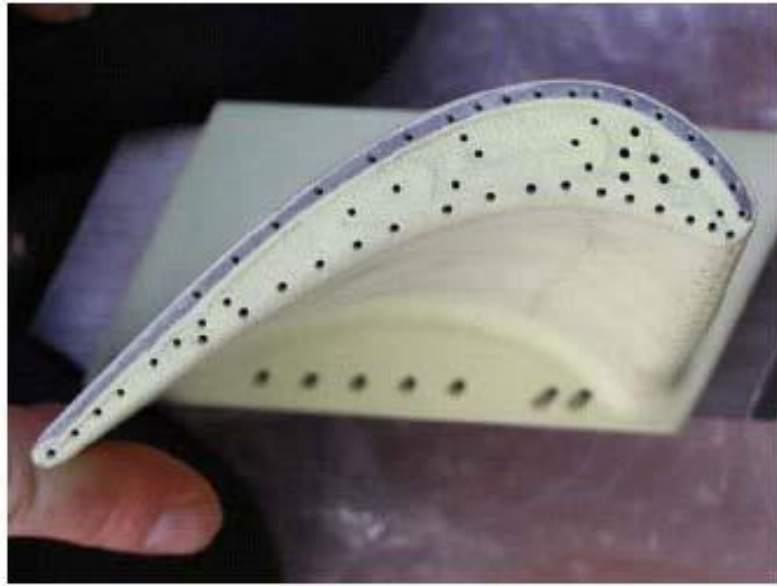


圖 10 三菱公司之 M501F 一級動葉較新型式葉片照片。

(a)



(b)



圖 11 三菱公司 M501G 一級動靜葉片照片(a) 一級動葉(b) 一級靜葉。

3、1、2 GE 公司葉片提升設計

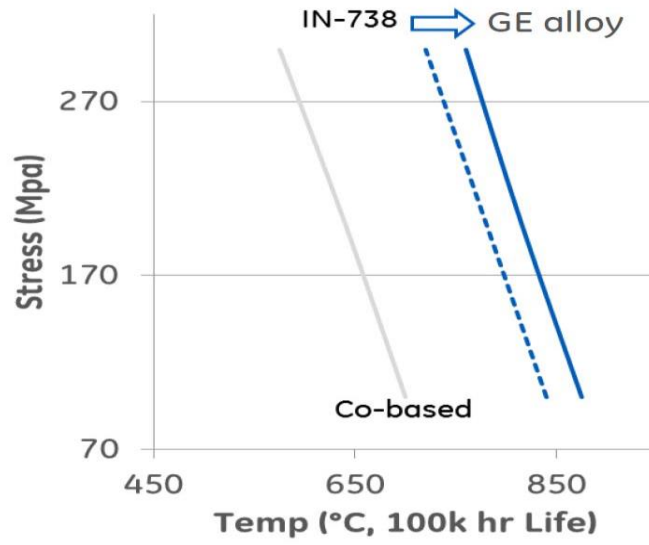
圖 12 為 GE 公司 M501F 一級動葉片性能提升方案⁽¹⁶⁾。圖 12 (a) 為材料性質提升數據圖，在相同運轉條件下，其潛變壽命為 IN738 的兩倍以上⁽¹⁶⁾；相同條件下其較 IN738 材料多耐 30°C 燃氣溫度⁽¹⁶⁾，GE 公司以厚度達 900 μm 以上、性質較佳的緻密垂直裂紋(Density Vertically Cracked, DVC)絕熱塗層，來達到需要的絕熱性質，主要是考量執行再生的容易程度。

GE 公司對於 501F 第一級動葉片運轉時的應力分析結果⁽¹⁷⁾與 EPRI 對 W501F 的結果⁽⁸⁾類似，其分析結果在壓力側的平台中間區域應力特別高，其次是葉片頂部⁽¹⁶⁾，其對於冷卻方式的加強，可以看到葉面接近頂部有細小冷卻孔，而頂端則為 10 個孔徑較大的冷卻孔⁽¹⁶⁾，如圖 12 (b) 所示；至於在平台壓力側，則是設計有平行而穿越於平台的 5 個冷卻孔⁽¹⁶⁾，如圖 12(c)照片⁽¹⁶⁾。GE 公司認為三菱公司的葉片只能使用 18,000~25,000 小時，而其葉片可以使用 32,000 小時。

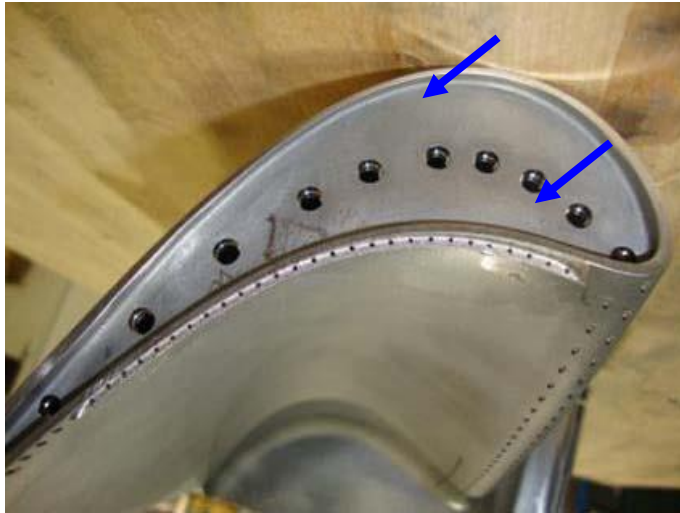
為了有效監測葉片母材潛變變化，以便評估其壽命，避免不必要的維護和修理、延長組件壽命並減少計劃外的停機時間，GE 公司開發了一種名為 Lightsight 的量測元件，貼在葉片背壓側隨葉片伸長而伸長⁽¹⁶⁾。圖 13 為 GE 公司動葉片壽命消耗比對情形⁽¹⁶⁾，圖 13 (a) 為 Lightsight 量測元件，圖 13 (b) 為監測系統示意圖，透過影像分析比對，可以評估葉片材料的潛變耗損程度，圖 13 (c) 為 Lightsight 實際黏貼於葉片背壓側照片。

GE 公司在氣封組件表面噴塗了一層蓬鬆的絕熱塗層⁽¹⁶⁾，此一絕熱塗層是弧形的，邊緣維持正常高度，而中間部位與動葉片接觸的部分較高，並且在其上切割出紋路，藉著這些設計的考量，來降低熱氣的洩漏，同時保護動葉片不被磨損⁽¹⁶⁾，圖 14 為氣封組件與動葉片組合示意圖及氣封組件噴塗層與加工紋路示意圖。

(a)



(b)



(c)

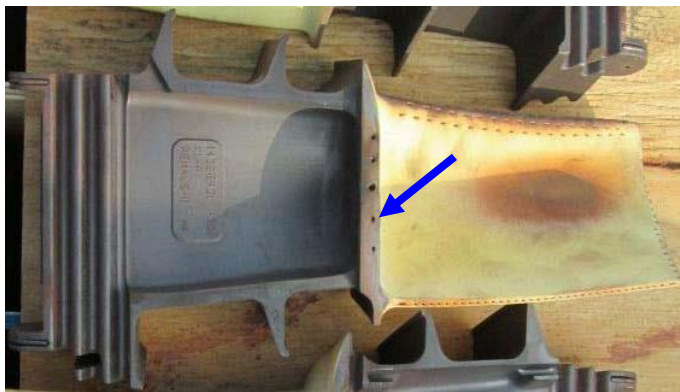
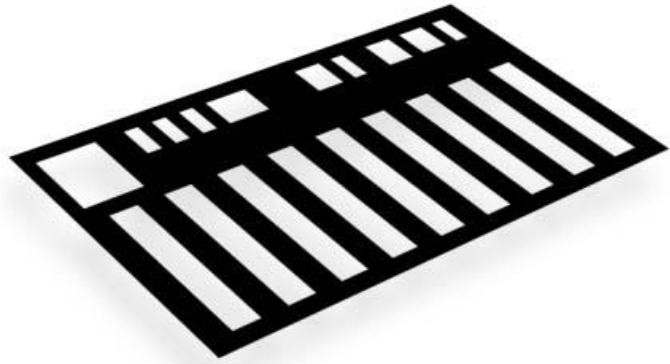
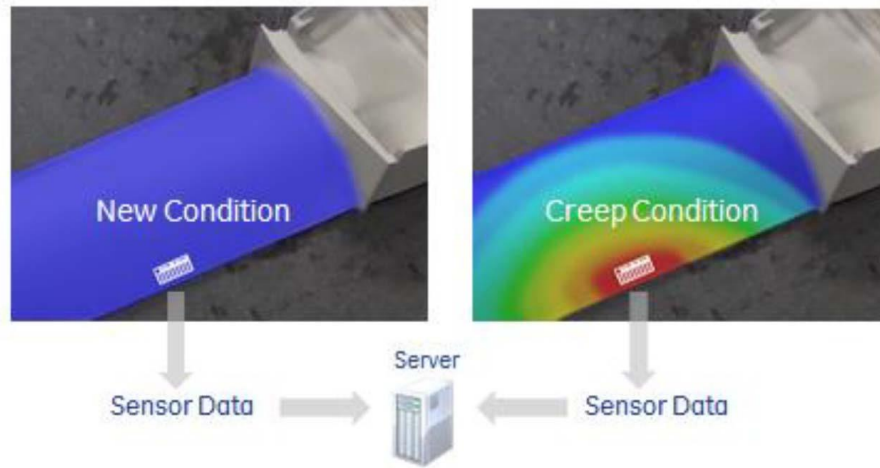


圖12 GE公司M501F一級動葉片性能提升方案⁽¹⁶⁾ (a) 材料性質提升 (b) 葉片頂部冷卻提升(c)實際照片。

(a)



(b)



(c)

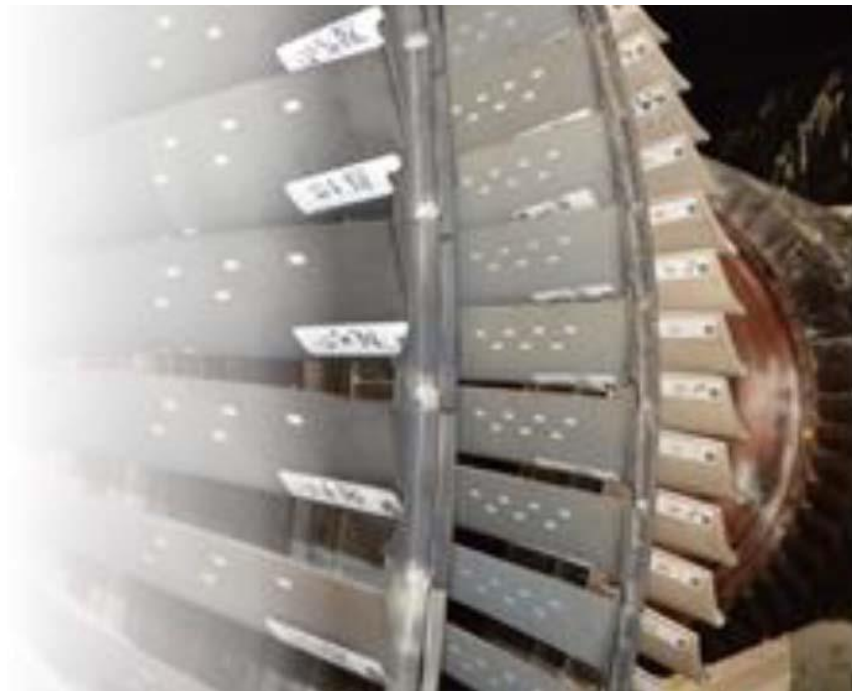


圖13 GE公司動葉片壽命消耗比對系統⁽¹⁶⁾ (a) Lightsight 量測元件 (b) 比對系統示意圖(c)實際黏貼照片。

(a)



(b)

GE Patent: US7614847

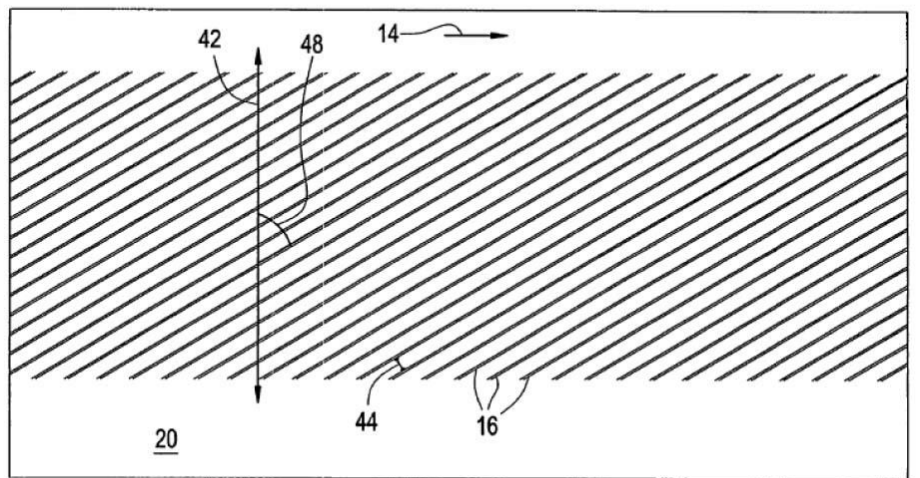


圖14 GE公司氣機段氣封組件設計⁽¹⁶⁾ (a) 氣封組件與動葉片組合示意圖 (b) 氣封組件噴塗層與加工紋路示意圖。

3、1、3 PSM 公司葉片提升設計

PSM 公司對於 M501F 第一級動葉片運轉時的應力分析結果⁽¹⁷⁾與 EPRI 對 W501F 的結果⁽⁸⁾類似，但是 PSM 公司分析的結果，在 M501F 第一級動葉片壓力側的平台中間與邊緣部分應力特別高⁽¹⁷⁾，PSM 公司認為主要是局部高溫所致，因此在鄰近這個區域的冷卻做了一些改善，詳如圖 15^(8,17,18)。圖 18 為 PSM 公司 M501F 一級動葉片性能提升方案^(8,17,18)，圖 15(a)為 W501F 內孔冷卻流道簡圖⁽⁸⁾，圖 15(b)為葉片冷卻提升方案，包括重新分配鄰近這個區域的葉面冷卻孔分布；冷卻孔的設計同樣以蛇紋狀遞延偏斜角度，使其具有冷卻空氣膜；增加了 5 個穿越平台的冷卻孔⁽¹⁸⁾，圖 15(c)為葉片平台附近性能提升方案，包括加大平台下方的空間並且在導翼側的平台下方進行削薄等等⁽¹⁷⁾，至於絕熱塗層則與 GE 公司同樣採用緻密垂直裂紋(DVC)塗層⁽¹⁷⁾。

PSM 公司對 M501F 第一、二、三、四級動葉片做關於外形、塗層、冷卻方面的改善⁽¹⁸⁾，外形方面，第一、級動葉在導翼側的平台下方進行削薄，第二級動葉在尾翼側的平台下方進行削薄，第三、四級動葉則將葉片頂端的硬面噴塗改為硬面銲接⁽¹⁸⁾；塗層方面，第一、二動葉的噴塗厚度都略有增厚，但塗層改為耐應力變化的 DVC 層⁽¹⁸⁾；冷卻方面，第一級動葉主要改善葉面導翼側冷卻孔，第二級動葉主要改善葉面尾翼側，第三級動葉主要改善葉片底部穿越至頂部的冷卻孔⁽¹⁸⁾，詳表 1 至表 3 PSM 公司第一、二、三級動葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

PSM 公司同樣對 M501F 第一、二、三級靜葉片做關於外形、塗層、冷卻方面的改善⁽¹⁸⁾，外形方面，第一級靜葉只做局部的小修，第二級靜葉則將直接面改為 Chevron 設計⁽¹⁸⁾；塗層方面，第一、二級靜葉以高速火焰噴塗超合金介層，以大氣電漿噴塗全覆蓋的絕熱塗層，第三級靜葉則以全覆

蓋的超合金介層，代替原廠的導翼端及尾翼端部分覆蓋⁽¹⁸⁾；冷卻方面，第一、二級靜葉主要進行平台壓力側的導翼端冷卻改善⁽¹⁸⁾，詳表 4、表 5 PSM 公司第一、二級靜葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

3、1、4 Sung-il 公司葉片提升設計

圖16為Sung-il公司動葉片再生製程照片^(9,19)。圖16 (a) 為穿越平台冷卻孔及葉面與平台交界的修改情形⁽⁹⁾，資料顯示其修改方案類同於EPRI 文獻發表的修改方案⁽¹⁹⁾，如圖16 (b)，包括頂蓋噴塗、10個斜角度穿越平台的冷卻孔、平台斜線面以及導翼端Cover Plate局部材料削減⁽¹⁹⁾。

Sung-il 公司建立了葉片精密鑄造技術及產能。圖 17 為 Sung-il 公司動葉片精密鑄造製程照片，圖 17 (a) 為陶瓷砂心與藍色臘膜，圖 17 (b) 為 4 支藍色的葉片臘膜組成的一株臘樹，圖 17 (c) 為沾漿及沾砂的製作殼模完成情形。圖 18 為 Sung-il 公司精密鑄造的 GT11NM 動靜葉片照片⁽²⁰⁾，圖 18 (a) 為動葉片壓力側及背壓側照片，圖 18 (b) 為靜葉片壓力側及背壓側照片。Sung-il 公司有實驗型 HIP 設備⁽⁹⁾，按其規格估計連夾治具一次只能處理一支小型葉片。

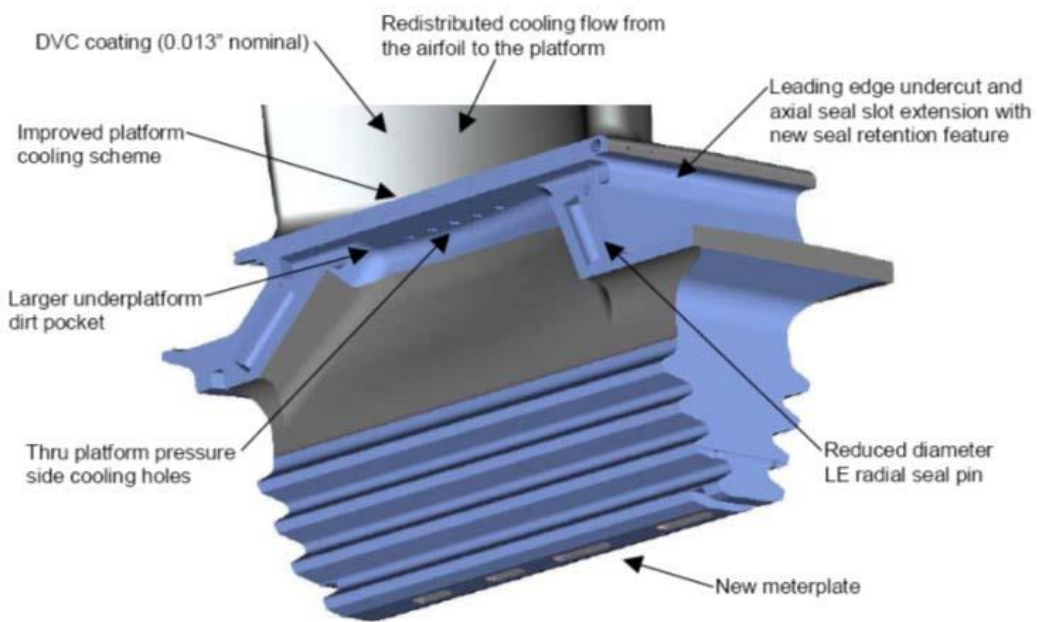
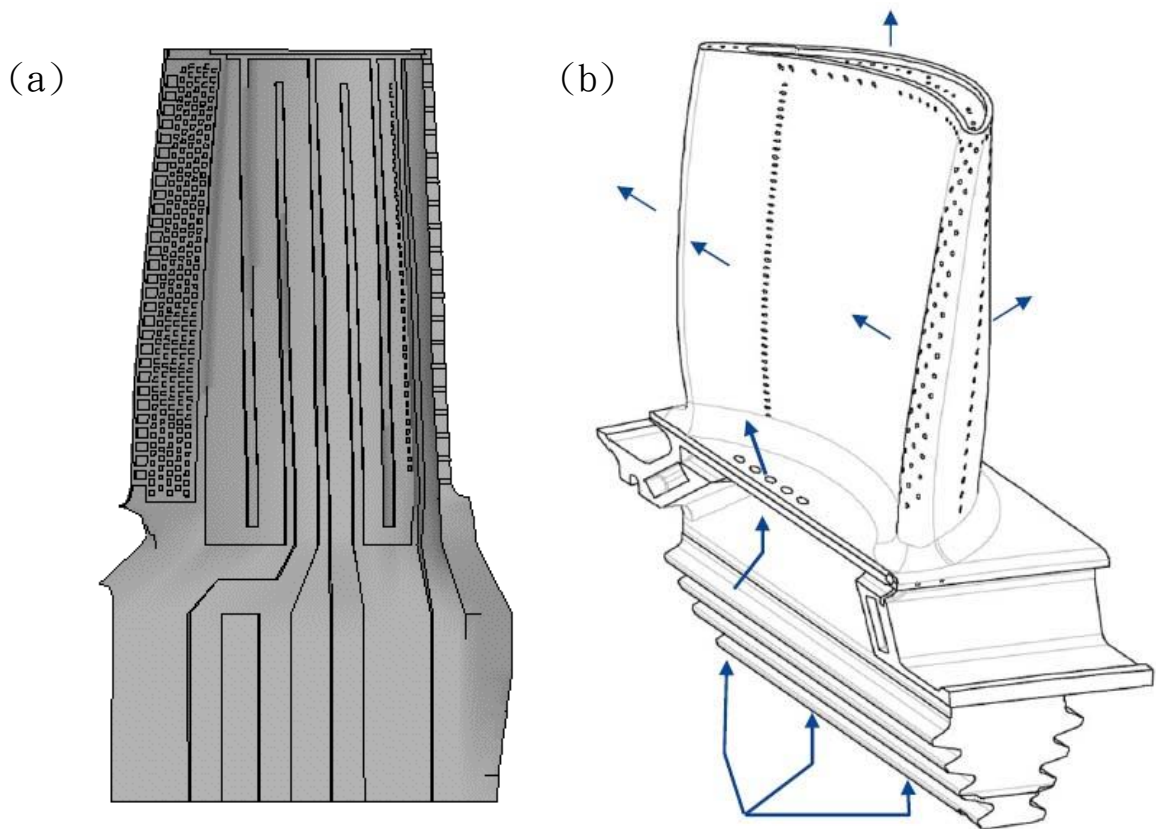


圖15 PSM公司M501F一級動葉片性能提升方案^(8,17,18) (a) W501F內孔冷卻流道簡圖 (b) 葉片冷卻提升方案(c)葉片平台附近性能提升方案。

表 1 PSM 公司第一級動葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

Component	Aspect	OEM	PSM M501F
Blade 1	Geometry	No squealer tip	2 squealer tips LE platform undercut Larger seal pocket
	Material	MGA1400 DS	PSM116 EQ
	Coating	0.016"-0.024" APS	HVOF bond coat PSM420 – 0.015"-0.025" strain resistant TBC
	Cooling	1+3+3 serpentine pass Normal LE FC holes	1+3+3 serpentine pass Improved leading edge cooling holes

表 2 PSM 公司第二級動葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

Component	Aspect	OEM	PSM M501F
Blade 2	Geometry	1 squealer tip	2 squealer tips TE platform undercut
	Material	MGA1400	PSM116 EQ
	Coating	0.014"-0.022" APS	HVOF bond coat PSM415 – 0.015"-0.025" strain resistant TBC
	Cooling	1+3 serpentine pass No turbulators in 1 pass Drilled TE	1+3 serpentine pass Turbulators in all passes Optimized cast trailing edge

表 3 PSM 公司第三級動葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

Component	Aspect	OEM	PSM M501F
Blade 3	Geometry	1 tip shroud fin Hard face coat	2 tip shroud fins Hard face weld
	Material	MGA1400	PSM112
	Coating	MCRAIY	MCRAIY
	Cooling	Shorter 8 drilled holes	Full length 8 stem drilled holes

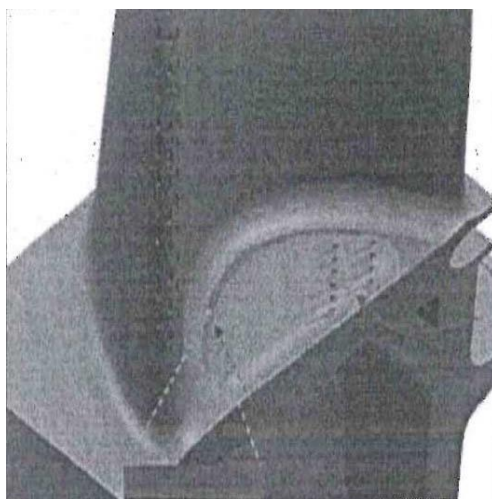
表 4 PSM 公司第一級靜葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

Component	Aspect	OEM	PSM M501F
Vane 1	Geometry	OD hook and timing slot changes	Same as OEM; interchangeable ID rail relief cut
	Material	MGA2400	PSM109
	Coating	TBC coating	HVOF bond coat PSM415 - full coverage APS TBC
	Cooling	“Sewer pipes” along mateface	Platform cooling improvements Leading edge cooling improvements

表 5 PSM 公司第二級靜葉片噴塗層與原廠比較⁽¹⁸⁾。

Component	Aspect	OEM	PSM M501F
Vane 2	Geometry	Straight mateface	Chevron design
	Material	MGA2400	PSM109
	Coating	TBC coating	HVOF bond coat PSM415 - full coverage APS TBC
	Cooling	“Sewer pipes” along mateface	Platform cooling Improvements Leading edge impingement cooling improvement

(a)



(b)

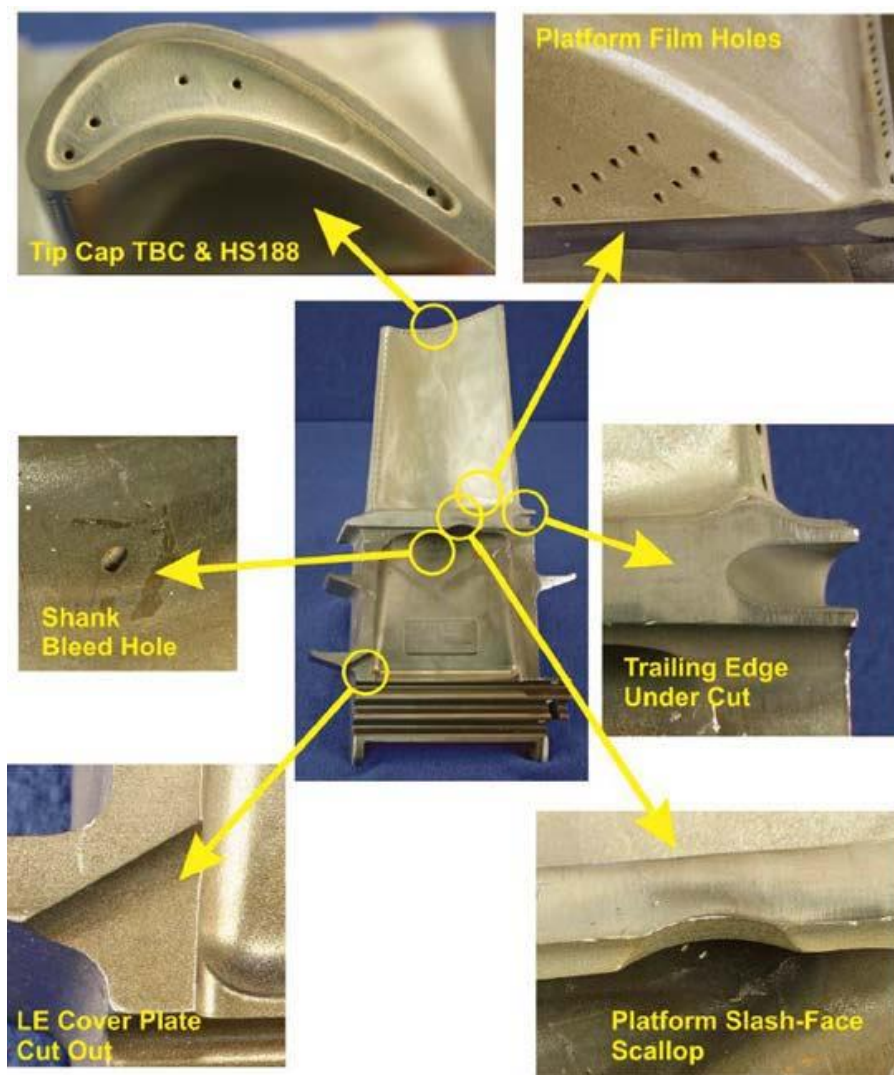


圖16 Sung-il公司動葉片再生製程照片^(9,19) (a) 穿越平台冷卻孔及葉面與平台交界修改 (b) EPRI文獻之修改方案

(a)



(b)



(c)



圖17 Sung-il公司動葉片精密鑄造製程照片 (a) 砂心與臘膜 (b) 葉片組臘樹(c)製作殼模



圖18 Sung-il公司 GT11NM動靜葉片精密鑄造照片⁽²⁰⁾ (a) 動葉片 (b) 靜葉片。

3、1、5 EPRI 噴塗層性能提升

圖 19 為 EPRI 發表之葉片噴鋅塗層性能提升案例⁽²¹⁾，圖 19 (a) 為母材與介金屬層及 DVC 絕熱塗層示意圖，其絕熱塗層厚度達 0.037” ，明顯比 PSM 公司的 0.024” 為厚，約為 940 μm ，與 GE 公司的絕熱塗層厚度相當，

圖 19 (b) 為 DVC 鍍層裂紋照片，其在高溫膨脹時，因著垂直裂紋可以隨之張開，不至於導致塗層脆裂或剝落。

(a)



(b)

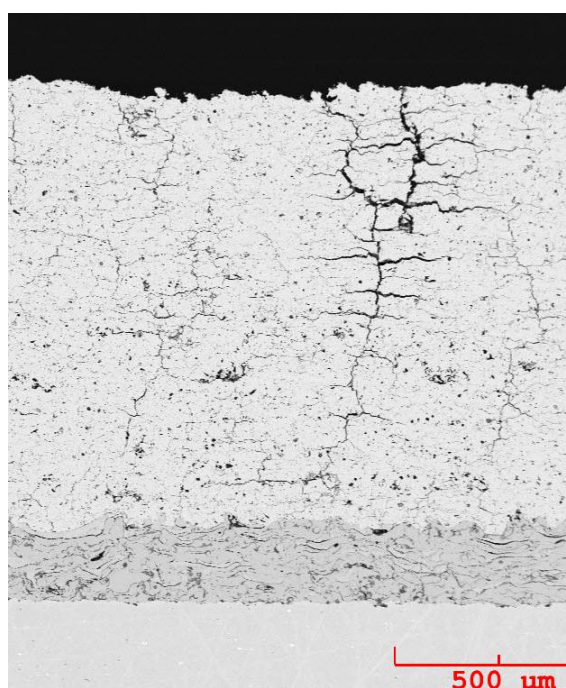


圖19 EPRI葉片噴鋁塗層性能提升案例⁽²¹⁾ (a) 母材與介金屬層及DVC絕熱塗層示意圖 (b) DVC鍍層裂紋照片。

3、2 燃燒組件性能提升設計

隨著氣渦輪機組燃燒氣體進氣端溫度的提升，燃燒組件材料及噴塗層性能的提升、組件設計的冷卻及高溫空氣與燃料的均勻混合，因此得以提高發電效率、放大可運轉的負載範圍、降低 NO_x 及 CO 氣體的排放、延長維護更換的週期等等，成為設計燃燒組件最重要的課題。

3、2、1 三菱燃燒組件性能提升設計

雖然本公司使用的M501F、M501G燃燒筒及導火筒材料，經過可攜式X光分析儀分析，為Hastelloy X合金⁽¹²⁾，但有文獻提到三菱重工可能使用其自行開發的Tomilloy合金製造燃燒內筒^(22~24)。Tomilloy合金含22%鉻、8%鈷、9%鉬、3%鎢、1%鈦、0.3%鋁^(22~24)，文獻顯示其在800°C之降伏強度與抗拉強度分別為294以及441Mpa⁽²⁴⁾，相較於Hastelloy X合金在760°C之降伏強度與抗拉強度分別為237及461Mpa、在871°C之降伏強度與抗拉強度分別為194及310Mpa，Tomilloy合金性質確實優異，並且其伸長率高達110%，更是Hastelloy X合金或是Inconel 617材料所無法比擬⁽²⁴⁾。根據文獻Tomilloy合金在850°C高溫、10,000小時長時間下，其金相尚未顯示出明顯的劣化⁽²⁴⁾。

另外，對於燃燒組件設計的提升，主要是在冷卻及高溫空氣與燃料的均勻混合。圖20為三菱公司M501F燃燒組件設計構造圖^(1,15,25)，圖20 (a) 為燃燒組件整體構造，顯示M501F燃燒組件燃燒器 (Fuel Nozzle) 有1個Pilot Nozzle、8個Main Nozzle，進氣閥 (Inner Gas Valve, IGV) 控制高壓空氣的進氣量，旁通閥 (Bypass Valve) 則協助調節空氣與燃料的均勻混合，由圖中可知整個燃燒內筒 (Basket) 全為燃燒區⁽¹⁵⁾；圖20 (b) 的燃

燒筒構造圖同樣說明了上述的燃燒情形⁽¹⁵⁾，另外圖中的兩個藍色箭頭表示壓縮空氣加強冷卻之處，圖20(c)顯示了此一局部雙層壁中的由Plate-Fin 提升為MT Fin冷卻之構造^(14, 25)。

圖21主要為三菱公司M501G燃燒組件設計構造圖^(15, 25)。M501G燃燒組件除了保有進氣閥的控制作用、旁通閥的調節作用，燃燒器則增加了Tophat Nozzle的設計，讓大約15%天然氣與空氣提前混合，分擔燃燒器之Main Nozzle預混功能，使混合效果更好、燃燒效率更高、燃燒火焰更短，以降低NO_x排放量，因此燃燒內筒更名為Swirler Holder，如圖21 (a) 所示之燃燒組件整體構造；圖21 (b) 顯示燃燒火焰區僅佔約燃燒內筒的四分之一，M501G燃燒內筒主要功能，成為提供燃料與空氣混合通道⁽²⁵⁾。燃燒內筒同樣以內外二層特殊鋼板形成夾層及內部冷卻通道，並在內層鋼板上同樣加工形成MT- Fin以提昇冷卻效果^(14, 25)。

M501J型氣渦輪機承襲許多M501G型氣渦輪機的設計，但其燃燒組件移除了空氣旁通閥。空氣旁通閥雖然可以調節空氣進到燃燒室的氣量，進而調節空燃比來控制NO_x排放量。但高於一定負載後，空氣旁通閥需全關，以便提供較多的空氣到燃燒室；可是當空氣旁通閥漏氣時，部分空氣旁通至下游，造成進到燃燒室之空氣減少，影響到機組效率以及NO_x排放量增高。因此，M501J氣渦輪機移除了空氣旁通閥，取而代之的是對燃燒器各個Nozzle的燃料分配控制，達到調節空氣與燃料比率的功能⁽¹⁵⁾。圖21(c)為M501J型及舊型噴嘴漩流設計得比較，M501J型噴嘴提供空氣與燃料更均勻的混合⁽¹⁵⁾。

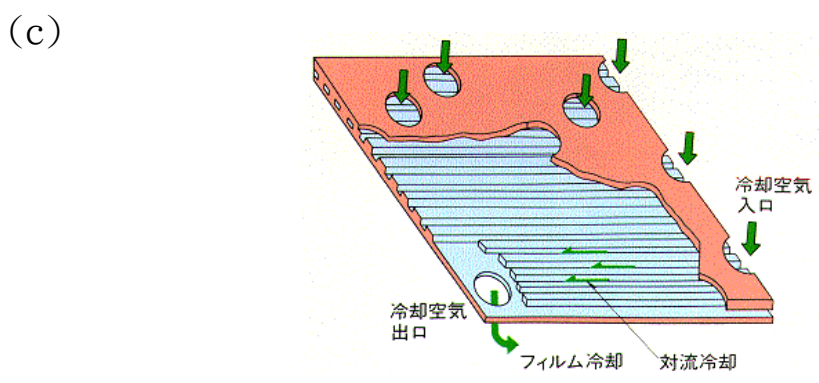
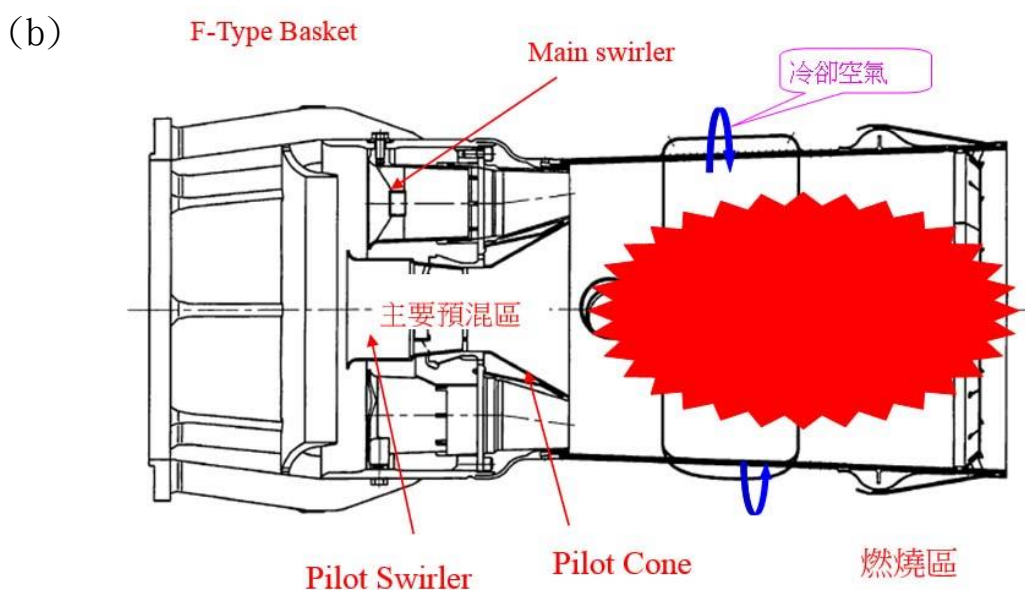
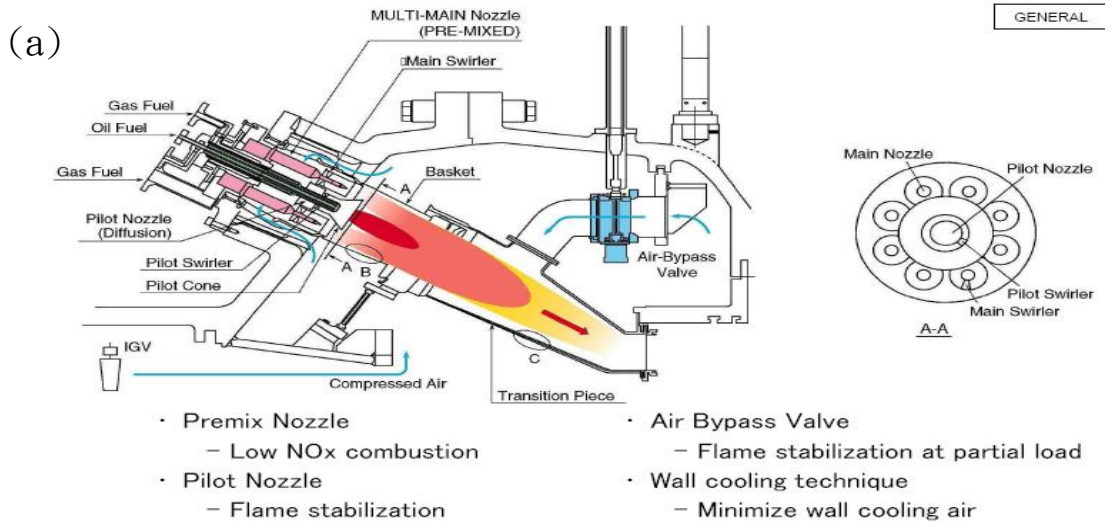
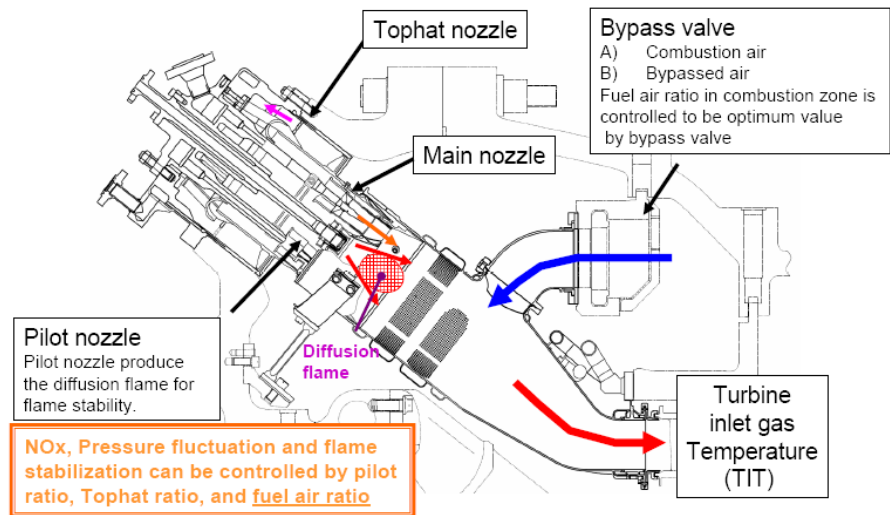


圖20 三菱公司M501F燃燒組件設計構造圖^(1, 14, 15, 25) (a) 燃燒組件整體構造 (b) 燃燒筒預混及燃燒 (c) MT Fin。



G-Type Swirler Holder (Basket)

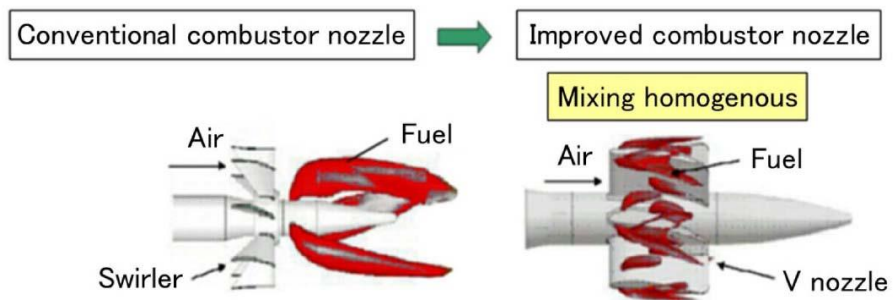
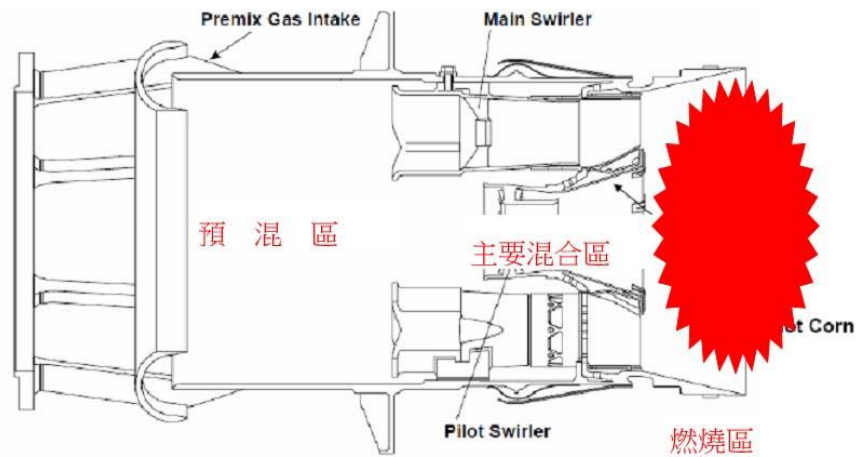


圖21 三菱公司M501G燃燒組件設計構造圖^(15, 25) (a)燃燒組件整體構造 (b) 燃燒筒預混及燃燒 (c)舊型及新型噴嘴設計。

3、2、2 GE 公司燃燒組件性能提升設計

GE公司設計的乾式低氮排放式(Dry Low NO_x, DLN)燃燒器 (Fuel Nozzle) 從DLN1發展到DLN2/2.6，再發展到DLN2+及DLN2.6+，從2個火焰區發展為單火焰區；將文火管穩定的精餾預混火焰改良為無文火的穩定傾斜預混火焰；燃料分級方式由軸向分級(Axial fuel staging)及空氣分佈，增加了周邊分級(Circumferential fuel staging)；增加中心噴嘴以提高調節比，達到火焰餘量控制以改善燃料靈活性，使得501F級溫度下，冷卻和洩漏減少，NO_x排放控制在9ppm。

圖22為GE公司7HA DLN 2.6+燃燒組件設計構造圖^(26,27)，圖22 (a) 為501F DLN燃燒組件⁽²⁷⁾，圖22 (b) 為7HA DLN 2.6+燃燒組件⁽²⁷⁾，GE公司藉圖22 (b) 中導火筒在標示1位置的構造設計，達到提升預混，以確保低的NO_x排放；藉圖中導火筒在標示2位置的壓縮空氣入口，達到軸向式燃料分級，使Turndown向低負載範圍擴展；藉圖中導火筒外殼在標示3位置的空氣屏蔽(Air shield)，達到軸向空氣分佈，並保護燃料軸向分級系統；藉圖中導火筒在標示4位置的縮短及較低的彎角，達到減少停留時間及導火筒的定制(Tailored)冷卻。圖22(c)為燃料噴嘴的構造圖⁽²⁶⁾，其旋流噴嘴(Swozzle, Swirler + Nozzle)設計有 hollow swirling vane fuel injection)構造，所製造的旋流使燃料與壓縮空氣充分混合，NO_x排放甚至可以控制在5ppm。

表6為GE公司7HA DLN 2.6+燃燒組件與501F DLN燃燒組件比較⁽²⁶⁾，表中左側欄位為501F燃燒組件規格，右側欄位為7HA 2.6燃燒組件規格，顯示501F燃燒筒為直徑16英吋的直筒構造；7HA 2.6燃燒筒則為直徑14~18英吋的錐筒構造，7HA 2.6燃燒筒的內襯部分較長以保護導火筒，其導火筒較短並且彎角較低，以達到減少停留時間，以及對導火筒衝擊較小等設

計目的；另外，按照GE公司的設計，燃燒器4支噴嘴全部設計為預混的噴嘴，而非三菱原廠的3支噴嘴設計為預混噴嘴，1支噴嘴設計為擴散混合噴嘴⁽²⁶⁾。

GE公司設計的導火筒加強了雙層壁的冷卻構造，由末端往前端輸送，其被外筒的突起及沖壓的空孔引入雙層壁之間，除了達到冷卻內壁，也因熱傳遞使壓縮空氣溫度提高；壓縮空氣接著進到導火筒前端，因為跳閘(Tripped)結構而形成漩渦，使氣流被切斷而增加熱傳遞，再次達到冷卻內壁及升溫的效果⁽²⁶⁾。

當燃燒室的燃料與壓縮空氣混合比高到一定比值時，燃燒氣體的溫度達到最高，此固然對發電效率有助益，此時的NO_x排放卻也是最高的，只在較低的燃料與空氣混合比時，NO_x的排放才是最低⁽²⁶⁾；圖23為最佳混合比條件示意，顯示在燃料與空氣的高混合比導致高NO_x排放與低混合比容易熄火間，並考慮到冷調動態(Cold-tune dynamic)與熱調動態(Hot-tune dynamic)，可以找到適合操作的綠色區間⁽²⁶⁾，GE公司的7HA DLN 2.6+燃燒組件，便是設計在此混合比的區間，其改善了舊式燃燒內筒空間內，燃料與空氣混合比或低或高、不均勻的情形，而得到燃燒內筒燃料與空氣的均勻混合⁽²⁶⁾。

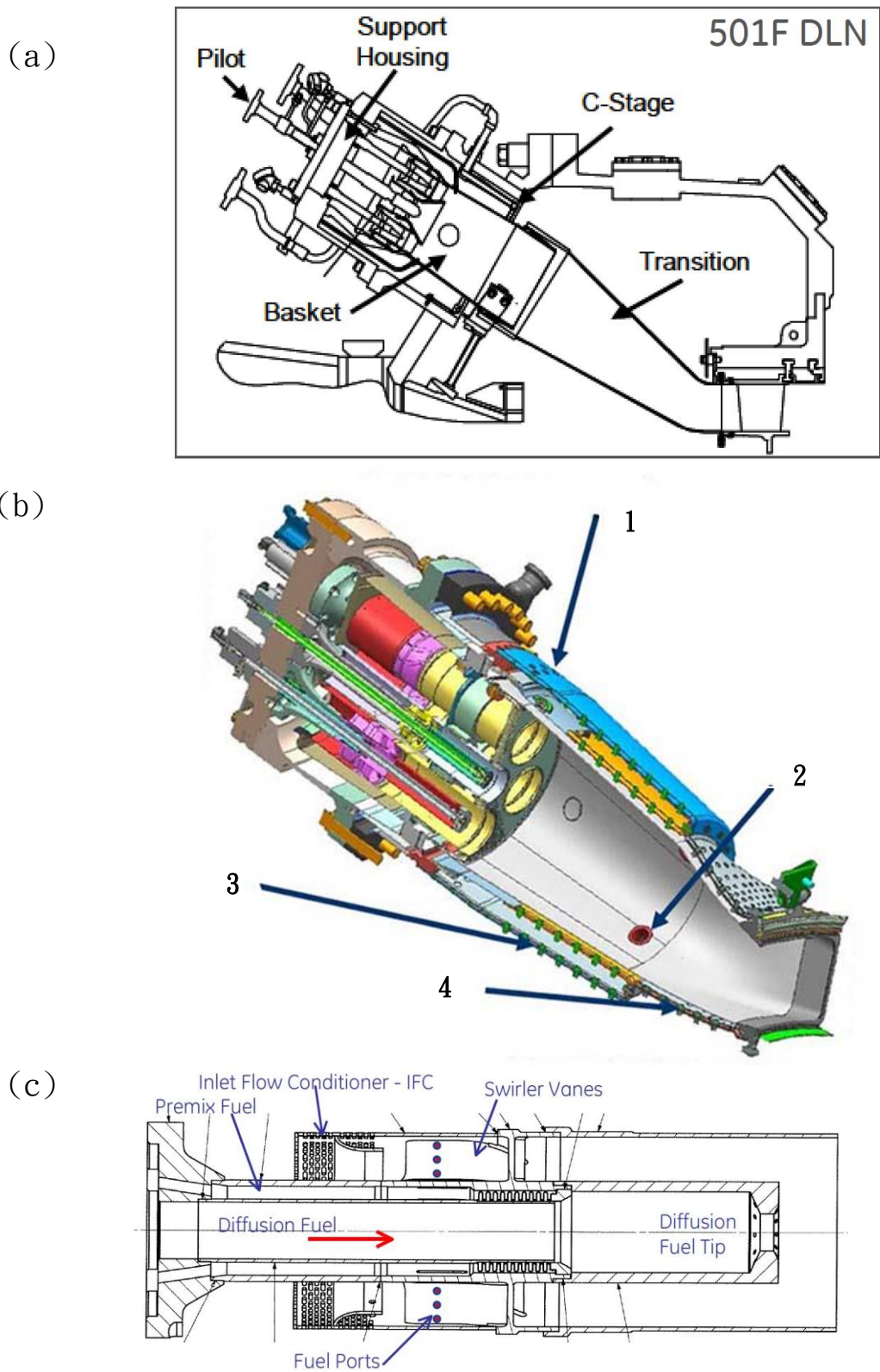


圖22 GE公司燃燒組件設計構造圖^(26, 27) (a) 501F DLN燃燒組件 (b) 7HA DLN 2.6+燃燒組件(c)漩流噴嘴。

表 6 GE 公司 501F DLN 與 7HA DLN 2.6 燃燒組件比較⁽²⁶⁾。

16, ~16" diameter	Can Count	14, ~18" diameter
4, 3 premix/1 diff	Fuel Circuits	4, 4 premix
Higher	Cant Angle	Lower
Cylindrical, shorter	Liner	Conical, longer
Longer	Transition Piece	Shorter

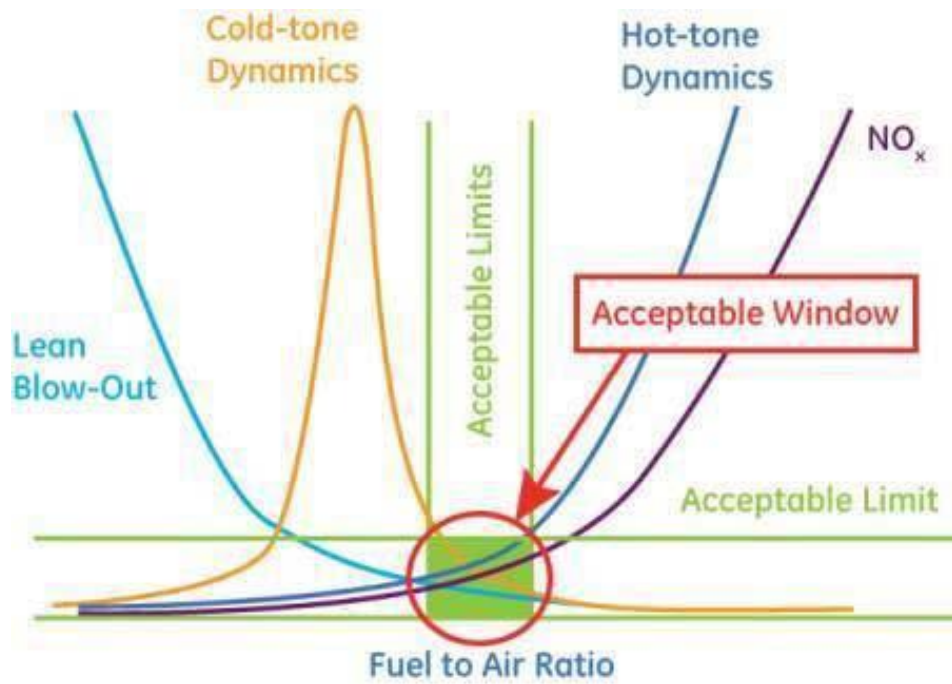


圖 23 GE 公司最佳混合比條件示意圖⁽²⁶⁾

3、2、3 PSM 公司燃燒組件性能提升設計

PSM 公司設計的燃燒筒壓縮空氣自筒尾進入，受燃燒筒外殼引導，分兩股進入燃燒筒，一股供應燃燒筒內部中心區，一股供應燃燒筒內部環狀區，燃料則是有兩股自燃燒筒前端導入，兩股分別由燃燒筒上下導入^(28~30)。因此 PSM 公司設計的燃燒筒有中心區及環狀區兩個燃燒區域，低負載時主要是靠環狀區的氣體混合及燃燒來控制，藉其匹配的調整達到混合燃燒均勻，使機組在高低負載下，效率仍能確保，NO_x 排放也能控制^(28~30)。

圖 24 為 PSM 公司燃燒筒設計構造示意圖^(29,30)。圖 24 (a) 為燃燒筒氣流示意圖，圖中藍色箭頭代表壓縮空氣紅色箭頭代表高溫燃燒氣⁽²⁹⁾，其氣動漩流提供很大的運轉穩定裕度；其火焰隔離使燃燒室內允許擴展的調整操作；強大的混合技術得以提高燃油靈活性和容許裕度；NO_x 低至 5ppm 並且可以自動燃燒調校；壽命 32,000；起停 1,250 次；可使用雙燃料，圖 24(b) 為 PSM 公司燃燒筒與原廠設計差異示意圖，主要的性能提升有：
1. 材料選擇允許更強的設計；2. 冷卻和頭端間的流量分配優化靈活調節性；3. 滲流孔設計允許在百葉窗設計上實現一致的流量控制；4. 緊流控制公差提高了調節比和操作窗口，諧振器提高穩定性，多個頭端更改可修復性⁽³⁰⁾。

圖 25 為 PSM 公司燃燒組件照片^(5,28)。圖 25(a) 為燃燒組件噴嘴照片，顯示其漩流(Swirl)設計，可以使壓縮氣體與燃氣充分混合⁽⁵⁾，GE 公司的燃燒組件噴嘴也有類似的漩流設計，並且也擁有專利，圖 25 (b) 為導火筒蜂巢結構照片，其氣密效果比毛刷減少 30% 的高溫燃氣洩漏⁽²⁸⁾。

圖 26 為 PSM 公司燃燒組件操作性能^(29,30)。圖 26(a) 為 PSM 公司燃燒組件與原廠操作性能比較，顯示其 NO_x 及 CO 的排放，明顯較原廠低⁽²⁹⁾，圖 26 (b) 為 PSM 公司燃燒組件將 Turndown 範圍自 43% 負荷擴展至約 30

%負荷以下，並且在不調整燒曲線下，維持 9ppm 的 NOx 排放及低的 CO 排放⁽³⁰⁾。

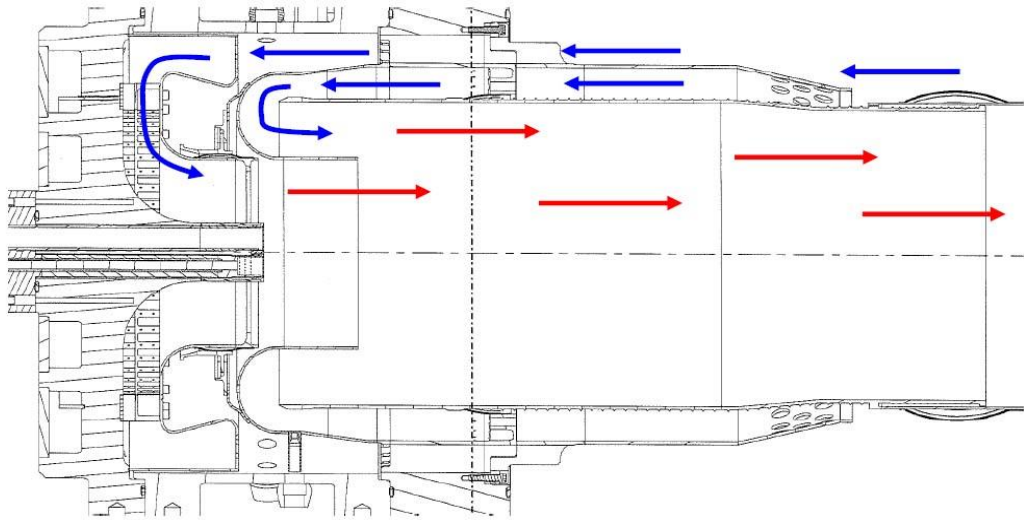
圖 27 為 PSM 公司燃燒組件測試與機組運轉範圍示意圖⁽³⁰⁾，圖 27(a) 為燃燒組件測試示意圖，藉由許多的溫度及壓力等感測器，可以實際測試客戶的燃燒組件運轉情況，當然也可以測試開發中的燃燒組件，以利性能提升設計，圖 27(b) 為機組運轉範圍與溫度控制，在較低負荷情形下，以進氣閥開度調節達到控制燃燒氣體溫度的目的，並且可以在低負荷下長時間運轉。PSM 公司設計的 DLN2.6 燃燒組件壓差比 OEM 小，發電損耗較低；其 GT36 燃燒組件，可以將 24,000 EOH 延長至 32,000 EOH；起停次數自 900 次延長至 1,100 次起停。

如圖 24 所示燃燒筒筒身為多層，燃燒筒材料為 Hanse 282，此材料在 800°C 之降伏強度及抗拉強度分別約 600 及 700Mpa，伸長率 24%，允許強度更高的設計，為耐燃燒之高溫，絕熱塗層採用具緻密垂直裂紋(DVC)的噴塗層。

PSM 公司的導火筒較為不同的是筒身為實心，採實心構造著眼於容易維修，其冷卻孔隨筒身曲線成一定夾角，導火筒材料為 Hanse 230，此材料在 800°C 之降伏強度及抗拉強度分別約 300 及 420Mpa，伸長率 65%以上，噴塗層為一般 TBC。經過 38,000 小時運轉後，其顏色顯示尚未發生嚴重高溫氧化。PSM 公司測試導火筒的流量，乃是以特殊膠帶分區密封分區測試。

表 7 為 PSM 公司燃燒組件與原廠比較^(18,)，其燃燒器再生週期壽命 (Combustion Repair Interval Life, CI)，達 25,000 EOH，超過原廠的 3 倍，起停 900 次，為原廠的 2 倍，最多可再生利用 4 次，總壽命 10 萬 EOH，總起停 3600 次，至少為原廠的 4 倍。圖 28 為 PSM 公司燃燒組件運轉測試照片⁽³¹⁾。

(a)



(b)

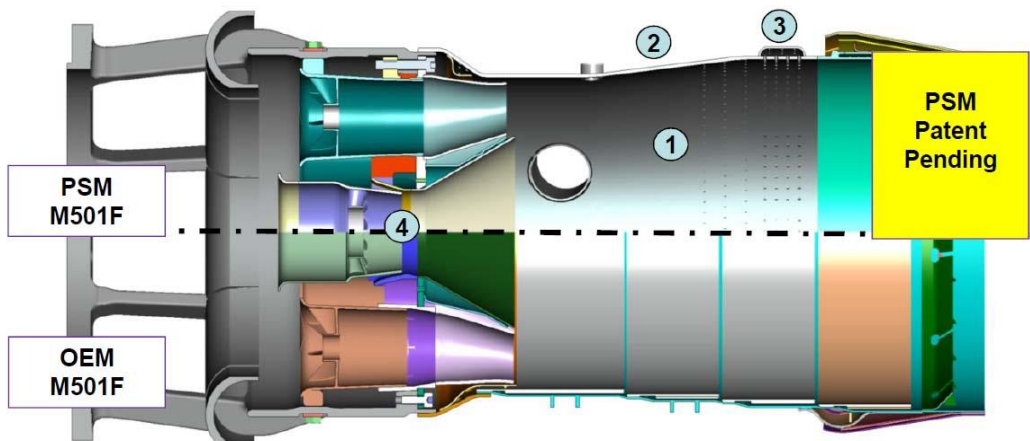


圖24 PSM公司燃燒筒設計構造圖^(28~30) (a) 燃燒筒氣流示意圖 (b) PSM公司
燃燒筒與原廠設計差異示意圖。

(a)



(b)



圖25 PSM公司燃燒組件照片^(5,28) (a) 噴嘴漩流設計 (b) 導火筒蜂巢氣密結構。

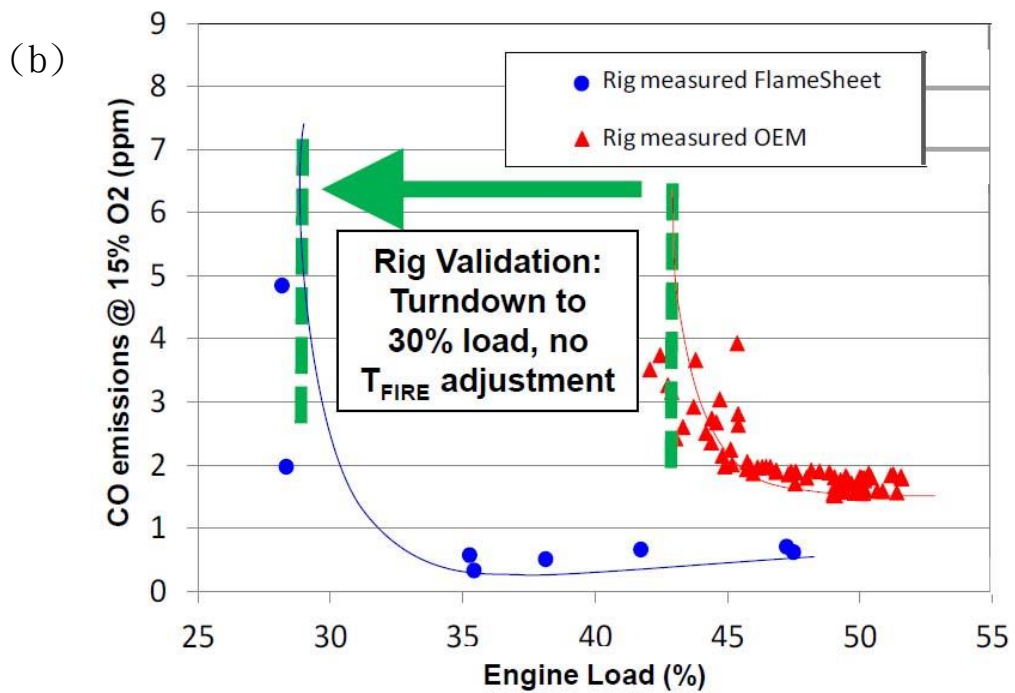
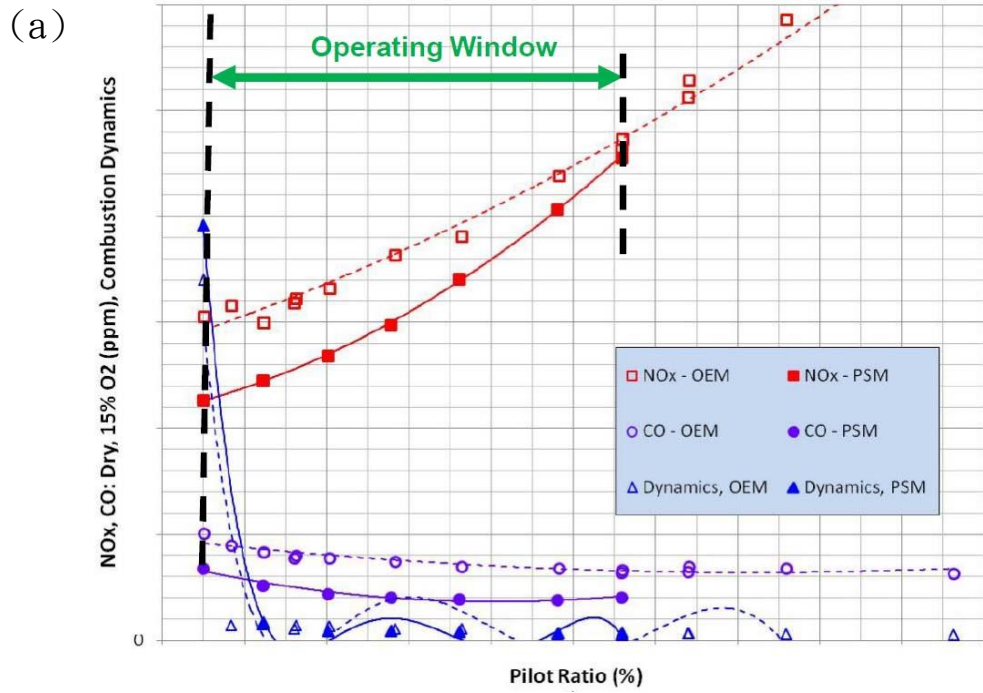
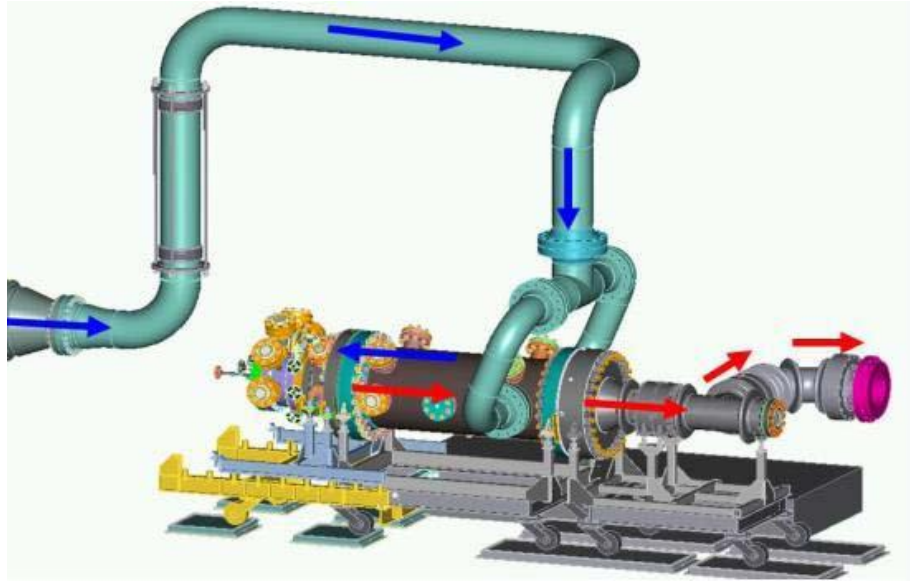


圖26 PSM公司燃燒組件操作性能^(29,30) (a) 與原廠操作性能比較 (b) Turndown 範圍擴展。

(a)



(b)

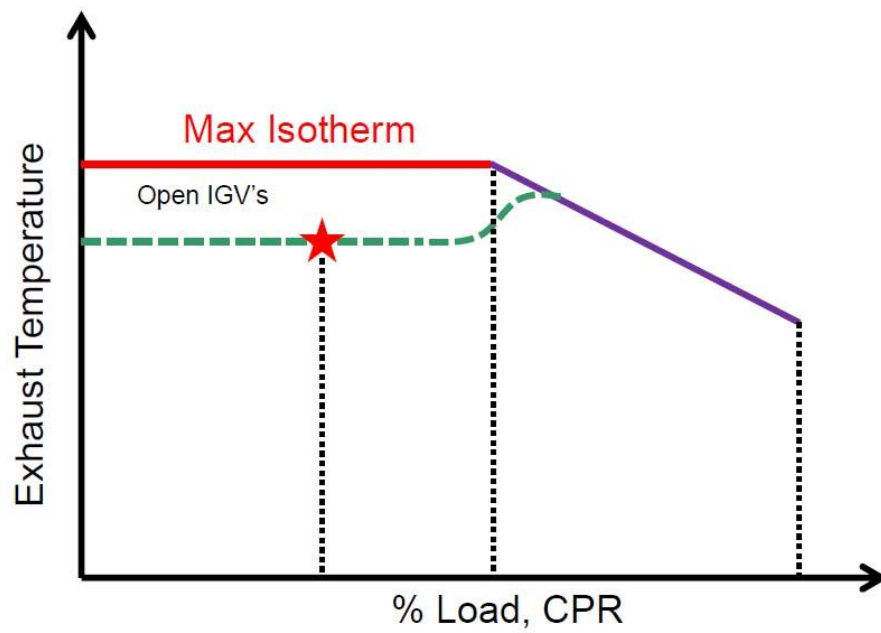


圖27 PSM公司燃燒組件測試與機組運轉範圍示意圖⁽²⁹⁾ (a) 燃燒組件測試 (b) 機組運轉範圍與溫度控制。

表 7 PSM 公司燃燒組件與原廠比較⁽¹⁸⁾

Item	OEM	PSM M501F
NOx emissions (LOL baseload)	25 ppm	Neutral compared to OEM at same IGV and same exhaust curve
CO emissions (LOL baseload)	25 ppm (LOL is ~65% at US site)	Neutral compared to OEM at same IGV and same exhaust curve
Combustion repair interval life (CI)	8K EOH (extending to 12K EOH) 450 starts (per OEM calculation method)	25K EOH 900 starts (per PSM calculation method)
Replacement life	Fuel injectors: 50K EOH Basket: 2 x CI (24K EOH or 900 starts) (per OEM calculation method)	Fuel nozzles: 100K EOH or 3600 starts Basket: 4 x CI (100K EOH or 3600 starts) (per PSM calculation method)
Combustion noise (Maximum steady state)	3.92 [psi pk-pk] instantaneous	Same as OEM
Control system	Netmation	No or limited modifications
OEM fuel system & skid compatibility	1 control valve	Use existing OEM skid/valves
OEM actuator	1 actuator TP bypass	Use existing OEM actuator

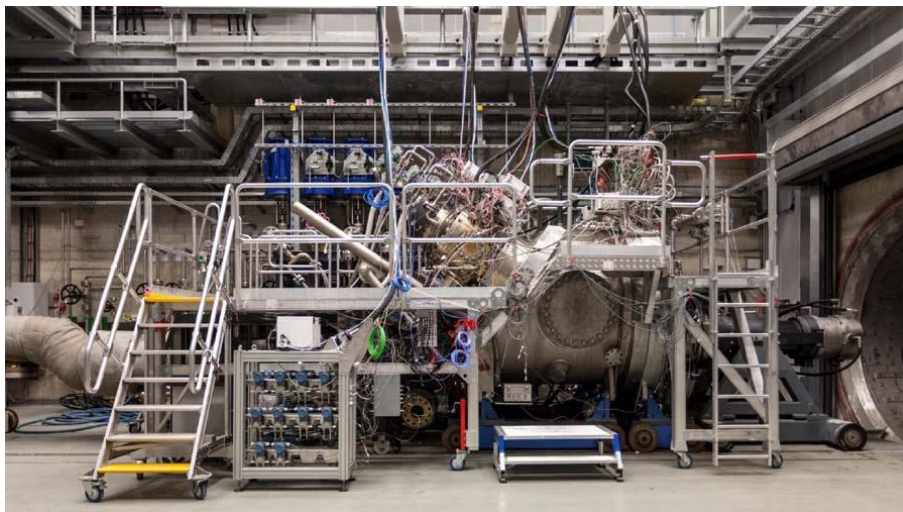


圖 28 PSM 公司燃燒組件運轉測試照片⁽³¹⁾。

3、2、4 Sung-il 公司燃燒組件材料提升及製造

Sung-il 公司將燃燒組件 Hastelloy X 合金，改變為 Nimonic 263 合金，使維護週期自 8,000 小時延長至 12,000 小時⁽²⁰⁾，Hastelloy X 合金在 760°C 之降伏強度及抗拉強度分別為 237 及 461Mpa、在 871°C 之降伏強度及抗拉強度分別約 194 及 310Mpa，Nimonic 263 合金在 800°C 之降伏強度及抗拉強度分別約 460 Mpa 及 587Mpa，伸長率約 26%，Nimonic 263 合金機械性質確實明顯較 Hastelloy X 合金優異。

圖29為Sung-il公司燃燒組件製造實績照片⁽²⁰⁾。該公司建立了燃燒組件片狀材料剪切設備及沖壓設備，配合銲接、噴塗等程序製造燃燒筒及導火筒，圖29 (a)即為7FA+e機型導火筒及導火筒照片⁽²⁰⁾，圖29 (b)為M501D機型燃燒筒及導火筒照片⁽²⁰⁾。

三菱公司於M501G氣渦輪機的先進燃燒組件，以Tomilloy合金取代 Hastelloy X合金^(22~24)，Tomilloy合金在800°C之降伏強度及抗拉強度分別約為294 Mpa及441 Mpa，相近Inconel 617材料⁽²⁰⁾，相較於Hastelloy X合金，Tomilloy合金性質確實優異，並且其伸長率高達110%。

PSM公司導火筒材料使用Hanse 230合金，此材料在800°C之降伏強度及抗拉強度分別約300及420Mpa，伸長率65%以上；燃燒筒材料使用Hanse 282合金，其在800°C之降伏強度及抗拉強度分別約600及700Mpa，其強度為三家公司所有使用材料中最高者，伸長率約為24%。

圖30為常見超合金之可銲接性⁽⁶⁾，由以上各合金的鈦、鋁、鉻、鈷元素含量，可以了解其銲接難易程度。Hastelloy X合金含22%鉻、1.5%鈷，不含鈦或鋁，銲接性良好，如圖35之X軸上的圖示，在Inconel 625材料右下的區間，顯示其比Inconel 625更容易銲接，其所含之0.6%鎢，對銲接性的影響應該很低；Tomilloy合金含22%鉻、8%鈷、1%鈦、0.3%鋁



圖 29 Sung-il 公司燃燒組件製造實績照片⁽²⁰⁾(a)7FA+e 機型燃燒筒及導火筒(b)M501D 機型燃燒筒及導火筒。

，銲接性良好，如圖30之圖示，介在Inconel 625及Inconel 617材料之間，當然Tomilloy合金所含之3%鎢，可能略為影響其銲接性；PSM公司所使用的Hanse 230合金，含22%鉻、5%鈷、0.1%鈦、0.3%鋁，銲接性良好，如圖30之圖示，介在Inconel 625及Hastelloy X材料之間，所含的14%鎢將會明顯影響其銲接性；Hanse 282合金，含20%鉻、10%鈷、2.1%鈦、1.5%鋁，銲接性仍在良好的區間，但在Tomilloy合金及Inconel 617材料之左上，顯示難度提高了一些，所含的14%鎢將會明顯影響其銲接性；Sung-il公司所使用的Nimonic 263合金⁽³²⁾，含鉻及鈷均在19~21%、含鈦約2.2%、含鋁約2.6%，在各廠使用之材料中，銲接難度最高，於圖30之銲接性良好與銲接性有所限制之邊界上⁽⁶⁾。

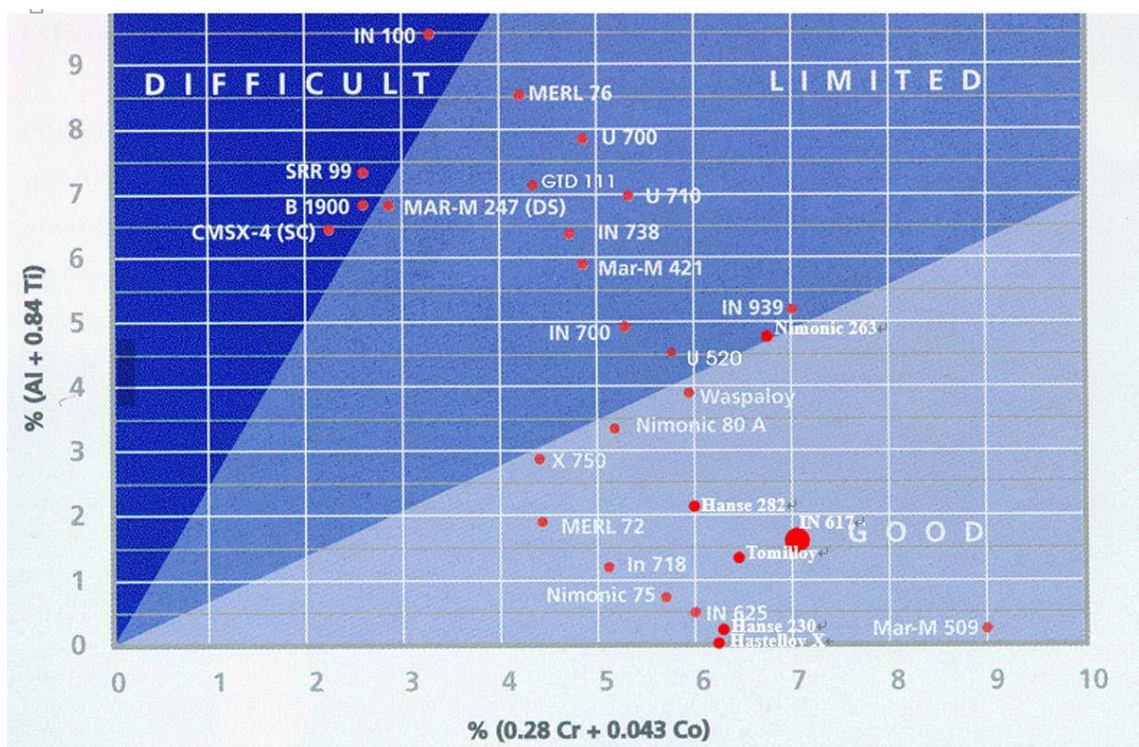


圖 30 各公司燃燒組件材料可銲接性質圖^(6, 32)。

四、心得及建議

- 1、由於 W501F 與 M501F 大部分組件具有互通性，因此 GE、PSM 公司對於 W501F 或 M501F 氣渦輪機熱元件的再生，及更先進機組的開發與設計經驗，足以為本公司參考及借鏡；Sung-il 公司則對於 GE 的 7FA+e 機型及三菱 M501D 機型熱元件有一定的技術經驗，對於 M501F 或 M501G 則有氣封元件及部分靜葉片的技術經驗，動葉的部分則尚在研發中。
- 2、關於氣渦輪機葉片材料，GE、PSM 公司未考慮比照三菱公司使用潛變性質更佳的定向凝固或單晶葉片材料，其著眼於容易執行再生製程，策略是以提高塗層性質為主。GE 公司並且開發了名為 Lightsight 的量測元件，貼在葉片背壓側，透過影像比對分析，評估葉片材料的潛變耗損程度。
- 3、參訪的三家公司皆以緻密垂直裂紋(DVC)絕熱塗層，來提高絕熱塗層厚度，同時克服塗層膨脹時的應力及剝落問題，GE 公司葉片的絕熱塗層厚度甚至高於 900 μm 。
- 4、對於葉形設計及冷卻方案，GE 公司設計比較大的葉片頂部冷卻孔，以及葉片壓力側平行於平台的冷卻孔；PSM 公司重新分配葉面冷卻孔分布，使其具有冷卻空氣膜，平台的冷卻方面有 5 個穿越孔；Sung-il 公司的方案是頂蓋執行噴塗、10 個斜角度穿越平台的冷卻孔、平台斜線面以及導翼端 Cover Plate 局部材料削減等。
- 5、關於燃燒組件的設計，GE 公司將燃燒器 4 支噴嘴全部設計為預混式，火焰改良為無文火的穩定傾斜預混火焰，增加中心噴嘴以提高調節比，達到火焰餘量控制，其旋流噴嘴設計有 hollow 渦旋葉片燃油噴射構造，使燃料與壓縮空氣充分混合，NO_x 排放控制在 9ppm。GE 公司燃燒

筒的內襯部分比原廠製造者長以保護導火筒，其導火筒較短、彎角較低，達到減少停留時間，對導火筒衝擊較小的目的。

- 6、對於燃燒條件控制，GE 公司避開高燃料與空氣混合比，所造成的高 NO_x 排放，在高燃料與空氣混合比、高 NO_x 排放，以及低混合比、易熄火之間，考慮到冷調動態與熱調動態，找到適合操作的區間。
- 7、PSM 公司的燃燒筒筒身為多層，有中心及環狀兩個燃燒區，低負載時靠環狀區的氣體混合及燃燒來控制，使高低負載下，效率仍能確保，NO_x 排放控制在 9ppm 以下，燃燒器同樣有漩流的設計，與 GE 公司同樣擁有自己的專利，絕熱塗層採用 DVC 噴塗層。導火筒筒身為實心，著眼於容易製造與維修，噴塗層採一般 TBC。其藉由燃燒控制將 Turndown 範圍自 43% 負荷向下擴展。
- 8、Sung-il 公司對於 GE 7FA+e 機型及三菱 M501D 機型燃燒組件有製造設備及實績，至於 M501F 或 M501G 燃燒組件的技術經驗，則尚在研發中。
- 9、GE、PSM 公司在燃燒組件部分，均朝向提高燃料與空氣的預混效果，將 Turndown 負荷範圍的向下擴展，降低 NO_x 排放在 9ppm，並控制 CO 的排放；在氣機段葉片、燃燒筒及導火筒等熱元件的壽命及檢修周期的延長方面，兩家公司均有大幅的提升。然而效率的提升、Turndown 負荷範圍的向下擴展、低 NO_x 及 CO 排放的確保，與空壓段、燃燒組件及氣機段等諸多組件的匹配有關，也牽涉到燃燒調校及控制系統，此部分需要更多的了解及驗證。
- 10、GE、PSM 公司有完整的實地測試設備及經驗，也有電廠機組在用電量低的季節配合做新組件測試；南韓因備載容量達 20% 以上，Sung-il 公司也有合作的電廠機組供組件改善之實測。

五、參考資料

- 1、 “501F Gas Turbine Maintenance Guide for Hot Gas Path Parts ” , ME-00254 Mitsubishi公司簡報資料, June, 2000.
- 2、 “GE Solutions for Mitsubishi Gas Turbines-GT Technology Repair” , GE公司技術資料, p23, July, 2016.
- 3、 “M501F 1st、 2nd、 3rd、 4th Turbine Blades Materials Certification” , Provided by Mitsubishi Heavy Industries.
- 4、 Rich Curtis and John Scheibel, “M501F / 701F Project Meeting Repair Guideline Review” , EPRI Technical Report.
- 5、 “PSM Update” , PSM公司簡報資料, July. 2016.
- 6、 Rich Curtis, John Scheibel, “Repair Technology for Gas Turbine Hot Section Components” , EPRI Technical Report, 2005.
- 7、 “F Technology Component Repair/Upgrade” , Liburdi Engineering Ltd. Liburdi Turbine Services Inc. Presentation file, 2008.
- 8、 R. Viswanathan, K. Krzywosz, S. Cheruvu and E. Wan, “Combustion Turbine (CT) Hot Section Coating Life Management” , Semi-Annual Technical Progress Report, Submitted by R. Viswanathan (EPRI) , Agreement Number:DE-FC26-01NT41231.
- 9、 “Gas turbine hot gas path Repair Process & Procedure” , Sung-il 公司資料, September, 2016。
- 10、 Marek Goral, Maciej Pytel, Kamil Dychton, Andrzej Nowotnik, “Kinetics Growth and Oxidation Resistance of Aluminide Coatings

- Deposited by the CVD Method on Re 80 Superalloy” , Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, V01:11, 2012, P853-857.
- 11、M. Pytel, M. Góral*, M. Maliniak, “The influence of production method on oxidation resistance of the aluminide coatings obtained on IN 100 alloy” , International Scientific Journal, V01:53, Issue 2, February 2012, P102-108.
 - 12、李日輝、吳憲政、鐘震洲、王敬堯、李桂賓、陳貞鳴, “501G氣渦輪機燃燒器組件絕熱塗層再生研究” , 台灣電力公司104年度研究發展專題.
 - 13、Sunao Aoki, “Trend and Key Technologies for Gas Turbine Combined Cycle Power Generation in a Globally Competitive Market and Environmental Regulations” , Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference Miami Beach, Florida, July 23-26, 2000.
 - 14、 “Upgrade Programs for Interval Extension” , Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Report , April. 2011.
 - 15、張國富, “新型複循環機組發電原理及設計理念、效率提升與運轉技術改善研習” 出國研習報告, 台電公司通霄發電廠, 2014年11月.
 - 16、 “Taiwan Power Company Customer Visit-501F AGP Capability” , GE公司技術資料, October, 2016.
 - 17、Jeremie Taillandier, “Datan CCPP 6 units and Nan-Pu CCPP 1 unit” , PSM公司簡報資料, Feb., 2012.

- 18、Dr Gregory Vogel, “PSM M501F product line-Presentation for Taiwan Power Company”, PSM公司簡報資料, December 11~12, 2012.
- 19、Rob Steele, “Program 79: Combustion Turbine Combined-Cycle Operations and Maintenance”, EPRI Technical Report, Generation Program Advisory Meeting, Nashville, Tennessee, p78, October 2, 2012.
- 20、“Sung-il Presentation Materials-Major Business Lines Products”, Sung-il公司資料, October 7, 2016。
- 21、“EPRI Advanced Low Conductivity Thermal Barrier Coating Program”, EPRI簡報資料, October, 2012.
- 22、“Design Evolution, Durability and Reliability of Mitsubishi Heavy Industries Heavy Duty Combustion Turbines”, Pedigree Matrices, Volume 7, EPRI Technical Report No:1012715.
- 23、“Remained Life Evaluation of Gas Turbine”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Report ME-00259, June, 2000.
- 24、辻一郎, 伊東眸, 塚越敬三, 佐平健彰, 倉内伸好, “ガスタービン燃焼器用Ni基超耐熱合金TOMILLOYの開発”, 日本金属學會會報, Vol:24, No:4, P319, 1985.
- 25、吳錫欽, “大潭複循環發電機組氣渦輪機熱燃氣道零組件設計安裝運轉維護訓練” 出國研習報告, 台電公司大潭發電廠, 2009年01月.
- 26、“Taiwan Power Company Customer Visit-Combustion Theory”, GE公司技術資料, October, 2016.
- 27、“Gas Turbine & Combined Cycle- 7HA Updates”, GE公司技術資

料, June, 2016.

28、PSM公司型錄資料

Peter Stuttaford, Dr. Kuo-Ting Hsia, “The Flame Sheet™ Combustor-
A Revolution in Combustion Technology for Power Generation Gas
Turbines” , PSM公司簡報資料, October, 2016.

30、Brian Micklos, “PSM M501F product line Overview” , PSM公司
簡報資料, October, 2016.

31、 “The New Ansaldo Energia GT36” , PSM公司簡報資料, Power-Gen
Europe 2016, Milan

32、 “Improvements for GT parts development” , Sung-il公司資料, pl,
2016。