

出國報告（出國類別：開會）

「第 16 屆事故調查研討會」  
出國報告

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職務：翟耀文 副調查官  
林哲旭 副研究員

派赴國家地區：新加坡

出國期間：民國 112 年 11 月 21 日至 11 月 23 日

報告日期：民國 113 年 2 月 1 日



# 目錄

摘要.....	i
一、前言.....	1
二、研討會議程 .....	2
2.1 議程概述.....	2
2.2 參與成員介紹.....	2
三、研討摘要與心得 .....	4
3.1 Safran 直升機發動機簡介 .....	4
3.2 現場事故調查的編組.....	8
3.3 直升機發動機起火與超溫損傷的認識.....	9
3.4 Safran 亞洲區發動機修護中心 .....	13
3.5 受訓心得.....	14
四、建議.....	15



## 摘要

此研討會共有 11 個航空事故調查單位派員參與，由法國航空事故調查局(BEA)、Airbus 與 Safran 直升機發動機部門於新加坡共同舉辦。研討會先對 Safran 生產的三種主要發動機型別 Arriel、Arrius、Makila，對發動機主結構及燃、滑油、電器、數位控制等各系統逐一簡短介紹，讓與會成員對直升機發動機構造及系統有概略的瞭解。隨後藉由歷年來直升機動力事故案例，進行分享及討論調查的方向與肇因，並針對事故發生時可採取之緊急處理措施及證據保全，BEA、Airbus 與 Safran 三方所能提供之技術協助、聯絡方式、發動機殘骸及紀錄器之處理及運送進行詳細的說明。

本研討會藉由介紹直升機發動機的設計原理，讓與會成員清楚明瞭其系統運作模式，並說明其各組件的運作原理，有助於發生直升機動力事故當下可以明確針對重點區域進行檢視。而航空器嚴重事故中發動機之損傷徵候及超溫燒損狀態、均提供事故研判之重要線索，發動機資料存儲模組及機載紀錄器亦為研判發動機失效之關鍵元素。

由於直升機發動機廠商於亞洲地區分布多國均有維修或翻修服務，會中介紹 Safran 的亞洲區維修中心能量與其實驗室檢測項目，使與會成員清楚明瞭事故涉及 Safran 所生產之發動機，於事故調查當下，可透過該公司提供哪些檢測支援以利事故肇因的判斷。透過此次研討會的討論，也明確提醒參與事故調查的調查人員應該具備哪些基本知識及能力、事故現場自身的防護措施有哪些?以及可以尋求哪些窗口給予協助。

會中更舉出先前在國外發生事故的案例，透過這幾天的內容來逐一分析成因，與會者透過彼此的交流更可得到不同的調查經驗。經過本次研討會的參與，可使本會對直升機事故調查有更進一步的認識，倘若日後有此類飛安事故，較容易切入重點、調查肇因。



# 一、前言

法國航空事故調查局（BEA）與 Safran 直升機發動機部門，為強化各國航空事故調查機構直升機發動機事故調查技術及調查經驗分享及交流，於 112 年 11 月 21 日至 11 月 23 日假新加坡實里達航空產業園區 Safran helicopter engine 維修中心共同舉辦第 16 屆事故調查研討會（Accident Investigation Seminar），原本會並無機會參與此研討會，因中國遲未決定是否參加本屆研討會，名額尚有空缺；本會與法國航空事故調查局合作且互動關係良好，故獲邀出席參與本次研討會議，本會由航空調查組翟耀文及運輸工程組林哲旭參加，期間與多國與會者共同分享相關議題。

此會議探討直升機發動機在事故調查中可提供的有利資料，再透過系統性的分析並結合發動機設計原理與實際運作方式，逐步歸納出事故發生的成因。會中藉由相關案例分享，並討論彼此的經驗與新知，致力提高飛航安全為目標。

本次研討會內容包含簡介直升機發動機的型號類別與設計，並針對發動機結構與各控制系統逐一簡短介紹。會中法國航空事故調查局（BEA）、空中巴士飛機製造商（Airbus）與 Safran 直升機發動機製造商透過相關事故案例說明分析，並建議事故發生時該準備的器材，建議採取的行動、基本防護器材與措施。由於 Safran 所生產之直升機發動機多為空中巴士直升機之動力選擇，故與法國航空調查局（BEA）相互合作，會中也明確說明遇有採用 Safran 直升機發動機的事故，均可聯繫上述單位，將會共同派員協助飛航事故的調查作業，並協助後續的分析與改進。

## 二、研討會議程

### 2.1 議程概述

日期	研討會議程
11/21	<ul style="list-style-type: none"><li>● 主辦單位(BEA、Airbus、Safran)簡介</li><li>● 個人自我介紹與所屬單位組織簡報</li><li>● Safran 直升機發動機概要介紹與系統說明</li></ul>
11/22	<ul style="list-style-type: none"><li>● 發動機製造商對直升機事故調查的建議</li><li>● 說明直升機發動機起火與超溫損傷徵候</li><li>● Safran 發動機工廠維修區參訪及討論</li><li>● Safran 發動機實驗室資源介紹</li><li>● 發動機經歷及維修文件介紹</li></ul>
11/23	<ul style="list-style-type: none"><li>● Safran Arrius 發動機系統訓練課程</li><li>● 發動機紀錄器數據說明</li><li>● 發動機頻譜分析</li></ul>

### 2.2 參與成員介紹

本次研討會為 Safran 直升機發動機廠商與法國航空事故調查局 (BEA) 共同主辦，空中巴士飛機製造商 (Airbus) 協辦。主要由 Safran 直升機發動機廠商訓練課程的首席講師 Mr. Benoit Leblanc 進行發動機訓練課程。再由 Safran 直升機發動機事故調查員 Xavier Azema 與 BEA 的部門主管 Frederic 分別針對事故調查所該注意的議題進行說明討論。

參與本次研討會成員共計 18 人，除主辦方外，多為世界各國的運輸事故調查單位，列舉如下：

- (1) Safran 直升機發動機：2 員
- (2) 法國航空事故調查局 (BEA)：2 員

- (3) 空中巴士 (Airbus) : 1 員
- (4) 台灣國家運輸安全調查委員會 (TTSB) : 2 員
- (5) 紐西蘭運輸事故調查委員會 (TAIC, New Zealand) : 1 員
- (6) 澳洲運輸安全局 (ATSB, Australian) : 2 員
- (7) 印尼國家運輸安全委員會 (KNKT, Indonesia) : 2 員
- (8) 新加坡運輸事故調查委員會 (TSIB, Singapore) : 2 人
- (9) 馬來西亞空難調查委員會 (AAIB, Malaysia) : 2 員
- (10) 菲律賓民航局 (CAAP, Philippines) : 1 員
- (11) 韓國航空及鐵路事故調查委員會 (ARAIB, Korea) : 1 人

### 三、研討摘要與心得

以下就會議研討之摘要與心得彙述如下：

#### 3.1 Safran 直升機發動機簡介

Safran 直升機發動機利用傳統燃氣渦輪產生之排氣動力，推動自由(動力)渦輪帶動外接齒輪箱，經過減速齒輪降低轉速放大扭力後輸出至直升機主齒輪箱，用以驅動直升機主旋翼提供升力及向後延伸傳動軸驅動尾旋翼，如圖 1 顯示燃氣渦輪構造及動力外接構造。

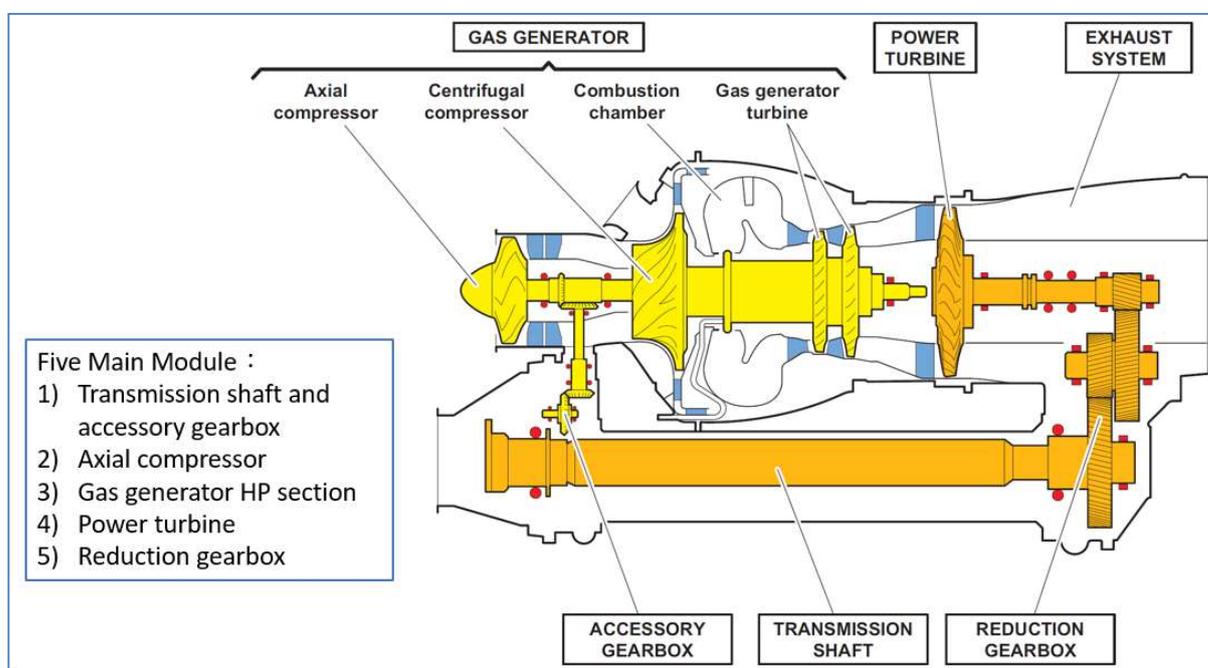


圖 1 ARRIEL 發動機主要組件圖

直升機渦輪發動機主要有兩大功能組件。一為燃氣產生(gas generator)組件，為傳統燃氣渦輪構造。另一為動力渦輪(power turbine)組件，利用前段燃氣渦輪之排氣推動動力渦輪轉換成軸上的機械能。這兩大功能組件互不相連，各自以不同的轉速運行。

在燃氣產生組件中，外界空氣經過軸流壓縮(Axial Compressor)及輻流壓縮(Centrifugal Compressor)，提高空氣壓力及密度後經擴散器進入燃燒段，壓縮空氣於燃燒室區分成主氣流(Primary air)與次氣流(Secondary air)，如圖 2 所示。

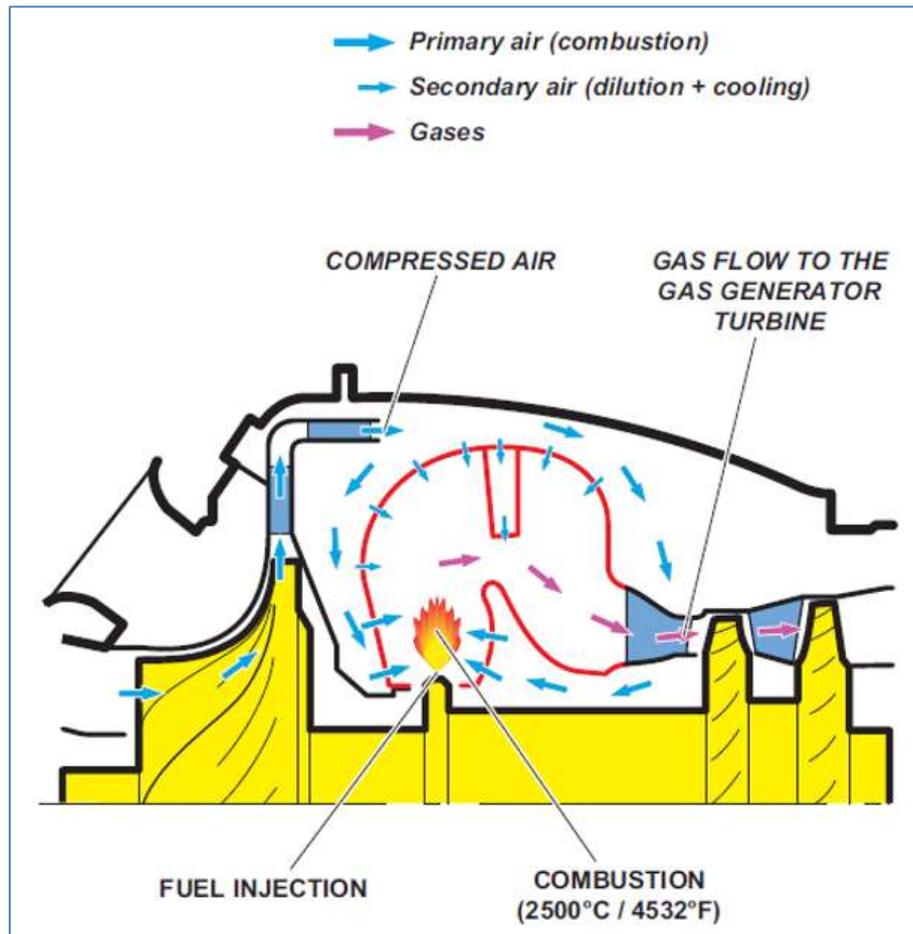


圖 2 ARRIEL 發動機燃燒段流路

- Primary air：提供燃燒室持續進行燃燒的空氣來源，壓縮後之空氣由擴散器進入燃燒段後，由噴油環周邊孔洞渦旋進入環形燃燒筒燃燒，由於燃燒室出口溫度高達攝氏 2500 度，部分的空氣流經中空渦輪噴嘴及渦輪定子提供冷卻，通過後再加入燃燒筒參加燃燒。
- Secondary air：此部分空氣由燃燒筒表面翅孔進入燃燒筒，提供內部高溫區域與筒壁間溫度緩衝，延長燃燒筒壽命避免壁面燒損，部分經由延伸管區域經過特別的設計與計算的孔洞加入燃燒氣流，可得穩定的燃燒火焰、同時稀釋與冷卻排氣流，並使進入渦輪段的溫度控制在正確的範圍之內。
- Gas：此氣流為燃燒產生的主要高溫高壓氣流，由燃燒室出口排出後經出口導片以最佳角度驅動渦輪轉子。

渦輪將燃燒之高溫高壓氣體中的動能轉換成機械動力，用來驅動壓縮機與附件齒輪箱。渦輪噴嘴接受燃燒室排出之氣流，以漸縮通道加速氣流並以最佳角度吹擊渦輪轉子驅動渦輪旋轉，而含有剩餘能量的氣流被導引到下一級的渦輪定子推動次一級渦輪葉片，如圖 3 所示。

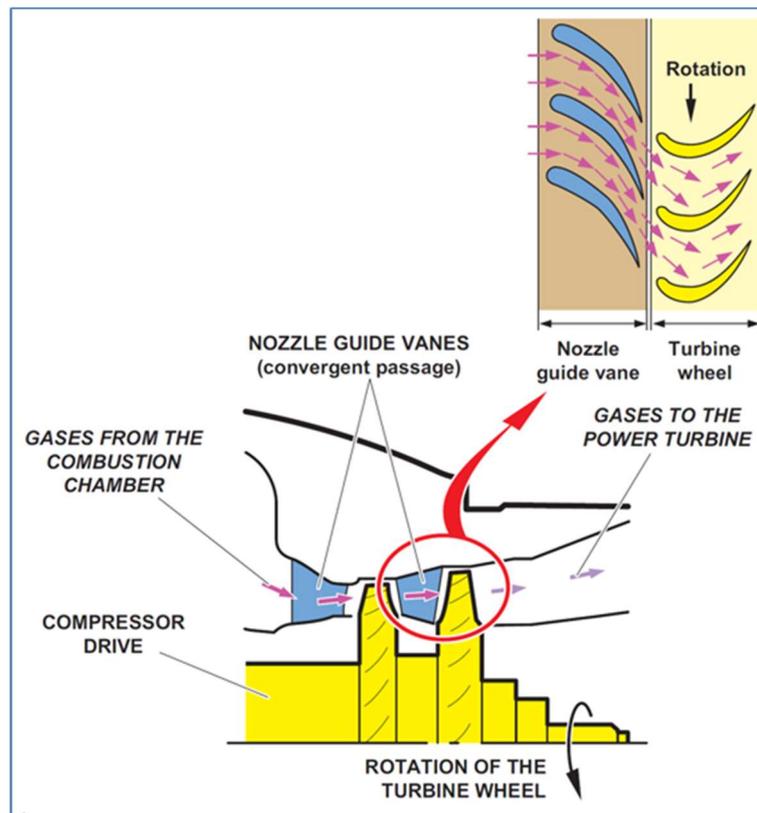


圖 3 ARRIEL 發動機渦輪段流路

動力渦輪為一自由渦輪構造，未與燃氣渦輪主軸銜接，但仍視為渦輪段之一級，由渦輪噴嘴將氣流經漸縮通道加速並引導至最佳角度推動渦輪葉片，用以驅動減速齒輪箱，最終排氣流經由尾管排出，如圖 4 所示。

減速齒輪箱的減速裝置藉由改變齒比降低轉速放大扭力來換取旋轉動力輸出。其運作方式是由動力渦輪軸透過耦合器驅動齒輪組，最終以約 6000 rpm 的轉速輸出，如圖 5 所示。發動機的附件傳動分為兩部分，N1 為燃氣渦輪段，自壓縮器軸傘齒輪及垂直傳動軸將動力傳遞至附件齒輪箱用以帶動發電機、轉速計、燃油控制器、滑油及回油泵。N2 為動力渦輪段，由輸出軸穿過附件齒輪箱內之環形齒輪帶動轉速調速器及 N2 轉速計。當發動機起動時，附件齒輪箱之起動機以反向方式驅動 N1 軸帶動壓縮器轉子，直到起動完成後脫離，並轉換為發電機功能，如圖 6 所示。

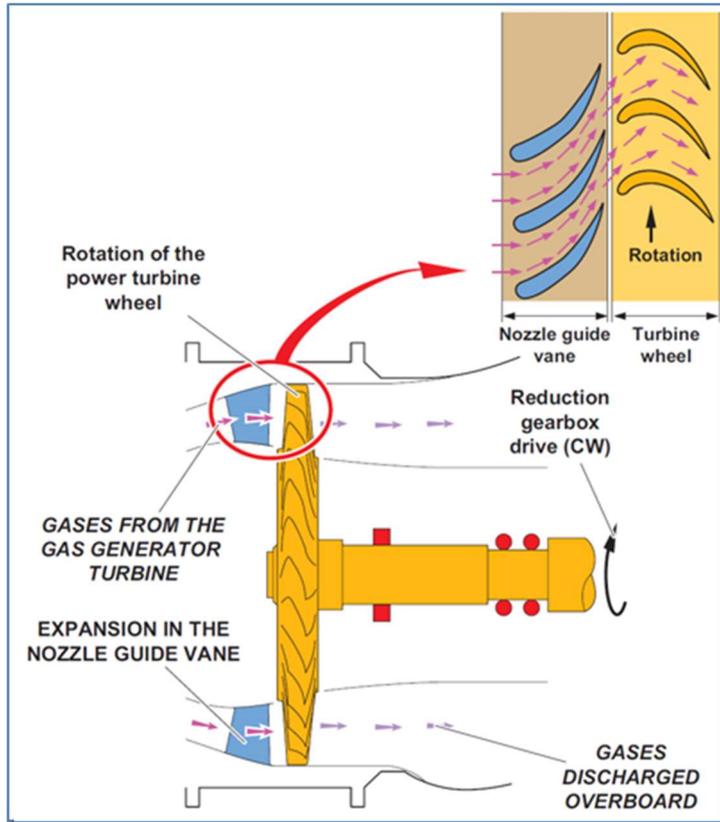


圖 4 ARRIEL 發動機動力渦輪流路

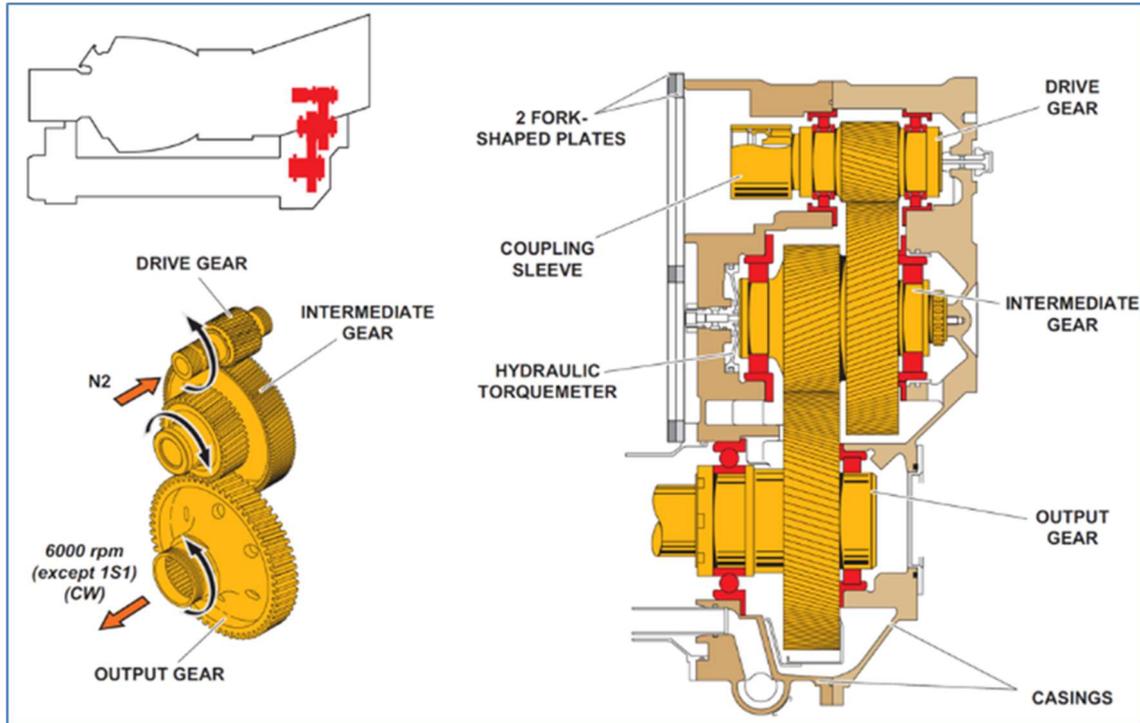


圖 5 ARRIEL 發動機減速齒輪箱組零件

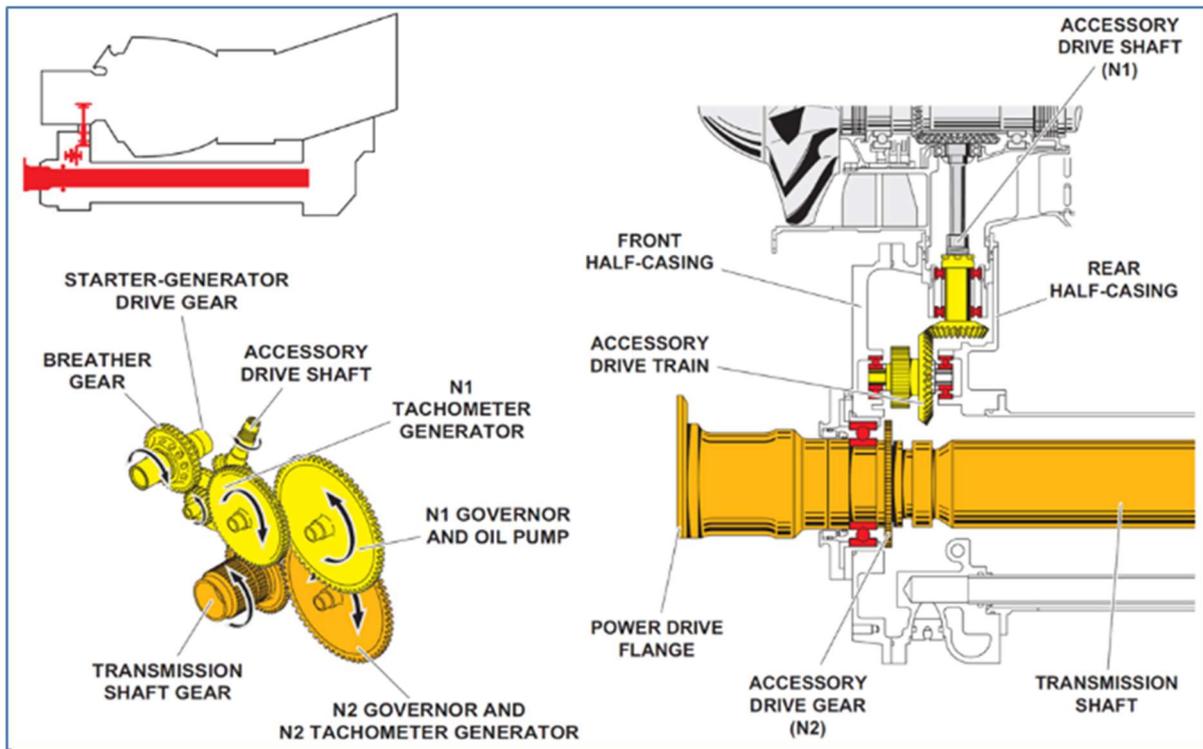


圖 6 ARRIEL 發動機附件齒輪箱組合作

藉由以上壓縮器段、燃燒段、渦輪段、動力渦輪段，附件齒輪段五個主要的模組，即可完成整個發動機從進氣轉換成動力輸出能量，進而帶動直升機旋翼輸出的整個動力來源。

### 3.2 現場事故調查的編組

倘若事故發生且該直升機發動機為 Safran 的產品，均可以直接聯繫 Safran 事故調查專責窗口協助進行事故調查，如事涉法國生產之直升機，Safran 亦會主動聯繫機體製造商與法國航空事故調查局(BEA)一同合作進行調查。為了可有效進行調查，通常會以有以下幾點事項，第一會先確認事故殘骸是否完整且可否搬運到適當地點，避免事故地點無法安全地檢視事故殘骸，也避免遭受非調查外的人員干擾。第二，此事故調查會以短期任務編組為主，一般來說約 1~4 天，但通常都會花多的時間。第三，一般調查小組的規模不大，不僅是機動編組且可靈活運用。由於 Safran 的技術支援遍及世界各地，當有事故調查需求，他們會聯繫最近的支援單位前往及時協助。

一般現場事故調查多半會遇到挑戰，造成影響現場事故調查，概略列舉如下：

- Occupational risks：此職業風險是指事故殘骸移到非開放場所後，殘存的有毒液體，甚至生物躲藏在內部，可動用大型機具翻動協助確認。
- Unconventional tools：此非常規工具是指因現場事故殘骸已無完整的直升機初始狀況，有時候已經嚴重變形或遭受應力破壞等影響，於是無法使用常規的工具來拆除，將會面臨尋求其他特殊器材進行拆卸或移除。
- Unsecured sites：此不安全的場所是指有時事故地點位於懸崖陡坡上、落差較大的圍牆外叢林野外中，易對調查人員產生較大的危險因子。
- Post crash fires：此事故後起火，有時會造成大量的事故因素有損毀的現象，嚴重影響事故的調查。
- Media presence：媒體報導可能影響事故調查，例如在事故調查中打聽與竊取調查資料與初步結論，有時更會妄自推論，影響調查進度與方向。

直升機的現場事故調查考量其環境與相關作業安全條件，Safran 要求其事故調查人員在以下的基本項目中必須滿足條件如下：

- 出發前準備：組織派遣的事故調查員均需要得到成員們的支持，並完成一系列的事故調查訓練，以確保有足夠的能力可進行事故調查。人員必須完成相關疫苗接種(如黃熱病、肝炎、傷寒、破傷風、白喉、小兒麻痺、腦膜炎等)，並在出發前進行相關醫學檢查並領取必要的個人防護包，以利自我調適身體健康。
- 現場事故地點確認：由於事故地點多元，調查人員出發前必須先確認事故地點的作業環境以及評估相關風險。出發前也必須取得當地的人境許可，並評估事故現場可配合的作業人員與官方配合窗口，針對有些較特殊的地點更需具備兩種以上的身分證明，以因應特殊狀況。
- 現場事故調查的自我防護：由於直升機意外事故發生，事故現場較為複雜，建議穿上全天候/全地形之安全鞋(耐燃油與耐油)，並戴上護目鏡與防塵口罩(FPP3 等級)，手套必須耐磨、防割與防穿孔，穿著連身工作服或防護衣。

### 3.3 直升機發動機起火與超溫損傷的認識

直升機的事故中，常伴隨著起火與超溫損傷等情形，事故調查時能了解損害的根源，將會有利調查的進展與後續分析方向。從 Safran 以往的調查經驗中，對於材料、

燃燒樣態與煙灰的分析，需要採行有系統的方法逐步進行，方能從這些分析中得到有用的調查訊息。

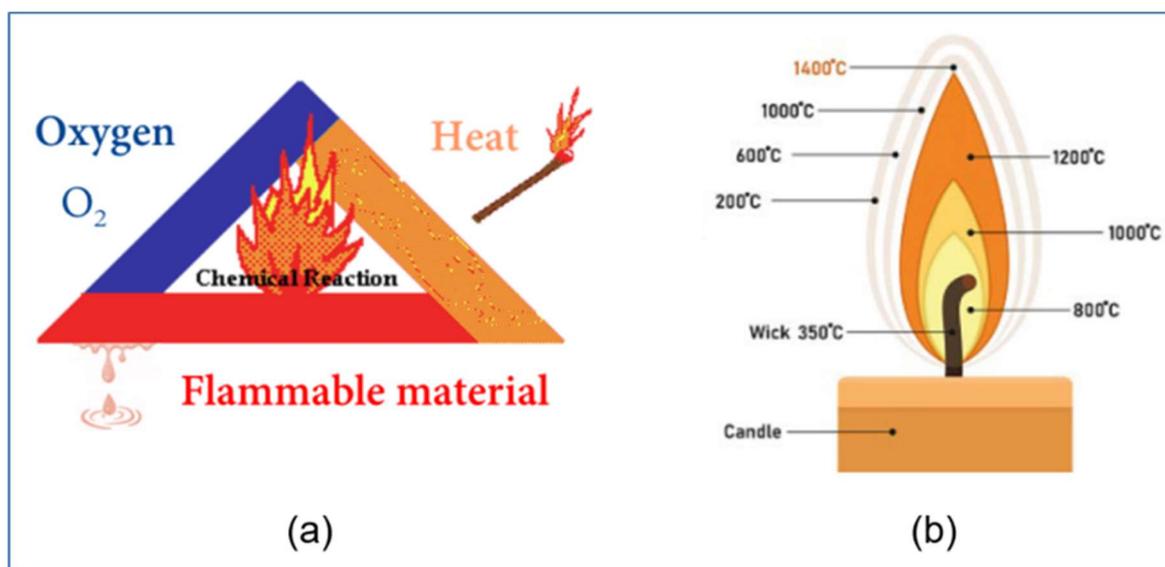


圖 7 起火與火焰示意圖

當物質有起火的現象，表示當可燃材料接觸到足夠的氧氣與熱源，就容易有明火的產生進而燃燒起來，如圖 7(a)所示。而火焰為物質燃燒產生發光部分，而焰本質上為激發狀態的高溫氣體。如圖 7(b)所示，火焰便隨著高溫現象，其氣體溫度可以達到 1100 度以上，但稍微離開火焰面兩三公厘，也就是離開正在釋放化學能的化學反應區，其氣體溫度很可能驟降到攝氏 250 度或更低。而整個火焰的每個位置又有不同的溫度分布，從火焰的顏色更代表著不同的燃燒溫度，紅光約攝氏 500~1000 度，橘光約攝氏 1100~1200 度，白光約攝氏 1300~1500 度區間。

直升機系統中的油料包含燃油、滑油與液壓油等，每種油料的特性不同，歸納整理如圖 8 所示。依照液體燃燒的特性來看，液體需要先有蒸發的現象，當變成蒸氣狀態才會有可能造成燃燒。故當液體受到足夠的熱量時，液體才會產生自燃現象的情況。故在發動機當中，當油類霧化後，會比流動中的液體更容易被點燃而造成事故。從歸納的圖表中可得知，雖每種油類的燃點不同，但要達到自燃的情況大約都是 200 度以上的溫度。故高溫的環境加上足夠多的氧氣就很容易引起燃燒。

		Jet A1	Engine oil	Hydraulic fluid
Flash point (ignition due to other flame)	°C (*)	40 – 60	200 – 250	80 – 100 (mineral) 175 – 250 (synth.)
Auto-Ignition	°C (*)	220 – 250	200 – 350	230 – 250 (mineral) ~ 350 (synth.)
Hot surface temperature (ignition on contact)	°C (*)	300 – 500	300 – 450	~ 450

圖 8 直升機使用油類燃燒溫度特性

由於發動機熱段屬高溫區域，故發動機及周邊附件、管線材料選擇必須將溫度納入考量。不同的金屬其融化溫度都不相同，Safran 歸納整理如圖 9 所示。發動機周遭的系統管線與特殊接頭，更是需要特別注意材質選用，避免因受熱造成損傷。

另機體的塗料也是一項執行事故調查中需要特別注意的地方，這些塗料從攝氏 250 度到 500 度左右，會使得塗料有軟化、變色、起泡與燒痕等現象，透過這些跡象都可輕易判斷出一開始熱源集中的區域，並需要特別去檢視，如圖 10 所示。

由於直升機事故涉及起火與超溫損傷的部分，每一項殘骸細節都必須要小心檢視與處理，但由於事故現場有大量粉塵與油漬，調查人員必須要做好自身的保護，除了選擇適當的 PPI 隨身設備，用以防護碳纖維或玻璃纖維的灰塵，更建議採用適當的呼吸過濾裝置，Safran 另建議以下注意事項：

- 證據的保護：情況許可建議與相關單位共同協調，務必封鎖該區域，防止非調查人員進入，並且避免觸摸殘骸。
- 事故勘查：儘量在不破壞事故現場的情況下來蒐集任何資訊，並詳盡地繪製該區域的地圖，相關位置資料予以保留，並拍攝大量的照片，勿使任何細節遺漏，以利後續確認釐清。另需詳盡記錄當下的材料清單，以利確認現場有那些東西與其最終狀態。
- 殘骸的經過資訊：需透過現場的殘骸狀況與細節，詳盡調查發動機及艙內可能的受熱持續時間。因為連續受熱與瞬間受熱對於事故後續的調查方向有非常大的影響。但由於短時間的極高溫度會產生與長時間受到中等溫度的損害情況類似，故需要非常小心謹慎的調查與釐清現場狀況。

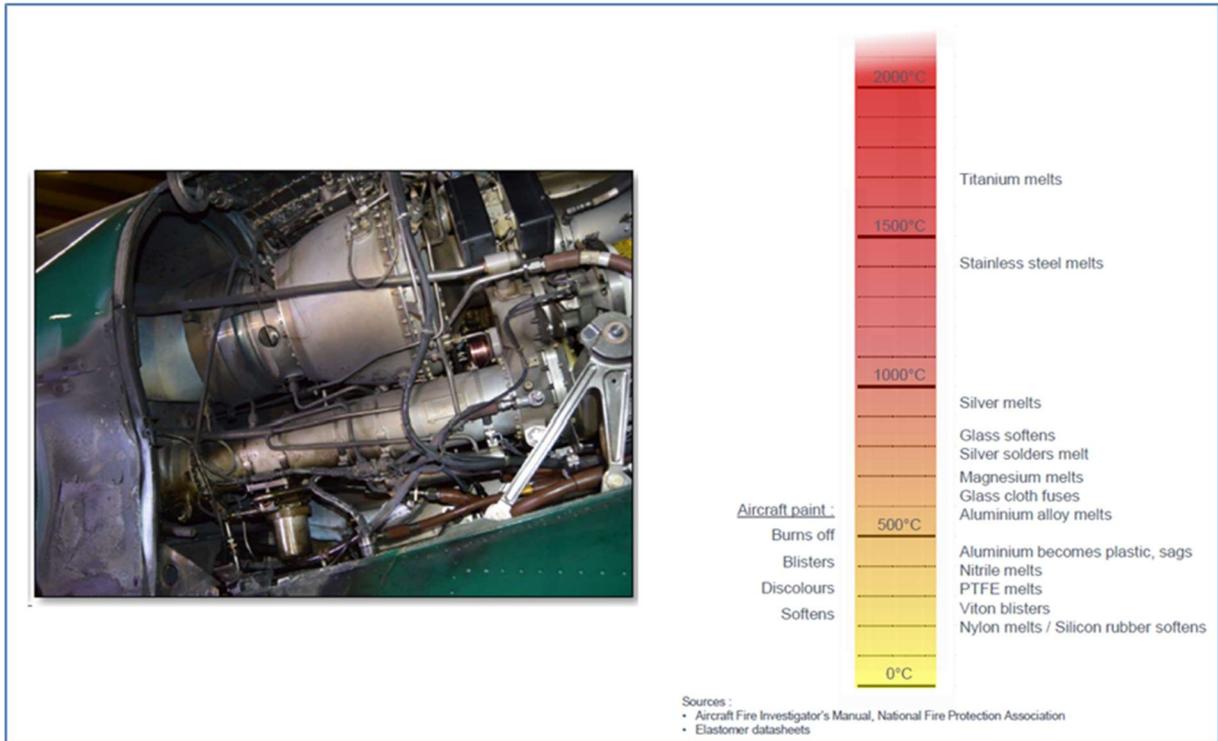


圖 9 不同材質熔點分布

**Paint**

- Heat damage to paint :
  - Softens ~ 250°C \*
  - Discolours
  - Blisters
  - Burns ~ 500°C \*

圖 10 機體漆面受熱徵候

### 3.4 Safran 亞洲區發動機修護中心

新加坡的 Safran 直升機發動機修護中心為整個亞洲地區的進階維護中心，一般的停機線維護可於各航空公司或私人使用者所屬場域執行，但如需分解模組進行維護或發動機內部定更件或壽限零件更換，亞洲地區需運送至新加坡的修護中心，以進行進階維護及檢測，方能確保發動機之適航品質。

每一具發動機送到新加坡的修護中心時，會先安置在於檢測區域。由 Safran 的技術人員開始針對發動機的狀況確認，而隨著發動機一起被送來的會有發動機經歷簿及發動機維修紀錄(Engine Log Book)等文件。技術人員會先確認該文件資料的內容，判斷是否有哪些零件已屆更換週期，在本次進廠期間更換。也會確認實際的組件資料於使用端維護紀錄與廠內的電腦紀錄相符，以確保發動機各項維護資料正確。

發動機資料確認完成後，隨即會在一旁的會議室與客戶進行溝通，並確認將進行的維護計畫及工作項目。待全部維護工作完成後，將進行一連串的系统測試，並更新維護資料及零組件時數或週期，確保各項資料與發動機實際狀況相符，方可出廠裝機使用。工廠內部因涉商業機密，僅允許參訪人員於工作區域外參觀。

另 Safran 公司有完整的實驗室能力，可以依照不同的零件型態與損壞樣貌，提供完整的檢測與分析能力，若於事故調查時也可提供完整的檢測分析結果，有利於分析成因。

- 機械性質分析：高溫可程式化控制爐、熱機械測試設備(拉伸、疲勞與彎曲等測試)。
- 光學檢測設備：用於冶金、微觀結構與斷口分析，包含搭配 EDS 功能的掃描電子顯微鏡、光學實體顯微鏡。
- 環境測試設備：可用於測試材料表面的試驗，包含鹽霧、循環鹽霧測試、氧化與腐蝕測試機台。
- 尺寸量測設備：三維量測儀與 3D 掃描儀器。
- 物理化學分析設備：發射光譜分析、氣體分析實驗室、粒子分析、層析儀器與差熱分析設備。

- 無損檢測設備：螢光滲透探傷、渦電流探傷、超音波探傷、內視鏡檢查、射線照相、磁力鏡、耦合內視鏡與 FPI 視鏡等設備。
- 殘留應力測量裝置

### 3.5 受訓心得

本會曾有多次直升機事故調查經驗，但發動機失效相關案例較少，本次研討會由 Safran 直升機發動機製造商與法國航空事故調查局共同合辦，會中不僅分享直升機的發動機相關設計理念，並透過國外實際的案例經驗分享，讓各國航空調查單位人員可以相互討論並分享，對本會培育直升機調查人員有實質上的幫助，本會日後可規劃直升機發動機事故調查相關訓練課程，使會內成員獲得如何分析發動機失效原因及解讀性能資料，以及事故現場該著重那些事證來獲取有利的調查資訊。以下就本次參與之研討會總結心得說明如下：

- 一、研討會內容著重於直升機事故調查，先從直升機發動機系統的構造開始介紹，並衍生相關模組的設計概念說明，透過國際間直升機發生的案例加以說明其調查內容與如何找出發生原因，使與會各國調查人員清楚明瞭事故發生當下需要如何著手準備調查，並該朝向哪個方向去追查事故發生原因，且若有需要原廠的調查協助該如何聯繫等。
- 二、本次研討會採小型討論及緊湊的議程，參與國家多為亞太地區且成員最多兩位，得以讓參與成員彼此相互認識並且交流，有助於議程中大家彼此討論與分享，主講人員也會適時確認參與者清楚明瞭議題內容及回答各項疑問。
- 三、本次參與成員為各國航空事故調查人員，會議主要討論旋翼機相關事故，各國均踴躍提出寶貴經驗與案例與成員們分享。現今直升機雖多已具有完整之飛航紀錄器及語音紀錄可確認相關航行及系統運作資訊，但對發動機或機體殘骸自殘骸現場處理至最終事故分析，此次會議提供寶貴及完整的資訊。

## 四、建議

本研討會內容規劃完善，可讓各國航空事故調查人員對直升機發動機構造、系統及失效徵候有更深入的了解，對事故現場初步判斷與資料蒐集有莫大助益，並清楚明瞭直升機發動機廠商與機體製造商於事故中可提供的技術支援及調查協助。國內運作中的直升機採用 Safran 的發動機除空軍 EC225 美洲獅，尚有空勤總隊 AS365 海豚直升機，近年離岸風電持續發展，因應風扇機電維護，國內數家航空業者與歐洲專業維護機隊合作引進之直升機多使用 Safran 發動機，國內此型發動機有逐漸增加之趨勢，本會日後可積極參與歐洲直升機及發動機相關研討會，汲取經驗及蒐集資料用以厚植直升機事故調查能量。