

熱流能源學門赴歐考察渦輪引擎科技研發與推動
考察報告

陳發林

國立台灣大學應用力學所

考察計畫提案人：陳朝光教授，熱流學門召集人

考察地點：英國、法國、德國、奧地利等國之學術研發單位

考察期間：民國 89 年 9 月 14 日至 10 月 6 日

考察團成員：

陳朝光教授 成功大學機械系，熱流學門召集人

謝曉星教授 中山大學機械系

曲新生教授 交通大學機械系

陳發林教授 台灣大學應力所

鄭友仁教授 中正大學機械系

黃鎮江教授 中華大學航空機械系

鄭慶陽教授 南台科技大學機械系

考察行程及時間表：

9 月 14 日-9 月 18 日	英國倫敦；牛津大學工程科學系渦輪引擎實驗室、劍橋大學物理系 MEMS 製造工程中心
9 月 19 日-9 月 22 日	法國巴黎；國立巴黎第六大學物理及機械研究所
9 月 23 日-9 月 26 日	德國柏林；柏林工業大學機械製造加工中心
9 月 27 日-9 月 30 日	德國慕尼黑；慕尼黑工業大學機械系流體力學研究所及 Siemens(西門子)研發部
10 月 1 日-10 月 4 日	奧地利維也納；維也納科技大學機械系熱流實驗室

前言

歐美在渦輪引擎研發生產技術執世界牛耳，我國在這方面之技術僅由漢翔生產 IDF 戰機而奠定良好基礎。近年來華航與長榮兩家航空業者相繼成立渦輪引擎維修工廠，大量投入人力與資金，準備迎接公元 2000 年亞洲航空市場蓬勃發展的契機。隨著 1989 年長榮機隊成立，及華航新機隊將於 2003 年成軍，國內採用 GE 引擎就有二百多具，再加上其它現有機隊之引擎，國內渦輪引擎之維修產能可能達每年 400 具以上。根據長榮航太所作之市場調查得知，2000 年亞洲市場的總產能應有 1500 具以上。若以每具引擎的平均維修費用是 800 萬台幣計，則年產值可達 120 億元。國內兩家業者及其它相關配合廠商，正準備迎接這龐大市場的來臨，積極與國內外研究單位接洽合作事宜。工程處熱流能源學門因此提出本案，赴歐洲四國考察渦輪引擎維修及研發單位，以求全面了解國外技術及研究發展情形，蒐集完整資料，供政府及相關研究單位或業者參考。以下針對各受訪單位之考察觀感記錄如后。

壹、牛津大學 (Oxford University)

本次考察活動第一站(9 月 15 日)，我們參訪了在國際間極富盛名的勞斯萊斯牛津大學-空氣動力學與熱傳技術中心 (The Rolls-Royce University Technology Center in Aerodynamics and Heat Transfer)，該中心是牛津大學工程科學系 (Department of Engineering Science) 底下眾多研究中心之一。中心位於 Osney 的 Southwell Laboratory，是一棟外觀極不顯眼的建築物。該中心負責人 Prof. Jones 因有要事未能出席，而由中心資深教授 Prof. Oldfield 與 Prof. Ainsworthg 兩人出面接待。該中心的前身是工程科學系的渦輪引擎團隊，該團

隊成立至今已有二十多年，過去主要從事渦輪引擎之空氣動力學與熱傳之研究，該團隊過去的研究績效相當卓著，例如，新型氣輪機測試風洞以及等熵輕活塞風洞的研發等，該團隊也曾為英國國防評估與研究局（Defense Evaluation and Research Agency，簡稱 DERA）建立了一座國家風洞，目前仍在 Farnborough 運轉中。幾年前，該團隊於在勞斯萊斯 (Rolls-Royce) 公司的資助下成立了牛津大學空氣動力學與熱傳技術中心 (The Rolls-Royce UTC in Aerodynamics and Heat Transfer)，除了長期進行渦輪引擎之空氣動力學與熱傳之量測研究外，近年來，正積極發展以 MEMS 為基礎的量測技術，進行渦輪引擎暫態特性之研究，這項技術的發展儼然已成為該中心的特色之一。由於研究績效卓著，該中心於 1996 年獲得 Royal Society Esso Energy Award。除了與勞斯萊斯有長期的合作關係之外，該中心也接受英國工程與物理科學研究委員會 (Engineering and Physics Science Research Council，簡稱 EPSRC)、大英委員會 (British Council)、國防研究所 (Defense Research Agency，簡稱 DRA) 等單位的委託研究。該中心的實驗設備相當多，研究主題也相當廣泛，由於時間所限，我們僅參觀了幾項研究主題的相關研究設備，包括渦輪機暫態流場壓力與溫度量測技術之發展以及渦輪機葉片冷卻技術研究等，以下簡單描述：

（1）暫態流場壓力與溫度量測技術之發展

這項研究主題主要在發展旋轉葉片暫態壓力與溫度特性之量測技術，目前已成功完成開發直接嵌入金屬表面的矽壓阻力微感測器 (Silicon Piezoresistive Sensor)，至於熱通量之量測技術，目前仍在研發中。Prof. Ainsworthg 首先帶領我們參觀了有關微型壓力感測器研發過程與其應用實例，該中心所研發的

微感測晶片尺寸大約在 1 mm^2 ，平均擷取速率 (Sample Rate) 為 100 kHz ，而操作壓力與溫度範圍則分別在 $0.3\text{--}30\text{ bar}$ 以及與 500°C 以下，嚴格的來說這種尺寸仍不能稱作 MEMS device，一般而言，MEMS 級之壓力感測器其大小介於 $1\text{ }\mu\text{m}$ 與 1 mm 之間，其次， 500°C 之操作溫度遠低於氣渦輪機的實際操作溫度，如何提升壓力微感測器的操作溫度也是亟待克服的問題之一。第一個參觀的實例為轉子後緣非定常流之壓力量測，如圖 (1-1) 所示，也就是將嵌有晶片的角錐型探針頭的壓力探針置於轉子後緣，以進行全場壓力之量測，由於壓力感測器的數據擷取速度高達 100 kHz ，對於一般轉速在 $3000\text{--}5000\text{ rpm}$ 的氣渦輪機而言，所得之結果足以描述全場壓力分佈，工作人員並當場展示量測結果，從動態影像表現非定常流壓力分佈，的確令人印象深刻，第二個應用實例則是將微感測晶片直接嵌入葉片金屬表面進行表面靜壓力之量測，如圖 (1-2) 所示，這部份的量測結果則以海報進行解說，之後 Prof. Ainsworth 緊接著帶我們參觀壓力感測器之製程與校正實驗室，由於這方面的技術牽涉到該中心與 Kulite Semiconductor Inc. 間商業協定與機密的緣故，我們並沒有拍照以及進行太詳盡的問答。

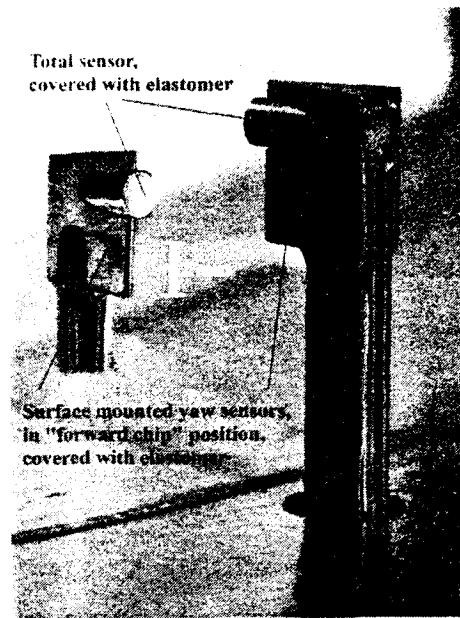
(2) 渦輪機冷卻技術之發展

該中心有關熱傳部份的研究，大部份集中在渦輪機葉片的內冷卻與外冷卻技術的研發，事實上，在渦輪機葉片冷卻技術的研究領域裡，該中心在世界上佔有舉足輕重的地位。其中有關外冷卻（或稱薄膜冷卻）技術部份的研究，並沒有做太詳盡的介紹，僅在現場展示了一些過去所研究的薄膜冷卻葉片實體，及一些研究結果，如圖 (1-3) 所示；有關內冷卻技術的

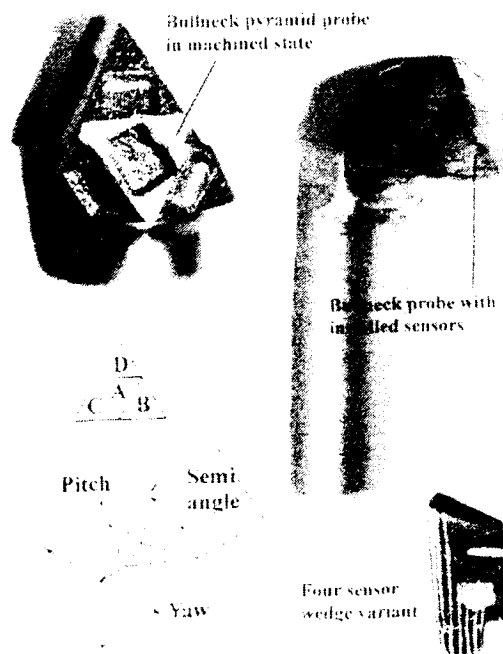
開發，我們則詳細的參觀了有關的實驗系統與量測技術，該中心所使用的內冷卻技術包括加裝 V 型肋條的強制對流之內冷卻管道、衝擊噴流冷卻技術等，所使用的研究方法主要為暫態液晶熱影像技術，由於一行人包括謝曉星教授與黃鎮江教授等對於氣輪機內冷卻技術有相當豐富的研究經驗與研究成果，因此，不斷的與實驗室負責人 Reader Ireland 討論並交換心得，事實上，有關氣輪機葉片內冷卻技術，國內相關的研究成果應該已超越了該中心。有關量測技術部份，值得一提的是該中心所使用的暫態液晶熱影像技術與目前國內許多學者所使用的稍有不同，他們的技術是藉由液晶顏色的彩度（Hue）隨著溫度呈線性變化的特性決定表面溫度後，再進一步探討熱傳係數或薄膜冷卻效率等熱傳特性，而目前國內許多學者所使用的軟體都是藉由液晶 RGB 顏色強度（Intensity）隨溫度變化的特性來分析熱傳係數，而基本上兩者都屬於逆運算技術。除了氣輪機葉片冷卻技術之研究外，該中心也應用暫態液晶量測技術探討類比燃燒器之熱傳特性，也就是利用加熱過的氬與空氣混合氣體模擬燃氣，藉以分析類比燃燒器表面的熱傳特性，如圖（1-4）所示。

整體而言，The Rolls-Royce UTC Aerodynamic and Heat Transfer 研究表相當傑出，尤其以 MEMS 技術為基礎的渦輪引擎量測微感測器之研發成果，尤其令人印象深刻，這種結合熱流、材料、電子、微機電等技術之整合工作，絕非以個別教授能力所能完成的，值得學門在推動或執行整合型計畫之參考。其次，該中心獲得 Rolls-Royce 經費的支持，並得以建立大型的渦輪機測試機台，因此，所從事的輪機相關研究，均可以葉片實體進行之，而且實驗狀況包括轉速溫度等都可以達到渦輪引擎實際操作狀況，這些是國內研究單位所無法相比擬的。

R W Amis (with others)



(a)



(b)

圖 (1-1) UTC 所發展的楔形探針壓力感測器

Unsteady pressure measurement

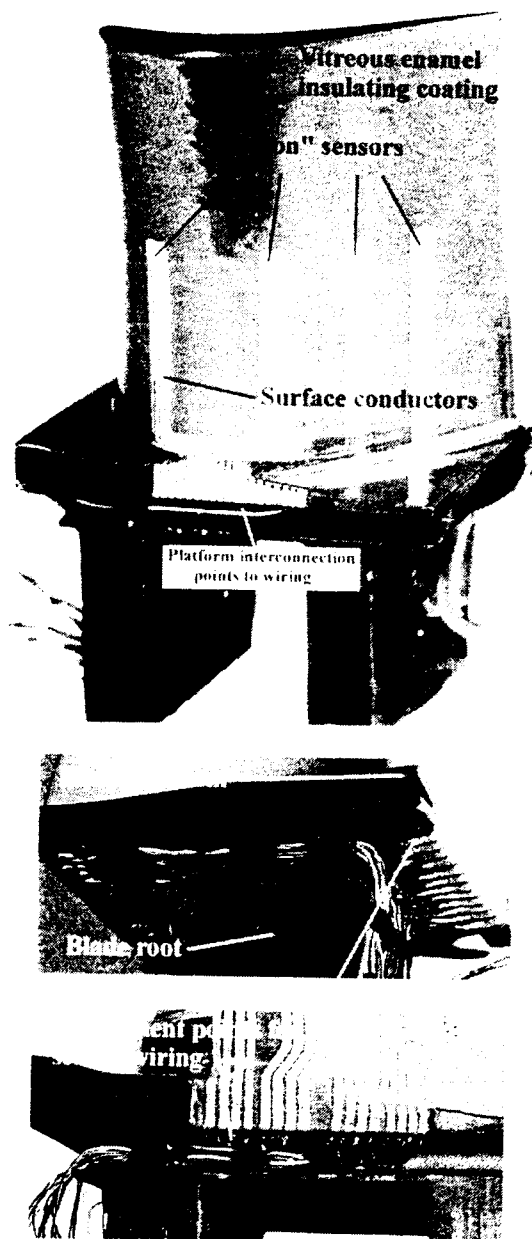


圖 (1-2) 嵌有 UTC 所發展壓力感測器之葉片

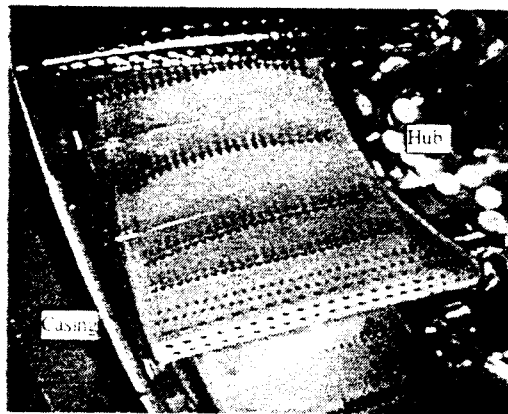


Figure 5 Pressure surface TLC image

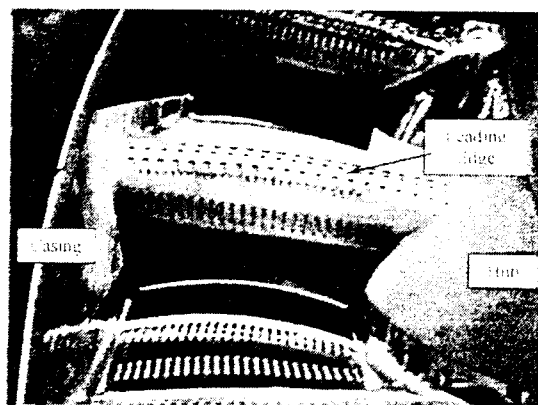


Figure 6 Leading edge TLC image

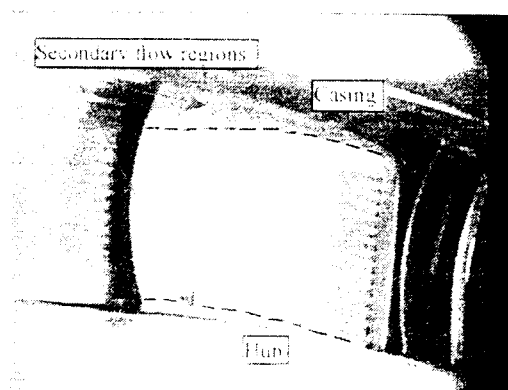
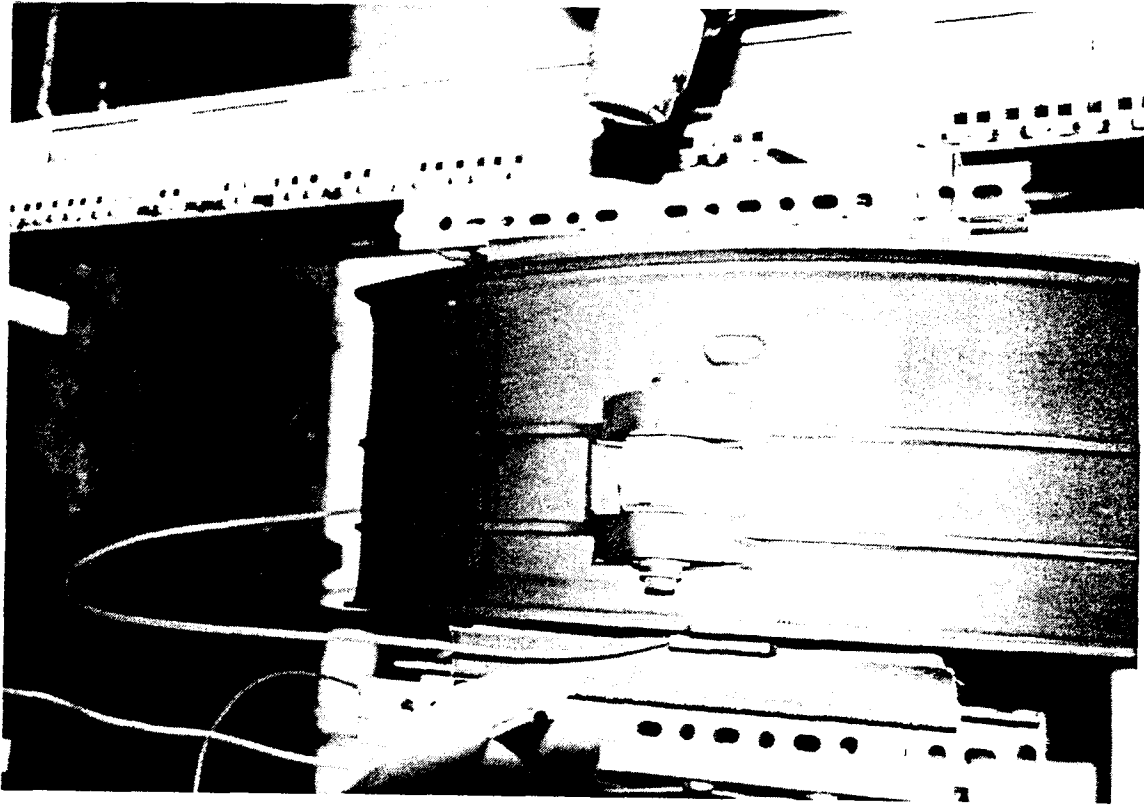
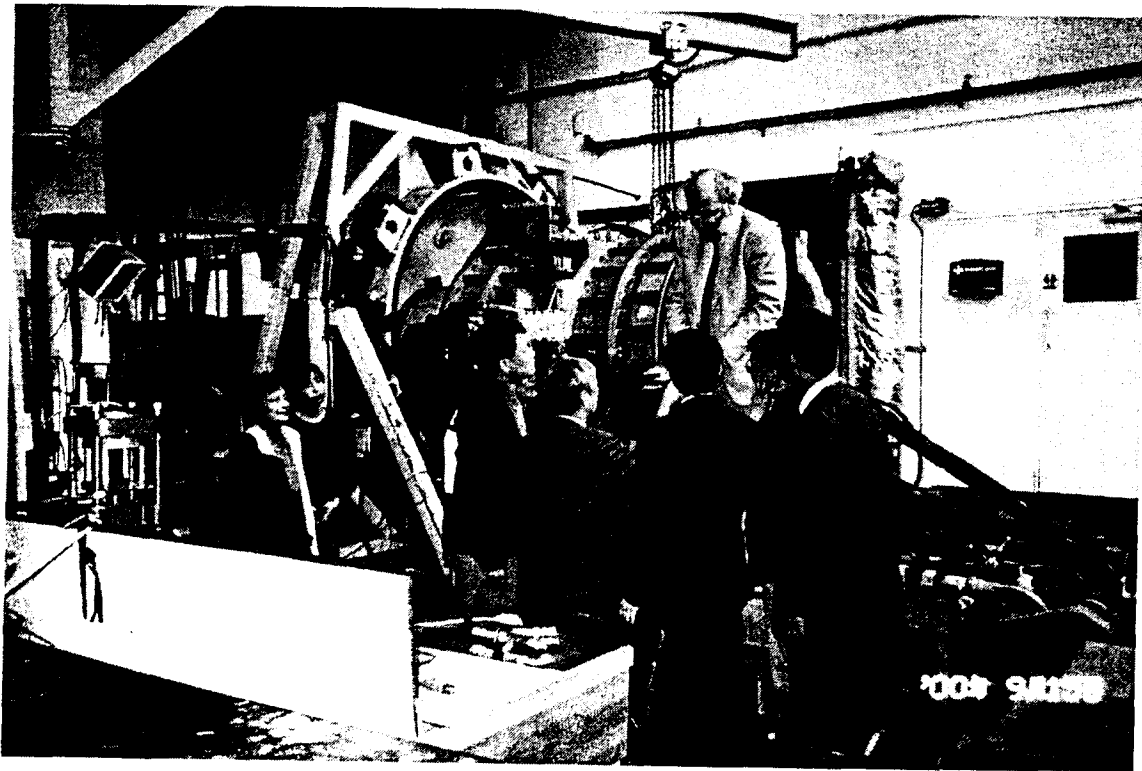


Figure 7 Suction surface TLC image

圖（1-3）使用薄膜冷卻技術之葉片



圖(1-4) 暫態液晶熱影像之實驗量測



圖(1-6) 參訪團參觀渦輪引擎實驗設備之情形

貳、劍橋大學 (Cambridge University)

9 月 18 日拜訪英國劍橋大學 (Cambridge University) 之 Cavendish 實驗室 (Cavendish Laboratory)，由半導體物理小組 (Semiconductor Physics Group) Charles G. Smith 博士接待，參觀半導體物理小組之相關實驗室及其最新研究成果，圖 (2-1) 為此行成員與 Dr. Smith 在 Cavendish Laboratory 前合照。

Cavendish 實驗室 (Cavendish Laboratory) 是劍橋大學 (Cambridge University) 物理科學院 (School of the Physical Sciences) 物理學系 (Department of Physics) 所屬之實驗室。該實驗室相當著名，其中，J. J. Thomson (Cavendish Professor 1884-1919) 發現電子已將近一百年，但人類應用電子以改善人類生活還是日新月異，潛力無窮。

Cavendish 實驗室 (Cavendish Laboratory) 研究範圍相當廣，可分為：以下幾個領域：

1. High Energy Physics (HEP) (高能物理)。
2. Astrophysics Group (AP) (天體物理小組)。
 - [1] Inferential Science Group (推理科學小組)。
 - [2] Geometric Algebra Research Group (幾何代數研究小組)。
3. Physics and Chemistry of Solids (PCS) (固體物理與化學)。
 - [1] Microstructural Physics (MP) (微結構物理)。
 - [2] Fracture Group (破裂小組)。
 - [3] Surface Physics (表面物理)。
 - [4] Thin Film Magnetism (薄膜磁性)。
 - [5] Materials Group (材料小組)。

4. Optoelectronics (OE) (光電子學)。
5. Semiconductor Physics (SP) (半導體物理小組)。
6. Theory of Condensed Matter (TCM) (濃縮物質理論)。。
7. Low-Temperature Physics (LTP) (低溫物理小組)。
8. Polymer and Colloids (P&C) (聚合物與懸浮液)。
9. The Microelectronics Center (微電子中心)。
10. The Interdisciplinary Research Center in Superconductivity (IRC) (跨領域超導體研究中心)。

半導體物理小組 (Semiconductor Physics Group) 應用最先進且時常是世界獨一無二之半導體儀器，以研究探討基本之電子現象。高品質 GaAs 與 AlGaAs 晶圓可在分子束磊晶法 (molecular beam epitaxy) 機器上生長，而表面之佈線則使用光學平版印刷術 (optical lithography)、電子束平版印刷術 (electronic beam lithography) 與離子束平版印刷術 (ion beam lithography)。半導體物理小組將分子束磊晶法 (molecular beam epitaxy)、離子束平版印刷術 (ion beam lithography)、掃描磁控隧穿分光術 (scanning magneto-tunnelling spectroscopy) 與表面淨化 (surface decontamination) 結合成一部機器。這些最新研製成功之半導體儀器可用來製造新的極小之三維量子結構，往往會在應用物理及技術上有挑戰性之發現。此外半導體物理小組擁有三台稀釋冷凍機，可降至 20mK，以用在大至 18T 之磁場裏，並擁有一系列之光學與微波裝置。

半導體物理小組 (Semiconductor Physics Group) 大約有七十多人，Pepper 教授領導此半導體物理小組。有十一個組員，另外有二十個 Research Associates，三十個研究生及幾個技術士。

半導體物理小組最新之研究專題包括：

1. Surface acoustic waves and current quantization (表面聲波與流動量子化)。
2. Thermal transport in mesoscopic systems (如介子大小系統之熱傳現象)。
3. Coulomb blockade in an antidot (antidot 之庫倫能障)。
4. One-dimensional electron gases formed without dopant (不需 dopant 所形成之一維電子氣體)。
5. Using a scanning probe to reveal transport properties of low-dimensional devices (使用掃描探針來顯示低維裝置之輸送性質)。
6. Spin-injection from a ferromagnet into a semiconductor (從磁鐵至半導體之旋轉注入)。
7. Magneto-tunnelling spectroscopy of one-dimensional quantum wires (一維量子線之磁控隧穿分光術)。
8. Silicon germanium research (矽化鎳之研究)。
9. Interaction effects in one-dimensional constriction (一維頸縮之相互作用效應)。
10. Nanostructures defined by regrowth on patterned epilayers (在 patterned epilayer 上再生長以定形之毫微結構)。
11. Device patterning using atomic force microscopy (使用原子力顯微鏡之器件佈線)。
12. Focused ion molecular beam epitaxy (FIMBE) (聚焦之離子束磊晶法)。
13. Growth and applications of self-assembled quantum dots

(自己組合之量子 dot 之生長與應用)。

14. Molecular nanoelectronics (分子毫微電子學)。

15. Terahertz imaging (萬億赫映像)。

16. Non-invasive probes- the detector (非侵入性探針-探測器)。

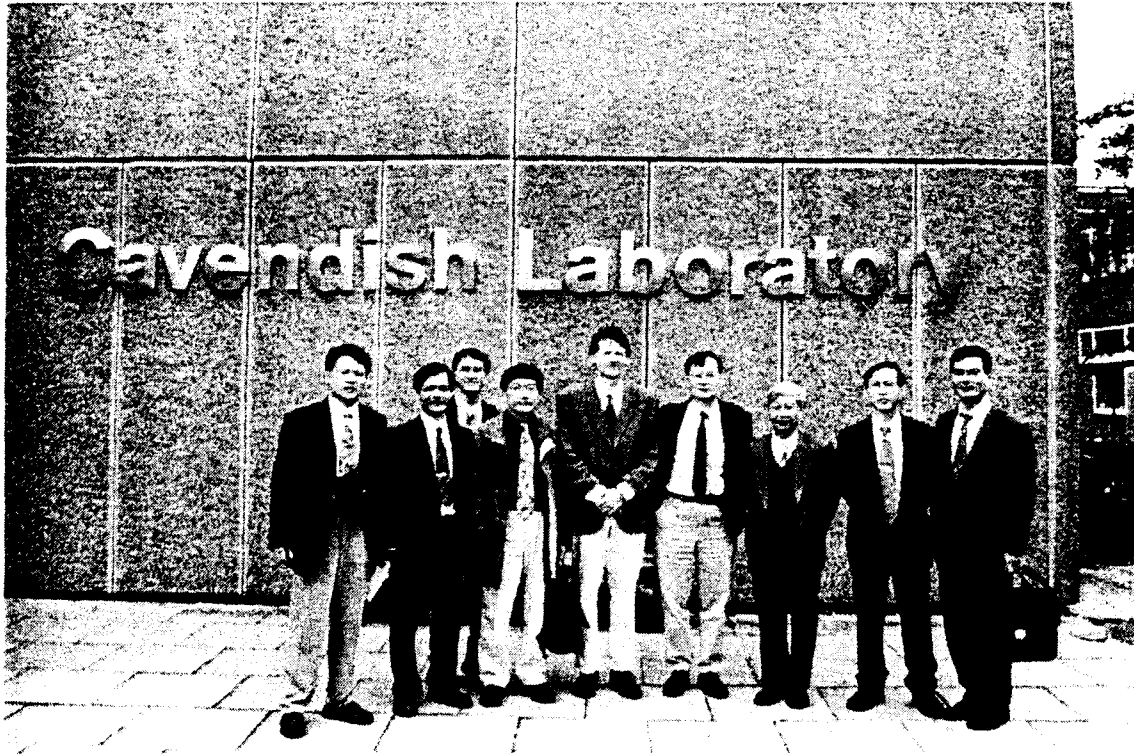


圖 (2-1) 考察團成員與 Dr. Smith (左五) 在 Cavendish Lab. 前合照

參、巴黎第六大學 (Universite Pierre et Marie Curie , Paris VI)

9 月 20 日拜訪 Universite Pierre et Marie Curie (Paris VI) 巴黎第六大學之 Laboratoire de Mecanique Physique (LMP), 該實驗室係與 CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) (國家科學研究中心) 之 SPI (Department des

Sciences pour l'Ingenieur) (工程科學部) 合作，即 SPI 之 Section 9 (Mecanique-Genie des materiaux-Acoustique) 與 Section 10 (Energie, mecanique des milieux fluides et reactifs genie des procedes) 設在 Laboratoire de Mecanique Physique 內。再配合 Universite Pierre et Marie Curie 之 UFR 923 (Mecanique-Energetique-Robotique)，及 Renault 汽車公司之人員、設備與經費等贊助，構成此實驗室。由 P. Y. Hennion 教授接待，參觀熱流相關實驗室及其最新研究成果。主要研究小組為：

1. 化學反應流體 (Fluides reactifs)。
2. 燃燒與污染 (Combustion et pollution)。
3. 混合引擎與替代燃料 (Moteurs hybrides et carburants de substitution)。
4. 熱傳遞 (Trasferts thermiques)。
5. 聲學與振動 (acoustique et vibrations)。
6. 物理聲學 (Acoustique physique)。

Laboratoire de Mecanique Physique 應用一套新穎之 COSMOS 聲納系統， multibeam front-scan sonar system，以觀察及研究海床。較傳統之 side-scan sonar system 有更佳之解析度，可用來偵測管線及其他用途，令人印象深刻。而混合引擎之研究係與 Renault 公司合作，有相當優秀之研究成果。

最新之研究專題包括：

1. Simplified theory of Ringbom Stirling machines (Ringbom 史特林引擎之簡化理論)。
2. Fuel consumption and emission reduction of small two-stroke engine through air-assisted fuel injection and

- delayed-charging (小型二行程引擎經由輔助空氣燃料噴射與延遲充氣以減少燃料消耗與排放)。
3. A study of turbocharged Diesel engine during sudden accelerations (突然加速時之渦輪增壓柴油引擎研究)。
 4. Combustion chamber carbonaceous deposits: reactions of formation and analysis of composition (燃燒室積碳：形成之化學反應與組成分析)。
 5. Visualization, measurement and modeling of a confined flow within a thermal engine (一熱機內之限制流動之可視化、量測與模式之建立)。
 6. Liquid film atomization due to sharp edge in spark-ignition engine (火花點火引擎內經由尖銳邊緣液體薄膜之霧化)。
 7. Wavelet analysis applied to the detection of abnormal ICE exhaust pipe (應用小波分析以偵測不正常 ICE 排氣管)。
 8. Characterization of I. C. Engines as a linear acoustic source using internal measurements (應用內部量測將 I. C. Engines 當作線性聲波源來瞭解其特性)。
 9. Ketohydroperoxides and ignition delay in internal combustion engines (內燃機內之 Ketohydroperoxides 與延遲點火)。
 10. Reactions of s- and n-C₄H₉O and n-OOC₄H₈OH radicals in oxygen
 11. (s-C₄H₉O 基、n-C₄H₉O 基與 n-OOC₄H₈OH 基在氧氣中之化學反應)。

12. Homogeneous and heterogeneous reactions of the n-C₅H₁₁O and n-C₅H₁₀OH and n-OOC₅H₁₀OH radicals in oxygen (n-C₅H₁₁O 基、n-C₅H₁₀OH 基與 n-OOC₅H₁₀OH 基在氧氣中之均勻與不均勻化學反應)。
13. An experiment of non-coherent synthetic aperture (非合成孔徑之實驗)。
14. Non-coherent synthetic aperture imaging (非合成孔徑之映像)。
15. Thermal constriction resistance of coated solids: static and sliding contacts (塗層固體之熱收縮阻力：靜態接觸與滑動接觸)。
16. 3-D numerical modeling of heat transfer between two-sliding bodies: temperature and thermal contact resistance (塗層固體之熱收縮阻力：靜態接觸與滑動接觸)。

SPI (Department des Sciences pour l'Ingenieur) (工程科學部)
創立於西元 1975 年，主要之研究方向為：

1. Integrated production (整合生產)。
2. Man/machine interaction (人機互動)。
3. High speed networks, distributed and parallel computing (高速網路，分配與平行計算)。
4. Diagnosis, security of industrial systems and operational reliability (診斷，工業系統之安全與操作可靠度)。
5. Microsystems, micro- and nanotechnology (微系統，微技術與毫微技術)。
6. Energy systems (能量系統)。

7. Processes (製程)。
8. Smart machines (智慧型機器)。
9. Coupled phenomena and extreme conditions (耦合現象與極端條件)。
10. Health care engineering (健康照顧工程)。
11. Adaptive structures and materials (可適應性結構與材料)。

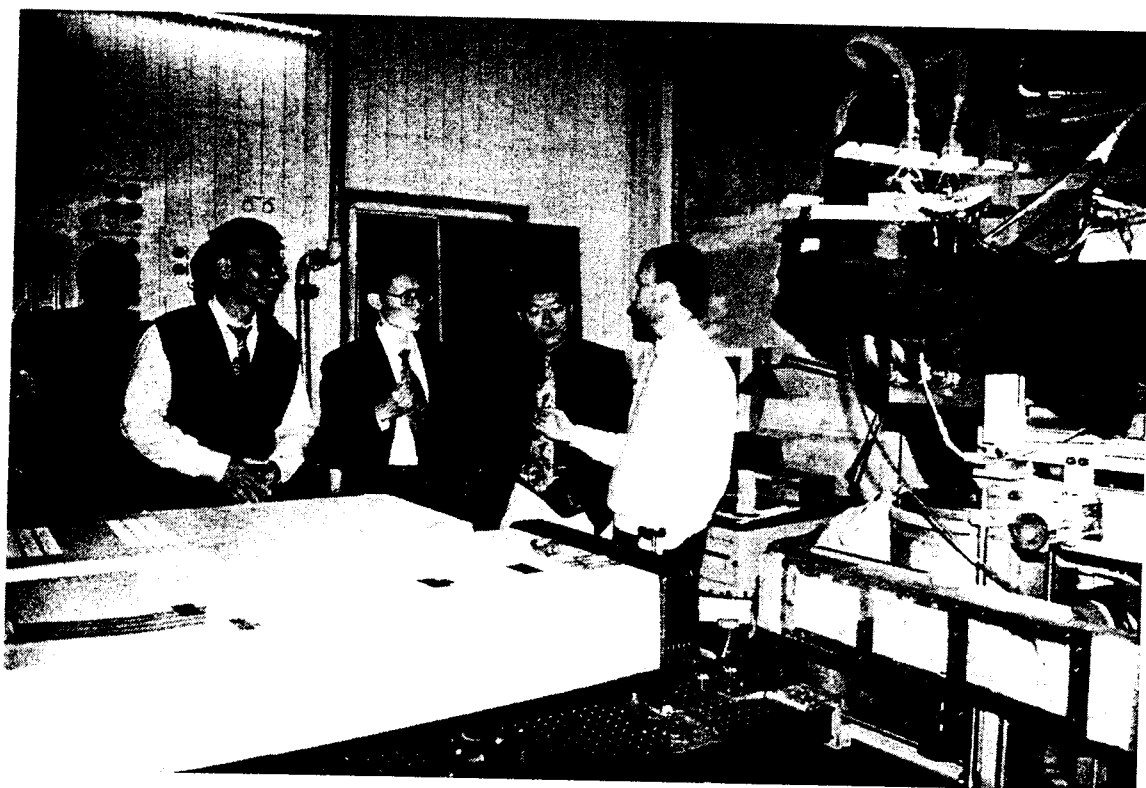


圖 (1-6) 參訪團參觀巴黎大學引擎實驗設備之情形

肆、柏林工業大學 (TU Berlin)

9月25日拜訪 Technische Universität Berlin, TU Berlin (柏林工業大學) Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (Institute for Machine Tools and Factory Management), 由工具機及工廠管理小組之經理 Erdmann Schäper 與研究工程師 Stefan Döll 兩位博士接待, 參觀最新工具機、相關實驗室及

其最新研究成果。

工具機及工廠管理小組 (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb) 由 Eckart Uhlmann 教授領導。該小組屬於工具機及製造業技術系 (Department of Machine Tools and Manufacturing Technology) 之一部分。

最新之研究活動包括：

1. Design optimization and experimental investigation of the static, dynamic and thermal behavior of machine tools (工具機靜態行為、動態行為與熱行為之設計最佳化與實驗探討)。
2. Model analysis of machine tools and components (工具機與其組件之模式分析)。
3. Computer aided optimization and simulation of machine concepts (機器構想之計算機輔助最佳化與模擬設計)。
4. FEM-analyses of the static, dynamic and thermal behavior of machine components (機器組件之靜態行為、動態行為與熱行為之有限元素分析)。
5. Design and optimization of clamping systems (夾緊系統之設計與最佳化)。
6. Manufacturing of high-precision turning workpieces (高精度轉動工件之製造)。
7. Process-control, investigation and reduction of disturbances (程序控制與干擾之探討與降低)。
8. Monitoring and controlling of manufacturing processes (製造程序之監視與控制)。
9. Deep-drawing and cutting presses (深引伸與切斷壓床)。

10. Magnetic forming machine (磁力成形機)。
11. Design and manufacturing of fiber-reinforced-plastic parts (纖維強化塑膠零件之設計與製造)。
12. Material analysis (材料分析)。
13. Rheological analysis (流變學)。
14. Acceptance tests of machine tools according to DIN 8601 (依據 DIN 8601 進行工具機之驗收檢驗)。
15. Bombardment tests of safety-related parts (安全相關零件之撞擊實驗)。

切削工具機之工作精度受到心軸之靜態行為、動態行為與熱行為影響。由於心軸軸承之摩擦，主軸台和心軸本身之溫度場隨位置與時間改變，所造成之熱變形大大影響工具機之精度。心軸本身採用纖維強化塑膠以減少軸向變形，但是主軸台之熱變形對工具機精度之影響較為複雜。工具機及工廠管理小組採用碳纖維強化塑膠 (carbon fiber reinforced plastic) 來製造主軸台以代替原有之鋼質主軸台，可減少百分之九十六垂直心軸變形。而工具機及工廠管理小組也探討碳纖維強化塑膠製造之主軸台合適之施力區域，即與軸承和機台之接觸區域，以減少變形。此外，工具機及工廠管理小組也探討在減少心軸熱變形以提高工作精度之時，如何能維持與傳統鋼質主軸台一樣之靜態與動態之穩定度。

工具機及工廠管理小組經由設定之磁場，應用磁性流體 (magnetic fluid) 於滑動軸承 (sliding bearing) 與滾動軸承 (rolling bearing)。應用磁性流體於滑動軸承內，可防止潤滑劑之側面流出，以減少潤滑劑之補充與更新。而應用磁性流體於滾動軸承內，則會使潤滑劑集中在滾珠或滾柱與軸承環之接觸點上。磁性流體 (magnetic fluid) 是由磁性粒子 (magnetic

particle)、界面活性劑 (surfactant) 與載送流體 (carrier fluid) 所構成。磁性粒子 (magnetic particle) 之大小為 5-15 nm，因其尺寸太小而幾乎無磨損。載送流體 (carrier fluid) 可採用合成機油或液態之礦物油。而界面活性劑 (surfactant) 則可披覆在磁性粒子上，以使磁性粒子分散。如此，磁性粒子之沉積與結塊就不容易發生。在磁場內，整個流體被吸引，磁性粒子與載送流體不會分開。有相當長之時間，人類應用磁性流體於旋轉軸上當作軸封使用，並應用磁性流體於揚聲器當作阻尼介質使用。工具機及工廠管理小組比較滑動軸承與滾動軸承採用磁性流體與傳統潤滑劑潤滑，在熱行為、動態行為與磨潤行為上有何不同。而且，工具機及工廠管理小組研究磁性流體用於潤滑滑動軸承與滾動軸承之限制，並研究最佳之潤滑程序以探討實際應用之可能性。

工具機及工廠管理小組正在研究如何將磁力成形技術 (magnetic forming technology) 整合到現代之連貫生產過程，如何將磁力成形技術做得更好。亦即如何設計線圈，如何決定基本之操作參數，如何使過程之調整又安全又準確。此研究主要為工具導向，亦即研發出工具之快速更換裝置，使磁力成形技術能整合到現代之連貫生產過程。同時該小組也研究如何保護操作人員與機器，使磁力成形機所生之電磁場對操作人員與機器均無害。磁力成形技術 (magnetic forming technology) 主要是依據感應之原理來設計，主要的材料為鋁及其合金。此乃因鋁製品愈來愈受工業界之歡迎，尤其是如太空構架 (space frame) 一般之鋁製品，重量輕 (lightweight) 又夠強，磁力成形技術非常適合來製造這種材料。磁力成形技術將能量儲存在充滿電之電容器內，此一電容器與成形工具 (線圈) 連接。當開關接通之瞬間，大電流會通過成形工具 (線圈)，所對應之

磁場會在工件中產生渦電流 (eddy current)，使成形工具 (線圈) 與工件中有徑向力之作用，以完成工件之成形。主要之關鍵為為成形工具 (線圈) 之機械設計。高電流與高成形力使得成形工具 (線圈) 受到很大之機械應力與熱應力。

工具機及工廠管理小組正在研究如何應用 fullerene (C60) 來解決低相對速度時高磨損之潤滑問題。Fullerene (C60) 可添加至潤滑傳統滑軌所使用之礦物油內，由於 fullerene (C60) 分子之幾何結構，fullerene (C60) 與礦物油之混合物可當作化學抗磨軸承 (chemical antifriction bearing) 來使用。Fullerene (C60) 之顏色為黑色，分子大小為 1 nm，溫度之穩定性可達到攝氏溫度 1000 度以上。其分子之幾何結構是鑽石與石墨以外之另一種碳之幾何結構。若應用 fullerene (C60) 於兩低相對速度之摩擦面間，可在兩摩擦面間造成充分之分離，以減少磨損。工具機及工廠管理小組研究指出：表面壓力增高時，fullerene (C60) 與礦物油之混合物的靜摩擦係數反而降低。此外，小組研究發現 fullerene (C60) 與礦物油之混合物的靜摩擦係數與滑動摩擦係數間之差異很小，所以 fullerene (C60) 與礦物油之混合物在高表面壓力與低相對速度時會呈現出很好之黏附-滑移 (stick-slip) 行為。

伍、慕尼黑西門子 (Siemens) 公司

西門子集團 (Siemens Groups) 是世界著名的跨國企業，主要事業包括資訊與通訊 (Information and Communications)、能源 (Energy)、運輸 (Transportation)、衛生保健 (Health Care)、以及照明 (Lighting) 等項目，其中，在資訊與通訊為該集團的營業大宗，1999 年中銷售金額約佔該集團總銷售金額的一半，而與電廠建造及技術輸出有關的能源部份，則僅佔該集團總銷售金額的 15 % 左右，儘管如此，西門子仍具有相當先進

渦輪引擎技術，值得一提的是，目前位於台北的林口火力發電廠以及台南興達火力發電廠，都是使用 Siemens 的機組。

西門子在慕尼黑共有五個工廠或研發中心，此次所參訪的是位於慕尼黑東南的西門子研發中心，我們一行人從旅館先搭乘地鐵（U-Ban）再轉乘高鐵（S-Ban）直抵該公司門口，此行由該中心技術合作部門的資深主管 Mr. Schmitter 接待，首先由他先致歡迎詞並對西門子公司進行簡介，緊接著由通訊部門工程師對該公司通訊技術的發展現況進行介紹，然後觀賞有關高速鐵路與核能電廠 3-D 虛擬實境實影片，最後再進行座談，整個參訪行程在享用 Schmitter 豐盛的法式午宴款待後結束，圖（5-1）為一行人與 Mr. Schmitter 在 Siemens 的展示室的合照。

基本上，此次所參訪的西門子研發中心主要是從事通訊技術的研發工作，並不進行電廠相關技術發展與生產任務，因此，整個參訪過程並無法參觀有關渦輪機的生產過程，至為可惜，儘管如此，從 Mr. Schmitter 帶領我們觀賞有關電廠 3D 虛擬實境影片裡、和 Schmitter 座談對話中、以及公司所提供的詳盡資料中，我們對目前西門子有關渦輪技術或發電廠目前的發展趨勢有初步的瞭解，尤其我們一行人所關切的燃料電池電廠目前發展現況，也從所提供的資料中獲得不少寶貴的資訊，以下僅就西門子針對燃料電池電廠目前的發展情況，做一簡單的介紹。

由於目前電廠面臨的相當多的問題，特別是核能電廠，除了第三世界國家外，目前幾乎沒有新的核能電廠的訂單，此

外，由於污染、石油價格不穩定等因素，傳統火力電廠也面臨了相當大的挑戰，因此，積極尋找新能源或替代能源已成為該公司重要的任務之一，燃料電池電廠的發展即是一例。燃料電池的基本原理是藉由氫氧反應產生水並釋出電子來發電，整個過程仍屬燃燒，只不過所使用的燃料與助燃劑分別是氫氣與氧氣，而燃燒後之產物則為水分子，如圖（5-2）所示，因此，整個發電過程並不會產生 CO、CO₂、NO_x、SO_x 等有害氣體或物質，他除了是一種乾淨的能源外，而且兼具有低噪音、高效率等特性。事實上，西門子從 1965 年即開始針對燃料電池進行研發，而有關燃料電池電廠部份，則是在 1970 年與 Westinghouse 所合組的一家名為 Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC) 的公司（總部設在美國 Pittsburgh）下，成立 Science and Technology Center，專門研發所謂固態氧化物燃料電池（Solid Oxide Fuel Cells，簡稱 SOFC）電廠，由於商用成效逐漸展露的緣故，這項研發計畫從 1980 年開始已經獲得美國能源部（DOE）經費支持。由於單一燃料電池電廠的輸出功率並不大，大約在 0.25-5 MW，因此，主要目標放在所謂分散型電廠（Decentralized Generation of Electric），或社區型電廠的市場，根據他們的預估，第一個 SOFC 電廠將可在 2004 年進行商業運轉，並可提早在 2002 年開始接受訂單，下面就 SOFC 目前的發展現況做一說明。

SOFC 是屬於高溫型燃料電池，SWPC 所發展的 SOFC 電廠基本上有兩種形態，第一種為圖（5-3）所示的常壓型 SOFC 系統，另外一種則是高壓型燃料電池系統，如圖（5-4）所示。常壓型 SOFC 系統適用於可靠度之要求較高而且較無須維修的環境，這種系統的電能效率接近 50 %，而且在運轉過程中

也可釋出可觀的熱能提供共生系統使用，因此又稱為共生型燃料電池電廠，這種產品初步規劃輸出功率在 250 kW，而目前已有一組 100 kW SOFC 共生型系統在荷蘭進行長期穩定性運轉測試，這組系統 46 % 的效率運轉超過了 14000 小時，他是目前全世界第一部進行商用測試的常壓型 SOFC 雛形機。第二種產品為高壓型燃料電池電廠，如圖 (5-4) 所示，這種電廠結合了燃料電池技術與氣輪機技術作為主要發電技術，因此又稱為燃料電池 / 氣輪機混成系統 (SOFC/Gas Turbine Hybrids)，主要提供全電力應用，與常壓型 SOFC 系統不同的是他加裝了一組氣輪機機組，此一氣輪機組主要有以下幾點功能：

- (1) 經由氣輪機組的壓縮機 (Compressor) 將空氣加壓送入 SOFC，使得 SOFC 內之氫氣與氧氣能夠充分反應。
- (2) 氣輪機出口的高溫燃氣可作為燃料與空氣等回熱 (Recuperation) 或預熱 (Preheating) 之用。
- (3) 氣輪機本身亦可提供系統部份發電量。

上述幾項功能均可有效提升系統效率，一般而言 SOFC/GT 混成系統平均電力效率可達 60 % 以上，甚至高達 70 %，從圖 (5-5) 的效率比較圖顯示，SOFC/GT 混成技術比起氣輪機復合循環 (Gas Turbine Combined Cycle) 以及先進氣輪機系統 (Advanced Turbine System) 的效率高出許多，而全世界第一部由 SWPC 所研發的 SOFC/GT 混成系統發電機組目前正在加州大學 Irvin 的國家燃料電池研究中心 (National Fuel Cell Research Center，簡稱 NFCR) 進行長期穩定性運轉測試，這個系統結合了一個高壓 SOFC 模組以及一個由 Northern Research and Engineering Corp. 所提供的微氣輪機，機組總輸

出功率為 220 kW，其中 SOFC 可提供 200 kW 的電力，而微氣輪機部份則可提供 20 kW 的電力，這個系統目前的效率為 55%，依這種規模的發電容量因該足以提供兩百個家庭的使用量，根據 NFCRC 的評估，在這個系統持續進行幾個月的測試並獲得相關的操作特性、參數以及經驗後，將可正式進行雛形機的設計與商業生產的階段，預期系統改進後其效率將可達到 70%。

目前，正值國內因核能電廠興建與否吵的不可開交之際，事實上，燃料電池電廠應該可以提供這些爭議一個很好的答案，也期待政府能提供國內燃料電池技術的研究環境，以便推動燃料電池技術之研發工作，並進一步考慮將燃料電池技術列入策略性產業之一。



圖（5-1）與 Mr. Schmitter（左四）在 Siemens 的展示室的合照

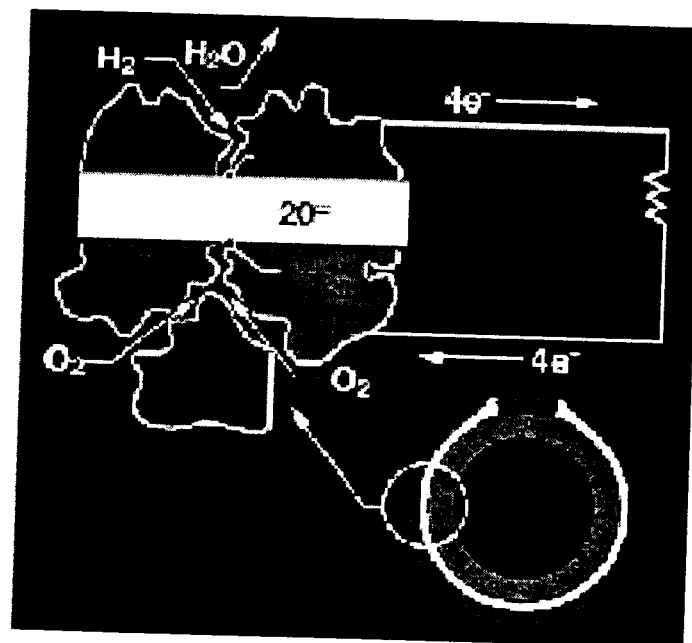
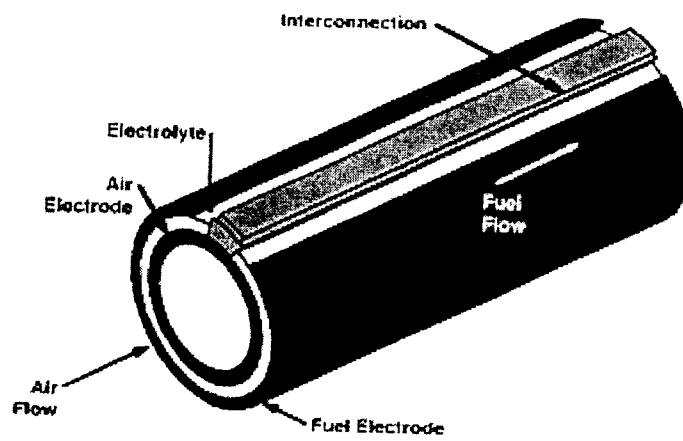


圖 (5-2) 燃料電池的基本原理

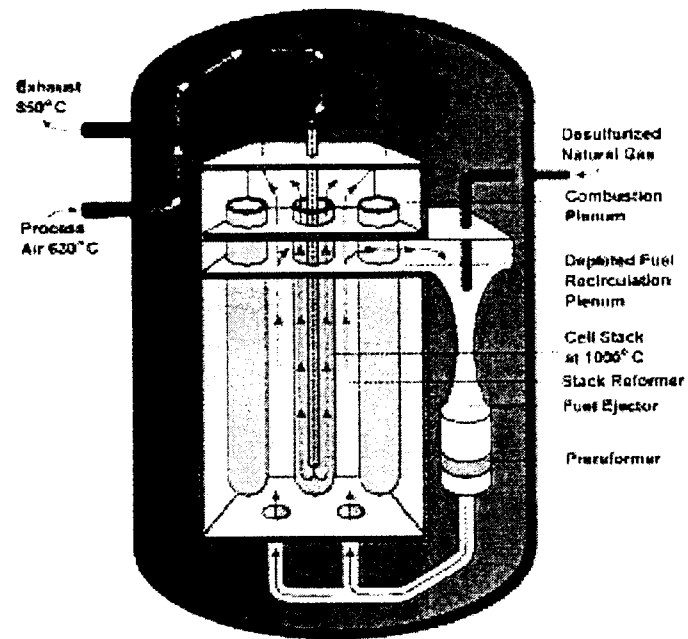


圖 (5-3) 常壓型 SOFC 系統示意圖

Basic operation of an SOFC generator / gas turbine.

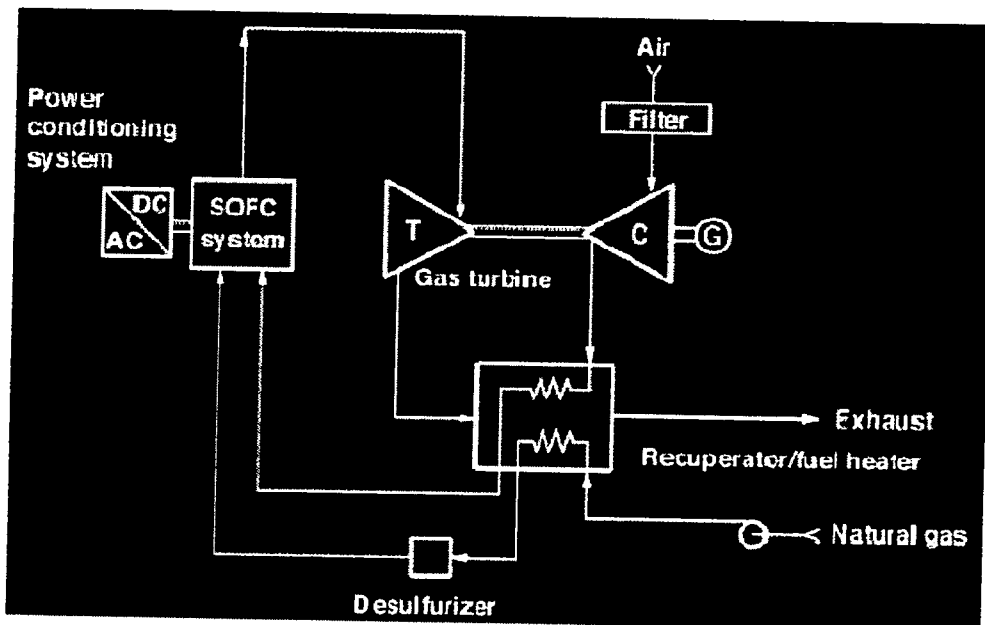
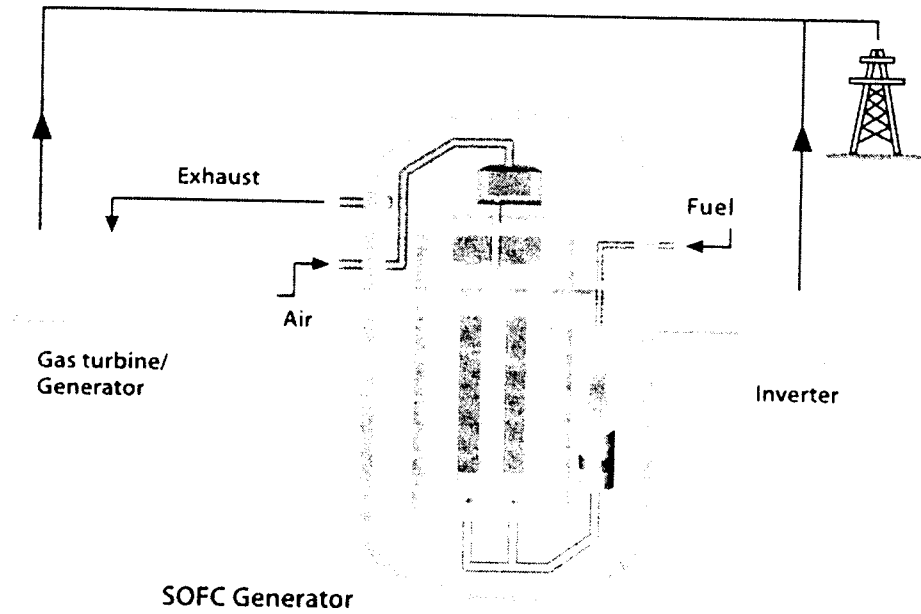
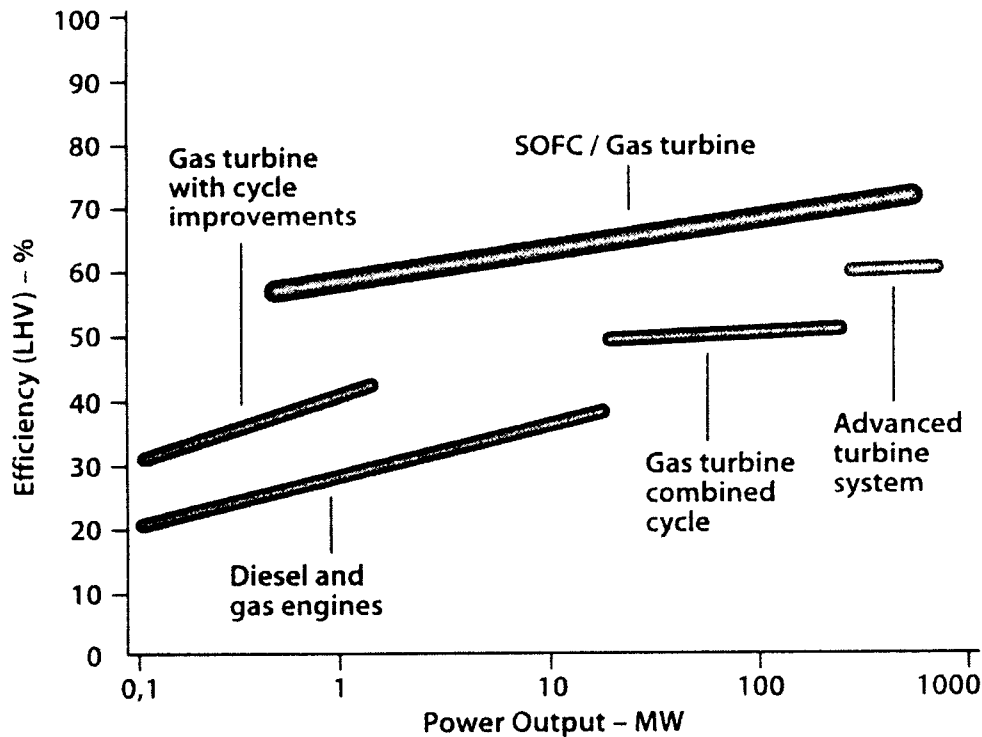


圖 (5-4) 高壓燃料電池/氣輪機混成系統 (SOFC/GT Hybrids)



Performance comparisons of natural gas power generation systems. The combination of a solid oxide fuel cell system with a gas turbine attains efficiencies twice as high as those achieved with combustion engines fueled by diesel or gas.

圖 (5-5) 傳統氣輪機發電系統與 SOFC/GT 混成發電系統
(低熱值) 效率之比較

陸、慕尼黑科技大學 (TU Munich) 與維也納科技大學 (TU Vienna)

行程尾聲，我們分別參訪了慕尼黑科技大學流體力學研究 (Fluid Mechanics Institute) 所以及維也納科技大學流體力學與熱傳研究 (Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer)，基本上，兩者之參訪均著重於研究與教學設備之觀摩與座談，參觀過程中我們拍了一些相關設備之照片以提供國內機械相

關係所改進教學設備之參考，值得一提的是，在座談中我們對目前機械教育的現況充分交換意見，並且也對日後持續進行學術交流工作達成共識。

後記與誌謝：

本次考察計畫由熱流能源學門召集人陳朝光教授於民國八十九年初向工程處提出申請。原計畫書中預訂於當年五月間參訪英國、德國、奧地利、捷克、匈牙利等五國學術及研發單位，然此計畫於七月間才被工程處接受並予補助。陳朝光教授隨即請陳發林教授進行安排參訪事宜，經約三週的聯絡協調與評估，才決定改變參訪國為英、法、德、奧四國。然四國中的受訪單位則是在八月間經多次協調才告確定。其中負責聯絡英國參訪者為謝曉星教授、法國為鄭友仁教授、德國為陳發林教授、奧地利為曲新生教授。協調過程中受駐英國台北代表處科技組張和中副組長，駐法國台北代表處科技組郭石城組長和王裕隆副組長，駐德國台北代表處科技組胡昌智組長等鼎力協助安排參訪一切事宜，並熱心招待，在此特予誌謝。此份報告中有關英國及法國之參訪報告是由鄭慶陽教授主筆撰寫，有關德國及奧地利之參訪報告是由黃鎮江教授主筆撰寫。致贈受訪單位之禮物由謝曉星教授提供，並代表考察團向各受訪單位致謝辭。訪問行程之交通住宿等事宜由陳發林教授之研究生助理曹嘉芸同學代為安排。