

國家同步輻射研究中心
出國報告書

出國人姓名：陳世偉

出國日期：20221123-20221125

目的地 (國家、城市)：日本兵庫縣 Spring-8

參加會議名稱或考察、研究訓練地點：進行單晶渦輪葉片
高能 X 光勞厄繞射實驗_產業先期研究

一、 目的

天然氣發電係靠渦輪機組在高溫下長時間運轉。重要的關鍵是渦輪葉片能夠擁有足夠長的使用壽命而不致損壞。為了有效提升使用壽命，最先進的渦輪葉片採用單晶結構設計，因為單晶結構沒有晶界，因此沒有原子快速擴散的路徑，在這樣的條件之下可以有效降低高溫潛變的發生機率與速度。

除了使用單晶結構設計，單晶結構的結晶性與結晶方位也是需要謹慎考量與嚴格控制的重點。因為如果結晶性差，結構缺陷會加速原子擴散移動，最終誘發高溫潛變的發生；結晶方位如果存在很大的偏移(mis-orientation)，也就是(001)面沒有垂直單晶葉片的長軸，抑制高溫潛變的效果也會大幅降低，這是因為原子在(001)面的擴散速度最快，如果(001)面傾向平行葉片長軸，原子在長軸方向的擴散就容易進行，長時間高溫環境使用後，葉片也就容易沿著長軸方向伸長，最終導致渦輪機組損壞(打死)。因此，分析單晶渦輪葉片的結晶性與結晶方位是相當重要的工作。

然而，單晶渦輪葉片的尺寸相當大，約是25cm*10cm*35cm左右；有特殊的流線形設計，最薄的地方有5mm厚；表面又有約莫1mm厚的噴塗厚模(熱阻障層)。在這樣的條件之下，需要分析底層的單晶結構，會有相當大的難度。這時候，即需要利用高能量同步輻射X光來穿透表層並且從高能X光繞射來得到內部結構資訊。

我們因此利用 Spring-8 BL28B2 光束線進行分析。該光束線可以提供 200 KeV 且具有連續波長的 X 光(white beam)，可以有效穿透單晶渦輪葉片並進行 white beam x-ray Laue diffraction。相較使用 8 環繞射儀進行 X 光繞射分析，white beam x-ray Laue diffraction 可以大幅縮短分析

時間，因此得到廠商的認同。從 Laue pattern 的分析可以瞭解單晶渦輪葉片的結晶性與結晶方位的關係。分析結果可以作為評估渦輪葉片使用效能的依據。

渦輪機組與渦輪葉片長期被少數國外大廠所掌握，如美商 GE、日商三菱重工與英商勞斯萊斯等。台灣沒有生產能力也沒有分析大尺寸單晶渦輪葉片的技術，只能完全依賴生產廠商提供的使用建議。

為了能提升台灣廠商對單晶渦輪葉片的自主性，台灣天然氣發電廠商希望與我們建立長期合作關係，建立單晶渦輪葉片的分析技術。我們因此展開相關工作。分析結果可以同時作為產業應用推廣的基礎。

二、行程

20221123 台灣出發。

20221124 進行實驗。

20221125 結束實驗、歸國。

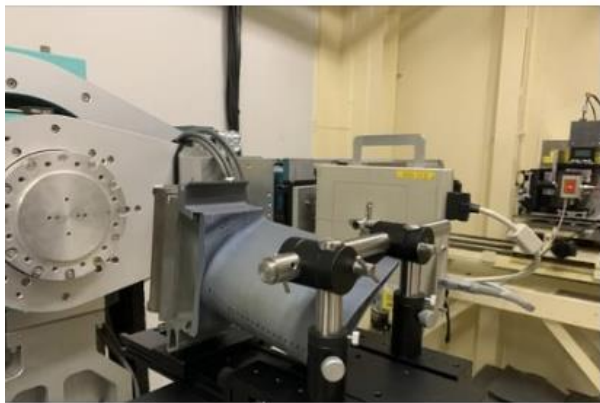
三、內容摘要：

Spring-8 BL28B2 的光束線如圖一所示。實驗進行時，我們將大尺寸的單晶渦輪葉片固定在 Kohzu precision co. 生產的載台上(如圖二)。該載台能夠進行 x、y、z、title 與 ω 旋轉。x、y、z 的位移精度是 0.01 μ m，title 與旋轉的精度是 0.01 度。最大承載重量是 50 公斤。

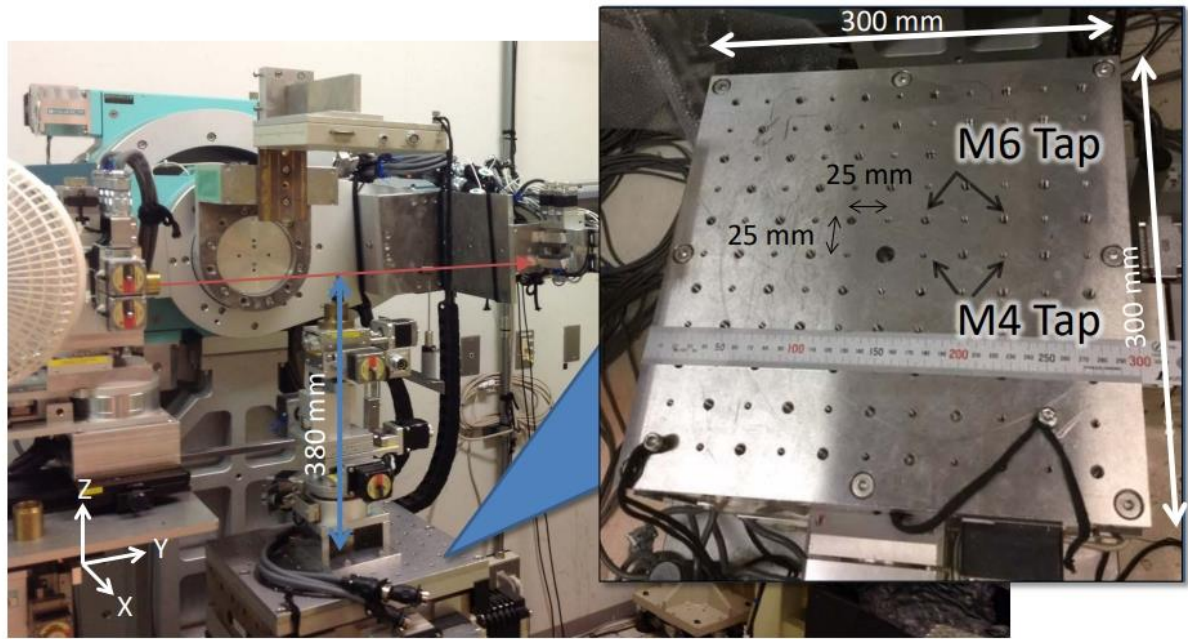
我們利用 200 KeV 的 X 光進行分析，white beam x-ray Laue diffraction 的分析結果如圖三所示。可以明顯發現繞射點呈現 FCC 的對稱關係，這即是反應單晶渦輪葉片

Ni-based superalloy 的 FCC 結構。要更精確的分析繞射圖樣，需要用 LauePT 軟體進行模擬與比對。LauePT 軟體是 Advanced Photon Source (APS) 的 Xian-Rong Huang 博士開發的軟體[1]。我們已經聯繫黃博士並取得同意進行授權使用，等待美國政府部門的審查通過之後，就能進行傳送。我們得到 LauePT 軟體之後，就可以精準的分析繞射數據，之後的分析工作也能比較容易進行。雖然目前還不能得到確切的結構資訊，我們還是從繞射圖樣(圖三)的觀察得到資訊。可以發現圖三當中的繞射圖樣不是一個點而是一個長條，與傳統單晶繞射圖樣不同。這是因為試片厚度(~5mm)造成的繞射訊號延伸。同時，我們也發現部分繞射點有分離的現象，也就是在同一個繞射位置的附近有兩個繞射點出現，這可能反應單晶結構的 mis-orientation 如文獻[2]所示。

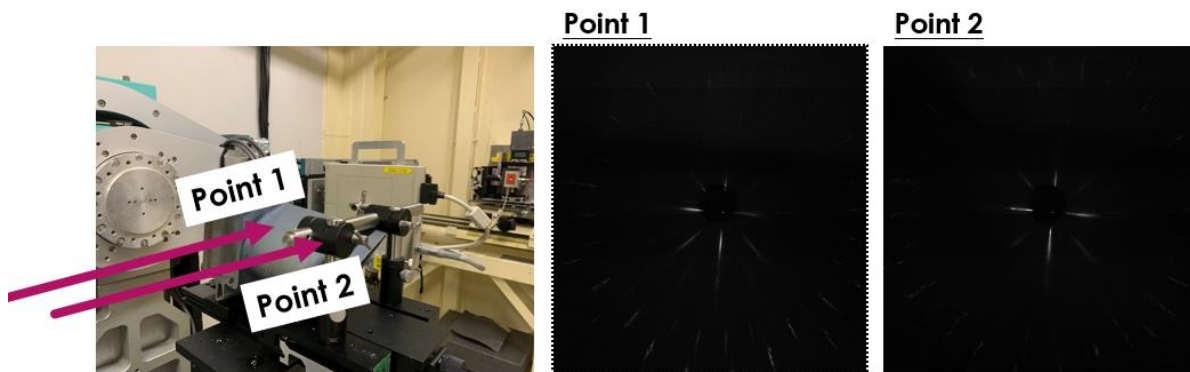
在實驗過程，我們選擇不同的位置進行分析，選轉試片並針對 001 繞射點進行 alignment，發現單晶渦輪葉片的 [001] 方向與葉片的長軸方向有 0.55 度的偏移 (mis-orientation)，也就是(001)面不是完全垂直葉片的長軸方向。因為這個葉片已經使用相當長的時間，也仍然維持良好的形貌。表示 0.55 度的方位偏移在可以忍受的範圍之內，不會降低葉片使用壽命。之後重要的研究工作即是，多大角度的方位偏移是不能容忍的？



圖一、Spring-8 BL28B2 實驗站與實驗設置。



圖二、Kohzu 載台。



圖三、white beam x-ray Laue diffraction 分析結果。

四、心得概述與建議

高能量 X 光是鋼鐵相關研究與產業應用的重點。但是長期以來台灣同步輻射 X 光的能量不夠高，限制相關研究與應用。所幸剛建造完成的 TPS31 光束線能夠提供 50KeV 的光，SP12B2 也計畫進行升級並且達到 100 KeV 的最終目標。將成為有力的後盾。然而，我們沒有高能 X 光繞射的偵測器，如果能購買相關設備，將能完成高能 X 光分析

大尺寸塊材的最後一哩路。

參考文獻:

1. X. R. Huang, J. Appl. Cry. 43 (2010) 926-928.
2. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2009907/v1>

註：

1. 本報告須於回國後 30 日內上網繳交，文字篇幅約 2~4 頁。
2. 回國後之口頭報告可為附件，但不得替代報告本文。