

出國報告（出國類別：其他）

2017 ICGEAC 出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：呂文豐 技術員

張中興 副研究員

黃俊源 研究員

派赴國家：英國

出國期間：106 年 5 月 5 日~106 年 5 月 17 日

報告日期：106 年 6 月 16 日

摘 要

本所黃俊源博士、張中興博士及呂文豐先生奉派參加 106 年 5 月 7 日至 12 日於英國切斯特行參加 2017 年國際合作環境效應促進材料劣化會議，會後並參訪伯明罕大學(University of Birmingham)冶金及材料系李航月教授督導之破壞與疲勞實驗室。核能電廠材料之老、劣化研究工作與電廠運轉或功率提升息息相關，需累積數十年經驗且投入大量人力、資金始得以持續進行。本所長期從事核能電廠材料之環境效應老、劣化機制與防制等研究，擬藉參加此會議與世界各國之專家及學者進行交流，汲取核能電廠經長期運轉後發生劣化之成因及防治等寶貴經驗，以強化本所及國內核能電廠預防材料老、劣化之技術，並發表本所研究成果，以提升本所之國際知名度。藉由參加此會議，可縮短本所在研究過程中之摸索期，適時修正研究方向，使研發成果不僅能接軌國際趨勢，更能符合國內核能電廠之實際需求，建議本所定期派員參加。參加此次會議有相當多的 SCC 方面之研究，並且有越來越多利用最近幾年發展之微結構分析技術 TKD 與 APT 技術探討 SCC 機制，本組與工研院合作有合作建立 TKD 分析技術，APT 技術則受限於儀器昂貴與試片製備困難而沒有，建議與國內相關研究單位合作發展。

報告內文之會議資料不得轉述或引用

目 次

摘要.....	i
一、目的.....	1
二、過程.....	4
三、心得.....	30
四、建議事項.....	56
附件：會議議程	

一、目的

2017 年國際合作環境效應促進材料劣化會議(International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking, ICG-EAC)於 5 月 7 日至 12 日於英國切斯特舉行。國際合作環境效應促進材料劣化會議為一國際性非營利組織(Non-profit organization, NPO)，成立於 1978 年，由美國核能管理委員會(USNRC)及美國電力研究院(EPRI)共同發起，創立初期名稱為 ICCGR (International Cooperative Group on Cyclic Crack Growth Rates)，主要探討材料於輕水式反應爐中之腐蝕疲勞及應力腐蝕問題，為兩年一次之國際研討會。1987 年，美國電力研究院另組織舉辦 ICG-IASCC (International Cooperative Group on Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking)，針對當時逐漸受重視之輻射促進應力腐蝕龜裂現象展開了每兩年一次的會議討論。因核能電廠材料的老、劣化現象隨電廠服役時間之增長而陸續浮現且成因愈趨複雜，1997 年，大會決議將 ICCGR 及 ICG-IASCC 合併，遂將組織更名為 ICG-EAC (International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking)，成為每年舉辦一次之大型國際研討會。該組織由世界各先進國家之核能電廠、管制單位及學術單位所組成，每年依序於亞洲、歐洲及美洲地區之各會員國所在地舉辦會議。根據大會統計，截至 2016 年底，共有 85 個與核能相關之單位為 ICG-EAC 之正式會員，分別來自全球 18 個國家/地區。去年(2016 年)之 ICG-EAC 會議於首次於中國大陸舉行，今年則在英國切斯特舉行由英國 Amec Foster Wheeler 與曼徹斯特大學(University of Manchester)主辦。

此會議之主要目的在於了解材料於核能電廠高溫、高壓、高放射性或含腐蝕介質之環境中之老、劣化行為及防治研究。材料之老、劣化及壽命評估不僅需投入大量之時間、資金及設備，更有賴經驗豐富之專家及學者做出正確、可靠的判斷。本所長期從事核能材料環境效應促進材料劣化之研究，致力於材料於核能電廠水環路中之劣化機制及防治工作，提供國內核能發電廠作為運轉功率提升、材料老化管理及關鍵組件壽命評估之參考，以期強化核能相關產業之管理能力及技

術發展。然而，核能材料之老、劣化研究領域既深且廣，本所研發人力及資源有限，需與國際接軌始能掌握更多來自世界各地的寶貴數據及經驗。基於此，加入國際合作環境效應促進材料劣化會議並成為正式會員，實屬必要。藉由參加此會議，與世界各先進國家與核能相關之學術機構、大專院校及廠商進行經驗及技術交流，以提升國內核能電廠自主運轉及安全管理之可靠性，強化組件材料之老、劣化防治關鍵技術，以期提供人民安全、乾淨、無慮的核能發電。此次參加會議之主要目的詳列於下：

- 1、 了解與核能電廠組件有關之材料劣化機制、壽命評估及防治等最新研究成果及技術，汲取世界各國核電廠之研發及老化管理經驗，並了解產業趨勢及與國際研究接軌，強化我國現役核能電廠之安全管理能力，進而提升本所在核能材料研究領域之專業程度。
- 2、 與世界各大核能研究機構及學術單位進行討論及經驗交流，強化本所人員於核能材料領域之專業知識，了解國際間核能組件相關議題發展現況，並拓展學術、產業人脈以及國際視野，以作為後續本所技術服務、計畫擬定之參考，並打下未來與國際單位合作之基石。
- 3、 以口頭報告方式發表本所研究成果「Effect of dendrite axes on stress corrosion cracking of 308L/304L welds in a high-temperature water environment」，廣泛汲取各國專家、學者之意見，以適時修正本所之研究方向，並增進與各研究單位之互動，提升本所在核能材料專業領域之學術知名度。
- 4、 大會安排參訪曼徹斯特大學與 Amec Foster Wheeler 公司。曼徹斯特大學是一所著名的英國大學，世界 50 強頂尖名校，歷年最高世界排名為全球第 26 名。Amec Foster Wheeler 公司，該公司已有 160 年歷史，專業工程師有 35000 人，遍佈 55 個國家，服務項目包刮 石化、礦業、能源、製程、環境及全球基礎建設等。

此會議僅限會員參加，欲入會者需經該組織審核並通過全體會員投票表決，始能

成為正式會員。所有研究及報告內容均以投影片或海報方式呈現，投稿僅需繳交論文摘要，不要求全文撰寫，故大會未提供會議論文集或其他書面資料。此次會議蒐集之資料來源主要為報告投影片、學術海報、講者口述及台下與專家、學者互動所得到之資訊。因會議資料嚴格管制，僅限正式會員瀏覽、使用，故此份報告之任何文字、數據及圖表等內容，如未經當事人同意，恕不得轉述及引用。

ICG-EAC 2017 會議結束隨即轉往伯明罕大學冶金及材料系 (School of Metallurgy and Materials, the University of Birmingham)，參訪疲勞與破裂實驗室 (Fatigue and Fracture Laboratory)，與實驗室負責人李航月教授就材料破裂、疲勞機制、組件老劣化損傷分析，及環境促進材料老裂化預測技術，其目的為進行經驗交流與討論，期間並應李航月教授之邀，於冶材系進行公開演講。

二、過程

(一) 行程

表 1、行程表

日 期	地 點	內 容
5 月 5~6 日	台灣→法國巴黎戴高樂機場(轉機)→英國曼徹斯特機場→切斯特	• 去程及準備會議資料
5 月 7 日	切斯特	• 實務研討會 (ICG-EAC 2017 Lectures)
5 月 8~12 日	切斯特	ICG-EAC 2017 年度會議
5 月 13~15 日	伯明罕大學	• 拜訪冶金及材料系李航月教授暨參觀疲勞與破壞實驗室 • 專題演講
5 月 16~17 日	英國伯明罕機場→荷蘭阿姆斯特丹史基普機場(轉機)→泰國(停留點)→台灣	• 資料整理與回程

本次出行人員為核子燃料及材料組研究員黃俊源博、張中興博士及呂文豐先生，共計 3 人。台灣同行人員則有國立清華大學工程與系統科學系葉宗洸教授等五人。本所同仁於 106 年 5 月 5 日晚間 2340 由桃園國際機場搭長榮航空班機(BR87)赴英國，於法國時間 5 月 6 日晨 0730 抵達巴黎戴高樂機場(CDG)，經轉機繼續航程後，於英國時間 5 月 6 日下午 1335 抵達英國曼徹斯特(Manchester)國際機場(MAN)，出關後由機場車站搭乘火車(Transpennine Express)前往英國古鎮切斯特，再搭計程車前往會議指定會場並入住(Carden Park Hotel, Chester 圖 1)。相較於公差結束返程，此段去程多有波折，讓我們印像深刻。5 月 7 日上午 09:30，主辦單位特別邀請多位微結構分析領域之學者及專家，於會議正式開始前一日，針對微結構分析技術包括 FIB、EBSD、TEM 與 APT 等進行一日之課程。分別由英國曼徹斯特大學 Grace Burke 博士、英國牛津大學(University of Oxford)Sergio Lozano-Perze 博士及英國牛津儀器公司(Oxford Instruments) John Lindsay 博士主

講。參加人數眾多，且台下學員發言、提問均踴躍。(圖 2)。



圖 1、Carden Park Hotel



圖 2、微結構分析技術課程

會議於 5 月 8 日上午召開，由會議主席葉宗洸教授分別介紹會議領導團隊、首次與會人員、新申請入會成員、主辦單位及會議注意事項等，並敲下議事槌宣布會議正式開始(圖 3)。會議首先邀請 National Nuclear Laboratory (NNL) UK 的 Andrew H. Sherry 博士對全體與會人員簡報有關英國核能發展之概況(圖 4)。



圖 3、主席葉宗洸教授



圖 4、Andrew H. Sherry 博士

簡報結束後隨即進行各項主題之口頭報告，會議首日共計 21 場報告，次日(5/09)共 22 場，主要發表關於焊件、輻射促進應力腐蝕龜裂(IASCC)、沃斯田鐵不銹鋼及低合金鋼相關之主題，並於過程中穿插總結報告。每日會議時間為早上 08:30 至下午 18:00，內容相當精彩、豐富。會議第三日(5/10)，上午探討主題為

二次側腐蝕共 9 場報告，隨後大會全體人員於酒店前集合拍攝大合照(圖 5)，下午為參訪切斯特古城。會議第四日則有 17 場報告，主題為低合金鋼及鎳基合金等材料之相關議題，並於該日晚間舉辦晚宴，讓各國專家、學者能自由互動。

會議第五日(5/12)上午共計 5 場報告，為其他相關之議題。所有報告於該日上午 11:25 全部結束，由大會主席葉宗洸教授宣布遴選申請入會單位之正式會員資格。本年度加入 ICG-EAC 之準會員共計 2 個單位，分別為 China Nuclear Power Design Company (CNPDC)與 Nuclear Power Institute of China (NPIC)。會議最後以全體與會人員共同投票的方式，決選該 2 單位成為正式會員。隨後大會即宣布 2018 及 2019 年之 ICG-EAC 會議將分別於美國田納西及台灣台南舉辦之消息。會議於該日下午 12:00 結束。

5 月 12 日下午 1:00，與會人員搭乘接駁車出發前往參訪 Amec Foster Wheeler 公司與曼徹斯特大學。此次參觀 Amec Foster Wheeler 公司之核能材料相關研究為主，參訪曼徹斯特大學主要以材料科學系為主。會議參訪結束隨即轉往伯明罕，利用六日兩日整理相關會議資料，5 月 15 日參訪伯明罕大學冶金及材料系(School of Metallurgy and Materials, the University of Birmingham)，主要參訪疲勞與破裂實驗室(Fatigue and Fracture Laboratory)。5 月 16 日下午 14:00，本所人員搭乘計程車由下榻飯店前往伯明罕國際機場，於下午 16:45 搭乘澤西航空 BE111 班機前往荷蘭，在荷蘭機場轉搭 22:15 長榮航空 BR076 返抵台灣桃園國際機場，完成此次豐盛之公差行程。



圖 5、2017 年 ICG-EAC 會議(二) 會議內容

今(2017)年 ICG-EAC 會議由 145 位來自 17 個國家、67 個成員組織的代表出席，主席為台灣清華大學葉宗光教授(Prof. TK Yeh)。會議中除了 56 篇口頭報告，還有 13 篇的海報及/或概要介紹，和八個教程講座(此講座已於 5 月 7 日報到當日舉行完畢)，詳見議程。為提升整體論文素質，所有投稿之摘要均須經過嚴格篩選始能獲接受並於大會發表。因投稿論文數量逐年增加，大會於去年首次提供總結報告(Summary presentation)之選項，可加速會議流程進行且同時能讓發表人的研究成果能受到關注，報告者可選擇以投影片方式進行 2 分鐘之研究成果重點摘要報告(圖 6)，並同時於海報展示區張貼海報(圖 7)，與會者即可於中場休息時段，就其感興趣的項目仔細瀏覽海報並與作者互相交流。會議口頭報告共分為七大主題，其內容及數量分別列於下：

1、 沃斯田鐵合金：鎳基合金 (Austenitic Alloys: Ni-base alloy)

共 13 篇，為此次會議討論最多之主題。內容主要針對鎳基合金 600 及 690 等材料，討論 Ni/Cr 成分、冷加工處理、熱時效及加氫水化學等對於材料在 PWR 或 CANDU 高溫水環路環境下之應力腐蝕、裂縫成長及氧化行為，其中又以 600 及 690 系列為此次會議報告中之大宗材料。

2、 沃斯田鐵合金：不銹鋼 (Austenitic Alloys: Stainless Steels)

共 10 篇，主要探討材料為沃斯田鐵系不銹鋼如 304 與 316，內容大部分為長時間熱時效處理或之不銹鋼或冷加工之材料，在不同水化學環境下模擬 BWR/PWR 高溫水環路環境下之應力腐蝕敏感性、電化學特性及裂縫成長速率等議題進行探討。

3、 銲接件 (Weldments)

共 9 篇，內容包含核電廠內牽涉銲接製程之組件材料如鎳基合金 52M、82、182，沃斯田鐵不銹鋼 308L、316L、316LN 等之同/異種銲接件於模擬 BWR/PWR 高溫水環路環境下之應力腐蝕及裂縫成長等議題。

4、 輻射促進應力腐蝕龜裂 (Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)

共 9 篇，主要探討核電廠不銹鋼材料受中子照射後之微結構分析、脆化機制，以及脆化後於高溫水環路中之裂縫成長行為研究。

5、 低合金鋼 (Low-Alloy Steels)

共 1 篇，內容為應用在反應爐壓力槽(RPV)之低合金鋼(LAS)於 LWR(light water reactor)高溫水環路環境下之破損機制研究。

6、 特殊議題 (Special Issue)

共 9 篇，內容關注二次側腐蝕的議題，主要探討二次側蒸汽產生器與材料合金 800、690 等腐蝕問題。

7、 一般論文 (General papers)

共 5 篇，內容非屬上述相關議題者歸於此類。

8、 摘要報告

共 13 篇，內容包括上述 7 種分類，但是只有簡短的總結報告。

此次會議本所共發表一篇會議論文，發表主題為: “Effect of dendrite axes on stress corrosion cracking of 308L/304L welds in a high-temperature water environment”，此研究項目由本所呂文豐先生、蔡坤釗博士及黃俊源博士共同執行，本篇報告主要探討樹枝狀結構方向對 304L/308L 焊接試片於高溫水環境下應力腐蝕龜裂(Stress Corrosion Cracking, SCC)成長速率之影響及裂縫成長機制。大會安排本所之口頭報告時間為會議第一日上午 9:40 之場次，並歸類為摘要報告，由呂文豐先生全程以英文進行發表，演講後在海報區與現場專家、學者進行意見反饋與經驗交流。



圖 6、研究成果重點摘要簡報



圖 7、學術海報展示區域

(三) 參訪內容

AMEC 與曼徹斯特大學(University of Manchester):

5/12 上午 ICGEAC 會議結束後，下午 1:00 即啟程赴 Amec Foster Wheeler 公司，該公司已有 160 年歷史，專業工程師有 35000 人，遍佈 55 個國家。服務項目包刮石化、礦業、能源、製程、環境及全球基礎建設等。與 EDF, Hitachi-GE, and Toshiba/Westinghouse 等國際公司共同合作新核電廠之設計、建造等工程。舉凡電廠運轉、延役、廢料處理、及除役，均是其服務範圍。此次參觀以核能材料相關研究為主，由於現場嚴禁照相，故僅就參觀設備做文字表述。該廠具有許多一般型材料拉伸測試設備，並具有測試大型構件的 250 噸疲勞試驗機，可執行整個構件疲勞試驗，目的是為獲得接近真實的材料劣化狀況。該廠有近 40 幾組潛變(Creep)拉伸設備及高溫高壓水環路應力腐蝕設備，規模之大，令人歎為觀止。該公司常接受工業界委託進行材料性質之測試，解決工業界之疑難雜症。約參觀 2 小時候，前往下一站至曼徹斯特大學(University of Manchester)。

曼徹斯特大學是一所著名的英國大學，世界 50 強頂尖名校，歷年最高世界排名為全球第 26 名。曼大是英國著名的六所「紅磚大學」之首，英國「常春藤聯盟」羅素大學集團的創始成員之一，始建於 1824 年。大學校園位於英國第二繁華城市曼徹斯特，是英國最大的單一校址大學。此次參訪主要以材料科學系為主，2015 年該系在 QS 全球世界大學排名為第 21 名。由曼徹斯特大學材料所教授 Grace Burke 導覽，參觀了許多高解析電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)，如圖 8。為了防止環境干擾四周圍都有做電磁波隔離，使高

倍率時影像更穩定，日後本所如有採購高解析電子顯微鏡是極重要之技術參考。

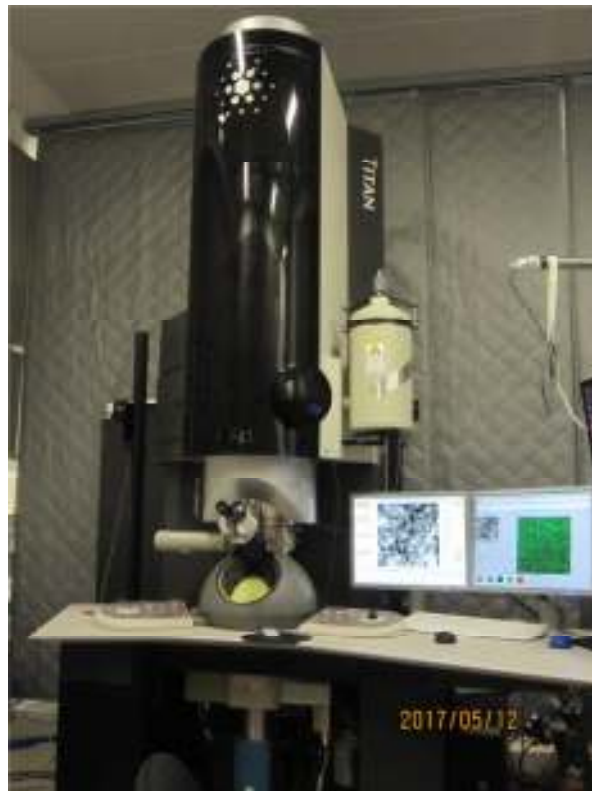


圖 8、 300 Kev TEM

該實驗室亦有 FIB 設備可進行 TEM 試片製作(圖 9)，甚至微小拉伸試片加工，如圖 10，



圖 9、FIB 設備



圖 10、微小拉伸試片加工

另外，該所有一台 Nano SIMS 50L，解析度可達 50 nm，如圖 11。Cs 離子源撞擊樣品後，產生的離子經過離子檢測器解析離子含量。下午 6:00 結束今天的

參訪行程，隨即至大學附近的火車站，搭車至伯明罕大學。



圖 11、Nano SIMS 50L

伯明罕大學冶金及材料系：

5 月 12 日 ICG-EAC 2017 會議結束隨即轉往伯明罕大學冶金及材料系(School of Metallurgy and Materials, the University of Birmingham)，參訪疲勞與破裂實驗室(Fatigue and Fracture Laboratory)，與實驗室負責人李航月教授就材料破裂、疲勞機制、組件老劣化損傷分析，及環境促進材料老裂化預測技術，進行經驗交流與討論，期間並應李航月教授之邀，於冶材系進行公開演講。

伯明罕為工業革命發源地，英國最大工業中心。伯明罕大學所在地伯明罕市(Birmingham city)，是英國第二大城(圖 12)，位於英格蘭中部大伯明罕區(West Midlands county)，人口約 120 萬。伯明罕市區風格既現代又傳統，在這裡可以看到壯麗的摩天大廈，也可以在緩緩流淌的小河邊品嚐古老的田園景色；因位處英國的心臟地帶，無論公路還是鐵路都四通八達，加上與國家展覽中心、伯明罕國際機場近在咫尺，遂使其成為國際性的歐洲文化大都市(Euro Hub)。伯明罕市有倫敦之外最大、最繁忙之車站，歐洲最大之都會圖書館，及全英演出最頻繁之交響樂及劇院-Birmingham Royal Ballet)；諸多企業如 Jaguar、Land Rover 和 MG Rover 等三大英國汽車製造公司也座落於市郊。世界著名創立於 1824 年伯明罕

市的糖果製造商 Cadbury，是英國歷史最久、最大的巧克力生產商，著名的 Cadbury World (Cadbury 巧克力發源地)，就位於距大學 2 站地的 Bournville (SellyOak 校區北)，Cadbury 家族第四代傳人 Sir Dominic Cadbury 為伯明罕大學前任校監(Chancellor)。



圖 12 Birmingham 位於英國地理位置圖與 Birmingham University 內的鐘塔
是當地著名之地標

1900 建校之伯明罕大學(The University of Birmingham)位居英格蘭(England)中部伯明罕市(Birmingham)，是英國第一所獲得女皇(Queen Victoria on 24 March 1900)特許狀(Royal charter)的紅磚大學(Mason University College)。身為六所紅磚大學常春藤聯盟之羅素大學集團(The Russell Group)創始成員之一，大學的歷史可追溯至 1828 創立的伯明罕藥理與外科醫學院(The Birmingham School of Medicine and Surgery)以及 1875 的梅森理學院(Mason Science College)。伯明罕大學校園中 100 公尺高的約瑟夫張伯倫紀念鐘塔(Joseph Chamberlain Memorial Clock Tower，圖 13)，不僅是校園之一標誌性建築，亦為伯明罕市地標，目前更是世界最高的獨立鐘塔。伯明罕大學全校基本保持有 28,000 多名學生(學生人數英國第 4)及 6,000 名教職員工，其中共有來自 150 個國家的 4500 多名國際學生。伯明罕大學有歡迎國際學生的悠久傳統，擁有英國最大的國際學生團體，是華人

(含中國大陸、台灣及香港)最喜歡申請的一英國大學。



(a)



(b)

圖 13、(a) Chancellor's Court, (b) Birmingham University 鐘塔

伯明罕大學為英國享有盛譽之頂尖學府，世界百強名校，2017 泰晤士報高等教育(Times Higher Education)世界大學排名第 130 名，全英第 19 名、2016-17 年 QS 世界大學排名(Quacquarelli Symonds World University Rankings, QS)中位列全英第 15 名、世界第 82 名；2016 全球就業能力大學排名全球第 90、英國第 4(次於牛津、劍橋及帝國理工)。2015-2016 伯明罕大學收入達六億多英鎊，TIMES 2015 年發布的英國大學就業率排名中，伯明罕大學以 84.3%的就業率名列全英第 4，高於倫敦政治經濟學院、倫敦大學學院、牛津大學等學府；2014 英國唯一官方組織 Research Assessment Exercise (REF)評估中，伯明罕大學位居世界第 15 位，大學 28.3%的科研水平已達到國際領先及以上(4*)，53.2%的科研已達到國際優秀及以上(3*)，大學還被推選為英國高等教育之科學、技術、工程和數學學科項目中心(STEM)，為"2014 年度大學"。又伯明罕大學商學院成立於 1902 年，在 2013 年經濟學人(Economist)全球 MBA 課程排行中，伯明罕大學商學院榮登第 85 位。2015 年金融時報最新 MBA 排名將伯明罕大學列為全球頂尖的 100 所 MBA 課程院校。伯明罕大學一直與伯明罕當地的工商業保持著緊密的聯繫，為學生的實習就業創造了良好條件。此外，伯明罕大學在醫學(圖 14)、科學、工程學、藝術、商業和社會科學領域內，皆有卓越成績。至 2017 年，伯明罕大學一共培養出 11 位諾貝爾獎得主和 3 位英國首相。



圖 14、 The Queen Elizabeth Hospital.

伯明罕大學提供一系列學位課程，其中包括 427 個本科課程和 327 個碩士課程，學科範圍非常廣泛，從初級護理、癌症研究，到心理學、體育與運動科學、音樂和工程學，研究方向涉及眾多領域並獲得了傑出的科研成果，為研究導向型大學。伯明罕大學在醫學、材料、教育和經濟領域相當強勢，生物科學專業方向就業率僅次於劍橋大學。在學術研究方面，伯明罕大學的研究成果包括如成功研製代替心臟運行的塑料心臟、利用微波為雷達提供動力、主要組成部分的合成、過敏性疫苗的應用、維生素 c 的合成、遺傳學發展下動植物養殖技術等。

2014 Research Assessment Exercise (REF) 評估中，伯明罕大學冶金及材料系整體研究為 5*A，位居英國頂級(top quartile)，86% 的科研達到國際領先及以上水平(4*)，31% 的科研已達到國際優秀及以上水平(3*)。冶金及材料系(School of Metallurgy and Materials) 前身為 1882 年創立之冶金系(Metallurgy)，後於 1946 年擴大為工業冶金與物理冶金系(Schools of Industrial Metallurgy and Physical Metallurgy)，1981 改為現今之冶金及材料系。冶金及材料系傑出人物甚多，廣為人知者(圖 15)如英國皇家院士(Fellow of the Royal Society, FRS) Alan Cottrell 公爵(17/7/1919~15/2/2012)、皇家院士 Raymond Smallman 教授(4/8/1929~25/2/2015) 及皇家院士 John Knott 教授；其中 Alan Cottrell 公爵為 Raymond Smallman 教授(伯明罕)與 John Knott 教授(劍橋邱吉爾學院)之博士論文指導教授；John Knott 教授為張中興(筆者)博士論文指導教授。在材料(及破裂)科學與冶金領域，Alan

Cottrell 公爵及 Raymond Smallman 與 John Knott 等教授具影響力之著作如下：

- Alan Cottrell 公爵：Theoretical structural metallurgy (1948)、Theory of crystal dislocations (1964)、The mechanical properties of matter (1964)、An introduction to metallurgy (1967)、Introduction to the Modern Theory of Metals (1988)、Chemical Bonding in Transition Metal Carbides (1995)、Concepts in the Electron Theory of Alloys (1998)，與近期之 How safe is nuclear energy (1981)、Structural Integrity of Nuclear Power Plant: Learning from History and Looking to the Future: Proceedings of the TAGSI/FESI Symposium 2013: Held at TWI, Cambridge, UK (2013)

- Raymond Smallman 教授：The deformation and defect structure of metals and materials (1968)

- John Knott 教授：Fundamentals of Fracture Mechanics (1973)、Worked Examples in Fracture Mechanics (1979)、Fracture Mechanics - Worked Examples (1993)

Alan Cottrell 公爵之 crystal dislocations、physical metallurgy，Raymond Smallman 教授之 defect structure 及 John Knott 教授之 Fracture Mechanics 等著作，為材料破裂科學及物理冶金必讀教本；其中 Alan Cottrell 公爵之"Cottrell" (or carbon) atmosphere、Crack-tip opening displacement (CTOD)、Dislocation 與 Raymond Smallman 教授之 Dislocation loop 理論，更開啟當代材料科學及破裂力學之進展。



(a) Sir Alan Cottrell (b) Prof. Raymond Smallman (c) Prof. John Knott

圖 15、冶金及材料系傑出教授 (a) Sir Alan Cottrell, FRS, (b) Prof. Raymond Smallman, FRS, and (c) Prof. John Knott, FRS

冶金及材料系主要研究領域涵蓋 Structural Materials、Functional Materials 及 Materials Processing 三面向(圖 16)：

- Structural Materials：包含 Polymers/Composite (Mike Jenkins, Stephen Kukureka, Gerard Fernando)、Ceramics (Jon Binner, Clive Ponton)、Advanced steel (Martin Strangwood, Clair Davis)、Non-ferrous (Isaac Chang, Mike Loreto, Alessandro Mottura, Mark Ward)
- Functional Materials：包含 Hydrogen storage materials (David Book)、Magnetic materials (Allan Walton, Rex Harrison)、Piezoelectric materials (Tim Button)、Superconducting materials (Adrian Crisan)、Biomedical materials (Artemis Stamboulis)、Sports materials (Mike, Martin & Hanshan)



圖 16、冶金及材料系主要研究領域

針對氫能材料成立之研究團隊及工作範疇如下(圖 17)

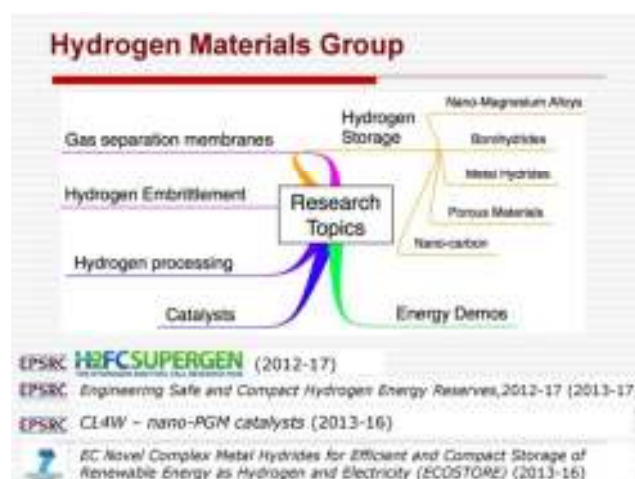


圖 17、氫能材料成立之研究團隊及工作範疇

- Materials Processing: 包含 Casting (Bill Griffith)、Plasma melting (Mark Ward)、Powder metallurgy (Isaac Chang)、Net-shape forming & additive manufacturing (Moataz Attallah)、Surface engineering (Hanshan Dong(董漢山))，圖 18)



圖 18、本所張中興博士(中)與 Prof. Hanshan Dong (右) 及 Dr Xiaoying Li (左)
在冶金及材料系合影

材料製程針對 material-process interaction 進行研究，研發團隊工作範疇如下

- Additive Manufacture 3D Printing
- Laser Deposition
- Net Shape Powder HIPing
- Friction Welding

包含先進材料製程(Advanced Materials Processing, 圖 19(a))，Melting-Casting (圖 19 (b))與 Materials & Process Modelling (圖 19 (c))。

Advanced Materials Processing

□ The scientific emphasis is on the material-process interaction, studied using electron microscopy, synchrotron X-rays and neutron diffraction, and micro-tomography, to assess the impact of the advanced processing techniques on the microstructure-property development in advanced materials.

Additive Manufacture 3D Printing	Laser Deposition	Net Shape Powder HIPing	Friction Welding
□ Metals: Ti, Al, Inconel □ Novel structures □ Process modelling	□ Repair + reshaping □ Alloy development □ Modelling	□ Powder pressing □ HIPing of Ti & Al □ Process modelling	□ Friction Stir □ Linear Friction □ Rotary Friction
			

Collaboration with MTC (£15M)  UNIVERSITY OF BIRMINGHAM

(a)

Melting & Casting

- Investment casting shell-moulding facilities.
- Real-time X-ray facilities for mould filling studies.
- Induction skull melter for casting Ti and TiAl alloys.
- Industrial scale Bridgman furnace for single crystal Ni-base superalloy turbine blades.




Collaboration with HTRC (£60M)  UNIVERSITY OF BIRMINGHAM

(b)

Materials & Process Modelling

- Casting/solidification (Nils Warnken)
- Melting/welding (Mark Ward)
- Phase/Microstructure (Martin Strangwood)
- Atomic-scale modelling (Alessandro Mottura)
- Metal forming (Jeff Brooks/Hector Basoalto)



An **Integrated Computational Materials Engineering (ICME)** approach is adopted for coupling themes, with the following research focus:

- Theme 1 Materials: Probabilistic materials descriptions
- Theme 2 Manufacturing: Process and physics driven models
- Theme 3 Performance: Probabilistic property predictions

 UNIVERSITY OF BIRMINGHAM

(c)

圖 19、研發團隊工作範疇 (a) Advanced Materials Processing, (b) Melting &

Casting, and (c) Materials & Process Modelling.

就材料 Performance- Degradation，研究領域(含 4 組研究團隊)如下(圖 20)。



圖 20、材料研究 performance & degradation.

以下簡介 Fatigue and Fracture 研究團隊(李航月(Dr Hangyue Li)教授提供資料):

Prof Paul Bowen (Fellow of the Royal Academy of Engineering, FREng (圖 21) 領導之疲勞及破裂團隊，在過去的 28 年持續不斷從事大規模跨領域之研究，材料涵蓋 nuclear pressure vessel steels、high-strength pipe-line steels、carbon-manganese steels、2.25Cr-1Mo welds、titanium alloys、titanium alumide alloys、nickel-based superalloys、fibre-reinforced titanium metal matrix composites、ceramics、ceramic-matrix-composites、alloy 709 (version of 20Cr-25Ni austenitic stainless steels)；試驗溫度：-196° to 1600°C；環境：空氣/真空。研發之標靶材料(Target materials)經常是前驅或是即將進入服役之先進材料，其適用對象主要在工業部門包括核能發電、石油、天然氣和航空航天，其中 Rolls-Royce 公司多年來一直是

科發基金主要來源。Prof Paul Bowen 領導之疲勞及破裂團隊，目前為 Rolls-Royce 公司於英國大學成立之 3 大研發中心(RR HTRC)龍頭，團隊研發實務負責人為本次拜訪之李航月教授(Dr Hangyue Li)。



圖 21、 Professor Paul Bowen (FREng)

依據 Microstructure-processing-property 三者架構，Fatigue and Fracture group (特別針對 Fatigue crack growth 及 Fracture toughness)進行以下研究：

- Nuclear pressure vessel steels 及 High-strength pipe-line steels (Exxon)

研究重點為延脆轉換溫度(Ductile-brittle transition temperature, DBTT)區域之低溫韌性(Low temperature toughness)與機械行為，特別是預應變(Pre-strain)對 carbon-manganese pressure vessel steels(含母材及鐸道)輻射脆化(Irradiation embrittlement)之影響；建立衝擊韌性(Charpy impact toughness)/破裂韌性(Fracture toughness)與溫度之關係。研發成果(將)應用在(1) Exxon 材料選用(Down-selection)發展，(2) Shell 管件法蘭之 fitness-for-purpose safety cases (where use has been outside the design code guidelines)，及(3) 英國核能監管單位 ONR(Office of Nuclear Regulation)之延役(Life extension)議題。

- Carbon-manganese 及 2.25Cr-1Mo steel (welds)

研究鋼材在低溫環境之劈裂(Cleavage fracture)機制(Micromechanisms)，建立不同測試溫度下臨界拉伸破壞應力(Critical local tensile fracture stress)與劈裂破壞

之關係，建立之關係中亦包含夾雜物尺寸(Inclusion size), 粒徑(Grain size)之作用，並進一步探究該關係對延脆轉換溫度之影響。

- A wide range of titanium alloys, titanium alumide alloys and nickel-based superalloys (all for Rolls-Royce)

不同製程條件及摩擦銲接(friction welding)後，材料於高溫環境短暫定應力(Dwell periods of up to 3600 secs)條件下之疲勞裂紋擴展(Fatigue crack growth)研究。在潛變脆性(Creep-brittle)合金(特別是 High-strength powder-based nickel superalloys)創新科技方面，針對高溫短暫定應力週期(Dwell-cycle at test temperatures of up to 700°C)條件，氧化(Oxidation)增進裂紋擴展(圖 22)之控制模式已建立，所發展出的裂紋擴展技術(Crack growth techniques)能夠使這種測試相對傳統潛變工藝(及短暫恆定應力，Dwell)更易、更快速完成，同時更能有效建立發生裂紋成長所需之短暫恆定應力歷時門檻(Thresholds for dwell effects)。

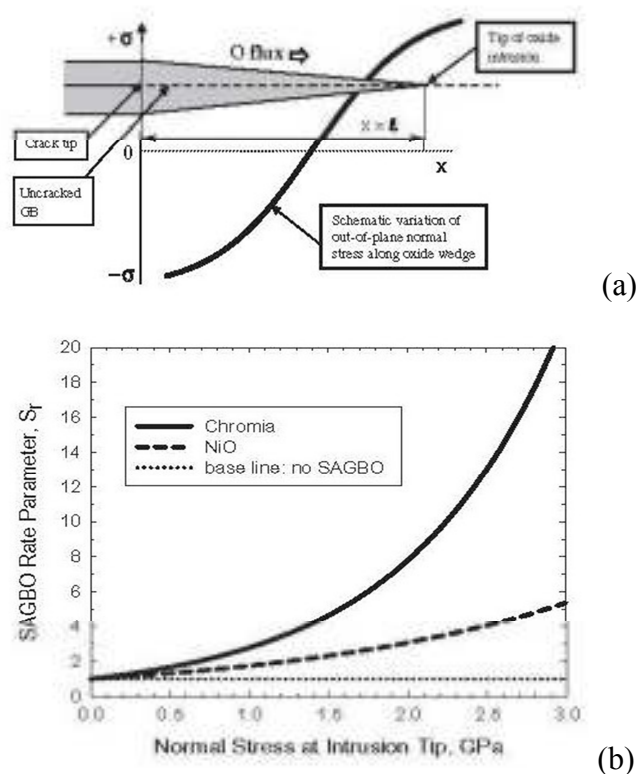


圖 22、(a)正應力示意圖:在固定裂縫尖端($x = 0$)沒有施加應力的情況下，沿

著氧化物侵入($0 \leq x \leq l$) 之正應力變化適應圖 (b) 計算之 SGB0 速率參數 (Sr)

對 650°C 下氧化鉻和氧化鎳的氧化物侵入尖端的拉伸應力的依賴性。

對於 aluminide alloys, 研究重點為建立'明確'之疲勞裂紋成長門檻(Fatigue crack growth thresholds), 確立在該門檻下, 小裂紋即便遭受高應力幅亦不會成長 (Confidence in "no growth" even for small cracks under high stress ranges)。

- Fibre-reinforced titanium metal matrix composites, ceramics and ceramic-matrix-composites

這些材料大量應用在航太工業(Aerospace)及電力生產業(Power generation industries), 測試條件(up to)1500°C in air、1600°C in vacuum。

- 近科期研 (joint UK/US programme)

將前述第 3 項 creep-brittle alloys 科研成果與技術, 推展至 creep-ductile austenitic stainless steels (the development alloy 709, a stronger version of the 20Cr-25Ni austenitic stainless steels used widely within current nuclear generating plant (in the UK and US))。

以下簡要敘述本所同仁(張中興、黃俊源)應李航月教授之邀, 於材料系進行公開專題報告(圖 23)及隨後參訪實驗室與校區情況。



圖 23、本所張中興博士在冶金及材料系的專題演講

專題報告:

(i) Introduction to IASCC of LWRs Internals (張中興 圖 24 至 26)

報告就下列 5 項進行

- 1 Introduction to IASCC (Irradiation-assisted SCC)
- 2 Irradiation Effects on SSC (Stress Corrosion Cracking)
 - 2.1 Effects on stress (S)
 - 2.2 Effects on water chemistry (E)
 - 2.3 Effects on material (M)
- 3 IASCC Mechanism
- 4 Rules on SCC Susceptibility (Lab & Plant OPEX)
- 5 Closing Remarks

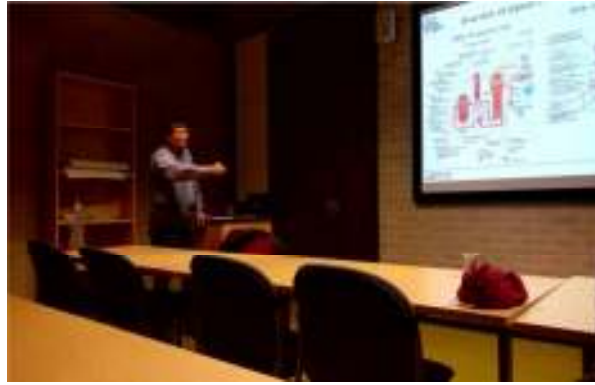


圖 24、張中興博士專題報告: Introduction to IASCC of LWRs Internals

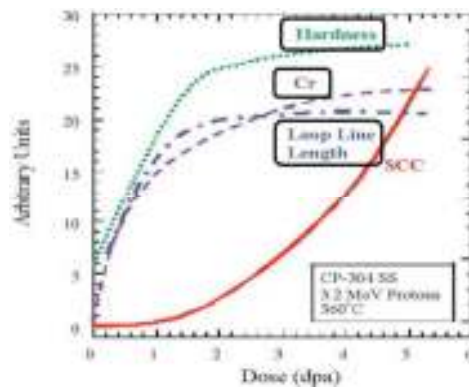


圖 25、所有隨著劑量增加而增加之參數(RIS, loops, hardness) 整合圖 (G Was, 11th Int. Conf. EDM in Nuclear Systems, Aug. 10-14, 2003).

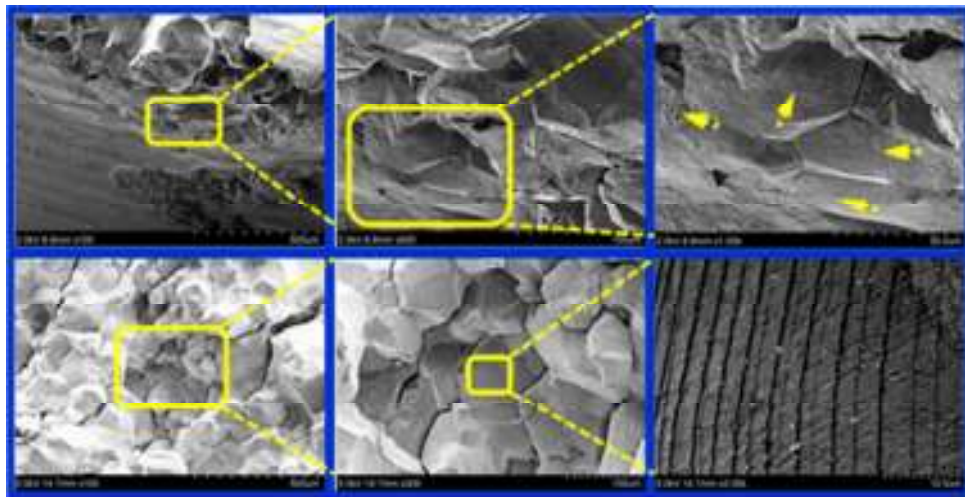


圖 26、在 304SS 破裂面觀察到 deformation channeling 為 IASCC 造成
(Source: CS Chang, INER-A3180R, May 2016).

主要結論：

- (1) Service and laboratory experiences have shown that irradiation

enhances stress corrosion cracking for all internals in high temperature water environment.

(2) The degree of IASCC increases with dose.

(3) Primary effects of radiation

stress $\Rightarrow$ creep/stress relaxation & swelling

Environment $\Rightarrow$ radiolysis

Material

$\Rightarrow$ micro-compositional effects (grain boundary chemistry)

$\rightarrow$ grain boundary segregation (RIS)

$\Rightarrow$ microstructural changes (defects evolution⁺)

$\rightarrow$ formation of dislocation loops, voids, precipitates

$\rightarrow$ deformation behaviour

$\rightarrow$ hardening

(4) Each of the principal effects of irradiation have been considered as potential causes of IASCC, but the multivariable nature of the problem obscures a definitive determination of the mechanism.

(5) IASCC is enhanced at a fluence that is dependent on applied stress/strain, corrosion potential, solution conductivity, crevice geometry, etc. While the concept of a 'threshold' fluence, $5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ is scientifically misleading, it is convenient in a practical engineering and nuclear regulatory.

(6) Plasticity localization is a potential mechanism for IASCC.

(ii) Environmental degradation of thermally-aged cast austenitic stainless steel welds in high temperature water environments (黃俊源 圖 27 至 29)

報告就下列 4 項進行

1 Introduction

1.1 Extensively used in NPP

1.2 Spinodal decomposition

1.3 Overlay on the aged Hot Leg piping

2 Experimental

3 Results and Discussion

4 Conclusions

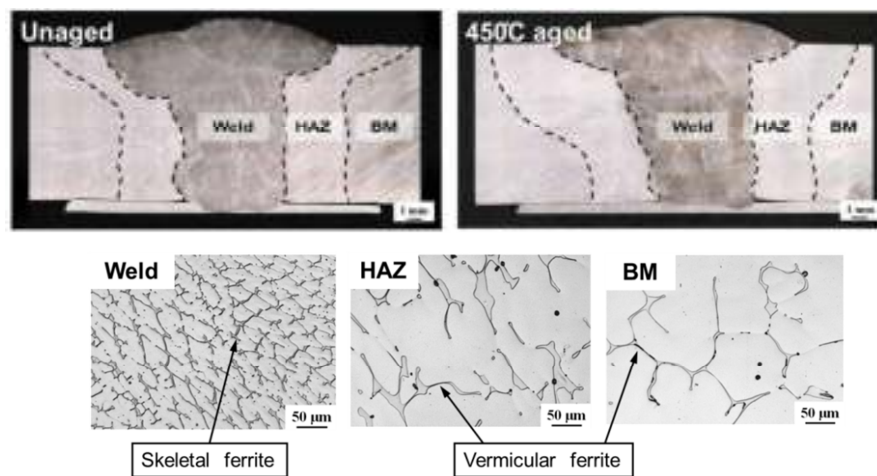


圖 27、 焊道金相 t

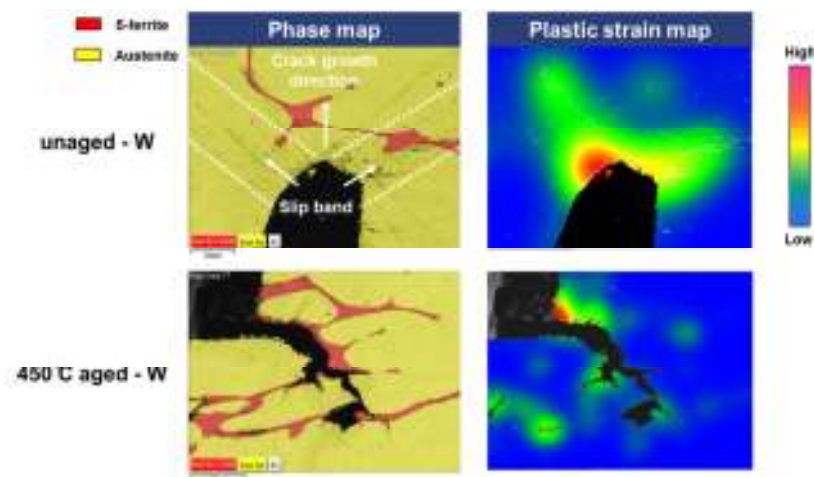


圖 28、 裂縫尖端 EBSD 分析圖

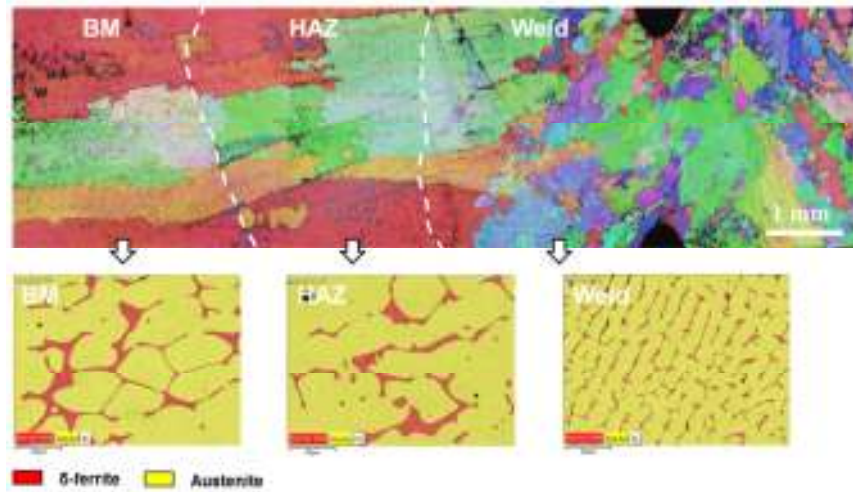


圖 29、 焊道附近 EBSD 圖

主要結論：

(1) Regardless of the specimen condition, the SSRT results in high temperature water showed that failure mostly took place in the BM instead of the weld metal and HAZ, which shows that the recovery of δ -ferrite in the HAZ region by welding might decreased its SCC susceptibility

(2) For the CF8A weldment without prior age treatment, crack growth along slip bands was the precursor of the SCC when tested in 300℃ water. The fracture surface mainly shows TGSCC feature.

(3) In 300℃ water condition, SCC along the γ/δ boundary or within δ -ferrite was responsible for the elongation loss of the weldment with prior age treatment. Zig-zag crack path together with large amount of secondary crack were observed on the fracture surface.

以下為參觀實驗室與校區剪影 (圖 30 至 33)



圖 30、ESH 測試設備



(a)

(b)

圖 31、冶金及材料系合影 (a) Prof. Hanshan Dong and (b) Prof. Hangyue Li. 從左到右: (a) YC Lee (ITRI), CS Chang, Prof. HS Dong, JY Huang, WF Lu ; (b) Dr Hangyue Li and CS Chang.



(a)



(b)

圖 32、冶金及材料系大門入口合影從左到右：(a) JY Huang, YC Lee (ITRI), Prof. HY Li, Dr XY Li, CS Chang, (b) Y Huang, WF Lu, YC Lee, CS Chang.



圖 33、Chancellor's Court of the University (從左到右：CS Chang, JY Huang, YC Lee (ITRI).

三、心得

由於會議發表論文數量極多，本章就與本所研究較為相關之論文，節錄部份內容進行整理並簡述於下，共計有「銲接件老裂化研究」、「不銹鋼材料老裂化研究」及「鎳基合金材料老裂化研究」等三項主題。

(一) 銲接件老裂化研究

異材銲接為核能電廠 RPV 建造過程中，接合重要組件的必要程序。然而，許多應力腐蝕裂紋經常發生在材料經過銲接程序後，特別是在熱影響區之位置，其主因為該處有較高之殘留應力/應變所致，故成為近年來應力腐蝕裂紋相關研究之探討重點。來自中國 Institute of Metal Research 的 Jianqiu Wang 博士等人發表“SCC behavior of 316L/52M dissimilar metal welded joint”，使用的焊件如圖 34 為 Shanghai Electric 提供 316L 母材搭配 52M 銲材進行銲接，以緊緻拉伸(Compact Tension, CT)試樣分別於融溶線(FB)、熱影響區域(HAZ)開槽，然後把 CT 試片放入壓力釜，在高溫、高壓水化學環境下之裂縫擴展行為，圖 35 為相關實驗設備與實驗參數。其實驗主要分為三部份：(1)銲件微結構分析，(2) HAZ 應力腐蝕龜裂速率分析，(3) FB 應力腐蝕龜裂速率分析。

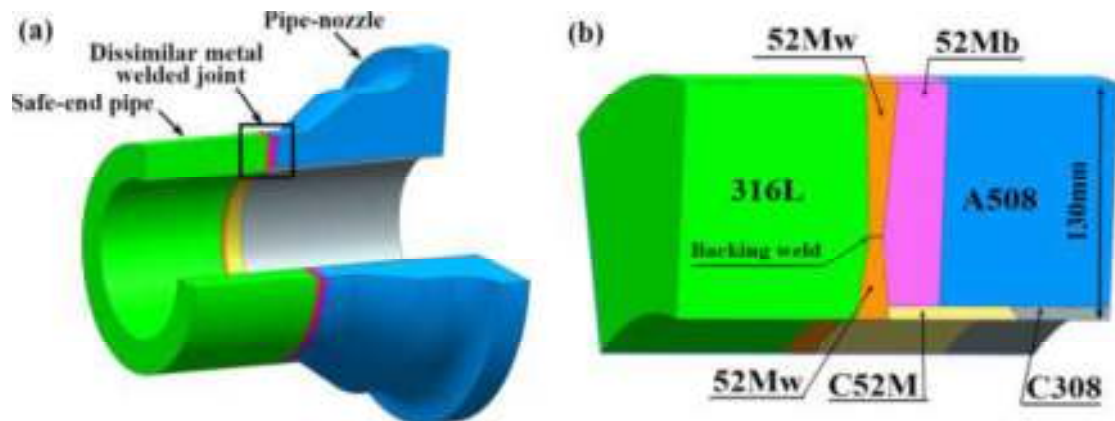


圖 34、實驗焊件



Solution: 1500 ppm B, 2.3 ppm Li
 DO: <10, 100, 500, 2000 ppb
 DH: 2800 ppb
 T: 240-340°C
 K: 25, 35 MPa√m

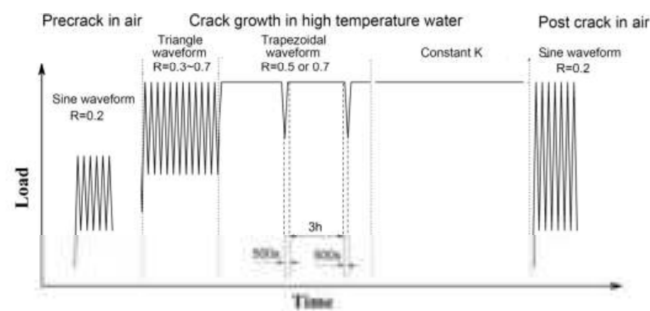


圖 35、實驗設備與參數

溶融線附近微結構金相如圖 36，316L 熱影響區域沒有觀察到滑移帶 (deformation band)，且附近的金相沒有多大的差異。接著量測溶融線附近的硬度 (圖 37)，316L 靠近溶融線的硬度值與母材 52M 硬度相近，遠離溶融線 3.6 mm 附近微熱影響區域硬度最高之位置，約為 240 HV。最後再利用 EBSD 分析溶融線附近之區域，由圖 38 中可以觀察到越遠離溶融線 LAB 晶界快速降低且殘留應變(residual strain)也隨著遠離溶融線而減少。

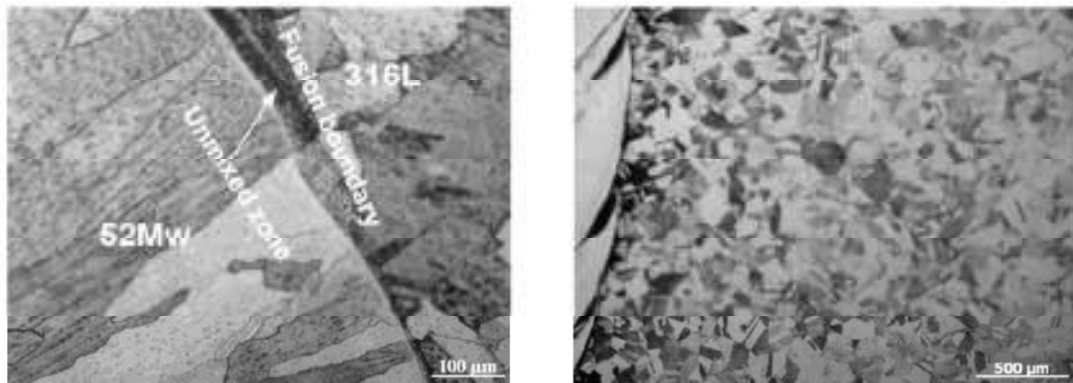


圖 36、溶融線附近微結構金相

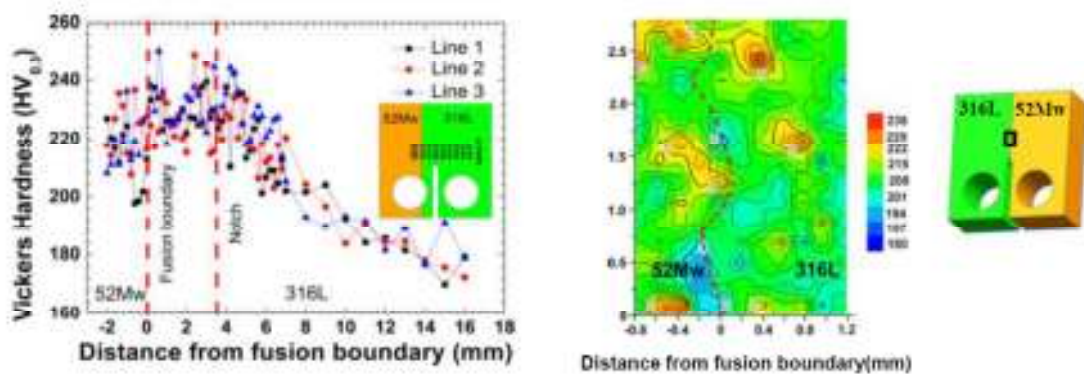


圖 37、溶融線附近硬度

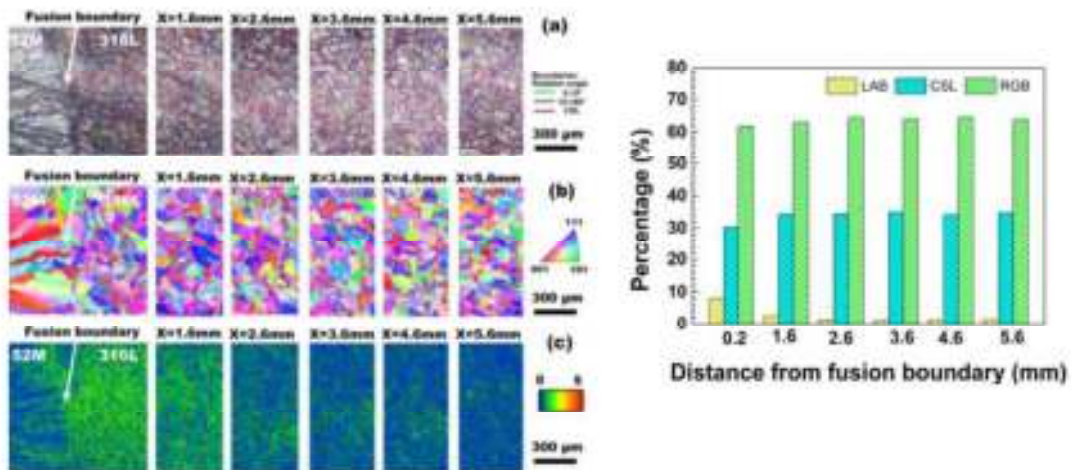


圖 38、溶融線附近 EBSD

316L HAZ 應力腐蝕龜裂實驗 CT 試片所取焊件位置如圖 39，開槽裂縫成長位置在距離溶融線 3.6 mm 的位置，該處位置為硬度最高的區域。其實驗中所改

變的參數如圖 40，有改變溫度、氧濃度、氫濃度與 K 值。作者再利用不同溫度下實驗所得到裂縫成長速度去計算 E_{aac} (apparent activation energy)，計算的結果為 78.2 kJ/mol，並把該值與文獻冷作加工的 316L 材料相互比較，發現該值約相似於 20%冷作加工的值 (圖 41)。316L 應力腐蝕裂縫成長速率在加氫後有明顯的降低，其速率相差超過一個數量級(圖 42)。HAZ 區域的破裂面如圖 43，破裂面有手指一樣突出比較快的裂縫，由其剖面圖觀察到裂縫生長較快的區域接近垂直於主破裂面(圖 44)，破損形貌由 SEM 觀察主要為沿晶破裂與少部分穿晶破裂(圖 45)。最後在試片 AR 面去觀察裂縫的成長發現二次裂縫主要為垂直主裂縫方向成長，造成的原因可能為焊件殘留應力所致(圖 46)。

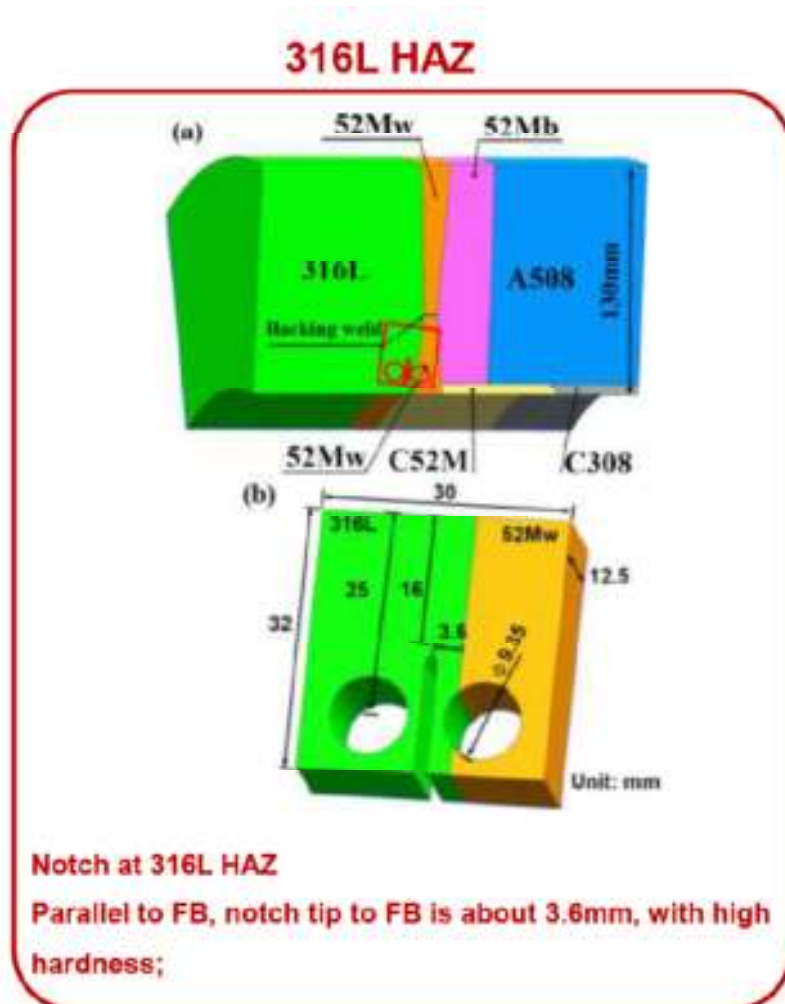


圖 39、316L HAZ 應力腐蝕龜裂實驗 CT 試片所取焊件位置

Water chemistry, loading history of CGR tests

Step No.	Temp. ° C	DO ppb	DH ppb	K _{max} MPa√m	Duration h
CF#1	320	2000	<5	25	27.5
CF#2	320	2000	<5	25	47.0
CF#3	320	2000	<5	25	69.0
SCC#1	320	2000	<5	25	362.4
SCC#2	320	2000	<5	35	283.4
SCC#3	340	2000	<5	35	254.4
SCC#4	260	2000	<5	35	317.4
SCC#5	280	2000	<5	35	514.8
SCC#6	300	2000	<5	35	380.7
SCC#7	240	2000	<5	35	420
SCC#8	260	2000	<5	35	406.6
SCC#9	320	500	<5	35	726.1
SCC#10	320	100	<5	35	269.9
SCC#11	320	<10	<5	35	552.4
SCC#12	320	<10	2800	35	749.0

Note: CF - triangle waveform, frequency of 0.01Hz, load ratio of 0.3, 0.5 and 0.7 for CF#1, CF#2 and CF#3, respectively; SCC -trapezoidal waveform, R=0.7, hold time 3 h, unload time = reload time = 500s;

圖 40、SCC 實驗參數

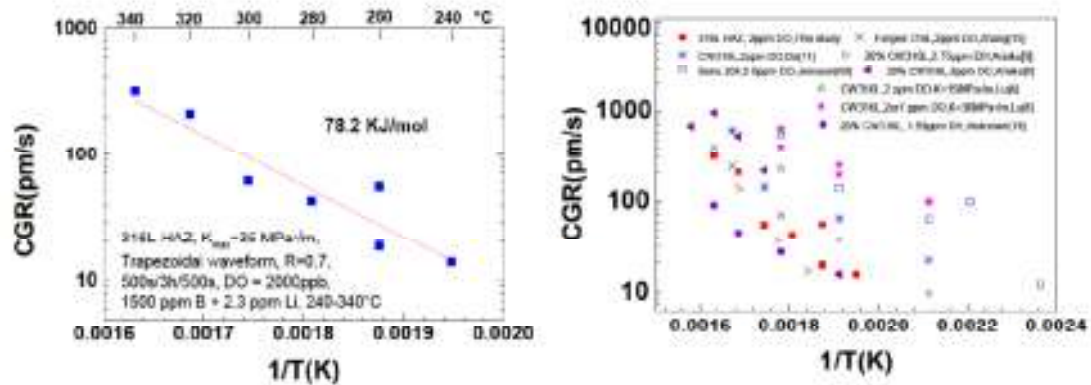


圖 41、E_{aae}(apparent activation energy)

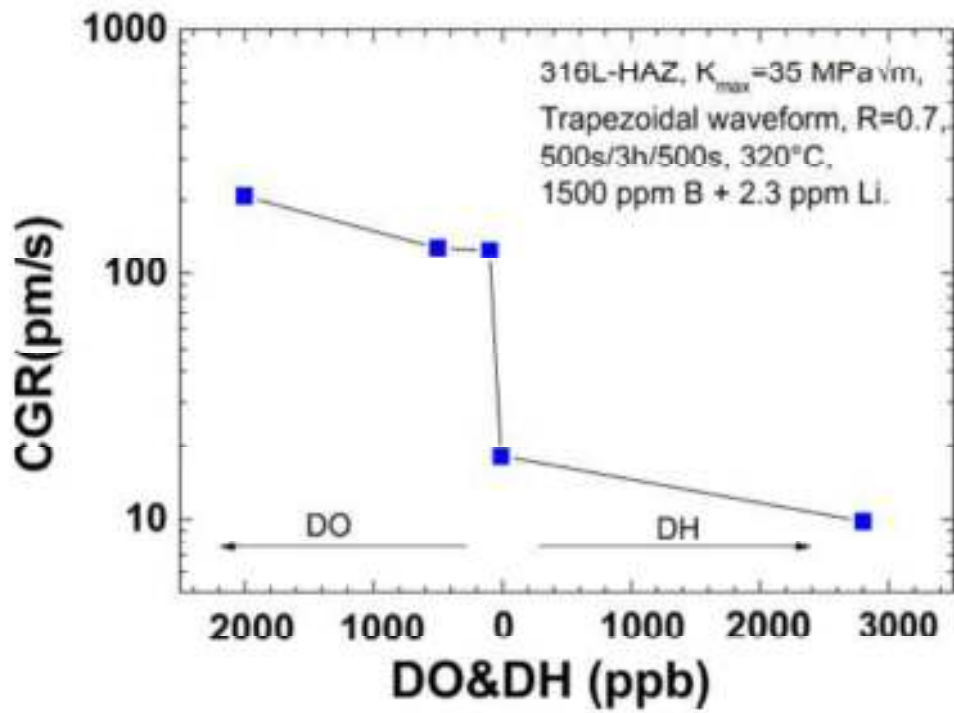


圖 42、裂縫生長速率與溶氧溶氫環境之比較

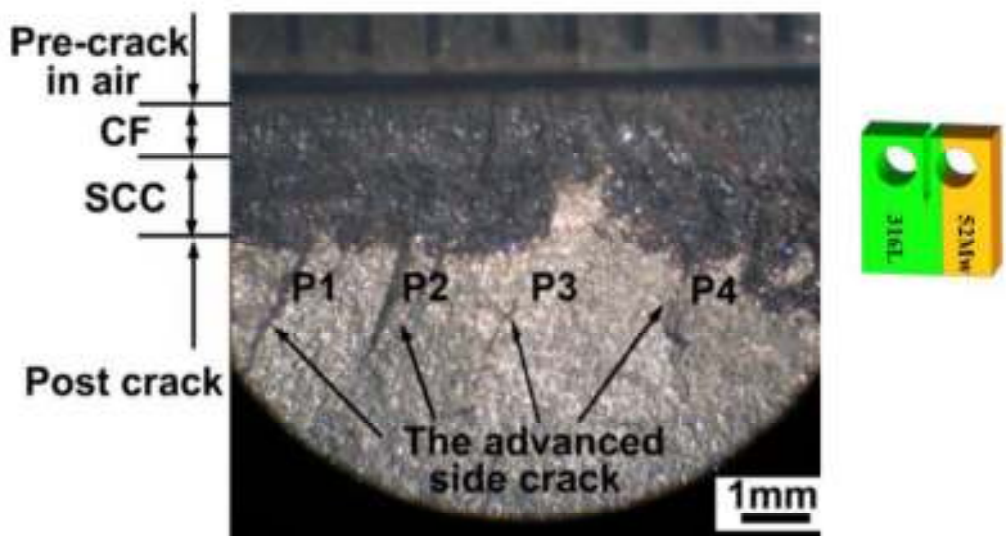


圖 43、HAZ 主破裂面

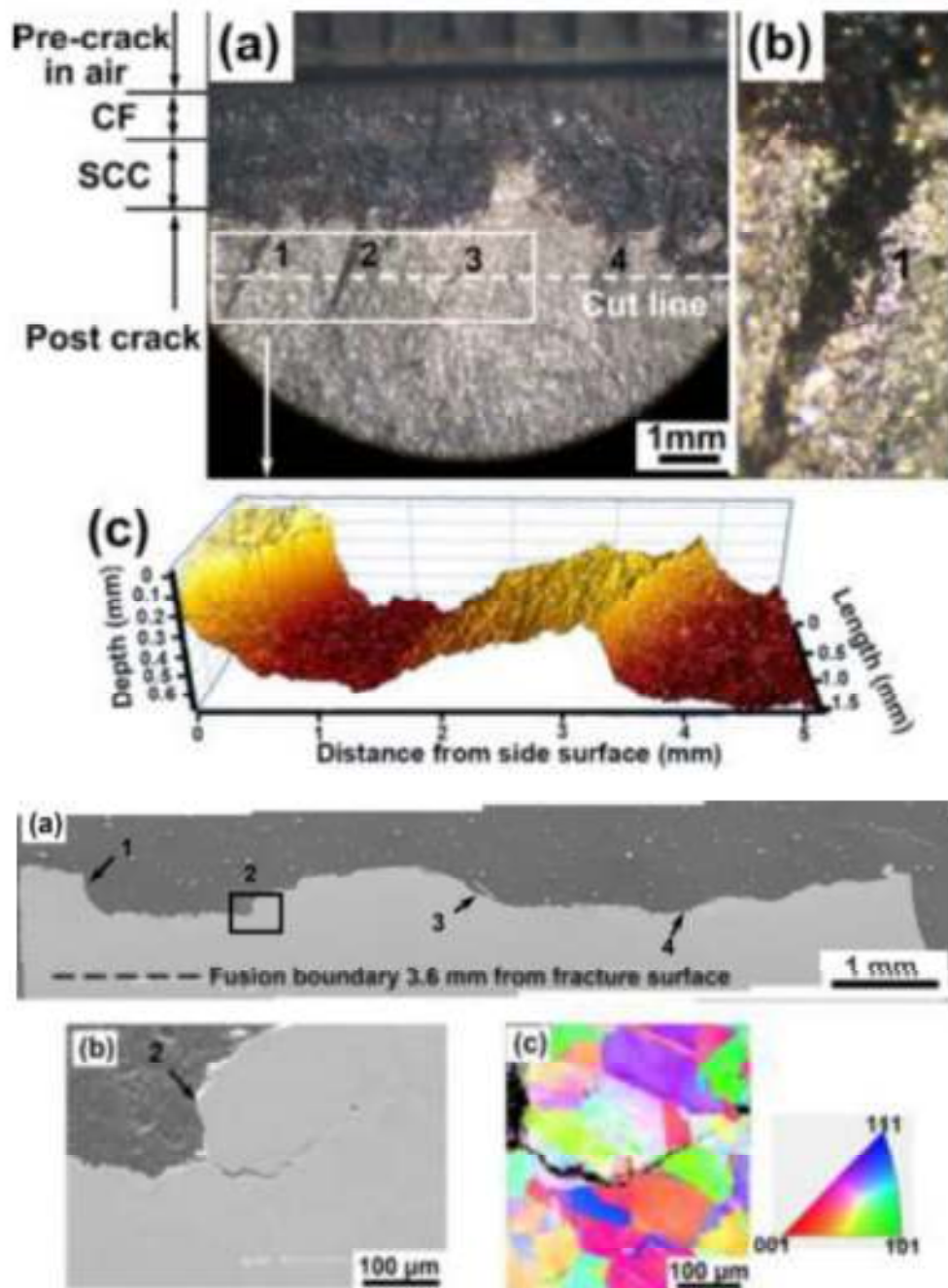


圖 44、破裂面沿白線對剖面 SEM 與 EBSD 分析

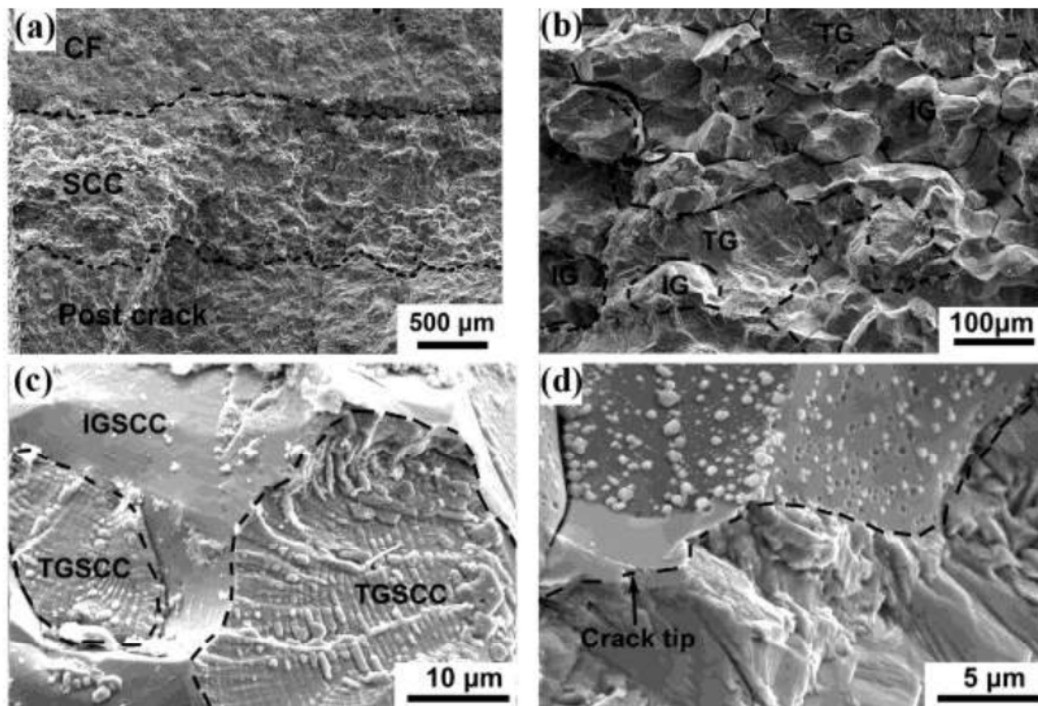


圖 45、破裂面 SEM 分析

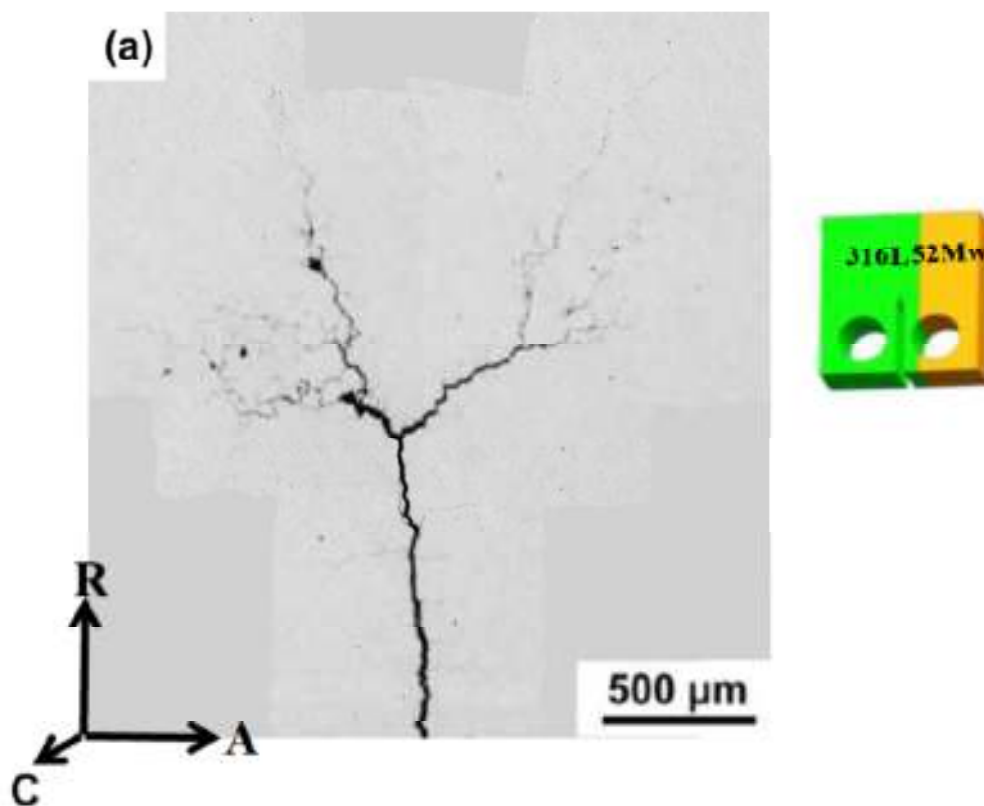


圖 46、AR 面 SEM 分析

316L/52M 溶融線應力腐蝕龜裂實驗 CT 試片所取焊件位置如圖 47，開槽裂縫成長位置試片 A 在溶融線上，B 則在距溶融線 0.2 mm 的位置。其實驗中所改變的參數與裂縫成長速率如圖 48，改變溫度、氧濃度、氬濃度與 K 值。破損形貌由 SEM 觀察為沿晶破裂與穿晶破裂的混合(圖 49)。作者再比較試片 A 與試片 B 裂縫成長速率，發現在溶氧環境下裂縫生長速率相差不大，但是在溶氬環境且溫度在 240°C 下試片 A 的裂縫成長速度比試片 B 大許多，但是在 320 到 340 度則相差減少許多(圖 50)。

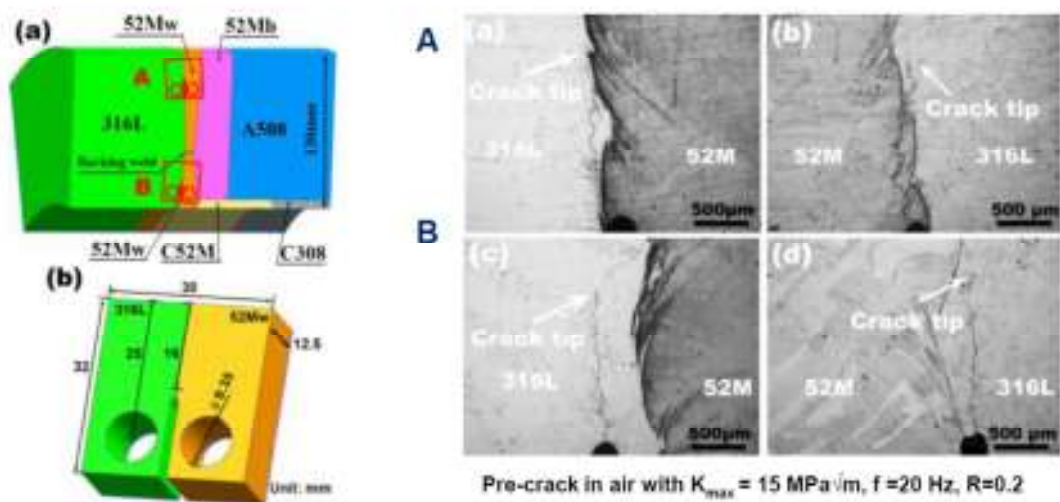


圖 47、316L/52M 溶融線應力腐蝕龜裂實驗 CT 試片所取焊件位置

Water chemistry, loading history of CGR tests of A and B

Sw	DO, ppb	DO, ppb	Duration, h	K_{max} , MPa√m	T_0 , °C	COR_0 , mm/y	T_0 , °C	COR_0 , mm/y
CF#1	2000	<9	21.0	25	320	1.90×10^{-6}	310	1.40×10^{-6}
CF#2	2000	<9	11.0	25	320	7.01×10^{-7}	310	5.90×10^{-7}
CF#3	2000	<9	95.7	25	320	1.82×10^{-7}	310	7.60×10^{-7}
SCC#1	2000	<9	158.7	25	320	1.04×10^{-7}	310	1.14×10^{-7}
SCC#2	2000	<9	191.6	35	320	1.89×10^{-7}	310	1.76×10^{-7}
SCC#3	100	<9	266.2	35	320	1.83×10^{-7}	310	1.67×10^{-7}
SCC#4	<40	<9	985.6	35	320	1.82×10^{-8}	310	1.23×10^{-8}
SCC#5	<10	2000	670.2	35	320	1.82×10^{-8}	310	1.37×10^{-8}
SCC#6	<10	2000	401.2	35	340	2.05×10^{-8}	330	1.71×10^{-8}
SCC#7	<10	2000	215.6	35	300	1.40×10^{-8}	300	4.10×10^{-8}
SCC#8	<10	2000	287.4	35	280	1.31×10^{-8}	280	1.99×10^{-8}
SCC#9	<10	2000	205.1	35	200	4.84×10^{-8}	200	2.40×10^{-8}
SCC#10	<10	2000	145.2	35	240	—	240	—
CF#4	<10	2000	54.1	35	240	1.02×10^{-5}	240	1.50×10^{-5}
SCC#11	<10	2000	456.8	35	240	6.32×10^{-6}	240	1.30×10^{-5}
SCC#12	100	<9	475.5	35	240	1.05×10^{-6}	240	8.47×10^{-6}
SCC#13	100	<9	185.6	35	280	6.02×10^{-6}	280	—

Note: CF = triangle loading waveform, frequency of 0.01 Hz and load ratio of 0.3, 0.5, and 0.7 for CF#1, CF#2, and CF#3, respectively. frequency of 0.001 Hz and load ratio of 0.7 for CF#4. SCC = trapezoidal loading waveform, load ratio of 0.7, hold time of 3 h, both loading and unloading time of 500 s.

圖 48、SCC 實驗參數與裂縫成長速率

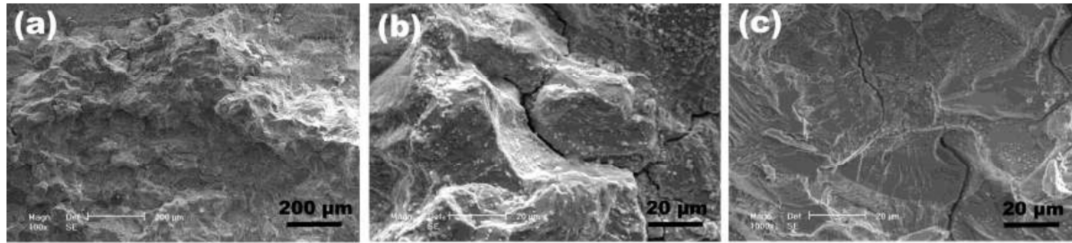


圖 49、破裂面 SEM 分析

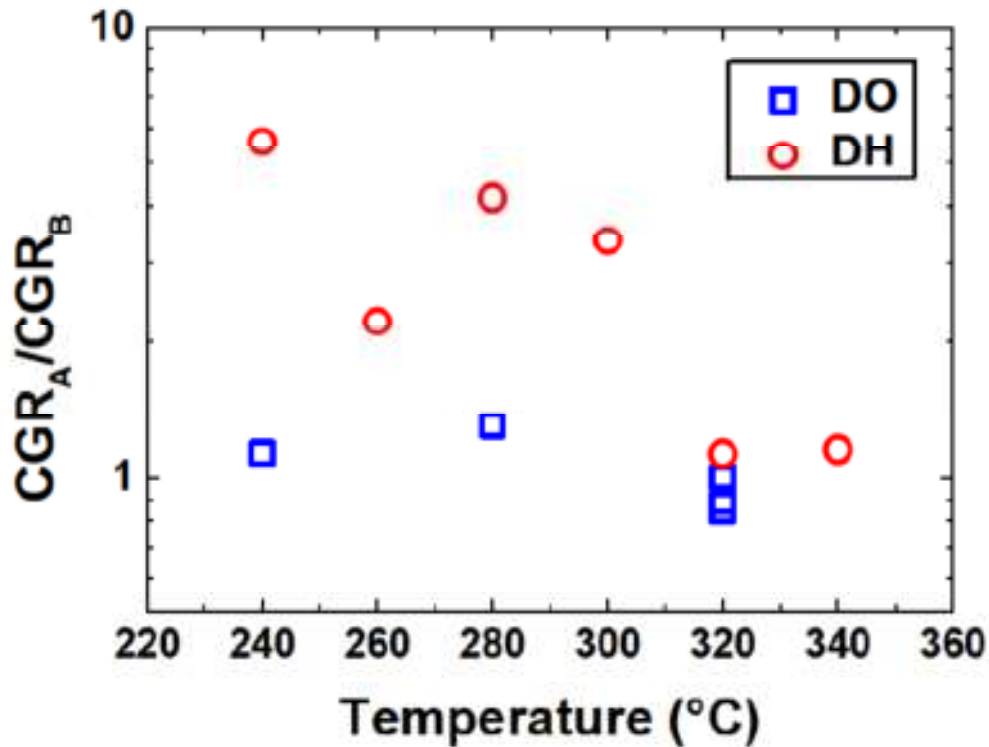


圖 50、試片 A 與試片 B 裂縫成長速率比較

(二) 不銹鋼材料老裂化研究

上海交通大學 Donghai Du 博士等人發表“The effect of cold work on the SCC crack growth rate of 316L in high temperature water”，探討冷作加工對不銹鋼 316L 在高溫水化學環境下對應力腐蝕龜裂(SCC)裂縫成長速率影響。在 BWR 與 PWR 核能電廠中冷作加工為加速材料 SCC 裂縫成長速度的主因，但是其機制還有待更進一步的研究與探討。該篇報告中使用的材料為 316L，其冷作加工示意圖為圖 51，分別為 0、10、20 與 40 % 的冷加工量，從其晶相圖 52 中可以觀察到隨著冷加工量的增加，晶粒會沿著厚度減少的垂直方向拉長，且滑移帶也隨著冷加工

量和增加。316L 冷加工試片的機械性質也隨著冷加工量增加而增加，但是延展性則明顯下降(圖 53)，且由冷作加工後的降伏強度與硬度在室溫下有一接近線性的關係。冷加工後的試片加工成 CT 試片進行 SCC 實驗，CT 試片有 SL 與 TL 方向，其中三片 SL 方向的試片進行 2 小時 600°C 的熱處理。SCC 實驗參數如圖 54，改變的參數主要分成三部份分別探討冷作加工的試片中降伏強度、殘留應變與裂縫成長方位對其之影響。

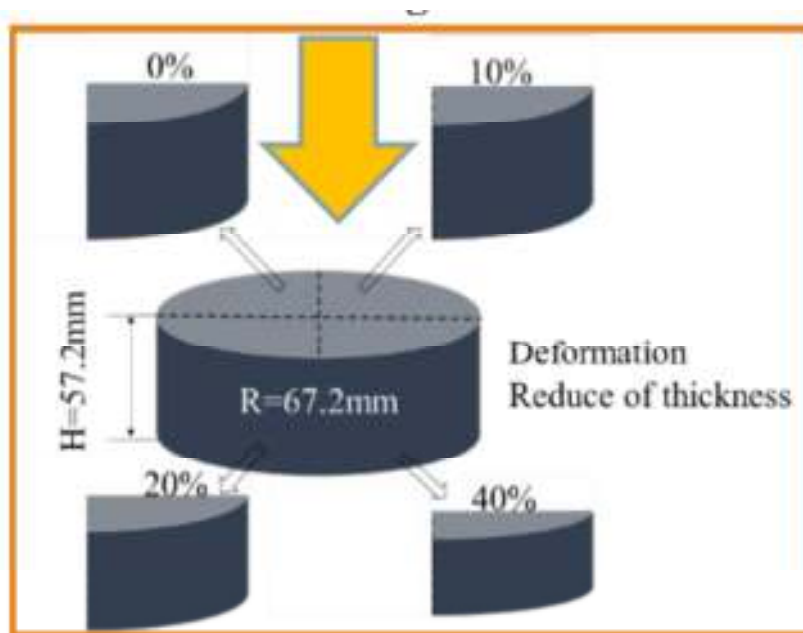


圖 51、316L 試片冷作加工示意圖

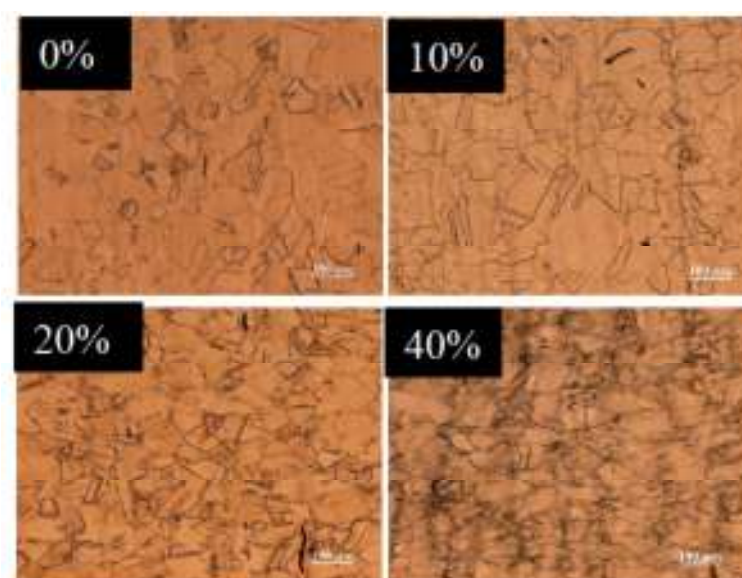


圖 52、冷作加工 316L 試片晶相

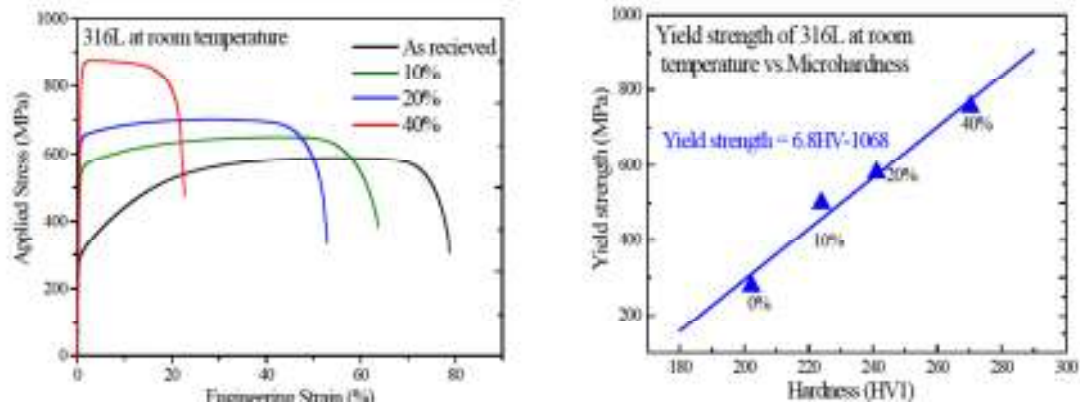


圖 53、冷作加工 316L 試片機械性質

10 specimens were tested in 325°C water

CW	Specimen ID	Direction	Condition	K (MPa√m)	Gas (ppm)
0	00SL01	S-L	As recieved	27.5	1.6 DH, 2 DO
10	10SL01	S-L	CW	27.5	1.6 DH, 2 DO
20	20SL01	S-L	CW	27.5	1.6 DH, 2 DO
40	40SL01	S-L	CW	10-27.5	1.6 DH, 2 DO
10	10SL02	S-L	CW+600 °C, 2 h	27.5	1.6 DH, 2 DO
20	20SL02	S-L	CW+600 °C, 2 h	27.5	1.6 DH, 2 DO
40	40SL02	S-L	CW+600 °C, 2 h	10-27.5	1.6 DH, 2 DO
10	10TL01	T-L	CW	27.5	1.6 DH, 2 DO
20	20TL01	T-L	CW	27.5	1.6 DH, 2 DO
40	40TL01	T-L	CW	27.5	1.6 DH, 2 DO

Study
↓
Yield strength
Residual strain
Orientation

圖 54、冷作加工 316L SCC 實驗參數

裂縫成長速率在溶氫 1.6 ppm 與溶氧 2 ppm 環境下與降伏強度關係圖如圖 55，隨著冷作加工量的增加溶氫環境的裂縫成長速度逐漸增加接近溶氧環境的裂縫生長速率，其裂縫生長速率增加最快速為 20 %冷作加工試片。利用不同裂縫成長速率與 n 值計算裂縫尖端的應變速率(strain rate)，降伏強度越高其應變速率越高(圖 56)。作者接著比較熱處理與沒有熱處理裂縫成長速率的差異，無論在溶氫或溶氧的高溫水環境下熱處理後的試片裂縫成長速率都會大幅降低，尤其是在溶氫環境下(圖 57)。以 40%冷作加工試片為例，溶氧環境下沒有熱處理的裂縫生長速率約為有熱處理的試片 3 倍，在溶氫環境下為 7 倍，其值不會因為 K 值

增加而有所改變(圖 58)。為了比較殘留應變對裂縫生長速率的影響進行探討，作者利用量測硬度(圖 59)與圖 53 之降伏強度與硬度關係式，以及圖 55 之降伏強度與裂縫生長速率關係去計算熱處理過後之裂縫生長速率，其得到的結果發現計算所得的值小於量測所得到值(表 2)，這代表除了硬度與降伏強度外，殘留應力也扮演減少裂縫生長速率重要的因素。為了更進一步瞭解殘留應力對裂縫生長速率的影響，作者更進一步利用 EBSD 分析局部方位差角分布 (KAM kernel average misorientation map)如圖 60，由電腦計算平均後的 KAM 值熱處理後比沒有熱處理的試片下降(圖 61)，但下降的幅度無法解釋為裂縫生長速率大幅下降的原因，所以作者認為最有可能為殘留應變的減少可能集中在晶界上。

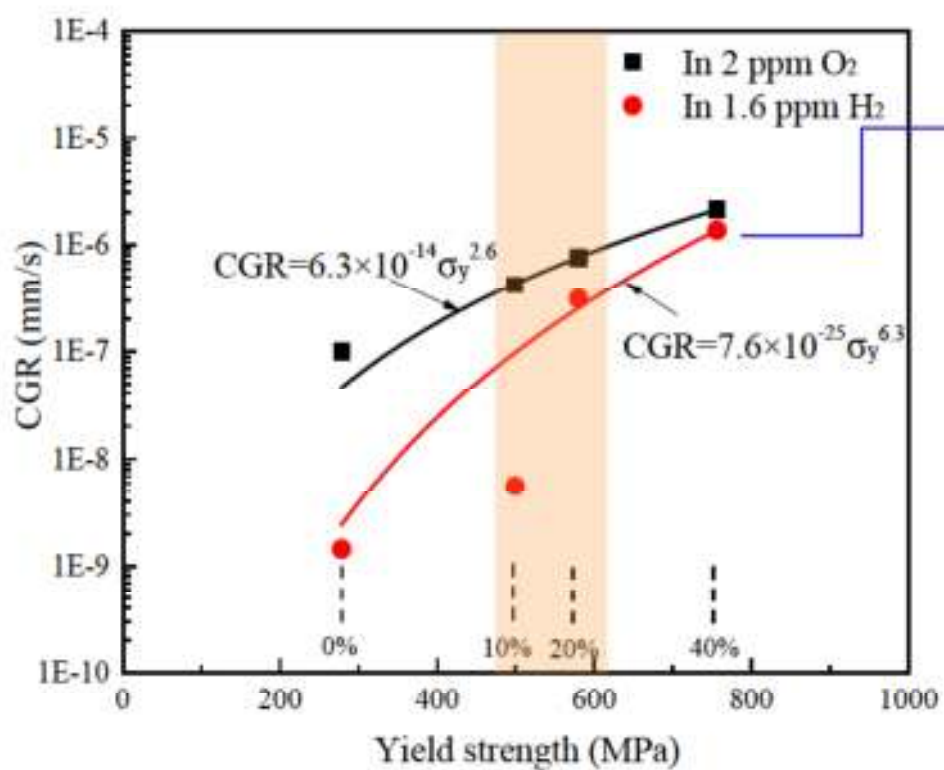


圖 55、裂縫生長速率 VS 降伏強度

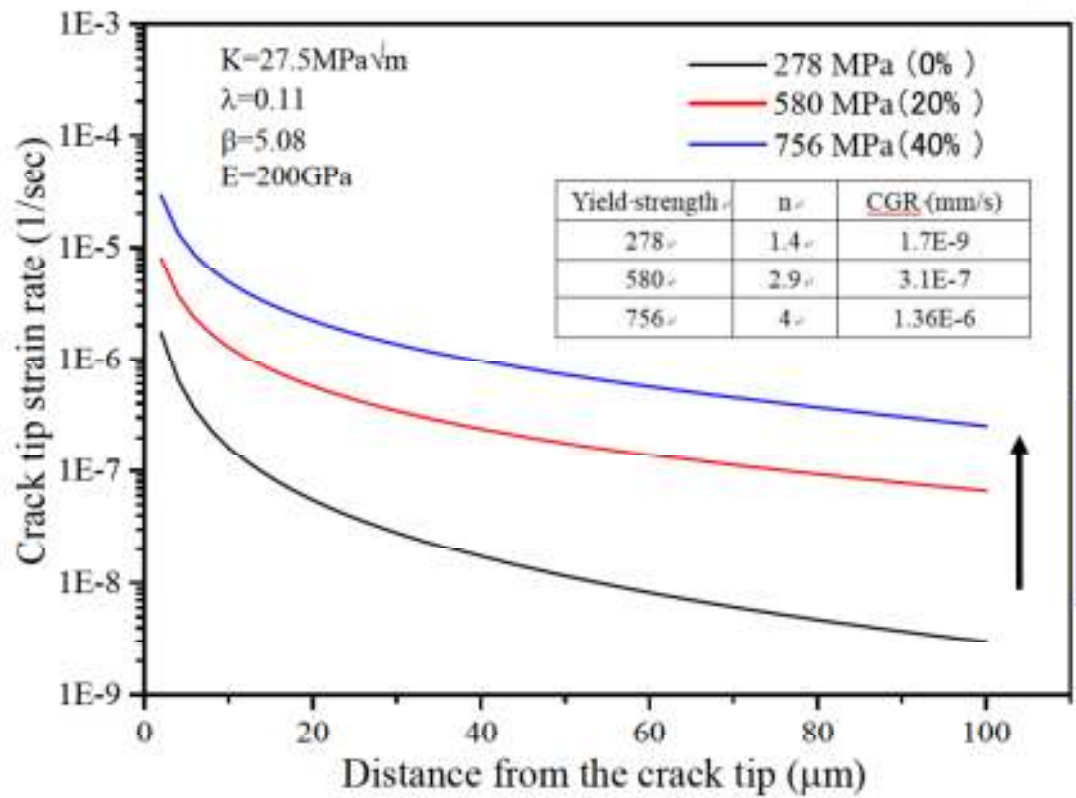


圖 56、裂縫尖端應變速率計算

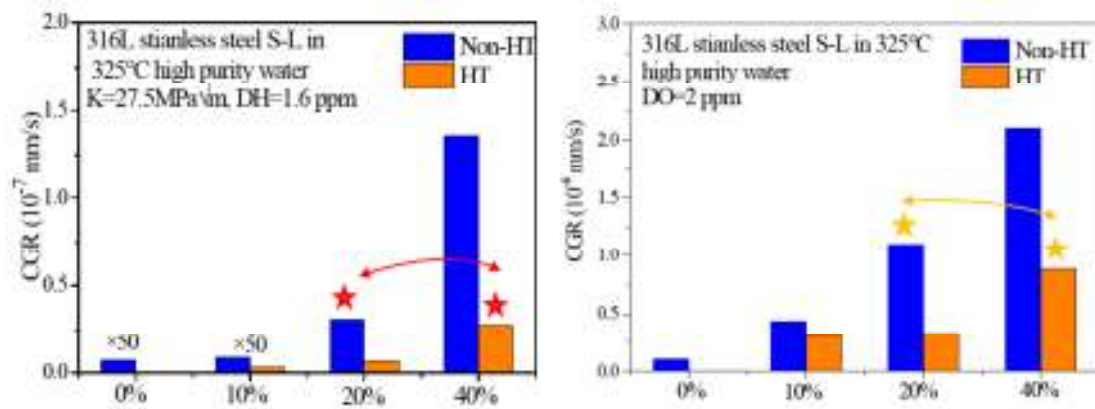


圖 57、熱處理與沒有熱處理試片裂縫生長速率比較圖

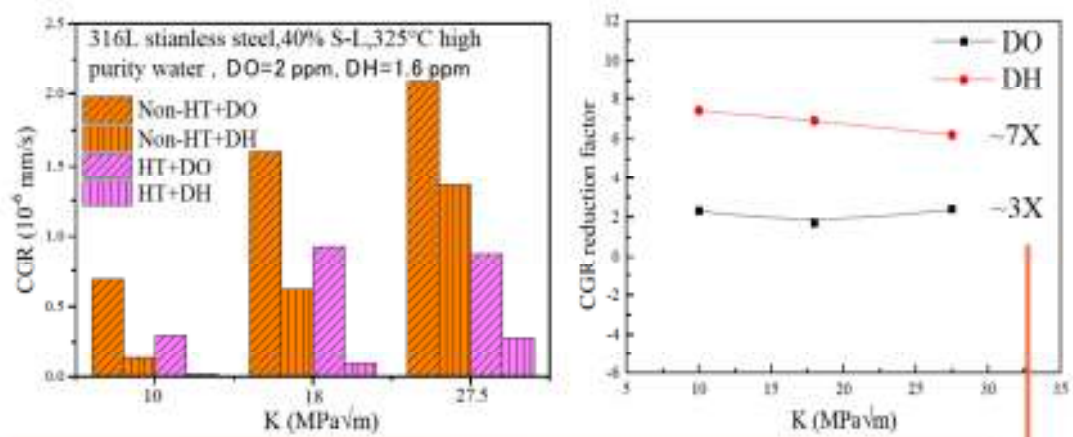


圖 58、40 %冷作加工試片測試參數與裂縫生長速率比較圖

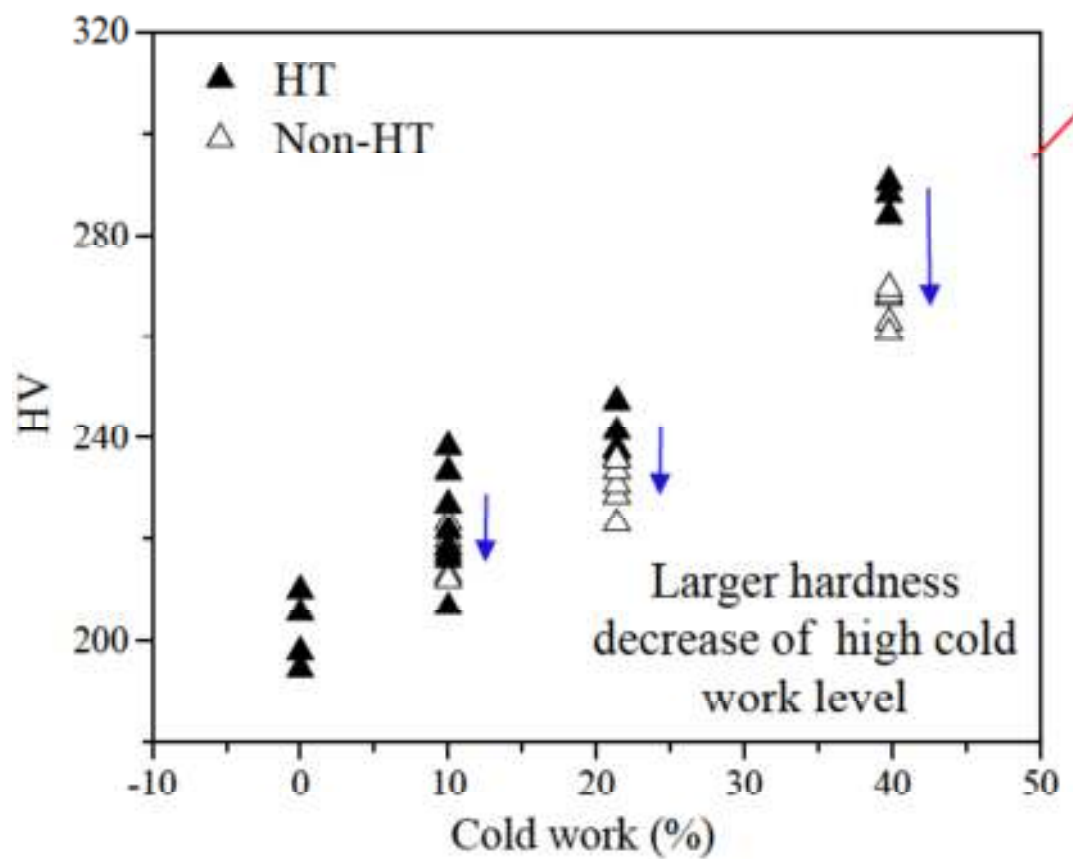


圖 59、熱處理前後之硬度比較

表 2、裂縫生長速率計算值與量測值之比較

CW	Calculated CGR_{Non-HT} / CGR_{HT}	Measured CGR_{Non-HT} / CGR_{HT}
10	1.18	1.4
20	1.38	3.3
40	1.6	3.0

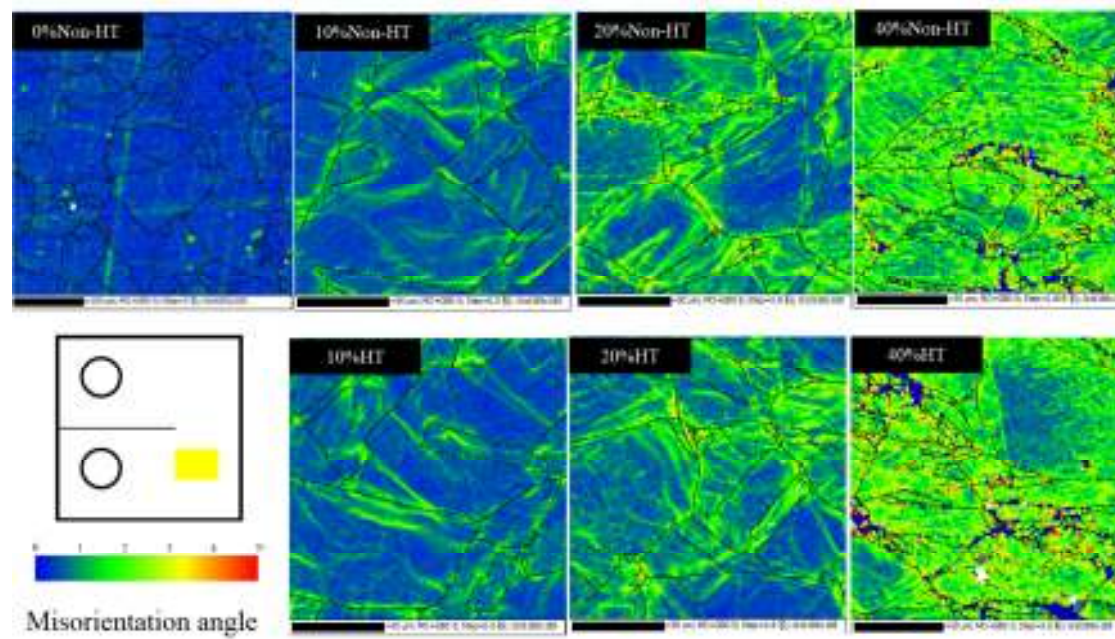


圖 60、各試片 EBSD 之 KAM 圖

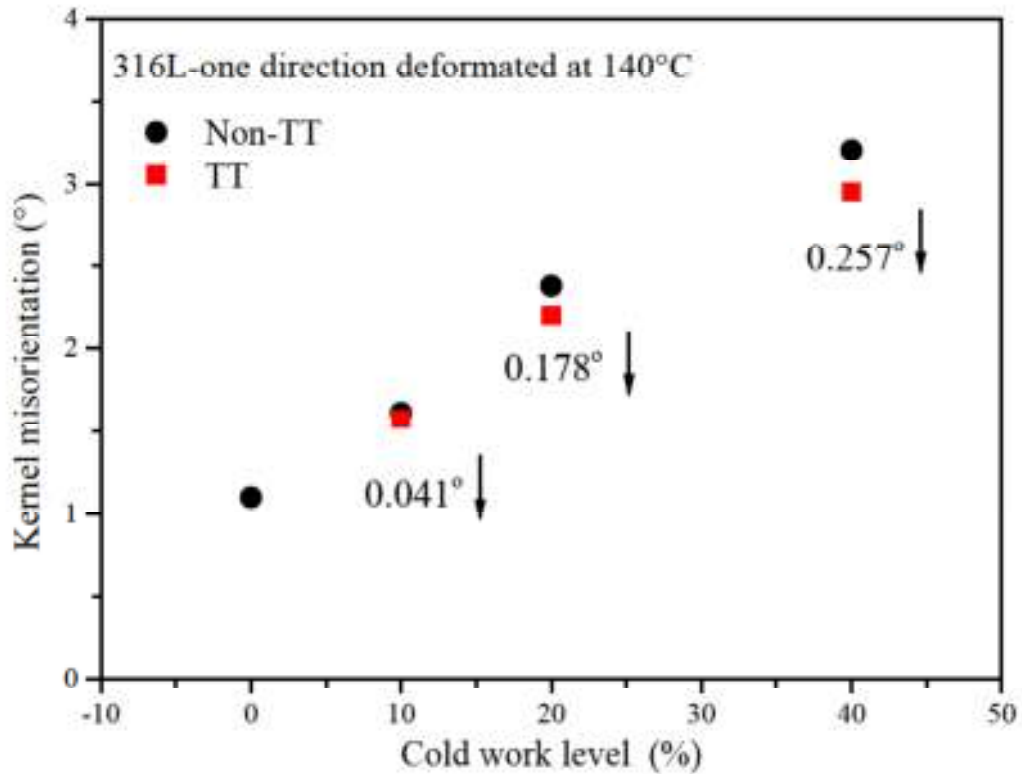


圖 61、各試片熱處理前後平均 Kernel misorientation 值

最後探討不同方位對裂縫生長速率之影響，首先量測 SL 與 TL 裂縫生長面之硬度，由圖 62 中可以發現 SL 硬度高於 TL 之硬度，由前面得到的結果可以推論 SL 裂縫生長速率高於 TL 之裂縫生長速率。在溶氫的水環境下冷加工 20% 以上 SL 方向裂縫生長速率約為 TL 方向 10 倍以上，並與文獻中所得到的結果相比較(圖 63)。接著比較在溶氧環境與溶氫環境對不同方位裂縫生長速度之影響(圖 64)，在 10% 冷作加工的條件下其不同方位之裂縫生長速率是相似的，隨著冷作加工量增加 SL 方向的裂縫生長速率增加速率遠高於 TL 方向，尤其是在溶氫環境下特別明顯，40% 冷作加工試片在溶氫環境下 SL 方向之裂縫生長速率為 TL 方向 40 倍以上。比較 SL 與 TL 在破裂面的形貌差別如圖 65，SL 試片隨著冷加工量增加裂縫尖端變得比較平順而手指形狀的凸出則減少，而 TL 試片則相反隨著冷加工量增加手指形狀凸出的區域增加且裂縫尖端越不平順。作者利用圖 66 去解釋為何 SL 試片裂縫生長速率隨著冷加工的量增加大於 TL 試片，在輕微冷加工時殘留應變集中在晶界附近，隨著冷加工的量增加殘留應變集中在晶界的量

也增加且此時晶界的方位受冷加工影響驅使晶界更平行於 SL 破裂面，進而導致殘留應變的方向主要為平行 SL 破裂面，因此 SL 破裂面的 SCC 敏感性將高於 TL 破裂面。

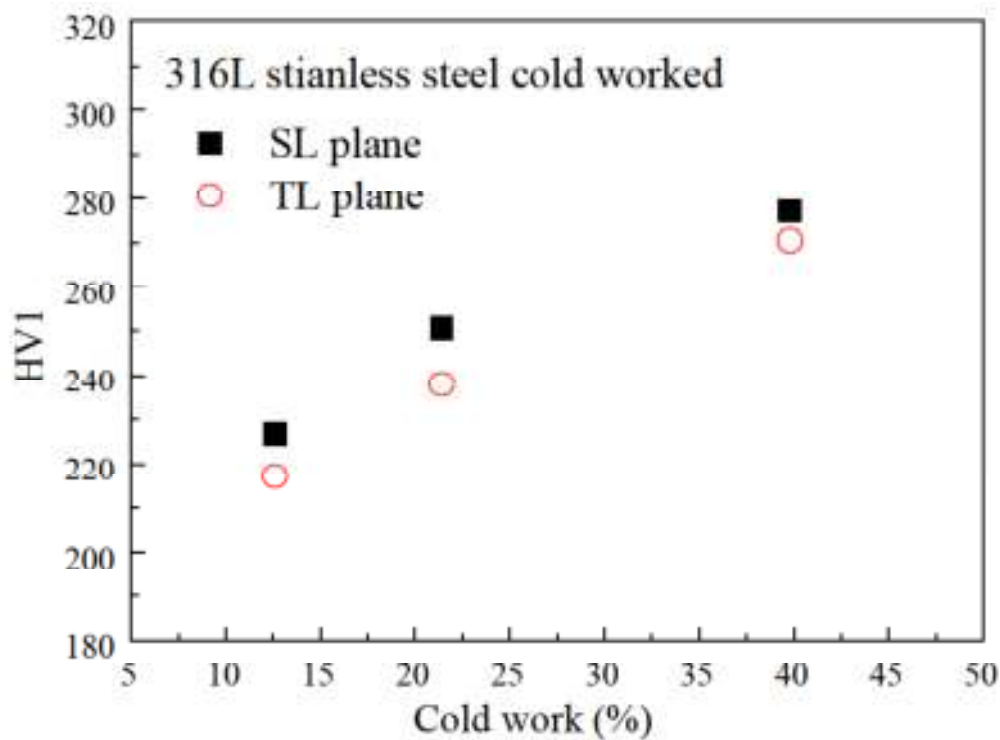


圖 62、SL 與 TL 試片硬度比較

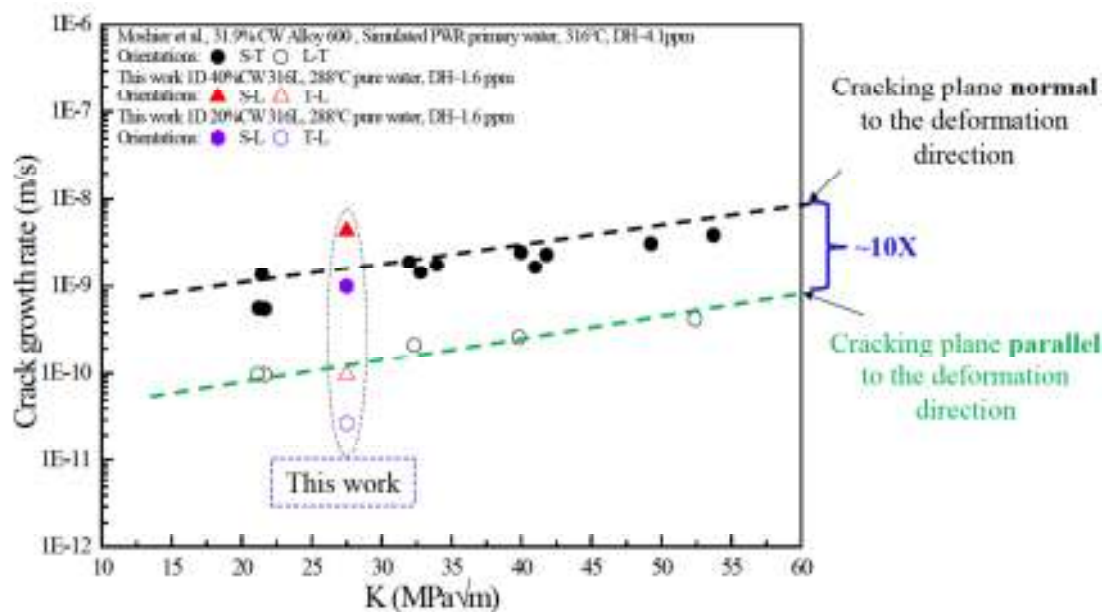


圖 63、不同方位裂縫生長速率與 K 值關係圖

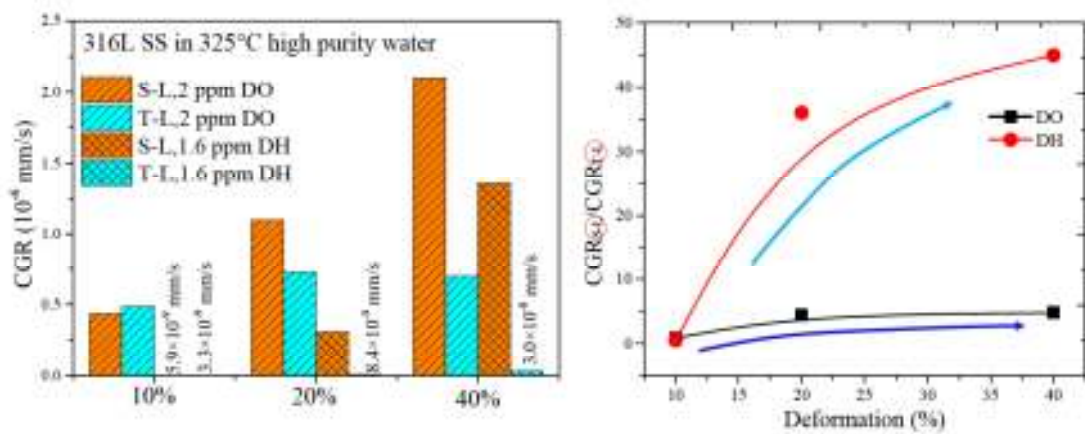


圖 64、溶氧環境與溶氫環境對不同方位裂縫生長速度之影響

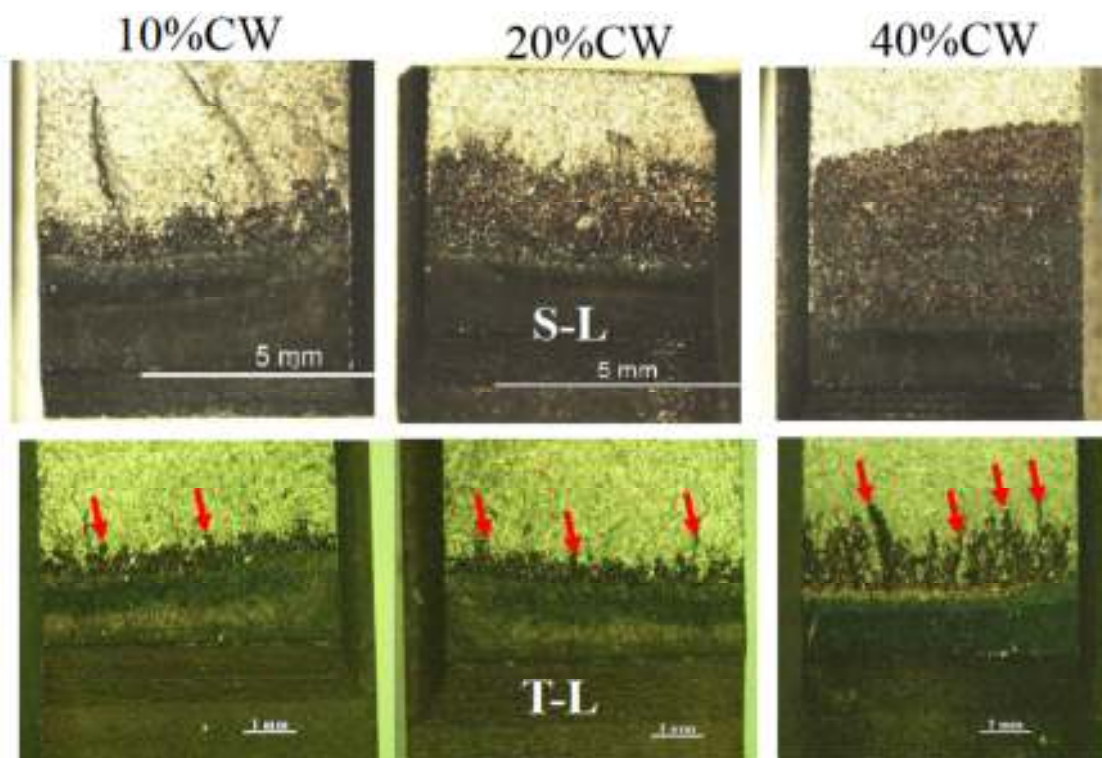


圖 65、SL 與 TL 表面破損形貌

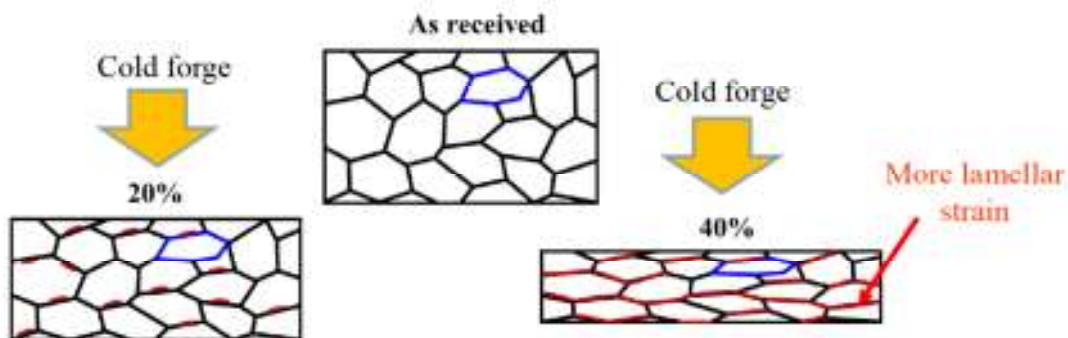


圖 66、殘留應變示意圖

(三) 鎳基合金材料老裂化研究

日本 Institute of Nuclear Safety System 的 Takumi Trachi 博士等人發表 “Influence of hydrogen on the PWSCC behavior of Alloy TT690”，探討合金 690 在 PWR 水化學環境中氫對應力腐蝕龜裂行為之影響。鎳基 690 合金因具有較佳之抗應力腐蝕性能，故逐漸取代了過去大量使用之鎳基 600 合金。然而，近年來的研究指出，690 合金於應用於 PWR 電廠中仍無法完全避免一次側冷卻水應力腐蝕龜裂(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)之現象，且在加氫環境下會使材料性質發生改變而導致加速 SCC 之行為(圖 67)。故本篇主要探討氫對 690 合金之 PWSCC 影響研究。此研究使用鎳基合金 690 與 600，其實驗設計如圖 68 所示，實驗一:利用潛變實驗探討在 PWR 的溫度與氫壓力條件下裂縫尖端之快速破裂行為；實驗二:在慢速率拉伸實驗(SSRT)在 PWR 水環境下與在 Ar 環境下的差異比較。

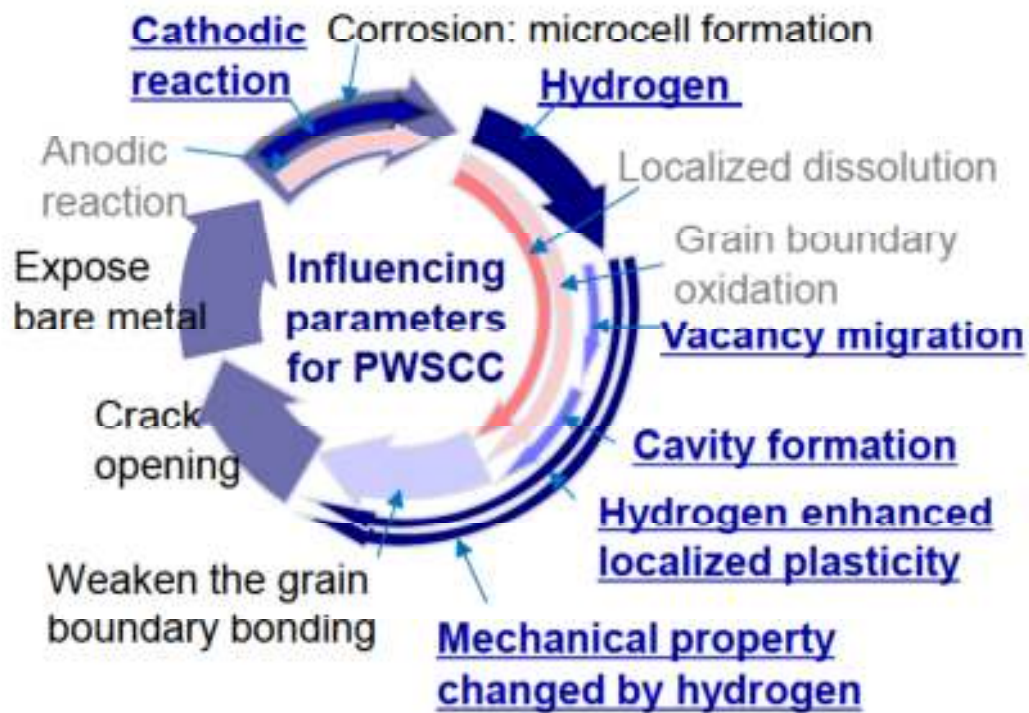


圖 67、氫對 PWSCC 之影響

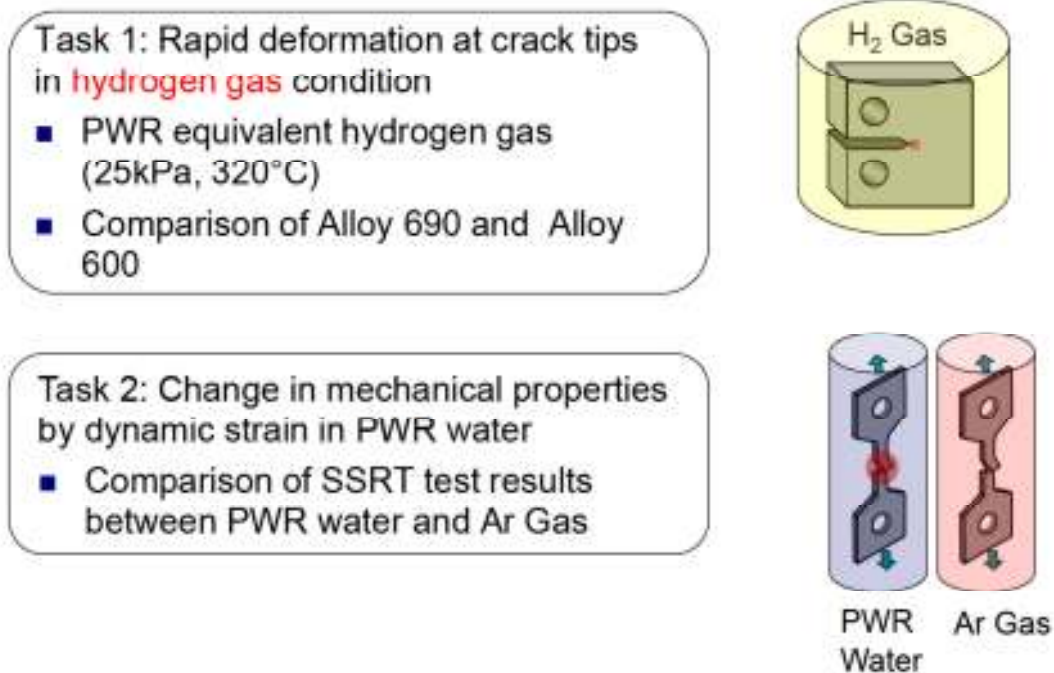


圖 68、實驗示意圖

實驗一的潛變實驗如圖 69，實驗環境先在 Ar 環境下一周之時間然後再轉換成 25 kPa 氫環境，應力強度因子 K 值約為 $40\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。實驗結果如圖 70，快速破裂的移動長度為 $8\mu\text{m}$ ，作者接著觀察表面裂縫形貌(圖 71)發現主裂縫尖端附近有許多微小的裂縫。利用合金 690 的結果與合金 600 的結果來比較(圖 72)，合金 600 快速破裂的移動長度為 $7.4\mu\text{m}$ ，整體觀察合金 690 量測位移距離都高於合金 600，因此無法利用其結果解釋關於 SCC 之敏感性，而合金 600 表面裂縫形貌與合金 690 相似，皆會在其主裂縫尖端附近有許多微小的裂縫。

■ Creep test apparatus

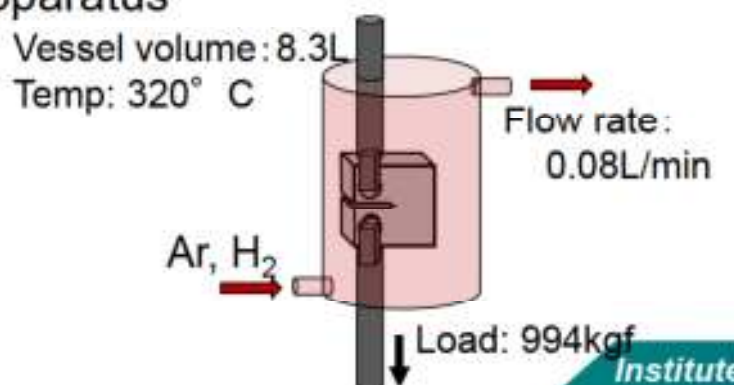


圖 69、潛變實驗示意圖

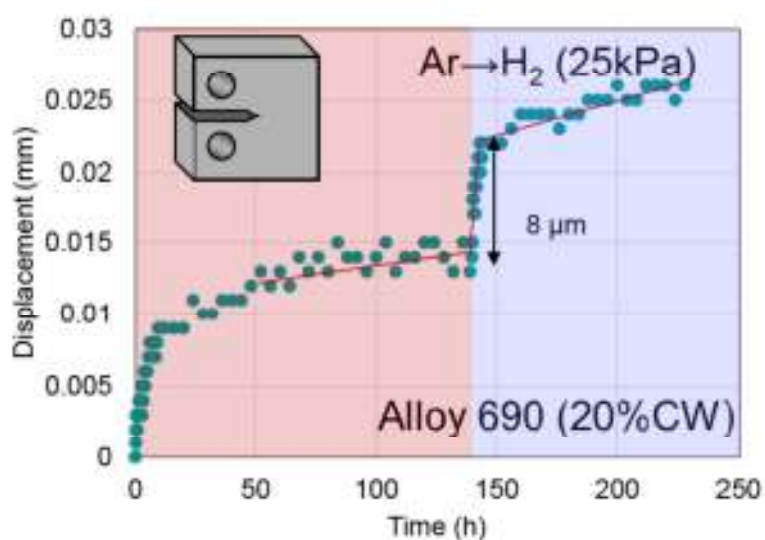


圖 70、潛變實驗位移 VS 時間

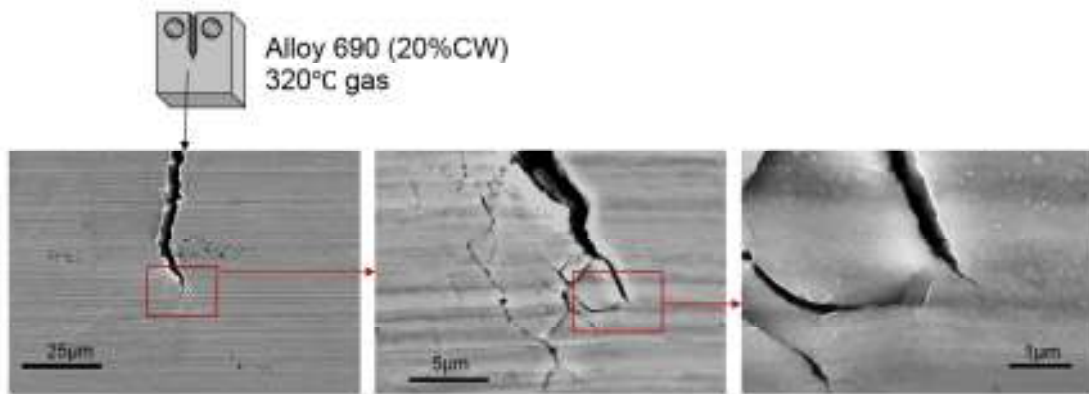


圖 71、潛變實驗合金 690 表面裂縫形貌

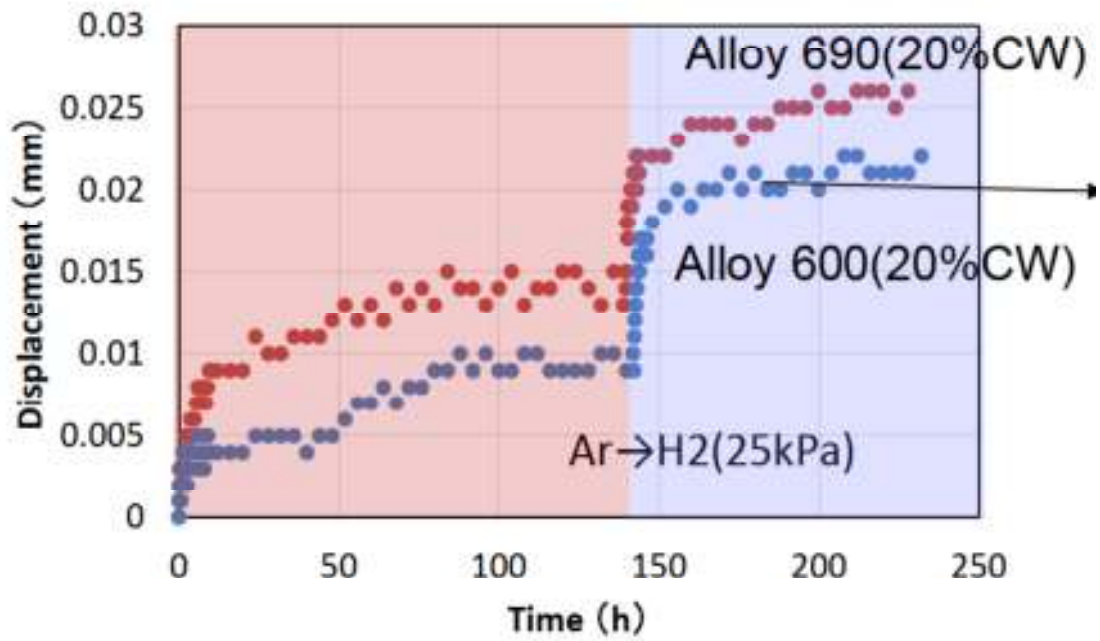
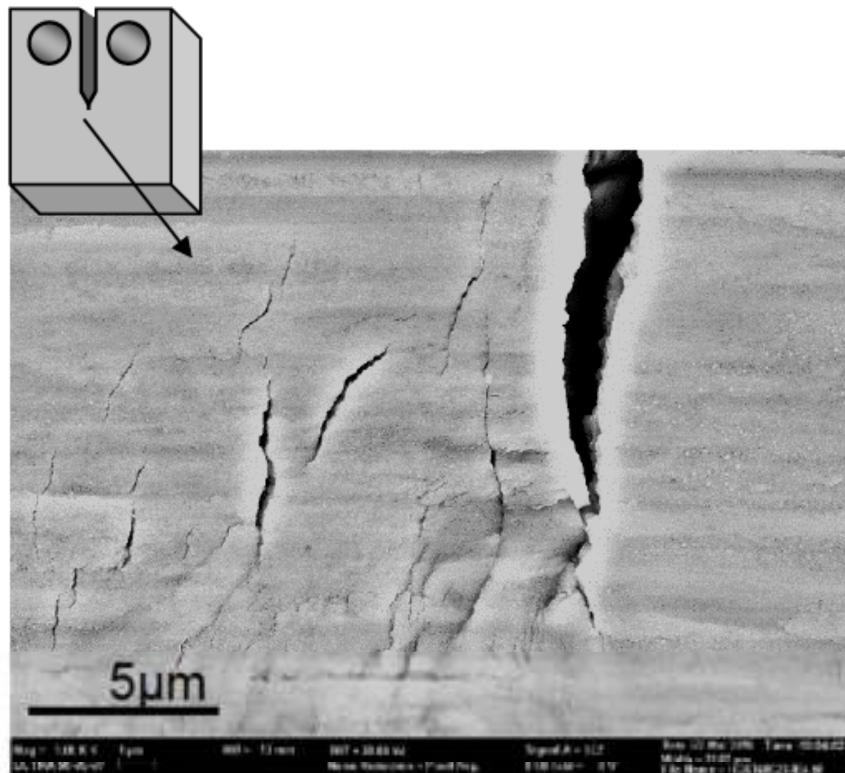


圖 72、合金 600 與 690 潛變實驗位移 VS 時間



Crack tip side wall in Alloy 600
(20%CW)

圖 73、潛變實驗合金 600 表面裂縫形貌

實驗二的慢速率拉伸實驗流程如圖 74，實驗在 PWR 水環境與 Ar 環境下先以 0.1mm/min 至降伏強度維持 2000 小時，再以 1×10^{-5} mm/min 速率進行慢速率拉伸，其環境溫度有 320、340 以及 360°C。其實驗結果如圖 75，在 PWR 水環境之材料強度相較於空氣或 Ar 氣是增加的，可能原因為氫影響其機械性質。再利用 SEM 分析其剖面二次裂縫(圖 76)，裂縫主要為沿著晶界破裂，且裂縫尖端有觀察到氫會促成的孔洞(Cavity)形狀的破損缺陷。

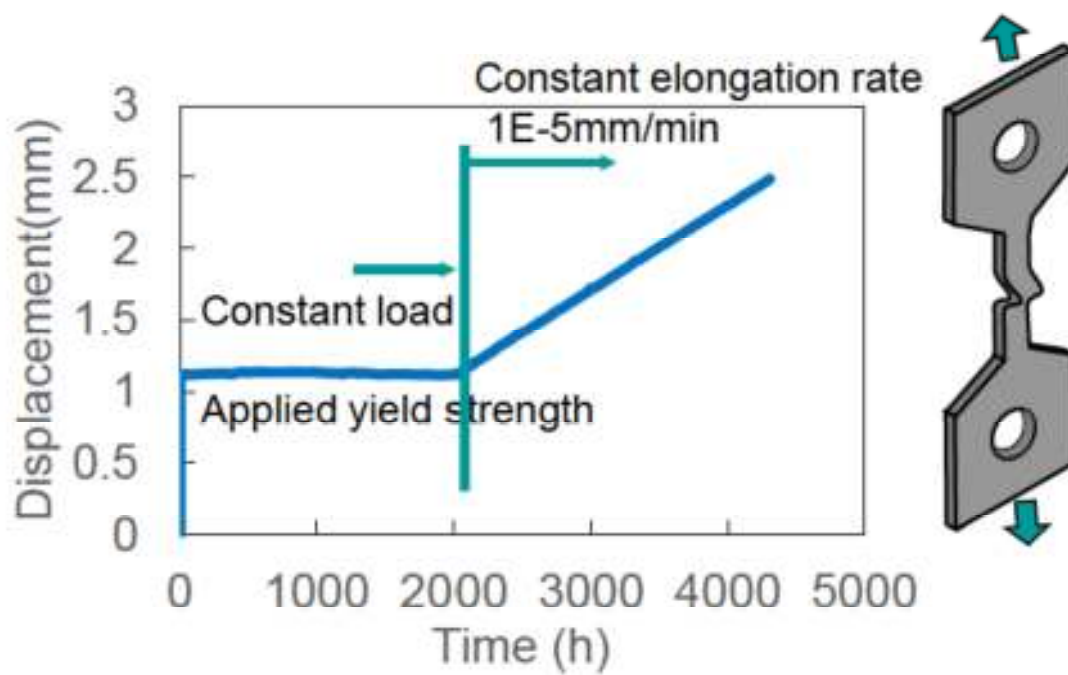


圖 74、慢速率拉伸實驗流程

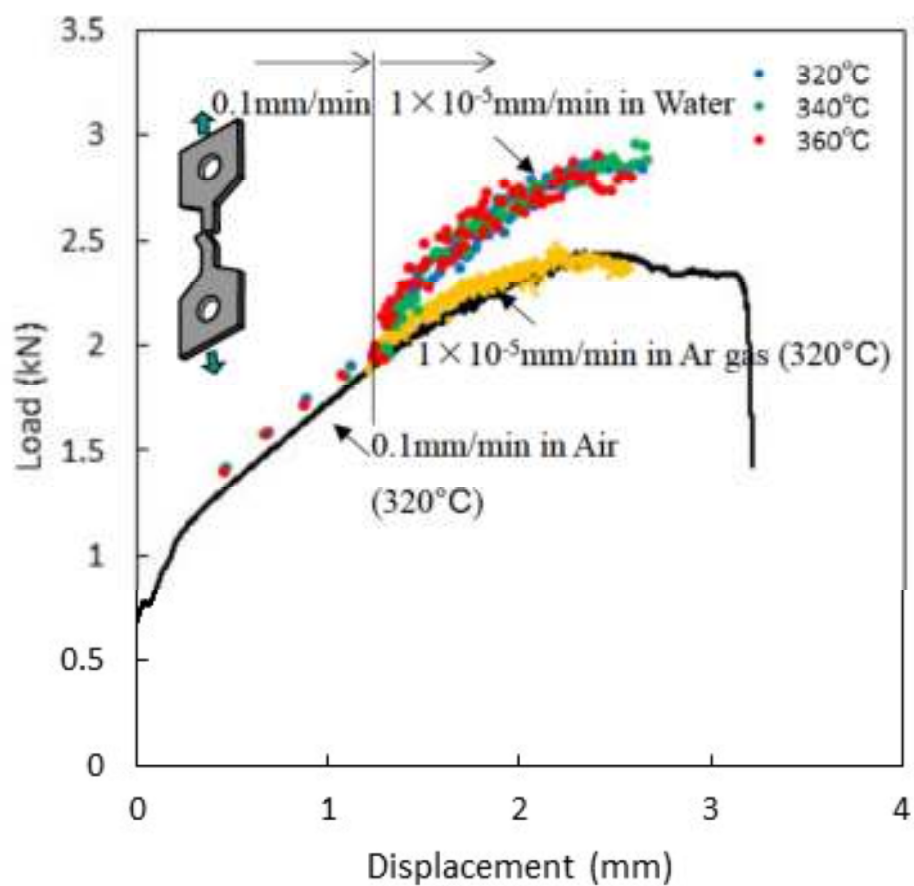


圖 75、應力 VS 位移

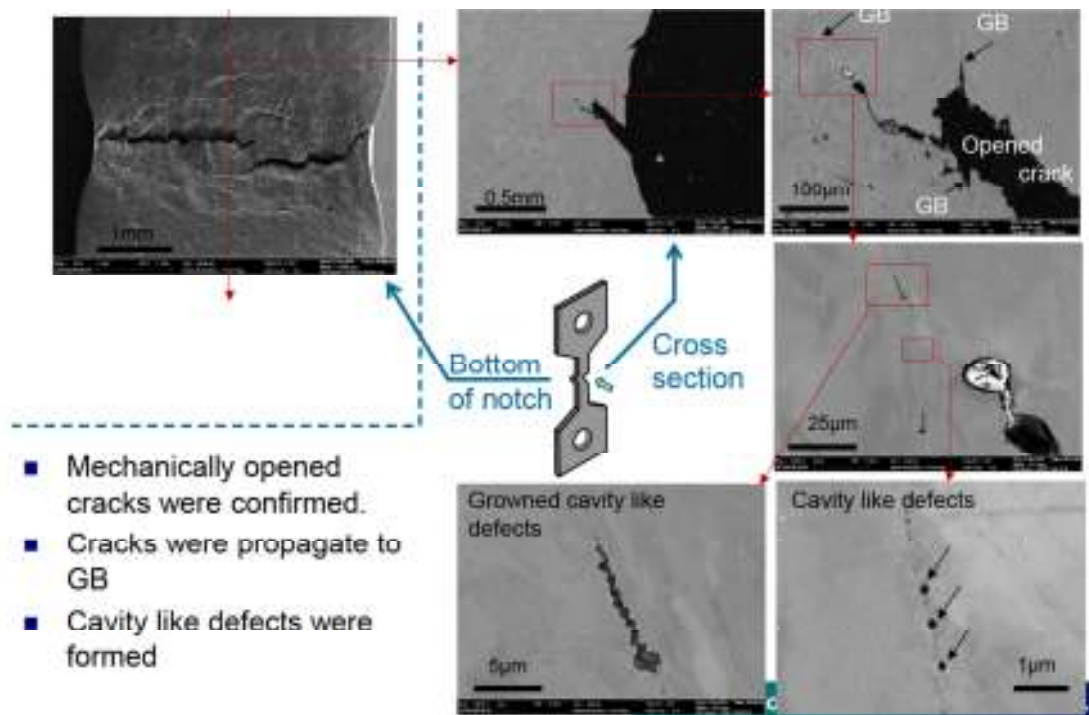


圖 76、剖面二次裂縫 SEM 分析

四、建議事項

- (一) 本所長期從事核能電廠材料之老、劣化研究工作研究，累積數十年經驗且投入大量人力、資金始得以持續進行。ICG-EAC 每年舉行之國際環境效應促進核能組件材料劣化會議，與來自世界各國核能材料領域之專家及學者進行交流，可減少自己摸索的時間，以強化核能電廠預防材料老、劣化之技術，並做為材料管理參考，提升國內核能發電之安全及可靠度，建議定期派員參與。
- (二) 電廠組件材料隨著長期運轉，老化效應愈發顯著，組件受損發生機率也隨之增加，因應材料老劣化議題，建議與研究機構(如此次參訪之英國伯明罕大學冶金及材料系)或國外熱室合作，取得材料老劣化分析技術及運轉管理資源。
- (三) 伯明罕大學冶金及材料系 Profs Paul Bowen/李航月博士督導之疲勞及破裂研究團隊，近期研究課題(a) RPV 壓力槽容器延脆轉換溫度區之低溫韌性與機械行為，與(b)運用在 600-700°C 之高溫材料開發(Alloy 709)與潛變破壞研究，研發內容與成果值得關注。

附件：會議議程

Title	Speaker / Chairman	Date	Time
Meeting registration (Reception, Carden Park Hotel)		Sun 07-05-2017	08:00 - 18:00
TUTORIAL ON MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION Part I (Shooting Lodge, Carden Park Hotel)	Grace BURKE	Sun 07-05-2017	09:30 - 12:30
+ Introduction to characterisation techniques starting from the basics	+ Grace BURKE		
+ Photographic characterisation	+ Ulla EHNINGER		
Application of Oxford Instruments EBSD	+ John LINDSAY		
+ Sample preparation I (ion FIB)	+ Grace BURKE		
+ Sample preparation II (FIB)	+ Sergio LOZANO-PEREZ		
- Lunch break (sponsored by FIB) -		Sun 07-05-2017	12:30 - 13:30
TUTORIAL ON MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION Part II (Shooting Lodge, Carden Park Hotel)	Sergio LOZANO-PEREZ	Sun 07-05-2017	13:30 - 15:00
+ (STEM) imaging and electron diffraction	+ Grace BURKE		
+ (STEM) Analytical STEM-EDS microanalysis + EELS	+ Sergio LOZANO-PEREZ		
+ APT and banding	+ Sergio LOZANO-PEREZ		
BOARD OF DIRECTORS MEETING Part I (Ayot Suite, Carden Park Hotel)	Tsung-Huang YEH	Sun 07-05-2017	15:15 - 18:00
Welcome reception (hotel bar) & dinner (Redmond's Restaurant) at Carden Park Hotel		Sun 07-05-2017	18:30
MONDAY MAY 8, 2017			
GENERAL BUSINESS Part I	Tsung-Huang YEH	Mon 08-05-2017	08:30 - 09:40
Welcome and administrative issues	+ Tsung-Huang YEH, Larry NELSON, Stefan BITTER		
New member applications	+ Yi Duan YUANGANG, Ji Qi XU		
Information on the meeting mechanics	+ John STARWARD		
+ Itinerary lecture: Powering growth - a critical decade ahead	+ Andrew H. SHERRY		
SUMMARY PRESENTATIONS (8 POSTERS) Part I	Michael WRIGHT	Mon 08-05-2017	09:40 - 10:00
+ Effect of grain size on the fatigue life of forged Alloy 600	+ Elaine WEST		
+ Investigation on intergranular corrosion behavior of Alloy 600FT tubing materials	+ Waoqiang LIU		
+ High temperature electrochemical corrosion behavior of Fe-Cr-Ni alloys in simulated PWR water	+ Jiamai WANG		
+ In search of the true Ni/NiO transition	+ Liberato VÖLKE		
+ Electrochemical and spectroscopic characterisation of oxide films formed on Alloy 182 in simulated BWR water: effects of dissolved hydrogen	+ Juxing BAI		
+ Characterization of stress corrosion cracks and crack initiation sites in Alloy 182 by electron backscatter diffraction (EBSD)	+ Juxing BAI		
+ Effect of weld type on SCC growth rate of Alloy 62 in simulated BWR environment	+ Yusuke SAKAI		
+ Effect of dezincing on stress corrosion cracking of 308L/304L welds in a high-temperature water environment	+ Wen Feng LU		
- Coffee break & poster session -		Mon 08-05-2017	10:00 - 10:30
WELDMENTS Part I	Ian DE CURTIS	Mon 08-05-2017	10:30 - 12:10
+ Characterisation of thermally aged Alloy 52 dissimilar metal weld	+ Ulla EHNINGER		
+ PWSCC susceptibility of modified Alloy 52	+ Takaharu MAEGUCHI		

+ Stress corrosion cracking of heat affected zone and fusion boundary for 316L/321 dissimilar metal weld joints in simulated primary water	+ Jianqiu WANG	
+ Dissimilar metal welds on VVER secondary side - operating experiences	+ Minerva ERNESTOVA	
- Lunch break -		Mon 08-05-2017 12:10 - 12:30
WELDMENTS Part II	PAI PING	Mon 08-05-2017 12:30 - 13:35
+ Testing of SA508-4H to Alloy 82 weld interface in high-temperature water	+ Mark CHATTERTON	
+ Characterization of microstructure of dissimilar weld joint (A508-4H/82/316L35) and its corrosion properties in high temperature water	+ Yonghao LI	
+ Crack growth properties of 90-base alloy weld metal Alloy 82 in BWR normal water chemistry (2nd report)	+ Yohei ONO	
+ SCC initiation of cold-worked Alloy 182 in simulated PWR primary water	+ Stephen M. BRUESCHER	
+ Stress corrosion crack initiation and short crack growth behaviour in Alloy 182 weld metal under BWR/HWC condition	+ Jueing SHI	
- Tea break -		Mon 08-05-2017 15:35 - 16:05
AUSTENITIC ALLOYS/ STAINLESS STEELS Part I	Peter ANDRESEN	Mon 08-05-2017 16:05 - 17:45
+ Root cause analysis of cracking on pipe elbow in PWR primary water	+ En-Hsu Hsu	
+ The effect of cold work level on the SCC crack growth rate of 316L in high temperature water	+ Donghai DU	
+ SCC growth rate testing of cold worked stainless steel in hydrogen deaerated water	+ David S. MORTON	
+ Environmentally-assisted fatigue and stress corrosion cracking behavior of 316 stainless steel through crack initiation tests in the simulated PWR environment	+ VOACH TAKEDA	
TUESDAY, MAY 9, 2017		
AUSTENITIC ALLOYS/ STAINLESS STEELS Part II	Tetsuo SHIO	Tue 08-05-2017 08:30 - 09:45
+ Effect of long term thermal aging on SCC initiation susceptibility in L-grade austenitic stainless steels	+ Yoshiyuki KAJI	

Stress corrosion cracking of 316L in simulated BWR water chemistry environments under start-up conditions	+ Chuan Han HO		
An investigation into the electrochemical behavior of 304 and 304L SS in simulated BWR startup environment	+ Yoshi WAGAI		
SUMMARY PRESENTATIONS (6 POSTERS) Part I	Gary S. WAG	Tue 09-05-2017	09:45 - 10:00
Environmental assisted cracking testing in subcritical and supercritical water using pressurized bellows based loading devices	+ Radek NOVOTNY		
Effects of water chemistry and metal ion concentrations on the cobalt incorporation into austenitic stainless steel surface oxide under BWR condition	+ Fabio SCHWAB		
Testing of a new autoclave system with a water loop in a hot cell	+ Maria ZIVINA		
Thermal aging behavior of grade CF8M cast austenitic stainless steels	+ Taku ARAI		
Influence of thermal aging on SCC behavior of 17-4 PH stainless steel in high temperature water	+ Takuji YAMADA		
Error in the literature regarding the nitrogen specification for Alloy 600/62	+ Maria Lynn KIDMAR		
- Coffee break & poster session -		Tue 09-05-2017	10:00 - 10:30
AUSTENITIC ALLOYS: STAINLESS STEELS Part II	Anders JOHSSON	Tue 09-05-2017	10:30 - 11:45
Microstructural effects on stress corrosion initiation in austenitic stainless steel in PWR environments	+ Venugopal ADDIPALLI		
The topology of three-dimensional grain boundary network and its influence on stress corrosion crack propagation	+ Tingguang LIU		
SCC in 288C water and pH behavior in 288C air of as-received and 10% cold rolled XM19	+ Peter ANDERSEN		
LOW-ALLOY STEELS	Hans-Peter SCHPERT	Tue 09-05-2017	11:45 - 12:10
Effects of high-temperature water environments on the fracture behaviour of low-alloy RPV steels	+ Zixing QIE		
- Group photograph & lunch break -		Tue 09-05-2017	12:10 - 13:30
IASCC Part I	Lisa EHRNSTEN	Tue 09-05-2017	13:30 - 15:35
Irradiation accelerated corrosion of structural materials and fuel cladding	+ Gary S. WAG		
Relationship between crack growth rates and locally deformed structures in irradiated 316L stainless steels	+ Yoshitaka CHUJI		
Grain boundary oxidation and degradation in neutron-irradiated stainless steels	+ Katsuhiko TSUJI		
The application of small scale mechanical testing to assess irradiation embrittlement and environmentally-assisted cracking	+ Colin JUDGE		
Strain rate, temperature and water effects on deformation of neutron irradiated steel of VVER reactor core internals	+ Anna HOGNA		
- Tea break -		Tue 09-05-2017	15:35 - 16:05
IASCC Part II	Anna HOGNA	Tue 09-05-2017	16:05 - 17:45
Effect of Zn addition and irradiation on the oxide film of 316L in simulated PWR primary water environment	+ Jun XIAO		
Crack growth rate and fracture toughness of 3-dpa cast austenitic stainless steels	+ Appayappa S BAO		
Microstructural evolution of welded stainless steels on integrated effect of thermal aging and low flux irradiation	+ Martin E. BURMAN		
Failure analysis of broken load transfer spring due to PWSCC in control rod driving mechanism	+ Sara VAN BIESSEN		
WEDNESDAY MAY 10, 2017			
SPECIAL SESSION Part I: SECONDARY-SIDE CORROSION ISSUES IN PWR, VVER AND CANDU SYSTEMS	Maria-Lynn KIDMAR	Wed 10-05-2017	08:30 - 10:15
The secondary side of nuclear plant steam generators - conditions relevant to EAC in PWR, VVER, and CANDU	+ Peter KING		
Secondary side SG tube degradation - European OREX - past and now! What about the future?	+ Beneta KILIAN		

+ ODSCC assessment of Alloy 690 under complex environments of secondary side	+ Dong-jin KIM		
+ Secondary side corrosion of SG tube alloys in typical secondary side chemistries	+ Ian DE CURRIERES		
+ Lead assisted stress corrosion cracking of steam generator body carbon steel	+ Timo SAARIO		
- Coffee break -		Wed 10-05-2017	10:15 - 10:35
SPECIAL SESSION Part I: SECONDARY SIDE CORROSION ISSUES IN PWR, VVER AND CANDU SYSTEMS	Ian DE CURRIERES	Wed 10-05-2017	10:35 - 12:25
+ Stress corrosion crack growth rate of Alloy 600/690 in an acidic secondary side crevice environment	+ Maria Lynn KOMAR		
+ Characterization of steam generator secondary side SCC in Alloy 600 using analytical transmission electron microscopy	+ Suraj PERSAUD		
+ Japanese view on secondary side EAC issues of steam generators	+ Toshiro YONEZAWA		
+ EPRI perspective on steam generator challenges	+ Brent CAPELL		
Panel discussion	All speakers		
- Lunch -		Wed 10-05-2017	12:25 - 13:15
Departure to the Chester sightseeing tour (in front of Carden Park Hotel)		Wed 10-05-2017	13:15
Departure to the banquet (in front of Carden Park Hotel)		Wed 10-05-2017	18:15
THURSDAY, MAY 11, 2017			
AUSTENITIC ALLOYS: Ni-BASE ALLOYS Part I (Round-Robin)	John W. STARRMANN	Thu 11-05-2017	08:45 - 10:00
+ Status and preliminary results of the ICG-EAC Round-Robin on SCC initiation in Alloy 600	+ John W. STARRMANN		
- Coffee break -		Thu 11-05-2017	10:00 - 10:30
AUSTENITIC ALLOYS: Ni-BASE ALLOYS Part II	Toshio YONEZAWA	Thu 11-05-2017	10:30 - 12:10
+ Evaluation of PWSCC susceptibility of steam generator mechanical plugs in Alloy 690	+ Emilen BURGER		
+ PWSCC initiation and growth of strain-hardened nickel-based alloys	+ Sung-Woo KIM		
+ The effect of creep on stress corrosion cracking of cold worked Alloy 690 in high temperature water environment	+ Lifu ZHANG		
+ Could the effect of Ni-content on crack growth rate hold the key to a mechanistic understanding of SCC?	+ Sergio LOZANO-PEREZ		
- Lunch break -		Thu 11-05-2017	12:10 - 13:15
AUSTENITIC ALLOYS: Ni-BASE ALLOYS Part III	Stephen M. BRIDGMAN	Thu 11-05-2017	13:30 - 15:35
+ Influence of hydrogen on the PWSCC behavior of Alloy TT600	+ Takumi TERACHI		
+ Thermal aging of Alloy 690 between 250 and 350 °C for 10,000 h	+ Hannu HANNUSEN		
+ Stress corrosion cracking in high temperature liquid/vapor environments of 304L/316L/690 for tubing of heavy-water corrosion system in CANDU	+ Guangfu LI		
+ Monte Carlo simulation based on SCC in hydrogenated steam environment for Alloy 600 MA	+ Takashi NAKAMORI		
+ Relationship of H ₂ - H ₂ O (g) to PWSCC: Elucidating "precursor" phenomena for SCC in Alloy 600	+ Grace GURKE		
- Tea break -		Thu 11-05-2017	15:35 - 16:05
AUSTENITIC ALLOYS: Ni-BASE ALLOYS Part IV	Peter ANDRESEN	Thu 11-05-2017	16:05 - 17:20
+ EAC susceptibility of wrought and HP Alloy 625 in PWR primary water	+ David HOBNER		
+ Radiation-enhanced diffusion of Cr in Ni	+ Cecile DUNAMEL		
+ Phase stability, hardening, and stress corrosion cracking in nickel-chromium alloys	+ George HOUAG		
BOARD OF DIRECTORS MEETING Part 2 (Ascot Suite, Carden Park Hotel)	Tsang-Kuang YEH	Thu 11-05-2017	18:00 - 20:00

TUESDAY MAY 12, 2017			
GENERAL PAPERS Part I	Armin RÖTH	Fri 12-05-2017	08:45 - 10:00
+ Highest reliability components – a regulator's perspective	+ Setareh NOLRAZI		
+ Challenge and reward of flat, tapered tensile specimen testing in high-temperature water	+ Marc VANSTRECHT		
+ A simulation of SCC tests to improve model predictions	+ Thierry COUANT		
- Coffee break -		Fri 12-05-2017	10:00 - 10:30
GENERAL PAPERS Part II	Hans-Peter SCHERT	Fri 12-05-2017	10:30 - 11:25
+ Scope of OPCR project and recent progress	+ Tatsuo SHIOE		
+ Development of oxide dispersion strengthened austenitic stainless steels for control rods	+ Yosaku MARUYO		
GENERAL BUSINESS Part I	Tsung-Kuang YEH	Fri 12-05-2017	11:25 - 12:00
Administrative issues (election of new members, financial status, website, etc.)	+ Tsung-Kuang YEH, Larry NELSON, Stefan RITTER		
2018 meeting of the ICG-EAC in Knoxville (USA)	+ Jeremy BUSBY		
Announcements of future EAC related events	+ Tsung-Kuang YEH		
Closure of the meeting	Tsung-Kuang YEH	Fri 12-05-2017	12:00 - 12:10
- Lunch (for those NOT participating in the technical tour) -		Fri 12-05-2017	12:10 - 12:30
Departure to the technical tour (lunch boxes will be available)		Fri 12-05-2017	12:15
Departure of the shuttle bus to Manchester Airport and University		Fri 12-05-2017	13:30
PRESENTATIONS FOR MEETING MINUTES ONLY (without oral summary presentations)			
+ U.S. NRC perspectives on primary water stress corrosion cracking of high-chromium, nickel-based alloys	+ Greg OBERSON		
+ Grain boundary precipitates leading to intergranular SCC initiation of cold-worked Alloy 600 and Alloy 690 in PWR primary water	+ Stephen M. BRUSHNER		