

中子科技應用： 借鏡國際最新發展以超前部署台灣未來情境(上)

黃爾文 副教授

國立交通大學材料系

ewenhuang@nctu.edu.tw

前言

先進光源雖不是阿拉丁神燈，但美國、歐盟、中國、日本、澳洲、韓國、印度、印尼等先進與新興國家，都先後積極投資中子設施的建設與開發。台灣目前並沒有大型的中子研發基地，但透過切合國家發展需要的選題，引入合適的中子設備，與篩選合適積累的方向，將可用上中子這項各國已經導入民生科技的獨特光源，透過跨領域的團隊，超前部署台灣未來情境下，所需要的新明燈。

本文將分享近年國際間中子科學與工程交流的第一手資訊，回顧各國應用中子技術的選題與藍圖，盤點各國挑出中子具代表性的應用方向、領域與類似技術成熟度（Technology Readiness Level, TRL）的預期科技落地時間，對比國家發展委員會於今年 7 月 13 日通過的：因應後疫情、快速變遷國際局勢下的「國家發展計畫(110 至 113 年)」。本文也將檢視科政中心 2019 年發表的「國家百大社會課題」中那些是全民期許、有待科技政策研議，並有機會藉由中子科技的應用，以系統化解決的問題與挑戰。

文末，將依據國家科技發展計畫管考評估機制，所分工的科技行政組織任務，借鏡國際案例，挑選可就我國情境，超前部署的運作機制，期待國內中子新設施投資啟用時，就馬上以這盞獨特的光源，培育好的人才，建立起管考機制，有共識的執行團隊，合力解決預期中，屆時將有燃眉之急，需要跨部會合作的國家挑戰。

一、中子科技解決的工業應用與民生議題

Dr. Jamie Schulz 是澳洲核子科技組織(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)中子設施 Australian Centre for Neutron Scattering 的領導者。去年 11 月間與任職 ANSTO 的 Industrial Liaison Manager 高級研究科學家- Anna Paradowska 博士來台推廣中子技術的應用(如下圖一)。他們對台電、工研院與東台精機舉出：從澳洲國家發展的角度，ANSTO 定位中子應用的新方向為新興工業的研發，以助澳洲擺脫太過倚重礦業出口的產業困境。舉出的例子是應用 ANSTO 的中子科技於澳洲的 Lab22 計畫，這個 Australia's Centre for Additive Innovation 計畫¹，是以高階製造的 3D 列印產業當作推動目標，希望對接澳洲優勢的礦藏，扭轉目前因為太過仰賴出口原材料，以致受限於國際經濟循環的窘境。澳洲科研單位藉由中子非破壞的研究優勢，結合大學與研發單位，選定智慧機械中的新興主題 3D 列印²，以研

¹ <https://www.csiro.au/en/Showcase/Lab22>

² <https://www.ansto.gov.au/news/international-collaboration-on-advanced-manufacturing>

發優化，從原料到製程、再到產品的全套產線 know-how[1]。其他應用的新興領域還包含了超導電纜的研發³與波音公司合作的航太元件開發⁴。



圖一：筆者與同步輻射中子應用小組鍾世俊組長、工業應用小組陳世偉博士於 2019 年 11 月與 ANSTO 的 Jamie Schulz 博士和 Anna Paradowska 博士拜訪(a) 台電綜合研究所、(b)工研院南分院及(c)東台精機以討論中子科學的商業用途。

在推廣的過程中 Anna Paradowska 博士指出，就澳洲而言，中子科技的應用除了前述的新興領域之外，對於澳洲重要的民生議題，像是澳洲國家標誌建設雪梨大橋的防蝕與除垢⁵、與 TWI⁶合作的大型金屬管線焊接課題⁷、電廠使用扇葉危安檢測⁸，還有澳洲交通基礎建設中的鐵軌⁹與飛航安全¹⁰。

二、亞太各國中子設施負責人的觀點

去年底筆者承辦了在第三屆亞洲-泛太平洋洲中子散射會議(AOCNS 2019)之下的 S5. Engineering and Industrial 論壇 (DOI: 10.13140/RG.2.2.33856.35841)，以及第三屆亞太中子工程應用協會 The 3rd Asia-Oceania Network on Neutron Engineering Diffraction (AONET)。

AOCNS 2019 的工業論壇與會者多是中子設施科學家與長期用戶。特別邀到了松山湖材料實驗室首席科學家趙金奎博士¹¹與會，趙博士分享了配合即將運作的東莞散裂中子源所建構

3

<https://www.ansto.gov.au/news/nuclear-techniques-measure-damage-superconducting-cables-for-fusion-energy-research-reactor>

⁴ <https://www.ansto.gov.au/news/neutrons-key-tool-modern-manufacturing-of-aircraft-components>

⁵ <https://www.ansto.gov.au/news/cleaning-sydney-harbour-bridge>

⁶ <https://www.twi-global.com/>

⁷ <https://www.ansto.gov.au/news/more-big-pipes-on-kowari>

⁸ <https://www.ansto.gov.au/news/using-neutrons-to-show-weak-spots-turbines-railway-lines-and-pipes>

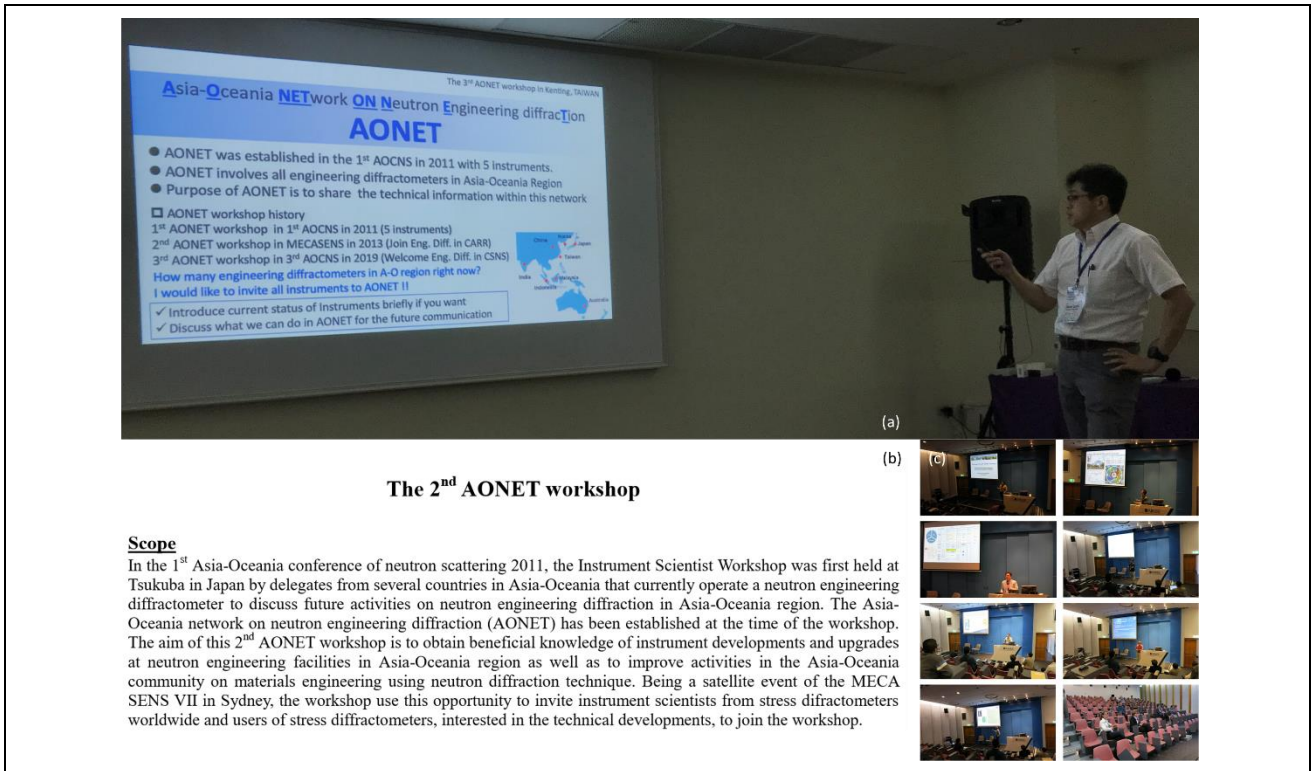
⁹ <https://www.ansto.gov.au/news/an-investigation-of-residual-stresses-insulated-rail-joints>

¹⁰ <https://www.ansto.gov.au/news/research-to-extend-aircraft-fatigue-life>

¹¹ <http://www.sslab.org.cn/jgshow.php?id=251>

的松山湖材料實驗室，其願景與發展方針。

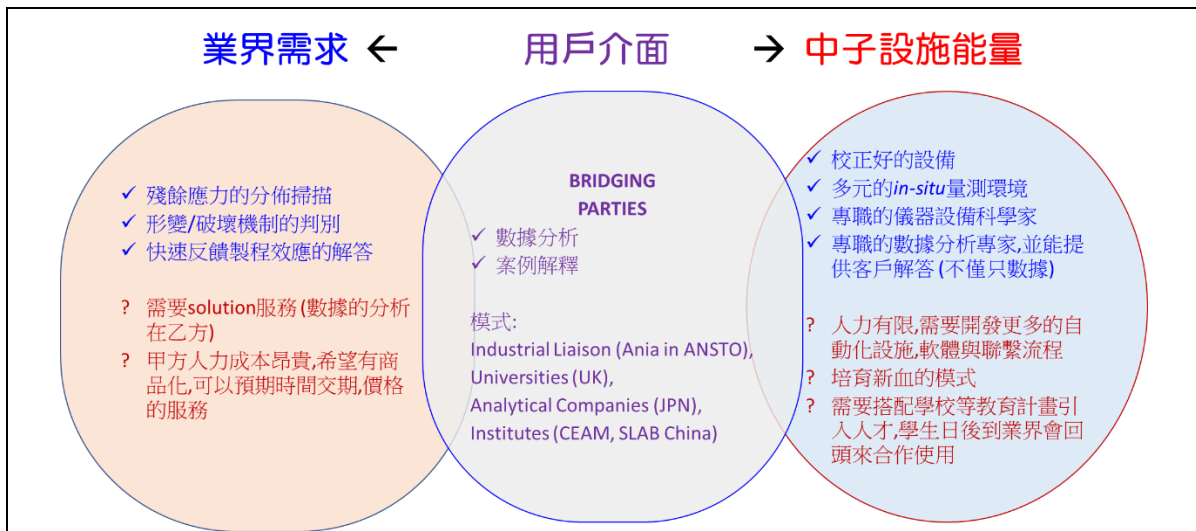
於AOCNS 2019的AONET衛星會議，總計有香港城市大學-應用物理系主任王循理教授、ANSTO Industrial Liaison 的 Anna Paradowska、日本大強度質子加速器設施(Japan Proton Accelerator Research, JPARC)-「TAKUMI 匠」設施科學家 Stefanus Harjo、日本原子力研究開發機構的鈴木裕士、韓國 Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) 的 Wan Chuck WOO 組長、印尼 National Nuclear Energy Agency of Indonesia (BATAN)的 Rifai Muslih 代表、同步輻射工業應用小組的陳世偉博士、廣東以色列理工學院的 Klaus-Dieter Liss 教授、廣東(東莞)材料基因高等理工研究院的張書彥院長、和筆者。



圖二：AONET: (a)鈴木裕士主席回顧自從 2011 起創辦的歷史與發展(b)第二屆在澳洲的會議議題與(c)剪影。

AONET 與會者總結應用中子的方向為: (一)需要教育工業用戶:中子量測不僅只於估算殘餘應力，還可同時解析材料的微結構與纖構，著名的案例為，在第二屆的 AOCNS 大會演講，韓國 High-Flux Advanced Neutron Application Reactor (HANARO)中子設施 Chang-Hee Lee 主任分享 HANARO 幫助韓國大型造船廠與首屈一指的鋼鐵公司，加速應用新焊接技術。(二)各設施間，應該比照同步輻射社群，建立共通互相比對量測精度的標準樣品(Round robin tests with stress designed samples)[2]; (三)因應新興科技建立即時(*in-situ* measurements)量測環境例如材料的機械性能[3-7]、焊接[8,9]與 3D 列印¹²[10-14]; (四)量測技術與資料的應用和管理; (五)數據分析技術的研發與擴散(總結如下圖)。

¹² <https://www.anl.gov/article/new-research-identifies-causes-for-defects-in-3d-printing-and-paves-way-for-better-results>



圖三：修改翻譯自 Stefanus Harjo 博士和 Anna Paradowska 博士在第三屆亞太中子工程應用協會 (AONET) 討論(DOI: 10.13140/RG.2.2.33856.35841)會後，統整的議題焦點。

三、我國百大議題的科技解方-「國家發展計畫(110 至 113 年)」

從財團法人國家實驗研究院，科技政策研究與資訊中心去年七月發表的「我國百大社會課題調查研究」¹³到 2035 年未來社會情境預測¹⁴，我們可以歸納出台灣需求的變與不變。不變的是對於長遠願景的追求:像是薪資成長、環境與災害相關的重要課題，會變動的包含隨著社會事件而反應的積極關注。

引用國發會資訊 如下¹⁵：我國民生經濟，必然受到美中貿易與科技戰等全球重大趨勢的影響，後疫情時代，全球經貿亦將產生新秩序；5G、人工智慧等數位科技，及數位經濟發展的重要性上升；與此同時全球人口因少子、高齡化改變結構；能源低碳轉型及氣候變遷的迫切性提高。科技政策的投資除了面向經濟成長之外，也必須兼顧區域均衡發展及環境永續。

國發會因應的建議為：政府應致力建設綠色經濟，一方面因應氣候變遷風險，降低極端氣候事件的衝擊；另一方面將氣候變化納入決策考量，以實現包容與永續的高品質經濟成長。以下是具體的科技政策：(一)數位創新：政府在 5+2 產業創新之基礎上，六大核心戰略產業為資訊及數位、資安卓越、精準健康、國防及戰略、綠電及再生能源、民生及戰備，讓臺灣在全球供應鏈扮演關鍵角色；並整備產業發展所需之人才、資金、法規、品牌等共通性策略；(二)推動安心關懷，營造全齡照顧的幸福社會，並投資青年以解決青年低薪。希望藉由政策制定與投資引導，發展永續韌性家園。

引用財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心發表「2035 年未來社會情境預測」¹⁶：(一)因為 3D 列印科技與產品等新科技成熟所重塑的供應鏈，將改變未來社會的生活圈；(二)因為數位科技進步、穿戴式、自動駕駛設備擷取並整合所興起的新數位便利生活模式，將改變人們的溝通、行動與決策順位，但同時也會看到更激烈的資安與隱私的價值碰撞；(三)利用技術達到更好的資源效率，例如：農業、食品與更準確監控天氣科技以滿足糧食需求，和利用金

¹³ <https://payment.narlabs.org.tw/stpibooks/book/bookDetail?id=ff8080816c40a572016c4bca51ec6815>

¹⁴ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news?id=633>

¹⁵ https://www.ndc.gov.tw/News_Content.aspx?n=114AAE178CD95D4C&s=15867684BCC9E703

¹⁶ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news?id=633>

融科技創新的社會。

四、即將到來的能源情境

其中與能源相關的科學、技術及創新，可參考科技政策研究與資訊中心發表的「2030 年科學、技術及創新在促進再生能源中扮演的角色」¹⁷、科技發展觀測平台的「2019 能源科技議題年度報告」¹⁸與「2019 年亞太地區之綠能發展趨勢」¹⁹。

根據陳霽整理的「2030 年再生能源分析」：太陽能、風力、生質能、水力與地熱能會是主流；並藉由全新技术的研發、儲能技術的優化以整合上述再生能源。並可以從特斯拉的企業藍圖驗證能源共享可行性，例如整合電動車的儲能優勢，將電動車併入電網，帶動能源系統走向分散式、數位化。也可預期激勵電力儲存技術的快速發展。依據林姿伶研究²⁰指出「亞太地區之能源發展趨勢」為：海上風力發電發展快速、太陽能光電於 2019 年顯著成長、藉由資通訊技術，帶動虛擬電廠發展、智慧型電表基礎建設受到重視、儲能市場快速成長、微電網市場興起，將發展為新興業務模式、亞太地區資料中心需求，推動不斷電系統市場成長。

表一：科技政策研究與資訊中心「能源科技」議題編輯小組 2020 五月發表的主要國家再生能源政策

地區	國家	政策
亞洲	中國	1. 以風能及太陽能為發展主體，增加太陽光電及陸上風力發電的部署 2. 建造輸電線路及電力需求警示系統
	日本	將再生能源供應商拍賣項目的容量門檻由 2MW 降至 500kW
	韓國	1. 透過再生能源配額制度確保發電目標量 2. 特過再生能源憑證鼓勵再生能源商業應用的部署
大洋洲	澳洲	擴大住宅太陽光電市場
北美洲	美國	1. 激勵住宅太陽光電市場 2. 降低風力發電及太陽光電發電投資成本
	加拿大	1. 發展陸域風力及水力發電 2. 增加亞伯達、安大略、魁北克省再生能源部署
歐洲	德國	1. 支持公共事業及分散式能源技術 2. 實施綜合能源法並批准 8GW 的太陽光電及風力發電的安裝
	西班牙	1. 向上修訂再生能源年度拍賣 2. 增加太陽光電及風力發電的安裝
	法國	1. 針對公共事業規模及大型商業系統推動競標制度 2. 鼓勵分散式太陽光電於住宅系統的發展
	荷蘭	1. 提升生質熱能及沼氣發電發展 2. 降低太陽能發電成本並擴大其在電網的容量

資料來源：International Energy Agency (2019), Renewables 2019 Analysis and Forecast to 2024

¹⁷ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/tdop/detail?tdpId=357233>

¹⁸ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/analysis-report?type=D>

¹⁹ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news?id=4b1141006ed19431016ed95bf82b07f4>

²⁰ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news?id=4b1141006ed19431016ed95bf82b07f4>

五、可選擇的中子技術與解題定位

(一)能源議題：循古慧雯分析的「全球太陽能及風力發電技術趨勢」²¹與報導的「燃料電池展望與新興技術趨勢」²²產業科技發展路徑分析，中子對於大型物件的穿透力，可以幫助風機渦輪等關鍵零組件的殘餘應力分析等疲勞壽命的研究[5, 15-21]。對於特殊原子的中子截面積可以有助於偵檢傳統研究設施不易量到的特殊元素[22]，進而應用於儲氫、鋰電池[23-27]、鈉電池、先進觸媒材料技術的研發。

(二)醫療議題：中子可應用於藥物設計與輸送的研發[28,29]。同時，應用 AI 以整合與運用醫療影像，是這次在疫情中大展身手的富士軟片股份有限公司 (Fujifilm ²³) 在 2018 年來訪同步輻射中心時，富士軟片的研發管理總部新成立的資訊學研究室，Hiroyuki Watanabe 博士暨研究員 ²⁴和 Masatoshi Nakanishi 博士交流分享時，所強調的先進光源影像可以貢獻於醫療的重要性。



圖四：2018 年 11 月 Hiroyuki Watanabe 博士暨研究員來訪同步輻射中心，討論先進光源於富士軟片股份有限公司 -AI 與大數據於醫療的應用潛力。

(三)智慧製造中的積層製造-3D 列印與高溫應用環境下的相關研究[30-33]。

(四)針對交通建設中的軌道與橋樑檢修則可參考可攜式中子源：日本 311 大地震後，許多的公共建築面臨該拆除重建或是該補強的兩難。如果需要補強的話，又該用甚麼方法檢測在何處進行強化以達到安全係數？國內專家現有的非破壞檢測技術包含核研所的超聲波檢測等技術。而美日所研發的可攜式中子源或可做為互補。

日本理光研究中心的大竹淑惠博士²⁵，所帶領的中子束技術團隊已經開發出可以架設於軌道上沿著橋梁等公共建築檢測安全性的移動式中子源。相對於拆掉重建或是需要耗費龐大人力物力的破壞性檢測，日本理光的研發概念與實用性已快速地將成品往商用化邁進²⁶。相對於日

²¹ <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news?id=4b11410071e465eb0171e8edf347049e>

²² <https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/focus-news?id=4b114100703be5f7017042f317bd074d>

²³ <https://brand.fujifilm.com/covid19/global/>

²⁴ https://www.researchgate.net/profile/Hiroyuki_Watanabe4

²⁵ http://www.riken.jp/en/research/labs/rap/adv_photon/neutr_beam/

²⁶ http://www.riken.jp/en/pr/topics/2013/20130907_1/

本理光可攜式中子源與檢測系統約需一台卡車的尺寸，美國 Berkeley 實驗室發展出尺寸更小的微型可移動式的中子源²⁷，總長度約 20 公分。

(五)航太造船產業：藉由中子量測航太引擎與機身元件殘餘應力，是相關產業研發的主要工具，著名的例子包含英國曼徹斯特大學 Withers 教授與 Rolls Royce 和空中巴士的研發案例²⁸；運用於船艦工業的中子技術著名的例子是加拿大中子束中心 (Canadian Neutron Beam Centre, NRC-CNRC) 在粉筆河(Chalk River) 的潛艦延壽案例²⁹。而此中子繞射量測的主要對象是焊接後的殘餘應力，因為潛艦運作所在的海洋環境，較能源相關組件所規範的條件更為嚴苛。應用中子對鹽化，腐蝕與壓力對大型焊件所造成影響的方法，足以做為離岸風能、海洋能等系統研究參考。

以下用英國中子研究單位(ISIS)網頁引用空中巴士專家 Richard Burguete 的感想作結語：“使用中子散射進行殘餘應力測量對於研發現有、新穎材料製造和加工技術具有無價的價值”³⁰。

參考資料

1. S. Paul, R. Singh, W. Yan, I. Samajdar, A. Paradowska, K. Thool and M. Reid, Scientific Reports **8** (1), 14726 (2018).
2. P. Scardi, M. Ermrich, A. Fitch, E.-W. Huang, R. Jardin, R. Kuzel, A. Leineweber, A. Mendoza Cuevas, S. Misture and L. Rebuffi, Journal of applied crystallography **51** (3), 831-843 (2018).
3. E.-W. Huang, B. Clausen, Y. Wang, H. Choo, P. K. Liaw, M. L. Benson, L. M. Pike and D. L. Klarstrom, International Journal of Fatigue **29** (9), 1812-1819 (2007).
4. E.-W. Huang, R. I. Barabash, Y. Wang, B. Clausen, L. Li, P. K. Liaw, G. E. Ice, Y. Ren, H. Choo and L. M. Pike, International Journal of Plasticity **24** (8), 1440-1456 (2008).
5. E.-W. Huang, R. I. Barabash, B. Clausen, Y.-L. Liu, J.-J. Kai, G. E. Ice, K. P. Woods and P. K. Liaw, International Journal of Plasticity **26** (8), 1124-1137 (2010).
6. E. W. Huang, K. W. Li, S. Y. Lee, W. C. Woo, Y. S. Ding, L. W. Tsay and C. H. Chen, Materials Science Forum **706**, 1685-1689 (2012)
7. E. W. Huang, C. K. Chang, P. Liaw and T. R. Swei, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (2016).
8. W. Woo, H. Choo, D. W. Brown, P. K. Liaw and Z. Feng, Scripta Materialia **54** (11), 1859-1864 (2006).
9. W. Woo, H. Choo, M. B. Prime, Z. Feng and B. Clausen, Acta Materialia **56** (8), 1701-1711 (2008).
10. R. Cunningham, C. Zhao, N. Parab, C. Kantzos, J. Pauza, K. Fezzaa, T. Sun and A. D. Rollett, Science **363** (6429), 849-852 (2019).
11. S. M. H. Hojjatzadeh, N. D. Parab, W. Yan, Q. Guo, L. Xiong, C. Zhao, M. Qu, L. I. Escano, X.

²⁷ <http://ipo.lbl.gov/lbnl1764/>

²⁸ <http://www.manchester.ac.uk/research/impact/case-studies/aircraft-fan-blades/>

²⁹ http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/achievements/highlights/2009/neutron_scattering.html

³⁰ <http://www.stfc.ac.uk/research/nuclear-physics/neutrons/neutrons-industry/#one>

- Xiao, K. Fezzaa, W. Everhart, T. Sun and L. Chen, *Nature Communications* **10** (1), 3088 (2019).
12. J.-C. Tseng, W.-C. Huang, W. Chang, A. Jeromin, T. F. Keller, J. Shen, A. C. Chuang, C.-C. Wang, B.-H. Lin, L. Amalia, N.-T. Tsou, S.-J. Shih and E. W. Huang, *Additive Manufacturing* **35**, 101322 (2020).
13. P.-I. Tsai, T.-N. Lam, M.-H. Wu, K.-Y. Tseng, Y.-W. Chang, J.-S. Sun, Y.-Y. Li, M.-H. Lee, S.-Y. Chen, C.-K. Chang, C.-J. Su, C.-H. Lin, C.-Y. Chiang, C.-S. Ku, N.-T. Tsou, S.-J. Shih, C.-C. Wang and E. W. Huang, *Materials Chemistry and Physics* **230**, 83-92 (2019).
14. E. W. Huang, S. Y. Lee, J. Jain, Y. Tong, K. An, N.-T. Tsou, T.-N. Lam, D. Yu, H. Chae, S.-W. Chen, S.-M. Chen and H.-S. Chou, *Intermetallics* **109**, 60-67 (2019).
15. E. W. Huang, R. I. Barabash, Y. Wang, B. Clausen, L. Li, P. K. Liaw, G. E. Ice, Y. Ren, H. Choo, L. M. Pike and D. L. Klarstrom, *International Journal of Plasticity* **24** (8), 1440-1456 (2008).
16. E.-W. Huang, B. Clausen, Y. Wang, H. Choo, P. K. Liaw, M. L. Benson, L. M. Pike and D. L. Klarstrom, *International journal of fatigue* **29** (9-11), 1812-1819 (2007).
17. E.-W. Huang, R. I. Barabash, G. E. Ice, W. Liu, Y.-L. Liu, J.-J. Kai and P. K. Liaw, *Jom* **61** (12), 53 (2009).
18. E.-W. Huang, R. I. Barabash, B. Clausen and P. K. Liaw, *Metallurgical and Materials Transactions A* **43** (5), 1454-1461 (2012).
19. E.-W. Huang, S. Y. Lee, W. Woo and K.-W. Lee, *Metallurgical and Materials Transactions A* **43** (8), 2785-2791 (2012).
20. E. W. Huang, C. K. Chang, P. Liaw and T. R. Swei, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* **39** (6), 675-685 (2016).
21. S. Seo, E.-W. Huang, W. Woo and S. Y. Lee, *International journal of fatigue* **104**, 408-415 (2017).
22. A. J. Edwards, R. S. Dhayal, P.-K. Liao, J.-H. Liao, M.-H. Chiang, R. O. Piltz, S. Kahlal, J.-Y. Saillard and C. W. Liu, *Angewandte Chemie* **126** (28), 7342-7346 (2014).
23. W. K. Pang, N. Sharma, V. K. Peterson, J.-J. Shiu and S.-h. Wu, *Journal of Power Sources* **246**, 464-472 (2014).
24. W. K. Pang, V. K. Peterson, N. Sharma, J.-J. Shiu and S.-h. Wu, *Chemistry of Materials* **26** (7), 2318-2326 (2014).
25. I. Bobrikov, A. Balagurov, C.-W. Hu, C.-H. Lee, T.-Y. Chen, S. Deleg and D. Balagurov, *Journal of Power Sources* **258**, 356-364 (2014).
26. C.-W. Hu, T.-Y. Chen, K.-S. Shih, P.-J. Wu, H.-C. Su, C.-Y. Chiang, A.-F. Huang, H.-W. Hsieh, C.-C. Chang and B.-Y. Shew, *Journal of Power Sources* **270**, 449-456 (2014).
27. C.-W. Hu, N. Sharma, C.-Y. Chiang, H.-C. Su, V. K. Peterson, H.-W. Hsieh, Y.-F. Lin, W.-C. Chou, B.-Y. Shew and C.-H. Lee, *Journal of Power Sources* **244**, 158-163 (2013).
28. C.-Y. Liu, X. Li, W.-Y. Chen, L.-C. Chang, Y.-F. Chen, H.-L. Chen, Y.-S. Sun, H.-Y. Lai and E. W. Huang, *Langmuir* **30** (38), 11421-11427 (2014).
29. Y. Liu, C.-Y. Chen, H.-L. Chen, K. Hong, C.-Y. Shew, X. Li, L. Liu, Y. B. Melnichenko, G. S.

- Smith, K. W. Herwig, L. Porcar and W.-R. Chen, *The Journal of Physical Chemistry Letters* **1** (13), 2020-2024 (2010).
30. E.-W. Huang, D. Yu, J.-W. Yeh, C. Lee, K. An and S.-Y. Tu, *Scripta Materialia* **101**, 32-35 (2015).
31. W. Woo, E.-W. Huang, J.-W. Yeh, H. Choo, C. Lee and S.-Y. Tu, *Intermetallics* **62**, 1-6 (2015).
32. E.-W. Huang, H.-S. Chou, K. Tu, W.-S. Hung, T.-N. Lam, C.-W. Tsai, C.-Y. Chiang, B.-H. Lin, A.-C. Yeh and S.-H. Chang, *Scientific reports* **9** (1), 1-10 (2019).
33. E.-W. Huang and P. K. Liaw, *MRS Bulletin* **44** (11), 847-853 (2019).
34. K. Kaufmann, C. Zhu, A. S. Rosengarten, D. Maryanovsky, T. J. Harrington, E. Marin and K. S. Vecchio, *Science* **367** (6477), 564-568 (2020).
35. A. Maiti, A. Venkat, G. D. Kosiba, W. L. Shaw, J. D. Sain, R. K. Lindsey, C. D. Grant, P. T. Bremer, A. G. Gyulassy, V. Pascucci and R. H. Gee, *Computational Materials Science* **182**, 109782 (2020).
36. V. C. Gudla, M. Storm, B. C. Palmer, J. J. Lewandowski, P. J. Withers, N. J. H. Holroyd and T. L. Burnett, *Corrosion Science* **174**, 108834 (2020).
37. S. J. Borland, J. Behnsen, N. Ashton, S. E. Francis, K. Brennan, M. J. Sherratt, P. J. Withers and A. E. Canfield, *International Journal of Molecular Sciences* **21** (12), 4538 (2020).
38. P. Gajjar, I. D. Styliari, T. T. H. Nguyen, J. Carr, X. Chen, J. A. Elliott, R. B. Hammond, T. L. Burnett, K. Roberts, P. J. Withers and D. Murnane, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* **151**, 32-44 (2020).
39. R. M. Sencu, Z. Yang, Y. C. Wang, P. J. Withers and C. Soutis, *Composites Science and Technology* **198**, 108243 (2020).
40. T. D. Turner, P. Gajjar, I. S. Fragkopoulos, J. Carr, T. T. H. Nguyen, D. Hooper, F. Clarke, N. Dawson, P. J. Withers and K. J. Roberts, *Crystal Growth & Design* **20** (7), 4252-4263 (2020).