

出國報告（出國類別：開會）

參加國際礦山水學會年會

服務機關：經濟部礦務局

姓名職稱：周國棟副局長、李正鴻科長

派赴國家地區：紐西蘭

出國期間：111年11月6日~11月16日

報告日期：112年2月13日

摘要

- IMWA 於 1979 年在西班牙安達盧西亞自治區之格拉納達成立，當時採礦業與水有關的問題日益嚴重。當時，該協會的主要關注點是採礦用水的安全問題。多年來，焦點轉向了更多的環境問題。自成立以來，IMWA 旨在促進研究人員、礦山經營者、顧問和學生之間的聯繫。該學會自成立以來每三年組織一次大會，並在其間的幾年中舉行專題研討會。IMWA 所有這些會議，均由會議地點當地主辦方籌辦。前次(第 14 次)大會原定 2020 年規劃於紐西蘭 Christchurch 舉行，適因當時新冠病毒疫情正值嚴峻之際而因此延後，另於 2021 年英國威爾斯 Cardiff 舉行(因新冠病毒疫情改為線上會議)。嗣經紐國宣布新冠疫情解封後，IMWA 決定重返該地舉行研討會，紐國籌辦方為延續先前規劃，爰以 RECONNECT 為標題，號召會員以及產學研界人士參與該項年度盛會。
- 觀察本次年度研討會據會方表示有來自 18 國之專家學者參與，惟迄會議結束前，仍有部分報名單位/人士未能與會，參與情形難稱踴躍，另規劃礦山酸水處理排放案例之參訪行程，也因此稍受影響。儘管如此，本屆會議仍依原定期程進行，會議主題仍延續以往礦山水規劃處理以及酸性水處理排放主軸，介紹相關較新之研究發表，大會於會後另安排前往紐國具代表性之礦業開發要地 - 南島西岸之 Reefton 礦鎮及 Stockton 高地

Denniston高地進行參訪，惜因紐國西岸多雨氣候影響，該區域之地形雨及濃霧，對於參訪行程造成不便，並且若干可供收錄之細節於濃霧與降雨中猶如陷入五里霧中，增添風險也不易資料收集，屬美中不足之處。所幸行程尾聲天氣逐漸放晴，團員也能於較佳路況下，平安返回東岸，雖難謂臻於完善，為本屆會議畫下句點。

目次

| | |
|-----------------|----|
| • 摘要..... | 1 |
| • 目次..... | 3 |
| • 壹、緣起..... | 4 |
| • 貳、會議經過..... | 5 |
| • 參、會議研討內容..... | 6 |
| • 肆、心得及建議..... | 23 |

壹、緣起

國際礦山水學會訂於2022年 11 月 7 日至 13日在紐西蘭基督城舉行的國際礦山水學會2022年會(IMWA 2022 CONFERENCE)。會議主題包括廣泛的水管理，議程含水處理技術研發、廢石與尾礦處理、地表水與地下水監測、礦山關礦與地球化學等。眾所周知，紐西蘭得天獨厚，享有獨特地理環境、秀麗山川以及自然環境，因此必須在各種迥異自然條件、敏感環境與利益相關者關注下，開發營運。在過去30餘年，紐西蘭降雨量範圍從乾到濕（降雨量為6米/年），氣候從亞熱帶到季節性低於冰點。在過去的 3 年裡，該國礦產部門的環境績效一直受到積極且嚴格的制度監管。這些嚴格的法規和多樣化的自然條件使紐西蘭的礦業能夠開發創新多面向的地表和地下礦山水管理方法。有鑑於紐澳地區礦業開發之技術與標準向來為世界領先地區，藉由參與IMWA2022大會，可瞭解紐國礦業開發現況、監管制度及環境保護實務與措施，並透過會議中環境影響監管相關議題之討論及交流，獲取相關技術與專業知識之最新發展，將有助於蒐集礦業資源開發所面臨之環境保護課題參考資訊。本次大會主題為礦山尾礦及酸水排放處理，包括與礦物開發有關之環境、監管及技術等方面，探討礦物資源開發後之環境監控與最小化對環境影響。參加本次大會之目的，除可瞭解國際礦山廢水處理發展概況及對自然環境系統之影響外，並可借鏡國際如何創新科技及其永續發展政策經驗，作為施政參考。

貳、會議經過

本次會議首先分別由IMWA及紐西蘭Verum集團代表致歡迎詞後，開始各項議題之探討。本屆會議議題主要包含採礦遺址、尾礦和坑湖、氣候變遷、水文地質、地球化學、關礦與方法和監測等面向之相關研究情形，由參與之各國產學研專家學者進行報告探討分享。大會並安排11/11~11/13前往紐國具代表性之礦業開發要地 - 南島西岸之Reefton地區之金礦及Stockton高地煤礦進行參訪；並簡單導覽Denniston高地之煤礦歷史遺址殘留之老舊設施。

參、會議研討內容

一、礦場遺址

英國 Swansea 大學地理系 Aaron Martin Lawrence Todd 簡報以追蹤劑注入和天氣採樣以及鹽稀釋流來測量英國溫帶流域的金屬通量，說明 Nantymwyn 鉛礦有大量的地下礦井、地表礦山廢料堆、倒塌的坑道和兩條穿過礦井和廢料的溪流。它是英國威爾斯地區 1,300 多個廢棄金屬礦之一，導致溪流以及礦區附近的動植物中的鉛和鋅含量升高。該研究使用了兩種測量污染物通量的方法：恆定流量下的恆定速率注入和天氣採樣，以及一年中的每月流量測量和採樣。這些顯示了地表和地下污染物的輸入、衰減和流量的時間變化以及源區污染的比例。

比利時皇家自然科學研究所之 Xavier Devleeschouwer 簡報說明，使用 PS-InSAR 時間序列觀察舊煤礦和深煤礦（瓦隆，比利時）上方三個十年（1992-2022）的地面變形。比利時瓦隆區的煤礦開採直到 1984 年才逐漸停止。地下水抽水活動停止，導致地下水逐漸回彈，但今天通過雷達干涉測量法仍然可見，不同地區，影響率不同，為了減輕採礦後時期對環境的威脅，需要監測這些採礦區附近的洪水和爆發風險、地表變形以及土木工程基礎設施的穩定性。持續散射雷達干涉測量技術揭示了拉盧維耶爾市（瓦隆區）南部用於天然氣開採和儲存的兩個地下水庫（西邊的佩羅內斯和東邊的安德盧斯）上方三十年間的地面位移。使用 ESA 衛星（ERS1/2、ENVISAT 和 Sentinel-1A）獲取的圖像生成了 236 張干涉圖。地表位移趨勢在時間和空間上都是異質的，具有不同的行為。ERS1/2（1992-2002）期間，西部 Peronnes 水庫可見抬升，東部 Anderlues 水庫仍受沉降影響。ENVISAT 期間（2003-2010），Peronnes 水庫抬升條件較強，僅右上角仍受沉降影響，而 Anderlues 水庫仍為普遍沉降現象。來自 Sentinel-1A 的最新數據顯示通過 Peronnes 水庫普遍隆起衛星視線方

向沉降速度向北和向南降低。Anderlues 水庫仍然受到沉降現象的影響，但與前幾十年相比，LOS 速度值有所降低。

美國顧問機構 Geomega 之 Andy Davis 簡報在百年老進行確定地下水基線之水化學，藉由快速滲透盆地 (RIBs) 之方式，美國內華達金礦可將礦山抽水返回地下，是一種環境和經濟上首選的重新滲透礦山抽水的方法。研究總結了 20 年來滲透到內華達州 RIBs 綠松石嶺的礦山抽水之水化學分析，並與地下水記錄進行了比較。每季對所有監測井(MW)的水位和內華達州環保部門(NDEP) 配置文件進行監測，這些分析物的趨勢表明，在綠松石嶺超過 22 年的滲透過程中，監測井都沒有受到不利影響。研究分析結果獲得監管機構同意，免除適用地下水標準，並且可以將濃度高達 45 $\mu\text{g/L}$ 的抽水水輸送到 RIB。

二、尾礦和坑湖

加拿大亞伯塔大學 Alsu Kuznetsova 簡報「通過油砂尾礦中的氧化還原過程抑制甲烷生成」，指出從亞伯塔省的油砂礦石中提取瀝青已產生超過 13 億立方米的尾礦、細粉砂和粘土、殘留瀝青和稀釋碳氫化合物的漿液，沉積在池塘中。甲烷排放是與尾礦相關的環境問題之一。碳氫化合物在厭氧微生物代謝過程中產生的甲烷從回收尾礦的尾礦壩和坑湖排放。該團隊研究了替代氧化還原條件下的碳氫化合物生物降解以抑制產生甲烷。研究結果顯示，在鐵和硫酸鹽還原條件下，本地微生物有可能生物降解尾礦中的碳氫化合物，轉變為二氧化碳。

紐西蘭 Verum 集團 James Pope 簡報「Waihi 礦山尾礦儲存、管理和監測的地球化學——35 年的最佳營運實踐」，該報告中講述，不造成下游影響的尾礦管理仍然是全球礦業部門獲得社會營運許可(Social license to operate, SLO)的關鍵因素之一。由 Oceana Gold 營運的現代 Waihi 礦山

於 1980 年代投入使用，採用了當時最佳的尾礦儲存方法，並根據紐西蘭資源管理法制定了監測計劃。Waihi 礦山使用地球化學和岩土工程分類材料建造尾礦儲存設施，並從每月收集尾礦樣本、大壩上層清水、長期尾礦浸出柱、大壩施工區檢查樣品等樣本進行地球化學分析；另從大約 50 個地點定期收集水、從近 100 個監測和控制井中定期採集地下水樣本、尾礦儲存設施(TSF)營運績效的定期部門間會議。營運團隊運用大約 30 年來收集的大量連續數據集來解釋尾礦和 TSF 的地球化學。收集這些數據可以為管理和資訊提供確定性，從而維護社會營運許可(SLO)。該數據集還使操作員能夠預測現場未來的水化學，並規劃未來的水管理要求。

秘魯顧問機構 Amphos 21 Consulting Peru 之 Eduardo Ruiz 簡報「尾礦貯存設施抽水：設計和運行的關鍵方面」，提及當前原材料價格上漲的背景下，廢棄物的增值和再加工，例如越來越多礦石品位顯著的尾礦，正在成為採礦作業中的選擇。老舊尾礦往往基礎設施主體缺乏防水，因此，在開採時，必須設計排水方案以確保安全作業。尾礦抽水也是預防和控制 TSF 物理穩定性的一種作法，因為它通過降低孔隙壓力提高了安全係數，特別是在有地震風險和/或液化等過程的地區，可以發揮重要作用。該作法另一個潛在的益處，是可因應氣候條件乾旱或水平衡不足的採礦作業中的水資源需求。該報告述及目前在秘魯中部安第斯山脈東科迪勒拉的聖拉斐爾(San Rafael)礦山中所需的抽水系統的設計、工程和施工過程方面，屬於世界上最大的應用案例。報告介紹 3 年期間實施績效和監測期間的關鍵活動，以及該系統維護策略或獲取可靠的水文地質資訊以及數值工具支持等因素，對於確保採礦進度尤為重要。

三、氣候變遷

澳洲必和必拓公司之 Tim Saxby 簡報「中部地區水資源恢復力項目—在不斷變化的氣候中維持生產」，說明必和必拓-三菱聯盟 (BMA) 位於澳洲昆士蘭州的中部地區冶金煤礦將受採礦影響的水體 (MAW) 儲存在蓄水壩和廢棄礦坑中。當超過可用的本地儲存量時，MAW 通過中部地區管道泵送並儲存在薩拉吉南礦。由於供水短缺，乾燥的氣候對生產構成重大風險。在礦山水平衡建模和基礎設施設計之間應用迭代分析，分析了一系列備選方案，以確定解決年度間氣候變化的首選解決方案。氣候變化影響也被視為評估的一部分。

美國 SRK Consulting Inc.之 David Pieter Hoekstra 簡報「結合隨機每日氣候、氣候變化和聖嬰—反聖嬰效應的水流模型的開發」，提及整合礦山水管理 (MWM) 對於選擇礦山戰略和管理至關重要。MWM 工具模擬預測未來氣候的不確定性，並對水文過程的響應進行建模。該顧問機構為座落於安第斯山脈高處的銅金斑岩礦開發了一種工具，將隨機日降水量、積雪、徑流和溫度（包括氣候變化和聖嬰—反聖嬰效應的校正）納入到單一模型。該記錄驅動了一個數值水文、集總流域參數徑流模型，該模型根據區域和當地流量計記錄進行校準，以在模擬氣候條件下產生流量。

德國勞西斯與中德礦業管理公司 (LMBV) Oliver Totsche 簡報「考慮到氣候變化和褐煤開採結束，恢復 Lusatian 水平衡」，說明 Lusatia 水平衡的恢復主要包括補充地下水短缺、創建安全的採礦湖泊、將其與公共供水系統連接以及提高水質。到目前為止，在很大程度上允許作業中採礦和復原工作的並存，並維持按需排放到接收水域的情況，方法是用開採中礦山抽水產生的剩餘水補償復原區的缺水。未來隨著燃煤發電的結束，目前以大量礦山排水為主的施普雷河流量將逐漸減少

。為了滿足包括該公司和當前開採中的採礦作業在內的所有用水戶的需求，迫切需要開發更多的水資源並增加現有的儲存容量。已有來自德國薩克森州、勃蘭登堡州和柏林州以及公共資助的該公司和私營礦業公司的成員組成的工作小組，正在共同努力尋找即將到來的水資源短缺問題的解決方法。

澳洲必和必拓公司(BHP)之 James 簡報「必和必拓昆士蘭礦山水規劃和水文設計中的氣候變化適應」，說明在資源行業的水文設計中很少有人關注氣候變遷方面的考量。作為一家領先的資源公司，必和必拓制定了一項企業戰略，即建立水資源適應氣候變化的能力，以實現長期的業務成功。本研究介紹了一套為昆士蘭必和必拓開發的實用程序，為從業者提供有關如何將氣候預測納入關鍵水文應用的指導。開發的方法還為氣候數據的選擇、處理以及如何將氣候變遷的影響納入水文設計、水資源管理和決策制定提供了一般指導。

四、水文地質

澳洲迪肯大學之 Devmi Kurukulasuriya 報告「礦山水中的不同年代追蹤劑不一致結果的難題」，對礦山水樣本的多個追蹤劑數據的解釋可能具有挑戰性，因為它包含具有年代分佈的水分子。從澳洲新南威爾斯州的一個煤礦收集的地下水和地表水樣本進行了不同年代之追蹤劑分析。單一分散模型用於每個追蹤劑，並且在新舊追蹤劑平均停留時間 (MRT) 之間存在相當大的差異的情況下，使用二元混合模型。新型追蹤劑氫 (3H) 和舊型追蹤劑碳 (14C) 的存在，表明樣品中每種水分子存在均有相當比例。

比利時地質調查局 Xavier Devleeschouwer 簡報「使用 PS-InSAR 和測壓井時間序列分析比利時瓦隆區 Saint-Vaast 附近廢棄煤炭特許經營區中

與舊排水渠相關的地面變形」，指出持久性散射體雷達干涉測量技術揭示了自 1992 年以來比利時瓦隆區聖瓦斯特（Saint-Vaast）的地面位移，那裡的舊排水渠允許礦山水排放到海恩河。據我們所知，Saint-Vaast 地區已經受到至少兩次影響，一次是排水渠堵塞破裂。該事件在地表引起了位移。將 PS-InSAR 結果與已安裝測壓井的觀測相結合，用於比較 2018 年第二次爆發事件之前、期間和之後在地表觀察到的地下水位演變和地面變形。

澳洲 Chris Kidd and Associates Christopher Kidd 報告「Waihi 地區礦山的抽水經驗 - 從 140 年的淺成熟液脈系統開採中吸取的教訓」，提及紐西蘭北島豪拉基區懷希鎮的瑪莎金礦經歷了兩個採礦和抽水活動時期——歷史上的 1880-1951 年和近代的 1988 年至今。懷希(Waihi) 號稱是紐西蘭的「黃金中心」(Heart Of Gold)，開採金礦已有百年以上的歷史。該礦山目前由 OceanaGold 所有，位於懷希鎮中心，周圍環繞著園藝區。近代採礦時期社區對抽水和監管之關注，主要是建築區下沉降的影響、露天礦坑周圍的邊坡穩定性、土地的傳統所有者或 Iwi (毛利語之「部落」) 特別關注農業用水井的損失、抽水排放對接收水體的影響以及對地表水體的影響。從 Waihi 礦山的抽水中吸取的教訓，對於在其他礦山地區，特別是第三紀和更年輕的火山環境中類似的淺成熟液脈金系統中規劃抽水計劃，可提供寶貴的見解。多級壓力計網路對抽水、探勘鑽探和採礦活動等之密集響應監測，為水文地質瞭解以及概念水文地質模型製定與修改等作業提供了有用的數據。另報告也述及地下水專家與採礦、岩土、環境和探勘部門之間密切工作關係的重要性，以優化有用的地下水相關數據的收集，從而降低地下水調查成本。

五、地球化學

澳洲礦山廢料管理公司(MWM)之 Leo Navarro 進行「Globe Progress Lake - 關閉效能監控和適應性管理」簡報時說明，OceanaGold (NZ) Corporation (OGC) 於 2015 年 9 月停止從 Reefton 黃金項目 (RGP) 的 Globe Pit 開採礦石。該礦坑被允許自然淹沒，現在是該場地關閉後的重要沉積物管理結構。早期坑湖水質監測發現高砷濃度（高達 6 g/m^3 ）對關閉目標構成風險。這種風險在降雨期間被認為是最大的，當時高流量和排放坑湖的砷負荷量可能超過下游處理能力。OGC 對 Globe Pit Lake 採用了適應性管理方法。該方法涉及對坑湖數據的廣泛監測（主要是按月坑湖體積測量和通過水體的水化學採樣），以跟蹤砷負荷量隨時間的累積並預測坑湖溢流時的砷濃度。制定了一系列管理方案，以涵蓋樂觀（不進行處理和排放符合規定）到保守（通過現有水處理廠進行砷處理）的情景。

隨著時間的推移，對儲存在坑湖水體中的砷總量進行了追蹤，以作為觸發適應性管理的關鍵指標。儲存在上層、溫躍層和下層中的砷被分別量化。在前三年，平均每日砷積累率從 $\sim 5 \text{ kg/d}$ 下降到 $\sim 0.38 \text{ kg/d}$ 。到第三年年底，坑湖在溢出時水體中的砷總量約為 3,000 公斤。該選項涉及將氯化鐵直接添加到鹼性坑湖中，以通過與氫氧化鐵的吸附/共沉澱從水體中去除砷。OGC 已於 2018 年 8 月和 2019 年 7 月進行了兩次礦坑內加鐵活動，添加了相當於 13,000 公斤溶解鐵。水體中的溶解砷已從約 2,600 公斤減少到約 450 公斤，遠低於可以考慮直接排放到 Devils Creek 的約 840 公斤砷負荷量目標。礦坑內的鐵含量使 OGC 可以開始將礦坑湖水排放到 Devils Creek，無需進一步處理。正在進行的坑湖監測表明，鐵含量已有效地隔離了坑湖沉積物中的砷。

六、礦山關閉

紐西蘭 Manaaki-Whenua Jo Cavanagh 報告「紐西蘭礦山環境生命週期指南系列」說明，通過幾個研究機構和主要礦業合作夥伴（包括礦業公司、地區委員會、保育部和毛利部落）之間的合作研究計劃，開發了一系列礦山環境生命週期指南，以協助礦山開發的規劃和營運過程，以最大限度地減少對環境的影響。報告中概述了針對酸性和非酸性煤、中溫熱液金和淺成熱液金開發的礦山環境生命週期指南。這些指南強調確保適當確定採礦後成果的重要性，並著重於以最具成本效益的方式實現這些成果。這些指南確定了礦山生命週期不同階段（營運前、營運、關閉和關閉後）所需資訊的性質和類型，以及如何使用這些資訊來協助礦山營運決策以降低成本-有效地實現商定的開採後成果。該指南參考了岩石地球化學、水生化學、淡水生態學、水生毒性、採礦管理、處理和恢復技術方面的研究，以及將經濟和文化價值納入決策過程的研究。處於當前礦山許可制度的背景下，環境資訊包括土地准入安排、在紐西蘭經營，以及主要環境立法《資源管理法》要求的資源許可。這些指南可提供礦業公司和監管機構使用，成為決策過程之參考資訊。

紐西蘭 Bathurst Resources Ltd. Eden Sinclair 報告「管理遺留酸性水以實現成功關閉礦山」，Bathurst Coal Limited 擁有並經營位於紐西蘭坎特伯雷區的坎特伯雷煤礦。該礦於 2013 年購買，在收購過程中發現存在與酸性水相關的遺留問題。在現場開始營運活動後，在 Bathurst 的指導下，來解決遺留酸性水以及未來的潛在問題。這包括分階段響應以表徵和安排材料、評估酸性水風險並實施適當的工程控制（預防最小化、控制和處理）以解決這些風險。這導致酸性水效應顯著降低，包括 pH 值的改善和場地酸負荷的降低。當市場和社會許可問題導致決定在 2021 年初關閉該礦山時，該礦山已準備好過渡到關閉礦山。該報告涵蓋了礦山營運期間為解決遺留酸性水問題並最大程度地減少與正在進行的營

運活動相關的酸性水影響而採取的步驟，以便制定可靠的最佳可行的礦山關閉計劃，從而確保良好的長期環境成果，同時最大限度地減少主動管理要求。

七、水處理

英國 Swansea University 地理系 Stuart Cairns 簡報「通過木灰改性生物炭去除酸性礦水中的金屬」，廢棄銅礦 Parys Mountain 有大面積未固結的礦山廢料、污水瀉湖和大量地下礦井。它每年向愛爾蘭海排放 34 噸金屬。木灰改性生物炭有可能用於修復酸性水排放。這項研究表明，生物炭可以固定來自 Parys Mountain 酸性水的相關金屬（鋅和銅）。鋅的最大測量固定化為 4.1 ± 0.4 mg/g，銅的最大固定化為 4.1 ± 0.0 mg/g，去除百分比高達 100%。固定化機制是沉澱和生物炭捕獲、離子交換和共沉澱。

紐西蘭 BT 礦業公司 Jodi Murray 報告「斯托克頓煤礦－酸性水污泥的管理」，提及酸性水排放處理的關鍵方面之一是管理整個中和過程中產生的沉積物和金屬沉澱物（污泥）。通常，這些污泥被收集在蓄水池中。使用經過加工的石灰石產品（例如氧化鈣 (CaO)）會產生密度非常低且體積龐大的污泥，需要大量儲存空間。斯托克頓礦 Mangatini 集水區內需要處理的大量酸負荷（每年高達 10,000 噸）需要大型保留結構。Mangatini 集水設施於 2009 年為此目的投入使用。鑑於污泥管理將成為一項持續的要求，因此決定研究污泥清除方法，以提供一個連續和可持續的系統，而不是每隔幾年進行一次大範圍清理。

在晴朗的天氣裡，污泥被泵送到濾床、織物袋中。持續的降雨和高水位可為數量受控的低密度污泥提供了從集水設施直接排放到原始溪流中的機會。當污水池水位較低時，可以用挖掘機和卡車清除較粗的污泥。需

要多種方法來管理 Mangatini 集水設施中的污泥堆積並保持乾淨的水面及與設施之運轉餘裕。連續清除系統而不是每隔幾年進行一次大範圍清理，使清除的污泥得到管理，對環境和採礦作業的影響可以忽略不計。對於斯托克頓礦，這些污泥管理方法已證明是實用且可持續的解決方案，也可用於其他場地。

南非地球科學委員會 Sisanda Prudence Gcasamba 報告「使用廢混凝土現地處理水淹地下礦井的礦山水：可行性研究」說明，在現地處理礦山水中使用建築和拆除廢棄物的研究結果。南非是一個以建築業為發展核心的發展中國家。該行業每年產生大約 5~8 百萬噸建築和拆除廢棄物，其中之一是廢混凝土。大部分廢棄物被填埋，其中一些在同一行業中重新利用。事後看來，由於泵送和中和材料的高成本，SA 還面臨著高昂的 MIW 處理成本。為了解決這些問題，在實驗室規模上對 WC 漿料進行了現地處理 MIW 的評估，以提供一種替代目前在 SA 中使用的典型技術的方法。該研究的實驗室結果表明，與傳統使用石灰和石灰石相比，WC 可能是 MIW 處理的替代選擇。使用廢混凝土將是一種很好的廢棄物再利用形式，也是南非管理 MIW 的一種具有成本效益的方法。

八、礦山水處理與監測

英國卡迪夫大學工程學院 Daniel Arulraj Abraham 簡報「使用陽離子結合樹脂和現場便攜式 XRF 檢測和測量礦山水中溶解的金屬」，展示的工作表明，薄膜擴散梯度和使用陽離子結合樹脂的類似被動採樣技術可以與便攜式 X 射線螢光有效結合，以可靠地檢測和監測礦山水中溶解的金屬種類。在這項研究中，Chelex 樹脂用於通過離子交換機制從合成礦泉水和真實礦泉水中捕獲金屬。在暴露於含有低 ppb 金屬的溶液

後，在樹脂上檢測到金屬離子，該方法對快速可靠地檢測受礦山影響的水體中的金屬具有很大的前景。

澳洲 Deswik 公司 Ainsley Camille Ferrier 報告「將水管理納入礦山營運規劃」，介紹水資源管理是任何採礦作業的重要組成部分。適當的水管理計劃通常是決定項目是否獲得監管機構批准和利益相關者接受的主要問題之一。大多數礦業經營者會在礦山生命週期的努力完成批准和規劃，將水資源規劃納入總體礦山計劃，但卻忽視在營運空間中貫徹這些計劃，以致於現場水管理只能在關閉計劃期間或降雨事件或事故後認真重新考慮。通過使用 Deswik.Enviro Water 工具，普通礦山規劃人員現在可以將集水區分析和進階水結構設計與規劃，納入標準的策略和礦山營運規劃流程。使用軟件來幫助簡化和自動化流程，以分析礦山計劃變更對集水區的潛在影響，例如使用修正版通用土壤流失公式(RUSLE)計算特定集水區的沉積物損失，使規劃人員能夠識別風險，並在它們發生之前糾正與水有關的問題。通過將集水區分析納入短期礦山計劃，可以運行情景來確定替代水管理結構的優點以及它們可能對特定規劃地形上的水流產生的影響。這應確保優化的採礦計劃考慮相關的集水區和流量。

美國 Adrian Brown Consultants, Inc. 之 Adrian Brown 報告「用於酸性和金屬礦山排放物長期被動處理的再生混凝土骨料—其工作的證明」，說明再生混凝土骨料(下稱 RCA)含有大約 10%-15%的熟石灰，以氫氧化鈣 (CaO.H₂O) 的形式存在，這是用於處理含金屬水的主要化學品。這使得 RCA 成為一種有吸引力的再生介質，用於被動中和及去除礦水中的金屬，特別是酸性岩石排水(ARD)及中和酸性岩石排水(NARD)之處理。RCA 具有高鹼性、多孔、可滲透、結構堅固、出色的過濾器、豐富、廉價且無淨碳足跡；被動處理介質所需的所有特性。被動處理是通過使含金屬的水通過 RCA 並通過吸附、沉澱和過濾將金屬捕獲在 RCA 基質

中來實現的。然而，混凝土基本上是不可溶的，因此過去使用 RCA 進行長期被動處理的嘗試基本上是無效的，在使用的流速和粒度下運行幾個月到幾年後，處理效果會迅速降低。在過去的三年裡，該機構一直在進行大量自籌資金的應用研究以克服這一缺點，並開發了一系列方法，使 RCA 能夠成功地用於含金屬水、ARD 和 NARD 的長期被動處理。該研究的重點是實現 RCA 中矽酸鹽石定時釋放的被動方法。研究結果表明，RCA 可以成為長期被動處理含金屬水，特別是作為礦山水處理的實用材料。成功處理大流量含金屬水（大約每秒 10-200 升）需要大約 3~6 毫米的粒徑，保留時間大約為 24 小時。

九、礦山參訪

(一)Globe Progress Gold Mine

Globe Progress 金礦位於紐西蘭南島西岸里夫頓鎮 (Reefton) 附近，正處於關閉和修復的最後階段。礦山關閉意味著留下一個不僅看起來不錯而且環境可持續的場地，努力提供適當的景觀、乾淨的溪流和恢復的原生灌木叢，該團隊承諾開發一種解決方案，並在很長一段時間後可繼續執行。創新思維促成了垂直流反應器的進一步發展，該概念由卡迪夫大學(Cardiff University)開發，然後在 Verum 集團和礦山廢棄物管理部門的協助下，由 Oceana Gold 團隊加以改造。該系統利用自然化學過程，來減少源自岩石中天然存在的礦物質(鐵和砷)的濃度。該過程旨在滿足對於可持續性的高度期望，藉由 Globe Pit Lake (GPL) 被動式處理酸性廢水，同時通過在水進入垂直流反應器之前對水進行曝氧來減少持續的開銷。水中的鐵從溶液中出來，變成紅棕色然後鐵顆粒輕輕地落在池塘底部的礫石床上。

鐵自然地吸引其他金屬，因此能夠從水中捕獲自由漂浮的砷水繼續藉由重力通過礫石床並離開系統進入 Devils Creek。廣泛的測試證明，垂直流反應器可以可靠地去除水中多餘的砷和鐵，雙過濾池確保垂直流反應器保持運行，同時其中一個池子被隔離，排乾並清理乾淨，然後將乾燥的產品從池塘底部移走並存放在受控的倉庫中。隨著時間的推移，Oceana Gold 礦山含有之金屬將從周圍岩石的可浸出區域耗盡，池塘將繼續自然地流入 Devils creek，該團隊致力於通過持續創新和實際應用實現永續採礦，該承諾的一部分是確保關閉的站點（如區域恢復項目）可以供子孫後代享用。

(二)ECHO Coal Mine

- 1.Echo 煤礦位於原始森林地區，山坡陡峭，位於紐西蘭南島西海岸，靠近里夫頓鎮 (Reefton)。歷史上，該地區是通過地下方法開採的，但現在是一個露天礦，由 New Zealand Coal & Carbon Ltd (NZCC)的子公司 Francis Mining Co. Ltd 經營，生產低灰分、半軟焦煤，出口供生產鋼鐵之用，包括日本、沙特阿拉伯、中國、澳洲、加拿大和印度。酸性水從礦山排放到 Wellman Creek，Wellman Creek 與 Garvey Creek 匯合，然後向下流入 Inangahua River。Garvey Creek 受到附近其他礦山的酸性水影響。
- 2.綠殼貽貝 (*Perna canaliculus*) 原產於紐西蘭，是紐西蘭最大的海鮮出口產品。大部分出口產品是全去殼貽貝，每年產生約 68,000 噸貝殼廢料。紐西蘭的研究表明，這種廢棄物可用於處理酸性水。進一步的實驗表明，殼的溶解導致 pH 值增加，硫酸鹽還原反應增加鹼度。該技術的首次全面應用是在紐西蘭廢棄的 Bellvue 煤礦安裝貽貝殼反應器。

大約 3000 立方米的新鮮貽貝殼被放置在一條長約 130 m、寬 8 m、深 3 m 的通道中，這是酸性水的原始流動路徑。該系統於 2019 年 5 月安裝，並於 2019 年 5 月 16 日開始流經該系統。Echo 煤礦的處理系統是紐西蘭最大的貽貝殼反應器。結果表明配置可以成功地通過形成金屬硫化物來還原硫酸鹽和去除金屬。儘管處理系統僅處理酸性水總流量的一部分，在未經處理的酸性水與反應器排放物匯合的下游，Wellman Creek 在過去一年的運行中產生的 pH 值平均為 6.7。鹼度是透過 CaCO_3 溶解產生的，該反應器由大約 3,000 立方米的新鮮貽貝殼組成，通過硫酸鹽還原和貝殼溶解來處理酸性水。

(三)STOCKTON Coal Mine

1.露天煤礦酸性水治理

位於南島西海岸韋斯特波特(WESTPORT)以北 35 公里處，由 Solid Energy New Zealand Ltd 所有，原由 Solid Energy 和 Downer EDI Mining New Zealand Ltd 的合夥公司 Stockton Alliance 營運，2017 年轉由 BT Mining 公司經營。是紐西蘭最大的露天礦山，開採中採礦面積約 930 公頃；約 180 公頃已修復。斯托克頓礦山擁有足夠的經濟可採資源，並供出口提供煉鋼業需用之優質冶金煤。

該礦位於西海岸的斯托克頓高地，海拔 700 至 1100 米，位於陡峭的懸崖頂部，該懸崖幾乎直接從海岸升起。當盛行的西風將富含水分的空氣從塔斯曼海帶到山區時，就會出現地形降雨。海岸的年降水量約為 3000~5000 毫米/年，礦區增加到 6000 毫米/年；全年隨時都可能出現日降雨量超過 200 毫米的頻繁降雨事件；年平均氣溫約為 9°C 。礦山的降雨量和強度對 930 公頃受擾動地面的侵蝕控制和水道內夾帶懸浮固體的管理具有重大影響。

酸性水(acid and metalliferous drainage) 是硫化物礦物在氧氣和水存在下氧化的結果。黃鐵礦是煤系中最常見的硫化物礦物，每氧化一莫耳黃鐵礦會產生四莫耳酸。黃鐵礦氧化產生的酸度可以被石灰石（例如 CaCO_3 ）等材料中和。岩石可以同時含有黃鐵礦和碳酸鹽，這意味著雖然可能存在黃鐵礦，但如果碳酸鹽含量足夠，則可能不會發生酸性水。

斯托克頓高地上的煤炭存在於始新世河口布倫納煤層 (BCM) 中，形成厚厚的煙煤層。這些煤層被海相沉積物覆蓋，主要是泥岩，在與煤層接觸附近有一些邊緣海相砂岩。黃鐵礦含量豐富（高達 5 wt%）煤層的上部和上覆海洋沉積物的下部、降雨、氧氣和黃鐵礦廢石之間的相互作用導致酸性礦井排水或酸性水。與自然排水系統相比，斯托克頓的酸性水含有豐富的溶解鋁和鐵，以及高濃度的痕量金屬。

一些集水區受到酸性水和升高的總懸浮固體 (TSS) 的影響，這些物質來自斯托克頓煤礦以及 Solid Energy 的前身和一些私人礦山的早期採礦，Solid Energy 已經認識到這些不利影響和當地利益相關者的擔憂。Mangatini 溪是 Ngakawau 河的重要支流，已被確定為 Ngakawau 集水區內水質差的主要來源，並製定了一項行動計劃來糾正這些問題。在對可能的解決方案和利益相關者（Ngakawau Riverwatch、Buller 區議會、西海岸地區議會和自然保護部）進行廣泛研究後，Solid Energy 承諾實現商定的水質目標。

為了在 2010 年 6 月的目標日期之前實現這些目標，在五年期間開發了重要的管理系統並建設了基礎設施。建立了管理系統以減少對水處理的要求，包括預防措施，例如員工教育和環境意識、形成酸的岩石的封蓋以減少酸性水的產生、侵蝕控制以減少沉積物流失以及使用直接移植和重新植被穩定斜坡的幼苗。關於水處理，安裝了下游水處理

技術，包括全場範圍的沉澱池，以在發電點捕獲沉積物和煤炭；斯托克頓黑水處理廠(BWTP)去除煤粉、沉積物並調整 pH 值；Mangatini 超細石灰石投加設備，用於提高 pH 值並去除溶解的金屬。

2.MANGATINI 集水處理設施

斯托克頓礦山於 2007 年初開始，嘗試投加石灰石讓 Ngakawau 河水質改善。酸負荷的顯著降低(降低了溶解鋁含量)及 pH 值雖有提高，但透明度和濁度目標的改進不如預期。在 2010 年 6 月 Mangatini 集水設施投入使用後，石灰石與沉澱物一起反應，使得清晰度得到了更為顯著改善。對 Ngakawau 河站點 NR 的上述結果的分析表明，Solid Energy 已接近其商定的利益相關者目標，並有效地管理了酸性水對 Mangatini 流域的影響。

在過去 Solid Energy 已開展了大量工作來管理沉積物並減輕酸形成覆蓋層的影響。除了 Mangatini 集水設施、BWTP、相關的水管理基礎設施和臨時石灰石配料廠，後續並進行更多的資本承諾，例如在 Mangatini 集水設施上方建造長期石灰石配料廠。Mangatini 集水設施上方的長期石灰石配料廠預計可進一步改善水質。所呈現的結果表明，在酸負荷 (pH) 和溶解鋁方面，水質有了顯著改善，並證實解決 Mangatini 溪流是顯著改善 Ngakawau 河水質的最佳選擇。需要進一步的工作來減少懸浮固體以提高水的透明度。這包括影響 Ngakawau 河水質的其他溪流 (Mine Creek、Ford Creek、Fly Creek 和 St Patrick Stream)，這項工作將在接下來的幾年內進行。(Bathurst Resources Ltd. 已承接礦山經營權)

酸性水排放處理是位於紐西蘭西海岸的斯托克頓煤礦的一項重大環境責任。這種責任是源自歷史和當前煤炭開採以及相關的黃鐵礦氧化的產物。酸性水影響的管理和治理將持續至少 100 年。迄今為止已取

得明顯進展，預計隨著河流健康狀況的改善，生物多樣性將會增加。迄今為止值得注意的結果包括 Ngakawau 河中魚類 (eg. galaxids inanga) 的回歸。

(四)Encarpment Coal Mine

Encarpment 煤礦項目是位於紐西蘭南島西海岸丹尼斯頓高地之羅奇福特山保護區的一個露天煤礦，Bathurst Resources Limited 計劃每年採取和出口 1 至 400 萬噸煤炭，該礦可能成為紐國第二大露天煤礦，僅次於斯托克頓煤礦。該礦於 2014 年開始採礦，參訪當日並無作業，礦方人員另述及下游客戶關廠與成本考量而暫停開採資訊。由於高地區域天候與濃霧影響，基於安全考量礦方人員僅簡單導覽礦山水被動處理相關設施現況。

該露天煤礦由 Bathurst Resources 在丹尼斯頓高地南部 200 公頃的保護土地上建立。該礦山計畫曾遭遇紐國 Forest and Bird 和 West Coast Environment Network 等環保組織反對，並向紐國環境法院提起訴訟。2013 年 11 月，Forest and Bird 決定不對環境法院於 10 月做出的允許 Escarpment Mine 繼續進行的決定提出上訴，並與 Bathurst Resources 達成協議，將為高原上的保護區提供永久保護，該保護區被稱為“丹尼斯頓永久保護區”。據 Bathurst Resources 管理人員表示，因應位於 Cape Foulwind 附近之主要客戶 Holcim 水泥廠於該年 6 月關閉以及全球硬焦煤價格下跌，該公司基於成本考量於 2016 年暫停採礦活動。

(五)Denniston 煤礦遺址

參訪日由於西岸天候視野不佳，依丹尼斯頓煤礦遺址現場立牌揭示相關資訊所揭，丹尼斯頓斜坡於 1880 年 4 月開始營運，這是一條自動索道，利用重力將紐西蘭鐵路總載重量為 12.5 噸的運煤車一次一個地從頂部丹尼斯頓的 Brakehead 降到下方的 Conns Creek。丹尼斯頓斜

坡在 1,670 米（83 條鍊或 1.04 英里）中總共下降了 516 米（1,693 英尺）。

每輛下降的貨車都用鋼絲繩將一輛空貨車拖上斜坡，每輛貨車都連接到自己的繩索和制動鼓上。兩個捲筒並排安裝在一根公共軸上，鋼絲繩以相反的方向纏繞在每個捲筒上。因此，當一個滾筒放出繩索並將一輛滿載的貨車拖下斜坡時，另一個滾筒正在捲起繩索並將一輛空貨車拉上斜坡。液壓活塞減慢捲筒的旋轉以控制貨車的速度。自上世紀停止生產後，原處僅保留少數老舊設施，現場並規劃相關位置設立立牌，簡介該歷史遺址，並於斜坡起點處後方備有木質觀景平台，可供民眾與遊客瞭解昔日該運送設施概略配置，及煤礦對昔日當地聚落發展之影響。

肆、心得及建議：

- (一)由於礦產資源與土地、水、植被等環境要素緊密相聯，大規模開發礦產資源勢將直接構成對環境的威脅與破壞，使得環境污染、生態退化及資源競爭與取得等環境議題成為全球礦業開發爭議最主要的原因，輕者往往導致生產力損失，嚴重者則造成礦山中止開發，甚而訴諸訴訟。紐國因獲得先天優良地理環境與生態，對環保意識甚高，礦方均戒慎恐懼，維持得來不易之營運執照。另該國礦山與環境工程顧問業協助制定環保指南，以供該國業界於礦業生命週期相關作業參用，均顯現該國業界自律作法，可供國內採礦業界及環保業界參考。
- (二)紐國與環境工程顧問業與軟體業結盟，藉由專業整合規劃並運用專案管理軟體，協助礦業開發單位進行開發歷程規劃模擬與管制，將水管理(環保以及水保)整合至礦山規劃內容，避免衝擊周遭社區及下游生態環境，

並有效協助業者依計畫施作，以符合法令要求與有效進行資源開發(如澳洲解決方案機構 Deswik 與環境諮詢公司 RGS Environmental 建立合作夥伴關係)，為採礦業於礦業生命週期規劃解決方案，提供整合式服務，使用軟件來幫助簡化和自動化流程，另可就水管理涉及之水保措施規劃納入，該模式實屬務實有效作法。雖較適合大規模礦山開發之用，仍值得國內未來倘有規模相近礦種/開發案例時，可予以審酌是否參採試行。

(三)隨著環境保護的趨嚴，周遭社會社區的關切，礦業界必需認知所處環境與社會之改變，礦業開發不應仍把經濟利益放在第一位，一再以犧牲環境與生態為代價。企業應思考如何強化綠色礦業的理念，提升礦業整體形象、促進礦業的永續與健康發展。另紐國業者注重社區民眾之權益與意見，於開發前與開發中均能與各該利害關係方進行溝通，取得共識與同意，並確實將環境維護相關允諾事項納入計畫執行，適時挹注資源協助社區營造，建立雙方互信基礎，以利礦業永續開發經營。

(四)此次會議部分研究應用監測方法進行礦山水追蹤及地表變形監測，除傳統測量監測、GIS 圖層外，合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)因其高解析度及公分級精度之優勢，被廣泛運用在大地測量上，並可運用於地下水監測；其中已永久性散射體合成孔徑雷達干涉(PS-InSAR)可以利用天然永久性散射點，有效獲得地表變形資訊，相對於傳統大地測量的點狀資訊，InSAR 技術利用雷達波掃描可快速獲取地表整體面狀資訊。雖因各國法令與地質條件不同，國內地下礦場關礦後尚無建立類似監測作法之規範，惟未來如有礦山關礦後之相關潛勢監測研究之需要，除現有之地球物理探測方法外，於資源允許情形或可評估引用該類技術為研究執行方法之選項。

(五)紐國礦業公司因應國內外相關產業煤礦需求，申請於南島西岸高地採運煤礦並提出資源許可，因鄰近保育範圍，對於取得資源許可，引起環保團體向當地環境法院提起訴訟及後續上訴，過程曠日廢時，並引起該國部長呼籲環保團體應考量當地居民就業之經濟需求不再上訴，所幸因礦方與環保團體取得共識與協議設立保留區，該團體放棄上訴，礦場最終得以開發，由該國案例可見礦業開發仍需於環保面向取得充分溝通共識，始能後續開發許可之進程，惜因全球煤價低迷與下游產業關廠而暫停開發，相信該國礦方日後持續落實環保措施，待景氣復甦，環保與礦業開發、提昇當地經濟仍有並存之空間。