

出國報告（出國類別：開會）

**參加美國國際地熱研討會 2024 Geothermal
Rising Conference (GRC)**

服務機關：經濟部地質調查及礦業管理中心

姓名職稱：陳棋炫 科長

派赴國家/地區：美國

出國期間：113.10.25-113.11.01

報告日期：114.1.12

目 錄

摘要 1

一、 目的與概述 2

二、 過程 4

三、 心得及建議 35

附錄 41

圖目錄

圖 1. 全球前十大地熱裝置容量的國家.....	3
圖 2. 會議進行序幕.....	8
圖 3. 海報展區.....	18
圖 4. 發表東部變質岩區地熱模型海報.....	18
圖 5. 廠商展覽區.....	19
圖 6. 會議交流休息區.....	19
圖 7. 會議海報觀摩.....	20
圖 8. Puna 地熱電廠(PGV)參訪.....	21
圖 9. PGV 電廠全景.....	22
圖 10. PGV 地熱電廠及其地理位置.....	22
圖 11. PGV 地熱電廠沿革簡報.....	23
圖 12. PGV 地熱地質模型.....	24
圖 13. 電廠內地熱鑽井位置分布.....	25
圖 14. 鑽井及地熱概念模型.....	27
圖 15. 歸極處理後(RTP)的全磁場強度.....	29
圖 16. 夏威夷火山國家公園火山噴發口.....	30
圖 17. 基拉韋主火山口.....	31
圖 18. 基拉韋火山伊基火山口.....	31
圖 19. 熔岩流洞穴。熔岩流流動時形成之天然地下隧道.....	32
圖 20. 火山國家公園內解說牌.....	32
圖 21. 夏威夷大島東南方基拉韋火山口岩漿通道範圍圖.....	33
圖 22. 火山噴發新聞畫面.....	34

表目錄

表 1. 出國計畫行程表.....	4
表 2. 地熱研討會大會議程.....	5

摘要

本次出國主要參加了美國舉辦的國際地熱能源大會暨展覽會(2024 GRC)，會議在美國夏威夷的大島舉行，會議以系列須付費的教育訓練課程揭開序幕，另有第一屆世界原住民地熱論壇，付費參與行程尚有參觀島上唯一一座 30MW 的 Puna 地熱電廠，以及夏威夷火山地質之旅。會議近一千兩百名參與者包含開發商、供應商、營運商、地球科學領域人員、政府單位、及投資者和金融業者等。活動以研討會、產商展覽和實地參訪為特色，進行探勘系統、開發技術、規模經濟、AI 控制、資金來源、和降低成本之討論。

此行會議主題琳瑯滿目，僅能選取最有興趣的場次參與，主要關注在高溫鑽井技術、增強型地熱系統(EGS)的發展，超高溫岩體(SHR)新興地熱議題，以及地球物理調查技術觀摩。目前我國政府將地熱能視為另一項再生能源的要角，本次會議也投稿我國地熱探勘進度及世界少有的變質岩區地熱型態探討，海報張貼時段，各國與會者前來關心我國地熱發展，並給與經驗分享，及尋求合作機會。

美國為國際上發展地熱最先進之國家，而美國舉辦的國際地熱大會 GRC，也為每年國際地熱大會最大盛事。近期各項新創技術發展相當快速，本次能親臨會議現場與地熱電廠，跟與會成員交流，從探勘領域、社群交流領域、鑽井技術領域、及有信心利用地熱作為能源轉型的主力，印象相當深刻，後續將考量適用我國地熱發展特性及發展需求，適時提出啟動相關經驗應用規劃，以加速我國地熱能源產業之發展。

一、 目的與概述

2024 年地熱崛起會議 (GRC, Geothermal Rising Conference)是地熱界最大的年度聚會。GRC 是地熱產業的旗艦年會，反映了地熱產業的全球性，匯集了工業界、學術界、政府單位和關心地熱發展的民眾。藉由地熱社群建立關係，討論地熱能在全球的機會和挑戰，發表最新的技術和創新。地熱能源可透過提供 24 小時不間斷的電力和熱能管理來構成社會能源轉型的支柱。國際上已經持續累積發展經驗數十年，其中尤以美國發展速度最快，目前地熱發電裝置已達 3.9GW (圖 1)，也持續創新開發地球熱能的技術，反觀我國 1980 年代地熱發展暫歇以來，近年重啟積極發展地熱能源，藉由參加國際會議，期能開展國際視野，了解我國與國際之階段處境，快速學習接觸相關技術、政策和市場分析、地熱電廠參觀以及與社群的交流機會。

2024GRC 於夏威夷大島舉辦，大會也有付費行程安排參訪島上唯一一座地熱電廠，及參訪火山國家公園，由於夏威夷火山活動屬於相當活躍，此次參訪目的為實地感受來自岩漿的能量，並藉由噴發火山口的實景，體會地下岩漿流動連通，可能帶來的地表災害及如何加以善用。而在會議參展方面，地熱創新技術所強調地熱在能於發展的生命週期，不僅在後端發電方面，且在前端探勘如何碰觸解鎖最佳地熱能發展區位。廠商展覽會提供全球具先進技術廠商之曝光機會。本次也走訪參展廠商討論專案、服務以及最先進的技術和設備，以評估利用在我國地熱發展之需用性。

會議期間主要參加數場有興趣議題場次，心得整理如內文。另大型會議也開放參與者論文投稿，因此彙整本單位目前在全台探勘階段的成果進行壁報投稿，主題為我國地熱活動的拓展及變質岩區調查成果初探。由於國際上的地熱發展以火山型居多，而我國又以變質岩區的地熱範圍佔大宗，希望藉投稿彙整變質岩區的地熱概念模型，與各國有經驗之與會者討論，獲取現階段改善及未來發展規劃之經驗。最後，綜整以上行程之見聞心得，以應用於目前相關地熱發展計畫之參考研擬。

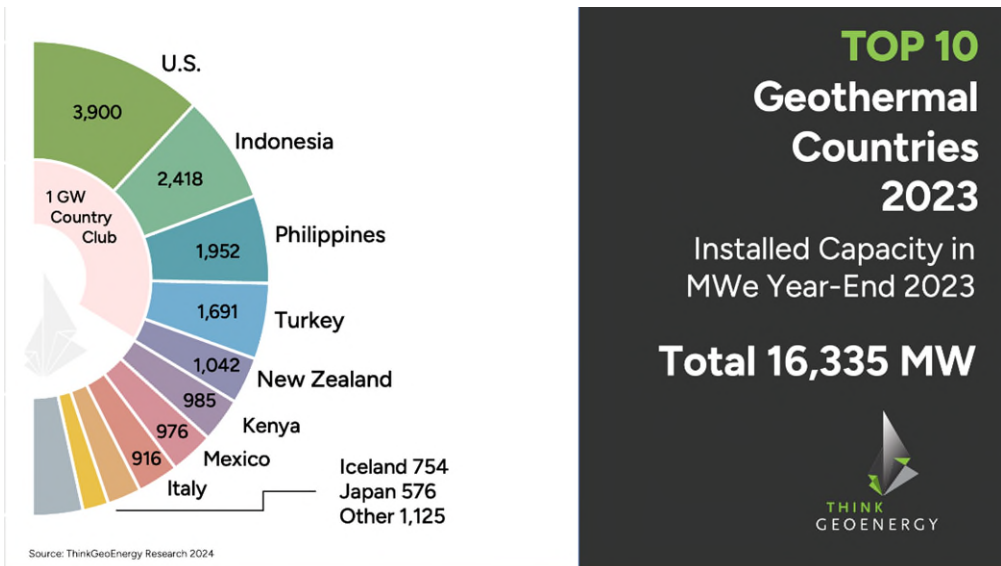


圖 1. 全球前十大地熱裝置容量的國家(Think Geoenergy, 2023)。

二、 過程

本次自台北搭乘夏威夷華航聯航出發後，於日本成田機場轉機，到夏威夷檀香山再轉大島科納機場，到達希爾頓渡假村，即為本次會議舉辦之地點。(表 1)。會議行程前幾日即有一系列付費教育訓練課程及參觀計畫。本次於會議前各安排了一天參與地熱電廠參訪、及火山地熱地質野外行程。GRC 室內會議全程在夏威夷希爾頓飯店內舉行，會議希望所有人都能夠盡量留在飯店裡活動，享受飯店所帶來之服務，會議一早即安排有瑜珈活動；每日整天會議結束，晚上也有安排晚宴及交流活動。參與研討會議三天，並於第二天晚上進行海報發表討論，發表本中心地熱探勘成果與外地熱領域專家交流，強化探勘技術知能。第三日下午開始返程。

表 1. 出國計畫行程表

日期/城市	活動	行程
10 月 25 日	臺北-成田-檀香山-科納	去程
10 月 26 日	Puna地熱電廠(PGV)	PGV 地熱電廠參訪
10 月 27 日	火山地熱地質野外	夏威夷火山國家公園野外
10 月 28-30 日	2024 美國夏威夷國際地熱大會 GRC	3 天大會會議，發表我國地熱調查進展海報
10 月 31 日-11 月 1 日	檀香山-成田-臺北	返程

(一)研討會內容

本年研討會共有約 1,200 名參與者，開幕式齊聚於大演講堂大會邀請演講，並邀請夏威夷原住民帶領進行祈福儀式(圖 2)，隨後分成數個演講廳分別進行，同一個時段平均有 6 個主題在不同演講廳內同時進行(表 2)，由於主題相當多元，個人本次著重在以下主題參加了 Drilling、Enhanced (or Engineered)、Reservoir/Production、Super Hot Geothermal、及 Geophysics 等場次。

表 2. 地熱研討會大會議程

<p>Field Trip</p> <p>Friday, October 25, 2024 7:30 AM - 6:00 PM <u>Field Trip 1: Puna Geothermal Venture Tour</u> <i>Bus begins loading at 7:10 AM</i> Lower Lobby</p>
<p>Saturday, October 26, 2024 7:00 AM - 9:00 PM <u>Field Trip 3: Big Island Geology Exploration Tour</u> <i>Bus begins loading at 6:40 AM</i> Lower Lobby 7:30 AM - 6:00 PM <u>Field Trip 2: Puna Geothermal Venture Tour</u> <i>Bus begins loading at 7:10 AM</i> Lower Lobby</p>
<p>Sunday, October 27, 2024 7:30 AM - 6:00 PM <u>Field Trip 4: Puna Geothermal Venture Tour</u> <i>Bus begins loading at 7:10 AM</i> Lower Lobby 7:30 AM - 5:00 PM <u>Field Trip 5: Hawai'i Cultural & History Tour</u> <i>Bus begins loading at 7:10 AM</i> Lower Lobby</p>
<p style="text-align: center;">Monday, October 28, 2024</p> <p>Registration Opening Plenary Session: Exploring the Geothermal Story Plenary Session II: Harnessing the Energy - Leaders and Innovations in Geothermal Exhibit Hall Open Networking Lunch Planning Your Career, and Developing the Next Generation Workforce in the Energy Transition Technical Poster Hub Panel 1A: Geothermal Focused Community Engagement Session 1B: Low Temperature/Direct Use Session 1C: Drilling Session 1D: Energy Conversion/Utilization</p>

Session 1E: Closed Loop/Advanced Geothermal Systems

Session 1F: Geochemistry

Geothermal Rising RIG Mixer

Monday Night Lū'au Mixer

Tuesday, October 29, 2024

Registration

Speaker Ready Room

Panel 2A: Advances & Innovations in Superhot Rock Geothermal: Resource Characterization, Well Design & Construction, and Project Development

Session 2B: Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems

Session 2C: Drilling

Session 2D: Low-Temperature/Direct Use

Session 2E: Geology

Session 2F: Regional Updates

GR Mentor-Mentee Meetup

Our Hidden Powers Book Signing

Exhibit Hall Open

20-Minute Sponsor Hosted Technical Sessions

Panel 3A: Geological Thermal Energy Storage (GeoTES) in Sedimentary Reservoirs: Technology and Market Assessment

Session 3B: Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems

Session 3C: Reservoir/Production

Session 3D: Energy Conversion/Utilization

Session 3E: Geology

Session 3F: Tribal Communities

Networking Lunch

Women in Geothermal (WING) Core Value Awards & Membership Meeting

20-Minute Sponsor Hosted Technical Sessions

Plenary Session III: Pressure Points - Policies, Sustainability and Investment

Break

Panel 4A: Ambient-Temperature Loop Geothermal Networks: From Demonstration to Nationwide Deployment

Session 4B: Super Hot Geothermal

Session 4C: Reservoir/Production

Session 4D: Economics

Session 4E: Geology

Session 4F: Diversity, Equity, Inclusion, and Belonging
Networking Reception in Exhibit Hall
Technical Poster Hub
GR Trivia Night

Wednesday, October 30, 2024

Women in Geothermal (WING) Fun Run/Walk
Speaker Ready Room
Plenary Session IV: Strengthening the Core - Community, Membership and Vision
Registration & Information
Break
Exhibit Hall Open
Invited Session: Drilling Classifications, Heating & Cooling Commercialization, and Non-Conventional Project Locations for Geothermal Applications
Panel 5A: Geothermal for the US Department of Defense (DOD) - Partnering for Energy Resiliency and Independence: An Update on Seven Ongoing Projects
Session 5B: Geophysics
Session 5C: Reservoir/Production
Session 5D: Machine Learning/Computing
Session 5E: Transition from Oil & Gas
Session 5F: Downhole Logging
Networking Lunch
Department of Defense and the Future of Geothermal
Panel 6A: Enhanced Geothermal Systems – Innovation and Deployment
Session 6B: Geophysics
Session 6C: Low-Temperature/Direct Use
Session 6D: Non-Technical
Session 6E: Well Construction & Completion
Session 6F: Mineral Extraction|Regional Updates
Exhibitor + Paramount Teardown
Closing Networking Reception



2-a. 會議報到處。



2-b. 開幕大會。由夏威夷原住民耆老帶領大會牽手禱告祈福。

圖 2. 會議進行序幕

本次參與會議發表場次依主題分別摘要及心得記錄如以下部分:

Session 1C: Drilling

1. 鑽頭隨鑽量測系統(MWD)為位於鑽串的最前端部位，由磁力及電力系統，可控制鑽頭方向，稱為導向鑽井，這系統包含於鑽頭動力，發展於 1978 年油氣井鑽井工業，當時耐溫為 85°C，至 1996 年，此系統逐漸進化已可耐溫達 175°C，油井工業約 20 年間電子量測技術進化了 90°C，由於感溫跟電子零件組合，主要依賴特殊材料保護殼體及材料散熱技術之研發，目前為止可耐溫達 200°C。目前隨未來 AGS 跟 EGS 的發展，可耐高溫的導向鑽井系統，為須積極研發之項目。目前新測試的包覆殼體之 PCBs，初步測試可達 210°C。Breaking the 200C Barrier – Development of an Integrated High Temperature Directional Drilling System
2. 鑽井溫度影響的溫度，包含泥漿冷卻、持續循環、鑽桿絕緣、改變泥漿性質。BHCT (Bottom hole circulating temperature)為循環幾個小時後井孔底部的循環流體（空氣、泥漿、水泥或水）的溫度。此溫度低於井底靜態溫度。因此，在極度惡劣的環境中，通常不適合井底靜態條件的組件或流體，可以在循環條件下小心使用。同樣，可以冷卻高溫井以使測井工具發揮作用。BHCT 在水泥套管操作設計中也很重要，因為水泥的凝固時間取決於溫度。當放置大量溫度敏感處理液時，BHCT 和井底靜態溫度 (BHST) 是重要參數。Managed Temperature Drilling: Real-Time Damage Monitoring of Insulated Drill pipes and an Automatic Controller to Mitigate Effects of Temperature Increase
3. 地熱初期鑽井有幾種孔徑選擇，此研究建議探勘初期時，可使用小孔徑取岩芯工法，加上井孔安裝槽孔管，有數種優勢，鑽探風險降低、可降低鑽探成本，重複可靠的步驟可增進學習曲線、可準確量測溫度、可準確取得岩樣試驗分析其孔隙率。Driving Down Exploration Costs in Geothermal
4. 為了發展 AGS、EGS 鑽探深度逐漸增加，會造遇到強度越高的岩石，鑽頭的磨耗及鑽探工時，會造成成本增加。鑽頭重量為重要參數，鑽頭鑽進速率(ROP)會與鑽頭旋轉速率、鑽頭切割深度有關。目前試驗結果為，高重量結合 PDC 鑽頭，理論上可以加快鑽近速率減少鑽井時間，然而因為轉速的突然增加，反而與地層的摩擦力增加，造成無法直近、

扭曲的鑽進軌跡，會增加鑽探長度，對鑽進有負面影響。因此本研究提出 Downhole anchoring and Drive system (DAD)，利用一個機頭動力帶一個擴孔及泥漿循環設備，克服孔壁摩擦力，可減少從地表操控並減少鑽孔的彎曲，如此一來增加的鑽頭重量就能直接施工於鑽進地層。根據在泰國試驗結果，此系統在花崗岩內之水平鑽進有效增加 70% (2,399 公尺)額外的鑽進長度。Enhanced Weight on Bit Application in Hard Rock Drilling Through Innovative Anchoring Technology

Session 2B: Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems

1. EGS 系統的模擬，以一對井，設計 5~10MW，運轉時間為 15 年的電廠，首先要估計熱傳導面積要設計多大，以及如何激發裂隙。因此利用三項模擬技術，包含(1)Gringarten analytical model (T)、(2)FOXEM numerical model (TH)、(3)ResFrac commercial simulator (THM) 等三種模擬模式。第一項模式為設計多重平行破裂模型(GEOPHIRES)計算溫度剖面。估算結果為岩石溫度在 20 年內，下降 20°C，取決於注入水體的流速與溫度，在設計的裂隙及間距，可求得需要進行熱交換的面積。第二項模擬則指出在單一裂隙，其下方的區域為有效熱傳輸的區域，裂隙孔徑也對模擬有明顯的影響。第三項設計 2 孔間距 150 公尺的井，設計參數進行模擬。模擬結果顯示，這三種模式有著一致的熱傳輸面積，7.5MW 要維持供應取熱 15 年，有效的傳輸面積約要 2.5 平方公里。且需要有 150 個破裂帶群集，井對的間距要達 125 公尺。Experimental investigation of the flow behavior of Ionic Liquids for use as working fluids in Enhanced Geothermal Systems
2. EGS 在康乃爾大學的區域供暖規劃，該大學設定了學校的減碳規劃，並預計利用 EGS 技術，在校園周圍設計取熱及回注系統。EGS Reservoir Modeling for Developing Geothermal District Heating at Cornell University
3. 一般的 EGS 對井設計，把水從注入井壓入經過地下地層系統，於井體內、井體的穿孔、地層的破碎帶，再從回收井吸取，會造成系統的阻抗，減少產值。因此如何設計注入的壓力以克服系統阻抗，及設計地層液裂長度減少阻抗，為工程設計重點。高壓的幫浦設計壓力支撐形成裂隙群系統，稱為地壓地熱系統(GGS)。支撐裂隙可使用支撐劑攜帶

液體(EGS)的方式，或以幫浦打進氣體壓力(GGS)支撐的方式。此研究利用 COMSOL Multiphysics 進行模擬，結果顯示 GGS 可增長裂隙及擴散，且與 EGS 比對可減少一半的阻抗，且僅需較少的裂隙，可唯一有效率及永續之取熱方法。Geopressured Geothermal System: An Efficient and Sustainable Heat Extraction Method

4. 地熱供暖及製冷社群及發展倡議(community GEO)，目標為利用地熱能供應至少社區 25%的負擔。此將達成減低能源負擔及減少化石燃料依賴，增加能源韌性，增進環境品質及提供工作機會。第一期工作為設計和規劃，分析地點和需求，可行性分析及利害關係人參與，提供社區尺度的規劃。低溫淺層井體，設計百口至千口的井體，建置中央迴路系統，建築物可逐漸納入此取供系統。目前已陸續有城市地區及郊區的系統，各城市可合作開放技術交流，美國能源部門也建置有 Community Geothermal Data。Department of Energy Community Geothermal Initiative
5. 印尼的地熱發電潛能約 25.4GW，政府發電目標為 2030 達到 3.4GW。而鑽井為達成目標為一的技術路徑，若能有效且智慧化的鑽井，則有機會利用人工智慧減少鑽井風險。此研究利用三個井場 25 孔鑽井參數，來訓練自動判斷主要生產段。Enhancing Geothermal Drilling Performance: A Stuck-Pipe Risk Advisor Leveraging Causal-AI and Semantic Web for Explainable Decision Support
6. 印尼地熱鑽井鑽遇火成岩、火山角礫岩、火山灰，岩石硬度高，地層不均質使得鑽頭耗損速度增加。本研究設計複合式三錐鑽頭在地熱鑽井進行測試，以 17.5”複合鑽進 669 米，平均每小時可鑽進 12.4 公尺，12.25”複合鑽頭，鑽進 595 米，平均每小時可鑽進 9.71 公尺。Drilling Innovation Enables Faster Delivery of Geothermal Wells in Indonesia

Session 3C: Reservoir/Production

1. 印尼西瓜哇島，屬於乾蒸氣地熱田，從 1982 年開始開發，至目前有 5 個地熱電廠，共計 235MW 裝置容量，每場平均 30MW 以上，最近的一場單元五，從 2015 年開始執行。整區目前有 99 口井，64 口作為生產井用途，7 口作為回注井用途，目前產能約成每年 4-5% 衰減。鑽井資料觀察顯示整個儲集層可區分成 3 個不同區域之高中低壓力區，三

個壓力區同時表現每年壓力約下降 0.28~0.31 bar。儲集層分析顯示，個別的產能與個別的壓力區相關，但是產能的改變並不完全跟壓力下降趨勢相關，因此可能與 Kamojang 儲集層側向透水性有無法有效連結有關。此儲集層於 2020 年的地熱地質模型指出不同壓力區可能對應了熱流上湧區(upflow)，2023 年的分析監測指出，整個儲集層壓力最高的位於東側，表示可能為整體熱源的上湧區的補注區，往西邊流動。

Temporal Evolution of Kamojang Reservoir Pressure: Unraveling Upflow Dynamics in a Dry Steam Geothermal System Through Multidisciplinary Analysis

2. 美國內華達州有著大範圍的山麓平原，本研究利用遙感探測，由衛星影像光譜表現來探測及解釋地熱區地表的物質，在盆地裡區的較大地熱田通然都是被覆蓋掩埋的，2018 年，AVIRIS 飛航線進行了光譜飛航掃描，14m pixel 包含 VNIR-SWIR 資料可從 <https://aviris.jpl.nasa.gov/dataportal/> 下載。Remote Sensing Case Studies for Detection and Interpretation of Surface Materials for Geothermal Exploration in the Basin and Range, Nevada, USA

Session 4B: Super Hot Geothermal

1. 超高溫的地熱系統(超級熱岩 SHR)，為目前研究增加地熱發電量的重要議題，本研究實驗 300°C 以上的熱流表現。在 8.5 吋管的內徑，水力熱流的極限約為 100kg/s，遠比蒸氣少，在壓縮的流體及超臨界區域，可用熱能可極大化，乾蒸氣循環需要高溫系統去得到最佳表現，閃發系統 375 度趨於穩定，ORC 系統工作流體高於 300°C，雙循環系統與閃發系統相比，對於不純物有較小的敏感度，高溫熱液井單口井可以有 30-32MW，比目前傳統的井可能大於 10 倍的發電量。Ideal Thermal-Hydraulic Performance of Geothermal Power Systems Above 300 °C
2. 高溫井體設計目前趨向有標準化的一致化的操作，然而高溫底下 (>200°C)，套管卻容易毀壞 由於以下幾個原因，隨著溫度增加套管問題增加，孔壁水泥灌漿可能會有局部弱化導致於套管毀壞，就算孔壁水泥灌漿能 100% 成功，套管還是可能會毀壞由於溫度的改變，例如熱膨脹，主要的破壞被認為是套管崩毀及軸張力的破壞。因此 R&D 仍然

需要進行，以減少套管破壞及高溫地熱井的運行可靠性。紐西蘭訂定深層地熱鑽井標準設計及鑽進標準程序(NZS 2403:2015)，在此標準設計底下通常可得到較令人信賴的井。本研究中，收集 136 口冰島的高溫鑽井，其中 75 口報導有發生事件，34 口(25%)確認有發生套管崩壞。而 40%有井體結垢問題，最常被分析的套管毀壞問題為套管變形壓毀及套管接頭張力破壞。經由材料強度分析顯示，在加熱或冷卻過程中均超過鋼材的降伏強度(Yield Point)。假如環形灌漿或水包被固化在水泥內，當水因溫度增加體積擴張時，則會產生高環狀水壓，當討管承受強度不足則會套管壓毀，如此即會減少地熱井產能。ISOR 從 2015 年開始發展彈性的套管接合，它可允許因熱伸張的位移，軸向壓應力可用材料的彈性加以克服，軸向張力也可因應，此設計並贏得一些創新獎，也將在 2024 年應用在冰島地區的高溫鑽井。此材料在地表進行試驗利用冰島 Hverahllo 地區，一口蒸氣井溫度 262°C於壓力 60bar-g 進行試驗，也於 2020 年在冰島另一口地熱井進行井下試驗，R&D 計畫也以 COMPASS 計畫持續進行。Increased Structural Integrity of Casings of High-Temperature Geothermal Wells using Novel Technologies

3. 本研究設計為估計超高溫地熱區潛能，辨認技術瓶頸，評估超級熱岩最佳能源生產路徑，推動政策可行投資及技術創新。目標為發展超過 500MW，冷卻水需求分析，發展設備技術成熟路徑，估算超熱岩地繞電廠的建置成本。生產路徑包含有設計為乾蒸氣直接利用發電、兩相流發電及雙循環系統發電。經由效能評估，乾蒸氣直接利用為最有效率的發電方式，冷卻方式以評估自然水冷通風冷卻塔、強制水冷通風冷卻塔及氣冷式的壓縮，評估結果為水冷式的冷卻較氣冷式的需要耗費 20 倍的水源，因此氣冷式被評估為較適用的。技術成熟度的評估在蒸氣收集系統、回注系統、分離系統的管材、壓縮器、氣體存放系統成熟度都達 TRL7-9，蒸氣渦輪發電機成熟度 TRL5-6。R&D 研究需持續投入在高花費的項目上，以減低成本，目標電廠建置成本為每千瓦 2000 美元。Optimizing Energy Production for Large Scale Superhot Rock Geothermal
4. 紐西蘭的超級熱機會，地下岩將入侵約在 3 萬 5 千年前，目前主要開發紐西蘭北島的火山地熱熱源約在地下 3 公里深溫度低於 300°C。利用地球物理調查資料，已經發現在地下 4-6 公里深，有溫度高於 373°C

的超熱岩，目前正在尋找資金來源及進行井體設計，目前地熱佔紐西蘭能源配比的 18%，若能取得超熱源進行地熱發電，預估到 2050 年，能增加地熱能源配比到 37%。估計每年可提供 30,000 GW 的熱能，預估在投資及法規可行下 2037 年可上線，預估 grid model 超過 2,000 MW，於 2050 可達經濟化。The Superhot Opportunity for New Zealand- Joining the Ends Together

5. 利用一個整合資產管理系統(IAM)對於超級熱岩(SHR)及增強型地熱系統(EGS)，包含工程岩石體積設計(ERV)，井體設、操作策略，利用傳導對流熱能和質量傳輸；暫態壓力與熱焓平衡，本研究以奧勒岡 Newberry 場域發展為例。此區地溫梯度 110°C/km，此類型地熱與一般傳統型地熱不同，超臨界之基本特性，井口溫度通常遠小於井底溫度，水壓隨深度及岩石溫度增加，性質並無不連續(除非當固定壓力時)，熱焓質在小於 375°C 隨著溫度穩定增加，在大於 375°C 則逐漸增加，在大於 440°C 則逐漸減少。工程手段地層裂隙，過去是用剪力去活化天然裂隙，現在用張力去活化天然裂隙。模擬結果岩石是熱源，水是載體，超過 375°C 水可以留住更多的熱但不表示岩石可傳遞更多熱(岩石有極限)，因此超臨界熱的擷取需要控制穩定發電率以避免產能隨時間降低。
Heat Harvester: Mazama Energy's Full-System Power Generation Optimizer for Superhot Rock EGS

6. 冰島地區的超熱岩，超臨界熱定義為溫度大於 374°C，壓力大於 220 bar，超級熱岩則定義為溫度大於 360°C，為何需要超級熱，利用鑽更深的井到達地熱系統的根部，擴充目前儲集層在體積及時間，如此可節省成本及改善發電效率，目前已鑽遇超級熱的 Krafla, K-4, 1975 無法控制的井噴噴發數個月; K-25, 1988 侵蝕掉開孔的襯管; k-30, 2009, 鑽穿岩漿侵入體; IDDP-1, 2009。其他有 bG-3 > 380°C, 2006, 7-30MW; IDDP-2 > 500°C。這些超級熱的井有幾項特色，流體的來源與周圍的熱液系統相似，有相對低的地熱氣體含量，如 CO₂、H₂S，HCL 氣體導致嚴重之腐蝕，高矽及高壓力需要避免井下沉澱結垢。這種井生產的挑戰，包含熱膨脹或影響套管及井口閥門、管線等。高井口蒸氣壓要避免井下矽華的沉澱結構，高流速分子會造成井管侵蝕，凝結的 HCL 會造成井管腐蝕。因此地表管材、熱交換機及渦輪機均要有特別處置。目前冰島上有多個鑽井計畫及深部回注計畫預計執行，邀請更多合作加入。

Session 5B: Geophysics

1. 利用 MT data 比對井內的換質及溫度可以有效定義溫度對比與蓋層有關的電阻值，我們或許知道理想的熱對流模式為地熱系統有個蓋層封阻了熱液的向上流動，封阻的特性來自於黏土化的礦物組成，如蒙脫石(Smectite)或其他複合黏土礦物層。低電阻($<10\Omega\text{m}$)代表較低溫的黏土蓋層，而往下過渡帶含有較脆性的伊萊石、綠泥石，會與較高電阻值相關已會有較高的溫度。本研究利用印尼蘇門答臘地熱井的黏土蓋層底部進行溫度與電阻值的對比分析。Base of Caprock Temperature Characterization in Sumatra Island, Study Case in PGE Fields
2. 電磁學法扮演發展地熱資源相當重要的技術地位，火山地區高熱焔系統的深部導電體地質成因，溫度會控制換質，熱液換質會控制電阻率，而電阻率則跟溫度相連結。但是前述模型卻省略了更深部的電阻值討論，現今的火山地區三維地電阻模型，幾乎有一半都可以看見更深部的導電體。淺部的低阻導電體，是由黏土化的換質帶造成，如蒙脫石；而往地層深部接續的較高電阻阻抗體，則為青磐岩化的換質帶區域，由含鐵及含硫的熱液造成，綠簾石-綠泥石-黃鐵礦，伴有赤鐵礦和磁鐵礦的變質相；再往下更深的低阻導電體，組成則可能為酸性流體煙柱(H_2S)或黃鐵礦 FeS_2 、岩漿驅動的鹵水、火成作用結晶的軟糊物、深部岩漿的補注通道或深埋的沉積物，了解深部低電阻成因相當重要，這深度會與岩漿源的深度相遇，需仔細觀察其往深處延伸程度。火成岩漿系統有複雜的結構和多種相態的組成，但在 MT 模型內，如此複雜的異相性，可以均質的低電阻導體成像。從岩漿熔融模擬三相態到計算導電度，在隨時間變化的過程模擬，可幫助了解電阻值的反應。舉幾個例子討論 Ethiopia(衣索比亞), Djibouti(吉布地), Indonesia,此三區均有 MT 的三維分析，均有火山地熱系統的地表高溫表現，以及深部導電體已有一些調查資料。東非裂谷系統一些深部導體的調查，跟陸殼張裂有關，在裂谷周圍有 4 個地熱調查計畫均有發現深部導體。衣索比亞的 Aluto、Tulu Moye、Corbetti，三維 MT 模擬是利用 GeFEM 進行(Grayver, 2014)，這三區的導體依前述區分成 C1、C2、C3，C1 已經利用鑽探驗證為黏土蓋層，C2 研判為上部岩漿團或鹵水儲集層，C3

則為源自於深部岩岩漿源。在東非的吉布地(Asal Fiale 場域)，具有高岩漿活動性，最近一次為 1978 年的地表裂隙噴發，淺層低電阻可對應到黏土蓋層及鹵水流體，可看到在 3 公里深以下有一個明顯的低電阻區，有研究指出這導體為玄武岩質的岩漿熔融。印尼蘇門達臘北邊的 Sibayak, 低電阻在火山口地區一直往深部延伸有根部，指示其為侵入岩體的岩漿來源通道，鑽井已經有發現黃鐵礦，熱液流體為火成蒸氣之主要來源。爪哇島西部的 Patuha, 西元 1600 年以來沒有火成活動紀錄，但是地表熱液徵兆很多，這裡也有發現淺部導體跟深部導電體，且深度導體無往下延伸，可能沒有根部，這種獨立形狀且缺少火成活動的地區指出導體可能為深埋的火山碎屑岩(約在地形面下 2000-4000 公尺)，或者是次火山海洋沉積物。爪哇島西部的 Dieng, 最近 1000 年沒有火山噴發過，但是火山口常有蒸汽噴發，他有淺層的低電阻層為蓋層，也有相對淺的深部導體，同樣從模型看來也沒有根部，此種孤立的深部低電阻層，解釋成岩漿源的鹵水透鏡狀的分布、熱液 plume 或黃鐵礦富集區。結論為火山地區深部的導體，地質意義依各區域特性有異，仍為一持續研究之議題。但是值得注意的是，如果找不到可能的地質成因解釋時，那必須回去再檢視 MT model，很有可能是測站資料品質出現問題。The nature of deep electrical conductors observed by the magnetotelluric method under volcanic high-enthalpy geothermal systems

3. 西印度群島，加勒比海系列的火山島嶼，若從事地熱發展，可減少對於化石燃料的依賴。本研究探討蒙哲臘島(Montserrat)的研究，該島也是屬於典型火山地熱系統，有岩漿上湧區及向外流通區。從 MT 的研究也可辨識出淺層黏土蓋層、較深層的導體、以及主要斷裂帶，斷裂帶附近伴隨地震發生。利用震波速度的比對，在靠近熱液換質區的 V_p 速度值，降低約 9%，研究進一步比對了溫度值、礦物成分黏土含量；得到結論當溫度增加到 150 時， V_p 可能降低 9%。岩性、孔隙率熱液換值都會影響到 V_p 、 V_s ，需要建立岩石學及地球物理的資料庫，以供能擴大尺度之分析及研究。Meso-scale geophysical characterisation of the geothermal system in Montserrat, West Indies
4. 利用全球案例進行地熱誘發地震之示警研究。研究芬蘭、加拿大亞伯達省的案例，設計偵測到地震規模、PGA、PGV 的紅黃綠燈示警等級。芬蘭在收集相當多注水深度、體積、壓力之監測案例後，統計紀錄到

的誘發地震事件，歸納出綠燈 $PGV=0.3\text{mm/s}$, $M<1.6$ ，黃燈 $PGV>1\text{mm/s}$ 及 M 介於 1.6-2.5 間。紅燈為 $M>2.5$ 及 $PGV>7.5\text{mm/s}$ 。加拿大則設計風險指標主要考量人身安全、災害風險及設計錯誤風險。因此輸入參數跟考量風險有關，進行風險指標估算。因此要設計地震示警的紅黃綠燈系統需有不同觀測數據及統計分析進行考量，若要進一步增地質分析的穩定性，則要取得更多回注相關的地下資料。Mitigating Induced Seismicity in Geothermal Energy Production: The Application of the Traffic Light System (TLS) and Global Case Studies

5. 美國猶他地區的鑽井計畫 Cape 計畫設計一個即時誘發地震監測系統，Fervo 已經鑽了 1 口深直井及 14 口水平井，其中 3 口水平井的激發裂隙注水計畫，此計畫是鄰近 Utah FORGE 計畫的場址進行，這些鑽井計畫都要有完整的井下電測分析井下裂隙方位，場址附近也布設 23 組地震站監測注水行為的誘發地震，而臨時性的光纖監測系統也跟著井套管安裝在井體內，總共 45 天的回注計畫，記錄到誘發的地震，也分析震源機制。這個地震即時監測系統，可監控制在注入期間對應的紅黃綠燈示警機制，而且在做這計畫前也與周圍社區進行溝通，光纖布設所分析井下的誘發震源機制分析，均為此計畫能順利執行的關鍵。Microseismic monitoring during a next generation enhanced geothermal system at Cape Modern, Utah



圖 3. 海報展區。大會制訂了統一的海報格式，採取內容審查制同時檢視海報格式。

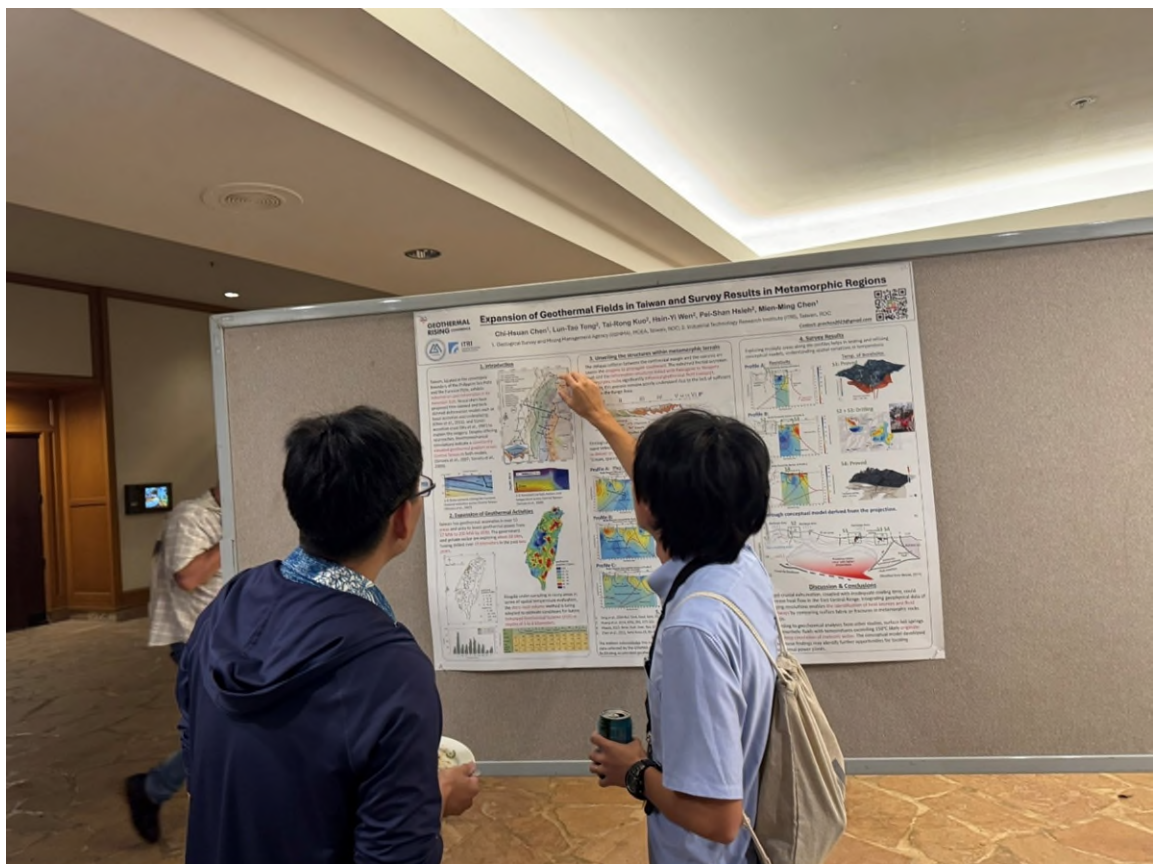


圖 4. 發表東部變質岩區地熱模型海報。日本地熱業者來海報前討論。



圖 5. 廠商展覽區。



圖 6. 會議交流休息區。

(二)電廠參觀 Puna Geothermal Venture(PGV)電廠

普納地熱系統（PGV）是位於夏威夷基拉韋火山東裂谷的 38MW 聯合循環地熱發電廠，是夏威夷唯一一座地熱電廠，足以供給 28,000 戶之電量使用（約佔社區使用量的 10%）。目前屬 Ormat Technologies 所有。該系統由 280-320°C 的液相主導高溫地熱資源提供能量。2018 年基拉韋火山噴發產生 10 億立方米的熔岩，導致電廠關閉，PGV 與監督合作夥伴密切合作，設計、工程並清理了一條通往該設施的新道路，直到 2020 年恢復運行。隨後完成了一系列鑽井計劃，新增生產井及回注井，使發電量重回 30MW 以上。通過地質、地球物理與地球化學數據整合，成功獲取聲學井下影像數據，分析地下裂隙和滲透性控制因素，也建立該地熱系統的概念模型。目前已取得計畫挹注，預計 2026 年要達到 46MW 的發電裝置目標。



圖 8. Puna 地熱電廠(PGV)參訪。電廠由現場經理進行簡報。



圖 9. PGV 電廠全景。



圖 10. PGV 地熱電廠及其地理位置。

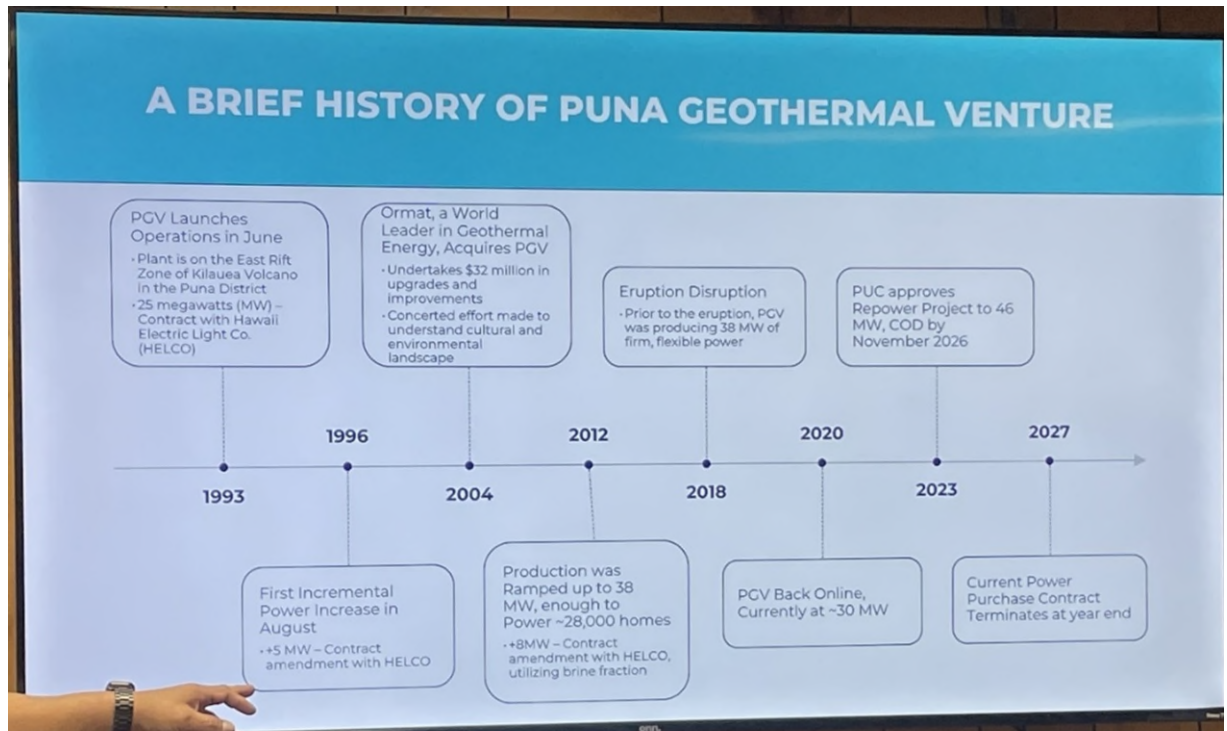


圖 11. PGV 地熱電廠沿革簡報。

區域地質與構造背景

PGV 位於夏威夷大島基拉韋火山的火山裂谷中。夏威夷群島由 8 個主要島嶼及 129 個次要島嶼與海底火山組成，這些群島由過去約 70 百萬年的地函熱點噴發活動形成 (Wilson, 1963)。大島為群島中最年輕島嶼，由五個主要盾狀火山組成、最年輕即為基拉韋火山。而最新的活躍火山，卡瑪埃胡阿卡納洛亞 (原名洛希) 位於基拉韋火山東南方海底 (Sherrod et al., 2021)。基拉韋火山的系統模型顯示，岩漿從 30-60 公里深處的地函上升，並由於浮力儲存在約 2-4 公里深的頂部儲存庫中，或者在 3-10 公里深處儲存於岩漿熔融的裂谷中 (Ryan, 1988)。

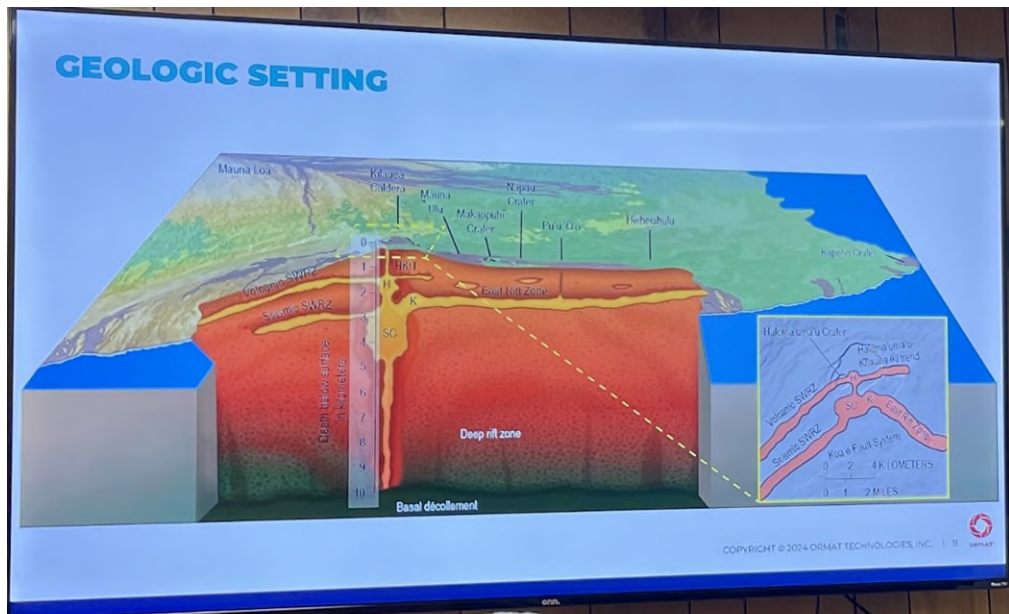


圖 12. PGV 地熱地質模型。

為進一步了解該場域的調查研究計畫，也參與了研討會內與此電廠相關的演講場次。

5. Conceptual Model of the Puna Geothermal System (11:20 AM - 11:40 AM)

PGV 回注井 KS-21 於 2022 年 11 月開鑽，並於 2023 年 1 月鑽探至總深度 2400 公尺。回注測試顯示，KS-21 的注入率指數為 ± 2.7 gpm/psi，這是自 2018 年基拉韋火山噴發以來在該領域觀察到的最高滲透率。KS-21 與東裂谷帶趨勢平行的 NE 走向裂縫相關的深滲透性，此走向的鑽探得知為一系列被輝綠岩岩脈侵入的地下和海底玄武岩，通過關鍵目標裂縫的多個交叉構造遇到了高滲透率。鑽屑分析和聲學鑽孔圖像測井，為 PGV 的首次成功圖像測井，雖然由於泥漿引起的信號衰減，影像質量欠佳，但仍辨識出 248 處構造特徵，為地下條件和儲層的滲透結構提供了新的解釋，為概念模型提供了新的邊界條件，以因應未來的儲層定位和資源管理。

地熱系統位於火山裂谷中，滲透性主要由裂谷平行的岩脈和裂谷垂直的構造所控制。系統被黏土蓋層覆蓋，井下地質資料顯示，普納地熱系統包括三個主要地層單元，從淺至深分別為：1) 玄武岩熔岩流，2) 以玻璃碎屑岩為主的近岸沉積物，3) 海底枕狀玄武岩。整個地層內分布著輝綠岩岩脈，且隨深度增加岩脈的密度與寬度均有所增長。

- 高滲透區域：滲透性主要與裂谷方向平行的垂直裂隙相關，這些裂隙通常位於輝綠岩脈的下盤側。

- 裂隙與岩脈的交互作用：裂隙的方向主要平行於裂谷的東北東走向，少數裂隙方向為垂直或向西北傾斜。

井下岩石的熱液改變表現在黏土、綠泥石與黃鐵礦的替代礦物化，並隨深度增加逐漸普遍。四種礦物組合反映了不同的溫度區間(150-287°C)，這些礦物填充於裂隙或氣孔中，對於資源開發與管理具有重要意義。普納地熱系統中的玄武岩至輝綠岩基質岩石經受熱液換質，表現為替代礦物化作用以及裂隙或氣孔中次生礦物的沉積。主要的替代礦物包括：黏土、綠泥石、黃鐵礦。這些替代作用在約 455 公尺時開始出現，並在 1220 公尺以下變得更加普遍。

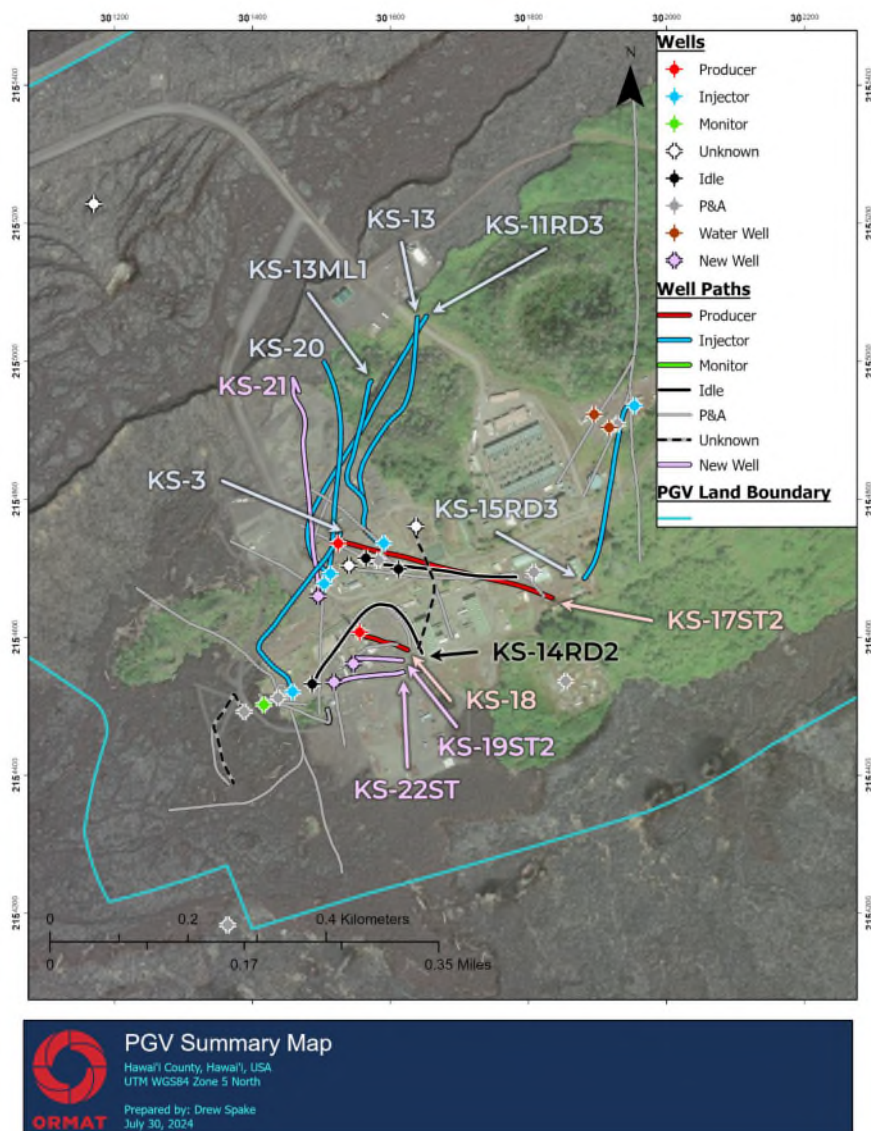


圖 13.. 電廠內地熱鑽井位置分布。除了主要生產井及回注井外，另外也鑽鑿了數孔淺層監測井。以此 30MW 規模地熱電廠，各種深淺不同功能井體總數也達 30 孔。

黏土含量與熱液改變的影響。在岩屑中發現的高黏土含量主要由兩方面決定：1.溫度驅動的改變過程。2.基盤岩性的特徵，特別是玻璃質碎屑岩的豐富性。黏土層的分佈：廣泛的黏土層始於地下約 792 公尺，並延伸至不同深度，形成覆蓋對流熱液系統的黏土蓋層。黏土蓋層由熔岩流、玻璃碎屑岩和枕狀玄武岩的熱液改變形成，這些岩石中含有大量易於黏土化的火山玻璃。黏土蓋層的分佈存在不均勻性，但其主要隨 200°C 等溫線分佈，因為黏土礦物（如蒙脫石）在高於該溫度時不穩定（Reyes, 1990）。黏土層與未改變的玄武岩和玻璃岩交錯，表示蓋層的換質作用並不完全。流體和蒸汽的微量滲漏：局部構造不連續性導致下伏熱液系統中的流體和蒸汽少量泄漏。這種現象在全球地熱系統中常見，並導致地表出現蒸汽和流體滲漏的表現（Rowland and Simmons, 2002）。

裂隙充填礦物的組合 普納地熱系統中，根據溫度和深度的不同，識別出幾種主要的裂隙充填礦物組合：

1. 低溫組合（淺層，150-200°C）：

- 主要包括無定形二氧化矽（蛋白石和玉髓）、硬石膏、黃鐵礦，伴隨粘土/綠泥石、沸石及方解石。

2. 中至高溫組合（中層，200-287°C）：

- 由硬石膏、黃鐵礦、石英、綠泥石，以及少量石榴子石和黃銅礦組成。

3. 高溫組合（深層，≥287°C）：

- 包括石英、綠簾石、綠泥石，以及少量透閃石和硬石膏。

利用鑽井岩屑分析，多井溫度量測，以及井測分析之裂隙及滲透層，彙整以下井下地熱概念模型。

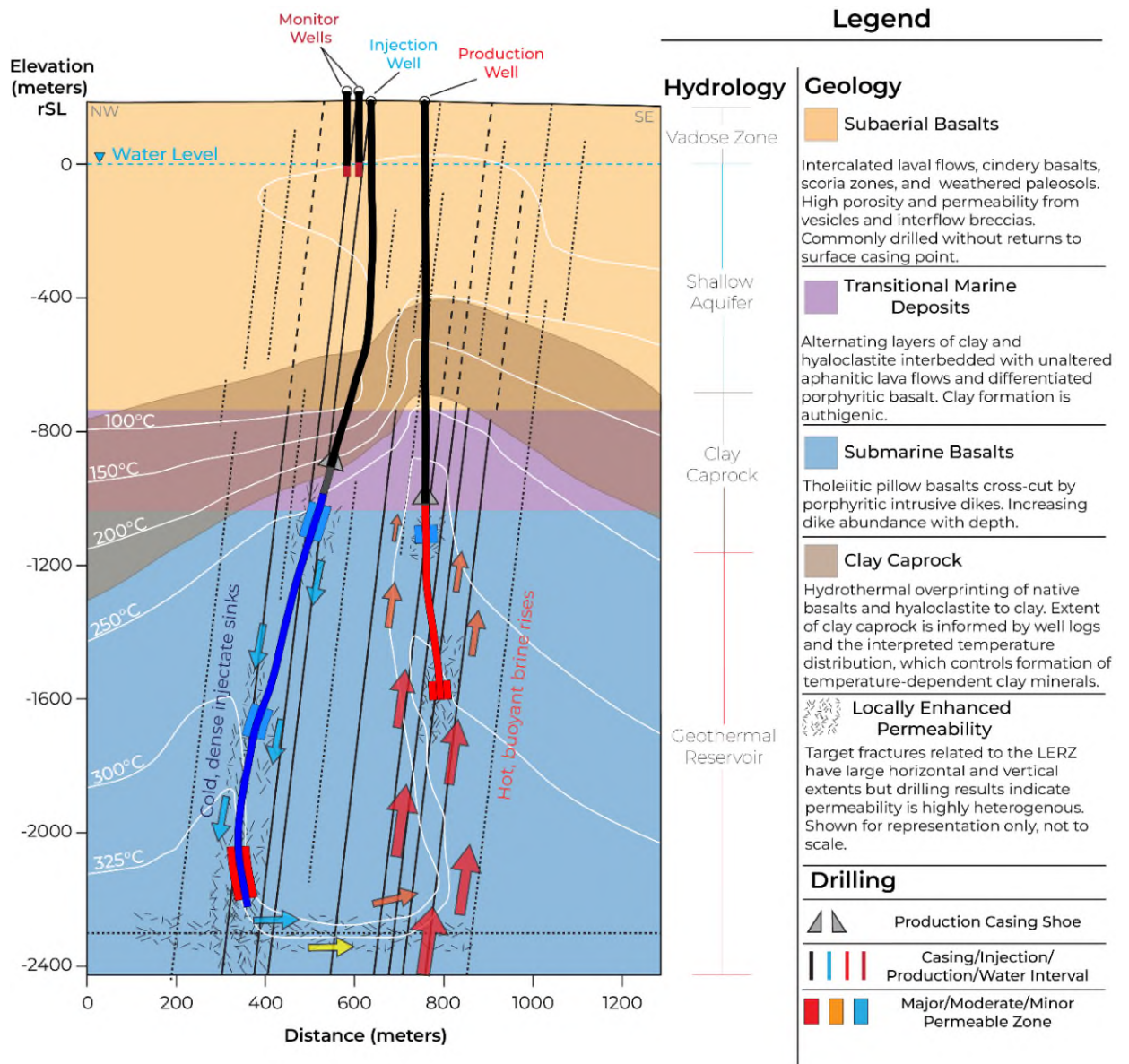


圖 14. 鑽井及地熱概念模型。

1. Detailed Airborne Magnetic Survey of the Puna Geothermal Venture and the Lower East Rift Zone, Island of Hawai'i (1:30 PM - 1:50 PM)

早期對基拉韋火山東側的磁力調查主要依賴於美國地質調查局於 1978 年進行的「普納森林」航空磁力，當時調查飛行線間距為 0.8 至 1.6 公里，證明磁力技術是成像裂谷區結構的有效工具(Flanigan & Long, 1987)。Ormat 的 2024 年機載磁力勘測利用更密集的線距（100 米間距）磁探測設備和處理技術來描繪 PGV 及其附近較小規模的裂縫。下東裂谷區（LERZ）的特點是從基拉韋山頂向下延伸到其東南側的磁高異常，在 PGV 附近顯著裂隙左側高磁，形成一個具有增強磁導率的區域，該區域承載著地熱系統中的流體運動。

本次調查捕獲的磁特徵顯示沿 N63E LERZ 主要趨勢的明顯磁力異常，其橫切特徵垂直於區域 LERZ 趨勢。儘管 N63E 趨勢的裂縫和裂縫特徵明確且具有滲透性，但橫切特徵的結構性質尚不清楚。然而，在 PGV 井圖像測井中判釋的 NW/SE 結構因其地熱意義而值得進一步研究（Spake，2024 年）。在 PGV 進行的示蹤劑測試證實了 PGV 存在橫切結構，可能作為流體流動的途徑。在地質均質的環境中，預期會有基本均勻的磁特徵；LERZ 上的玄武岩呈現出強磁高點與相鄰磁低點（ ± 6000 nT）並列的對比。這項調查代表了在 PGV 複雜的磁性和構造環境方面取得的重大進展。值得注意的是在這地熱資源深度超過 900 公尺區域，磁力調查並未與熱液系統上部的磁性礦物改變直接相關。反而磁力異常的中斷與裂谷趨勢相關，可能反映磁力變化的深層結構，其可能影響滲透性通道。

Ormat 公司進行了一次針對 PGV 的高解析度空中磁力調查，揭示了以下關鍵特徵：

- 磁異常與裂谷噴發通道和斷層高度相關。
- 磁力數據顯示，裂谷的淺層岩脈與裂谷幾何形狀相符，包括裂谷在普納地熱系統附近的左階抬升特徵。
- 一些磁異常的斷裂結構呈 NW-SE 方向（約 $333^{\circ}/153^{\circ}$ ），支持該區域內存在垂直於裂谷的裂隙。

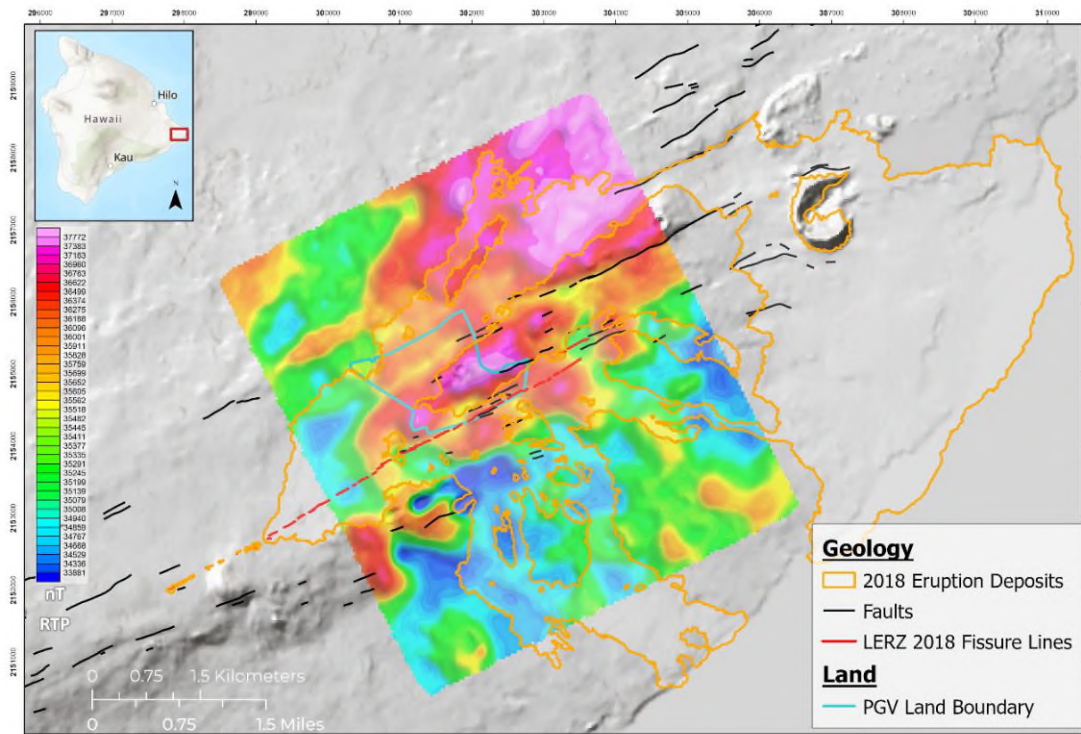


圖 15. 歸極處理後(RTP)的全磁場強度。覆蓋基拉韋火山東裂谷和普納地熱系統的數據結果。圖中顯示了2018年噴發形成的玄武岩沉積物(橙色邊界)，磁異常不直接與這些沉積物相關，顯示此技術能解析更深層的結構。

(三)參訪夏威夷火山國家公園

本次野外行程參訪了夏威夷火山國家公園，國家公園內有有旅館供住宿，相當適合徒步旅行。其中基拉韋火山主峰火山口(Summit Caldera)，號稱是唯一可以開車到達的火山口，且可以走進破火山口的凝固熔岩流上。此火山因 1959 年的噴發而聞名，產生了高達 1900 英尺的熔岩噴泉，並在火山口形成了一個熔岩湖。2018 年 4 月 30 日，普納火山口發生大規模塌陷岩漿湖消失。隨後在一場 5.0 級的地震後，岩漿大量噴出，熔岩將東側的卡波霍灣以及綠湖（夏威夷島面積最大的天然淡水湖）全部摧毀，導致近 2000 人撤離並造成 1 人重傷。噴發於 2018 年 8 月中旬減弱此次爆發形成的最大火山口被命名為 Ahu‘ailā‘au。



圖 16. 夏威夷火山國家公園火山噴發口。

基拉韋火山的大部分由玄武岩質的熔岩流組成，間歇有火山灰和相對較少量爆炸式噴發的火山噴發碎屑，因此基拉韋厄火山沒有錐狀火山外型。基拉韋火山隨著時間的推移從海底建立起來，因此它的大部分體積仍然在水下；地面表面呈緩傾斜，細長，分散的盾形，面積約為 1,500 km²，佔該島總面積的 13.7% (維基百科)。



圖 17. 基拉韋主火山口。在熔岩流谷地內仍有火山噴氣口持續冒煙。



圖 18. 基拉韋火山伊基火山口。中間穿越之淡線路跡，即為可散步於熔岩流上之步道。



圖 19. 熔岩流洞穴。熔岩流流動時形成之天然地下隧道。



圖 20. 火山國家公園內解說牌。

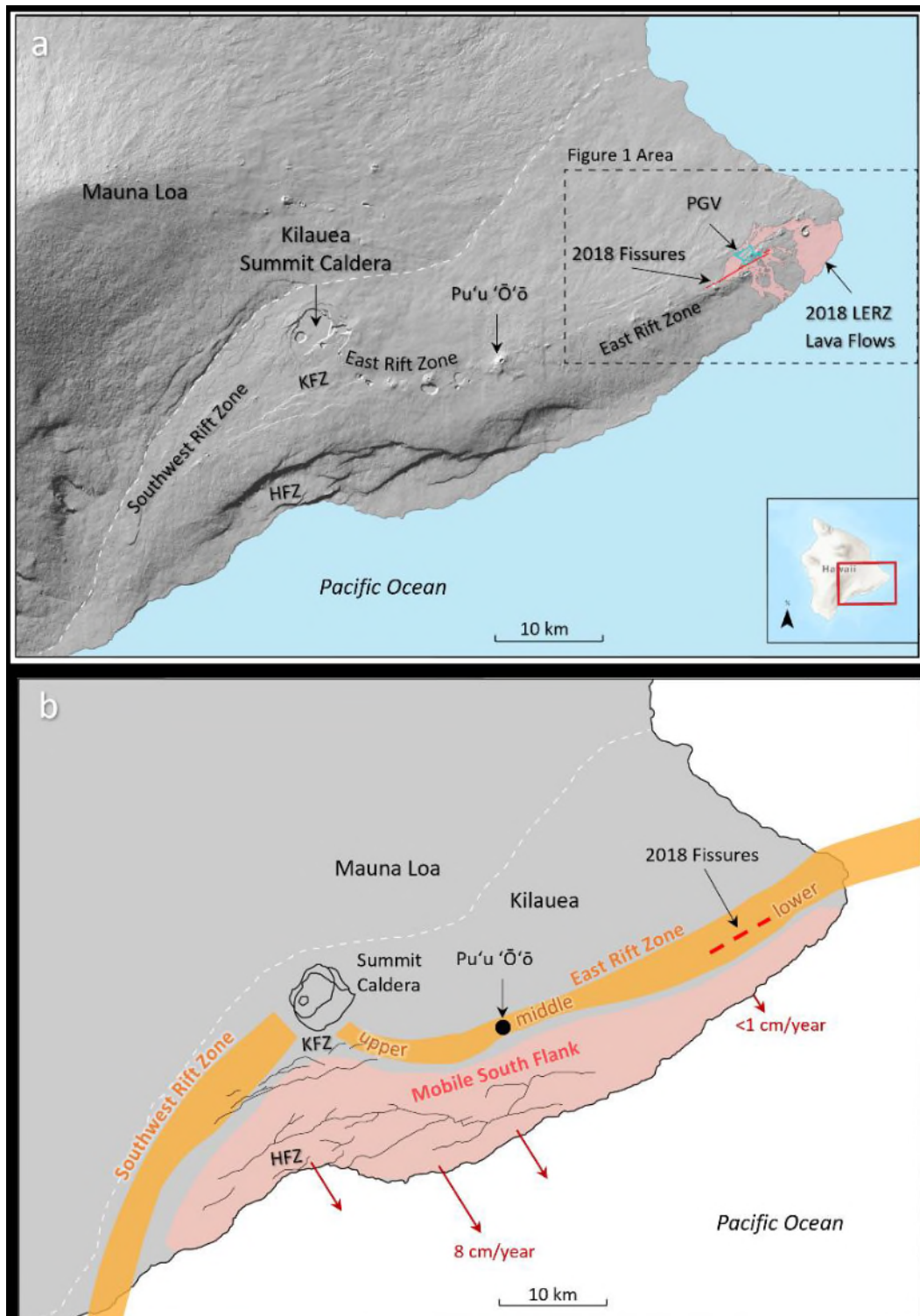


圖 21. 夏威夷大島東南方基拉韋火山口岩漿通道範圍圖。

由 2018 年基拉韋火山的噴發調查顯示，及上圖 LiDAR 地形的破火山口、線型構造延伸，均可判釋出火山與 PGV 電廠為東裂谷帶為同一系列裂隙的岩漿通道，裂谷帶以南，地塊呈現向東南方張裂移動，也因此為現生

活躍的火山構造。

後記：

夏威夷第二大的基拉韋火山，於 10 月底造訪後，2024/12/23 號再度噴發，熔岩一度噴到高 80 公尺，岩漿在火山口內流竄，含二氧化碳及硫化氫之火山氣體伴隨噴出。23 號凌晨，開始出現地震活動，噴發主要集中在造訪的 Summit Caldera 主火山口。



圖 22. 火山噴發新聞畫面。達志影像美聯社。

三、心得及建議

為對抗全球氣候變遷、地球升溫、溫室氣體排放議題，地熱為目前全球用來擺脫化石燃料，寄與厚望的能源項目，也是我國對於能源產業的轉型，以及對於 2050 淨零路徑的前瞻能源貢獻項目。本次參加國際地熱大會，感受到地熱產業在各國間的發展關係相對緊密，全球在這產業領域的人口相對少，因此地熱投資開發商、技術商、及設備商也都相對耳熟能詳，例如 ORMAT、EAVOR、Kenaj Drilling、SLB、Baker Hughes、BLUESPARK、NALCOWATER、Geologica、Halliburton、Jacobs 等。地熱需要借重地球科學領域的專業知識，如地質學、地球物理學、地球化學，因此為能將科學轉化為實際產業的最佳路徑。由於對地球提取能源，是一個國際新創市場，因此各項開發技術在各個場域被賞識及發展，除了傳統型地熱(CGS)、增強型地熱(EGS)、進階型地熱(AGS)、超臨界地熱(SGS)、又持續發展超級熱地熱(SHR)，以期能達降低成本後。到處都有地熱(Geothermal everywhere)的境界。

目前地熱發展需要國際間彼此的資金投入及技術資源，以及彼此的經驗分享。每個國家都在發展各自的先進技術及場域經驗，參與國際會議，為能快速收納多個場域的經驗的快速途徑。本次會議參與的幾項專題討論，包含鑽井技術、儲集層監測技術、EGS 的發展利用、超級熱岩的地熱型態、以及地球物理調查模式。而參訪地熱電廠，可了解一個場域的發展歷史、地熱地質模型、發展經驗及對於社區及城市再生能源的貢獻。經綜合比對目前我國地熱場域可能遭遇問題，及可應用的地熱開發型態，歸納出以下幾點心得：

(一)鑽井技術

大規模的地熱開展，取決於向地下鑽進及對儲集層處置之開採技術，美國過去累積油頁岩的開採技術，在水平地層以工程手段製造地層裂隙有相當多經驗，直接將油氣井技術轉化成地熱開採，為目前地熱工業領域相當大的討論主題。本次研討會的鑽井工程，討論到導向鑽井鑽具耐溫的提升，增加 PDC 鑽頭鑽進速度的設計應用、鑽井溫度的控制、

水平井鑽進軌跡與對地層磨擦力的控制。目前國際地熱發展的目標為超過 300°C，過去油氣井或油頁岩鑽井也無此種溫度的技術，因此鑽井工程技術，為須持續突破技術極限的項目。

我國除了台灣中油公司擁有油氣井 5 公里以上的鑽井技術以外，僅有少數幾家民間鑽井公司，可執行超過 1 公里以上的地熱井，若要鑽進超過 2 公里則僅更少有此機具及技術能力，這對於要發展地熱事業具有相當大挑戰。本中心近兩年鑽探遭遇地下地層緩慢的問題，有因地層湧水、地層裂隙、堅硬地層、井噴壓力等，且大部分地熱井鄰近有村莊聚落，受到要求 1 天只能 12 小時施工，鑽進速度無法提升，以致影響整體發展規模。

(二) EGS 增強型地熱系統及監測示警系統

為發展非傳統型地熱，免除受到水量及地層壓力不足，導致影響發電效能，增強型地熱系統需要利用工程手段，在地層間加壓注水增加裂隙，並利用水平鑽井，增加目標地層的激發裂隙體積。鑽井工程界已經發展到設計鑽頭、鑽鏈系統、鑽進溫控系統、AI 分析裂隙出水深度方位等，而熱、水、力學的模擬軟體，可用來分析需要開幾組裂隙，以及對井(注水井及抽水井)的間距。各國為提升地熱使用規模，近期把發展目標放在 EGS 上，我國也大致遵循國際經驗及路徑，然而由於如前述在鑽井工業量能與技術的不足，工程進展短期需要取經國際公司；而在地下條件模擬，我國則已有相關技術性的研究開展進行。

EGS 的地層液裂會誘發地震，誘發地震需要在可控的範圍內，也須做好社會溝通，在監控的議題上，已經有多個國際經驗設計利用地震觀測站、井下光纖 DAS，統計注水體積、注水量、誘發地震規模、地動 PGA、PGV 等，建立紅黃綠燈的警示系統，及進行風險認定。各項燈號對應設計調整工程液裂程序及民眾須跟進應變程序。

(三) 超級熱岩(SHR)系統

超熱岩體定義為溫度超過 360°C；超臨界流體地熱系統定義為溫度 >374°C 及壓力 >220bars。由於世界上已有超過 20 口鑽井鑽至超熱岩體。超熱岩體單口井的產能可達 40-50MW，若能發展超熱岩體發電，其經技術成熟後的均化能源成本(LCOE)最低。因此這類型的地熱發電，為吸引各項技術新創革新的目標，目前國際上有 6 個地區從事超熱岩體的研究計畫，2024 年地熱界舉辦多次關於超熱岩體的研討會，讓與會者發想在法規、社群、技術上如何發展技術路徑。超級熱岩體系統深度約 5-15 公里，若在地溫梯度 100°C/km 以上(大部分為火山區域)發展，則深度可減少到 5 公里以內。本項地熱系統在國際上為創新設計階段，過去鑽井井體也有部分套管受高溫(200°C)毀壞，鑽具套管接頭目前也尚有一些技術瓶頸，各國從事也都會先分析各項技術成熟度，以及成本估算。

我國地熱目前探勘進度在大屯火山地區，地溫梯度超過 100°C/km，3-5km 範圍內有機會達 SHR；而變質岩地區梯度約 55°C/km，至少要 6 公里深才有可能達超熱岩系統。近年大屯山馬槽地區 1 公里的鑽井溫度約 250°C，已是國內近 40 年來鑽探的最高溫度，產能表現可能為最好的井。高溫井內的泥漿循環、井壁灌漿、井管接縫強度、井內試驗、井體壓力、產能測試、蒸汽摩擦阻力平衡等，如果如國際經驗所述，我們都才都正開始有實井調校試驗。但由於目前發現井底壓力太大，噴流或井體孔徑太小，可能無法讓產能完整發揮。但馬槽接近七星山火山口，1970 年代鑽井也曾在一千多公尺的井內量測到 290°C，顯示未來我國在靠近火山中心，應有機會持續向深部鑽探達到發展 SHR 的機會。

(四) 地球物理探勘項目

空中磁力、重力、震波速度、以及大地電磁法 MT，為最常用來辨識地熱構造的地球物理調查項目。Puna 火山電廠的空中磁測調查，顯示了磁力線型構造與岩漿噴發通道有關，且與地表熔岩流的範圍並不相同，指示深部的岩漿構造。蒙哲獵島的火山換質帶 Vp 數值約降低了 9%，USGS 進行內華達州布法羅山谷，搭配各種地球物理調查，圈繪地殼構

造邊界，而另位有以 LiDAR 影像判釋線型，利用衛星長短紅外線波段，判釋地熱潛能區。本次於會場中也參訪 STRYDE 微型反射震測接收器，以及井下電測耐溫包覆套件。

MT(大地電磁法)為地熱探勘中最廣泛使用的地球物理技術，研究分析顯示三維電阻值、熱液換質礦物成分及溫度，彼此間有特定關係，因此火山地區黏土蓋層，大多數的火山地區都容易被辨識出來。也有研究利用電阻值進一步比對礦物成分，界定溫度範圍區間。因此建立三項地學的相互關係即可由調查過程中，研判地層物質及材料。PGV 地熱電廠建立的地熱概念模型，也分別點出了黏土礦物成分與井群溫度分布之關係。此項技術在我國火山地區調查也有應用到，然而除在火山淺部的低電阻，在更深部也發現電阻值過渡帶，及更深的低電阻體，在大屯火山群及國際上其他火山地區也有看到，剛開始調查出來時，還在討論幾種成因。在印尼火山研究，此種被孤立的深部低電阻層，解釋成岩漿源的鹵水透鏡狀的分布、熱液 plume 或黃鐵礦富集區。而大屯山的案例也可能為一高溫透鏡狀鹵水的分布。結論為火山地區深部的導體，地質意義依各區域特性有異，仍為一持續研究之議題。

(五)建議

1. 持續擴增本土鑽井量能：

近幾年我國地熱發電事業重啟後，從地質調查業、地物調查業、工程顧問業、鑽井工程業、投資者等市場開始活絡，經濟部也順其道而行，投入前期探勘調查、公開探勘資料、修訂再生能源條例，設立地熱法規專節，設立地熱專案辦公室輔導業者，推動探勘獎勵補助，推行躉購費率制度公告收購電價，鼓勵銀行融資等措施。然而國際間的發展腳步更快，從傳統型地熱進化到增強型地熱，再蛻變成進階型地熱，現在已有超臨界地熱、超級熱岩地熱系統等。每一項都是國際市場不斷改進的技術原型及創新。除了後端的發電技術外，最主要還是依賴前段的鑽井工程及取熱技術，在克服技術缺口後，直指岩漿來源，直接提升單口井產能 10 倍成長並降低均化成本。

本中心近兩年拓展全台地熱調查計畫，發包民間鑽商進行鑽井大孔徑有 2 孔，小口徑取芯探井有 10 口，加上能源署地熱開發獎勵措施推波助瀾，2024 年間，已開始有多家業者添購新鑽機，逐步提升我國鑽探量能及技術。我國擁有發展傳統型地熱、增強型地熱、甚至在大屯山區具有發展超級熱岩的場址的條件。建議目前初期發展階段，可從擴大傳統地熱井鑽井需求，開始培力民間鑽井商；至於較高規格之鑽井技術，則仍需由較大規模國營企業，如中油公司與國外合作協力執行，持續在大屯山區等高溫區位，進行鑽探調查，同時與國際公司合作，進化相關高溫鑽井技術，或者直接引進國外鑽井技術商進行技術轉移。

2. 數據整合人工智慧應用：

我國重啟投入地熱領域調查時間相對較短，在有關地球科學領域的探勘科技，包含地質調查、地球物理調查、地球化學調查等，均需學習地質多樣性的技術適用程度。我國學界的地球科學學門，研究能量居世界前茅，也與各國多有交流，因此在各種調查技術的使用上能快速尋求學界的支援。然而當地熱越往開發路徑前進，則需要科學與工程及科學與實務的結合。除了中油公司以外，我國學界並無豐富的地下深處探勘經驗，因此累積經驗及累積數據為目前

階段的重點，未來人工智慧的崛起也可協助在相關資料特徵上之判斷。建議現階段應該開始建立數據格式標準，並累積成數據資料庫，開始走向人工智慧應用的規劃。

3. 持續加強國際合作：

地熱能源的發掘及開發，為全球通往淨零排放路徑的重要項目，而地熱能源的特性優點，包含可為基載能源、低碳排、可 24 小時發電、電廠用地相對小、可分散式布置、可儲能調配的特點，在全球地熱開發商及供應商的推波助瀾下，開啟了一波又一波的創新科技浪潮，目前已推廣到持續擴增鑽井設備、技術、深度及溫度，地熱應該走向 everywhere，火山地區也應該利用到高過 360°C 超高溫熱岩 (SHR) 或超臨界熱流 (SCS)。

本次參加 GRC，感受到國際地熱市場的活絡，各國經驗在法規處理、地質探勘、地熱模式、鑽井工程、地熱社群經營、低溫熱利用、綠色融資、海外資金均有相當多的經驗，尤其在創造樂觀前景的行銷方面。我國近幾年也每年都舉辦國際地熱研討會，同樣的國際社群也會進到臺灣來推廣市場，因此在發展過程中如遇到任何需求，可很輕易地尋求到國際的經驗及協助；於此同時，我國政府也展現極大的目標及決心，這也有利於吸引國際大廠及國內企業投入地熱發展。藉由此次參加美國地熱大會的技術探討與會議，相關技術討論的心得希望可應用於地熱場域，以加速地熱開發願景。

附錄

附錄:議程議題綜覽

Schedule at a Glance

Monday, October 28, 2024

8:00 AM - 10:00 AM

[Opening Plenary Session: Exploring the Geothermal Story](#)

10:30 AM - 12:30 PM

[Plenary Session II: Harnessing the Energy - Leaders and Innovations in Geothermal](#)

Exhibit Hall

[Planning Your Career, and Developing the Next Generation Workforce in the Energy Transition](#)

[Technical Poster Hub](#)

3:00 PM - 5:00 PM

[Panel 1A: Geothermal Focused Community Engagement](#)

[Session 1B: Low Temperature/Direct Use](#)

Kohala 1-2

- 1. National modeling of geothermal district energy systems with ambient-temperature loops using dGeo (3:00 PM - 3:20 PM)
- 2. Developing Geothermal District Heating in Lakeview, Oregon (3:20 PM - 3:40 PM)
- 3. Advancing District Energy Geoexchange Solutions in Single Family Home and Mixed-Use Communities: Strategies and Real-World Insights (3:40 PM - 4:00 PM)
- 4. City-scale Thermal Energy Network Design for Utility Decision Makers (4:00 PM - 4:20 PM)
- 5. Rangárveita, a small district heating in the south part of Iceland - Future master plan (4:20 PM - 4:40 PM)
- 6. Exploring the Open Loop Geothermal Potential of the Penn South Neighborhood, NY Using Numerical Modeling (4:40 PM - 5:00 PM)

[Session 1C: Drilling](#)

Kohala 3-4

- 1. Breaking the 200C Barrier – Development of an Integrated High Temperature Directional Drilling System (3:00 PM - 3:20 PM)
- 2. Managed Temperature Drilling: Real-Time Damage Monitoring of Insulated Drillpipes and an Automatic Controller to Mitigate Effects of Temperature Increase (3:20 PM - 3:40 PM)
- 3. Effect of Hydrostatic Pressure on Mechanical Specific Energy and Interfacial

Friction Angle in Hard Rock Drilling (3:40 PM - 4:00 PM)

- 4. Driving Down Exploration Costs in Geothermal (4:00 PM - 4:20 PM)
- 5. Enhanced Weight on Bit Application in Hard Rock Drilling Through Innovative Anchoring Technology (4:20 PM - 4:40 PM)
- 6. Optimizing Hard Rock Geothermal Drilling Efficiency with PDC Bits: A Comprehensive Study (4:40 PM - 5:00 PM)

Session 1D: Energy Conversion/Utilization

King's 1 (Grand Ballroom)

- 1. Optimizing Flexible Geothermal Energy Generation: A Techno-Economic Analysis Using FGEM for EGS Huff-n-Puff (3:00 PM - 3:20 PM)
- 2. Design, development, and performance analysis of an ejector prototype for connecting high and low-pressure geothermal wells (3:20 PM - 3:40 PM)
- 3. An Overview of the Performance Testing of a Supercritical CO₂ Geothermal Turbine (3:40 PM - 4:00 PM)
- 4. Optimized integration of Turboden ORC technology with FERVO proprietary EGS systems, for dispatchable baseload generation (4:00 PM - 4:20 PM)
- 5. Mechanical Evaluation of a Novel Cement Formulation used for Thermal Energy Storage Wells (4:20 PM - 4:40 PM)
- 6. High Pressure Pelton Turbines: A Simple Yet Effective Means of Scaling the Energy Storage and Geothermal Industry (4:40 PM - 5:00 PM)

Session 1E: Closed Loop/Advanced Geothermal Systems

King's 2 (Grand Ballroom)

- 1. Techno-Economic Viability of Flexible Dispatch of Unconventional Geothermal Systems (3:00 PM - 3:20 PM)
- 2. Geomechanical Modelling for Closed-Loop Geothermal Development in Geretsried, Germany (3:20 PM - 3:40 PM)
- 3. Exploring Thermal Efficiency: Accurately assessing K-Values of Vacuum Insulated Tubulars for Geothermal Applications (3:40 PM - 4:00 PM)
- 4. Influence of reservoir convection on heating in closed-loop geothermal (4:00 PM - 4:20 PM)
- 5. Optimizing Geothermal Borehole Number and Positioning through Simulated Annealing Algorithm (4:20 PM - 4:40 PM)
- 6. On the potential of closed-loop long horizontal wells for heat storage (4:40 PM - 5:00 PM)

Session 1F: Geochemistry

King's 3 (Grand Ballroom)

- 1. Predicting Hydrothermal Reservoir Depth from Chemical Geothermometers Using a Three-Dimensional Temperature Model in the Great Basin, USA (3:00 PM - 3:20 PM)

- 2. Development of a New Screening Method for Low Silica Adhesion Resin Materials Based on the Ab Initio Quantum Chemical Approach (3:20 PM - 3:40 PM)
- 3. A Simple Predictive Tool for Geothermal Amorphous Aluminosilicate Scales: Correlation with Field Examples (3:40 PM - 4:00 PM)
- 4. Stable Isotope Characterization of the High Temperature Steam Reservoir of the Northwest Geysers: Review of Data Acquired During Step out Drilling Program and Integration into 3D Geological Model (4:00 PM - 4:20 PM)
- 5. Development of Reactive Transport Models for Very High Temperature Heat Aquifer Storage (VESTA) at a Pilot Site in Germany (4:20 PM - 4:40 PM)
- 6. How Important Is the Hydrothermal Alteration in the Upper Rhine Graben for Geothermal Lithium Assessment? (4:40 PM - 5:00 PM)

5:00 PM - 6:00 PM

[Geothermal Rising RIG Mixer](#)

Promenade Terrace

7:00 PM - 9:00 PM

[Monday Night Lū'au Mixer](#)

Kamehameha Court

Tuesday, October 29, 2024

7:30 AM - 9:30 AM

[Panel 2A: Advances & Innovations in Superhot Rock Geothermal: Resource Characterization, Well Design & Construction, and Project Development](#)

Monarchy (Grand Ballroom)

[Session 2B: Enhanced \(or Engineered\) Geothermal Systems](#)

Kohala 1-2

- 1. Experimental investigation of the flow behavior of Ionic Liquids for use as working fluids in Enhanced Geothermal Systems (7:30 AM - 7:50 AM)
- 2. EGS Reservoir Modeling for Developing Geothermal District Heating at Cornell University (7:50 AM - 8:10 AM)
- 3. Geopressured Geothermal System: An Efficient and Sustainable Heat Extraction Method (8:10 AM - 8:30 AM)
- 4. Operation Strategies to Avoid Thermal Short-circuit in EGSs with Horizontal Wells (8:30 AM - 8:50 AM)
- 5. Experimental Analysis of Fluid Hydraulics in Enhanced Geothermal Systems (8:50 AM - 9:10 AM)
- 6. Understanding Thermal Effects on In-Situ Stress Estimations Through Post-Peak Pressure Analysis from High-Temperature True-Triaxial Block Fracturing Experiments (9:10 AM - 9:30 AM)

[Session 2C: Drilling](#)

Kohala 3-4

- 1. High-Temperature Characterization and Drilling Simulation of Rock from Utah FORGE (7:30 AM - 7:50 AM)
- 2. Severe Lost Circulation Mitigation using Temperature Activated Materials (7:50 AM - 8:10 AM)
- 3. Expandable LCMs; An Effective Solution for Plugging Fractures (8:10 AM - 8:30 AM)
- 4. The Characteristics of the Overpressured Sedimentary Formation in Ulubelu Geothermal Field, Indonesia (8:30 AM - 8:50 AM)
- 5. Enhancing Geothermal Drilling Performance: A Stuck-Pipe Risk Advisor Leveraging Causal-AI and Semantic Web for Explainable Decision Support (8:50 AM - 9:10 AM)
- 6. Drilling Innovation Enables Faster Delivery of Geothermal Wells in Indonesia (9:10 AM - 9:30 AM)

Session 2D: Low-Temperature/Direct Use

King's 1 (Grand Ballroom)

- 1. Towards Accurate Geothermal Mapping: Analyzing BHT Correction Approaches in Presidio County, Texas (7:30 AM - 7:50 AM)
- 2. Optimization of Borehole Thermal Energy Storage in Design and Operating Schedules (7:50 AM - 8:10 AM)
- 3. Technical Feasibility of a Novel Geothermal-Solar Thermal Hybrid Plant (8:10 AM - 8:30 AM)
- 4. U.S. Department of Energy Community Geothermal Initiative (8:30 AM - 8:50 AM)
- 5. Low-Temperature Geothermal Play Fairway Analysis for the Denver Basin (8:50 AM - 9:10 AM)
- 6. Galleries-to-Calories (G2C): An International Collaboration Evaluating Thermal Energy Storage in Abandoned Mines for District Heating (9:10 AM - 9:30 AM)

Session 2E: Geology

King's 2 (Grand Ballroom)

- 1. Geothermal Resource and Opportunities Assessment of Colorado (7:30 AM - 7:50 AM)
- 2. Identifying Sedimentary Geothermal Play Types in the Cretaceous Strata of South Texas Through High Resolution Temperature-Depth Mapping Based on Corrected Bottom-Hole Temperature Measurements (7:50 AM - 8:10 AM)
- 3. Final Results of the Hawai'i Play Fairway Project (8:10 AM - 8:30 AM)
- 4. Exploring Geothermal Potential of Great Basin Sub-Regions (8:30 AM - 8:50 AM)
- 5. Geothermal Play Fairway Analysis (GPFA) - Part II: Texas/Gulf Coast Mechanisms of Heat Generation (8:50 AM - 9:10 AM)
- 6. Characterizing sedimentary geothermal plays and reservoirs of the Great Salt Lake Basin, Utah (9:10 AM - 9:30 AM)

Session 2F: Regional Updates

King's 3 (Grand Ballroom)

- 1. Evaluation of the Precambrian basement temperature below four South Slave communities, Northwest Territories, Canada (7:30 AM - 7:50 AM)
- 2. Fort Wainwright Army Installation Geothermal Prototype Initiative: Initial Results (7:50 AM - 8:10 AM)
- 3. Geothermal Development and Use, 1995-2024 (8:10 AM - 8:30 AM)
- 4. Canadian expertise and financing in global geothermal exploration and development (8:30 AM - 8:50 AM)
- 5. Quantifying Geothermal's Role in the Clean Energy Transition: Improving Geothermal Data, Analysis, and Model Representation (8:50 AM - 9:10 AM)
- 6. Geothermal in Western U.S. resource and transmission planning: a review of recent trends in the 2020s (9:10 AM - 9:30 AM)

10:00 AM - 12:00 PM

Panel 3A: Geological Thermal Energy Storage (GeOTES) in Sedimentary Reservoirs: Technology and Market Assessment

Monarchy (Grand Ballroom)

Session 3B: Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems

Kohala 1-2

- 1. Influence of hydraulic fracturing on induced seismicity based on a combined flow and geomechanical model (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Analysis of the Stimulated Volume and Seismicity Migration in Utah FORGE Stimulations (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. Scaling and Thermal Penetration Depth in Enhanced Geothermal Energy Production (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Learning curve of seismic risk mitigation for EGS since Basel 2006 to Utah FORGE 2024 from the perspective of a project developer (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Interpretation of Stimulated Permeability by Model Calibration with Data from Circulation Program at FORGE (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Integrated Life Cycle Simulation Study and Recommendations for Utah FORGE (11:40 AM - 12:00 PM)

Session 3C: Reservoir/Production

Kohala 3-4

- 1. Temporal Evolution of Kamojang Reservoir Pressure: Unraveling Upflow Dynamics in a Dry Steam Geothermal System Through Multidisciplinary Analysis (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Coupled multi-segment wellbore and thermal modeling in a deep sedimentary geothermal field -- a case study for the DEEP Geothermal Project, Saskatchewan,

Canada (10:20 AM - 10:40 AM)

- 3. Numerical Modeling and Reservoir Behavior of the Puna Geothermal Venture (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Updates of Numerical Reservoir Model for Sorik Marapi Geothermal Field (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. A Wellbore Model Approach for Scaling Prediction and Condition Assessment (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Enhancing Reservoir Performance Insight: A Comprehensive Monitoring Approach with Steam Allocation Lumut Balai (SALB) Application (11:40 AM - 12:00 PM)

Session 3D: Energy Conversion/Utilization

King's 1 (Grand Ballroom)

- 1. Generating Value in Non-Condensable Gas Emissions from Geothermal (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Monetizing Low-Moderate Enthalpy Reservoirs: Lessons Learned (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. A study of deep geothermal energy feasibility for “behind the fence” power at the Calgary International Airport. (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Grid Resilience Analysis on Geothermal District Heating and Cooling Implementation Alongside Four Existing Oil and Gas Wells in Tuttle, Oklahoma (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Greenhouse Gas Emissions Reduction: Global Geothermal Power Plant Catalog (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Geothermal Power for Green Hydrogen Production (11:40 AM - 12:00 PM)

Session 3E: Geology

King's 2 (Grand Ballroom)

- 1. Fracture permeability in basement greywacke for supercritical drilling planning (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Characterisation of core from a New Zealand geothermal field and its reaction to receiving CO₂-rich injection fluids. (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. Alteration Assemblages and Paragenesis at the Sorik Marapi Geothermal Prospect, Sumatra, Indonesia (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Characterizing the Subsurface Structures and Determination of In-Situ Stress Orientations: A Case Study from The Tuchang Geothermal Prospect Area, Northeastern Taiwan (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Conceptual Model of the Puna Geothermal System (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Remote Sensing Case Studies for Detection and Interpretation of Surface Materials for Geothermal Exploration in the Basin and Range, Nevada, USA (11:40 AM - 12:00 PM)

Session 3F: Tribal Communities

King's 3 (Grand Ballroom)

- 1. Empowering the Lānaʻi Island Community with Groundwater and Geothermal Resources (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Why does geothermal matter for Tribal land? The Geothermal Journey of the Pawnee Nation (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. The Waiwhatu Project: Developing Shared Language (English-Te Reo Māori) for Communicating Geothermal Scientific Terms (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Indigenous participation in geothermal projects: learnings from Aotearoa New Zealand (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Geothermal Direct-Use Application for Greenhouse Heating: Case Study of Osage Tribal Nation (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Driving Success through Tribal Collaboration and Partnerships: Recent Developments at Pilgrim Hot Springs (11:40 AM - 12:00 PM)

2:00 PM - 4:00 PM

Plenary Session III: Pressure Points - Policies, Sustainability and Investment

Monarchy (Grand Ballroom)

4:30 PM - 6:30 PM

Panel 4A: Ambient-Temperature Loop Geothermal Networks: From Demonstration to Nationwide Deployment

Monarchy (Grand Ballroom)

Session 4B: Super Hot Geothermal

Kohala 1-2

- 1. Ideal Thermal-Hydraulic Performance of Geothermal Power Systems Above 300 °C (4:30 PM - 4:50 PM)
- 2. Increased Structural Integrity of Casings of High-Temperature Geothermal Wells using Novel Technologies (4:50 PM - 5:10 PM)
- 3. Optimizing Energy Production for Large Scale Superhot Rock Geothermal (5:10 PM - 5:30 PM)
- 4. The Superhot Opportunity for New Zealand- Joining the Ends Together (5:30 PM - 5:50 PM)
- 5. Heat Harvester: Mazama Energy's Full-System Power Generation Optimizer for Superhot Rock EGS (5:50 PM - 6:10 PM)
- 6. Superhot Geothermal - Experience and Outlook in Iceland (6:10 PM - 6:30 PM)

Session 4C: Reservoir/Production

Kohala 3-4

- 1. Development and Evaluation of Preformed Particle Gels for Preferential Fluid Flow Control (4:30 PM - 4:50 PM)
- 2. Dynamic Modeling of Fracture Networks to Optimize Geothermal Reservoir Performance (4:50 PM - 5:10 PM)

- 3. Characterization of Flow in Induced Fractured Networks Using Tracers in Enhanced Geothermal Systems (5:10 PM - 5:30 PM)
- 4. Power Outputs from the Field Tests of Thermoelectric Generators at Different Temperatures (5:30 PM - 5:50 PM)
- 5. Unlocking the Full Production Potential of Geothermal Wells in Indonesia using a Novel In-situ Generated Acid Fluid Technology (5:50 PM - 6:10 PM)
- 6. Textural Analysis of Sedimentary Rocks: Implications for Geothermal Reservoir Characterization (6:10 PM - 6:30 PM)

Session 4D: Economics

King's 1 (Grand Ballroom)

- 1. Probability of Discovery as a useful concept for communicating exploration drilling uncertainty (4:30 PM - 4:50 PM)
- 2. Assessing the Economic Value of Underground Thermal Storage for Hybrid Geothermal Power (4:50 PM - 5:10 PM)
- 3. Whispers of a New Frontier for Safe and Profitable Geothermal Anywhere (5:10 PM - 5:30 PM)
- 4. Geothermal Power Systems Analysis: Outcome of Industry Stakeholders Workshop (5:30 PM - 5:50 PM)
- 5. Geothermal Reserves Standards: A Study of the Applicability of the SPE Petroleum Resources Management System, a Proposed Classification Framework for Geothermal Reserves and Resources (5:50 PM - 6:10 PM)
- 6. Collaboration and Continuous Improvement Makes Utah Geothermal Project Economic and Successful (6:10 PM - 6:30 PM)

Session 4E: Geology

King's 2 (Grand Ballroom)

- 1. Geologic Mapping Standards for Developing Geothermal Resource Conceptual Models; Survey Design, Applications, Pitfalls and Remedies (4:30 PM - 4:50 PM)
- 2. A Comprehensive Exploration and Modeling Approach for Heat and Geothermal Lithium Extraction in the Upper Rhine Graben (4:50 PM - 5:10 PM)
- 3. Evolution of Shallow Temperature Surveys (5:10 PM - 5:30 PM)
- 4. Structural Setting and Geothermal Potential of Northeastern Reese River Valley, North-Central Nevada: Highly Prospective Detailed Study Site in the INGENIOUS Project (5:30 PM - 5:50 PM)
- 5. Structural control of elevated geothermal gradients in the southern San Luis basin, Taos County, NM (5:50 PM - 6:10 PM)
- 6. Mount Augustine: Exploring For a New Geothermal Resource in South Central Alaska (6:10 PM - 6:30 PM)

Session 4F: Diversity, Equity, Inclusion, and Belonging

King's 3 (Grand Ballroom)

- 1. Strengths-Based Bridges: Fostering Diversity, Inclusion, and Innovation in the Geothermal Industry (4:30 PM - 4:50 PM)
- 2. The Canadian Geothermal Energy Industry: Status, Potential, and Opportunities from a Policy Perspective (4:50 PM - 5:10 PM)
- 3. GeoBridge: Connecting Communities to Geothermal Information and Opportunities (5:10 PM - 5:30 PM)
- 4. Geothermal Collegiate Competition: Evolution and Impact (5:30 PM - 5:50 PM)
- 5. Ormat Technical Career Path Development and Implementation (5:50 PM - 6:10 PM)
- 6. Amplifying Voices: Advancing DEIB and Tribal Initiatives in Geothermal (6:10 PM - 6:30 PM)

7:30 AM - 9:30 AM

Plenary Session IV: Strengthening the Core - Community, Membership and Vision

Monarchy (Grand Ballroom)

10:00 AM - 12:00 PM

Invited Session: Drilling Classifications, Heating & Cooling Commercialization, and Non-Conventional Project Locations for Geothermal Applications

Kohala 4

Panel 5A: Geothermal for the US Department of Defense (DOD) - Partnering for Energy Resiliency and Independence: An Update on Seven Ongoing Projects

Monarchy (Grand Ballroom)

Session 5B: Geophysics

Kohala 1-2

- 1. Base of Caprock Temperature Characterization in Sumatra Island, Study Case in PGE Fields (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. The nature of deep electrical conductors observed by the magnetotelluric method under volcanic high-enthalpy geothermal systems (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. Meso-scale geophysical characterisation of the geothermal system in Montserrat, West Indies (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Mitigating Induced Seismicity in Geothermal Energy Production: The Application of the Traffic Light System (TLS) and Global Case Studies (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Microseismic monitoring during a next generation enhanced geothermal system at Cape Modern, Utah (11:20 AM - 11:40 AM)

Session 5C: Reservoir/Production

Kohala 3

- 1. Casa Diablo IV: A case study for cooperative baseline analysis to mitigate environmental impacts (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Geothermal Resource Management: Insights from Stock Modeling Analysis in Icelandic Fields (10:20 AM - 10:40 AM)

- 3. Conceptual Model of the Hydrothermal System at the Salton Sea KGRA (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Improving Geothermal Well Production through Scale Removal: A Lakeview, Oregon Case Study (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Puna Geothermal Venture Flow Testing: Facility Design Upgrades and Results (11:20 AM - 11:40 PM)
- 6. Hot springs and geysers: Exploring historical and modern impacts of geothermal energy production on surface thermal features and standardizing management practices. (11:40 AM - 12:00 PM)

[Session 5D: Machine Learning/Computing](#)

King's 1 (Grand Ballroom)

- 1. Empowering Geothermal Research: The Geothermal Data Repository's New AI Research Assistant (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Separating Signals in Elevation Data Improves Supervised Machine Learning Predictions for Hydrothermal Favorability (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. Unsupervised Machine Learning For Assessing Geothermal Heat Exchanger Performance (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Development of Artificial Neural Networks for Estimating Static Formation Temperature (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Hard Rock Drilling Efficiency Mapping using Machine Learning (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Fostering Geothermal Machine Learning Success: Elevating Big Data Accessibility and Automated Data Standardization in the Geothermal Data Repository (11:40 AM - 12:00 PM)

[Session 5E: Transition from Oil & Gas](#)

King's 2 (Grand Ballroom)

- 1. Geothermal Reservoir Simulation Analysis in Support of Electricity Co-Production Feasibility Study at the Blackburn Oil Field, Nevada (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Impact of Geothermal Energy Production from Four Inactive Oil and Gas Wells in Tuttle, Oklahoma for District Heating and Cooling on Grid Flexibility (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. Modeling a Hybrid Renewable Energy System for Bowman County, North Dakota: Assessing the Feasibility of Transitioning from Coal to Wind, Solar, and Geothermal Power (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. DeepStor - District heating from high-temperature heat storage in a depleted hydrocarbon reservoir (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. Optimizing Design and Operation of Closed Loop Geothermal Using Integrated Asset Simulation (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Geothermal Prospecting in Oil and Gas Basins (11:40 AM - 12:00 PM)

Session 5F: Downhole Logging

King's 3 (Grand Ballroom)

- 1. Utilizing & Testing of Advanced Wireline Conveyed Sub-Surface Tools in Vapor Dominated Reservoir – The Geysers (10:00 AM - 10:20 AM)
- 2. Preventing Downhole Tool Failure during Geothermal Well Construction Using a Hybrid Real-Time Temperature Management Advisory System (10:20 AM - 10:40 AM)
- 3. Temperature and Pressure Transient Analysis: Pre and Post-Deflagration Assessment (10:40 AM - 11:00 AM)
- 4. Chloride-based Wireline Tool for Measuring Fracture Inflow in Enhanced Geothermal Systems (EGS) Wells: Field Deployment Updates (11:00 AM - 11:20 AM)
- 5. 300 Degree Celsius Electronic Component Packaging for Geothermal Tools (11:20 AM - 11:40 AM)
- 6. Innovative E-line Intervention Solutions for Geothermal Wells (11:40 AM - 12:00 PM)

1:30 PM - 3:30 PM

Department of Defense and the Future of Geothermal

Kohala 4

Panel 6A: Enhanced Geothermal Systems – Innovation and Deployment

Monarchy (Grand Ballroom)

Session 6B: Geophysics

Kohala 1-2

- 1. Detailed Airborne Magnetic Survey of the Puna Geothermal Venture and the Lower East Rift Zone, Island of Hawai'i (1:30 PM - 1:50 PM)
- 2. Exploration of deep hot sedimentary aquifer geothermal systems in the Midyan basin of Saudi Arabia by ENOWA-NEOM (1:50 PM - 2:10 PM)
- 3. The influence of basement structures on geothermal springs: inferences from potential field mapping, western Great Basin, California (2:10PM - 2:30 PM)
- 4. A direct comparison of resistivity models from helicopter transient electromagnetic and magnetotelluric datasets collected over a blind geothermal system in East Hawthorne, Nevada, USA. (2:30 PM - 2:50 PM)
- 5. Geophysical modeling of a possible blind geothermal system near Battle Mountain, NV (2:50 PM - 3:10 PM)
- 6. Ground and Airborne-based Geophysical Mapping and Modelling of an Active Hydrothermal System at Mammoth Lakes, California (3:10 PM - 3:30 PM)

Session 6C: Low-Temperature/Direct Use

Kohala 3

- 1. A Preliminary Investigation on the Performance and Cost of a Dual-Source Heat

Pump using both the Air and the Ground (1:30 PM - 1:50 PM)

- 2. The First Open-Source Database for Geothermal Networks (1:50 PM - 2:10 PM)
- 3. A Definitional Taxonomy for (Geo)Thermal Energy Networks (2:10PM - 2:30 PM)
- 4. Grid Value Analysis of Geothermal Systems for End-Use Applications (2:30 PM - 2:50 PM)
- 5. Creation of a Geothermal Heat Pump Database (2:50 PM - 3:10 PM)
- 6. How 5th Generation Energy Networks Can Be The Source Of Energy To Supply High Temperature Water to Decarbonize Buildings Using High Temperature Distribution Loops (3:10 PM - 3:30 PM)

Session 6D: Non-Technical

King's 1 (Grand Ballroom)

- 1. Advancing Understanding of Geothermal Representation in the Power Sector to Accelerate Deployment (1:30 PM - 1:50 PM)
- 2. Overview of Environmental Permitting to Support the PGV Repower Project (1:50 PM - 2:10 PM)
- 3. A social science of the subsurface: Advances in geothermal communication and engagement research (2:10PM - 2:30 PM)
- 4. EMBRACING A CIRCULAR MODEL IN MANAGEMENT OF GETHERMAL POWER PLANTS COOLING TOWER FILL PACKS. A CASE STUDY OF PARTNERSHIP BETWEEN KENGEN AND JUA KALI ENTERPRENEURS (2:30 PM - 2:50 PM)
- 5.The Third Electric Energy Transition Calls for Geothermal Energy Assurance (2:50 PM - 3:10 PM)
- 6. Declaration of Communication (3:10 PM - 3:30 PM)

Session 6E: Well Construction & Completion

King's 2 (Grand Ballroom)

- 1. Zonal Isolation Concept for FORGE Geothermal Wells (1:30 PM - 1:50 PM)
- 2. Development and Qualification of an Elastomer Based Retrievable Packer for Effective Annular Isolation in Enhanced Geothermal Systems (1:50 PM - 2:10 PM)
- 3. Alkali-activated Gibbsite Cement for Use in Supercritical and CO₂-rich Geothermal Wells (2:10PM - 2:30 PM)
- 4. Integration Well Construction, Value to Reduce Overall West Java Geothermal Development Cost (2:30 PM - 2:50 PM)
- 5. REVOLUTIONISING GEOTHERMAL WELL DESIGN AND OPERATIONS WITH HIGH-TEMPERATURE METAL EXPANDABLE PACKER TECHNOLOGY: A NOVEL APPROACH IN DRILLING AND WORKOVER (2:50 PM - 3:10 PM)
- 6. A Summary of the FORGE Project for the Development of Multi-Stage Fracturing System and Wellbore Tractor to Enable Zonal Isolation During Stimulation and EGS Operations in Horizontal Wellbores (3:10 PM - 3:30 PM)

Session 6F: Mineral Extraction | Regional Updates

King's 3 (Grand Ballroom)

- 1. Quantifying the Impact of Water Needs for Lithium Production from Geothermal Brines in the Salton Sea KGRA (1:30 PM - 1:50 PM)
- 2. What's in Your Brine - a Case for Critical Minerals Co-production from Geothermal Brines (1:50 PM - 2:10 PM)
- 3. Initial Simulations of Lithium Production from Geothermal Brines (2:10PM - 2:30 PM)
- 4. REVIEW OF LITHIUM EXTRACTION SUITABLE FOR INDONESIA GEOTHERMAL BRINE (2:30 PM - 2:50 PM)
- 5. How can the EU's post-communist countries use geothermal to achieve energy independence? (2:50 PM - 3:10 PM)
- 6. Exploring the Past, Present, and Future: Geothermal Energy on the 100th Anniversary of the Turkish Republic (3:10 PM - 3:30 PM)

3:30 PM - 4:30 PM

[Closing Networking Reception](#)

Grand Promenade