

出國報告（出國類別：開會）

參加冰島雷克雅維克「2024年冰島地
熱研討會」(Iceland Geothermal
Conference 2024)

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：石油開採工程師 朱正文

派赴國家/地區：冰島

出國期間：113年5月24日至6月1日

報告日期：113年6月18日

摘要

地熱能是一種能夠作為基載電力之再生能源，其發電過程不產生或少量產生二氧化碳，且與其他可再生能源相比，地熱能還具有不受氣候變化影響以及受到天然災害時不易中斷的優勢，有助於滿足國內不斷增長的電力需求。它還具有獨特的可靠性，地熱發電站的負載係數通常為 95%，而水力和風力發電站的典型負載係數為 30-50%。根據 2024 年我國舉辦之地熱論壇地礦中心規劃，台灣 2025 年規劃建 20MW 之地熱電廠，2030 年建置 200MW，2040 年 2GW，2050 年 6G，其中，淺層地熱，或稱為傳統地熱、水熱型地熱大約僅夠數百 MW 等級之建置，因此 2040 年以後之地熱發電目標必須仰賴更先進的 EGS、AGS 或甚至超高溫地熱之發電技術。

冰島位於中洋脊上之獨特的地質條件造就其有豐富的地熱資源，冰島 80%以上之能源是使用當地的天然資源，主要包含水力發電、地熱供暖及發電還有少部分之風力發電。

冰島在地熱發電上的投資不僅僅是因為地熱發電擁有穩定、可靠、清潔等特性，另一個相當重要的面向是，這大大的加深了政府、能源業者、地熱研究發展與當地人民的信賴關係，例如當地地熱發電大廠 ON 演講時表示，地熱開發當地民眾其實最支持的是免費(或說折價)供暖系統，並扶植當地產業，如溫室種植、公共溫泉浴池等等，創造一個共享的開發社區，反而是地熱發電普遍不受到當地民眾支持，原因是發電跟當地社區無法結合。

本次參與的是由冰島再生能源協會(Iceland Renewable Energy Cluster)所主辦之 2024 冰島地熱研討會，邀請了冰島地熱產業的上中下游廠商一同參與介紹，並有各國專家學者分享研究成果。本次出國與會主要行程如表一。

表 1：主要行程摘述

日期	主要行程摘述
5/24(五)-5/25(六)	去程 (台灣台北 → 荷蘭阿姆斯特丹→冰島)
5/27(一)	參觀 ISOR，與該機構專家對談。
5/28(二)	研討會第一天 (參與 Bridging the Gaps: Advancing Superhot Rock Energy workshop、會場)
5/29(三)	研討會第二天 (會場、參觀雷克雅內斯(Reykjanes)地熱發電廠)

5/30(四)	研討會第三天 (會場)
5/31(五)-6/1(日)	返程 (冰島→ 英國倫敦 → 台灣台北)

圖一為本次出國人員探研所朱正文於議場內攝影。圖二為會場一隅，圖三為冰島總統蒞臨演講照片。圖四為台灣訪問團參觀 ISOR 合影，成員有中研院 3 人、台灣大學 1 人、中央大學 1 人、地熱產業界 3 人(包含本人)。



圖一，出國人員會場內相片。



圖二，會場一隅。



圖三，冰島總統蒞臨演講。



圖四，台灣訪問團參訪 ISOR。

目次

目的.....	2
過程.....	3
具體成效.....	5
心得及建議.....	29

目的

2024 年台灣國際地熱論壇中，台灣目標在 2030 年開發 200MWe 之地熱電廠，並規劃於 2040 年增長至 2GWe，而中油公司在其中需扮演重要角色，本出國計畫與探採研究所 113 年研究題目「地熱井產能熱焓最佳化研究」研究地熱流體成分、產能測試及熱焓計算有關，另考慮到 114 年研究題目會與地熱電廠營運相關，因此本次出國計畫亦討論電廠建置的流程及營運要項。冰島為世界上地熱資源最為豐富的國家之一，其位於中洋脊的獨特地質環境造就極為豐富的地熱資源，因此冰島地熱研討會安排了不少實地參訪，亦有許多不同主題的研討論文。且因該國在低滲透率地層以及超高溫火山型之地熱開發亦有相當的經驗，故研討會內容亦包含 EGS 和 Super Hot Geothermal 之最先進的地熱開發主題，當然也包含了傳統的鑽完井及修井主題、儲集層開發、地球化學及電廠操作等相關研討主題。參與此研討會將能使本年度研究計畫有所助益，並提升中油公司地熱能開發之能力，以及掌握深層地熱開發先導研究之國際現況。於本次行程中同時拜訪冰島地熱相關學術機構，進行地熱探勘、開發及生產相關業務之交流。本出國計畫與台灣大學宋聖榮教授、中央大學盧乙嘉教授以及中央研究院李建成老師等人一起參訪 Iceland Geosurvey, ISOR，並與地熱領域相關學者進行交流。

過程

本次出國計畫行程自 5 月 27 日至 5 月 30 日，其中會議時間為 5 月 28 日至 5 月 30 日，共三天，而 5 月 27 日前往冰島地質調查局(Iceland GeoSurvey, ISOR)參觀，過程簡表如表二所示，廠商型錄及完整會議議程如圖五至八所示。

表二，此次出國計畫過程簡表。

日期	行程	說明
(一) 113 年 5 月 27 日(星期一)，議程前一日	1. 前往冰島地質調查局(Iceland GeoSurvey, ISOR)參觀並深入討論。	與 Bjarni Richer 先生(資深地質師)以及 Dadi Porbjornsson 先生深入討論，詳細內容請參照具體成效(一)及心得與建議部分。參訪照片如圖四。
(二)113 年 5 月 28 日(星期二)，議程第一日	1. 當日會議：Bridging the Gaps: Advancing Superhot Rock Energy workshop. 2. 下午 15:00 以後為註冊時間，並前往接洽各廠商	參與超高溫地熱課程，遴選重點如具體成效(二)部分。完整內容及報告因內容過多不在本報告完整呈現。 重點廠商整理如具體成效(二)部分，索取 DM 如圖五所示。
(三)113 年 5 月 29 日(星期三)，議程第二日上午	1.開幕式 2.第一個主題，參加加強型地熱系統(B1,Enhanced Geothermal Systems)	參與加強性地熱主題，遴選重點文章兩篇如具體成效(三)所示。完整內容及報告因內容過多不在本報告完整呈現。
(四)113 年 5 月 29 日(星期三)，議程第二日下午	野外實察。 FT7-Renewable Energy	因火山噴發，原訂參觀 Reykjanes Resource Park 以及內部之地熱電廠，臨時改變參訪地點，改成參觀北美板塊及歐亞大陸板塊交接處及水力發電廠。介紹如具體成效(四)所示。
(五)113 年 5 月 30 日(星期四)，議程第三日上午	1.第一個主題，參加地熱儲集層(D2,Geothermal Reservoir)。 2.第二個主題，參加超高溫地熱(B3,Super Hot Geothermal)。	參與地熱儲集層及超高溫地熱兩個主題，遴選重點文章四篇如具體成效(五)所示。完整內容及報告因內容過多不在本報告完整呈現。
(六)113 年 5 月 30 日(星期四)，議程第三日下午	1.第一個主題，參加鑽井完井及修井(C4, Drilling, well Completion and Workover)。	參與鑽井、完井及修井一個主題，遴選重點文章二篇如具體成效(六)所示。細內容及報告因內容過多不在本報告完整呈現。



圖五，會場廠商之型錄。

IGC program
星期三, 五月 28, 2024

Time	Event
9:00 - 13:00	SIDE EVENTS Bringing the Sales, Advances Business Stock Excess At Björnulf, Harpa Concert Hall Geothermal Energy Engineering Development Beyond Electricity Generation At Eldfella, Harpa Concert Hall
13:00 - 17:00	Geopark Invest Stakeholders in Reykjavik
14:00 - 16:00	Presentation of International Geothermal Association at SHJ Hall
17:00 - 19:00	6:00 PM - Registration & Exhibition opens WELCOME RECEPTION

圖六，5/28 會議第一天議程。

星期三, 五月 29, 2024

Time	Event
9:30 - 10:00	SECURITY AND STABILITY Opening Speech - Dr. Guðni Th. Jóhannesson, President of Iceland, Sverrir Freyr Haraldsson, CEO of Reykjavik Energy, ISU, Madsen, Chief Geologist, Sinopec Group, Dr. Mark Rommer, CEO of International Geothermal Association PLENARY SESSION - OPENING
10:00 - 10:30	COFFEE BREAK
10:30 - 12:00	A1 - Policy and Regulatory Frameworks , B1 - Enhanced Geothermal Systems , S1 - Geothermal Utilization Planning , D1 - Competency for Energy Transition
12:00 - 13:30	LUNCH - EXHIBITION
13:00 - 17:00	FIELD TRIPS Attendees of IGC 2024 can select one field trip. <i>Seats are limited. Information about bookings will be sent out to registered participants soon.</i>
14:00 - 19:00	ET 1 - Geothermal Park ET 2 - Cascaded Use of Geothermal ET 3 - Reykjavik Resource Park ET 4 - Educating the Future ET 7 - Renewable Energy
19:00 - 22:00	GEOTHERMAL GARDEN PARTY Let's have some fun

圖七，5/29 會議第二天議程。

星期四, 五月 30, 2024

Time	Event
8:30 - 10:00	A2 - Direct Utilization - Diversification , B2 - Zero Waste Geothermal - Circular Economy , C2 - Desking Geothermal - From Exploration to Funding and Operation , D2 - Geothermal Reservoir
9:00 - 15:30	MATCHMAKING - B2B
10:00 - 10:30	COFFEE BREAK - EXHIBITION BLUESPARK® Technology Demonstration - Removing Wellbore Scale at 10:00 - Location in front of the main entrance at Harpa conference venue
10:30 - 12:00	A3 - Food Security , B3 - Super Hot Geothermal , C3 - Energy Storage and Load Balancing , D3 - Geothermal Operation
12:00 - 13:00	LUNCH & EXHIBITION
13:00 - 14:30	A4 - Resilience - Natural Disasters , B4 - Zero Emission Geothermal , C4 - District Heat Competition and Wicketover , D4 - Heating and Cooling
14:30 - 15:00	COFFEE BREAK - EXHIBITION
15:00 - 16:30	CLOSING - PLENARY Mr. Guðlaugur Þór Þórsson, Minister of Environment, Energy and Climate, Dr. Clávia Raquel Grinnson, former resident of Iceland, Kristín Linda Arnadóttir, Deputy CEO of Landsvirkjun National Power Company, Mr. Sigurður Allí Jónsson - CEO Arctic Green, Gauri Singh - Deputy Director IGCNA, Dr. Dagmar Passoni - Designer of IGC

圖八，5/30 會議第三天議程。

具體成效

具體成效依據會議過程順序排列，將會議內容中重要的部分提出介紹，並加入本人針對台灣地熱情況反思及建議。

(一) 113 年 5 月 27 日(星期一)，議程前一日

1. 前往 Iceland GeoSurvey，ISOR

本次冰島地熱會議台灣共有 8 人前往參與，其中包含中研院 3 人、台灣大學 1 人、中央大學 1 人以及包含本人在內產業界 3 人，雖大家所關注的專業領域不一定一樣，但都是關注台灣地熱產業之人士，在與 ISOR 專業學者，包含 Bjarni Richer 先生(資深地質師)以及 Dadi Porbjornsson 先生(資深地質師)對談，內容聚焦地球物理、地球化學、地熱地質、鑽井工程、完井工程、儲集層工程及電廠營運等部分。

2. 簡介 ISOR

ISOR 全名為 Iceland GeoSurvey，過去為冰島政府機關，直譯為冰島地質調查局，但在 2003 年改制後成為一獨立之研究機構，類似於現在台灣工研院之角色，其專業領域包含地質領域到開發工程皆有涉略，全機關約有 50 幾位專家，分別負責不同領域。

3. 重點整理

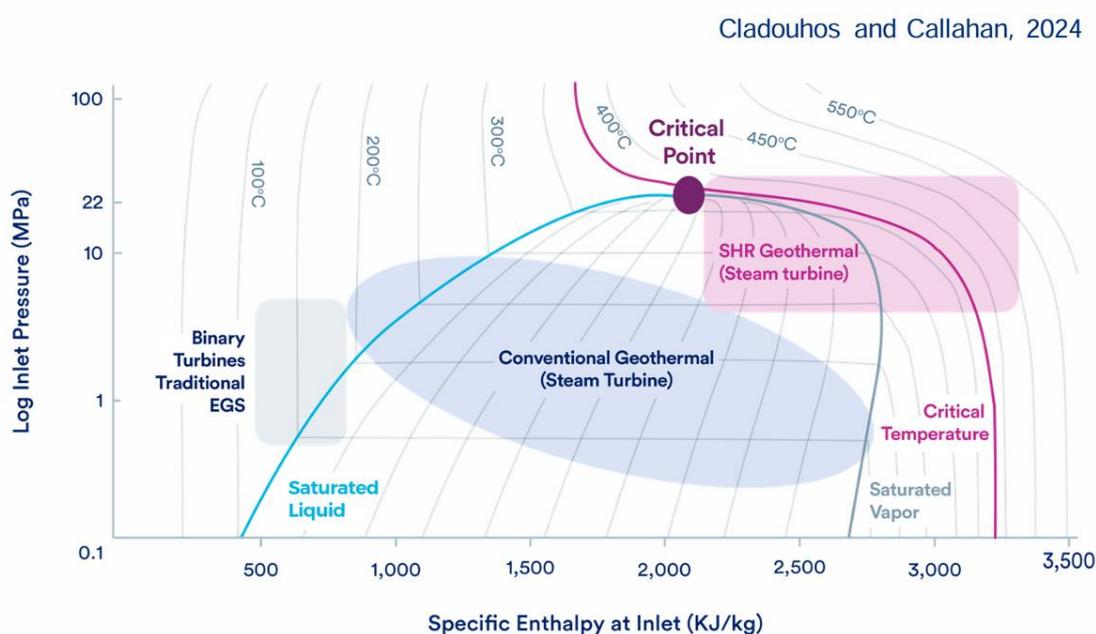
本人與當地專家分享土場地熱鑽井經驗及遇到的問題，例如膚表(skin)因子大、漏泥、水泥堵漏等問題，Bjarni Richer 先生明確的指出，用傳統泥漿鑽地熱井一定會造成儲集層汙損嚴重，膚表因子達到數十是很正常的，所以建議鑽到儲層的時候用清水鑽井或是空氣鑽井，至少要用低固粒低密度的聚合物泥漿，不能加皂土(Bentonite)。漏泥問題建議降低鑽進速率，不要用水泥在儲層內堵漏，會對地熱儲層造成不良的影響。另外提到如果用水鑽進，地表設備就不需要除泥器或震動篩，需要沉澱池，並且會接一個消音器(如產能測試 James 法所使用之設備)進行降溫，還會有冷卻水塔降溫，並且增加水的泵量以達到壓制井的目的，建議值是 67L/S 以上，ISOR 表示如果需要詳細的規劃設計可以考慮合作，並且指出目前地熱井鑽井規範是採用紐西蘭標準 NZS 2403:2015。

(二)113 年 5 月 28 日(星期二)，議程第一日

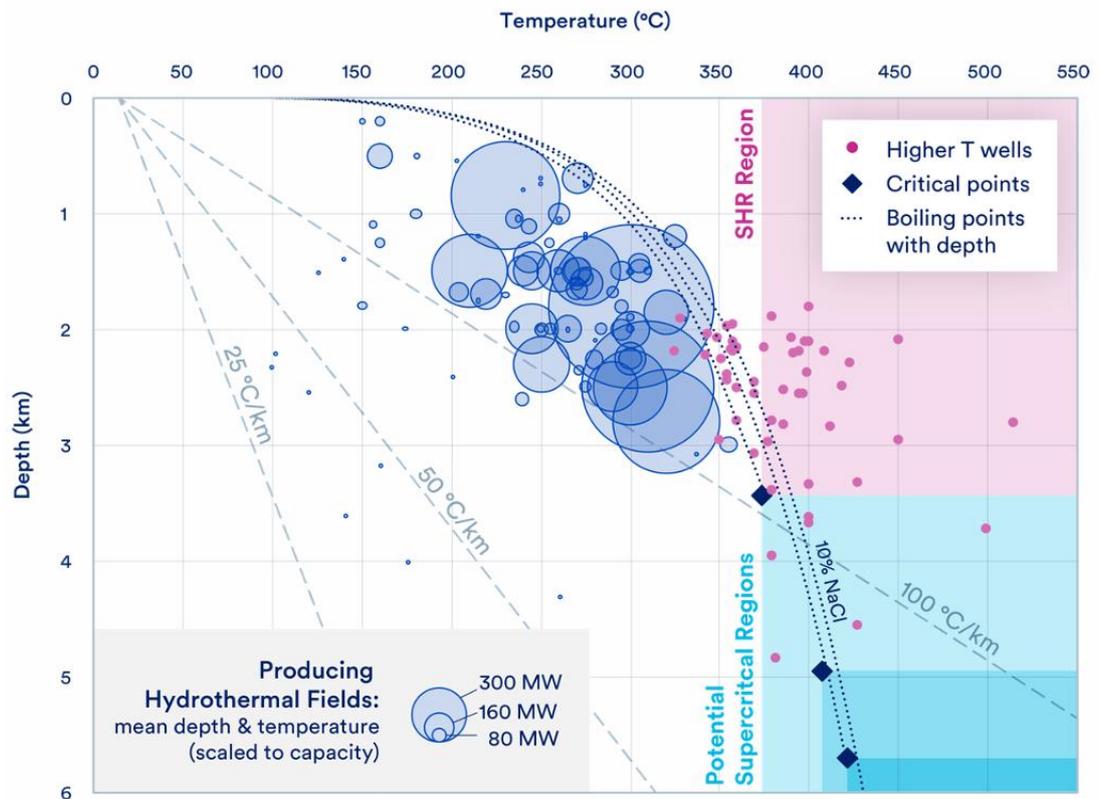
1. 當日會議：Bridging the Gaps: Advancing Superhot Rock Energy workshop.

本 workshop 主辦單位是 Clear Air Task Force，主題是在探討超高溫地熱開發的關鍵技術門檻，這些技術門檻對於商業規模的超高溫地熱能源開發專案的成功至關重要。參與人員每人會獲得五份技術文件，每份報告都深入探討了該技術，五個技術領域包含了：鑽井、熱交換、完井、探勘以及電力生產。

主要目標是評估現有技術水平，找出尚未成熟之技術以及距離成熟之差距，並確定未來的研究、開發和測試工作應集中之領域。這些報告旨在確保沒有忽視任何關鍵領域，並為技術的每個部分定義明確的前進方向。根據演講內容，超高溫地熱田要符合下列四個條件，分別是 1. 高的地層溫度(大於 375°C)，2. 熱焓值大於 2100KJ/kg，或者熱焓大於 2800 KJ/kg，且沒有超臨界流體冷凝的現象。水的壓力和熱焓相圖如圖九所示。根據圖十所示，現在冰島電廠大部分都還是使用傳統地熱，但是有鑽到很多超高溫地熱田的井，未來如何使用這些井進行超高溫地熱能應用便是此次 Workshop 的研討重點，台灣大屯山七星山或磺嘴山等區域亦有機會。



圖九. 水的熱焓對壓力圖，定義傳統地熱或超高溫地熱。



圖十，溫度對深度圖，包含發電廠規模。

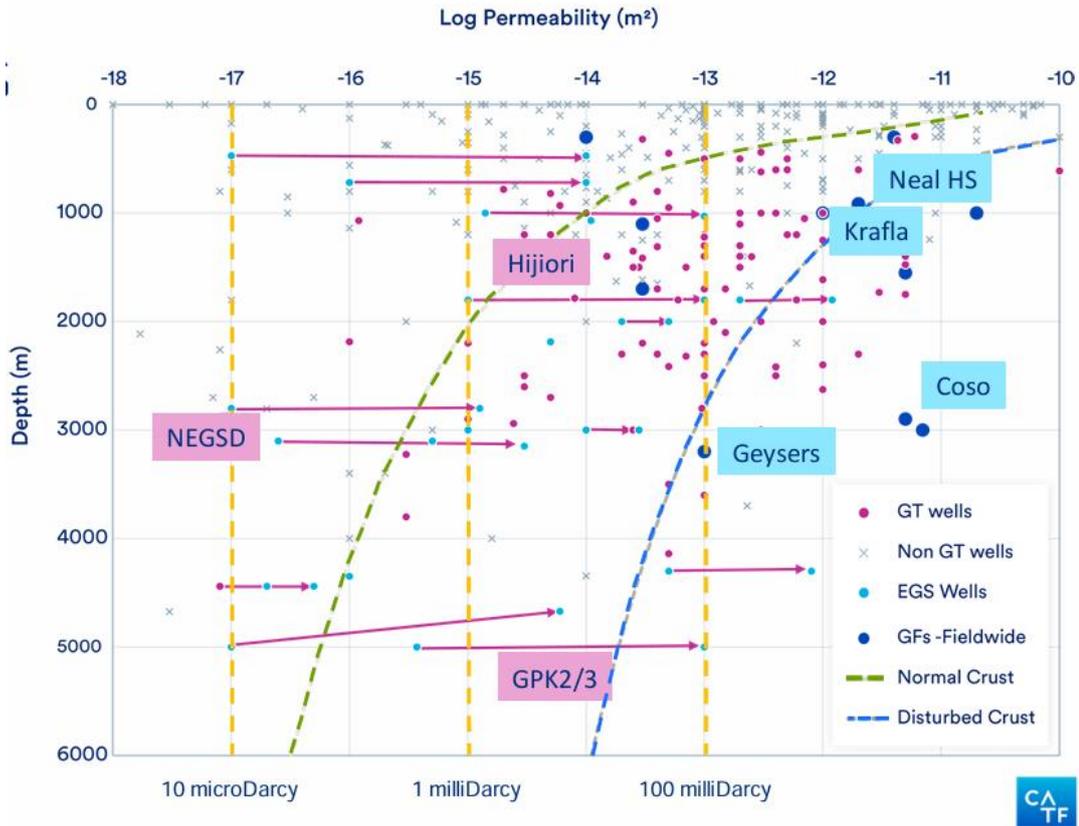
超高溫地熱田主要有三個優勢，第一是高的裝置容量，由於超高溫地熱田的能量密度非常高，所以單位體積的地熱儲層可以產出較高的能量，規模大也有助於降低電廠單位建置成本¹⁴；第二是減少生產井鑽鑿，理由也是因為超高溫地熱田的能量密度非常高，所以一口井能產出的總能量變大，要開發相同規模的發電站只需要更少的井¹⁴；第三是增加發電機組效率，由於發電機組的效率通常會隨著地熱流體熱焓值的增加而增加，因此超高溫地熱田的開發是值得期待的未來地熱開發標的。

但開發超高溫地熱亦伴隨許多技術門檻及風險，本次 Workshop 特別介紹 TRL 技術分析方法，該方法將技術成熟度分為九級，最高的 TRL9 代表技術成熟，最低的 TRL1 代表技術剛起步，而本 workshop 針對各個技術面向都有討論。

本報告針對鑽井技術 TRL 低於 7 的部分進行簡介，TRL 已達到 8~9 的則僅列舉：1. 鑽機設計，2. 傳統旋轉鑽機，3. 隔熱塗層技術，4. 循環流體卻技術。小於等於 TRL7 的技術有 6 類：1. 混合常規鑽井(Hybrid Conventional Drilling)，超高溫地熱田溫度可達 400°C 以上，需考量鑽井液系統高溫下運作以及如何傳達動力至鑽頭位置？報告內列舉方法有液動槌、高壓水沖法以及改良式 PDC 鑽頭。2. 直接使用能量鑽進，最新研究技術有電漿鑽井，毫米波鑽井，利用高能電漿或脈衝取代傳統鑽頭的方式進行鑽進。3. 抗高溫設備，如果井內有良好的降溫環境時可被評估成熟度較高(TRL7~8)，但若溫

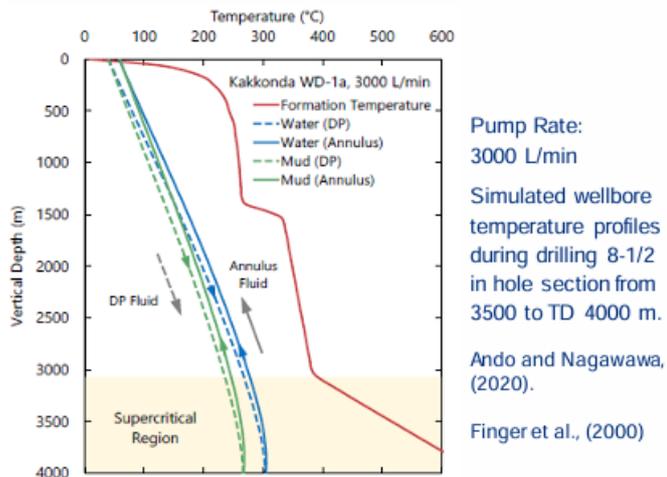
度超過 400°C，其技術成熟度僅 3。列舉常見的井下工具廠牌及耐溫：Hephae, PandoraX, 210 °C Weatherford, Heatwave 200 °C、Halliburton, 200 °C、Full MWD/LWD, Solar 175 °C、MWD, Quasar, 200 °C、Baker Hughes 175 °C、Schlumberger 175 °C、NOV, Hellfire, 175 °C。4. 保溫鑽桿，為保護鑽桿材質不受高溫影響劣化，需考慮鑽桿保溫性能，報告舉例是設計兩層鑽桿，中間有冷卻流體或真空隔熱以達到鑽桿不受溫度影響。5. 抗高溫鑽井液，目前能抗最高溫的是聚合物鑽井液，可耐 230°C，但相比於超高溫儲層的溫度還是不足。6. 流體動力學，分析超高溫流體流動時的動力特性，例如會形成層流或是亂流。結論是鑽探超高溫地熱田需要在實驗室和大學的研發支援下使現有的鑽井工程方法逐漸進步，以達到 TRL8 以上。另外還考慮套管腐蝕問題、脆性問題等等，這兩部分根據不同條件有不同的技術成熟度，現存地熱井鑽鑿已有成熟技術，但超高溫地熱井鑽鑿尚未明確分類，因此在此報告不過多介紹。

超高溫地熱田開發技術可以與 EGS 技術結合開發，該報告總結原因有以下五點：
1. 3 公里以下，原地層為脆性且滲透率小於 1mD，2. 具有經濟效益的地熱井滲透率需要大於 100 mD。3. 將未受改善的地層改為受改善的地層(地質改良)。4. 在現有的油井增產技術顯示這是可以做到的。5. 各地地熱都需要非常規方法(激勵生產)。圖十一呈現滲透率對深度做圖，並標示不同地熱田案場 EGS 地質改良後的滲透率變化。粉紅色箭頭便是使用 EGS 後滲透率改善之變化。



圖十一，滲透率對深度做圖，並標示不同地熱田案場 EGS 地質改良後的滲透率變化。

接著介紹井下工具、模擬和儲層工程部分。工具部分，首先是定向鑽井所需工具的介紹，如井底馬達、旋轉導引系統、MWD（溫度可達 $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、循環、隔熱鑽桿、泥漿冷卻提高溫度耐受性，例如模擬泥漿以及水在鑽進中的溫度變化，結果如圖十二所示。

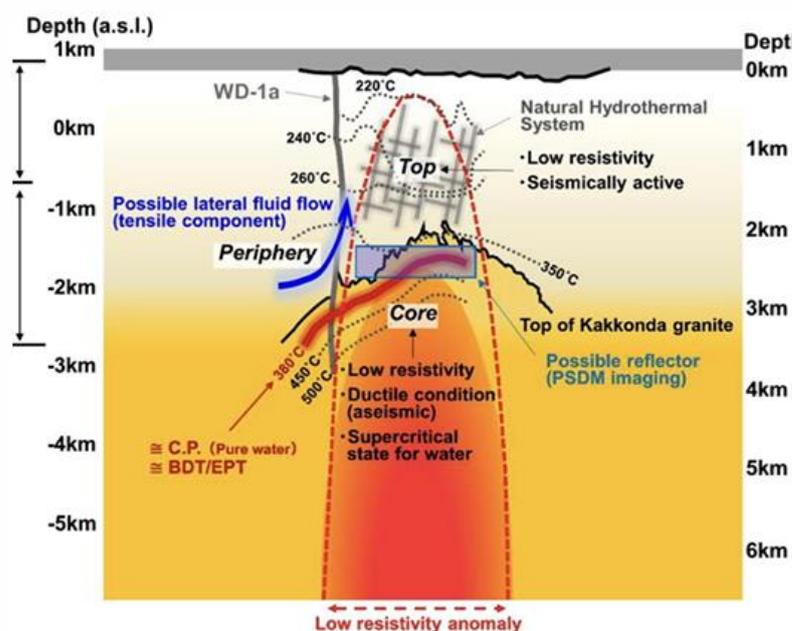


圖十二，模擬用水和泥漿的溫度變化。

接著是井的特性分析，例如應力方向/狀態和天然裂縫特徵，確定應力方向、狀態、

大小、隨深度的變化，天然裂縫特徵如方向、強度等。異質性如葉理、岩性接觸等。這部分可以靠測井期間井筒冷卻/鑽井及起下鑽測井更高的溫度或更好的隔熱儀器。

超高溫地熱田的開發歷史，首先是 1995 年日本 Kakkonda WD-1a 井，第一次鑽到超高溫(>500°C)。其地質概念模式如圖十三所示。接著是 2010 年美國 NW Geysers EGS demo，可產出 400°C、25kg/s 的產能，並減少附近井的地熱流體的腐蝕性和不凝結氣體。然後是 2009 年冰島的 IDDP 計畫，IDDP-1 號井，鑽到未預期到的流紋岩岩漿在 2104 公尺，產了 16 個月，熱焓 30MW 的地熱流體，至少 500°C 還有自然滲透率。2017 年又鑽鑿了 IDDP-2 號井，該井成功在 410°C 環境下取得岩芯，並在 400°C 時成功起斜並傾斜 30 度定向鑽進。最新是 2018 年在義大利 DESCRAMBLE Vennelle-2 號井，鑽至 520°C 低滲透率的緻密超高溫儲層。



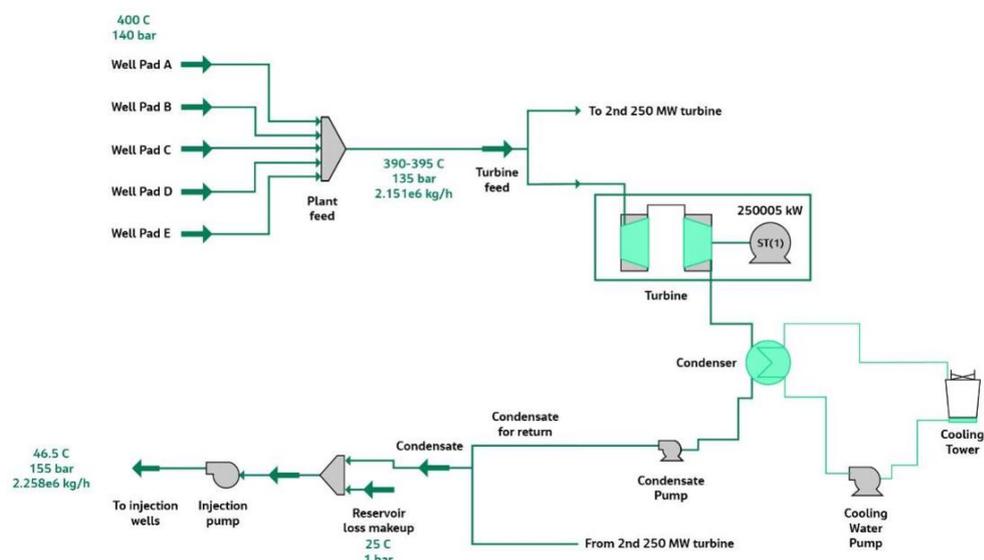
WD-1a. Kakkonda Japan - 1995

圖十三，日本 Kakkonda WD-1a 井地熱概念模式。

最後是發電機組端，該報告提出了閃發式和雙循環式發電機組的設計概念圖，圖十四是乾蒸氣的單閃式發電機組設計原理，圖十五是雙循環發電機組的設計原理。閃發式發電機組是將五口井控制到相同的溫度壓力後進入到渦輪機組，也就是需要在井頭到渦輪機組間控制好每口井的溫度壓力和流量，這個整流系統也是整個發電機組最困難的部分之一，接著渦輪機在直接接觸到地熱蒸氣也需要注意是否有硫化氫或其他雜質造成渦輪機葉片腐蝕的問題，另外，跟雙循環機組不同的是，雙循環機組看重的是熱焓，也就是流量跟溫度，壓力的影響程度較低，但是單閃式的發電機組對壓力極為重視，不能讓壓力有太大的變化，因此對地熱儲層的壓力管理尤為重要。雙循環發電機組也需要進行整流的工作，整流時也是需要控制好溫度和壓力以避免倒井現象發生(一生

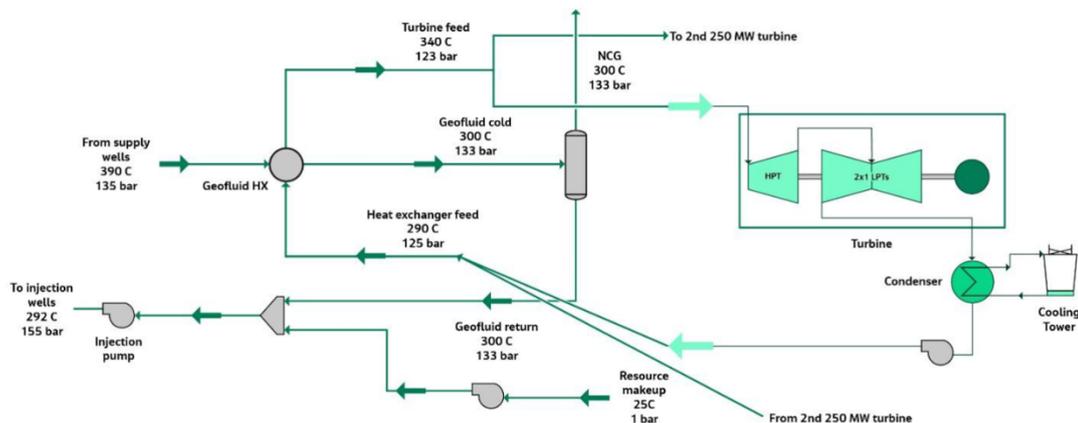
產井壓力大於另一生產井過多，使地熱流體在生產井內亂串回注，無法將地熱流體導至發電機組)，整流後進入熱交換版加熱雙循環發電機組之工作流體使其汽化推動渦輪機，熱交換後的地熱流體則回注回地底或做其他直接利用。

— Dry Steam Plant Model



圖十四，乾蒸氣單閃式發電機組概念。

— Binary Model



圖十五，雙循環式發電機組。

2. 下午 15:00 以後為註冊時間，並前往接洽各廠商：

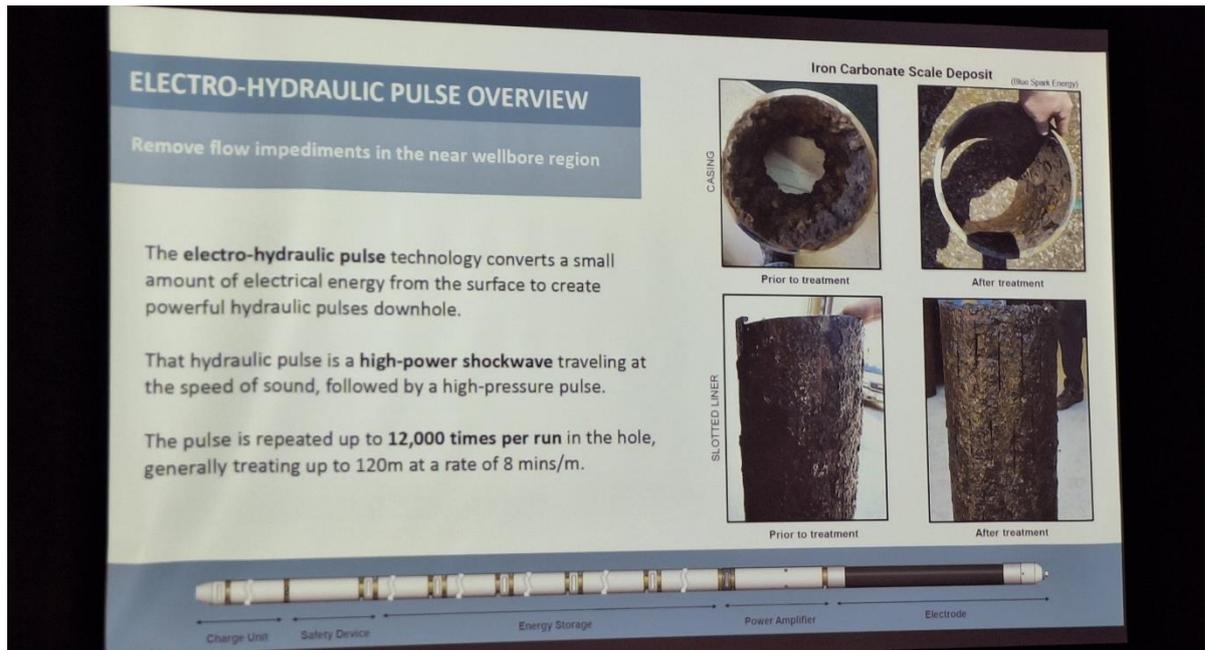
本次接觸廠商眾多，由於本人專業及公司缺乏的為工程相關部分，因此主業接觸相關廠商，以下一一列舉。

2.1 Blue Shark Energy: <https://bluesparkenergy.com/>。該廠商介紹一種可以

清除管內結垢之設備，稱為 ELECTRO-HYDRAULIC，可用鋼纜車放置井內，其原理是利用電力產生高壓的水力脈衝，使管內結垢被破壞，屬新的方法，且這種方法不會有化學結垢抑制劑環境汙染之疑慮，也沒有傳統機械洗井的耗時及高成本，且本方法已經有實際案場案例確定可以實作，其照片如圖十六至圖十八所示。



圖十六，現場展示其除垢工具。



圖十七，廠商展示現場實際應用效果投影片。



圖十八，廠商展示該工具比較機械洗井及化學抑制劑之優劣。

2.2.xylem 公司，主要是做水質監測及處理的廠商，其廠商販售相當多水質監測儀器及分析儀器，本人此行與廠商交流並取得名片及產品型錄，若未來公司有需要可以向該廠商採購適當之設備或藥劑。

2.3.Archer Oiltools 公司，主要是販賣井下工具及鑽井工具之廠商，現場接洽為該公司的產品經理 Torodd Solheim 先生，本人此行與廠商交流並取得名片及產品型錄，

若未來公司有需要可以向該廠商採購適當之設備，該公司有販售機械清除結垢之井下除垢器(Reliable well cleaning)，並有多種不同幾何形狀之設計。

2.4.NIVUS 公司，各種水相關之量測及監測設備，例如流量計、水質檢測計等等，較為特殊的是該公司有許多流量計設備，以及專門的軟體處理，主要可應用在地熱井廢水回注或排放時。

2.5.GEFA 公司，該公司販售各式閥門，以及可控式閥門，作為地熱電廠地表設備個式閥門是不可或缺的。

2.6.BOHMER 公司，該公司跟前一間 GEFA 公司一樣是販售各式閥門，以及可控式閥門，作為地熱電廠地表設備個式閥門是不可或缺的。

2.7.Endress+Hauser 公司，該公司主要販售流量計、氣體渦輪機、客製化的設備製作，若未來大屯火山有打到氣井，可考慮這間廠商之設備使用。

2.8.rotork 公司，該公司主要產品為地熱電廠地面設備產品及技術服務，例如控制閥門、各式榴量計、各種數據蒐集及連線，物聯網技術及電廠地表最佳化設計等等，若未來電廠營運出現狀況可考慮該家廠商。

2.9.ZWICK 公司，該公司為設計及販售管線、法蘭等設備之廠商。

2.10.ISOR，冰島地質調查機構，該公司從上游探勘到中游生產工程以及下游電廠營運皆有技術服務，因此可做為顧問公司接觸，該公司於冰島經驗豐富，本次出訪亦有前往該機構總部洽談，獲益良多。

(三)113 年 5 月 29 日(星期三)，議程第二日上午

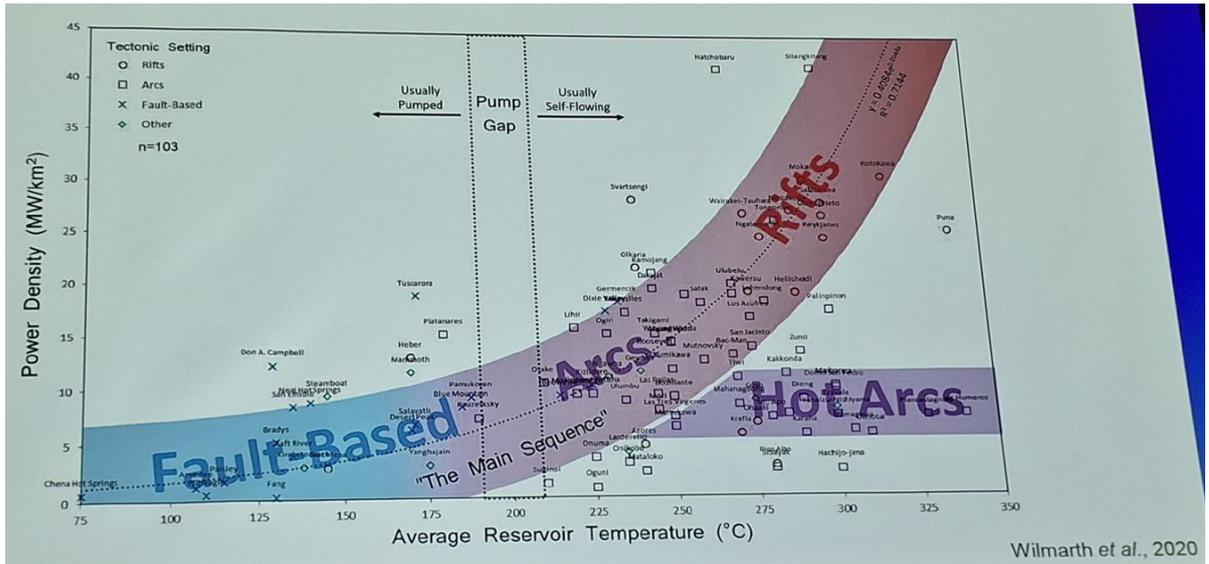
早上為開幕式及第一個主題，第一個主題本人參加加強型地熱(Enhanced Geothermal Systems)，共四個研究報告，並遴選重要支兩篇文獻進行簡介。

開幕式首先是冰島合唱團的演出，爾後由冰島總統針對該國家的地熱發展進行演講，冰島在第二次世界大戰以前的主要能源也是燃燒石化燃料，然後對當地空氣造成汙染，因此在國家能源政策方向上進行公投，公投結果是要發展乾淨能源，因此冰島致力於發展乾淨能源，主要是水力發電和地熱能應用，也取得極佳的成果，並分享了冰島改變前後的照片(圖十九)。

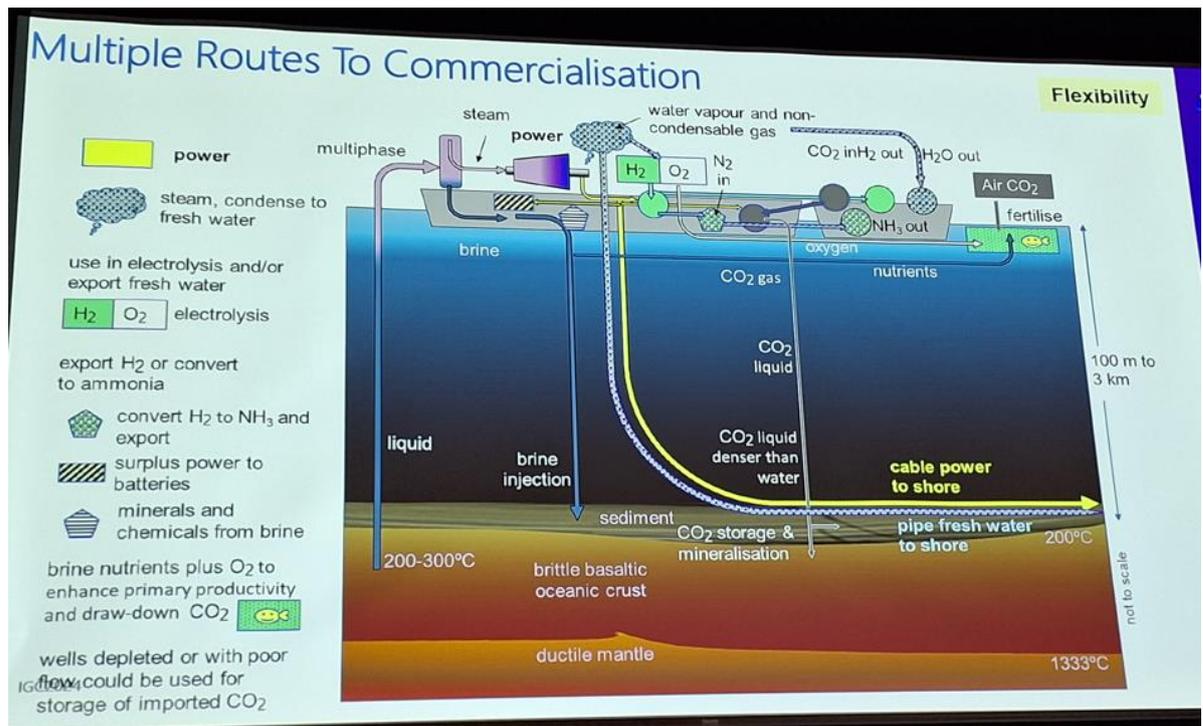


圖十九，冰島空氣汙染改善狀況 1938-2024。

在專題報告中本人截取有用的資料進行分享，首先第一篇:在 Breaking Through To New Green Frontiers by Harnessing Offshore Spreading Centre Geothermal Energy 報告中，講者提到外海的地熱探勘這樣一個嶄新的概念，並有對能量密度對儲層溫度做圖，如圖二十，該圖展示了不同地質樣態的能量密度，而這能量覓地也會直接影響到換熱效率及經濟可行性，通常能量密度越高的地方其經濟可行性越高。該研究提出一個複合式外海地熱開發之概念，除了直接取用熱水以外，還可以利用該電力直接在船上進行水解產生氫氣和氧氣，或用能量進行二氧化碳封存，以及利用這些能量進行養殖漁業，如此一來地熱發電的電就直接在船上進行應用，不需要額外拉電纜回陸地，但此方法經濟是否可行還需要更多的研究，其概念圖如圖二十一所示。



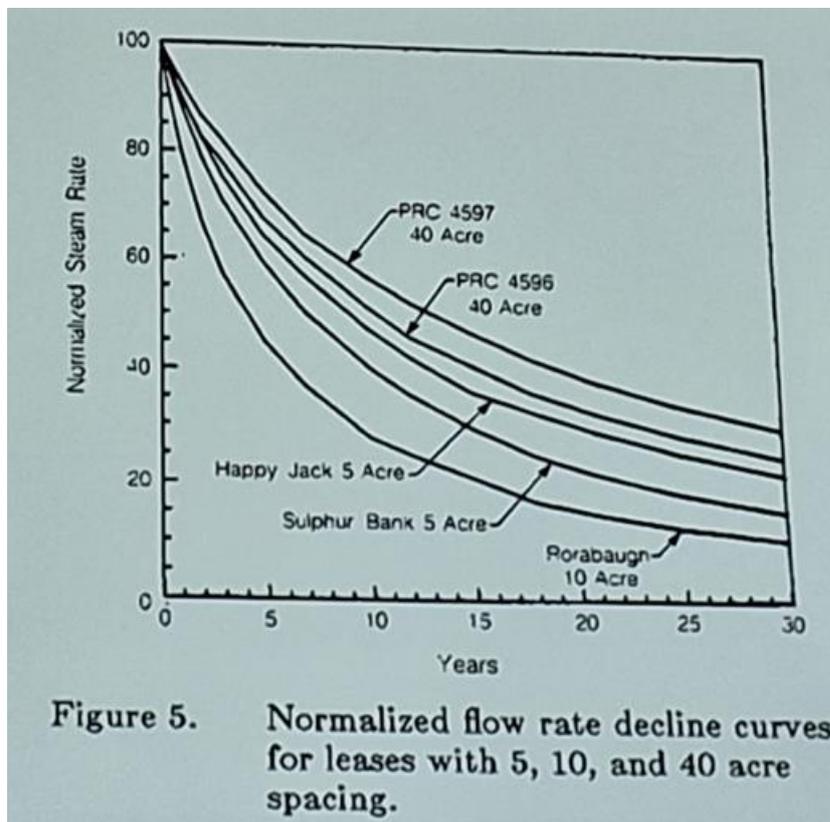
圖二十，能量密度對平均儲層溫度及不同地質狀態關係圖。



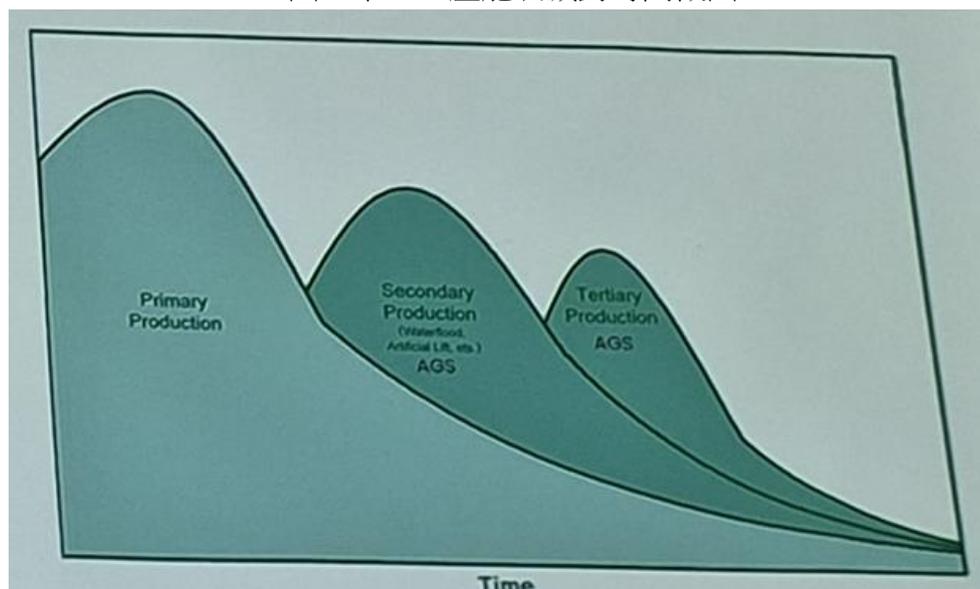
圖二十一，外海地熱應用概念。

第二篇為 Closed Loop Geothermal Systems - An Application for Revitalizing Mature Geothermal Fields，在報告中，提到了地熱井流量隨時間遞減的曲線(如圖二十二)，在不做任何處理的情況下，可能 10-20 年產量衰減一半左右，當然儲層體積越大衰減越慢，而如果將衰減之地熱井進行 AGS 應用亦可增加產能，而該報告公司為

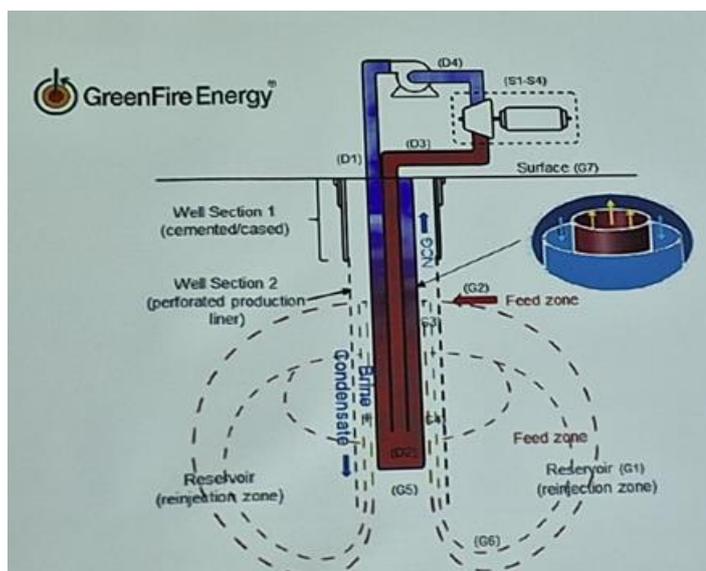
Baker Hughes，以及 GreenFire 團隊，亦是之前與中油公司有合作之廠商，因此本次報告亦介紹 Greenloop 技術，也就是單井同軸技術，其關鍵技術及概念如圖二十三所示，間單的說就是用單井同軸的方式將地底下的熱能用工作流體(水)攜出，也會應用到原本地下儲層之滲透率，因此並不全然是只在井內進行熱交換，也需考慮地層內之流體交換換熱，其概念圖如圖二十四所示。



圖二十二，產能衰減對時間做圖。



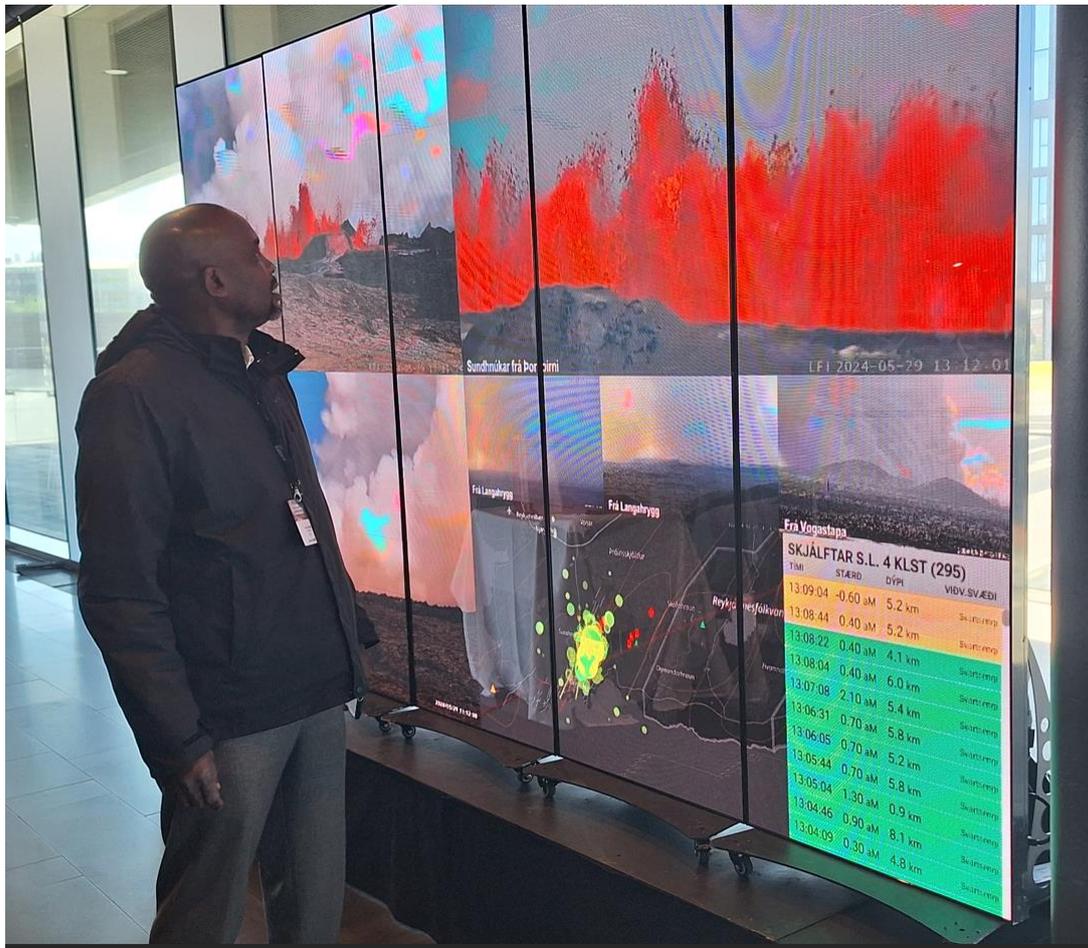
圖二十三，若有做 AGS 可恢復地熱井衰減情形。



圖二十四，Greenloop 技術原理概念圖。

(四)113 年 5 月 29 日(星期三)，議程第二日下午

該日下午原本要進行野外實察，原本要參訪 Reykjanes Resource Park 以及內部之地熱電廠，但由於冰島火山噴發，且噴發位置非常接近原本參訪之地方，因此臨時改變參訪地點，改成參觀北美板塊及歐亞大陸板塊交接處及水力發電廠。在火山爆發當下會場有感受到微微震動，爾後會場所有螢幕開始直播火山爆發現場，實屬難得經驗。但無法近距離參觀地熱電廠非常遺憾。火山爆發時會場所有螢幕都進行現場直播(圖二十五)，爾後參觀之板塊交界處如圖二十六。



圖二十五，會場現場大螢幕直播火山噴發。

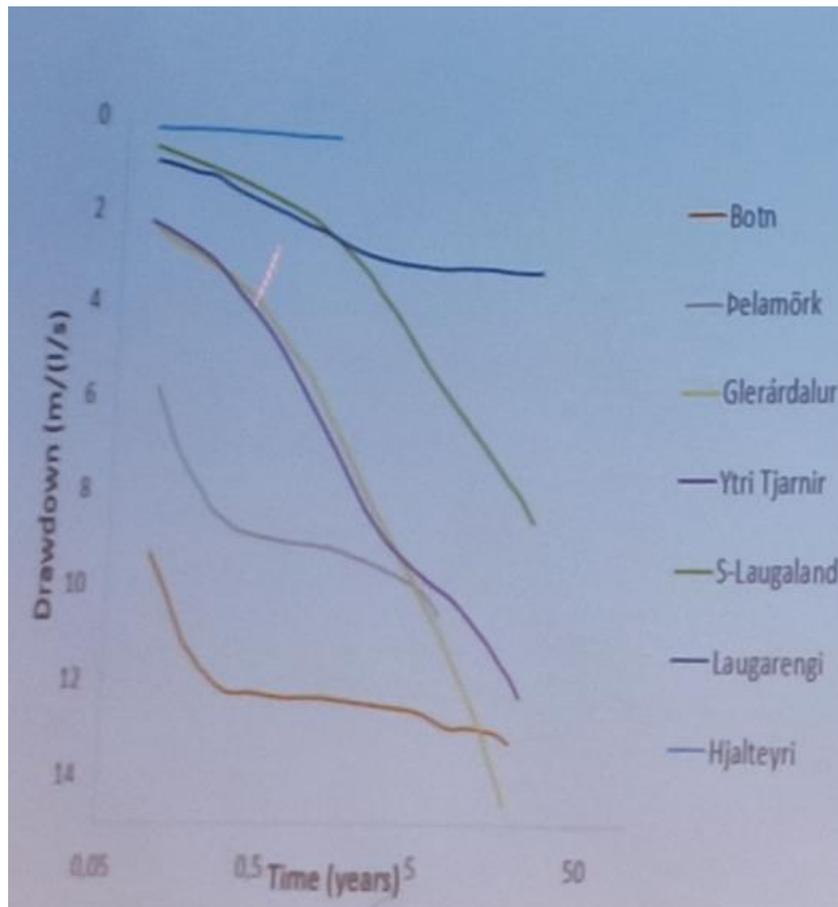


圖二十六，兩大板塊交界，自北美板塊望向歐亞大陸板塊，中間為陷落地形。

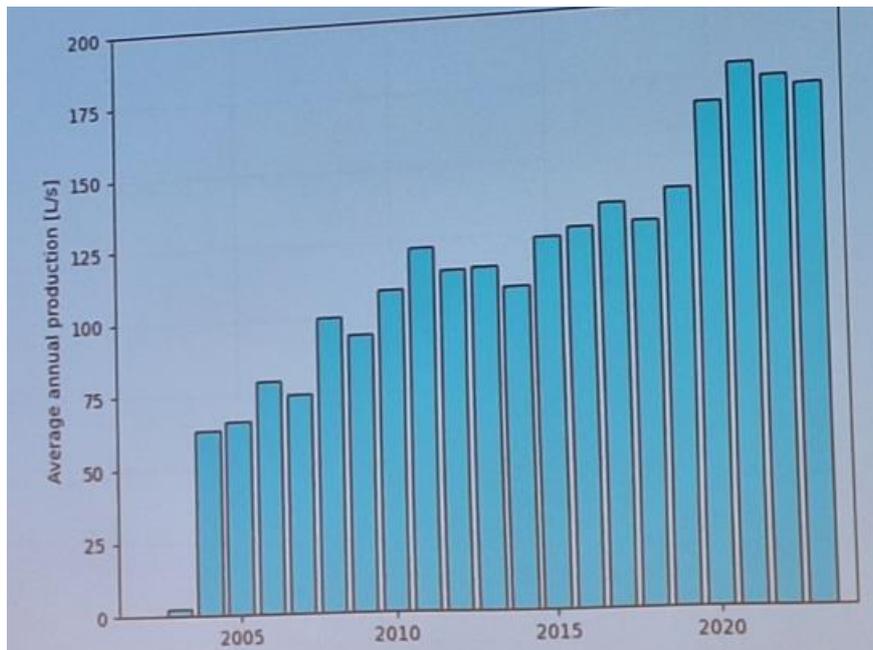
(五)113 年 5 月 30 日(星期四)，議程第三日上午

早上包含兩個主要的議程，其一為 Geothermal Reservoir，其二為 Super Hot Geothermal，第一個議程的題目有四個，而第二個議程的題目有五個，這兩個主題各遴選兩篇文章進行簡介。

第一篇，在 The Highly Productive Hjalteyri Low-Temperature Geothermal System in Eyjafjörður: Lessons Learned After 20 Years of Utilization 報告中，整理了西北冰島一個名為 Hjalteyri 低溫地熱系統中在生產 20 年的過程中對儲層的變化及統計數據，該地熱田的特色之一為高滲透率，其中圖二十七表示平均產能，可以發現該地產能逐年增加，從 2004 年開始生產的 60-80L/s，提升到 2024 年的 160L/s，該地熱區特別的地方是地下水位在生產過程中沒有變化，跟其他地熱田有不同之處，各地熱田的水位隨生產年份的變化如圖二十八所示，這二十年中該研究針對地熱流體的化學成分都有進行監測，可以發現綠離子在 2022-2023 年快速升高，且 Cl/B 數值增加，SiO₂ 數值自 115 下降至 100，綜合上述三個化學證據推測應是有海水入侵儲層，大約是 0.5%。

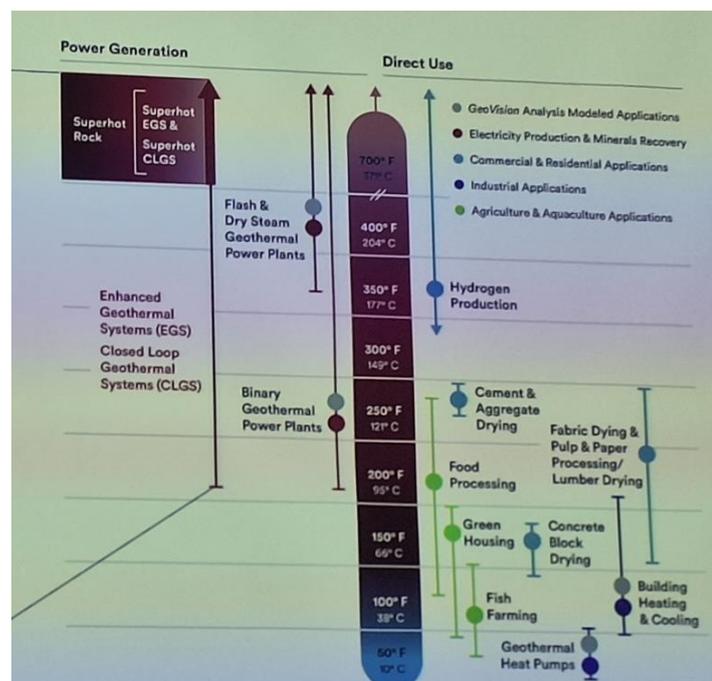


圖二十七，不同地熱田的地下水位下降對時間的曲線。

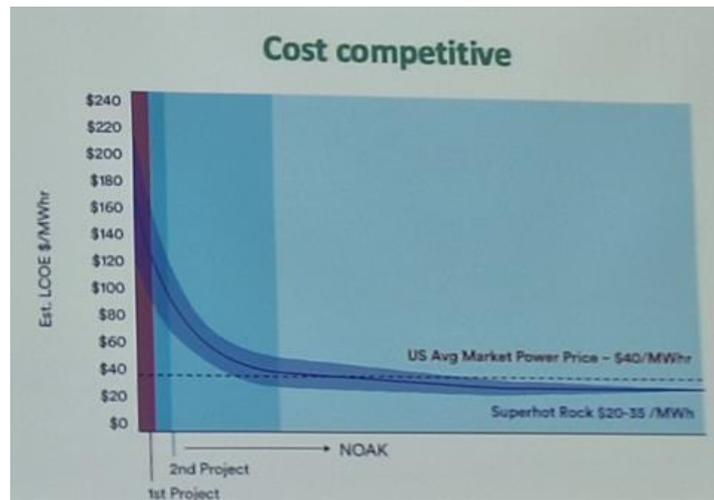


圖二十八，該地熱田產率隨時間變化長條圖。

第二篇，名稱為 Critical Gaps in Superhot Geothermal，該報告中，統整了 EGS 和 AGS 的適用範圍，也定義了超高溫地熱的範圍，並將傳統上不同溫度的地熱應用統整成一張圖，如圖二十九所示，並引用文獻推測地熱成本遞降對時間的預估曲線(如圖三十所示)，該文件顯示美國平均市場價格約為 \$40/MWhr。這也是地熱發電的成本目標。



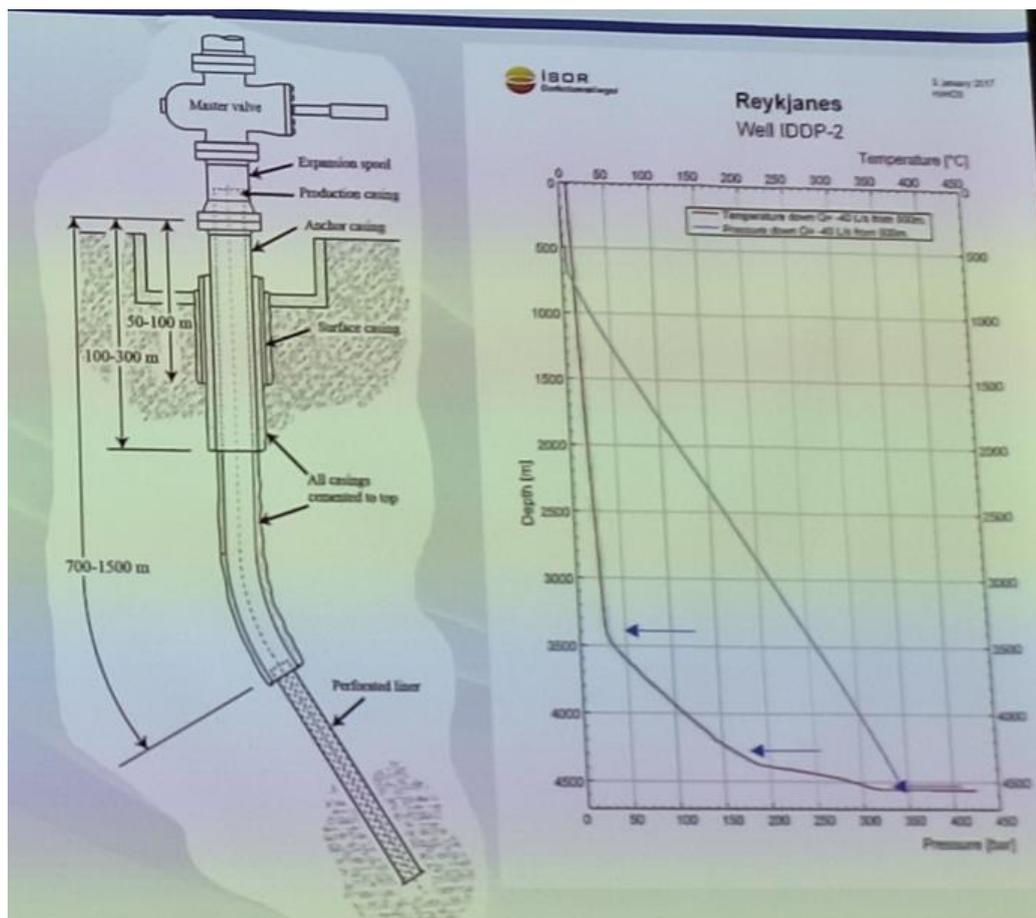
圖二十九，不同溫度之地熱應用。



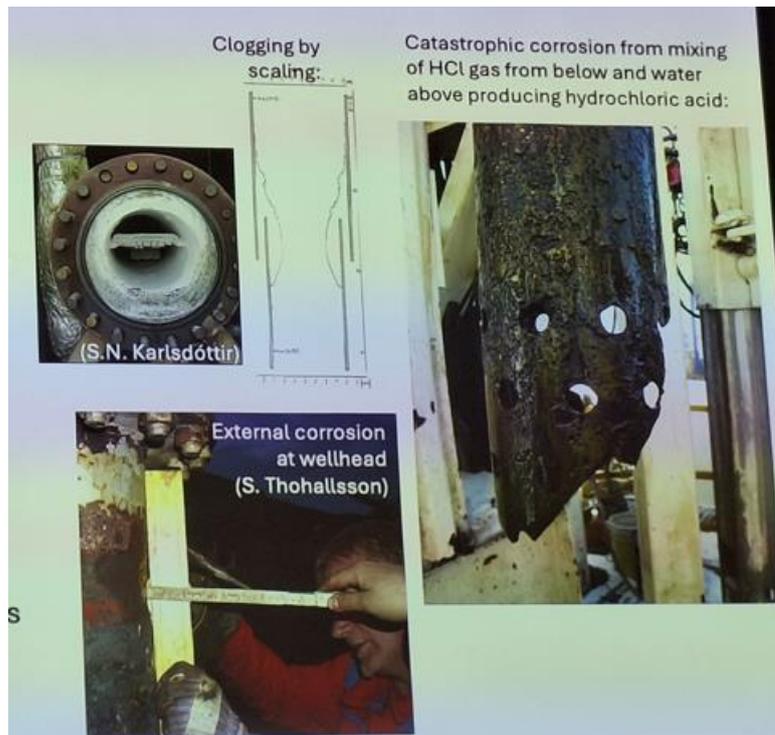
圖三十，超高溫地熱成本隨時間遞降預測圖。

第三篇及第四篇皆為超高溫地熱田領域，因都是 IDDP 的研究成果，故結合兩篇一併介紹，該兩篇報告分別是「IDDP - Innovation and Lessons Learned from an Engineering Perspective」以及「IDDP3 and beyond - what's next?」首先介紹 IDDP2 的井程設計及溫度剖面(圖三十一)，可以發現在 3500M 時溫度快速上升，到 4500M 時溫度已經突破 400°C 且依舊快速上升，可能是打到岩漿了。在整個試驗過程中，發生了一些問題，首先是篩管被侵蝕，爾後是井下取樣器遭遇溫度極限，然後是在套管內管徑變化處的結垢問題，侵蝕和結垢問題實體照片如圖三十二所示。為解決上述三個問題，ISOR 進行研發，關於腐蝕問題，研發出三種解決方案，其一是雷射包程(TWI and Hornet Laser Cladding)，其二是套管連結套(ISOR's Flexible Couplings)，其三為長套管水泥設計(CURISTEC and SINTEF)，還有套管崩塌保護設備(四種設備圖片如圖三十三所示)。井底取樣高溫問題則是研發井底取樣高溫取樣器，目前已設計出可耐 300°C 以上之井底取樣器，目標是可耐 500°C 之井底取樣器。井底取樣器的耐溫限制主要限制位置為封隔環，若是 Viton O 環，僅可耐溫至 230°C，國內常見之取樣器皆是此種形式。目前 ISOR 已成功開發 Kalres O 環系統，可耐溫至 300°C，接下來要研發金屬對金屬之封閉系統，這種方式可以耐溫度到 500°C，也是現在的研發重點。接著簡介 IDDP 計畫的時間軸，該計畫為冰島深部鑽井計畫，自 2001 年啟動，2008 年開始鑽鑿 IDDP-1，2012 年 7 月將 IDDP-1 井關閉，2016 年 8 月開始鑽鑿 IDDP-2 井，並於隔年 1 月完成，其中 IDDP-1 鑽鑿到岩漿，IDDP-2 鑽到超臨界流體儲層，皆是重要之成果，報告中亦分享溫度壓力對深度之曲線圖，也分享套管設計一些部分，如 IDDP-1 使用 K55 套管，IDDP-2 使用 L-80 套管，為了改善腐蝕情況使用添加 Cr 之 L-80 套管，也知道了使用套管的金屬連接器會因為強力的焯火現象導致其連接器斷裂，另外在 IDDP-1 鑽進過程也釐清了，鑽桿在鑽遇岩漿時會無法正常使用而被捨棄，當溫度上升時是腐蝕環

境，另外二氧化矽會在降溫過程中析出，且 IDDP-1 單井的熱功率輸出約為 30MW，其鑽至岩漿之照片如圖三十四所示。最後，這個計畫最終是要找到大量接近岩漿的超高溫地熱儲層(示意圖如圖三十五所示)，並預期建立超高溫地熱田之取熱循環，如圖三十六所示，有兩種預想模式，第一種是在中間打一口深井注水，在旁邊打許多淺井做為生產井，注水至深處被加熱後會由生產井產出。第二種是打兩口井深井，一注一產，所注入之水被加熱後由生產井產出。兩種方法之示意圖如圖三十七三種方法之中間及右側示意圖所示。



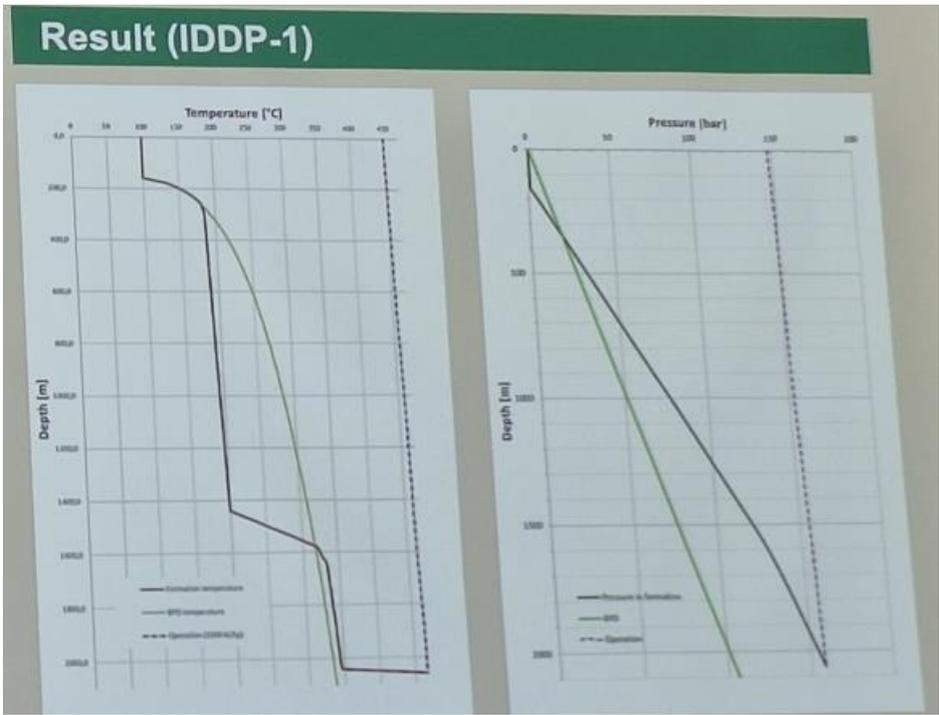
圖三十一，IDDP-2 井的井程設計及溫度剖面。



圖三十二，IDDP-2 套管結垢及腐蝕狀況圖片。

<p>Casing corrosion mitigation TWI and Hornet Laser Cladding</p>	<p>Thermal expansion mitigation ÍSOR's Flexible Couplings</p>
<p>Cement solutions for long casings CURISTEC and SINTEF</p> <p>Fig: S.N. Karlsdóttir</p>	<p>Casing collapse prevention Technology in development at ÍSOR</p>

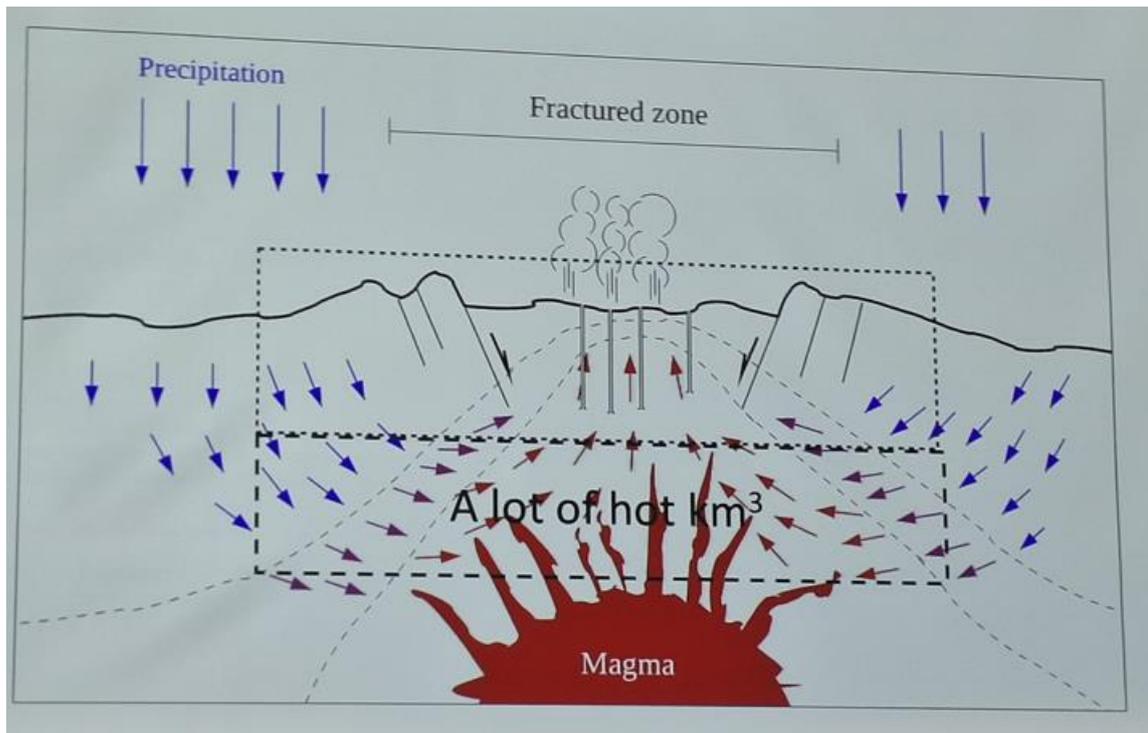
圖三十三，ÍSOR 套管防侵蝕解決方法。



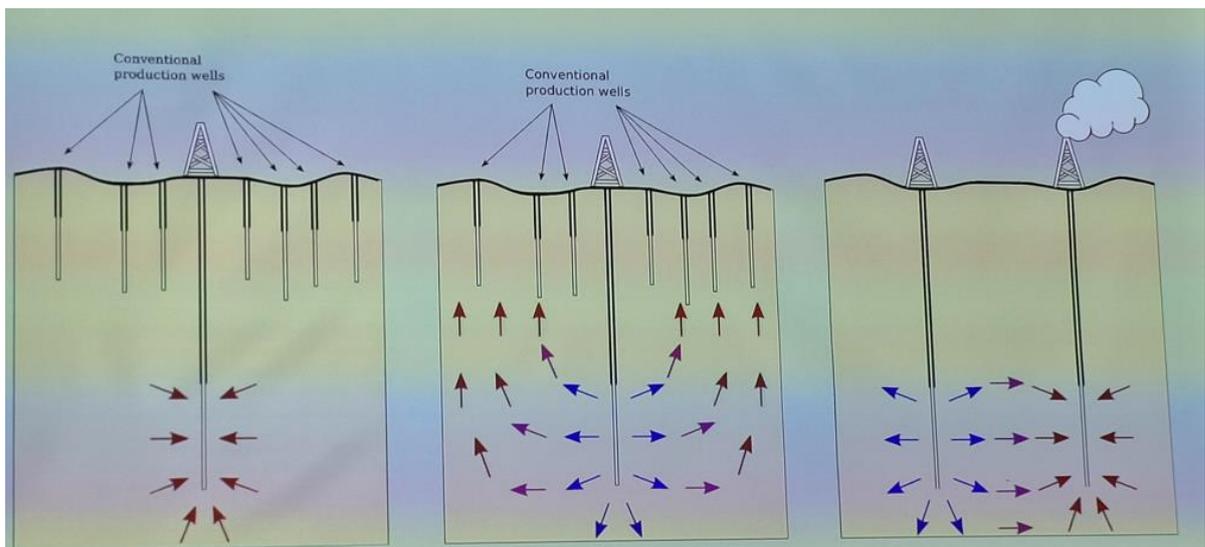
圖三十四，IDDP-1 壓力溫度對深度曲線圖。



圖三十五，大量接觸岩漿之水蒸氣自井頭噴出。



圖三十六，IDDP 計畫想找到之超高溫地熱田示意圖。



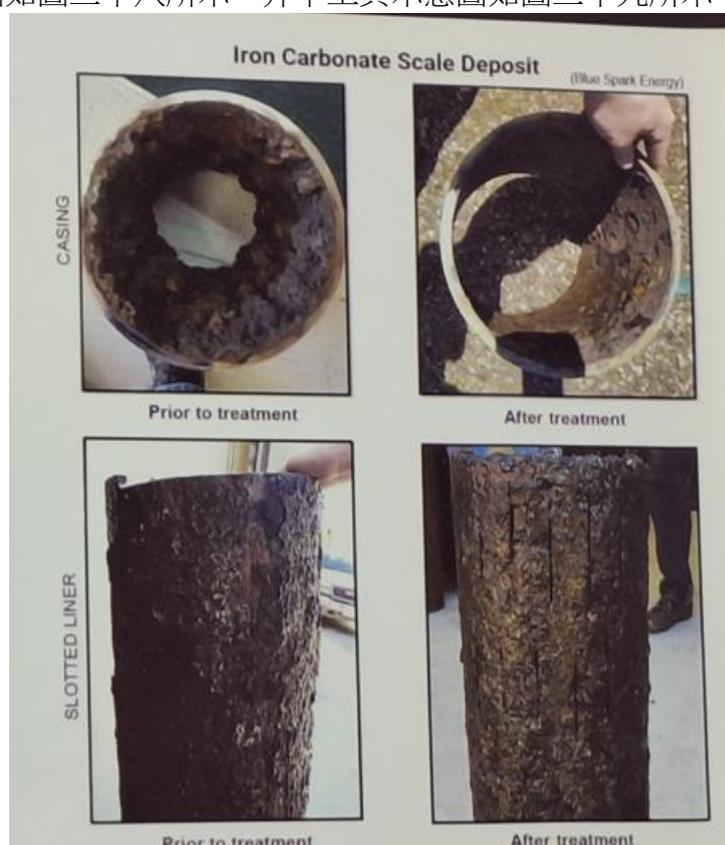
圖三十七，超高溫地熱田生產方式示意圖。

(六)113 年 5 月 30 日(星期四)，議程第三日下午

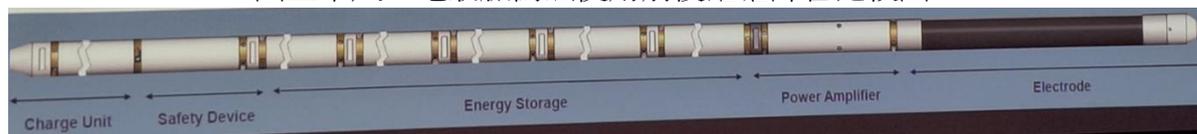
下午包含一個主要的議程，為 Drilling , well Completion and Workover 鑽井完井及修井，其議程的題目有六個，遴選兩篇文章進行介紹。

第一篇為 Extending the Life Cycle of Geothermal Wells: Effective Strategies for Scale Removal，在報告中，提出了有效的移除井內結垢物的方法，

分別為酸洗、機械洗井、以及最新的電液脈衝法(electro-hydraulic pulse)。酸洗可用於碳酸鹽或矽酸鹽結垢，其方法為添加 HF 5%及 HCl 10%，若無矽酸鹽僅有碳酸鹽可考慮僅添加 HCl，操作原理為自地表住宿酸液並施加壓力使酸液進入地層，並與結垢物反應後清除。機械洗井則是利用特殊之井下工具，將其工具利用鑽機放入井內進行物理清洗結垢物，此方法最為直觀，但無法清除地層內之結垢，該方法可適用於幾乎所有井況，最後是電液脈衝法，利用特殊之井下工具放入井內，其原理為利用地表產生電力傳至該井下工具，使工具產生高壓液體脈衝，利用高壓水力脈衝沖洗結垢物並破壞其構造達到洗井的目的，該工具一 RUN 可以產稱超過 12000 次高壓水力脈衝，大約一次可清理 120 公尺的結垢，大約是每公尺 8 分鐘，其井下工具尺寸約為 2.75 吋。其試驗之前後比較圖如圖三十八所示。井下工具示意圖如圖三十九所示。



圖三十八，電液脈衝法使用前後結垢篩管比較圖。



圖三十九，電液脈衝法井下工具示意圖。

第二篇為「Minimal Impact Rigless Scale Removal for Geothermal Wells」，在該報告中，Welltec 公司提出當地熱井產生碳酸鹽結垢和矽酸鹽結垢時，卻無法用結

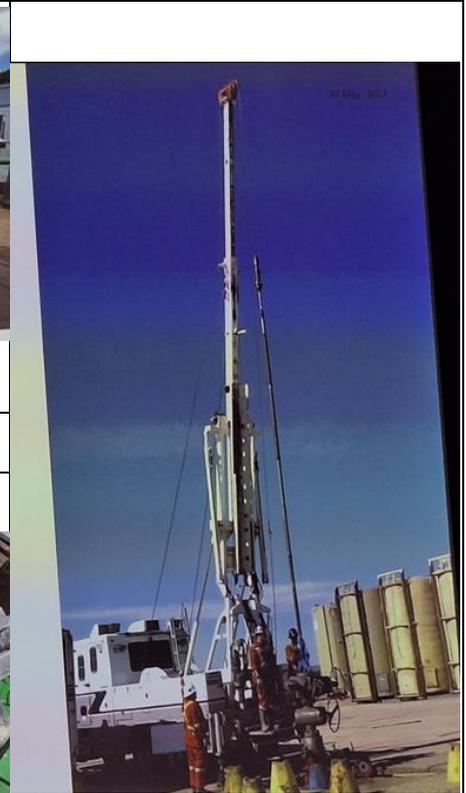
垢抑制劑控制時可以用一種井下工具進行清除，其產品名稱為 Well Miller 318HT，其設計是一看似螺旋之井頭刮除器(如圖四十至四十一)，控制 WOB 為 500-600kg，可用吊車直接吊掛該設備進井內清洗。所需設備為吊車、鋼纜、井下刮除器元件以及如需冷卻之循環系統，該設備可以承受 185°C 12 小時。展示設備適用於 9 5/8 套管內之刮除，亦是國外地熱生產井常規生產尺寸。現場施作照片如圖四十二所示。



圖四十，井內刮除器全貌



圖四十一，井內刮除器井頭部分



圖四十二，使用現場照片

心得及建議

本次出國行程印象最深刻的部份是跟 ISOR 的兩位專家 Bjarni Richer 和 Dadi porbjornsson 進行深度對談，討論的重點是台灣目前地熱開發的重點問題。第一部分是流程問題，專家語重心長表示，開發地熱案場首重經濟可行性，當然在探勘階段我們可以樂觀的評估，例如使用地球物理方法、地質方法或地球化學方法去進行探勘並預估資源量(Resource)，但當篩選出地熱好景區後，接續便需審慎進行探勘井驗證。探勘井通常以 slim hole 模式進行，並以 3 口井為一個探勘計畫進行，通常會是兩口井較淺，探明地熱儲層邊界，如 MT 所找出之黏土化帶邊界，以及溫度壓力，最後一口打在估計產量最高的地方探明地熱儲層的溫度壓力和產量，這口井通常會比較深；當打完這三口探勘井後，就會規畫生產井，規劃生產井有幾個重點要素，第一是口徑最大化，為了能讓生產井最大量生產，因此會規畫大的井徑，例如我們參觀的地熱電廠所使用的生產井的生產套管都是 9 5/8 吋的套管，甚至更大，第二是準確預測生產層的深度，並採用低汗損或無汗損的鑽井工法，例如鑽至生產層後改為清水泥漿鑽進。如一開始循環技術較不成熟建議可以先使用高分子泥漿，也可以稱為低密度低固粒泥漿，成分大概是水加上一些抗高溫的增黏劑，密度大約是 1.00~1.05。專家特別提醒必須限制皂土(Bentonite)的添加，因為皂土會與高溫岩石發生反應而固化在岩石表面，或是固相物質進入產層產生嚴重汗損，造成嚴重膚表因子效應。

本人討論中提到本公司土場鑽井遭遇膚表因子數值為數十甚至上百，專家明確的指出絕對(absolutely)是泥漿內的皂土等固相物質造成的。而漏泥問題建議降低鑽進速率，建議是最快也不要超過 10m/hr，一開始可以用 5-10m/hr 嘗試，實際上根據鑽井現場循環漏失的速度來決定鑽進速率，並不是鑽越快越好。接著指出不要用水泥在儲層內堵漏，會對地熱儲層造成不良影響。用水鑽進的設備部分，不需要除泥器或震動篩，沉澱池需保留，並且連接一個消音器(如產能測試 James 法中所使用的消音器)進行降溫，並建議使用冷卻水塔降溫以保障循環水的溫度夠低，並且增加水的泵量以達到壓制井的目的，建議值是 67 L/S 以上。其核心概念就是利用大量快速的水循環進行井內控制，並完善散熱設備。ISOR 表示如果需要詳細的規劃設計可以考慮合作，並且指出目前地熱井鑽井規範是採用紐西蘭標準 NZS 2403:2015，本所可考慮購買引進。

另外，在整個研討會過程中，與許多地熱開發專家都有討論，例如 Tony Pink 先生、Jim Lawless 先生，Jim 先生亦在 2022 年本人出國紐西蘭時有所接觸，故討論內容牽涉到兩年前所報告之內容並進行更深入的探討，因此接下來文章會有與該年度出國報告內文類似之內容，還有來自台灣的宋教授及盧教授，其中針對地熱開發風險有詳盡的討論。首先討論的議題是關於地熱開發會失敗的原因，可大致歸納四大點：(1) 地質科學領域、資源工程及電廠設計團隊之間產生溝通不良或缺乏溝通。(2) 未能在開發過程中保持靈活度，不建議一開始就將目標訂死，例如設立五年後要有 10MW 的發電量這樣的目標是不靈活的，必須要隨著計劃的進展更新資料和調整工作規劃。舉例來說，如果持續探勘後發現地熱田邊界較小，或原先以為是上湧帶(upflow)的地區原來是外流帶(outflow)，這些因素都會影響到最終發電量。(3) 缺乏對於可操作性和熱源品質等條件對長期(20-30年)運營重要性的認知。一個地熱田在資源工程領域必須

算出最大開發量，如果超過就會造成地熱儲層壓力或產量下降，因而導致無法營運 20 年，這部分可以觀察土耳其，因為該國的開發方式可能會造成這樣的結果。(4) 缺乏了解地熱開發必須以營利為目標。因此開發計畫必須在最初和不斷改進的過程中都需要時時檢視具有財務可行性。除了上述四個問題，還針對其他領域提出了常見的失敗案例，如技術問題、溝通問題甚至是人為問題等等，接下來是本人所了解的一些失敗案例，也在跟專家討論的時候提出。

首先在探勘以及定井位時，第一個要注意不同火山系統(如島弧型、大陸張裂型等等)，不同型的火山系統會產生的熱上湧帶(Upflow)以及熱液帶(Outflow)並不一致，熱上湧帶才是熱源來源，如果只是熱液帶可能會產生淺層高溫，但深層卻沒有更高溫的情況，所以其實地熱越深溫度越高並不是一定正確的觀念，還要看地熱系統及地熱田的性質。在地球物理方法上，使用大地電磁法(MT)或電阻法的時候需要特別注意，量測到的是電阻率這個物理量，能找到的可能是含離子的地層水或是受到熱液換質作用的變質化帶(Smectite clays)，這兩種東西無法代表現生熱源，在變質岩地區甚至沒有變質化帶的可能，火山地區還需搭配火山噴發歷史及地球化學方法(地質溫度計)佐證，而地質溫度計的使用也要注意條件是否適合，尤其是陽離子地質溫度計(鈣鈉鉀系列)要考慮水溶液飽和及平衡條件，務實經驗上通常會高估了溫度。在台灣土場地區就發現淺層高溫(約到 700 公尺)，但更深卻降溫的現象，代表淺層熱源是從其他地方 outflow 過來，但是否能找到 upflow 則是需要考慮當地地質情況以及地表能打井的位置，現階段尚無法預測，而 outflow 的資源量必定會比 upflow 小的多。另外台灣變質岩地區根本不會有所謂的熱液換質作用，因此 MT 的低電阻帶究竟代表什麼意思?最有可能的是含離子的水，但含離子的水又怎麼能代表熱呢?乾熱岩所呈現的 MT 數值到底如何?這些都是值得探討的問題。

接著討論鑽井地質會遭遇的問題，首先提到在火成岩地區之變質化帶的黏土礦物有會吸水膨脹的礦物存在，所以在鑽井的時候要注意其對泥漿造成的影響，若能預測深度則可以下套管保護。另外礦物分析部分建議使用 XRD，並盡快能夠回饋到現場，由現場地質師判斷鑽進進度是變質化帶還是已進入儲層。還有地熱概念模式要隨著現場地表和鑽井資料的更新持續更新，避免用錯誤的概念模式進行規劃。在生產井鑽遇產層時，鑽井工法和泥漿工法必須要考慮保護儲層，這部分在心得與感想第一段在 ISOR 有詳細的介紹，在此不加贅述。

接著是裂隙判斷部分，火山行地熱地區的裂隙很常被岩漿冷卻產生的 Joint 影響判斷，這些後期形成的裂隙其連通性和範圍較差，因此需要搭配火山噴發歷史和該地的地質剖面圖協助判斷，現在的 LiDAR 是一種前期很好判斷裂隙的技術。

接著是人為的問題，這個部分就不是科學問題，而是管理或制度方面的問題，首先，是要極力避免用短時間的治標不治本的規劃來取代長期策略，這個部分常常發生在鑽井策略上，由於一口生產井和一口探勘井(slim hole)成本差距非常大，因此建議會是先打好夠多的探勘井了解儲層特性後再決定生產井，而這些前期探勘井通常會轉為監測井。而且探勘井是預測生產井的產層深度、溫度及壓力的重要依據，這也有助於井體設計。

在討論過程中討論幾種常見的錯誤樣態：第一，鑽井地點是受限於地表限制，但是

一個地熱系統哪裡潛能最高並不是看地表馬路或井坪的位置。第二，我們已經投很多錢了，一定要鑽到。也就是期待投資成本回收，已經花錢了，就要打到好，結果就是花更多錢。第三，我知道鑽井下去可能會失敗，可是預算已經下來了。這部分常發生在公部門，因為預算執行需要有一定的執行率，所以就算後來發現井的位置不好，但是也無法改變，一定得硬著頭皮打井。最後一點，對鑽井商的合約要求不宜太嚴格，避免沒有調整的空間，但也不能太鬆，避免要做什麼時連設備都不足，這部分還需共同努力。

接著討論到產能測試以及其解釋的問題：第一，一口井要進行回注實驗的時候不能太快注入，要等生產一段時間穩定之後才能注入，避免還沒得到真實產能就被影響，若因為回注影響溫度通常要幾個月的時間才能恢復。第二，在生產剛開始的時候，不凝結氣體會造成壓力較大，生產一段時間後不凝結氣體含量會下降，而壓力也會因為不凝結氣體分壓下降而下降，造成產量下降。第三，不能過分依賴恢復試驗中的 horner plots 進行溫度預測，因為在泥漿狀態下進行溫度量測，若產層被泥漿降溫過多或是堵塞會造成外推之溫度不準確，最後一次循環時間這個數值較不好掌握，建議還是把井放置一段時間後量測溫度較準。最後，除地質條件是一大塊乾熱岩的地區以外，不建議用淺井的溫度梯度來外插更深的井的溫度，這樣做通常都會高估深層的地溫。

接著講開發過程和風險評估常見的問題：第一，所謂好的資源量(Resource)是指有經濟開發價值的地熱案場，沒有經濟效益的地熱開發案潛能並不能稱為資源量。第二，在計算蘊藏量的時候，要考慮所謂的回復因子(recovery factor)，也就是地熱能轉換成我們能使用的電能(或其他所需能源)的比例，通常直接利用的回復因子高於發電，由於發電還要經過熱電轉換的過程，一次熱交換的效率通常只有 10%，若如果用 100%計算，到時候開採時會無法達到一開始計算的蘊藏量。第三，要區分不同地方的溫度，例如井底(儲集層)溫度、井頭溫度、分離器溫度或是機組入口溫度，這四個溫度代表不同的意義。例如拿井頭溫度作為發電機組入口設計溫度，就會導致實際運轉時，機組入口溫度都會低於設計溫度的狀況，導致發電效率下降，而且雙循環發電機組的效率上限跟地熱流體的蒸氣占比有很大的關係，如果汽水比改變，會嚴重影響雙循環發電機組的熱電轉換效率。第四是管線設計，原則是避免壓降，以及保溫，需考慮的是地形和井位高程，以及管線和地面設施是否有交叉的情形出現，這些需要最佳化設計。須避免僅根據地表或平面圖設計管線，而忽略了實際地表的人工建物、自然地形環境、高程差或是管線本身的交錯。第五，須注意各井間的溫度壓力差異，若兩井間壓差過大會導致倒井現象，也就是高壓井的地熱流體通過地表管線直接回注到低壓的生產井內。第六，結垢問題。結垢問題需要考慮到地熱流體成分、溫度和壓力條件，因此在地表設計時須注意溫度和壓力控制，這部分跟管線設計也有關，若是管線交錯的時候設計了一個垂直上升的管線或是管徑突然變大，可能會造成壓力瞬間下降導致結垢，或是在熱交換版溫度下降太快導致結垢。最後一點，電廠規模設計要跟現場能開採的地熱資源相匹配，機組太小會浪費地熱能，機組太大地熱流體不夠又會使熱電轉換效率不佳，然後也不建議蓋所謂的示範案場，除非特殊科學目的須解決，不然一般的示範案場都不具經濟效益。

上述心得建議可作為中油公司未來規劃地熱電廠時的參考依據，以達到地熱電廠效益最大化以及為台灣綠能開發盡一份力。