

出國報告（出國類別：開會）

參加 2023 年國際應用地球科學與能源
年會(IMAGE)暨論文發表
出國人員報告書

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：林逸威 (地球物理師)

派赴國家：美國

出國期間：112 年 8 月 27 日至 9 月 3 日

報告日期：112 年 9 月 28 日

摘要

本出國計畫為參加 2023 年於美國休士頓舉辦的「國際應用地球科學與能源年會(The International Meeting for Applied Geoscience & Energy, IMAGE)」暨論文發表。IMAGE 會議內容包含地質、地球物理、能源轉型、碳封存等眾多議題。本報告從聽取會議簡報內容中，整理出五項：開頭演講提到的永續經營、氫能探勘、碳封存的 4D 震測監測、有物理訊息的 AI 及 FWI 工作坊。

能源轉型是現今不論個人或公司團體所要面臨的問題，要如何因應且生存下去？或許我們都需要改變以順應潮流。而這可能也是 SEG、AAPG 等學會以往各自舉辦年會改為合辦此年會的原因之一，讓更多不同領域的人一同來討論，一同來尋找問題的答案，並且踏出實行的第一步。

氫能探勘雖然不是新的議題，但是近來越發受到重視。能源公司除了使用藍氫及綠氫等能源載體，將其儲存、運輸外，自然富集形成的「黃金」氫也可以是一個選項。「黃金」氫所對應的氫氣系統雖然與石油系統不同，但可透過類似方法來歸納氫氣可能富集的原因。

碳封存的 4D 震測監測主要是整理會場內，與挪威 Sleipner 碳封存場址相關的簡報。Sleipner 是世界上第一個以減少碳排放為目標而開始的碳封存計畫，並且也已對外公開從 1994 年施測的 3D 基線震測資料體，到開始碳封存後所陸續炸測的監測資料體，是許多研究使用的資料。報告主要討論 4D 震測監測所面對的極限與挑戰。

近期在科學界關於 AI 熱門的議題其中之一為具有物理訊息的 AI。傳統 AI 的解算主要是與線性代數相關，但不一定具有物理意義。透過大量的真實觀測資料或物理模擬資料，可將神經網路訓練成具有物理訊息的，而可以將它運用在預測未知的資料上。

會後的 FWI 工作坊則是展示近期最新的科技：彈性參數或多參數全波形逆推。一般 FWI 尚須初步前處理如去除雜訊、濾波等，以及準備一個初始速度模型。新的彈性參數或多參數全波形逆推則強調可輸入原始採集的 OBN 資料，同時逆推速度、不同角度的反射係數等模型，以此模擬的彈性波可與採集資料匹配，最後逆推所得反射係數影像即可用於震測解釋等後續其他應用。

目次

摘要.....	1
目次.....	2
壹、 目的.....	3
貳、 過程.....	4
參、 具體成效.....	11
肆、 心得及建議	32

壹、目的

往年的 SEG 年會在 2021 年已改成由地球物理探勘師學會(SEG)、美國石油地質師學會(AAPG)及沉積地質學會(SEPM)共同舉辦之「國際應用地球科學與能源年會(The International Meeting for Applied Geoscience & Energy, IMAGE)」，今年為第三屆，在美國休士頓舉辦。IMAGE 主要提供地球科學家、能源專業人員及相關產業意見領袖一個平台，分享最佳的可行方案、發現最佳解方，對於眼前面臨的挑戰研擬最新的策略，以形塑應用地球科學及能源產業的未來。

參與本會議，主要目的為論文發表 (利用 RGB 值相減的最小變異數提取孔隙厚度比例)及了解目前最新探勘油氣的地球物理技術，包含全波形逆推等相關議題。本研討會議題豐富，在短短三天的議程內，在地球物理方面，囊括了從震測資料採集、處理、解釋、資料逆推、建模，以及不同的地球物理方法如重力、磁力、分散式聲波感測(DAS)等議題。地質方面則是小從古生物及儲集岩辨識，大至盆地模擬及石油系統都涵蓋了，還有近期熱門的碳封存、人工智慧、永續能源發展、非傳統能源等關於石化產業未來的議題都在其中。

在會議最後一天，藉由參加會議後的工作坊 (W-6: Elastic and Multiparameter FWI: What is Appropriate for Field Data Applications)，期能了解如何將全波形逆推應用在實際的資料上。

貳、過程

本次出國任務為期 8 天，主要行程為參加 8/29 至 9/1 之 IMAGE 2023 年會。會議舉辦地點位於美國休士頓 George R. Brown 會議中心。詳細出國行程如表 1。

表 1、出國行程表

起迄日期	天數	到達地點	詳細工作內容
8/27 (日) 8/28 (一)	2	台北－美國休士頓	啟程
8/29 (二) 9/1 (五)	4	美國休士頓	參加 IMAGE 2023年會
9/2 (六) 9/3 (日)	2	美國休士頓－台北	返程
合計	8 天		

1. IMAGE 2023 會議簡介

IMAGE 會議為由 SEG、AAPG 及 SEPM 合辦之整合型年會，集結世界各地從事地質、地球物理、油氣探勘、能源等相關業務及研發的人員，包含各個領域，如學校、能源公司、技術服務公司、政府單位、國際組織、學會…等。會議希望提供一個各領域、各專長可以一起討論的平台，因此除了主要技術會議的口頭與海報報告外，在廠商展覽會場還設計有社群公園(Society Park)及聚集地(Gathering Place)讓學生、同業可以聚一聚，聊一聊。在會場設計有四個展館(Pavilion)固定時間舉辦演講，包含數位化(Digitalization)、近地表(Near-Surface)、碳管理(Carbon Management)、全球能源機會(Global Energy Opportunities)等四個主題。會議中也安插許多特殊演講，如「整合地質地物：從發現巨大油氣田學到的功課」的發現思考論壇。

會議也有為了學生設計的活動，如 SEG EVOLVE 等類似實習，並在會議展場中成果發表。在會議開始前一天(9/28)有短期課程(Short Course)，在會議結束後一天(9/1)有工作坊(Workshop)提供學生、從業人員學習的機會。

2. IMAGE 2023 會議議程簡介

大會議程如表 2，技術會議口頭報告議程如表 3，海報報告議程如表 4，口頭及海報時段皆為上午及下午各 2 場，但海報張貼時段可為整個上午或整個下午。技術會議分類有 4 類：地質、地物、整合型(地質與地物)及特殊演講(SS)。

地質的主題包含：盆地模擬及石油系統(BMPS)、新興探勘概念(ENEC)、「碳酸鹽、蒸發鹽及混合系統」(CEMS)、地球化學(GCHEM)、石油地球科學的歷史(HPG)、「古生物、生物地層前緣及應用」(PBAA)、矽質碎屑岩系統(SILIC)、大地構造及地質力學(STGM)、非傳統資源(UNCON)。

地物的主題包含：「非均向性、振幅支距效應及震波逆推」(AAS)、採集(ACQ)、分散式聲波感測系統(DAS)、大地電磁及位能場(EMP)、全波形逆推(FWI)、重力及磁力(GM)、誘發及被動地震學(IPS)、近地表(NS)、岩石物理(RP)、震測模擬及理論(SMT)、震測資料處理(SP)。

整合型的主題包含：井下(Borehole)、低碳方案及 CCS(CO₂)、地質地物解釋(INT)、深度整合資料及原則(INTD)、機器學習及資料分析(MLDA)、礦業探勘及採集(MME)、「新能源前緣、關鍵礦藏及行星地球科學」(NEF)、整合儲集層描述(RC)、永續能源發展及環境地球科學(SUS)。

表 2、IMAGE 會議議程

Schedule at a Glance

All events take place at the George R. Brown Convention Center and/or the hotels unless otherwise noted.

SATURDAY, 26 AUGUST

Preconvention Field Trip

SUNDAY, 27 AUGUST

Registration
8:00 a.m.–5:30 p.m.

Preconvention Short Courses
8:00 a.m.–5:00 p.m.

SEG/Chevron Student Leadership Symposium (SLS) — Day 1
12:00 p.m.–5:00 p.m.

SEG Gravity and Magnetics Committee Meeting
5:00 p.m.–6:00 p.m.

MONDAY, 28 AUGUST

Registration
7:30 a.m.–7:00 p.m.

Preconvention Short Courses
8:00 a.m.–4:00 p.m.

SEG DISC with Phil Ringrose
8:00 a.m.–4:00 p.m.

SEG/Chevron Student Leadership Symposium (SLS) — Day 2
8:30 a.m.–3:30 p.m.

SEG Council Meeting and Presidential Address
1:00 p.m.–3:00 p.m.

Opening Session: Sustainability and our Geoscience Enterprise — Exploring our Grand Challenges
4:30 p.m.–5:30 p.m.

Exhibition and Icebreaker Reception
5:30 p.m.–7:30 p.m.

Early Career Networking Reception (by invitation only)
6:30 p.m.–8:00 p.m.

Satellite registration is available at the hotels. Times will be posted online.

TUESDAY, 29 AUGUST

Registration
7:00 a.m.–5:30 p.m.

Oral Sessions (Morning)
8:00 a.m.–12:00 p.m.

SEG Challenge Bowl World Finals
8:00 a.m.–10:00 a.m.

Exhibition
9:00 a.m.–6:00 p.m.

Digitalization Pavilion Theatre Presentations
9:00 a.m.–6:00 p.m.

Carbon Management Pavilion Theatre Presentations
9:00 a.m.–6:00 p.m.

Near-Surface Pavilion Theatre Presentations
9:00 a.m.–6:00 p.m.

Refreshment Break
9:30 a.m.–10:30 a.m.

GEO Pavilion Theatre Presentations
10:00 a.m.–11:20 a.m.

Poster Sessions (Morning)
10:20 a.m.–12:00 p.m.

Strategic Panel: Revitalizing the Energy Workforce Post-Pandemic and Across Generations
10:20 a.m.–11:35 a.m.

U-Pitch New Technology Showcase
10:00 a.m.–5:00 p.m.

All-Convention Luncheon
11:30 a.m.–1:15 p.m.

SEG Near-Surface Geophysics Technical Section Committee Meeting
12:00 p.m.–1:00 p.m.

Strategic Panel: Powering the Energy Landscape of Tomorrow: Successful Geoscience Collaboration with Diverse Teams
1:20 p.m.–2:35 p.m.

Oral Sessions (Afternoon)
1:20 p.m.–5:20 p.m.

Poster Sessions (Afternoon)
1:20 p.m.–5:20 p.m.

GEO Pavilion Theatre Presentations
2:00 p.m.–3:20 p.m.

Refreshment Break
3:00 p.m.–4:00 p.m.

SEG JEDI Committee Open House
3:00 p.m.–4:00 p.m.

Strategic Panel: The Energy Transition: Modernizing Business Workflows and Optimizing the Data Supply Chain
3:40 p.m.–4:55 p.m.

Early Career Speed Mentoring
3:00 p.m.–5:00 p.m.

End-of-Day Reception
5:00 p.m.–6:00 p.m.

SEG Geoscientists *without Borders*® Reception
5:00 p.m.–6:00 p.m.

AAPG Honors & Awards Ceremony
6:30 p.m.–7:30 p.m.

SEG Honors & Awards Ceremony
6:30 p.m.–7:30 p.m.

SEG Near-Surface Geophysics Technical Section Reception
7:00 p.m.–10:00 p.m.

SEPM Research Group Meetings
7:00 p.m.–10:00 p.m.

AAPG/SEG Presidents' Reception (by invitation only)
7:30 p.m.–8:30 p.m.

Presidential Jam
8:30 p.m.–12:00 a.m.

WEDNESDAY, 30 AUGUST

Registration
7:30 a.m.–5:30 p.m.

American Geosciences Institute — Geoscience Development Roundtable Breakfast
8:00 a.m.–12:00 p.m.

表 2、IMAGE 會議議程(續)

Note: Information is current as of 8 August 2023
All times throughout this guide are listed in Central Daylight Time.

<p>Oral Sessions (Morning) 8:00 a.m.–12:00 p.m.</p> <p>ICEG Meeting 8:00 a.m.–9:00 a.m.</p> <p>Strategic Panel: Digital Geoscience and Operations: Case Studies from Onshore, Offshore, and Unconventionals 8:00 a.m.–9:15 a.m.</p> <p>AAPG Foundation Forum 8:30 a.m.–10:00 a.m.</p> <p>Exhibition 9:00 a.m.–6:00 p.m.</p> <p>Digitalization Pavilion Theatre Presentations 9:00 a.m.–6:00 p.m.</p> <p>Carbon Management Pavilion Theatre Presentations 9:00 a.m.–6:00 p.m.</p> <p>Near-Surface Pavilion Theatre Presentations 9:00 a.m.–6:00 p.m.</p> <p>Refreshment Break 9:30 a.m.–10:30 a.m.</p> <p>SEG EVOLVE and SEG Field Camps 10:00 a.m.–5:30 p.m.</p> <p>GEO Pavilion Theatre Presentations 10:00 a.m.–11:20 a.m.</p> <p>U-Pitch New Technology Showcase 10:00 a.m.–5:00 p.m.</p> <p>Poster Sessions (Morning) 10:20 a.m.–12:00 p.m.</p> <p>Strategic Panel: The Energy Addition: Energy Industry Diversification Strategies 10:20 a.m.–11:35 a.m.</p> <p>Digital Wildcatters Live Session in the Gathering Place 10:30 a.m.–11:30 a.m.</p> <p>AAPG Division of Professional Affairs (DPA) Luncheon 11:30 a.m.–1:00 p.m.</p> <p>AAPG Women's Network Luncheon 11:30 a.m.–1:00 p.m.</p>	<p>SEG Gravity and Magnetism Luncheon 11:30 a.m.–1:00 p.m.</p> <p>Strategic Panel: The Power of Partnership: Utilizing Higher Education Resources to Support Industry Innovation and Growth 1:20 p.m.–2:35 p.m.</p> <p>Oral Sessions (Afternoon) 1:20 p.m.–5:20 p.m.</p> <p>Poster Sessions (Afternoon) 1:20 p.m.–5:20 p.m.</p> <p>Special Session: Discovery Thinking 1:20 p.m.–5:20 p.m.</p> <p>Digital Wildcatters Live Session in the Gathering Place 1:30 p.m.–2:30 p.m.</p> <p>GEO Pavilion Theatre Presentations 2:00 p.m.–3:40 p.m.</p> <p>End-of-Day Reception 5:00 p.m.–6:00 p.m.</p> <p>SEG Mining and Mineral Exploration Committee Meeting 5:00 p.m.–6:30 p.m.</p> <p>Michel T. Halbouty Lecture 5:25 p.m.–6:15 p.m.</p> <p>Alumni Receptions 5:30 p.m.–7:30 p.m.</p> <p>AAPG Foundation Chairman's Reception (by invitation only) 6:30 p.m.–8:30 p.m.</p> <p>AAPG/SEG Latin America and Caribbean Region Meeting and Reception 7:00 p.m.–8:30 p.m.</p>	<p>THURSDAY, 31 AUGUST</p> <p>SEG CO₂ Research Sub-Committee Meeting 7:00 a.m.–7:45 a.m.</p> <p>Women's Networking Breakfast at Phoenicia MKT 7:00 a.m.–9:00 a.m.</p> <p>Registration 7:30 a.m.–2:30 p.m.</p> <p>Oral Sessions (Morning) 8:00 a.m.–12:00 p.m.</p> <p>SEG Applied Sciences Educational Program (ASEP) 9:00 a.m.–1:00 p.m.</p> <p>Exhibition 9:00 a.m.–3:00 p.m.</p> <p>Digitalization Pavilion Theatre Presentations 9:00 a.m.–3:00 p.m.</p> <p>Carbon Management Pavilion Theatre Presentations 9:00 a.m.–3:00 p.m.</p> <p>Near-Surface Pavilion Theatre Presentations 9:00 a.m.–3:00 p.m.</p> <p>U-Pitch New Technology Showcase 10:00 a.m.–12:00 p.m.</p> <p>Poster Sessions (Morning) 10:20 a.m.–12:00 p.m.</p> <p>Strategic Panel: The Future of Energy Investment: The Next Five Years 10:20 a.m.–11:35 a.m.</p> <p>SEG Development and Production Luncheon 11:30 a.m.–1:00 p.m.</p> <p>AAPG Energy and Minerals Division (EMD) and AAPG Division of Environmental Geologists (DEG) Luncheon 11:30 a.m.–1:00 p.m.</p> <p><i>Schedule continues on next page</i></p>
<p>SEG Hydrogeophysics Committee Meeting 12:00 p.m.–1:00 p.m.</p> <p>Strategic Panel: ESG in 2023: Strategies for Building Positive Industry Messaging and Community Trust 1:20 p.m.–2:35 p.m.</p> <p>Poster Sessions (Afternoon) 1:20 p.m.–3:00 p.m.</p> <p>Oral Sessions (Afternoon) 1:20 p.m.–4:50 p.m.</p>	<p>The Geology of Beer: An In-Person Tasting Experience for Geoscientists and Beer Enthusiasts! AAPGWN, AWG Lone Star, Midwest GeoSciences 3:00 p.m.–5:00 p.m. True Anomaly Brewing 2012 Dallas St.</p> <p>SEG Research Committee Meeting 5:00 p.m.–7:30 p.m.</p> <p>SEG Development and Production Committee Meeting 5:30 p.m.–6:30 p.m.</p>	<p>SEG Hydrogeophysics Committee Meeting 7:00 p.m.–8:00 p.m.</p> <p>FRIDAY, 1 SEPTEMBER</p> <p>Postconvention Workshops 8:30 a.m.–5:00 p.m.</p> <p>Postconvention Short Course at SLB Training Center 8:30 a.m.–5:00 p.m.</p>

表3、技術會議口頭報告議程

Technical Program Grid Oral Sessions



Color	Category
Orange	Geology
Green	Geophysics
Blue	Integrated (Geology and Geophysics)
Yellow	Special Sessions

Room #	Tuesday, 29 August				Wednesday, 30 August		Thursday, 31 August					
	8:00 a.m.–9:40 a.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	1:20 p.m.–3:00 p.m.	3:40 p.m.–5:20 p.m.	8:00 a.m.–9:40 a.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	1:20 p.m.–3:00 p.m.	3:40 p.m.–5:20 p.m.	8:00 a.m.–9:40 a.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	1:20 p.m.–3:00 p.m.	3:10 p.m.–4:50 p.m.
351A	NS 1: Imaging, Inversion, and Machine Learning in Near-Surface Geophysics 1	NS 2: Near-Surface Geophysics for Monitoring and Remediation	NS 3: Imaging, Inversion, and Machine Learning in Near-Surface Geophysics 3	NS 4: Seismic Methods in Near-Surface Geophysics	NS 5: Urban, Geotechnical, and Archeological Applications	NS 6: Dams, Levees, Coastal, and Cryosphere Geophysics	SS 13: SEG-INGU Hydrogeophysics	SS 15: Detecting and Characterizing Orphaned Oil and Gas Wells	SS 17: Long-Term Geophysical Monitoring of Near-Surface Processes	SS 18: Innovative Crossover Technologies between the Oil and Gas and Near-Surface and Mineral Sectors	SS 19: Cryogeophysics: Near-surface Geophysics in the Cryosphere	SS 21: Dams and Levees
351B	MLDA 1: Full-waveform Inversion and Velocity Model Building 1	MLDA 2: Physics-Informed Neural Networks and Fourier Neural Operators	MLDA 3: Uncertainty Quantification	MLDA 4: Seismic Processing and Imaging 1	MLDA 5: Low Carbon Solution	MLDA 6: Seismic Interpretation 1	MLDA 7: Borehole Applications	MLDA 8: Petrophysical Analytics	MLDA 9: Inversion and Property Estimation 2	MLDA 10: Reservoir Modeling 2	MLDA 11: Reservoir Modeling 3	MLDA 12: Generative Models
360A	SS 1: Future of Applied Geophysics: Applications	SS 2: Future of Applied Geophysics: Tools	SS 3: Recent Advances and the Road Ahead: Hot Topics in Geoscience 1	SS 4: Recent Advances and the Road Ahead: Hot Topics in Geoscience 2	SS 9: Petroleum Enrichment and the Tethys Geodynamic System 1	SS 12: Petroleum Enrichment and the Tethys Geodynamic System 2	SS 14: Discovery Thinking: Integrating Geology and Geophysics: Lessons from Discoveries 1	SS 16: Discovery Thinking: Integrating Geology and Geophysics: Lessons from Discoveries 2	SP 9: Multiple Removal Techniques 2	SP 11: Wavefield Separation and Deconvolution	AQC 4: Compressive Sensing and Novel Methods	AQC 5: Ocean Bottom Nodes
361A	ENE1: Best Practices in Exploration Discoveries 1	ENE2: New Trends and Emerging Exploration Concepts 1	ENE3: The Power of Integration: Turning Challenges into Opportunities	SS 6: Use of Seismic Data for Critical Mineral Exploration	SS 10: Recent Advances in CCS Monitoring: Technology and Case Study	SILIC 1: Deepwater Sedimentary Systems 1	SILIC 2: Deepwater Sedimentary Systems 3	SILIC 3: Advances in Siliciclastic Systems Modeling and Prediction	SILIC 4: Applied Chemostratigraphy, Biostratigraphy and Provenance Studies	SILIC 5: Reservoir Characterization of Siliciclastic Systems 2	SILIC 6: Source to Sink Basin Analysis and Tectono-Stratigraphic Interactions	SILIC 7: Shallow Marine Sedimentary Systems 3
361B	UNCON 1: Basin and Play-scale Characterization 1	UNCON 2: Shale and Tight Reservoir Characterization 1	UNCON 3: Applied Geosciences for Shale and Tight Reservoirs 1	UNCON 4: Innovative Solutions and Data Science Applications in Unconventional Resource Evaluation 1	UNCON 5: Pore-scale Techniques and Laboratory Studies for Characterizing Mudrocks 1	CO ₂ 1: Developments and Lessons Learned	CO ₂ 2: Modeling and Simulation	CO ₂ 3: Regional Evaluations and Site Characterizations	CO ₂ 4: Monitoring 3	CO ₂ 5: Monitoring 4	CO ₂ 6: Modeling and Simulation: Machine Learning in CCS 1	CO ₂ 7: Modeling and Simulation: Machine Learning in CCS 2
362A	INT 1: Intelligent Reservoir Property Prediction	INT 2: Intelligent Seismic Horizon Interpretation	INT 3: Structural Interpretation	INT 4: Sedimentary Interpretation	INT 5: Resolution	INT 6: Attribute	INT 7: Case Study: Sand Body	INT 8: Case Study: Faults and Fractures	INT 9: Interpretation and Inversion 1	INT 10: Interpretation and Inversion 2	INT 11: Integrated Interpretation	INT 12: Stratigraphic Mapping
362B	BH 1: VSP and Crosswell	BH 2: Petrophysics	BH 3: Geomechanics and Geophysics	BH 4: Near-wellbore Imaging and Structural Modeling	MME 1: Mineral Exploration: Geophysics 1	MME 2: Mineral Exploration: Development: Applied Geoscience	MME 3: Mineral Exploration: Geophysical Case Studies 1	MME 4: Mineral Exploration: Geophysical Case Studies 2	HPG 1: History of Petroleum Geology	GCHEM 1: Geochemistry and Petroleum Systems	GCHEM 2: Fluid Geochemistry	GCHEM 3: Geochemistry of Unconventionals
362C	SUS 1: Rock Stars of SDGs	SUS 2: Global Water Crisis	SS 4: Geoscientists Without Borders®: Applied Geoscience for Humanitarian Need 1	SS 7: Geoscientists Without Borders®: Applied Geoscience for Humanitarian Need 2	SS 11: Tectonics, Sedimentary Basins, and Petroleum Systems	NEF 1: Advancements in Subsurface Geothermal Resource Development	NEF 2: Hydrogen: Geologic Resources and Subsurface Storage	NEF 3: Critical Minerals and Extraterrestrial Resources Research	STGM 1: Structural Interpretation, Geomechanical Modeling, and Geophysics	STGM 2: Natural and Induced Fractures, and Fluid Flow	STGM 3: Fault and Natural Fracture Characterization	STGM 4: Salt Deposition, Diapirism, and Deformation
370A	TL 1: Advances and Case Studies	TL 2: Quantitative Analysis and Inversion	FWI 1: Case Studies 1	FWI 2: Case Studies 2	FWI 3: Cycle Skipping	FWI 4: Elastic and Multiparameter	FWI 5: Land, Marine Streamer, and OBN	FWI 6: Reflection	FWI 7: New Advances	FWI 8: Theory and Methods 1	FWI 9: Machine Learning 2	FWI 10: Theory and Methods 2
371A	CEMS 1: Advances in Permian Basin Understanding 1	CEMS 2: Carbonate Source Rocks and Unconventional Systems	CEMS 3: Controls on Carbonate Depositional Systems	CEMS 4: Diagenesis and Pore Systems in Carbonate Reservoirs	CEMS 5: Technologies and Methods in Carbonate Reservoir Characterization 1	CEMS 6: Carbonate Insights from Modern and Outcrop Analogs	AAS 1: AVO Inversion	AAS 2: Fracture Properties Estimation	AAS 3: Anisotropy	AAS 4: Reservoir Property Estimation	AAS 5: Novel Technologies	AAS 6: Case Studies
371B	SP 1: Migration Algorithms 1	SP 2: Imaging Case Study	SP 3: Elastic and Diffraction Imaging	SP 4: Least-squares Imaging and Q-migration	SP 5: Advanced Velocity Model Building Techniques 1	SP 6: Velocity Model Building and Application	SP 7: Machine Learning Denoise	SP 8: Machine Learning Event Detection	SP 10: Seismic Data Interpolation and Regularization 2	SP 12: Noise Removal 2	SP 13: Deblending and Denoise	SP 14: Novel Solutions and Applications
372A	SMT 1: Theoretical Developments in Seismic Modeling and Wave Phenomena 1	SMT 2: Theoretical Developments in Seismic Modeling and Wave Phenomena 2	SMT 3: Theoretical Developments in Seismic Modeling and Wave Phenomena 3	SMT 4: Theoretical Developments in Seismic Modeling and Wave Phenomena 4	BMP5 1: Integrated Workflows in Basin Modeling	BMP5 2: Seal and Pore Pressure Risk Assessment	BMP5 3: Petroleum Systems Case Studies 2	RC 1: Fracture Systems and Dynamic Modeling	RC 2: Seismic Inversion Methods	RC 3: Methods and Case Studies 2	RC 4: Methods and Case Studies 3	RC 5: Case Studies
372B	GM 1: Inversion	GM 2: Applications	EMP 1: EM Methods 1	EMP 2: EM Methods 2	IPS 1: Mechanisms	IPS 2: Induced Seismicity in Midland, Texas	IPS 3: Novel Methods	AQC 1: Marine Acquisition	AQC 2: Survey Design and Optimization	AQC 3: CCS and Marine Vibrators	SS 20: Open-Source Software for Geospatial Data Manipulation and Geophysical Data Processing and Inversion	PBAA 1: Microfossils in Hydrocarbon Exploration: Case Studies
372C	INTD 1: Joint Inversion and Quantum Computing	INTD 2: Pressure Estimation and Deep Integrations	INTD 3: Data Across Disciplines	SS 8: SEPM Research Symposium: The Sedimentary Response to Changing Climate	RP 1: Dispersion and Attenuation	RP 2: Fractures and Anisotropy	RP 3: Pore Scale Effects	RP 4: Properties of Sandstones	DAS 1: Case Study: Offshore	DAS 2: Seismic Analysis and Inversion	DAS 3: Low-frequency DAS and Strain Sensing	DAS 4: New Methods and Applications

表 4、技術會議海報報告議程

Technical Program Grid

Poster Sessions



Station	Tuesday, 29 August				Wednesday, 30 August				Thursday, 31 August		
	10:20 a.m.–12:00 p.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	1:20 p.m.–3:00 p.m.	3:40 p.m.–5:20 p.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	1:20 p.m.–3:00 p.m.	3:40 p.m.–5:20 p.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	10:20 a.m.–12:00 p.m.	1:20 p.m.–3:00 p.m.
1	STUD P1: Student Session 1	AAS P1: Prestack and Azimuthal Inversion	AAS P2: Compressional and Shear Waves	AAS P3: Facies and Fluids	NS P2: Climate, Coastal, and Environmental Geophysics	AAS P4: Inversion	AAS P5: New Technologies and Applications 1	AAS P6: New Technologies and Applications 2	NS P3: Urban, Geotechnical and Archeological Geophysics	NS P4: Seismic for Near Surface Geophysics	RP P4: Pore Structure Effects
2	RP P1: Experimental Studies	NS P1: Imaging, Inversion, and Machine Learning in Near Surface Geophysics 2	AQC P1: OBN Design and Deployment	AQC P2: Land Acquisition	RP P2: Property Predictions	AQC P3: Compressive Sensing and Signal Processing	AQC P4: Vibroseis Operation and Case Study	IPS P1: Detection Methods	IPS P2: Observation	SMT P1: Theoretical Developments in Seismic Modeling and Wave Phenomena 5	SMT P2: Theoretical Developments in Seismic Modeling and Wave Phenomena 6
3	STUD P2: Student Session 2	CO ₂ P1: Site Characterizations and Case Studies 1	CO ₂ P2: Site Characterizations and Case Studies 2	CO ₂ P3: Monitoring 1	CO ₂ P4: Monitoring 2	BH P1: Borehole Geophysics for Carbon Storage	BH P2: Machine Learning for Wellbore Applications	ENEC P1: Best Practices in Exploration Discoveries 2	ENEC P2: New Trends and Emerging Exploration Concepts 2	TL P1: Feasibility, Processing and Imaging of 4D Seismic	TL P2: Improvements in Time-lapse Analysis
4	STGM P1: Contractual Tectonics	STGM P2: Extensional Tectonics and Salt-related Systems	BMP5 P1: Petroleum Systems Case Studies 1	BMP5 P2: Quantitative Approaches for Validating and Constraining Basin Models	STGM P3: Faults, Fractures, and Fluids 1	CEMS P1: Characterization of Conventional Carbonate Reservoirs	CEMS P2: Faults, Fractures, and Karst in Carbonate Reservoirs	CEMS P3: Advances in Permian Basin Understanding 2	STGM P4: Faults, Fractures, and Fluids 2	CEMS P4: Technologies and Methods in Carbonate Reservoir Characterization 2	CEMS P5: Utilization of Core in Carbonate Reservoir Characterization
5	STUD P5: Student Session 3	FWI P1: Machine Learning 1	FWI P2: Applications 1	FWI P3: Theory	FWI P4: Applications 2	DAS P1: Case Study: Onshore	DASP2: Machine Learning Applications 1	DASP3: Machine Learning Applications 2	RP P3: Reservoir Characterization	EMP P1: EM Methods 3	GM P1: Potential Field Applications
6	SP P1: Multiple Removal Techniques 1	SP P2: Seismic Data Interpolation and Regularization 1	SP P3: Denoise and Deblend	SP P4: Noise Removal 1	SP P5: Advanced Velocity Model Building Techniques 2	SP P6: Machine Learning Applications for Seismic Processing	SP P7: Least-squares Migration and Q-migration	SP P8: Elastic, Diffraction, and Marchenko Imaging	SP P9: Migration Algorithms 2	SP P10: Imaging Case History	SP P11: Emerging Technologies: Case Studies and Advances
7	STUD P4: Student Session 4	GCHEM P1: Geochemical Methods and Tools 1	GCHEM P2: Geochemical Methods and Tools 2	INTD P1: Reservoir Modeling and Drilling Decision	INTD P2: Data Integration in Exploration and Production	UNCON P1: Basin and Play-scale Characterization 2	UNCON P2: Shale and Tight Reservoir Characterization 2	UNCON P3: Applied Geosciences for Shale and Tight Reservoirs 2	SUS P1: Earth Science in Action	UNCON P4: Innovative Solutions and Data Science Applications in Unconventional Resource Evaluation 2	UNCON P5: Pore-scale Techniques and Laboratory Studies for Characterizing Mudrocks 2
8	INT P1: Case Study: Seismic Sequence and Facies Analysis	INT P2: Case Study: Igneous Intrusion	INT P3: AI Based Seismic Interpretation Workflows 1	INT P4: AI Based Seismic Interpretation Workflows 2	INT P5: Seismic Facies Analysis: Inversion	INT P6: Seismic Facies Analysis: Modeling	INT P7: Inversion Methods	INT P8: Interpretation Methods	INT P9: Quantitative Interpretation	INT P10: Reservoir Characterization	INT P11: Case Study: Structural Modeling
9	STUD P5: Student Session 5	MLDA P1: Inversion and Property Estimation 1	MLDA P2: Reservoir Modeling 1	MLDA P3: Novel Applications 1	NEF P1: Geothermal and Hydrogen Resources	MLDA P4: Full-waveform Inversion and Velocity Model Building 2	MLDA P5: Seismic Interpretation 2	MLDA P6: Seismic Processing and Imaging 2	MLDA P7: Novel Applications 2	MLDA P8: Seismic Processing and Imaging 3	MLDA P9: Petrophysical Analytics and Borehole Applications
10	STUD P6: Student Session 6	RC P1: Methods 1	RC P2: Methods 2	RC P3: Methods 3	RC P4: Methods and Case Studies 1	SILIC P1: Deepwater Sedimentary Systems 2	SILIC P2: Reservoir Characterization of Siliclastic Systems 1	SILIC P3: Shallow Marine Sedimentary Systems 1	MME P1: Mineral Exploration: Geophysics 2	SILIC P4: Shallow Marine Sedimentary Systems 2	SILIC P5: Other Relevant Topics

於 RC P2: Methods 2 發表論文

KEY TO TOPIC AREAS

AAS Anisotropy, AVO, and Seismic Inversion
 ACO Acquisition
 BH Borehole
 BMP5 Basin Modeling and Petroleum Systems
 CEMS Carbonates, Evaporites and Mixed Systems
 CO₂ Low Carbon Solutions/CCS
 DAS Distributed Acoustic Sensing
 EMP EM and Potential Field
 ENEC Emerging New Exploration Concepts:
 Challenges and Opportunities
 FWI Full-Waveform Inversion
 GCHEM Geochemistry
 GM Gravity and Magnetics

HPG History of Petroleum Geoscience
 INT Geological and Geophysical Interpretation
 INTD Deep Integration of Data and Disciplines
 IPS Induced and Passive Seismic
 MLDA Machine Learning and Data Analytics:
 Theory and Special Applications
 MME Mining and Mineral Exploration
 NEF New Energy Frontiers, Critical Minerals,
 Planetary Geoscience
 NS Near Surface
 PBAA Paleontology and Biostratigraphy
 Advances and Application

RC Integrated Reservoir Characterization
 RP Rock Physics
 SILIC Siliclastic Systems
 SMT Seismic Modeling and Theory
 SP Seismic Processing
 SS Special Session
 STGM Structure, Tectonics, and Geomechanics
 STUD AAPG, SEG, and SEPM Student Research
 SUS Sustainability Energy Development
 and Environmental Geoscience
 TL Time Lapse
 UNCON Unconventional Resources



3. IMAGE 2023 會議參與過程簡述

會議前一天(8/28)上午抵達飯店後，下午參加開幕演講。

會議第一天(8/29)上午參加 MLDA 1 口頭報告，以及於展覽會場之海報報告。
下午於海報區發表論文(表 4)。

會議第二天(8/30)上午 08:00 - 09:15 參加 FWI 3 (1st, 2nd)、MLDA 5 (3rd)、SS 11(4th)
口頭報告。09:15 - 10:00 參觀海報。10:30 - 11:35 參加 FWI 4 (3rd, 4th) 口頭報告。
下午參加 NEF 2 口頭報告及參觀海報。

會議第三天(8/31)上午 08:00 - 09:15 參加 FWI 7 口頭報告。09:15 - 10:20 參觀
海報，10:30 - 11:35 參加 DAS 2 (1st, 2nd, 3rd)、SS 18 (4th) 口頭報告。下午參加 INT
11(2nd, 3rd)、STGM 4 口頭報告及參觀海報。

會議結束後一天(9/1)上午參加全波形逆推的工作坊(Elastic and Multi-parameter
FWI: What is Appropriate for Field Data Applications)。

參、具體成效

參加此次會議主要任務是發表論文 (利用 RGB 值相減的最小變異數提取孔隙厚度比例)及聽取會議報告，會議報告的內容可分為開場演講、氫能探勘、碳封存的 4D 震測監測、有物理訊息的 AI 及 FWI 工作坊。

1. 論文發表

第一天下午 14:35 於展覽會場海報區 10D 進行報告。一組海報報告會有 2 名主席主持會議，4 張海報接連報告，大家則圍著海報聽簡報。

在海報張貼一開始(圖 1)，有一位老師來參觀海報，並詢問這個研究是否有繼續預估孔喉及滲透率？這的確是此研究還可往後延伸的方向。後續有遇到兩位奧克拉荷馬大學的研究生及員工來看海報，她們也在做岩石薄片的研究，並關心此類相關的技術。我們討論了岩石薄片影像分析時會遇到的問題，到底孔隙要標到哪裡？如果藍色多標一點，那麼孔隙率就會高一點，反之則孔隙率降低。而此項技術則是描述孔隙漸變的過程，再透過實驗數據決定一個影像分割的門檻值。

本次出國參加會議，透過論文發表增加台灣中油公司於國際會議上的曝光度，以及與其他單位人員交流的機會。

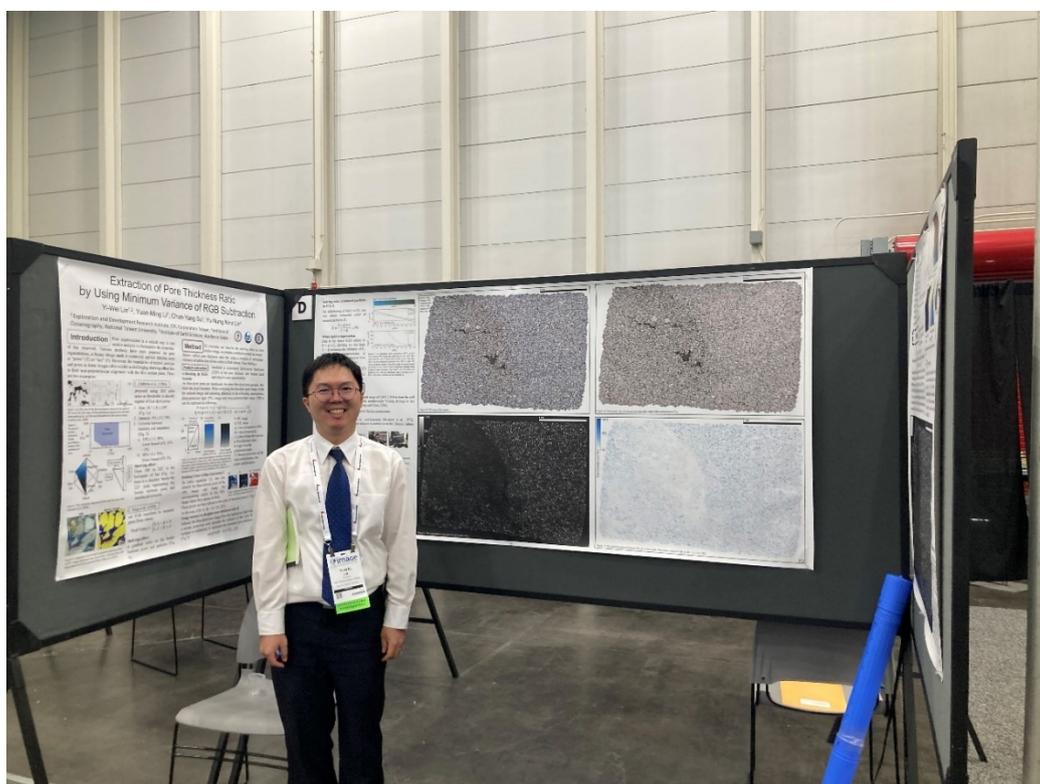


圖 1、於 RC 2 海報報告之現況。

2. 開場演講

開場由 IMAGE 會議的主席 Gretchen M. Gillis 致詞，她以「改變」為主軸，說到從 2021 年 IMAGE 會議改由 SEG、AAPG 及 SEPM 合辦開始，已經第 3 屆了。「改變」是必須的，如能源轉型是當前能源公司所面臨的挑戰，又或者像板塊學說的提出改變了地球科學以往的認知。改變是對於未來的責任。

Jonathan Arthur 博士，美國地球科學組織(American Geosciences Institute, AGI) CEO 的開場演講主題是「永續與我們的地球科學企業－探尋我們偉大的挑戰」(Sustainability and our Geoscience Enterprise – Exploring our Grand Challenges) (圖 2)。Arthur 博士提到地球科學及地球學家在解決全球世人們所面臨挑戰的價值。近期為了回應聯合國於 2015 年提出的 17 項永續發展目標(SDGs)，地球物理探勘師學會(SEG)及美國地球物理聯盟(AGU)分別發表了《地球物理永續藍圖》(Capello et al., 2021)以及《地球科學起而行》(Capello et al., 2023)，描繪了如何利用地球科學來因應永續發展目標這個巨大的挑戰(圖 3)。要解決這個複雜問題，需要合作、創新及持續的奉獻，才能實現轉型及永續。

他也提到一個企業如何因應永續的目標，人才及其專業性是關鍵。透過教育機構、勞動力參與、有效的數據分析及特殊專業認證等，讓礦業、石油等能源產業能夠有處理問題的人才和專業能力。像是麥肯錫的報告(Abenov et al., 2023)中指出的，在美國及澳洲，礦業公司正面臨人才短缺，吸引不到年輕人，礦業工程相關研究所畢業生數正逐年下降(圖 4)，年輕人考慮從事礦業相關工作的意願也比其他產業低(圖 5)。造成的原因有很多，如 1. 礦業公司給人不環保等既定的形象。2. 許多偏遠礦區缺乏先進的基礎設施，降低了家庭友好度。3. 人們普遍認為礦區工作身體素質要求較高且危險等。

而在 AGI 的報告(Mosher et al., 2023)中，提到隨著從以化石燃料為主之經濟導向轉為以材料為主，許多地球科學領域中的傳統油氣工作已經消失。相反的，地熱、風能和太陽能、碳捕捉甚至與電池及電池材料相關的地球科學應用等新能源職位開始出現。這些新型職位確認地球科學專業知識對能源部門仍至關重要，但人才所必需具備的技術和能力正在快速地改變。從 2013 年到 2022 年，美國石油及天然氣產業對研究所畢業生的招聘從 72%降至 4% (圖 6)，而這可能間接影響了美國地球科學相關學系研究所的學生註冊人數，有下降的趨勢(圖 7)。

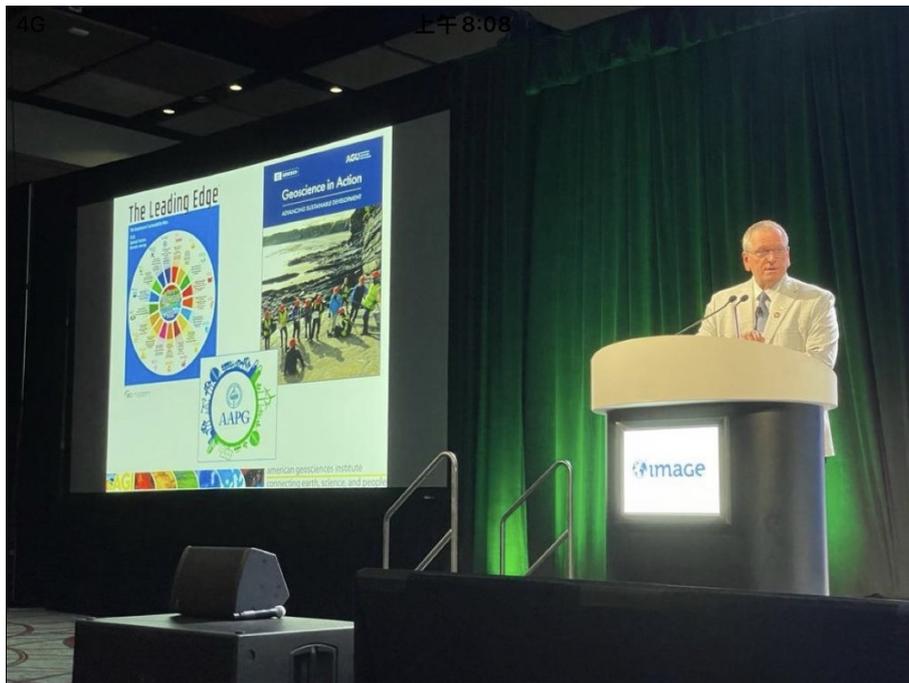


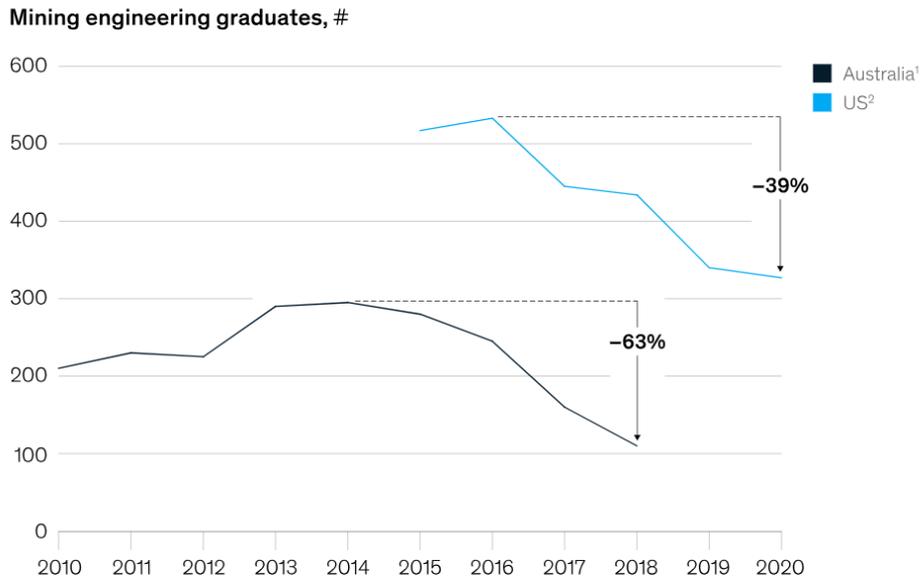
圖 2、Jonathan Arthur 博士演講。(引自 Maria Angela Capello LinkedIn 圖片)



圖 3、地球物理永續環—總結如何透過地球物理來支持永續發展目標甚至是超越目標。

(Capello et al., 2021)

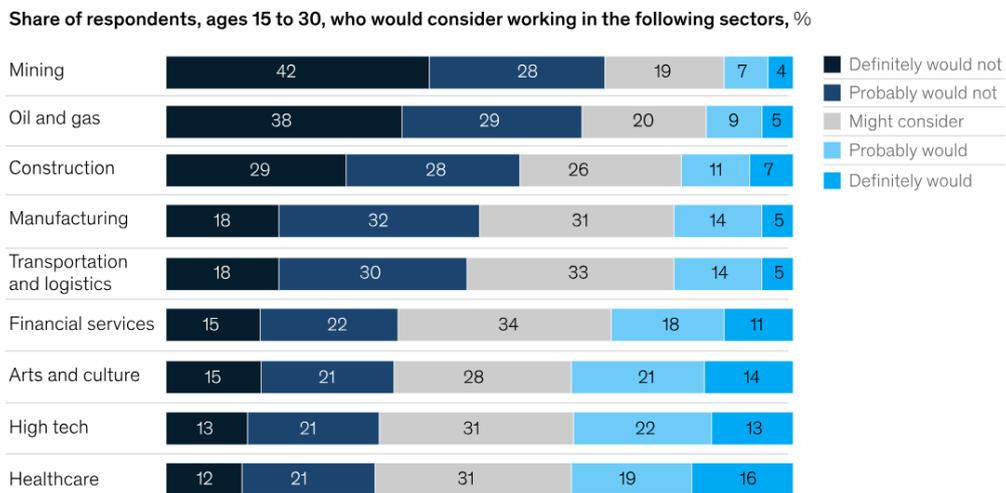
Young talent is not joining the mining industry.



McKinsey & Company

圖 4、年輕人力加入礦業的人數減少，如美國、澳洲礦業工程的研究生人數正逐年下降。
 (Abenov et al., 2023)

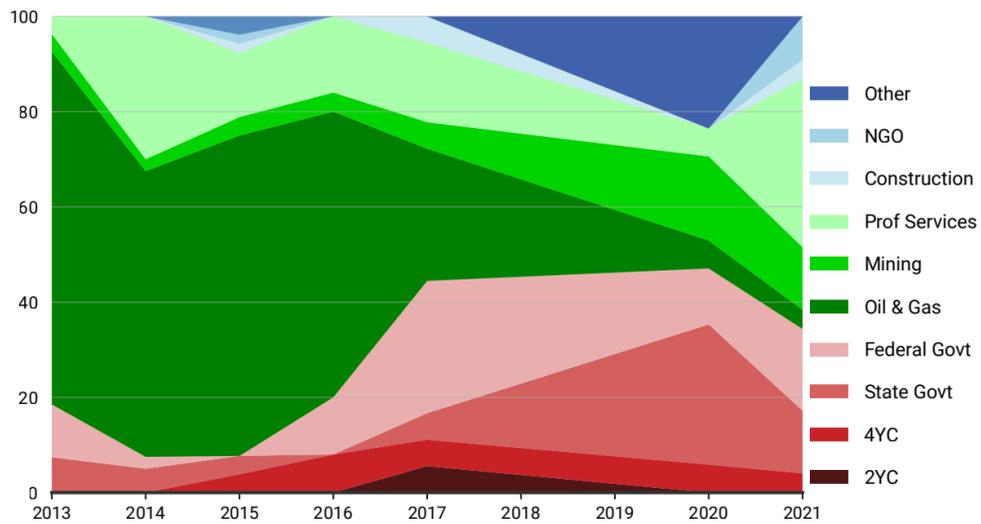
Mining is not attractive to young talent.



McKinsey & Company

圖 5、礦業吸引不到年輕人力的注意。15 至 30 歲年輕人考慮上述產業就業意願的比例。
 (Abenov et al., 2023)

Figure 3.9a: Employment Sector of Master's Graduates, 2013–2021
Percent of employed graduates

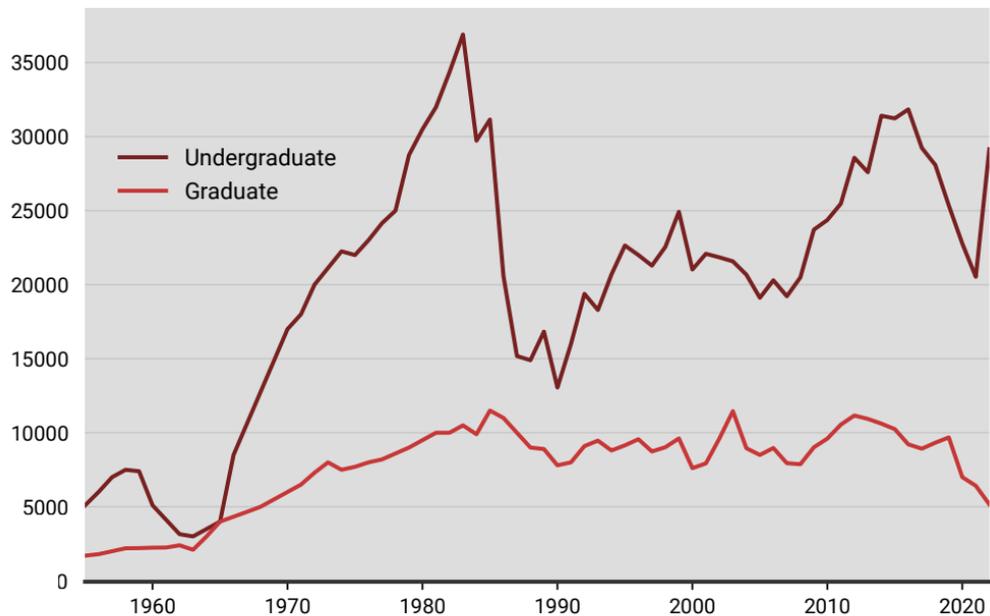


The employment destination of master's geoscience graduates in the U.S. continues to change as the dominance of the oil and gas industry wanes.

American Geosciences Institute. Source: Report on the Survey of Recent Geoscience Graduates 2021

圖 6、2013-2021 美國地球科學研究所畢業生就業領域比例，隨著油氣產業主導性逐漸萎縮而改變。(Mosher et al., 2023)

Figure 3.14a: Geoscience Enrollment in the United States, 1955–2022
Students enrolled



Historical timeline of enrollment by U.S. geoscience programs since 1955.

American Geosciences Institute. Source: AGI Directory of Geoscience Departments Survey 2023

圖 7、1955-2022 美國地球科學領域學生註冊人數變化。(Mosher et al., 2023)

3. 氫能探勘

近幾年零碳排的氫氣已成為熱門的能源載體。在 NEF 2「氫氣的地質資源與地下儲存」的會議報告中，Ellis (2023) 提到以往人們認為達到經濟規模的天然氫氣儲藏是不存在的，因為其高度擴散性及容易與其他物質反應而被認為存在地層的時間很短。油氣探勘通常在含有熱成熟有機質豐富岩石的沉積盆地。遇到有機質豐富岩石的氫氣可能會被消耗掉，形成烴類化合物。相反的，通過富鐵岩石的高溫還原水和放射性岩石的輻解水可以生成大量氫氣 (圖 8)，油氣探勘中很少遇到這種火成岩的環境。這在礦產資源探勘較容易遇到，但常缺乏詳細的氣體分析，且與生成和潛在封存氫氣的深度相比，大多數採礦作業的深度相對較淺。1987 年在西非鑽井時，偶然發現了地質氫氣積聚，當時一口淺水井因意外的氣體爆炸被封堵和廢棄。25 年後重新進入井，發現含有超過 97% 的氫氣，隨後的探勘活動描繪出存在五個堆疊儲層 (Prinzhofer et al., 2018)，估計含有約 6700 億立方英尺的氫氣儲藏。

相較於使用再生能源電解水產生的綠氫及將碳排封存的藍氫，自然界中在地下富集的氫氣被稱為「黃金氫」，Zhang et al. (2023) 提到探勘「黃金氫」的地球物理方法。研究提出了在超基性岩會產生氫氣的氫氣系統中，以氫氣源岩為目標的探勘策略。超基性火成岩環境有出現如輝長岩、方輝橄欖岩及蛇紋岩化的方輝橄欖岩等，如阿曼鑽井計畫 (Kelemen et al., 2021) 的鑽井成果(圖 9)，因此研究模擬了此情境的震波探勘、大地電磁探勘、主動電磁探勘及磁力探勘等方法，其結果顯示震波探勘難分辨橄欖岩的蛇紋岩化，因密度差異較小，但磁力探勘可以分辨。

GeoH₂ 計畫是德州大學經濟地質局與業界一同發展氫經濟的計畫。氫經濟的發展需要許多基礎設施(圖 10)，鹽洞則是儲存氫氣的絕佳選擇，因其具有高速的注入/採收速率。Maraggi & Moscardelli (2023b) 評估了德克薩斯州，路易斯安那州和密西西比州的鹽丘挖成洞穴以儲存氫氣的潛力。該研究根據 USGS 的資料盤點了墨西哥灣周圍此三州海上、陸上的鹽丘，根據鹽丘的大小、數量來估計可以製作多少鹽洞，並可以儲存多少氫氣。最後研究將盤點的結果建成網頁形式的資料庫，此資料庫還可以模擬鹽洞的氫氣儲存、注採循環。

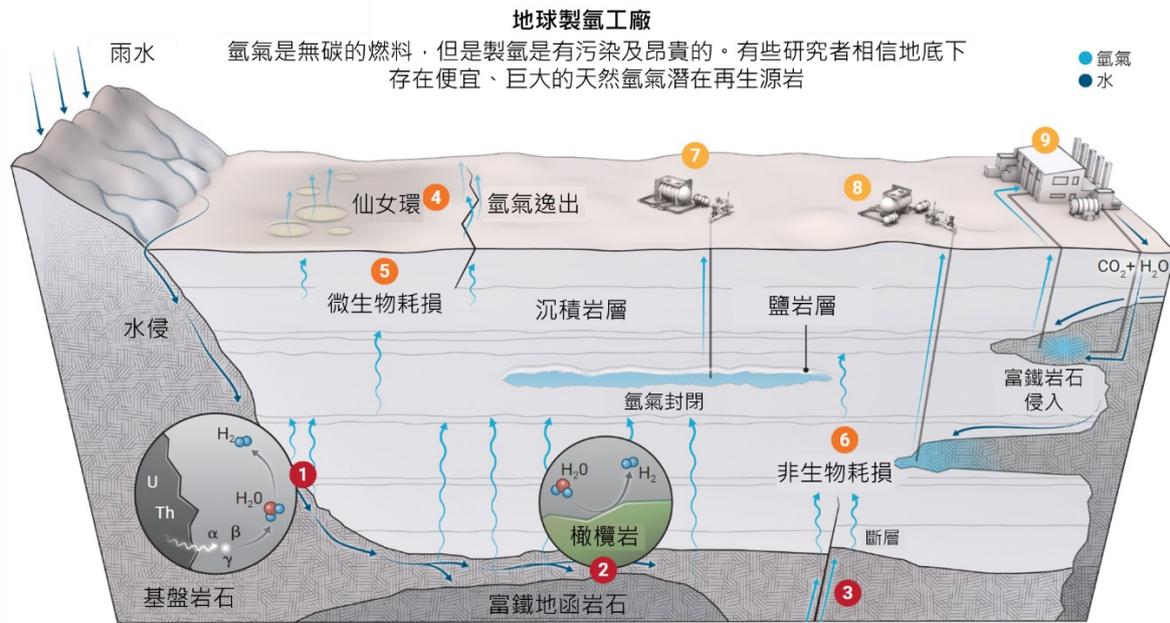


圖 8、描繪了氫氣的產生、損耗的機制及如何萃取的方式。氫氣的產生：①輻解：在岩石中的放射線元素所產生的射線可以分解水。這個過程很緩慢，因此古老的岩石比較可能產生氫氣。②蛇紋岩化：在高溫的環境，水會跟富含鐵的岩石作用產生氫氣。這一個快速、再生的反應叫做蛇紋岩化，能驅動大部分的生產。③座落於深部：來自地核或地函的氫氣流會從板塊邊界及斷層上升，但是這種廣大、深的氫儲藏理論是有爭議的。損耗的機制：④逸氣：氫氣透過斷層和裂隙可以快速移棲，在岩石中則是以擴散的形式。些許的逸氣可能可以解釋稱之為仙女環(Fairy Circles)的凹陷。⑤微生物：在淺層的土壤及岩石中，微生物會消耗氫氣以取得能量，通常會產生甲烷。⑥非生物反應：在地層深處，氫氣會與岩石和其他氣體反應產生水、甲烷及礦物。萃取的方式：⑦封閉：氫氣可能可以像油氣一樣取出，藉著鑽遇在鹽岩或其他不透氣層之下，封閉於含孔隙岩層中的氫氣儲藏。⑧直接法：如果富鐵的源岩夠淺且有裂隙可以儲存氫氣，那麼有可能可直接鑽至富鐵的源岩以生產。⑨加強採收：氫氣生產可能可藉由將水注入富鐵的岩石而激勵生產，加入二氧化碳則是將其一起封存於地層中，減緩氣候暖化。修改自 Hand (2023)。

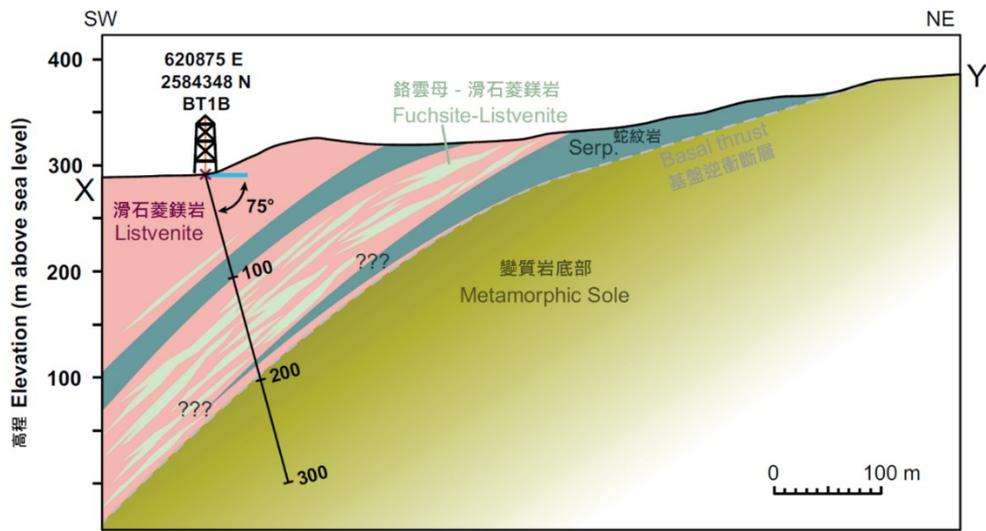


圖 9、阿曼鑽探計畫過 BT1 鑽探點剖面圖，顯示到基盤逆衝斷層的深度及 BT1B 孔的主要岩性分布。修改自 Kelemen et al. (2020)。

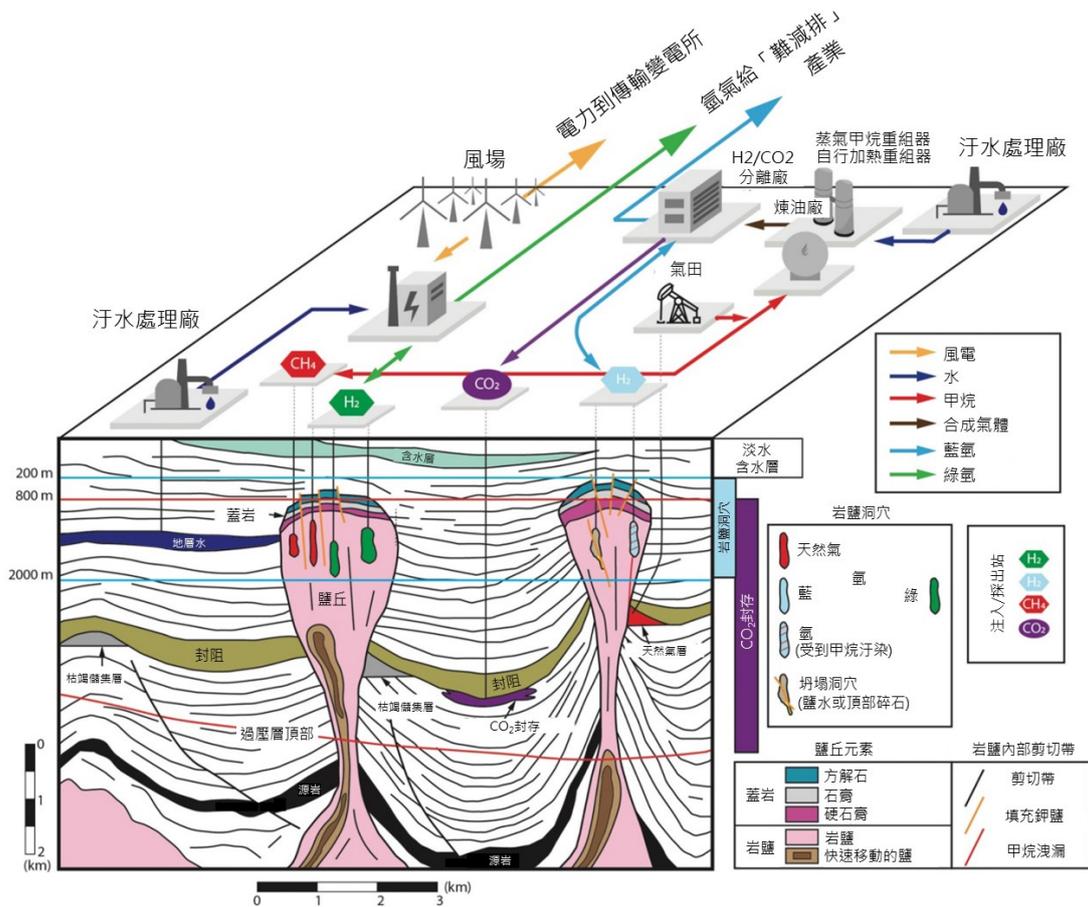


圖 10、促進氫經濟發展所需基礎設施及地上、地下條件示意圖。除了在鹽洞儲氫外，製造藍氫還需要接入天然氣田和靠近蒸汽甲烷重組器的位置及碳捕捉和封存。製造綠氫也需要接入水資源、可再生能源和昂貴的電解器。關鍵組件將包括氫氣運輸網路的開發，接入市場和實施的安全標準。修改自 Maraggi & Moscardelli (2023a)。

4. 碳封存的 4D 震測監測

會議中對於「低碳解決方案及碳封存(Low Carbon Solutions/CCS)」這個主題，共有 7 場口頭會議及 4 場海報會議，議題涵蓋選址、儲集岩描述、監測、建模、模擬等。關於碳封存監測，有許多報告是關於挪威的 Sleipner 場址(圖 11)，因為在 2020 年挪威國家石油公司為了促進碳儲存技術的創新及發展，透過 SINTEF (led CO₂ Data Share Consortium) 公開其監測資料，包含 4D 震測資料(<https://co2datashare.org/dataset/sleipner-4d-seismic-dataset>)。Sleipner 是第一個為了溫室氣體排放減量的碳封存場址，以減少挪威政府課徵 CO₂ 排放稅的壓力。從 1996 年開始從天然氣中分離 CO₂，並將其注入到 800 公尺深的鹽水層中，預計每年封存 100 萬噸 CO₂。在注入 CO₂ 之前，1994 年炸測了 3D 基線震測資料體，之後在 1999、2001、2004、2006、2008、2010 年分別炸測 3D 監測震測資料體，透過資料體間交互比對、正規化、沿時間排列，便成為延時震測資料體(Time-lapse Seismic Cube)，延時震測資料體通常用於監測海上油氣田生產。圖 12 顯示 1994 年基線及至 2010 年 4 個監測資料體(Williams and Chadwick, 2021)，上排為過注入口之南北向剖面，隨著 CO₂ 封存在鹽水層的孔隙中，振幅也隨之變大；中排為 Utsira 全層段之方均根振幅，顯示整體 CO₂ 水平方向的擴散；下段為 Utsira 頂部 CO₂ 水平擴散的情形。

Lecerf and Reiser (2023) 提到使用 4D 震測資料監測 CO₂ 封存的挑戰，主要有以下幾項：增加對於上覆蓋岩地質力學的解析度、封存完整性，以及如何描繪 CO₂ 飽和度/壓力之分布。圖 13 顯示在普通 4D 震測資料在 CO₂ 飽和度從 0 增加至 20% 時，仍有能力可以偵測，震測訊號的時間位移(Time Shift)在 30 公尺厚的砂層有超過 2 毫秒。時間位移是由於 CO₂ 注入後造成該層速度降低，而使得震測訊號雙程走時變慢而在震測剖面往下的現象(圖 14)，為目前監測 CO₂ 封存容易發現的一種震波屬性。而在 CO₂ 飽和度從 30% 增加至 50% 時，4D 寬頻震測訊號還有 0.1 至 1 毫秒的時間位移(圖 13)。CO₂ 飽和度超過 50% 以上，在既有的 4D 寬頻震測訊號中則難以觀察出差異(圖 13 黑框範圍)。由於上述的挑戰性，此研究提出幾個工具作為解方：

1. 增加訊號頻寬。當 4D 訊號變化已經微小到難以偵測的時候就需要額外的震測訊號頻寬及角度(圖 15)，像是在採集資料的時候，精準的控制震源與接收器、使用在水下較深的纜線可提供較低頻訊號以改善訊噪比，而多種接收器(速度及加速度)則可以提供重複的高頻訊號，以避開不同天氣的波浪影響。

2. 利用井測資料進行 4D 訊號模擬。此研究建立了一個互動式工具，可利用井測資

料等如量測彈性參數，以校正岩石物理參數並模擬。然後微調模型進行震波模擬，以符合觀測到的 CO₂ 監測震測資料(圖 16)。除了 4D 訊號模擬外，4D 噪訊影響預估可以根據正規化方均根(Normalize Root Mean Square, NRMS)模型進行評估：

$$NRMS^2 \approx 4 \frac{(1 - S)^2 SN + 1 + S^2 + S(2\pi \tau f_d)^2 SN}{(1 + S)^2 (1 + SN)},$$

$$S = RMS(\text{monitor})/RMS(\text{baseline})$$

SN = Signal to Noise, 訊噪比

τ = *Time-Shift*, 時間位移

f_d = *Dominant frequency*, 主頻

從圖 17 可以看出 NRMS 與頻率相關，較高頻的動態噪訊應較低，而有好的重複性(較低的 NRMS 值)，也就是有好的解析度。因此從邏輯上推敲，4D 超高解析度(Ultra High Resolution, UHR) 的 CO₂ 監測，頻寬為 30-350 Hz 潛在可以偵測到 0.1 秒以下的時間位移。但是 4D UHR 的挑戰可能在改善 4D 訊噪比。

在 Geosoft 公司的攤位，Brian Russell 副總在其《利用 HampsonRussell 軟體有效且可靠的 CCUS 及地熱工作流程》報告中提到(圖 18)，結合 HampsonRussell 的 Pro4D 及震測體屬性(Volume Attribute)軟體，也可以觀察到在 Sleipner 場址 CO₂ 注入所造成的低頻陰影區(Low-Frequency Shadows, LFS, 圖 19) (Anthony and Vedanti, 2022)。

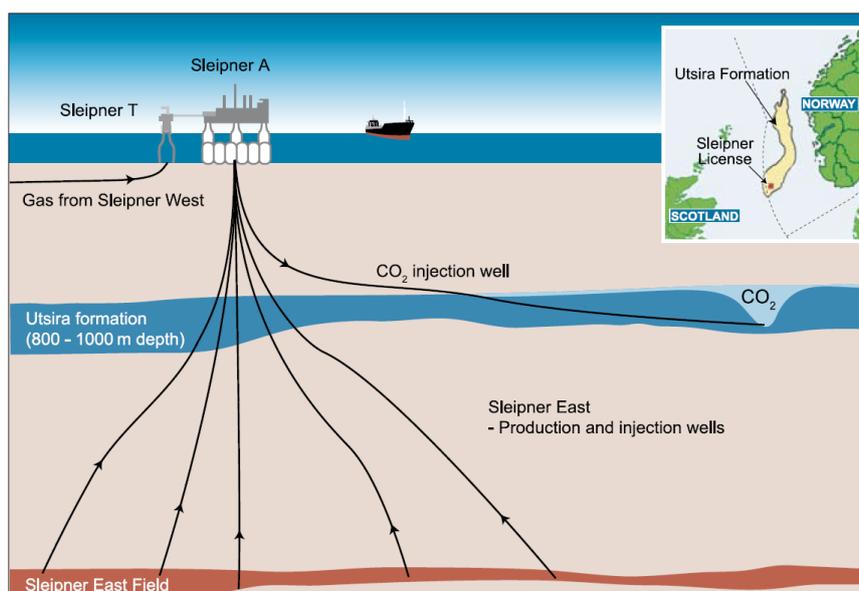


圖 11、Sleipner 碳封存計畫示意圖，右上圖：Utsira 地層的位置和範圍。(Anderson et al., 2005)

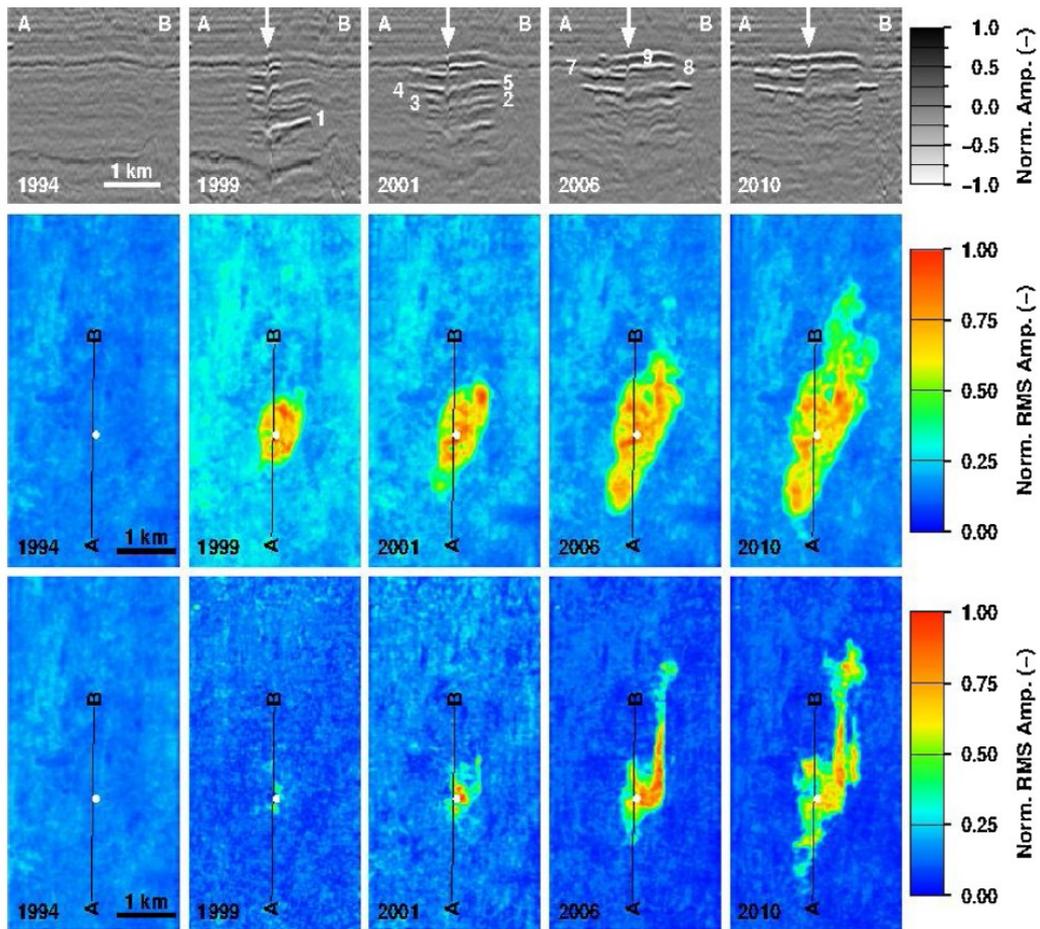


圖 12、Sleipner 延時震測資料顯示 1994 年的基線震測資料以及選取一些重複調查的震測資料。上排：帶有強烈 CO₂ 羽流反射訊號的震測剖面，數字指個別的 CO₂ 層。中排：整層羽流反射訊號(方均根振幅)的水平分布。下排：頂(第 9)層 CO₂ 層反射訊號(方均根振幅)的水平分布。(Williams and Chadwick, 2021)

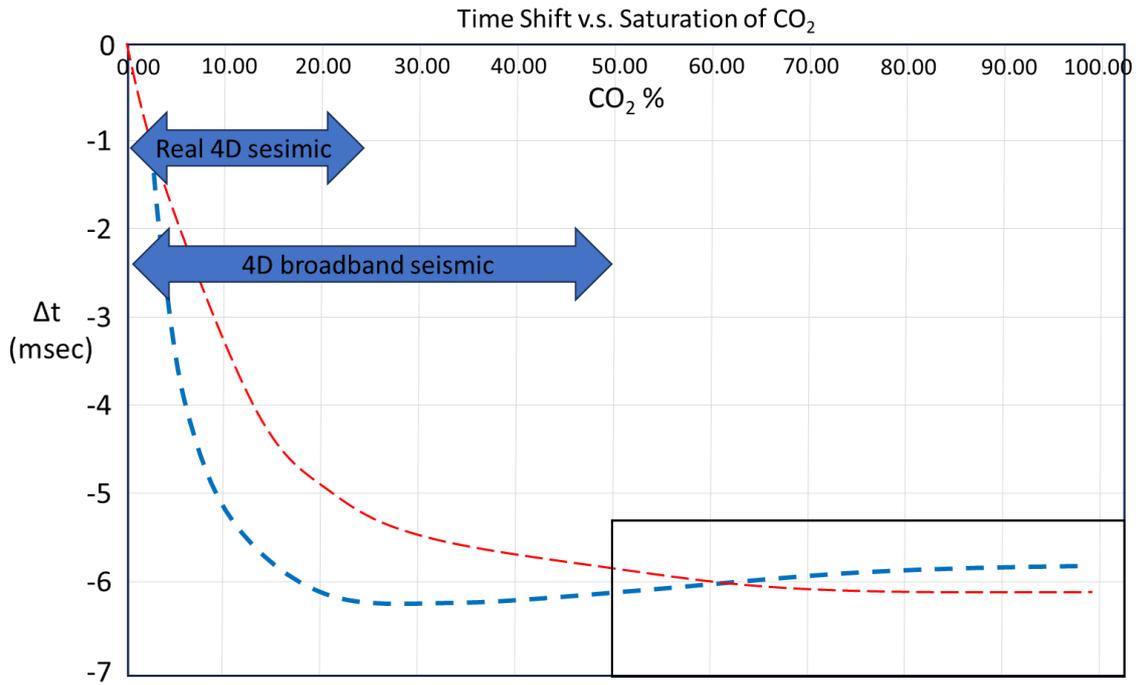


圖 13、30 公尺厚砂層之二氧化碳飽和度與震測訊號位移關係示意圖，藍線為普通 4D 震測資料曲線，紅線為 4D 寬頻震測資料曲線。

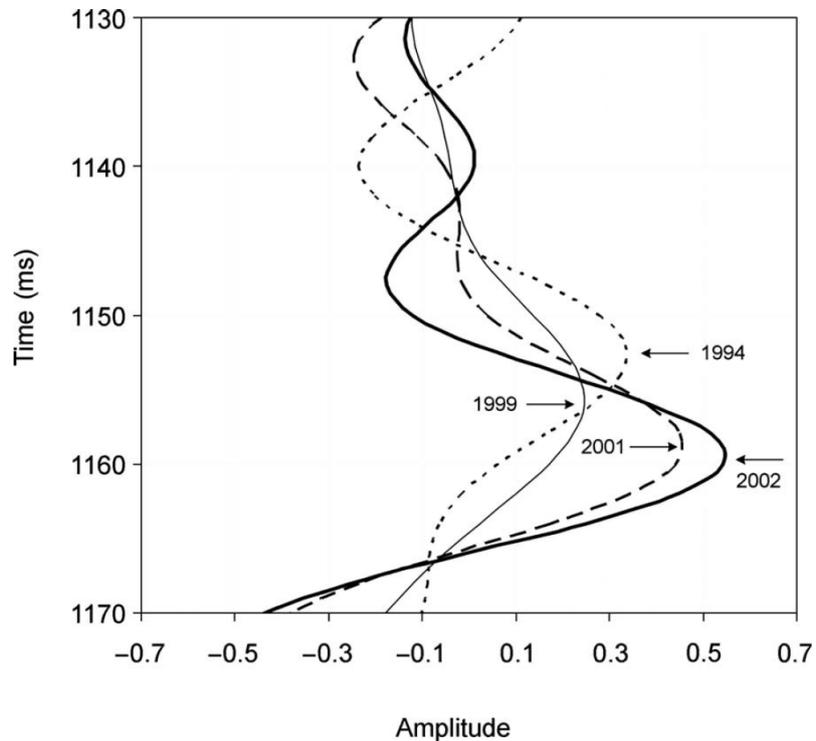


圖 14、顯示 CO₂羽流對於 Utsira 砂岩底部震測訊號的影響，每次調查後波峰時間偏移系統性的增加，另外振幅效應也非常突出。(Ghaderi and Landrø, 2009)

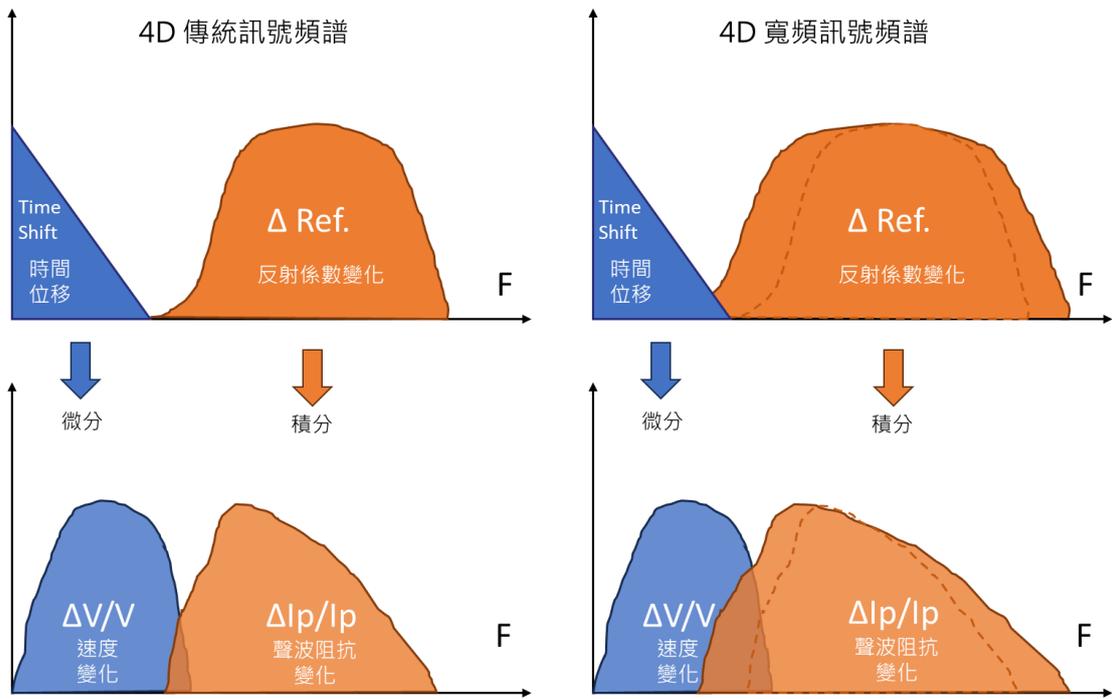


圖 15、利用時間位移及反射係數差異逆推速度及聲波阻抗變化示意圖，顯示低頻和高頻訊號重複性的重要。在校正 ΔI_p 及 ΔV 時，較寬的 4D 訊號有較寬的聲波阻抗變化。

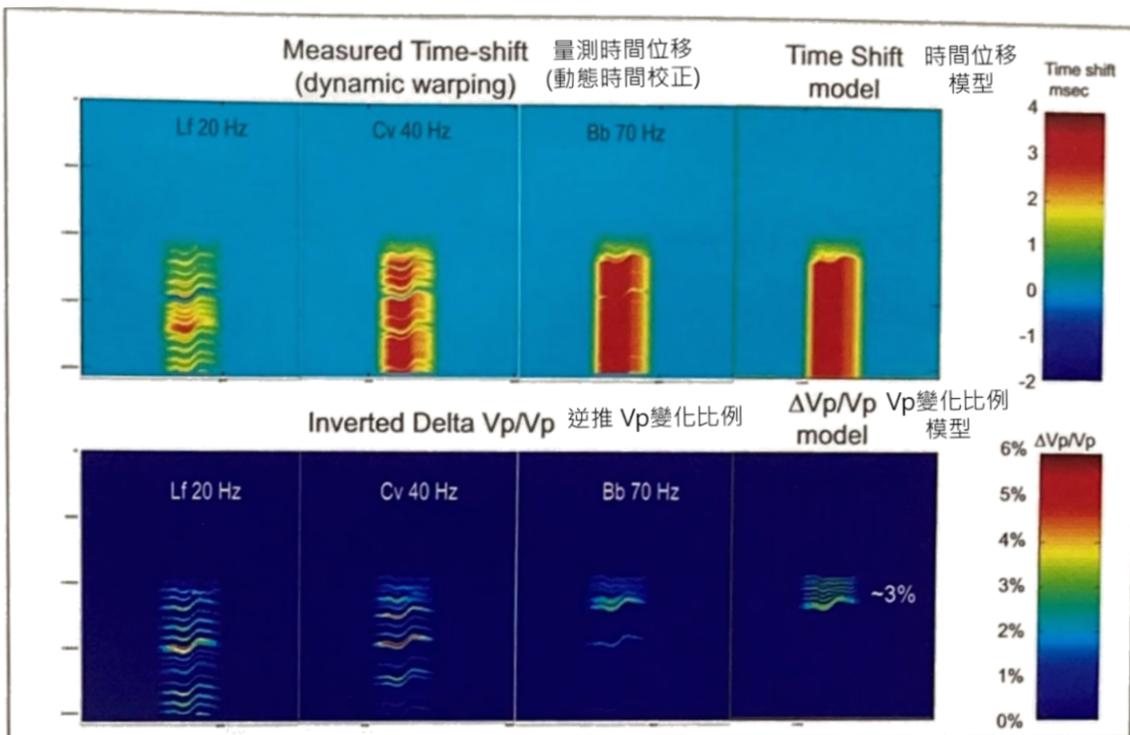


圖 16、評估解析度需要萃取 CO_2 飽和度改變的動態資訊，例如：3% $\Delta V_p/V_p$ 。上排為量測的時間位移及時間位移模型，下排為逆推的 V_p 變化比例與 V_p 變化比例模型。(Lecerf and Reiser, 2023)

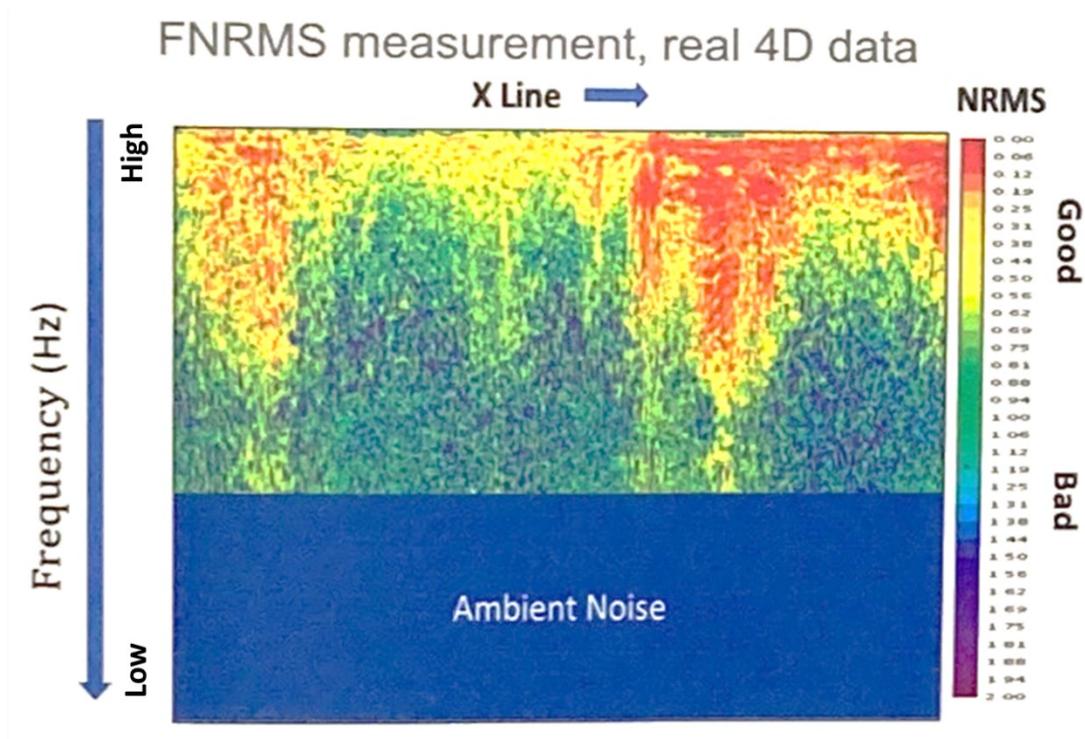


圖 17、4D 震測資料 NRMS 轉至頻率域，成為 FNRMS。橫軸為測線，縱軸為頻率。顯示 NRMS 較低之處多為高頻。(Lecerf and Reiser, 2023)

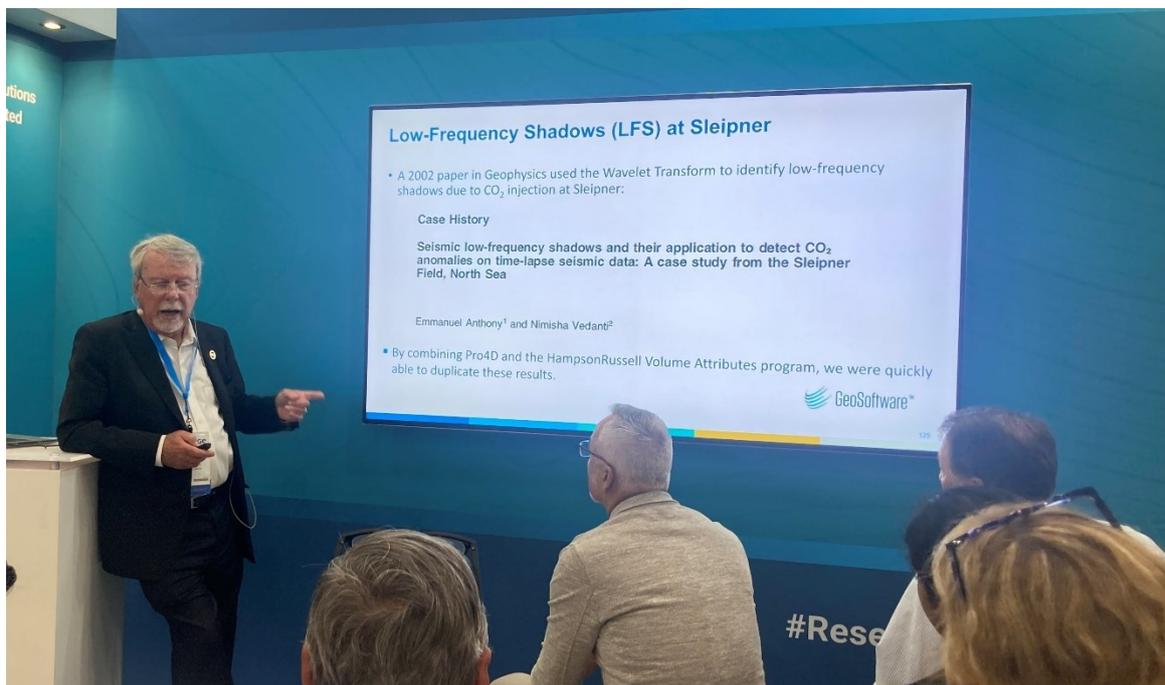


圖 18、Brian Russell，Geosoftware 副總，也是 Hampson-Russell 軟體的共同發明人之一，於展場演講。

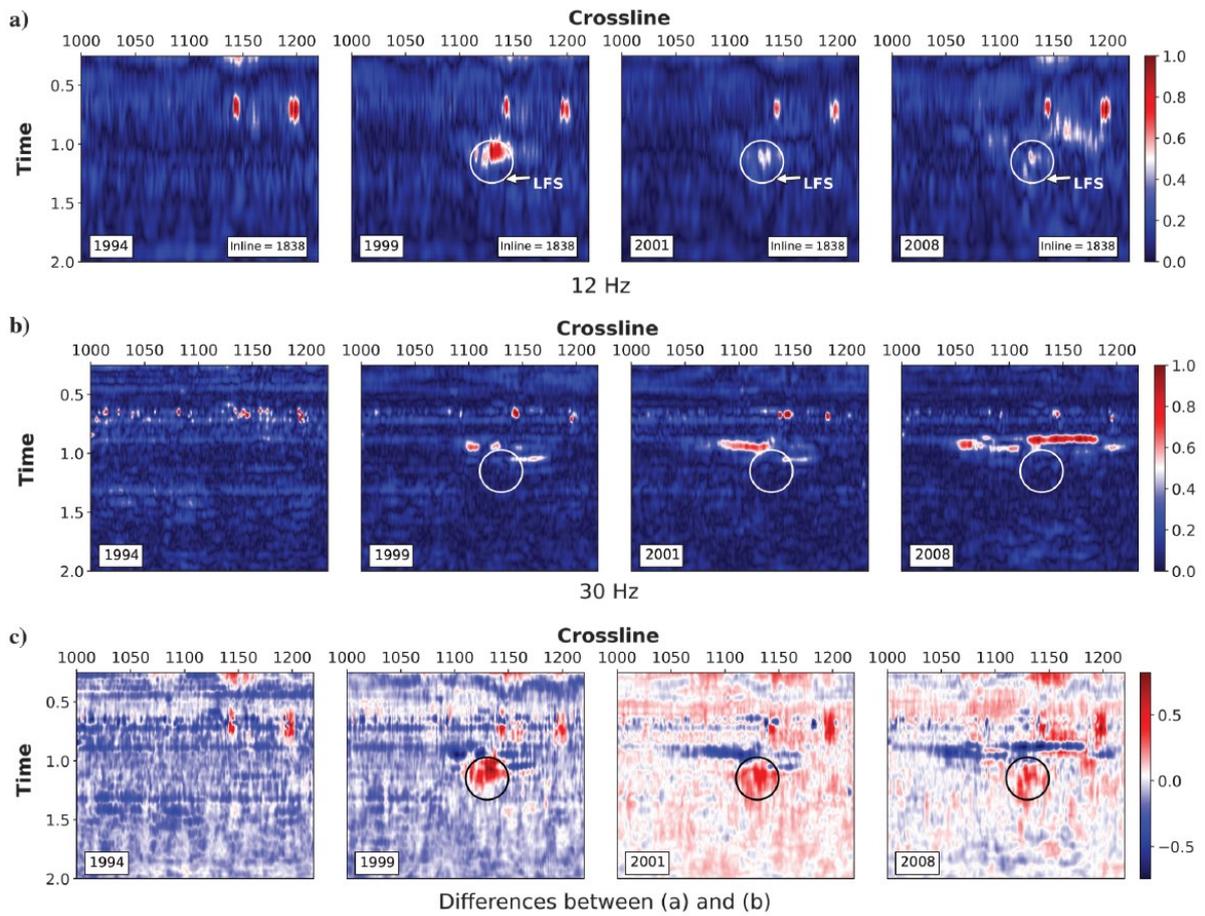


圖 19、由左至右分別展示 1994、1999、2001 及 2008 年之資料體，在 CO₂ 注入點(Inline:1838) 剖面，相同頻率的部分。(a) 12 Hz，(b) 30 Hz，(c) (a)及(b)的差異。圓圈代表 LFS。LFS 在 頻率 12 Hz 被觀察到，並在 30 Hz 消失。(Anthony and Vedanti, 2022)

5. 有物理訊息的 AI

關於 AI，科學社群發現有些神經網路是可設計成帶有物理意義的，也就是物理訊息神經網路(Physics-Informed Neural Networks, PINNs) (Karniadakis et al., 2021)。如果神經網路可以反映物理訊息，那麼它也可以反映這些物理現象的不確定性(Kabir et al., 2018)，推估神經網路的不確定性稱為不確定性量化(Uncertainty Quantification)。Sun et al. (2023) 則是在探討怎麼量化自動速度建模的逆推神經網路(Invertible Neural Network)的不確定性 (圖 20、21)。而美國的羅斯拉莫斯實驗室也釋出 OpenFWI 2.0 資料集(Feng et al., 2023, 圖 22)，可以用來訓練如基於 InversionNet (Wu and Lin, 2019) 的 ElasticNet，用類似全波形逆推的方式進行速度建模。他們希望全波形逆推不只可以應用在油氣探勘，也可以應用在 CCUS、醫學上的超音波掃描等領域。Jordao et al. (2023) 則是利用近期最新的 Transformer 等神經網路模型來分類岩石薄片影像的岩性。

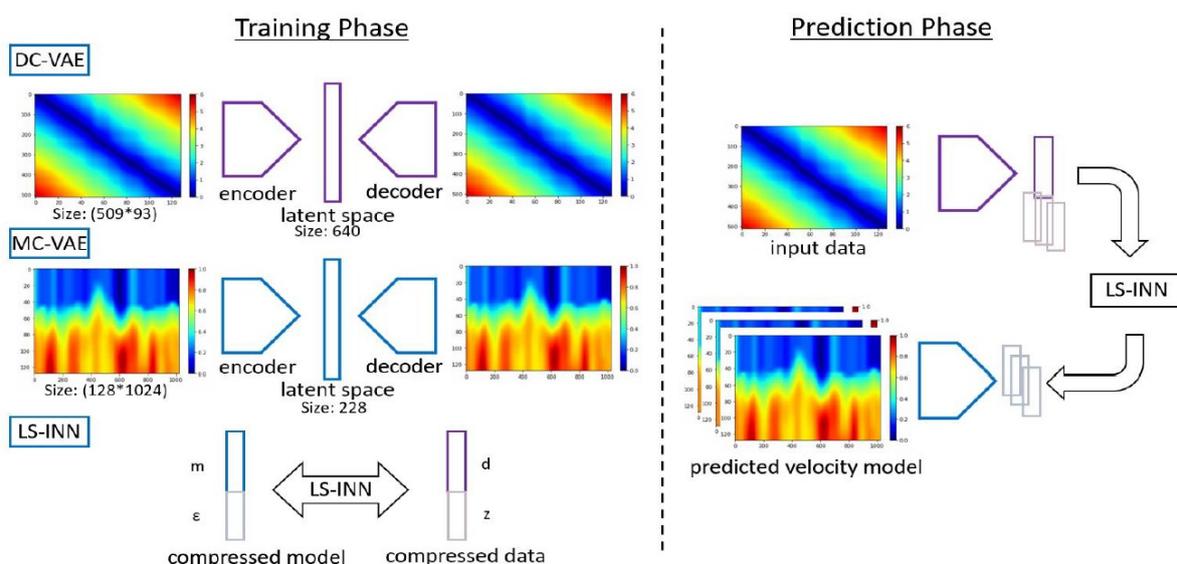


圖 20、隱藏空間(Latent Space)逆推的流程。圖左為訓練相(Training Phase)，圖右為預測相(Prediction Phase)。在訓練相，兩個變分自編碼器(Variational AutoEncoders, VAEs)和一個可逆推神經網路(INN) 需要一起訓練。而在預測相，則是把資料壓縮(Data Compression)自編碼器(DC-VAE)的編碼器(Encoder)，隱藏空間的可逆推神經網路(LS-INN)，以及模型壓縮(Model Compression)的自編碼器(MC-VAE)的解碼器(Decoder)串聯在一起。(Sun et al., 2023)

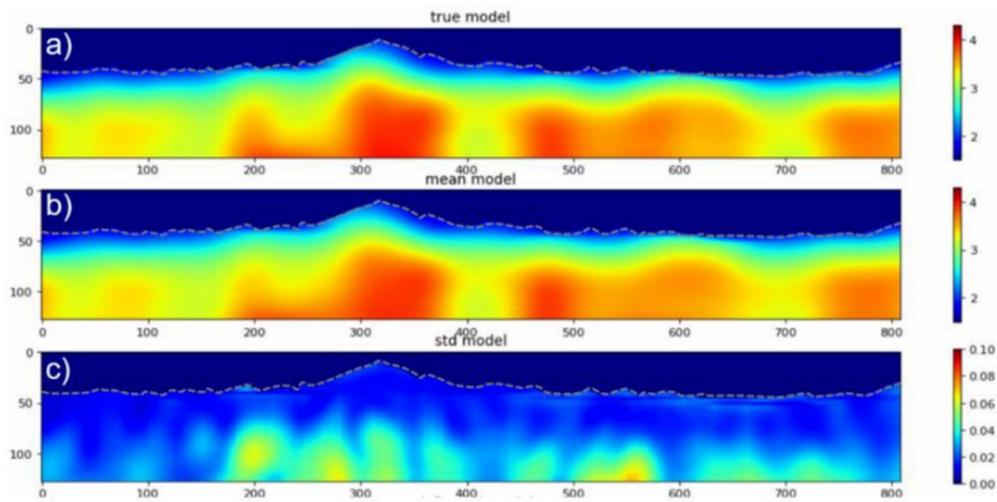


圖 21、從測試資料所得到整體速度模型結果。(a)真實模型，(b)逆推所得平均模型，(c) 兩者間逆推誤差。只有顯示部分逆推模型。(Sun et al., 2023)

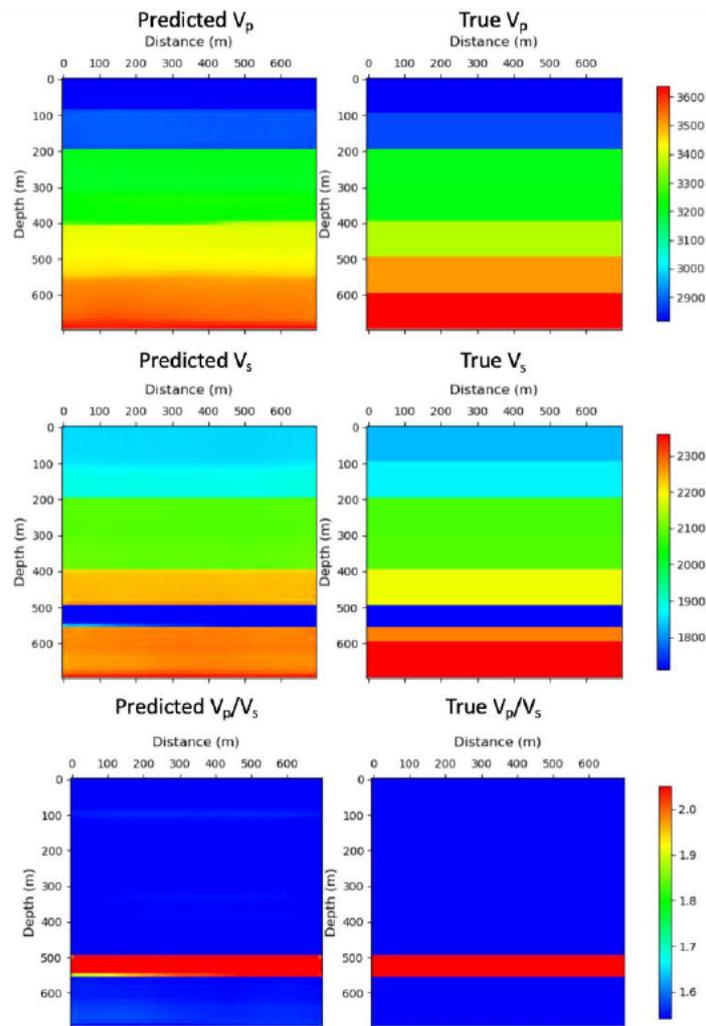


圖 22、圖左為神經網路預測模型，圖右為真實(Ground True)模型。上排為聲波速度 V_p 模型，中排為剪力波速度 V_s 模型，下排為 V_p/V_s 模型。(Feng et al., 2023)

6. FWI 工作坊

在全波形逆推的工作坊，主題是彈性係數或多參數的全波形逆推(EFWI 或 MPFWI)，主要應用在墨西哥灣外海鹽岩下方的成像。在 TGS 的介紹中，雖然是使用 EFWI，但主要還是逆推 P 波速度，而 S 波速度及密度則是透過關係式轉換而得。逆推完的 V_p 、 V_s 和密度模型再跟井測資料校正。由於 EFWI 不只模擬 P 波波場，也模擬隨之產生的 S 波波場，故對於波形有較好的預測，而 P 波振幅隨著支距的變化(AVO)也有保留下來，產生的模型在鹽岩和矽酸鹽層的交接面也較為銳利。而 MPFWI (McLeman et al., 2023)則是 DUG 公司推廣的方法，其同時逆推不同角度的反射係數等模型參數，優點是只要使用野外採集的原始資料，經過 MPFWI，其逆推而得的反射係數模型已經接近傳統方法所獲得的震測影像(圖 23)。

如 BP 的 Mad Dog 油田(圖 24a)，這個油田有 60 億桶石油資源量，和 Woodside、Shell 公司一起開發生產。這個油田是在 1998 年使用 Kirchhoff 重合前深度移位(Prestack Depth-Migrated, PSDM)窄方位拖曳式浮纜資料(Narrow-Azimuth Towed-Streamer, NATS)而找到的。當第一桶油透過 Spar 海上平台開始生產時，由於岩鹽的覆蓋使得成像困難及缺乏井控制，對於這個油田的認識有限。隨著資料品質改進，驗證井越來越多，才發現這個油田遠比原先預測的還大。於是在 2016 年開始了 Mad Dog Phase 2 (MD2)，能夠使用第二個較大的生產設備。85%的儲集層位於岩鹽下方，大部分已鑽的井及未來的探勘目標都在圖 24b 的紅色橢圓處，若沒有進一步的影像改善，則開發將受到影響。

2004 年世界上第一個大規模廣方位拖曳式浮纜調查(WATS)在 Mad Dog 進行，同時間倒轉時間移位(Reverse Time Migration, RTM)及不同均向性速度模型等技術開始發展，成像品質越來越好(圖 25)。但由於主要目標層的鹽岩交接面太陡峭，許多震波經過該面反射往下走，因此成像仍不太清楚。Mad Dog 於 2018 年開始採集海底節點(Ocean Bottom Node, OBN)資料(圖 26)，OBN 資料在此礦區的支距最短有 10-12 公里，最長可達 20 公里，適合應用於 FWI。2022 年彈性係數全波形逆推(EFWI)被應用到此 OBN 的資料集上，逆推結果包含速度模型(圖 27c)及 EFWI 所導出的震測影像(圖 27f)，改進了鹽岩下方因擠壓而拱起形成正斷層系統的成像。

傳統的震測資料處理，需要前處理、解釋密集的速度建模及移位等處理，時間週期約 1 年。使用原始資料的 FWI 減少了速度建模的時間，從 EFWI 方法得到的反射係數約幾個月便可完成。

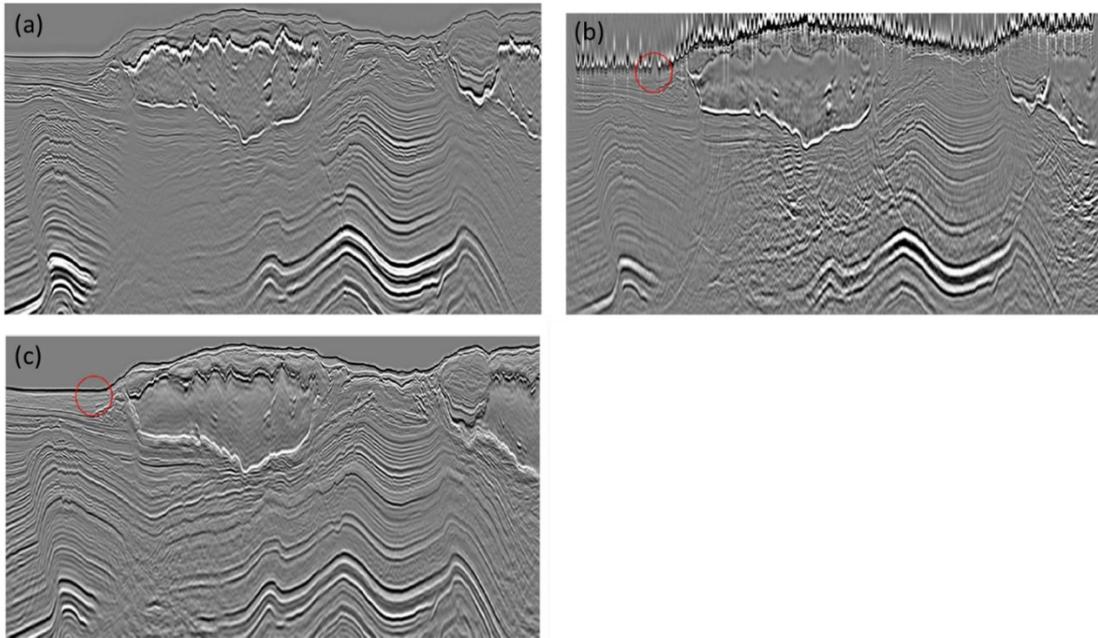


圖 23、(a)使用已經過前處理之震測資料及傳統速度建模得到之速度模型，經由傳統 RTM 的重合後剖面。(b)使用野外採集資料及 FWI 得到的速度模型，經由傳統 RTM 的重合後剖面。(c)使用野外採集資料，利用 MPFWI 而得到的成像結果。(McLeman et al., 2023)

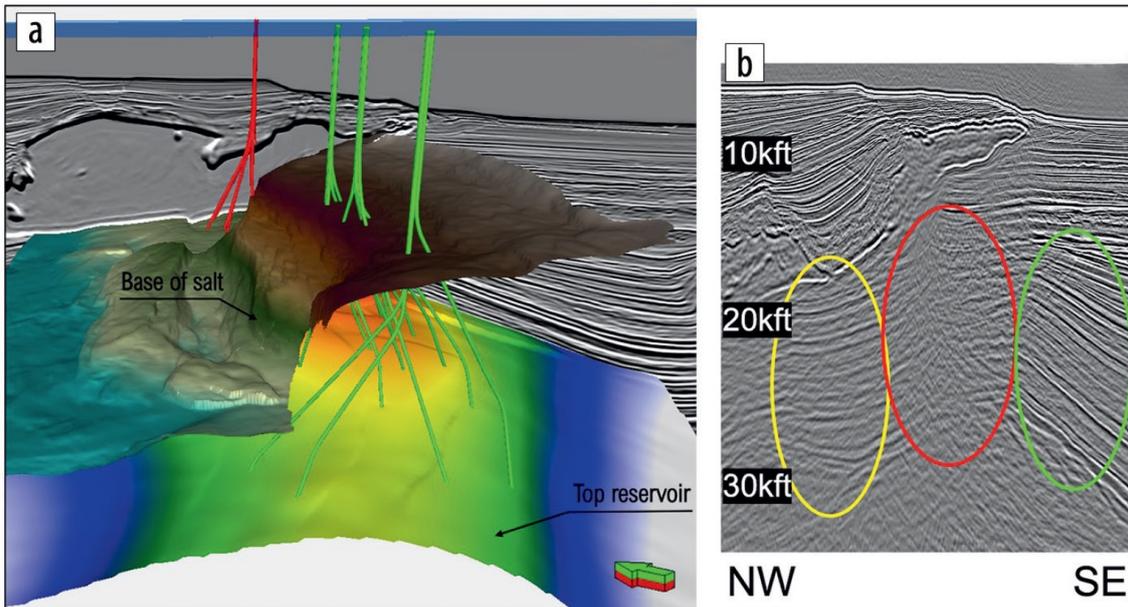


圖 24、(a) Mad Dog 油田 3D 視角圖，顯示岩鹽的底部及儲集岩的頂部。紅線為 spar 海上平台生產井，綠線為 MD2 生產井。背景圖為 Mad Dog 油田東區西北－東南向剖面。(b) 中區西北－東南向剖面，使用波動方程移位，雙方位 NATS 資料。黑色為波峰，白色為波谷。三個橢圓標示影像品質：綠色為佳，黃色為中等，紅色為差。(Liu et al., 2023)

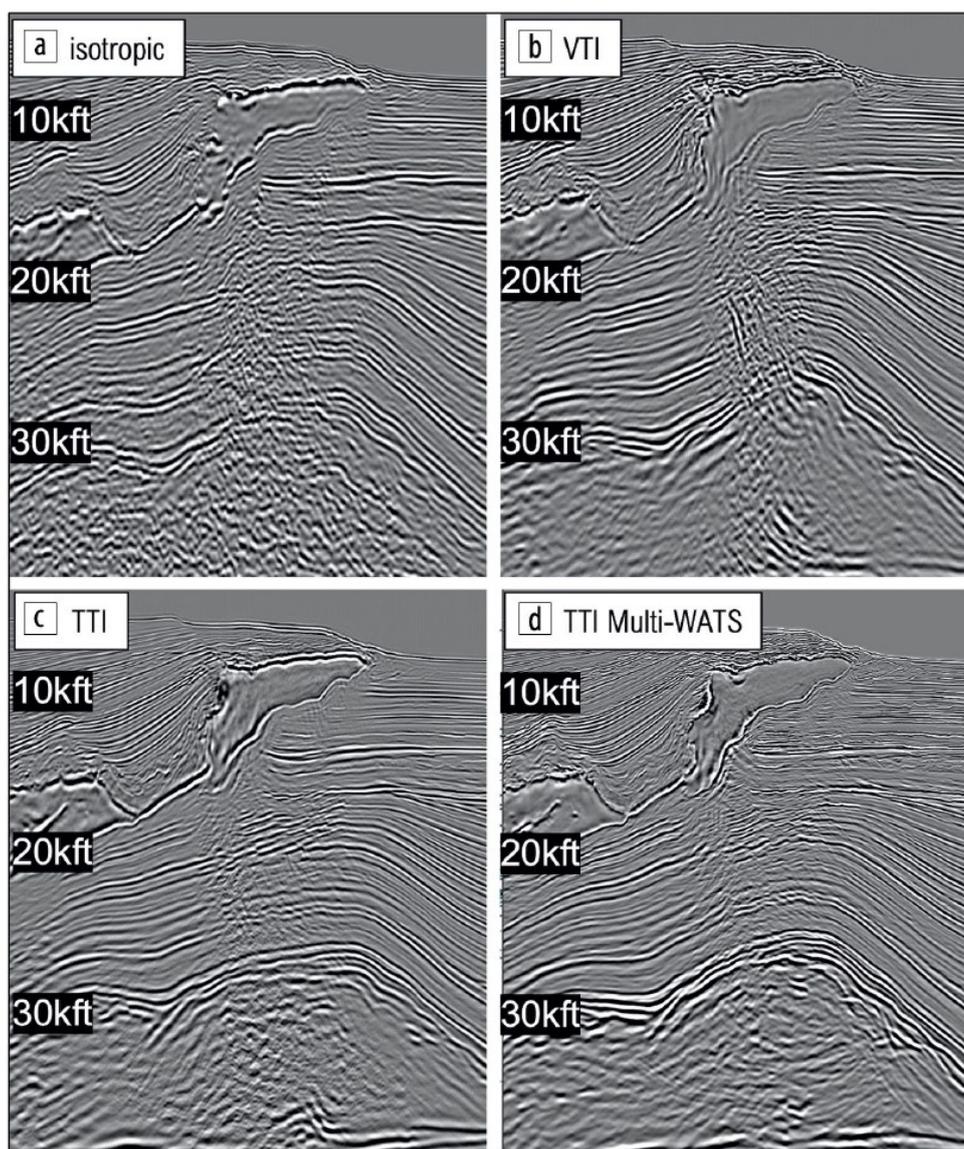


圖 25、Mad Dog WATS 資料的中部西北－東南向剖面，使用不同速度模型搭配 RTM 的重合後影像。(a) 2005 年均向(Isotropic)速度模型，(b)2007 年垂直縱向均向性(VTI)速度模型，(c) 2009 年傾斜縱向均向性(TTI)速度模型，(d)2012 年多重 WATS 資料搭配 TTI 模型。(Liu et al., 2023)

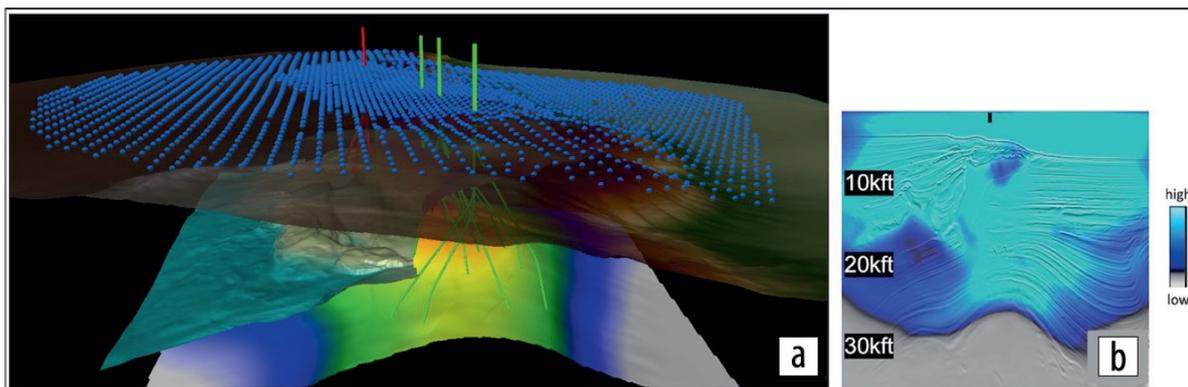


圖 26、Mad Dog 油田與 OBN (藍點) 3D 視角圖，加上水深、岩鹽底部、儲集鹽頂部、Spar 生產井(紅線)以及 MD2 井(綠線)。(b)潛地波(Diving Wave)照明的剖面，色條標示不同的照明程度。(Liu et al., 2023)

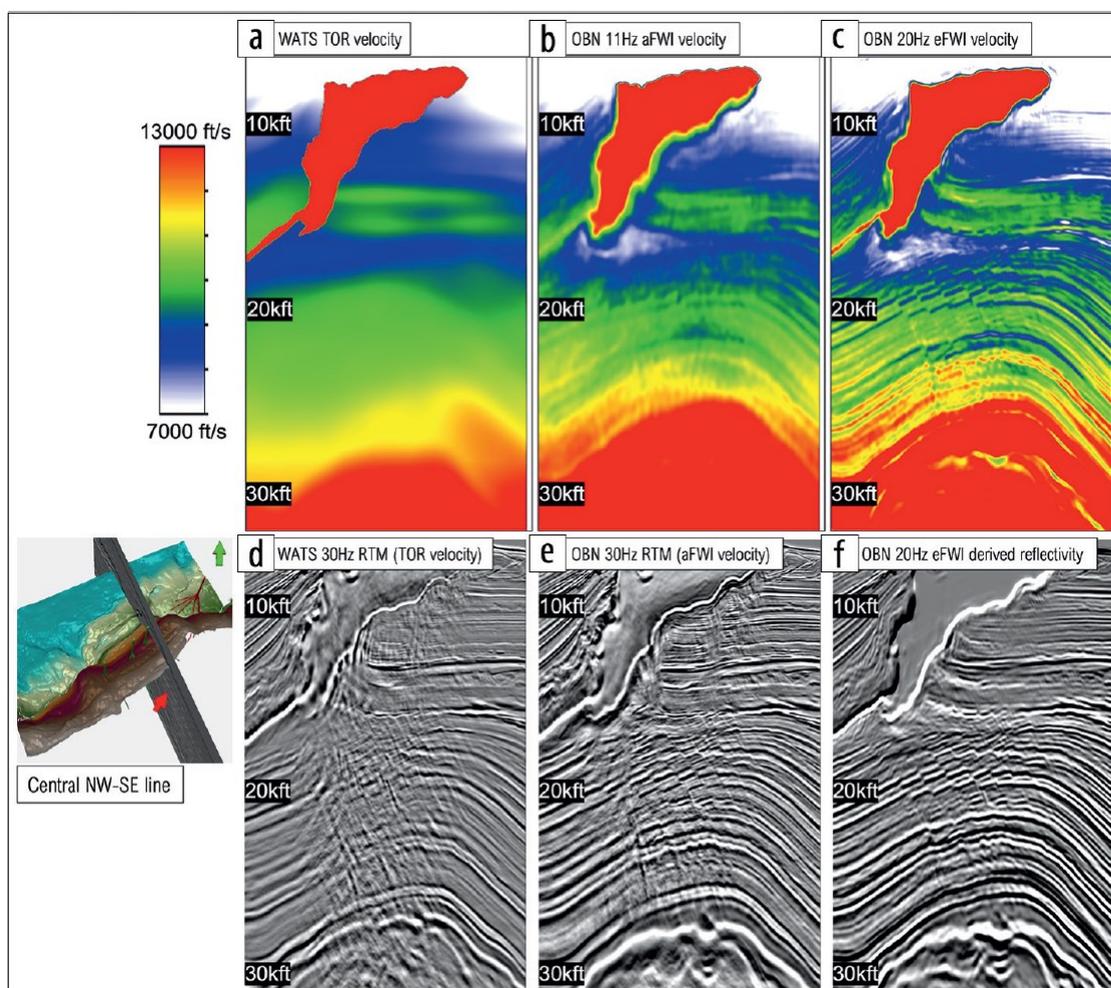


圖 27、中區西北—東南向剖面圖。左側 3D 圖顯示其位置。(a)WATS 傾斜正交非均向性 (TOR)速度模型，(b)OBN 11 Hz 聲波全波形逆推(A-FWI)速度模型，(c) OBN 20 Hz EFWI 速度模型，(d)30 Hz WATS RTM 重合後影像，(e) 30 Hz OBN RTM 重合後影像，(f) 20 Hz E-FWI 得到的反射係數。(Liu et al., 2023)

肆、心得及建議

參加此次會議的印象是展覽規模很大，涵蓋的內容很多，同一時間有 14 個口頭報告及 10 個海報報告，甚至在展場還有其他展覽演講正在同時進行。因此只能選擇參加跟自己相關的，感興趣的內容。

其次是全球都在面對能源轉型的問題，從教育機構、個人及能源相關產業要如何因應？在開頭演講中，講者提到近年在美國地科相關科系的研究所學生註冊數在下降，可能跟石油公司減少招聘地科相關學生有關。到底地球科學相關科系要怎麼因應現今強調能源轉型的環境？要怎麼對地球永續發展有貢獻？要怎麼繼續吸引並訓練學生能夠具備一定技能進入職場？

個人要如何因應能源轉型？油氣探勘相關職位的減少，對於地科人員的就業衝擊很大。如在會議中與一些海外留學同學交流時，他們提到：兩年前，石油公司因為負油價大裁員，有些部門甚至裁員 50%，今年才開始又慢慢招聘。

能源相關產業也正在轉型。在 SS 18 的口頭報告中，PGS(震測資料採集及處理公司)的講者說現在他們公司也在做轉型，買 P-cable，為海上風場做淺層震測。他們希望一次施測，就可以完成一切該做的項目，就是前處理到 PSDM，甚至是連 Vp/Vs 都可以得到，那這樣就可以有土壤地工的資料。

此次 IMAGE 會議的設計的確提供一個對話的平台，讓地質、地物、能源公司等不同部門的人能夠一起討論，一起面對問題，如學生變少的問題、找不到人才的問題、全球暖化的問題、在岩鹽下方成像不好的問題等，諸多各式各類的問題。建議不只地球物理人員可以參加，也可以派公司其他部門的人一同參與，一同發想。

伍、參考資料

- Abenov, T., Franklin-Hensler, M., & Grabbert, T. (2023). Has mining lost its luster?: why talent is moving elsewhere and how to bring them back.
- Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H. B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., ... & Zhou, D. (2005). Underground geological storage. in Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press.
- Anthony, E., & Vedanti, N. (2022). Seismic low-frequency shadows and their application to detect CO₂ anomalies on time-lapse seismic data: A case study from the Sleipner Field, North Sea. *Geophysics*, 87(2), B81-B91.
- Capello, M. A., Shaughnessy, A., & Caslin, E. (2021). The geophysical sustainability atlas: Mapping geophysics to the UN Sustainable Development Goals. *The Leading Edge*, 40(1), 10-24.
- Capello, M., Caslin, E., Stewart, I., Cox, D., Shaughnessy, A., Atekwana, E., ... & Mhopjeni, K. (2023). Geoscience in action: advancing sustainable development.
- Ellis, G. (2023). Geologic hydrogen: An overlooked potential primary clean-energy resource. The International Meeting for Applied Geoscience & Energy.
- Feng, S., Wang, H., Deng, C., Feng, Y., Zhu, M., Jin, P., Chen, Y., & Lin, Y. (2023) OpenFWI 2.0: Benchmark datasets for elastic full-waveform inversion. The International Meeting for Applied Geoscience & Energy.
- Ghaderi, A., & Landrø, M. (2009). Estimation of thickness and velocity changes of injected carbon dioxide layers from prestack time-lapse seismic data. *Geophysics*, 74(2), O17-O28.
- Hand, E. (2023). Hidden hydrogen. *Science (New York, NY)*, 379(6633), 630-636.
- Jordao, A., Souza, J. d., Zeitoum, N., Avansi, M. K., Pedrini, H., Vidal, A. C., Rezende, M., & Silva, Y. (2023) Synthetic digital thin-section image generation to classify

microfacies through deep learning models. The International Meeting for Applied Geoscience & Energy.

Kabir, H. D., Khosravi, A., Hosen, M. A., & Nahavandi, S. (2018). Neural network-based uncertainty quantification: A survey of methodologies and applications. *IEEE access*, 6, 36218-36234.

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422-440.

Kelemen, P. B., Leong, J. A., Carlos de Obeso, J., Matter, J. M., Ellison, E. T., Templeton, A., ... & Oman Drilling Project Science Team. (2021). Initial results from the Oman drilling project multi-borehole observatory: Petrogenesis and ongoing alteration of mantle peridotite in the weathering horizon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(12), e2021JB022729.

Kelemen, P. B., Matter, J. M., Teagle, D. A. H., Coggon, J. A., & Oman Drilling Project Science Team. (2020). Site BT1: Fluid and mass exchange on a subduction zone plate boundary. Kelemen, PB et al. *Proceedings of the Oman Drilling Project*. College Station, TX, International Ocean Discovery Program.

Liu, H., Rollins, F., Pratt, K., Da Silva, E., Mootoo, N., Yang, T., ... & Mei, J. (2023). Solving Mad Dog subsalt imaging in two decades: From WATS to OBN to elastic FWI. *The Leading Edge*, 42(6), 398-405.

Lecerf, D., & Reiser, C. (2023). Challenges for monitoring CO₂ sequestration using 4D seismic. The International Meeting for Applied Geoscience & Energy.

Maraggi, L. M. R., & Moscardelli, L. G. (2023a). Modeling hydrogen storage capacities, injection and withdrawal cycles in salt caverns: Introducing the GeoH₂ salt storage and cycling app. *International Journal of Hydrogen Energy*.

- Maraggi, L. M. R., & Moscardelli, L. G. (2023b). Hydrogen storage potential of U.S. salt domes in Texas, Louisiana, and Mississippi. *The International Meeting for Applied Geoscience & Energy*.
- McLeman, J., Rayment, T., Burgess, T., Dancer, K., Hampson, G., & Pauli, A. (2023). Superior resolution through multiparameter FWI imaging: A new philosophy in seismic processing and imaging. *The Leading Edge*, 42(1), 34-43.
- Mosher, S., Ryan, J., & Keane C. (2023). Vision and change in the geosciences: Shaping the future of graduate geoscience education. American Geosciences Institute.
- Prinzhofer, A., Cissé, C. S. T., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(42), 19315-19326.
- Sun, Y., Shen, J., & Williamson, P. (2023) Invertible neural network for automatic velocity model building and uncertainty quantification. *The International Meeting for Applied Geoscience & Energy*.
- Wu, Y., & Lin, Y. (2019). InversionNet: An efficient and accurate data-driven full waveform inversion. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 6, 419-433.
- Williams, G. A., & Chadwick, R. A. (2021). Influence of reservoir-scale heterogeneities on the growth, evolution and migration of a CO₂ plume at the Sleipner Field, Norwegian North Sea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 106, 103260.
- Zhang, M., Li, Y., & Ellis, G. (2023) Geophysics in gold H₂ exploration. *The International Meeting for Applied Geoscience & Energy*.