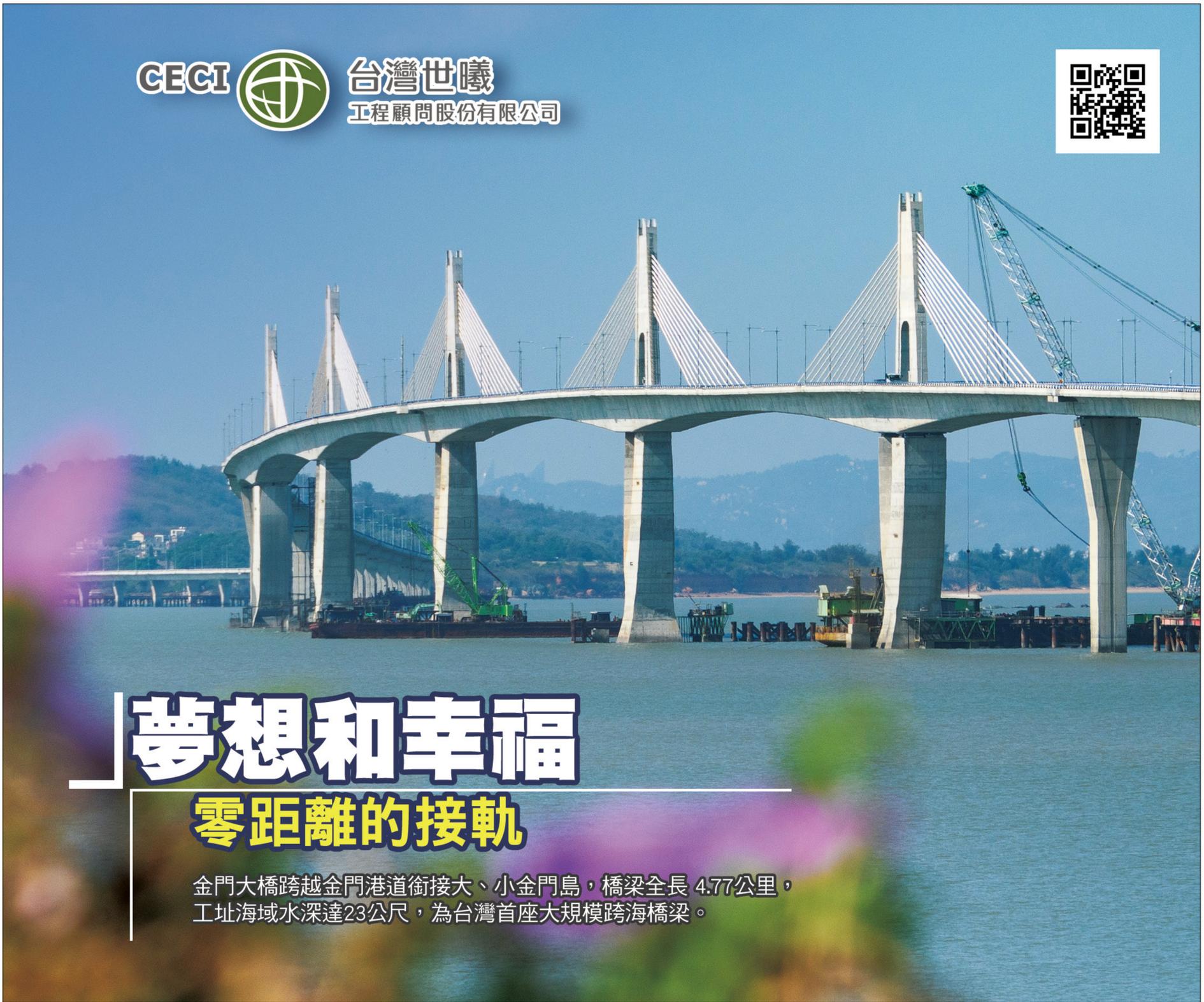


土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

December
2023

CECI  台灣世曦
工程顧問股份有限公司



夢想和幸福

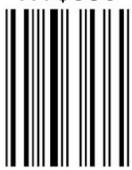
零距離的接軌

金門大橋跨越金門港道銜接大、小金門島，橋梁全長 4.77公里，
工址海域水深達23公尺，為台灣首座大規模跨海橋梁。

ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 50, No. 6

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

專 輯

地質資源探測、
開發技術與保育策略

理事長的話

第26屆理事長
高宗正

特別報導

112年年會
高雄盛大舉行

理事長的話



「土開五域 水創十方」是去（2023）年慶祝「中國水利工程學會」（1931年成立）與「中國土木工程學會」（1936年成立）於1973年合併為「中國土木水利工程學會」50周年時的活動主題，說明土木水利工程在人類文明進展過程中扮演著相當重要的角色。土木水利工程開拓人類生活必備的基礎設施與各項建設，奠定民眾生活福祉，帶動經濟發展，更進而建立文明。

近年來，全世界面對極端型氣候變遷與地球暖化日益嚴重的問題，環境保護、社會責任、公司治理（ESG）已成為當前企業組織共同面對的重大議題。加上資通訊科技日新月異的極速發展，各行各業均面臨更多的挑戰；尤其在人工智慧、雲端運算、大數據運用、物聯網等多項技術與所建立的平台（Platform）等等，莫不對原本的運作模式帶來作業或程序的各項變革。土木水利工程師肩負國家社會建設和經濟發展的重要使命，應率先積極整合諸多不同領域的相關技術，以因應氣候環境變遷與科技進展帶來的影響。

感謝過去各屆理事長、理監事與各委員會主任委員的無私奉獻與努力，及所有會員的長期支持，本學會扮演土木水利工程業界之產、官、學、研間交流平台，推動各類新技術、新工法，不遺餘力，且略具成效。惟目前國內工程產業，除受到上述全球性大環境的衝擊外，尚須面對基層作業人員與工程師人才大量匱乏、技術傳承斷層、工料供應鏈不順、及不少非業界人士對工程建設行業誤解等等嚴峻考驗。有鑑於此，未來我們除持續推廣如水利、結構、運輸、大地、營管、水資源、鐵公路…等基本領域之學術與技術外，對於新興的氣候變遷、ESG、IT科技與土木水利工程融合等議題，如碳盤查、淨零碳排、IOT、人工智慧、UAV、循環經濟、智慧城市、自然解方（NBS）…等等，均將由相關委員會持續辦理推動，以服務會員、帶動產業良性發展。更期盼未來能吸引年輕人投入國家建設行列，培育更多土木水利工程整合性專業人才。

適逢新春之際、謹此恭賀各位會員新年快樂！祝福大家

平安健康、順心如意、龍年行大運！

中國土木水利工程學會第26屆理事長

高宗正 敬上
113年1月

高宗正理事長 簡介

現職

亞新工程顧問股份有限公司副董事長

經歷

亞新工程顧問國際公司集團研發長

財團法人臺灣營建研究院董事長

新北市副市長／新北市政府工務局局長

臺北市政府捷運工程局副局長、總工程司、東區工程處處長、中區工程處處長、資訊中心主任

臺北市政府捷運系統工程局籌備處處長

榮民工程處

台灣電力公司

學歷

亞洲理工學院工學（電腦）碩士

中原大學土木工程系工學士

榮譽事蹟

2020 中國工程師學會會士

2017 中國土木水利工程學會工程獎章（工程事業類）

2016 行政院二等功績獎章

2015 中國土木水利工程學會 104 年 BIM 技術優良獎－績優個人

2014 行政院公共工程委員會公共工程專業獎章

2013 泰國曼谷亞洲理工學院校友總會亞洲理工學院傑出校友

2011 中國土木水利工程學會會士

2011 中原大學傑出校友

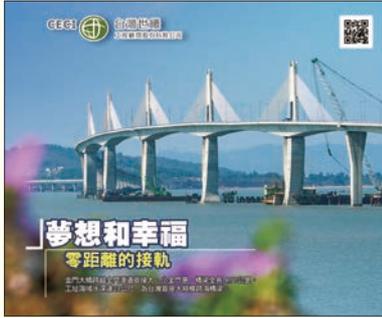
2010 中華民國道路協會道路獎章

2004 臺北市政府二等弼光首長政績紀念獎章

2002 中原大學土木工程學系中原大學土木水利傑出校友

2002 中國工程師學會十大傑出工程師

1989 中華民國資訊月籌備委員會中華民國傑出資訊人才



夢想和幸福 零距離的接軌
台灣世曦工程顧問股份有限公司

土木水利



社團法人中國土木工程學會會刊

發行人：高宗正

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：詹錢登 (國立成功大學水利系特聘教授兼工學院院長、編輯出版委員會主任委員兼總編輯)

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元 (航郵另計)

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十六屆理監事 (依姓氏筆劃排序)

理事長：高宗正

常務理事：朱惕之 余信遠 廖學瑞 賴建信

理事：王宇睿 王昭烈 林子剛 林祐正 林聰利 胡宣德 高銘堂

張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃一平 楊正君

楊偉甫 歐善惠 謝尚賢 謝震輝

常務監事：宋裕祺

監事：王藝峰 吳文隆 呂良正 沈景鵬 邱琳濱 賴建宏

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠管建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第 518 號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第 0248 號

特別報導 112年年會大會及土木水利工程論壇紀實 112年12月1日 高雄盛大舉行

3



「地質資源探測、開發技術與保育策略」專輯 (客座主編：徐國錦教授)

- | | | |
|--------------------------|-------------------------|----|
| 📖 專輯序言：地質資源探測、開發技術與保育策略 | 徐國錦 | 17 |
| 📖 以工程觀點評析台灣地熱能源開發的現在與未來 | 謝秉志 | 18 |
| 📖 台灣雲林地區地層下陷磁環分層監測井彎曲度檢測 | 黃鈺祐／吳泓昱／林政偉／陳芳瓊 | 23 |
| 📖 地質資源開發分析評估與現地應力 | 潘啟平／陳麒任／董家鈞／柳志錫 | 29 |
| 📖 如何幫核廢料找個安全的家 | 柯建仲／莊伯禹／顏銀桐／魏倫璋／陳耐錦 | 39 |
| 📖 地質資源可以掌握嗎？不確定性分析 | 陳尚穎／徐國錦／周子硯 | 56 |
| 📖 溫泉資源調查與評估 | 李振誥／林宏奕／龔文瑞 | 65 |
| 📖 新烏山嶺引水隧道施工遭遇瓦斯資源之對策 | 汪世輝／蕭富元／周永川／王建力 | 72 |
| 📖 二氧化碳地質封存：我國減碳機會與挑戰 | 林殿順／徐偉啾／林哲銓／蔡宜伶／楊雅梅／陳新翰 | 79 |

廣告特搜

- | | |
|---|-----|
| 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 | 封面 |
| 中國土木工程學會第26屆高宗正理事長的話 | 封面裡 |
| 安固工程股份有限公司 — 安得固 建築修復結構補強 | 78 |
| 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — Creativity · Excellence · Conservation · Integrity | 封底裡 |
| 土木水利，新年龍是吉
個人團體，好運龍有春 第26屆高宗正理事長暨全體理監事 敬賀 | 封底 |



112年年會

高雄盛大舉行 光彩奪目

112年12月1日
高雄萬豪酒店

社團法人中國土木水利工程學會、 國立高雄科技大學、 正修科技大學 聯合主辦



會場及報到

感謝各界先進遠道而來，112年會盛事倍增光彩！



感謝諸多單位贈送花籃祝賀



現場人潮絡繹不絕

開幕典禮



宋理事長開幕致詞



王美花部長貴賓致詞



各界熱烈參與，大會座無虛席

大會專題演講

工研院張培仁副院長專題演講：「台灣科技產業發展趨勢」



工研院張培仁副院長
專題演講

大會專題演講：台灣科技產業發展趨勢



宋理事長、高理事長與張培仁副院長合影



現場貴賓專心聽講

工程獎章、中技社學術獎 頒獎



工程獎章 學術研究類得獎人－胡宣德特聘教授



工程獎章 優良設計類得獎人－廖學瑞總經理



工程獎章 終身成就類得獎人－陳仲賢董事長



中技社土木水利工程學術獎得獎人－劉格非教授
(右為中技社頒獎人蘇慧貞教授)

曾元一特殊貢獻獎 頒獎

由曾元一先生個人贊助的「曾元一特殊貢獻獎」
首度頒發予 前榮工處處長 嚴孝章先生，由嚴先生女兒 嚴慈為女士 領獎。



曾元一先生致詞



嚴慈為女士 領獎



現場播放 嚴孝章先生紀念影片

112年會士 頒發證書

恭喜 112 年度三位新會士



邱永芳理事長
臺灣海洋產業聯合會



周家蓓特聘教授
國立臺灣大學土木工程學系



蘇玫心資深協理
台灣世曦工程顧問股份有限公司



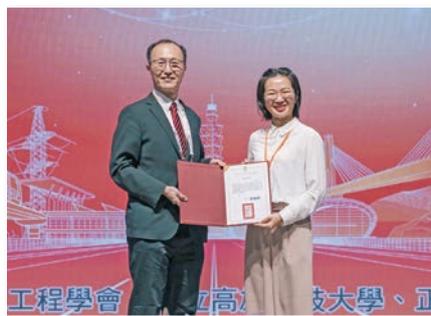
會士合影

論文獎 頒獎

恭喜六篇論文獲獎



由標準化觀點探討自駕車所需道路事件
資訊之設計與建立



結構物線上健康診斷安全評估系統建置：
應用於國震中心大樓



竹材輕質混凝土板工程性質之探討



利用雲端技術進行營建行動裝置查驗
及大數據統計之研究



建築工程 BIM 模型分解結構模式
建置與應用之研究



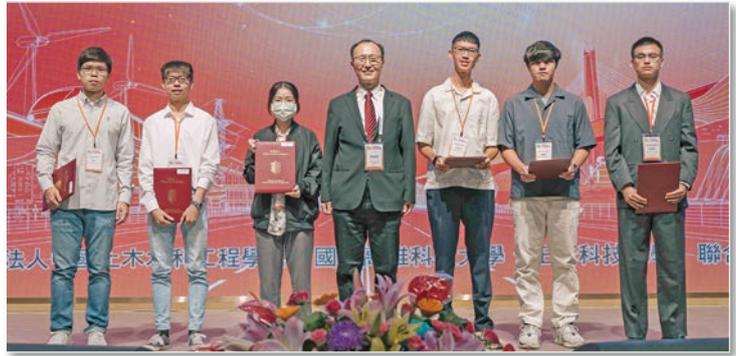
市區綠道路指標之準備程度與得分
改善建議

學生獎學金 頒獎

恭喜 23 位同學獲獎



朱宜甄、謝孟均、潘宗誠、蔡安晴、楊少棋



許睿廷、洪敏修、張芷綺、劉庭宇、林祐成、謝叡彰、陳延融



林憲弘、佟愷、楊正宏、吳珮楨、周家揚、楊哲瑜、陳育維、蔡幸潤、林哲弘、張皓宇、李承軒

「2023 工程數位創新應用獎」頒獎

恭喜 11 件工程獲獎(1)



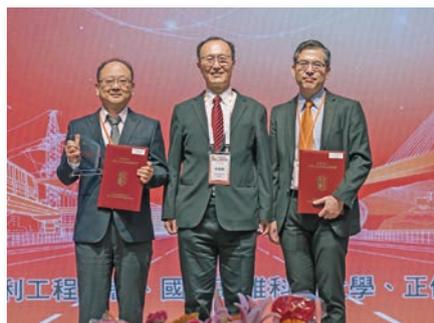
臺北自來水智慧化資訊管理系統 2.0



無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究



桃園市中壢運動公園區段徵收工程委託設計及監造技術服務



臺北都會區大眾捷運系統環狀線東環段 DF118 設計標



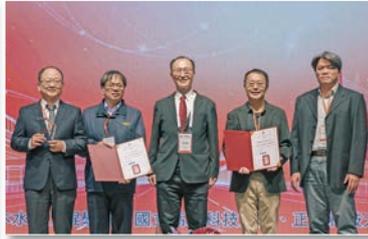
111 年度中山區道路巡查維護修繕成效式契約

「2023 工程數位創新應用獎」頒獎

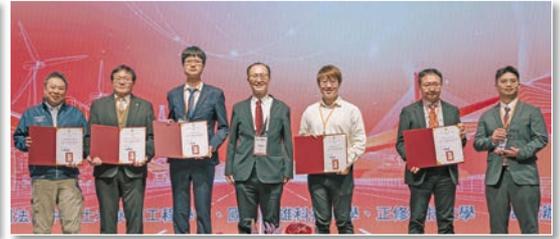
恭喜 11 件工程獲獎 (2)



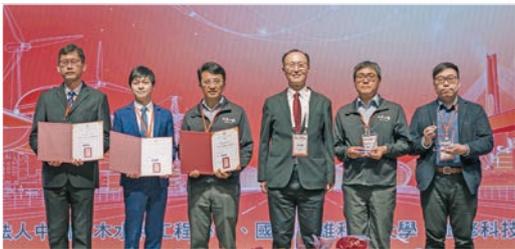
興達電廠燃氣機組更新改建計畫
345/161kV 開關場區土建及附屬機電工程



臺北都會區大眾捷運系統環狀線
南環段 DF115 設計標



淡江大橋及其連絡道路 5K+000~7K+035
新建工程



新北市雨、污水下水道 GIS_ 智慧化維運
及減碳管理



氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫



BIM 建築資訊整合管理系統

112 年工程美化獎 – 工程美化與景觀類 頒獎

景觀類 (1)

共頒發永續貢獻獎 1 件、首獎 1 件、
特優 5 件、優等 12 件、佳作 13 件



周南山主任委員致詞



永續貢獻獎 – 臺北榮民總醫院



首獎 – 三貂嶺生態友善隧道



特優 – 金門大橋



特優 – 大漢溪跨河休憩路廊銜接工程



特優 – 廣慈博愛園區整體開發計畫公共住宅
第 D 標統包工程



特優 – 桃園市立圖書館新建總館暨停車場興建工程



特優 – 潭子交流道工程 - 豐原連絡道斜張橋

112年工程美化獎－工程美化與景觀類 頒獎

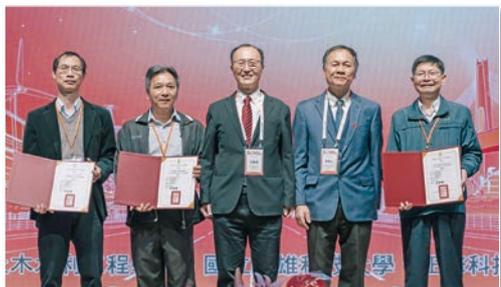
景觀類 (2)



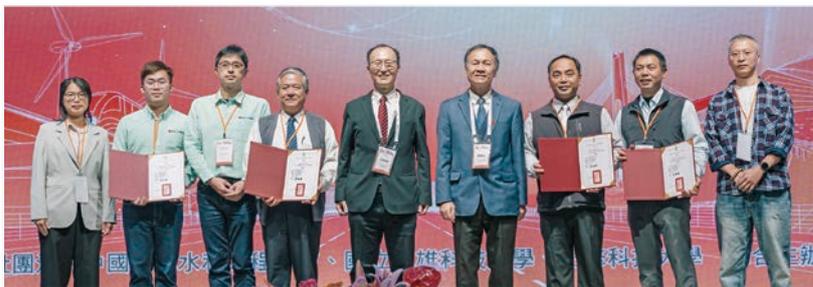
優等－觀音草漯



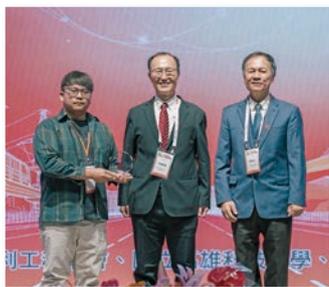
優等－瑞三礦業



優等－土城社會住宅



優等－原民公園 優等



優等－苗栗茶產業



優等－省道合歡山段



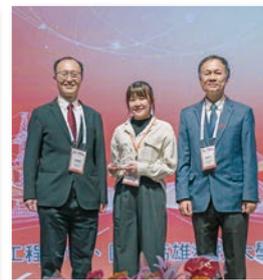
優等－太平村無二窯



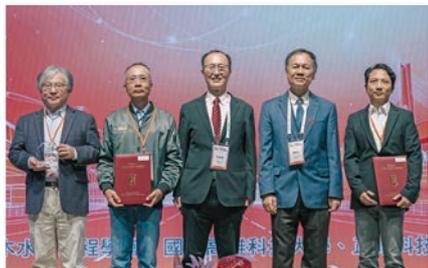
優等－興國公園



優等－安坑輕軌



優等－溪濱公園



優等－蘇澳服務區

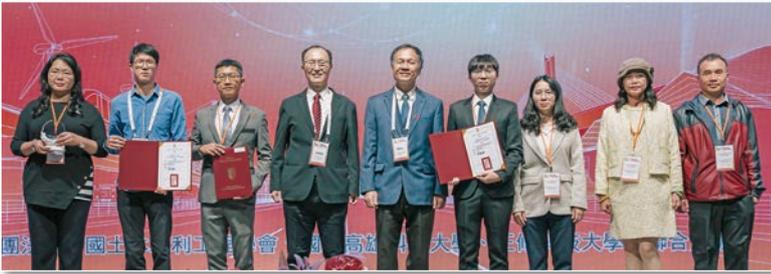


優等－屏鵝公路

112 年工程美化獎 – 工程生態與環境類 頒獎

生態類 (1)

共頒發首獎 1 件、特優 5 件、
優等 10 件、佳作 8 件



首獎 – 大湍森林公園



特優 – 二仁溪



特優 – 奎輝橋下游野溪



特優 – 獅潭鄉大東勢溪



特優 – 勝興鐵道



特優 – 大漢溪右岸



優等 – 金獅村



優等 – 大湖桶



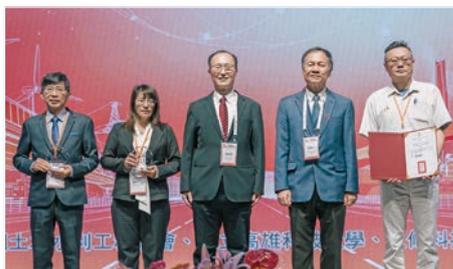
優等 – 藤寮坑溝



優等 – 瓦礫溝



優等 – 山坡地溪溝



優等 – 明隧道



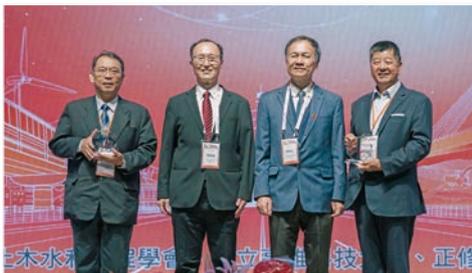
優等 – 林口溪上游

112年工程美化獎－工程生態與環境類 頒獎

生態類(2)



優等－水汙頭



優等－木瓜溪



優等－茄荖寮溪

「2023 全國大專生工程創意競賽」頒獎

共頒發金獎 1 件、銀獎 1 件、銅獎 1 件



金獎－OREO
中原大學 土木工程學系



銀獎－肥嘟嘟左衛門地球保衛隊
中央大學 土木工程學系



銅獎－大虎隊
國立臺灣科技大學 營建工程系

第二十六屆理事長交接典禮



宋裕祺理事長(左)、高宗正理事長(右)完成交接，
由沈景鵬監事(中)監交。



第26屆高宗正理事長致詞

禮成、唱大禹歌

112 年年會大會圓滿成功！



全體起立合唱「大禹歌」



論壇一

土木工程概論－營造業缺工現況及因應方案



黃忠發院長演講



主持人、講者合影



李柏昌所長演講



吳冠霖經理演講



曹昌盛副總演講



呂福元理事長演講



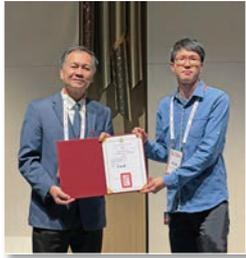
現場座無虛席

論壇二

112年工程美化獎－景觀類 頒獎暨優勝發表



佳作－石門嵩山



佳作－羅漢松公園



佳作－埤塘景觀



佳作－南方澳大橋



佳作－蕃薯社區



佳作－新化林場



佳作－三鶯文創



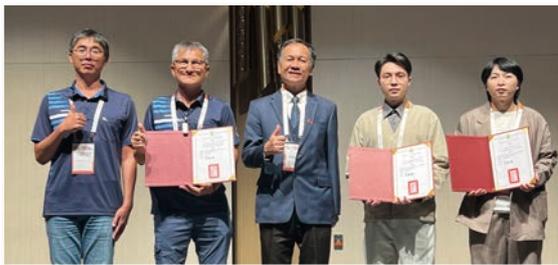
佳作－國語實小



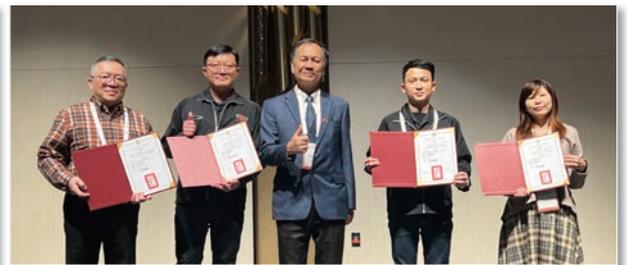
佳作－港墘國小



佳作－鹿野中興



佳作－大湖口溪



佳作－迪化公園



佳作－汐止公八



永績貢獻獎發表－榮民總醫院

論壇三 2023 工程數位創新應用獎 成果發表



濟濟一堂，交流熱絡！

論壇四 水利工程論壇 – 永續多元水資源的政策及執行



主持人、講者合影



賴建信署長演講



呂文豪處長演講

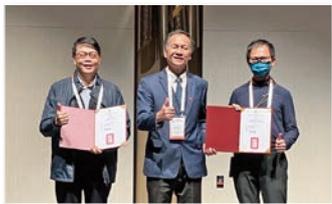


杜冠禎副總演講



梁錦淵副局長演講

論壇五 112年工程美化獎－生態類 頒獎暨優勝發表



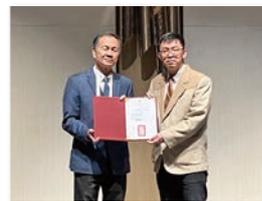
佳作－小楊梅步道



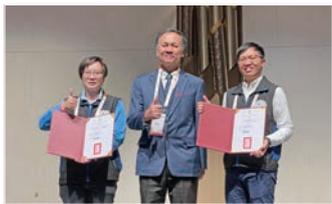
佳作－地下水觀測站井



佳作－打鐵坑野溪



佳作－忠寮社區



佳作－安通溫泉



佳作－東勢林場



~全體大合照~

論壇六 2023 全國大專院校學生工程創意競賽 優勝發表



林元生主持人致詞



金獎－OREO 團隊演講



銀獎－肥嘟嘟左衛門地球保衛隊演講



銅獎－大虎隊演講

感謝名單

112 年恰逢本學會合併 50 周年，各界熱烈迴響，贊助踴躍，銘感五內！

福清營造股份有限公司
 台灣世曦工程顧問股份有限公司
 財團法人臺灣營建研究院
 義力營造股份有限公司
 禹順工程技術顧問有限公司
 中興工程顧問股份有限公司
 元利建設企業股份有限公司
 台灣中油股份有限公司
 亞新工程顧問股份有限公司
 泛亞工程建設股份有限公司
 財團法人中興土木科技發展文教基金會 林呈教授
 壹山營造股份有限公司
 築遠工程顧問有限公司
 桃園國際機場股份有限公司
 台北市土木技師公會
 志成橡膠廠股份有限公司
 財團法人中興工程顧問社
 遠揚營造工程股份有限公司
 中華民國全國營造業工地主任公會
 中華坡地防災及資源再利用技術協會
 合康工程顧問股份有限公司
 林同棧工程顧問股份有限公司
 祐勝工程股份有限公司
 閣康聯合建築師事務所
 中力建築系統有限公司
 中華工程教育學會
 中華民國結構工程學會
 台聯工程顧問股份有限公司
 台灣循環經濟學會
 台灣電力股份有限公司
 正盛工業股份有限公司
 永峻工程顧問股份有限公司
 交通部高速公路局
 光怡營造股份有限公司
 宇泰工程顧問有限公司
 安固工程股份有限公司
 宏華營造股份有限公司
 邑菖工程顧問有限公司
 東建工程顧問有限公司
 品興營造股份有限公司
 恆康工程顧問股份有限公司
 皇昌營造股份有限公司
 根基營造股份有限公司
 海悅國際開發股份有限公司
 萬機鋼鐵工業股份有限公司
 詮華國土測繪有限公司
 榮承發工程顧問股份有限公司
 臺陽合金工業股份有限公司
 麗明營造股份有限公司

利德工程股份有限公司
 奇博科技股份有限公司
 社團法人中華民國建築技術學會
 大彥工程顧問股份有限公司
 工信工程股份有限公司
 中華工程股份有限公司
 中華民國結構工程師公會全國聯合會
 中興保全科技股份有限公司台北分公司
 王正源建築師事務所
 台北市結構工程工業技師公會
 台南市土木技師公會
 台南市結構工程師公會
 台灣整合防災工程技術顧問有限公司
 台灣邁達斯股份有限公司
 正堯工程顧問股份有限公司
 永興結構土木聯合技師事務所
 立景工程顧問股份有限公司
 交通部公路總局
 仲冠工程顧問有限公司
 兆弘機電股份有限公司
 全業工程顧問有限公司
 合美工程股份有限公司
 吉田工程顧問有限公司
 安倉營造股份有限公司
 江世雄結構技師事務所
 沃旭能源股份有限公司
 和建工程顧問股份有限公司
 尚乘工程顧問有限公司
 社團法人中華工程仲裁協會
 社團法人台灣省結構工程師公會
 社團法人桃園市土木技師公會
 社團法人新北市土木技師公會
 社團法人臺灣省土木技師公會
 社團法人臺灣省水土保持技師公會
 青山工程顧問有限公司
 信業工程顧問有限公司
 品創工程顧問有限公司
 柏林股份有限公司
 科技圖書股份有限公司
 宸鼎工程技術顧問有限公司
 桃園市結構工程師公會
 泰興工程顧問股份有限公司
 海洋委員會
 真毅營造有限公司
 祐彬營造股份有限公司
 財團法人中華顧問工程司
 財團法人台灣建築中心
 財團法人地工技術研究發展基金會
 高雄市結構工程工業技師公會

國家住宅及都市更新中心
 國振工程顧問有限公司
 國興結構技師事務所
 凱巨工程顧問有限公司
 長圓工程顧問有限公司
 黃昭琳
 新北市政府新建工程處
 臺中市土木技師公會
 臺中市工程技術顧問商業同業公會
 臺中市結構工程師公會
 臺北市政府捷運工程局
 臺灣仲裁協會
 遠東機械工業股份有限公司
 廣貴富國際投資有限公司
 震庭工程顧問有限公司
 導航科技工程有限公司
 聯邦工程顧問股份有限公司
 駿宏工程顧問有限公司
 豐立工程顧問股份有限公司
 山林水環境工程股份有限公司
 自強工程顧問有限公司
 行政法人國家災害防救科技中心
 行政院農業委員會農田水利署石門管理處
 社團法人中國工程師學會
 長昇法律事務所
 桃園市政府水務局
 財團法人中技社
 財團法人中興工程科技研究發展基金會
 高雄市土木技師公會
 華光工程顧問股份有限公司
 華電聯網股份有限公司
 新北市政府養護工程處
 慧築營建科技股份有限公司
 黎明工程顧問股份有限公司
 聯合大地工程顧問股份有限公司
 財團法人中鼎教育基金會
 中華民國大地工程師公會
 互助營造股份有限公司
 尹晟測繪工程有限公司
 交廣工程顧問有限公司
 行政院農業委員會農田水利署屏東管理處
 行政院農業委員會農田水利署瑠公管理處
 社團法人中華民國水土保持技師公會全國聯合會
 新北市政府捷運工程局
 經濟部水利署北區水資源局
 經濟部水利署南區水資源局
 日商鹿島營造股份有限公司

大會圓滿成功 幕後工作人員居功厥偉



感謝黃文俊及王心怡兩位司儀默契十足



感謝正修科技大學柯武德教授帶領學生支援年會各項工作



地質資源探測、開發技術 與保育策略 專輯序言

專輯客座主編 徐國錦／國立成功大學資源工程學系 教授

依據美國礦物教育聯盟 2022 年估算，每位美國人每年需要使用掉 17,360 公斤的礦物資源，而一位生命期 77.3 年的美國人，將會使用掉 1,342 公噸的礦物、金屬與燃料；而依據經濟部國際貿易局 2010 ~ 2022 年礦物進出口資料，平均每位台灣民眾每年使用能源礦物 5,249 公斤、金屬礦物 1,077 公斤與工業原物礦物 1,471 公斤。這些現代人類必要維生與文明發展的資源都是來自地質資源。地質資源可概分為固體資源、流體資源、能源資源，空間資源與再生資源。固體資源涵蓋金屬與非金屬資源；流體資源包含地下水、溫泉與天然氣；能源資源包含煤、鈾、地熱、水合物、傳統與非傳統石化能源；空間資源為核廢料處置、城市與產業廢棄物掩埋、隧道交通運輸、地下輸水通道、再生能源存放、綠能地質儲集、二氧化碳封存、戰備防空與遊憩所需的地下空間；再生資源則為地質資源用後可再處理使用的循環資源。雖然人類對地質資源的需求隨著技術演進與國際局勢變化，會不斷地消長改變。但是可以確定的是人類對地質資源的需求是永

遠存在不會消失的。地質資源是地球母親所賜予，人類使用地質資源究竟是開啟了永遠無法回復的潘朵拉盒子？還是擦拭了可以解決棘手問題的阿拉丁神燈？過去人類使用地質資源是野蠻但不古老，先進卻不文明。長期濫用地質資源是氣候暖化部分成因，而明智利用保育地質資源卻也是維繫人類後續存亡的重要關鍵。產官學界與民眾對於使用地質資源解決能源與環境困境抱有高度期待，也對資源永續可能性及衍生環境災害持有疑慮。有鑑於此，應土木水利會刊主編詹錢登院長邀請，由學者專家編撰專刊，從地質資源觀點，以科普文字傳播地質資源的知識與專業，提供讀者了解地質資源，啟發讀者對地質資源的興趣，期能達到資源、環境與文明的永續共容與共榮。本期內容涵蓋地球物理應用、地質力學評估、溫泉資源、地熱資源、核廢料地質處置、隧道工程實務、二氧化碳封存與不確定分析技術；地質資源中的地下水資源部分，讀者可參閱土木水利第四十八卷第六期地下水資源專刊介紹。非常感謝本期賜稿的學者專家，撥冗撰寫文章，提出寶貴的地質資源相關課題精闢看法，促進觀念與知識的傳播，在此萬分致謝。🇹🇼

通訊方式：徐國錦教授 kchsu@mail.ncku.edu.tw



以工程觀點評析 台灣地熱 能源開發的 現在與未來

謝秉志* / 國立成功大學資源工程學系 教授

地熱是一種基載的可再生能源，不受天氣影響可以穩定供應電力。地熱不僅具有儲能特性也可進行靈活調控，可以良好的與其他電力能源做搭配使用，也是台灣邁向淨零的一項重要戰略工具。在過去，台灣是全世界第 14 個利用地熱能源發電的國家，但早期因為儲集層管理及管線結垢等問題影響導致了地熱電廠的關閉。現今因應台灣對於綠電的需求，地熱發電已在 2021 年重啟，目前也有至少 4 座地熱電廠商轉而為台灣提供無碳電力。在未來，在台灣淨零的關鍵戰略目標之下，地熱開發將在 2050 年達到數十億瓦（GW）等級，這一個目標的達成需要仰賴創新技術的佈局。在以工程觀點評析台灣地熱能源開發的未來部分，本文盤點了目前利用傳統水熱型地熱系統可能遭遇的挑戰，再進一步針對增進熱電轉換效率、增強熱液產量、尋找超高溫儲集層以及產出更多的地下可用熱量的面向，逐一介紹地熱發電效率的提升方式、增強型地熱系統、超臨界型地熱系統、先進型地熱系統以及沉積岩地熱系統的技術應用性。在地熱發展的未來，透過地熱開發技術的研發創新，可以用工程方法有效的從地層岩石中取出更多的熱能，轉換為電能並為台灣提供無碳的再生能源電力。台灣可以充分的應用這一個存在於腳底下的豐沛熱能以達成淨零目標。

前言

現在地熱的緩慢進展跟 19 世紀中期的石油工業發展非常類似。19 世紀中期的石油工業僅僅在地表明顯的有油氣跡象的地區，使用當時存在的開發技術，進行少少的油氣資源開發。這種情況跟現在的地熱的發展很像。目前只有在一些地表有熱泉、蒸汽等明顯的具有地熱地表跡象的地方才有地熱開發。換言之，利用石油工程的 150 年開發經驗，地熱是可以有很好的未來，而且速度可以更加快。

地熱與石油都是一種地球地質能源（Geo-energy），但地熱與石油是有本質上的不同。地熱是一種可再生、永續、且零碳的綠色能源、而石油是不可再生、會耗竭、高排碳的化石能源。這個本質上的不同會造

成這兩者地質能源在零碳的未來上會有不同的命運。台灣身處於能源轉型及追求淨零碳排的時代，由目前的高度依賴石油天然氣及煤等化石燃料能，將逐漸轉變為高度的使用，甚至是要 100% 使用，像地熱這種的可再生能源。在這個過程中需要有根本性的觀念轉變。

對使用化石燃料能來說，台灣確實是能源貧乏國家，能源進口依存度高達 98%，這確實是現況。但目前台灣已經走上能源轉型，未來對使用可再生能源來說，台灣絕對會變成能源大國。一個台灣自己有、而且在未來也需要的「零碳、自主、再生」能源，沒有理由不做極大的開發。在這樣的情境下，政府的角色極其重要，而台灣地熱能源的開發就是檢驗政府對於自己是否認定我們是能源大國這一個根本性觀念建立的最好證明。

* 通訊作者，bzhsieh@mail.ncku.edu.tw

什麼是地熱能 (Geothermal energy) ?

地熱是一種可再生能源，是一種來自於您我腳底下地層內的熱能，我們稱它是一種地球地質能源。基本上，地熱是在腳下地層中所能夠發現的所有熱能。這個熱能儲存於地層的岩石中、以及地層孔隙（或裂隙）內的流體（熱水或蒸氣）之中。

地熱也是一種潔淨能源，它不受天氣影響而具有穩定供應特性，所以地熱不是一種間歇性的再生能源；它自帶儲能系統而具有成為基載能源的特性，因為地球內部就是一個自然且巨大的儲能裝置；它也可以靈活的開/關而具有可調控特性，使得地熱能源可以良好的與其他電力能源做搭配使用。地熱也可以同時有電應用及熱應用，可以產出電力或是提供熱能供暖，也可以作為能源儲存使用。

地熱能源開發的獨特之處

地熱能源埋藏於地下地層中，如果在地表沒有明顯的熱徵（例如：高溫溫泉或蒸氣噴口），一般在地表不容易聯想到地熱就藏在腳底下地層深處。所以在開發前需要使用特別的探勘技術來進行地熱資源探查。地熱能源開發的獨特之處之一，就是地熱能源的經濟性開發確認是需要利用深鑽井進行探勘，同時也需要進行儲集層評估以瞭解產能及水質。另一個地熱能源開發的獨特之處是考慮水資源永續循環。透過生產井（開發井）將地熱有效的從地下深處帶到地表後，需要規劃回注井將帶出地熱的水再注回地下去，以達成水資源循環，並讓地熱能源可以永續被使用。

地熱能源開發系統

簡單來說，地熱能源的開發有三大單元系統，分別為取熱系統、發電系統以及回注系統（如圖 1）。在取熱系統來說，目前最有利於進行地熱能源開發的環境是同時在地下地層具備有「熱源、裂隙、流體」的完美組合環境，這一個良好的儲集層環境也稱為傳統水熱型地熱系統。

而在取熱系統中，最重要的工程建設就是地熱生產井。生產井是地下熱能能被帶到地表的必要基礎設施。而通常地熱熱能被帶出的方式，常是隨著地熱水被生產到地上。因此在取熱系統中，水是「載體」，而我們需要的是「熱」。

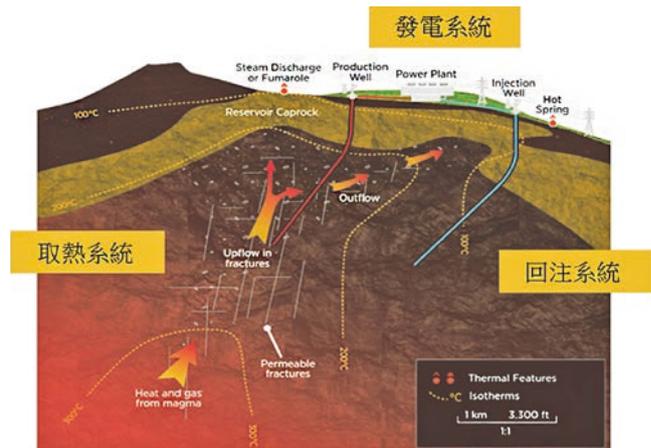


圖 1 地熱能源開發三大單元系統：取熱系統、發電系統、回注系統（修改自 Grant and Bixley^[1]）

我們通常依靠地層中的自然壓力能量讓地熱水自湧出地表。如果遇到地熱水無法自湧的情形時，也可以使用注氣法或是使用井底潛式幫浦將地熱水引出。這兩種方法是將地熱取出至地表的常用的人工提舉方法。

地熱能源開發的第二個系統是發電系統。以前地熱電廠多使用乾蒸氣方式（Dry steam）直接發電，也常使用閃發式（Flash）進行發電，而目前則多應用雙循環式（Binary）作為發電。這一個發電方式的演進的目的就是希望能盡量擴充可用的地熱能源範圍，從以往只針對高溫流體（大約攝氏 200 度以上）到現在擴展到中溫流體（攝氏 100 度以上）就可以進行發電。

地熱能源開發的第三個系統是回注系統。回注系統是維持地熱能源可以永續發展的重要關鍵。地熱水是將地熱能源帶出地表的載體，當熱能在地表經由發電系統達成熱電轉換的工作之後，所生產的地熱水應該要盡量注回地層，以保持地熱儲集層的壓力穩定，避免地層壓力的能量有太多喪失。因此，有良好的回注系統設計是進行儲集層管理的重要方法。若能設計好回注系統，則可以在維持地層壓力的同時，也避免所注回地層的低溫流體流到生產井而影響生產井的產能。

台灣地熱能源開發

台灣很早就進行地熱能源的調查及開發。最早在 1965 年左右，政府即針對大屯火山群（Tatun Volcano Group, TVG）進行地熱資源調查，也鑽鑿數口探勘井確認地熱資源。但因為地熱流體的酸性問題而無法在當時進行開發生產。

1973 年的石油危機之後，台灣進行了更廣域的地熱

能源探查。針對一些高溫的溫泉徵兆區，包括宜蘭、南投、台東等地都進行地熱資源調查。而當時以宜蘭清水選定為第一優先開發場域。所以在 1977 年啟動台灣第一個地熱發電廠計畫：宜蘭清水地熱計畫。1981 年，清水地熱發電廠正式商轉。所產出的高溫流體，由閃發式（Flash）發電裝置進行發電。當初所設計的發電容量是 3 MW，而這也是全世界第 14 個地熱發電廠。電廠運行 12 年之後，因為沒有做好儲集層管理，也因為管線結垢問題影響產能，所以在 1993 年電廠關閉。

在清水電廠的運轉期間，於 1985 年，台灣同時啟動了第二個地熱發電廠計畫：宜蘭土場地熱計畫。1986 年完成土場地熱發電廠建置，這是台灣第一個雙循環式（Binary）地熱發電系統，當初所設置的裝置容量是 0.26 MW（260 kW）。土場地熱計畫是一個成功的地熱發電計畫，1994 年因為計畫期限到期而將地熱電廠關閉。

到了 2006 年，政府重新啟動地熱資源探查及開發計畫。首先是清水地熱的重啟計畫，工研院與能源局在清水地熱場域進行修井與新鑽井，並進行有機朗肯循環（ORC）發電系統開發與測試，在 2018 年建置了 300 kW ORC 發電系統，作為地熱示範電廠。政府也針對大屯火山群（TVG）再度進行地熱資源調查評估，進行地球物理調查、建立地熱概念模型、也進行一口探勘井鑽鑿。能源局也規劃並公布了大屯山區域的地熱潛力開發區（T1-T5）以刺激業者投入進行地熱資源開發。

到了 2021 年清水地熱電廠透過宜蘭縣政府的 BOT 案招標方式而正式商轉。目前的清水地熱電廠裝置容量是 4.2 MW，採用 ORC 系統進行發電，是目前台灣正式商轉的 MW 等級的地熱電廠。除了宜蘭之外，台東金崙也有 0.5 MW 的地熱商轉電廠正式上線。在今年（2023 年）台電公司的宜蘭仁澤 0.84 MW 地熱電廠、金山四磺子坪 1 MW 地熱電廠，明年（2024 年）台灣中油公司的宜蘭土場地熱電廠都陸續商轉為台灣提供地熱電力。

地熱創新技術展望

台灣已經開始有地熱發電的實績，開發案場也逐一出現，國家單位（例如地調所）也投入更多的資源進行地熱資源調查，這些都主要著重於傳統水熱型地熱環境內。台灣傳統水熱型的地熱開發量經評估約在 1 GW 之下，到今年（2023 年）止，只有開出大約 7 MW 左右的裝置容量。而在政府的目標中，在 2025 年可能只達到 20 MW，到 2030 年也可能達成最低 56 MW 或最高

192 MW 的開發量。地熱能源對台灣的綠能及淨零未來來說是一項硬需求，因此需要盡力尋求技術突破，努力開發出台灣地下的地熱資源。

我們在期待台灣地熱發電的發展時，也需要展望技術未來。地熱的開發未來需要的是創新技術，而我們可以期待的技術發展可歸納為四個層面，分別是：(1) 增進熱電轉換效率、(2) 增強熱液產量、(3) 找到更高溫的儲集層、以及 (4) 找到更多量的地下可用熱。這些可以由地熱開發的發電願景以及地熱開發的取熱願景來看。

在地熱開發的發電願景技術中，地熱電廠一開始使用乾蒸氣（Dry steam）直接發電，之後使用閃蒸（Flash）型式發電，目前多應用的是雙循環式（Binary）發電。為了更求效率提升，現在也有複合式（Combined-cycle）發電及混合式（Hybrid）發電，希望能在取出同樣的熱能條件下，可以透過更高的熱電轉換效率而產出更多的電力。

而在地熱開發的取熱願景技術中，主要都是要解決傳統水熱型地熱的難以標準化及擴展化的挑戰問題，所以目前研發出多種不同的地熱系統技術。傳統水熱型地熱系統備有「熱源 / 裂隙 / 流體」的完美組合，且在地表常有明顯的地熱熱徵（例如：溫泉或是高溫噴氣）可以讓我們知道地下地層中可能具有高壓且高溫的地熱流體。也因此，傳統水熱型地熱常常是高品質的地熱資源。但傳統水熱型地熱的挑戰問題是目前大型又好發現的地熱田已經都開發了，而且雖然透過地表熱徵可以輕易的發現它，但探勘新礦區的花費及風險還是高。傳統水熱型地熱也常屬於區域限定，只有在特定的地方才有。因此，難以標準化及擴展化形成了目前傳統水熱型地熱的挑戰問題。但地熱除了儲存於裂隙流體中之外，真正儲存最多地熱熱能的物體是地層的岩石本體。如果可以有好的工程技術可以將地層岩石的熱用工程方法取出，則可以解決需要豐富的地熱流體才能作為發電的問題。

因此，目前第一個地熱開發的取熱願景技術就是增強型地熱（Enhanced geothermal systems, EGS）（如圖 2）。增強型地熱主要應用於具有岩石熱源但較缺乏裂隙流體的地層（意即，乾熱岩型式）。在這個系統中不是依賴自然的地下流體將地熱熱能帶出，而是利用工程方式（或人工方式）建立一個良好的儲集層流體流動環境，並利用人工注入冷溫流體使之與地層熱岩接觸後造成溫度上升成為熱液，然後再由生產井產出進行發電應用。發電後的尾水熱度降低，重新利用注入井注回地層，創造一個取熱循環。

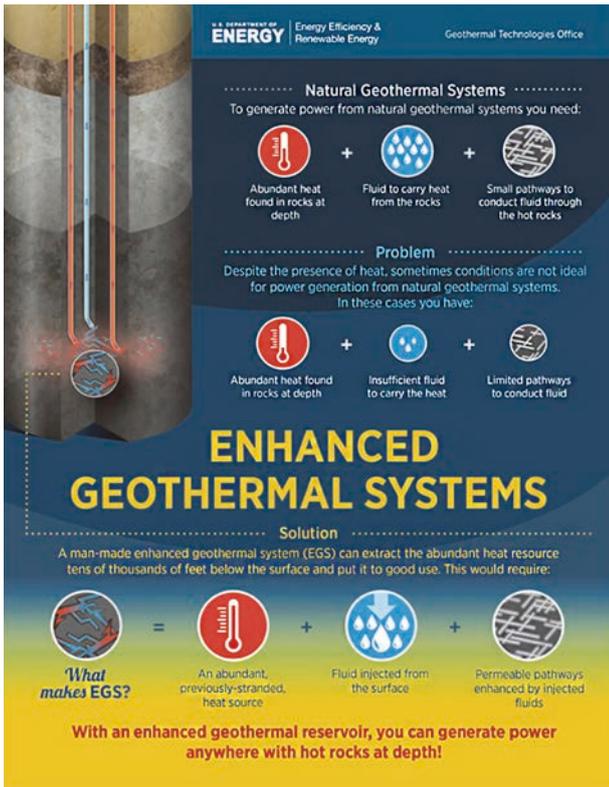


圖 2 增強型地熱 (EGS) (US DOE [2])

理論上，增強型地熱可以應用在世界各處。在市場有綠電需要，加上油氣工業鑽井及注產技術的應用之下，增強型地熱有很好的發展未來性。美國因為有頁岩油氣的工程技術，所以對增強型地熱的技術研發相當積極。目前在美國最有名的增強型地熱系統 (EGS) 計畫即為 FORGE 計畫 [3]。

地熱發電注重的是儲集層的熱度，如果可以找到某一地熱儲集層其地層溫度非常高的話，將有助於提升單井發電產能。因此，第二個地熱開發的取熱願景技術就是超臨界型地熱 (Supercritical geothermal system, SGS)。

當水溫超過 373°C 及壓力超過 220 bars 時，水將形成超臨界態 (Supercritical)。超臨界水的熱焓非常高，因此，若使用超臨界水之生產井進行發電應用，其發電能力將比傳統水熱型地熱的生產井高上數倍。另一個常見的比較案例說明，在一個 400°C 的地熱儲集層中使用 3 口井 (包含生產井與注入井) 將如同在一個 200°C 的增強型地熱 (EGS) 的儲集層中使用 42 口井 (包含所有的生產井與注入井)，由此可見超臨界地熱的單井高產能的潛力 (圖 3)。

超臨界型地熱目前在冰島、紐西蘭、日本等國家都正在進行技術研究，其中，冰島因其獨特的地熱地

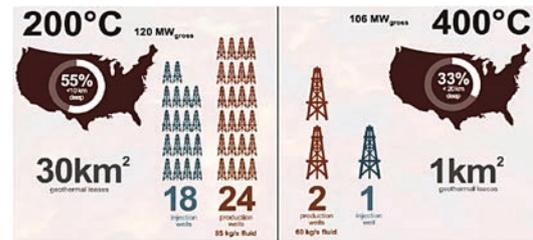


圖 3 超臨界型地熱與增強型地熱的所需井數相比 (US DOE [2])

質優勢，已經進行了超臨界井的鑽井測試。紐西蘭也將超臨界型地熱視為未來該國地熱發展的重要走向。

因為超臨界型地熱的單井高產能的吸引力，也促使一些新創公司投入技術研究。其中最受到注目的是美國的 Quaise 公司 [4]。這一家超臨界型地熱新創公司著重於深鑽井技術，他們目前正研發可以讓鑽井深度達到 10 ~ 20 公里的鑽井設備及技術。一般來說，當井深度達到 10 公里時，溫度已經超過 300°C，更深的地層高溫可以讓注產循環的地熱流體達到超臨界狀態而帶出非常高的單井發電產能。

第三個地熱開發的取熱願景技術是「取熱不取水」的科技，我們稱為先進型地熱系統 (Advanced geothermal systems, AGS)。先進型地熱系統 (AGS) 也可稱為 “closed loop” system (閉迴路系統)。先進型地熱系統 (AGS) 是真正的取熱不取水，它不採地層裡的流體，只採地層的熱。這些採收的熱可以作為熱應用及電應用。先進型地熱系統 (AGS) 與熱泵 (Heat pump) 的技術原理相似，但熱泵 (Heat pump) 較屬於近地表的工作範圍，且其應用多為熱應用，所以先進型地熱系統 (AGS) 與熱泵 (Heat pump) 是以不同類別進行區分。

先進型地熱系統 (AGS) 這一個新穎地熱技術類型也有許多地熱新創公司進行技術研發投入。其中，最有名的公司就是加拿大 Eavor 公司 [5] 所發展的 “Eavor-Loop”。Eavor 第一階段的技術概念設計是 “Eavor-Lite”，這一個示範計畫在加拿大 Alberta 進行試驗 (圖 4)。此試驗獲得成功且吸引了多家公司 (包含石油公司) 的資金投資益注。Eavor 目前在德國及日本都有技術開發的發電計畫正在進行中。

除了 “Eavor-Loop”，還有 “Green-Loop” (GreenFire Energy 公司 [6])，他們進行的是井下熱交換系統的技術研發。另外也有 “HeatRoots” Sage Geosystem 公司 [7]，他們結合單井閉迴路系統及創新的井激勵設計，形成一個複合型的「閉迴路 / 增強型地熱系統」。

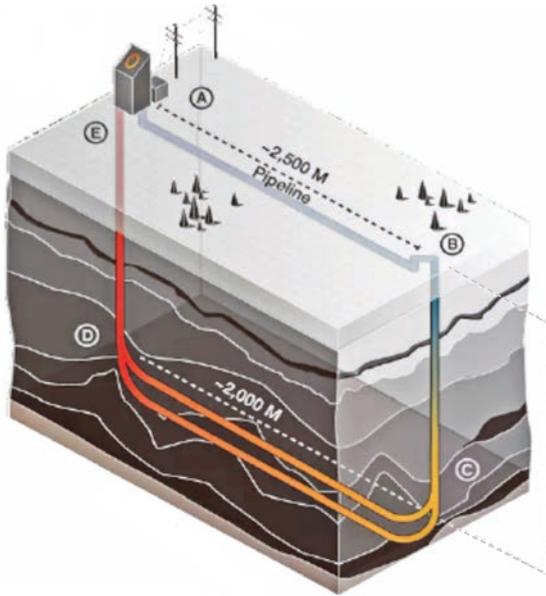


圖 4 加拿大 Eavor 公司之 Eavor-Lite 試驗計畫

第四個地熱開發的取熱技術則是著重在沉積岩地層，這是一個直接應用石油工程開發技術且使用在石油工程熟悉的地質環境（沉積岩）中的地熱能源開發工程。與前面所敘述的增強型與先進型地熱開發系統較適用的地質環境不同，前述的地熱創新技術主要是針對乾熱岩體系或是裂隙體系的火成岩或變質岩地層進行地熱開發，而這一個完全使用石油工程開發技術進行地熱能源開發的方法則是針對具有廣泛孔隙空間及分布特性的沉積岩進行地熱開發。

沉積岩地熱儲集層的溫度梯度，一般來說在 $3 \sim 4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 之間，台灣也有一些具有較高溫 $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的地區，但老實來說，與一般所想像的火成岩或變質岩的 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 高地溫梯度環境來說，沉積岩地熱儲集層的溫度不會是一開始進行地熱發展時所想要追逐的選項。但地熱發電的真正意涵是要先將大量的地下熱量拿到（生產到）地表來才有機會進行熱電轉換並獲得電力。沉積岩儲集層的溫度雖然不是最高，但沉積岩環境是一種孔隙連通環境，沉積岩的面積區域也相當廣泛，這導致可以從沉積岩地層中採出比火成岩或變質岩地層更多的流體。溫度不是最佳的條件但可以用最佳的產熱水率來彌補，在這種因素組合之下，從沉積岩地熱儲集層中可以採出的地下熱量總量也可以很高。

國際中進行沉積岩地熱開發的值得關注的公司就是加拿大的 DEEP 計畫（DEEP Earth Energy Production Corp.^[8]），在今年（2023 年）9 月該計畫正式通過第三方技術審查，確認其第一期利用 2 口生產井及 2 口注

入井可達成 5 MW 的發電能力，以及第二期可以擴大到 25 MW 的發電能力。DEEP 計畫的最終目標是要開發出 180 MW 的地熱裝置容量電力。

對台灣來說，沉積岩廣泛的分布於台灣西部、此區域的電網建設充足、也因著孔隙空間廣泛分布的特性，可被評估的沉積岩區域比東部裂隙帶區域更多。在沉積岩區域進行地熱開發，可以達到規模化及可擴展化。若能善用石油工程的鑽井及開採技術，尤其是水平井鑽井技術引入更可以增加台灣更多地熱能源開發的機會。

結語

台灣需要再生能源，更需要基載電力，地熱能源將是這個需求的最重要解方。而目前，世界上的地熱發電技術與取熱技術一直在進行技術研發創新，其目標就是利用各種工程方式，有效的從地層岩石中取出更多的熱能，並且轉換為電能提供為無碳的再生能源電力。若我們著眼於技術的研發，就可以大量產出台灣地下的地熱能以轉換為電力供應。

台灣地下的地熱能源蘊藏豐富無庸置疑，但要進行地熱能源「開發」之前，仍需要經過「探勘」過程。探勘即帶有不確定性，在台灣地熱發展的萌芽階段，若政府沒有直接幫忙有心投入於地熱發展的產業界做好地熱探勘，則可以想像的是地熱發展速度將非常緩慢。讓地熱探勘的風險性消失，後續的地熱開發工作就可以加速進行。

除了探勘風險性的層面之外，另一個地熱開發的商業發展核心就是「可擴展性（Scalability）」。如何應用技術讓台灣各處的地下地熱都有機會被開發應用，若政府及企業可以從可擴展性的這一個層面思考，台灣的地熱能源發展會更有未來。

參考文獻

1. Grant, M. and Bixley, P. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press. 378pp.
2. US DOE (2023). <https://www.energy.gov/eere/forge/enhanced-geothermal-systems>
3. FORGE (2023). <https://www.energy.gov/eere/forge/forge-home>
4. Quaise (2023). <https://www.quoise.energy/>
5. Eavor (2023). <https://www.eavor.com/>
6. GreenFire Energy (2023). <https://www.greenfireenergy.com/>
7. Sage Geosystem (2023). <https://www.sagegeosystems.com/>
8. DEEP Earth Energy Production Corp. (2023). <https://deepcorp.ca/>



台灣 雲林地區 地層下陷

磁環分層 監測井 彎曲度檢測

黃鈺祐／國立成功大學資源工程學系 研究生

吳泓昱*／國立成功大學資源工程學系 助理教授

林政偉／國立成功大學水工試驗所水資源環境組 副組長

陳芳瓊／經濟部水利署水文技術組第三科 科長

台灣地區因經濟的迅速起飛，導致農業與工業等對於水資源的需求大增，為應對該用水的需求，地下水資源成為主要的水源之一。當長期的抽取地下水時，會導致地下水位不斷下降，若遇到降雨無法及時補充時，地下岩層和土壤會有明顯的下陷現象。為監測地層下陷的情況，經濟部水利署在彰化、雲林等多個縣市設置地層下陷監測井，藉由觀測磁環的深度位置去推估地層的壓縮量。而當我們以磁環感測器量測磁環位置時，皆假設地層下陷監測井為垂直井記錄磁環位置與估算地層壓縮量，卻忽略了井孔可能因人為鑿井、地層的側向壓力等種種因素，導致磁環位置與原本假設的垂直井位置有差異，因此導致錯估地層之壓縮量。故本研究採用高解析度超音波攝影進行施測，透過儀器內的三軸磁力計、三軸加速度計來計算井的方位角（Azimuth）、傾角（Tilt），並利用所量測得到之深度、方位角、傾角等資訊，以三角函數解算真實井下的走向，藉此獲取真實的磁環位置，且透過高解析度超音波攝影所紀錄之影像可以推估地層下陷監測井地下水位之深度位置。後續可依定期量測之結果建立資料庫，而該資料庫除包含井的真實垂深、井孔走向、井壁影像、方位角、傾角與磁環真實位置，並可依蒐集到的資訊來定義一套井孔的健康度標準，依該資訊作為是否淘汰該井之依據。

關鍵詞：地層下陷監測井、地下水、地球物理井測

前言

隨著台灣地區經濟發展的蓬勃進展，農業用水需求與極端氣候變遷的影響，對於水資源的需求已逐漸攀升。為了應對此情勢，地下水成為當地主要的取水來源之一。然而，長期超抽地下水導致地下水位不斷下降，當降雨無法及時補充時，地下岩層和土壤就會出現明顯的下陷現象。這種情況在全台皆有相關的觀察紀錄，其中以雲林地區特別嚴重^[1]，不但對建築物、道路和農田造成損害，也可能引發其他問題，如地下

水鹽水入侵和土壤沉降等。為了掌握彰化及雲林地區地層下陷的情形，水利署已於彰雲地區建置完成 36 口磁環分層式地層下陷監測井（以下簡稱地陷井），可以透過定期測量不同深度的磁環獲得其下陷資訊。以往都是透過磁環感測器（磁簧開關型、磁力計型）進行磁環深度量測，然而，對於井下的走向、傾角等真實狀況（以下簡稱井況）的分析資料一直付之闕如。因此在 111 年度水利署的地陷監測井現地井測計畫中，新增使用高解析度超音波攝影進行施測，透過施測的結果可以得到地下水位深度、井的方位角、傾角與磁環深度等資訊。111 年度計畫之結果顯示，位於客厝國小

* 通訊作者，sonata.wu@gmail.com

之地陷井量測結果有將近 3° 的傾角，其井底東西向偏差值為 14.6 公尺（西），南北向則為 5.4 公尺（南），仁和國小、土庫國中及宜梧國中之傾角皆小於 1°，因此其井底偏差值東西向皆在 2 公尺內，南北向偏差在 4 公尺內^[2]。假設建置地陷井時已發生偏斜，則可能高估監測井深度範圍（約 300 公尺）之下陷量；若因土層側向應力引致逐年之變化，則可能低估監測井深度範圍之下陷量。因此本研究望透過井下測量技術掌握真實的井下狀況與磁環位置，建立起地陷井之井孔狀況資料庫，提供磁環量測地層下陷之參考基準。

雲林區地質概述

雲林縣之地質構造（圖 1）主要為中新世至更新世的台地礫石層及沖積層^[3]，其屬臺灣西部麓山帶地質區，由第三紀碎岩層組成，主要岩石是砂岩和頁岩的互層，局部夾有石灰岩和凝灰岩的凸鏡體或薄層所組成。縣境內沖積層絕大部分屬現代沖積層，主要由黏土、粉砂、砂和礫石組成，廣泛地覆蓋在平原與盆地區內。而雲林地區位於濁水溪沖積扇南端，其扇頂地區以礫石及沖積砂土為主、扇尾則以細砂及泥居多，其形成過程為河流夾帶上游岩石碎屑，由扇頂至扇尾沉積，在搬運過程中較重顆粒下沉，較輕顆粒則沉積於表面接續河水方向移動。地層依照該方式逐漸向上堆積形成粗顆粒與細顆粒的互層狀態^[4]。

可量測地陷監測井量測導管彎曲度之檢測技術及校正方法

導管彎曲度之檢測技術

井下測量（Borehole Logging）一直以來都在石油工業和地球物理探勘中被廣泛應用，其用來評估井孔狀態和井孔穩定性，主要優勢在於提供地表下井孔和地層物理參數的高解析度（公分級別）資訊。不論井孔是否使用套管，在其尺寸大於儀器直徑的情況下，皆可獲取連續性之井測資料。井下環孔攝影是獲得連續的井孔影像和方位資訊的最佳工具，尤其是高解析度超聲波環孔攝影（High Resolution Acoustic Televiewer），可適用各種情況下的井下測量，包括混濁的鑽井泥漿或地下水，都可以獲得良好的井況資訊。除了超聲波影像之外，井孔或井下導管的方位和傾角也是校正井孔影像的重要資訊，幫助了解井孔當前狀況和走向（圖 2）。而美國地質調查所（USGS）已使用此技術校正地下水井中水位的變化多年，其利用井測工具量測井孔偏差，有效修正不同地點及年代井位之差異性，確保其水位監測計畫的準確性^[6]。

高解析度超音波攝影可透過記錄聲波的傳輸時間（Travel Time）與振幅（Amplitude）生成連續影像，且藉由三軸磁力計方位角定向，能夠得到連續且定向的 360° 井壁視圖，從井孔影像中可以辨別地層特徵、關係和方位角及應力方向（圖 3）。

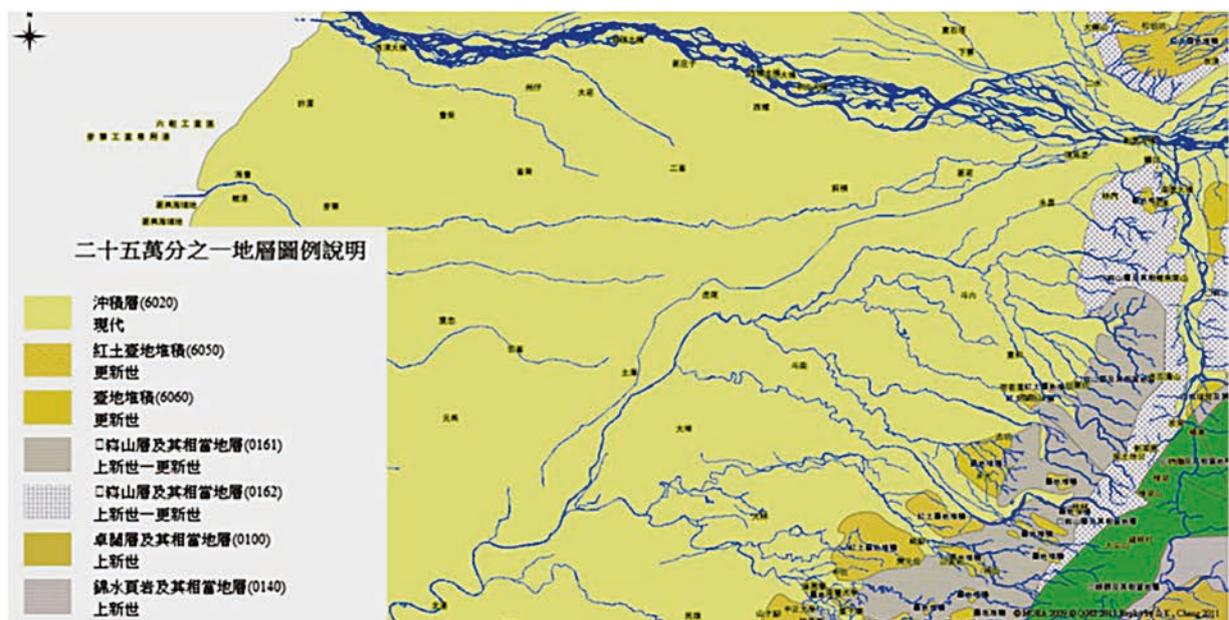


圖 1 雲林地區濁水溪沖積扇二十五萬分之一地質圖^[5]

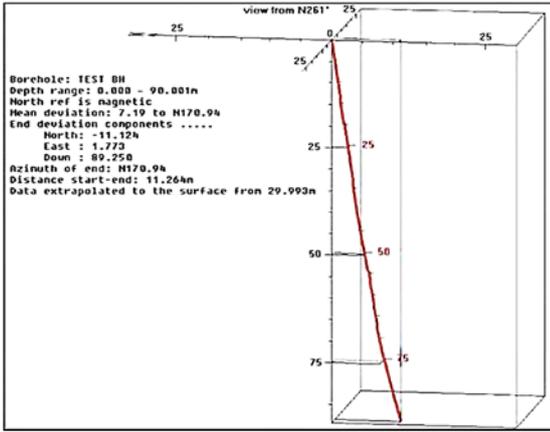


圖 2 聲波造影演算之井孔偏移與井向 [7]

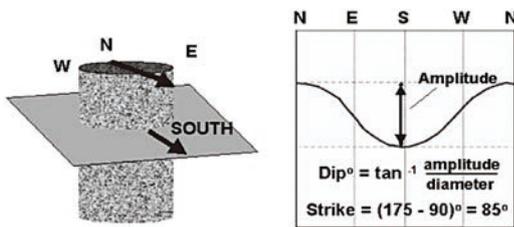


圖 3 井內定向 360 度圖像和方位角和傾角計算 (摘自 Williams, J.H. and Johnson, C. D. [8])

高解析度超音波攝影內設置 0.5 ~ 1.5 MHz 的訊號傳感器、三軸磁力計及三軸加速度計，訊號傳感器須透過泥漿或地下水等介質傳遞聲波，透過紀錄聲波的傳輸時間 (Travel Time) 及振幅 (Amplitude)，其收回的聲波信號會被記錄成井下照片的圖像，時差數據可用於生成高解析度之影像 (圖 4)，而方位角 (Azimuth) 與傾角 (Tilt) 可透過三軸磁力計及三軸加速度計紀錄之三分量差值推導出。

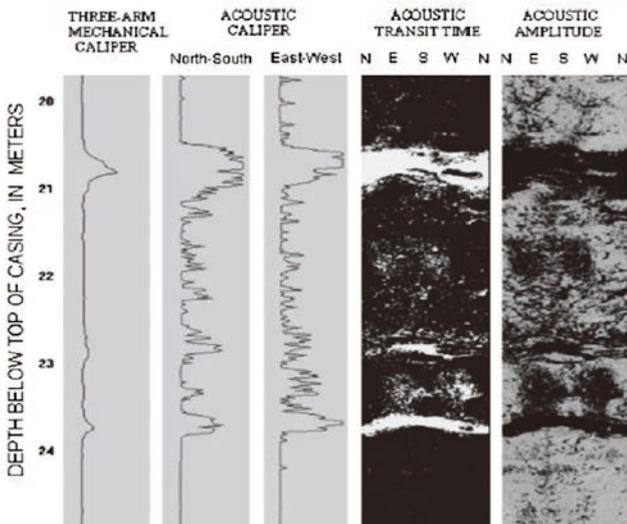


圖 4 150 毫米直徑鑽孔中的三臂機械和聲學測井儀井測以及聲波時差和振幅電視圖像 (摘自 Williams and Johnson [8])

井偏井斜量測原理

三軸加速度計與三軸磁力計被運用於解算井位之井偏井斜，其基本原理是透過儀器主體坐標系與地理坐標系之間的角度差，將儀器記錄的加速度量值及磁通量值進行坐標系統的轉換，進而反推出井偏井斜之角度 [9,10]。\$X_b/Y_b/Z_b\$ 為儀器主體坐標系統，分別指向儀器徑向方向、切向方向及儀器軸線方向，\$E/N/U\$ 則為地理坐標系統，分別指向東方 (\$E\$)、北方 (\$N\$) 及向上方向 (\$U\$)。產生三種平面：水平面 (\$H\$)、鑽井橫切面 (\$P\$) 及與井孔變形長軸一致的井孔彎曲面 (\$V\$)。儀器主軸方向 (\$Z_b\$) 與鉛垂方向之夾角即為井斜角 (\$\delta\$)，而井孔彎曲面與北方之夾角則為井偏角 (\$\theta\$) 如圖 5 所示。透過井斜不同導致重力 (\$G\$) 會沿井軸及其垂向的分量發生變化，在儀器主體坐標系統上就會記錄有三個加速度分量 (\$G_x, G_y, G_z\$)，即可利用此分量計算出井斜角 \$\delta\$，可表示為式 (1)。

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{G_x^2 + G_y^2}}{G_z} \quad (1)$$

式(1)中 \$\delta\$ 為井斜角，\$G_x, G_y, G_z\$ 分別代表加速度計分別於 \$x, y, z\$ 軸向之讀數。

藉由加速度分量 (\$G_x, G_y\$)，即可算出重力工具面角 \$T\$，如式(2)所示。

$$T = -\tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (2)$$

磁力計所紀錄的磁通量 (\$M\$) 在地理坐標系統中可以用 \$M_E/M_N/M_U\$ 表示但在儀器主體坐標系統中則標示為 \$M_x/M_y/M_z\$ 如式(3)所表示，兩不同座標系統間可藉由一旋轉矩陣 \$C\$ (式(4)) 進行轉換。

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} M_E \\ M_N \\ M_U \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} 0 \\ M \cos \phi \\ M \sin \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中 \$M_x/M_y/M_z\$ 為儀器在主體座標中 \$x, y, z\$ 軸之讀數，\$M_x/M_y/M_z\$ 為地理坐標系統中三軸之讀數，\$\phi\$ 為所在地之緯度角度，兩不同座標系統間可藉由一旋轉矩陣 \$C\$ 進行轉換，如式(4)所表示。

$$C = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \delta \cos T & \sin \theta \cos \delta \cos T + \cos \theta \sin T & -\sin \delta \cos T \\ -\cos \theta \cos \delta \sin T & -\sin \theta \cos \delta \sin T + \cos \theta \cos T & \sin \delta \sin T \\ \cos \theta \sin \delta & \sin \theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中 \$T\$ 為重力工具面角，\$\delta\$ 為井斜角，\$\theta\$ 為井偏角，\$\theta\$ 可藉由式(5)求得。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_z - G_z Q}{M_x G_y - M_y G_x}$$

其中 $Q = M_x \times G_x + M_y \times G_y + M_z \times G_z$ (5)

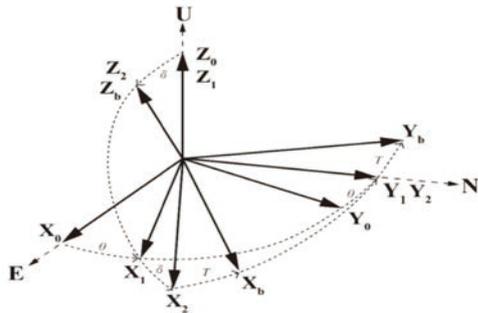


圖 5 座標轉換過程示意圖 (修改自 Ren et al. [9])

研究成果

本研究目前針對彰化及雲林地區皆有進行量測作業 (圖 6)，因彰化地區地層下陷監測井 (以下簡稱地陷井) 施測當時可下放深度較淺，故本文中僅以雲林地區之地陷井做討論。雲林地區一共測試 4 口地陷井，分別位於大埤鄉仁和國小、元長鄉客厝國小、土庫鎮土庫國中及口湖鄉宜梧國中。除宜梧中外都已於不同時間點完成重複施測，以確認其準確度與可信度。

磁環真實位置

探針通過地陷井內設置的磁環位置時會使三軸磁力計及記錄之影像產生異常，該異常部分通過三軸磁力計做為主要判斷磁環位置之依據，其影像為輔助判斷如圖 7 所示。透過判斷出來之磁環位置進行真實垂深校正，仁和國小為 110 年設站因監測期距不長故無列入修正表內，客厝國小、土庫國中、宜梧國中 3 口井累積下陷井偏井斜修正後如表 1 所示。以客厝國小為例，民國 92 年 10 月量測第 20 個磁環位置為 297.175 公尺，而民國 110 年量測同一磁環位置為 296.563 公尺，故客厝國小 0 ~ 297 公尺累積的下陷為 0.612 公尺。若設站時監測井已發生偏斜，則可能高估監測井深度範圍 (約 300 公尺) 之下陷量，以設站時監測井已發生偏斜進行分析顯示，監測期間現地量測與實際垂向累積量之差異不大。但若井偏斜因土層之側向應力導致逐年的變化，則可能低估監測井深度範圍之下陷量，以設站時監測井未發生偏斜進行分析顯示，客厝國小地陷監測井之現地量測與實際垂向累積量差異可能達 40 公分 (297.2 公尺深度範圍)。

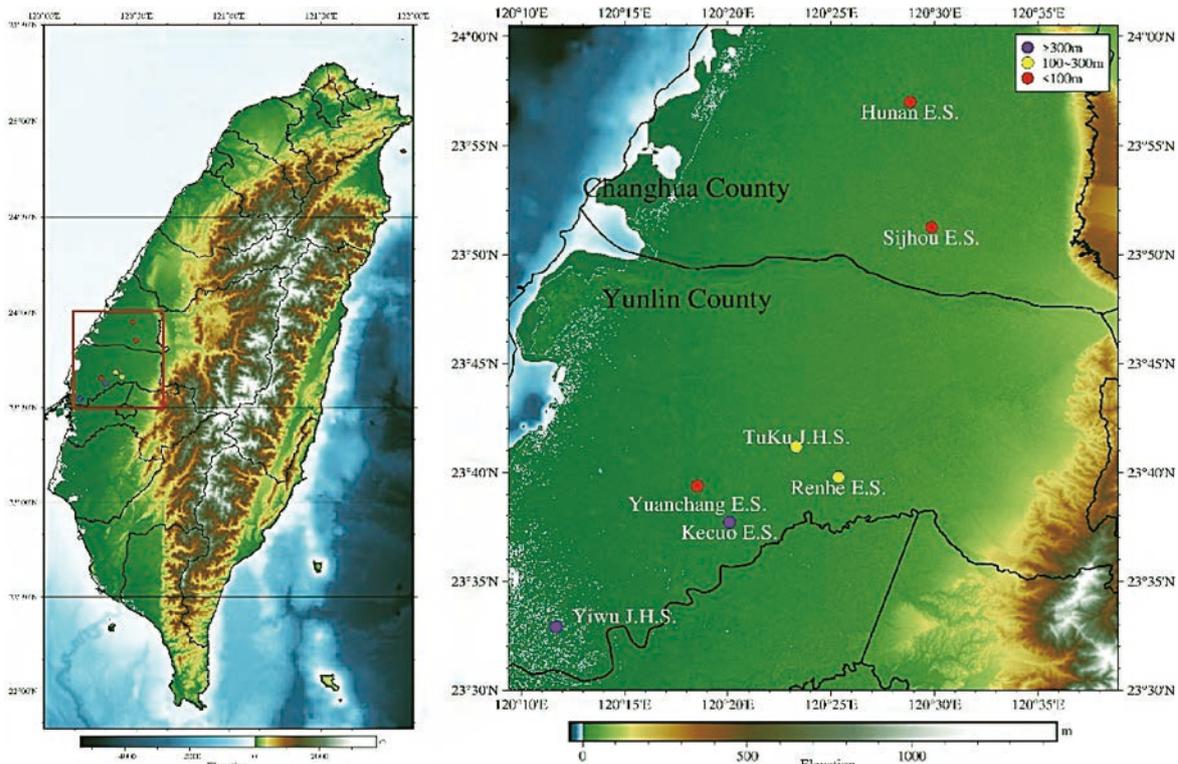


圖 6 施測井位圖

(圖中 E.S. 為國小 Elementary School 縮寫，J.H.S. 為國中 Junior High School 縮寫)

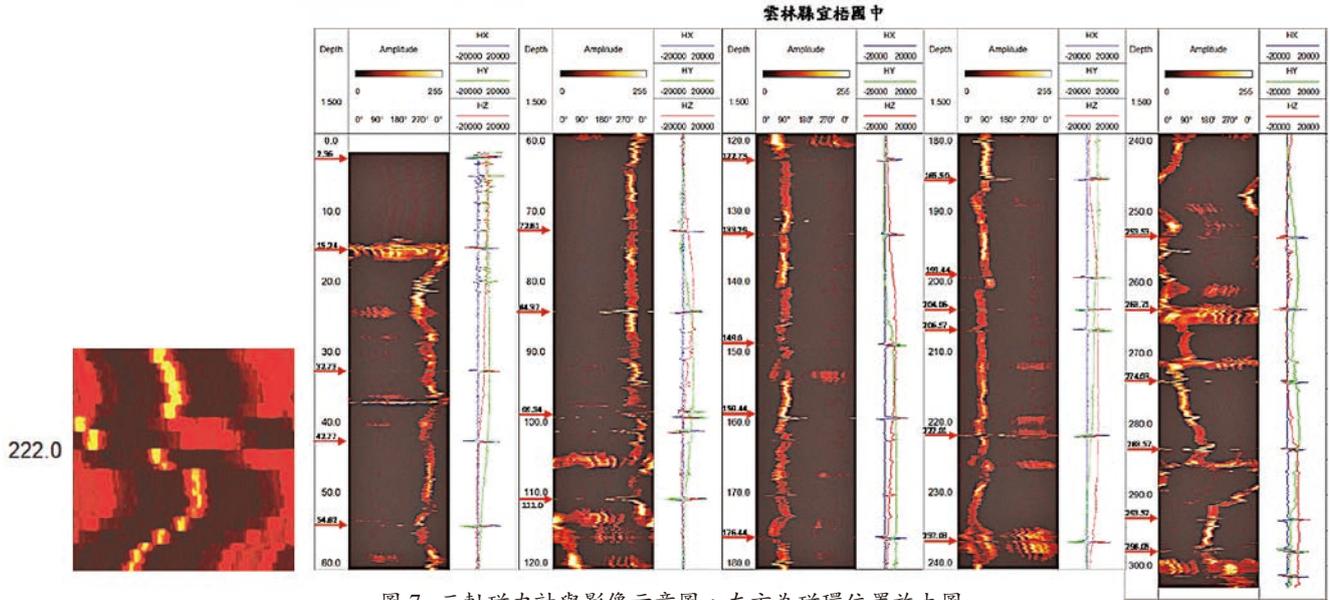


圖 7 三軸磁力計與影像示意圖，左方為磁環位置放大圖

表 1 地陷井累積下陷結果修正

監測井	量測期距	對應井測深度之磁環編號 (對應深度)	現地量測垂向累積下陷 (公分)	修正後垂向累積下陷 (公分)	
				設站已傾斜	設站未傾斜
客厝	92~110 年	No. 20 (297.2 公尺)	61.20	61.12	101.34
土庫	92~110 年	No. 19 (242.0 公尺)	40.70	40.69	43.99
宜梧	98~110 年	No. 27 (298.6 公尺)	17.80	17.80	17.83

彎曲度檢測

於不同時間點施測後，量測之方位角、傾角與量測路徑進行解算可得到該井孔之真實垂深與真實井況，依照解算出之結果繪製出三維走向圖如圖 8 所示，將不同時間所測得之結果整理，並以井底的水平位移量與垂直測深計算求得井頂傾角數值，客厝國小將有將近 3° 的傾角之外，其餘 3 口地陷井仁和國小、土庫國中及宜梧國中之井底傾角皆小於 1°，以一般鑽井工程角度來看，井頂傾角小於 5° 皆可視為垂直井 [11]。

地表下地下水位深度

高解析度超音波攝影需透過泥漿、地下水等介質傳遞聲波，並記錄時差數據利用此數據生成井下的影像，反之無介質則無法生成影像，如圖 7 中在約 14 公尺處未接觸到介質前其振幅較低與 14 公尺之後有接觸地下水之振幅有明顯差異，因此我們可以藉由影像開始紀錄之深度為地表下地下水位深度如表 2 所示。

表 2 地陷井之地表地下水位深度

井位	時間	地表下地下水位之深度 (公尺)
客厝國小	2022/08/17	16.999
土庫國中	2022/08/18	17.599
仁和國小	2022/08/19	16.935
宜梧國中	2022/10/28	13.945

討論

美國地質調查所 (USGS) 繪製水位分布圖時透過磁性和陀螺儀校正地下水位，並表明透過磁性與陀螺儀校正後的地下水位即使相隔多年，也具有良好的一致性 [6]。當初建立地陷井時未量測井偏井斜作為後續參考依據，現今僅能透過高解析度超音波攝影定期量測獲取井偏井斜資訊。若僅依靠磁環感測器量測地陷井內磁環位置作為地層下陷概況之數據進行分析，需注意可能低估該地點之地層下陷量，以井偏斜程度較嚴重的客厝國小與井偏斜程度較輕微的宜梧國中做比較，宜梧國中

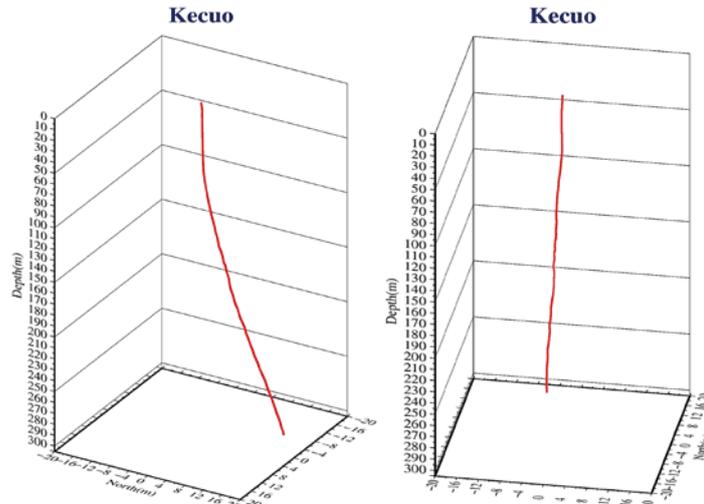


圖 8 雲林縣客厝國小第三次施測地陷監測井之磁環位置與井偏井斜狀況

井頂傾角約 0.082° 、客厝國小井頂傾角約 2.992° ，兩口井透過量測獲得的井偏井斜校正垂向累積下陷量前後差距，可以發現客厝國中受井偏斜的影響校正前後差距約 40 公分，反之宜梧國中差距僅 0.03 公分，從兩口井比較中可以發現到井偏井斜量測的重要性。

結論

透過高解析度超音波攝影內建置的三軸磁力計與三軸加速度計可以獲得高解析度、連續性的井下測量資料確認磁環位置深度，同時藉由影像校正其確切位置，精度可達公分等級，並可透過方位角與傾角將磁環深度校正至真實垂直深度。該技術唯擔憂處為井管撓曲至儀器無法下放至井底，客厝國小量測出傾角度數為 4 口井最大卻依然可下放至井底 300 公尺，反之土庫國中卻僅下放至 243 公尺處，推估此現象為客厝國小傾角變化為緩慢升高，而土庫國中傾角在井內某處有巨大的變化導致無法下放獲取資料。該技術可以準確地得到井下資訊，幫助掌握真實井下資訊，包括井的方位角、傾角、真實垂深等，若進行定期量測建立一資料庫包含該井所量測到之資訊，以此提供資訊判斷是否淘汰地層下陷監測井之依據，磁環方面根據量測所得之資訊，可以掌握真實垂直向的磁環深度，避免低估地層下陷之壓縮量。而地陷井之地下水位深度僅可以作為地下水位面參考，因其與地下水觀測井在設站時目的不同，故鑿井時開篩與否會影響到井內的水位高度，若以井測獲得之地下水位深度計算地下水高程將有一定程度之誤差，故僅可供參考使用。

參考文獻

1. 經濟部水利署網站 (2023), https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/Home/Index
2. 經濟部水利署 (2022), 111 年度彰雲地層下陷監測井井況評估及量測精度探討。
3. 經濟部中央地質調查所網站 (2023), <https://gis3.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/t3/index1.cfm>。
4. 蔣榮、吳建宏、林宏明 (2017), 「雲林地區沖積層大深度壓密沉陷行為之研究」, 中華防災學刊, 9(2), 147-153.
5. 吳尹聿 (2012), 雲林地區濁水溪沖積扇地下水補注地質敏感區地電阻勘查, 碩士論文, 國立臺灣海洋大學, 臺灣博碩士論文知識加值系統, <https://hdl.handle.net/11296/ax5a32>。
6. Twining, B.V. (2016). *Borehole Deviation and Correction Factor Data for Selected Wells in the Eastern Snake River Plain Aquifer at and near the Idaho*. National Laboratory, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2016-5163 (DOE/ID-22241), 23pp., plus appendixes, <https://doi.org/10.3133/sir20165163>.
7. Siddans, A.W.B. (2002). "Structural Geology Using Borehole-wall Imagery: Case Study of an OPTV Log in Flagstones, North Scotland," *First Break*. 20, 623-629.
8. Williams, J.H. and Johnson, C.D. (2004). "Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies." *Journal of Applied Geophysics*, 55(1), 151-159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.06.009>
9. Ren Y, Wang Y, Wang M, Wu S, and Wei B. (2014). "A measuring system for well logging attitude and a method of sensor calibration." *Sensors*. 14(5), 9256-9270. <https://doi.org/10.3390/s140509256>
10. Zhang, W.X., Chen, W.X., Di, Q.Y., Sun, Y.T., Yang, Y.Y., and Zheng, J. (2017). "An investigation of the extraction method of gravitational acceleration signal for at-bit dynamic inclination measurement." *Chinese J. Geophys.* 60(11), 4174-4183, (in Chinese). doi: 10.6038/cjg20171105.
11. Farah, F.O. (2013). "Directional well design, trajectory and survey calculations, with a case study in Fiale, Asal rift, Djibouti." *Geothermal Training Programme*, 27, 27-34. 



地質資源 開發分析評估與 現地應力

潘啟平* / 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

陳麒任 / 國家原子能科技研究院 副研究員

董家鈞 / 國立中央大學應用地質研究所 教授

柳志錫 / 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 技術副組長

地質資源是指來自地殼的各種天然資源（固體、氣體、液體元素）與空間資源^[1]，天然資源如岩石、金屬、寶石、石油、天然氣、地熱能或地下水等，空間資源如儲氣窖、二氧化碳地質封存（geologic carbon sequestration）、核廢料最終處置（nuclear waste final disposal）或壓縮空氣儲能等。隨著全球人口持續增加與工業技術發展，人類對於空間與天然資源的開發、利用的需求逐步增加。

隨著人類活動與化石能源開發與應用，大量溫室氣體排放至大氣中，造成全球暖化增溫、氣候變遷與海平面上升等嚴重影響。有鑑於此，各國陸續提出「2050 淨零排放」的宣示與行動。使用綠能（如地熱能）、減少二氧化碳排放量、趨緩全球暖化和氣候變遷已是全球所應負之重要責任。2050 淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標。另一方面，核廢料選址與安全性問題受社會大眾關注。核廢料是使用核能後衍生的必然產物，在我國努力朝向非核家園政策的同時，如何將其進行完善的處置亦是一項重要課題。

「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」所提出之 12 項戰略中，其中包含以地熱為發展重點之「前瞻能源」以及「碳捕捉利用及封存」。而無論是能增加臺灣地熱產能之增強型地熱系統（Enhanced Geothermal System, EGS）抑或是被國際能源署（International Energy Agency, IEA）列為重要減碳項目的二氧化碳地質封存，皆涉及岩盤受高壓灌注後之穩定性問題。核廢料最終處置之場址，需確保不會對生態圈造成輻射影響，與上述兩項資源工程，均涉及岩盤中流體移棲以及傳輸行為。而現地應力，影響岩盤水力-力學特性，控制土木與資源工程規劃、設計與施工，也是安全評估的關鍵。本篇文章將藉由說明現地應力對地質資源開發的影響、介紹現地應力量測方法與實施策略、及國內外之資源工程量測現地應力之案例與應用，探討現地應力對地質資源開發之重要性。

關鍵詞：現地應力、地熱、碳封存、水力-力學特性

現地應力對地質資源開發的影響

「現地應力」用於描述地下岩體的現今應力狀態，應力張量為二階張量，包含 9 個分量，其中共計 6 個為獨立分量。現地應力為地層荷重、板塊運動、地溫梯度、地表剝蝕作用與人為因素的綜合結果，可影響岩盤（岩石與裂隙）之強度、變形性與滲透性等水力-力學特性及行為。此外，地質資源開發無可避免地將

擾動地下岩體，並進一步改變現地應力，如何評估現地應力與可能改變對地質資源工程規劃、設計、施工與營運管理之影響至關重要。這個章節我們將會藉由二氧化碳地質封存、增強型地熱系統與核廢料處置的角度，說明現地應力對於地質資源開發的重要性。

二氧化碳地質封存

二氧化碳地質封存是利用岩石圈的儲集層（reservoir）孔隙儲存二氧化碳，以蓋層（caprock）

* 通訊作者，ChiPingPan@itri.org.tw

封閉，目前全球已有 30 個以上商轉場址。適合作為二氧化碳地質封存的地質環境需具備許多條件，但不外乎都是必須使二氧化碳能安全且穩定地待在可控範圍內。而其中現地應力對與二氧化碳封存的影响主要在於以下兩點：

1. 二氧化碳洩漏的可能性 [2,3]；
2. 造成誘發地震的可能性 [2,4]。

關於洩漏問題，二氧化碳地質封存的在初步選址時應盡可能避開斷層或自然裂隙，而當有弱面存在時必須證明其具有很低的滲透性或為關閉的狀態 [5]。受現地應力控制的洩漏途徑如圖 1 所示，其中包含：

1. 不規則井壁 (enlarged borehole) 條件下的固井 (cement) 不良施作：在鑽井期間，岩體的剪力降伏可能會造成鑽鑿之不規則井壁。若在蓋岩中產生此現象，可能會在套管與井壁間形成洩漏途徑。此現象與現地應力大小、岩石抗壓強度及泥漿密度有直接關係 [6]。因此，確定現地應力大小可設計較合適的鑽井計畫，或評估場地現存鑽井之洩漏風險 [5]。
2. 既有斷層與裂隙的再活動或再張開：鑽井隨二氧化碳的注入造成孔隙壓力上升，當作用在裂隙面上的應力克服裂隙的剪力強度或張力強度時，原先已關閉的斷層與裂隙可能再度張開或再活動。而斷層與裂隙的再活動、生成及破壞機制取決於孔隙水壓、位態與所受應力大小及方向 [3,5,7]。
3. 水力破裂：流體的注入造成孔底壓力上升，當孔隙壓力過大，便會產生新裂隙。若新裂隙延伸超過原定的注入區間，可能會成為二氧化碳的洩漏通道 [5]。

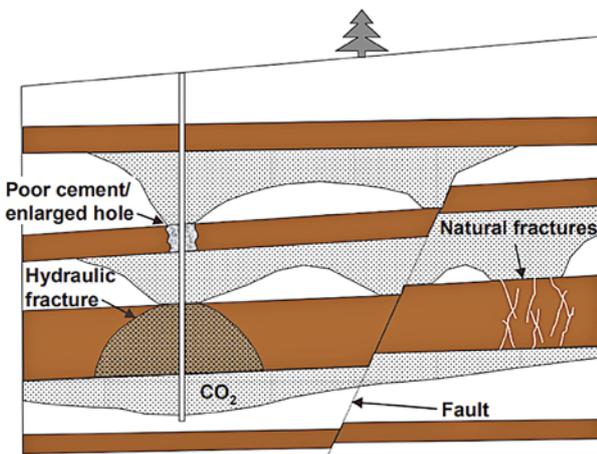


圖 1 二氧化碳地質封存的主要洩漏途徑 [5]

基於以上三點可以說明我們需對潛在二氧化碳地質封存場址之現地應力有充分之瞭解，包含注入前的調查，注入階段與注入後階段的監測。

關於灌注壓力誘發地震問題，與上述水力破裂相關。地震的發生意味著在地殼中的有效應力超過強度 [8,9]，即脆性地殼的臨界應力性質 (critically stressed nature) [10]。因這項特性，當我們將流體注入深井時，勢必會改變岩盤之有效應力狀態。當斷層面上的摩擦阻力被克服，使得早已儲存在岩體內的彈性能量得以釋放，造成誘發地震的可能性 [2,4]。過去的研究亦顯示出即使是微小的地震也具有影響封存構造完整性的可能性 [2]。而在現實中，應力的量測結果不僅證實了在地殼內部的臨界應力性質，同時也能針對對目標場址訂定流體注入之壓力與速率規範，以防止誘發地震的發生 [2]。

另外，現地應力也影響儲存量估計以及灌注之二氧化碳移棲 (影響孔隙體積與水力傳導特性)。

增強型地熱系統

具有經濟效益的地熱系統需要岩體充滿裂隙且具有良好的滲透性、裂隙密度、足夠的裂隙面積和地下水源。當地具有高溫但不具有充足的地下水及良好的滲透性以建立傳統地熱系統時，可藉由人為加壓的方式激發岩體的滲透性，使經地層加熱的流體進入生產井，這類方法被稱為增強型地熱系統。現地應力對與增強型地熱系統的影響在於以下幾點：

1. 岩層中的裂隙是否能成為導水裂隙 [11,12]；
2. 水力壓裂策略與設計 [13]；
3. 岩體破壞，注水可能引發微震 [14]。

在增強型地熱系統項目中，自然裂隙的幾何形貌和水文特性與現地應力狀態相關，裂隙導水能力為影響熱田產能之關鍵參數之一。於低滲透性岩體的取熱效率受控於裂隙位態與使裂隙滑動或張裂的臨界壓力 [15-17]。在相同的岩石應力張量環境底下，裂隙位態決定作用在裂隙上之正向應力。換言之，裂隙導水能力好壞受裂隙自身位態與現地應力張量影響。

現地應力對於計畫和評估水力壓裂施行策略至關重要。水力壓裂為將水注入井孔中，使岩層產生新裂隙或使既有裂隙滑動，藉此增強岩層滲透性的方法。其中使岩體發生破壞進而產生裂隙的壓力，可以透過

現地應力與岩石的張裂強度進行計算。而使既有裂隙剪脹產生流體通道，所需壓力亦受作用於既有裂隙上之正向應力影響。了解現地應力就可以評估在進行水力壓裂時需施加多少的壓力能使裂隙張開或產生滑動，以維持地熱儲集層的滲透性^[18-21]。

增強型地熱系統將流體注入岩體內的過程可能會伴隨微地震活動。機制之一與二氧化碳封存中可能造成誘發地震的機制類似，為注入所造成的超額孔隙水壓使作用在裂隙上的有效正向應力下降所造成的裂隙/斷層滑動^[22,23]，其二為注入之冷水與高溫儲集層的溫差所導致熱應力影響導致裂隙破壞^[24]。現地應力場是評估裂隙滑動的關鍵需求^[14]。由此可知在誘發地震方面，現地應力對理解地熱候選場址產生誘發地震的潛能與注入行為的執行策略，也扮演不可或缺的角色。

核廢料最終處置

核廢料最終處置的目標是將這些廢料永久地隔離和封存，以防止核輻射對人類和生態系統造成危害。國際間普遍認為地質處置是較為可行的處置方式。核廢料最終處置需尋求長期穩定、低滲透性的岩石做為「天然障壁系統」，其隔離與遲滯被視為處置場的重要功能之一，是多重障壁系統不可或缺的部分，這類地質條件必須經過篩選。而其中，現地應力即為地質條件評選的要素之一。現地應力環境資訊對核廢料最終處置之影響如下：

1. 對母岩滲透特性之影響^[25]；
2. 開挖損傷區的形成評估；
3. 地下處置設施之空間規劃與配置、處置母岩之開挖與支撐工法選定、處置坑道之結構穩定性與功能性^[26-28]。

前兩項與安全評估息息相關。對於需要良好密封性的核廢料處置場址而言，母岩的滲透性在性能評估中扮演著重要的角色^[25]。處置場之母岩通常會選用低滲透性的岩類，由裂隙的滲透性主導母岩的滲透性。研究認為，應力變化導致的裂隙閉合、開啟或剪脹是改變滲透性的主要原因^[29,30]，因而需要現地應力以評估裂隙水力-力學特性。

核廢料最終處置需要在地底深處進行地下處置設施與處置隧道的開挖，而現地應力控制了開挖面周圍應力場的分布。開挖所造成的岩體損傷將導致岩體強

度、變形性與滲透性等工程性質的改變，進而影響圍岩阻絕與遲滯核種向外釋放與遷移的功能^[26]。根據研究，深層坑道相較於淺層坑道而言，相對較高的現地應力可能引發剝落破壞（stress-induced spalling）。坑道周圍之穩定性與破壞模式取決於現地應力主應力之大小、方向與岩石之單壓強度^[31]。

最後，岩體的力學特性及其所處的現地應力環境資訊，可用以預測處置隧道規劃與設計。如地下處置設施之空間規劃與配置、處置母岩之開挖與支撐工法選定、處置坑道之結構穩定性與功能性^[27]。現地應力場資訊亦可以應用在建立處置系統之安全功能指標、廢棄物罐的抗壓性能、處置隧道開挖過程的應力擾動、處置隧道設計之方向、工程障壁的穩定性（應力重新分布造成的岩體應變）、長期潛變效應...等等，可說是不可或缺的分析因子之一。

現地應力量測方法與施測策略

由前一章節我們已經知曉現地應力對地質資源開發之重要性，現地應力資訊必須納入探勘、設計與監測項目中。現地應力量測方法五花八門，每個方法都各自有其優缺點與限制。因此選擇合適的量測方法，並訂定完整的現地應力特徵化策略。

當我們進行場址調查，對地下工程場址或區域特性進行特徵化/描述，目標是建立一個包含地形、土壤、岩石、構造、水文地質、地球化學和（熱）力學特性的三維工程地質模型，而當中也包含了現地應力。欲建立一個完整的三維應力模型，或稱最終岩石應力模型（final rock stress model），我們可以分為三個階段：(1) 建立最佳預估應力模型（best estimate stress model）；(2) 現地應力量測；(3) 建立整合應力判定（integrated stress determination），進而完成最終岩石應力模型^[32]，如圖 2。

建立最佳預估應力模型

在進行應力量測之前，藉由蒐集可取得之資料，瞭解場址所處的應力場、構造地質環境，以確立量測項目之目標。蒐集的資料包含板塊尺度的世界應力圖資料庫、地貌地形、地殼變形，逐漸向場址處縮小尺度進入斷層尺度，如地質構造等等。再透過既有鑽井與岩心中觀察的現象，如既有井孔中的岩層的穩定

最佳預估應力模型 (Best estimate stress model)		應力量測方法 (stress measurement methods)		整合應力判定 (Integrated stress determination)		最終岩石應力模型 (Final rock stress model)
萃取資料	預測之應力種類	孔內量測方法	水力破裂法 既存裂隙水力法 套管致裂法 孔內應力釋放法 孔內破壞	判定應力模型	水力破裂法 既存裂隙水力法 套鑽法 震源機制解 斷層滑移分析 其他	尺度關係
	世界應力圖資料庫					
地貌地質資料	地貌 地形 冰河效應 抬升 沉降	基於岩心之量測方法	非彈性應變回復法 差應變取錄分析法 異向波速法 岩芯解裂 音射效應	數值模型	岩石力學 參數 邊界條件 幾何形狀 使用之軟體特性(邊界元素法、離散元素法、有限元素法)	
	地層 岩石種類 延伸 邊界 真向性					
	地質構造 斷層 礦物脈 岩脈 裂隙帶 節理					
鑽井和岩芯資料	鑽井資料 穩定性 井孔破壞 斷層擦痕分析 岩石品質 地下水	地震	開採誘發地震 流體誘發地震 水庫誘發地震			
	岩芯資料 岩芯解裂 斷層擦痕分析					
現有資料		新資料		整合資料		最終資料

圖 2 建立最終岩石應力模型之步驟 (翻譯自 Stephansson and Zang^[32])

性、井孔破壞、裂隙分布、地下水資訊，或岩心是否有發生餅裂現象等等，推估場址尺度的可能現地應力資訊。藉由統整這些資訊，以確立量測項目的目標及訂定及合適的現地應力量測方法^[32]。

在建立現地應力量測策略時，首先需確立量測目標。如：僅量測主應力方向、量測一個或多個主應力分量大小、量測完整的應力張量、監測場址內應力狀態的變化。再如參數的給定是利用過去資料推估還是實際測量、量測數值與場址環境的解釋相容性、準確度、評估量測結果不確定性和可能之空間變異性。另外尚包括施作程序確認、是否需多種不同的量測方法來交互驗證、數值模擬的支持、品質管控等等^[33]。

應力評估策略中亦不能僅依賴單一組測量數據，結合在不同位置及深度進行的測量數據可以使資訊更加完整。當各種測量結果是在應力變化明顯的不同位置進行時，必須提出合理的內插方法及規則，並確定內插方法涉及之假設的可靠度。若欲將結果外插到範圍更大的區域，應確定外插的信心水準。地形、地質和岩性變化都可能影響應力張量，因而只有直接進行現地應力量測才能確定。由於這些因素對岩石力學和水文地質學性質至關重要，因此它們應該在最終岩石應力模型報告中詳細說明^[33]。

現地應力量測

在進行現地應力量測前，ISRM 建議先建立最佳預估應力模型，可以用於選擇合適的現地應力量測方法。不同種類的現地應力量測方法都有其優勢與限制，舉凡施測深度、量測結果的維度、數值精度、與施測位置等^[34]。以最為廣泛應用的套鑽法 (overcoring) 與水力破裂法 (hydraulic fracturing) 為例，分別說明於下：

套鑽法的原理是利用地下受壓之岩層，再解壓後會產生膨脹性應變，利用應變計加以量測，再進行分析岩盤中現地應力之大小、方向及分布情形。在欲量測的位置鑽鑿先導孔，並將應變計放置於先導孔內，施作流程如圖 3 所示。當實施套鑽時，岩石因解壓產生的應變便會由應變計記錄下來。此方法可以藉由一個點量測到現地應力資訊，然而套鑽法須要既有坑道，若遇到岩盤變形涉及非彈性的行為時，此方法也不適用，此外，套鑽法對於細小的變形行為格外敏感，量測獲得的數值經常較為發散^[34,35]。

水力破裂法的原理是在井內利用上下封塞 (straddle packer) 孤立一個區段，以流體注入至該區段內 (通常是水) 加壓使岩層中產生新裂隙。在井壁上生成新的裂隙必須克服作用於井壁上之最小切向應力，裂隙持續延伸則須克服生成之裂隙面上之正向應力^[34,36]，施作原理

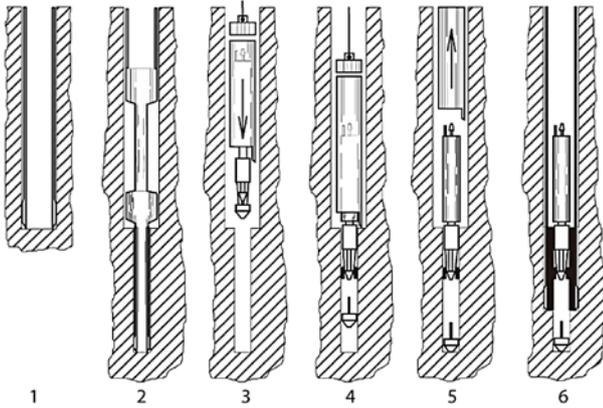


圖 3 套鑽法的實施步驟示意圖 [35]

如圖 4(a)。利用量測裂隙關閉時的壓力及彈性力學的解 (Kirsch solution)，推求現地應力場 [37]。此方法所量測到的現地應力準確度高，但其要求垂直應力不可為最小主應力，且僅能推求水平主應力，可與其他應力量測方法結合，例如觀察井孔破裂。

既存裂隙水力法 (Hydraulic Test of Pre-exist Fracture, HTPF) [34,36] 將施加壓力的目標更改為井孔內的既存裂隙，藉由量測作用於裂隙上的正向應力推求完整的應力張量，施作原理如圖 4(b)。此方法得以克服水力破裂法的垂直應力不能為最小主應力之限制，但必須找到 6 個以上不同位態的既存裂隙，所花的時間較長，通常會作為水力破裂法無法施行時之備用方案。此外水力破裂法的試驗段內不得有既存裂隙存在，而既存裂隙水力法的試驗段則僅能有一個裂隙存在，由於試驗將注入流體，因此會影響鑽孔周圍的水化學環境 [34,36]。

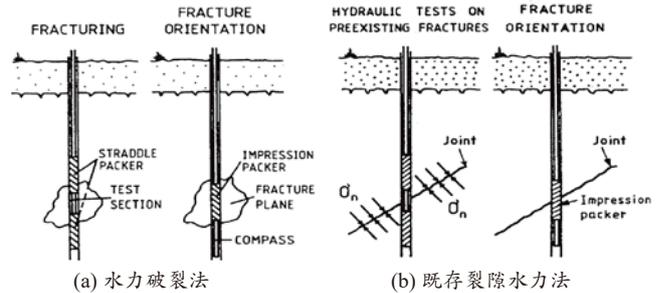


圖 4 井下現地應力量測原理示意圖 [36]

其它方法如門止法 (doorstopper) 與隧道反算法 (back analysis) 需有既有坑道；岩心餅裂 (core discing)、非彈性應變回復法 (anelastic strain recovery) 等均僅能作為定性評估或僅為概略性之估計方法，井孔破裂 (borehole breakout) 通常要深井且只能得到水平主應力方向 ... 等等 [34]。表 1 中將常見方法的優缺點逐一列舉。不同種類的現地應力量測方法有其合適的項目及用途，在建立場址的完整現地應力資訊時，應考慮多項量測或評估方法之數據，進行綜合分析並相互驗證比對 [34]。

建立整合應力判定

建立最終岩石應力模型的最後階段，為整合不同應力量測方法的數據。整合工作可以避免單個量測方法缺點與限制造成量測結果偏離現實，相互比對亦可以提升量測結果的可靠度。整合數據的方式有不同的演算法，然而最廣泛使用的仍屬最小平方法 [32]。

除整合應力量測結果之外，亦可以數值模擬技術對現地應力場進行研判和解釋，或是描述現地應力對

表 1 不同現地應力量測方法之優缺點 (翻譯自 Ljunggren et al. [34])

方法	2D/3D	優勢	限制	適合使用於
套鑽法	2D/3D	理論和實務上發展最為成熟的技術	由於涉及的岩體體積小而引起的數據分散；需要鑽機	量測至深度約 1,000 公尺處
門止法	2D	在具有裂隙或高壓的岩石內可以施作	只能提供二維數據；需要鑽機	軟弱或高壓的岩石
水力破裂法	2D	在既存的鑽井中實施量測；數據集中；涉及相當大的岩體體積；快速	只能提供二維數據；在理論上無法量測最大水平主應力；擾動水化學	淺部至深部；取得應力剖面
既存裂隙水力法	2D/3D	在既存的鑽井中實施量測，可以施作於高壓岩石且水力破裂法與套鑽法皆失敗時	耗時；在鑽井中需有不同位態	在應力評估的早期階段，當水力破裂法及套鑽法皆失敗時（由於此方法耗時）
岩心餅裂	2D	在鑽井時就可以獲得的資訊	僅有質化量測	在應力評估的早期階段
井孔破裂	2D	在早期就可以獲得的資訊，相對快速	僅限於方向資訊。理論上需要進一步發展以推斷應力大小	通常發生於深井
震源機制解	2D	可用於相當深深度的應力評估	僅有非常深處的資訊	
凱瑟效應	2D/3D	能夠輕易量測	相對不高的可信度	粗略的評估
黏彈性應變回復法 / 差應變曲線分析法 / 岩石樣本之異向性特性 (RACOS)	2D/3D	可在相當深的深度使用	對微觀尺度進行複雜的測量，對多個因素敏感。	在相當深的深度評估應力狀態
反算法	2D	快速且簡單，因涉及的岩體體積大具高度確定性	理論上不具唯一解	僅可以使用於建造隧道時
分析地質資料	2D/3D	花費較少	非常粗糙的預估，可信度低	在計畫的早期

現地環境的影響 [38,39]，如圖 5。在對於斷層帶或破碎帶等具有較低岩石品質、應力變化快速而不容易進行直接量測的區域，數值建模能夠提供現地應力大小和方向的預測，並呈現最終岩石應力模型之不確定性。

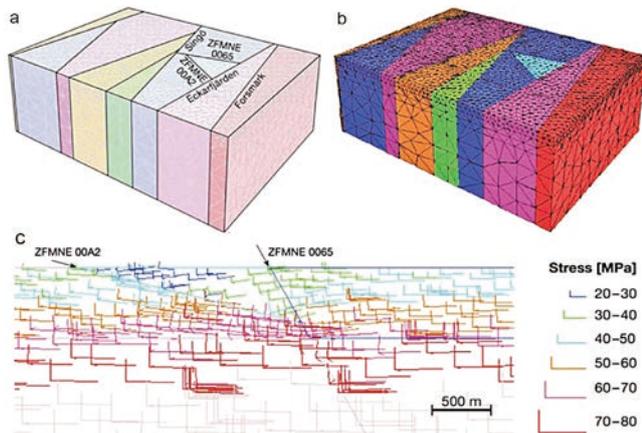


圖 5 使用離散元素法 3DEC 進行應力場數值模擬。(a) 瑞典 Forsmark 核廢料處置場主要變形帶位置；(b) 3DEC 模型；(c) 數值分析獲得之主要變形帶 (ZFMNE) 上方和下方的主應力 (大小與方向) 分布 [40]。

現地應力量測之案例與應用

現地應力是涉及大地工程與地質資源開發項目不可或缺的資訊，針對各類現地應力量測方法已有諸多參考文獻值得參考 [35,36,41-43]，且國、內外已有許多施作案例與應用，本文整理數個實際案例，包括場址應力特性、設施設計、合適的量測方法、災害風險評估，以提供我國於推動大型資源開發邁入實作階段時參考。

現地應力量測於國內之發展

台灣現地應力量測，早期為岩盤隧道工程與採礦工程之應用，陳錦清與俞旗文曾在雪山隧道進行水力破裂試驗 [44]；採礦工程的部分，石作珉等人，在花蓮聯峯石礦場以套鑽法進行對現地應力變形量測的研究 [45]；接續為放射性廢棄物處置應用，台灣 H 區與 K 區在潛在處置母岩特性調查與評估階段進行了一些現地應力量測工作 [46]，H 區與 K 區現地應力量測結果如圖 6 所示。

H 區根據非彈性應變回復法進行現地應力量測。顯示 H 區所在位置之現地應力環境，正處於正斷層的應力環境 [47]。並透過地質探勘孔之岩心、地表露頭的裂隙類型及裂隙面理搭配定年分析結果推斷古應立場隨時間的變化。由於 H 區未能順利進行水力破裂法之現地應力量測法，採用岩心的非彈性應變回復法推估現地應力數值，應用時需慎重考量數據的不確定性 [46]。

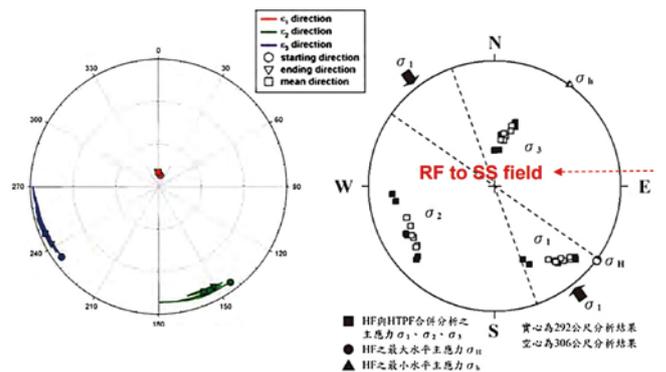


圖 6 左圖為 H 區之非彈性主應變方向投影圖 [47]，右圖為 K 區現地應力量測結果 [48]。

K 區於 KMBH01 鑽孔使用水力破裂法與既存裂隙水力法量測現地應力，施測深度分別為 238 m、292 m、300 m、306 m 和 430 m，300 m 使用既存裂隙水力法，量測結果顯示為走滑斷層或逆衝斷層應力場；其他深度使用水力破裂法，量測結果卻顯示現代應力場是走滑斷層應力場，反映出現地應力隨深度的異質異向性。此外，現地應力之試驗結果，需考量下列不確定性：(1) 水力破裂法或既存裂隙水力法之試驗位置非常靠近區域構造，可能導致現地應力量測值的偏差；(2) 水力破裂法假設現地應力其中之一主應力方向與鑽孔軸平行 [46]。

在進行高放規劃設計時，上述現地應力之量測數據於下列項目起到了關鍵的作用。設計廢棄物罐圍壓需求時，考慮現地應力之大小確保廢棄物罐的抗壓能力符合需求，同時以數值模擬求得各分段的抗壓性能。在處置隧道設計時考慮現地應力及應力方向，因處置隧道長軸與最大水平主應力方向相同或小於 5 正負 30 度之內，對於降低處置隧道及處置孔剝落有顯著效果 [49]，將處置隧道與最大水平主應力夾角 16.4 度。未來仍可藉由現地應力資訊，考慮隧道岩體潛應變。

近期台灣於封存與地熱，亦進行了一些現地應力量測 / 評估工作。增強型地熱系統的部分，江俞萱以水力破裂法量測之資訊進行宜蘭地區斷層再活動之評估工作 [50]、孫天祥利用非彈性應變回復法 (anelastic strain recovery) 評估宜蘭清水現地應力狀態 [11]，高子恩結合岩心中視構造分析，探討紅柴林地下構造與應力之關係 [12]；此外汪蘭君利用水力破裂法結合裸孔伸張寬度進行鐵砧山現地應力場與斷層再活動分析 [51]，Heidbach 等人利用震源機制反算繪製台灣應力地圖 [52]。

現地應力量測於國外之發展

二氧化碳封存案例：北極光（挪威）

北極光是法國道達爾能源（TotalEnergies）、荷蘭皇家殼牌石油公司（Shell）及挪威國家石油公司（Equinor）所推出之碳捕捉及封存計畫。北極光案場以 XLOT（extend leak-off test）試驗方法測得最小主應力（XLOT 以水力破裂法為基礎，惟 XLOT 注重於岩層破裂之壓力以確保井孔鑽鑿之穩定性），利用 Kirsch model 結合岩層之彈性常數與鑽井引起的裂隙（drilling induced fracture）發生之條件，限制最大主應力可能的分布區間^[53]。

藉由北極光案場現地應力量測資訊，了解應力方向和大小。將垂直應力（ $\sim 25\text{MPa}$ ）以及可能之最大、最小水平主應力（SH、Sh）組合，繪製摩爾圓並與破壞包絡線（2 種強度參數組合），如圖 7 所示，根據現地應力與破壞包絡線，即可進行現況以及各種灌注壓力下之安全係數計算。同時透過現地應力之量測結果結合岩層之礦物組成分析繪製水平應力剖面，建立井周圍的應力分布與裂隙發展模擬^[53]，如圖 8 所示。

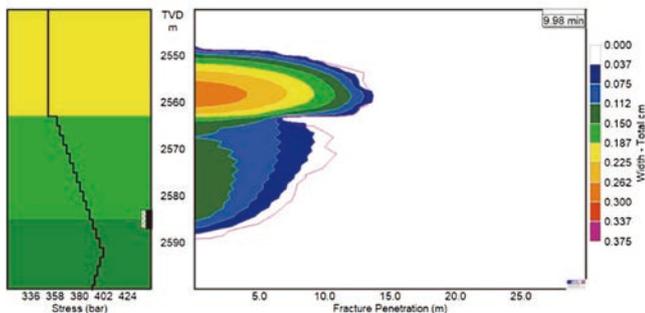


圖 7 XLOT 試驗裂隙生成 3D 模擬。左圖以不同顏色呈現地層分布，以黑線呈現現地應力資訊，黑色方框為 XLOT 試驗的實施位置。右圖為 XLOT 所造成的裂隙分布，不同顏色表示其寬度^[53]。

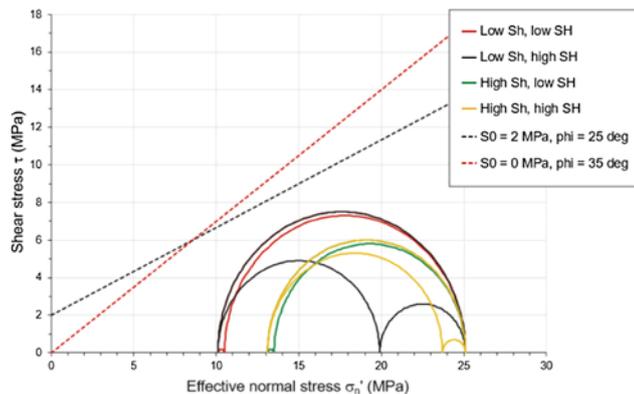


圖 8 以莫爾圓呈現不同條件下之岩層應力狀態，包含鄰近斷層的破壞包絡線^[53]。

增強型地熱系統：The Geysers（美國）— 灌注流體誘發地震推估有效主應力方向變化與破裂機制改變

The Geysers 位於美國加州，屬乾熱蒸氣型地熱田。該地熱區自 1960 年起開始生產，商業運轉至今已超過 50 年，總裝置容量可達 1.6 GWe，為美國最重要的地熱區。然而該地區經常性的發生地震，其中也不乏因地熱開發活動注水所引起的誘發地震。注入期間無法直接量測現地應力時使用應力推估方法，Martinez-Garzón 等人及 Boyd 等人使用地聲感測器（geophone）和地震儀（seismometer）蒐集注入過程之地震資訊，利用地震矩張量（moment tensor）反演現地應力，如圖 9 所示。得知液體注入地層所造成的應力場變化。與觀測之地震活動相結合，探討液體注入與誘發地震之關係與推斷儲集層特性。研究結果中表明了隨著注水的過程，應力場會發生旋轉。隨注入體積的增加，應力狀態往走向滑移的方向發展，可能是由於岩石冷卻和產生的伸張應變所造成^[54,55]。

一種新型態現地應力量測方法

既存裂隙間的複雜交互作用主導了岩層潛在的不穩定性^[56]。岩盤工程的穩定性分析及監測中常見的做法是利用現地應力量測結果與岩石試驗數據對岩石與裂隙的水力-力學參數進行推估。然而持續存在的問題在於，如何在現地環境下以合適的尺度取得裂隙之現地特性^[57]。用於現地裂隙特性的逐步注入法（Step-rate Injection Method for Fracture in-situ properties, SIMFIP）可進行包含注入前的現地應力與岩石水力-力學參數之調查、注入階段與注入後階段的三維變形量監測。同時也能夠結合數值模型推估現地應力張量^[57]。

SIMFIP 為一套在對既存裂隙進行水力破裂的同時監測裂隙位移量、水壓、水流流速、溫度與壓力的系統^[58]，其系統設置如圖 10。其裂隙位移量的量測方法為將兩個金屬環固定於施測裂隙的上下盤，以脈衝及階段式兩種方式注入水壓，並利用應變計紀錄兩個金屬環之相對位移。依據位移量、水壓、水流流速推估裂隙在現地環境下的水力-力學特性與行為。

SIMFIP 亦可以做為現地應力推估之方法。G 依據施測區域內的裂隙位態、孔隙水壓與材料參數（完整岩石、裂隙與流體的水力-力學參數）建立 SIMFIP 施測區間的數值模型，如圖 11。現地應力場作為唯一可變動的邊界條件，將數值模型模擬之試驗數據與真實試

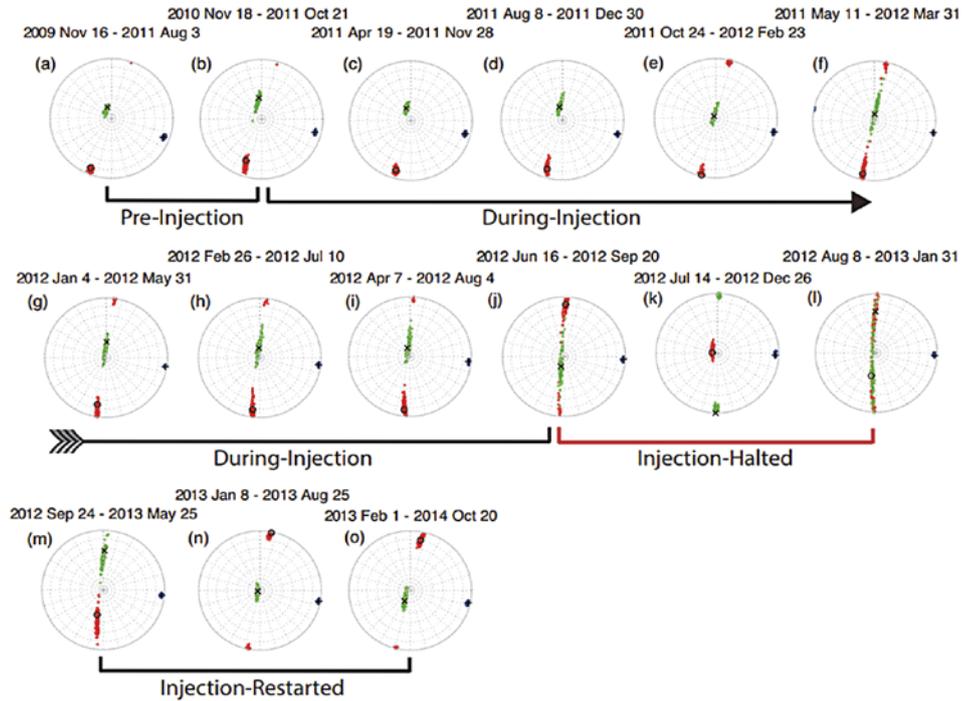


圖 9 使用 STRESSINVERSE [58] 在 15 個重疊時間段內獲得的主應力方向 [55]

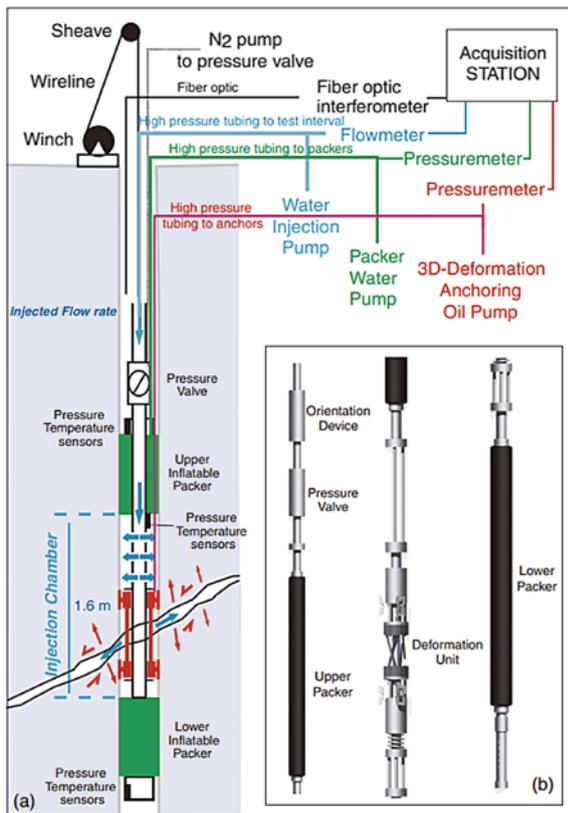


圖 10 (a) SIMFIP 試驗的設備設置；(b) 井下探管組成 [57]。

驗數據進行比對，推估可能的現地應力場 [59]。其結果貼合該區域過去文獻所描述之應力張量，顯示 SIMFIP 同時具備量測裂隙現地參數與現地應力推估的能力。

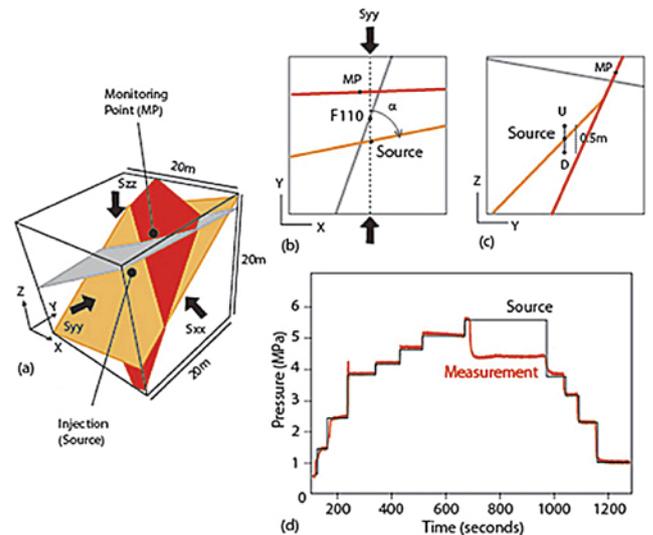


圖 11 (a) 利用 3DEC 建立之 SIMFIP 施測區間之數值模型；(b) 數值模型之水平剖面；(c) 數值模型之垂直剖面；(d) 試驗之壓力與時間關係圖 [59]。

結論

現地應力與深地層資源開發工程息息相關，包含二氧化碳封存、增強型地熱系統與核廢料最終處置等均必定需要應力場資料以進行開發可行性、生產控管與衍伸之風險等評估，其結果更會影響開發標的之經濟效益與安全性等，因此必須被視為開發流程重要的一環。

現地應力的量測方法雖然有不同的方式，但為能建立精準且完整之應力場特徵，建議遵循 ISRM 之建議方法 (suggestion method)，參考以下程序：(1) 現地應力量測目標、(2) 建立最佳預估應力模型、(3) 選定合適的應力量測方法、(4) 將資料彙整為整合應力判定模型並建立、(5) 最終岩石應力模型。

現地應力量測方法已發展多年已相當成熟，但隨著科技發展，精密度及穩定性更高之應力應變感測儀器已被開發應用（如光纖感測元件等），因此未來如何導入高精密度儀器並應用之孔內觀測，是一個值得評估及發展的方向。

誌謝

本文承經濟部能源局契約編號 112-E0216「碳捕存再利用整合示範計畫」與台灣電力股份有限公司「用過核子燃料最終處置計畫—潛在處置母岩特性調查與評估階段—104 ~ 107 年度計畫」和「前瞻地熱技術—焱子坪、深澳及禮樂地區之地熱初探」經費上的支持及所有參與人員的專業與努力，特此致上最高感謝之意。

參考文獻

- Kaminskaite, I., Piazzolo, S., Emery, A.R., Shaw, N., and Fisher, Q.J. (2022). "The importance of physiochemical processes in decarbonisation technology applications utilizing the subsurface: A review." *Earth Science, Systems and Society*, **2**, 10043.
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M. (2012). "Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**(26), 10164-10168.
- Song, J. and Zhang, D. (2013). "Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration." *Environmental Science and Technology*, **47**(1), 9-22.
- 鍾明劍、譚志豪 (2016)。「二氧化碳地質封存誘發地震之定量風險評估」，中興工程，第 113 期，第 3-14 頁。
- Hawkes, C.D., Bachu, S., Haug, K., and Thompson, A.W. (2005). "Analysis of in-situ stress regime in the Alberta Basin, Canada, for performance assessment of CO₂ geological sequestration sites." *Proceedings of the Fourth Annual Conference on Carbon Capture And Sequestration*, DOE/NETL, 22.
- Hawkes, C. and McLellan, P. (1999). "A new model for predicting time-dependent failure of shales: Theory and application." *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **38**(12), 49-55.
- Streit, J.E. and Watson, M.N. (2004). "Estimating rates of potential CO₂ loss from geological storage sites for risk and uncertainty analysis." *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Vancouver, Canada.
- Zoback, M.L. and Zoback, M. (1980). "State of stress in the conterminous United States." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **85**(B11), 6113-6156.
- Zoback, M.L. (1992). "First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project." *Journal of Geophysical Research*, **97**(B8), 11, 703-11, 728.
- Zoback, M.D., Townend, J., and Grollmund, B. (2002). "Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere." *International Geology Review*, **44**(5), 383-401.
- 孫天祥 (2014)。「臺灣宜蘭清水地熱區之應力狀態研究」，國立臺灣師範大學地球科學系，碩士論文，共 66 頁。
- 高子恩 (2016)。「宜蘭紅柴林地區現地應力與導水裂隙關係之研究」，國立臺灣師範大學地球科學系，碩士論文，共 109 頁。
- Massachusetts Institute of Technology (2006). *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Jeanne, P., Rutqvist, J., Dobson, P.F., Walters, M., Hartline, C., and Garcia, J. (2014). "The impacts of mechanical stress transfers caused by hydromechanical and thermal processes on fault stability during hydraulic stimulation in a deep geothermal reservoir." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **72**, 149-163.
- Barton, C.A., Zoback, M.D., and Moos, D. (1995). "Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock." *Geology*, **23**(8), 683-686.
- Ito, T. and Zoback, M.D. (2000). "Fracture permeability and in situ stress to 7 km depth in the KTB scientific drillhole." *Geophysical Research Letters*, **27**, 1045-1048.
- Townend, J. and Zoback, M.D. (2000). "How faulting keeps the crust strong." *Geology*, **28**, 399-402.
- Barton, C.A., Hickman, S.H., Morin, R., Zoback, M.D., and Benoit, D. (1998). *Reservoir-Scale Fracture Permeability in the Dixie Valley, Nevada, Geothermal Field*. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, SPE-47371.
- Hickman, S., Zoback, M., and Benoit, R. (1998). *Tectonic Controls on Fault-Zone Permeability in a Geothermal Reservoir at Dixie Valley, Nevada*. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering. SPE-47213.
- Hickman, S.H., Zoback, M.D., Barton, C.A., Benoit, R., Svitek, J., and Summers, R. (1999). *Stress and Permeability Heterogeneity within the Dixie Valley Geothermal Reservoir: Recent Results from Well 82-5*. USDOE Idaho Operations Office, Idaho Falls, ID; Oxbow Geothermal Corporation (US). DOE/ID/13762.
- Hickman, S.H. and Davatzes, N.C. (2010). "In-situ stress and fracture characterization for planning of an EGS stimulation in the Desert Peak Geothermal Field, Nevada." *Proceedings of the Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.
- Shapiro, S.A., Patzig, R., Rothert, E., and Rindschwentner, J. (2003). "Triggering of seismicity by pore-pressure perturbations: Permeability-related signatures of the phenomenon." *Thermo-Hydro-Mechanical Coupling in Fractured Rock*, 1051-1066.
- Rutqvist, J., Dobson, P.F., Garcia, J., Hartline, C., Jeanne, P., Oldenburg, C.M., Vasco, D.W., and Walters, M. (2015). "The northwest Geysers EGS demonstration project, California: Pre-stimulation modeling and interpretation of the stimulation." *Mathematical Geosciences*, **47**, 3-29.
- Alam, A.B., Fujii, Y., Dipu, N.H., Sophea, B., and Rahim, A.B. (2023). "Importance of stress and temperature-dependent permeability of rocks and its application in underground nuclear waste disposal." *MIST International Journal of Science and Technology*, **11**,

- 39-49.
25. Majer, E.L. and Peterson, J.E. (2007). "The impact of injection on seismicity at the Geysers, California Geothermal Field." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **44**(8), 1079-1090.
 26. 楊長義、李宏輝 (2020), 低放射性廢棄物處置現地應力對處置坑道結構穩定影響研析, 行政院原子能委員會核能研究所。
 27. 楊長義、李宏輝 (2021), 低放射性廢棄物處置現地應力量測影響因子研析, 行政院原子能委員會核能研究所。
 28. Christiansson, R. and Janson, T. (2003). "A test of different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in Äspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 1161-1172.
 29. Pusch, R. (1989). "Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **26**, 79-83.
 30. Kelsall, P.C., Case, J.B., and Chabannes, C.R. (1984). "Evaluation of excavation induced changes in rock permeability." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **21**(3), 123-35.
 31. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). "Empirical strength criterion for rock masses." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **106**(9), 1013-1035.
 32. Stephansson, O. and Zang, A. (2012). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 5: Establishing a model for the in situ stress at a given site." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**, 995-969.
 33. Hudson, J.A., Cornet, F.H., and Christiansson, R. I. S. R. M. (2003). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 1: Strategy for rock stress estimation." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 991-998.
 34. Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., and Christiansson, R. (2003). "An overview of rock stress measurement methods." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 975-989.
 35. Sjöberg, J., Christiansson, R., and Hudson, J.A. (2003). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 2: Overcoring methods." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 999-1010.
 36. Haimson, B.C. and Cornet, F.H. (2003). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 1011-1020.
 37. Kirsch, (1898). "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre." *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, **42**, 797-807.
 38. Sturgul, J.R., Scheidegger, A.E., and Grinshpan, Z. (1976). "Finite-element model of a mountain massif." *Geology*, **4**(7), 439-442.
 39. te Kamp, L., Konietzky, H., and Blümling, P. (2020). *Three-Dimensional Modeling of the Planned Wellenberg Repository Site in Switzerland*. Numerical Models in Geomechanics, CRC Press, 385-390.
 40. Hakami, H. (2006). *Numerical Studies on Spatial Variation of the In Situ Stress Field at Forsmark—A Further Step. Site Descriptive Modelling Forsmark-Stage 2.1*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, R-06-124.
 41. 施國欽、孫荔珍 (1994), 「岩體現地試驗之簡介」, 地工技術雜誌, 第 46 期, 第 5-21 頁。
 42. 楊明宗、歐陽湘、柳志錫、吳建宏 (2004), 「水力破裂法現地應力量測及破壞準則探討」, 地工技術雜誌, 第 99 期, 第 5-14 頁。
 43. 俞旗文 (2007), 「利用取樣岩心量測岩石現地應力的技術」, 中興工程, 第 94 期, 第 11-18 頁。
 44. 陳錦清、俞旗文 (1994), 「坪林隧道沿線水力破裂法現地應力量測」, 地工技術雜誌, 第 46 期, 第 35-46 頁。
 45. 石作珉、鄧博維、劉振維 (1994), 「利用套鑽法量測現地應力之研究」, 地工技術雜誌, 第 46 期, 第 23-34 頁。
 46. 台灣電力公司 (2019), 用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告, SNFD2017。
 47. 葉恩肇、李偉誠、孫天祥、林為人、林蔚、林鎮國、陳文山 (2012), 「花蓮和平地區非彈性應變回復法之現地應力量測」, 地工技術, 第 131 期, 第 23-34 頁。
 48. 時振梁、環文林、張裕明、戴聯琦、陶壽福、丁國瑜、常向東、李小軍、汪素雲、金巖、李洪訓、楊玉林、張政治、丁鍾鼎、王守業、張志中、張曉東、潘華、陳昌斌、宋昭儀、吳宣 (2004), 核電廠地震安全性評價中的地震構造研究, 中國電力出版社, 共 351 頁。
 49. SKB (2009). *Underground Design Forsmark Layout D2*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Sweden, R- 08-116.
 50. 江俞萱 (2014), 宜蘭三星清水地區現地應力與斷層再活動分析, 國立中央大學地球科學系碩士論文, 共 130 頁。
 51. 汪蘭君 (2009), 鐵砧山現地應力與斷層再活動分析, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 共 81 頁。
 52. Heidbach, O., Liang, W.T., Morawietz, S., von Specht, S., and Ma, K.F. (2022). *Stress Map of Taiwan 2022*. GFZ German Research Center for Geosciences.
 53. Thompson, N., Andrews, J.S., Wu, L., and Meneguolo, R. (2022). "Characterization of the in-situ stress on the Horda platform—A study from the Northern Lights Eos well." *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **114**, 103580.
 54. Martínez-Garzón, P., Bohnhoff, M., Kwiatek, G., and Dresen, G. (2013). "Stress tensor changes related to fluid injection at the Geysers Geothermal Field, California." *Geophysical Research Letters*, **40**, 2596-2601.
 55. Boyd, O.S., Dreger, D.S., Gritto R., and Garcia J. (2018). "Analysis of seismic moment tensors and in situ stress during Enhanced Geothermal System development at The Geysers Geothermal Field, California." *Geophysical Journal International*, **215**, 1483-1500.
 56. Hoek, E. and Bray, J. (1974). *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
 57. Guglielmi, Y., Cappa, F., Laçon, H., Janowczyk, J.B., Rutqvist, J., Tsang, C. and Wang, J.S. (2013). "ISRM suggested method for step-rate injection method for fracture in-situ properties (SIMFIP): Using a 3-components borehole deformation sensor." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **47**, 303-311.
 58. Vavryčuk, V. (2014). "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms." *Geophysical Journal International*, **199**(1), 69-77.
 59. Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Rutqvist, J., Cappa, F., Jeanne, P., and Birkholzer, J. (2020). "Estimating perturbed stress from 3-D borehole displacements induced by fluid injection in fractured or faulted shales." *Geophysical Journal International*, **221**(3), 1684-1695. 



如何幫核廢料找個安全的家

柯建仲* / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 副理

莊伯禹 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 組長

顏銀桐 / 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 組長

魏倫璋 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 組長

陳耐錦 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 組長

多年來，高放射性核子燃料（又稱核廢料）的深層地質處置研究常是諸多產官學研各界關注且討論熱烈的課題，除了專業研究技術的討論外，如何找尋一個具長期穩定性及安全性佳的處置地點及地質環境，是各界最為聚焦也最不易產生共識的問題，主要係因過去的研究常參考國際先進國家之技術資料進行評估，較難以本土的數據資料執行處置設施安全性與長期穩定性的分析及評估，進而落實民眾與各界之溝通，來尋求最佳的共識。然，近年來臺灣電力公司已逐步整合國內外學研能量，推動場址描述模型建置、工程概念設計與安全評估的整合概念，期望藉此國際處置研究的共通經驗，使臺灣可以發展與國際接軌的核心技術，據此，本文主要提出建置各領域場址描述模型之重點內容與須發展之關鍵技術，進而可真正的凝聚共識朝向幫核廢料找到安全的家之路前進。

臺灣用過核子燃料處置全程工作規劃

臺灣電力公司依照「放射性物料管理法」與其「施行細則」之相關規定，已於 2004 年底提出「用過核子燃料最終處置計畫書」，並於 2006 年經行政院原子能委員會（現為核能安全委員會，以下簡稱核安會）核定，台電公司必須依該計畫書之期程確實執行，並且每 4 年考量國際發展趨勢及國內實際進展狀況，進行工作內容之檢討與修訂，而於 2015 年 3 月完成之修訂版內，將全用過核子燃料處置規劃分為 5 個任務階段（如圖 1），依序為：

- 潛在處置母岩特性調查與評估階段（2005～2017 年）
- 候選場址評選與核定階段（2018～2028 年）
- 場址詳細調查與試驗階段（2029～2038 年）
- 處置設施設計與安全分析評估階段（2039～2044 年）
- 處置設施建造階段（2045～2055 年）



圖 1 臺灣用過核子燃料處置全程規劃

台電公司自 1986 年起積極展開相關研究計畫，整體策略在於循序發展必要的處置技術，使處置安全符合國際水準，以落實保障公眾健康與維護環境品質的最終目標。目前國際公認深層地質處置為用過核子燃料最可行之處置方式，藉由將用過核子燃料處置於深度約 300 至 1,000 公尺

* 通訊作者，ccke@sinotech.org.tw

的地下穩定岩層中，配合廢棄物罐、緩衝回填材料等工程設施形成「多重障壁」系統，以達到隔離（使地表的地質作用與人類活動不會影響地下的處置設施）、圍阻（使處置設施中的放射性物質不易釋出到地層）與遲滯（有效遲滯放射性核種的釋出與遷移，使放射性物質在影響人類生活環境之前，已衰變到對人體健康無害的程度）的安全功能。根據 Viswanathanl 等人 [1] 對於深層地質環境相關的工程應用研析成果，核廢料處置不僅是最長工程生命週期的議題外，亦是須整合岩石力學、水文地質、熱學、地球化學、傳輸與地表生態環境特徵的耦合分析程序（圖 2）。

場址描述模型建置技術

依據「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」（SNFD2017 報告）及「我國用過核子燃料最終處置技術初步安全論證報告」（SNFD2021 報告），在現階段無特定場址之前提下，須持續進行最終處置相關技術發展與技術建置，然而受到缺少更新地質調查數據與參數的條件下，工程設計與安全評估之技術發展進程仍受限制，因此，如何建立 1 套嚴謹且有系統性的用過核子燃料高階安全處置方案，亦為當前深受輿論關切的課題。參考國際先進國家經驗可歸納得知，包含區域地質、岩石力學與熱學、地球化學、水文地質、傳輸特性、地表系統、生物圈等 7 個主要領域的場址描述模型（Site Descriptive Model, SDM）建置技術，將決定用過核子燃料最終處置設施安全性評估的精準度與可信度，

其中最關鍵也最困難的工作，即是如何詳實地勾勒出近場及遠場地質圈的處置母岩地質環境特徵，並準確地掌握裂隙岩體中核種的流動與傳輸路徑。

有別於歐美國家之地質環境，臺灣因受劇烈造山運動影響，造成地質構造多且破碎，加上地形陡峭嶙峋，致使水文地質條件極端複雜，各地區岩石的物理特性、化學特性、力學特性與生成條件皆不相同，所呈現的應力分布、地下水系統與傳輸行為無論在時間或空間維度上都有相當大的變異性，倘若無法取得現地高信度參數或資訊，對於後端執行安全性評估會有相當程度的困難性，也將增加諸多安全評估上的不確定性。因此，原子能委員會（現為核子安全委員會）建議應持續加強地質調查與現地應力量測及其相關應用技術之建置，以確保高放處置技術最佳化且符合國際水平，提升處置設施的安全性，確保民眾安全及環境品質。

在尋求安全的最終處置設施過程中，需可取得研究區域之完整調查數據，以提供後續建立場址功能 / 安全評估技術，本文主要說明七大科學領域之場址描述模型之關鍵主軸與重點調查研究，除提供處置技術發展的建議課題外，並希冀藉由各領域實質工作間的交互關聯性，完整的建立可應用於本土地質環境具長期安全性與穩定性的選址方向，進而達成最終處置設施建置之目標。相關場址描述模型建置的流程係參考瑞典 SKB 的研究規劃（圖 3），包含調查及資料蒐集、闡述區域地質單元特性分布，再藉由區域地質單元分布結果，分別進行七個領域之場址描述模型建置與場址描述。

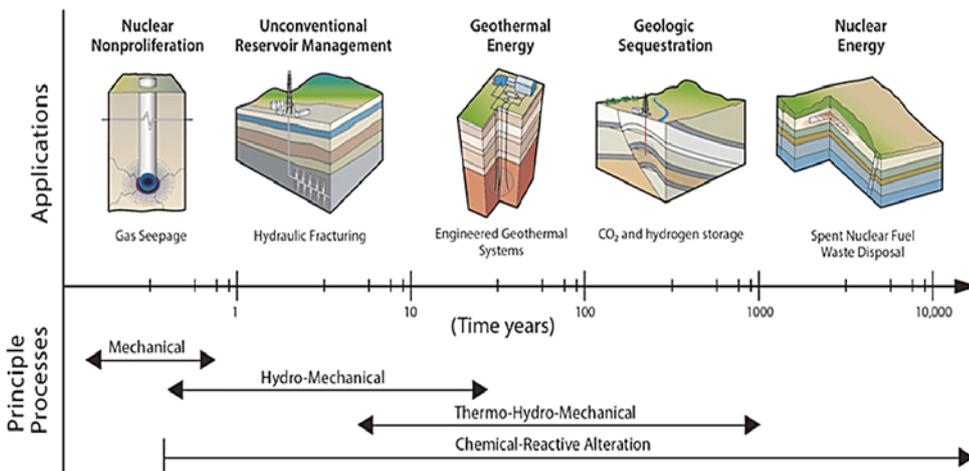


圖 2 深層裂隙岩體相關之綠能資源探查 / 貯集 / 處置工程應用與其工程生命週期及主要影響作用 [1]

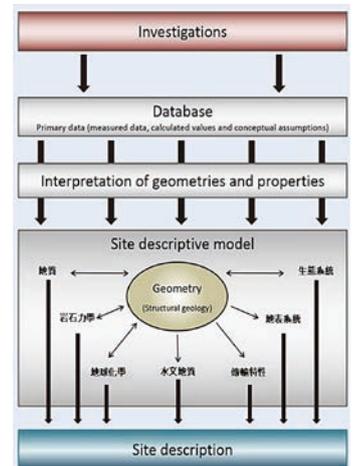


圖 3 瑞典 SKB 場址描述模型建置流程 [2]

區域地質描述模型

因深層地質處置概念中，最須優先掌握之關鍵為研究區域之地質環境特徵與其分布特性，包含地形、速度構造、地表線型及露頭與井下裂隙特徵，並可藉由參數特徵化技術建置區域地質描述模型。以下說明各項特性之重點調查技術與方法。

區域地形模型

為進行後續各項三維場址描述模型之建置，並提供區域地表構造線型判釋以及地表系統分析使用，須建立研究區域剝除植生後之高精度數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。此外，亦須產製研究區域之正射影像，以輔助判釋工作之進行，藉以瞭解地表之植生、裸露地、土地利用等概況，據此建置區域地形模型。

近年來針對廣域之區域地形模型取得方法通常以光學雷達 (Light Detection And Ranging, LiDAR, 簡稱光達) 為主，而一般常採用有人飛機搭載 LiDAR 方式 (亦即 Air-Borne LiDAR, 空載光達)，依據地形特性規劃航線，並配合飛機上的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 以及慣性測量單元 (Inertial Measurement Unit, IMU)，來解算各反射點的三維空間位置，產製成帶有 X, Y, Z 坐標資訊的原始點雲 (point cloud)，進而產製符合真實地形 DEM。

三維速度構造模式建置

三維速度構造為建構地質特性描述模型所需之基礎資訊，其主要參考各類地球物理調查資料來進行分析整合，建置區域三維速度構造模式之重點有二，其一為彙整選定研究範圍之區域尺度地球物理文獻，並探討及釐清區域內地球物理資料於構造解釋上不足之處；其二為，地物探查方法比較分析及補充探查規劃，依研究範圍現有之波速構造進行彙整研析，瞭解現有波速研究成果之使用限制，再據此擬定施行地球物理方法探測之適宜策略，以建置研究區域內之三維速度構造模式。

受限於研究區域之地形地貌及人文地理分布，適合應用於波速調查之方法種類有所不同。波速調查施測前，將先行針對研究區域進行初步勘查，得以評估最適合應用之波速調查方法。根據使用震源差異及施測特性，波速量測可分為三種方法：(1) 主動震源侵入式方法 (active source invasive method)；(2) 主動震源非侵入式方法 (active source non-invasive method)；(3) 被動震源非侵入式方法 (passive source non-invasive method)。

其中，主動震源侵入式方法常見以懸盪式速度井測系統 (suspension PS-logging system) (Ogura^[3], Kaneko *et al.*^[4]) 進行施測，但由於需透過鑽井調查，雖其成果較精確且具代表性，但施測成本較高。而主動震源非侵入式方法，常見如多頻道表面波震測 (Multi-channel Analysis of Surface Wave, MASW) 方法 (Park *et al.*^[5,6]) 以及反射震測 (Seismic Reflection Method) 方法 (Steeple and Miller^[7]) 或折射震測 (Seismic Refraction Method) 方法 (Palmer^[8])。前者由於其低成本與施測便利特性，在工程實務調查上被廣泛應用，對於近地表數十公尺至百公尺範圍，可以獲得相對高精確度的波速剖面。而震測法利用人為產生的震波，紀錄通過地下地層反射或折射後的訊號，經震波分析，得以描繪地層形貌。該方法廣泛使用於石油探勘及大地工程地下構造測勘，也對於活動斷層的偵測提供極大貢獻。

區域地質構造與不連續面分布調查與參數特徵化

區域地表構造線型與露頭裂隙分布調查

(1) 地表構造線型

近年來剝除植生與建物之高精度 DEM 已廣泛應用於人工或半自動之地質構造、地表線型，以及崩塌地等地形貌判釋工作^[9-14]。為瞭解研究區域內可能的地質構造分布，利用前述所產製之剝除植生與建物之高精度 DEM 來進行地表構造線型判釋。

(2) 露頭裂隙分布資料

為建置研究區域內之 Geo-DFN (Geological Discrete Fracture Network)，須針對地表露頭及鑽孔之井下裂隙進行調查。首先在露頭裂隙分布調查部分，其可分為兩個方法，第一種採用二維視窗法進行人工量測，第二種則係採用無人機光達進行三維半自動分析。前者將針對研究區域內人車可及的露頭進行人工測繪，然而，此類調查常碰到雖有完整露頭，但因人力難以到達坡腹或坡頂，以致於無法獲得完整露頭之所有裂隙數據，僅能以地面可量測處之資料進行分析，但此做法可能受到局部露頭的裂隙出露狀況影響統計結果，且人力量測次數仍屬有限，是故，近期已發展以無人機光達 (Unmanned Aerial Vehicle Light Detection And Ranging, UAV LiDAR) 針對完整露頭施測，據以進行完整露頭三維點雲模型建置，進而分析萃取完整露頭之裂隙數據資料。

(3) 井下裂隙分布調查

前述透過地表露頭調查技術已可取得區域及場址尺度之裂隙分布特性，而為建置序率式區域地質模型

及提供離散裂隙網路參數集，另需挑選研究區域範圍內之鑽孔進行井下裂隙分布調查。

孔內攝影係於鑽孔中置入一攝影設備，於鑽孔吊放或拉升的過程直接攝錄孔壁影像，可獲取鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布及特殊地質材料，評估地層破碎程度與主要含水層位置 [15-17]，對於傳統鑽探調查限制的改善提供解決之道。

常用之孔內攝影調查方法分成音射式與光學式兩種。以下說明兩種設備之調查內容與方法。

(a) 音射式孔內攝影技術：音射式孔內攝影係於液體中發射超音波束，側錄地層的反射波以獲得井壁軟硬程度的反射振幅，此外從反射回波的走時訊號可獲得音波發射源至孔壁之間的距離，藉由鑽孔的全方向掃描與縱深向測量，可獲得孔壁的連續影像與鑽孔的 360 度半徑資訊。本技術應用超音波在液體中的傳導來顯像，故無法提供地下水水面以上之側錄成果，但可於高濁度水質之地下水環境進行量測位態資訊而不受干擾。

(b) 光學式孔內攝影技術：光學式孔內系統硬體包含 LED 光源、鏡頭以及感光元件，藉由光源控制孔壁反射光量並透過鏡頭控制曝光強度後，被攝孔壁投影至感光元件上以數位資訊保存。本技術應用光學原理成像，攝影過程不受介質差異影響，即便在無地下水的鑽孔內，亦能側錄到完整井下裂隙資料，但光學成像對空間通視需求性高，在地下水環境中側錄時，濁度將主導攝影的品質優劣。

因上述兩種設備各有其優劣，且地質環境、地下水位深度及鑽探過程所導致之水質變化情形均會影響調查成果之品質，故一般會於鑽孔執行兩種量測技術，以利後續進行比較分析與互補設備本身量測資訊及結果不足之處。圖 4 為孔內攝影量測結果的展示圖，包含光學式孔內攝影調查獲得之裂隙分布成果及音攝式之 3D 裂隙岩體結構特徵影像（鑽孔尺度），圖 5 則為井下裂隙特性的統計結果展示。

序率式區域地質模型特徵化與離散裂隙網路參數集建置

過去在 SNFD2017 報告中，僅透過孔內裂隙分布資料進行統計分析，分別歸納岩層層與地下岩層之裂隙叢集分布情形，建構離散裂隙網路參數集 (DFN Recipe)，而工程設計與安全評估則利用此參數集生成裂隙網路進行後續分析，由於離散裂隙網路生成過程中，採取隨機生成的方式，過去瑞典 SKB 研究指出離

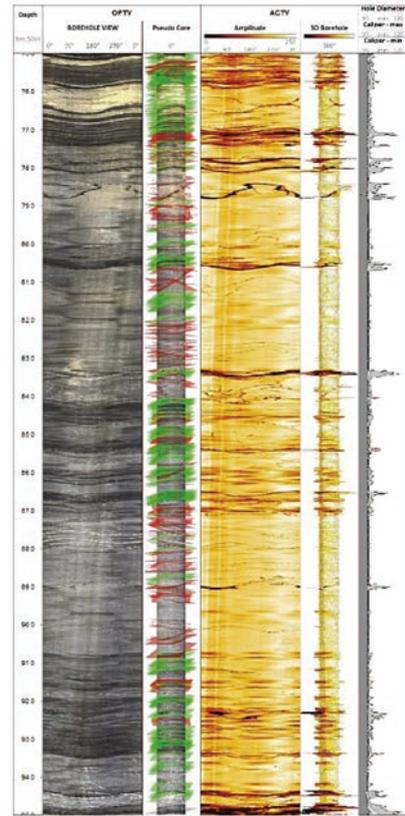


圖 4 孔內攝影示意圖

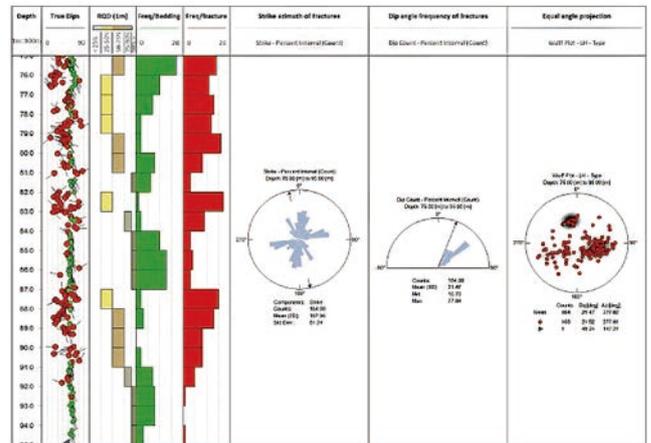


圖 5 孔內攝影位態分析示意圖

散裂隙網路參數集仍須結合地表露頭調查資料與不斷的驗證更新才能獲得較具場址代表性之結果 [2]。

此外，Munier [18] 提出以系統化方法針對裂隙調查數據進行序率式分析，離散裂隙網路所需採用之調查數據與對應生成參數，如圖 6 所示；而 Fox et al. [19] 則以瑞典 Forsmark 場址周圍以及各裂隙域之調查數據進行實務之模型建立與不確定性探討，並建議使用鑽孔之裂隙調查數據執行離散裂隙網路模式之驗證 (Verification) 與條件式 (Conditioning) 模擬，以降低模式之不確定性。離散裂隙網路模式特徵化之流程概念可參考圖 7。



圖 6 建立離散裂隙網路模式之調查數據與生成參數項目
資料來源：重繪自 Munier [18]

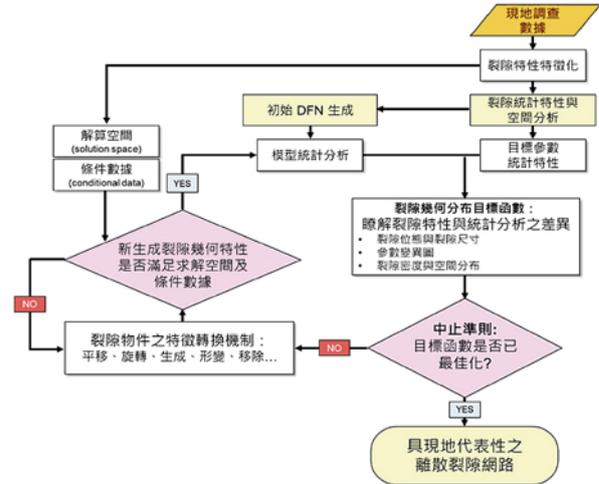


圖 7 離散裂隙網路模式建立與特徵化程序
資料來源：重繪自 Tran et al. [20]

岩石力學及熱學描述模型

國際上針對高放射性廢棄物之最終處置，皆採取深層地質處置的方法，透過天然障壁的隔絕與圍阻，避免放射性核種外釋對生物圈產生危害，而如何選取適當的深度進行處置場設計，以及評估母岩特性是否能滿足工程設計與安全評估需求，皆有賴於岩體之物理特性與岩石力學特性，因此須取得研究區域內岩體之含水量、孔隙率、密度、力學及熱學特性（包含各種岩石力學室內試驗、裂隙面之正向勁度、單壓強度、潛變特性及熱傳導特性等）與地溫梯度等岩石物理特性資料，綜整量測數據資料，判釋地質構造分布情形，建立三維地下岩體孔隙率分布模式、地下岩體密度與地質構造分布模式及地下岩體熱特性分布模式。

區域應力場空間分布

現地應力量測的方法眾多，一般工程較常用的包括水力破裂法（hydraulic fracturing）、平鈹千斤頂法（flat jack），以及套鑽法（overcoring）、井孔崩落法（borehole breakout）等，由於這些試驗大多在隧道中進行，必當受到開挖擾動影響而改變原始應力的大小及方向，相形之下水力破裂法、套鑽法，以及井孔崩落法（如圖 8）可透過鑽井穿越應力釋放帶（開挖擾動帶），因此試驗較能反映自然應力的結果，惟水力破裂法係對地層施壓產生裂隙，在高岩覆的堅硬岩盤需具備相當規模的加壓設施得以將地層劈裂，且可能有增加水力連通性等隱憂，因此不論在經濟性或安全性均有其限制。另一方面，套鑽法係以鑽孔後，岩石於自由面應力釋放產生的變形來

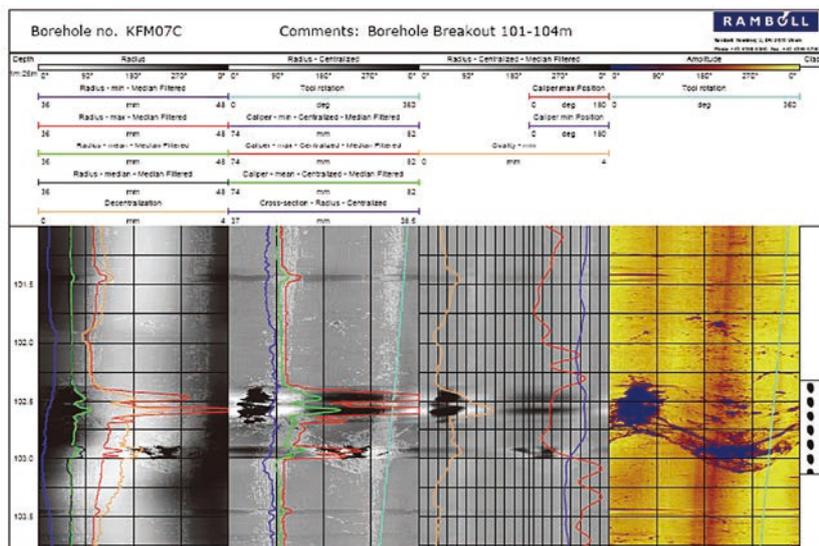


圖 8 井孔崩落法之實際案例 [21]

量測現地應力；而井孔崩落法則係透過鑽孔過程，孔壁受現地應力影響而產生之不對稱變形，進而由井徑變化情形來推估現地主應力方向。

另室內試驗亦可採用岩心音射量測技術、岩心非彈性應變回復量測及岩心直徑試驗等方法，來與現地量測結果進行比較分析。此外，廣域地質構造之間接量測，例如全球衛星定位系統（GPS）連續觀測資料分析、震源機制解等，則可做為量測成果之區域代表性檢核，包含其方向性、最大與最小主應力之比值等。藉由上述資料比對之結果，亦可採定量或半定量方式檢視量測成果的試驗誤差，進而探討其誤差來源為儀器限制性抑或是人為操作等，並評估影響試驗結果因素之不確定性。

場域受震行為特性分析

1. 位移定值影響特性模式

臺灣地體構造如此活躍區域，處置設施長時間受鄰近斷層、孕震構造及隱沒帶所引致地震所產生之永久位移影響，為安全評估之重要議題。當時間納入安全考量，則可經由機率式斷層位移危害度分析（Probabilistic Fault Displacement Hazard. Analysis, PFDHA），量化特定時間內斷層錯動時可能引致之地表位移量超越機率，提供結構物設計對抗潛在斷層位移災損合理參數。機率式斷層位移危害度分析方法中，主斷層錯動產生位移之預估式為重要關鍵。然，斷層位移模型（Fault Displacement Models）仍寥落且約束性不佳，關鍵原因在於缺乏詳細且足夠的斷層位移觀測資料。有鑑於此，須探討國內外各類靜態及動態模擬方法，配合輔助機率式斷層位移危害度模式所需，以發生過地震斷層引致地表變形之案例性分析之餘，確認方法可行性後，進而使用模擬成果探討應用於臺灣使用斷層位移預估之適用性

2. 位移機率影響特性模式

斷層錯動與地變形之效應是處置設施最需考量的受地震影響作用。因劇烈地震所產生之同震地表位移，對位於斷層上或附近之結構物可能造成重大損害，並將影響未來結構安全性，評估可能位移量值可作為結構適當之設計依據而減輕危害衝擊。Youngs 等人^[22]提出機率式斷層位移危害度分析來估計斷層位移量，但對於斷層位移錯動之危害分析仍然有相當高之不確定性，部分原因乃是缺乏詳細之斷層位移觀測資料。此

外，機率式斷層位移危害度分析，須搭配合宜之位移資料庫，並選擇適合本土之地表破裂分布函數、斷層震源模型、斷層活動度等進行機率式斷層位移危害度分析運算，另亦須考量地震模擬、斷層破裂物理學和流變學之成果及區域地質、地震活動和構造特徵，來降低分析結果之不確定性。

場域振動影響特徵分析

1. 地表及井下振動特徵模式

高放處置設施之建置前、建置階段及營運階段之地震監測工作，須瞭解環境背景震動特性及受地震引致震動特性，作為不同階段對於地震安全評估的依據。針對臺灣地震活動極為活躍的背景，場址描述模型勢必要探討其地震及引致之地震動特性，作為後續場址安全評估的基礎背景資料。從以往的隧道及礦場坑道地震監測相關文獻資料，一般而言，地底下深部所記錄到之地震動，比起地表地震動來的小^[23-27]。然而，隧道及坑道設施隨之地震所引發地震動之衝擊下，仍有引致損壞的可能性^[28]。

我國之「高放射性廢棄物最終處置場址技術規範」雖明文規定場址不得設置於活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區，然臺灣多震環境下，雖從法規上已初步排除活動斷層及構造之直接影響，然而間接由非場址區域內之斷層構造發生地震所引致地動影響則無法排除，因此地震引致處置場址之地震影響為安全評估之關鍵議題。而處置場若規劃於 300 m 至 1,000 m 概念下，場域振動影響是否隨深度有其差異性亦為探討分析之重點。

2. 場域背景震動特性模式

地震儀器監測目的在於釐清場域之長期背景地震活動，及提供設施建置後，脆弱構造所引致之地震及岩石不穩定狀況。經由空間及時間高解析監測下，則可於設施建置同時，辨識岩層細部弱帶、活動斷層或構造、岩石內水移棲路徑之發展狀況，並且輔助瞭解區域應力狀態。藉由場域背景震動特性模式技術及分析程序之建立，將可應用於獲取場址尺度所記錄之背景振動特性。

針對地下處置設施於建構前、中、後期之振動訊號分析，必須經由完整分析評估連續振動記錄，釐清季節性及事件性之特定場域特性，作為後續系統安全及風險評估之重要基礎資訊。

適性地動預估式及其不確定性模式

高放處置地下設施之地震影響性評估，較一般地表結構物有不同的考量，尤其是考慮堅硬岩盤內之地震動模式。一般地表結構物之設計地震歷時的計算，會以參考地盤（760 m/s）進行地震危害度分析計算，再利用地盤反應分析，往上計算至特定地盤特性之地震歷時與地震動值表現。雖然過往地下地震監測資料顯示，地震動隨深度會有逐漸減弱的趨勢，然而對於堅硬母岩區域之地動特性缺乏實際之觀測紀錄。若以特定場址特性而言，母岩環境的差異必然存在地震動表現的差異，當有現地地震監測資料，經由與其他監測資料比較，可深入探討場址區域性地表震動特性差異，除了更能瞭解場址地盤特性所造成的場址效應外，也能透過區域差異的修正獲得現地可使用之場址特性參考基準。

岩石力學參數特徵化與岩石力學描述模型建置

國際上針對高放射性廢棄物之最終處置，均以深層地質處置為設計方案，因此如何決定最佳處置深度以及選取合適岩層進行施工，取決於岩層的材料特性與力學特性。而在安全評估方面，岩石力學描述模型更可用來評估各種地質作用對於處置場穩定性之影響。透過岩石力學現地調查技術發展，可獲取不同岩層之參數特性，並提供後續場址描述模型、隧道設計與施工、地震剪力情節的安全評估使用。

岩石力學描述模型之建置，除了各岩石力學單元之空間分布外，各單元之岩石力學特性更是該模型最重要的內涵，因此在模型建置前，首重於確認模型所需涵蓋之特徵化參數，這些參數不僅是岩石力學單元劃分的重要依據，亦是模型建置後，賦與各單元特性的基礎資料，故有必要先透過文獻蒐集研析之過程，歸納所需之參數表。

岩石力學描述模型的建立可分為理論方法（theoretical approach）、經驗方法（empirical approach）以及應力方法（stress approach）等3種主要面向（SKB^[29]，圖9），在完成模型的建置後，可藉由後續的檢驗工作，逐步確認模式內各參數的敏感度及模式的不確定性。

地球化學描述模型

地球化學調查資料與參數特徵化

岩石礦物之組成成分為地球化學描述模型建置時之重要參數資料^[30,31]，母岩之岩石礦物組成成為影響地下

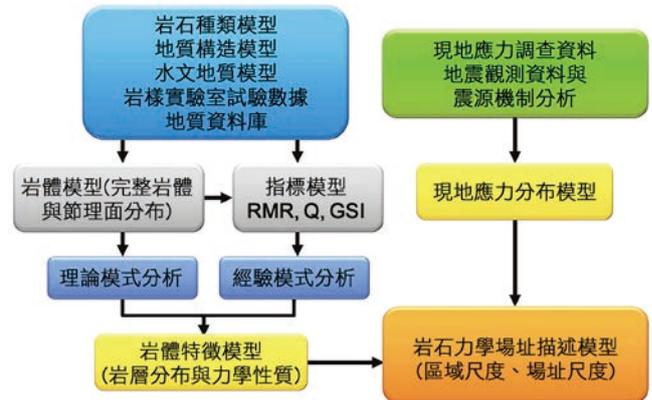


圖9 岩石力學描述模型建置之流程圖^[29]

水及地表水成分的主要因素，然而，除了母岩之外，因裂隙為地下水流動之主要路徑，因此裂隙填充物亦對地下水成分與核種吸附特性具有顯著的影響，另一方面，裂隙填充物多由古地下水沉積與沉澱所生成，其亦可反映出地下水的成分演化，因此在建置地球化學描述模型前，須先透過岩石礦物分析工作掌握母岩及裂隙填充物之特性。除了地球化學描述模型的建置外，地史演化歷程亦可從岩石礦物成分及定年結果進行推導，從而建立地史演育模型^[32]。

1. 地下水成分與特性分析

國際高放處置皆選取低透水性之岩體作為處置母岩進行放射性廢棄物處置^[2]，而存在於岩體中的裂隙或破碎帶，不僅是地下水流動的主要通道，同時也會影響地下水化學特性演化，進而導致核種傳輸之遲滯能力變化，因此如何調查現階段之地下水組成分布將影響著後續安全評估的成果，藉由不同季節與不同深度之地下水樣本，瞭解研究區域內之地下水組成季節性變化情形，並透過地下水水質長期監測資料，觀測其受到自然作用之變動範圍與影響特徵，如：降雨、地震等，歸納地下水歷時演變特徵，以提供後續模式分析使用。

2. 地表水體成分與特性分析

地下水與地表水地球化學特性是高放處置分析很重要的參數（如表1）^[2]，透過比較地下水與地表水之化學特性可協助釐清研究區域地下水補注來源與劃定模型之補注邊界，亦可透過地表水化學特性，瞭解核種外釋至近地表區域，近地表土壤層之核種吸附能力與遲滯能力，因此須取得研究區域內不同季節地表水樣本之地球化學特性，瞭解研究區域內之地表水成分季節性變化情形，並提供地表描述模型分析使用。

表 1 地表水及地下水地球化學特性分析 [2]

項目	測量參數
地下水與地表水基本特性分析	酸鹼值 (pH)、導電度 (EC)、鹽度 (salinity)、氧化還原電位 (Eh)
地下水與地表水化學特性分析	總溶解固體、總有機碳濃度、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-
地下水與地表水微量元素分析	Fe, Mn, U, Th, Ra, Al, Li, Cs, Sr, Ba, I, Br, F, NO_x , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Cu, Zr, Rb, HS
地下水與地表水同位素分析	^3H , $\delta^2\text{H}$ (D), $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

3. 地球化學參數特徵化與地球化學描述模型建置

地球化學描述模型主要係提供處置母岩鄰近區域的地下水質與化學特性分布，可推估古水文地質變化，亦可預測處置母岩的地球化學演化情形 [33]，地球化學特徵描述包含地表水組成、地下水組成、地表水與地下水交互作用、周圍岩石種類對地下水化學特性的影響、岩水反應等 [34]，透過地球化學描述模型，可分析未來處置設施周圍岩體之地球化學條件演化過程，以利安全評估分析使用。

水文地質描述模型

水文地質空間分布特性與三維數值分析

在處置母岩中，地下水主要藉由裂隙與岩層孔隙進行流動，其流動速率的快慢將直接影響緩衝材料侵蝕速率與銅罐腐蝕速率，而當核種外釋後，岩層裂隙網路特性與地下水流場分布皆會影響核種外釋點的位置，因此如何描述裂隙岩體裂隙參數與滲透性演化儼

然成為至關重要的議題，也深深影響工程設計與安全評估結果之適宜性及合理性。

然而調查裂隙岩體水文特性並非易事，肇因於地下水在岩層中流動，對於完整岩石或是不連通的裂隙，其地下水流動速率極為緩慢，地下水流通常集中於少數透水連通裂隙 [35]，此流動通道稱為優勢水流路徑 (preferential flow path)。因此，須獲取研究區域之水力試驗與水文地質特性資料，提供岩體透水性與裂隙水流分析使用，並提供後續建置水文地質場址描述模型之基礎。

定率式與序率式岩體透水性評估分析

針對區域尺度與場址尺度皆會使用定率式方法 (deterministic approach) 建立已知岩石單元、地質構造與不連續面之數值模型，利用連續模式與孔隙介質模式計算長時間尺度之核種外釋情境，此方式不僅可有效減少系統運算資源與時間，亦可透過確定性地質構造與不連續面模擬，補足離散裂隙網路模型以隨機方法生成裂隙所產生的不確定性，結合區域地質特徵化結果，並蒐集區域地質構造的水文特性，建置不同尺度之定率式岩體透水性評估模型 (如圖 10)，提供地質構造之幾何分布與水文特性參數。

序率式岩體裂隙特性與透水性分析

過去在 SNFD2017 報告中的地質參數表 (工研院 [36]; 台電公司 [37]) 是引用瑞典 SKB 的裂隙尺寸與導水特性的經驗公式 (SKB [38]) 進行分析，由於裂隙

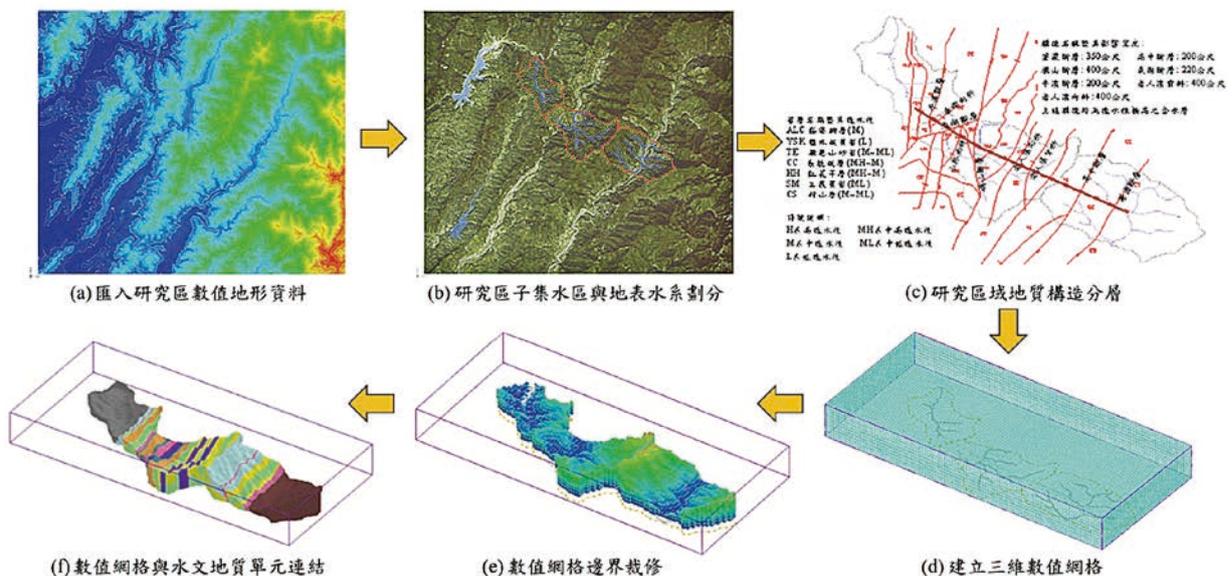


圖 10 廣域三維水文地質概念模型之建立流程圖

的導水特性為場址描述模型與安全評估的關鍵參數，因此在瑞典 SKB 提及裂隙尺寸與導水特性具有場址特性，但受限於過去參考案例之數據不足，此假設具關鍵性之影響，故建置本土化之裂隙尺寸與導水係數的經驗公式有其必要。

序率式岩體透水性評估模型

在 SNFD2017 報告中，係以離散裂隙網路參數集 (DFN Recipe) 為基礎，在後續工程設計與安全評估的應用，包含廢孔準則之處置孔截切分析、裂隙水流分析、核種外釋模擬等，都使用不同軟體生成各自之離散裂隙網路實現值，有些分析生成上百組實現值，為確定一組具代表性之實現值，瑞典 SKB 在場址描述模型中以下列兩種方式進行探討，第一種為地質離散裂隙網路參數集 (Geo-DFN Recipe)，透過地表裂隙調查與孔內裂隙分布資料統計獲得；第二種為水力離散裂隙網路參數集 (Hydro-DFN Recipe)，為進一步比對水力調查資料後，所獲得較貼近場址裂隙水流之參數集。

水文地質場址描述模型建置

過去臺灣處置計畫以離島結晶岩測試區為基礎，建置相關數據分析與特徵化技術，而 SNFD2021 報告則延續離島結晶岩之基礎，精進工程設計與安全評估技術，然而受限於水文地質之數據量不足，導致在後續安全評估數值分析過程中，很多參數都引用至國外場址資料，由於無法量化各種假設與引用下之不確定性，以致於安全評估結果缺乏本土代表性。因此，實務面的研究應基於本土取得之完整的現地試驗數據與水力試驗成果，進行水文地質參數率定，建置不同尺度之水文地質描述模型，並依循國外建置流程 (如圖 11)，分階段進行水文地質描述模型之更新。

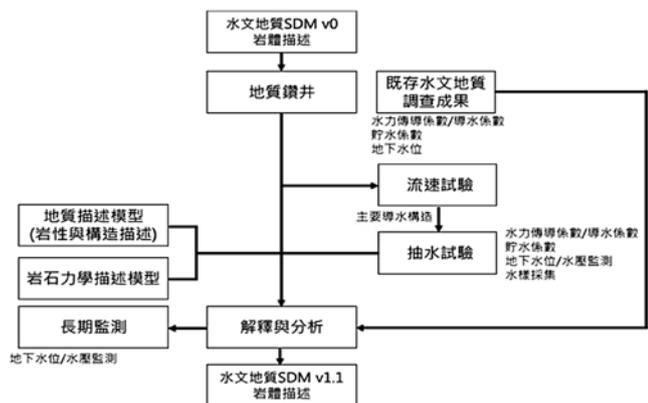


圖 11 執行初次調查前之水文地質描述模型工作規劃流程 [2]

傳輸特性描述模型

岩體傳輸參數特性分析與模式評估

在國際高放處置安全評估中，假設核種由處置場外釋的過程 (圖 12)，將經由岩體中的裂隙域 (Hydraulic Conductor Domain, HCD) 和岩石域 (Hydraulic Rock Domain, HRD)，最終經由近地表之土壤域 (Hydraulic Soil Domain, HSD) 傳輸至生物圈，而天然障壁 (地質圈) 之遲滯能力主控於岩層與土壤傳輸特性，對應將影響傳輸至生物圈的時間與放射性核種的活度。地質圈之遲滯能力是選址過程中所需考慮的要素之一，受到裂隙之通道水流效應、岩體之擴散與延散特性、岩體對於核種的吸附特性、遲滯特性等影響，均是性能評估與安全評估的關鍵影響因子 (圖 13)。因此，如何有效獲得研究區域天然障壁之傳輸特性與遲滯能力，對於後續傳輸特性描述模型之建立具有關鍵影響。一般常以示蹤試驗與岩石吸附試驗等方法，來獲得岩體中裂隙域與岩石域之傳輸特性與遲滯能力，以利後續建置傳輸特性場址描述模型。示蹤試驗示意如圖 14。

土壤或岩屑層傳輸特性分析與模式評估

水文地質空間通常可分為裂隙域 (HCD)、岩石域 (HRD) 與土壤域 (HSD)，SKB [39] 提到瑞典 Forsmark 的土壤域 (HSD) 約在地下 0 m 至地下 20 m 的深度

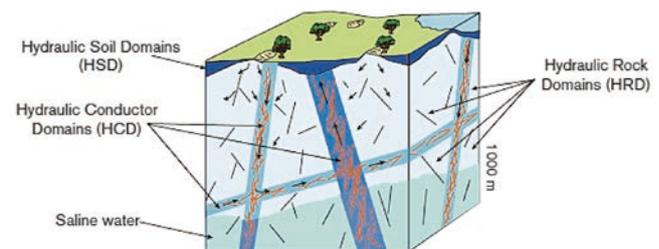


圖 12 研究區域之裂隙域 (HCD)、岩石域 (HRD) 與土壤域 (HSD) 示意圖 [2]

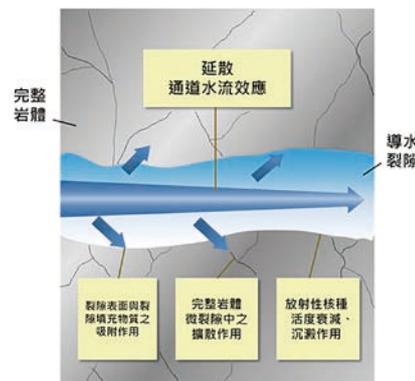


圖 13 核種於導水裂隙中傳輸所需考慮之作用機制 [2]

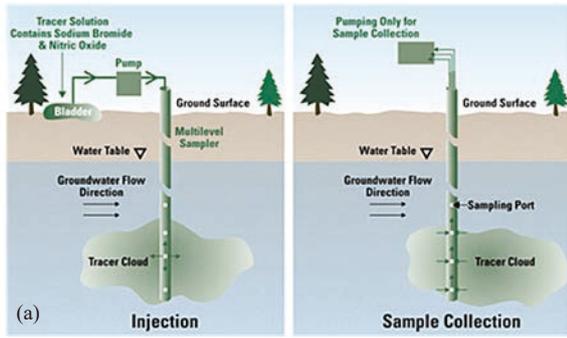


圖 14 (a) 單孔示蹤試驗示意圖；(b) 跨孔示蹤試驗示意圖

資料來源：(a) USGS: <https://www.usgs.gov/media/images/single-well-tracer-test>,
 (b) USGS: https://toxics.usgs.gov/highlights/contamination_sim2.html

區間中，此區域係由土壤介質所組成的岩屑層，描述溶質在土壤域（HSD）的傳輸情形通常使用溶質平流-延散方程式來表示，方程式中重要參數為孔隙率、延散係數與分配係數（吸附係數）：延散係數將影響著核種或是溶質在孔隙介質的傳輸特性；分配係數（Distribution Coefficient）為一旦核種進入土壤域（HSD）後，描述岩屑層的吸附特性；孔隙率則與土壤孔隙介質之含水量、流通量與滲透率有關，將影響著核種或溶質的傳輸速率。最後將區域地質特性之數值地形模型與地表系統之岩屑層分布結果，搭配研究區域的土壤樣本之孔隙率、延散係數與分配係數（吸附係數）的量測，據以建立土壤分類與土壤傳輸單元，以提供後續數值模式分析使用。

傳輸特性參數特徵化與溶質傳輸描述模型建置

由於不同岩體具備不同的傳輸特性，考量地質圈之 FEPs 需評估溶解物種的平流傳輸與混合、裂隙與岩石基質溶解物種的擴散傳輸、物種形成與吸附及膠體作用等影響，因此，基於國內外研究成果，及現地示蹤劑試驗數據、岩石吸附試驗與土壤延散試驗，進行傳輸特性參數率定，建置不同尺度之傳輸特性描述模型，並依循國外建置流程（如圖 15）建置傳輸特性描述模型。

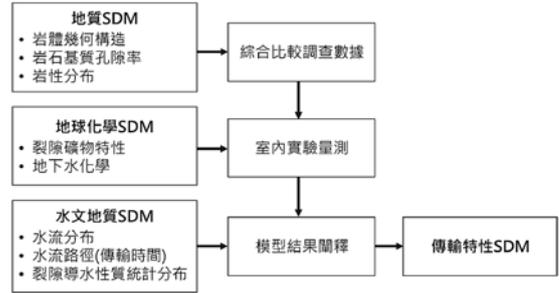


圖 15 傳輸特性場址描述模型所需資訊與建置規劃流程 [2]

地表系統描述模型

地表系統空間分布特性與三維數值分析

大氣中的水以降水、蒸發散、入滲及逕流等形式循環（圖 16），不斷在大氣、陸地及海洋之間交換，因此地表水、地下水及氣象長期且穩定的監測及不同季節之變化情形，對於研究區域因應未來處置設施之長期演化與安全評估需求，扮演著重要的角色。據此須評估土壤厚度分布及分析土壤樣本試驗參數，以及取得長時間之氣象、地表水及地下水的監測數據，以瞭解各式監測資料之歷時變化，方能建立本土地表系統空間分布特性及三維數值分析。

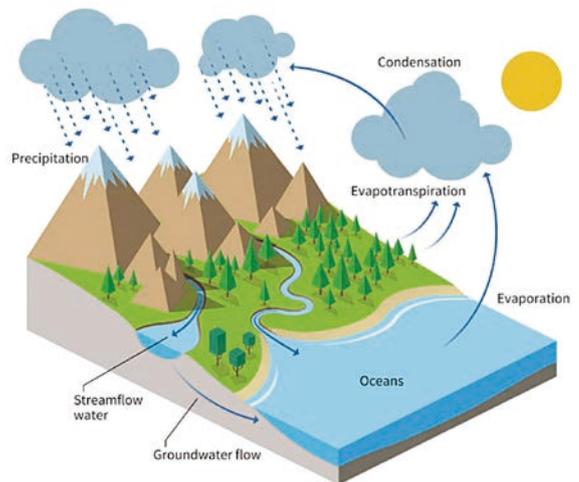


圖 16 大氣、地表水、地下水之水循環分布圖
 資料來源：<https://npwa.org/water-cycle/>

區域地表剝蝕速率評估

由地形演育觀點或依據地殼均衡原理可知地表抬升與構造有關，亦可能與剝蝕有關（如圖 17）^[40]，但不論地殼抬升與否，地表剝蝕（denudation）皆會造成處置設施靠近人類生活圈（如圖 18），其行為包含固體或溶質的形式流失的土地質量^[41]、風化（weathering）、搬運（transportation）及侵蝕（corrasion），故臺灣常見之地表

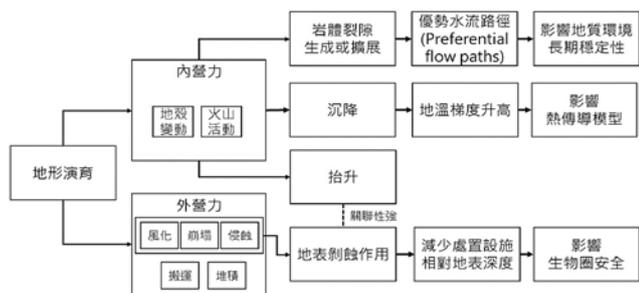


圖 17 地形演育造成區域地表抬升或沉降之影響

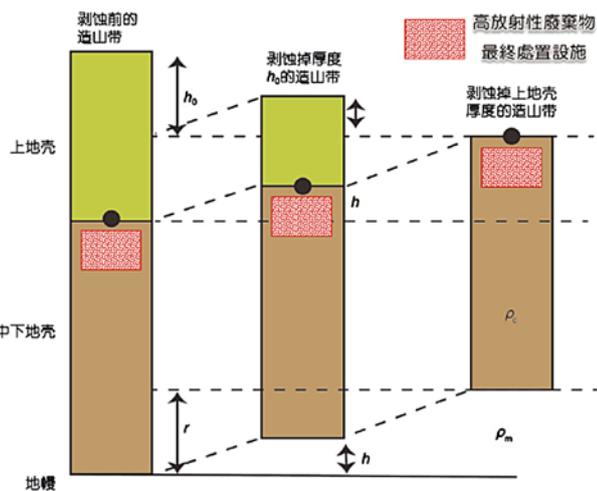


圖 18 地表剝蝕造成用過核子燃料最終處置設施靠近人類生活圖示意圖

資料來源：重繪自劉靜等人 [42]

剝蝕的行為，如：土壤沖蝕或基岩剝蝕、河床下刷或側淘、土石流及崩塌等。

此外，若以一個氣候循環的為分界，地表高程變化量可分為兩類評估方法，超過者為無法區隔侵蝕速率及抬升速率且需配合定年之長時間尺度推估法，另一者屬於需要分別量測地表抬升 / 沉降量及地表剝蝕 / 堆積量之短時間尺度監測法（如圖 19），且部分方法於臺灣地區已有研究成果（如圖 20）。但前述短時間尺度之地表抬升 / 沉降監測資料分布較為零散，且地表剝蝕多位於歷史災害發生地點，故須有長期的觀測數據方能具體評估最終處置設施之適宜性。

地表系統參數特徵化與地表系統描述模型建置

目前在高放處置計畫中之地表系統研究相對缺乏，對於崩積層厚度與地下水補注量皆採單一數值假設，此簡化假設均會影響地表水文與地下水文循環關係，亦間接影響處置設施的長期圍阻安全功能之評估結果，一旦處置設施發生圍阻失效的情形，放射性核種藉由地下水，經母岩之裂隙傳輸至地表後，亦將隨

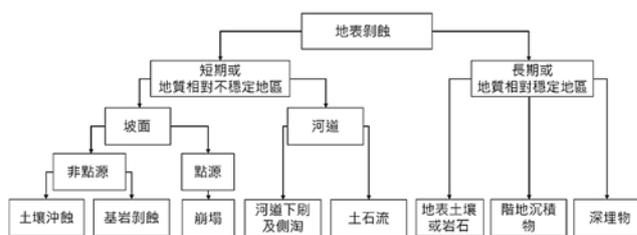
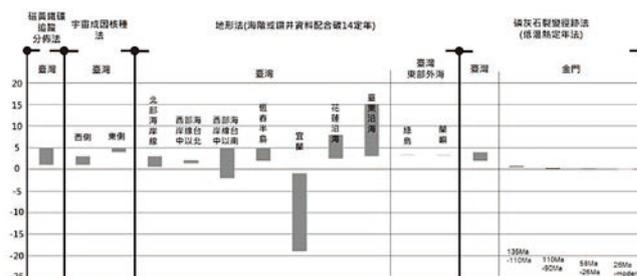
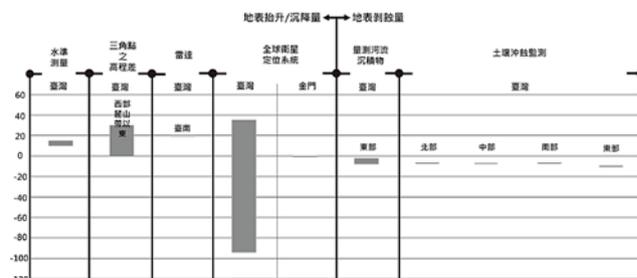


圖 19 短期及長期地表剝蝕評估對象分類示意圖



(a) 推估法



(b) 監測法

圖 20 地表高程變化量之推估法及監測法應用於臺灣地區前人成果圖（資料來源：[43-63]）

著地表河川流向進行傳輸，造成生物圈中對應的關鍵群體與曝露劑量之影響。為針對處置設施之長期安全評估，及滿足地下水文與生物圈發展相關模式需求，應取得完整的地表系統量測數據與觀測資料，進行地表系統模型參數率定，建置不同尺度之地表系統描述模型（如圖 21）。

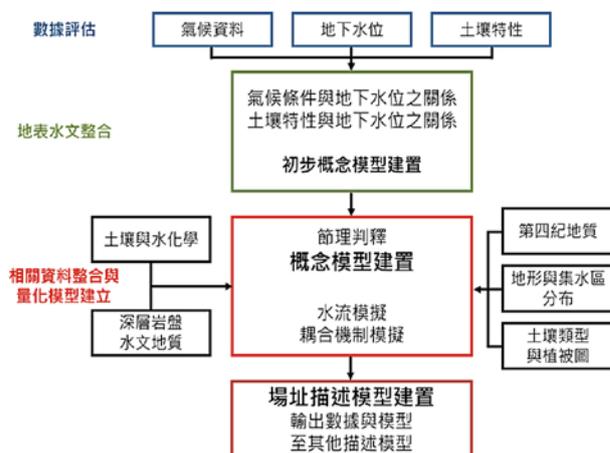


圖 21 地表系統與近地表水文場址描述模型建置概念流程

生態系統描述模型

生態系統調查資料間分布之數值模擬

生物圈安全評估的主要目的是評估當放射性核種自圍障壁釋放後，放射性核種進入生物圈環境，使人類或其他物種接受輻射曝露，增加輻射對其健康危害之風險。評估內容將可作為生物圈完整描述和分析，並評估不同放射性核種將導致人類或生物圈物種可能接受之輻射劑量，進而提供安全評估其輻射導致健康危害之年風險。因此，生態系統描述模型需包括生態系統模型架構、主要傳輸途徑、地景模型及生態系統參數。生物圈核種傳輸之起點是指放射性核種由近場釋出到地質圈再遷移進入連通之地景發展生態系統。對於生物圈的主要組成部分如圖 22 所示，相關數據蒐集與生態調查的內容，包括：植物相生態模式、動物相生態模式、農林漁牧業分布與土地使用型態模式等，利用各種生態模式所獲得之森林分布與農林漁牧業分布等資料，搭配水體分布資訊，可進行整合性分析，建立地景模式；而搭配地景模式，得以研究生態系統調查資料間分布及進行數值模擬。

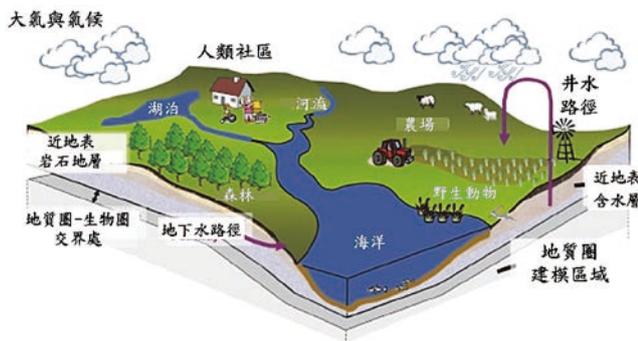


圖 22 生物圈組成示意圖

1. 植物相生態模式

植物生態系統為核種外釋後之生態傳播路徑與關鍵群體之選擇，亦屬生物圈重要的一環。植物相調查以物種為對象，須將某一地區所有植物種類列出清單，詳細記錄每一物種的族群數量、族群結構、族群分布、族群動態及生育環境等基本資料。而植群調查則以植物社會（一群對環境需求相似的植物集合體）為對象，利用取樣的方式，調查某一地區所有植物社會，並記錄每一種植物社會的組成、結構、分布等，並推測各植物社會演替動態及植物社會間的相互關係。

2. 動物相生態模式

動物生態系為核種外釋後之生態傳播路徑與關鍵

群體之選擇，亦屬生物圈重要的一環。因此，在進行生態系統特徵化評估時，為完整描述生物圈特性，並評估不同放射性核種將導致人類或其餘物種可能接受之輻射劑量，透過安全評估分析核種外釋輻射導致其健康危害之年風險。

3. 農林漁牧業分布與土地使用型態模式

在生物圈描述模型的建構方面，研究區域內農林漁牧業活動之分布資料，包含：土地使用型態資料、作物栽種與動物飼養、人口與聚落分布調查、農產型態及畜牧型態調查資料等，可代表人類在研究區域內的活動型態，以及在放射性核種釋出後，人類可能接觸、吸入或攝入放射性核種之途徑，並分析各項參數變動之影響因素，探討參數間的關聯性，建立農林漁牧業分布與土地使用型態模式。

4. 地景模式

有鑑於地景演化議題，涵蓋許多元素的交互影響，其中水體分布資訊、森林地景變遷（forest landscape change）與地質模擬（geology simulation）均為重要的議題，同時，考量演化分析受時間、空間與人為因素等三大主軸之影響，依據特定研究區與尺度各自發展出不同的模式與應用，故有不同的參數選定、演算法、不確定性及情境分析等時空交互作用所構成的關鍵議題。地景模式（如圖 23）須利用其他生態模式所獲得之森林分布與農林漁牧業分布資料，搭配水體分布資訊，進行整合性的分析，作為生態系統調查資料間分布及進行數值模擬研究之依據。

生態系統描述模型建置

生物圈係為處置系統核種釋出經由工程障壁至天然障壁，再由地質圈外釋出的受體。生物圈評估內容須確定該核種污染物在環境中的分布，並確定與處置系統

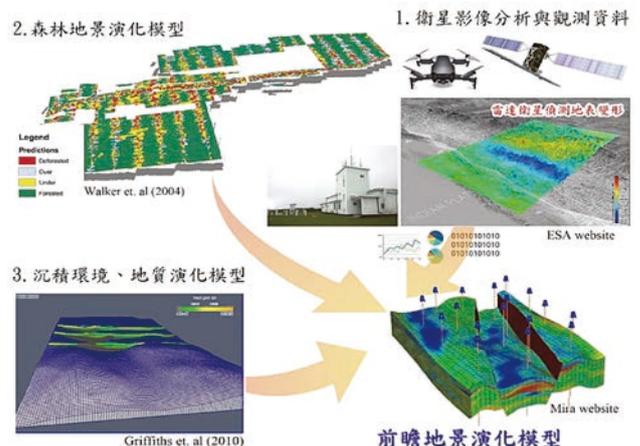


圖 23 地景演化模型示意圖

有關之傳輸終點。這些終點包括潛在環境濃度和人類及其他生物體的潛在曝露途徑。在評估過程中，放射性核種通過生物圈的遷移需要進行模擬預測，以便能夠估計環境介質（例如土壤或地表水）中的核種濃度。這些濃度用以估計關鍵群體（可能最易受輻射的群體）和非人類生物群的輻射接收劑量。因此，生態系統描述模型為放射性核種從深層處置系統外釋的潛在後果提供環境背景條件。為了研究此環境背景條件，需分析地景地表系統內部和之間的物質通量，任何處置系統之生物圈可分為三大生態系統：陸地、地表水（包括溪流、河流和湖泊）和河口海岸海洋系統，如圖 24 所示。

在我國尚未選定高放處置場階段，先行建立生物圈生態系統特徵化與模組，可預先完成生物圈安全評估有關之場址描述模型技術發展。針對生態系統植物相、動物相、農林漁牧業分布與土地使用型態及地景模型進行基本資料調查，並再使用特徵化技術與描述模型建置方法（圖 25），除單個生態系統外，並針對確定特定生態系統或子生態系統內部和不同生態系統間之轉移通量的機制和動態建構模式，以便能對生物圈系統能有長期持續的認知與評估。

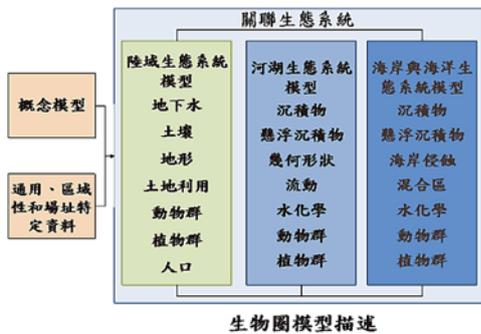


圖 24 生物圈模型描述概念示意圖

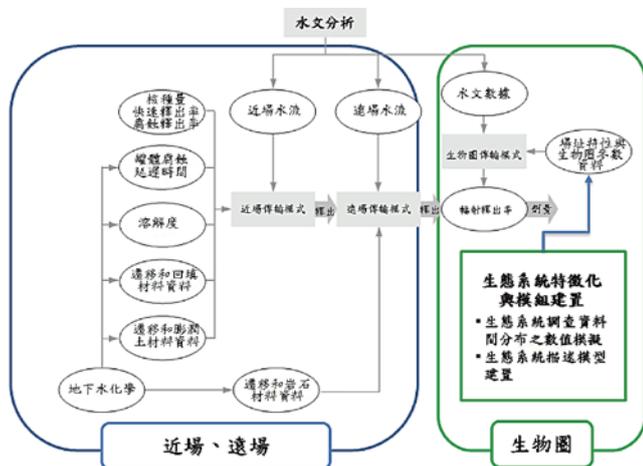


圖 25 近場、遠場及生物圈安全評估作業之模式計算流程

現階段發展之關鍵技術

高階核廢料處置場址模型對於岩體裂隙與優勢水流路徑必須詳細調查，完整且熟稔的孔內水文地質調查技術即可掌握關鍵的特性及參數。針對建構合理化之裂隙岩體模型，地表露頭及孔內攝影調查量測之裂隙位態分布與孔內地下水流速調查量測之垂直流速數據最為關鍵，以下分別說明三種量測技術之發展情況。

UAV 光達之露頭調查技術

為建置研究區之離散裂隙網路模型 (Discrete Fracture Network, DFN)，地表露頭調查為獲取裂隙特性最直接、有效且可信的方法，然傳統之露頭調查常碰到，雖有完整露頭，但因人力難以到達坡腹或坡頂，以致於無法獲得完整露頭之所有裂隙數據，僅能以地面可量測處之資料進行分析，但此做法可能受到局部露頭的裂隙出露狀況影響統計結果，且人力量測次數仍屬有限。近年無人機 (UAV) 承載能力與飛行穩定性大幅提升，又因光達 (LiDAR) 模組微型化，故以無人機光達 (Unmanned Aerial Vehicle Light Detection And Ranging, UAV LiDAR) 可針對完整露頭施測，據以進行完整露頭三維點雲模型建置，進而分析萃取完整露頭之裂隙數據資料。

無人機光達方法之三維半自動分析方面，將可建置完整露頭之三維點雲模型並分析其裂隙分布特性，首先於室內作業階段預先規劃施測航線以及地面控制點布設位置，其施測範圍將包含傳統二維視窗法範圍，以供比對分析使用。室外作業時，將採用同時搭載 IMU 與即時動態定位技術 (Real Time Kinematic, RTK) 之 UAV LiDAR 設備，於完成地面控制點之布設後，以地面 RTK 設備量測地面控制點之坐標，並依據規劃之航線施測。施測完成之三維點雲模型將進行其精度檢核，並於編修及濾除植生之點雲後，產製剝除植生後之完整露頭三維點雲資料 (圖 26)。基於空間中至少三個點便可形成一個面的概念，可利用點雲資料進行裂隙面的萃取 (圖 27)，如片理、解壓節理，以及其他裂隙，而為提高裂隙面的代表性，亦須依據各露頭之岩石特性來訂定每個裂隙面至少所需包含的點雲數量，以避免萃取到由太少點雲所構成的零碎面。

為了確保前述無人機光達方法之三維半自動分析成果與二維視窗法之人工量測成果有其一致性，以確信可利用完整露頭三維點雲資料來進行所有裂隙萃取面的組

數、延伸性、間距等特性分析，後續亦須利用兩種分析成果進行比對分析（圖 28），以確認探討人工量測與半自動分析之誤差，進而降低量測之不確定性 [64,65]。

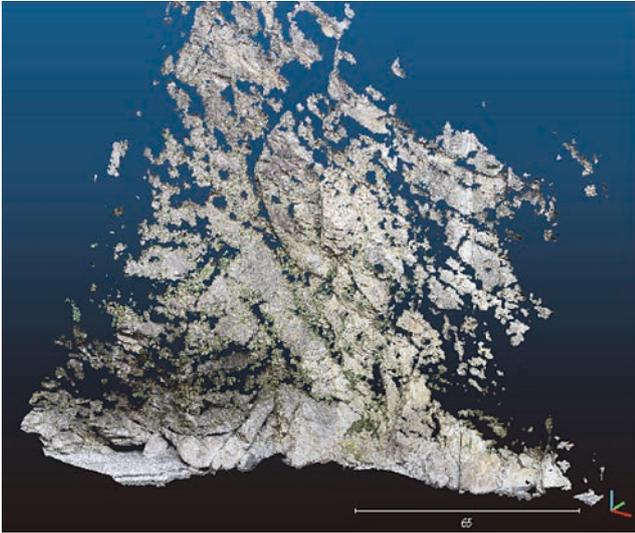


圖 26 完整露頭之三維點雲模型

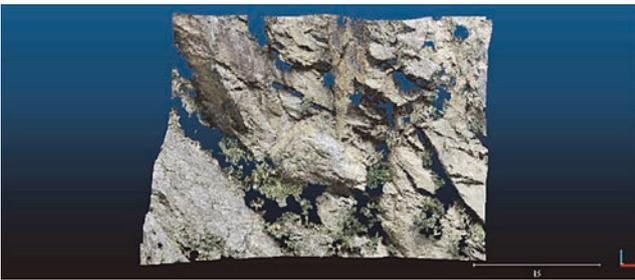


圖 27 利用三維點雲資料進行裂隙面萃取之成果示意圖

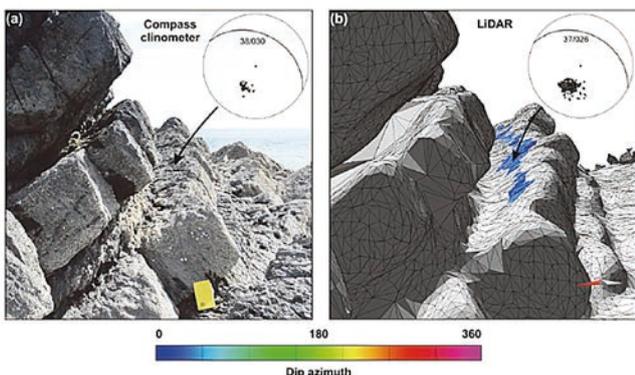


圖 28 不連續面位態之人工量測、LiDAR 模型半自動分析成果比對示意圖 [64]

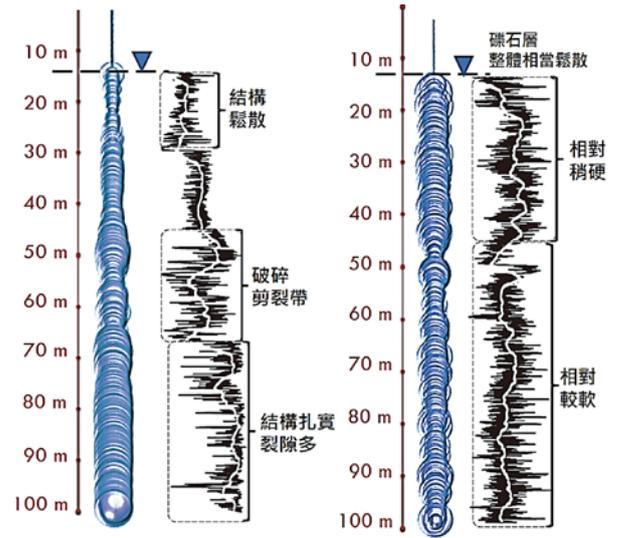


圖 29 擬三維岩體結構顯影。(左) 裂隙岩層；(右) 岩屑層

孔內攝影調查之三維成果展示

孔內攝影調查技術依其功能可分為光學式及音射式兩種，一般來說，除地下水位太深而以光學式探頭進行調查外，常以音射式進行側錄，其優點為可不受水質濁度影響而獲取裂隙位態分布及可由音波反射振幅之結果進階分析獲得岩體結構特徵，從最初僅能顯示地層結構相對鬆散與堅硬之擬三維顯影（圖 29），至最新的全視角三維結構顯影技術（圖 30），已可整合位態資訊、井徑變化及內寬大小呈現出真實地層細緻的三維裂隙分布結構特徵，大幅提升孔內攝影判釋成果的易讀性及工程應用的便利性，並可與工程規劃階段所建置之裂隙岩體分析模型進行驗證比較，提高規劃結果的可信度。

孔內高精度地下水流速調查

藉由孔內攝影之三維岩體結構特徵結果可掌握地層主要裂隙區段及位態分布，進而產製 Geo-DFN，惟研究場址的地下水流動特性往往是影響工程規劃設計與評估成果的關鍵要素，且如何從 Geo-DFN 結合地下水流動特性轉化為 Hydro-DFN，為工程分析與設計的重點研究之一，而孔內地下水流速調查技術為最直接且可獲得地下岩層各深度流動特性之方法，可分為自然流場與抽水狀態兩種量測方式，其中，以抽水狀態對提升透水裂隙之解析能力有較佳之效果，然而在流速儀量測時獲得的流速（流量）資料為量測點以下地層所提供，因此每個量測位置容易受到其下方區段出水量干擾，降低其解析能力。

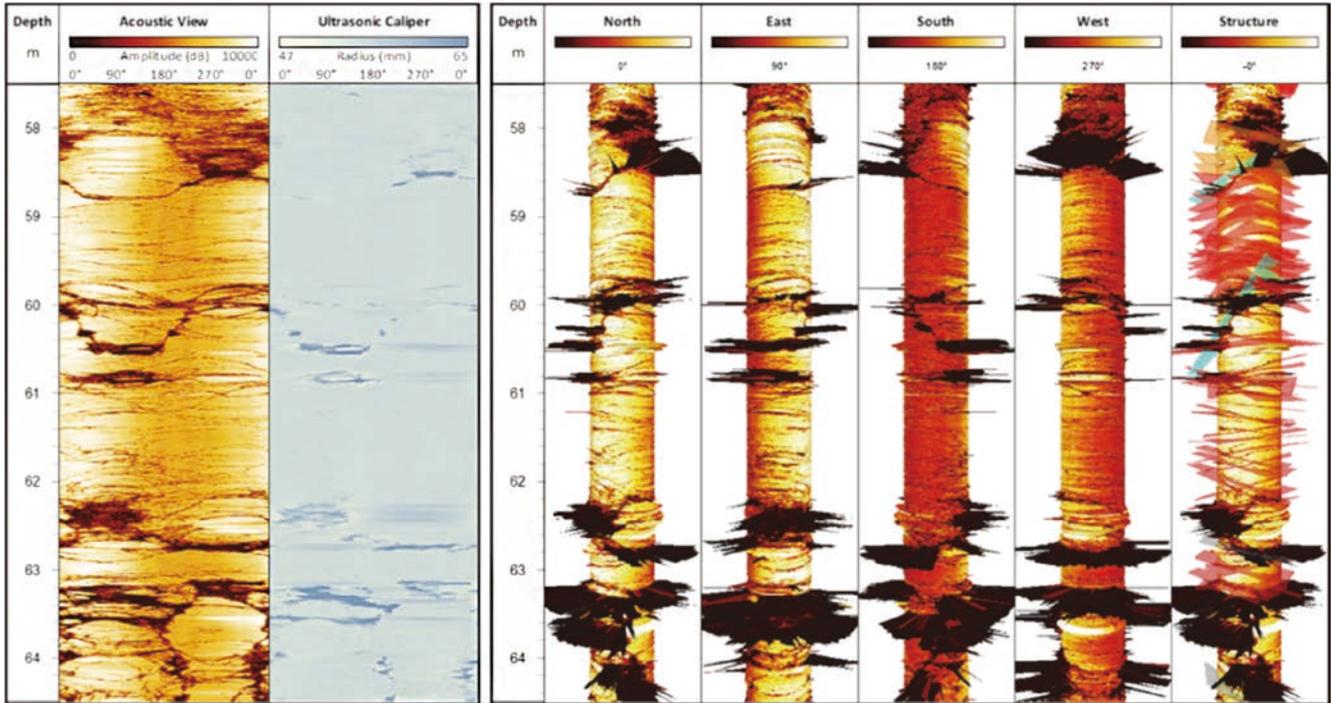


圖 30 全視角三維岩體結構特徵 (結合井徑調查)

據此，國內外專家學者分別研發相關具量測特定區段範圍之流速裝置，如圖 31 所示，其中圖 31(a) 為芬蘭 POSIVA 公司針對核廢料處置場址之裂隙水流特性自行研究發展之探測設備，其中並整合單點電阻及導電度之量測功能，屬於多功能之整合式探頭。圖 31(b) 為國內自行研發之封塞水流分離裝置結合既有之商用地下水流速探測設備，於量測時搭配抽水系統，可獲取 10 cm 區段內單一裂隙之高精度地下水流速，對於瞭解優勢水流路徑之區段及關鍵裂隙之流速流量精準度有相當大的助益，將可大幅提升工程設計的可靠度。

結語

隨著國際先進國家（如芬蘭及瑞典等）已取得核廢料處置設施建置執照且刻正執行建設或規劃的階段，臺灣相關高放深層地質處置技術之發展除了仰賴國內具專業技術的產學研團隊外，亦可透過國際交流合作習取實務處置場址之關鍵地質環境特徵調查、分析與評估技術，促使國內各界投入相關技術研究發展。

建立場址描述模型為處置研究最首要且優先的關鍵課題，而其基礎條件則須具備本土完整的各項領域相關試驗及調查數據，因此若可凝聚各研究團隊的專業合作，並搭配合宜的溝通方式，將可達成核廢料安全處置的最終目標。



圖 31 (a) 芬蘭 POSIVA 製作之整合式封塞流速儀 (最小量測區段為 25 cm); (b) 熱脈衝流速儀之封塞水流分離裝置 (最小量測區段為 10 cm)

參考文獻

1. Viswanathan, H.S., Ajo-Franklin, J., Birkholzer, J.T., Carey, J.W., Guglielmi, Y., and Hyman, J.D. (2022). "From fluid flow to coupled processes in fractured rock: Recent advances and new frontiers." *Reviews of Geophysics*, **60**, e2021RG000744. <https://doi.org/10.1029/2021RG000744>.

2. SKB (2001). *Site Investigations—Investigation Methods and General Execution Programme*, SKB Report TR-01-29, 261pp.
3. Ogura, K. (1988). *Expansion of Applicability for Suspensor PS Logging*, OYO Technical Report, pp. 69-98.
4. Kaneko, F., Kanemori, T., and Tonouchi, K. (1990). "Low-frequency shear wave logging in unconsolidated formations for geotechnical applications." In: Paillet, F.L. and Saunders, W.R. (eds.), ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 79-98.
5. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999). "Multichannel analysis of surface waves," *Geophysics*, **64**, pp. 800-808.
6. Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J. (2007). "Multichannel analysis of surface waves (MASW)—Active and passive methods," *The Leading Edge*, **26**(1), pp. 60-64.
7. Steeples, D.W. and Miller, R.D. (1988). "Seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and ground-water problems," *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. 409-461.
8. Palmer, D. (1981). "An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation," *Geophysics*, **46**(11), pp. 1508-1518.
9. Begg, J.G. and Mouslopoulou, V. (2010). "Analysis of late Holocene faulting within an active rift using lidar, Taupo Rift, New Zealand," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **190**(1-2), pp. 152-167.
10. Grebby, S., Cunningham, D., Naden, J., and Tansey, K. (2012). "Application of airborne LiDAR data and airborne multispectral imagery to structural mapping of the upper section of the Troodos ophiolite, Cyprus," *International Journal of Earth Sciences*, **101**(6), pp. 1645-1660.
11. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012). "Use of LIDAR in landslide investigations: A review," *Natural Hazards*, **61**(1), pp. 5-28.
12. Scheiber, T., Fredin, O., Viola, G., Jarna, A., Gasser, D., and Api Ska-Viola, R. (2015). "Manual extraction of bedrock lineaments from high-resolution LiDAR data: methodological bias and human perception." *Gff*, **137**(4), pp. 362-372.
13. Yeomans, C.M., Middleton, M., Shail, R.K., Grebby, S., and Lusty, P.A. (2019). "Integrated object-based image analysis for semi-automated geological lineament detection in southwest England," *Computers & Geosciences*, **123**, pp. 137-148.
14. Booth, A.M., McCarley, J.C., and Nelson, J. (2020). "Multi-year, three-dimensional landslide surface deformation from repeat lidar and response to precipitation: Mill Gulch earthflow, California," *Landslides*, pp. 1-14.
15. Chung, M.C., Hsu, S.M., Ku, C.Y., Tan, C.H., and Chi, S.Y. (2008). "Case studies of high resolution acoustic televiewer for geotechnical exploration and core sample correction," *The 3rd International Conference on Site Characterization*, pp. 679-685.
16. Gaillot, P., Brewer, T., Pezard, P., and Yeh, E.C. (2007). "Borehole imaging tools—principles and applications," *Scientific Drilling*, **5**, pp. 1-4.
17. Williams, J.H. and Johnson, C.D. (2004). "Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies," *Journal of Applied Geophysics*, **55**(1-2), pp. 151-159.
18. Munier R. (2004). *Statistical Analysis of Fracture Data, Adapted for Modelling Discrete Fracture Networks*, Version 2, SKB Report R-04-66, 55pp.
19. Fox A., La Pointe P., Hermanson J., and Öhman J. (2007). *Statistical Geological Discrete Fracture Network Model Forsmark Modelling Stage 2.2*, SKB Report R-07-46, 406pp.
20. Tran, N.H., Chen, Z., and Rahman, S.S. (2006). "Integrated conditional global optimisation for discrete fracture network modelling," *Computers & Geosciences*, **32**(1), pp. 17-27.
21. SKB (2014). *Forsmark Site Investigation: Mapping of Borehole Breakouts KFM08D, Processing of Acoustical Televiewer Data from 2007 and 2014*, SKB Report P-14-29, 32pp.
22. Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, AR., Ake, J.P., Slemmons, D.B., McCalpin, J.P., Doser, D.I., Fridrich, C.J., Swan, F.H., Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhn, R.L., Knuepfer, L.K., Smith, R.B., dePolo, C.M., O'Leary, K.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S., and Toro, G.R. (2003). "A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA)," *Earthquake Spectra*, **19**(1), pp. 191-219.
23. Nasu, N. (1931). "Comparative studies of earthquake motions above ground and in a tunnel," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **9**, pp. 454-472.
24. Kanai, K. and Tanaka, T. (1951). "Observations of earthquake motion at different depths of the earth," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **28**, pp. 107-113.
25. Komada, H. and Hayashi, M. (1980). *Earthquake Observation Around the Site of Underground Power Station*, CRIEPI report, E379003, pp. 1-34.
26. Matsunami, K., Zhang, W., Irikura, K., and Xie, L.L. (2003). "Estimation of seismic site response in the Tangshan area, China, using deep underground records," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, pp. 1065-1078.
27. Atkinson, G.M. and Kraeva, N. (2010). "Ground motions underground compared to those on the surface: A case study from Sudbury, Ontario," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(3), pp. 1293-1305.
28. Aydan, Ö., Ohta, Y., Geni, M., Tokashiki, N., and Özbayir, K. (2010). "Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**(6), pp. 857-875.
29. SKB (2002a). *Site Investigations—Strategy for Rock Mechanics Site Descriptive Model*, SKB Report TR-02-01, 150pp.
30. SKB (2006). *Oskarshamn Site Investigation—Modal and Geochemical Analyses of Drill Core Samples 2006 and Updated Bedrock Map of the Laxemar Subarea*, SKB Report P-06-279, 37pp.
31. SKB (2007). *Oskarshamn Site Investigation—Modal and Geochemical Analyses of Drill Core Samples 2007 and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of a Dolerite*, SKB Report P-07-191, 25pp.
32. Shao, W.Y., Chung, S.L., Chen, W.S., Lee, H.Y., and Xie, L.W. (2015). "Old continental zircons from a young oceanic arc, eastern Taiwan: Implications for Luzon subduction initiation and Asian accretionary orogeny," *Geology*, **43**(6), pp. 479-482.
33. SKB, (2000). *Geoscientific Programme for Investigation and Evaluation of Sites for the Deep Repository*. SKB Report TR-00-20, 115pp.
34. SKB (2002b). *Hydrogeochemical Site Descriptive Model—A Strategy for the Model Development during Site Investigations*, SKB Report R-02-49, 63pp.
35. Berkowitz, B. (2002). "Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review," *Advances in Water Resources*, **25**(8-12), pp. 861-884.
36. 工研院 (2015) · 用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查 (104 ~ 107 年度計畫) · SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告, 表二: 地質概念模式及特性數據。
37. 台電公司 (2017) · 用過核子燃料最終處置計畫—潛在母岩特性調查與評估階段—105 年度計畫成果報告 (修訂二版) · 共 388 頁。
38. SKB (2010). *Data Report for the Safety Assessment SR-Site*, SKB Report TR-10-52, 458pp.
39. SKB (2008), *Site Description of Forsmark at Completion of the Site Investigation Phase*, SKB TR-08-05, 539pp.
40. England, P. and Molnar, P. (1990). "Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks," *Geology*, **18**, pp. 1173-1177.

41. Anderson, R.S. and Anderson, S.P. (2010). *Geomorphology—The Mechanics and Chemistry of Landscapes*, first edition, 651pp.
42. 劉靜、張金玉、葛玉魁、王偉、曾令森、李根、林旭 (2018), 「構造—氣候—地表過程相互作用的交叉研究」構造地貌學, 第 63 卷, 第 30 期, 第 3070-3088 頁。
43. 樓穎慧 (1989), 大屯火山區海階的碳十四定年研究, 國立臺灣大學地質研究所, 碩士論文, 共 78 頁。
44. 陳于高 (1993), 晚更新世以來南臺灣地區海面變化與新構造運動研究, 國立臺灣大學地質學研究所博士論文, 共 158 頁。
45. 劉佳怡 (2006), 臺灣西北部海岸階地的地形學研究, 中國文化大學地質研究所碩士論文, 共 80 頁。
46. 蔡佳穎 (2013), 臺灣東北部之海階地形及其新構造意義, 國立臺灣師範大學地球科學系碩士論文, 共 215 頁。
47. 蘇清全 (2011), 蘭陽平原末次冰期以來沉積環境變遷與構造作用特性, 國立臺灣大學地質學研究所碩士論文, 共 129 頁。
48. 謝孟龍、劉平妹 (2010), 花東海岸全新世地殼上升速率的再檢討, 經濟部中央地質調查所彙刊, 第 23 號, 第 165-199 頁。
49. Liew, P.M., Hsieh, M.L., and Lai, C.K. (1990). "Tectonic significance of Holocene marine terraces in the Coastal Range, eastern Taiwan," *Tectonophysics*, **183**, pp. 121-127.
50. Liew, P.M., Pirazzoli, P.A., Hsieh, M.L., Arnold, M., Barusseau, J.P., Fontugne, M., and Giresse, P. (1993). "Holocene tectonic uplift deduced from elevated shorelines, eastern Coastal Range of Taiwan," *Tectonophysics*, **222**, pp. 55-68.
51. Yamaguchi, M. and Ota, Y. (2004). "Tectonic interpretations of Holocene marine terraces, east coast of Coastal Range, Taiwan," *Quaternary International*, **115**, pp. 71-81.
52. 楊清淵 (2018), 兩萬年以來花東海岸北段的海階演化, 國立臺灣大學地質學研究所碩士論文, 共 171 頁。
53. 陳思婷 (2018), 晚更新世以來花東海岸南段的階地演化, 國立臺灣大學地質學研究所碩士論文, 共 163 頁。
54. 台電公司 (2015), 用過核子燃料最終處置計畫—潛在處置母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查 (104~107 年度計畫) — SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告—表二: 地質概念模式及特性數據, SNFD ITRI TR2015 0001, 108 年 3 月, 共 297 頁。
55. Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M. (2011). "Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008," *Journal of Geophysical Research*, **116**, B08406, pp. 1-16.
56. 饒瑞鈞、景國恩、謝宗訓、余致義、侯進雄、李元希、胡植慶、詹瑜璋、李建成、洪日豪 (2003), 台南台地的地表變形與地震潛能, 活動斷層調查研究專刊, 經濟部中央地質調查所特刊, 第十四號, 第 147-156 頁。
57. 陳惠芬 (1984), 「從三角點檢測成果見到的臺灣的地盤升降」, 紀念徐鐵良先生榮退地質學論文集, 第 127-140 頁。
58. Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C.-T., Wang, H.-T., Angelier, J., Rudant, J.P., and Chang, C.-P. (2001). "Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry," *Geophysical Research Letters*, **28**, pp. 3071-3074.
59. 國土測繪中心 (2019), 內政部國土測繪中心 108 年度精進現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式採購案工作總報告, 共 290 頁。
60. 台電公司 (2017), 用過核子燃料最終處置計畫—潛在處置母岩特性調查與評估階段—我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告 (SNFD2017 報告), 共 559 頁。
61. 陳炳權 (2017), 造山運動期間地殼動力演化: 以華南沿海金門島為例, 國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論文, 共 103 頁。
62. 水保局 (2016), 105 年水庫集水區土砂環境檢查及治理成效追蹤, 共 473 頁。
63. 水保局 (2017), 106 年水庫集水區土砂環境檢查與評估, 共 524 頁。
64. Cawood, A.J., Bond, C.E., Howell, J.A., Butler, R.W., and Totake, Y. (2017). "LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models," *Journal of Structural Geology*, **98**, pp. 67-82.
65. Thiele, S.T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S.A., and Cruden, A.R. (2017). "Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data," *Solid Earth*, **8**(6), 1241-1253. 



歡迎加入學會



www.ciche.org.tw
下載入會申請書

e-mail: service@ciche.org.tw

電話: (02) 2392-6325

傳真: (02) 2396-4260

土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文, 以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向, 為一綜合性刊物, 內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄, 歡迎賜稿, 來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓, 中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收, 刊登後將贈送每位作者一本雜誌, 不再另致稿酬; 歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章, 相關注意事項如後:

- 工程新知及技術報導, 行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得, 工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章, 由本刊委請專家 1~2 人審查, 來文請寄電子檔案, 照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡, 並附圖表照片, 所有圖表及照片務求清晰, 且應附簡短說明, 並均請註明製圖者及攝影者, 請勿任意由網站下載圖片, 以釐清版權問題。



地質資源 可以掌握嗎？不確定性分析

陳尚頴／國立成功大學資源工程學系 博士後研究員

徐國錦*／國立成功大學資源工程學系 教授

周子硯／國立成功大學資源工程學系 專題生

地質資源之掌握仰賴不確定性量化技術。本文提出了地質資源之分類與定義，並展示靜態與動態兩種不確定性分析範例。靜態分析範例以普通克利金法評估了地質空間資源—濁水溪沖積扇地區之地層下陷，量化了地下孔隙空間資源損失與其估算之不確定性。在動態地下水資源不確定性分析範例中，以蒙地卡羅模擬法結合系集卡門濾波器，量化動態地下水流數值模式的不確定性，並實現模式參數和狀態的即時更新。本文透過範例向讀者展示掌握地下資源之不確定性量化方法及其重要性。

前言

全球經濟局勢正受到當前國際政治和氣候變遷等因素的劇烈衝擊，因此有效地利用地質資源將成為穩定全球或個別經濟體系的必要環節^[1]。透過資源工程手段，我們可以增進瞭解並妥善運用地底下的固體資源、能源資源、流體資源和空間資源^[2]，這也是未來能夠實現能源轉型和永續發展的關鍵之一^[3]。根據這四大地質資源的分類，我們能夠進一步定義和盤點各種不同的地質資源。固體資源包括土壤、岩石、金屬礦物和非金屬礦物。流體資源包括地下水、石油和天然氣。能源資源則包括傳統的固體能源，如煤炭和鈾，流體能源如石油和天然氣，以及非傳統能源如甲烷水合物，還有以流體為載體的地熱能源。最後，還有一個非常廣泛應用但鮮為人所注意的地下空間資源，如二氧化碳地質封存、核廢料深地質處置、地下水資源儲存、集水廊道、天然氣與石油儲備、地下水抽蓄儲能、地質儲熱、地下儲氫或壓縮空氣等人造空間及天然孔隙空間的利用^[4]。

* 通訊作者，kchsu@mail.ncku.edu.tw

地質資源的利用範圍非常廣泛且多樣化。除了支撐現代社會文明所需的傳統固體和能源資源外，地下水資源、非傳統能源資源和空間資源預計將在未來極端氣候條件下逐漸成為最受重視的領域。利用地下空間儲存地下水能提供穩定的備援水資源。地熱具有穩定性高和佔地面積小等特點，適合取代傳統火力發電成為可再生的基載電力，從而減少碳排放。利用地下空間作為二氧化碳封存，將協助實現淨零碳排的目標；作為核廢料處置場，將保障生物圈的安全和永續；作為儲能空間進行季節性和大規模能源調度，將減緩風光電等間歇性能源帶來的能源安全衝擊。由此可見，地質資源將影響各種產業以及日常生活。然而，若想要掌握這些潛在的地質資源，必須瞭解如何量化地下資源評估之不確定性。

地質資源量化評估之不確定性最主要的來源為量測資料之空間稀缺性。舉例而言：地熱開發過程需要瞭解地底下的溫度在空間中的分布情形，但地下溫度之量測通常僅限於數個沿著鑽孔隨鑽深變化之溫度量測。即便鑽孔密度再高，也無法「以管窺天」全面性瞭解地底下每個位置點上之真實溫度分布。為了能夠

充分利用現有的觀測資料，空間估測如線性內插、反距離權重法等內插方法被廣泛的應用。而在資源工程慣例中，最常使用的內插方法為序率式的克利金法，克利金法為無母數的最佳無偏線性估測器，以半變差函數表達觀測資料在空間中分布的連續性，估測之結果包含估測平均值及估測變異數。以上述地熱溫度分布分析為例，克利金除了估測溫度分布之平均值外，還會計算該估測值之變異數，即表示估測不確定性。該不確定性在遠離資料處將上升，可以適當反映出內插結果在不同位置上之信心程度。這一類型直接內插空間變數之不確定性量化可以歸類為靜態地質資源不確定性量化，最常用於評估固體資源（如礦區品位評估）或空間資源（如孔隙流體儲存最大容量評估）。

除了直接內插空間變數所面臨的靜態不確定性之外，第二類為建構數值模式時由於參數空間估測之不確定性，將進一步衍生出的模式預測狀態值不確定性，稱為動態不確定性。動態不確定性之來源即為資料稀缺性，以及地質材料之天然異質性。例如：若要以數值模擬預測地下水污染之流速流向，必須設定水力傳導係數在不同數值網格上的變化，然而當水力傳導係數之估測本身具有不確定性時，模擬預測狀態值（如水頭或污染物濃度）結果之不確定性也應當被量化。量化動態不確定性最常見的方法為蒙地卡羅模擬法。蒙地卡羅法之步驟首先以地質統計方法如逐步高斯模擬法產生大量水力傳導係數可能的分布，每一個水力傳導係數配置都作為一個「實現場」的參數設定，經過等數量的數值模式前向模擬，計算出每一個不同水力傳導係數配置情境下狀態值預測為何，最後再將每一實現場狀態值統計，計算出平均值、變異數等統計動差，完成動態地質資源不確定性量化。蒙地卡羅模擬法之外，專家學者陸續發展出近似或強化運算效率的動差方程式方、或機率密度分布法，用以量化數值模式之動態不確定性。

動態不確定性分析對地質資源之掌握具有非常重要的意義，能提供決策者在資源管理或風險決策之基礎，不確定性之資訊還可進一步用於參數反算問題，甚至可結合資料同化工具（如系集卡門濾波器）整合即時資料，使數值模式中參數與狀態之準度或精度都能夠隨著資料之增加而提升。在有限的地下資料所提供的資訊內，最大程度的掌握地下流體資源（如氫氣採回收率評估）或能源資源（如地熱回注水冷鋒推進評估）。地

質資源之不確定性分析為跨學科的領域，涉及到地質統計學、偏微分數值計算方法、及資料同化技術。本文旨在透過範例展示不確定性分析之效果與衍生功用。本文接續的結構分為方法論、靜態不確定性分析範例、動態不確定性分析範例、與結論四個章節。

方法論

地質統計克利金內插方法（靜態分析）

想要掌握地質資源，必須先掌握其在地下空間中之分布情況。若地質資源的狀態或性質在空間中的變化在短時間尺度之內不會發生改變，我們可以將其定義為靜態區域化變量（regionalized variable），設法去描述一個無法直接觀測的空間狀態或參數在空間中的變異。在不可能全面取得地下量測資料的前提下，在資源工程領域中經常使用地質統計學中的克利金法，利用有限數量的量測資料來估測該區域化變量在整體空間中的分布。首先，第一步是要瞭解蒐集的資料組在空間中的連續性，利用半變差函數（semivariogram）計算並表示區域化變量之資料在空間所呈現出的變異程度^[5,6]，計算數學式為：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(x_i) - Z(x_j))^2] \quad (1)$$

其中 $N(h)$ 為代表 h 向量下所可以採樣的總組數，上述公式所求得的為實驗變異函數（experimental variogram）。為了能將實驗變異圖以 h 的函數來表示，以利於克利金法的空間內差推估，因此常配上固定的數學模式進行擬合。如圖 1 所示，常用的擬合模式包含指數、高斯與球型等^[7,8]。而這些模型中包含的參

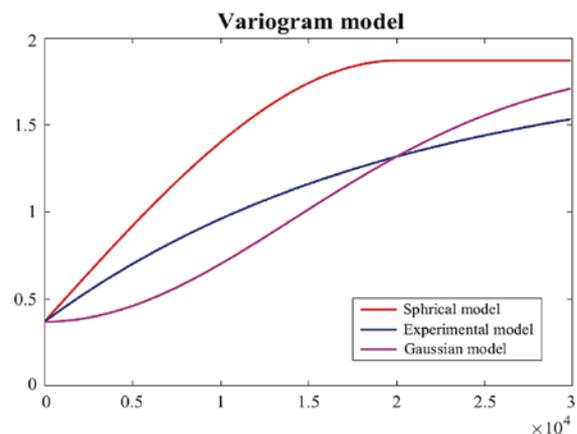


圖 1 不同的數學模型的理论變差圖

數有塊金值 (nugget)、門檻值 (sill) 以及影響範圍 (range)。當變異函數 $\gamma(h)$ 隨著距離 h 增加而增大，並逐漸逼近一定值，稱為門檻值，而逼進門檻值所對應的距離稱為影響範圍，表示空間中兩位置的距離小於影響範圍時，彼此間仍具有一定的空間相關性。至於變差函數與縱軸的截距則稱為塊金值，變異函數在 h 為於零時，其產生之不連續值使 $h = 0, \gamma(h) > 0$ 的這個現象稱為塊金效應，塊金效應可以解釋成量測誤差，或是參數中與空間不相關之隨機項。

普通克利金法 (ordinary kriging) 為一種最普遍的地質統計內插方法。將已知的觀測資料數值乘上相對應之權重，最後以線性疊加推估出未知位置點上之數值。搭配拉格朗日運算子以及最佳化的計算可以得到普通克利金系統 (如公式(2))。

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \dots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 γ 為代入距離 h 為 $x_i - x_j$ 之理論半變差函數值， μ 為拉格朗日運算子。將 γ 及 h 代入公式(2)，即可計算出每一個別資料值之 λ 權重。最後將權重值代入公式(3)，即可求得估測值 $Z^*(x_i)$ 。

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

與其他內插方法如線性內插、反距離權重法相比，序率式的克利金法應用於地質資源掌握之特殊性為，其能夠提供內插的最佳無偏估測，且同時能量化出空間估測之不確定性。該不確定性以估測變異數表達，並透過半變差函數與權重計算，如公式(4)：

$$\sigma_{OK}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(h_{i0}) + \mu \quad (4)$$

計算出之變異數越高，表示在位置上距離觀測資料點越遠，我們對於內差點位的掌握度越低，不確定性越大。反之，則代表該處所估測出來的數值可靠度上升，由此可以判斷出該處之地質資源之可掌握程度較高。

數值模式不確定性量化及資料同化 (動態分析)

地質資源的評估，尤其是地下流體資源或能源資源，經常會使用數值模式運算模擬地下的動態變化。例如以各種數值方法 (有限差分法、有限元素法、無網格法) 求解動態異質異向地下水流控制方程式^[9]：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} - Q_m \quad (5)$$

其中 K_x 、 K_y 、 K_z 為不同方向上的模式參數—水力傳導係數； ϕ 為數值模式輸出狀態—水力水頭； S_s 為比儲水係數； Q_m 為源匯項，代表抽水或注水。根據達西定律，我們可以知道水力水頭在空間中的起伏取決於水力傳導係數在空間中的變化。具體來說，在公式(5)中的 K_x 、 K_y 、 K_z 為空間變數，若在特定區域的水力傳導係數值較高，則該處水流通過之水力梯度較緩和，水力水頭變化較少。相同的道理，任何地質資源的數值模式建構都必須仰賴模式中參數的空間估測。然而，參數之設定不可避免地會遭遇到空間估測的不確定性，因此數值模式輸出之結果也帶有不確定性，應該適當地被量化。

數值模式之不確定性量化經常會使用一個以機率統計為基礎的方法—蒙地卡羅模擬法 (Monte Carlo simulation)。這個方法得名於蒙地卡羅賭場，因為在模擬過程中使用了隨機亂數，去模擬賭博裡的運氣成分。蒙地卡羅模擬的基本概念是通過隨機抽樣的方式，在問題的參數空間中生成大量的隨機樣本，然後根據這些隨機樣本的模擬結果 (稱為實現場) 來進行統計分析。蒙地卡羅模擬法的可靠性和準確性取決於所生成的隨機樣本數量和質量。地下水流數值模式的蒙地卡羅模擬一般步驟如下^[9]：

1. 確定模擬參數：根據地下水流數值模式，確定需要考慮的參數和邊界條件。這些參數可能包括水文地質特性如孔隙率、滲透率等。
2. 確定參數分佈：為每個模擬參數和邊界條件，根據現有數據或專家知識，確定其機率分佈。這些分佈可以是均勻分佈、高斯分佈等。
3. 生成隨機參數組合：使用隨機數生成器，根據確定的參數分佈，生成大量的隨機參數組合。在水文地質模式中，最常使用之方法為地質統計學中的逐步高斯模擬法 (sequential Gaussian simulation)。
4. 運行數值模式：將每個隨機參數組合代入地下水流數值模式，進行求解控制方程式的計算，獲得多個模擬結果稱為實現場。數值方法可以為有限差分法、有限元素法、無網格法等各種方法。
5. 統計分析：對所有模擬結果進行統計分析，計算每個點位的地下水位等變量的機率分佈，得到水力水頭之不確定性分佈圖。

動態不確定性分析提供更全面和可靠的地下資源不確定性評估，使決策者能夠在具備可信度和風險知識的情況下瞭解地下資源的狀態，做出更加永續、更加符合經濟效益的重要工程決策^[10]。

不確定性分析之貢獻除了上述能提供地質資源掌握度評估之外，動態不確定性量化在近年更進一步促成了數值模式的資料同化技術。地下資源之數值模式參數，經常透過反向演算（inverse modeling）的計算獲得，意即使用模式輸出變量的真實量測資料，修正模式輸入之參數數值，用以提升模式預測的精確度。這類反算技術基本上都建構於動態不確定性分析。例如近年開始普及的系集卡門濾波器（ensemble Kalman filter）方法^[11]，即是結合蒙地卡羅模擬法與貝氏更新的精神設計。首先透過比較資料或模式之不確定性，計算出卡門增益（Kalman gain）：

$$\mathbf{G} = \Sigma_{ss}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \Sigma_{ss}^f \mathbf{H}^T + \Sigma_{dd})^{-1} \quad (6)$$

其中 Σ_{ss} 為動態不確定性分析獲得之模式不確定性； Σ_{dd} 為新增資料之不確定性； \mathbf{H} 為對角線元素為 1 或 0 的觀測矩陣。計算獲得卡門增益後，即可用以更新模式之參數與狀態：

$$\mathbf{s}^u = \mathbf{s}^f + \mathbf{G} (\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{s}^f) \quad (7)$$

蒙地卡羅模擬的應用使得我們能夠量化具不確定性參數對模式輸出之可靠度影響。這種評估不僅對於科學研究具有重要價值，在地下資源實務工程與管理等實際應用中扮演關鍵角色。另外，蒙地卡羅模擬還可以延伸應用至資料同化技術中，用於整合新增資料，改進模擬結果的精度與準度。這些方法的進一步發展和應用將有助於更好地瞭解地下資源系統的動態行為。

靜態不確定性分析範例

本文展示的第一個範例為靜態地下空間資源之估測不確定性分析。臺灣中部濁水溪沖積扇為台灣重要的農漁業生產區，也是臺灣地層下陷最為嚴重的區域之一。地層下陷的主因來自於地下水的超抽，導致含水層系統內有效應力的增加，土體顆粒的壓縮導致地表的陷落。雖緩慢的地層下陷可能不會造成立即的危險性，但長年持續性的下陷代表著地下孔隙空間的不斷損失，將使地下水補注填充之孔隙空間縮小，導致

地下水資源的枯竭，間接地對擁有大量水資源需求的農漁業造成衝擊。

地下的孔隙空間資源損失量，可以透過地表變化量來估算。近年來多種監測方式被應用在監測地層下陷，包含水準測量（spirit leveling）、全球定位系統（GNSS leveling）等方式^[12]。本文選用單一年（2019 ~ 2020）的水準高程量測值進行濁水溪沖積扇的地層下陷，水準測量或稱逐差水準測量（differential leveling survey）是利用水準儀後視與前視觀測水準尺讀數，讀取後計算可以得到兩點的高程差，並將欲觀測的區域布置水準樁位，並建立水準測線網絡，於現地進行水準高程差的測量後至內業將設計好的水準網絡，進行閉合差的檢合，確定同一個路線形成一個閉合圈時，觀測的高程差必須接近零。經過上述的檢合以及平差計算後，將控制點的高程帶入便能得到各樁位的高程值。

水準高程測量位置如下圖 2 所示，水準高程測量資料位置空間密度較高，共有 773 筆垂向位移資料。雲林與彰化地區之水準高程測量於每年五月份進行一次完整人工測量，圖 3 紅色方塊點為實驗變差圖，黑色線段為擬合後的球型理論變差圖。

經由上述的理論變差函數的取得後，帶入普通克利金的系統中便能求得下陷量於濁水溪沖積扇中間空分佈的情形，結果如圖 4 所示，可以觀察到顏色越接近藍色則代表下陷量越大的區域，垂向的縮減也表示空間損失的增加，其中紅色的等值線框住之區域則代表水利署所公告下陷量達每年 3 公分標準之嚴重下陷區域，主要分佈於雲林縣濁水溪扇央處的土庫鎮、虎尾鎮、元長鄉等地方。2019 ~ 2021 地質空間損失計算結果為 6,988 萬立方公尺，相當於 0.14 座曾文水庫的有效容量。普通克利金除了能夠進行空間內插，也能夠計算克利金變異數（kriging variance）來代表內差點位的估測不確定性，由圖 5 所示，可以觀察到接近水準測量點位的估測不確定性越小，遠離則估測不確定性增加。但由於水準觀測點位數量多，且分佈密集，因此整體估測的不確定性仍較低，可以看到整體色塊顏色偏淡，於在資料點分佈路線上明顯的降低，而在水準樁位上的估測不確定性為零。

本範例透過普通克利金的方法，對濁水溪沖積扇的地層下陷進行了地下孔隙空間資源的估測和不確定性分

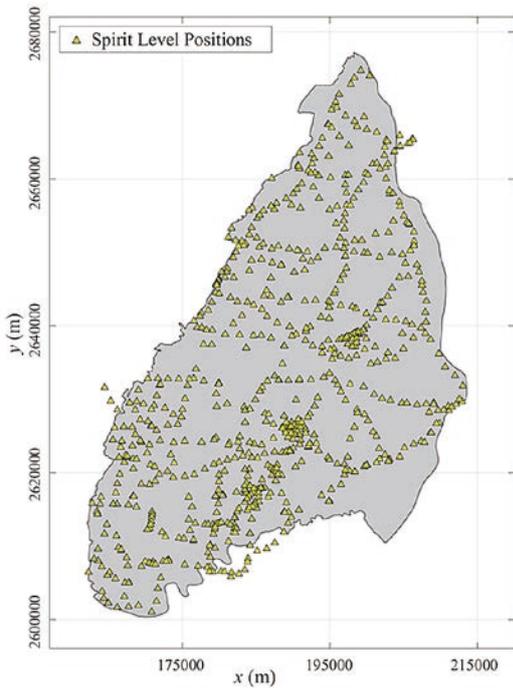


圖 2 濁水溪沖積扇水準資料點位置

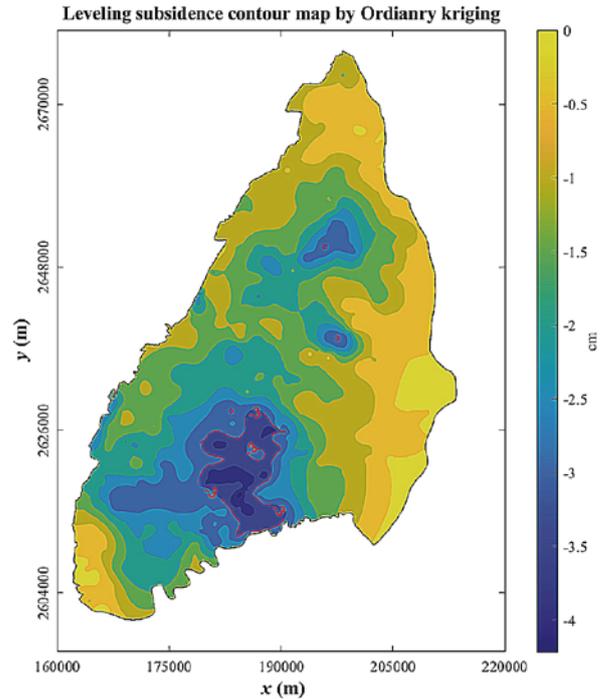


圖 4 水準測量地層下陷普通克利金內插等值圖

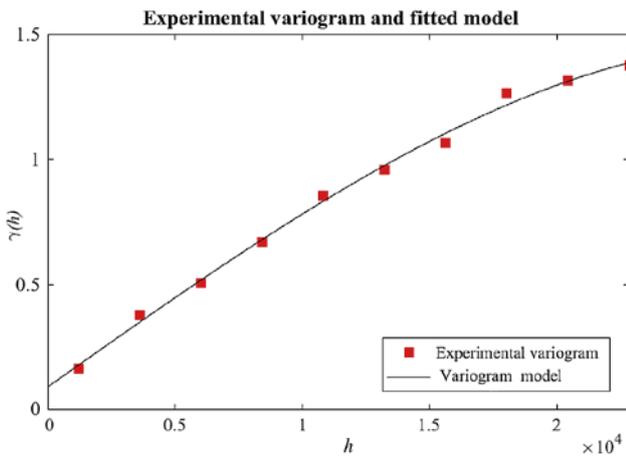


圖 3 水準測量下陷量理論變差圖擬合結果

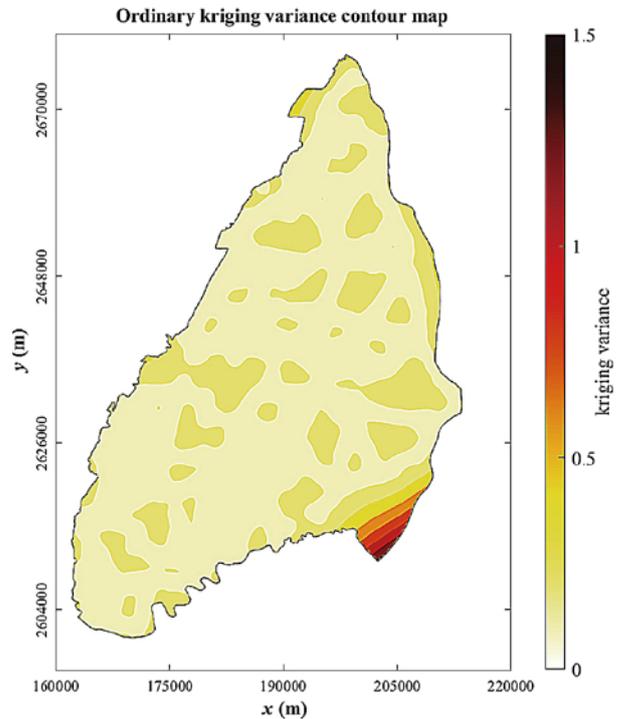


圖 5 水準測量地層下陷普通克利金內插變異數等值圖

析。長期的地層下陷現象對於農漁業生產所需的地下水資源供應造成了間接的衝擊。透過水準高程測量資料，建立了地表高程變化資料的理論變差圖，分析資料之空間連續性，內插得到不同區域的下陷量分佈情況。普通克利金的空間內插方法，不僅提供了詳細的下陷量分佈圖，還能計算估測不確定性，顯示了不同位置的估測信心水準。由於水準觀測點位較多且分佈密集，整體估測的不確定性相對較低。靜態不確定性分析量化了空間資源損失評估的可靠度，有助於相關單位掌握該地區地下孔隙空間資源管理，制定地下資源管理和保護策略，確保農漁業生產的永續發展和地下水資源的合理利用。

動態不確定性分析範例

本節展示一個地下資源動態不確定性分析的範例，以蒙地卡羅模擬法量化地下水流數值模式預測值之變異數，即不確定性，以評估地下水流之掌握程度。本節首先創造一個假設問題，透過逐漸蒐集到的

資料，不斷更新一個在不規則含水層邊界中的數值模擬模式。在假設問題的背景真實場中，以逐步高斯模擬法創造異質水力傳導係數的分佈，假設抽水井的位置、抽水量於時間，並以單純的前向模擬計算出暫態水頭隨時間變化的背景真實場。再假設水力傳導係數採樣蒐集和水位觀測，作為逐日的資料組被整合進不確定性量化及資料同化的數值模式中，並動態地量化準度和精度的變化。本文中的數值方法選用無網格法（逐步高斯模擬法）以適應不規則的邊界。

背景真實場

背景真實場之假想不規則含水層邊界如圖 6(a)，該邊界為輕微的凹形 (concave)。前向數值模擬使用無網格法布點，紅點為定水頭邊界，藍點為無流動邊界，灰色點為內部計算點，方形為抽水井位置。圖 6(b) 為逐步高斯模擬法以影響範圍為 500 公尺而基台值為 1 的共變異數函數連續性所產生出的水力傳導係數背景真實場，圖中呈現為取自然對數轉換之數值，產生出之水力傳導

係數數值範圍接近礫石與砂之水力傳導係數。抽水井運轉時間與抽水速率如圖 7。暫態數值模式之初始條件為相同邊界條件下但不包含抽水影響的穩態模擬結果。開始模擬後，總共有五口抽水井，各自有不同的抽水速率，模擬之時間步距為 6 小時，模擬時間總長度總共為 28 天。在抽水井的擾動下，水力水頭之背景真實場隨時間變動，時間為第 0 天、第 5 天、第 15 天、第 28 天之水力水頭等值圖繪如圖 8。

採樣觀測資料

數值模式中一開始僅有五個抽水井位置上量測的水力傳導係數值，如圖 9(a) 紅色實心菱形標記，隨後自第 1 日起直到第 17 日每天採樣兩筆水力傳導係數，位置如圖 9(a) 空心菱形所標記，總共採樣 31 筆水力傳導係數。而水力水頭觀測如圖 9(b) 所示，在抽水井位置上始終有水力水頭的監測，自第 15 日開始每日增加兩口觀測井直到第 21 日，最終總共設置 19 處水頭觀測。從背景真實場量測到的水頭觀測紀錄如圖 10 所

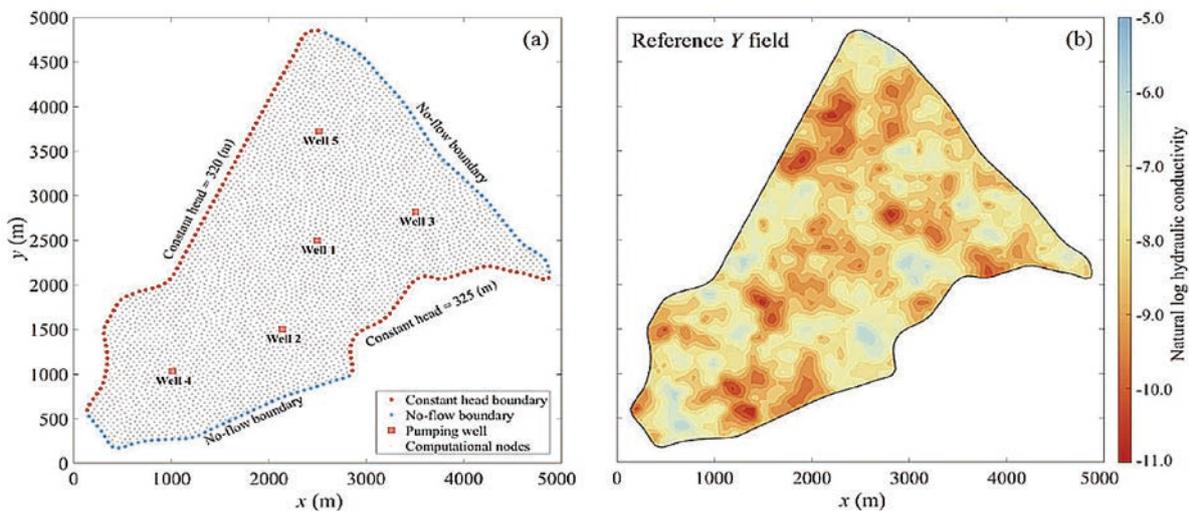


圖 6 (a) 含水層邊界條件與計算布點及 (b) 水力傳導係數背景真實場 [13]

Pumping well name	Time (day)																												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Well 1 (100 CMD)	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing
Well 2 (350 CMD)	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing
Well 3 (500 CMD)	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing
Well 4 (80 CMD)	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing
Well 5 (200 CMD)	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing	Producing

CMD: cubic meter per day

Producing

Shut-in

圖 7 抽水井操作時間表 [13]

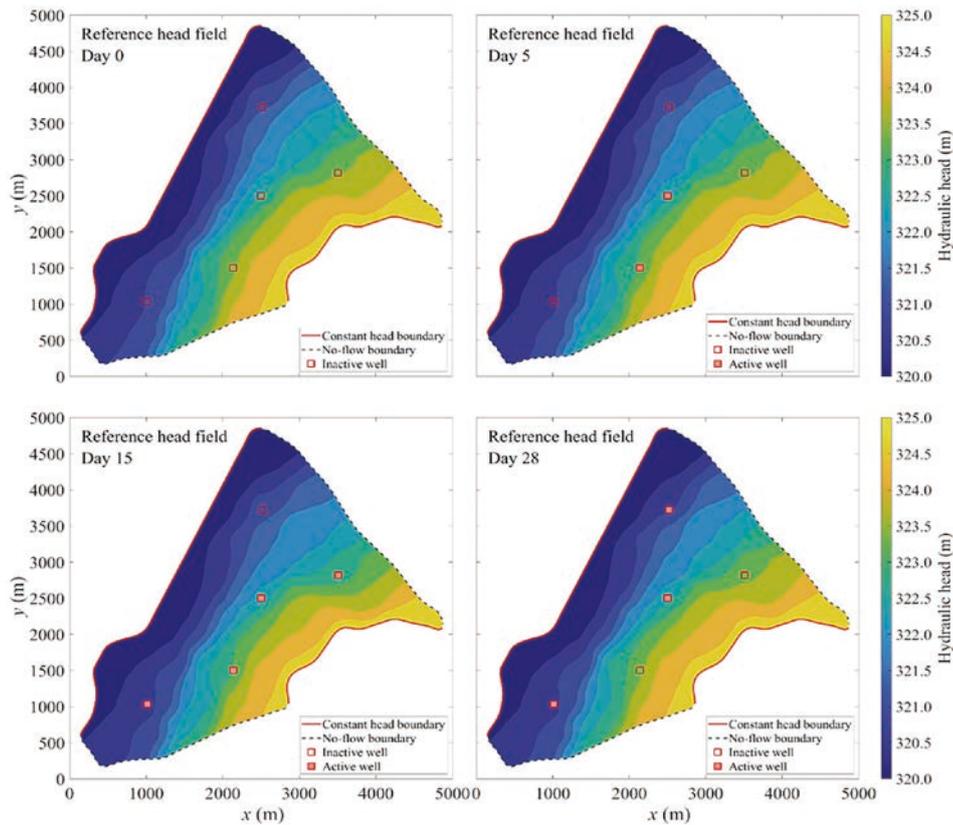


圖 8 水力水頭背景真實場 [13]

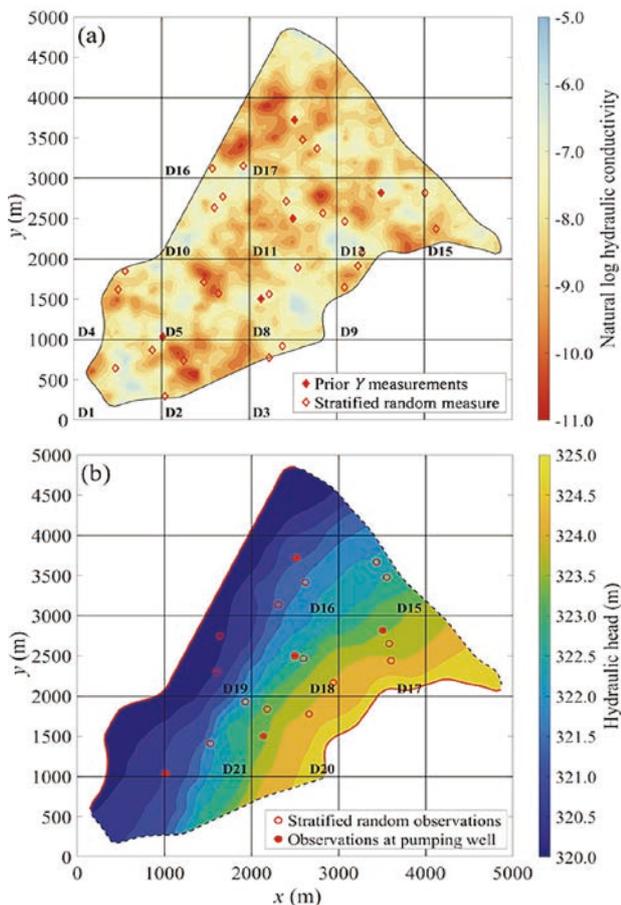


圖 9 (a) 水力傳導係數採樣及 (b) 水力水頭觀測位置與時間順序 [13]

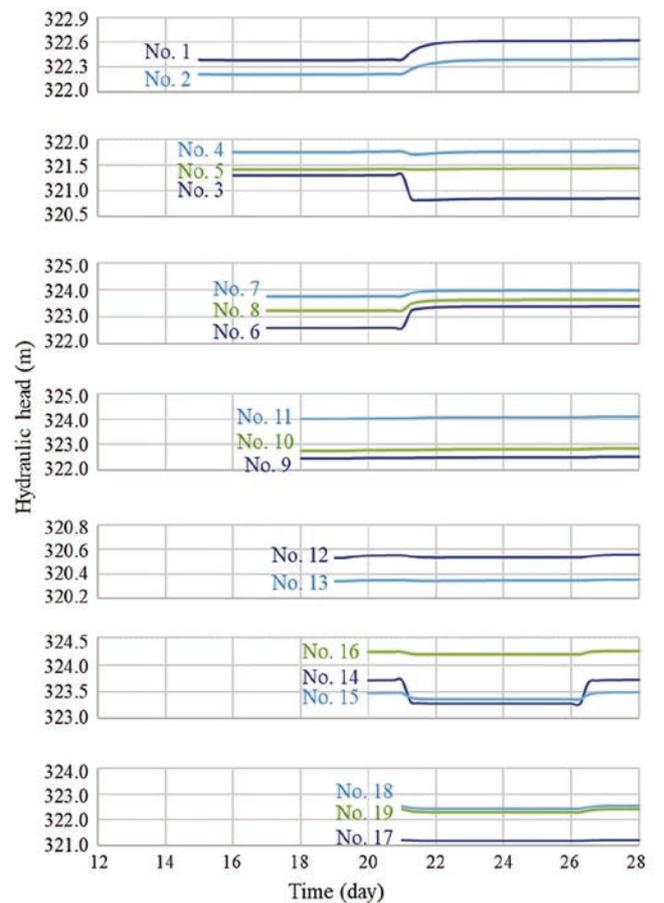


圖 10 水力水頭觀測資料紀錄 [13]

示，資料在不同時間點開始加入，水位變化反映出抽水井擾動下含水層的變化，透過資料同化技術便可掌握地下水孔隙介質之參數。

數值模式預測之不確定性量化與資料同化

假設邊界條件及抽水條件已知，數值模式中之參數輸入首先以五筆抽水井位置上的水力傳導係數作為條件化資料，透過逐步高斯模擬法計算得數萬場實現場，分別進行前向模擬，經統計計算可以得到參數與狀態之系集平均值與共變異數，代表模式之蒙地卡羅不確定性量化。若有新增資料取得，可代入系集卡門濾波器中，以卡門增益修正更新參數與狀態之平均值與共變異數。

圖 11 為模式參數更新之結果。圖 11(a) 為水力傳導係數估測之平均值，圖 11(b) 為水力傳導係數平均值之誤差，圖 11(c) 為水力傳導係數估測變異數，即模式參數之不確定性。在進行資料同化的過程中，從第 15 天到第 28 天，系集卡門濾波器進行了水力水頭的更新，更新其平均值和共變異數，同時在每次前向模擬中最佳化水力傳導係數的平均值和共變異數。儘管在第 17 天後停止新增水力傳導係數資料，但水位資料反向建構了水力傳導係數平均值的區域空間變異性，使其更加細緻（如圖 11(a)）。估計的水力傳導係數值的誤差逐步減小（圖 11(b)）。資料同化後的新水力傳導係數和水頭資料可以即時量化水力傳導係數的不確定性（圖 11(c)）。在資料位置附近的不確定性減量最為突出。由此可見模式參數經過將動態資料整合進模式當中，其準度與精度皆有顯著的提升效果。

隨著資料不斷融合進數值模式中，在水力傳導係數平均值校正期間，水頭平均估計值也會發生變化。圖 12(a) 顯示了第 7 天、第 14 天、第 21 天和第 28 天的瞬時平均水頭估計值。資料同化從第 15 天到第 28 天的水頭資料減少了平均水頭估計值和背景參考場之間的誤差（圖 12(b)）。水頭估測不確定性在資料同化的過程中持續減小（圖 12(c)）。結果顯示，結合蒙地卡羅模擬法與系集卡門濾波器，可以進行動態地下資源之不確定性量化，掌握數值模擬之準度和精度。

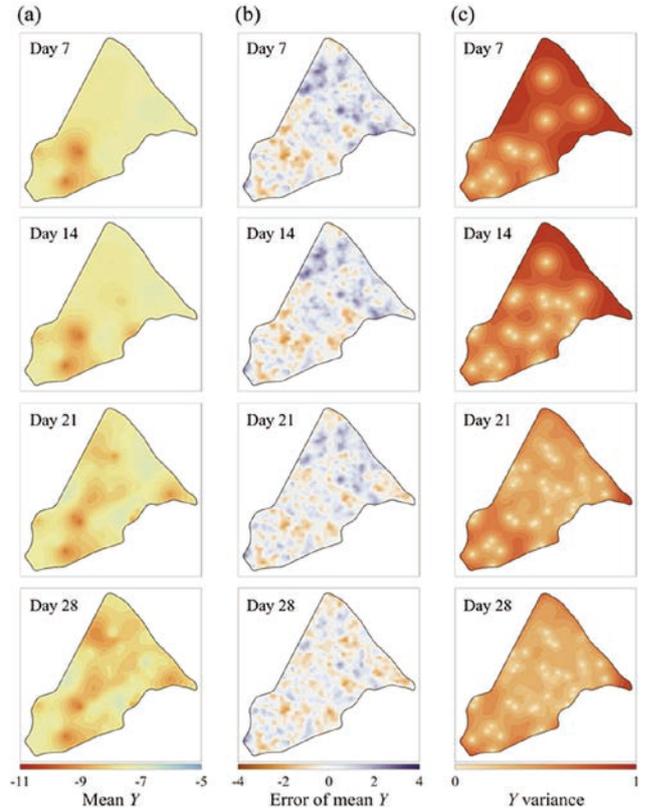


圖 11 參數之 (a) 系集平均、(b) 平均誤差、及 (c) 動態不確定性分析^[13]

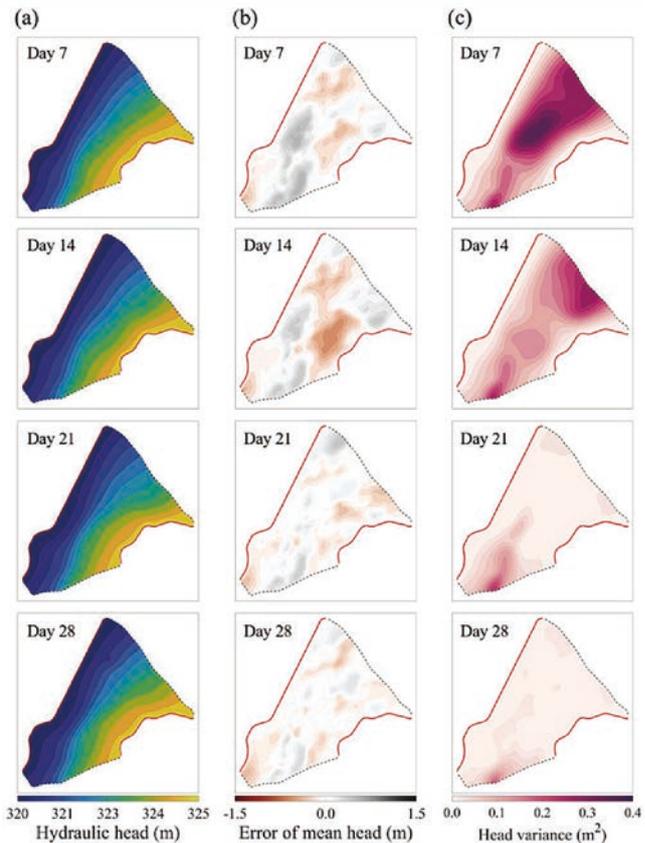


圖 12 狀態之 (a) 系集平均、(b) 平均誤差、及 (c) 動態不確定性分析^[13]

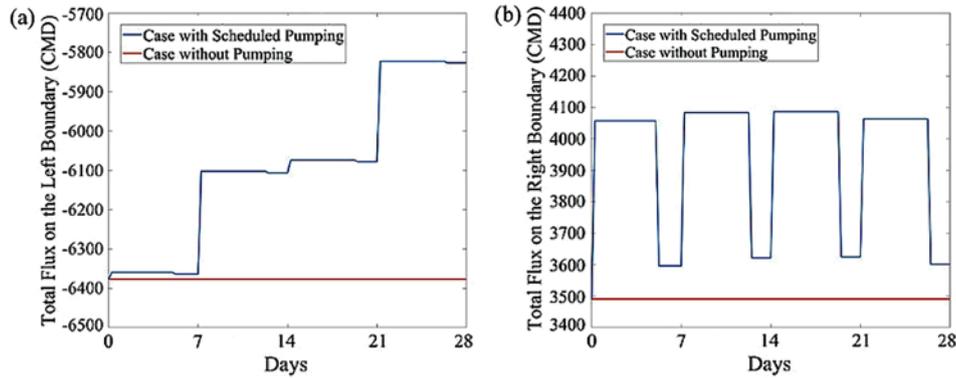


圖 13 (a) 下游定水頭邊界之通量與 (b) 上游邊界定水頭邊界之通量

含水層水資源進出量動態變化

透過資料同化即時更新得到最佳參數場後，便可根據工程或管理需求，以更新後之模式執行運算進行地下水資源量之評估。例如本範例中，可以計算定水頭邊界法線方向上之水頭梯度，再利用達西公式分析水流進出之通量。舉例而言，可以分析抽水井依照圖 7 抽水操作的情境，或含水層不受抽水井擾動的情境，來比較抽水行為對於進出水量有何影響。本案例分析結果如圖 13，圖中通量正值為水資源流入含水層，負值為水資源流出含水層。可以看出當抽水開始操作，由於抽水造成水力梯度之改變，在上游定水頭邊界流入含水層之通量增加，而下游定水頭邊界流出量有顯著減少。透過模擬將對掌握動態流體資源非常有助益。

結論

本文提出了地質資源之種類與定義，並以不確定性量化方式瞭解地質資源。本文旨在介紹不確定性分析在地下資源研究中的實務應用，以靜態和動態兩類範例展示其重要性和效果。在靜態不確定性分析範例中，我們利用普通克利金法對濁水溪沖積扇地區的地層下陷進行了評估，並展示了地層下陷在空間的分布與其內插的不確定性，而地層下陷量增加也表示地質空間資源損失量增加，這有助於地下資源管理和保護策略的制定，確保農漁業生產的永續發展和地下水資源的合理使用。在動態不確定性分析範例中，我們展示了蒙地卡羅模擬法和系集卡門濾波器的結合，用於量化動態地下水流數值模式的預測不確定性。不確定性量化搭配資料同化技術，能夠動態更新地下水流模式參數與狀態，並即時量化更新後之模式精準度，提供地下水資源評估。不確定性量化技術在地下資源管理和決策中具有重要意義，有助於更好地掌握地質資源系統的靜態現象或動態行為。

參考文獻

1. Viswanathan, H.S., Ajo-Franklin, J., Birkholzer, J.T., Carey, J.W., Guglielmi, Y., Hyman, J.D., Karra, S., Pyrak-Nolte, L.J., Rajaram, H., Srinivasan, G., and Tartakovsky, D.M. (2022). "From fluid flow to coupled processes in fractured rock: Recent advances and new frontiers," *Reviews of Geophysics*, **60**(1), e2021RG000744.
2. Shrivastava, K.L. and Kumar, A. (2014). *Geo-Resources*, Scientific Publishers, Jodhpur, India.
3. Younger, P.L. (2014). "Hydrogeological challenges in a low-carbon economy," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **47**, 7-27.
4. Matos, C.R., Carneiro, J.F., and Silva, P.P. (2019). "Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification," *Journal of Energy Storage*, **21**, 241-258.
5. Matheron, G. (1971). "The theory of regionalized variables and its applications," *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique*, **5**, Foutainebleau, France.
6. McGrath, D., Zhang, C., and Carton, O.T. (2004). "Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland," *Environmental Pollution*, **127**(2), 239-248.
7. Bárdossy, A. (1997). *Introduction to Geostatistics*, Institute of Hydraulic Engineering, University of Stuttgart.
8. De Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Paris School of Mines, Fontainebleau.
9. Chen S.-Y., Hsu, K.-C., and Fan, C.-M. (2021). "Improvement of generalized finite difference method for stochastic subsurface flow modeling," *Journal of Computational Physics*, **429**, 110002.
10. Chen, S.-Y., Wei, J.-Y., and Hsu, K.-C. (2023). "Data assimilation for real-time subsurface flow modeling with dynamically adaptive meshless node adjustments," *Engineering with Computers*, Accepted.
11. Panzeri, M., Riva, M., Guadagnini, A., and Neuman, S.P. (2015). "EnKF coupled with groundwater flow moment equations applied to Lauswiesen aquifer, Germany," *Journal of Hydrology*, **521**, 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.057>
12. Hung, W.C., Hwang, C., Chang, C.P., Yen, J.Y., Liu, C.H., and Yang, W.H. (2010). "Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan," *Environmental Earth Sciences*, **59**(7), 1535-1548.
13. Chen, S.-Y. (2022). *Data Assimilation for Real-Time Subsurface Flow Modeling with Dynamically Adaptive Meshless Node Adjustments*, Ph.D. Dissertation, National Cheng Kung University. 



溫泉資源 調查與評估

李振誥／國立成功大學資源工程學系 特聘教授

林宏奕*／國立成功大學大地資源研究中心 研究員

龔文瑞／國立成功大學大地資源研究中心 研究員

臺灣獨特的水文及地質條件，孕育近 200 處溫泉徵兆。隨著國人對休閒生活的重視及溫泉觀光產業的發展，溫泉需求量日趨提高。為避免溫泉地區溫泉水位、泉溫及泉質劣化，以及未來溫泉資源之永續利用，建立溫泉資源評估程序，對於溫泉地區生產管理為相當重要之工作。本研究首先依據溫泉形成機制，建立淺層地下水、溫泉儲集層以及深部循環水概念，探討溫泉資源評估所需資料以及探查方式，包括溫泉井水位、溫度等資料，地球物理探查成果，最後以溫泉區水文地質數值模型為例，反推深層循環水量以了解溫泉資源來源及量能，作為溫泉資源運用與調控之重要依據。

前言

由於臺灣地區獨特之地質條件且雨量豐沛，地熱區加上充足之地下水造就眾多溫泉地區，在不同地質條件下造就不同型態溫泉類型，又具有溫泉取用便利之優勢，造成溫泉觀光產業之發達。然而久遠的開發利用歷史，造成部分知名溫泉地區之溫泉資源供不應求，尤在旅遊旺季及乾旱季節，包括溫泉井水位下降、泉溫、泉質之變化。在溫泉地區永續利用之觀點下，合理且適當之使用溫泉資源為溫泉地區管理最重要之課題，然現有溫泉地區可能已出現供不應求之情況，或是溫泉生產已對區域地下水造成極大影響，考慮總量管制之方法可有效調控溫泉資源之利用情況。

過去資料顯示溫泉開發、抽取、管理、監測與保育工作，皆必須有完整且可靠之溫泉資源評估作為依據。由於溫泉資源屬於地下水資源之部份，且溫泉產狀常為淺層水與深層水混合之結果，故在進行溫泉地區溫泉資源評估時，應進行從大區域集水區之整體地下水賦存與態勢評估，再進行小區域溫泉地區溫泉資源評估，方可了解整體溫泉資源情況，以便進行溫泉地區永續開發利用與經營管理。

* 通訊作者，mariolin226@gmail.com

溫泉資源評估程序

由於溫泉地區具有較淺之地底熱源，而地下熱水透過構造上升至淺部地層後，與淺層地下水混合形成溫泉。但由於地下資料不易取得，故在溫泉相關研究中，估計地下溫泉資源具有相當之困難度。欲評估地下循環水資源量，須先了解淺層水來源及補注量，並探查溫泉儲集層產狀，以逆推模式反算地下熱能資源及分布^[1-3]。Kirjukhin 等人^[4]於俄羅斯 Kamchatka 之 Puzhetsky 地熱區進行地熱資源逆推模式研究指出，對於溫泉地區，由資源形成過程及產狀可區分為 (1) 補注層，由天水補注至淺層地下水層，(2) 混合層，為溫泉儲集層，由淺層水與深部循環水混合而成之溫泉水層，(3) 上升層，由熱源提供之熱能及上升水流區，如圖 1 所示。為完成此完整評估程序，須從集水區範圍評估天降水與淺層地下水關聯性，釐清地下水補注來源，並配合溫泉井監測資料，推估深層循環水以評定溫泉資源，了解溫泉地區水循環，最後以數值模式建立溫泉地區水文地質模型，用以評估溫泉可用資源量。

溫泉與水文地質調查步驟

溫泉地質調查步驟，應依各階段的特定需求，按一定的工作程序，有計劃的進行，依循測繪－勘探－

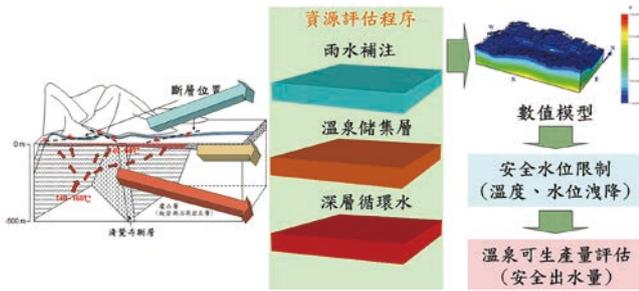


圖 1 溫泉資源評估程序圖

試驗 – 長期監測的順序循序辦理之，考慮不同階段皆之工作內容由淺入深、由簡單到複雜，逐層深化。

溫泉與水文地質調查內容

地質調查的內容應針對所規劃之調查項目、不同勘查階段及精度的要求等，進行調查內容與重點課題之觀察、描述和測量，以掌握調查區階段性的重點內容與重要議題，成果則應充分顯示流域及其影響範圍內之水文地質與溫泉地質特性。調查內容至少包括：

1. 基本氣象、水文與地質資料蒐集。
2. 區域地質調查分析。
3. 含水層與儲集層特性與形成條件調查。
4. 儲集層之補注範圍及深循環可能路徑、熱能來源。

地下含水層與溫泉儲集層介質調查

流域內之含水層與溫泉儲集層介質，因為地質條件的不同，大致可以分為三種不同的型態，包括未固結沉積岩孔隙介質、基岩裂隙介質和岩溶介質。不同含水層介質各具不同的特性，因此地下水勘探調查的內容或是使用的方法，也不盡相同。

溫泉與水文地質調查方法

有關水文地質與溫泉地質調查方法之主要內容，包括：

1. 遙感探測：通常使用航空照片及衛星影像，篩選合適資料，進行水文地質與溫泉地質特性的分析。
2. 地面地質調查：觀察並記錄在露頭位置所露出之岩石、土壤或地質構造、溫泉露頭等，必要時，也可採取合適之樣品，進行相關的實驗。
3. 溫泉地質探勘，主要包括地球物理探勘、地質鑽探、地化（同位素）組成分析。
4. 地下水試驗：可於現地進行或由取到之樣本在試驗室進行試驗，求取各項水力、力學、物理及化學等性質的資料。

5. 地下水與地溫觀測：觀測溫泉露頭、水井、鑽孔與地面水等，觀測位置之布置，應以掌握全調查區地下水與地溫之動態為原則。

溫泉資源評程序建置

溫泉資源評估應考慮利用水文地質理論與調查方法，來建置溫泉地質模式，完成區域調查而配合地下水模式進行模擬分析，以評估溫泉儲集層資源量或安全出水量之量化指標為原則。完整溫泉資源評估，須考慮：(1) 淺層地下水、(2) 儲集層熱與水平衡模式、(3) 深部地下水與 (4) 溫泉資源評估。

水文地質與溫泉概念模式建置

水文地質模式建置需依調查區域內之數值地形模型，劃分區域內地面水系分布與子集水區範圍，配合地形、地質構造與地層，結合水文、水文地質與溫泉資料，建立地下水文地質含水層分區、分層、溫泉儲集層位置以及水文地質邊界，將溫泉主要儲存地層劃設為溫泉儲集層。

深循環水評估

溫泉地區特異之地溫梯度為形成溫泉地區之主因，而此熱能為深層高溫水岩地質構造上湧，與淺層地下水混合後而形成溫泉儲集層。深層循環水評估不易，通常以能量平衡之觀點，由於溫泉儲集層以及淺層地下水概況可藉由地質探查得知，故深層循環水量可利用數值模式進行評估，評估方式為利用水文地質之逆推模式 (inverse method)，利用已建立數值模型，採率定方式推求深層循環水量。

溫泉資源計算方法

溫泉水水資源量在不同的條件下有不同的評估方法，常用的評估方法有資源平衡法、開採試驗法、試驗推斷法等。

1. 資源平衡法：根據計算開採條件擬定開採方案和需水量的大小，採用相應的穩定流計算公式，考慮出水溫度限制下計算該開採方案條件下的出水量，以進行調整開採方案或減小開採量重新評估。此法一般應用於儲集層分布較廣、厚度較大、補注來源充分的非受壓含水層，如沖積平原地區。
2. 開採試驗法：利用探勘開採孔或生產孔（單井或井

群)，進行接近於實際生產量（一般不小於實際需水量的 50%）的較長時間的穩定流抽水試驗，在這種定流量的較長時間的抽水試驗過程中，停止試驗後，觀測水位於自然靜水位與水溫相關性。此法常用於地質條件比較複雜，溫泉水的補注、排水條件不易查清，特別是對基岩裂隙水，此方法比較客觀實際且可靠性較強。

3. 試驗推斷法：通過修定流抽水試驗，利用三次以上降深試驗的資料，確定出抽水降深 Sw 與出水量 Q 的關係，在可接受水溫變化下根據 $Sw-Q$ 關係曲線類型，用相應的出水量方程式外推設計降深的出水量，該出水量的計算值即可視為允許溫泉取用量。

溫泉數值模型建立

地下水數值模式建置原則

數值模式主要用來模擬地下水流場與熱流場，應具備與水文地質模式相對應性、模擬成果可預測性、模式具可回饋性等特性。地下水數值模式應在水文地質模式建置完成後進行，在所設有研擬方案下，模擬地下水流場，預測水位、水溫變化的空間分布與隨時間演變，以提供流域內水資源聯合調配、溫泉人工調蓄補注、溫泉生產管理與研究溫泉地質問題等之解決方案為原則。

模式建立方法及步驟：建置方法及步驟分為建立概念水文地質模式、驗證修改地下水數值模式及選用驗證後，利用地下水數值模式進行地下水水位與水量預測。步驟說明如下：

1. 建立水文地質模式：根據地層與地質構造條件，配合含水層與溫泉儲集層條件、地下水流動條件與邊界條件，如前述「水文地質模式建置」內容，來選擇相對應之地下水數值模式。
2. 率定修改數值模式：根據現地地下水壓力、溫度變化，或進行抽水試驗或開採後水位、水溫變動資料等進行模擬與率定，並進行回饋分析，調整到至少水文地質條件與地下水流場具合理性，以檢驗數值模式正確性。
3. 選用率定後地下水數值模式進行溫泉水位與水溫預測：驗證後模式，模擬分析應確定在邊界與補注排出條件，不隨氣候與水文條件變化時，方可進行，方可符合數值模式要求。

溫泉數值模型建立要點

地熱區模擬必須考慮熱能傳輸以及質量傳遞的耦合問題，同時介質的異質及異向性問題也必須考慮其中，而且還有相變、溶質傳輸之問題存在，形成極度複雜的模型，在地熱區模擬技術上，模型建立之過程必須包含：

1. 概念模型建立，根據收集之資料，將研究區劃分數個主要區域，及設定特殊構造之位置。
2. 重要地質結構之建立，根據地熱區之資料，設定主要通道帶之區域等，並依據模式假設或概念模式，給定各網格之參數設定。
3. 邊界條件設定，地熱模型中，必須設定水流流場與地熱場之邊界條件。
4. 模式律定 (calibration)，根據監測所得資料，調整細部模型參數以符合現場資料之變化，包括水流及地熱溫度都須符合現場資料。

溫泉資源評估案例 – 知本溫泉

研究區域與既有調查資料

知本溫泉區位於台東地區知本溪流域（圖 2），為變質岩溫泉沿知本溪岸出現，東起自知本溫泉橋，西至觀林吊橋止，全長約 3 公里，已知溫泉露頭有六處，溫泉水之地表溫度大致在 30°C 至 60°C 之間，屬於中溫溫泉。然而就地熱探勘知本熱水溫度高達 150°C 以上。經濟部能源委員會^[5]於（1984）在知本地區進行

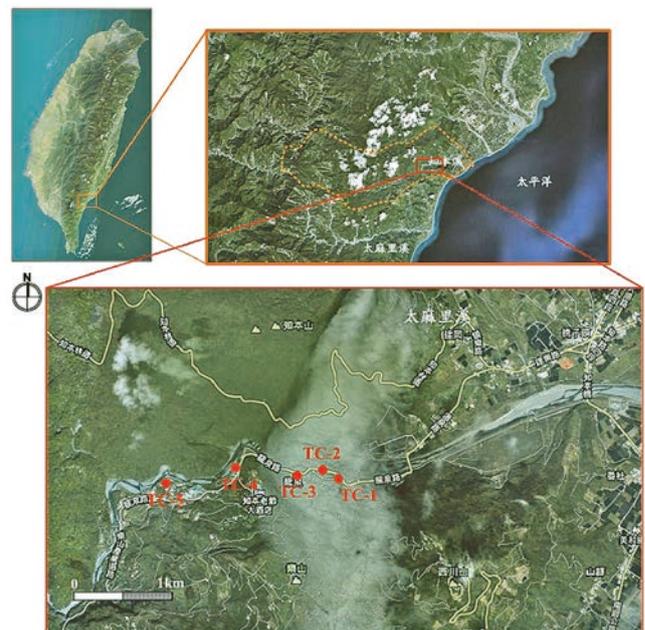


圖 2 研究區地理位位置及地熱區鑽探井之分布圖

地熱資源探勘計畫，於知本地熱區鑽了五口地質鑽探井，鑽井位置分佈如圖 2 所示，TC-1、TC-2、TC-3、TC-4 及 TC-5 分別為五口鑽探井的位置，井深度為 500 公尺，只有 TC-2 為 493 公尺，鑽井岩心資料顯示除了上層 10 至 30 公尺的沖積層外，整個地區的岩層幾乎都是暗灰色板岩和變質砂岩互層的地質組成。

前述 5 口鑽探井溫度剖面如圖 3 所示，圖中顯示 TC-1、TC-2、TC-3 鑽孔剖面圖溫度變化較為一致，地溫梯度約為 40°C/km，此範圍為知本外溫泉地區（龍泉路 43 巷附近）；TC-4、TC-5 鑽孔剖面圖溫度有較明顯的變化，地溫梯度約為 100°C/km，此範圍為知本內溫泉地區（知本森林公園入口前），比照知本地形、地質資料研判知本地區熱源是由清覺寺內溫泉地區底層供應，藉由斷層和破碎帶傳遞熱源。

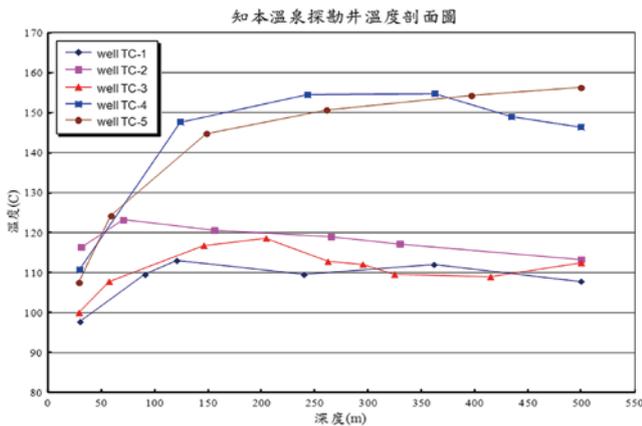


圖 3 知本溫泉探勘井溫度剖面圖 [6]

知本溫泉之成因主要由地下水受深部地熱作用而升高溫度，並將地層中礦物質溶解成為各種特性的溫泉或熱水流出地表，知本溫泉區廣義而言可歸類為中央山脈變質岩區，此類溫泉屬高山深谷溫泉。根據氫同位素水質分析，發現地熱水之氫同位素含量與海拔較高之溪水氫同位素是相當一致的，顯示地熱水主要來自高海拔地區，經過長距離的深循環，在適當的地質條件下，如斷層破碎帶、裂隙、地形等地質構造，提供了地下水之通路，進而湧出地表，在接近地表時遭遇到淺層地下水產生混合之情形，形成溫泉 [7]。經濟部水利署 [8] 推測知本溫泉可能來自西北-東南走向之高角度清覺寺斷層，切穿東北-西南走向之知本溪斷層，如圖 4 所示。知本溪上游沿知本溪斷層西延部分發育，至本段知本溪中游河谷受清覺寺斷層截切，再與地表地下水混合後，儲存在溫泉儲集層中，並沿斷層交錯裂隙帶上湧，溫泉露頭處沿著知本溪河谷蜿蜒。

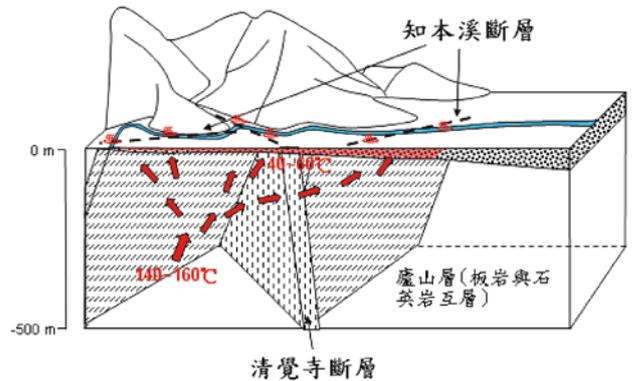


圖 4 知本溫泉形成機制示意圖 [8]

知本溫泉地區數值模型建立

O'Sullivan 等人 [9] 統整 1990 至 2001 年有關地熱區模擬之研究。地熱區之數值模擬一向應用於地熱開採造成之影響評估，及地熱區熱能資源開發估計，研究中統整 11 年間發表於各學術期刊之地熱模擬研究，總計 101 個研究中，採用 TOUGH/TOUGH2 之研究就有 56 個，佔了一半以上，足見此數值程式有足夠能力應用於地熱儲區之案例模擬。本研究應用 TOUGH2 數值模擬程式模擬地下水流與地熱溫度之分佈情形，以及求解注入井對地熱區地下水之影響。此程式由 Pruess *et al.* [10] 所撰寫完成，並使用積分式有限差分法 (Edwards [11]; Narasimhan and Witherspoon [12]) 模擬多維空間、多相流體在孔隙介質之質能傳輸。考慮地表水文邊界，劃定模擬範圍，並配合地質資料及水文地質參數，依知本溫泉地區地下水壓力溫度設定，完成溫泉區數值模型建立。

本研究溫泉數值模擬範圍以溫泉產業區為主，沿知本溪中下游劃定，模擬範圍南北為 3 公里東西向 4 公里如圖 5 所示。其中東側邊界知本溪溪谷範圍，設定為定水頭邊界，西側知本溪溪谷範圍，同為定水頭邊界，其餘邊界，北側為知本山區域，南邊為西川山，則由率定過程設為流量邊界。

數值模型網格大小為 100 公尺立方，根據地電阻探測成果，在深度高程為 -200 公尺（海拔）深度以下，地層為緻密砂岩層，故本數值模型深度設為 1,100 公尺（海拔 600 ~ -500 公尺），如圖 6 所示。在地質分層部分，在河谷地區自地表以下存在風化沖積層，深度約 50 ~ 100 公尺，故本數值模型於河谷地帶地表第一層設定為沖積層，而地球物理顯示自沖積層以下，約存在

100 ~ 200 公尺節理岩體，故河谷位置沖積層以下 200 公尺內設為破碎砂岩，以下為緻密砂岩，河谷以外區域則表層 200 公尺為破碎砂岩，以下為緻密砂岩，如圖 7 所示，地層介質參數設定如表 1 所示。

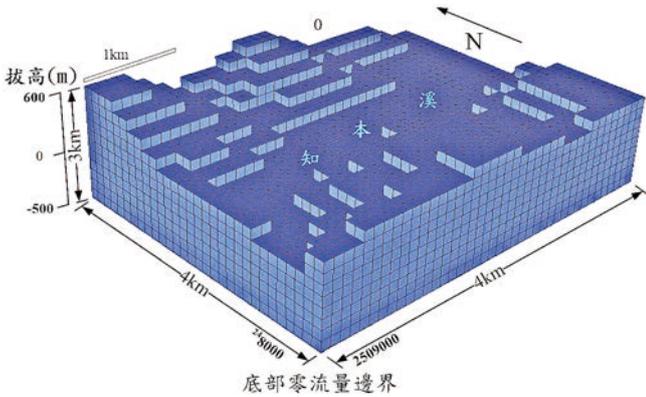


圖 5 知本溫泉模擬模型圖

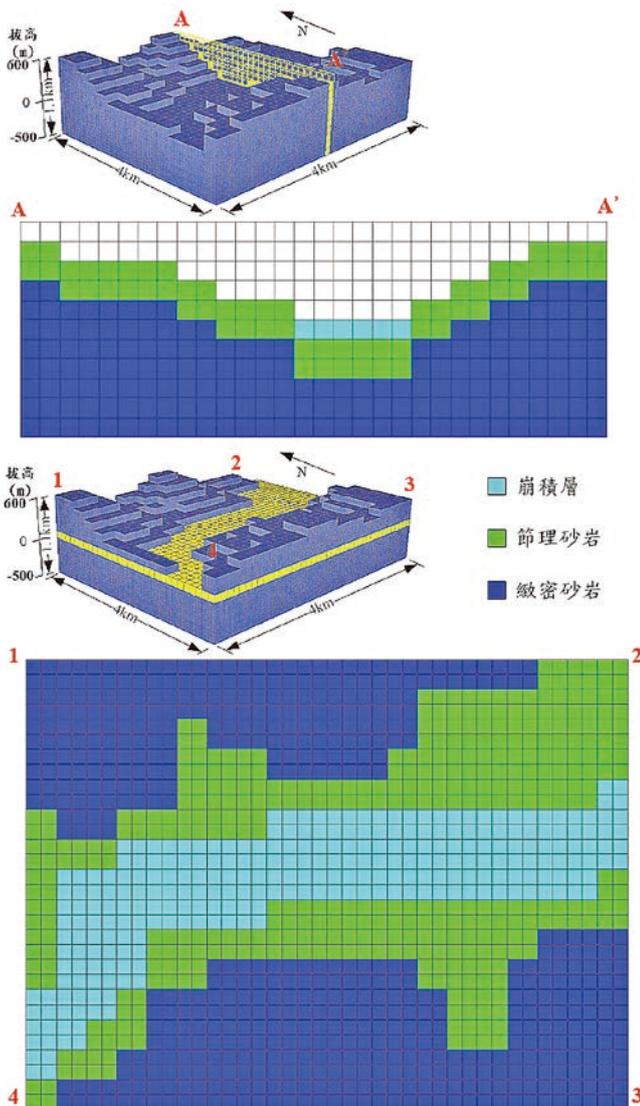


圖 6 數值模型地層設定圖

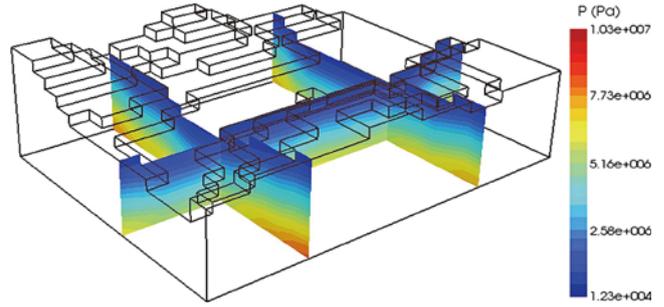


圖 7 知本溫泉數值模型初始水位設定

表 1 數值模型參數表

	沖積層	節理砂岩	變質砂岩
密度 ($/\text{kg}/\text{m}^3$)	1,500	2,600	2,600
孔隙率	0.3	0.1	0.1
滲透率 (m^2)	2.7E-13	6.00E-14	6.00E-16
熱傳係數 ($\text{W}/\text{m}^2 - ^\circ\text{K}$)	1.3	2.5	2.1
比熱 ($\text{cal}/\text{kg} - ^\circ\text{C}$)	800	730	710

評估溫泉水流路徑及深循環水量

以上述建立溫泉地區數值模型，由既有觀測資料設定初始地下水位，可得數值模型初始水位，約沿地表高層分布（圖 7）；在地溫設定部分，本研究利用已知地層溫度資料，採深循環水注入方式，利用現有資料率定地溫，以反求注入水量方式，推斷本區深循環水量。

本研究根據經濟部水利署^[6]進行五口溫泉探勘井地溫測結果（如圖 1 所示），可得知本區地溫約可分為兩部分相對高溫區，本研究之數值模式則視此區具備兩處主要通道，並設定注入區域共三區（A、B 與 C）如圖 8 所示。注入位置為模型底層（海拔 -500 公尺），水溫則以前述探查所得 -500 公尺地溫作為注入水溫度，深循環水注入後數值模型溫度變化如圖 9 所示，並利用經濟部水利署^[6]量測 TC-1 與 TC-5 兩口溫度進行率定，率定地溫結果如圖 10 所示。率定成果如表 2 所示，深循環水量 A 區總量為每年 66.6 萬噸，B 區每年 54.5 萬噸，C 區每年 9.1 萬噸，各區循環水溫度不同，故換算為熱焓量後，此區每年深循環水帶入熱焓為 7.4×10^{14} 焦耳。

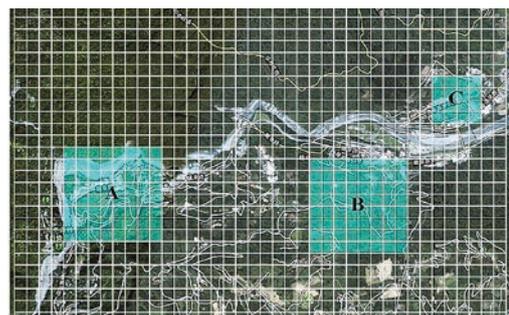
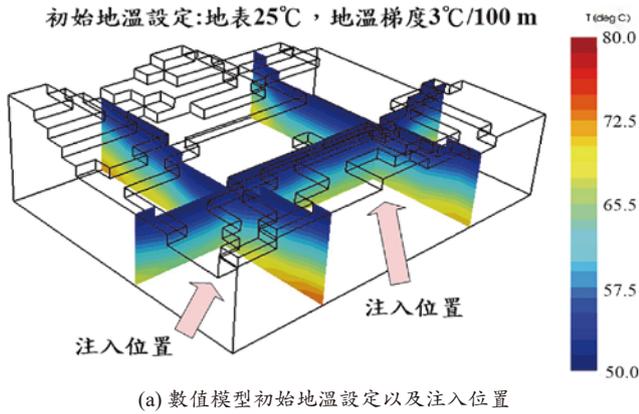


圖 8 知本溫泉地區深層水注入位置示意圖



(a) 數值模型初始地溫設定以及注入位置

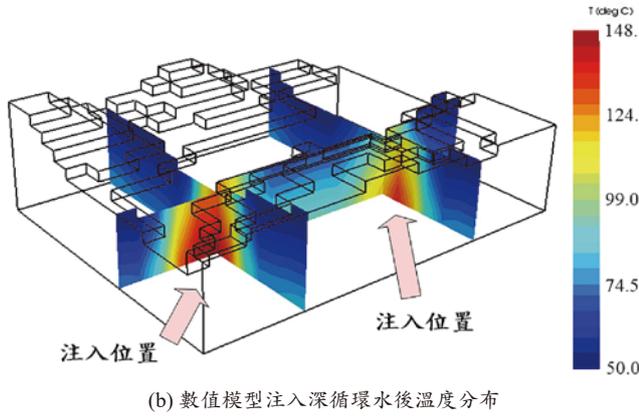


圖 9 深循環水注入後數值模型溫度變化

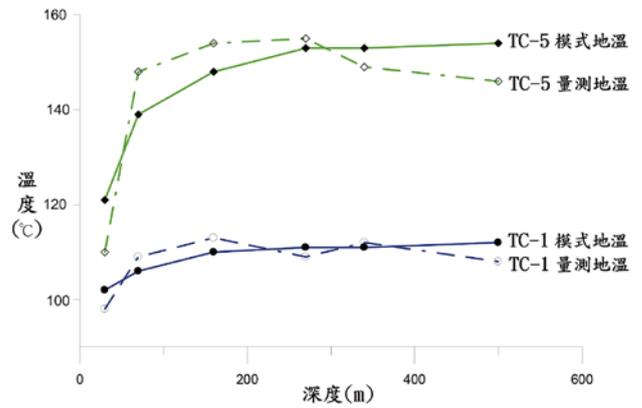


圖 10 TC-1 與 TC-5 地下溫度率定結果

表 2 深層循環水率定成果

注入區域	每網格循環水率定量 (kg/s)	深循環水溫 (°C)	補注網格數	網格層數	深循環水量 (噸/年)
A	0.11	150	64	3	666,040
B	0.09	120	64	3	544,942
C	0.06	110	16	3	90,824
小結					1,211,073
A 區熱焓	4.2×10^{14} 焦耳/年				
B 區熱焓	2.7×10^{14} 焦耳/年				
C 區熱焓	4.2×10^{13} 焦耳/年				
總熱焓	7.4×10^{14} 焦耳/年				
註：熱焓 = $4,200$ (焦耳/公斤-°C) × 水量 (公斤) × 水溫 (°C)					

溫泉資源潛能

由於台灣地區地下水豐沛，在特異地溫梯度區域型成溫泉資源，而決定溫泉資源豐富與否，則決定於由深部地層提供之熱能高低，若熱能豐富，則溫泉水溫度高，具有豐富溫泉資源且取用較易；反之熱能較低，溫泉水溫低，可能不符經濟成本，或是易受人工補注等因素影響溫泉品質，故溫泉儲集層所受熱能提供量，即可決定溫泉資源潛能之高低，本研究則定義溫泉資源潛能

為「下方地層提供給溫泉儲集層之熱流量大小」，溫泉儲集層之溫度與熱能高低，皆由下方熱源所提供，故將此熱流量大小，視為溫泉資源潛能，且由於溫泉取用位於儲集層，故將此溫泉資源潛能位置定為儲集層位置。

本研究將依上結果述方法，以數值模型模擬成果做為知本溫泉地區地熱資源潛能劃分基準，利用完成之數值模型，可得知模型中各位置熱流量資料如圖 11 所示。

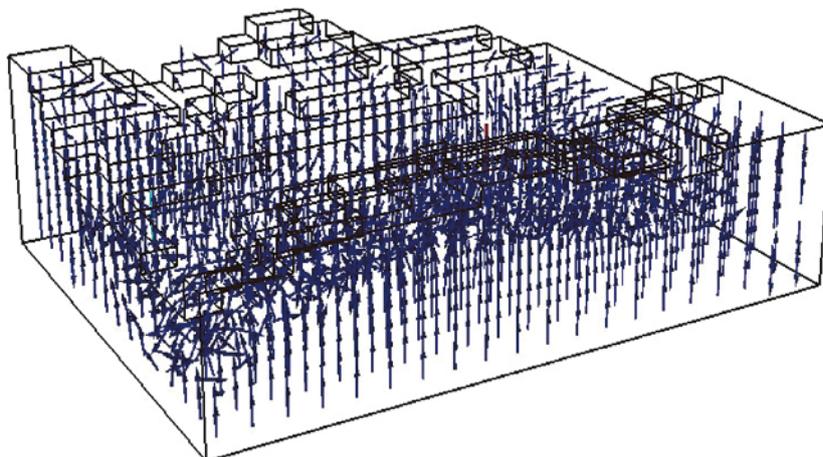


圖 11 數值模型熱流量方向及大小空間分佈圖

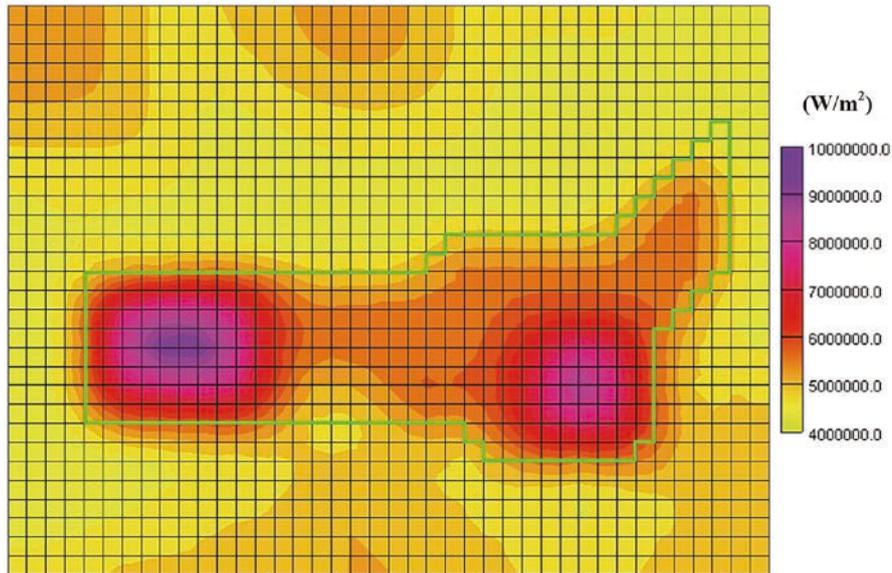


圖 12 知本溫泉地區溫泉儲集層熱流量等值圖

圖中顯示箭頭即為各網格之熱流量分佈情況與方向，向量長度即代表熱流量大小。本研究評估地熱資源潛能為地層提供給溫泉儲集層之熱流量，以模式剖面為例，本數值模型中，破碎砂岩層為知本溫泉地區全儲集層，故由數值模式中獲得各下部緻密砂岩提供給儲集層之熱流量。研究區溫泉資源潛能則如圖 12 所示，由圖中熱流量結果，可清楚瞭解知本溫泉資源潛能量值與分布情況。

結語

本研究是以區域之水文地質概念模型與溫泉儲集層形成條件為基礎，說明溫泉資源評估過程以及重要知深淺循環水概念，在有限之調查資料下，利用數值模擬方法，求解研究區域內之地下水水流與熱流問題。利用溫泉地區資料建立溫泉地區數值模型，已為廣泛運用以及推估溫泉資源之方式，利用合乎需求之地下水與熱能耦合軟體，依地溫資料以及水文地質概念模型，可利用數值模型反推溫泉區深層循環水量以及熱能分布。以案例區知本溫泉為例，模擬結果顯示本區深循環水量總和為每年 121.1 萬噸，換算為熱焓量後，此區每年深循環水帶入熱焓為 7.4×10^{14} 焦耳。本研究定義溫泉資源潛能為下部地層提供溫泉儲集層之熱流量大小，並根據數值模型計算知本溫泉地區儲集層溫泉潛能，結果顯示知本森林公園入口前與龍泉路 43 巷為此區溫泉資源潛勢最高區域，以此評估程序可瞭解知本溫泉區整體溫泉資源潛

能與分布，而後配合溫泉地區溫泉井監測資料，可架構溫泉區開發利用與經營管理準則，確保資源不致發生超限利用情況，維持資源永續。

參考文獻

1. 李振誥、林士哲、馬惠達、林宏奕 (2003), 「金崙溫泉資源之調查分析」, 台灣水利, 第 51 卷, 第 3 期, 第 58-68 頁。
2. 李振誥、李京霖、龔文瑞 (2007), 「陽明山馬槽地區溫泉資源調查分析之研究」, 台灣水利, 第 55 卷, 第 3 期, 第 46-53 頁。
3. 李振誥、陳尉平、龔文瑞、陳進發、林宏奕 (2008), 「溫泉可開發量推估及其應用於烏來溫泉區」, 台灣水利, 第 56 卷, 第 1 期, 第 60-68 頁。
4. Kiryukhin, A.V., Asaulova, N.P., and Finsterle, S. (2008). "Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia." *Geothermics*, **37**, pp. 540-562.
5. 經濟部能源委員會 (1984), 台灣區地熱資源探勘評估報告。
6. 經濟部水利署 (2001), 台灣溫泉水資源之調查及開發利用 (2/4)。
7. 陳肇夏 (1982), 地熱地質與探勘, 貞觀出版社, 第 115 頁。
8. 經濟部水利署 (2008), 南區溫泉監測系統站址規劃設計。
9. O'Sullivan, M.J., Pruess, K., and Lippmann, M.J. (2001). "State of the art of geothermal reservoir simulation." *Geothermics*, **30**, pp. 395-429.
10. Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999). *TOUGH2 User's Guide*, Version 2.0, Lawrence Berkeley Lab. Rep. LBNL-43134 UC-400, Berkeley, CA.
11. Edwards, A.L. (1972). *TRUMP: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems*, National Technical Information Service, National Bureau of Standards, Springfield, VA.
12. Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P. A. (1976). "An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media." *Water Resources Research*, **12**(1), pp. 57-64. 



新烏山嶺引水隧道 施工遭遇 瓦斯資源 之對策

汪世輝* / 利德工程股份有限公司 經理

蕭富元 / 財團法人中興工程顧問社 組長

周永川 / 台灣世曦工程顧問股份有限公司 經理

王建力 / 國立成功大學資源工程系 副教授

天然氣瓦斯對採礦者而言，係汲汲想得到的資源；但對土木水利者而言，係萬萬不想碰到的災害。八田與一興建之舊烏山嶺隧道為串連曾文水庫與烏山頭水庫之重要且唯一的引水隧道。沿線因通過台灣產油氣的地層，施工當時曾引起數次瓦斯氣爆事件，造成不少死傷。鑑於此，新烏山嶺引水隧道參考過去經驗，採取先進之「不打岩栓」、「分層探查」、「加強通風」、「止氣噴灌」、「鑽井洩氣」、「勤測瓦斯」及「嚴控火源」等施工關鍵技術，隧道自 104 年 12 月進洞至 107 年 5 月貫通期間，無發生任何抽坍及氣爆事件，有效掌控高瓦斯隧道之施工安全。本文期供後續類似高瓦斯隧道施工之參考。

關鍵字：烏山嶺引水隧道、瓦斯隧道、可燃性氣體

前言

新烏山嶺引水隧道主要係因連結曾文水庫與烏山頭水庫供水系統的舊引水隧道，自 1930 年通水啟用至今已逾 90 年。隧道結構品質日漸劣化，且在無法長期停水，進行全線補強加固下，為避免舊引水隧道發生突發性崩壞的斷水風險，並恢復原有的 56 m³/sec 輸水能力。因此，乃於其下游側約 200 ~ 400 公尺處，興建新的引水隧道。新烏山嶺引水隧道全長約 3.4 公里，開挖斷面積約 43 m²，穿越阿里山山脈南緣分支，覆蓋最高約 400 多公尺。由隧道東口至西口依序經過現代沖積層、鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩、六重溪層（砂頁岩互層），如圖 1 所示。

糖恩山砂岩及六重溪層均為臺灣西南部的產油氣層，雖暫不具經濟生產價值，但開挖過程中，若遭遇油氣入滲，在隧道侷限空間內之低濃度（5% ~ 15%）下，

倘遇火源即具有爆炸之風險，如圖 2 所示。根據資料顯示^[1]，過去舊引水隧道施工過程中，即曾遭遇多達 25 次規模不等之油氣洩出事件，並曾發生 9 次氣爆意外災害。

臺灣以往已有多起煤礦開採及隧道施工氣爆案例，例如舊烏山嶺引水隧道、鯉魚潭水庫士林水力電廠頭水隧道、曾文水庫越域引水西隧道等。但災害發生後，鮮少系統性探討其處理對策，本文歸納成功貫通之新烏山嶺引水隧道，介紹其所採取之「不打岩栓」、「分層探查」、「勤測瓦斯」、「加強通風」、「止氣噴灌」、「鑽井洩氣」及「嚴控火源」等施工關鍵對策，期供未來瓦斯隧道施工之參考。

不打岩栓

系統岩栓是新奧工法一個重要的支撐構件。但對瓦斯隧道來說，岩栓的打設過程，可能造成裂隙連通，油氣入滲的管道。因此，本隧道構思以「不打設岩栓」之觀念，來進行隧道設計；再輔以加厚噴凝土及仰拱閉合，來彌補

* 通訊作者，shihuiwang@raitocom.tw

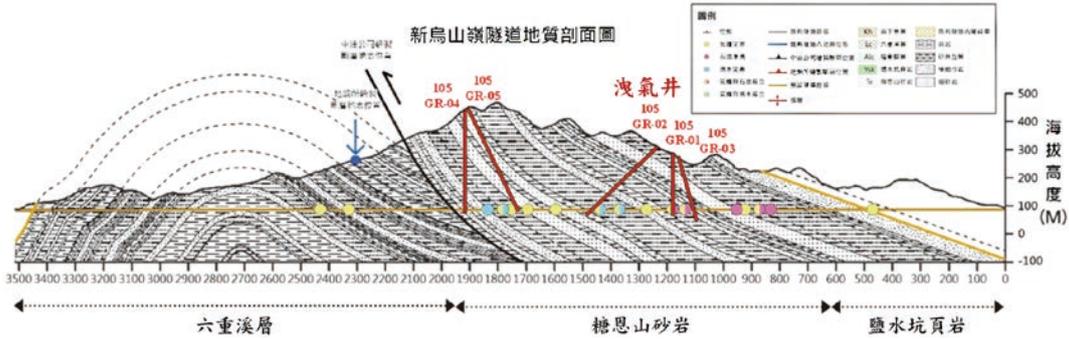


圖 1 隧道地質圖及洩氣井配置圖

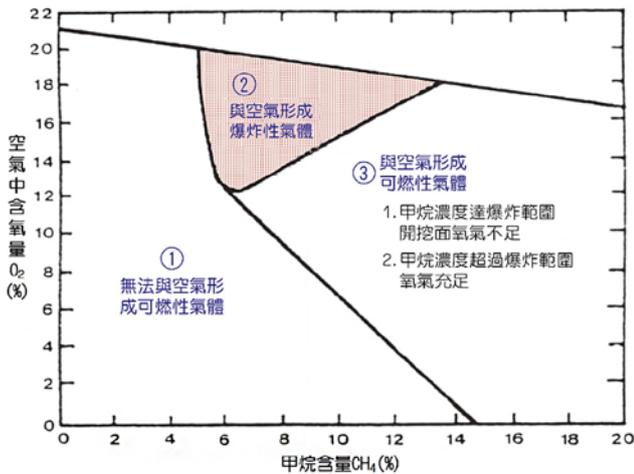


圖 2 甲烷爆炸性和空氣中含氧量關係圖

隧道支撐。後經開挖驗證，實際頂拱及水平收斂變位量也不到預估變形量之 30% (如圖 3)。

但在一些特殊區段，如：洞口段、交叉段及避車道等，避免不了需岩栓補強時，則以「自鑽式岩栓」取代，於第一層噴凝土完成後隨即施打，並以第二層噴凝土披覆方式，以避免油氣藉由岩栓滲出，如圖 4 所示。另為通風順暢，避免瓦斯蓄積，這些特殊區段，線型設計亦盡量採「順接」方式，如避車道斷面順接設計 (如圖 5) 及橫坑交叉段順接設計 (如圖 6)。

分層探查

「瓦斯分層探查」概念，源自石油工程技術。過去完井後的孔口瓦斯測定，僅可得知全井地層甲烷氣體逸出濃度，而無法研判瓦斯出氣位置、出氣地層特徵及相對應的出氣濃度。因此，在補充地質調查階段，乃構思配合鑽孔施作過程，每鑽進固定深度 (如 10 m ~ 20 m) 或鑽井回水有氣泡冒出、或地層變異破碎處等，即辦理氣體成分分析及瓦斯濃度量測。

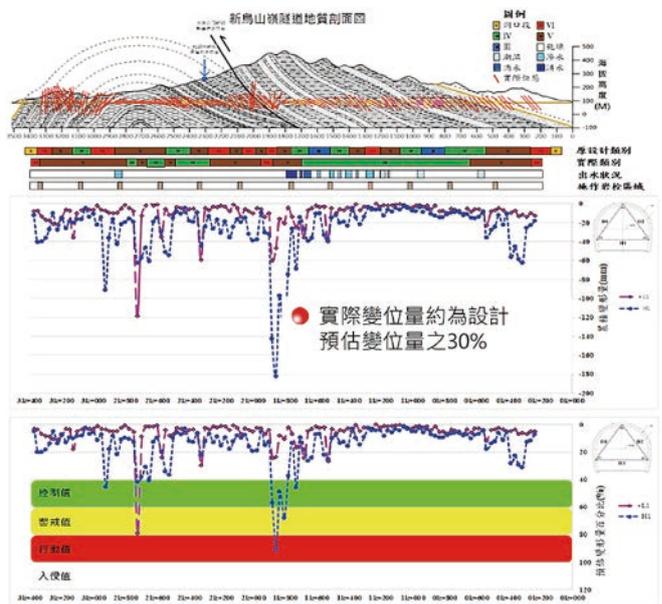


圖 3 瓦斯隧道沿線變位情況

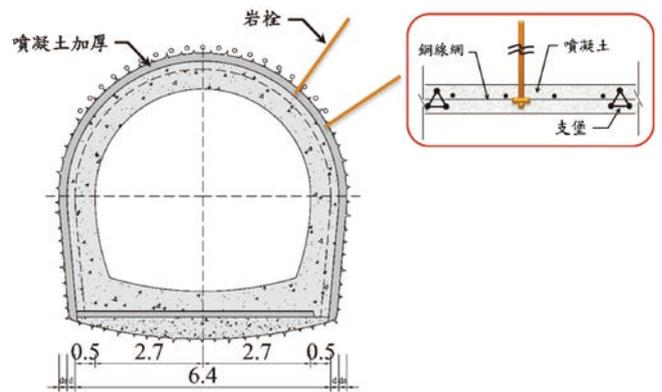


圖 4 瓦斯隧道開挖支撐示意圖



圖 5 避車道斷面順接設計



圖 6 施工橫坑交叉段順接設計

量測方法係將氣體收集裝置導入至鑽井特定位置（如疑似出氣地層或地下水位上方 20 ~ 50 cm 處），以密封管路連接至地面集氣設備，而後開始進行抽氣作業，打開地面氣體收集閥口，確認管路中已無原殘留空氣後，置入氣體偵測器量測可燃性甲烷氣體濃度及其歷時變化情形，取氣體濃度歷時變化達穩定時之觀測值做為偵測結果。由於已鑽進段的孔壁均有鑽桿接續，而鑽桿與岩壁間的距離通常極微，故鑽孔中所偵測到的氣體主要應來自孔底鑽頭地層中所滲出，故該次量測結果，應可視為該深度位置所滲出的氣體濃度。圖 7 為瓦斯分層探查過程及結果。

依瓦斯的成因，可分為煤系瓦斯地層及非煤系瓦斯地層（油頁岩及含天然氣、石油地層）。本隧道依據瓦斯絕對湧出量的多少，劃分不同的「瓦斯地層」，如表 1 所示。

一個瓦斯工區內不同地段原瓦斯地層中的初始瓦斯含量，可能受施工通風及止氣影響，而稀釋出不同瓦斯濃度。根據釋出之瓦斯濃度，本隧道將瓦斯工區劃分為「微瓦斯工區」、「低瓦斯工區」、「高瓦斯工區」與「瓦斯突出工區」等四種管理等級，如表 2 所示。

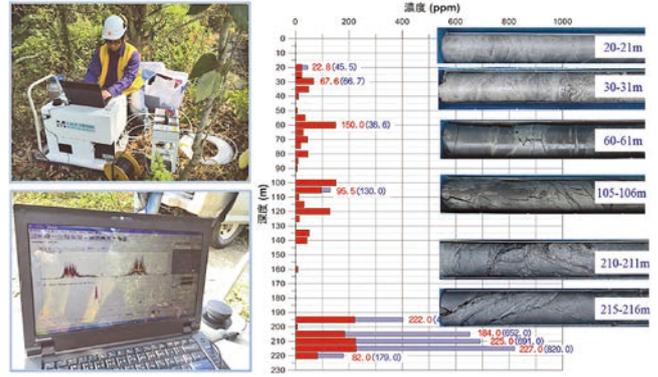


圖 7 鑽井過程瓦斯分層探查情形 [2]

表 1 瓦斯地層等級劃分

瓦斯地層	瓦斯湧出量 Q_{CH_4} (m^3/min)
微瓦斯	$Q < 0.5$
低瓦斯	$0.5 \leq Q < 1.5$ (8L/S)
高瓦斯	$1.5 \leq Q < 4.8$ (25L/S)
瓦斯突出	$Q \geq 4.8$ (80L/S)

表 2 瓦斯工區等級劃分（氣爆濃度 5% ~ 15%）

瓦斯工區	瓦斯濃度 (%)	爆炸下限 LEL (%)
微瓦斯	< 0.25	< 5
低瓦斯	0.25 (含) ~ 0.5	5 ~ 10
高瓦斯	0.5 (含) ~ 1.0	10 ~ 20
瓦斯突出	≥ 1.0	> 20

加強通風

隧道作業中裝炸、出碴、焊接等不可避免會產生火花，要完全杜絕難度極大。從降低瓦斯濃度觀點，通過通風稀釋，將其控制在爆炸下限內，使即出現少數火花，也不會導致瓦斯氣爆，是最為有效防護。

研究表明，風速在 0.3 m/s 時，甲烷會從發生點逆流形成甲烷層（約 20 cm）；當風速達 0.5 m/s 時，甲烷幾乎不會發生逆流，但會形成甲烷層；當風速超過 1.0 m/s 時，甲烷散亂，甲烷層會消失，不會在頂拱上部聚積。

為達回風速 1.0 m/s，本隧道採 1.2 m 管徑「雙管送風」方式，總送風量 $43 \times 60 = 2,580 m^3/min$ 以上，如圖 8。其優點有效射程大，稀釋、排出瓦斯及煙塵之效果好；工作面回風流不通過風機及風管，對有瓦斯湧出的工作面安全性高；而污濁空氣沿隧道流出，沿途帶走隧道內瓦斯、粉塵及廢氣，對改善洞內環境、降低瓦斯更有利。另外受氣壓影響，隧道內回風速不足區段，本隧道亦引進射流風機進行補強，同時可作為隧道貫通後延續加強通風用。

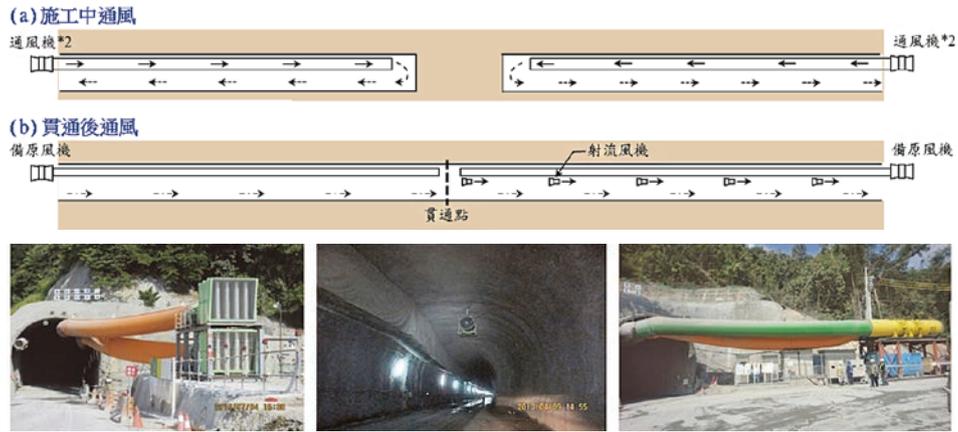


圖 8 雙管送風及射流風機方式

止氣噴灌

台灣止氣灌漿之施工案例較止水灌漿少很多。因此，本案例藉由成大資源系岩力實驗室之微流細孔分析儀來量測各種止氣材料的透氣係數，供施工選用之參考。實驗結果顯示，隧道圍岩地層及設計噴凝土屬於半透氣性質 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s；襯砌混凝土、水泥砂漿及選用之樹脂止氣灌漿與止氣噴漿材可介於不透氣性質 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s，圖 9 所示。

本隧道「止氣噴灌」使用時機，為遭遇高瓦斯地層，雙管通風仍無法降低瓦斯濃度時。未開挖段採用「止氣灌漿」；已開挖段採用「止氣噴漿」，即所謂前灌後噴方式。灌漿材採用 PU 樹脂類；噴漿材則使用高分子聚合物，薄層施噴後 4 小時即可達單壓強度 100 kg/cm² 以上。

以止氣噴漿成效為例，於未止氣灌漿區段開炸後瓦斯滲出，加強通風（2 管）達 5 hr 仍無法降低瓦斯濃度至 20LEL 以下，人員無法進入，顯示高瓦斯工區瓦斯有持續滲入；但施作止氣灌漿後，開炸所造成之瓦

斯滲漏，可在加強通風下約 1 hr 內，將瓦斯濃度降至人員可進入（出碴）之濃度，顯示止氣灌漿有效阻斷並減少高瓦斯氣體持續滲入（如圖 10）。

而完工前，利用紅外線光譜儀（如圖 11）來量測不同階段隧道瓦斯空間分布情形，如圖 12。由圖 12 可知隧道貫通完成噴漿情況下，瓦斯濃度值最高約 500 PPM；而於隧道襯砌完成後，出氣段瓦斯濃度已降至 250 PPM；而於最後完成襯砌拱頂回填灌漿後，量測之瓦斯濃度甚低至 100 PPM 左右（遠低於瓦斯管制濃度 2,500 PPM 甚多）。

鑽井洩氣

新烏山嶺隧道所採用之「鑽井洩氣」工法，乃模仿大地工程的點井降水工法原理。構思在隧道遭遇瓦斯突出地層前進行鑽孔，並安裝高性能抽氣設備，事先洩除地層中的瓦斯氣體，避免開挖時大量高濃度氣體突入隧道內，如圖 13 所示。傳統豎井排氣工法則是在氣體進入隧道內後，再透過豎井將氣體排出隧道外，二者差異，

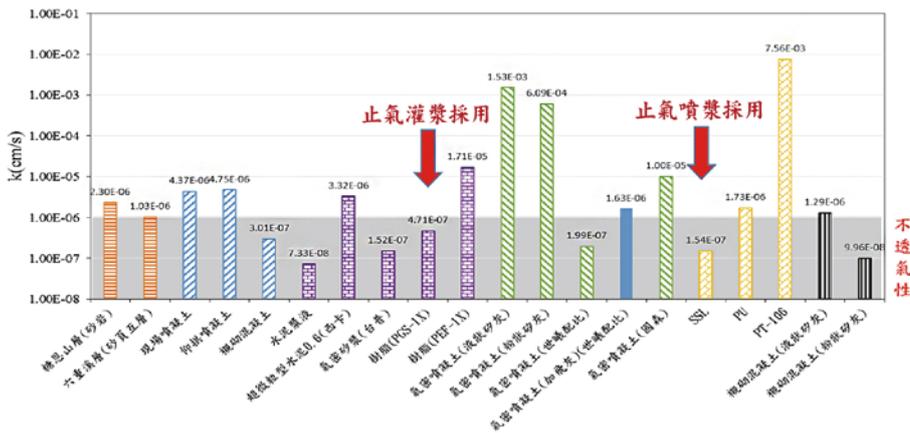


圖 9 各種止氣材料試驗結果

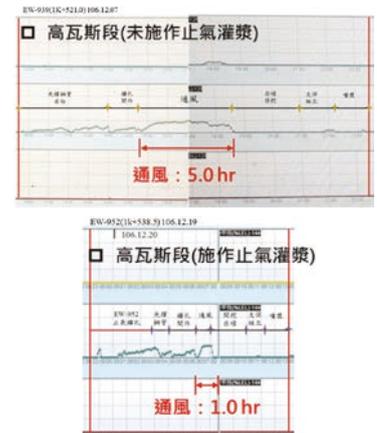


圖 10 止氣灌漿成效示意圖

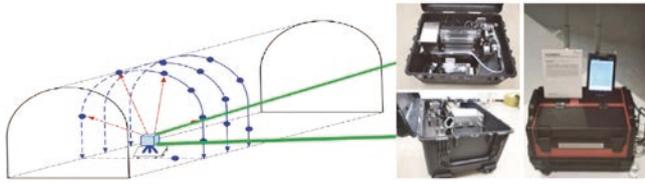


圖 11 隧道空間紅外線光譜儀氣體量測系統 (精度 10 PPM)

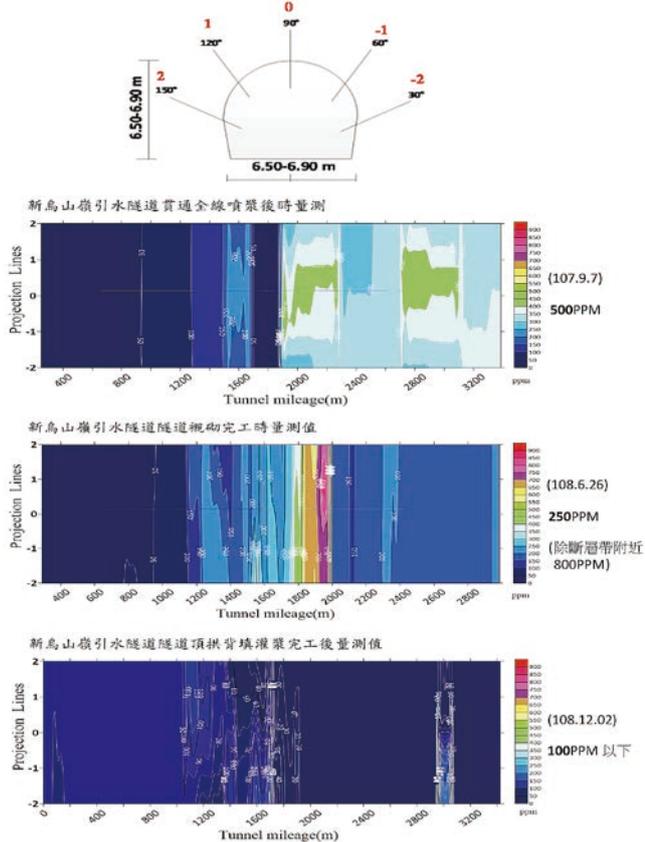


圖 12 隧道噴漿、襯砌及回填灌漿後瓦斯濃度測值 (PPM)

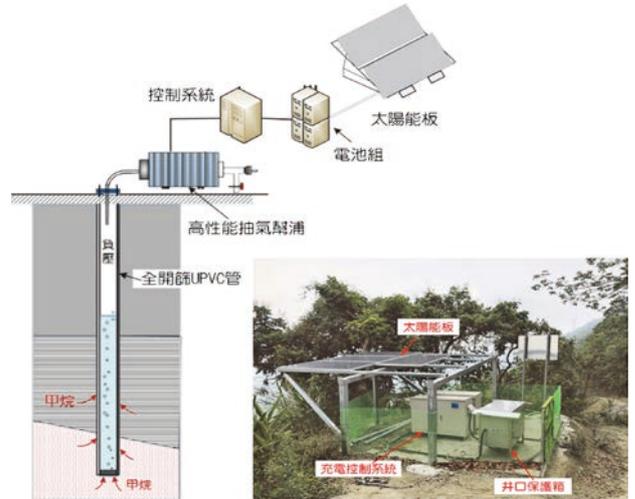


圖 13 鑽井洩氣工法示意圖 [3]

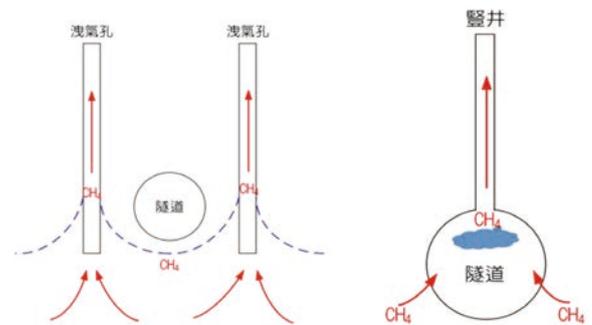


圖 14 瓦斯排氣工法示意圖

如圖 14 所示。豎井排氣過程係將隧道內的氣體濃度逐步降低，如圖 15 所示。以洩氣井 GR-04 為例，完井後濃度持續下降，降至 LEL20% 左右便維持平穩趨勢，但仍表示地層中有高濃度瓦斯，隧道應隨時注意氣爆之風險。

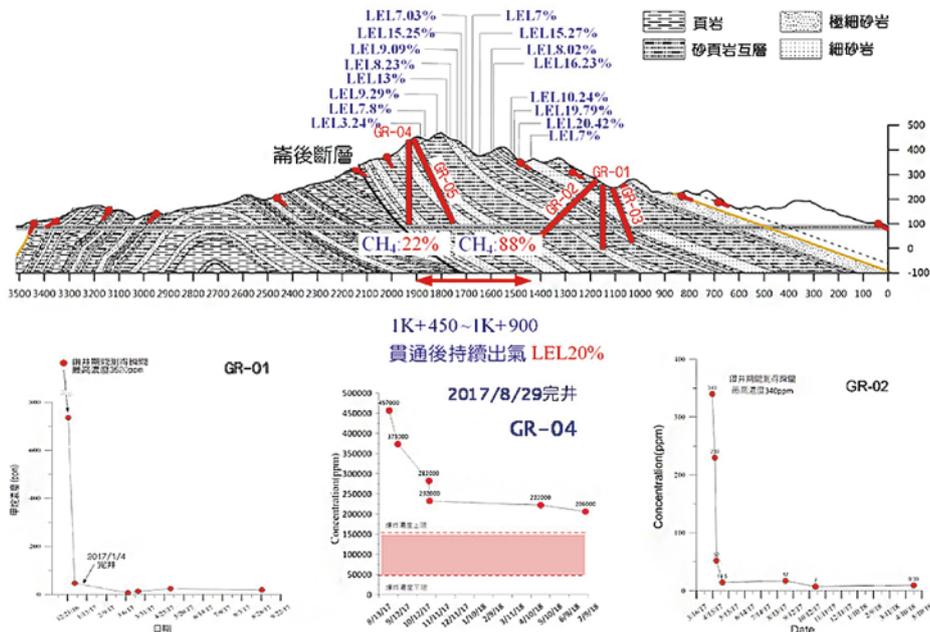


圖 15 瓦斯排氣工法成效示意圖

勤測瓦斯

瓦斯濃度及回風速度量測，是瓦斯工區很重要的管控指標。微瓦斯、低瓦斯工區慣採用人工檢測方式；而高瓦斯、瓦斯突出工區，則採用人工檢測與自動檢測相結合方式。本案例除採用原有四合一氣體偵測器勤測外，每隔 250 M 設置固定式氣體偵測器，如圖 16 所示。

以往，瓦斯隧道氣爆事件之發生，很大程度上是瓦斯濃度及回風速度量測訊息，無法立即分析回饋，並進一步等級判定，採取適當對策所致。圖 17 為本案例所量測到的瓦斯連續監測數據，分析後發現瓦斯滲出大部分集中在開炸後及打設先撐鋼管階段，雖達高瓦斯工區濃度，但經採取加強通風後，一般能在 30 ~ 60 分鐘內，將瓦斯降至管控值 LEL < 10 內（即低瓦斯工區），使非防爆型之行走式作業機具能夠進場施工。

嚴控火源

施工階段瓦斯工區機具設備防爆等級，原則採表 3 方式。微瓦斯工區可採用非防爆型機具設備；低瓦斯工

區則電氣設備需防爆型；高瓦斯工區固定式作業機具需防爆型，而行走式作業機具在進行防爆改裝後，可採非防爆型。有鑑作業機械要採防爆型較為困難，本隧道採以通風為主、止氣為輔對策，希望將高瓦斯工區降為低瓦斯工區後，始進洞施工。

表 3 瓦斯工區防爆等級

瓦斯工區	電氣設備 (固定式)	作業機具 (固定式)	作業機械 (行走式)
微瓦斯	×	×	×
低瓦斯	○	×	×
高瓦斯	○	○	× (防爆改裝)
瓦斯突出	○	○	○

註：× 非防爆型 ○ 防爆型

結論

目前台灣瓦斯隧道之調查及施工，多仍侷限於原則及定性之建議，甚少量化指標原則。對於遭遇瓦斯之處理對策，亦缺乏實質系統性介紹。本文以成功貫通之新烏山嶺瓦斯隧道為例，介紹實際採取之各項施工技術及預防對策，以圖 18 所示，希此文供後續類似案例參考。

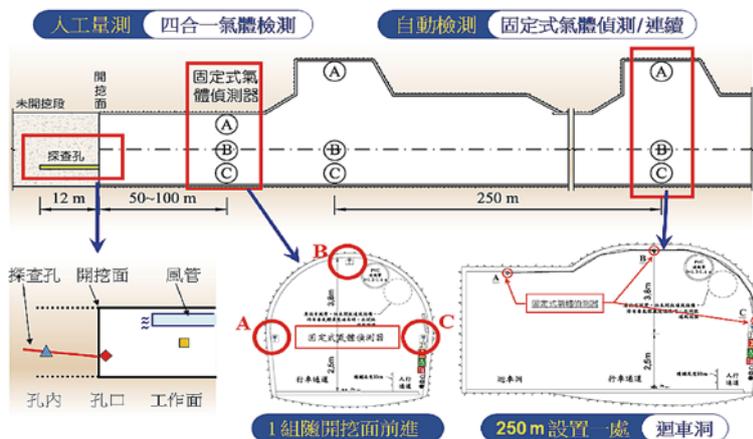


圖 16 氣體檢測方法示意圖

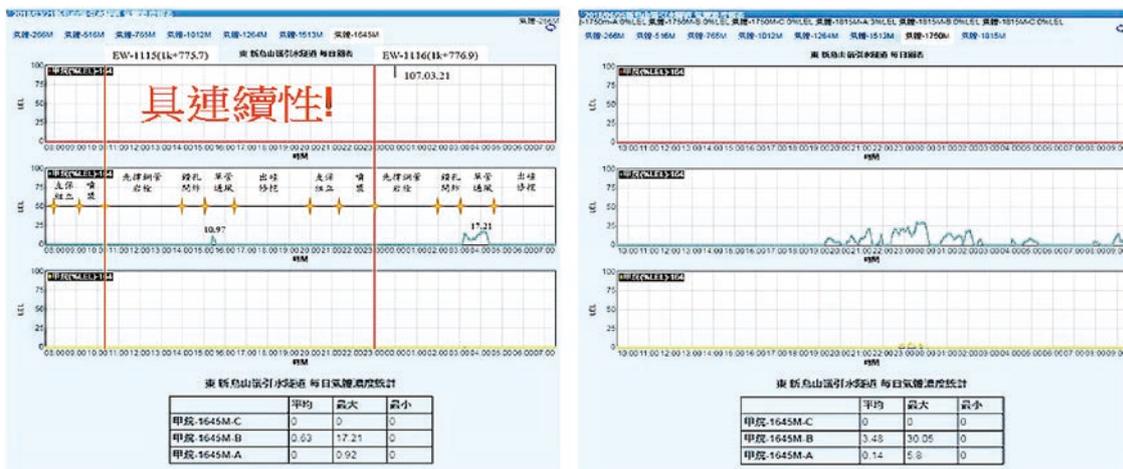


圖 17 固定式氣體偵測連續監測圖

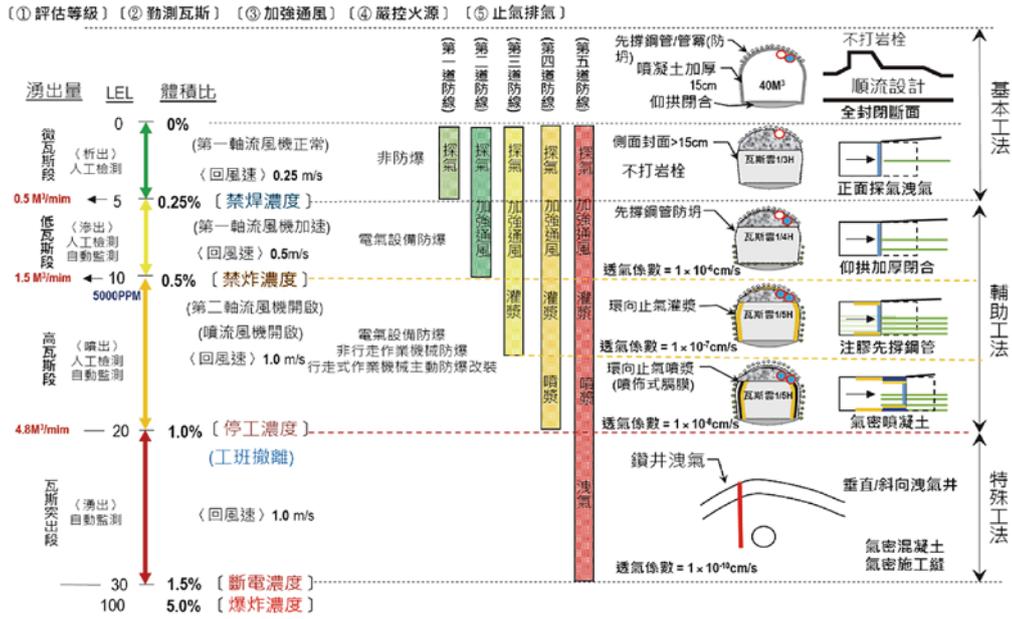
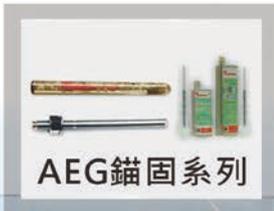
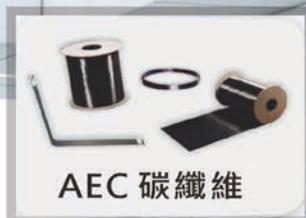


圖 18 瓦斯隧道施工對策圖

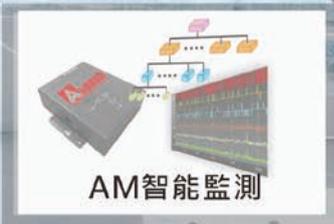
參考文獻

1. 利德工程股份有限公司、松和工業股份有限公司、世曦工程顧問股份有限公司 (2015), 新烏山嶺引水隧道工程服務建議書, 臺灣嘉南農田水利會。
2. 汪世輝、林文斌、呂金彥、蕭富元 (2020), 「主動式洩氣工法於

- 新烏山嶺引水隧道成效評估」, 第 18 屆大地工程學術研究討論會論文集, 台灣屏東。
3. 汪世輝、王薇薇、蔡政憲、蕭富元、高憲彰 (2017), 「鑽井洩氣工法應用於降低隧道開挖出氣濃度的可能性探討」, 第 16 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集, 貴州, 第 239-246 頁。



建築修復結構補強
STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM



免費服務電話 台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
0800-009-666 桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw





二氧化碳地質封存： 我國減碳機會與挑戰

林殿順* / 國立中央大學地球科學學系 教授、國立中央大學碳封存及地熱研究中心 主任

徐偉啾 / 國立中央大學地球科學學系 博士班研究生

林哲銓 / 國立中央大學碳封存及地熱研究中心 博士後研究員

蔡宜伶 / 國立中央大學地球科學學系 專任研究助理

楊雅梅 / 工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

陳新翰 / 工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

我國響應全球期望於本世紀末將全球暖化溫度控制在 1.5°C 之內，為共同承擔全球目標，將「2050 淨零排放」入「氣候變遷因應法」。在政府所提的十二項關鍵戰略中，二氧化碳捕捉利用及封存 (CCUS) 技術，擔負關鍵減碳與負碳角色。政府規劃於 2030 年與 2050 年時，年度碳捕捉利用及封存目標，分別為 1.76 ~ 4.60 百萬噸與 40.2 百萬噸。我國在此巨大的利用碳封存技術減碳的需求下，是否有足夠的地下封存空間，以及在開展與佈建碳封存場初期，我國可能遇到那些挑戰與機會。本文綜合討論主要二氧化碳排放源與排放量地理位置分布、我國碳封存潛能、政府目前實施 CCUS 之規劃。最後提出若大規模實施碳封存可能遇到的挑戰與面對此挑戰的應對方法。

本文根據地質與體積法評估我國陸海域、盆地尺度鹽水層碳封存總量概估為 390 億噸，加上前人研究所得的陸上構造封存量 28 億噸，共約 418 億噸，遠超過政府規劃至 2050 年封存約 5 億噸之封存量。若考慮二氧化碳主要排放源與良好封存潛能區之匹配，以濱海區與近岸之鹽水層封存為首選。考慮地質條件則以桃園陸海域、台中彰化雲林陸海域等台西盆地範圍為最佳封存區域；嘉義以南至高雄之濱海區陸海域（台南盆地），因前期少有碳封存研究，且有較多斷層，封存潛能尚待詳細評估。

我國具有巨大的碳封存潛能，唯目前我國 CCUS 技術仍遭遇多項挑戰，如政府利用 CCUS 減碳的決心與企圖心不足、碳封存法規仍在制訂中、技術仍在發展階段、經濟成本高昂、民眾仍有疑慮等。建議政府展現利用 CCUS 減碳之企圖心與決心；儘快完善碳封存法規；鏈結國際充實我國碳封存場址之調查、二氧化碳灌注與監測與維運技術；財務補助 CCUS 計畫；建置國家碳封存試驗場與教育館，成為技術驗證與民眾溝通場域，加強社會與利害關係人溝通，提高社會對 CCUS 接收度。

關鍵字：2050 淨零排放、二氧化碳捕捉利用及封存

前言

2021 年第 26 屆聯合國氣候變遷會議 (26th Conference of the Parties, COP 26) 與會國家達成「格拉斯哥氣候協議」，期望於本世紀末將全球暖化溫度控制

在 1.5°C 之內，各國因此陸續提出「2050 淨零排放」的淨零時程與策略。「2050 淨零排放」已成國際趨勢，為共同承擔全球目標，我國亦將「2050 淨零排放」入法，並於氣候變遷因應法，制定碳封存管理辦法。二氧化碳排放主要來自於化石能源（煤、石油、天然氣等）之使用，為減少化石能源使用，必需提高替代能源及再生能

* 通訊作者，andrewl@ncu.edu.tw

源之發電占比。然而，於替代能源與再生能源無法完全取代化石能源之前，值此能源轉型之際，化石燃料的使用仍是必要之惡。

IPCC [1] 闡明二氧化碳捕捉利用及封存 (Carbon Capture, Use and Sequestration, CCUS) 技術是減少大規模化石能源和工業排放二氧化碳的重要選擇。國際能源總署 (International Energy Agency, IEA) 2021 年提出「全球能源部門 2050 淨零排放路徑」報告指出，全球能源系統去碳的關鍵支柱為能源效率、行為改變、電氣化、再生能源、氫能、生質能源以及 CCUS (如圖 1 上圖)。以 CCS 為發展基礎的生質能碳捕存 (BECCS) 及直接空氣碳捕存 (DACCS)，更是提供負碳排機會。

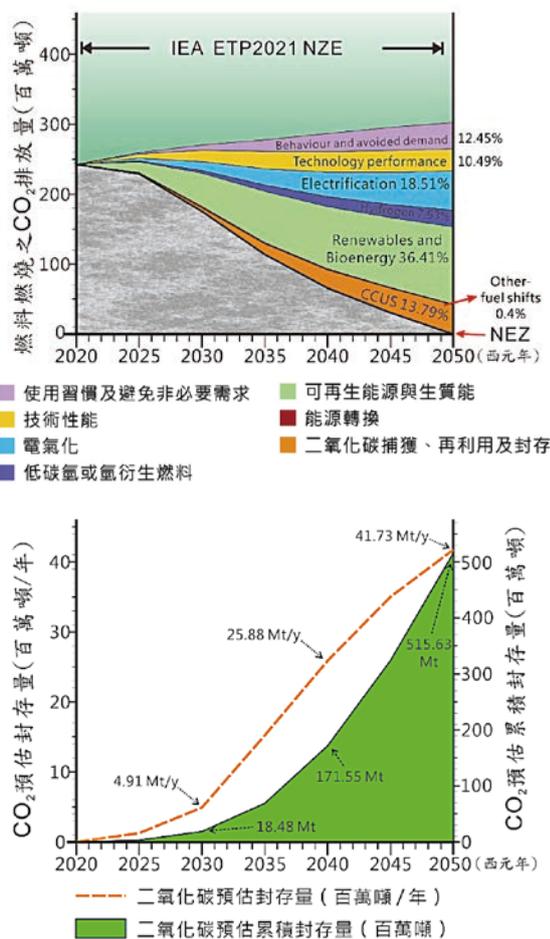


圖 1 (上圖) 我國 2020 ~ 2050 預估年排碳量及以國際能源總署所預期的減碳技術方法，達到 2050 淨零碳排之減碳情境。(下圖) 根據上圖情境，利用 CCUS 占 13.79% 減碳貢獻，估計自 2020 至 2050 每年之二氧化碳捕捉再利用及封存量 (橘色虛線) 以及二氧化碳封存累積總量 (綠色區塊)。本估計顯示，於 2050 年時，每年需封存 41.73 百萬噸，此估計值與國發會等 [4] 所預估，於同年我國需年封存 40.2 百萬噸相當。本估計也闡明，我國至少需有 515.63 百萬噸的二氧化碳封存空間，方能達到利用 CCUS 減碳，達到 2050 淨零碳排需求。

聯合國歐洲經濟委員會之 CCUS 技術簡報 [2]，指出大部分的碳捕捉技術屬於開發與示範階段的 Technology Readiness Level (TRL) 1 ~ 6 (9 為最成熟)，但胺吸收及薄膜碳捕捉等技術則達 TRL9 成熟布建階段；而油氣田及鹽水層地質封存則達 TRL8 的布建階段。如此的評估也反映於暨存且未來將大量布建的全球 CCUS 設施。根據 Global CCS Institute [3] 報導，目前全球商轉中的碳捕存場共有 29 座，共年封存約 41 百萬噸二氧化碳。其中二氧化碳捕捉來源及場址數，由多到少，分別為天然氣處理 (13 座)、化工 / 煉油 (6)、肥料 (4)、氫氣 (2)、發電廠 (2)、鋼鐵廠 (1)、合成氣等 (1)；碳封存方式及場址數量分別為強化採油 (22)、鹽水層封存 (6)、多樣處置 (1)。全球正在規劃中，預計於 2030 商轉的碳捕存場共約 103 座，其中二氧化碳捕捉來源及場址數，由多到少，分別為化工 / 煉油 (45)、發電廠 (25)、氫氣 (13)、天然氣處理 (5)、肥料 / 水泥 / 焚化廠 (3)、其他 (6)。碳封存方式及場址數量分別為強化採油 (6)、鹽水層封存 (84)、多樣處置 (1)、評估中 (12)。可見有更多的化工 / 煉油廠、發電廠及氫氣廠進行碳捕捉，而鹽水層封存變成碳封存的主流選項。

根據國發會等 [4] 之規劃，預計我國在 2050 年時，再生能源發電量占比需達 60 ~ 70%，在無法去碳的電力 (如化石能源、(灰藍) 氫能) 與非電力 (產業住商與運輸部門) 所產生的二氧化碳，於 2050 年時仍達到每年排放約 40.2 百萬噸。若要達到 2050 淨零排放，必須使用國發會等 [4] 所制定的「十二項關鍵戰略」之一的 CCUS 技術，將此年排放於 2050 年，約達 40.2 百萬噸的二氧化碳進行捕捉利用及封存才能達到目標，完成淨零最後一哩路。

若以 IEA [5] 之 CCUS 於能源系統各減碳方法中的減碳貢獻比例 (即 13.79%)，搭配我國至 2050 年之預計年排碳量，計算我國利用 CCUS 減碳所需的二氧化碳封存量。計算結果如圖 1 下圖所示，圖 1 顯示台灣 2020 ~ 2050 年減碳情境 (上圖) 暨預估二氧化碳封存量 (下圖)。圖中顯示於 2030 年時，我國需每年封存 4.91 百萬噸；於 2050 年時，需年封存 41.73 百萬噸。此兩估計值，與國發會等 [4] 發布的 2030 與 2050 碳封存目標，分別為 1.76 ~ 4.60 百萬噸與 40.2 百萬噸，非常接近。圖 1 也顯示若以此估計，我國至 2050 年時，地下岩層需至少需有安全封存 5.15 億噸之二氧化碳之能力。

本文將先討論我國二氧化碳主要排放源及排放量的地理分布，回顧我國二氧化碳地質封存之前期研究，討論台灣地質及我國二氧化碳地質封存潛能，最後並討論我國進行大規模二氧化碳地質封存之機會與挑戰。

我國主要二氧化碳排放源分布與排放量

根據環境保護署^[6]之「國家溫室氣體排放清冊報告」顯示我國於2005年之二氧化碳排放量為266.46百萬噸二氧化碳當量，於2021年為283.114百萬噸二氧化碳當量，碳排放量成長約6.25%，平均成長率約為0.38%，其中能源部門及工業製程及產品使用部門就佔了99.8%的排放量，例如發電廠、石化廠、鋼鐵廠等。

圖2至圖4為根據環境部「事業溫室氣體排放量資訊平台」2021年資料所繪製之圖表。圖2為年排放量大於一百萬噸之排放源列表，台灣於2021年排放量大於一百萬噸廠址有29處。這些大型排放源所累積的排放量總和約為202.35百萬噸，佔了2021年總碳排放量的71.5%。其中前五大的年排放源分別為台中火力發電廠(27.43百萬噸)、麥寮石化廠(26.48百萬噸)、中鋼小港廠(20.88百萬噸)、興達發電廠(16.23百萬噸)

二氧化碳年排放量大於一百萬噸之排放源			
排名	排放源	公司	排放量 (百萬噸)
1	台中發電廠	台灣電力股份有限公司	27.43
2	麥寮石化廠	台塑石化股份有限公司	26.48
3	中鋼小港廠	中國鋼鐵股份有限公司	20.88
4	興達發電廠	台灣電力股份有限公司	16.23
5	林口發電廠	台灣電力股份有限公司	14.67
6	大林發電廠	台灣電力股份有限公司	13.06
7	大潭發電廠	台灣電力股份有限公司	10.97
8	通霄發電廠	台灣電力股份有限公司	9.98
9	中龍鋼鐵龍井廠	中國鋼鐵股份有限公司	9.45
10	麥寮汽電廠	台灣塑膠工業股份有限公司	8.88
11	和平發電廠	和平電力股份有限公司	7.53
12	台泥和平廠	台灣水泥股份有限公司	3.66
13	南部發電廠	台灣電力股份有限公司	3.16
14	亞泥花蓮廠	亞洲水泥股份有限公司	2.91
15	大林煉油廠	台灣中油股份有限公司	2.60
16	台塑仁武廠	台灣塑膠工業股份有限公司	2.53
17	協和發電廠	台灣電力股份有限公司	2.45
18	台化鐵新港廠	台灣化學纖維股份有限公司	2.21
19	森霸電力	森霸電力公司	2.12
20	林園石化廠	台灣中油股份有限公司	2.11
21	華亞汽電廠	華亞汽電股份有限公司	2.08
22	長生電力	長生電力股份有限公司	1.85
23	統國煉油廠	台灣中油股份有限公司	1.60
24	嘉惠電力	嘉惠電力股份有限公司	1.58
25	長春石化苗粟廠	長春石油化學股份有限公司	1.40
26	台化鐵龍德廠	台灣化學纖維股份有限公司	1.31
27	台化鐵海豐場	台灣化學纖維股份有限公司	1.27
28	台泥蘇澳廠	台灣水泥股份有限公司	1.13
29	星能電力	星能電力股份有限公司	1.01

資料來源：環境部事業溫室氣體排放量資訊平台 2021年

圖2 我國二氧化碳年排放量大於一百萬噸之排放廠、所屬企業、2021年之年排放量(單位為百萬噸)。

資料來源為環境部事業溫室氣體排放資訊平台(2021年)^[7]

及林口發電廠(14.67百萬噸)，並將這些排放源用藍圈白字標記於圖3上。圖3展示了台灣主要的排放源、地質分區和活動斷層分布，根據排放量大小，分別以紅色(>10百萬噸)、橘色(>5百萬噸)及綠色(>1百萬噸)表示。排放量大於10百萬噸有7個廠址，介於5~



圖3 台灣陸地地質圖、活動斷層(紅色線段)及海域水深圖。活動斷層分布根據林啟文等^[8]，圖中顯示二氧化碳主要排放源及2021年之年度排放量(排放量依據環境部事業溫室氣體排放資訊平台資料^[7]，單位：百萬噸Mt)。陸上與海域封閉構造以白色橢圓形表示，其圖說見圖之右下方。圖左上方表列呂明達等人^[9]所計算之14個陸上封閉構造名稱及封存量(單位：百萬噸Mt)。

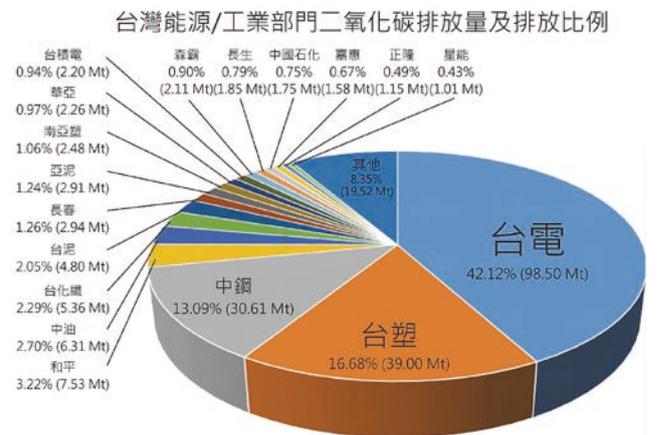


圖4 我國2021年各企業二氧化碳排放量及所占總排碳量之比例。資料來源為環境部事業溫室氣體排放資訊平台(2021年)^[7]

10 百萬噸有 4 個廠址，介於 1 ~ 5 百萬噸有 18 個廠址。可看出大部分的排放源皆位於台灣西半部沿海區域，其中又集中於桃園、台中、雲林及高雄四處。圖 4 展示了各企業於總排放量之佔比，總排放量僅包含環境部有統計之公司，共 233.87 百萬噸，其中佔比前五名依序為台電 (42.12%)、台塑 (16.68%)、中鋼 (13.09%)、和平 (3.22%) 及中油 (2.70%)。

我國地質條件

台灣海域及陸域具有厚達約 10 公里的新生代沉積岩層 (圖 5) [10,11]。此巨厚的沉積層序經常以厚層砂岩與頁岩交替出現，其中，具高孔隙率的砂岩層可成為 CO₂ 的潛在儲集層；而其上覆的頁岩層可成為蓋岩層，具有將 CO₂ 封存於地下並防止溢散至地表的功能。根據潛在二氧化碳儲集層與蓋層組合，可將台灣西部陸海域二氧化碳儲集系統，由淺至深分為 4 個系統 (圖 6)：(1) R1 系統：下部卓蘭層；(2) R2 系統：錦水頁岩 (蓋層) – 桂竹林層、南莊層、觀音山砂岩 (儲集層)；(3) R3 系統：打鹿頁岩 (蓋層) – 北寮層、石底層 (儲集層)；(4) R4 系統：碧靈頁岩 (蓋層) – 木山層、五指山層 (儲集層)。

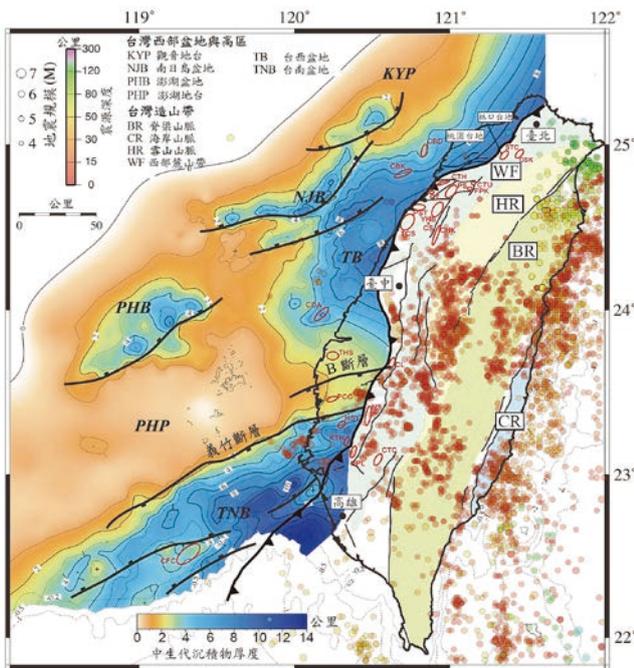


圖 5 我國地質分區及平原區與台灣海峽之新生代沉積層厚度 (單位公里)。紅色橢圓顯示台灣中油公司曾經鑽井之構造。圖中顯示 1970 ~ 2010 規模大於 4 之地震震源分布，顏色表示震源深度、圓圈大小代表地震規模。英文縮寫代號見圖左上角說明。

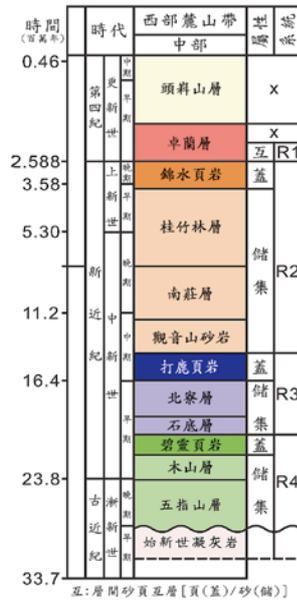


圖 6 台灣西部陸海域漸新世至第四紀地層以及二氧化碳儲集系統，由淺至深分別為 R1、R2、R3、R4 等碳封存系統。

前人研究指出我國至少有四種二氧化碳地質封存模式 [12]，分別為 (A) 陸上封閉構造、(B) 濱海開放鹽水層、(C) 海域開放鹽水層、(D) 海域封閉構造等。其中，濱海開放鹽水層因封存量、靠近主要二氧化碳排放源、地震風險較低、預期灌注之二氧化碳主要往海峽方向移棲 (往西移棲，因地層往東傾斜)，而成為我國碳封存首選場址。

我國初期二氧化碳地質封存場址研究，有能源局委託工研院的碳封存研究 [13-15]。該研究整理台灣由北至南、陸域及海域之地質構造與地層，提出潛在二氧化碳地質封存區域與封存型態。約於同時，台灣電力公司也委託中興工程顧問社，研究台灣碳封存潛能研究，研究重點區域為台中彰化濱海區 [16,17]。國科會能源國家型計劃第一期「二氧化碳捕捉與封存」的研究結果，也顯示我國具有巨量的二氧化碳地質封存潛能 [18-20]。

呂明達等人 [9] 分析台灣陸域構造，指出其可封存 28 億噸二氧化碳；林殿順等人 [10] 分析台灣西部平原區及台灣海峽的鹽水層估計可封存約 459 億噸二氧化碳，遠大於利用 IEA [5] 模型推估台灣 2021 ~ 2050 年之累積封存量僅 5.15 億噸，因此，我國利用鹽水層封存二氧化碳之潛能不容小覷。國科會能源國家型計劃第二期計畫 NEP-II [21-24]，曾於六輕麥寮廠、彰濱工業區、台中電廠等陸海域進行反射震波測勘，配合台灣中油鑽井資料，顯示上述三區陸海域之深鹽水層皆可封存大量二氧化碳。台灣電力公司於 2012 ~ 2013 年在彰化濱海的彰濱工業區鑽鑿一口 3,000 公尺深的地質井 [25]，並根據分析之資料，將該區之地層區分為

三組二氧化碳封存系統，由淺至深分別為卓蘭層下部系統 (R1)、錦水頁岩-桂竹林層-觀音山砂岩 (R2) 與打鹿層頁岩-北寮層 (R3)，預估可封存 138 億噸二氧化碳。

我國前期研究指出台灣具有巨量的碳封存潛能。可進行碳封存的場址分布於西部麓山帶、西部平原區及台灣海峽。西部麓山帶之碳封存構造，主要為枯竭油氣田或是封閉構造；平原區及台灣海峽主要碳封存構造為深部鹽水層或是封閉構造。圖 7 顯示我國陸海域油氣構造之油氣儲集地層與蓋層，顯示此類儲集層與蓋層組合也適用於二氧化碳地質封存。

二氧化碳地質封存量概估

本文中之二氧化碳地質封存量的評估，可分為兩類，第一類為陸域構造封存，這類的封存量取決於封閉構造的大小；第二類為陸海域深部鹽水層封存，深部鹽水層的分布範圍，及其所涵蓋的面積相比於構造封存會較大，其二氧化碳封存量也較大。圖 3 與圖 5 展示台灣陸海域油氣田及封閉構造位置，不論是封閉構造或是廢棄油氣田，皆為封存二氧化碳的潛在場址。呂明達等人 [9] 評估陸上 14 個封閉構造 (圖 3 左上角插圖之黃色不規則圈合為評估之構造) 之二氧化碳封存量，其碳封存量評估之關係式如下：

$$\text{封存潛能} = \text{構造面積} \times \text{儲集層淨厚度} \times \text{孔隙率} \times \text{氣體體積因子} \times \text{掃排效率} \times \text{CO}_2 \text{飽和度} \quad (1)$$

評估結果顯示陸域封閉構造之二氧化碳封存總量可達 28.29 億噸 (圖 3 左上方列出各構造封存量)，可見陸域構造封存具有相當的潛力。

本文所使用的深部鹽水層封存量之評估方法有兩類，第一類為使用美國 National Energy Technology Laboratory (NETL) 所開發的二氧化碳封存量估算軟體 CO₂-SCREEN，該軟體所使用評估方式為美國能源部所提供的 USDOE 法 [26]。第二種為使用蒙地卡羅統計法，使用的評估方式亦是使用 USDOE 法。USDOE 法計算所使用的關係式如下：

$$GCO_2 = A \times h_g \times \phi \times \rho \times E_{\text{saline}} \quad (2)$$

其中 A 為封存構造面積 (m²)；h_g 為儲集層厚度 (m)；φ 為儲集層孔隙率；ρ 為二氧化碳密度；E_{saline} 為封存量效率因子，指的是岩石孔隙中可填滿二氧化碳的比例。

圖 8 為本文評估結果，以 20 公里 × 20 公里之方格，顯示台灣深部鹽水層各區塊之二氧化碳封存量分布 (單位為百萬噸)，該評估結果也曾報導於呂慶慧等人 [27]。評估區域分為北部桃竹苗區、中部中彰雲區、南部嘉南區，根據數字及色塊顏色來表示封存量大小，顏色偏向深色表示該區域之封存量較高，顏色偏向淺色表示該區域的封存量較低，其中封存量高潛能區用粉紫色圈合標示。封存量評估所涵蓋的深度範圍為 800 公尺至 3,000 公尺深，其包含的封存系統分別為 R2、R3 及 R4 系統。中彰雲區因為收集的資料及參數較為齊全，所以使用 CO₂-SCREEN 來評估；桃竹苗區及嘉南區域則沿用林殿順等人 [11] 之參數，但做更細部的區域計算並調整儲集層厚度，這兩區則使用蒙地卡羅統計法評估。桃竹苗區的封存量概估總和約為 12,188 百萬噸 (約 122



圖 7 我國陸海域鑽井，於各封閉構造所鑽遇之含油氣地層。顯示台灣新生代地層，由淺到深有多重蓋層與儲集層組合，此類組合也適合應用於二氧化碳地質封存。

台灣深部鹽水層封存量評估、地質區及活動斷層分布

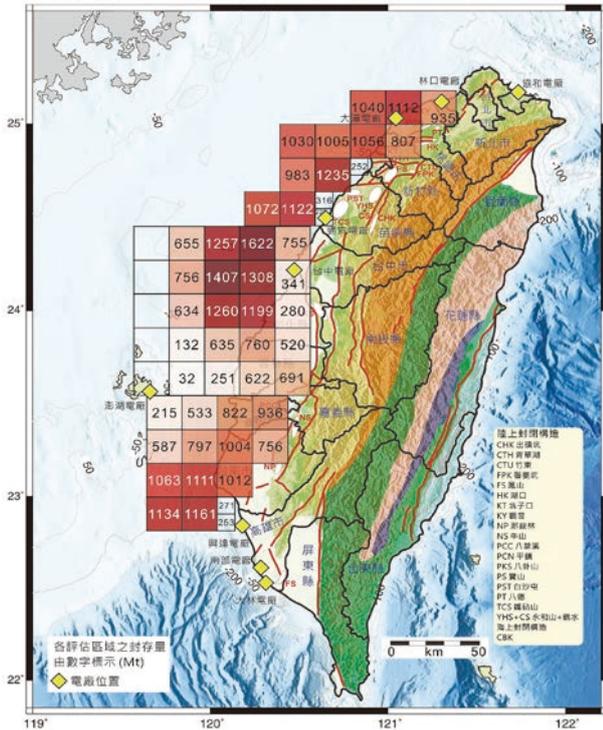


圖 8 本研究所計算之我國深部鹽水層之二氧化碳封存量（單位：百萬噸）。每個方格為 20 公里 × 20 公里。方格顏色深淺代表封存量大小。該評估結果也曾報導於呂慶慧等人 [27]

億噸)；中彰雲區的封存量概估總和約為 15,135 百萬噸 (約 151 億噸)；嘉南區的封存量概估總和約為 11,655 百萬噸 (約 117 億噸)。三個區域的深部鹽水層封存量總計高達 390 億噸，如此可觀的封存量也證明了，台灣的深部鹽水層具有非常良好的碳封存潛能。本文所估計的碳封存總量 (390 億噸) 少於林殿順等人 [11] 所估計的 459 億噸封存量，可能有兩種原因：

1. 桃竹苗區與嘉南區的參數基本上是沿用舊有資料，但是計算的面積及儲集層厚度因重新設計範圍而有差異。相較先前研究所使用之不規則的整區面積及粗略的儲集層厚度分布，本文的面積參數比較小且多格，儲集層厚度分度也較精準且收斂，在計算上誤差會比較小，所評估出的封存量也會較精確。
2. 中彰雲區的參數則有使用震測及井測資料，除了與桃竹苗區與嘉南區一樣使用較小的面積多格計算，使所使用的參數相比於先前研究更為精確，包含儲集層厚度、孔隙率、溫度及壓力等，配合使用 CO₂-SCREEN 來評估，其計算所得出的封存量也更為精確。

深部鹽水層及構造封存在台灣的封存量合計約為 418 億噸，這是台灣在碳封存上一個相當良好的條件，更是一個可以大量減少碳排放的方式之一。

碳封存挑戰

如前述，根據國發會規劃，我國在 2050 年時，每年二氧化碳地質封存灌注量約 40.2 百萬噸。若以年灌注 1 百萬噸的封存場址來計算，我國在 2050 年時至少需建置約 40 個碳封存場址。在此巨量的碳封存需求下，我國實施 CCUS，目前面臨政治、經濟、技術、法規制度等方面的挑戰及環境和社會文化障礙。啟用政策工具、更多的公眾支持和技術創新等條件可以減少這些障礙。以下討論我國大規模實施碳封存的挑戰與機會。

明確的國家 2025 ~ 2050 碳封存規劃及利用 CCUS 減碳企圖心

國發會等 [4] 規劃「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略由國科會、經濟部、環境部共同主辦。其中，國科會負責 CCUS 技術部分，經濟部負責碳利用及封存示範，環境部負責碳封存法規部分。上述三單位也提出「臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫」 [27]。政府也制定 2030 短期目標為年封存 1.76 ~ 4.60 百萬噸 (基線目標 1.74 ~ 1.79 百萬噸；積極目標 4.60 百萬噸，國科會等 [28])。各單位也依分工，積極進行碳捕捉研發與規劃。目前，台電與台灣中油各分別規劃建置每年封存 2,000 噸 (台灣電力股份有限公司 [29]) 以及三年封存 30 萬噸 (台灣中油公司 [30]) 之碳封存試驗場，示範驗證碳封存灌注與監測技術。待封存試驗成功後，再推廣辦理。目前規劃的碳封存進程，過於保守，應很難達到 2030 年封存 1.76 ~ 4.60 百萬噸的短期目標。

雖然 IEA [5] 推估「製程技術性能改進」與「再生能源」為前期 (2020 年至 2040 年) 主要減碳貢獻度的關鍵技術；CCUS 技術與氫能應用則為後期 (2040 年至 2050 年) 減碳的技術。但一個碳封存場之建置需要民眾能接受，並至少費時 6 ~ 8 年以上的時間。再者，我國尚無封存場址，影響廠商提升碳捕捉規模意願。建議政府提出自 2025 年至 2050 年每年的碳封存灌注目標、潛在封存場址群規劃暨達到此目標的詳細路徑圖；加速碳封存的進程、儘早建立具規模的碳封存場，展現利用如國發會等 [4] 所規劃的利用 CCUS 減碳的企圖心與決心。

企業施行 CCUS 的經濟誘因

在經濟部分，目前二氧化碳捕捉與封存成本過高，對企業而言沒有經濟誘因。建議政府仿效歐美等先進國家，施行財稅誘因，輔導並鼓勵企業利用碳捕捉減碳。如：(1) 政府補助碳捕捉設施建置；(2) 針對投資碳捕捉

計畫的企業，政府減免碳費與營業稅徵收；(3) 政府制定碳權方法學，使二氧化碳地質封存經過認證，企業可取得碳權；(4) 封存的二氧化碳可抵所得稅額（如美國降低通貨膨脹法案的第 45Q 條聯邦公司法）；(5) 國內金融單位將投資碳捕存公司，提昇永續分類評比分數。

碳封存技術發展與國際鏈結

如前述，台灣主要碳封存方式有陸域及海域之構造封存（如枯竭的油氣田）及鹽水層封存。國科會等^[28]規劃先投入濱海至海域鹽水層封存場址開發，因此區鄰近大型二氧化碳排放源（圖 3）且濱海區遠離人口密集區，海域開發也之環境議題較少。另外，國科會等^[28]也強調建立本地質封存評估、安全監測、風險評估及場址運維技術，引進國外海事工程技術等。

碳封存場址評估部分，在場址調查評估期間，需收集大量地下地質（如鑽井）與地球物理（如反射震測）資料；於碳封存灌注與監測期間，需要大量設備與經費挹注。建議政府投入充足經費與人力，購置足夠的儀器設備，以利進行碳封存地下地質特性分析以及碳封存監測與安全評估。進行碳封存場址調查，建議先進行地表下地質條件評估，再進行地表環境分析（如排放源位置、保護區等）。地表下評估主要為探明二氧化碳封存容量與合理的注入率、二氧化碳被穩定有效封存的能力、二氧化碳封存層與蓋層壓力、潛在斷層或裂隙的空間分布、場址及附近之地震與斷層活動性及二氧化碳注入時是否會誘發地震或斷層錯動、二氧化碳儲集層的水力動力系統、封存場址於二氧化碳注入期間與灌注後之監測潛力、遺留井對封存有效性的影響程度等。

由於地質封存風險相關之國際標準已建立，並且各國開發商轉案例也已有實場應用，建議本土方法學以國際標準為方法學之基礎與原則，參考國際場址開發與管理之作法，根據本土環境的需求進行適合各個場址的風險評估，並同時建立監測計畫與溝通諮詢管道，定期滾動式修正風險管理計畫。

我國並無實際碳封存場址之灌注監測實例，未來應如國科會等^[28]所建議的，鏈結國際機構及企業，提升我國 CCUS 研發能量與培育國際人才；鏈結國外技術及經驗，評估引介來臺合作示範驗證。

CCUS 社會溝通及國家級碳封存試驗場暨教育館建置

於 2012 ~ 2013 年，台灣中油公司曾於枯竭的苗栗

永如山天然氣田，灌注 300 公噸二氧化碳於 3,200 公尺深的打鹿砂層中，進行枯竭氣田天然氣增產（CO₂-EGR）及二氧化碳地質封存試驗計畫，後因媒體負面報導及民眾疑慮，導致試驗計畫終止。此例顯明在進行碳封存之前，取得公眾信任是當務之急。建議未來任何碳封存場址之開發，應進行公眾參與碳捕存溝通，透過公眾參與及協商意見回饋，增進利害關係人了解碳捕存議題，並期以獲得支持。有效傳達正確資訊利害關係人，同時持續取得問題方向，進而引導後續政策與主管機關工作推動方向。

為確保封存於地下的二氧化碳能安全、長期的駐留於地下並與大氣隔離，也不影響環境。需有完整的封存場址安全及風險評估、輸送管線安全評估、二氧化碳注儲的量測、監測與驗證等。雖然國外多有相應的法規以及商轉成功的碳封存場址可供參考。前述的場址評估與技術的建立，需要透過本土試驗計畫，以驗證封存的安全性及技術可行性。建議由環境部主導，經濟部、國科會參與，邀請地方政府與企業，鏈結國際機構與企業，建置國家級碳封存試驗場暨教育館。此封存試驗場暨教育館可驗證碳封存灌注與監測等各項技術及安全性，成為碳封存法規制定之參考，也可成為民眾及社會溝通場域。透過碳捕存教育館的設置，增進社會及利害關係人了解碳捕存議題，化解民眾疑慮。

結論

本文討論二氧化碳地質封存在我國邁向「2050 淨零排放」的關鍵角色以及在布建 CCUS 過程中可能面對的挑戰與機會。根據國發會等^[4]之規劃，預計我國在 2050 年時，再生能源發電量占比需達 60% ~ 70%，在無法去碳的電力與非電力所產生的二氧化碳，於 2050 年時仍達到每年排放約 40.2 百萬噸。若要達到 2050 淨零排放，必須使用 CCUS 技術，將此年排放約 40.2 百萬噸的二氧化碳進行捕捉利用及封存才能達到目標，完成淨零最後一哩路。

我國盆地尺度之二氧化碳地質封存量可達約 418 億噸，遠超過政府規劃至 2050 年時，至少須封存約 5 億噸之封存量。若考慮碳封存場址鄰近二氧化碳主要排放源及較穩定之地質區，以桃園、台中彰化雲林等區之濱海區與近岸之鹽水層封存為首選。

然而，在我國在初期布建 CCUS 減碳之際，仍然面對政府利用 CCUS 技術減碳之企圖心與決心不足、技術

成熟度不足、經濟成本過高以及社會接受度有待提升等挑戰。對於以上挑戰，本文提出下列建議：

1. 政府利用 CCUS 技術減碳決心與企圖心不足：政府應提出明確的國家 2025 ~ 2050 碳封存規劃及相關配套措施，展現利用 CCUS 減碳企圖心。
2. 碳封存技術發展與國際鏈結：我國並無實際碳封存場址之灌注監測實例，未來應如國科會等^[4]所建議，鏈結國際機構及企業，提升我國 CCUS 研發能量與培育國際人才；鏈結國外技術及經驗，評估引介來臺合作示範驗證。
3. 經濟誘因輔導企業進行 CCUS：政府可施行財稅誘因，輔導並鼓勵企業利用碳捕存減碳。
4. 國家級碳封存試驗場暨教育館建置：國家級封存試驗場暨教育館可驗證碳封存灌注與監測等各項技術及安全性，鏈結國際，成為碳封存法規制定之參考，也可成為民眾及社會溝通場域。

我國具有巨量的碳封存潛能，在政府適當地規劃與推動下，應可布建大量 CCUS 場址，安全地封存二氧化碳，利用 CCUS 技術達到國發會等^[4]所訂下的減碳目標。

參考文獻

1. IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee, H., Romero, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184pp, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. UNECE (2021). *Technology Brief: Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)*. 27pp.
3. Global CCS Institute (2021). *Global Status of CCS 2021*, 79pp.
4. 國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會 (2022)，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，共 80 頁。
5. IEA (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency, 222pp.
6. 環境保護署 (2023)，中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，行政院環境保護署，共 273 頁。
7. 境部事業溫室氣體排放量資訊平台 (2021) URL: https://ghgregistry.moenv.gov.tw/epa_ghg/Accession/PublicInformation.aspx
8. 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000)，臺灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 頁。
9. 呂明達、宣大衡、黃雲津、范政暉 (2008)，台灣陸上二氧化碳地質封存潛能評估，礦冶，第 52 卷，第 3 期，第 154-161 頁。
10. Lin, A.T., Watts, A.B., and Hesselbo, S.P. (2003). "Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region." *Basin Research*, 15(4), 453-478.
11. 林殿順、楊健男、李科賢、譚志豪、劉浙仁、邵國士、王順民、李易叡、俞旗文、冀樹勇、左峻德、陳彥豪、鄭貞怡、馬雲亭、林立夫、陳慶馨、丁桓展、劉文惠 (2014)，台灣二氧化碳地質封存地質圖集，能源國家型科技計畫淨煤捕碳與儲碳主軸專案計畫，行政院國家科學委員會，共 36 頁。

12. 林殿順 (2010)，「台灣二氧化碳地質封存潛能及安全性」，經濟前瞻，第 132 期，第 93-97 頁。
13. 林殿順、陳洲生、董家鈞 (2007)，台灣沉積岩層地質封存潛能資料研析與評估，工業技術研究院經濟部能源科技研究發展計畫分包研究期末報告，共 76 頁。
14. 林殿順、陳州生、董家鈞 (2008)，台灣西南部沉積岩層資料蒐集分析，工業技術研究院經濟部能源科技研究發展計畫分包研究期末報告，共 82 頁。
15. 林殿順、陳州生、董家鈞 (2009)，二氧化碳地質封存場址特性調查技術建立與試作，工業技術研究院經濟部能源科技研究發展計畫分包研究期末報告，共 118 頁。
16. 財團法人中興工程顧問社 (2009)，二氧化碳地下封存地質資料庫建置與候選場址評選計畫，台灣電力公司委託研究期末報告 (採購案號：PDD-EGS-970303)。
17. 財團法人中興工程顧問社 (2011)，二氧化碳地質封存試驗場址調查規劃與研究，台灣電力公司委託研究期末報告採購案號：R0159900001，共 299 頁。
18. 許樹坤、林殿順、王乾盈、董家鈞、楊耿明、林再興、黃蕙珠 (2010)，台灣二氧化碳地質封存研究 (I)，國家科學委員會專題研究計畫期末報告，共 130 頁。
19. 許樹坤、林殿順、王乾盈、李明旭、楊耿明、林再興、黃蕙珠、洪日豪 (2011)，台灣二氧化碳地質封存研究 (II)，國家科學委員會專題研究計畫期中報告，共 24 頁。
20. 許樹坤、林殿順、王乾盈、李明旭、楊耿明、林再興、黃蕙珠、洪日豪 (2012)，台灣二氧化碳地質封存研究 (III)，國家科學委員會專題研究計畫期末報告，共 90 頁。
21. 林殿順、田永銘、王乾盈、林慶偉、楊耿明、簡錦樹、洪日豪、劉台生、謝秉志、林靜怡、黃蕙珠、林再興、倪春發 (2013)，台灣二氧化碳地質封存研究暨先導試驗場建置及整合技術開發 (I)，科技部專題研究計畫期末報告，共 183 頁。
22. 楊耿明、簡錦樹、謝秉志、饒瑞鈞、洪日豪、林殿順、王乾盈、倪春發 (2014)，台灣中北部沿海地區 CO₂ 封存技術及注儲先導試驗，科技部專題研究計畫期末報告，共 202 頁。
23. 林殿順、王乾盈、許樹坤、倪春發、饒瑞鈞、謝秉志、楊耿明 (2016)，台灣中部陸海域之二氧化碳地質封存潛在場址調查及碳封存發展規劃 (I)，科技部專題研究計畫期末報告，共 229 頁。
24. 林殿順、王乾盈、許樹坤、倪春發、饒瑞鈞、謝秉志、楊耿明 (2017)，台灣中部陸海域之二氧化碳地質封存潛在場址調查及碳封存發展規劃 (I)，科技部專題研究計畫期末報告，共 229 頁。
25. 財團法人中興工程顧問社 (2014)，二氧化碳地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發 (一) 完成報告，台灣電力公司委託研究期末報告採購案號：R0150000001，共 558 頁。
26. Goodman, A., Hakala, A., Bromhal, G., Deel, D., Rodosta, T., Frailey, S., Small, M., Allen, D., Romanov, V., Fazio, J., Huerta, N., McIntyre, D., Kutchko, B., and Guthrie, G. (2011). "U.S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale." *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 952-965.
27. 呂慶慧、陳俊佑、李伯亨、楊雅梅、鄭如琇、潘冠倫、彭毓之、張嘉元、張家瑄 (2023)，碳捕存技術 (CCS) 地質封存潛能評估及環境建構完成報告，台灣電力股份有限公司 111 年度研究計畫期末報告 (TPC-546-2517-1009)，共 325 頁。
28. 國科會、經濟部、環保署 (2023)，臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫，共 22 頁。
29. 台灣電力股份有限公司 (2023)，台中發電廠第九、十號機發電計畫環境影響說明書第六次變更內容對照表 (設置二氧化碳封存試驗場址) (修訂本)，共 190 頁。
30. 台灣中油公司 (2023)，鐵砧山地區天然氣注、產氣井開發計畫環境影響說明書第四次變更內容對照表，共 89 頁。





茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折， 4期以上8.5折	

刊登月份：

51.1 51.2 51.3 51.4 51.5 51.6 共 次
(2月) (4月) (6月) (8月) (10月) (12月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)
商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款 帳號	0	0	0	3	0	6	7	8	金 額	仟萬	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元
									新台幣 (小寫)								

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- 常年會員年費 1,200元
 初級會員年費 300元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

- 國內·個人會員 新台幣 300元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元
自第 卷第 期起， 年期雙月刊 份

訂閱中國土木工程學刊，一年八期

- 國內·個人會員 新台幣 1,600元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 3,600元
 國外·個人 美金 80元
 國外·機關團體 美金 200元
自第 卷第 期起 年期學刊 份

收款戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄 款 人	
地 址	地 址	
電 話	電 話	
	主管：	經辦局收款戳

- ◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款 別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200 元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300 元
會員證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣 300 元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800 元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
身分證號碼			訂閱中國土木工程學刊，一年八期 <input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣 1,600 元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 3,600 元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 80 元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 200 元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
卡 別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		白天聯絡電話
信用卡卡號			通訊地址
信用卡末三碼			
信用卡有效期限	(月 / 年)		
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

夢想和幸福

零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw

龍瑞盈門 大吉大利



112.11.21 第26屆第1次理監事聯席會議合照

土木水利 新年龍是吉

產官學研 好運龍有春



第26屆高宗正理事長暨全體理監事 敬賀