

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
技術支援報告(1)
附件 A

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

台灣電力公司

中華民國 108 年 3 月

注意

本報告係台灣電力公司執行成果之一，其著作財產屬台灣電力公司所有。報告中之各項資料內容未經台灣電力公司或其代表人書面授權，不得複製、實施、使用或改作。台灣電力公司及著作人對未經授權之引用或其他不當之引用不負任何法律責任，亦不負擔因引用或參考本報告致使私人權益受到傷害之責任。

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
技術支援報告(1)
附件 A

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

台灣電力公司

中華民國 106 年 12 月

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
技術支援報告(1)附件 A

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

林鎮國、林蔚、謝佩珊、董倫道、錢正明、
田能全、黃淞洋、劉台生、吳柏林、張育德、尹承遠

摘要

台灣參考案例是一個虛擬案例，在台灣尚未進入核廢料最終處置地點評選階段前，參考案例是一技術整合測試的研究案例，提供相關研究單位，藉以建立及分享相關處置技術。雖然，本參考案例的應用及功能，無法涵蓋處置計畫的全部重要工作；例如，全國性的地質環境研析及處置合適性研究等工作。但透過本參考案例研究，能儲備將來有特定候選處置地點時，所需之地質特性調查、處置概念設計及安全評估等整合性評估能力。

台灣參考案例共包含三個表格及其對應的輔助說明文件，內容包含相關處置概念模式、資料及假設條件。此三個表的名稱及內容分別為：(1)表一：法規要求、處置概念及安全評估情境；(2)表二：地質概念模式及特性數據；(3)表三：安全評估之數學模式、假設、邊界條件及參數。

針對參考案例表二的建構，除了參考日本 H12 報告參考案例的經驗外，同時亦考量瑞典及芬蘭在「場址描述模式」(SDM)的成功發展經驗。台灣目前尚未確定最終處置的候選場址，亦尚未針對任何特定地點，進行如瑞典及芬蘭場址的系統化現地調查與評估。為了有效學習 SDM 的國際成功發展經驗，針對參考案例表二的建構，特別將過去 K 區所累積的有限研究成果，在加入適當假設及簡化條件下，儘

量以 SDM 的章節架構進行本報告第三章之編排。根據台灣現有相關法規的規範，K 區因為人口密度過高、地下水資源寶貴，以及提供給製酒業之豐富的地下水資源，K 區已被排除在候選場址的考量範圍。

本報告主要作為台灣參考案例表二之輔助說明文件，說明其內容及相關之科學性背景，相關內容詳見本報告第二章及第三章。本參考案例表二之版次為 RC2015-1231，在三年內將不作任何更新，並做為 SNFD2017 報告第三章第二節(地質合成)、第四章(處置設計與工程技術)及第五章(安全評估)，三者間具關連性研究需求的共同測試內容及假設條件。自本版次參考案例表二定稿至 2018 年底期間的計畫研究成果及相關回饋修正建議，將被充分考量並納入下一版次的參考案例表二內容中，做為持續精進的主要依據。

關鍵字：SNFD2017 報告、參考案例、表二、地質概念模式及特性數據、場址描述模式

The Spent Nuclear Fuel Final Disposal Program
Potential Host Rock Characterization and Evaluation Stage
Technical Feasibility Assessment Report on Spent Nuclear Fuel Final
Disposal
Technical Supporting Report (1) Appendix A

The Taiwan Reference Case of the SNFD2017 Report –
Table-2: Geological Conceptual Models and Characteristic Data

Cheng-Kuo Lin, Wayne Lin, Pei-Shan Hsieh, Lun-Tao Tong,
Jeng-Ming Chien, Neng-Chuan Tien, Sung-Yang Huang,
Tai-Sheng Liou, Po-Lin Wu, Yu-Te Chang, Chen-Yuan Yin

ABSTRACT

The Taiwan Reference Case is a hypothetical case and the common basis for all Taiwan's R&D partners to develop disposal technology and share experience and knowledge before the candidate site for final disposal of radioactive waste be selected. The function of the Taiwan Reference Case and its application cannot cover all important tasks necessary for the geological disposal of radioactive waste. For example, nationwide study on geological environment for the scientific feasibility of geological disposal in Taiwan is an important R&D tasks but not covered by the Reference Case itself.

In the Taiwan Reference Case, three structuralized tables were constructed to provide the common basis of conceptual models, properties, and assumptions of geological, engineering and safety assessment for all different potential users of this Reference Case. These three tables are titled as: (1) Table-1: Disposal Regulations, Repository Design, and Safety Assessment Scenario; (2) Table-2: Geological Conceptual Models and Characteristic Data; and (3) Table-3: Mathematical Models, Assumptions, Boundary Conditions, and Data of Safety Assessment.

The Table-2 was constructed borrowing the experience of the reference case of Japanese H12 report and the Swedish and Finnish site descriptive model (SDM). However, because Taiwan's candidate site has not been proposed, no systematic field investigation and evaluation for any specific area in Taiwan have yet been conducted. Therefore, to take advantage of SDM, a very limited geological information of a specific area (K area) is compiled with necessary simplifications in the SDM format as close as possible in the Chapter 3 of this report. Nonetheless, in accordance with current Taiwanese regulations, the K area cannot be considered as a candidate site due to high population density, precious groundwater resources, and water supply for the wine industry.

The major objective of this report is to document the background information and scientific basis for the construction of the Table-2 of Taiwan Reference Case in the chapter 2 & 3 of this report. The version identification of this Table-2 is RC2015-1231. Its content will be frozen for 3 years to serve as the common basis for all users involved in the integration R&D tasks related to the Ch3.2 (Geosynthesis), Ch4 (Repository Design and Engineering Technology) and Ch5 (Safety Assessment) of the SNFD2017 report. The next version of the Table-2 is scheduled to be renewed and published at the end of 2018. All constructive findings among the two successive versions will be documented and served as the scientific basis for future modification of the Table-2 of Taiwan Reference Case.

Keywords: SNFD2017 report, Reference Case, Table-2, Geological Conceptual Model, SDM.

目錄 (Contents)

頁次

1. 前言	1-1
1.1. SNFD2017報告及參考案例	1-1
1.2. 台灣參考案例	1-4
1.2.1. 功能	1-4
1.2.2. 內容	1-4
1.2.3. 版次設定及共同資訊凍結	1-5
1.2.4. 前期回饋經驗	1-5
1.2.5. 共識及規範	1-6
1.3. 本報告應用目標	1-9
2. 台灣參考案例表二	2-1
3. 台灣參考案例表二內容之科學依據	3-1
3.1. 研究區及現有資料	3-1
3.1.1. 研究區：K區	3-1
3.1.2. 現地資料	3-7
3.2. 地質環境及演化觀點	3-18
3.2.1. 地質環境	3-18
3.2.2. 地質演化	3-20
3.2.3. 氣候變遷	3-31
3.3. 地表系統與母岩關聯性	3-40
3.3.1. 地表及海底地形	3-40
3.3.2. 地表溫度及壓力	3-43
3.3.3. 降雨量及入滲量	3-43
3.3.4. 第四紀地層	3-46
3.3.5. 含水層	3-46
3.4. 母岩地質特性	3-50
3.4.1. 地質單元	3-50
3.4.2. 地質概念模式	3-59
3.4.3. 淨抬升速率	3-60
3.4.4. 地溫梯度	3-61
3.5. 母岩熱特性	3-79
3.5.1. 熱傳導係數	3-80
3.5.2. 比熱	3-81

3.5.3. 熱膨脹係數.....	3-82
3.6. 母岩力學特性.....	3-84
3.6.1. 力學特性	3-84
3.6.2. 現地應力	3-88
3.6.3. 古應力變化.....	3-91
3.7. 母岩水文地質特性	3-97
3.7.1. 水文地質概念模式	3-97
3.7.2. 水力傳導特性.....	3-104
3.7.3. 裂隙量測及統計特性	3-105
3.8. 母岩水文地球化學特性.....	3-125
3.8.1. 岩石礦物特性.....	3-126
3.8.2. 地下水化學組成特性	3-135
3.8.3. 水文地球化學概念模式.....	3-156
3.9. 母岩傳輸特性.....	3-183
3.9.1. 流通路徑	3-183
3.9.2. 流通路徑參數.....	3-206
3.9.3. 吸附及擴散.....	3-211
3.10. 表二的使用範例	3-217
3.10.1. 多孔介質地下水流場模擬範例	3-218
3.10.2. 離散裂隙網路模擬範例.....	3-229
3.11. 結論.....	3-238
4. 參考文獻.....	4-1

圖目錄

	頁次
圖 1-1：台灣參考案例三個表格在處置計畫研究架構中的角色.....	1-3
圖 3-1：金門島與烈嶼島地表地形.....	3-3
圖 3-2：金門地區位置圖及衛星影像.....	3-5
圖 3-3：K區技術發展目的及主要導水裂隙帶調查解析流程.....	3-8
圖 3-4：金門地區地質圖.....	3-11
圖 3-5：大陸沿海及台灣西部離島花崗岩分布圖.....	3-19
圖 3-6：台海地區岩漿活動與大地構造演化圖.....	3-26
圖 3-7：西部離島花崗岩體中經常出現的輝綠岩脈.....	3-28
圖 3-8：大陸東南沿海福建地區地震與熱流分布圖.....	3-29
圖 3-9：冰河時期及冰期與間冰期.....	3-35
圖 3-10：亞洲地區第四紀海岸線分布圖.....	3-36
圖 3-11：台灣地區過去11 ka至5 ka間的海水面變化.....	3-37
圖 3-12：南中國海海水表面鹽度之變化歷程圖.....	3-38
圖 3-13：台灣地區理想化海水面及鹽度變化週期特徵.....	3-39
圖 3-14：金門島週圍海底地形.....	3-41
圖 3-15：金門地區年降雨量與蒸發量關係圖.....	3-44
圖 3-16：金門島年入滲率估算分布圖.....	3-45
圖 3-17：金門地區沉積層含水層之水力傳導係數等值分布圖.....	3-48
圖 3-18：金門地區沉積層含水層之等厚度分布圖.....	3-49
圖 3-19：K區1999年至2010年期間R&D活動位置圖.....	3-63
圖 3-20：K區重磁線性分布圖.....	3-64
圖 3-21：K區重磁聯合逆推剖面結果圖.....	3-66
圖 3-22：K區重磁力逆推剖面解析侵入構造及岩性變化.....	3-67
圖 3-23：K區地電阻剖面與可能導水裂隙帶解析圖.....	3-69
圖 3-24：K區花崗岩體常見的輝綠岩脈群.....	3-71
圖 3-25：地質鑽探及孔內試驗確認地下地質特性.....	3-73
圖 3-26：K區地質概念模式.....	3-75
圖 3-27：K區地質演化概念模式.....	3-77
圖 3-28：K區岩樣熱特性量測結果圖.....	3-83
圖 3-29：K區現地應力量測.....	3-90
圖 3-30：K區應力場晚白堊紀以來可能變化趨勢(1/2).....	3-93
圖 3-31：K區應力場晚白堊紀以來可能變化趨勢(2/2).....	3-95
圖 3-32：K區水文地質單元3D分布圖.....	3-107
圖 3-33：K區水文地質概念模式.....	3-108
圖 3-34：K區孔內多封塞段水壓監測結果圖.....	3-110
圖 3-35：K區地下水流的可能邊界條件.....	3-113
圖 3-36：K區通井微流速井測結果圖.....	3-114
圖 3-37：K區花崗岩體裂隙帶水力傳導係數隨深度分布情形.....	3-116
圖 3-38：K區花崗岩體裂隙帶水力傳導係數擴尺度修正公式.....	3-118
圖 3-39：K區地表露頭裂隙之測線量測及統計結果.....	3-120

圖 3-40	: K區翟山坑道裂隙量測及統計結果.....	3-121
圖 3-41	: K區孔內裂隙量測及統計結果.....	3-122
圖 3-42	: KMBH01-02-04跨孔試驗場及F1與F2構造位態.....	3-123
圖 3-43	: KMBH01-02-04的裂隙分布密度與構造位置具明顯相關性.....	3-124
圖 3-44	: K區花崗岩心之岩相與XRD分析結果.....	3-131
圖 3-45	: K區花崗岩心之化學組成及分類.....	3-133
圖 3-46	: K區淺層及深層地下水質特性.....	3-138
圖 3-47	: K區孔內深層地下水取樣工具及判斷標準.....	3-140
圖 3-48	: K區孔內深層地下水取樣封塞段之位置判斷流程.....	3-142
圖 3-49	: K區孔內深層地下水封塞取樣監測記錄.....	3-144
圖 3-50	: K區深層地下水水質之Stiff分布圖.....	3-146
圖 3-51	: K區深層地下水水質之Piper圖及 ² H- ¹⁸ O同位素分布圖.....	3-148
圖 3-52	: K區深層地下水水質之二變量散點圖.....	3-150
圖 3-53	: U元素在K區平均深層水質條件下的Eh-pH穩定相圖.....	3-158
圖 3-54	: Cu元素在K區平均深層水質條件下的Eh-pH穩定相圖.....	3-160
圖 3-55	: Fe元素在K區平均深層水質條件下的Eh-pH穩定相圖.....	3-162
圖 3-56	: K區深層地下水可能發生的氧化還原反應(1/2).....	3-164
圖 3-57	: K區深層地下水可能發生的氧化還原反應(2/2).....	3-166
圖 3-58	: K區風化岩心內高嶺土及白雲母的可能來源.....	3-168
圖 3-59	: K區反應路徑模擬設計案例及目的.....	3-175
圖 3-60	: K區反應路徑模擬案例一之礦物相隨時間變化結果.....	3-177
圖 3-61	: K區地下水pH & Eh之現場水質與反應路徑模擬結果比較圖.....	3-179
圖 3-62	: 開挖擾動對地下水pH&Eh影響性模擬結果圖.....	3-181
圖 3-63	: K區孔內裂隙密度隨深度之累積百分比.....	3-194
圖 3-64	: K區孔內裂隙密度累積百分比與裂隙區間設定.....	3-196
圖 3-65	: K區FDMA裂隙區間之裂隙叢集分布圖.....	3-198
圖 3-66	: K區FDMB裂隙區間之裂隙叢集分布圖.....	3-200
圖 3-67	: K區裂隙尺寸之碎形維度指數值.....	3-202
圖 3-68	: 裂隙網路連通性與裂隙半徑下限門檻值測試範例.....	3-204
圖 3-69	: KMBH01-02-04跨孔追蹤稀釋試驗結果圖.....	3-208
圖 3-70	: 批次吸附試驗示意圖.....	3-213
圖 3-71	: 管柱薄片擴散試驗示意圖.....	3-214
圖 3-72	: 管柱薄片擴散試驗結果圖.....	3-215
圖 3-73	: K區地下水流場(多孔介質)模擬之地質單元及數值網格設定.....	3-219
圖 3-74	: K區地下水流場(多孔介質)模擬之起始及邊界條件設定.....	3-221
圖 3-75	: K區多孔介質模擬結果範例_主要導水裂隙地下水流特徵.....	3-223
圖 3-76	: K區多孔介質模擬結果範例_非反應性示蹤劑傳輸特徵.....	3-225
圖 3-77	: K區多孔介質模擬結果範例_C-C'剖面之地下水流速.....	3-227
圖 3-78	: K區DFN連通性測試範例(1/3).....	3-232
圖 3-79	: K區DFN連通性測試範例(2/3).....	3-234
圖 3-80	: K區DFN連通性測試範例(3/3).....	3-236

表目錄

	頁次
表 2-1：台灣參考案例表二.....	2-3
表 2-2：地質單元代碼表.....	2-14
表 2-3：地電阻探測剖面代碼表.....	2-16
表 2-4：地質探勘孔代碼表.....	2-17
表 2-5：KMBH01研究工作彙整表.....	2-18
表 2-6：KMBH02研究工作彙整表.....	2-20
表 2-7：KMBH03研究工作彙整表.....	2-22
表 2-8：KMBH04研究工作彙整表.....	2-25
表 2-9：KMBH05研究工作彙整表.....	2-28
表 2-10：KMBH06研究工作彙整表.....	2-30
表 3-1：邊界條件類型.....	3-103
表 3-2：K區深層地下水水質分析結果.....	3-152
表 3-3：深層地下水水質平均值.....	3-154
表 3-4：KMBH01-02-04跨孔追蹤試驗解析結果.....	3-210
表 3-5：冪函數分布之裂隙尺寸參數對DFN統計實現的敏感度測試結果.....	3-231

1. 前言

1.1. SNFD2017報告及參考案例

依照「放射性物料管理法」與「施行細則」之相關規定(2002/12/25 頒布)，台電公司於 2004 年底提出「用過核子燃料最終處置計畫書」，經奉台灣核能主管機關(原子能委員會，以下簡稱原能會)於 2006 年 7 月核定；規劃於 2038 年確定最終處置場址，2028 年確定候選場址。最終處置計畫分為 5 個連續階段，現階段處於「潛在處置母岩特性與調查評估」階段(2005~2017 年)，並設定兩個重要里程碑(台電公司，2006，c6p7)，分別是：

- (1) 於 2009 年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告」(以下簡稱 SNFD2009 報告)；
- (2) 於 2017 年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(以下簡稱 SNFD2017 報告)」。

台電公司於 2009 年如期提報 SNFD2009 報告(台電公司，2010)至主管機關，歷經原能會及各界學者專家的審查，於 2010 年 7 月獲原能會同意核備並上網公告。

評估任何一個地區是否適合做為核廢料最終處置地地點，除了關鍵性的民眾接受度外，就科學技術是否可行的角度而言，必須透過所謂的安全評估，針對規劃的處置概念設計、工程技術，與地質條件，量化說明處置設施的整體安全性是否符合法規的規範標準。相關的設計及評估工作，必須搭配地質條件特性，方能完成具備科學說服力的設計及評估工作。本質上，地質條件的掌握、處置概念的設計，及安全評估的代表性，必須透過不斷的精修與回饋修正，方能逐步取得具備科學說服力的工作成果。

台灣目前尚未進入核廢料最終處置地地點的場址評選階段，規劃於 2038 年(台電公司，2006，c6p6)確定最終處置地地點，現階段處於「潛在處置母岩特性與調查評估」階段(2005~2017 年)，但根據國際經驗可知，為了確保放射性廢棄物處置的安全性，相關處置技術，尤其是

深層地質特性調查、處置概念設計、安全評估技術的發展精進、整合測試與回饋修正工作，必須盡早展開。

針對 SNFD2017 報告架構，原能會考量台灣與日本的地質環境相近，日本核廢料處置研究之 H12 報告(以下簡稱日本 H12 報告)(JNC, 2000)與台灣 SNFD2017 報告階段相當，因此原能會於 2011 年，明確要求 SNFD2017 報告架構內容及其研發要項，應參照日本 H12 報告章節架構及研發要項，以利與國際接軌，及檢驗台灣現階段處置技術發展情形，並釐清後續技術發展方向(物管局 2011/02/22 會議紀錄，SNFD-FCMA-MM2011-0222)。

在沒有候選場址的狀況下，日本 H12 報告透過地質合成(Geosynthesis)建立參考案例(Reference Case)的做法，建構一個僅供技術發展需求的虛擬案例，用以發展相關處置技術。

台灣在尚未確定最終處置場址的現況下，為盡早展開相關技術的發展工作，考量台灣與日本地質條件類似，且兩國目前均尚無候選場址的相同條件下，台灣參考日本 H12 的作法，透過所謂參考案例(Reference Case)(JNC, 2000, c5.5)的建構，採用表格化的清楚條列方式，提供包含相關概念模式、資料及假設條件的說明，供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力。基本上，台灣參考案例(圖 1-1)共包含三個表格及其對應的輔助說明文件，此三個表的名稱及內容分別為：

- (1) 表一：法規要求、處置概念及安全評估情境
- (2) 表二：地質概念模式及特性參數
- (3) 表三：安全評估之數學模式、假設、邊界條件及參數

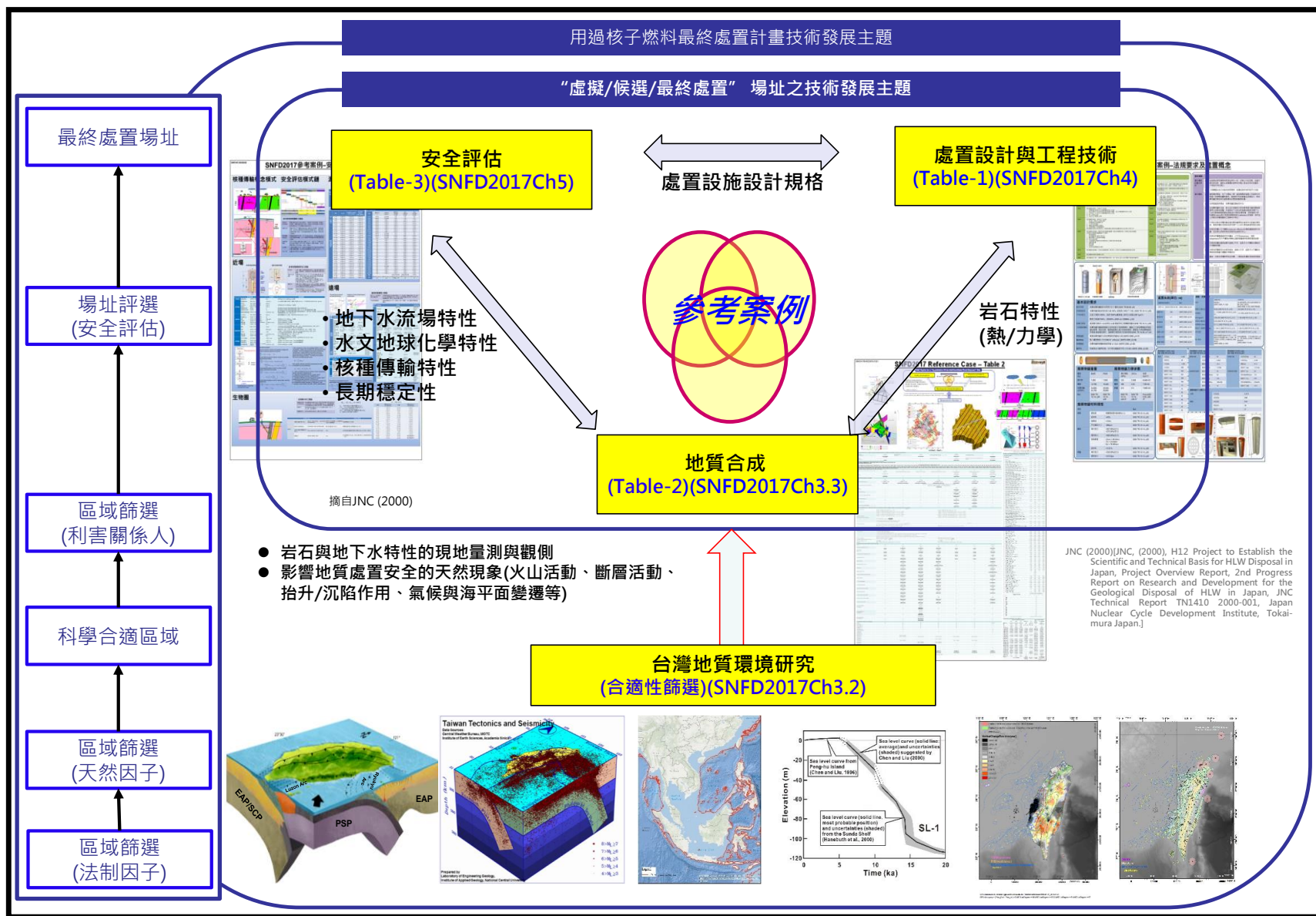


圖 1-1：台灣參考案例三個表格在處置計畫研究架構中的角色

1.2. 台灣參考案例

1.2.1. 功能

台灣參考案例的功能說明如下：

- (1) 參考案例是台灣在尚未進入核廢料最終處置地地點評選階段前的虛擬案例，供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力。
- (2) 參考案例的建構、測試與持續精進，可確保台灣未來進入場址評選階段時，有合適的技術能力，以及正確的調查、設計、評估重點與流程，可供展開特定地點之處置科學合適性的探討與評估。
- (3) 參考案例的應用及功能，無法涵蓋處置計畫的全部重要工作；例如，全國性的地質環境研析及處置合適性研究、包封容器腐蝕試驗、核種吸附特性試驗等工作。參考案例的主要功能，僅係在儲備將來有特定候選處置地地點時，所需該特定候選地點之地質特性調查、處置概念設計、安全評估的整合性評估能力。

1.2.2. 內容

台灣參考案例的內容說明如下：

- (1) 參考案例的內容，基本上，是透過對台灣地質條件、處置概念及安全評估技術需求的初步合理認知，經由科學性的討論，合成一個台灣未來可能面臨的核廢料最終處置之地質條件、處置概念、安全評估方法的虛擬案例，包含相關概念模式、資料及假設條件的文字與圖像說明。
- (2) 參考案例僅包含一個基本、合理之虛擬案例的內容說明，不包含其他可能的變動情節、工程設計的描述說明、預測或討論。
- (3) 台灣參考案例共包含三個表及其對應的輔助說明文件：
 - (a) 表一：法規要求、處置概念及安全評估情境
 - (b) 表二：地質概念模式及特性參數
 - (c) 表三：安全評估之數學模式、假設、邊界條件及參數

1.2.3. 版次設定及共同資訊凍結

台灣參考案例表二之版次設定的相關考量說明如下：

- (1) 參考案例研究成果的分享及比對，是其持續精修的主要動力，也是參考案例應用的主要功能及精神。研究成果的分享與比對，必須架構在相同的測試內容及假設條件基礎下，方能聚焦共識、發揮其最大效能。
- (2) 隨著新資料、新認知、新需求的持續出現，參考案例可能面臨持續不斷修正的要求。然而，持續不段的修正與發佈新版內容，將導致參考案例之應用成果整合的困擾或失敗；因為任何一種參考案例的研究應用，均需要時間，當不同使用端因時間差異而使用不同資料(不同版次)時，將因資料或認知基礎的不同而導致整合困難或無法整合，其結果將無法提供有效的階段性回饋修正建議，喪失持續不斷回饋修正的主要精神。因此在特定時間區段中，參考案例的內容必須保持一定，並明確標示其版次，以確保各不同研究團隊具有相同的測試內容及假設條件。
- (3) 本參考案例表二的版次為 RC2015-1231，其內容將冷凍不變三年，其內容主要做為 SNFD2017 報告第三章第二節(地質合成)、第四章(處置設計與工程技術)及第五章(安全評估)，三者間具關連性研究需求的共同測試內容及假設條件。
- (4) 自本版次參考案例表二定稿至 2018/12/31 期間的計畫研究成果及相關回饋修正建議，將被充分考量並納入下一版此的參考案例表二內容中，做為持續精進的主要依據。

1.2.4. 前期回饋經驗

在 SNFD2009 報告中，曾針對功能評估技術，建立初步評估能力；評估所需數據依序採用測試區調查所得之現地資料、實驗研究資料與國外文獻適用數據或合理假設之參考值等(台電公司，2010，ch4.6)。

- (1) SNFD2009 報告相關模式、數據、假設散居該報告各章節，閱讀不易，有必要更加系統化；因此，本版參考案例透過三個結構化

表格的建立，及各表的對應輔助說明文件，以期清楚說明 SNFD2017 報告參考案例的相關模式、數據及假設。

- (2) SNFD2009 報告相關評估資料、公式、假設來源或立論基礎，採用一般文章的引用方式，造成資料可追蹤性較弱，不利審查及經驗的累積；因此，本版參考案例相關引用方式，要求細至各引用來源的頁碼、圖號、表號、章節段落或識別碼，以利使用者的查詢，增加 SNFD2017 報告的追蹤性。

1.2.5. 共識及規範

參考案例的建構，涉及地形(geomorphology)、地質(geology)、水文地質(hydrogeology)、水文地球化學(hydrogeochemistry)、岩石力學(rock mechanics)、隧道工程(tunnel engineering)、化學工程(chemical engineering)、核子工程(nuclear engineering)等諸多不同學科的資料解讀、研判與整合，且其最終成果亦必須考量不同使用端的需求特性。由於參考案例的參與者(建構者及使用者)眾多，為提升溝通使用效率，因此，必須有明確的機制，加以規範。

1.2.5.1. 內容的結構化與代碼化

由於參考案例的參與者(建構者及使用者)眾多，為提升溝通使用效率，降低過多繁瑣文字說明，可能產生的不必要誤解，必須有一套機制，讓各參與者能快速、清楚、正確掌握參考案例內容的意義。

- (1) 參考案例內容必須能以結構化的表格形式表達，以利使用者能快速掌握參考案例內容的全貌；搭配輔助文字的說明，讓各不同參與者，針對其特定需求，深入了解參考案例對應內容的背景及意義。
- (2) 參考案例內容所涉及描述對象(如岩體、構造)及其特性描述，必須以統一代碼方式描述，以降低過多繁瑣文字說明，或因不同專業領域描述習慣不同，可能產生的不必要誤解；搭配文件的輔助說明，讓各不同參與者，明確掌握參考案例各代碼的定義。

1.2.5.2. 內容的可追蹤性

持續有效的回饋修正，是建構及應用參考案例的主要精神。參考案例的內容，主要建構於任一時間冷凍點前的相關資料、認知及需求。隨著參考案例內容的使用，或認知及需求的更新，針對原本內容的出處，以及認知及需求更新的緣由，必須有一套機制，讓各參與者能快速、清楚的追蹤掌握。

- (1) 參考案例的相關模式、數值、公式及假設等資訊，均必須系統化說明各資訊的來源，建立資訊來源的可追蹤性。
- (2) 參考案例各資訊內容的來源說明，必須詳細(如細至引用來源的頁碼、圖號、表號或會議紀錄的代碼)，以增加資料追蹤的便利性。

1.2.5.3. 文件編號、檔案命名及引用原則

為了加強文件內容的可追溯性，參考案例表二需要一個統一並結構化的編碼系統，並依此規則進行紙本文件與其相應之電子檔案命名，涵蓋範圍包括：技術報告、資料庫與會議紀錄等文件。

1.2.5.3.1. 文件編碼系統

更新的文件編碼系統於 2015 年開始使用，編碼規則如下所述：
文件名稱編碼格式(CodeD)

= SNFD-UNIT-CCyyyy-mmdd/####

其中，

SNFD: Spent Nuclear Fuel Disposal project，計畫名稱。

UNIT: 文件產生者之 4 碼代號，例如：

- ◆ FCMA: 原能會物管局
- ◆ TPCX: 台電公司
- ◆ ITRI: 工研院
- ◆ INER: 核研所
- ◆ NTUX: 台灣大學

◆ GSTX: 地質學會

CC: 文件類型之 2 碼代號 例如：

◆ AP: 年度計畫

◆ AR: 年度報告

◆ DB: 資料庫

◆ MM: 會議紀錄

◆ TR: 技術報告

◆ QA: 問題與回答

yyyy: 文件產出年份之 4 碼代號。

mmdd/####: 文件產出日期或流水號之 4 碼代號，mmdd 或####

mm: 文件產出月份之 2 碼代號。

dd: 文件產出日期之 2 碼代號。

####: 文件序號之 4 碼代號，或是 2015 年前產出文件之原始文件編碼序號。

1.2.5.3.2. 文件內容引用方式

本計畫產出文件內容的引用方式，可以採用以下的引用規則：

文件內容的引用方式

=CodeD-[a#][c#]p#/t#/f#

其中，

CodeD: 本計畫產出文件的代碼

[]: 可選擇的代號

[a#]: 引用文獻的附錄號碼

[c#]: 引用文獻的章節號碼

p#/t#/f#: 引用文獻的頁碼、表號或圖號，可能是 p#、t#或 f#

◆ p#: 引用內容之所在頁碼

◆ t#: 引用內容之所在表號

◆ f#: 引用內容之所在圖號

1.2.5.4. 單位的一致性

由於參考案例的參與者(建構者及使用者)眾多，為提升溝通及使用效率，降低各數值應用時之單位轉換可能產生的錯誤，必須有一套機制，讓各參與者能快速、正確使用參考案例的相關數值資訊。

- (1) 各數值必須清楚說明其單位，但因參與者眾多，使用習慣不同，難以統一採用特定單位系統。例如，在國際單位制(SI system)，時間單位為秒(s)，但用在地質年代描述時，實在很困難讓不同參與者聯想到 3.1536×10^{13} s 代表 1 Ma。參考案例表二內容所涉及之相關參數的單位，均以參考案例表二內容之約定為準，以降低解讀錯誤的可能性。
- (1) 相關坐標數值資訊，必須清楚說明其坐標系統(如 TM2、TW97)，以利坐標數值的正確使用。

1.3. 本報告應用目標

本報告應用目標說明如下：

- (1) 本報告主要作為台灣參考案例表二(地質相關概念模式及特性參數)之輔助說明文件，說明參考案例表二的建置內容及其相關論述基礎。
- (2) 本報告將作為主管機關要求之 SNFD2017 報告架構第 3.2 節(Geosynthesis)的主要內容。

2. 台灣參考案例表二

表 2-1 是台灣參考案例之表二(地質概念模式及特性參數)內容；表 2-2 至表 2-10 是表 2-1 的輔助表格，詳列表 2-1 中相關地質物件代碼的定義及試驗項目與成果所引用之參考文獻等資訊。

近年來，瑞典及芬蘭在核廢料最終處置的發展方面，取得相當傲人的進展。瑞典於 2009 年確定最終處置地點(Forsmark)，2011 年提出建照申請，預計於 2019 年開始建造最終處置設施，2029 年開始進行最終處置設施的運轉(SKB, 2013, p6)；而芬蘭則於 2015 年 11 月成功取得最終處置場址(Olkiluoto)的建造許可，成為世界上第一個取得高放射性廢棄物最終處置設施建照許可的國家。台灣目前尚未確定最終處置的候選場址，亦未針對任何特定地點，進行系統化的現地調查與評估，所以不適合直接使用 SDM 的論述方法。但是，台灣除了參考日本 H12 的基本架構(JNC, 2000, c5.5)外，仍可吸取瑞典場址描述模型(Site Descriptive Model, SDM)的成功發展經驗(SKB, 2008, p13)，並考量台灣的現況，於參考案例中參酌 SDM 的相關作法，進行參考案例表二的建構。

本報告內容在於提供參考案例表二的相關輔助說明及文件，說明地質相關概念模式的建構基礎，及參數資料的取得方式及特性。為了吸取 SDM 的相關優點，參考案例的地質資訊內容，主要來自於台灣同一地區-K 區的相關研究文獻及成果；根據台灣現有相關法規的規範，考量點包括 K 區的高人口密度，以及提供給製酒業之豐富的地下水資源，K 區已被排除在候選場址的考量範圍。

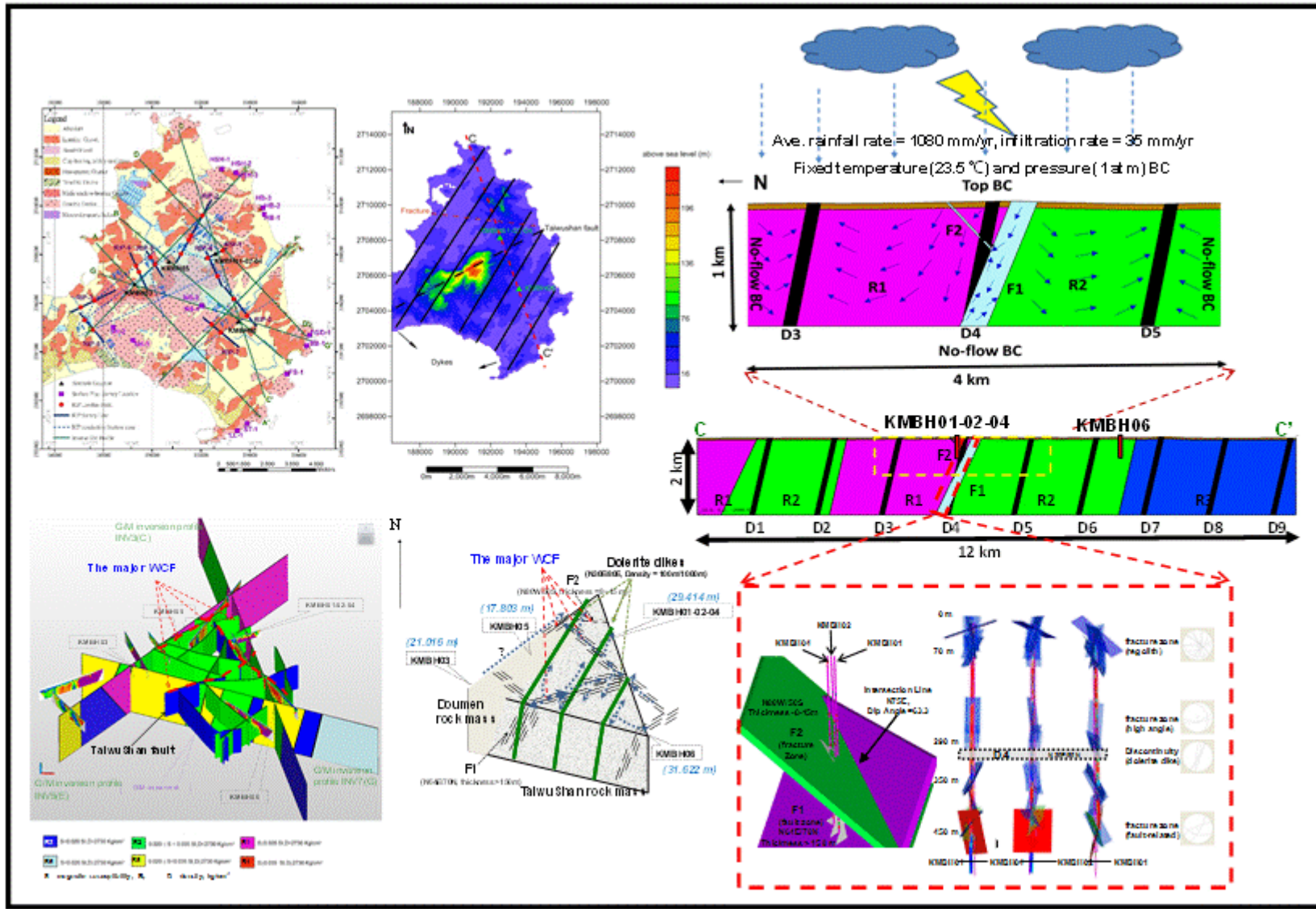
除了現有文獻外，在 1999 年至 2010 年間，研究團隊曾在 K 區進行相關地質調查技術的發展測試工作，相關技術研究成果及數據，亦將一併用以建構參考案例表二的內容；表 2-2 至表 2-10 分別系統化詳列，在 1999 年至 2010 年間，在 K 區進行的地質相關研究對象、試驗項目及成果的相關資訊，其中：

- ◆ 表 2-2 列出 K 區研究至今所歸納的相關地質單元、構造代碼編號，及其重要研究報告代碼，包含：岩體、岩脈及可能地下水導水構造。
- ◆ 表 2-3 列出 K 區地電阻探測剖面(Resistivity Image Profiling, RIP)的位置資訊，及其研判結果解析的重要研究報告代碼。K 區地電阻探測位置，主要是根據 K 區重磁力逆推結果來規劃，而地電阻探測剖面的研判解析結果，主要用以初步研判地下水主要導水裂隙的位置，決定地質探勘孔的位置。
- ◆ 表 2-4 列出 K 區地質鑽探孔 KMBH01 至 KMBH06 各孔的相關資訊，包含座標、孔徑、鑽探深度、角度、技術研究報告等資訊。
- ◆ 表 2-5 至表 2-10 詳列 KMBH01 至 KMBH06 各孔內曾做過的相關研究工作及其對應的技術報告代碼。

表 2-1：台灣參考案例表二

Section01：版次 = SNFD-ITRI-RC2015-1231

Section02：概念模式



Section03：起始條件及邊界條件

Temperature @ water table (°C)	23.5	Thermal Gradient (°C/100 m)	1.7	Ave. Rainfall rate (mm/yr)	1080	Up-lifting Rate (mm/yr)	0.1
	23.4 to 23.9		1.5 to 1.8		650 to 1650		
	TR2012-0290-ac2p43		TR2012-0290-ac2p43		TR2009-0270-c3p11		TR2015-0324-c3p382
Pressure @surface(Pa)	1.01 e+05			Infiltration rate (mm/yr)	35	Sea-level variations w.r.t. the current level (m) in next Ma	-120 to +10
	-				-80 to 190		-130 to +10
	assumption				TR2009-0270-c3p11		TR2015-0324-c3p406

Section04：地形及構造 (GIS 及 CAD 圖檔)

ArcGIS for topography, surface geological map, river and lake, locations of study activities, bathymetry of surrounding = SNFD-ITRI-RC2015-1231.mpk
3D Structure in AutoCAD = SNFD-ITRI-RC2015-1231.dwg

Topography of the C-C' Profile; unit = (m, m)

Point C(X,Y) = (Coordinate System = TWD97_119) = (190756.80, 2713387.00) = L@0; N19W; (L, Z) = (0, 4.42), (100, 1.99), (200, 1.72), (300, 3.60), (400, 4.71), (500, 11.30), (600, 18.18), (700, 16.88), (800, 16.52), (900, 11.82), (1000, 8.85), (1100, 7.54), (1200, 6.45), (1300, 5.99), (1400, 6.02), (1500, 6.25), (1600, 6.55), (1700, 7.17), (1800, 7.49), (1900, 8.07), (2000, 9.15), (2100, 12.76), (2200, 13.99), (2300, 13.42), (2400, 16.26), (2500, 16.97), (2600, 20.83), (2700, 26.57), (2800, 61.05), (2900, 51.68), (3000, 45.95), (3100, 39.62), (3200, 45.97), (3300, 56.39), (3400, 38.17), (3500, 36.21), (3600, 30.40), (3700, 28.59), (3800, 29.41), (3900, 30.06), (4000, 31.13), (4100, 31.23), (4200, 25.74), (4300, 21.86), (4400, 19.77), (4500, 23.77), (4600, 26.56), (4700, 23.48), (4800, 23.37), (4900, 22.00), (5000, 19.25), (5100, 18.00), (5200, 20.98), (5300, 26.31), (5400, 31.58), (5500, 25.71), (5600, 26.43), (5700, 23.31), (5800, 20.97), (5900, 20.12), (6000, 20.97), (6100, 25.87), (6200, 28.01), (6300, 25.96), (6400, 28.24), (6500, 31.18), (6600, 29.36), (6700, 36.09), (6800, 43.44), (6900, 50.18), (7000, 38.60), (7100, 41.10), (7200, 39.46), (7300, 35.64), (7400, 31.69), (7500, 29.48), (7600, 27.11), (7700, 24.41), (7800, 23.31), (7900, 23.60), (8000, 22.00), (8100, 21.15), (8200, 22.35), (8300, 23.96), (8400, 23.38), (8500, 24.01), (8600, 22.52), (8700, 20.95), (8800, 20.51), (8900, 19.40), (9000, 17.90), (9100, 17.55), (9200, 16.00), (9300, 14.70), (9400, 14.00), (9500, 14.02), (9600, 14.43), (9700, 12.37), (9800, 11.95), (9900, 11.27), (10000, 11.28), (10100, 11.07), (10200, 9.73), (10300, 10.18), (10400, 8.89), (10500, 8.92), (10600, 6.98), (10700, 6.18), (10800, 6.44), (10900, 12.65), (11000, 14.61), (11100, 22.48), (11200, 11.94), (11300, 10.62), (11400, 12.04), (11500, 12.88), (11600, 12.22), (11700, 10.63), (11800, 9.52), (11900, 9.18), (12000, 7.30)

Section05：地質特徵(岩體及構造)單元

Unit ID	R0	R1	R2	R3	F1	F2	D1 to D10
	Regolith	Granitic gneiss+Migmatite (TaiWuShan rock mass)	Granitic gneiss (TaiWuShan rock mass)	Granitic gneiss+Migmatite (transition zone)	TaiWuShan fault	TaiWuShan fault-branch	Doleritic dike swarm
Strike/dip	thickness 70 m	-	-	-	N64E/70N (width=200m)	N80W/50S (width=20m)	N30E/80N (100m per 1000m)
	5 to 90 m	-	-	-	>150m	8 to 15m	-
	TR2009-0270-c4p1	-	-	-	TR2005-0219-c4p26	TR2007-0247-c4p22	TR2012-0290-c4p8

Section06：水力傳導特性

Unit ID	R0	R1	R2	R3	F1	F2	D1 to D10
Hydraulic conductivity (m/s)	1.0e-5	1.0e-10	1.0e-10	1.0e-10	5.e-06	5.e-06	1.0e-11
	5.0e-06 to 1.0e-04	4.1e-12 to 1.0e-9	4.1e-12 to 1.0e-9	4.1e-12 to 1.0e-9	3.0e-08 to 1.e-04	3.0e-08 to 1.e-04	4.1e-12 to 1.0e-9
	TR2009-0270-c4p1	TR2007-0248-c3p15; TR2013-0320-c3p33	TR2007-0248-c3p15; TR2013-0320-c3p33	TR2007-0248-c3p15; TR2013-0320-c3p33	TR2012-0290-ac3P45	TR2012-0290-ac3P45	TR2007-0248-c3p15; TR2013-0320-c3p33
Upscaling of Hydraulic conductivity (m/s)	Hydraulic conductivity of fracture (m/s): upscaling from $K_m(L_m)$ to $K_u(L_u)$; $L_u = 3 \sim 500m$ $Log_{10}(K_u) = 0.855 \times Log_{10}(K_m) - 1.32 \times (Log_{10}(L_u/L_m))$ TR2006-0243-c4p55						
Effective Porosity (%)	-	-	-	-	0.01	0.015	-
	-	-	-	-	0.01	0.007 to 0.015	-
	-	-	-	-	TR2009-0267-c5p12	TR2009-0267-c4p6	-
Effective velocity (m/s)	-	-	-	-	2.0e-05	1.3e-04	-
	-	-	-	-	2.0e-05 or 2.0e-04	1.3e-04 to 2.9e-04	-
	-	-	-	-	TR2009-0267-c5p12	TR2009-0267-c4p6	-
	-	-	-	-	2.0e-03	1.0e-02	-

Mechanic Dispersion Coefficient (m^2/s)	-	-	-	-	2.0e-03 or 2.0e-02	2.9e-05 to 1.0e-02	-
	-	-	-	-	TR2009-0267-c5p12	TR2009-0267-c4p6	-
Hydraulic Dispersivity (m)	-	-	-	-	100	75	-
	-	-	-	-	100	0.1 to 75	-
	-	-	-	-	TR2009-0267-c5p12	TR2009-0267-c4p6	-
Peclet number, Pe, (*)	-	-	-	-	10	8	-
	-	-	-	-	10	8 to 3150	-
	-	-	-	-	TR2009-0267-c5p12	TR2009-0267-c4p6	-
Tortuosity (Travel Length/distance)	-	-	-	-	6	35	-
	-	-	-	-	3.2 or 6	1.2 to 35	-
	-	-	-	-	TR2009-0267-c5p12	TR2009-0267-c4p6	-

Section07：裂隙參數集

Fracture Domain	FDMA	FDMB
Fracture Domain	Elevation (height, m) < 70 m	Elevation (height, m) > 70 m
Fracture clusters (Pole_Trend, Pole_Plunge)	Cluster 1 = (198, 18), Fish distribution ($\theta, \kappa = 18$), $P_{32,rel}=26\%$	Cluster 1 = (65, 17), Fish distribution ($\theta, \kappa = 20$), $P_{32,rel}=15\%$
	Cluster 2 = (155, 4), Fish distribution ($\theta, \kappa = 15$), $P_{32,rel}=24\%$	Cluster 2 = (344, 38), Fish distribution ($\theta, \kappa = 18$), $P_{32,rel}=24\%$
	Cluster 3 = (264, 23), Fish distribution ($\theta, \kappa = 16$), $P_{32,rel}=18\%$	Cluster 3 = (281, 29), Fish distribution ($\theta, \kappa = 16$), $P_{32,rel}=30\%$
	Cluster 4 = (98, 81), Fish distribution ($\theta, \kappa = 11$), $P_{32,rel}=32\%$	Cluster 4 = (174, 22), Fish distribution ($\theta, \kappa = 17$), $P_{32,rel}=10\%$
		Cluster 5 = (175, 75), Fish distribution ($\theta, \kappa = 19$), $P_{32,rel}=21\%$
	Fisher distribution $f(\theta, \kappa) = \frac{\kappa \sin \theta e^{\kappa \cos \theta}}{e^{\kappa} - e^{-\kappa}}$; θ = the angular displacement form the mean pole vector κ = a concentration parameter of Fisher distribution	
Fracture intensity	$P_{32} = 2.4$ P_{32} = Area of fractures per unit volume of rock mass (volumetric intensity, m^{-1})	$P_{32} = 0.3$
Fracture size	Power law : $k_r = 2.6, r_0 = 0.1 m, r_{min} = 4.5 m, r_{max} = 564 m$ $P(R \geq r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{k_r}$, $P_{32}(r_{min}, r_{max}) = \frac{[r_{min}^{k_r-2} - r_{max}^{k_r-2}]}{r_0^{k_r-2}} P_{32}(r_0, \infty)$ R is the fracture radius r_0 is the minimum radius value r is any fracture radius between r_0 and ∞ k_r is the exponent of fractal dimension, or the “fracture radius scaling exponent” (La Pointe, 2002, p381). $P(R \geq r)$ is the probability that a circular-shape fracture with a radius greater than or equal to r $P_{32}(r_{min}, r_{max})$ is the volumetric fracture intensity corrected with determined fracture radius between r_{min} and r_{max}	Power law : $k_r = 2.6, r_0 = 0.1 m, r_{min} = 4.5 m, r_{max} = 564 m$
Fracture location	Stationary random (Poisson) process	Stationary random (Poisson) process
Fracture Transmissivity ($T, m^2/s$)	$T = 1.51 \times 10^{-7} \times (L^{0.7})$; $L = \sqrt{(\pi r^2)}$	$T = 3.98 \times 10^{-10} \times (L^{0.5})$; $L = \sqrt{(\pi r^2)}$
Fracture Aperture (e, m)	$e = 0.5\sqrt{T}$	$e = 0.5\sqrt{T}$
Source	SNFD-SKBI-PL2015-1023; Vidstrand et al., 2010, p107	SNFD-SKBI-PL2015-1023; Vidstrand et al., 2010, p106

Section08：熱及力學特性

Unit ID	R0	R1	R2	R3	F1	F2	D1 to D10
---------	----	----	----	----	----	----	-----------

Wet heat conductivity ($W/(m \cdot K)$)	2.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	3.0
	-	2.3 to 3.0	2.3 to 3.0	2.3 to 3.0	-	-	2.3 to 3.0
	assumption	TR2010-0275-c4p7	TR2010-0275-c4p7	TR2010-0275-c4p7	assumption	assumption	TR2010-0275-c4p7
Specific heat ($J/(kg \cdot K)$)	800	800	800	800	800	800	800
	-	730 to 903	730 to 903	730 to 903	-	-	730 to 903
	assumption	TR2010-0275-c4p7	TR2010-0275-c4p7	TR2010-0275-c4p7	assumption	assumption	TR2010-0275-c4p7
Thermal expansion coefficient ($1/K$)	8.0e-06	8.0e-06	8.0e-06	8.0e-06	8.0e-06	8.0e-06	8.0e-06
	-	-	-	-	-	-	-
	assumption	assumption	assumption	assumption	assumption	assumption	assumption
Dry density (kg/m^3)	2000	2750	2630	2650	2600	2600	2750
	-	2730 to 2770	2610 to 2660	2600 to 2750	-	-	2740 or 2750
	assumption	TR2005-0219-c4p66	TR2005-0219-c4p66	TR2003-0199-c2p7	assumption	assumption	TR2003-0199-c2p11
Specific gravity	-	2.77	2.65	2.66	-	-	2.76
	-	2.75 to 2.79	2.63 to 2.68	2.62 to 2.76	-	-	2.76 or 2.76
	-	TR2005-0219-c4p66	TR2005-0219-c4p66	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p11
Saturated density (kg/m^3)	-	2760	2640	2650	-	-	2750
	-	2740 to 2780	2620 to 2670	2610 to 2750	-	-	2750 or 2750
	-	TR2005-0219-c4p66	TR2005-0219-c4p66	SNFD-ITRI-MM2015-1202	-	-	SNFD-ITRI-MM2015-1202
Porosity (%)	-	0.53	0.54	0.72	-	-	0.68
	-	0.34 to 0.77	0.38 to 0.65	0.60 to 0.87	-	-	0.60 or 0.77
	-	TR2005-0219-c4p66	TR2005-0219-c4p67	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p11
Water adsorption (%)	-	0.19	0.21	0.27	-	-	0.25
	-	0.12 to 0.28	0.14 to 0.25	0.22 to 0.33	-	-	0.22 or 0.28
	-	TR2005-0219-c4p66	TR2005-0219-c4p67	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p11
Uniaxial compressive strength (MPa)	-	111.54	125.97	77.12	-	-	71.99
	-	89.16 to 131.21	75.68 to 168.66	51.51 to 106.56	-	-	51.51 or 92.47
	-	TR2005-0219-c4p67	TR2005-0219-c4p67	SNFD-ITRI-MM2015-1202	-	-	TR2003-0199-c2p12
Cohesion (MPa)	-	27.46	23.75	28.84	-	-	22.75
	-	26.42 to 28.49	17.99 to 29.51	22.75 or 34.92	-	-	22.75
	-	TR2005-0219-c4p68	TR2005-0219-c4p68	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p12
Friction angle (degree)	-	51.05	54.90	56.5	-	-	56
	-	47.90 to 54.20	50.71 to 59.08	56 or 57	-	-	56
	-	TR2005-0219-c4p68	TR2005-0219-c4p68	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p12
Tensile strength (MPa)	-	10.99	9.73	8.41	-	-	7.37
	-	6.99 to 14.60	6.91 to 13.33	6.43 to 10.72	-	-	7.37
	-	TR2005-0219-c4p69	TR2005-0219-c4p69	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p13
Secant Young's modulus (GPa)	-	44.18	41.93	25.72	-	-	25.52
	-	31.70 to 51.77	34.15 to 51.19	19.42 to 30.02	-	-	25.52
	-	TR2005-0219-c4p70	TR2005-0219-c4p70	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p13
Secant Poisson's ratio	-	0.17	0.15	0.16	-	-	0.15
	-	0.13 to 0.27	0.11 to 0.19	0.14 to 0.18	-	-	0.15
	-	TR2005-0219-c4p70	TR2005-0219-c4p70	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p13
Dynamic shear modulus (GPa)	-	22.88	17.98		-	-	
	-	16.75 to 29.24	12.99 to 24.50		-	-	
	-	TR2005-0219-c4p71	TR2005-0219-c4p71		-	-	

Dynamic Young's modulus (GPa)	-	55.17	42.28	31.55	-	-	29.5
	-	41.31 to 73.60	30.28 to 58.37	26.50 to 37.90	-	-	26.50 to 33.1
	-	TR2005-0219-c4p71	TR2005-0219-c4p71	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p13
Dynamic Poisson's ratio	-	0.20	0.17	0.22	-	-	0.20
	-	0.12 to 0.27	0.10 to 0.25	0.14 to 0.26	-	-	0.14 to 0.24
	-	TR2005-0219-c4p71	TR2005-0219-c4p71	TR2003-0199-c2p7	-	-	TR2003-0199-c2p13
In-situ stress (MPa) (HF@306m)	-	-	$\sigma_v=8.11$	-	-	-	-
	-	-	$\sigma_H=10.68$	-	-	-	-
	-	-	$\sigma_h=5.75$	-	-	-	-
	-	-	KMBH01@306m	-	-	-	-
	-	-	TR2003-0199-c3p17	-	-	-	-
In-situ stress (MPa) (HF@430m)	-	-	$\sigma_v=11.40$	-	-	-	-
	-	-	$\sigma_H=14.43$	-	-	-	-
	-	-	$\sigma_h=9.38$	-	-	-	-
	-	-	KMBH01@430m	-	-	-	-
	-	-	TR2003-0199-c3p17	-	-	-	-
In-situ stress (MPa) (HTPF@300m)	-	-	$\sigma_1=10.29$ to 12.34	-	-	-	-
	-	-	$\sigma_2=6.66$ to 8.62	-	-	-	-
	-	-	$\sigma_3=0.76$ to 2.14	-	-	-	-
	-	-	KMBH01@268~320m	-	-	-	-
	-	-	TR2005-0219-c4p107	-	-	-	-

Section09 : 礦物組成

Unit ID	R0	R1	R2	R3	F1	F2	D1 to D10
Quartz (v%)	-	20	35	35	35	35	~5
Plagioclase (v%)	-	55	15	25	15	15	30
K-feldspar (v%)	-	8	45	37	45	45	-
Biotite (v%)	-	5	5	3	3	3	-
Amphibole (v%)	-	10	-	-	-	-	30
Clinopyroxene (v%)	-	-	-	-	-	-	15
Chlorite (v%)	-	<1	-	<1	1	1	~5
Ilmenite (v%)	-	-	-	-	-	-	-
Magnetite (v%)	-	-	-	-	-	-	-
Sphene (v%)	-	trace > 100 grains	-	-	-	-	-
Zircon (v%)	-	trace > 10 grains	trace > 10 grains	trace > 10 grains	trace > 10 grains	trace > 10 grains	-
Garnet (v%)	-	-	-	-	-	-	-
Apatite (v%)	-	-	-	trace > 10 grains	-	-	-
Epidote (v%)	-	trace > 20 grains	-	-	trace < 10grains	trace < 10grains	-
Allanite (v%)	-	-	trace > 20 grains	trace > 10 grains	-	-	-
Zoisite (v%)	-	-	trace > 20 grains	trace > 10 grains	-	-	-
Sericite (v%)	-	-	-	-	1	1	-
Muscovite (v%)	-	-	-	-	-	-	-
Kaolinite (v%)	-	-	-	-	-	-	-

Calcite (v%)	-	-	-	-	-	-	~5
Pyrite (v%)	-	-	-	-	-	-	-
Opaque Minerals (v%)	-	-	-	-	-	-	10
	-	KMBH03@384.4m	KMBH04@462.2m	KMBH06@419.0m	KMBH04@497.1m	KMBH04@497.1m	KMBH04@291.7m
2 nd minerals suggested by geochemical modeling	-	TR2012-0288-c7p5	TR2012-0288-c7p31	TR2012-0288-c7p50	TR2012-0288-c7p32	TR2012-0288-c7p32	TR2012-0288-c7p19
	Saponite-Ca, Nontronite-Na, Nontronite-Ca, Carbon, Dawsonite, Dolomite						
TR2015-0305-c3p18							

Section10：地下水組成

	Average Groundwater Quality				Average Surface Water		
	KM			SKB-Äspö	HC	River (global)	Sea (global)
Depth (m)	300 to 400m	400 to 500m	300 to 500m	~550 m	30 m to 50m	surface	surface
pH	7.67	8.98	8.60	7.7	6.21 ~ 7.73		7.5~(8.2)~8.4
pe	-3.10	-6.79	-5.73	-5.21 ~ -1.24	-4.6 ~ 2.2		
T(°C)	28.80	31.70	30.87			25	15
EC (mS/cm)	0.407	0.320	0.345			~0.1	~42.9
Cl_tot (mol/L)	1.29e-03	8.55e-04	9.77e-04	1.81e-01	1.63e-01	2.20e-04	5.46e-01
C_tot (mol/L)	1.32e-03	1.15e-03	1.21e-03	1.64e-04	5.30e-04	8.52e-04	2.33e-03
S_tot (mol/L)	1.30e-04	9.59e-05	1.05e-04	5.83e-03	6.67e-03	1.15e-04	2.82e-02
N_tot (mol/L)	2.12e-05	4.03e-05	3.35e-05	2.85e-06	1.64e-05		1.07e-02
P_tot (mol/L)	1.63e-06	2.05e-06	1.88e-06	1.61e-07		6.46e-07	2.00e-06
B_tot (mol/L)						9.25e-07	4.16e-04
Si_tot (mol/L)	1.18e-03	6.90e-04	8.31e-04	1.46e-04	4.14e-04	2.31e-04	7.94e-05
F_tot (mol/L)	1.19e-04	2.11e-04	1.85e-04	7.89e-05		5.26e-08	6.84e-05
Br_tot (mol/L)				5.01e-04		2.50e-07	8.42e-04
I_tot (mol/L)				1.10e-06		5.51e-08	5.01e-07
Na_tot (mol/L)	1.29e-03	1.68e-03	1.57e-03	9.13e-02	9.48e-02	2.74e-04	4.68e-01
K_tot (mol/L)	1.48e-04	6.98e-05	9.22e-05	2.05e-04	1.28e-03	5.88e-05	1.02e-02
Ca_tot (mol/L)	6.18e-04	2.79e-04	3.76e-04	4.73e-02	1.93e-02	3.74e-04	1.03e-02
Mg_tot (mol/L)	1.30e-04	2.00e-05	6.38e-05	1.73e-03	1.34e-02	1.69e-04	5.31e-02
Al_tot (mol/L)						1.85e-06	7.94e-08
Fe_tot (mol/L)	1.37e-05	5.18e-06	7.62e-06	4.3e-06	6.56e-04	7.16e-07	3.16e-08
Cu_tot (mol/L)	1.18e-07	2.76e-07	2.37e-07			1.10e-07	7.94e-09
Mn_tot (mol/L)	3.90e-06	9.60e-07	1.94e-06	5.28e-06	2.64e-04	1.27e-07	3.98e-09
Zn_tot (mol/L)	7.22e-06	1.17e-06	2.90e-06		1.11e-06	3.06e-07	
Cd_tot (mol/L)	ND	3.11e-08	3.11e-08			8.89e-11	
Cr_tot (mol/L)	1.92e-08	2.50e-07	1.35e-07			1.92e-08	6.31e-09
Ni_tot (mol/L)	5.59e-05	3.30e-05	4.07e-05		1.46e-06	5.11e-09	2.51e-08
Pb_tot (mol/L)	1.25e-07	1.57e-07	1.46e-07		9.59e-07		
As_tot (mol/L)	ND	1.00e-08	1.00e-08		1.69e-08	2.67e-08	5.01e-08
U_tot (mol/L)						1.68e-10	1.99e-10

Salinity (‰)	0.279	0.208	0.228				
Source	TR2012-0290-ac4p44~46			Bruno et al.,(1997), p106	4ML1100-RS-6001- p46	Faure (1991), p173&p442	Stumm and Morgan (1982), p184, p463 & p567

Section11：天然系統的重要化學反應

T	Reactions	Log (equilibrium constant) at different conditions							
		a	b	c	d	e	f	g	h
1	Quartz (SiO_2); $SiO_2 \rightleftharpoons SiO_{2(aq)}$	-4.6319	-3.9993	-3.4734	-3.0782	-2.7191	-2.4378	-2.2057	-2.0168
1	Maximum_Microcline ($KAlSi_3O_8$); $KAlSi_3O_8 + 4 H^+ \rightleftharpoons K^+ + Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 2 H_2O$	-0.2212	-0.2753	-0.9654	-1.8683	-2.8881	-3.7735	-4.5884	-5.4170
2	Albite_low ($NaAlSi_3O_8$); $NaAlSi_3O_8 + 4 H^+ \rightleftharpoons Na^+ + Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 2 H_2O$	3.2730	2.7645	1.5678	0.2236	-1.2042	-2.3889	-3.4301	-4.4368
2	Anorthite ($CaAl_2(SiO_4)_2$), type= Feldspar $CaAl_2(SiO_4)_2 + 8 H^+ \rightleftharpoons Ca^{++} + 2 Al^{+++} + 2 SiO_{2(aq)} + 4 H_2O$	31.1921	26.5780	20.8090	15.3121	9.7228	5.1155	1.1209	-2.5408
2	Phlogopite ($KAlMg_3Si_3O_{10}(OH)_2$), type = Mica; $KAlMg_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 10 H^+ \rightleftharpoons K^+ + Al^{+++} + 3 Mg^{++} + 3 SiO_{2(aq)} + 6 H_2O$	42.0937	37.4400	31.5103	25.9003	20.3119	15.8204	12.0011	8.5120
2	Annite ($KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$), type = Mica; $KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 10 H^+ \rightleftharpoons K^+ + 3 Fe^{++} + Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 6 H_2O$	33.3018	29.4693	24.4456	19.6118	14.7256	10.7356	7.2830	4.0648
1	Epidote ($Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}OH$); $Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}OH + 13 H^+ \rightleftharpoons 2 Ca^{++} + Fe^{+++} + 2 Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 7 H_2O$	38.7601	32.9296	25.5332	18.4443	11.2039	5.1908	-0.0907	-5.0320
2	Daphnite-14A ($Fe_5AlAlSi_3O_{10}(OH)_8$), type = Chlorite; $Fe_5AlAlSi_3O_{10}(OH)_8 + 16 H^+ \rightleftharpoons 5 Fe^{++} + 2 Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 12 H_2O$	60.2452	52.2821	42.5135	33.3581	24.1876	16.7157	10.2648	4.3107
2	Clinochlore-14A ($Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$), type = Chlorite; $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + 16 H^+ \rightleftharpoons 2 Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 5 Mg^{++} + 12 H_2O$	76.7345	67.2391	55.7725	45.1520	34.6423	26.2016	19.0325	12.5384
2	Tremolite ($Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$), type =Amphibole; $Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 14 H^+ \rightleftharpoons 2 Ca^{++} + 5 Mg^{++} + 8 SiO_{2(aq)} + 8 H_2O$	66.9228	61.2367	53.1713	45.2528	37.3013	30.9517	25.6087	20.7268
2	Anthophyllite ($Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$), type =Amphibole; $Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2 + 14 H^+ \rightleftharpoons 7 Mg^{++} + 8 H_2O + 8 SiO_{2(aq)}$	73.7182	66.7965	57.3207	48.1440	38.9960	31.7377	25.6825	20.2305
2	Diopside ($CaMgSi_2O_6$), type = Pyroxene; $CaMgSi_2O_6 + 4 H^+ \rightleftharpoons Ca^{++} + Mg^{++} + 2 SiO_{2(aq)} + 2 H_2O$	22.9006	20.9643	18.3539	15.8250	13.2838	11.2437	9.5226	7.9589
2	Hedenbergite ($CaFe(SiO_3)_2$), type = Pyroxene; $CaFe(SiO_3)_2 + 4 H^+ \rightleftharpoons Ca^{++} + Fe^{++} + 2 SiO_{2(aq)} + 2 H_2O$	21.3901	19.6060	17.1582	14.7606	12.3281	10.3564	8.6777	7.1386
2	Andradite ($Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$), type = Garnet; $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3 + 12 H^+ \rightleftharpoons 3 Ca^{++} + 2 Fe^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 6 H_2O$	37.8063	33.3352	27.5160	21.8831	16.1075	11.2987	7.0542	3.0309
2	Grossular ($Ca_3Al_2(SiO_4)_3$), type = Garnet; $Ca_3Al_2(SiO_4)_3 + 12 H^+ \rightleftharpoons 3 Ca^{++} + 2 Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 6 H_2O$	58.4989	51.9228	43.7071	35.8991	27.9912	21.5032	15.8992	10.7569
1	Zoisite ($Ca_2Al_3(SiO_4)_3OH$); $Ca_2Al_3(SiO_4)_3OH + 13 H^+ \rightleftharpoons 2 Ca^{++} + 3 Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 7 H_2O$	50.2850	43.3017	34.5917	26.3105	17.9016	10.9686	4.9422	-0.6133

1	Muscovite ($Al_3Si_3O_{10}(OH)_2$), type = Mica; $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 10 H^+ \Leftrightarrow K^+ + 3 Al^{+++} + 3 SiO_{2(aq)} + 6 H_2O$	17.1295	13.5858	8.8387	4.1918	-0.6018	-4.6169	-8.1836	-11.5635
1	Calcite ($CaCO_3$); $CaCO_3 + H^+ \Leftrightarrow Ca^{++} + HCO_3^-$	2.2257	1.8487	1.3330	0.7743	0.0999	-0.5838	-1.3262	-2.2154
1	Pyrite (FeS_2); $FeS_2 + H_2O \Leftrightarrow Fe^{++} + 0.25 SO_4^{--} + 1.75 HS^- + 0.25 H^+$	-26.5030	-24.6534	-22.7519	-21.2343	-20.0248	-19.3959	-19.2784	-19.7437
1	Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$); $Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6 H^+ \Leftrightarrow 2 Al^{+++} + 2 SiO_{2(aq)} + 5 H_2O$	9.0182	6.8101	3.8468	0.9541	-2.0187	-4.5022	-6.7083	-8.8022
1	Magnetite (Fe_3O_4); $Fe_3O_4 + 8 H^+ \Leftrightarrow Fe^{++} + 2 Fe^{+++} + 4 H_2O$	13.8989	10.4724	6.4420	2.6912	-1.1245	-4.3319	-7.2074	-9.9523
1	Ilmenite ($FeTiO_3$) $FeTiO_3 + 2 H^+ + H_2O \Leftrightarrow Fe^{++} + Ti(OH)_{4(aq)}$		0.9046						
2	Hematite (Fe_2O_3), type = end member of il; $Fe_2O_3 + 6 H^+ \Leftrightarrow 2 Fe^{+++} + 3 H_2O$	2.1411	0.1086	-2.3178	-4.6072	-6.9784	-9.0207	-10.9039	-12.7511
2	Fluorapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$); $Ca_5(PO_4)_3F + 3 H^+ \Leftrightarrow 5 Ca^{++} + 3 HPO_4^{--} + F^-$	-23.8548	-24.9940	-27.0651	-29.7302	-33.3854	-37.4634	-42.1966	-48.1254
3	Dawsonite ($NaAlCO_3(OH)_2$); $NaAlCO_3(OH)_2 + 3 H^+ \Leftrightarrow Al^{+++} + HCO_3^- + Na^+ + 2 H_2O$	5.5674	4.3464	2.9527	1.7173	0.5179	-0.4753	500.0000	500.0000
3	Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$); $CaMg(CO_3)_2 + 2 H^+ \Leftrightarrow Ca^{++} + Mg^{++} + 2 HCO_3^-$	3.4063	2.5135	1.3314	0.0944	-1.3493	-2.7744	-4.2968	-6.1006
3	Saponite-Ca ($Ca_{0.165}Mg_3Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$), type = Smectite; $Ca_{0.165}Mg_3Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 7.32 H^+ \Leftrightarrow 0.165 Ca^{++} + 3 Mg^{++} + 0.33 Al^{+++} + 3.67 SiO_{2(aq)} + 4.66 H_2O$	29.2440	26.2900	22.1907	18.2025	14.2134	11.0280	8.3382	5.8721
3	Nontronite-Ca ($Ca_{0.165}Fe_2Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$), type = Smectite; $Ca_{0.165}Fe_2Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 7.32 H^+ \Leftrightarrow 0.165 Ca^{++} + 2 Fe^{+++} + 0.33 Al^{+++} + 3.67 SiO_{2(aq)} + 4.66 H_2O$	-11.3915	-11.5822	-12.6234	-13.9486	-15.4751	-16.8671	-18.2346	-19.7093
3	Nontronite-Na (Smectite, $Na_{0.33}Fe_2Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$), type = Smectite; $Na_{0.33}Fe_2Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 7.32 H^+ \Leftrightarrow 0.33 Na^+ + 2 Fe^{+++} + 0.33 Al^{+++} + 3.67 SiO_{2(aq)} + 4.66 H_2O$	-11.4385	-11.5263	-12.4420	-13.6424	-15.0323	-16.3030	-17.5600	-18.9316
1	Zircon ($ZrSiO_4$); $ZrSiO_4 + 2 H^+ \Leftrightarrow Zr(OH)_2^{++} + SiO_{2(aq)}$	-16.5702	-15.4193	-14.3228	-13.4475	-12.6795	-12.1280	-11.7279	-11.4490
3*	Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$); $CaSO_4 \cdot 2H_2O \Leftrightarrow Ca^{++} + SO_4^{--} + 2H_2O$	-4.5331	-4.4823	-4.6094	-4.9035	-5.4299	-6.1266	-7.0386	-8.3003
3*	Illite (Illite, $K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{2.3}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$), type = Illite; $K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{2.3}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2 + 8 H^+ \Leftrightarrow 0.25 Mg^{++} + 0.6 K^+ + 2.3 Al^{+++} + 3.5 SiO_{2(aq)} + 5 H_2O$	11.3859	9.0260	5.5550	2.0472	-1.6128	-4.6923	-7.4468	-10.0976
4	$OH^- + H^+ \Leftrightarrow H_2O$	14.9398	13.9951	13.0272	12.2551	11.6308	11.2836	11.1675	11.3002
4	$H_{2(aq)} + 0.5 O_{2(aq)} \Leftrightarrow H_2O$	50.4784	46.1066	40.9717	36.1762	31.3419	27.4263	24.1653	21.3650
5	$O_{2(g)} \Leftrightarrow O_{2(aq)}$	-2.6567	-2.8983	-3.0633	-3.1076	-3.0354	-2.8742	-2.6488	-2.3537

6	$2H_2O \Leftrightarrow O_{2(g)} + 4H^+ + 4e^-$	-91.0448	-83.1049	-74.0534	-65.8641	-57.8929	-51.6848	-46.7256	-42.6828
4	$CO_{2(aq)} + H_2O \Leftrightarrow HCO_3^- + H^+$	-6.5804	-6.3447	-6.2684	-6.3882	-6.7235	-7.1969	-7.7868	-8.5280
4	$CO_3^{--} + H^+ \Leftrightarrow HCO_3^-$	10.6241	10.3288	10.1304	10.0836	10.2003	10.4648	10.8707	11.4638
5	$CO_{2(g)} + H_2O \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$	-7.6765	-7.8136	-8.0527	-8.3574	-8.7692	-9.2165	-9.7202	-10.3393
5	$C + H_2O + O_{2(aq)} \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$	70.3758	64.1735	56.8565	49.9814	42.9869	37.2430	32.3599	28.0165
4	$H_2S_{(aq)} \Leftrightarrow H^+ + HS^-$	-7.4159	-6.9877	-6.6467	-6.4827	-6.4960	-6.6831	-7.0225	-7.5536
4	$S^{--} + H^+ \Leftrightarrow HS^-$	13.7100	12.9351	12.0082	11.1018	10.1202	9.2545	8.4250	7.5568
4	$HS^- + 2 O_{2(aq)} \Leftrightarrow H^+ + SO_4^{--}$	152.0993	138.3169	122.1371	107.0295	91.7855	79.4025	69.0257	60.0062
4	$N_{2(aq)} + 3 H_2O \Leftrightarrow 2 NH_{3(aq)} + 1.5 O_{2(aq)}$	-127.4562	-116.4609	-103.8097	-92.2328	-80.8113	-71.7755	-64.4353	-58.3245
4	$NH_4^+ \Leftrightarrow NH_{3(aq)} + H^+$	-10.0691	-9.2410	-8.2847	-7.4010	-6.5156	-5.7992	-5.1995	-4.6767
4	$NO_3^- + H^+ + H_2O \Leftrightarrow NH_{3(aq)} + 2 O_{2(aq)}$	-68.1779	-62.1001	-54.8254	-47.8997	-40.7634	-34.8282	-29.7190	-25.1037
4	$HF_{(aq)} \Leftrightarrow H^+ + F^-$	-2.9848	-3.1681	-3.4737	-3.8482	-4.3381	-4.8589	-5.4367	-6.1354
4	$HCrO_4^- \Leftrightarrow H^+ + CrO_4^{--}$	-6.5275	-6.4944	-6.6415	-6.9494	-7.4554	-8.0610	-8.7721	-9.6513
4	$HSiO_3^- + H^+ \Leftrightarrow SiO_{2(aq)} + H_2O$	10.3231	9.9525	9.4684	9.0844	8.8497	8.8394	9.0224	9.4141
4	$CH_{4(aq)} + 2O_{2(aq)} \Leftrightarrow HCO_3^- + H^+ + H_2O$	157.8202	144.1412	128.0446	112.9831	97.7553	85.3617	74.9554	65.8785
4	$HCOO^- + H^+ \Leftrightarrow Formic_acid_{(aq)}$	3.7949	3.7530	3.8042	3.9447	4.1981	4.5256	4.9454	5.5316
4	$NaOH_{(aq)} + H^+ \Leftrightarrow Na^+ + H_2O$	15.6450	14.7948	13.8004	12.8848	11.9708	11.2215	10.5573	9.8847
4	$NaHCO_{3(aq)} \Leftrightarrow Na^+ + HCO_3^-$	-0.3734	-0.1541	0.1098	0.4108	0.7926	1.2130		
4	$NaCO_3^- + H^+ \Leftrightarrow Na^+ + HCO_3^-$	9.8150	9.8144	10.0745	10.6485	11.5684	12.6320	13.7927	14.9187
4	$NaCl_{(aq)} \Leftrightarrow Na^+ + Cl^-$	0.8286	0.7770	0.6509	0.4730	0.2140	-0.0933	-0.4778	-1.0125
4	$NaHSiO_{3(aq)} + H^+ \Leftrightarrow Na^+ + SiO_{2(aq)} + H_2O$	8.4138	8.3040	8.0530	7.8291	7.6843	7.6582	7.7061	7.7808
4	$NaF_{(aq)} \Leftrightarrow Na^+ + F^-$	1.0819	0.9976	0.8328	0.6235	0.3383	0.0111	-0.3934	-0.9516
4	$NaAlO_{2(aq)} + 4 H^+ \Leftrightarrow Na^+ + Al^{+++} + 2 H_2O$	26.6454	23.6266	20.0941	16.8223	13.5351	10.8447	8.5326	6.4430
4	$KCl_{(aq)} \Leftrightarrow K^+ + Cl^-$	1.7097	1.4946	1.2163	0.9240	0.5747	0.2148	-0.1957	-0.7347
4	$KSO_4^- \Leftrightarrow K^+ + SO_4^{--}$	-0.8854	-0.8796	-0.9907	-1.1946	-1.5202	-1.9189	-2.4160	-3.0860
4	$CaCO_{3(aq)} + H^+ \Leftrightarrow Ca^{++} + HCO_3^-$	7.5021	7.0017	6.4516	5.9636	5.4683	5.0185	4.5355	3.9118
4	$CaHCO_3^+ \Leftrightarrow Ca^{++} + HCO_3^-$	-1.0951	-1.0467	-1.1592	-1.4181	-1.8587	-2.4000	-3.0514	-3.8725
4	$CaSO_{4(aq)} \Leftrightarrow Ca^{++} + SO_4^{--}$	-2.0713	-2.1111	-2.2647	-2.5111	-2.9101	-3.4328	-4.1424	-5.1853
4	$CaCl^+ \Leftrightarrow Ca^{++} + Cl^-$	0.6729	0.6956	0.5886	0.3566	-0.0399	-0.5332	-1.1352	-1.9071
4	$CaF^+ \Leftrightarrow Ca^{++} + F^-$	-0.6545	-0.6817	-0.8623	-1.1704	-1.6492	-2.2147	-2.8835	-3.7204
4	$MgCO_{3(aq)} + H^+ \Leftrightarrow Mg^{++} + HCO_3^-$	7.7399	7.3499	6.9262	6.5632	6.2045	5.8725	5.4900	4.9530
4	$MgHCO_3^+ \Leftrightarrow Mg^{++} + HCO_3^-$	-1.0798	-1.0357	-1.1638	-1.4355	-1.8804	-2.4146	-3.0493	-3.8424
4	$MgSO_{(aq)} \Leftrightarrow Mg^{++} + SO_4^{--}$	-2.1387	-2.4117	-2.8370	-3.3473	-4.0727	-4.9554	500.0000	500.0000
4	$MgCl^+ \Leftrightarrow Mg^{++} + Cl^-$	0.0494	0.1349	0.0548	-0.1820	-0.6068	-1.1389	-1.7843	-2.6016
4	$MgF^+ \Leftrightarrow Mg^{++} + F^-$	-1.3868	-1.3524	-1.4780	-1.7390	-2.1679	-2.6884	-3.3159	-4.1169
4	$FeHCO_3^+ \Leftrightarrow Fe^{++} + HCO_3^-$		-2.7200						
4	$FeCO_{3(aq)} + H^+ \Leftrightarrow Fe^{++} + HCO_3^-$		5.5988						
4	$FeOH^+ + H^+ \Leftrightarrow Fe^{++} + H_2O$		9.5000						

5*	$Fe(OH)_{3(aq)} + 3 H^+ \Leftrightarrow Fe^{+++} + 3 H_2O$		12.0000						
4	$AlO_2^- + 4 H^+ \Leftrightarrow Al^{+++} + 2 H_2O$	25.7948	22.8833	19.5707	16.5819	13.6762	11.4090	9.5977	8.1671
4	$AlOH^{++} + H^+ \Leftrightarrow Al^{+++} + H_2O$	5.7264	4.9571	4.0033	3.0626	2.0516	1.1673	0.3661	-0.3794
4	$Al(OH)_2^+ + 2 H^+ \Leftrightarrow Al^{+++} + 2 H_2O$	12.1394	10.5945	8.7455	6.9818	5.1460	3.5858	2.2019	0.9295
4	$HAlO_2(aq) + 3 H^+ \Leftrightarrow Al^{+++} + 2 H_2O$	18.7152	16.4329	13.7251	11.1731	8.5568	6.3739	4.4775	2.7831
4	$Cr^{+++} + 2.5 H_2O + 0.75 O_{2(aq)} \Leftrightarrow CrO_4^{--} + 5 H^+$	-9.8295	-8.3842	-7.0746	-6.2253	-5.7968	-5.8762	-6.3654	-7.3226
4	$Cr^{+} + 2 H_2O + O_{2(aq)} \Leftrightarrow CrO_4^{--} + 4H^+$	23.9518	21.6373	18.6198	15.5121	12.0449	8.8917	5.9054	2.8706
4	$Cu^+ + H^+ + 0.25 O_{2(aq)} \Leftrightarrow Cu^{++} + 0.5 H_2O$	21.0868	18.7704	16.0617	13.5457	11.0155	8.9577	7.2203	5.6947
4	$MnCl^+ \Leftrightarrow Mn^{++} + Cl^-$	-0.0716	-0.3013	-0.7149	-1.2375	-1.9315	-2.6727	-3.4911	-4.4594
4	$MnO_4^- + 3 H^+ \Leftrightarrow Mn^{++} + 1.25 O_{2(aq)} + 1.5 H_2O$	22.3542	20.2963	18.1502	16.4111	14.9463	14.0113	13.4539	13.2304
4	$MnO_4^{--} + 4 H^+ \Leftrightarrow Mn^{++} + O_{2(aq)} + 2 H_2O$	34.9612	32.4146	29.8283	27.8067	26.2121	25.3354	25.0086	25.2308
4	$MnSO_4(aq) \Leftrightarrow Mn^{++} + SO_4^{--}$	3.6054	2.6561	1.3529	-0.0417	-1.6802	-3.2784	-4.9407	-6.8411
4	$NiSO_4(aq) \Leftrightarrow Ni^{++} + SO_4^{--}$	-2.1172	-2.1257	-2.2089	-2.3276	-2.5419	-2.8464		
4	$ZnOH^+ + H^+ \Leftrightarrow Zn^{++} + H_2O$		8.9600	7.9300	6.9900	6.0600	5.3300	4.7400	4.2500
4	$ZnHCO_3^+ \Leftrightarrow Zn^{++} + HCO_3^-$		-1.4200	-1.6000	-1.8200	-2.2000	-2.7100	-3.4100	-4.5500
4	$ZnSO_4(aq) \Leftrightarrow Zn^{++} + SO_4^{--}$	-2.1079	-2.3062	-2.6537	-3.0650	-3.6603	-4.3951		
	TR2015-0305-c3p33	thermo.com.V8.R6+.dat, GWB®, V9.0							
T	Components of Reactions	Log (equilibrium constant) at different conditions							
		a	b	c	d	e	f	g	h
9	H^+								N.A.
9	$O_{2(aq)}$								N.A.
9	HCO_3^-								N.A.
9	SO_4^{--}								N.A.
9	Cl^-								N.A.
9	$NH_{3(aq)}$								N.A.
9	F^-								N.A.
9	CrO_4^{--}								N.A.
9	$SiO_{2(aq)}$								N.A.
9	Na^+								N.A.
9	K^+								N.A.
9	Ca^{++}								N.A.
9	Mg^{++}								N.A.
9	Fe^{++}								N.A.
9	Al^{+++}								N.A.
9	Cu^{++}								N.A.
9	Mn^{++}								N.A.
9	Ni^{++}								N.A.
9	Pb^{++}								N.A.
9	Zn^{++}								N.A.

- (1) T (types of species):
 T = 1, mineral identified in rock samples
 T = 2, mineral's group/family identified in rock samples
 T = 3, additional secondary minerals suggested by geochemical modeling
 T = 4, dominate aqueous species suggested by geochemical modeling
 T = 5, gas/aqueous equilibrium suggested by geochemical modeling
 T = 6, redox equation.
 T = 9, system components.
 T=N*, expert judgement
- (2) Equilibrium constant (K) at different conditions (thermo.com.V8.R6+.dat, GWB®, V9.0):
 a = $\log_{10}(K)$ @T = 0°C & P = 1.0312 bar
 b = $\log_{10}(K)$ @T = 25°C & P = 1.0312 bar
 c = $\log_{10}(K)$ @T = 60°C & P = 1.0312 bar
 d = $\log_{10}(K)$ @T = 100°C & P = 1.0312 bar
 e = $\log_{10}(K)$ @T = 150°C & P = $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{SatVap}}$ bar = 4.7572 bar
 f = $\log_{10}(K)$ @T = 200°C & P = $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{SatVap}}$ bar = 15.5365 bar
 g = $\log_{10}(K)$ @T = 250°C & P = $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{SatVap}}$ bar = 39.7365 bar
 h = $\log_{10}(K)$ @T = 300°C & P = $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{SatVap}}$ bar = 85.83787 bar

註解：

- ◆ 每個參數下方有 3 列資訊列：
 - 第 1 列為建議參數值。
 - 第 2 列為參數值範圍。
 - 第 3 列為參數值資料來源。

表 2-2：地質單元代碼表

Code	Comment		
R#	ID of Rock Unit; classification based on integrated inversion of gravity and magnetic data (TR2002-0154-c5p12; TR2007-0241-c6p12~13; TR2010-0273-c3p11; TR2012-0290-c4p15)		
	<i>S</i> (magnetic susceptibility)	<i>D</i> (density)	Remarks
R1	$S \geq 0.035$	$D \leq 2730 \text{ kg/m}^3$	Granitic gneiss+Migmatite (TaiWuShan rock mass)
R2	$0.020 \leq S < 0.035$	$D \leq 2730 \text{ kg/m}^3$	Granitic gneiss (TaiWuShan rock mass)
R3	$S < 0.020$	$D \leq 2730 \text{ kg/m}^3$	Granitic gneiss+Migmatite (transition zone)
R4	$S \geq 0.035$	$D > 2730 \text{ kg/m}^3$	Granite (DouMen rock mass)
R5	$0.020 \leq S < 0.035$	$D > 2730 \text{ kg/m}^3$	Tonalitic gneiss+Migmatite (ChengGong rock mass)
R6	$S < 0.020$	$D > 2730 \text{ kg/m}^3$	Granitic gneiss+Migmatite (transition zone)
D#	ID of intrusive doleritic dyke; attitude: N30E80N; frequency: 100 m width per 1000 m spacing. (TR2003-0190-c4p43&p50; TR2007-0242-c4p5&p8).		
D1 to D10	There are 10 idealized dykes in C-C' profile		
F#	ID of Potential MWCF (Major Water-Conducting Feature)		
F1	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F1 \cong E3 in SNFD-ITRI-TR2005-0219-c4p62&p63 ◆ TaiWuShan fault; attitude: N64E/70N; width > 150 m (TR2005-0219-c4p26; TR2007-0235-c5p5; TR2007-0242-c4p6; TR2007-0247-c4p22) ◆ The width of F1 was assumed equal to 200 m for simplicity 		
F2	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F2 \cong W2 in TR2005-0219-c4p62&p64 ◆ Fracture zone; attitude: N80W/50S; width ~ 8 to 15 m (TR2007-0247-c4p22) ◆ The width of F2 was assumed equal to 20 m for simplicity 		
F3	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F3 = E2 in TR2005-0219-c4p62&p63; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F4	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F4 = E4 in TR2005-0219-c4p62&p64; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F5	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F5 = W3 in TR2005-0219-c4p62&p64; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F6	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F6 = E1 in TR2005-0219-c4p62&p63; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F7	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F7 = E5 in TR2005-0219-c4p62&p64; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F8	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F8 = W4 in TR2005-0219-c4p62&p64; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F9	<ul style="list-style-type: none"> ◆ F9 = W1 in TR2005-0219-c4p62&p64; ◆ a potential MWCF interpreted only by resistivity survey 		
F10	F10; a possible MWCF interpreted only by resistivity survey (TR2007-0242-c4p47)		

F11	F11; a possible MWCF interpreted only by resistivity survey
-----	---

◆ TR = SNFD-ITRI-TR

表 2-3：地電阻探測剖面代碼表

Profile ID	Profile Direction	Coordinate		Length (m)	Spacing (m)	InvDepth (m)	Report ID	Comment
		Start_N (UTM_50N)	Start_E (UTM_50N)					
RIP-1	N53E	2707595.717	644564.820	1000	10	300	TR2003-0196-c3p1&c6p7&a1p1	Note1
RIP-2	N28E	2710064.671	644810.823	3000	10	500	TR2003-0196-c3p1&c6p8&a1p3	Note1
RIP-3	N63E	2705349.096	639094.366	2000	10	500	TR2003-0196-c3p1&c6p8&a1p8	Note1
RIP-4	N160E	2707895.455	644608.757	1600	10	500	TR2005-2192-c6p1&p12&a1p11	Note1
RIP-5	N144E	2706387.510	645252.513	2000	10	500	TR2005-2192-c6p2&p13&a1p14	Note1
RIP-6	N154E	2707795.701	641483.843	1700	10	500	TR2005-2192-c6p4&p14&a1p17	Note1
RIP-7	N130E	2705104.995	644405.418	1900	10	500	TR2005-2192-c6p5&p15&a1p20	Note1
RIP-8	N139E	2705304.662	639247.975	1600	10	500	TR2005-2192-c6p6&p16&a1p23	Note1
RIP-9	N148E	2707923.753	642175.053	1265	10		TR2006-0252-c4p17&p19; KM3D_2014_DefineLine_LineID=9; TR2012-0290-ac2p32	

Profile ID	Profile Direction	Coordinate		Length (m)	Spacing (m)	InvDepth (m)	Report ID	Comment
		Start_N (TWD97)	Start_E (TWD97)					
RIP-1	N53E	2707788.981	192144.708	1000	10	300	TR2003-0196-c3p1&c6p7&a1p1	Note1
RIP-2	N28E	2710255.543	192424.990	3000	10	500	TR2003-0196-c3p1&c6p8&a1p3	Note1
RIP-3	N63E	2705617.169	186640.908	2000	10	500	TR2003-0196-c3p1&c6p8&a1p8	Note1
RIP-4	N160E	2708088.234	192192.812	1600	10	500	TR2005-2192-c6p1&p12&a1p11	Note1
RIP-5	N144E	2706570.759	192815.957	2000	10	500	TR2005-2192-c6p2&p13&a1p14	Note1
RIP-6	N154E	2708031.699	189065.235	1700	10	500	TR2005-2192-c6p4&p14&a1p17	Note1
RIP-7	N130E	2705299.444	191950.760	1900	10	500	TR2005-2192-c6p5&p15&a1p20	Note1
RIP-8	N139E	2705570.590	186793.965	1600	10	500	TR2005-2192-c6p6&p16&a1p23	Note1
RIP-9	N148E	2708150.235	189758.501	1265	10		TR2006-0252-c4p17&p19; KM3D_2014_DefineLine_LineID=9; TR2012-0290-ac2p32	

- ◆ RIP: Resistivity Image Profile
- ◆ Coordinate: the coordinate of the starting point of the resistivity profile.
- ◆ UTM_50N: a projected coordinate system (Universal Transverse Mercator); zone 50N with Hay Ford datum and central meridian as 117°E.
- ◆ TWD97: a projected coordinate system; Taiwan Datum 1997 with central meridian as 119°E.
- ◆ Length: the length of the resistivity survey line.
- ◆ Spacing: the electrode spacing along the resistivity survey line.
- ◆ InvDepth: the desired depth of investigation.
- ◆ ReportID: the ID and page number of the cited report.
- ◆ Note1: Instrument: OYO Profiler4®; 2D Inversion: RES2DINV® (TR2003-0196-c3p2; TR2005-2192-c3p2).
- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR

表 2-4：地質探勘孔代碼表

BoreholeID	Coordiante (m)			Inclination		CL (m)	DL (m)	DID (mm)	COD (mm)	ReportID	Comments
	Northing (TWD97)	Easting (TWD97)	Height (Ellipsoid)	Theta	Phi						
KMBH01	2708023.347	192591.822	33.294	90	0	15.00	501.60	100	~62	TR2002-0154-c6p1&aA&aB	◆ Hit F1 structure ◆ Transition zone (R1 to R2)
KMBH02	2708029.923	192584.167	33.556	90	0	15.00	501.20	100	~62	TR2003-0191-c6p1&aA&aB TR2007-0235-c6p1&aA&aB	◆ Hit F1 structure ◆ Transition zone (R1 to R2)
KMBH03	2706786.595	189276.412	22.546	70	150	56.67	504.00	100	~62	TR2003-0191-c6p1&aA&aB	◆ Transition zone (R2, R4 & R5)
KMBH04	2708033.314	192593.645	33.713	90	0	18.00	560.20	100	~62	TR2004-2201-c3p1	◆ Hit F1 structure ◆ Transition zone (R1 to R2)
KMBH05	2707700.408	190679.209	22.173	90	0	42.00	504.00	100	~62	TR2007-0235-c6p1&aA&aB	◆ DouMen rock mass (R4)
KMBH06	2705241.363	193526.423	32.722	90	0	60.00	504.00	100	~62	TR2007-0235-c3p2&aA&aB	◆ TaiWuShan rock mass (R2)

- ◆ Coordinate: the coordinate of the top center point of borehole's casing.
- ◆ TWD97: a projected coordinate system; Taiwan Datum 1997 with central meridian as 119°E
- ◆ Theta: degree between the borehole and the horizon plane.
- ◆ Phi: degree from the North to the projection of the borehole on the horizon plane
- ◆ CL: the casing length in HW size (ID ca. 101 mm; OD ca. 115 mm).
- ◆ DL: the drilling length from the top of casing to the bottom of borehole.
- ◆ DID: the inner diameter of borehole, ca. 100 mm.
- ◆ COD: the outer diameter of core; the diameter could be expanded due to pressure release at surface.
- ◆ ReportID: the ID and page number of the cited report.
- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR

表 2-5：KMBH01 研究工作彙整表

Length (m)	CoreLog	CorePhoto	GPLog	TVL	CrossERT	FlowLog	ChemLog	HydraulicT	TracerT	WSample	MineralDC	RockM	RockT	Stress							
0 to 10	TR2002-0154-aA	TR2002-0154-aB	TR2003-0195-c6p11	TR2003-0195-aA	TR2005-0220-c3p53	TR2003-0193-c3p6	TR2003-0198-c2p8; TR2012-0290-ac4p6														
10 to 20																					
20 to 30																					
30 to 40															TR2007-0243-c4p11						
40 to 50															TR2007-0243-c4p11	TR2003-0198-c2p30&p34; TR2012-0290-ac4p44&p49					
50 to 60															TR2007-0243-c4p12; TR2003-0193-c5p16						
60 to 70																					
70 to 80																					
80 to 90																					
90 to 100																					
100 to 110																					
110 to 120																					
120 to 130																					
130 to 140																					
140 to 150																					
150 to 160																					
160 to 170																					
170 to 180																					TR2003-0199-c3p17
180 to 190																					
190 to 200															TR2007-0243-c4p13; TR2003-0193-c5p16	TR2007-0243-c4p68; TR2009-0267-c4p1&p4&p6	TR2003-0198-c2p23&p34; TR2012-0290-ac4p44&p49				
200 to 210																					
210 to 220																					
220 to 230																					
230 to 240																					
240 to 250														TR2003-0199-c3p17							
250 to 260								TR2003-0193-c5p16			TR2003-0199-c2p12&p13&p14										
260 to 270																					
270 to 280																					
280 to 290								TR2007-0243-c4p13; TR2003-0193-c5p16													
290 to 300											TR2003-0199-c2p12&p13&p14			TR2005-0219-c4p112							
300 to 310														TR2003-0199-c3p17; TR2005-0219-c4p112							
310 to 320																					
320 to 330									TR2005-0220-c3p76												
330 to 340									TR2007-0243-c4p69;												

340 to 350							TR2009-0267- c4p1&p5&p6				
350 to 360							TR2007-0243- c4p14; TR2003-0193-c5p16	TR2003-0198- c2p25&p34; TR2012-0290- ac4p44&p49			
360 to 370											
370 to 380											
380 to 390											
390 to 400											
400 to 410											
410 to 420											
420 to 430											
430 to 440											
440 to 450											TR2003-0199-c3p17
450 to 460							TR2007-0243-c4p14				
460 to 470							TR2007-0243-c4p15				
470 to 480							TR2007-0243-c4p15				
480 to 490							TR2007-0243- c4p16; TR2003-0193-c5p16	TR2003-0198- c2p28&p34; TR2012-0290- ac4p44&p49		TR2003-0199-c2p13&p14	
490 to 500							TR2007-0243-c4p16				

- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR
- ◆ DB = SNFD-ITRI-DB
- ◆ Length: the length from the top of borehole's casing to the target zone.
- ◆ CoreLog: core logging, including CR(Core Recovery, %), RQD (Rock-Quality Designation, %), FI (# of Fracture per meter), RD (Rock Description)
- ◆ CorePhoto: photo of cores, 1 meter per segment, 4 segment per box
- ◆ GLog: (open-hole) single-hole geophysical logging including GR (gamma ray log), caliper log, temperature log, SP (spontaneous potential log), R16 (16" short normal electrical log), R64 (64" long normal electrical log), SPR (single point resistance log), LL (lateral log), FL (fluid log), full-waveform sonic log, neutron log, dipmeter log, spectral gamma ray log.
- ◆ TVL: (open-hole) televiewer logging including OPTV (optical televiewer log) and ATV (acoustic televiewer).
- ◆ CrossERT: (open-hole) cross-hole electrical resistivity tomography
- ◆ FlowLog: (open-hole) flowmeter logging (heat pulse)
- ◆ ChemLog: (open-hole) borehole hydrogeochemical logging before and after perturbation of borehole's water head, including temperature (°C), pH, redox potential (mV), electrical conductivity (mS/cm).
- ◆ HydraulicT: packed-off hydraulic test
- ◆ TracerT: tracer test
- ◆ WSample: packed-off groundwater sampling
- ◆ MineralDC: mineral dating a/o composition analysis
- ◆ RockM: lab measurements of rock mechanical properties
- ◆ RockT: lab measure of rock thermal properties
- ◆ Stress: in-situ stress measurement (hydraulic fracturing)

表 2-6：KMBH02 研究工作彙整表

Length (m)	CoreLog	CorePhoto	GPLog	TVL	CrossERT	FlowLog	ChemLog	HydraulicTest	TracerT	WSample	MineralDC	RockM	RockT	Stress						
0 to 10	TR2003-0191-aA	TR2003-0191-ac	TR2003-0195-c6P17	TR2003-0195-aA; DB2003-0195	TR2005-0220-c3p54	TR2003-0193-c3p7	none													
10 to 20																TR2003-0199-c2p12&p13&p14				
20 to 30														TR2007-0243-c4p17						
30 to 40														TR2003-0193-c5p17						
40 to 50														TR2007-0243-c4p18; TR2003-0193-c5p17				TR2003-0199-c2p12&p13&p14		
50 to 60														TR2003-0193-c5p17						
60 to 70														TR2007-0243-c4p18 TR2003-0193-c5p17				TR2003-0199-c2p12&p13&p14		
70 to 80																				
80 to 90																		TR2003-0199-c2p12&p13&p14		
90 to 100																				
100 to 110								TR2009-0267-c5p12			TR2003-0199-c2p12&p13&p14									
110 to 120																				
120 to 130																				
130 to 140																				
140 to 150																				
150 to 160								TR2007-0243-c4p19				TR2003-0199-c2p12&p13&p14								
160 to 170																				
170 to 180																				
180 to 190																				
190 to 200												TR2003-0199-c2p12&p13&p14								
200 to 210	TR2007-0235-aA	TR2007-0235-aB																		
210 to 220																				
220 to 230																				
230 to 240																				
240 to 250									TR2007-0243-c4p19											
250 to 260																				
260 to 270																				
270 to 280																				
280 to 290																				

290 to 300																							
300 to 310																							
310 to 320																							
320 to 330																							
330 to 340																							
340 to 350									TR2009-0267- c5p12														
350 to 360																							
360 to 370																							
370 to 380																							
380 to 390																							
390 to 400																							
400 to 410																							
410 to 420																							
420 to 430																							
430 to 440																							
440 to 450																							
450 to 460																							
460 to 470																							
470 to 480																							
480 to 490																							
490 to 500																							

- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR
- ◆ DB = SNFD-ITRI-DB
- ◆ Length: the length from the top of borehole's casing to the target zone.
- ◆ CoreLog: core logging, including CR(Core Recovery, %), RQD (Rock-Quality Designation, %), FI (# of Fracture per meter), RD (Rock Description)
- ◆ CorePhoto: photo of cores, 1 meter per segment, 4 segment per box
- ◆ GPLog: (open-hole) single-hole geophysical logging including GR (gamma ray log), caliper log, temperature log, SP (spontaneous potential log), R16 (16" short normal electrical log), R64 (64" long normal electrical log), SPR (single point resistance log), LL (lateral log), FL (fluid log), full-waveform sonic log, neutron log, dipmeter log, spectral gamma ray log.
- ◆ TVL: (open-hole) televiwer logging including OPTV (optical televiwer log) and ATV (acoustic televiwer).
- ◆ CrossERT: (open-hole) cross-hole electrical resistivity tomography
- ◆ FlowLog: (open-hole) flowmeter logging (heat pulse)
- ◆ ChemLog: (open-hole) borehole hydrogeochemical logging before and after perturbation of borehole's water head, including temperature (°C), pH, redox potential (mV), electrical conductivity (mS/cm).
- ◆ HydraulicT: packed-off hydraulic test
- ◆ TracerT: tracer test
- ◆ WSample: packed-off groundwater sampling
- ◆ MineralDC: mineral dating a/o composition analysis
- ◆ RockM: lab measurements of rock mechanical properties
- ◆ RockT: lab measure of rock thermal properties
- ◆ Stress: in-situ stress measurement (hydraulic fracturing)

表 2-7：KMBH03 研究工作彙整表

Length (m)	CoreLog	CorePhoto	GPLog	TVL	CrossERT	FlowLog	ChemLog	HydraulicTest	TracerT	WSample	MineralDC	RockM	RockT	Stress							
0 to 10	TR2003-0191-aB	TR2003-0191-AD	TR2007-0236c4p16	DB2007-0236	none	TR2007-0238-c3p5	TR2007-2037-c4p7&p11; TR2012-0290-ac4p7														
10 to 20																					
20 to 30																					
30 to 40																					
40 to 50																					
50 to 60																					
60 to 70																			TR2005-0219-c4p91&p93&p96&p98		
70 to 80																					
80 to 90																					
90 to 100																	TR2007-0237-c4p12&p16&p33; TR2012-0290-ac4p44&p49				
100 to 110															TR2007-0238-c4p27						
110 to 120																			TR2005-0219-c4p91&p93&p95&p96&p98		
120 to 130																					
130 to 140															TR2007-0238-c4p27						
140 to 150																					
150 to 160																					
160 to 170																			TR2005-0219-c4p91&p93&p96&p98		
170 to 180																					
180 to 190															TR2007-0238-c4p27						
190 to 200															TR2007-0238-c4p27						
200 to 210																					
210 to 220																					
220 to 230															TR2007-0238-c4p27				TR2005-0219-c4p91&p93&p95&p96&p98		
230 to 240																					
240 to 250																					
250 to 260																					

260 to 270									TR2005-0219- c4p91&p93&p95 &p96&p98		
270 to 280											
280 to 290											
290 to 300									TR2005-0219- c4p92&p93&p96 &p98		
300 to 310											
310 to 320											
320 to 330								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
330 to 340								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
340 to 350											
350 to 360								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
360 to 370									TR2005-0219- c4p91&p93&p95 &p96&p98		
370 to 380								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
380 to 390							TR2007-0237- c4p12&p16&p33; TR2012-0290-ac4p44&p49	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31	TR2005-0219- c4p91&p92&p93 &p96&p98		
390 to 400								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
400 to 410											
410 to 420											
420 to 430											
430 to 440								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
440 to 450											
450 to 460								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31	TR2005-0219- c4p91&p93&p95 &p96&p98		
460 to 470											
470 to 480								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p30&p31			
480 to 490											
490 to 500											

- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR
- ◆ DB = SNFD-ITRI-DB
- ◆ Length: the length from the top of borehole's casing to the target zone.
- ◆ CoreLog: core logging, including CR(Core Recovery, %), RQD (Rock-Quality Designation, %), FI (# of Fracture per meter), RD (Rock Description)

- ◆ CorePhoto: photo of cores, 1 meter per segment, 4 segment per box
- ◆ GPLog: (open-hole) single-hole geophysical logging including GR (gamma ray log), caliper log, temperature log, SP (spontaneous potential log), R16 (16" short normal electrical log), R64 (64" long normal electrical log), SPR (single point resistance log), LL (lateral log), FL (fluid log), full-waveform sonic log, neutron log, dipmeter log, spectral gamma ray log.
- ◆ TVL: (open-hole) televiewer logging including OPTV (optical televiewer log) and ATV (acoustic televiewer).
- ◆ CrossERT: (open-hole) cross-hole electrical resistivity tomography
- ◆ FlowLog: (open-hole) flowmeter logging (heat pulse)
- ◆ ChemLog: (open-hole) borehole hydrogeochemical logging before and after perturbation of borehole's water head, including temperature (°C), pH, redox potential (mV), electrical conductivity (mS/cm).
- ◆ HydraulicT: packed-off hydraulic test
- ◆ TracerT: tracer test
- ◆ WSample: packed-off groundwater sampling
- ◆ MineralDC: mineral dating a/o composition analysis
- ◆ RockM: lab measurements of rock mechanical properties
- ◆ RockT: lab measure of rock thermal properties
- ◆ Stress: in-situ stress measurement (hydraulic fracturing)

表 2-8：KMBH04 研究工作彙整表

Length (m)	CoreLog	CorePhoto	GPLogg	TVL	CrossERT	Flowlog	Chmelog	HydraulicTest	TracerT	WSample	MineralDC	RockM	RockT	Stress						
0 to 10	TR2004-2201-aA	TR2004-2201-aB	TR2004-2203-p9	DB2004-2203	TR2005-0220-c3p55	TR2005-0220-c2p23	TR2005-2202-c2p5; TR2012-0290-a4p8													
10 to 20																				
20 to 30														TR2007-0243-c4p20				TR2005-0219-c4p91&p94&p95 &p97&p98		
30 to 40														TR2007-0243-c4p20						
40 to 50																				
50 to 60															TR2007-0243-c4p21	TR2005-2202-c2p12&p20; TR2012-0290-ac4p44&p49				
60 to 70															TR2007-0243-c4p21; TR2005-0220-c2p24					
70 to 80																				
80 to 90																		TR2005-0219-c4p91&p94&p95 &p97&p98		
90 to 100																				
100 to 110															TR2007-0243-c4p22					
110 to 120																				
120 to 130																		TR2005-0219-c4p91&p94&p97 &p98		
130 to 140																				
140 to 150																				
150 to 160																				
160 to 170																				
170 to 180																				
180 to 190															TR2007-0243-c4p22; TR2005-0220-c2p24	TR2007-0243-c4p68; TR2009-0267-c4p1&p4&p6			TR2005-0219-c4p92&p94&p97 &p98	
190 to 200																				
200 to 210								TR2007-0243-c4p23												
210 to 220								TR2005-0220-c2p24												
220 to 230												TR2005-0219-c4p91&p94&p95 &p97&p98								
230 to 240																				
240 to 250																				

250 to 260							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
260 to 270					TR2007-0243- c4p23; TR2005-0220-c2p24	TR2005-2202- c2p14&p20; TR2012-0290- ac4p44&p49	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33	TR2005-0219- c4p91&p94&p97 &p98		
270 to 280							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
280 to 290							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
290 to 300					TR2007-0243- c4p24; TR2005-0220-c2p24	TR2005-0220-c3p76	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
300 to 310										
310 to 320								TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33		
320 to 330								TR2005-0219- c4p92&p94&p97 &p98		
330 to 340					TR2007-0243-c4p24	TR2007-0243-c4p69; TR2009-0267- c4p1&p5&p6				
340 to 350					TR2007-0243- c4p25; TR2005-0220-c2p24		TR2005-2202- c2p15&p20; TR2012-0290- ac4p44&p49	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33		
350 to 360										
360 to 370							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33	TR2005-0219- c4p91&p94&p95 &p97&p98		
370 to 380							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
380 to 390					TR2007-0243- c4p26; TR2005-0220-c2p24		TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
390 to 400										
400 to 410							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
410 to 420					TR2007-0243- c4p26; TR2005-0220-c2p24			TR2005-0219- c4p91&p94&p95 &p97&p98		
420 to 430										
430 to 440										
440 to 450					TR2007-0243-c4p27					
450 to 460							TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
460 to 470						TR2009-0267-c5p12	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33	TR2005-0219- c4p91&p94&p95 &p97&p98	TR2010-0275- C2p3&p7	
470 to 480					TR2007-0243-c4p27					

480 to 490							TR2007-0243-c4p28						
490 to 500							TR2007-0243-c4p29; TR2005-0220-c2p24		TR2005-2202-c2p17&p20; TR2012-0290-ac4p44&p49	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
500 to 510										TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
510 to 520										TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p31&p32&p33			
520 to 530													
530 to 540													
540 to 550													
550 to 560													

- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR
- ◆ DB = SNFD-ITRI-DB
- ◆ Length: the length from the top of borehole's casing to the target zone.
- ◆ CoreLog: core logging, including CR(Core Recovery, %), RQD (Rock-Quality Designation, %), FI (# of Fracture per meter), RD (Rock Description)
- ◆ CorePhoto: photo of cores, 1 meter per segment, 4 segment per box
- ◆ GPLog: (open-hole) single-hole geophysical logging including GR (gamma ray log), caliper log, temperature log, SP (spontaneous potential log), R16 (16" short normal electrical log), R64 (64" long normal electrical log), SPR (single point resistance log), LL (lateral log), FL (fluid log), full-waveform sonic log, neutron log, dipmeter log, spectral gamma ray log.
- ◆ TVL: (open-hole) televiwer logging including OPTV (optical televiwer log) and ATV (acoustic televiwer).
- ◆ CrossERT: (open-hole) cross-hole electrical resistivity tomography
- ◆ FlowLog: (open-hole) flowmeter logging (heat pulse)
- ◆ ChemLog: (open-hole) borehole hydrogeochemical logging before and after perturbation of borehole's water head, including temperature (°C), pH, redox potential (mV), electrical conductivity (mS/cm).
- ◆ HydraulicT: packed-off hydraulic test
- ◆ TracerT: tracer test
- ◆ WSample: packed-off groundwater sampling
- ◆ MineralDC: mineral dating a/o composition analysis
- ◆ RockM: lab measurements of rock mechanical properties
- ◆ RockT: lab measure of rock thermal properties
- ◆ Stress: in-situ stress measurement (hydraulic fracturing)

表 2-9：KMBH05 研究工作彙整表

Length (m)	CoreLog	CorePhoto	GPlog	TVL	CrossERT	FlowLog	ChemLog	HydraulicTest	TracerT	WSample	MineralDC	RockM	RockT	Stress							
0 to 10	TR2007-0235-aA	TR2007-0235-aB	TR2007-0236C5P17	DB2007-0236	none	TR2007-0238-c3p7	TR2007-0237-c4p22&p25; TR2012-0290-ac4p9														
10 to 20																					
20 to 30																					
30 to 40																					
40 to 50																					
50 to 60																					
60 to 70																					
70 to 80																					
80 to 90																					
90 to 100															TR2007-0238-c4p27		TR2007-0237-c4p27&p30&p33; TR2012-0290-ac4p44&p49				
100 to 110															TR2007-0238-c4p27						
110 to 120																					
120 to 130																					
130 to 140																					
140 to 150																					
150 to 160																					
160 to 170																					
170 to 180																					
180 to 190																					
190 to 200																					
200 to 210																					
210 to 220																					
220 to 230																					
230 to 240															TR2007-0238-c4p27						
240 to 250																					
250 to 260															TR2007-0238-c4p27		TR2007-0237-c4p27&p30&p33; TR2012-0290-ac4p44&p49				
260 to 270																					
270 to 280																					
280 to 290																					
290 to 300															TR2007-0238-c4p27						

300 to 310																				
310 to 320																				
320 to 330																				
330 to 340																				
340 to 350																				
350 to 360																				
360 to 370																				
370 to 380																				
380 to 390																				
390 to 400																				
400 to 410																				
410 to 420																				
420 to 430																				
430 to 440																				
440 to 450																				
450 to 460																				
460 to 470																				
470 to 480																				
480 to 490																				
490 to 500																				

- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR
- ◆ DB = SNFD-ITRI-DB
- ◆ Length: the length from the top of borehole’s casing to the target zone.
- ◆ CoreLog: core logging, including CR(Core Recovery, %), RQD (Rock-Quality Designation, %), FI (# of Fracture per meter), RD (Rock Description)
- ◆ CorePhoto: photo of cores, 1 meter per segment, 4 segment per box
- ◆ GPLog: (open-hole) single-hole geophysical logging including GR (gamma ray log), caliper log, temperature log, SP (spontaneous potential log), R16 (16” short normal electrical log), R64 (64” long normal electrical log), SPR (single point resistance log), LL (lateral log), FL (fluid log), full-waveform sonic log, neutron log, dipmeter log, spectral gamma ray log.
- ◆ TVL: (open-hole) televiewer logging including OPTV (optical televiewer log) and ATV (acoustic televiewer).
- ◆ CrossERT: (open-hole) cross-hole electrical resistivity tomography
- ◆ FlowLog: (open-hole) flowmeter logging (heat pulse)
- ◆ ChemLog: (open-hole) borehole hydrogeochemical logging before and after perturbation of borehole’s water head, including temperature (°C), pH, redox potential (mV), electrical conductivity (mS/cm).
- ◆ HydraulicT: packed-off hydraulic test
- ◆ TracerT: tracer test
- ◆ WSample: packed-off groundwater sampling
- ◆ MineralDC: mineral dating a/o composition analysis
- ◆ RockM: lab measurements of rock mechanical properties
- ◆ RockT: lab measure of rock thermal properties
- ◆ Stress: in-situ stress measurement (hydraulic fracturing)

表 2-10：KMBH06 研究工作彙整表

Length (m)	CoreLog	CorePhoto	GPLog	TVL	CrossERT	FlowLog	ChemLog	HydraulicTest	TracerT	WSample	MineralDC	RockM	RockT	Stress							
0 to 10	TR2007-0235-aA	TR2007-0235-aB	TR2008-0264-c4p16	DB2008-0264-	none	TR2009-0266-c3p4	TR2009-0265-c4p5&p10; TR2012-0290-ac4p10														
10 to 20																					
20 to 30																					
30 to 40																					
40 to 50																					
50 to 60															TR2009-0266-c3p13						
60 to 70																					
70 to 80															TR2009-0266-c3p13						
80 to 90																					
90 to 100																					
100 to 110															TR2009-0266-c3p13						
110 to 120																					
120 to 130															TR2009-0266-c3p13		TR2009-0265-c4p11&p16&p20; TR2012-0290-ac4p44&p49	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
130 to 140															TR2009-0266-c3p13						
140 to 150																					
150 to 160																					
160 to 170															TR2009-0266-c3p13						
170 to 180															TR2009-0266-c3p13						
180 to 190																					
190 to 200																					
200 to 210																					
210 to 220																					
220 to 230																		TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
230 to 240																					
240 to 250																					
250 to 260															TR2009-0266-c3p13						
260 to 270															TR2009-0266-c3p13			TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
270 to 280															TR2009-0266-c3p13		TR2009-0265-c4p11&p16&p20;	TR2012-0288			

								TR2012-0290-ac4p44&p49	C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
280 to 290												
290 to 300												
300 to 310									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
310 to 320												
320 to 330												
330 to 340												
340 to 350							TR2009-0266-c3p13		TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
350 to 360									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
360 to 370									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
370 to 380												
380 to 390												
390 to 400									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
400 to 410												
410 to 420									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
420 to 430												
430 to 440							TR2009-0266-c3p13					
440 to 450												
450 to 460												
460 to 470									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
470 to 480							TR2009-0266-c3p13		TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
480 to 490									TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35 &p36			
490 to 500							TR2009-0266-c3p13	TR2009-0265-c4p13&p16&p20; TR2012-0290-ac4p44&p49	TR2012-0288 C4p17&p18&p19 &p33&p34&p35			

- ◆ TR = SNFD-ITRI-TR
- ◆ DB = SNFD-ITRI-DB
- ◆ Length: the length from the top of borehole's casing to the target zone.
- ◆ CoreLog: core logging, including CR(Core Recovery, %), RQD (Rock-Quality Designation, %), FI (# of Fracture per meter), RD (Rock Description)
- ◆ CorePhoto: photo of cores, 1 meter per segment, 4 segment per box
- ◆ GPLog: (open-hole) single-hole geophysical logging including GR (gamma ray log), caliper log, temperature log, SP (spontaneous potential log), R16 (16" short normal electrical log), R64 (64" long normal electrical log), SPR (single point resistance log), LL (lateral log), FL (fluid log), full-waveform sonic log, neutron log, dipmeter log, spectral gamma ray log.
- ◆ TVL: (open-hole) televiewer logging including OPTV (optical televiewer log) and ATV (acoustic televiewer).
- ◆ CrossERT: (open-hole) cross-hole electrical resistivity tomography
- ◆ FlowLog: (open-hole) flowmeter logging (heat pulse)
- ◆ ChemLog: (open-hole) borehole hydrogeochemical logging before and after perturbation of borehole's water head, including temperature (°C), pH, redox potential (mV), electrical conductivity (mS/cm).
- ◆ HydraulicT: packed-off hydraulic test
- ◆ TracerT: tracer test
- ◆ WSample: packed-off groundwater sampling
- ◆ MineralDC: mineral dating a/o composition analysis
- ◆ RockM: lab measurements of rock mechanical properties
- ◆ RockT: lab measure of rock thermal properties
- ◆ Stress: in-situ stress measurement (hydraulic fracturing)

3. 台灣參考案例表二內容之科學依據

3.1. 研究區及現有資料

3.1.1. 研究區：K區

K區係指金門縣金門島東部(圖 3-1)。金門島位於台灣海峽西側，其位置如圖 3-2 所示，距離台灣約 210 公里，靠近福建東南的廈門灣，距離廈門約 7 公里；金門地區有大小 12 個島嶼，共約 150 平方公里。

金門島東西長 20 公里，南北最長處位於東部約 15 公里。金門島東部出露有大面積的花崗岩體，故而選做研究測試區域，簡稱 K 區，以發展深層地質調查技術。根據台灣現有相關法規的規範，考量點包括 K 區的高人口密度，以及提供給製酒業之豐富的地下水資源，K 區已被排除在候選場址的考量範圍。

在沒有候選場址的狀況下，台灣參考日本 H12 報告透過所謂參考案例(Reference Case) (JNC, 2000, c5.5)的作法，建置一個僅供技術發展需求的虛擬案例，採用表格化的清楚條列方式，提供包含相關概念模式、資料、假設及限制條件的說明，供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力；台灣參考案例共包含三個表格及其內容，分別說明：

- (1) 表一：法規要求、處置概念及安全評估情境
- (2) 表二：地質概念模式及特性參數
- (3) 表三：安全評估之數學模式、假設、邊界條件及參數

其中，關於地質概念模式及參數(表二)的相關輔助說明，台灣吸取瑞典 SDM (Site Descriptive Model)的成功發展經驗(SKB, 2008, p13)，並考量台灣尚未有候選場址的現況，加入 SDM 的相關資料彙整結構及考量重點，而建構完成。本報告內容主要在編排表二的相關輔助說明，說明相關概念模式的建構基礎、參數資料的取得方式，及參數數值的特性。

顧名思義，SDM 是針對特定場址所建構的系統化描述說明。至今，瑞典僅針對 Forsmark (Östhammar) 及 Laxemar (Oskarshamn) 兩個候選場址，曾建構其對應的 SDM (SKB, 2008, p13; SKB, 2009, p13)；另外，芬蘭亦曾對其於 2001 年確定的最終處置場址(Olkiluoto)，建構其 SDM (Geier et al., 2012, p8; Posiva, 2009, p8)。

台灣目前尚未決定候選場址，因此在應用 SDM 方法上，有其矛盾性及困難度；然而，SDM 方法經過瑞典及芬蘭實際場址的評估應用，及多年來不斷的精修，SDM 的系統化描述方式，相當值得台灣學習。因此，在台灣參考案例(一個僅供技術發展需求的虛擬案例)表二的建構方面，採用 K 區歷年(1999 年至 2010 年)研究發展所累積的相關地質資訊，以利學習 SDM 方法；理由說明如下：

- (1) SDM 方法必須架構在所有資料均來自於同一特定地區，或可用以探討該特定地區的資料，但台灣目前尚未決定候選場址，也從未對特定地區進行系統化的調查解析工作，但 K 區所累積的研究資料相對較多，學習 SDM 方法不足的資料，其所需的假設相對較少。
- (2) 花崗岩類的潛在母岩是台灣現階段的評估重點(物管局會議紀錄：FCMA-MM2011-0222)，台灣西部之花崗岩離島的地質環境特性類似，金門島屬於其中一個離島，其特性可代表台灣西部的花崗岩離島。
- (3) 金門島因高人口密度及地下水資源保護等考量因素，根據台灣現有法令規範，應已被排除於候選場址考量地區。因此，使用 K 區歷年所累積的研究資料進行 SDM 方法的學習，較不會引發已確定或已內定最終處置場址的疑慮與爭議，且相關的研究成果，如地下水流特性的模擬研究結果，可回饋政府進行 K 區地下水資源保護或開發規劃的重要參考，達到互蒙其利的雙贏結果。

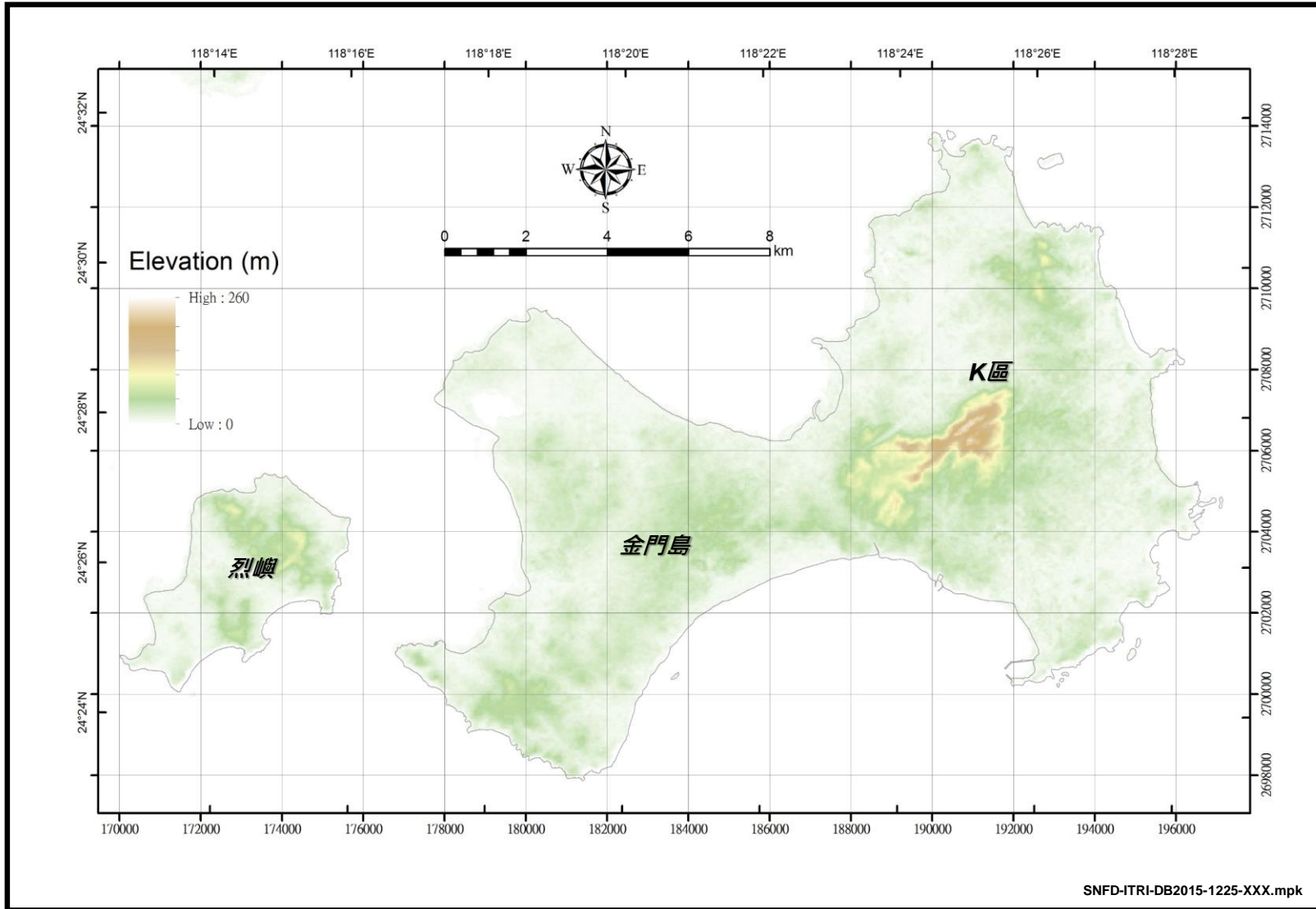


圖 3-1：金門島與烈嶼島地表地形

註解：

- ◆ 金門島東部出露有大面積的花崗岩體，故而選做研究測試區域，簡稱K區，以發展深層地質調查技術。

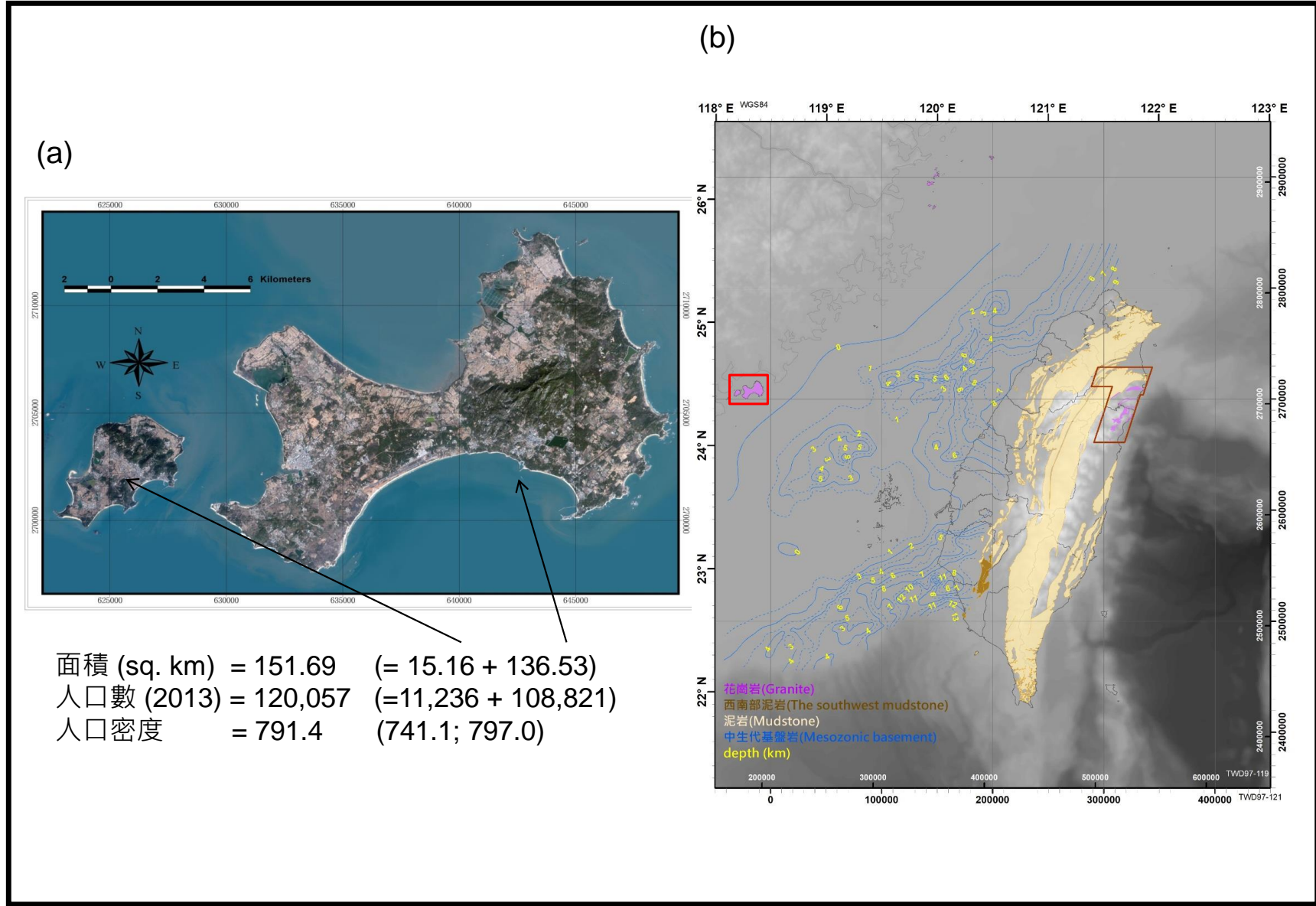


圖 3-2：金門地區位置圖及衛星影像

註解：

(a) 金門地區的衛星影像圖，包含金門島及烈嶼。

➤ K區係指金門島的東部地區。

(b) 臺灣3大潛在處置母岩分布圖，其中金門島(紅色實線區間)位於臺灣海峽西側。

➤ 泥岩(包括泥岩、頁岩、硬頁岩、板岩)出露分布地區以鵝黃色與土黃色標示；僅西南部泥岩(土黃色)曾被考量做為臺灣的潛在母岩。

➤ 中生代基盤岩在地表以下的深度，以黃色文字表示。

➤ 花崗岩分布地區以粉紅色標示。

➤ 黑白漸層顏色代表地形高程，越白代表高程越高，越黑代表高程越低(深度越深)；高程資料範圍為(-10 km 至 +4 km)，資料來源為國家實驗研究院-臺灣海洋科技研究中心。

3.1.2. 現地資料

本章節之主要目的在說明在建置參考案例表二(表 2-1)過程中，所考量的 K 區現地資料及分類。

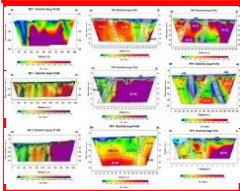
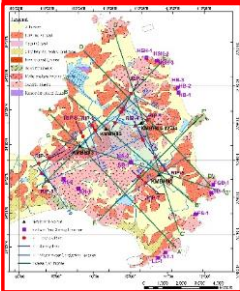
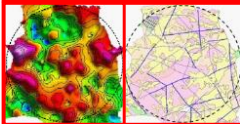
3.1.2.1. 概述及代碼表

K 區地質調查技術研究工作自 1999 年展開(林蔚等, 2012, c1p1), 進行深層地質整合性調查技術之研究發展工作, 主要目標在: 建立地下水主要導水裂隙帶之調查及解析技術流程的精進測試(圖 3-3); 至 2010 年停止所有相關現地研究工作, 監測工作則至 2014 年停止, 並將歷年研究成果於 2013 年 8 月 29 日轉交金門縣政府。

K 區的地表調查以地質調查及地球物理探測為主, 根據探測結果, 自 2002 年起至 2007 年間先後共鑽鑿 6 口地質井孔, 編號 KMBH01、KMBH02、KMBH03、KMBH04、KMBH05 及 KMBH06。其中 KMBH01、KMBH02 及 KMBH04 三井孔間間隔約 10 m, 建構成跨孔試驗平台, 提供深層水文及地球化學特性長期監測與相關技術測試之場所。相關調查資料與解釋之技術報告代碼, 請參見表 2-5 至表 2-10。

地質探勘孔提供進行地球物理井測、地球化學井測、水力試驗及現地大地應力等量測, 以建構 K 區的地質概念模型。岩心則提供做為岩相分析、礦物組成特性分析、岩石力學、熱特性量測、核種遷移等實驗室分析與試驗所需之樣品, 以增進對基盤岩特性的瞭解。KMBH01-02-04 跨孔測試場的各项孔內調查成果, 亦提供作為建立離散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)模型所需的資料。

透過相關技術發展工作的伴隨產出, K 區累計共完成約 500 點地表重/磁力探測、16 km 地電阻剖面、3000 m (6 孔)地質鑽探、及地物/水文/地化/岩力等各式孔內探測測試作業及資料, 並透過整合性的地質、地物、水文、水化學及環境資料解析, 建構出 K 區初步地質概念模式。另外, 期間亦透過 KMBH01-02-04 跨孔測試場, 針對太武山斷層帶(主要導水裂隙, F1)及其分支裂隙帶(次要導水裂隙, F2), 進行整合性調查與解析研究。

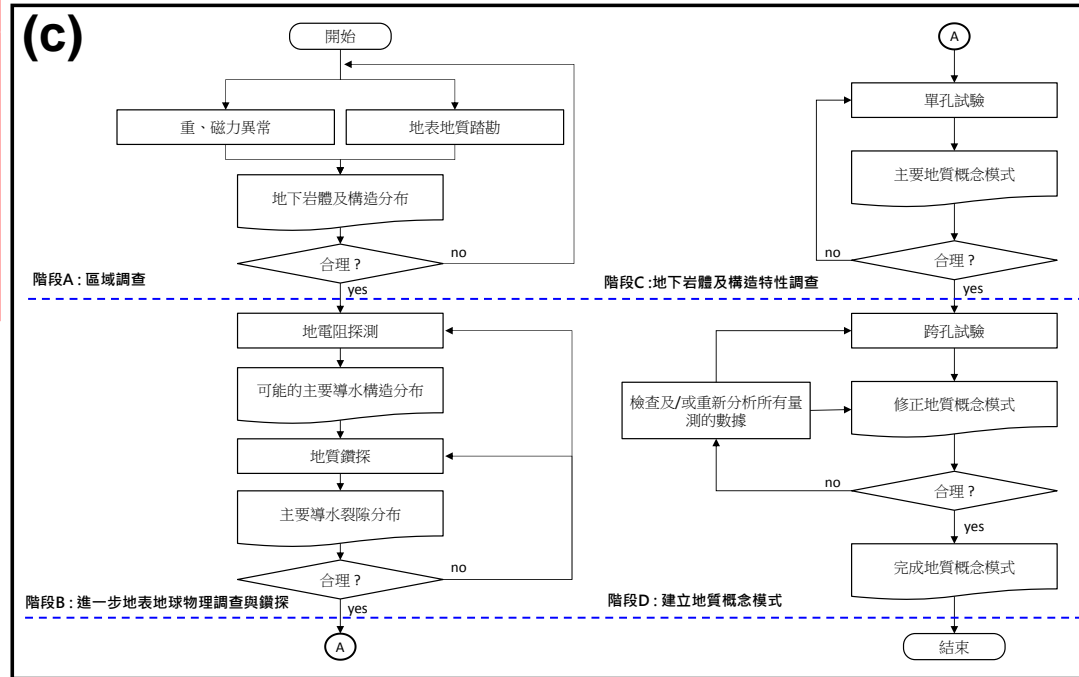


重點：

➤ 地下岩體和主要導水裂隙(MWCF)分布與其特性

產出：

➤ 概念模式與特性參數



野外工作的執行順序與品質皆重要！

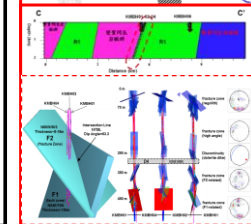
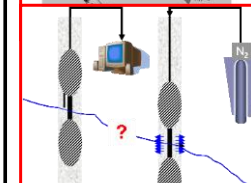
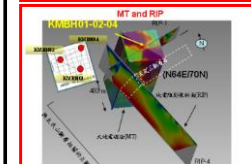
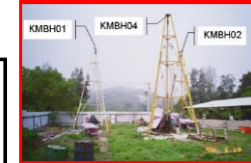
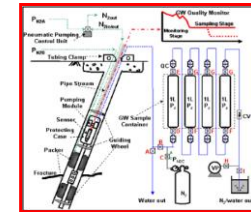


圖 3-3：K 區技術發展目的及主要導水裂隙帶調查解析流程

註解：

- ◆ 左圖由上而下分別為地表裂隙量測、重/磁線型分析、地質圖與構造初步研判、地電阻剖面、地質鑽探調查解析技術範例。
- ◆ 右圖由上而下分別為地下水力試驗及水質取樣、跨孔試驗、地下電阻分布解析、追蹤稀釋試驗、地質概念模式範例。
- ◆ 圖中流程圖為地下岩體及 MWCF 分布調查建議流程圖。
- ◆ 1999 至 2010 年間，計畫執行團隊於 K 區進行一系列的技術發展工作，建立地下水主要導水裂隙的調查技術流程。
- ◆ 以 K 區技術建立的經驗，對結晶岩中的主要導水裂隙進行以下調查流程。

階段 A:區域調查

- 地表地質踏勘(地表地質圖)。
- 重磁力探測(聚焦於異常線形構造)。
- 產出推測 A:依據現階段的調查結果，對地下岩體的構造和分布作合理的推測。

階段 B:進一步地表地球物理調查與鑽探

- 依據推測 A 產出地電阻調查(建立地電阻影像剖面)；探測線應盡可能垂直於階段 A 產出之線形構造，以獲得較好的電阻率測量結果。
- 產出推測 B:依據 RIP 的低電阻區連通性，對主要導水裂隙分佈作合理的推測。
- 鑽孔驗證主要導水裂隙的存在，以及地下岩體和構造的分佈。
- 若驗證結果不合理則回到階段 A。

階段 C:地下岩體及構造特性調查

- 進行鑽孔調查，確定岩石，構造和地下水特性。
- 產出推測 C:基於現階段調查結果所得出的主要地質概念模式。
- 若成果不合理則回到階段 B。
- 階段 D:建立與驗證地質概念模式
- 進行跨孔試驗，以便更了解主要導水裂隙、地下岩體及構造分布。

產出推測 D: 基於現階段調查結果修正地質概念模式。

- 若成果不符合則回到階段 C。

3.1.2.2. 地表調查

(1) 地表地質調查

地表地質調查於 1999 年展開，調查區域涵蓋整個金門島，調查重點包括：基盤岩岩石組成、岩性特徵、產狀、岩層分布、岩體截切關係及構造等，產出 1/25,000 地質圖(圖 3-4)。2002 年至 2003 年間採集 16 組岩石樣本，進行岩石學及地球化學分析。

(2) 海域震測

於 2002 年在金門島東、西及南側近海，使用底層剖面法(sub-bottom profiling method)進行高解析海域震測，共完成 9 條測線，總長度 80 km，探測深度約 20 m，主要目的於瞭解陸上構造與海域構造間的關係及其關聯性(羅聖宗與李伯當，2003，c3p1)。

(3) 重力探測

在 2000 年完成 460 個重力測點，範圍涵蓋金門島全區，平均測點間距約 500 m，主要探測目的在於描繪區域岩體與構造分布。2005 年使用 Oasis montaj®軟體進行再處理，產出布蓋重力網格。相關技術研究資料與解釋之技術報告代碼，請參見表 2-2。

(4) 磁力探測

在 2000 年完成 468 個磁力測點，範圍涵蓋金門島全區，平均測點間距約 500 m，主要探測目的在於描繪區域岩體與構造分布。2005 年使用 Oasis montaj®軟體進行再處理，產出全磁力強度網格(Total Magnetic Intensity grid, TMI grid)。相關技術研究資料與解釋之技術報告代碼，請參見表 2-2。

(5) 地電阻探測

在 2002 年至 2004 年間共完成 9 條地電阻剖面，總長度 14.5 km，主要探測目的在於描繪基盤岩內破碎帶的位置及其上覆沖積層的厚度。電極排列採用雙極排列(pole-pole configuration)，電極間距為 10 m，平均探測深度約 500 m。相關技術研究資料與解釋之技術報告代碼，請參見表 2-3。

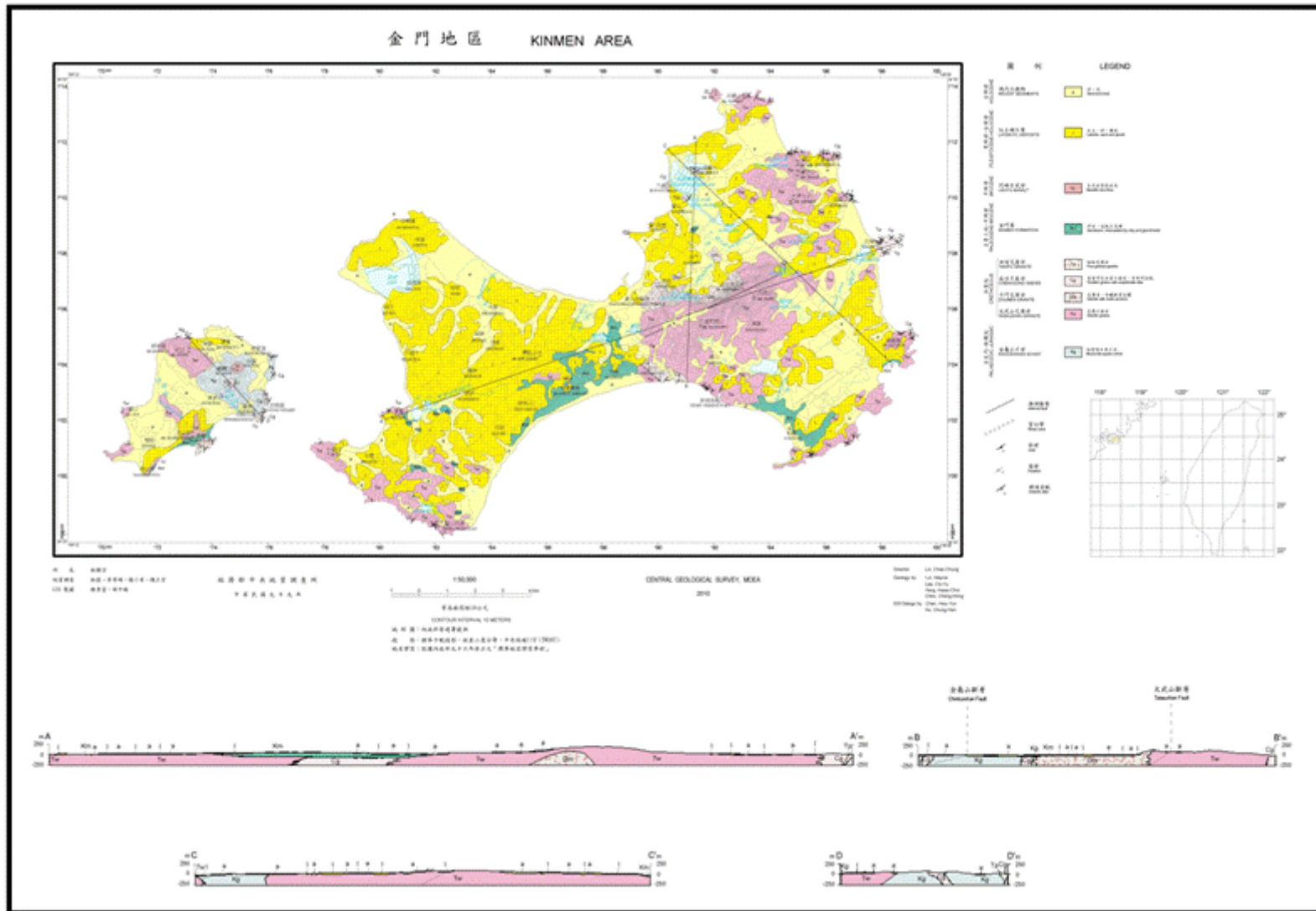


圖 3-4：金門地區地質圖

資料來源：Lin et al. (2011)

Lin et al. (2011) [In Chinese: 林蔚、李寄嶼、楊小青、陳正宏 (2011), 五萬分之一台灣地質圖—金門地區, 經濟部中央地質調查所。]

3.1.2.3. 孔內調查

3.1.2.3.1. 鑽孔分布

於 2002 年至 2007 年間共鑽鑿 6 口地質井孔，編號 KMBH01、KMBH02、KMBH03、KMBH04、KMBH05 及 KMBH06(表 2-4)，裸孔孔徑為 100 mm (HQ size)，全程鑽取岩心。其中 KMBH02 於 2002 年鑽鑿深度 201 m，以便與 KMBH01 進行跨孔試驗，於 2004 年加深至 500 m，建立 KMBH01-02-04 跨孔測試場及探討其地下概念模式。相關技術研究報告及其產出，請參考表 2-5 至表 2-10 的相關欄位。

3.1.2.3.2. 岩心井錄及孔內調查項目

K 區孔內相關技術研究報告及其產出，請參考表 2-5 至表 2-10 的對應欄位。

(1) 岩心井錄

所有鑽孔完成後均由專業地質人員逐段檢視岩心並加以紀錄，紀錄項目包括：岩心回收率(core recovery rate)、岩石品質指標(RQD)、岩性、主要礦物、裂隙密度、構造等。

(2) 地球物理井測

所有鑽孔完成後均進行地球物理井測，主要目的在於量測岩層的物理特性及裂隙分布，量測項目包括：

(a) 標準地球物理井測

伽瑪井測(gamma ray log)、井徑井測(caliper log)、溫度井測(temperature log)、自然電位井測(spontaneous potential log)、短長距電阻井測(short normal electrical log)、正長距電阻井測(long normal electrical log)、單點電阻井測(single point resistance log)、側向電阻井測(lateral electrical log)，及流體電阻井測(fluid electrical log)。

(b) 特殊地球物理井測

全波型超音波井測(full-waveform sonic log)、中子井測(neutron log)、傾角井測(dipmeter log)、伽瑪能譜井測

(spectral gamma ray log)、聲波電視井測(acoustic televiwer), 及光學成像井測(optical televiwer)。

(3) 跨孔地電阻層析成像

於 2004 年在 KMBH01-02-04 跨孔試驗場，進行跨孔地電阻層析成像(cross-hole Electrical Resistivity Tomography, cross-hole ERT)探測，電極間距為 2 m，主要目的在於描繪兩井孔間破碎帶的分布，共完成 3 個剖面，各剖面兩側的井孔編號分別為 KMBH01-KMBH02、KMBH02-KMBH04 及 KMBH04-KMBH01。

(4) 流速井測

所有鑽孔完成後，在通井情況下均進行微流速井測(flowmeter log)，以研判導水裂隙的位置。

(5) 單孔水力試驗

(a) 於 2002 年至 2007 年間使用雙封塞(double packer)針對 6 口鑽井的主要裂隙段進行水力試驗，試驗段長度約 3 m，目的在於推算試驗段的水力傳導係數(hydraulic conductivity)。試驗方法包括：定水量試驗(constant-flow pumping test)、定水頭試驗(constant-head test)、微水試驗(slug test)及脈衝試驗(pressure pulse test)等。

(b) 於 2005 年至 2006 年間在 KMBH01、KMBH02 及 KMBH04 井孔，分別以 3 m, 30 m, 100 m 及 500 m 封塞段長度，進行擴尺度(upscaling)水力試驗，以評估有效的水力傳導係數供模擬使用。

(6) 跨孔水力試驗

於 2005 年至 2006 年間在 KMBH01、KMBH02 及 KMBH04 井孔進行跨孔水力試驗，共完成 3 個剖面，各剖面兩側的井孔編號分別為 KMBH01-KMBH02、KMBH02-KMBH04 及 KMBH04-KMBH01。試驗項目包括水力掃描試驗(hydraulic tomography)及跨孔示蹤試驗(cross-hole tracer test)，主要目的分別為研判裂隙聯通性及計算溶質的水力擴散係數(hydraulic dispersion coefficient)。

(7) 水文地球化學井測

於 2003 年至 2012 年間針對 KMBH01、KMBH03、KMBH04、KMBH05 及 KMBH06 鑽孔，在抽水干擾(pumping interference)前及抽水干擾後，各進行一次水文地球化學井測(Hydrogeochemical Logging)，以研判主要導水裂隙的深度，量測項目包括：溫度、電導度(EC)、酸鹼度(pH)、氧化還原電位(Redox)及溶氧(DO)。

(8) 地下水取樣分析

於 2003 年至 2012 年間在 KMBH01、KMBH03、KMBH04、KMBH05 及 KMBH06 鑽孔，針對特定導水裂隙帶，以雙封塞(double packer)進行地下水取樣。在取樣過程中，透過安裝在封塞段的化學感測器，隨時監測地下水的溫度、酸鹼度、氧化還原電位及溶氧量等敏感性參數的數值，在實驗室分析其化學成份，並以 stiff 水質圖或 piper 水質圖，呈現各裂隙帶地下水的水質特徵。

(9) 現地應力量測

於 2003 年針對 KMBH01 深度 175 m、238 m、306 m 及 430 m 等 4 處完整岩體區段，進行水力破裂(hydraulic fracturing)以推算對應深度處的現地應力。於 2004 年針對 KMBH01 深度 300 公尺處，進行既存裂隙水力法(Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures, HTPF)以推算對應深度處的現地應力。

3.1.2.3.3. 岩心實驗室分析

(1) 礦物組成特性分析

在 2001 年選取 KMBH03、KMBH04 及 KMBH06 等鑽孔不同岩性之完整新鮮岩樣與裂隙帶破碎岩樣，進行岩石薄片岩相分析、全岩礦物與地球化學組成分析。

(2) 定年分析

在 2004 年收集文獻發表的 18 處地表花崗岩露頭定年成果，並採集 5 個地表代表性岩體樣品及 1 個 KMBH01 深度 495.8 m 之花崗片麻岩樣品，採用氬氬定年法(Ar-Ar dating)配合核飛跡定年

法(fission-track dating)，分析花崗岩類常見的角閃石、黑雲母、正長石及磷灰石等礦物的年代。

(3) 岩石力學特性量測

於 2002 年至 2004 年間採取 KMBH01、KMBH02、KMBH03 及 KMBH04 等鑽孔代表性岩心共計 49 個樣品，進行實驗室力學試驗，試驗項目包括：一般物理性質試驗、單軸壓縮試驗、三軸壓縮試驗、間接抗張強度試驗、靜彈性模數試驗、動彈性模數試驗等。

(4) 岩塊水力特性量測

在 2005 年自 K 區取得花崗岩石材，製備完整岩塊進行室內水力試驗，並以人工方式製造單一裂隙岩塊，進行室內示蹤試驗(tracer test)。主要目的在於獲取大尺寸標本的岩體水力傳導係數(hydraulic conductivity)及水力擴散係數(hydraulic dynamic dispersion coefficient)。

(5) 熱特性量測

熱特性量測的目的在於量測花崗岩的熱傳導係數(thermal conductivity)，試驗樣品包括岩心及岩塊二類，岩心樣品取自 KMBH04 深度 410 m 至 460 m 間完整花崗岩，岩塊樣品則購自 K 區當地花崗岩石材。試驗方法包括：暫態平面熱源法(transient plane source method)與熱探針法。

(6) 核種吸附及傳輸特性

在 2011 年間以 K 區花崗岩岩心樣本，針對碘、銫與銑離子進行核種擴散實驗，以量測上述核種的擴散係數(diffusion coefficient)。也針對銫與銑離子進行吸附實驗，以量測上述核種的分配係數(Kd)。

3.1.2.4. 監測

3.1.2.4.1. 概述

監測是一種連續的紀錄，其主要目的在於建立基線(baseline)資料，並且提供對於重要參數隨時間的變化情形。K 區的監測工作主要

針對井孔內的水文地質及水文地球化學特性，進行長時間且連續的量測。

3.1.2.4.2. 監測項目

(1) 水文地質監測

自 2007 年起至資料凍結日止，針對 KMBH01、KMBH03、KMBH05、KMBH06 等井孔特定裂隙段進行長期地下水壓力監測，藉由井場設置的氣象觀測站，同時記錄降雨等氣候參數，主要目的在於分析地下水位隨時間的變化特性。

(2) 水文地球化學監測

於 2009 年至 2010 年期間，針對 KMBH06 井孔特定裂隙段地下水，進行長期水質監測，監測項目包括：溫度(T)、電導度(EC)、酸鹼度(pH)及氧化還原電位(Eh)等水質敏感性參數。

3.1.2.5. 地形資料

(1) 衛星影像

採用 2001 年 11 月 31 日拍攝的 IKONOS 衛星影像。

(2) 數值地形模型

(a) 陸域採用 2011 年發行的 ASTER GDEM Version 2 數值地形模型，網格大小為 30 m。

(b) 海域採用 2014 年發行的 GMRT Version 1.7 數值地形模型，網格大小為 448.25 m。

3.1.2.6. 資料庫

K 區所有調查及監測數據均儲存在專用伺服器上，數據類型資料以 Access®檔案儲存，文字及影像資料儲存在 SQL 伺服器，並可透過 SharePoint®介面查詢相關資訊，圖層類資料則以 ArcGIS®格式儲存。

3.2. 地質環境及演化觀點

本章節之主要目的在說明參考案例表二(表 2-1)所參考地區，亦即 K 區，根據目前地質研究所了解的地質演化史，作為預測未來可能地質演化的論述基礎。

3.2.1. 地質環境

金門島位於福建東南沿海的長樂-南澳變質帶上(圖 3-5)，該變質帶寬度約 40 公里，其區域地質特性為：

- (1) 長樂-南澳變質帶出露地表的岩性，屬於中下部地殼的白堊紀混合岩、同構造侵入岩及花崗岩(林蔚等，2011，p3)。
- (2) 長樂-南澳變質帶以平潭-東山深斷裂帶為西界；平潭-東山深斷裂帶的西側屬於白堊紀岩漿岩帶，出露晚期侏羅紀至白堊紀的火山岩及花崗岩(圖 3-5)；此一白堊紀岩漿岩帶，分布向北可延伸到韓國、日本等地，向南至海南島、越南一帶，均屬於白堊紀環太平洋火環(Ring of Fire)的西緣，為晚燕山運動從造山期(130-110 Ma)至後造山期(110-99 Ma)之岩漿活動的產物(林蔚，2001，p176)。

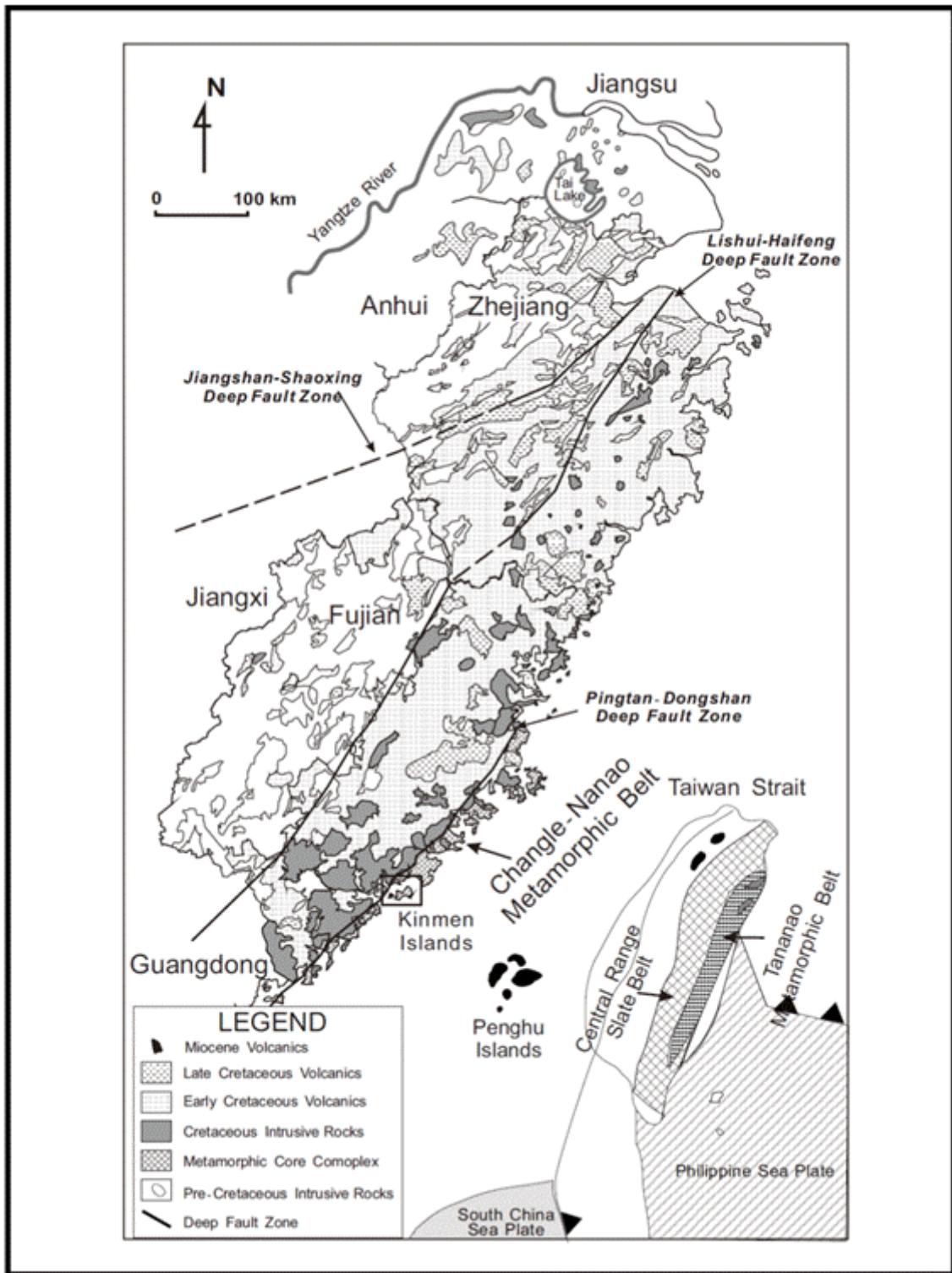


圖 3-5：大陸沿海及台灣西部離島花崗岩分布圖

資料來源：Chen et al. (2004, p238)

Chen, C.H., Lin, W., Lan, C.Y. and Lee, C. Y. (2004), Geochemical, Sr and Nd isotopic characteristics and tectonic implications for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Cretaceous) orogeny, SE China. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, Vol. 95, 237-248.

3.2.2. 地質演化

金門島位於台灣海峽西側，距離菲律賓海板塊板塊邊界已超過 300 公里(圖 3-5)，因此受板塊聚合作用影響小，自澎湖以西均為穩定大陸地塊，少有地震發生，亦無活動斷層的報導。金門島與鄰近福建東南沿海的地質演化史，可追溯到二疊紀或之前，華南大陸邊緣沈積了巨厚的沈積層，並在三疊紀初期發生華南陸塊與印支陸塊的碰撞與縫合作用(即印支運動)，奠定了現有華南的形貌。

綜觀金門島的大地構造活動歷史，如圖 3-6 所示，可以說明主要的板塊架構自新生代以來已具備現今形貌。且從侏羅紀(約 190 Ma)至中新世(約 10 Ma)各時期的岩漿活動紀錄，可進一步釐清金門島地質事件與大地構造演化模式(林蔚等，2011，p28)。

3.2.2.1. 燕山運動與同造山岩漿活動時期

- ◆ 華南地區自侏羅紀(約 190 Ma)，開始發生早燕山期花崗岩漿大規模的侵入活動(圖 3-6a)，廣佈的早燕山期花崗岩體侵入古生代地層，也有火山岩不整合覆蓋在古生代地層上。[不整合(unconformity)是指現今兩個相連的地層 A 及 C，A 地層及 C 地層的形成時間具有明顯的不連續性，顯示過去有段時間中，原本應存在的 B 地層，因為某些地質活動，如抬升及剝蝕作用，而使得 B 地層不存在於現今的 A 地層與 C 地層之間；現今地層 A 及地層 C 的交接面，稱為不整合面]
- ◆ 早期白堊紀(圖 3-6b)時，由於古太平洋海板塊快速增生，造成環太平洋地區隱沒作用加劇，歐亞大陸東部開始受到廣域的晚燕山運動所影響。
 - 此時期在福建沿海地區的地殼變動，以大型左移深斷裂活動與岩漿活動為主，也造成了褶皺、斷層、推覆體等構造。由於平潭—東山深斷裂帶(圖 3-5)的活動時間(約 122 Ma)，與同構造岩漿侵入體形成的年代約略相同(約 130 Ma 至 120 Ma)，所以在火成岩侵入與變質作用下，形成了長樂—南澳變

質帶(Changle-Nanao Metamorphic Belt: CNMB)(圖 3-5)。長樂—南澳變質帶屬晚中生代歐亞大陸東緣「安地斯山型」(Andean-type)造山帶的變質核心雜岩(metamorphic core complex)，而金門島就位於此變質帶的中段。

- 長樂—南澳變質帶上的前寒武紀結晶基盤岩、古生代變質沈積岩及中生代火山岩層，均受剪切構造及變質作用影響，而K區裡含石墨的金龜山片岩可能就屬於此類。
- K區的太武山花崗片麻岩(表 2-2 的 R1 及 R2 岩體單元)，屬於受平潭—東山深斷裂帶活動影響的「前造山期」變形花崗岩體(約 140 Ma)；成功片麻岩(R5)、斗門花崗岩(R4)及其共生的角閃岩脈，則是與造山運動同時發生，侵入並變質的「同造山期」岩體(約 130—110 Ma)。
- 由於平潭—東山深斷裂帶(圖 3-5)的左移剪切活動，使得金門島中下部地殼，快速隆升至地殼淺部，同時發生同構造侵入活動，形成以花崗片麻岩及混合岩(表 2-2 的 R1 及 R2 岩體單元)，及英雲閃長岩質片麻岩(R5)、角閃岩脈、混合岩與花崗岩(R4)，以及上述岩脈群侵入至花崗片麻岩體(R3 及 R6)為主的變質核心雜岩(metamorphic core complex)。
- 金門島的火成岩與變質岩層主要抬升的階段在早白堊紀，宏觀而言，長樂—南澳變質帶初期由北段開始發生劇烈抬升，而中、南段稍晚，並有由西往東剝蝕率增加的現象，因此高度變質帶的分布靠近東側沿海一帶。

3.2.2.2. 張裂地體環境與後造山岩漿活動時期

- ◆ 白堊紀中晚期(約 110 Ma 至 99 Ma)(圖 3-6c)，此時的構造環境轉變為以張裂型態為主，金門島發生新一期大規模的後造山期岩漿活動。岩漿侵入早期白堊紀形成的結晶基盤岩體中，形成未變形、淺位侵入的花崗岩體，同時在岩體附近發生大規模的火山活動，這些大量未變形花崗岩及火山岩的形成，顯示了剪切帶活動

的停止。此時期的岩漿多以岩脈或岩株的方式侵入(約 101 Ma)，繼之發生東北走向輝綠岩脈群的侵入活動(約 92 Ma 至 76 Ma)。

- ◆ 從晚期白堊紀(約 90 Ma 至 80 Ma) (圖 3-6d)至古第三紀(約 66 Ma 至 23 Ma)，廣泛發生的大陸邊緣張裂作用，持續讓岩石圈減薄，在歐亞大陸東部構成被動大陸邊緣及邊緣海(例如南中國海及日本海)張裂。在此地體環境下，金門島開始以穩定地塊，緩慢發生抬升與剝蝕作用。
- ◆ 92-76 Ma 期間，在結晶基盤的冷卻節理形成過程中，伴生大範圍輝綠岩脈(表 2-2 的 D#地質單元)的侵入活動(走向一致以 N30E 為主，近乎垂直)(圖 3-7)，均屬於張裂構造，顯示此區結晶基盤已剝蝕至地殼淺部。
- ◆ 至白堊紀晚期，K 區的太武山斷層(走向/傾角為 N64E/70N)隨台灣海峽張裂發生活動(林蔚等，2012，c4p31)，且台灣海峽張裂構造與岩漿活動有由西往東遷移的趨勢，直到漸新世開始的南中國海板塊張裂活動為止(Chen et al., 2010, p28)。

3.2.2.3. 穩定地塊的形成時期

- ◆ 新生代初期(圖 3-6e)金門地區仍屬於山地。華南沿海地區普遍發生不整合與沈積間斷，至早期第三紀，鄰近台灣海峽地區開始有始新世沈積盆地形成，而金門島因地殼長期穩定剝蝕，現有地表的結晶基盤已出露地表，開始有河流沈積物的堆積，主要是大陸東南的古九龍江河道流經金門島西側，並風化淋濾成富含高嶺土礦的沉積層，不整合地蓋在花崗岩質或花崗片麻岩質基盤上。
- ◆ 由區域大地構造架構、岩層分布及氣候變遷等資料綜合研判，金門島與福建之間存在厚度達數百公尺以上的變質沉積岩層，使金門島花崗片麻岩與福建結晶岩層不相連。
- ◆ 中新世早期(約 15 Ma 前)，全球海水面上升最高峰，金門島一度四面環海，使得河流(古九龍江)無法再流經金門島而中斷河流沈積。

- ◆ 中新世晚期(約 10 Ma 前)，海水退卻，金門島的中新世玄武岩流以陸相噴發，形成明顯的柱狀節理特徵，玄武岩流不整合地蓋在沉積層之上，顯示當時原為濱海環境的金門島相對抬升成陸地。再度與大陸相連，也使得古九龍江河道再度流經金門島，形成礫石層堆積(夾層中偶見數十萬年前古植物化石)，之後更強烈風化為紅土礫石層(林蔚等，2011，p33)。此時期記錄海水面變動的古海蝕平台，至今仍處於濱海，顯示 10 Ma 以來此區地殼無明顯抬升或沉陷。
- ◆ 中新世金門島的海岸變遷循環，迄今仍不斷發生在海岸附近，顯示地殼變動在過去 10 Ma 期間相當有限，結晶岩基盤的剝蝕作用也在廣泛風積沈積物覆蓋下，降低侵蝕速率。簡言之，金門島自 10 Ma 前即發展為一穩定的地塊(林蔚等，2011，p30)。

3.2.2.4. 第四紀時期

3.2.2.4.1. 週期性變化特性

第四紀時期(2.6 Ma)開始至今，基本上，具周期性的氣候變遷過程(詳第 3.2.3 節說明)，使得金門島地表環境，周期性的受海平面升降而改變其外在環境及形貌：

- ◆ 當冰期來臨時，海平面降低，金門島與大陸相連，有河流流經，屬於內陸丘陵地；當間冰期來臨時，海水面上升，直到金門島四面環海時，古九龍江河道改道，不流經金門島。
- ◆ 鄰近台灣海峽的地形，冰期海水面下降時，大部分出露為陸地，為地形平緩的丘陵與平原，以風成沙丘堆積的南北向沙漠環境為主。間冰期海水面升高，逐漸為海水覆蓋，海水面最高時可使金門島四面環海形成島嶼。地球現今為間冰期，台灣海峽平均水深僅 80 m，K 區也在約 5 千年至 6 千年前，開始四面環海迄今。

自末次冰盛期(last glacial maximum, LGM)(約 2 萬年前)至今：

- ◆ 在末次冰盛期時，台灣附近的海水面較今日低約 120 m (Rohling et al., 1998, p162)，海岸線在金門島東南方約 200 km 外(澎湖地區南方)，金門島屬沙漠環境；
- ◆ 距今 1 萬年前冰期結束時，台灣附近的海水面較今日低約 40 m，此時金門島仍為丘陵地一部分；
- ◆ 至 6 千年前，海水面可能高於現今海水面 2.4 m (陳于高，1993，pi)，使金門島四面環海至今。此時，金門島已有新石器時代的人類活動記錄，顯示當時古人類需在海岸較高處營生，並留下貝塚遺跡(郭素秋等，2005，p8&p120)，該貝塚遺跡可能為金門島最早的人類活動記錄；而後海岸線略往外退卻，陸域面積變大，低窪處有沼澤及溼地形成。5 千年來此區海水面高度已無明顯變動。

3.2.2.4.2. 水文地質特性

自約 40 ka 至 5 ka 間，在福建沿海與金門島皆形成廣泛的「老紅砂」與膏鹽地層(張明書等，2000，c4)，屬於氧化、沙漠化的沉積環境。在末次冰盛期(last glacial maximum, LGM)(約 2 萬年前)時，大陸東南沿海(含金門島)處於乾旱環境下，以沙漠化風成沈積層為主。金門島主要地下水循環，受區域地形影響，自西北方福建山區往東南方台灣海峽流動，地下水自福建流入金門島前會經過厚層變質沉積岩層，然後才順著破碎帶流入金門島結晶基盤岩中，約至澎湖南方才出海；且當時地下水位較今日為低，古地理環境較今日偏向沙漠乾燥氣候，有較厚的滲流帶(或稱通氣層，vadose zone)，故地下水質也會受到沙漠化富含膏鹽類之蒸發岩(evaporite)影響。

末次冰期後(9.7 ka 至 9.6 ka)至 6 ka 前，因兩極冰帽融化使得海水面快速上升，金門島在四面環海下，原本流經福建地區的古河道直接在廈門灣裡進行沉積作用，以致河流沉積物無法搬運至金門島，又由於金門島本島地形低緩，故島上無法形成具有搬運作用的河流，稱為「無能河」(林朝榮，1970，p1)。此區雨季時地下水面高，形成湖積澤地(富含泥炭)；遇乾季則蒸發作用強烈，淺層地下水位低下，形

成風成堆積層，因氧化作用影響下形成紅壤或紅層，兩者交錯沉積，自此福建地區河系已與金門島隔絕。

3.2.2.4.3. 歷史地震紀錄

金門島鄰近地區 1 千年來有數個歷史地震(規模大於 6)紀錄，如 1067、1185、1445、1604 年，分布如圖 3-8(b)，最大地震事件為 1604 年的泉州大地震，地震規模推估達到 8。雖然金門島較台灣地震紀錄低很多，但 2001 至 2014 年間福建地區的 97 座寬頻地震網，記錄了 3203 個(地震規模介於 0.5 至 4.8 之間)地震事件，分布如圖 3-8(c)所示。而區域地溫梯度推測由福建西部內陸往東部沿海逐漸增高，金門島鄰近的福建沿海一帶屬於熱流較高地區，漳州至泉州一帶地震記錄也較其他地區增加，與熱流增高的趨勢一致(Cai et al., 2015, p526)。

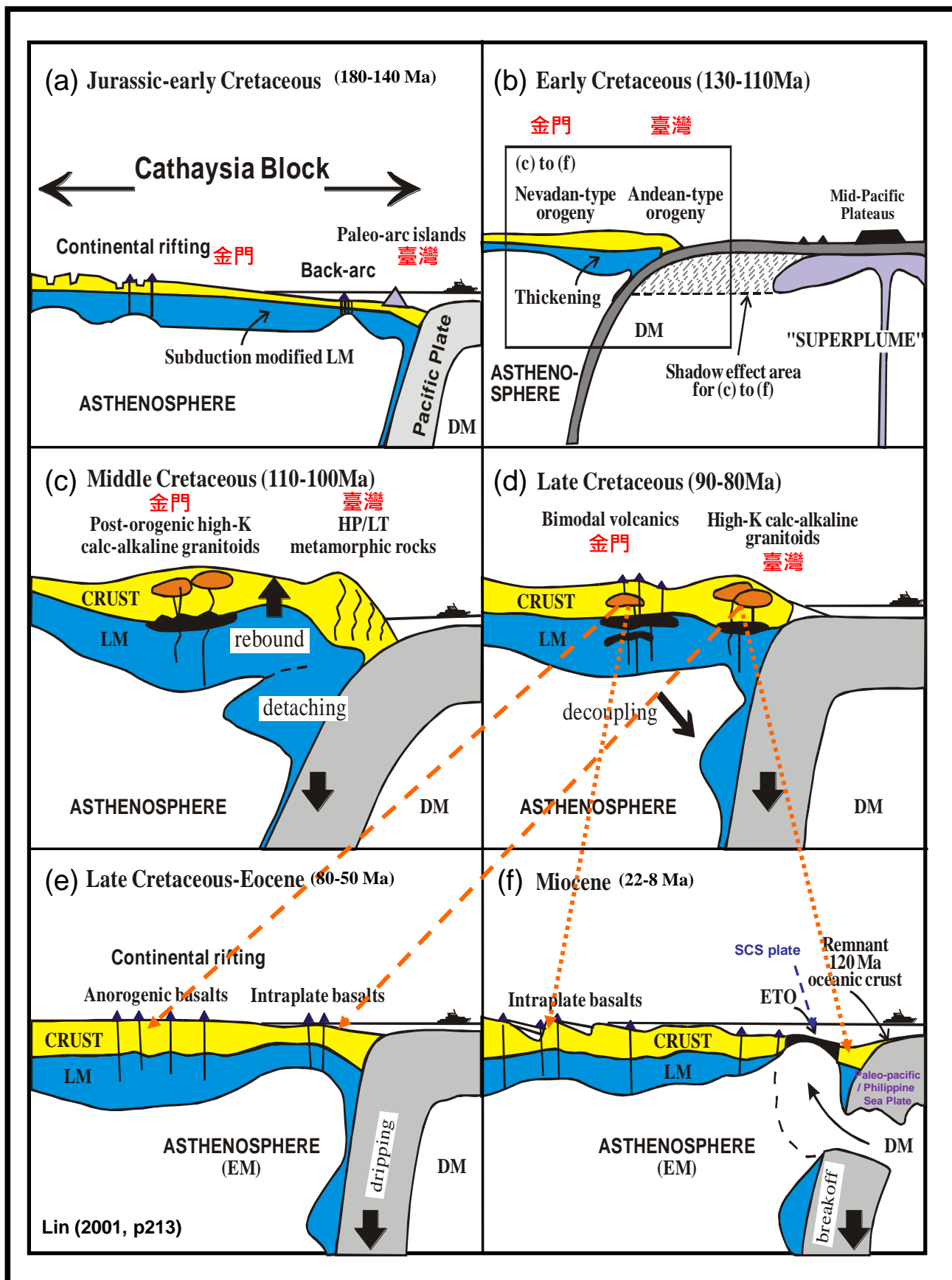


圖 3-6：台海地區岩漿活動與大地構造演化圖

註解：

- ◆ 侏羅紀至早白堊紀(約 140 MaBP 以前)，古太平洋板塊向西隱沒至歐亞大陸邊緣，大陸內部廣泛發生板內型張裂環境的岩漿活動。
- ◆ 早白堊紀(約 120 MaBP 左右)，西太平洋發生洪流玄武岩噴發活動，歐亞大陸邊緣亦發生廣泛的燕山運動。
- ◆ 燕山運動後期(約 110-100 MaBP)，造山帶內部形成張裂環境的後造山型花崗岩(如福建、浙江等)，造山帶邊緣則發生高壓低溫相變質作用(如台灣東部大南澳變質帶)。
- ◆ 晚白堊紀(約 90-80 MaBP)，造山帶內部形成張裂型火山活動，造山帶邊緣則形成張裂環境之後造山型花崗岩(如台灣東部花崗岩)。
- ◆ 晚白堊紀至始新世，隱沒作用停止，大陸邊緣發生板內型張裂環境的玄武岩噴發活動，台灣東部大南澳變質帶無島弧岩漿活動發生。
- ◆ 中新世期間，大陸邊緣張裂活動伴生 K 區與澎湖廣泛的玄武岩噴發活動，此時南中國海板塊擴張，使得台灣大南澳片岩發生漂移作用。

資料來源：TPC (2010, c2p281)

TPC (2010) [In Chinese: 台電公司(2010)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告，台灣電力公司核能後端營運處；行政院原子能委員會放射性物料管理局；2010 年 7 月核備。]

- 岩脈是西部離島代表性構造
- 岩脈是地下水非常重要的阻水構造

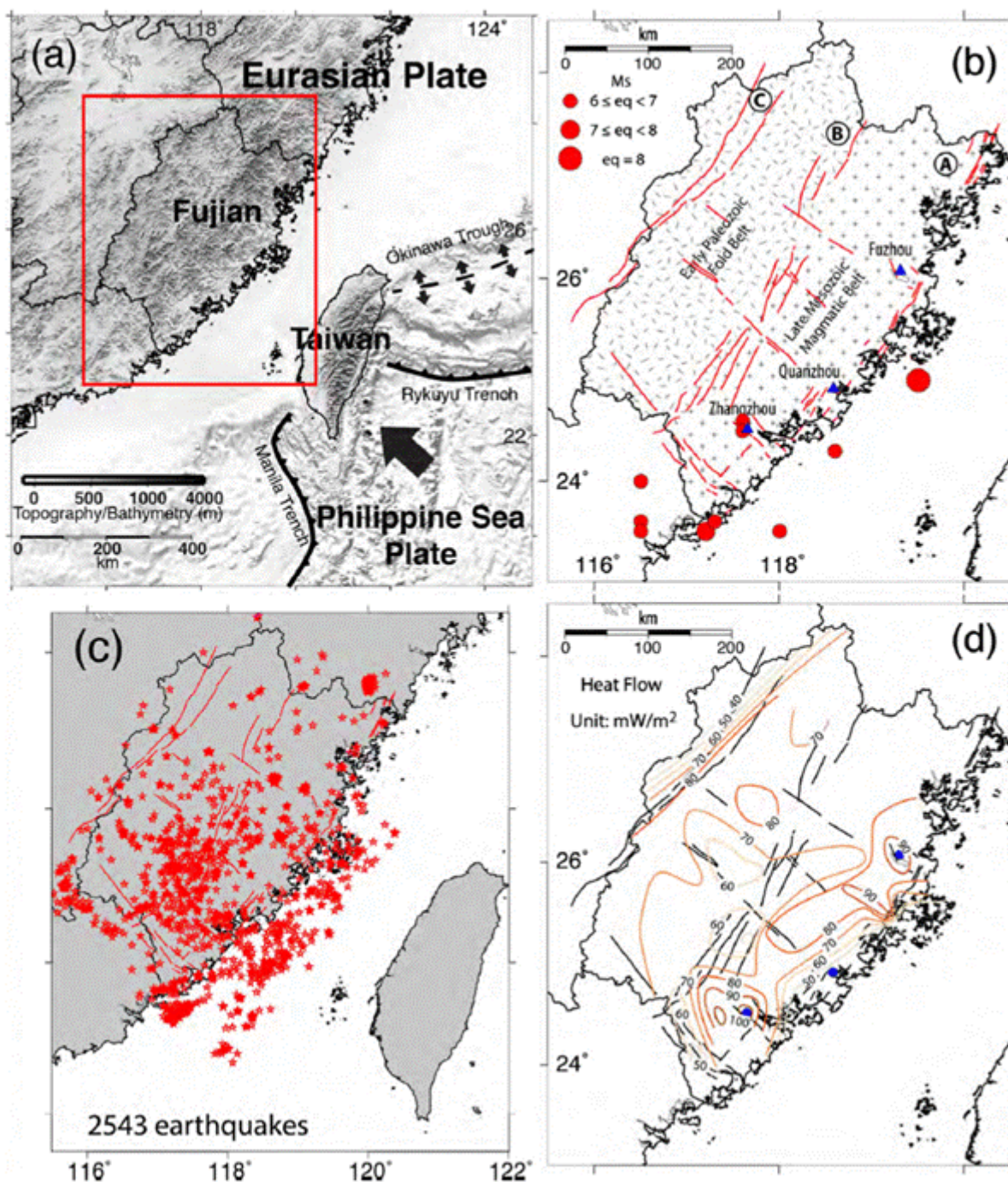


(a) 金門的岩脈

(b) 烏坵的岩脈

(c) 馬祖的岩脈

圖 3-7：西部離島花崗岩體中經常出現的輝綠岩脈



Source: Cai et al. (2015, p518 & p519)

圖 3-8：大陸東南沿海福建地區地震與熱流分布圖

註解：

- (a) 大陸東南沿海板塊架構。
- (b) 地質構造分布及規模大於 6 的歷史地震位置。
- (c) 97 座寬頻地震網記錄福建 2001 至 2014 年間 3,203 個規模介於 0.5 至 4.8 的地震事件，繪製 2,543 個代表性地震紀錄的分布圖。
- (d) 福建地區熱流分布圖。

資料來源：Cai et al. (2015, p518 & p519)

Cai, H.T., Kuo-Chen, H., Jin, X., Wang, C.Y., Huang, B.S. and Yen, H.Y. (2015), A three-dimensional Vp, Vs, and Vp/Vs crustal structure in Fujian, Southeast China, from active- and passive-source experiments. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 111, p. 517-527.

3.2.3. 氣候變遷

本章節之主要目的在說明台灣參考案例表二中，下列內容的科學依據：

- ◆ Section03 之海水面變遷資料的由來。
- ◆ 海水鹽度的可能變化特性。

斷層活動、火山活動、地殼垂直活動和氣候變遷與海平面變化，是影響環太平洋地區處置場址之地質環境長期穩定性的四項主要自然活動。其中，氣候變遷為海水面變化之驅動力，而海水面變化可能對處置系統造成的衝擊有：地下水流場和地下水化性改變、地下水位變動、海/淡水介面遷移、侵蝕/淤積作用等，這些衝擊會干擾處置系統的地質環境穩定性，進而影響處置場之功能(JNC, 2000, c3.3.4)。

3.2.3.1. 海水面變化

冰河時期(ice age)是指地球歷史上，地球表面溫度長期呈現持續降低的趨勢且有冰層覆蓋陸地的時間區間(圖 3-9)；在過去 20 億年間，至少有 5 個冰河時期。最近一次冰河時期(上新世-第四紀冰河時期)，開始於約 2.6 Ma 前。在冰河時期中，會有數個時間區段，在此時間區段中，溫度逐漸降低，冰川覆蓋陸地面積逐漸加大、海水面逐漸降低，稱為冰期(glacial period)；而在兩個冰期間的時間區段，稱為間冰期(interglacial period)。地球目前處於一個間冰期，因為過去數千年來，地表冰川覆蓋面積並未逐漸加大。大致上來說，

- ◆ 進入冰期後，冰川和永凍土會增長形成，海水面會逐漸下降，使得海岸線高於海水面，導致河流有強烈的下切作用，侵蝕出較深的河谷，且海/淡水介面會隨海岸線移動而變遷，雪線往低緯度與低海拔地區遷移。
- ◆ 進入間冰期後，因兩極冰帽融化使得海水面升高，氣候溫暖，冰川與凍土層向兩極收縮，恢復的地方逐漸變成森林。

陳文山等(2005, p42)說明地球表面溫度是受到日照量的變化所影響，而日照量變化又受到地球運行軌道的週期性改變而影響，米蘭科維奇(Milankovitch)推演出地球運行軌道的週期，有 22 ka (ka, 千年)、41 ka 與 100 ka 的變化週期；2.5 Ma 至 0.9 Ma 前之間的氣候變化週期主要為 41 ka，而 0.9 Ma 至今的氣候變化週期則以 100 ka 週期為主(Naish and Kamp, 1997, p978; Naish et al., 1998, p695; Chen et al., 2001, p1249)。其中，100 ka 週期的事件，會因全球溫度變化造成融冰量的改變，而造成大幅度的海水面變動。

末次冰期(last glacial epoch)是指於第四紀更新世內發生的最近一次冰期事件，約於 0.11 Ma 至 0.12 Ma 前開始，於 9.6 ka 至 9.7 ka 結束；末次冰盛期(last glacial maximum, LGM)距今約 20 ka 前，當時的海水面較現今低約 120 m (Rohling et al., 1998, p162)；之後間冰期氣候變暖，海水面開始逐漸上升，至約 6 千年前達最高海水面，約比現今高約 10 m (IPCC, 2013, p1146)，爾後緩慢下降到達現今的位置(圖 3-11)。

更仔細地來看：

- ◆ 末次冰盛期時，全球海面較今日低約 120 m (Rohling et al., 1998, p162)，現今的淺海陸棚大都曝露出海面成為陸地，臺灣海峽同樣也成為連接亞洲大陸的陸橋，台灣附近海岸線可能南移至澎湖以南(圖 3-10)。在這寒冷的冰河期，地處亞熱帶的臺灣島，海拔 3,300 m 以上的高山也被冰川覆蓋，此時的乾冷氣候造成南中國海的表層海水溫度(sea surface temperature, SST)估計要比今日低 3.5°C 至 6°C (謝傳禮等，1996, p1)，在台灣的溫度會比今日低 8°C 至 9°C，而年雨量也僅有今日的一半，然後開始趨於減緩(劉平妹，2003, p23)。
- ◆ 20 ka 之後，全球氣候逐漸升高，進入了溫暖的間冰期，海面也逐漸上升，海岸線朝陸地前進，原本連接亞洲大陸的陸橋逐漸被海水淹沒。20 ka 至 15 ka 期間海水面上升速度較緩慢，平均每千年約 6 m；15 ka 至 10 ka 期間海水面上升速度較緩慢，平均每千年約 10 m。

- ◆ 約 10 ka 前，回復現今的海峽地形，此時高山上的冰河也已消失，只遺留下冰川的遺跡(Siame et al., 2007, p2185)；
- ◆ 約至 6 ka 前，氣候才逐漸穩定，海面達到最高點，較今日高約 10 m (IPCC, 2013, p1146) (圖 3-11)，現今臺灣島周圍海岸平原都被海水淹沒，海岸線位在現今山麓與丘陵地的前緣；6,000 年後海面不再上升，河流搬運大量沉積物堆積在海岸，並逐漸地擴大成為西部海岸平原。

台灣地區晚全新世(約 10 ka 前)以來海水面的變動與全球性變化趨勢一致(陳于高，1993，p47 - p49；Chen and Liu, 1996, p254)，更仔細地推估 11 ka 至 5 ka 之間台灣的海水面變化為(圖 3-11) (Hsieh et al., 2006, p356)：

- ◆ 11 ka 至 10 ka 間海水面快速升高(升高速率為每千年大於 13 m)；
- ◆ 10 ka 至 6.6 ka 海水面升高速率略減(升高速率為每千年 8 m 至 9 m)；
- ◆ 到了 6.6 ka 至 6.5 ka 升高速率更低，而後趨於穩定至目前海水面高度。

3.2.3.2. 海水鹽度變化

南中國海(South China Sea, SCS)是西太平洋最大的一個邊緣海，介於東亞與西太平洋中的關鍵位置使其靈敏地反應出氣候變遷，南中國海海水的特性為：

- ◆ 南中國海北側與西南側有著寬廣的大陸棚，而中心與東側則是分布著深海盆地地形，平均深度可達約 4,000 m。南中國海北側的平均海水表面溫度約 18°C，而南側約 27°C (鄭郁豫，2000，p1-2)。
- ◆ 在末次冰期時，海水面較今日低於 120 m，南中國海成為一個半封閉邊緣海，僅與西太平洋海水相通，溫暖的印度洋海水流被露出的大陸棚切斷，因此更降低了南中國海的表層海水溫度(鄭郁豫，2000，p2)。

- ◆ 南中國海的 SSS 變化趨勢與開放海洋的變化不太相同；開放性海洋在冰期有較高的鹽度，而間冰期則是較低的鹽度(Adkins et al., 2002, p1771)，但南中國海(邊緣海)的 SSS 變化主要受控於區域性的蒸發-降雨作用的影響，而受淡水補注的影響較小，故鹽度下降反映著較今日低的蒸發量或較高的降雨量(鄭郁豫，2000，p34-36)。
- ◆ 南中國海的古鹽度變化可以提供 K 區附近之冰期與間冰期海水表層鹽度變化資訊。過去 170 ka，南中國海的海水表層鹽度變化量 (Δs) 的變化大約在 -4‰ 到 +1‰ 之間(鄭郁豫，2000，p27) (圖 3-12)，而且大部分都低於現今海水的 SSS。目前南中國海區域之海水表層鹽度(sea surface salinity, SSS)為 33.2-34.4‰ (鄭郁豫，2000，p2)，而全球平均海水鹽度為 34.7‰ (Levitus and Boyer, 1994, p67)。

圖 3-13 為根據上述說明，所建立的理想化海水面及鹽度變化的週期性特徵。

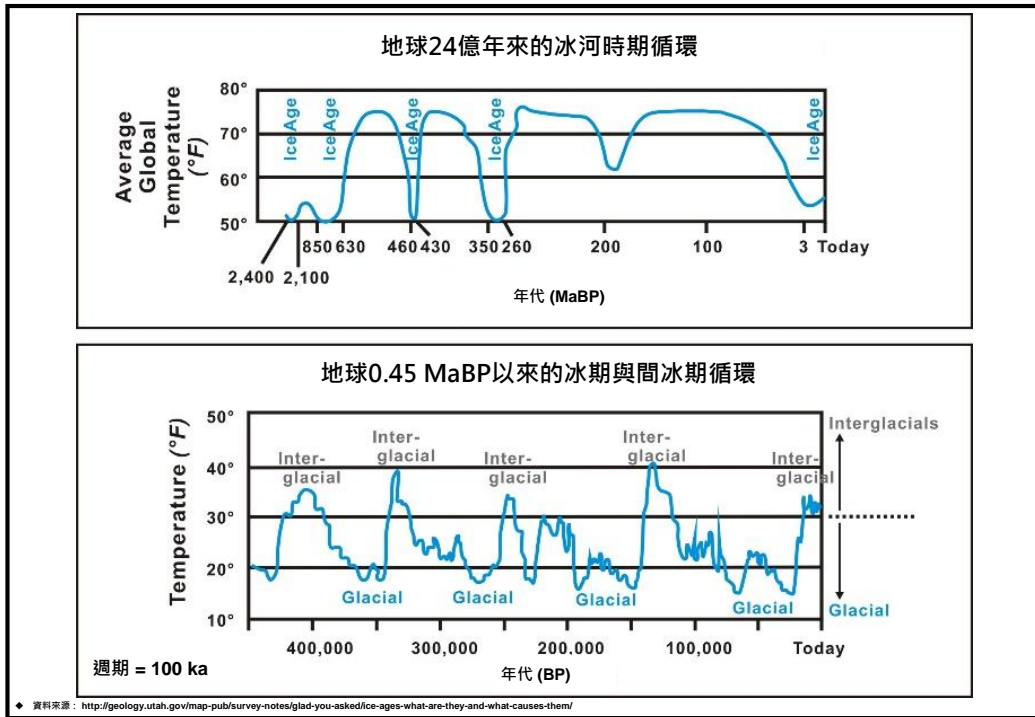


圖 3-9：冰河時期及冰期與間冰期

資料來源：

<http://geology.utah.gov/map-pub/survey-notes/glad-you-asked/ice-ages-what-are-they-and-what-causes-them/>

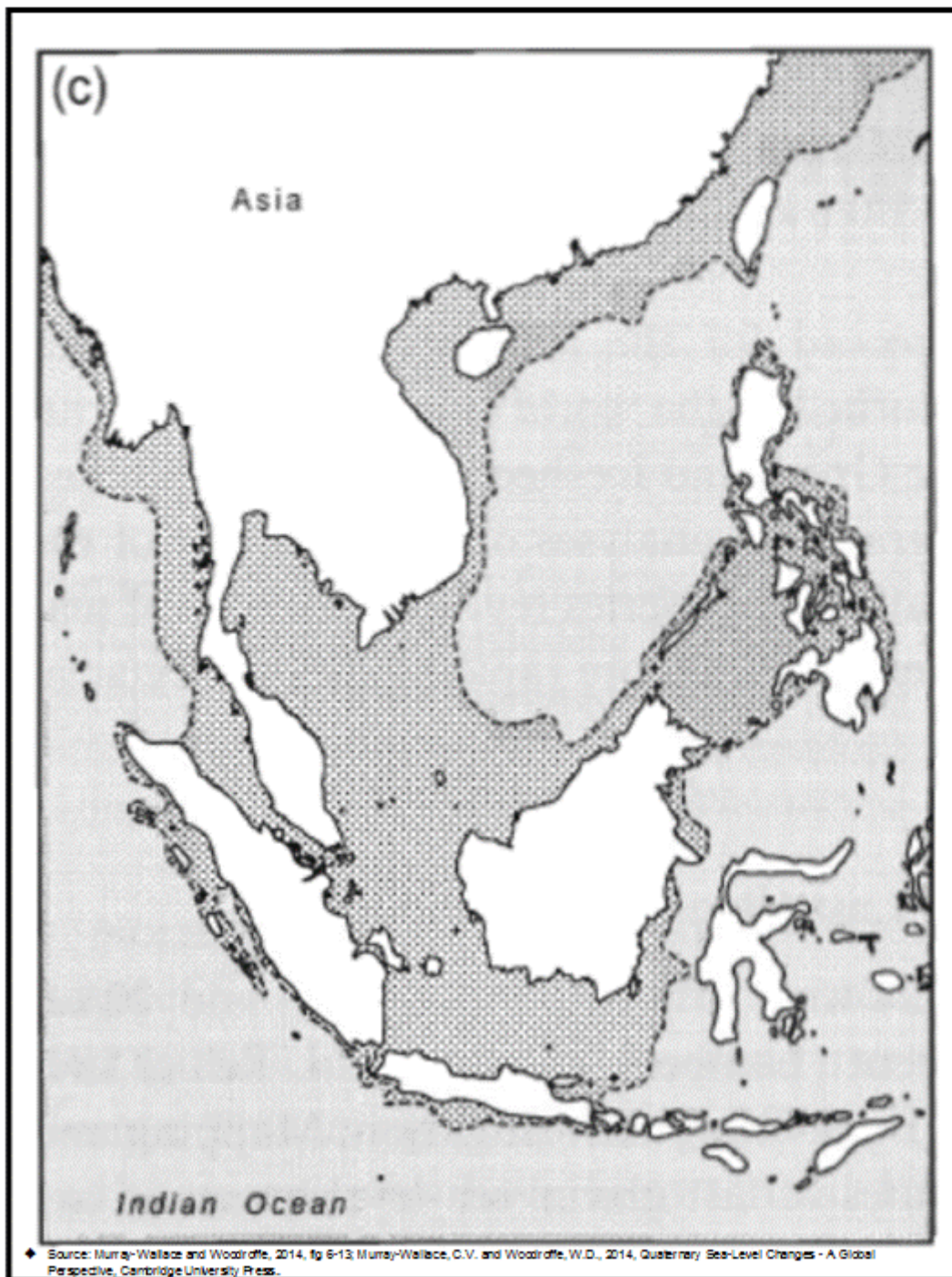


圖 3-10：亞洲地區第四紀海岸線分布圖

資料來源：Murray-Wallace and Woodroffe (2014, fig6-13)
Murray-Wallace, C.V. and Woodroffe, W.D., 2014, Quaternary Sea-Level Changes - A Global Perspective, Cambridge University Press.

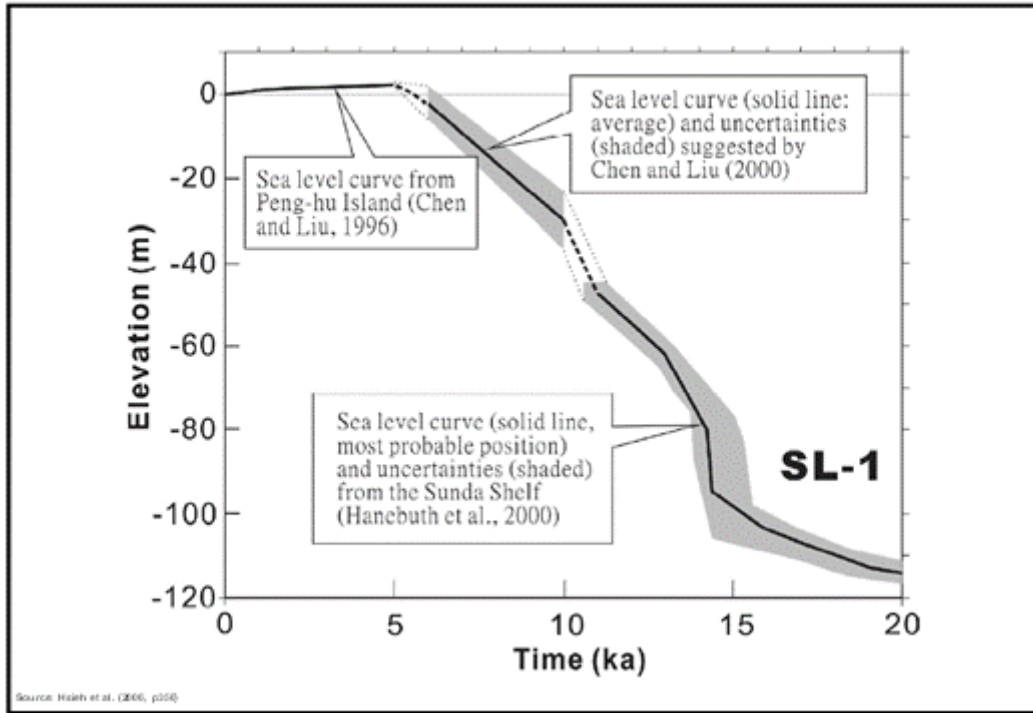


圖 3-11：台灣地區過去 11 ka 至 5 ka 間的海水面變化

資料來源：Hsieh et al. (2006, p356)

Hsieh, M.L., Lai, T.H., Wu, L.C., Lu, W.C., Liu, H.T., and Liew, P.M. 2006, Eustatic Sea-Level Change of 11–5 ka in Western Taiwan, Constrained by Radiocarbon Dates of Core Sediments, TAO, Vol. 17, No. 2, p.353–370.

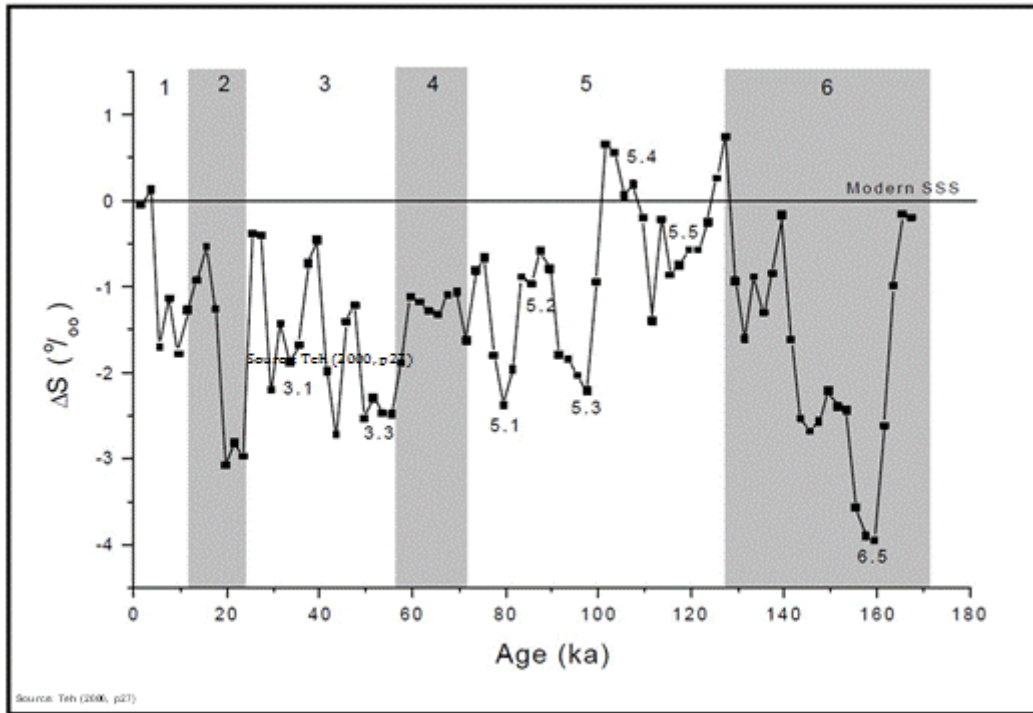


圖 3-12：南中國海海水表面鹽度之變化歷程圖

註解：

- Δs = Sea surface salinity variation
- SSS = Sea surface salinity
- SCS = South China Sea
- The modern SSS is taken as 33.4‰.

資料來源：Teh (2000, p27)

Teh (2000) [In Chinese: 鄭郁豫(2000)，南海過去十七萬年以來的古海溫與古鹽度重建，國立台灣大學地質學研究所碩士論文。]

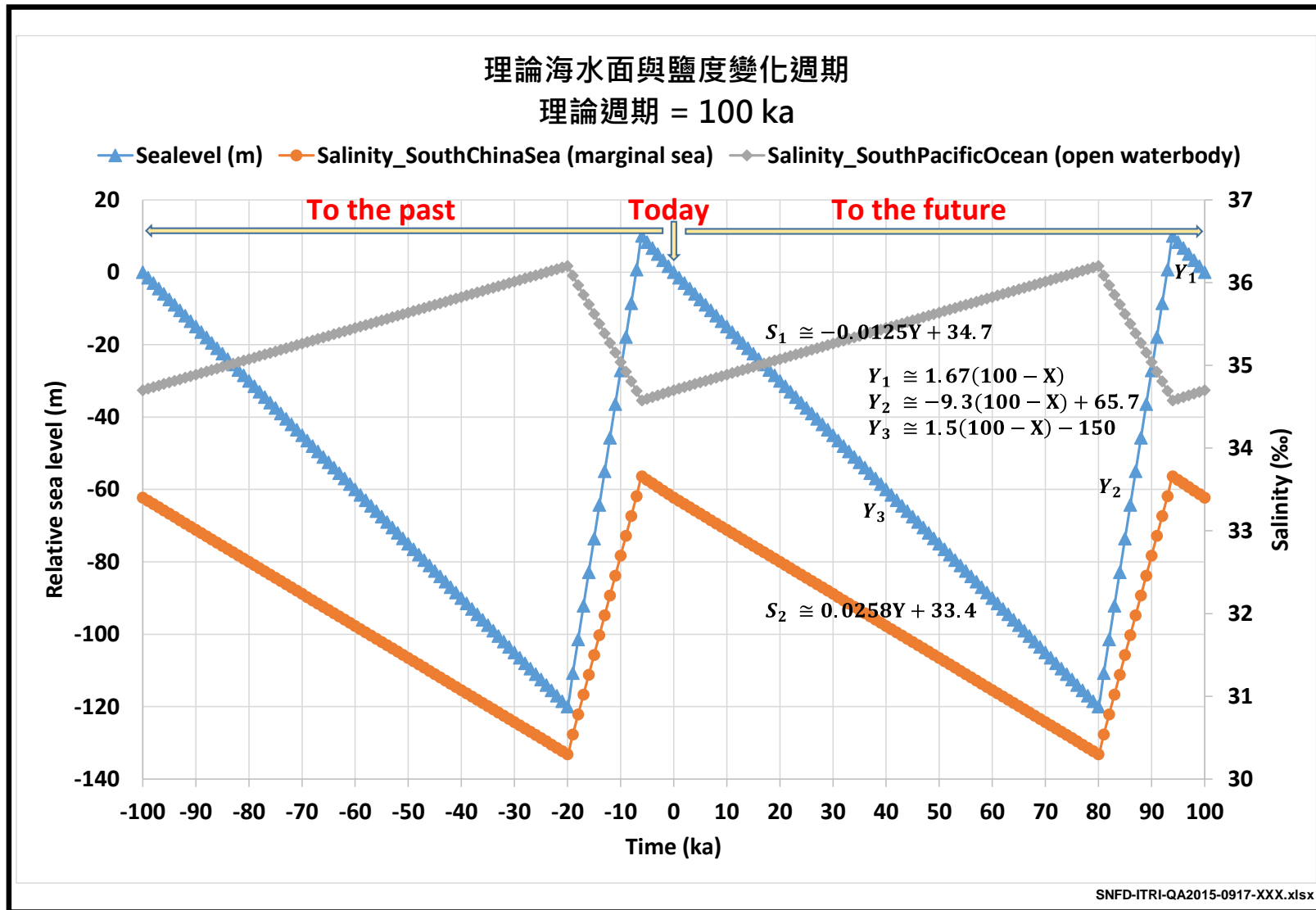


圖 3-13：台灣地區理想化海水面及鹽度變化週期特徵

3.3. 地表系統與母岩關聯性

本章節之主要目的在說明台灣參考案例表二中，下列內容的科學依據：

- ◆ Section03 之溫度、壓力、降雨量、入滲量的由來。
- ◆ Section05 之 R0 地質單元之基本特性的由來。

3.3.1. 地表及海底地形

K 區係指金門島東部(圖 3-1 及圖 3-2)，以下將分別說明金門地區的地表地形及周圍的海底地形。

金門地區有大小 12 個島嶼，共約 150 平方公里；金門島及烈嶼為最大的兩個島嶼(圖 3-1 及圖 3-2)。金門島及烈嶼以花崗岩類(granitic rocks)基盤為主，受長期侵蝕風化影響造成地勢平緩的丘陵。主要地貌特徵包括花崗岩體的殘丘、玄武岩熔岩流、紅土台地、現代沖積平原與風成砂丘等。全新世以來金門島四面環海，原與大陸相連的古河道變成旱谷地形，現有水系亦屬無能河(林朝棨，1970，p4)。

金門島(Kinmen Island)地勢最高的太武山為花崗片麻岩類構成的丘陵，主峰稱為北太武山，標高 262 公尺(圖 3-1)。烈嶼(Liehyu Island)地勢最高為麒麟山，由紅土化的片岩類基盤所形成的殘丘，其頂部覆蓋薄層泥岩與玄武岩熔岩流，標高 114 公尺(圖 3-1 左)。金門島東部(K area)花崗片麻岩類基盤的出露面積最廣，包括太武山、美人山、寨子山、獅山等地，其丘陵形貌多受到東北走向與西北走西的高角度節理以及剝蝕風化形成的大型洋蔥狀節理(exfoliation)所控制，常見沿著節理崩解而形成陡峭崖面或穹隆地貌。此外，花崗岩體殘丘的山麓與山頂，零星分布一些受剝離風化形成節理發達的突岩(tors)(林蔚等，2011，p2)。

金門島周圍的海底地形如圖 3-14 示。由於 K 區(金門島東部)周圍海域的海床不深，因此在下次冰期來臨時，將因為海水面的下降(詳第 3.2.3 節說明)，海岸線南遷至數百公里外的澎湖(圖 3-10)，而使得 K 區與大陸陸地連接，由現在的海島環境，轉為內陸的沙漠地區。

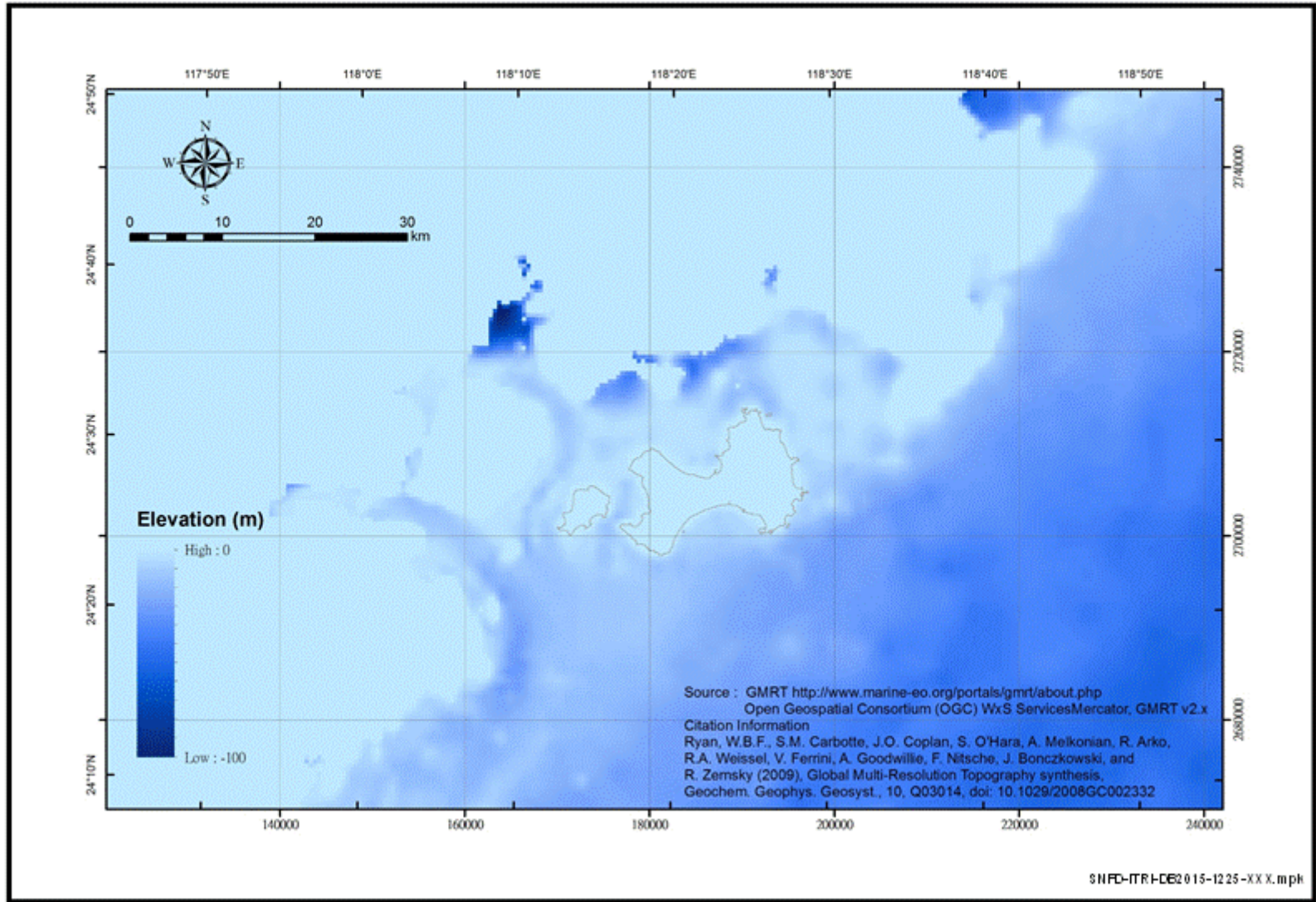


圖 3-14：金門島週圍海底地形

資料來源：GMRT <http://www.marine-geo.org/portals/gmrt/about.php>

Open Geospatial Consortium (OGC) WxS Services Mercator, GMRT v2.x

Ryan, W.B.F., S.M. Carbotte, J.O. Coplan, S. O'Hara, A. Melkonian, R. Arko, R.A. Weisse, V. Ferrini, A. Goodwillie, F. Nitsche, J. Bonczkowski, and R. Zemsky (2009), Global Multi-Resolution Topography synthesis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332.

3.3.2. 地表溫度及壓力

在 K 區的 6 孔地質鑽井(KMBH01-KMBH06) (表 2-5 至表 2-10) 皆已完成相關的地球物理井測，其中溫度井測(temperature logging) 是利用探測器上敏感的熱偶電阻，用來記錄溫度隨深度的變化情形。根據 K 區各鑽井之溫度井測結果，整體看來 K 區在地下水水位面的地層溫度，分布範圍在 23.4°C 至 23.9°C 之間(Lin et al., 2012, ac2p43)。而地表壓力則假設為海平面的平均氣壓值 1.01×10^5 Pa，也就是一大氣壓。

3.3.3. 降雨量及入滲量

圖 3-15 為 K 區自 1954 年至 2002 年，近 60 年之長期降雨量及蒸發量之變化趨勢圖，圖中所示蒸發量自 1971 年後逐年遞減，可能與當地植樹造林結果有關，平均蒸發量為 1,654 mm；而期間內之降雨量分布範圍為 650~1,650 mm，平均降雨量約為 1,074 mm，遠低於平均蒸發量，且無明顯變化趨勢。

地下水入滲量，是在自然狀態下，水由地面進入地下之過程。圖 3-16 是 K 區 1954 年至 2002 年估算之年入滲率(q_{in})分布圖，圖中負值代表當年蒸發效應大於降雨入滲，1954 年至 2002 年之入滲量變化範圍為 -80~190 mm/yr，而平均入滲率約為 35 mm/yr (Chiang and Yu, 2009, c3p11)。

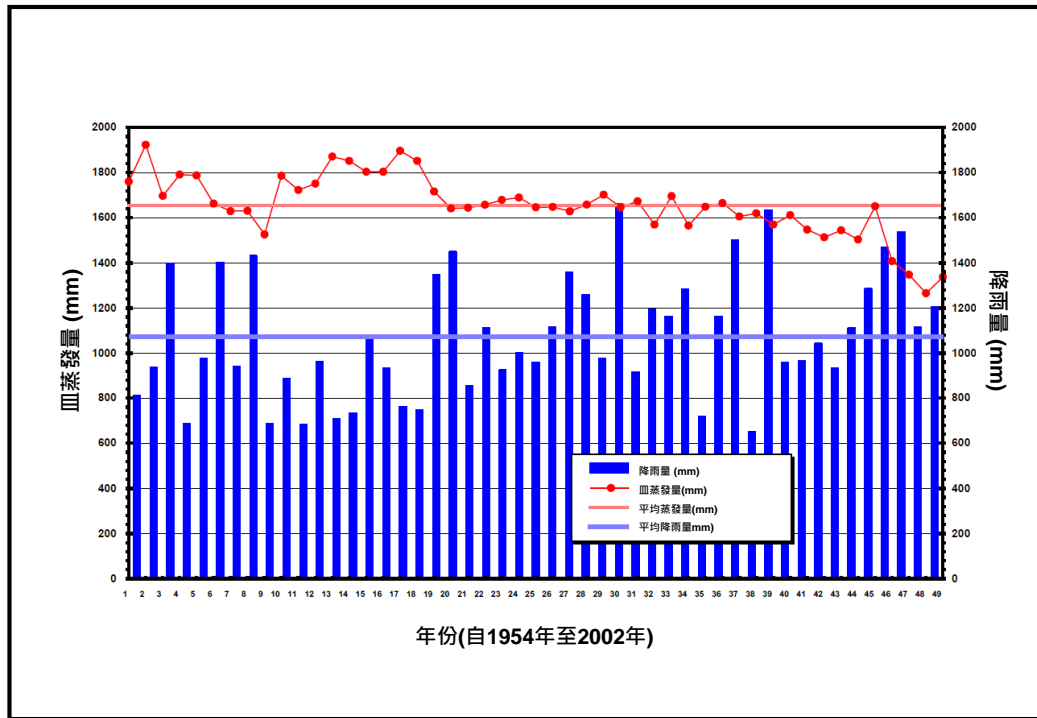


圖 3-15：金門地區年降雨量與蒸發量關係圖

註解：

◆ 資料期間：1954 年至 2002 年。

資料來源：Chiang and Yu (2009, c3p11)

Chiang and Yu (2009) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫)--區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。]

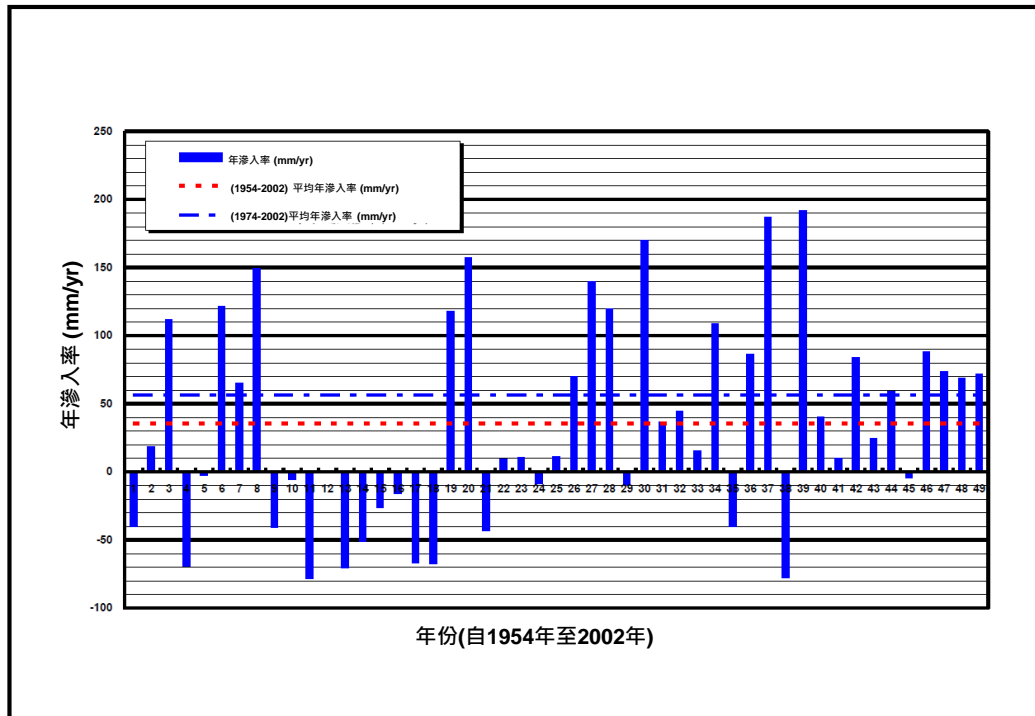


圖 3-16：金門島年入滲率估算分布圖

註解：

◆ 資料期間：1954 年至 2002 年。

資料來源：Chiang and Yu (2009, c3p11)

Chiang and Yu (2009) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫)--區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。]

3.3.4. 第四紀地層

金門地區第四紀地層依岩石地層組成來區分，主要可分為金門層、玄武岩層、紅土礫石層與現代沖積層(陳培源，1970，p7；尤崇極等人，1991，c3p12-18；林蔚等人，2011，p6)：

- (1) 金門層為含黏土細砂岩及礫岩，是古九龍江河道的堆積物，分布範圍在金門島的南部。
- (2) 玄武岩層主要是玄武岩流風化形成，廣泛分布在金門島的中、南部。
- (3) 紅土礫石層以紅土層與礫石層為主，廣泛覆蓋在基盤岩(花崗岩)、金門層與玄武岩層上。
- (4) 現代沖積層亦廣泛分布，在古湖泊及濱海地帶等地勢低緩地區，主要由砂、泥及泥炭所組成，部份海岸地區的砂層淘選度極佳，可形成數公尺厚的石英砂層。

3.3.5. 含水層

金門島地下主要含水層大致上可區分為第四紀沉積層及花崗岩裂隙岩層含水層兩類。第四紀沉積層包括金門層、紅土堆積層和現代沖積層，金門層為花崗岩基盤上最早形成之沉積層，主要位於金門島之西半部，可能為一古河道沉積(陳培源，1970，p4)；金門島東部(K區)則多為深層裂隙岩層含水層。

Liu et al. (2006, p4366)利用金門島內 12 口沉積層地下水觀測井之岩心紀錄資料，所製作完成之金門島沉積層地質柵欄圖，亦顯現主要沉積層含水層大多分布於金門島西部，金門島東部(K區)多為花崗岩質裂隙含水層，金門島西北方則有少數黏土質沉積。整體來說，金門島表層沉積含水層厚度約介於 5~90 m 之間(Chiang and Yu, 2009, c4p1)，約可分為三區：

- (1) 西區(金城)：

地下含水層可分為五層，最厚的含水層可達 100 m，有一厚達 0.5 m 至 10 m 的黏土層。本區是 K 區重要的含水層，年供應超過

$3 \times 10^3 m^3$ ，約是 K 區用水量的一半 (Liu, et. al., 2006, p4365；翁自保，2008，p46-49)。

(2) 東北區(沙美)：

地下含水層可分為五層，最厚的含水層小於 30 m。

(3) 東南區(料羅)：

東南區則可分為三層，最厚的含水層小於 30 m。有一厚達 0.5 m 至 10 m 的黏土層。

K 區沖積層地下含水層之水力傳導係數及其厚度之等值圖，請參考圖 3-17 及圖 3-18，水力傳導係數值約介於 5.0×10^{-6} 至 1.5×10^{-4} m/sec 之間 (Chiang and Yu, 2009, c4p1)。

依據金門島東部(K區)花崗岩體裂隙含水層地下水流動特性的研究，可將地下水分為兩區，一為太武山岩體的地下水，其順裂隙帶(如 F2 構造)往西北方向流動，流經東北向的太武山斷層後，改偏北順斷層(如 F1 構造)傾角方向流動。另一為斗門岩體的地下水，其來源可能是大區域數萬年以來形成的沙漠地下水，古地下水流向可能是由西北往東南，但在島嶼形成四周環海後，此區形成屬於比較靜止之澤地或湖積環境下的地下水型態，受鄰近水庫蓄水影響，地下水流向約略與溪流方向相同(林蔚等，2012，c4p11-12)。

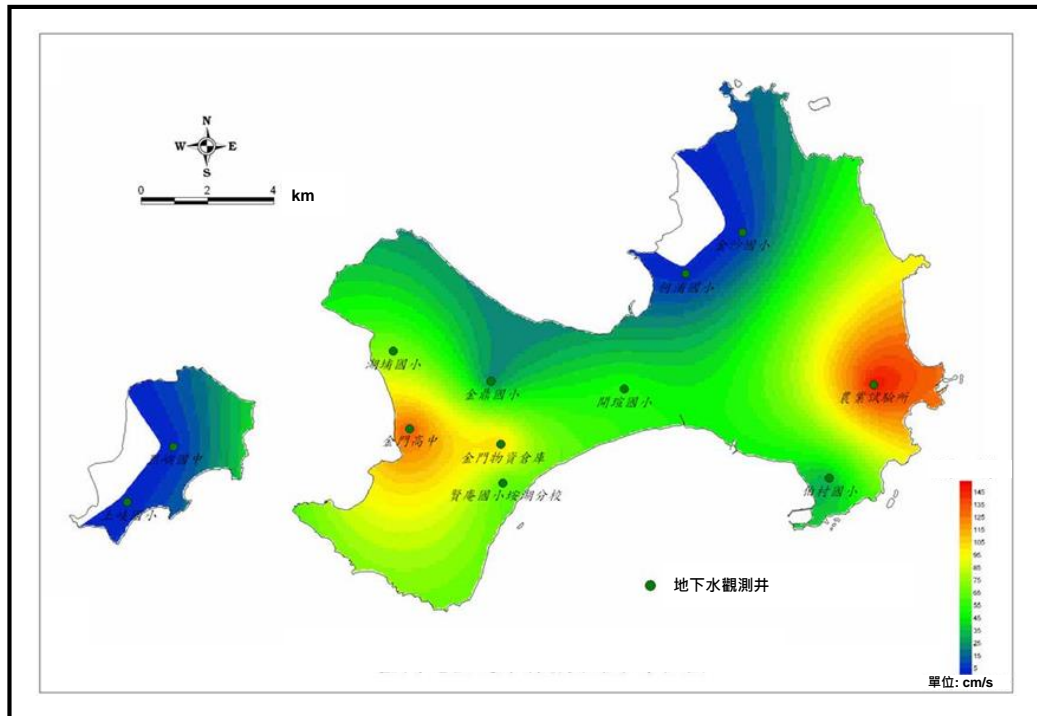


圖 3-17：金門地區沉積層含水層之水力傳導係數等值分布圖

資料來源：Chiang and Yu (2009, c4p5)

Chiang and Yu (2009) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99年度計畫)--區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。]

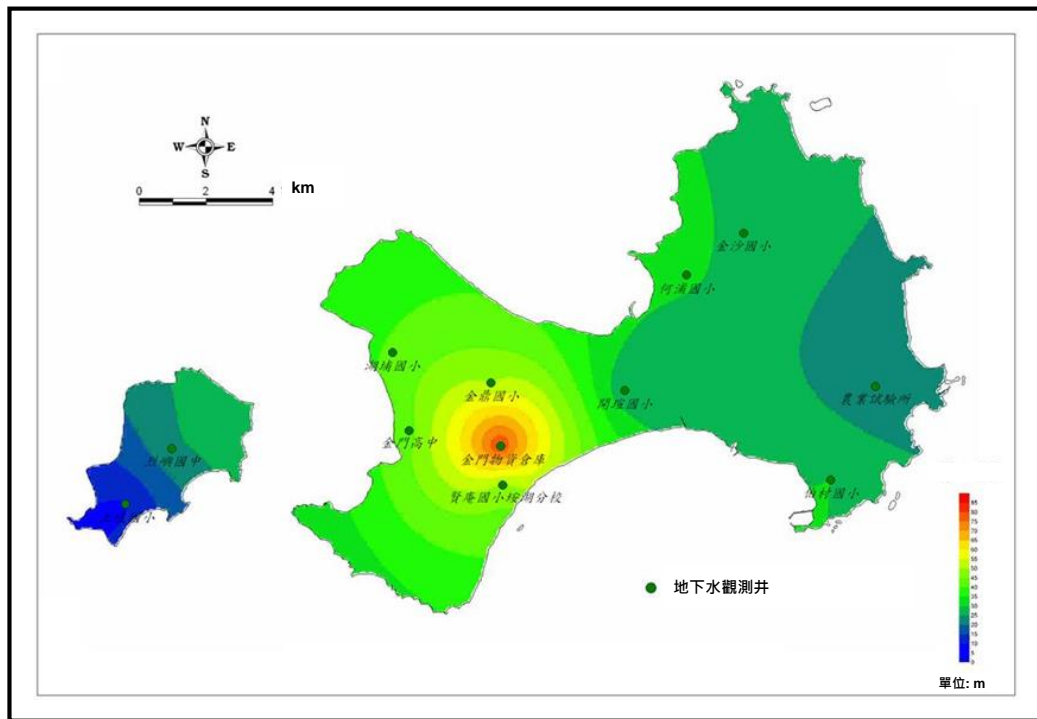


圖 3-18：金門地區沉積層含水層之等厚度分布圖

資料來源：Chiang and Yu (2009, c4p5)

Chiang and Yu (2009) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99年度計畫)--區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。]

3.4. 母岩地質特性

本章節之主要目的在說明參考案例表二中，下列內容的科學依據：

- (1) Section05 各地質單元(表 2-2)的由來。
- (2) Section02 地質概念模式的由來。
- (3) Section03 之抬升速率數值的由來。

3.4.1. 地質單元

K 區係指金門本島東部，金門地理位置圖及其衛星影像，如圖 3-2 所示。1999 至 2010 年間，計畫執行團隊於 K 區進行一系列的技術發展工作(林蔚等 12 人，2012)，建立地下水主要導水裂隙的調查技術流程(圖 3-3)。除了建立相關技術流程外，透過現地研究成果，計畫執行團隊亦建立該區的地表地質圖(圖 3-4)(林蔚等 4 人，2011)。圖 3-19 為 1999 至 2010 年間，執行團隊在 K 區曾進行過之技術發展工作的位置分佈圖。

透過地質調查與重、磁力地表測勘，整合判釋得線性構造分布(圖 3-20)，進一步根據重、磁力逆推剖面成果(圖 3-21)及地質鑽探結果，解析侵入構造及岩性變化剖面，如圖 3-22 所示；再加上參考地電阻影像剖面探測資料(圖 3-23)，用以區別(可能為岩體邊界或岩脈等)非導水的構造線形與導水裂隙帶，據以推測導水裂隙帶延伸性及空間分布。分別說明如下：

- (1) 根據重、磁力逆推剖面成果(圖 3-21)之岩體密度及磁感率的差異值，與地表地質與地質鑽探結果，共區分 6 個岩體單元(表 2-2 的 R1 至 R6)。另外，根據地表地質與地質鑽探結果及其他文獻研究結果，K 區的地表風化層(表 2-2 的 R0)約介於 5 至 90m(蔣立為與余錦昌，2009, c4p1)。
- (2) 根據地電阻調查(圖 3-23 左圖中的深藍色實線)，及其資料解析結果剖面(圖 3-23 右圖中的 9 個地電阻影像剖面)，研判 11 條可能的導水裂隙帶(表 2-2 的 F1 至 F11，圖 3-23 左圖中的淺藍色虛線)；其中，僅 F1 與 F2 導水裂隙帶，經實際地質鑽探驗證

其確實存在，並進行相關跨孔實驗取得相關特性參數(圖 3-25)。F3 至 F11 雖亦可能為導水裂隙帶，但尚未經過地質鑽探確認，因此，不在本版次參考案例表二的建構內容。

以下將分別說明 K 區各地質單元(包含侵入岩脈)的基本特性：

3.4.1.1. 單元R

金門本島地區(圖 3-1 及圖 3-4)出露的地層有金龜山片岩、太武山花崗片麻岩、成功片麻岩、斗門花崗岩、田埔花崗岩、金門層、烈嶼玄武岩。此外，全區皆有古九龍江河道堆積的紅土礫石層以及全新世堆積的沖積層、風成砂丘等現代沉積層(林蔚等，2011，p6)

參考案例涵蓋了金門本島東部(K區)地表風化層、太武山花崗片麻岩、成功片麻岩及斗門花崗岩等花崗岩體，其特性與構造分述如下：

3.4.1.1.1. 地表剝蝕節理與風化層R0

岩體剝蝕近地表時，因風化及解壓作用形成的節理，多為最後期之低角度構造，並平行地表發育。在花崗岩基盤區，剝蝕節理所形成的風化裂隙岩層為主要淺層含水層。

K 區的地表風化層(R0)約介於 5 至 90m(蔣立為與余錦昌，2009, c4p1)，以地電阻剖面推估平均約為 50 m(林蔚等，2007，c4p27)，以孔內裂隙統計約為 70 m(圖 3-64)。

3.4.1.1.2. 太武山花崗片麻岩R1

太武山花崗片麻岩淺灰黃至淺粉紅色的粗粒含長石、石英、黑雲母的花崗片麻岩(包括 R1, R2 及 R3 岩體單元)，為 K 區主要結晶基盤岩，位於剪切帶中，但受剪切活動的變形與變質作用較小，部分仍保留下前期(晚侏羅紀到早白堊紀 160-140 Ma)岩性特徵。

根據岩體密度及磁感率的差異值，太武山花崗片麻岩體可細分為 3 個岩體單元，R1、R2 及 R3(表 2-2)。透過重磁力解析發現(圖 3-21)，圍繞在斗門岩體(R4)周圍的太武山花崗片麻岩體(R1)，受到磁性較高

的鐵鎂質侵入體的侵入作用影響，R1 具有較 R2 高的磁性，密度兩者相近；另一方面，混合岩化部分融熔導致長英質礦物含量增加，因此過渡帶的密度會較 R4 低。顯示此花崗片麻岩體受到剪切帶的剪張活動，伴生的斗門花崗岩侵入活動影響，在斗門花崗岩體附近形成混合岩化接觸圈，因此 R1 在岩性上有較多混合岩與片麻岩特徵（林蔚，2001，p169）。

3.4.1.1.3. 太武山花崗片麻岩R2

根據岩體密度及磁感率的差異值，太武山花崗片麻岩體可細分為 3 個岩體單元，R1、R2 及 R3(表 2-2)。其中，R2 岩體單元的變形與變質作用最小，保留下前期(晚侏羅紀到早白堊紀 160-140 Ma)花崗岩體的岩性特徵。

現今 R2 岩體的原岩(花崗岩)，其侵入年代約為 139 Ma 之前，化學組成及年代均可與侏羅紀花崗岩漿活動對比；其形成花崗片麻岩與混合岩的變形與變質年代，主要發生在 130 至 120 Ma 之間(林蔚等，2011，p11)。

部分 R2 岩體單元之長英質礦物與鐵鎂礦物形成條帶狀(layered)構造，呈現發育良好的片麻理或混合岩狀(migmatitic)構造，有些岩體含長石斑狀變晶(porphyroblastic)構造與眼球狀(augen)構造，部分 R2 岩體單元為灰白色粗粒疊層狀(stromatic)構造發達的二雲母花崗片麻岩(林蔚，2001，p169)。透過重磁力解析發現(圖 3-21)，花崗片麻岩體核心(R2)的磁性，較接觸圈混合岩化的過渡帶(R1)低，密度則差不多；但磁性與密度均較 R4 岩體低。

R2 岩體單元的主要組成礦物包括正長石、斜長石、石英與黑雲母，偶含少量白雲母、角閃石、磷灰石、鋯石、石榴子石、磁鐵礦與鈦鐵礦等附屬礦物；主要礦物常間夾綠泥石、綠簾石與絹雲母等退變質作用形成的次生礦物(林蔚等，2011，p10)。

3.4.1.1.4. 太武山花崗片麻岩R3

根據岩體密度及磁感率的差異值，太武山花崗片麻岩體可細分為3個岩體單元，R1、R2及R3(表 2-2)。其中，R3岩體單元是淺灰黃至淺粉紅色的粗粒黑雲母花崗片麻岩。R3岩體單元為K區主要結晶基盤岩的邊緣，位於剪切帶中，但受剪切活動的變形與變質作用較大，因靠近成功片麻岩(R5)與角閃岩脈的過渡帶，R3含有許多混合岩化接觸圈特徵。另外，受部分融熔作用影響，R3含有較多的長英質礦物。從重磁力解析來看(圖 3-21)，R3具有最低的磁性及密度特徵。

3.4.1.1.5. 斗門花崗岩R4

斗門花崗岩體(R4岩體單元)是灰至灰黑色粗粒黑雲母花崗岩，主要含正長石、斜長石、石英、黑雲母與角閃石等主要礦物，礦物顆粒呈散點狀分布或流動狀構造。在R4岩體單元中，常見灰黑色閃長岩質包體，包體的邊界多平行於圍岩的流動狀構造，含鐵鎂礦物比例高，鐵鎂質條帶構造(schlieren)發育良好。從重磁力解析來看(圖 3-21)，R4具有最高的磁性與密度特徵。

R4岩體單元的鑽探岩心可見粗粒具流動構造，為片麻理發育不良的侵入體。順剪切帶侵入的年代為120 Ma，屬於剪張環境下形成的侵入體(林蔚等，2011，p13)。此侵入作用造成周圍的太武山花崗片麻岩，廣泛發生部分融熔作用及混合岩化作用，形成混合岩化接觸圈(即R1岩體單元的特徵)。

3.4.1.1.6. 成功片麻岩與混合岩R5

R5岩體單元包含成功片麻岩體與混合岩。成功片麻岩體是灰色至深灰色中至粗粒片麻岩，主要順韌性剪切帶侵入，形成帶狀岩體，分布在太武山花崗片麻岩體周圍。R5岩體單元的主要礦物為正長石、斜長石、石英、黑雲母與角閃石，含白色長石常呈斑狀變晶、變嵌晶狀(Poikiloblastic)與眼球狀構造，局部地區出露混合岩化條帶狀、疊層狀構造、褶皺構造與串腸構造等特徵。

此外，R5 岩體單元含同構造侵入的角閃岩脈，部份露頭顯示角閃岩脈受剪切作用形成長條狀角閃岩包體，構成特殊的「魚群狀構造」特徵。本層常見由角閃岩質與花崗岩質交互組成的層狀混合岩 (layered migmatite)，呈現串腸狀構造，並形成糜嶺岩帶。部分分支切過太武山花崗片麻岩體，伴隨著剪切帶富含角閃岩脈及片麻岩條帶，並造成混合岩化特徵(即 R1 岩體單元的特徵)。從重磁力解析結果(圖 3-21)，R5 呈現較高的磁性與密度特徵。

成功片麻岩的原岩具有奧長花崗岩與英雲閃長岩的特徵，屬於燕山運動同造山期岩漿活動產生之特有高鋁低鉀鈣鹼性花崗岩類，順剪切帶侵入的年代主要發生在 130 至 120 Ma 之間(林蔚等，2011，p32)。

3.4.1.1.7. 花崗片麻岩與混合岩R6

R6 岩體單元是灰黑至粉紅色的粗粒黑雲母花崗片麻岩及成功片麻岩的接觸帶，位於剪切帶中，但受剪切活動的變形與變質作用較大，並形成岩性的過渡帶。產狀上花崗片麻岩中夾有許多密度較高的成功片麻岩及角閃岩脈，常伴生混合岩化接觸圈。另外，從重磁力解析結果(圖 3-21)，R6 具有較低的磁性及較高的密度。

3.4.1.2. 單元D

金門地區之後造山期細粒花崗岩脈(即田埔花崗岩，年代約 101 Ma)、偉晶岩脈、輝綠岩脈群(年代約 92-76 Ma)(李寄嶠，1994，p152)，均順被動張裂的節理侵入淺部地殼，並與圍岩緊密鑲嵌接觸，且截切過所有韌性剪切帶，顯示剪切作用已停止，大地構造環境已轉為張裂環境的正斷層作用為主(林蔚等，2011，p29)。

在上述的岩脈中，淺綠色、墨綠色至黑色含角閃石斑晶或均質細粒的輝綠岩，以岩脈群(dike swarm)的產狀普遍出露於金門島。由於輝綠岩脈貫穿片岩、花崗片麻岩、花崗岩以及偉晶花崗岩及細晶岩脈，故屬於最後一期的岩漿侵入活動的產物。輝綠岩脈內沒有明顯的葉理發育，與圍岩之接觸面平整，無反應邊緣。輝綠岩脈主要礦物組成爲斜長石、角閃石、單斜輝石、不透光礦物(如鈦鐵礦、磁鐵礦)，偶有

綠泥石、綠簾石、陽起石、楣石與方解石(林蔚等, 2011, p22; 謝佩珊及林蔚, 2012, c7)。

輝綠岩脈往往順北東向張性節理侵入, 此類節理亦多為基盤岩的冷卻節理, 因此輝綠岩脈群以數十公分至數公尺寬, 高角度且走向主要為 N30E 成群侵入結晶基盤(圖 3-24)。輝綠岩脈本身亦因快速冷卻而發育許多自身的冷卻節理, 與圍岩的冷卻節理彼此不相連。因此, 輝綠岩脈群為重要的不連續面。在參考案例表二中, 簡化輝綠岩脈群的出現頻率為: 每公里間距平均出現 100 m 寬度的輝綠岩脈(表 2-2 中的 D1 to D10), 以利其他數值模擬的建構應用。

3.4.1.3. 單元F

在深地層處置概念的場址特性調查評估中, 主要導水裂隙是核種在地層遷移的主要通道, 故, 通常是調查評估的重點。

由於地下水的電阻通常比結晶岩低, 因此透過地層電阻的探測解析, 可初步推測結晶岩地區的導水裂隙帶。根據地電阻測線的位置安排(圖 3-23 左圖中的淺藍色虛線)及其探測結果的解析(圖 3-23 右圖中的 9 張地電阻影像剖面), 研判 K 區可能存在 11 條導水構造(表 2-2 的 F1 至 F11, 圖 3-23 左圖中的淺藍色虛線); 其中, 僅 F1 與 F2 導水構造, 經實際地質鑽探驗證其確實存在, 並進行相關跨孔實驗技術發展(圖 3-25), 取得相關特性參數。F3 至 F11 雖亦可能為導水裂隙帶, 但尚未經過地質鑽探確認且缺乏相關孔內試驗數據, 因此, 不在本版次參考案例表二的建構內容。

根據地電阻調查結果(圖 3-23)並配合地表地質調查、重磁探測、航照線形特徵與地質鑽探等調查資料, 針對太武山四周區域之地下構造分布判釋。研判太武山及其周圍地區具有多條北東與北西等兩個方向的地質構造, 這些地質構造帶, 可能代表為地下岩層間的破碎帶、斷層帶, 以及不同岩體的分界等構造(林蔚等, 2005, c4p63&p64):

- ◆ F1 構造: 北東向構造, 約自太武山西緣測線 RIP-8 距離 950 公尺處之破碎帶起, 連接位於太武山中央之線形構造線, 向東北方向延伸貫穿太武山, 而與位於太武山東側之測線 RIP-4 距離 1,220

公尺處之破碎帶相連接(圖 3-23)。F1 為一走向約北 60 度東，向北傾斜，寬度約在 150 公尺左右之地質破碎帶構造，此破碎帶其分布位態與 KMBH01、KMBH02、KMBH04 鑽井所鑽遇之太武山斷層位態吻合。此外，由 F1 往北東方向延伸，亦可連接至近海震研判結果的疑似構造區(羅聖宗與李伯當，2003，Fig. 3-6-F)。

- ◆ F2 構造：北西向構造，位於太武山之東北緣，以測線 RIP-2 之距離 450 公尺與測線 RIP-1 之距離 150 公尺等兩處破碎帶，相連接而成之北西向地質構造(圖 3-23)。此北西向構造可能為太武山斷層的共扼破碎帶。此帶傾角接近垂直，寬度約在 150~200 公尺左右。此外，在 KMBH01、KMBH02、KMBH04 鑽井中約 330 至 350 公尺左右鑽遇此破裂帶的一小分支。
- ◆ F3 構造：北東向構造，自測線 RIP-8 距離 500 公尺處之低電阻帶，連接太武山西北側之線形構造線，向東北方向延伸，與測線 RIP-2 於距離 1,000 公尺處之破碎帶相連接(圖 3-23)，屬於走向約北 55 度東的地質構造帶，研判可能為岩體內的破碎帶構造。
- ◆ F4 構造：北東向構造，位於太武山東南側，由測線 RIP-5 之距離 600 公尺，與測線 RIP-7 距離 450 公尺等兩處低電阻異常帶所連接而成(圖 3-23)，約呈北 45 度東的線性構造帶，研判應屬於岩體內之破碎帶構造。
- ◆ F5 構造：北西向構造，位於太武山之東北側，以測線 RIP-2 之距離 1,350 公尺處，與測線 RIP-1 之距離 840 公尺等兩處破碎帶相連接而成(圖 3-23)，走向約呈北 65 度西的地質構造，此構造之傾角接近於垂直，寬度約在 80 公尺左右，可能為岩體內之破碎帶構造。
- ◆ F6 構造：北東向構造，約自太武山西北緣起，以 RIP-8 距離 500 公尺、RIP-3 距離 1,000 公尺與 RIP-6 距離 600 公尺等三處為控制點(圖 3-23)，其走向約呈北東 37 度，研判此構造兩側電阻值差異大，應為太武山花崗岩體北界，此帶含水量多可能為沿著兩岩體界線發展之破碎帶，寬度約在 150 至 200 公尺左右。

- ◆ F7 構造：北東向構造，位於太武山東南側，係由測線 RIP-5 之距離 1,550 公尺與測線 RIP-7 距離 950 公尺等兩處低電阻異常帶所連接而成一約呈北 55 度東的地質破碎帶構造(圖 3-23)，此一破碎帶寬度約在 150 至 200 公尺左右，以高角度向北傾斜，應為太武山岩體向東南方延伸所遇之重要構造帶，其構造屬性尚待調查。
- ◆ F8 構造：北西向構造，位於太武山之東北側，以測線 RIP-2 之距離 2,250 公尺處之破碎帶(圖 3-23)，配合顯著的北西向線形構造研判，應存在一地質破碎帶構造，此破碎帶之走向約呈北 65 度西，寬度約在 80 公尺左右。
- ◆ F9 構造：北西向構造，位於太武山西緣，配合線形構造概可以測線 RIP-3 距離 500 公尺與測線 RIP-8 距離 1,100 公尺等兩處低電阻構造連線，形成約呈北 30 度西的地質破碎構造帶(圖 3-23)，亦為太武山岩體分布之西界。此外，由 F9 往東南方向延伸，亦可連接至近海震研判結果的疑似構造區(羅聖宗與李伯當，2003，Fig. 3-6-D)。
- ◆ F10 構造：北西向構造，位於太武山之東側，沿地形線形的公路進行施測的 RIP-4，呈現淺層電阻影像剖面明顯具有低電阻層(圖 3-23)，推測與測線平行此一北西向構造有關。經大地電磁法針對 KBMH01、KMBH02 及 KMBH04 鑽井附近三維逆推解析的結果(林蔚等，2007，c4p47)，顯示有北西向高角度構造帶(F10)與北東向高角度構造帶(F1)在此交錯，形成巨厚低電阻特徵。此外，由 F10 往東南方向延伸，亦可連接至近海震研判結果的疑似構造區(羅聖宗與李伯當，2003，Fig. 3-6-E)。
- ◆ F11 構造：北西向構造，位於太武山之西側，根據北太武山地形變化，以及太武山北側平原上河系北轉的地形線形連線，推測存在一條北西向構造帶，該構造約略平行 RIP-9 測線(圖 3-23)，在 RIP-9 上呈現淺層電阻影像剖面明顯的低電阻層。

此外，了解構造的生成前後順序，有助於了解構造本身的特性；K區構造的生成前後順序(林蔚等，2007，c4p5)，分列如下：

(1) 韌性剪切帶：

K區屬於長樂-南澳變質帶中段，受到平潭-東山深斷裂帶(圖 3-5)活動的影響，圍繞著太武山花崗片麻岩體周圍，有東北向及西北向兩組韌性剪切帶，成功片麻岩體之原岩岩漿沿著剪切帶侵入，侵入深度約中部地殼，主要呈現角閃岩相變質作用的特徵。受剪切活動影響，形成中至細粒片理發育良好的片麻岩及角閃岩脈，年代約為 129 Ma (林蔚等，2011，p32)，此同構造侵入體的年代亦可代表此剪切構造活動的年代。然而，細粒花崗岩脈與偉晶岩脈群於 100Ma 左右侵入此剪切帶，顯示此剪切帶的剪切活動在 100 Ma 以前已停止活動。

(2) 細粒花崗岩脈及偉晶岩脈侵入構造：

細粒花崗岩脈及偉晶岩脈的岩漿多順被動張性節理侵入並快速冷卻成岩脈，顯示侵入當時侵位深度相當淺，且已屬於張裂型大地構造環境。這些岩漿侵入裂隙並以結晶相嵌與圍岩密合，因此不會形成任何導水通道。

(3) 冷卻節理：

冷卻節理多伴生在細粒花崗岩脈或偉晶岩脈附近，為基盤岩快速冷卻收縮的結果。此節理發育於岩體溫度冷卻至攝氏 300-200 度以下，根據輝綠岩脈全岩鉀氫法，加上花崗岩及花崗片麻岩的黑雲母及鉀長石氫氫法、磷灰石核飛跡法等放射性定年法資料顯示，冷卻節理形成於 95 Ma 以後(林蔚等，2011，p32)。

(4) 輝綠岩脈群侵入構造：

輝綠岩脈大都順北東向張性節理侵入，此類節理亦多為基盤岩的冷卻節理，因此輝綠岩脈群以數十公分至數公尺寬，高角度且走向主要為 N30E 成群侵入結晶基盤(圖 3-24)。輝綠岩脈本身亦因快速冷卻而發育許多自身的冷卻節理，與圍岩的冷卻節理彼此不相連。因此，輝綠岩脈群為 K 區地下水重要的不連續面。

(5) 斷層帶

太武山斷層為最具代表性的北東向正斷層帶(F1)。太武山斷層帶截切過太武山，通過太武山公墓，於南、北太武山之間形成約北60度東延伸的斷層谷。

針對此斷層帶調查深層地質特性而設置的 KMBH01、KMBH02 及 KMBH04 三口鑽井(圖 3-25 及圖 3-26)，由鑽取之岩心顯示斷層角礫、斷層泥及破碎帶等特徵，依據鑽遇斷層頂面深度計算出位態為 N64E/70N 的正斷層(F1)，約與太武山的斷層谷延伸方向一致(林蔚等，2005，c4p28)。此三口井在約 350m 深度，亦鑽遇 F2 構造的分支，其為位態約為 N80W/50S 的破裂帶(F2)，寬度約為 8 至 15 m。

由於部份輝綠岩脈受斷層影響形成破碎剪裂帶，因此可知斷層發生在輝綠岩脈侵入活動(92-76 Ma)之後。而太武山斷層兩側結晶基盤的核飛跡年代在晚白堊紀有明顯冷卻率的差異，但在新生代以後並無差別，顯示太武山斷層帶活動應在 76-58 Ma 之間(Lin et al., 2012, c4p75)。

(6) 剝蝕節理：

岩體剝蝕近地表時，因風化及解壓作用形成的節理，多為最後期之低角度構造，並平行地表發育。在 K 區花崗岩基盤區，剝蝕節理所形成的風化裂隙岩層為主要淺層含水層。

3.4.2. 地質概念模式

根據前述地質單元的建構論述，K 區的地質概念模式如圖 3-26 所示，其建構過程及重點地質特徵簡述如下：

- (1) 首先，透過重磁逆推的結果及地表地質調查結果，初步推測地下岩性及構造的分布(圖 3-21)，並據以規劃地電阻探測測線；重磁線形顯示兩組主要位態：約 N50E 及 N45W(圖 3-20)。
- (2) 根據地電阻探測解析結果，研判地下含水構造的可能分布情形，據以規劃地質鑽探孔位置(圖 3-23)；地電阻分析結果顯示兩組主要低電阻：約 N60E 及 N45W，其中一組非常接近太武山斷層的位態(N64E/70N)。

- (3) 根據地表地質、重磁逆推、地電阻探測、地質鑽探所取得的岩心及孔內探測之分析結果，建立 K 區地下地質概念模式如圖 3-26 所示；其中，根據 KMBH01-02-03 的相關孔內及跨孔測試(跨孔地電阻、示蹤試驗、MT 測量等)可知：太武山斷層(F1)(N64E/70N)及其共軛裂隙帶(F2)(N80W/50S)為主要導水帶。

3.4.3. 淨抬升速率

根據第 3.2 節區域地質演化觀點的描述，及 K 區地表及岩心樣品定年的分析結果(圖 3-27)，可推測 K 區地質演化過程，及其淨抬升/剝蝕速率(林蔚等，2003，c4p53；林蔚等，2005，c4p30)，摘述如下：

- (1) 太武山岩體及斗門岩體為 K 區東部兩個主要的花崗岩體；花崗岩體的形成年齡以太武山岩體最老(生成於 160 to 140 Ma 間)，斗門岩體最晚(生成於 120 Ma 前)。
- (2) 在燕山運動的晚期(100 to 90 Ma 間)，K 區岩體快速抬升冷卻；穿插於岩體間的細粒花崗岩脈及偉晶岩脈，約形成於此一期間。
- (3) 92 to 76 Ma 間，因花崗岩體冷卻形成的節理，成為輝綠岩脈群侵入的主要管道(李寄嶼，1994，p152)。這些岩脈為 K 區現今的主要阻水構造(如圖 3-24 所示)，其位態大致為 N30E/80N，約每公里出現一群總寬度約 100 m 的岩脈；類似的岩脈分布特性，亦出現於馬祖、烏坵等離島(圖 3-7)。
- (4) 截切過太武山岩體最大的正斷層構造為太武山斷層，位態為 N64E/70N，斷層厚度超過 150 公尺以上(林蔚等，2007，c4p49)。此斷層截切過輝綠岩脈群，顯示活動年代晚於輝綠岩脈；核飛跡定年結果顯示斷層上下盤剝蝕歷史在 58 Ma (圖 3-27)以來已無明顯差異，故斷層活動年代可能界於 76 Ma 至 58 Ma 之間。
- (5) 岩樣之磷灰石核飛跡的封存溫度約為 110 °C，在假設完美封存的條件下，岩樣內磷灰石之核飛跡定年(FTD_Ap, Fission-track dating on apatite minerals)的年代數值，代表該岩樣自過去在 110 °C 環境至今的可能經過時間(年齡)。另外，假設岩體過去至

今的地溫梯度為定值 30 °C/km 且地表溫度亦為定值 20 °C，則 FTD_Ap 的年代數值亦代表該岩樣在深度約 3 km(=(110 °C - 20 °C) / (30 °C/km)) 抬升至現今採樣深度的時間。K 區地表岩樣 FTD_Ap 的年代數值範圍約界於 87~58 Ma，平均約 73 Ma(圖 3-27)，在 495m 深度岩樣(KMBH01)的 FTD_Ap 年代數值約為 26Ma(圖 3-27)，則 K 區的淨抬升速率非常慢，可能介於 0.01 m/yr 至 0.1 m/yr：

- ◆ 假設 73 Ma 至今，岩體的淨抬升速率為定值，則其淨抬升速率約為 0.04 mm /yr (= (3000 m - 0 m) / 73 Ma)。
- ◆ 假設 26 Ma 至今，岩體的淨抬升速率為定值，則其淨抬升速率約為 0.1 mm /yr (= (3000 m - 495 m) / 26 Ma)。
- ◆ 假設 73 Ma 至 26Ma 間，岩體的淨抬升速率為定值，則其淨抬升速率約為 0.01 mm /yr (= 495 m / (73 Ma - 26 Ma))。

3.4.4. 地溫梯度

利用在 K 區花崗岩體 4 個位置深達 500m 的 6 口深井，量測地下水流體溫度變化，了解結晶基盤的地溫梯度特性。其中，KMBH01、KMBH02、KMBH04 及 KMBH06 位於太武山花崗片麻岩中，KMBH03 及 KMBH05 位於斗門花崗岩體內部(圖 3-19)。

太武山花崗片麻岩體內部(R2 岩體單元)以 KMBH06 為代表，KMBH06 之井溫，除最淺處受地表效應影響不計外，10m 以下溫度由 24.0°C 隨深度穩定增加，至 500m 深為 32.3°C，曲率幾無變化，反映地下水流動甚低不致影響溫度，地溫梯度約 1.7°C/100m (李奕亨等，2008，c4p4)。另一方面，KMBH01、KMBH02 及 KMBH04 位於太武山花崗片麻岩體(R1 岩體單元)的主要破碎帶上(即太武山斷層，F1)，相鄰僅 10m 設置成小規模試驗場，專門針對斷層帶進行井下量測。若以 KMBH01 為代表，除掉地表效應不計後，井下的溫度自 15 m 處的 23.4°C，至 498m 的 32.0°C，溫度變化呈緩慢上升，曲率幾無變化，反映跨孔間地下水流速低緩不影響溫度變化，每 100 m 增加 1.8°C (郭泰融等，2003，c6p8)。

KMBH03 及 KMBH05 均位於斗門花崗岩體(R4 岩體單元)。KMBH03 之井溫除地表效應外，隨地溫梯度穩定增加，溫度由 23.7°C 升至 31.7°C，曲率幾無變化，地溫梯度約 1.6°C/100m(李奕亨等，2007，c4p4)。KMBH05 之除地表效應外，至深度 20-45m 逐漸穩定於 24.4°C。此深度之後，溫度由 24.4°C 升至 32.8°C，曲率幾無變化，地溫梯度約 1.8°C /100m (李奕亨等，2007，c5p4)。

整體而言，K 區地溫梯度在深度 500m 的鑽井中量測得到地下水流體溫度變化，獲得結晶基盤的地溫梯度特性平均為 1.7°C/100m，介於 1.6-1.9°C/100m 之間。

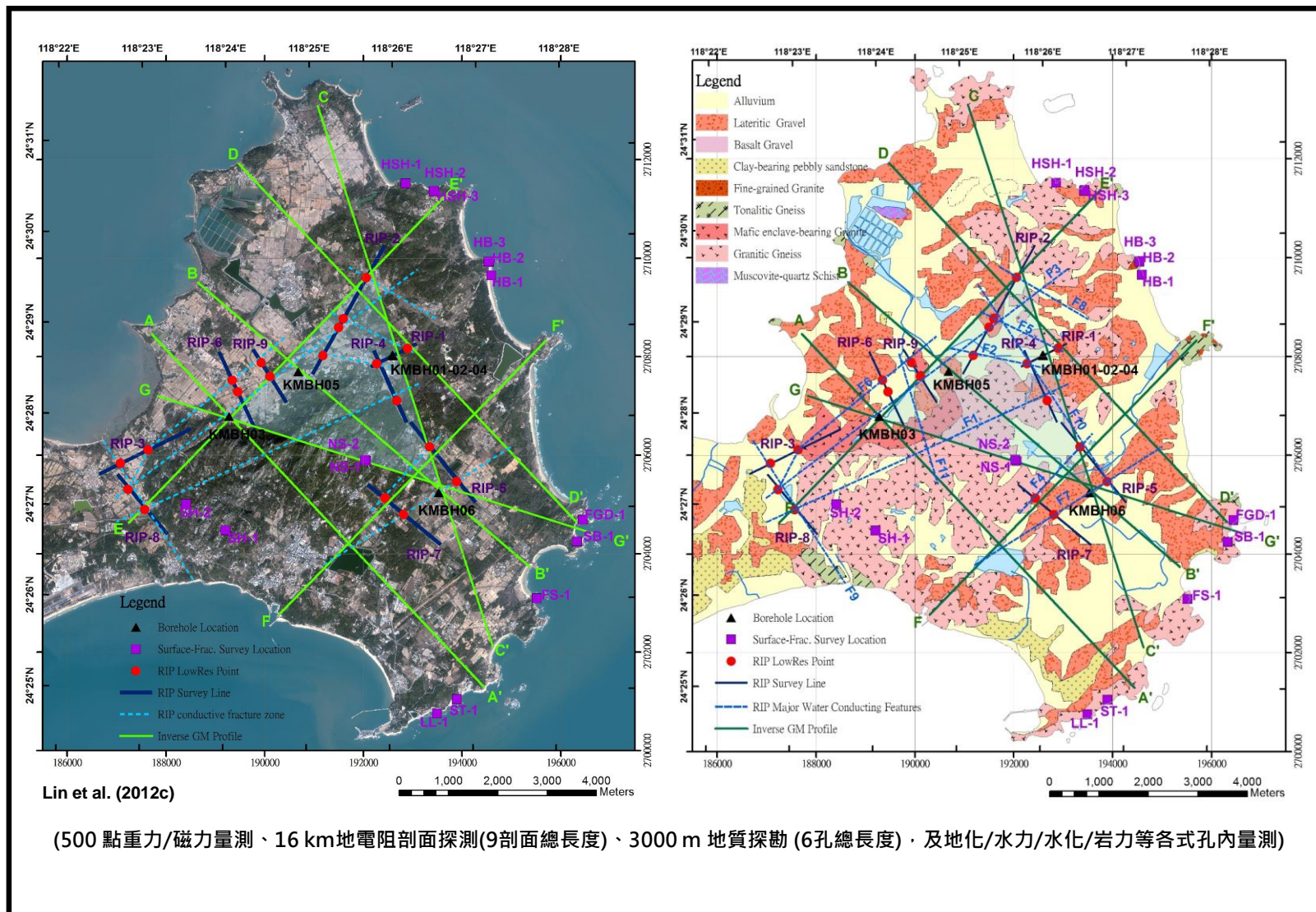


圖 3-19：K 區 1999 年至 2010 年期間 R&D 活動位置圖

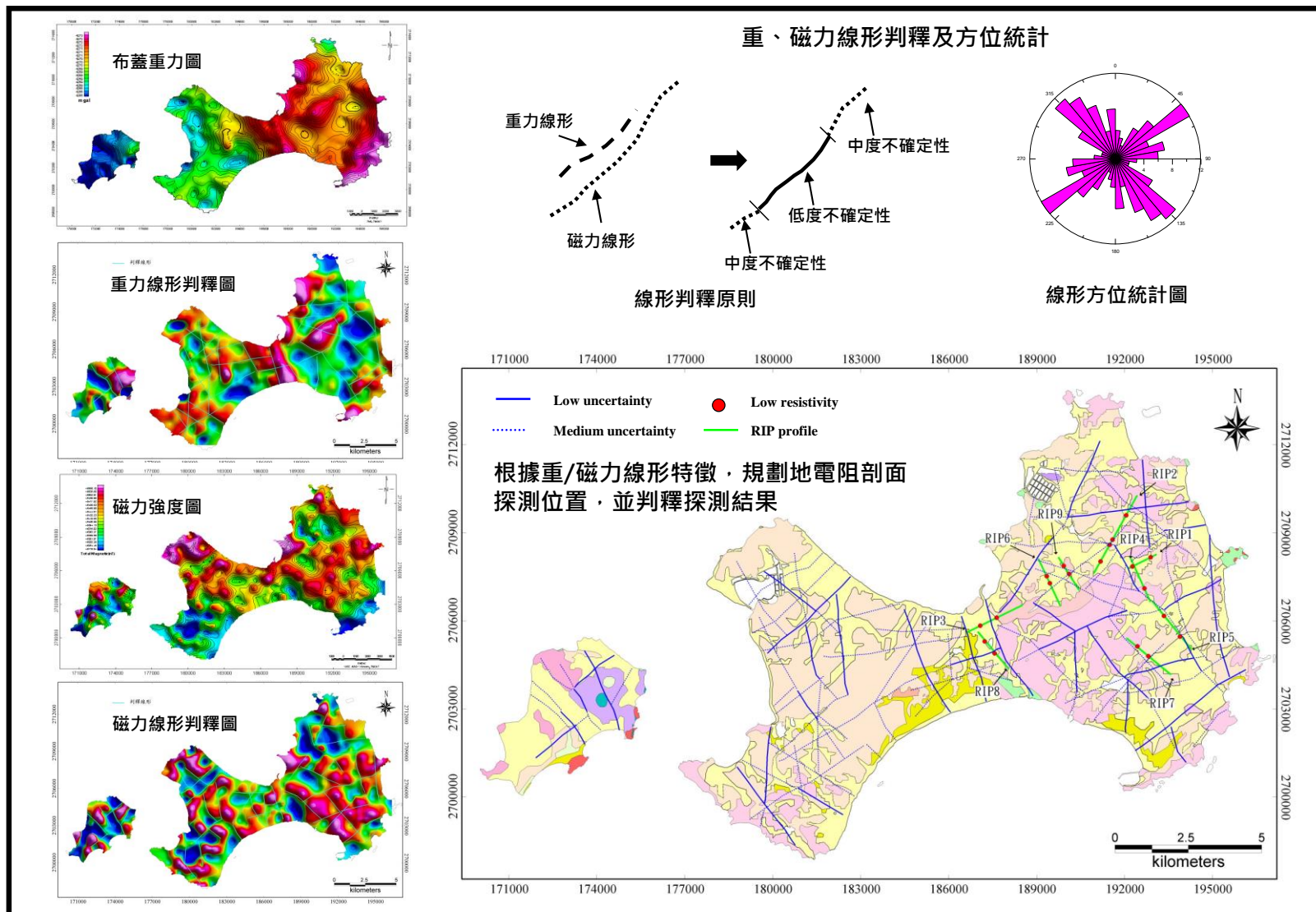


圖 3-20：K區重磁線性分布圖

註解：

- ◆ 左圖由上而下分別為：
 - K區布蓋重力異常圖(Guo et al., 2007, c4p12)；
 - K區重力梯度及線形判釋圖(Guo et al., 2007, c5p4)；
 - K區全磁力異常圖(Guo et al., 2007, c4p12)；
 - K區磁力梯度及線形判釋圖(Guo et al., 2007, c5p5)。
- ◆ 右上圖為重、磁力線形判釋整合示意圖及線形方位統計圖(Guo et al., 2007, c5p6&p7)。
- ◆ 右下圖重磁線形與地電阻探測結果比較圖(Guo et al., 2007, c5p7)。

Guo et al. (2007) [In Chinese: 郭泰融、林蔚、董倫道 (2007), 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(94~96 年度計畫)－K 區重磁力測勘資料逆推處理 94~96 年執行成果報告, 工研院/台電公司委辦, SNFD-EEL-90-241 / SNFD-ITRI-TR2007-0241。]

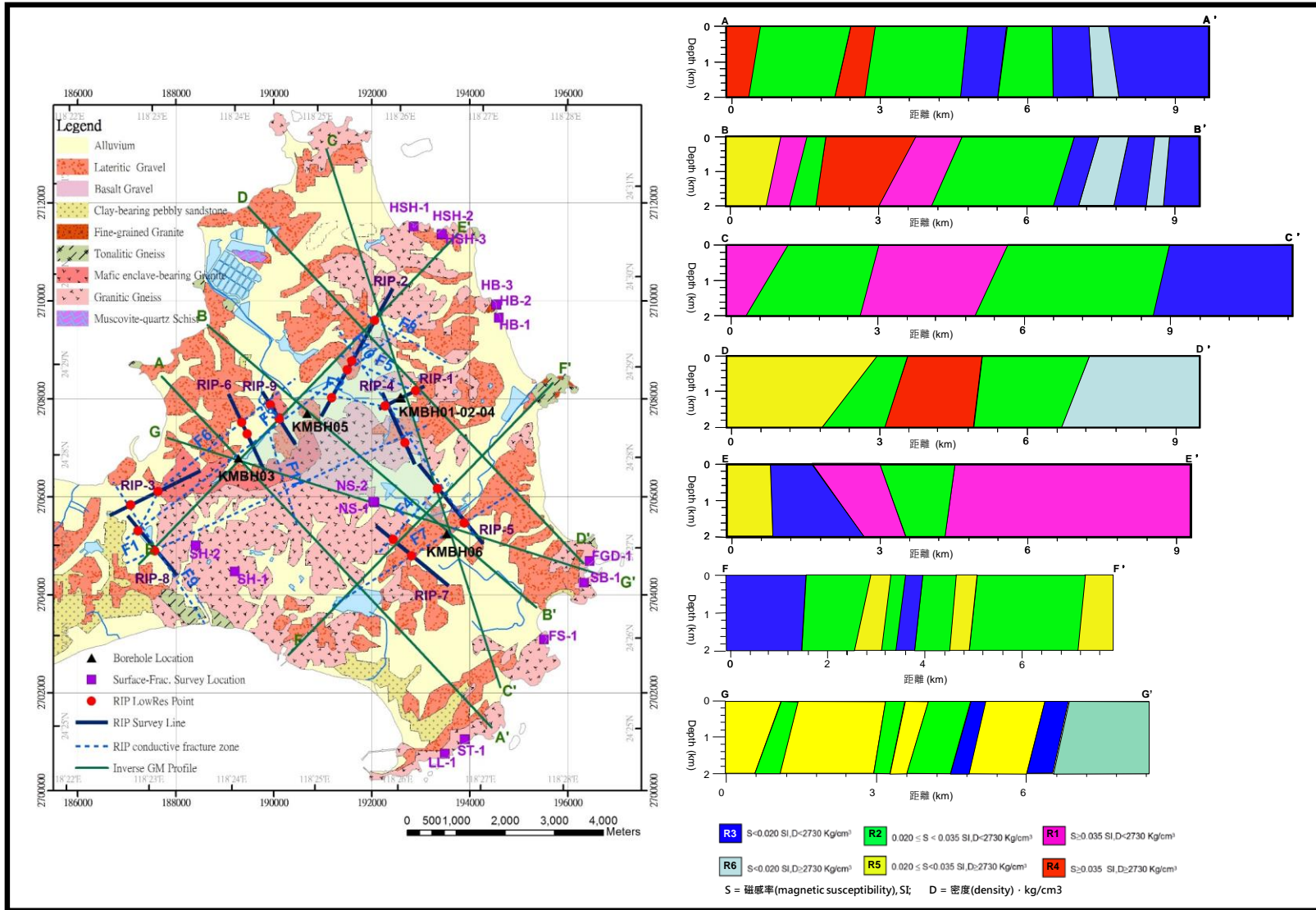


圖 3-21：K區重磁聯合逆推剖面結果圖

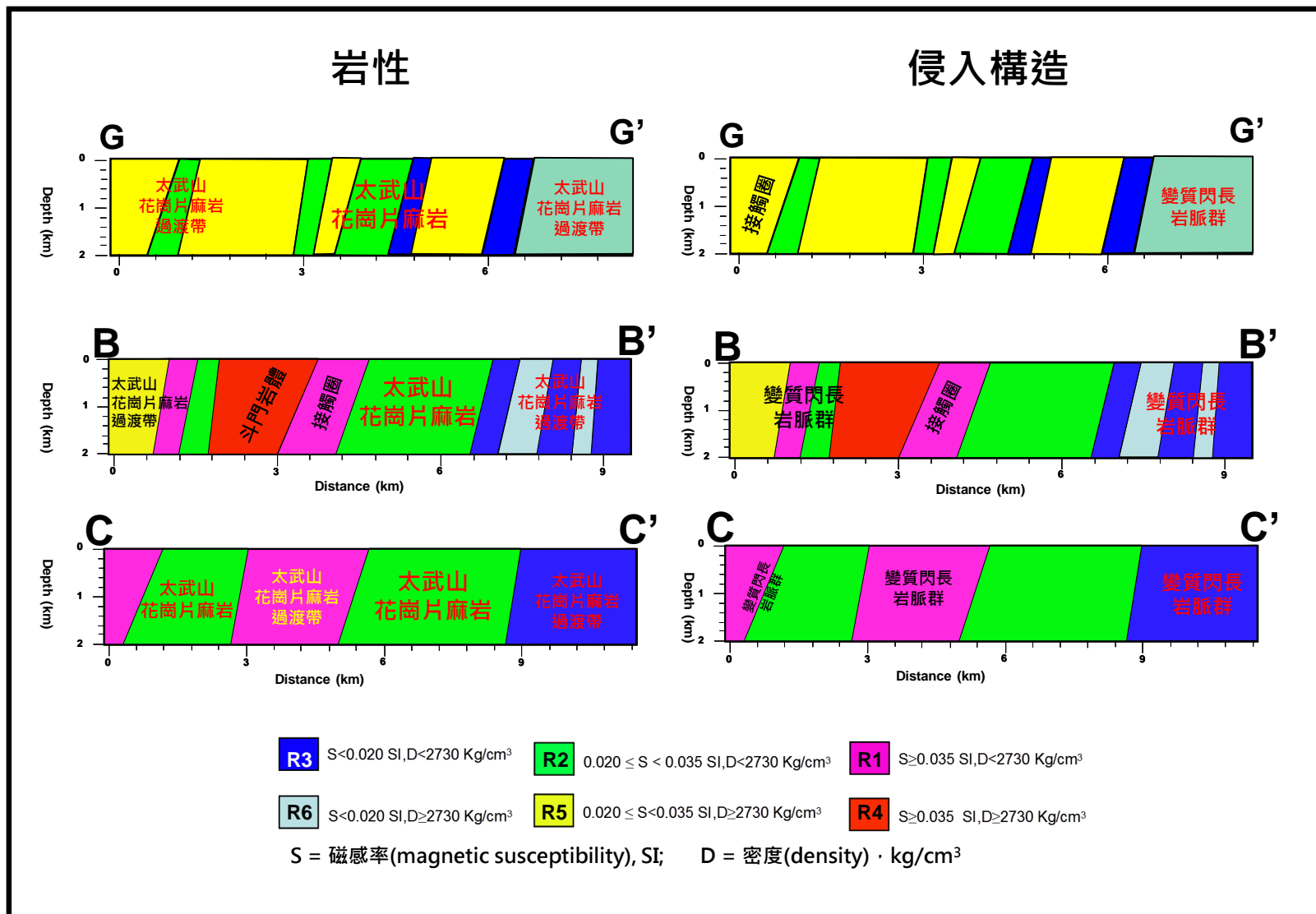


圖 3-22：K 區重磁力逆推剖面解析侵入構造及岩性變化

註解：

- ◆ S 代表岩體的磁感率。
- ◆ D 代表岩體的密度。
- ◆ 各逆推剖面的位置，請參考圖 3-21。

資料來源：Lin et al. (2015, c3p58)

Lin et al. (2015) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、董倫道、謝佩珊、錢正明、田能全、張育德、黃淞洋、李奕亨、陳文山、郭泰融、蔣立為、廖彥喆、謝德勇、邱欣瑜、楊勤儀(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(101~103 年度計畫)-- 地質環境歷年研究成果 2014 年整合報告(SNFD2014GE)，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-324 / SNFD-ITRI-TR2015-0324。]

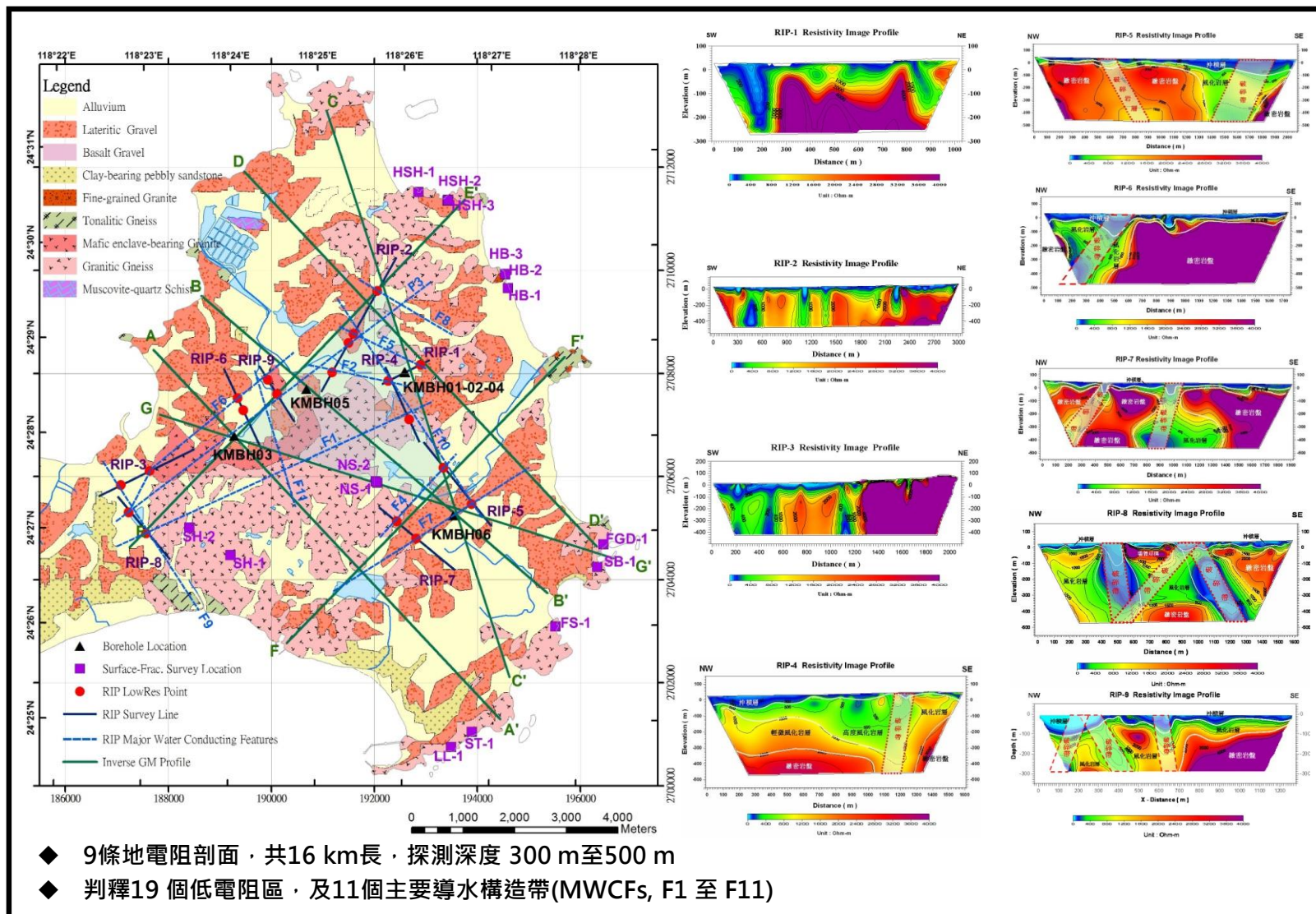


圖 3-23：K 區地電阻剖面與可能導水裂隙帶解析圖

註解：

- ◆ 左圖為 K 區地表地質圖及 1999-2010 年調查地點位置圖 (Lin et al., 2012, c4p9)。
- ◆ 右圖為地電阻探測之 9 張 RIP 剖面 (Lin et al., 2012, c2p22 to p33)。
- ◆ 在 RIP 剖面中，藍色區域代表低電阻帶，可能代表含水量較高或黏土含量較高的區域。
- ◆ 當地電阻測線與構造無法正交時，RIP 剖面的結果可能會有點失真。

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋 (2012)，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 (99~101 年度計畫) – K 區調查成果 (1999-2010) 彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

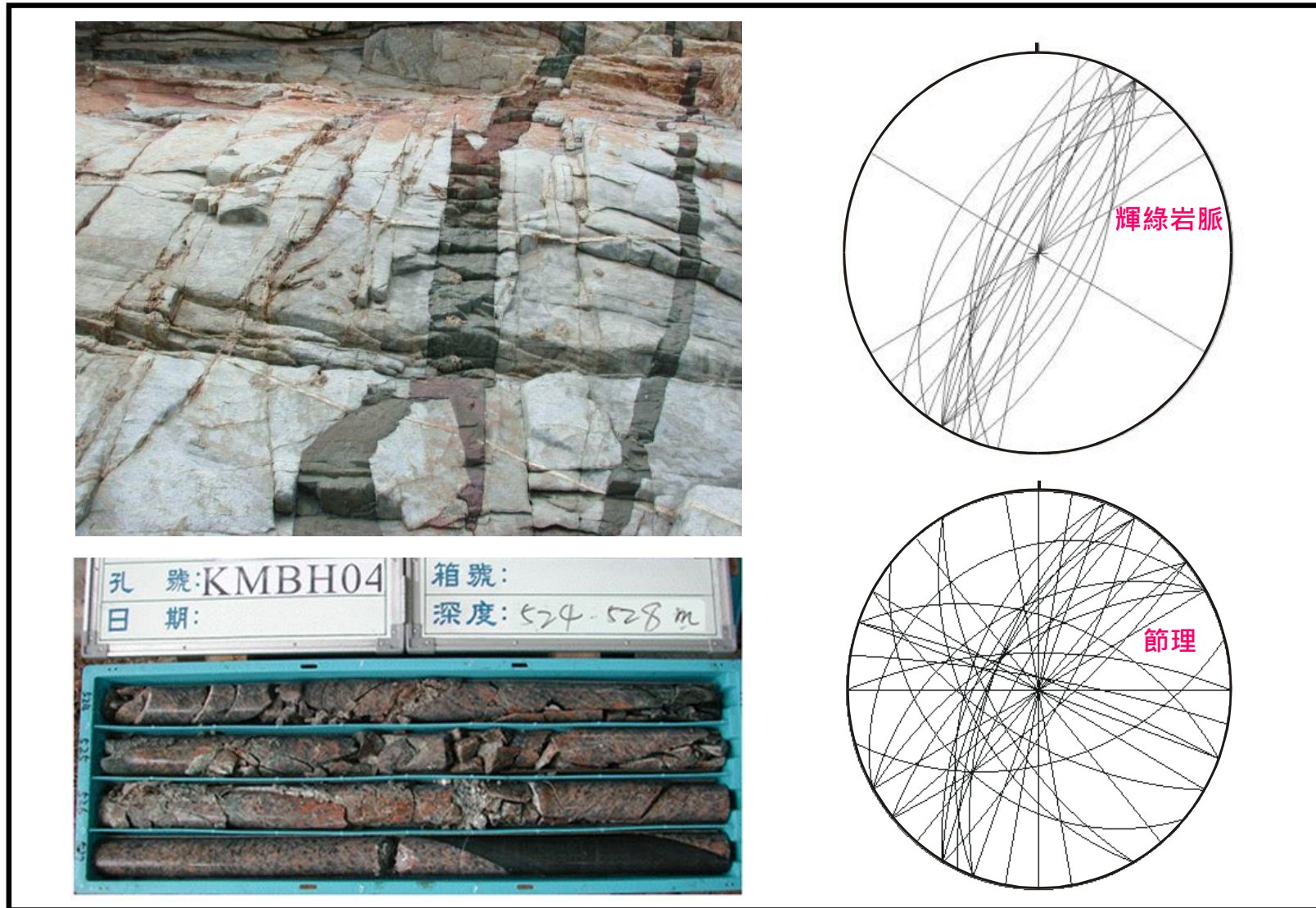


圖 3-24：K區花崗岩體常見的輝綠岩脈群

註解：

- ◆ 上圖為沿海邊出露的太武山花崗片麻岩露頭，可見輝綠岩脈群及共生的裂隙帶。K區花崗岩體中的輝綠岩脈的位態相當一致，均為 N30E 近乎垂直的高角度岩脈脈(Lin et al., 2012, c4p33)。
- ◆ 下圖為太武山斷層帶的井下岩心，夾有黑色的輝綠岩脈(Lin et al., 2012, c4p34)。

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

鑽井

井下地球物理調查

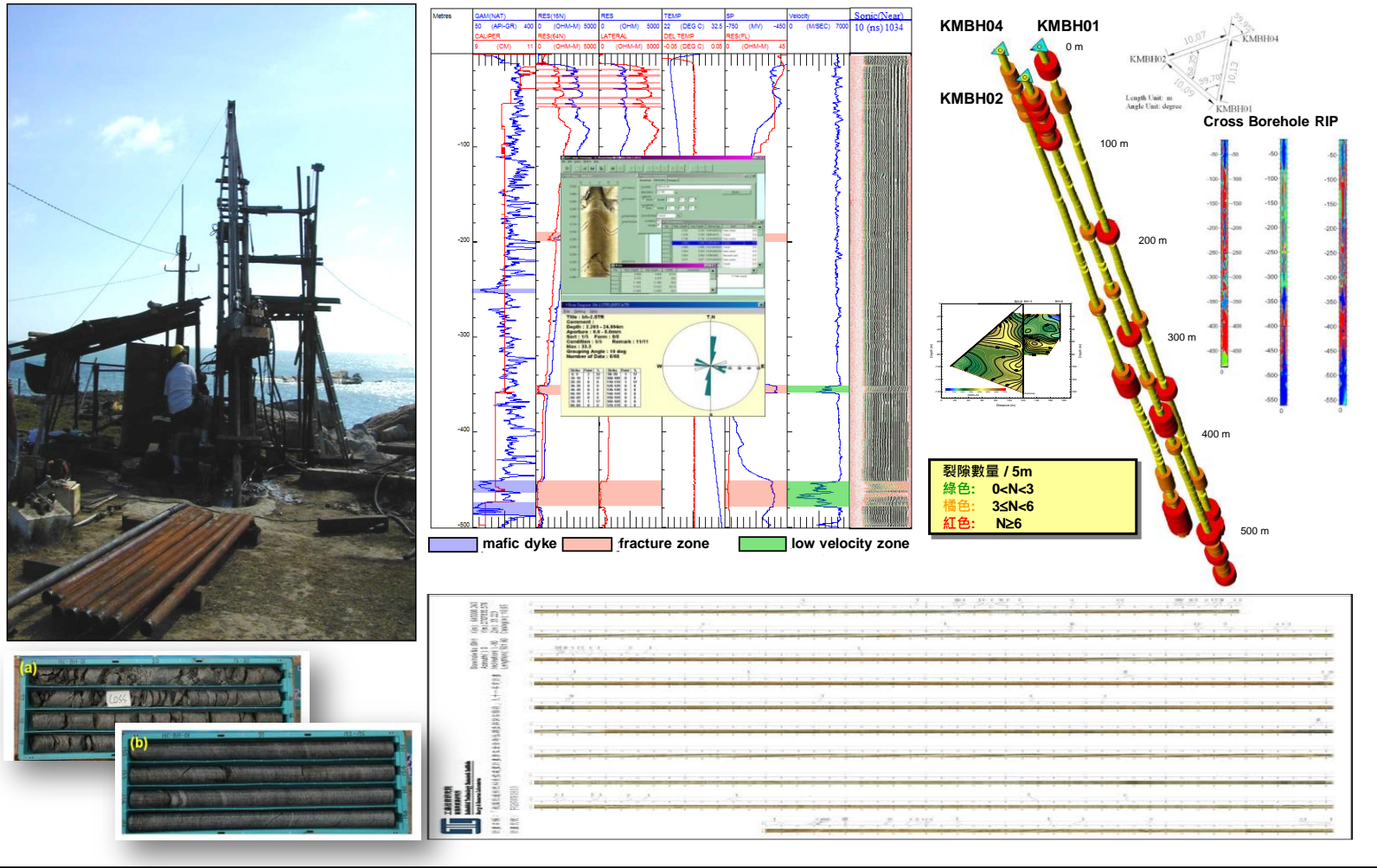


圖 3-25：地質鑽探及孔內試驗確認地下地質特性

註解：

- ◆ 左圖為地質鑽探照片(烏坵，1999)。
- ◆ 上中圖為地球物理井測及孔內攝影結果範例圖。
- ◆ 上右圖為 KMBH01-02-04 裂隙分布(Lin et al., 2007, c4p197)及跨孔地電阻解析圖(Chang et al., 2005, c3p52)。

Chang et al. (2005) [In Chinese: 張傳聖、郭泰融、林蔚、張育德、李奕亨、歐陽湘(2005)，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(93 年度計畫)－跨孔試驗與量測，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-220 / SNFD-ITRI-TR2005-0220。]

Lin et al. (2007) [In Chinese: 林鎮國、董倫道、蔣立為、林蔚、廖啟雯、錢正明、郭泰融、陳文山、李奕亨、楊明宗、張育德、歐陽湘、張濟權、蘇毓秀、劉台生、衛元耀(2007)，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(94~96 年度計畫)－期末報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-254 / SNFD-ITRI-TR2007-0254。]

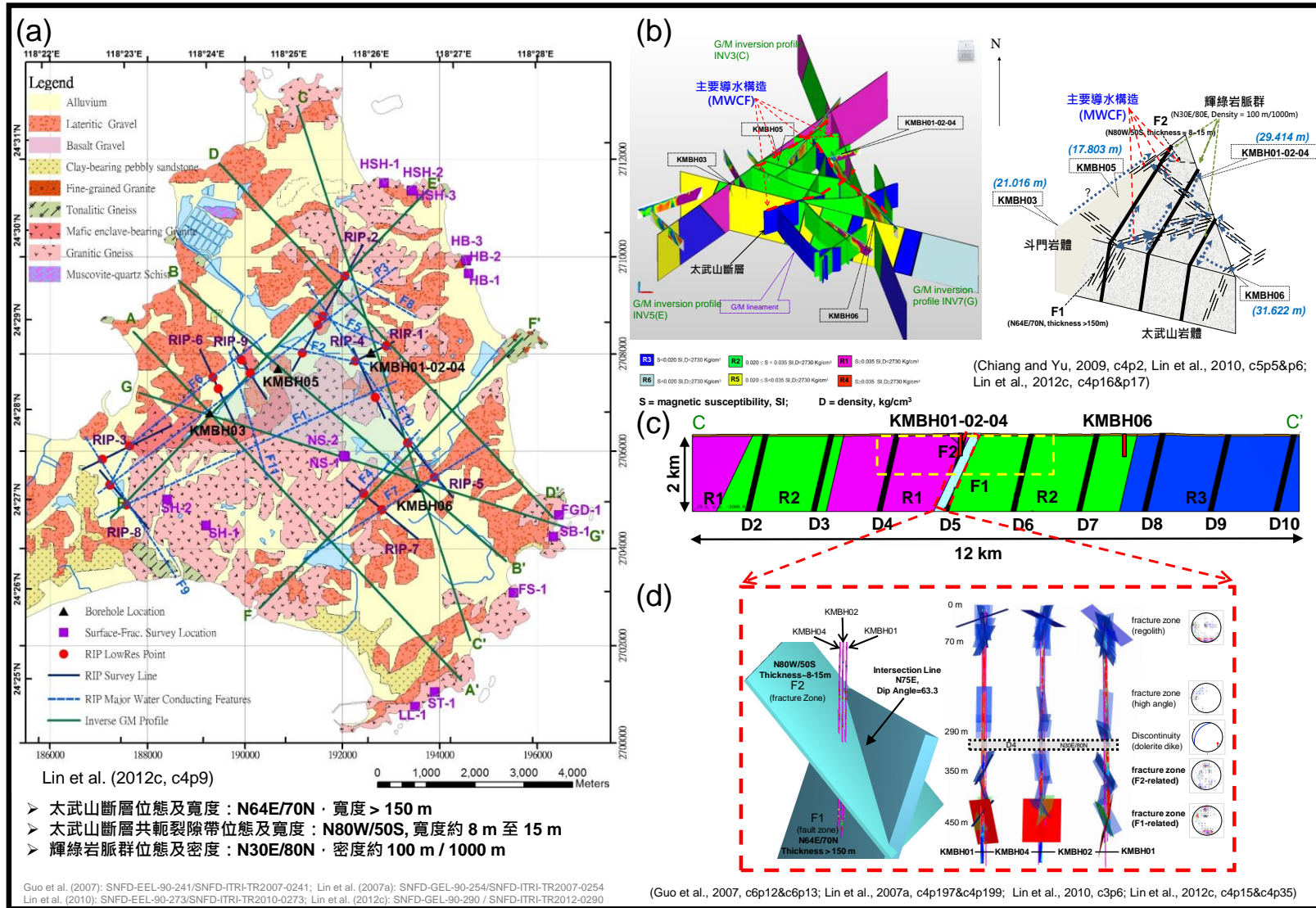


圖 3-26 : K 區地質概念模式

註解：

- ◆ 左圖為 K 區地質圖及 1999-2010 年調查地點位置圖(Lin et al., 2012, c4p9)。
- ◆ 右上圖 K 區東部 KMBH03-06 剖面朝南之地質概念模式展示圖，及導水裂隙構造流向示意圖(Lin et al., 2010, c5p5&p6; Lin et al., 2012, c4p16&p17)。
- ◆ 右中圖對應左圖 C-C'剖面的重磁力逆推剖面構造及岩性變化圖(Guo et al., 2007, c6p12&c6p13; Lin et al., 2010, c3p6; Lin et al., 2012, c4p15)
- ◆ S 為磁感率(單位 SI)；D 為密度(單位 Kg/cm³)。
- ◆ 重、磁逆推剖面深度為 2 km，顏色分帶反映不同岩性。
- ◆ 右下圖為 KMBH01-02-04 之裂隙空間分布與跨孔地電阻影像剖面比較圖(Lin et al., 2007, c4p197&199; Lin et al., 2012, c4p35)。
- ◆ 裂隙空間分布均通過低電阻帶上(跨孔地電阻剖面中藍色及綠色影像所示)，顯示符合地球物理調查裂隙含水層的低電阻物性。此外，紅色虛線框線內左側圖示太武山斷層與鑽井關係。根據鑽井位置獲得裂隙面位於 350 公尺者，為太武山斷層帶分支之裂隙帶，以綠色平面標示；450 公尺為太武山斷層頂面(位態為 N64E/70N)，以紅色平面標示。

Lin et al. (2007) [In Chinese: 林鎮國、董倫道、蔣立為、林蔚、廖啟雯、錢正明、郭泰融、陳文山、李奕亨、楊明宗、張育德、歐陽湘、張濟權、蘇毓秀、劉台生、衛元耀(2007)，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(94~96 年度計畫)一期末報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-254 / SNFD-ITRI-TR2007-0254。]

Lin et al. (2010) [In Chinese: 林蔚、錢正明、蔣立為、林鎮國、郭泰融、張育德、陳文山、謝佩珊(2010)，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(97~99 年度計畫)－K 區東部地質概念模式成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-273 / SNFD-ITRI-TR2010-0273。]

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

Guo et al.(2007) [In Chinese: 郭泰融、林蔚、董倫道(2007)，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(94~96 年度計畫)－K 區重磁力測勘資料逆推處理 94~96 年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-241 / SNFD-ITRI-TR2007-0241。]

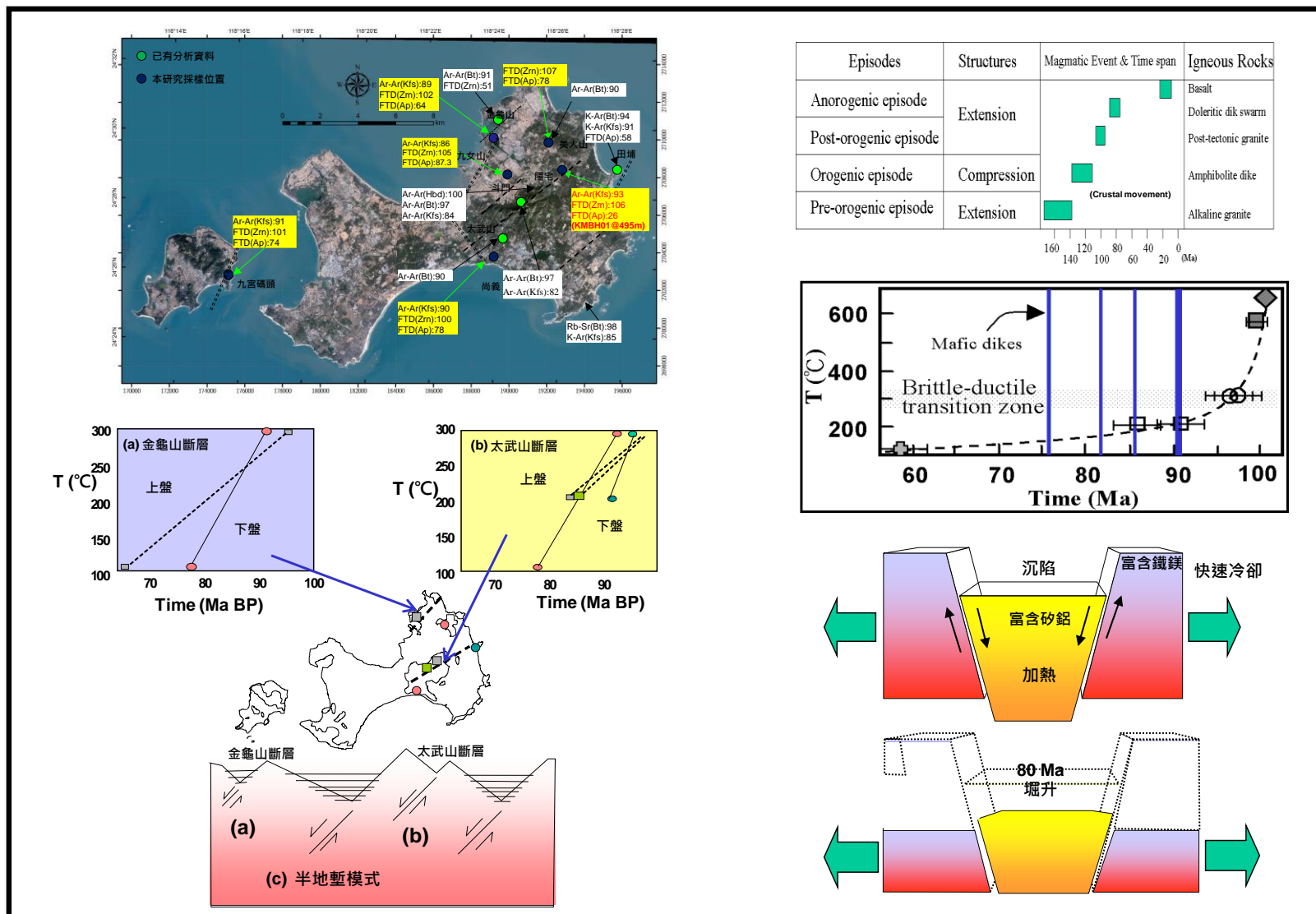


圖 3-27：K 區地質演化概念模式

註解：

- ◆ 左上圖為 K 區花崗岩樣定年分析結果分布圖 (Lin et al., 2003, c4p59; Lin et al., 2005, c4p8&p18&p23&p24; Lin et al., c3p346)。
 - Ar-Ar: Ar-Ar dating
 - FTD: Fission-Track Dating
 - Bt: Biotite
 - Kfs: K-feldspar
 - Zrn: Zircon
 - Ap: Apatite
- ◆ 左下圖為 K 區東部花崗岩體溫度-時間路徑與半地塹模式 (Lin et al., 2005, c4p38)。
- ◆ 右中圖為 K 區花崗岩體溫度-時間路徑與地塹型正斷層活動模式 (Lin et al., 2003, c4p56)。
- ◆ 右下圖，為根據 K 區斷層上下盤岩樣的定年分析結果，所建構出的 K 區地質演化模式 (Lin et al., 2003, c4p57)。
- ◆ 在 K 區地質演化史或長期穩定性方面：根據「地表岩樣」「礦物定年」所建立的岩體冷卻歷史 (T-t 圖) (T=溫度；t=礦物封存溫度年代)。
 - 100 to 90 Ma 間，為 K 區岩體快速抬升冷卻的期間。
 - 90 to 75 Ma 間，為岩脈侵入的主要發生期間。
 - 約 58 Ma 前，岩體的溫度約 110 °C，代表岩體當時的深度約 3 km (今天在地表)，所以抬升率約僅為 $3\text{km}/58\text{Ma}=50\text{m}/\text{Ma}$ 。
 - 磷灰石核飛跡定年資料 (495m 深岩樣獲得 110 °C 冷卻年代為 26Ma) 顯示 (Lin et al., 2005, c4p30)：抬升率約僅為 $0.495\text{km}/26\text{Ma}=20\text{m}/\text{Ma}$ 。

Lin et al. (2003) [In Chinese: 林蔚、張育德、張傳聖 (2003)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫 (91 年計畫)--K 區花崗岩體特性分析，工研院能資所執行/台灣電力公司委辦計畫，SNFD-ERL-90-190 / SNFD-ITRI-TR2003-0190。]

Lin et al., (2005) [In Chinese: 林蔚、陳文山、楊明宗、歐陽湘 (2005)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫 (93 年計畫)-- 潛在母岩特性調查計畫，工研院能資所執行/台灣電力公司委辦計畫，SNFD-ERL-90-219 / SNFD-ITRI-TR2005-0219。]

Lin et al. (2015) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、董倫道、謝佩珊、錢正明、田能全、張育德、黃淞洋、李奕亨、陳文山、郭泰融、蔣立為、廖彥喆、謝德勇、邱欣瑜、楊勤儀、劉台生、楊燦堯、陳志南、王竹方、郭明錦、郭陳濤 (2015)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫 (101-103 年計畫)--地質環境歷年研究成果 2014 年整合報告 (SNFD2014GE)，工研院能資所執行/台灣電力公司委辦計畫，SNFD-ITRI-90-324 / SNFD-ITRI-TR2015-0324。]

3.5. 母岩熱特性

本章節之主要目的在說明參考案例表二(表 2-1)中，Section08 之熱特性資料的由來。

處置系統中包含工程障壁及天然障壁，合稱多重障壁系統；工程障壁系統包括廢棄物罐、緩衝材料、回填材料，天然障壁則為處置母岩。天然障壁應具有延滯放射性核種遷移的功能，也就是當工程障壁失去隔離功能時，能有效限制或減緩放射性核種的遷移。多重障壁的功能性，取決於四項重要特性，即為熱傳、水力、力學及化學，簡稱 T-H-M-C 特性，及其彼此間的耦合效應。

高放處置系統中，因核種衰變所產生的衰變熱能，將依序傳遞至工程障壁系統再至母岩，由於工程障壁與母岩具有不同的物理特性，包含：

- ◆ 不同的熱傳參數(如熱傳導係數、比熱)
- ◆ 不同的力學參數(如楊氏模數與柏松比)
- ◆ 不同的熱力耦合特性參數(如熱膨脹係數)

，因此，通常會在工程障壁與母岩界面間處生應力集中現象，特別是在處置系統的角隅處。

除了會對工程障壁的機械性能產生影響外，天然障壁(母岩)的熱特性亦會對工程障壁的水力及化學性質產生影響性，例如，緩衝材料的再飽和及癒合能力。因此，在處置系統的安全評估中，母岩的熱特性是分析 T-H-M-C 耦合行為及其效應的重要特性參數。

藉由參考案例表二(表 2-1)所提供的熱特性參數，可供進行 T-H-M-C 相關耦合行為及影響性的研究分析。此外，因為母岩是天然材料，其熱特性參數必然存在一定變異性，於參考案例表二中，亦提供不同取樣位置之母岩熱特性所量測的變異範圍，可供進行參數敏感度與不確定性分析，了解母岩熱特性參數對處置系統安全性的影響範圍。

熱傳遞是一種因溫度差異產生的能量傳送現象，由高溫區傳遞能量至低溫區，有三種傳遞方式：熱傳導(Conduction)，熱對流(Convection)與輻射(Radiation)。

- ◆ 熱傳導是透過物質中的分子激發，不涉及物質流動，而將能量傳遞的一種熱傳遞機制
- ◆ 熱對流是透過物質的流動，將能量傳遞的一種熱傳遞機制。
- ◆ 輻射是透過電磁波，不需要經過介質，將能量傳遞過空間的一種熱傳遞機制。

一般研究顯示，在處置場的環境中，熱對流與輻射熱效應相對於熱傳效應可以忽略，亦即處置場的熱傳遞主要由熱傳導所控制。母岩熱特性主要包含熱傳導、比熱及熱膨脹等參數，其特性將影響處置場溫度分佈、熱應力分佈(Thermal-Mechanical coupling)以及再飽和行為(Thermal-Hydraulic coupling)。若母岩有較高的熱傳導係數，廢棄物所產生之衰變熱將較易傳遞，母岩環境溫度上升程度相對較低，於熱應力耦合作用下所引起的最大熱應力場也相對較低(或母岩具有較低之熱膨脹係數)，此對確保工程障壁系統功能的完整性有比較正面的作用。材料熱特性測定方法，國際上多是遵循美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)標準熱傳導參數試驗方法進行測定。

3.5.1. 熱傳導係數

母岩熱傳導係數可遵循兩種測定方法(圖 3-28)：

- (1) 暫態平面熱源法(Transient Plane Source Method, TPS)，適合用於實驗室大量岩石樣品的熱傳導係數量測，特點為量測速度快且樣品不需複雜的前處理作業。
- (2) ASTM D5334 是適用於土壤及軟岩之熱傳導係數量測的標準方法(ASTM-D5334-5, 2005, p1-6)，其應於於花崗岩類之硬岩時須先克服鑽孔問題；但其特點為試體樣本大，對於相對不均質之大地材料而言，具有較高之量測代表性。

在相當有限的量測數據條件下，初步建議或假設參考案例表二之對應熱傳導係數值(表 2-1)如下：

- ◆ 除 R0 外，R#的熱傳導係數之量測數據範圍約介於 $2.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，建議參考案例表二之對應參數值為 $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。
- ◆ D#的熱傳導係數之量測數據範圍約介於 $2.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，建議參考案例表二之對應參數值為 $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。
- ◆ R0 所代表之地表風化層，目前並無實際量測數據，考量其材料密度相對較低，理論上，其熱傳導係數數值應小於 R#及 D#，故建議假設其在參考案例表二之對應參數值為 $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。
- ◆ F#所代表斷層或導水裂隙帶，目前並無實際量測數據，考量其材料密度相對較低，理論上其熱傳導係數數值應小於 R#及 D#，故建議假設其在參考案例表二之對應參數值為 $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

3.5.2. 比熱

母岩的比熱參數可採用前述 TPS 法兼測，或以 ASTM E1269 建議之熱示差掃描卡量計(Differential Scanning Calorimeter, DSC)進行測定(ASTM, 2011, p1-6；劉智超、田能全，2015，c4p12)。在相當有限的量測數據條件下，初步建議或假設參考案例表二之對應參數值(表 2-1)如下：

- ◆ 除 R0 外，R#的比熱量測數據範圍約介於 $730 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ to $903 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，建議參考案例之對應參數值為 $800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。
- ◆ D#的比熱量測數據範圍約介於 $730 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ to $903 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，建議參考案例之對應參數值為 $800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。
- ◆ R0 所代表之地表風化層，目前並無實際量測數據，在不考量其孔隙內含水量的影響，因屬同一類材料的風化產物，其固體成分的比熱應與 R#及 D#差異不大，故建議假設其在參考案例表二之對應參數值亦為 $800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

- ◆ F#所代表斷層或導水裂隙帶，目前並無實際量測數據，在不考量其孔隙內含水量的影響，因屬同一類材料的風化產物，其固體成分的比熱應與 R#及 D#差異不大，故建議假設其在參考案例表二之對應參數值亦為 $800 J/(kg \cdot K)$ 。

3.5.3. 熱膨脹係數

岩石熱膨脹係數可採用 ASTM E831 之建議固體材料的線性熱膨脹試驗法 (ASTM, 2012, p1-4)，測定材料隨溫度增加時之線性膨脹率。由於 K 區母岩目前尚無熱膨脹係數之實際量測數據，參考 H 區母岩熱膨脹係數介於 $7 \times 10^{-6} K^{-1}$ to $9 \times 10^{-6} K^{-1}$ (劉智超、田能全，2015，c5p2)，故建議假設其在參考案例表二之對應參數為 $8 \times 10^{-6} K^{-1}$ 。

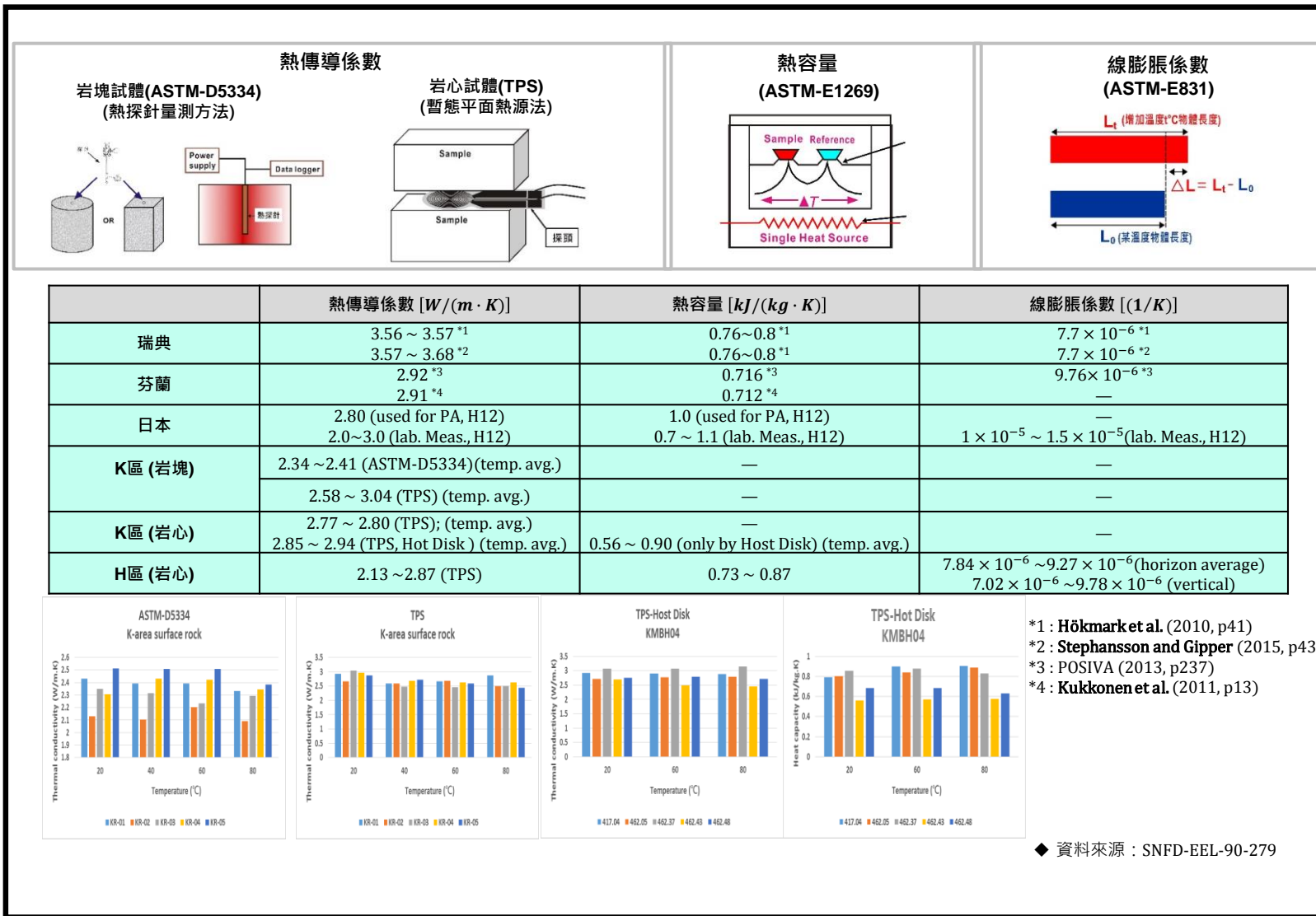


圖 3-28：K 區岩樣熱特性量測結果圖

3.6. 母岩力學特性

本章節之主要目的在說明參考案例表二(表 2-1)中，Section08 之力學特性資料的由來。

3.6.1. 力學特性

母岩之力學特性不僅止於應用於功能安全評估多場耦合分析，亦同時牽涉其工程設計與隧道施工工法，包括處置坑道穩定性、開挖擾動程度、隧道工程作業評估等。

母岩力學特性參數係指強度參數(strength properties)、變形參數(deformation properties)與場址現地應力；其中，

- ◆ 強度參數包括岩石的單軸壓縮強度、張力強度，及剪力強度參數(凝聚力C與內摩擦角 ϕ)；
- ◆ 變形參數包括岩石之靜彈性模數(E_s)、靜態柏松比(ν_s)，以及岩石之動彈性模數(E_d)、動剪力模數(G_d)與動態柏松比(ν_d)。

另外，母岩力學特性往往與岩體物理性質具有關連性，包括單位重、含水量、比重、吸水率、孔隙率(比)。

岩石力學特性測定方法，國際上大多遵循國際岩石力學學會建議岩石試驗方法(ISRM suggested methods for rock characterization testing and monitoring)進行測定。因此，參考案例表的相關力學特性參數，亦遵循 ISRM 建議岩石試驗方法進行測定。

3.6.1.1. 物理性質參數

母岩之物理參數依據 ISRM 岩石物性建議試驗方法(Brown, E.T., 1981, p81-89)，測定參數包括比重(specific gravity)、乾密度(dry density)、孔隙率(porosity)、飽和單位重(saturated density)、吸水率(water adsorption)：

- ◆ R1 岩體樣品之乾密度測定範圍約介於 2730 kg/m^3 至 2770 kg/m^3 ，比重介於 2.75 至 2.79，飽和密度介於 2740 kg/m^3 至

2780 kg/m^3 ，孔隙率介於 0.34 % 至 0.77 %，吸水率介於 0.12% 至 0.28%(林蔚等人，2005，c4p66-67)。

- ◆ R2 岩體樣品之乾密度測定範圍約介於 2610 kg/m^3 至 2660 kg/m^3 ，比重介於 2.63 至 2.68，飽和密度介於 2620 kg/m^3 至 2670 kg/m^3 ，孔隙率介於 0.38 % 至 0.65 %，吸水率介於 0.14% 至 0.25% (林蔚等，2005，c4p66-67)。
- ◆ R3 岩體樣品之乾密度測定範圍約介於 2600 kg/m^3 至 2750 kg/m^3 ，比重介於 2.62 至 2.76，飽和密度介於 2610 kg/m^3 至 2750 kg/m^3 ，孔隙率介於 0.60 % 至 0.87 %，吸水率介於 0.22 % 至 0.33 %(楊明宗等，2003，c2p7；SNFD-ITRI-MM2015-1202)。
- ◆ D# 岩體樣品之乾密度測定範圍約介於 2740 kg/m^3 至 2750 kg/m^3 ，比重為 2.76，飽和密度為 2750 kg/m^3 ，孔隙率介於 0.60 % to 0.77 %，吸水率介於 0.22 % 至 0.28 % (楊明宗等，2003，c2p11；SNFD-ITRI-MM2015-1202)。

3.6.1.2. 室內岩心試體強度參數

3.6.1.2.1. 單軸壓縮強度

母岩單軸壓縮強度主要依據 ISRM 建議之岩心單軸壓縮量測方法 (Brown, 1981, p113-114)，量取岩心試體在未承受圍束壓力之下的抗壓強度：

- ◆ R1 岩體樣品所測定之單軸壓縮強度範圍約介於 89.16 MPa 至 131.21 MPa (林蔚等，2005，c4p67)。
- ◆ R2 岩體樣品所測定之單軸壓縮強度範圍約介於 75.68 MPa 至 168.66 MPa (林蔚等，2005，c4p67)。
- ◆ R3 岩體樣品所測定之單軸壓縮強度範圍約介於 51.51 MPa 至 106.56 MPa (SNFD-ITRI-MM2015-1202)。
- ◆ D# 岩體樣品所測定之單軸壓縮強度範圍約介於 51.51 MPa 至 92.47 MPa (楊明宗等，2003，c2p11)。

上述母岩之單軸壓縮強度範圍，根據國際岩石力學學會之岩石強度分級屬強岩至甚強岩。

3.6.1.2.2. 張力強度

母岩之張力強度參數依據 ISRM 岩石張力強度建議量測方法 (Brown, 1981, p119-121)，可區分為直接張力強度測定法與間接張力強度測定法(巴西試驗，Brazil test)。由於直接張力(拉力)試驗不易施作，因為直接拉力甚難施加於圓柱型之上下底面上容易導致試驗失敗，故 ISRM 建議以施壓取代施拉之間接測定法，即可避開此問題。間接張力強度測定法(巴西試驗)藉由在圓柱形試體頂點上施加線型載重，使試體中心附近產生開裂破壞，進而計算得出間接張力強度。

- ◆ R1 岩體樣品所測定之張力強度範圍約介於 6.99 MPa 至 14.60 MPa (林蔚等，2005，c4p69)。
- ◆ R2 岩體樣品所測定之張力強度範圍約介於 6.91 MPa 至 13.33 MPa (林蔚等，2005，c4p69)。
- ◆ R3 岩體樣品所測定之張力強度範圍約介於 6.43 MPa 至 10.72 MPa (楊明宗等，2003，c2p7)。
- ◆ D#岩體樣品所測定之張力強度約為 7.37 MPa (楊明宗等，2003，c2p11)。

3.6.1.2.3. 剪力強度參數

母岩的剪力強度參數，係依據 ISRM 建議之岩心三軸壓縮試驗方法 (Brown, 1981, p125-127)，於不同圍壓條件求得破壞包絡線，並藉由不同岩石破壞準則，求取其剪力強度參數。一般而言，大地材料多採用莫爾-庫倫破壞準則 (Mohr-Coulomb failure criteria)，計算得到岩樣的剪力強度參數：凝聚力 (cohesion, C) 與內摩擦角 (internal friction angle, ϕ)。

- ◆ R1 岩體樣品所測定之剪力強度參數範圍：凝聚力 (C) 約介於 26.42 MPa 至 28.49 MPa，內摩擦角 (ϕ) 約介於 47.90° 至 54.20° (林蔚等，2005，c4p68)。

- ◆ R2 岩體樣品所測定之剪力強度參數範圍：凝聚力(C)約介於 17.99 MPa 至 29.51 MPa，內摩擦角(ϕ)約介於 50.71°至 59.08° (林蔚等，2005，c4p68)。
- ◆ R3 岩體樣品所測定之剪力強度參數範圍：凝聚力(C)約介於 22.75 MPa 至 34.92MPa，內摩擦角(ϕ)約介於 56°至 57° (楊明宗等，2003，c2p7)。
- ◆ D#岩體樣品所測定之剪力強度參數範圍：凝聚力(C)為 22.75 MPa，內摩擦角(ϕ)為 56° (楊明宗等，2003，c2p11-12)。

3.6.1.3. 室內岩心試體變形性參數

3.6.1.3.1. 靜彈性參數

母岩的靜態變形性參數，主要依據 ISRM 建議的岩心單軸壓縮兼測靜彈性係數試驗方法(Brown, 1981, p114-116)，方法與單軸壓縮試驗類似，但靜彈性模數測定需於試體表面黏貼應變計，於試驗過程記錄壓力及所對應之軸向與橫向應變。藉量測岩石試體的應力-應變關係，分析得出靜彈性(楊氏)模數(Young's modulus)和柏松比(Poisson's ratio)等變形性參數。由於靜彈性模數的計算，係取應力-應變曲線某一範圍的斜率，且岩石材料並非完全線彈性材料，故依斜率定義不同而區分為割線變形模數(secant deformation modulus)與切線變形模數(tangent deformation modulus)，以變形模數代表線彈性材料中之楊氏模數(Young's modulus)。由於割線變形模數(E50)之計算定義較明確，因此在參考案例表二中，以割線變形模數作為靜彈性參數定義基準。

- ◆ R1 岩體樣品測定之靜彈性參數範圍：割線變形模數(E50)約介於 31.70 GPa 至 52.66 GPa，柏松比(ν)約介於 0.13 至 0.27 (林蔚等，2005，c4p70)。
- ◆ R2 岩體樣品所測定之靜彈性參數範圍：割線變形模數(E50)約介於 34.15 GPa 至 51.19 GPa，柏松比(ν)約介於 0.11 至 0.19 (林蔚等，2005，c4p70)。

- ◆ R3 岩體樣品所測定之靜彈性參數範圍：割線變形模數(E50)約介於 19.42 GPa 至 30.02 GPa，柏松比(ν)約介於 0.14 至 0.18 (楊明宗等，2003，c2p7)。
- ◆ D# 岩體樣品所測定之靜彈性參數範圍：割線變形模數(E50)為 25.52 GPa，柏松比(ν)為 0.15 (楊明宗等，2003，c2p13)。

3.6.1.3.2. 動彈性參數

母岩的動態變形性參數，主要依據 ISRM 建議之岩心音波速試驗方法(Brown, 1981, p107-110)，試驗主要目的在求取完整岩心之動彈性模數；利用超音波儀器於試體之一端給予彈性波，以測定此彈性波達另一端的時間，再量測試體長度以換算求得彈性波在岩心內之傳遞速度。由所求得之彈性波速換算岩石之動態彈性模數(dynamic Young's modulus)、動態柏松比(dynamic Poisson's ratio)，以及動態剪力模數(dynamic shear modulus)。

- ◆ R1 岩體樣品所測定之動彈性參數範圍：動態剪力模數約介於 16.75 GPa 至 29.24 GPa，動態彈性模數約介於 41.31 GPa 至 73.60 GPa，動態柏松比約介於 0.12 至 0.27 (林蔚等，2005，c4p71)。
- ◆ R2 岩體樣品所測定之動彈性參數範圍：動態剪力模數約介於 12.99 GPa 至 24.50 GPa，動態彈性模數約介於 30.28 GPa 至 58.37 GPa，動態柏松比約介於 0.10 至 0.25(林蔚等，2005，c4p71)。
- ◆ R3 岩體樣品所測定之動彈性參數範圍：動態彈性模數約介於 26.50 GPa 至 37.9 GPa，動態柏松比約介於 0.14 至 0.26 (楊明宗等，2003，c2p7)。
- ◆ D# 岩體樣品所測定之動彈性參數範圍：動態彈性模數約介於 26.50 GPa to 33.1 GPa，動態柏松比約介於 0.14 to 0.24 (楊明宗等，2003，c2p13)。

3.6.2. 現地應力

依照工程基礎的深度而言，現地應力量測方式可以概分為一般基礎工程與深部地下工程的現地應力量測，更深部的應力場甚至可以藉

由震源機制進行應力反演而獲得。於淺部基礎工程，常見的現地應力量測方法有水力破裂法(Hydraulic Fracturing Method)(如圖 3-29 所示)、套鑽法(Over-Coring Method)、平鈸千斤頂法(Flat-Jack Method)、孔底法(Doorstopper Method)等。而於深井的現地應力評估方式，可以分為井孔方法與岩心方法兩大類，井孔法中有井壁破裂(Borehole Breakout)、鑽井誘導張力裂隙(Drilling-Induced Tensile Fracture)、水力破裂法(Hydraulic Fracturing)等，而岩心法中包括音射法(Acoustic Emission)、音射速率分析(Acoustic Emission Rate Analysis)、變形率分析(Deformation Rate Analysis)、非彈性應變回復法(Anelastic Strain Recovery, ASR)等方法(葉恩肇等，2012，p23-24)。

參考案例表二所列的現地應力參數數據來源及特性，分別說明如下：

- ◆ 於 KMBH01 鑽孔深度 306 公尺處進行水力破裂法(Hydraulic Fracturing, HF)，測得之現地應力為：垂直應力 $\sigma_v=8.11$ MPa，水平最大主應力 $\sigma_H=10.68$ MPa，水平最小主應力 $\sigma_h=5.73$ MPa (楊明宗等，2003，c3p17)。
- ◆ 於 KMBH01 鑽孔深度 430 公尺處進行水力破裂法(Hydraulic Fracturing, HF)，測得之現地應力為：垂直應力 $\sigma_v=11.4$ MPa，水平最大主應力 $\sigma_H=14.43$ MPa，水平最小主應力 $\sigma_h=9.38$ MPa (楊明宗等，2003，c3p17)。
- ◆ 於 KMBH01 鑽孔深度 300 公尺處進行既存裂隙水力法(Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures, HTPF)，測得之現地應力為：最大主應力 σ_1 約 10.29 MPa 至 12.34 MPa，次要主應力 σ_2 約 6.66 MPa 至 8.62 MPa，最小主應力 σ_3 約 0.76 MPa 至 2.14 MPa；試驗區域最大主應力方向投影至水平後約為 N21W 至 N54W (林蔚等，2005，c4p107)。

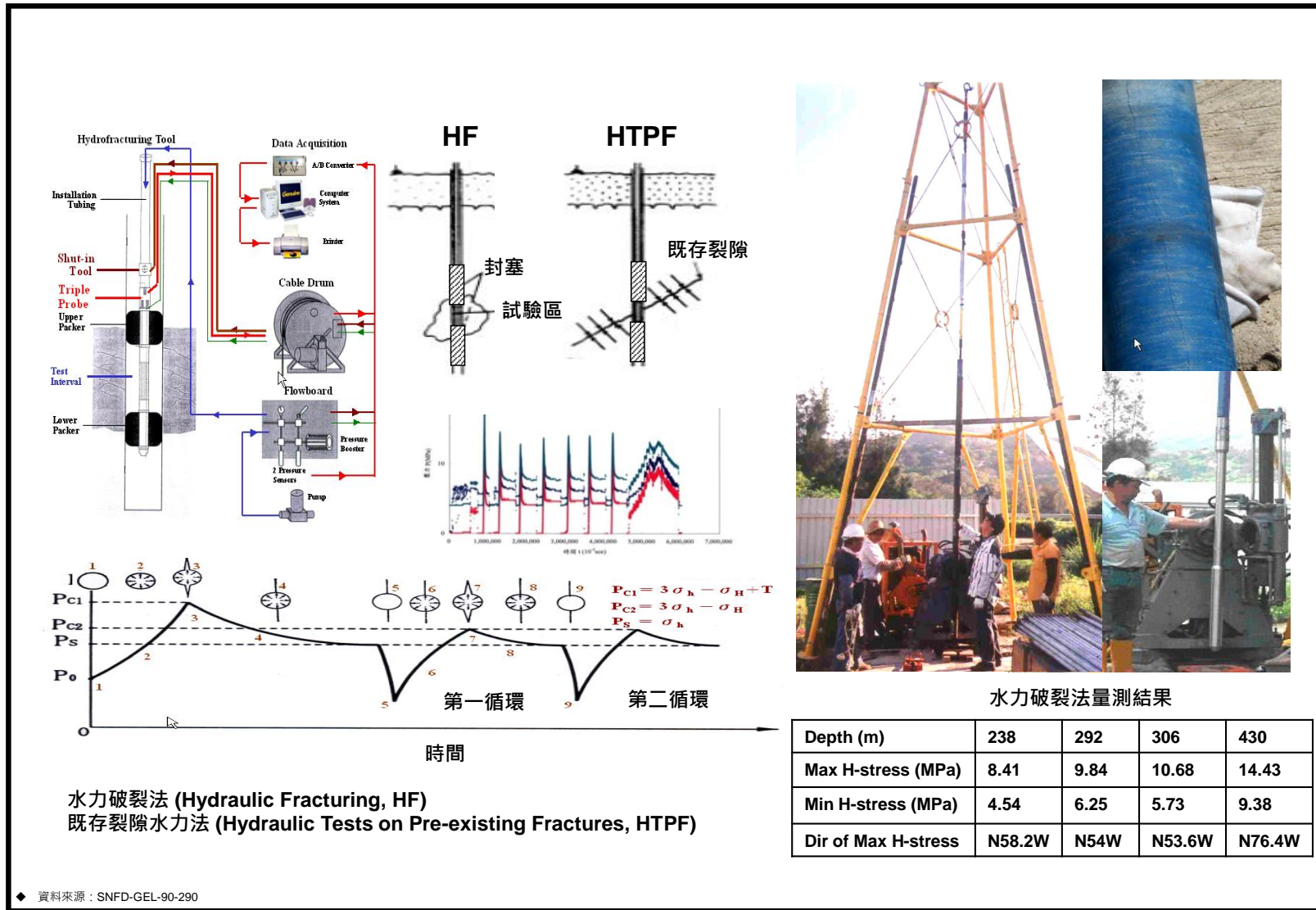


圖 3-29：K 區現地應力量測

3.6.3. 古應力變化

綜合輝綠岩脈露頭位態所推測之古應力場，以及井下水力破裂試驗果所得知現今之應力場，可評估自晚白堊紀以來金門地區應力場之變化情形。

在 K 區可發現不同岩性之岩脈，包括角閃岩、偉晶花崗岩、細粒花崗岩及輝綠岩脈。這些岩脈代表在不同的岩漿活動與區域應力場下的產物。其中，輝綠岩脈被認為於非造山期張裂環境下最晚生成(92-76 Ma)的岩脈，主要走向為 N30E (林蔚，2001; 林蔚等，2003, c4p43; 林蔚等，2011)。

根據 André 等人(2001)所提出之計算方法及 Anderson 之斷層理論，金門地區之晚白堊紀古應力場可以從輝綠岩脈露頭之位態推得。計算結果顯示，主應力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 分別為 94.8 MPa、89.6 MPa 及 80.3 MPa，屬於正斷層應力場(陳炳權等，2015, p23)。此外，根據現地應力量測結果，可以得知：

- (1) 根據在 KMBH01 鑽孔不同深度進行之水力破裂法(HF)之結果(楊明宗等，2003, c3p17)，最大與最小主應力方向接近水平，顯示現代應力場可能係走滑斷層應力場(圖 3-30)，而此可能與華南陸塊持續抬升與剝蝕有關(林蔚等，2012, c4p52)。
- (2) 根據在 KMBH01 鑽孔不同深度利用既存裂隙水力法(HTPF)之結果(林蔚等，2005, c4p107)，最小應力方向接近垂直，顯示現代應力場可能是逆斷層或走滑斷層應力場(圖 3-31)，而此可能與菲律賓海板塊撞擊歐亞板塊有關(圖 3-8a)。

利用水力破裂法(HF)或既存裂隙水力法(HTPF)進行現地應力之試驗結果，需慎重考量下列不確定性：

- (1) 水力破裂法(HF)或既存裂隙水力法(HTPF)之試驗位置非常靠近 F1 及 F2 構造(表 2-2)，可能導致現地應力量測值的偏差。
- (2) 水力破裂法(HF)假設之一為現地應力中之一主應力方向與鑽孔軸平行，可能與現況不一致。

金門地區之應力場自白堊紀以來並非毫無變化，有可能從正斷層應力場翻轉成逆斷層或走滑斷層應力場；從某些區域性之研究結果(例如構造、GPS)，可以證實 K 區現代應力場係走滑斷層應力場(時振梁等，2004，p237)。

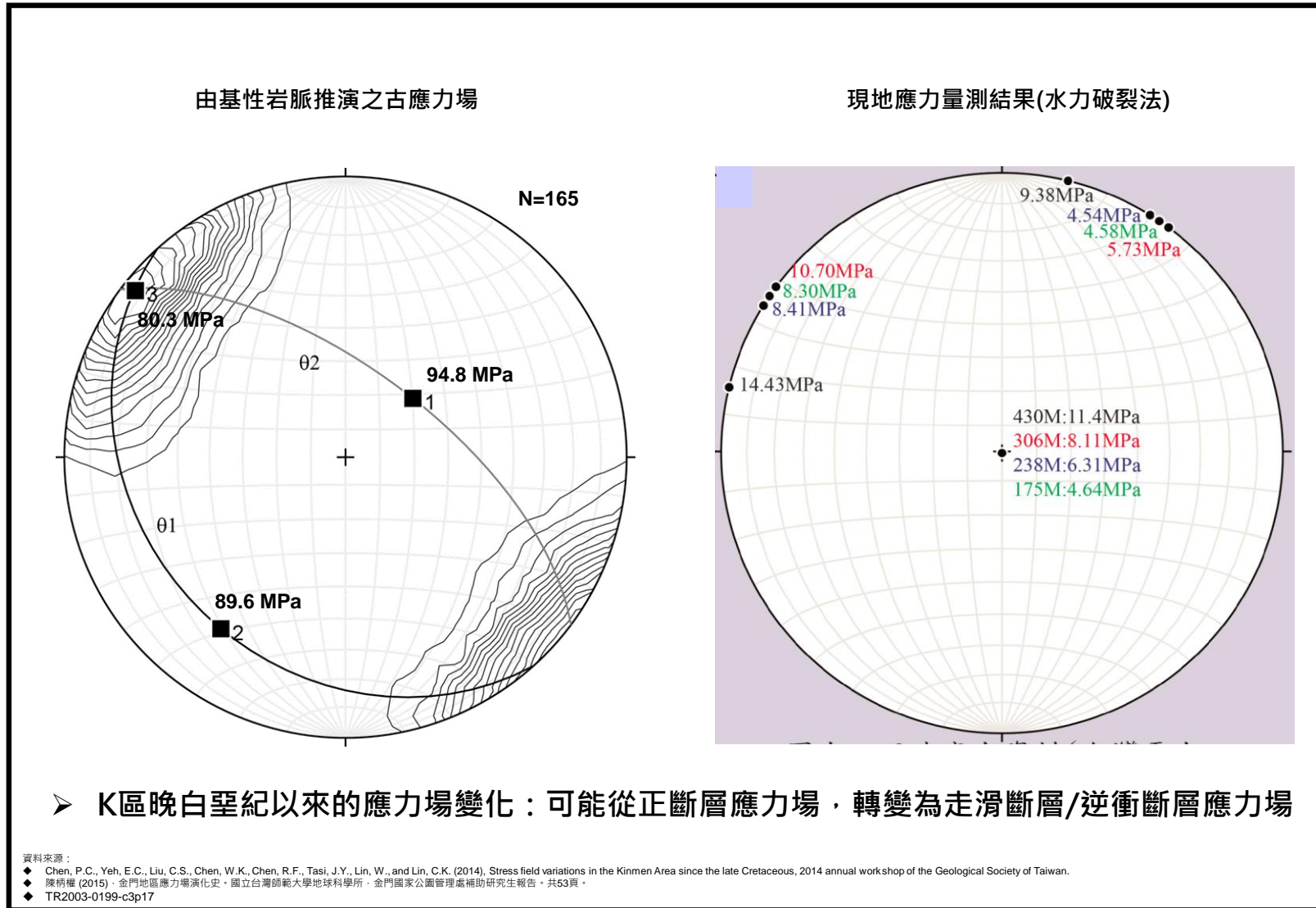


圖 3-30：K 區應力場晚白堊紀以來可能變化趨勢(1/2)

註解：

- ◆ Some important uncertainties must be considered for the modern stress measurements by down-hole HF tests,
 - The testing locations of HF are very close to the F1 and F2 structures (see Table 2-2) which could deviate the local stress.
 - HF testing assumes one of stress vector is parallel to the gravity direction that may not be true in reality.
- ◆ The paleo-stress field of K-area in late Cretaceous was estimated from the attitudes of outcrop diabase dikes based on the calculation method proposed by André et al. (2001) and Anderson's theory of faulting.
- ◆ The modern stress field could be characterized by strike-slip fault that could be related to the continuous crustal uplift and erosion of SE China (Chen et al., 2014).

André et al. (2001) [André, A.-S., Sausse, J. and Lespinasse, M. (2001), New approach for the quantification of paleo-stress magnitudes: application to the Soultz vein system (Rhine graben, France), *Tectonophysics*, vol. 336, pp.215-231.]

Chen et al. (2014) [Chen, P.C., Yeh, E.C., Liu, C.S., Chen, W.K., Chen, R.F., Tasi, J.Y., Lin, W., and Lin, C.K. (2014), Stress field variations in the Kinmen Area since the late Cretaceous, 2014 annual workshop of the Geological Society of Taiwan.]

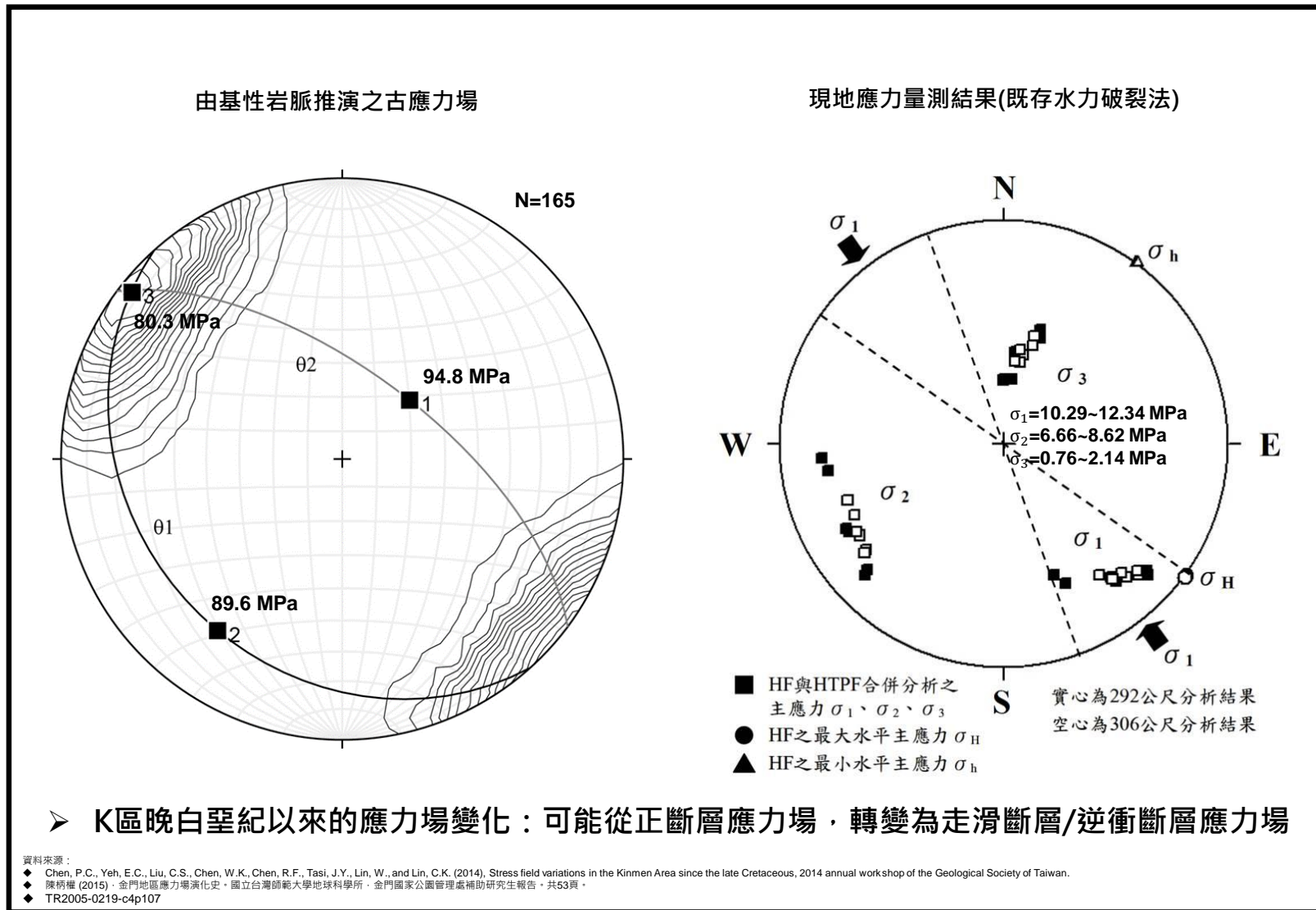


圖 3-31：K 區應力場晚白堊紀以來可能變化趨勢(2/2)

註解：

- ◆ Some important uncertainties must be considered for the modern stress measurements by down-hole HTPF tests,
 - The testing locations of HTPF are very close to the F1 and F2 structures (see Table 2-2) which could deviate the local stress.
- ◆ The paleo-stress field of K-area in late Cretaceous was estimated from the attitudes of outcrop diabase dikes based on the calculation method proposed by André et al. (2001) and Anderson's theory of faulting.
- ◆ The modern stress field could be characterized by reverse fault t that could be related to the Philippine sea plate hit the Eurasia plat (Figure 3-8a).

André et al. (2001) [André, A.-S., Sausse, J. and Lespinasse, M. (2001), New approach for the quantification of paleo-stress magnitudes: application to the Soultz vein system (Rhine graben, France), *Tectonophysics*, vol. 336, pp.215-231.]

3.7. 母岩水文地質特性

本章節之主要目的在說明參考案例表二(表 2-1)中，下列內容的科學依據：

- (1) Section02 之水文地質概念模式的由來。
- (2) Section06 之水力傳導係數的由來。

母岩水文地質特性調查之主要目的在於瞭解處置母岩的水力特性，並清楚確定水文模型參數分布以及定義邊界條件與初始條件。技術內容可包含水文地質原始資料的調查以及建立模型供後續評估處置場功能安全及環境影響(SKB, 2008, p229)。

在「深層地質處置」概念中，地下水的流動特性，是影響核種在地層遷移速率與分布的主要因子。一個具有緩慢地下水流(通量)的深層地質條件，將使核種在地層的遷移速度低，是考量處置場功能優劣與否的關鍵因子(JNC, 2000, c2p2)。

有鑑於此，台灣在沒有候選場址的狀況下，亦參考日本 H12 的基礎架構，彙整水文地質特性調查成果以及相關水力試驗資料，建置一個僅供技術發展需求的虛擬案例(Reference Case) (JNC, 2000, c5.5)，並且加入瑞典 SDM(Site Descriptive Model)的相關做法(SKB, 2008, p13)，提供功能安全評估(Performance Assessment)所需之水文地質特性參數，供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力。

3.7.1. 水文地質概念模式

3.7.1.1. 水文地質單元

K 區大致上可分為以下四組類型水文地質單元，包含：

- (1) 風化層(R0：5 m 至 90 m)：

根據 Liu et al. (2006, p4366)所製作完成之金門島沖積層地質柵欄圖，主要含水層大多分布於金門島西部，金門島東部(K 區)多為花崗岩質裂隙含水層，金門島西北方則有少數黏土質。沉積淺

層 10m 上方以風化層、砂、黏土及風化崩解的花崗片麻岩殘礫或殘塊(regolith)為主，其下為堅硬的花崗片麻岩夾低角度裂隙帶，即剝蝕節理(exfoliation)發育之含水層。

(2) 不同性質花崗岩(R1~R#)：

大部分為完整花崗岩體，夾角閃石岩脈，少裂隙頻率區段，僅有高角度裂隙帶通過，向上延伸可能通到淺層含水層，長度足以與其他裂隙帶相連而達淺層含水層。

(3) 主要導水裂隙(F#)：

根據 KMBH01-02-04 跨孔試驗場的調查結果顯示，太武山斷層(F1 構造，位態約為 N64E/70N，厚度可能超過 150 m 的破碎帶)及相關斷層分支裂隙(F2 構造，位態約為 N80W/50S，厚約 8 m 至 15 m 的破碎帶)皆具有良好的裂隙連通性及透水性。F3 至 F11(表 2-2)雖亦可能為導水裂隙帶，但尚未經過地質鑽探確認，因此，不在本版次參考案例表二的建構內容。

(4) 阻水構造(D#)：

由小規模試驗場水文地質試驗可得知 K 區東北向輝綠岩脈群為重要的阻水構造 (Liou et al., 2009, p1033)，因此往西北方向流動的地下水可能無法跨過此一不連續面，位態約為 N30E/80N，根據地表地質調查可合理假設此一阻水構造的出現頻率約為每公里間距，寬度 100 m。

上述水文地質單元在空間中的分布情形，如圖 3-32 所示。

3.7.1.2. 地下水流向特性

- (1) 根據前述所建立的 K 區地質概念模式(如圖 3-26 所示)(第 3.4 節)，可知：除了地形效應外，K 區地下水的流動特性，主要受控於破裂帶的影響，包含 F1 構造(太武山斷層)以及 F2 構造(斷層分支裂隙)，均為可能的主要導水通道，但輝綠岩脈群的阻水特性，將改變其區域性的流向(圖 3-33)。

- (2) 根據現有鑽井(KMBH01~06)通井地下水位資料顯示，太武山岩體中的地下水可能朝西北方向移動，斗門岩體地下水可能朝東北方向移動(蔣立為與余錦昌，2009，c4p2)(圖 3-33 右下圖)：
- (a) 太武山岩體之 KMBH06 通井水位最高，而 KMBH01-02-04 跨孔試驗場的通井水位較低，推測地下水沿裂隙帶往西北方向流動(不考慮含有阻水構造下)。
 - (b) 斗門岩體以金沙溪源頭的 KMBH03 井通井地下水位最高，KMBH05 通井水位較低，故推測地下水沿裂隙帶往東北方向流動，大致與金沙溪流向一致，但 KMBH03 位於擎天水庫下方，故其高水位可能受人工蓄水的影響而產生高水位。
- (3) 根據 KMBH04、05 及 06 分段封塞(100 to 200 m, 200 to 300 m, 300 to 400 m, 400 to 500 m)的水壓(pressure head)監測資料顯示(圖 3-34)：
- (a) KMBH06 各封塞段的水頭(hydraulic head)變化範圍均比 KMBH04 高，顯示太武山岩體深層地下水可能由 KMBH06 朝 KMBH04(西北方向)移動(不考慮含有阻水構造下)，此與由通井水位研判水流方向的趨勢相同。
 - (b) KMBH04 穿過太武山斷層，其第二段封塞段(200 to 300 m)隨雨量的變化明顯與其他封塞段(100 to 200 m、300 to 400 m、400 to 500 m)不同，顯示該段與補注區的連通性最高，應與前述 F2 構造(相交 KMBH04 於深度約 340 m)及輝綠岩脈(相交 KMBH04 於深度約 290 m)有關。
 - (c) KMBH05 各封塞段的水頭(hydraulic head)最低，且其變動特性不像 KMBH04 及 KMBH06 隨降雨量的平滑變動，其震動範圍很大(圖 3-34)，顯示 KMBH05 週圍含水層的聯通性不佳，與 KMBH04 及 KMBH06 可能分屬不同的地下水域。
 - (d) 雖然 KMBH03 的分段封塞監測的儀器安裝已經完成，然而目前取得的監測資料尚未足夠，故無法研判 KMBH03 至 KMBH05 深層地下水的流向。
- (4) 阻水構造：

- (a) K區花崗岩測試區有下列幾種緻密岩層，包括完整花崗岩體、花崗片麻岩體(含花崗片麻岩、角閃岩脈及花崗岩脈)及輝綠岩脈，這些火成岩的交界均形成重要的不連續面。地下水主要賦存於這些緻密岩層的裂隙帶中。此外，斷層構造除了形成導水裂隙帶外，亦會導致裂隙不連續及富含斷層泥等特徵，而形成阻水構造。
- (b) 由 KMBH01-02-04 跨孔試驗場之水文地質試驗得到太武山斷層 F1 構造的水文地質特性，亦發現此區東北向輝綠岩脈群是重要的阻水構造(不連續面) (Liou et al., 2009, p1033)，因此往西北方向流動的地下水可能無法跨過此一不連續面，除非該不連續面的完整性受到其他構造(如斷層或其共軛裂隙帶，如 F1 或 F2)所破壞。F1 斷層構造及阻水構造(輝綠岩脈)阻水構造的存在，可以解釋太武山岩體南側(KMBH06)的地下水位較高的情況(圖 3-34 右下圖)。除此之外，考慮更大範圍時，斗門岩體地下水位較太武山岩體水位更低，可能反映兩岩體內除了輝綠岩脈構造外，亦存有兩岩體間屬於岩體接觸邊界(contact)之不連續面。

3.7.1.3. 地下水來源

由 6 口深井裂隙封塞取樣，分析得到水文地球化學資料(Liou et al., 2009, p1580)，顯示此區有 2 種地下水源；以北太武山為分水嶺，且流動方向並不相同，一為太武山岩體的地下水，另一為位於斗門岩體的地下水：

(1) 太武山岩體地下水：

由氫氧同位素的分析結果(圖 3-51 右下圖)可知，斷層帶集水區的地下水經天水快速入滲與補注，屬於局部地域非蒸發型地下水特性，地下水流向主要順西北向裂隙帶方向流動，流經東北向的太武山斷層 F1 構造或輝綠岩脈不連續面時而轉向，其水質以 KMBH01 鑽井為代表。

(2) 斗門岩體地下水：

來源可能是大區域第四紀(數萬年)以來形成的沙漠地下水，古地下水流向可能是由西北往東南，從淺層覆蓋層觀察到多層泥炭層及泥層，顯示古環境曾發育沼澤及湖泊，當時地下水埋藏深度較淺，在島嶼形成四周環海後，此區形成屬於比較靜止之澤地或湖積環境，具有溶解膏鹽層(evaporite)後入滲的蒸發型地下水特性(Liou et al., 2009, p1582)，水質以 KMBH05 鑽井為代表；相關地化模擬逆推研究結果，亦顯示該區的地下水質的演化過程中，必須考量溶解石膏鹽(gypsum)，方能合理解釋深層地下水質的特性。

3.7.1.4. 地下水流動的可能邊界條件

根據第 3.7.1.2 節以及第 3.7.1.3 節的描述，K 區地下水會受到輝綠岩脈、F1、F2 的影響，合理推論邊界條件也是影響水流因子之一。

三種常用邊界條件的數學通式及其特性參數值，如表 3-1 所示(Carnahan et al., 1977, p462; Davis, 1984, p129)。目前對於 K 區水文地質條件的認知顯示：

- ◆ K 區位於金門島的東邊，金門島東、西兩側的地形差異不大(圖 3-1)，且金門島東、西兩側間，有厚約百米的古九龍江沉積層，因此可合理假設 K 區西側為無流動邊界，亦即表 3-1 中的 Neumann 類型且 $c = 0$ 的邊界條件。
- ◆ 當深度越深時，地下水上下流動越緩慢，故當深度夠深時，可合理假設為底部為無流動邊界。
- ◆ 至於其他的邊界條件，有以下兩種可能(圖 3-35)：
 - (a) K 區本身地形最高點為 262m，與海邊距離約 7.5 km (詳第 3.1.1 節)，K 區本身的地形效應約為 0.035 m/m ($=262/(7.5*1000)=0.035$)。由於大陸東南高山及台灣高山(約 3000m)與金門島均距離均很遠，超過 200 km，兩者對 K 區產生的地形影響效應均約為 0.015 m/m ($=3000/(200*1000)=0.015$)，比 K 區本身的地形效應(0.035 m/m)小，且大陸東南高山及台灣高山對 K 區之地形效應影

響的方向相反，會互相抵銷。因此，K區西側及底部以外的邊界條件，可假設為表 3-1 的 Dirichlet 邊界條件，例如設定邊界的水頭壓力為定值，或稱為定水頭邊界。

- (b) 淺層部分(R0)的邊界條件設定，可考量地表岩體的出露分布位置，採用 Liu et al. (2006, p4367)的邊界條件設定，亦即有岩體出露的邊界設為無流動邊界，其他邊界設為定水頭邊界；至於，深層部分的邊界條件設定，考慮大陸東南地形高程的影響效應，東北及西南邊界，可假設為定水頭邊界，其餘可設定為無流動邊界。此種邊界條件的地下水流場模擬結果範例，請參考第 3.10.1 節。

表 3-1：邊界條件類型

$a \frac{d\chi}{dn} = b(\chi - \chi_0) + c$			
χ = dependent variable χ_0 = reference value, could be a function of time. n = direction, <i>X, Y, or Z</i> a = parameter, could be a function of time b = parameter, could be a function of time c = parameter, could be a function of time			
Types of boundary condition	a	b	c
Dirichlet boundary condition	= 0	≠ 0	= 0
Neumann boundary condition	≠ 0	= 0	*
Mixed (Third) boundary condition	≠ 0	≠ 0	*

Carnahan D., Luther, H.A., and Wilkes, J.O. (1977), Applied Numerical Methods, John Wiley & Son.

Davis, M.E. (1984) Numerical Methods and Modeling for Chemical Engineers, John Wiley & Sons.

3.7.2. 水力傳導特性

3.7.2.1. 導水裂隙帶

K 區所有鑽孔完成後，在通井情況下均進行微流速井測 (flowmeter logging)，結合岩心井錄、地物井測及微流速井測結果，用以研判孔內導水裂隙帶的位置。KMBH01 至 KMBH06 孔內導水裂隙帶，以雙封塞水力試驗量測得到的水力傳導係數數值，介於 3.0×10^{-8} m/s 至 10^{-4} m/s 之間，平均值約為 5.0×10^{-6} m/s (圖 3-37) (林蔚等，2012，c4p45)。

在地下水流模擬工作中，數值模擬網格的尺度(可能為數百公尺)，與現場水力試驗的封塞尺度(通常僅為數公尺)會有所差異，因此，現場水力試驗所得到的水力傳導係數數值，必須經過適度的擴尺度修正，方能應用於地下水流模擬的工作。根據 KMBH01-02-04 不同封塞尺度 (3 m 至 500 m) 的水力試驗結果(圖 3-38) (蔣立為等，2006，c4p55)，建構下面的關係式，供進行 K 區水力傳導係數數值之擴尺度效應修正。

$$\text{Log}_{10}(K_u) = 0.855 \times \text{Log}_{10}(K_m) - 1.32 \times (\text{Log}_{10}(L_u/L_m))$$

其中，

L_m ：代表孔內水力試驗的封塞間距(m)。

L_u ：代表地下水流場數值模擬之網格尺寸大小(m)。

K_m ：代表以封塞間距 L_m ，進行孔內水力試驗所獲得的水力傳導係數數值(m/s)。

K_u ：代表對應於地下水流場數值模擬之網格尺寸為 L_u 的水力傳導係數數值(m/s)。

至於 K 區沖積層地下含水層之水力傳導係數，經計算約介於 5.0×10^{-6} m/s 至 1.5×10^{-4} m/s 間(圖 3-17) (Chiang and Yu, 2009, c4p1)，建議參考值為 1.0×10^{-5} m/s。

3.7.2.2. 緻密岩層

針對導水特性較差的完整花崗岩體，進行室內岩塊及現場孔內的雙封塞水力脈衝試驗；

- ◆ 實驗室岩塊(Block)水力脈衝試驗(hydraulic pulse test)結果，顯示水力傳導係數介於 4.1×10^{-12} m/s 至 3.6×10^{-11} m/s 之間(楊明宗等，2007，c3p15)，建議參考值為 1.0×10^{-11} m/s。
- ◆ 現地雙封塞水力脈衝試驗(hydraulic pulse test)顯示水力傳導係數介於 10^{-10} m/s 至 10^{-9} m/s 之間(林鎮國等，2013，c3p33)。

綜合上述結果，參考案例表二之緻密岩層的水力傳導係數建議值為：R#的水力傳導係數為 10^{-10} m/s，D#的水力傳導係數為 10^{-11} m/s。

3.7.3. 裂隙量測及統計特性

岩體中的地下水流向，主要受到不連續面(如主要導水裂隙、阻水構造、裂隙)的分布而控制，且大部分地下水的流向主要沿著主要導水裂隙及岩體內的裂隙網路流動；微血管導水構造可類比於人體中的動脈及靜脈，而裂隙網路可類比於人體中的微血管。

溶質(或核種)在岩體中的傳輸，除了受控於主要導水裂隙外，則更進一步受到裂隙面中的內寬變化造成的水力延散、裂隙充填物造成的吸附(adsorption)效應，及裂隙與圍岩間的圍岩擴散(matrix diffusion)而產生遲滯(retardation)效應等而影響(JNC, 2000, c3p11)。

預測核種在岩體中可能的傳輸路徑，是放射性廢棄物深層地質處置的重要研究工作；除了必須探討導水構造(表 2-2 的 F 構造)的分布及傳輸特性外，岩體(表 2-2 的 R 單元)中離散裂隙網路的分布特性，是另一個關鍵的研究重點。針對離散裂隙網路的研究，裂隙參數的量測是最基本的工作；可透過對岩體露頭、坑道面及孔內裂隙參數的量測數據，運用地質統計技術，分析裂隙參數之統計特性，藉以瞭解裂隙結構特性並架構離散裂隙網路(詳第 3.9.1.2 節說明及第 3.10.2

節範例)，用以探討核種的可能傳輸路徑、或處置坑被特定尺寸裂隙穿越的可能機率。

K 區共進行三種不同類型的裂隙量測：

- ◆ 地表露頭裂隙之測線量測及其統計結果，如圖 3-39 所示。
- ◆ 坑道面裂隙之視窗採樣量測及其統計結果，如圖 3-40 所示。
- ◆ 孔內裂隙之量測(孔內影像)及其統計結果，如圖 3-41 所示。

另外，KMBH01, 02 及 04 是三孔各距離約 10m，深度各約 500m 深的地質鑽孔，主要用以確認 F1 構造(太武山斷層)及 F2 構造的位態(圖 3-42)，及進行相關跨孔試驗(詳第 3.9.2.1.2 節說明)。根據 KMBH01, 02 及 04 的孔內裂隙分布特性(圖 3-43)，顯示：

- ◆ 該地區的風化層約 70m 厚。
- ◆ 裂隙的密度分布與構造位置有明顯相關性；圖 3-43 左圖之孔內裂隙高密度區域，與右圖 F1 及 F2 構造的深度位置，具明顯相關性。

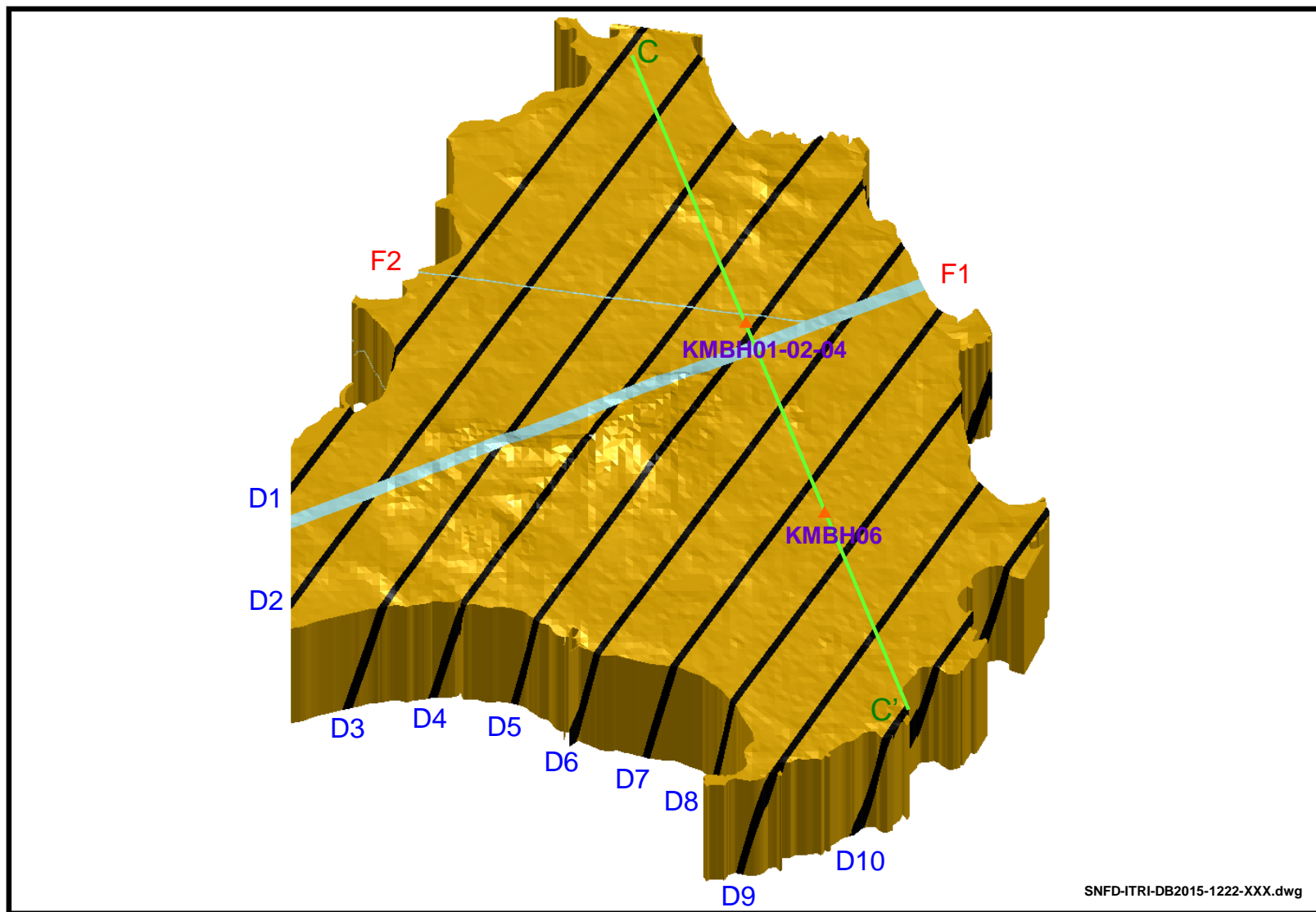


圖 3-32 : K 區水文地質單元 3D 分布圖

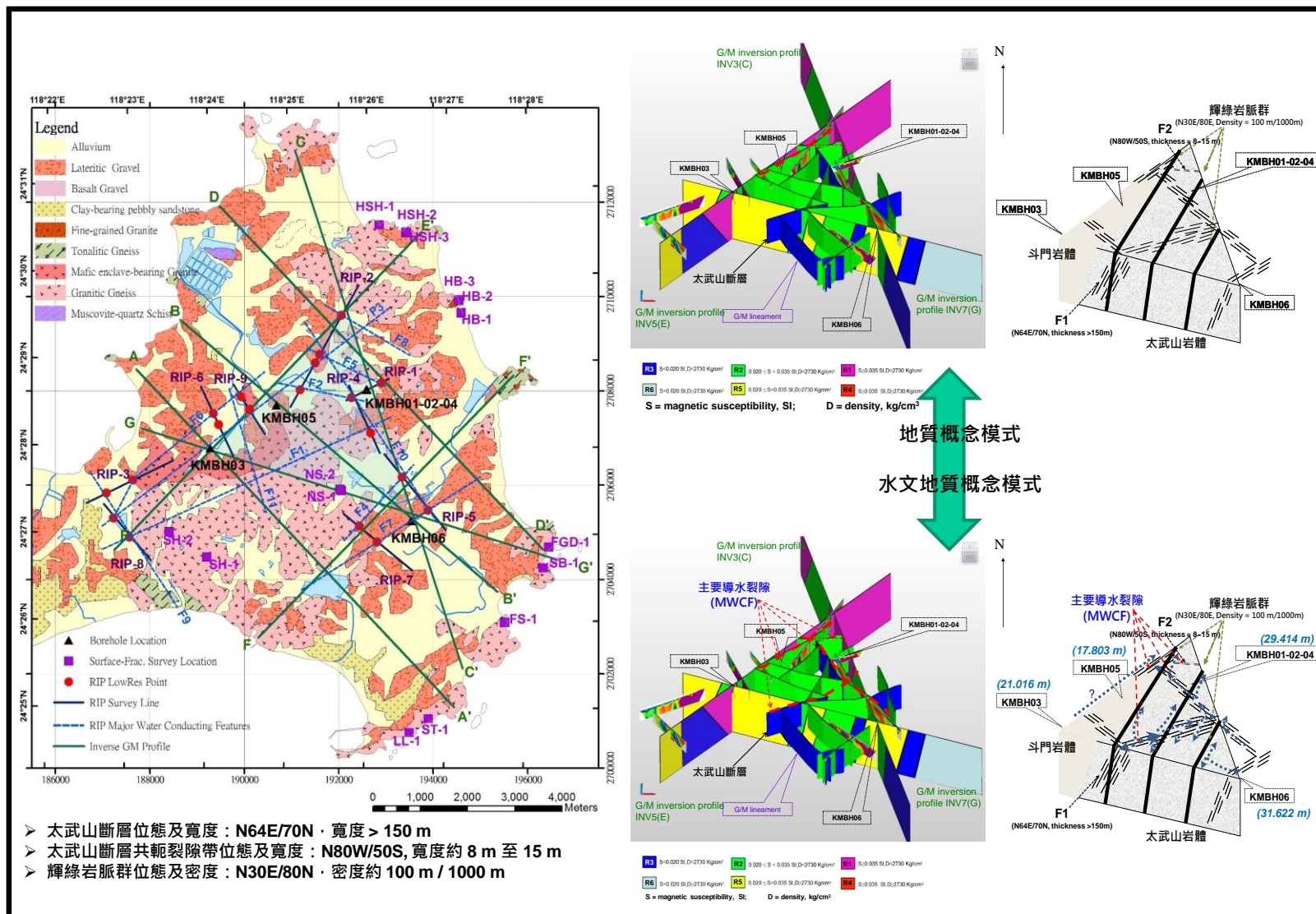


圖 3-33：K 區水文地質概念模式

註解：

◆ 除右下圖外，其餘註解說明同圖 3-26。

◆ 右下圖為 K 區水文地質概念模式：

- 括號內的數字為通井狀態下的水位數據，日期為 2008 年 4 月 15 日 (Chiang and Yu, 2009, c4p2)；
- 綠色實線為輝綠岩脈(阻水構造)，呈東北向分布(N30E/80N)，每公里間距約 100 m 寬度的岩脈；
- 藍色虛線箭頭為地下水的可能流向；藍色虛線箭頭(含?符號)為斗門岩體 MWCFs 的可能水流方向；
- 太武山斷層南側岩體之 MWCFs 內，往西北方向流動的地下水流向，在太武山斷層帶跨孔試驗場附近，因輝綠岩脈(阻水構造)影響，轉向偏東北流向 (Lin et al., 2010, c5p5&p6; Lin et al., 2012, c4p16&p17)。

Chiang and Yu (2009) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫)--區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。]

Lin et al. (2010) [In Chinese: 林蔚、錢正明、蔣立為、林鎮國、郭泰融、張育德、陳文山、謝佩珊(2010)，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(97~99 年度計畫)-K 區東部地質概念模式成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-273 / SNFD-ITRI-TR2010-0273。]

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)-K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

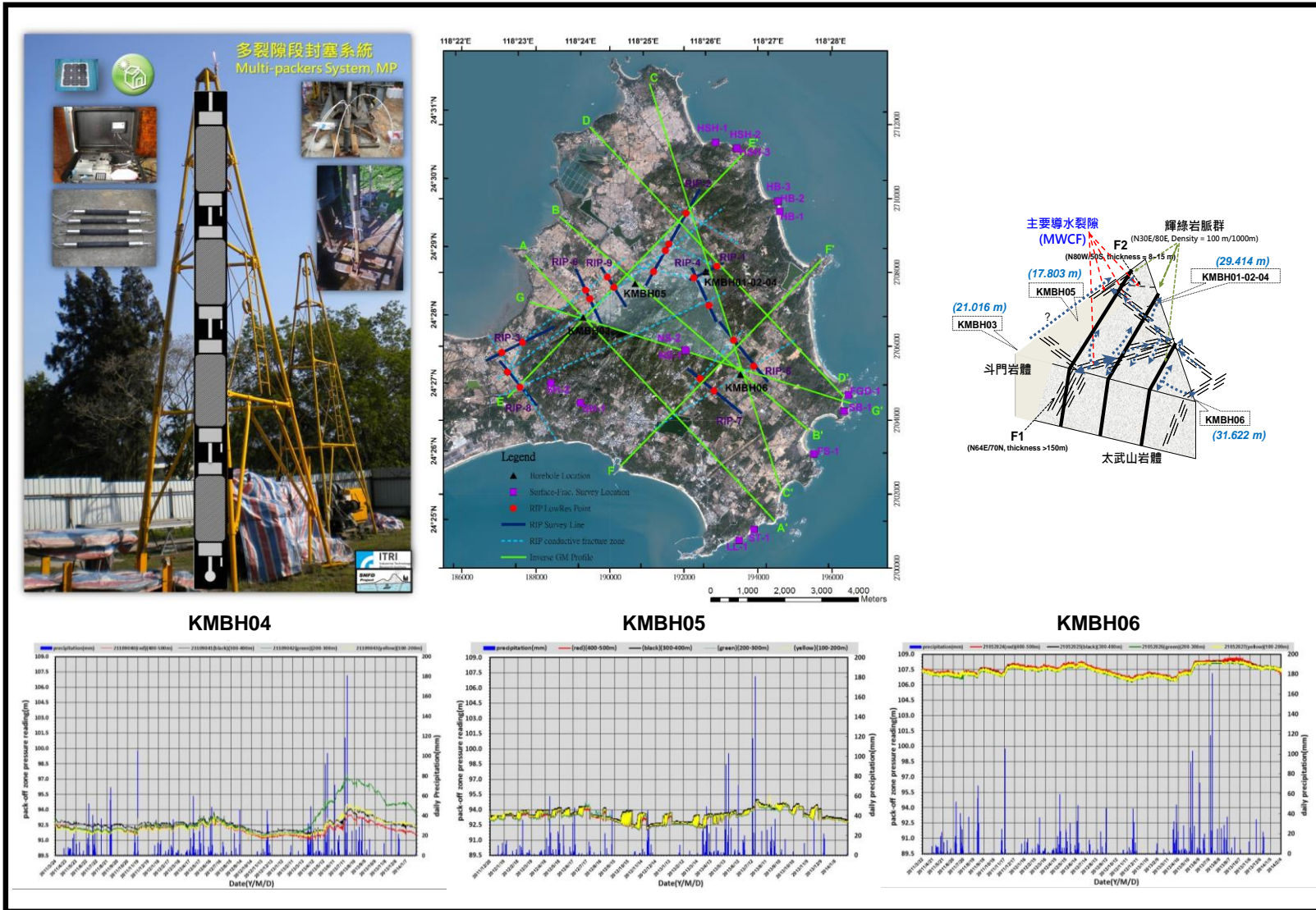


圖 3-34：K 區孔內多封塞段水壓監測結果圖

註解：

上圖由左至右，分別為：

◆ 孔內多封塞水壓監測設備及安裝示意圖；

- 各井封塞監測段安裝均相同，每段封塞段的間距均相同，間距為 100 m。
- 各井均有 4 個連續的封塞監測段：
 - 第 1 封塞段安裝於井孔下 100 m 至 200 m 間。
 - 第 2 封塞段安裝於井孔下 200 m 至 300 m 間。
 - 第 3 封塞段安裝於井孔下 300 m 至 400 m 間。
 - 第 4 封塞段安裝於井孔下 400 m 至 500 m 間。
- 壓力計均安裝於井孔下 100 m，並以 PU 管(1/4")穿過封塞聯通至各封塞段以量測該封塞段壓力。
 - 下圖監測數據中，第一封塞段的壓力監測值，以黃色監測數據線表示。
 - 下圖監測數據中，第二封塞段的壓力監測值，以綠色監測數據線表示。
 - 下圖監測數據中，第三封塞段的壓力監測值，以黑色監測數據線表示。
 - 下圖監測數據中，第四封塞段的壓力監測值，以紅黑色監測數據線表示。

◆ K 區各井的分布地點，請參考圖中的衛星影像圖。

◆ K 區各井之縱座標(m)/橫座標(m)/橢球高(m)如下：

- KMBH01 = 2708023.347/192591.822/33.294
- KMBH02 = 2708029.923/192584.167/33.556
- KMBH03 = 2706786.595/189276.412/22.546
- KMBH04 = 2708033.314/192593.645/33.713
- KMBH05 = 2707700.408/190679.209/22.173
- KMBH06 = 2705241.363/193526.423/32.722

◆ 水文地質概念模式(詳圖 3-33 說明)。

下圖為分段封塞水壓監測結果(林鎮國等 26 人，2014, ch3.2.2.1)；

◆ 橫座標為監測期距(日期間距為 30 日)：

- KMBH04: 2011/03/24 to 2014/01/07
- KMBH05: 2011/12/20 to 2014/01/08
- KMBH06: 2011/03/22 to 2014/02/04

◆ 縱座標(右)：對應橫座標期間之日降水量(mm/day)，資料來源為中央氣象局(www.cwb.gov.tw/V7/climate/)。

◆ 縱座標(左)：各封塞段的壓力監測值。

壓力監測值已換算成壓力頭(pressure head)(ψ , m)，但並未考量井孔高程差異(ΔZ , m)，若欲評估水流方向所需的水頭(hydraulic head)，則尚須以下列關係式計算水頭： $h = \psi + \Delta Z$ 。若以 KMBH05 井下 100 m 為 Z 的參考基準點($\Delta Z_{\text{KMBH05}} = 0$)，則：

- $\Delta Z_{\text{KMBH04}} = 33.713 - 22.173 = 11.54$
- $\Delta Z_{\text{KMBH05}} = 22.173 - 22.173 = 0$
- $\Delta Z_{\text{KMBH06}} = 32.722 - 22.173 = 10.55$

◆ 監測期間各井之封塞段的水頭數值高低依序為：

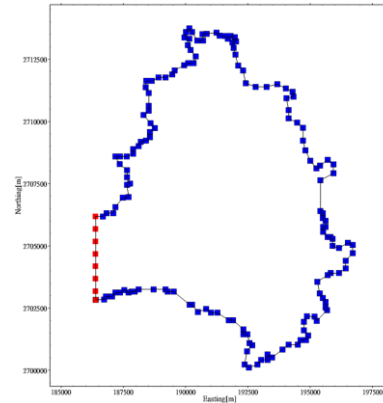
- KMBH06(106m + ΔZ_{KMBH06} to 109m + ΔZ_{KMBH06} ; 116.55 m to 119.55 m)

- KMBH04($91\text{m} + \Delta Z_{\text{KMBH04}}$ to $97\text{m} + \Delta Z_{\text{KMBH04}}$; 102.54 m to 108.54 m)
- KMBH05($92\text{m} + \Delta Z_{\text{KMBH05}}$ to $95\text{m} + \Delta Z_{\text{KMBH05}}$; 92 m to 95 m)
- ◆ 針對 KMBH04 監測數據：
 - 各封塞區段水壓數值亦均有上下震盪(91 to 97m)的情形。
 - 第 2 封塞段(200 to 300 m)壓力值抬升量(91 to 97m)遠高於其他 3 個封塞區段(91 to 94m)，顯示該區段與補注區的關聯性比其他三區段更高，該抬升量隨雨量減緩後，逐漸回復。
- ◆ 針對 KMBH05 監測數據：
 - 監測期間各封塞區段壓力值亦均有上下震盪(92 to 95m)的情形。
 - KMBH05 震盪形式與 KMBH04 及 KMBH06 明顯不同，較不具連續性；研判週遭含水層的連通性較差。
- ◆ 針對 KMBH06 監測數據：
 - 各封塞段的水頭數值遠高於 KMBH04 及 KMBH05 各封塞段水頭數值。
 - 各封塞段的水壓數值均與降水量的變化有明顯的關係存在，顯現 KMBH06 位於壓力的高區且各封塞區段裂隙連通性良好。

Chiang et al. (2015) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌、林鎮國(2015)，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(101~103 年度計畫)－KMBH03-04-05-06 裂隙水壓長期監測 FY101~103 執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-ITRI-90-302 / SNFD-ITRI-TR2015-0302。]

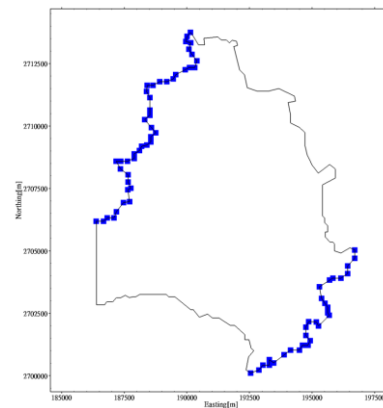
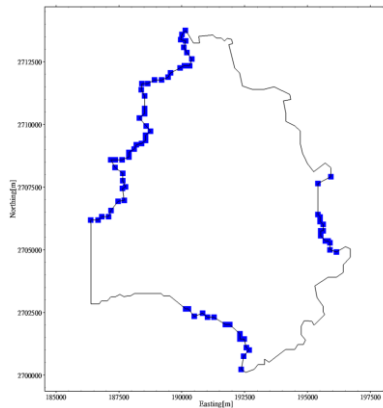
Lin et al. (2014) [In Chinese: 林鎮國、林蔚、董倫道、錢正明、李奕亨、陳文山、田能全、謝佩珊、蔣立為、張育德、劉智超、廖啟雯、蘇毓秀、洪偉嘉、謝德勇、黃淞洋、劉致育、吳上智、邱欣瑜、廖彥喆、劉台生、王竹方、陳志南、楊燦堯、郭明錦、蔡祁欽(2014)，用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段(101~103 年度計畫)－執行成果第二次期中報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-ITRI-90-321 / SNFD-ITRI-TR2014-0321。]

3維模型的上部邊界假設為定水頭(Dirichlet-type)邊界條件，下部邊界則假設為無流(No-flow)邊界。模型側邊有2種邊界假設，分別敘述如下：



邊界條件1：

模型西側紅色長方形表示無流邊界，其餘藍色長方形表示定水頭(Dirichlet-type)邊界條件。



邊界條件2：

藍色長方形表示淺部(左圖)與深部(右圖)的定水頭(Dirichlet-type)邊界條件位置，其他無符號位置則為無流邊界條件。

圖 3-35：K區地下水流的可能邊界條件

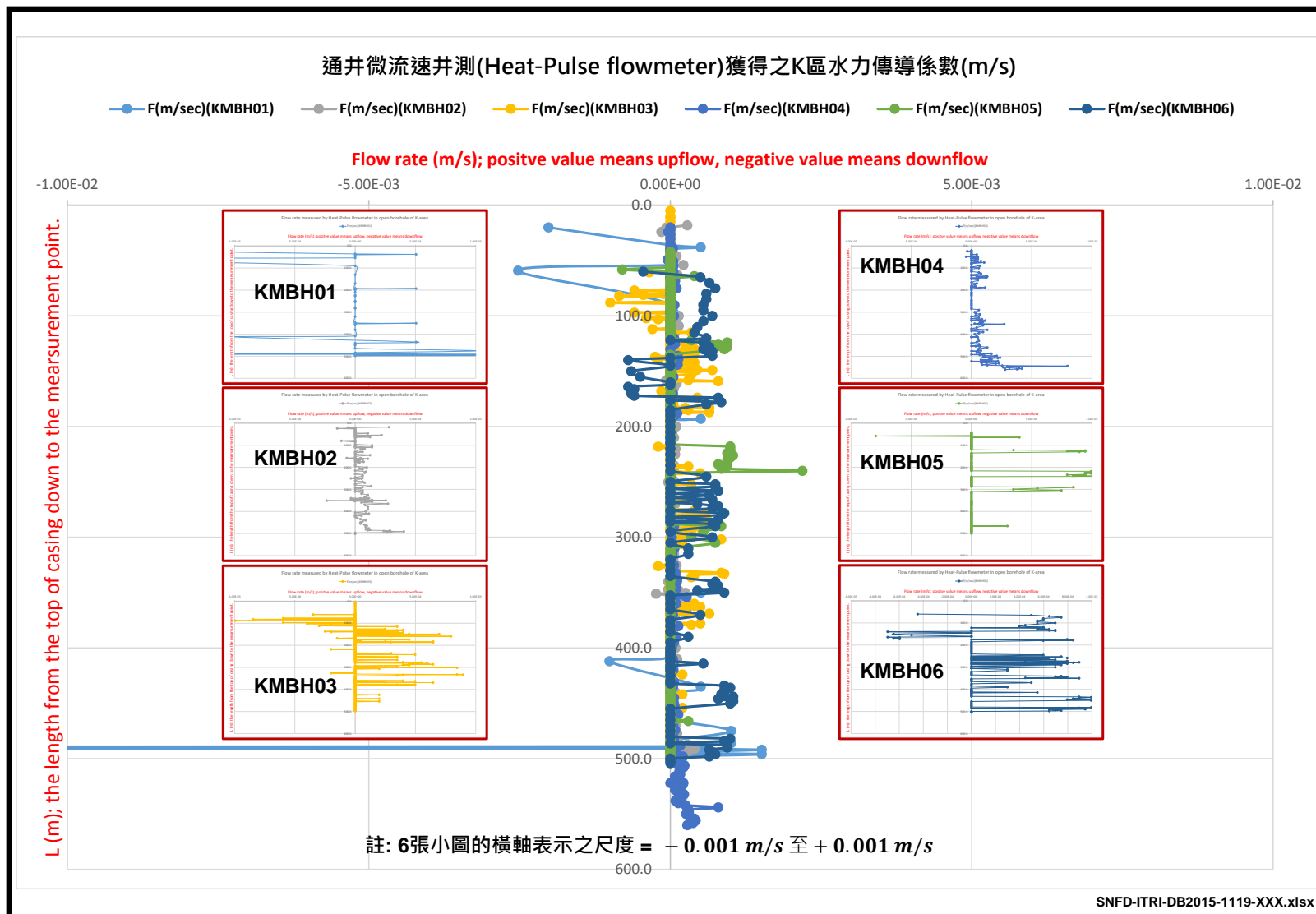


圖 3-36 : K 區通井微流速井測結果圖

註解：

- ◆ The original objective of each borehole drilled in K area is planned to verify the major water-conducting feature speculated by RIP interpretations. Therefore, many fractures are expected to be detected in these boreholes.
- ◆ Any two of KMBH01, KMBH02, and KMBH04 are around 10 m distance, and they are designed to identify the altitude of the TaiWuShan fault (F1) around 450 m depth. The F2 structure is also identified in these three boreholes around 320 m to 350 m depth.
- ◆ The location of KMBH05 is away from the original designed location due to the land accessibility.

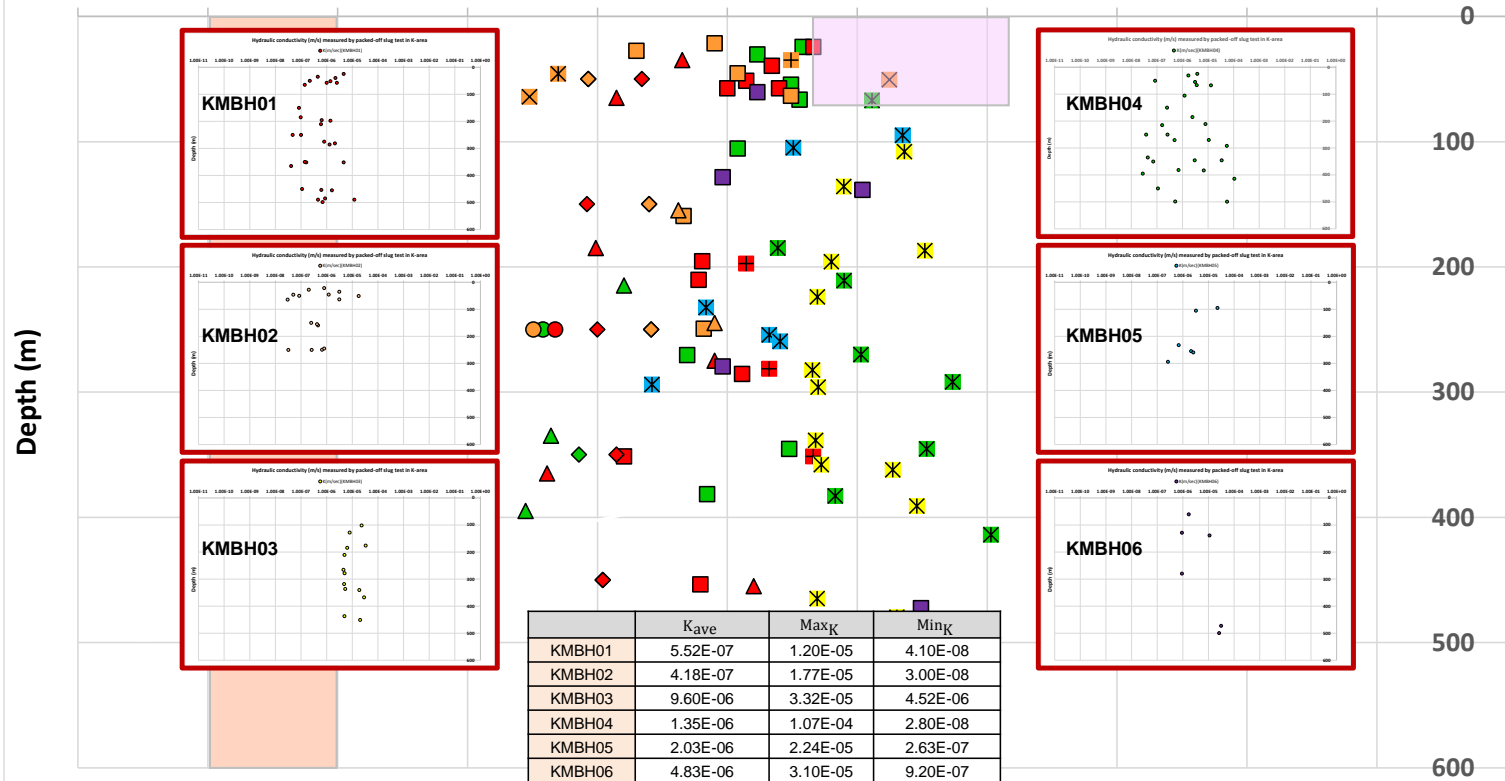
透過封塞水力試驗(pack-off slug test)獲得之K區水力傳導係數(m/s)

● K(m/sec)(KMBH01) ● K(m/sec)(KMBH02) ● K(m/sec)(KMBH03) ● K(m/sec)(KMBH04) ● K(m/sec)(KMBH05) ● K(m/sec)(KMBH06)

Double-packer internals: ▣ 1 m ▤ 1.5 m ▥ 2 m ▦ 3 m ▧ 30 m ▨ 100 m ▩ 500 m

□ K(m/sec) of regolith aquifers (<70 m) (monitoring wells from Kinmen County WaterWorks) □ K(m/sec) (in-situ pulse tests in intact rocks)

1.00E-11 1.00E-10 1.00E-09 1.00E-08 1.00E-07 1.00E-06 1.00E-05 1.00E-04 1.00E-03 1.00E-02 1.00E-01 1.00E+00



Lin et al. (2012c); SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290
 Lin et al. (2013); SNFD-ITRI-90-320 / SNFD-ITRI-TR2013-0320
 Yang et al. (2007); SNFD-EEL-90-248 / SNFD-ITRI-TR2007-0248

(Lin et al., 2012c, ac3p47; Lin et al., 2013, ch3.2.2&c3p33; Yang et al., 2007)

圖 3-37：K 區花崗岩體裂隙帶水力傳導係數隨深度分布情形

註解：

- ◆ 除了 KMBH05 外，裂隙水力傳導係數值(Lin et al., 2012, ac3p47)並無明顯隨深度的增加而有遞減之現象。
- ◆ 針對導水特性較差的裂隙段，亦進行 9 段雙封塞水力試驗，礙於時間尺度，僅能估計其數值小於 10^{-9} m/s (Lin et al., 2013, ch3.2.2)，略大於室內完整岩塊的水力試驗值(3.2×10^{-11} m/s) (Yang et al., 2007, c3p15)。
- ◆ 4 組孔內脈衝示驗結果顯示，水力傳導係數值介於 10^{-10} m/s 至 10^{-9} m/s 之間(Lin et al., 2013, c3p33)。

Chiang et al. (2009) [In Chinese: 蔣立為、張育德、陳冠宇、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫) -- KMBH06 裂隙特性量測與分析-水文地質孔內調查與分析執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-266 / SNFD-ITRI-TR2009-0266。]

Yang et al. (2007) [In Chinese: 楊明宗、劉智超、蔣立為(2007)，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(94~96 年度計畫)--岩塊水力試驗 94~96 年執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-248 / SNFD-ITRI-TR2007-0248。]

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)-K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

Lin et al. (2013) [In Chinese: 林鎮國、林蔚、董倫道、蔣立為、田能全、張育德、謝佩珊、陳文山、劉智超、李奕亨、錢正明、廖啟雯、洪偉嘉、謝德勇、蘇毓秀、邱欣瑜、黃淞洋、劉致育、劉台生、王竹方、陳志南、楊燦堯、郭明錦、蔡祁欽(2013)，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(101~103 年度計畫)-執行成果第一次期中報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-ITRI-90-320 / SNFD-ITRI-TR2013-0320。]

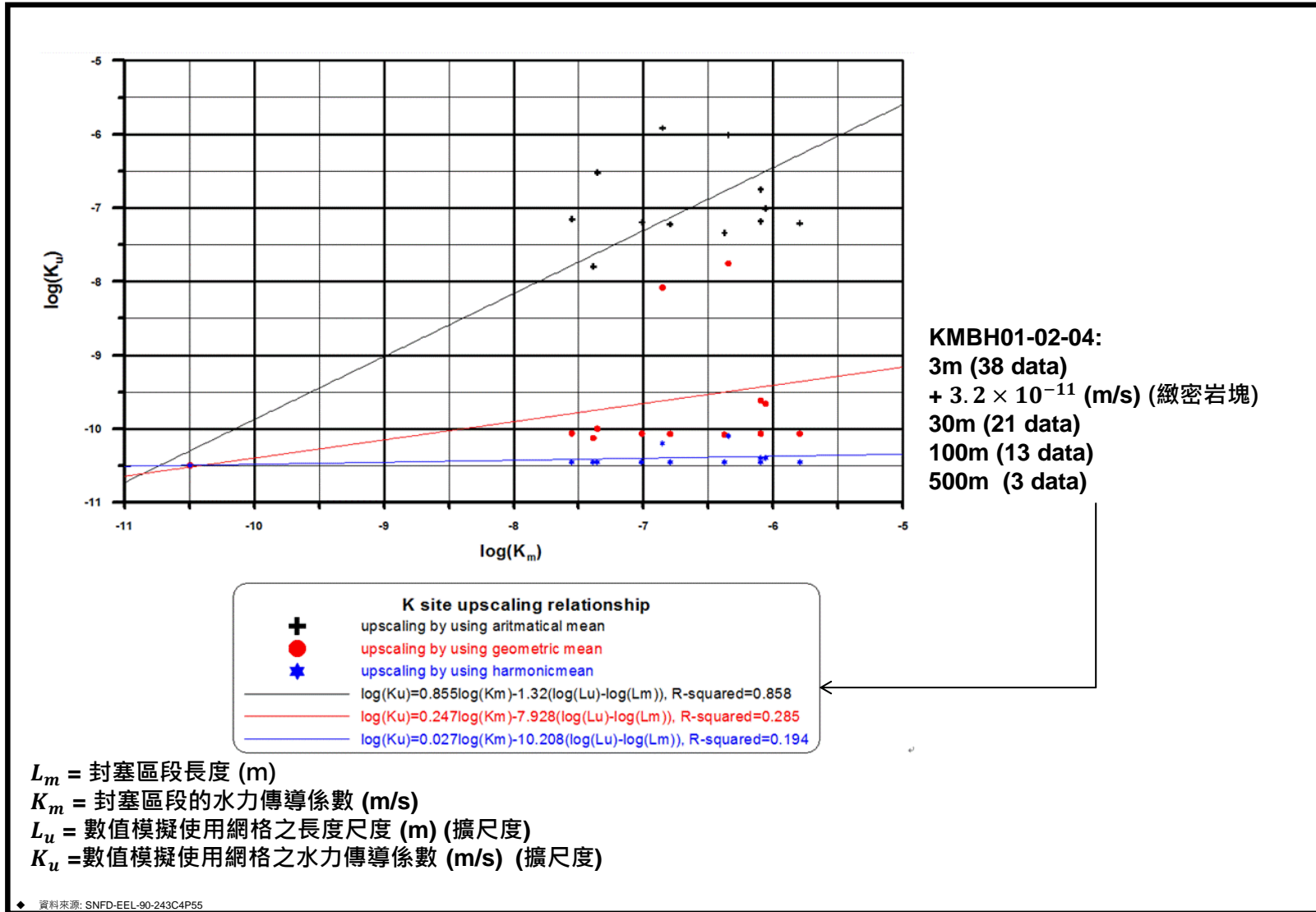


圖 3-38：K 區花崗岩體裂隙帶水力傳導係數擴尺度修正公式

資料來源：Chiang et al. (2006, c4p55)

Chiang et al. (2006) [In Chinese: 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2006)，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(94~96 年度計畫)--技術發展—跨孔追蹤稀釋試驗成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-243 / SNFD-ITRI-TR2006-0243。]

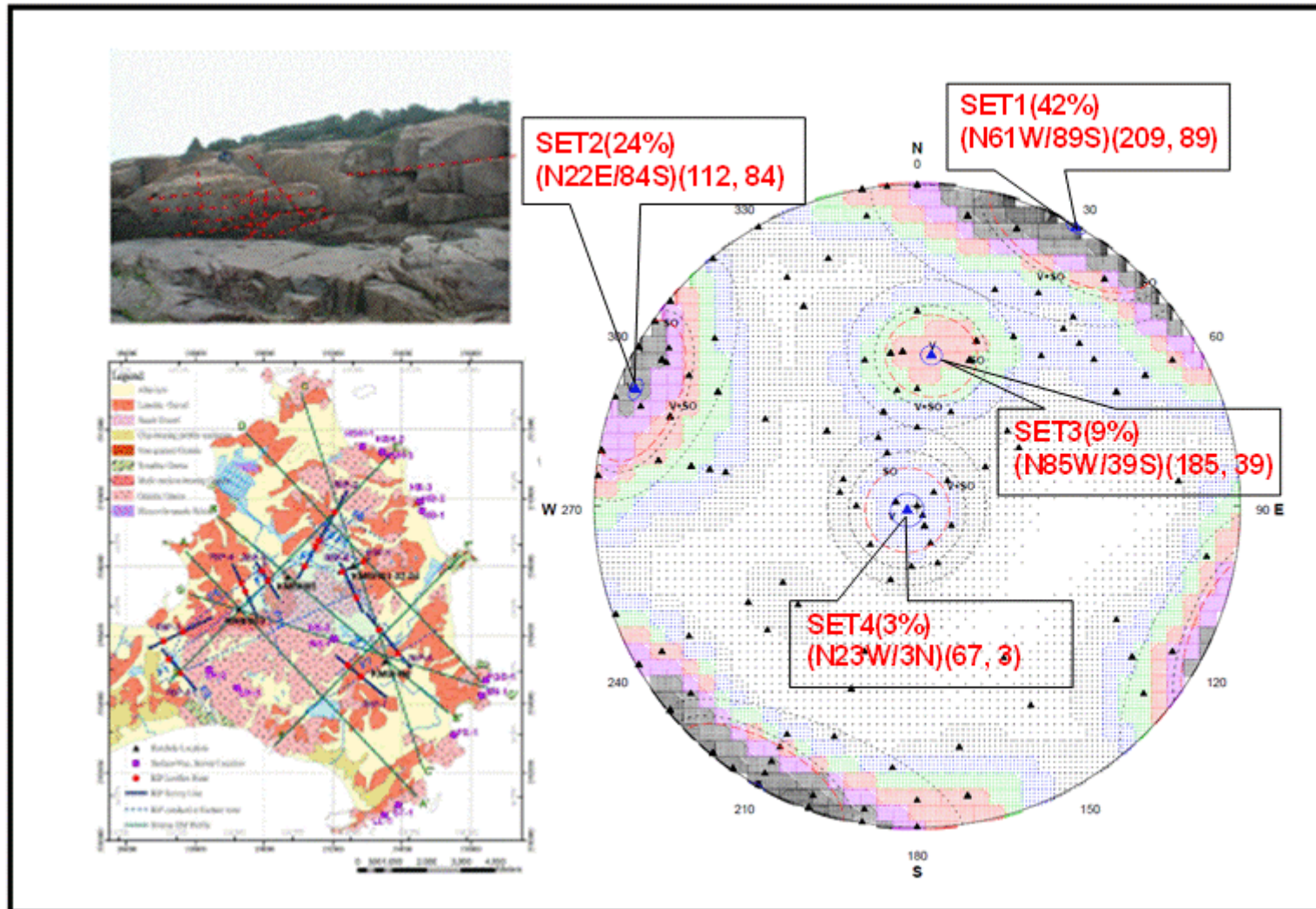


圖 3-39：K 區地表露頭裂隙之測線量測及統計結果

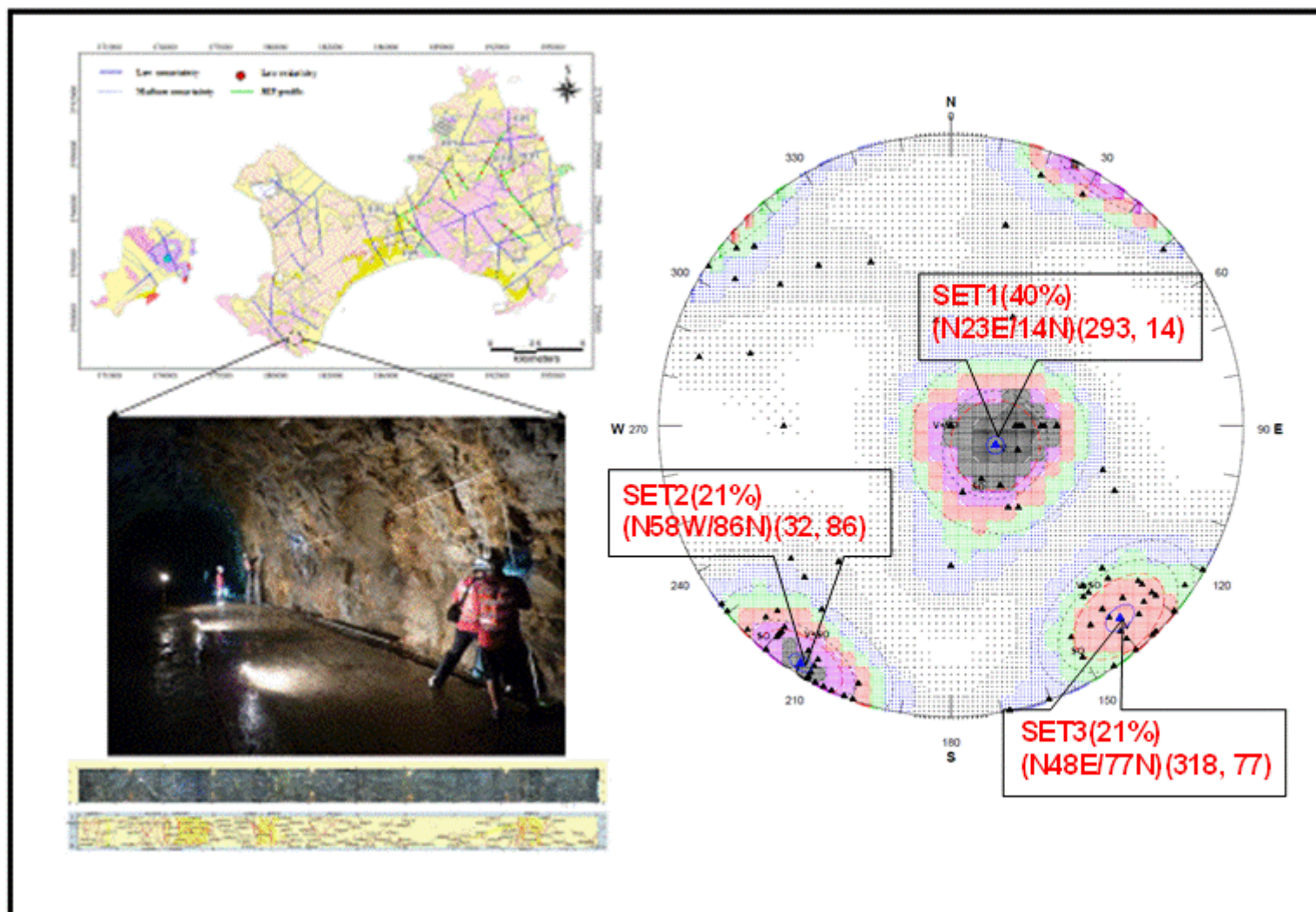


圖 3-40：K區翟山坑道裂隙量測及統計結果

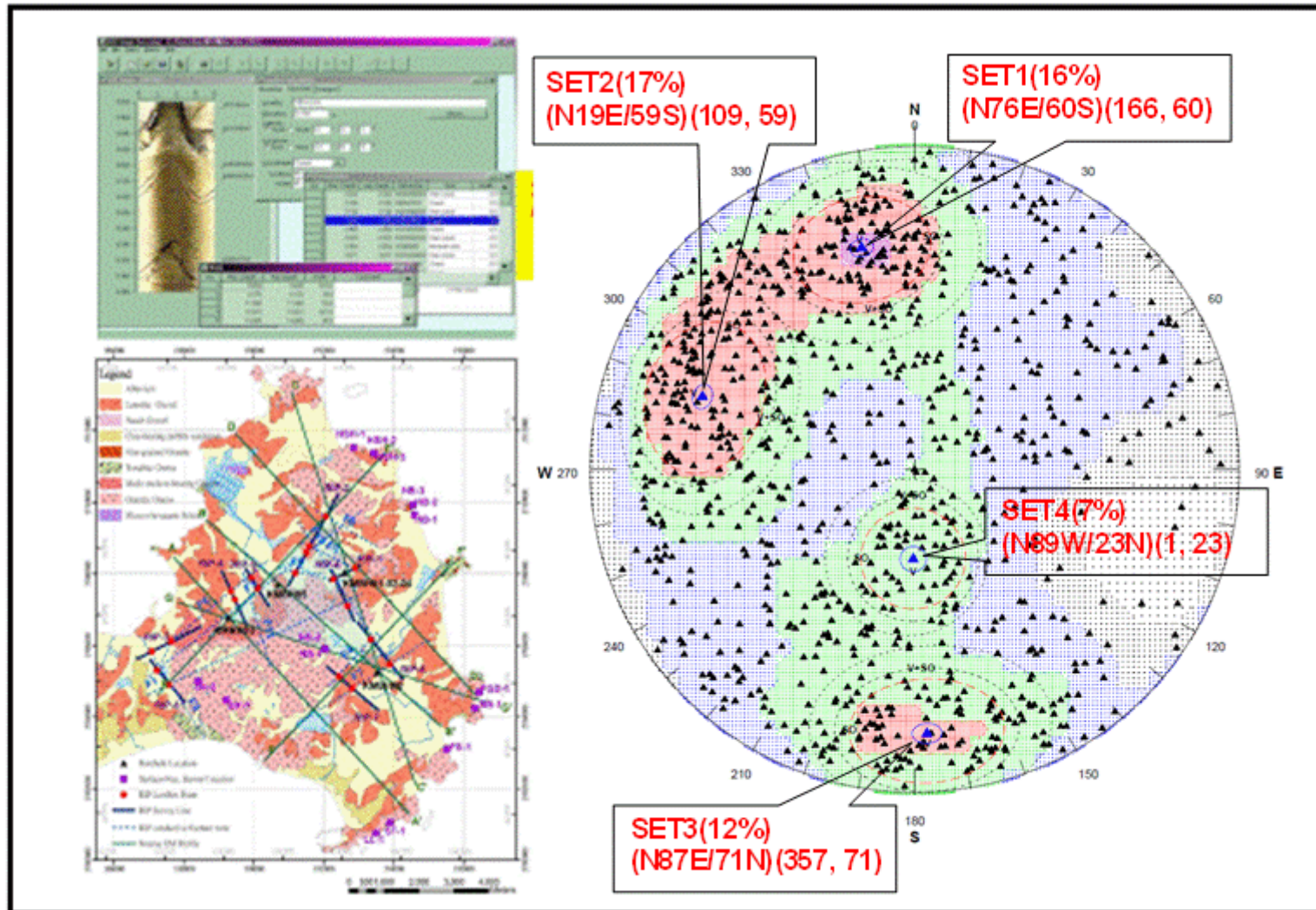


圖 3-41：K 區孔內裂隙量測及統計結果

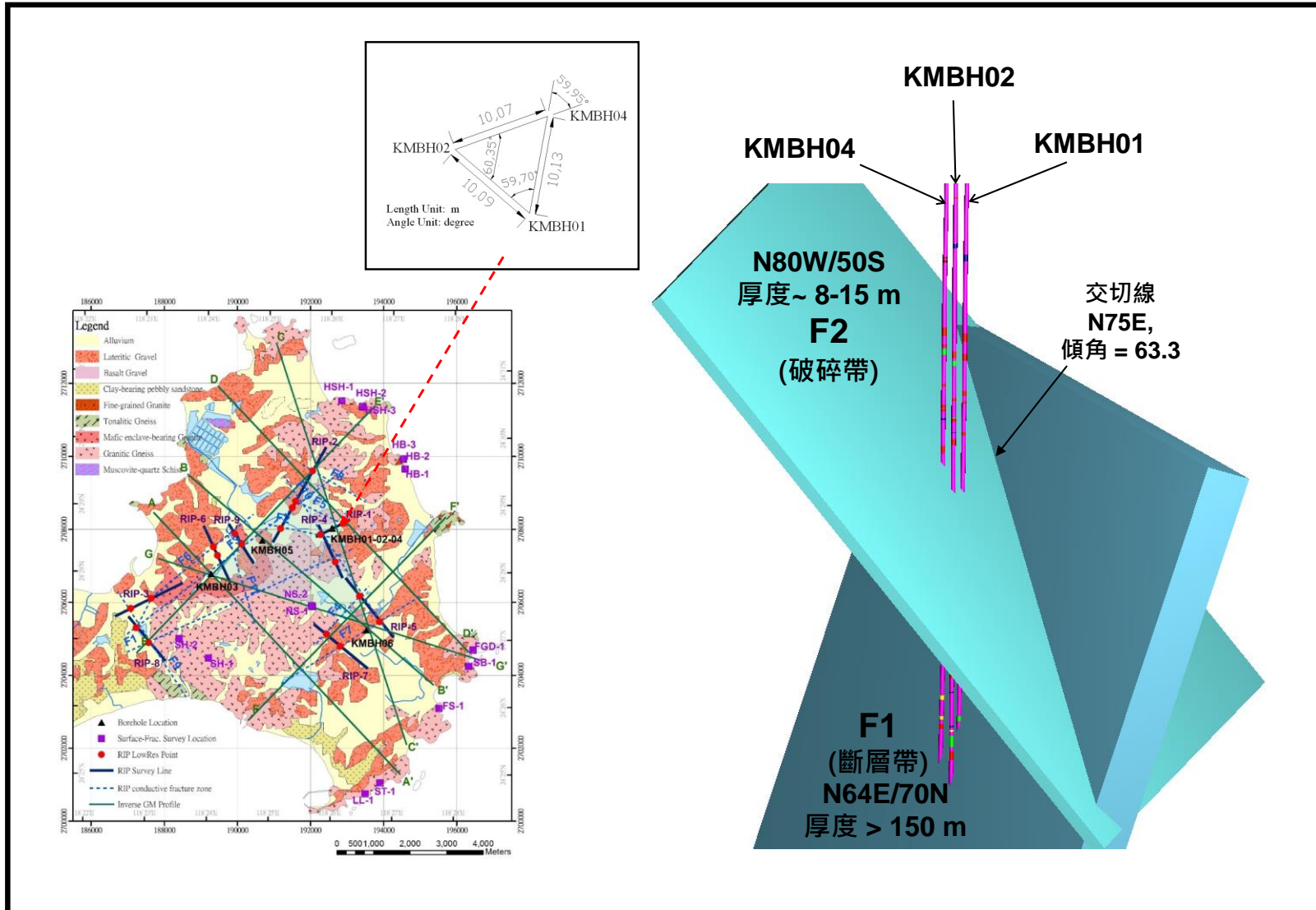


圖 3-42 : KMBH01-02-04 跨孔試驗場及 F1 與 F2 構造位態

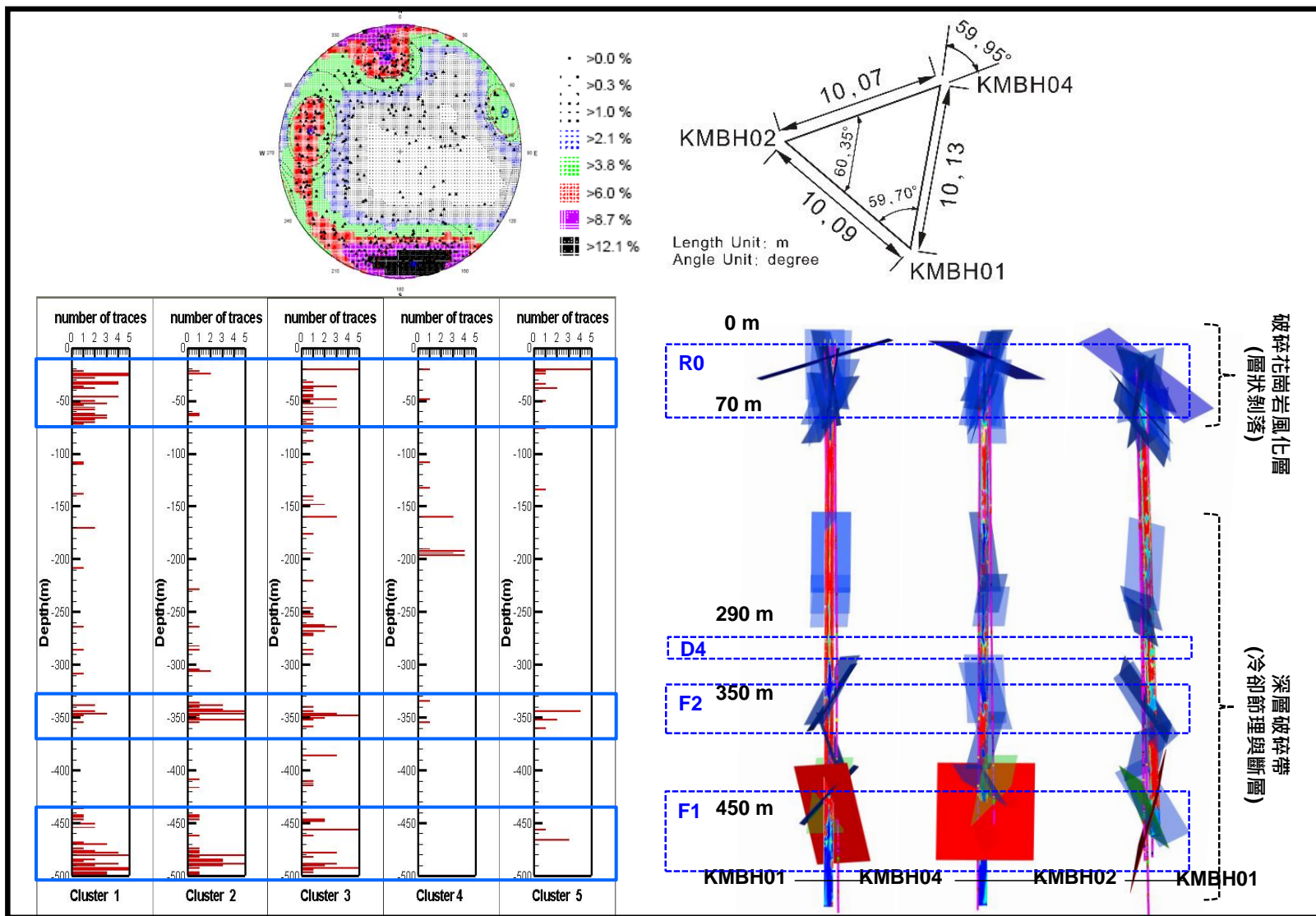


圖 3-43 : KMBH01-02-04 的裂隙分布密度與構造位置具明顯相關性

3.8. 母岩水文地球化學特性

本章節之主要目的在說明參考案例表二(表 2-1)中，下列內容的科學依據：

- (1) Section09 之礦物相及組成的由來。
- (2) Section10 之地下水質的由來。
- (3) Section11 之主要化學反應的由來。

在「深層地質處置」概念中，處置母岩的評估，除了需考慮岩層之地質、水文、地震和岩石力學特性等條件外，其水文地球化學特性更是決定是否適合進行深層地質處置的關鍵。而所謂合適的水文地球化學環境，係指母岩及其環境具備高的放射性核種遲滯能力、高的化學緩衝能力，以及低的核種溶解度之地下水化學特性(Metz et al., 2003, p266)。

除了直接影響核種的溶解度外，地下水的化學特性，尤其是地下水的酸鹼度及氧化還原條件，對工程障壁(如緩衝回填材料)及天然障壁(母岩)的屏障功能亦具有重要的影響性。因此，研析處置環境地下水的化學特性及其可能的化學演化機制，是潛在處置母岩安全評估中一項重要且基本的工作(JNC, 2000, c3p9)。

代表性的深地層水質資料及詳細的礦物組成，是評估水文地球化學環境合適性的必要基本資訊；而地化模擬技術(包含熱力學相圖分析及反應路徑模擬)，則是探討水文地球化學環境的長期演化(穩定)特性的必要能力。

透過歷年的技術發展成果，本計畫除了取得 K 區花崗岩的深地層裂隙水質、及其周圍新鮮與風化岩樣之礦物組成等資訊外，亦利用上述資料進行熱力學穩定相圖的分析，以及不同案例條件下的岩-水反應路徑模擬等研究工作。

本章節以下內容，摘錄了 K 區研究所獲得之重要參數或資訊，包含礦物及地下水的特性，以及經過相圖分析及反應路徑模擬所建議的化學反應系統，做為參考案例表二的 Section09、Section10 及

Section11 的相關科學論述基礎，並根據前述的研究成果，探討說明在不同化學擾動條件下，pH 及 Eh 的可能變動範圍。

3.8.1. 岩石礦物特性

K 區花崗岩區的岩石礦物組成特性說明如下(謝佩珊與林蔚，2012, c5p1)：

3.8.1.1. 岩石學及岩相學分析

從岩相觀察與分析結果顯示，

(1) KMBH03 井所屬岩體(斗門岩體)，是由偏中性的閃長岩與花崗閃長岩所組成。

◆ 主要礦物有石英、斜長石、鉀長石、黑雲母與角閃石，與綠簾石、褐簾石、榭石、鋁石與磷灰石等副礦物，少量在長石或雲母邊緣出現輕度-中度蝕變現象。

◆ 裂隙帶岩段破碎，屬整體中度到強烈蝕變，大量蝕變成為簾石類、綠泥石類或黏土類次生礦物，已無法分辨其原岩特徵；粉紅-灰白至墨綠次生礦物充填於裂面上，鬆散易剝離。

(2) KMBH04 及 KMBH06 鑽井所屬岩體(太武山岩體)，則是由粗粒、灰色至淺粉紅色花崗片麻岩構成。

◆ 新鮮岩樣主要礦物包括石英、鉀長石、斜長石與黑雲母，含少量角閃石、綠簾石、褐簾石、鋁石、磷灰石、石榴子石與不透光礦物；在主要礦物間偶會出現絹雲母、綠泥石類的次生礦物，並夾有細微石英脈。

◆ 裂隙帶岩段破裂程度高、表面粗糙，遭受強烈蝕變作用，黏土化、綠泥石化程度高，明顯形成覆蓋破裂面之白色-黃綠色的隱晶質粉狀次生礦物，部份為易剝離片狀；部份礦物仍保有原本晶體外形，但內部早已轉變為蝕變礦物，礦物之間亦充填蝕變礦物，偶見風化鏽染。

3.8.1.2. 礦物鑑定與組成分析

- (1) 由礦物鑑定與組成分析結果(圖 3-44)得知，
- ◆ 新鮮圍岩經蝕變作用後石英大量減少，長石也明顯發生不同程度的纖維長石化、絹雲母化或黏土化蝕變現象，特別是鉀長石斑晶明顯蝕變為白雲母種類中的一種絹雲母；
 - ◆ 黑雲母蝕變大量減少至消失，在黑雲母消失之時，綠泥石大量形成，推論兩者之間存在有消長關係，黑雲母從邊緣逐漸蝕變轉換為綠泥石，且以主要含鐵之綠泥石亞種為主；
 - ◆ 另在裂隙段中常可見大量方解石晶體充填。
- (2) K 區花崗岩的新鮮礦物組成，主要以石英(quartz)、鉀長石(K-feldspar)、斜長石類(plagioclase)、黑雲母類(biotite)為主要成份(謝佩珊與林蔚，2012, c7)。
- (3) 在 K 區輝綠岩脈的新鮮礦物組成方面，主要以斜長石類(plagioclase)、角閃石類(amphibole)、單斜輝石(clinopyroxene)、不透光礦物(如 ilmenite、magnetite 等)為主要成份(謝佩珊與林蔚，2012, c7)。
- (4) K 區裂隙帶風化岩心樣品實際分析所得的次生礦物及微量的殘餘原生礦物，包含石英(quartz)、綠泥石類(chlorite)、角閃石類(amphibole)、綠簾石類(eidode)、鈦鐵礦(ilmenite)、磁鐵礦(magnetite)、鋯石(zircon)、石榴石類(garnet)、褐簾石類(allanite)、絹雲母(sericite)、白雲母(muscovite)、單斜輝石(clinopyroxene)、黝簾石(zoisite)、方解石(calcite)、磷灰石類(apatite)、黃鐵礦(pyrite)、高嶺石(kaolinite)，及其它微量的黏土礦物(clay)(謝佩珊與林蔚，2012, c4p5)；其中，
- ◆ 綠泥石類、簾石類、絹雲母、方解石、黃鐵礦、高嶺石、石英及黏土礦物為主要的次生礦物；石英可能為次生或原生。
 - ◆ 角閃石類、鈦鐵礦、磁鐵礦、鋯石、石榴石類、白雲母、單斜輝石、磷灰石類等可能為微量的殘餘原生礦物(副礦物)。

3.8.1.3. 全岩化學組成

在全岩地球化學組成分析方面，

- (1) TAS 圖是根據全岩粉末地球化學主要元素分析中之 SiO_2 、 Na_2O 與 K_2O 含量，所建立之火成岩岩性鑑別圖，利用此圖可以明確分類未知火成岩樣本的詳細岩性；
- (2) 原始地函標準化之不相容元素蛛網圖 (primitive mantle-normalized incompatible element spidergram) 則是利用岩石中固定種類的微量元素含量，經過對原始地函為標準計算後，所連結起來所形成的趨勢圖，結果可與許多世界上公認之已知來源的岩石圖譜進行比對，以了解岩石的源岩、演化特性。

由新鮮圍岩主要元素之 TAS 化學組成分類圖(圖 3-45 左下圖)，可知，

- (1) KMBH03 井所屬岩體的 SiO_2 含量集中於 56 wt% 至 66 wt% 之間，屬於偏向較中-中酸性的閃長岩-花崗閃長岩，僅有少數偉晶或粗粒狀花崗岩 ($SiO_2 > 75$ wt%)；
- (2) KMBH04 及 KMBH06 鑽井所屬岩體之 SiO_2 含量則集中於 70 wt% 至 78 wt% 之間，主要為酸性的花崗岩，部分則為侵入的中性閃長岩 ($SiO_2 \approx 52$ wt% 至 62 wt%) 至基性 ($SiO_2 \approx 50$ wt% 至 52 wt%) 岩脈。
- (3) 至於裂隙填充物與其新鮮圍岩比較，顯示 SiO_2 含量皆相對較低， Al_2O_3 與 CaO 明顯富集，石英或矽酸鹽類礦物受到蝕變作用溶解或換質，重新膠結的次生礦物傾向以碳酸鹽類為主，同時易遷移的 Na_2O 、 K_2O 推測因被流體帶走而呈現含量偏低的現象。而以上新鮮圍岩與裂隙帶化學組成改變亦符合礦物相的觀察。

至於微量元素方面，由原始地函標準化之不相容元素蛛網圖(圖 3-45 右下圖)，可知，

- (1) 太武山岩體的閃長岩-花崗閃長岩-花崗岩與斗門花崗閃長岩-花崗岩皆表現出多變的大離子半徑元素含量(LILE)，Ba, Sr, U, P 虧

損，顯示受到長石與磷灰石結晶分化的影響，還有明顯的 Nb, Ta 與 Ti 虧損現象，但整體而言太武山岩體鑽取的岩心成分變化幅度相對大於斗門岩體岩心；岩心與露頭岩樣性質相似(圖 3-45 右圖)。

- (2) 裂隙散狀填充物亦呈現輕稀土元素富集與鎔(Eu)元素虧損，但在稀土元素總含量上，裂隙帶都明顯富集，推論也是受到蝕變作用下，易遷移性元素被溶解帶離，但稀土元素仍保留並相對富集。
- (3) 因此，相較於新鮮花崗岩，裂隙帶在不相容元素蛛網圖中呈現出某些稀土元素富集的現象，顯示裂隙中因長期岩-水反應結果，含可吸附 La、Ce、Sm、Nd 等元素的次生礦物。

3.8.1.4. 各地質單元礦物組成建議值

表二 Section09 的礦物相及礦物組成(mineral phases and composition)資料，取自針對 K 區 KMBH03、KMBH04、KMBH06 等 3 口地質鑽井之岩心所進行的分析結果(謝佩珊與林蔚，2012，c7)。

岩象分析係利用偏光顯微鏡進行岩石薄片之岩象學觀察，記錄岩石的礦物組成與結構；並佐以點計數器(point counter)來計數礦物組成含量比例，單位為體積百分比。依據不同的岩體及構造單元，其所對應的礦物相及礦物組成說明如下：

- (1) R1 礦物相及礦物組成：

以 KMBH03 深度 384.43 至 385.00 m 之斗門岩體岩心(樣品編號：KMBH0305)的岩相分析結果為代表，岩性屬於花崗閃長岩(謝佩珊與林蔚，2012，c7p5)。

- (2) R2 礦物相及礦物組成：

以 KMBH04 深度 462.60 至 463.00 m 之太武山岩體岩心(樣品編號：KMBH0416)的岩相分析結果為代表，岩性屬於花崗片麻岩(謝佩珊與林蔚，2012，c7p31)。

- (3) R3 礦物相及礦物組成：

以 KMBH06 深度 419.00 至 419.27 m 之太武山岩體岩心(樣品編號:KMBH0613)的岩相分析結果為代表,岩性屬於花崗片麻岩(謝佩珊與林蔚, 2012, c7p50)。

(4) F1 及 F2 礦物相及礦物組成:

以 KMBH04 深度 497.10 至 497.55 m 之太武山岩體岩心(樣品編號:KMBH0417)的岩相分析結果為代表,岩性屬於花崗片麻岩(謝佩珊與林蔚, 2012, c7p32)。

(5) D1 至 D10 礦物相及礦物組成:

以 KMBH04 深度 291.70 至 292.00 m 之太武山岩體岩心(樣品編號:KMBH0405)的岩相分析結果為代表,岩性屬於輝綠岩(謝佩珊與林蔚, 2012, c7p19)。

此外,在 Section09 最下方所列之礦物,為 K 區地化反應模擬(詳第 3.8.3.2 節說明)結果所建議增列之次生礦物相,此等礦物大都在風化岩心中發現,部分(如 Dawsonite、C)雖然在岩象分析中未被鑑定出,但其在地化模擬過程中,係為熱力學平衡狀態下可能形成的穩定性物種。

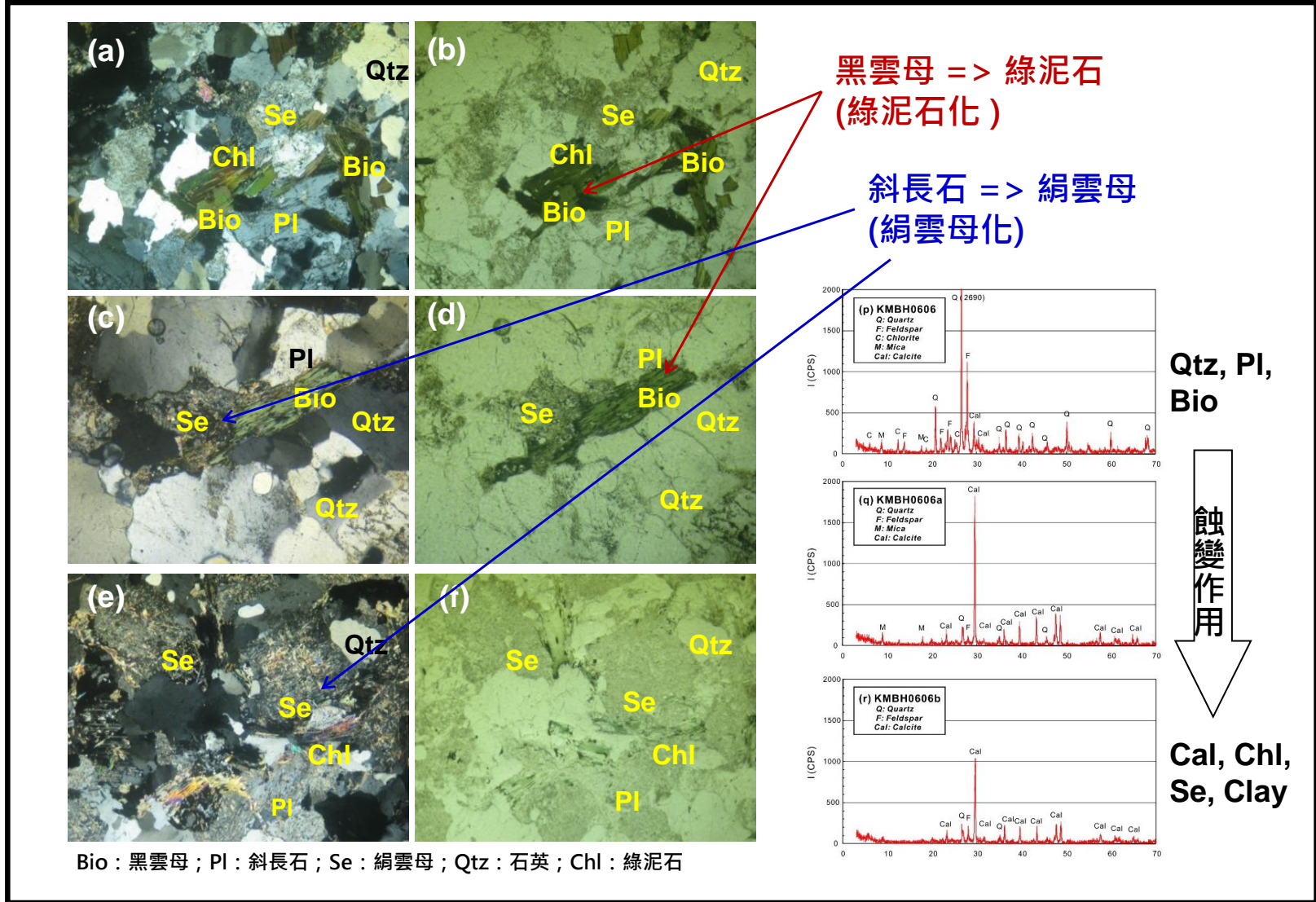


圖 3-44：K 區花崗岩心之岩相與 XRD 分析結果

資料來源：Hsieh and Lin (2012, ac4p20-22)

Hsieh and Lin(2012) [In Chinese: 謝佩珊、林蔚(2012)，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－潛在母岩特性調查－K區花崗岩岩心礦物組成特性分析，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-288 / SNFD-ITRI-TR2012-0288。]

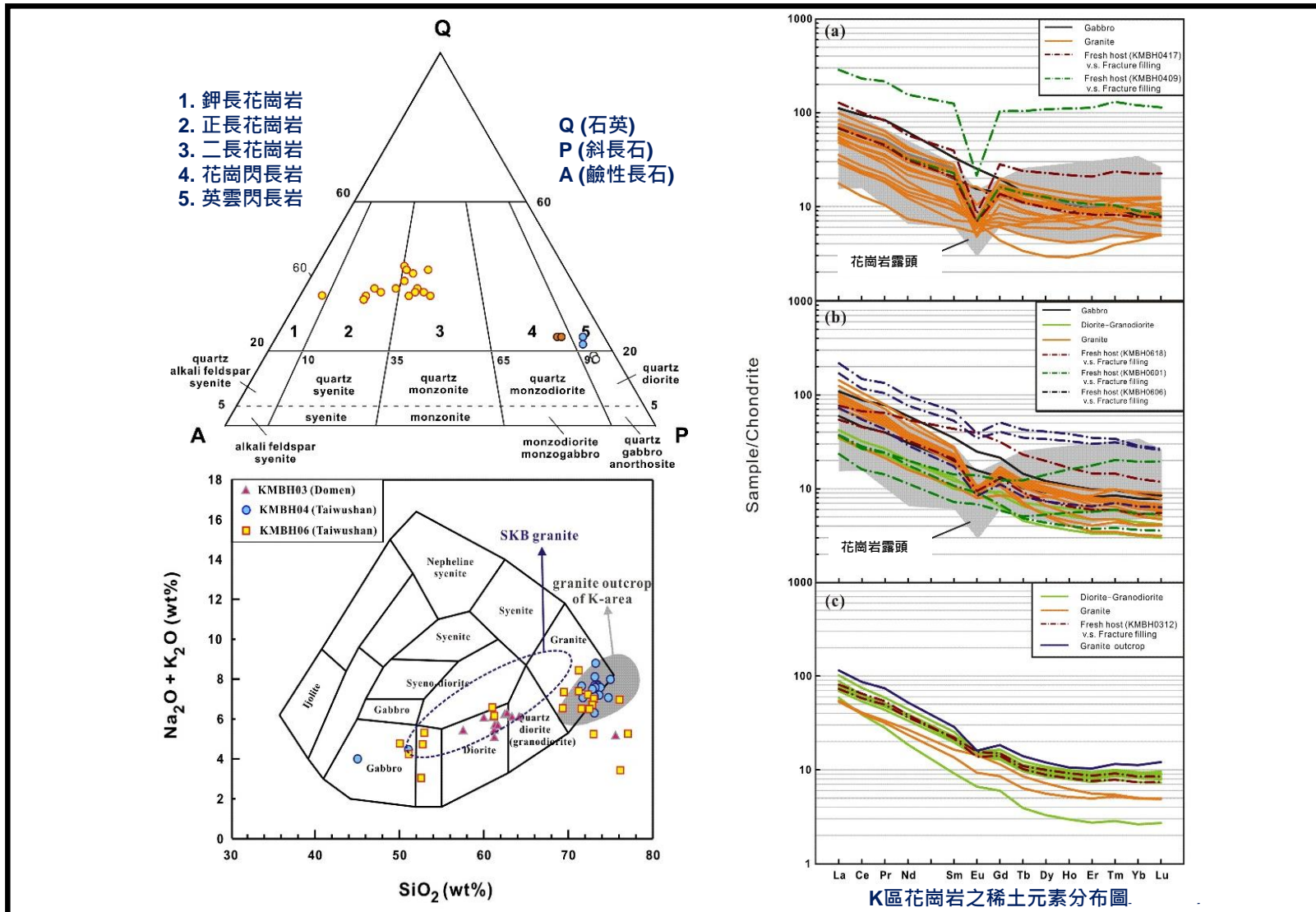


圖 3-45：K 區花崗岩心之化學組成及分類

資料來源：Hsieh and Lin (2012, ac4p38-39)

Hsieh and Lin(2012) [In Chinese: 謝佩珊、林蔚(2012)，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－潛在母岩特性調查－K區花崗岩岩心礦物組成特性分析，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-288 / SNFD-ITRI-TR2012-0288。]

3.8.2. 地下水化學組成特性

K 區花崗岩測試區之淺層地下水 (<50 m) 及深層地下水質 (KMBH01 至 KMBH06) (<500 m) 的水質取樣 (雙封塞取樣) 分析結果 (林蔚等, 2012, ac4p44 to p45), 如圖 3-46 所示。

表二 Section10 的地下水水質資料, 係取自於本計畫在 1999 至 2010 年期間, 針對 K 區 KMBH01、KMBH03、KMBH04、KMBH05 及 KMBH06 等五口地質鑽井之主要裂隙帶所進行的地下水採樣及分析結果 (林蔚等, 2012, ac4); 取樣方法及過程, 簡述如下:

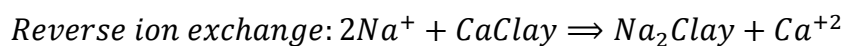
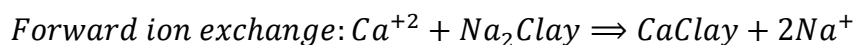
- ◆ 圖 3-47 說明 K 區深層地下水採樣工具及採樣標準。
- ◆ 圖 3-48 說明如何決定 K 區地下封塞取樣段的方法。
- ◆ 圖 3-49 摘列 K 區深層地下水採樣過程中, 部分封塞段水質特性 (酸鹼度、氧化還原電位、電導度、水壓) 隨時間的變化紀錄。

總計於上述五口地質鑽井中的 16 組主要導水裂隙中, 共取得 18 個地下水水樣 (2 個為重複採樣), 並將其水質分析結果 (表 3-2), 依據採樣深度, 劃分成 300 m 至 400 m、400 m 至 500 m、300 m 至 500 m 等 3 個深度區段的平均水質 (表 3-3), 以利後續相關研究使用。

K 區地下水質特性摘述如下:

- ◆ K 區淺層地下水 (< 50 m) 的 pH 約介於 4.6 至 7.1 (圖 3-46) (Liu et al., 2008, p378), 深層地下水 (50 m 至 500 m) 的 pH 值約介於 6.29 至 9.76 (表 3-2), 由於 pH 變動範圍大 (4.6 至 9.76), 顯示其 pH 緩衝能力不高; 台灣本島東部花崗岩地區, 因受大理岩包圍, 其地下水的 pH 緩衝能力高, 大範圍地區的地下水 pH 值均約為 8。
- ◆ K 區深層地下水 (50 m 至 500 m) 的 Eh 約介於 -0.48 volts 至 +0.35 volts (表 3-2), 整體而言, 當深度大於 400 m 時, K 區深層地下水已處於還原環境 (Eh < 0)。

- ◆ K 區地下水樣的取樣點因遠離海邊(圖 3-19 中的 KMBH01 至 KMBH06)，其地下水在 500 m 深度時，水質仍比海水淡很多(圖 3-50)。
- ◆ 由圖 3-50 可明顯發現：位於太武山北側的 KMBH03 及 KMBH05 的水質條件，明顯與位於南側的 KMBH01, 04 及 06 的水質有明顯不同，前者離子強度較高，且鈣離子及硫酸根離子相對較高，可能來自石膏的溶解(Liou et al., 2009, p1575)；石膏的來源，可能是因太武山北側部份地區在上一次冰期時，因海水面下降而處於高度蒸發(沙漠化)區域而形成石膏(林蔚等，2010，c4p11)。
- ◆ 氫氧同位素的分析結果顯示，K 區地下水樣的主要來源為天水(圖 3-51) (林蔚等，2010，c4p12)。
- ◆ 目前的相關研究結果顯示，金門本島的地下水鹽化程度並不嚴重，且鹽化來源可能來自以前沉積物的瀝濾(Liu, et al., 2008, p379&p380)。另外，由於地下水的硫酸根與氯離子，並無明顯的線性關係，故應該與海水入侵無關，其硫酸根離子的來源可能與石膏的溶解有關(Liou, et al., 2009, p1575&p1585)。
- ◆ 由於 K 區深層水樣的離子濃度很淡，因此，很難判斷離子交換機制對水質的影響性。除了 KMBH01 之 300~400m 及 400~500m 水質明顯呈現 $\Delta Ca_{eq} \cong \Delta Na_{eq}$ (圖 3-50)，顯示有離子交換反應的可能性外，其餘水質條件隨深度的變化並無類似的明顯特性。



但若將水質以雙組合變數作圖(圖 3-52)，可看出：

- (a) 除了天水源的 Na 離子外，K 區所得的深層地下水樣應該有其它的鈉離子來源(圖 3-52(a))；例如 albite 的風化、正向離子交換。
- (b) 大部分的深層地下水樣呈現達離子交換平衡的特徵(圖 3-52(b))；太武山南側的水樣(KMBH01, 04, & 06)比北側水樣(KMBH03 & 05)更明顯。

- (c) 太武山北側之深層地下水樣(KMBH03 & 05)的鈣及鎂離子濃度，除了受碳酸鈣、白雲石、石膏的溶解反應影響外，尚可能有其他影響因子，例如正向離子交換(圖 3-52(c))。
- (d) 根據風化帶岩心分析結果(詳前節)，顯示破裂帶內確實可觀察到風化次生的微量黏土礦物，因此，上述的正向離子交換機制可能存在，進而影響水質特性；但因黏土含量少，難以確定其組成，根據反應路徑模擬結果(詳下節)，則建議可能是 smectite 類的 saponite、nontronite 等。

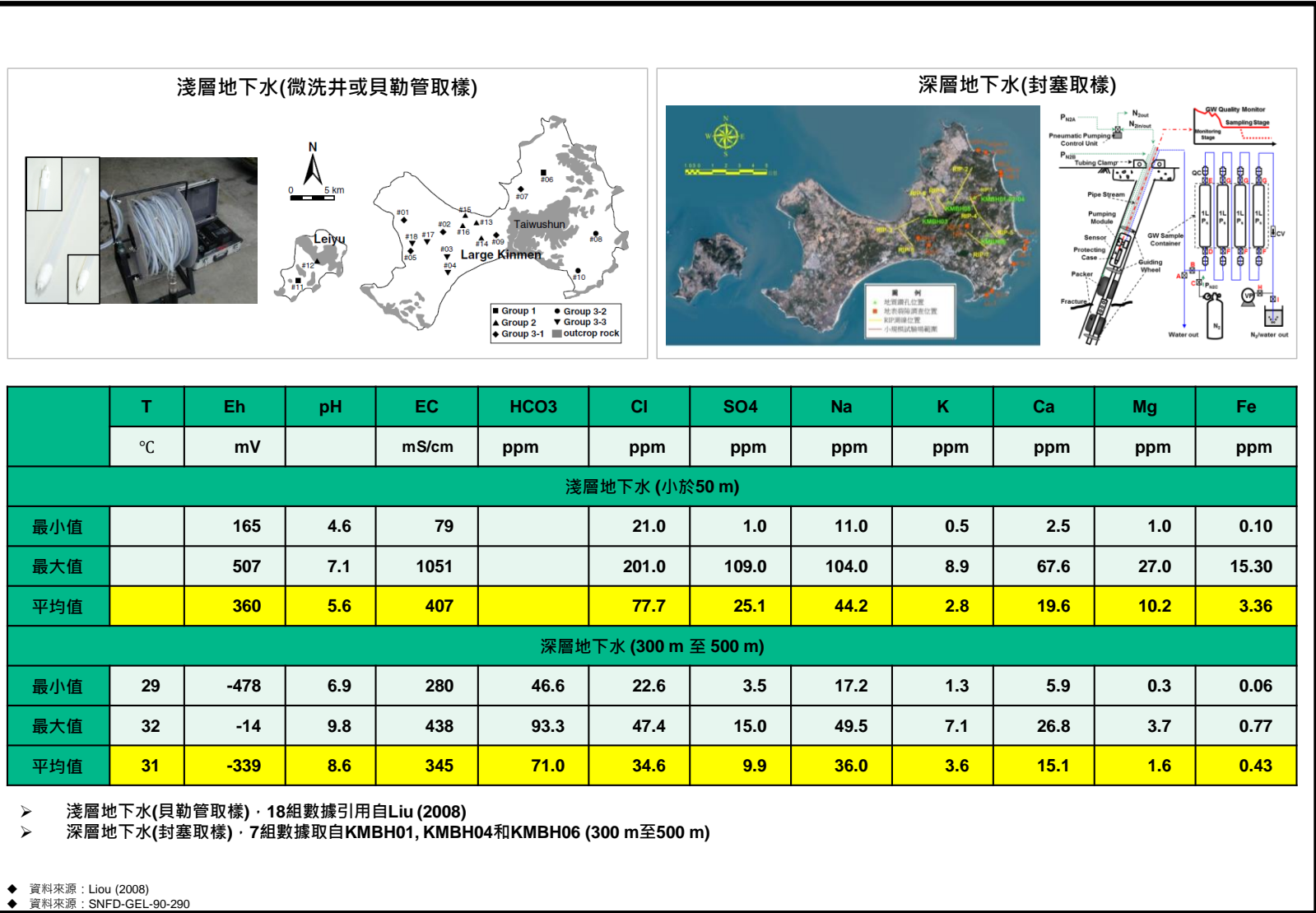


圖 3-46：K 區淺層及深層地下水質特性

註解：

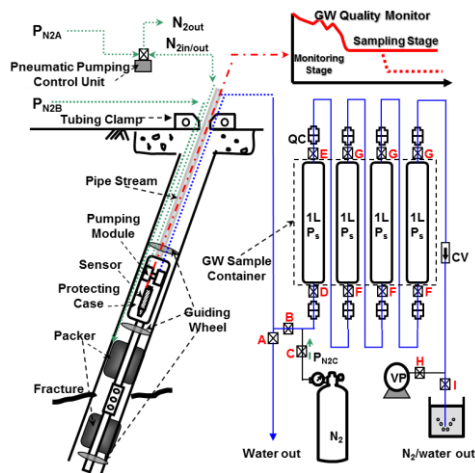
- ◆ 淺層地下水(<70 m)水質，取自民用水井(Liu et al., 2008; WRA, 2005, t3.1-1 and t3.1-2)。
- ◆ 深層地下水(300 m to 500 m)水質，取自孔內封塞段(Lin et al., 2012, ac4p41)。

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

Liu et al. (2008) [Liu, C.-W., Jang, C.-S., Chen, C.-P., Lin, C.-N., and Lou, K.-L. (2008), Characterization of groundwater quality in Kinmen Island using multivariate analysis and geochemical modeling, Hydrological Process, Vol. 22, pp. 276-383.]

ChemWish

(Chemical and Hydraulic Exploration Marlinespike for groundWater Isolated in a boreHole)



功能：

- 地下水封塞取樣 與/或 長期監測
- 水力試驗

規格：

- 深度可達1,000 m
- 直井/斜井

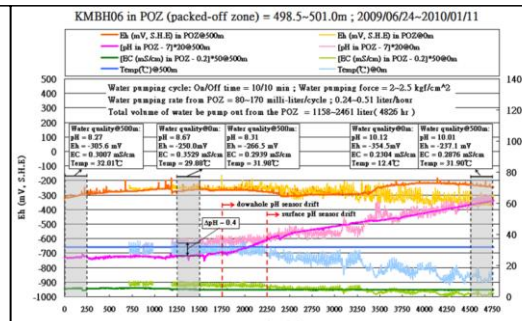
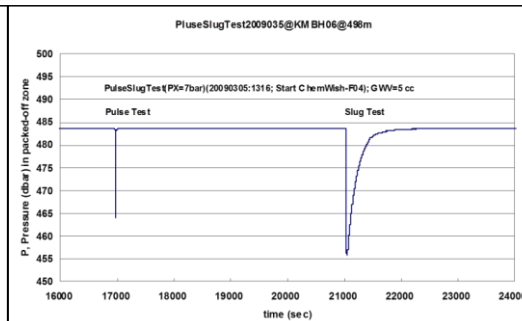
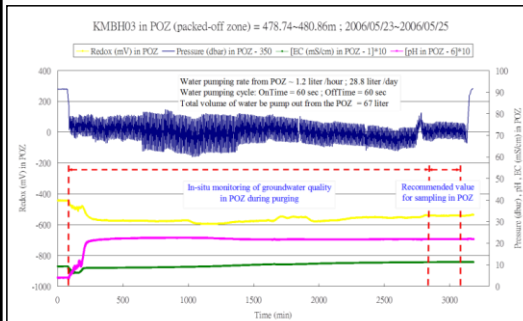
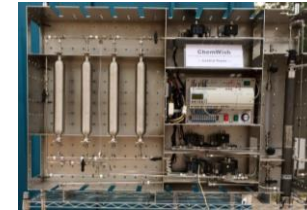


圖 3-47：K 區孔內深層地下水取樣工具及判斷標準

註解：

- ◆ 除淺層套管外，K 區地質鑽孔均以裸孔建置，孔內裂隙帶之地下水水樣，均以封塞取樣方式取得，以避免混合到孔內其他深度的地下水(Lin et al., 2012, ac4p3)。
- ◆ 封塞段內的地下水，以氣動(氮氣)裝置將地下水以脈動方式，經 1/4 吋 PU 管抽取至地表，每次脈動都會造成封塞段的水壓下降，而使得臨孔周圍裂隙帶的地下水進入封塞段中。
- ◆ 封塞段內有安裝化學感應器，用以連續監測封塞段內地下水之溫度、水壓、酸鹼度、氧化還原電位、溶氧量及電導度，並將訊號即時傳遞至意表監視器及紀錄系統。
- ◆ 在進行地下水取樣前，至少必須抽取 3 倍封塞段體積的地下水至地表，且封塞段內地下水之連續監測數據必須達穩定數值，其變動範圍，必須小於： $\text{pH} \leq \pm 0.2$, $\text{EC} \leq \pm 3\%$, $\text{Redox} \leq \pm 20 \text{ mV}$ 。
- ◆ 在進行地下水取樣時，封塞段內地下水，經 PU 管被抽取至地表控制模組之不銹鋼鋼瓶內；該鋼瓶於取樣前，經抽真空後灌入特定壓力的惰性氣體，避免負壓使外界氣體進入鋼瓶。取得水樣後，將該不銹鋼鋼瓶閥門關閉，冷藏送實驗室分析。

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

地下水取樣區段

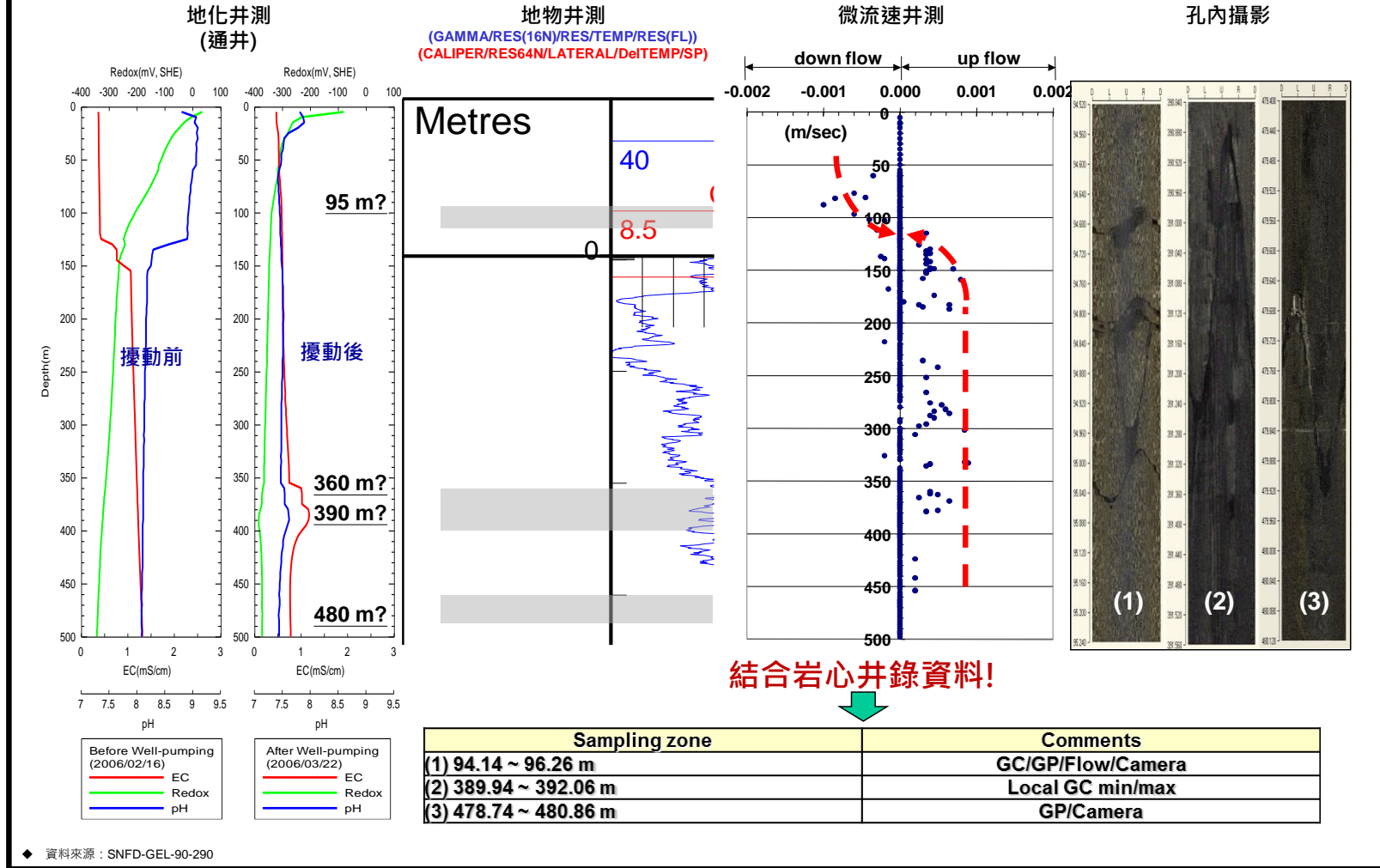


圖 3-48：K 區孔內深層地下水取樣封塞段之位置判斷流程

資料來源：Lin et al. (2012, ac4p11)

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

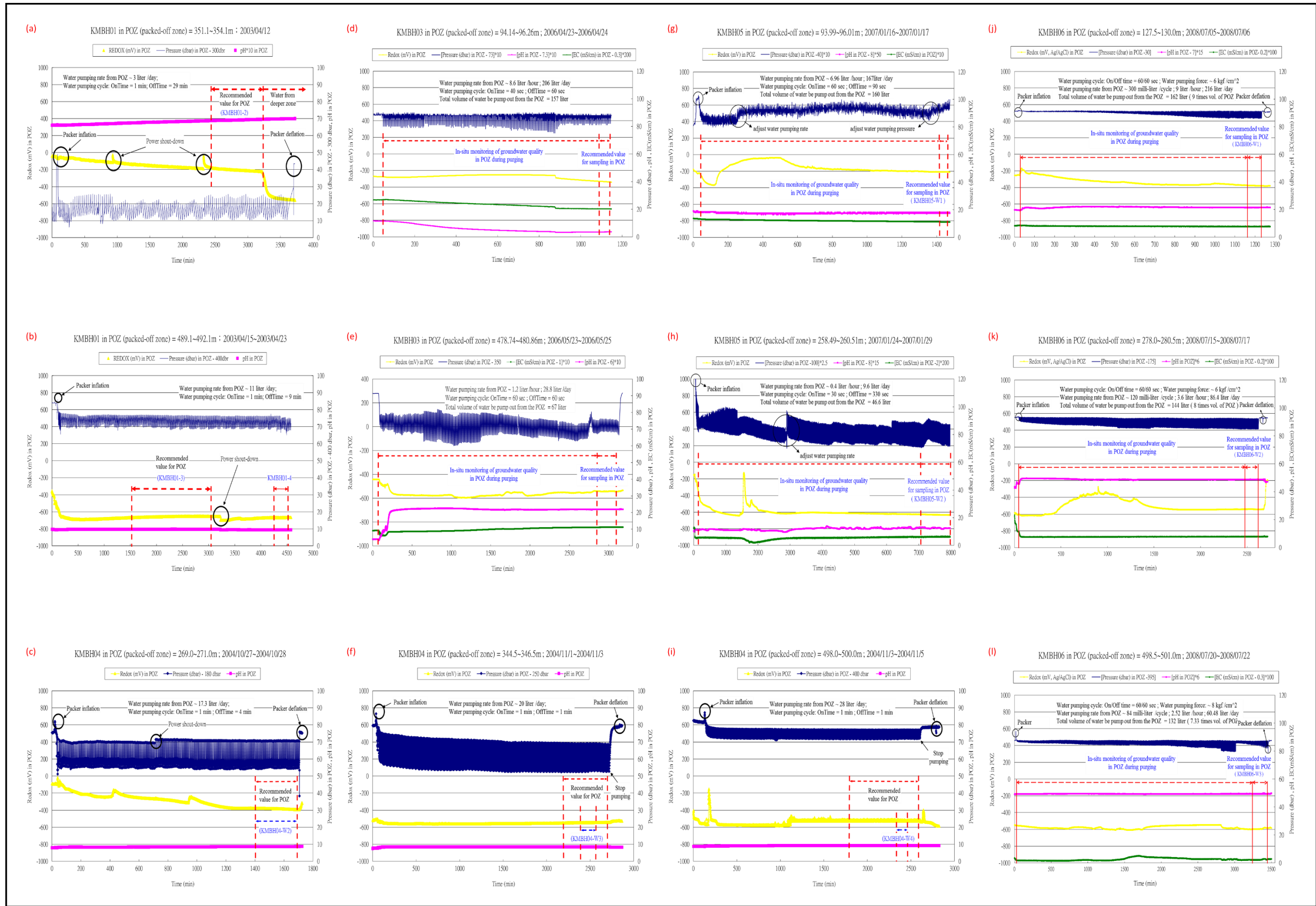


圖 3-49 : K 區孔內深層地下水封塞取樣監測記錄

註解：

- ◆ 圖中藍色、粉紅色、黃色及綠色線，分別代表在地下水質監測及取樣過程中，各封塞段內地下水的水壓、酸鹼度、氧化還原電位及電導度的監測數據。
- ◆ 封塞段內的地下水，以氣動(氮氣)裝置將地下水以脈動方式，經 1/4 吋 PU 管抽取至地表，每次脈動都會造成封塞段的水壓下降，而使得臨孔周圍裂隙帶的地下水進入封塞段中。
- ◆ 在相同的脈動抽水速度下，(a)、(b)、(C)、(f)及(i)的水壓脈動變化，呈現穩定的變化特徵，顯示這些封塞段的裂隙聯通佳，裂隙地下水源源不絕。
- ◆ 在相同的脈動抽水速度下，(j)及(k)的水壓脈動變化，呈現變動範圍越來越大的趨勢，顯示這些封塞段的裂隙聯通不佳，裂隙地下水源相當有限。
- ◆ 在相同的脈動抽水速度下，(d)及(e)的水壓脈動變化，其變動範圍呈現先大後小的特徵，顯示這些封塞段的裂隙，原本聯通性不佳，但經持續不段脈動抽水過程後，有些原本塞住的裂隙被打開而造成較佳的聯通性。

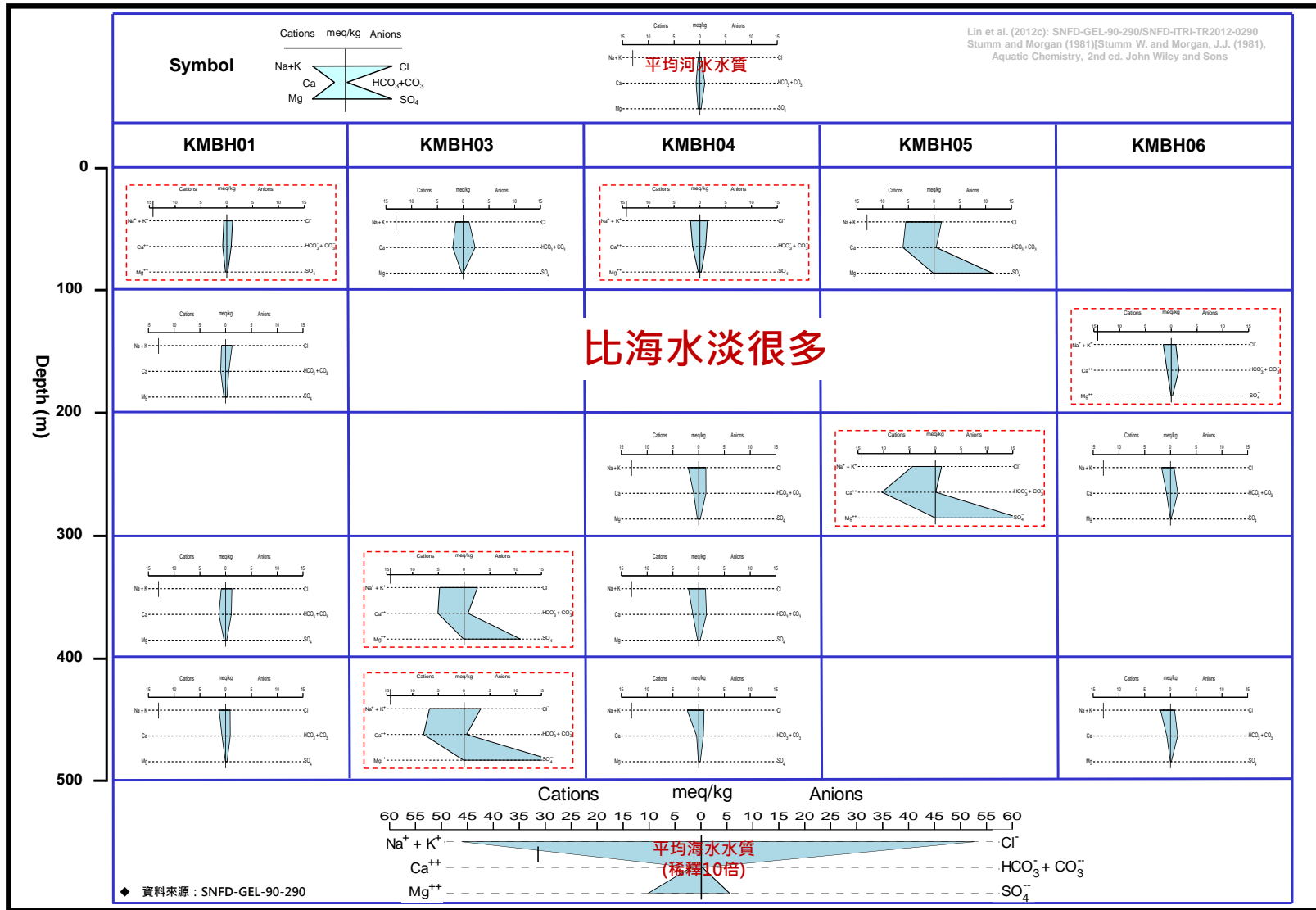


圖 3-50：K區深層地下水水質之 Stiff 分布圖

註解：

- ◆ 水質分析詳細數據，請參考表 3-2。
- ◆ 右上角分布圖為全球平均河水水質(Faure, 1991, p442)的 Stiff 圖。
- ◆ 下圖為全世界平均海水水質(Stumm and Morgan, 1981, p567)稀釋 10 倍的 Stiff 圖。
- ◆ 紅色虛框代表其水質分析結果未達離子平衡(>15%)。

Faure (1991) [Faure, G. (1991), Principles and Applications of Inorganic Geochemistry. Macmillan.]

Stumm and Morgan (1981) [Stumm W. and Morgan, J.J. (1981), Aquatic Chemistry, 2nd ed. John Wiley and Sons.]

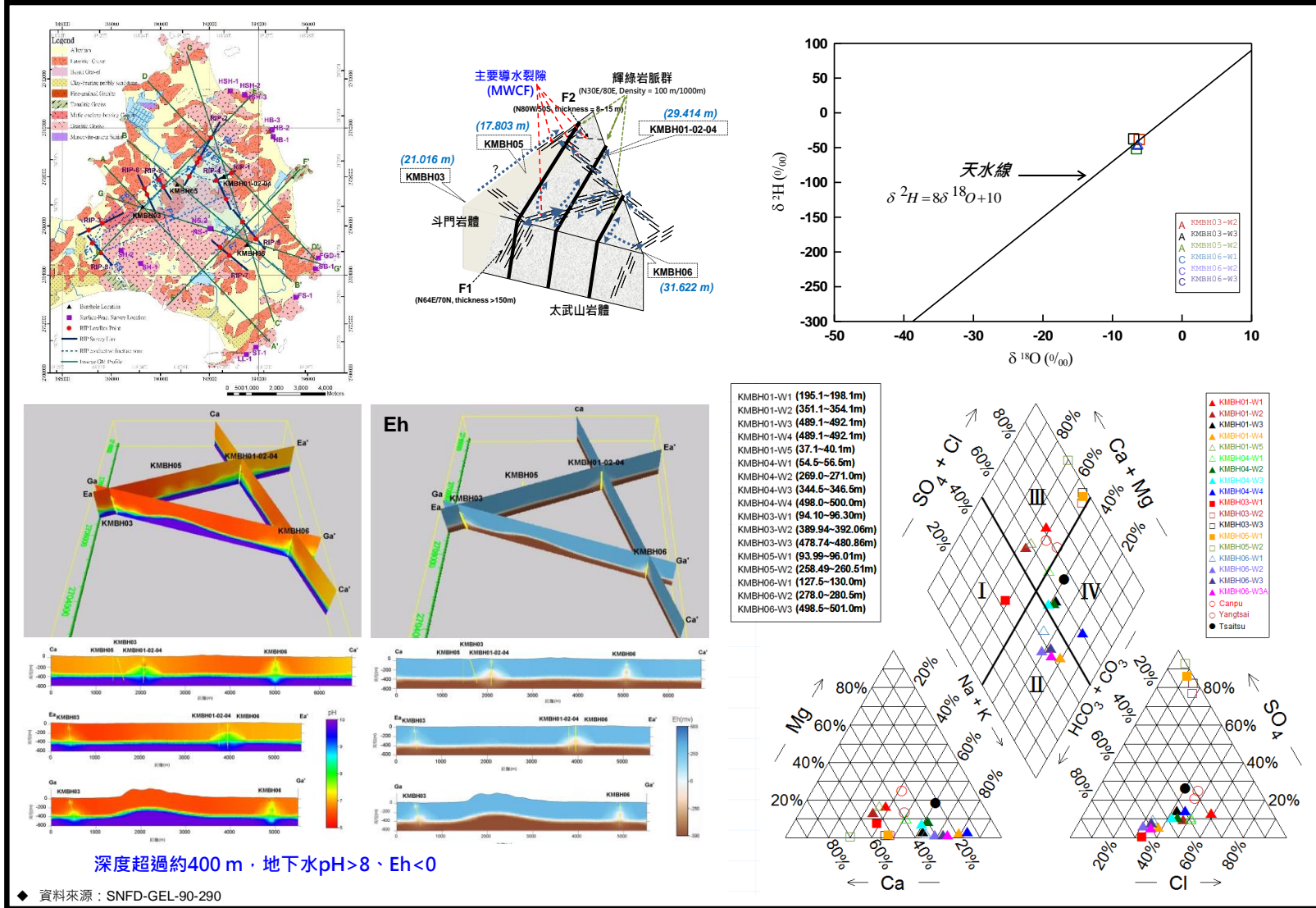


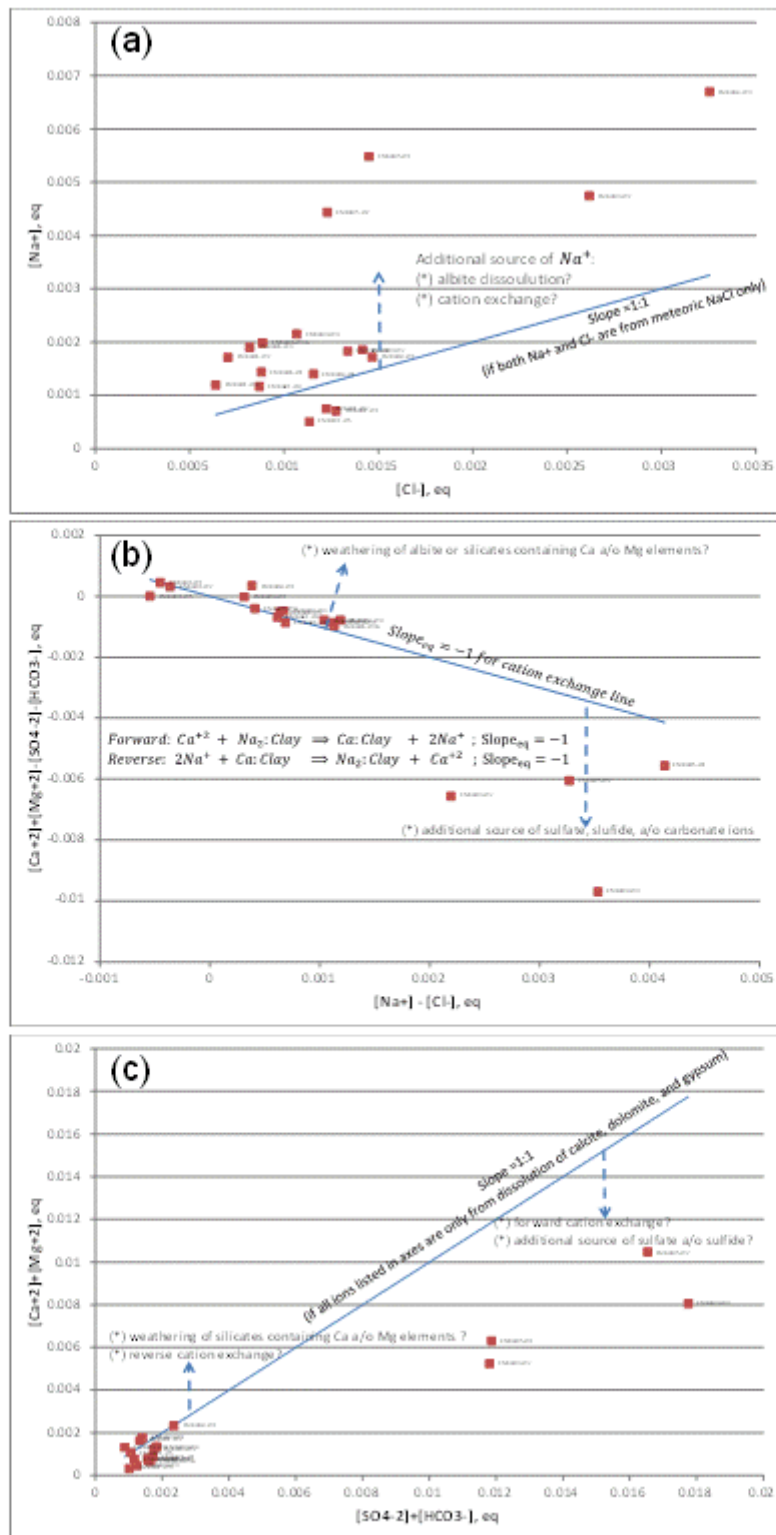
圖 3-51：K 區深層地下水水質之 Piper 圖及 ^2H - ^{18}O 同位素分布圖

註解：

- ◆ 左上圖為 K 區地質圖及 1999-2010 年調查地點位置圖(Lin et al., 2012, c4p9)。
- ◆ 左下圖為 pH 及 Eh 之 3D 度空間數據網格化計算結果(Lin et al., 2010, c5p10&p11)。
- ◆ 右上圖為 Piper diagram(Lin et al., 2010, c4p13)。
- ◆ 右下圖為氫氧同位素關係圖(Lin et al., 2010,c4p12)。

Lin et al. (2010) [In Chinese: 林蔚、錢正明、蔣立為、林鎮國、郭泰融、張育德、陳文山、謝佩珊(2010)，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(97~99 年度計畫)－K 區東部地質概念模式成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-273 / SNFD-ITRI-TR2010-0273。]

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]



SNFD-ITR-TR2015-1226-000.xlsx

圖 3-52：K 區深層地下水水質之二變量散點圖

註解：

- ◆ 水質數據及資料來源，請參考表 3-2。
- ◆ 上圖為 Na^+ vs. Cl^- 圖中顯示，應有來自於非天水的 Na 離子源，尤其是 KMBH03 及 KMBH05(太武山北側)的水質，例如：weathering of albite, 或離子交換產生的鈉離子。
- ◆ 中圖為 $[\text{Ca}^{+2}]_* = [\text{Ca}^{+2}] + [\text{Mg}^{+2}] - [\text{SO}_4^{-2}] - [\text{Cl}^-]$ vs. $[\text{Na}^+]_* = [\text{Na}^+] - [\text{Cl}^-]$ 的分布圖，斜率 -1 代表處於離子交換平衡狀態；圖中顯示，大部份的水質可能呈離子交換平衡狀態，尤其是 KMBH01, 02, 04 及 06(太武山南側)。
- ◆ 下圖為 $[\text{Ca}^{+2}] + [\text{Mg}^{+2}]$ vs $[\text{SO}_4^{-2}] + [\text{HCO}_3^-]$ 的分布圖，若水溶液中的所有相關離子，均僅來自於 calcite, dolomite 及 gypsum 的平衡溶解，則其斜率應為 1；圖中顯示，在高離子濃度狀態下，可能有明顯的離子交換作用發生，或以其他非來自於 gypsum 的硫酸根及非自於 calcite, dolomite 的碳酸根。
- ◆ 二變量散點圖特性：
 - (1) For $[\text{Na}^+]$ vs. $[\text{Cl}^-]$ plot (Jacob et al., 2014, p10/17; Rajmohan and Elango, 2004, p51&53 ; Srinivasamoorthy, 2011, p21):
 - (a) Slope=1, assuming all $[\text{Na}^+]$ and $[\text{Cl}^-]$ are from meteoric NaCl
 - (b) Data in the upper zone means that there is additional source for $[\text{Na}^+]$, e.g.
 - weathering of albite
 - forward ion exchange ($\text{Ca}^{+2} + \text{Na}_2\text{Clay} \Rightarrow \text{CaClay} + 2\text{Na}^+$)
 - (2) For $[\text{Ca}^{+2}]_*$ vs. $[\text{Na}^+]_*$ plot (Rajmohan and Elango, 2004, p58):
 - (a) Slope=-1, assuming the cation exchange reaction is in equilibrium.
 - (b) $[\text{Ca}^{+2}]_* = [\text{Ca}^{+2}] + [\text{Mg}^{+2}] - [\text{SO}_4^{-2}] - [\text{HCO}_3^-]$
 - (c) $[\text{Na}^+]_* = [\text{Na}^+] - [\text{Cl}^-]$
 - (d) Data in the upper zone means that there is additional source or sink for $[\text{Ca}^{+2}]_*$, e.g.,
 - weathering of silicates containing Ca a/o Mg elements
 - shortage of Na_2Clay
 - (e) Data in the lower zone means that there is additional source for $[\text{Na}^+]_*$, e.g.,
 - additional source of sulfate or bicarbonate.
 - shortage of CaClay
 - (3) For $[\text{Ca}^{+2}] + [\text{Mg}^{+2}]$ vs. $[\text{SO}_4^{-2}] + [\text{HCO}_3^-]$ plot (Jacob et al., 2014, p10/17 ; Rajmohan and Elango, 2004, p57):
 - (a) Slope=1, assuming all ions listed in the X and Y axes are from the dissolution of calcite, dolomite, or gypsum
 - (b) Data in the upper zone means that there is additional source or sink for $[\text{Ca}^{+2}]$ a/o $[\text{Mg}^{+2}]$, e.g.,
 - weathering of silicates containing Ca a/o Mg elements
 - reverse ion exchange ($2\text{Na}^+ + \text{CaClay} \Rightarrow \text{Na}_2\text{Clay} + \text{Ca}^{+2}$)
 - (c) Data in the lower zone:
 - forward ion exchange ($\text{Ca}^{+2} + \text{Na}_2\text{Clay} \Rightarrow \text{CaClay} + 2\text{Na}^+$)
 - additional source of sulfate a/o bicarbonate

Jacob et al. (2014) [Jacob, N., Modreck, G., and Van, T. G. (2014), A Comparative Hydrogeochemical Study of Granitic Fractured and Alluvial Channel Aquifer Systems, Global Journal of Science Frontier Research: H Environment & Earth Science, Volume 14, Issue 2, Version 1.0, Year 2014.]
Rajmohan and Elango (2004) [Rajmohan N. and Elango, E. (2004), Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India, Environmental Geology (2004) 46:47-61.]
Srinivasamoorthy et al. (2011) [Srinivasamoorthy, K., Vasanthavigar, M., Vijayaraghavan, K., Chidambaram, S., Anandhan, P., and Manivannan, R. (2011), Use of Hydrochemistry and Stable Isotopes as Tools for Groundwater Evolution and Contamination Investigations, Geosciences 2011; 1(1): 16-25.]

表 3-2：K 區深層地下水水質分析結果

Item	Unit	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value
Sample No.	*	KMBH01-W1	KMBH01-W2	KMBH01-W3	KMBH01-W4	KMBH01-W5	KMBH04-W1	KMBH04-W2	KMBH04-W3	KMBH04-W4	KMBH03-W1	KMBH03-W2	KMBH03-W3	KMBH05-W1	KMBH05-W2	KMBH06-W1	KMBH06-W2	KMBH06-W3	KMBH06-W3A	KM5
Depth	m	195.1~198.1	351.1~354.1	489.1~492.1	489.1~492.1	37.1~40.1	54.5~56.5	269.0~271.0	344.5~346.5	498.0~500.0	94.10~96.30	389.94~392.06	478.74~480.86	93.99~96.01	258.49~260.51	127.5~130.0	278.0~280.5	498.5~501.0	498.5~501.0	400~500
Temp.	°C	26.01	28.89	31.42	31.42	23.198	23.53	27.33	28.71	31.49	24.041	29.442	31.136	24.481	27.695	25.436	28.478	32.164	32.019	31.703
EC	mS/cm	0.292	0.376	0.321	0.333	0.271	0.353	0.417	0.438	0.343	0.4009	1.3584	2.1239	1.1186	2.0313	0.2772	0.2784	0.3239	0.2804	0.320
pH	*	6.29	6.92	9.76	9.44	6.71	7.5	8.66	8.42	9.22	7.64	8.09	8.19	8.35	8.83	8.43	8.12	8.24	8.23	8.978
Eh _(S.H.E)	mV	346.2	-13.7	-476.3	-478.3	154.1	67.8	-189.1	-353.5	-333.4	-136.8	-346.3	-351.0	-12.2	-436.5	-182.2	-349.3	-402.1	-316.9	-401.4
DO	ppm	0.23	0.02	0.06	1.76	0.03	11.64	1.4	1.61	0.58	0.04	1.46	2.52	0.08	0.95	1.41	2.55	2.78	3.01	
DO(well logging)	ppm	0.04	0.035	0.09	0.09	1.16	0.68	0.05	0	0	0.18	0.03	0.04	0.17	0.05	0	0	0		0.04
HCO ₃ ⁻	mol/L	6.15E-04	1.11E-03	7.64E-04	8.85E-04	8.72E-04	1.12E-03	1.44E-03	1.53E-03	9.21E-04	2.34E-03	7.65E-04	4.74E-04	4.10E-04	8.52E-05	1.49E-03	1.44E-03	1.41E-03	1.53E-03	1.10E-03
CO ₃ ²⁻	mol/L			6.67E-05	2.67E-05															4.67E-05
PO ₄ ³⁻	mol/L	3.26E-06	1.79E-06	3.16E-06	1.95E-06	2.28E-05	9.63E-06	2.47E-06	1.47E-06	1.05E-06	4.00E-06	2.16E-06	2.42E-06	3.79E-06	1.79E-06					2.05E-06
SO ₄ ²⁻	mol/L	1.30E-04	1.09E-04	1.35E-04	3.64E-05	9.37E-05	1.41E-04	1.56E-04	1.51E-04	1.56E-04	5.21E-06	5.52E-03	8.64E-03	5.73E-03	8.22E-03	1.15E-04	5.90E-05	8.40E-05	5.23E-05	9.28E-05
HS ⁻	mol/L	1.25E-07	9.36E-08	6.55E-07	8.27E-06	9.36E-08	2.81E-07	1.87E-07	2.18E-07	1.56E-07	4.05E-07	2.18E-07	8.11E-07	1.56E-07	2.15E-06					3.03E-06
NO ₃ ⁻	mol/L	2.74E-05	6.45E-06	4.84E-06	5.65E-06	2.26E-05	4.03E-06	1.13E-05	1.05E-05	3.31E-05	6.45E-06	2.34E-05	9.68E-06		2.42E-06					1.45E-05
NO ₂ ⁻	mol/L	4.35E-08	4.35E-08	3.26E-08	2.17E-08	1.72E-06	1.01E-06	2.17E-08	5.22E-07	1.52E-07	5.87E-07	2.83E-07	4.78E-07	3.91E-07	2.61E-07			6.52E-08		6.79E-08
NH ₃ -N	mol/L	1.10E-04	2.64E-06	5.23E-05	2.73E-05	8.51E-06	1.64E-05	3.14E-05	2.23E-05	2.26E-05	1.12E-05	2.32E-05	1.29E-05	3.46E-05	2.06E-06	1.29E-05			5.87E-07	2.57E-05
SiO ₂	mol/L	8.40E-05	9.43E-05	9.58E-05	7.70E-05	9.97E-05	1.68E-03	2.28E-03	2.27E-03	2.14E-03	6.72E-04	2.60E-04	2.36E-04	3.43E-04	2.88E-04	5.43E-04	5.54E-04	5.84E-04	5.58E-04	6.90E-04
F ⁻	mol/L	4.84E-05	4.37E-05	1.03E-04	1.38E-04	2.74E-05	1.87E-04	1.68E-04	1.95E-04	1.93E-04	8.89E-05	1.67E-04	1.72E-04	2.52E-04	3.78E-04	2.29E-04	2.59E-04	3.17E-04	3.05E-04	2.11E-04
Cl ⁻	mol/L	1.28E-03	1.22E-03	8.69E-04	6.38E-04	1.13E-03	1.47E-03	1.42E-03	1.34E-03	1.07E-03	1.16E-03	2.62E-03	3.26E-03	1.45E-03	1.23E-03	8.80E-04	7.02E-04	8.18E-04	8.86E-04	8.55E-04
Fe	mol/L	1.04E-05	1.38E-05	1.13E-05	2.86E-06	2.33E-06	1.78E-05	1.28E-05	1.36E-05	9.13E-06	8.59E-06	9.49E-06	9.13E-06	7.16E-07	7.16E-07	1.20E-06	3.13E-06	1.07E-06	1.56E-06	5.18E-06
Cu	mol/L	1.05E-07	1.18E-07	7.26E-07	5.67E-08	6.92E-08		6.30E-08		4.72E-08	6.30E-08		3.15E-08	4.72E-08						2.76E-07
Ca ²⁺	mol/L	4.89E-04	6.69E-04	3.62E-04	1.48E-04	4.02E-04	7.15E-04	4.96E-04	5.68E-04	1.98E-04	1.02E-03	2.57E-03	3.97E-03	3.07E-03	5.24E-03	4.17E-04	3.84E-04	3.57E-04	3.32E-04	2.79E-04
Mg ²⁺	mol/L	1.69E-04	1.53E-04	2.18E-05	1.11E-05	1.30E-04	1.60E-04	1.24E-04	1.06E-04	2.72E-05	1.41E-04	4.94E-05	6.25E-05	7.98E-05		1.46E-05	5.31E-06			2.00E-05
Na ⁺	mol/L	7.05E-04	7.48E-04	1.17E-03	1.19E-03	5.05E-04	1.72E-03	1.86E-03	1.83E-03	2.15E-03	1.40E-03	4.74E-03	6.70E-03	5.48E-03	4.44E-03	1.44E-03	1.71E-03	1.90E-03	1.98E-03	1.68E-03
K ⁺	mol/L	1.19E-04	1.15E-04	1.13E-04	5.96E-05	8.39E-05	1.32E-04	1.95E-04	1.82E-04	1.02E-04	6.85E-05	6.96E-05	8.64E-05	1.07E-04	6.27E-05	1.28E-04	3.20E-05	4.14E-05	3.30E-05	6.98E-05
Cd	mol/L			5.34E-08	8.90E-09															3.11E-08
Cr	mol/L	3.85E-08	1.92E-08	2.50E-07		5.77E-08														2.50E-07
Mn	mol/L	6.01E-06	6.73E-06	3.09E-06	2.18E-07	5.64E-06	8.68E-06	1.26E-06	1.07E-06	3.09E-07	5.24E-06	9.46E-07	2.29E-06	4.19E-07	1.64E-07	2.91E-07			2.18E-07	9.60E-07
Ni	mol/L	4.09E-05	5.59E-05	3.63E-05	2.98E-05	4.46E-05					5.11E-07					2.04E-07	1.53E-07			3.30E-05
Pb	mol/L	3.86E-08			7.72E-08	8.69E-08	1.79E-07	1.21E-07	1.25E-07	2.36E-07										1.57E-07
Zn	mol/L	7.04E-06	1.42E-05	1.53E-06	2.29E-06	5.81E-07	2.45E-07	2.29E-07	2.14E-07	1.22E-07	7.65E-07	3.06E-07	1.07E-06	3.06E-07	1.53E-07	1.21E-06	1.09E-06	6.73E-07	1.22E-06	1.17E-06
As	mol/L			9.34E-09									5.34E-09	1.60E-08			9.34E-09	1.07E-08		1.00E-08
δ ² H	‰											-38	-37		-51.2	-44.3	-45.1	-45.6		
δ ¹⁸ O	‰											-6.2	-7		-6.6	-6.38	-6.44	-6.49		
¹⁴ C _{DIC} -ages	y.BP											8340±50	7518±30		357±30	12575±35	9749±35	14565±35		
Σ Anion	eq/L	-2.24E-03	-2.61E-03	-2.21E-03	-1.83E-03	-2.31E-03	-3.09E-03	-3.36E-03	-3.38E-03	-2.55E-03	-3.61E-03	-1.46E-02	-2.12E-02	-1.36E-02	-1.82E-02	-2.84E-03	-2.52E-03	-2.72E-03	-2.83E-03	-2.48E-03
Σ Cation	eq/L	2.21E-03	2.61E-03	2.11E-03	1.61E-03	1.71E-03	3.64E-03	3.32E-03	3.39E-03	2.72E-03	3.82E-03	1.01E-02	1.49E-02	1.19E-02	1.50E-02	2.43E-03	2.53E-03	2.65E-03	2.68E-03	2.39E-03
Charge Balance	%	-0.95%	0.20%	-4.64%	-13.15%	-30.09%	16.27%	-1.26%	0.17%	6.72%	5.55%	-36.84%	-35.13%	-13.27%	-19.18%	-15.25%	0.24%	-2.38%	-5.15%	-3.63%
Salinity	‰	0.153	0.186	0.153	0.128	0.150	0.319	0.369	0.372	0.306	0.307	0.907	1.311	0.908	0.388	0.226	0.213	0.224	0.229	0.208

註解：

- ◆ 水質分析結果補充說明：
 - 取樣工具及判斷標準，請參考圖 3-47。
 - 取樣封塞段之位置判斷流程，請參考圖 3-48。
 - 取樣監測記錄，請參考圖 3-49。
 - 各封塞段水樣分析結果的 Stiff 水質圖，請參考圖 3-50。
 - 各封塞段水樣分析結果的 Piper 圖及 $^2\text{H}-^{18}\text{O}$ 同位素分布圖，請參考圖 3-51。
- ◆ 地下水化學組成分析：
 - 地下水化學組成分析項目，包含鈉、鉀、鈣、鎂、鎘、鉻、銅、鐵、錳、鎳、鉛、鋅、砷、二價鐵、碳酸氫鹽、碳酸鹽、氯離子、氟離子、硫化物、硫酸鹽、硝酸鹽、亞硝酸鹽、氨氮、磷酸鹽與二氧化矽。
 - 陰離子成分(包含碳酸氫鹽、碳酸鹽、氯離子、氟離子、硫化物、硫酸鹽、硝酸鹽、亞硝酸鹽、氨氮、磷酸鹽)與二氧化矽，係於地表取得樣品後，以 HACH 公司所生產的水質分析設備進行現場分析。
 - 陽離子成分，係委由國內分析機構進行分析。
 - 部分深度較深之水樣，亦進行氫氧同位素的分析與碳 14 定年。
 - KM5 = 深度 400~500 m 之平均水質(包含 KMBH01-W3, KMBH01-W4, KMBH04-W4, KMBH06-W3 和 KMBH06-W3A)
 - $Eh_{(S.H.E)} = Eh_{(measure)} + Eh_{(reference)}$, $Eh_{(reference)} = -1.0239 * Temp. + 221.85$
 - $Salinity = \sum C_i \times MW_i$, $C_i = \text{conc. of species-i with mol/L unit}$, $MW_i = \text{molecular weight of species-i}$.

資料來源：Lin et al., (2012, ac4p44-46)

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

- ◆ The dissolved oxygen value includes two sets of data, i.e., “DO value” and “DO (well logging) value”. These two sets of dissolved oxygen value were measured in the same depth by the same model of membrane-type sensor. However, “DO value” was measured in the packed-off zone and “DO (well logging) value” in open borehole condition.
- ◆ In our experience in downhole groundwater packed-off sampling, continuously pumping water out from the packed-off zone may damage the membrane-type sensor installed in the packed-off zone due to the pressure fluctuation during pumping, which sometimes resulted in abnormal “DO value” (SNFD-ITRI-TR2009-0237, c3p2). Therefore, “DO (well logging) value” should be more reliable.

資料來源：Chang et al., 2007 (2007, c3p2)

Chang et al. (2007) [In Chinese: 張育德、林鎮國、李崇豪、陳榮輝(2007)，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－潛在母岩特性調查計畫(94~96 年度計畫)－地球化學孔內調查 94~96 年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-237/SNFD-ITRI-TR2007-0237。]

表 3-3：深層地下水水質平均值

	平均地下水質				平均地表水質		
	KM			SKB-Äspö	HC	River (global)	Sea (global)
Depth (m)	300 to 400m	400 to 500m	300 to 500m	~550 m	30 m to 50m	surface	surface
pH	7.67	8.98	8.60	7.7	6.21 ~ 7.73		7.5~(8.2)~8.4
pe	-3.10	-6.79	-5.73	-5.21 ~ -1.24	-4.6 ~ 2.2		
T(°C)	28.80	31.70	30.87			25	15
EC (mS/cm)	0.407	0.320	0.345			~0.1	~42.9
Cl_tot (mol/L)	1.29e-03	8.55e-04	9.77e-04	1.81e-01	1.63e-01	2.20e-04	5.46e-01
C_tot (mol/L)	1.32e-03	1.15e-03	1.21e-03	1.64e-04	5.30e-04	8.52e-04	2.33e-03
S_tot (mol/L)	1.30e-04	9.59e-05	1.05e-04	5.83e-03	6.67e-03	1.15e-04	2.82e-02
N_tot (mol/L)	2.12e-05	4.03e-05	3.35e-05	2.85e-06	1.64e-05		1.07e-02
P_tot (mol/L)	1.63e-06	2.05e-06	1.88e-06	1.61e-07		6.46e-07	2.00e-06
B_tot (mol/L)						9.25e-07	4.16e-04
Si_tot (mol/L)	1.18e-03	6.90e-04	8.31e-04	1.46e-04	4.14e-04	2.31e-04	7.94e-05
F_tot (mol/L)	1.19e-04	2.11e-04	1.85e-04	7.89e-05		5.26e-08	6.84e-05
Br_tot (mol/L)				5.01e-04		2.50e-07	8.42e-04
I_tot (mol/L)				1.10e-06		5.51e-08	5.01e-07
Na_tot (mol/L)	1.29e-03	1.68e-03	1.57e-03	9.13e-02	9.48e-02	2.74e-04	4.68e-01
K_tot (mol/L)	1.48e-04	6.98e-05	9.22e-05	2.05e-04	1.28e-03	5.88e-05	1.02e-02
Ca_tot (mol/L)	6.18e-04	2.79e-04	3.76e-04	4.73e-02	1.93e-02	3.74e-04	1.03e-02
Mg_tot (mol/L)	1.30e-04	2.00e-05	6.38e-05	1.73e-03	1.34e-02	1.69e-04	5.31e-02
Al_tot (mol/L)						1.85e-06	7.94e-08
Fe_tot (mol/L)	1.37e-05	5.18e-06	7.62e-06	4.3e-06	6.56e-04	7.16e-07	3.16e-08
Cu_tot (mol/L)	1.18e-07	2.76e-07	2.37e-07			1.10e-07	7.94e-09
Mn_tot (mol/L)	3.90e-06	9.60e-07	1.94e-06	5.28e-06	2.64e-04	1.27e-07	3.98e-09
Zn_tot (mol/L)	7.22e-06	1.17e-06	2.90e-06		1.11e-06	3.06e-07	
Cd_tot (mol/L)	ND	3.11e-08	3.11e-08			8.89e-11	
Cr_tot (mol/L)	1.92e-08	2.50e-07	1.35e-07			1.92e-08	6.31e-09
Ni_tot (mol/L)	5.59e-05	3.30e-05	4.07e-05		1.46e-06	5.11e-09	2.51e-08
Pb_tot (mol/L)	1.25e-07	1.57e-07	1.46e-07		9.59e-07		
As_tot (mol/L)	ND	1.00e-08	1.00e-08		1.69e-08	2.67e-08	5.01e-08
U_tot (mol/L)						1.68e-10	1.99e-10
Salinity (‰)	0.279	0.208	0.228				
Source	TR2012-0290-ac4p44~46			Bruno et al.,(1997), p106	4ML1100-RS-6001- p46	Faure (1991), p173&p442	Stumm and Morgan (1982), p184, p463 & p567

註解：

- ◆ 溫度、導電度、酸鹼度及氧化還原電位為取樣過程中的現地即時量測值(圖 3-47)，其餘的水質參數(表 3-2)則是在水樣取自地表後再進行分析。在樣品前處理或分析過程中，樣品暴露於空氣中是不可避免的，同時也會造成水中離子成分之存在型態的改變(例如，硫化物在氧化環境會轉變為硫酸鹽類)。因此，表中所列之水質成分，係以各離子所含之主要元素的總濃度(mol/L)來表示。
- ◆ KM4：深度 300~400 m 之平均水質(包含 KMBH01-W2 和 KMBH04-W3)。
- ◆ KM5：深度 400~500 m 之平均水質(包含 KMBH01-W3, KMBH01-W4, KMBH04-W4, KMBH06-W3 和 KMBH06-W3A)。
- ◆ KMi：深度 300~500 m 之平均水質(包含 KMBH01-W2, KMBH01-W3, KMBH01-W4, KMBH04-W3, KMBH04-W4, KMBH06-W3 和 KMBH06-W3A)。

Bruno (1997) [Bruno, J., E. Cera, J. de Pablo, L. Duro, S. Jordana, and D.Savage, 1997, Determination of radionuclide solubility limits to be used in SR 97: Uncertainties associated to calculated solubility's, SKB Technical Report TR-97-33.]

Faure (1991) [Faure, G., 1991, Principle and Applications of Inorganic Geochemistry, Macmillan]

Lin (2000) [In Chinese: 林鎮國, 2000, 低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫-地球化學調查分項工作報告, 4ML1100-RS-6001, 工業技術研究院能源與資源研究所。]

Stumm and Morgan (1981) [Stumm, W., and J. J. Morgan, 1981, Aquatic Chemistry, 2nd ed. John Wiley and Sons.]

3.8.3. 水文地球化學概念模式

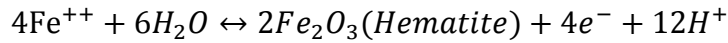
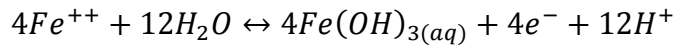
3.8.3.1. 物種化學穩定特性

所謂的物種化學穩定特性分析，主要是根據熱力學第二定律，針對特定化學元素或物種所建置的化學穩定相圖，所建置的相圖包含 *Eh vs. pH* 穩定相圖 (Pourbaix, 1966) 及活性對數組合穩定相圖兩種。相關相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之 PhaseChem 程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫。

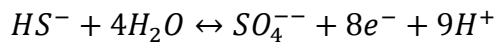
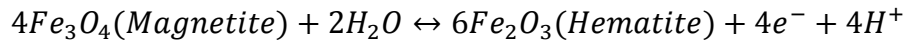
針對 K 區花崗岩深層水質特性的 *Eh vs. pH* 穩定相圖的分析結果說明如下：

- (1) 用過核子燃料的主要成份 (Uraninite, $UO_{2(s)}$) 具有相當大的化學穩定區間 (圖 3-53 之深咖啡色區間)，且其化學穩定區間受溫度變化 (32 °C 至 80 °C) 的影響不大。
- (2) 銅廢料罐的主要成份 (Copper, $Cu_{(s)}$) 具有 Eh-pH 穩定區間 (圖 3-54 之粉紅色區間)，但其化學穩定區間受溫度變化 (32 °C 至 80 °C)，僅有些微的影響；銅的穩定區間隨溫度升高而些微縮小。另外，理論上，在部份 Eh-pH 區間內，銅會轉變為 Chalcocite (Cu_2S) (圖 3-54 之藍色區間) 而改變銅廢料罐的穩定性，但該化學轉變的「速度」有多快，則無法從像圖中得知。
- (3) 理論上，鐵 (圖 3-55 之紅色區間) 在水呈穩定的區間內 (圖 3-55 內兩條黑色虛線之區間)，沒有化學穩定區間。
 - 在 KBS-3 概念中，鑄鐵主要位於銅廢料罐內部，除非銅廢料罐的銅腐蝕或破損並使鐵接觸到地下水，否則在銅廢料罐內部的鑄鐵，應能保持其完整性。
 - 從另一個角度而言，在相對較還原的 K 區地下水環境中，原本溶於地下水中的硫及鐵元素是有可能反應形成黃鐵礦 (圖 3-55 之灰色區間)；例如 KMBH03-W3 (深度約 480m, $pH \cong 8.19$, $Eh \cong -351$ mV) 周圍岩心樣品中，雖然含量不高，但確實觀察到黃鐵礦的存在 (謝佩珊與林蔚，2012, c4p5)。
- (4) 由圖 3-56 及圖 3-57 可知，K 區的氧化還原反應，必須包含：

(*) 在 pH 較低環境中 ($pH < 8$, 圖 3-56 及圖 3-57 中較大的橢圓形區間) :



(*) 在 pH 較高環境中 ($pH > 8$, 圖 3-56 及圖 3-57 中較小的橢圓形區間) :



另外，由 $Na_2O - Al_2O_3 - H_2O - SiO_2$ 及 $K_2O - Al_2O_3 - H_2O - SiO_2$ 的活性對數組合穩定相圖(圖 3-58)，可發現在 K 區的化學環境下：

- (1) 岩心礦物組成分析所發現的 kaolinite 可能「原始」來自於 albite 的風化，因為現地數據大都坐落或靠近 albite 及 kaolinite 的平衡界面(圖 3-58 左圖)。
- (2) 岩心礦物組成分析所發現的 muscovite 可能是原生礦物，亦可能來自於 microcline 的風化，因為現地實驗數據的斜率與 microcline 及 muscovite 的平衡界面斜率非常接近(圖 3-58 右圖)，但在由 microcline 風化至 muscovite 的過程中，可能存在某些中間產物(如 illite)。

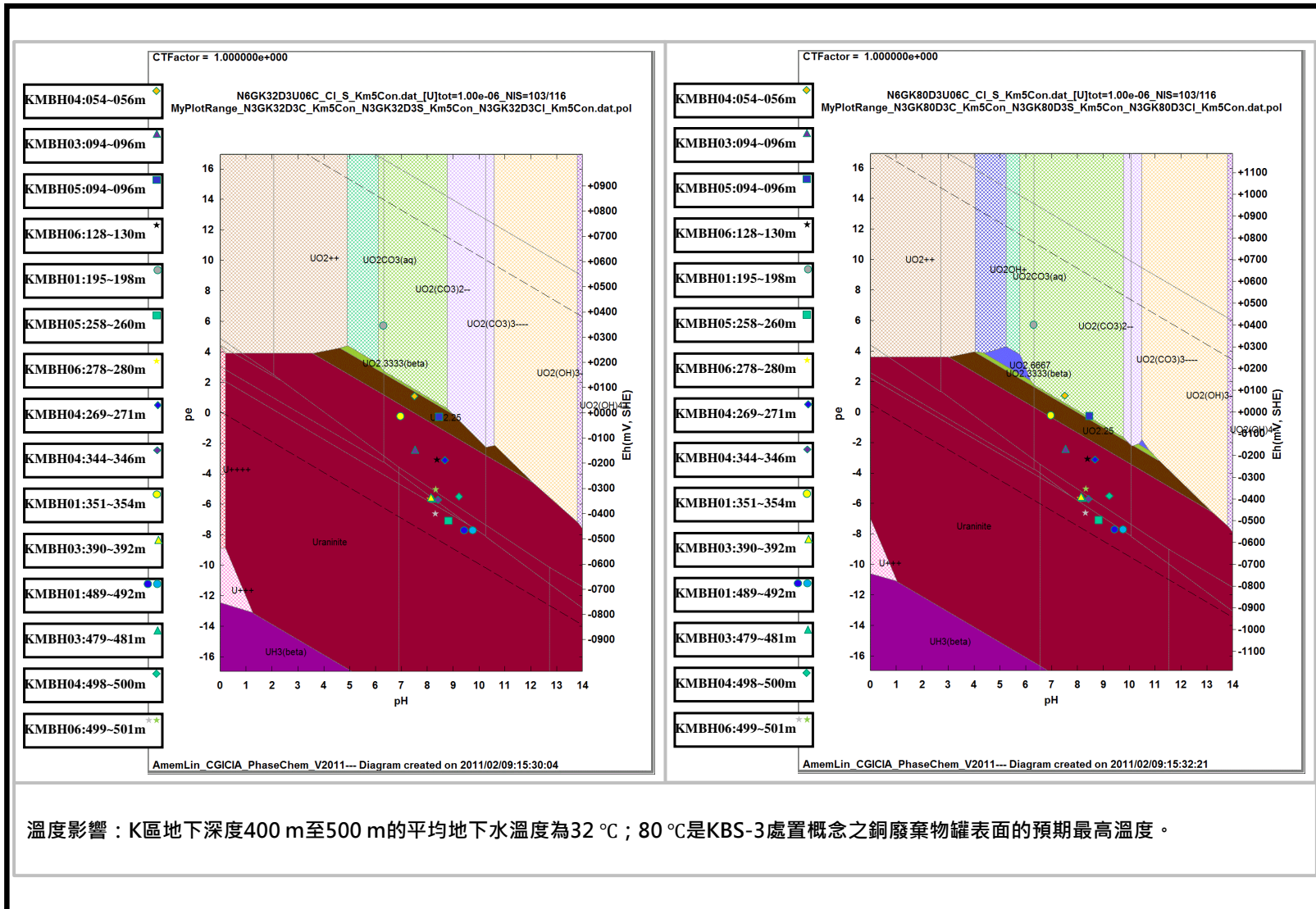


圖 3-53：U 元素在 K 區平均深層水質條件下的 Eh-pH 穩定相圖

註解：

- ◆ Eh-pH相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之PhaseChem程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫(thermo.com.V8.R6+.dat)，並假設各離子活性等於離子濃度，亦即不考慮活性係數的影響。
- ◆ 左圖為U元素在32 °C及KM5水質條件(表 3-3)下的*Eh vs. pH*穩定相圖；32 °C為KM5的平均溫度。
- ◆ 右圖為U元素在80 °C及KM5水質條件下的*Eh vs. pH*穩定相圖；80 °C為KBS-3處置概念之銅廢棄物罐表面的預期最高溫度。
- ◆ 左、右兩圖均以 10^{-6} mole/L，做為判斷穩定區間的溶解度限值。
- ◆ 左、右兩圖中各顏色星號位置，為K區各孔內各深度所實際量測到*Eh*及*pH*數值。
- ◆ 基本上，在K區的水質條件中，用過核燃料的主要成份(Uraninite, $UO_{2(s)}$)具有很大的Eh-pH穩定區間(深咖啡色區間)，越還原的化學環境越穩定。
- ◆ 比對左右兩圖可知：溫度的改變，對(Uraninite, $UO_{2(s)}$)的Eh-pH穩定區間並無太大的影響，但對其他固體(如 $UO_{2.6667}$)或離子(如 $UO_2(CO_3)_3^{--}$)的穩定區間，則有明顯的影響性。

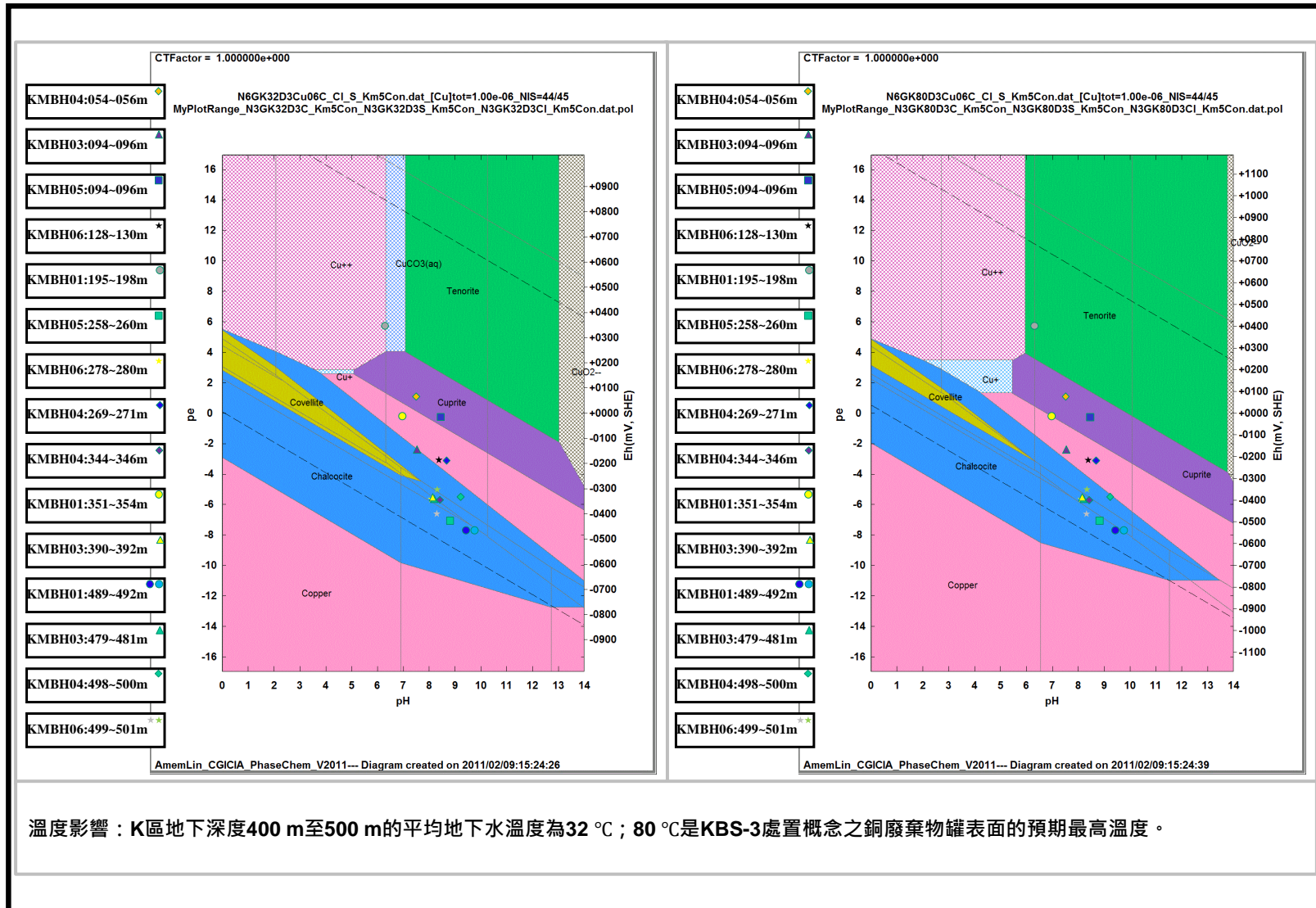


圖 3-54：Cu 元素在 K 區平均深層水質條件下的 Eh-pH 穩定相圖

註解：

- ◆ Eh-pH相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之PhaseChem程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫(thermo.com.V8.R6+.dat)，並假設各離子活性等於離子濃度，亦即不考慮活性係數的影響。
- ◆ 左圖為Cu元素在32℃及KM5水質條件(表3-3)下的Eh vs.pH穩定相圖；32℃為KM5的平均溫度。
- ◆ 右圖為Cu元素在80℃及KM5水質條件下的Eh vs.pH穩定相圖；80℃為KBS-3處置概念之銅廢棄物罐表面的預期最高溫度。
- ◆ 左、右兩圖均以 10^{-6} mole/L，做為判斷穩定區間的溶解度限值。
- ◆ 左、右兩圖中各顏色星號位置，為K區各孔內各深度所實際量測到Eh及pH數值。
- ◆ 基本上，在離島K區的水質條件中，銅廢棄物罐的主要成份，銅(Copper)具有Eh-pH穩定區間(粉紅色區間)。
- ◆ 雖然銅廢棄物罐的銅(Copper)，在部份Eh-pH區間內，理論上，會轉變為Chalcocite(Cu_2S)而改變銅廢棄物罐的穩定性，但Eh-pH相圖並無法提供上述的轉變「速度」資訊。另外，當Chalcocite(Cu_2S)在銅表面形成時，可能使得整個轉變「速度」，由起始的化學反應控制，轉變為擴散控制，進而降低轉變「速度」。
- ◆ 比對左右兩圖可知：溫度的改變，對銅(Copper)的Eh-pH穩定區間，僅有些微的影響性；溫度升高，其穩定區間些微縮小。

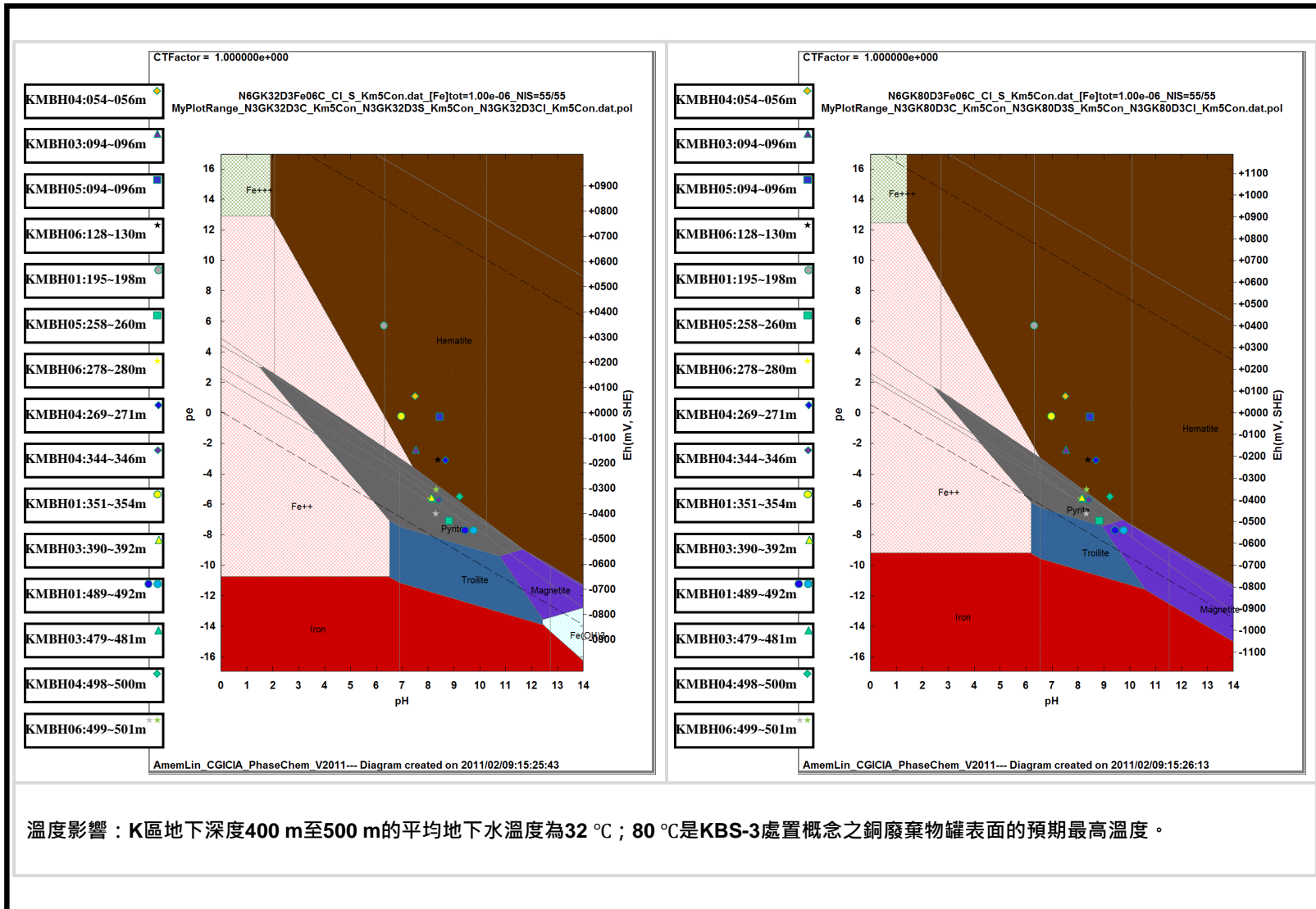
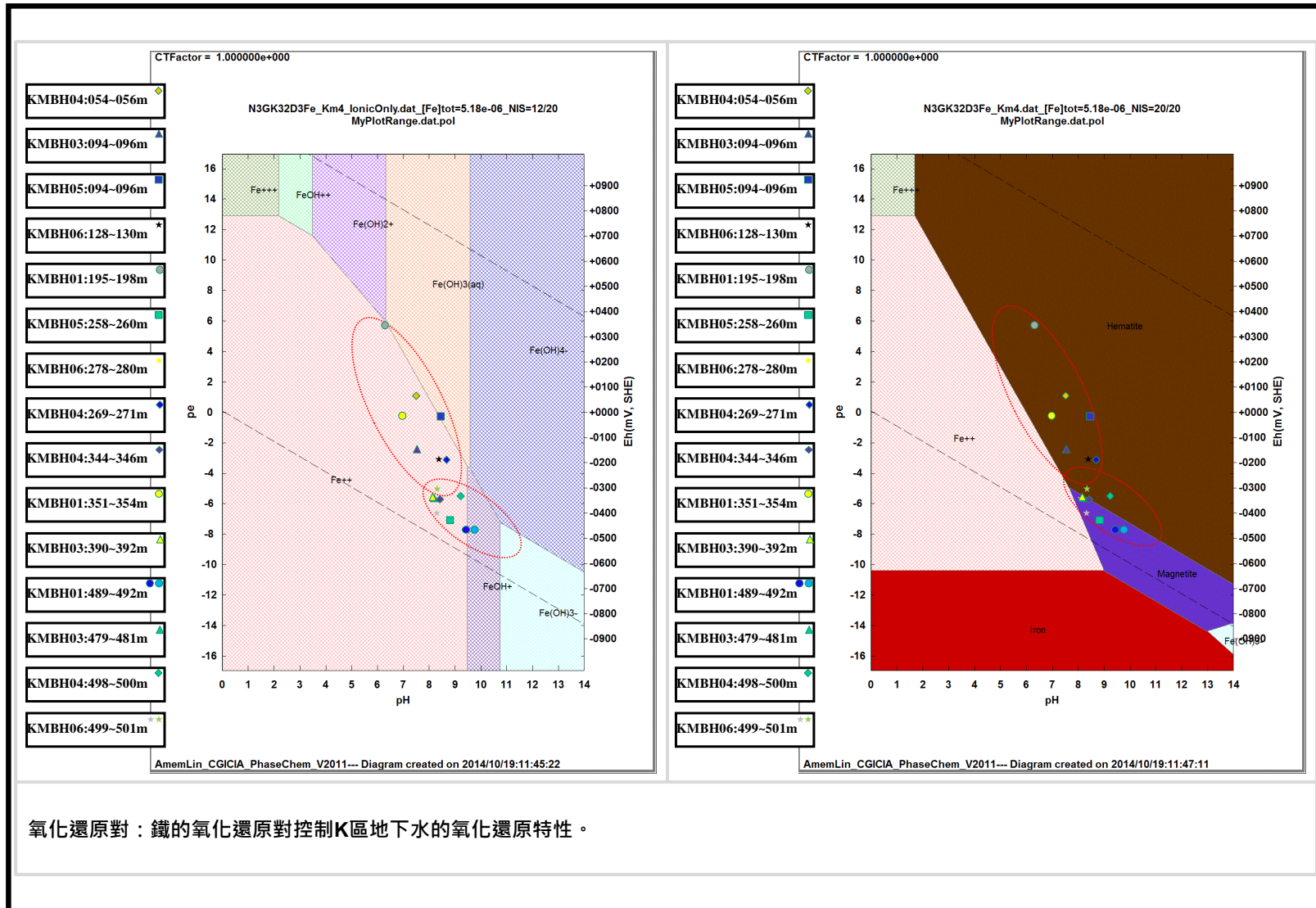


圖 3-55：Fe 元素在 K 區平均深層水質條件下的 Eh-pH 穩定相圖

註解：

- ◆ Eh-pH相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之 PhaseChem 程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫(thermo.com.V8.R6+.dat)，並假設各離子活性等於離子濃度，亦即不考慮活性係數的影響。
- ◆ 左圖為 Fe 元素在 32 °C及 KM5 水質條件(表 3-3)下的 *Eh vs. pH* 穩定相圖；32 °C為 KM5 的平均溫度。
- ◆ 右圖為 Fe 元素在 80 °C及 KM5 水質條件下的 *Eh vs. pH* 穩定相圖；80 °C為 KBS-3 處置概念之銅廢棄物罐表面的預期最高溫度。
- ◆ 左、右兩圖均以 10^{-6} mole/L，做為判斷穩定區間的溶解度限值。
- ◆ 左、右兩圖中各顏色星號位置，為 K 區各孔內各深度所實際量測到 *Eh*及 *pH* 數值。
- ◆ 基本上，在離島 K 區的水質條件及水呈穩定的區間(圖中上下兩條虛線所包含的範圍)中，鐵(iron, $Fe_{(s)}$)是沒有穩定區間，亦即理論上，鐵會(氧化)溶解或轉變為其他礦物相(如 hematite)。
- ◆ 在 KBS-3 的概念中，銅廢棄物罐內部含鑄鐵，主要用以增加銅廢棄物罐的結構力。
- ◆ 從另一個角度而言，在相對較還原的 K 區地下水環境中，原本溶於地下水中的硫及鐵元素是有可能反應形成黃鐵礦(灰色區間)；例如 KMBH03-W3(深度約 480 m, $pH \cong 8.19$, $Eh \cong -351$ mV)周圍岩心樣品中，雖然含量不高，但確實觀察到黃鐵礦的存在(謝佩珊與林蔚，2012, c4p5)。

Hsieh and Lin(2012) [In Chinese: 謝佩珊、林蔚(2012)，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—潛在母岩特性調查—K 區花崗岩岩心礦物組成特性分析，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-288，SNFD-ITRI-TR2012-0288。]



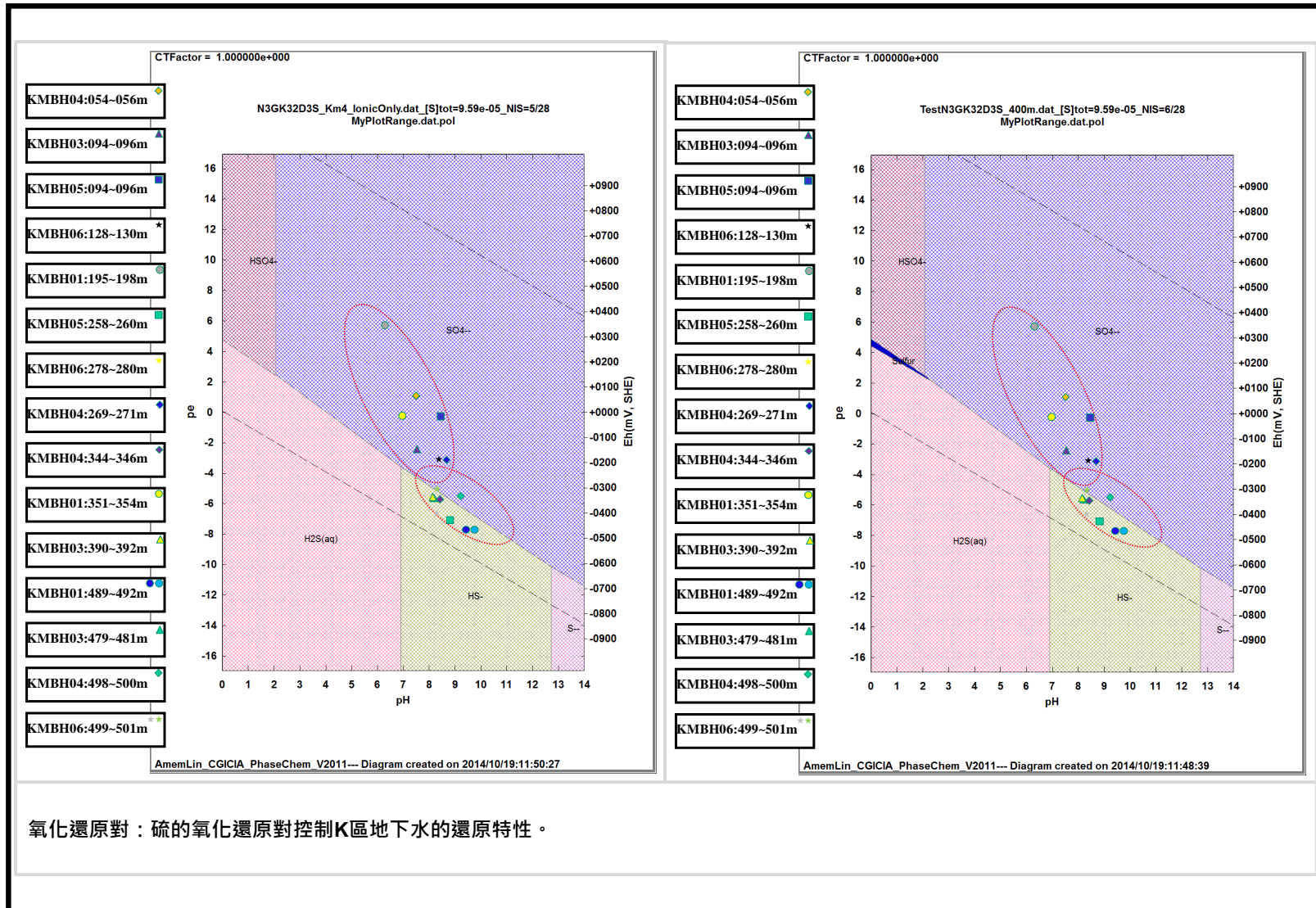
氧化還原對：鐵的氧化還原對控制K區地下水的氧化還原特性。

圖 3-56：K 區深層地下水可能發生的氧化還原反應(1/2)

註解：

- ◆ Eh-pH相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之PhaseChem程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫(thermo.com.V8.R6+.dat)，並假設各離子活性等於離子濃度，亦即不考慮活性係數的影響。
- ◆ 左圖為Fe元素在水溶液中的Eh-pH穩定相圖，右圖為Fe元素在岩水系統中的Eh-pH穩定相圖；左右兩圖Fe元素的總量及溫度均以KM5的水質含量(表3-3)，亦即32°C及 5.18×10^{-6} mole/L進行計算。
- ◆ 左、右兩圖中各顏色星號位置，為K區各孔內各深度所實際量測到Eh及pH數值。
- ◆ 現場數據似乎呈現兩個特定負斜率的關係，pH值越高Eh值越低，其斜率轉折點約位於 $pH \cong 8$ 。
- ◆ 在pH較低環境中($pH < 8$ ，圖中較大的橢圓形)，實際量測到Eh-pH數值，其變化斜率非常接近二價鐵(Fe^{++})及三價鐵的氧化還原反應：
 - $4Fe^{++} + 12H_2O \rightleftharpoons 4Fe(OH)_3(aq) + 4e^- + 12H^+$
 - $4Fe^{++} + 6H_2O \rightleftharpoons 2Fe_2O_3(Hematite) + 4e^- + 12H^+$
- ◆ 在pH較高環境中($pH > 8$ ，圖中較小的橢圓形)，各孔內各深度所實際量測到Eh-pH數值，其變化斜率非常接近二價鐵(Magnetite)及三價鐵(Hematite)的氧化還原反應：
 - $4Fe_3O_4(Magnetite) + 2H_2O \rightleftharpoons 6Fe_2O_3(Hematite) + 4e^- + 4H^+$
 - $HS^- + 4H_2O \rightleftharpoons SO_4^{2-} + 8e^- + 9H^+$
- ◆ 由K區的岩心分析結果可知，鐵的原始主要來源，可能是黑雲母(biotite)；岩相分析觀察到黑雲母的邊緣常已風化成綠泥石類(chlorite) (Hsieh and Lin, 2012, c4p7, c7p32, etc.)，部份Fe元素，在較還原環境中可能伴生形成magnetite，在氧化環境中可能伴生形成hematite。
- ◆ K區岩心礦物分析中，大部份的破裂帶風化岩心中，可明顯發現ilmenite(a solid solution of $FeTiO_3$ and Fe_2O_3) (謝佩珊及林蔚，2012，c7p13&p14)，或magnetite(Hsieh and Lin, 2012, c7p36)的存在。

Hsieh and Lin(2012) [In Chinese: 謝佩珊、林蔚(2012)，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—潛在母岩特性調查—K區花崗岩岩心礦物組成特性分析，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-288，SNFD-ITRI-TR2012-0288。]



氧化還原對：硫的氧化還原對控制K區地下水的還原特性。

圖 3-57：K 區深層地下水可能發生的氧化還原反應(2/2)

註解：

- ◆ Eh-pH相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之PhaseChem程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫(thermo.com.V8.R6+.dat)，並假設各離子活性等於離子濃度，亦即不考慮活性係數的影響。
- ◆ 左圖為S元素在水溶液中的Eh-pH穩定相圖，右圖為S元素在岩水系統中的Eh-pH穩定相圖；左右兩圖Fe元素的總量及溫度均以KM5的水質含量(表3-3)，亦即32 °C及 9.59×10^{-5} mole/L進行計算。
- ◆ 左、右兩圖中各顏色星號位置，為K區各孔內各深度所實際量測到Eh及pH數值。
- ◆ 現場數據似乎呈現兩個特定負斜率的關係，pH值越高Eh值越低，其斜率轉折點約位於 $pH \cong 8$ 。
- ◆ 在pH較低環境中($pH < 8$ 圖中較大的橢圓形)，孔內各深度各地點所實際量測到Eh-pH數值，其變化斜律與硫的氧化還原($H_2S_{(aq)} + 4H_2O \rightarrow SO_4^{--} + 8e^- + 10H^+$)並無明顯關係。
- ◆ 在較低的氧化還原環境中(圖中較小的橢圓形)，孔內各深度各地點所實際量測到Eh-pH數值，其變化斜律非常接近硫的氧化還原對($HS^- + 4H_2O \rightarrow SO_4^{--} + 8e^- + 9H^+$)。

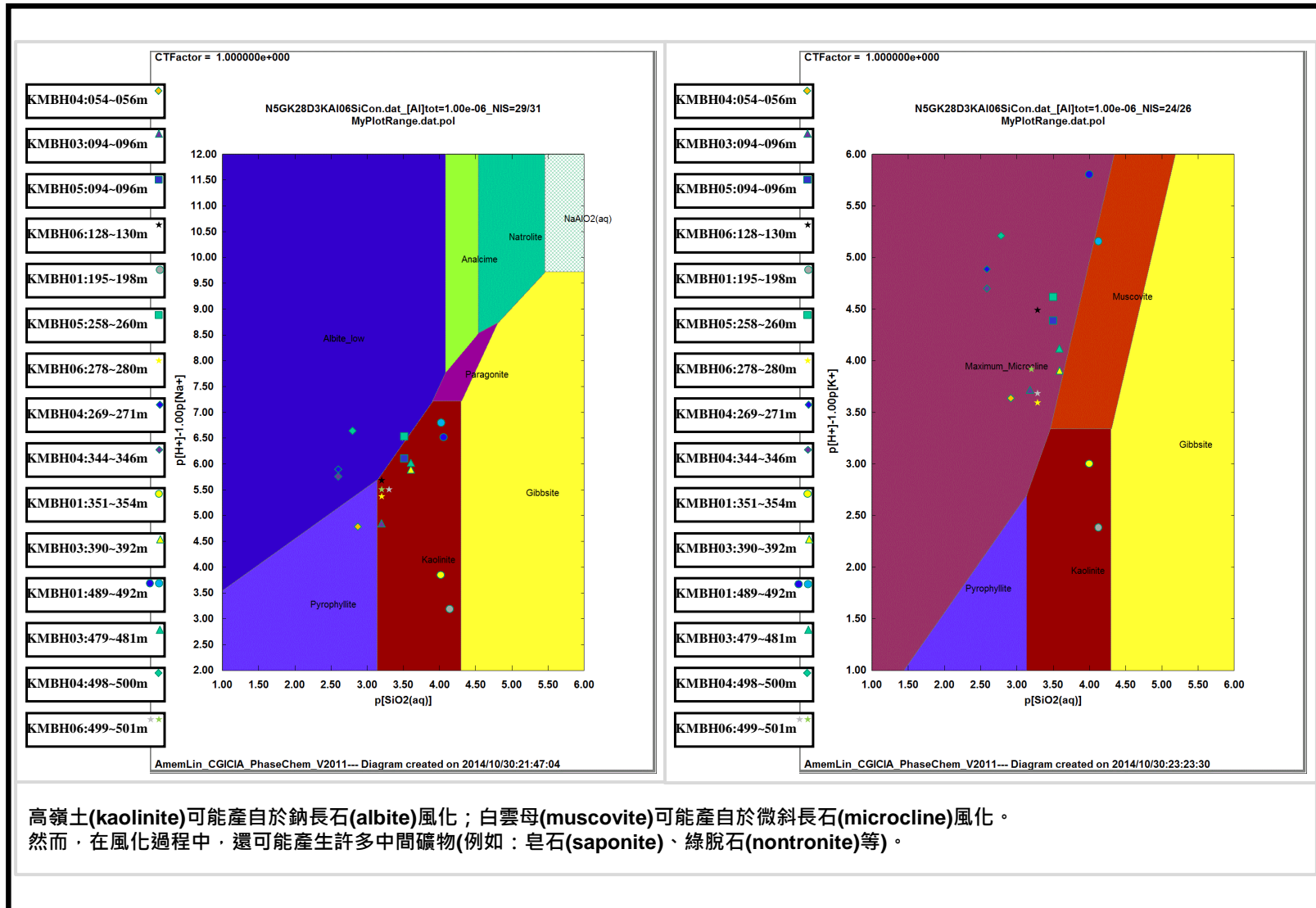


圖 3-58：K 區風化岩心內高嶺土及白雲母的可能來源

註解：

- ◆ 活性組合相圖的繪製係使用計畫內部自行開發之 PhaseChem 程式，並採用與反應路徑模擬研究所用之相同熱力學資料庫 (thermo.com.V8.R6+.dat)，並假設各離子活性等於離子濃度，亦即不考慮活性係數的影響。
- ◆ 左圖為 $Na_2O - Al_2O_3 - H_2O - SiO_2$ (封閉系統) 的活性對數組合穩定相圖。
- ◆ 右圖為 $K_2O - Al_2O_3 - H_2O - SiO_2$ (封閉系統) 的活性對數組合穩定相圖。
- ◆ 左右兩圖的建置條件均為假設 Al 的總活性為 10^{-6} 。
- ◆ 左右兩圖中各顏色符號標示位置，為 K 區各孔內各深度所實際量測各對應參數活性對數值組合的分布圖；假設活性等於其濃度。
- ◆ 左圖資料點的分布斜率與 Albite 及 kaolinite 的平衡界面斜率很接近，顯示 Kaolinite 可能來自於 Albite 的風化。(nontronite 等黏土礦物)。
- ◆ 右圖資料點的分布斜率與 Microcline 及 Muscovite 的平衡界面斜率很接近，顯 Muscovite 可能來自於 Albite_low 的風化。右圖部份資料點分布於 Microcline 的穩定區間內，顯示在由 Microcline 風化至 Muscovite 的過程中可能存在某些中間產物，如 illite (Garrels, 1984, p164)，相關中間產物因含其他化學元素(如 Mg)，除非簡化其化學組成並可合理假設其自由能，否則理論上，不會顯現於 $K_2O - Al_2O_3 - H_2O - SiO_2$ 圖中。

Garrels (1984) [Garrels, R.M. (1984), Montmorillonite/Illite Stability Diagrams, Clays and Clay Minerals, Vol.32, No. 3, 161-166.]

3.8.3.2. pH及Eh可能變動範圍及主要化學反應

表二 Section11 所列之天然系統主要化學反應，係取自 K 區花崗岩質地化反應模擬研究之工作成果(張育德等，2015)，可用以做為進行 K 區地下水在不同環境下的化學反應模擬時，所必須考量的主要化學反應；其相關論述與說明如下。

處置深度化學環境的改變，會影響核種在該深度下的遷移特性，例如，核種在地下水中的溶解度，及母岩礦物吸附核種的特性。處置系統的化學長期穩定性，主要取決於天然系統(母岩)受外界環境改變時的敏感性(化學緩衝能力)，越不敏感代表越具備化學長期穩定性。

深層地質處置設施在開挖、運轉期間，其深層地化環境，勢必將因坑道開挖、通風操作等人為因素，而使其偏離其原本的化學平衡環境，雖然在地質時間尺度中，可能僅是短暫數十年的擾動，但仍應探討此類變化對處置安全性影響因子(如 pH、Eh 值)的可能影響範圍。

針對 K 區所取得的地下水質及岩心礦物組成資料，執行團隊透過透過地化模式(GWB, Geochemist's Workbench®, Version 9)及其內建的熱力學資料庫(thermo.com.V8.R6+.dat) (Bethke, 2008)，針對五種不同的可能情境(圖 3-59)，進行反應路徑模擬，用以架構合理的化學反應系統。

在任兩個不同的熱力學平衡狀態間，可能有許多不同的反應路徑(過程)；而一個所謂合理的反應路徑，其在模擬路徑中所形成的次生礦物，必須要能與實際風化岩樣中所存在的次生礦物相呼應。換言之，裂隙帶風化岩心樣品分析所得的次生礦物相組成，可以作為驗證反應路徑模擬是否合理的指標。

在進行反應路徑模擬時，挑選可能的礦物相是一件相當關鍵但繁瑣的工作，其中，岩石樣本所鑑定出的礦物種類為其必要選擇的礦物相。在 K 區的反應路徑模擬中，針對礦物相的挑選，將礦物分為 4 類，包含：

- ◆ 主要原生礦物(以下簡稱 group-A 礦物)；
- ◆ 微量原生礦物(以下簡稱 group-B 礦物)；

- ◆ 風化產物(以下簡稱 group-C 礦物)；
- ◆ 由反應路徑模擬所建議可能形成(沉澱)的礦物(以下簡稱 group-D 礦物)

其中，group-D 礦物雖然未能在風化岩心樣品中被發現，但理論上，其可能存在，只是可能數量太少未被發現，或因其形成速率太慢，尚未形成於風化岩樣中。

在進行礦物相挑選時，如果任一 group-D 礦物的形成，在反應路徑模擬過程中，會抑制任一 group-C 礦物的形成，則此 group-D 礦物就不列入考慮。依據上述礦物相的挑選原則，針對 K 區的反應路徑模擬，共選取 32 個礦物相。

針對天然的反應系統，在進行反應路徑模擬時，由於礦物反應動力學的資訊貧乏，或因不同礦物反應速率差異過大所造成的數值分析困難度，故很難完全以反應動力學方法來進行反應路徑的模擬。針對一反應系統的模擬，因為 GWB 可同時結合動力及平衡反應兩種模式來進行反應路徑的模擬，故，可將反應路徑的模擬結果，以時間尺度來表示。在進行 K 區反應路徑模擬時，

- ◆ 僅新鮮的主要原生礦物(即 group-A 礦物)的溶解反應，以動力學方法模擬(Palandri and Kharaka, 2004)。
- ◆ 其餘礦物的沉澱或溶解、水中離子的相關化學反應，則以平衡反應來進行模擬。

圖 3-60 為透過 GWB 進行反應路徑模擬的結果範例；該範例展示在反應路徑過程中，礦物相隨時間變化的模擬結果(Case1 案例)。

此外，將 K 區現場封塞取樣所量測的水質(pH 和 Eh)，套印於相關之 Eh-pH 穩定相圖，可用來決定反應路徑模擬時所必須考慮的氧化還原反應。套印結果顯示(圖 3-56 及圖 3-57)，因為現場量測資料的分布斜率，與相圖中某些氧化還原反應的界面斜率非常接近，因此，在進行反應路徑模擬時，下列氧化還原反應或其相關之獨立反應，必須將其列入考慮：

- ◆ 當 pH 值小於 8 時，應包含 Fe^{++} 及 $Fe(OH)_{3(aq)}$ 的氧化還原反應(如圖 3-56 左方所示)。
- ◆ 當 pH 值大於 8 時，應包含磁鐵礦(Magnetite)及赤鐵礦(Hematite)的氧化還原反應(如圖 3-56 右方所示)，以及硫化氫離子(HS^-)及硫酸根離子(SO_4^{--})的氧化還原反應(如圖 3-57 左方所示)。

為簡化反應系統之故，選擇在所有反應路徑模擬過程中，濃度大於 $1.0E-8$ molarity 的水溶性物種，作為代表反應系統中可能存在的主要水溶性物種，總計共有 55 個水溶性物種。綜合以上之說明，針對 K 區之反應路徑模擬，共涵蓋 87 個物種(32 個礦物相及 55 個水溶性物種)，每一個物種均有其化學反應(表 2-1)；換言之，以 K 區為例，合理的反應路徑必須涵蓋此 87 個化學反應。

K 區的 5 種情境案例(圖 3-59)，均使用此相同的 87 個化學反應，其反應路徑模擬結果，均能展現此 5 種情境下的化學特徵。因此，建議此 87 個化學反應作為表二 Section11 之內容(表 2-1)，用以描述 K 區地下水在不同環境或擾動下的化學演化特性。

圖 3-61 為 5 種不同情境案例(圖 3-59)之反應路徑的 pH 及 Eh 模擬結果(圖 3-61)，以及現場水質量測之 pH 及 Eh 分布範圍：

- ◆ Case 1 是被設計用來探討 K 區深層地下水之最高 pH 及最低 Eh 的可能範圍。Case 1 模擬得到之 pH 及 Eh 值，其變動範圍不大(pH= 8.99 to 10.41; Eh = -0.58 volts to -0.40 volts)。K 區平均深層水質條件(pH \cong 8.98, Eh \cong -0.4 volts；表 3-3)，是 Case1 案例模擬的起始條件，該平均水質與 Case1 模擬結果的變動範圍，差異不大，顯示於 K 區利用封塞取樣方式所獲得的地下水組成，具有其代表性；因為模擬結果與現場量測結果差異不大，代表取樣方法及過程並未對深層化學環境造成嚴重的擾動。
- ◆ Case 2 是被設計用來探討 K 區深層導水裂隙帶內地下水之 pH 及 Eh 的可能變動範圍。K 區太武山斷層帶之深層地下水(KMBH01-W3；取樣深度約 490 m、pH 約 9.76、Eh 約 -0.48 volts；表 3-2)，與 Case2 模擬的最終平衡數值 pH 約 9.75 及 Eh 約 -0.45 volts，

差異很小；顯示 Case2 的深層開放裂隙的假設條件(詳圖 3-59 的註解說明)，可用以描述斷層帶的深層地下水化學環境。

- ◆ Case 4 是被設計用來探討 K 區淺層導水裂隙帶內地下水之 pH 及 Eh 的可能變動範圍。Case 4 模擬得到之 pH 及 Eh 值，其變動範圍亦不大(pH= 6.99 to 8.48; Eh = -0.32 volts to -0.17 volts)，但其 Eh 的變動範圍略低於 K 區起始淺層地下水的 Eh 值(KMBH04-W1；表 3-2)。而造成此偏差的可能原因為該淺層地下水樣的採樣深度過於接近地表，致使某些含氧量較高的地下水，在取樣過程中流入封塞段中。
- ◆ Case 2 和 Case 4 兩案例之模擬目的為瞭解深層與淺層開口裂隙地下水的化學演化特性，其模擬結果所獲得的 pH 及 Eh 的變動範圍，可用以推估 K 區導水裂隙可能的 pH 及 Eh 範圍。大部分 K 區深層地下水的 pH 及 Eh 值(pH = 6.29 至 9.76；Eh = -0.48 volts 至 +0.35 volts；表 3-2)，與 Case 2 及 Case 4 的模擬範圍(pH = 6.99 to 9.75 and Eh = -0.45 volts to -0.17 volts)差異不大，顯示模擬結果的合理性。相對於模擬數值範圍，部分現場地下水樣具有較低的 pH 值及較高的 Eh 值，可能原因是在取樣過程中，有相對較淺層的地下水(較低的 pH 值及較高的 Eh 值)，循裂隙流入該取樣封塞段中。
- ◆ Case 5 是被設計用來探討 K 區地表風化含水層之 pH 及 Eh 的可能變動範圍。地表水現場量測之最低 pH 值(4.6)，有略為低於 Case 5 模擬得到之 pH 值(4.91)的現象，顯示未飽和層的 P_{CO_2} 可能高於 0.01 atm(詳圖 3-59 的註解說明)。其次，最高的 Eh 模擬值(0.93 volts)係由於初始所假設的 P_{O_2} (=0.2 atm)所導致；而最低的 Eh 模擬值(-0.33 volts)低於現場量測之最低值(0.17 volts)，顯示民用井地下水的抽取速率可能過快，而使其未能達到化學平衡。
- ◆ Case 3 是被設計用來探討坑道開挖動行為對深層地下水質的影響程度。Case 3 的最低 pH 模擬值與最高的 Eh 模擬值，係因為模擬擾動情境(如隧道開挖時，內燃機的使用)所假設的高 P_{CO_2} 值(= 0.01 atm)及高 P_{O_2} 值(= 0.2 atm)所導致(詳圖 3-59 的註解說明)。

而根據其模擬結果顯示，於最終之反應階段，pH 與 Eh 模擬值，均會趨近於 case 1 的模擬結果(即深層封閉裂隙情境的理論背景值)。此外，由模擬結果亦可得知，若隧道開挖後能有完美的回填與密封，則隧道開挖對化學環境擾動的影響時間不會很久，約數十年後即可回到深層封閉裂隙情境之天然背景值(圖 3-62)。

K 區反應路徑模擬研究結果及建議如下：

- (1) 必須考慮表二所列的 87 個化學反應，方能較完整描述 K 區地下水在不同環境下的化學反應特性。
- (2) 案例 1 的模擬結果，pH= 8.99 至 10.41; Eh = -0.58 volts 至 -0.40 volts，可用來推估 K 區深層母岩(表 2-2 的 R1 至 R6)空隙內之可能 pH 及 Eh 變動範圍。
- (3) 案例 2 及 4 的模擬結果，pH = 6.99 至 9.75 及 Eh = -0.45 volts 至 -0.17 volts，可用來推估 K 區主要導水裂隙帶(表 2-2 的 F# 構造)之可能 pH 及 Eh 變動範圍。
- (4) 地表民用水井的數據範圍，pH= 4.6 至 7.1；Eh = 0.17 volts 至 0.51 volts，可用來推估 K 區風化岩層(表 2-2 的 R0)之可能 pH 及 Eh 變動範圍。
- (5) 在進行安全評估時，針對核種溶解度及被吸附性的敏感度分析範圍，應該考量案例 1、2 及 4 的 pH 與 Eh 模擬結果的數值變動範圍，亦即，pH = 6.99 至 10.41 及 Eh = -0.58 volts 至 -0.17 volts。
- (6) 只要完整的回填處置坑道，坑道開挖擾動造成的化學環境干擾，可能僅須數十年時間尺度，即可回復到開挖前的背景值。

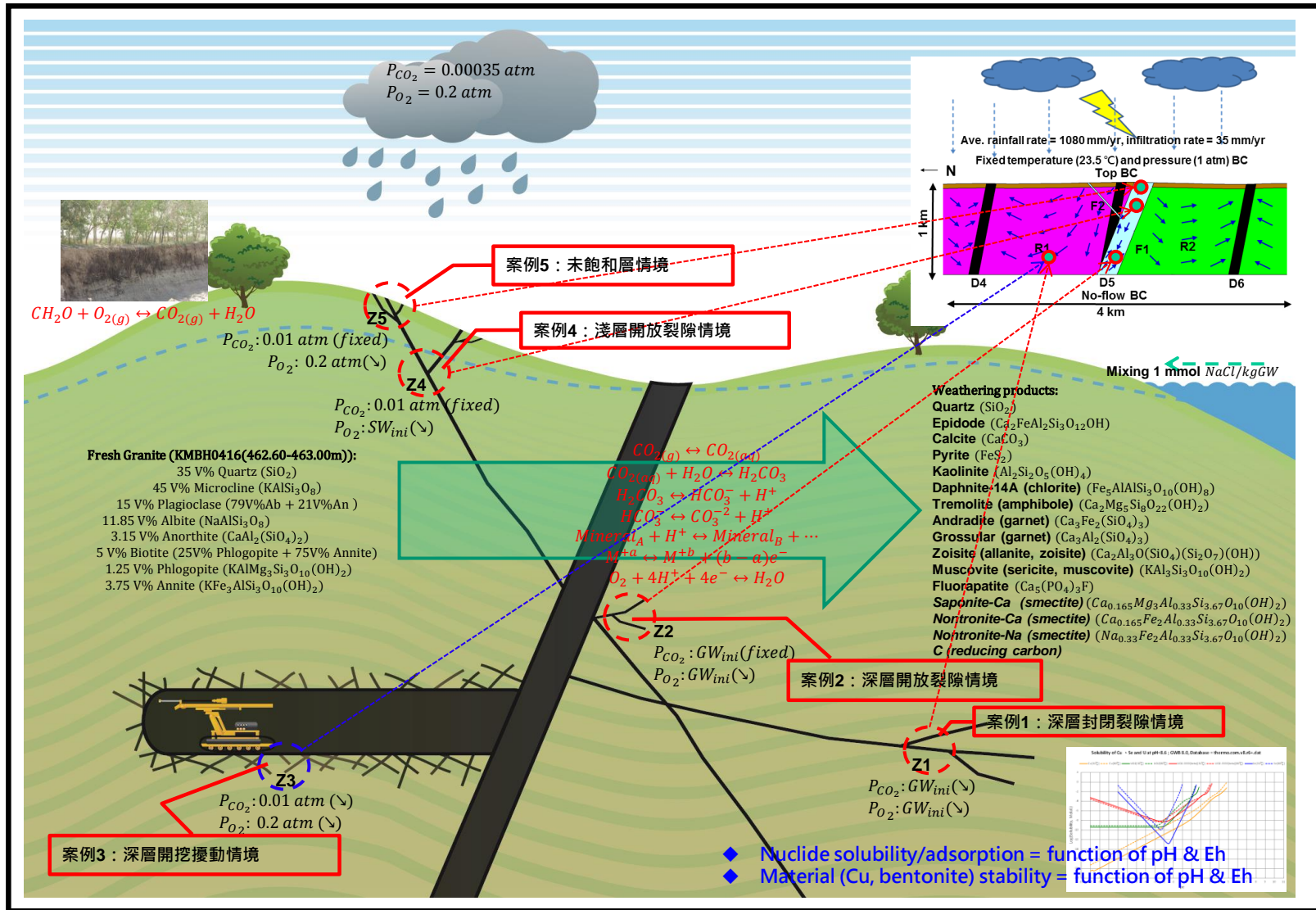


圖 3-59：K 區反應路徑模擬設計案例及目的

註解：

案例 1：深層封閉裂隙情境

- 目的：本案例可供用以研判深地層在無干擾狀態下之水文地球化學的可能特性，或用以研判地下水取樣分析結果與所謂熱力學平衡狀態的差距。
- 假設：本案例假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸後，馬上與外界隔絕，形成一個封閉式的反應系統，進行其化學演化。

案例 2：深層開放裂隙情境

- 目的：本案例之模擬結果，可供建構功能安全評估之導水裂隙化學環境可能面臨的 pH 上限值及 Eh 下限值，研判在深層地下水流動管道內，或其週遭裂隙之水文地球化學環境的可能特性。另外，本情境與深層封閉裂隙(情境 1)之反應路徑模擬條件，與深地層風化岩心的環境接近，因此，可比對次生礦物相的實驗分析與模擬結果，研判模擬結果的合理性。
- 假設：本案例假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸時，因地下水的流動，使整個反應系統的風化驅動力，如 CO₂ 的含量(逸壓)，維持在一個定值；假設該定值等於深層水質的分析結果。

案例 3：深層開挖擾動情境

- 目的：本案例之模擬結果可供評估近場開挖擾動行為對水文地球化學環境的可能變動範圍。雖然在深地層處置概念的時間尺度(百萬年)中，地層處置開挖及運轉的工程行為，僅為相對地短暫(數十年)，但相關工程行為，如內燃機的使用帶入大量 CO₂、因通風需求帶入大量 O₂，將干擾原本深地層的水文地球化學特性。
- 假設：本案例假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸時，地下水的風化驅動力，瞬間提高至高 CO₂ 含量 (P_{CO₂}=10,000 ppm) 及高 O₂ 含量的條件 (P_{O₂}=0.2atm) 後，因處置場封閉未能持續提供 CO₂ 及 O₂，使得該封閉式反應系統中的 CO₂ 及 O₂ 含量，因反應而持續降低。

案例 4：淺層開放裂隙情境

- 目的：本案例之模擬結果，可供建構功能安全評估之導水裂隙化學環境可能面臨的 pH 下限值及 Eh 上限值，研判在淺層地下水流動管道內，或其週遭裂隙之水文地球化學環境的可能特性。
- 假設：本案例假設「淺層地下水」與新鮮岩石接觸時，因淺層地下水受其上方未飽和層的高 CO₂ 含量的影響，使整個反應系統的 CO₂ 風化驅動力，維持在一個定值 (P_{CO₂}=10,000 ppm)。

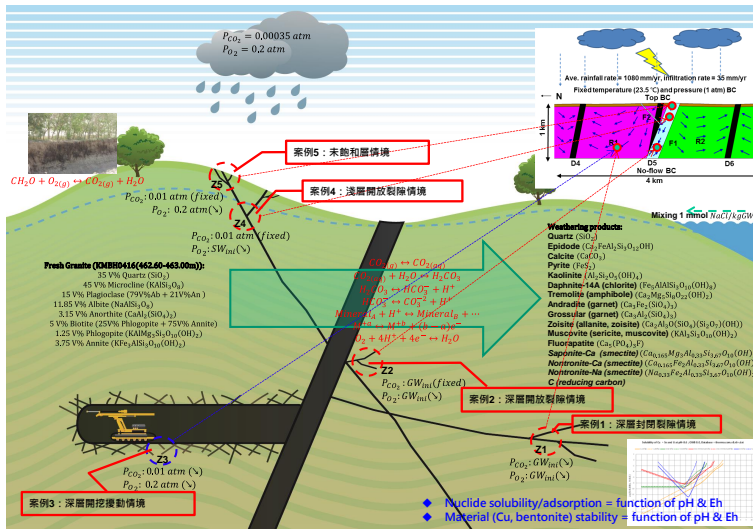
案例 5：未飽和層情境

- 目的：本案例之模擬結果主要用以評估地表入滲水的可能水質條件。未飽和層中的地下水，上接富含 O₂ 的天然雨水，向下為淺層地下水的主要來源。由於未飽和層上部的土壤植物根部及微生物的作用，使得未飽和層中的 O₂ 會逐漸消耗，並使得未飽和層中的 CO₂ 含量，通常遠大於大氣中 CO₂ 含量。
- 假設：此案例首先假設純水與大氣 (P_{CO₂}=350 ppm, P_{O₂}=0.2atm) 達平衡後，再與海風混合形成含 NaCl 的未飽和層的入滲水 (1 mmol/kgGW)，或因海水入侵所造成的同等效應；其次，再假設該含 NaCl 的入滲水在未飽和層與岩石接觸時，因土壤植物根部及微生物的作用，使其整個反應系統的 CO₂ 風化驅動力，維持在一個高 CO₂ 含量的定值 (P_{CO₂}=10,000 ppm)，但因整個反應系統與大氣隔離，故未飽和層的 O₂ 不再補充，隨反應的進行而改變。

資料來源：Chang et al. (2015, Ch3.2); Lin et al. (2015, Fig. 2)

Chang et al. (2015) [In Chinese: 張育德、林鎮國、謝佩珊、林蔚(2015) 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(101~103 年度計畫)－花崗岩質地化反應模擬技術研究，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-305 / SNFD-ITRI-TR2015-0305。]

Lin et al. (2015) [Lin, C.K., Change, Y.T., Hsieh, P.S., and Chen, S.C., Applications of reaction-path modelling in geological disposal concept of radioactive waste, East Asia Forum on Radwaste Management, Oct. 25-28, 2015, Taichung City]



反應過程中產生之次生礦物(右圖中彩色線)：

- 高嶺土(Kaolinite)
- 白雲母(Muscovite)
- 鈣型皂石(Saponite-Ca)
- 鐵綠泥石(Daphnite-14A)
- 綠簾石(Epidote)
- 透閃石(Tremolite)
- 鈣鋁榴石(Grossular)

這些礦物也都會在風化岩石樣本中發現。

案例1：深層封閉裂隙情境的設計目的

➢ 為了要估算在地下深處且良好隔離環境(pH的上限和Eh的下限)的最終平衡狀態(化學條件)。

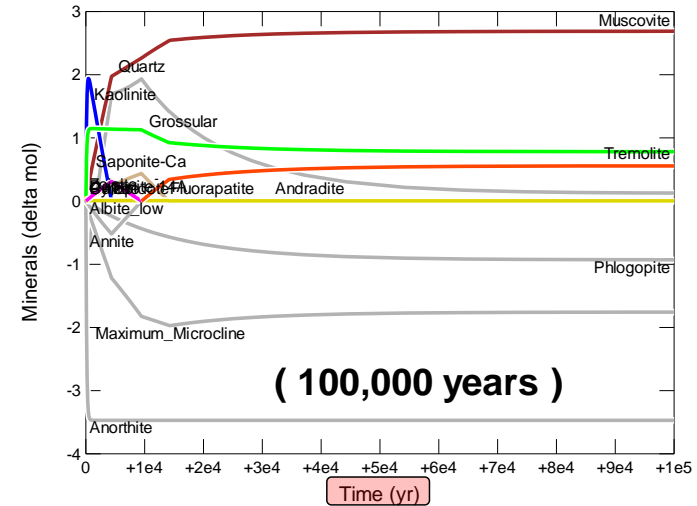
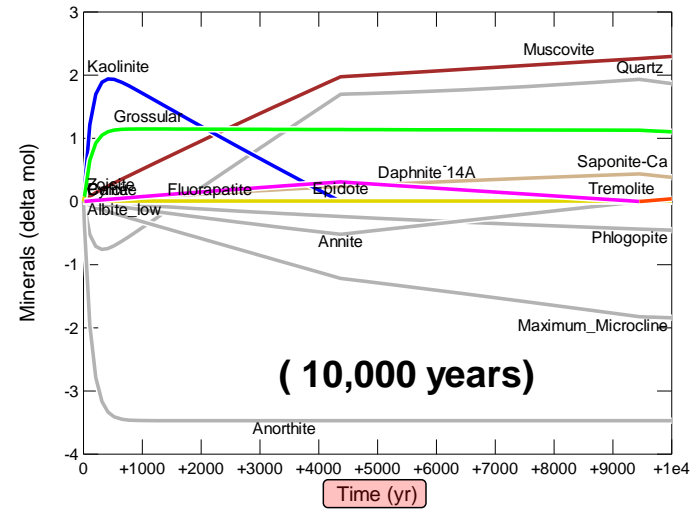


圖 3-60：K區反應路徑模擬案例一之礦物相隨時間變化結果。

註解：

◆ 關於各案例的模擬目的及假設，請參考圖 3-59 之註解說明。

資料來源：Chang et al. (2015, Fig. 3.7)

Chang et al. (2015) [In Chinese: 張育德、林鎮國、謝佩珊、林蔚(2015) 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(101~103 年度計畫)－花崗岩質地化反應模擬技術研究，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-305 / SNFD-ITRI-TR2015-0305。]

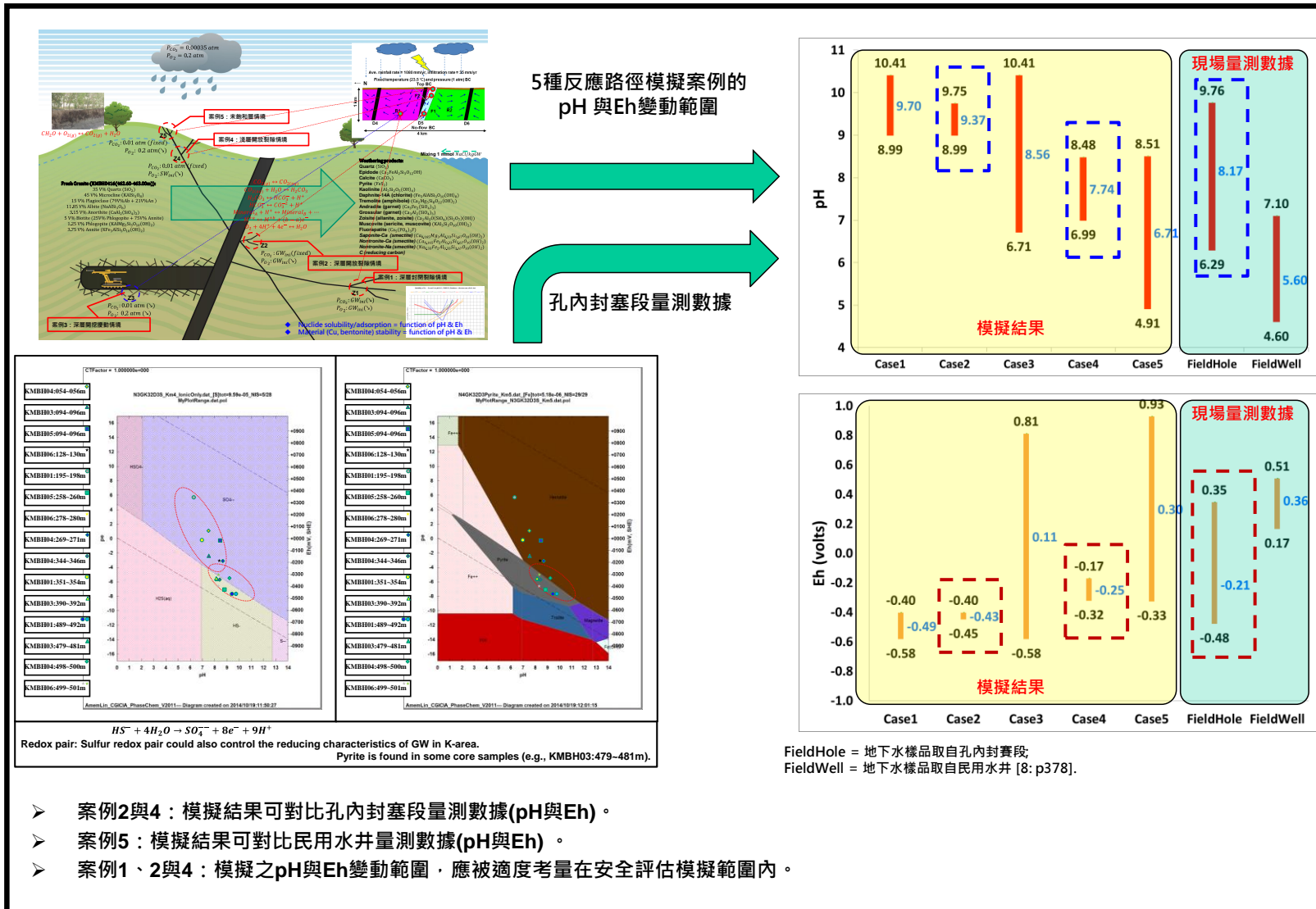


圖 3-61：K 區地下水 pH & Eh 之現場水質與反應路徑模擬結果比較圖

註解：

- ◆ 關於各案例的模擬目的及假設，請參考圖 3-59 之註解說明。
- ◆ 關於各案例的反應路徑模擬過程及結果，請參張育德等(2015，cgh.3.5)。
- ◆ 圖中，“FieldHole”代表 K 區孔內封塞段的量測數據(Lin et al., 2012, ac4p44~46)。
- ◆ 圖中，“FieldWell”代表 K 區民用水井的量測數據(Liu et al., 2008)。

資料來源：Lin et al. (2015, Fig. 5)

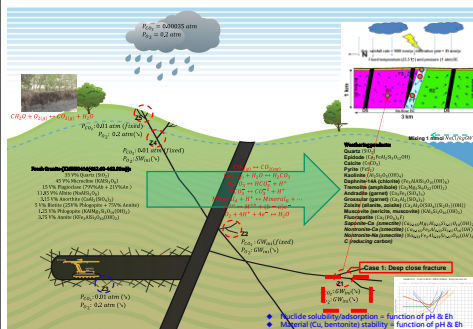
Chang et al. (2015) [In Chinese: 張育德、林鎮國、謝佩珊、林蔚(2015) 用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段(101~103 年度計畫)－花崗岩質地化反應模擬技術研究，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-305 / SNFD-ITRI-TR2015-0305。]

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

Lin et al. (2015) [Lin, C.K., Change, Y.T., Hsieh, P.S., and Chen, S.C. (2015), Applications of reaction-path modelling in geological disposal concept of radioactive waste, East Asia Forum on Radwaste Management, Oct. 25-28, 2015, Taichung City]

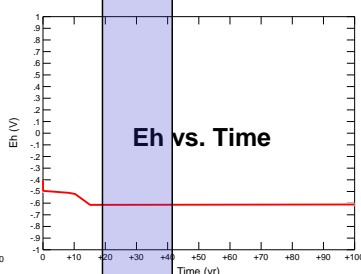
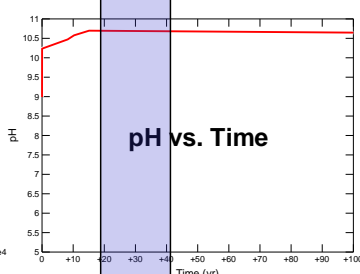
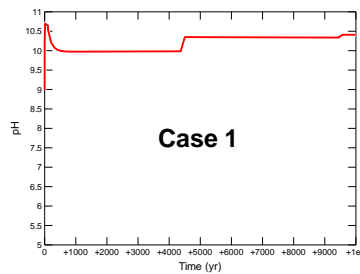
Liu et al. (2008) [Liu, C.-W., Jang, C.-S., Chen, C.-P., Lin, C.-N., and Lou, K.-L. (2008), Characterization of groundwater quality in Kinmen Island using multivariate analysis and geochemical modeling, Hydrological Process, Vol. 22, pp. 276-383.]

案例1：深層封閉裂隙情境

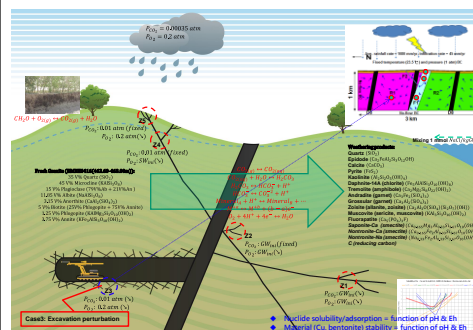


(10,000年)

(100年)

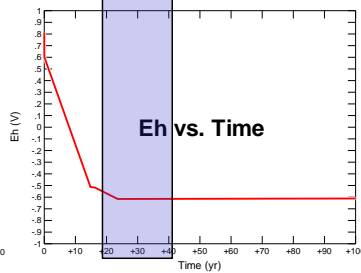
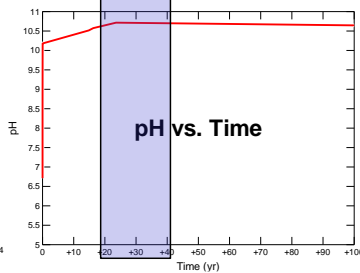
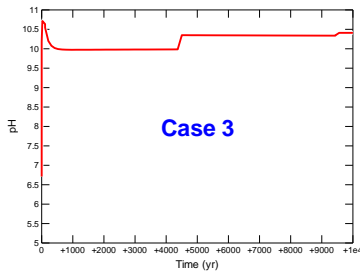


案例3：深層開挖擾動情境



(封閉後10,000年)

(封閉後100年)



➤ 如果能夠構建和維持處置後的完全封閉，對於隧道開挖(案例3)引起的化學擾動，回到自然背景(案例1)的恢復期可能僅需要幾十年。

圖 3-62：開挖擾動對地下水 pH&Eh 影響性模擬結果圖。

註解：

◆ 關於各案例的模擬目的及假設，請參考圖 3-59 之註解說明。

資料來源：Lin et al. (2015, Fig. 6)

Lin et al. (2015) [Lin, C.K., Change, Y.T., Hsieh, P.S., and Chen, S.C. (2015), Applications of reaction-path modelling in geological disposal concept of radioactive waste, East Asia Forum on Radwaste Management, Oct. 25-28, 2015, Taichung City]

3.9. 母岩傳輸特性

本章節之主要目的在說明參考案例表二中，下列內容的科學依據：

- (1) Section02 之主要導水裂隙及阻水構造。
- (2) Section07 之完整岩體的離散裂隙網路參數集的由來。
- (3) Section06 之傳輸特性的由來。

一般而言，在進行處置場安全評估或說明時，為強化計算及溝通效率，可依照時間與空間的差異性，將核種的傳輸分為近場、遠場及生物圈三個區域，分別評估或說明。其中，近場主要探討核種源項 (source term) 以及工程障壁 (engineered barrier) 對核種的圍阻功能；遠場涉及母岩對核種遲滯以及稀釋效應；而生物圈則描述核種如何藉由各種途徑攝入人體內，並計算輻射劑量。

在深層地質處置概念中，處置場建造於一個適合的處置母岩內。當核種因故由近場釋出後，即進入遠場的處置母岩，由於一般合適的母岩中的地下水流非常緩慢，加上母岩對核種的吸附 (adsorption) 作用，以及核種本身的放射性衰變，使核種到達生物圈前，活度已大大減弱，不致產生對人類造成傷害的劑量。而母岩對核種的遲滯作用，可長達數萬年甚至百萬年之久，因此，在處置多重障壁概念 (multi-barrier concept) 中，母岩被稱為天然障壁，是作用時間最長的安全措施。

母岩對核種遷移的遲滯功能，取決於地下水在母岩中的流動特性、母岩對核種的吸附能力、核種在母岩中的擴散能力等相關傳輸特性，本章將分別說明 K 區的地下水流通路徑及其傳輸參數特性。

3.9.1. 流通路徑

岩體中的地下水流向，主要受到不連續面 (如主要導水裂隙、阻水構造、裂隙) 的分布而控制，且大部分地下水的流向主要沿著主要導水裂隙 (MWCF) 及岩體內的離散裂隙網路 (DFN) 流動；主要導水裂

隙可類比於人體中的動脈及靜脈，而裂隙網路可類比於人體中的微血管。

- ◆ 主要導水裂隙(MWCF)是在巨觀尺度下，地下水的主要流通道徑，是由一群密集集中的裂隙所組成，又稱為破裂帶；其尺寸大小通常達公里等級，可由現場調查研判其空間的位置及大小。
- ◆ 離散裂隙網路(DFN)是在微觀尺度下，岩體內的地下水流通道徑，是由眾多離散裂隙聯通形成的地下水流通網路；其單一裂隙的大小，小於 MWCF 的尺寸，可能很小且數量眾多；通常可由裂隙調查，經由統計實現(realization)來架構裂隙網路。完整岩體的流動異向性，主要取決於 DFN 的特性。

主要導水裂隙(MWCF)及離散裂隙網路(DFN)兩者可能互相聯通，且均可能成為地下水在岩層中的快速流通道徑，亦即核種可能遷移至人類生活圈的快速流通道徑。

3.9.1.1. 主要導水裂隙及阻水構造

參考目前對 K 區水文地質概念模式的建構成果可知，在描述其地下水主要流通道徑特性時，必須考量：

- ◆ F1 與 F2 為主要導水裂隙(MWCFs)，F1 及 F2 分別代表太武山斷層及其分支裂隙，其對應的空間分布位置、位態及流動特性，請參考表 2-1。雖然根據 RIP 的研判結果(詳第 3.4.1.3 節)，顯示 K 區可能有其他的主要導水裂隙(F3 至 F11，圖 3-23)，但因尚未進行確認調查(如地質鑽探及其孔內試驗)，且本參考案例建置的目的在技術發展而非場址評估，因此其他可能的主要導水裂隙(F3 至 F11)不在本報告的討論範圍。
- ◆ D#為阻水構造，代表輝綠岩脈，其對應的空間分布位置及流動特性，請參考表 2-1。根據目前對 K 區輝綠岩脈的現場觀察結果可知，未被斷層或破裂帶切穿的完整輝綠岩脈，是 K 區地下水流動的重要阻水構造。雖然 K 區輝綠岩脈以岩脈群的方式出現，考量本參考案例之目的在技術發展而非場址評估，將其簡化為特定間

距頻率：每公里間距平均出現 100 m 寬度的輝綠岩脈，以利其他數值模擬的建構應用。

- ◆ 由於流通或阻水是相對性的物理概念，例如，相對於 F#構造，D#構造因具有相對較低的水力傳導特性，故，被視為阻水構造。在論述地下水流通路徑特性時，K區其他岩體單元(如 R#)的空間相對位置及其流動特性，亦必須同時被考量。R#為岩體單元，其中，R0 代表地表風化層，R1 至 R6 代表不同的花崗岩岩體，其對應的空間分布位置及流動特性，請參考表 2-1。

3.9.1.2. 離散裂隙網路

針對小尺寸(公分等級)的岩樣，可利用一些特殊的技術，例如微斷層掃描技術(Micro-CT, Micro computed tomography)，藉以視覺化(visualize)小型岩樣內部的裂隙構造以及流通路徑。然而，現今，類似的特殊技術並不能直接應用於處置計畫所關注的巨大岩體尺寸(數公里等級)。截至目前為止，實務面上，僅能根據岩體表面所能“觀察”得到的裂隙特徵(如破裂軌跡長度等)，藉由統計理論“推測”岩體內部之裂隙構造的空間分布。

離散裂隙網路模型(Discrete Fracture Network，簡稱 DFN)係根據現場裂隙的統計特性，針對特定的空間範圍及特定的應求需求(例如特定岩體內的地下水流模擬)，產生的一組隨機模型，又稱為統計實現(realization)。由於 DFN 是由統計理論產生的一組隨機模型，因此針對任一特定應用，通常都會產生多組的 DFN 及進行其相關分析，用以提升其應用的可信度。

儘管使用完全相同的裂隙統計特性來建構 DFN，卻可能因為考慮不同應用層面，而設置不同的簡化假設條件，進而導致建構完成的 DFN 模型有所不同。例如，以建構 DFN 的裂隙面形狀為例，考慮不同的應用層面，一般來說可將不規則的裂隙面形狀簡化為圓形或是矩形，則其因應產生的裂隙連通路徑，亦可能有所不同。

事實上，裂隙是一個三維且不規則形狀的物件，但若以此進行模擬，將會大大增加計算的複雜性。因此，為了簡化計算流程以及易於

視覺化展示，裂隙通常被簡化為一個具均勻厚度的面形幾何體，例如矩形、圓形以及橢圓形等。從數學的角度而言，任何有限大小的平面皆能以下述三種參數定義：

- (1) 平面位態法向量參數
- (2) 平面中間點座標
- (3) 平面大小尺寸

在特定岩體空間內，尤其是結晶岩體，可能存在數量很多的裂隙。因此，通常透過統計學方法，來瞭解岩體表面可觀察量測之裂隙的統計特性，進而架構(統計實現)該岩體內部之裂隙構造的空間分布特性。針對特定岩體空間，所謂「可觀察量測之裂隙」的數量，會因為研究尺度的不同，巨觀尺度或微觀尺度，而會有所不同。例如，以 K 區的岩體範圍為例，根據重力及磁力的逆推分析，可能存在數十條公里等級的線性構造(巨大裂隙)，但若根據井內岩心裂隙的判識結果，可能存在數百萬條公分等級的裂隙。

- (1) 經由現場“觀察”所得到大量的裂隙資料，可經由位態統計分析，區分為數組叢集(clusters)以及該叢集內相對應的裂隙密度(density)。每一組叢集可以找到該叢集平均位態的平均法向量，及用以描述叢集內各裂隙面之位態向量與該平均法向量之離散因子(dispersion factor)。
- (2) 裂隙中心位置的統計分布模式，可由現場“觀察”的裂隙密度經由統計檢定方式分析裂隙中心分布模式，例如卜瓦松分布(Poisson distribution)。
- (3) 裂隙大小的統計分布模式，可由現場“觀察”的裂隙軌跡長度經由統計檢定方式分析是否服從特定的機率分布，例如冪函數分布(Power-law distribution)。

現場調查所得的原始裂隙資料經由統計分析後，其參數計算結果，又稱為離散裂隙網路參數集(簡稱裂隙參數集)，可供後續 DFN 建構模型使用；裂隙參數集包含以下資訊：

(1) 裂隙叢集的統計分類及其特性，包含各裂隙叢集的以下資訊：

(a) 各裂隙叢集的平均法向量

此平均法向量代表此叢集裂隙內所有裂隙面的平均位態集中趨勢，通常以此平均位態法向量在下半球的極點(pole)投影的方位角(trend)及傾沒角(plunge)描述。

(b) 叢集內各裂隙面之位態向量的離散因子

叢集內各裂隙面之位態向量，與叢集平均位態向量的離散特性，通常可以用費雪分布(Fisher distribution)及其參數kappa (κ)描述； κ 值越高，代表該叢集所包含的裂隙位態向量較聚集，反之則較離散。

(c) 各裂隙叢集的統計密度(強度)

裂隙密度(強度)通常用以下參數描述：

- P_{10} ：一維空間中的裂隙線頻率，定義為單位長度的測線內所有與測線相交的裂隙個數，單位為 $1/m$ 。
- P_{32} ：三維空間中的裂隙體積強度，定義為單位體積內所有裂隙面積(單一裂隙面)的總合，單位為 m^2/m^3 ，或通常簡化 $1/m$ 。

(2) 各裂隙叢集內各隨機裂隙面之中心位置的統計分布模式

(3) 各裂隙叢集內各隨機裂隙面之尺寸大小的統計理論分布模式

除上述必要的 DFN 組成要素之外，若以統計分布的公式描述裂隙尺寸大小並用以建構 DFN 模型時，必須還得考慮以下所敘述的特定情況：

(1) “為避免調查尺度的限制，造成對裂隙尺寸之統計分布模型的偏差，可結合不同尺度下(考慮尺度範圍可從公尺至公里)的調查結果，一併進行分析。亦即，取得野外露頭數十公尺尺度的裂隙數據後，亦可以結合數十公里尺度的線性構造資訊，一併進行分析，用以建構裂隙尺寸的統計分布模型”(La Pointe et al., 2008, p42)。冪函數分布模式是一種典型用以分析裂隙面大小機率分布的統計分布模式(La Pointe, 2002, p381; La Pointe et al., 2008, p44)。

- (2) 用以產生裂隙面大小的統計分布模式中，必須先設置裂隙面尺寸的下限值($\equiv r_0$)，否則 DFN 模擬結果將出現無限多組尺寸“極微小”的裂隙面。以孔內攝影分析(Borehole Image Processing System, BIPs)裂隙資料為例，模擬過程即將井孔半徑設定為裂隙面半徑的下限值。此項設定值源自於若裂隙面尺寸小於井孔半徑，則實際上於 BIPs 處理過程中亦難以發現該組裂隙軌跡。
- (3) 裂隙面尺寸的冪函數分布模式描述如下(La Pointe, 2002, p381)：

$$P(R \geq r; r_0 \leq r < \infty) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{k_r - b}$$

其中，

R 為裂隙半徑

r_0 為裂隙半徑的最小值

r 為任何一介於 r_0 以及無限大之間的裂隙半徑值。

k_r 為碎形維度的指數值，亦可稱為裂隙半徑的尺度指數。

b 為維度修正因子

$b = 0$ 應用於三維案例(La Pointe, 2002, p381);

$b = 1$ 應用於二維案例(La Pointe, 2002, p383);

$b = 2$ 應用於一維案例(La Pointe, 2002, p387).

$P(R \geq r; r_0 \leq r < \infty)$ 代表裂隙半徑(R)大於或等於 r 時的機率密度機率值。

- (4) 根據 BIPs 判識結果可統計單位長度之裂隙個數，並且經過 Terzaghi 位態修正後產生一維裂隙強度 $P_{10}(R \geq r; r_0 \leq r < \infty)$ ，而三維裂隙強度 $P_{32}(R \geq r; r_0 \leq r < \infty)$ 則可經由 P_{10} 加權計算後得到(La Pointe et al., 2008, p48; Follin et al., 2006, p35; Wang, 2005, p6).
- (5) 實務上，當使用裂隙半徑的冪函數統計分布模式，用以建構 DFN 三維模型時，會另外設定裂隙半徑的上下門檻值(r_{max} 及 r_{min})，產出更符合水文地質特性的 DFN，上下門檻值的數值會影響目標區域與模型邊界(如地表)之間的連通性。

- (a) “大型”的裂隙構造(例如斷層構造)，應該可由地質學家經現場調查確認其位置，確定性地描述於地質概念模型中。意即，在進行 DFN 模擬計算時，若裂隙半徑大於某上限門檻值($\equiv r_{max}$)時，就不該被考慮以統計方式，隨機產生於 DFN 模型中。一般而言，一個尺寸大於 1000 m × 1000 m 大小的矩形裂隙面(換算為等面積的圓形裂隙面為 $\pi \times r_{max} \times r_{max}$ ， $r_{max} \cong 564$ m)，應該可以被現場調查發現，確定其位置。因此，在建構 DFN 過程中，不應該考量任何尺寸大於 r_{max} 的隨機裂隙，而是將尺寸大於 r_{max} 的裂隙以確定的裂隙構造(裂隙帶)直接設定於地質概念模式中(Follin et al., 2005, p62; Follin et al., 2006, Fig2-2)。
- (b) 同樣地，在建構 DFN 時，亦必須設定裂隙半徑的下限門檻值($\equiv r_{min}$)，以避免產生過多極小尺寸的裂隙面，過小的裂隙對 DFN 的裂隙連通性可能沒幫助，但過多的小裂隙會造成 DFN 模擬及其後續相關應用的計算負擔。下限門檻值的決定($\equiv r_{min}$)，基本上是透過不斷地修正裂隙半徑最小值，產生不同 DFN 模型，疊代計算至目標區域與其邊界的 DFN 形成連通性。
- (c) 經過上下門檻值(r_{max} 及 r_{min})設定後的裂隙強度機率值($P_{32}(R \geq r; r_{min} \leq r < r_{max})$)，與原本調查統計所得的裂隙強度機率值($P_{32}(R \geq r; r_0 \leq r < \infty)$)，並非相同；上述裂隙強度機率值之間的數學關係，可用下列公式所描述(La Pointe et al., 2008, p46; Follin et al., 2006, p24)：

$$P_{32}(R \geq r; r_{min} \leq r < r_{max}) = \frac{(r_{min}^{(2-kr)} - r_{max}^{(2-kr)})}{r_0^{(2-kr)}} \times P_{32}(R \geq r; r_0 \leq r < \infty)$$

總而言之，針對特定區間內的地水流場模擬而言，任一 DFN 模型，僅為一組根據特定裂隙半徑範圍(r_{min} 至 r_{max})，所隨機產生的裂隙網路。

針對整個研究區域，若裂隙特性存在明顯的區域差別性，可將研究區域細分成幾個裂隙區域(fracture domains)，並分別針對各裂隙區域，建構其離散裂隙網路參數集。整個研究區域之裂隙網路，可由各裂隙區域之裂隙網路組合而成，透過此種方法，可有效降低整個研究區域之裂隙網路的不確定性(La Pointe et al., 2008, p27)。

執行團隊在此非常感謝 SKBI (SKB International)以及 Golder (the Golder Associates AB)，在目前 K 區有限的調查資料條件下，協助建構 K 區的離散裂隙網路參數集；茲將其相關建議，簡述如下：

(1) 裂隙區域(Fracture Domain)：

透過對 KMBH01 至 KMBH06 六口地質井的 BIPs 裂隙判識資料檢視後，發現 KMBH01 至 KMBH04 四口地質井的累積裂隙強度(Cumulative Fracture Intensity, CFI)隨深度的分布，具有相似性(如圖 3-63 所示)，約在 63m 深度有個變化點(圖 3-64)。因此，建議概略以 70m 深度為區分，分成兩個裂隙區域(FDMA 及 FDMB)，分別計算裂隙體積強度(圖 3-64)及裂隙的統計特性。

- FDMA: 裂隙區域範圍在深度 70 m 以上的裂隙強度 P_{32} 計算值約等於 $2.4 m^{-1}$ 。
- FDMB: 裂隙區域範圍在深度 70 m 以下的裂隙強度 P_{32} 計算值約等於 $0.3 m^{-1}$ 。
- 另外，K 區的地表風化層(R0)，以地電阻剖面大致推估其厚度約為 50 m (林蔚等，2007，c4p27)，為簡化數學模擬及模型說明展式，故假設 R0 厚度與 FDMA 一樣，均為 70 m。

(2) 裂隙叢集(Fracture Cluster)：

(a) 裂隙區域 FDMA 所有裂隙的位態經過統計分析，共可分類為四組叢集，並可利用 Fisher 分布，分析叢集內裂隙位態集中趨勢(如圖 3-65 所示)。茲將各裂隙叢集的極點(pole)方位角(trend)、傾沒角(plunge)、Fisher 離散因子(κ)與裂隙強度所占比例($P_{32,rel}$)描述如下：

- 裂隙叢集一(set-1)： $198^{\circ}/18^{\circ}/18/26\%$
- 裂隙叢集二(set-2)： $155^{\circ}/4^{\circ}/15/24\%$

➤ 裂隙叢集三(set-3)： 264°/23°/16/18%

➤ 裂隙叢集四(set-4)： 98°/81°/11/32%

(b) 裂隙區域 FDMB 所有裂隙的位態經過統計分析，共可分類為五組叢集，並利用 Fisher 分布，分析叢集內裂隙位態集中趨勢(如圖 3-66 所示)。茲將各裂隙叢集的極點(pole)方位角(trend)、傾沒角(plunge)、Fisher 離散因子(κ)與裂隙強度所占比例($P_{32,rel}$)描述如下：

➤ 裂隙叢集一(set-1)： 65°/17°/20/15%

➤ 裂隙叢集二(set-2)： 344°/38°/18/24%

➤ 裂隙叢集三(set-3)： 281°/29°/16/30%

➤ 裂隙叢集四(set-4)： 174°/22°/17/10%

➤ 裂隙叢集五(set-5)： 175°/75°/19/21%

(3) 裂隙位置(Fracture Location)：

假設卜瓦松分布過程(隨機過程)，可用以隨機產生每一組裂隙面的中心位置。

(4) 裂隙大小(Fracture Size)：

裂隙尺寸(半徑)分布可用冪函數統計分布模式描述，並簡述參數如下：

➤ k_r 約為 2.6；其計算方式如圖 3-67 所示。

➤ r_0 應為 0.05 m(井孔半徑)，但將 r_0 增加至 0.1 m，用以產生較多較大的裂隙面及增加裂隙連通性，降低 DFN 模擬及後續應用的計算負擔，以利技術發展測試及展示(詳第 3.10.2 節)。

➤ 假設最大裂隙面為 1,000 m × 1,000 m 的矩形，亦即裂隙半徑之上限門檻值可設定為 564 m。

➤ 經過初步疊代計算後，模擬結果顯示裂隙半徑若大於 5.64 m 時，則目標深度(假設 500 m)至模型邊界(地表)之間的裂隙連通性不佳(如圖 3-68 所示)。因此，裂隙半徑下限門檻值(r_{min})必須小於 5.64 m(相當於 10 m × 10 m 矩形裂隙面)，

經多次疊代計算後，建議下限門檻值(r_{min})為 4.5 m(相當於 8 m × 8 m 矩形裂隙面)(詳第 3.10.2 節)。

(5) 裂隙導水係數(Fracture Transmissivity)：

統計過程產生的 DFN 內的各隨機裂隙，通常可藉由以下公式，利用裂隙半徑計算其導水係數(transmissivity, T)：

- (a) Klimzcak 等人(2010)以及 Zimmerman & Bodvarsson(1996) 研究指出導水係數(T)與矩形裂隙的邊長(L)具有以下關係式：

$$T = 1.9281 \times 10^{-10} \times (L^{1.5})$$

其中，

T 為矩形裂隙(面積： $L(m) \times L(m)$)所計算的導水係數。

L 為正方形裂隙的邊長，若換算等同面積的圓形裂隙面半徑，

則二者之間的關係式可表示為 $L = \sqrt{(\pi r^2)}$ 或 $r = \sqrt{L^2/\pi}$ 。

- (b) 針對 DFN 內各隨機裂隙之導水係數的估算方式，因目前尚無法在 K 區進行相關必要的現地試驗(例如大量的抽水試驗及孔內流速量測)，因此參考案例表二採用瑞典 Forsmark 現場調查的經驗公式，計算導水係數：

- ◆ 裂隙區域 FDMA，可參考 Forsmark-FFM02 岩體實驗的經驗公式(Vidstrand et al., 2010, p107)：

$$T = 1.51 \times 10^{-7} \times (L^{0.7})$$

- ◆ 裂隙區域 FDMB，可參考 Forsmark-FFM01 岩體實驗的經驗公式(Vidstrand et al., 2010, p106)：

$$T = 3.98 \times 10^{-10} \times (L^{0.5})$$

(6) 傳輸內寬(Transport Aperture)：

針對 DFN 內各隨機裂隙之傳輸內寬(transport aperture)，可藉由以下經驗公式計算其傳輸內寬(transport aperture)以及導水係數(T)之間的關係(Follin et al, 2005, p22)：

$$e = 0.5\sqrt{T}$$

其中，

T 為裂隙的導水係數(m^2/s)。

e 為相對於導水係數所計算的裂隙傳輸內寬(m)。

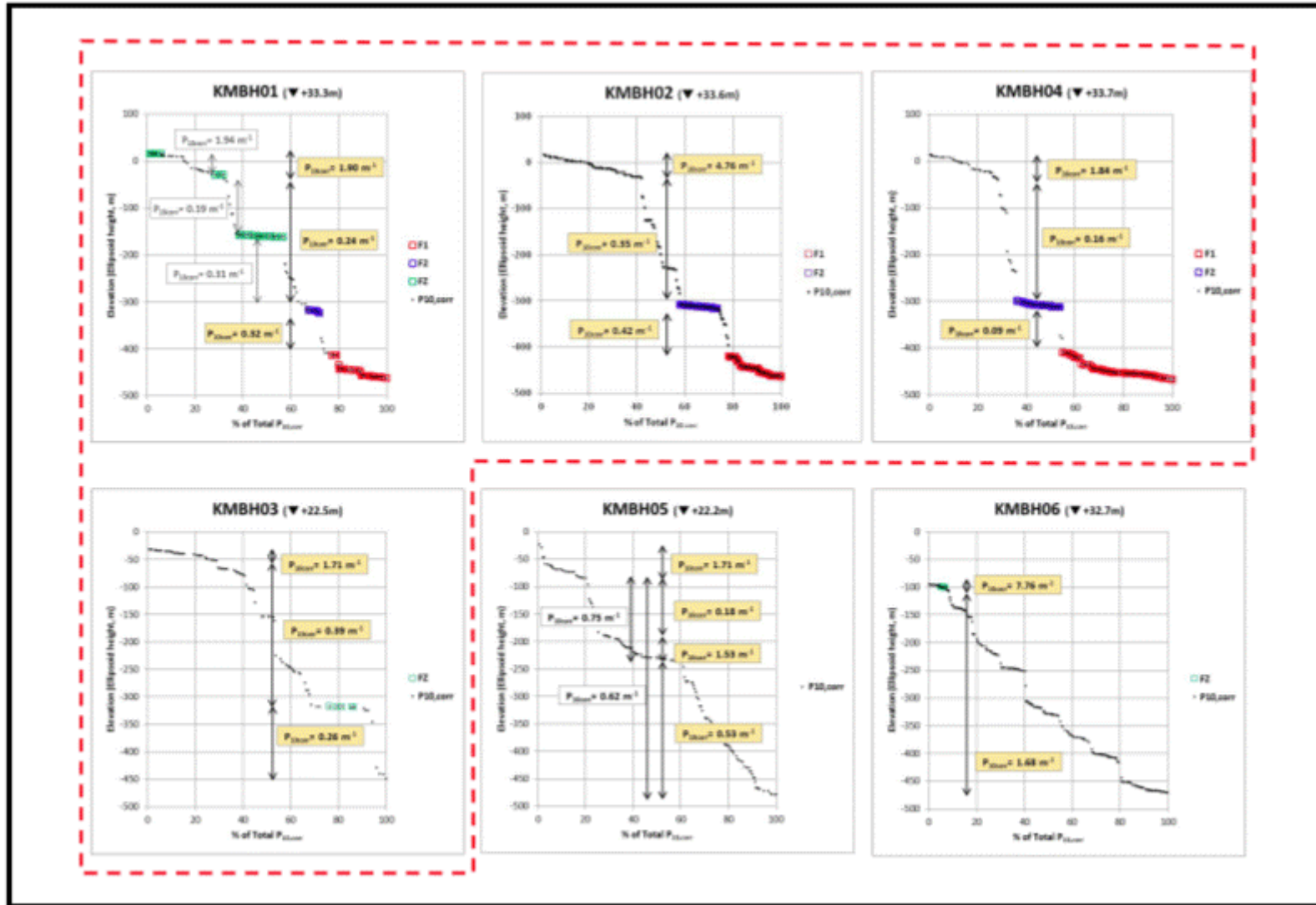


圖 3-63：K 區孔內裂隙密度隨深度之累積百分比

註解：

- ◆ Results provided by Dr. Follin, S., 2015.
- ◆ The CFI (Cumulative Fracture Intensity) plots of KMBH01 to KMBH04 show similar variation pattern verse depth.
- ◆ The liner fracture intensity (P_{10}) is corrected by Terzaghi correction.

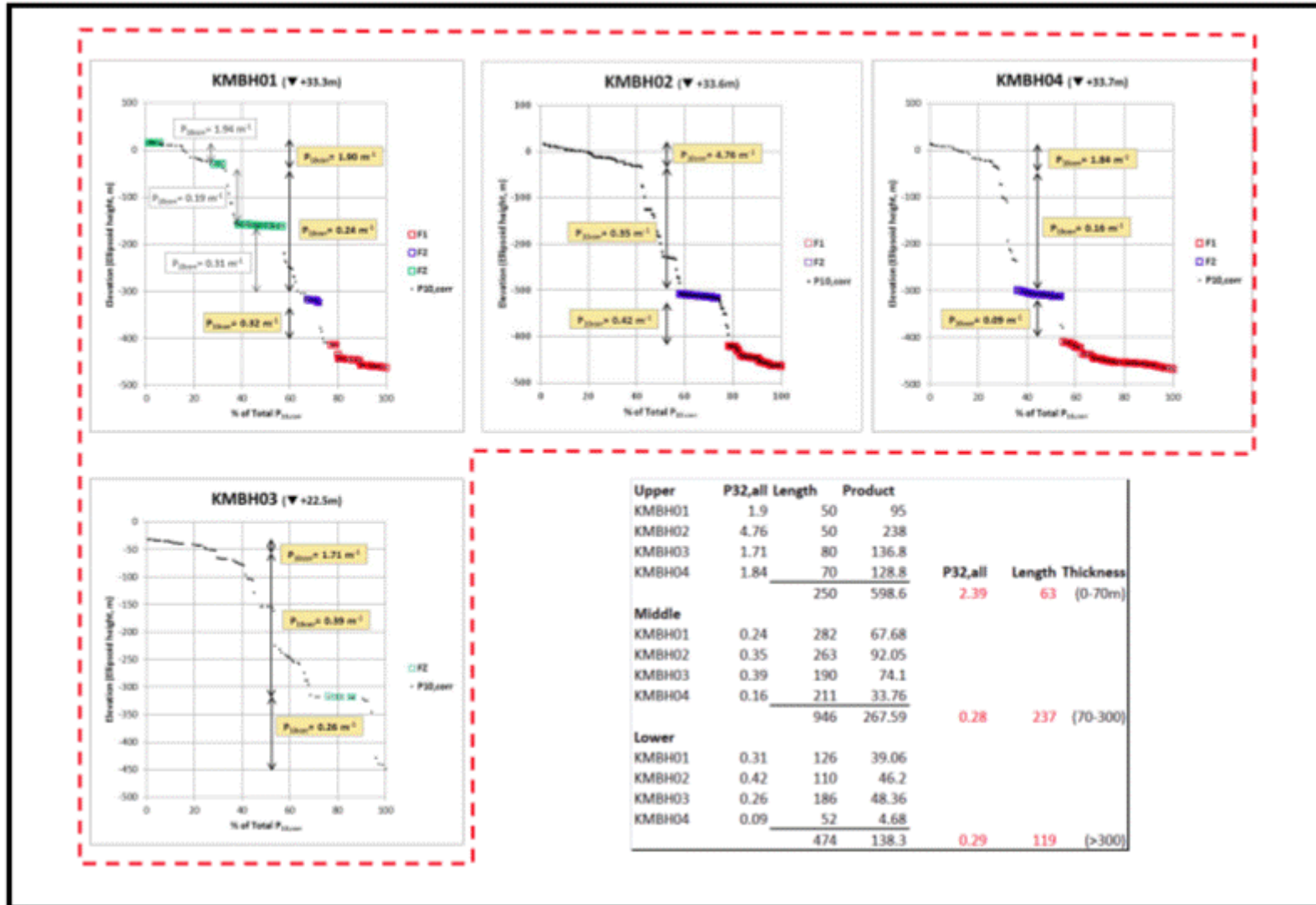


圖 3-64：K 區孔內裂隙密度累積百分比與裂隙區間設定

註解：

- ◆ Results provided by Dr. Follin, S., 2015.
- ◆ Two fracture domains as function of depth, FDMA and FDMB, are proposed and separated around 70 m depth.
- ◆ Fracture volume intensity (P_{32}) is assumed equal to the liner fracture intensity (P_{10})

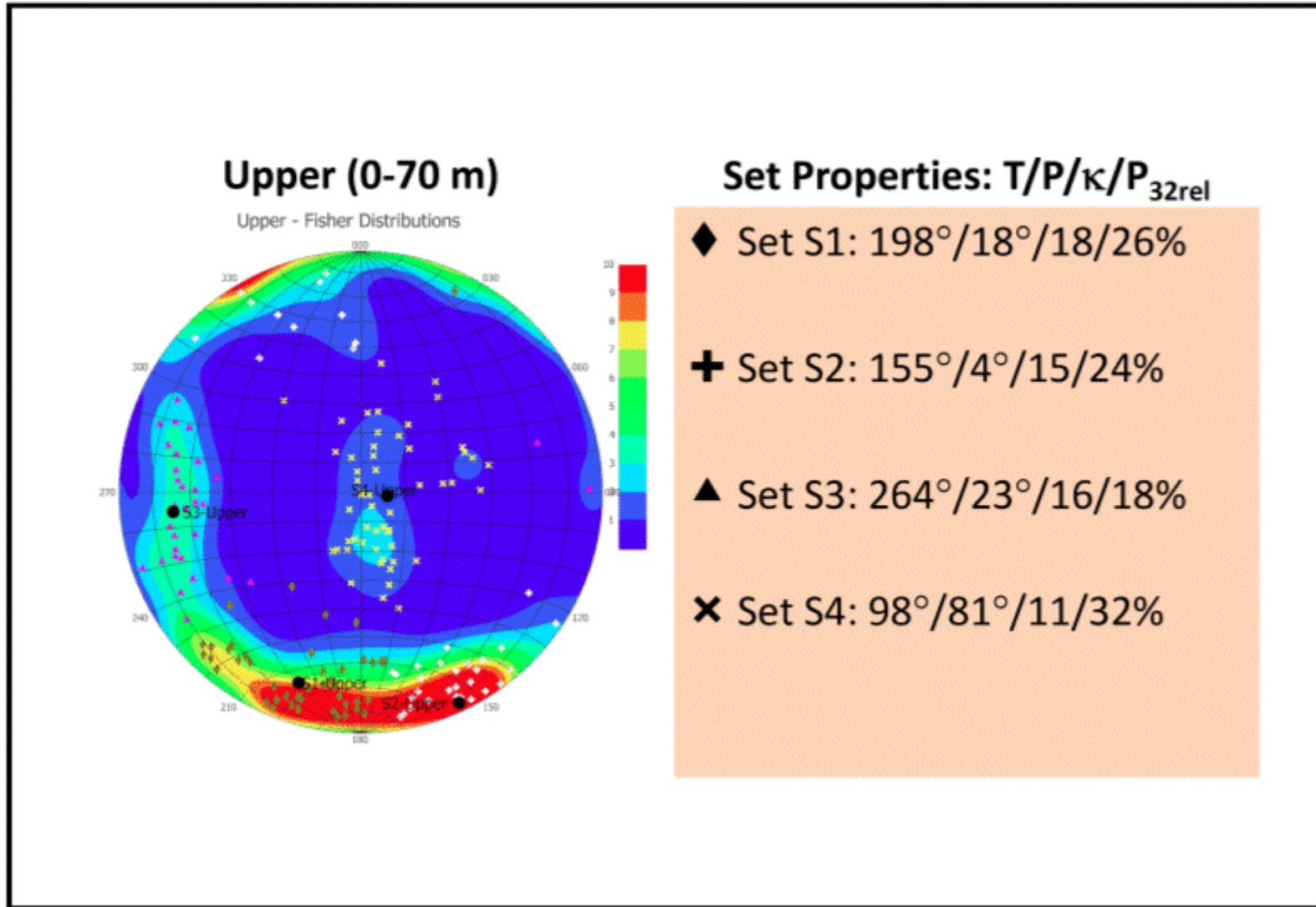


圖 3-65：K區 FDMA 裂隙區間之裂隙叢集分布圖

註解：

- ◆ Results provided by Dr. Follin, S., 2015.
- ◆ FDMA: fracture domain above 70 m depth with $P_{32} \cong 2.4 m^{-1}$

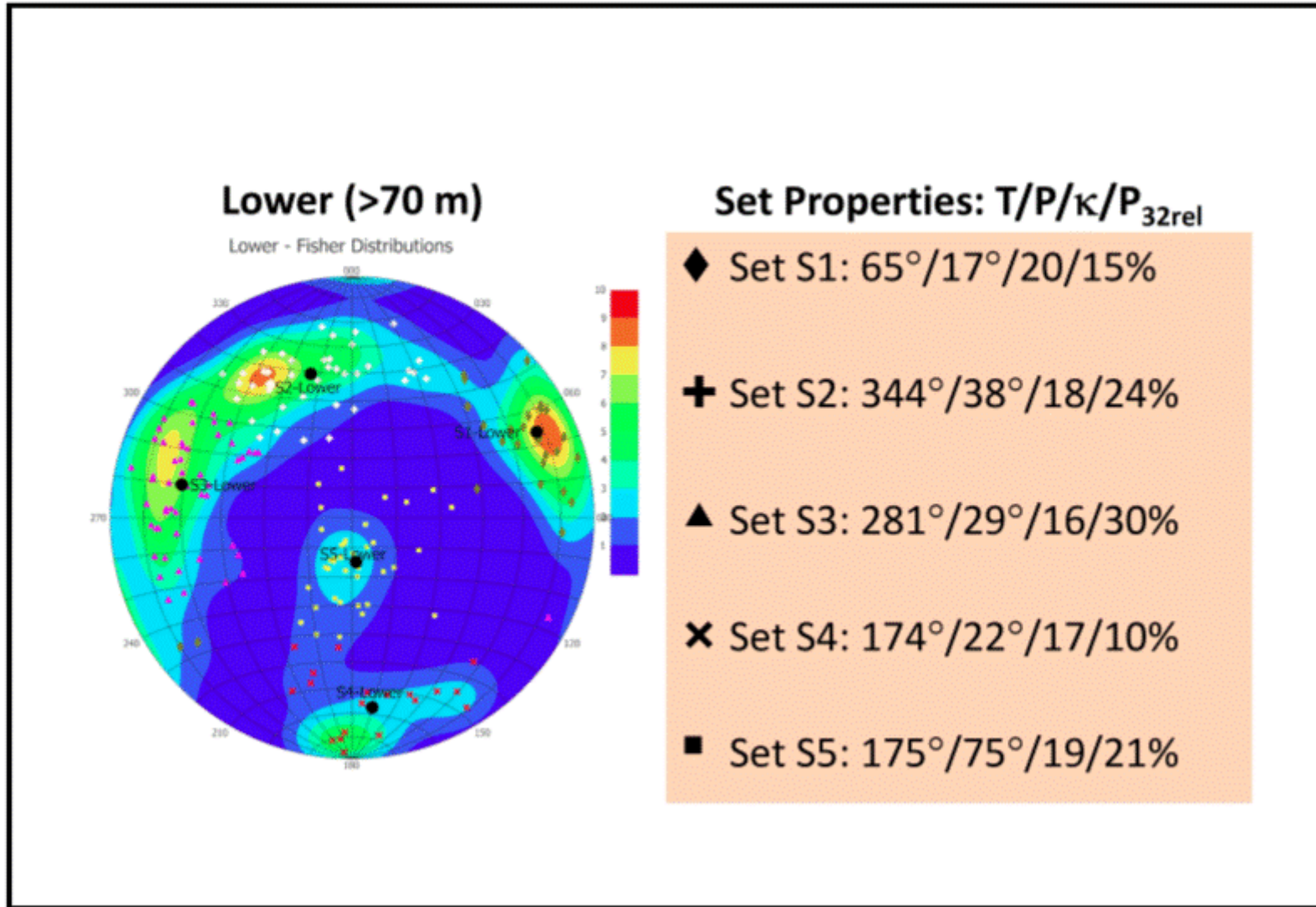
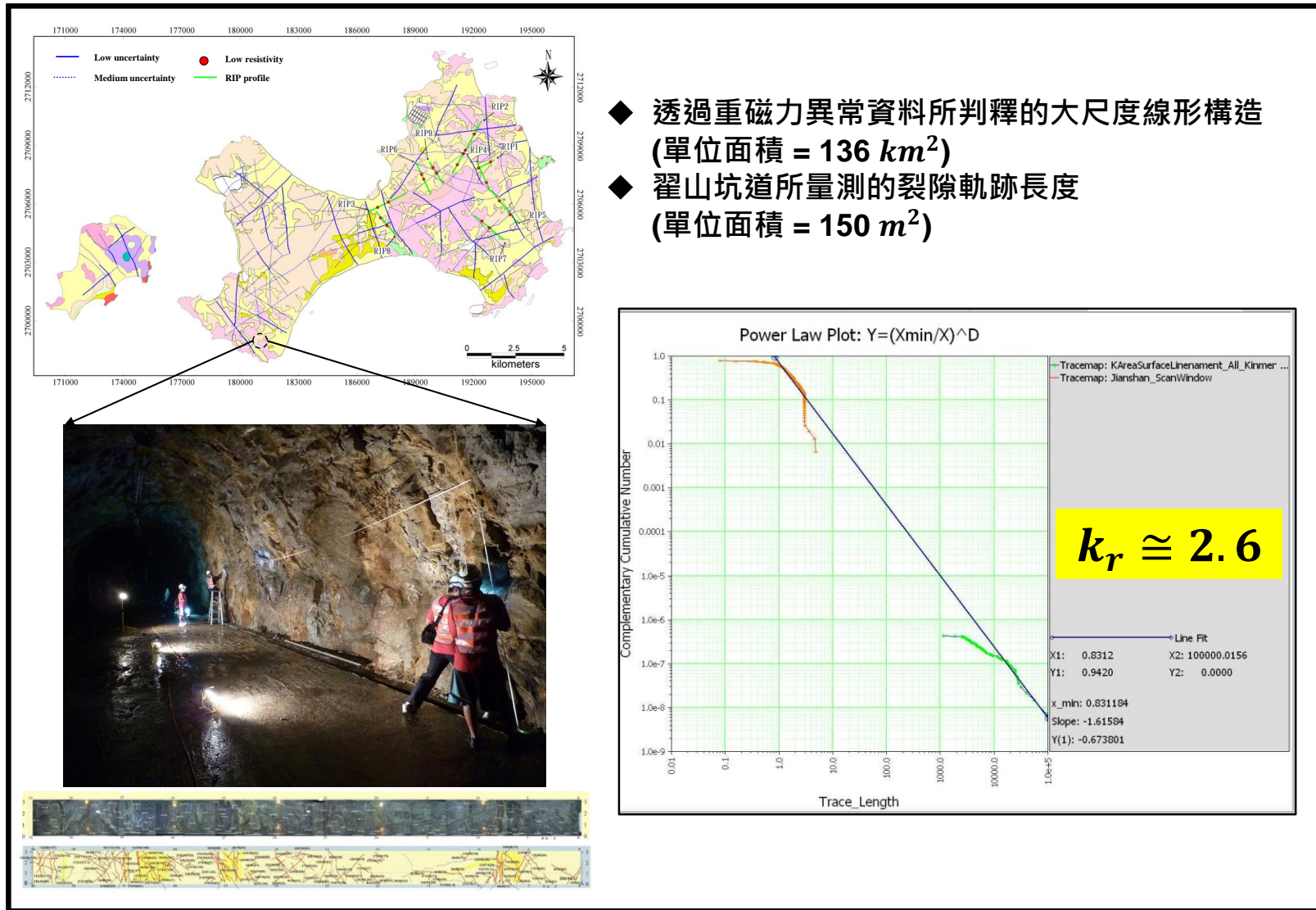


圖 3-66：K區 FDMB 裂隙區間之裂隙叢集分布圖

註解：

- ◆ Results provided by Dr. Follin, S., 2015.
- ◆ FDMB: fracture domain below 70 m depth with $P_{32} \cong 0.3 \text{ m}^{-1}$



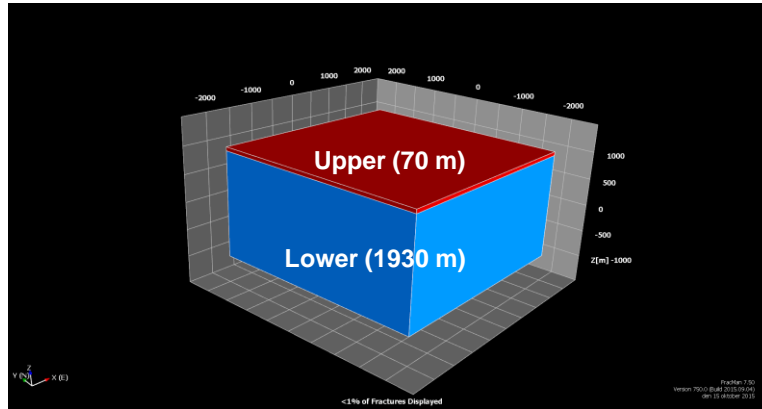
- ◆ 透過重磁力異常資料所判釋的大尺度線形構造 (單位面積 = 136 km^2)
- ◆ 翟山坑道所量測的裂隙軌跡長度 (單位面積 = 150 m^2)

圖 3-67：K 區裂隙尺寸之碎形維度指數值

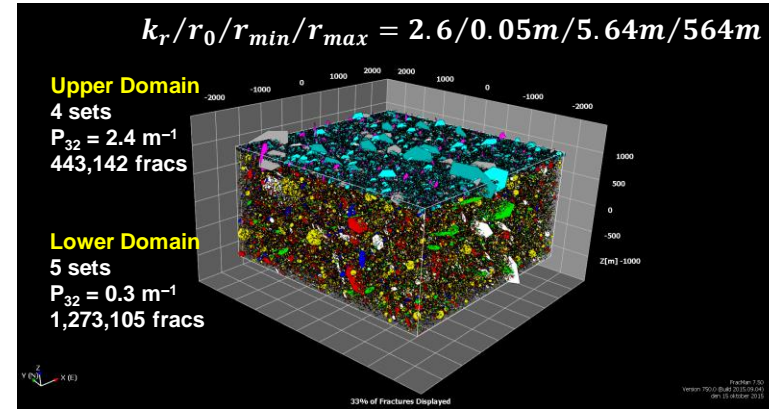
註解：

- ◆ Results provided by Prof. Liou, T.S, 2015.
- ◆ Large-scale lineament data from gravity and magnetic anomaly data (area = 136 km²)(see Figure 3-20)
- ◆ Trace length measurement from Jianshan tunnel (area = 150 m²), which is located at the southwest Kinmen Island.
- ◆ From this analysis, the exponent (k_r) of fractal dimension for K-Area is 'exactly' as 2.6.

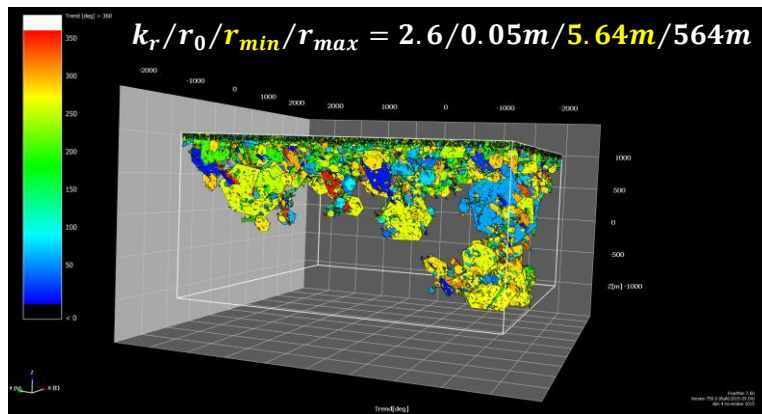
(a) 模型設定大小 = $4 \times 4 \times 2 \text{ km}^3$



(b) 模擬裂隙總數 = 1,716,247 個裂隙



(c) 模型內共425,913 個裂隙連通至地表



(d) 模型內未有連通至地表的裂隙

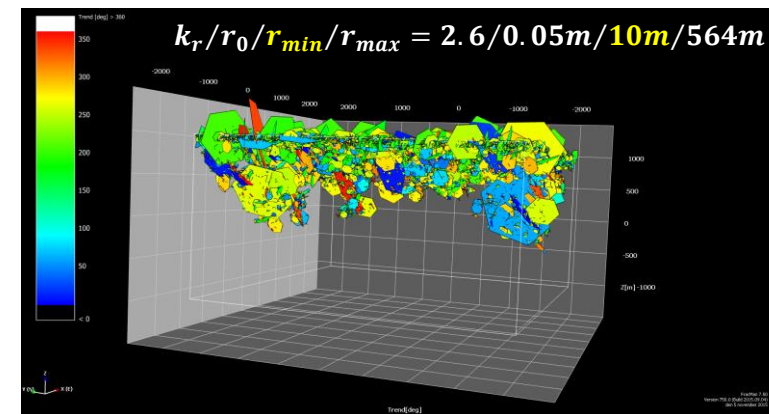


圖 3-68：裂隙網路連通性與裂隙半徑下限門檻值測試範例

註解：

- ◆ Results provided by Dr. Follin, S., 2015.
- ◆ Domain size = 4 km x 4 km x 2 km
- ◆ The value of r_{min} should lower than 5.64 m in order to form fracture connectivity from the target depth to ground surface.

DFN recipe:

(1) Fracture Domain:

After reviewing the BIPs recorded from KMBH01 to KMBH06, all fractures from KMBH01 to KMBH04 are analyzed statistically due to their similar CFI (Cumulative Fracture Intensity) patterns varied with depth (Figure 3-63). Two fracture domains (FDM) are proposed and their corresponding P_{32} are calculated (Figure 3-64):

- ◆ FDMA: fracture domain above 70 m depth with $P_{32} \cong 2.4 m^{-1}$
- ◆ FDMB: fracture domain below 70 m depth with $P_{32} \cong 0.3 m^{-1}$

(2) Fracture Cluster:

Four fracture clusters (sets) are classified for the upper fracture domain (FDMA) with the following statistic characteristics (Figure 3-65) in sequence of Pole_Trend/Pole_Plunge/ κ of Fisher distribution/ $P_{32,rel}$ with $\sum P_{32,rel} = 1$:

- ◆ Cluster-1 (set-1): 198°/18°/18/26%
- ◆ Cluster-2 (set-2): 155°/4°/15/24%
- ◆ Cluster-3 (set-3): 264°/23°/16/18%
- ◆ Cluster-4 (set-4): 98°/81°/11/32%

Five fracture clusters (sets) are classified for the upper fracture domain (FDMB) with the following statistic characteristics (Figure 3-66) in sequence of Pole_Trend/Pole_Plunge/ κ of Fisher distribution/ $P_{32,rel}$ with $\sum P_{32,rel} = 1$:

- ◆ Cluster-1 (set-1): 65°/17°/20/15%
- ◆ Cluster-2 (set-2): 344°/38°/18/24%
- ◆ Cluster-3 (set-3): 281°/29°/16/30%
- ◆ Cluster-4 (set-4): 174°/22°/17/10%
- ◆ Cluster-5 (set-5): 175°/75°/19/21%

(3) Fracture Location:

A Poisson process (random process) is assumed and used to generate the location of each stochastic fracture.

(4) Fracture Size:

For the fracture size distribution, a power-law distribution is recommended with the following parameters:

- ◆ k_r is 2.6.
- ◆ $r_0=0.05$ m (the borehole radius).
- ◆ $r_{max}=564$ m that is corresponding to a rectangular fracture with size as 1000 m x 1000 m.
- ◆ $r_{min}=5.64$ m that is corresponding to a rectangular fracture with size as 10 m x 10 m. After few iterations, the minimum size of circular fracture should be lower than 5.64 m in order to form fracture connectivity from the target depth (assumed to be 500 m depth) to boundary (ground surface)

3.9.2. 流通路徑參數

3.9.2.1. 主要導水裂隙及阻水構造

3.9.2.1.1. 水力傳導係數

關於岩體內破裂帶的水力傳導特性量測方法及結果，與擴尺度效應所需的參數修正方式，請參考第 3.7.2.1 節的詳細說明。關於緻密岩層水力傳導特性量測方法及結果，請參考第 3.7.2.2 節的詳細說明。

3.9.2.1.2. 水力延散特性

依據水力掃瞄試驗結果顯示，KMBH01-02-04 跨孔測試場地下存在四組可能連通的裂隙段(蔣立為等，2006，c4p56)，為了解 F1 構造與 F2 構造的水力延散特性，進行跨孔追蹤稀釋試驗，以計算傳輸參數，其試驗方式及資料解析結果，如圖 3-69(蔣立為等，2009，c2p3, c4p3-p5, c5p2&p9&p10) 及表 3-4 所示(蔣立為等，2009，c4p6&c5p12)；其中，表 3-4 中所列：

(1) F1 構造(太武山斷層)：

於 KMBH04 深度 450 m 至 560 m 封塞段注入示蹤劑(NaCl)，並於 KMBH02 深度 340 m (320 m 至 350 m)封塞段進行追蹤劑濃度的監測，計算結果顯示：

- ◆ 有效孔隙率約為 0.01%
- ◆ 有效流速約為 5.0×10^{-5} m/s
- ◆ 水力擴散係數約為 2.0×10^{-3} m²/s
- ◆ 延散度約為 100 m
- ◆ 佩克萊數為 10

(2) F2 構造(太武山斷層分支裂隙)：

於 KMBH01 深度 320 m 至 350 m 封塞段注入示蹤劑(NaCl)，並於 KMBH04 深度 350 m(320 m 至 380 m)封塞段進行追蹤劑濃度的監測，計算結果顯示：

- ◆ 有效孔隙率約為 0.015%
- ◆ 有效流速約為 1.3×10^{-4} m/s

- ◆ 水力擴散係數約為 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- ◆ 延散度約為 75 m
- ◆ 佩克萊數為 8

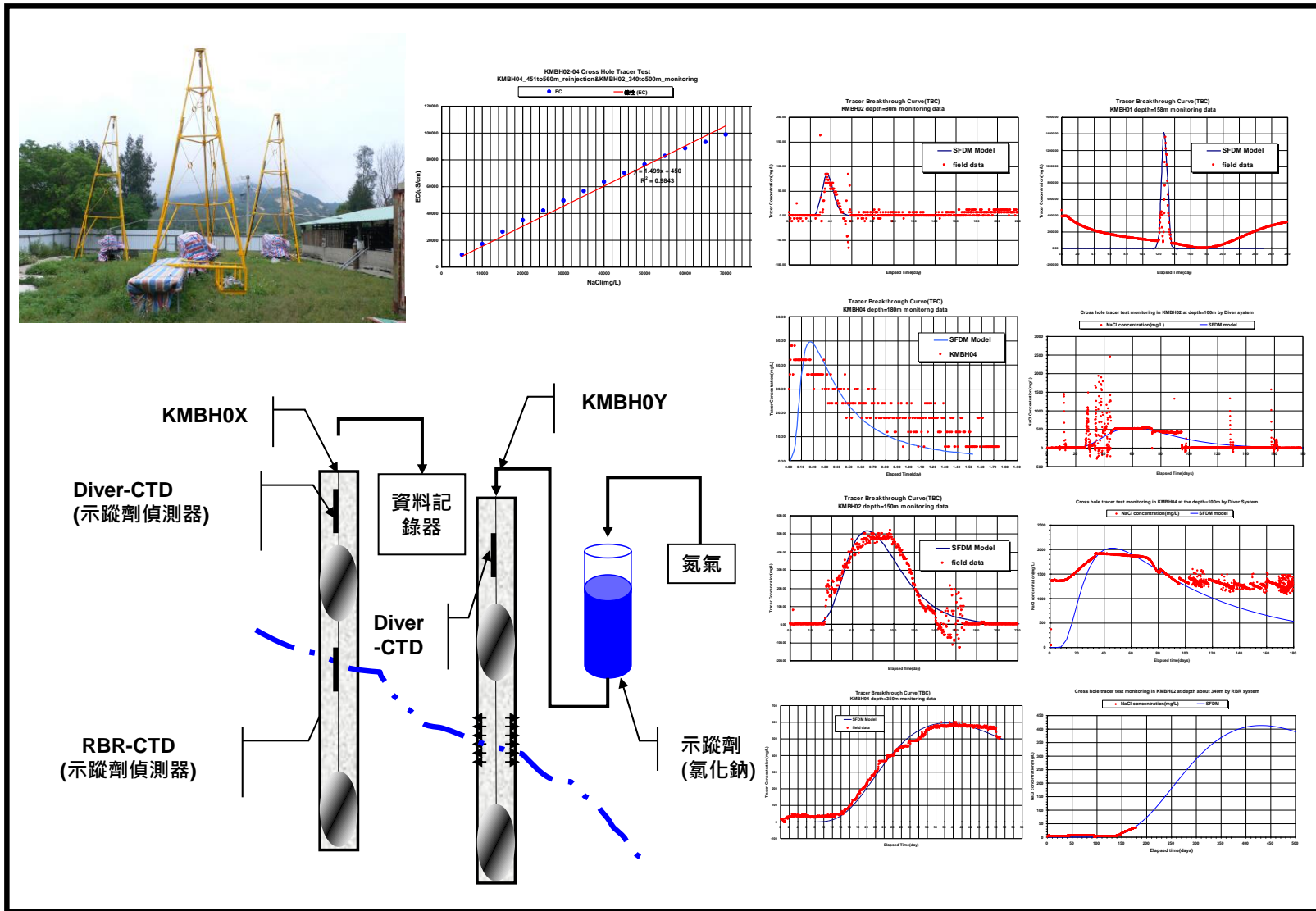


圖 3-69 : KMBH01-02-04 跨孔追蹤稀釋試驗結果圖

註解：

◆ 右圖為跨孔追蹤稀釋試驗結果圖 (Chiang et al., 2009, c4p3&p5, c5p2, p9&p10)。

Chiang et al. (2009) [In Chinese: 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫)－KMBH02-04 斷層帶跨孔追蹤稀釋試驗執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-267 / SNFD-ITRI-TR2009-0267。]

表 3-4：KMBH01-02-04 跨孔追蹤試驗解析結果

示蹤劑(NaCl)注入段 (孔號與深度)	示蹤劑監測段 (孔號與深度)	傳輸參數					
		Movement Length (L, m)	Fracture Porosity (η , %)	Effective Velocity ($v_{\text{effective}}$, m/day)	Dispersivity (α , m)	Mechanic Dispersion Coefficient (D, m ² /day)	Peclet Number ($Pe=L/\alpha$)
KMBH01@170~200m	KMBH02@80m	65	0.01	17.3	0.7	12	93
KMBH01@170~200m	KMBH04@180m	10	0.05	17.3	5	87	2
KMBH01@320~350m	KMBH01@158m	315	0.007	24.7	0.1	2.5	3150
KMBH01@320~350m	KMBH02@150m	220	0.007	24.7	13	321	17
KMBH01@320~350m	KMBH04@350m	630	0.015	11.5	75	863	8
KMBH04@450~560m	KMBH02@100m	1300	0.01	17	100	1700	13
KMBH04@450~560m	KMBH02@340m	1000	0.01	1.73	100	173	10

註解：

- ◆ 水動力延散係數(hydrodynamic dispersion coefficient) = 有效分子擴散係數(effective molecular diffusion coefficient) + 機械延散係數(mechanic dispersion coefficient, D)；Bear and Verruijt(1987, p165)。
- ◆ 機械延散係數(mechanic dispersion coefficient, D)(Bear and Verruijt, 1987, p161&p163)，亦稱為水力擴散係數(hydraulic diffusion coefficient)(Chiang et al., 2009, c5p11)或水力延散係數(hydraulic dispersion coefficient)(Liou, 2009, c4p7)。

$$D \cong \alpha \times v_{\text{effective}} = \alpha \times \frac{\text{Darcy Velocity}}{\eta}$$

資料來源：Chiang et al. (2009, c4p6&c5p12)

Bear and Verruijt (1987) [Bear, J., and Verruijt, A. (1987), Theory and Applications of Transport in Porous Media: Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel, Boston.]

Chiang et al. (2009) [In Chinese: 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫)－KMBH02-04 斷層帶跨孔追蹤稀釋試驗執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-267 / SNFD-ITRI-TR2009-0267。]

Liou (2009) [In Chinese: 劉台生(2009)，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(97~99 年度計畫)－KMBH01-04 試驗場址之自然梯度示蹤劑試驗數據分析，中正大學執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-268 / SNFD-ITRI-TR2009-0268。]

3.9.2.2. 離散裂隙網路

3.9.2.2.1. 離散裂隙導水特性

關於 DFN 所產生的離散裂隙，其對應的導水特性，請參考第 3.9.1.2 節說明。

3.9.2.2.2. 離散裂隙內寬

關於 DFN 所產生的離散裂隙，其對應的裂隙(傳輸)內寬，請參考第 3.9.1.2 節說明。

3.9.3. 吸附及擴散

母岩對核種的吸附特性及核種在母岩內的擴散係數，是影響核種傳輸特性的兩大因素；對於低吸附性的核種，核種在母岩的擴散深度會比高吸附性核種更深(JNC, 2000, ch.3.2.4.3)。此兩個特性參數，與母岩的特性及所處環境息息相關，因此，只有在場址特性調查階段，才能夠確定其數值範圍。

實驗室核種試驗主要包含批次吸附試驗(圖 3-70)及管柱擴散實驗(圖 3-71)等兩大類；主要目的在量測岩樣吸附核種能力的特性參數(K_d)，及核種在岩體內擴散能力的傳輸參數(D_e , effective porous diffusion coefficient)。目前研究重點結論，摘述如下：

(1) K 區花崗岩粉碎樣品對 Cs 有比 Se 較大的吸附能力，約大一個數量級；對 Cs 而言，K 區花崗岩粉碎樣品在氧化環境下，有較大的吸附能力；對 Se 而言，K 區花崗岩粉碎樣品在還原環境下，有較大的吸附能力(王竹方等，2015, ch.5.1)：

(a) 在氧化環境下：

- 在 pH 介於 7.7 至 9.9 ($ave \cong 8.3$)，及 Eh 介於 103 至 687 ($ave \cong 277$) mV 的實驗條件下，Cs 的 K_d 值約介於 11 至 111 ($ave \cong 36$) mL/g 之間。

- 在 pH 介於 6.1 至 8.5 (*ave* \cong 7.2), 及 Eh 介於 105 至 487 (*ave* \cong 272) mV 的實驗條件下, Se 的 K_d 值約介於 0.4 至 16 (*ave* \cong 4) mL/g 之間。

(b) 在還原環境下:

- 在 pH 介於 7.1 至 9.9 (*ave* \cong 8.3), 及 Eh 介於 -687 至 -105 (*ave* \cong -279) mV 的實驗條件下, Cs 的 K_d 值約介於 8 至 67 (*ave* \cong 25) mL/g 之間。
- 在 pH 介於 6.1 至 8.5 (*ave* \cong 7.2), 及 Eh 介於 -687 至 -105 (*ave* \cong -268) mV 的實驗條件下, Se 的 K_d 值約介於 2.8 至 30 (*ave* \cong 12) mL/g 之間。

(2) 經過接近 1,000 天的薄片擴散實驗(K 區花崗岩)(圖 3-72), 初步的實驗發現碘離子的有效擴散係數 (D_e) 大約在 $6 \text{ to } 10 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$; 而 Cs 與 Se 的有效擴散係數約界 $2 \text{ to } 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ (王竹方等 14 人, 2015, ch5.4)。

批次吸附試驗

1 g 固相樣品
+
30 mL 合成地下水/海水
 C_0 核種濃度



120 rpm 14 days
+
10,000 rpm 5 min



$$K_d = \frac{\text{單位固相重量所吸附的核種重量}}{\text{單位水體溶解的核種重量}} = \frac{(C_0 - C_{eq})V}{C_{eq}M} = \frac{C_0 - C_{eq}}{C_{eq}} \frac{V}{M}$$

K_d = 分配係數, [mL/g]。

C_0 = 吸附前的水體核種濃度, [mole/L]。

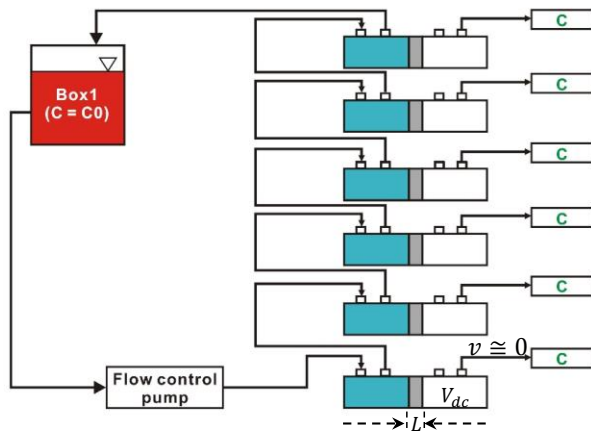
C_{eq} = 吸附後核種於水體中的平衡濃度, [mole/L]。

M = 固相重量, [g] = 1

V = 水體體積, [mL] = 30

圖 3-70：批次吸附試驗示意圖

管柱擴散實驗



L = column's length, [m]; A = cross area of column, [m^2]
 V_{dc} = volume of diffusive cell (replaced with fresh water every 24 hr), [m^3]

Type 1: Concentration vs. time:

$$\frac{C(L, t)}{C_0} = 1 - \frac{x}{L} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{D_a n^2 \pi^2 t}{L}\right) \right]$$

➡ Curve fitting to determine D_a

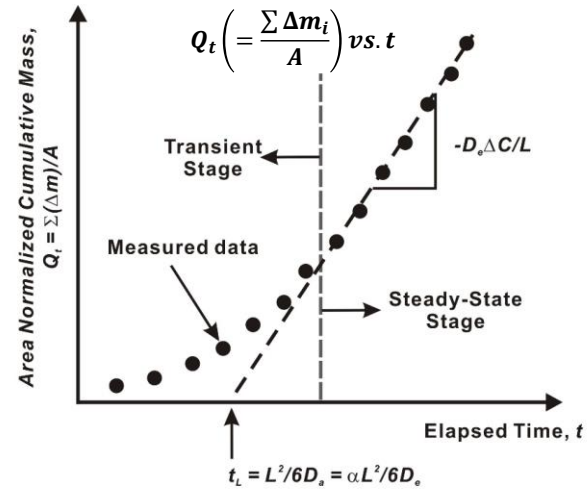
$$D_a = \frac{L^2}{6t_L} = \text{視擴散係數}$$

$$D_e = \alpha D_a = \frac{\alpha L^2}{6t_L} = \text{有效孔隙擴散係數}$$

$$R_d = \frac{D_e}{\epsilon D_a} = \text{遲滯係數} = 1 \text{ for free species}$$

$$\alpha = \epsilon R_d = \text{岩石容積因子}$$

$$t_L = \text{延遲時間}$$



Type 2: Mass accumulation flux (Q_t) vs. time:

$$Q_t \equiv \frac{Q}{A} = D_e \int_0^t \left(\frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right)_{x=L} dt$$

$$D_e = \left(\frac{L \sum \Delta m_i}{-\Delta C A \sum \Delta t_i} \right)_{steady\ state} = \left(\frac{L \sum \Delta m_i}{C_0 A \sum \Delta t_i} \right)_{steady\ state} = \frac{V_{dc} L}{A t_s}, [m^2/s]$$

$$\frac{1}{t_s} \equiv \frac{\left(\frac{\sum \Delta m_i}{\sum \Delta t_i} \right)_{steady\ state}}{(\Delta m)_{steady\ state}} = \frac{\left(\frac{\sum \Delta m_i}{\sum \Delta t_i} \right)_{steady\ state}}{V_{dc} C_0}, [1/s]$$

t_s = 穩態持續時間

Steady state

= system after the BTC (Break Through Curve) of the C/C_0 vs. t

Source: Crank, 1975, p49 to p52; Shackelford and Moore, 2013, p141; Marimon, 2002, p18 to p22; Eriksen and Jacobsson, 1984, p9

圖 3-71：管柱薄片擴散試驗示意圖

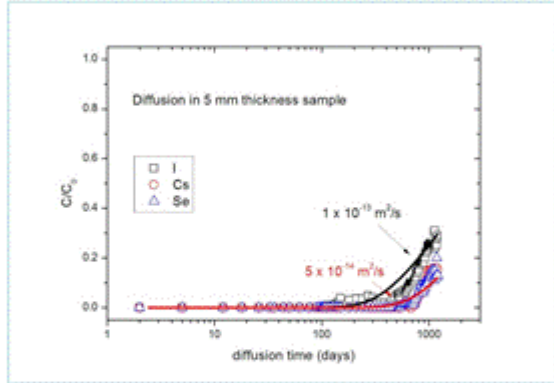
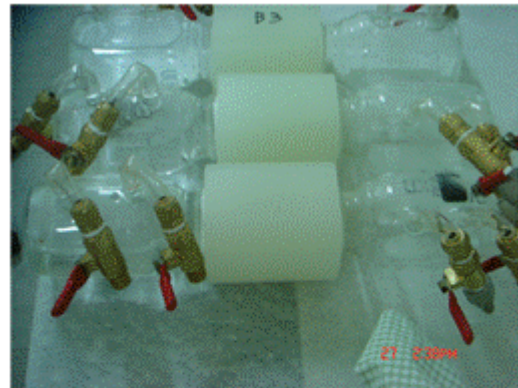
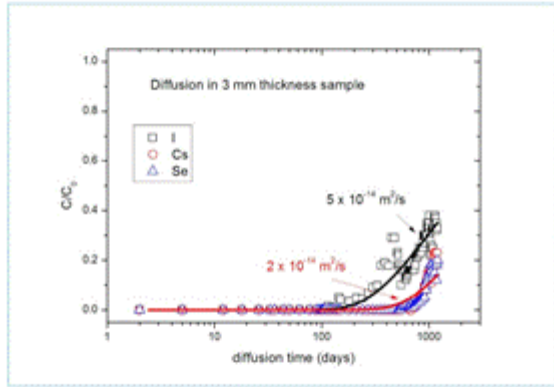
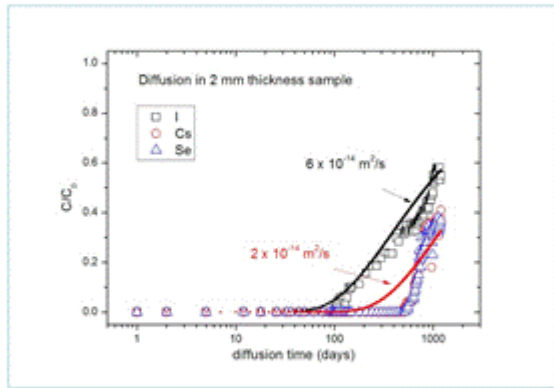


圖 3-72：管柱薄片擴散試驗結果圖

註解：

- ◆ (a), (b)及(c)三圖為薄片擴散試驗(I, Se, Cs)結果，由上而下，岩石薄片厚度分別為 2 mm、3 mm 及 5 mm。
- ◆ 經過約 1,000 天的擴散實驗，碘離子的有效擴散係數(D_e) $6 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 至 $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ；而 Cs 與 Se 的有效擴散係數約界 $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 至 $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

資料來源：Wang et al. (2015, ch5.4)

Wang et al. (2015) [In Chinese: 王竹方、王本誠、楊正焰、王清海、謝易恭、張芳瑜、姜筑玲、黃俊強、顏于鈞、賴妍辰、洪薪婷、陳以諾、黃玟玲、黃國通(2015)，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(101~103 年度計畫)－實驗室岩體核種遷移與傳流試驗，清華大學執行/工研院及台電公司委託，SNFD-NTHU-90-309 / SNFD-NTHU-TR2015-0309。]

3.10. 表二的使用範例

參考案例是台灣在尚未進入核廢料最終處置地評選階段前的虛擬案例，供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力。

本報告為加強台灣參考案例表二(地質概念模式及地質特性參數)的使用效率，確保不同使用者對表二內容資訊有共同的認知，以及確保資訊已充分可供進行現階段技術發展的需求。因此，特別針對表二相關資訊的使用方式，包含主要流動路徑及離散裂隙網路等，進行模擬範例說明。這些範例說明，僅供做為表二內容資訊的補充說明文件；任何涉及處置設施設計及其安全評估所需的數值模擬工作，並非本報告探討主題。

3.10.1. 多孔介質地下水流場模擬範例

- ◆ 根據表二地質單元(R、D及F)的定義(表 2-1及表 2-2)及其在空間上的分布，與地形高層的數值(如圖 3-1所示)，可建構 K區地質單元的網格分布，如圖 3-73所示；共使用將近一百萬個網格。
 - 因地表數值高層(Digital Elevation Model, DEM)數據過多，無法列於表二外，故，以色階形式展示於圖 3-1。
 - 因 R1至 R6的水力傳導特性類似，故可視為同一水力單元。
- ◆ 根據表二提供的 K區平均入滲量、溫度、地溫梯度等資訊，及考量 K區西北部的中國大陸地形影響(詳第 3.7.1.4節說明)，設定其起始及邊界條件，如圖 3-74所示。
- ◆ 根據表二提供的 K區各地質單元水之力傳導係數建議值，設定其水力傳導係數值。
- ◆ 使用商業版模擬器 TOUGH2 (Zhang et al., 2008, p67)，地下水流場模擬如圖 3-75所示。
- ◆ 地下水流動特性的模擬結果，說明如下：
 - F1為地下水流動速度最快區域，於 F1中放入非反應性示蹤劑測試，示蹤劑可於數十年內傳輸到地表(圖 3-76)。
 - F2因尺度較小，對於區域水流影響，不若 F1明顯。
 - 水流在 R0中的流動快速，流速與流向與地表高層有關(圖 3-77)。
 - 水流在 R#流速極為緩慢，水流方向由水壓及邊界條件主導。
 - 水流在 D#流速極為緩慢(圖 3-77)，主要原因為極低的水力傳導係數所致。圖 3-77為 C-C'剖面(圖 3-73)的地下水流場模擬結果，圖中顏色較深的區域，代表該區域的流速較低。

本章節所建立模型，僅為測試參考案例表二中之參數是否充足以及是否可用，不同模擬情境(scenario)，或地下水邊界條件的設定不同(詳第 3.7.1.4節說明)，可能得到不一樣的模擬結果。

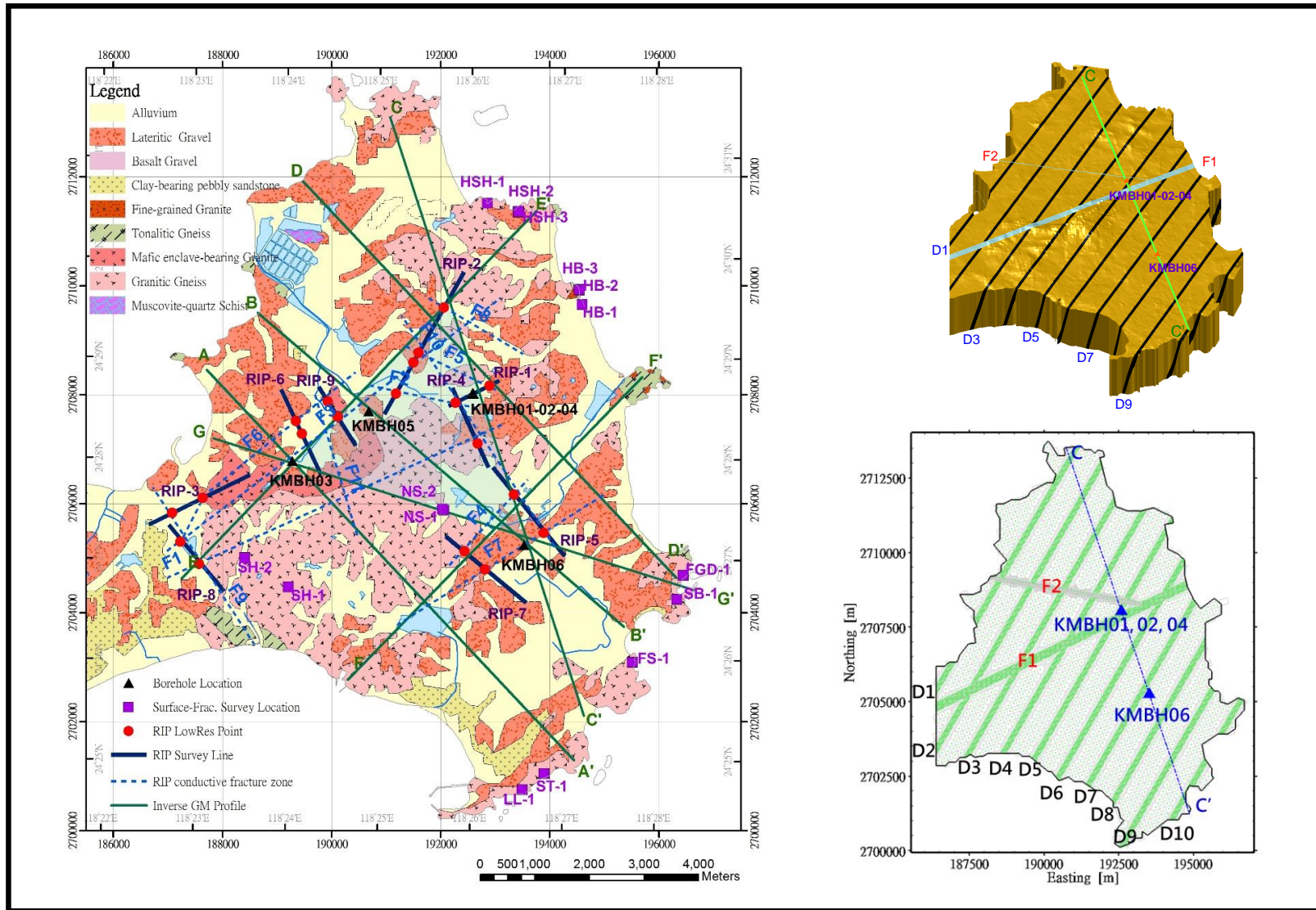


圖 3-73：K 區地下水流場(多孔介質)模擬之地質單元及數值網格設定

註解：

- ◆ 左圖為 K 區地質圖及 1999-2010 年調查地點位置圖 (Lin et al., 2012, c4p9)。
- ◆ F1 構造係指太武山斷層。
- ◆ F2 構造係指太武山斷層的分支破裂帶。
- ◆ D1-D10 代表輝綠岩脈。

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委託，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-090。]

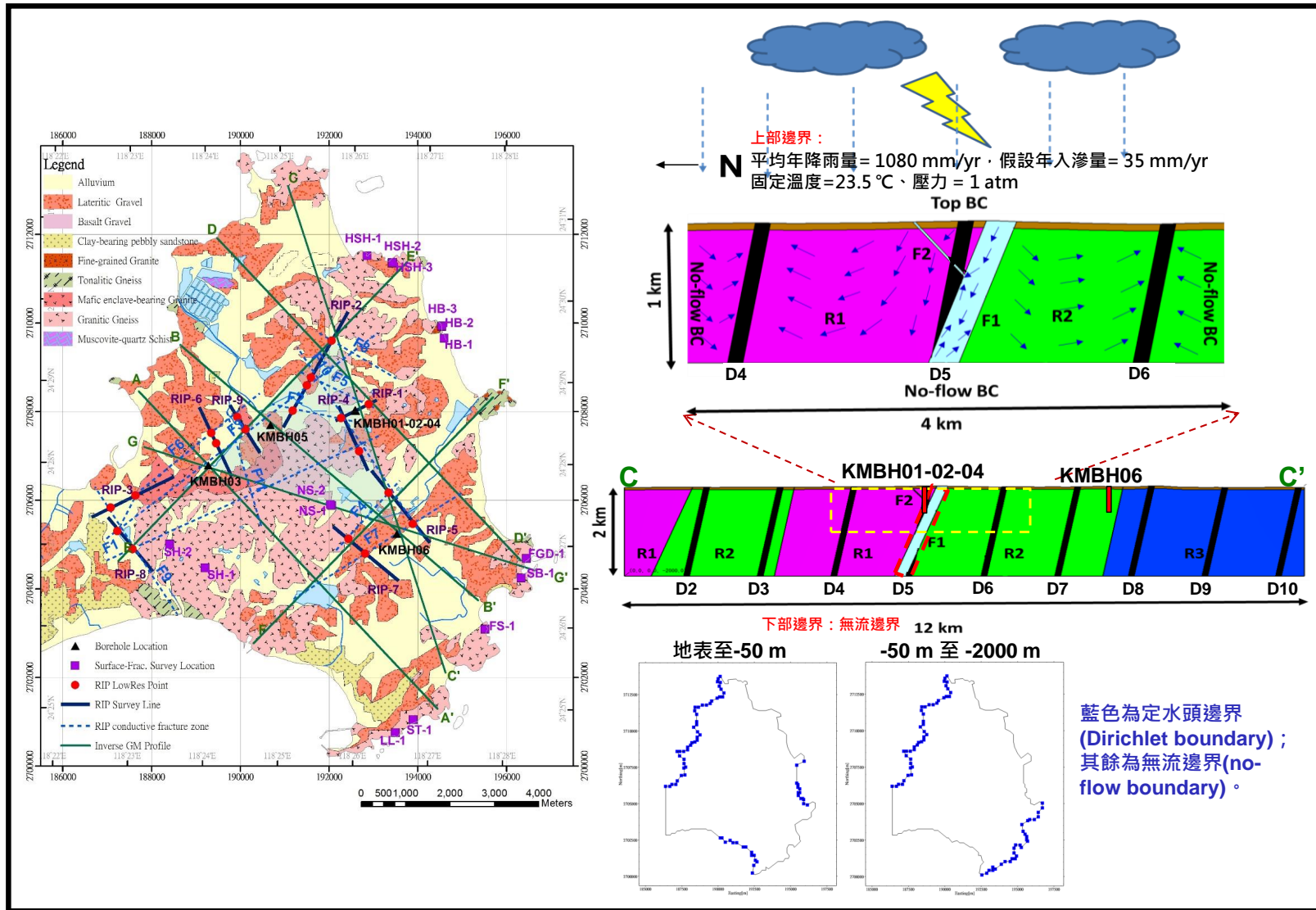


圖 3-74：K 區地下水流場(多孔介質)模擬之起始及邊界條件設定

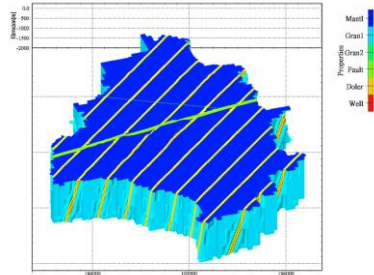
註解：

- ◆ 左圖為 K 區地質圖及 1999-2010 年調查地點位置圖 (Lin et al., 2012, c4p9)。
- ◆ 右上圖為起始及邊界條件，以 CC'剖面為例。
- ◆ 右下圖為不同深度的邊界條件。

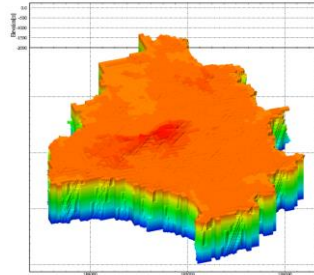
Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委託，

地質模型

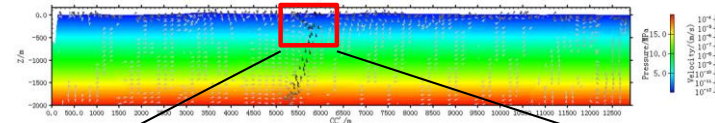
岩體類型



地形高程

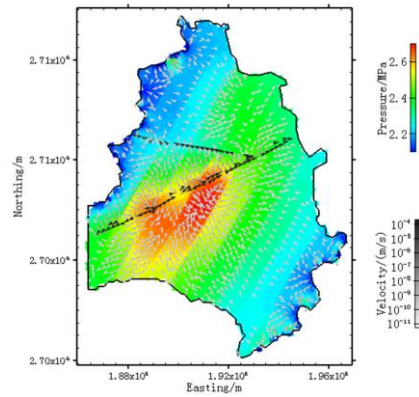


CC' 剖面之地下水的壓力分布、流速及流向



不同深度(水平切面)地下水的壓力分布、流速及流向

深度 200 m



深度 700 m

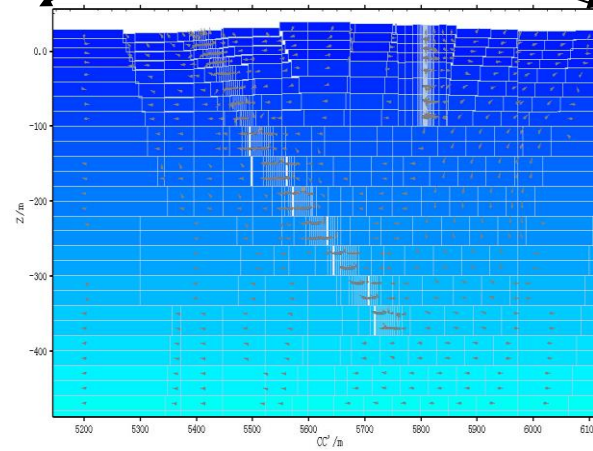
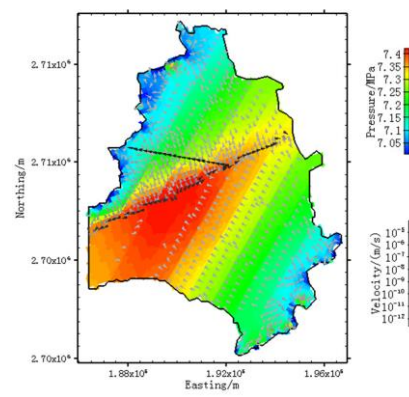


圖 3-75：K 區多孔介質模擬結果範例_主要導水裂隙地下水流特徵

註解：

- ◆ 左上圖為 K 區水文地質單元及高程分布。
- ◆ 左下圖為 K 區 200 m 及 700 m 深度地下水流方向及大小的模擬結果。
- ◆ 右圖則為 CC' 剖面的地下水流方向及大小的模擬結果。

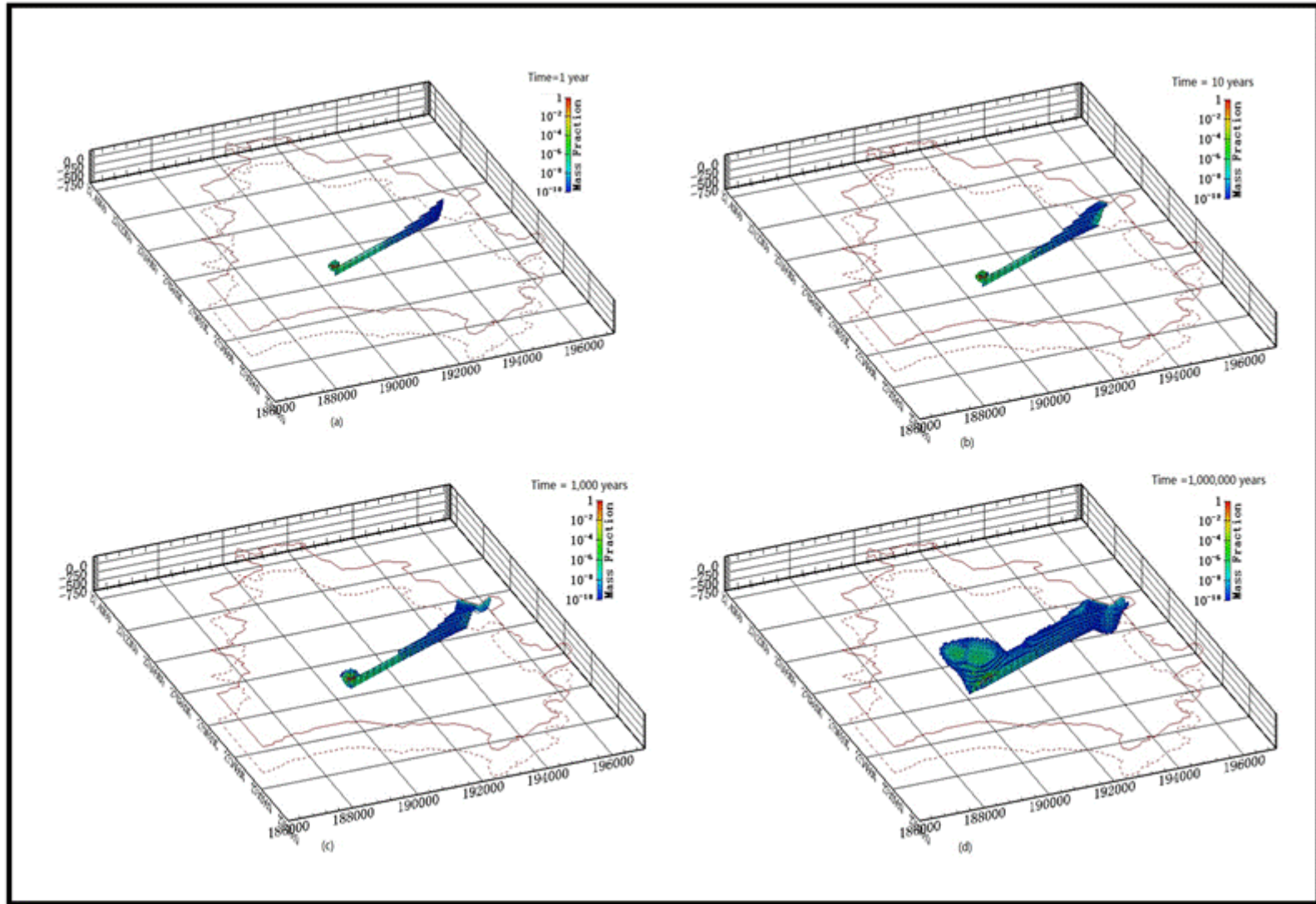


圖 3-76：K 區多孔介質模擬結果範例_非反應性示蹤劑傳輸特徵

註解：

- ◆ Transport of non-reactive tracer at the simulation of 1, 10, 100 and 1,000,000 years.
- ◆ The tracer reaches the surface and the coastal boundaries quickly at 1 and 10 years.
- ◆ The tracer accumulate at the surface and the boundary after 10 years.

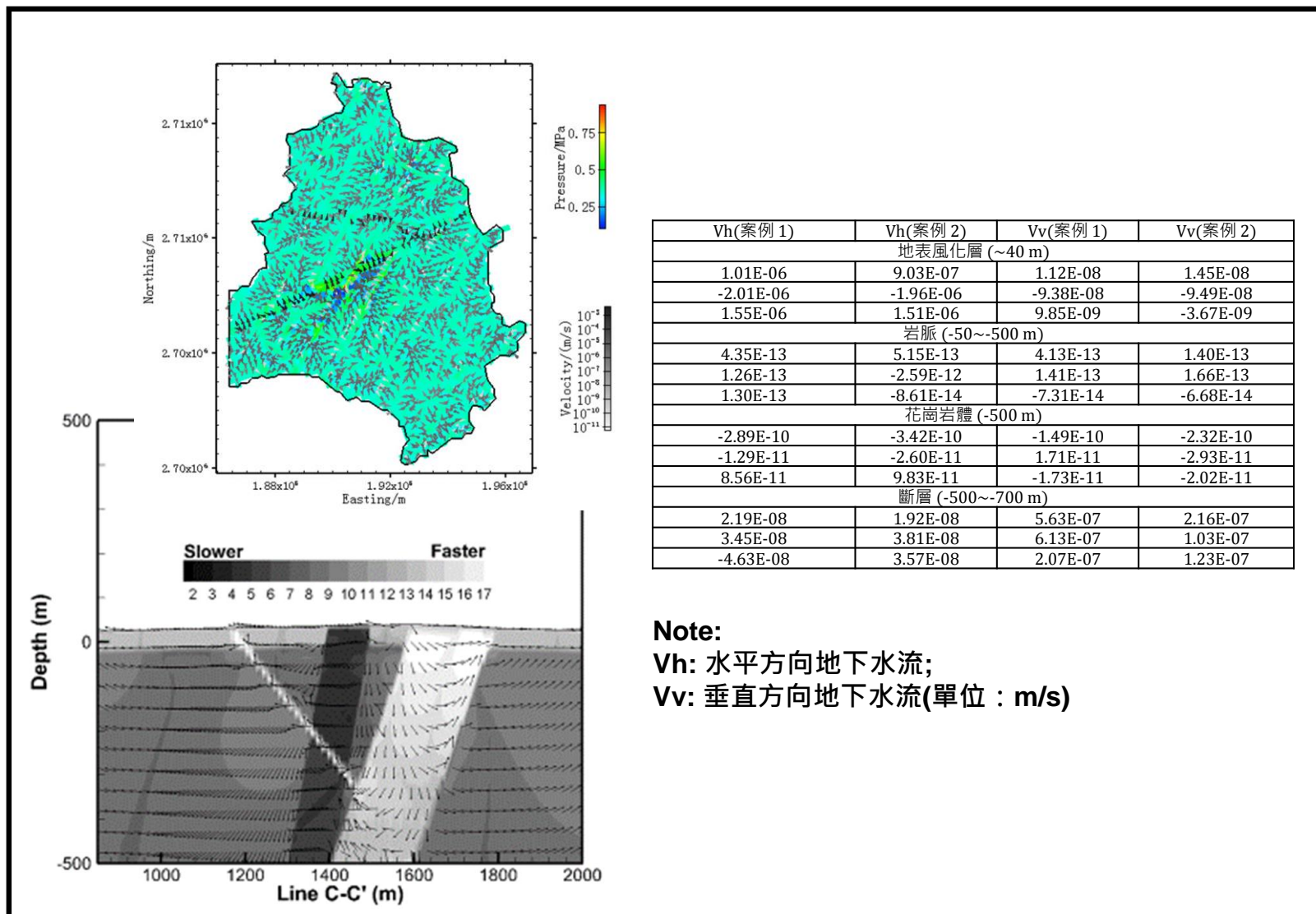


圖 3-77：K 區多孔介質模擬結果範例_C-C'剖面之地下水流速

註解：

- ◆ The upper-left figure is a plane view shows the groundwater flow direction and magnitude at the depth of regolith region.
- ◆ The lower-left figure is a vertical view shows the groundwater flow direction and the relative velocity near TaiWuShan fault along CC' profile.
- ◆ The RHS table shows the magnitude of flow velocities in different rock unit from two simulation cases.

3.10.2. 離散裂隙網路模擬範例

將第 3.9.1.2 節關於 K 區離散裂隙網路參數集的建議值，應用至 K 區的範圍，並進行 r_{min} 及 r_0 參數的敏感度測試，圖 3-78 至圖 3-80 為 FracMan(version 7.5) 產出的測試結果，包含 DFN 的統計實現、自目標深度(500 m)至地表的裂隙聯通性，以及在 500 m 深度的裂隙軌跡圖。

- ◆ 由圖 3-78 可知，該組參數的設定，已可產生一組 DFN 具有 2,690 個裂隙(表 3-5)，自目標深度(500 m)聯通至地表，但與虛擬處置場的處置坑道(圖 3-78(d))並無裂隙相交；詳細的離散裂隙網路參數集，請參考圖 3-78 的註解說明。
- ◆ 除了調整 r_{min} 自 5.64 m(圖 3-78)至 4.5 m(圖 3-79)外，圖 3-79 及圖 3-78 採用相同的離散裂隙網路參數集。由圖 3-79 可知，該組參數的設定，可產生一組 DFN 具有 3,517 個裂隙(表 3-5)，自目標深度(500 m)聯通至地表，且有數個裂隙相交於預設區域(圖 3-79 (d))。值得注意的是，此時 DFN 的總裂隙數已高達 8 百萬個以上，在數值運算上已略現負擔。
- ◆ 根據前述圖 3-79 及圖 3-78 的敏感度測試結果，嘗試持續下調 r_{min} 值至 2.8 m，但在 72 小時內尚無法完成 DFN 的計算。因此，嘗試調整 r_0 值；理論上，調大 r_0 值，將使得有更多的機率產生較大尺寸(r_{min} 至 r_{max})的裂隙，對於目標深度至地表邊界的聯通性需求，應會產生更好的裂隙聯通性。
 - 除了調整 r_0 自 0.05 m(圖 3-79)至 0.1 m(圖 3-80)外，圖 3-80 及圖 3-79 採用相同的離散裂隙網路參數集。由圖 3-80 可知，該組參數的設定，可產生一組 DFN 具有 13,341 個裂隙(表 3-5)，自目標深度(500m)聯通至地表，且有多個裂隙相交於預設區域(圖 3-80(d))。值得注意的是，此時 DFN 的總裂隙數已高達 1 千 3 百萬個以上，在數值運算上已是沉重的負擔。

- 就計畫現階段的技術發展測試需求，圖 3-80 所產生之 DFN 的統計實現、自目標深度(500 m)至地表的裂隙聯通性，以及在 500 m 深度的裂隙軌跡，已能滿足需求。因此，針對參考案例(虛擬案例)表二之離散裂隙網路參數集中，用以描述裂隙尺寸大小函數之參數的建議值為： r_0 為 0.1 m、 r_{min} 為 4.5 m，及 r_{max} 為 564 m。當然，將來若針對真實的場址評估需求，必須要有功能更強大的電腦來產生 DFN 模擬計算。

表 3-5：冪函數分布之裂隙尺寸參數對 DFN 統計實現的敏感度測試結果

參數	圖 3-78	圖 3-79		圖 3-80
r_0	0.05 m	0.05 m		0.05 m
r_{min}	5.64 m	4.5 m		2.8 m
Number of Fracture A	4,916,801	8,743,518	Very heavy numerical burden. Stop simulation after 72 hours, need a higher speed computer to run DFN simulation.	13,297,869
Number of Fracture B	1,708,965	2,834,750		5,158,373
Number of Fracture C	2,690	3,517		13,341

註解：

- Number of Fracture A: the total number of all DFN fractures generated by the proposed DFN recipe.
- Number of Fracture B: the number of fractures that connect the target depth (500 m) to the surface ground.
- Number of Fracture C: the number of fracture that intersect the surface at 500 m depth.
- The specification of computer used to run DFN simulation:

工作站	Dell Precision T7600 Workstation Technical Specifications
處理器	Two Intel® Xeon® processor E5-2600 family with six cores
操作系統	Genuine Windows® 7 Professional 64-Bit
主機板	Intel® C600 series
記憶體	128 GB
繪圖顯示卡	NVIDIA-Quadro 6000 (6G)
硬碟空間	4 TB

$r_0 = 0.05 \text{ m}, r_{min} = 5.64 \text{ m}, r_{max} = 564 \text{ m}$

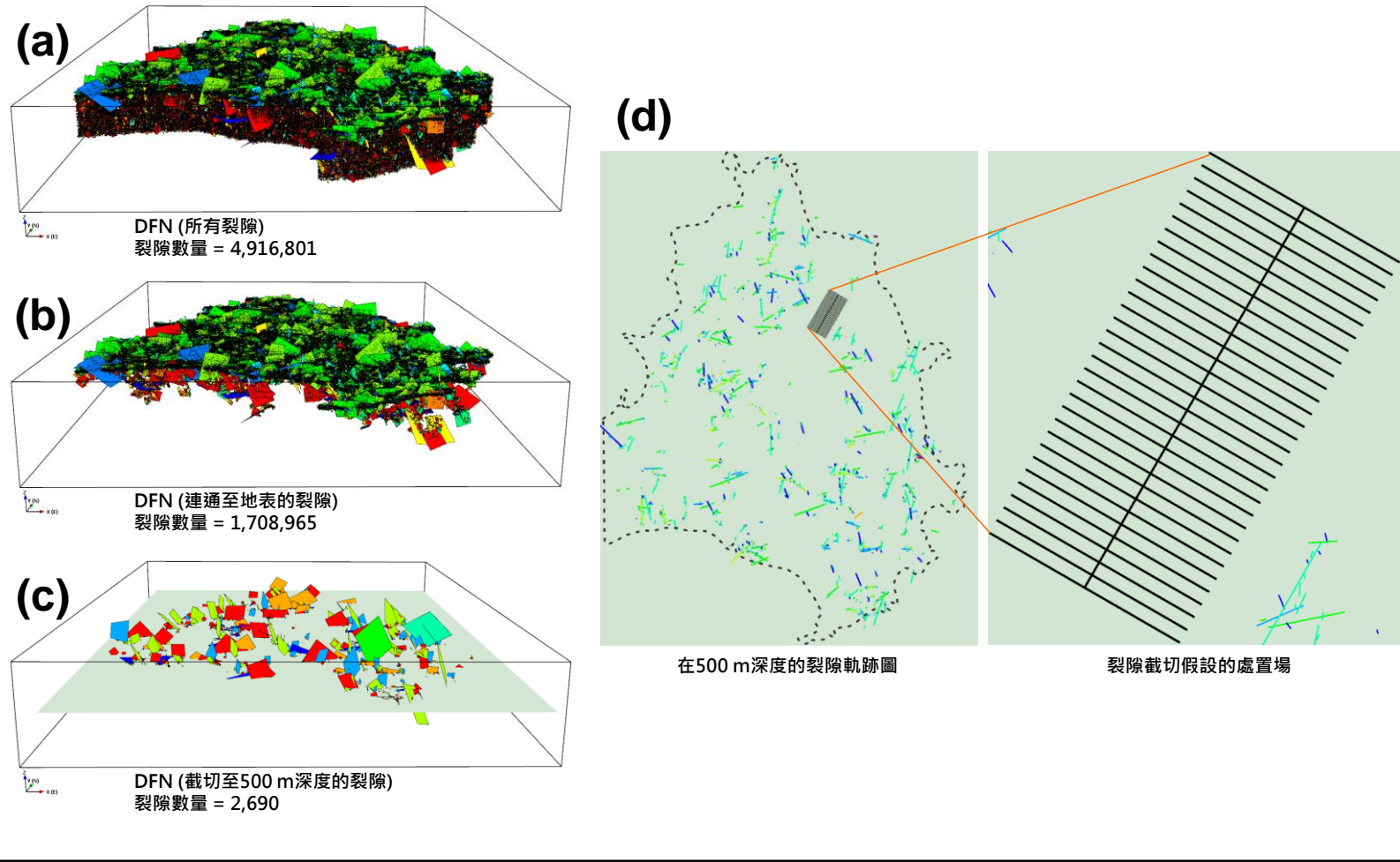


圖 3-78：K 區 DFN 連通性測試範例(1/3)

註解：

- (a) 本案例用以產生 K 區 DFN 的裂隙食譜，共產生 4,916,801 個裂隙。
- (b) 所產生 4,916,801 個裂隙中，有 1,708,965 個裂隙，可自目標深度(500 m)聯通至地表。
- (c) 具備聯通性的 1,708,965 個裂隙中，共有 2,690 個裂隙，截切至目標深度(500 m)。
- (d) 截切至目標深度(500 m)之 2,690 個裂隙，其在 500 m 深度的裂隙軌跡圖。

DFN recipe:

◆ Fracture Domain:

After reviewing the BIPs recorded from KMBH01 to KMBH06, all fractures from KMBH01 to KMBH04 are analyzed statistically due to their similar CFI (Cumulative Fracture Intensity) patterns varied with depth (Figure 3-63). Two fracture domains (FDM) are proposed and their corresponding P_{32} are calculated (Figure 3-64):

- FDMA: fracture domain above 70 m depth with $P_{32} \cong 2.4 m^{-1}$
- FDMB: fracture domain below 70 m depth with $P_{32} \cong 0.3 m^{-1}$

◆ Fracture Cluster:

Four fracture clusters (sets) are classified for the upper fracture domain (FDMA) with the following statistic characteristics (Figure 3-65) in sequence of Pole_Trend/Pole_Plunge/ κ of Fisher distribution/ $P_{32,rel}$ with $\sum P_{32,rel} = 1$:

- Cluster-1 (set-1): 198°/18°/18/26%
- Cluster-2 (set-2): 155°/4°/15/24%
- Cluster-3 (set-3): 264°/23°/16/18%
- Cluster-4 (set-4): 98°/81°/11/32%

Five fracture clusters (sets) are classified for the upper fracture domain (FDMB) with the following statistic characteristics (Figure 3-66) in sequence of Pole_Trend/Pole_Plunge / κ of Fisher distribution/ $P_{32,rel}$ with $\sum P_{32,rel} = 1$:

- Cluster-1 (set-1): 65°/17°/20/15%
- Cluster-2 (set-2): 344°/38°/18/24%
- Cluster-3 (set-3): 281°/29°/16/30%
- Cluster-4 (set-4): 174°/22°/17/10%
- Cluster-5 (set-5): 175°/75°/19/21%

◆ (3) Fracture Location:

A Poisson process (random process) is assumed and used to generate the location of each stochastic fracture.

◆ Fracture Size:

For the fracture size distribution, a power-law distribution is recommended with the following parameters:

- $k_r = 2.6$.
- $r_0 = 0.05$ m.
- $r_{max} = 564$ m that is corresponding to a rectangular fracture with size as 1000 m x 1000 m.
- $r_{min} = 5.64$ m that is corresponding to a rectangular fracture with size as 10 m x 10 m

$r_0 = 0.05 \text{ m}, r_{min} = 4.5 \text{ m}, r_{max} = 564 \text{ m}$

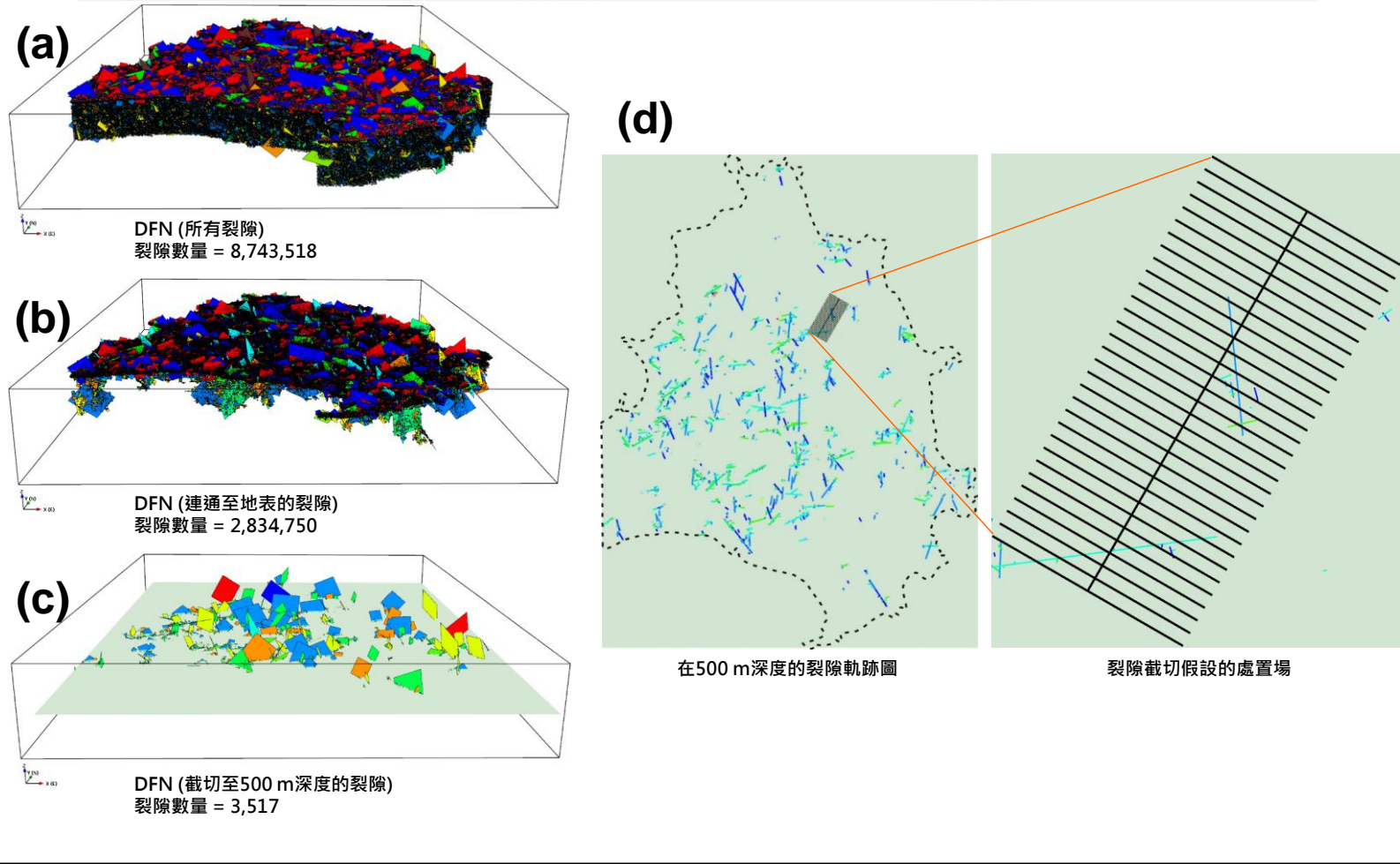


圖 3-79：K 區 DFN 連通性測試範例(2/3)

註解：

- (a) 本案例用以產生 K 區 DFN 的裂隙食譜，共產生 8,743,518 個裂隙。
- (b) 所產生 8,743,518 個裂隙中，有 2,834,750 個裂隙，可自目標深度(500 m)聯通至地表。
- (c) 具備聯通性的 2,834,750 個裂隙中，共有 3,5171 個裂隙，截切至目標深度(500 m)。
- (d) 截切至目標深度(500 m)之 3,517 個裂隙，其在 500 m 深度的裂隙軌跡圖。

裂隙參數集：除了 r_{min} 為 4.5 m 外，其他裂隙食譜參數值，同圖 3-78。

$r_0 = 0.1 \text{ m}, r_{min} = 4.5 \text{ m}, r_{max} = 564 \text{ m}$

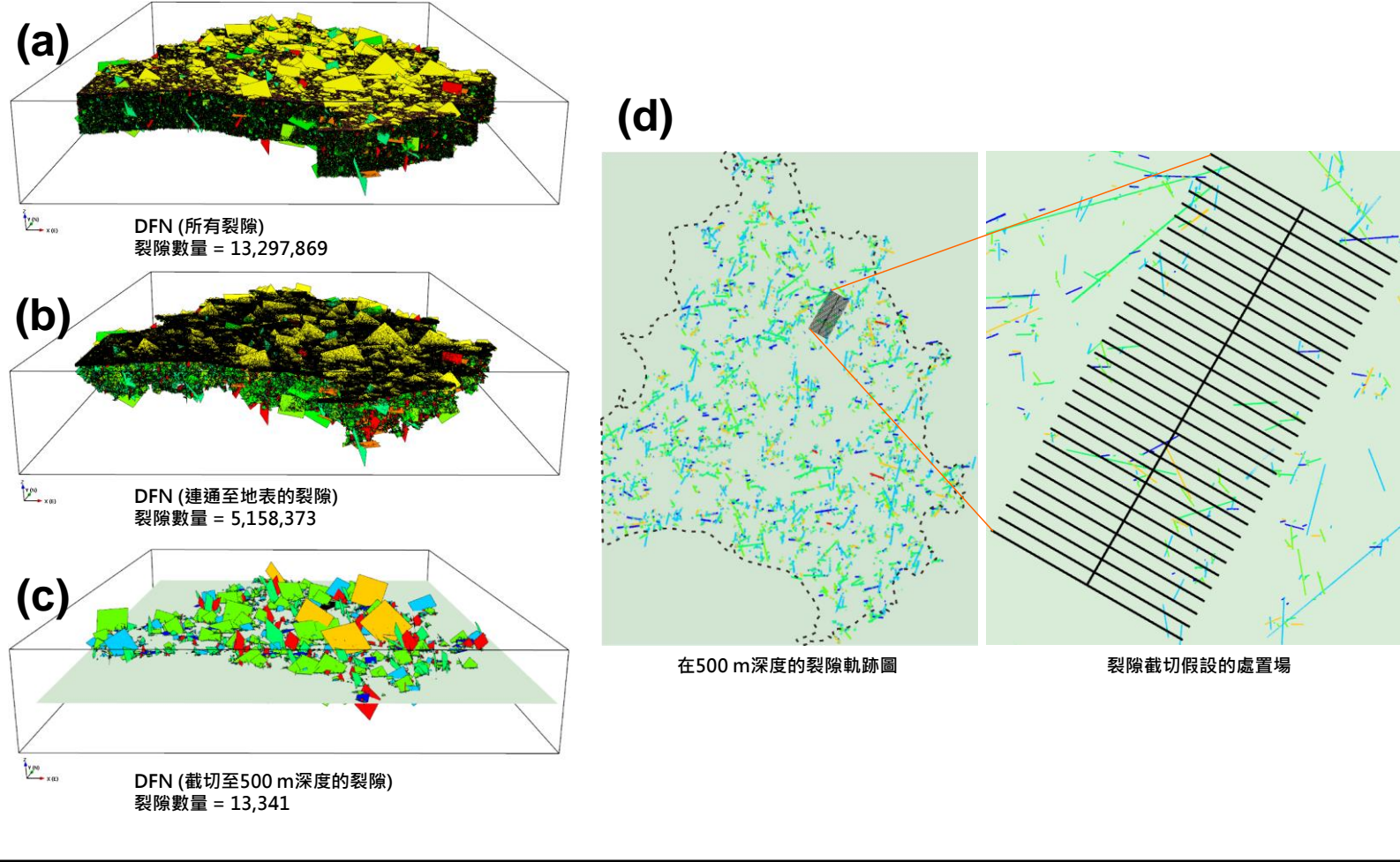


圖 3-80 : K 區 DFN 連通性測試範例(3/3)

註解：

- (a) 本案例用以產生 K 區 DFN 的裂隙食譜，共產生 13,297,869 個裂隙。
- (b) 所產生 13,297,869 個裂隙中，有 5,158,373 個裂隙，可自目標深度(500 m)聯通至地表。
- (c) 具備聯通性的 5,158,373 個裂隙中，共有 13,341 個裂隙，截切至目標深度(500 m)。
- (d) 截切至目標深度(500 m)之 13,341 個裂隙，其在 500 m 深度的裂隙軌跡圖。

裂隙參數集：除了 r_0 為 0.1 m 外，其他裂隙食譜參數值，同圖 3-79。

3.11. 結論

本報告相關重點結論摘述如下：

- (1) 誠如本報告開宗明義所述，台灣參考案例是一個虛擬案例，在台灣尚未進入核廢料最終處置地評選階段前，參考案例是一技術整合測試的研究案例，可供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力。台灣參考案例共包含三個表格及其對應的輔助說明文件，內容包含相關處置概念模式、資料及假設條件。此三個表的名稱及內容分別為：
 - ◆ 表一：法規要求、處置概念及安全評估情境；
 - ◆ 表二：地質概念模式及特性數據；
 - ◆ 表三：安全評估之數學模式、假設、邊界條件及參數。
- (2) 本報告主要作為台灣參考案例表二之輔助說明文件，說明其建置內容及相關科學性背景的論述基礎；其內容及論述分別編排於本報告第二章及第三章。
- (3) 雖然台灣目前尚無候選場址，也從未針對特定地區進行系統化的調查與評估，但為了有效學習國際成功發展經驗，例如日本 H12 參考案例，及瑞典與芬蘭 SDM，因此，針對參考案例表二的建構，特別將過去 K 區所累積的有限研究成果(1999 至 2010)，在加入適當假設及簡化條件下，盡量以 SDM 的章節架構編排於本報告第三章。根據台灣現有相關法規的規範，K 區因為人口密度過高、地下水資源寶貴，以及提供給製酒業之豐富的地下水資源，K 區已被排除在候選場址的考量範圍。
- (4) 本參考案例表二的版次序號為 RC2015-1231，其內容根據預先定義之地質單元(表 2-2)分類，以結構化表格方式列於本報告第二章，其對應內容的相關科學性論述，分別說明於本報告第三章。整個表二內容可容納於一張 A0 海報中，讓使用者可快速一覽表二所有內容及相關資訊的彼此關聯性；表二共包含 11 段不同段落的資訊內容，各資訊段落名稱如下：
 - ◆ Section01: 版次號碼

- ◆ Section02: 概念模式
 - ◆ Section03: 起始條件及邊界條件
 - ◆ Section04: 地形及構造(GIS 及 CAD 圖檔)
 - ◆ Section05: 地質特徵(岩體及構造)單元
 - ◆ Section06: 水力傳導特性
 - ◆ Section07: 離散裂隙網路參數集
 - ◆ Section08: 熱及力學特性
 - ◆ Section09: 礦物組成
 - ◆ Section10: 地下水組成
 - ◆ Section11: 天然系統的重要化學反應
- (5) 針對技術發展及整合測試正需求，經過第 3.8.3 節的反應路徑模擬範例、第 3.10.1 節的地下水流場模擬範例示範、第 3.10.2 節的裂隙網路模擬範例示範，顯示目前參考案例表二的內容，已能滿足 SMFD2017 報告的基本需求。不同的特殊應用需求，可能需要了解表二資料的相關詳細背景內容；表二無法涵蓋各種不同的特殊需求，因此，除了在第三章各節分別說明地質模式、資料及假設的科學性論述基礎外，本報告所有相關數據資料來源的引用方式，均詳細至頁碼、圖號或表號，用以加強資料的可追蹤性，方便使用者進行更深入的相關研究。
- (6) 根據目前的認知，K 區重點地質特徵摘述如下：
- ◆ K 區自約 58Ma 前，即進入穩定的地質環境，抬升速率很低，約 0.1 mm/yr。
 - ◆ K 區目前屬大陸邊緣的離島環境，但在 10 萬年尺度的氣候變遷(海平面變化)循環過程中，雖然海水面變動範圍可能界於 +10m 至 -120m，但 K 區大部分時間應處於內陸沙漠環境。
 - ◆ K 區主要岩性為花崗岩，有特定方向及廣泛出現的輝綠岩脈。
 - ◆ K 區中心位置在 500 公尺深度範圍內的地溫梯度低，約 1.7 °C/100 m；地下水很淡，且當地下水深度超過 400 m 後，屬於還原環境。

- ◆ K區地質概念模式目前可分為 6 個岩體地質單元(R1 至 R6); 1 個表層風化單元(R0)，厚度約 70m; 11 個可能導水裂隙帶(F1 至 F11)，其中僅 F1 及 F2 有實際地質鑽探確認其存在; 10 條理想化的輝綠岩脈(D1 至 D10)，每 1000 m 間距出現總寬度約 100m (表 2-2)。其中，未被構造切穿的輝綠岩脈是影響 K 區地下水流特徵的重要阻水構造。

(7) 就任何應用而言，現地資料永遠不夠。隨著研究成果的持續不斷累積、認知的修正，與新增需求的出現，相關地質概念模式、代表性參數或假設，亦必需調整或精修。針對 K 區而言，後續若有相關地下資源的開發應用，例如地下水資源開發，以下是目前後續可能需要精修的項目或議題：

- ◆ 雖然根據非侵入式的地電阻探測結果，顯示 F3 至 F11 構造可能存在，但因缺乏地質鑽探驗證及孔內相關試驗數據，且考量計畫現階段單純的技術發展需求，因此未被包含於表二中；後續 K 區若有相關地下資源的開發應用，F3 至 F11 構造的確證及特性化，是重要的現地調查評估工作。
- ◆ 關於裂隙網路(DFN)各個隨機產生之裂隙，其導水特性、裂隙寬度與裂隙大小間的數學關係式，因缺乏各孔內隨深度(不論是否破裂)的水力試驗及大規模的抽水試驗，因此，目前無法以統計方式求出其關係式；表二中的對應內容，係參考自瑞典 Forsmark 的相關數學關係式。後續 K 區若有地下水資源開發需要，此類現地試驗工作相當重要。
- ◆ 所有的統計資料，均將因量測數量的增加而可能會有所調整。例如，目前新增累計的數據顯示，輝綠岩脈(表 2-2 的 D#)的位態統計，可能需由 N30E80N 調整至約 N30E83S。考量計畫現階段的技術發展，必須架構在相同的測試內容及假設條件基礎下，方能聚焦共識、發揮其最大效能，因此，相關修正需求，將留待下版次更新時，再統一考量是否需要調整表二的對應內容。

4. 參考文獻

- Adkins, J.F., McIntyre, K., Schrag, D.P., 2002, The Salinity, Temperature, and $\delta^{18}\text{O}$ of the Glacial Deep Ocean, *Science*, Vol. 298, pp. 1769–1773.
- André, A.-S., Sausse, J., and Lespinasse, M. (2001), New approach for the quantification of paleostress magnitudes: application to the Soultz vein system (Rhine graben, France), *Tectonophysics*, Vol. 336, pp. 215–231.
- ASTM Standard D5334-05, (2005), Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard E1269, (2011), Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard E831, (2012), Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bear, J., and Verruijt, A. (1987), *Theory and applications of transport in porous media: Modeling groundwater flow and pollution*, D. Reidel, Boston.
- Bethke, C.M. (2008), *Geochemical and biogeochemical reaction modeling*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- Brown, E.T., (1981), *Rock characterization testing and monitoring – ISRM suggested method*, Pergamon Press Ltd., U.K.
- Bruno, J., E. Cera, J. de Pablo, L. Duro, S. Jordana, and D.Savage, (1997), Determination of radionuclide solubility limits to be used in SR 97: Uncertainties associated to calculated solubilities, SKB Technical Report TR-97-33.
- Cai, H.T., Kuo-Chen, H., Jin, X., Wang, C.Y., Huang, B.S., and Yen, H.Y. (2015), A three-dimensional V_p , V_s , and V_p/V_s crustal structure

in Fujian, Southeast China, from active- and passive-source experiments, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 111, p. 517-527.

Carnahan D., Luther, H.A., and Wilkes, J.O. (1977), *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Son.

Chang et al. (2000) [In Chinese: 張明書、陳民本、劉守全、林峰(2000), 中國海岸帶晚第四紀地質, 國家海洋科學研究中心, 共 334 頁。]

Chang et al. (2005) [In Chinese: 張傳聖、郭泰融、林蔚、張育德、李奕亨、歐陽湘(2005), 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(93 年度計畫)－跨孔試驗與量測, 工研院執行/台電公司委辦, SNFD-GEL-90-220 / SNFD-ITRI-TR2005-0220。]

Chang et al. (2015) [In Chinese: 張育德、林鎮國、謝佩珊、林蔚(2015) 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(101~103 年度計畫)－花崗岩質地化反應模擬技術研究, 工研院執行/台電公司委辦, SNFD-ITRI-90-305 / SNFD-ITRI-TR2015-0305。]

Chen (1970) [In Chinese: 陳培源(1970), 金門島及烈嶼地質說明書, 經濟部金門地質礦產測勘對工作報告, 第 7 - 19 頁。]

Chen (1993) [In Chinese: 陳于高(1993), 晚更新世以來南台灣地區海水面變化與新構造運動研究, 國立臺灣大學博士論文, 共 158 頁。]

Chen (2015) [In Chinese: 陳炳權 (2015), 金門地區應力場演化史, 國立臺灣師範大學地球科學所, 金門國家公園管理處補助研究生報告。]

Chen et al. (2005) [In Chinese: 陳文山、宋時驊、吳樂群、徐濔德、楊小青(2005), 末次冰期以來台灣海岸平原區的海岸線變遷, 考古人類學刊, 第 26 期, 第 40 - 55 頁。]

Chen et al. (2015) [In Chinese: 陳炳權(2015), 金門地區應力場演化史, 國立臺灣師範大學地球科學所, 金門國家公園管理處補助研究生報告。]

- Chen, C.H., Hsieh, P.S., Wang, K.L., Yang, H.J., Lin, W., Liang, Y.H., Lee, C.Y. and Yang, H.C. (2010), Zircon LA-ICPMS U-Pb ages and Hf isotopes of Huayu (Penghu Islands) volcanics in the Taiwan Strait and tectonic implication, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 37, pp. 17-30.
- Chen, C.H., Lin, W., Lan, C.Y. and Lee, C.Y. (2004), Geochemical, Sr and Nd isotopic characteristics and tectonic implications for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Cretaceous) orogeny, SE China, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, Vol. 95, pp.237-248.
- Chen, W.S., Ridgway, K.D., Horng, C.S., Chen, Y.G., Shea, K.S., and Yeh, M.G. (2001), Stratigraphic architecture, magnetostratigraphy, and incised-valley systems of the Pliocene-Pleistocene collisional marine foreland basin of Taiwan, eustatic and tectonic controls on deposition, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 113, pp. 1249-1271.
- Chen, Y.G., and Liu, T.K. (1996), Sea level changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait, *Quaternary Research*, Vol. 45, pp. 254-262.
- Chiang and Yu (2009) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫) --區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。]
- Chiang et al. (2006) [In Chinese: 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2006)，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(94~96 年度計畫)--技術發展—跨孔追蹤稀釋試驗成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-243 / SNFD-ITRI-TR2006-0243。]
- Chiang et al. (2009) [In Chinese: 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫)—KMBH02-04 斷層帶跨孔追蹤稀釋試驗執

行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-267 / SNFD-ITRI-TR2009-0267。]

Chiang et al. (2009) [In Chinese: 蔣立為、張育德、陳冠宇、余錦昌 (2009) ，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(97~99 年度計畫) -- KMBH06 裂隙特性量測與分析-水文地質孔內調查與分析執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-266 / SNFD-ITRI-TR2009-0266。]

Chiang et al. (2015) [In Chinese: 蔣立為、余錦昌、林鎮國(2015) ，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(101~103 年度計畫) – KMBH03-04-05-06 裂隙水壓長期監測 FY101~103 執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-302 / SNFD-ITRI-TR2015-0302。]

Davis, M.E. (1984) Numerical Methods and Modeling for Chemical Engineers, John Wiley & Sons.

Faure, G. (1991), Principle and applications of inorganic geochemistry, Macmillan.

Follin, S., Stigsson, M. and Svensson, U., (2005), Regional hydrogeological simulations for Forsmark – numerical modelling using DarcyTools Preliminary site description Forsmark area – version 1.2, SKB R-05-60.

Follin, S., Stigsson, M., and Svensson, U. (2006), Hydrogeological DFN modelling using structural and hydraulic data from KLX04 Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2, SKB R-06-24.

Garrels, R.M. (1984), Montmorillonite/Illite stability diagrams, Clays and clay minerals, Vol.32, No. 3, pp. 161–166.

Geier, J., Bath, A., and Stephansson, O. (2012), Comparison of site descriptive models for Olkiluoto, Finland and Forsmark, Sweden, STUK-TR 14, STUK.

- Guo et al. (2003) [In Chinese: 郭泰融、張傳聖、董倫道、李奕亨、陳文山、黃炎聰(2003)，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(91 年度計畫) —K 區地球物理井測(BH1 及 BH2 孔)報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-195，SNFD-ITRI-TR2003-0195。]
- Guo et al. (2007) [In Chinese: 郭泰融、林蔚、董倫道(2007)，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(94~96 年度計畫)—K 區重磁力測勘資料逆推處理 94~96 年執行成果報告，工研院/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-241 / SNFD-ITRI-TR2007-0241。]
- Hsieh and Lin (2012) [In Chinese: 謝佩珊、林蔚(2012)，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—潛在母岩特性調查—K 區花崗岩岩心礦物組成特性分析，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-288 / SNFD-ITRI-TR2012-0288。]
- Hsieh et al. (1996) [In Chinese: 謝傳禮、翦知潛、趙泉鴻、汪品先(1996)，末次盛冰期中國海古地理輪廓及其氣候效應，第四紀研究，第 16 卷，第 1 期，第 1 - 10 頁。]
- Hsieh, M.L., Lai, T.H., Wu, L.C., Lu, W.C., Liu, H.T., and Liew, P.M. (2006), Eustatic Sea-Level Change of 11-5 ka in Western Taiwan, Constrained by Radiocarbon Dates of Core Sediments, TAO, Vol. 17, No. 2, p.353-370.
- IPCC (2013), Climate change 2013: The physical science basis. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M., Eds., Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 1535 p.
- Jacob, N., Modreck, G., and Van, T. G. (2014), A comparative hydrogeochemical study of granitic fractured and alluvial channel aquifer systems, Global Journal of Science Frontier

Research: H Environment & Earth Science, Vol. 14, Issue 2, Version 1.0.

JNC (2000), H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, 2nd Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, JNC Technical Report TN1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai-mura Japan.

Kuo et al. (2005) [In Chinese: 郭素秋、劉益昌、戴瑞春(2005)，金門移民適應與遷移調查研究(史前期)。內政部營建署金門國家公園研究報告，共 149 頁。]

La Pointe, P.R. (2002), Derivation of parent fracture population statistics from trace length measurements of fractal fracture populations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 39, pp. 381-388.

La Pointe, P.R., Fox, A., Hermanson, J., and Öhman, J. (2008), Geological discrete fracture network model for the Laxemar site - Site Descriptive Modelling SDM-Site Laxemar, R-08-55, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Lee (1994) [In Chinese: 李寄嶠 (1994) 澎湖地區玄武岩類與福建地區基性岩脈之定年學與地球化學兼論中生代晚期以來中國東南地函之演化。國立台灣大學地質研究所博士論文，第 1-124 頁。]

Levitus, S., and Boyer, T. (1994), World Ocean Atlas, Vol. 3: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 3, U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 99 p.

Li et al. (2007) [In Chinese: 李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2007)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段(94~96年計畫)--地球物理孔內調查 94~96年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-236，SNFD-ITRI-TR2007-0236。]

Li et al. (2008) [In Chinese: 李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2008)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛

在母岩特性調查(97-99年計畫)--KMBH06 裂隙特性量測與分析-地球物理孔內調查與分析執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-264，SNFD-ITRI-TR2008-0264。]

Liew (2003) [In Chinese: 劉平妹(2003)，乾溼冷暖孢粉知道，科學發展，第 369 期，第 18 - 23 頁。]

Lin (1970) [In Chinese: 林朝榮(1970)，經濟部金門地質礦產測勘隊工作報告，第 1-5 頁。]

Lin (2000) [In Chinese: 林鎮國(2000)，低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫-地球化學調查分項工作報告，4ML1100-RS-6001，工業技術研究院能源與資源研究所。]

Lin (2001) [In Chinese: 林蔚(2001)，華南沿海地區晚燕山期侵入岩漿活動及大地構造意義，國立台灣大學地質科學研究所博士論文，共 236 頁。]

Lin and Chang (2002) [In Chinese: 林鎮國、張育德(2002)，我國用過核燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估階段-發展初步功能/安全評估模式(第一年計畫)-Eh(pe)-pH 穩定相圖應用技術之建立，工研院執行/核研所及台電公司委辦，SNFD-INER-90-513 / SNFD-ITRI-TR2002-0513。]

Lin et al. (2003) [In Chinese: 林蔚、張育德、張傳聖(2003)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫(91年計畫)--K 區花崗岩體特性分析，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-190 / SNFD-ITRI-TR2003-0190。]

Lin et al. (2005) [In Chinese: 林蔚、陳文山、楊明宗、歐陽湘(2005)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(93年計畫)--潛在母岩特性調查，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-219 / SNFD-ITRI-TR2005-0219。]

Lin et al. (2007) [In Chinese: 林蔚、錢正明、郭泰融、陳文山、廖啓雯、林鎮國(2007)，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(94~96年度計畫)--K 區潛在處置母岩地質概念模式評估 94~96 年執行成果報告，工研

院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-242 / SNFD-ITRI-TR2007-0242。]

Lin et al. (2007) [In Chinese: 林鎮國、董倫道、蔣立為、林蔚、廖啟雯、錢正明、郭泰融、陳文山、李奕亨、楊明宗、張育德、歐陽湘、張濟權、蘇毓秀、劉台生、衛元耀(2007)，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(94~96 年度計畫)一期末報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-254 / SNFD-ITRI-TR2007-0254。]

Lin et al. (2010) [In Chinese: 林蔚、錢正明、蔣立為、林鎮國、郭泰融、張育德、陳文山、謝佩珊(2010)，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(97~99 年度計畫)－K 區東部地質概念模式成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-273 / SNFD-ITRI-TR2010-0273。]

Lin et al. (2011) [In Chinese: 林蔚、李寄嶼、楊小青、陳正宏(2011)，五萬分之一台灣地質圖—金門地區，經濟部中央地質調查所，共 58 頁。]

Lin et al. (2012) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)－K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。]

Lin et al. (2013) [In Chinese: 林鎮國、林蔚、董倫道、蔣立為、田能全、張育德、謝佩珊、陳文山、劉智超、李奕亨、錢正明、廖啟雯、洪偉嘉、謝德勇、蘇毓秀、邱欣瑜、黃淞洋、劉致育、劉台生、王竹方、陳志南、楊燦堯、郭明錦、蔡祁欽(2013)，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(101~103 年度計畫)－執行成果第一次期中報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-320 / SNFD-ITRI-TR2013-0320。]

Lin et al. (2014) [In Chinese: 林鎮國、林蔚、董倫道、錢正明、李奕亨、陳文山、田能全、謝佩珊、蔣立為、張育德、劉智超、廖啟雯、蘇毓秀、洪偉嘉、謝德勇、黃淞洋、劉致育、吳上智、邱欣瑜、廖彥喆、劉台生、王竹方、陳志南、楊燦堯、郭明錦、蔡祁欽(2014), 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(101~103 年度計畫)－執行成果第二次期中報告, 工研院執行/台電公司委辦, SNFD-ITRI-90-321 / SNFD-ITRI-TR2014-0321。]

Lin et al. (2015) [In Chinese: 林蔚、林鎮國、董倫道、謝佩珊、錢正明、田能全、張育德、黃淞洋、李奕亨、陳文山、郭泰融、蔣立為、廖彥喆、謝德勇、邱欣瑜、楊勤儀(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(101~103 年度計畫)--地質環境歷年研究成果 2014 年整合報告(SNFD2014GE), 工研院執行/台電公司委辦, SNFD-EEL-90-324 / SNFD-ITRI-TR2015-0324。]

Lin, C.K., Change, Y.T., Hsieh, P.S., and Chen, S.C. (2015) Applications of reaction-path modelling in geological disposal concept of radioactive waste, East Asia Forum on Radwaste Management, Oct. 25-28, 2015, Taichung City.

Liou (2009) [In Chinese: 劉台生(2009), 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(97~99 年度計畫)－KMBH01-04 試驗場址之自然梯度示蹤劑試驗數據分析, 中正大學執行/工研院及台電公司委辦, SNFD-EEL-90-268 / SNFD-ITRI-TR2009-0268。]

Liou and Tien (2015) [In Chinese: 劉智超、田能全(2015), 我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(101-103 年度計畫)--花崗岩物性、熱及力學特性分析 FY101~103 執行成果報告, 工研院執行/台電公司委辦, SNFD-ITRI-90-311 / SNFD-ITRI-TR2015-0311。]

- Liou, T.S., Lee, Y.H., Chiang, L.W., Lin, W., Guo, T.R., Chen, W.S., and Chien, J.M. (2009), Alternative water resources in granitic rock: a case study from Kinmen Island, *Environmental Earth Sciences*, 59(5), pp. 1033-1046, DOI:10.1007/s12665-009-0095-4.
- Liou, T.S., Lu, H.Y., Lin, C.K., Lin, W., Chang, Y.T., Chien, J.M., and Chen, W.F. (2009), Geochemical investigation of groundwater in a granitic island: A case study from Kinmen Island, Taiwan, *Environmental Geology*, Vol. 58, No. 7, pp. 1575-1585, DOI: 10.1007 s00254-008-1664-7.
- Lisker, F., Ventura, B., and Glasmacher, U.A. (2009), Apatite thermochronology in modern geology, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 324, pp. 1-23.
- Liu, C.W., Jang, C.S., Chen, C.P., Lin, C.N., and Lou, K.L. (2008), Characterization of groundwater quality in Kinmen Island using multivariate analysis and geochemical modeling, *Hydrological Process*, Vol. 22, pp. 276-383.
- Liu, C.W., Lin, C.N., Jang, C.S., Chen, C.P., Chang J.F., Fan, C.C., and Lou, K.H. (2006), Sustainable groundwater management in Kinmen Island, *Hydrological Process*, Vol. 20, pp. 4363-4372.
- Lo and Li (2003) [In Chinese: 羅聖宗、李伯當(2003)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(91 年度計畫) - K 區海底淺層剖面探測報告，工研院能資所執行 / 台電公司委託，SNFD-ERL-90-197 / SNFD-ITRI-TR2003-0197。]
- Metz, V., Kienzler, B., and Schüßler, W. (2003), Geochemical evaluation of different groundwater-host rock systems for radioactive waste disposal. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 61, pp. 265-279.
- Murray-Wallace, C.V. and Woodroffe, W.D. (2014), *Quaternary Sea-Level Changes - A Global Perspective*, Cambridge University Press.

- Naish, T.R., Abbott, S.T., Alloway, B.V., Beu, A.G., Carter, R.M., Edwards, A.R., Journeaux, T.D., Kamp, P.J.J., Pillans, B.J., Saul, G. and Woolfe, K.J. (1998), Astronomical calibration of a southern hemisphere Plio-Pleistocene reference section, Wanganui Basin, New Zealand, *Quaternary Science Review*, Vol. 17, pp. 695–710.
- Naish, T.R., and Kamp, P.J.J. (1997), Sequence Stratigraphy of 6th Order (41 K.y.) Plio-Pleistocene Cyclothems, Wanganui Basin, New Zealand: A Case for the Regressive Systems Tract, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 109, pp. 978–999.
- Palandri, J.L., and Kharaka, Y.K. (2004) A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling: U.S. Geological Survey Open File Report 2004–1068.
- Posiva (2009), Olkiluoto Site Description 2008, Part 1, Report 2009–01, Posiva Oy, Eurajoki.
- Pourbaix, M., Zhang, H., and Yang, X. (1996) Atlas of Chemical and Electrochemical Equilibria in the Presence of a Gaseous Phase, CEBELCOR, Brussels.
- Rajmohan N., and Elango, E. (2004), Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India, *Environmental Geology*, Vol. 46, pp. 47–61.
- Rohling, E.J., Fenton, M., Jorissen, F.J., Bertrand, P., Ganssen, G., and Caulet, J.P. (1998), Magnitudes of Sea-Level Lowstands of the Past 500,000 Years, *Nature*, Vol. 394, pp. 162–165.
- Shi et al. (2004) [In Chinese: 時振梁、環文林、張裕明、戴聯筠、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。]
- Siame, L., Chu, H.-T., Carcaillet, J., Bourlès, D., Braucher, R., Lu, W.-C., Angelier, J., and Dussouliéz, Ph. (2007), Glacial retreat history

- of Nanhuta Shan (north-east Taiwan) from preserved glacial features: the cosmic ray exposure perspective, *Quaternary Sciences Reviews*, Vol. 26, pp. 2185–2200.
- SKB (2008), Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase - SDM-Site Forsmark, Technical Report TR-08-05, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Sweden.
- SKB (2009), Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase - SDM-Site Laxemar, Technical Report TR-09-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Sweden.
- SKB (2013), RD&D Programme 2013 Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, Technical Report TR-13-18, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Sweden.
- Srinivasamoorthy, K., Vasanthavigar, M., Vijayaraghavan, K., Chidambaram, S., Anandhan, P., and Manivannan, R. (2011), Use of Hydrochemistry and Stable Isotopes as Tools for Groundwater Evolution and Contamination Investigations, *Geosciences*, Vol. 1, No. 1, pp.16–25.
- Stumm W., and Morgan, J.J. (1981), *Aquatic Chemistry*, 2nd ed. John Wiley and Sons.
- Teh (2000) [In Chinese: 鄭郁豫(2000), 南海過去十七萬年以來的古海溫與古鹽度重建, 國立台灣大學地質學研究所碩士論文。]
- TPC (2006) [In Chinese: 台電公司(2006), 用過核子燃料最終處置計畫書, 台灣電力公司核能後端營運處; 行政院原子能委員會放射性物料管理局; 2006年7月核備。]
- TPC (2010) [In Chinese: 台電公司(2010), 我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告, 台灣電力公司核能後端營運處; 行政院原子能委員會放射性物料管理局; 2010年7月核備。]
- Wang, X. (2005), Stereological interpretation of rock fracture traces on borehole walls and other cylindrical surfaces, Virginia

Polytechnic Institute and State University, doctoral dissertation, 113p.

Wang et al. (2015) [In Chinese: 王竹方、王本誠、楊正焰、王清海、謝易恭、張芳瑜、姜筑玲、黃俊強、顏于鈞、賴妍辰、洪薪婷、陳以諾、黃玟玲、黃國通(2015)，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(101~103 年度計畫)－實驗室岩體核種遷移與傳流試驗，清華大學執行/工研院及電公司委辦，SNFD-NTHU-90-309 / SNFD-NTHU-TR2015-0309。]

Weng (2008)[In Chinese: 翁自保(2008)，金門的水資源，地質，第 27 卷，第 3 期，第 45-49 頁。]

Yang et al. (2003) [In Chinese: 楊明宗、柳志錫、沈振南、林棋財、楊敏順、呂金玉(2003)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(91 年計畫)--K 區(BH1 及 BH2)岩石力學報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-199 / SNFD-ITRI-TR2003-0199。]

Yang et al. (2007) [In Chinese: 楊明宗、劉智超、蔣立為(2007)，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(94~96 年度計畫)--岩塊水力試驗 94~96 年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-248 / SNFD-ITRI-TR2007-0248。]

Yeh et al. (2012) [In Chinese: 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。]

You et al., (1991)[In Chinese: 尤崇極、鄧仁杰、施清芳、張福麟、張坤城、劉建麟、宋國良(1991)，我國用過核燃料長程處置計畫第二階段工作計畫--結晶岩區地質驗證調查，核研所執行/台電公司委辦。]

Zhang, K., Wu, Y.S., and Pruess, K. (2008), User's guide for TOUGH2-MP-A massively parallel version of the TOUGH2 code, LBNL-

315E, Earth Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.

尤崇極、鄧仁杰、施清芳、張福麟、張坤城、劉建麟、宋國良(1991)，我國用過核燃料長程處置計畫第二階段工作計畫--結晶岩區地質驗證調查，核研所執行/台電公司委辦。

王竹方、王本誠、楊正焰、王清海、謝易恭、張芳瑜、姜筑玲、黃俊強、顏于鈞、賴妍辰、洪薪婷、陳以諾、黃玟玲、黃國通(2015)，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(101~103年度計畫)-實驗室岩體核種遷移與傳流試驗，清華大學執行/工研院及電公司委辦，SNFD-NTHU-90-309 / SNFD-NTHU-TR2015-0309。

台電公司(2006)，用過核子燃料最終處置計畫書，台灣電力公司核能後端營運處；行政院原子能委員會放射性物料管理局；2006年7月核備。

台電公司(2010)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告，台灣電力公司核能後端營運處；行政院原子能委員會放射性物料管理局；2010年7月核備。

李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2007)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段(94~96年計畫)--地球物理孔內調查 94~96年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-236，SNFD-ITRI-TR2007-0236。

李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2008)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(97-99年計畫)--KMBH06 裂隙特性量測與分析-地球物理孔內調查與分析執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-264，SNFD-ITRI-TR2008-0264。

李寄嶼 (1994) 澎湖地區玄武岩類與福建地區基性岩脈之定年學與地球化學兼論中生代晚期以來中國東南地函之演化。國立台灣大學地質研究所博士論文，第 1-124 頁。

林朝榮(1970)，經濟部金門地質礦產測勘隊工作報告，第 1-5 頁。

- 林蔚(2001)，華南沿海地區晚燕山期侵入岩漿活動及大地構造意義，國立台灣大學地質科學研究所博士論文，共 236 頁。
- 林蔚、李寄嶼、楊小青、陳正宏(2011)，五萬分之一台灣地質圖—金門地區，經濟部中央地質調查所，共 58 頁。
- 林蔚、林鎮國、董倫道、謝佩珊、錢正明、田能全、張育德、黃淞洋、李奕亨、陳文山、郭泰融、蔣立為、廖彥喆、謝德勇、邱欣瑜、楊勤儀(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(101~103 年度計畫)--地質環境歷年研究成果 2014 年整合報告(SNFD2014GE)，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-324 / SNFD-ITRI-TR2015-0324。
- 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，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(99~101 年度計畫)—K 區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290 / SNFD-ITRI-TR2012-0290。
- 林蔚、張育德、張傳聖(2003)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫(91 年計畫)--K 區花崗岩體特性分析，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-190 / SNFD-ITRI-TR2003-0190。
- 林蔚、陳文山、楊明宗、歐陽湘(2005)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(93 年計畫)--潛在母岩特性調查，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-219 / SNFD-ITRI-TR2005-0219。
- 林蔚、錢正明、郭泰融、陳文山、廖啓雯、林鎮國(2007)，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(94~96 年度計畫)--K 區潛在處置母岩地質概念模式評估 94~96 年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-242 / SNFD-ITRI-TR2007-0242。
- 林蔚、錢正明、蔣立為、林鎮國、郭泰融、張育德、陳文山、謝佩珊(2010)，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(97~99 年度計畫)-K 區東部地質概念模式成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-273 / SNFD-ITRI-TR2010-0273。

林鎮國(2000)，低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫-地球化學調查分項工作報告，4ML1100-RS-6001，工業技術研究院能源與資源研究所。

林鎮國、林蔚、董倫道、蔣立為、田能全、張育德、謝佩珊、陳文山、劉智超、李奕亨、錢正明、廖啟雯、洪偉嘉、謝德勇、蘇毓秀、邱欣瑜、黃淞洋、劉致育、劉台生、王竹方、陳志南、楊燦堯、郭明錦、蔡祁欽(2013)，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(101~103 年度計畫)-執行成果第一次期中報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-320 / SNFD-ITRI-TR2013-0320。

林鎮國、林蔚、董倫道、錢正明、李奕亨、陳文山、田能全、謝佩珊、蔣立為、張育德、劉智超、廖啟雯、蘇毓秀、洪偉嘉、謝德勇、黃淞洋、劉致育、吳上智、邱欣瑜、廖彥喆、劉台生、王竹方、陳志南、楊燦堯、郭明錦、蔡祁欽(2014)，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(101~103 年度計畫)-執行成果第二次期中報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-321 / SNFD-ITRI-TR2014-0321。

林鎮國、張育德(2002)，我國用過核燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估階段-發展初步功能/安全評估模式(第一年計畫)-Eh(pe)-pH 穩定相圖應用技術之建立，工研院執行/核研所及台電公司委辦，SNFD-INER-90-513 / SNFD-ITRI-TR2002-0513。

林鎮國、董倫道、蔣立為、林蔚、廖啟雯、錢正明、郭泰融、陳文山、李奕亨、楊明宗、張育德、歐陽湘、張濟權、蘇毓秀、劉台生、衛元耀(2007)，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(94~96 年度計畫)-期末報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-254 / SNFD-ITRI-TR2007-0254。

- 時振梁、環文林、張裕明、戴聯筠、陶壽福、丁國瑜、常向東、李小軍、汪素雲、金嚴、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。
- 翁自保(2008)，金門的水資源，地質，第 27 卷，第 3 期，第 45-49 頁。
- 張育德、林鎮國、謝佩珊、林蔚(2015) 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(101~103 年度計畫)－花崗岩質地化反應模擬技術研究，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-305 / SNFD-ITRI-TR2015-0305。
- 張明書、陳民本、劉守全、林峰(2000)，中國海岸帶晚第四紀地質，國家海洋科學研究中心，共 334 頁。
- 張傳聖、郭泰融、林蔚、張育德、李奕亨、歐陽湘(2005)，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(93 年度計畫)－跨孔試驗與量測，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-220 / SNFD-ITRI-TR2005-0220。
- 郭泰融、林蔚、董倫道(2007)，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(94~96 年度計畫)－K 區重磁力測勘資料逆推處理 94~96 年執行成果報告，工研院/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-241 / SNFD-ITRI-TR2007-0241。
- 郭泰融、張傳聖、董倫道、李奕亨、陳文山、黃炎聰(2003)，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(91 年度計畫)－K 區地球物理井測(BH1 及 BH2 孔)報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-195，SNFD-ITRI-TR2003-0195。
- 郭素秋、劉益昌、戴瑞春(2005)，金門移民適應與遷移調查研究(史前期)。內政部營建署金門國家公園研究報告，共 149 頁。
- 陳于高(1993)，晚更新世以來南台灣地區海水面變化與新構造運動研究，國立臺灣大學博士論文，共 158 頁。

- 陳文山、宋時驊、吳樂群、徐濤德、楊小青(2005)，末次冰期以來台灣海岸平原區的海岸線變遷，考古人類學刊，第 26 期，第 40 - 55 頁。
- 陳炳權(2015)，金門地區應力場演化史，國立臺灣師範大學地球科學所，金門國家公園管理處補助研究生報告。
- 陳培源(1970)，金門島及烈嶼地質說明書，經濟部金門地質礦產測勘對工作報告，第 7 - 19 頁。
- 楊明宗、柳志錫、沈振南、林棋財、楊敏順、呂金玉(2003)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(91 年計畫)--K 區(BH1 及 BH2)岩石力學報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-199 / SNFD-ITRI-TR2003-0199。
- 楊明宗、劉智超、蔣立為(2007)，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(94~96 年度計畫)--岩塊水力試驗 94~96 年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-248 / SNFD-ITRI-TR2007-0248。
- 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，土工技術，第 131 期，第 23-34 頁。
- 劉台生(2009)，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(97~99 年度計畫)—KMBH01-04 試驗場址之自然梯度示蹤劑試驗數據分析，中正大學執行/工研院及台電公司委辦，SNFD-EEL-90-268 / SNFD-ITRI-TR2009-0268。
- 劉平妹(2003)，乾溼冷暖孢粉知道，科學發展，第 369 期，第 18 - 23 頁。
- 劉智超、田能全(2015)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(101-103 年度計畫)--花崗岩物性、熱及力學特性分析 FY101~103 執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-311 / SNFD-ITRI-TR2015-0311。

- 蔣立為、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫) --區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270 / SNFD-ITRI-TR2009-0270。
- 蔣立為、余錦昌、林鎮國(2015)，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(101~103 年度計畫) — KMBH03-04-05-06 裂隙水壓長期監測 FY101~103 執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-302 / SNFD-ITRI-TR2015-0302。
- 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2006)，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(94~96 年度計畫)--技術發展—跨孔追蹤稀釋試驗成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-243 / SNFD-ITRI-TR2006-0243。
- 蔣立為、林蔚、錢正明、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫) — KMBH02-04 斷層帶跨孔追蹤稀釋試驗執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-267 / SNFD-ITRI-TR2009-0267。
- 蔣立為、張育德、陳冠宇、余錦昌(2009)，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(97~99 年度計畫) -- KMBH06 裂隙特性量測與分析-水文地質孔內調查與分析執行成果報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-EEL-90-266 / SNFD-ITRI-TR2009-0266。
- 鄭郁豫(2000)，南海過去十七萬年以來的古海溫與古鹽度重建，國立台灣大學地質學研究所碩士論文。
- 謝佩珊、林蔚(2012)，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 — 潛在母岩特性調查 — K 區花崗岩岩心礦物組成特性分析，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-288 / SNFD-ITRI-TR2012-0288。
- 謝傳禮、翦知潛、趙泉鴻、汪品先(1996)，末次盛冰期中國海古地理輪廓及其氣候效應，第四紀研究，第 16 卷，第 1 期，第 1 - 10 頁。

羅聖宗、李伯當(2003)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查(91年度計畫)-K區海底淺層剖面探測報告，工研院能資所執行/台電公司委託，SNFD-ERL-90-197 / SNFD-ITRI-TR2003-0197。