

行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物坑道處置  
核種遷移參數評估技術之研究

計畫編號：102FCMA005

受委託機關(構)：環興科技股份有限公司

計畫主持人：林伯聰

報告日期：中華民國 102 年 12 月





## 目錄

第一章	前言.....	1
1.1	計畫目的.....	1
1.2	服務項目及工作範圍.....	1
1.3	日本坑道處置設施概述.....	2
1.4	安全分析之地下水情節參數設定概述.....	3
第二章	日本低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術.....	6
2.1	天然障壁的核種遷移參數設定.....	6
2.1.1	地質環境評估.....	7
2.1.2	氣候與海平面變化評估.....	28
2.1.3	地形變化評估.....	41
2.1.4	地下水解析的水文地質模式建立.....	51
2.1.5	地下水解析.....	75
2.1.6	地下水解析模式驗證.....	83
2.1.7	開挖影響區的透水性評估.....	96
2.1.8	工程障壁對地下水流動之影響評估.....	106
2.1.9	地球化學環境評估.....	109
2.1.10	流出點的流量評估.....	118
2.1.11	天然障壁的核種遷移評估參數之設定.....	121
2.2	工程障壁的核種遷移參數設定.....	131
2.2.1	工程障壁的設計與施工.....	131
2.2.2	建設營運階段的工程障壁狀態評估.....	144
2.2.3	回填後的工程障壁狀態評估.....	156
2.2.4	工程障壁的核種遷移評估之參數設定.....	224
第三章	我國低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術建議.....	235
3.1	我國地質環境概述.....	235
3.1.1	火成活動.....	235
3.1.2	斷層活動.....	243
3.1.3	地震.....	246
3.1.4	泥火山.....	250
3.1.5	塊體崩移.....	254
3.2	我國氣候變遷與海平面變化概述.....	260
3.2.1	氣溫.....	260
3.2.2	海平面.....	265
3.2.3	降雨量.....	271
3.3	我國地形變化概述.....	273



3.4 我國的低放射性廢棄物處置概念.....	277
3.5 我國的核種遷移參數考量與建議.....	278
第四章 「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版草案)」之精 進建議.....	292
第五章 結論.....	294
附錄 期末報告(初稿)審查意見與意見回覆.....	300

## 表目錄

表 2.1.1-1	地質環境評估所需的資訊與調查方法 .....	8
表 2.1.3-2-1	河川之隆起速度與河床高度變化速度 .....	46
表 2.1.4.1-1	廣域的文獻調查與地表勘查可獲得之資訊 .....	53
表 2.1.4.1-2	進行廣域地下水解析時的注意事項與對應案例 .....	54
表 2.1.4.2-1	主要的調查項目、方法及流動概念模式在設定時相關的資料 .....	58
表 2.1.4.3-1	建立水文地質模型所需要的資料及調查方法 .....	64
表 2.1.4.3-3	建立水文地質模型的主要檢討事項與注意事項 .....	66
表 2.1.4.4-1	設定巨觀水理特性時的必要資料與調查 .....	70
表 2.1.5.1-1	地下水解析程式的功能 .....	76
表 2.1.5.1-2	密度流(移流分散)解析程式的功能 .....	76
表 2.1.5.1-3	具代表性的移流分散與多相流解析程式 .....	77
表 2.1.5.3-1	流動解析的邊界條件適用案例 .....	82
表 2.1.6.2-1	驗證指標 .....	88
表 2.1.6.4-1	地下水調查使用的示蹤劑 .....	93
表 2.1.6.4-2	利用放射性核種測量地下水年代 .....	94
表 2.1.7.2-1	量測與觀察項目 .....	99
表 2.1.7.2-2	利用調查結果推估開挖受損區域之方法 .....	100
表 2.1.7.3-1	坑道周邊岩盤透水性的相關調查與試驗 .....	101
表 2.1.7.3-2	開挖影響區的透水性預測評估所需的調查數據資料 .....	101
表 2.1.7.5-1	評估岩盤隨時間變化之主要力學模式 .....	105
表 2.1.9.1-1	處置設施建設前的地球化學環境調查 .....	114
表 2.1.9.2-1	計算化學物種組成及地球化學模式 .....	118
表 2.1.10.1-1	計算流出點流量時需取得之資料 .....	120
表 2.1.11-1	天然障壁相關的核種遷移評估參數 .....	124
表 2.2.1.2-1	工程障壁各組成構件需具備之機能 .....	134
表 2.2.1.3-1	填充材需具備之機能及對應的設計考量 .....	136
表 2.2.1.3-2	處置窖需具備之機能及對應的設計考量 .....	137
表 2.2.1.3-3	低擴散層需具備之機能及對應的設計考量 .....	138
表 2.2.1.3-4	低透水層需具備之機能及對應的設計考量 .....	139
表 2.2.1.3-5	回填材需具備之機能及對應的設計考量 .....	141
表 2.2.1.3-6	坑道需具備之機能及對應的設計考量 .....	141
表 2.2.2-1	選出建設營運階段的影響要因 .....	144
表 2.2.2-2	建設營運階段的影響要因及其狀態假設 .....	145
表 2.2.3-1	水泥類材料(處置窖、低擴散層)的透水性及擴散性的影響要因 .....	159
表 2.2.3-2	膨潤土類材料(低透水層)的透水性及擴散性的影響要因 .....	160

表 2.2.3.1-1	飽和與未飽和狀態下的膨潤壓評估式與解析程式 .....	166
表 2.2.3.2-1	膨潤土類材料沉陷之評估方法 .....	171
表 2.2.3.3-1	核能相關設施的混凝土溫度限制 .....	178
表 2.2.3.5-1	地下構造物的耐震設計指針與基準(1/2) .....	187
表 2.2.3.5-1	地下構造物的耐震設計指針與基準(2/2) .....	189
表 2.2.3.6-1	各階段代表的腐蝕機制與腐蝕形態 .....	193
表 2.2.3.7-1	高密度膨潤土中的氣體遷移機制之相關研究 .....	204
表 2.2.3.7-2	氣體遷移解析程式的特徵與驗證案例 .....	206
表 2.2.3.7-3	日本的處置設施對氣體遷移解析的檢討案例 .....	207
表 2.2.3.8-1	水泥水化物的溶出模型 .....	213
表 3.1.2-1	各國對活動斷層的定義 .....	243
表 3.1.5-1	世界近百年大型山崩災害一覽表 .....	255
表 3.2.1-1	IPCC 第三次評估報告建立的六個未來發展情境 .....	264
表 3.2.2-1	台灣地區性海平面變遷推估速率 .....	267
表 3.2.2-2	未來 15 萬年的全球氣候情境 .....	270
表 3.5-1	我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(1/5) .....	280
表 3.5-1	我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(2/5) .....	281
表 3.5-1	我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(3/5) .....	282
表 3.5-1	我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(4/5) .....	283
表 3.5-1	我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(5/5) .....	285
表 3.5-2	我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(1/5) .....	285
表 3.5-2	我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(2/5) .....	286
表 3.5-2	我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(3/5) .....	287
表 3.5-2	我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(4/5) .....	288
表 3.5-2	我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(5/5) .....	290

## 圖目錄

圖 1.3-1	低放射性廢棄物地下處置設施概念圖 .....	2
圖 1.3-2	工程障壁構造示意圖 .....	3
圖 1.4-1	地下水傳輸概念 .....	4
圖 1.4-2	評估地下水情節所需之核種遷移主要參數 .....	5
圖 2.1-1	天然障壁的核種遷移評估參數之設定流程 .....	6
圖 2.1.1-1	長期變動現象的項目及其關聯性 .....	8
圖 2.1.1.1-1	日本列島周邊的板塊位置及第四紀火山分布 .....	11
圖 2.1.1.1-2	過去 6000 萬年間的火山前緣移動量 .....	12
圖 2.1.1.1-3	各個火山與第四紀火山群中心之距離 .....	12
圖 2.1.1.1-4	地溫梯度與火山噴發中心間距之關係 .....	14
圖 2.1.1.1-5	火山碎屑流的厚度與距離之關係 .....	15
圖 2.1.1.1-6	火山碎屑流於覆蓋厚度 100m 時地表下的溫度變化 .....	15
圖 2.1.1.2-1	地震斷層周邊的地盤隆起與沉降 .....	18
圖 2.1.1.2-2	主斷層周邊小斷層的分布密度與主斷層之距離 .....	18
圖 2.1.2.1-1	南極冰層冰芯的氫氣同位素比所得過去 45 萬年間的氣溫變化 ....	29
圖 2.1.2.1-2	數百年至數千年間的氣溫變動 .....	29
圖 2.1.2.1-3	以花粉化石推估岐阜縣東濃地區於過去 35 萬年間的氣溫變化幅度 .....	30
圖 2.1.2.1-4	以花粉化石分類與溫暖指數推估之末次冰盛期的年平均氣溫 .....	31
圖 2.1.2.2-1	過去 45 萬年間的海洋平面變動區線 .....	33
圖 2.1.2.3-1	福井縣三方湖於過去 4.7 萬年間的降雨量推估結果 .....	35
圖 2.1.2.3-2	日本列島的年平均氣溫與年降雨量之關係 .....	36
圖 2.1.2.6-1	年平均氣溫與永凍土厚度之關係 .....	40
圖 2.1.3.1-1	日本列島沿海地區的地殼變動分類 .....	43
圖 2.1.3.1-2	河成地形面的斷面模式與隆起量之關係 .....	44
圖 2.1.3.2-1	日本的侵蝕速度分布圖 .....	47
圖 2.1.3.2-2	日本列島各地的海蝕平台幅度與構成岩石、海岸山地及海蝕崖的高 度關係.....	48
圖 2.1.3.3-1	地質系統與物質移動 .....	50
圖 2.1.4.1-1	廣域地下水流概念模型 .....	52
圖 2.1.4.1-2	檢討範圍設定流程 .....	52
圖 2.1.4.2-1	流動概念模式 .....	55
圖 2.1.4.2-2	調查到流動概念模式的設定流程 .....	57
圖 2.1.4.3-1	從調查到水文地質模式建立的流程 .....	63
圖 2.1.4.3-2	高透水部份與低透水部份的模型化流程 .....	65

圖 2.1.4.3-3	由孔隙水壓量測推測低透水部分的分布(以地下水滲透區域為例)	66
圖 2.1.4.3-4	裂縫的痕跡長分布	67
圖 2.1.4.4-1	巨觀的水理特性設定流程	69
圖 2.1.4.4-2	長區間透水試驗與短區間透水試驗的比較案例	71
圖 2.1.4.4-3	裂縫與基質部的複合模式	73
圖 2.1.4.4-4	裂縫與基質部的複合模式與示蹤劑試驗的模擬	74
圖 2.1.5-1	與核種遷移評估參數有關的地下水流動解析設定流程	76
圖 2.1.5.3-1	流動解析的解析範圍與邊界條件	81
圖 2.1.6-1	驗證地下水流動解析模型的檢討流程	84
圖 2.1.6.2-1	實測水位與計算水位之散布圖	86
圖 2.1.6.2-2	解析結果的等水位線與鑽孔位置的實測水位比較圖	87
圖 2.1.6.4-1	地球化學的地下水調查評估項目與方法	92
圖 2.1.7-1	開挖影響區的概念示意圖	96
圖 2.1.7-2	開挖影響區的透水性評估流程	97
圖 2.1.7.4-1	不同地層的力學物理性質	103
圖 2.1.8-1	人工障壁對地下水流動影響之檢討流程	106
圖 2.1.9.1-1	處置設施開挖造成氧化範圍增加的進展模式	110
圖 2.1.9.1-2	坑道坑壁的風化研究	111
圖 2.1.9.1-3	開挖造成鹽水影響範圍改變之概念圖	111
圖 2.1.9.1-4	建設處置設施對地球化學環境變化影響之評估流程	112
圖 2.1.9.2-1	海水影響範圍之概念模式	116
圖 2.1.9.2-2	堆積性軟岩的氧化帶移動機制	116
圖 2.1.9.2-3	長期變動現象造成地球化學環境變化的檢討流程	117
圖 2.1.10-1	流出點的流量評估流程	119
圖 2.1.11-1	核種遷移評估參數的設定流程	124
圖 2.1.11.1-1	通過設施流量的設定流程	126
圖 2.1.11.2-1	實際流速的設定流程	127
圖 2.1.11.3-1	遷移路徑長及流出點位置的設定流程	128
圖 2.1.11.4-1	分散特性的設定流程	129
圖 2.1.11.5-1	流出點稀釋水量的設定流程	130
圖 2.2.1.2-1	工程障壁的機能設定流程	132
圖 2.2.1.2-2	處置設施的設計需求	133
圖 2.2.1.3-1	有效黏土密度與透水係數之關係	140
圖 2.2.2-1	建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(1/4)	148
圖 2.2.2-1	建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(2/4)	149
圖 2.2.2-1	建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(3/4)	150
圖 2.2.2-1	建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(4/4)	151



圖 2.2.2.1-1	建設營運階段時的水泥類材料裂縫評估流程 .....	153
圖 2.2.2.2-1	建設營運階段時，膨潤土類材料的有效黏土密度評估流程 .....	156
圖 2.2.3-1	回填後的影響要因及狀態預測 .....	158
圖 2.2.3-2	回填後的工程障壁狀態及影響要因 .....	161
圖 2.2.3.1-1	kunigel V1 與 Ca 型化膨潤土的膨潤壓比較(蒸餾水) .....	163
圖 2.2.3.1-2	人工海水的膨潤壓量測 .....	164
圖 2.2.3.1-3	空隙被水填充後的膨潤壓與有效黏土密度之關係 .....	165
圖 2.2.3.1-4	膨潤壓與含水比的關係 .....	167
圖 2.2.3.1-5	Grimasel 地下研究所的緩衝材試驗及熱-水-應力耦合解析 .....	168
圖 2.2.3.1-6	處置設施的應力-入滲耦合解析案例 .....	169
圖 2.2.3.2-1	足立、岡模型的解析案例 .....	172
圖 2.2.3.2-2	膨潤壓與沉陷量之關係 .....	173
圖 2.2.3.3-1	C-S-H 的熱變化 .....	175
圖 2.2.3.3-2	混凝土加熱後的抗壓強度與抗拉強度之殘存比 .....	176
圖 2.2.3.3-3	壓縮強度和溫度的關係 .....	177
圖 2.2.3.3-4	加熱時間與抗壓強度殘存率之關係 .....	177
圖 2.2.3.3-6	溫度裂縫指數與溫度裂縫發生之機率關係圖 .....	181
圖 2.2.3.5-1	地下構造物的地震反應評估流程 .....	189
圖 2.2.3.6-1	鋼筋的腐蝕狀況及對處置窖與低擴散層的影響示意圖 .....	192
圖 2.2.3.6-2	由碳鋼的氣體發生率計算腐蝕速率的歷時變化 .....	195
圖 2.2.3.6-3	以氫氧化鈣製做試驗溶液的碳鋼腐蝕速率 .....	196
圖 2.2.3.6-4	保護層與產生裂縫時的腐蝕量之關係 .....	196
圖 2.2.3.7-1	飽和水泥砂漿試體的氣體遷移概念示意圖 .....	200
圖 2.2.3.7-2	膨潤土中的氣體遷移機制 .....	200
圖 2.2.3.7-3	氣體遷移試驗前後的透水係數比較 .....	201
圖 2.2.3.7-4	氣體產生對工程障壁的影響評估流程 .....	202
圖 2.2.3.7-5	GMT 的豎坑內部壓力及二相流解析解之比較 .....	203
圖 2.2.3.8-1	不同配比的鈣離子溶出量 .....	210
圖 2.2.3.8-2	浸泡在不同溶液中的鈣離子溶出量 .....	210
圖 2.2.3.8-3	碳酸氫離子抑制溶出現象的概念示意圖 .....	211
圖 2.2.3.8-4	水化物的溶出預測方法 .....	212
圖 2.2.3.8-5	混凝土抗壓強度與溶出率之關係 .....	214
圖 2.2.3.8-6	水泥類材料的彈性係數與溶出率之關係 .....	215
圖 2.2.3.9-1	Na 型膨潤土與 Ca 型瓶潤土的有效黏土密度與透水係數之關係 .....	217
圖 2.2.3.9-2	膨潤土在不同 Ca 型化比例下，孔隙率與透水係數之關係 .....	218
圖 3.3.9-3	Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土，其有效黏土密度與 H-3 的有效擴散 係數之關係 .....	218

圖 2.2.3.9-4 Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土，其有效黏土密度與最大膨潤壓之關係.....	219
圖 2.2.3.9-5 Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土的最大膨潤率差異 .....	219
圖 2.2.4.1-1 裂縫幅度與透水係數之關係 .....	226
圖 2.2.4.1-2 孔隙率與透水係數的關係 .....	226
圖 2.2.4.1-3 裂縫幅度與氘水中的有效擴散係數之關係 .....	227
圖 2.2.4.1-4 裂縫幅度與有效擴散係數之關係 .....	228
圖 2.2.4.1-5 孔隙率與有效擴散係數之關係 .....	228
圖 2.2.4.1-6 OPC 試體中的 Ca 之有效擴散係數.....	230
圖 2.2.4.1-7 OPC、FAC 試體中的有機碳之有效擴散係數.....	230
圖 2.2.4.2-1 膨潤土自身的封閉性確認試驗 .....	233
圖 2.2.4.2-2 各種離子的有效擴散係數與有效黏土密度之關係 .....	234
圖 3.1.1-1 台灣北部火山帶(NTVZ)活動的時空分布圖 .....	237
圖 3.1.1-2 呂宋島弧火山岩噴發活動的時空分布 .....	238
圖 3.1.1-3 大陸東南及台海一帶晚白堊紀至新生代火山岩分布圖 .....	240
圖 3.1.1-4 大陸東南及台海一帶第三紀玄武岩分布時空演變圖 .....	241
圖 3.1.2-1 台灣活動斷層分布圖 .....	244
圖 3.1.3-1 台灣地震分區圖 .....	246
圖 3.1.3-2 台灣地區 1900~2009 年規模大於 4 之地震震央分布圖 .....	248
圖 3.1.3-3 台灣地區 1973~2009 年之地震震源分布圖 .....	249
圖 3.1.4-1 台灣南部的陸上泥火山分布 .....	251
圖 3.1.4-2 台灣西南海域之海底泥火山分布 .....	252
圖 3.1.5-1 草嶺歷年的大崩山之崩滑體與地形演變 .....	254
圖 3.1.5-2 莫拉克颱風後之崩塌地分布圖 .....	259
圖 3.2.1-1 全球過去 15 萬年之氣候變遷 .....	261
圖 3.2.1-2 全球過去 1.8 萬年之氣候變遷 .....	262
圖 3.2.1-3 台灣區域年平均溫度變化圖 .....	264
圖 3.2.2-1 全球過去 15 萬年之海水面變化 .....	266
圖 3.2.2-2 台灣 2 萬年前至今的絕對海平面曲線 .....	266
圖 3.2.2-3 台灣地區特定地點未來 200 年的海平面上升情況 .....	268
圖 3.2.2-4 台灣地區未來 15 萬年海平面自然變遷示意圖 .....	269
圖 3.2.3-1 不同情境下，2080~2099 相對於 1980~1999 之降雨變化百分比....	272
圖 3.2.3-2 A1B 情境下，2080-2099 年相對於 1980-1999 之降雨變化趨勢(以降雨季節劃分).....	272
圖 3.3-2 台灣 1970-1999 年期間侵蝕速率圖 .....	275
圖 3.3-1 台灣侵蝕速率圖 .....	275
圖 3.3-4 台灣全新世構造隆升速率(不含平原及山區).....	276

圖 3.3-3	台灣現代造山運動( $\leq 5\text{Myr}$ )時期之核飛跡剝露率圖.....	276
圖 3.4-1	台東縣達仁鄉建議候選場址處置坑道剖面示意圖 .....	277





# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

為確保低放射性廢棄物最終處置設施可滿足安全需求，行政院原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」，做為後續低放射性廢棄物處置作業推動之管制規範。考量我國與日本之地理環境特性較為相似，以及處置之核種遷移評估為確保處置安全之重要關鍵因素之一，今(102)年度為提升管制技術及持續精進管制規範，擬就日本現行之「低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術之研究」進行研析，以萃取其評估技術精華，藉以提升國內低放處置關鍵管制技術及精進相關管制規範。

## 1.2 服務項目及工作範圍

依招標規範規定，本計畫之工作項目如下：

- 一、研析日本土木學會研究出版「低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術之研究」，研提其關鍵評估技術。
- 二、依前項研析結果，就我國處置及環境等特性，研提我國低放射性廢棄物處置設施核種遷移參數評估技術建議，做為安全分析報告審查及管制作業之參考。
- 三、綜合分析前述研析成果，研提「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」相關章節之精進建議。
- 四、撰寫研究成果報告。

### 1.3 日本坑道處置設施概述

日本的放射性廢棄物可分為高放射性廢棄物及低放射性廢棄物兩種，高放射性廢棄物來源為核燃料再處理後之玻璃固化體，主要以深地層方式處置；而低放射性廢棄物則依其來源及放射性強弱，規劃有近地表及地下坑道等處置方式，其中，地下坑道式處置的處置對象包括電廠、再處理設施及 MOX 燃料加工設施於運轉及除役時產生之低放射性廢棄物。

考量處置場的長期安全性，處置場於規劃時需考量以下條件：(1)處置深度須遠超過一般地下水利用深度。(2)選擇抑制放射性核種遷移機能較佳之場址。(3)處置設施的抑制核種遷移機能需比近地表處置設施良好。基於以上條件，日本之低放射性廢棄物地下處置坑道設置於地表下 50 公尺處，並以天然障壁及工程障壁組合而成的多重障壁系統，遲滯放射性核種遷移，確保處置之安全性，如圖 1.3-1 所示。

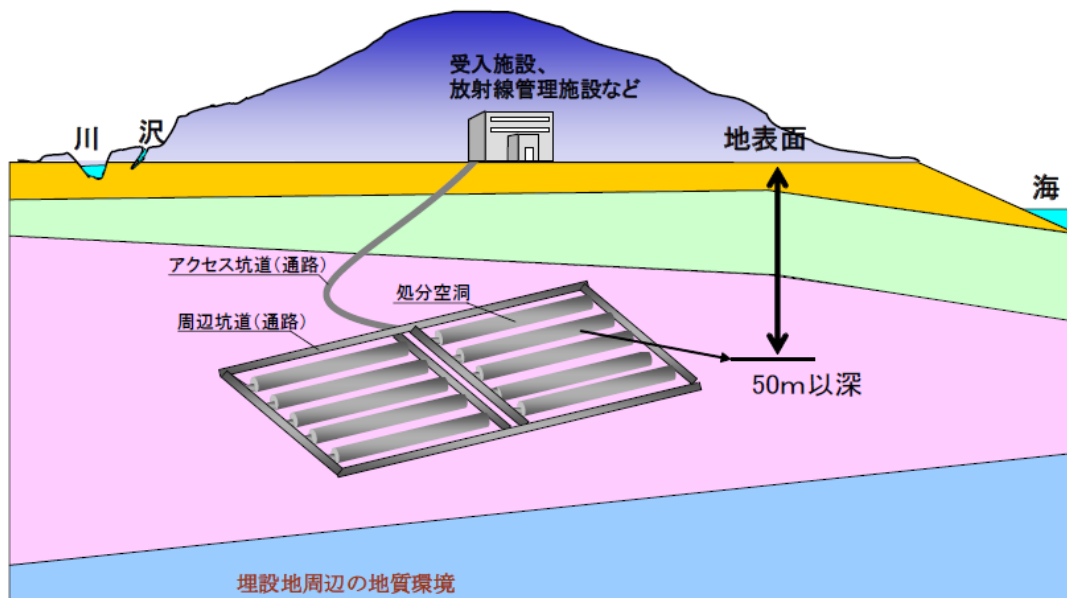


圖 1.3-1 低放射性廢棄物地下處置設施概念圖

地下坑道處置設施主要包含低放射性廢棄物接收設施、低放射性廢棄物埋設之處置坑道、處置坑道之聯絡坑道，以及包含處置坑道之工程障壁系統。工程障壁系統大致可概分成使用水泥類材料的工程障壁、使用膨潤土類材料的工程障壁及與處置坑道相關之支保工等。使用水泥類材料的工程障壁包括處置窖、填充於廢棄物與處置窖間空隙的填充材及包覆於處置窖外層的低擴散層。使用膨潤土類材料的工程障壁則包括包覆於低擴散層外層的低透水層及填充於坑道與低透水層間空隙的回填材，如圖 1.3-2 所示。

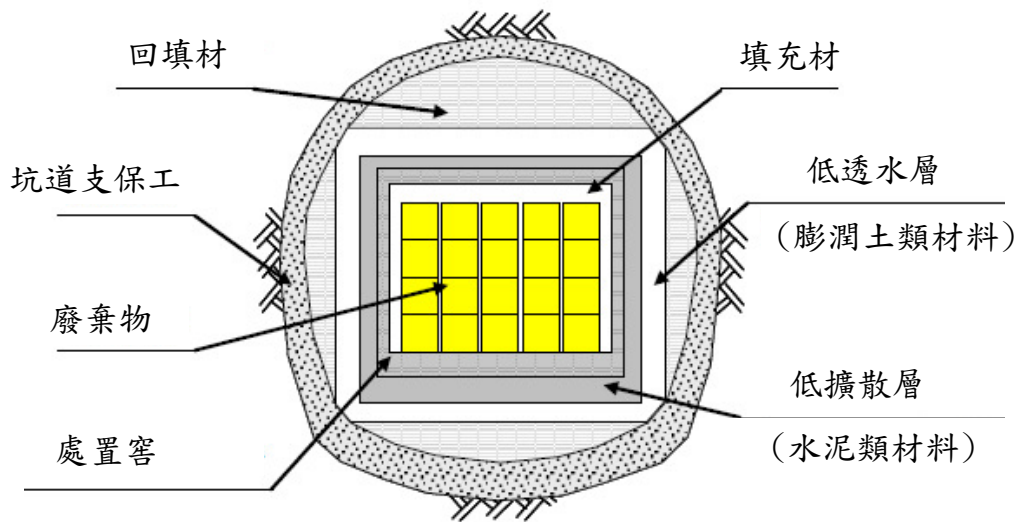


圖 1.3-2 工程障壁構造示意圖

#### 1.4 安全分析之地下水情節參數設定概述

低放處置設施主要藉由多重障壁系統來遲滯核種遷移，故處置設施功能完善與否，為達到保障民眾與環境安全之關鍵，而安全分析即是評估其安全性之主要分析技術。在進行低放射性廢棄物處置的安全評估時，需先確認所有可能影響處置場安全的特徵、事件、作用，其次在這些特徵、事件、作用(簡稱 FEPs)中，選擇會影響處置場核種外釋的重要 FEPs，依場址特性及合理的邏輯關

係推演形成各種情節。安全分析即依據情節分析的結果，蒐集必要之參數及數據，利用適宜之評估模式進行分析，並將模式評估的結果與法規標準比較，以證明處置場的安全性符合對民眾健康的保護。依據日本原子力安全委員會(Nuclear Safety Commission, NSC)在 2004 年 6 月修正放射性廢棄物處置安全管制的共同重要事項，考量處置設施之長期安全具有很高之不確定性，故依不同發生頻度的事件所對應之情節，採取不同的劑量限值，其情節設定包括基本情節、變動情節及人為或稀有事件情節，各情節所對應之劑量限值分別為  $10\mu\text{Sv/y}$ 、 $0.3\text{mSv/y}$  及  $10\sim 100\text{mSv/y}$ 。

核種自源項傳輸至生物圈的途徑，依傳輸媒介不同可分為固態、氣態及液態傳輸，其中尤以地下水傳輸為最具代表性，其概念如圖 1.4-1 所示。日本針對地下水傳輸情節，考量天然障壁受到氣候及地質環境影響的長期變動項目，以及工程障壁受到周邊地下水、地質與岩盤特性影響之長期狀態變化，提出安全分析所需參數之設定方向，作為安全分析時之參考，如圖 1.4-2 所示，以提升安全分析結果之精度。

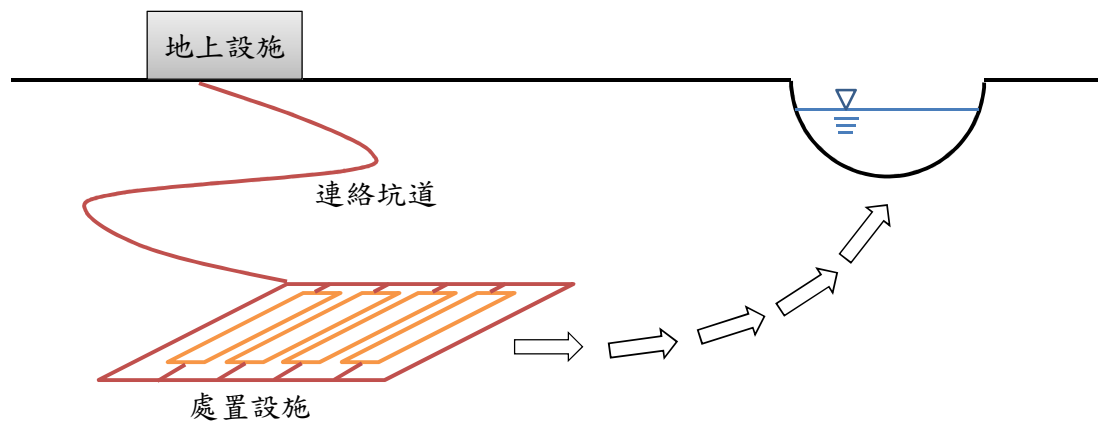


圖 1.4-1 地下水傳輸概念

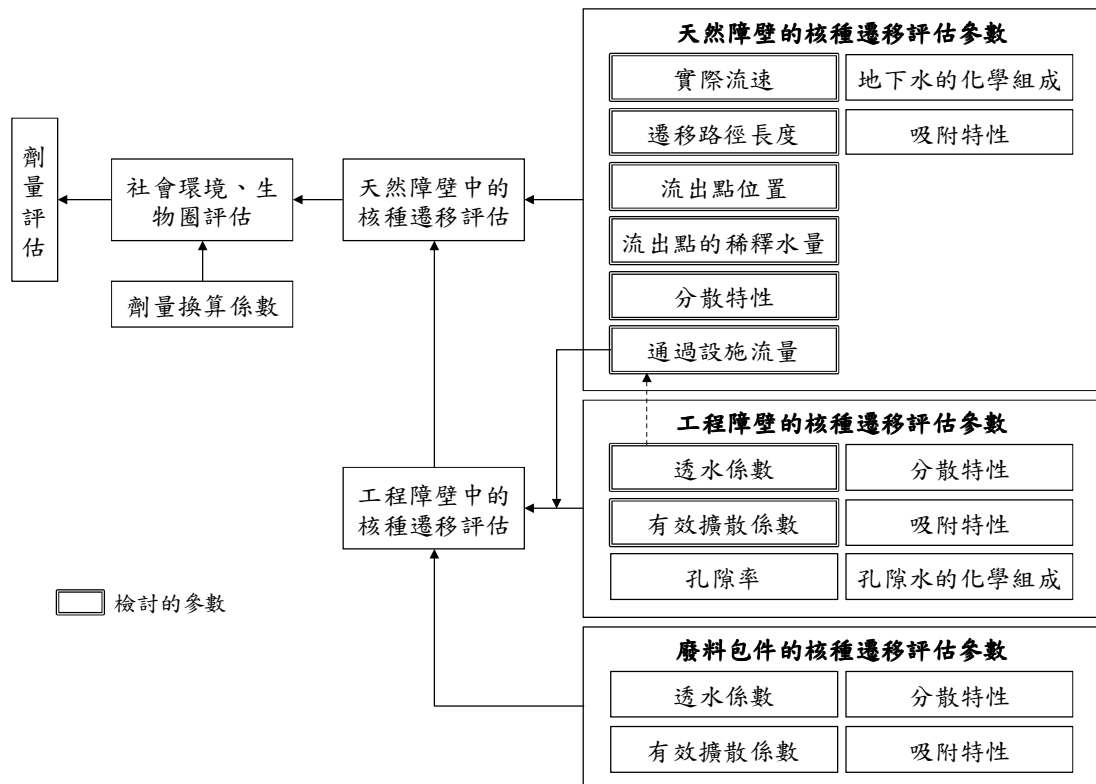


圖 1.4-2 評估地下水情節所需之核種遷移主要參數

## 第二章 日本低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術

### 2.1 天然障壁的核種遷移參數設定

在地下水情節中，於設定天然障壁的核種遷移評估參數前，需先調查處置場址的地質與水理特性，選擇適合的數值模式進行地下水流動解析，並考量氣候與海平面變化、地形變化等長期變動現象對未來的設施及地下水流動之影響，最後根據相關評估與解析結果設定與天然障壁有關的核種遷移評估參數，其流程如圖 2.1-1 所示，各評估項目之內容說明如后。

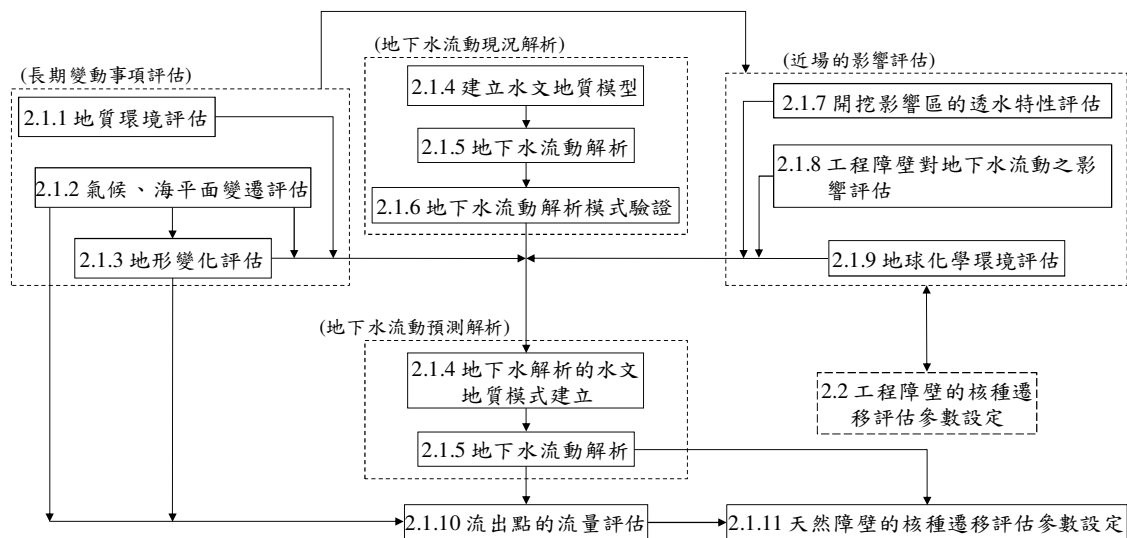


圖 2.1-1 天然障壁的核種遷移評估參數之設定流程



### 2.1.1 地質環境評估

地質環境的評估可從對處置設施的影響及對核種遷移的影響等兩方面著手，一方面須確認地質環境不會使處置場於營運階段發生重大事故，另一方面則需考量未來地質環境受到邊界條件影響的長期變動狀況及其對核種遷移的影響。地質環境需考量的項目有火成活動、斷層活動、地震、風化、泥火山、塊體運動(Mass movement)等，相關調查方法彙整如表 2.1.1-1 所示，主要是以文獻調查、現地調查及解析等方式，取得現在及過去的地質環境資訊。地質環境的長期變動現象大致可區分為由地球內部能量引起的板塊運動(Plate tectonics)、因太陽活動與地球軌道等周期性變化所造成的氣候變遷以及兩者相互影響而造成的地域性的變動，如圖 2.1.1-1 所示。藉由分析過去至今的長期變動現象發生原因與規則性，以評估未來板塊運動的持續性、氣候變遷的周期性及地域性變動等長期變動現象的變動時間與變動幅度，並提升預測的準確性。

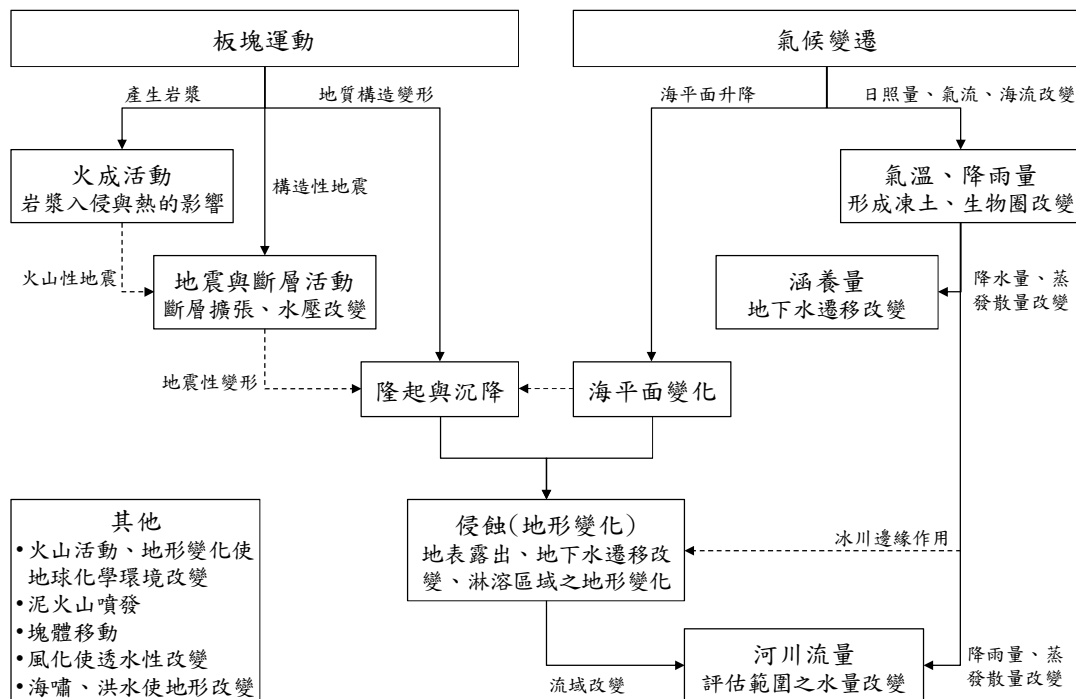




圖 2.1.1-1 長期變動現象的項目及其關聯性

表 2.1.1-1 地質環境評估所需的資訊與調查方法

地質現象	評估需要的資訊	主要調查方法	調查的目的
火成活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>火山的空間分布、時間分布、規模</li> <li>地溫分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文獻調查</li> <li>地表現勘</li> <li>鑽探調查</li> <li>地溫分布測量</li> <li>火山碎屑流模擬</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>評估處置場址發生火山的可能性。</li> <li>評估岩漿、火山碎屑流到達處置場址的可能性及影響。</li> <li>掌握處置場址周邊的地熱分布、地熱源頭，並評估影響範圍。</li> </ul>
斷層活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>活構造(斷層、摺曲、撓曲)的分布、裂縫等影響範圍</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>判讀空拍照片</li> <li>地表現勘</li> <li>鑽探調查</li> <li>物理調查</li> <li>地質年代量測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>評估活構造對處置場址的影響。</li> <li>評估活構造的影響範圍。</li> </ul>
地震活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>推測地震規模</li> <li>地震造成地形、地下水流動改變</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文獻調查</li> <li>孔隙水壓量測</li> <li>地震觀測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握處置場址的地震規模。</li> <li>量測孔隙水壓，掌握地震對水壓變化之影響。</li> </ul>
風化	<ul style="list-style-type: none"> <li>風化的進展速度</li> <li>風化造成透水性的變化量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鑽探調查</li> <li>礦物與化學組成</li> <li>透水試驗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握地形變化、海平面變動及地下水補注量變化對風化進展速度之影響。</li> </ul>
泥火山	<ul style="list-style-type: none"> <li>可成發生泥火山的地質、孔隙水壓分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表現勘</li> <li>鑽探調查</li> <li>物理調查</li> <li>孔隙水壓量測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握泥火山發生的可能性及其影響。</li> </ul>
塊體運動	<ul style="list-style-type: none"> <li>可能產生塊體運動的地質與地質構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表現勘</li> <li>鑽探調查</li> <li>物理調查</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握塊體運動發生的可能性及其影響。</li> </ul>
氣候與海平面變動	<ul style="list-style-type: none"> <li>未來的氣溫及降雨量的變化量</li> <li>未來的海平面變動量</li> <li>因氣溫降低與岩盤凍結造成之地下水補注量變化量</li> <li>地下水補注量改變對地下水流動的影響</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文獻調查</li> <li>氣象調查</li> <li>地表現勘</li> <li>鑽探調查</li> <li>堆積現象解析</li> <li>花粉化石分析</li> <li>堆積物年代測定</li> <li>表面流出水量測定</li> <li>氣候模擬</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取得過去氣溫、降雨量、海平面變動等相關資料，作為未來狀況預測之基本資料。</li> <li>由氣溫、降雨量、河川流量等氣候變動，預測地下水補注量的變化。</li> <li>利用地下水流動解析，掌握永凍土對地下水補注量變化之影響。</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流動解析</li> </ul>	
地形變化 (隆起、沉 降、侵蝕)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 由海平面變動量、隆起量、侵蝕量預測設施位置未來的地形</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 空拍照片判讀</li> <li>• 地表現勘</li> <li>• 堆積物年代測定</li> <li>• 地下水流動解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 掌握處置場址過去的隆起與沉降量，及其持續性。</li> <li>• 由地形發展史掌握侵蝕的種類與侵蝕的型態，根據海平面變動與隆起量所推估的侵蝕基準面，預測未來的地形變化。</li> <li>• 預測未來的流出點形態變化。</li> <li>• 考量地形變化及地下水流動解析資料後，製作未來的地形模型。</li> </ul>
地球化學 環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 因火成活動、地形變化、氣候變動造成的地球化學環境變化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水質測量</li> <li>• 地球化學分析</li> <li>• 透水試驗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 由水質測量掌握地球化學環境現況。</li> <li>• 考量火成活動、地形變化、氣候變動等現象後，預測透水性、氧化區域及水質變化。</li> </ul>
流出點 流量	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 因氣候變動、地形變化造成的流出點流量變化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 文獻調查</li> <li>• 地形變化預測</li> <li>• 氣候變動預測</li> <li>• 氣象調查</li> <li>• 氣候模擬</li> <li>• 地下水流動解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氣候變動、地形變化發生後之流出點流量。</li> </ul>

### 2.1.1.1 火成活動的評估

當處置設施遭遇岩漿流入或岩漿噴發的狀況時，可能會造成處置設施直接顯露、天然障壁受損形成核種遷移最短路徑以及地表或地下溫度改變使地下水流明顯改變等現象。此外，火山周邊易有高溫與強酸性的環境，處置設施可能會受到火山氣體、水質變化及地表溫度改變等影響。故評估時是以處置場附近的火成活動紀錄為基本，先確認處置場不是位在第四紀火山帶，檢討熔漿、火山碎屑流、火山泥流等火成活動的影響範圍，及其對天然障壁、地下水流動及地球化學環境之影響。

#### 一、日本的火成活動現況

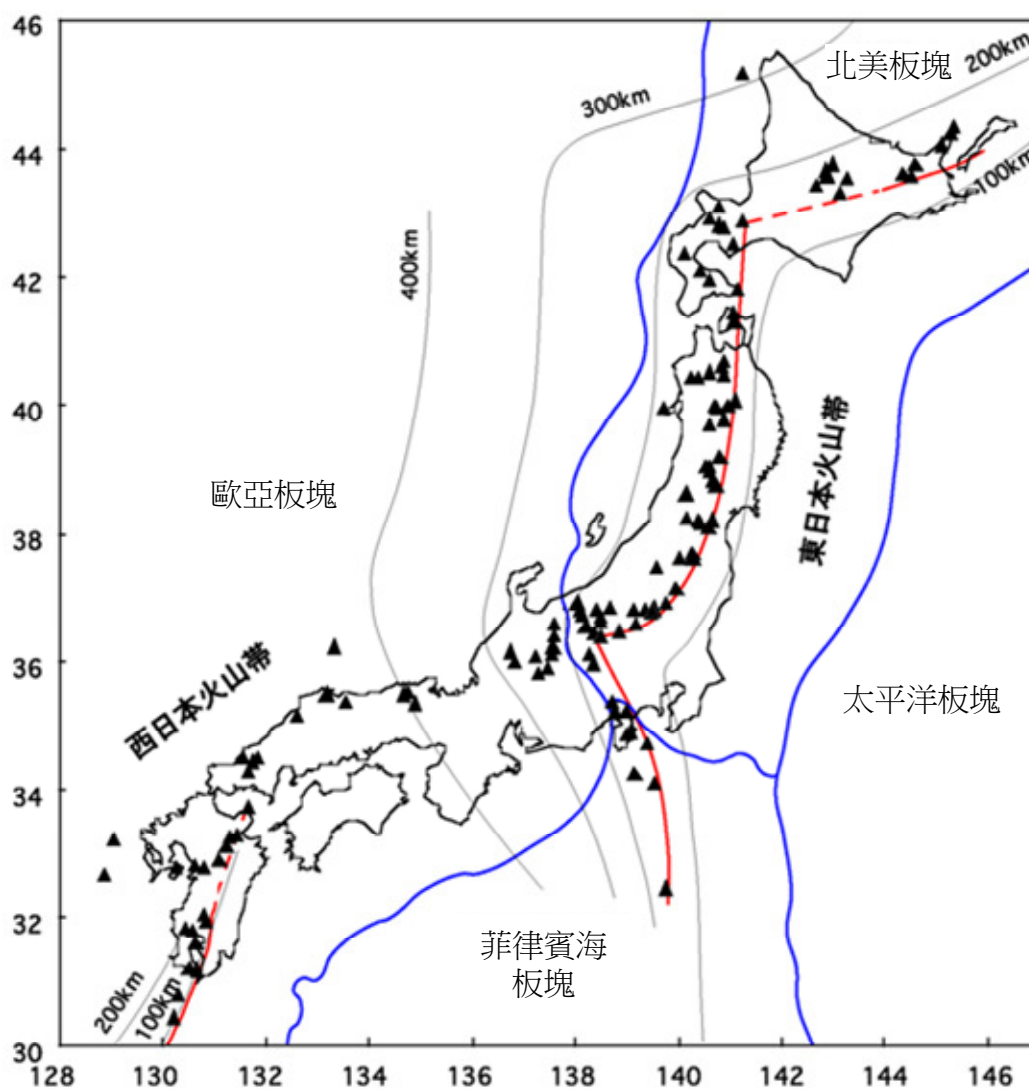
日本列島的第四紀火山自東北日本、小笠原島弧、山陰、九州到南西諸島呈帶狀散落分布在島弧後側，此帶狀火山大約沿著隱沒的海洋版塊之 100km 等深度線西側分布，如圖

2.1.1.1-1 所示。由於火山帶的寬度受到板塊角度影響，故與板塊的分布、隱沒的方向與角度有密切的關係。日本彙整與火山活動、地溫、熔漿、火山碎屑流、火山泥流等火成活動相關之文獻資料，分別說明下。

#### (一)火山活動範圍隨時間的變化

火山位置的大規模移動主要受到板塊運動影響，由於日本列島周邊的太平洋板塊及菲律賓海板塊分別從 250 萬年前與 150 萬年前開始即無運動方向上的改變，且板塊運動所需時間約 100 萬年以上，故日本列島周邊之板塊於 10 萬年內不會有劇烈的變化，板塊運動不會對火山位置造成影響。

統計東北日本過去的火山前緣(volcanic front)移動量如圖 2.1.1.1-2 所示，第四紀火山前緣的移動量大多在數十公里的範圍內。對於個別火山的活動範圍，統計日本 344 個第四紀火山與第四紀火山群中心的距離，其中有 98% 的火山與火山群中心的距離都在 15 公里以內，如圖 2.1.1.1-3 所示。



(第四紀火山カタログ委員会編, 1999を編集)

(▲:第四紀火山; — 火山前緣 ; — 板塊邊界 ; — 板塊隱沒等深線 )

圖 2.1.1.1-1 日本列島周邊的板塊位置及第四紀火山分布

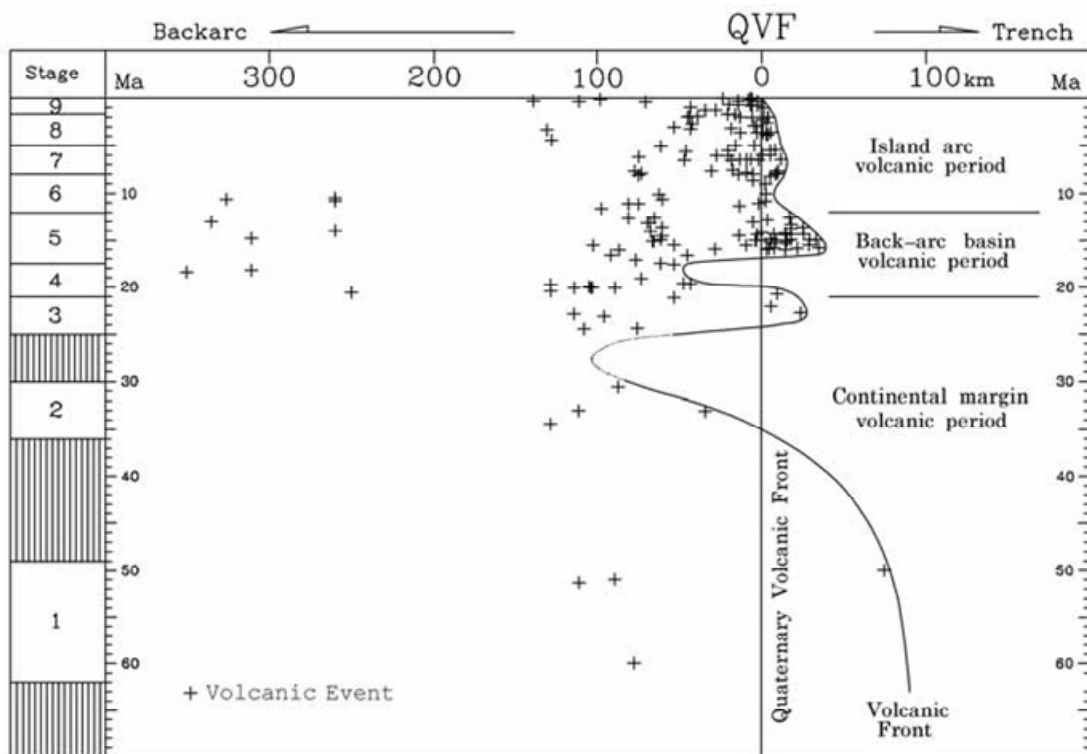


圖 2.1.1.1-2 過去 6000 萬年間的火山前緣移動量

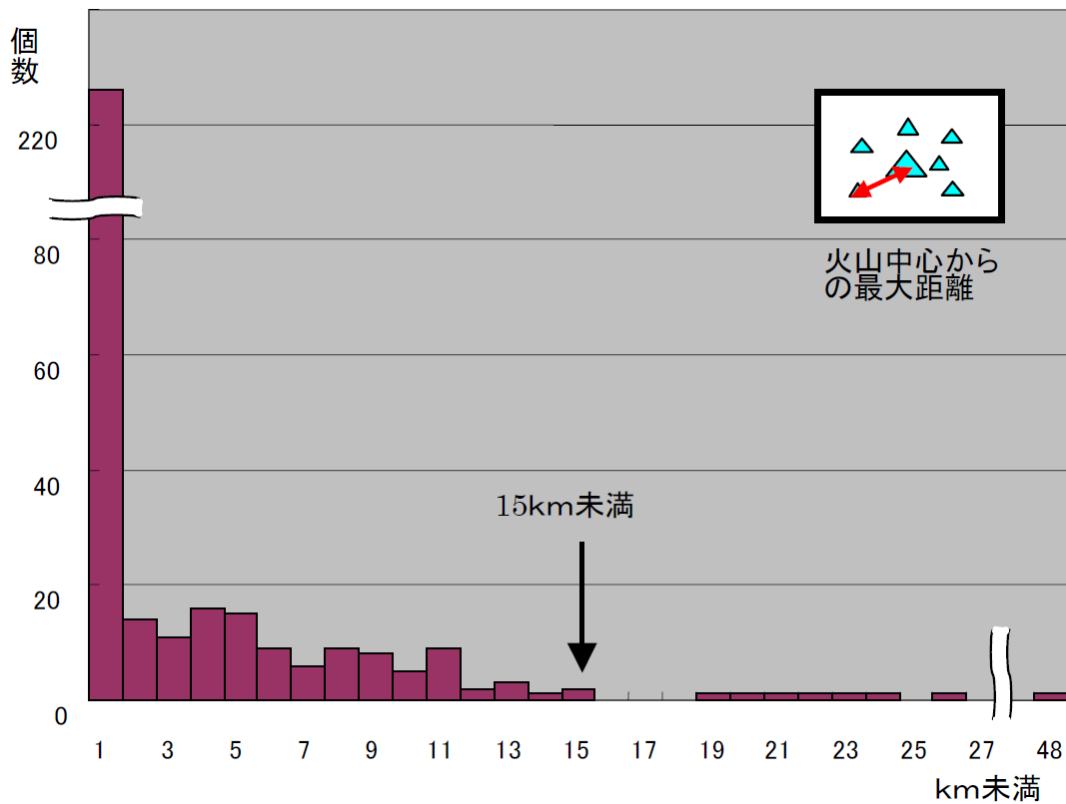


圖 2.1.1.1-3 各個火山與第四紀火山群中心之距離

## (二)岩漿流入與噴發的地點、規模與特性

為預測未來岩漿流入、噴發的地點、規模與特性，需蒐集各個火山的活動特性與發展經過等相關資料，以此為基礎檢討過去到現在的岩漿流入與噴發歷程，找出其中的傾向與規則性。根據日本研究東伊豆單成火山、有珠火山、富士火山、三宅島火山、霧島火山、櫻島火山等火山的火山口分布、火山構造及應力場等特性，彙整出火山口移動的特徵，說明如下：

- 1.火山口的移動特性會隨廣域應力場及局部應力場不同而改變。
- 2.局部應力場的範圍幾乎與火山本身大小一致。
- 3.錯動斷層的應力差，可能會造成岩漿的水平移動。
- 4.火山構造中的不連續面可作為阻礙岩漿移動的障壁。
- 5.廣域應力場及岩漿流入造成的局部應力場皆會影響單成火山群的分布。

## (三)地溫分布

日本列島不包括火山區域的地溫梯度約為 $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ~ $5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，而在第四紀火山周圍因受到火成活動影響，其地溫梯度則超過 $10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，且自火山噴發中心起算半徑 20 公里之範圍內皆會受到影響，如圖 2.1.1.1-4 所示。



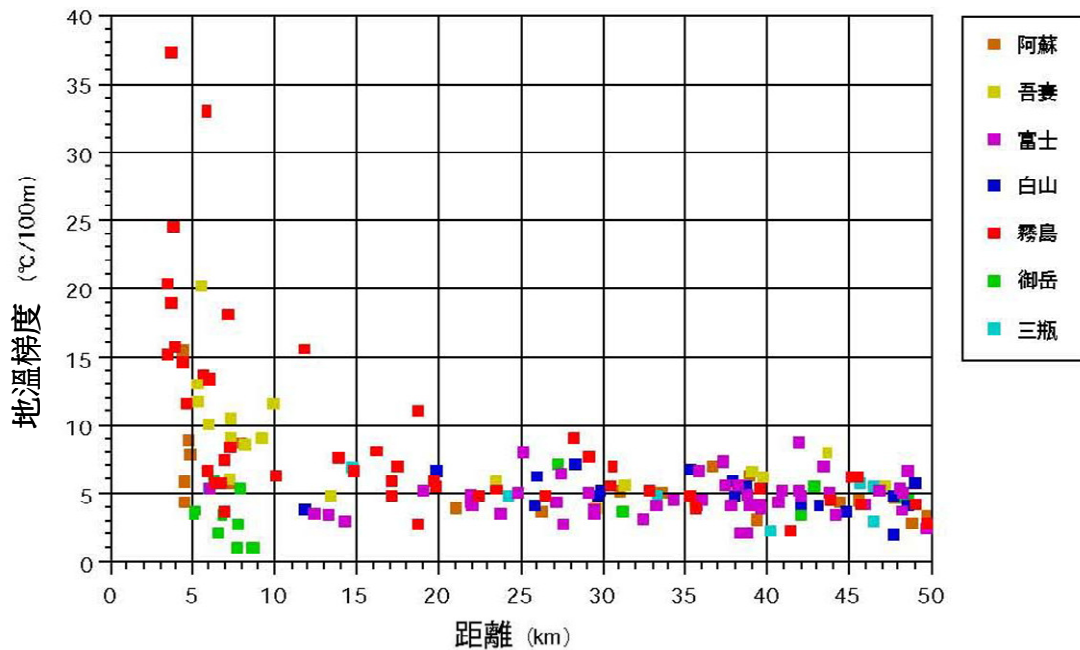


圖 2.1.1.1-4 地溫梯度與火山噴發中心間距之關係

#### (四)熔漿、火山碎屑流與火山泥流的分布

根據日本地質調查所推估富士火山的三島熔漿流研究，熔漿流最遠可流到 50km 左右。而根據日本對規模最大的阿蘇火山碎屑流的調查，距離 40km 處之厚度約 100m，如圖 2.1.1.1-5 所示，且最遠可流到 160km。此外，為了解火山碎屑流造成的熱效應，以數值方法分析覆蓋厚度 100m 的火山碎屑流(不考慮降雨及海水冷卻效應)，其結果如圖 2.1.1.1-6 所示，當火山碎屑流溫度 900°C 時，地下 100m 處的溫度可超過 100°C 以上，且可持續 600 年。另外，火山湖的崩塌與積雪地區的火山噴發所造成的火山泥流，其規模較降雨產生的泥流大，根據對富士火山相模川泥流的調查，泥流最遠可達約 120km。

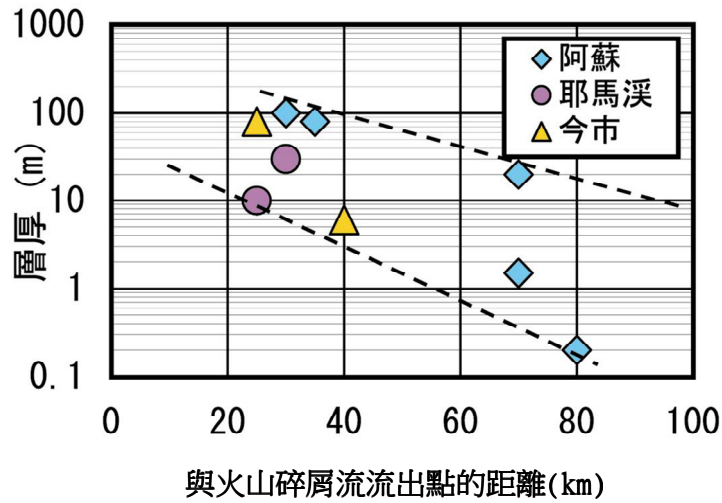


圖 2.1.1.1-5 火山碎屑流的厚度與距離之關係

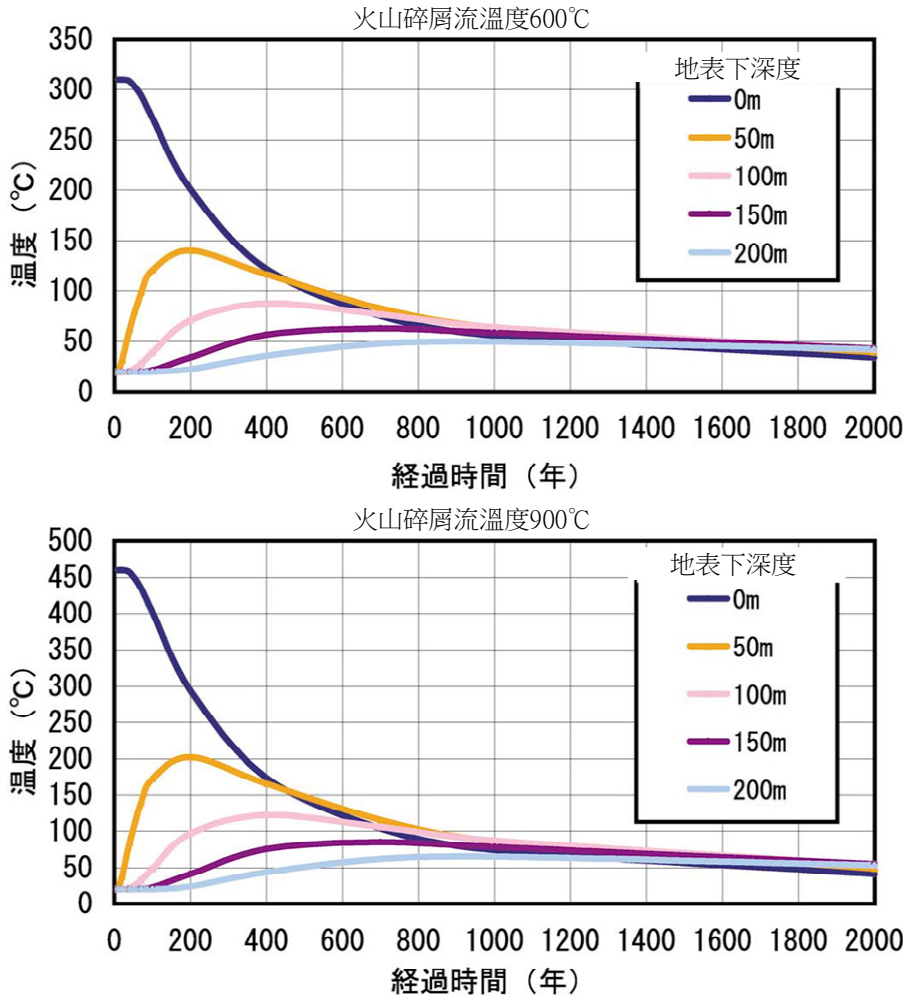


圖 2.1.1.1-6 火山碎屑流於覆蓋厚度 100m 時地表下的溫度變化

二、評估方法



### (一)未來的火山分布與活動範圍

評估未來的火山分布與活動範圍時，除參考第四紀火山的形態、側火山的分布、活動位置的變遷、火山前緣與火山活動的規則性等資料外，亦需考量岩漿形成過程與壓縮應力場間的關聯性。此外，利用個別火山體與第四紀火山中心間的距離、個別火山體的火山口移動等資訊，評估處置場未來受火成活動所產生的岩漿流入與噴發影響之可能性。

### (二)未來的地溫分布

由於距離火山 20km 以上的地方，地溫上升的可能性較低，故可推估火山活動位置起算 20km 的區域內，為未來地溫受到火山活動影響之範圍。若超過 20km 以上且沒有火成活動影響但有地溫梯度大的區域出現時，則需重新評估處置場的地溫梯度與地下深處的熱源構造。

### (三)未來的熔漿、火山碎屑流與火山泥流之影響範圍

參考處置場所在位置及其附近區域，由其過去曾發生的火成活動所造成之熔漿與火山碎屑流的分布範圍記錄，進行未來的狀況預測。

#### 2.1.1.2 斷層活動的評估

若處置場位於活動斷層上或是鄰近地區有活動斷層，當斷層錯動或因錯動而擴展至處置場時，將會直接影響處置設施及天然障壁。即便斷層錯動未直接到達處置場，但處置設施周邊岩盤的變位與變形也會使透水性產生變化，影響地下水流動。故可以處置場周邊環境的地形、地質與地質構造的資料為基礎，確認處置場附近是否具有會直接或間接影響處置設施及天然障壁的活動斷層，並評估活動斷層影響的水理範圍。

## 一、現況說明

### (一)斷層的擴展與移動

日本對活動斷層的認定可分為廣義及狹義兩種，廣義的活動斷層為第四紀以來曾經活動過且未來可能再度活動的斷層，狹義的活動斷層則是自第四紀後半或過去 10 萬年以來曾經活動過且未來可能再度活動的斷層。可視評估需求斟酌調整活動斷層的時間尺度。

由於斷層在反覆活動下，會在地表附近產生斷層分支或衍生新斷層。日本土木學會指出，這些衍生的斷層幾乎是夾雜斷續的存在於活動斷層間，且距離相近，方向大部分為平行或斜向同一方向，故評估時需以「活動斷層帶」作為考量。此外，對單一斷層於縱向的擴展，彙整現有資訊說明如下：

- 1.斷層的長度大約為累積位移量的 10 倍。其中，累積位移量可以平均位移速度與考慮時間之乘積表示，而考慮時間內的斷層擴展速度約是平均位移速度的 10 倍。
- 2.具有兩面以上段丘面之斷層，在數十萬年間沒有成長或擴展的跡象。此外，在地殼應力場沒有顯著變化的區域，若目前沒有活動斷層存在，將來也較不會有新的活動斷層產生。

### (二)斷層的水理影響範圍

對於斷層的水理影響範圍，目前雖有地震時造成斷層附近地下水位產生變化的案例，但現階段並沒有影響範圍的定量化評估。由於周邊岩盤因變位產生裂縫的範圍，可能會與水理影響範圍相同，故彙整因斷層而產生變位與變形的範圍評估資料，作為水理影響範圍評估之參考。由圖 2.1.1.2-1 可知，地震時斷層會產生垂直變位的範圍，約在斷層附近的 10km 距離以內，因此，日本土木學會依照上述數據提出：「因斷層產生的顯著影響，僅限於斷層起算 1km 之範圍

內」。而圖 2.1.1.2-2 為日本調查光明斷層(超過 100 萬年以上活動時間且長度超過 50km 的斷層)周邊小斷層的分布結果，由圖可知，若以主斷層為中心，則主斷層左右兩邊 2km 的範圍外，幾乎沒有小斷層分布及變位或變形產生。

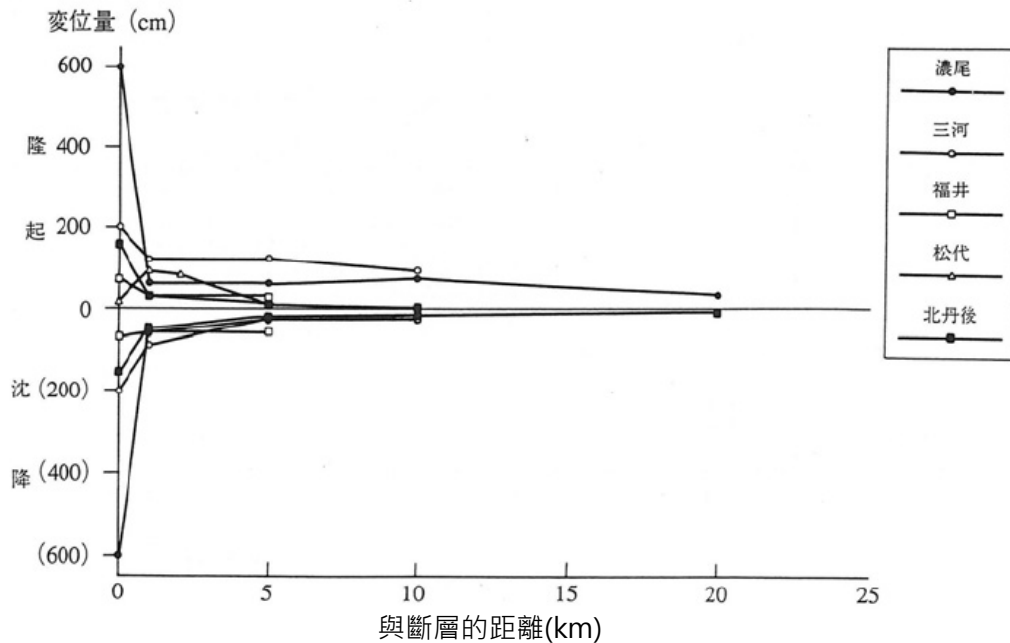


圖 2.1.1.2-1 地震斷層周邊的地盤隆起與沉降

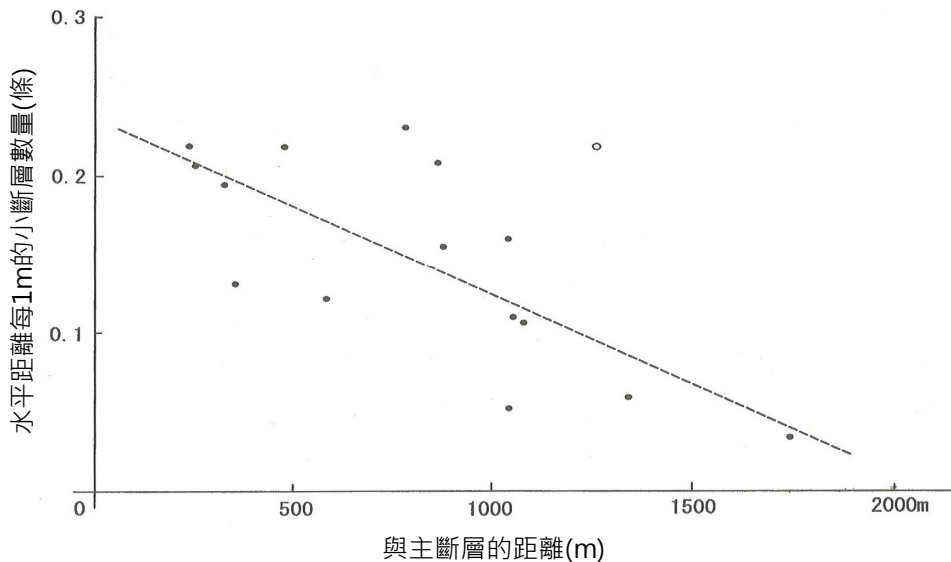


圖 2.1.1.2-2 主斷層周邊小斷層的分布密度與主斷層之距離

(三)活動褶曲與活動撓曲

褶曲是指地層的波浪狀變形，撓曲是指平坦且重疊的地層中，局部的傾斜造成的彎曲現象，也可稱為單斜構造。活動褶曲則是指通過第四紀構造所生成的褶曲，而活動撓曲亦同。有關活動褶曲與活動撓曲的主要資訊彙整如下：

- 1.活動褶曲與活動撓曲主要是伴隨著壓縮應力或基盤的斷層運動所形成。
- 2.活動褶曲與活動撓曲之變形方式主要有 3 種：
  - (1).具有第四紀堆積層的未固結或半固結層以及新第三紀堆積層的沉積岩等較厚地層的分布區域，其受到壓縮應力作用，造成地下深處的震源斷層(seismogenic fault)活動，導致斷層直接變形，但因沒有傳達到地表，僅在地層內延展變形。
  - (2).隨著斷層拖曳而變形。
  - (3).無論有無斷層，地層的延展性受到壓縮應力的擠壓而變形。
- 3.活動褶曲多伴隨背衝斷層產生。
- 4.伴隨褶曲產生的斷層，一般有褶曲構造中受到局部壓縮應力場所形成的低角逆斷層、受到局部拉力場所形成的高角正斷層及低角逆斷層與高角正斷層的並排彎曲滑動(flexural slip)等，而曲滑斷層(flexural-slip fault)可能為背斜或向斜。

## 二、評估方法

### (一)活動斷層的分布、擴展與移動之評估

藉由文獻調查、空拍照片判讀、地表現勘、鑽探調查、物理調查等方法，評估處置場周邊的斷層、褶曲與撓曲的分布狀況。若有明確的地表或海底變形或未經確認的斷層與斷層錯位存在的可能性時，可以褶曲構造及撓曲構造為基礎推

估深部斷層，輔以考量段丘的分布特性、隆起與沉降等，檢查有無斷層、褶曲與撓曲構造分布。

## (二)水理影響範圍評估

為評估斷層活動對水理造成的影響範圍，可以變位與變形構造範圍的相關資料為基礎，加上對處置場的地質條件與斷層活動之調查結果，綜合評估水理影響範圍。

### 2.1.1.3 地震評估

當地震發生時，不論是發生地滑與坡面崩塌等地形變化，或是使工程障壁中已存在的裂縫串連，改變地下水流的流速與流向等現象，都有可能降低工程障壁抑制核種遷移之機能。故需以過去之地震紀錄、板塊邊界與斷層等資料，評估未來可能發生之地震規模及其對處置設施之影響。

#### 一、現況說明

##### (一)地震規模

日本的地震規模資料來源主要參考地震調查委員會利用「機率論的地震預測地圖」及「特定震源斷層(seismogenic fault)的地震預測地圖」等兩種地圖，所彙整出之「全國地震預測概估地圖」。

「機率論的地震預測地圖」是將日本列島的地震分類，檢討各種地震的發生地點、規模及發生的可能性，並將日本分成 1 平方公里的格網，分析將來可能發生的地震規模與機率。

##### 1.發生於陸域及沿岸地區之地震

- 發生在 98 個主要斷層帶的特性地震(characteristic earthquake)



- 發生在 98 個主要斷層帶但不屬於特性地震之地震
  - 發生在 98 個主要斷層帶以外的活斷層之地震
  - 發生在陸域且屬於非特定活斷層之地震
  - 發生在上述區域以外之地震
2. 發生在海溝、板塊邊界及其附近之地震
- 海溝型地震(伴隨板塊隱沒產生的大地震)
  - 發生於板塊間但不屬於大地震之地震
  - 發生於隱沒或已經隱沒的板塊內但不屬於大地震之地震
  - 發生在上述區域以外之地震

「特定震源斷層(seismogenic fault)的地震預測地圖」是針對上述地震進行強地震評估所得之 14 個震源斷層(seismogenic fault)，進行下述的計算與驗證，評估個別地震的詳細規模與發生機率。

1. 設定特性化震源模式(包括可表現巨觀震源特性的震源斷層(seismogenic fault)形態與規模，及可表現微觀震源特性的震源斷層(seismogenic fault)不均質性)。
2. 建立地下構造模式(設定地震基盤及基礎工程)
3. 計算強地震(有限差分法及統計上使用的格林函數法與混合合成法)。
4. 驗證預測結果(比較波形、震度分布等)

此外，於選擇處置場的地震規模時，可參考下列方法進行。

1. 詳細調查處置場周邊的活動斷層性質及過去地震發生的狀況，加上中、小與微小地震的分布、應力場、地震發生

型式(包含板塊的形狀、運動、交互作用)等研究成果，進行綜合檢討。

- 2.將下列地震做為選擇的重要參考。
  - 大陸地殼內地震。
  - 板塊間地震。
  - 海洋板塊內地震。
- 3.當震源在場址附近，且評估其可能會對處置設施造成重大影響時，須著重於斷層模式方法。
- 4.若要考量「基準地震 Ss 訂定過程中的不確定性」時，須依照可能影響不確定性之原因及程度，選擇適合的方法。
- 5.對於「沒有特定震源的地震」，即使對於場址周邊環境進行充分調查，也無法對場址附近所有可能發生的大陸地殼內地震進行評估。此外，對於沒有在地表留下明顯跡象的震源斷層(seismogenic fault)所造成的地震，必要時可以機率論的方式進行評估。
- 6.選擇檢討用的地震與訂定基準地震 Ss 時，須進行必要的調查與評估，而對於以往資料，須充分考量其精度後方可使用。
- 7.對於設施的構造及支撐該設施的地盤而言，若確認地震反應譜有特殊的周波數特性時，須反饋至基準地震 Ss 的訂定上。

## (二)對地下水流動的影響

日本核燃料循環開發機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC)彙整 1995 年兵庫縣南部地震及 2000 年鳥取縣西部地震等觀測案例，以了解地震對地下水流之影響，簡要說明如下。

- 1.對地下水位的變化量而言，若地下水位在地表下 30m 以內，則地下水位大約降低數十公分至 5 公尺，最大可至

- 18 公尺。但若超過地表下 30m，則大約上昇數公分至數十公分，最大觀測值為 3 公尺。
2. 對震源斷層(seismogenic fault)周邊地下淺層之透水係數平均變化量而言，斷層活動後的透水係數約為活動前的 5~7 倍。
  3. 大部分受到地震擾動影響之地下水位與水壓，可以在數個月或數年內恢復，但在活動後的斷層周邊，則有經過數年後仍沒有恢復的情形發生。

因此，地震對的地下水流動變化的長期影響範圍，僅限於活動後的斷層周邊。

## 二、評估方法

日本原子力安全委員的「耐震設計審查指針」主要是以場址可能發生的最大級地震作為考量。目前對於地震的評估則以此指針為基礎，考量斷層的規模與活動經歷、受板塊影響之地震等項目後，求得地震規模。對於未來的地震評估，則需考量地下坑道處置的評估期間尺度、地震的反覆程度及不確定性之幅度等項目後進行預測。

而在地震對地下水流動的影響中，依據過去的文獻資料顯示，地震對地下水流動變化的長期影響範圍，僅限於活動後的斷層周邊。若處置設施附近沒有活動斷層存在，則受影響的機率較低。但此結論是針對部分案例分析所得之結果，往後仍需持續蒐集資料，以提升評估之準確性。



#### 2.1.1.4 風化評估

風化作用分為物理風化及化學風化兩種，物理風化作用主要是岩石受到溫度變化產生的熱脹冷縮、孔隙水結凍膨脹、地殼變動時的抬升作用及生物活動造成岩石縫隙加大等物理機制影響。化學風化作用則是指岩石中所含的礦物或化學成份發生變化，水和氧兩種物質，是促進化學風化主要的因素。化學風化最主要的方式有氧化、碳酸鹽化、溶解、水合、水解和生物作用等六種。

風化區域的岩盤力學特性與水理特性，皆與未受風化之區域不同。因未來的隆起、沉降、氣候與海平面變化，導致地表的侵蝕及降水量改變，進而發生地下水位及水質改變、凍結融解加速、上載荷重減少等現象，造成物理與化學風化擴展至較深的區域。故需以地形、地層與岩石的現況，加上岩石-水之反應等資訊為基礎，評估風化的影響範圍。

##### 一、現況說明

彙整風化的影響範圍及擴展速度等相關資訊說明如下。

##### (一)風化的影響範圍

風化作用是由地表開始產生的現象，其影響範圍受到岩盤的裂縫分布、透水性、礦物與化學組成等影響，可藉由鑽心取樣、透水試驗、礦物與化學分析等方法來掌握此方面的資訊。

##### (二)風化的擴展速度

風化的擴展速度可藉由下列方法得到：

##### 1.風化深度與風化開始時間之關係

藉由岩盤出露到地表的時間(侵入時間、上部地層剝蝕時間、陸化時間)與風化深度，可推得過去的風化擴展速度。

## 2.風化深度與岩石-水反應速度之關係

以岩石的礦物與化學組成、透水性等資訊為基礎，了解場址的岩石-水反應機制及速度，即可評估風化擴展速度。

### 二、評估方法

藉由風化地質、地下水、岩石的礦物與化學組成、風化區域與未風化岩盤的透水性與裂縫密度等基本資料，並掌握風化導致力學性質、透水性、地球化學環境改變之範圍、風化開始時間(岩盤接近地表時間)及岩石-水反應等機制，進而推估場址過去之風化擴展速度，並以此為基礎，加以考量未來之地形變化及氣候變遷，預測未來之風化影響範圍。

#### 2.1.1.5 泥火山評估

在沉積岩分佈的地區，某些地層在沉積岩的壓密過程中，沒有進行脫水作用而維持高壓力或是地下有天然氣時，則地下將可能有高壓孔隙水與氣體存在。此種地層受到地震與火山活動的影響形成泥狀流體，並與地下水及氣體一同噴出地表而形成泥火山。若處置場場址有泥火山時，將會對處置設施及天然障壁造成直接影響。若處置場場址沒有泥火山分佈，但附近有泥火山噴發時，仍可能造成地下水遷移路徑上的透水性變化及地下水流出點的位置與型態改變。因此，蒐集場址及其周邊之地質與地質構造等資料，確認處置場及其附近是否有泥火山分布，若有泥火山存在時，需評估泥火山或高孔隙水壓的地層對地下水流動的影響。

## 一、現況說明

### (一)泥火山的發生區域與原因

日本目前確認有泥火山的地方有北海道新冠町、新潟縣松代町等，分佈於第三紀沉積岩的背斜軸附近。泥火山噴發的原因可能有(1)因黏土礦物之相位轉移造成的脫水作用；(2)急遽的堆積作用壓縮下方的未固結層；(3)逆衝斷層發達造成構造的壓縮；(4)泥質堆積物中的有機物所產生的氣體等。

日本土木學會彙整相關資訊後，認為泥火山在地質構造上的分佈範圍可能僅限於第三紀以後沉積岩的背斜軸附近以及斷層或裂縫等弱線的分佈範圍。此外，雖然沒有泥火山出現但有泥貫入體(Mud diapir)存在者，則可能有尚未被發現之泥火山。

### (二)掌握泥火山的方法

- 1.泥火山出現在地表時，因泥火山的地形特徵較特殊，例如錐狀小丘、陷落火山口等，故可藉由現地調查與空拍照片判讀來進行確認。
- 2.地層中有泥貫入體存在者，可利用地電阻與震波速度的差異等物理探查方法來進行確認。

## 二、評估方法

泥火山的產生與地下的地質或地質構造有關，故利用對處置場及其附近的現地調查與空拍照片判讀，來掌握既有的泥火山分佈。對於具有高孔隙水壓的地層，可以鑽心取樣等物理探查方法進行調查，以評估未來泥火山噴發的可能性。

### 2.1.1.6 塊體運動評估

塊體運動是指構成地表的土壤和碎屑受到重力的作用，而往下坡移動或沉陷的現象，例如山崩、地滑及潛變。山崩的移動速度較快，移動區域與不動區域間有明確的交界。地滑的移動速度較慢，移動區域與不動區域間有明確的交界。潛變的移動速度非常慢，移動區域與不動區域間沒有明確的交界。

當大規模的塊體運動發生在處置場內時，可能會對處置設施及天然障壁產生直接且巨大的影響，而當大規模之塊體運動發生在處置場附近時，實際流速、遷移路徑長度、地下水流出點的位置與型態等參數也會隨地形變化而改變。因此，蒐集處置場及其周邊的地質與地質構造等資料，確認處置場是否有發生大規模塊體運動的可能性。若處置場即其周邊可能發生大規模塊體運動時，須評估發生塊體運動時對核種遷移的影響。

#### 一、現況說明

日本的地滑現象多分佈於新第三紀海成沉積岩、中新世火山岩類、古第三紀至新第三紀夾炭層等區域。另以位在南阿爾卑斯山的七面山為例，其大規模塊體運動之影響範圍約為東西 3km、南北 4km、深度 400m。

#### 二、評估方法

日本的大規模塊體運動主要受到地質或地質構造影響，例如底部是光滑面分佈的地質構造、不安定的地形等，可藉由對處置場及其周邊的空拍照片判釋、現地調查、鑽心取樣等方法，了解其地質與地質構造狀況，評估大規模塊體運動發生的可能性及分布範圍與影響範圍。

## 2.1.2 氣候與海平面變化評估

氣候變遷是因太陽活動或地球軌道等因素，產生 2 萬年或 4 萬年周期的變動，包括日照量變化、地球規模的大氣與海洋水之大循環、大陸冰層的盛衰、溫室效應的氣體濃度變化等。這些變動將使氣溫、海平面、蒸發散量與地下水補注量跟著改變，進而對地下流動產生影響。故需檢討過去至今的變動原因、變動周期及規則性，以此為基礎評估未來的氣候與海平面變化，並將人為活動造成的暖化納入考量。

### 2.1.2.1 氣溫的評估

氣溫變化除受到降水量、蒸發散量、地下水補注量、河川流量等水平衡的變動影響外，也會受到生物圈之影響。利用含有花粉化石的湖沼堆積物及大陸冰層的氧同位素比，可獲得過去氣溫的變動資訊，再加入人類活動的影響因素，以進行處置場未來的氣溫及氣溫變動幅度之評估。

#### 一、現況說明

彙整過去之氣溫變動相關資訊，說明如下。

- (一)利用南極大陸冰層冰芯中的氧與氫同位素比，推估過去約 70 萬年之氣溫變動，如圖 2.1.2.1-1 所示，在過去 45 萬年間，溫暖期(間冰期)與寒冷期(冰期)以 8~12 萬年為單位交互進行，南極至今的氣溫變動幅度約為  $-8^{\circ}\text{C}$  至  $+5^{\circ}\text{C}$  之間。
- (二)由大陸冰層發達時期與海平面較低時期之冰芯中的氧同位素比，推估過去數百年至數千年間周期較短的氣溫變化幅度，如圖 2.1.2.1-2 所示，氣溫約有正負幾度 C 的變動。這種短周期的氣溫變動現象稱之為 Dansgaard-Oeschger Cycle。



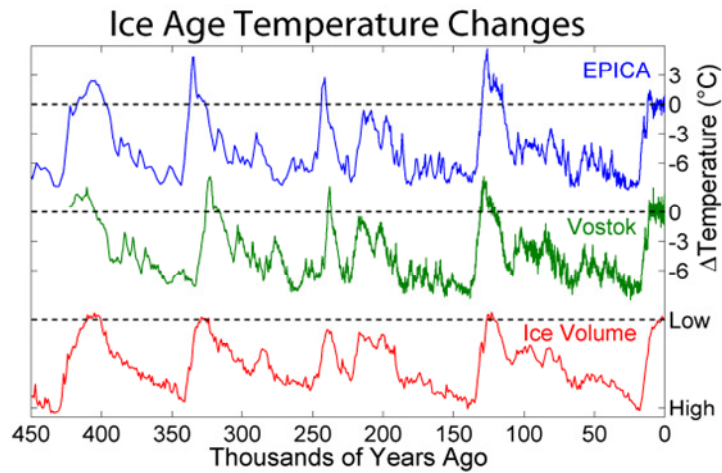


圖 2.1.2.1-1 南極冰層冰芯的氫氣同位素比所得過去 45 萬年間的氣溫變化

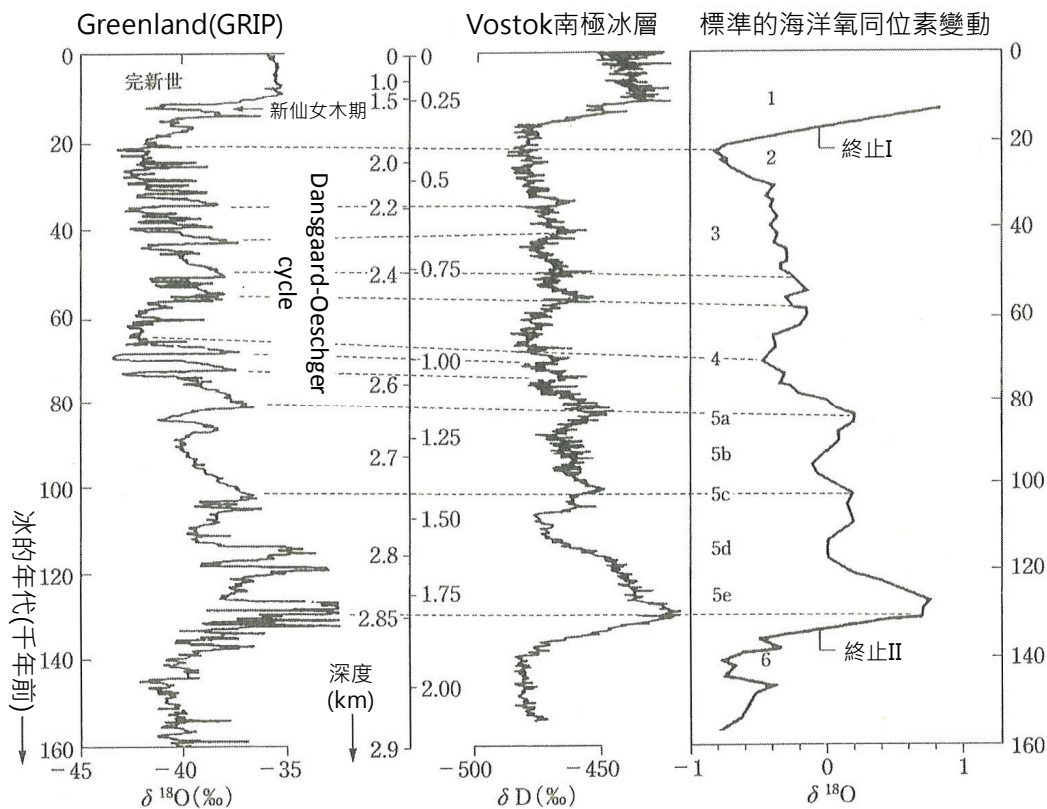


圖 2.1.2.1-2 數百年至數千年間的氣溫變動

(三)以花粉分類與氣溫的關係為基礎，由岐阜縣東濃地區的濕地堆積物中之花粉化石，推估過去約 35 萬年間的氣溫，如

圖 2.1.2.1-3 所示。以東濃地區的氣溫變動而言，其氣溫變動幅度與現在相較約為 $-9^{\circ}\text{C} \sim +2^{\circ}\text{C}$ 。

(四)以植生帶所得溫暖指數與年平均氣溫的關係為基礎，配合日本各地的花粉化石分類，推估末次冰盛期(LGM)的氣溫，如圖 2.1.2.1-4 所示。由結果可知，末次冰盛期(LGM)之年平均溫度與現在相較約為 $-4^{\circ}\text{C} \sim -13^{\circ}\text{C}$ 。高緯度地區的下降量則更大。

(五)除上述分析方法外，亦可利用大氣海洋結合大循環模式進行氣候模擬，以了解過去的氣溫變動機制。

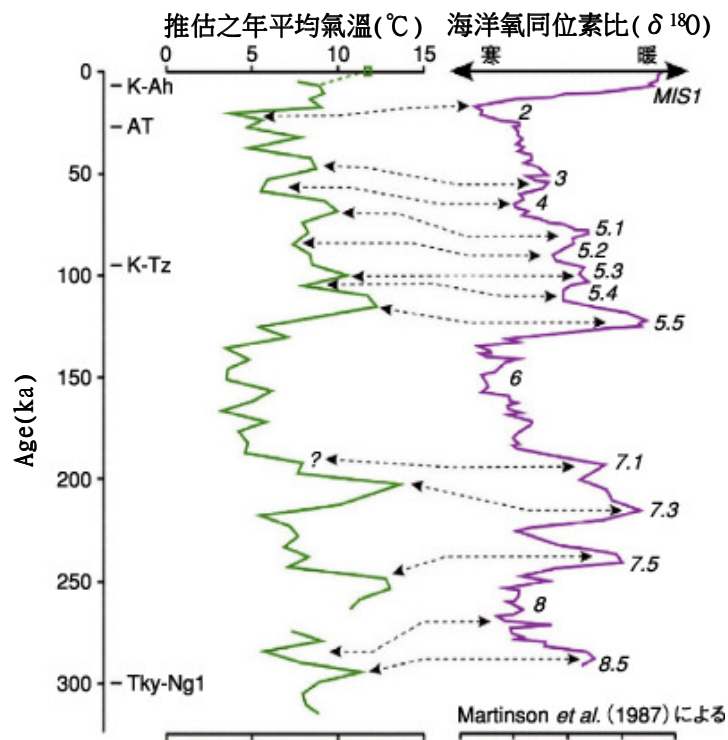


圖 2.1.2.1-3 以花粉化石推估岐阜縣東濃地區於過去 35 萬年間的氣溫變化幅度



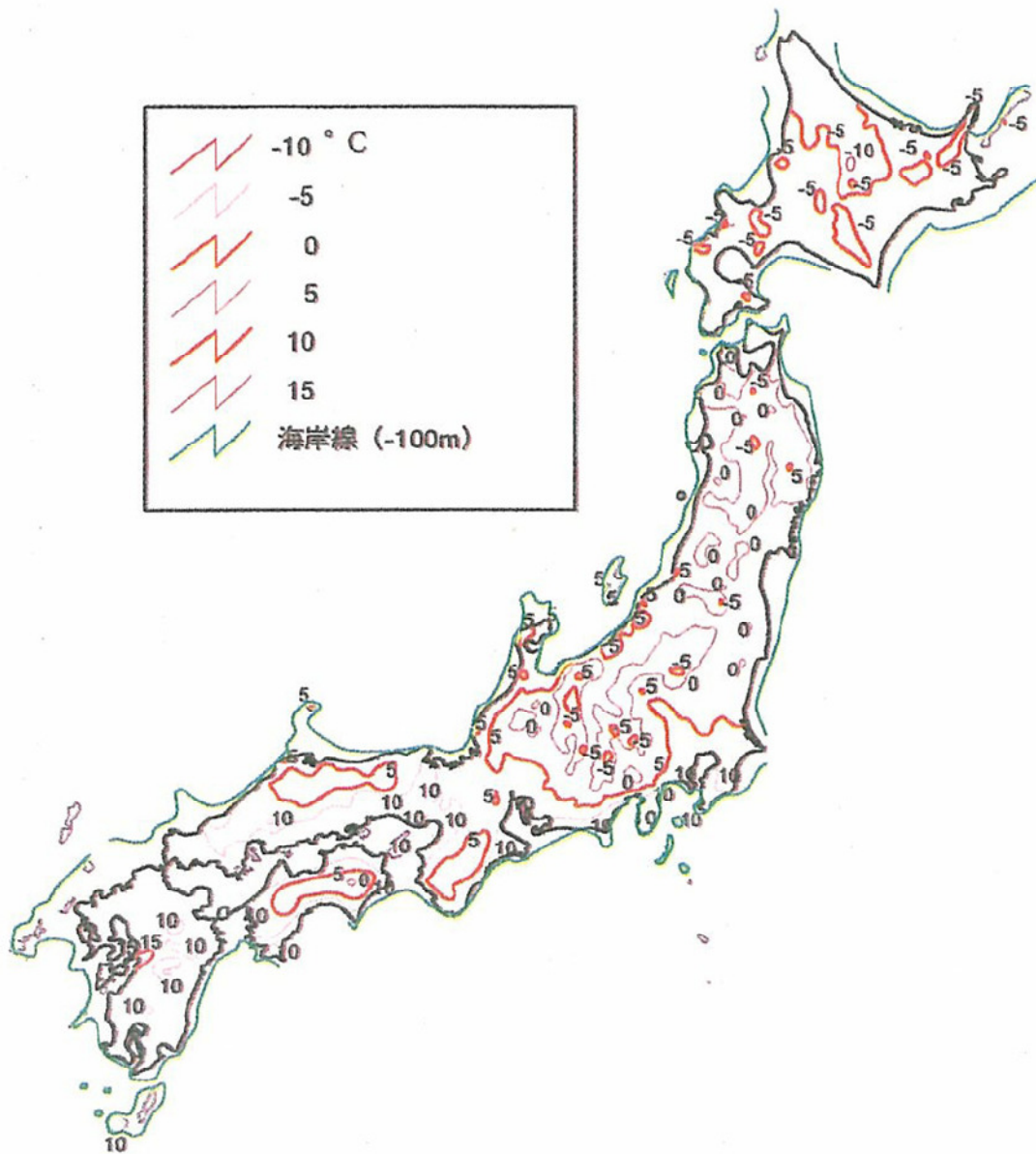


圖 2.1.2.1-4 以花粉化石分類與溫暖指數推估之末次冰盛期的年平均氣溫

## 二、評估方法

蒐集處置場址的氣溫資料，評估過去最溫暖期與最寒冷期的氣溫，將此變動幅度作為評估未來氣溫之基礎，分別考量溫暖期持續進行與漸漸寒冷化等兩種狀況，評估其氣溫變動趨勢。

### 2.1.2.2 海平面的評估

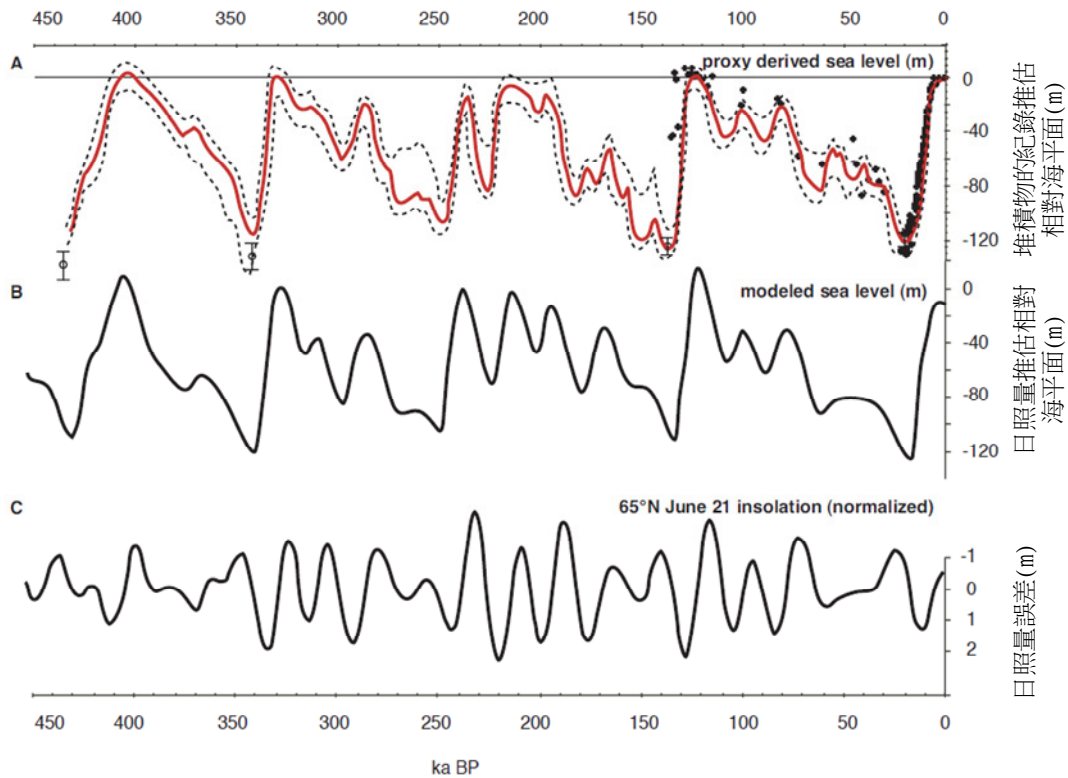
當海平面改變時，將會使處置設施與海平面的高差及距離產生變化，且地下水流、侵蝕基準面、侵蝕量、堆積量等也會跟著改變。此外，海平面變動使海底的壓力改變，間接造成地殼上昇或下降，導致地下水的實際流速、遷移路徑長及流出點位置與形態的改變。故需以過去的海平面變動資料及未來人類活動的影響為基礎，評估未來的海平面變化。

#### 一、現況說明

彙整海平面變化相關之資訊說明如下。

(一)推估過去海平面變動可以有孔蟲(Foraminifer)殼的氧與氫同位素比、紅海堆積物的鹽分濃度及海階(marine terrace)面的古濱線(Former shore line)高度等方法進行。以冰芯中得到之有孔蟲殼的氧與氫同位素比，推估過去約 45 萬年間的海平面變化周期約為 8 至 12 萬年，若以現在的海平面為基準，過去 45 萬年的海平面與現在相比約在 +10m 至 -130m 之間變動。由紅海堆積物的鹽分濃度來看，43 萬年前的海平面比現在約低  $139\text{m} \pm 11\text{m}$ 。此外，根據 Huon 半島(Huon Peninsula)之海階面的古濱線高度，過去 14 萬年間的海平面與現在相比約為 +5m 至 -130m 的變化幅度。如圖 2.1.2.2-1 所示。

(二)因海平面變化而使海底壓力改變造成的地殼上昇或下降，其海平面變動與地殼升降之關係隨區域而異，日本列島的沿海地區，當海平面變動量在 100 公尺以上時，地殼變動量約在數公尺左右。



- 珊瑚段丘的U/Th定年及堆積物的<sup>14</sup>C定年推估之相對海平面
- ⊖ 紅海的鹽分濃度推估的最低相對海平面
- ⋯ 冰芯中有孔蟲的氧同位素比推估的相對海平面

圖 2.1.2.2-1 過去 45 萬年間的海平面變動區線

## 二、評估方法

假設未來的氣溫變化有溫暖期持續與逐漸寒冷化等兩種狀況，以此假設為基礎評估未來的海平面變化。評估方法說明如下：

- (一)由過去多次反覆的溫暖期(間冰期)與寒冷期(冰期)交互進行期間中，各個期間之海平面變動幅度最大值與最小值，假設未來海平面的值將會在此範圍內變動。
- (二)當針對逐漸寒冷化的狀況進行評估時，需先假設現在為溫暖期，並以過去數次溫暖期到寒冷期的變動曲線來設定海平面的降低曲線。

### 2.1.2.3 降雨量的評估

當降雨量改變時，地下水補注量及地表水的流量會隨之變化，並對地下水的實際流速、遷移路徑長、從處置設施流出地下水的流出點流量造成影響。故需以花粉化石、氣溫與降雨量間的關係加上現有的知識能力，對未來的降雨量及降雨量變動幅度進行評估。

#### 一、現況說明

##### (一)使用花粉化石資料推估降水量

利用湖沼堆積物中殘留的花粉化石資料推估古環境時，由花粉化石群聚得到的植物相與現存的植生比對，以獲取溫暖期與寒冷期的相關資訊。但植生帶除會受到氣溫與降雨量影響外，還會受到周邊地形及表層地質之影響，其估定量化評估方法說明如下：

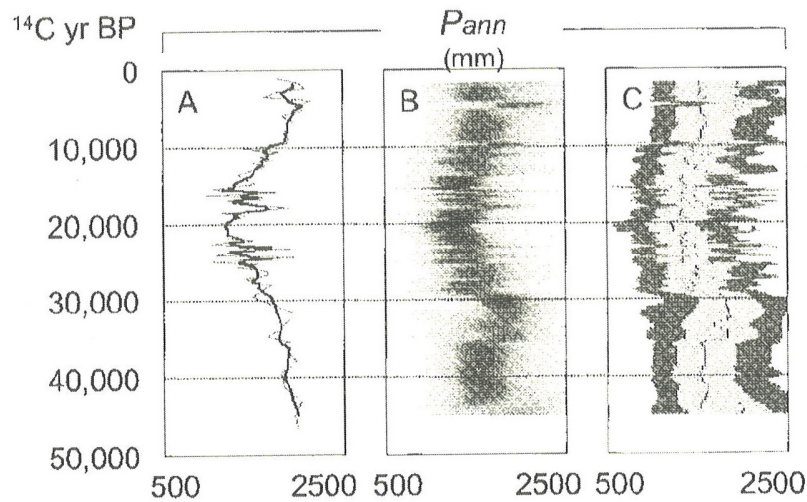
##### 1.以植生的生長條件為基礎進行推估

以採集到的花粉化石與植生分布，推估年最低降雨量，例如山毛櫸(Fagaceae)的生長條件是氣溫超過 $5^{\circ}\text{C}$ 以上、月降雨量超過800mm。由此方式推估日本列島在2萬年前的末次冰盛期(LGM)的降水量，約為目前的50%至70%。

##### 2.以現今的氣溫、降雨量與植生帶的關係推估降雨量

利用現今的氣溫、降水量與植生(表層花粉)等資料，輔以過去花粉化石群聚的類似性進行多變量解析，進而推估過去的氣溫與降雨量。圖2.1.2.3-1為藉由日本列島的表層花粉數據集，求得福井縣三方湖於過去4.7萬年間之氣溫與降雨量，其末次冰盛期(LGM)的降雨量可能較現今降水量少。





- A：最佳現代類比法求得之復原值(細線)，移動平均(粗線)  
B：A的移動平均之概率分布  
C：信賴係數68.2%~95.4%之信賴區間的概率分布

圖 2.1.2.3-1 福井縣三方湖於過去 4.7 萬年間的降雨量推估結果

## (二)以氣溫與降雨量的關聯性為基礎進行推估

圖 2.1.2.3-2 為日本列島的年平均氣溫與年降雨量之關係圖，由圖可知，年平均氣溫與年降雨量並沒有直接關連性。由於緯度或高程相近的區域，其降雨量影響因子(氣候帶、地形、風向、海流等)較為相似，故以緯度或高程分類，再利用氣溫的預測結果，推估降雨量幅度。

## (三)以氣候模擬為基礎進行推估

使用大氣海洋結合大循環模式的氣候模擬，推估末次冰盛期(LGM)的氣候，加上考量處置場的地形、氣候帶、風向、海流等因子後，估測氣溫與降雨量。

## 二、評估方法

利用現有的知識與能力，考量未來的氣候變動後，評估處置場未來的降雨量。但不論是採用花粉化石法、氣溫與降水量的關聯性法或氣候模擬法，皆須確認使用資料與設定條件的準確性。

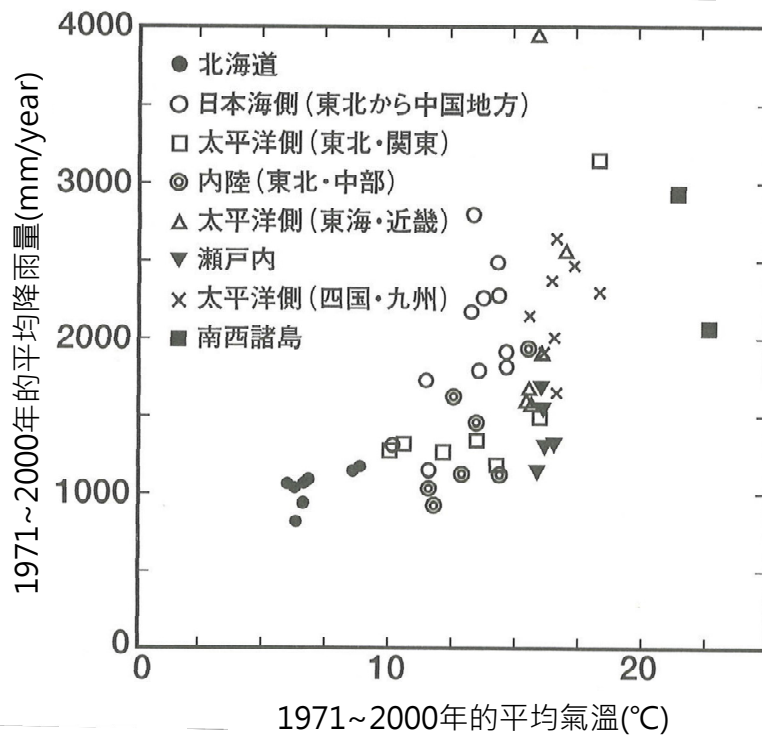


圖 2.1.2.3-2 日本列島的年平均氣溫與年降雨量之關係

#### 2.1.2.4 蒸發散量的評估

當蒸發散量變化時，將會對地下水的實際流速、遷移路徑長、流出點流量造成影響。就核種遷移評估的長期考量而言，需以未來的氣溫與降雨量評估結果為基礎，對處置場址未來的蒸發散量進行推估。

##### 一、現況說明

(一)蒸發散量的主要推估方法，包括：

- 1.由蒸發計實測值推估
- 2.利用降雨量與流域流量等資料，以水平衡方式推估(蒸發散量=流域降雨量-河川流量)
- 3.由經驗公式推估可能的蒸發散量(Sones weight 式、Harmon 式、Penman 式等)

#### 4.由熱平衡推估實際蒸發散量(Penman Monteith 式、使用體積的單層模式法)

由於上述方法皆須輸入必要的參數後才能求得蒸發散量，但預測未來氣候變動時，需輸入的參數較多(例如氣溫、日照量、風速、植生等)，預測的執行上較不容易，故推估之蒸發散量可能會有較大的誤差產生。

(二)利用日本全國的網格氣候資料，由水平衡方式求得實際蒸發散量，並與 Thornthwaite 法求得之蒸發散量比較，由比較結果可知，除積雪地區外，其他地區兩者幾乎相同。

### 二、評估方法

以處置場址的地形及氣候條件為基礎，加上經驗式、熱平衡式的推估結果以及對相同氣候帶地區的蒸發散量評估，推測處置場址未來的蒸發散量。對於推估未來蒸發散量的設定方法，舉例說明如下。

(一)先利用處置場址周邊的觀測資料，以水平衡方法推估蒸發散量，再由多種蒸發散量推估方法中，選擇可以表現處置場目前的蒸發散量推估方法，以未來的氣候變遷(氣溫、降雨量)、地形預測、植生、積雪等資料為基礎進行蒸發散量推測。當不確定未來是否會有積雪時，可用 Thornthwaite 法的可能蒸發散量做為參考。

(二)找出與未來之氣溫、降雨量及地理等條件相似之地區，利用此地區的觀測資料做為預測未來狀況之設定參考。

(三)當以各種方法求得之蒸發散量，其值差異懸殊時，找出可能的影響因素，選擇適當的參數值重新評估，若無法選擇適當的參數值時，則可以分布的範圍區間進行評估。



### 2.1.2.5 地下水補注量的評估

地下水補注量發生變化，則地下水補注區的地下水位隨之改變，將會對地下水的實際流速與遷移路徑長造成影響。就核種遷移評估的長期考量而言，需以未來的氣溫、降雨量、蒸發散量之評估結果為基礎，評估處置場址未來的地下水補注量。

#### 一、現況說明

(一)降至地表的雨水可分為地表附近的表面逕流、滲透至地下的地下水補注量及蒸發散等三種型式，各種型式所佔的比例由氣溫、植生、地盤的透水性與水份特性決定，故降雨量的變化量，並不直接等於地下水補注量的變化量。此外，當年平均氣溫在 $-2^{\circ}\text{C}$ 以下時，可能會形成永凍土，故地下水補注量也會隨之變化。

(二)目前的地下水補注量設定方法，說明如下。

##### 1.由基底流出量推估

流域下游的流出區域所觀測到的流量，分為地表附近的表面流量(直接流出量)及滲透至地下的流出量(基底流出量)兩部份。直接流出量會受到降雨量的變化影響，基底流出量則可由長期的觀測流量紀錄經過計算後取得，進而推估地下水補注量。

##### 2.由地下水解析模式推估

地下水面可由地盤的透水性、水份特性與地下水補注量來決定。故可根據實測值來設定地盤的透水性與水份特性，利用地下水解析模式，推估實際地下水位面的地下水補注量。

#### 二、評估方法

可以利用與現況地下水補注量相同的設定方法，加上氣候變化時的基底流出量或地下水位面等資料，推估未來的地

下水補注量。或是由現在氣溫與降雨量變化、基底流出量、地下水位面的觀測結果，將其與地下水補注區末次冰盛期(LGM)的地下水位面資料(例如不飽和帶、氧化範圍等)比較，以推估未來的地下水補注量。

不論使用上述何種方法，都很難確定其設定值是否適當，故須同時以地下水解析模式推估地下水補注量變化的情況，及其對地下水流的影响程度。

### 2.1.2.6 永凍土的評估

當氣溫降低時，可能於地表附近形成永凍土。永凍土會降低地下水補注量，並對地下水流造成很大的影響。且永凍土的深度到達處置設施的深度時，會直接影響處置設施及天然障壁的功能。故需由未來氣溫變化的評估結果，就處置設施的長期機能考量而言，確認未來氣溫降至最低時，永凍土的深度也不至於到達處置設施的深度。而對核種遷移評估的長期考量而言，須評估形成永凍土後對地下水流之影響。

#### 一、現況說明

- (一)永凍土一般受到積雪量的影響，但若年平均氣溫低於 $-2^{\circ}\text{C}$ 以下時，則可能形成連續永凍土、不連續永凍土及點狀分布永凍土。
- (二)年平均氣溫與永凍土的厚度具有高度的關連性，如圖 2.1.2.6-1 所示，可以此關連性為基礎，預測未來永凍土的形成。
- (三)有關過去永凍土形成的紀錄，可藉由表層堆積物中的冰緣作用紀錄(內卷(involution)、融凍泥流(solifluction))來確認。

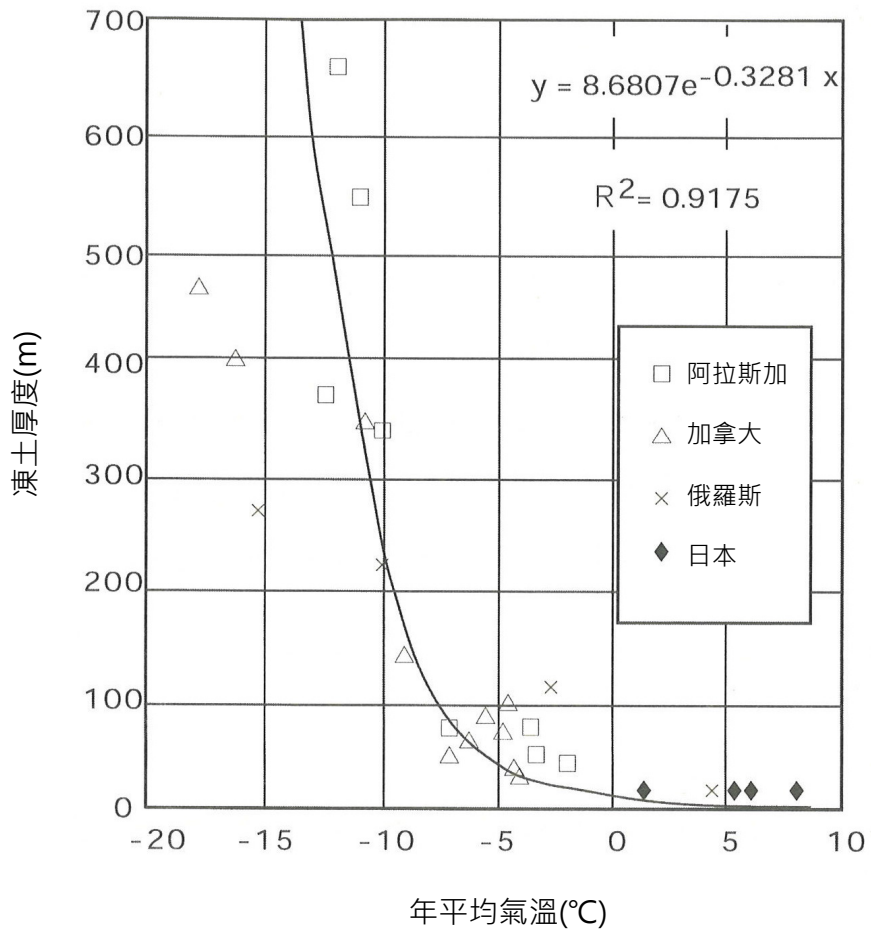


圖 2.1.2.6-1 年平均氣溫與永凍土厚度之關係

## 二、評估方法

利用處置場址的永凍土形成紀錄及未來氣候變遷所推估的氣溫變化，評估永凍土形成的可能性與深度。此外，若地表附近有可能形成永凍土時，採用地下水解析模式，評估永凍土對地下水流之影響。

### 2.1.3 地形變化評估

處置場址的地下水流會受周邊的地形影響，且當隆起與侵蝕作用持續發生時，將提高處置設施向地表接近的可能性。故評估處置場址未來的地形變化，將有助於地下水解析及處置設施接近地表時間的評估。

#### 2.1.3.1 隆起與沉降運動的評估

隆起與沉降是板塊運動的廣域應力、斷層及摺曲等作用造成的結果，當隆起與沉降發生時，與地形相關的地形坡度、處置場址與侵蝕基準面的高程差與距離、侵蝕量與沉降量等都會跟著改變，進而影響地下水流。故就核種遷移評估的長期考量而言，需以地形、地層及岩石中所留下的隆起與沉降量紀錄，評估未來的隆起與沉降量。

##### 一、現況說明

(一)日本列島位於太平洋板塊、菲律賓海板塊、北美板塊與歐亞大陸板塊的交界，板塊運動的構造應力會直接引起隆起與沈降運動，而此廣域的構造應力也會形成斷層與摺曲構造，並對隆起與沈降造成間接影響。

(二)地質時代的隆起與沈降運動，會於地形、地層或岩石中留下紀錄。蒐集過去的隆起與沈降量資料，彙整其推估方法說明如下。

##### 1.地形學的方法

地形學的方法是利用海階或河階的海拔高度分布或相對高差來推估隆起量。沿海地區的地殼變動量可利用海階面古濱線高度求得，如圖 2.1.3.1-1 所示為日本列島沿岸區域過去 12.5 萬年間的垂直地殼變動量。內陸地區的

更新世晚期隆起量，可以河川形狀與海階的分布來推估，如圖 2.1.3.1-2 所示。

## 2.地質學的方法

沈降區域可利用地層的堆積環境、層厚與堆積年代來推估隆起與沉降量。地層的堆積速度會隨環境條件改變，一般而言，堆積層側向的層相變化較顯著，不易判定為同時代面，與前述地形學的方法相較，雖然隨時間變化的辨識度較低，但有利長期變動過程之推估。目前使用的判釋方法有：(1)以最終間冰期在沿海形成的地層(灘前堆積物)為指標，來討論隆起量的分布與地殼變動；(2)鑽心取樣的堆積相解析與  $^{14}\text{C}$  定年法，來嘗試解讀完新世的地震性隆起與沈降。

## 3.大地測量學的方法

利用三角測量、GPS 等測量資料，除可推估隆起與沈降量外，水平方向的移動量也可得到較佳精度。使用大地測量學的方法時，可推估的時間尺度小於 100 年，與大地震發生頻率相同，故僅能獲得短時間的數據。因此，以大地測量學之方法得到的變動結果，將可能與地形或地質學的評估方法所得的長期平均變動傾向有所差異。

## 二、評估方法

以地形學、地質學與大地測量學的評估方法，得到過去的隆起與沉降量、短期與長期的變動原因與持續性等資料，以外插法推估處置場址未來的隆起與沉降量。推估未來的隆起與沉降量時，須考慮過去資訊的正確性、以外插法分析時的變動幅度等影響因素後進行設定。例如由海階面古濱線高度與形成年代來推估過去的隆起量時，須確認段丘面形成時的海平面、各段丘面的風成層厚度、周邊段丘面古濱線海拔分布之正確性。而在推估未來超過數萬年以上的狀況時，須



考量處置場周邊的地殼變動機制、斷層與摺曲構造的影響及未來廣域應力場的持續性等，設定未來隆起與沈降量的變動幅度後進行評估。

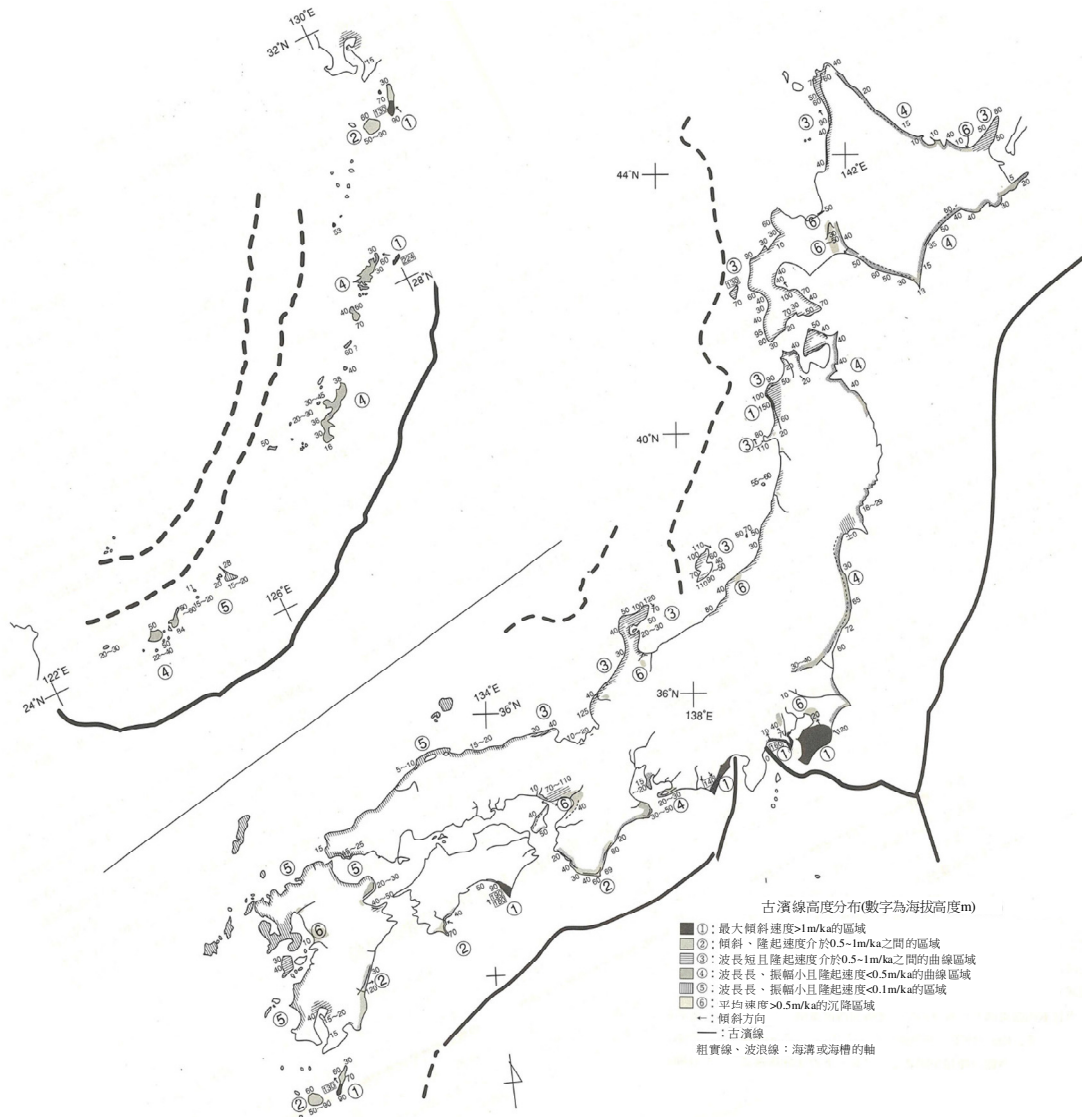


圖 2.1.3.1-1 日本列島沿海地區的地殼變動分類



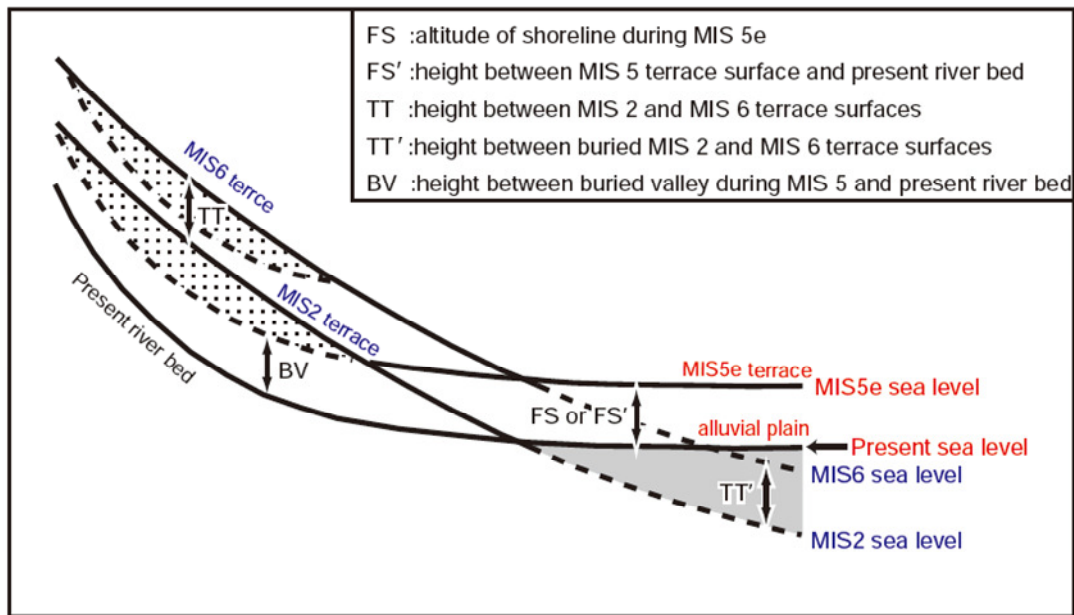


圖 2.1.3.1-2 河成地形面的斷面模式與隆起量之關係

### 2.1.3.2 侵蝕作用的評估

受到處置場址與侵蝕基準面的高差、處置場址與海岸的距離、水系配置與河川流量的河蝕、沿岸流與波浪的海蝕等現象的產生而導致侵蝕作用。當發生侵蝕時，由於地形變化可能導致地下水的實際流速、遷移路徑長及流出點位置與形態的變化。故就核種遷移評估的長期考量上，利用地形、地層與岩石所留下的侵蝕記錄，評估未來的侵蝕作用。

#### 一、現況說明

侵蝕可分為因河川或降雨導致的侵蝕(河蝕、雨蝕)、因風導致的侵蝕(風蝕)、因海水作用導致的侵蝕(海蝕)、因冰河導致的侵蝕(冰蝕)等種類。日本列島因四面環海，溫暖多雨且地形起伏大，故主要的侵蝕作用以河蝕與海蝕為主。

### (一)河川的侵蝕量(下侵量)

侵蝕基準面(若屬河川流入海者，則為海面)的位置與降雨量會影響河川的下侵量，若以溫暖期(間冰期)與寒冷期(冰期)等巨觀的時間尺度來看，其下侵過程說明如下：

- 1.間冰期(例如現在)：因降雨量增加導致河川流量增加，故上游持續向下侵蝕，侵蝕後的土砂往下游堆積。
- 2.冰期：降雨量減少導致河川流量降低，故上游不會因侵蝕作用產生土砂。而凍結融解作用產生的土砂，因河川流量降低，故運移到下游的堆積量也隨之降低。此外，下游區域受到海平面下降影響，侵蝕基準面隨之降低，故下侵現象持續進行。

上述侵蝕過程伴隨海平面變動的周期而反復發生，前一個周期的間冰期與冰期之河床面位置，可由其在河階上留下的紀錄得之，並以此推估前一個海平面變動周期的下侵量。日本用此方法推估隆起速度與河床高度變化速度之關係，如表 2.1.3.2-1 所示，河川內陸區域在 1 個周期的海平面變動下，最大下侵量大約等於或低於隆起量。此外，當以現況海岸線附近的河川下侵作用推估下侵量時，最大海退之最大侵蝕量不會大於 90m，並將此結果與末次冰盛期(LGM)的河床面比較。由於終冰期最盛期(LGM)的河床面比現在的海平面低 120m，故河川於現在海岸線附近的最大下侵量，將不會超過經歷過海平面變動後的隆起與沈降量。

### (二)流域的侵蝕量

河川的流域侵蝕主要是水流對河川谷壁作用造成的侵蝕。水流以河床做為侵蝕基準面，最大侵蝕量可由河川坡度與侵蝕發生位置推估。例如在有多個段丘面分布的區域，針對其中不屬於海平面變動周期造成的段丘面，比較段丘面的

殘存率、段丘面上水流深度、橫斷面的相似性等差異後，推估侵蝕形狀及侵蝕量。此外，日本以壩的淤積量與地形起伏，推估整個流域的平均侵蝕量，如圖 2.1.3.2-1 所示。另又以海階為對象，由下切河谷(Dissected Valley)的體積計算侵蝕速度與隆起速度之關係。受到離水後的經過時間與地形構成物質的強度不同影響，侵蝕速度與隆起速度隨時間增加而達平衡狀態(例如軟岩形成的丘陵地形為離水後 45~65 萬年、山地為離水後 100 萬~數百萬年)，隆起的部分受到侵蝕。

表 2.1.3.2-1 河川之隆起速度與河床高度變化速度

	TT (m/10 <sup>3</sup> y) 隆起速度	BB (m/10 <sup>3</sup> y) 長期平均 下侵速度	Ds(m) 一個周期的下 侵速度 (BB×120Kyr)	IG (m/10 <sup>3</sup> y) 最大下侵 速度	G (m/10 <sup>3</sup> y) 堆積速度	Di(m) 間冰期的 下侵量	A(m) 冰期的 下侵量
相模川 津久井湖 附近	0.25	0.25	30	3.5~5.0	0.4~0.7	70~80	35~50
鐮川 吉田附近	0.25~0.35	0.25~0.35	30~42	3.0~5.0	0.2~0.4	60~75	20~40
荒川 秩父盆地	0.4	0.4	48	4.0~7.0	0.2~0.4	60~70	20~30
信濃川 十日町墓 地	0.6	0.6	72	2.2~5.3	0.3~0.4	45~80	20~30

調査地域では河床は規則的な埋積と下刻を繰り返し、fill-top 段丘面と埋没谷を形成してきた。fill-top 段丘面を結ぶ直線を TT、埋没谷底を結ぶ直線を BB と呼ぶ。

Riverbeds in the studied areas repeated deepening and aggradation regularly and formed fill-top terraces and buried valleys. A linear relationship when the heights of filltop terraces are plotted against their ages is named TT. That of buried valley bottoms is BB.

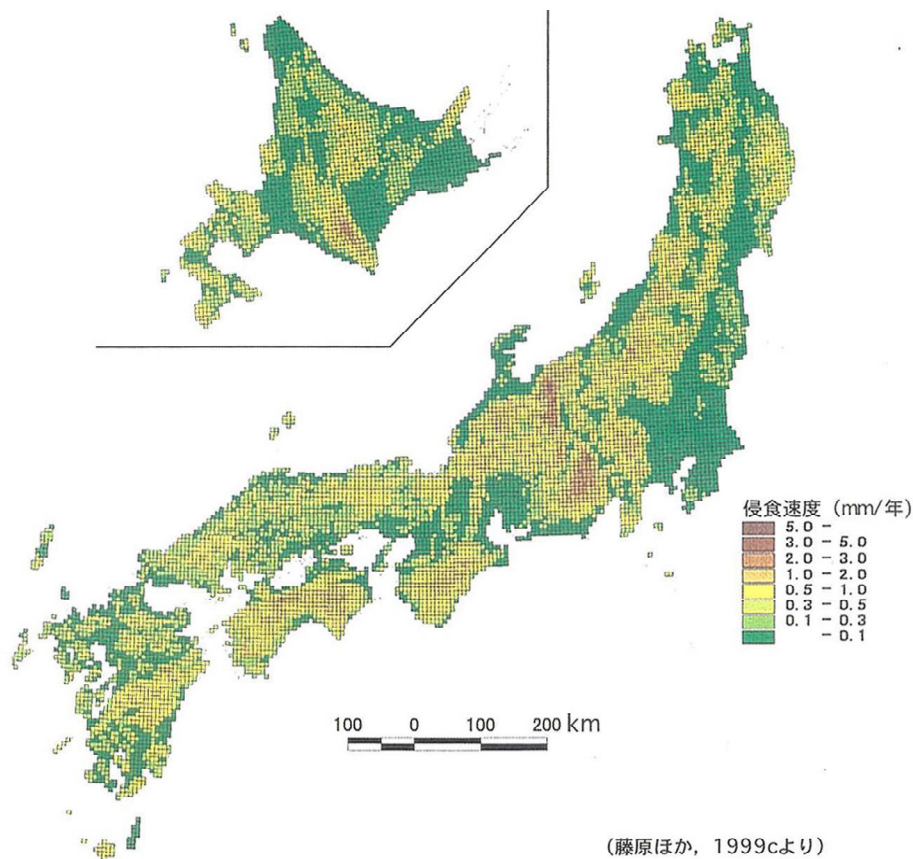


圖 2.1.3.2-1 日本的侵蝕速度分布圖

### (三)海蝕

因波浪與潮流造成沿岸部分的侵蝕，稱之為海蝕。因 6,000 年前的高海面期一直持續至今，可利用海圖測量海蝕崖下方到基盤岩的海蝕平台前端之幅度，求得過去 6,000 年間的海蝕崖後退量。日本列島各地的海蝕平台幅度與構成岩石、海岸山地及海蝕崖的高度關係，如圖 2.1.3.2-2 所示。海蝕崖後退速度隨地形與海流不同而有很大的差異，根據圖 2.1.3.2-2 之評估結果，海蝕崖後退速度的最大值，在第四紀層為 80cm/年，在第三紀層為 30cm/年。

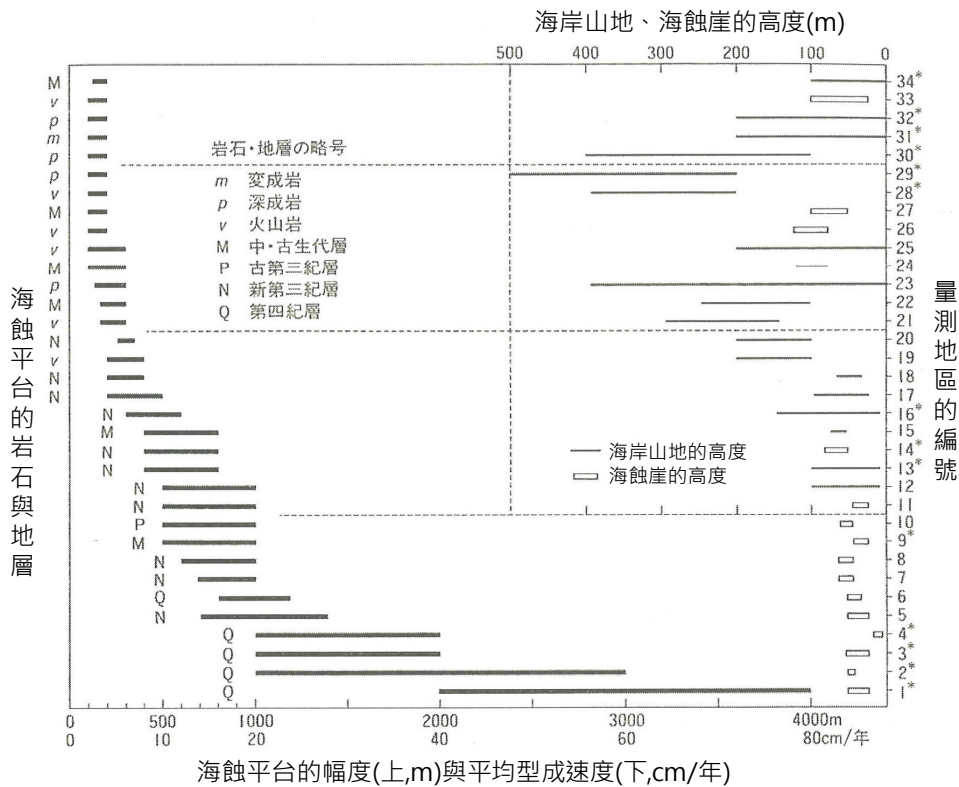


圖 2.1.3.2-2 日本列島各地的海蝕平台幅度與構成岩石、海岸山地及海蝕崖的高度關係

## 二、評估方法

評估侵蝕量時需考量隆起與沈降量、降雨量及海平面變動量等相關項目。並利用現有知識能力及未來仍舊持續等特性，以下列方法對處置場址的未來侵蝕量推估。

(一)以處置場址的隆起與沈降量、降雨量及海平面變動量為基準，利用目前對河川下侵量、流域侵蝕量及海蝕量的預測方法，推估過去的侵蝕量，以驗證評估方法之準確性。

(二)利用對過去的了解，以外插的方式，預測未來的隆起與沈降量、降水量及海平面變動量。

其中，除需留意未來的隆起與沈降量、降雨量及海平面變動量之正確性外，也須考量過去侵蝕量推估的可靠性。例如間冰期與冰期反覆發生時，河川的下侵量以 1 個海平面變



動周期(約 10 萬年間)的平均下侵速度表示。若預測的期間為短周期時，下侵量會隨假設狀不同而有所變化，包括持續溫暖期(間冰期)及寒冷期(冰期)兩種狀況。因此，對於未來氣候的預測範圍，須考量侵蝕基準面變化的最大幅度，亦即考量溫暖期持續與漸漸有寒冷化的傾向兩種狀況的最大侵蝕量。

### 2.1.3.3 地形模式的設定

為檢討伴隨地形變化的地下水流動及流出域的改變，須以處置場址設定的海平面變動、隆起與沈降運動及侵蝕作用為基礎，利用處置場址未來地形的評估結果，作為地下水解析所使用的地形模式。

#### 一、現況說明

目前尚未有針對長期地形變化評估的泛用模式，日本彙整隆起與沈降量、侵蝕量相關的檢討案例，說明隆起與侵蝕的預測方法。

(一)利用地形與地層的相關紀錄，以下列順序進行未來的隆起與沈降量推估。

- 1.調查處置場址的地形變動及地層(地質構造)種類分布，依地殼變動類型進行分類。
- 2.參考日本列島典型的地殼變動類型，將處置場址的變動分到適當的類型。
- 3.檢討該累積變動的開始時間、進行速度及空間分布等。

(二)針對各類型的地形變動與地質構造，除可由開始的時間了解其發展外，也可藉由天然案例與理論實驗來驗證。確認整個變動發展過程後，以此推估未來的變動進展狀況與變動量。



(三)預測未來侵蝕狀況前，須根據過去之地形及地層所留下的痕跡，以掌握侵蝕隨時間的變遷發展。

關於地形變化的預測方法，JNC 以內陸地區為對象，利用圖 2.1.3.3-1 所示的分類，由擴散方程式的基本式，開發可表現坡面域與河川域物質移動之 3 維地形變化模擬技術，以預測 10 萬年時間尺度的廣域地形變化。此外，河川的形狀是由過去的侵蝕所造成，若處置場位於段丘上時，可由周邊水系過去的侵蝕量，推估向下及側向的侵蝕速度，並利用由隆起與沈降量及海平面變動量推估所得之未來侵蝕基準面的標高為基準，預測未來的地形。

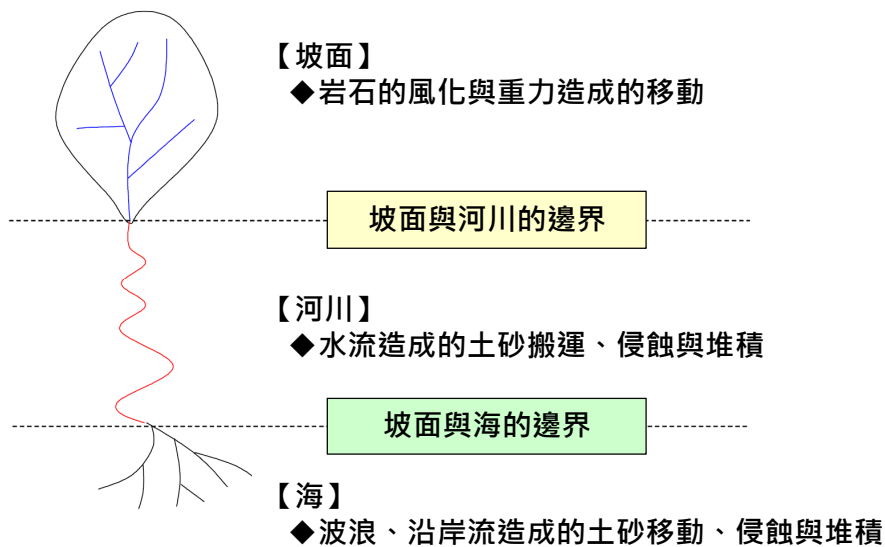


圖 2.1.3.3-1 地質系統與物質移動

## 2.1.4 地下水解析的水文地質模式建立

與天然障壁相關的核種遷移評估參數包括通過設施流量、實際流速、遷移路徑長度、分散特性、流出點位置、流出點之稀釋水量等。因地下水解析已考量水文地質構造的影響，故除稀釋水量與分散特性外，其餘的參數皆可由地下水解析求得。進行地下水解析時，須設定檢討範圍，針對該範圍進行水文地質調查。並以此調查結果為基礎，建置地下水解析的流動概念模式與水文地質模式，並設定相對應之巨觀水理特性。

### 2.1.4.1 檢討範圍設定

一般而言，地下水會受到地形、地質、水質分布的限制，分為淺層流場、深層流場與停滯區，如圖 2.1.4.1-1 所示。因此，要分析通過處置場的地下水流場時，需在核種遷移評估參數設定前，藉由調查與分析訂定適當的檢討範圍，其流程如圖 2.1.4.1-2 所示。在初步調查階段，多以文獻、地表現勘調查或地下水分析結果，設定檢討範圍，故可能有精度不足的情況。隨著調查的精進與分析修正，檢討範圍也需跟著檢討其適宜性。

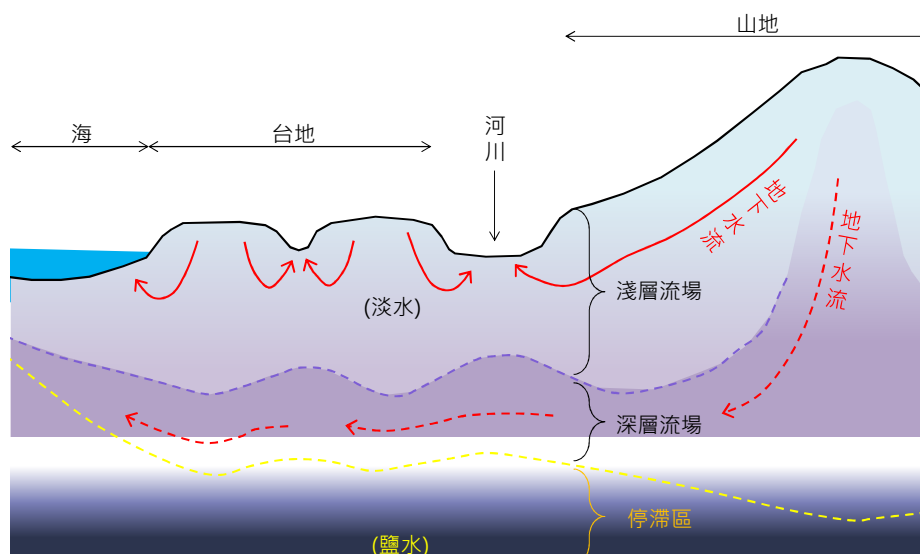


圖 2.1.4.1-1 廣域地下水流概念模型

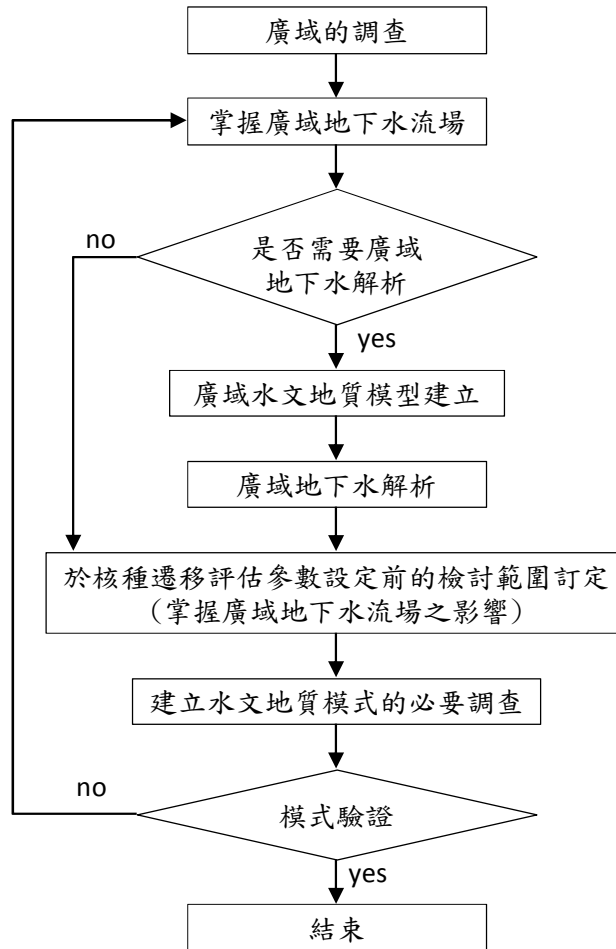


圖 2.1.4.1-2 檢討範圍設定流程

### 一、必要的資料

要了解處置場址周邊的地下水流動系統，必須對廣域的範圍進行地形、地質、地質構造、水文、水質、地下水理等各方面的文獻調查，並視需要進行地表勘查、物理勘查與鑽探調查。此外，地下水流場會受到地形、地質、地質構造、海水及化石海水(fossil salt water)與淡水的密度差、地熱形成的熱對流等影響，調查時亦須格外注意。有關文獻調查與地表勘查可獲得之資料彙整如表 2.1.4.1-1。

### 二、設定方法

以處置場址周邊的廣域調查結果為基礎，掌握通過處置設施的地下水流場，加上核種遷移評估參數設定前的調查與

解析，以訂定檢討範圍。檢討範圍與處置設施設定深度對應之地下水流場不同時，可視需要參考廣域水文地質模式的地下水解析成果。廣域的水文地質模式是用有限的資料建構而成，故須檢討模式的適用性及檢討範圍設定的適宜性，表 2.1.4.1-2 為廣域地下水解析時的注意事項及其相關因應措施。

表 2.1.4.1-1 廣域的文獻調查與地表勘查可獲得之資訊

項目	方法	規格與基準	可獲得之資訊
地形	地形解析、遙測、文獻調查、地表勘查	<p>活動斷層判釋基準：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 土木學會(1999): 原子力發電所的現地多樣性技術-斷層活動性評估技術</li> <li>• 岡田篤正、東鄉正美(2000): 近畿的活動層</li> <li>• 中田高、今泉俊文(2002): 活斷層詳細數位地圖 200 萬分之一日本列島活斷層圖</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 藉由地形圖的地形解析(地形分區與水系分布)推估處置場址的地下水流動影響範圍(入滲區域及流出區域)</li> <li>• 以航拍圖判釋廣域地下水流動系統及斷層預測</li> <li>• 從地表形狀獲得與未來地形變化相關的資訊</li> <li>• 解析模式所需的數值地形資料</li> </ul>
地質	文獻調查(地質圖)、地表勘查、物理探勘、鑽探		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 從岩質分布評估多孔隙岩盤的裂縫(建立概念模式)</li> <li>• 可能造成地下水最短遷移路徑的斷層與高透水地層的預測</li> <li>• 廣域地下水流動的地質構造邊界條件</li> <li>• 調查段丘構成的地質與地層，以獲得段丘的形成年代與隆起量(速度)等資訊</li> </ul>
水文	文獻調查、地表勘查	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氣象業務法</li> <li>• 水文觀測業務規定(JIS B8302-2002)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 利用氣象數據與文獻調查，以獲得該地區的水平衡狀況及地下水補注量</li> </ul>
水質	文獻調查、地表勘查		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 從文獻調查資料取得地下水水質資訊</li> <li>• 特殊海岸地區的鹽水影響範圍及化石海水的分布</li> </ul>
地下水理	文獻調查		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 與該地區地下水流動相關之透水特性資料蒐集</li> </ul>
其他	文獻調查		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 從溫泉、地溫分布與火山分布的情況，獲得熱對流相關資訊</li> </ul>

表 2.1.4.1-2 進行廣域地下水解析時的注意事項與對應案例

項目	注意事項	對應案例
地形	使用現有的地形數值資料時，因網格較大，無法顯現河川對地下水流動之影響。	將解析模式與模式化所需精度之地型圖做一比較，修正模式使其可以反應影響地下水流動的水系。
地質與地質構造	廣域地下水流動解析，可巨觀的掌握地下水流。不是標準案例的話，則無法將地質分布模式化。	若推估可能有影響地下水流動的沉積構造(高透水地層或低透水地層等)或斷層時，須進行適當的參數研究後，檢討其影響性。
邊界條件	沒有明確的邊界條件	考量整體水平衡後設定邊界條件。
		上部 沿著地表面形狀做為水位固定邊界。視需要進行地下水補注量變化之參數研究。
		側邊 將分水嶺、河川、海、低透水斷層等水理邊界的不透水邊界與水位固定邊界，設定為邊界條件。此外，視需要變更解析範圍，並檢討影響性。
底部 考量處置設施的處置深度，視需要進行底部邊界變化之參數研究，檢討對處置場的影響。		
透水係數	因有許多場合沒有明確的相對應岩質的透水係數。	進行透水係數變化之參數研究，檢討對於對象地點的影響。

#### 2.1.4.2 流動概念模式設定

流動概念模式包括裂縫網路(Network)模式、雙重透水性模式、多孔質介質模式等。其中，雙重透水性模式因有豐富的連續性裂縫與不連續性裂縫兩種狀況，於設定相對應的流動概念模式時需分開考量。流動概念模式如圖 2.1.4.2-1 所示，並說明如下。

1. 裂縫網路(Network)模式：若裂縫網路(Network)發達，則基質部的透水性會降低，因此地下水幾乎僅會在裂縫間流動，需設定裂縫的分布與透水性後進行模式化。
2. 雙重透水性模式

(1)豐富的連續性裂縫：由連續性佳且豐富的裂縫與基質部構成，地下水會在裂縫與基質部兩邊流動。模式化時除設定裂縫的分布外，也須同時設定裂縫與基質部各別的透水性及孔隙率。

(2)不連續性的裂縫：由連續性不佳的裂縫與基質部構成，地下水會在裂縫與基質部兩邊流動。但與豐富的連續性裂縫之雙重透水性模式相比，幾乎沒有僅沿著裂縫流動的地下水。進行模式化時同樣需設定裂縫的分布、透水性及孔隙率。

3.多孔質介質模式：其概念為地下水在沒有裂縫的基質部流動。進行模式化時須設定基質部的透水性及孔隙率。

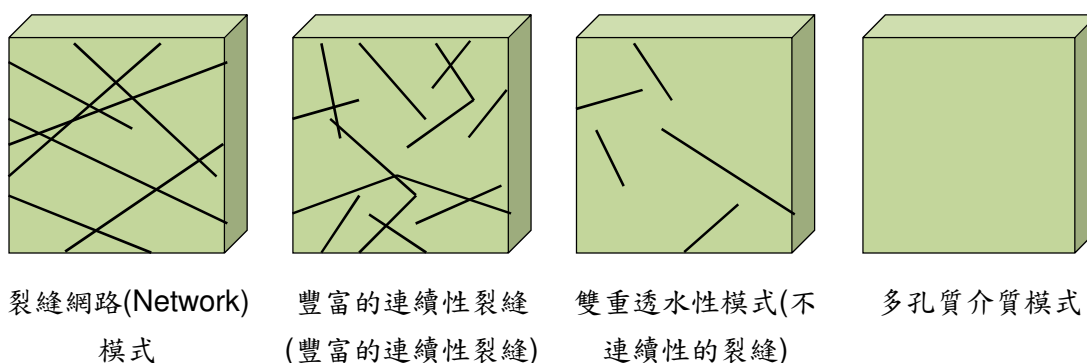


圖 2.1.4.2-1 流動概念模式

#### 一、必要的資料

在眾多的流動概念模式中，選擇適合處置場岩盤之模式，彙整設定流動概念模式時所需的資料，並視須要進行適當的調查與解析。有關調查與設定流動概念模式之流程，如圖 2.1.4.2-2 所示，可分為下列 4 大項目。

- 1.裂縫的幾何特性(頻率、方向、大小分布等)。
- 2.裂縫的水理特性(透水量係數、開口幅度、開口率等相關資料)。
- 3.基質部的水理特性(透水係數、有效孔隙率等)。



#### 4. 裂縫與基質部的流量比(裂縫對整體地下水流動的影響程度)。

上述資料可由下列調查方法取得，並彙整如表 2.1.4.2-1 所示。

1. 藉由觀察岩心、BTV(Borehole television)、開挖面與坑道壁面的地質，取得裂縫的幾何學特性資料。BTV 觀察與地質觀察，可確認裂縫的開口幅度與開口率；觀察岩心表面裂縫與周邊的基質部，以掌握裂縫的重要水理特性。觀察岩心的基質部固結度，可對基質部的透水性進行定性的判斷。此外，觀察開挖面與坑道壁面的湧水狀況，可確認形成水路的裂縫及裂縫與基質部之流量比等定性的評估。
2. 由現場的單孔式透水試驗及孔間透水試驗，可得基質部的透水係數及裂縫的透水量係數。若裂縫密集存在時，在試驗區間取不同位置重覆進行試驗，以掌握各別裂縫的透水性。若是均質的基質部且在透水係數已知的條件下，可採用室內透水試驗。
3. 由流向流速測量與示蹤劑稀釋試驗，可知裂縫與基質部在自然狀態下的達西流速。利用流量觀測(Flow meter logging)，可測得高透水裂縫並有效掌握裂縫與基質部的流量比。此外，由湧水量的測定，可定量的取得裂縫與基質部的流量比。
4. 利用量測孔隙水壓的方式，可得高透水性裂縫與低透水層在孔隙水壓不連續部份存在的可能性。
5. 由地化學調查裂縫與基質部的水質，可研判裂縫成為較佳流動路徑的可能性。
6. 以裂縫為對象於現場進行示蹤劑試驗，可得到裂縫的連續性與平均開口幅度。

7.由室內的孔隙率試驗可得基質部的孔隙率。此外，若進行室內示蹤劑試驗，可得基質部的有效孔隙率。

## 二、設定方法

建立岩盤分析模式時，即使採用相同的調查數據資料，但不同的流動概念模式有不同的設定方法，計算出的遷移時間分布結果意有所差異。因此，設定處置場址的流動概念模式時，須審慎考量其適宜性，避免評估結果過度樂觀或太過保守。此外，由於流動概念模式須充分反映實際狀況，隨著調查精細度增加，視需要可再檢討或修正模式的適當性。

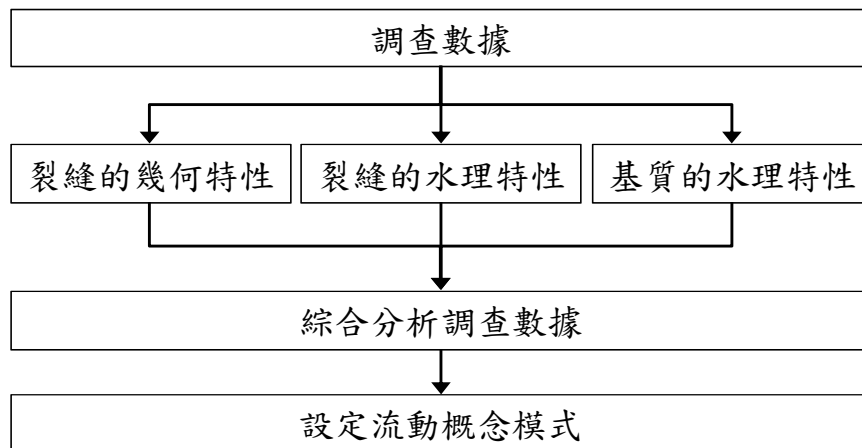


圖 2.1.4.2-2 調查到流動概念模式的設定流程

表 2.1.4.2-1 主要的調查項目、方法及流動概念模式在設定時相關的資料

調查項目	調查方法	流動概念模式設定時有用的資料種類				資料的利用方法等
		裂縫的幾何特性	裂縫的水理特性	基質部的水理特性	裂縫與基質部的流量比	
地質調查	觀察岩心箱	○	△	○	△	裂縫頻率、檢討地下水流動路徑
	觀察 BTV	◎	○	△	—	裂縫頻率、方向、開口幅度、開口率
	地質觀察 (開挖面與坑道壁面)	◎	○	○	○	裂縫頻率、方向、大小、開口幅度、開口率、檢討地下水流動路徑
透水試驗	室內透水試驗	—	—	◎	—	基質部的透水係數
	單孔式透水試驗	—	◎	◎	○	裂縫的透水量係數、基質部的透水係數
	孔間透水試驗	○	◎	◎	◎	裂縫的透水量係數、基質部的透水係數、裂縫的連續性
其他相關水理試驗	流向流速測量	—	△	△	○	裂縫與基質部在自然狀態下的達西流速
	示蹤劑稀釋試驗	—	△	△	○	裂縫與基質部在自然狀態下的達西流速
	流量觀測	—	○	△	○	高透水裂縫、裂縫與基質部的概略水理特性
	測量湧水量	—	○	○	◎	裂縫的湧水量占整體湧水量的百分比
	測量孔隙水壓	—	△	△	△	有無高透水層裂縫與低透水層
	地球化學調查	—	△	△	△	檢討地下水流動路徑
	裂縫示蹤劑試驗	◎	◎	△	△	裂縫的連續性
	室內示蹤劑試驗	—	—	◎	—	基質部的有效孔隙率
測量室內孔隙率	—	—	◎	—	基質部的孔隙率	
其他	反射法地震探查	△	—	—	—	有無大規模的構造

◎：非常有效的調查方法    ○：有效的調查方法    △：可做為參考的調查方法或視需要而進行的調查方法

### 2.1.4.3 建立水文地質模型

檢討範圍的水文地質模型可依據下列方針建立，有關調查、試驗及建立水文地質模式的流程，如圖 2.1.4.3-1 所示。

- 1.以流動概念模式為基本進行模型化。
- 2.先從地質特徵檢討地質分區，以此檢討結果加上透水性，針對水文地質分區進行檢討。
- 3.著重於影響地下水流動的斷層、裂縫分布、地層等項目，選出很難由地質分區顯現出的大尺度高透水部份與低透水部份，檢討模型化能否反映連續性。

#### 一、必要的資料

為建立水文地質模型，需經由調查與試驗取得地質、地質構造、斷層、裂縫分布、透水係數、孔隙水壓等影響地下水流的地質與透水性數據資料。此外，為驗證水文地質模型，必須取得地下水位、孔隙水壓、流量、地球化學(水質與地下水年代等)等資料。彙整調查與試驗時所需要的注意事項及調查方法，如表 2.1.4.3-1 所示，並摘要說明如下。

- 1.進行鑽探調查時，為確保資料的可用性，鑽孔位置須平均分配，且視需要進行物理探查。
- 2.以裂縫分布及同一地層中的夾層特徵為調查目標時，可從了解透水性的觀點進行水質觀察與水理試驗。
- 3.為了解裂縫分布特性，需有裂縫的分布方向、裂縫密度、裂縫大小等資料。裂縫的分布方向與裂縫密度可以鑽探資料(觀察岩心箱、孔內攝影(Borehole Television, BTV)等)、地表調查(觀察開挖面)、試驗坑道調查(觀察坑壁地質)等方式取得，裂縫大小的分布可以地表調查(觀察開挖面)及試驗坑道調查(觀察坑壁地質)等方式取得。

4. 透水試驗依據試驗地點不同，可分為現場透水試驗(單孔式透水試驗、孔間透水試驗等)及室內透水試驗兩種，而各透水試驗又有許多試驗方法，可依檢討範圍的水理特徵選擇合適之試驗方法。
5. 從檢討範圍的水理特徵、坑道開挖及地下水流場變化等觀點，進行孔隙水壓的量測。為詳細掌握孔隙水壓的變動情況，孔隙水壓之量測建議採長期連續量測方式進行。
6. 為驗證水文地質模型，除需考量地下水位、孔隙水壓、流量、地球化學(水質、地下水年代等)等項目之正確性外，亦需蒐集坑道開挖前的初期狀態及坑道開挖後隨時間變化之狀態等資料。

## 二、設定方法

### (一) 檢討水文地質區分

從檢討範圍內的地質與地質構造中，選出與地下水流動有關的地質特徵進行地質區分的研究。並考量調查及試驗所獲得各地質區分之水理特性與地質特徵之關聯性，以進行水文地質區分。與地下水流動有關的地質特徵詳如表 2.1.4.3-2 所列，假設是處置場址所在岩層特性為堆積性軟岩時，需留意岩盤的基質(粒徑分布、孔隙率、孔隙構造等)、風化與變質狀況、沉積構造、高透水性或低透水性的地質構造(斷層、破碎帶、薄層等)連續性、裂縫分布特性(裂縫密度、裂縫大小的分布)等地質特徵。若著重於水文地質區分的透水性時，需考量地質區分、風化、變質、裂縫分布特性、透水異向性、透水性受深度的影響性等項目與透水係數分布的關係，以設定水文地質區分的透水係數。

### (二) 選出大尺度的高透水部份與低透水部份

連續性高的高透水部份與低透水部份，都會對地下水流場產生很大的影響。若可從地質圖中判斷出影響因子為地層

與斷層時，則可藉由透水試驗結果之比較，選出高透水部份與低透水部份，但高透水部份與低透水部份有下述情況發生時，容易在調查時被忽略。

- 透水試驗區間內含有多個高透水部份(例如：高透水裂縫、高透水薄層)
- 比透水試驗區間長度還薄的低透水層。
- 分布在鑽探試驗取樣後無法確認的地方(例如：鑽孔與鑽孔間)，且變位量小的斷層(高透水部或低透水部)。

為增加水文地質模型的精度，須找出上述項目並反映在模式內。以下針對選出高透水部份與低透水部時所需注意的事項說明如下，其模型化流程如圖 2.1.4.3-2 所示。

#### 1. 鑽探取樣的注意事項

- (1). 平均配置鑽探孔，確保鑽探調查資料具代表性。
- (2). 觀察岩心時，須注意同一地層中的夾層或薄層的特徵。
- (3). 觀察岩心與孔內攝影(BTV)時，由裂縫分布的特徵歸納出裂縫密集處。

#### 2. 進行物理探查的注意事項

若在鑽探取樣孔之間，有變位量小的地層存在時，需視需要採用 3D 反射法地震探查等物理探查方法，補充鑽孔調查結果。

#### 3. 掌握透水性的注意事項

- (1). 利用鑽孔進行現場透水試驗時，為確保高透水部份或低透水部份於調查時不會被忽略，需於深度方向進行連續性試驗以獲取透水係數之數據資料。此外，因高透水部會對地下水流動造成很大的影響，可視需要增加流量觀測、流向流速測定、孔間透水試驗等試驗，以取得更詳細的水理特性資料。



(2).由於岩盤內的孔隙水壓分布可反應廣域的水理特性，故低透水部份可視需要由孔隙水壓的測定來了解分布的範圍與連續性。如圖 2.4.3-3 所示，於透水性均勻的地層，全水頭從地下水滲透區域向地下深層方向慢慢降低，而當地層中有低透水部分時，孔隙水壓會出現轉折點。

### (三)建立模型

由地下水流相關之地質特徵、水文地質區分的低透水性及高透水部份與低透水部份的研判結果，建立水文地質模型。建立地質模型與水文地質模型時，需檢討與注意之事項詳如表 2.1.4.3-3 所列。

依據水文地質區分的檢討結果，評估可能有數個不同的水文地質模型時，可視需要建立不同的水文地質模型以利後續評估之進行。這些水文地質模型可利用後續的 2.1.6 節的地下水流動解析驗證之說明，利用地下水位、孔隙水壓、流量、地球化學(水質、地下水年代等)，驗證模型的驗證的適當性，並視需要修正模型。

此外，針對裂縫進行模型化時，需評估裂縫分布特性，以反饋到水文地質模型中。圖 2.1.4.3-4 為不同地點之裂縫痕跡長的分布，由圖可知是以冪次法則分布。故可調查試驗坑道，以獲得裂縫痕跡長與裂縫大小的分布後，進行裂縫模型化的設定。

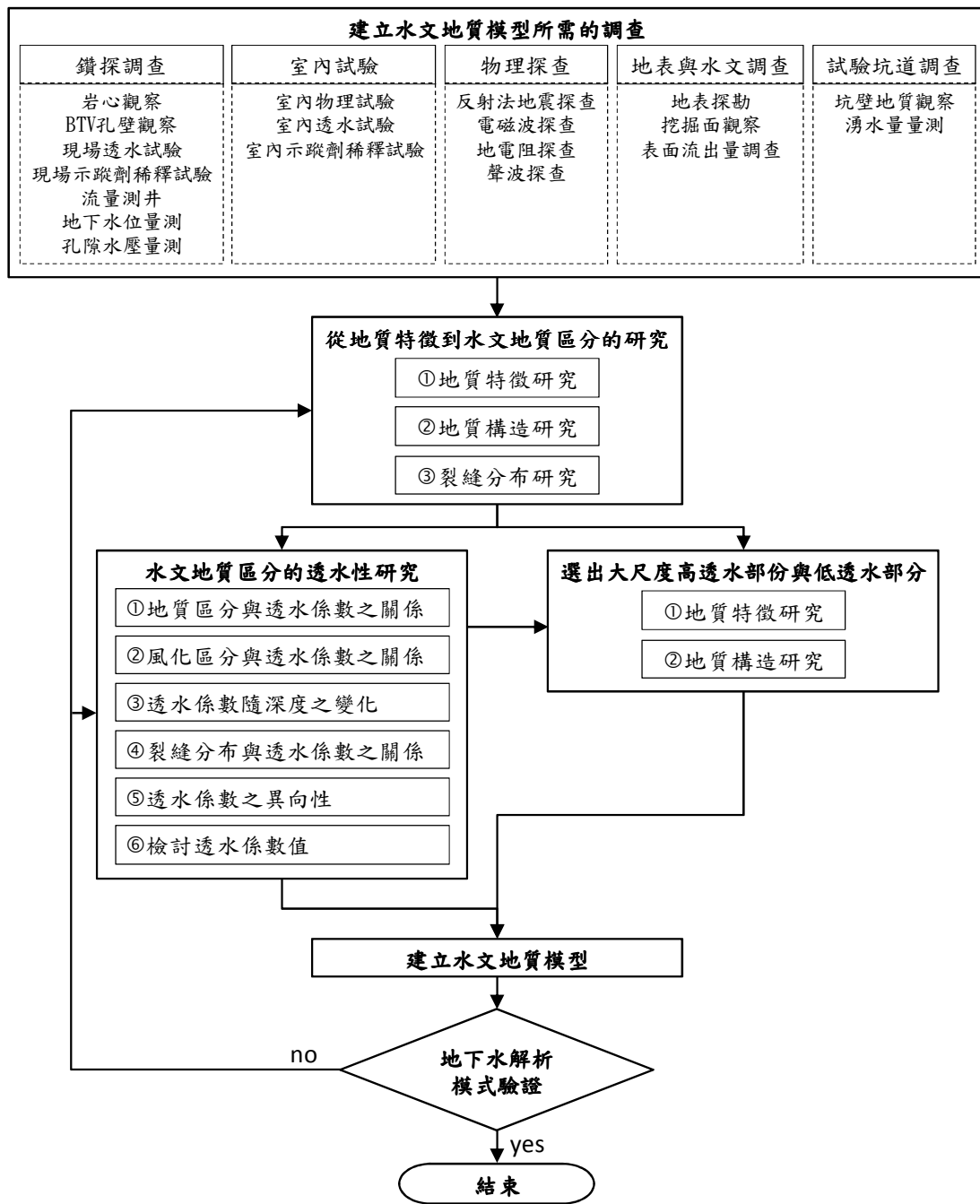


圖 2.1.4.3-1 從調查到水文地質模式建立的流程

表 2.1.4.3-1 建立水文地質模型所需要的資料及調查方法

需要的資料	調查及試驗	規格與標準	主要調查方法之目的	
<b>【地質、地質構造】</b> 地質分布 斷層分布 裂縫分布 風化分布  <b>【透水特性】</b> 透水係數 透水異向性 有效孔隙率  <b>【孔隙水壓分布】</b> 地下水位 表面流出量 孔隙水壓	鑽 心 調 查	觀察岩心	※鑽探調查之目的為取得處置場址的地質與地下水資料，故採網格配置確保資料的正確性。	
		觀察孔內攝影 (BTV)		
		注水式透水試驗	JGS1322—2003	※現場透水試驗之目的為掌握各地層的透水性及選出高透水區域。
		抽水式透水試驗		※示蹤劑試驗之目的為掌握裂縫的連續性，並視需要進行。
		孔間透水試驗		※流向流速測量及流量觀測之目的為掌握高透水區域，並視需要進行。
		示蹤劑試驗		
		流向流速測量		※水質分析之目的為掌握地下水流，並以物質遷移的角度獲取相關資訊。
		流量觀測		
		地下水水質分析	JISK0101—1998	※孔隙水壓主要以確認水文地質區分的妥當性及提高精度為目的。並特別針對水壓變化點，選出高透水部份及低透水部份。
		地下水位測量	JGS1322—2003	
孔隙水壓測量				
<b>【地球化學環境】</b> 地下水水質	室 內 試 驗	室內物理試驗	ISRM 指針等	※室內示蹤劑試驗是藉由實際流速與達西流速之比較，來掌握與地下水流動有關的孔隙率。
		室內透水試驗	JISA1218—1998	
		室內示蹤劑試驗	JGS0311—2000	
	物 理 探 查	反射法地震探查		※反射法地震探查之主要目的為掌握高透水部份與低透水部份的相關斷層構造，並補充鑽探調查時鑽孔間資料不足的部分。
		電導率(electrical conductivity)探查		※地電阻探查以掌握地下深層的鹽水分布為目的。
		音波探查		※聲波探查之主要目的為掌握海域、湖沼等區域的地下地質構造。
	地 表 調 查	地表探勘		※地表探勘及開挖面觀察除可了解地質分布外，還能掌握與透水性有關的裂縫痕跡長(Trace length)或分布。
		觀察開挖面		

	水文調查	調查表面流出量	水文觀測業務規定	※整合氣象觀測資料可掌握河川流量、地下水補注量等水文狀況。
	調查坑調查	坑壁地質調查		※試驗坑道調查可直接確認處置深度的地質狀況，以及裂縫裂縫痕跡長(Trace length)或分布、透水試驗、水質分析等適當性。
		測量湧水量		
		分析地下水水質		※測量湧水量之目的為確認水文地質模型及設定值的適當性。

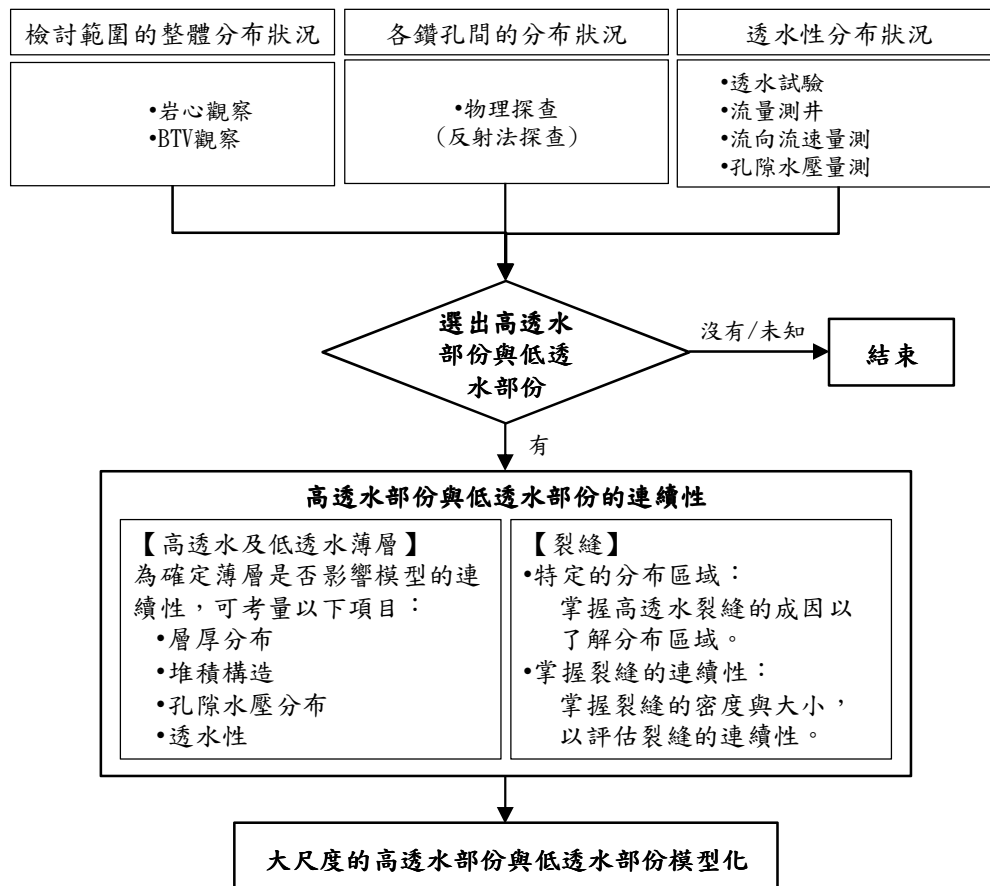


圖 2.1.4.3-2 高透水部份與低透水部份的模型化流程

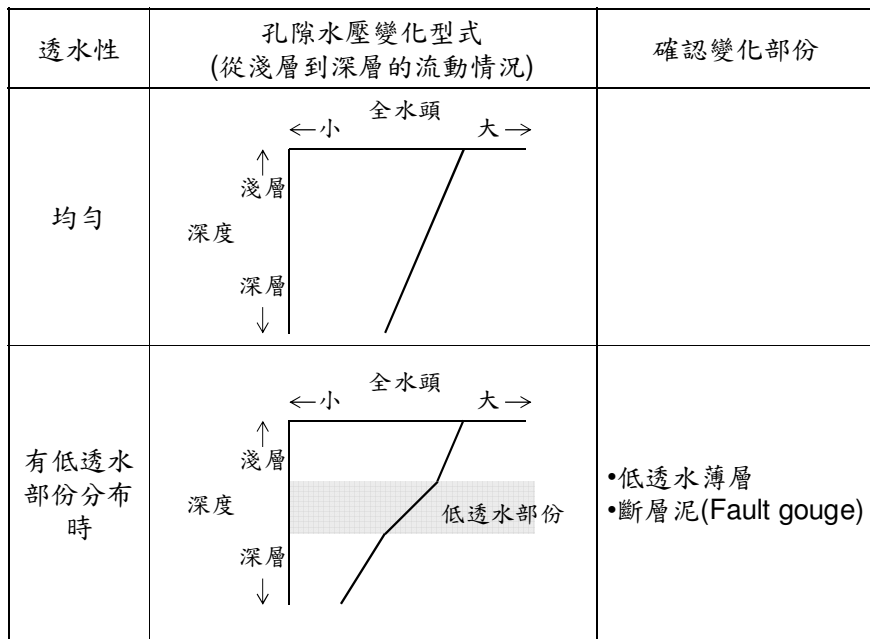


圖 2.1.4.3-3 由孔隙水壓量測推測低透水部分的分布(以地下水滲透區域為例)

表 2.1.4.3-3 建立水文地質模型的主要檢討事項與注意事項

模型	項目	檢討事項與注意事項
地質模型	地層分布 斷層分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 以地表探勘、鑽心取樣調查為基礎，掌握地質層序與地質分布。</li> <li>• 視需要可利用 3D 反射法地震探查等物理探查方法，補充各鑽孔間的地質資料。</li> </ul>
水文地質模型	水文地質區分	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 基本上以地質特徵為基礎進行地質區分，並檢討與透水特性的關連性來進行水文地質區分。</li> <li>• 進行區分時，除考量透水係數外，也必須考量裂縫分布、風化分布、地層的連續性、沉積構造等。</li> <li>• 利用孔隙水壓變化區的分布亦為有效的方法。</li> </ul>
	大尺度高透水份	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 斷層附近可能會因連續的高透水裂縫而成為高透水份，但因斷層成因不同(構造型斷層/堆積時斷層)，並非所有斷層附近都會形成高透水份，故可由斷層的地質性狀及成因判斷是否有高透水份。</li> </ul>
	高透水薄層	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 當周邊岩盤的透水性高時，現地透水試驗將會受到限制，不一定可確認高透水薄層的存在。</li> <li>• 若透水試驗得到的透水係數甚大時，可能是試驗區間的裂縫造成，可由區間中的岩質與構造判斷高透水的發生原因，並藉由室內透水試驗掌握透水係數。</li> </ul>

	高透 水 裂 縫	<ul style="list-style-type: none"> <li>由裂縫的成因(應力變化、岩盤物理性質的差異等)評估高透水裂縫的分布區域。</li> </ul>
大尺 度 低 透 水 部 份	低透 水 薄 層	<ul style="list-style-type: none"> <li>低透水部份大多為斷層、沉積岩中的薄層等。</li> <li>現地透水試驗時，若試驗區間長度太長，則很難由透水試驗找出低透水薄層。</li> <li>由地質觀察選出低透水地質(黏土層、凝灰岩薄層等)，並藉由室內透水試驗掌握透水係數。</li> </ul>

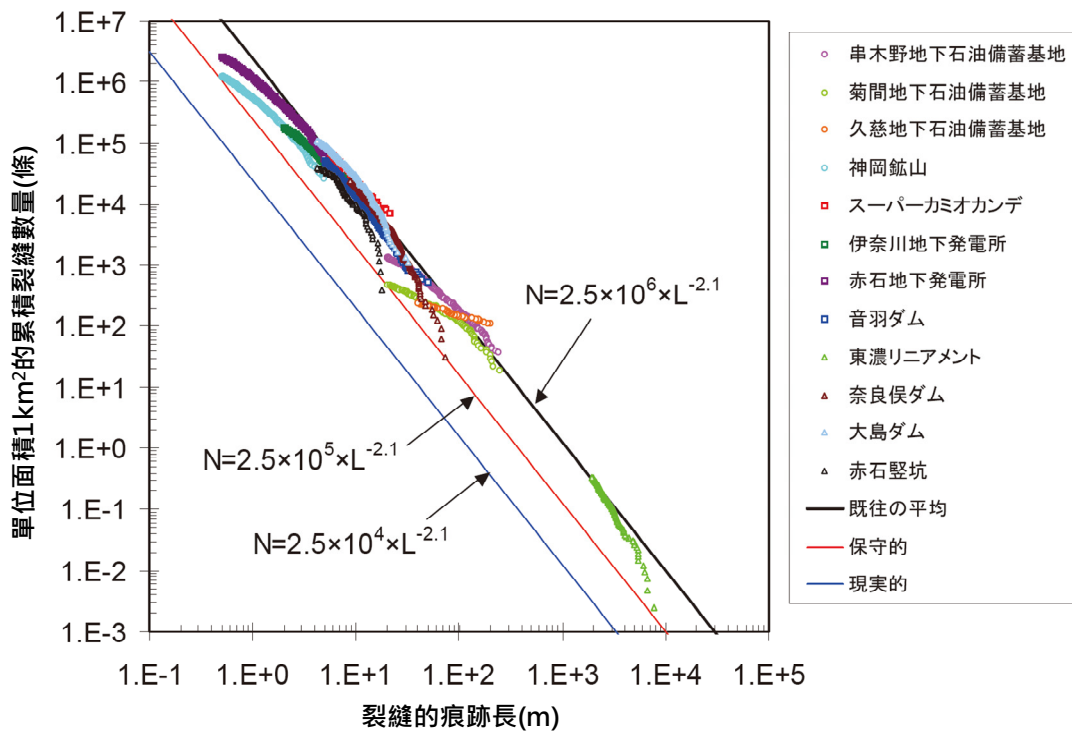


圖 2.1.4.3-4 裂縫的痕跡長分布

#### 2.1.4.4 巨觀水理特性的設定



巨觀的水理特性設定流程如圖 2.1.4.4-1 所示，須先以 2.1.4.2 節與 2.1.4.3 節為基礎建立水文地質模型，並針對各種不同水文地質區分，決定巨觀的水理特性設定方法，以進行實際的巨觀水理特性設定。

#### 一、必要的資料

進行地下水流動解析與核種遷移解析時，須將解析區域依據水理特性的不同劃分為數個區域，針對個別區域計算其透水係數、有效孔隙率、分散長等水理特性。對於同一水理特性區域的分割作業，可參考 2.1.4.3 節的方法，並利用調查資料決定各區域的水理特性後，設定巨觀的水理特性。因此，須注意水文地質模型所分割的區域，其個別的流動概念模式，並整理相關調查數據，以求得巨觀的水理特性。有關設定巨觀水理特性所需的資料、數據整理方法與調查項目，詳如表 2.1.4.4-1 所列。

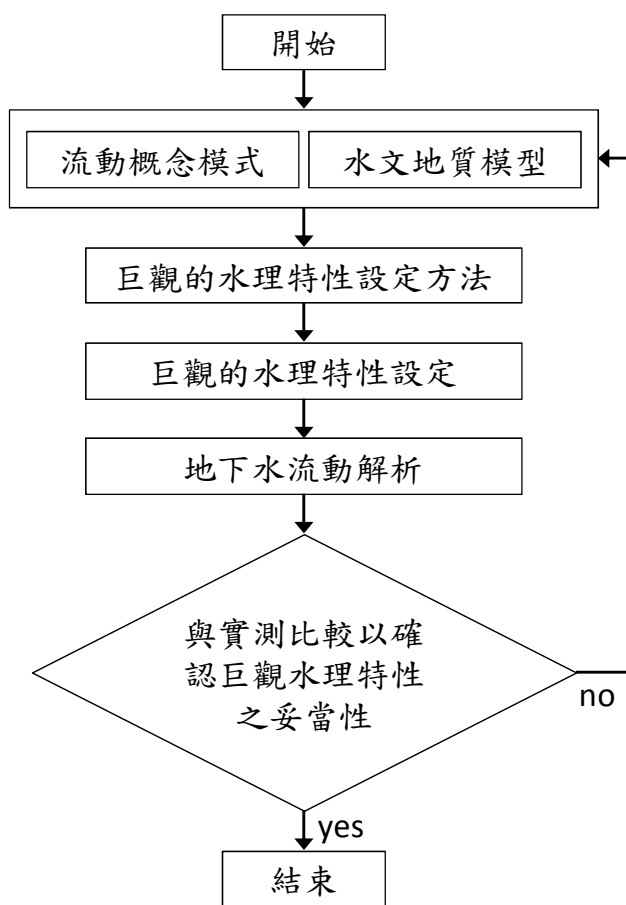


圖 2.1.4.4-1 巨觀的水理特性設定流程

表 2.1.4.4-1 設定巨觀水理特性時的必要資料與調查

設定巨觀水理特性所需的資料	得到左欄資料後可採用的數據彙整方法	調查項目
基質部的透水係數分布	• 透水試驗結果(透水係數)的頻率分布圖(含沒有裂縫區間)	• 室內及現地透水試驗 • 觀察孔內攝影(BTV) • 觀察岩心箱
基質部的有效孔隙率分布	• 有效孔隙率分布的頻率分布圖	• 室內示蹤劑試驗
裂縫的密度	• 裂縫的密度(裂縫數/觀察長度) • 裂縫的密度(裂縫數/觀察壁面面積)	• 觀察孔內攝影(BTV) • 觀察岩心 • 觀察地質壁面
裂縫的中心座標	• 地質描繪(可表現裂縫分布狀態)	• 觀察地質壁面
裂縫的方向分布	• 裂縫的走向傾斜分布(觀察孔內攝影(BTV)、觀察岩心) • 裂縫的傾斜走向分布(觀察地質壁面)	• 觀察孔內攝影(BTV)(觀察岩心) • 觀察地質壁面
裂縫的大小分布	• 由地質壁面觀察所得之裂縫痕跡長分布	• 觀察地質壁面
裂縫的透水量係數分布	• 透水試驗結果(透水係數)的頻率分布圖(含裂縫區間)	• 透水試驗 • 觀察孔內攝影(BTV) • 觀察岩心

## 二、設定方法

### (一)巨觀的水理特性設定方法

彙整水文地質區分的調查資料，若屬於規則分布時，巨觀的水理特性設定可直接採用調查值的平均，而平均方法不論採用幾何平均(對數平均)或算術平均，差異都不至於過大。但實際上調查的資料通常為不規則分布，對於不規則分布則可採用下列方法獲取巨觀的水理特性。

#### 1.利用廣域調查結果

為因應設定巨觀水理特性時的區域尺度，可採用長區間的抽水試驗。但若無法進行試驗時，可利用長區間的抽水試驗之透水試驗結果與較短區間的透水試驗結果相互比較，以掌握巨觀的透水係數特性後，如圖 2.1.4.4-2 所示。

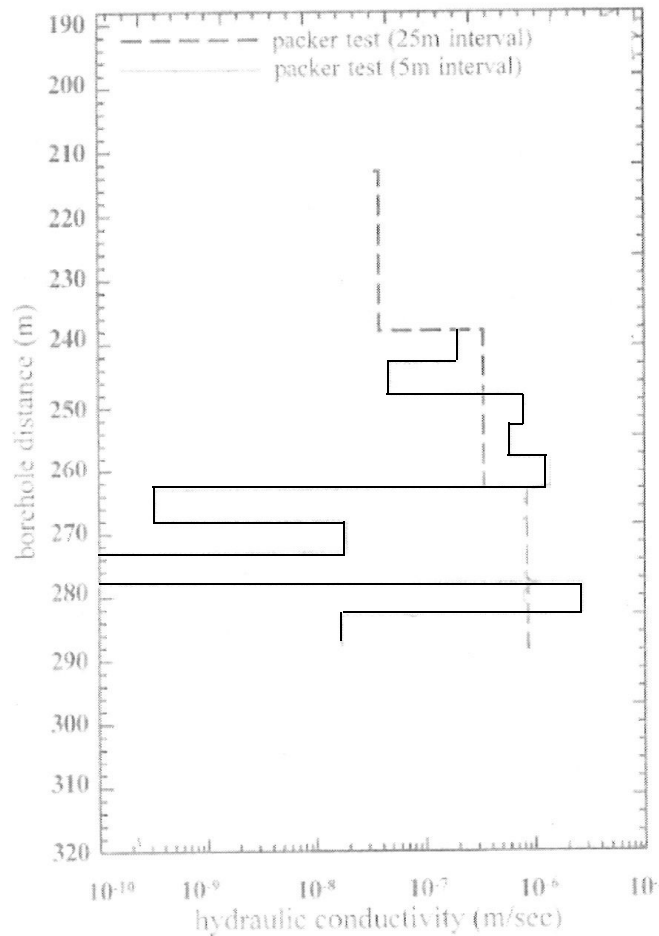


圖 2.1.4.4-2 長區間透水試驗與短區間透水試驗的比較案例

## 2.採用統計學、地球統計學等理論方法

巨觀的水理特性也可藉由統計學或地球統計學等方式獲得。假設透水係數的統計量並沒有方向與位置性(等向且穩態)，以 $\sigma_f$ 表示不規則透水係數的自然對數標準差，則巨觀的透水係數  $K_{eff}$  可用 Matheron(1967)、Gutjahr(1978)等公式求得，說明如下：

$$\text{Mathero} \tag{2.1.4.4}$$
$$n : \tag{-1}$$

Gutjahr

: (2.1.4.4  
-2)

其中， $K_g$  為透水係數的幾何平均值。

此外，對於巨觀的分散長  $\alpha_L$ ，也可由透水係數的統計量來表示，例如運用 Gelhar 和 Axness 的統計式，分散長可以下式表示：

$$\alpha_L = \sigma_f^2 \lambda / \gamma^2 \quad (2.1.4.4-3)$$

其中，其中  $\gamma$  為透水係數(以對數求得)的相關長、 $\lambda$  為流動因子。 $\lambda$  若以巨觀的透水係數式(2.1.4.4-2 式)表示，則如下式所示：

$$\lambda = \exp(\sigma_f / 6) \quad (2.1.4.4-4)$$

### 3. 利用數值模擬方法

對於基質部為不均質性的岩盤，利用可以推估透水係數分布的解析模式，進行大規模的透水試驗與示蹤劑試驗的模擬，以求得巨觀的水理特性。對於基質部中沒有連續性裂縫存在的岩盤，可考量建立解析模式，在此模式上進行透水試驗與示蹤劑試驗的模擬，以求得巨觀的水理特性。日本曾利用下列方式，求得巨觀的透水係數、分散長及有效孔隙率等巨觀水理特性。

- (1). 將裂縫的走向與傾斜、痕跡長、密度分布等調查結果，利用蒙特卡羅法(Monte Carlo method)，將裂 3D 模型化(圖 2.1.4.4-3)。

- (2).將裂縫及岩盤基質部分別網格化後，將兩邊管路(Channel)相接，建立複合管路模式(圖 2.1.4.4-3)。
- (3).給予此模式相對水位差，計算通過模式全斷面的地下水流量，由該流量推估巨觀的透水係數。
- (4).在模式上游交界面釋放多個假想粒子，推估不同粒子到達下游交界面的遷移時間，製作貫流曲線(Breakthrough curve)，如圖 2.1.4.4-4 所示。並由該曲線與移流分散方程式的解，共同求得實際平均流速與巨觀的分散長。
- (5).將求得巨觀的透水係數時之達西流速除以實際平均流速，則可得到巨觀的有效孔隙率。

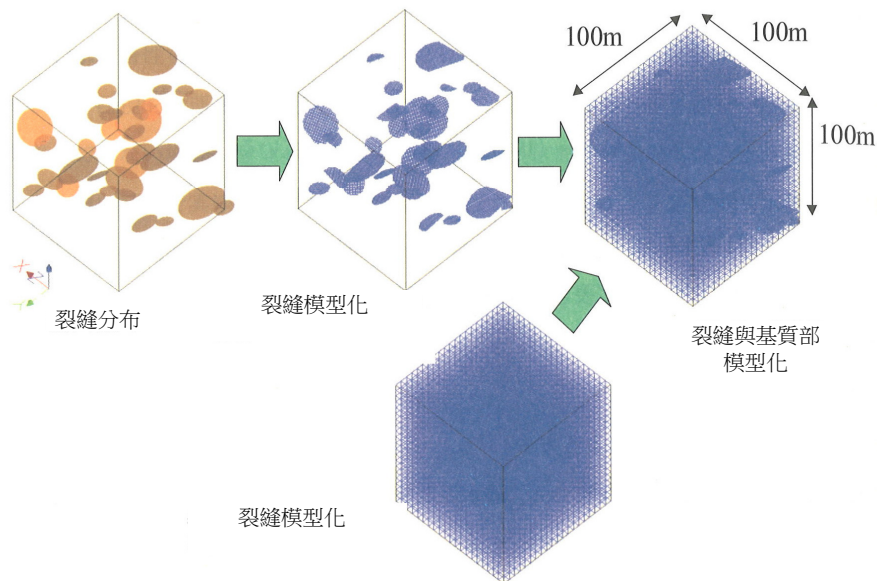


圖 2.1.4.4-3 裂縫與基質部的複合模式



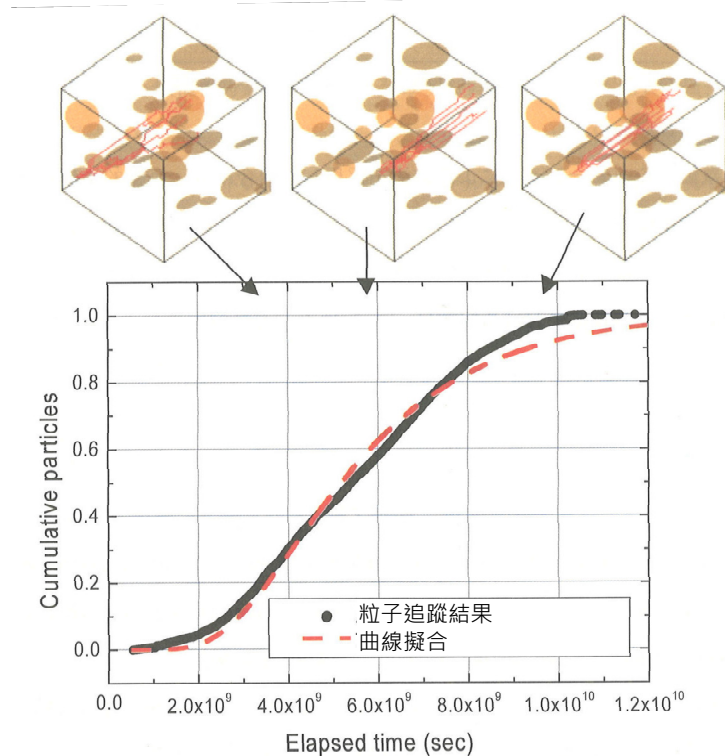


圖 2.1.4.4-4 裂縫與基質部的複合模式與示蹤劑試驗的模擬

### (二)巨觀水理特性的設定

以巨觀的水理特性設定方法為基礎，利用其所求得巨觀水理特性值，進行地下水流動解析，並將解析結果與實測值互相比較，以確認其適當性。設計值的不確定性主要是調查及設定方法的不確定性造成，設定方法的不確定性受到近似式的精度、數值計算時的離散化的大小(網格大小)等影響，可利用敏感度分析降低不確定性之影響。調查的不確定性主要是因為調查資料的不均一性、數據資料少、試驗與量測裝置的精度限制等造成，其不確定性可由敏感度分析或統計方法降低影響。

### 2.1.5 地下水解析

核種遷移評估參數中，與天然障壁性能相關的實際流速、遷移路徑長度、流出點位置、通過設施流量等地下水流動參數，可利用地下水流動解析取得相關參數值。進行地下水流動解析時需注意下列事項，而地下水流動解析的評估與設定流程，如圖 2.1.5-1 所示。

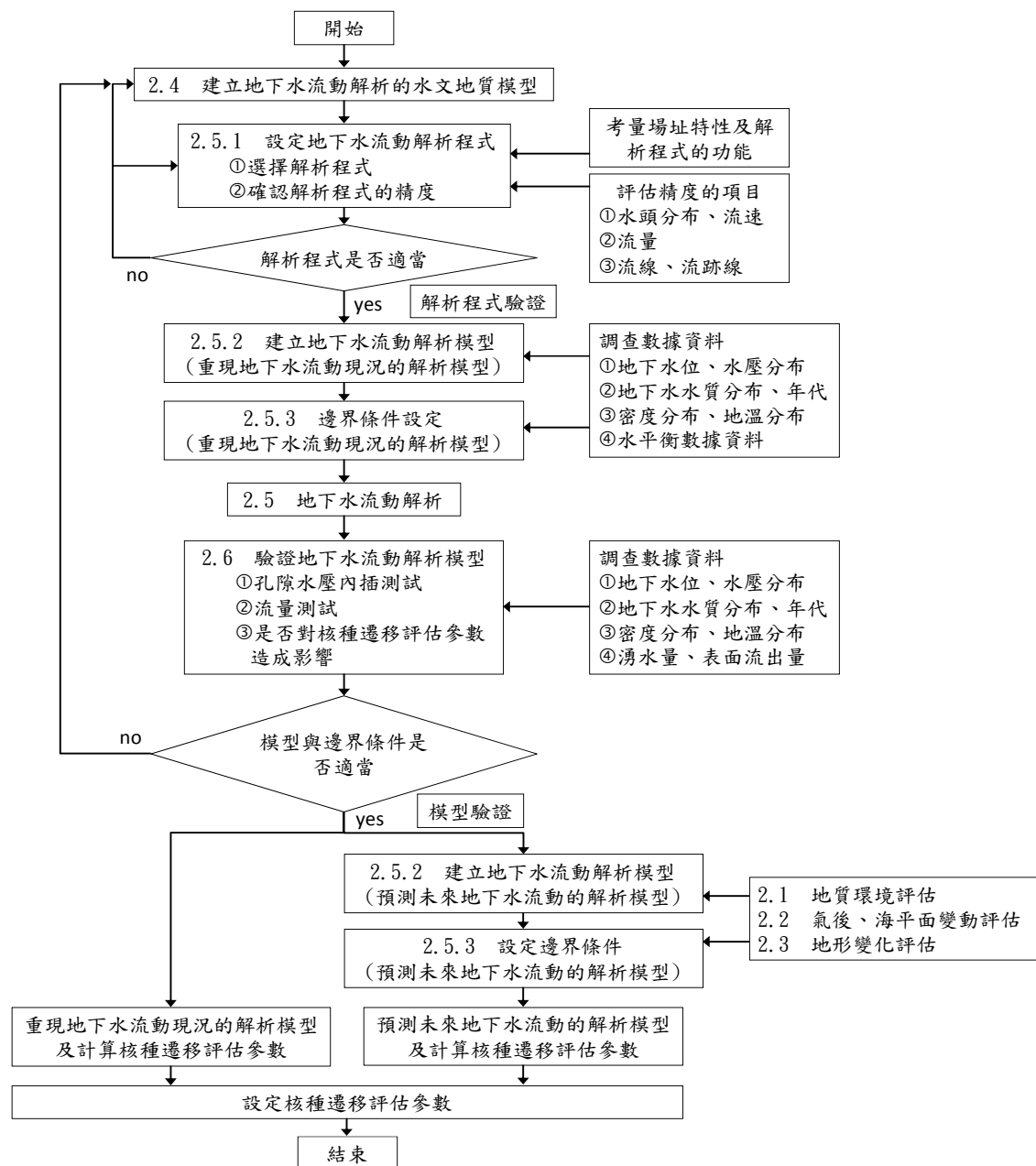


圖 2.1.5-1 與核種遷移評估參數有關的地下水流動解析設定流程

### 2.1.5.1 地下水流動解析程式設定

天然障壁的核種遷移評估參數中，與地下水相關的有實際流速、遷移路徑長度、流出點位置、及通過設施流量等項目，其可由地下水流動解析取得相關數值。並依照地點特性及程式的功能選擇適當之解析程式，若要將鹽分濃度與溫度對密度變化的影響納入考量時，可採用密度流解析程式。

#### 一、一般必要的功能

地點特性及其所需的程式功能，彙整如表 2.1.5.1-1 及表 2.1.5.1-2 所列。並整理出國際上具代表性的移流分散與多相流解析程式，詳如表 2.1.5.1-3。

表 2.1.5.1-1 地下水解析程式的功能

地點特性	必須具備的功能
地形、地質構造複雜	3 維解析、處理多層構造問題
必須處理飽和與不飽和之問題	處理自由水面問題
必須設定地下水補注與蒸發散邊界、滲出面邊界、遠方邊界的狀況	處理各種邊界條件
必須考慮裂縫、高透水薄層的狀況及處置設施的詳細模型化	處理各種主要網格的形狀
進行長期變動預測、過去歷史經歷推測	非穩態解析評估

表 2.1.5.1-2 密度流(移流分散)解析程式的功能

地點特性	必須具備的功能
水溫影響流動狀態	處理密度受水溫影響的問題
必須考量鹽分濃度對鹽水密度變化的影響	物質移動與密度變化之關連性
進行長期變動預測、過去歷史經歷推測	非穩態解析評估



### 2.1.5.2 建立地下水流動解析模型

進行地下水流動解析時，須因應地點特性與解析目的設定解析區域並建立解析模型。製作解析模型時，需考量檢討範圍、流動概念模式、水文地質模型、巨觀的水理特性、解析程式的功能與計算機的能力等。此外，為計算核種遷移評估參數，考量處置設施封閉後到未來之天然障壁長期變動現象及處置設施的長期狀態變化，以驗證過的現況重現地下水流動解析模型為基礎，建立預測未來狀況之地下水流動解析模型。

#### 一、必要的資料

建立地下水流動解析模型時，需有可反映現況與未來的數據資料。有關建立重現現況的地下水流動解析模型的所需資料，可參考 2.1.4 節之說明，除需有檢討範圍、流動概念模式、水文地質模型、巨觀水理特性等資料外，也須考量解析程式的功能與計算機的運算能力。而在建立預測未來狀況之地下水流動解析模型時，除需用到現況重現的地下水流動解析模型外，還要能反映 2.1.1 節、2.1.2 節及 2.1.3 節所提及之地質環境、氣後與海平面變動、地形變化等長期變動現象與對近場的影響評估。

#### 二、設定方法

根據不同解析目的(例如：算出設施通過流量、由處置設施到生物圈的遷移路徑與遷移時間等)，進行相對應的解析區域設定與網格分割。可由廣域解析模型中的某個部分著手建立詳細模型，建立解析模型時需注意以下事項：

1. 水力梯度大時，網格的大小影響精度高低，網格小的精度較佳。若有裂縫與薄層時，可視需要以 2 維網格與 1 維網格或 3 維網格與 2 維網格進行模型化。

- 2.不同的解析程式有不同的網格條件。
- 3.解析模型的規模，可根據解析的種類(穩態與非穩態、飽和與非飽和等)設定計算的範圍。
- 4.採用 Euler 法進行解析時，雖然長寬比(Aspect ratio)對地下水流動解析的影響不大，但對於核種遷移解析的網格分割，若局部拉克勒數(Peclet number)沒有超過 10 時，須將時間間距(time step)的庫朗數(Courant number)設定在 1 以下，避免數值產生震盪。

此外，預測未來狀況的地下水流動解析模型，須能反映長期變動現象的評估結果。當長期變動現象的評估結果有變化時，視需要進行相對應的模型化，並檢討其對核種遷移評估參數的影響性。

### 2.1.5.3 邊界條件設定

邊界條件是地下水流動解析時需輸入的條件之一，綜合考量解析目的、解析程式的功能與限制條件、廣域地下水流動解析結果及調查資料後，進行邊界條件的設定。

#### 一、必要的資料

設定現況重現的地下水流動解析模型之邊界條件時，須要下列資料。

- 1.地下水位分布、孔隙水壓分布
- 2.地下水的水質分布、地下水年代
- 3.地下水密度分布與地溫分布
- 4.檢討範圍(解析模型區域)內的水平衡資料
- 5.廣域地下水流動解析結果



而設定預測未來的地下水流動解析模型之邊界條件時，除需參考現況重現的地下水流動解析模型所使用的資料外，還要將氣候與海平面變動、地型變化等地質環境之長期變動現象評估結果以及開挖影響區域、工程障壁等近場評估結果納入考量。

## 二、設定方法

設定邊界條件時的注意事項說明如下：

1. 進行穩態流動解析時，在解析模型中至少須確認有 1 點為已知水頭。由於已知水頭在邊界條件的設定中為相當重要的限制條件，故在設定時須特別注意。
2. 地下水補注量(蒸發散量)的邊界條件設定方法，需確認有無調查資料後，依照下列方法選擇最適當的方式進行設定。
  - 使用日本國內的平均入滲量=1mm/day(約300~400mm/y)。
  - 以水平衡檢討結果為基礎，進行入滲量的設定。
  - 由解析區域內觀測到之地下水位分布設定入滲量。
  - 蒸發散量之邊界，其入滲量以負值考量。
3. 地下水位面接近地表附近時，固定水頭邊界近似於地表面的壓力水頭，即壓力水頭為 0。
4. 可能有地下水出滲的地方(例如坡面)，需確認出滲面邊界的出滲水量及水頭條件。
5. 若研判在側面邊界與底面邊界上很少有外部的流出流入量時，可將邊界條件設為不透水邊界(固定邊界的流量為 0)。但在解析區域的設定上，若研判邊界條件影響小及設定不透水邊界不妥當時，也可設定半透水邊界。此外，當從一個大模型中切出部分模型時，其邊界條件可採用大模型解析時所使用的已知水頭作為邊界條件，但若會影響部

分模型的內部或超過部份模型的邊界設定甚多時，則需配合解析目的審慎選擇。

6. 邊界條件設定的適當性，可藉由比較地下水流動解析的結果與實測結果，進行模型的修正。
7. 進行非穩態解析時，初期條件需能反映初期時刻的狀態。

有關地下水流動解析的邊界條件與適用案例，彙理如表 2.1.5.3-1 與圖 2.1.5.3-1。此外，對於密度流解析的邊界條件設定，可參考與地下水流動狀況相符的已知濃度邊界(淡水流入區域：淡水濃度、海水流入區域：海水濃度)及與處置場址地溫梯度的相符的已知溫度邊界。而密度流解析是非穩態解析時，邊界條件可設定為解析區域的初期濃度分布與初期溫度分布。

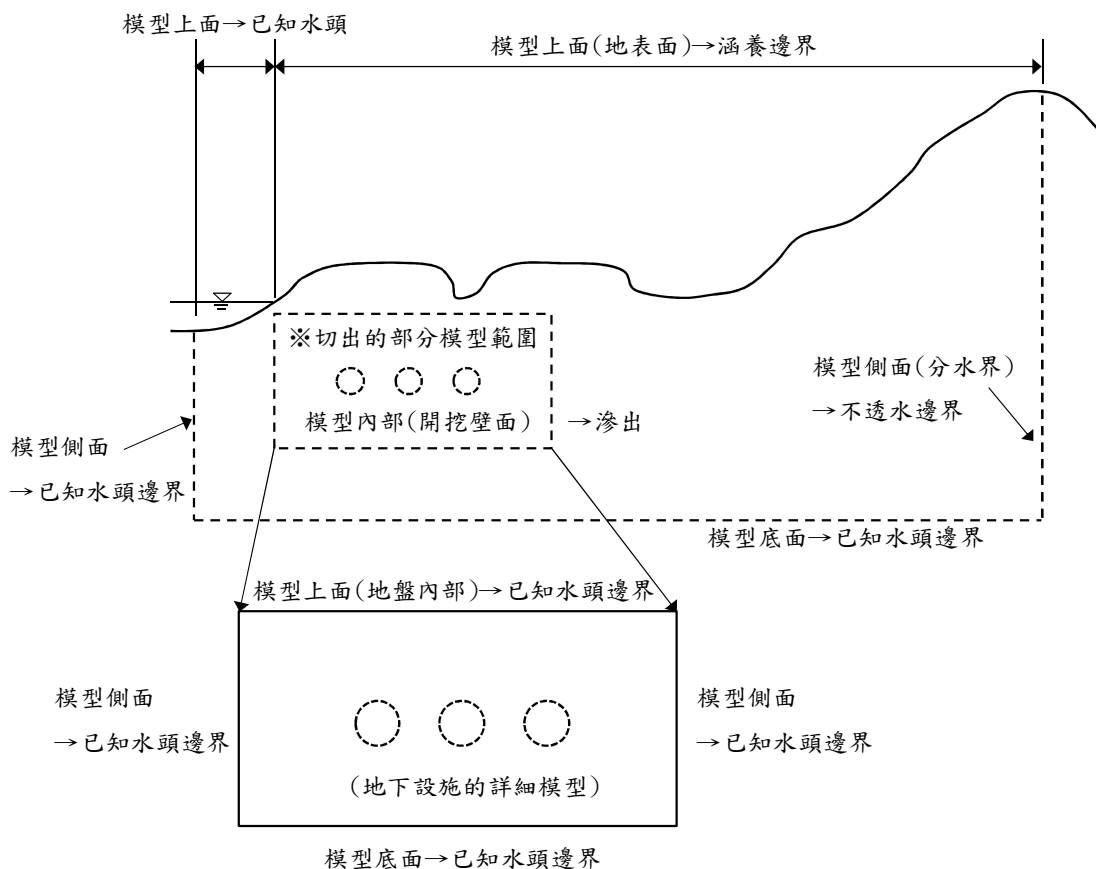


圖 2.1.5.3-1 流動解析的解析範圍與邊界條件

表 2.1.5.3-1 流動解析的邊界條件適用案例

解析模型之 邊界位置		邊界條件的 種類	適用對象	設定方法案例與備註
上面	地表面	入滲邊界 <sup>※1</sup> 蒸發散邊界	自由地下水面問題	1.日本國內平均值 1mm/day(約 300~400mm/y)
				2.依據水文調查資料
		3.地下水位分布的再現性及敏感度分析		
		出滲面邊界 <sup>※2</sup>	自由地下水面問題	當地下水位不明時，利用可變邊界進行設定
		已知水頭邊界	廣域地下水流動問題	地表面近似地下水位面(壓力水頭為0的固定邊界)
	海底、湖沼底、河川底	已知水頭邊界		考量水壓後的水頭固定邊界
地盤內部	已知水頭邊界	切出的部分模型解析	1.使用大尺度的解析結果內插 2.以實測資料為基礎 3.滿足假設的水力梯度條件	
	半透水邊界	無法由已知水頭與已知通量提供時	參考 <sup>※3</sup>	
側面	模型側面邊界	不透水邊界	廣域流動的分水嶺、分水界	以已知通量為0進行設定
		已知水頭邊界	切出的部分模型解析等	1.使用大尺度的解析結果內插 2.以實測資料為基礎 3.滿足假設的水力梯度條件
		半透水邊界	無法由已知水頭與已知通量提供時	參考 <sup>※3</sup>
底面	模型底面邊界	不透水邊界	流出流入量小、水質不同或滯留於深層地下水時	以已知通量為0進行設定
		已知水頭邊界	切出的部分模型解析	1.使用大尺度的解析結果內插 2.以實測資料為基礎 3.滿足假設的水力梯度條件
內部	模型內部邊界	出滲面邊界	坑道開挖壁面	開挖壁面設定為可變邊界
		已知水頭邊界	鑽孔的水位固定	模式內部為水頭固定邊界
		已知通量邊界	鑽孔的灌水與抽水流量固定	模式內部為流量固定邊界

※1 入滲邊界：已知通量邊界的一種，由解析模型的地表面考量入滲量。但隨著地下水位面的上升，

節點的壓力水頭大於 0 時，地表面壓力水頭為 0 之固定邊界，視為可變邊界條件。此外，當入滲量為負值時，即相當於考量地表面的蒸發散量(蒸發散邊界)。

※2 出滲面邊界：為可變邊界條件的一種，由地下水位面的位置起算，節點的壓力水頭大於 0 時，使用壓力水頭為 0 的固定邊界(視為流出條件)。當壓力水頭為負值時，採用不透水邊界。

※3 半透水邊界：前述條件無法規範的水頭、流量之邊界條件，以下式表示：

其中， $K$ =透水係數、 $h$ =邊界的未知水頭值、 $\alpha$ =漏水抵抗、 $L$ =邊界到已知水頭  $H$  的距離、 $H$ =已知水頭

### 2.1.6 地下水解析模式驗證

驗證解析模型的目的，是為確認解析模型推估之核種遷移評估參數(實際流速、遷移路徑長度、流出點位置、通過設施流量等)的精度。地下水流動解析模型的驗證，是將現況重現的地下水流動解析結果與與驗證資料相互比較，並視需要加入過去到現在的地形變化與氣候變動驗證模式的正確性。當計算結果與實測結果不一致時，須參考 2.1.4.2 節、2.1.4.3 節、2.1.4.4 節、2.1.5.1 節、2.1.5.2 節、2.1.5.3 節之說明重新檢討並改善現況重現的地下水流動解析模型。由於驗證資料很難與解析結果完全一致，盡可能確定解析條件的正確性，並進行敏感度分析，以利後續利用預測未來狀況之地下水流動解析模型計算出核種遷移評估參數的代表值。有關驗證地下水流動解析模型的檢討流程如圖 2.1.6-1 所示。

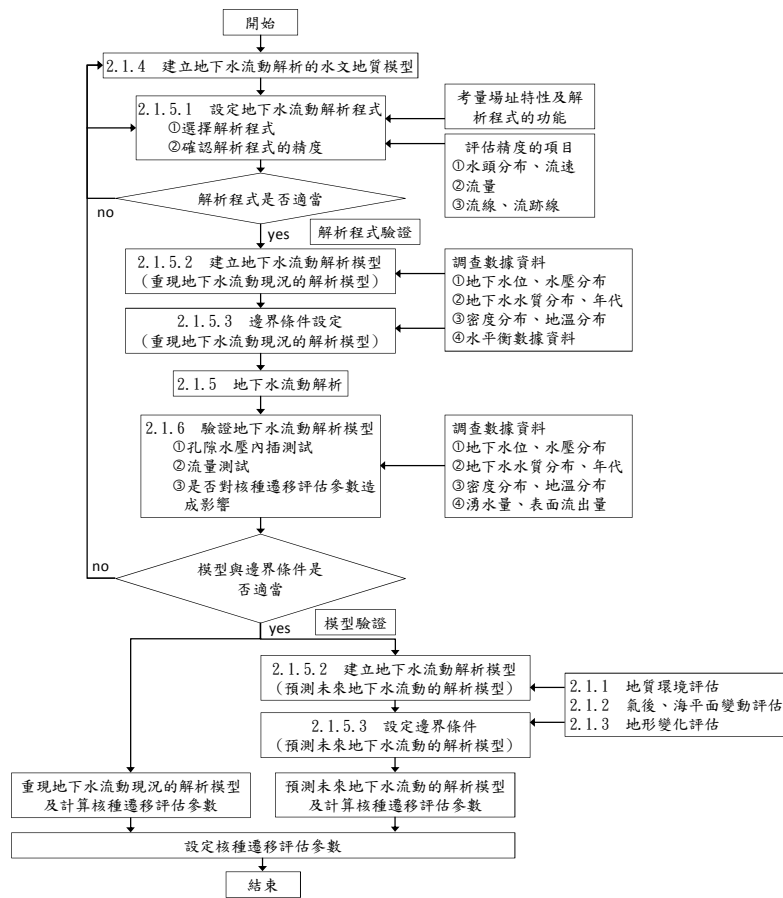


圖 2.1.6-1 驗證地下水流動解析模型的檢討流程

### 2.1.6.1 選擇驗證數據資料

驗證地下水流動解析模型是要確認解析結果對實測資料的重現程度，故需考量實測資料的可信度、資料取得位置與數量、對解析模型構成要素的敏感度等因素，選擇適當的驗證資料。

#### 一、必要的資料

驗證地下水流動解析模型所需的驗證資料，包括地下水位與孔隙水壓資料、流量資料(湧水量、表面流出量)及地球化學資料(水質、地下水年代)。

#### 二、選擇方法

選擇驗證資料時，需考量資料的測量精度、處置場的分布及資料取得位置與通過處置設施流跡線間的關係。此時，

各水文地質區分的透水係數與解析條件等模型的構成要素，會對模型產生很大的影響時，此敏感度高的資料即為驗證所需的資料。基本上，驗證的實測資料多選擇不是用於模型與邊界條件的資料。此外，也需選擇人為擾動影響之資料作為驗證資料，例如進行坑道開挖時，可取得地下水位分布、孔隙水壓分布的變動與坑道內湧水量間的關係等資料。

### 2.1.6.2 利用地下水位與孔隙水壓資料進行驗證

將地下水位、孔隙水壓分布等不是用於設定邊界條件的實測資料與解析結果相互比較，以驗證模型的水文地質構造、各水文地質區分之透水係數的相對比例(大小關係)、邊界條件等資料的重現性。例如相互比較地下水位，可驗證地表附近地層之透水性與地下水補注量等上部邊界條件。此外，因坑道開挖、大規模抽水試驗等人為擾動而影響地下水流場時，可藉由現況重現分析增加模型驗證的信賴度。

#### 一、必要的資料

必要的資料包括地下水位(淺地層)及孔隙水壓(深地層)的實測值與解析結果。彙整資料時，須掌握資料的時變性，以及因開挖等人為干擾而影響地下水環境之邊界條件變化等資料。

#### 二、驗證方法

驗證方法主要利用實測結果與解析結果相互比較，以了解解析結果的再現性。例如將實測水位與計算水位繪製如圖 2.1.6.2-1，並計算兩者的相關係數，以針對解析結果的再現性進行定量評估，或是將計算結果之等水位線與鑽孔調查的實測結果繪製如圖 2.1.6.2-2，以掌握解析區域內各點的再現



性。此外，亦可利用各種由解析而得的實際值再現性指標，如表 2.1.6.2-1 所示。

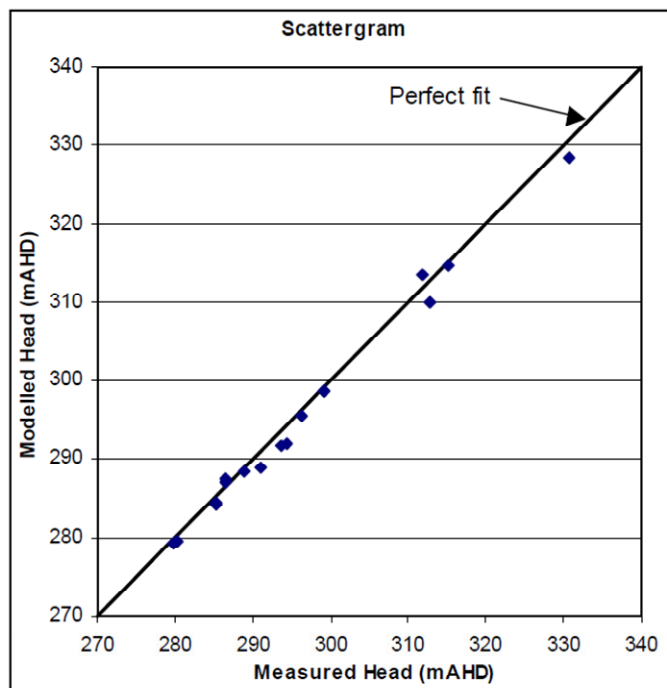


圖 2.1.6.2-1 實測水位與計算水位之散布圖

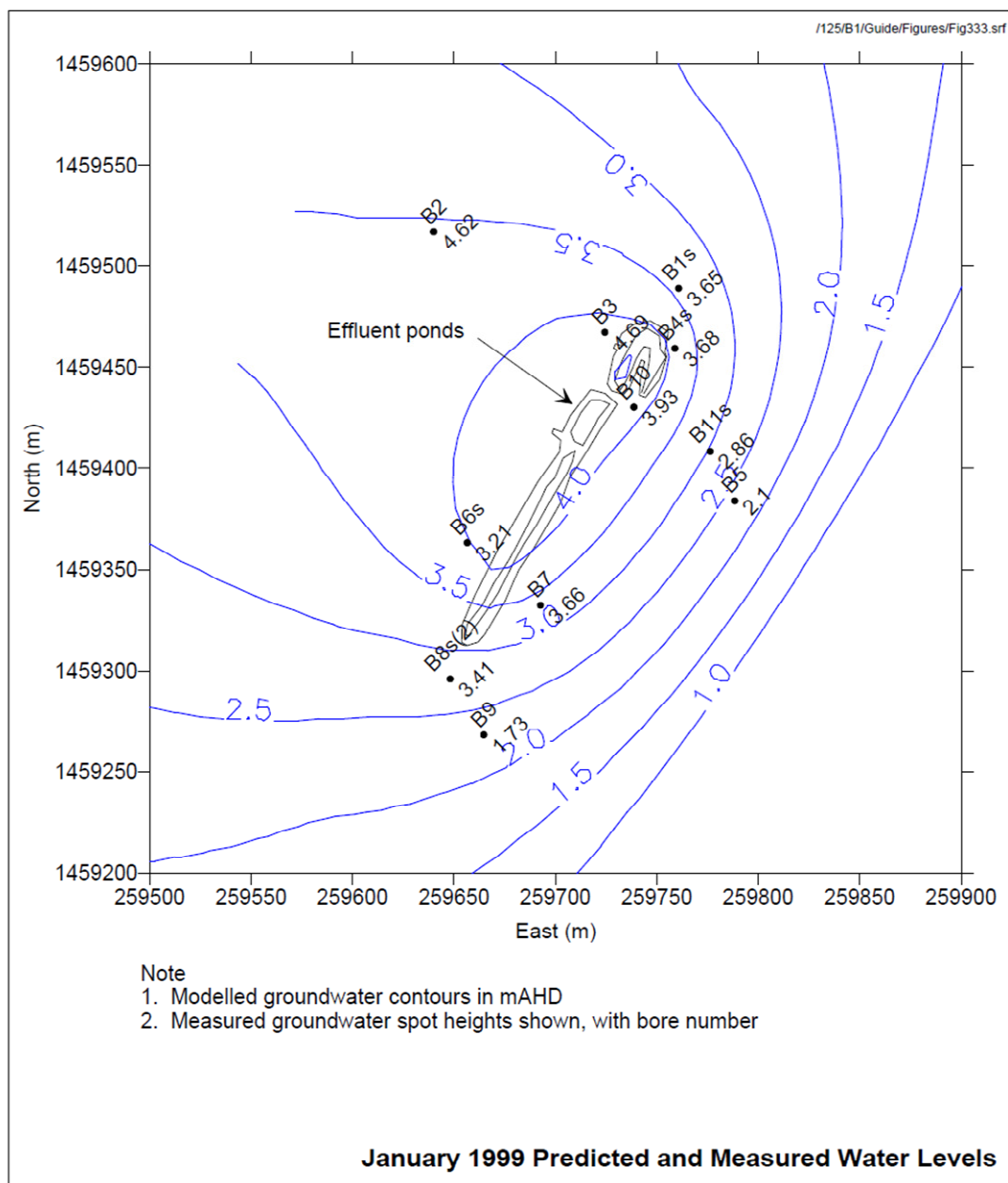


圖 2.1.6.2-2 解析結果的等水位線與鑽孔位置的實測水位比較圖

表 2.1.6.2-1 驗證指標

No	說明	方程式	備註
1	Residual	$R_i = h_i - H_i$ [m] $R_i$ =residual、 $H_i$ =measure head at point i、 $h_i$ =modelled head at approximate location where $H_i$ was measured	Use the maximum as a criterion, or display a histogram; this should be normally distributed around zero.
2	Sum of Residual(SR)	[m] $W_i$ =weighting (range 0 to 1)	Weighting can be (subjectively) applied at selected points to help account for confidence in the data quality. SR is not intuitive, as it varies with sample size.
3	Mean Sum of Residual $MSR = \frac{SR}{n}$	[m]	Independent of sample size, but depends on the range in the measured values.
4	Scaled Mean Sum of Residual (SMSR)	[%] =range of measured heads across model domain	SMSR is an intuitive relative measure which is independent of the measure range.
5	Sum of Squares (SSQ)	[m <sup>2</sup> ]	The units [m <sup>2</sup> ] indicate that this is not an intuitive measure of performance. Depends on the sample size.
6	Mean Sum of Squares $MSSQ = \frac{SSQ}{n}$	[m <sup>2</sup> ]	Not an intuitive measure of performance, but it is independent of the sample size.
7	Root Mean Square $RMS = \sqrt{MSSQ}$	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i (h_i - H_i)^2}$	An absolute measure that is problem-dependent (i.e. its value is affected by the range in the measured values). It is usually

		[m]	thought to be the best error measure if errors are normally distribute.
8	Root Mean Square(RMFS)	$100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n W_i}}$ [%] Weight $W_i$ applies to fraction, not the residual	This measure is affected by magnitude of $H_i$ , which is determined by the datum. Model boundary condition may constrain $h_i$ . An improved performance can be contrived by changing the datum to increase $H_i$ .
9	Scaled RMFS (SRMFS)	$SRMFS = RMFS \frac{\bar{H}}{\Delta H}$ [%]	$\bar{H}$ = mean of measured head values, which have a range of .
10	Scaled RMS(SRMS)	$SRMS$ [%]	SRMS and SRMFS should both be both low (say less than 5% or some other agree value), indicateing that the ratio of error to total head differential is small, and hence errors are only a small part of the overall model response.
11	Coefficient of Determination (CD)		CD tends to one for perfect calibrations.

### 2.1.6.3 利用流量資料進行驗證

由周邊岩盤的透水性及開挖產生的水力梯度，可決定湧向坑道的湧水量，當周邊的全水頭分布(水力梯度條件)的再現性良好時，解析得到之湧水量與實測值的一致性，將影響岩盤設定的透水係數之適當性。

#### 一、必要的資料

必要的資料有坑道湧水量的實測值與解析結果。彙整資料時須掌握資料的時變性、開挖使地下水環境邊界條件變化

等資料。此外，當岩盤透水性非常小時，須注意不能忽略坑道壁面受到蒸發之影響。

## 二、驗證方法

驗證方法包括相互比較坑道湧水量、孔隙水壓分布及地表面流出量的解析結果與實測值，以驗證坑道周邊岩盤的透水係數。當利用湧水量做比較時，若為儲留性較大的岩盤，則湧水量需經過一段時間後才能達到定值，故在與實測值比較時，須考量非穩態性。當利用孔隙水壓分布的再現性確認各岩相間的相對透水性時，除可驗證坑道周邊岩盤的透水性外，亦可間接驗證距離坑道較遠之岩盤的透水性。而比較地表面流出量與解析結果時，可由廣域水平衡觀點驗證地盤或岩盤的透水性。

### 2.1.6.4 利用地球化學(水質、地下水年代等)資料進行驗證

水質、地下水年代等的地球化學資料，可反映流動路徑、滯留時間等狀況。因此，可利用地下水流動解析模型所設定的岩盤透水係數分布、邊界條件、解析求得之地下水實際流速等資料，做為模式驗證資料。

#### 一、必要的資料

必要的資料有地下水的水質、地下水年代等的地球化學資料，主要利用示蹤劑試驗與測量地下水年代等方法獲得相關資料，為使地球化學的地下水調查方法能有系統的進行，將地下水流動評估項目與調查方法之關係，整理如圖 2.6.4-1 所示。示蹤劑試驗有利用地下水中含有的溶解成分與人為投入示蹤劑兩種方式。前者適用於掌握廣域流場，後者適用於地下水流速快或有範圍限制的區域。有關地下水調查使用的

示蹤劑整理如表 2.1.6.4-1 所示。地下水年代測量法是一種以地下水滯留時間求得地下水流動狀況的方法，適用於廣域流場。地下水年代量測為利用放射性核種與放射性核種衰變產物於測量範圍內量測地下水年代，量測時所需的取水量與分析方法整理如表 2.1.6.4-2 所示。

## 二、驗證的方法

使用地下水水質、地下水年代驗證現況之地下水流動解析模型時，可使用下列方法：1.以地下水水質進行驗證時，若有海水入侵的情況發生，可使用密度流解析(移動分散解析)，將所推估的鹽分濃度與實測值相互比較。2.以地下水年代進行驗證時，可以地下水流動解析算出任意地點到達地下水流動路徑的時間與流出時間，將該地點的實測數據與地下水年代相互比較。由於用來驗證解析模型的地球化學資料，多使用存在於自然界的微量物質，因此日本提出下列驗證時的注意事項。

- 1.分析技術的精度是否可滿足目的？
- 2.是否可採取到原來的地下水？
- 3.測量時使用的各種假設與作為解釋的模型之正確性及適用範圍？
- 4.可否整合水文地質資料？



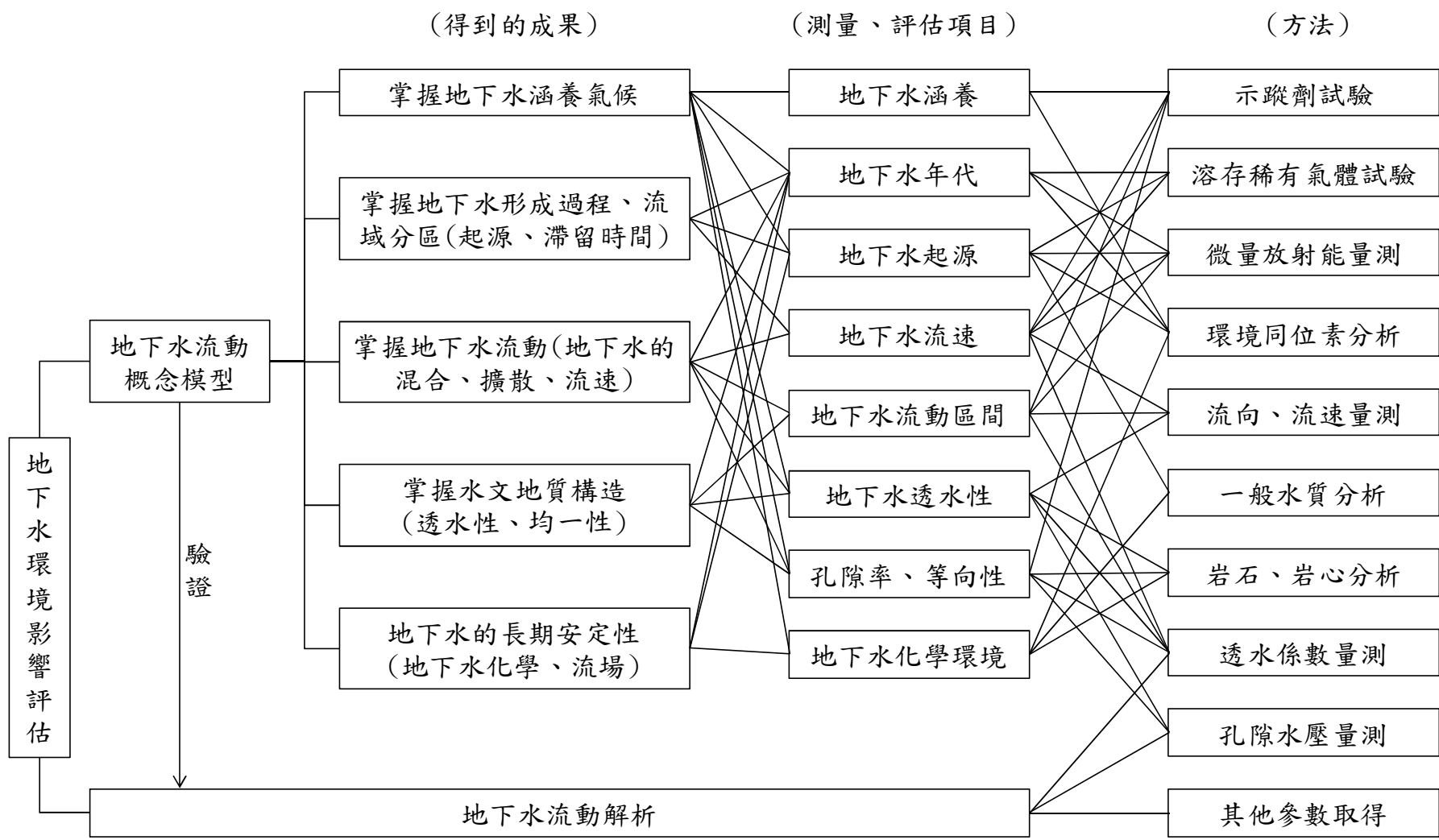


圖 2.1.6.4-1 地球化學的地下水調查評估項目與方法

表 2.1.6.4-1 地下水調查使用的示蹤劑

示蹤劑種類	作為示蹤劑的材料	示蹤劑的檢測方法	實測案例	問題點
熱	溫水	高感度溫度感應器 (精度 0.02°C)	• 利用與地下水水溫不同的湖水，以脈衝注入，量測注入井外 46km 處的水溫變化。	• 需特別注意水溫變化會產生密度流。
固體粒子	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 著色的蘚苔種子</li> <li>• 小型計時炸彈</li> <li>• 酵母菌</li> <li>• 大腸桿菌</li> <li>• 病毒</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 微生物培養與增殖</li> <li>• 地上型地震計測量爆發時的震動</li> </ul>	• 利用 Karst 地形與玄武岩的空洞進行地下水調查，或觀察垃圾掩埋場污水的滲透移動。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 因巨大粒子形成造成阻塞。</li> <li>• 微生物會受到 PH、離子強度的影響。</li> <li>• 地下水污染的危險。</li> </ul>
離子	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Cl^-</math>、<math>Br^-</math>、<math>I^-</math>、<math>SO_4^{2-}</math>(陰離子)</li> <li>• 重金屬或微量金屬的 EDTA 等複合鉗合物</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 電氣傳導計</li> <li>• 離子計</li> <li>• 液相層析法</li> <li>• 中子放射化分析 (ICM-MS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 以往多採用食鹽，但亦可利用天然水中含有比較低的 <math>Br^-</math>、<math>I^-</math>。</li> <li>• 可利用水庫漏水檢查時使用之 In 或 La 網格的複合 DTPA</li> </ul>	• 為抑止密度流發生，離子強度需控制在 3000ppm 以下。
安定同位素	$^2H(D)$ 、 $^{13}C$ 、 $^{15}N$ 、 $^{18}O$ 、 $^{34}S$	質量分析	• 調查天然存在的同位素(主要為 D 與 $^{18}O$ )變動及雨水滲透速度。	• 需要高度的分析技術，故分析費用高。
放射性同位素	$^3H$ 、 $^{14}C$ 、 $^{32}Si$ 、 $^{36}Cl$ 、 $^{39}Ar$ 、 $^{60}Co(EDTA)$ 、 $^{81}Kr$ 、 $^{85}Kr$ 、 $^{129}I$ 、 $^{222}Rn$	放射線量測或利用串級式加速器進行質量分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 以往採用在地下水中投入 <math>^{131}I</math> 與 <math>^{60}Co(EDTA)</math> 進行調查，但現在已透過法律禁止。</li> <li>• 多以自然界的 <math>^3H</math>、<math>^{14}C</math>、<math>^{36}Cl</math>、<math>^{81}Kr</math>、<math>^{222}Rn</math> 來量測地下水年代。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 活用自然界存在的放射性核種時，需要高度的量測技術。</li> <li>• 量測放射線時，需大量的樣品水量。</li> </ul>
有機染料	rhodamine WT、胺基酸 G 酸	比色分析 分光分析	• 因只需 0.1ppb 且價格便宜，多用於石灰石與玄武岩等龜裂與空洞多的岩盤或礫石層的地下水調查。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 會受到直射的日光與微生物的影響而分解。</li> <li>• 由於懸浮物與有機物的吸附，會使</li> </ul>

				濃度降低。
溶解氣體	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性氣體(<sup>133</sup>Xe、<sup>85</sup>Kr、<sup>222</sup>Rn)</li> <li>• 有機氣體(甲硫醇、甲烷、氟利昂氣體)</li> <li>• 稀有氣體(He、Ne、Ar、Kr、Xe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射線量測</li> <li>• 氣相層析法</li> <li>• 質量分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 甲硫醇適用於 Karst 地形的地下水調查。</li> <li>• 環境中的氟利昂氣體適用於廣域地下水調查。</li> <li>• 將 He 溶解注入作為地下水示蹤劑。</li> <li>• 由 <sup>3</sup>He+<sup>3</sup>H 到 <sup>4</sup>He 的蓄積量來量測地下水年代，而 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 的比可適用於廣域地下水流動的流動分區。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 採取樣品水時，需特別注意勿讓溶解氣體汽化造成散逸。</li> </ul>

表 2.1.6.4-2 利用放射性核種測量地下水年代

量測法	放射性核種	半衰期(年)	降雨中初期濃度	地下水年代量測範圍(年)	需要的取水量(ml)	實測案例	分析方法
使用大氣起源的放射性核種之測定方法	<sup>85</sup> Kr	10.7	10 <sup>-8</sup> dpm 以下 (在 1950 年前)	1~40	1.2×10 <sup>-5</sup> ~3.6×10 <sup>-5</sup>	依據荷蘭的 Crakow 地下量測，得到 10~40 年的結果。	抽出溶解氣體，利用氫分離精製，分裝數支比例計後，進行 β 射線量測。
	<sup>3</sup> H	12.3	3.6(dpm/l) (在 1950 年前)	1~60	1000	調查六甲山的地下水循環，六甲隧道內的地下水年代為 40 年，流速為 0~17m/y。	電解濃縮後，以低背景液相閃爍計數器，進行 β 射線量測。
	<sup>39</sup> Ar	270	4×10 <sup>-5</sup> (dpm/l)	50~2000	7×10 <sup>6</sup> ~9×10 <sup>8</sup>	由 <sup>3</sup> H 法量測結果為 50 年以上，判斷 Zurzach 溫泉水的年代為 70 年。	使用帶有多重遮蔽的低背景氣體量測管，進行 β 射線量測。
	<sup>14</sup> C	5,730	2×10 <sup>-1</sup> (dpm/l)	500~2000	2×10 <sup>5</sup>	對於熊本平野的地下水，以 <sup>3</sup> H、 <sup>14</sup> C、 <sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U 進行調查，確認地下水主要由最近的降雨與非常古老的滯留時間(3~4 萬年)組成。	以液相閃爍計數器或氣體量測管，進行 β 射線量測。(由地下水中獲取 BaCO <sub>3</sub> 中的碳後，進行碳分離)串級式加速器分析進行質量分析(元素狀的碳)
	<sup>81</sup> Kr	210,000	7×10 <sup>-9</sup> (dpm/l)	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-8</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10<sup>4</sup>(由 RIS 分析)</li> <li>• 10<sup>8</sup>~10<sup>9</sup>(量測一般)</li> </ul>	加拿大 Manitoba 洲，其水層地下水的年代為 1.4×10 <sup>6</sup> 年。	溶解氣體抽出分離精製後，以加速器質量分析。

					的放射能)		
	<sup>36</sup> Cl	301,000	$1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ (dpm/l)	$5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1000~5000(串級式加速器分析)</li> <li>• <math>10^8 \sim 10^9</math>(量測一般的放射能)</li> </ul>	澳洲 Great Artesian Basin 的地下水為 $10^5 \sim 10^6$ 。加拿大 Manitoba 洲的地下水為 $6 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^6$ 年。	串級式加速器進行質量分析(由 AgCl 中抽出 Cl)
使用蓄積於地下水的稀有氣體之測定方法	<sup>3</sup> He	安定核種	$\sim 10^{-14}$ ccSTP/g (background)	1~80 (與 <sup>3</sup> He 組合)	>15	三島熔岩流內及周邊地下水為 10~15 年。庄川流域的地下水為 1~20 年。	質量分析(分離稀有氣體)
	<sup>4</sup> He	安定核種	$\sim 10^{-8}$ ccSTP/g (background)	$10^4 \sim 10^7$ (與 U、Th 組合)	>15	Savannah River 周邊地下水，年代量測為 $8.4 \times 10^5$ 年，以此推估地下水流速為 0.06m/y。	質量分析(分離稀有氣體)
	<sup>222</sup> Rn	0.01	-	0.03 以下	1000	瑞士 Glatt 河流域，由地表水到地下水的入滲，得到地下水平均流速為 4.6m/day。	抽出甲苯後，由液相閃爍計數器進行 $\beta$ 射線量測。

### 2.1.7 開挖影響區的透水性評估

坑道周邊岩盤受到開挖影響時，會使部分區域的初期性質產生改變，此影響範圍即為開挖影響區。可能產生變化的特性有破壞特性與變形特性等力學特性、透水係數等水理特性、因空氣進入造成地下水氧化還原電位改變等地球化學特性。若從岩盤力學的角度說明開挖影響區，主要是指開挖受損範圍及應力重新分配範圍，如圖 2.1.7-1 所示。開挖受損範圍內，受到開挖衝擊與岩盤應力重新分配的影響，會有新裂縫生成、既有裂縫擴張與岩盤塑性化等現象，此範圍又稱為破壞區域。而開挖影響區內，開挖受損範圍以外的區域，即便應力發生變化，岩盤仍可維持彈性狀態。此外，應力重新分配範圍內的應力變化會使裂縫的開口與岩盤孔隙改變，進而影響岩盤的透水性。故開挖對岩盤透水性的影響範圍與變化量之影響，與岩盤力學反應有高度相關性。當處置設施周邊的透水性增加且影響到安全評估時，須評估透水性增加的區域及程度，以反映至地下水流動解析中。有關開挖影響區的透水性評估流程，如圖 2.1.7-2 所示。

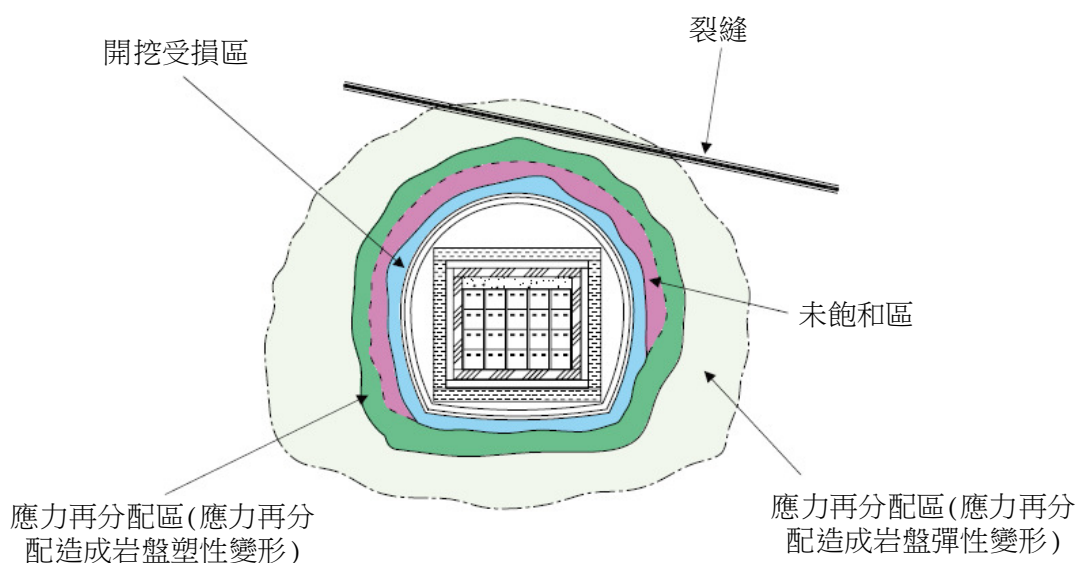


圖 2.1.7-1 開挖影響區的概念示意圖

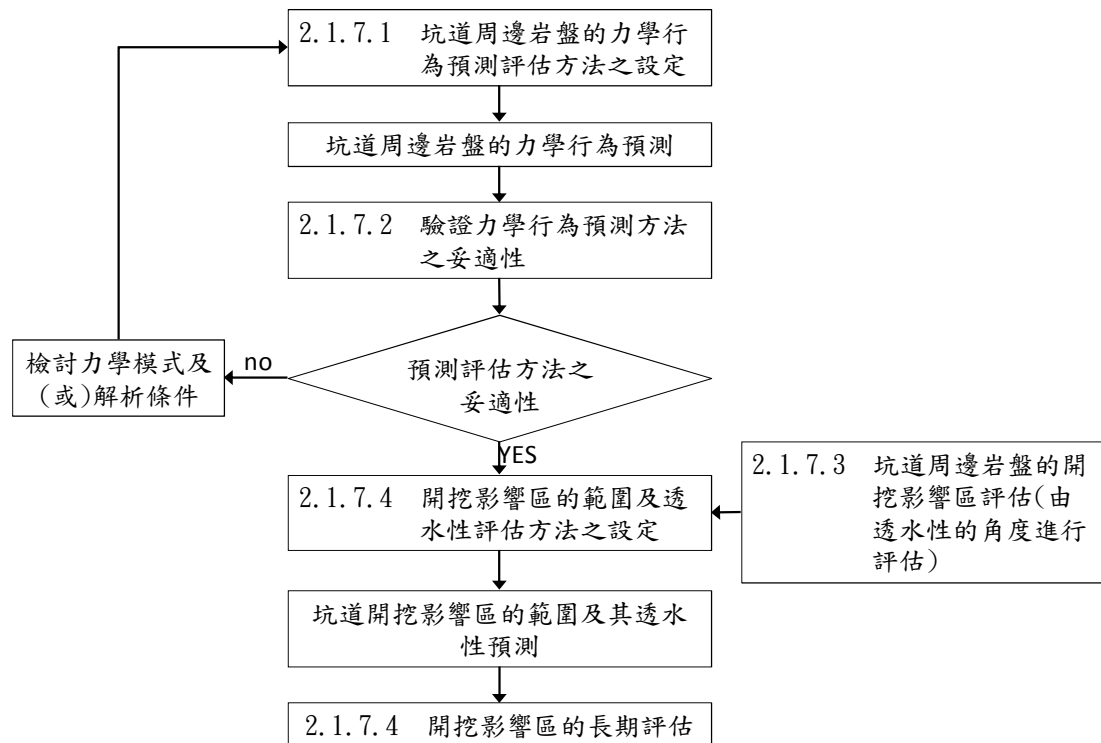


圖 2.1.7-2 開挖影響區的透水性評估流程

### 2.1.7.1 坑道周邊岩盤的力學行為預測評估方法之設定

#### 一、必要的資料

開挖時的岩盤力學行為是造成坑道周邊岩盤透水性變化的主因，故設定開挖影響範圍時，可採用岩盤力學行為的數值分析方法。分析時須輸入的參數資料有初期地壓、岩盤的強度及變形之相關參數、支保工的物理性質等。可利用現地岩盤試驗、室內岩石試驗及初期地壓測量等方式，取得岩盤力學模式所需相關資料。

#### 二、設定方法

坑道周邊岩盤的力學行為預測與評估通常採用二維有限元素法，包括線彈性模式、非線彈性模式、線彈塑性模式(應變硬化、完全塑性、應變軟化)等模式皆可適用。坑道周邊岩



盤的力學行為，除受到坑道斷面尺寸、斷面形狀、初期地壓的大小與方向、孔隙水壓、岩盤的力學特性(強度、變形特性)、現有裂縫之位置、密度與傾斜走向、支保工樣式等項目影響外，開挖順序(橫斷面開挖、開挖進行長)、開挖方式(爆破開挖、機械開挖)、施工時間等亦會產生影響。因此，進行數值分析時，須檢討影響岩盤力學行為的要素，考量需要的項目後再進行設定。最後可根據數值分析結果的破壞區域、岩盤應力與岩盤強度、剪應力與岩盤界線應力等方式，判定開挖受損範圍。

### 2.1.7.2 驗證力學行為預測評估方法的適當性

坑道開挖之力學行為預測可能會有與實際狀況不符的情況發生，主要是因為坑道開挖前的地質調查精度、室內或現地試驗與實際構造物的尺度差異、應力的受力方向不同、初期地壓的測量精度、不適合的岩盤力學模式等各種在坑道開挖前的力學性質精度不佳所導致。故在坑道現址進行坑道周邊岩盤的地質觀察與反應量測，將其結果與數值結果相互比較，確認岩盤力學模式與分析使用的輸入條件之適當性，當實際行為與分析結果不相同時，需以岩盤的實際行為對岩盤力學模式與輸入條件進行修正。

#### 一、必要的資料

驗證坑道周邊岩盤力學行為的預測方法時，需要坑道頂端的沉陷、岩盤內部變位、淨空變位等資料。一般常用的坑道周邊岩盤行為之調查，可參考表 2.1.7.2-1 整理的量測、觀察方法。評估岩盤的開挖受損區域時，可使用岩盤變位、彈性波速度、孔內攝影(BTV)觀測裂縫、岩盤應力、岩盤的彈性

係數等方法，但需要整併數種調查結果，經過比較檢討後，提升評估實際岩盤開挖受損區域的精確度。

表 2.1.7.2-1 量測與觀察項目

調查項目	目的	調查方法
岩盤變位	觀察岩盤行為	伸縮計 滑動測微計(Sliding micrometer)
	推估破壞區域	
	檢討分析結果	
支保工應力	支撐效果	應變計 噴漿混凝土應力計
	觀察岩盤行為	
	檢討分析結果	
頂端沉陷 內空變位	觀察岩盤行為	淨空變位計/電子式收斂計 (Convergence Meter)
	檢討分析結果	
彈性波速度	推估岩盤物理性質變化範圍	彈性波測量裝置
	檢討分析結果	
坑道周邊岩盤 的狀況	確認地質資料	孔內攝影(Borehole TV, BTV)
	裂縫狀況	
	推估破壞區域	
地表地質	確認地質資料	目視觀察
坑道周邊岩盤 的應力	確認應力重新分配的狀況	地壓量測
	推估破壞區域	
	檢討分析結果	
坑道周邊岩盤 的彈性係數	推估彈性係數變化範圍	坑道內水平荷重試驗
	推估破壞區域	
	檢討分析結果	

## 二、設定方法

驗證力學行為之預測評估方法與輸入條件的適當性時，可直接比較岩盤變位、淨空變位、頂端沉陷、支保工應力、岩盤應力等項目之調查結果與預測結果。而對於實際岩盤的開挖受損區域，可直接比較其調查結果與預測結果，有關利用調查結果推估開挖受損區域之方法，彙整如表 2.1.7.2-2 所示。

表 2.1.7.2-2 利用調查結果推估開挖受損區域之方法

調查項目	破壞區域的推估
岩盤變位	利用測量岩盤變位值推估岩盤應變，並將其與應變界限比較後，推估破壞區域。
孔內攝影(BTV)觀測裂縫	將產生新裂縫區域視為破壞區域。此外，亦可以確認既有裂縫的開口量增加區域做為破壞區域之推估範圍。
岩盤應力	當岩盤保持彈性狀態時，越靠近坑道壁面，其壁面切線方向的岩盤應力越大。當量測的地壓在前述傾向以外的區域時，即為破壞區域。
彈性波速度	比較坑道開挖前的彈性波速度，彈性波速度較開挖前低的區域，即為破壞區域。
岩盤的彈性係數	比較坑道開挖前的岩盤彈性係數，彈性係數較開挖前低的區域，即為破壞區域。

### 2.1.7.3 坑道周邊岩盤的開挖影響區評估(由透水性的角度進行評估)

岩盤的成因、是否有既有裂縫、不均質性的程度等因素，都可能會使坑道周邊開挖時的透水性變化區域及其變化量改變。由於岩盤的透水性與力學特性相似，僅靠室內試驗較難以充分評估，因此需要在與處置坑道相同之地層與深度的地方，進行坑道周邊岩盤透水性的相關調查，由透水性的角度評估開挖影響區及其透水性。

#### 一、必要的資料

為由透水性的角度評估坑道周邊岩盤的開挖影響區，需有現址的透水性相關資料，故需在現址進行相關調查。坑道周邊的透水性調查方法，可參考表 2.1.7.3-1 彙整之方法。此外，最好能搭配進行邊界條件明確的室內岩心透水試驗，以與現地的調查結果相互比較。故利用透水性調查，選出透水性變化的區域，評估開挖影響區的範圍，同時也可獲得開挖

影響區透水性預測評估時所需的資料，詳細之資料需求如表 2.1.7.3-2 所示。

表 2.1.7.3-1 坑道周邊岩盤透水性的相關調查與試驗

調查方法	目的
地質觀察	掌握地質的不均質性及坑道的裂縫狀況
鑽孔攝影	觀察裂縫
	選定透水試驗的位置
聯合變位計	量測龜裂開口幅度的變化
透水試驗 短期透水試驗	掌握坑道周邊岩盤透水性分布
孔間透水試驗	掌握坑道周邊岩盤孔隙水壓分布
流體側井	量測湧水、溫度變化、導電率
孔內蒸發量試驗	量測孔壁的蒸發散量

表 2.1.7.3-2 開挖影響區的透水性預測評估所需的調查數據資料

地質的構成與構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 岩種、岩相</li> <li>• 地層的分布、傾斜</li> <li>• 地質邊界的位置、傾斜</li> </ul>
岩質	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 固結度</li> <li>• 風化的狀況與深度</li> <li>• 變質的狀況與位置</li> <li>• 鬆散的狀況與位置</li> </ul>
不連續面	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 斷層的位置、走向、傾斜、特性</li> <li>• 裂縫的開口量、位置、走向、傾斜、特性</li> </ul>
透水性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 透水係數</li> </ul>

## 二、評估方法

以透水性及岩盤行為的相關調查結果為基礎，評估開挖影響區及其透水性。此外，評估坑道開挖伴隨的透水性變化時，需取得初期狀態的透水性。故需在坑道開挖前，利用鑽孔的岩心進行室內透水試驗或是在離坑道一定距離的位置進行透水試驗，以評估初期狀態的透水性。

#### 2.1.7.4 開挖影響區的範圍及其透水性的評估方法之設定

根據以往的調查結果，開挖影響區的透水係數通常較開挖前增加 10~1000 倍。由於透水性主要受到裂縫生成與擴展影響，若要藉由力學模式分析開挖影響區內的裂縫數及裂縫連續性等項目，較難獲得精度良好的預測結果，故需配合現地調查結果作為透水性定量預測評估的基本。

##### 一、必要的資料

進行開挖影響區的範圍及其透水性的評估時，所需的資料有 2.1.7.2 節中驗證力學行為預測方法之適當性時所使用的現地力學行為調查與試驗資料、2.1.7.3 節中評估現地透水性之調查與試驗資料、2.1.7.1 節中坑道周邊岩盤的力學行為預測評估方法之設定資料、2.1.7.2 節中的力學行為分析預測結果。

##### 二、設定方法

###### (一)設定的基本考量

預測開挖影響區的範圍時，可以 2.1.7.2 中驗證過的力學模式之數值分析結果為基礎，並與 2.1.7.3 節中由透水性角度推估所得之開挖影響區相互比較。若由透水性角度推估之範圍與岩盤的開挖受損區域一致時，則力學模式之數值分析結果即為開挖影響區之範圍。若由透水性角度推估之範圍延伸至開挖受損區域外側時，需藉由設定岩盤應變、局部安全係數(可由岩盤的破壞基準與應力求得)等力學指標，配合力學模式之數值分析結果，推估開挖影響區的範圍。

###### (二)設定時的注意事項

在設定處置設施整體的開挖影響區域時，需考量岩盤物理性質的不均質性。圖 2.1.7.4-1 即為過去的調查結果案



例，由圖可知，在同一個地層中的岩盤物理性質已具有明顯的不均質性，較難在處置設施周邊找到具有代表性的岩盤。因此，需要事前調查處置設施周邊的地質構造、成因、細微裂縫的存在等影響岩盤力學與透水性的因素，並將岩盤分類後，彙整相同類別岩盤的不同特性，以統計方法分析，進而設定適用於預測分析時具代表性的物理性質。

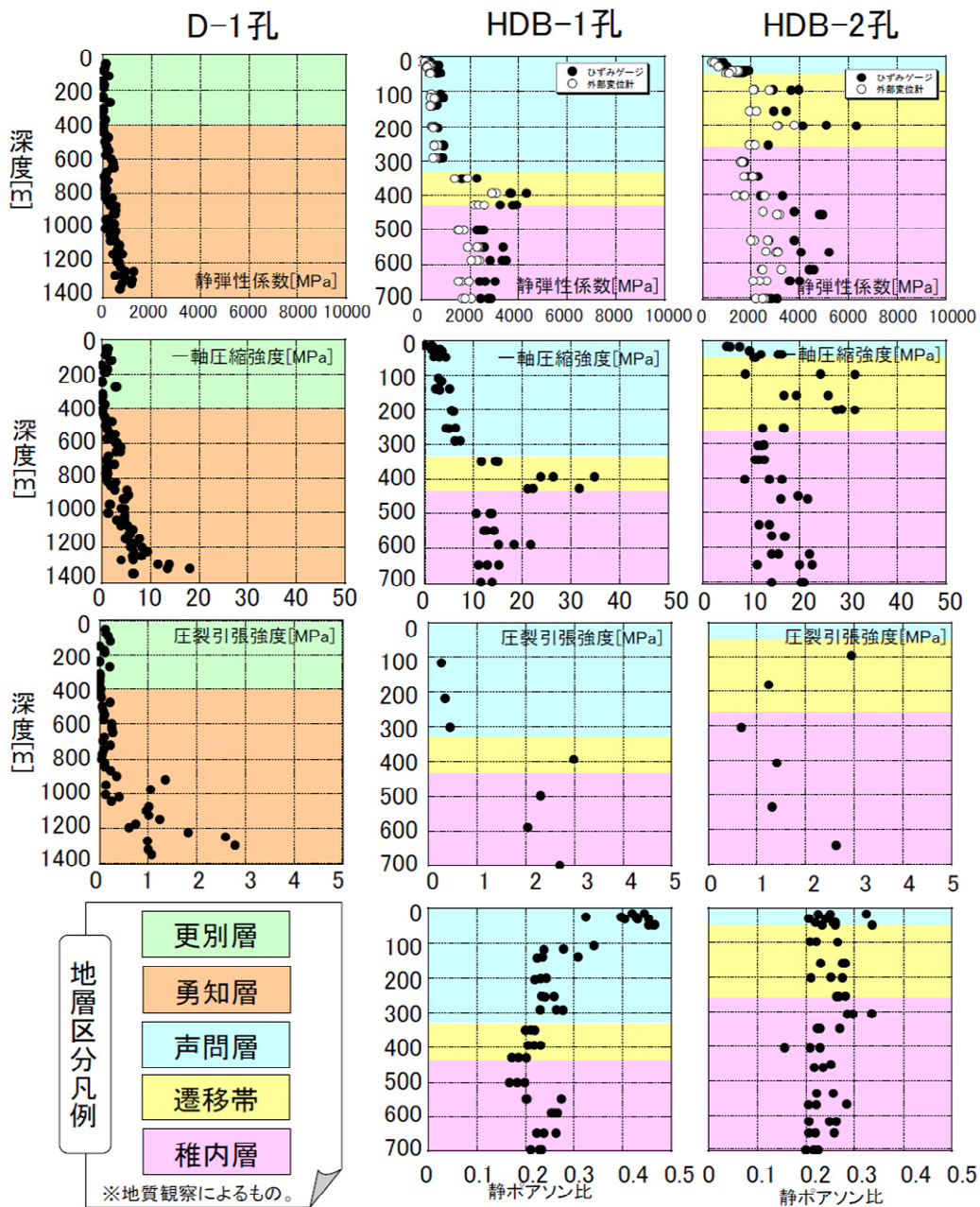


圖 2.1.7.4-1 不同地層的力學物理性質



### 2.1.7.5 開挖影響區的長期評估

#### 一、長期預測方法

處置坑道的周邊於回填結束後，會有換氣造成的乾燥、空氣進入造成氧化、再冠水、岩盤隨時間變化的行為、廢棄體包件的熱傳導、膨潤土類材料的膨潤壓作用、水泥類材料的劣化造成應力重新分配、氣體壓力作用、開挖影響區的自體修復效果等熱、水理、力學、化學相關的眾多現象產生，這些現象之間也會相互作用，進而影響開挖影響區及其透水性。

評估開挖影響區的長期變化時，若要考量前述所有影響因子，則評估上會有很大的困難性。可利用岩盤隨時間的變化、膨潤土類材料的膨潤壓作用、水泥類材料的劣化等主要的力學現象組合，選擇適合的力學模式，設定長期的變化條件，預測處置設施及岩盤之長期力學行為，評估開挖影響區的進展狀況。此預測評估中，有關岩盤隨時間變化適用之力學模式彙整如表 2.1.7.5-1。

#### 二、影響長期預測的原因

由表 2.1.7.5-1 可知，不同的岩盤需要不同的力學模式參數，各模式的參數基本上皆由岩石試體的室內試驗結果為基礎進行設定。對於以室內試驗結果進行參數設定的適當性，需與力學模式一起驗證，驗證時可採用內空變位隨時間的變化等較長時間的岩盤反應量測結果，並將其與分析結果相互比較。

考量工程障壁對岩盤在力學上造成的影響，主要有溶解使水泥類材料的剛性降低、膨潤土類材料再冠水產生的膨潤壓、鋼筋腐蝕膨脹造成裂縫使 RC 構造物剛性降低、金屬腐蝕產生的氣體壓力等。這些影響因素可由過往的檢討成果與

試驗進行量化的設定。此外，影響開挖影響區的力學要因有地震作用、長期地下水位變動造成孔隙水壓變動、因隆起與侵蝕造成土壤披覆改變而使地壓變化等。故需整合推估天然障壁的長期變動現象，視需要反應至預測分析條件中。

表 2.1.7.5-1 評估岩盤隨時間變化之主要力學模式

模式名稱	概要	對象地盤
強度劣化模式	泥岩、頁岩等膨脹性地層，具有隨時間變化之地層反應，假設岩盤強度隨時間改變，且因時間的關係，產生黏著力形成彈塑性模式。	膨脹性地層
大久保模式	非線形的 Maxwell 模式的一種，受到應力的岩盤，假設其各要素皆符合隨著時間經過而增加之特性，可做為評估岩盤的長期黏性反應，亦即合規性(Compliance)可變型模式。	軟岩、硬岩
山富模式	流變學的 3 要素分別為 Spring、dashboard 及 Slider，其中 Slider 可反應應變硬化性、非硬化性及應變軟化等 3 種特性，特別是岩石的應變硬化與軟化特性、一次、二次與三次變化的潛變曲線與潛變破壞，再加上可表現包含強度破壞點以後的變形特性與應變速度增加造成強度增加的黏彈塑性所構成的模式。	軟岩
關口、太田模式	包含可表現黏性土壤的壓密特性、剪力特性、膨脹特性的 Cam-clay 型彈塑性構成模式，以及能夠考量流變學特性及主應力回轉形成的異向性的彈黏塑性構成模式。可適用於泥岩等過度壓密的黏性土，也可適用於軟岩。	軟岩、黏性土
足立、剛模式	擴大可表現黏性土壤的壓密特性、剪力特性及膨脹特性的 Cam-clay 型彈塑性構成模式，導入動態的塑流法則(Flow rule)，使其能說明時變性的彈黏塑性構成模式。	軟岩、黏性土
奧井、掘井模式	假設硬岩的潛變現象是應力腐蝕而造成龜裂延伸的原因，此種微裂縫進展模式，是將多數分布的彈性體中，以微觀力學作為均質化基礎，導出連體理論的構成模式。	硬岩

### 三、考慮事項

進行開挖影響區的長期評估時，需先評估開挖結束與回填後的處置設施及周邊岩盤的狀態，才能設定初始值。預測評估時需考量 2.1.7.1 節提及之項目，並利用 2.1.7.4 節之檢討方法檢討預測分析結果。在前述提到的影響原因中，有些

較難預測的部分，需以參數研究分析其對開挖影響區的影響程度。此外，由表 2.1.7.5-1 可知，不論是採用何種力學模式，進行以萬年為單位的預測時，幾乎是以現有的經驗法則進行外插法的方式，因此在設定天然障壁的核種遷移評估參數時，對開挖影響區敏感度較高的地方，為確保預測結果的準確性，建議使用複數的力學模式進行預測。

### 2.1.8 工程障壁對地下水流動之影響評估

可能會對地下水流動產生影響之工程障壁包括廢棄物包件、低擴散層(水泥類材料)、處置窖、低透水層(膨潤土系材料)、回填材、支保工、開挖影響區、聯絡坑道、力學與水力封塞、換氣坑、調查用鑽心孔、監視孔等項目，視需要評估這些項目對地下水流動之影響。有關工程障壁、坑道等設施對地下水流動影響之評估可利用地下水流動解析計算，可參考圖 2.1.8-1 之檢討流程。

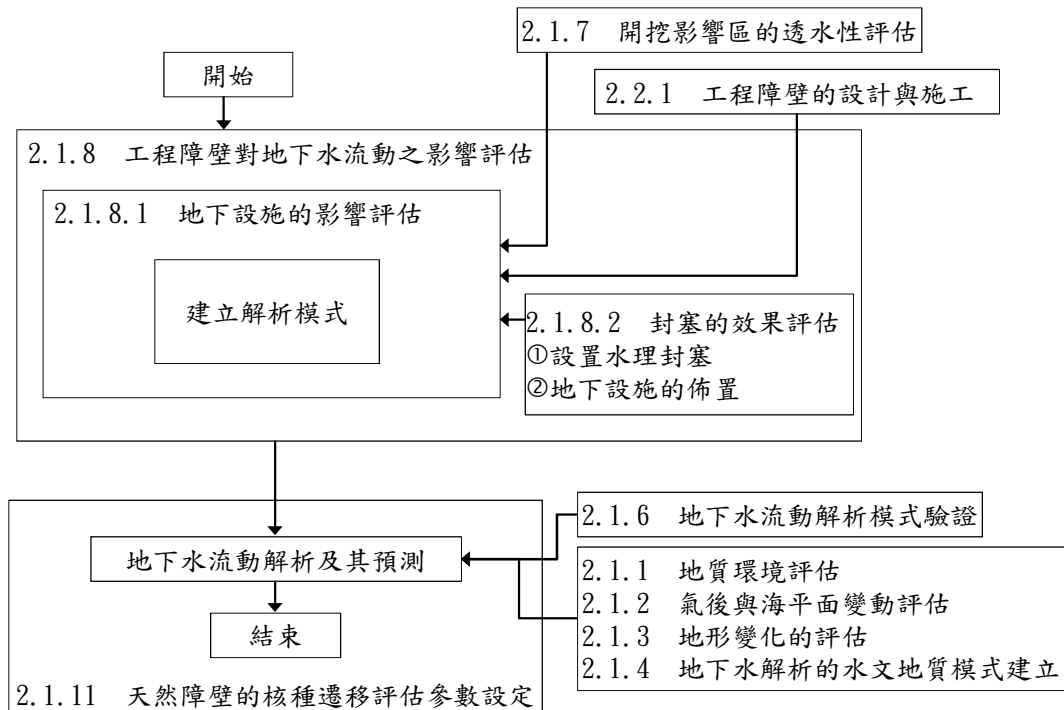


圖 2.1.8-1 人工障壁對地下水流動影響之檢討流程

### 2.1.8.1 地下設施的影響評估

評估複雜的工程障壁對地下水流動解析的影響時，須建立詳細的解析模型，並考量解析模型的規模、電腦演算容量、計算時間等項目，進行適當的模型化後，再設定解析條件。

#### 一、必要的資料

地下水流動解析時須輸入的資料有工程障壁的形狀與型式、長期的狀態變化(透水係數的變化)等資料。

#### 二、評估方法

以工程障壁的形狀與型式為基礎建構解析模式，並考量長期的狀態變化進行地下水流動解析，評估地下設施的影響。利用地下水流動解析評估地下設施的影響時，須注意下列事項：

1. 網格分割的適當性對地下設施構成部位之模型化影響
  - 解析模型的網格越細，則精度會越高，故在電腦演算容量及計算時間之容許範圍內，分割越細越好。
  - 水力梯度大的部分(例如：低透水層)，特別需要較細的網格。
2. 初期性能與長期劣化對工程障壁各部位的透水性影響
  - 適當的設定工程障壁透水係數。
3. 切出的模型邊界條件之影響
  - 採用不受地下設施影響且充分遠離設施的位置做為邊界，若一定要將邊界設置在地下設施附近時，則邊界條件須採保守設定。

### 2.1.8.2 水力封塞效果的評估

水力封塞是以控制地下水流動為目的，掌握此種工程障壁的影響與效果，則可建構安全性更高的工程障壁系統。控制地下水流動的方法有設置水力封塞及地下設施的佈置兩種方式。水力封塞主要是遮斷高透水區域的連續性，其設置方式是在坑道的一部分使用低透水材料做為水力封塞。地下設施的佈置是透過地下設施的佈設使高透水區域的地下水流動方向不同，避免地下水的流路中斷的方法。

#### 一、必要的資料

為評估水力封塞與地下設施佈置對地下水流動的影響，其所需資料說明如下。

- 1.水力封塞的設置位置。
- 2.水力封塞的樣式(形狀、尺寸、透水性等)。
- 3.地下設施整體的佈置。
- 4.處置坑道與其他坑道的連續性。
- 5.地下水流動方向與處置坑道軸的關係。

#### 二、評估方法

將水力封塞的設計與型式詳細的模型化後，進行地下水流動解析，並評估地下設施周邊的地下水流動狀況、通過處置設施的地下水實際流速及遷移路徑長等影響。評估結果要能確認水力封塞的效果並反映至地下設施的設計。此外，對於水力封塞的長期性能(透水係數等)變化，可採敏感度分析掌握其對核種遷移評估參數的影響。

對地下設施佈置而言，因要預測大範圍的地下水流動影響，故地下水流動解析的模型已包含整體地下設施，必要時可針對地下設施周邊的地下水流動影響進行評估。



## 2.1.9 地球化學環境評估

於處置場的建設以及營運階段時，湧水可能會使處置設施周邊的岩盤變成未飽和的狀態，再加上開挖影響區及處置設施高透水層的影響，未飽和的範圍將有擴大的可能。若處置設施周邊岩盤在建設前為還原狀態，則岩盤變成未飽和狀態時，會使周邊岩盤的氧化範圍增加。

此外，在推估火成活動、地形變化、海平面變化等長期變動現象時，亦需了解場址的水質分布、氧化還原狀態等地球化學環境的變化。例如在檢討基本的場址設置條件時，即便確認火成活動不會造成處置設施破壞或工程障壁損壞，但仍可能受到周邊火山活動產生的強酸性地下水影響。而地形變化或海平面上升等現象發生時，鹽水入侵可能會影響地下水流動或加速處置設施劣化。這些氧化還原狀態、水質等地球化學環境改變時，工程障壁的機能與廢棄物包件的溶出率亦隨之變化。因此，須評估地球化學環境變化對處置設施的建設及長期變動現象之影響。

### 2.1.9.1 建設處置設施時的地球化學環境評估

處置設施周邊的岩盤在建設前為還原狀態時，因坑道開挖後，大氣進入坑道內，並隨著與氧氣接觸過的水之移動或是氧氣擴散(未飽和區域增加)，擴大設施周邊岩盤的氧化範圍，如圖 2.1.9.1-1 所示。此外，當處置設施周邊岩盤的氧化範圍越接近地表氧化區與連續水路時，處置設施周邊岩盤的氧化範圍會沿著水路擴大。而當處置設施回填後，因再冠水或再飽和使地下水流動產生變化，處置設施周邊岩盤可能再回復為還原狀態。



根據地下坑道開挖後之岩盤變化的相關研究文獻資料，開挖後經過 80 年之凝灰岩及堆積性軟岩的砂質泥岩地質，自坑壁向岩石方向數 10 公分的岩石內，其黃鐵礦有氧化現象。此氧化帶的產生與坑壁的氧氣擴散、岩石的礦物化學組成(氧氣的消化能力)、岩石的空氣孔隙率(未飽和度)、透水係數等有關，如圖 2.1.9.1-2 所示。此外，若地下深層的地下水含有雨水以外之地下水(例如化石海水)時，因處置設施的開挖影響地下水流場，地下水沿著水路上升，使處置設施周圍的地球化學環境產生變化，如圖 2.1.9.1-3 所示。

綜上所述，有關處置設施於建設時的地球化學環境變化評估流程，如圖 2.1.9.1-4 所示。

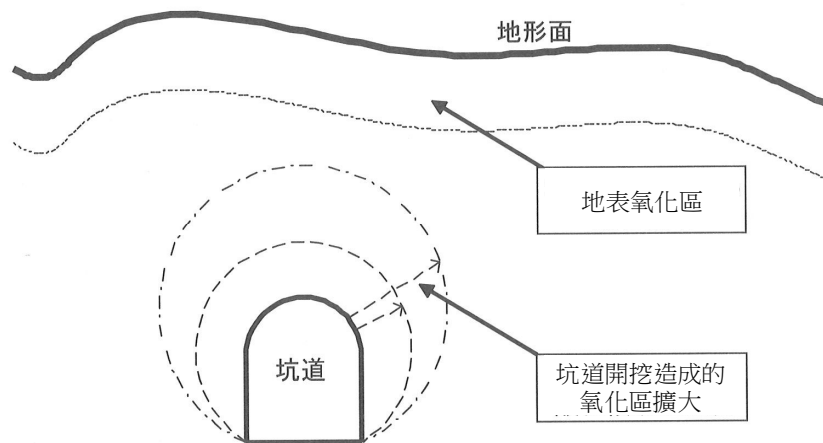


圖 2.1.9.1-1 處置設施開挖造成氧化範圍增加的進展模式

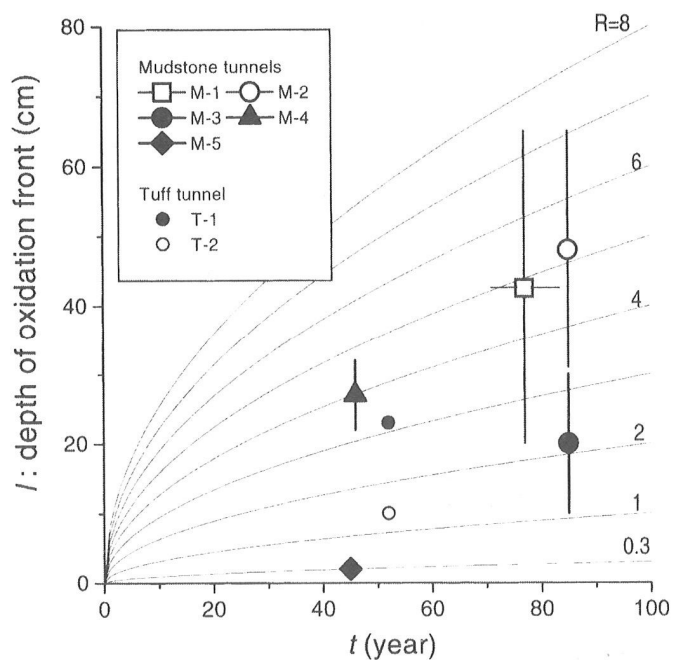


圖 2.1.9.1-2 坑道坑壁的風化研究

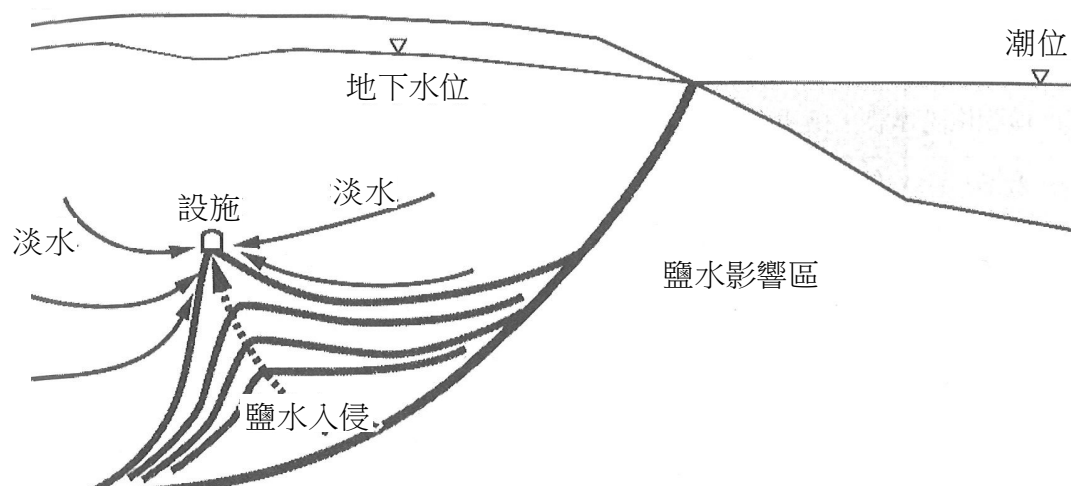


圖 2.1.9.1-3 開挖造成鹽水影響範圍改變之概念圖

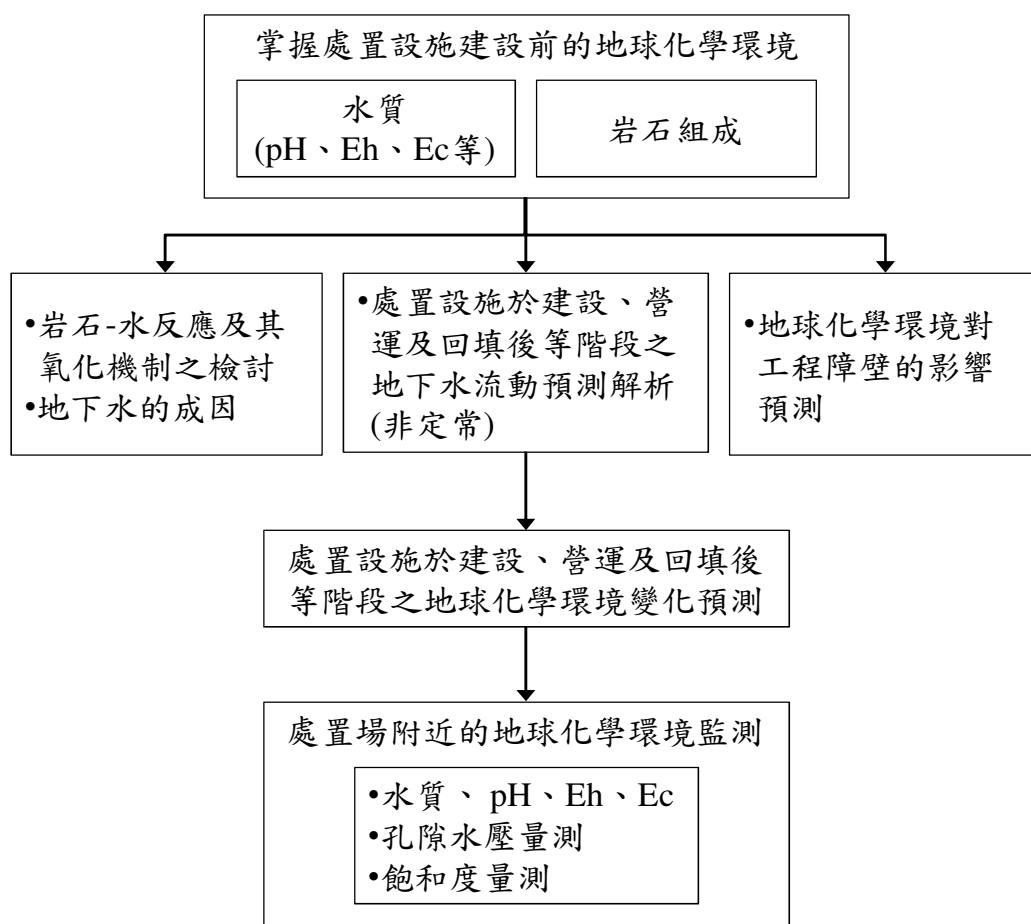


圖 2.1.9.1-4 建設處置設施對地球化學環境變化影響之評估流程

## 一、必要的資料

設定處置設施興建造成的地球化學環境變化，需進行下列檢討。

1. 檢討岩石-水反應導致地球化學環境變化的機制。
2. 處置設施於建設、營運及回填後等階段之地下水流動預測解析(非穩態)。
3. 工程障壁受到地球化學環境的影響評估。

其中，「工程障壁受到地球化學環境的影響評估」需考量膨潤土中含有的黃鐵礦、坑道支撐材中的支保工與岩錨等鐵製品的影響，故需要工程障壁的設計相關資料。而「檢討岩石-水反應導致地球化學環境變化的機制」及「處置設施於建設、營運及回填後等階段之地下水流動預測解析(非穩態)」所需的資料相當多，可參考 2.1.4 節之說明，此章節不再重複贅述。

為掌握處置設施建設前的地球化學環境所需進行的相關調查，詳列於表 2.1.9.1-1。調查時的注意事項彙整如下：

1. 利用鑽孔取水時，須排除鑽孔洗孔水的影響，建議將示蹤劑投入洗孔水中追蹤其路徑。尤其是在地下水補注區鑽孔取水時，因地下水補注區容易受到洗孔水影響，需格外注意。
2. 量測地下水中的氧化還原電位(Eh)，因接觸地上的空氣，容易造成氧化狀態，盡可能在取水位置進行量測。
3. 深層地下水中，其來源非雨水的地下水，因處置設施的建設造成地球化學環境的變化，地下水沿著水路上昇，可能使設施位置的地球化學環境改變。因此，須掌握表層到深層的水質分布狀況。

4. 檢討地下水之來源，可參考 2.1.6.4 節中所述，利用水質與同位素之組合、放射性核種推估地下水年代等方法。

表 2.1.9.1-1 處置設施建設前的地球化學環境調查

區分	項目	主要調查與試驗方法	主要目的
水質	鑽孔取水	以雙環塞工法 (Double Packer) 進行取水	採取目標範圍內的地下水，掌握地球環境化學的狀況。
	現址水質測量	pH、Eh、Ec 等	現址的地球化學環境資料，特別是氧化還原的相關訊息。
	室內水質分析	水質分析、同位素分析等	地下水的水質組成、同位素比等與地下水起源有關的相關資訊。
岩石	礦物組成分析	薄片觀察、X 線反射分析等	岩石-水反應及其氧化機制的相關資訊。
	化學組成分析	濕式分析、螢光 X 線分析	

## 二、評估方法

建設處置設施可能造成的地球化學環境變化，包括設施周邊岩盤的飽和與未飽和的狀態變化、因飽和與未飽和變化造成的氧化還原狀態改變、深層地下水沿著水路上昇所造成的水質變化等，可利用地下水流動解析評估及預測地球化學環境變化。

以地下水流動解析評估地球化學環境變化時，相關注意事項說明如下：

1. 針對處置設施建設前、建設、營運及回填等階段，進行非穩態地下水流動解析。
2. 解析模型除要能反映水文地質構造、開挖影響區、工程障壁的狀態外，也須考慮到地下水成因等與水-岩石反應相關的現象。

- 3.若處置設施規模較大時，希望能進行三維的地下水流動解析。
- 4.檢討雨水以外的深層地下水移動時，因有很多高濃度的溶解成份，可採用密度流解析進行分析。

利用地下水流動解析預測設施周邊岩盤的地球化學環境變化時，因地球化學環境會隨著處置設施的建設逐漸變化，較難以開挖坑道前的資料驗證模型的正確性。因此，需於設施建設後，持續監測孔隙水壓、飽和度等地球化學環境變化，並將監測結果反饋至地球化學環境變化之預測模式中。

### 2.1.9.2 長期變動現象的地球化學環境評估

長期變動現象造成之地球化學環境變化，包括火山活動的岩漿對地下水之影響、海平面變動對海水影響範圍移動之影響、地形變化對地下水流場變化之影響、地表風化對氧化帶移動之影響等。當海平面上升，海水影響範圍會向內陸移動，將有可能對處置設施造成影響，如圖 2.1.9.2-1 所示。而地表風化造成氧化帶之移動機制是因地表的含氧水入滲至地表下與岩石中的硫化物反應(氧化)，造成氧化帶向下方移動，如圖 2.1.9.2-2 所示。還原劑大多是具有低氧化數遷移元素( $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 等)之礦物，或是含有黃鐵礦或  $\text{Fe}^{2+}$ 的黏土礦物。若含有黃鐵礦時，氧化會使氫氧化鐵沉澱而產生硫酸。

綜上所述，長期變動現象造成的地球化學環境變化之檢討流程，如圖 2.1.9.2-3 所示。



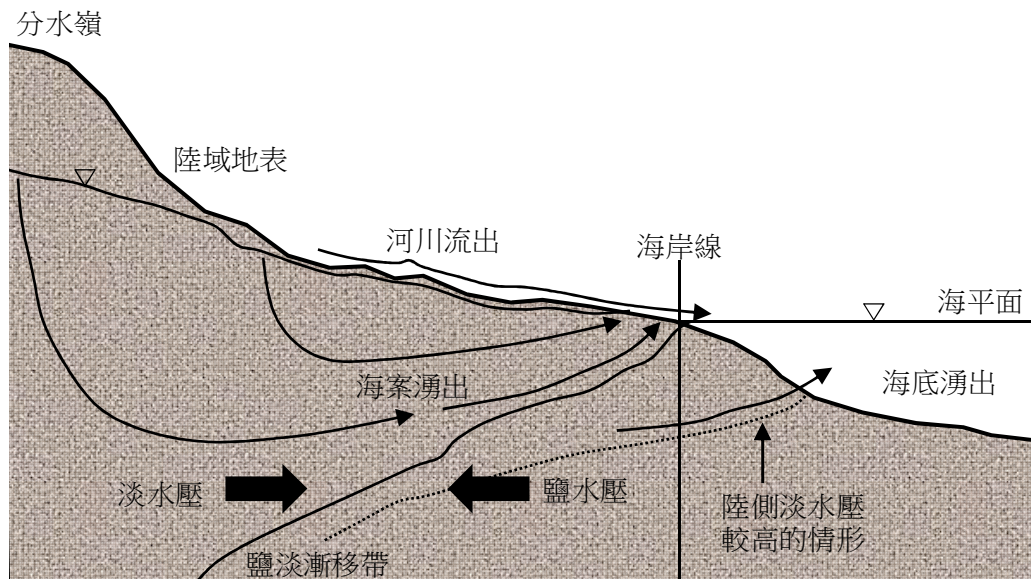


圖 2.1.9.2-1 海水影響範圍之概念模式

區分	風化作用		
表層氧化帶	地表	↓ CO <sub>2</sub>	碳酸及礦物溶解
氧化帶	↓ O <sub>2</sub>	↓ 氧化邊界	
溶解帶	↑ 地下水位	↓ H <sup>+</sup>	綠泥石→蒙脫石(smectite)分解 黃鐵礦→硫酸+鐵的氧化物/氫氧化物
新鮮岩體		↓ 溶解邊界	礦物溶解及化學成分溶出

圖 2.1.9.2-2 堆積性軟岩的氧化帶移動機制

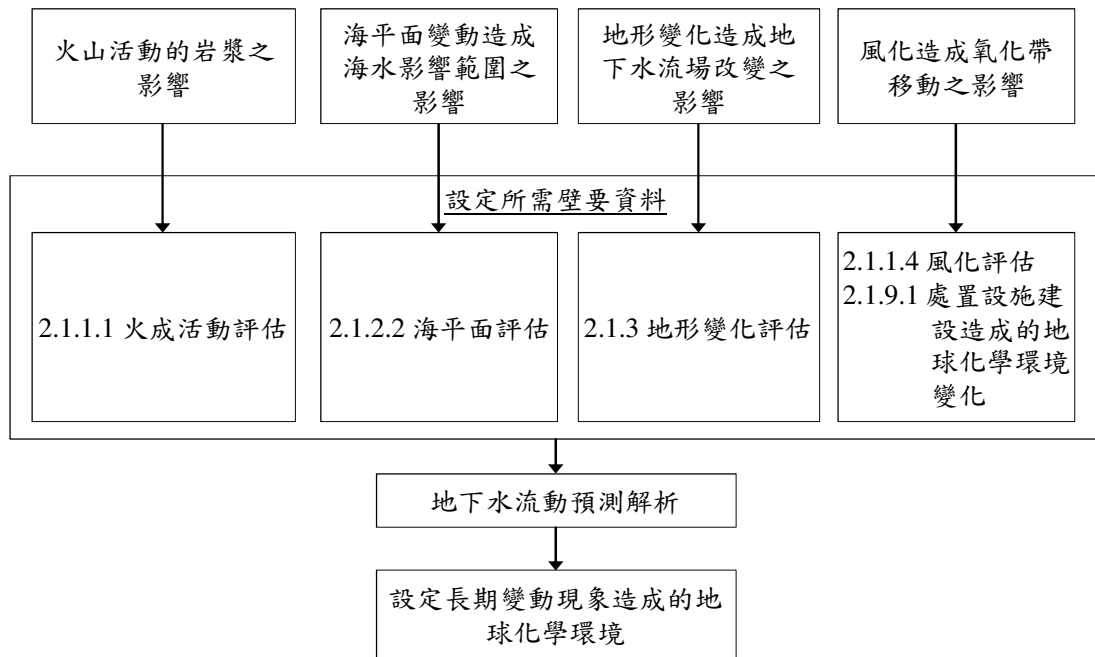


圖 2.1.9.2-3 長期變動現象造成地球化學環境變化的檢討流程

#### 一、必要的資料

長期變動現象造成地球化學環境變化之檢討資料，可採用前述章節所記載的方法。

#### 二、評估方法

對於長期變動現象造成地球化學環境變化之評估，可參考 2.1.1.1 節、2.1.2.2 節及 2.1.3 節的檢討結果，考量地形變化、海平面變動的影響後，設定地下水流動解析。地下水流動解析可參照 2.1.5 節之說明進行設定，並以 2.1.6 節說明的方法檢討模型的適當性。若解析模型的精度、未來的地形預測、海平面變動預測的設定幅度有差異時，可藉由敏感度解析掌握對核種遷移評估參數的影響。

此外，檢討地表風化對氧化帶移動之影響時，需了解地表的風化分布，並就其成因以地質學的觀點檢討其對處置設施的長期影響。而長期的氧化作用，可利用現有的水-岩石反應之地球化學程式，將相關程式詳列於表 2.1.9.2-1。

表 2.1.9.2-1 計算化學物種組成及地球化學模式

程式	目的	資訊與來源	備註
WATEQ 4 F	計算化學物種組成	<a href="http://water.usgs.gov/software/geochemical.html">http://water.usgs.gov/software/geochemical.html</a>	public domain*
PHREEQC	地球化學模式	<a href="http://water.usgs.gov/software/geochemical.html">http://water.usgs.gov/software/geochemical.html</a>	public domain
PHRQPIZ	地球化學模式	<a href="http://water.usgs.gov/software/geochemical.html">http://water.usgs.gov/software/geochemical.html</a>	public domain
PHREEQM	地球化學模式	Geochemistry groundwater and pollution by Appelo and Postma (1993)	左列的書中所附的磁碟片
MINTEQA 2	計算化學物種組成	<a href="http://www.epa.gov/earth100/records/a00164.html">http://www.epa.gov/earth100/records/a00164.html</a>	public domain
MINEQL+	地球化學模式	<a href="http://www.minegl.com/mineql.html">http://www.minegl.com/mineql.html</a>	commercial**
The Geochemist's Workbench	地球化學模式	<a href="http://www.rockware.com">http://www.rockware.com</a>	commercial**
EQ3/6	地球化學模式	<a href="http://www.llnl.gov/ees/esd'geochem/eq36.html">http://www.llnl.gov/ees/esd'geochem/eq36.html</a>	public domain
CHILLER	地球化學模式 (高溫)	mhreed@oregon.uoregon.edu	license***
WEB-PHREEQC	地球化學模式	<a href="http://www.ndsu.ndak.edu/webphreeq">http://www.ndsu.ndak.edu/webphreeq</a>	網站上的 PHREEQC

備註：

\* 從左列網站下載，免費使用。

\*\* 從左列網站購買。

\*\*\* 使用許可有時間限制。公司企業使用需付費。

### 2.1.10 流出點的流量評估

由於地下水中的核種濃度會於地下水流到地表(生物圈)時，被流出點的地表水(河川、湖泊等陸水或海水)稀釋，故劑量評估時需取得流出點之地表水流量。雖然流出位置的地表水可能為陸水或海水，但此處僅以河川、溪流等地表水流量進行說明，而流出位

置為海域時，則設定沿岸的流況與擴散等稀釋效果。為進行流出點之地表水流量評估，從資料取得至流量設定的流程，說明如圖 2.1.10-1 所示。

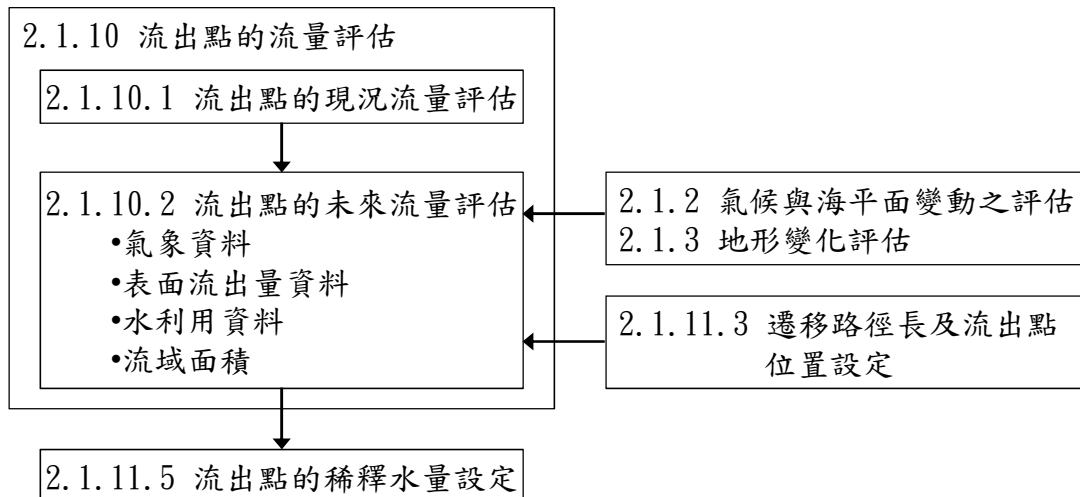


圖 2.1.10-1 流出點的流量評估流程

### 2.1.10.1 流出點的現況流量評估

#### 一、必要的資料

一般計算地表水流量時，先由地形的分水嶺設定流域面積，再利用直接量測法量測該流域河川之總流量，或利用該地點流域面積與降水量、蒸發散量等氣象資料之關係，由水平衡法推估。為求得流出點的地表水流量，相關資料取得方法彙理如表 2.1.10.1-1。

#### (一)直接測量法

所謂直接測量地表水之方法，是以河川水位與流速推估河川流量。日本大部份的主要河川都有相關量測數據資料，可直接使用該資料。而較小的溪流則沒有量測資料，需要設

置流量觀測堰進行地表水流量觀測，相關觀測方法可參考「改訂新版 建設省河川防砂技術基準(案)」。

## (二)水平衡公式法

水平衡公式中，地表水流量(R)為：

$$R=(P-E-\Delta S)\times\text{流域面積} \quad (2.1.10.1-1)$$

其中：

R=地表水流量

P=降水量

E=蒸發散量

$\Delta S$ =儲流量變化(1 年的儲流量變化， $\Delta S=0$ )

以水平衡公式法推估地表水流量，須取得降雨量、蒸發散量、流域面積等相關資訊。其中，蒸發散量可使用直接測量或是經驗公式計算，代表方法說明如下：

- 1.以蒸發計推估。
- 2.由經驗公式推估可能之蒸發散量。(Sones weight 式、Harmon 式、Penman 式等)
- 3.以熱平衡式推估實際蒸發散量。(Penman-Monteith 式、體積的單層模式法)

## 二、評估方法

利用直接測量所得之實測值與利用水平衡公式的推估值，考量兩者的整合性與實測值的正確性後，評估流出點的地表水流量。

表 2.1.10.1-1 計算流出點流量時需取得之資料

區分	項目	內容
現場觀測	地表水流量	<ul style="list-style-type: none"><li>• 利用堰觀測地表水流量。</li><li>• 觀測方法參考「改訂新版建設省河川防砂技術基準(案)與解說調查編」(日本河川協會編，1997)。</li></ul>
	氣象觀測	<ul style="list-style-type: none"><li>• 降雨量、氣溫、日照量、風速、風量等。</li></ul>

文 獻 調 查	地表水流量	<ul style="list-style-type: none"> <li>觀測方法參考「地上氣象觀測指針」(氣象廳, 1993)。</li> <li>縣、國等河川流量觀測資料</li> </ul>
	氣象資料	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本氣象協會 AMeDAS(Automated Meteorological Data Acquisition System)資料</li> </ul>
	水利用調查	<ul style="list-style-type: none"> <li>河川的水利用調查</li> </ul>
	流域面積	<ul style="list-style-type: none"> <li>地形圖(對於未來的地形預測可參考 2.1.3 節)</li> </ul>

## 2.1.10.2 流出點的未來流量評估

### 一、必要的資料

流出點的地表水未來流量可由表 2.1.10.1-1 中提到的項目, 以及未來評估時期的流出點地形資料(流域面積)與氣候資料(氣溫、降水量、蒸發散量等), 利用可預測未來的水平衡公式法評估。

有關未來的地形與氣候資料, 可參考 2.1.3 節與 2.1.2 節之說明, 利用其預測結果推估未來評估時期之流出點地表水流量。

### 二、評估方法

對陸域的河川與溪流而言, 流出點的未來地表水流量會受到氣候條件與地形的影響。基本上以未來的氣候變動(氣溫、降水量、蒸發散量等)預測結果, 加上地形變化、海平面變動造成的流域面積及流出區域型態改變, 利用水平衡公式法評估地表水流量。對海域而言, 則需評估未來的地形變化與海平面變動對流出點附近流況造成之影響。

## 2.1.11 天然障壁的核種遷移評估參數之設定

與天然障壁相關的核種遷移評估參數, 詳列於表 2.1.11-1, 其中, 與處置設施的核種滲出有關之參數為通過設施流量, 與天然障壁的核種遷移有關的參數為實際流速、遷移路徑長度、分散



特性，與地表(生物圈)的核種遷移及劑量評估有關的參數為流出點位置及稀釋水量。

設定核種遷移評估參數時，需考量①情節與評估期間的解析目的；②必要的解析精度；③模型的維度及解析時與物理化學現象相關的核種遷移評估模型特徵。

根據日本原子能安全委員會(2007)對劑量評估之要求，基本情節需使用信賴度高之參數，變動情節則建議使用科學上合理範圍內之參數。設定信賴度高的核種遷移評估參數時，若該參數之資料來源為統計數據，可採用其平均值、中間值或頻率最高的值，但若資料來源非以統計方式彙整資料時，則需在可能的範圍內進行多方面的檢討後再設定參數。

天然障壁的核種遷移評估參數設定時，一般採用預測解析模型。可先利用與現況相近且詳細的模型進行地下水流動解析，依照該解析結果設定核種遷移評估參數。並可將模型中的水文地質不均質性單純化，利用低維度的模型進行核種遷移解析。例如將模型化之三維水文地質區分用於地下水流動解析，並沿用分析得到之流跡線，將複數地層平均後的均值一維模型用於核種遷移解析。此外，核種遷移解析中對於含裂縫與無裂縫之部分，則可使用其他方法將模型單純化。核種遷移解析在設定時須能反應流場的不均質性與解析目的。

另外，進行一維核種遷移解析時，多以三維地下水流動解析取得流跡線後，求得處置設施到生物圈的遷移路徑長。但因不同的流跡線起點會造成不同的遷移路徑，進行一維核種遷移解析時，需考量遷移路徑長的代表值及其變異性。同樣地，進行地下水流動解析所得之實際流速、分散特性(與遷移路徑長有關)、流出點位置，也需考量代表值及其變異性。

綜上所述，採用地下水流動解析結果設定天然障壁相關的核種遷移參數時，需考量地下水流動解析模型與核種遷移解析模型

的差異及地下水流動解析結果的變異性。有關核種遷移評估參數的設定流程如圖 2.1.11-1 所示，個別的參數設定說明詳後續之章節。

表 2.1.11-1 天然障壁相關的核種遷移評估參數

分類	核種遷移評估參數	備註
核種自處置設施漏出	<ul style="list-style-type: none"> <li>設施通過流量</li> </ul>	工程障壁的透水係數設定方法在第 3 章說明。工程障壁的吸附特性設定方法不在本報告之討論範圍。
天然障壁中的核種遷移	<ul style="list-style-type: none"> <li>實際流速(平均孔隙流速)</li> <li>遷移路徑長</li> <li>分散特性</li> </ul>	封塞的水理特性設定方法及地盤的吸附特性設定方法，不在本報告之討論範圍。
地表(生物圈)的核種遷移與劑量評估	<ul style="list-style-type: none"> <li>流出點位置</li> <li>流出點的稀釋水量</li> </ul>	生物圈的核種遷移相關模式及其對應之參數，不在本報告之討論範圍。

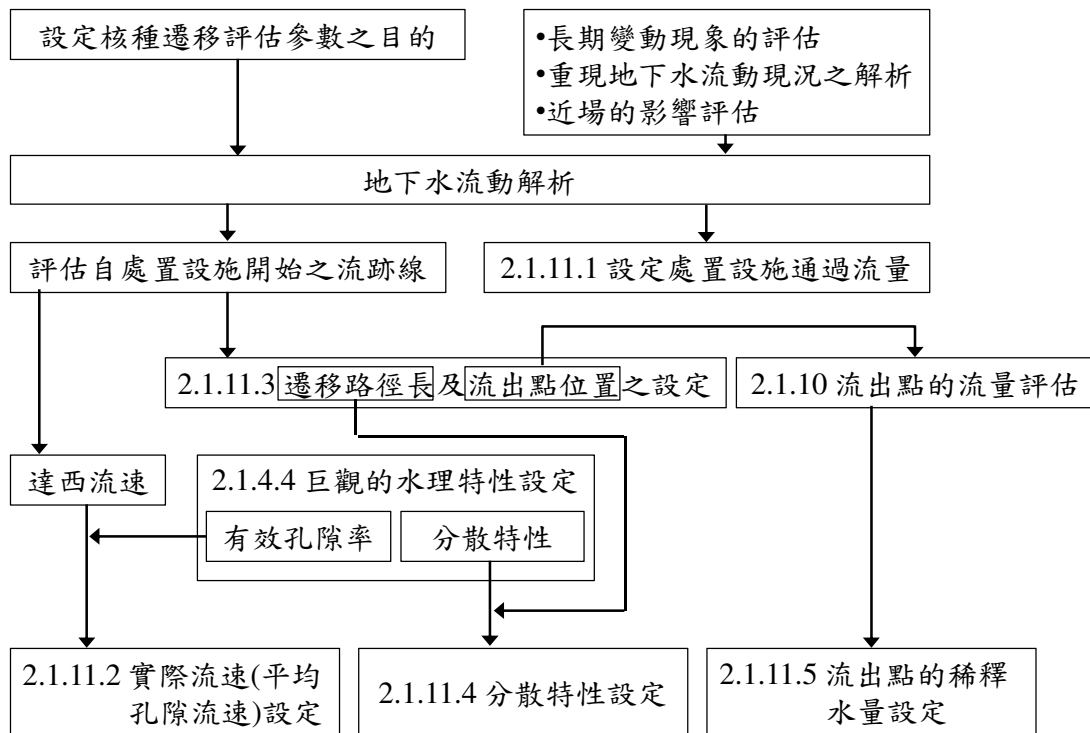


圖 2.1.11-1 核種遷移評估參數的設定流程

### 2.1.11.1 通過設施流量的設定

通過設施流量是指，接觸過放射性核種的地下水，經過低透水層、低擴散層等工程障壁後，向外流出的流量。流量的多寡受到工程障壁的透水性、地下水流動方向、處置設施及其周邊的水力梯度影響。求解通過設施流量時，可將處置設施周邊的水力梯度及工程障壁視為均質多孔質介質，則可以等價的透水係數簡易求得通過設施流量，亦可利用數值解析方法求解通過設施流量，解析使用的程式可參考 2.1.5.1 節中，可適當評估流量之程式。

當工程障壁與地盤的透水係數差很多時，數值解析方法可計算出通過任何區域(例如處置設施內低透水層的內側區域)的流量(純量或向量)。但以有限元素法做為分析手法時，若要使計算結果的水力梯度分佈精度提高，則網格須越細越好，特別是在想計算的流量區域附近有透水係數對比較大的材料存在時，局部的水力梯度分佈差異，會影響網格分割的大小及求解的精度。

為提高工程障壁與開挖影響區的解析精度，使用從大模型切出之狹小範圍模型推估通過設施流量時，設定邊界條件需使用不受設置處置設施影響之邊界。此外，設定通過設施流量時，也須考量前述因素之變動幅度。

另外，低透水工程障壁之外側，有開挖影響區、支保工劣化等連續高透水部份時，若地下水選擇通過高透水部份，則可抑制進入處置設施內部的地下水滲透量。此時，沒有高透水的區域其通過設施流量會降低，但由設施流出的核種透過高透水部份流出的遷移時間也會變短，故在設定通過設施流量時，需進行雙方檢討做綜合判斷。有關設定通過設施流量之流程，如圖 2.1.11.1-1 所示。

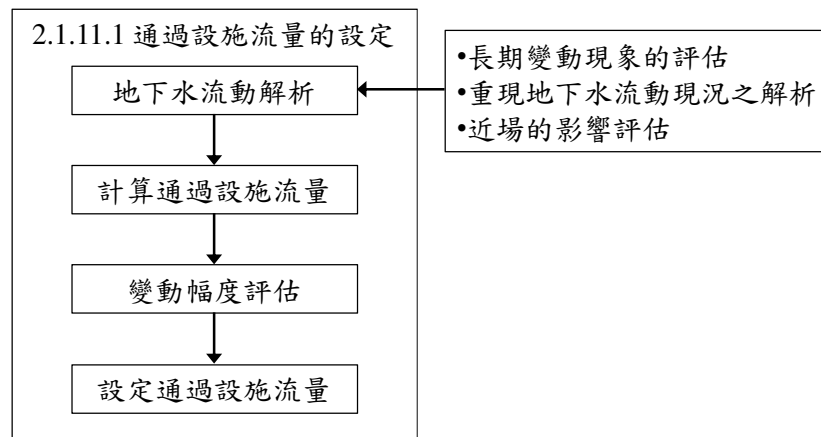


圖 2.11.1-1 通過設施流量的設定流程

### 2.1.11.2 實際流速(平均孔隙流速)的設定

一般而言，實際流速的定義為個別粒子在個別場所下的微觀速度，但此處是指流體粒子在巨觀移動方向上的平均速度。故實際流速(平均孔隙流速)是指介質(岩盤等)中流動的流體粒子之移動速度。

當以地下水解析取得實際流速時，需先利用地下水解析求解處置設施到生物圈之流跡線，再換算成平均達西流速(遷移路徑長 $\div$ 達西流速換算的遷移時間)，最後除以有效孔隙率即為實際流速。有關地下水流動解析模型之設定可參考 2.1.5.1 結之說明，選擇可適當評估流跡線之模型。此外，也須確認平均達西流速的計算誤差。計算有效孔隙率時，可利用室內或現場的示蹤劑試驗取得示蹤劑試驗的達西流速，除以試驗時的實際流速(示蹤劑試驗的遷移路徑長 $\div$ 示蹤劑的平均破過時間)，即為有效孔隙率。至於裂縫加速地下水實際流速的情形，可視需要考量實際流速修正係數(參考 2.1.4.4 節)。有關實際流速的設定流程(流跡線評估方法)，如圖 2.1.11.2-1 所示。

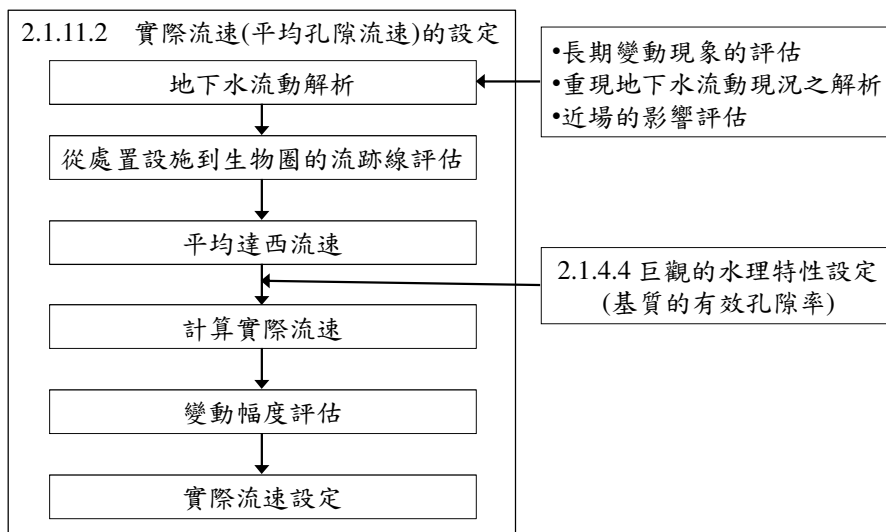


圖 2.1.11.2-1 實際流速的設定流程

### 2.1.11.3 遷移路徑長度及流出點位置之設定

天然障壁的遷移路徑長，是指由處置設施到生物圈的核種遷移路徑長。此處所指遷移路徑長，為沿著流跡線兩點間的巨集距離，相當於在與介質(岩盤等)有效孔隙率相等之斷面比中，直線上的流路長，其與在彎曲的孔隙中移動之流體粒子的實際移動距離不同。將遷移路徑長除以實際流速，即可得到地下水自處置設施到生物圈的遷移時間。

流出點位置是指由處置設施滲出的核種跟著地下水遷移，最後從地表流出之位置(生物圈)。流出點位置影響遷移路徑之設定，同時，因地下水中的核種濃度會被流出點的水量稀釋，故設定流出點位置之稀釋水量也具有重要性。

遷移路徑長度及流出點位置可利用地下水流動解析取得，首先以地下水流動解析之流跡線結果為基礎，求解處置設施到生物圈的遷移路徑，進而設定流跡線的長度與流出點位置。有關遷移



路徑長度及流出點位置的設定流程(評估流跡線方法)，如圖 2.1.11.3-1 所示。

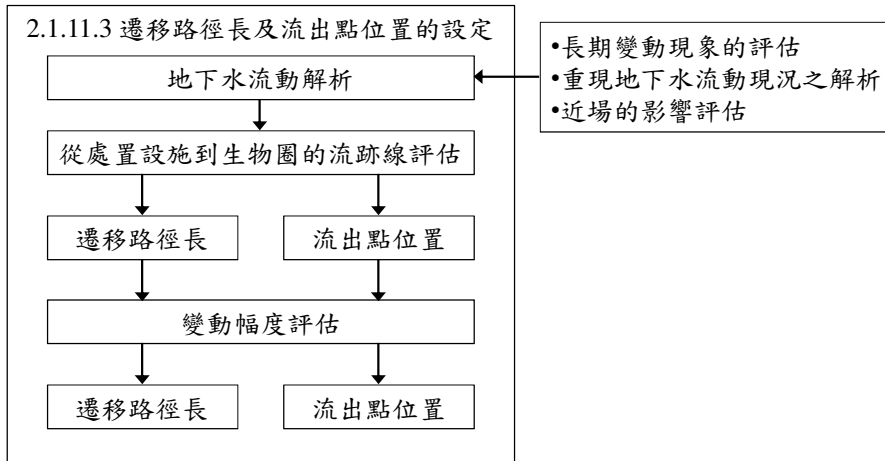


圖 2.1.11.3-1 遷移路徑長及流出點位置的設定流程

#### 2.1.11.4 分散特性的設定

當液體中的物質濃度不同時，會藉由擴散與混合使濃度均勻分布。在地下水流動的狀態下，扣除流速極小的情況後，一般分子的擴散效果低，加上流路與孔隙分歧，孔隙中各個點的流體粒子流速(實際流速)不均，影響物質的擴散與混合過程。若從較大的尺度來看，因地盤的透水性空間之不均質性與裂縫分布，皆會產生濃度的擴散與混合。隨著地下水流動，液體間的物質之擴散與混合過程，即稱為分散。

分散特性的設定方法包括(1)利用示踪劑試驗；(2)參考文獻的經驗法則，或是參考 2.1.4.4 節所述，利用處置場址的不均質水理特性；(3)使用解析模型。

一般而言，隨著遷移路徑長增加，地盤的不均質性也會增加。所以小範圍的示踪劑試驗所得之分散特性，不會直接用來作為大範圍的實際評估對象之分散特性。若利用解析模型設定分散

特性時，須將地盤透水性的空間不均質性、裂縫分布等模型化，雖可求得與實際評估對象相同規模的分散特性，但考量解析範圍增加，則小範圍的不均質性可能無法模型化，因此利用解析結果設定分散特性時，也需考量模型的限制。有關分散特性的設定流程，如圖 2.1.11.4-1 所示。

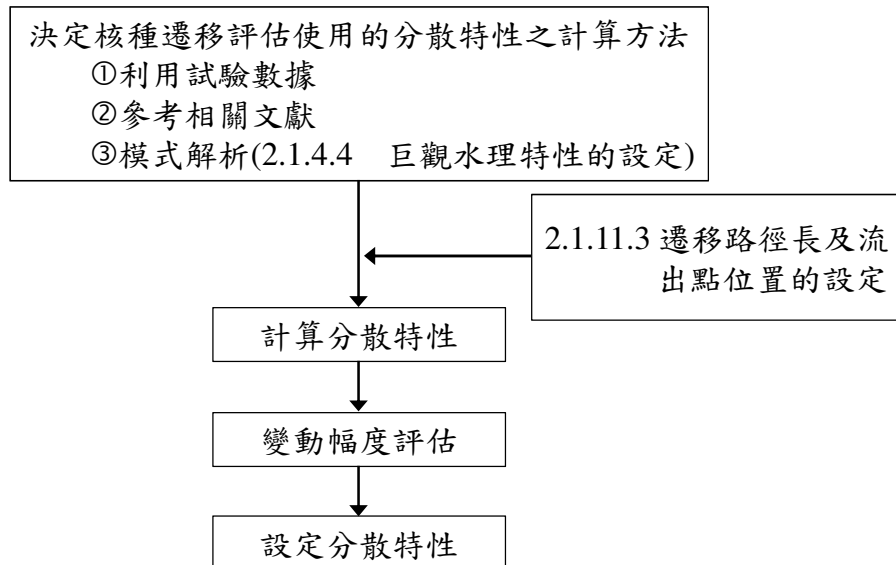


圖 2.1.11.4-1 分散特性的設定流程

### 2.1.11.5 流出點稀釋水量的設定

由處置設施滲出之含有放射性核種的地下水，若流至海、湖泊、河川等地時，因放射性濃度會被稀釋，可推估對人類的影響將會降低。在河川、溪流等地下水流出點的流量，稱之稀釋水量。

流出點的稀釋水量可利用計算流出點位置的流量而得到。流出點的位置評估已於 2.1.11.3 節中說明，流出點位置的流量則可參考 2.1.10 節中，有關流出點流量評估之相關說明。

求得之稀釋水量會有下列項目的變動幅度，因此在計算稀釋水量時，需考量下列變動幅度後再行設定。

1. 流出位置的變動幅度。
2. 流域面積的變動幅度。(地質條件等的影響)
3. 長期的地形變化造成流域面積改變。
4. 長期的氣候變動。

關於流出點的稀釋水量的設定流程詳如圖 2.1.11.5-1 所示。

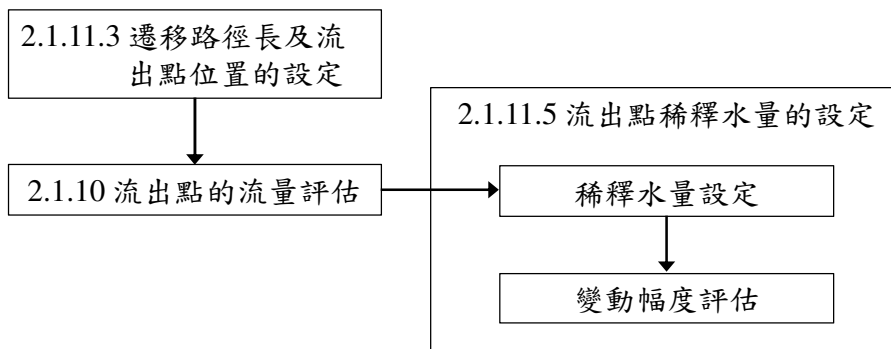


圖 2.1.11.5-1 流出點稀釋水量的設定流程

## 2.2 工程障壁的核種遷移參數設定

### 2.2.1 工程障壁的設計與施工

地下坑道處置設施主要是利用工程障壁與天然障壁組合的多重障壁系統，抑制廢棄物包件與地下水接觸，延遲放射性核種遷移的時間，確保放射性核種不會對人類及其生活環境造成影響。工程障壁的設計與施工，需考量處置設施於建設、營運至回填後等階段的安全要求，以及放射性廢棄物內之長半衰期核種、地質環境等條件後，訂定工程障壁各個組成構件所需具備的機能。並在符合經濟性的前提下，選擇高耐久性的材料，使用現階段能力範圍內最適當且最佳的設計與施工技術。

#### 2.2.1.1 工程障壁的基本組成設定

設置工程障壁的主要目的為抑制射性核種遷移，設計時需多方考量廢棄物包件、地質與地下水環境等條件後，確立工程障壁系統的組成。設定工程障壁的基本組成時，可參考日本國內外之案例及「低放射性廢棄物處置的基本方針」(原子力委，1998)，確定工程障壁需具備的機能後，選擇適合的材料，組合各個組成構件成為完整的工程障壁系統。由於進行相關解說與檢討時，需有具體的工程障壁組成做為討論對象，故利用圖 1.3-2 的工程障壁系統作為後續討論之代表。

#### 2.2.1.2 設定工程障壁各組成構件需具備之機能

工程障壁機能的設定流程，是以處置設施的安全需求設定處置設施的設計需求，再以此訂定工程障壁各組成構件所需之機能，

如圖 2.2.1.2-1 所示。詳細解說可參考「低放射性廢棄物餘裕深度處置的安全規範(草案)」(綜合資源調查會, 2007)中的基本機能(安全需求), 將工程障壁的機能要求依時間順序分為建設營運階段及回填後兩大部分, 列出不同時間點所需的處置設施設計需求, 如圖 2.2.1.2-2 所示, 並整合各機能要求對應之組成構件。參考「TRU 廢棄物處份技術檢討書-第 2 次 TRU 廢棄物處置研究開發概要」(電事連、JNC, 2005)的內容, 以圖 1.3-2 的工程障壁系統為對象, 彙整工程障壁各組成構件所需之機能, 如表 2.2.1.2-1 所示。

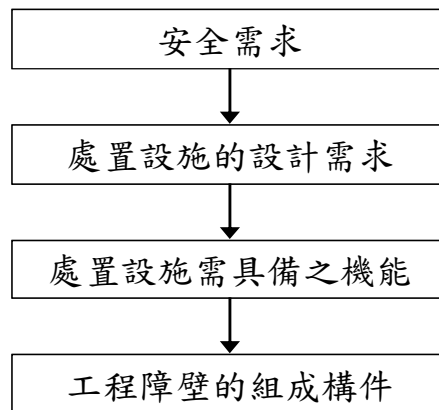
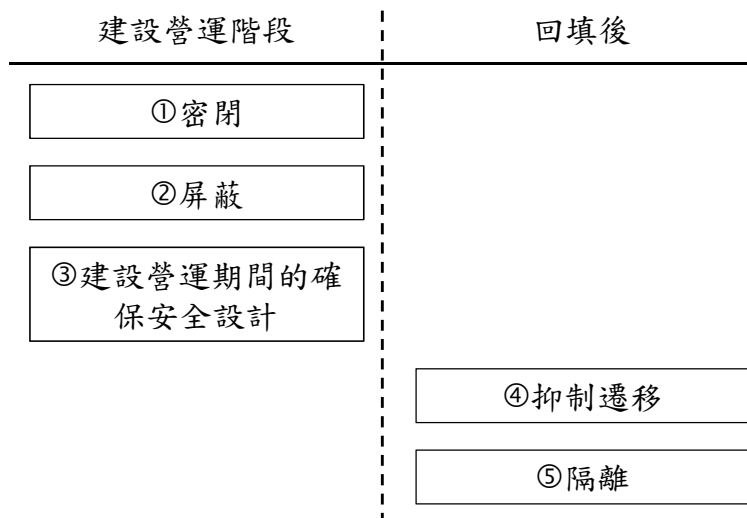


圖 2.2.1.2-1 工程障壁的機能設定流程



## 圖 2.2.1.2-2 處置設施的設計需求



表 2.2.1.2-1 工程障壁各組成構件需具備之機能

設計需求	處置設施需具備之機能		工程障壁各組成構件需具備之機能							
	機能	機能之內容	廢棄物包件	填充材	處置窖	低擴散層	低透水層	回填材	處置坑道	
建設營運階段	③	確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性	確實建設營運時的空間、確保力學安定性。	—	—	●	●	●	●	●
			廢棄物包件定置場所需有足夠強度承受荷重。	●	●	—	—	—	—	—
	①②	確保坑道安定性	維持坑道形狀。	—	—	—	—	—	—	●
		防止污染擴大	營運時，防止放射性物質洩漏至容器外的環境。	●	○	○	○	—	—	—
			廢棄物包件保持固定在放置的位置上。	○	●	○	—	—	—	—
	③	確保輻射暴露的安全性	高劑量的廢棄物包件需有屏蔽機能，以降低表面劑量率，提高廢棄物包件定置作業的安全性。	●	—	—	—	—	—	—
開始進行定置作業後，對環境需有足夠的屏蔽效果。			—	●*	●*	●*	—	—	—	
回填後	④	確保力學安定性	各組成構件保持在要求的位置，沒有顯著變形。	○	○	○	○	○	○	○
	④	抑制放射性核種釋出	降低放射性核種漏出速度，抑制放射性核種擴散。	—	○	○	●	○	—	—
			降低放射性核種的釋出率，抑制核種遷移。	○	—	—	—	—	—	—
			吸附具溶解性的放射性核種。	—	○	○	○	○	○	○
	④	抑制地下水移動	抑制通過工程障壁的地下水流量。	○	○	○	○	●	○	○
			避免處置設施內形成連續的地下水遷移路徑。	—	—	—	—	—	●	○
		密閉性	設施內的空隙需完全填充。	—	—	—	—	○	○	—
	④	確保化學安定性	避免處置環境與工程障壁間的相互作用導致劣化產生。	○	○	○	○	○	○	○
④	確保熱變質的安定性	避免處置設施內的溫度因發熱廢棄物而超過容許溫度。	○	○	○	○	○	○	○	
	確保氣體遷移的安定性	避免處置設施內的壓力使障壁材料劣化，形成地下水遷移之連續路徑。	○	○	○	○	○	○	○	

	抑制膠體(colloid)遷移	防止放射性核種膠體的移動及天然膠體的侵入。	—	—	—	—	○	○	—
⑤	防止人類入侵	避免人類輕易的入侵。	—	—	—	—	—	○	—

●：設計時各組成構件需單獨考量之機能(●\*是填充材、處置窖、低擴散層的設計上，需綜合考量之機能)

○：以設計時設定的樣式為基礎，確認性能評估後，視需要將機能反映至設計。亦即由綜合考量系統整體之效果進行確認

—：無此機能要求

### 2.2.1.3 工程障壁的設計

本章節主要針對表 2.2.1.2-1 中，需具備「設計時各構成部位需單獨考量之機能」的組成構件，說明其設計方針。並於設計時考量施工與經濟之合理性，選擇耐久性佳之材料，使用現階段能力可及的最適當且最佳之技術。

#### 一、填充材的設計

填充材的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」、「防止污染擴大」及「確保輻射暴露的安全性」。為使機能可以充分發揮其功效，針對「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」，須考量自充填性、承受載重、廢棄物包件發熱等項目進行設計。針對「防止污染擴大」，需考量自充填性、廢棄物包件發熱等項目進行設計。針對「確保輻射暴露的安全性」，需綜合考量低擴散層、處置窖及填充材的材料厚度與密度後，設定填充材的材料厚度與密度。有關填充材的機能要求與設計考量，彙整如表 2.2.1.3-1 所示。

表 2.2.1.3-1 填充材需具備之機能及對應的設計考量

處置設施需具備之機能(設計時各組成構件需單獨考量之機能)		設計上的考慮項目	設計的對應
機能	機能之內容		
確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性	廢棄物包件與處置窖的整體安定性	自充填性、承受載重、廢棄物包件發熱	適當的材料與配比設計
防止污染擴大	廢棄物包件保持固定在放置的位置上	自充填性、廢棄物包件發熱	適當的材料與配比設計
確保輻射暴露的安全性	開始進行定置作業後，對環境需有足夠的屏蔽效果	低擴散層、處置窖、填充材的厚度與密度	設定適當的構件厚度與密度

## 二、處置窖的設計

處置窖的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「確保輻射暴露的安全性」。為使機能可以充分發揮其功效，對於「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」，需考量施工時載重、廢棄物包件載重、營運時載重及地震力等項目進行構造設計。此外，為確保回填後處置窖的「確保力學安定性」之機能，可利用綜合考量系統整體之效果進行確認。另外，對於「確保輻射暴露的安全性」，需綜合考量填充材與低擴散層的材料厚度與密度後，設定處置窖的材料厚度與密度。處置窖需具備之機能與設計時考量，彙整如表 2.2.1.3-2 所示。

表 2.2.1.3-2 處置窖需具備之機能及對應的設計考量

處置設施需具備之機能(設計時各組成構件需單獨考量之機能)		設計上的考慮項目	設計的對應
機能	機能之內容		
確保營運空間、 確保自重與外力 作用下之安全性	確實建設營運時 的空間、確保力學 安定性	施工時載重、廢棄 物包件載重、營運 時載重及地震力等	適當的構造 設計
確保輻射暴露的 安全性	開始進行定置作 業後，對環境需有 足夠的屏蔽效果	低擴散層、處置 窖、填充材的厚度 與密度	設定適當的 構件厚度與 密度

## 三、低擴散層的設計

低擴散層的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」、「抑制放射性核種釋出」及「確保輻射暴露的安全性」。為使機能可以充分發揮其功效，對於「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」，須考量自重、地震力後，檢討

結構的安全性。對於「抑制放射性核種釋出」，需考量材料的緻密度、裂縫的抑制、水泥水合物溶出速度的抑制等項目進行材料設計。對於「確保輻射暴露的安全性」，則需綜合考量填充材與處置窖的材料厚度與密度後，設定低擴散層的材料厚度與密度。低擴散層需具備之機能與設計時考量，彙整如表 2.2.1.3-3 所示。

表 2.2.1.3-3 低擴散層需具備之機能及對應的設計考量

處置設施需具備之機能(設計時各組成構件需單獨考量之機能)		設計上的考慮項目	設計的對應
機能	機能之內容		
確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性	確實建設營運時的空間、確保力學安定性	自重及地震力等	檢討構造的安定性
抑制放射性核種釋出	降低放射性核種漏出速度,抑制放射性核種擴散	材料的緻密度、裂縫的抑制、水泥水合物溶出速度	適當的材料設計
確保輻射暴露的安全性	開始進行定置作業後,對環境需有足夠的屏蔽效果	低擴散層、處置窖、填充材的厚度與密度	設定適當的構件厚度與密度

#### 四、低透水層的設計

低透水層的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「抑制地下水流動」。為使機能可以充分發揮其功效，對於「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」，需考量上加載重造成底部低透水層沉陷的狀況後，進行材料設計及材料厚度設定。對於「抑制地下水流動」，則需確認所需之有效黏土密度後，進行材料設計及材料厚度設定。低透水層需具備之機能與設計時考量，彙整如表 2.2.1.3-4 所示。

表 2.2.1.3-4 低透水層需具備之機能及對應的設計考量

處置設施需具備之機能(設計時各組成構件需單獨考量之機能)		設計上的考慮項目	設計的對應
機能	機能之內容		
確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性	確實建設營運時的空間、確保力學安定性	上加載重造成底部低透水層變形	適當的材料設計與構件厚度設定
抑制地下水流動	抑制通過工程障壁的地下水流量	確保足夠的有效黏土密度及厚度	適當的材料設計與構件厚度設定

此外，有效黏土密度(Effective clay dry density： $\rho_e$  ( $Mg/m^3$ ))是用砂的體積除以膨潤土的乾燥密度計算而得之指標，以下式表示。

$$\rho_e = Mb / (Vb + Va) = \rho_d (100 - Rs) / (100 - \rho_d \times Rs / \rho_s)$$

其中，

Mb：膨潤土乾燥質量(Mg)

Vb：膨潤土容積( $m^3$ )

Va：孔隙容積( $m^3$ )

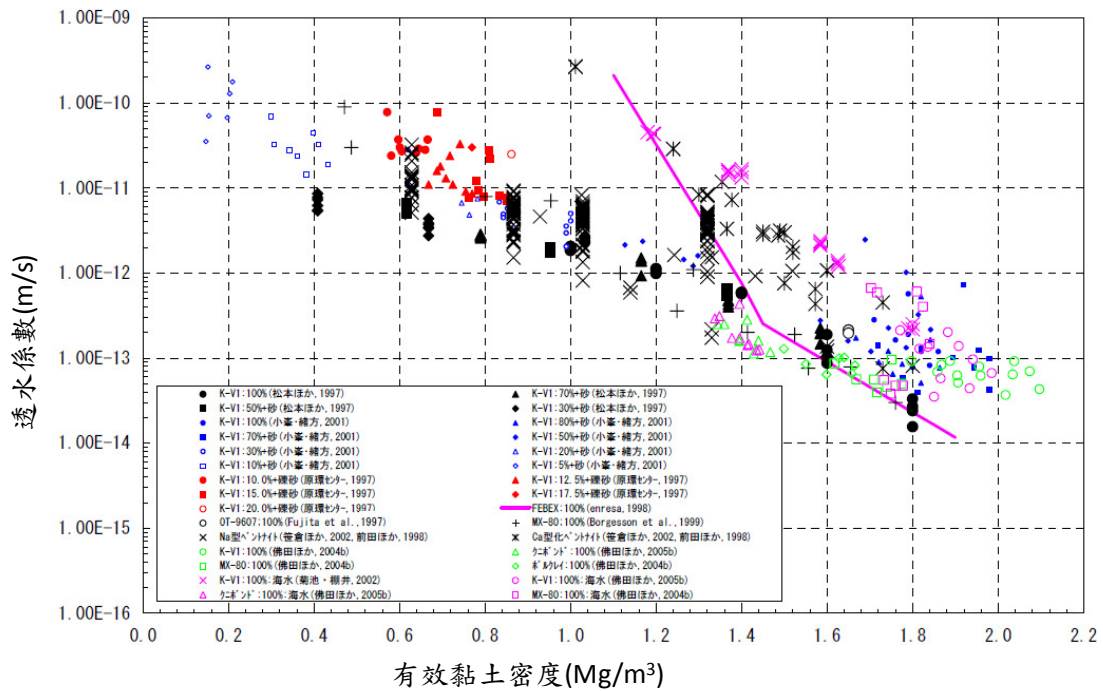
$\rho_d$ ：骨材乾燥密度( $Mg/m^3$ )

Rs：骨材乾燥質量之混合率(wt%)

$\rho_s$ ：骨材的密度( $Mg/m^3$ )

由於膨潤土類材料的透水性與有效黏土密度有相關性，如圖 2.2.1.3-1 所示，故在材料設計中，對於有效黏土密度的設定極為重要。有效黏土密度受到膨潤土 Ca 型化、溶解、膨潤壓、變形、施工等影響，需綜合考量後進行材料設計。





注1：Kunigel V1簡寫成K-V1

圖 2.2.1.3-1 有效黏土密度與透水係數之關係

### 五、回填材的設計

回填材的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「抑制地下水流動」。為使機能可以充分發揮其功效，對於「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」，需考量施工時載重、廢棄物包件載重、營運時載重及地震時載重等項目，進行材料設計與構造設計。對於「抑制地下水流動」，須確保空隙填充性並考量回填材本身經過長期時間後的變形狀況。

根據設施型態的特徵及回填位置，回填材可分為底部、側部及上部三種，回填材的使用材料為膨潤土混合土，設計時需考量各別位置的特徵，再行選定使用材料。回填材需具備之機能與設計時考量，彙整如表 2.2.1.3-5 所示。

表 2.2.1.3-5 回填材需具備之機能及對應的設計考量

處置設施需具備之機能(設計時各組成構件需單獨考量之機能)		設計上的考慮項目	設計的對應
機能	機能之內容		
確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性	確實建設營運時的空間、確保力學安定性	施工時載重、廢棄物包件載重、營運時載重及地震時載重	適當的材料與構造設計
抑制地下水流動	避免處置設施內形成連續的地下水遷移路徑	確保空隙填充性	適當的材料與構造設計

## 六、坑道的設計

關於支保工的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「確保坑道安全性」。為使這些機能可以充分發揮其功效，需考量坑道形狀、地層特性、開挖方法、施工時載重、營運時載重、地震力等，檢討坑道的安全性後設定坑道樣式。設計時可參考「土木學會隧道標準示方書」(土木學會，20060)，充分考量設計條件與必要的設計項目，檢討採用適當的方法。坑道需具備之機能與設計時考量，彙整如表 2.2.1.3-6 所示。

表 2.2.1.3-6 坑道需具備之機能及對應的設計考量

處置設施需具備之機能(設計時各組成構件需單獨考量之機能)		設計上的考慮項目	設計的對應
機能	機能之內容		
確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性	確實建設營運時的空間、確保力學安定性	坑道形狀、地層特性、開挖方法、施工時載重、營運時載重、地震力等	適當的構造設計及坑道樣式設定
確保坑道安全性	維持坑道形狀	同上	同上

#### 2.2.1.4 工程障壁施工計畫的擬定

工程障壁的施工計畫，須確保各組成構件於建設營運階段及回填後各階段之機能，並考量環境條件、工期、使用材料、施工機械與設備、施工方法等條件後，擬訂施工計畫。

##### 一、填充材的施工

填充材的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」、「防止污染擴大」及「確保輻射暴露的安全性」。為確保填充材之機能，需考慮施工方法及材料特性等條件後，擬定施工計畫。由其對於堆疊的廢棄包件間之狹窄空間，一定要能確實填充空隙。若填充材使用混凝土或砂漿時，可參考日本土木學會的「高流動混凝土施工指針」(1998)，擬定施工計畫。

##### 二、處置窖的施工

處置窖的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「確保輻射暴露的安全性」。為確保處置窖之機能，需考慮施工方法及材料特性等條件後，擬訂施工計畫。

##### 三、低擴散層的施工

低擴散層的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」、「抑制放射性核種釋出」及「確保輻射暴露的安全性」。為確保低擴散層之機能，需考慮施工方法及材料特性等條件後，擬訂施工計畫。特別是在「抑制放射性核種釋出」機能上，因水化熱、乾燥收縮及自生收縮等原因而產生之裂縫，需注意裂縫的因應對策。此外，事前掌握底部低擴散層灌漿

時之水分對低透水層的影響，及其可能造成不良的影響部分，於事前檢討並研擬對策。

#### 四、低透水層的施工

低透水層的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「抑制地下水流動」。為確保低透水層之機能，要考慮施工方法及材料特性等條件後，擬定施工計畫。擬定施工計畫時，需注意下列與膨潤土有關之特性。

- 1.膨潤土為天然的礦物資源，因採礦與製造場地不同，會使膨潤土具有不同的物理與化學特性。
- 2.土壤材料的特徵：粒度與含水比會因施工方法不同，而有不同的壓密性與密度。
- 3.當膨潤土與大氣中的水分勢能不平衡時，於交界面會產生水分移動，膨潤土的含水比會因應大氣的溫度與濕度而有所變化。亦即施工後的低透水層之水分，會受到地下坑道內的相對濕度影響，當過於乾燥或吸濕性顯著時，低透水層可能會產生裂縫。

#### 五、回填材的施工

回填材的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「抑制地下水流動」。為確保回填材之機能，要考慮施工方法及材料特性等條件後，擬定施工計畫。

在「抑制地下水流動」機能上，最重要是確保回填材的填充性。使用膨潤土混合土時，其粒度與含水比會因施工方法不同而有不同的固結性與密度，需特別注意上部及側部的狹窄處施工。

#### 六、坑道的設計

隧道施工一般分為開挖中構築一次支保與視需要在施工時進行二次覆工。坑道的「設計時各組成構件需單獨考量之機能」，包括「確保營運空間、確保自重與外力作用下之安全性」及「確保坑道安全性」。要確保具備所需機能，需在開挖後迅速進行施工，讓支保工與開挖面盡可能緊密接合或一體化，增加開挖面之安定性。有關坑道之施工，可參考「土木學會隧道標準示方書」(土木學會，2006)，充分考量開挖面特性、開挖方法及地層狀態後，採取適當的方式。

## 2.2.2 建設營運階段的工程障壁狀態評估

於建設營運階段，影響工程障壁狀態之要因，可分為設計施工要因以及工程障壁的周邊環境條件與外力條件等施工後的周邊環境條件要因兩種。因建設營運階段內包含兩種狀況，其施工條件與外力條件會有所不同，選擇影響要因時，可將建設營運階段的順序與方法繪製成展開圖，以推估建設營運對工程障壁狀態之影響，如圖 2.2.2-1 所示。對於水泥類材料組成的處置窖及低擴散層而言，水泥材料硬化的過程中，因水泥的水化熱、自生收縮、乾燥收縮及建設營運的載重等因素而產生裂縫，導致透水性及擴散性改變。此外，施工縫造成的不連續區域也會影響透水性及擴散性。當營運時間很長時，另需考量中性化的影響。至於膨潤土類材料組成的低透水層，因建設營運的載重會造成低透水層的壓縮變形，導致有效黏土密度變化，進而影響透水性及擴散性。

表 2.2.2-1 選出建設營運階段的影響要因

	人工障壁狀態的影響要因
設計與施工造成之要因	1.設計要因 • 水泥類材料：構件的形狀與尺寸、配比條件、材料品質 • 膨潤土類材料：材料品質 2.施工要因 • 水泥類材料：流動性混凝土的狀態、灌漿方法、養護方法



	• 膨潤土類材料：含水比調整、鋪設的均勻度、壓密方法
施工後的周邊環境造成之要因	工程障壁的環境條件(溫度、濕度)、外力條件(建設營運的載重)

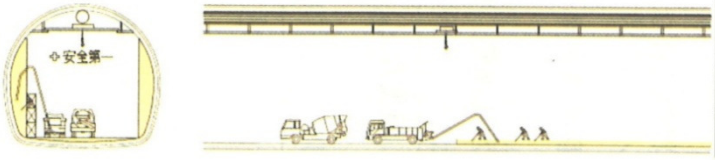
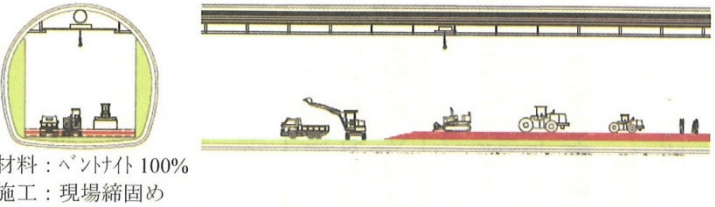
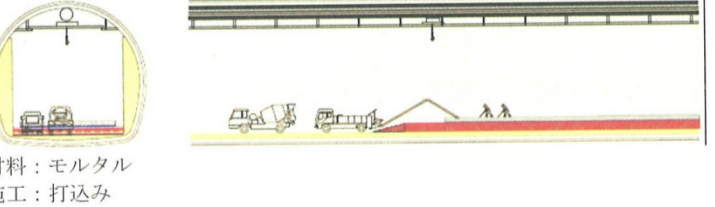
考量上述的性質狀態變化，選出工程障壁的影響要因與狀態，如表 2.2.2-2 所示。本章節主要檢討工程障壁的處置窖、低擴散層與低透水層等主要結構，但對於其他工程障壁的組成材料也須進行相同的檢討。有關建設營運階段的影響要因，可參考土木學會的「土木學會隧道標準示方書」，透過設計的觀點，於各種評估方法中挑出適用的方法。

表 2.2.2-2 建設營運階段的影響要因及其狀態假設

	影響要因		假設狀態
	設計與施工要因	施工後之環境條件要因	
處置窖	水泥水化熱		裂縫(硬化過程)
	自生收縮		裂縫(硬化過程)
	工作縫		存在不連續區域
		乾燥收縮、天車載重、廢棄物包件載重、填充材灌漿時的側壓、低透水層施工時的震動	裂縫(硬化過程)
低擴散層	水泥水化熱		裂縫(硬化過程)
	自生收縮		裂縫(硬化過程)
	工作縫		存在不連續區域
		乾燥收縮、天車載重、廢棄物包件載重、填充材灌漿時的側壓、低透水層施工時的震動	裂縫(硬化過程)
低透水層	材料品質的不均質性、施工的不均一性		有效黏土密度的分布
	工作縫(處置單元施工時)		存在不連續區域(處置單元施工時)
		坑內環境造成的吸濕與乾燥	產生裂縫
		混凝土灌漿(含有水分造成膨潤土膨潤)	有效黏土密度的分布
		天車載重、廢棄物包件載重	壓縮與變形造成的有效黏土密度變化
		回填產生之載重	壓縮與變形造成的有效黏土密度變化


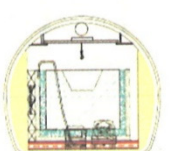




建設營運的順序與方法		工程障壁 組成材料	影響要因		假設狀態
			設計與施工要因	施工後的周邊環境 條件要因	
側部與 底部回 填					
底部低 透水層	 <p>材料：ペント付100% 施工：現場締め</p>	低透水層	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 材料品質的不均質性</li> <li>• 施工的不均一性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 坑內濕度造成膨潤土膨脹</li> </ul>	底部：有效黏土密度的分布
側部與 底部低 擴散層/ 處	 <p>材料：モルタル 施工：打込み</p>	低擴散層	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水泥水化熱</li> <li>• 混凝土的自生收縮與乾燥收縮</li> <li>• 工作縫</li> </ul>		底部：裂縫、不連續區域的存在
		低透水層		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 混凝土灌漿(含有水分)造成膨潤土膨潤</li> </ul>	底部：有效黏土密度的分布

置 窖					
--------	--	--	--	--	--

圖 2.2.2-1 建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(1/4)

建設營運的順序與方法		工程障壁 組成材料	影響要因		假設狀態
			設計與施工要因	施工後的周邊環境條件要因	
側部與底部 低擴散層	處置窖  材料：RC（鉄筋コンクリート） 施工：打込み	處置窖	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水泥水化熱</li> <li>• 混凝土的自生收縮與乾燥收縮</li> <li>• 工作縫</li> </ul>		側部/底部：裂縫 側部：不連續區域的存在
		低擴散層		• 處置窖的載重(施工階段的不均一載重)	底部：裂縫
		低透水層		• 處置窖的載重	底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變
測部 低擴散層/處置窖	處置窖  材料：モルタル 施工：打込み	處置窖		• 低擴散層的載重(施工階段的不均一載重)	側部/底部：裂縫
		低擴散層	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水泥水化熱</li> <li>• 工作縫</li> </ul>	• 混凝土的自生收縮與乾燥收縮	側部：裂縫、不連續區域的存在
		低透水層		• 低擴散層的載重	底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變

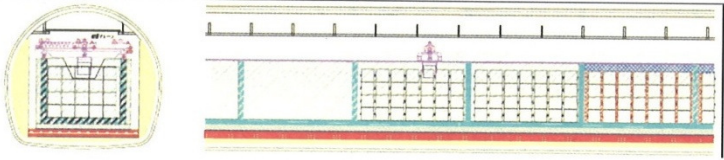
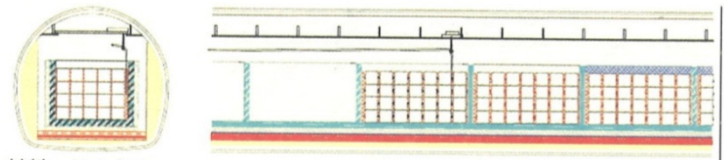
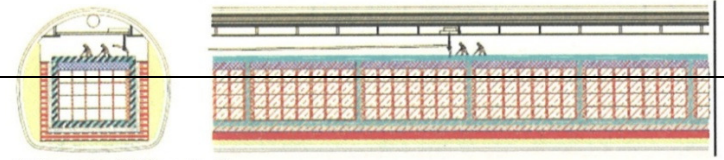
廢棄物包件堆置		處置窖		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 天車載重</li> <li>• 廢棄物包件載重(施工階段的不均一載重)</li> </ul>	側部/底部：裂縫
		低擴散層		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 天車載重</li> <li>• 廢棄物包件載重</li> </ul>	側部/底部：裂縫
		低透水層		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 天車載重</li> <li>• 廢棄物包件載重</li> </ul>	底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變

圖 2.2.2-1 建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(2/4)

建設營運的順序與方法		工程障壁組成材料	影響要因		假設狀態
			設計與施工要因	施工後的周邊環境條件要因	
窖內空隙填充	 材料：モルタル 施工：打込み	處置窖		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 填充材的載重(施工階段的不均一載重)</li> </ul>	側部/底部：裂縫
		低擴散層		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 填充材的載重</li> </ul>	側部/底部：裂縫
		低透水層		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 填充材的載重</li> </ul>	底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變
上部處置	 材料：RC (鉄筋コンクリート)	處置窖	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水泥水化熱</li> <li>• 混凝土的自生收縮與乾燥收縮</li> <li>• 工作縫</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 上部處置窖的載重(施工階段的不均一載重)</li> </ul>	上部/底部：裂縫 上部：不連續區域的存在

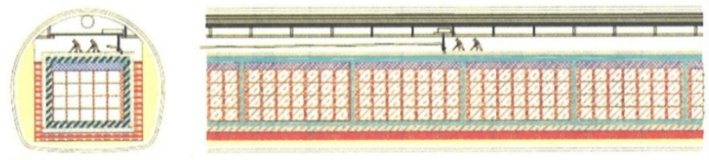
窖/ 上部 擴散層	窖		低擴散層		• 上部處置窖的載重	底部：裂縫
			低透水層		• 上部處置窖的載重	底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變
上部擴散層	上部擴散層	 <p>材料：モルタル 施工：打込み</p>	處置窖		• 上部低擴散層的載重(施工階段的不均一載重)	上部/底部：裂縫
			低擴散層	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水泥水化熱</li> <li>• 混凝土的自生收縮與乾燥收縮</li> <li>• 工作縫</li> </ul>	• 上部低擴散層的載重	上部/底部：裂縫 上部：不連續區域的存在
			低透水層		• 上部低擴散層的載重	底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變

圖 2.2.2-1 建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(3/4)

建設營運的順序與方法		工程障壁組成材料	影響要因		假設狀態
			設計與施工要因	施工後的周邊環境條件要因	
上部與側部低透水層	 <p>材料：ヘント付100% 施工：現場締固め or プック or 吹付け</p>	處置窖		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 上部低透水層的載重(施工階段的不均一載重)</li> <li>• 低透水層施工時的震動</li> </ul>	上部/側部/底部：裂縫

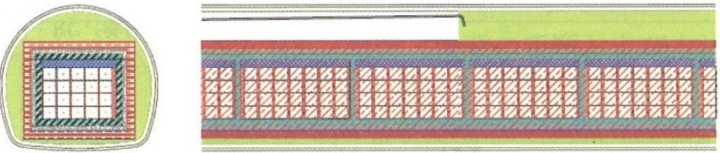
		低擴散層		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 上部低透水層的載重</li> <li>• 低透水層施工時的震動</li> </ul>	上部/側部/底部：裂縫
		低透水層	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 材料品質的不均質性</li> <li>• 施工的不均一性</li> <li>• 工作縫(處置單元施工時)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 坑內環境造成的吸濕與乾燥</li> <li>• 上部低透水層的載重</li> </ul>	上部/側部：有效黏土密度的分布、不連續區域的存在(處置單元施工時) 底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變
上部回填		處置窖		• 回填材的載重(施工階段的不均一載重)	上部/底部：裂縫
		低擴散層		• 回填材的載重	上部/底部：裂縫
		低透水層		• 回填材的載重	上部/側部/底部：壓縮與變形造成有效黏土密度改變

圖 2.2.2-1 建設營運的順序與方法及各階段之影響要因與工程障壁狀態(4/4)



### 2.2.2.1 水泥類材料的裂縫評估

#### 一、裂縫對工程障壁的影響

由表 2.2.2-2 可知，水泥類材料組成的處置窖與低擴散層，在建設營運階段會因硬化過程產生的水泥水化熱與自生收縮以及硬化後的乾燥收縮、天車載重、廢棄物包件載重、填充材灌漿時的側壓及低擴散層施工時的載重等因素，使工程障壁產生裂縫。處置窖與低擴散層的裂縫，不但會降低低擴散性能，也會增加建設營運階段的輻射暴露機率，故需預測工程障壁的狀態。

#### 二、評估方法

建設營運階段對裂縫的評估流程，如圖 2.2.2.1-1 所示。硬化過程中產生裂縫(水化熱、自生收縮產生的裂縫)的可能性，可參考「土木學會混凝土標準示方書-[設計編]」(土木學會，2007)中的「初期裂縫的檢查」，作為預測與評估之依據。而裂縫的特性(幅度、間隔)，可利用統計法、CP 裂縫幅度法及 FEM 等評估方法來進行預測與評估。此外，亦可在實際建設環境的坑道內，進行大規模的施工實驗，或是利用解析的評估方法，提高硬化過程的裂縫預測與評估之精度。

水泥硬化後可能因天車載重、廢棄物包件載重、填充材灌漿時的側壓等載重作用而產生裂縫，對於鋼筋混凝土材料組成的處置窖，可參考「土木學會混凝土標準示方書-[設計編]」(土木學會，2007)中的彎矩裂縫幅度計算式，以預測最大彎矩裂縫幅度。另外，低擴散層在經過長期的劣化影響下，仍需保有低擴散性的機能要求，故可採用無筋水泥類材料，以避免鋼筋腐蝕膨脹對低擴散層造成破壞。評估無筋材料的裂縫發生程度，可利用等價連續體解析、不連續體解析等方法，並根據推估的變形量與載重，選擇適用的模型。例如基

質部歪斜軟化的材料，可使用可分析拉力軟化特性的非線形解析。

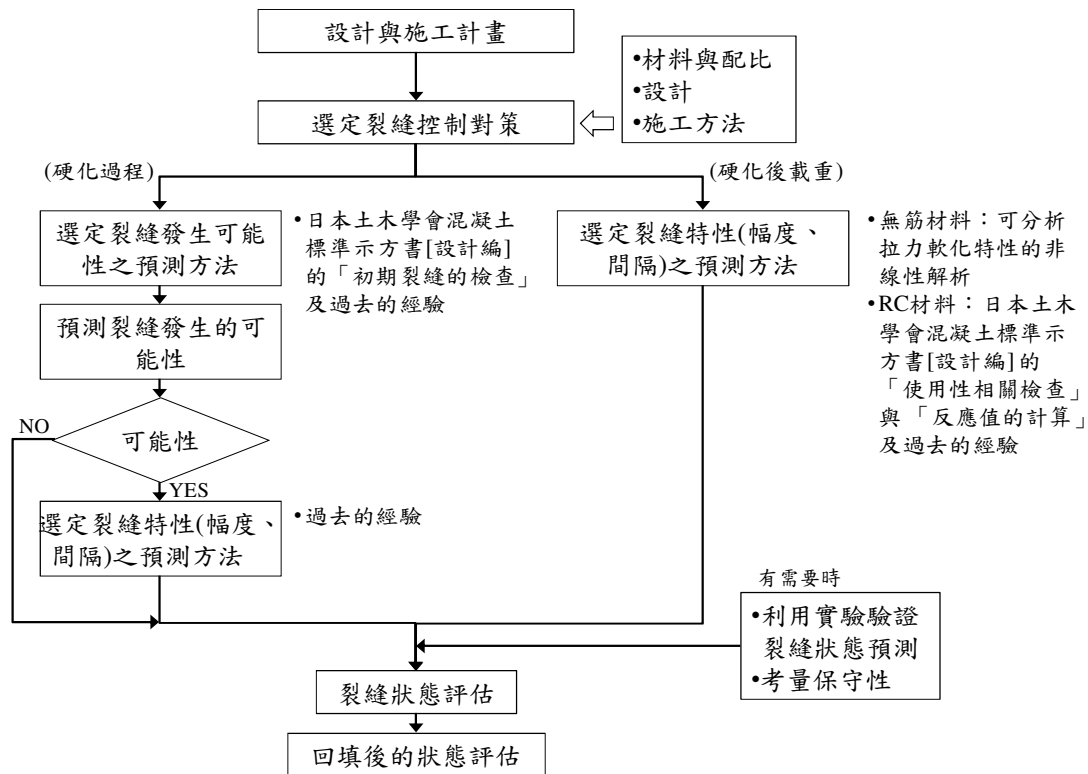


圖 2.2.2.1-1 建設營運階段時的水泥類材料裂縫評估流程

### 三、現況了解與今後發展

硬化過程中的裂縫，主要是因極初期的水泥水化熱、自生收縮等因素所造成的裂縫，有關此部分的評估方法已有相當多研究及一般土木構造物的施工實際經驗可供參考。對於裂縫發生之可能性，其預測方法可參考「混凝土標準示方書」中建議之模型、輸入參數、邊界條件的不確定性等評估方法。但因「混凝土標準示方書」主要是以鋼筋混凝土構造物為對象，而低擴散層是由無筋材料組成，用「混凝土標準示方書」建議之方法評估裂縫產生的可能性，其預測的不確定性較高，故可藉由模擬低擴散層的實際規模試體確認裂縫產生的

狀況，或參考其他解析評估方法，以提升無筋材料產生裂縫可能性之預測可信度。對於裂縫特性(幅度、間隔)的預測評估，可參考壁狀鋼筋混凝土材料的實際案例。

鋼筋混凝土材料硬化後產生的裂縫，可參考「混凝土標準示方書」中的彎矩裂縫幅度計算式，評估裂縫幅度與間隔。但水泥類材料組成的設施，包括鋼筋混凝土材料的處置窖與無筋水泥材料的低擴散層，兩者是緊密接合的型態。因此必須依據結合型態，選擇適合的彎矩裂縫幅度計算式或有限元素分析方法。無筋材料的低擴散層可用具有拉力軟化特性的非線形解析，但因拉力軟化構成的模型精度不足，加上拉力軟化的開始應力、破壞能量等資料及數據不足等不確定性，故需藉由試驗驗證其適用性，以提升解析與評估精度。

此外，水泥水化熱、自生收縮等行為，在硬化過程中會產生部分殘留應力，但一般設計時往往僅針對硬化後的外加載重進行應力評估，對於硬化過程中的實際殘留應力之資料及取得方法較為缺乏。另外，側邊低透水層到上部回填施工完成為止，因換氣會影響乾燥收縮，有裂縫的產生與延伸的可能性。

### 2.2.2.2 膨潤土類材料的有效黏土密度評估

#### 一、有效黏土密度對工程障壁的影響

由表 2.2.2-2 可知，在建設營運階段，膨潤土類材料組成的低透水層因為材料品質的不均勻性、施工的不均一性、坑內環境造成的吸濕與乾燥、混凝土灌漿時的水分造成膨潤等影響要因，使壓密過的低透水層之內層，其有效黏土密度的分布產生改變。此外，天車載重、廢棄物包件載重、回填的

載重等因素，亦會使低透水層壓縮與變形，導致有效黏土密度變化。

膨潤壓對膨潤土的透水係數、力學特性及再冠水後之狀態評估的影響較大，而膨潤壓又與有效黏土密度有直接相關性。故在建設營運階段評估低透水層狀態時，也需掌握有效黏土密度的分布與變化。

## 二、評估方法

建設營運階段時，低透水層有效黏土密度的評估流程，如圖 2.2.2.2-1 所示。材料品質的不均勻性、施工的不均一性、坑內環境造成的吸濕與乾燥、混凝土灌漿時的水分造成膨潤等因素，將改變有效黏土密度的分布，可利用施工試驗的結果與其他相關資料進行評估與預測。此外，低透水層受到天車載重、廢棄物包件載重、回填載重等作用影響產生壓縮與變形，進而改變有效黏土密度，此可利用非線形解析進行評估。

## 三、現況了解與今後發展

低透水層有效黏土密度的分布狀況，大部份是在施工時產生改變。依據以往的現場壓密工法經驗，利用夯壓施工的標準偏差為  $0.08 \text{ Mg/m}^3$  (平均  $1.64 \text{ Mg/m}^3$ )，大型滾壓機的標準偏差為  $0.05 \text{ Mg/m}^3$  (平均  $1.63 \text{ Mg/m}^3$ )，亦即有效黏土密度會產生上述不同程度的分布。而坑內施工造成的吸濕與乾燥，則可藉由坑內環境的膨潤土塊暴露試驗取得相關資訊，若設定好適當的含水比則不會有太大的影響。

雖然有效黏土密度與透水係數間有強烈之相關性，但並非對等的關係，而是有一定程度的不確定性存在。有相關研究指出，若從統計學的觀點來看，此不確定性為常態分布。有效黏土密度的不均一性對低透水層的透水性影響，可利用地盤統計學的方法進行檢討。例如以夯壓的膨潤土層為對

象，若膨潤土層整體的透水係數為對數透水係數平均值之定值，則地盤內的有效黏土密度分布不容易受到影響。此外，同樣以夯壓的膨潤土層為對象進行模擬，也得到相同的結果。此外，工作縫與膨潤土塊工法產生的空隙，於飽和膨潤後對透水性幾乎沒有影響。期望今後陸續累積不同種類膨潤土的使用經驗、原材料的礦物性質變化、施工時與施工後的有效黏土密度分布等評估的相關資訊。

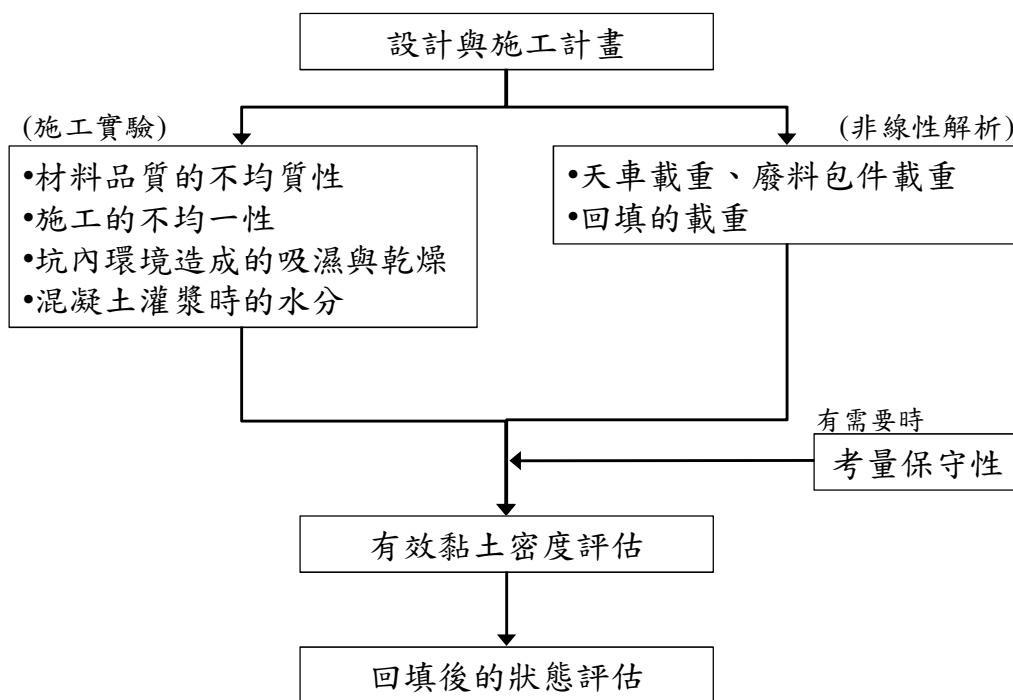


圖 2.2.2.2-1 建設營運階段時，膨潤土類材料的有效黏土密度評估  
流程

### 2.2.3 回填後的工程障壁狀態評估

評估回填後之工程障壁狀態評估時，蒐集影響要因造成的現象及影響要因間的交互作用，評估其可能對工程障壁性能產生之影響。由於回填後階段與回填前的建設營運階段在時間尺度上為



連續進行，故需考量原本在建設營運階段選出之影響要因造成之狀態變化。此外，依據建設營運階段的品質管理與狀態評估結果，可排除某些不具影響性的影響要因。綜上所述，可挑出對回填後有長期影響之要因並加以彙整。

圖 2.2.3-1 是經由推估各階段的影響要因後，彙整出之工程障壁狀態。根據工程障壁的使用材料的不同，可推估水泥類材料與膨潤土類材料於再冠水時的特性變化。水泥類材料組成的處置窖及低擴散層，受到鋼筋腐蝕、外力條件改變及水泥水化物溶出等影響，會有新裂縫生成、裂縫擴張或是孔隙率改變等現象發生。而膨潤土類材料組成的低透水層，受到與水接觸產生之膨潤壓或交換性陽離子變化(Ca 型化)等影響，使透水性增加或有效黏土密度改變。這些水泥類材料或膨潤土類材料的狀態變化，都會影響工程障壁之透水性與擴散性。故考量工程障壁的相關特性變化後，針對水泥類材料與膨潤土類材料之透水性與擴散性，選出影響要因，並彙整如表 2.2.3-1 及表 2.2.3-2 所示。此外，各影響要因間的交互作用，如圖 2.2.3-2 所示。

回填後的長期狀態評估無法以數值解析作為主要分析方法，較適用以性能評估為目的之模型評估方法。而在建設營運階段時，以影響要因為對象的長期評估，可採用延長時間後的外插法或是複數的評估方法。故可依照不同階段選擇合適的評估方法。此外，亦可參考「TRU 廢棄物處份技術檢討書」(電事連·JNC, 2005)等案例，找出室內試驗、現場試驗、數值分析、天然類比等各種評估方法的適用範圍與信賴性。判斷各階段工程障壁性能評估的可能性及確實性。隨著評估時間的增加，適用方法與相關資料之品質與數量會有階段性的變化。故由資料彙整搭配現階段可行之技術能力，即可表達工程障壁的狀態設定與評估期間的關聯性。



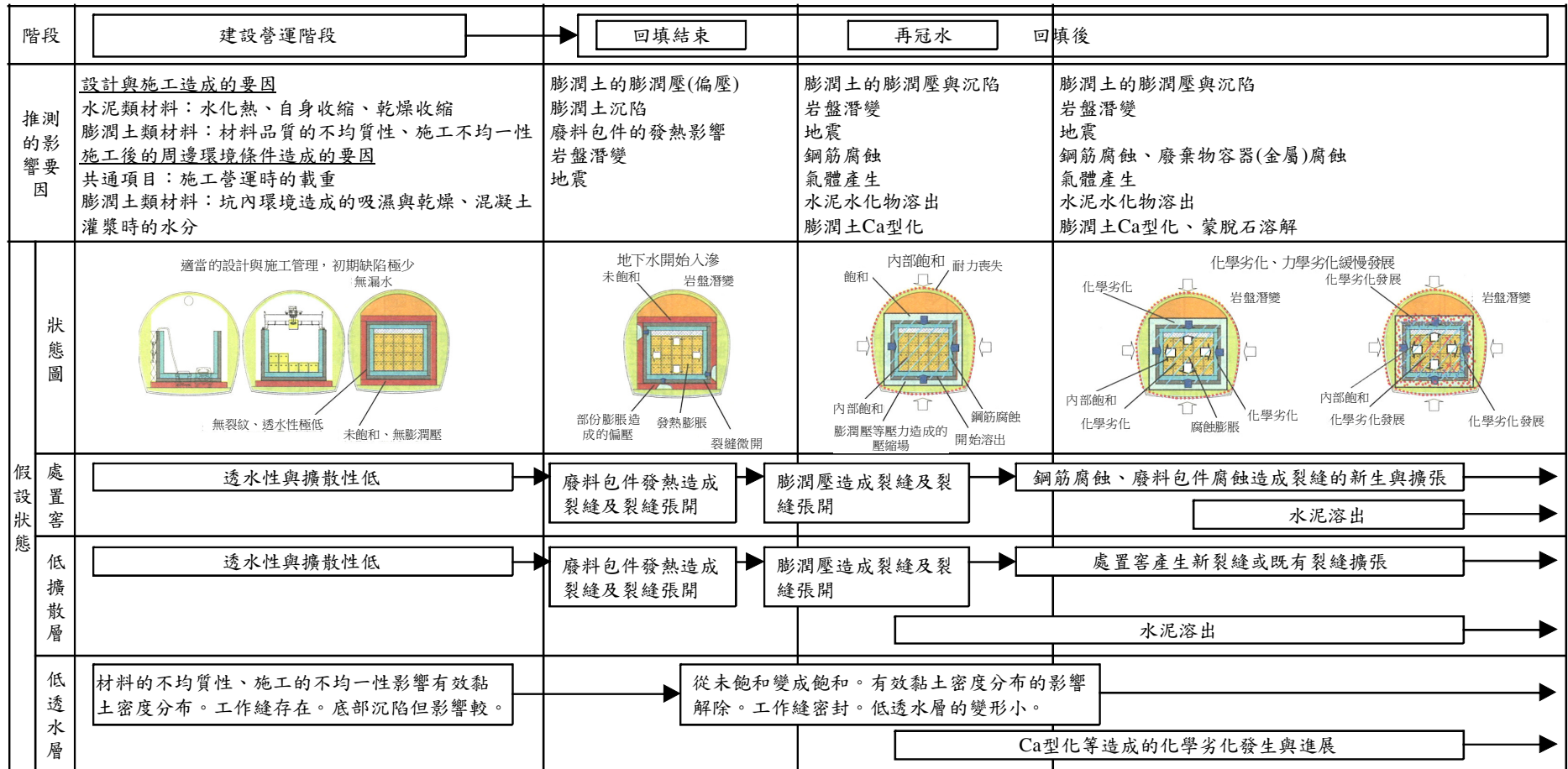


圖 2.2.3-1 回填後的影響要因及狀態預測

表 2.2.3-1 水泥類材料(處置窖、低擴散層)的透水性及擴散性的影響  
要因

影響要因		影響工程障壁狀態之機制		
初期裂縫擴張及新裂縫產生	物理影響	膨潤土的膨脹壓		膨脹壓(包括膨脹過程的側壓)使處置窖及低擴散層產生裂縫
		膨潤土沉陷		低透水層底部不均勻沉陷造成水泥類材料位移，使處置窖及低擴散層產生裂縫
		鋼筋腐蝕		鋼筋腐蝕膨脹使處置窖及低擴散層產生裂縫
		金屬容器腐蝕		金屬容器腐蝕膨脹使處置窖及低擴散層產生裂縫
				金屬容器腐蝕破損使處置窖及低擴散層產生裂縫
		氣體		鋼筋、廢棄物容器腐蝕產生的氣體壓力，使處置窖及低擴散層產生裂縫
		岩盤潛變		岩盤潛變使處置窖及低擴散層產生裂縫
	地震		地震力使處置窖及低擴散層產生裂縫	
	化學影響	膨脹性礦物破壞基質材料	周邊高硫酸離子濃度的地下水	地下水含有高濃度硫酸離子時，膨脹性的鈣礬石促使裂縫產生
			廢棄物中的可溶性鹽類	廢棄物內含有硫酸鹽時，膨脹性的鈣礬石促使裂縫產生
鹼骨材反應		鹼骨材反應使處置窖及低擴散層產生裂縫		
裂縫部分產生次生礦物		地下水與水泥溶出成份反應生成次生礦物，阻塞裂縫		
孔隙變化(孔隙率改變)	化學影響	水泥水化物溶出、產生次生礦物		地下水使水泥水化物溶出，溶出之成分與地下水反應生成次生礦物，造成孔隙改變

表 2.2.3-2 膨潤土類材料(低透水層)的透水性及擴散性的影響要因

影響要因			影響工程障壁狀態之機制	
膨潤土特性改變	化學影響	交換性陽離子變化(鈣型化)	水泥類材料的孔隙水中具有高濃度的鈣離子，促使鈣型化發生	
		高離子強度聚合	周邊地下水鹽水化	鹽分累積與孔隙特性(孔隙率、孔隙構造)改變，使膨脹性能降低
			廢棄物中的硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽類	鹽分累積與孔隙特性(孔隙率、孔隙構造)改變，使膨脹性能降低
有效黏土密度改變	物理影響	廢棄物金屬容器腐蝕	廢棄物金屬容器腐蝕膨脹壓縮到低透水層，使密度增加 廢棄物金屬容器腐蝕塌陷使低透水層的膨脹密度降低	
		氣體	廢棄物金屬容器腐蝕產生氣體，氣體壓力壓縮低透水層，使密度增加	
		膨潤土沉陷	低透水層底部壓縮變形使低透水層上部的密度降低	
		岩盤潛變	岩盤潛變使低透水層厚度變小、密度增加	
		地震	地震力造成低透水層沉陷，使密度產生變化	
		膨潤土流失至鄰近構造空隙	膨潤土流失到鄰近混凝土構造之裂縫間隙，造成密度降低	
	化學影響	蒙脫石溶解、副成分礦物溶解、次生礦物產生	水泥類材料的高鹼性孔隙水使構成膨潤土的成分溶解，造成密度降低。溶解出的成分與地下水反應生成次生礦物沉澱。	
形成短路徑	物理影響	氣體	廢棄物腐蝕產生的氣體壓力破壞低透水層，形成密度低的區域。	
		膨潤土塊的连接空隙	膨潤土塊間的连接縫隙容易產生高透水性，但對整個膨潤土層的透水性影響較小	

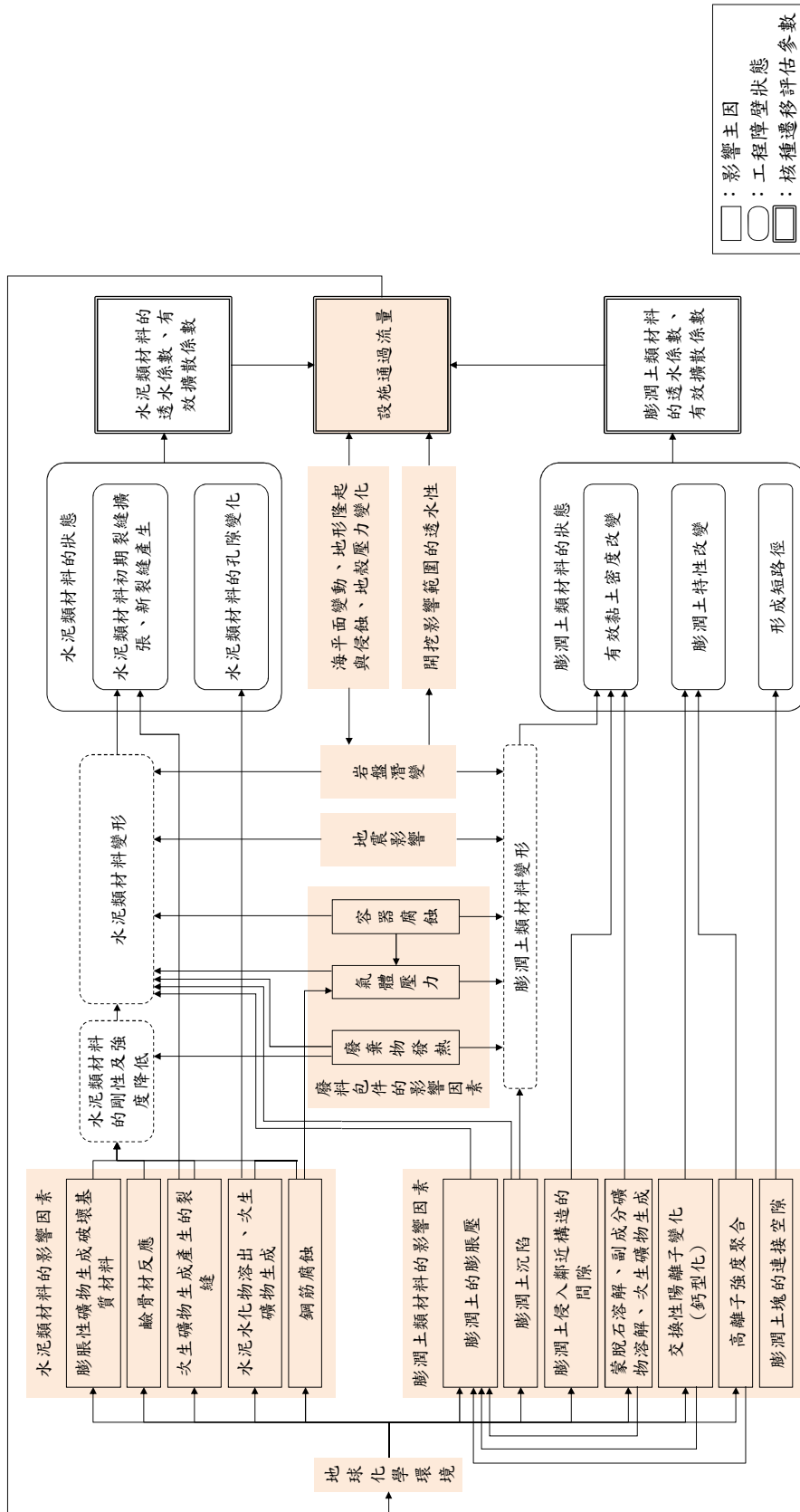


圖 2.2.3-2 回填後的工程障壁狀態及影響要因

### 2.2.3.1 膨潤土類材料的膨潤壓評估

#### 一、膨潤壓對工程障壁的影響

膨潤土的主要礦物為蒙脫石，蒙脫石為厚度約 1nm 的薄片狀礦物，受到結晶間的互力作用會產生膨潤壓。層間粒子的相互作用可以擴散二重層模型或 DLVO 理論評估。擴散二重層模型是根據層間水分、陽離子擴散力及結晶表面負電荷間的引力平衡，使層間離子形成擴散二重層。擴散二重層內的離子濃度高於擴散二重層外的離子濃度，因而形成滲透力，此滲透力即為對外部產生壓力(膨潤壓)的膨潤力。

與低透水層相鄰的低擴散層與回填材，膨潤壓會對其產生外力作用，此外力再傳遞至岩盤(或支保工)、處置窖或填充材。此外，在地下水入滲過程中，因水的不均勻入侵，可能產生局部的膨潤壓，局部膨潤壓作用在處置窖、低擴散層等水泥類材料上會使其產生裂縫，導致透水係數或擴散係數增加。

膨潤土膨潤壓的大小，受到膨潤土的有效黏土密度、層間離子濃度、層間離子種類、地下水組成、溫度及飽和度等影響。彙整有效黏土密度與膨潤壓之試驗結果，如圖 2.2.3.1-1，膨潤壓會隨有效黏土密度增加而變大。一般而言，膨潤土的膨潤壓會受到 Ca 型化的影響，但從圖 2.2.3.1-1 可知，當有效黏土密度大於  $1.4 \text{ Mg/m}^3$  時，Ca 型化膨潤土與未 Ca 型化的 Na 型膨潤土，膨潤壓並沒有太大差異。此外，即使膨潤土的名稱相同，但因出產年份、採取時間及採取場所不同，產生蒙脫石含有率、陽離子交換容量及交換性陽離子量的差異，使膨潤土的膨潤性跟著改變。此外，因試體的製作方法與尺寸的不同，亦會影響膨潤壓。



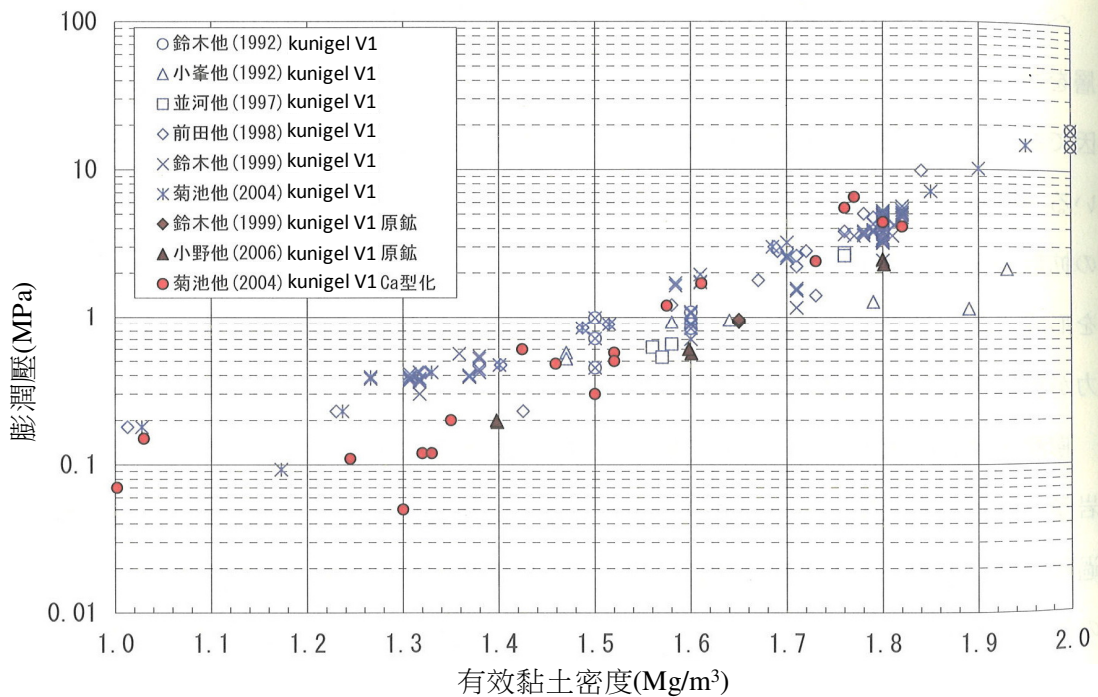


圖 2.2.3.1-1 kunigel V1 與 Ca 型化膨潤土的膨潤壓比較(蒸餾水)

因此，以膨潤土的有效黏土密度推估膨潤壓時，須先以同一名稱之膨潤土為基礎，依採取時期、採取場所考量蒙脫石含有率、陽離子交換容量及交換性陽離子量的差異，並適當的將周圍的化學環境條件及其限制條件、施工方法等反應至試驗結果，從試驗結果獲得有效黏土密度與膨潤壓之關係。

以人工海水對膨潤土進行相關試驗，試驗結果如圖 2.2.3.1-2 所示。地下水中離子濃度增加，會造成膨潤土的膨潤壓下降。但當有效黏土密度大於  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  時，膨潤壓則無大幅降低的趨勢。



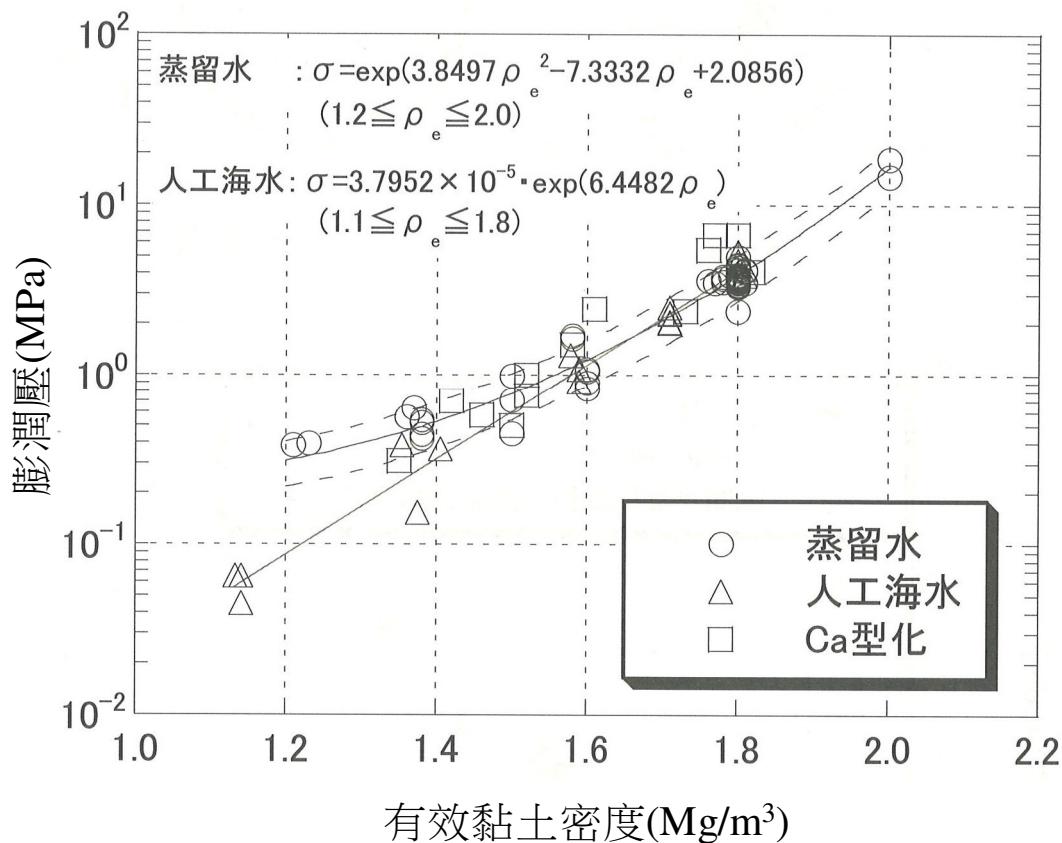


圖 2.2.3.1-2 人工海水的膨潤壓量測

當膨潤土有空隙時，空隙被水填充後的膨潤壓與有效黏土密度之關係，如圖 2.2.3.1-3 所示。若空隙被水填充後的平均密度相同，則不論有無空隙或空隙發生位置不同，皆會有相同的膨潤壓。

## 二、評估方法

當地下水入滲至工程障壁時，膨潤土的膨潤壓會對工程障壁產生作用力，此為影響回填後工程障壁狀態的原因之一。若要預測膨潤壓作用位置及其隨時間的變化，以及評估膨潤土的膨潤對工程障壁的狀態影響，須進行下列檢討。

1. 評估膨潤土的材料特性及其在飽合與未飽和狀態下的膨潤壓。(以室內試驗為基礎進行模型化)

2. 利用數值解析評估工程障壁的入滲過程及膨潤壓的發生行為。

有關飽和與未飽和狀態下的膨潤壓評估式與解析程式，整理如表 2.2.3.1-1 所示。

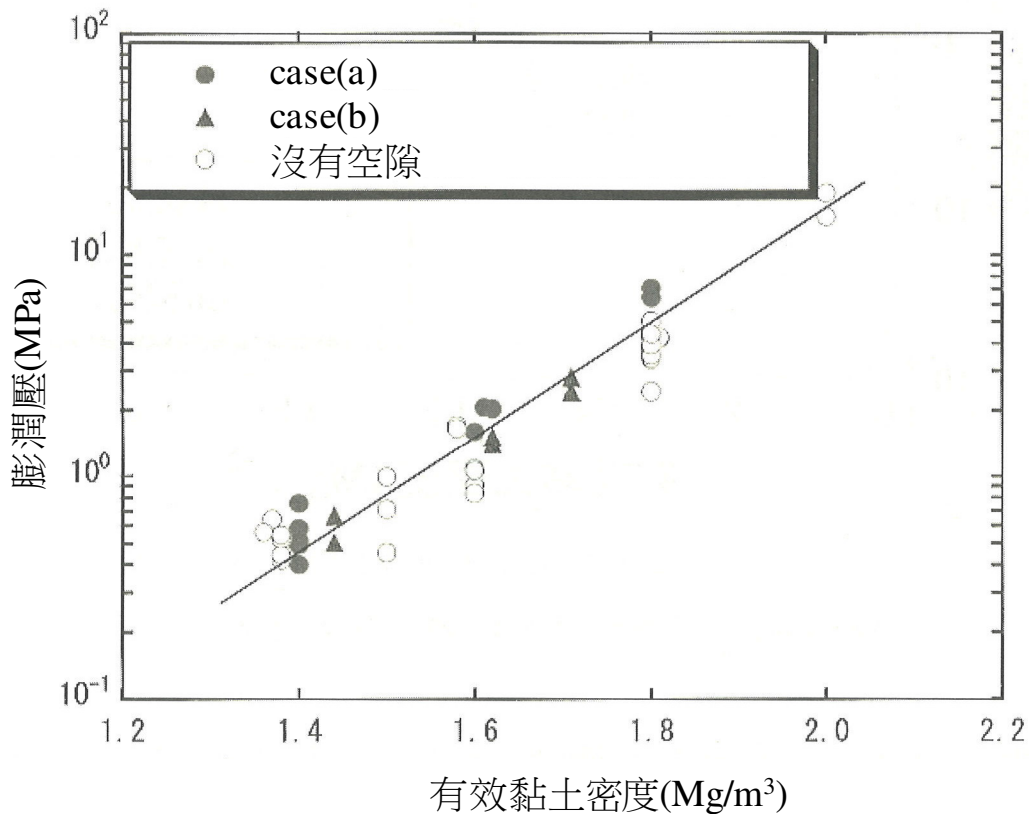
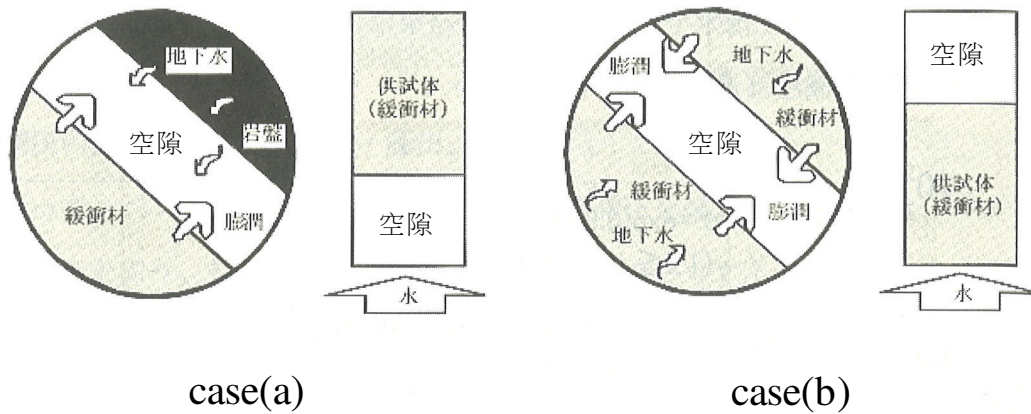


圖 2.2.3.1-3 空隙被水填充後的膨潤壓與有效黏土密度之關係

表 2.2.3.1-1 飽和與未飽和狀態下的膨潤壓評估式與解析程式

模型/程式名稱	概要	適用範圍
小的膨潤評估式 (Komine · Ogata , 2003) 、(Komine · Ogata , 2004)	依據 Gouy-Chapman 的擴散二重層及 van der Waals 力的理論，將最大膨潤率與膨潤土的膨潤體積應變關係式以及膨潤體積應變與兩黏土粒子間距離的關係式導入模型。還要考量膨潤土的配比及膨潤土中含有之陽離子種類與陽離子組成。	可精確算出飽和膨潤土之膨潤壓與密度、孔隙水離子濃度間的關係。
上等人在未飽和域的膨潤評估式 ( 上等 , 2004)	將飽和過程中及飽和後的膨潤壓與飽合度間的關係模型化。飽和膨潤壓可由化學潛勢函數得知。	可計算飽合度的變化與膨潤壓的關係。依據應力-入滲耦合程式，解析地下水的入滲與膨潤壓的發生。因不飽和過程中的膨潤壓試驗較缺乏相關數據，故有其不確定性。
熱-水-應力耦合 THAMES (Ohnishi 等 , 1985)	廢棄物包件的放熱、地下水侵入周邊岩盤及地下水侵入等現象，造成膨潤土類材料產生膨潤壓、周邊岩盤應力變化等「熱-水-應力耦合」。耦合現象是依據動量守 定、水的質量守 定律、能量守 定律等物理量守 定律，將變位、全水頭、溫度等未知量進行模型化。	熱-水-應力的完全耦合模式。但溫度、水份及水壓等輸入參數的研究，及輸入參數對力學相關性的研究，仍存有不確定性。

有關上述第 1 點提到之飽和膨潤壓，可由試驗數據資料取得(如圖 2.2.3.1-1、圖 2.2.3.1-2)，或是利用 Gouy-Chapman 的擴散二重層理論及化學潛勢理論為基礎，提出精度較加之重現模型。另一方面，未飽和狀態的膨潤壓，則可利用蒸氣壓法的實驗結果與入滲試驗的實驗結果，找出試體含水比與膨潤壓的關係，如圖 2.2.3.1-4 所示。入滲試驗使用的試體，初期含水比為 10%，於測量膨潤壓後進行入滲試驗。此外，若 Kunigel V1 的土壤密度為  $2.70 \text{ Mg/m}^3$ 、有效黏土密度為  $1.80 \text{ Mg/m}^3$  時，飽合度 80%及 100%所對之含水比分別為 14.8%及 18.5%。由圖 2.2.3.1-4 可知，膨潤壓有隨著含水增

加而變大的趨勢，但若僅就入滲試驗的量測結果來看，接近飽和的含水比時，則含水比的變化對膨潤壓的影響不大。

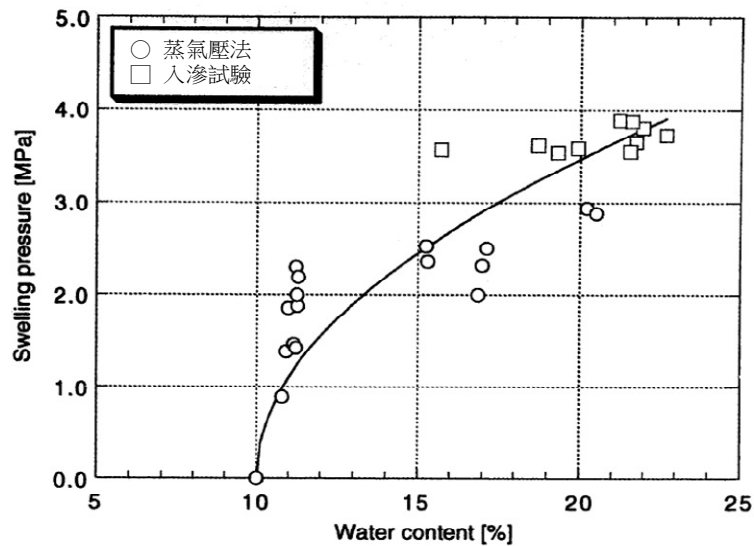


圖 2.2.3.1-4 膨潤壓與含水比的關係

有關上述第 2 點提到之回填至再冠水階段的膨潤土膨潤過程，是飽和/未飽和之滲流與應力的耦合問題，可採用應力-入滲耦合解析。針對膨潤土的膨潤壓所建構的熱-水-應力耦合模型，主要是參考高放射性廢棄物處置為評估緩衝材的飽和時間與膨潤壓所開發出的模型。解析模型的驗證可參考 DECOVALEX 與 VALUCLAY 等國際合作計畫，檢討其適用性。此外，熱-水-應力耦合解析亦可參考 Grimasel 地下研究所之工程障壁試驗解析，如圖 2.2.3.1-5 所示。

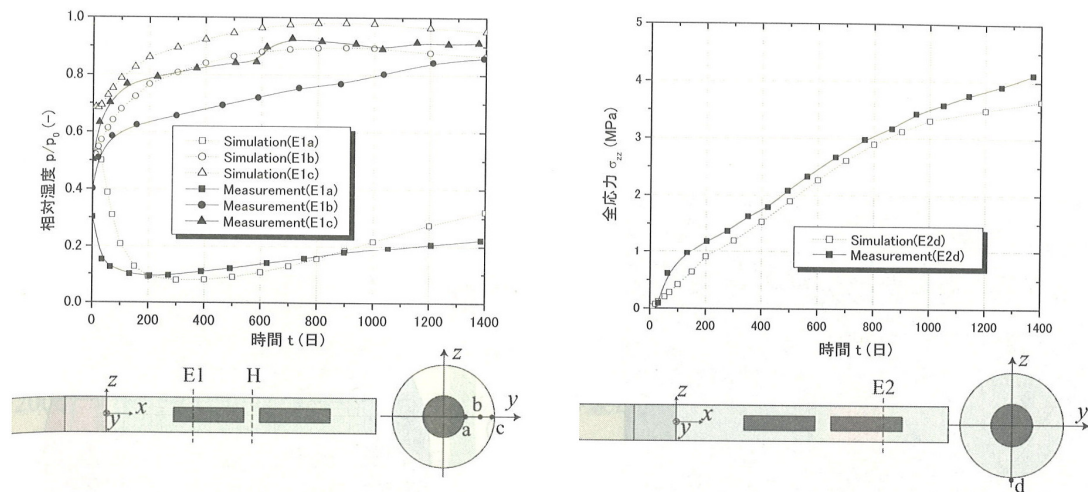


圖 2.2.3.1-5 Grimasel 地下研究所的緩衝材試驗及熱-水-應力耦合解析

工程障壁的入滲過程與飽和的檢討，可以氣液二相流解析或是飽和/未飽和滲流解析進行評估。並以此評估結果為基礎，進行膨潤壓作用下之力學解析或應力-入滲耦合解析，以評估工程障壁的力學狀態。圖 2.2.3.1-6 是以處置設施為對象，進行應力-入滲耦合解析之案例。圖 2.2.3.1-6(a)的解析模型是以處置設施周邊 50m×50m 的區域為對象，模型的組成由外到內分別為岩盤、外側水泥層、膨潤土層、內側水泥層。當參數研究是以岩盤及外側水泥層的強度為對象時，改變岩盤及外側水泥層的強度，以分析不同狀況下的變位與應力分布，如圖 2.2.3.1-6(b)~(d)所示。圖中的解析結果是將岩盤與外側水泥層的強度設定在最低的情況時，工程障壁內的最大變位值為 10mm 左右，膨潤土內側的水泥層(低擴散層)仍可維持其壓縮場。此外，圖 2.2.3.1-6 的結果是岩盤到外側水泥層皆有相同的地下水入滲案例。若以同樣的方式，計算外側水泥層有部分地下水入滲時，可得到膨潤土內側仍可維持壓縮場之結果。



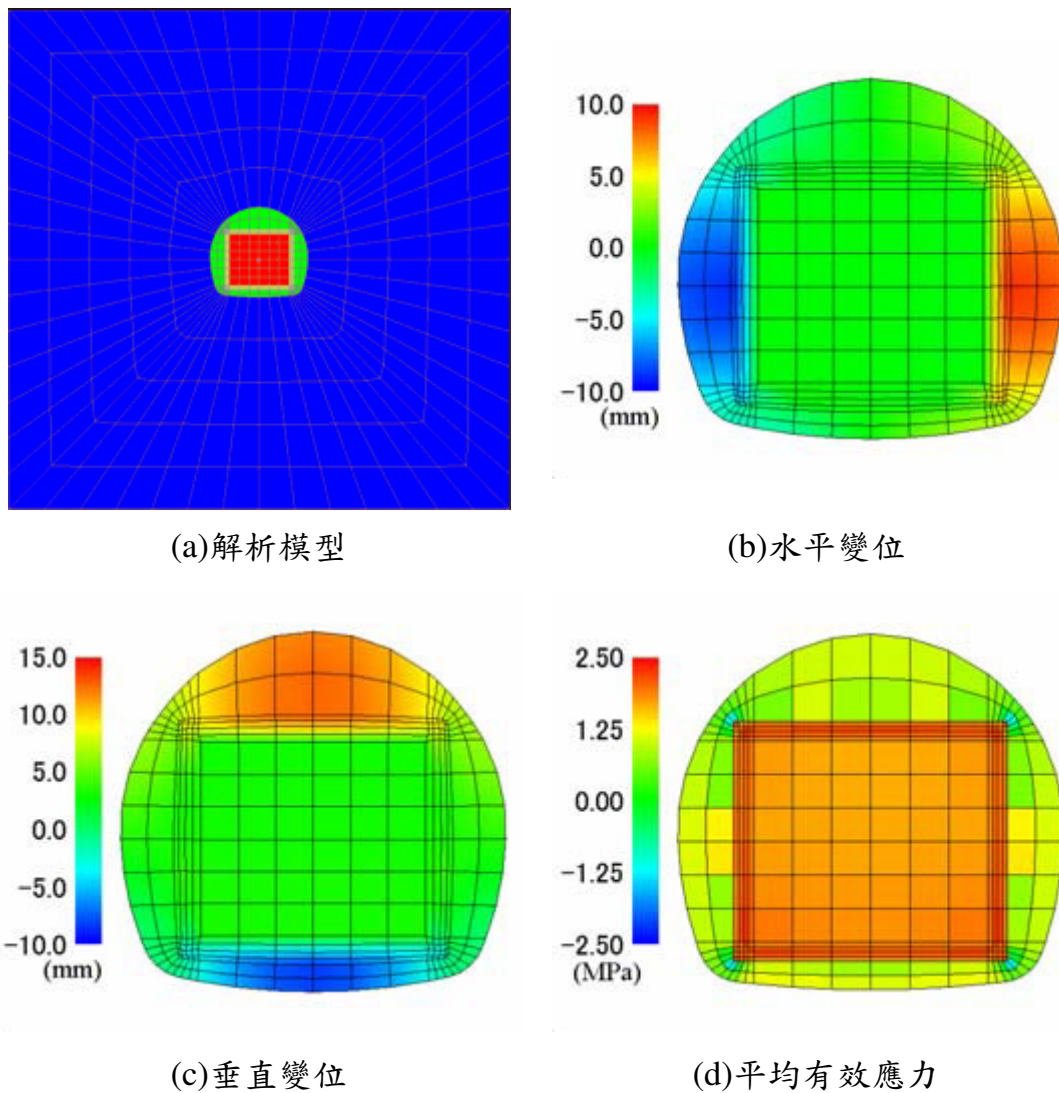


圖 2.2.3.1-6 處置設施的應力-入滲耦合解析案例

### 三、現況 解與今後發展

回填結束後，工程障壁周邊有地下水入侵，膨潤土膨潤產生膨潤壓。通常在進行一般檢討時，將此膨潤壓視為再冠水後的穩態膨潤壓。但因處置系統規模甚大，初期因水的不均一入侵而造成局部的膨潤壓，故需評估膨潤土從再冠水開始到飽和期間的膨潤壓，其隨時間與空間的演變，並於構造物設計時，須考量偏壓之作用。此外，就長期評估而言，可預想膨潤土會因化學變質、膨潤土流出造成密度降低等因素，使膨潤壓亦有長期的變化。另一方面，膨潤壓可由有效



蒙脫石密度推估，雖然發生蒙脫石溶解產生次生礦物等變質及密度降低的現象，但若利用 下的膨潤土密度，仍可以續評估膨潤壓。瑞典 SKB 的安全評估報告亦使用此方法。

### 2.2.3.2 膨潤土類材料沉陷的評估

#### 一、膨潤土類材料沉陷對工程障壁的影響

膨潤土類材料組成的底部低透水層，在建設營運階段，會受到低擴散層與處置窖設置、廢棄物包件定置、填充材填充、側邊及上部低透水層設置、回填材設置等不同的上加載重作用。在封閉後階段，仍會受到工程障壁自重、岩盤潛變產生的地壓、氣體壓力、廢棄物容器(金屬)的腐蝕膨脹壓等壓力作用。此外，膨潤土類材料因地下水入侵而產生膨潤，特別是上部低透水層的膨潤壓，會透過工程障壁對底部透水層產生壓縮力作用。

低透水層使用的膨潤土類材料，其特性幾乎與土壤類材料相同，當受到短期或長期的載重作用時，會產生壓縮或剪力變形，而長期的載重更會產生壓密或潛變現象。故施工的不均一性及上加載重的條件不同，會使膨潤土材料產生不均勻沉陷，處置窖及低擴散層也會因此產生裂縫，若要維持低透水層的低透水性，則須確保材料有足夠的厚度與有效黏土密度。

#### 二、評估方法

評估膨潤土類材料的沉陷，可以 2.2.3.1 節為基礎，並利用可處理長期壓密沉陷與潛變問題的解析方法。以往在工程地質學中用過之評估方法，彙整如表 2.2.3.2-1 所列，若要採用表中提到之模型進行數值解析時，模型各類輸入參數可

參考實驗數據進行設定。為了解相關解析方法的適用性，可將其與試驗結果(例如遠心模型試驗)相互比較與驗證。

表 2.2.3.2-1 膨潤土類材料沉陷之評估方法

模型名稱	概要	適用範圍
關口、太田模型	將可表現黏性土壤的壓密特性、剪力特性及膨脹特性的 Cam-Clay 型彈塑性構成模型，擴大成可表現土壤粒子構的自體潛變模型，亦可說明彈塑性構成模型的時間依賴性。	適用於正常的壓密黏土地盤。
足立、岡模型	將可表現黏性土壤的壓密特性、剪力特性、膨脹特性的 Cam-Clay 型彈塑性構成模型，導入動態流動原則，使其可說明彈塑性構成模型的時間依賴性。	適用於正規的壓密。過度壓密黏土地盤及軟岩。適用於正規的壓密黏土地盤。由室內試驗結果來求得參數，有實際用於現場問題的實。

表 2.2.3.2-1 中的足立、岡模型的解析案例，如圖 2.2.3.2-1 所示。圖 2.2.3.2-1(a)為岩盤中處置窖之 2D 平面應變問題模型，此模型包含坑道周邊的開挖影響區。分析時，膨潤土層採用黏彈塑性體，其他材料則採用線彈性體。圖 2.2.3.2-1(b)則為低透水層飽和膨潤後 10,000 年的潛變變形量(增量值)，由結果可知，潛變變形量已經小到可以忽略的程度。

為驗證膨潤土類材料的沉陷解析，可藉由遠心模型試驗的小型模型裝置，縮短實際現象的時間，重現實際地盤的力學行為。圖 2.2.3.2-2 是高放射性廢棄物處置場的包封容器沉陷的解析結果及遠心模型試驗結果，針對不同種類但初期有效黏土密度相同的膨潤土進行解析與試驗，當膨潤土類材料的膨潤壓越小，則包封容器下陷量有越大的傾向。

### 三、現況理解與今後發展

表 2.2.3.2-1 所列的解析模型中的關口、太田模型與足立、岡模型，是根據許多實驗結果構成而成之模型，因其解

析評估技術適用於填土構造物，故已有用在軟弱地盤上建造機場之案例，並經過數十年的實際驗證。今後，除持續累積解析模型所需的物理特性值外，也須累積驗證解析模型所需的遠心模型試驗資料，提高解析模型對長期問題評估結果之精度。此外，對於 Ca 型化與鹼性變質等劣化的變形解析，因相關案例較少，日後仍需持續蒐集相關資訊。

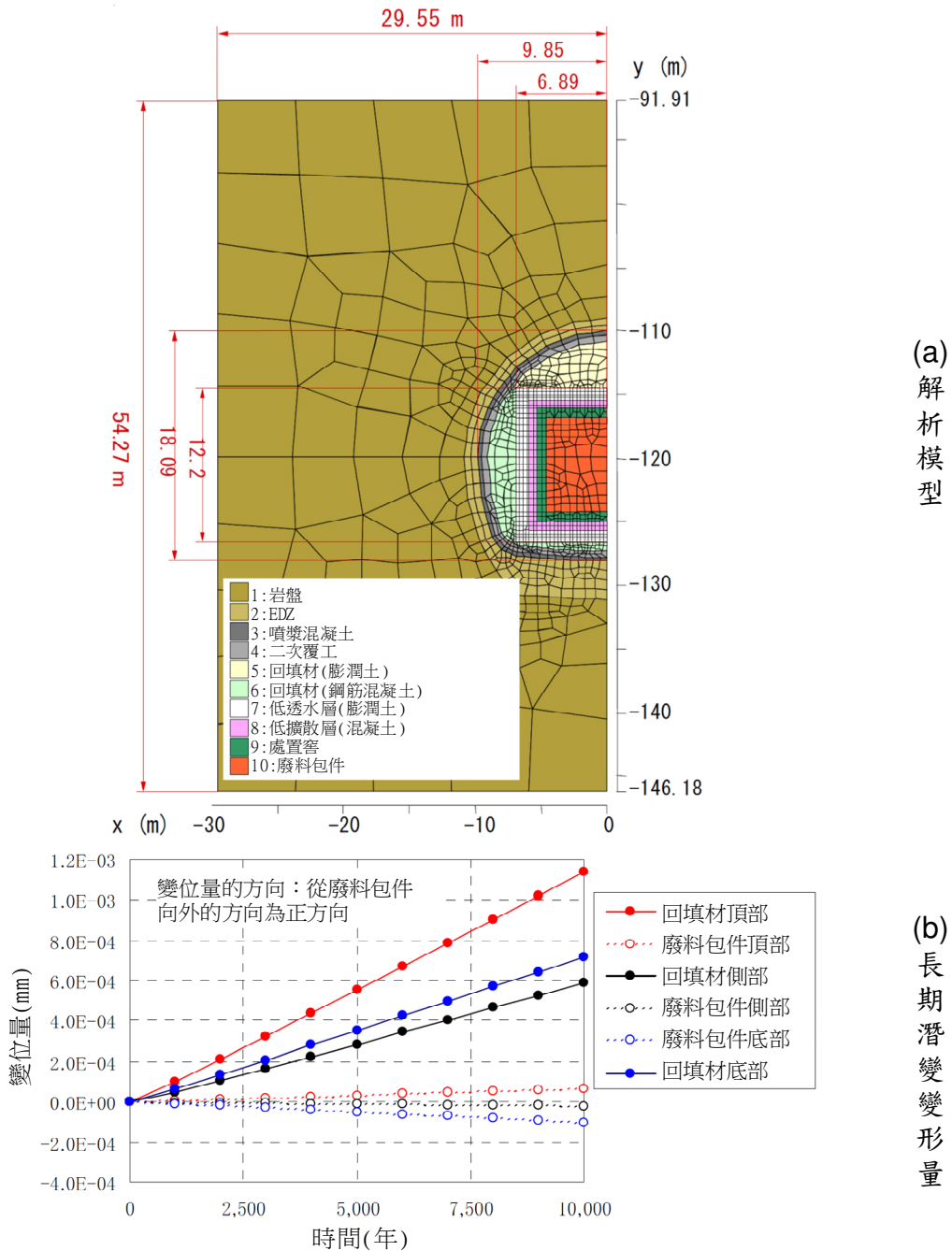


圖 2.2.3.2-1 足立、岡模型的解析案例

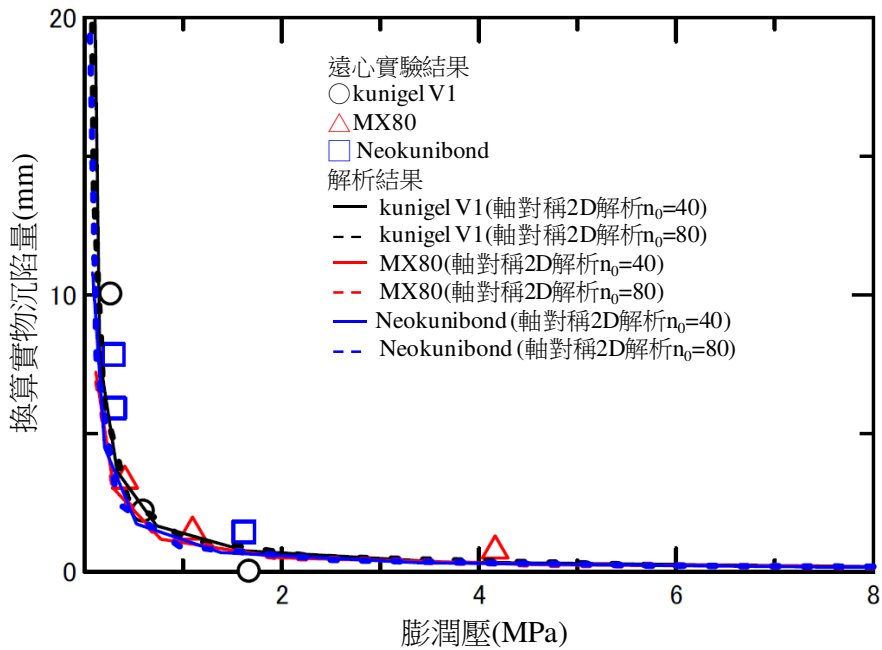


圖 2.2.3.2-2 膨潤壓與沉陷量之關係

### 2.2.3.3 廢棄物包件發熱的影響評估

#### 一、廢棄物包件發熱對工程障壁的影響

工程障壁的組成材料受到廢棄物包件中的放射性核種衰變產生的熱或周邊母岩的地熱之影響時，各材料的溫度會因其熱物理性質不同而有所不同。當各材料的溫度上升時，會導致水泥類材料與膨潤土類材料變質，可能會降低工程障壁抑制核種遷移之機能。假使材料沒有因溫度上升而變質，但因溫度上升改變核種遷移環境，則可能會使核種的型態、溶解度及遷移速度等發生變化。此外，各材料因溫度變化會產生膨脹或收縮變形，若該變形受到限制則會產生溫度應力，對力學行為造成影響。另外，水泥材料與膨潤土類材料的變質，亦可能造成材料特性改變，故檢討力學影響時也須一併納入。

綜上所述，當工程障壁的溫度上升時，需針對材料變質造成性能變化、溫度變化導致性能變化、溫度變化造成體積變化而產生應力與裂縫等項目進行檢討。

#### (一)材料變質造成性能變化

在高溫環境下的水泥類材料與膨潤土類材料會產生變質，可能會降低低透水性、低擴散性、核種吸附特性等工程障壁的抑制核種遷移機能，或是降低力學安定性。水泥類材料受熱後的性能與水化反應有關，其中對抑制核種遷移機能影響較大的，包括溫度上升使水化物的相態改變、加熱促進水化反應。有關水泥類材料的受熱變質研究結果，彙整如下。

- 1.即使溫度在  $100^{\circ}\text{C}$  以下，水泥類材料的 酸鈣水化生成物(C-S-H)的結 構造也可能會改變。
- 2.對多個水泥類材料進行浸泡試驗，當浸泡溫度為  $55^{\circ}\text{C}$  時，C-S-H 的 鈣石(Afwillite)的有變化傾向。當浸泡溫度為  $85^{\circ}\text{C}$  時，部份 C-S-H 會變為雪 鈣石(Tobermorite)。
- 3.使用含有硫酸根離子或碳酸根離子的地下水進行浸泡試驗，溫度大於  $50^{\circ}\text{C}$  以上時，OPC 會生成 鈣石(Afwillite)，混合水泥(高 75%+OPC25%、飛灰 60%+OPC40%)則會生成雪 鈣石(Tobermorite)。
- 4.C-S-H 在  $60^{\circ}\text{C}$  時幾乎為膠狀存在， $85^{\circ}\text{C}$  以上則隨 Ca/Si 的比例不同而產生不同的結 化。當 Ca/Si 比為 0.9 時會生成雪 鈣石(Tobermorite)；當 Ca/Si 比為 1.3 時會生成六水 鈣石(Jennite)、微量成分的 鈣石(Afwillite)及 C-S-H II；當 Ca/Si 比為 1.7 時會生成六水 鈣石(Jennite)、微量成分的 鈣石(Afwillite)及 C-S-H I。此外，此種變化也被 可能會對核種的吸附能力造成影響。



- 5.將 C-S-H 的 Ca/Si 比與各溫度下之安定水化物間的關係，繪製如圖 2.2.3.3-1 所示。由圖可知，溫度條件大於 80°C 時，C-S-H 會產生結晶化。
- 6.C-S-H 因為熱變質而產生結晶化，但產生熱變質的溫度卻較難以明確定義。日本對於 TRU 廢棄物處置的相關檢討中，就水泥類材料的核種吸附性觀點，若將處置場內的溫度限制在 80°C 以下時，可抑制熱變質的影響。

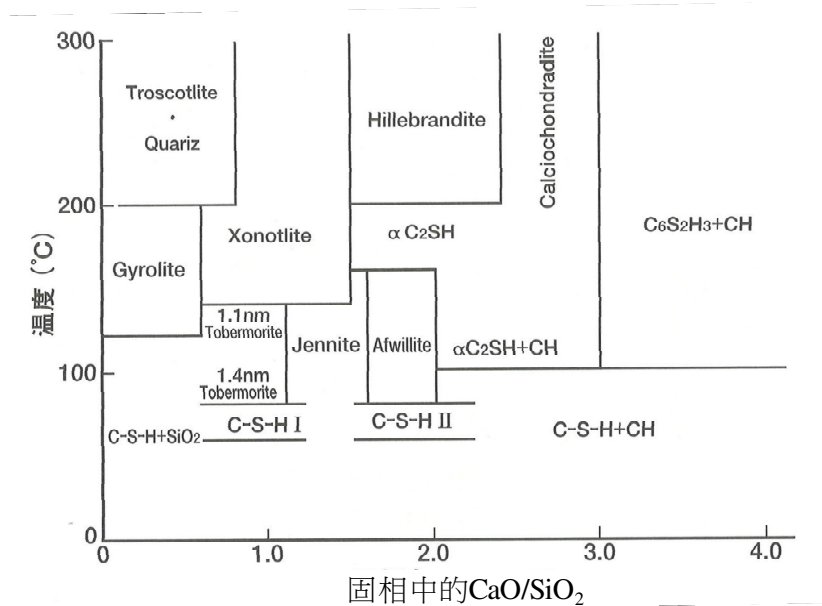


圖 2.2.3.3-1 C-S-H 的熱變化

此外，工程障壁受熱後的力學行為，也會影響抑制核種遷移之機能，故同樣整理相關研究結果作為相關評估之參考。

1. 混凝土的劣化程度隨溫度與暴露時間而異，當試體在加熱前的養護有用覆蓋材料覆蓋時，則試體加熱至溫度 50°C ~80°C 左右時，抗壓強度達到最低點，強度會比初始值少約 20%~25%，且溫度對抗拉強度的影響較抗壓強度大，，如圖 2.2.3.3-2 所示。



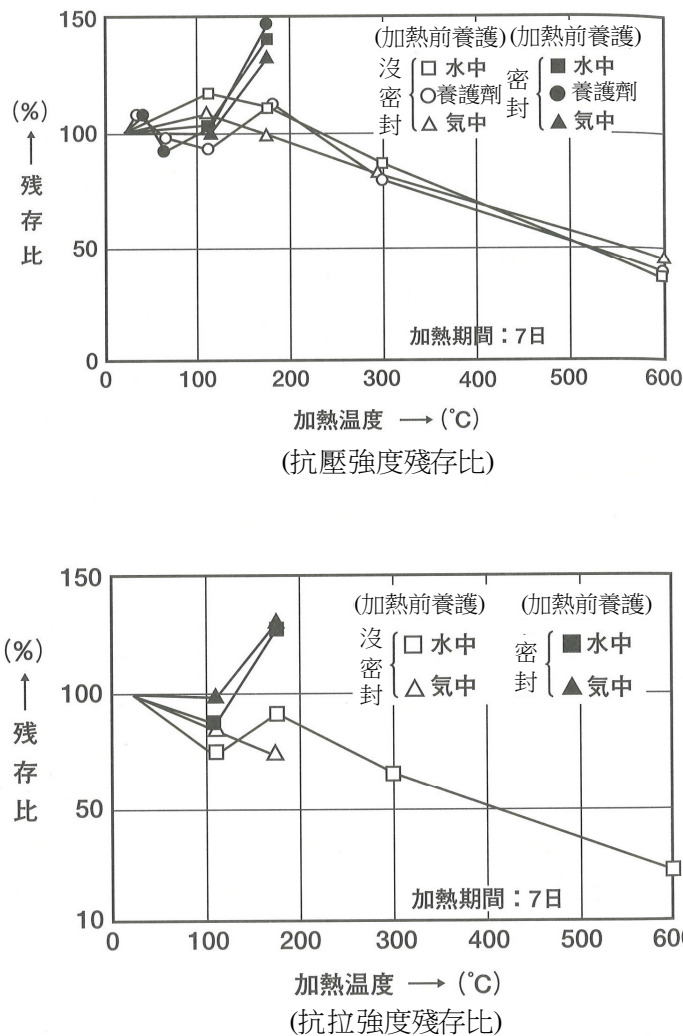


圖 2.2.3.3-2 混凝土加熱後的抗壓強度與抗拉強度之殘存比

2. 日本建築學會認為，混凝土構造物的強度、模數等材料基本物理性質會受到溫度影響，當溫度在 50°C 左右時，抗壓強度減少的幅度最大，約為 10%~15%，模數則隨溫度升高而降低。
3. 高溫下的混凝土特性也會受到骨材影響，當使用的骨材是石灰岩及膨脹頁岩時，混凝土強度降低的相當快，如圖 2.2.3.3-3 所示。

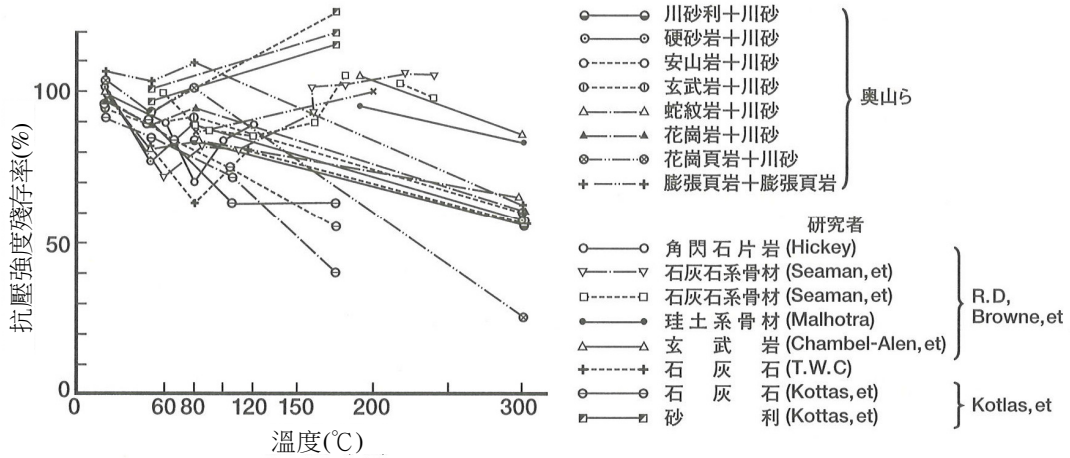


圖 2.2.3.3-3 壓縮強度和溫度的關係

4.長時間在高溫 下的強度變化量測結果，如圖 2.2.3.3-4 所示。當溫度小於 100°C 時， 時間 1,000 日之內之抗壓強度幾乎不會改變。

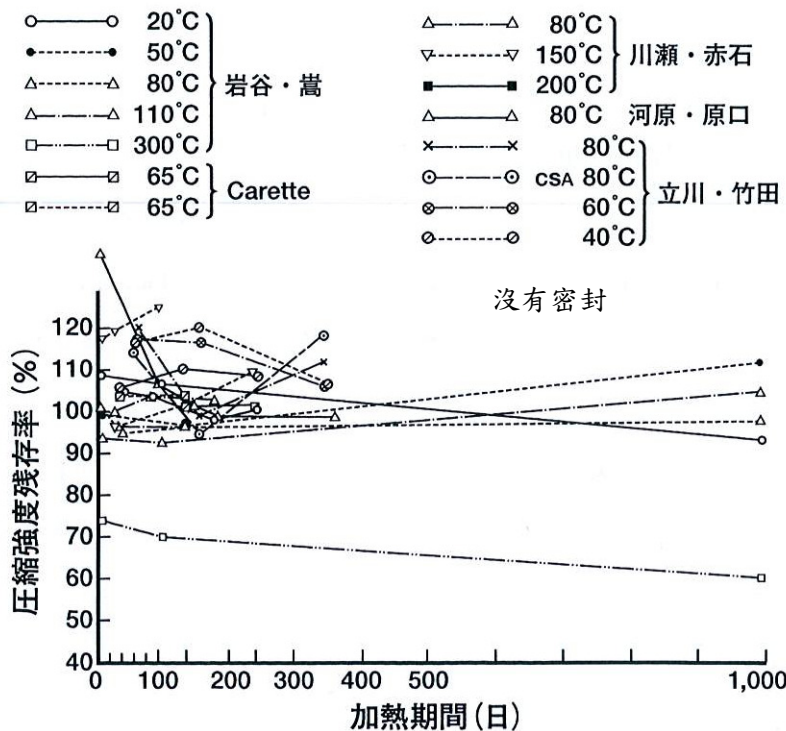


圖 2.2.3.3-4 加熱時間與抗壓強度殘存率之關係

5. 利用各種砂漿試體，在 110°C 的溫度條件下，量測試體經過 10 年後的強度與質量變化。當試驗一開始時，強度有略為增加，加熱期間至 1 年左右時，強度開始有慢慢降低的趨勢，但經過 10 年後，其強度與原始狀況差異不大。
6. 混凝土在溫度 450°C 的範圍內，會因再次水化反應而使強度恢復到加熱前的強度。
7. 彙整日本之核能相關設施的混凝土溫度限制，如表 2.2.3.3-1 所列。表中的溫度限制是依據混凝土材料特性，以溫度影響下沒有明顯劣化為前題所定之值。但此數據並沒有明確的根據。

表 2.2.3.3-1 核能相關設施的混凝土溫度限制

溫度作用	反應 建築結構設計・同 解說 (日本建築學會 1988)		溫度作用	混凝土製反應 格納容 器相關構造的技术基準 (通產省告示 452 號)	
	一般	局部		貫通部	其他
長時間	65°C	90°C	穩定狀態	90°C	65°C
	175°C	350°C		非穩定狀態	噴射力作用的 部分
短時間	175°C	350°C	非穩定狀態		340°C

綜上所述，廢棄物包件的發熱對水泥類材料的力學特性影響，會因水泥類材料的空隙水散失程度而不同。若熱源在處置設施內側，加上周邊濕度高時，對力學特性的影響程度相對較小。但因無法否定溫度對力學特性之影響，為使各種解析能適當反應力學性能變化，須事先確認水泥類材料的抗壓強度、抗拉強度及 模數受熱之影響及其變化時間與影響程度。

膨潤土類材料經過化學反應後的特性與水泥類材料不同，膨潤土類材料初期的化學及礦物性能較為安定。若加上

熱的作用，膨潤土類材料的主要構成礦物蒙脫石 (Smectite)，可能會有依利石化 (Illitization) 與 酸鹽化 (Chlorite) 的現象。但若處置設施的周邊溫度可以控制在 100°C 以下，且有可抑制大量鈣離子、鐵離子、 離子釋出的環境時，則不容易產生依利石化與 酸鹽化。

此外，蒙脫石與因礦物溶解所產生的非 形 石 (Amorphous silica) 等次生礦物的沉澱，可能會對透水性產生影響，但若溫度在 100°C 以下，則不會產生溶解作用而影響透水性。

## (二) 溫度變化導致性能變化

工程障壁材料受熱後，材料的性質雖然沒有改變，但功能仍然可能會受到影響。例如：

- 核種活化造成擴散係數變化。
- 因核種及共存物質的溶解度變化，影響擴散、吸附分配反應。
- 因溫度梯度造成水的對流、乾燥造成水的移動等原因，影響透水、擴散反應。
- 因為水、水化物及骨材的體積變化，造成孔隙水壓改變，影響透水、擴散反應。
- 因水化物的熱膨脹造成孔隙變化，影響透水、擴散及吸附分配反應。
- 因水化物的體積變化造成表面積改變，影響吸附分配反應。

有關擴散係數變化的相關研究結果，如圖 2.2.3.3-5 所示，為溫度變化與 NaCl 的有效擴散係數之關係。量測擴散係數時，為防止水化物受溫度影響而變質，試驗前先將水泥砂漿試體在溫度 60°C 的環境下養護，然後量測不同溫度下的有效擴散係數。當溫度從室溫升到 60°C 時，擴散係數會

有  $10^1 \sim 10^2$  的差異。此外，溫度接近室溫時，陰離子的擴散速度較陽離子大，但超過  $70^\circ\text{C}$  時，水泥砂漿的電氣化學性質會產生變化，陰離子與陽離子的擴散速度會有較大的轉變。由此可知，水泥類材料在施工良好的狀況下，仍會因溫度環境改變，對核種擴散產生影響。

### (三)溫度變化造成體積變化而產生應力與裂縫

熱應力為產生裂縫的主要原因，需考量其對工程障壁之影響。當作用在水泥類材料上的拉應力超過其所能承受的抗拉強度時，就會產生裂縫。因此，評估廢棄物包件發熱對力學之影響時，可利用溫度解析及應力解析，求得溫度變化時因體積變化產生的應力，並將此應力與材料的抗拉強度相互比較，以推估裂縫產生的可能性。此方法亦可用於評估巨積混凝土受到水泥水化熱影響時，其溫度應力及溫度裂縫的變化。檢討巨積混凝土的溫度裂縫，可以裂縫指數( $I_{cr}$ )為評估指標。

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t)$$

其中：

$f_{tk}(t)$ ： 期  $t$  日下的混凝土抗拉強度

$\sigma_t(t)$ ： 期  $t$  日下的混凝土最大主拉應力

當裂縫指數越大時，代表裂縫越不易發生。彙整到目前為止的相關實驗及施工結果，彙整出裂縫指數與裂縫發生機率的關係，如圖 2.2.3.3-6 所示，以作為處置設施檢討時之參考。



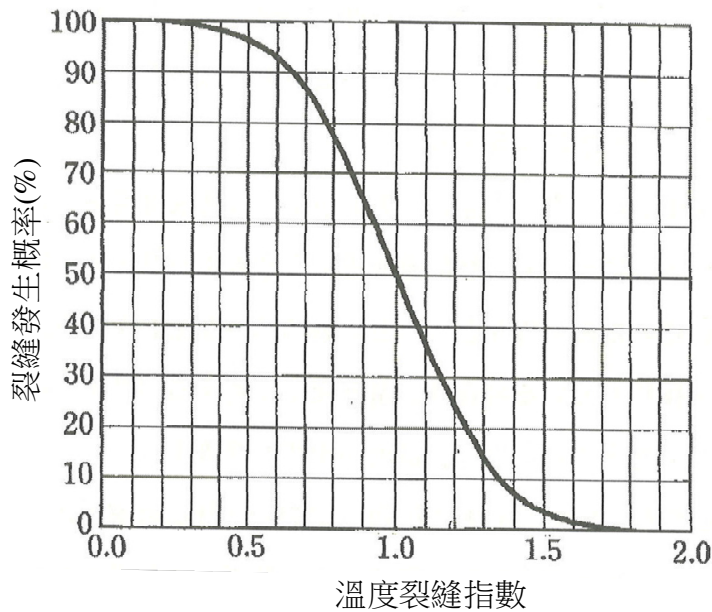


圖 2.2.3.3-6 溫度裂縫指數與溫度裂縫發生之機率關係圖

## 二、評估方法

熱變質的影響評估，可利用溫度解析求得處置坑道的環境溫度後，並與實驗結果相互比對。熱應力對工程障壁的影響評估，可利用溫度解析與應力解析的組合方法，並比較溫度應力與材料強度之大小。

對於因溫度變化造成體積變化，而產生應力與裂縫的評估方法與流程，可參考日本土木學會的「土木學會混凝土標準示方書[設計編]」中，有關水泥水化作用導致裂縫的確認項目。若以廢棄物包件的發熱為評估對象時，溫度解析與應力解析的流程，概要說明如下：

### 1. 熱傳導解析：

設定廢棄物包件的發熱條件(發熱量、衰減特性)、處置設施的熱邊界條件(固定溫度、熱傳達邊界)及組成材料的熱特性(熱傳導率、比熱)後，進行非穩態熱傳導解析，以評估溫度分布及其經過時間。熱的傳輸一般有傳導、對



流、輻射等，但以處置設施為對象的所有熱傳導，可以控制方程式將其模型化，加上常用數值解法則可確認評估方法。

#### 2.材料變質的檢討：

將熱傳導解析所得之溫度作為前提條件，利用材料的加熱試驗結果及地球化學解析程式，求解材料性能之變化。若由試驗與解析結果無法直接求得工程障壁之性能時，則可用換算的方式求得所需之 案。

#### 3.性能變化的檢討：

工程障壁的組成材料受到溫度作用但沒有產生變質反應時，先以熱傳導解析求得之工程障壁環境溫度，再以此溫度為條件，進行核種擴散解析。若無法使用溫度影響的評估方法時，可由溫度變化對工程障壁組成材料產生的性能變化，做為溫度影響的評估。

#### 4.應力及裂縫的相關解析(力學解析)：

以熱傳導解析所得之溫度分布做為輸入條件，進行溫度應力解析。此解析以各部位發生的應變及應力，評估工程障壁的力學狀態。熱應力解析是以控制方程式為基礎進行模型化，加上常用數值解法則可確認評估方法。

### 三、現況了解與今後發展

推估廢棄物包件的發熱特性及地下坑道處置設施的形態時，因廢棄物包件發熱影響，使工程障壁的最高溫度出現在回填後數年左右，且對工程障壁的影響會於短時間內結束。但若有變質作用發生時，則對工程障壁的影響將可能持續到發熱結束為止。故需檢討發熱期間的工程障壁溫度與性能變化之關係，以利後續評估期間內的影響評估。

對於預測溫度的熱傳導解析及預測力學行為的應力解析，目前已有泛用程式，可用於工程障壁經歷溫度預測及結

構力學之影響與設計。邊界條件(溫度固定邊界、熱傳達邊界、反射邊界等)可視模型須要進行適當的設定。但目前沒有針對溫度固定邊界與反射邊界設定的研究，而熱傳達邊界設定的主要考量為熱傳達率，可參考日本機械學會的「熱傳手」等資料。另外，解析使用的特性值(熱傳導率、比熱、密度)，則從試驗取得較佳，避免使用一般值。

水泥類材料的水化物變質之相關研究已相當多，但並不能跟障壁的性能互相連結。因此，在進行核種遷移的相關解析時，須於解析前確認所使用的特性值。膨潤土類材料的礦物變質亦有相當多研究，若能了解溫度與水泥滲出水所含的地下水組成等環境條件，就可推估變質狀況，並利用有效膨潤土殘留量評估障壁的性能。

廢棄物包件發熱對工程障壁的影響對策，可從化學與礦物學的觀點著手，設定上限溫度，避免熱變質的問題。再加上充分檢討熱影響的時間與影響程度，以適當反應至設定條件中。

#### 2.2.3.4 岩盤潛變的評估

##### 一、岩盤潛變對工程障壁的影響

岩盤潛變是指岩盤隨著時間增加所產生的岩盤變形、岩盤內應力等現象，可能會影響建設營運中的安全性、工程障壁的長期性能、坑道周邊岩盤的天然障壁性能等性能。其中，岩盤潛變對工程障壁的長期性能影響，包括處置窖及低擴散層產生裂縫、低透水層的厚度變化及剪力破壞等，可能使工程障壁的性能降低。對天然障壁的長期性能影響，則是因開挖影響區擴張，導致天然障壁的性能低下。

日本土木學會對於高放射性廢棄物處置場的地層處置技術曾提到，「評估岩盤潛變、緩衝材(膨潤土)的膨潤壓、包封容器的腐蝕膨脹、各構件組成材料的長期化學變質與劣化等各種力學相互作用下之影響，以對工程障壁的性能影響最小及施工可行性為前提進行設計。」因此，依據處置地點的岩種，考量不同特性後選擇岩盤潛變行為預測模型，並輔以室內試驗、現場量測等數據資料，以驗證行為預測模型的適當性。

## 二、評估方法

岩盤潛變之評估方法主要使用的力學模型，彙整如表 2.1.7.5-1 所示。選擇適合處置地點岩盤特性的力學模型，藉由岩盤潛變評估，預測岩盤潛變對工程障壁的影響。

## 三、現況 解與今後發展

評估岩盤潛變對一般地下構造物的影響時，主要是將量測數據資料作為預測解析力學模型的輸入參數，或對量測數據資料外插。由於地下構造物於開挖完成後較少進行長期且持續的定量觀測，故可參考的資料相對較少。驗證以量測資料為主的預測方法時，預測評估的年限約為該一般地下構造物的使用年限。

評估處置設施的長期岩盤潛變，須先選擇適合處置地點岩盤特性的力學模型，藉由數值解析的外插進行預測分析。此外亦須評估外插的誤差及岩盤與坑道內部的工程障壁邊界條件(坑道內部中，工程障壁剛性降低之評估)。

依據過去的工程經驗可知，岩盤潛變的發生傾向與坑道內部設置的工程障壁之剛性有關。假設處置坑道內部工程障壁的剛性為砂漿的 1/100，則經過 100 萬年後，坑道內部有工程障壁的岩盤潛變約為沒有工程障壁的 1/10。亦即處置坑道內設置具有一定剛性的工程障壁，可抑制長期的岩盤潛變。

綜上所述，評估岩盤潛變的長期狀態時，除須選擇適合處置地點岩盤特性的力學模型及設定適當的物理特性值外，亦需考量工程障壁隨時間增加的剛性變化，以評估其抑制岩盤潛變之效果。

### 2.2.3.5 地震的影響評估

#### 一、地震對工程障壁的影響

處置設施與岩盤受到地震力作用，使工程障壁產生應力、應變及變形，尤其是當水泥類材料產生裂縫及膨潤土類材料變形與沉陷時，比較可能影響工程障壁之性能。

地震的影響會因處置地點的地質構造與處置設施的深度不同而有所差異，須對評估可能發生的地震規模，以預測工程障壁各構件產生的應力、應變及變形，並評估其力學安定性。

此外，處置設施進行地震影響評估時，地震條件可使用建設營運階段的設施安全性評估時使用之地震，或是回填後的工程障壁長時間狀態評估時使用之地震。

#### 二、評估方法

一般而言，坑道或隧道等地下構造物的地震力，與周邊岩盤的動程度有關。進行地下構造物的地震影響評估時，需先針對處置設施及其周邊岩盤近型地震反應解析，以求得作用於構造物的地震力。

彙整日本主要的耐震設計指針或基準及其地震影響評估之方法，如表 2.2.3.5-1 所列。坑道或隧道等地下構造物的耐震解析方式，可分為將地下構造物或地盤系統以力學模型置換所進行的靜態解析以及利用動力學模型解析的動態解析

兩大類。 態解析方法包括震度法、反應變位法、反應震度法等，動態解析方法有反應譜法、模式解析法、逐次反應解析法、複合反應解析法等。

坑道或隧道的橫斷面形狀有矩形、 形、 形等，縱斷面則為 狀。故進行地震影響評估時，須因應方向選擇適合的解析方法。

依據現狀選擇 態解析方法或動態解析方法，作為評估地下構造物於地震時的反應方法，相關評估流程如圖 2.2.3.5-1 所示。 態解析流程包括①設定設計地震、②地盤的地震反應解析、③求得地震載重、④構造物與地盤系統的構造解析與安定解析。動態解析則是將地下構造物與周邊地盤視為一體並將其模型化後，依序進行項目②~④。

因 態解析方法將地震載重與構造分析分開計算，加上有許多簡化與假設，故此評估方法相對簡易。但動態解析方法是直接震動地下構造物與周邊地盤的動力模型，可表現出各別的動態行為與兩者間的相互作用。故當進行地震對工程障壁的評估時，除考量各別解析方法的特性外，也須依照著重的現象不同，選擇適當的解析方法。



表 2.2.3.5-1 地下構造物的耐震設計指針與基準(1/2)

地下構造物的設計指針與基準	記載之方法概要
(社)日本道路協會：共同溝設計指針(1986)	共同管溝的耐震設計，主要是針對軟弱地盤處、地盤條件變化處或特殊構造等地方。耐震計算上採用反應變位法，檢討縱向共同管溝，橫向部分則依據標準斷面的檢討結果。若地震的影響小時，則不需特別針對此部分進行耐震計算。此外，對於地盤的地形及地質變化顯著的區域、構造複雜的區域，則建議以動態解析確認安全性。
( )鐵道綜合技術研究所：鐵道構造物等設計標準・同解說 潛 隧道 (1997)	鐵道設施的潛 隧道耐震計算法，一般採用反應變位法。但【解說】中提到，遇到構造物規模較大、地層構造複雜的狀況時，則建議使用地震反應解析較佳。反應變位法中的地盤變位量，是假設地震波是以正 波形 水平方向傳 ，再以反應速度譜的反應譜法計算。此外，對於地層構造複雜的狀況，亦可利用地盤的反應解析計算地震時的地盤變位量。
( )鐵道綜合技術研究所：鐵道構造物等設計標準・同解說 耐震設計 (1999)	鐵道開挖隧道的反應值，是考量 路直角方向上的地盤及構造物的相互作用、地盤及構造物的非線形性後，進行計算。而計算方法可採用反應變位法、簡易反應變位法、動態解析法。
(社)日本水道協會：水道設施耐震工法指針・解說 (1997)	「地下構造物，可利用震度法或反應變位法進行耐震設計。若地震行為複雜且構造物需進行地震 Level2 的耐震設計時，可視需要採取動態解析法，並對照震度法或反應變位法的耐震設計結果」。對於一般埋設管路的縱向之耐震設計來說，地震 Level1 採用反應變位法；Level2 採用反應變位法，並可視需要採用動態解析法。
(社)日本下水道協會：下水道設施的耐震對策指針與解說(1997)	線狀地下構造物採用反應變位法。
(社)日本 斯協會：高壓 斯導管耐震設計指針 JGA 指-206-00	此指針是根據過去的地震波形紀錄與地震發生頻率紀錄，在導管的設計 內，設定與設計地震等價的地震載重出現次數，配合導管材料的設計 乏曲線，訂定耐震設計之容許應變量。因此，依照地盤條件、管路構造條件所計算出之地震應變量，不能超過上述容許應變量，並以此為基礎評估 乏受損程度後進行耐震設計。耐震設計所需的必要條件包括表層地盤變位與應變、地盤彈 常數、容許應變量等，利用這些條件的計算結果，不須使用特殊解析工具檢



	討，即可進行耐震設計。
土木學會原子力 土木委員會：原子 力發電所 外重 要土木構造物的 耐震性能檢查指 針·同手 (2002)	1992年，日本原子力土木委員會發行「原子力發電所 外重要土木構造物的耐震設計有關之安全性檢查手 」。2002年，將極限狀態設計的觀念導入1992年的手 中，提出性能檢查的概要說明，並將「[2002年制定]混凝土標準示方書[耐震性能檢查編]」的內容整合至本指針中。為能對耐震性進行合理的調查，評估方法需注意(1)使用地盤-構造物連結系統之時間歷程地震反應解析。(2)解析用的材料模型，須能考量地盤及構造物的非線性。

表 2.2.3.5-1 地下構造物的耐震設計指針與基準(2/2)

地下構造物的設計指針與基準	記載之方法概要
土木學會混凝土委員會：[2002 年制定]混凝土標準示方書[耐震性能檢查編]	本示方書的目的是在地震反應解析時，使用現階段最新的耐震工程資訊求解。原則上，動態解析法需使用時間歷程反應解析，對於構造物必須保有的耐震性能，檢查時可參考原本的材料特性。舉例說明如下：(1)混凝土材料：壓縮範圍的應力-應變曲線，當超過最大應力點後會進入軟化區，若應力加載進入塑性區，則載後會有殘留塑性應變而降低剛性。(2)鋼筋材料：降伏、應變硬化、包格效應(Bauschinger's effect)、降伏後吸收能量的應力-應變關係、拉力範圍的應力-應變關係。(3)地盤：考量地震影響造成地盤的塑性化、液化等性狀變化。

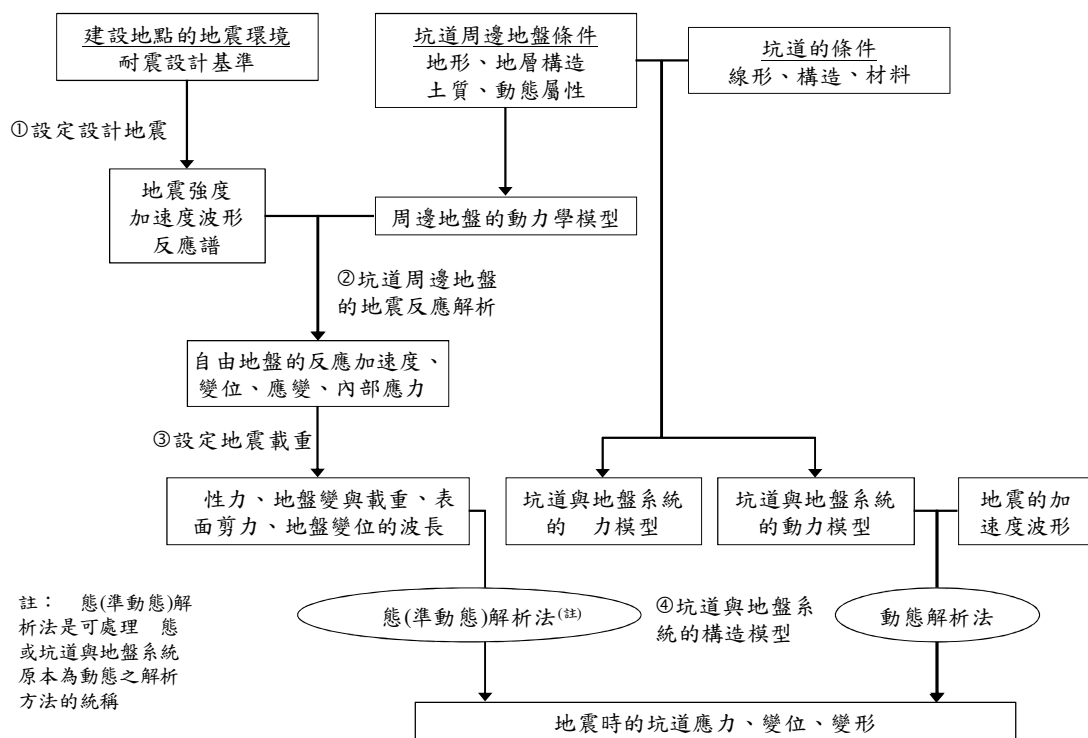


圖 2.2.3.5-1 地下構造物的地震反應評估流程

### 三、現況 解與今後發展

建設營運階段的設施安全性評估，可以現行的規範為參考依據，設定評估時所採用的地震。有關地震反應與耐震性

的評估，可參考核能發電廠等重要構造物的耐震評估方法。此外，因地震發生的規模大小及頻率、工程障壁的變質與裂縫等影響因素，對動態反應特性之設定相當重要，需適當的反應至工程障壁的長期地震影響評估中。

### 2.2.3.6 鋼筋腐蝕的影響評估

#### 一、鋼筋腐蝕對工程障壁的影響

處置窖是以鋼筋混凝土材料建構而成，當鋼筋腐蝕時會產生膨脹壓，使鋼筋周邊產生裂縫(圖 2.2.3.6-1 之 STEP3)。鋼筋腐蝕量受到保護層、混凝土強度、鋼筋直徑等因素影響，可藉由設定腐蝕量與腐蝕速度，推估裂縫的發生時間、裂縫的擴張與裂縫幅度。鋼筋腐蝕膨脹產生的裂縫會往鋼筋的內外方向或搭接方向擴張，當裂縫延伸到低擴散層時，對低擴散層的力學安定性、透水性及擴散性皆會有所影響。隨著裂縫的產生與擴張，當裂縫貫通處置窖與低擴散層時(圖 2.2.3.6-1 之 STEP5)，水泥類材料的透水性隨之逐漸增加。此外，水泥類材料的擴散性，是根據材料中具有裂縫部分對健全部份(未含裂縫部份)的斷面積比例決定，故裂縫的發生與擴張，亦會使擴散性增加。

#### (一)鋼筋腐蝕機制

鋼筋腐蝕是因為電化學的陽極反應與陰極反應，並隨氧氣的有無而有不同的反應式。當有氧氣存在時，屬於氧化型腐蝕；當沒有氧氣存在時，則屬於還原型腐蝕。

##### 1.氧化型腐蝕

鐵與水、氧反應會生成氫氧化亞鐵(II)( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ )，氫氧化亞鐵(II)因為溶解氧的存在而氧化產生三氧化二鐵

( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、氫氧化鐵(III)( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )、單水氫氧化鐵(III)( $\text{FeOOH}$ )、氧化鐵(III)( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )等氧化物。此外，水泥類材料的孔隙溶液中，有鹽化物離子等 態破壞型離子存在時，會破壞鋼筋表層的 態保護，並產生「間隙腐蝕」、「孔蝕」等局部腐蝕的現象。這種局部腐蝕是一種獨特的陽極反應，初始時在金屬表面的 處形成腐蝕的據點， 處因缺少氧氣，而 處外圍則氧氣充足，兩者形成了濃差電， 處的缺氧區為陽極，四周為陰極，由於腐蝕 處聚集了帶正電的金屬離子，並吸引了帶負電的鹽化物離子，金屬離子的水解產生了氫離子，氫離子和鹽化物離子均會加速金屬的腐蝕作用。 處腐蝕的結果，分別引進更多的鹽化物離子和氫離子，如此 性循環， 處逐漸被腐蝕成深孔。

由於鋼筋劣化的主要原因為混凝土中的鹽化物離子超過 界質，破壞 態保護 造成局部腐蝕。因此，日本「土木學會混凝土標準示方書[設計編]」中，訂定鹽化物離子的 界濃度為  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ，若超過此 界濃度則可能發生鋼筋腐蝕。而混凝土中含有的鹽化物離子濃度總量小於  $0.3 \text{ kg/m}^3$  時，鹽化物離子對構造物性能不具影響性。

此外，pH 值降低至中性範圍時(pH 值小於 10)，則會破壞 態保護，增加鋼筋腐蝕速度，並造成全面性的鋼筋表面腐蝕。

## 2. 還原型腐蝕

鐵與水反應會生成氫氧化亞鐵( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ )與氫氣，當溫度上升時，則可能使氫氧化亞鐵( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ )逐漸生成三氧化二鐵( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。

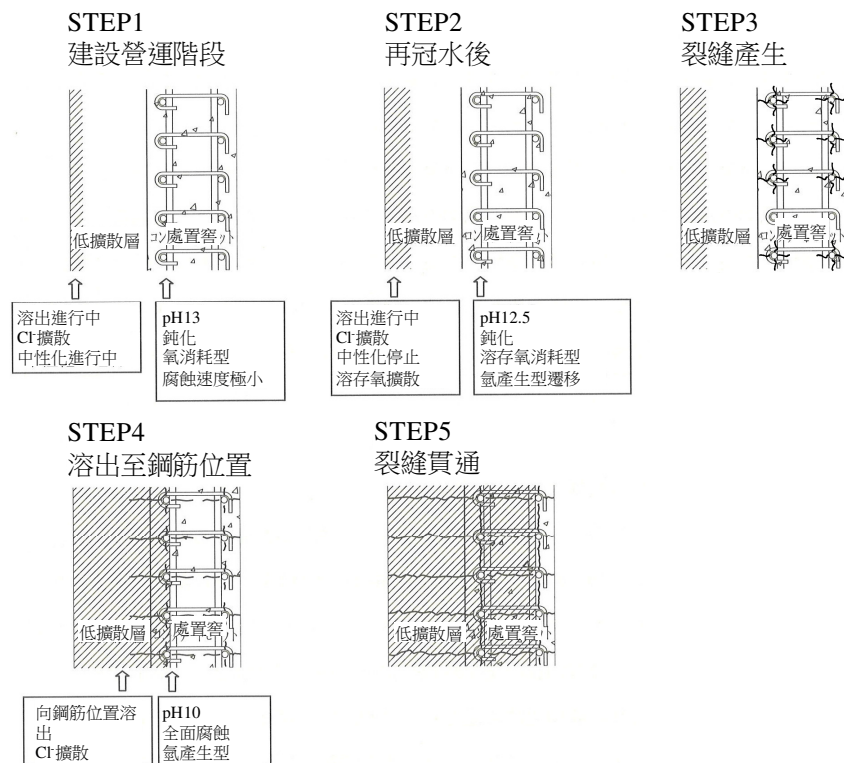


圖 2.2.3.6-1 鋼筋的腐蝕狀況及對處置窖與低擴散層的影響示意圖

## (二)腐蝕的進展

建設營運階段時，因處置窖的鋼筋處於鹼性環境下，表層會覆蓋一層 態保護，而此 態保護 會受到中性化或鹽害破壞。中性化的程度受到混凝土在大氣中的暴露時間長短所影響，一般來說，經過 50 年後，中性化的範圍約只有 20mm 左右。若於設定保護層厚度時考量中性化的影響範圍，即可排除中性化對鋼筋腐蝕之影響。此外，再冠水與地下水的鹽化物離子濃度低於鋼材腐蝕的 界濃度  $1.2 \text{ kg/m}^3$  時，則不會受到鹽害影響。各階段代表的腐蝕機制與腐蝕形態，如表 2.2.3.6-1 所示。

當鋼筋周邊沒有氧氣存在的狀態下，鋼筋的腐蝕機制就會轉向還原型腐蝕，但因此時仍維持在鹼性環境下，故腐蝕速度較慢，腐蝕緩慢地進行。但從膨潤土類材料開始，到低擴散層整體直至處置窖中鋼筋位置為止，持續有溶出現象，



或是地下水中有溶解存在的碳酸成分(溶液態碳酸氣體、碳酸氫離子及碳酸離子)，這些現象都會導致中性化，並造成態保護破壞。此時，對鋼筋的腐蝕可能為全面性的腐蝕，其腐蝕速度相較於表層有態保護的狀態下，會快1個級數。

表 2.2.3.6-1 各階段代表的腐蝕機制與腐蝕形態

	氧氣	腐蝕機制	pH	態保護	腐蝕型態	腐蝕速度
建設營運階段~再冠水	有	氧化型腐蝕	13	有	化腐蝕	極慢
			10	中性化破壞	全面性腐蝕	快
			13	鹽害局部破壞	局部腐蝕	極快
再冠水後	無	還原型腐蝕	12.5	有	化腐蝕	極慢
溶出後至鋼筋位置	無	還原型腐蝕	10	無	全面性腐蝕	快

## 二、評估方法

因長期鋼筋腐蝕造成裂縫的相關研究或資料較少，故較難直接進行預測。較常使用的方式為利用腐蝕量推估裂縫進展狀況的預測模型，並由各種實驗、解析結果、實際構造處的量測結果確認模型的正確性。以推測的處置環境狀況為基礎，假設腐蝕機制及腐蝕型態的時間序列變遷，設定適當的腐蝕量與腐蝕速度，以掌握裂縫的程度及進展狀況。

鋼筋的腐蝕行為主要分為(I)建設營運階段~再冠水、(II)再冠水後、(III)溶出後到鋼筋位置為止等三個階段。(I)~(II)的遷移時間是以再冠水的時間為分界點，再冠水後的最初期是消溶存氧氣的氧化型化腐蝕，當鋼筋周邊的溶存氧氣低於某個濃度後，則會轉變為還原型的化腐蝕。(II)~(III)的遷移時間則以計算所得之溶出時間為分界點。(III)階段後，因鋼筋腐蝕速度變大，膨潤土類材料的裂縫也會快速進展。



鋼筋周邊產生裂縫時之腐蝕量，可參考日本土木學會「混凝土標準示方書[管理維持編]」中規定的  $10 \text{ mg/cm}^3$  作為基準，並採用實驗值或力學模型推估裂縫的進展狀況。此外，裂縫幅度可根據破壞力學理論，採用離散裂縫模型進行二維有限元素解析。

### (一)腐蝕速度

#### 1. 化腐蝕速率

碳鋼在 pH12.5~13.5 的環境下為 化，因有微量的 化保持電流密度存在，可利用其推估 化腐蝕速率。G·Wranglen(1981)認為，此 化保持電流密度  $i_p$  約為  $1 \text{ A/cm}^2$ ，且低於  $1 \text{ A/cm}^2$  後會開始逐漸變小。假設鐵離子皆為二價離子的狀況下，根據法拉第定律(Faraday's Law)， $1 \text{ A/cm}^2$  的 化保持電流密度，其對應之腐蝕速率為  $11.6 \text{ m/y}$ 。此外，在 pH12.5~13.5 左右的環境下， 化碳鋼之腐蝕速率為陽極反應控制型，無論有無氧化劑皆對腐蝕速率影響不大。並有研究指出，此時的碳鋼平均腐蝕速率(323K)為  $0.1\sim 0.05 \text{ m/y}$ 。

#### 2. 還原型腐蝕速率

日本有相關研究針對低氧且鹼性條件下，利用腐蝕產生的氫氣量推估碳鋼的腐蝕速率。

##### (1)以 NaOH 製做試驗溶液：

參考海水系地下水的組成成份，利用 NaOH 調整 pH 值(分別為 10、12.5、13.5)製做試驗溶液，並將碳鋼浸泡在試驗溶液中 180 日，由氣體的產生量推估腐蝕速度，試驗結果如圖 2.2.3.6-2 所示。腐蝕速度隨時間降低，且與溶液的 pH 值有關。當 pH 為 10 時，腐蝕速度約介於  $0.2\sim 2 \text{ m/y}$  之間，當 pH 為 12.5 及 13.5 時，則腐蝕速度約介於  $0.01\sim 0.3 \text{ m/y}$  之間。故試驗

溶液的濃度越高，則碳鋼表面越容易形成 態保護，腐蝕速度因而隨之降低。

(2)以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  製做試驗溶液：

在溫度  $35^\circ\text{C}$  及周圍氧濃度為 1ppb 以下之條件下，以氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )製做試驗溶液，經過 900 天左右的試驗時間，根據碳鋼產生的氫氣量，換算腐蝕速率，實驗結果如圖 2.2.6.6-3 所示，當試驗時間超過 800 天以後，腐蝕速率約為 0.02 m/y 左右。

(二)裂縫的程度與進展狀況

預測腐蝕裂縫的進展狀況，可從腐蝕量的評估方法或力學模型求得。日本針對 10cm 以下的保護層，其裂縫產生時的腐蝕量進行相關研究，包括以電解腐蝕試驗了解保護層與鋼筋直徑之關係，或是假設腐蝕生成物的體積膨脹率為 2.5 倍，進行 FEM 彈性解析，其結果如圖 2.2.3.6-4 所示。由圖可知，保護層小於 10cm 時，解析解與實驗結果大致符合，腐蝕速率約在  $3\sim 10\text{ mg/cm}^2$  之間。

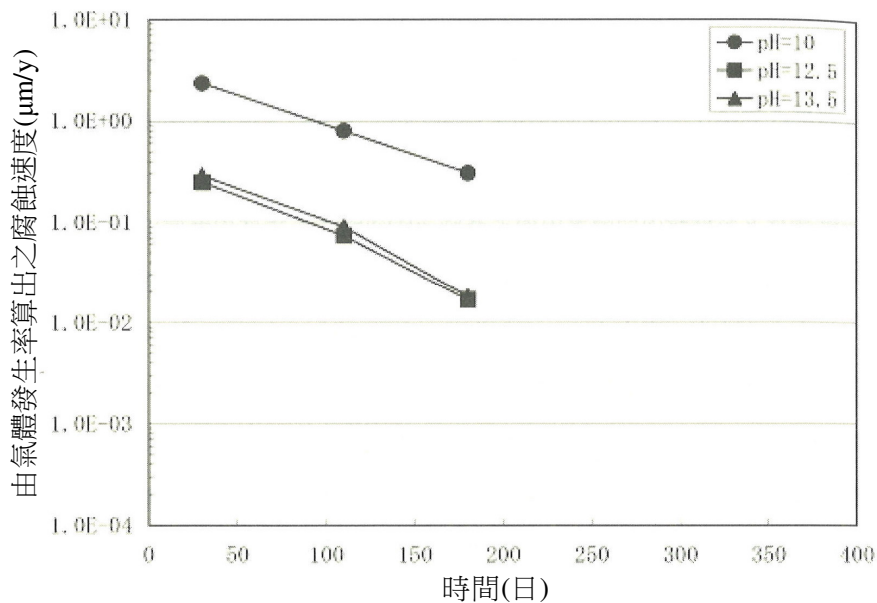


圖 2.2.3.6-2 由碳鋼的氣體發生率計算腐蝕速率的歷時變化

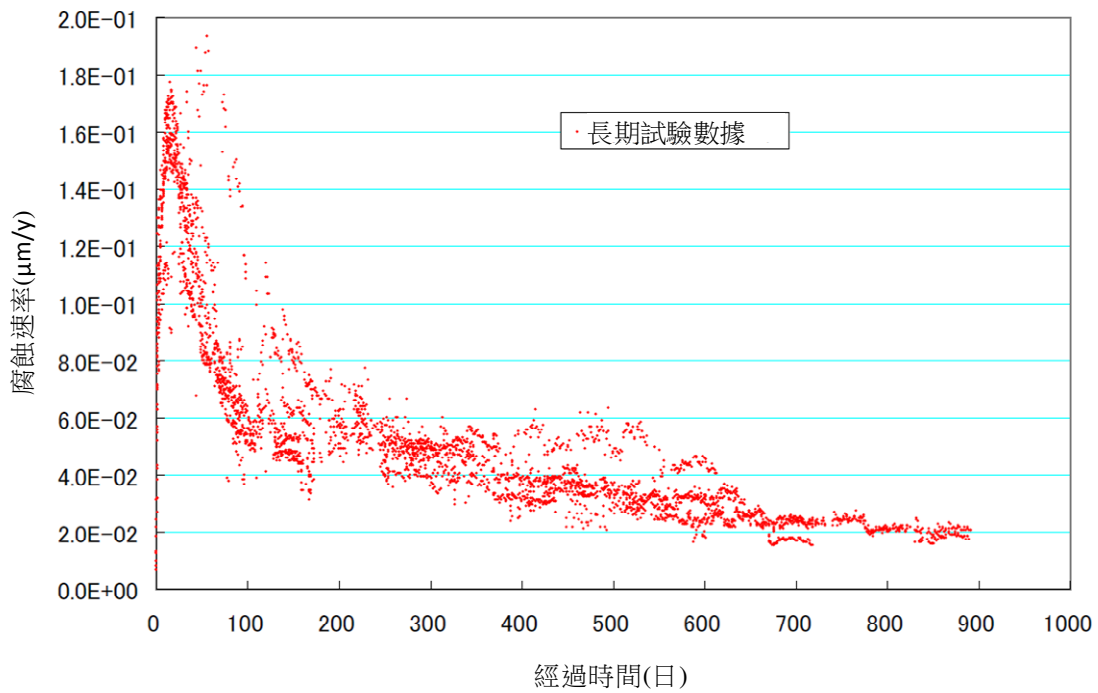


圖 2.2.3.6-3 以氫氧化鈣製做試驗溶液的碳鋼腐蝕速率

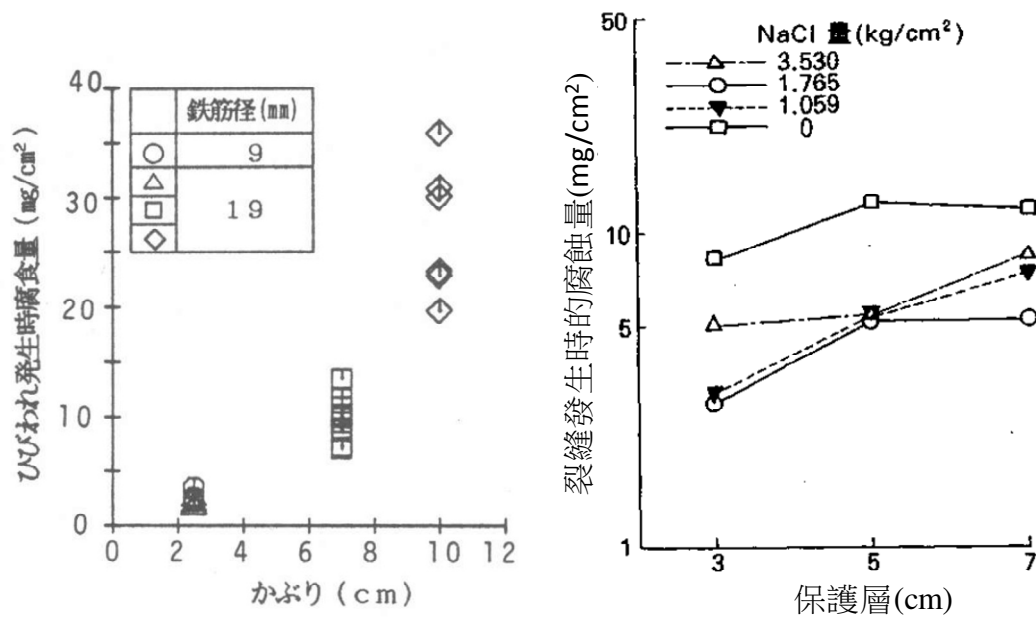


圖 2.2.3.6-4 保護層與產生裂縫時的腐蝕量之關係

此外，日本土木學會的「混凝土標準示方書[管理維持編]」中提到，中性化與鹽害發生在一般的鋼筋混凝土構造

物時，裂縫產生時的鋼筋腐蝕量為  $10 \text{ mg/cm}^2$ ，考量保護層、混凝土強度、鋼筋直徑等影響，使用彈性解析或彈塑性解析的方法，適當的設定力學模型參數，則可對裂縫狀態進行評估。

對於保護層 10cm 以上的狀況，根據既有的實驗數據資料，腐蝕裂縫產生時的鋼筋腐蝕量為  $20\sim 40 \text{ mg/cm}^2$ ，最好能與力學模型的計算結果相互比較。

### 三、現況了解與今後發展

處置窖鋼筋的健全性與處置設施長期的安定性有密切關係，故需評估處置窖鋼筋健全性的維持時間。此外，因鋼筋腐蝕會使處置窖的裂縫延伸至低擴散層，提高低擴散層的擴散性與透水性，因此也需評估低擴散層的裂縫狀態。

工程障壁回填後，從地下水入侵至再冠水階段，幾乎不會有鋼筋腐蝕。而再冠水後的腐蝕反應為還原型腐蝕的 化狀態，此種狀態下的腐蝕速率非常慢。

對於混凝土中的鋼筋腐蝕評估，針對鹽害與中性化的氧化型腐蝕已有許多研究成果，提供了許多有關腐蝕速率與裂縫發生時間、裂縫程度等項目之評估方法，但因鋼筋腐蝕造成裂縫產生的原因甚多，故須考量構造物的特性後，選擇適當的參數與方法進行評估。

再冠水後的腐蝕為還原型腐蝕，但卻沒有太多有關腐蝕生成物與腐蝕速率的相關資訊。需充實評估時所需之腐蝕速度、腐蝕膨脹率、腐蝕生成物的力學特性等知識，提高外在環境隨時間變化(再冠水為止的期間、地下水中的鹽化物離子量等)之狀態設定精度，考量低擴散層與處置窖長期的力學性能影響、溶出等物質變化之影響、材料間的附著程度對裂縫進展之影響、對鄰近鋼筋的裂縫進展及連續化之影等因素，提高裂縫產生與進展狀態評估的適當性。

### 2.2.3.7 氣體產生之影響評估

#### 一、氣體產生對工程障壁的影響

回填後，因地下水入侵使工程障壁產生再冠水，使處置設施周邊及內部化學環境條件具有還原性，使處置窖中的鋼筋或廢棄物包件所含的金屬產生還原型腐蝕，於處置設施內產生氫氣。由於工程障壁是採用細緻的水泥類材料或透水性低的高密度膨潤土，當處置設施再冠水達到飽和狀態時，此時的水泥類材料與膨潤土類材料之透氣性相當低，加上氫氣產生的速度較快，造成處置設施內的氫氣蓄積，此蓄積壓力會導致處置窖與低擴散層的裂縫產生與進展以及低透水層受到壓縮使密度增加，工程障壁的狀態產生變化，進而影響處置設施的性能。

飽和水泥類材料及飽和膨潤土類材料之氣體遷移實驗的案例不多，目前尚無法完全掌握此種氣體遷移的機制，但已由近年來的日本國內外研究案例，微了解氣體遷移的機制。

#### (一)飽和水泥類材料的氣體遷移機制

根據歐洲的 Status Report(Rodwell 等，1999)，彙整以往的氣體遷移試驗結果，針對飽和水泥類材料的氣體遷移機制說明如下：

1. 氣體壓力低的情況下，氣體溶存在孔隙水中，並隨之擴散與移流而遷移。
2. 氣體壓力超過氣體侵入壓( 界壓)時，氣體會置換孔隙水開始兩相流的氣體遷移，透氣係數會隨上下流的壓差而變化。
3. 氣體壓力相對較高且飽和度低的情況下，細孔內的孔隙水不會移動，會產生氣體的單相移動。



也就是說，當氣體產生速率很慢時，氣體溶存在孔隙水中，並隨其擴散而遷移，故氣體可排出處置設施外，不會對障壁產生影響。但若溶存在孔隙水中的氣體擴散後沒有被完全排出，再加上氣體產生速率很快時，則會在達到障壁材料的氣體侵入壓前產生氣體蓄積。

此外，日本為了解材料的細孔徑分佈與破過特性 (Breakthrough characteristic) 之關係，利用飽和砂漿進行氣體遷移試驗，其結果如圖 2.2.3.7-1 所示。當氣體侵入飽和砂漿時，推估會產生的現象包括①細孔被水填滿的狀態下，氣體壓力將較大孔徑內的水擠出、②上游至下游產生連續氣體路徑之時間點即會產生破過、③而後孔徑較小處也會產生相同現象。由圖 2.2.3.7-1 下方的(a)圖可知，細孔徑大小與孔隙量皆必須超過某個值才會產生破過。圖 2.2.3.7-1 下方的(b)圖則採用水灰比 150%~300%之水泥砂漿試體進行實驗，水灰比較小的材料，發生破過所需的壓力越大。但實際上用於處置設施的水泥類材料，其水灰比較前述實驗使用之試體更小，因此仍需留意高氣體壓力可能對障壁產生影響。

## (二)飽和膨潤土類材料的氣體遷移機制

對於容易產生變形的膨潤土類材料而言，氣體遷移機制較為複雜。日本有相關研究針對飽和壓密的膨潤土進行氣體遷移實驗，當氣體壓力上升時，評估試體中心及容器介面附近的排水及氣體排出行為之差異，其氣體遷移機制如圖 2.2.3.7-2 所示。多孔質介質受到氣體壓力作用，兩相流的氣體侵入至膨潤土中，隨著氣體壓力增加，膨潤土中形成氣體路徑，氣體壓力使膨潤土中的全土壓上昇，因水力壓裂 (Hydraulic fracturing) 而產生龜裂，較大的破過現象亦隨之產生。亦即當氣體產生速度快時(或膨潤土滲透率低)，氣體無法藉由溶存在水中而擴散或是藉由兩相流遷移，故無法將



氣體完全排出至處置設施外，且在達到水力壓裂的 界壓力前，氣體皆有可能有蓄積在處置設施內。此外，氣體發生破過而形成遷移路徑時，低透水層可能會有局部透水係數增加的狀況發生。但由過去的實驗數據可知(圖 2.2.3.7-3)，破過後的再飽和可修復遷移路徑，透水性幾乎可以回復到破過前的狀況。

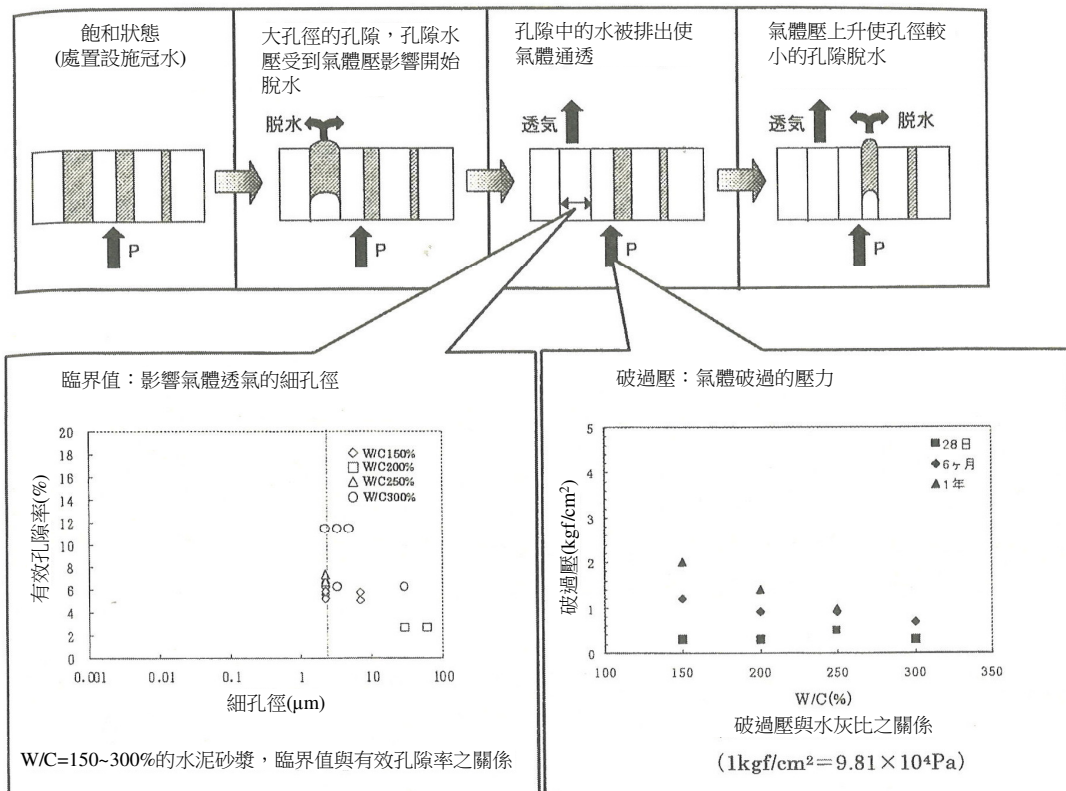


圖 2.2.3.7-1 飽和水泥砂漿試體的氣體遷移概念示意圖

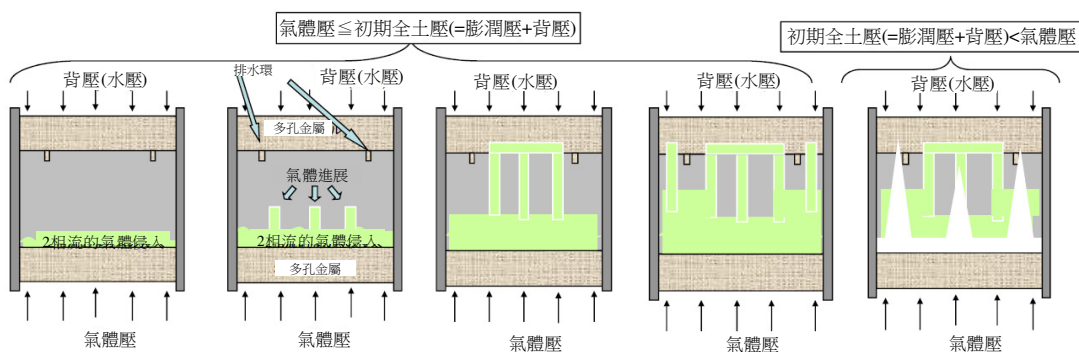


圖 2.2.3.7-2 膨潤土中的氣體遷移機制

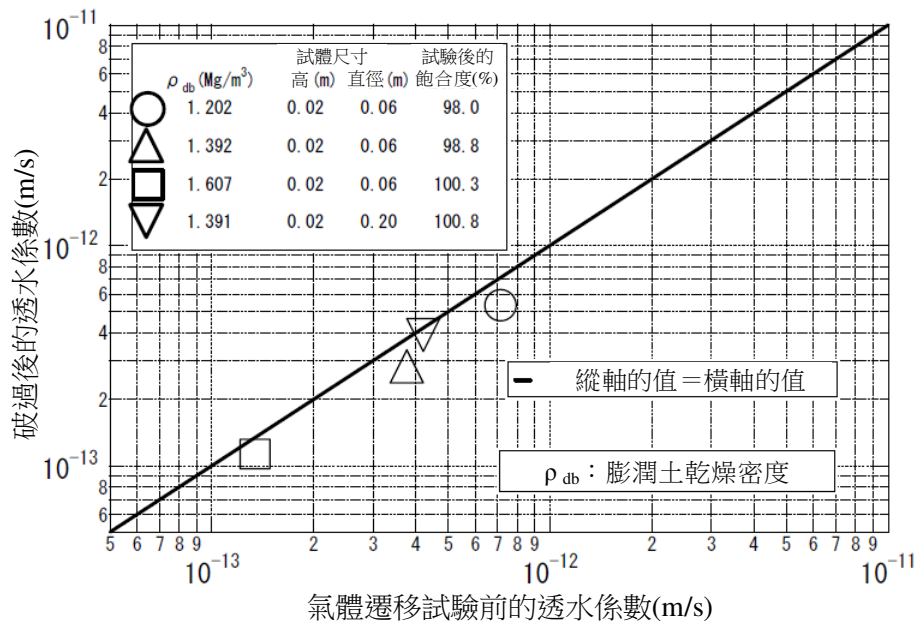


圖 2.2.3.7-3 氣體遷移試驗前後的透水係數比較

此外，因直接觀察膨潤土內部的氣體遷移狀態，實行上較為困難，將現有對氣體遷移機制的研究，整理如表 2.2.3.7-1，但也須留意不同研究間，對於氣體遷移機制的解釋並非完全相同。今後對於高密度膨潤土的氣體遷移機制，仍需有更詳細的研究與理解。

## 二、評估方法

以鋼筋腐蝕評估的氣體產生量、產生速率、廢棄物包件條件等項目作為設定的輸入條件，利用數值解析預測處置設施的氣體遷移行為(作用於工程障壁各構件的氣體壓、水壓等)。依此結果評估工程障壁各部分及整體處置設施的力學安定性。但受限於前述的飽和水泥類材料與飽和膨潤土類材料的氣體遷移試驗案例不多，加上材料特性(水泥類材料的配比、養護條件；膨潤土類材料的密度、膨潤特性等)也會影響氣體遷移特性，故須事先由室內氣體遷移試驗等方法，掌握該材料的氣體遷移特性。有關氣體產生對工程障壁的影響評估流程，如圖 2.2.3.7-4 所示。

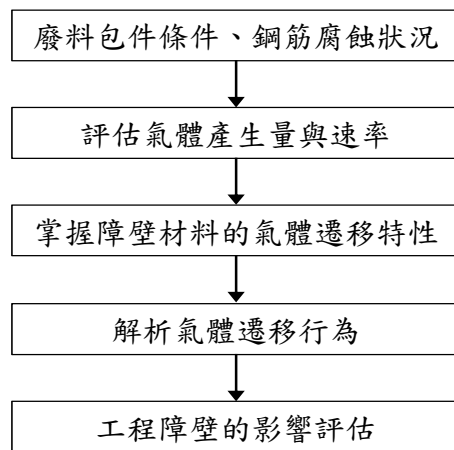


圖 2.2.3.7-4 氣體產生對工程障壁的影響評估流程

將適用於工程障壁材料的氣體遷移行為之解析程式及其概要說明與特徵，彙整如表 2.2.3.7-1 所示。解析程式大致可分為三類，分別說明如下。

1. 以連續介質兩相流模型為基礎之程式：

以兩相流模型為基礎之解析程式，可用於岩盤等多孔質介質的流體傳輸問題，已有許多使用實例。且近年來對於工程障壁材料的氣體遷移解析，也增加了許多驗證案例。對於膨潤土中形成最佳流路的氣體遷移而言，本質上為連續介質模型，但並沒有整合相關理論，需藉由增加與氣體壓力相關的孔隙率或滲透率的變化模型基本公式後，才可表現出氣體壓力使氣體流量急速增加等現象。此種機能較容易利用兩相流模型的組合進行相關模擬，在解析實際規模問題上，數值安定性的信賴度較高，但仍須留意參數設定時的觀性。

2. 氣體經由選擇的路徑遷移之解析程式：

對於膨潤土類材料形成最佳流路的氣體遷移機制而言，相關理論的整合度高，且對室內氣體遷移試驗亦有較高的重現性。但氣體遷移特性中最基本的參數，如龜裂的

幅度與方向等，幾乎無法由實測值決定，僅能藉由擬合(fitting)決定，且還有多維化及升尺度(upscaling)等較為困難的問題。

### 3.其他連續介質模型之解析程式：

此處的連續介質模型與前述不同，並不使用兩相流理論。在表 2.2.3.7-2 中，本分類模型之共同特徵為計算的必要參數多且包含物理意義上不明確的參數。此外，有研究報告指出，GAMBIT-GWS 模型無法解決力學的不安定問題。故期望今後對於參數的設定方法與根據能更明確化，且能與試驗結果比較後進行驗證。

進行場址等級的氣體遷移試驗，評估解析程式的適用性。例如在瑞士的 Grimsel 試驗場所進行的氣體遷移試驗，此試驗建構一個與實際規模大小相同的工程障壁，工程障壁包括混凝土豎坑(silo)及 20%膨潤土混合土，經過數年達到飽和後，進行氣體遷移試驗(Gas Migration Test, GMT)。量測氣體注入過程即注入後之壓力反應，並以 TOUGH2、CODE-BRIGHT、GETFLOWS、ROCKFLOW、MHERLIN 等 5 種模型進行解析，結果如圖 2.2.3.7-5 所示，除部分結果差異較大外，大部分的解析模式都可重現實測的壓力反應行為。

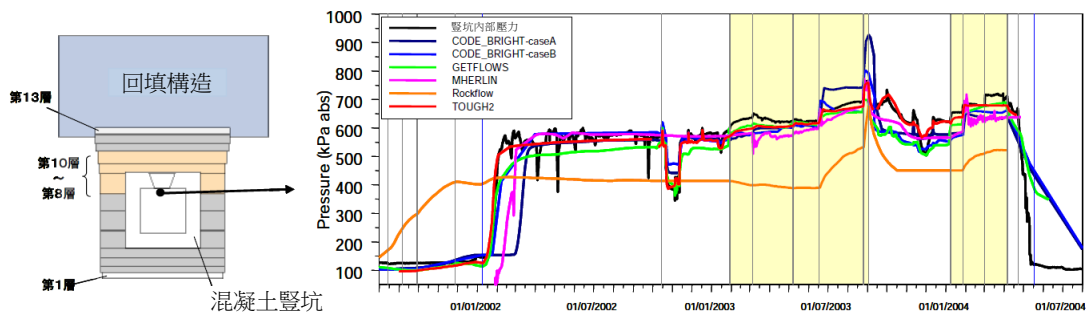


圖 2.2.3.7-5 GMT 的豎坑內部壓力及二相流解析解之比較

表 2.2.3.7-1 高密度膨潤土中的氣體遷移機制之相關研究

文獻、試驗條件	氣體遷移機制說明		與田中等人提出的機制之整合性	田中等人提出的機制
Horseman 等人 試驗條件： 壓密的 MX-80 乾燥密度 1.678~1.669(平均 1.678Mg/m <sup>3</sup> )、 1.555~1.605(平均 1.577Mg/m <sup>3</sup> )	1	初期時，氣體壓超過水壓與膨潤壓時，氣體才會侵入飽和膨潤土。	x	氣體壓大於背壓，氣體開始入侵。
	2	由毛細管壓推測所得之初期飽和膨潤土的氣體侵入壓非常大時，孔隙水與氣體直接置換且不會導致生成 2 相流。由毛細管壓推測所得之氣體侵入壓小於氣體壓時，會造成膨潤土破壞。	x	到大破過發生前，可藉由 2 相流與氣體路徑(良好流路)透氣透水。
	3	氣體壓的拉力破壞會形成龜裂，氣體會在不連續面移動。若不存在此種氣體路徑，則對氣體而言，初期飽和膨潤土完全不具滲透性。	x	可推測 2 相流也有氣體遷移。
Hoch 等人 材料：飽和膨潤土	1	不受孔隙構造實質變化影響之傳統 2 相流概念，與此概念一致的孔隙水移動所造成的氣體遷移。	○	到大破過發生前的所有過程，皆有 2 相流存在。
	2	因微小裂縫(Microfissuring)形成氣體路徑導致氣體遷移，形成此氣體路徑的主要原因是黏土構造改變。	△	至少在大破過發生前，連結內的氣體路徑有先路徑存在。如果此微小裂縫被氣體路徑換，則左列  △會是○。

	3	黏土試體的巨觀裂縫 (Macroscopic fracture) 造成的氣體遷移。	△	如果巨觀裂縫被大破過換，則左列△會是○。
Graham 材料：加拿大產 黏土	1	受到毛細管壓與水力梯度影響的 2 相移流。	○	2 相流存在於大破過發生前的所有過程。
	2	溶存氣體擴散。	△	推估應會產生。
	3	氣體蓄積造成許多大孔隙，導致土構造變形。	○	由 6cm 試體實驗結果可知，到大破過發生前的所有過程中，孔隙水壓不會等於 0。
	4	最小主應力小於材料的抗拉強度，導致龜裂 (fissuring) 與水壓破碎。	△	氣體壓大於初期土壓後，會產生大破過，此兩者間並沒有 存在。但氣體壓與最小主應力、材料抗拉強度間之關係，無法從此研究中獲得相關結果。



表 2.2.3.7-2 氣體遷移解析程式的特徵與驗證案例

種類	解析程式名稱	解析程式的概要與特徵	氣體遷移試驗的驗證實	
			室內試驗	現址試驗
以連續兩相流模型為基礎之程式	TOUGH2	LBNL 開發的多相流解析模型。因程式已經公開，故日本國內外多相流解析的案例豐富。適用於膨潤土中的氣體遷移，也可獨自導入壓力與孔隙率之關係。	砂漿、水泥漿體 混凝土 70% kunigel V1	GMT(20% kunigel V1+混凝土+岩盤)
	GETFLOWS	基本上與 TOUGH2 有相同的功能，但導入材料的孔隙力上升造成孔隙擴大，亦即「流路擴幅現象」。對於溶存氣體可採用速度論。	—	GMT(20% kunigel V1+混凝土+岩盤)
	CODE-BRIGHT	兩相流、力學、熱的耦合模型。力學變形以不飽和土壤擴張後的彈塑性模型為主，同時也可考慮膨潤土的膨潤行為。	Boom Clay	GMT(20% kunigel V1+混凝土+岩盤)
	TOPAZ	為兩相流解析模型的一種。但導入「絕對滲透率及孔隙率會隨流體壓力而變化之關係」。	Boom Clay	—
	ROCKFLOW	原先為解析有龜裂的多孔質介質之兩相流行為所開發之模型。現在擴展為「熱、水理、力學耦合模型」。	—	GMT(20% kunigel V1+混凝土+岩盤)
	MHERLIN	熱、水理、力學耦合的有限元素模型。	—	GMT(20% kunigel V1+混凝土+岩盤)
考量氣體經由選擇路徑之解析程式	維管束模型	對於介質中不同管徑的毛細管，氣液介面的移動速度以 $\text{agen-Poiseuille}$ 式表示。評估抵抗氣體壓及毛細管表面張力的壓力差造成的表面水之行為。但毛細管分佈等主要參數很難實際測量。	Boom Clay	—
	GARNET	假設毛細管為格子狀聯結，毛細管的機率密度函數為 $\chi^2$ 數分布。單一毛細管中的流動依循維管束模型。與維管束模型相同，主要參數很難實際測量。	—	—
	Multiple Front Propagation Model (MFPM)	對於上述的維管束模型，以氣體壓造成的毛細管擴張及不同的管徑、長度與方向的毛細管組合，加上機率論產生的流路，則可對遷移介質的不均質性進行評估。但主要參數幾乎無法實際測量。	Boom Clay	—
	GMClay	國際共同研究計畫 GAMBIT Club 的第一階段模型。氣體會產生拉應力破壞黏土構造，若追加與龜裂進展方向相同幅度的體積要素，則可表現龜裂的發生與進行。因升尺度較為困難，故放棄開發。	MX-80	—
	中的提案模型	提出選擇路徑的氣液介面移動模型。模型導出的詳細項目與實驗的驗證不明。	—	—
其他連續介質模型之解析程式	改良型 TOUGH2	氣體壓會增加透過性，但氣體壓降低時遷移路徑會閉塞，此為膨潤土特有的現象。因此，與兩相流模型不同，採用自有的模型附加 TOUGH2。但需擬合參數多。	100% kunigel V1 70% kunigel V1 MX-80	—
	GAMBIT-GWS 模型	GAMBIT Club 計畫的第三階段模型。適用力學變形與介質中物質遷移的耦合。有關數值解上的問題仍在檢討中。	MX-80	—

評估氣體產生對工程障壁影響之方法，可利用前述氣體遷移行為解析獲得處置設施各構造的氣體壓力與水壓，或是利用其他力學解析方法、流體行為與力學變形耦合的解析方法等，評估處置設施構造的安定性。例如流體壓(氣壓+水壓)造成材料內部的張力破壞、水泥類材料的工作縫與裂縫擴大、確認工程障壁整體構造物之壓縮、拉力與剪力破壞等。

日本的低放射性廢棄物近地表處置設施、高放射性廢棄物深地層處置設施、TRU 廢棄物深地層處置設施等處置場，其用於測試氣體遷移解析及其對工程障壁影響評估所使用之模式，如表 2.2.3.7-3 所列。所有的研究報告都顯示「氣體對工程障壁之力學影響甚小」，且對於判斷有無影響的具體基準值，於評估方法內並沒有明確說明。期望今後能在相關資訊明確化後，考量處置設施的設施組成、障壁的材料特性、氣體產生速率及周邊環境條件等條件後進行評估。

表 2.2.3.7-3 日本的處置設施對氣體遷移解析的檢討案例

處置設施種類	模型中的組成設施	使用的解析模型	對工程障壁的影響評估結果
低放射性近地表處置	廢棄物包件、水泥砂漿、多孔混凝土處置窖、混凝土、膨潤土混合土(膨潤土 15%+砂 85%)	中的模型	設施的最大氣體壓力約為數公尺內的覆土厚度造成的壓力。
高放射性深地層處置	廢棄物包件(玻璃固化體、密封容器)、緩衝材(膨潤土 70%+砂 30%)、回填材、岩盤	TOUGH2	處置 30 年後，孔隙水壓上升到與地下水壓相當的程度，上升比例為初期孔隙水壓的 10%。不會對工程障壁的結構力學造成影響。
TRU 深地層處置	廢棄物包件、填充材、構造本體、支保工、緩衝材(膨潤土 70%+砂 30%)、岩盤	改良型 TOUGH2	設施內的壓力上升到與初期地下水壓 1.3Mpa~1.4Mpa 相當，對緩衝材的力學破壞可能性較低。

### 三、現況理解與今後發展

目前對於水泥類材料、膨潤土類材料的氣體遷移遷移機制尚在慢慢了解中，且日本或其他國 也有部分實驗案例可供參考。此外，氣體遷移解析程式的開發與驗證已有進展，室內實驗及現地實驗的規模也在提升，可藉由適當的參數設定，順利重現氣體遷移行為。

#### 2.2.3.8 水泥水化物的溶出、次生礦物生成的評估

##### 一、水泥水化物的溶出、次生礦物生成對工程障壁的影響

水泥類材料與地下水接觸後， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 等水泥水化物中的鈣會溶出，改變孔隙率及孔隙構造，會直接使水泥類材料的透水係數及擴散係數增加，此外，溶出也會導致水泥類材料的抗壓強度與彈性係數等力學特性降低。一 水泥類材料因強度不足而變形，低透水層的邊界條件產生變化，則低透水層的透水性也會間接受到影響。

水泥類材料與膨潤土類材料的孔隙水組成並不相同，兩者交界面會因化學梯度的 動而產生的溶質遷移的現象。對膨潤土類材料而言，高鈣濃度的孔隙水會使膨潤土類材料 Ca 型化，高鹼性濃度的孔隙水會使膨潤土類材料中的蒙脫石及副成分礦物溶解，進而影響抑制核種遷移的機能。對水泥類材料而言，溶出成分與地下水成分反應後，水泥類材料的表面會有方解石等次生礦物生成，次生礦物會填充水泥類材料的孔隙，抑制透水係數與擴散係數的增加。

溶出造成水泥水化物變質的機制，包括①含有 、鈣等溶解度高的鹼鹽之溶解與擴散；②氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )之溶解

與擴散；③ 酸鈣水化物(C-S-H)中的鈣離子( $\text{Ca}^{2+}$ )、氫氧根離子( $\text{OH}^-$ )、 酸根離子( $\text{SiO}_3^-$ )之溶解與擴散；④C-S-H 中 Ca/Si 比降低的部分 化。此外，前述變質的過程中，會使鈣離子 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) 在混凝土中的移動速度產生速率決定步 (bottleneck)。移動機制是依據構造物的設置環境，經由水流來輸 (移流)，以鈣濃度( $\text{Ca}^{2+}$ )分布作為 動力，產生擴散現象。不論何種 動力產生速率決定步 ，其結果都是由固相表面向層狀變質進行。

根據許多相關實驗研究結果可知，水泥水化物的溶出會因水泥材料的配比及地下水水質不同，造成溶出速度差異。日本利用 通波特蘭水泥試體(P-OrLs)及低熱波特蘭水泥加飛灰混合試體(P-LF、M-LF)，經過長時間的純水浸泡，檢討配比對溶出之影響，結果如圖 2.2.3.8-1 所示，P-LF、M-LF 原為溶解性較高之水泥水化物，但因  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量較少，故 P-LF、M-LF 試體的  $\text{Ca}^{2+}$  溶出量較 P-OrLs 試體低。此外，日本亦利用純水、淡水地下水模擬溶液、海水地下水模擬溶液等不同水質的地下水，將低熱波特蘭水泥加飛灰混合的試體(M-LF)浸泡在各種溶液下，檢討不同地下水水質對溶出的影響，結果如圖 2.2.3.8-2 所示，試體浸泡在淡水地下水模擬溶液與海水地下水模擬溶液中之鈣離子( $\text{Ca}^{2+}$ )溶出量較浸泡在純水中少。為了解此現象的發生原因，利用 EMPA 分析及 X-ray 反射分析溶液及試體，由分析結果可知，溶液中含有的碳酸氫離子( $\text{HCO}_3^-$ )與溶出試體的鈣離子( $\text{Ca}^{2+}$ )反應，在試體表面形成方解石沉澱層，抑制溶出的發生(圖 3.3.8-3)。

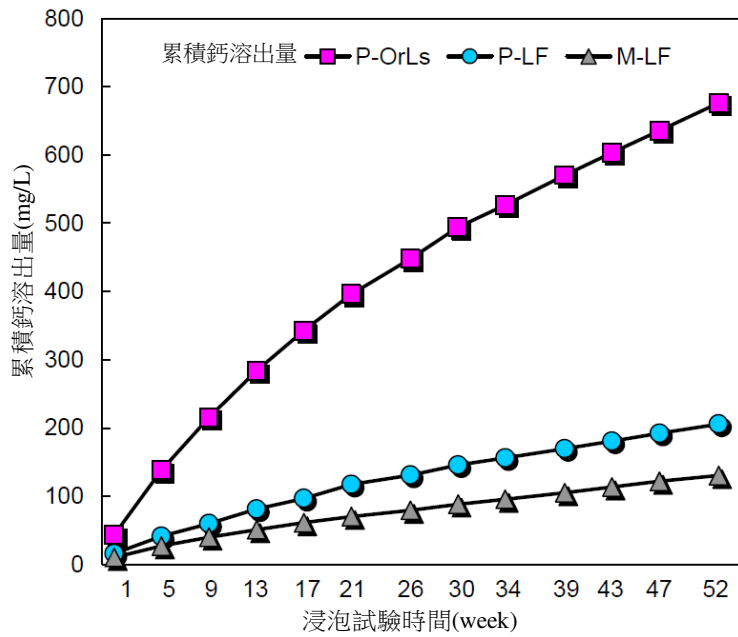


圖 2.2.3.8-1 不同配比的鈣離子溶出量

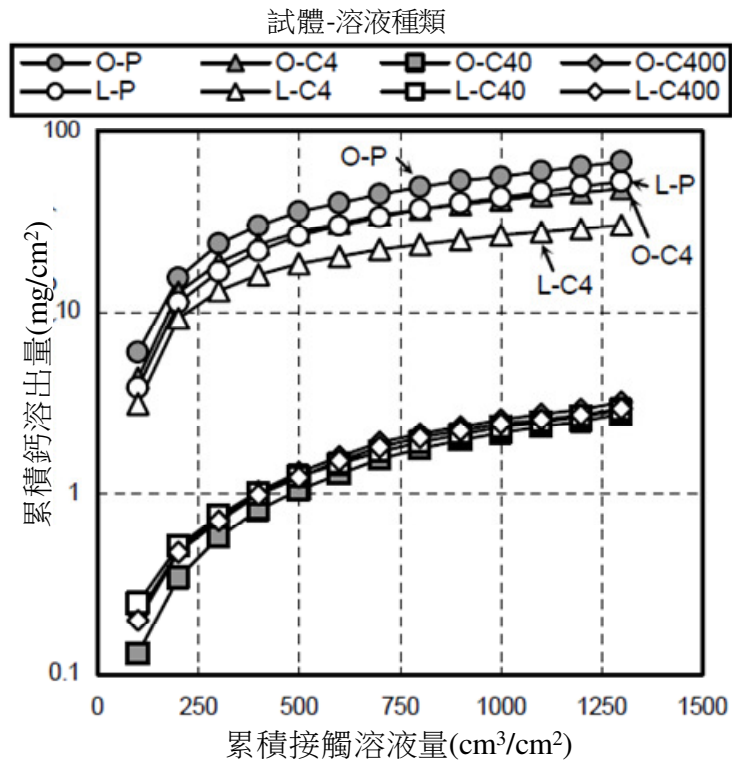


圖 2.23.3.8-2 浸泡在不同溶液中的鈣離子溶出量

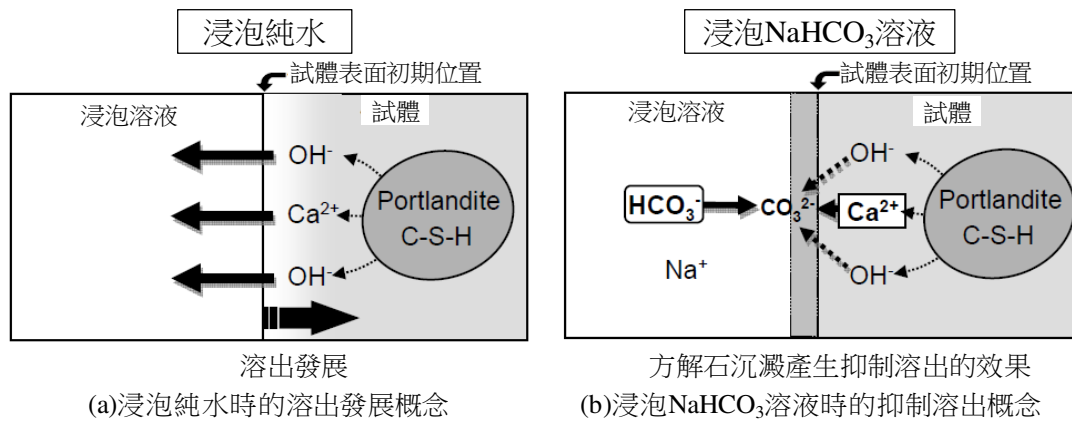


圖 2.2.3.8-3 碳酸氫離子抑制溶出現象的概念示意圖

水泥類材料的抗拉強度較抗壓強度小，故需考量裂縫對長期耐久性的影響。目前所進行的長期行為評估，包括水泥類材料的裂縫對透水、擴散之影響。此外，水泥類材料的長期行為中仍有尚未明的現象，包括裂縫附近的溶出、次生礦物的析出、含有裂縫材料的物質透過性變化等。目前日本為這些現象，仍在持續進行相關研究，例如利用具有裂縫的試體，經過浸泡試驗或通水試驗後，確認次生礦物的生成現象、溶出的裂縫幅度上限等。另一方面也同時研發單一裂縫內的物質遷移及通水方向的一維移流分散模型、硬化體固態部分的物質遷移及沿著裂縫垂直方向的一維擴散所組成的模型、物質遷移-化學平衡計算程式等。

## 二、評估方法

水泥硬化體中的鈣溶出現象評估，可利用下列解析方法。但因目前還沒有廣泛利用的評估方法，故可由下列方法中，選擇多種方法綜合評估。

1. 水化物溶解模型(使用地球化學平衡計算程式之模型、固液平衡模型等)。
2. 物質遷移模型(壓力梯度造成的移流、濃度梯度、電(Electrophoresis)等)。



3.物理與力學特性變化模型(以經驗法則與實驗為基礎之模型、孔隙率模型等)。

4.以經驗法則與實驗為基礎之劣化模型( $\sqrt{t}$ 法、多變量解析模型等)。

這些預測方法中，水化物溶解模型是先將過去的實驗數據公式化，以此公式評估 C-S-H 與  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  之溶解現象(固液平衡模型)，再以地球化學平衡計算程式配合固液平衡模型，評估水化物的溶解現象(使用地球化學平衡計算程式之模型)。而物質遷移模型則是以達西定律(移流)與 Fick 定律(擴散)為基礎的劣化預測模型(圖 2.2.3.8-4)。

由於地球化學平衡計算程式的精度，受到程式中的熱力學資料正確性影響。故可評估水中所含物質與水化物接觸造成的溶解反應與次生礦物生成反應之熱力學資料，對建構熱力學模型相當重要。此外，因水化物的溶解與沉澱造成之孔隙量及孔隙結構變化，可由實驗了解孔隙變化與物質遷移係數(擴散係數、透水係數等)之關係，並以此關係為基礎，建構物質遷移係數評估模型，若能多加考量裂縫與冷縫缺陷，則可有效提高模型之精度。有關水泥水化物溶出的代表模型，整理如表 2.2.3.8-1 所示，使用時須注意適用範圍。

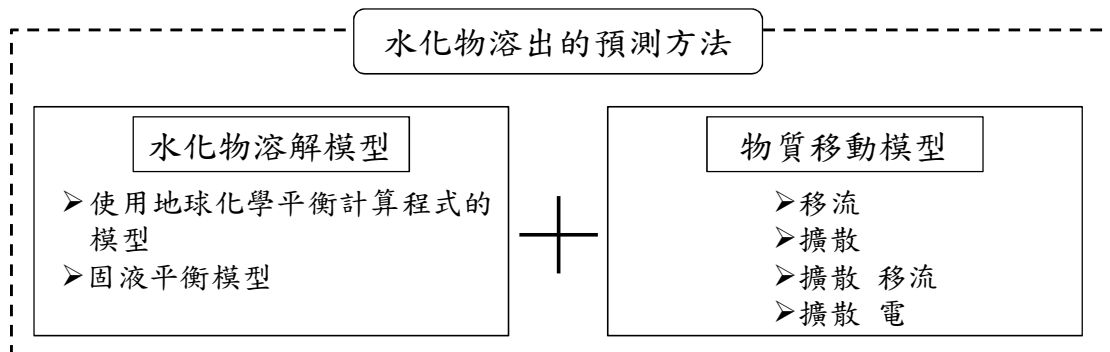


圖 2.2.3.8-4 水化物的溶出預測方法

表 2.2.3.8-1 水泥水化物的溶出模型

模型名稱	概要
Atkinson 等人(1989)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Greenberg、Atkinson 針對 酸鈣水化物(C-S-H)的實驗數據</li> <li>對象礦物：NaOH、KOH、Ca(OH)<sub>2</sub>、C-S-H</li> </ul>
Berner(1989)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MINEQLE database</li> <li>對象礦物：Ca(OH)<sub>2</sub>、C-S-H、HG、CASH、Aft</li> </ul>
豐原等人(2002)、Yamada 等人(2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>PHREEQE 平衡計算</li> <li>對象礦物：Ca(OH)<sub>2</sub>、C-S-H、CASH、Aft、CaCO<sub>3</sub></li> </ul>
山等人(2001)、Sugiyama 與 Fujita(2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>HARPHRQ 平衡計算</li> <li>對象礦物：Ca(OH)<sub>2</sub>、C-S-H、HT、Aft</li> </ul>
橫關等人(2003)、橫關(2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>依據實驗數據建構的模型</li> <li>對象礦物：NaOH、KOH、Ca(OH)<sub>2</sub>、C-S-H、CaCO<sub>3</sub></li> </ul>
半井等人(2005)、半井等人(2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>依據實驗數據建構的模型</li> <li>對象礦物：Ca(OH)<sub>2</sub>、C-S-H</li> </ul>

此外，因水泥硬化體溶出鈣而使強度降低之評估，是以水泥砂漿的抗壓強度降低率，代表鈣溶出對混凝土抗壓強度之影響，其關係式如下，結果如圖 2.2.3.8-5 所示。

$$\sigma_c = \sigma_{c0} \times \alpha_{Sc} \times R_{Sp}$$

$$\alpha_{Sc} = 1 - (L_c/100) \times (1 - R_{Sc(Lc=100)}/R_{Sp(Lc=100)})$$

$$R_{Sc(Lc=100)} = \sigma_{c(\min)}/\sigma_{c0}$$

$$R_{Sp(Lc=100)} = \exp(-0.0762 \times a \times L_c)$$

$$a = 1.038 \exp(-0.0135 \times (W/C))$$

其中：

$\sigma_c$ ：水泥系材料的抗壓強度(MPa)

$\sigma_{c0}$ ：水泥系材料的初期抗壓強度(MPa)

$\alpha_{Sc}$ ： $L_c=100\%$ 時，水泥類材料的抗壓強度達下限值之修正係數

$L_c$ ：鈣溶出率(%)

$R_{Sp}$ ：水泥砂漿的強度降低率

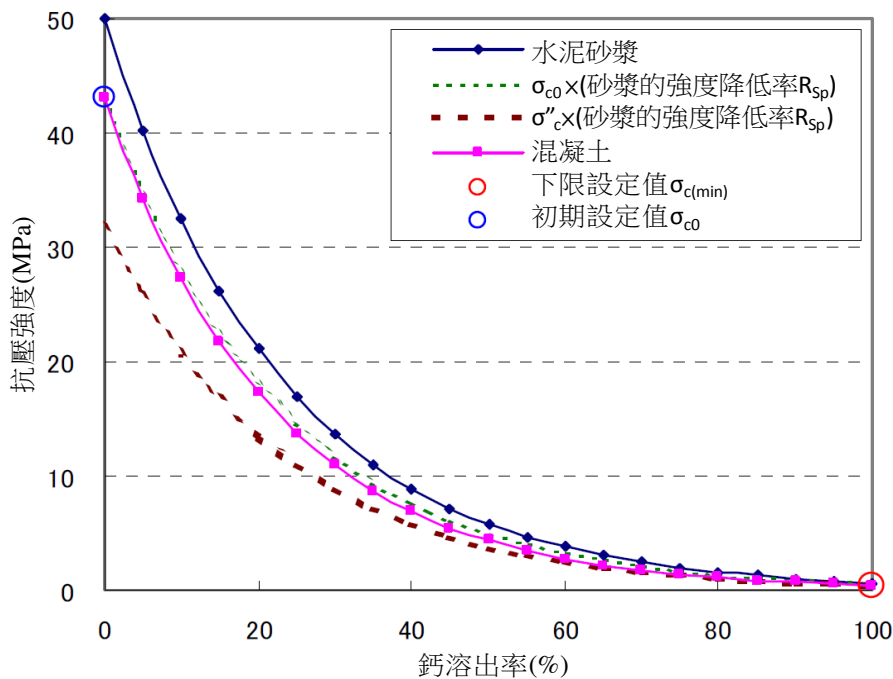


圖 2.2.3.8-5 混凝土抗壓強度與溶出率之關係

此外，日本彙整相關溶出試驗結果，找出水泥砂漿及混凝土的強度與彈性係數之評估模型，其公式如下所示，其結果如圖 2.2.3.8-6 所示。

混凝土的彈性係數：

$$E_c = 21000 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times (\sigma_c / 20)^{0.5} \quad [\text{MPa}]$$

其中：

$\gamma$ ：單位容積質量( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )

$\sigma_c$ ：抗壓強度

砂漿的彈性係數：

$$E_m = 1.999 \times 10^3 \times \sigma_m^{0.610} \quad [\text{MPa}]$$

其中：

$\sigma_m$ ：抗壓強度

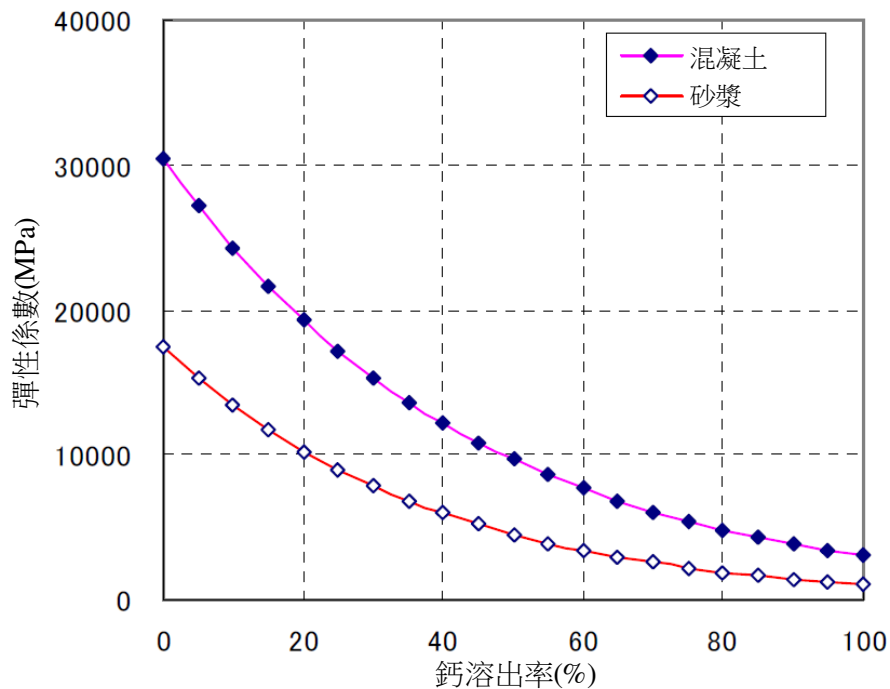


圖 2.2.3.8-6 水泥類材料的彈性係數與溶出率之關係

### 三、現況理解與今後發展

土木學會彙整混凝土的化學侵蝕與溶出等相關研究與現況，以及水壩、水路構造物、水道設施等水利設施的水泥水化物溶出變質之調查，提出各種有關溶出的機制與解析方法，提供溶出現象的預測與評估之方向。

水泥類材料的設計及評估回填後的長期狀態時，需了解微量水化物的溶解與沉澱現象的機制，以及溶解反應造成的二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ ) 與硫酸根離子之行為。溶出與次生礦物的生成主要受到環境影響，故長期評估時，除須考量各種變動要因外，也需將滲流、鋼筋腐蝕、膨潤土膨潤壓及岩盤潛變等長期環境變化之影響納入考量。

為提高評估之信賴性，對於不飽和時的行為反應、溶解模型的適用性調查等題亦需考量。相較於溶出時間，由於不飽和時間比溶出時間短，雖然影響較小，但仍可利用數值解析與實驗評估進行量化分析。溶解模型是利用諸多假設與

限制條件前提下所獲得的實驗資料所建構之模型，因有限制使用對象礦物，在使用前須確定適用條件。

今後將持續累積基本資料，進行相關題的研究，也希望能提高水泥類材料變質的天然類比研究之評估精度。

### 2.2.3.9 膨潤土類材料 Ca 型化的評估

#### 一、膨潤土類材料 Ca 型化對工程障壁的影響

膨潤土分為 Na 型與 Ca 型兩種，Na 型膨潤土是指結構層間的交換陽離子以 Na 離子為主，Na 離子含量較多的膨潤土，膨潤性及低透水性較佳。Ca 型膨潤土是指交換陽離子以 Ca 離子為主，Ca 離子含量較多的膨潤土，低透水性與膨潤性皆不佳。因此，目前以低透水性較佳的 Na 型膨潤土作為處置設施緩衝材的主要材料。處置設施中的水泥類材料會因水泥水化物溶出，使地下水中的 Ca 離子濃度維持在高濃度狀態。膨潤土的層間 Na 離子會與地下水中的 Ca 離子進行交換，使透水性增加及膨潤性降低，並對障壁性能產生影響。除了 Ca 型化以外的離子交換反應以外，還有廢棄物包件容器與鋼筋提供之鐵離子所產生的 Fe 型化，Fe 型化對緩衝材性能的影響程度，大致上與 Ca 型化相同。有關 Ca 型化的相關研究成果彙整說明如下：

1. Na 型膨潤土與 Ca 型膨潤土的有效黏土密度與透水係數的關係如圖 2.2.3.9-1 所示。由圖可知，當有效黏土密度相同時，Ca 型膨潤土的透水係數會大於 Na 型膨潤土的透水係數，但隨著有效黏土密度增加，兩者差異會縮小。
2. 針對不同 Ca 型化比例的 kunigel V1 膨潤土(Na 型膨潤土)，利用透水係數與孔隙率之實驗數據資料，找出透水

係數與 Ca 型化比例之關係式，如圖 2.2.3.9-2 所示。當孔隙率越小(有效黏土密度越大)，Ca 型化對低透水性的影響較小。

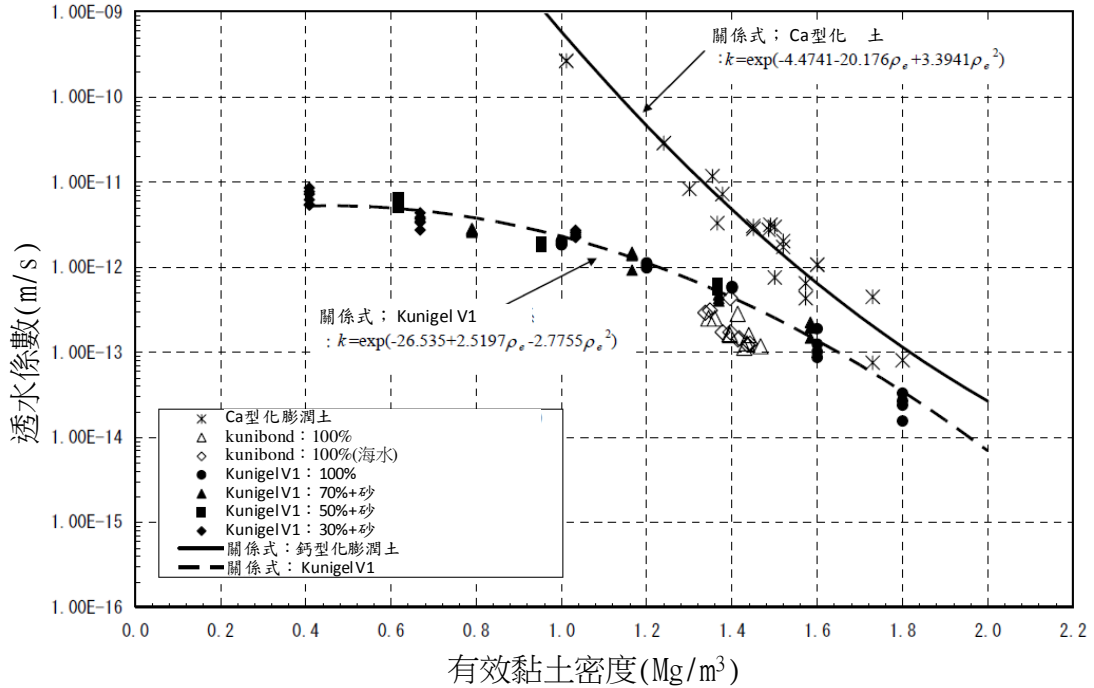


圖 2.2.3.9-1 Na 型膨潤土與 Ca 型瓶潤土的有效黏土密度與透水係數之關係

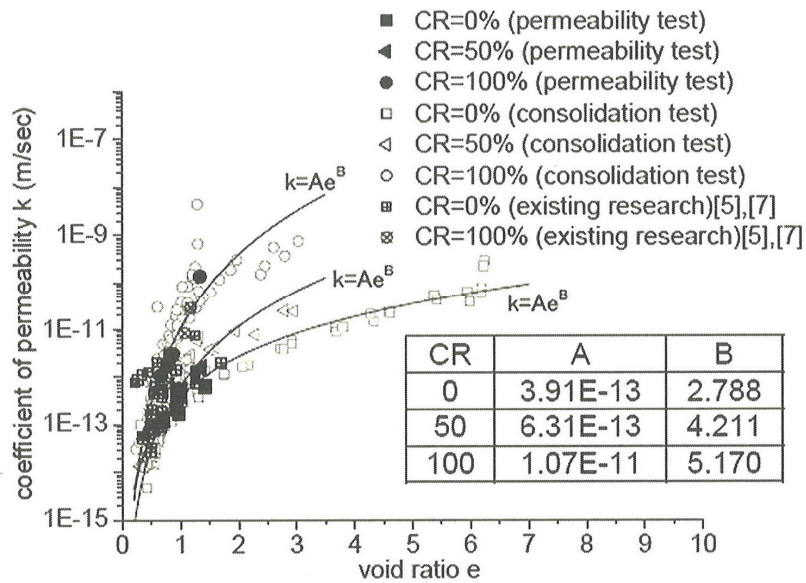




圖 2.2.3.9-2 膨潤土在不同 Ca 型化比例下，孔隙率與透水係數之關係

3. 對 kunigel V1 膨潤土(Na 型膨潤土)以鹽化鈣強制進行陽離子交換，取得 Ca 型化膨潤土的有效擴散係數，並與 Na 型膨潤土過去的實驗結果相互比較，如圖 2.2.3.9-3 所示。圖中為氚(H-3)的有效擴散係數與有效黏土密度之關係，當有效黏土密度越大，則有效擴散係數越小，但 Ca 型化卻不會對有效擴散係數造成影響。
4. 利用鹽化鈣將 kunigel V1 膨潤土(Na 型膨潤土)Ca 型化，以比較兩者間的最大膨潤壓差異，如圖 2.2.3.9-4 所示。當有效黏土密度超過  $1.6 \text{ g/cm}^3$  時，Ca 型化對最大膨潤壓沒有太大影響，但有效黏土密度較低時，Ca 型化膨潤土的最大膨潤壓比 Na 型膨潤土低。
5. 當有效黏土密度越大時，最大膨潤率也會隨之增高，但 Ca 型化膨潤土而言的膨潤率增加趨勢較小，其最大膨潤率約為 Na 型膨潤土的 1/5 左右，如圖 2.2.3.9-5 所示。

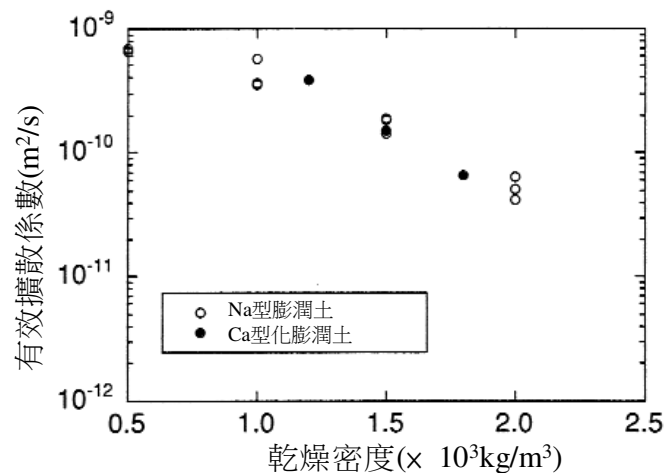


圖 3.3.9-3 Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土，其有效黏土密度與 H-3 的有效擴散係數之關係

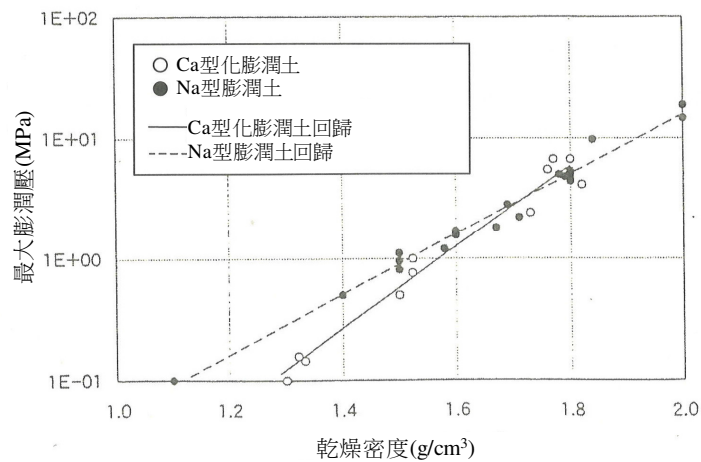


圖 2.2.3.9-4 Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土，其有效黏土密度與最大膨潤壓之關係

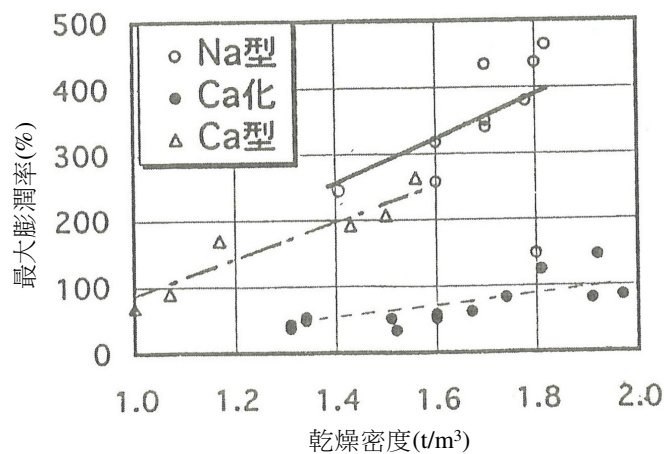


圖 2.2.3.9-5 Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土的最大膨潤率差異

## 二、評估方法

依據以下順序評估膨潤土 Ca 型化之影響。

1. 利用實驗數據掌握 Ca 型化程度對透水性之影響。
2. 掌握混凝土溶出之 Ca 離子濃度隨時間變化之關係。
3. 將膨潤土的離子交換反應模型化。
4. 依據 1~3 項之結果，進行擴散解析或移流與擴散解析，分析膨潤土的 Ca 型化程度及其透水性變化。

### 三、現況理解與今後發展

以目前的研究，尚無法針對交換性陽離子變化精確評估其變化機制與時間之關係，故對於 Ca 型化的程度及其各種特性變化，僅能根據相關試驗數據資料及解析概略的掌握。

當水泥類材料與膨潤土類材料共存時，由於陽離子交換反應較一般反應快，故在質量守 的前提下，保守假設水泥類材提供的 Ca 離子全部在 間將膨潤土 Ca 型化。但實際上，因地下水組成、水泥類材料的 Ca 離子溶出速度、Ca 離子的移流速度與擴散速度、膨潤土的陽離子交換反應速度等因素影響，而使長期性的變質分布產生差異。為提高長期性變質預測解析精度之信賴性，故需取得 Ca 型化速度之相關資料，並檢討 Ca 型化膨潤土的長期空間分布變化。未來將持續針對 Ca 型化以外的陽離子交換反應(與鋼筋、支保工、廢棄物包件的金屬離子之反應)進行研究。

#### 2.2.3.10 蒙脫石溶解、副成分礦物溶解及次生礦物生成的評估

##### 一、蒙脫石溶解、副成分礦物溶解及次生礦物生成對工程障壁的影響

處置設施的水泥類材料，其水泥成分的溶出作用會產生高鹼性孔隙水，可能會使蒙脫石及其他膨潤土的組成礦物溶解或生成次生礦物。蒙脫石溶解產生的次生礦物包括 C-H-S 膠體、石(Zeolite)或混合層礦物，可經由室內試驗確認。副成份礦物的溶解或沉澱，則包括方解石、石、(Chalcedony)及長石等礦物的溶解與沉澱、硫酸鈣的溶解、黃鐵礦氧化等。

這些廣泛的化學變質會使膨潤土的膨潤性受損，影響低透水層的水理特性。此外，因膨潤土的變質及礦物組成的變化、廢棄物包件漏出之輻射性物質、膨潤土類材料溶出之離子等因素，亦會改變低透水層的吸附特性，影響吸附分配係數。

## 二、評估方法

蒙脫石與鹼性溶液相互作用，會因溶解反應與溶解物質而生成新的礦物。其評估方法可依據下列順序進行。

1. 利用遠離平衡態等實驗求得粉狀蒙脫石與膨潤土副成份礦物的溶解速度公式。
2. 考量反應平衡之地球化學解析程式。
3. 考量上述 1、2 項後，利用移流與擴散解析掌握膨潤土層的密度分布與時間變化。

## 三、現況理解與今後發展

可反應溶解、變質、沉澱及礦物生成之化學反應模型與物質遷移模型組合而成之評估方法，TRU 廢棄物處置設施即利用此方法，定量評估處置設施經過 10 萬年以後之蒙脫石與副成份礦物的溶解及次生礦物的生成。蒙脫石溶解是因為長期且持續的高鹼性環境造成，故長期評估時須累積蒙脫石的安定性、C-H-S 膠體的產生等相關資料，並同時針對速度論進行檢討。有關膨潤土的變質、溶解與沉澱之實驗資料，已有相當多實驗數據，今後仍需持續研究孔隙水的物理化學性質、離子交換性、擴散、溶解及次生礦物生成等現象的壓縮狀態效果(限制空間的溶液反應實態)。此外，利用地球化學解析程式評估溶解物質及新礦物生成時，需適當判斷評估對象為初期礦物或次生礦物，並持續擴充熱力學的數據資料。

處置後數十年程度的短期現象，對於 TRU 廢棄物及高放射性廢棄物等具有發熱特性的廢棄物包件而言，當廢棄物包

件發熱使溫度梯度上升時，於低溫下溶解度較高之礦物，因膨潤土類材料的低溫部份溶解，再度沉澱於構造體內側及廢棄物包件表面。例如硫酸鈣(石膏(Gypsum)及硬石(Anhydrite))與方解石即具有此種特性。瑞典 SKB 的 Äspö 硬岩實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory)及日本的相關室內實驗研究，都有實際觀測到這些現象。對於地下坑道處置的工程障壁結構，因溫度梯度平緩，推估較不易產生此現象，並可藉由提升解析方法以增加此推論之信賴性。

### 2.2.3.11 近場的力學行為評估

#### 一、近場的力學行為對工程障壁的影響

工程障壁的主要機能要求為低擴散性及低透水性等抑制核種遷移之機能，評估長期性能時，須同時檢討物理及化學的影響。各影響要因及其對工程障壁影響之概要，可參考 2.2.3 節之說明，而各影響要因於現狀下之評估方法，則已詳述於 2.2.3.1~2.2.3.10 節中。

考量工程障壁的長期狀態變化時，對水泥類材料而言，因鋼筋腐蝕或水泥水化物溶出等現象，使水泥類材料的密度及孔隙率等物理特性產生變化，導致強度與彈性係數等力學特性也跟著改變。對膨潤土類材料而言，因交換性陽離子反應或高鹼性孔隙水等因素之影響，產生蒙脫石溶解等化學變質，將可能改變膨潤特性。這些工程障壁的化學變質並不會直接影響工程障壁的透水性及擴散性，但可能因力學行為改變而直接影響工程障壁的性能。因此，需針對各影響要因個別檢討，同時考量各影響要因之交互作用，以評估近場的力學行為。



## 二、評估方法

各影響要因的評估方法已於 2.2.3.1~2.2.3.10 節中詳述，因此本章節主要針對各要因交互作用下之力學行為進行評估。

若評估的對象不是特殊的組成方程式或複雜的非線性行為，則可使用一般常用的力學解析方法評估工程障壁之力學行為。綜合考量解析方法的適用性與精度，加上有限元素法的發展已相當成熟且已多 泛用程式可供選擇，故可利用有限元素法進行相關分析。此外，亦可根據分析對象、分析內容與分析特徵，從材料非線性解析方法、幾何學非線性解析方法等其他評估方法中，選出適合之評估方式。

由於力學解析使用的泛用程式大都為解決力學問題而研發，無法直接分析化學造成之影響。因此，評估化學變質對力學行為的影響時，最好利用可解決化學變化與力學變化相互作用之耦合解析方法進行評估。

## 三、現況理解與今後發展

正常地質環境條件下，一般土木構造物的使用年限內，材料的化學變質對材料的力學特性影響較小。但回填後的數十年內，則需考量不飽和膨潤土的不均勻滲透行為、膨潤土類材料的膨潤壓、膨潤土類材料的沉陷、廢棄物包件的發熱及地震等影響。評估方法已於前述相關章節中詳述，並可利用實測值驗證解析結果的適當性。

各影響要因交互作用下，對工程障壁的長期狀態變化之影響，須利用可評估化學變遷與力學變遷耦合之解析方法，日本對於此解析方法尚處於開發研究階段。

希望今後能持續提升各種模型的完整度與精度、增加對無法經由實驗確認的長期現象之說明性、提高地下水入滲與膨潤土類材料耦合評估研究之信賴度。



## 2.2.4 工程障壁的核種遷移評估之參數設定

### 2.2.4.1 水泥類材料的透水係數及有效擴散係數之設定

#### 一、工程障壁狀態變化導致透水係數與有效擴散係數改變

水泥類材料在硬化過程中，因水化熱與自生收縮而產生裂縫，硬化後則因乾燥收縮或營運時與回填後的載重變化而增加裂縫產生的可能性。處置窖為鋼筋混凝土結構物，從過去的經驗可知，處置窖於建設營運階段產生的裂縫，可透過其他方法加以控制，但卻無法避免因鋼筋腐蝕產生膨脹壓等長期狀態變化導致的裂縫生成。低擴散層為無筋砂漿構造物，僅靠砂漿抵抗拉應力，故抑制裂縫產生的能力較低弱。此外，水泥類材料因地下水長時間作用，產生水泥水化物溶出與次生礦物生成，使孔隙構造改變，進而影響透水性與擴散性。

裂縫的存在對水泥類材料的透水係數影響甚大，尤其是裂縫貫通時對透水係數的影響更為顯著。但對處置設施整體的透水性而言，若膨潤土類材料的低透水層能發揮預期的機能，則幾乎可以不用考慮水泥類材料的裂縫影響。

水泥類材料的有效擴散係數是根據裂縫部分與健全部分的斷面積比來決定，並隨著裂縫的產生與擴張而增加。此外，水泥水化物的溶出使孔隙率增加，有效擴散係數也隨之增加。

#### (一) 透水係數

水泥類材料的透水係數會受到裂縫及孔隙率影響。因裂縫造成的透水量與壁面內外的水力梯度或裂縫幅度成正比，故可由適當的試驗確認裂縫產生的透水量，若無法進行

試驗時，可利用以下公式，並參考過去的實際經驗與研究成果設定係數  $a$ ，以求得裂縫產生的透水量。

其中，

$Q_{cjd}$ ：透水量設計值( $m^3/s$ )

$w$ ：裂縫幅度設計值( $m$ )

$b$ ：檢查對象的裂縫長( $m$ )

$h$ ：構造物內面與外面的水頭差( $m$ )

$L$ ：透水路徑長，相當於檢查對象的斷面厚度期望值( $m$ )，

一般採用設計斷面厚度

$\gamma$ ：水的單位重( $N/m^3$ )

：水的黏性係數( $Ns/m^2$ )

$a$ ：裂縫在材料內的彎曲程度及裂縫的表面度之影響係數(例如：當裂縫面平滑且平行平板時，係數  $a$  為 1，當  $a$  為 25 時，透水量幾乎達到上限)

利用上式及達西定律(流速=透水係數×水力梯度)的換算，可求得砂漿單位面積的透水係數與裂縫幅度之關係，其結果如圖 2.2.4.1-1 所示。

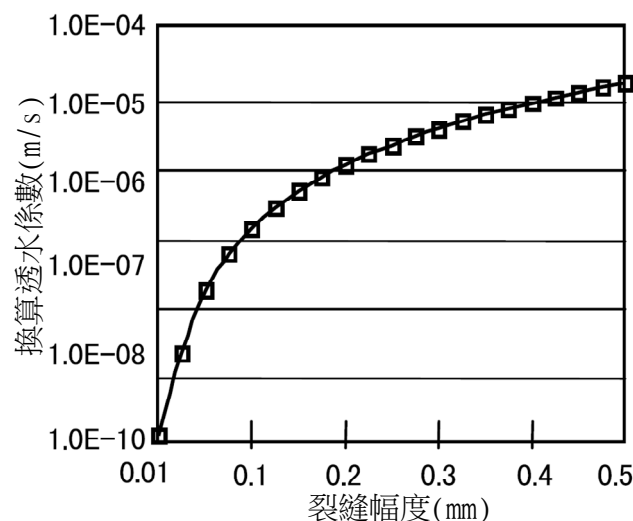


圖 2.2.4.1-1 裂縫幅度與透水係數之關係

此外，水泥類材料的透水係數也會受到孔隙率、孔隙徑分布、孔隙連結度及孔隙彎曲度(tortuosity)等孔隙構造影響，並以孔隙率作為評估孔隙構造之代表指標。

因材料孔隙率隨著水灰比改變，故針對不同水灰比的試體量測空隙率與透水係數，其結果如圖將 2.2.4.1-2 所示。對整體趨勢而言，當空隙率變大，透水係數跟著增加。但若針對孔隙率相同但配比不同的試體，可發現 通波特蘭水泥試體與飛灰混合水泥試體會會有不同的透水係數。推測發生此現象的原因，應該是孔隙徑分布等孔隙構造不同所造成。

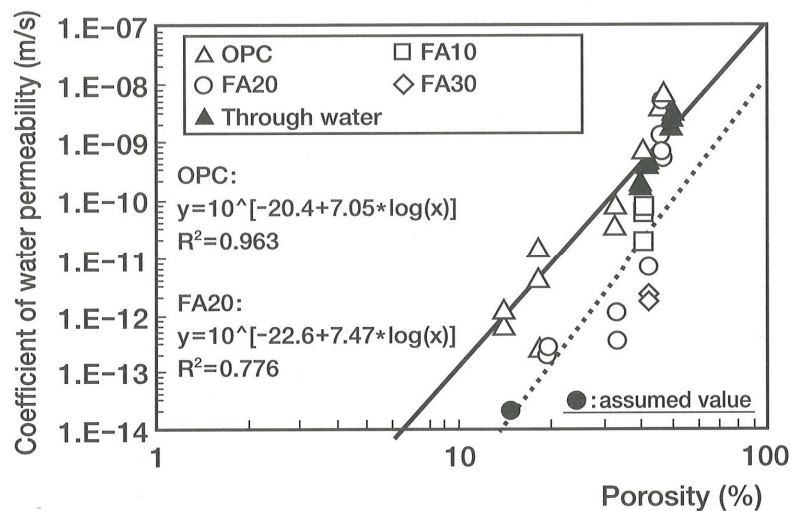


圖 2.2.4.1-2 孔隙率與透水係數的關係

## (二)有效擴散係數

含有裂縫砂漿的有效擴散係數計算方式，是先求得健全砂漿部分之表面積與砂漿有效擴散係數之乘積，再求得裂縫部分的裂縫表面積與自由水中有效擴散係數之乘積，而後將兩者相加後除以全部的表面積即可得到含有裂縫砂漿的有效擴散係數。為比較上數計算方式與實驗結果之差異，將直徑 50mm、高 6mm 的砂漿試體( 通波特蘭水泥、W/C=0.4、S/C=1.5)割出裂縫後，投入氙水中，並量測其有

效擴散係數。結果如圖 2.2.4.1-3 所示，試驗值略大於計算值，推測此現象可能是因為製做試體時有細微裂縫產生，造成試驗值偏高。

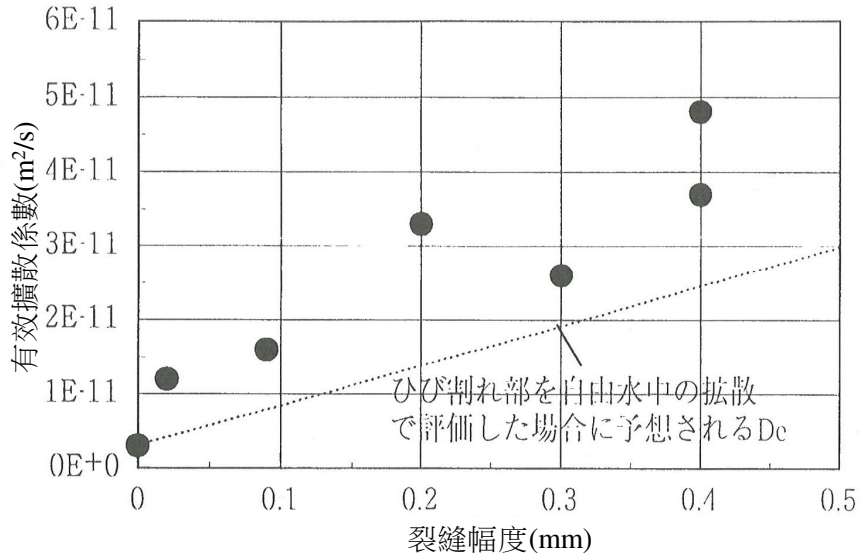


圖 2.2.4.1-3 裂縫幅度與氬水中的有效擴散係數之關係

同樣地用上述計算方法，在 1m<sup>2</sup> 的表面積上製造一條裂縫，以了解裂縫數量或裂縫幅度對有效擴散隙豎之影響，結果如圖 2.2.4.1-4 所示。當裂縫數量增加或幅度擴大，有效擴散係數也會隨之增加，但裂縫幅度對有效擴散係數的變化幅度影響不大。

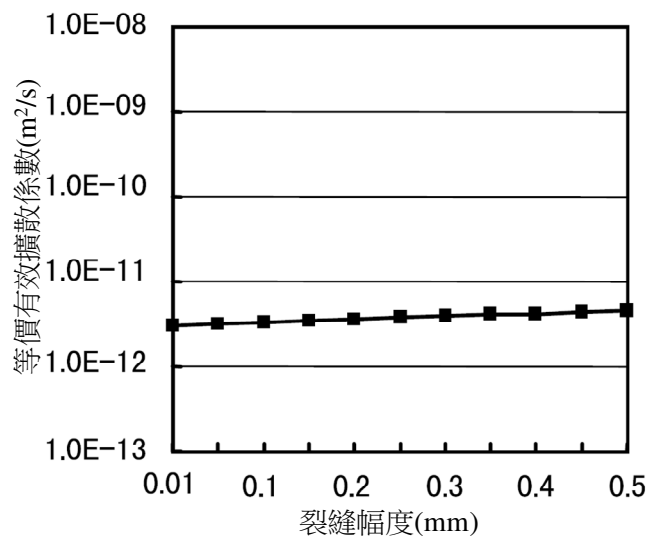


圖 2.2.4.1-4 裂縫幅度與有效擴散係數之關係

此外，水泥類材料的有效擴散係數一樣會受到孔隙率、孔隙徑分布、孔隙連結度及孔隙彎曲度等空隙構造影響。將不同水灰比之試體投入氚水中，量測氚水的有效擴散係數，如圖 2.2.4.1-5 所示。

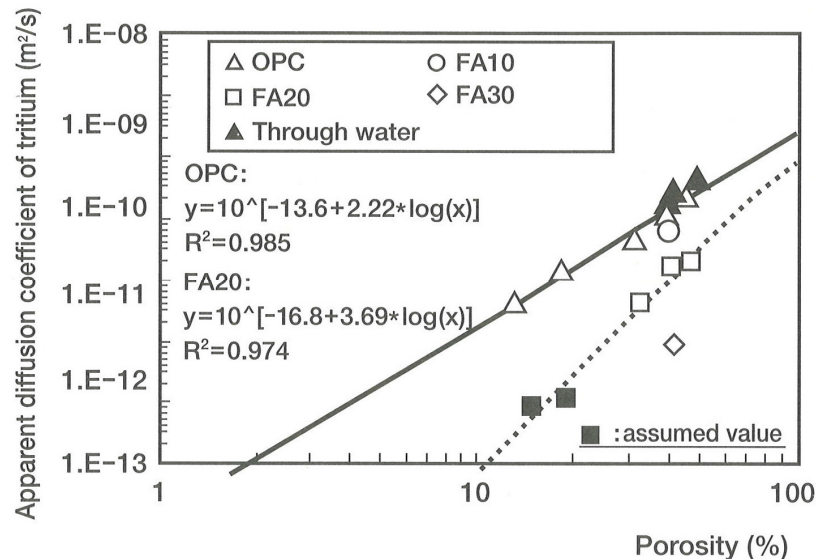


圖 2.2.4.1-5 孔隙率與有效擴散係數之關係

## 二、透水係數與有效擴散係數的設定方法

裂縫幅度與透水係數及有效擴散係數間的關係，如圖 2.2.4.1-1 及圖 2.2.4.1-4 所示。而空隙率與透水係數及有效擴散係數間的關係，則如圖 2.2.4.1-2 與圖 2.2.4.1-5 所示。

工程障壁的水泥類材料，從灌漿後的初期性能開始，到營運時及回填後的各種載重，各個環節中都有會影響工程障壁狀態的要因。蒐集所有可能的影響要因，利用目前的技術能力，評估水泥類材料在裂縫的性狀等方面隨時間的變化，並依據該結果設定水泥類材料的透水係數及有效擴散係數。

## 三、現況理解與今後發展

水泥類材料透過材料選擇、適當配比及慎施工，則可達到低透水性的要求。以往對水泥類材料的透水與擴散現象



的定量化評估，主要是以空隙徑分布與透水係數之關係為基礎建構模型。亦有 Atkinson 與 Nickerson(1988)、Haga 等人(2005)、千田與 山(2006)等人以實驗方式求得水泥硬化體中的核種擴散係數。Atkinson 與 Nickerson 利用 Through-diffusion 法、In/out-diffusion 法、Penetration 法等試驗方法，求得波特蘭水泥硬化體中的  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{I}^-$  等核種的擴散係數( $\text{Cs}^+$ ： $2 \times 10^{-12} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ ： $3 \times 10^{-12} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、 $\text{I}^-$ ： $9 \times 10^{-12} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )。Haga 等人針對 OPC 硬化體進行試驗，獲得 Ca 的有效擴散係數，結果如圖 2.2.4.1-6 所示。千田與 山則以水灰比 0.35~1.02 的 OPC 試體及飛灰混合低熱波特蘭水泥 (FAC) 試體，利用有機碳( 酸根離子)的透過擴散試驗，取得有效擴散係數與空隙率、細孔徑間之關係，如圖 2.2.4.1-7 所示。

此外，對於長期狀態的影響評估，須先了解各種現象(裂縫、溶出等)之機制，評估此種現象發生時的水泥類材料狀態變化(裂縫幅度、孔隙構造等)，檢討長時間下之水泥類材料的透水係數與有效擴散係數的參數設定。也希望日後能有更多的研究作為 證，以提升評估的信賴性。

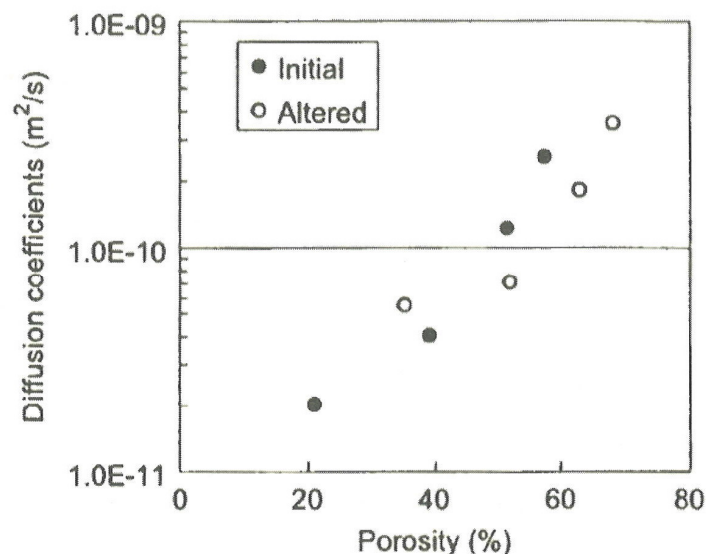




圖 2.2.4.1-6 OPC 試體中的 Ca 之有效擴散係數

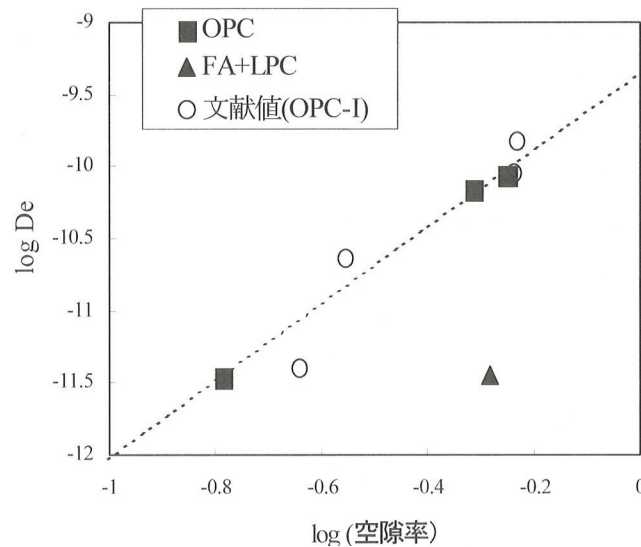


圖 2.2.4.1-7 OPC、FAC 試體中的有機碳之有效擴散係數

### 2.2.4.2 膨潤土類材料的透水係數及有效擴散係數的設定

#### 一、因工程障壁的狀態變化導致透水係數與有效擴散係數改變

低透水層是以膨潤土為主要組成材料，其透水係數與有效擴散係數受到壓密施工後之有效黏土密度分布影響。營運時的各種載重作用，會改變有效黏土密度分布。回填後則因地下水入侵產生的膨潤壓，使密度再次重新分配。且回填後經過一段時間以後，因水泥類材料的溶出，造成 Na 型膨潤土 Ca 型化、蒙脫石溶解等化學變化，膨潤土材料之特性亦隨之改變。

#### (一) 透水係數

在膨潤土種類相同的情況下，透水係數與有效黏土密度間有強烈的關連性，如圖 2.2.3.9-1 所示。圖中有許多試驗數據資料分布不在趨勢線的主軸帶上，此種不一致性，可能是因為試體內的密度分布與構造異向性等材料特性不同，或

是量測方法不同所造成之差異。若透過控制完全排除量測方法之影響時，則有效黏土密度對應之透水係數，幾乎為常態分布。故有效黏土密度與透水係數間的不均勻分布，可視為常態分布的 然誤差，並利用地盤統計學或統計學等方法加以評估。

為具體掌握低透水層受到壓密作用後之有效黏土密度分布，須先找出營運時的各種載重(廢棄物包件載重、天車載重等)，再評估其對有效黏土密度分布之影響，必要時可參考地盤統計學等方法，以機率論評估整體低透水層的透水性。但根據過去的研究成果，壓密作用造成低透水層內的有效黏土密度分布改變，對整體低透水層的透水性影響不大。此外，低透水層施工完成後，若緊接著施工建置低擴散層，低擴散層中的水泥孔隙水會因吸引作用而侵入低透水層，此亦需納入評估考量。

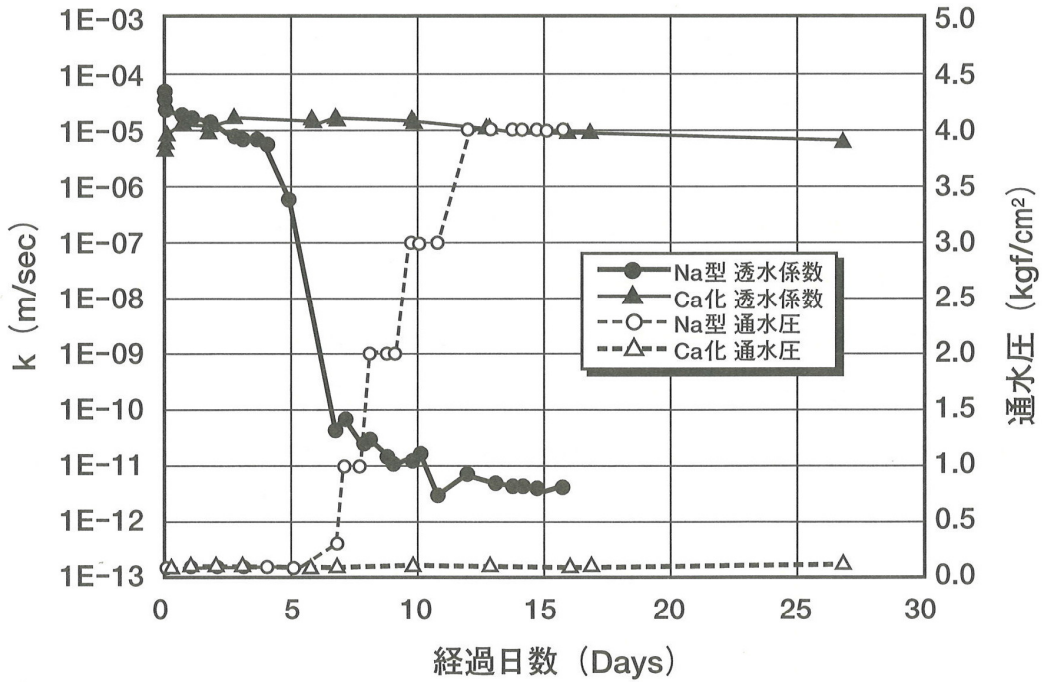
若回填後的地下水為均勻侵入時，膨潤壓會均勻分布，低透水層的內側設施會有等向的正向應力增量產生。若地下水為不均勻侵入時，低透水層中飽和度增加的區域會產生膨潤壓，擠壓其他區域改變其有效黏土密度。為評估此種現象之影響，以壓製成型的膨潤土為試體，分別為有效黏土密度  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  的 kunigel V1 膨潤土(Na 型)及 Ca 型化 kunigel V1 膨潤土，將其個別放入容器中且容器內需保留 30% 的空間，之後開始加入水份，以調查透水係數與密度分布變化之關係，結果如圖 2.2.4.2-1 所示。由圖 2.2.4.2-1(a)可知，飽和度增加造成的有效黏土密度變化對 Na 型 kunigel V1 膨潤土的透水係數，會使其隨時間經過而降低，但對 Ca 型化 kunigel V1 膨潤土的透水係數則幾乎沒有影響。這是因為 Na 型 kunigel V1 膨潤土的膨潤性較佳，吸水後膨潤填滿空隙，使透水係數降低，而 Ca 型化 kunigel V1 膨潤土的膨潤

性較差，無法填滿空隙，所以透水係數不受影響。圖 2.2.4.2-1(b)則是將容器 後，量測含水比與有效黏土密度分布之關係。由圖 2.2.4.2-1(b)可發現，不論是何種膨潤土，含水比與有效黏土密度都有各自趨於一致的傾向。此外，需特別注意的是坑道上部的膨潤土與坑道下部的膨潤土，因為施工順序、膨潤土來源及承受載重不同，作用應力也不同，故使坑道上部的膨潤土與坑道下部的膨潤土的有效黏土密度產生差異。

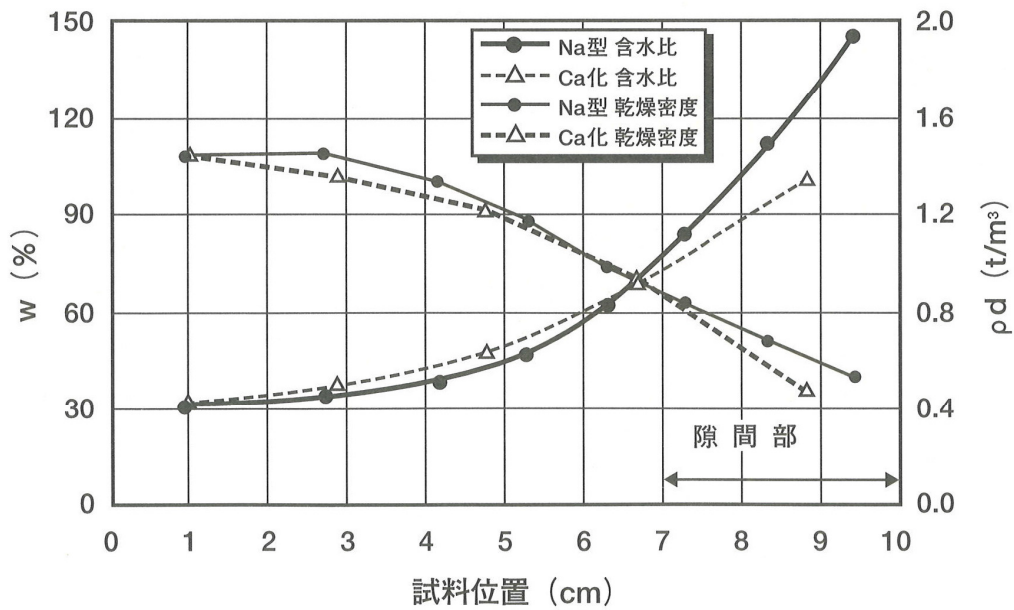
入侵的地下水因低透水層的飽和度增加，使其內側的水泥類材料也達到飽和，並開始發生溶出反應。因此，在低透水層飽和時，須考慮低透水層因水泥類材料溶出而造成的化學變質。此外，低透水層飽和後，膨潤土會產生潛變變形而影響低透水層內的密度分布。

## (二)有效擴散係數

由圖 2.2.3.9-3 及圖 2.2.4.2-2 的膨潤土有效擴散係數分布圖可知，膨潤土的有效黏土密度越大，有效擴散係數越小，因此，須評估壓密後狀態改變導致有效黏土密度分布變化以及 Ca 型化對有效擴散係數之影響。此外，水泥類材料溶出的高鹼性孔隙水溶解蒙脫石使密度降低，造成有效擴散係數增加等狀況，亦需納入考量。



(a) 透水係數的歷時變化



(b) 試驗後的容器內含水比與有效黏土密度分布

圖 2.2.4.2-1 膨潤土自身的封閉性確認試驗

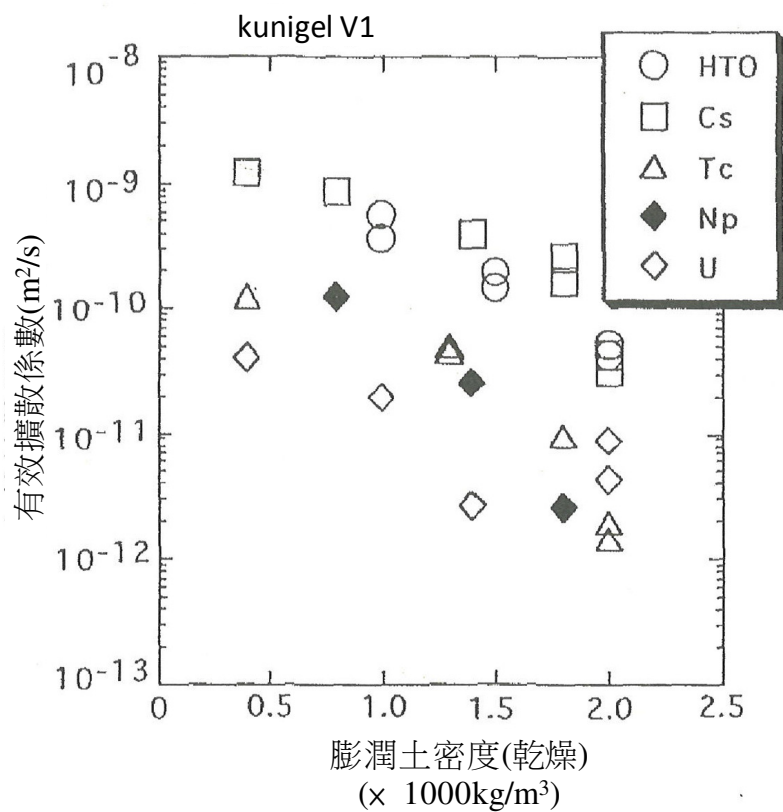


圖 2.2.4.2-2 各種離子的有效擴散係數與有效黏土密度之關係

## 第三章 我國低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數 評估技術建議

### 3.1 我國地質環境概述

#### 3.1.1 火成活動

台灣地區位於環太平洋火山帶(或稱太平洋火環—Circum-Pacific Ring of Fire)之西，自中生代以來發生過數次火成活動，此區火成活動的歷史，可追溯到主要基盤岩形成、重要構造事件、至近代火山活動及地熱資源。火成活動地下深部(數十公里至數百公里處)產生的岩漿，溫度高達 $650\sim 1,300^{\circ}\text{C}$ ，上升到地表發生噴發作用形成火山岩，或者是侵入岩層中經岩漿冷卻固結形成深成岩。在中生代時期，西太平洋火環的火成活動(包括日本、中國、大陸東南、台灣、菲律賓、越南等地)，與古太平洋板塊與歐亞大陸板塊的相互運動有密切關係。在新生代時期，台灣地區的火成活動則與南中國海板塊隱沒至菲律賓海板塊，以及菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊有關。

#### 一、台灣的火山分布

許多火山岩地層都是火山活動的殘跡，甚至有保留火山形的，若依其活動年代的記錄分類，可分為活火山(active volcanoes)、休眠火山(dormant volcanoes)及死火山(extinct volcanoes)等三類。傳統上，以歷史記錄或一萬年內有噴發活動的火山為活火山，但現今認為活火山的定義，可根據火山監測結果，若顯示火山地底下可能存在岩漿庫，且正在產生岩漿或進行岩漿遷移的活動者，可歸類為活火山；死火山為有潛在噴發可能的活火山，也可能是年輕的休眠火山，需進一步調查；至於死火山則為地底下岩漿庫已不存在，無噴發

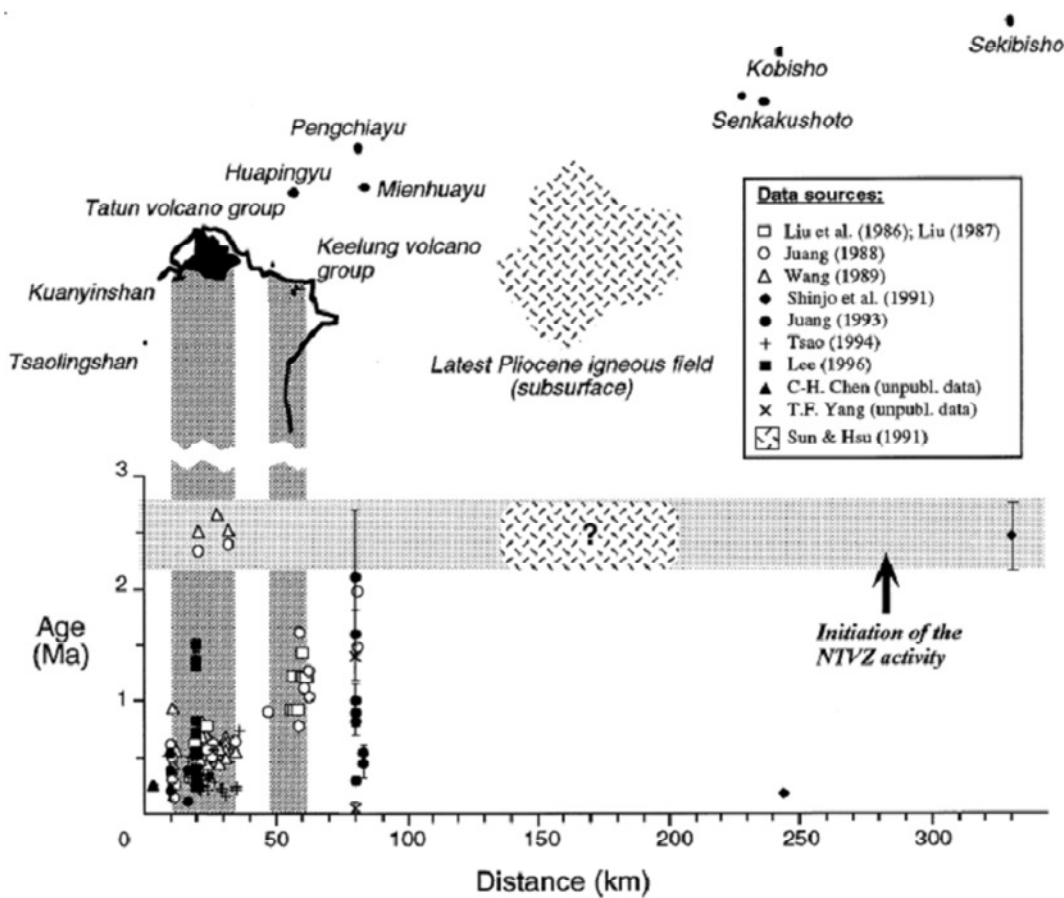


活動之 (Szakacs, 1994)。台灣的火山分布依時空、板塊運動的作用，有明顯的 限性，主要可分為北部、東部與西部等三個火山區。

#### (一)北部火山區

台灣北部及外海小島一系列之晚上新世至第四紀的火山活動，構成所謂台灣北部火山活動帶(Northern Taiwan Volcanic Zone, NTVZ)，主要分布區域為大 火山群、基隆火山群、觀音山、草嶺山及東北外海之離島( 佳 、 花 、花瓶 、黃 、 及龜山島)( 正 ，1990)，如圖 3.1.1-1 所示。台灣北部火山活動約自 280 萬年前開始，大約是晚上新世時期，並持續至約十幾萬年前仍有活動的記錄，包括東北外海的 與 花 ，以及陸上的大 火山群，皆約在同一時期噴發(約 260~280 萬年)。

此外，龜山島是台灣 一的活火山島，最近一次噴發是在 7,000 年前(Chen et al., 2001)。而大 火山群因定年學的限制，其噴發時間一度曾被認為是老於 20 萬年的 火山，但在台北盆地鑽井發現約 1 萬年左右沉積層中，夾有源於大 山噴發的火山灰層，以及伴生火山活動的 林大火殘跡(Chen and Lin, 2002)。加上近年來對大 火山群的研究，發現火山噴氣的同位素( $^3\text{He}$   $^4\text{He}$ )分析結果，有很高比率的 氣是由岩漿釋放出來，且和日本、菲律賓等鄰近國的活火山 同位素比值非常接近。另一發現則來自微震分析，大 火山群附近長期以來有相當多的微震(規模 3.0)，尤其集中在七 山一大 坑一帶。這些密集的微地震所表現的波形和頻率，與許多活火山地區因岩漿或熱液在裂隙中遷移引起的「火山地震」訊號有相同的特性。因此，推測大 火山群下方地殼深處仍有岩漿庫存在的可能性( 中，2009)。



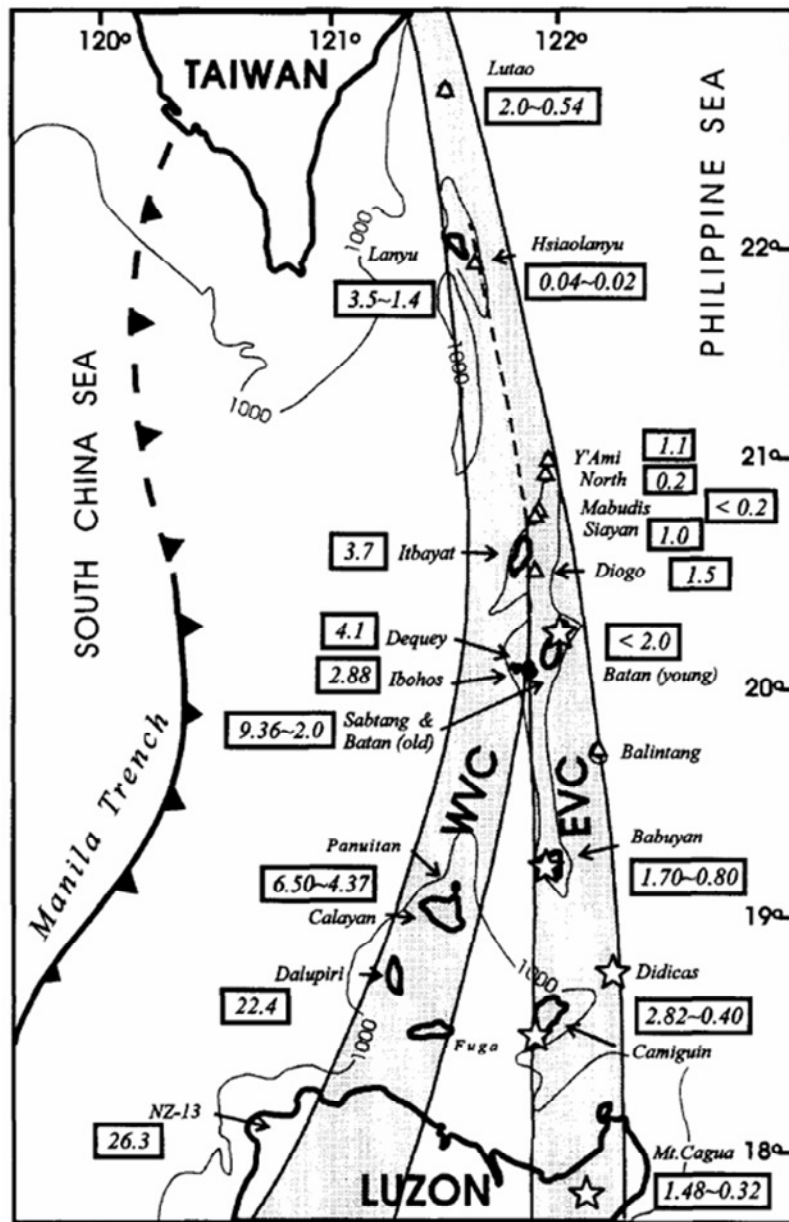
資料來源： 國 ，2000。

圖 3.1.1-1 台灣北部火山帶(NTVZ)活動的時空分布圖

## (二) 東部火山區

東部火山區為南中國海板塊隱沒至菲律賓海板塊下，形成的火山島，視為北呂宋島弧的一部份。北呂宋島弧可分為東西兩個火山島，在北緯 20° 以北合併為一。綠島及小蘭等屬於東邊島，較為年輕(大多屬於第四紀火山)；蘭則屬於西邊島，較老且地勢較平緩，有厚層石灰岩，如圖 3.1.1-2 所示(Yang et al., 1996)。由於弧陸的關係，屬於北呂宋島弧最北端的海岸山脈，已經脫離原來的隱沒帶，與台灣東部大南澳片岩帶縫合，應不致再發生火山活動。但屬於呂宋島弧東邊年輕島的綠島及小蘭，則尚處

於隱沒帶中，受到隱沒作用影響，仍具有潛在噴發活動的可能性。



註：方 內為 K-Ar、Ar-Ar 定年資料，單位為 Ma(百萬年)。

資料來源：Yang et al., 1996

圖 3.1.1-2 呂宋島弧火山岩噴發活動的時空分布

### (三)西部火山區

西部火山區由東北向西南可分為公 地區、關西— 東 與角板山地區、 湖群島。西部火山區的火山活動，屬於中

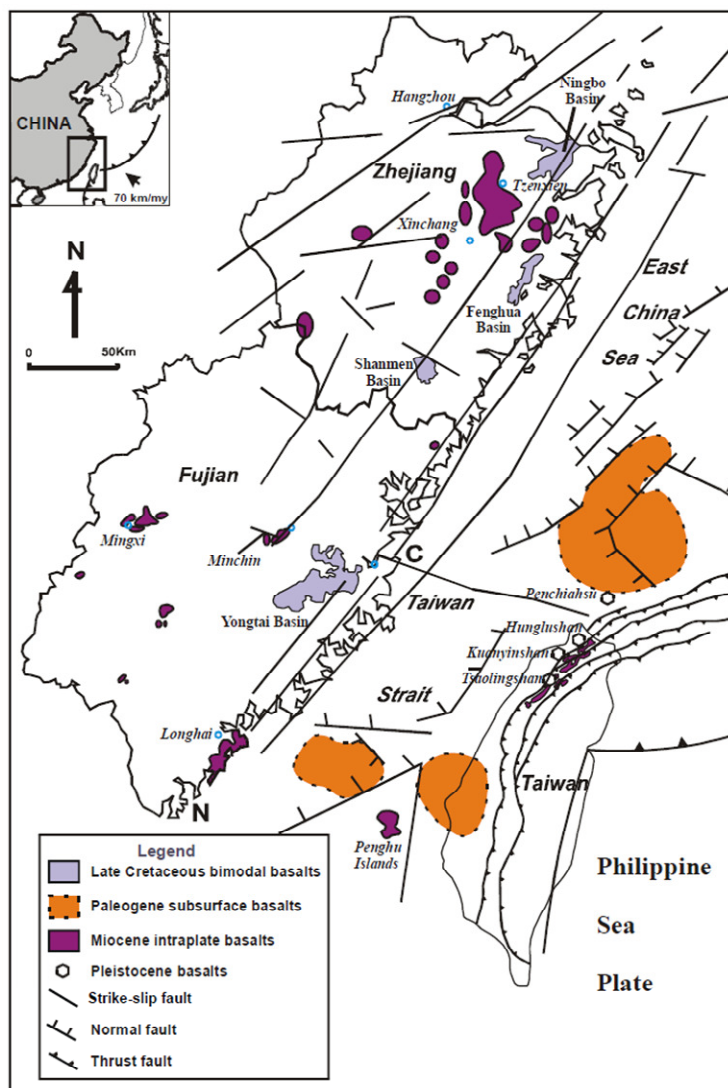
國東南沿海及台海地區在第三紀以來，發生以玄武質岩類為主的大陸內部張裂環境火山活動的一部份，甚至與南中國海的擴張，及 澳和歐亞兩大板塊 等構造運動有密切關係。自白堊紀以來，中國東南及台海地區之大地構造型態，即由原來受古太平洋海板塊隱沒作用的之擠壓環境，轉為張裂環境，從大陸岩石圈內部產生拉張現象，產生一系列大陸內部張裂盆地及火成活動(Teng and Lin, 2004)，如圖 3.1.1-3 所示。逐漸往南推進的結果，最後在漸新世於大陸東南大陸岩石圈邊緣，發生南中國海的張裂活動，以及 佈歐亞大陸東部的第三紀玄武岩噴發活動(Chung et al., 1997)。

根據台灣西部火山區玄武岩類之定年研究，近十餘年來經由  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年法系統性的分析，已確 應屬中新世噴發的產物( ，2003)，故台灣西部新第三紀的大陸板塊內部玄武岩類應在中新世時，活動最為頻 。若就中國東南岩區之新生代玄武岩類而言，新第三紀之中、晚期亦為噴發最盛的時期；綜合而言，可歸納以下列特點：

1. 台灣西部火山區主要的火山活動都在南海擴張晚期，或是停止擴張之後發生。前者以台灣西部 山帶公 期火山岩及福建外帶火山岩為代表 其餘地區均在南海擴張停止後，才有大量玄武岩噴發。
2. 從大陸東南及台海一帶火山活動之初始噴發年代來看，大致上有由南至北，由東向西逐漸年輕的趨勢。而火山活動停止的時間，亦具有上述之規律性。
3. 在大約 1,200 萬年開始，台灣附近受到弧陸擠壓與 效應的影響(Teng, 1990)，區內張裂作用陸續發生停滯，並轉趨閉合，從而影響各區的火山活動，直至晚中新世結束時，台灣海 一帶的張裂活動及伴生火山活動即告終止。

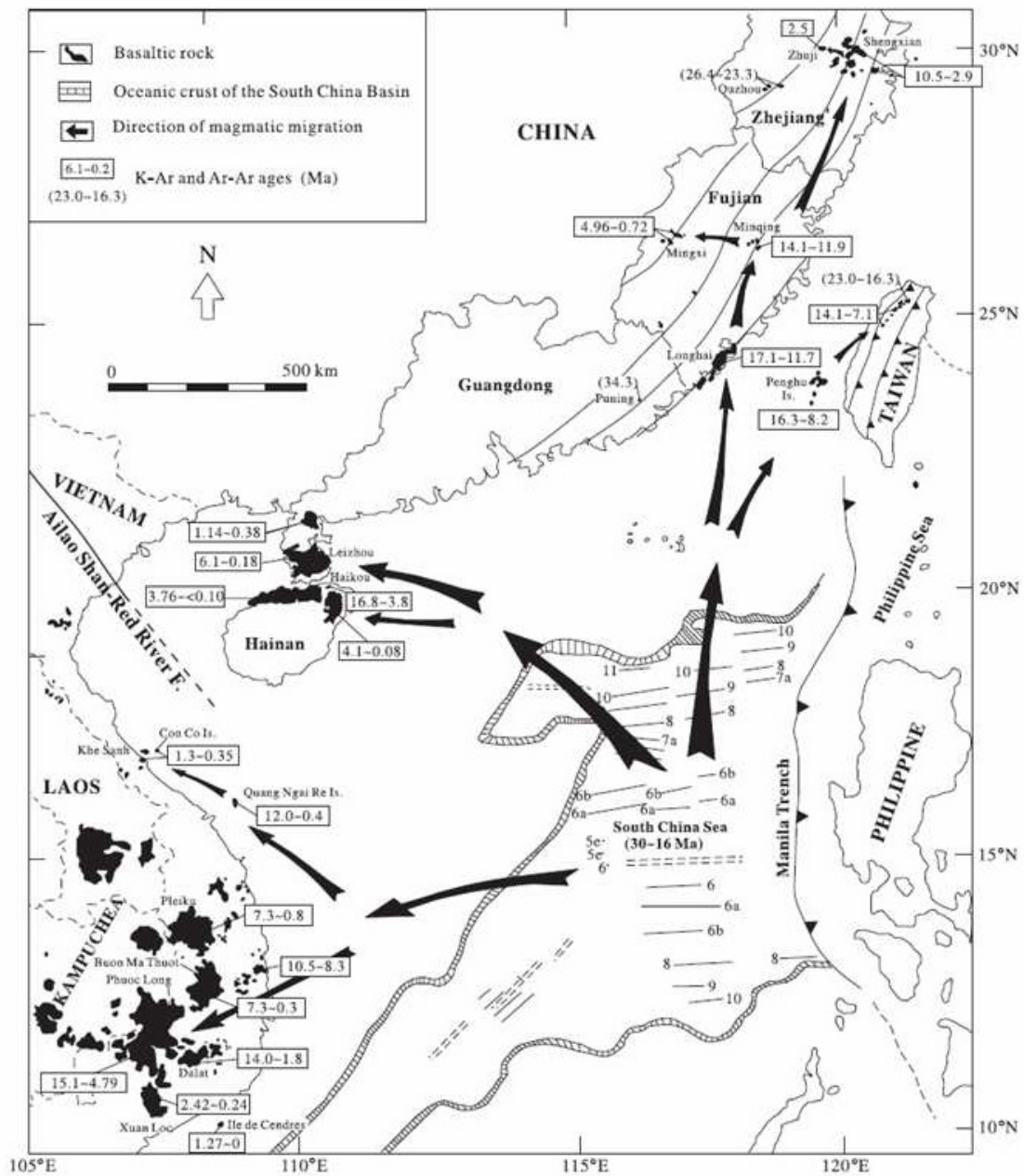


因此， 地區火山活動終止與遷移的關係，在東西方向是從福建外帶及中外帶(~1,200 萬年)最先結束，岩漿活動向西側之福建內帶(70 萬年)遷移；而在南北方向則是從靠近 區之福建外帶(~1,200 萬年)最先終止，然後向北到 外帶之 海(460 萬年)，最後再往西北方向之內帶的 縣(350 萬年)及內帶的諸 (250 萬年)推進，有遠離台海一帶的趨勢，如圖 3.1.1-4 所示。



資料來源： ， 2003

圖 3.1.1-3 大陸東南及台海一帶晚白堊紀至新生代火山岩分布圖



資料來源：Hoa et al., 2003

圖 3.1.1-4 大陸東南及台海一帶第三紀玄武岩分布時空演變圖

## 二、地溫分布

台灣的地熱活動依熱源的不同，可分為火山性地熱系統及非火山性地熱系統等兩種。火山性地熱系統的熱源來自於岩漿，主要是因火山噴發時形成的火山碎屑岩或火山劇烈活動對岩層產生爆破作用，形成豐富的裂隙和斷層，此時若有



地表水入滲至地下深處，在流經岩漿庫上方時被加熱而形成高溫的熱水或蒸氣，這些高溫的熱水或蒸氣一部分儲存在孔隙或裂隙之內，另一部分則順沿斷層帶或岩層裂隙所形成的通道，上升至地表，形成溫泉或噴氣孔。目前台灣的火山性地熱系統僅有北部大 地熱區及宜蘭外海的龜山島兩處，大 地熱區的地下溫度，在鑽探所及的深度，2,000 公尺範圍內是攝 200~300 度，地熱流體主要產自基盤的五指山砂岩及覆蓋其上的安山岩質火山岩中的裂隙，地熱流體的化學特性是含高鹽分及多量硫酸根，呈相當強烈的酸性，pH 值在 2~5 之間，腐蝕性甚強( 明 ，2004)。

非火山性地熱系統之熱源則來自於板塊運動造成的高地溫梯度，以台灣為例，由於位處歐亞板塊和菲律賓海板塊的聚合邊界，造山運動劇烈，高溫的地殼抬升至淺處，但因岩層是熱的不良導體，無法快速散熱，於是在地殼淺處累積熱能，形成甚高的地溫梯度， 公里約可上升 45~60°C。非火山性地熱區的熱水化學特性都很相似，主要成分是碳酸氫 ，總含量約 3,000ppm 左右，pH 值在 8~9 之間，呈弱鹼性，佳無腐蝕性( 明 ，2004)。

### 三、小結

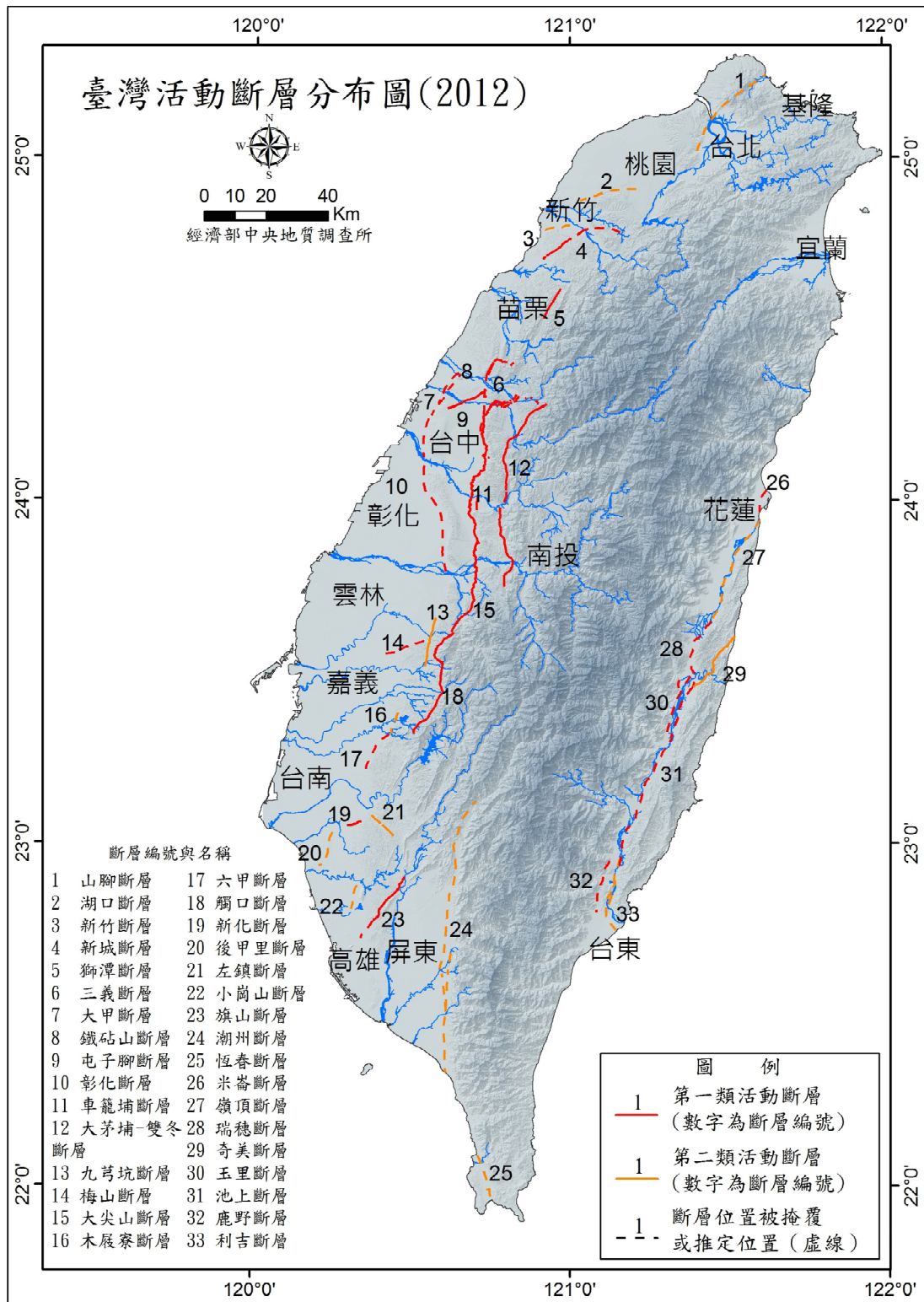
綜上所述，我國的龜山島、大 火山群、綠島及小蘭等火山仍有噴發之可能性。根據「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」第四條及「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」第二條之要求，處置設施場址不得位於後火山活動地區，已初步排除處置設施直接受到火成活動影響的可能性。但仍可斟酌參考日本之研究，考量處置場是否位於火山活動範圍(火山群中心起算半徑 15km 內)及地溫影響範圍(火山噴發中心起算半徑 20km 內)，並評估其對地下水之影響。

### 3.1.2 斷層活動

台灣位於菲律賓海板塊和歐亞板塊交接帶，板塊的聚合造成地殼擠壓變形及造山作用，在此過程中產生了許多斷層。各國學者或地方機構有關活動斷層的定義，雖無一致性結論，但至少重點都包含一個近期錯動(recent offset)的時間基準，以及強調未來再發作(recurrence)或再活動的可能性。活動斷層討論的時間基準從「數百年以來」、「全新世以來」或「第四紀以來」皆有，美國原子能委員會、國際原子能委員會、日本活斷層研究會及經濟部中央地質調查所採用的定義就有不同考量，彙整如表 3.1.2-1 所示。根據經濟部中央地質調查所最新公布之台灣活動斷層分布圖(圖 3.1.2-1)，台灣的活動斷層包括台灣北部 8 條斷層、中部 8 條斷層、西南部 9 條斷層、南部 4 條斷層及東部 8 條斷層等共 33 條；其中 20 條屬於第一類，13 條屬於第二類，另有南 斷層、大平地斷層、東斷層、 斷層等 4 條存性活動斷層。

表 3.1.2-1 各國對活動斷層的定義

機構	活動斷層的定義
美國 原子能 委員會	為制定核能電廠選址的需要，提出只要符合下列任何一項或一項以上準則之斷層，即應被視為能動斷層(capable fault)： <ul style="list-style-type: none"> <li>• 以往 35,000 年內曾經有過一次接近錯移地表之斷層。</li> <li>• 以往 500,00 年內曾有多次接近地表斷層活動之斷層。</li> <li>• 與上述準則認定之活動斷層有構造上的關聯，且能推測為可能會發生錯移之斷層。</li> </ul>
國際 原子能 委員會	除了美國原子能委員會所使用的三項準則外，國際原子能委員會增加了兩項： <ul style="list-style-type: none"> <li>• 斷層有潛移(creep)之證據，「潛移」意指緩慢之位移，不一定會產生有感地震(macro-earthquake)。</li> <li>• 地形上有地表斷裂、 曲或錯移(offset)現象等證據。</li> </ul>
日本活斷層 研究會	自第四紀以來曾經錯移過，且推測沿此破裂面將來仍可能再度活動的斷層。
經濟部 中央地質 調查所	過去 100,000 年內曾活動，未來可能再度活動的斷層。 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 第一類活動斷層：過去 10,000 年內曾活動者</li> <li>• 第二類活動斷層：過去 100,000 年~10,000 年內曾活動者</li> <li>• 存性活動斷層：過去 500,000 年有活動，但不確定過去 100,000 年內是否有活動的斷層。</li> </ul>



資料來源：經濟部中央地質調查所網站。

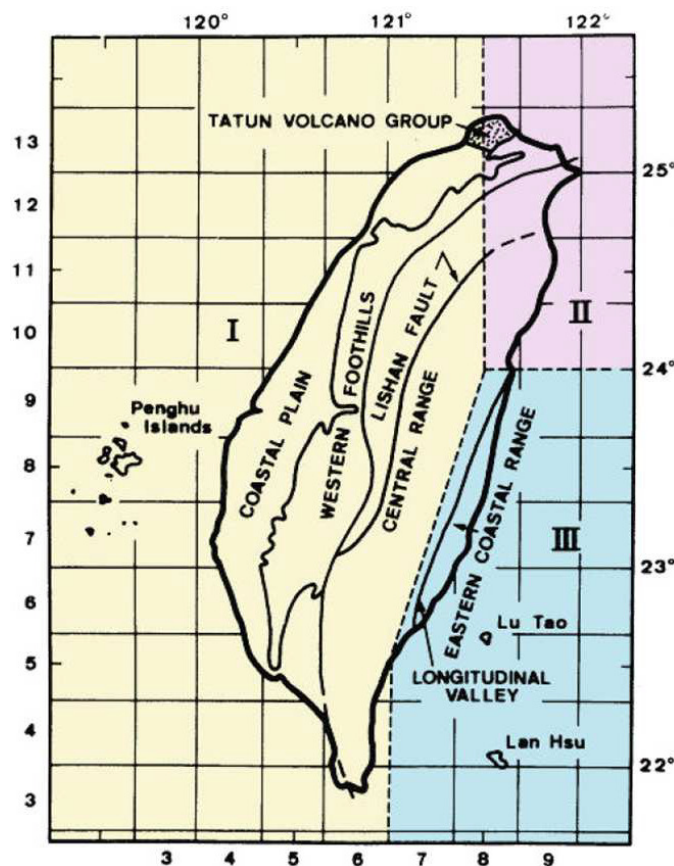
圖 3.1.2-1 台灣活動斷層分布圖

斷層活動不僅可能直接損害處置設施的功能，亦可能使周圍的地下水流場改變。根據「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」第四條及「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」第二條之要求，處置設施場址不得位於活動斷層之主要斷層跡線兩側各 1km 及兩端延伸 3km 之帶狀地區，加上日本研究指出，斷層活動造成的變形，以斷層兩側 1km 的範圍內較為顯著，故可初步排除斷層活動時直接對處置設施及處置場的水理狀況造成影響的可能性。但長期而言，仍須評估場址內的褶曲構造分布狀況、鄰近處置場的斷層擴展與移動等現象，對處置場的影響。



### 3.1.3 地震

台灣位在地震頻 的環太平洋地震帶上，全球超過 70% 的地震發生在此地震帶內。台灣的地震活 帶大致可分為西部、東部及東北部三個地帶，如圖 3.1.3-1 所示。由於地震大多發生在板塊接觸地帶，台灣東部的菲律賓海板塊向北隱沒傾斜至歐亞大陸板塊之下，造成台灣東北部地震發生頻率有集中於板塊隱沒帶之現象；於台灣南部也可觀察到向東隱沒之傾斜地震帶；至於台灣西部之震源分布，則主要為集中於斷層構造區附近之淺層地震。



資料來源：Tsai, 1977

圖 3.1.3-1 台灣地震分區圖

### 一、西部地震帶

自台北南方經台中、嘉義而至台南，寬約 80km，大致與島軸平行。地震發生頻率較低，且均屬淺層地震(深度約 10km)，往往造成地面劇烈錯動，因之地震災害較大，而且餘震次數也較多。

### 二、東部地震帶

北起宜蘭東北海底向南南西延伸經過花蓮、新臺至台東，並可一直延伸到呂宋島；此帶北端自宜蘭與環太平洋地震帶延伸至西太平洋海底者相連，南端幾與菲律賓地震帶相接，整體呈現近似弧形並面太平洋，亦和台灣島相平行，寬約 130km，此區的地震集中在歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的交界帶。

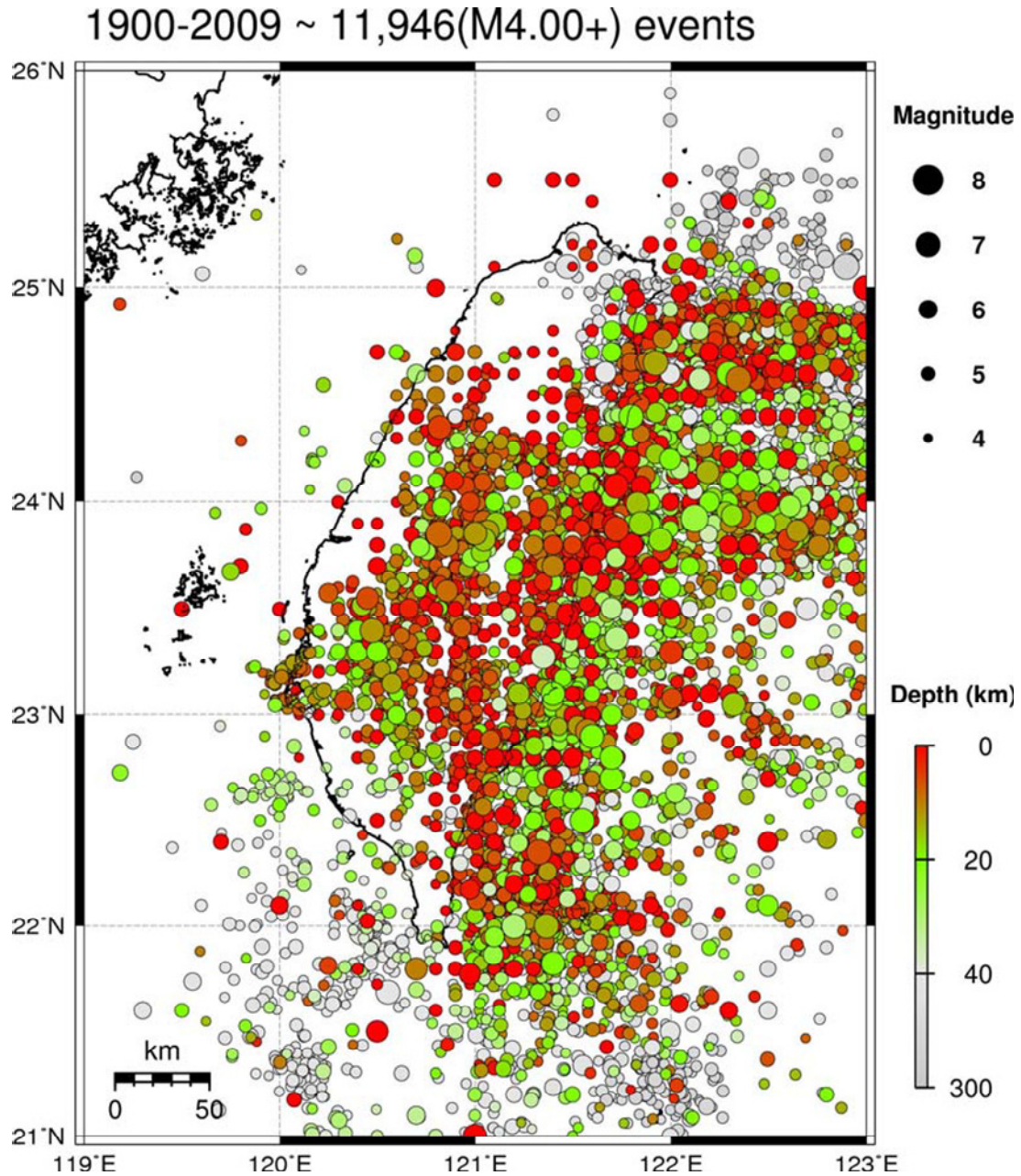
### 三、東北部地震帶

此帶自琉球群島向西南延伸，經宜蘭、蘭陽溪上游至花蓮附近，震源深度從淺層延伸到 300km 深。

以空間分布特性而言，台灣地區自 1900 至 2009 年來，規模大於 4 以上的地震計有 11,946 個(圖 3.1.3-2)，震源深度最深接近 300 公里。由地震活動在空間上的震源分布可以發現，台灣地區震源深度較深的地震大部分都是在台灣東北部發生(圖 3.1.3-3)，且台灣東部於北緯 24°附近，震源分布開始明顯呈現向北隱沒的傾斜地震帶，而在該地區地震深度小於 20~30 公里之地震則形成帶狀向東北延伸至琉球群島附近；另外在台灣南部約東經 121°附近也隱約呈現向東隱沒之傾斜地震帶，但是在此地區所發生的地震偏少，所呈現的隱沒作用也比較模糊；至於台灣西部之震源分布，則主要為集中於斷層構造區附近之淺層地震。整體而言，除在台灣西部的北山與觀音重力高區以及在台灣

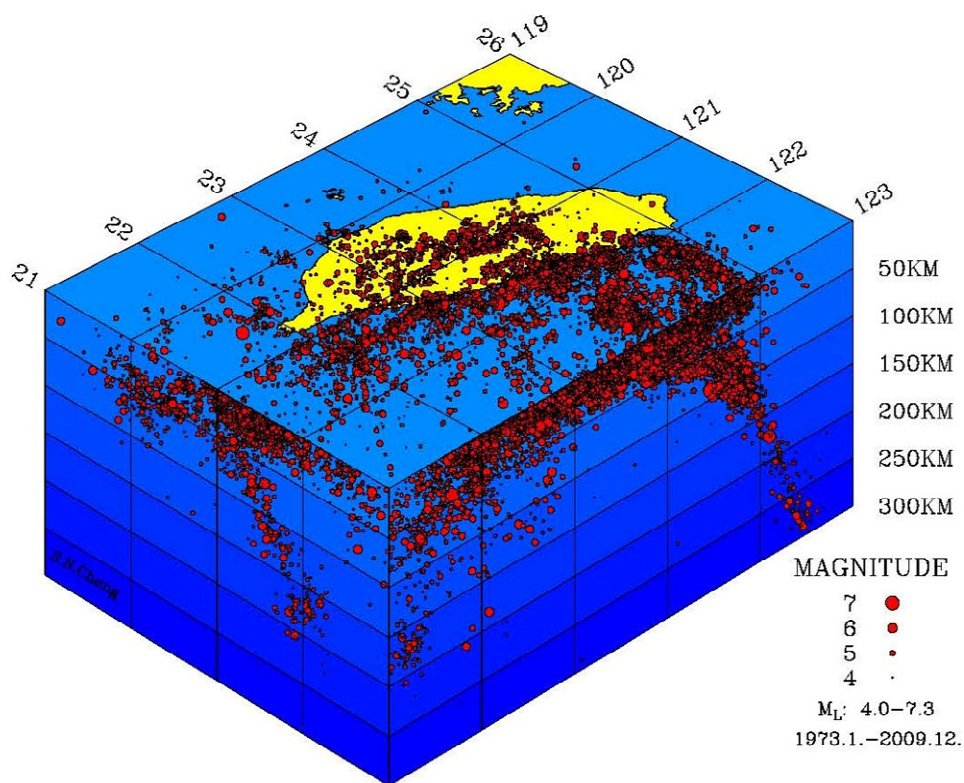


東部花東縱谷中段西側的地震偏少以外，整個台灣地區之地震活動都非常頻。



資料來源：溫國 等，2011。

圖 3.1.3-2 台灣地區 1900~2009 年規模大於 4 之地震震央分布圖



資 來源：溫國 等，2011。

圖 3.1.3-3 台灣地區 1973~2009 年之地震震源分布圖

### 3.1.4 泥火山

泥火山為泥質物質混合水和氣體，伴隨向上運動的力量，經由狹窄的通道或裂隙，噴出地表或海底所形成的地形景觀，廣泛分布於活動大陸性邊緣，在非活動性大陸邊緣也陸續觀察到。形成泥火山的地質環境通常有三項特徵，包括(1)構造側向擠壓的應力；(2)構造荷重及沈積荷重；(3)深部存在鬆軟、細粒、低密度的沈積物，通常為泥岩或頁岩。台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合邊界上，西南海域在地體構造上為隱沒增積作用轉變為弧—陸的過帶，屬於側向構造擠壓的環境；加上更新世以來大量造山帶的沈積物輸入西南海域，覆蓋於上新世深海相的泥岩層之上。因此，台灣在地質構造上符合泥火山形成的環境特徵。

#### 一、台灣的泥火山分布

台灣的陸上泥火山分布於西南部及東部之泥岩區，主要可分成 4 個帶，第一是古坑背斜泥火山帶，包括鹽水坑、山頭、大滾水和小滾水 5 個泥火山區，大致沿古坑背斜呈等距離線狀排列；第二是山斷層泥火山帶，包括小份、南勢湖、千、山頂和深水 5 個泥火山區，大致沿著山斷層呈線狀分布，這一地帶的泥火山較密集，活動最劇烈；第三是高屏海岸平原泥火山帶，包括底山、滾水及山等 3 個泥火山區，如圖 3.1.4-1 所示；第四是東部海岸山脈西南段泥火山帶，包括羅山和電光兩個泥火山區(曾等，2007)。

而海底泥火山則礙於探測技術，至今才能對的形、分布位置及活動做系統性與全面性的研究。目前除了發現在外海及球周圍有泥火山群聚外，也發現高外



海的泥火山分布與附近陸地上的泥火山有連貫性，初步估計台灣西南海域可能有超過 94 座的海底泥火山，分布如圖 3.1.4-2 所示。

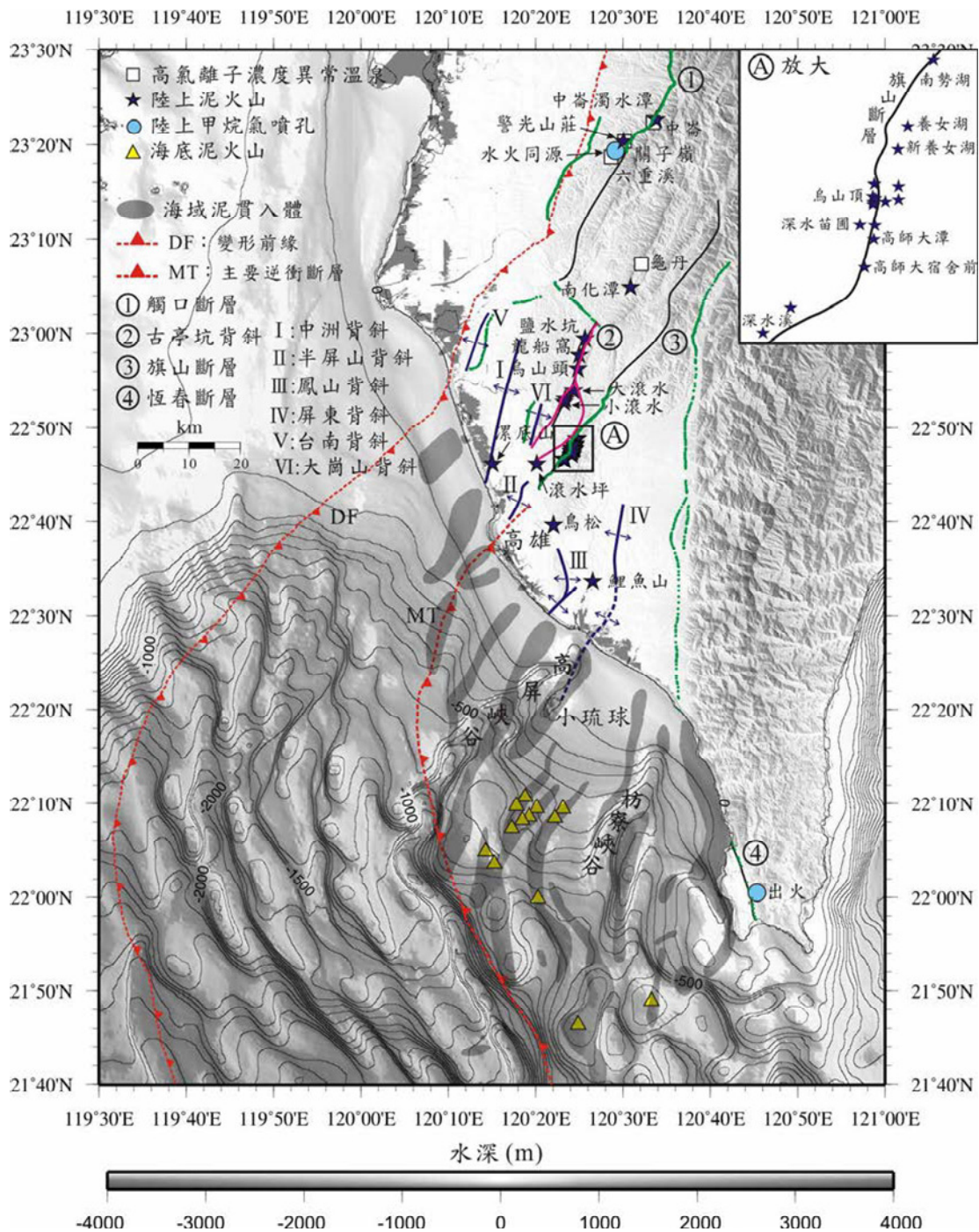
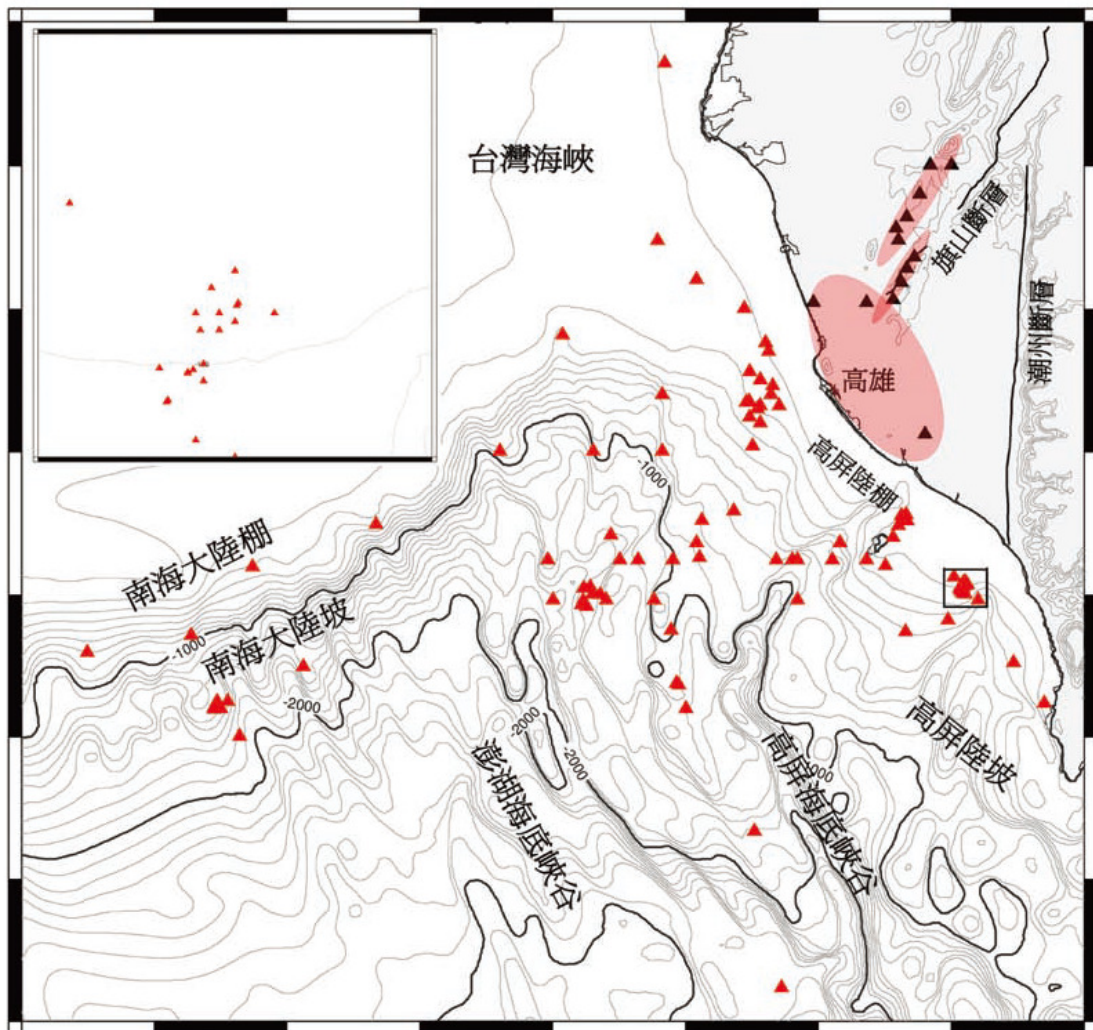


圖 3.1.4-1 台灣南部的陸上泥火山分布



備註：黑色三角形代表陸上泥火山，紅色三角形代表海底泥火山，圖中左上角是外海區域的局部放大圖，

資料來源：曾興，2007年4月。

圖 3.1.4-2 台灣西南海域之海底泥火山分布

一般而言，海底泥火山的形成和泥貫入體侵入有關，而陸上泥火山之形成原因則主要與斷層或褶皺作用有關。泥貫入體一般隱伏於海床下方，上部覆蓋有沉積物，如有裂隙或斷層貫穿上部沉積地層，泥貫入體之泥質物會沿著裂隙向上流，在海床上噴出，泥質物逐漸在噴口處堆積成泥火山外觀。泥貫入體也可能直接出露在海床，例如台灣西南海域高屏上部斜坡之海山；如果泥貫入體出露海床後，受構造抬升後出露海平面，則可形成陸地，例如小琉球即為泥貫入



體出露海平面之陸地。隨著造山運動之演化歷程，部份原位處於海域之泥貫入體，可能受造山運動之抬升作用而變為陸地，例如位於台灣西南部之台南、中洲、大山、古坑、半屏山、山及屏東等背斜構造，如果將這些背斜構造往西南海域的方向延伸分別可以連接到海域上的泥貫入體，在構造上有相連接之關係，研判這些背斜構造，應屬於泥貫入體構造，如圖 3.1.4-1 所示。

其中，大山背斜及古坑背斜之抬升，應是來自西南方向之泥貫入體抬升影響，並非來自東南方向之大地構造應力，顯示可能仍受海域泥貫入體構造之影響。而古坑背斜可能仍受海域泥貫入體抬升影響，其沿線泥火山之熱成來源氣體，有可能和現今海域流體有關，海陸通道可能還連通。海岸平原區之泥火山(底山、滾水、烏松及山)之流體來源可能來自現今海域，尤其烏松及山泥火山之高壓流體最為明顯(松，2013)。

## 二、小結

由於台灣的泥火山活動仍有噴發之可能性存在，根據「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」第四條及「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」第二條之要求，處置設施場址不得位於泥火山噴出點半徑 1 公里範圍內之地區，可初步排除泥火山對處置設施之影響，但處置場附近若有泥火山存在時，泥火山或高孔隙水壓對地下水流場之影響。

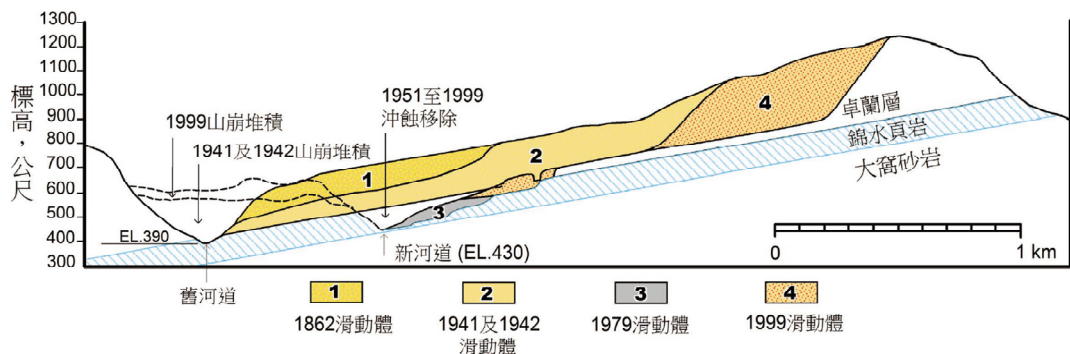


### 3.1.5 塊體崩移

台灣位處菲律賓海洋板塊及歐亞大陸板塊交接處，在地震、颱風、雨等潛在因子造成的外在劇烈干擾下，可能發大規模崩滑破壞，導致山崩、洪水及土石流等土砂災害，滑動規模甚至可能達數十公。

#### 一、台灣過去的大規模山崩

若崩塌體積排名，近百年世界前 38 名的大型山崩中，台灣佔了 5 個，如表 3.1.5-1 所示。其中，草嶺共經歷 5 次大規模山崩，且最近的 4 次被列入世界前 38 名的大型山崩排名。草嶺大山崩範圍寬約 2 里、長約 3 公里，5 次滑動的空間順序及地形演變如圖 3.1.5-1 所示。



資料來源：，2011。

圖 3.1.5-1 草嶺歷年的大崩山之崩滑體與地形演變

第一次山崩是在 1862 年 6 月 7 日，根據台灣氣象台出版之義地方烈震報告(台灣總氣象，1942)，草嶺山因 1862 年 6 月 7 日之大地震而發生崩山，留下一處明顯之斷崖，崩塌岩屑塞河道，形成天然壩，壩高無記載。該壩於 1898 年決，決原因亦無記載。

表 3.1.5-1 世界近百年大型山崩災害一覽表

	Locality	Country	Estimated failure volume ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	Year	Triggering
1	Usoi	Tajikistan	2000	1911	Tajikistan Eq.
2	Mayunmarca	Peru	1000	1974	Peru Eq.
3	Pufu Ravine, Luquan	China	450	1965	
4	Yigong	China	300	2000	
5	Vajont	Italy	292	1963	
6	Bairaman	Papua New Guinea	180	1985	
7	Hiedayama	Japan	150	1911	
8	Diexi	China	150	1933	Sichuan Eq.
9	Tsao-Ling 4	Taiwan	125	1999	Chi-Chi Eq.
10	Zana	China	120	1943	
11	Tsao-Ling 2	Taiwan	100	1942	Storm
12	Paatuut	Greenland	90	2000	
13	Tsao-Ling 1	Taiwan	84	1941	Chung-Pu Eq.
14	Huascaran 2	Peru	75	1970	Peru Eq.
15	Khait	Tajikistan	75	1949	
16	Tanggudong	China	68	1967	
17	Falling Mountain	New Zealand	57	1929	
18	Ok Tedi Mine	Papua New Guinea	50	1989	
19	Chiu-Fen-Erh-Shan	Taiwan	50	1999	Chi-Chi Eq.
20	Hope	Canada	47	1965	W. Canada Eq.
21	Sale Mountain	China	45	1983	
22	Gros Ventre	USA	40	1925	
23	Mount Ontake	Japan	36	1984	
24	Valtellina	Italy	35	1987	
25	Frank	Canada	30	1903	
26	Xintan	China	27	1985	
27	Schwan	Alaska USA	27	1964	Alaska Eq.
28	Fairweather	Alaska USA	26	1964	Alaska Eq.
29	Tsao-Ling 3	Taiwan	26	1979	Storm
30	Ancash 2	Peru	25	1946	
31	Siaolin	Taiwan	24	2009	Typhn. Morakot

32	Allen 4	Alaska USA	23	1964	Alaska Eq.
33	La Josefina	Ecuador	23	1993	
34	Madison Canyon	USA	20	1959	Yellowstone Eq.
35	Steller 1	Alaska USA	20	1964	Alaska Eq.
36	Ancash	Peru	20	1946	
37	Bualtar Glacier	Pakistan	20	1986	
38	Costantino	Italy	20	1973	

資料來源： ，2011。

第二次山崩在 1941 年 12 月 17 日，依據 義地方烈震報告，12 月 17 日 4 時 20 分，全台灣皆感受到強烈地震。當時的地震規模為 7.1，震央在 義東南方約 10 公里處的中 附近，震源深約 10 公里。此次地震引發之山崩甚多，其中規模最大者即是草嶺大山崩。地震時 山之西南面發生崩塌，岩層滑落 塞河道形成高約 70 公尺之天然壩。

第三次山崩在 1942 年 8 月 10 日，因連日 雨使 山受到雨水浸潤，西南面再度發生更大規模之山崩，崩落之岩屑將原有之天然壩堆高至 170 公尺。但在 1951 年 5 月中 因連日雨，巨大洪流之水面超出 流口達 4 公尺， 流口下游發現裂縫，天然壩開始 決。

第四次山崩在 1979 年 8 月 14 日，依據台灣省水利局草嶺崩山記之 述，8 月 14 日 ，右岸舊崩塌積土開始小規模之崩落，崩落岩屑堆積於舊草嶺天然壩 址上。8 月 15 日發生雨，右岸岩層大量崩落，完全堆積河道中，再度形成天然壩。壩體積約 5 百萬立方公尺，高約 90 公尺，頂部長約 10 公尺，寬約 100 公尺，蓄水量約 4,000 萬立方公尺。

第五次山崩在 1999 年 9 月 21 日，因集集大地震 發草嶺大山崩，總崩塌及堆積面積約 528 公 。滑動塊體主要在原大崩崖以上到 山三角點附近，面積約 75 公 ，中心厚度約 200 公尺；次要滑動體在原斷 谷附近；總滑動體積約 125 百萬立

方公尺。堆積物中約 25 百萬立方公尺的土石堆積於 水溪河谷，形成一個沿河道長約 5 公里的天然壩， 水溪再度受 而形成「新草嶺 」；天然壩高約 50 公尺，最大蓄水量約三千五百萬立方公尺。崩滑體中另約 1 立方公尺的土石則越過 水溪堆積到對岸的 交山上。

草嶺大山崩是典型的天然順向坡滑動，其百餘年來之地形演變說明了順向坡滑動的一部分地形循環。預期草嶺順向坡會 續發生中大規模的滑動，直至完整地露出大 砂岩頂部而形成「蓋岩」，完成一個完整的地形侵蝕循環。這種快速的順向坡地形侵蝕循環，可能是活動造山帶中的一種重要的地形演變現象。

## 二、台灣近年之崩塌地分布概況

台灣在經歷 921 地震、 颱風、 樂克颱風及莫拉克颱風等大型災害後，崩塌面積有逐漸增加之趨勢，莫拉克颱風後之崩塌地分布如圖 3.1.5-2 所示，主要集中在中部、南部及東部山區。根據 聯光等人之研究，降雨為引致山坡地崩塌的主要觸發因子之一，莫拉克颱風降雨所引致的崩塌 露地面積，約由 97 年 樂克颱風後的 194 平方公里增加至 563 平方公里，增加約 369 平方公里，加上自然複 變遷之處，因莫拉克颱風所引致之崩塌 露地面積則為 435 平方公里。莫拉克颱風降雨所引發之崩塌 露地規模已超越 921 地震所引致之崩塌範圍，其崩塌鬆散土砂未來如遇 雨 蝕將可能引致的二次災害。分析莫拉克颱風所引致之崩塌地，75%的崩塌地分布於高程 200 公尺至 2000 公尺間，而位於高程 600 公尺至 1600 公尺間之崩塌地則約佔全部崩塌地之 50%。另外，莫拉克颱風所引致之崩塌地主要分布於坡度 50 度以下之地區，80%的崩塌地在坡度 20~50 度間的範圍內發生，其中在坡度 30~40 度間發生的比例更高達 35%。

## 三、小結

由此可知，台灣的山區有可能發生大規模的崩塌現象，根據「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」第四條及「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」第二條之要求，處置設施場址不得位於單一崩塌區面積大於 0.1 平方公里以上，且工程無法整 克服之地區，此可排除塊體崩移直接對處置設施造成影響，但仍須考量處置場範圍外的塊體崩移對地下水流場之影響。



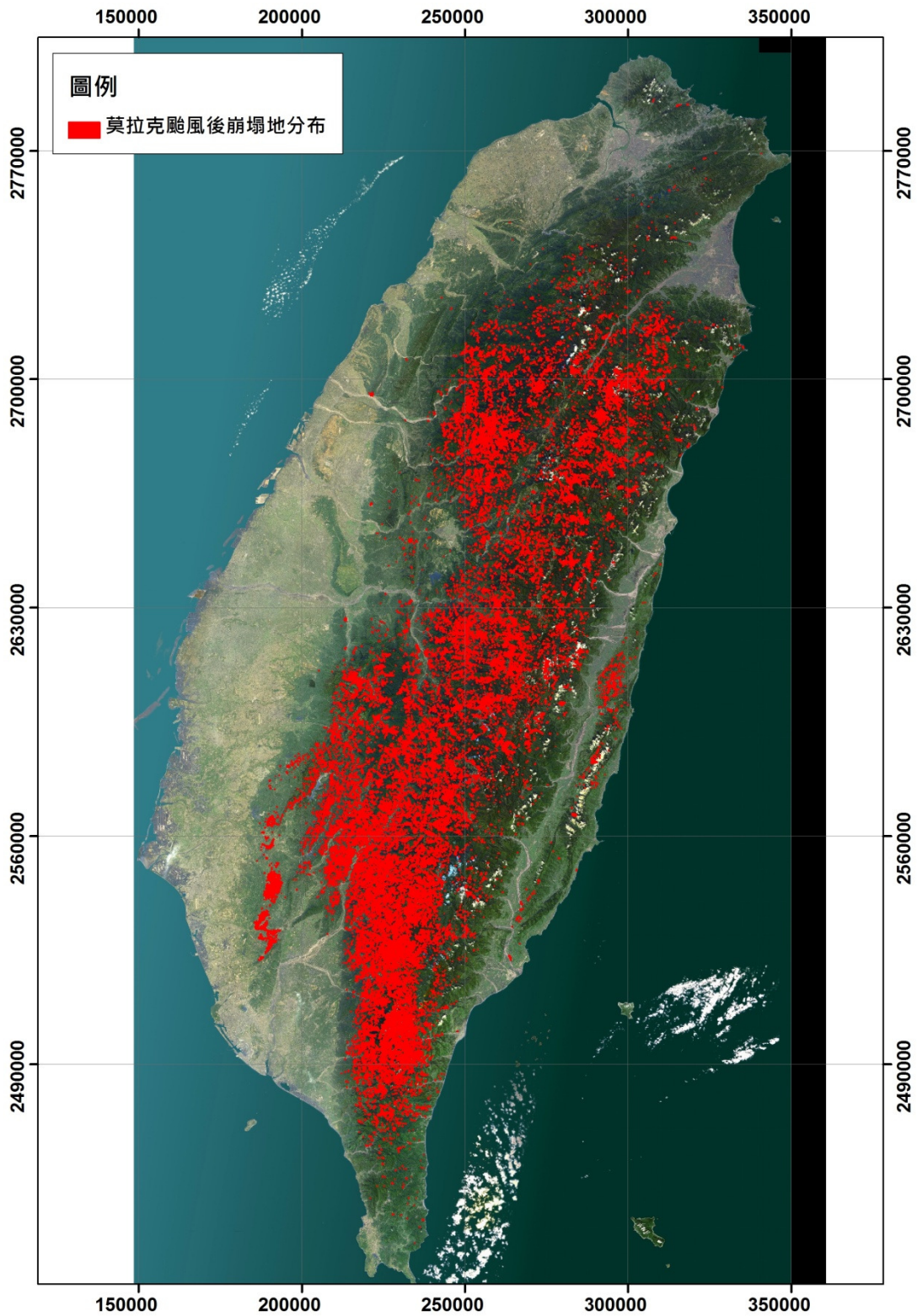


圖 3.1.5-2 莫拉克颱風後之崩塌地分布圖

## 3.2 我國氣候變遷與海平面變化概述

由於全球氣候變遷為海水面長期演變之動力，海水面之變遷對處置系統造成之衝擊則包括改變地下水流和地下水化性、地下水位變動、海/淡水介面遷移、侵蝕/淤積作用等，以致干擾處置系統的穩定地質環境，進而影響處置場之功能。另一方面，氣候變遷於短期方面，造成區域異於日之異常性氣候變化加劇，諸如氣溫之劇升/降、降雨量/日數之增加或減少、颱風/暴雨增加，造成區域性乾/水、山崩/土石流等災變現象之發生，此皆因區域性氣候變遷，改變了流域的水文、水力狀況，影響河流的運、侵蝕能力；改變山坡上的植被，影響沉積物粒的大小及供應量，而大幅的增加了大地侵蝕或風化之速率所致。

### 3.2.1 氣溫

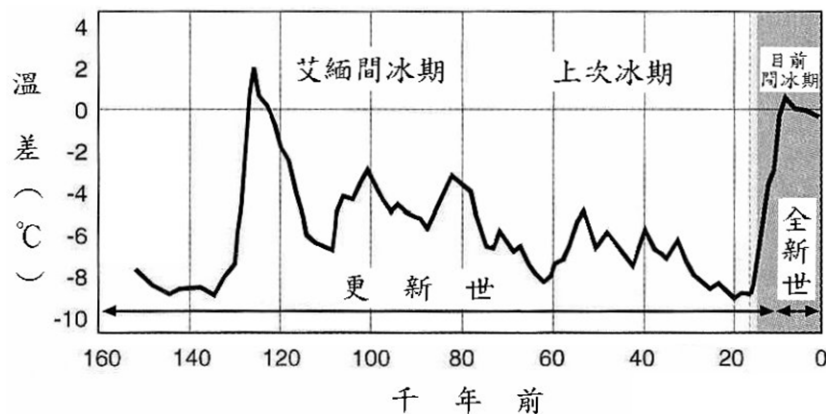
#### 一、台灣過去 15 萬年以來之氣溫變化

全球過去 15 萬年之溫度變化包括了上次間冰期(12.8~7.1 萬年前約近 6 萬年間)、上次冰期(約 7~1 萬年前且 1.8 萬年前全球溫度達最低)及目前之全新世暖期(即 1 萬年前，溫度升到與現今相似之程度)，為一完整之「暖—冷—暖」古氣候變遷模式，如圖 3.2.1-1 所示。地球在此 15 萬年中，溫暖時期僅持續了短時間，多數時候的溫度處於緩慢震盪下降狀態，比較起來，升溫的過程快速，短短時間內氣候就發生劇烈改變，今日地球氣候可對比至間冰期的高階狀態。

台灣地區於上次間冰期的氣候相當溫暖，溫暖程度甚至可能在全新世之上，而最溫暖時期可能比目前尚高出 3°C 左右。台灣地區於上次冰期之氣候以乾冷為主，其中 4.5~3.5 萬年前為冰期中的短暖期，可由大溪下游地區、中部丘陵區及水溪積之花粉分析證實。小暖期(4.5~3.5 萬年)

後，還於 3.5~3 萬年前還出現短 潮濕期，此外於 1.4~1 萬年前濕度亦有增加現象。

7 萬年前較今日溫度下降達 8~10 °C，古雪線 (paleo-snowline) 在 3,400m 以下；2 萬年前則較今日下降 5 °C 左右，古雪線在 3,500m 左右，雖然寒冷現象有漸緩之趨勢，但乾燥程度反而加強，降雨量可能只有今日之一半。



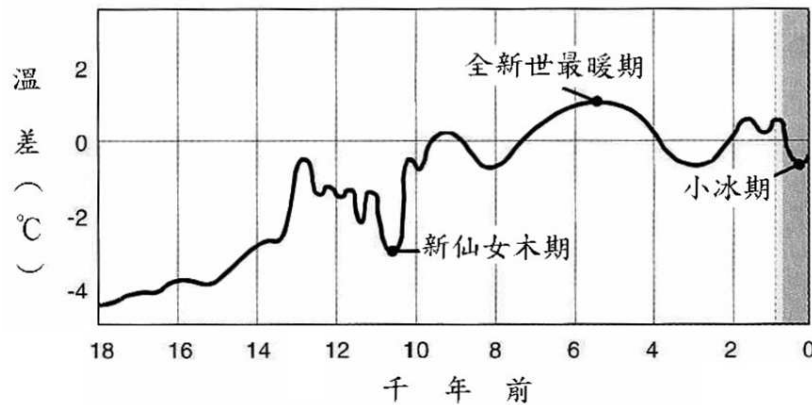
資料來源：引自 Jenkins, 2001； 敏, 2002

圖 3.2.1-1 全球過去 15 萬年之氣候變遷

## 二、台灣過去 1.8 萬年以來之溫度變化

在上次冰期後期約 1.8 萬年前左右，北極冰原的發 到 達極致，稱為上次冰期最盛期 (Last Glacial Maximum, LGM)。自此以後，全球氣溫便開始急速上升，而於 1 萬年前正式脫離冰期進入溫暖的全新世。受到氣候非線性回饋的影響，冰期過 到全新世的氣候極度不穩定，在長期暖化的過程中，氣溫來回震盪劇烈，其中又以發生於 1.1~1 萬年前( 正年代約 1.3~1.15 萬年前)的新 木 (Younger Dryas) 回冷事件最為明顯。進入全新世以後，全球溫度仍緩緩上升，至全新世中期達最高，大概比目前還高出 1~2 °C，稱之為全新世大暖期或氣候適宜期。大暖期之後，溫度長期屬於下降趨

勢，但其中 2,000 年前左右曾經歷一次較小幅度的暖化時期。上次冰期最盛期以來的氣候曲線如圖 3.2.1-2 所示。



資料來源：引自 Jenkins, 2001； 敏, 2002

圖 3.2.1-2 全球過去 1.8 萬年之氣候變遷

而台灣地區於上次冰期最盛期的乾冷氣候，溫度要比今日低超過  $6^{\circ}\text{C}$  以上，一直持續到約 1.7 萬年前開始有減緩趨勢。距今約 1.3~1 萬年間，氣候表現出冰期與間冰期之間的過渡現象，轉暖變濕，但氣候狀況相當不穩定。

進入 1 萬年前的全新世後，則意味著正暖濕氣候的來臨。發生於全新世中全新世的大暖期，在全台灣都可發現紀錄。大致而言，台灣地區全新世大暖期約發生於 9,500~4,000 年前，其中又以 9,500~8,500 年前及 7,000~5,000 年前最為盛，當時氣候甚至比目前更暖和。在大暖期之後，溫度略有下降，直到約 2,000 年前左右，溫度再次微升高  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。

### 三、台灣百年以來之溫度變化

過去 100 年，全球平均地表氣溫約上升了  $0.6^{\circ}\text{C}$ ，以北半球而言，增溫程度可能是過去一千年來最大的。台灣地區百年來溫度之上升速率在  $1.0\sim 1.4^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$  之間，較全球平均地表氣溫上升  $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$  為高。表示台灣暖化趨勢較全球明顯，且冬季增溫的幅度較夏季明顯，平地較山區明顯。



#### 四、台灣未來之溫度變化

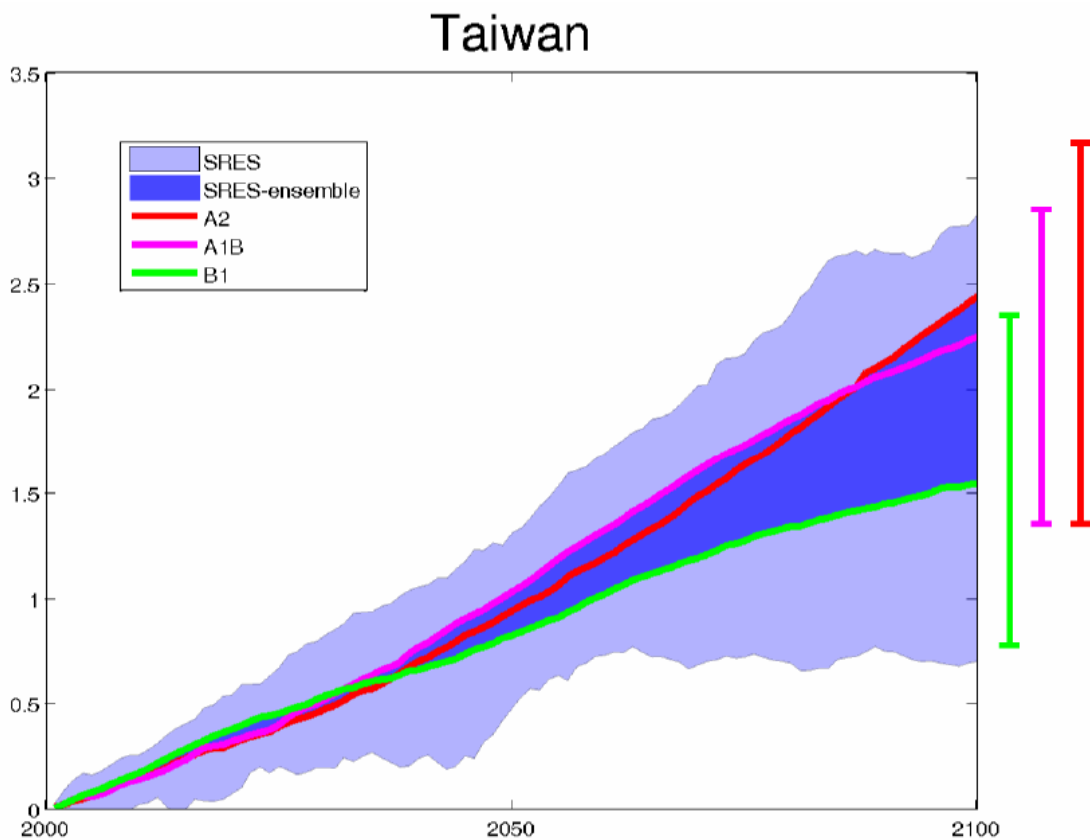
IPCC 綜合化石能源使用狀況、人口成長與經濟發展三種主要因素，分析未來六種可能發展的情境，彙整如表 3.2.1-1 所示，以獲取百年大氣中二氧化碳濃度和硫氧化物濃度，並估算全球平均氣溫演變趨勢。台灣大學全球變遷研究中心參考 IPCC 之評估方法，預估台灣地區至 2100 年，於 A1B、A2、B1 等 3 種未來情境下之溫度變化，結果如圖 3.2.1-3 所示。台灣地區的整體溫度變化，於 2080~2099 年間相對於 1980~1999 年間，全島平均溫度將會上升。溫度暖化程度，會隨著不同的情境，而有顯著的差異。在較重的 A2 情境下，約平均可增加 2.5°C；在大多數公認最可能發生的 A1B 情境下，約平均上升 2.3°C；而在溫室氣體排放顯著減緩的條件下之 B1 情境，仍可能上升 1.5°C。

目前台灣對於氣候變遷之研究主要著重於未來百年內之變化，但處置系統所需的時間尺度遠大於現有的評估結果。故需重建古氣候之氣溫變動幅度，以評估未來氣溫的長期變動趨勢。



表 3.2.1-1 IPCC 第三次評估報告建立的六個未來發展情境

情境	特點
A1FI	密集使用化石能源，人口成長緩慢，全球均衡發展
A1T	非化石能源擴張迅速，人口成長緩慢，全球均衡發展
A1B	各類能源均衡使用，人口成長緩慢，全球均衡發展
A2	人口持續成長，全球非均衡發展
B1	在 A1 人口成長情況下，全球永續發展的最佳解決方案
B2	地區性經濟、社會和環境永續發展的解決方案



備註：淺色為所有模式結果，包含三種情境，最高值與最低值的範圍。深色是相同情境下，先求出多個模式的平均值(Scenario Ensemble Mean)，再得出情境之間的最高值和最低值的範圍。  
資料來源： 中明等，2008。

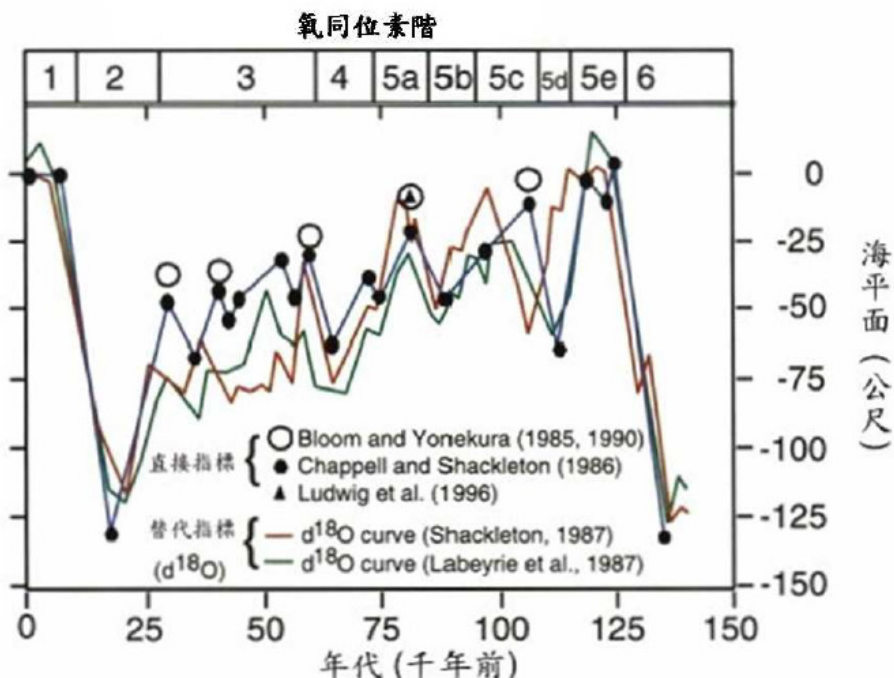
圖 3.2.1-3 台灣區域年平均溫度變化圖

### 3.2.2 海平面

#### 一、台灣過去 1.8 萬年以來之海平面變化

全球海平面在過去 15 萬年的變化趨勢與氣溫變化十分相似，如圖 3.2.2-1 所示，上次間冰期(約 12.5 萬年前)與上次冰期(約 1.8 萬年前)之海平面降低幅度最高可達 130m 左右 (Shinn, 2001)。

而距今約 2 萬年前的末次冰期，當時全球海平面較現今低約 120m，之後氣候變暖，海平面一直持續上升至今。初期約從 2~1.4 萬年前期間，海水面上升的速度較緩慢，平均千年約 6m。之後 1.4~0.6 萬年前之間，海水面上升的速度約 千年 10m。6,000 年前至今，海平面的變動則趨於穩定，沒有太多的變化，其變動幅度大約在 0.3~0.5m 之間(Church et al., 2001)。

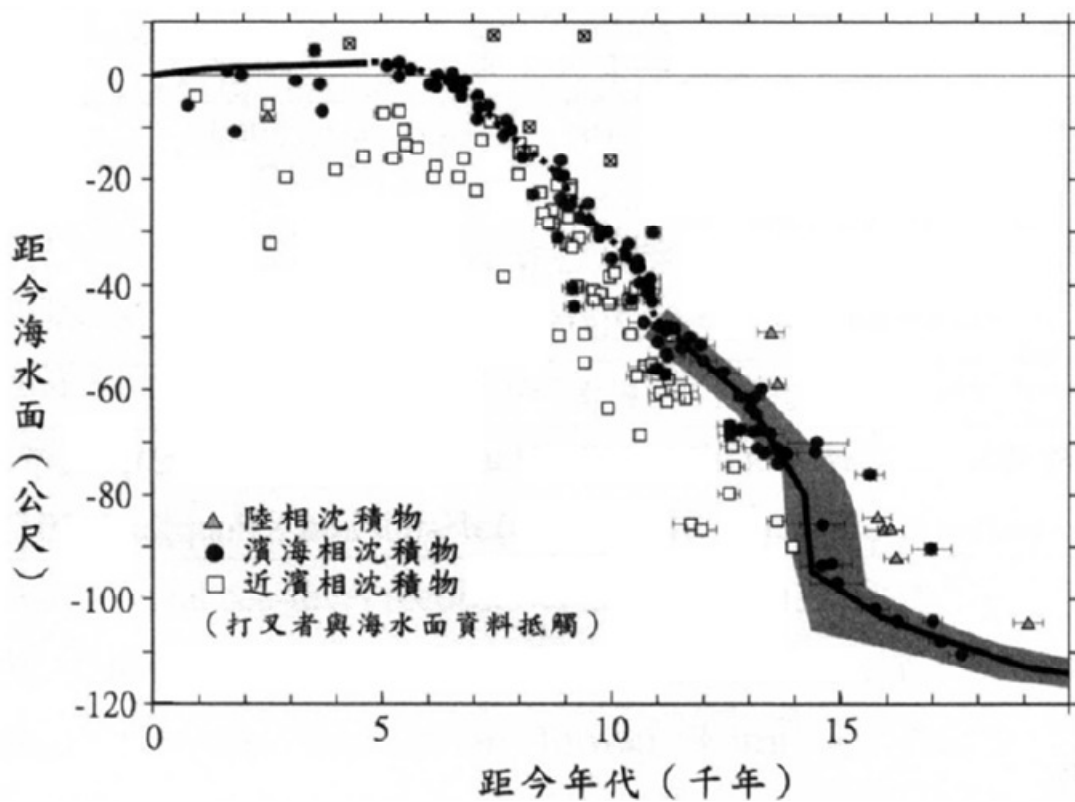


註：由海洋氧-18 同位素(<sup>18</sup>O)分析，所定出來地球氣候變遷的時期，稱為海洋同位素階(Marine isotope stage)，或氧同位素階，數 越小越接近現在。

資料來源：Shinn, 2001； 敏, 2002

圖 3.2.2-1 全球過去 15 萬年之海水面變化

有關台灣地區於全新世的海平面變化研究，(2005)  
運用地質調查所西南部平原岩心資料，建立台灣 2 萬年至今的絕對海平面曲線，如圖 3.2.2-2 所示。圖中顯示距今 1.1~1 萬年前，海平面上升的速度大於 13mm/yr，距今 10,000~6,500 年前，海平面上升速度約 8~9mm/yr，但自 6,500 年前以來，海水面變動甚微。



註： 曲線為絕對海水面；5,000 年來的海水面曲線 湖群島所記錄者；11,000~20,000 年前的海水面曲線， 建立自 Sunda Shelf(陰影部份為其不確定範圍)  
資料來源： ，2005

圖 3.2.2-2 台灣 2 萬年前至今的絕對海平面曲線

## 二、台灣百年以來之海平面變化

依據 IPCC 在 2001 年公佈的「第三次氣候評估報告」(IPCC TAR)，有關海平面上升趨勢的評估結果及分析全球潮位計觀測紀錄顯示，在 20 世紀的百年間，全球海平面上升速

率約 1.0~2.0mm/yr，而以高緯地區上升較為快速，由台灣所處緯度研判海平面上升速率約為 1.5mm/yr。

(2000)應用中央氣象局西岸之基隆、台中、高、廣、東岸之富岡等五地，穩定度較高的驗潮站 18 年以上觀測資料分析海平面變化，台灣地區海平面變動趨勢為東岸下降，西岸及宜蘭平原上升；任徵(2002)排除全球海平面上升趨勢(1.5mm/yr)之後，依此進一步推估出基隆、台中、高、廣、富岡等五特定地點之海平面變遷速率，彙整如表 3.2.2-1 所示。

湖地區因四周海域並未在陸地發現，顯示沒有明顯地殼上升運動；全新世中期較高海水期的濱相堆積，現仍保留在沿岸平原，顯示無明顯沉降作用發生；沒有明顯地震紀錄，顯示湖群島為台灣附近地殼最穩定的地區等因素，研判湖海平面上升速率和全球一致(1.5mm/yr)。

金與地區由於缺乏長期監測資料，無法評估海平面變動趨勢，而由中國國海洋局分析其沿海 48 個站之紀錄顯示，在中國沿海各區海平面變化情形大多數為上升趨勢，其中東海上升率為 1.9mm/yr，南海為 2.0mm/yr，略高於全球海平面上升速率。因此，若金等離島海平面上升速率以 2.0mm/yr 計，排除全球海平面上升趨勢(1.5mm/yr)之後，地區性海平面變遷推估為 0.5mm/yr。

表 3.2.2-1 台灣地區性海平面變遷推估速率

地區	基隆	台中	高	廣	富	湖	金
排除全球海平面上升趨勢(1.5mm/yr)之後的海平面變遷推估速率(mm/yr)	-1.1	-0.3	0.7	1.2	-7.1	0	0.5

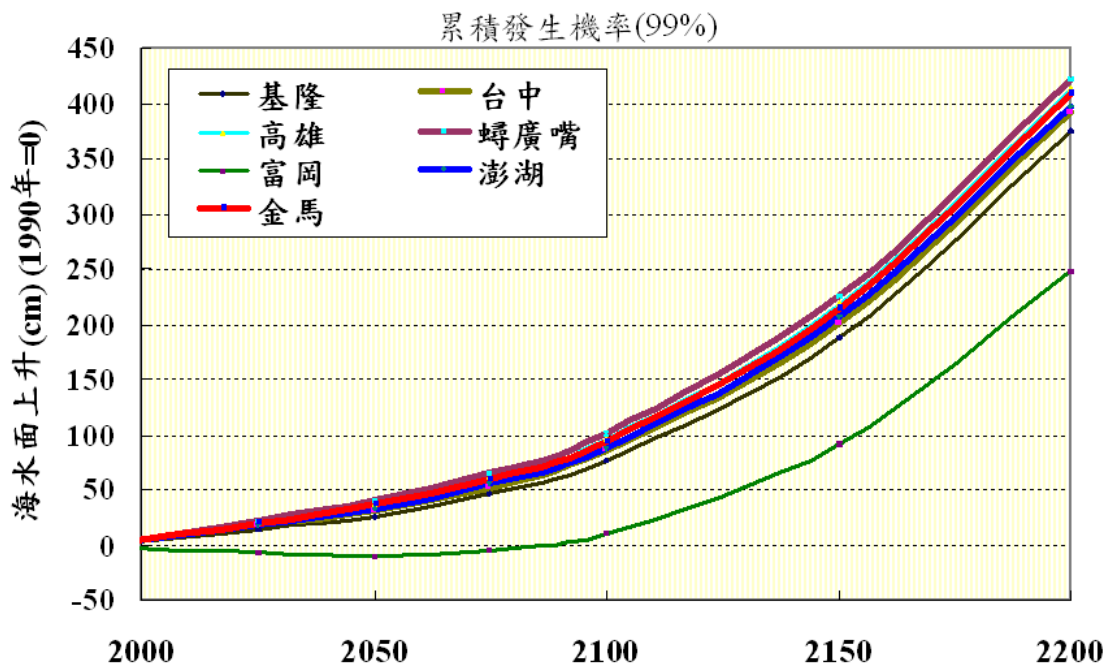
資料來源：任徵，2002。

### 三、台灣未來之海平面變化

台灣未來之海平面變化可依上述 IPCC 對未來百年全球暖化導致氣候變遷所作的預測，在這幾種可能發生的氣候變遷情景發展下，進行預測與評估。

海平面變化所考量的因素包括極地和高緯地區冰雪融化，以及海水水體的熱脹效應。台灣的海平面變化除了受到全球暖化導致的氣候變遷影響外，還要考量地區性的長期變遷因素(板塊運動、地殼垂直變動、地層下陷、 蝕/淤積)。

任徵(2002)推估台灣地區的特定地點，至 2200 年的海平面變化(累積發生機率 99%)，結果如圖 3.2.2-3 所示。



資料來源： 任徵(2002)，我國用過核廢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-海水面變遷情景分析及不確定性探討報告

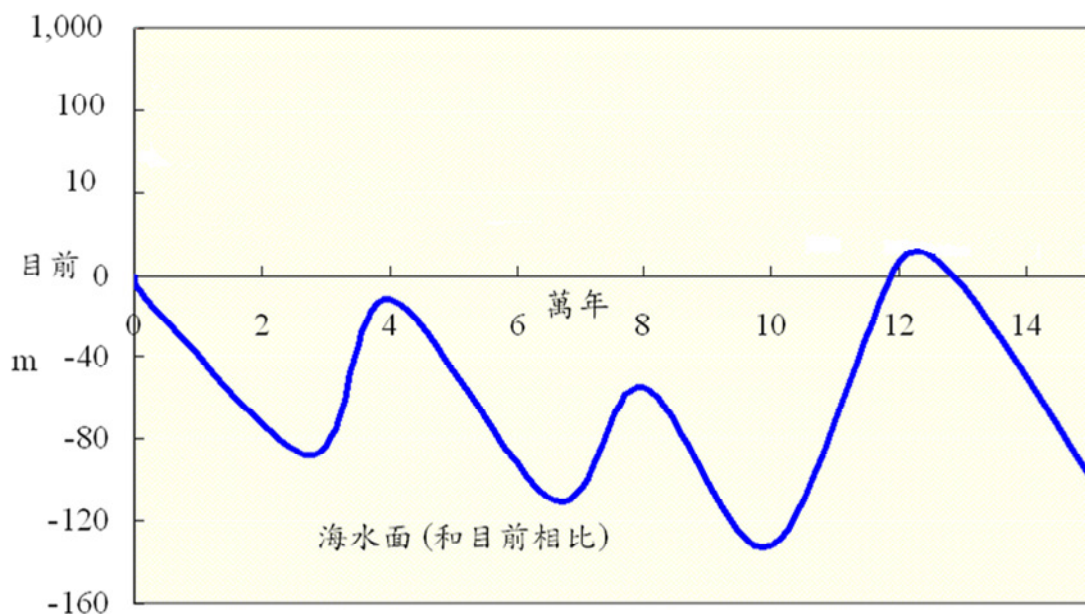
圖 3.2.2-3 台灣地區特定地點未來 200 年的海平面上升情況

此外，Moren 及 Passe(1999)曾應用三個簡單模型，推算未來 15 萬年全球氣候特徵，推算結果如表 3.2.2-2 所示。依據 Moren 及 Passe 的研究結果，若 全球氣候的冷、暖轉



折，可將未來 15 萬年，區分為 個時段，除了未來 5,000 年仍延續目前氣候狀況外，預期在未來 15 萬年期間，將出現四個冷期和三個暖期。一般而言，冷期持續約 3 萬年；暖期則相對的較短，約維持 1 萬年左右，就會進入下個冷期。

根據國外古氣候研究結果，上一次冰期最盛期(LGM)(約在 2.2~1.9 萬年前)的冰層和凍原向南延伸範圍，距台灣仍有相當距離。因此，在 Moren 及 Passe (1999)全球氣候變遷情境，四個冷期北半球冰層和凍原南下擴散範圍不及台灣地區的情況下，全球海平面下降，是影響台灣地區相對海岸線變動的主要因素。任徵(2002)基於「上一次冰期最盛期海平面約比目前低 130m」及「下一冰期最盛期(約在未來 10 萬年)海平面最低點同為 130m；未來各冷、暖期海平面，也比照前一間冰期相同氣溫時的水平」等假設前題下，估算台灣海平面變遷情景，結果如圖 3.2.2-4 所示。



資料來源： 任徵，2002。

圖 3.2.2-4 台灣地區未來 15 萬年海平面自然變遷示意圖

表 3.2.2-2 未來 15 萬年的全球氣候情境

期間(千年)	氣候特徵
0~5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 和目前相近。</li> </ul>
5~30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 逐漸步入冷期，全球平均氣溫約較目前低約 8°C，於未來 20~30 千年期間達冰河最大量。</li> <li>• 北半球高緯高山冰層開始擴張範圍，最遠延伸至目前波羅的海。</li> <li>• 凍原擴及波羅的海南岸及部份 Smaland 高地。</li> <li>• 期初北半球高緯地區海岸線呈下降趨勢；後期北半球高緯地區地殼承受冰層壓力而呈逐漸下陷趨勢，目前波羅的海沿岸浸入水中。</li> <li>• 陸地蓄積冰層使得全球海水面逐漸下降，冰層及凍原擴散範圍僅及於中高緯地區，台灣地區海水面隨全球趨勢，逐漸下降。</li> </ul>
30~40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 暖期，氣溫快速回昇，但仍較目前為冷，氣溫較目前低約 1°C。</li> <li>• 北半球高緯地區凍原範圍向北退卻。</li> <li>• 冰層融化。</li> <li>• 北半球高緯地區海岸線呈下降趨勢。</li> <li>• 台灣地區海水面逐漸上升，但仍較目前為低。</li> </ul>
40~70	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 進入新的冷期，未來 60kyr 氣溫約比目前低約 10°C，其後冷期達於最高點，冰層 延北半球高緯地區。</li> <li>• 北半球高緯地區冰層及凍原範圍向東南擴張；未來 60~70 千年期間地殼受冰層及凍原壓縮，北半球高緯大部份海岸地區為海水沒，凍原 延北半球高緯地區。</li> <li>• 台灣地區海水面隨全球趨勢下降，約較目前低。</li> </ul>
70~80	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 暖期，逐漸回暖但仍較目前低約 5°C。</li> <li>• 冰層及凍原迅速退卻，並小於未來 20~30 千年期間所覆蓋的範圍。</li> <li>• 北半球高緯地區海岸線因地殼上昇而下降。</li> <li>• 台灣地區海水面回升，但較目前低。</li> </ul>
80~110	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 新的冷期開始，未來 100 千年氣溫約比目前低約 12°C，之後冰河達於最大。</li> <li>• 北半球高緯冰層和凍原向南延伸；未來 100~110 千年期間冰層覆蓋整個斯地維亞半島，經 羅斯 延至波蘭和 國北部。</li> <li>• 北半球高緯海岸線下降。</li> <li>• 台灣地區海水面隨全球趨勢下降。</li> </ul>
110~130	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 間冰期，全球氣溫迅速回暖。</li> <li>• 北半球高緯地區冰層和凍原退回至目前範圍。</li> <li>• 北半球高緯地區海岸線仍略高於目前位置。</li> <li>• 最暖期出現於未來 120 千年，很可能略高於目前氣溫。</li> <li>• 台灣地區海水面回升，但較目前為低。</li> </ul>
130~150	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 開始新的冰期循環。</li> <li>• 高緯冰層和凍原開始向中緯地區延伸。</li> <li>• 期末可能和未來 60~70 千年期間 延範圍相近。</li> <li>• 台灣地區海水面下降至最低點。</li> </ul>

### 3.2.3 降雨量

#### 一、台灣過去 1.8 萬年以來之降雨量變化

過去 1.8 萬年主要古水文狀況變動時期，約在 1.3~1.2 萬年前、9,000~7,000 年前、6,000~5,000 年前、2,000 多年前及數百年以來，分別有雨量 然增加的現象。

#### 二、台灣百年以來之降雨量變化

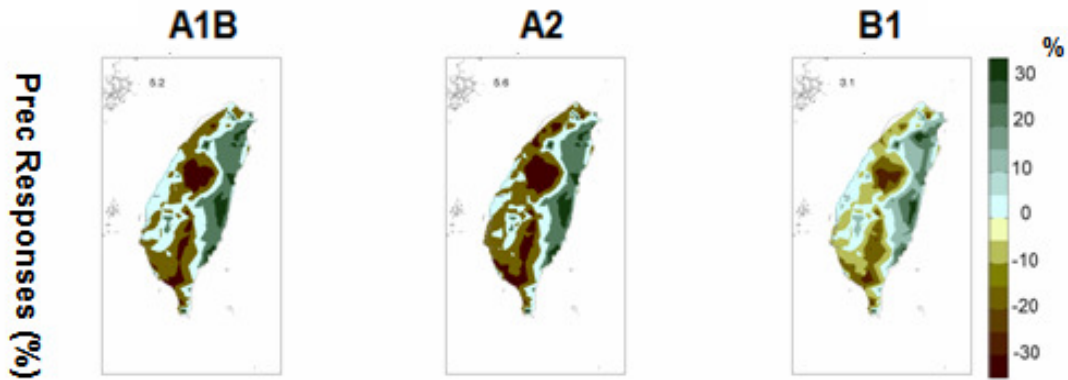
近百年來，台灣北部地區的平均年降雨量逐年增加，但年降雨日數逐年減少，亦即降雨強度有逐漸增大的趨勢；山區 季降水量長期屬減少趨勢。依台灣各氣象站百年來降雨資料統計分析，以基隆和台北氣象站為例，近百年來之平均降雨量分別增加了 1,185mm/98 年(或 12.1mm/年)和 268mm/103 年(或 2.6mm/年)，而年降雨日數分別減少 14.6 天/98 年(或 0.15 天/年)和 27.8 天/103 年(或 0.27 天/年)，依此計算， 雨日之降雨量分別增加約 50%及 30%(黃金山，2001)。

#### 三、台灣未來之降雨量變化

根據台灣大學全球變遷研究中心之推估，未來台灣的降雨變化，可能會有多雨的趨勢，但是有部分區域，可能也會有缺水的危機。然而，總降雨變化量不大，也並不如溫度變化般的具有空間一致性。於 2080~2099 年間相對於 1980~1999 年間，平均總降雨量，在 A1B 和 A2 情境的預估值是類似的，可能增加 5.2~5.6%，而 B1 情境可能增加 3.1%，如圖 3.2.3-1 所示。

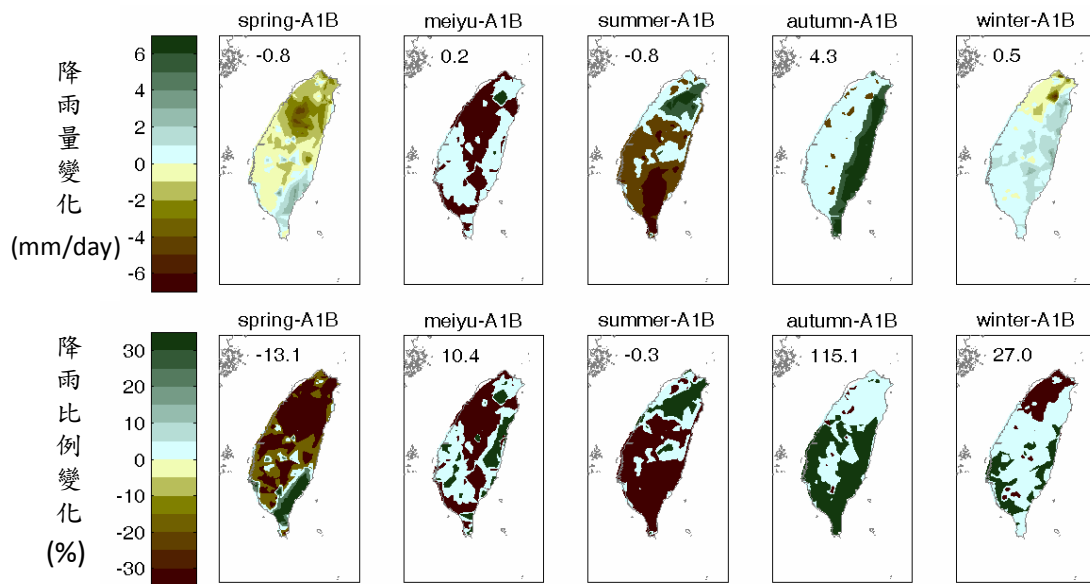
若從降雨季節區分的話，3、4 月是 雨，5、6 月是 雨 季節，7~9 月為典型 季，10 月、11 月為 季，1、2 和 12

月則為 季。本世紀末之相對降雨變化量，其空間分布如圖 3.2.3-2 所示。



資料來源： 中明等，2008。

圖 3.2.3-1 不同情境下，2080~2099 相對於 1980~1999 之降雨變化百分比



資料來源： 中明等，2008。

圖 3.2.3-2 A1B 情境下，2080-2099 年相對於 1980-1999 之降雨變化趨勢(以降雨季節劃分)



### 3.3 我國地形變化概述

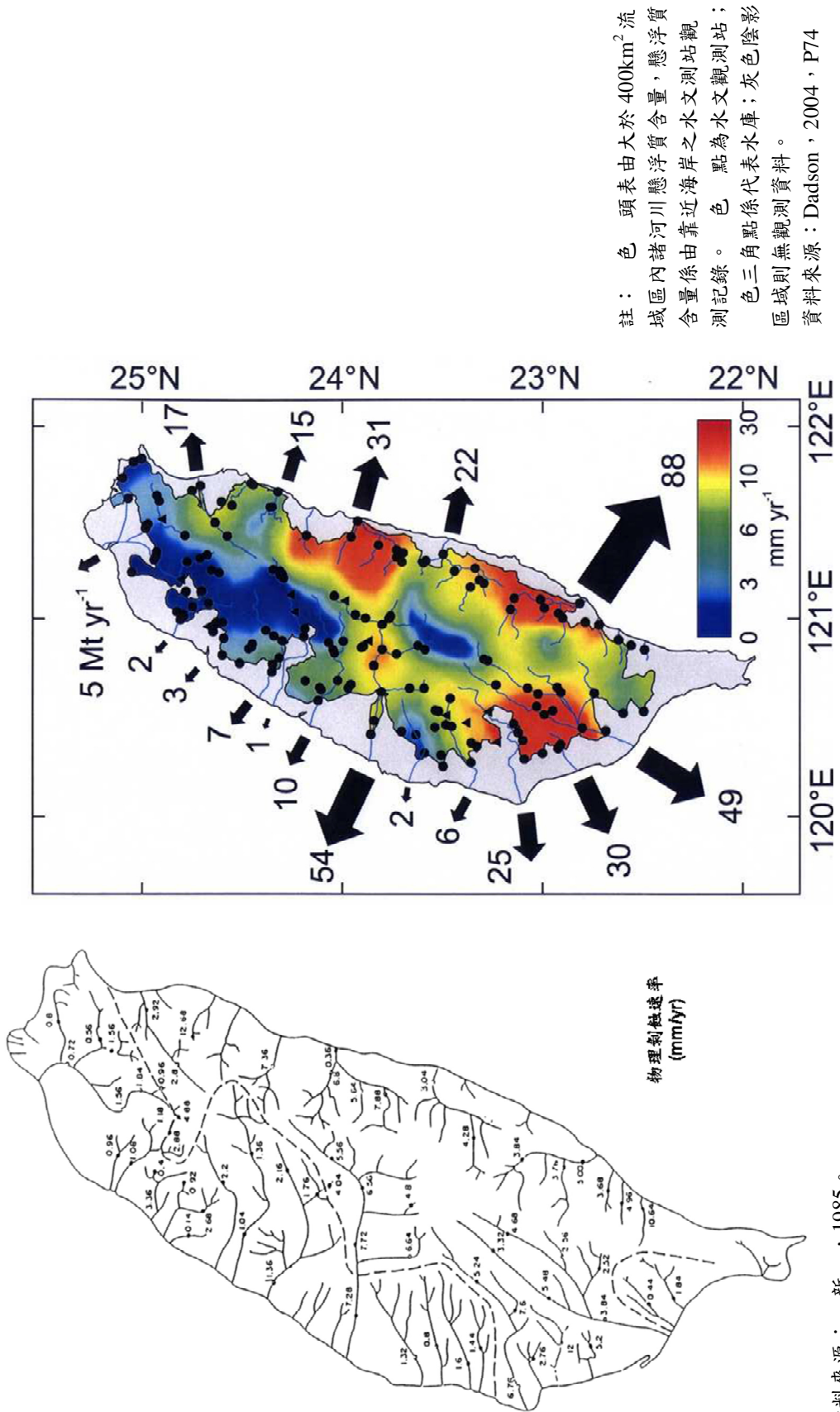
台灣地區地形坡度急，雨量豐，風化作用盛行，這些條件均促使地表接受快速的剝蝕。遠 (1976)推測台灣全島陸地之物理性侵蝕速率，如圖 3.3-1 所示；線左側地區年侵蝕速度較低，大部分在 3mm/yr 以下；線右側(山地部份)的侵蝕速度平均 5.5mm/yr，此與 Dadson(2004)針對台灣山區，30 年期間(1970~1999)之侵蝕速率研究成果(圖 3.3-2)，即標高大於 500m 之山區平均侵蝕速率為 6mm/yr 相當合；另就長時間範圍尺度，利用台灣東逆衝斷層帶及變質岩山區，代表現在造山運動( $\leq 5\text{Ma}$ )之核飛跡灰石之定年樣品，量測出在中央山脈東之剝露率為 3~6mm/yr，如圖 3.3-3 所示，此與前述山區平均侵蝕速率 5.5~6mm/yr 之值相當一致，但與世界各地相比較，台灣本島之山地侵蝕速率仍相對較高。

此外，台灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊的縫合線上，菲律賓海板塊與歐亞大陸於上新世中期，引發了台灣地質史上一次大規模的造山運動，將原本位於海平面以下的沉積物隆起。造山運動至更新世中期之陸地隆升更為迅速，台灣島大部份地區已露出水面，由於陸地隆升之速率大於侵蝕速率，造就了今日的台灣島及島上高達 3,000m 以上的山脈。菲律賓海板塊今仍以年約 7cm 的速度向西北方向移動，對歐亞大陸邊緣產生持續性的擠壓。但台灣並不是個地區都是隆升，配合既有的隆升速率與地形，無海階發或沒有留下古海水面證據的侵蝕性海岸，如東北海岸、蘇花海岸及台東、大武海岸，推測幾千年以來(或更久)應是處於緩慢隆升甚至沉降)的狀況。平原地區則大都以沉降為主。綜合台灣相關之地殼上升與沉降特性研究，彙整地殼上升與沉降之定量資料說明如下：



1. 台灣在更新世造山運動時期的隆升速率約在 5mm/yr 以上( 新 , 1985)。
2. 聰 (1982)以核分裂飛跡法,測定中央山脈在更新世造山運動時期(0.58~0.128Ma 前)之平均隆升速率達 年  $10.7\pm 2.2\text{mm}$ ; 而最近 60 萬年的平均隆升速率為 年約  $8.9\pm 1.9\text{mm}$ 。
3. 等(1977)的測定, 半島、台南一帶及海岸山脈的平均上升率自 9,000 年以來大約都是 年  $5.0\pm 0.7\text{mm}$ ; 而台灣北部海岸一帶在 1,500~5,500 年前的隆升率非常小,不大於 年 2mm; 但在 5,500~8,500 年前,隆升率則達 年 5.3mm。
4. (2005)推算台灣島各海岸全新世的構造隆升、沉降速率,如圖 3.1.4-4 所示,北海岸與 海岸約為 年上升 1~2mm; 半島局部區域可達 年 3~4mm; 西南丘陵外緣與花東海岸南段之上升達 年 5mm 以上(甚至高達 年 1cm); 蘭陽溪平原是全島全新世沉降最快的平原, 年可達 1cm 以上; 屏東平原所屬的高屏溪出海口,其沉降速度可達 年 5~6mm; 水溪平原的構造運動較穩定, 年沉降速率在 1~2mm; 南、高 平原顯著受到構造運動影響,形成一系列的向斜與背斜(台地),向斜地區構造沉降速率 年可達 3~4mm。

由上述諸多資料顯示,台灣陸地上昇速率自更新世末期造山運動高潮時期結束後,已有逐漸減緩的趨勢,且最近的上昇速率與侵蝕速率相當,使台灣近期之陸地高度無顯著變化。若以全新世之台灣海岸地區地殼之上升/沉降速率在-10~+5mm/yr 範圍值估算,則未來十萬年台灣海岸地區之地殼高度變化在-1,000~+500m 間。



資料來源：新，1985。

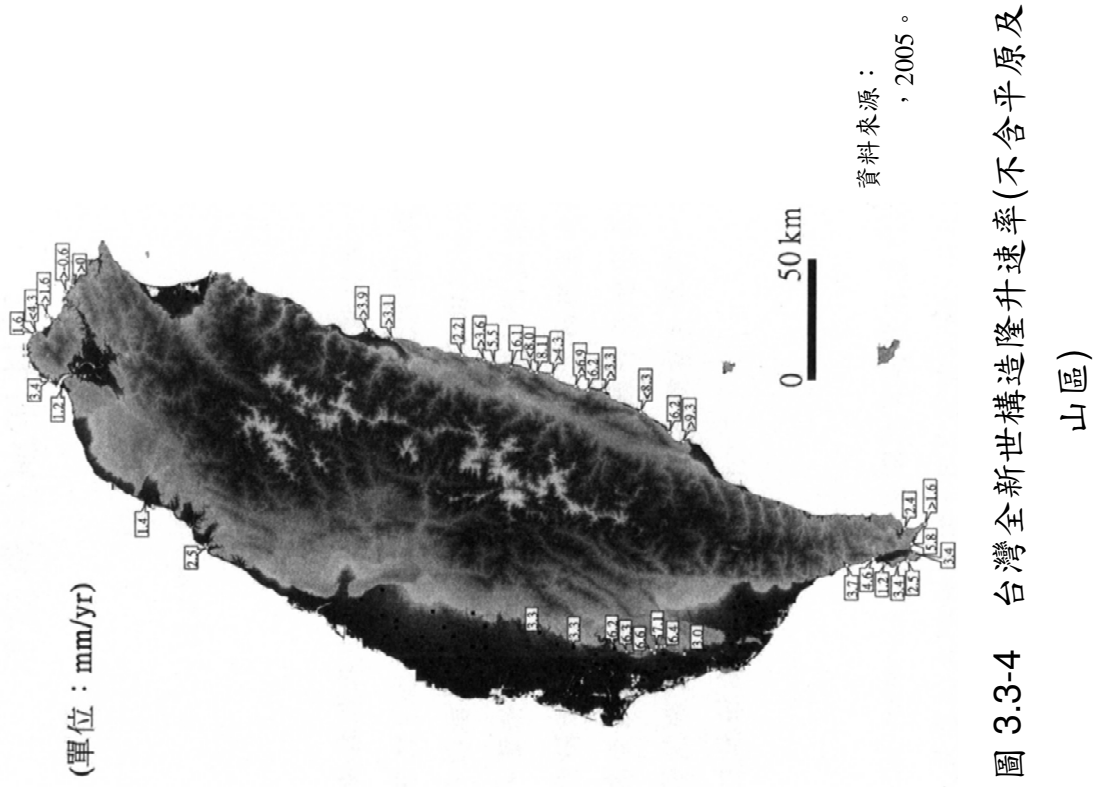


圖 3.3-3 台灣現代造山運動(≤5Myr)時期之核飛跡剝露率圖

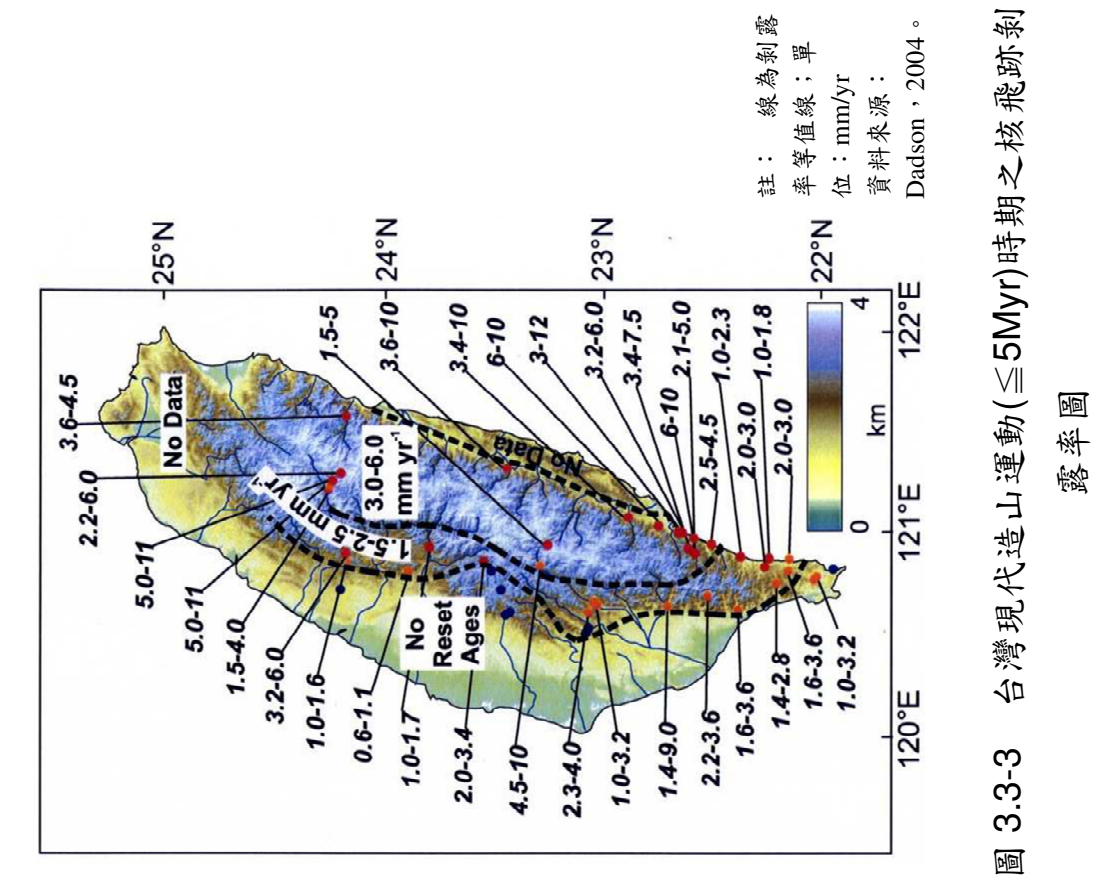


圖 3.3-4 台灣全新世構造隆升速率(不含平原及山區)



### 3.4 我國的低放射性廢棄物處置概念

我國的低放射性廢棄物最終處置場址仍處於選址階段，目前已公告「台東縣達仁鄉」及「金 縣 鄉」等 2 處地點為建議候選場址。由於處置設施的處置概念因場址不同而有些微差異，故本報告先以台東縣達仁鄉建議候選場址的處置概念，做為後續工程障壁討論時的參考依據。

台東縣達仁鄉建議候選場址位於達仁溪及 溪間的丘陵地，採用坑道處置方式，初步規劃處置坑道之高程介於 EL.+20m~EL.+40m 間。主要以多重障壁的概念遲滯核種傳輸，使核種於到達生物圈時，放射性已衰變至對人體無害的程度。多重障壁系統由天然障壁與工程障壁組合而成，工程障壁包含廢棄物包件、窖內填充、處置窖、覆蓋層、回填材料、坑道 等，如圖 3.4-1 所示，而在坑道 以外則屬於天然障壁範圍。

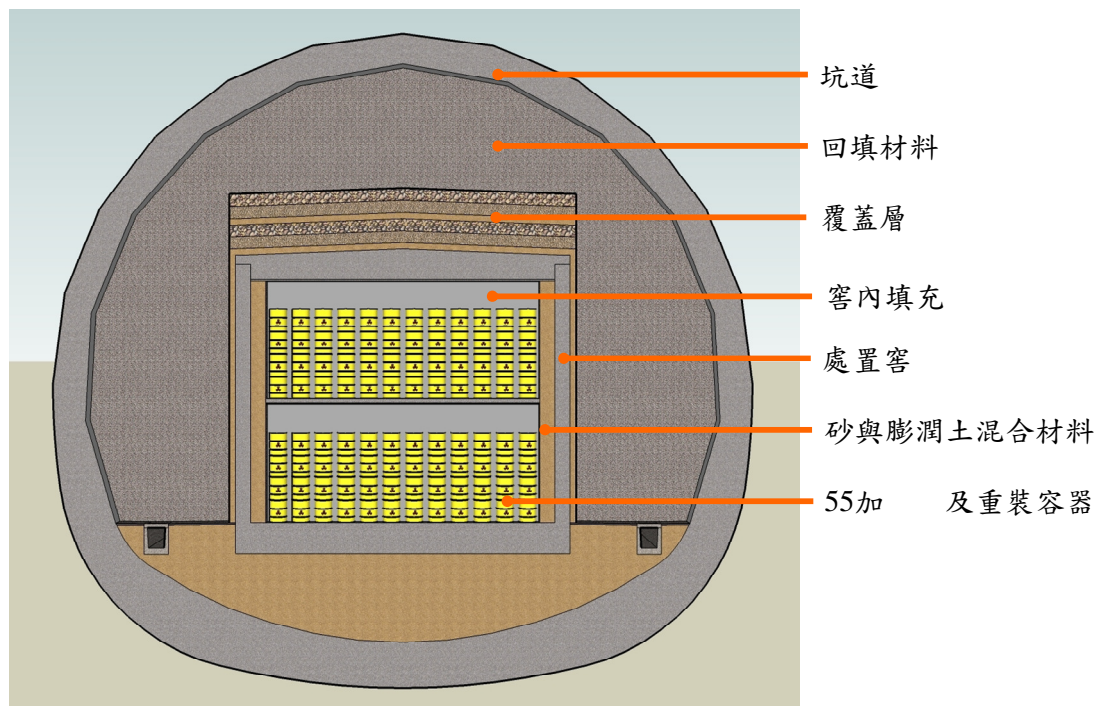


圖 3.4-1 台東縣達仁鄉建議候選場址處置坑道剖面示意圖

處置窖是以鋼筋混凝土為主要構成材料，處置窖的內側與外側皆有一層砂與膨潤土混合材料，利用膨潤土的低透水性，降低水入滲至處置窖內與廢棄物接觸的機會。廢棄物包件放入處置窖後，以高流動性混凝土填充於窖內空隙，固定廢棄物包件。最後再於處置窖頂部加置礫石層、砂層、砂與膨潤土混合物作為覆蓋層，分層提供排水路徑，防止水滲入窖體。處置作業完成後，以開挖料回填坑道，坑道洞口作特殊封塞(Plug)設計，降低坑道成為核種傳輸徑的可能性。

### 3.5 我國的核種遷移參數考量與建議

台灣的低放射性廢棄物最終處置場的處置概念，與日本的餘裕深度處置場的處置概念相似，皆採坑道式的多重障壁處置系統，地質環境亦多有相同的特性。因此在核種遷移參數的考量上大致相同，主要包括通過設施流量、實際流速、遷移路徑長、分散特性、流出點位置、稀釋水量、透水係數及有效擴散係數等，大致可區分為天然障壁及工程障壁兩大類，分別說明如下。

#### 一、天然障壁的核種遷移參數評估技術建議

通過設施流量、實際流速、遷移路徑長、分散特性、流出點位置及稀釋水量等參數，會受到天然障壁的長期環境特性影響，由前述的討論可知，台灣在地質環境上的特性大都與日本相似，日本所處緯度較高，須考量寒冷氣候下的永凍土對地下水流場之影響，台灣則因緯度較低，積雪量要達到可以形成永凍土的機會較低。且根據土壤學的研究，台灣的土壤種類豐富，全球 12 類土壤中的 11 類都可在台灣發現，獨沒有永凍土存在，因此在評估時可先不考量永凍土的影響。



另外，台灣的「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」及「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」，於選址時已初步排除部分敏感地質條件對處置設施的不利影響，但仍須評估處置場周圍環境的長期變動現象對地下水流場之影響。彙整我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議，如表 3.5-1 所列。

## 二、工程障壁的核種遷移參數評估技術建議

與工程障壁相關的核種遷移參數主要包括透水係數及有效擴散係數，這些參數會受到工程障壁的材料及長期狀態改變等因素影響。以日本考量的影響因素為基礎，根據我國的工程障壁設計概念，彙整出我國於評估時須考量之影響因素，如表 3.5-2 所示，將影響參數的因素概分為水泥類材料、膨潤土類材料及其他等三大類。但我國低放射性廢棄物最終處置場所處置的廢棄物以 A 類、B 類及 C 類廢棄物為主，核種衰變熱作用較不顯著，其發熱升溫的作用不致影響工程障壁之功能，故我國在進行工程障壁的長期狀態評估時，可先不考慮廢棄物包件發熱對障壁之影響。

另外，雖然工程障壁使用的材料與日本相同，皆為水泥類材料及膨潤土類材料，故其材料特性的趨勢大致相同，但水泥類材料的特性隨設計、配比而不同，膨潤土類材料也因使用的膨潤土來源不同，而有不同的特性。因此，未來可參考國際上的經驗與方法，針對我國的工程障壁進行長期的特性與狀態評估。

表 3.5-1 我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(1/5)

影響因素	評估目的		日本的研究或建議	台灣是否 納入考慮	主要評估方法	
	對處置設 施的影響	對核種遷 移的影響				
地質環境	火成活動	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>火山活動範圍：火山群中心起算半徑 15km 內。</li> <li>地溫影響範圍：火山噴發中心起算半徑 20km 內。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>依法規要求，處置設施場址不得位於後火山活動地區。處置場內不會有火山分布，</li> <li>火山活動位置起算 20km 的區域內，為未來地溫受到火山活動影響之範圍。</li> </ul>
	斷層活動	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>斷層的長度約為縱向累積位移量的 10 倍。</li> <li>地殼應力場沒有顯著變化的區域，若現在無新斷層產生，未來也不會產生新斷層。</li> <li>以斷層活動產生的變位範圍做為水理影響範圍，日本土木學會提出，斷層活動對周圍岩盤變位的顯著影響範圍，在斷層兩側 1km 範圍內。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>依法規要求，處置設施場址不得位於活動斷層之主要斷層跡線兩側各 1km 及兩端延伸 3km 之帶狀地區。</li> <li>藉由文獻調查、空拍照片判讀、地表現勘、鑽探調查、物理調查等方法，評估處置場周邊的斷層、褶曲與撓曲的分布狀況。</li> </ul>
	地震	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>以日本原子能安全委員會的「耐震設計審查指針」為基礎，評估未來可能發生之地震規模。</li> <li>地震對地下水流動的長期影響，僅限於活動後的斷層周邊。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>對於未來的地震評估，需考量地下坑道處置的評估時間尺度、地震的反覆程度及不確定性之幅度等項目後進行預測。</li> <li>地震對地下水流動變化的長期影響範圍，僅限於活動後的斷層周邊。而法規已排除場址設置於活動斷層周邊的可能性，故可先不可慮地震對地下水流場之影響。</li> </ul>
	風化		✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>風化影響範圍：利用鑽心取樣、透水試驗、礦物與化學分析等方法進行推估。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用風化地質、地下水、岩石的礦物與化學組成、風化與未風化岩盤的透水性、裂縫密度等基本資料，掌握風化機</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>•風化擴展速度:由岩盤出露到地表的時間與風化深度，或是岩石-水的反應機制及速度進行推估。</li> </ul>		<p>制，推估場址過去之風化擴展速度，並以此為基礎，考量未來的地形變化及氣候變遷，預測未來之風化影響範圍。</p>
--	--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------	--	-----------------------------------------------------------

備註：

○：必須考慮。△：處置場範圍外有此影響因素時，須考慮其對核種遷移的影響。x：不需考慮。

表 3.5-1 我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(2/5)

影響因素	評估目的		日本的研究或建議	台灣是否 納入考慮	主要評估方法
	對處置設 施的影響	對核種遷 移的影響			
地質環境	泥火山	✓	✓	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>•依法規要求，處置設施場址不得位於泥火山噴出點半徑 1 公里範圍內之地區。</li> <li>•利用處置場及其附近的現地調查與空拍照片判讀，掌握既有的泥火山分佈。</li> <li>•對於具有高孔隙水壓的地層，可以鑽心取樣等物理探查方法進行調查，以評估未來泥火山噴發的可能性。</li> </ul>
	塊體崩移	✓		△	<ul style="list-style-type: none"> <li>•依法規要求，處置設施場址不得位於單一崩塌區面積大於 0.1 平方公里以上，且工程無法整 克服之地區。</li> <li>•藉由對處置場及其周邊的空拍照片判釋、現地調查、鑽心取樣等方法，了解其地質與地質構造狀況，評估大規模塊體崩移發生的可能性及分布範圍與影響範圍。</li> </ul>
氣候	氣溫		✓	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•蒐集處置場址的氣溫資料，評估過去最溫暖期與最寒冷期的氣溫，將此變動幅度作為評估未來氣溫之基礎，分別考</li> </ul>

°C~+2°C。

與海平面變化				<ul style="list-style-type: none"> <li>•利用含有花粉化石的湖沼沉積物及大陸冰層的氧同位素比，獲得過去氣溫的變動趨勢，再加入人類活動等因素，評估未來的氣溫變化。</li> </ul>		量溫暖期持續進行與漸漸寒冷化等兩種狀況，評估其氣溫變動趨勢。
	海平面		✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>•過去 14 萬年間的海平面與現在相比約為 +5m~ -130m 的變化幅度。</li> <li>•日本的沿海地區，海平面變動量大於 100m 時，地殼變動量約為數公尺。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•以未來的氣溫變化有溫暖期持續與逐漸寒冷化等兩種狀況為評估之前提條件。由過去多次反覆的溫暖期(間冰期)與寒冷期(冰期)交互進行期間之海平面變動幅度最大值與最小值，假設未來海平面的值將會在此範圍內變動。</li> <li>•當針對逐漸寒冷化的狀況進行評估時，需先假設現在為溫暖期，並以過去數次溫暖期到寒冷期的變動曲線來設定海平面的降低曲線。</li> </ul>

表 3.5-1 我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(3/5)

影響因素	評估目的		日本的研究或建議	台灣是否納入考慮	主要評估方法
	對處置設施的影響	對核種遷移的影響			
氣候與海平面變化	降雨量	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>•日本在 2 萬年前的降雨量約為目前的 50%~70%。</li> <li>•年平均氣溫與降雨量並沒有直接關聯性。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•利用花粉化石法或氣候模擬法等現有的技術，評估處置場未來的降雨量，並須確認使用資料與設定條件的準確性。</li> </ul>
	蒸發散量	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>•在非積雪區域，以 Thornthwaite 法求得之蒸發散量，其誤差較小。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•以處置場址的地形及氣候條件為基礎，加上經驗式、熱平衡式的推估結果以及對相同氣候帶地區的蒸發散量評估，推測處置場址未來的蒸發散量。</li> </ul>
	地下	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>•以地下水解析模式驗證其他推估方法之適</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•利用現況地下水補注量的設定方法，加上氣候變化時的基</li> </ul>

	水補注量			宜性。		底流出量或地下水位面等資料，推估未來的地下水補注量。或是由現在氣溫與降雨量變化、基底流出量、地下水位面的觀測結果，將其與地下水補注區末次冰盛期(LGM)的地下水位面資料(例如不飽和帶、氧化範圍等)比較，以推估未來的地下水補注量。 •不論使用何種方法，都須同時以地下水解析模式推估地下水補注量變化的情況，及其對地下水流的影响程度。
	永凍土		✓	•年平均氣溫低於-2°C時可能會形成永凍土。	×	
地形變化	隆起與沉降	✓	✓	•可以地形學、地質學及測量學等方法推估地殼變動量，但測量學方法的可推估時間小於100年。	○	•以地形學、地質學與大地測量學等方法，取得過去的隆起與沈降量、短期與長期的變動原因與持續性等資料，利用外插法推估處置場址未來的隆起與沈降量。

備註：

○：必須考慮。△：處置場範圍外有此影響因素時，須考慮其對核種遷移的影響。×：不需考慮。

表 3.5-1 我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(4/5)

影響因素	評估目的		日本的研究或建議	台灣是否納入考慮	主要評估方法
	對處置設施的影響	對核種遷移的影響			
地形	侵蝕	✓	✓	○	•以處置場址的隆起與沈降量、降雨量及海平面變動量為基準，利用目前對河川下侵量、流域侵蝕量及海蝕量的預測



變化				<ul style="list-style-type: none"> <li>•沿岸區域，最大海退時之最大下侵量不會大於 90m。</li> <li>•海蝕崖後退速度的最大值，於第四紀層為 80cm/年，第三紀層為 30cm/年。</li> </ul>		<p>方法，推估過去的侵蝕量，驗證評估方法之準確性。再以外插的方式，預測未來的隆起與沈降量、降雨量及海平面變動量。</p>
地球化學環境	建設營運造成	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>•位於凝灰岩及沉積軟岩的砂質泥岩地質，坑道開挖後 80 年，自坑道壁向岩石方向數十公分的範圍內有氧化現象。</li> <li>•掌握處置設施建設前的地球化學環境，以地下水模式推估處置設施興建造成的地球化學環境變化。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•建設處置設施可能造成的地球化學環境變化，包括設施周邊岩盤的飽和與未飽和狀態變化、因飽和與未飽和變化造成的氧化還原狀態改變、深層地下水沿著水路上升造成的水質變化等，可利用地下水流動解析評估及預測地球化學環境變化。</li> <li>•需於設施建設後，持續監測孔隙水壓、飽和度等地球化學環境變化，並將監測結果反饋至地球化學環境變化之預測模式中。</li> </ul>
	長期變動現象造成	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>•考量火山活動的岩漿對地下水之影響、海平面變動對海水影響範圍移動之影響、地形變化對地下水流場變化之影響、地表風化對氧化帶移動之影響等長期變動現象之變化，以地下水模式推估地球化學環境變化。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>•對於長期變動現象造成地球化學環境變化之評估，可利用地下水流動解析評估及預測地球化學環境變化。若解析模型的精度、未來的地形預測、海平面變動預測的設定幅度有差異時，可藉由敏感度解析掌握對核種遷移評估參數的影響。</li> <li>•檢討地表風化對氧化帶移動之影響時，需了解地表的風化分布，並就其成因以地質學的觀點檢討其對處置設施的長期影響。</li> <li>•長期的氧化作用，可利用現有的水-岩石反應之地球化學程式進行評估。</li> </ul>

表 3.5-1 我國天然障壁的核種遷移參數評估之技術建議(5/5)

影響因素	評估目的		日本的研究或建議	台灣是否 納入考慮	主要評估方法
	對處置設 施的影響	對核種遷 移的影響			
開挖影響 區的透水性		✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>開挖影響區之透水係數通常較開挖前增加 10~1,000 倍。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>評估開挖影響區的長期變化時，可利用岩盤隨時間的變化、膨潤土類材料的膨潤壓作用、水泥類材料的劣化等主要力學現象組合，選擇適合的力學模式，設定長期的變化條件，預測處置設施及岩盤之長期力學行為，評估開挖影響區的進展狀況。</li> </ul>

備註：

○：必須考慮。△：處置場範圍外有此影響因素時，須考慮其對核種遷移的影響。x：不需考慮。

表 3.5-2 我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(1/5)

影響因素	評估目的	日本的研究或建議	台灣是否 納入考慮	主要評估方法
水泥類 材料 鋼筋腐蝕	對水泥類材 料的裂縫擴 展與新生裂 縫之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本「土木學會混凝土標準示方書[設計編]」中，訂定混凝土中鹽化物離子的 界濃度為 1.2 kg/m<sup>3</sup>，若超過此 界濃度則可能發生鋼筋腐蝕。pH 值降低至中性範圍時(pH 值小於 10)，則會破壞 態保護，增加鋼筋腐蝕速度。</li> <li>混凝土在大氣中暴露經過 50 年後，混凝土中性化的範圍約為 20mm。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>因長期的鋼筋腐蝕造成裂縫之相關研究或資料較少，故較難直接進行預測。可利用腐蝕量推估裂縫進展狀況的預測模型，並由各種實驗、解析結果、實際構造處的量測結果確認模型的正確性。以推測的處置環境狀況為基礎，假設腐蝕機制及腐蝕型態的時間序列變遷，設定適當的腐蝕量與腐蝕速度，以掌握裂縫的程度及進展狀況。</li> <li>鋼筋周邊產生裂縫時之腐蝕量，可參考日本土木學會「混</li> </ul>

					凝土標準示方書[管理維持編]」中規定的 $10 \text{ mg/cm}^3$ 作為基準，並採用實驗值或力學模型推估裂縫的進展狀況。此外，裂縫幅度可根據破壞力學理論，採用離散裂縫模型進行二維有限元素解析。
--	--	--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------

表 3.5-2 我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(2/5)

影響因素		評估目的	日本的研究或建議	台灣是否 納入考慮	主要評估方法
水泥類材料	水泥水化物溶出、次生礦物生成	對水泥類材料的裂縫擴展與新生裂縫之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 低熱波特蘭水泥加飛灰混合的試體浸泡在淡水地下水模擬溶液與海水地下水模擬溶液中之 <math>\text{Ca}^{2+}</math> 溶出量較浸泡在純水中少。此因溶液中的碳酸氫離子 (<math>\text{HCO}_3^-</math>) 與溶出試體的 <math>\text{Ca}^{2+}</math> 反應，在試體表面形成方解石沉澱層，抑制溶出的發生。</li> <li>• 土木學會彙整混凝土的化學侵蝕與溶出等相關研究與現況，以及水壩、水路構造物、水道設施等水利設施的水泥水化物溶出變質之調查，提出各種有關溶出的機制與解析方法，提供溶出現象的預測與評估之方向。</li> <li>• 水泥類材料的設計及評估回填後的長期狀態時，需了解微量水化物的溶解與沉澱現象的機制，以及溶解反應造成的二氧化矽與硫酸根離子之行為。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水化物溶解模型(使用地球化學平衡計算程式之模型、固液平衡模型等)。</li> <li>• 物質遷移模型(壓力梯度造成的移流、濃度梯度、電(Electrophoresis)等)。</li> <li>• 物理與力學特性變化模型(以經驗法則與實驗為基礎之模型、孔隙率模型等)。</li> <li>• 以經驗法則與實驗為基礎之劣化模型( t 法、多變量解析模型等)。</li> </ul>
		對水泥類材料的孔隙變化之影響			

膨潤土類材料	膨潤壓	對水泥類材料的裂縫擴展與新生裂縫之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>膨潤土的膨潤壓受到膨潤土的有效黏土密度、層間離子濃度、層間離子種類、地下水組成、溫度及飽和度等影響。</li> <li>根據試驗結果，膨潤壓隨有效黏土密度增加而變大。</li> <li>即使膨潤土的名稱相同，但因出產年份、採取時間及採取場所不同，產生蒙脫石含有率、陽離子交換容量及交換性陽離子量的差異，使膨潤土的膨潤性跟著改變。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>評估膨潤土的材料特性及其在飽合與未飽和狀態下的膨潤壓。以室內試驗為基礎進行模型化或利用數值解析評估工程障壁的入滲過程及膨潤壓的發生行為。</li> </ul>

備註：○：必須考慮。x：不需考慮。

表 3.5-2 我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(3/5)

影響因素		評估目的	日本的研究或建議	台灣是否納入考慮	主要評估方法
膨潤土類材料	蒙脫石溶解、副成分礦物溶解、次生礦物生成	對膨潤土有效黏土密度之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>水泥類材料的溶出作用會產生高鹼性孔隙水，可能會使蒙脫石及其他膨潤土的組成礦物溶解或生成次生礦物。</li> <li>蒙脫石溶解是因為長期且持續的高鹼性環境造成，故長期評估時須累積蒙脫石的安定性、C-H-S 膠體的產生等相關資料，並同時針對速度論進行檢討。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用遠離平衡態等實驗求得粉狀蒙脫石與膨潤土副成份礦物的溶解速度公式。選擇反應平衡之地球化學解析程式，利用移流與擴散解析掌握膨潤土層的密度分布與時間變化。</li> </ul>
	鈣型化	膨潤土特性改變	<ul style="list-style-type: none"> <li>當有效黏土密度相同時，Ca 型膨潤土的透水係數會大於 Na 型膨潤土的透水係數，但隨著有效</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用實驗數據掌握 Ca 型化程度對透水性之影響及混凝土溶出之 Ca 離子濃度隨時間變化之關係。將膨潤土的離子</li> </ul>

		<p>黏土密度增加，兩者差異會縮小。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•當孔隙率越小(有效黏土密度越大)，則 Ca 型化對低透水性的影響較小。</li> <li>•當有效黏土密度越大，則有效擴散係數越小，但 Ca 型化卻不會對有效擴散係數造成影響。</li> <li>•有效黏土密度超過 1.6 g/cm<sup>3</sup> 時，Ca 型化對最大膨潤壓沒有太大影響，但有效黏土密度較低時，Ca 型化膨潤土的最大膨潤壓比 Na 型膨潤土低。</li> <li>•當有效黏土密度越大時，最大膨潤率也會隨之增高，但 Ca 型化膨潤土的膨潤率增加趨勢較小，其最大膨潤率約為 Na 型膨潤土的 1/5。</li> <li>•以目前的研究，尚無法針對交換性陽離子變化精確評估其變化機制與時間之關係，故對於 Ca 型化的程度及其各種特性變化，僅能根據相關試驗數據資料及解析概略的掌握。</li> </ul>		<p>交換反應模型化，並進行擴散解析或移流與擴散解析，分析膨潤土的 Ca 型化程度及其透水性變化。</p>
--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	-------------------------------------------------------

表 3.5-2 我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(4/5)

影響因素	評估目的	日本的研究或建議	台灣是否納入考慮	主要評估方法
------	------	----------	----------	--------



膨潤土類材料	沉陷	對膨潤土有效黏土密度之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>處置場封閉後仍會受到工程障壁自重、岩盤潛變產生的地壓、氣體壓力、廢棄物容器(金屬)的腐蝕膨脹壓等壓力作用。</li> <li>施工的不均一性及上加載重的條件不同，會使膨潤土材料產生不均勻沉陷，處置窖及低擴散層也會因此產生裂縫，若要維持低透水層的低透水性，則須確保材料有足夠的厚度與有效黏土密度。</li> <li>日本所使用的解析模式是根據許多實驗結果建立的模式，因其解析評估技術適用於填土構造物，故已有用在軟弱地盤上建造機場之案例，並經過數十年的實際驗證。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用可處理長期壓密沉陷與潛變問題的解析方法，參考實驗數據進行參數設定，以評估膨潤土的沉陷。</li> <li>為了解相關解析方法的適用性，可將其與試驗結果(例如遠心模型試驗)相互比較與驗證。</li> </ul>
		對水泥類材料的裂縫擴展與新生裂縫之影響			
其他	氣體產生	對水泥類材料的裂縫擴展與新生裂縫之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>當氣體產生速率很慢時，氣體溶存在孔隙水中，並隨其擴散而遷移，故氣體可排出處置設施外，不會對障壁產生影響。但若溶存在孔隙水中的氣體擴散後沒有被完全排出，再加上氣體產生速率很快時，則會在達到障壁材料的氣體侵入壓前產生氣體蓄積。</li> <li>飽和膨潤土內之氣體發生破過而形成遷移路徑時，可能會有局部透水係數增加的狀況發生。但由實驗發現，破過後的再飽和可修復遷移路徑，透水性幾乎可以回復到破過前的狀況。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>以鋼筋腐蝕評估的氣體產生量、產生速率、廢棄物包件條件等項目作為設定的輸入條件，利用數值解析預測處置設施的氣體遷移行為。並依此結果評估工程障壁各部分及整體處置設施的力學安定性。</li> <li>受限於飽和水泥類材料與飽和膨潤土類材料的氣體遷移試驗案例不多，加上材料特性(水泥類材料的配比、養護條件；膨潤土類材料的密度、膨潤特性等)也會影響氣體遷移特性，故須事先由室內氣體遷移試驗等方法，掌握該材料的氣體遷移特性。</li> </ul>
		對膨潤土有效黏土密度之影響			

備註：○：必須考慮。x：不需考慮。

表 3.5-2 我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(5/5)

影響因素	評估目的	日本的研究或建議	台灣是否 納入考慮	主要評估方法	
其他	廢棄物包 件發熱	對水泥類材 料的裂縫擴 展與新生裂 縫之影響  對膨潤土有 效黏土密度 之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢棄物包件中的放射性核種衰變產生的熱，使工程障壁的組成材料溫度上升，導致材料變質，可能會降低工程障壁抑制核種遷移之機能。</li> <li>當工程障壁的溫度上升時，需針對材料變質造成性能變化、溫度變化導致性能變化、溫度變化造成體積變化而產生應力與裂縫等項目進行檢討。</li> </ul>	×	
	地震	對水泥類材 料的裂縫擴 展與新生裂 縫之影響  對膨潤土有 效黏土密度 之影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>建設營運階段的設施安全性評估，可以現行的規範為參考依據，設定評估時所採用的地震。有關地震反應與耐震性的評估，可參考核能發電廠等重要構造物的耐震評估方法。</li> <li>地震發生的規模大小及頻率、工程障壁的變質與裂縫等影響因素，對動態反應特性之設定相當重要，需適當的反應至工程障壁的長期地震影響評估中。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道或隧道等地下構造物的地震力，與周邊岩盤的動程度有關。進行地下構造物的地震影響評估時，需先針對處置設施及其周邊岩盤近型地震反應解析，以求得作用於構造物的地震力。</li> </ul>
	岩盤潛變	對水泥類材 料的裂縫擴 展與新生裂	<ul style="list-style-type: none"> <li>依據過去的工程經驗，岩盤潛變的發生傾向與坑道內部設置的工程障壁之剛性有關。當處置坑道內設置具有一定剛性的工程障壁時，可抑</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>依據處置地點的岩種，考量不同特性後選擇岩盤潛變行為預測模型，並輔以室內試驗、現場量測等數據資料，以驗證行為預測模型的適當性。</li> </ul>

		縫之影響	制長期的岩盤潛變。		
--	--	------	-----------	--	--

備註：○：必須考慮。x：不需考慮。

## 第四章 「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」之精進建議

由前述章節可知，低放射性廢棄物最終處置場的安全分析，其於地下水情節所需考量的核種遷移評估參數包括設施通過流量、實際流速、遷移路徑長、分散特性、流出點位置、流出點的稀釋水量、透水係數及有係擴散係數，各參數的設定方法需視場址特性，設定不同的調查精度、調查方法、解析精度與解析方法。故保留對參數設定方法之彈性，僅以核種遷移須考量之參數為基礎，檢視「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」，針對「第七章 處置設施之安全評估」提出之建議如下：

頁	原文	修正建議
7-2	<p>二、核種傳輸特性：</p> <p>(一)提供資料</p> <p>4. 覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、<u>總孔隙度與有效孔隙度、水力傳導係數</u>以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p>	<p>二、核種傳輸特性：</p> <p>(一)提供資料</p> <p>4. 覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、<u>總孔隙度與有效孔隙度、有效擴散係數、水力傳導係數</u>以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p>
7-3	<p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮合劑之影響或其他可能提高</p>	<p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷</p>

頁	原文	修正建議
	<p>放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的放射性核種外釋模型及參數值、<u>(c)滲漏進入處置單元之水量與放射性核種外釋之關係資料。</u></p>	<p>移之化學媒介時，所使用的放射性核種外釋模型及參數值、<u>(c)滲漏進入處置單元之水量、自處置單元向天然障壁流出之水量及其與放射性核種外釋之關係資料。</u></p>
7-5	<p>五、核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制： (一)提供資料 1. 地下水 (1) 依場址地質及水文地質特性，描述潛在的核種遷移地下水途徑。 (2) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。 (3) 核種藉地下水之傳輸模式。 (4) <u>人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。</u></p>	<p>五、核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制： (一)提供資料 1. 地下水 (1) 依場址地質及水文地質特性，描述潛在的核種遷移地下水途徑。 (2) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。 (3) 核種藉地下水之傳輸模式。 (4) <u>人類或生物圈可能接觸到地下水位置、場界位置之核種濃度以及地下水自此位置流出後被地表水稀釋的地表水流量。</u> (5) <u>說明長期變動現象(例如地質環境、氣候與海平面變化、地形變化等)對地下水流之影響。</u></p>
7-9	<p>(一)提供資料 1. 水的侵蝕 2. 邊坡穩定性 3. 地層沉陷與下陷</p>	<p>(一)提供資料 1. 水的侵蝕 2. 邊坡穩定性 3. 地層沉陷與下陷 4. <u>地球化學環境</u> (1) <u>處置設施建設前的水質(pH、Eh、Ec 等)、岩石組成等地球化學環境資料，以及處置設施的工程設計等相關資料。</u> (2) <u>長期可能對工程障壁之影響分析。</u> (3) <u>處置場的地球化學環境監測計畫。</u></p>



## 第五章 結論

- 一、天然障壁之核種遷移參數選定前，需透過現地調查取得環境特性參數，再利用合適的解析方法或模式，經過驗證或合理論證後，方可確定選用之參數值。
- 二、核種遷移評估參數選用時，須考慮包括地質環境特性(地震、風化等)、未來的氣候變遷(氣溫、降雨量、海平面、地下水補注量、蒸發散量等)、地球化學環境變化、開挖影響區的長期變化等長期環境變動現象，其均可能影響處置設施功能或核種遷移的特性。
- 三、設定核種遷移評估參數所需的調查方法，須考量場址特性與精度要求，並根據選用之解析方法或模式、驗證方法及其他評估時所需取得之資料，選用可滿足評估要求之調查方法。
- 四、水泥類材料在硬化過程中，因水化熱與自生收縮而產生裂縫，硬化後則因乾燥收縮或營運時與回填後的載重變化而增加裂縫產生的可能性。於建設營運階段產可透過其他方法加以控制裂縫生成，但卻無法避免因鋼筋腐蝕產生膨脹壓等長期狀態變化導致的裂縫生成。此外，水泥類材料因地下水長時間作用，產生水泥水化物溶出與次生礦物生成，使孔隙構造改變，進而影響透水性與擴散性。故需考慮水泥類材料的透水係數與有效擴散係數受到裂縫及孔隙率之影響。
- 五、膨潤土類材料的透水係數與有效擴散係數的選用，須考慮壓密施工對有效黏土密度分布影響、營運時的各種載重作用對有效黏土密度分布的影響、回填後因地下水入侵而產生的膨潤壓對有效黏土密度之影響、因水泥類材料溶出造成 Na 型膨潤土 Ca 型化與蒙脫石溶解等化學變化而使膨潤土材料之特性改變等各類作用。

## 參考文獻

- [1] 社 法人土木學會能源委員會 低放射性廢棄物餘裕深度處置  
相關研究小委員會， 裕深度 分 安全評 地下水  
用 核種移行評 設定 考 方，2008。
- [2] 台灣電力公司(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。
- [3] 國 (2000)，台灣北部及外海晚上新世-第四紀火山岩的地球化  
學特性與岩石成因，國立台灣大學，地質學研究所， 士論文。
- [4] Yang, T.F. , Lee, T., Chen, C.H., Cheng, S.N. , Knittel, U.,  
Punongbayan, R.S., and Rasdas, A.R. (1996), A double Island  
Arc Between Taiwan and Luzon: Consequence of Ridge  
Subduction, Tectonophysics, Vol. 258, pp. 85-101.
- [5] (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(91 年計畫)-中國東南地區岩漿活動及大地構造演化之研  
究，工業技術研究院委 計畫，SNFD-GSC-90-200，國立台灣  
大學。
- [6] Hoa, K.S. , Chen, J.C., Lo, C.H., and Zhao, H.L. (2003),  
40Ar–39Ar Dat ing and Geochemical Characteristics of Late  
Cenozoic Basaltic Rocks from the Zhejiang–Fujian Region, SE  
China: Eruption Ages, Magma Evolut ion and Pet rogenesis,  
Chemical Geology, Vol. 197, pp. 287-318.
- [7] Tsai, Y.B. , Teng, T.L., Chiu, J.M. , and Liu, H.L. (1977),  
Tectonic implicat ions of the seismici ty in the Taiwan region,  
Mem. Geol. Soc. China, No. 2, pp. 13-41.
- [8] 溫國 、張 文、 俊 、黃 、何美 與 新 (2011)，  
灣地區地震潛勢評估之研究，中央氣象局。

- [9] 松 (2013), 灣西南海域上部高屏斜坡泥貫入體及泥火山之分布及相關海床特徵, 國立中央大學, 地球科學學系, 士論文。
- [10] 曾 與 (2007.04), 台灣西南海域的泥火山, 科學發展期, 412 期。
- [11] (2011), 大型山崩之發生、機制與地形演 --台灣大型山崩回 及山崩資料分析, 國立中央大學應用地質研究所。
- [12] (2011), 草嶺大崩山之地質與地形演變, 中華水土保持學報, 42(4): 325-335。
- [13] 台灣總 氣象 (1942), 「 義地方烈震報告」, 共 227 頁。(Taipei Observatory (1942). Report on Chia-Yi earthquake on 17th December 1941, Taiwan Governor s Office, 227. (in Japanese))
- [14] Jenkins, D.A. (2001), Potential impacts and effects of climate change, in: Geological perspectives of global climate change, Gerhard, L. C. Harrison, W. E., and Hanson, B. M. eds., AAPG Studies in Geology 47, Chapter 3, 337-360.
- [15] 敏(2002), 我國用過核廢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-台灣地區第四紀古氣候變遷研究報告, 工業技術研究院委 計畫, SNFD-GSC-90-162。
- [16] IPCC, 2001: Climate change 2001: the Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm).
- [17] IPCC, 2007: Climate change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, [http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1\\_Print\\_Front\\_Matter.pdf](http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_Front_Matter.pdf)

- [18] 中明、明進、林華、  
、  
、林、曾與  
正達(2008)，台灣地區未來氣候變遷預估，台灣大學全球變遷  
研究中心。
- [19] Shinn, E.A. (2001), Coral reefs and shoreline dipsticks, in  
Gerhard, L.C., Harrison, W.E., and Hanson, B.M., eds.,  
Geological Perspectives of Global Climate Change: American  
Association of Petroleum Geologists Studies in Geology No. 47,  
pp. 251-264.
- [20] (2005)，一些簡單數字的背後：回  
灣千、萬年時距地  
塊上升、沉降速率的研究，2005年  
灣活動斷層與地震災害研  
討會論文集，第47-58頁。
- [21] (2000)，台灣地區驗潮站及高程基準網之監測及計算工  
作，中央研究院地球科學研究所  
題研究計畫成果報告。
- [22] 任徵(2002)，我國用過核廢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-海水面變遷情景分析及不確定性  
探討報告，台灣電力公司委  
計畫，SNFD-ERL-90-167，工業技  
術研究院。
- [23] Moren, L., and Pässe, T. (1999), Climate and shoreline in  
Sweden during Weichsel and the next 150,000 years, SKB  
Technical Report TR01-19, Swedish Nuclear Fuel And Waste  
Management Company, Sweden.
- [24] 黃金山(2001)建構我國完整的防洪策略與體系：無法承受的颱  
「檢討建構前  
性防洪  
災策略與體系」研討會書面資料，12-32  
頁。
- [25] 、遠、大 (1977)，全新世以來  
灣島的上升率，  
中國地質學會  
利，第2號，第57-70頁。
- [26] Dadson, S. (2004), Erosion of an active mountain belt, Ph.D.  
Thesis, University of Cambridge.

- [27] 新 (1985), 台灣褶 帶之昇降運動與侵蝕作用對工程之影響, 台灣坡地社區工程地質研討會論文 集, 經濟部中央地質調查所。
- [28] 聰 (1982), 台灣 灰石、 石、 石之核飛跡研究與其在大地構造上之意義, 國立台灣大學, 地質系研究所, 士論文。
- [29] 、 遠 、 大 (1977), 全新世以來 灣島的上升率, 中國地質學會 利, 第 2 號, 第 57-70 頁。
- [30] Szakacs, A. (1994), Redefining Active Volcanoes: A Discussion, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 56, No. 5, pp. 321-325.
- [31] 正 (1990), 灣地質之一, 台灣之火成岩, 經濟部中央地質調查所。
- [32] Chen, Y.G., Wu, W.S., Chen, C.H., and Liu, T.K. (2001), A Date for Volcanic Eruption Inferred from a Siltstone Xenolith, *Quaternary Science Reviews*, Vol. 20, pp. 869-873.
- [33] Chen, C.H., and Lin, S.B. (2002), Eruptions Younger than 20 ka of the Tatun Volcano Group as Viewed from the Sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin, *Western Pacific Earth Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 191-204.
- [34] 中(2009), 潛在性的活火山—大 火山群, 科學發展, 2009 年 5 月, 437 期。
- [35] Teng, L.S., and Lin, A.T. (2004), Cenozoic Tectonics of the China Continental Margin: Insights from Taiwan, in Malpas, J., C.J.N. Fletcher, J.R. Ali, and J.C. Aitchison, eds., *Aspects of the Tectonic Evolution of China*, Geological Society, London, Special Publication, Vol. 226, pp. 313-332.
- [36] Chung, S.L., Cheng, H., Jahn, B.M., O'Reilly, S.Y., and Zhu, B.Q. (1997), Major and Trace Element, and Sr-Nd Isotope Constraints on the Origin of Paleogene Volcanism in South



- China Prior to the South China Sea Opening, *Lithos*, Vol. 40, pp. 203-220.
- [37] Teng, L.S. (1990), Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, *Tectonophysics*, 183, pp. 57-76.
- [38] 明 (2004), 地熱資源, 科學發展, 2004年11月, 383期。
- [39] Shinn, E.A. (2001), Coral reefs and shoreline dipsticks, in Gerhard, L.C., Harrison, W.E., and Hanson, B.M., eds., *Geological Perspectives of Global Climate Change: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology No. 47*, pp. 251-264.
- [40] Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D., and Woodworth, P.L. (2001), Changes in Sea Level, in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, eds. Houghton and Ding, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [41] 聯光、林、林又、林與如 (2011), 莫拉克颱風降雨與崩塌分佈特性探討。

## 附錄 期末報告(初稿)審查意見與意見回覆

項次	審查意見	委 單位 復說明
1	第 2 頁所述「處置場經過數百年後仍可作為一般土地使用」，此說法應再斟酌。	感 委員建議，將此 修正為「考量處置場的長期安全性，處置場於規劃時...」。
2	第 25 頁有關塊體運動之定義「塊體運動是指地表的構成物質與水混合後，受到地震或火山活動等外力作用，致物體因自重而產生塊狀移動的現象」，不符合一般學術定義說法，應重新檢視修正。	感 委員建議，將塊體運動之說明修正為「塊體運動是指構成地表的土壤和碎屑受到重力的作用，而往下坡移動或沉陷的現象，例如山崩、地滑及潛變。」
3	第二章中內容所述「國內」部分，建議修正為「日本國內」。	感 委員建議，已依委員意見修正。
4	第三章所述之各項內容，應引述其資料來源，並列於參考文獻。	感 委員建議，已於文章內容中增加資料來源，並列於參考文獻中。
5	第 234 頁圖 3.1.3-2，其圖示所列資料年限為 1973.1-2009.12，但圖說確列資料年限為 1991-2008，應此差異。	感 委員指正，圖說之說明為誤植，已修正為正確之年限。
6	第 3.1.5 塊體運動章節中，只說明草嶺山崩部分，無全島之山崩分布特性描述，應補充。	感 委員建議，已補充全台之崩塌地分布與相關說明，詳見 3.1.5 節。
7	表 3.5-2 我國工程障壁的核種遷移參數評估之技術建議(5/5)，有關氣體產生台灣是否納入考慮未有評斷，應補充。	感 委員建議，有關氣體產生的影響因素，台灣亦應納入考量，此為製表之 漏，已將其補上。