

用過核子燃料最終處置計畫  
候選場址評選與核定階段  
107 年度工作計畫  
(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國 107 年 2 月



# 107 年度工作計畫目錄

	頁次
<b>1. 概述</b> .....	<b>1-1</b>
<b>2. 計畫目標</b> .....	<b>2-1</b>
<b>3. 區域特性調查技術精進</b> .....	<b>3-1</b>
3.1. 區域與構造地質.....	3-1
3.1.1. 離島結晶岩三維磁感率及電阻率模型.....	3-1
3.2. 地球化學.....	3-3
3.2.1. 離島結晶岩體之岩礦組成與年代分析.....	3-3
3.3. 長期監測.....	3-5
3.3.1. 驗潮站監測地殼變動與絕對海水面變化.....	3-5
3.3.2. 構造活動性微震監測與分析.....	3-7
<b>4. 處置設施合適性與設計方案評估精進</b> .....	<b>4-1</b>
4.1. 輻射源項及核種特性研究.....	4-1
4.1.1. 用過核子燃料存量與源項特性評估.....	4-1
4.1.2. 地下水輻射分解.....	4-2
4.2. 處置系統適用性驗證與調整方案.....	4-3
4.2.1. 災害歷史地震震源模型及其敏感度分析.....	4-3
4.3. 廢棄物罐技術方案.....	4-6
4.3.1. 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能評估與測試.....	4-6
4.3.2. 銅質材料摩擦攪拌銲接與檢測技術.....	4-8
4.3.3. 廢棄物罐鑄鐵製造與檢測技術.....	4-9
4.4. 緩衝材料與回填材料研發技術.....	4-11
4.4.1. 回填材料設計與施工.....	4-11
4.4.2. 緩衝材料高圍壓力學參數測試.....	4-12
4.4.3. 工程障壁高圍壓縮尺測試設備與方法.....	4-13
4.5. 處置設施設計技術方案.....	4-15
4.5.1. 隧道支撐材料之長期耐久性分析與驗證研究.....	4-15
<b>5. 安全評估精進</b> .....	<b>5-1</b>
5.1. 安全評估流程建立與方法.....	5-1
5.1.1. 安全評估方法精進.....	5-1
5.1.2. 安全評估技術資料庫.....	5-2
5.2. 安全評估分析模式建立與執行.....	5-4

5.2.1. 分析模式的選用與開發.....	5-4
5.2.2. 工程障壁系統評估技術.....	5-5
5.3. 熱力(T)-水力(H)-力學(M)-化學(C)實驗與模擬技術研發.....	5-7
5.3.1. 緩衝與回填材料受水力作用影響.....	5-7
5.3.2. 緩衝與回填材料受化學作用影響.....	5-8
5.3.3. 緩衝材料耦合試驗及數值模擬.....	5-9
<b>6. 整合性技術.....</b>	<b>6-1</b>
6.1. 地質圈長期穩定性評估.....	6-1
6.1.1. 地表監測與岩體變動趨勢分析.....	6-1
6.1.2. 結晶岩深層地下水化學長期演化特性.....	6-2
6.2. 地下水流分析模式驗證與技術精進.....	6-7
6.2.1. 整合型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬.....	6-7
6.2.2. 離島結晶岩區海平面下降之地下水流數值模式.....	6-9
6.2.3. 離島結晶岩區域地下水流場演化模擬.....	6-10
6.3. 核種遷移試驗與評估技術.....	6-12
6.3.1. 室內實驗室模擬核種於緩衝材料、回填材料與處置母岩遷移 行為.....	6-12
<b>7. 參考文獻.....</b>	<b>7-1</b>

## 圖目錄

	頁次
圖 1-1：用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃.....	1-5
圖 3-1：磁力測點分布圖.....	3-10
圖 3-2：東部結晶岩體微震觀測網觀測成果.....	3-11
圖 5-1：安全評估11步驟.....	5-13
圖 5-2：腐蝕情節安全評估模式鏈.....	5-14
圖 5-3：剪力情節安全評估模式鏈.....	5-15
圖 5-4：緩衝材料感測器埋設位置試驗配置示意圖.....	5-16
圖 6-1：東部結晶岩體反應路徑模擬情境示意.....	6-15
圖 6-2：異質異向性的處理方法.....	6-16
圖 6-3：主要地質單元三維分布圖.....	6-16
圖 6-4：海水入侵時之地下水流模式.....	6-17

## 表目錄

	頁次
表 3-1：磁力三維逆推參數一覽表.....	3-10
表 6-1：三維水文地質數值模式輸入參數.....	6-14

## 1. 概述

我國自民國 67 年開始利用核能發電，迄今計有核一、二及三廠共 6 部核能機組，龍門計畫(龍門電廠)因國內政策轉變進行封存工作，一號機完工進行封存，二號機停工。其中，核一、二廠 4 座機組為沸水式反應器，核三廠 2 座機組為壓水式反應器，龍門電廠 2 部則為進步型沸水式反應器。預估此 3 座核能電廠的 6 部機組運轉 40 年將會產生約 4,913 公噸鈾的用過核子燃料。

用過核子燃料是指在核子反應器使用到無法再有效地支持核分裂反應且被移出反應器的核子燃料；依據國內法規定義，高放射性廢棄物指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物。高放射性廢棄物具有相當高之放射性，會釋放大量的衰變熱，所含之放射性核種中，如  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{129}\text{I}$  等分裂產物及  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{243}\text{Am}$  與  $^{247}\text{Cm}$  等錒系核種，其半衰期甚長，且部分核種為阿伐發射體，對人體具長期潛在的輻射危害，因此，審慎尋找共同認可的處置方式，確保高放射性廢棄物可以長期摒除在可能影響人類目前生活環境之外，一直是核能技術發展的重點之一。

用過核子燃料最終處置的基本要求是選擇適當的環境，將用過核子燃料永久安置，使其與人類生活圈隔離，以確保民眾安全及環境品質。國際間曾考量過多種處置方案，包括：海床處置、深孔處置、冰層處置、井注處置、太空處置及深層地質處置，經過國際間多年的研究後，咸認「深層地質處置」是目前可行的一種處置方式。「深層地質處置」係採用「多重障壁」的概念，利用深部岩層的隔離阻絕特性，將用過核子燃料埋存在深約 300 公尺至 1,000 公尺的地下岩層中，再配合廢棄物罐、緩衝材料、回填材料等所組成之工程障壁系統，透過天然障壁及工程障壁，有效的將可能釋出的核種隔離與遲滯於多重障壁中，以換取足夠的時間，讓核種的輻射強度在影響人類目前生活環境之前，已衰減至法令規定所容許的限值。依原子能委員會 102 年 01 月 18 日修正公布之「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，其中第 9 條規定高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設

施外一般人所造成之個人年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗。第 10 條規定高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外關鍵群體中個人所造成之個人年風險，不得超過一百萬分之一。

我國用過核子燃料處置之推動，係依「用過核子燃料最終處置計畫書(95年版)」之擬定時程及規劃、執行境內最終處置之技術發展及處置設施的籌建工作，為確保處置計畫符合國際現況發展，處置計畫書於 99 年曾修訂改版，目前處置計畫依據原子能委員會 104 年 3 月核備之「用過核子燃料最終處置計畫書(103年版)」切實執行。處置計畫之第一階段「潛在處置母岩特性調查與評估階段」規劃於 106 年結束，台電公司已於 98 年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD2009 報告) (台電公司，2010)」並於 99 年 7 月獲原能會同意核備；並預計於 106 年底提報「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SNFD2017 報告)」確認國內具有合適之處置母岩、最終處置工程及長期安全評估技術。

經濟合作暨發展組織(OECD, 2009, p.3)指出地質處置要求地質圈的長期穩定特性。所謂長期穩定，非指狀態一直不變，而是地質圈相當緩慢而持續的演變過程裡，能維持符合安全處置的地質條件。根據 SNFD2009 報告(台電公司，2010)的研究結果顯示：臺灣地區活動構造、地震、火山活動及地質災害均有其侷限分布的特性；除了離島結晶岩體具備長期地質穩定特性外，過去認為位於板塊邊界之本島結晶岩體，根據最新研究顯示可能近百萬年來，已邁入相對穩定地塊的地質環境條件。且因其地質及構造特性可能與離島結晶岩類似，故在後續的潛在處置母岩調查工作中，將加強本島結晶岩體穩定性的研究。初期進行岩體規模、分布與主要構造帶延伸等資訊的調查研究，取得後續評估及驗證所必要之基礎參數；同時將先前於離島結晶岩體發展之調查研究技術，移轉應用於本島結晶岩體，以蒐集本島結晶岩體相關地質參數。並發展結晶岩體及工程障壁系統之熱力、水力、力學及化學特性相關之調查與評估技術，藉以取得完整地下岩體調查數據，以利後續本島結晶岩體穩定性評估工作之進行。

民國 98 年以後，台灣電力公司依據原子能委員會就 SNFD2009 報告之審查意見，持續於離島結晶岩體測試區發展處置技術，期能透過各項技術的整合性驗證，取得關鍵技術的能力與成果，以及測試區的地質特性參數、構造及建構初步地質概念模式，供功能/安全評估技術發展應用，以完備現地調查至功能評估的整體作業流程。另，在此技術基礎上，進一步展開本島結晶岩體深層地質特性調查，並加強地殼變動(地震、斷層、抬升、沉陷、侵蝕與剝蝕等作用)、火山活動、氣候變遷與海平面升降等調查工作，以期累積本島潛在處置母岩長期穩定性評估之關鍵資訊，以如期提報 SNFD2017 報告。

後續將遵照國內高放選址相關法規要求，進行候選場址之評選及調查工作；並依原能會核備之處置計畫書之規劃，進行候選場址建議調查區域之調查工作，建立候選場址之功能及安全評估技術，務實推動用過核子燃料最終處置計畫。

台電公司為了因應用過核子燃料安全處置的需求，於 72 年研訂核子反應器用過核子燃料處理研究計畫書，並於 75 年報請行政院核定後據以實施。此長程處置計畫之發展，自 75 年開始至 93 年間，共歷經：處置概念初步研發、初期工作規劃、區域調查技術準備，以及調查實施與技術發展階段等 4 個主要階段。台電公司依照「放射性物料管理法」與「放射性物料管理法施行細則」相關規定，於 93 年底提出「用過核子燃料最終處置計畫書」，經奉原能會於 95 年核定。台電公司必須依照「用過核子燃料最終處置計畫書」規劃內容確實執行各項工作，並依每 4 年須進行檢討修正一次之規定，以及考量國際發展趨勢與國內實際進展狀況，對規劃工作內容進行修正。104 年 3 月已完成處置計畫書(2014 年修訂版)的核備(台電公司，2015)，其規劃全程工作包含 5 個任務階段：

- (1) 潛在處置母岩特性調查與評估階段(94 年~106 年)
- (2) 候選場址評選與核定階段(107 年~117 年)
- (3) 場址詳細調查與試驗階段(118 年~127 年)
- (4) 處置場設計與安全分析評估階段(128 年~133 年)
- (5) 處置場建造階段(134 年~144 年)

上述各階段工作將透過地質調查、工程設計與安全評估迭代改進以達成目標，各階段之時程、目標及重要里程碑，如圖 1-1 所示。

台電公司預計於 106 年底如期提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」，完成潛在處置母岩特性調查與評估，以及建立功能/安全評估技術，達成第一階段之目標，並提出建議候選場址調查區域。

依 99 年核備之 SNFD2009 報告，已初步說明國內具有潛在處置母岩，並具備初步處置技術之可行性。SNFD2017 報告以 SNFD2009 報告為基礎，強化說明潛在處置母岩之特性、處置工程技術及長期安全評估技術。並透過國際專家同儕審查，確保報告符合國際水平。預計於 106 年底提出之「SNFD2017 報告」，其中依原能會要求，需達成用過核子燃料處置計畫之 3 項階段性目標(100 年 2 月 22 日會議紀錄)包括：(1)能否找到合適的花崗岩進行地質處置；(2)地質處置工程技術能力是否完備；(3)地質處置設施長期安全性之評估，以利如期如質達成「潛在處置母岩特性調查與評估階段(94 年~106 年)」之重要目標與里程碑。

目前 SNFD2017 報告已完成國際同儕審查作業，國際同儕審查團隊在審查期間分享各國執行最終處置計畫之經驗及心得，並認為報告內容符合國際水平且已達成第 1 階段設定目標，可以接續執行第 2 階段，並提供後續工作規劃建議。台電公司正依國際同儕審查團隊之建議，以目標導向檢討技術建置規劃，以確保可如期如質完成第 2 階段研究目標。



## 2. 計畫目標

107 年度將進入用過核子燃料最終處置計畫之第 2 階段「候選場址評選與核定階段(107 年~117 年)」，原能會要求台電公司每 4 年須提出技術更新報告(「105 年度放射性廢棄物最終處置計畫執行成果報告」審查會議紀錄)，在沒有特定場址之情形下，將善用國外發展經驗及聚焦國內研發資源，持續以「區域特性調查」、「處置設施合適性與設計方案」及「安全評估」等 3 項核心技術，作為第 2 階段工作推動之 3 大主軸。台電公司正規劃研擬 108-117 年長期技術建置計畫並將配合前述每 4 年之技術更新報告要求及納入原能會就 SNFD2017 報告之審查意見，再尋求國內外專家學者意見後實施。

107 年工作計畫仍在精進上述 3 項核心技術，分別於第 3 章、第 4 章及第 5 章說明；另外，基於完成第一階段之階段性研究成果後，參考國際專家建議，針對 3 項核心技術進行整合與討論，提出關鍵之整合技術性議題，包括：(1)地質圈長期穩定性評估；(2)地下水流分析模式驗證與技術精進；(3)核種遷移試驗與評估技術，於第 6 章中進行說明。

### 3. 區域特性調查技術精進

#### 3.1. 區域與構造地質

##### 3.1.1. 離島結晶岩三維磁感率及電阻率模型

###### 3.1.1.1. 研究目的

蒐集既有離島結晶岩的聲頻大地電磁探測與磁力探測數據，透過逆推處理，分別建立三維地層電阻模型及三維磁感率模型，提供區域深層地質與深層構造的幾何型態與延伸資訊，作為地質概念模式及地下水流場模擬的基礎資訊。

###### 3.1.1.2. 研究內容

SNFD2017 報告中使用既有傳統聲頻大地電磁探測及磁力探測數據，以一維或二維逆推處理獲得地下地質的電阻率及磁感率特性，解析裂隙岩體內地質構造與導水裂隙帶幾何型態與分布特性，並建立離島結晶岩體參考案例的地質概念模式。有鑑於了解深層結晶岩體的岩層分布、幾何型態及構造延伸性，在候選場址評選與核定階段屬於建立地質概念模式的關鍵技術，可提供地下水流場模擬三維地質與構造分布及參數化分析之用。根據既有空中磁測技術發展經驗，規劃精進地表地球物理三維逆推技術，重新彙整既有聲頻大地電磁探測與磁力探測數據，透過三維逆推處理，分別建立三維地層電阻模型及三維磁感率模型，提供三維地下水流場模擬技術發展之用。107 年度工作規劃為：

###### (1) 電阻率三維逆推

###### (a) 資料處理

從量測紀錄中挑選符合品質需求的訊號，並計算其視電阻率與相位測深曲線，再將資料轉換為三維逆推所需之格式。採用 WSINV3DMT 程式進行大地電磁資料三維逆推處理，使用阻抗張量作為觀測資料，包含各測點的  $Z_{xx}$ 、 $Z_{xy}$ 、 $Z_{yx}$ 、 $Z_{yy}$  等全張量紀錄，平均選取 0.1 Hz 至 10,000 Hz 中的 16 組頻段進行逆推處理。

###### (b) 電阻率模型

三維網格(3D mesh)係以調查測點分布區域之中心點為模型原點，水平方向(X與Y)的網格間距為0.5 km，外圍網格間距則以1.3倍數逐漸增大；垂直方向則為由小至大不等間距的網格組成。

## (2) 磁力三維逆推

### (a) 資料處理

採用 Geosoft 公司開發的 VOXI 軟體，編整既有地表磁力探測資料(表 3-1；)，因地表磁力探測資料點之間距約為 500 m，因此先設計水平間距為 500 m 之網格。

### (b) 岩石磁感率量測

現地量測片麻岩、花崗岩、輝綠岩等不同岩層之磁感率特性，以做為磁力逆推之參考依據。

### (c) 三維磁感率模型

經磁力資料處理產生全磁力網格資料，使用 TMI 網格作為三維逆推的輸入網格，於逆推過程中設定先扣除二階趨勢面(2<sup>nd</sup> trend)後，再擷取資料作為逆推的觀測網格，以水平地形模型作為三維網格的上邊界，進行岩體磁感率逆推，以建立三維磁感率模型。

#### 3.1.1.3. 預期研究成果

有鑑於離島結晶岩體地下水流場模擬三維地質與構造分布的需求，彙整既有現地測勘資料，規劃利用逆推技術，建立三維電阻率及三維磁感率模型。107 年度預期成果為：

- (1) 編整既有聲頻大地電磁探測數據，透過三維逆推處理，建立三維地層電阻模型，提供三維地下水流場模擬所需裂隙含水層與導水裂隙帶幾何型態與延伸分布資訊。
- (2) 編整既有磁力探測數據，透過三維逆推處理，建立三維磁感率模型，提供三維地下水流場模擬技術所需岩體幾何型態與延伸分布資訊。
- (3) 加強比對地表地質圖，並比對參考案例既有的三維地質圈概念模型，提供後續精進安全案例的地下水文流場模擬之用。

## 3.2. 地球化學

### 3.2.1. 離島結晶岩體之岩礦組成與年代分析

#### 3.2.1.1. 研究目的

離島結晶岩沿大陸東南沿岸分布，從 SNFD2017 報告可了解：在南北數百公里範圍內，由許多中生代侵入體所構成。過去數千萬年間，曾受多期侵入活動影響，或受構造變形與變質作用，岩石組成存在差異性。雖然地質演化歷史長期穩定，針對水文地球化學現地特性的評估需求，應透過不同位置代表性結晶岩體的詳細岩石及礦物組成分析，研究長期岩-水反應作用下蝕變礦物的特徵，並根據定年分析，探討水文地球化學的演化歷史，提供長期穩定性評估的基礎資料。

#### 3.2.1.2. 研究內容

地下水的化學特性是不同來源的水(如：天水、海水、高溫地熱流體等)與不同性質的圍岩(如：花崗岩、泥岩等)長期反應後，呈現出現地特有的水文地球化學性質。針對地球化學模擬及核種傳輸微結構資訊的需求，微結構三維成像技術將應用於結晶岩質、低孔隙率的岩心樣本上。透過 micro-CT 高解析度影像的取得、影像濾波的重建、三維定位的建模等工作，獲得礦物與孔隙呈現的三維空間資訊。此外，輔以顯微儀器分析(例如掃描式電子顯微鏡、偏光顯微鏡)，獲得定性分析礦物組成資訊。在此基礎之上，後續計畫可進一步搭配礦物/孔隙定位與比對，探討礦物組成之間的結晶關係、原生/次生礦物生長關係、孔隙連通性，提供後續地球化學反應模擬之用。

SNFD2017 報告已利用既有現地量測的地下水化學組成，加上圍岩環境條件參數(礦物組成)，配合不同情境的地化模擬運算，據以瞭解離島結晶岩體與地下水交互反應下，離子交換、礦物溶解或沉澱的平衡關係，進而建立水文地球化學概念模式，發展概念模式長期演化的評估技術(例如 Site Descriptive Model, SDM)，提供安全評估之用。

針對其他離島結晶岩體，107 年度規劃蒐集離島結晶岩體(烏坵、馬祖列島)岩石或岩心樣本，補充岩性特性及定年分析結果，以備候選場址評選與核定階段評估水文地球化學特性之用。其工作內容包括：

(a) 礦物組成

經偏光顯微鏡及電子顯微鏡等分析，針對岩象與礦物組成與結構觀察結果，提供岩性基礎資料。

(b) 岩石組成

經 X 光螢光分析儀(X-Ray Fluorescence, XRF)及感應耦合電漿質譜(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer, ICP-MS)分析實驗，取得主要元素與微量元素之地球化學分析數據，提供岩性及岩體分類基礎資料。

(c) 岩象特性

代表性樣本之岩象研究，進行新鮮與蝕變礦物的組成變化分析，提供岩-水反應所需必要次生礦物資訊。

(d) 定年分析

結晶岩體之鋯石鈾鉛定年，提供結晶岩體分類、岩漿活動分期、地質歷史演化必要資訊。

(d) 時空演化分析

根據產狀、岩石組成、礦物及岩象特徵、定年資料等，可以重建各離島結晶岩體的侵入活動歷史，以及構造發育後經長期地下水流動，產生岩-水反應的時空演化關係，據以提供參考案例長期演化技術說明岩性組成的差異，進而探討受地下水化學長期影響下地質長期穩定性。

### 3.2.1.3. 預期研究成果

離島結晶岩在 SNFD2017 報告已建立 SDM 技術，完成參考案例。其他代表性離島的侵入岩體亦需進行岩石組成、定年分析等工作，107 年度預期成果包括：

- (1) 詳細岩象特徵觀察，提供岩-水反應長期作用的關鍵資訊；
- (2) 完成時空演化分析，提供後續以 SDM 技術進行參考演化評估。

### 3.3. 長期監測

#### 3.3.1. 驗潮站監測地殼變動與絕對海水面變化

##### 3.3.1.1. 研究目的

為建構臺灣地區絕對海水面觀測系統，藉此取得受氣候變遷影響下之臺灣周緣海水面變化資料，作為後續環境衝擊的直接佐證數據，進而探討數十至百年時間尺度之海水面的變遷與氣候變遷的影響機制，提供後續研究抬升/沉陷作用的參考基準資料。

##### 3.3.1.2. 研究內容

利用驗潮站與衛星測高資料可作為研究海水面變化之 2 種主要觀測量，由於潮位站觀測量為相對於岸邊基準點之海水面變動觀測值，基準點可能受到地表垂直變動影響，故潮位站觀測值包含海水面變化與地表垂直變動訊號。

在資料預處理上，利用調和分析法 (harmonic analysis; Schwartz, 2005, p990) 來分析海潮，將主要已知週期的潮汐影響去除，包括半日潮汐 (semidiurnal tide)、全日潮汐 (diurnal tide)、以及年週期的長期潮汐等。另外，海水面變化亦受到大氣壓力變化的影響 (Wunsch and Stammer, 1997, p79)，這些因颱風或其他突發瞬變氣象之「異常值」也需要逐一剔除。

衛星測高資料選用時，需排除太靠近海岸線受陸地影響的量測數據 (Hwang 等人，2006，p204；Vignudelli 等人，2005，p1)，並需進行各項標準的修正，包括地球物理修正 (乾、濕對流層和電離層)，海洋狀態偏差和各種潮汐效應。各潮位測站之間的距離和相應測高資料的空間分布亦很重要，需同時考慮長期海平面變化至少 10 年的時間尺度，並對其他空間分布變因較不敏感的資料進行選用。

進行臺灣地區絕對海水面變化研究，利用附近海域測高衛星與驗潮站資料，分別取得相對於參考橢球之海水面高度及潮位觀測站現地量測的海水面變化與基準點周圍地表垂直變動資料。另外，潮位監測站的數據還受到日月引力與大氣壓力影響，亦受到人為造成基準偏移

的影響，計算絕對與相對海水面升降變動速率(Sea Level Rise, SLR)時，需改正海潮、逆氣和基準不一致等效應。107 年度研究內容包括：

- (1) 利用改正數據計算 10 年與 20 年的相對與絕對海水面升降變動速率。
- (2) 結合臺灣少數幾座驗潮站與 GPS 觀測站共站，進一步分析驗潮站基準與 GPS 高程的差異，作為後續資料觀測與分析驗證參考。
- (3) 求得相對於岸邊基準點之海水面變化速率，可利用 6 參數擬合相對海水面變化，並以最小二乘法解算未知參數，估算出相對海水面升降變動速率，6 參數擬合公式如下：

$SL(t) = a + bt + c\sin(2\pi t) + d\cos(2\pi t) + e\sin(4\pi t) + f\cos(4\pi t)$	(3-1)
--	-------

其中，

$a$ ：偏差；

$b$ ：SLR 變化速率，[mm/yr]；

$c$ 和 $e$ 分別：年週期訊號和半年週期訊號之正弦振幅；

$d$ 和 $f$ 分別：年週期訊號和半年週期訊號之餘弦振幅；

$t$ ：時間，[year]；

SL為衛星測高或潮位站技術觀測海水面高度變化之時間序列。

衛星測高所觀測海水面高度不受固體地球變形之影響，為相對於參考橢球之絕對量；而潮位站資料經地表垂直變動改正後，亦為相對於各自參考基準之絕對量。因此利用前述 6 參數擬合公式(如式 (3-1) 所示)，分別擬合改正後之衛星測高與地表垂直變動改正後的潮位站資料，估算出臺灣附近海域絕對海水面變化速率，能夠了解臺灣附近海域 SLR 情形。

### 3.3.1.3. 預期研究成果

長期建構臺灣地區絕對海水面的監測與研析技術，評估氣候變遷影響海水面升降與岩體抬升/沉陷作用的影響關聯性，以備候選場址評選與核定階段所需基礎資訊。107 年度預期成果包括：

- (1) 持續更新臺灣附近海域測高衛星及潮位站監測資料，以增加觀測量提升精度，據以計算相對和絕對海水面變化速率。
- (2) 參考鄰近地表變形監測數據，分析驗潮站鄰近海岸地區之抬升/沉陷趨勢。

### 3.3.2. 構造活動性微震監測與分析

#### 3.3.2.1. 研究目的

臺灣構造活動性與地震研究，主要集中在臺灣西部及花東縱谷活動斷層區。本計畫針對臺灣西部離島、臺灣海峽及臺灣東部結晶岩體等地震相對安靜帶，以實測微震數據，研析震源機制、破裂尺度及其反映不同地體構造區塊間的時空演化差異。

#### 3.3.2.2. 研究內容

地震活動所產生的震波訊號，可供探討地質圈破裂或斷層錯動位置及空間分布。掌握地下遠近任何錯動發生位置，是區域性處置環境安全評估或處置工程設計所需的關鍵資訊。利用本島結晶岩體建置的微震監測網，蒐集微小地震觀測資料(圖 3-2)，可據以解析鄰近不同地塊間震源機制的差異，進而計算地震活動破裂尺度，了解地震由深至淺反映大地應力的轉變，以及不同地體構造區塊孕震環境的差異。另一方面，蒐集閩臺地區地震網有關西部離島及臺灣海峽記錄的地震數據，進行震源機制研析，可提供不同地體構造區塊間的時空演化差異，以備候選場址評選與核定階段所需基礎資訊。107 年度工作規劃為：

#### (1) 震源機制分析

西部離島、臺灣海峽及臺灣東部結晶岩體(淺於 6 km)相對於板塊邊界與活動斷層分布區域，屬於臺灣國土範圍地震相對安靜帶。自西到東跨過數個板塊邊界及地體構造區塊，震源機制解析可提

供深層現地應力背景資訊，據以比較不同區塊時空演變的差異，提供地質長期穩定性分析之用。

(2) 震源尺度分析

對於中大型的震源尺度關係，根據 Yen and Ma(2011, p471)所提出的破裂尺度迴歸經驗公式，利用地震矩大小計算有效斷層破裂長度與寬度。其中，以地震矩  $M_0 \cong 10^{20}$  Nm 為界，針對地震矩大小差異， $M_0 \leq 10^{20}$  Nm 使用式(3-2)，而  $M_0 > 10^{20}$  Nm 則使用式(3-3)。

$\log L_e = \frac{1}{2} \log M_0 - 8.08 \quad (\leq 10^{20} \text{ Nm})$ $\log W_e = \frac{1}{2} \log M_0 - 8.08$	(3-2)
$\log L_e = \frac{1}{3} \log M_0 - 4.84 \quad (\geq 10^{20} \text{ Nm})$ $\log W_e = \frac{1}{3} \log M_0 - 5.27$	(3-3)

式(3-2)與式(3-3)中， $M_0$  為地震矩， $L_e$  為有效斷層長，而  $W_e$  為有效斷層寬，利用此關係經驗式可由地震矩大小推估一斷層面的有效斷層破裂尺度。

另為瞭解地震矩大小、有效破裂面積  $A_e$  及應力降  $\Delta\sigma$  之間的關係，參照 Kanamori and Anderson(1975, p1080)提出的方程式(式(3-4)，推估不同規模及有效破裂面積所對應之應力降範圍。

$\log M_0 = \frac{3}{2} \log A_e + \log \left( \frac{16}{7\pi^{3/2}} \Delta\sigma \right)$	(3-4)
--	-------

3.3.2.3. 預期研究成果

本計畫針對臺灣西部離島、臺灣海峽及臺灣東部結晶岩體等地震相對安靜帶，以實測微震數據，研析震源機制、破裂尺度及其反映不同地體構造區塊間的時空演化差異，提供安全評估及地質長期穩定性評估之用。107 年度預期成果為：

- (1) 分布於西部離島、臺灣海峽及東部結晶岩體之震源機制解，分析不同地體構造區塊，在不同深度下反映的大地應力特性；
- (2) 針對東部結晶岩體小型地震，分析其破裂尺度，並與全臺中大尺度地震的有效斷層破裂範圍進行比較，藉由地震矩的大小及有效破裂面積，推求其所對應之應力降大小。

表 3-1：磁力三維逆推參數一覽表

參數名稱	參數
觀測網格類別/資料數量	TMI / 4,178
觀測網格誤差(error value)	4.156 nT (5% of the standard deviation)
東西方向坐標範圍(m)	(172500, 197500)
南北方向坐標範圍(m)	(2697500, 2714500)
網格頂部高程	0 m
網格底部高程	-5,123 m
水平網格間距	500 m
垂直網格(m)	270, 292, 315, 340, 367, 397, 428, 463, 500, 540, 580, 630
網格數目(X, Y, Z)	50 × 34 × 12
趨勢面移除(trend removal)	2 <sup>nd</sup>
平滑權重(smooth trad-off)	-

註：以上參數係使用於 VOXI 軟體主要設定。

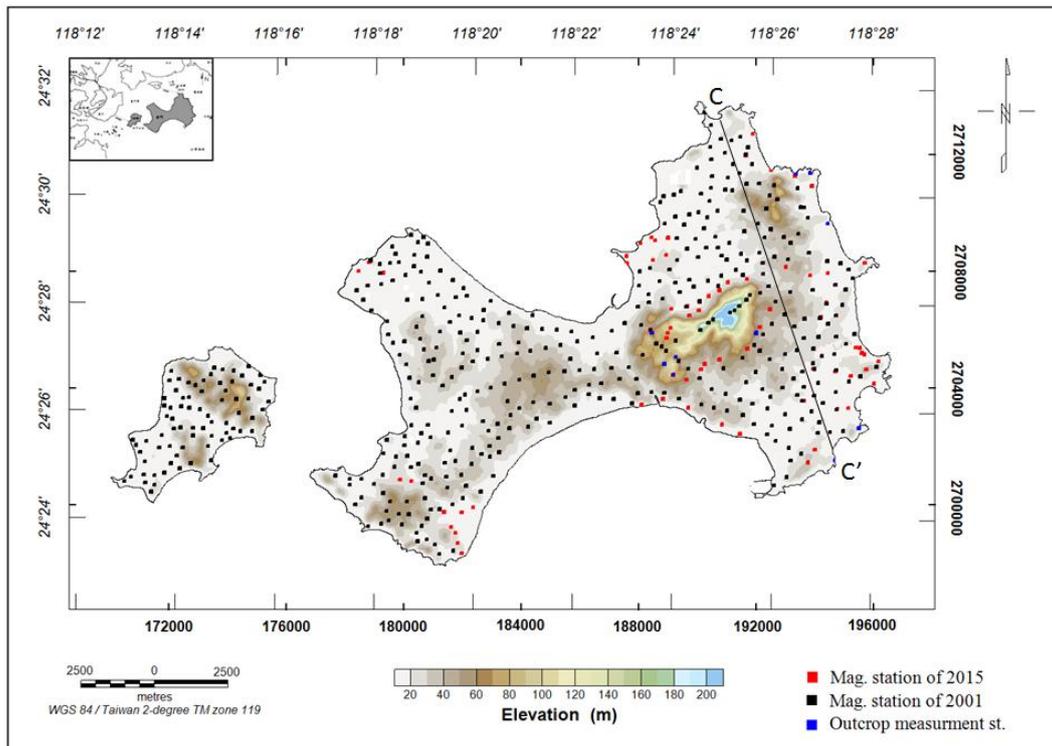


圖 3-1：磁力測點分布圖

說明：CC'剖面為參考案例地質概念剖面

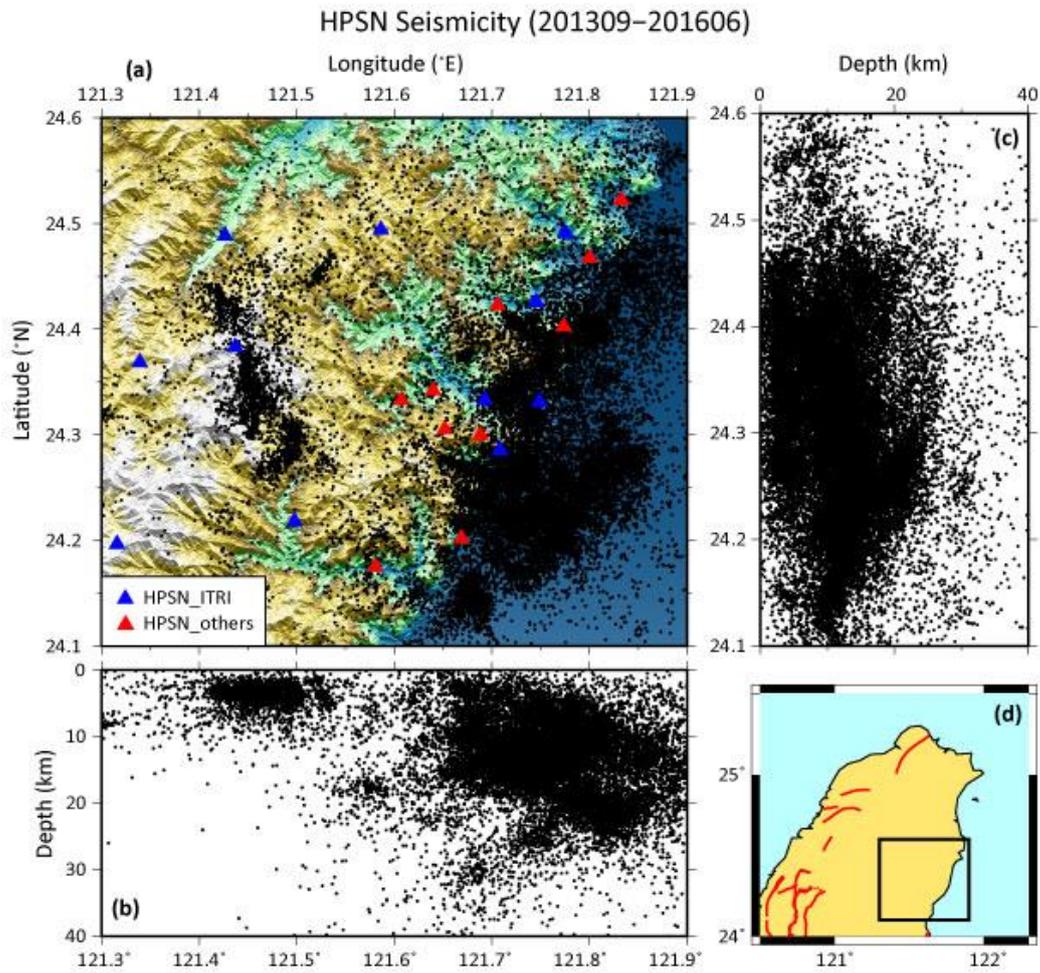


圖 3-2：東部結晶岩體微震觀測網觀測成果

註：(a) 記錄 2013 年 9 月至 2016 年 6 月之地震事件分布，顯示東部結晶岩體相對於海域地震群為地震相對安靜帶。藍色與紅色三角形為測站位置；(b) 為沿經度線投影深度 40 km 內之地震分布，顯示東部結晶岩體淺於 6 km 範圍微震數量少；(c) 為沿緯度線投影深度 40 km 內之地震分布；(d) 黑色方框為(a)之範圍。

## 4. 處置設施合適性與設計方案評估精進

### 4.1. 輻射源項及核種特性研究

#### 4.1.1. 用過核子燃料存量與源項特性評估

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

##### 4.1.1.1. 研究目的

用過核子燃料特性直接影響處置設施之設計，同時，依據核種之特性，在各個障壁系統內之遷移狀況也會有很大差異，故用過核子燃料特性及在各障壁元件之交互作用，為評估處置設施安全的關鍵項目之一。本研究將根據核電廠實際運轉歷程，提出符合國內條件之用過核子燃料射源項特性、重要核種盤存量及氣體分裂產物等評估資訊，建立整合性用過核子燃料特性資料庫，供廢棄物罐或處置設施進行最佳化探討之基礎。

##### 4.1.1.2. 研究內容

本研究主要採用 ORIGEN-S 模組進行用過核子燃料之特性分析。並依據 SNFD2017 報告各情節案例之分析結果回饋，進行討論，107 年度工作規劃包括：

- (1) 依據國內電廠用過核子燃料組件設計與運轉歷程資訊，評估源項與重要核種資訊，並將其彙整、發展出簡明易瞭解之查詢使用者介面，以建立整合性核後端用過核子燃料特性資料庫。
- (2) 針對重要核種部分，依據 SNFD2017 各情節案例之分析結果回饋，進一步討論重要核種在各步驟之特性與重要性，以提升評估之整體可信度。

##### 4.1.1.3. 預期研究成果

- (1) 初步建立用過核子燃料特性資料庫之系統架構與測試資料庫，供處置計畫長期管理及設計研究參考。故 107 年度計畫工作目標為發展用過核子燃料與建置資料庫系統架構，進行資料庫介面與參數需求清單之設計與規劃。
- (2) 重要核種將依據 SNFD2017 報告之回饋，討論重要核種於各個評估步驟之重要性與特性。

## 4.1.2. 地下水輻射分解

### 4.1.2.1. 研究目的

根據國際研究結果，用過核子燃料處置場中的輻射源(如阿伐、貝它及加馬射線)若與地下水接觸，將會造成水輻射分解反應，產生過氧化氫( $H_2O_2$ )及自由基( $H^*$ ,  $HO^*$ ,  $HO_2^*$ ,  $OH^-$ ,  $H_3O^+$ )，其反應產物易對處置場中廢棄物罐或其他材料造成腐蝕現象的加速或降低，並影響其他相關內部組件。故本研究將分析水輻射分解之反應機制、反應產物及產量估算，配合相關結晶岩測試區地下水的化學組成、氧化還原環境資料或設計條件提出產物之分析結果，並評估水輻射分解反應產物對銅腐蝕與內部組件造成的影響，以提供後續安全分析、廢棄物罐設計及整體安全評估的分析方法。

### 4.1.2.2. 研究內容

本研究將持續蒐集各國水輻射分解效應的研究結果及研究方法，並進行處置場中水輻射分解效應的產生機制分析，並了解輻射水解效應對廢棄物罐材料與緩衝材料的功能影響，並規劃後續實驗室研發工作。107 年度規劃工作包括：

- (1) 整合國內用過核子燃料內之阿伐、貝它及加馬射線射源資訊及分析射源來源重要核種資料，作為造成水輻射分解反應的射源項資料。根據射源項資料提出高放處置場中可能產生的水輻射分解反應機制，並討論其產物對工程障壁材料的影響。
- (2) 參考各國水輻射分解效應的研究結果，探討不同地下水質及處置場條件對於水輻射分解反應造成的影響。最後，根據以上結果，建立對輻射水分解反應相關反應機制及產物濃度的分析方法。

### 4.1.2.3. 預期研究成果

利用開發分析技術，探討射源項與地下水輻射分解機制的相關反應，作為未來安全評估時的參考依據，107 年度預期研究成果包括：

- (1) 用過核子燃料內阿伐、貝它及加馬射線射源分析。
- (2) 討論射源項與地下水輻射分解機制的相關反應機制。
- (3) 探討不同處置環境下對水輻射分解反應的影響。
- (4) 建立水輻射分解相關反應機制及產物濃度分析方法。

## 4.2. 處置系統適用性驗證與調整方案

### 4.2.1. 災害歷史地震震源模型及其敏感度分析

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

#### 4.2.1.1. 研究目的

依照國際原子能總署發佈之核能規範 SSG-9(IAEA, 2010)要求，研究歷史地震之震源模型，並使用混合法地震波模擬技術，產生加速度波形，與歷史地震之觀測加速度、或依觀測震度轉換後之加速度進行比較。依照比較後之結果進行震源模型之敏感度分析，產生與歷史地震最近似且保守之震源參數，以供後續斷層引致裂隙位移研究使用。

根據既有研究，處置場因位於地下深處，其受震之加速度值遠低於地表，設施受震影響亦較地表設施為低，然而地震的發生有可能引發處置場附近構造裂隙的剪裂位移，此剪裂位移可能切過處置孔，並造成廢棄物罐的失效，進而引發核種的外釋，因此，對於可能引起裂隙位移的震源，須加以研究，並且以地震模擬進行裂隙位移量的預測，提供處置場對地震災害防範所需。

目前國內地震波模擬之技術，依據頻段之不同可分為 2 類：第 1 類為低於 1 Hz 之低頻地震波模擬，第 2 類則為高於 1 Hz 之高頻地震波模擬，相關說明分述如下：

- (1) 第 1 類模擬技術於國內常使用之方法為頻率-波數積分法 (Frequency-Wavenumber Integration Method)、有限差分法 (Finite Difference Method) 及譜元素法 (Spectral Element Method)。前者僅考慮地震源至接收站間的一維速度構造。該方法的優點是計算速度快，所需的運算資源少。後 2 者則使用三維之速度構造，其計算時間取決於速度構造模型之解析度，提供之模型精度越高、耗費的時間與運算資源越多。但此 2 者可描述震源破裂後，地震波開始於介質中傳遞之完整過程。
- (2) 第 2 類模擬技術則包含了經驗格林函數方法 (Empirical Green's Function Method) 及隨機法 (Stochastic Method)。若在震源附近有規模較小之地震源發生，則可以此小地震作為模擬目標地震源

所需之經驗格林函數，反之若無可做為經驗格林函數之小規模地震，則可使用隨機法。其以隨機雜訊，套用包絡視窗函數(shaping window function)，將訊號模擬成地震波形式，轉換到頻率域後進行正規化，並透過符合震源理論之頻譜進行修正，最後轉回時間域得到模擬地震波。混合法(Hybrid method)則是透過結合低頻及高頻地震波模擬的估算方式，應用 1 個匹配濾波器(matching filter)，同時擷取某特定頻率以下(低頻段)及特定頻率以上(高頻段)各自的波形內涵，最後，於時間域將波形加以結合，得到最終所要求得之寬頻地震波。

各場址附近所關注之孕震構造，其可能產生之地震規模依據歷史觀測紀錄皆不相同，故在進行地震引致裂隙位移研究時需考慮多組不同之震源參數，進行多次分析。透過混合法地震模擬技術與觀測紀錄之比較過程，可針對特定地震產生最佳化之震源參數，以減小震源參數之範圍，縮短程式運算所耗費之時間。

#### 4.2.1.2. 研究內容

蒐集歷史地震之觀測及記錄文獻，提供後續震源參數敏感度分析之比對基礎。蒐集該歷史地震可能震源之研究文獻，並參考 IAEA SSG-9、日本地震調查研究推進本部(Headquarters for Earthquake Research Promotion)的「特定孕震斷層之地震強震動模擬方法準則」等地震模擬參數規範，建立初步之震源參數模型。利用混合法地震波模擬，產生模擬地震波與歷史觀測資料及理論之衰減律進行比對。依照比較之結果進行參數敏感度分析，建立最適之地震震源參數模型。

107 年度工作規劃如下：

- (1) 地震模擬法規研究，參考 IAEA SSG-9 與日本地震模擬相關法規，建立國內地震模擬之參考基準。
- (2) 蒐集國內外文獻進行 1920 年花蓮外海地震之震源幾何模型研究，就各種震源模型推估之比較，並蒐集海域地質調查資料、地體構造資料，進行震源斷層幾何參數評估，包括位置、長度、寬度、深度、傾角等。

- (3) 蒐集震度歷史地震資料，依照震源機制選用合適衰減模式，由已建立之震源模型，進行衰減模式之預測，並與觀測震度比較。
- (4) 透過觀測與預測比較結果，以及依照文獻比較、最大規模經驗公式比較，以建立最大規模估計值與參數不確定度。
- (5) 建立最佳化震源模型，模型參數包括：巨觀參數 (macroparameter)：地震矩 (seismic moment)、平均滑移量 (average dislocation)、斷層面積 (size of the fault) 等；與微觀參數 (microparameter)：平均應力降 (average stress drop)、滑移速度時間函數 (rise time function)、斷層嵌塊的面積 (size of asperity)。

#### 4.2.1.3. 預期研究成果

利用混合法地震波模擬技術與歷史地震之觀測資料進行比對，進行參數敏感度分析，產生特定歷史地震的最佳化震源參數，107 年度預期研究成果包括：

- (1) 斷層幾何參數 (包括位置、長度、寬度、深度、傾角、滑移角)。
- (2) 巨觀參數，包括斷層面積、地震矩及平均錯動量等。
- (3) 微觀參數，包括滑移速度時間函數、平均應力降及斷層嵌塊的面積等。震源參數最終可提供地震引致裂隙位移模擬研究使用。

### **4.3. 廢棄物罐技術方案**

#### **4.3.1. 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能評估與測試**

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

##### **4.3.1.1. 研究目的**

用過核子燃料廢棄物罐是放置廢棄物的處置容器，並做為用過核子燃料與地質處置環境隔離的第一道重要屏障，為處置階段之首要關鍵，其主要目的是要避免用過核子燃料中放射性核種向周圍環境洩漏滲出。因此，需考慮廢棄物罐在長期處於地質處置環境的條件下之腐蝕行為等工程問題，故廢棄物罐材料的腐蝕行為，將直接決定其可行性與其使用壽命。

在過去的 30 年到 35 年裡，瑞典 SKB 針對銅罐腐蝕行為，進行深入研究並有相當大的進展，較重要的研究成果包括在處置場環境的現場試驗驗證，以及長時間的腐蝕作用驗證，藉此更深入的了解銅腐蝕的相關機理與影響，其中包含在冰河條件下的長期好氧環境之影響、初期高溫效應、缺氧環境硫化物之影響等條件，進行長期腐蝕行為預測之重要研究。

為建立本土化之腐蝕評估與試驗能量，本階段依照地化特性配置模擬地下水溶液，並透過長期曝露試驗，建立廢棄物罐抗蝕性之基本資料，了解金屬材料(銅與鑄鐵)本身的抗蝕特性，建立銅及鑄鐵之腐蝕量及廢棄物罐殘餘壽命預測模式，並將研究成果與國際上研究報告進行比對，藉此作為後續本土化廢棄物罐防蝕性能與設計發展之參考依據。

##### **4.3.1.2. 研究內容**

本研究計畫為長期曝露測試研究，探討廢棄物罐在特定地質條件下的抗腐蝕特性。採用 MX-80 膨潤土為緩衝材料之設計概念，進行廢棄物罐於 MX-80 中之腐蝕評估研究，並產出不同條件下之腐蝕深度成果比較圖。在試驗方面，則製作銅材質與鑄鐵材質之試片，以及金屬材料抗拉與抗彎試片，採用長期曝露試驗法進行腐蝕試驗，藉此了解特定地質條件下(如曝露水質種類、溫度差異、地下水 pH 值、氣

離子濃度等特性)各種試片的抗蝕特性。藉定期觀測各試片的腐蝕電位、極化阻抗值、腐蝕速率或銅與鑄鐵離子析出量等抗蝕特性指標，藉此作為後續長期觀測廢棄物罐罐體抗蝕性能相關研究之參考。此外，亦針對特定曝露時間的測試件，進行金屬材料抗拉與抗彎試驗，藉此了解腐蝕對金屬材料機械特性的影響程度；爾後，透過相關試驗建立合理的罐體壽命評估標準，將研究成果與 H12 報告、瑞典 SKB 等國外技術報告彙整比較，並對腐蝕模擬模式進行初步評估。

107 年則將持續所規劃的長期曝露腐蝕試驗，預計可執行腐蝕累計達 450 天以上，除持續執行腐蝕性能試驗並蒐集相關抗蝕特性指標外，輔以表面金相觀察、腐蝕生成物的物化性分析等表面微觀結構觀察，藉此評估銅與鑄鐵的長期腐蝕速率並建立壽命預測模式。此外，配合本研究的長期曝露試驗結果，觀察銅與鑄鐵間的異電位腐蝕，並收集國外相關文獻與技術報告資料，了解受蝕後金屬表面的腐蝕應力裂縫等劣化現象；另外，探討銅腐蝕產物之力學穩定性，藉由銅腐蝕後所產生的體積變化，評估對廢棄物罐整體力學行為影響之可能性；最後，建立導入臺灣地化條件的腐蝕評估模式，並藉此來詮釋試驗結果，以及彙整實驗室試驗資料修正與更新腐蝕評估模式，並依照國際合作交流的意見彙整結果修正相關評估模式，以供將來廢棄物罐進行本土化運用之參考依據。前述研究涵蓋工作項目包括：

- (1) 執行長期腐蝕試驗，並量測腐蝕電位、速率或銅離子與鐵離子析出量。
- (2) 觀察表面晶相及繪製相關比較圖(不同 pH 值、環境條件對腐蝕電位之關係圖)。
- (3) 建立腐蝕量對銅與鑄鐵材料機械性能之影響。
- (4) 觀察腐蝕生成物並進行物化性分析。
- (5) 評估銅與鑄鐵腐蝕厚度，建立壽命預測模式。
- (6) 觀察銅與鑄鐵間的異電位腐蝕情況。
- (7) 探討腐蝕產物的體積穩定性，對廢棄物罐整體力學行為影響之可能性。

(8) 研究成果與瑞典 SKB 等國外技術報告彙整，並預定與國外專家進行成果比較研討。

#### **4.3.1.3. 預期研究成果**

本研究係參考地化特性建立廢棄物罐抗蝕性之基本資料，進行銅廢棄物罐金屬材料抗蝕性能測試驗證，107 年度預計研究成果包括：

- (1) 完成長期腐蝕試驗，進行長期腐蝕性能分析，如腐蝕速率、腐蝕電位、pH 值、氯離子濃度等因子的影響。
- (2) 完成長期腐蝕後的拉伸與彎曲試驗，以瞭解腐蝕對廢棄物罐金屬材料機械特性之影響。
- (3) 分析腐蝕產物特性，如腐蝕物種類、成分、外觀形態等。
- (4) 建立銅材料受腐蝕對性能產生之影響評估及殘餘壽命預測模式，並與國際間的相關研究進行成果比較。

#### **4.3.2. 銅質材料摩擦攪拌銲接與檢測技術**

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

##### **4.3.2.1. 研究目的**

銅廢棄物罐作為工程障壁系統第一道重要屏障，對於防止用過核子燃料之核種外釋有重大影響，一旦廢棄物罐銲接有缺陷，則可能增加核種外釋的機率；若地下水由銲接缺陷處進入，將加速內襯鑄鐵之腐蝕，造成廢棄物罐承壓能力不足而破壞。因此，成功的銲接，將有助於長期處置的抗蝕性與承受外力。本計畫將參考國際經驗，以英國焊接研究所(The Welding Institute, TWI)於 1991 年開發之摩擦攪拌銲接(friction stir welding, FSW)技術為基礎進行研究，並透過非破壞性檢測來驗證銲接成果。本研究已透過先期研究，取得銲接之特性參數，並利用這些數據來作為設計大型銲接設備的參考數據。在先期研究中已成功完成厚度 10mm 之純銅摩擦攪拌對接，然厚度不同其所適合之銲接參數也不同。因此，必須透過進一步地研究與實驗，取得必要參數，以建置本土機具設計與銲接技術。

#### 4.3.2.2. 研究內容

本研究長期以建立銲接設備、收集彙整銲機參數、設計製造銲接工具，以及建立相關檢測技術及國內適用規範為目標。在長期研究上，除以現有設備對銲接參數作全盤的研究外，也採用不同銲接工具的設計來提高銲接成功率與工具壽命，而更長遠的規劃則要設計製造重型銲接設備。107 年度工作規劃包括：

- (1) 蒐集國內 FSW 工業技術資訊：包含銲接技術擁有者(產業界或是學界)、銲接機製造商資訊、英國 TWI 專利授權內容等，以設法找出未來整合之可能性，相關資訊亦可能可用於廢棄物罐替代方案之製造資訊中。
- (2) 蒐集國內銅質材料銲接技術資訊，國內進行相關的研究之學術單位大都針對 5 mm 以下的薄板，5 mm 以上的厚板研究付之闕如，本研究將以既有之 10mm 銲接經驗，發展 20mm 厚之純銅厚板銲接技術，並視既有設備能量測試可銲板厚，找出在此板厚區間內可靠之銲接參數。
- (3) 使用螺紋狀探針的銲接工具，建立板厚 20mm 純銅板之摩擦攪拌點對接技術，包括銲接操作條件對銲接品質、銲接擠壓負荷、銲接溫度以及材料流動行為之影響等之實驗成果，以作為後續研究及技術實用化之參考數據及銲接工具設計的參考。
- (4) 探討可能適用之銲接與非破壞檢驗相關法規。

#### 4.3.2.3. 預期研究成果

- (1) 為銅腐蝕研究，先行製備銲接試片，並測試銲道的抗蝕性。
- (2) 累積建立銲接機械設備與銲接工具設計的相關技術。

#### 4.3.3. 廢棄物罐鑄鐵製造與檢測技術

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

##### 4.3.3.1. 研究目的

評估自行製造廢棄物罐之可能性與可行性，依適合我國燃料特性的設計理念製造鑄鐵內襯；本研究計畫之目標係建立 BWR 用過核燃

料廢棄物罐之鑄鐵內襯(含內模)製造技術，確認重要性質參數是否符合 KBS-3 參考設計，並對於國內自製之可行性提出完整評估。並透過實際試製來研究鑄件品質，也藉此來培養國內廠商的大型鑄件加工經驗。

#### 4.3.3.2. 研究內容

大型鑄造品之鑄造需累積足夠的生產經驗，才能克服生產上技術的難度，肇因於各種鑄造成品之型狀有差異，材質要求的差異，以及加工要求的差異，鑄造製成品的些微調整，看似容易，卻往往有不可預期的失敗情況及良率過低的情況。此外，國內可購得的材料規格及加工能量也與國際有差異。因此，需透過實際試製來研究鑄件品質，此外，也藉實際委託廠商加工來培養國內廠商的大型鑄件加工經驗。

107 年度工作規劃包括：

##### (1) 燃料尺寸對廢棄物罐設計與地面裝罐設施之影響評估

依據國內核電廠用過核子燃料之特性，修訂廢棄物罐之設計參數，並建立檔案資料庫及技術文件，提出評估結果。

##### (2) 製作 BWR 用過核燃料廢棄物罐之鑄鐵內襯

目前我國參考瑞典 KBS-3 廢棄物罐做為廢棄物罐之概念設計參考，將持續蒐集國內可能具備鑄鐵內襯製作能力之廠商資訊，並與其探討自製 BWR 用過核子燃料廢棄物罐可能面臨的困難，並對製作實務的開發路徑提出具體可行建議方案。

##### (3) BWR 全斷面縮尺型鑄鐵內襯試體鑄造及測試

本研究將委託廠商試製鑄鐵芯，以進行包括：BWR 鋼管內模之銲接組裝、BWR 全斷面縮尺型球墨鑄鐵芯之造模及熔鑄、附鑄試樣之金相組織分析及拉伸試驗、試樣之化學成分分析、BWR 全斷面縮尺型球墨鑄鐵芯之表面機械加工，以及 BWR 全斷面縮尺型取樣樣品之拉伸試驗等各項試驗。

#### 4.3.3.3. 預期研究成果

- (1) 評估國內自製 BWR 廢棄物罐的可行性，提出製作與替代方案。
- (2) 完成全斷面縮尺型鑄鐵內襯的試製及加工，測試取樣樣品的機械性質以瞭解鑄件的品質，以利未來相關評估與試驗規劃工作。

#### **4.4. 緩衝材料與回填材料研發技術**

##### **4.4.1. 回填材料設計與施工**

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

###### **4.4.1.1. 研究目的**

處置作業結束後，需以回填材料將地下開挖之處置坑道、聯絡通道及豎井等確實回填，以抑制地下水流與降低處置設施工程障壁之化學變化，故水力傳導係數、夯實特性、回脹特性與力學特性，為回填材料之研究內容重點。

日本曾針對現地夯實法及預鑄塊體後堆疊 2 種施工方法進行研究探討(Chijimatsu et al.,1999, pA-1)，研究中指出預鑄塊體後至現地堆疊的工法可縮短施工時間，且較能控制施工品質。本研究將參考瑞典 SKB 對處置坑道的回填設計需求與施工技術(SK B, 2010, p56-62)，以純膨潤土預鑄塊體至現地堆疊、周圍以膨潤土顆粒(pellets)方式回填處置坑道。並建立現場施工的控管與檢測技術，訂定適宜我國之處置坑道回填材料設計需求與製作程序。

###### **4.4.1.2. 研究內容**

本工作項目參考國際間回填材料設計考量、相關材料特性檢驗技術、及現地試驗驗證技術，透過實驗室試驗建立參數試驗技術及檢驗技術，以確定所設計之回填材料塊體規格符合安全需求。107 年度工作規劃為：

- (1) 發展處置坑道回填材料塊體製造技術，探討回填材料塊體製作程序及相關成品檢驗流程。
- (2) 發展回填材料塊體製作之技術經驗及建立品質控管流程，並藉由技術發展經驗回饋至回填材料設計需求中。

###### **4.4.1.3. 預期研究成果**

- (1) 建立回填材料塊體製作程序。
- (2) 建立回填材料塊體成品品質控管流程及檢驗程序。

#### 4.4.2. 緩衝材料高圍壓力學參數測試

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

##### 4.4.2.1. 研究目的

根據 IAEA 之定義，緩衝材料的係指包覆在廢棄物罐周圍，作為限制地下水接近廢棄物罐之障壁，並藉由吸附及沉澱等功能以降低核種外釋之速率。廢棄物罐重壓於緩衝材料中所產生之沉陷，可能同時影響到緩衝材料的安全功能。H12 報告在第 4.7.2.3 節 (JNC, 2000, p132-p133) 說明，針對廢棄物罐沉陷問題，需瞭解緩衝材料在處置環境下，其受廢棄物罐重量或腐蝕膨脹所產生的變形量，藉此評估緩衝材料變形後的參數改變。估計 1 萬年後，廢棄物罐導致緩衝材料的沉陷量，水平置放時約為 2.6 mm、或垂直置放時約為 5.1 mm，該報告說明此研究基於一些假設，並認為須取得緩衝材料高圍壓環境下的相關參數資料。高圍壓力學參數，可用於廢棄物罐沉陷分析，了解廢棄物罐重量對於緩衝材料變形行為之影響。

我國於地工領域過去曾進行過之沉陷評估多屬於地表或近地表的地層與設施，但廢棄物罐及緩衝材料則處在地下且受到現地應力作用之狀態，緩衝材料之壓密及回脹行為必然有所差異，為可更精確評估廢棄物罐的沉陷行為，則需針對緩衝材料取得高圍壓下之力學參數，並更一步進行沉陷量的推估。

##### 4.4.2.2. 研究內容

本研究將利用緩衝材料三軸壓縮試驗，以取得低圍壓至高圍壓環境下，膨潤土在不同含水量與密度的力學參數，以及利用單向度壓密試驗的初步結果，推估膨潤土的壓縮情形與參數，藉以進行廢棄物罐沉陷的數值評估，由分析結果獲得沉陷量。107 年度工作規劃為：

利用 ASTM D2435(2011, p6-p10)推估膨潤土的壓縮情形與參數，並參考 SKB TR-02-12 報告 (SKB, 2001, p1-p198)、SKB TR-03-07 報告 (SKB, 2003, p1-p176) 等相關文獻，綜合緩衝材料的各項參數後，利用土壤力學之方法，建立數值模式，評估受廢棄物罐作用之緩衝材料沉陷行為。

#### 4.4.2.3. 預期研究成果

完成緩衝材料受廢棄物罐作用之變形分析，及長時間作用下之沉陷行為分析。

#### 4.4.3. 工程障壁高圍壓縮尺測試設備與方法

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

##### 4.4.3.1. 研究目的

預定建立可容納廢棄物罐與緩衝材料的縮尺試體的測試設備，進行處置孔受裂隙剪力位移之縮尺測試，以獲得受剪過程之廢棄物罐、緩衝材料觀測數據，提供數值分析比較之用，並對銅、鑄鐵、緩衝材料的應力分配行為，與材料間的接觸特性進行研究，以提升廢棄物罐受剪力位移失效評估模擬技術。

目前日本 JAEA(Morimasa Naito et al., 2008, p1-p6)及 SKB R-11-21(SK B, 2011b, p43-p55)，皆已進行縮尺的廢棄物罐及緩衝材料的剪力試驗，分別考量裂隙位移以不同角度經過來錯動廢棄物罐，並量測地震剪切的效應。參考國際發展，我國位於地震帶，亦應進行廢棄物罐與緩衝材料之裂隙位移影響試驗，研究緩衝材料與廢棄物罐受地震剪力的影響，除強化數值模擬預測能力，亦可探討改善緩衝材料與廢棄物罐材質特性，建立提升耐震能力之方法，但礙於現有的三軸式的尺寸太小，以及可施加之圍壓不足，故須進行特殊規格之三軸室的開發。

##### 4.4.3.2. 研究內容

研究國際上最終處置之廢棄物罐剪力試驗方法，進行大尺寸高圍壓三軸室初步及細部設計，以及進行採購發包、製作與測試驗收，最後進行功能測試。107 年度將進行研究之準備工作，包括：

三軸室之設計與訂製，委託工廠製作及適當修改，進行大尺寸高圍壓三軸室測試驗收，依高圍壓三軸功能測試結果，並進行必要調整。由於儀器測試調整需要時間，在計畫結束時，提出此設備可用之範圍，並於爾後提出定壓裝置等配套措施建議。

#### 4.4.3.3. 預期研究成果

- (1) 完成大尺寸高圍壓三軸室之設計及製作，並完成功能測試。
- (2) 評估國際上最終處置之廢棄物罐剪力試驗方法。

## 4.5. 處置設施設計技術方案

### 4.5.1. 隧道支撐材料之長期耐久性分析與驗證研究

本項係延續 106 年度的研究計畫，該計畫自 105 年度開始執行，預計 107 年度完成。

#### 4.5.1.1. 研究目的

國際上低鹼混凝土主要用於處置坑道之密封灌漿、岩栓固定與岩壁噴凝土支撐等方面。在混凝土材料規格之研究中，主要針對混凝土之酸鹼度，並強調混凝土在降低酸鹼度的同時，亦須保持適當的抗壓強度與低水力傳導的能力。各國分別採用不同的水膠比及取代率進行低鹼混凝土的研究，瑞典 SKB 採用 0.825 與 0.55 的水膠比進行試驗，其中矽灰取代率為 40%；芬蘭使用 0.825 的水膠比並採用 40%矽灰取代率；而日本 JNC 則使用 20%矽灰與 40%飛灰之取代、20%矽灰與 50%飛灰之取代及 20%矽灰與 60%飛灰之取代等 3 項配比進行試驗。

由於目前尚無低鹼混凝土與本土化材料之交互作用研究，故參考地下設施與工程障壁設計概念，針對坑道混凝土與低鹼性混凝土進行性能評估，並進行耐久性驗證，確認處置場設施的使用壽命可符合設計需求，並提供適當的防護措施。

#### 4.5.1.2. 研究內容

試驗規劃主要參考瑞典 SKB 做法，設計一組低鹼混凝土配比，作為處置坑道支撐材料與處置場施工、封閉時之用，並透過幾項力學性能與耐久特性驗證試驗，確認低鹼混凝土技術用於本土處置坑道施工營建之可行性。107 年度工作規劃如下：

- (1) 持續進行試體乾縮試驗(包含砂漿棒、混凝土矩形塊乾縮與環狀乾縮試驗)。
- (2) 持續進行低鹼混凝土鋼筋腐蝕長期試驗。
- (3) 持續進行低鹼混凝土滲透試驗(包含快速氯離子滲透、加速氯離子滲透、圍塘試驗等)。
- (4) 低鹼混凝土微觀結構分析(包含壓汞試驗、孔隙分布與定量計算、電子顯微鏡觀測等)。

- (5) 觀察低鹼混凝土水化反應物之成分與物化性分析。
- (6) 探討混凝土水化物對膨潤土之影響。
- (7) 研究成果與瑞典 SKB 等國外技術報告比對，並預定與國外專家進行成果比較研討。

#### **4.5.1.3. 預期研究成果**

- (1) 拌製不同配比之混凝土與低鹼混凝土試體，分別進行力學性能測試與耐久性測試。
- (2) 針對低鹼混凝土內埋鋼筋進行長期腐蝕試驗，了解低鹼混凝土的抗蝕特性。
- (3) 驗證其長期使用性及制定適當的壽命評估模式與耐久性設計準則。

## 5. 安全評估精進

### 5.1. 安全評估流程建立與方法

#### 5.1.1. 安全評估方法精進

本項工作自 105 年度開始執行，106 年已將安全評估方法應用於 SNFD2017 參考案例並建立技術可行性，同時也完成國際同儕審查，107 年度將依據國際同儕審查意見回饋經驗以及研究國際安全評估技術發展，進行安全評估方法精進研究。

##### 5.1.1.1. 研究目的

安全評估為安全論證之主要支持基礎。提供安全論證合理量化之參考依據。提供各面向之應用，包含：處置方法選擇的比較基礎；數據取得、研究與發展的優先度；設施設計、運轉規劃與申請執照等。

目前安全評估發展，主要參考瑞典 SKB(TR 11-01)所建立之安全評估 11 步驟，其安全評估最主要的目的，為評估處置設施在長時間演化下，對於周遭生物圈造成的輻射曝露時，構成風險的程度，以及是否於安全評估期程內符合法規限值。

基於上述既有成果，後續將納入 IAEA 的 SSG-23 導則之建議項目，依據建議內容，相關的評估方法與數據亦需要符合其要求。同時，NEA 安全論證整合團隊(The NEA Integration Group for the Safety Case, IGSC)，於 2012 年提出放射性廢棄物地質處置設施安全評估方法(Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, MeSA)(OECD, 2012)，故本工作項目將研究上述之國際趨勢，精進本土安全評估技術，以能支持安全論證。

##### 5.1.1.2. 研究方法

安全評估為安全論證在科學與技術上的重要基礎，安全評估主要範疇在於理解何種情境下將造成放射性核種釋出，以及何種途徑可能會造成對人類與環境的危害。構成安全評估品質與可信度的重要基礎，主要來自數據及模式，內容包含處置系統地質特性的整體描述、科學論證、科學數據以及評估方法論和分析模式。故如何建立系統化的安全評估流程，透過對障壁安全功能的研究並討論影響與安全相關的特性，結合科學數據與評估結果，提升整體安全評估信心。

目前參考的瑞典 SKB 安全評估 11 步驟(如圖 5-1)，可概略分為 3 個部分，初始條件、安全功能評估及情節分析，與 MeSA 報告中通用安全評估流程相比，11 步驟中的步驟 1 至 4 即為對應 NEA 報告中通用安全評估流程的場址描述及設計規範(Site description and design specification)；步驟 5 至 8 可對應至 NEA 報告中通用安全評估流程的機制了解及機制間相互作用的整合(Synthesis of process understanding and of influences between processes)；而步驟 9 至 11 則可對應至 NEA 報告中通用安全評估流程的安全評估。107 年度工作規劃為：

- (1) 研析 MeSA 報告中，有關安全評估之內容及系統論述與情節等面向之資訊。
- (2) 檢視 IAEA 安全技術導則 SSG-23 之規定、安全原則與安全要求等。在彙整上述 IAEA 的 SSG-23 報告與 MeSA 報告 2 篇報告概念後，並與國內安全評估案例建置方法與步驟進行比較分析，以提升國內參考案例之功能/安全評估之策略與建立流程之可信度。最後，對於我國未來長程處置安全評估技術發展規劃作出具體建議。

#### **5.1.1.3. 預期研究成果**

- (1) 完成 NEA 安全論證方法及通用安全評估案例建構方法之研析。
- (2) 完成 IAEA 安全技術準則 SSG-23 之資訊解讀，並與國內安全評估方法比較及提出建議。

#### **5.1.2. 安全評估技術資料庫**

本項工作延續 106 年度的研究計畫，106 年度已針對工程設計與安全評估著手研擬資料庫架構，107 年度將彙集 105 年度與 106 年度之工作成果，完成安全評估技術知識管理雛型系統建置，以利計畫成果之展現。

#### 5.1.2.1. 研究目的

高放處置設施系統繁雜，橫跨眾多學科領域，為利各項領域之技術整合，將研究以系統化資料庫進行相關資訊管理，可提升用過核子燃料處置計畫推動之品質。

國內用過核子燃料最終處置工作自 75 年起開始積極推動，迄今已 30 年。計畫執行期間所產生的知識與技術研發成果，雖然均有進行電子化保存，但僅止於資料與文件檔案儲存作為。相對於其他放射性廢棄物處置先進國家，均已發現與重視知識管理之問題，並投入相當的知識管理工作，以利計畫推行。

處置計畫具有長週期、複雜性及政治敏感等獨特性，持續累積的知識庫相當龐大複雜而不易整合。

#### 5.1.2.2. 研究內容

現階段性將先參考日本知識管理系統(knowledge management system, KMS)建立資料庫，長期發展則將藉由資訊科技技術，涵蓋知識管理資料庫、計畫管理資料庫以及需求管理資料庫，以提升高放計畫之品質並利於推行。107 年度工作規劃為：

- (1) 研閱各階段功能/安全評估技術研發相關報告與進行資料分析，分析知識管理體系並建置其雛型系統，內容包含：分析計畫管理及知識管理等核心資訊。
- (2) 提供具有計畫性與系統性的程序，用於執行與記錄過程中的各個步驟，以增進輸入資料、模式及結果的品質與信心。
- (3) 制定一個架構，使安全評估活動能據以實施並做成紀錄，並能證明符合程序。

#### 5.1.2.3. 預期研究成果

- (1) 提供計畫參與人員可充分分享知識，而後繼執行參與者亦可儘速瞭解研發歷程與成果，以及發揮技術傳承的最大價值。
- (2) 完成安全評估技術知識管理雛型系統建置，提供以研究成果資訊為主之網頁化搜尋與瀏覽之功能，以利計畫成果之展現。

## 5.2. 安全評估分析模式建立與執行

### 5.2.1. 分析模式的選用與開發

本項工作自 105 年度開始執行，106 年已針對腐蝕情節與剪力情節建置安全評估模式鏈，並應用於 SNFD2017 參考案例完成量化分析計算，107 年度將彙整安全評估系統中的分析模式選用，並完成開發需求研究。

#### 5.2.1.1. 研究目的

用過核子燃料處置設施系統相當複雜，故其評估時，評估模型需適度地進行切割，而實際執行評估，則須藉由數值模型進行模擬實作。例如採用數值模型，評估廢棄物罐長時間下所受到腐蝕影響之程度，或是受到剪力進而引起廢棄物罐失效之機率等。故分析模式之建立與發展，為安全評估案例實作之骨幹。

本計畫雖利用離島結晶岩測試區參考案例，已初步建立執行安全評估所需之腐蝕情節安全評估模式鏈(如圖 5-2)與剪力情節安全評估模式鏈(如圖 5-3)。惟大部分用在各安全評估議題分析所使用的軟體/模式，仍須透過本土案例驗證，以強化其可信度，並透過不斷更新之現地參數，提昇評估之精確性。

#### 5.2.1.2. 研究內容

分析模式之開發，主要基於各情節/案例之安全評估實作需求，故依據 FEPs 資料庫推演之可能安全議題，配合各項安全議題，採用不同的模型/軟體進行實作/開發並累積經驗，以提升整體安全評估品質與信心建立。107 年度工作規劃項目包括：

- (1) 依據各評估分項之需求，選用符合我國現階段安全評估需求的數值模式。
- (2) 配合團隊專業分工，針對 6 個主要模擬評估項目，包含燃料特性、生物圈、廢棄物罐侵蝕、地震引起剪力、水文與核種遷移項目，蒐集國際間放射性廢棄物地質處置安全評估相關領域所使用的數值模式，分析各模式的應用方式與適用條件，以進行數值模擬模型選用之比較分析討論。

(3) 生物圈方面，涉及到地形、土地使用與食物鏈等，可為 1 個獨立討論的評估項目。現階段國內安全評估採用由 Quintessa 所開發的 Amber 軟體(Quintessa Ltd., 2013, p1-p187)，而瑞典 SKB 則採用由 Facilia 所開發的 Ecolego 軟體(SK B, 2011a, p245)；這 2 套模擬工具分別採用隔室模式(component model)與交互矩陣(interactive matrix)不同模型架構。而依據瑞典管制機關 SKI 同步使用於瑞典 SR-97 案例之測試，仍可取得相近似之結果。據此，為了進一步了解，並規劃生物圈模型發展方向，將借鏡相同目的不同評估軟體之經驗。

#### **5.2.1.3. 預期研究成果**

分析模型之流程建立，是具體化情節/案例安全評估之主幹。107 年度預期彙整安全評估系統中的數值模式選用依據與程式，依據 6 個評估流程中的主要模擬項目，分別進行比較分析與討論。

### **5.2.2. 工程障壁系統評估技術**

本項工作自 105 年度開始執行，106 年已建立放射性核種在近場與遠場傳輸機制之量化技術，107 年度將持續以數值分析軟體進行膠體遷移案例之模擬與討論。

#### **5.2.2.1. 研究目的**

工程障壁於近場提供重要核種圍阻與遲滯的安全功能，考量時間演化，可能形成膠體。由於膠體形成易造成膨潤土材料流失侵蝕，影響緩衝材料之安全功能。故本研究將依據膠體與地下水、緩衝材料等交互作用機制，建立膠體遷移案例之安全評估分析技術，並討論納入膠體遷移後，對於處置設施安全評估結果之影響。

#### **5.2.2.2. 研究內容**

放射性核種在廢棄物罐失效後逐漸釋出，依據形成地下水通道所接觸到的近場緩衝材料與遠場母岩之特性等，其遷移機制涵蓋擴散、平流與延散等，相當複雜；同時亦須考量地下水陽離子強度影響蒙脫石形成膠體之機制，其中亦將改變放射性核種於近場與遠場的傳輸結果。此外，工程障壁系統內部組件的參考演化過程，亦可作為安全分

析情節設計的基礎架構，並可作為分析內部組件作用機制重要性的判斷依據，了解其對核種傳輸機制之影響。

綜合上述研究，蒐集目前國際間執行放射性廢棄物最終處置研究之相關核能機構，針對安全評估當中內部參考演化的相關文獻，以及重要的作用機制進行分析，並針對工程障壁內部組件於各時期的影響機制進行探討。107 年度工作規劃為：

- (1) 蒐集安全評估中核種遷移的相關文獻，並針對膠體的形成與在地下水中的特性、膠體在緩衝回填材料與母岩的傳輸行為、核種與膠體如何作用、搭載核種的膠體如何傳輸，以及膠體促進核種遷移的現象與機制進行分析，研究其對於核種傳輸相關參數之影響，並使用模擬軟體與數值模式進行探討，以 SKB 之膠體遷移案例為基礎，探討發生膠體傳輸對核種釋出之影響。
- (2) 參考國際經驗彙整不同的膠體遷移模型，運用 GoldSim 數值分析工具，建構膠體評估模型。

#### **5.2.2.3. 預期研究成果**

以數值分析模式進行膠體遷移案例之模擬與討論。

### 5.3. 熱力(T)-水力(H)-力學(M)-化學(C)實驗與模擬技術研發

#### 5.3.1. 緩衝與回填材料受水力作用影響

##### 5.3.1.1. 研究目的

隨著地下水入侵，因腐蝕所產生之氣體可能受緩衝材料阻擋而無法逸散，累積至高壓後於緩衝材料內形成突破氣體通道，進而影響其遲滯安全功能。

國際間十分重視氣體傳輸對於處置場長期安全造成之影響，亦積極執行氣體遷移之相關實驗，因氣體傳輸特性對邊界條件十分敏感，實驗過程亦相當耗時，國際間之現階段成果仍包含許多不確定性。因此，本研究目的主要為「探討緩衝材料中氣體遷移行為」，藉由建立相關實驗、獲得試驗數據，以直接提供安全評估論證，或進一步發展相關模式預測氣體遷移行為對處置安全之影響。

##### 5.3.1.2. 研究內容

評估氣體遷移行為對緩衝材料的影響，建立「緩衝材料氣體滲透試驗裝置」，以壓實膨潤土試體，於飽和且完全膨脹之定溫條件下進行試驗研究，將可探討試體尺寸、密度、增壓條件及地下水組成等不同邊界條件下之氣體傳輸特性，補足現有實驗數據不足情形，提供完善之處置場安全評估研究。107 年度工作規劃為：

進行緩衝材料氣體滲透試驗之整體流程建置與技術建立，以緩衝材料試體進行試驗測試，取得相關實驗參數。

試驗設置是將緩衝材料試體置於定容不鏽鋼試驗容器中 (Test Vessel)，通以循環水使其達飽和，過程中產生之回脹壓力 (Swelling Pressure) 為緩衝材料阻擋氣體傳輸之主要抗力，將以容器上方之荷重元 (Load Cell) 進行量測；待試體飽和後開始由下方注入氣體，使壓力逐步增加，待氣壓達臨界壓力時，氣體通道形成，氣體將快速且大量的從下游端洩出，該臨界壓力稱為突破壓力 (Breakthrough Pressure)；試驗過程中將持續監測突破壓力、回脹壓力及氣體流率 (Gas Flow Rate)。

##### 5.3.1.3. 預期研究成果

(1) 完成緩衝材料氣體滲透試驗之整體流程建置與技術建立。

- (2) 以緩衝材料試體進行試驗測試，取得氣體滲透率(Permeability)、突破壓力及相關實驗參數，以利後續進行其他條件之試驗，使實驗數據更加完整，作為評估腐蝕氣體對緩衝材料影響之依據。

### 5.3.2. 緩衝與回填材料受化學作用影響

#### 5.3.2.1. 研究目的

現階段處置概念中，廢棄物罐為使用銅質外殼鑄鐵內裡之材質，周圍以夯實之膨潤土做為緩衝材料。而於處置環境中，硫化物為造成廢棄物罐腐蝕之重要因子之一；膨潤土吸附、膨脹行為與礦物組成，可能因為地下水當中不同離子成分而改變，使緩衝能力降低。

現階段參考國際上之相關研究，建立本土化之研究評估與執行試驗能力，包括硫化物對緩衝材料侵蝕速率研究，以及地下水化學組成對緩衝材料/回填材料影響研究。本研究將探討處置環境緩衝材料中之硫化物之影響，對廢棄物罐厚度設計與腐蝕評估，以及緩衝材料設計功能驗證之建立，提供基礎；分析地下水當中的不同成分、pH 值、離子濃度等參數對緩衝材料/回填材料之影響；評估緩衝材料/回填材料膨脹能力，在參考案例的地下水條件下，是否能夠維持設計需求。

#### 5.3.2.2. 研究內容

參考國際上之相關研究，探討處置環境及緩衝材料中硫化物來源與擴散行為、對銅質材料之腐蝕作用，以及緩衝材料對地下環境硫化物腐蝕速率影響；探討緩衝材料/回填材料於地下處置環境中膨潤土與地下水的相互作用，分析評估在我國地質條件下之地下水化學作用。本研究將提供廢棄物罐腐蝕分析、廢棄物罐厚度設計，以及緩衝材料設計參考，建立未來緩衝材料設計與長期穩定性功能評估驗證技術之基礎；探討不同地下水化學組成對緩衝材料/回填材料之回脹能力、吸附能力及礦物成分之影響，分析參考案例的地下水成分對緩衝材料/回填材料之影響，以提供未來相關設計與功能驗證之依據。107 年度工作規劃為：

- (1) 延續 106 年之成果，建置硫酸鹽擴散試驗設備，執行擴散試驗，分析硫酸鹽於膨潤土中之擴散作用。

- (2) 建置硫酸鹽還原菌試驗設備，研究硫酸鹽還原菌在膨潤土中之活性。
- (3) 持續進行回脹壓力試驗，分析膨潤土在不同成分水溶液條件下之回脹行為。
- (4) 使用不同成分水溶液與膨潤土樣本混合，分析樣本陽離子吸附能力變化，以及分析晶體變化。

### 5.3.2.3. 預期研究成果

- (1) 獲得緩衝材料中硫酸鹽之有效擴散係數及視擴散係數。
- (2) 建立硫酸鹽還原菌於不同膨潤土密度中之活性影響。

### 5.3.3. 緩衝材料耦合試驗及數值模擬

#### 5.3.3.1. 研究目的

- (1) 緩衝材料 THM 耦合縮尺試驗研究

深層地質處置場環境中，包含廢棄物罐衰變熱、地溫梯度、地下水入滲等環境因素，及膨潤土本身遇水後產生之回脹變化的力學行為，使緩衝材料成為一複雜的 THM 的耦合機制，為了解緩衝材料在處置孔中受廢棄物衰變熱及地下水滲透作用下產生之 THM 耦合行為，對其功能的長期穩定性及安全影響，以建立耦合試驗模型，以瞭解膨潤土之膨脹壓力、相對濕度及溫度變化與相互間的關係。

此外，感測器之適用性及壽命為本研究重點之一，亦為最具挑戰性之任務，延續 106 年度之實驗配置，評估感測器之耐久性並加以改良，精進感測器之耐久性及其合適之布置位置；為提供日後大型的耦合模擬試驗模型建立技術與試驗方法建立基礎，以及提供工程障壁設計與安全評估之論證參考。

- (2) 緩衝材料 THM 耦合特性研究

深層地質處置場之近場環境考量廢棄物衰變熱及地溫梯度，加上處置場封閉後地下水入侵之影響，處置場近場環境之溫度屬於變溫條件，故處置場之近場環境屬於熱-水-力變化之多重物理耦合條件，過去傳統的參數試驗研究多未考量溫度場之影響，若以單

一條件之參數數據納入耦合數值模型分析，可能會與實際之物理行為有所誤差。

考量處置場受地溫及廢棄物衰變熱影響，本研究建立具溫度場之三軸試驗設備探討溫度場之影響，土壤環境三軸試驗模擬現地狀態進行緩衝材料 THM 耦合行為，探討飽和狀態、圍壓環境、溫度變化、滲透特性、膨脹特性。綜合試驗得到緩衝材料力學參數，將以岩石力學與土壤力學之方法分析，來評估圍岩對緩衝材料的影響與長時間緩衝材料的承載能力，提供緩衝材料功能評估及工程障壁穩定性分析之用。

### (3) 緩衝材料 THM 耦合數值模擬

處置場位於地下數百公尺深處，當地下水進入緩衝材料後，地下水的進出可能會形成核種擴散的主要途徑，故研究緩衝材料受地下水入侵後其飽和度的變化有其必要性。本研究旨在探討深地層處置場在廢棄物罐熱效應作用下，水分在工程障壁中的移動情形(與緩衝材料之飽和度與含水量有關)，以及在水的作用下，近場溫度重新分布之情況，藉以了解地下水入侵對處置場帶來之影響。參考國際間相關 TH 耦合數值模擬發展，考量水力作用納入耦合分析時，飽和環境與未飽和環境差異顯著，飽和環境下的模擬僅考慮由固體材料與水構成，而在未飽和環境下則需再考慮孔隙的影響。在未飽和狀態下進行水力傳導效應模擬時，材料孔隙中會形成一負孔隙壓力，將外部水吸入材料內，在模擬過程中需考慮各材料之持水曲線(Water Retention Curve)。本研究將參考國際間 TH 耦合數值模擬模型及相關研究發展，初步建立 TH 耦合數值模型，以逐步建立我國耦合數值分析技術，以供處置場長期穩定性分析及安全評估之論證依據。

#### 5.3.3.2. 研究內容

##### (1) 緩衝材料 THM 耦合縮尺試驗研究

利用可調溫度的加熱器置於膨潤土塊體中央，用來模擬廢棄物罐之衰變熱，並在周圍給予水壓模擬地下水滲透，膨潤土塊體模型

外圍以恆溫水浴層控制邊界溫度來模擬處置場地溫條件。在膨潤土塊體中配置感測器，並藉由數據擷取器傳至電腦定時記錄。107 年工作規劃為：延續 106 年度之研究，於試體周圍注入水流，模擬緩衝材料受地下水入滲之影響，並以試體內部安裝之感測器及數據擷取器，持續監測膨潤土塊體受溫度及水份入滲影響過程中，溫度、應力及濕度變化的情形，膨潤土塊體模型之感測器埋設位置如圖 5-4 所示。

## (2) 緩衝材料 THM 耦合特性研究

為了執行緩衝材料熱-水-力特性相關實驗，本研究擬採用具溫度場之土壤環境三軸試驗儀，該儀器可同時選擇溫度、孔隙水壓、圍壓與軸向應力及孔隙氣壓等不同參數，以模擬地溫梯度與廢棄物衰變熱、地下水壓力、現地應力狀態與廢棄物罐自重，以及緩衝材料未飽和狀態之力學特性。107 年度工作規劃為：

- (a) 探討緩衝材料吸水過程中應力狀態對緩衝材料體積變化、孔隙比變化；隨後再加入溫度、孔隙水壓圍壓與軸差應力等條件，探討緩衝材料熱-水-力耦合特性。
- (b) 並藉由先前熱-力試驗結果為基礎，比較分析孔隙水壓造成緩衝材料力學特性與變形特性之變化，建立環境條件與緩衝材料力學參數之關係。

## (3) 緩衝材料 THM 耦合數值模擬

彙整國際間處置場耦合數值分析技術發展與相關研究成果，建立數值分析技術理論與分析模型假設基礎，經與文獻案例平行驗證，確立數值模型與分析方法之正確性與有效性後，發展本土處置場近場熱力-力學及熱力-水力 2 種耦合分析模型，計算工程障壁(包括緩衝材料、回填材料)及圍岩之溫度、應力、飽和度(或含水量)與位移隨時間變化之關係。107 年度工作規劃為：

- (a) 研析國際間 TH 耦合數值分析技術發展與相關研究成果，建立數值分析技術理論與分析模型假設基礎。
- (b) 依數值分析理論及模型假設條件建立 TH 耦合數值模擬之基本分析模型，包含網格之建立、材料組合律模式之假設、邊

界條件與初始條件之設定與測試，並與國外分析結果進行平行驗證，擬合相應之試驗成果驗證模型之正確性，以及參數敏感度分析。

#### 5.3.3.3. 預期研究成果

##### (1) 緩衝材料 THM 耦合縮尺試驗研究

本年度延續 106 年度 TM 耦合試驗模型，加入水份入滲之影響，取得縮尺耦合試驗模型之溫度、應力及濕度變化歷時數據，並分析膨潤土材料受溫度、水份及應力變化之相互關係。

##### (2) 緩衝材料 THM 耦合特性研究

建立本土緩衝材料材料試驗技術能量，比較溫度、圍壓及孔隙水壓之不同環境狀態之影響，並獲取相應之緩衝材料力學參數，可作為數值模擬力學模型參數之用。

##### (3) 緩衝材料 THM 耦合數值模擬

(a) 建立 TH 耦合數值分析理論模型。

(b) 與國際間相關 TH 試驗案例平行驗證模型之正確性，逐步建立我國耦合數值模擬技術發展之基礎。

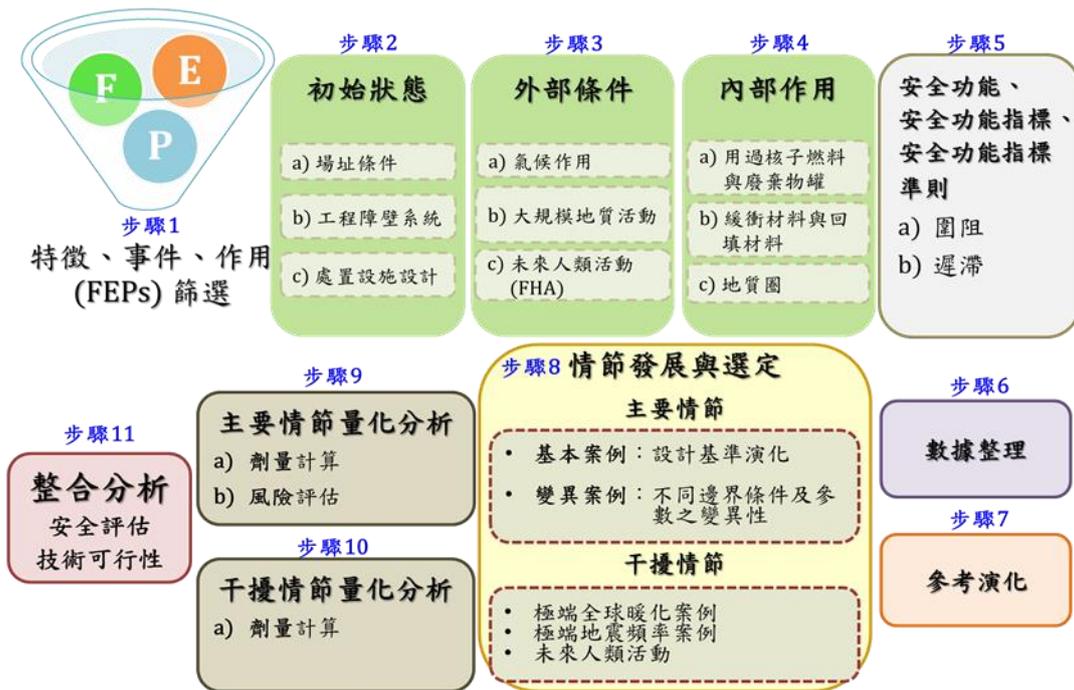


圖 5-1：安全評估 11 步驟

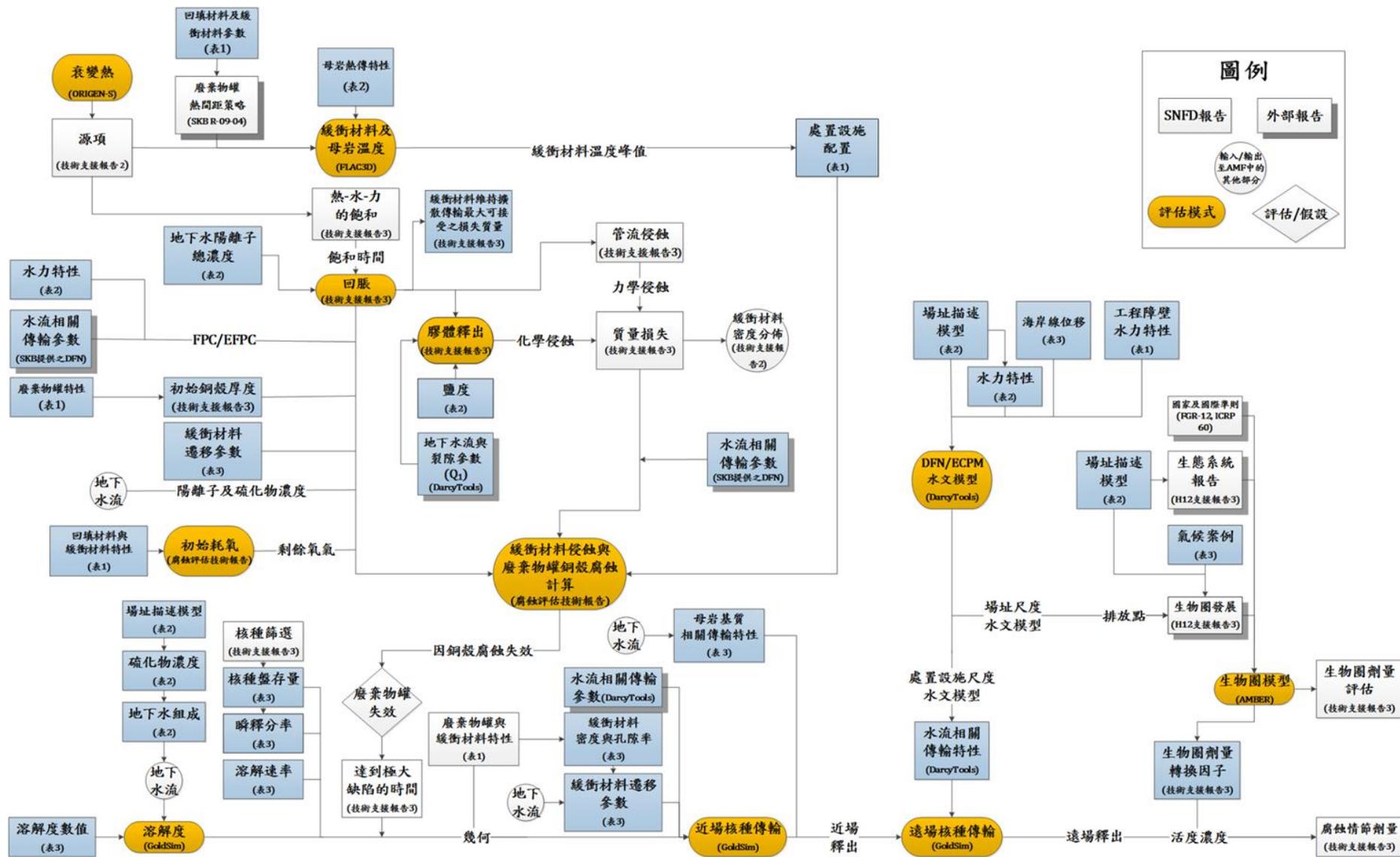


圖 5-2：腐蝕情節安全評估模式鏈



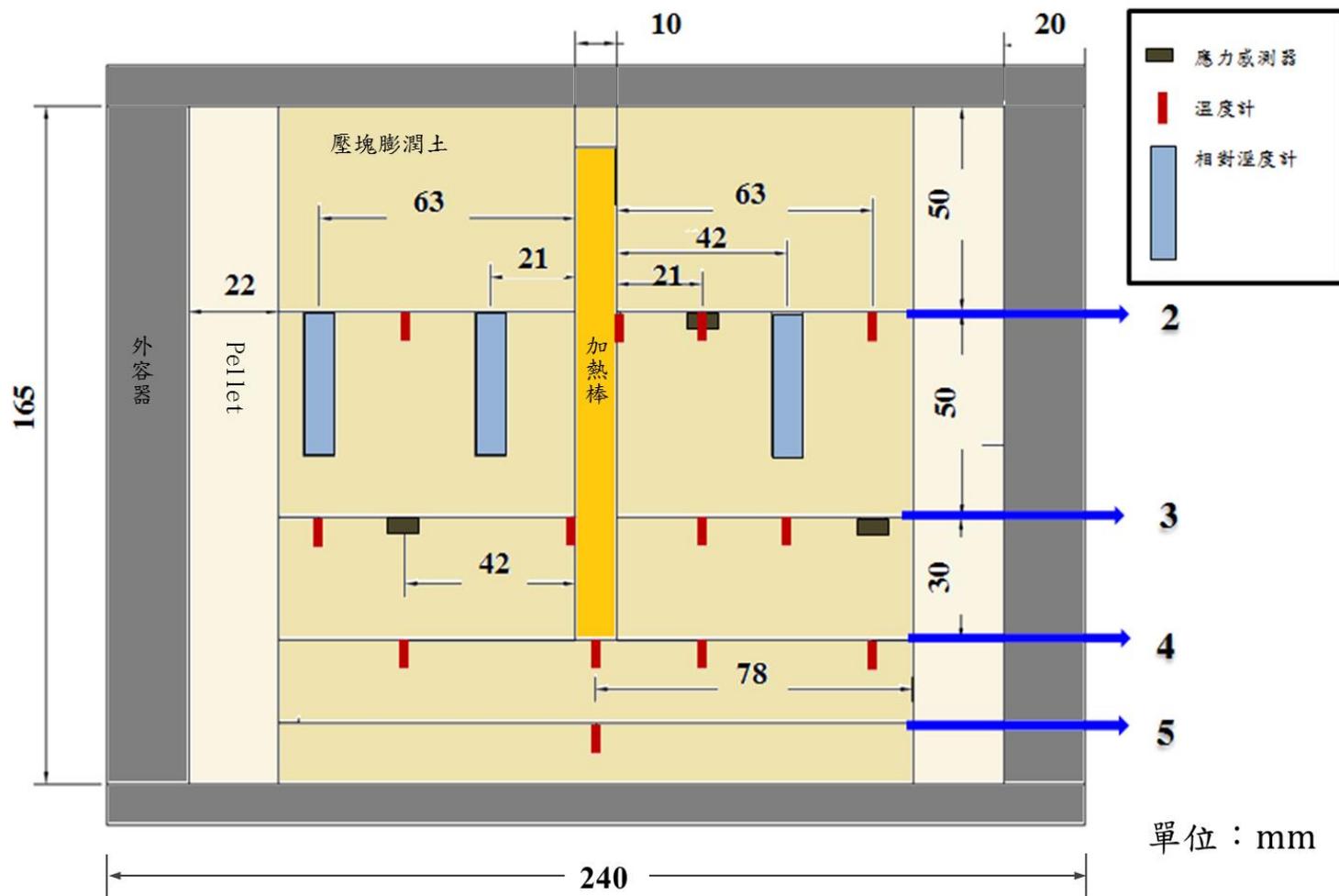


圖 5-4：緩衝材料感測器埋設位置試驗配置示意圖

## 6. 整合性技術

### 6.1. 地質圈長期穩定性評估

#### 6.1.1. 地表監測與岩體變動趨勢分析

##### 6.1.1.1. 研究目的

為取得候選場址評選與核定階段所需之評選參考依據，且參照原能會公告之「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」，場址應避免位於山崩、地陷或火山活動之虞的地區及地質構造有明顯抬升、沉降、褶皺或斷層活動變化的地區。因此，地質圈長期穩定性評估需就短、中、長期不同時間尺度的地質現象，以地質調查數據建立短、中、長期模擬與評估技術。

SNFD2017 報告中已彙整全國性地質的短、中、長期抬升與剝蝕作用、沉陷與沈積作用的地質紀錄。在此基礎之上，針對北部張裂帶短期地殼穩定性，累積長時距監測數據以提高監測精度，未來將據以評估山崩、地陷及地質構造等自然影響因子，並用以建立深層地質受地殼變動影響相關評估技術。

##### 6.1.1.2. 研究內容

利用高精度地表監測與岩體變動趨勢分析相關技術，提供潛在地質構造邊界地殼變動差異、不同區塊抬升/沉陷差異及不同時間尺度比較等基礎資訊。107 年度工作規劃為：

- (1) 以區域性 GPS 連續觀測站網之三維定位成果為基礎，建構區域結晶岩體水平及垂直位移之速度場模型，以瞭解區域 GPS 站網涵蓋的結晶岩體水平及垂直方向的變動速度，獲得長期穩定性與地表變形趨勢佐證所需的量測數據。
- (2) 以半年為期之頻率，遵循內政部衛星控制點的作業規範(內政部，1994，p6)(測量精度之基線長標準誤差在 5 mm + 1.0 ppm 內)，實際 GPS 測量時間為 8 小時(大於內政部規範之 4 小時)，以提升測量精度，據此獲得位移變化的觀測數據。並依據內政部「一等水準測量作業規範」(內政部，2014，p4-p 28)施作水準導線測量，檢核各定期觀測樁(包括連續觀測站副樁)之絕對高程變動量，提供評估結晶岩體長期穩定性之用。

- (3) 連續觀測成果資料規劃分析 4 項觀測量評估指標，包括：L1 載波之多路徑指標、L2 載波之多路徑指標、週波脫落之統計數、接收儀內部時錶平均偏差量。經篩選後訊號品質不良的觀測數據將予剔除，不納入後續分析中以提高定位精度。再利用 Bernese 5.0 版 GPS 資料處理軟體解算觀測資料解算，輔以臺灣地理位置和點位分布狀況，進行在地化修正，以期適用於臺灣地區的網形配置，並使用去除雜訊分析模式進行相關誤差值修正。
- (4) 針對 GPS 時間序列資料分析，規劃以主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)，進行誤差或雜訊的濾波及分離，以提高坐標序列的信噪比，可有效地從 GPS 連續觀測的坐標時間序列中，解析出影響地表形態變化相關的綜合指標資訊。

#### **6.1.1.3. 預期研究成果**

- (1) 針對結晶岩體與其鄰近圍岩間構造接觸帶，進行 GPS 連續觀測站與定期觀測樁的長期監測，並分析監測期間岩體變動趨勢。
- (2) 持續計算 GPS 連續觀測站定位解算成果，並進行時間序列變化分析，探究結晶岩體不同區塊抬升/沉陷作用的影響機制。

### **6.1.2. 結晶岩深層地下水化學長期演化特性**

#### **6.1.2.1. 研究目的**

採用地化模擬軟體(如 Geochemist's Workbench, GWB)，針對本島結晶岩深層裂隙岩層的長期岩-水反應過程，以水文地球化學反應路徑模擬結果，評估深層封閉裂隙、深層開放裂隙、淺層開放裂隙等 3 種主要裂隙地下水的化學特性之長期演化。

#### **6.1.2.2. 研究內容**

深層地質環境的地下水化學特性，主要取決於其地下水來源與周圍岩石長期進行岩-水反應的演化結果，主要的反應包含礦物的溶解、沉澱，以及離子交換等作用。由於天然條件下的地球化學反應系統，可能包含相當複雜的礦/水/氣化學反應，因此，利用地化模式軟體之模擬運算，是用以理解或預測地下水化學特性及其演化機制的一項有

力工具。而詳細的礦物及地下水組成等資訊，有助於提升地下水化學特性預測的準確性及其演化機制的合理性。

針對反應路徑模擬軟體，本研究係採用商業化之 GWB (版次為 Professional version 9.0) 地化軟體。該軟體不但經過美國 NRC (Nuclear Regulatory Commission) 在其高階放射性廢棄物計畫所認可，同時也是近年來各國在其用過核子燃料處置計畫中，廣為採用的地化模擬軟體。至於模擬所需的熱力學資料庫，則是採用 GWB 軟體所內建之「thermo.com.V8.R6+.dat」資料庫；而反應動力模擬所需礦物溶解反應速率參數，則是參考美國地質調查局之相關資料 (Palandri and Kharaka, 2004, p12-p45)。

在反應路徑模擬方法上，本研究針對每種情境案例的反應路徑模擬，均包含相對反應速率 (CaseZx)，及採用礦物溶解或沉澱反應速率方程式 (Palandri and Kharaka, 2004, p2-p6) 之反應動力 (CaseKx) 等 2 種模式；前者可供快速研判反應系統達最終平衡時的化學特性，後者則供研判反應系統隨時間的可能演化情形。詳細內容說明如下：

#### (1) 相對反應速率模式

在模擬岩(礦)-水反應時，若無法得知礦物的溶解/沉澱反應的反應速率方程式時，則通常會採用所謂的相對反應速率：

$$r_{V\pm} = k_1$$

其中，

$r_{V\pm}$  = 單位系統體積內，某礦物 ( $M_{(s)}$ ) 的溶解或沉澱反應速率 (reaction rate)， $[mole \cdot m^{-3} \cdot sec^{-1}]$ 。

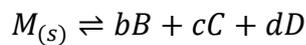
$k_1$  = 使用者自定參數值；通常會令  $k_1$  值和礦物的含量成正比，來進行模擬 (Wolery, 2002, pD-15)。另外，在礦物溶解(加入系統)過程中，當礦物的溶解在溶液相達飽合狀態時 ( $Q > K$ )，則此後所有的反應路徑計算，僅將剩餘的礦物轉化為系統的固相物 (Bethke, 2006, p12)。

#### (2) 反應速率方程式(反應動力模式)

在反應動力學中，反應速率方程式(reaction rate equation)是用以描述一化學反應速率的代數方程式。

不像質量作用定律(mass action law)是一清楚、明確、唯一的關係式，用以描述特定化學反應中，各物種活性(濃度)間的關係。基本上，反應速率方程式，通常是單純透過實驗數據隨時間變化的曲線擬合(curve fitting)、或透過半理論推導所獲得的數學關係式(如 Michaelis-Menten equation)並加上實驗數據隨時間變化的曲線擬合(Fogler, 1992, p66)，用以描述某一化學反應進行的速率。

針對一個礦物溶解/沉澱反應：



Palandri and Kharaka (2004)提出其溶解或沉澱之反應速率方程式的通式：

$$\begin{aligned} \gamma_{V\pm} = & \left( \frac{A_{RS}}{V} \right) \times \left[ k_{SO,A} \times \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \times (a_{H^+})^{n_A} \times F_A \right. \\ & \times \left( 1 - \left( \frac{Q}{K} \right)^{P_{A1}} \right)^{P_{A2}} + k_{SO,W} \times \exp\left(\frac{-E_W}{RT}\right) \times (a_{H^+})^{n_W} \\ & \times F_{AW} \times \left( 1 - \left( \frac{Q}{K} \right)^{P_{W1}} \right)^{P_{W2}} + k_{SO,B} \times \exp\left(\frac{-E_B}{RT}\right) \\ & \left. \times (a_{H^+})^{n_B} \times F_B \times \left( 1 - \left( \frac{Q}{K} \right)^{P_{B1}} \right)^{P_{B2}} \right] \end{aligned}$$

其中，

$\gamma_{V\pm}$  = 單位系統體積內，某礦物( $M_{(s)}$ )的溶解或沉澱反應速率(reaction rate)， $\left[ \left( \frac{m^2}{m^3} \right) \right] [mole \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}] = [mole \cdot m^{-3} \cdot sec^{-1}]$ 。

$A_{RS}$  = 礦物( $M_{(s)}$ )的有效反應面積(reactive surface)， $[m^2]$ 。

$V$  為系統的體積， $[m^3]$ ；其數值  $\geq 0$ 。

$Q \equiv \prod (a_i)^{\nu_i}$  = 活性乘積(ion activity product)， $[ \cdot ]$ 。

$K \equiv \{\prod(a_i)^{v_i}\}_{equilibrium}$  = 平衡狀態下的活性乘積 (activity product)(=理論平衡常數)，[·]。

當  $Q > K \Rightarrow \gamma_{V\pm} < 0$  代表礦物沉澱；當  $Q < K \Rightarrow \gamma_{V\pm} > 0$  代表礦物溶解。

$a_{H^+}$  = 水中氫離子的活性，[·]。

$R$  = 氣體常數 =  $8.3143 \times 10^{-5} [\text{bar} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

$T$  = 溫度，[K]。

$E_A$ 、 $E_W$ 、 $E_B$  = 在酸性(A, acidic)、中性(W, neutral)及鹼性(B, base)條件下的反應活化能(activation energy) [ $J \cdot \text{mole}^{-1}$ ]。

$k_{SO,A}$ 、 $k_{SO,W}$ 、 $k_{SO,B}$  = 在酸性、中性及鹼性條件下的 Arrhenius pre-exponential factor，[ $\text{mole} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ]。

$n_A$ 、 $n_W$ 、 $n_B$  = 水中氫離子活性在酸性、中性及鹼性條件下的反應參數。

$F_A$ 、 $F_W$ 、 $F_B$  = 其它離子效應修正參數。

$P_{A1}$ 、 $P_{A2}$ 、 $P_{W1}$ 、 $P_{W2}$ 、 $P_{B1}$ 、 $P_{B2}$  = 在酸性、中性及鹼性條件下， $Q/K$  的反應參數。

針對任一個化學反應系統，不論採用實驗所得的反應速率方程式模式，或所謂的相對反應速率模式，其反應過程或許會有所不同，但最終的平衡計算結果，理論上，必須相同，方能滿足熱力學的平衡限制條件。由於一旦採用實驗所得的反應速率方程式，來進行地化反應模擬時，常會因數值計算的困難，而耗時甚久或難以收斂，因此通常會先以相對反應速率的方式，先初步評估整個反應系統的最終平衡狀態，用以適度簡化反應系統後，再以實驗所得的反應速率方程式進行模擬。

SNFD2017 報告已完成離島結晶岩體水文地球化學長期演化的技術發展。在此基礎上，針對本島結晶岩體水文地球化學研究，先就既有資訊進行蒐集，並據以規劃 107 年工作內容為：

(1) 地質背景資訊

本島結晶岩體鄰近大理岩與片岩接觸帶。因地質演化歷程，經歷了輕度至中度變質作用，形成具明顯葉理構造的變質花崗岩體，在主要組成的石英、長石類礦物中，均間夾或富集具核種吸附能力的礦物，如綠泥石類、雲母類、絹雲母類、方解石等。這些礦物資訊對岩水反應研究相當關鍵。106 年度開始進行本島結晶岩地下水地球化學演化的研究，蒐集整理所需數據，雖然既有現地資訊有限，仍顯示出區域性水文地化特性，主要受到片岩及大理岩等圍岩的影響，於百餘公尺深就呈現具有還原特性的地下水，明顯不同於離島結晶岩，需數百公尺深才達到還原環境。

(2) 進行 3 種模擬情境案例(如圖 6-1)

(a) 深層封閉裂隙情境(CaseZ1/K1)

假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸後，馬上與外界隔絕，形成一個封閉式的反應系統，進行其化學演化。

(b) 深層開放裂隙情境(CaseZ2/K2)

假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸時，因地下水的流動，使整個反應系統的風化驅動力，如  $\text{CO}_2$  的含量(逸壓)，維持在一個定值；並假設該定值等於深層地下水的平衡  $\text{CO}_2$  值。

(c) 淺層開放裂隙情境(CaseZ4/K4)

假設「淺層地下水」與新鮮岩石接觸時，因淺層地下水受其上方未飽和層(土壤層)的高  $\text{CO}_2$  含量的影響，使整個反應系統的  $\text{CO}_2$  風化驅動力，維持在一個定值( $P_{\text{CO}_2}=0.01 \text{ atm}$ )。

### 6.1.2.3. 預期研究成果

根據本島結晶岩體主要導水裂隙的水文地化特性(pH 和 Eh 的變動範圍)，模擬岩-水反應過程，可能形成的次生礦物種類，候選場址評選與核定階段進行安全評估，探討核種溶解度及吸附特性之參考依據。107 年度預期成果包括：

- (1) 地下水的化學特性在深層封閉裂隙、深層開放裂隙、淺層開放裂隙等 3 種情境案例下岩-水反應的長期演化分析；

(2) 經由 3 種情境案例反應路徑模擬，提供本島結晶岩體裂隙地下水化學環境的 pH 及 Eh 的變化範圍，據以比較離島與本島結晶岩體在長期演化方面的差異。

## 6.2. 地下水流分析模式驗證與技術精進

### 6.2.1. 整合型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬

#### 6.2.1.1. 研究目的

根據離島結晶岩體參考案例的資料，首先以數值模擬方法產生符合現地特性的離散裂隙網路(discrete fracture network,DFN)，接著利用擴尺度計算技術，將 DFN 轉換為三維 ECPM，並修改 TOUGH2 程式，使其適用於計算所得的異質異向性 ECPM，並利用 TOUGH2 的 EOS7 模組，模擬出含鹽水的地下水流分布。

#### 6.2.1.2. 研究內容

探討核種傳輸的地下水流通路徑，自工程障壁、地質圈至生物圈所需模擬地下水流場的區域，空間尺度可能到達數公里至數十公里，若將整個模擬區域均視為裂隙岩體，則 DFN 模擬區域的尺度太大，造成 DFN 數值模擬以及 DFN 地下水流數值模擬的計算量太大，故需發展技術有效地提供大區域流場模擬結果，提供候選場址評選與核定階段安全評估之用。

經過長期研發裂隙岩體地下水流與溶質傳輸模擬技術，發展整合型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬方法，DFN 轉換為等效連續孔隙介質(equivalent continuous porous medium, ECPM)的技術，發展三維 ECPM 地下水流數值模擬技術是目前最關鍵需待發展的技術，以供後續建構評估裂隙岩體內溶質傳輸，所需之裂隙網路數值模擬簡化方法的參考依據。

使用現地量測數據進行模擬技術發展，需從建立地表及井下裂隙資料量測技術開始，發展裂隙參數資料分析工具，建立三維 DFN 數值模擬工具，並將 DFN 轉換為 ECPM。將 DFN 轉換為 ECPM 後，需進一步針對三維地質資訊具有的異向性進行研究。因 DFN 具有特定的導水特性構造(water conducting feature)，且不同導水特性構造的

滲透係數及走向均不一致，使得轉換後的 ECPM 具有異質 (heterogeneity) 且異向 (anisotropy) 的特性，故 ECPM 中的地下水流模擬需要能處理異質性及異向性的影響。

傳統 TOUGH2 處理異質異向性的方式如圖 6-2 上半部所示，下半部則為本研究採用的方法。傳統方法中，若該網格具有異向性，則可指定不同的軸向方向滲透係數，即  $k_{xx} \neq k_{yy} \neq k_{zz}$ ；且若模擬的介質同時具有異質性，則可針對每個網格定義 1 個唯一的滲透係數修正值 (Permeability Modifier,  $\xi$ )，但不同網格可指定不同的  $\xi$ 。相較之下，若已將 DFN 轉換為 ECPM，且每個網格在不同軸方向的滲透係數的變化程度不同，故每個網格在 3 個軸向方向須定義 3 個不同的  $\xi$ ，並如圖 6-2 下方的示意圖所示，將不同軸方向滲透係數乘以該方向的  $\xi$ ，因而可處理複雜的介質異質性及異向性。

在既有離島結晶岩以現地數據建立的地質構造概念模式，彙整地表及井下裂隙參數資料，進而建構 DFN 裂隙參數集 (DFN recipe) 等技術基礎之上，一方面需持續修改 ECPM 地下水模擬所需的初始及邊界條件，以符合現地量測的地質特性；另一方面，因 TOUGH2 數值模擬程式在處理異質及異向性部分需進行修改，使其能適用於離島結晶岩體參考案例的 ECPM 地下水流模擬。107 年規劃工作如下：

- (1) 將 ECPM 進行後處理，以轉換為符合 TOUGH2 的 EOS7 模組所需的數值網格資料；
- (2) 修改網格間地下水質量交換的程式碼；
- (3) 考慮不同網格間異質性滲透係數在網格交接面的內插值；
- (4) 考慮水力梯度與網格交接面之間的向量關係，以確保計算出正確的質量進出差值。
- (5) 完成大尺度模擬區域地下水流場的數值模型，用以模擬參考案例穩態的鹽水地下水流場。

### 6.2.1.3. 預期研究成果

參考案例模擬區域包含處置系統中近場處置坑道所在的母岩及遠場的裂隙岩體，並盡可能延伸至生物圈。因考慮的空間尺度可能到達數公里至數十公里，若將整個模擬區域均視為 DFN，則因模擬區域

的尺度太大，造成 DFN 數值模擬以及 DFN 地下水流數值模擬的計算量太大，故無法有效地根據模擬結果評估處置場址的安全性。針對 DFN 轉換 ECPM 後，需產生符合 TOUGH2 格式的三維網格資料檔，進而修改 TOUGH2 程式，使其能處理 ECPM 的異質性與異向性，將是地下水流場模擬技術發展的關鍵。107 年度預期成果為：

- (1) 針對近百公里範圍地下水流場模擬的需求，透過 DFN 轉換為 ECPM，建立大尺度模擬區域異質性與異向性數值模擬的技術；
- (2) 模擬離島結晶岩體參考案例穩態的鹽水地下水流場，提供未來安全評估分析大區域流動路徑之用。

## 6.2.2. 離島結晶岩區海平面下降之地下水流數值模式

本項為延續 106 年度「岩體裂隙傳輸安全評估模型技術」與「開發裂隙與連體模式等效參數升尺度技術」之成果。

### 6.2.2.1. 研究目的

在用過核子燃料最終處置計畫的處置概念中，地下水的流動特性除了影響緩衝材料的侵蝕及廢棄物罐的腐蝕之外，更是核種在地層中遷移與分布的重要因素。為了要充分瞭解深層地下水的運移，確定深地層的水文地質特性及瞭解處置母岩的物理性質後，再據以建構水文地質概念模式提供地下水的模擬為一系列的重要任務。其中，水文地質演化為參考演化中之重要演化過程之一，而海平面隨著冰河循環的上升/下降將影響地下水流場，進而影響安全評估於近/遠場的分析結果。

對於用過核子燃料最終處置計畫而言，大尺度且深層的地下水流特性係處置計畫探究的重點，本計畫雖曾透過與瑞典 SKB 技術合作初步建立離島結晶岩測試區海平面下降 20 公尺之地下水模擬案例 (Selroos et al., 2016, p1-p172)；惟因現地調查資料有限，對於模擬區域的劃分、上邊界條件設定等仍有精進空間。此外，海平面下降 20 公尺案例，尚不足以代表整個水文地質演化之所有情境；因此，有必要針對海平面下降對於地下水流場造成的影響，進行細部研析。

#### 6.2.2.2. 研究內容

海平面下降將影響地表之地形、河系、侵蝕率等，進一步影響地下水流狀況；因此，就長期發展而言，需要同步考量海平面下降對於前述因子所造成的複合影響，藉以訂定不同海平面下降情境下的地表地形及河系發展狀況後，再作為水文地質參考演化之輸入參數並進行相對應之地下水模擬工作。

107 年度工作規劃，預計以中國大陸沿海、臺灣海峽及臺灣本島之數值地形圖為基礎，在不考慮侵蝕率及外在條件的變化下，僅以海平面下降後之河系分布作為研究對象，並選定自然邊界作為模擬區域劃分依據，輔以合理的假設(如岩性分布、水力特性參數等)，進行離島結晶岩測試區海平面下降之地下水流數值模擬。

#### 6.2.2.3. 預期研究成果

- (1) 基於中國大陸沿海、臺灣海峽及臺灣本島之數值地形圖，進行海平面下降後之河系分布。
- (2) 基於海平面下降後之河系分布分析結果，選定自然邊界作為模擬區域劃分依據，輔以合理的假設進行離島結晶岩測試區海平面下降之地下水流數值模擬。

### 6.2.3. 離島結晶岩區域地下水流場演化模擬

#### 6.2.3.1. 研究目的

以離島結晶岩體建置的參考案例，利用現地數據建立區域性地下水水文地質三維數值模型，探討離島結晶岩體大區域分布地下水流場，及其導水構造帶與岩脈群阻水構造，模擬海水與淡水交互作用，經長期氣候與海平面變遷的演變過程。

#### 6.2.3.2. 研究內容

##### (1) 資料彙整與評估

現地數據採用 SNFD2017 參考案例既有的現地數據(表 3-1)，以建構三維連續孔隙介質(Continuous Porous Medium, CPM)模型，根據不同演化時期，探討不同模型間，地下水流之差異性。模擬

器為 TOUGH2-MP，在裂隙-基質的局部熱力學平衡假設下，基於連續介質假設的經典滲流理論，來模擬地下水流場的時空演變。

## (2) 建構模型邊界

利用高程圖數化後得到模型邊界圖，假設模型的側邊界在最西部邊界為無流(no flow)；其餘側邊界皆假設為定溫與定水頭(Dirichlet boundary type)。模型的東西向寬度約 10 km，南北向長度約 14 km，深度為海平面下 1 km。模型側邊界假設為海水。

## (3) 建立概念模型

三維模型概念中，分成 5 個主要地質單元，分別為風化帶(Regolith: R0)，由破碎花崗岩及沉積物組成，依模型高程分布，厚度約 70 m，覆蓋整個模型。風化帶的水力傳導係數大，水流主要流向大海或向下入滲。風化層以下均為岩性緻密的花崗岩(Granite: R1- R3)基盤，水力傳導係數小；輝綠岩脈(Dyke: D1-D10)呈東北-西南走向的岩脈群分布，水力傳導係數可能低於花崗岩，在模型中扮演阻水構造(圖 6-3)，可能改變地下水流向。模型的最大高程介於 240 m 至 250 m 之間，地表溫度固定為 23.5 °C，地表壓力固定為一大氣壓( $1.01 \times 10^5$  Pa)，並據此做為模型頂部邊界條件。入滲量假設為 35 mm/yr，作為模型源項。太武山斷層(F1)(位態 N64E/70N)，切過整個模擬區域，形成主要導水裂隙帶，太武山分支裂隙(F2)為模型中另一主要導水裂隙帶，F2 與 F1 相交於地表下約 320 m 至 350 m 處。

### 6.2.3.3. 預期研究成果

5 千年前離島結晶岩才形成類似今日的島嶼環境。島嶼環境未來區域地下水演化(圖 6-4)的模擬技術，對候選場址評選與核定階段安全評估技術發展相當關鍵，107 年度預期成果包括：

- (1) 呈現不同海水深度的邊界條件，對海水入侵及地下水流場的影響；由區域水文地質三維模擬結果，可回饋給現地調查後續規劃參考；
- (2) 後續持續更新現地調查取得的參數，適時修正與精進數值模型，提供安全評估技術發展之用。

### 6.3. 核種遷移試驗與評估技術

#### 6.3.1. 室內實驗室模擬核種於緩衝材料、回填材料與處置母岩遷移行為

##### 6.3.1.1. 研究目的

本計畫將持續建置核種遷移實驗室核設施，模擬及彙整深層地質處置中的重要核種之遷移參數(如：分配係數與擴散係數)，係國內唯一運用熱測試放射化學實驗與模擬交互驗證的系統性研究，提供最終處置場之安全評估及工程障壁設計時所需本土化參數輸入之重要參考依據，並精進評估模式。

透過實驗技術精進與方法開發，獲得本土之核種遷移數據，作為建立用過核子燃料深層地層處置功能安全評估之不確定性及參數敏感度分析程式之基礎。

過去採用批次法判定核種吸附等級與獲得粗略分配係數(Kd)的快篩方式，但往往得到 Kd 值高估的情形。而利用注入槽與擴散槽為固定濃度(CC-CC)的穿透擴散(Through-Diffusion)模式，以漸近線來求取擴散係數外，核種濃度之累積突破曲線(cumulative breakthrough curve)可較精確得到分配係數(Kd)數據，對於低吸附性核種(Tc、I)，非常適合。

NEA 於 1980 年 2 月，就放射性廢料處置提出國際吸附資訊檢索系統(International Sorption Information Retrieval System, ISIRS)開發計畫，並建立吸附數據資料庫；瑞士 Nagra 於 1994 年開始建立吸附數據資料庫；法國 Andra、瑞典 SKB；芬蘭 Posiva Oy 等廢棄物專責機構，對於實驗室與現地之近/遠場核種遷移研究已有多年歷史；日本原子力研究開發機構(JAEA)之核種遷移研究團隊、地層處置研究開發部門，亦於 2003 年 8 月，建置電子化網版與提供全球使用者查詢之服務平台之熱力學、吸附與擴散資料庫(Thermodynamic, Sorption & Diffusion DataBase)。

本研究可結合地下水滲流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數，透過水文地球化學分析模式，與地下水滲流機制、核種傳輸等模擬分析結果作一比對與驗證。

### 6.3.1.2. 研究內容

以放射化學實驗室為測試平台，依據重要核種的不同吸附特性，配合參考案例的地球化學條件，建立遷移之實驗設計及分析技術，建立系統性之標準作業程序，並整合國內外核種遷移參數相關實驗方法，包括：批次、擴散及管柱實驗等。

於實驗室中模擬深地層特殊環境( $E_h < 0$  mV)下，觀察核種的遷移行為完成在近場(緩衝材料/回填材料:膨潤土)與遠場(離島結晶岩測試區或東部結晶岩測試區)或主要水力傳導帶中重要核種之分配係數，提供最終處置計畫之放射性核種遷移行為評估與驗證，確保與提高功能安全評估模式可靠度。

而長期研究內容，將針對高吸附性核種(如 U、Th 或 TRU 超鈾元素)在 pH 值為 7、有氧及厭氧條件下，不同的放射性核種可能存在不同價態的物種，探討近場與遠場(如母岩裂隙段衍生礦物之吸附作用)之遷移機制與行為。而實驗結果利用地球化學(如 PHREEQC)計算式，模擬放射性核種在不同地球水文化學條件(pH 值、離子強度、有機物濃度、溫度、氧化還原等)下，產生之地質礦物岩水反應作用。

107 年度將完成評估鎔(Tc)、碘(I)、銫(Cs)、鈾(U)與釷(Th)等 5 個核種之分配係數(kd)值所需之實驗。

### 6.3.1.3. 預期研究成果

進行本土化離島結晶岩測試區或東部結晶岩測試區深地層環境之重要核種遷移試驗模擬與驗證分析，提供國內功能安全評估之參考。

表 6-1：三維水文地質數值模式輸入參數

General I.C. and B.C. (Assume no flow boundary condition @ the left and bottom boundaries)					
Item		Data range		Reference value	
Temperature @ water table (°C)		23.4 to 23.9		23.5	
Thermal gradient (°C/100 m)		1.5 to 1.8		1.7	
Pressure @ surface (Pa)		NA		$1.01 \times 10^5$	
Ave. Precipitation rate (mm/yr)		650 to 1650		1080	
Infiltration rate (mm/yr)		-80 to 190		35	
Hydraulic Properties					
Rock and Structure Units	R0 (Regolith)	R1, R2, R3 (Granite mass)	F1 (Taiwushan fault)	F2 (Taiwushan branch fracture)	D0 to D10 (Dyke)
Strike/dip	Thickness=70 m	--	N64E/70N Width=200 m	N80W/50S Width=20 m	N30E/80N Width=100 m per 1000 m
Hydraulic conductivity (m/s)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-11}$
Effective Porosity (%)	10	0.5	0.01	0.015	0.68
Wet heat conductivity ( $W / m \cdot ^\circ C$ )	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0
Specific heat (J / kg·°C)	800	800	800	800	800
Dry density (kg / m <sup>3</sup> )	2000	2750	2600	2600	2750

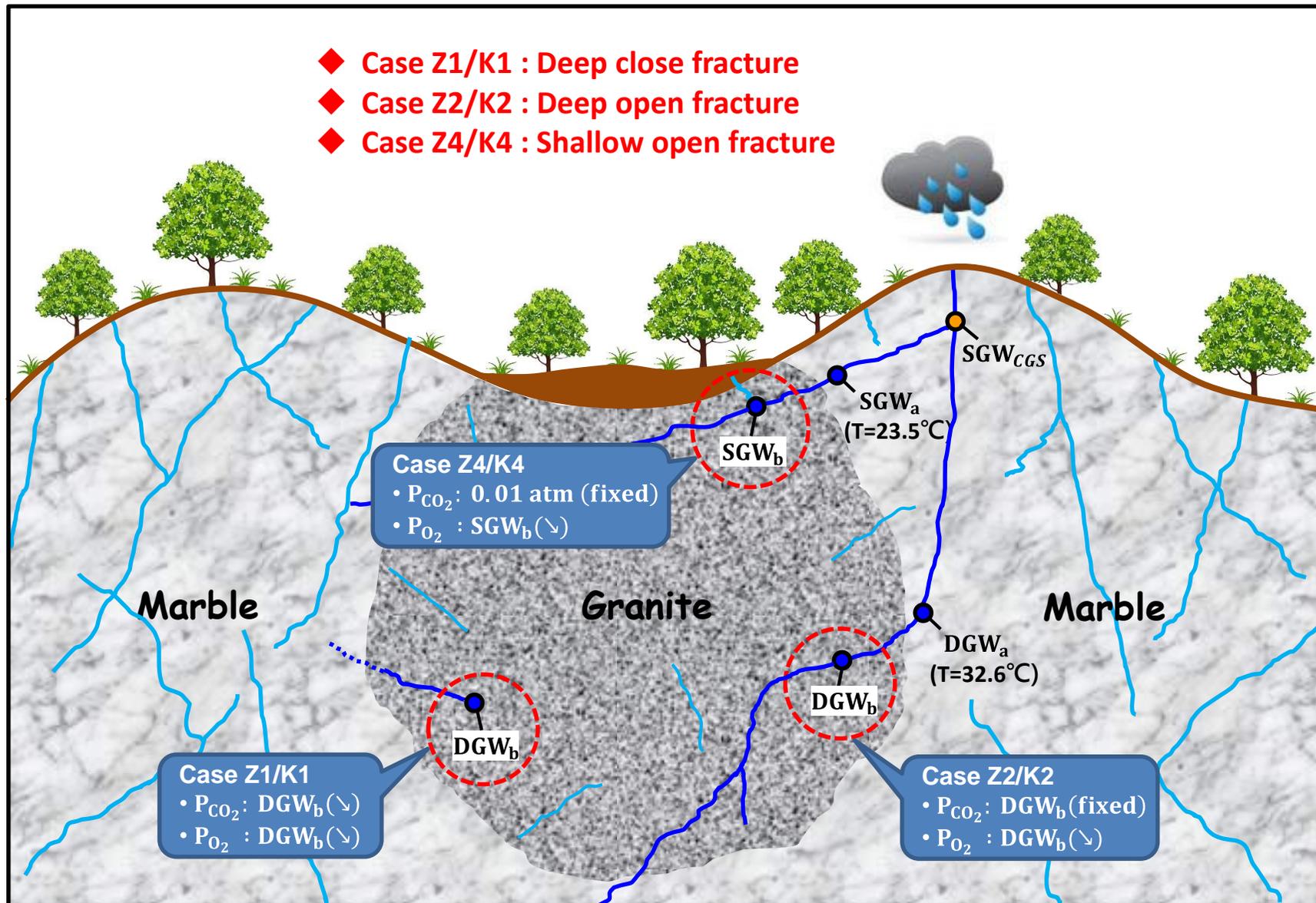


圖 6-1：東部結晶岩體反應路徑模擬情境示意

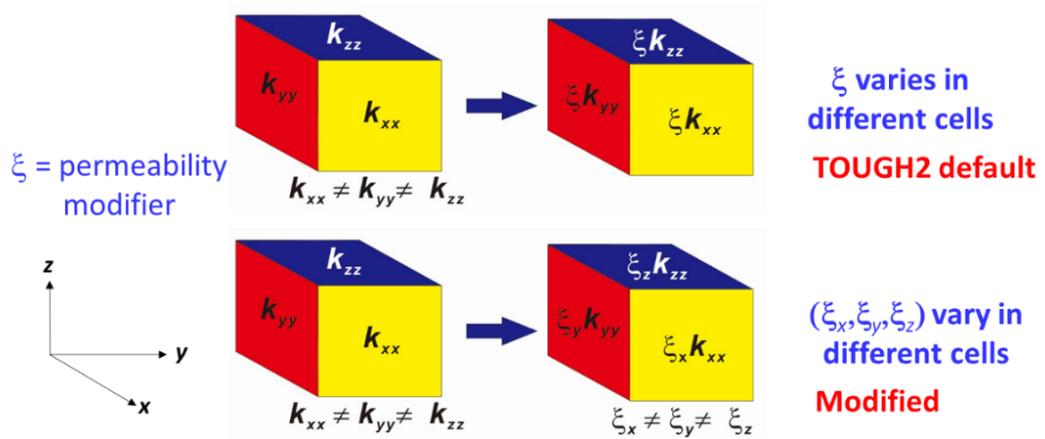


圖 6-2：異質異向性的處理方法

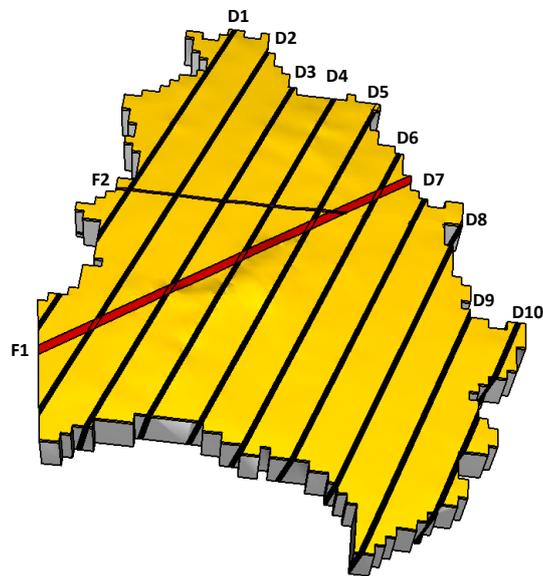


圖 6-3：主要地質單元三維分布圖

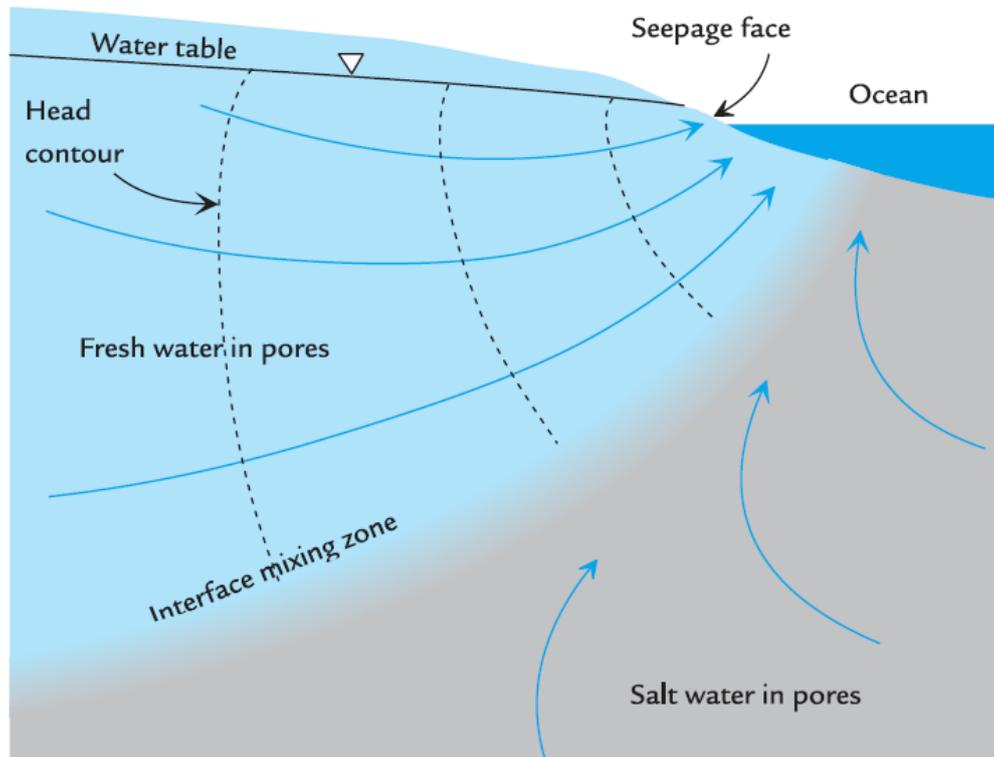


圖 6-4：海水入侵時之地下水流模式

資料來源：摘自 Fitts (2002, p73)

## 7. 參考文獻

- 內政部(1994)，內政部辦理一等、二等衛星控制點測量作業規範，內政部。摘自內政部地政司衛星測量中心網頁，網址：[http://www.gps.moi.gov.tw/satellite/boardfile/GPS\\_spec.pdf](http://www.gps.moi.gov.tw/satellite/boardfile/GPS_spec.pdf)。
- 內政部(2014)，內政部一等水準測量作業規範，內政部。摘自內政部地政司衛星測量中心網頁，網址：[http://www.gps.moi.gov.tw/99056UploadPic/一等水準測量作業規範\\_第3版.pdf](http://www.gps.moi.gov.tw/99056UploadPic/一等水準測量作業規範_第3版.pdf)。
- 台電公司(2010)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告，台灣電力公司，共 758 頁。
- 台電公司(2015)，用過核子燃料最終處置計畫書，2015 年修訂版，台灣電力公司，共 267 頁。
- ASTM D2435-04 (2011), Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, American Society for Testing and Materials, West Conshocken, Pennsylvania, USA.
- Chijimatsu, M., Sugita, Y., and Amemiya, K. (1999), A study on Manufacturing and Construction method of Buffer, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN8400 99-035.
- Fitts, C.E. (2002), Groundwater science, ISBN: 0122578554, Elsevier Science.
- Fogler, H. S. (1992), Elements of chemical reaction engineering, 2nd edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Hwang, C., Guo, J., Deng, X., Hsu, H.Y., Liu, Y. (2006), Coastal gravity anomaly from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data, Journal of Geodesy, Vol. 80, Issue 4, pp. 204-216. (doi:10.1007/s00190-062-0052-x)
- IAEA (2010), Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Series, No. SSG-9, IAEA, Vienna.

- IAEA (2012), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Series No. SSG-23, IAEA, Vienna.
- JNC (2000), H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basics for HLW Disposal in Japan, Project Overview report, JNC TN1410-2000-001
- Kanamori, H. and D. L. Anderson. (1975), Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bulletin of the Seismological Society of America 65(5), pp. 1073-1095.
- Morimasa N., Yuya S., Kenji T., and Mikazu Y. (2008). Experimental study on the effects of fault movement on the engineered barrier system. Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering, USA.
- OECD (2009), Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock. Workshop Proceedings Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007. NEA No. 6362.
- OECD (2012), Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, NEA No. 6923
- Quintessa Limited (2013), AMBER 5.7 Reference Guide, QE-AMBER-1, Version 5.7
- Schwartz, M. L. (2005), Encyclopedia of Coastal Science, Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 1-1086.
- Selroos, J.-O., Vidstrand, P., Follin, S., Ferry, M. (2016). Hydrogeological modelling of K-area, Taiwan, using a DFN approach, SKB International Report 192 (TPC 7), Prepared for TPC by SKB International AB, Sweden, pp. 1-172.
- SKB (2001), Design, production and initial state of the buffer, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-02-12.
- SKB (2003), The Buffer and Backfill Handbook Part 3: Models for calculation of processes and behavior, SKB, TR-03-07.
- SKB (2010), Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB, TR-10-16.

- SKB (2011a), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main Report of the SR-Site project, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Report, Technical Report TR-11-01.
- SKB (2011b), Effects of earthquake induced rock shear on containment system integrity, SKB, R-11-21.
- Vignudelli, S., Cipollini, P., Roblou, L., Lyard, F., Gasparini, G.P., Manzella, G.M.R., Astraldi, M. (2005), Improved satellite altimetry in coastal systems: case study of the Corsica Channel, Mediterranean Sea, *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L07608, pp.1-5. (doi:10.1029/2005GL22602)
- Wunsch, C., and Stammer, D. (1997), Atmospheric loading and the oceanic “inverted barometer” effect, *Reviews of Geophysics*, Vol 35, pp. 79–107.
- Yen, Y. T. and K. F. Ma (2011), Source-scaling relationship for M 4.6–8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(2), pp. 464-481.