

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安全評估  
關鍵議題初步探討

計畫編號：100FCMA007

執行單位：行政院原子能委員會核能研究所

計畫主持人：張福麟

報告日期：中華民國一〇〇年十一月



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安全評估  
關鍵議題初步探討

協同研究人員：童琮樟





## 中文摘要

我國低放射性廢棄物最終處置計畫目前已選定二處建議候選場址，後續將進行公投、環境影響評估等法定程序。此二處潛在場址適用之處置概念為坑道式處置。原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)作為執照申請之審查機關，因應業務研發需求，爰委請原子能委員會核能研究所(以下簡稱核研所)進行「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」計畫，期程自民國 100 年 5 月 2 日起至 11 月 30 日止，共 6 個月

本研究工作依據契約書完成(1)國際間低放射性廢棄物坑道處置安全評估之案例研究；(2)安全評估之重要參數研究；(3)安全評估有關工程障壁及地質障壁之關鍵議題研議。相關成果可提供物管局進行低放射性廢棄物處置安全評估報告審查作業之依據，及提供物管局規劃未來低放處置管制研究發展方向之參考。

關鍵字：低放射性廢棄物、坑道處置、安全評估

## ABSTRACT

The two proposed sites have selected for low-level radioactive waste (LLW) final disposal sites in Taiwan. Based on the follow-up schedule, the referendum and environmental impact assessment will execute positively. Tunnel disposal is an appropriate conception for this two potential sites. Fuel Cycle and Materials Administration (FCMA) is a competent authority which to examine the licence application. To match up the professional work development, Institute of Nuclear Energy Research (INER) is commissioned to execute the plan “*Preliminary Study of Key Topic for Low-Level Radioactive Waste Tunnel Disposal Safety Assessment*” by FCMA. The schedule for this plan starts at May 2, 2011 and continues through November 30, 2011.

The achievements of this study includes follows: (1) study the international repository case for LLW tunnel disposal; (2) analysis the parameters for safety assessment; and (3) propose the key topic of engineered barrier system and geologic barrier system for safety assessment of LLW final disposal. These can benefits the review work of safety assessment report and further development for the safety of LLW disposal facilities.

Keyword: low-level radioactive waste(LLW), tunnel disposal, safety assessment

# 目錄

中文摘要.....	i
ABSTRACT .....	ii
目錄.....	iii
附圖目錄.....	vi
附表目錄.....	ix
附表目錄.....	ix
<b>1. 前言 .....</b>	<b>1</b>
1.1 計畫目的.....	1
1.2 工作範圍.....	2
1.3 成果效益.....	3
1.4 報告架構.....	3
<b>2. 加拿大中低放 DGR 計畫坑道處置案例研究.....</b>	<b>5</b>
2.1 計畫背景與現況 .....	5
2.1.1 背景 .....	5
2.1.2 期程 .....	11
2.1.3 場址特性 .....	15
2.2 DGR 計畫概念設計階段(2003)之安全評估案例 .....	17
2.2.1 廢棄物存量 .....	20
2.2.2 處置概念 .....	22
2.2.3 地質概念模型 .....	28

2.2.4 情節與傳輸途徑分析 .....	31
2.2.5 安全評估 .....	40
2.3 DGR 計畫執照申請階段(2011)之安全評估案例 .....	49
2.3.1 廢棄物存量 .....	49
2.3.2 處置概念 .....	51
2.3.3 地質概念模型 .....	58
2.3.4 情節與傳輸途徑分析 .....	65
2.3.5 安全評估 .....	73
2.4 安全評估之重要參數研析 .....	78
2.4.1 廢棄物類參數 .....	78
2.4.2 處置場類參數 .....	79
2.4.3 地質圈類參數 .....	80
<b>3.低放坑道處置安全評估關鍵議題之建議.....</b>	<b>81</b>
3.1 低放射性廢棄物坑道處置安全評估之關鍵議題 .....	81
3.2 安全評估關鍵議題於我國處置環境應用之適用性說明 .....	90
3.3 我國低放坑道處置安全評估最優先考量之關鍵議題項目 .....	96
<b>4.計畫管理與技術溝通成果.....</b>	<b>101</b>
4.1 計畫管理.....	101
4.2 技術溝通成果.....	102
<b>5.結論與建議.....</b>	<b>103</b>
5.1 結論.....	103
5.2 建議.....	104
<b>參考文獻.....</b>	<b>105</b>

**附錄一：加拿大 DGR 廢棄物容器.....A-1**

**附錄二：加拿大 DGR 安全評估參數.....B-1**

## 附圖目錄

圖 2.1-1 加拿大 DGR 處置場位置圖 .....	7
圖 2.1-2 WWMF 設施配置圖 .....	8
圖 2.1-3 DGR 地表設施配置圖 .....	9
圖 2.1-4 加拿大核能廢棄物管理方針.....	10
圖 2.1-5 DGR 計畫期程(2005-2018).....	13
圖 2.1-6 DGR 計畫 2012-2019 預計執行工作項目與期程.....	14
圖 2.1-7 DGR 場址俯瞰圖 .....	15
圖 2.1-8 DGR 場址地質剖面圖 .....	16
圖 2.2-1 安全評估在處置場生命週期中的重要性 .....	18
圖 2.2-2 安全評估流程.....	19
圖 2.2-3 處置概念示意圖.....	25
圖 2.2-4 CAGCV 處置概念斷面圖.....	26
圖 2.2-5 DRCV 處置概念圖 .....	27
圖 2.2-6 水文地質概念模型.....	30
圖 2.2-7 安全評估模式建立步驟.....	32
圖 2.2-8 CAGCV 處置概念的湖水外釋情節，近場區域核種傳輸路徑 ....	34
圖 2.2-9 CAGCV 處置概念的湖水外釋情節，遠場區域核種傳輸路徑 ....	35
圖 2.2-10 CAGCV 處置概念的人類入侵情節 .....	35
圖 2.2-11 CAGCV 處置概念的人類入侵情節，核種傳輸路徑 .....	36
圖 2.2-12 DRCV 處置概念的湖水外釋情節，近場區域核種傳輸路徑 .....	37
圖 2.2-13 DRCV 處置概念的湖水外釋情節，遠場區域核種傳輸路徑 .....	38
圖 2.2-14 DRCV-S 及 DRCV-L 概念之場址地下水流示意.....	39

圖 2.2-15 近場區塊模式結構 .....	42
圖 2.2-16 近場區塊模式分析架構 .....	43
圖 2.2-17 CAGCV-T 概念之遠場地下水流動方向 .....	44
圖 2.2-18 CAGCV-T 概念之遠場區塊模式分析架構 .....	45
圖 2.2-19 CAGCV-S 概念之遠場地下水流動方向 .....	46
圖 2.2-20 CAGCV-S 概念之遠場區塊模式分析架構 .....	46
圖 2.2-21 DRCV 概念之遠場區塊模式分析架構 .....	47
圖 2.3-1 DGR 魚骨狀規劃及配置(2009 年版) .....	52
圖 2.3-2 DGR 矩形狀規劃及配置(2011 年版) .....	53
圖 2.3-3 DGR 處置場服務區 .....	54
圖 2.3-4 DGR 處置場廢棄物置放區 .....	54
圖 2.3-5 箱型廢棄物容器堆疊方式 .....	56
圖 2.3-6 裝填樹脂類廢棄物之圓桶型容器並排置放方式 .....	57
圖 2.3-7 斷層構造面調查 .....	59
圖 2.3-8 Bruce 場址周圍之 1985~2010 年間的地震活動性 .....	60
圖 2.3-9 DGR 系列與 US 系列之鑽井位置圖 .....	61
圖 2.3-10 DGR 系列鑽井位置 .....	62
圖 2.3-11 井內自然裂隙頻率調查 .....	62
圖 2.3-12 鑽井探查岩層分布 .....	63
圖 2.3-13 跨井水力試驗之水力傳導度結果 .....	64
圖 2.3-14 DGR 處置場核種傳輸途徑 .....	68
圖 2.3-15 DGR 處置場安全評估之正常演化情節 .....	69
圖 2.3-16 人類入侵情節 .....	70
圖 2.3-17 豎井回填失效情節 .....	71

圖 2.3-18 調查井回填失效情節.....	71
圖 2.3-19 垂直斷層經過情節.....	72
圖 2.3-20 分析程式鏈.....	74
圖 2.3-21 FRAC3DVS-OPG 之模擬流場分布.....	75
圖 2.3-22 T2GGM 之程式架構與功能.....	75
圖 2.3-23 正常演化情節下近場與遠場之區塊串聯.....	76
圖 2.3-24 破壞情節下近場與遠場之區塊串聯.....	76
圖 2.3-25 安全評估之核種活度歷時曲線.....	77
圖 3.1-1 開挖擾動帶及高度破壞帶之界定範圍.....	86
圖 3.2-1 國內坑道處置安全評估之程式鏈.....	95



## 附表目錄

表 2.2-1 預估至 2035 年之 LLW 廢棄物存量.....	21
表 2.2-2 各種處置概念形式在地質技術上之可行性.....	24
表 2.2-3 近場區塊模式設定.....	42
表 2.2-4 CAGCV-T 概念之遠場各區塊尺寸設定.....	44
表 2.2-5 CAGCV-S 概念之遠場各區塊尺寸設定.....	45
表 2.2-6 DRCV 概念之遠場各區塊尺寸設定.....	47
表 2.2-7 安全評估結果.....	48
表 2.3-1 預估至 2062 年之 L&ILW 廢棄物存量.....	50
表 2.3-2 置放室規劃及廢棄物種類.....	55
表 2.3-3 置放室設計尺寸.....	55
表 3.1-1 關鍵議題分類說明.....	82
表 3.3-1 安全評估關鍵議題優先順序.....	99



# 1. 前言

## 1.1 計畫目的

行政院原子能委員會核能研究所(以下簡稱核研所)為配合行政院原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)之業務研發需求，接受委託執行「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」(以下簡稱本計畫)。計畫期程自民國 100 年 5 月 2 日起至民國 100 年 11 月 30 日止，共計六個月。計畫目的在於依據物管局的構想與需求，進行低放射性廢棄物坑道處置安全評估之國外案例研究與經驗回饋，並對安全評估中關鍵議題進行研析，提供物管局作為檢討精進低放處置安全法規或審查導則之依據及規劃未來低放處置管制研究發展方向之參考。

本計畫工作項目如下：

### (1) 國外低放射性廢棄物坑道處置安全評估之案例研究：

彙整國外低放射性廢棄物坑道處置方式(如：加拿大坑道處置計畫)國家安全評估報告之案例研究，含處置時程、場址特性描述、情節模擬、安全評估架構及結果等。

### (2) 低放射性廢棄物坑道處置安全評估案例重要參數研析：

針對前項坑道處置案例之安全評估報告中進行參數分析，提出重要參數之研析結果。

### (3) 國外案例之工程障壁與地質障壁關鍵議題整理：

針對前項坑道處置案例之安全評估報告，對於工程障壁與地質障壁之關鍵議題進行研析，其中工程障壁系統包含：廢棄物存量與特性、關鍵核種、處置場配置尺寸、及評估模式與結果等；地質障壁系統包括場址特性描述、水文地質模型、及評估模式與結果等。

#### (4) 研究成果報告撰寫：

於 100 年 10 月底前完成「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」成果報告初稿一冊，送物管局審查，續依審查意見完成報告修訂。

### 1.2 工作範圍

- (1) 文獻彙整與分析：彙整國外低放射性廢棄物坑道處置方式(如：加拿大坑道處置計畫)國家安全評估報告之案例研究，加拿大規劃之處置時程中，2003 年為概念設計階段，針對處置概念研擬及初步安全評估等項目，共計 2 冊國家報告；2011 年為執照申請階段，在確認處置場概念及場址特性後，進行封閉後安全分析報告，共計 9 冊國家報告。加拿大之安全評估報告內容完整含括處置時程、場址特性描述、廢棄物特性、情節模擬、工程障壁及地質圈概念模型、安全評估架構及評估結果等，具有參考的價值。
- (2) 案例研究：配合計畫需求，就前述彙整之資料，分析加拿大坑道處置安全評估審查相關重點摘述與整合分析，並歸納國際經驗回饋於我國實際應用，研擬安全評估審查之關鍵議題。
- (3) 雙方技術研討與溝通：計畫執行期間，核研所執行計畫人員與物管局業務負責人密切聯繫進行互動，藉由每月舉辦之雙方討論會議，以確保計畫執行成果符合委託單位之需求。
- (4) 報告撰寫：針對案例研究成果中提出對我國之低放射性廢棄物坑道處置安全評估之關鍵議題，撰寫為計畫報告，提送物管局審查後修訂定稿。

### 1.3 成果效益

本報告成果對物管局執行低放射性廢棄物坑道處置場安全評估之管制工作有以下的實質效益：

- (1) 若經濟部選址小組依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」規定順利選出處置場址，則處置設施經營者於將針對坑道式處置場進行場址特性調查，得到相關參數已進行安全評估，屆時物管局將依法展開處置場安全評估報告之審查作業，本報告有助於物管局順利推展該審查任務。
- (2) 本報告以加拿大在執行中低放射性廢棄物最終處置之成功案例，據以分析在概念設計階段及執照申請階段兩個重要時程的安全評估報告之差異性，從中探討低放射性廢棄物坑道處置安全評估之關鍵議題，提供物管局作為檢討精進低放處置安全法規或審查導則之依據及規劃未來低放處置管制研究發展方向之參考。
- (3) 相關資訊彙整成果與研究心得，可提供物管局執行低放射性廢棄物處置計畫管制之科學技術基準，提升管制之品質與信心。

### 1.4 報告架構

本成果報告第 1 章為前言，說明計畫目的、工作範圍、研究方法、計畫成果效益等；第 2 章為加拿大中低放射性廢棄物坑道處置計畫之案例研究，內容分別敘述加拿大之處置計畫背景、期程與場址現況，及兩個重要階段之安全評估成果，例如廢棄物存量、處置概念、地質概念模型、情節與傳輸途徑分析、安全評估及重要參數等；第 3 章為低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題之探討，援引加拿大在坑道處置安全評估之成功經驗，提出在安全評估報告之關鍵議題，及探討在我國處置環境應用之適用

性，提出我國低放坑道處置最優先考量之關鍵議題項目；第 4 章為說明計畫管理與技術溝通成果，說明計畫執行期間核研所與物管局技術交流成效；第 5 章為報告結論與建議。

## 2. 加拿大中低放 DGR 計畫坑道處置案例研究

### 2.1 計畫背景與現況

#### 2.1.1 背景

加拿大依據核能安全管制法(Nuclear Safety and Control Act)，於 2000 年成立加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)，其任務導向為延續 1946 年成立的原子能管制局(Atomic Energy Control Board, AECB)之業務，為原子能管制、廢棄物管理、與相關法規制定之主管機關。CNSC 站在管制單位的立場，目的在於保護環境、加拿大居民的健康及安全，並履行加拿大和平地運用核能的國際義務，主要負責監管加拿大的核能產業、核燃料及核廢棄物之運用。

加拿大核廢棄物管理機構(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)為依據 2002 年 11 月 15 日生效之「An Act Respecting the Long-Term Management of Nuclear Fuel Waste, NWFA」，而成立之核能廢棄物管理專責機構及負責基金運用。

CNSC 的廢棄物管理策略為要求廢棄物擁有者與管理設施運轉者依法負責廢棄物安全管理之責任。而安大略電力公司(Ontario Power Generation, OPG)為加拿大主要核能電廠之營運公司，擁有 Pickering、Bruce、Darlington 三座核能電廠，合計 20 部重水式反應機組，其中 Bruce A 與 Bruce B 電廠均位於安大略省布魯斯郡(Bruce)。

為了管理這三座核能電廠產生的中低放射性廢棄物(Low and Intermediate Level Radioactive Waste, L&ILW)，OPG 與 Kincardine 市政府針

對 L&ILW 最終處置計畫有簽署合作協議，在 Bruce 核能電廠西部設置西部廢棄物管理設施(Western Waste Management Facility, WWMF)，地理位置圖如圖 2.1-1，鄰近休倫湖(Huron Lake)，整個 WWMF 設施配置如圖 2.1-2，圖中編號 1、4、5、6、7、8 主要作為廢棄物貯存設施，編號 2 為廢棄物體積減容設施，編號 3 為運輸護箱維修與保養處，編號 9 則為最終處置場址，計畫以深層地質處置場(Deep Geologic Repository, DGR)型式作為 L&ILW 之最終處置，整個處置場地表設施配置如圖 2.1-3，規劃有主要豎井井架(Main Shaft Headframe)及通風豎井井架(Ventilation Shaft Headframe)與地下處置場連通，在主要豎井旁邊則設有廢棄物包裝容器接收廠房(Waste Packing Receiving Building)及壓縮室(Compressor Room)等。

加拿大針對核能電廠產生的廢棄物有其管理方針(如圖 2.1-4)，核能廢棄物依型態分為維修過程產生的廢棄物(Maintenance Wastes)、經處理過的廢棄物(Process Wastes)、及用過核燃料(Used Fuel)，其中前兩者多屬於中低階放射性，經過貯存後即送至 OPG 之 WWMF 進行最終處置；用過核燃料則在經過濕式貯存(Wet Storage)後送至 NWMO 最終處置設施。





圖 2.1-1 加拿大 DGR 處置場位置圖



圖 2.1-2 WWMF 設施配置圖

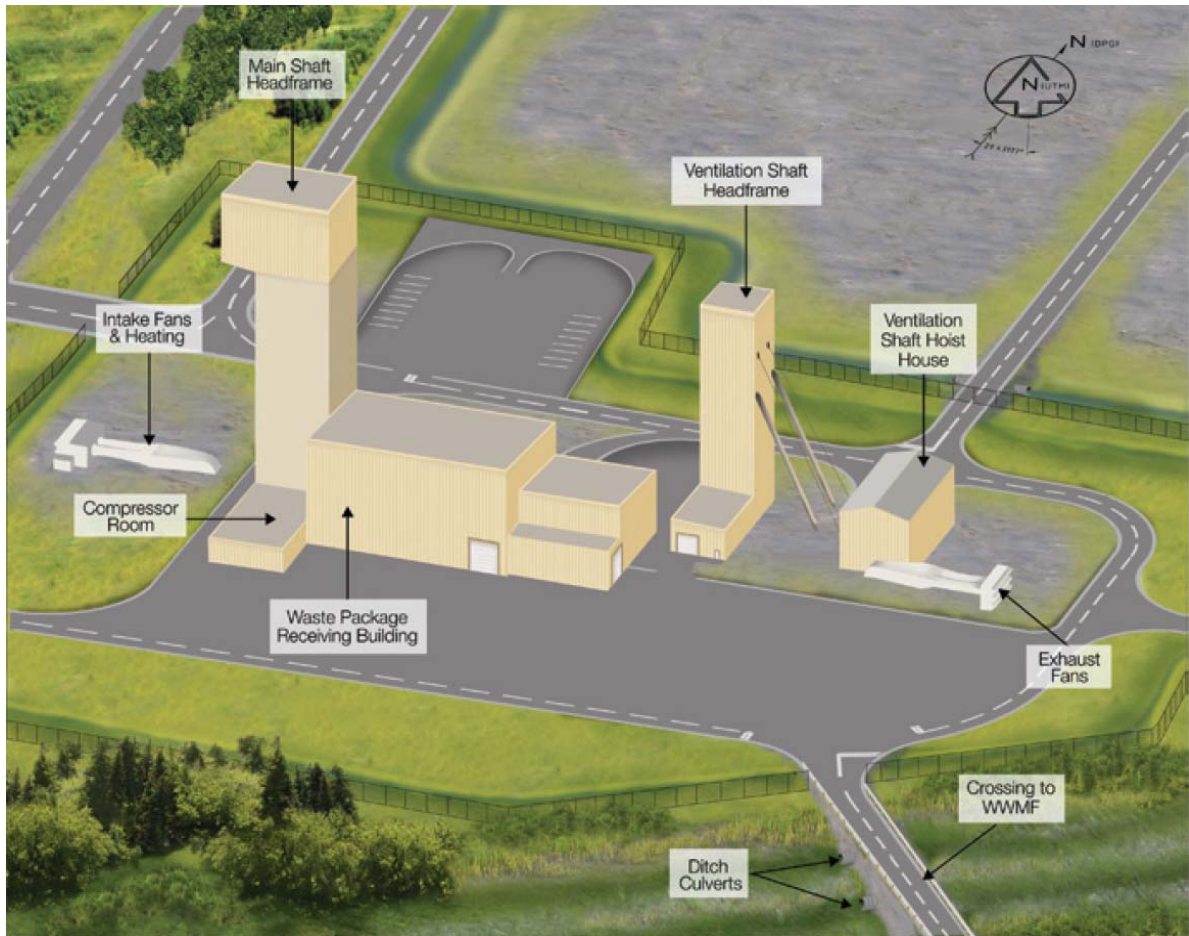


圖 2.1-3 DGR 地表設施配置圖

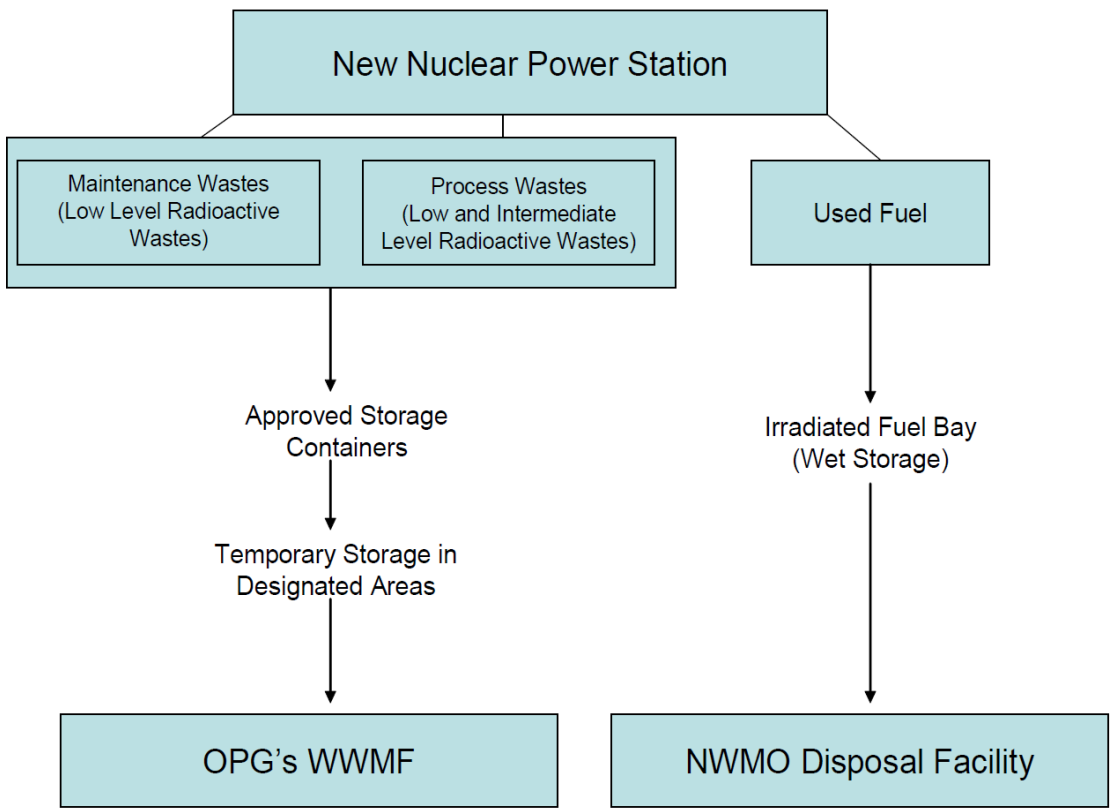


圖 2.1-4 加拿大核能廢棄物管理方針

### 2.1.2 期程

OPG 為主要執行 DGR 計畫的單位，並結合各顧問公司如 Golder Associates Ltd.、Quintessa Ltd.、Gartner Lee Ltd.、INTERA Engineering Ltd.、Itasca Consulting Ltd.、Hatch Ltd. 等、及各大學院校如 University of Waterloo、University of Toronto 等之專責研究及場址調查之人員通力合作。期程始於 1998 年，由 Golder Associates 提出一般性處置概念設計，2001 年時，Kincardine 市政府提出在 Bruce 核電廠內設置 L&ILW 長期管理設施之可行性評估，2002 年 4 月 Kincardine 市政府與 OPG 簽訂備忘錄(Memorandum of Understanding)，整個 DGR 計畫訂於 2003 年時為概念設計階段，以假設場址位置及處置場概念為基礎，進行概念設計階段之安全評估(Golder Associates Ltd., 2003)，而後 Golder Associates Ltd. 於 2004 年針對工程技術可行性、安全與執照許可可行性、經濟可行性進行研究，並公布公眾意願調查結果(Golder Associates Ltd., 2004)；Gartner Lee Ltd. 也於 2004 年做過獨立的經濟可行性與社會接受度分析(Gartner Lee Ltd., 2004)；OPG 及 Kincardine 市政府簽署有關於 DGR 計畫之合作協議(Ontario Power Generation, 2004)，並公布整個 DGR 計畫的時程與階段性目標；而 The Strategic Counsel 在 2005 年向 Kincardine 市政府說明公眾意願調查結果，在年滿 18 歲的 6778 位公民內，支持在 WWMF 設置 L&ILW 處置場的比例為 60%，反對者的比例有 22%，中立者有 13%，不知道或拒絕調查者有 5% (The Strategic Counsel, 2005)。據此於 2006 年時決議將 ILW 納入 DGR 內，並陸續在 2009 年針對環境評估(Environmental Assessment, EA)提出報告，及完成第一版安全分析案例(Garisto et al., 2009)，2010 年並已完成初步設計報告(Hatch Ltd., 2010)及第二版安全分析案例，2011 年為執照申請階段，已完成封閉前安全評估

報告(Postclosure Safety Assessments)及環境衝擊評估報告(Environmental Impact Statement, EIS)，並提送審查，期望於 2012 年取得建造執照 (Construction Licence)，於 2018 年完成建造後能順利運轉開始接收廢棄物(圖 2.1-5)。

2012 至 2019 年間工作項目主要在於處置場建造的同時，持續進行場址特性調查工作(圖 2.1-6)，並希望能獲得處置場內更為詳細的資料。

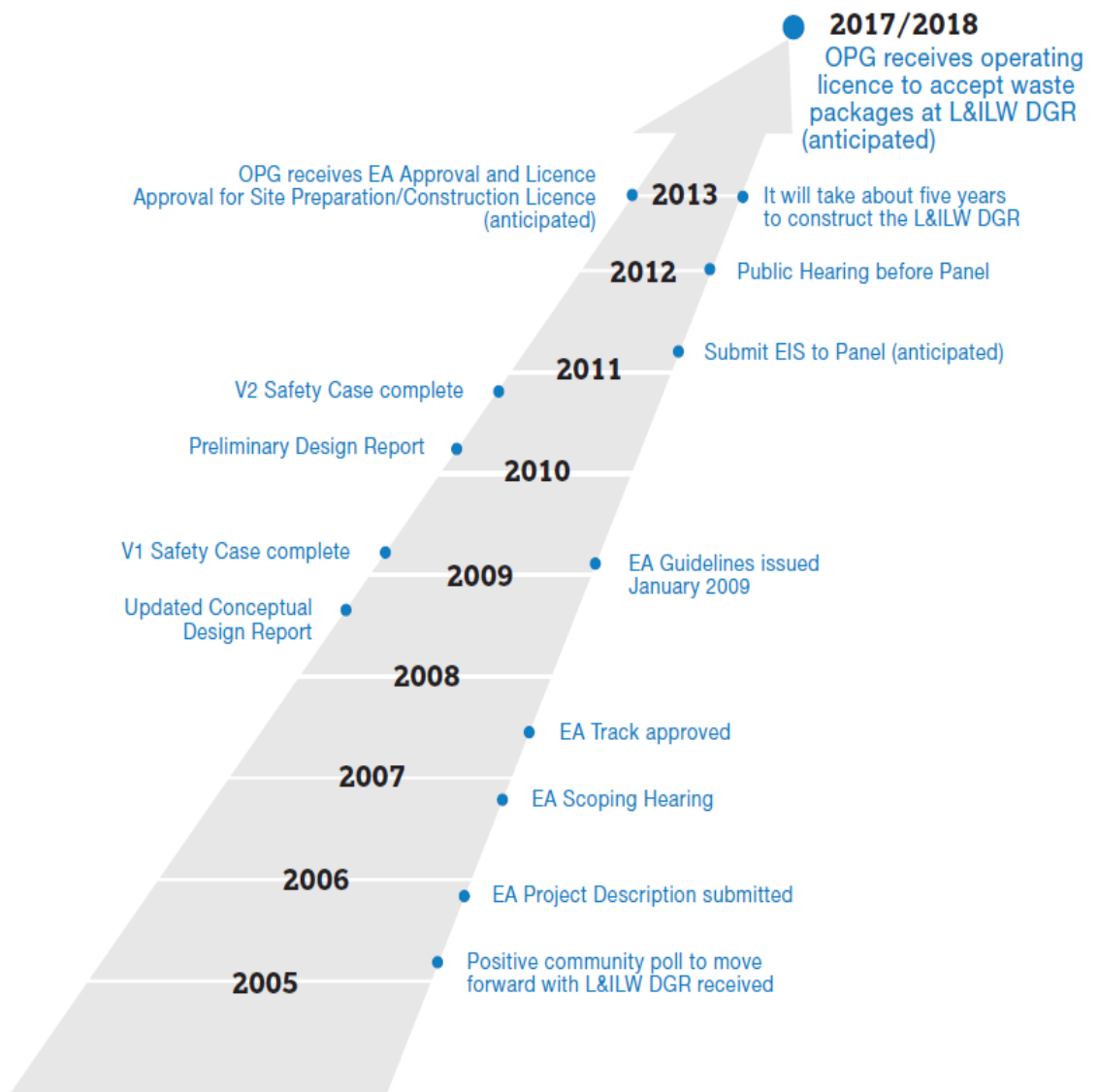


圖 2.1-5 DGR 計畫期程(2005-2018)



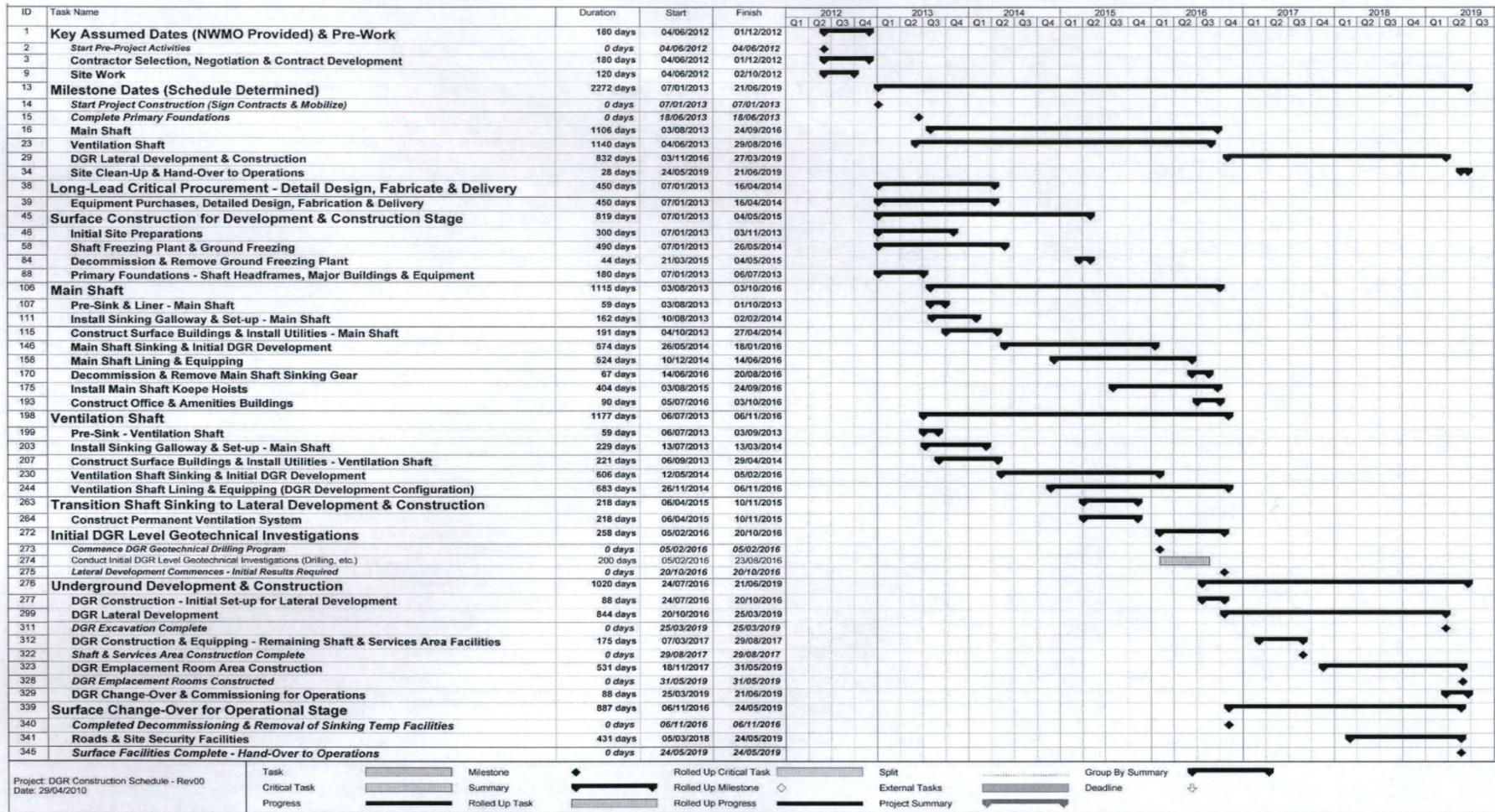


圖 2.1-6 DGR 計畫 2012-2019 預計執行工作項目與期程



### 2.1.3 場址特性

加拿大安大略省西南部為古生代沉積岩，沉積岩地質分層為平坦，西南部局部區域出現下沉，東南部邊緣區域受到阿拉帕契山脈的沉降作用，東北部岩石與密西根盆地屬前寒武紀結晶岩層，密西根盆地累積的沉積岩層厚度超過 4 km，多為海洋沉積物。

DGR 預計設置在 WWMF 區域內，俯瞰圖如圖 2.1-7，場址範圍如圖上點線圍成區域。



圖 2.1-7 DGR 場址俯瞰圖

由深達 845 m 之鑽孔探測及岩心資料判釋結果顯示，其由上至下之地層組成可分(圖 2.1-8)：

- (1) 地表至 105 m 深處：為泥盆紀石灰岩(Devonian Dolostones)層，或稱含有白雲石的石灰岩(Dolomitic Limestones)；
- (2) 105 m 深至 430 m 深處：為希留利亞紀(Silurian)石灰岩及頁岩(Shale)層；
- (3) 430 m 深至 830 m 深處：為奧陶紀(Ordovician)頁岩層；
- (4) 830 m 深至 845 m 深處：為寒武紀砂岩(Cambrian Sandstone)層，並夾雜覆蓋著前寒武紀花崗岩質片麻岩(Precambrian Granitic Gneiss)。

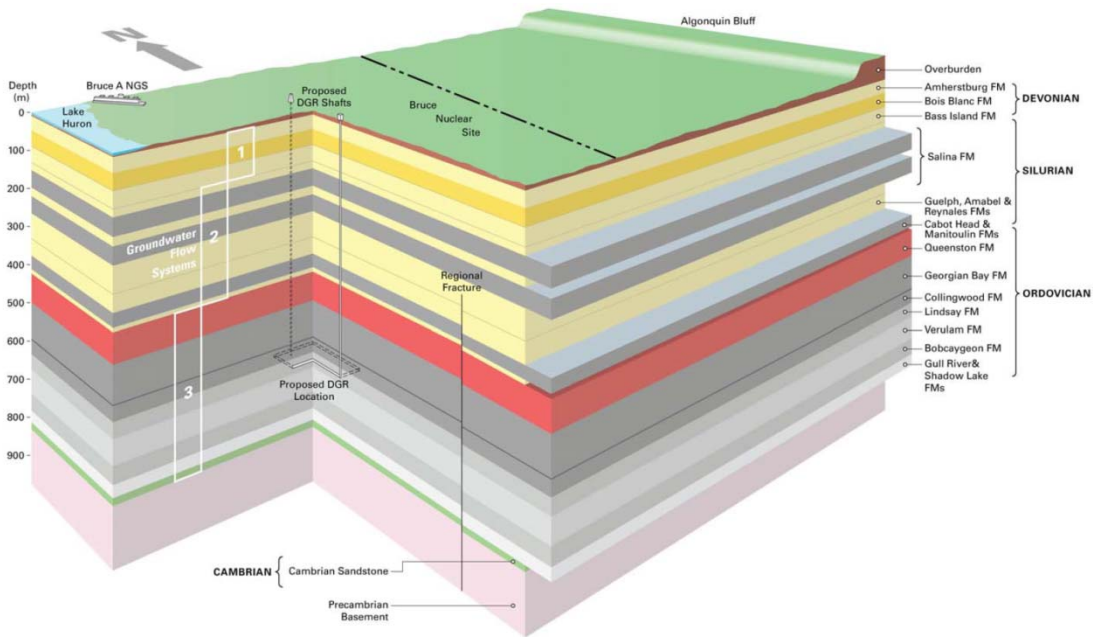


圖 2.1-8 DGR 場址地質剖面圖

## 2.2 DGR 計畫概念設計階段(2003)之安全評估案例

處置場之生命週期依序由選址與處置設施設計(或稱為概念設計階段)、處置設施建造、處置設施運轉、處置設施封閉與確認、封閉後監管期、監管後、到場址釋出再利用等階段，安全評估均為重要之項目(圖 2.2-1)，其目的在於利用科學的理論與方法，來描述處置場現地特性，進而評估在處置場歷程中可能發生對人類的危害衝擊。安全評估結果的信賴與否，端視數據資料的可靠性與實用性而定，在各階段中均有其適用於安全評估的資料，從選址與處置設施設計到處置設施建造的階段需要預測的資料、類比的資料、及實驗的資料等；在處置設施建造到處置設施運轉的階段需要測試的資料、施工的資料、及實驗的資料等；在處置設施運轉到處置設施封閉與確認的階段需要運轉期的監測資料及實驗的資料等；在處置設施封閉與確認到封閉後監管期的階段需要封閉後的監測資料及實驗的資料等。

安全評估的整體流程(圖 2.2-2)從界定評估背景、描述處置系統、情節發展與判定、模式建構與工具建立、運跑分析、結果解釋、到與安全標準比較，方能得知安全評估是否合宜，若屬合宜，則可為公眾所接受，若不合宜，則需評估能否有效改善，若可以改善，則回去重新檢視各環節進行修訂，若無法改善，此安全評估項目即遭否決。

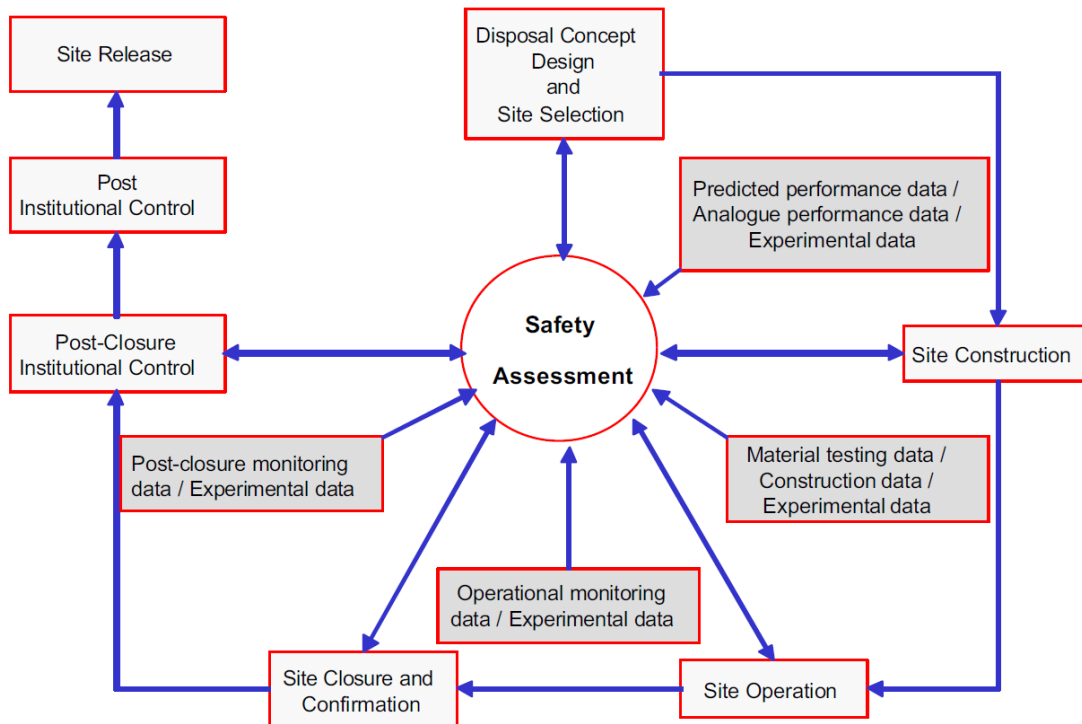


圖 2.2-1 安全評估在處置場生命週期中的重要性

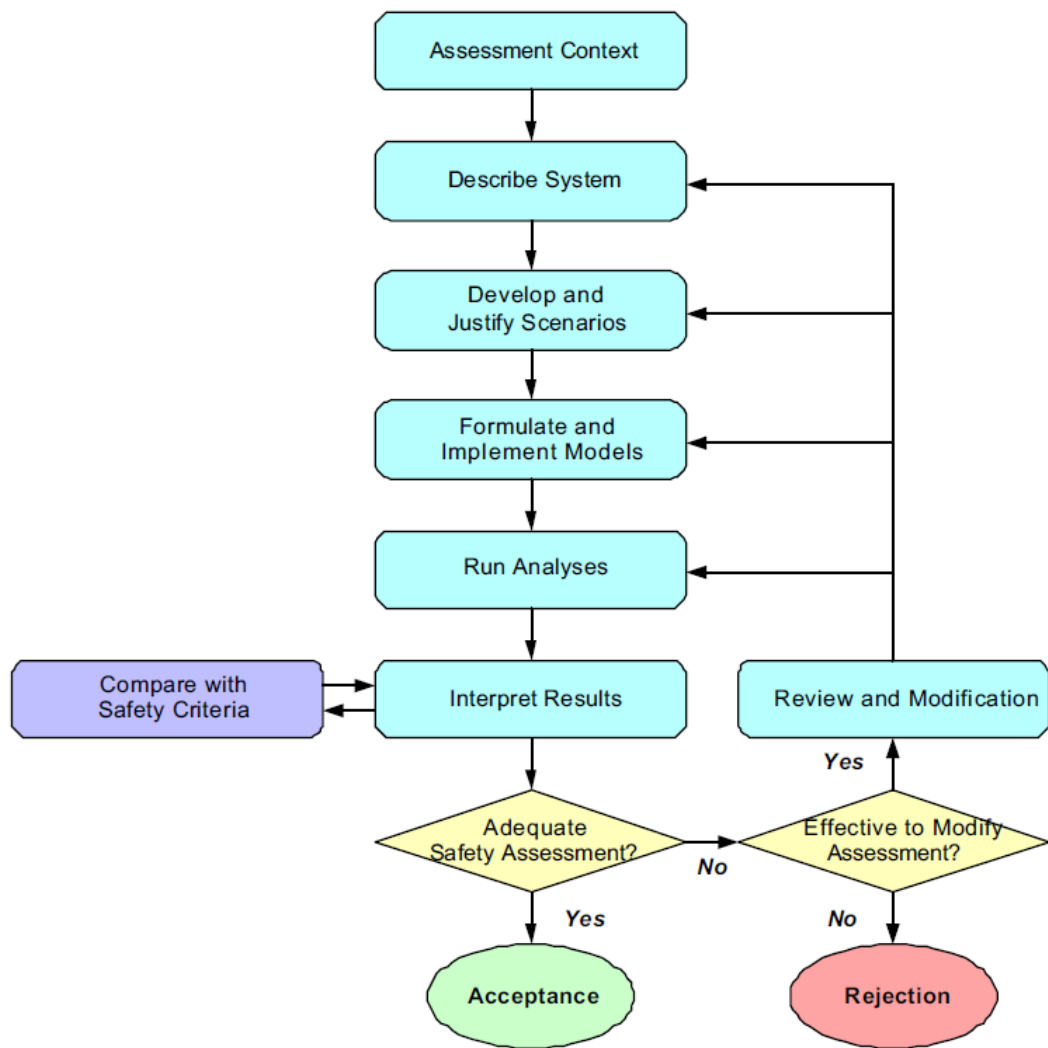


圖 2.2-2 安全評估流程

### 2.2.1 廢棄物存量

概念設計階段僅考慮處置 LLW 為主，廢棄物存量(Waste Inventory)估算為以核能電廠使用年限做考量，分別考量：

- (1)所有核能電廠皆運轉 40 年；
- (2)所有核能電廠皆運轉 25 年等兩類情況

並以能產生較多廢棄物存量與體積之情況(High Volume Scenario)作為保守估算之依據，因此依其核能電廠最後除役時間，其安全評估報告中採用估算期為 2035 年。

總計可能產生之廢棄物型態及裝置容器有箱子裝的底灰(Bottom Ash)、圓桶裝的袋灰(Baghouse Ash)、固化包(Compact Bales)、固化箱(Compact Boxes)，非經處理過之廢棄物裝置於圓筒(Non-pro Drums)、非經處理過之廢棄物裝置於盒箱(Non-pro Boxes)及其它等，經分析後可有 37 個關鍵核種，預估至 2035 年之核種總活度達  $1.3 \times 10^{15}$  Bq (表 2.2-1)。

對於灰燼類的廢棄物，經收集後主要裝置於金屬質箱型容器或圓筒型容器；固化廢棄物則裝置於容量約  $2.5 \text{ m}^3$  之金屬質箱型容器；非經處理過之廢棄物則裝置於金屬質箱型容器或圓筒型容器。

表 2.2-1 預估至 2035 年之 LLW 廢棄物存量

Radio-nuclide	Bottom Ash (bins)	Baghouse Ash (drums)	Compact Bales	Compact Boxes	Non-pro Drums	Non-pro Boxes	Non-pro Other	Total
H-3	5.2x10 <sup>10</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	7.2x10 <sup>13</sup>	9.8x10 <sup>12</sup>	1.4x10 <sup>12</sup>	8.3x10 <sup>12</sup>	5.5x10 <sup>12</sup>	9.7x10 <sup>13</sup>
C-14	1.8x10 <sup>10</sup>	6.5x10 <sup>8</sup>	3.8x10 <sup>9</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>	2.0x10 <sup>10</sup>	1.2x10 <sup>11</sup>	7.8x10 <sup>10</sup>	2.5x10 <sup>11</sup>
Cl-36	4.0x10 <sup>6</sup>	6.1x10 <sup>4</sup>	2.4x10 <sup>6</sup>	6.6x10 <sup>6</sup>	2.5x10 <sup>6</sup>	1.5x10 <sup>7</sup>	9.9x10 <sup>6</sup>	4.0x10 <sup>7</sup>
Fe-55	2.1x10 <sup>12</sup>	3.2x10 <sup>10</sup>	4.3x10 <sup>11</sup>	1.2x10 <sup>12</sup>	6.5x10 <sup>11</sup>	3.8x10 <sup>12</sup>	2.5x10 <sup>12</sup>	1.1x10 <sup>13</sup>
Co-60	3.5x10 <sup>8</sup>	4.8x10 <sup>6</sup>	3.0x10 <sup>7</sup>	8.2x10 <sup>7</sup>	4.7x10 <sup>7</sup>	2.8x10 <sup>8</sup>	1.8x10 <sup>8</sup>	9.7x10 <sup>8</sup>
Ni-59	3.4x10 <sup>11</sup>	5.1x10 <sup>9</sup>	2.0x10 <sup>11</sup>	5.5x10 <sup>11</sup>	2.1x10 <sup>11</sup>	1.2x10 <sup>12</sup>	8.2x10 <sup>11</sup>	3.4x10 <sup>12</sup>
Ni-63	5.0x10 <sup>10</sup>	6.7x10 <sup>8</sup>	4.2x10 <sup>9</sup>	1.2x10 <sup>10</sup>	6.5x10 <sup>9</sup>	3.9x10 <sup>10</sup>	2.5x10 <sup>10</sup>	1.4x10 <sup>11</sup>
Se-79	4.4x10 <sup>5</sup>	2.0x10 <sup>5</sup>	3.3x10 <sup>5</sup>	8.9x10 <sup>5</sup>	7.4x10 <sup>5</sup>	4.4x10 <sup>6</sup>	2.9x10 <sup>6</sup>	9.8x10 <sup>6</sup>
Sr-90	1.1x10 <sup>10</sup>	5.2x10 <sup>8</sup>	4.2x10 <sup>9</sup>	1.1x10 <sup>10</sup>	5.5x10 <sup>9</sup>	3.2x10 <sup>10</sup>	2.1x10 <sup>10</sup>	8.6x10 <sup>10</sup>
Zr-93	4.7x10 <sup>4</sup>	3.7x10 <sup>2</sup>	2.3x10 <sup>4</sup>	6.3x10 <sup>4</sup>	7.9x10 <sup>3</sup>	4.7x10 <sup>4</sup>	3.1x10 <sup>4</sup>	2.2x10 <sup>5</sup>
Nb-94	2.8x10 <sup>9</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	2.5x10 <sup>9</sup>	6.9x10 <sup>9</sup>	5.3x10 <sup>8</sup>	3.1x10 <sup>9</sup>	2.1x10 <sup>9</sup>	1.8x10 <sup>10</sup>
Tc-99	1.6x10 <sup>7</sup>	7.5x10 <sup>6</sup>	1.2x10 <sup>7</sup>	3.3x10 <sup>7</sup>	2.7x10 <sup>7</sup>	1.6x10 <sup>8</sup>	1.1x10 <sup>8</sup>	3.7x10 <sup>8</sup>
Ru-106	7.5x10 <sup>10</sup>	2.0x10 <sup>9</sup>	1.5x10 <sup>11</sup>	4.0x10 <sup>11</sup>	3.3x10 <sup>9</sup>	2.0x10 <sup>10</sup>	1.3x10 <sup>10</sup>	6.6x10 <sup>11</sup>
Ag-108m	1.3x10 <sup>6</sup>	6.0x10 <sup>5</sup>	9.8x10 <sup>5</sup>	2.7x10 <sup>6</sup>	2.2x10 <sup>6</sup>	1.3x10 <sup>7</sup>	8.6x10 <sup>6</sup>	3.0x10 <sup>7</sup>
Sb-125	3.3x10 <sup>10</sup>	5.1x10 <sup>9</sup>	3.5x10 <sup>10</sup>	9.5x10 <sup>10</sup>	6.3x10 <sup>9</sup>	3.7x10 <sup>10</sup>	2.5x10 <sup>10</sup>	2.4x10 <sup>11</sup>
Sn-126	6.8x10 <sup>5</sup>	3.1x10 <sup>5</sup>	5.0x10 <sup>5</sup>	1.4x10 <sup>6</sup>	1.1x10 <sup>6</sup>	6.7x10 <sup>6</sup>	4.4x10 <sup>6</sup>	1.5x10 <sup>7</sup>
I-129	3.7x10 <sup>4</sup>	1.7x10 <sup>4</sup>	2.7x10 <sup>4</sup>	7.4x10 <sup>4</sup>	6.2x10 <sup>4</sup>	3.7x10 <sup>5</sup>	2.4x10 <sup>5</sup>	8.2x10 <sup>5</sup>
Cs-134	1.6x10 <sup>10</sup>	6.3x10 <sup>9</sup>	1.7x10 <sup>10</sup>	4.5x10 <sup>10</sup>	1.3x10 <sup>10</sup>	7.9x10 <sup>10</sup>	5.2x10 <sup>10</sup>	2.3x10 <sup>11</sup>
Cs-135	1.3x10 <sup>5</sup>	5.9x10 <sup>4</sup>	9.6x10 <sup>4</sup>	2.6x10 <sup>5</sup>	2.2x10 <sup>5</sup>	1.3x10 <sup>6</sup>	8.5x10 <sup>5</sup>	2.9x10 <sup>6</sup>
Cs-137	1.3x10 <sup>11</sup>	5.7x10 <sup>10</sup>	9.3x10 <sup>10</sup>	2.5x10 <sup>11</sup>	2.1x10 <sup>11</sup>	1.2x10 <sup>12</sup>	8.2x10 <sup>11</sup>	2.8x10 <sup>12</sup>
Sm-151	4.4x10 <sup>5</sup>	2.0x10 <sup>5</sup>	3.3x10 <sup>5</sup>	8.9x10 <sup>5</sup>	7.4x10 <sup>5</sup>	4.4x10 <sup>6</sup>	2.9x10 <sup>6</sup>	9.8x10 <sup>6</sup>
Eu-152	0.0x10 <sup>0</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	2.1x10 <sup>8</sup>	1.2x10 <sup>9</sup>	8.2x10 <sup>8</sup>	2.3x10 <sup>9</sup>
Eu-154	5.8x10 <sup>9</sup>	3.1x10 <sup>8</sup>	5.6x10 <sup>9</sup>	1.5x10 <sup>10</sup>	2.3x10 <sup>8</sup>	1.4x10 <sup>9</sup>	8.9x10 <sup>8</sup>	2.9x10 <sup>10</sup>
Eu-155	1.3x10 <sup>9</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	1.2x10 <sup>9</sup>	3.2x10 <sup>9</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	0.0x10 <sup>0</sup>	5.7x10 <sup>9</sup>
U-234	2.9x10 <sup>5</sup>	1.1x10 <sup>4</sup>	3.2x10 <sup>5</sup>	8.7x10 <sup>5</sup>	8.2x10 <sup>4</sup>	4.9x10 <sup>5</sup>	3.2x10 <sup>5</sup>	2.4x10 <sup>6</sup>
U-235	4.8x10 <sup>3</sup>	1.7x10 <sup>2</sup>	5.2x10 <sup>3</sup>	1.4x10 <sup>4</sup>	1.3x10 <sup>3</sup>	7.9x10 <sup>3</sup>	5.2x10 <sup>3</sup>	3.9x10 <sup>4</sup>
U-236	5.4x10 <sup>4</sup>	2.0x10 <sup>3</sup>	5.9x10 <sup>4</sup>	1.6x10 <sup>5</sup>	1.5x10 <sup>4</sup>	9.0x10 <sup>4</sup>	6.0x10 <sup>4</sup>	4.4x10 <sup>5</sup>
U-238	3.6x10 <sup>5</sup>	1.3x10 <sup>4</sup>	4.0x10 <sup>5</sup>	1.1x10 <sup>6</sup>	1.0x10 <sup>5</sup>	6.0x10 <sup>5</sup>	4.0x10 <sup>5</sup>	3.0x10 <sup>6</sup>
Np-237	2.7x10 <sup>4</sup>	9.8x10 <sup>2</sup>	3.0x10 <sup>4</sup>	8.2x10 <sup>4</sup>	7.7x10 <sup>3</sup>	4.6x10 <sup>4</sup>	3.0x10 <sup>4</sup>	2.2x10 <sup>5</sup>
Pu-238	1.0x10 <sup>8</sup>	4.3x10 <sup>6</sup>	1.2x10 <sup>8</sup>	3.4x10 <sup>8</sup>	2.2x10 <sup>7</sup>	1.3x10 <sup>8</sup>	8.4x10 <sup>7</sup>	8.1x10 <sup>8</sup>
Pu-239	1.8x10 <sup>8</sup>	6.4x10 <sup>6</sup>	2.0x10 <sup>8</sup>	5.3x10 <sup>8</sup>	5.0x10 <sup>7</sup>	3.0x10 <sup>8</sup>	2.0x10 <sup>8</sup>	1.5x10 <sup>9</sup>
Pu-240	2.6x10 <sup>8</sup>	9.2x10 <sup>6</sup>	2.8x10 <sup>8</sup>	7.7x10 <sup>8</sup>	7.2x10 <sup>7</sup>	4.3x10 <sup>8</sup>	2.8x10 <sup>8</sup>	2.1x10 <sup>9</sup>
Pu-241	2.4x10 <sup>10</sup>	8.5x10 <sup>8</sup>	2.6x10 <sup>10</sup>	7.1x10 <sup>10</sup>	6.7x10 <sup>9</sup>	4.0x10 <sup>10</sup>	2.6x10 <sup>10</sup>	1.9x10 <sup>11</sup>
Pu-242	2.5x10 <sup>8</sup>	1.2x10 <sup>7</sup>	3.7x10 <sup>8</sup>	1.0x10 <sup>9</sup>	8.7x10 <sup>7</sup>	5.2x10 <sup>8</sup>	3.4x10 <sup>8</sup>	2.6x10 <sup>9</sup>
Am-241	2.6x10 <sup>5</sup>	9.4x10 <sup>3</sup>	2.9x10 <sup>5</sup>	7.8x10 <sup>5</sup>	7.3x10 <sup>4</sup>	4.3x10 <sup>5</sup>	2.9x10 <sup>5</sup>	2.1x10 <sup>6</sup>
Am-243	5.7x10 <sup>5</sup>	2.0x10 <sup>4</sup>	6.2x10 <sup>5</sup>	1.7x10 <sup>6</sup>	1.6x10 <sup>5</sup>	9.5x10 <sup>5</sup>	6.3x10 <sup>5</sup>	4.7x10 <sup>6</sup>
Cm-244	1.1x10 <sup>8</sup>	7.8x10 <sup>6</sup>	2.4x10 <sup>8</sup>	6.5x10 <sup>8</sup>	2.7x10 <sup>7</sup>	1.6x10 <sup>8</sup>	1.1x10 <sup>8</sup>	1.3x10 <sup>9</sup>
Total	3.9x10 <sup>12</sup>	1.2x10 <sup>11</sup>	7.3x10 <sup>13</sup>	1.5x10 <sup>13</sup>	1.2x10 <sup>14</sup>	6.8x10 <sup>14</sup>	4.5x10 <sup>14</sup>	1.3x10 <sup>15</sup>

## 2.2.2 處置概念

概念設計階段之處置概念發展曾考慮以下幾種(圖 2.2-3)：

- (1)地表混凝土窖(Covered Above Grade Concrete Vault , CAGCV)上有覆蓋層；
- (2)地表混凝土窖-砂岩層(Covered Above Grade Concrete Vault on Sand , CAGCV-S)；
- (3)地表混凝土窖-冰磧層(Covered Above Grade Concrete Vault on Till , CAGCV-T)；
- (4)淺層混凝土窖(Shallow Concrete Vault , SCV)；
- (5)深層混凝土窖(Deep Concrete Vault, DCV)；
- (6)岩石洞穴中的地窖(Rock Cavern Vault, RCV)；
- (7)深層頁岩質岩洞穴的地窖(Deep Rock Cavern Vault in Shale, DRCV-S)：位於深度 400 m 頁岩層；
- (8)深層石灰岩質岩洞穴的地窖(Deep Rock Cavern Vault in Limestone, DRCV-L)：位於深度 660 m 石灰岩層。

經 Golder 公司評估，認為在地質條件與工程技術上較為可行的概念有 CAGCV-S、CAGCV-T、DRCV-S 及 DRCV-L(表 2.2-2)。

在地表混凝土窖(CAGCV)的處置概念中，每個處置窖設計尺寸為長 27 m、為寬 17 m、高 7 m，外壁、樓板及天花板均為 0.9 m 厚的鋼筋水泥(Reinforced Concrete)，每個處置窖容量約為 3200 m<sup>3</sup>，相鄰處置窖之間有 0.1 m 寬的空隙用砂石回填，中央進出通道為 9 m 寬，上層覆蓋層為 4 m 寬的複合材料層，斷面圖如圖 2.2-4。



而在深層岩洞穴地窖(DRCV)的概念圖(圖 2.2-5)中，以豎井(Shaft)連通地表設施與處置場之間，在深層岩石中，開挖一條中央運轉隧道(寬 8 m 及高 5 m)，而後分別在兩旁在開挖坑道地窖作為處置空間，每個坑道地窖之設計尺寸為寬 10 m、高 7 m、長 120 m、處置容量約為 8400 m<sup>3</sup>，相鄰坑道地窖之間隔為 15 m。而當坑道地窖中完成廢棄物置放後，在最外圍與中央運轉隧道之間以 10 m 厚之混凝土予以回填。

表 2.2-2 各種處置概念形式在地質技術上之可行性

初步處置概念	地質技術可行	可能可行	不可行
地表混凝土窖-砂岩層(CAGCV-S)	√		
地表混凝土窖-冰磧層(CAGCV-T)	√		
淺層混凝土窖(SCV), 10 m 深冰磧層		?	
深層凝土地窖(DCV)			X
淺層岩石洞穴中的地窖(SRCV), 60 m 深石灰岩層		?	
深層岩洞穴的地窖(DRCV), 鹽岩			X
深層頁岩質岩洞穴的地窖(DRCV-S), 460 m 深	√		
深層石灰岩質岩洞穴的地窖(DRCV-L), 660 m 深	√		

資料來源：修改自 Golder Associates, 2003

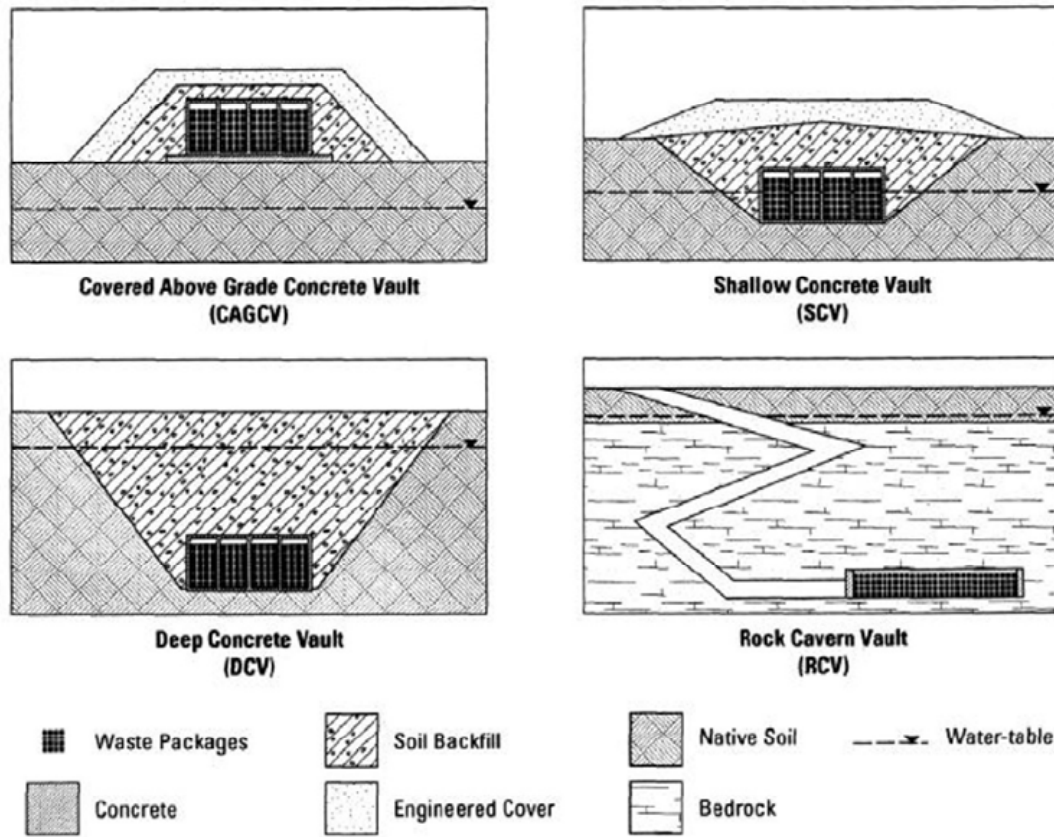
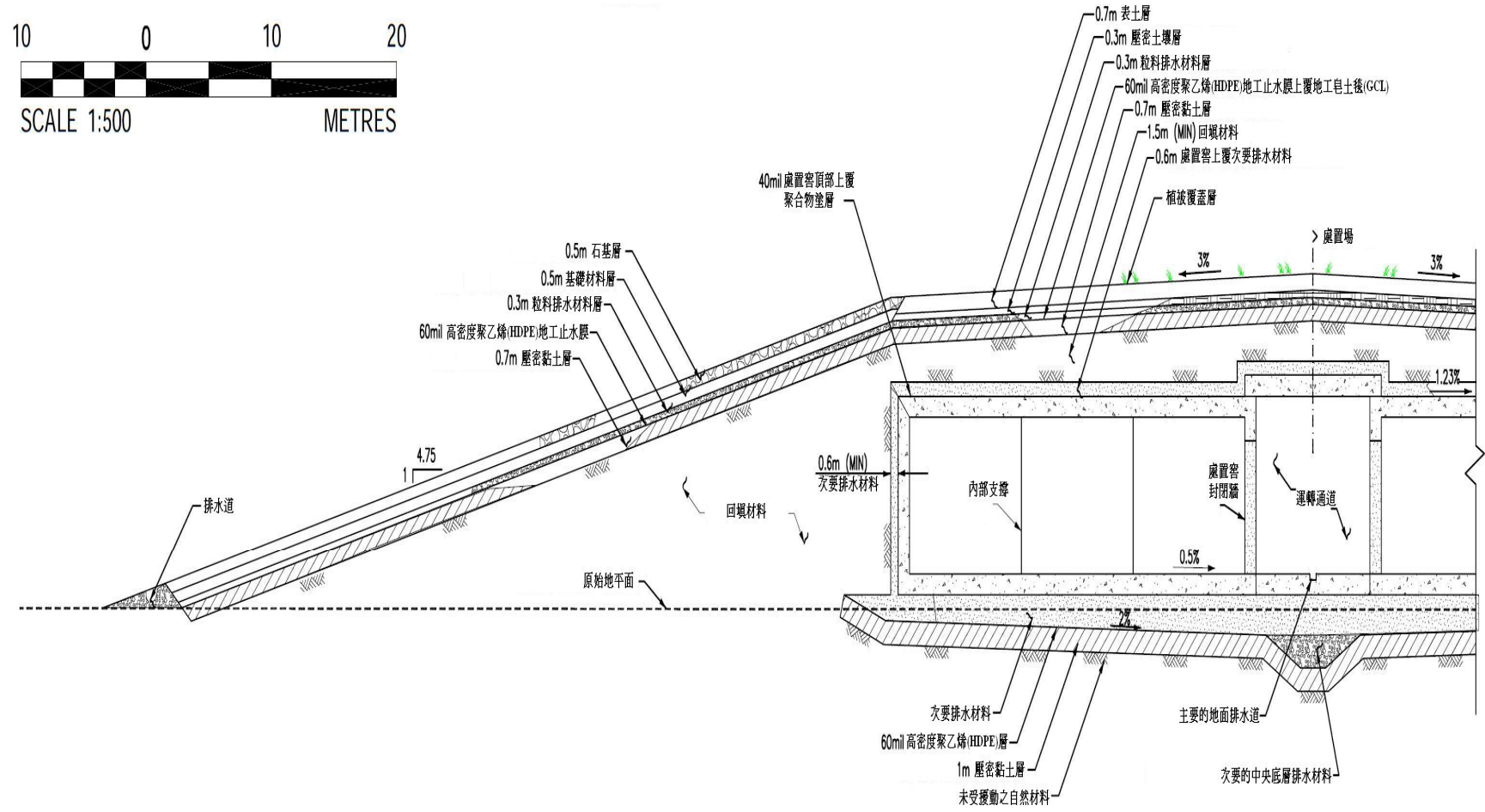
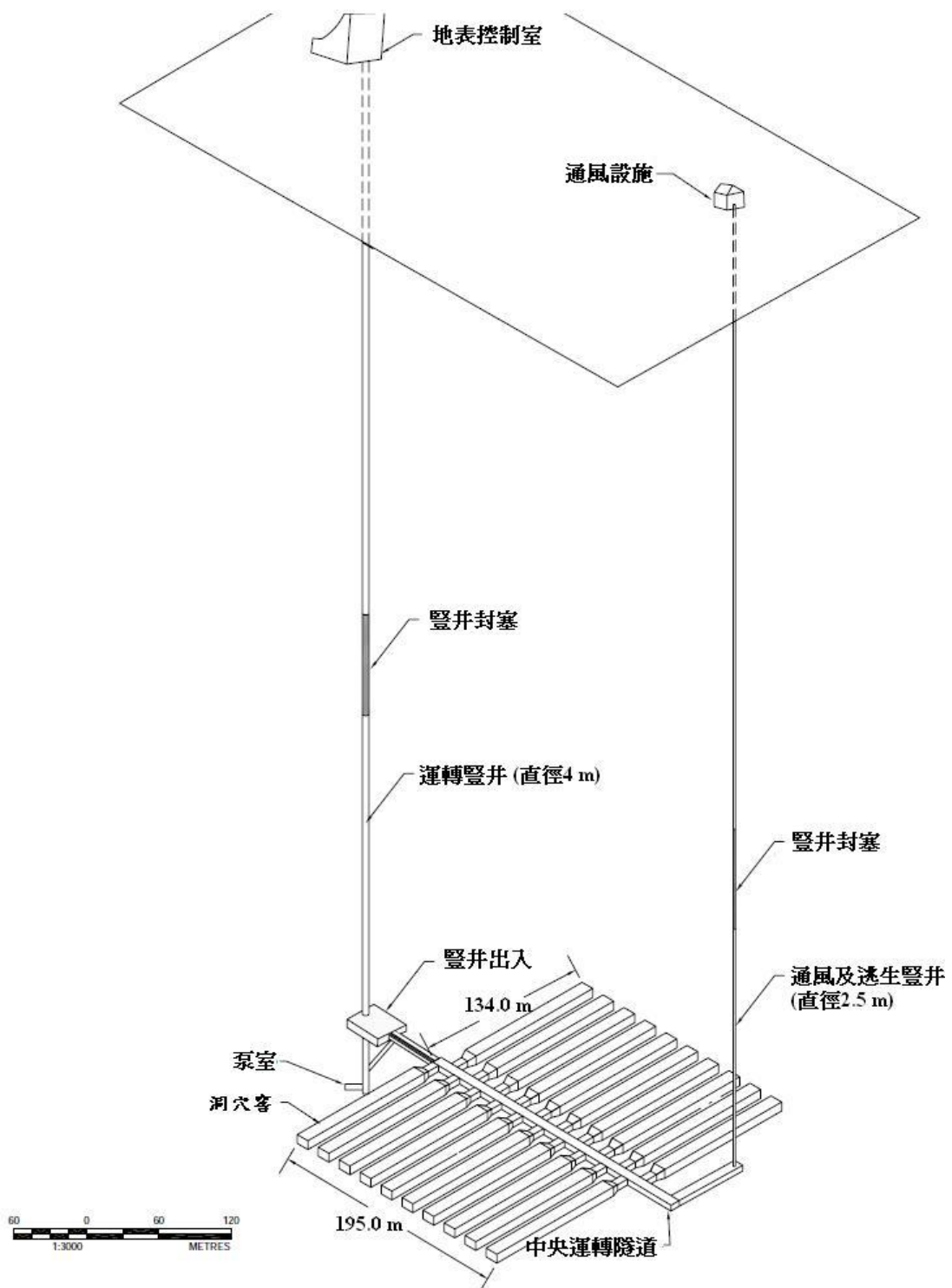


圖 2.2-3 處置概念示意圖



資料來源：修改自 Golder Associates, 2003

圖 2.2-4 CAGCV 處置概念斷面圖



資料來源：修改自 Golder Associates, 2003

圖 2.2-5 DRCV 處置概念圖

### 2.2.3 地質概念模型

經 Golder Associates (2003)調查與研究，並建立場址水文地質概念 (Hydrogeological Concept)，如圖 2.2-6，將場址地下區域區分為四個，說明如下：

(1)表層地下水(Surficial Groundwater Zone)：

- (A)介質屬冰磧土及砂質土
- (B)具低滲透性
- (C)地下水於冰磧土中流速約為 0.02 m/yr
- (D)地下水於砂質土中流速約為 10 m/yr
- (E)地下水質屬淡水
- (F)地下水由內地流向休倫湖

(2)淺層地下水(Shallow Badrock Groundwater Zone)：

- (A)介質為白雲岩
- (B)滲透性較高
- (C)地下水流速約介於 50~ 300 m/yr
- (D)水質為淡水但帶有微鹽分(Brackish)
- (E)地下水由內地流向休倫湖

(3)中層地下水(Intermediate Badrock Groundwater Zone)：

- (A)介質為頁岩與白雲岩
- (B)滲透性較低
- (C)地下水流速約介於 1~ 10 m/yr
- (D)水質含有鹽分(Saline)，甚至為濃鹽水(Brine)
- (E)地下水緩慢流向休倫湖

(4)深層地下水(Deep Badrock Groundwater Zone)：

(A)介質為頁岩與石灰岩

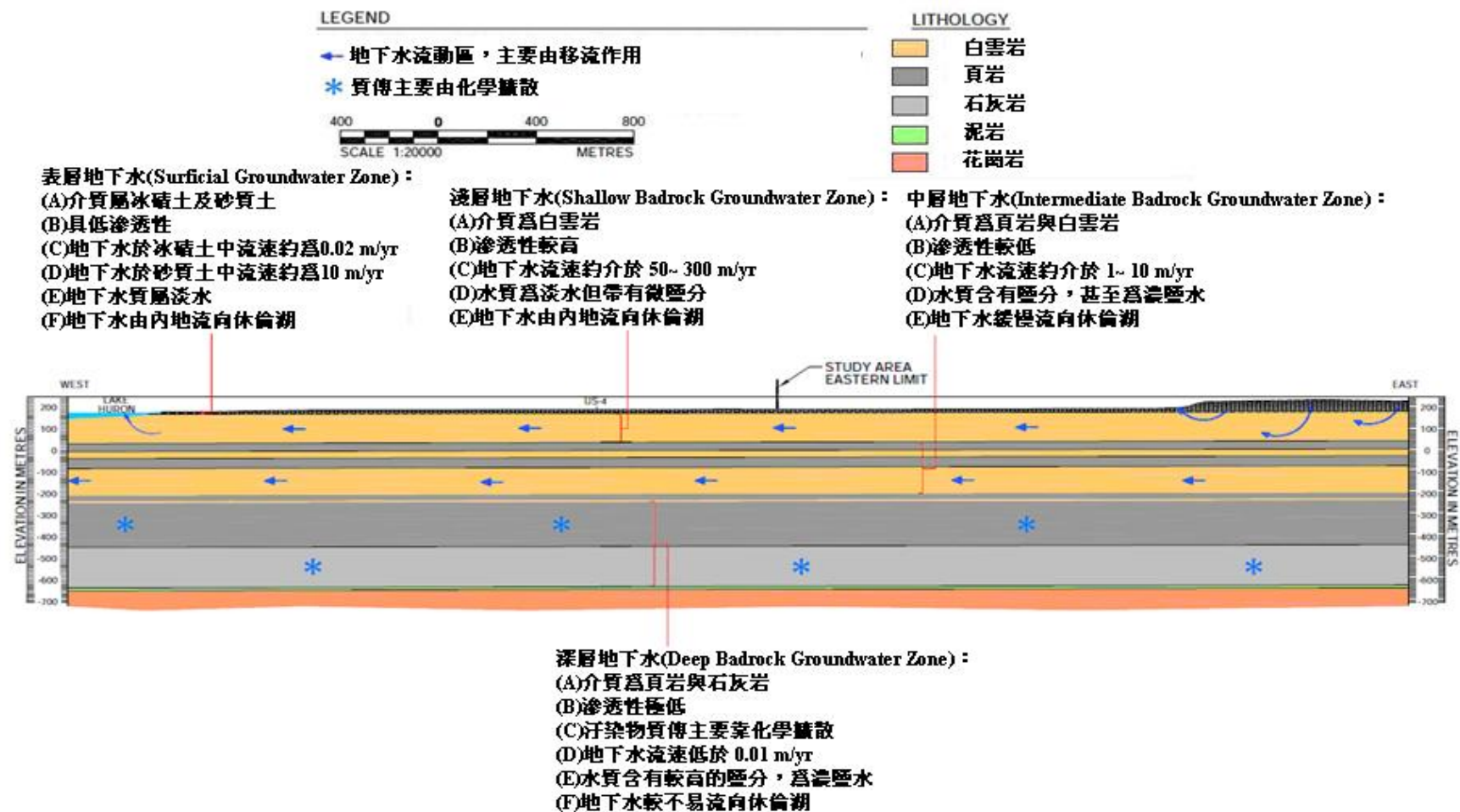
(B)滲透性極低

(C)汙染物質傳主要靠化學擴散(Chemical Diffusion)

(D)地下水流速低於 0.01 m/yr

(E)水質含有較高的鹽分，為濃鹽水

(F)地下水較不易流向休倫湖



資料來源：修改自 Golder Associates, 2003

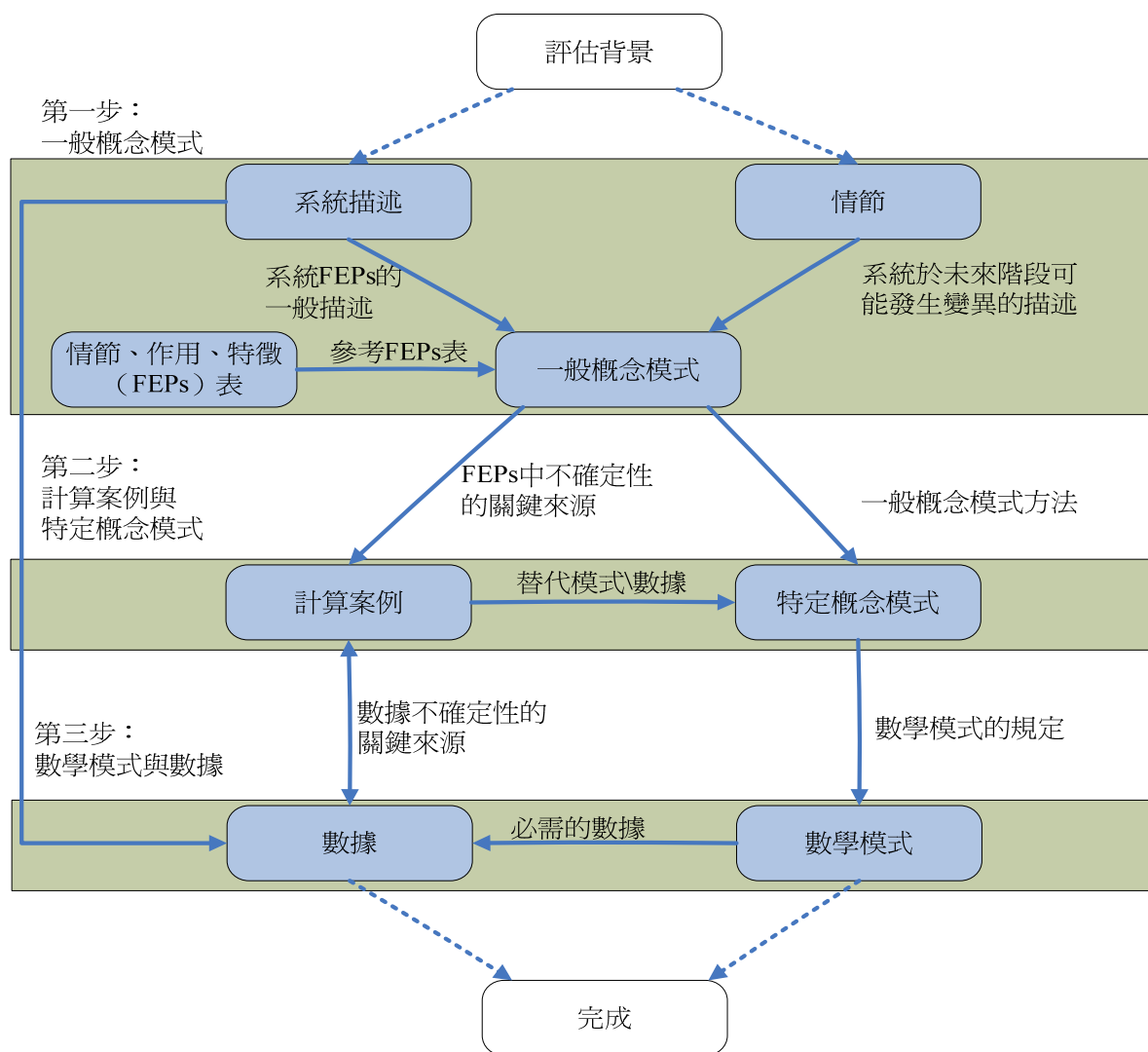
圖 2.2-6 水文地質概念模型



#### 2.2.4 情節與傳輸途徑分析

情節(Scenario)是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵(Feature)、事件(Event)及作用(Process)等的組合，即為 FEP，需要考量場址及處置設施的特徵，及未來可能發生的突發事件，利用專家研判方式，確認影響處置系統功能與安全的主要作用，再依據這些作用建構出情節表，即為 FEP List。

安全評估是針對在所選擇的場址條件及規劃的處置系統下，充分考量所有可能發生的情節後，建構概念模式，再利用數學模式來模擬處置系統的功用及核種傳輸的可能行為，並評估可能產生的潛生效應對處置系統的影響，而數學模式與引用的相關數據必須能代表所有重要的影響因素，步驟如圖 2.2-7。



資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

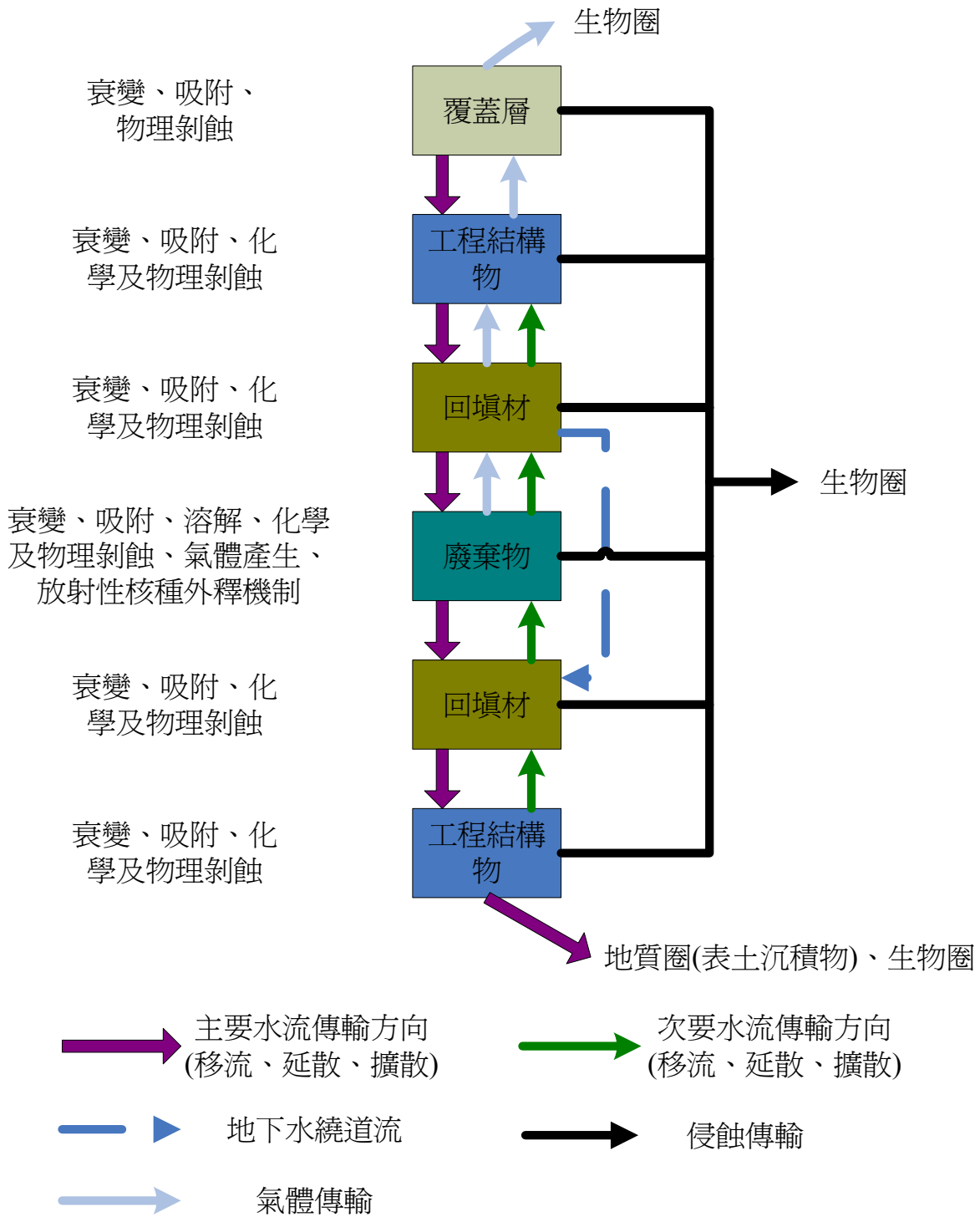
圖 2.2-7 安全評估模式建立步驟

當情節建構後，依據其對處置場及影響到人類健康的重要性或可能性，區別為參考情節(Reference Scenario)及變異情節，此處考慮核種隨地下水流向休倫湖的湖水外釋(Lake Release)為參考情節。而 CAGCV 處置概念的湖水外釋情節，近場區域核種傳輸的路徑(圖 2.2-8)為由廢棄物容器外釋

後到達外圍回填區及工程結構區，其傳輸作用有移流(Advection)、延散(Dispersion)及擴散(Diffusion)等物理作用，化學作用則有衰變(Decay)、溶解(Dissolution)、及吸附(Sorption)等。遠場區域為由近場區域到達淺層地下水區(圖 2.2-9)，最終接觸到湖水或井水等人類生活圈之可能範圍，在淺層地下水區域，核種傳輸主要靠地下水中的移流及延散等物理作用，化學作用則有衰變及吸附。

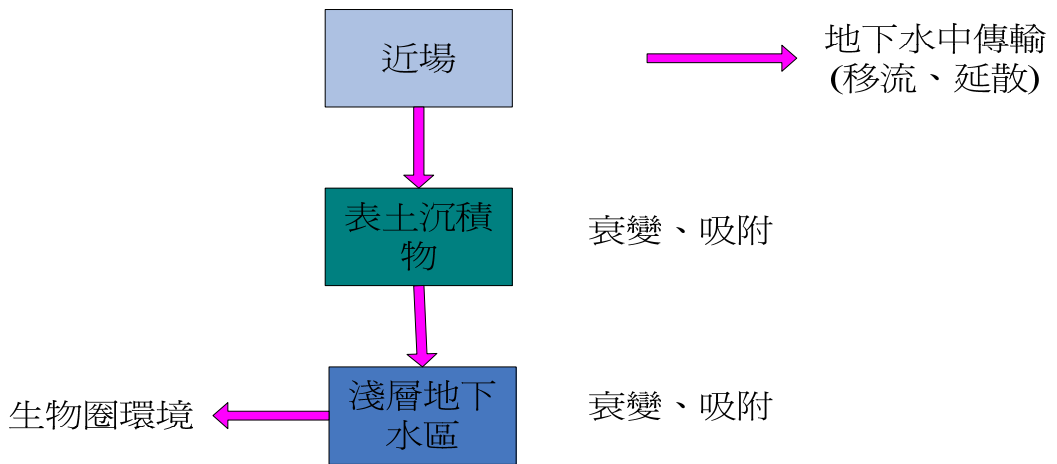
而變異情節則考慮人類入侵情節(Human Intrusion Scenario)，因在 CAGCV 的概念中，處置場屬地表混凝土窖形式，人類於未來在處置場監管範圍內可能進行一些行為，包含農耕、畜牧等(圖 2.2-10)，因此處置場核種外釋後極可能因人體吸入(Inhalation)及攝取(Ingestion)等動作而接觸到人類，或懸浮(Resuspension)於大氣中而被人體吸入(圖 2.2-11)；而在 DRCV 概念中，則主要考慮到人類可能因鑽井(Borehole)行為侵入到處置場中。

而在 DRCV 處置概念的湖水外釋情節中，近場區域核種傳輸路徑相同於 CAGCV 處置概念，相異之處只在於 DRCV 為深層處置概念，因此近場外圍邊界為較為深層的奧陶紀(Ordovician)岩石的地質圈，且因地下水流緩慢，因此核種外釋機制僅靠擴散作用(圖 2.2-12)。遠場區域核種傳輸途徑為由近場外圍藉擴散作用到達深層地下水區及中層地下水區後，經由地下水移流及延散作用傳輸至湖水區(圖 2.2-13)。圖 2.2-14 即說明 DRCV-S 及 DRCV-L 概念之處置場皆位於地下水流動較為緩慢區，唯有先藉擴散作用至淺層地下水區，而後才能傳輸至湖水。



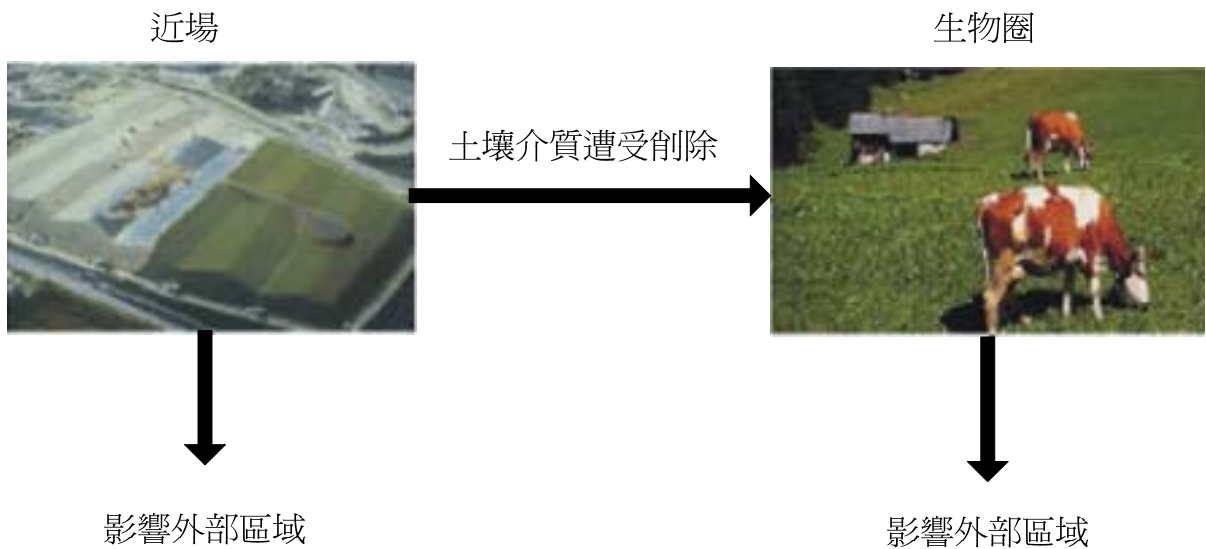
資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

圖 2.2-8 CAGCV 處置概念的湖水外釋情節，近場區域核種傳輸路徑



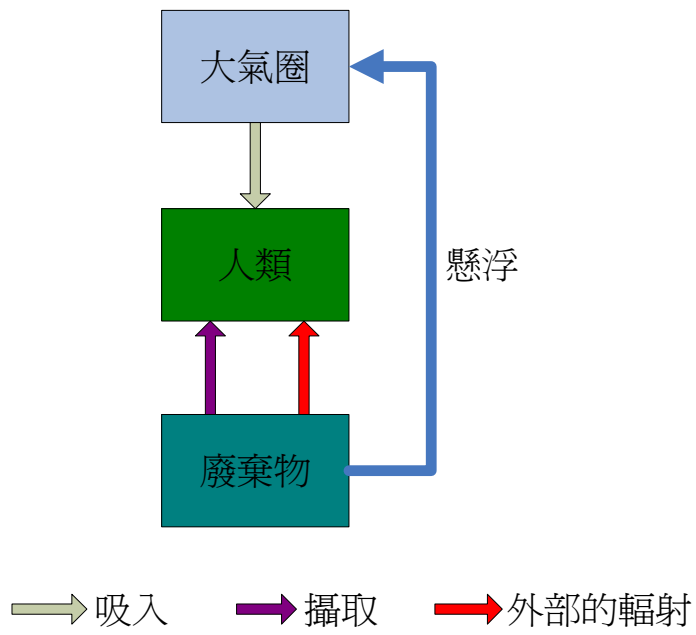
資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

圖 2.2-9 CAGCV 處置概念的湖水外釋情節，遠場區域核種傳輸路徑



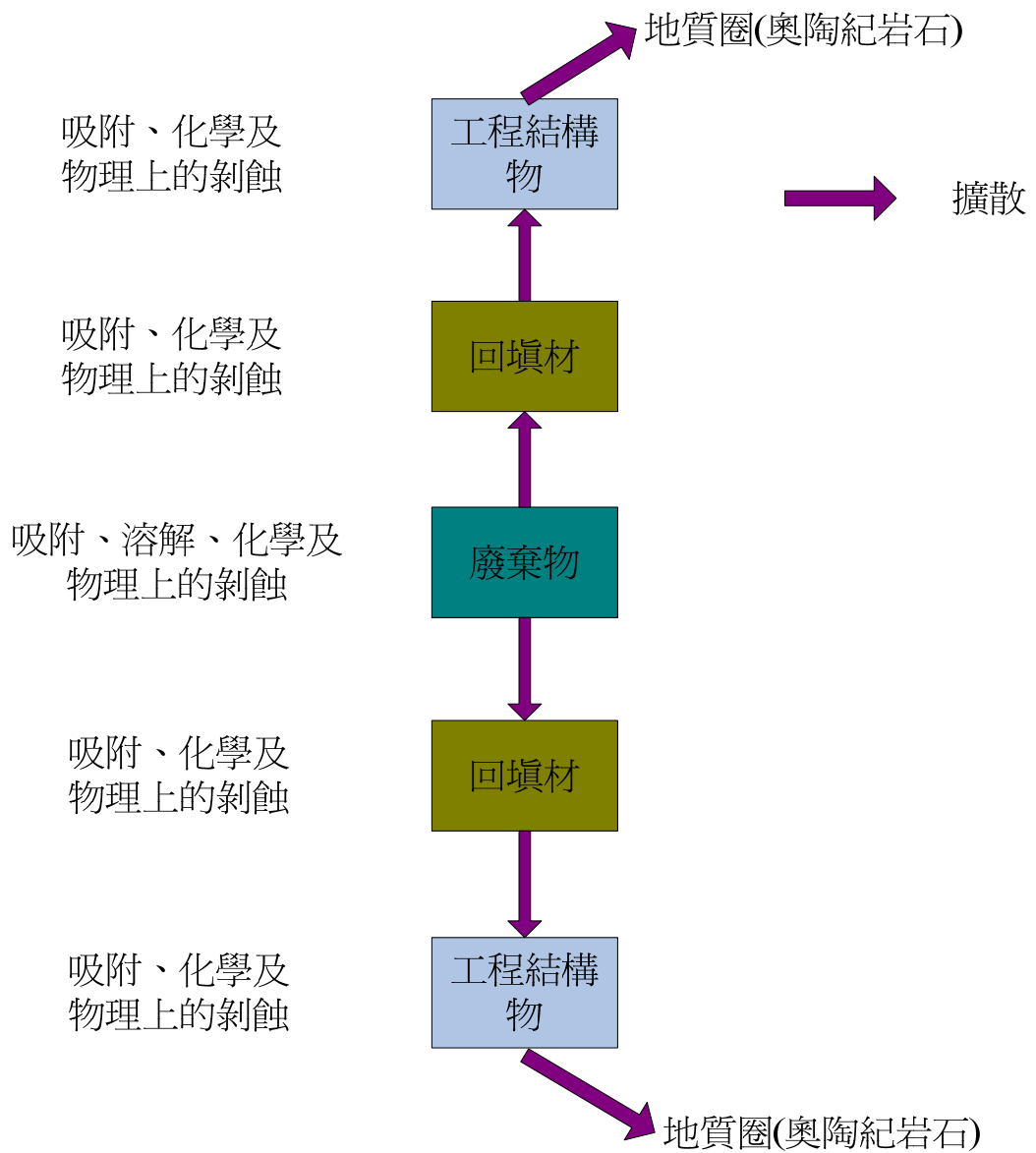
資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

圖 2.2-10 CAGCV 處置概念的人類入侵情節



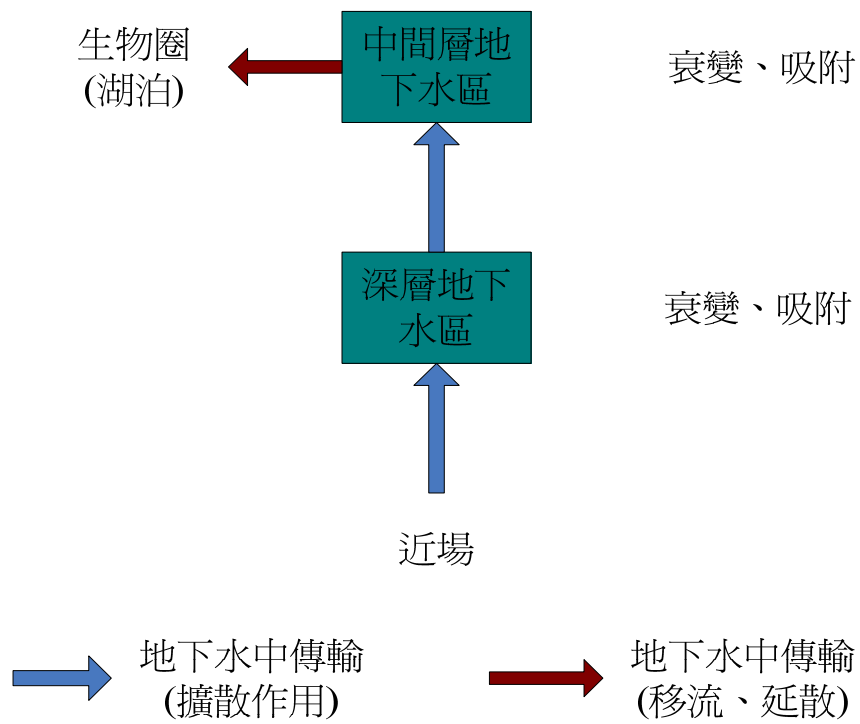
資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

圖 2.2-11 CAGCV 處置概念的人類入侵情節，核種傳輸路徑



資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

圖 2.2-12 DRCV 處置概念的湖水外釋情節，近場區域核種傳輸路徑



資料來源：修改自 Quintessa Limited, 2003

圖 2.2-13 DRCV 處置概念的湖水外釋情節，遠場區域核種傳輸路徑



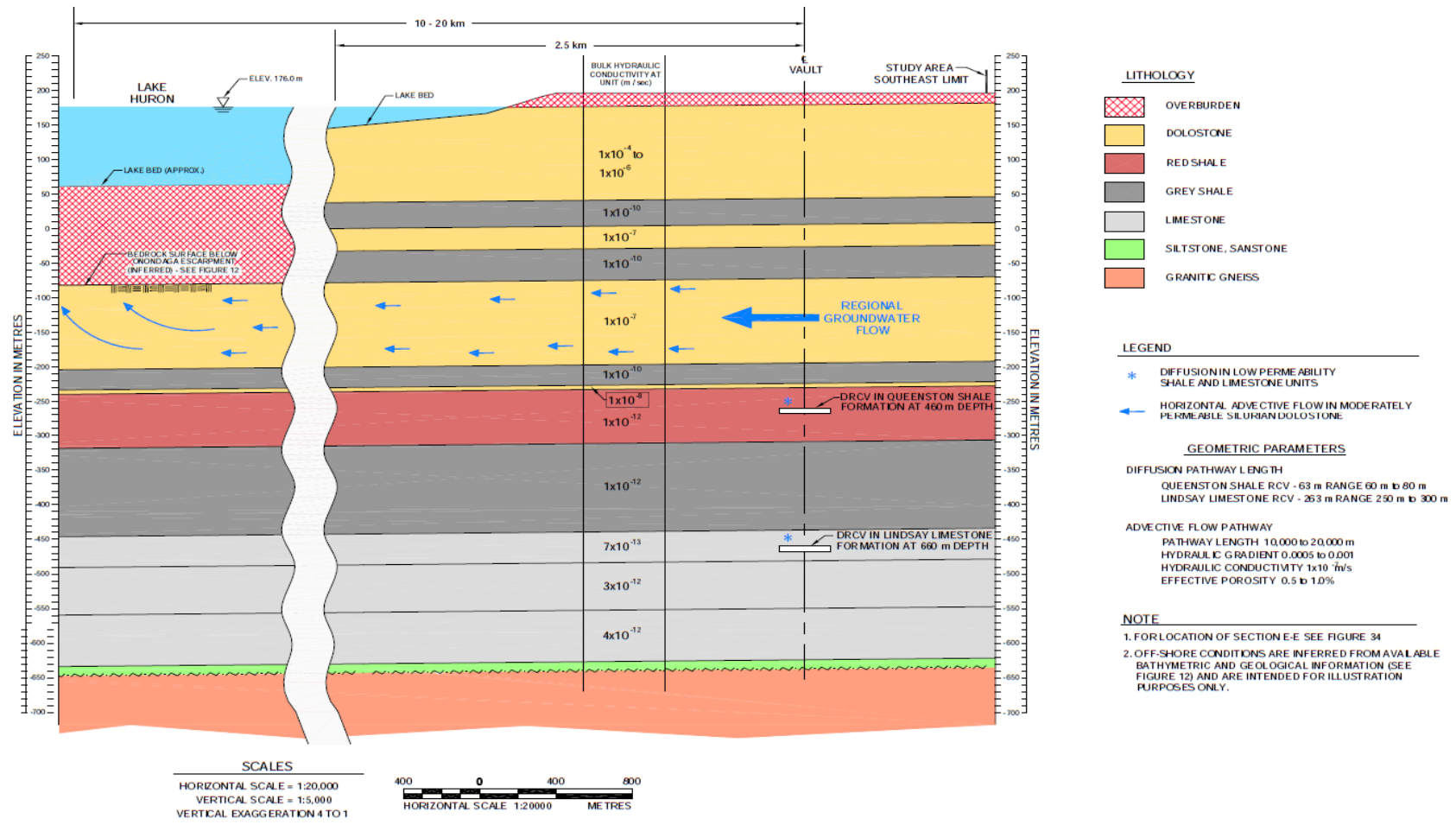


圖 2.2-14 DRCV-S 及 DRCV-L 概念之場址地下水流示意

## 2.2.5 安全評估

安全評估程式則採用 AMBER 4.4 版程式來建構完整之近場及遠場概念模式及進行核種傳輸分析，AMBER 程式為 Quintessa Limited 發展之視窗介面程式，採用區塊模式(Compartment Modelling)理論進行分析，其程式開發過程皆依循 ISO 9001:2000 標準，使用者可依實際場址概念、輸入實際參數值、應用合理的傳輸理論、及設定合適之區塊數目等，進而完整建構於視窗介面上。國際上已有多數案例應用 AMBER 程式來進行 LLW 處置場的安全評估，此處 Quintessa Limited 為配合加拿大低放處置安全評估之案例，將 AMBER 程式修正為 4.4 版(Enviros and Quintessa, 2002)。

以區塊模式建構近場區域時，亦即將每個處置單元、每個回填區、每個外圍工程結構區等均視為區塊體，而後合理的傳輸理論如移流或擴散等，來建構近場區域(圖 2.2-15)。表 2.2-3 為針對 CAGCV 及 DRCV 兩種處置概念，分別考慮灌漿(Grouting)及無灌漿(Non-grouting)之情況，由圖 2.2-16 知廢棄物本體(Wasteform)設有三個區塊，代號分別為 NF-WF1A、NF-WF1B 及 NF-WF1C，工程結構區設有上下部兩區塊，代號分別為 NF-UnEng1 及 NF-DwnEng1，回填材料區設有上下部兩區塊，代號分別為 NF-UnBac1 及 NF-DwnBac1，而後各區塊間加以設定傳輸作用的連結，即為在 AMBER 視窗介面上建構完成近場區塊模式分析架構(圖 2.2-16)。

而在遠場區域中，主要依據不同岩層特性作為區塊設定的考量，在 CAGCV-T 概念中，地質圈環境為冰磧土層及白雲岩層，區塊設定代號為 FF\_Till 與 FF\_Dol，且因考量傳輸特性中，縱向延散度(Longitudinal Dispersivity)定義為傳輸總路徑長度(Total Path Length)之 1/10，如此一來，每個區塊長度的設定須做調整，因此冰磧土層設定有五個區塊

(FF\_Till1~FF\_Till5)，白雲岩層設定有五個區塊(FF\_Dol 1~FF\_Dol 5)，表 2.2-4 即說明 CAGCV-T 概念中，遠場各區塊尺寸設定，依據 CAGCV-T 概念中之地下水主要流向圖(圖 2.2-17)，核種由近場混凝土窖中外釋後，到達遠場中上層冰磧土層後，再往下滲流至白雲岩層，因白雲岩層下層為滲透性較低之頁岩層，水流即在白雲岩層中往休倫湖流動，其各區塊之間的串聯如圖 2.2-18。

同理，CAGCV-S 概念中遠場地質環境由上而下依序有砂岩層、未飽和白雲岩層、及飽和白雲岩層等三種，考量其縱向延散度的設定，因此區塊設定分別有 FF\_Sand1~FF\_Sand2、FF\_UnsatDol1~FF\_UnsatDol3、及 FF\_Dol 1~FF\_Dol 5 等，其區塊尺寸設定如表 2.2-5，核種由近場外釋後即接觸到遠場砂岩層，隨著水流方向依序到達未飽和白雲岩層、飽和白雲岩層、及休倫湖(圖 2.2-19)，其區塊間串聯如圖 2.2-20。

而在 DRCV 概念中，處置場位於深層石灰岩層，地下水不易流動至休倫湖，主要藉由擴散作用往上層之頁岩層及飽和白雲岩層，而豎井區亦成為核種傳輸之考慮路徑之一，其後在飽和白雲岩層中即隨地下水流向休倫湖，其區塊設定有 FF\_Lime1~FF\_Lime5、FF\_Shale1~FF\_Shale5、FF\_Shaft1~FF\_Shaft5、及 FF\_Dol 1~FF\_Dol 5 等，各區塊尺寸列於表 2.2-6，其建構之各區塊之間的串聯如圖 2.2-21。

安全評估運算結果如表 2.2-7，可看出參考情節中，有灌漿的情況皆比無灌漿的情況其尖峰劑量率較為低；DRCV 的概念皆比 CAGCV 的概念其尖峰劑量率較為低；而因有人類侵入的行為，其尖峰劑量率值皆比參考情節較為高。

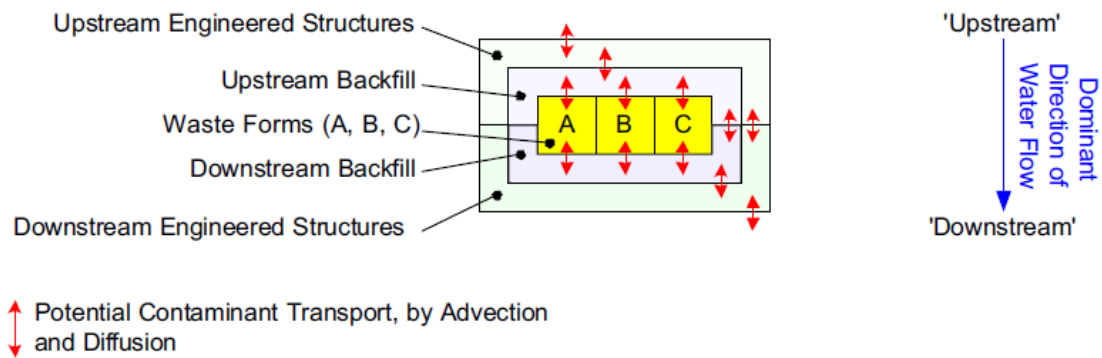


圖 2.2-15 近場區塊模式結構

表 2.2-3 近場區塊模式設定

Compartment(s)	Material Assigned in			
	CAGCV (Nongrouting)	CAGCV (Grouting)	DRCV (Nongrouting)	DRCV (Grouting)
Waste Form A (NF_WF1A)	RawAsh	GroutAsh	RawAsh	GroutAsh
Waste Form B (NF_WF1B)	RawComp	GroutComp	RawComp	GroutComp
Waste Form C (NF_WF1C)	RawNonPro	GroutNonPro	RawNonPro	GroutNonPro
Engineered structures (NF_UpEng1, NF_DwnEng1)	Eng_Conc	Eng_Conc	Water	Water
Backfill (NF_UpBac1, NF_DwnBac1)	Water	Back_Grout	Water	Back_Grout

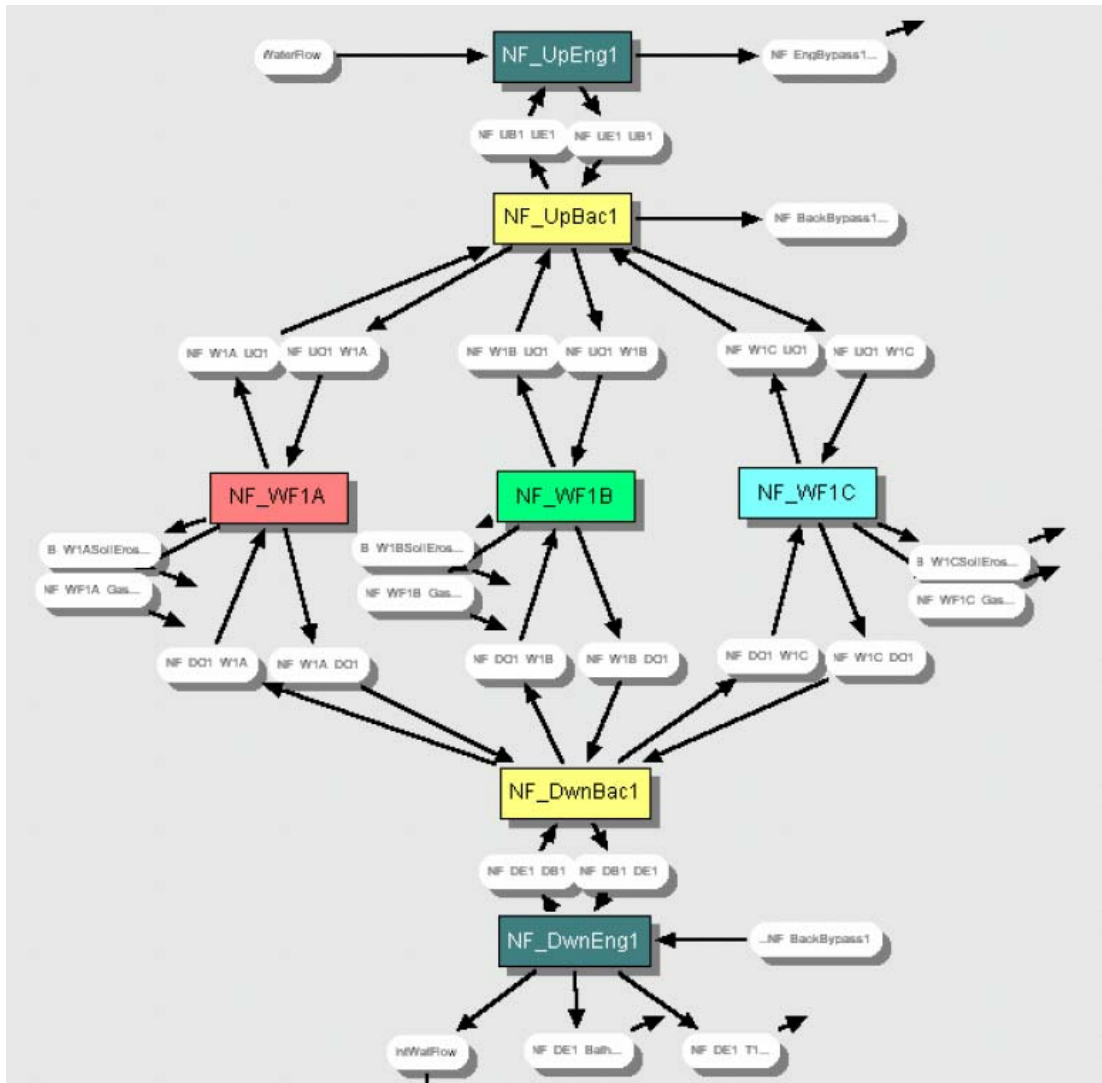


圖 2.2-16 近場區塊模式分析架構

表 2.2-4 CAGCV-T 概念之遠場各區塊尺寸設定

Compartment	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Material
FF_Till1	67	320	3	Weathered Till
FF_Till2...5	67	320	3.5	Unweathered Till
FF_Dol1...5	$L_{Dol}/5$	320	10	Saturated Dolostone

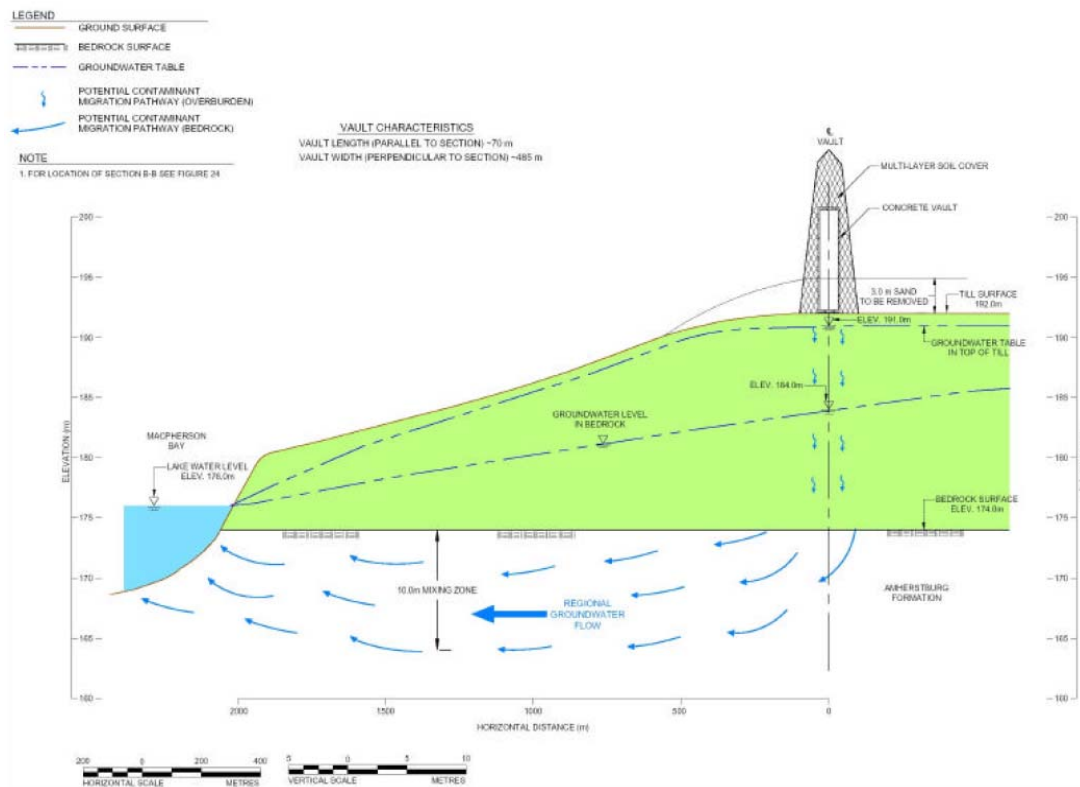


圖 2.2-17 CAGCV-T 概念之遠場地下水流動方向

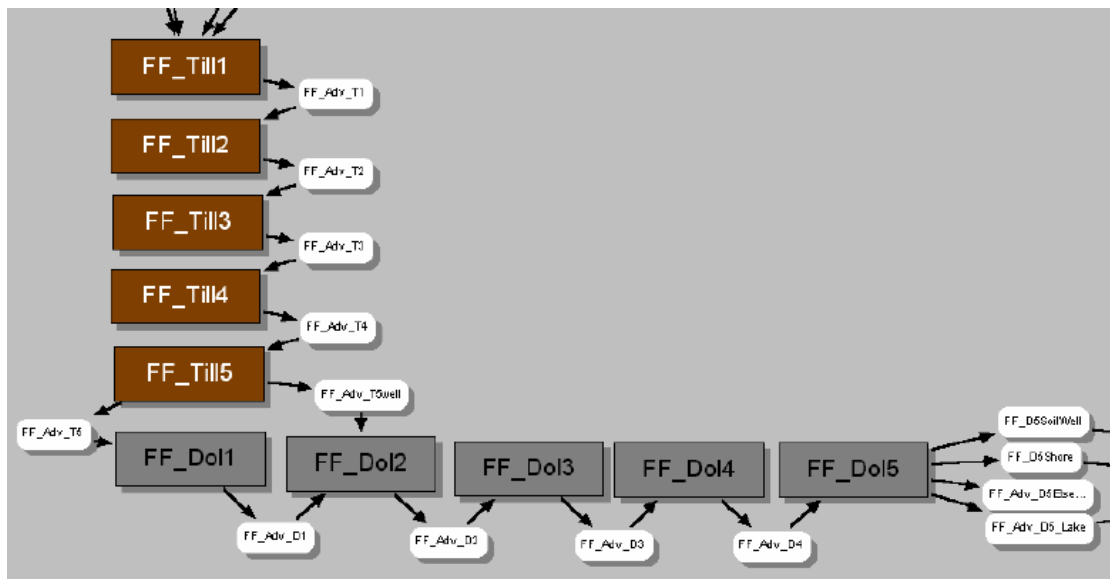


圖 2.2-18 CAGCV-T 概念之遠場區塊模式分析架構

表 2.2-5 CAGCV-S 概念之遠場各區塊尺寸設定

Compartment	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Material
FF_Sand1...2	67	320	1.75	Sand
FF_UnsatDol1...3	67	320	1.33	Unsaturated Dolostone
FF_Dol1...5	$L_{Dol}/5$	320	10	Saturated Dolostone

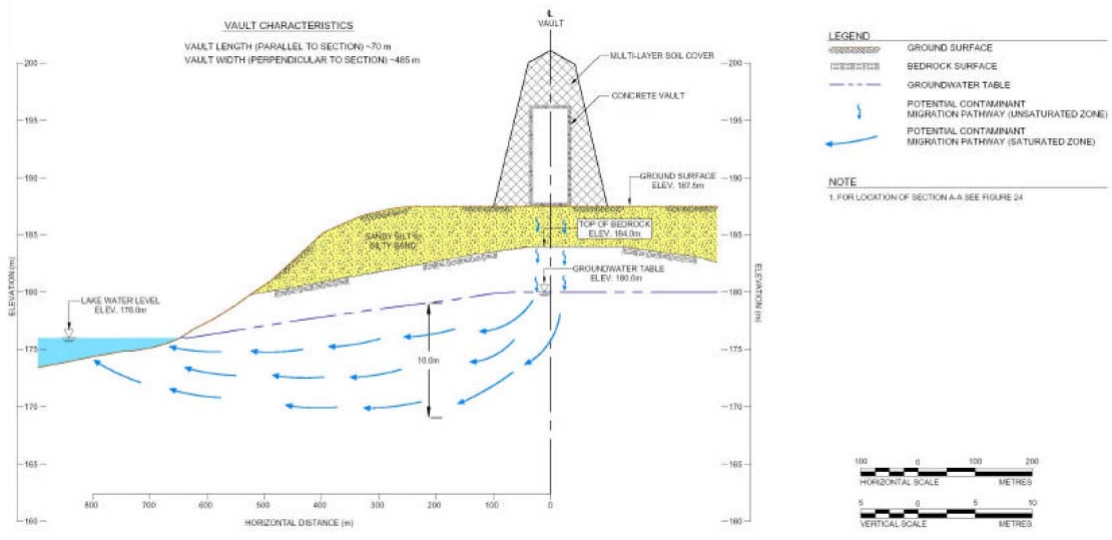


圖 2.2-19 CAGCV-S 概念之遠場地下水流動方向

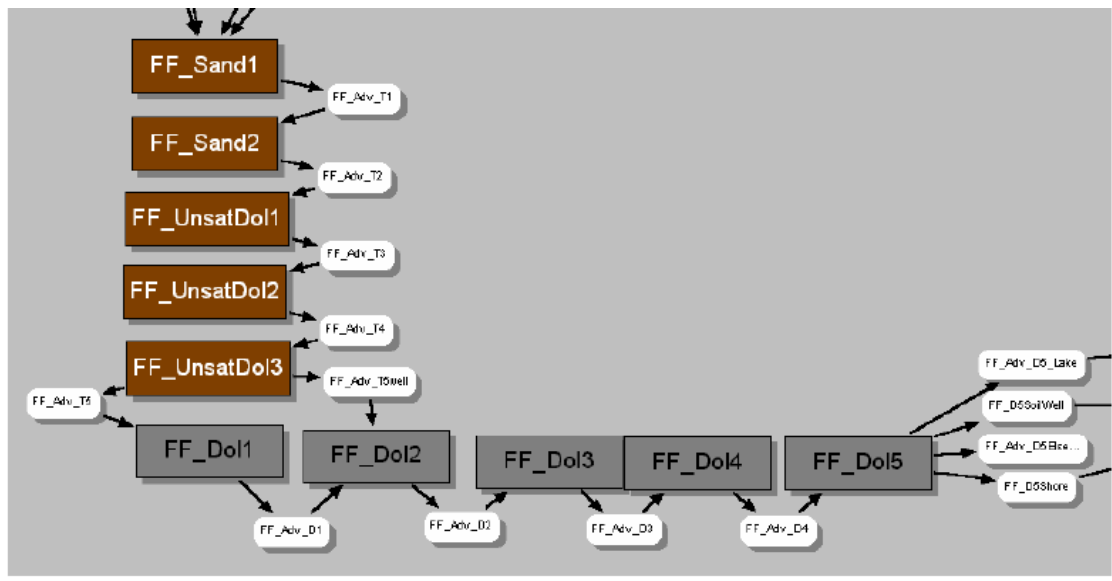


圖 2.2-20 CAGCV-S 概念之遠場區塊模式分析架構



表 2.2-6 DRCV 概念之遠場各區塊尺寸設定

Compartment	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Material
FF_Lime1...5	240	160	6	Limestone
FF_Shale1...5	240	160	12 / 46	Shale
FF_Shaft1...5	5	5	12 / 52	Sand/Gravel
FF_Dol1...5	3000	160	100	Saturated Dolostone

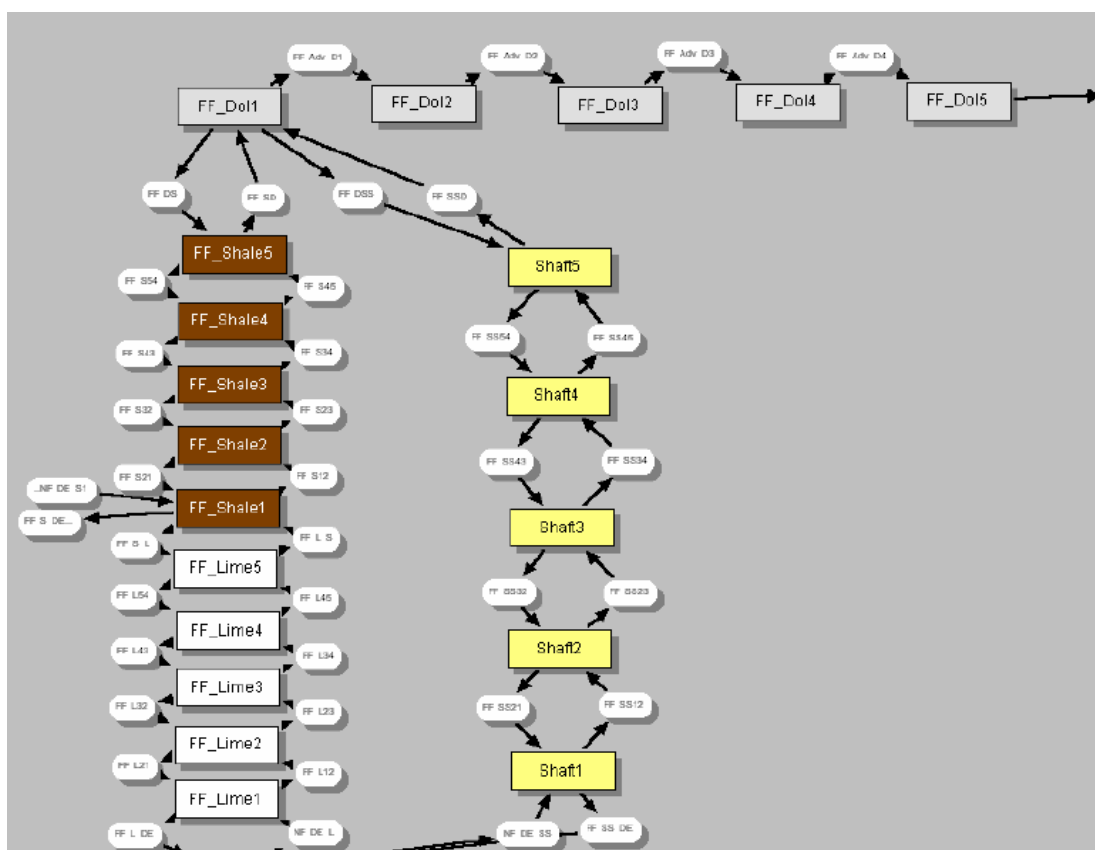


圖 2.2-21 DRCV 概念之遠場區塊模式分析架構

表 2.2-7 安全評估結果

Scenario	Repository Concept	Level of Engineering	Calculation Case	Peak Dose Rate (mSv y <sup>-1</sup> )		
				300 -1,000 y	1,000 - 10,000 y	> 10,000 y
Reference	CAGCV-T	Non-grouting	Lake Release	$2 \times 10^{-10}$	$8 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-11}$
		Grouting	Lake Release	$4 \times 10^{-13}$	$8 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-11}$
	CAGCV-S	Non-grouting	Lake Release	$1 \times 10^{-9}$	$8 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$
		Grouting	Lake Release	$3 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-8}$
	DRCV-S	Non-grouting	Lake Release	-	$2 \times 10^{-15}$	$4 \times 10^{-14}$
		Grouting	Lake Release	-	-	$9 \times 10^{-15}$
	DRCV-L	Non-grouting	Lake Release	-	-	$2 \times 10^{-14}$
		Grouting	Lake Release	-	-	$5 \times 10^{-15}$
Human Intrusion	CAGCV-S&T	Non-grouting	Borehole	$3 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$
		Grouting	Borehole	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-6}$
	DRCV-S&L	Non-grouting	Borehole	$3 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$
		Grouting	Borehole	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$

## 2.3 DGR 計畫執照申請階段(2011)之安全評估案例

根據前述 DGR 計畫期程所述，在 2004 年後，陸續參考概念設計階段安全評估的結果、納入 ILW 之決議、及 Kincardine 市公眾意願調查結果等，決議處置場採深層地質處置場形式，期間持續進行深地層鑽孔探察、水力及岩石力學等相關試驗工作，於 2011 年為申請建造及運轉執照，完成封閉前安全評估報告及環境衝擊評估報告，目前已提送審查。整份封閉前安全評估報告共計有 9 冊，包含安全評估摘要報告、正常演化情節分析、人類入侵情節及其他破壞情節分析、處置系統描述及功能、FEP 分析、地下水傳輸模式、氣體傳輸模式、數據資料、及氣體傳輸分析程式 T2GGM 介紹等。

### 2.3.1 廢棄物存量

2004 年首次決定，原 Bruce 場址之最終處置場除原有 LLW 外，將納入 ILW，並採分區處置原則。ILW 主要為除役後核反應器元件(Used Nuclear Reactor Component)及純化反應器水系統(Purify Reactor Water System)使用過後的樹脂(Resin)及濾材(Filter)。

其廢棄物存量估算原則為考量 DGR 5 年建造期和 35 年運轉期，及預期 10 年的封閉期(含廢除地面設施及回填地下豎井)，依此時程，DGR 於 2062 年後完成封閉，因此安全評估中廢棄物存量及核種初始活度須預估自 2062 年始算。表 2.3-1 說明廢棄物存量中，其 LLW 總重量為  $8.30 \times 10^6$  Kg，ILW 總重量為  $9.02 \times 10^5$  Kg，進一步核種特性及活度分析後，總計有 37 個核種，總活度達  $1.62 \times 10^{16}$  Bq。

表 2.3-1 預估至 2062 年之 L&ILW 廢棄物存量

Radio-nuclide	Amount(Bq) at 2062			Elements/ Chemicals	Amount (Kg)		
	LLW	ILW	Total		LLW	ILW	Total
H-3	8.49x10 <sup>14</sup>	1.56x10 <sup>14</sup>	1.00x10 <sup>15</sup>	Antimony	3.23x10 <sup>03</sup>	2.35x10 <sup>01</sup>	3.25x10 <sup>03</sup>
C-14	2.42x10 <sup>12</sup>	6.07x10 <sup>15</sup>	6.07x10 <sup>15</sup>	Arsenic	2.83x10 <sup>02</sup>	1.42x10 <sup>02</sup>	4.25x10 <sup>02</sup>
Cl-36	6.01x10 <sup>08</sup>	1.42x10 <sup>12</sup>	1.42x10 <sup>12</sup>	Barium	9.42x10 <sup>03</sup>	1.59x10 <sup>02</sup>	9.58x10 <sup>03</sup>
Ni-59	5.01x10 <sup>10</sup>	3.63x10 <sup>13</sup>	3.64x10 <sup>13</sup>	Beryllium	1.11x10 <sup>02</sup>	2.10x10 <sup>01</sup>	1.32x10 <sup>02</sup>
Ni-63	5.04x10 <sup>12</sup>	3.95x10 <sup>15</sup>	3.96x10 <sup>15</sup>	Boron	1.53x10 <sup>03</sup>	5.25x10 <sup>03</sup>	6.78x10 <sup>03</sup>
Se-79	1.54x10 <sup>06</sup>	1.25x10 <sup>10</sup>	1.25x10 <sup>10</sup>	Bromine	1.30x10 <sup>02</sup>	4.62x10 <sup>-01</sup>	1.30x10 <sup>02</sup>
Sr-90	8.96x10 <sup>12</sup>	4.52x10 <sup>13</sup>	5.42x10 <sup>13</sup>	Cadmium	1.12x10 <sup>04</sup>	1.96x10 <sup>01</sup>	1.12x10 <sup>04</sup>
Mo-93	0.00x10 <sup>00</sup>	1.00x10 <sup>12</sup>	1.00x10 <sup>12</sup>	Chromium	7.85x10 <sup>05</sup>	1.98x10 <sup>05</sup>	9.84x10 <sup>05</sup>
Zr-93	4.54x10 <sup>06</sup>	2.13x10 <sup>14</sup>	2.13x10 <sup>14</sup>	Cobalt	3.42x10 <sup>02</sup>	3.01x10 <sup>02</sup>	6.44x10 <sup>02</sup>
Nb-93m	0.00x10 <sup>00</sup>	9.26x10 <sup>12</sup>	9.26x10 <sup>12</sup>	Copper	3.35x10 <sup>06</sup>	7.01x10 <sup>03</sup>	3.35x10 <sup>06</sup>
Nb-94	2.46x10 <sup>10</sup>	4.60x10 <sup>15</sup>	4.60x10 <sup>15</sup>	Gadolinium	0.00x10 <sup>00</sup>	5.41x10 <sup>03</sup>	5.41x10 <sup>03</sup>
Tc-99	6.28x10 <sup>07</sup>	6.10x10 <sup>10</sup>	6.10x10 <sup>10</sup>	Hafnium	0.00x10 <sup>00</sup>	2.58x10 <sup>02</sup>	2.58x10 <sup>02</sup>
Ag-108m	3.43x10 <sup>07</sup>	1.97x10 <sup>13</sup>	1.97x10 <sup>13</sup>	Iodine	6.60x10 <sup>01</sup>	1.19x10 <sup>-01</sup>	6.61x10 <sup>01</sup>
Sn-121m	0.00x10 <sup>00</sup>	7.76x10 <sup>13</sup>	7.76x10 <sup>13</sup>	Lead	1.52x10 <sup>06</sup>	2.85x10 <sup>02</sup>	1.52x10 <sup>06</sup>
I-129	1.21x10 <sup>06</sup>	1.33x10 <sup>08</sup>	1.34x10 <sup>08</sup>	Lithium	4.47x10 <sup>01</sup>	5.89x10 <sup>03</sup>	5.94x10 <sup>03</sup>
Cs-137	1.32x10 <sup>13</sup>	9.37x10 <sup>13</sup>	1.07x10 <sup>14</sup>	Manganese	8.32x10 <sup>05</sup>	1.71x10 <sup>04</sup>	8.49x10 <sup>05</sup>
Ir-192m	0.00x10 <sup>00</sup>	1.14x10 <sup>10</sup>	1.14x10 <sup>10</sup>	Mercury	6.83x10 <sup>01</sup>	3.73x10 <sup>-01</sup>	6.87x10 <sup>01</sup>
Pt-193	0.00x10 <sup>00</sup>	1.15x10 <sup>13</sup>	1.15x10 <sup>13</sup>	Molybdenum	2.15x10 <sup>02</sup>	9.78x10 <sup>02</sup>	1.19x10 <sup>03</sup>
Pb-210	3.20x10 <sup>10</sup>	0.00x10 <sup>00</sup>	3.20x10 <sup>10</sup>	Nickel	1.63x10 <sup>06</sup>	4.92x10 <sup>04</sup>	1.68x10 <sup>06</sup>
Ra-226	3.80x10 <sup>09</sup>	0.00x10 <sup>00</sup>	3.80x10 <sup>09</sup>	Niobium	1.02x10 <sup>02</sup>	1.10x10 <sup>04</sup>	1.11x10 <sup>04</sup>
U-232	2.25x10 <sup>08</sup>	7.71x10 <sup>06</sup>	2.33x10 <sup>08</sup>	Scandium	2.29x10 <sup>01</sup>	6.16x10 <sup>-01</sup>	2.35x10 <sup>01</sup>
U-233	3.07x10 <sup>08</sup>	8.88x10 <sup>06</sup>	3.15x10 <sup>08</sup>	Selenium	8.14x10 <sup>01</sup>	5.06x10 <sup>00</sup>	8.64x10 <sup>01</sup>
U-234	1.34x10 <sup>09</sup>	1.30x10 <sup>08</sup>	1.47x10 <sup>09</sup>	Silver	5.13x10 <sup>00</sup>	2.13x10 <sup>00</sup>	7.26x10 <sup>00</sup>
U-235	2.16x10 <sup>07</sup>	2.08x10 <sup>06</sup>	2.36x10 <sup>07</sup>	Strontium	3.24x10 <sup>03</sup>	3.35x10 <sup>01</sup>	3.27x10 <sup>03</sup>
U-236	2.56x10 <sup>08</sup>	2.38x10 <sup>07</sup>	2.80x10 <sup>08</sup>	Tellurium	2.03x10 <sup>02</sup>	6.63x10 <sup>-02</sup>	2.03x10 <sup>02</sup>
U-238	5.91x10 <sup>09</sup>	1.60x10 <sup>08</sup>	6.07x10 <sup>09</sup>	Thallium	2.41x10 <sup>-01</sup>	3.04x10 <sup>-01</sup>	5.45x10 <sup>-01</sup>
Np-237	1.23x10 <sup>08</sup>	1.07x10 <sup>07</sup>	1.34x10 <sup>08</sup>	Tin	1.37x10 <sup>02</sup>	2.37x10 <sup>03</sup>	2.51x10 <sup>03</sup>
Pu-238	4.69x10 <sup>11</sup>	2.77x10 <sup>10</sup>	4.96x10 <sup>11</sup>	Tungsten	1.18x10 <sup>00</sup>	1.48x10 <sup>02</sup>	1.49x10 <sup>02</sup>
Pu-239	8.32x10 <sup>11</sup>	8.51x10 <sup>10</sup>	9.18x10 <sup>11</sup>	Uranium	3.34x10 <sup>02</sup>	2.49x10 <sup>01</sup>	3.59x10 <sup>02</sup>
Pu-240	1.23x10 <sup>12</sup>	1.24x10 <sup>11</sup>	1.35x10 <sup>12</sup>	Vanadium	8.97x10 <sup>01</sup>	9.56x10 <sup>02</sup>	1.05x10 <sup>03</sup>
Pu-241	6.75x10 <sup>10</sup>	1.76x10 <sup>12</sup>	1.83x10 <sup>12</sup>	Zinc	1.47x10 <sup>05</sup>	2.06x10 <sup>03</sup>	1.49x10 <sup>05</sup>
Pu-242	1.23x10 <sup>09</sup>	1.26x10 <sup>08</sup>	1.36x10 <sup>09</sup>	Zirconium	7.42x10 <sup>02</sup>	5.95x10 <sup>05</sup>	5.96x10 <sup>05</sup>
Am-241	2.16x10 <sup>12</sup>	2.30x10 <sup>11</sup>	2.39x10 <sup>12</sup>	PAHs	3.43x10 <sup>00</sup>	0.00x10 <sup>00</sup>	3.43x10 <sup>00</sup>
Am-242m	2.35x10 <sup>09</sup>	2.39x10 <sup>07</sup>	2.37x10 <sup>09</sup>	Cl-Benzenes & Cl-Benzene	2.76x10 <sup>00</sup>	0.00x10 <sup>00</sup>	2.76x10 <sup>00</sup>
Am-243	2.67x10 <sup>09</sup>	4.31x10 <sup>08</sup>	3.10x10 <sup>09</sup>	Dioxins & Furans	9.25x10 <sup>-02</sup>	0.00x10 <sup>00</sup>	9.25x10 <sup>-02</sup>
Cm-243	2.70x10 <sup>09</sup>	5.30x10 <sup>08</sup>	3.23x10 <sup>09</sup>	PCBs	1.31x10 <sup>-01</sup>	0.00x10 <sup>00</sup>	1.31x10 <sup>-01</sup>
Cm-244	1.93x10 <sup>11</sup>	1.25x10 <sup>11</sup>	3.18x10 <sup>11</sup>				
Total	8.83x10 <sup>14</sup>	1.53x10 <sup>16</sup>	1.62x10 <sup>16</sup>				

### 2.3.2 處置概念

DGR 處置場設計在 2009 年時曾考慮過魚骨狀的規畫配置，如圖 2.3-1，因考量施工較為困難、佔地較多、及配合地質條件等因素，故於 2011 年調整為矩形式規劃(圖 2.3-2)，設置有主要豎井(Main Shaft)及通風豎井(Ventilation Shaft)等兩條豎井，處置場區分為兩部分，一部分為服務區(Services Area)，主要作為人員工作、機具置放及維修保養等場所(圖 2.3-3)，另一部分為置放區(圖 2.3-4)，設置有兩平板(Panel)區，及 31 個廢棄物置放室(Panel 1 區設有 14 個置放室，Panel 2 區設有 17 個置放室)；置放區與服務區之間藉兩條運轉隧道(Access Tunnel)將廢棄物運送至置放室內，而置放室考量到開挖穩定的因素，將設計以沿著最大水平主應力(Major Principal Horizontal Stress)的方向來開挖每個置放室，以達到最大穩定度。

而廢棄物置放室中置放之廢棄物種類有未處理之 LLW(Non-Processible LLW)、LLW 蒸汽產生器(Steam Generators)、其他 LLW 及 ILW 等(表 2.3-2)，尺寸設計規劃如表 2.3-3。每個置放室賦予編號 P1~P6，置放方式因廢棄物容器型式而有所不同，箱型廢棄物容器採用堆疊方式(圖 2.3-5)、裝填樹脂類廢棄物之圓桶型容器則採用並排置放方式(圖 2.3-6)

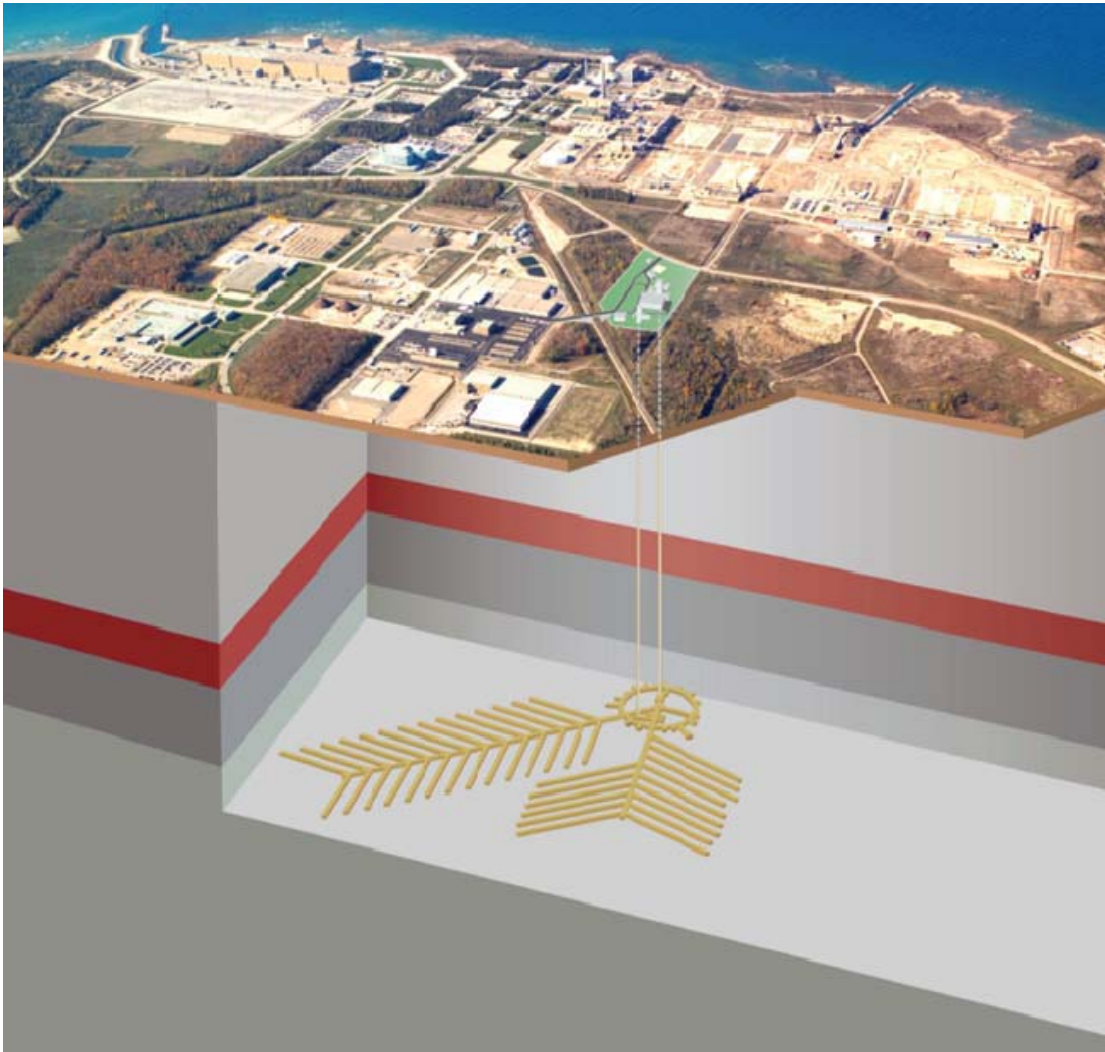


圖 2.3-1 DGR 魚骨狀規劃及配置(2009 年版)

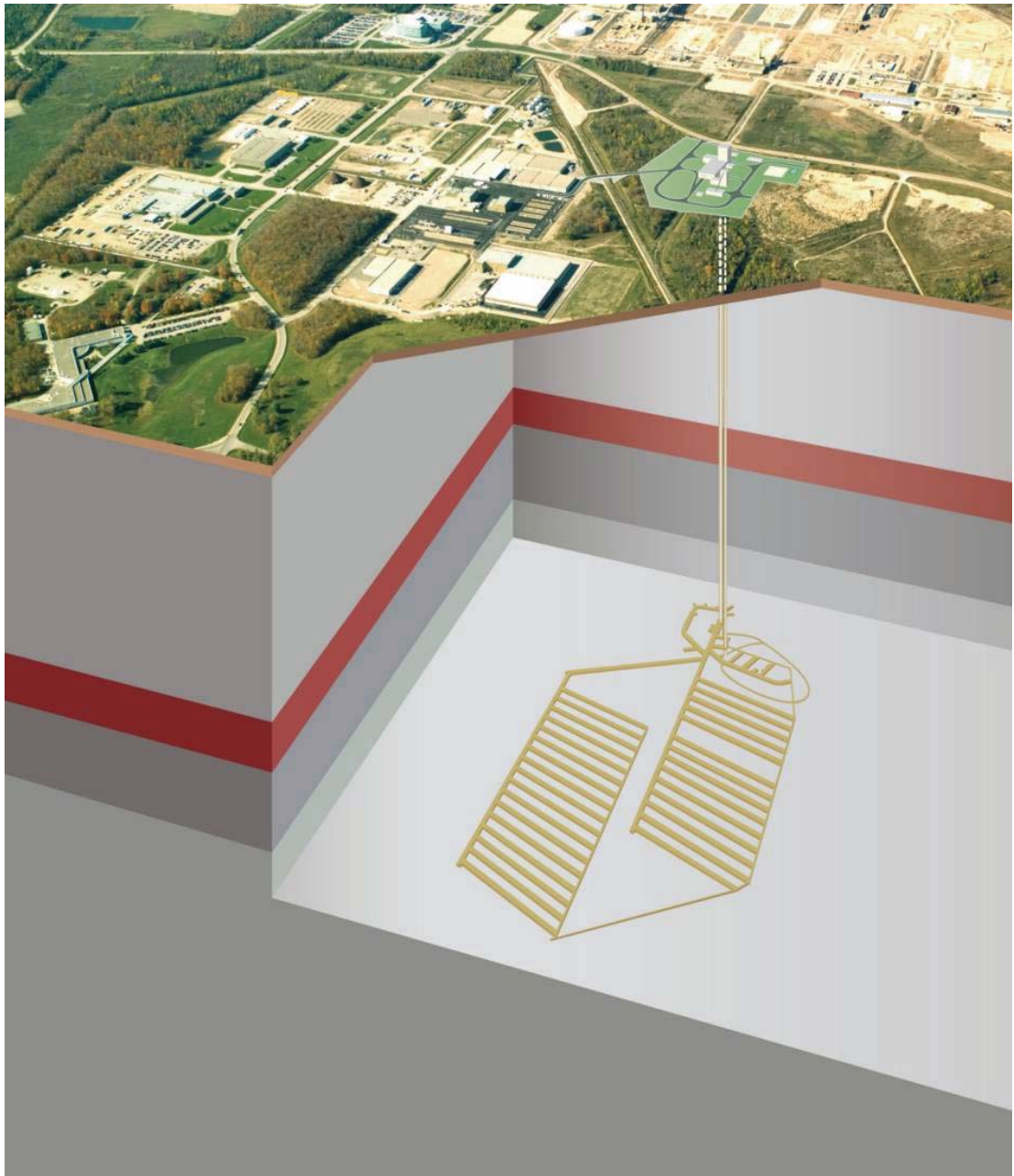


圖 2.3-2 DGR 矩形狀規劃及配置(2011 年版)

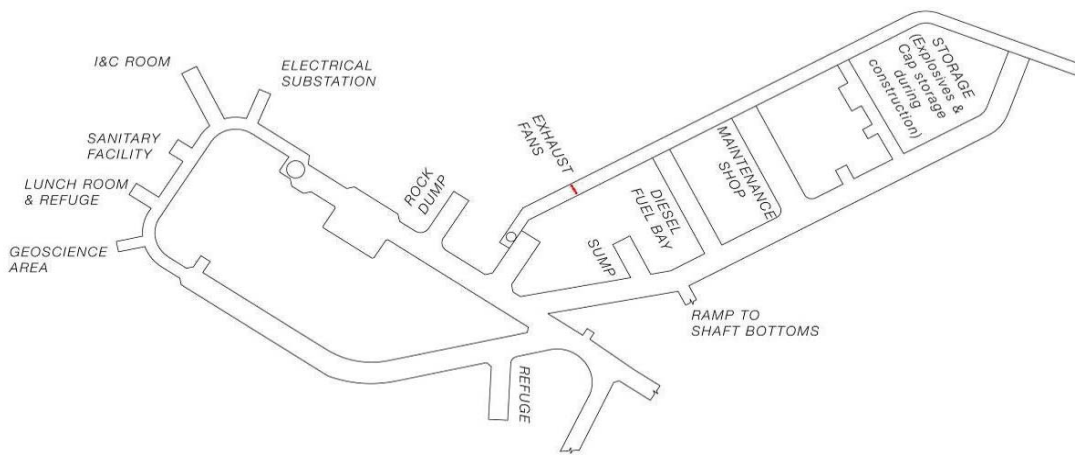


圖 2.3-3 DGR 處置場服務區

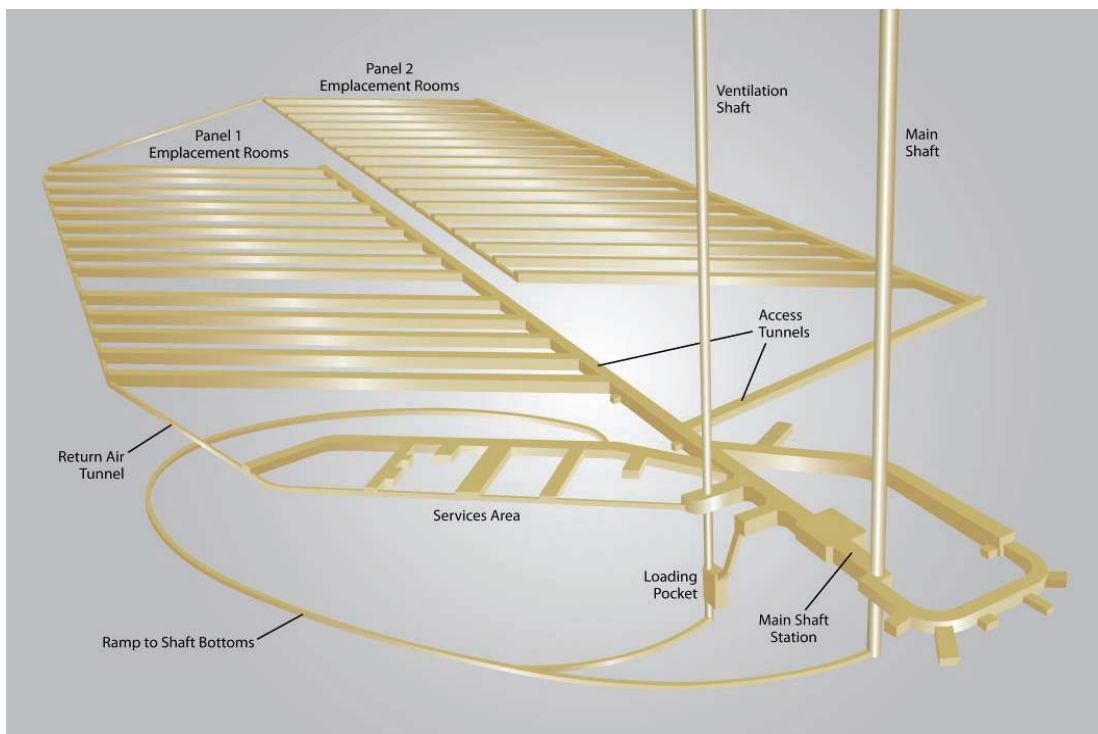


圖 2.3-4 DGR 處置場廢棄物置放區



表 2.3-2 置放室規劃及廢棄物種類

置放室 廢棄物種類	Panel 1		Panel 2
	Room 1-5	Room 6-14	Room 1-17
未處理之 LLW (Non-Processible)	1		
LLW 蒸汽產生器 (Steam Generators)		1	1
其他 LLW 種類	1	3	13
ILW 種類	3	5	4

表 2.3-3 置放室設計尺寸

置放室	Panel 1						Panel 2						總計
深度(m)	682.1						682.1						
置放室 編號	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
置放室 數目	4	0	3	2	2	3	13	1	2	1	0	0	31
每室之 長度(m)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
每室之 寬度(m)	8.6	8.6	8.4	7.4	8.4	8.1	8.6	8.6	8.4	7.4	8.4	8.1	
每室之 高度(m)	7	6.35	5.8	6.5	6.2	7.2	7	6.35	5.8	6.5	6.2	7.2	
總覆蓋 面積 (m <sup>2</sup> )	28,875						36,150						65,025

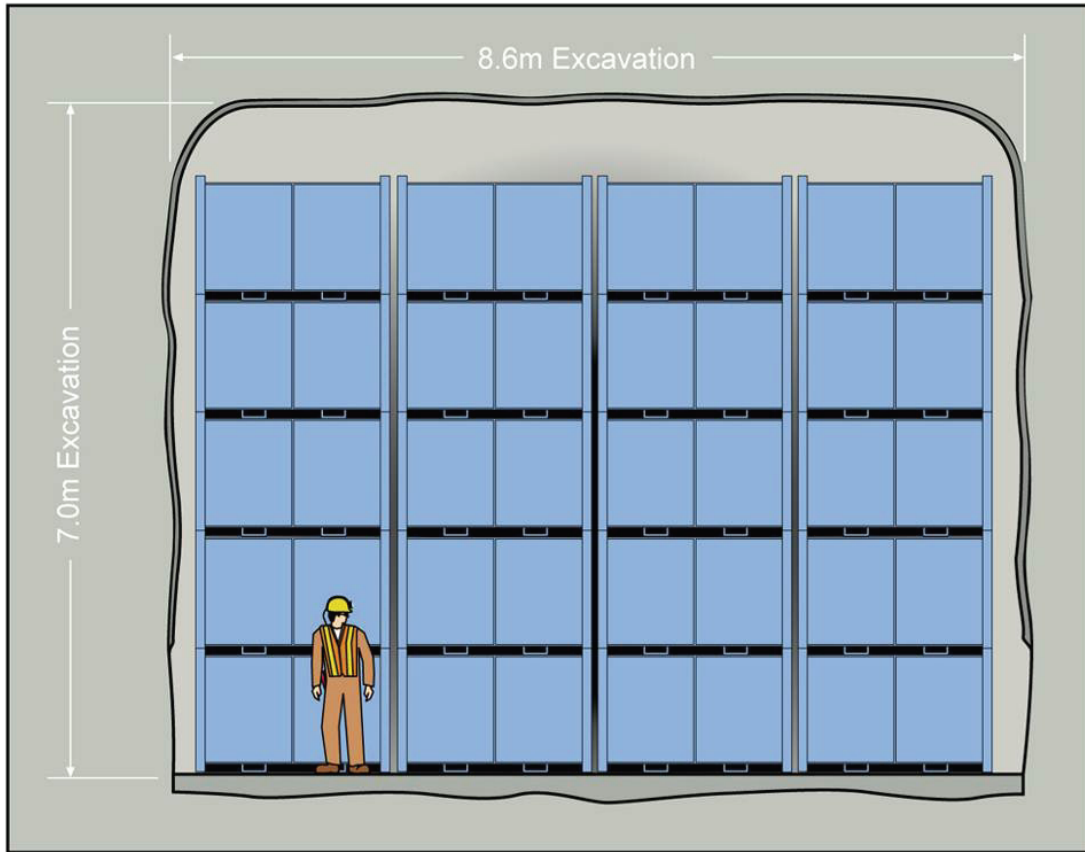


圖 2.3-5 箱型廢棄物容器堆疊方式

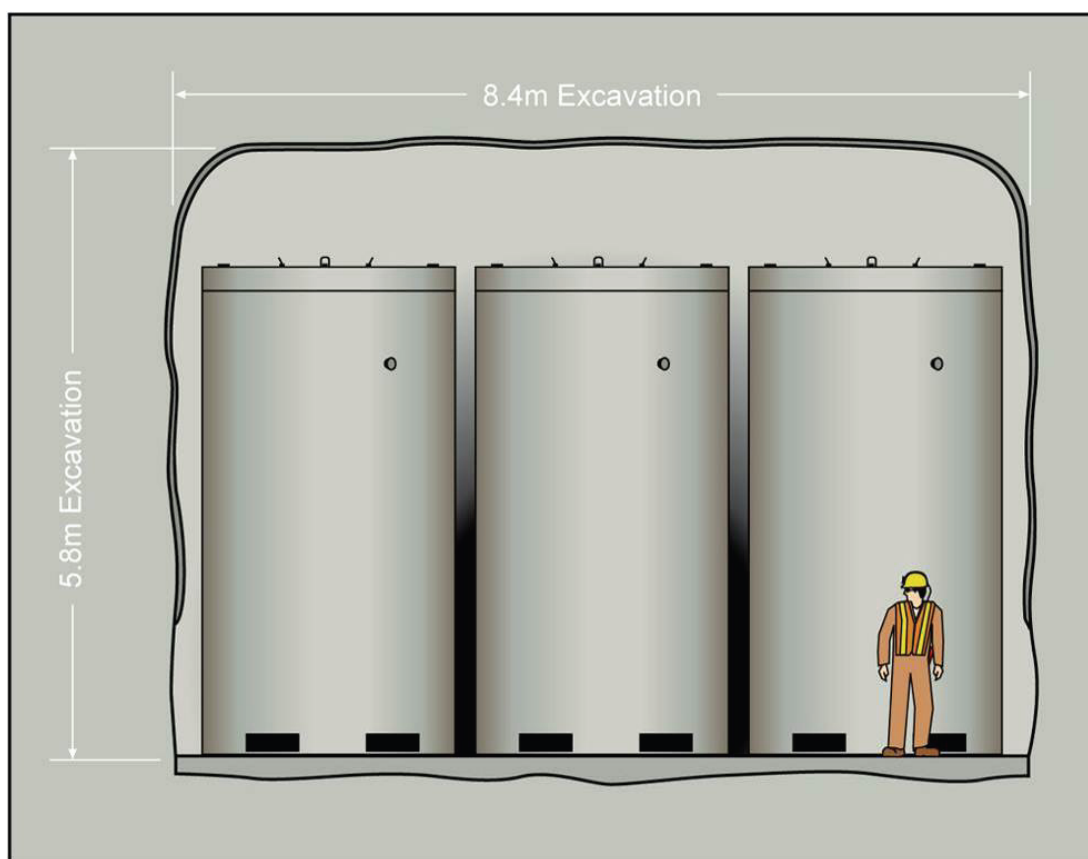


圖 2.3-6 裝填樹脂類廢棄物之圓桶型容器並排置放方式

### 2.3.3 地質概念模型

DGR 之處置場深度達 680 m 深，地層名稱又稱為 Cobourg 構造層，周圍母岩為穩定的奧陶紀頁岩層與石灰岩層，厚度達 400 m，滲透性極低。而由加拿大國內政府或學術研究單位所作的斷層(Fault)構造面調查顯示(圖 2.3-7)，Bruce 場址附近的斷層較少，而斷層構造面多位於安大略省南方區域。

而 1985 年至 2010 年間，Bruce 場址區域曾經發生地震(Seismicity)的震央位置及地震規模如圖 2.3-8，Bruce 場址半徑 50 Km 內曾經發生一次規模達 2 級之地震，震央位於 Bruce 場址北方之休倫湖內；半徑 150 Km 範圍內於 2005 年曾經發生一次規模達 4.3 級之地震。

為求了解深地層特性，利用鑽井(Borehole)取得岩芯並加以判釋，可以了解岩層分布及裂隙(Fracture)分布，Bruce 場址已有較為淺層的 US 系列井，而 OPG 陸續在 DGR 預定場址周圍進行六口深井的鑽井，編號為 DGR-1~6，相關位置如圖 2.3-9，另由圖 2.3-10 中可看出 DGR-5 及 DGR-6 兩口井為斜井，其餘為直井。圖 2.3-11 為由鑽井之岩芯判釋其孔內自然裂隙頻率(Core Natural Fracture Frequency)，可看出深度 200 m 以內裂隙頻率較高，顯示淺層區域之地層分布較破碎，往下深度越為深層，其裂隙頻率越小，顯示深層區域屬完整且穩定之地層結構，而岩層分布如圖 2.3-12。

另由跨孔水力試驗中得到之各地層之水力傳導度(圖 2.3-13)，可看出處置場所在的 Cobourg 構造層之水力傳導度相較於其上的每一層均為低。

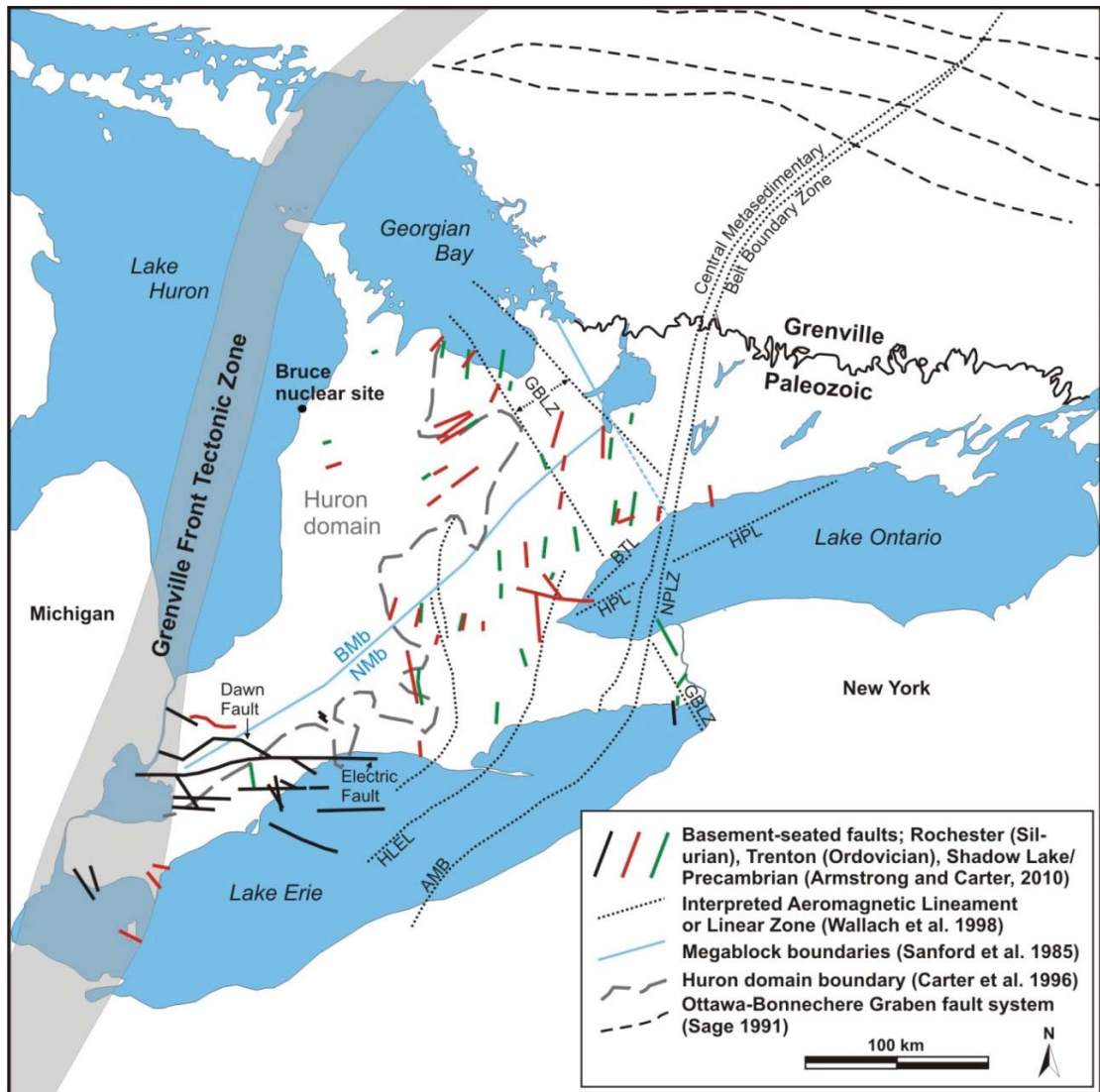


圖 2.3-7 斷層構造面調查

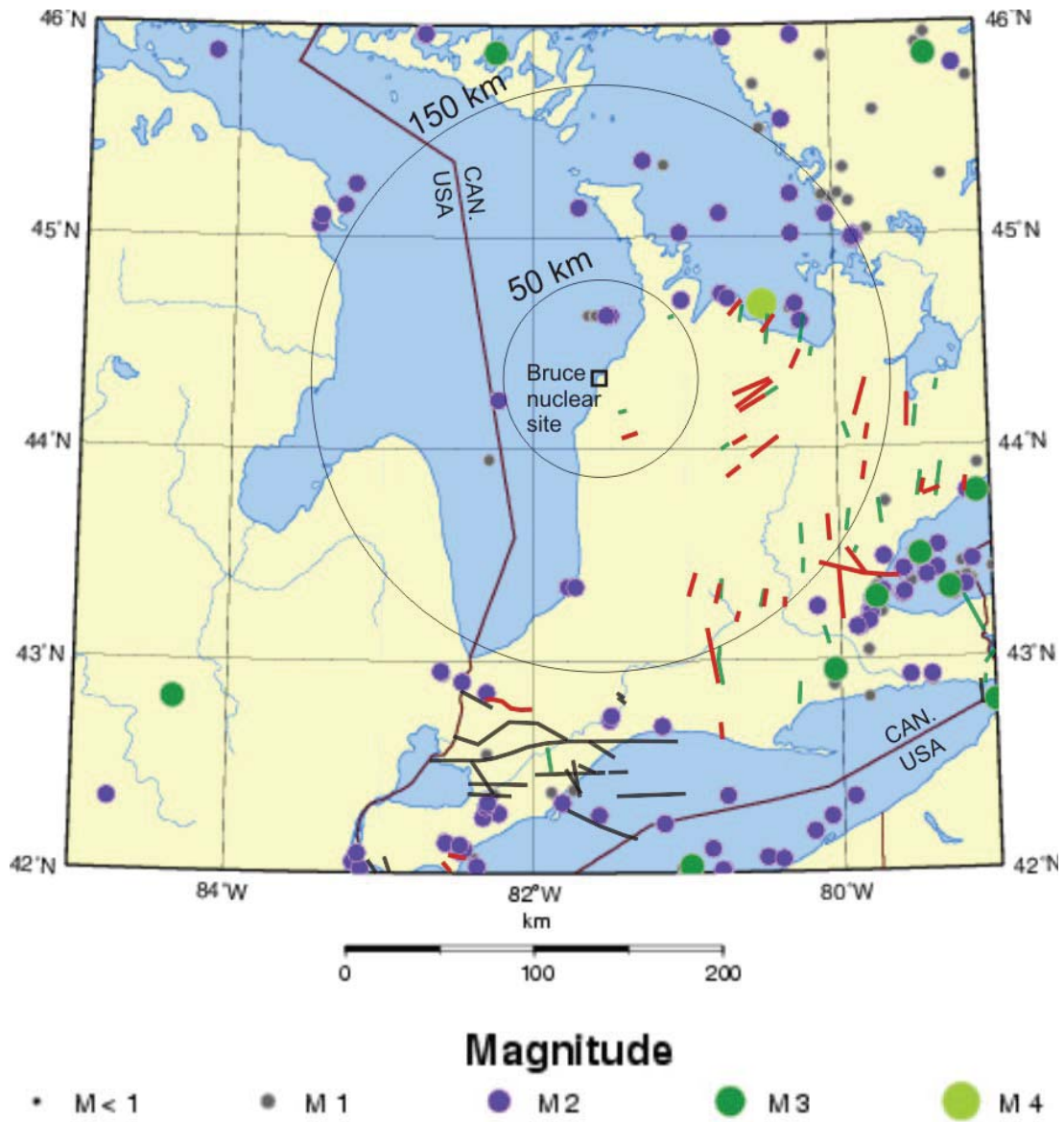


圖 2.3-8 Bruce 場址周圍之 1985~2010 年間的地震活動性

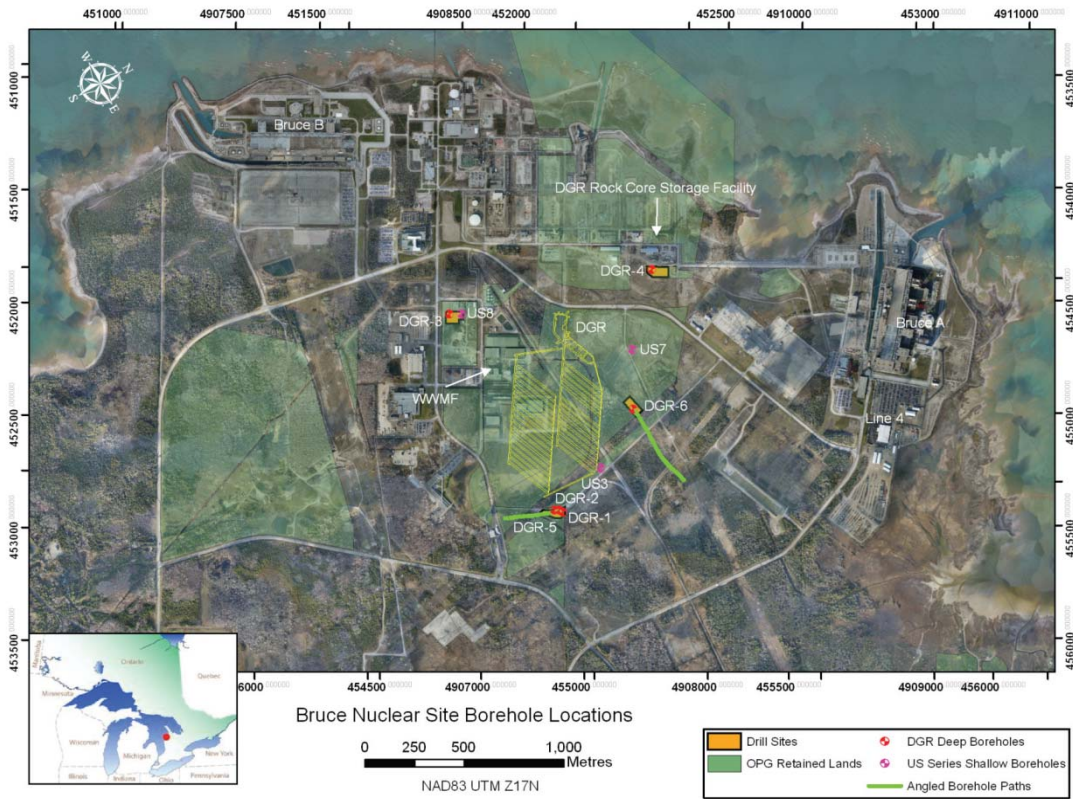


圖 2.3-9 DGR 系列與 US 系列之鑽井位置圖



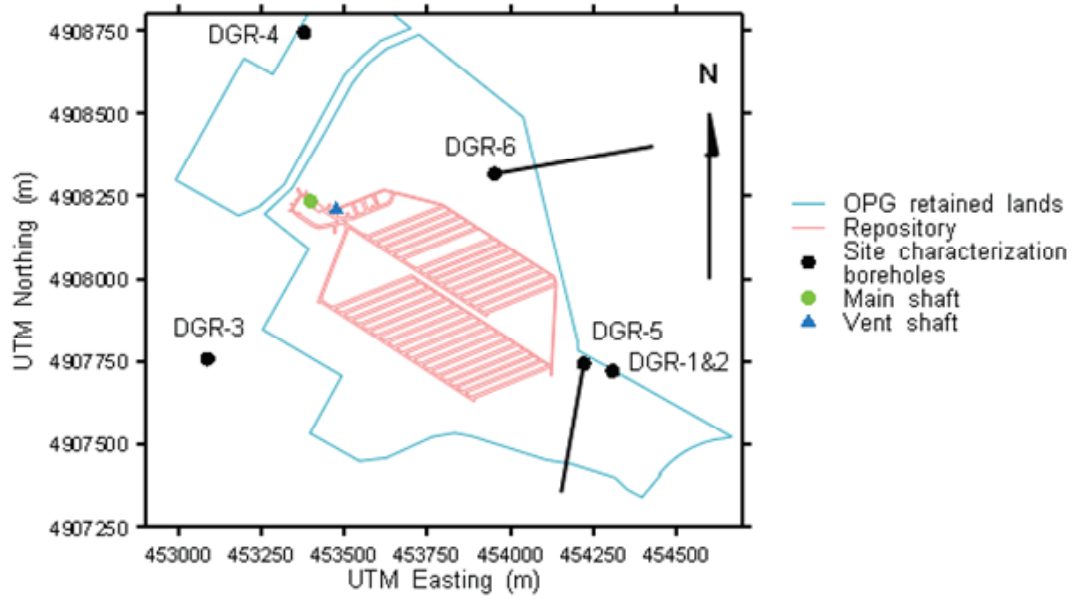


圖 2.3-10 DGR 系列鑽井位置

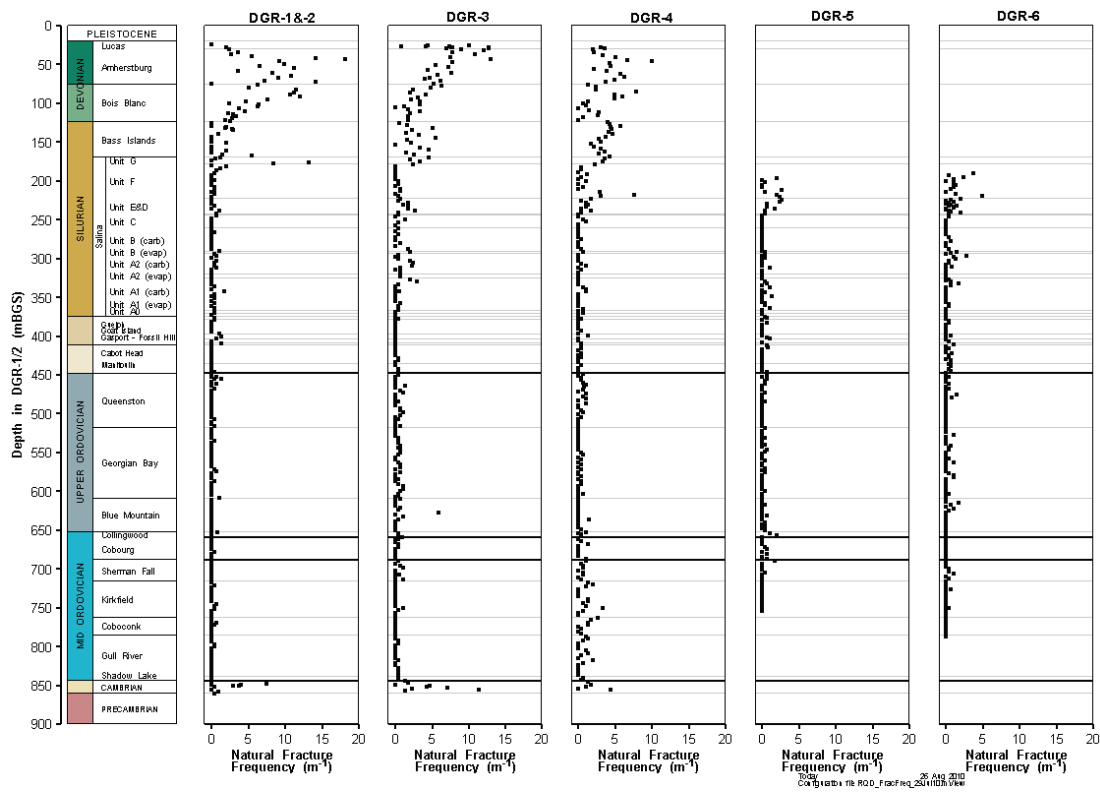


圖 2.3-11 井內自然裂隙頻率調查



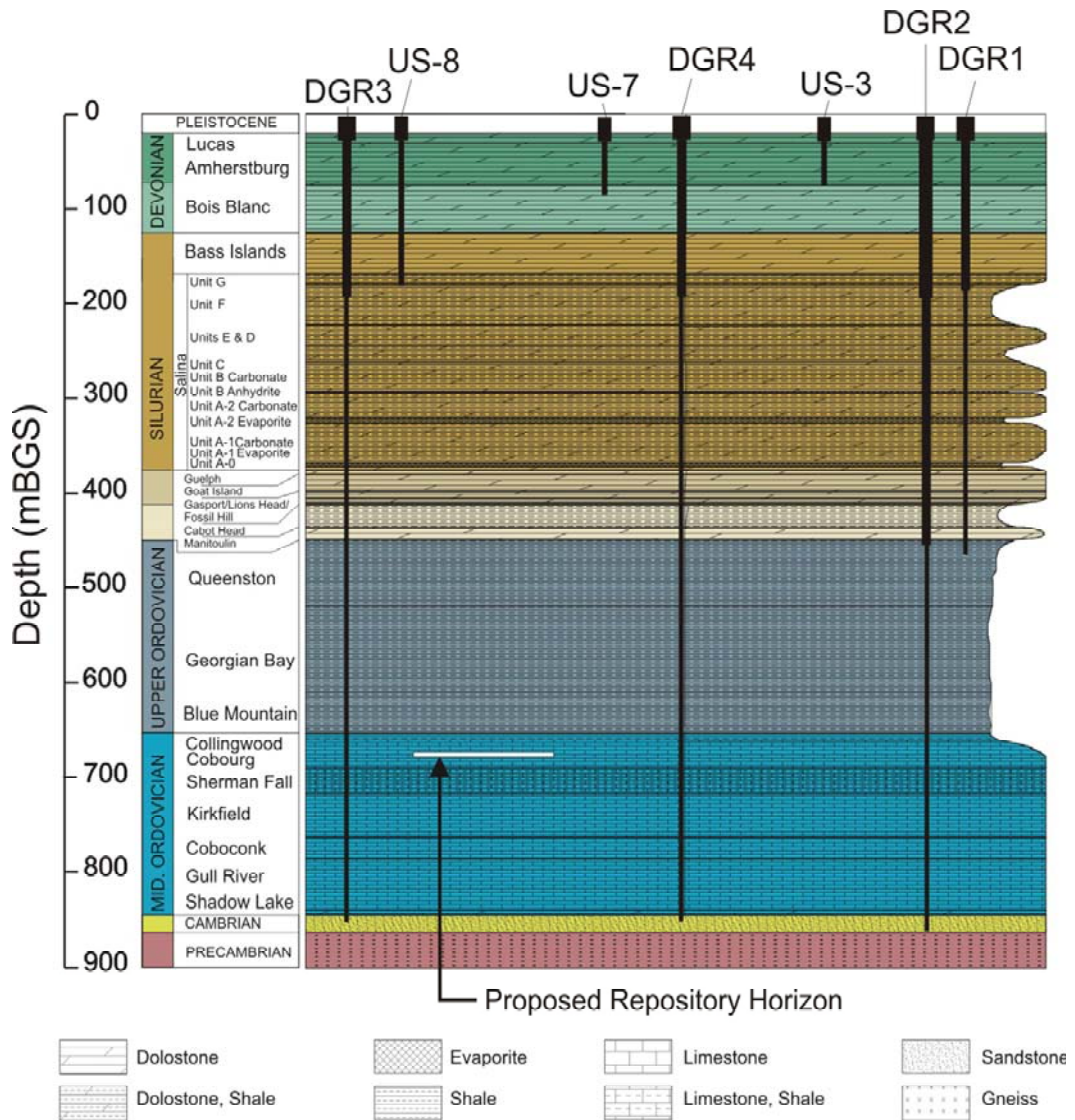


圖 2.3-12 鑽井探查岩層分布

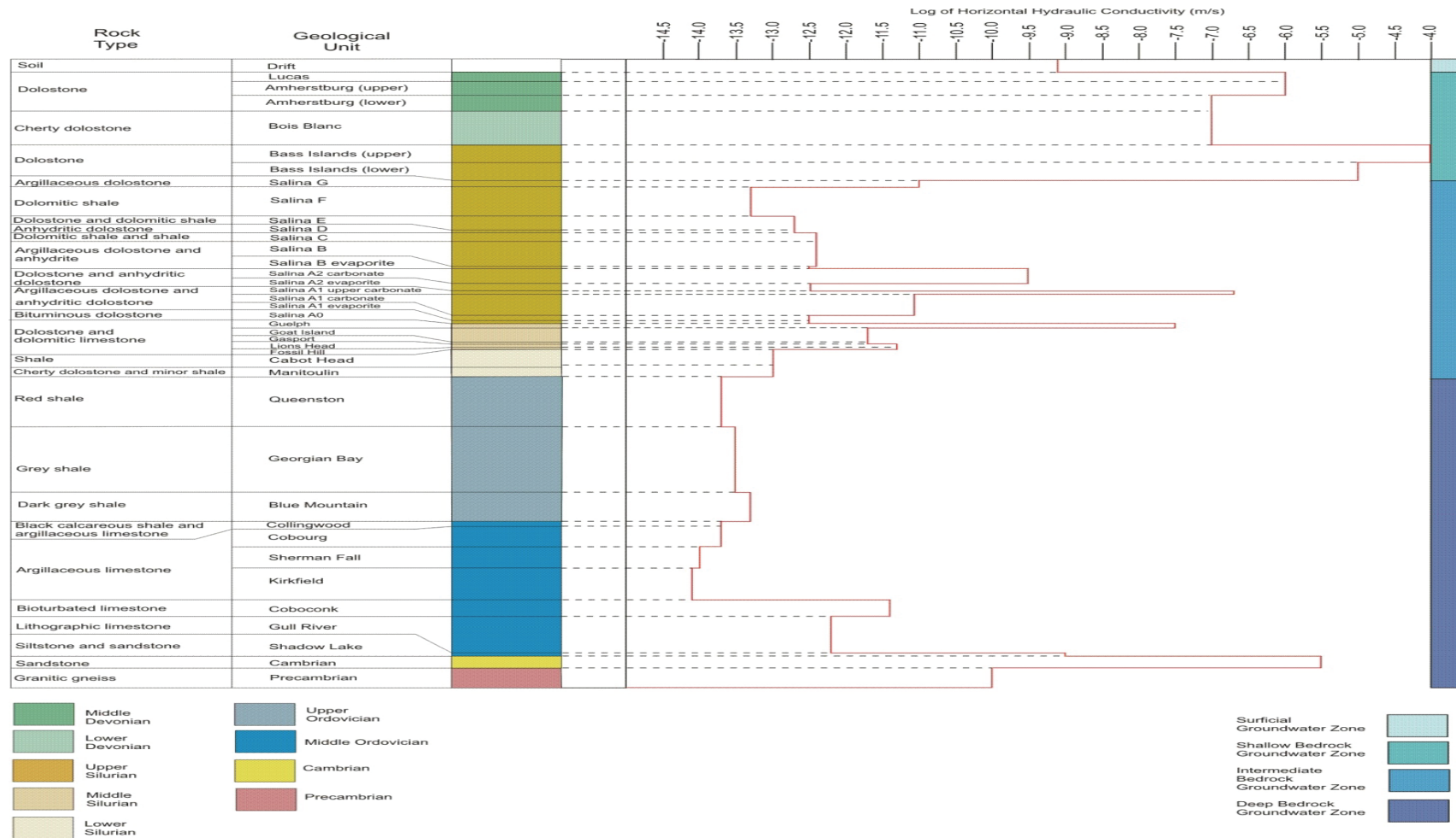


圖 2.3-13 跨井水力試驗之水力傳導度結果

### 2.3.4 情節與傳輸途徑分析

DGR 安全評估中，對放射性核種的傳輸途徑如圖 2.3-14，首先核種於置放室內經歷自由混合(Free Mixing)及分離(Partitioning)之作用後，由於處置場所在位置周圍母岩滲透性極低，因此藉由擴散作用將核種傳輸至開挖擾動帶區(Excavation Damaged Zone, EDZ)及坑道區，亦產生氣體的外釋。而 EDZ 及坑道區因開挖作用導致周圍岩石因解壓而孔隙率增大，水流滲透率提高，因此核種主要藉由移流及擴散作用傳輸至豎井區，在豎井區亦同樣藉由移流及擴散作用傳輸至生物圈活動範圍。

針對 DGR 之情節設定有正常演化情節(Normal Evolution Scenario)及破壞情節(Disruptive Scenario)等，敘述如下：

正常演化情節：在一百萬年的評估時間裡，發生廢棄物本體和外包裝容器剝蝕，工程障壁材料出現劣化及失去效益後，放射性核種藉由擴散及延散作用在地下水中傳輸，且伴有氣體產生且外釋，如圖 2.3-15。

在正常演化情節下，考慮兩種案例分析：

- (1)參考案例(Reference Case)：由奧陶紀沉積物內部壓力及寒武紀砂岩之超額壓力(Overpressure)造成之地下水流動，參考案例之建立係依據 2011 年的地質圈特性調查計畫並結合地層學理論。
- (2)簡化基本案例(Simplified Base Case)：簡化為穩態條件，將處置場超額壓力保守地歸為來自於寒武紀，此超額壓力會消失在深層及中間層岩床之地下水流區域，而造成與淺層岩床地下水流域間保持一固定之垂直水頭梯度。

破壞情節：在處置場封閉後，因人類不經意的入侵行為、豎井或調查井發生回填失效、及發生垂直斷層等主客觀因素，而破壞到原本處置場的

設計效能，形成處置場與生物圈接觸的通路，致使放射性核種突然從該通路中外釋，考慮以下 4 種：

- (1)人類入侵情節(Human Intrusion)：在處置場解除監管後，人類不經意地進行鑽井，短期間內造成氣體外釋(圖 2.3-16a)，長期來看，核種於岩體中隨地下水中傳輸，當接觸到人類鑽井後，藉由擴散作用到達淺層地下水區，而在淺層地下水區即由移流作用到達人類飲水井(圖 2.3-16b)。
- (2)豎井回填失效情節(Severe Shaft Seal Failure)：

豎井及坑道的回填採用：

- (a)巨型混凝土石塊(Concrete Monolith)：提供穩定支撐；
- (b)混凝土隔板(Concrete Bulkheads)：提供滲透阻絕及結構支撐；
- (c)工程回填材料(Engineered Fill)：採用膨潤土(70%)與砂(30%)之重量百分比混合，具有低滲透性、潛變(Creep)、自癒(Self-heal)等特性；
- (d)混凝土蓋(Concrete Cap)：當豎井回填完畢於頂端加置混凝土蓋。

當回填材料隨著時間演變發生材料劣化失效，原豎井回填區極有可能出現孔隙，造成地下水滲入，形成核種傳輸的通路(圖 2.3-17)。

- (3)調查井回填失效情節(Poorly Sealed Borehole)：當執行場址調查所用之調查井 DGR-1~6 如發生回填失效的情形，亦有可能發生如前述豎井回填失效的情形，造成核種傳輸的通路(圖 2.3-18)。

- (4)垂直斷層經過情節(Vertical Fault)：假想在處置場封閉後，因大地構造作用而在處置場周圍產生斷層，而形成核種可能傳輸的通路(圖 2.3-19)。

DGR 之 2011 年版封閉前安全評估報告中，加入了氣體傳輸的考量，氣體主要由於處置場有機廢棄物(Organic Waste)中許多微生物分解產生，或從金屬廢棄物(Metallic Waste)腐蝕過程中揮發產生，其氣體產生後多伴隨地

下水流往地質圈中傳輸。在處置場封閉後，存在的氣體會影響封閉式處置場中再飽和 (Resaturation) 的時間，且會帶出氣體狀態核種 (Gaseous Radionuclide) 的釋出，因此氣體產生 (Gas Generation) 亦為 DGR 處置場安全評估中之考量。

圖 2.3-14 DGR 處置場核種傳輸途徑

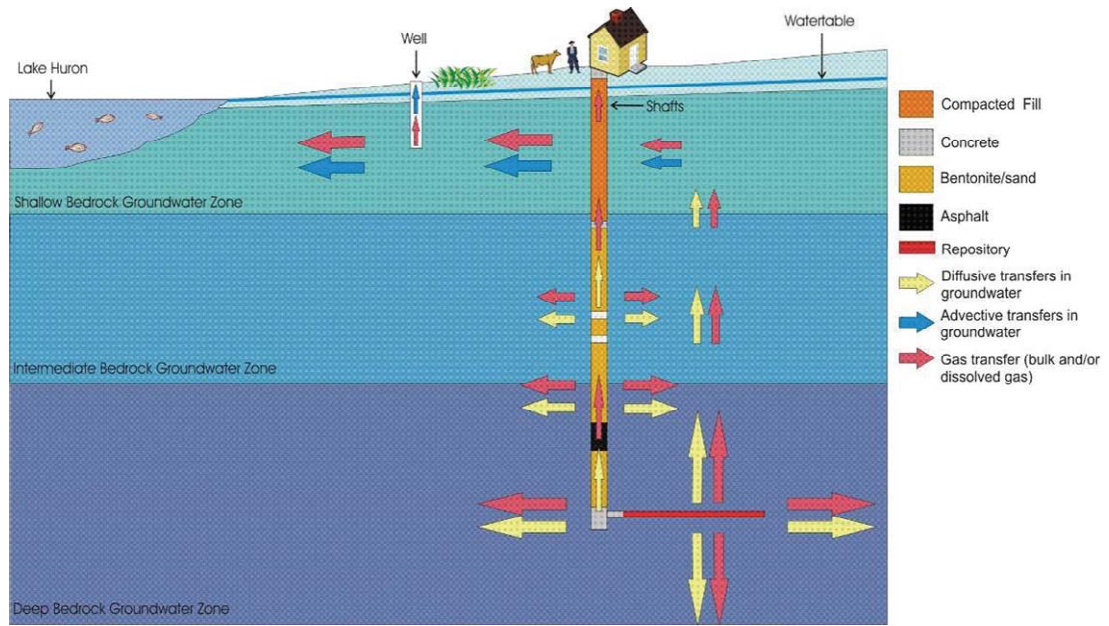
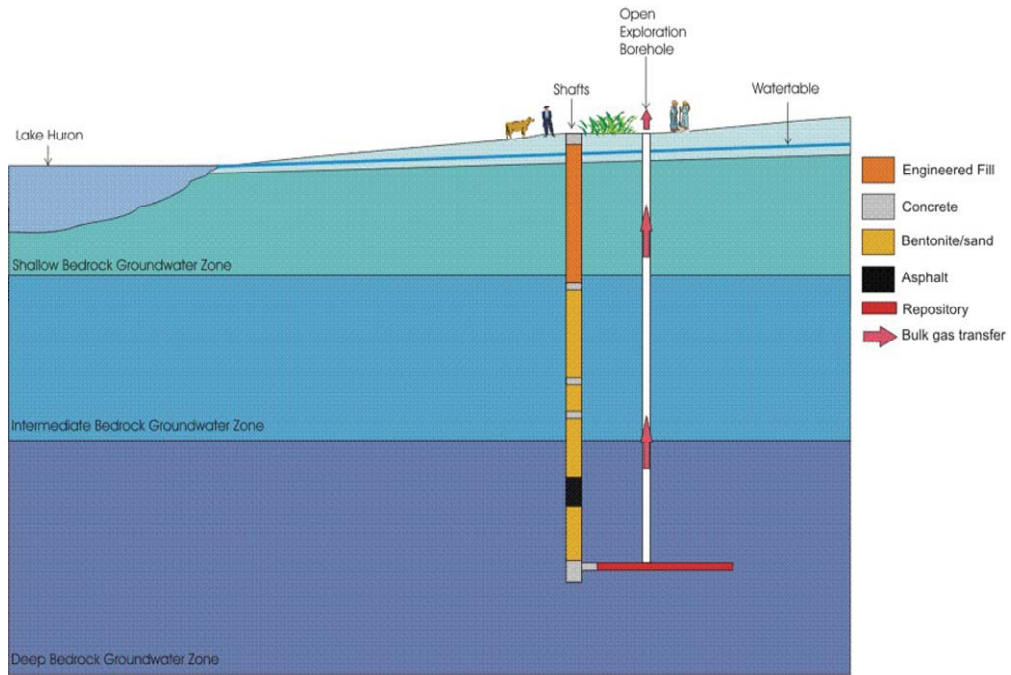
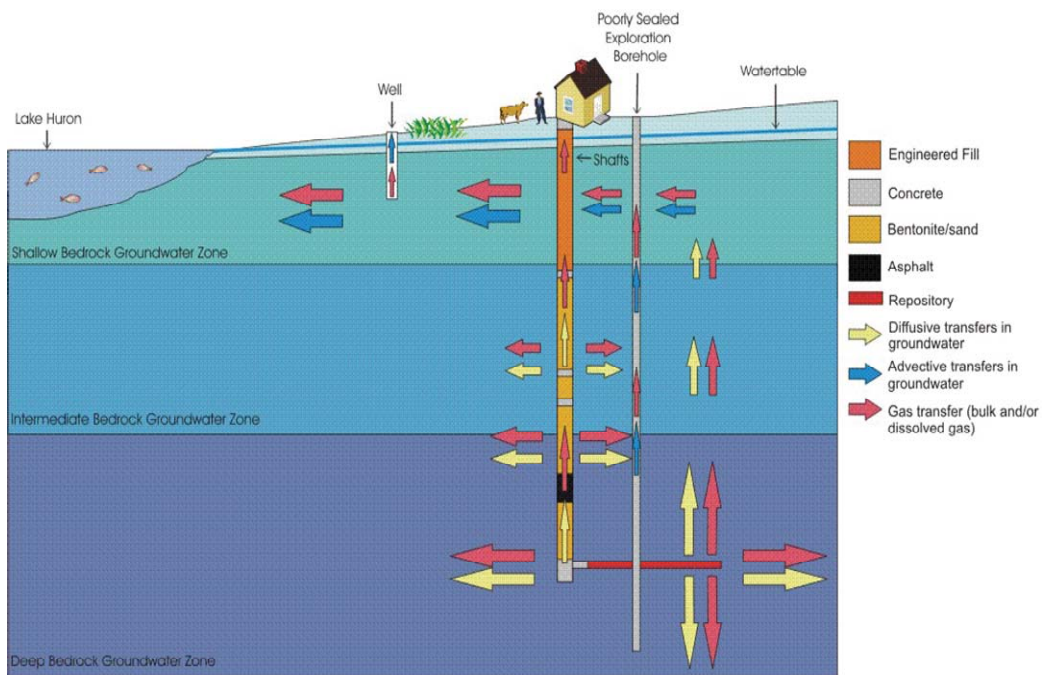


圖 2.3-15 DGR 處置場安全評估之正常演化情節





(a) 短期氣體外釋



(b) 長期地下水外釋

圖 2.3-16 人類入侵情節



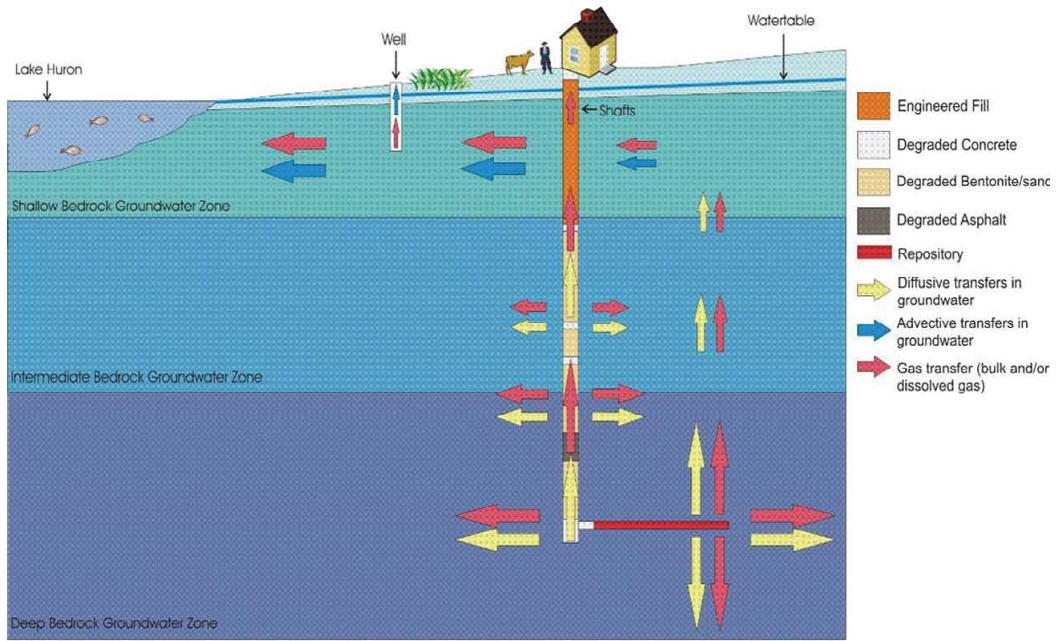


圖 2.3-17 豎井回填失效情節

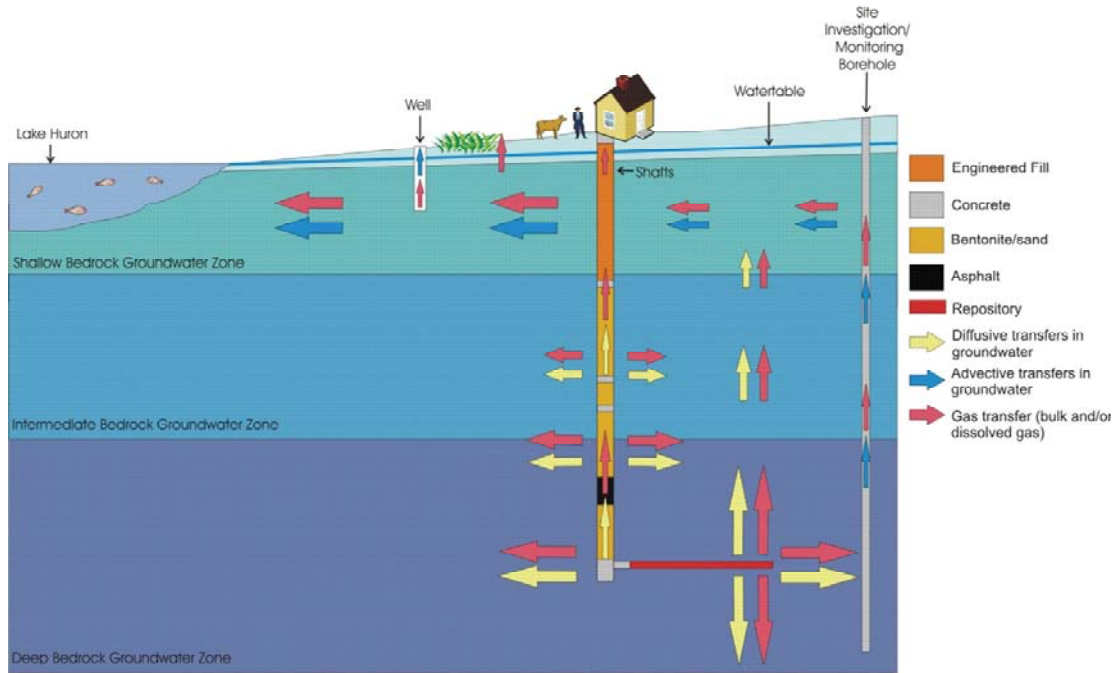


圖 2.3-18 調查井回填失效情節

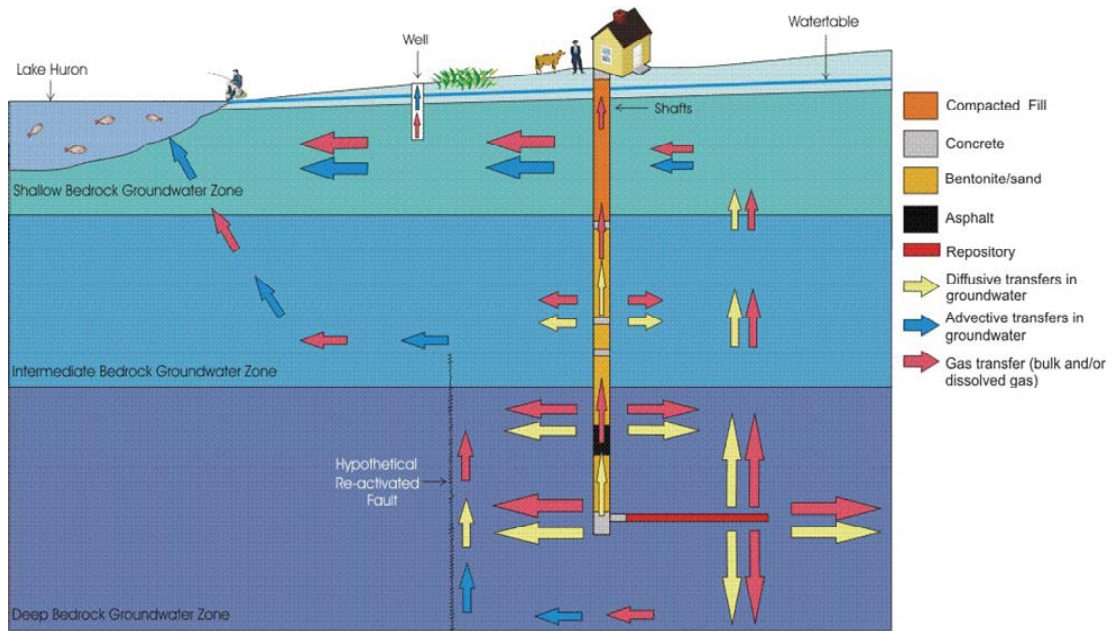


圖 2.3-19 垂直斷層經過情節

### 2.3.5 安全評估

DGR 之 2011 年版封閉前安全評估報告中，由於已確定：

- (1)處置場採深層處置場型式；
- (2)處置場位置位於 680 m 深處之穩定頁岩層與石灰岩層；
- (3)廢棄物存量確定估算至 2062 年封閉前的存量；
- (4)確定將進行 L&ILW 的廢棄物處置；
- (5)處置場置放概念與配置尺寸之資料已完備；

(6)地質調查與鑽井調查之數據資料已完備等六項處置場重要性，故 Quintessa Ltd. 在進行安全評估時方能決定採用 FRAC3DVS-OPG、T2GGM、及 AMBER 之程式鏈(圖 2.3-20)來模擬與評估，其中

FRAC3DVS-OPG：為 NWMO 為配合 DGR 計畫所撰寫之程式，其功用可依據現地地質條件及地質參數建構三維現地模型，並應用水流傳輸理論、有限元素法及水力邊界條件等，來建立地下水流場(圖 2.3-21)。

T2GGM：加拿大 DGR 計畫中發展之氣體產生模式(Gas Generation Model, GGM)用來模擬處置場中氣體的產生過程、及氣體在處置場與地質圈交界處之相互影響，DGR 計畫已根據 GGM 模式及理論發展出一套 Fortran 程式；TOUGH2 程式為 Lawrence Berkeley National Laboratory 之地球科學組發展，可用於模擬地質圈中孔隙介質(Porous Media)中之多相流(Multi-phase Fluid Flow)模式；而 T2GGM 程式之概念為將 GGM 模式與 TOUGH2 程式之多相流模式結合起來，作為一套可以分析氣體和地下水在處置場及地質圈中傳輸之程式(圖 2.3-22)。

AMBER：為 Quintessa Ltd.所撰寫及發展的視窗程式，採用區塊模式來分析，藉由建立各區塊間的機制作用來串連每個區塊。2011年版安全評估採用更新版本 AMBER 5.3 版(Quintessa Ltd., 2009)來進行近場、遠場之核種外釋濃度評估，其正常演化情節與破壞情節之近場與遠場之區塊串聯如圖 2.3-23 與圖 2.3-24，評估結果之核種歷時曲線如圖 2.3-25，顯示各案例之核種活度歷時曲線皆低於原先的核種總活度值。

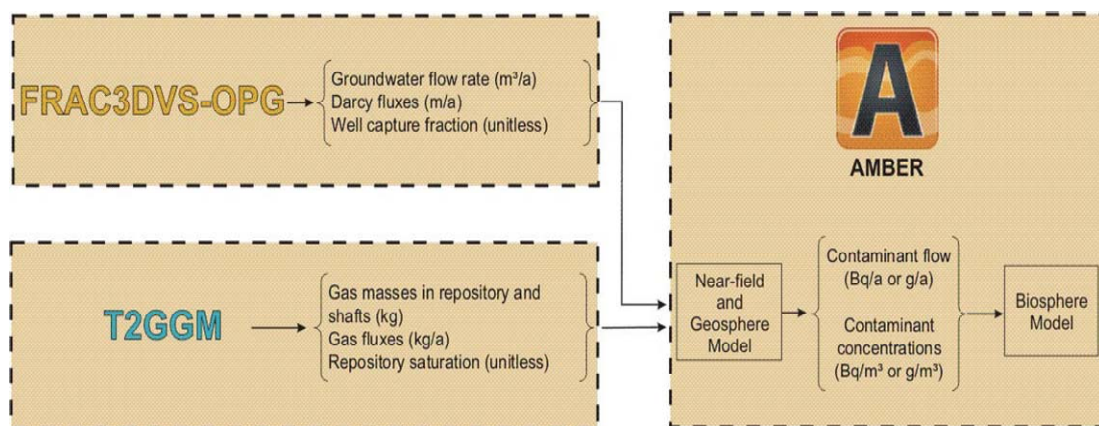


圖 2.3-20 分析程式鏈

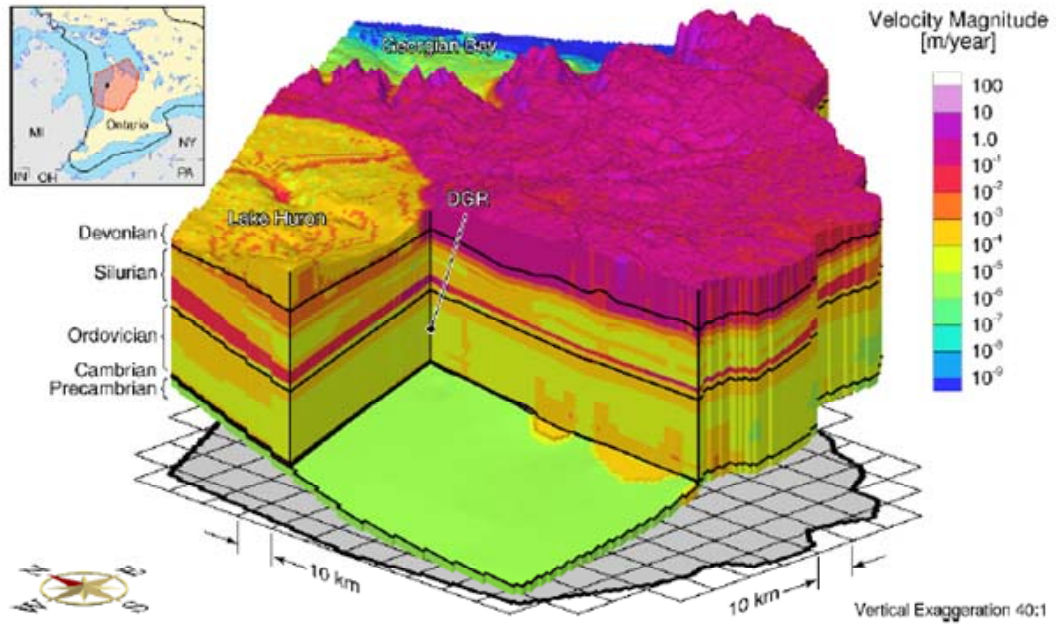


圖 2.3-21 FRAC3DVS-OPG 之模擬流場分布

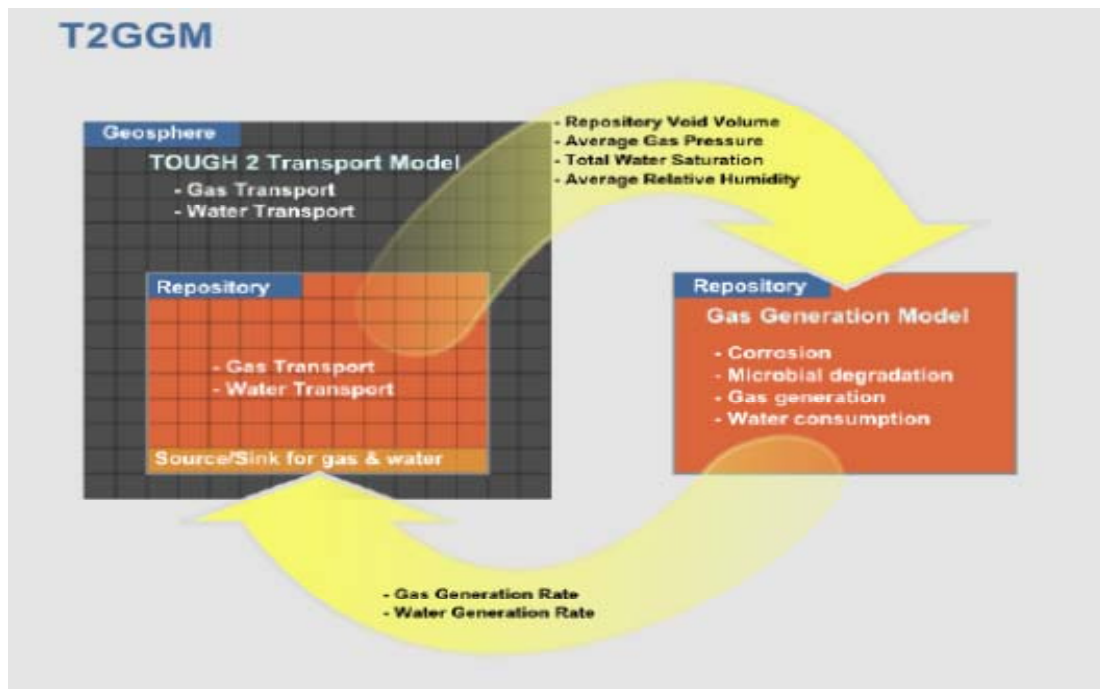


圖 2.3-22 T2GGM 之程式架構與功能



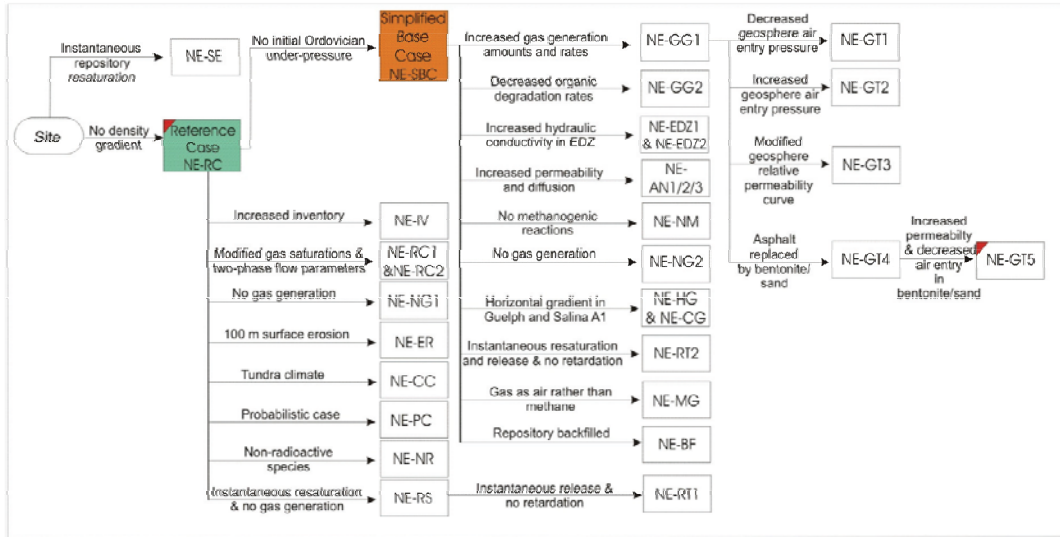


圖 2.3-23 正常演化情節下近場與遠場之區塊串聯

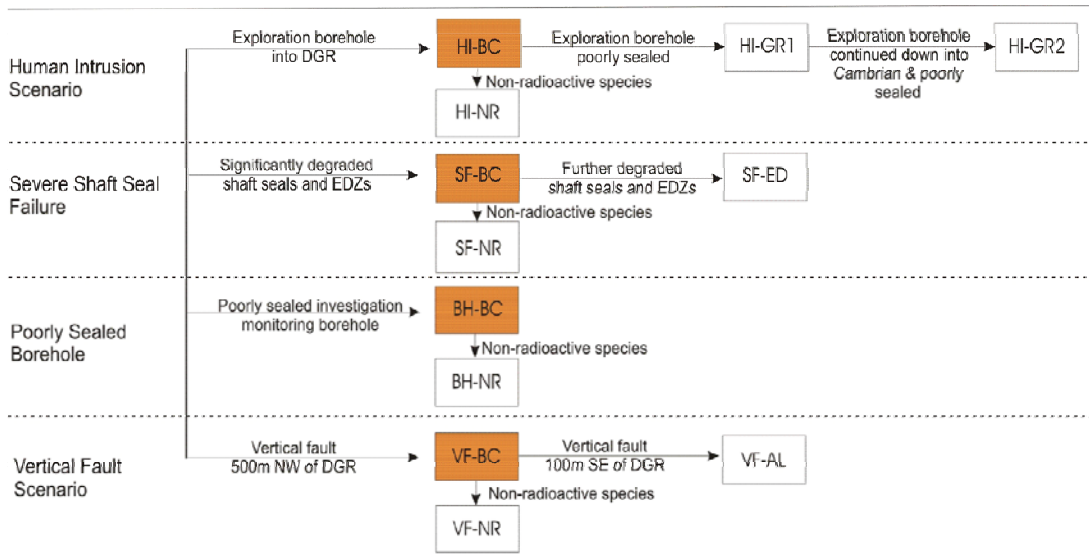


圖 2.3-24 破壞情節下近場與遠場之區塊串聯

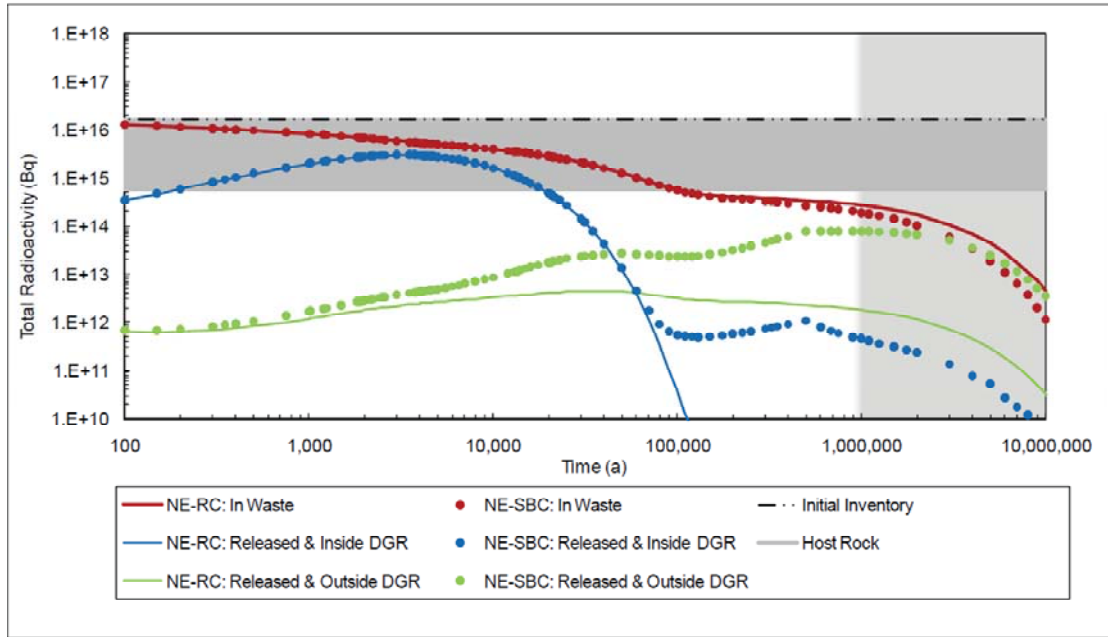


圖 2.3-25 安全評估之核種活度歷時曲線

## 2.4 安全評估之重要參數研析

由於我國與加拿大之低放處置同採坑道處置，但廢棄物、處置場與地質環境不盡相同，本研究僅就安全評估中所需之參數類別加以說明。

加拿大安全評估中，使用之參數類別區分為廢棄物類(或稱源項)參數、處置場類(或稱近場)參數、地質圈類(或稱遠場)參數等(詳細數值參閱附錄二)，說明如下：

### 2.4.1 廢棄物類參數

廢棄物類參數之需求與說明如下

#### (1)核種基本特性：

(A)半化期(Half-life)及衰變常數(Decay Constant)：半化期為放射性核種衰變至初始活度一半所需的時間，又稱為半衰期；衰變常數為放射性核種在單位時間內衰變的原子所占的分數。而半化期與衰變常數皆屬放射性核種之特定性質，與外在環境變異性無關。

(B)衰變鏈(Decay Chain)：從一個母核種進行一連串的衰變至另一個核種，直到此子核種為穩定核種為止，又稱衰變系列(Decay Series)

#### (2)廢棄物存量(Inventory)：描述各核種之初始活度

#### (3)化學性質：

(A)水質特性(厭氧或好氧、pH、溶解度、氯化物濃度)

(B)溶解度

(C)吸附係數

(D)腐蝕率

(E)微生物剝蝕率



## 2.4.2 處置場類參數

處置場類參數之說明與需求如下：

(1)設計及配置參數：為處置場基本參數，於安全評估中關係到概念模式之邊界建立，需求如下：

(A)基本設計及配置(Layout)

(B)置放室(Emplacement Room)、運轉隧道(Access Tunnel)、通風斜坑(Ventilation Drift)等之尺寸

(C)主要進出豎井與通風豎井之尺寸

(2)處置容器特性參數：為廢棄物本體外第一層包覆之工程障壁，其參數需求如下：

(A)容器尺寸、幾何形狀(箱型或圓筒型)

(B)容器材質、密度

(C)內容量、外容量、外表面積

(D)容器壁厚(Wall thickness)、外塗層

(E)地化環境對處置容器的腐蝕率

(3)回填材料特性參數：為處置場人工製成材料之基本參數，於安全評估中關係到概念模式之建立及水流傳輸之模擬。處置場封閉後之回填材料特性參數需求如下：

(A)置放室回填混凝土所需數量

(B)豎井回填之材料特性，包含密度、擴散係數、比儲水率、水力傳導度及孔隙率等

(a)結構混凝土(Structural Concrete)；

(b)低熱高性能水泥(Low Heat, High Performance Cement, LHHPC)；

(c)膨潤土/砂(Bentonite/Sand)；

(d)瀝青水泥混合物(Asphalt Mastic Mix)；

(e)工程回填物(Engineered Fill)。

加拿大 DGR 安全評估中，針對以上五種回填材料，以試驗室方法求得各項參數，分別考慮材料在發生劣化變質前及發生劣化變質後的兩種情況，而水力傳導度及孔隙率等參數在經過統計分析後得到適當之分布型態，具有重要的參考價值

(C)化學元素在材料介質中之吸附係數(Sorption Coefficient;  $K_d$ )。

### 2.4.3 地質圈類參數

地質圈類參數之說明與需求如下：

#### (1)地質特性

(A)分層深度、水質：分層深度為了解各地質層之深度，並藉由地下水特性調查判別各層之水文地質分區的歸類，在地質圈之概念模型建立中為基本之場址特性參數；另藉由 DGR-3 及 DGR-4 鑽井之地下水質樣本分析，了解整個地下水環境中 pH、Eh、及各離子濃度等特性及參數值，有助於對地球化學方面之研究。

(B)開挖擾動帶特性：如擾動帶之厚度、孔隙率等

#### (2)傳輸特性

(A)傳輸路徑長度與面積

(B)水力傳導度及滲透性

(C)地下水位及水力梯度

(D)比儲水率

(E)孔隙率

(F)核種元素在地質圈中之吸附係數值

### 3.低放坑道處置安全評估關鍵議題之建議

#### 3.1 低放射性廢棄物坑道處置安全評估之關鍵議題

加拿大為求解決核能電廠運轉產生的 L&ILW，從 1998 年開始即已著手進行概念設計、地質調查、及安全評估等重要工作，而至今能於 2011 年有個明確場址，並提送封閉前安全評估報告及環境衝擊評估報告予政府單位進行審查，其成功經驗可回饋予我國低放處置安全評估進行參考。

綜觀第二章加拿大安全評估之案例說明，並對安全評估有關工程障壁及地質障壁關鍵議題進行研析，提出之關鍵議題區分為八大分類共計十三項議題，如表 3.1-1 所列，並依序敘述如下：

表 3.1-1 關鍵議題分類說明

分類	關鍵議題
分類一、廢棄物存量估算	議題一、存量估算時間
分類二、核種特性	議題二、初始活度或濃度
	議題三、半化期及衰變常數
	議題四、衰變鏈特性(母核種及子核種)
分類三、工程障壁材料	議題五、廢棄物容器形狀與材質
	議題六、豎井與坑道回填材料特性
	議題七、開挖擾動帶特性
分類四、地質圈	議題八、地質概念模型
	議題九、地下水傳輸
分類五、氣體傳輸	議題十、氣體產生、傳輸、及評估程式
分類六、情節	議題十一、情節演化與建構
分類七、評估程式	議題十二、評估程式的適用、串聯與精進
分類八、參數不確定性與變異性	議題十三、參數不確定性與變異性

## 分類一、廢棄物存量估算

### 議題一、存量估算時間

廢棄物存量多寡影響到處置場設計容量、處置場配置、及安全評估中源項(source term)之數量；而存量估算時間的設定影響到存量的多寡。概念設計階段(2003年版)，存量估算為以核能電廠使用年限做考量，以 LLW 為主，總計 37 個關鍵核種，其預估至 2035 年之核種總活度達  $1.3 \times 10^{15}$  Bq；執照申請階段(2011年版)，因 DGR 之設計、建造、運轉、與封閉時程已有一完整的規劃，故採用 DGR 封閉後之時間作為存量估算時間，並以 I/LLW 為主，總計有 37 個關鍵核種，其預估自 2062 年之核種總活度達  $1.62 \times 10^{16}$  Bq。

考量我國國情現況，核能電廠使用期與處置場封閉期未必相符，故廢棄物存量估算期宜配合處置場的時程規劃。

## 分類二、核種特性

### 議題二、初始活度或濃度

安全評估中，須能依存量分析中獲得個別核種之初始活度(Activity)或濃度(Concentration)，活度單位為貝克(Bq)，濃度單位為莫爾(mole)。

### 議題三、半化期及衰變常數

半化期(Half-life)為放射性核種衰變至初始活度一半所需的時間，又稱為半衰期；衰變常數(Decay constant)為放射性核種在單位時間內衰變的原子所占的分數。而半化期與衰變常數皆屬放射性核種之特定性質，與外在環境變異性無關。

#### 議題四、衰變鏈特性(母核種及子核種)

衰變鏈(Decay chain)：從一個母核種進行一連串的衰變至另一個核種，直到此子核種為穩定核種為止，又稱衰變系列(Decay series)；於安全評估中，需要依據半化期和衰變鏈來決定核種的衰變與滋生。

#### 分類三、工程障壁材料

#### 議題五、廢棄物容器形狀與材質

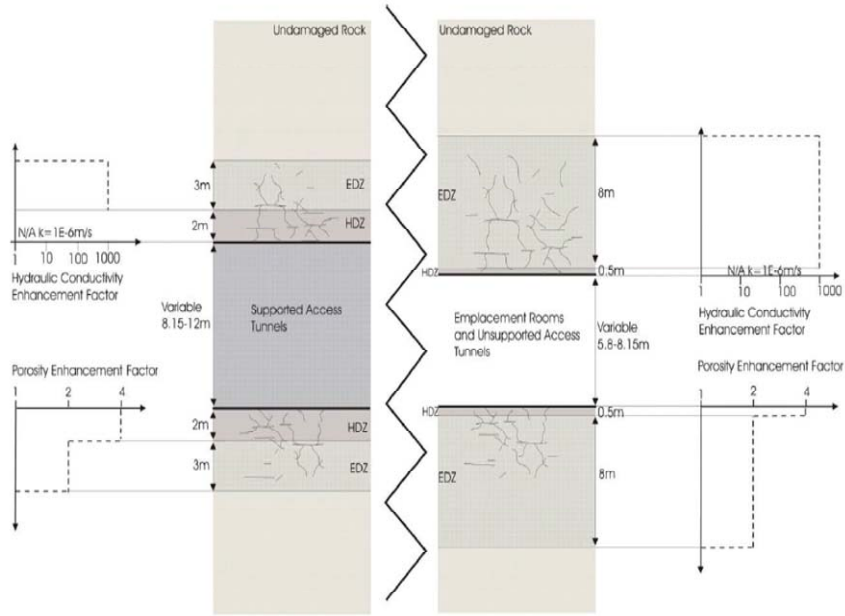
依據廢棄物性質及放射性高低決定使用的容器形狀與材質。加拿大考慮廢棄物容器形狀與材質有灰燼盛裝箱(碳鋼質)(Carbon Steel Ash Bin)、可壓縮廢棄物壓縮箱(微鋼質)(Mild Steel Compactor Box)、非經處理過後廢棄物之盛裝箱(Non-pro Box)、可壓實之廢棄物捆裝包(微鋼質)(Mild Steel Bale Rack)、非經處理過後廢棄物之圓桶箱(碳鋼質)(Carbon Steel Drum Bin)、低階樹脂式廢棄物盛裝槽(Low Level Resin Pallet Tank)、活性液態污泥盛裝箱(Active Liquid Waste sludge Box)、濾材及輻射蕊之置放槽(Tile Hole Equivalent Liner)、管狀廢棄物盛裝器(Retube Waste Container)、及廢樹脂盛裝桶(Resin liner)等，各廢棄物容器外尚有外包裝(Overpacks)，並以水泥砂漿回填空隙。

#### 議題六、豎井與坑道回填材料特性

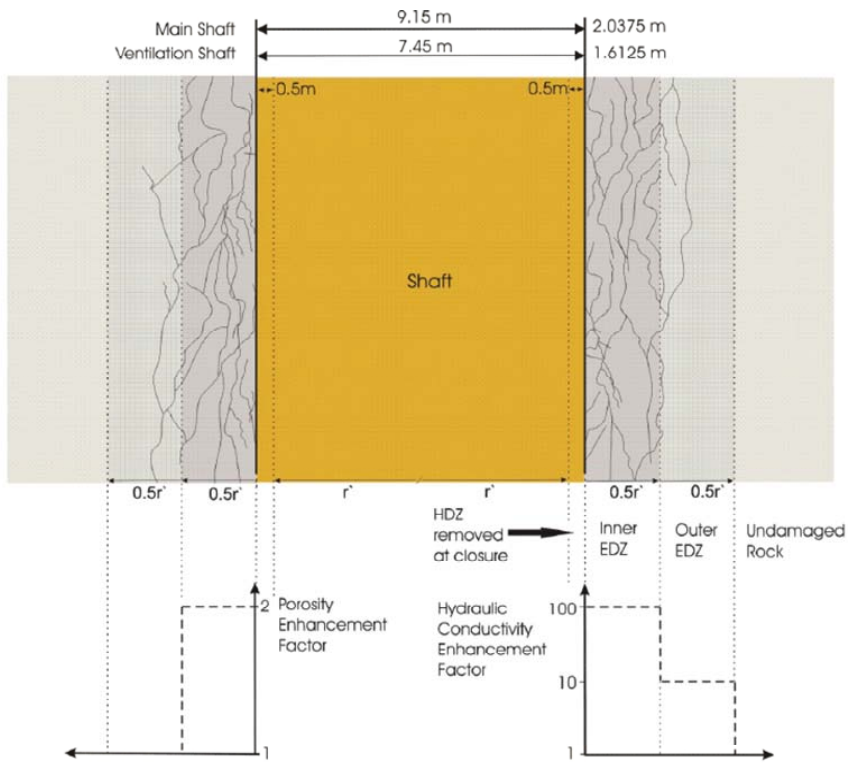
加拿大 DGR 在其考慮豎井與調查井回填失效情節，當回填材料隨著時間歷程發生材料劣化失效，原坑道、豎井及調查井回填區極有可能出現孔隙，造成地下水滲入，形成核種傳輸的通路。核種在豎井與調查井區塊中之傳輸機制主要藉由擴散與地下水移流，因此在安全評估中，回填材料之特性參數如密度、孔隙率、滲透係數與擴散係數等為影響核種釋出濃度值的關鍵因素。

## 議題七、開挖擾動帶特性

因開挖的作用而對圍岩形成擾動及造成現地岩體應力釋放，使得坑道與豎井周圍岩體特定區域內，應力及應變產生變化或形成微裂隙，並改變水力傳導或吸附行為，影響岩體對於核種傳輸的遲滯能力。此一特定區域在大地工程領域稱之為開挖擾動帶。在加拿大研究中，使用開挖擾動帶(Excavation Disturbed Zone, EDZ)及高度破壞帶(Highly Damaged Zone, HDZ)兩種名詞，一般均以開挖坑道或豎井之半徑作為界定範圍之依據，其界定範圍如圖 3.1-1，而核種在擾動帶區之傳輸機制主要為擴散與地下水移流。



(a) 運轉隧道與置放室



(b) 垂直豎井區

圖 3.1-1 開挖擾動帶及高度破壞帶之界定範圍



## 分類四、地質圈

### 議題八、地質概念模型

安全評估中有賴於對場址特性的詳細調查及地質參數的取得等，方能據以建構有代表性的場址地質概念模型。加拿大 DGR 計畫中多年來持續有計畫地對 Bruce 場址進行調查與試驗，包含地質與地層、斷層及裂隙分布、及地震活動性等調查；與岩石力學、及跨孔水力等試驗，方能據以建構符合現地特性的水文地質概念模型。其中地質與地層、斷層與裂隙分布會直接影響地質概念模型建立；斷層與裂隙分布會影響核種傳輸路徑；斷層與裂隙分布、地震活動性會影響情節 FEP 之建構，皆為安全評估中所關切的議題。

### 議題九、地下水傳輸

在坑道式處置場中，核種藉由地下水流而遷移，成為安全評估中必須考量的情節。藉助於前述地質與地層的調查，可以知道不同地層中地下水流動快慢的情形，進而定義出核種遷移路徑(Migration Pathway)與核種釋出及遷移機制，核種遷移路徑為核種由廢棄物體釋出後到接觸到生物圈環境中之途徑，如加拿大之定義有：

核種遷移路徑：廢棄物體→運轉隧道→豎井、調查井、或垂直斷層→基岩地下水流區

核種釋出及遷移機制：釋出於氣體、釋出於地下水、自由混合、分離、吸附、移流、與擴散等。

藉由加拿大之經驗可知，定義核種遷移路徑，須先了解：

- (1)場址之地質、水文、大地工程及地球化學特性；
- (2)處置場配置、運轉隧道及豎井區開挖之情況(尤其是開挖擾動帶之範圍，因開挖擾動帶常為核種容易傳輸之區域)。

定義核種傳輸機制，須先了解：

- (1)核種特性，如高吸附及低吸附、高溶解與低溶解；
- (2)環境介質特性(如移流機制為地下水中存在傳導性及水力梯度，地下水方可在基岩中流動，進而帶動核種遷移)。

## 分類五、氣體傳輸

### 議題十、氣體產生、傳輸、及評估程式

如同前述，氣體產生為 DGR 處置場中之關鍵因素，其產生主要由於處置場有機廢棄物中許多微生物分解產生，或從金屬廢棄物腐蝕過程中揮發產生，所以了解廢棄物型態方能評估是否會產生氣體。而其氣體狀態核種產生後與地下水混和後，隨地下水流往地質圈中傳輸，故其適用之 T2GGM 評估程式為將 GGM 模式與 TOUGH2 程式之多相流模式結合起來，作為一套可以分析氣體和地下水在處置場及地質圈中傳輸之程式。

## 分類六、情節

### 議題十一、情節演化與建構

加拿大依據其處置概念、場址地質與地下水流動特性、豎井及調查井鑽井位置、斷層位置等調查，設定有正常演化情節及破壞情節(人類入侵、豎井及調查井鑽井、及垂直斷層經過等)，而安全評估程式須能依據建構之演化情節，進行程式架構的建立、參數的設定並進行核種傳輸之安全分析。加拿大因採用以區塊模式發展之 AMBER 程式來進行分析，針對各項演化情節方能藉由區塊之建構、區塊與區塊間之串聯來進行分析。

## 分類七、評估程式

### 議題十二、評估程式的適用、串聯與精進

加拿大的評估程式之發展、串聯與精進歷程如下：

(1)概念設計階段(2003 年版)：

評估程式 AMBER 4.4 版為以區塊模式來模擬近場、遠場核種傳輸

(2)執照申請階段(2003 年版)：

評估程式 FRAC3DVS-OPG 以執行場址區域地下水流場建立；

評估程式 T2GGM 為結合 GGM 模式與 TOUGH2 程式，用以評估氣體傳輸；

評估程式 AMBER 5.3 版首先將 FRAC3DVS-OPG 之地下水流場與 T2GGM 之氣體傳輸結果納入，而後以區塊模式來模擬近場、遠場核種傳輸及生物圈核種劑量。

廢棄物最終處置之安全評估結果可信與否，關鍵點在於能否應用合適之安全評估程式、能否配合需求進行各種安全評估程式之間的串聯、安全評估程式是否能與時俱進合理更新、參數值是否具備現地代表性等。處置場之安全評估範圍從源項、近場工程障壁、遠場地質圈、以致到生物圈等，由於各場域間屬性不同，一般皆選用各自合適之評估程式後，在藉由各評估程式間之輸出及輸入串聯，由於評估範圍在空間及時間上均較為廣大，因此在選用適當之評估程式時需要多方面考量。

## 分類八、參數不確定性與變異性

### 議題十三、參數不確定性與變異性

不確定性(Uncertainty)的產生在於對處置過程與環境條件的變異尚無法完整地及嚴密地了解及描述，例如：因無法完全地判斷地球化

學的條件，在評估處置場及地質圈環境中的溶解度限值及吸附係數時，即出現不確定性。

不確定性來源有：

- (1) 許多參數的基本值大多由於可由實驗與調查而得，但參數值範圍的適用性可能就是不確定；
- (2) 因量測方法在尺度範圍適用的差異，對複雜且較小尺度的參數值較不易精確地觀測；
- (3) 觀測數據值的獲得可能因量測方法或過程中產生誤差；
- (4) 觀測數據可能缺乏。

變異性(Variability)的產生在於處置系統的過程與特徵已被初步考慮下，尚會由於時間和空間的變遷而自然產生變異性，例如，因容器罐的製作差異或處於不同時間下的地化環境中，腐蝕速率而有變異性。

於安全評估中對於參數不確定性和變異性之處理為由多次調查與實驗所得之參數數據值，藉由統計分析得到該參數之機率分布函數(probability distribution function, PDF)，可知該參數在安全評估中適用之分布型態，並藉由機率式及確定式分析可瞭解參數不確定性的影響。

### 3.2 安全評估關鍵議題於我國處置環境應用之適用性說明

目前國內低放射性廢棄物最終處置場的選址作業，經濟部於民國98年12月底前核定公告「台東縣達仁鄉」及「澎湖縣望安鄉」2處「建議候選場址」，但因澎湖縣政府依據「文化資產保存法」規定將望安鄉東吉嶼場址部分土地公告劃為「澎湖南海玄武岩自然保留

區」，因此，依法應由經濟部補足 2 處以上「建議候選場址」，才能繼續進行後續作業。選址小組在民國 99 年 9 月 1 日召開委員會議，票選出「台東縣達仁鄉(南田村)」及「金門縣烏坵鄉(小坵村)」2 處潛在場址，並由經濟部在 10 日正式公告為「建議候選場址」，並著手進行後續公投、環境影響評估等法定程序。配合目前的兩處建議候選場址之地質條件，「坑道處置」遂成為國內有關低放最終處置之發展目標，其概念為利用既有之地表下方 100 公尺深度內的坑道(烏坵場址)或在山區開挖處置坑道(達仁場址)，利用鋼筋混凝土窖、回填材料等工程障壁，將廢棄物桶貯存於內，並藉由周遭地質圈完整母岩的緻密性及低滲透性，有效隔離或遲滯核種遷移長達 300 年。

國內中興工程顧問股份有限公司於 2007 年曾進行達仁場址之坑道處置初步安全評估，本研究參考該本初步安全評估報告成果(以下稱該本報告)(田能全等，2007)，對照於加拿大 DGR 處置場，探討安全評估關鍵議題於我國處置環境應用之適用性。

1. 國內低放射性廢棄物來源主要為核能電廠運轉與除役廢棄物與小產源廢棄物等，核能電廠的低放射性運轉廢棄物是指在運轉及維修過程中所產生之廢棄物，目前依其物理性質可分成濕式廢棄物及乾式廢棄物；小產源的運轉廢棄物來源包含各研究用核能設施運轉所產生之廢棄物及接收全國同位素應用業界所產生之廢棄物。其存量估算依據係參考國內核能電廠運轉壽命至 2065 年，初步選用分析核種有 H-3、C-14、Co-60、Ni-63、Sr-90、Tc-99、I-129、Cs-137、Pu-239、Pu-240 等 10 種核種，並以前述核種之初始活度值作為源項。上述內容與加拿大於概念設計階段之分析流程極為類似。

2. 該本報告指出：描述核種衰變需定義核種的半化期，核種隨時間衰變為初始數量/濃度的一半所需的時間稱為該核種的半化期，這個特性為進行安全評估非常重要的因子。

3. 該本報告指出：

#### 坑道處置設施概念

(A) 處置容器：不銹鋼(或鍍鋅鋼)材質 55 加侖桶，使用壽命假設為 100 年。

(B) 通行隧道：最大坡度依拖車下坡之坡度上限值定為 3.2%，以縮短通行隧道長度。通行隧道位於處置隧道兩端，考量通風及排水處置區之通行隧道坡度約 1%。通行隧道淨高 11.5 公尺，分為上下兩層。下層檢查及監測通道高 2.5 公尺，上層供重車通行所需高度約 5 公尺，並考慮通行隧道頂端吊放直徑約 1.5 公尺之供風管/排風管，因此上層淨高設計為 7 公尺。另上下層隔板厚約 1.0 公尺，下層隧道鋪底後約 1.0 公尺。

(C) 處置坑道：噴凝土厚度 0.15 公尺，混凝土襯砌厚度 0.6 公尺，隧道鋪底厚約 1.0 公尺，倒 D 型斷面，淨高約 11.6 公尺，底寬 10.6 公尺。每一坑道分成 10 區(處置室)，每區長 33 公尺，寬 7.8 公尺，內隔牆厚 0.3 公尺，外隔牆厚 0.4 公尺，高約 7.5 公尺。處置坑道總長 332.7 公尺，約可處置 50,000 桶，以一百萬桶計，共需處置隧道 20 條，另考慮卡車卸載區，則每一坑道約需長度 400 公尺。處置坑道中心間距 70 公尺。

(D) 處置窖：採 RC 隔牆，以起重機吊放廢棄物桶。廢棄物桶以高 7 層寬 13 排堆置，每斷面 91 桶。

(E) 回填材料：暫以純膨潤土作為評估考慮。

上述五項說明我國在坑道處置初步之概念發展，因我國廢棄物型態為 LLW，故以不銹鋼(或鍍鋅鋼)材質 55 加侖桶做為處置容器，不似加拿大考慮多種的廢棄物容器形狀與材質；且國內處置場概念並無開挖豎井與調查井，但需考慮處置坑道與處置窖之回填；且具有開挖坑道之行為，即有開挖擾動帶的因素考量，故開挖擾動帶特性仍為須考量之關鍵因素。

#### 4. 該本報告對場址特性調查結果說明如下：

本場址地質係屬中央山脈西翼地質區，以硬頁岩及板岩為主之脊梁山脈帶南側，脊梁山脈帶的組成岩石主要為岩性單調之板岩、硬頁岩和千枚岩所成的巨厚岩系。本場址區出露地層皆屬潮州層，岩性主要由厚塊狀硬頁岩所組成，局部地區有變質砂岩夾層出露。週邊溪流及東側海灘一帶則屬現代沖積層堆積，由未經膠結之礫石、砂及黏土所組成。本場址亦受到褶皺構造影響，常觀察到小規模之地層褶皺構造，造成此褶皺變形主要應力來源，係來自菲律賓海板塊自東南往西北方向對歐亞大陸板塊之擠壓，由於此一擠壓作用目前仍持續穩定進行中，故近期內本場區之主應力方向仍為西北-東南向。依據現有資料文獻顯示，本場址可能之原始沉積場所應屬大陸斜坡至大陸隆起環境，半深海懸浮泥質物的自然沉降，以及由濁流所帶來之較粗粒沉積物堆積，其岩性以硬頁岩、硬頁岩夾薄層砂岩為主。本區亦深受大烏複褶皺構造影響，普遍的褶皺為區內之主要地質構造；區內雖未發現大規模斷層構造，惟不能排除存在著不規則小規模剪裂構造之可能。台灣東部位於歐亞板塊與菲律賓海板塊之相互衝撞區，花東縱谷之地體構造活動最為活躍，其北段地體構造活動較為劇烈，往南則漸趨緩和，根據中央地質調查所之台灣活動斷層分布圖顯

示，目前台灣東部地區計有 7 條斷層，本場址所在處屬地震發生頻率甚低且規模較小的區域，且場址周圍方圓 20 公里內均無已知之活動斷層存在，亦即為本場址之地質較為穩定，地體活動度相對較低。

上述已完整說明國內坑道處置安全評估中所具備有地質與地層、斷層及裂隙分布、及地震活動性等調查與研究成果。

5. 該本報告尚無考慮氣體傳輸因素。惟國內須進行較詳細的廢棄物特性分析後，配合場址地化條件，方能評估是否有氣體傳輸的考量。
6. 該本報告設計了基本情節及變異情節，基本情節為模擬核種離開處置場後，即在地質圈開始傳輸，並在距離處置場最近聚落人類進行鑿井取水行為，核種由地質圈進入生物圈之途徑為水井情節，亦即為基本情節；而變異情節起因為人工設計不良或天然環境改變，考慮有不同的廢棄物體擴散係數對總劑量率的案例，另一例為當移去工程障壁時之核種劑量分佈圖，所謂移去工程障壁為將混凝土空間的性質改為母岩，因此對核種仍有阻滯能力。由該本報告顯示我國亦有考慮基本情節與變異情節，與加拿大之情節建構與模擬極為類似。
7. 該本報告使用 FEHM、BLT-MS 與 GoldSim 三套程式進行輸出串聯，敘述如下：

執行地下水流場部分由 FEHM 程式進行，FEHM 程式之原文名稱為 Finite Element Heat and Mass transfer code，是由美國洛薩拉摩國家實驗室(Los Alamos National Laboratory) George A. Zivoloski 等研究員於 1988 年所發展，主要以有限元素法解熱與質量傳輸程式，可模擬飽和層的地下水流動與核種傳輸的問題。



BLT-MS(Breach, Leach, and Transport–Multiple Species)程式係由美國核能管制委員會(NRC)贊助，委由美國能源研究部門之Brookhaven 國家實驗室所發展，做為地表下之低放射性廢棄物處置場的安全性評估之用。BLT-MS 程式的基本架構源自於BLT 程式，是以有限元素分析法，利用 Fortran77 程式語言所撰寫的電腦軟體。通常，外釋可發生於氣相與液相，BLT-MS 程式主要探討液相的外釋。

最後用 GoldSim 模擬工作平台之機率式安全分析，並在以上三個程式加以串聯後，形成我國安全評估報告中之程式鏈(圖 3.2-1)。

8. 該本報告中在以 GoldSim 模擬工作平台進行機率式安全分析，其設定的不確定性分析參數有核種溶解度、吸附係數、廢棄物本體之分子擴散係數、混凝土擴散係數、廢棄物本體之腐蝕率、與處置容器之腐蝕率等六項，在設定有均勻分布及對數均勻分布之機率分布型態後，方能執行機率式安全分析。

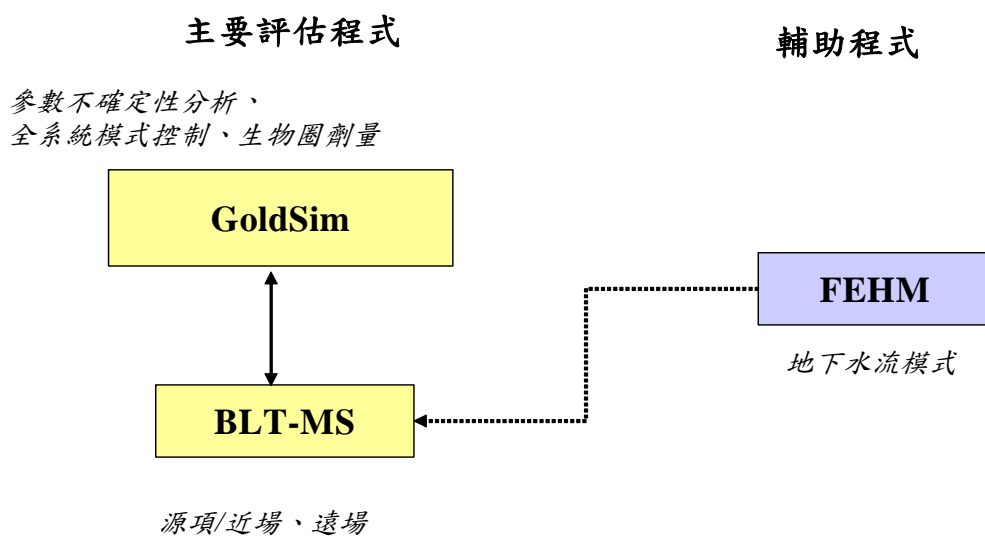


圖 3.2-1 國內坑道處置安全評估之程式鏈

### 3.3 我國低放坑道處置安全評估最優先考量之關鍵議題項目

綜合前章節中我國坑道處置環境描述及關鍵議題之相對應，鑒於國內地質條件特殊，低放處置場選址不易，可能只有唯一一座處置場，故須審慎執行低放坑道處置安全評估。本研究參考加拿大坑道處置安全評估案例，及我國現階段執行安全評估之經驗與既有文獻等，提出我國低放坑道處置之安全評估關鍵議題優先考量評估，評估順序為最優先、優先、次優先等，最優先意指現階段最須釐清或進行調查；優先意指待前述最優先項目完成後方能接續進行；次優先意指為國際間通用，現階段只須持續蒐集文獻分析。

安全評估關鍵議題項目考量列於表 3.3-1，並說明如下：

#### 議題一、存量估算時間(最優先)

我國如能在核電政策明朗化之後，配合核能電廠使用期限，及低放處置場建造、運轉、封閉之時程，期望廢棄物存量能估算至處置場封閉時。

#### 議題二、初始活度或濃度(優先)

藉由存量估算時間之設定，期望能經由核種特性分析，得到處置場封閉時關鍵核種之初始活度或濃度等。

#### 議題三、半化期及衰變常數(次優先)

此為核種特性常數，可藉由蒐集國際間文獻之應用數據做為參考。

#### 議題四、衰變鏈特性(次優先)

此為核種特性常數，可藉由蒐集國際間文獻之應用數據做為參考。

#### 議題五、廢棄物容器形狀與材質(優先)

前述指出國內曾進行以不銹鋼(或鍍鋅鋼)材質 55 加侖桶做為處置容器時之安全評估，但隨著時間進程，現國內亦考慮以高完整性盛裝容器(High-Integrity Container, HIC)作為處置容器，未來須持續進行各項材料試驗以得到高完整性盛裝容器的各項材料參數，並進行安全評估。

#### 議題六、豎井與坑道回填材料特性(優先)

待國內處置場址及處置場細部設計決定後，方能評估是否設置豎井；而回填材料方面，需考慮現地開挖處置坑道後的岩石做為回填材料的適用性，故現階段可持續進行各項材料試驗以得到回填材料的最佳配比及各項材料參數，並進行安全評估。

#### 議題七、開挖擾動帶特性(次優先)

現階段可參考國際間對開挖擾動帶的研究文獻，及參酌國內隧道開挖工程的經驗，而加拿大的經驗顯示目前以參酌坑道開挖面尺寸來假設開挖擾動帶厚度，可提供國內現階段參考，未來逐步評估開挖擾動帶對地下水流與核種傳輸的影響。

#### 議題八、地質概念模型(最優先)

加拿大的經驗顯示在概念設計階段時即已對場址進行調查，建構出初步地質概念模型，爾後陸續以鑽井調查及岩石水力試驗等，了解地質特性如地震及斷層分布等，並調整地質概念模型。建構合理且具現地代表性之地質概念模型為安全評估中最为關鍵之議題。

#### 議題九、地下水傳輸(最優先)

地質環境中若具備滲透性、水力傳導度、及水力梯度等，地下水方能流動，流場分布的模擬為安全評估中不可或缺的一項工作。且地下水流為放射性核種遷移的主要媒介，有賴於地質概念模型的建構，方能定義核種遷移路徑與遷移機制。

#### 議題十、氣體產生、傳輸、及評估程式(次優先)

加拿大的經驗顯示氣體產生主要由於處置場有機廢棄物中許多微生物分解產生，或從金屬廢棄物腐蝕過程中揮發產生，所以必須了解廢棄物型態後，方能評估是否會產生氣體。

#### 議題十一、情節演化與建構(優先)

情節是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵、事件及作用等的組合，需要考量場址及處置設施的特徵，及未來可能發生的突發事件，利用專家研判方式，確認影響處置系統功能與安全的主要作用，再依據這些作用建構出演化情節。一般而言，安全評估須充分考量基本演化情節及數種可能之變異情節等。

#### 議題十二、評估程式的適用、串聯與精進(最優先)

國際間執行處置場安全評估者皆以配合場址特性及概念模式來選用合適之評估程式，因模擬的對象不同而需有數個評估程式，此時需要釐清各程式之間的輸出入串聯，形成適合處置場安全評估之程式鏈。國內初步執行安全評估時使用 FEHM、BLT-MS 與 GoldSim 三套程式，隨著時間進程，須持續建立程式分析及精進的技術。

### 議題十三、參數不確定性與變異性(優先)

前述指出，安全評估中對於參數不確定性和變異性之處理為由多次調查與實驗所得之參數數據值，藉由統計分析得到該參數之機率分布函數，可知該參數在安全評估中適用之分布型態，並藉由機率式及確定式分析可瞭解參數不確定性的影響。現階段須在處置場址確定後，持續進行多次調查與實驗，得到具本土現地特性之參數數據值，方能得到合適之參數分布型態。

表 3.3-1 安全評估關鍵議題優先順序

關鍵議題	考量之優先順序		
	最優先	優先	次優先
議題一、存量估算時間	√		
議題二、初始活度或濃度		√	
議題三、半化期及衰變常數			√
議題四、衰變鏈特性(母核種及子核種)			√
議題五、廢棄物容器形狀與材質		√	
議題六、豎井與坑道回填材料特性		√	
議題七、開挖擾動帶特性			√
議題八、地質概念模型	√		
議題九、地下水傳輸	√		
議題十、氣體產生、傳輸、及評估程式			√
議題十一、情節演化與建構		√	
議題十二、評估程式的適用、串聯與精進	√		
議題十三、參數不確定性與變異性		√	



## 4.計畫管理與技術溝通成果

### 4.1 計畫管理

本計畫依據核研所內部例行嚴謹之計畫管理與品質保證作業，確實達成以下管理目標：

- (1)文獻共享與備份：本計畫執行期間對國際間坑道處置安全評估案例進行文獻資料蒐集，所有文獻資料並與參與計畫同仁共享，且能達到異地儲存之品保要求；
- (2)計畫討論與研究：針對計畫執行成果，經由核研所計畫參與人員之共同研究與討論，及資深研究人員提供研究經驗與指導等，致使研究成果以臻完善；
- (3)與委方保持聯繫：計畫執行期間核研所計畫參與人員與委方人員密切配合，保持聯繫，以雙方每月溝通會議方式查核每月執行進度、了解計畫執行成果、及雙方意見交流。

## 4.2 技術溝通成果

本計畫執行期間，雙方每月舉辦溝通會議，由核研所計畫參與人員提供當月份工作成果簡報，作為了解計畫執行成果及查核每月執行進度，以下簡述每次工作成果內容及討論要項：

### (1) 第一次雙方溝通會議

- (A) 說明計畫簡介、執行目標、計畫期程
- (B) 說明加拿大在概念設計階段之安全評估案例探討
- (C) 參與物管局舉辦「低放射性廢棄物坑道處置技術之探討」專題演講

### (2) 第二次雙方溝通會議

- (A) 說明加拿大在執照申請階段之安全評估案例探討

### (3) 第三次雙方溝通會議

- (A) 說明坑道處置安全評估之關鍵議題探討

### (4) 第四次雙方溝通會議

- (A) 補充說明坑道處置安全評估之關鍵議題探討
- (B) 說明安全評估之重要參數研析
- (C) 說明成果報告章節之擬定
- (D) 會議中決議將加拿大考慮之廢棄物容器形式及各項重要評估參數等以報告附錄方式節錄。

### (5) 第五次雙方溝通會議

- (A) 說明安全評估關鍵議題於我國處置環境應用之適用性
- (B) 說明我國低放坑道處置最優先考量之安全評估關鍵議題項目

### (6) 第六次雙方溝通會議

- (A) 說明計畫整體執行成果



## 5.結論與建議

### 5.1 結論

本計畫依契約書內容完成以下工作成果：

#### (1)坑道處置案例研究

完成加拿大中低放設性廢棄物坑道處置在”概念發展階段”與”執照申請階段”等兩個重要時程所進行安全評估之案例說明，包含廢棄物存量、處置概念、地質概念模型、情節與傳輸途徑分析、安全評估等五項重要內容；及說明安全評估中重要參數之需求、重要性與數值參考等。

#### (2)安全評估關鍵議題之建議

參考加拿大中低放設性廢棄物坑道處置安全評估案例，針對坑道處置安全評估，完成關鍵議題區分為八大分類共計十三項議題之研議；並參考國內歷年來執行坑道處置安全評估之成果，完成關鍵議題在我國處置場環境應用的適用性分析；及完成我國低放坑道處置最優先考量之安全評估關鍵議題項目。

#### (3)雙方每月溝通會議

計畫執行期間全程與委方單位物管局人員保持聯繫，密切配合，藉由雙方溝通會議之舉辦，進行計畫成果說明與討論，以提升計畫成效。

#### (4)完成研究計畫成果報告之撰寫

依契約書要求，如期完成研究計畫成果報告，配合後續報告審查作業，進行報告修訂及審查意見回覆。

## 5.2 建議

本計畫之研究心得與建議如下：

- (1) 處置場安全評估是評估處置安全之核心工作，依據國際間安全評估報告完整之安全評估步驟包含界定評估背景、廢棄物處置系統描述、情節發展與判定、模式建構與模擬、到結果分析等。因此，建立完整且嚴謹的評估流程，厚植安全評估的技術能力，為現階段國內須重視的技術培養。
- (2) 安全評估所需的參數種類繁多，舉凡地質參數、水力與傳輸參數、及核種特性參數等，有賴各項地質調查及試驗等提供，加拿大結合其國內各工程公司與大專院校之間通力合作，此合作模式可作為我國推動低放處置計畫之參考。
- (3) 處置場安全評估是進行公眾溝通的有效依據，期望能通盤考量各種可能變異情節下，建構合理且具現地代表性的概念模式，並以合適之評估程式來進行評估，方能得到公眾的支持。
- (4) 處置場安全評估是反覆而持續進行的程序，我國未來應隨著後續處置相關資訊、場址特性調查資訊、及安全評估程式之精度與廣度的增加而逐步精進。

## 參考文獻

1. Envirosci Quantis and Quintessa Ltd.(2002), AMBER 4.4 Reference Guide.
2. Garisto N.C., Hussain S. and Ho A.(2009), OPG's Deep Geologic Repository for Low and Intermediate Level Waste – Preclosure Safety Assessment (V1) Report., NWMO DGR-TR-2009-09.
3. Gartner Lee Ltd.(2004), Western Waste Management Facility – Independent Economic and Social Analysis.
4. Geofirma Engineering Ltd. and Quintessa Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: Gas Modelling., NWMO DGR-TR-2011-31.
5. Geofirma Engineering Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: Groundwater Modelling., NWMO DGR-TR-2011-30.
6. Golder Associates Ltd.(2003), LLW Geotechnical Feasibility Study, Western Waste Management Facility, Bruce Site, Tiverton, Ontario.
7. Golder Associates Ltd.(2004), Independent Assessment of Long-Term Waste Management Options for Low and Intermediate Level Wastes at OPG's Western Waste Management Facility.
8. Hatch Ltd.(2010), OPG's OPG's Deep Geologic Repository for Low and Intermediate Level Waste – Preliminary Design Report., H333000-WP700-05-124-0001, Rev.02.
9. Nuclear Waste Management Organization(2007), FRAC3DVS-OPG Enhancements: Subgridding, Hydromechanical Deformation and

- Anisotropic Molecular Diffusion., NWMO TR-2007-05.
10. Ontario Power Generation(2004), DGR Hosting Agreement between Ontario Power Generation and Municipality of Kincardine.
  11. Ontario Power Generation(2011), Environmental Impact Statement Summary.
  12. Quintessa Ltd. and Geofirma Engineering Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: Data., NWMO DGR-TR-2011-32.
  13. Quintessa Ltd. and Geofirma Engineering Ltd.(2011), T2GGM Version 2: Gas Generation and Transport Code., NWMO DGR-TR-2011-33.
  14. Quintessa Ltd. and SENES Consultants Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: Analysis of Human Intrusion and Other Disruptive Scenarios., NWMO DGR-TR-2011-27.
  15. Quintessa Ltd.(2003), Preliminary Safety Assessment of Concepts for a Permanent Waste Repository at the Western Waste Management Facility Bruce Site., QRS-1127B-1 v1.0.
  16. Quintessa Ltd.(2009), AMBER 5.3 Reference Guide.
  17. Quintessa Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: Analysis of the Normal Evolution Scenario., NWMO DGR-TR-2011-26.
  18. Quintessa Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: System and Its Evolution., NWMO DGR-TR-2011-28.
  19. Quintessa Ltd., Geofirma Engineering Ltd. and SENES Consultants Ltd.(2011), OPG's Deep Geologic Repository for Low and Intermediate Level Waste – Postclosure Safety Assessment., NWMO

DGR-TR-2011-25.

20. Quintessa Ltd., SENES Consultants Ltd. and Geofirma Engineering Ltd.(2011), Postclosure Safety Assessment: Features, Events and Processes., NWMO DGR-TR-2011-29.
21. Suckling P., Calder N., Humphreys P., King F., and Leung H.(2009), The Development and Use of T2GGM: A Gas Modelling Code for the Postclosure Safety Assessment of OPG's Proposed L&ILW Deep Geologic Repository, Canada., Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, October 11-15, 2009, Liverpool, UK, ICEM2009-16291.
22. The Strategic Counsel(2005), Presentation to the Municipality of Kincardine - Consultation Methodology and Response Rates.
23. 田能全、莊文壽(2007)，候選替代場址初步長期功能評估，低放射性廢棄物最終處置場可行性安全評估計畫期末報告。









# 附 錄 一




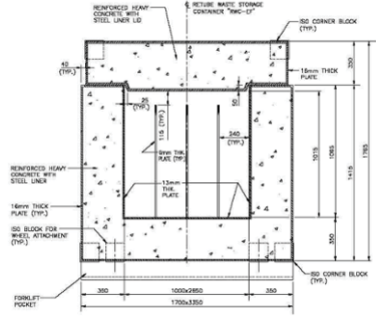

## 加拿大 DGR 廢棄物容器





### Reference Containers and Overpacks

Container Name, Wastes and Overpack	Picture	Container Name, Wastes and Overpack	Picture
<p><b>Carbon steel ash bin (AIBN)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bottom ash</li> <li>• Baghouse ash</li> </ul> <p>Reference overpack</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• LLW sheet metal overpack (BINOPK)</li> </ul>		<p><b>Mild steel bale rack (BRACK)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compacted waste (bales)</li> </ul> <p>Reference overpack</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• To be overpacked but details not yet specified. Assumed to be simple sheet metal cover.</li> </ul>	
<p><b>Mild steel compactor box (B25)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compacted waste (boxes)</li> </ul> <p>Reference overpack</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• None</li> </ul>		<p><b>Carbon steel drum bin (DBIN)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non-processible waste (drummed)</li> </ul> <p>Reference overpack</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10% overpacked in LLW sheet metal overpack (BINOPK)</li> </ul>	
<p><b>Non-pro box (NBP47)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non-processible waste (boxes)</li> </ul> <p>Reference overpack</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• None</li> </ul>		<p><b>Low level resin pallet tank (RTK)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ALW resins</li> <li>• LLW resins</li> </ul> <p>Reference overpack</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• To be overpacked but details not yet specified. Assumed to be simple sheet metal cover.</li> </ul>	

Container Name, Wastes and Overpack	Picture	Container Name, Wastes and Overpack	Picture
<p><b>ALW sludge box (NPBSB)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ALW sludges</li> </ul> <p><b>Reference overpack</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>LLW sheet metal overpack (BINOPK)</li> </ul>		<p><b>Resin liner (RL)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CANDECON resins</li> <li>Moderator resins</li> <li>PHT resins</li> <li>Misc. resins</li> </ul> <p><b>Reference shield (RLSHLD1)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Concrete cylinder each holding two resin liners</li> </ul>	
<p><b>Tile hole equivalent liner (THLIC18)*</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Filters and elements</li> <li>Irradiated core components</li> <li>IX columns</li> </ul> <p><b>Reference overpack*</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Transported in a re-usable shield and inserted into a concrete pipe array in the emplacement room</li> </ul>		<p><b>Retube waste container (RWC-EF)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Retube wastes (end fittings)</li> </ul>	
<p><b>Retube waste container (RWC-PT)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Retube wastes (pressure tubes)</li> <li>Retube wastes (calandria tubes)</li> <li>Retube wastes (calandria tube inserts)</li> </ul>		<p><b>Notes:</b></p> <p>This table presents a simplified description of waste containers and overpacks. Pictures generally show the containers as they appear during storage at WWMF. All containers will be lidded and overpacked if necessary. Steam Generators are not shown in the table as they will not be placed in containers.</p> <p>* Original preliminary design. Replaced by steel and concrete ATHEL and ILW Shield containers in final preliminary design (OPG,2010).</p>	





## 附 錄 二

### 加拿大 DGR 安全評估參數



### LLW Reference Container and Overpack Characteristics

	Bottom Ash	Baghouse Ash	Compacted Waste (Bales) <sup>a</sup>	Compacted Waste (Boxes)	Non-Pro. (Drums)	Non-Pro. (Boxes)	LL /ALW Resins <sup>a</sup>	ALW Sludges	Steam Generators <sup>b</sup>	LLW Overpack
Container (Identifier)	New Ash Bin (AIBN)	New Ash Bin (AIBN)	Bale Rack (BRACK) with sheet metal cover	Compactor Box (B25)	Drum Bin (DBIN)	Non-pro Container (NPB47)	Pallet Tank (RTK) with sheet metal cover	ALW Sludge Box (NPBSB)	Cut Segments	LLW overpack (BINOPK)
External Width (m)	1.32	1.32	1.22	1.12	1.32	1.32	1.24	1.32	1.8 – 3.6 (O.D.)	1.78
External Depth (m)	1.32	1.32	2.29	1.84	1.96	1.96	1.24	1.96	1.8 – 3.6 (O.D.)	2.54
External Height (m)	1.4	1.4	1.2	1.3	1.03	1.19	1.68	1.03	2.2 – 4.5 (O.L.)	1.88
Geometry	Box	Box	Box	Box	Box with six drums	Box	Box	Box	Segment	Box
Closure	Bolted lid	Bolted lid	Cover around box frame	Clipped gasketed lid	Bolted lid	Lid	Cover around box frame	Lid	Welded steel plate	Lid
Material	Carbon steel	Carbon steel	Carbon steel	Mild steel	Carbon steel	Steel tubular frame and sheet metal	Carbon steel	Carbon steel	Carbon steel shell	Carbon steel
Wall thickness (mm)	3.4	3.4	1.6	4.6	6.5	2.8	1.6	2.7	75	3.4
Coating	Zn galvanized	Zn galvanized	Paint	Paint	Paint	Paint	Paint	Paint	None	Paint
Internal Volume (m <sup>3</sup> )	1.8	1.8	1.64	2.3	1.2	2.5	1.5	2.2	Variable	6.56
External Volume (m <sup>3</sup> )	2.5	2.5	3.4	2.8	2.8	3.2	2.7	2.7	Variable (12-21)	8.5
External Surface Area (m <sup>2</sup> )	10.9	10.9	14.0	11.8	11.9	13.0	11.4	11.9	Variable (30-44)	25.1

Notes: From Appendix E of OPG (2010). These 'reference containers and overpacks' are for consideration in determining the performance of waste packaging in the repository, and not in the calculation of inventory volumes (see Section 3.4 for these assumptions). a 1.6-mm carbon-steel cover assumed.

b Data from the Nuclear Waste Management Organization (NWMO) (2010a).

### ILW Reference Container and Overpack Characteristics

	CANDECON, Moderator, PHT and Misc. Resins	Resin Shields <sup>a</sup>	Filters & Elements	Irradiated Core Comp- onents	IX Columns	Retube Waste Containers  (End	Retube Waste Containers (Others)
Container (Identifier)	Resin Liner (RLSS)	Resin liner shield 1 (RLSHLD1)	IC-18 T-H-E Liner (THLIC18) <sup>b</sup>	ILW Shield <sup>c</sup>		End fitting container (RWC(EF))	Pressure tube container (RWC(PT))
External Width (m)	1.63 (O.D.)	2.2 (OD)	0.55 (O.D.) <sup>b</sup>	1.0 (O.D.) <sup>c</sup>		1.70	1.85
External Depth (m)	1.63 (O.D.)	2.2 (OD)	0.55 (O.D.) <sup>b</sup>	1.0 (O.D.) <sup>c</sup>		3.35	1.85
External Height (m)	1.8	4.25	10.7 <sup>b</sup>	1.7 <sup>c</sup>		1.92	2.25
Geometry	Cylinder	Cylinder	Cylinder			Box	Box
Material	Stainless steel	Concrete	Carbon steel <sup>b</sup>	Concrete and steel <sup>c</sup>		Steel- concrete-	Steel- concrete-
Wall thickness (mm)	6.3	250	10 <sup>b</sup>	Not given <sup>c</sup>		350	475
Coating	None	None	Galvanized <sup>b</sup>	None <sup>c</sup>		Stainless steel lined	Stainless steel lined
Internal Volume (m <sup>3</sup> )	3	6	2.5 <sup>b</sup>	0.25 <sup>c</sup>		2.7	0.8
External Volume (m <sup>3</sup> )	3.8	16.2	2.6 <sup>b</sup>	1.3 <sup>c</sup>		10.9	7.7
External Surface Area (m <sup>2</sup> )	13.4	37	20.8 <sup>b</sup>	6.9 <sup>c</sup>		30.8	23.5

**Notes:**

Data from NWMO (2010a) and Appendix E of OPG (2010).

These reference containers and overpacks are used in determining the performance of waste packaging in the repository, and not in the calculation of inventory volumes (see Section 3.4 for these assumptions).

- a Concrete Resin Liner Shield of 250 mm thickness is assumed. Two alternative concrete shields are also available, and a stainless steel overpack. However, the 250 mm shield will be most common, see OPG (2010).
- b For the original preliminary design, it has been assumed that these wastes are emplaced in IC-18 T-H-E liners.
- c For the final preliminary design, it has been assumed that these wastes are emplaced in ILW shields.



### Physical Properties of Raw Wastes

Parameter	Bulk Density (kg m <sup>-3</sup> )	Physical Porosity/ Void Fraction (-)	Moisture Content (kg water/ kg waste)
Bottom Ash	550	0.3	0.01 <sup>d</sup>
Baghouse Ash	390	0.3	0.001 <sup>e</sup>
Compacted Waste - Boxes	1000	0.5	0.001 <sup>e</sup>
Compacted Wastes - Bales	770	0.5	0.001 <sup>e</sup>
Non-processible – Drums	500	0.4 <sup>c</sup>	0.001 <sup>e</sup>
Non-processible – Boxes	230	0.9	0.001 <sup>e</sup>
Non-processible – Other	1070 <sup>a</sup>	0.8 <sup>b</sup>	0.001 <sup>e</sup>
LL/ALW Resins	750 <sup>j</sup>	0.4 <sup>i</sup>	0.03 <sup>f</sup>
ALW Sludges	1120	0.3	0.01 <sup>g</sup>
Steam Generators	1730 <sup>k</sup>	0.8 <sup>k</sup>	0.001 <sup>e</sup>
CANDECON Resins	850 <sup>j</sup>	0.4 <sup>i</sup>	0.03 <sup>f</sup>
Moderator Resins	850 <sup>j</sup>	0.4 <sup>i</sup>	0.03 <sup>f</sup>
PHT Resins	850 <sup>j</sup>	0.4 <sup>i</sup>	0.03 <sup>f</sup>
Misc. Resins	850 <sup>j</sup>	0.4 <sup>i</sup>	0.03 <sup>f</sup>
Irradiated Core Hardware	880	0.9	0.001 <sup>e</sup>
Filters and Filter Elements	880	0.9	0.1 <sup>h</sup>
IX Columns	880 <sup>l</sup>	0.5 <sup>m</sup>	0.03 <sup>f</sup>
Retube Waste (Pressure Tubes)	2290 <sup>o</sup>	0.7 <sup>n</sup>	0.001 <sup>e</sup>
Retube Waste (End Fittings)	970 <sup>p</sup>	0.9 <sup>n</sup>	0.001 <sup>e</sup>
Retube Waste (Calandria Tubes)	1270 <sup>q</sup>	0.8 <sup>n</sup>	0.001 <sup>e</sup>
Retube Waste (Calandria Tube Inserts)	580 <sup>r</sup>	0.9 <sup>n</sup>	0.001 <sup>e</sup>

Notes:

Data based on assumptions described in OPG (2010), in particular, Table C-7.

- a Averaged value calculated using data from Tables 2.1, C-7 and Appendix E of OPG (2010) to derive a 53:47 split between the mass of items such as heat exchangers and the mass of items such as encapsulated tile holes.
- b Averaged value calculated using data from Tables 2.1, C-7 and Appendix E of OPG (2010) to derive a 85:15 split between the porosity of items such as heat exchangers and the porosity of items such as encapsulated tile holes.
- c Contains granular fills and therefore has fewer voids than the other non-processible wastes.
- d May contain some moisture, because water is sprayed onto the ashes during loading into the bins to cool the ashes. Some of the moisture may evaporate during storage.
- e Waste would normally be dry; this represents trace amounts of water in the package.
- f Bound (bead) water not included. Free water is drained from the resins during transfer to the resin liners at the stations, but some water remains on the bottom of the liners, typically 3%.
- g Water content is immobilized with polymer gel.
- h Expect some moisture retention on filters.
- i Typical physical porosity of resins, from standard technical specifications.
- j Includes bound water.
- k Based on ungrouted porosity of 0.9 (Table C-7 of OPG 2010), a nominal grout porosity of ~30%, an ungrouted bulk density of 1500 kg m<sup>-3</sup> (midpoint of values in Table C-7 of OPG 2010), and grout grain density of 2560 kg m<sup>-3</sup> (Table 4.26).
- l Taken to be the same as filters and filter elements.
- m No data given in OPG (2010). Value of 0.5 adopted for the current assessment.
- n Calculated using  $(1 - \text{Bulk Density}/\text{True Density})$ . The Bulk Density is the density of the

wastes as packaged, and the True Density is the density of the solid metal that makes up the items. True Density data are taken from Tables C-2 to C-5 of OPG (2010).

- o Based on weight of 61 kg per pressure tube and 30 pressure tubes per box (Table 3.4 of OPG 2010) and 242 boxes with net volume of 193 m<sup>3</sup> (Table 3.1 of OPG 2010).
- p Based on weight of 163 kg per end fitting and 16 end fittings per box (Table 3.4 of OPG 2010) and 899 boxes with net volume of 2429 m<sup>3</sup> (Table 3.1 of OPG 2010).
- q Based on weight of 23 kg per Calandria tube and 44 Calandria tubes per box (Table 3.4 of OPG 2010) and 167 boxes with net volume of 133 m<sup>3</sup> (Table 3.1 of OPG 2010).
- r Based on weight of 1.2 kg per Calandria tube insert and 384 Calandria tube inserts per box (Table 3.4 of OPG 2010) and 45 boxes with net volume of 36 m<sup>3</sup> (Table 3.1 of OPG 2010).

### Reference Waste Volumes

Waste Categories	Raw (Net) Volume (m <sup>3</sup> )	Number of DGR Containers	Emplaced Volume (m <sup>3</sup> )
<b>LLW</b>			
Bottom ash	2,033	882	7,497
Baghouse ash	364	218	1,853
Compacted wastes (bales)	2,268	1,383	4,702
Compacted wastes (boxes)	14,110	6,135	17,177
Non-processible (drums)	9,408	7,840	25,532
Non-processible (boxes)	56,713	24,190	73,792
Non-processible (other)	3,279	164	3,279
LLW and ALW resins	3,393	2,165	6,307
ALW sludges	3,569	1,709	14,527
Steam generators	8,387	512	8,387
<i>Sub-total LLW</i>	<i>103,524</i>	<i>45,198</i>	<i>163,053</i>
<b>ILW</b>			
Moderator resins	1,929	430	4,779
PHT resins	1,348	301	3,340
Misc. resins	1,808	403	4,480
CANDECON resins	2,257	503	5,592
Irradiated core components	27	4,459 <sup>a</sup> 4,453 <sup>b</sup>	6,101 <sup>a</sup> 9,453 <sup>b</sup>
Filters and filter elements	1,344		
IX columns	544		
Retube Wastes (Pressure Tubes)	193	242	1,860
Retube Wastes (End Fittings)	2,429	899	9,804
Retube Wastes (Calandria Tubes)	133	167	1,285
Retube Wastes (Calandria Tube Inserts)	36	45	349
<i>Sub-total ILW</i>	<i>12,048</i>	<i>7,449<sup>a</sup></i> <i>7,443<sup>b</sup></i>	<i>37,590<sup>a</sup></i> <i>40,942<sup>b</sup></i>
<b>Total</b>	<b>115,572</b>	<b>52,647<sup>a</sup></b> <b>52,641<sup>b</sup></b>	<b>200,643<sup>a</sup></b> <b>203,995<sup>b</sup></b>

Notes:

Data from Tables 2.1 and 3.1 of OPG (2010).

a Based on waste packages proposed in original preliminary design (NWMO 2010a). b Based on waste packages in final preliminary design (OPG 2010).

### Potentially Important Radionuclides and their Half-Lives

Radionuclide	Half-life (a)	Decay Constant ( $a^{-1}$ )
H-3	1.23E+01	5.63E-02
C-14	5.70E+03	1.22E-04
Cl-36	3.01E+05	2.30E-06
Ni-59	1.01E+05	6.86E-06
Ni-63	1.00E+02	6.92E-03
Se-79	2.95E+05	2.35E-06
Sr-90 <sup>a</sup>	2.88E+01	2.41E-02
Nb-93m	1.61E+01	4.30E-02
Mo-93	4.00E+03	1.73E-04
Zr-93	1.53E+06	4.53E-07
Nb-94	2.03E+04	3.41E-05
Tc-99	2.11E+05	3.28E-06
Ag-108m <sup>a</sup>	4.18E+02	1.66E-03
Sn-121m <sup>a</sup>	4.39E+01	1.58E-02
I-129	1.57E+07	4.41E-08
Cs-137 <sup>a</sup>	3.02E+01	2.30E-02
Ir-192	2.02E-01	3.43E+00
Ir-192m	2.41E+02	2.88E-03
Pt-193	5.00E+01	1.39E-02
Pb-210 <sup>a</sup>	2.22E+01	3.12E-02
Po-210	3.79E-01	1.83E+00
Rn-222 <sup>b</sup>	1.05E-02	6.62E+01
Ra-226 <sup>a</sup>	1.60E+03	4.33E-04
Ra-228 <sup>a</sup>	5.75E+00	1.21E-01
Th-228 <sup>a</sup>	1.91E+00	3.63E-01
Th-229 <sup>a</sup>	7.34E+03	9.44E-05
Th-230	7.54E+04	9.20E-06
Th-232	1.41E+10	4.93E-11
Ac-227 <sup>a</sup>	2.18E+01	3.18E-02
Pa-231	3.28E+04	2.12E-05
Pa-233	7.38E-02	9.39E+00

<b>Radionuclide</b>	<b>Half-life (a)</b>	<b>Decay Constant (a<sup>-1</sup>)</b>
U-232	6.89E+01	1.01E-02
U-233	1.59E+05	4.35E-06
U-234	2.46E+05	2.82E-06
U-235 <sup>a</sup>	7.04E+08	9.85E-10
U-236	2.34E+07	2.96E-08
U-238 <sup>a</sup>	4.47E+09	1.55E-10
Np-237	2.14E+06	3.23E-07
Pu-238	8.77E+01	7.90E-03
Pu-239	2.41E+04	2.87E-05
Pu-240	6.56E+03	1.06E-04
Pu-241 <sup>a</sup>	1.44E+01	4.83E-02
Pu-242	3.75E+05	1.85E-06
Am-241	4.32E+02	1.60E-03
Am-242m <sup>a</sup>	1.41E+02	4.92E-03
Am-243 <sup>a</sup>	7.37E+03	9.40E-05
Cm-242	4.46E-01	1.56E+00
Cm-243	2.91E+01	2.38E-02
Cm-244	1.81E+01	3.83E-02

Notes: Half-lives from the electronic database supplied with ICRP (2008).

a Short-lived daughters taken to be in secular equilibrium.

b Short-lived daughter of Ra-226, modelled explicitly in the biosphere.

## Radionuclide Decay Schemes

Radio-nuclide	Explicitly Modelled Decay Chain
Mo-93	→ (0.8800) Nb-93m
Ir-192m	→ Ir-192
U-232	→ Th-228
Pu-241	→ Am-241 → Np-237 → Pa-233 → U-233 → Th-229
Am-242m	→ (0.1722) Pu-242 → U-238 → U-234 ↘
	→ (0.8233) Cm-242 → Pu-238 → U-234 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210 → Po-210
	→ (0.0045) Pu-238 ↗
Cm-243	→ (0.0024) Am-243 → Pu-239 → U-235 → Pa-231 → Ac-227
	→ (0.9976) Pu-239 ↗
Cm-244	Pu-240 → U-236 → Th-232 → Ra-228 → Th-228

Notes: Branching ratios for radioactive progeny are indicated in brackets preceding the progeny. If none is indicated, the branching ratio is 1. Short-lived radioactive progeny (e.g., with half-life of a few tens of days) have been taken to be in secular equilibrium with their long-lived parent.

## Radionuclides with Progeny in Secular Equilibrium

Radio-nuclide	Progeny in Secular Equilibrium
Sr-90	→ Y-90
Ag-108m	→ (8.700E-2) Ag-108
Sn-121m	→ (7.760E-1) Sn-121
Cs-137	→ (9.440E-1) Ba-137m
Pb-210	→ Bi-210
Ra-226	→ Rn-222 → Po-218 → (9.998E-1) Pb-214 → Bi-214 → (9.998E-1) Po-214
	→ (2.000E-4) At-218 ↗
Ra-228	→ Ac-228
Th-228	→ Ra-224 → Rn-220 → Po-216 → Pb-212 → Bi-212 → (6.406E-1) Po-212
	→ (3.594E-1) Tl-208
Th-229	→ Ra-225 → Ac-225 → Fr-221 → At-217 → Bi-213 → (9.791E-1) Po-213 → Pb-209
	→ (2.090E-2) Tl-209 ↗
Ac-227	→ (9.862E-1) Th-227 → Ra-223 → Rn-219 → Po-215 → Pb-211 → Bi-211 → (9.972E-1) Tl-207
	→ (1.380E-2) Fr-223 ↗ → (2.760E-3) Po-211
U-235	→ Th-231
U-238	→ Th-234 → Pa-234m → (1.600E-3) Pa-234
Pu-241	→ (2.450E-5) U-237
Am-242m	→ (0.9955) Am-242
	→ (0.0045) Np-238
Am-243	→ Np-239

Note:

Branching ratios for radioactive progeny have been indicated in brackets preceding the progeny. If none is indicated, the branching ratio is 1.

### Corrosion Rates for Metals

Conditions	Metal	Corrosion Rate ( $\text{m a}^{-1}$ )			
		Best Estimate	Probability Distribution Function		
			Distribution	Minimum	Maximum
Aerobic humid conditions (Phase 1)	Un-passivated C-steel and galvanized steel	1E-05	log uniform	1E-06	1E-04
	Passivated C-steel, stainless steel and Ni-alloys	1E-07	log uniform	5E-08	5E-06
	Zirconium based alloys	1E-08	log uniform	5E-09	5E-08
Anaerobic humid conditions (Phase 2)	Un-passivated C-steel and galvanized steel	1E-06	log uniform	1E-07	1E-05
	Passivated C-steel, stainless steel and	1E-07	log uniform	1E-08	1E-06
	Zirconium based alloys	1E-08	log uniform	5E-09	5E-08
Anaerobic saline saturated conditions (Phase 3)	Un-passivated C-steel and galvanized steel	2E-06	log uniform	1E-07	1E-05
	Passivated C-steel, stainless steel and	1E-07	log uniform	1E-08	1E-06
	Zirconium based alloys	1E-08	log uniform	5E-09	5E-08

Notes: The rates in the above table are appropriate for the expected repository environment: pH 5.0-6.5 (except pH 12-13 for the passivated C-steel), temperature of  $\sim 20$  °C, and a Na-Ca-Cl salinity of 170-215  $\text{g L}^{-1}$ .

**Excavated Dimensions and Areas of Emplacement Rooms and Access Tunnels**

<b>Parameters</b>	<b>Panel 1</b>						<b>Panel 2</b>						<b>Total</b>
<b>Emplacement Rooms:</b>													
Depth (m) (1)	682.1						682.1						
Emplacement Room ID (2)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
Number of Emplacement Rooms (2)	4	0	3	2	2	3	13	1	2	1	0	0	31
Length of each room (m) (2)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
Width of each room (m) (2)	8.6	8.6	8.4	7.4	8.4	8.1	8.6	8.6	8.4	7.4	8.4	8.1	
Height of each room (m) (2)	7	6.35	5.8	6.5	6.2	7.2	7	6.35	5.8	6.5	6.2	7.2	
Total Roof Area (m <sup>2</sup> )	28,875						36,150						65,025
<b>Access Tunnels (outside shaft and services area):</b>													
Length (m) (2)	514 (2) / 510 (3)						809 (2) / 820 (3)						
Width (m) x Height (m)	5.4 x 8.15 (2) / 5.4 x 6.4 (3)						5.9 x 8.15 (2) / 5.4 x 6.4 (3)						
Roof Area (m <sup>2</sup> )	2,812 (2) / 2,780 (3)						4,773 (2) / 4,600 (3)						7,585 (2) / 7,380 (3)
<b>Ventilation (Return Air) Drifts:</b>													
Length (m)	None (2) / 520 (3)						None (2) / 795 (3)						
Width x Height (m)	None (2) / 5 x 5 (3)						None (2) / 5 x 5 (3)						
Roof Area (m <sup>2</sup> )	- (2) / 2,600 (3)						- (2) / 4,000 (3)						- (2) / 6,600 (3)
<b>Panel (from first emplacement room):</b>													
Length (m) (2)	250 (2) / 260 (3)						250 (2) / 260 (3)						
Width (m) (2)	441 (2) / 440 (3)						515 (2) / 515 (3)						
Footprint (m <sup>2</sup> )	110,250 (2) / 114,000 (3)						128,750 (2) / 134,000 (3)						239,000 (2) / 248,000 (3)

Notes:

1. For the Postclosure Safety Assessment, the repository floor elevation is taken to be -496.3 m above sea level (mASL) (i.e., a depth of 682.1 mBGS) based on



ground surface elevation of 185.84 mASL at DGR-2. This is 6 m above top of Sherman Falls (Section 4.2).

2. Data from NWMO (2010a) for the original preliminary design.
3. Data from NWMO (2010b) for the final preliminary design.

### Dimensions and Cross-sectional Areas of Shafts at Closure

	Main Shaft	Ventilation Shaft
<b>Surficial Groundwater Zone:</b>		
Length (m) (1)	20	20
Excavated Diameter (m) (1)	9.4	7.7
Finished Diameter (m) (2)	6.5	5
Excavated cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	69.40	46.57
Finished cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	33.18	19.63
Liner thickness (m)	1.45	1.35
<b>Shallow Bedrock Groundwater Zone:</b>		
Length (m) (1)	158.6	158.6
Excavated Diameter (m) (1)	8.15	6.45
Finished Diameter (m) (2)	6.5	5
Excavated cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	52.17	32.67
Finished cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	33.18	19.63
Liner thickness (m)	0.83	0.73
<b>Intermediate Bedrock Groundwater Zone:</b>		
Length (m) (1)	269.1	269.1
Diameter (m) (3)	9.15	7.45
Cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	65.76	43.59
Liner thickness (m)	0	0
<b>Deep Bedrock Groundwater Zone:</b>		
Length to top of monolith (m) (1)	214.4	214.4
Diameter (m) (4)	9.15	7.45
Cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	65.76	43.59
Liner thickness (m)	0	0

Notes:

1. Data from NWMO (2010a).
2. Liner and highly damaged zone (HDZ) around shafts in Surficial and Shallow Bedrock Groundwater Zones are not removed at closure (NWMO 2010a).
3. Data from NWMO (2010a). Shaft liners in Intermediate Bedrock Groundwater Zone are removed at closure and 0.5 m thickness of HDZ removed (NWMO 2010a) from around the shafts. The diameter given is the diameter of the shaft once the liner and HDZ have been removed.
4. Data from NWMO (2010a). Shaft liners above the level of the DGR are removed at closure and 0.5 m thickness of HDZ removed (NWMO 2010a) from around the shafts. The diameter given is the diameter of the shaft once the liner and HDZ have been removed.

## Repository Volumes

	Panel 1	Panel 2	Total
<b>ORIGINAL PRELIMINARY DESIGN</b>			
<b>Excavated Volumes (m<sup>3</sup>):</b>			
Emplacement Rooms (1)	1.91E+05	2.46E+05	4.37E+05
Access Tunnel (outside shaft and services area) (1)	2.26E+04	3.89E+04	6.15E+04
Shaft and Services Area (2)			3.53E+04
<b>Total</b>	<b>2.13E+05</b>	<b>2.85E+05</b>	<b>5.33E+05</b>
<b>Void Volume (m<sup>3</sup>):</b>			
Emplacement Rooms (3)	1.55E+05	1.99E+05	3.53E+05
Access Tunnel (outside shaft and services area) (4)	1.93E+04	3.63E+04	5.56E+04
Shaft and Services Area (5)			9.18E+03
<b>Total</b>	<b>1.74E+05</b>	<b>2.35E+05</b>	<b>4.18E+05</b>
<b>FINAL PRELIMINARY DESIGN</b>			
<b>Excavated Volumes (m<sup>3</sup>):</b>			
Emplacement Rooms (1)	1.91E+05	2.46E+05	4.37E+05
Access Tunnel (outside shaft and services area) and Ventilation Drifts (1)	3.06E+04	4.90E+04	7.96E+04
Shaft and Services Area (2)			4.79E+04
<b>Total</b>	<b>2.22E+05</b>	<b>2.95E+05</b>	<b>5.65E+05</b>
<b>Void Volume (m<sup>3</sup>):</b>			
Emplacement Rooms (3)	1.63E+05	2.02E+05	3.65E+05
Access Tunnel (outside shaft and services area) and Ventilation Drifts (4)	2.50E+04	4.40E+04	6.90E+04
Shaft and Services Area (5)			1.54E+04
<b>Total</b>	<b>1.88E+05</b>	<b>2.46E+05</b>	<b>4.49E+05</b>

Notes:

1. Derived from dimensions given in Table 4.3. Includes volume that will be filled by room and closure walls.
2. Data from NWMO (2010a) for original preliminary design, and NWMO (2010b) for final preliminary design.  
Includes volume that will be filled by concrete monolith at base of main and ventilation shafts but does not include ramps down to shaft sumps.
3. Derived by subtracting emplaced waste volume given in Table 4.6 from excavated volume with allowance for volume of concrete in rooms, waste voidage (Table 3.10) and packaging voidage (Appendix H).
4. Allowance made for volume of concrete in tunnels and drifts.
5. Allowance made for volume of concrete in shaft and services area (including concrete monolith (Figure 4.5 for final preliminary design, and Figure 4.6 for original preliminary design). Allowance also made for volume of concrete and steel decommissioned ventilation shaft, and

equipment used in the DGR (e.g., forklifts and cranes) which is to be left in the South and West Service Tunnels.

### Numbers of Containers and Volumes of Waste in Each Panel

Waste Categories	Panel 1		Panel 2	
	Number of Containers	Emplaced Volume (m <sup>3</sup> )	Number of Containers	Emplaced Volume (m <sup>3</sup> )
<b>LLW</b>				
Bottom ash	208	1,764	674	5,733
Baghouse ash	51	436	167	1,417
Compacted wastes (bales)	325	1,106	1,058	3,596
Compacted wastes (boxes)	1,444	4,042	4,691	13,135
Non-processible (drums)	1,845	6,008	5,995	19,524
Non-processible (boxes)	5,692	17,363	18,498	56,429
Non-processible (other)	164	3,279	0	0
LLW resins	509	1,484	1,656	4,823
ALW resins				
ALW sludges	402	3,418	1,307	11,109
Steam generators	256	4,194	256	4,194
<b>Sub-total LLW</b>	<b>10,896</b>	<b>43,093</b>	<b>34,302</b>	<b>119,960</b>
<b>ILW</b>				
CANDECON resins	335	3,728	168	1,864
Moderator resins	287	3,186	143	1,593
PHT resins	201	2,227	100	1,113
Misc. resins	269	2,987	134	1,493
Irradiated core components	2,973 (1)	4,067 (1)	1,486 (1)	2,034 (1)
Filters and filter elements				
IX columns	2,969 (2)	6,302 (2)	1,484 (2)	3,151 (2)
Retube Wastes (Pressure Tubes)	161	1,240	81	620
Retube Wastes (End Fittings)	599	6,536	300	3,268
Retube Wastes (Calandria Tubes)	111	857	56	428
Retube Wastes (Calandria Tube Inserts)	30	233	15	116
<b>Sub-total ILW</b>	<b>4,966 (1)</b>	<b>25,060 (1)</b>	<b>2,483 (1)</b>	<b>12,530 (1)</b>
	<b>4,962 (2)</b>	<b>27,295 (2)</b>	<b>2,481 (2)</b>	<b>13,647 (2)</b>
<b>Total</b>	<b>15,862 (1)</b>	<b>68,153 (1)</b>	<b>36,785 (1)</b>	<b>132,490 (1)</b>
	<b>15,858 (2)</b>	<b>70,388 (2)</b>	<b>36,783 (2)</b>	<b>133,607 (2)</b>

Note:

Values calculated using container and waste data from Table 3.11 and waste allocation given in Table 4.2.

1. Data from NWMO (2010a) for the original preliminary design.
2. Data from NWMO (2010b) for the final preliminary design.

### Sequence of Shaft Sealing Materials

Sealing Material ID	Depth of Top (mBGS)	Depth of Base (mBGS)	Vertical Length (m)	Diameter (m)		Comment
				Main Shaft	Ventilation Shaft	
CC	0.0	20.0	20.0	6.50	5.00	Concrete cap
S6	20.0	178.6	158.6	6.50	5.00	Engineered fill. Shaft liner and HDZ not removed.
B3	178.6	190.6	12.0	13.23	10.68	Concrete bulkhead keyed into rock to distance equal to 0.5*shaft radius. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
S5	190.6	322.8	132.2	9.15	7.45	Bentonite/sand mix. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
B2	322.8	340.8	6.0 (straight) 12.0 (keyed-in)	9.15 (straight) 13.23 (keyed in)	7.45 (straight) 10.68 (keyed in)	Lower 12 m of concrete bulkhead keyed into rock to distance equal to 0.5*shaft radius. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
S4	340.8	372.6	31.8	9.15	7.45	Bentonite/sand mix. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
B1	372.6	390.6	6.0 (straight) 12.0 (keyed-in)	9.15 (straight) 13.23 (keyed in)	7.45 (straight) 10.68 (keyed in)	Lower 12 m of concrete bulkhead keyed into rock to distance equal to 0.5*shaft radius. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
S3	390.6	506.6	116.0	9.15	7.45	Bentonite/sand mix. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
S2	506.6	567.5	60.9	9.15	7.45	Asphalt Mastic Mix. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
S1	567.5	662.1	94.6	9.15	7.45	Bentonite/sand mix. Shaft liner and HDZ removed prior to emplacement of shaft seal.
Shaft Monolith above DGR floor	662.1	682.1	20	9.15	7.45	Concrete. Shaft liner and shaft HDZ above DGR floor removed prior to emplacement of shaft seal.

Sealing Material ID	Depth of Top (mBGS)	Depth of Base (mBGS)	Vertical Length (m)	Diameter (m)		Comment
				Main Shaft	Ventilation Shaft	
Shaft Monolith below DGR floor (1)	682.1	719.1/746.4	37/64.3	8.15	6.45	Shaft liner and shaft HDZ below DGR floor not removed prior to emplacement of shaft seal. Thickness of liner included in diameter value

Note:

- 1 Base of monolith in main shaft is at 719.1 m and in ventilation shaft is at 746.4 m.

### Mass and Volume of Shaft Sealing Materials

Sealing Material ID	Sealing Material Type	Main Shaft		Ventilation Shaft		Total Volume (m <sup>3</sup> ) (1)	Total Mass (kg) (2)
		Volume (m <sup>3</sup> ) (1)	Mass (kg) (2)	Volume (m <sup>3</sup> ) (1)	Mass (kg) (2)		
CC	Concrete	6.6E+02	1.6E+06	3.9E+02	9.5E+05	1.1E+03	2.6E+06
S6	Engineered fill	5.3E+03	1.0E+07	3.1E+03	6.2E+06	8.4E+03	1.7E+07
B3	Concrete	1.6E+03	4.0E+06	1.1E+03	2.6E+06	2.7E+03	6.6E+06
S5	Bentonite/sand	8.7E+03	1.4E+07	5.8E+03	9.2E+06	1.4E+04	2.3E+07
B2	Concrete	2.0E+03	5.0E+06	1.3E+03	3.2E+06	3.4E+03	8.2E+06
S4	Bentonite/sand	2.1E+03	3.3E+06	1.4E+03	2.2E+06	3.5E+03	5.6E+06
B1	Concrete	2.0E+03	5.0E+06	1.3E+03	3.2E+06	3.4E+03	8.2E+06
S3	Bentonite/sand	7.6E+03	1.2E+07	5.1E+03	8.1E+06	1.3E+04	2.0E+07
S2	Asphalt Mastic Mix	4.0E+03	8.0E+06	2.7E+03	5.3E+06	6.7E+03	1.3E+07
S1	Bentonite/sand	6.2E+03	1.0E+07	4.1E+03	6.6E+06	1.0E+04	1.7E+07
Monolith	Concrete	Included in calculation of repository concrete in Table 4.7 and Table 4.8					
<b>Total (excl. monolith)</b>	<b>Engineered fill</b>	<b>5.3E+03</b>	<b>1.0E+07</b>	<b>3.1E+03</b>	<b>6.2E+06</b>	<b>8.4E+03</b>	<b>1.7E+07</b>
	<b>Concrete (3)</b>	<b>1.0E+04</b>	<b>2.5E+07</b>	<b>6.7E+03</b>	<b>1.6E+07</b>	<b>1.7E+04</b>	<b>4.1E+07</b>
	<b>Bentonite/Sand</b>	<b>2.5E+04</b>	<b>3.9E+07</b>	<b>1.6E+04</b>	<b>2.6E+07</b>	<b>4.1E+04</b>	<b>6.6E+07</b>
	<b>Asphalt Mastic Mix</b>	<b>4.0E+03</b>	<b>8.0E+06</b>	<b>2.7E+03</b>	<b>5.3E+06</b>	<b>6.7E+03</b>	<b>1.3E+07</b>

Notes:

1. Calculated from dimensions given in Table 4.14.
2. Derived using bulk densities given in Table 4.26. Includes liner in Surficial and Shallow Bedrock Groundwater Zones.
3. Includes concrete liners in shafts in Surficial and Shallow Bedrock Groundwater Zones.

### Hydraulic Conductivities and Porosities for Repository Materials

Parameter	Material		Undegraded	Degraded
Vertical and Horizontal Hydraulic Conductivity (m s <sup>-1</sup> ) (1)	Structural Concrete	Ref. value	1E-10	1E-8
		PDF values	Min: 1E-11 /Max: 1E-9	Min: 1E-9 /Max: 1E-7
		PDF type	Log-triangular	Log-triangular
	LHHPC	Ref. value	2E-12	1E-10
		PDF values	Min: 2E-13Max: 2E-11	Min: 1E-11 /Max: 1E-9
		PDF type	Log-triangular	Log-triangular
	Bentonite/sand	Ref. value	1E-11	
		PDF values	Min: 1E-14 /Max: 1E-9	
		PDF type	Log-triangular	
	Asphalt Mastic Mix	Ref. value	1E-12	
		PDF values	Min: 1E-14 /Max: 1E-11	
		PDF type	Log-triangular	
	Engineered Fill	Ref. value	1E-4	
		PDF values	Min: 1E-6 /Max: 1E-2	
		PDF type	Log-triangular	
Diffusion and Transport Porosities (-)	Structural Concrete	Ref. value	0.11	0.25
		PDF values	Min: 0.08 /Max: 0.14	Min: 0.2 /Max: 0.3
		PDF type	Triangular	Triangular
	LHHPC	Ref. value	0.05	0.1
		PDF values	Min: 0.04 /Max: 0.1	Min: 0.05 /Max: 0.15
		PDF type	Triangular	Triangular
	Bentonite/sand	Ref. value	0.29	
		PDF values	Min: 0.25 /Max: 0.33	
		PDF type	Triangular	
	Asphalt	Ref. value	0.02	
		PDF values	Min: 0.01 /Max: 0.04	
		PDF type	Triangular	
	Engineered Fill	Ref. value	0.25	
		PDF values	Min: 0.2 /Max: 0.3	
		PDF type	Triangular	

Note:

1. Slightly lower values (less than a factor of two) can be expected for saline conditions due to greater density and viscosity of water. However, this data report adopts freshwater hydraulic conductivity values irrespective of salinity conditions.



### Sorption Coefficients for Bentonite/Sand Shaft Seals ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

Element	Kd
C	0
Cl	0
Cr	0 <sup>(1)</sup>
Ni	0
Cu	0 <sup>(1)</sup>
Zr	0.05
Nb	0.1
Cd	0 <sup>(1)</sup>
I	0
Pb	0.001
Ra	0
U	0.01
Np	0.004
Pu	0.5
All other elements and organic contaminants	0

Note:

1. Where relevant data is not available, a value of 0 is chosen conservatively.

### Densities for Repository Materials

Parameter	Material	Undegraded	Degraded
Grain Density (kg m <sup>-3</sup> )	Structural Concrete <sup>(1)</sup>	2560	2650
	LHHPC	2560 <sup>(2)</sup>	2650 <sup>(3)</sup>
	Bentonite/Sand	2740 <sup>(4)</sup>	
	Asphalt	1990 <sup>(5)</sup>	
	Engineered Fill	2650 <sup>(6)</sup>	
Dry Bulk Density (kg m <sup>-3</sup> )	Structural Concrete <sup>(7)</sup>	2280	1990
	LHHPC	2425 <sup>(8)</sup>	2390 <sup>(7)</sup>
	Bentonite/Sand	1600 <sup>(9)</sup>	
	Asphalt	1960 <sup>(7)</sup>	
	Engineered Fill	1990 <sup>(7)</sup>	

Notes:

1. Taken to be the same as for LHHPC.
2. Derived from bulk density using Equation 4.4 and porosity value from Table 4.22.
3. Assumed to degrade to have the same grain density as quartz given in CRC (2006).
4. Average grain density for 70:30 mix of MX80 bentonite (2780 kg m<sup>-3</sup>, Karnland et al. 2008) and quartz sand (2650 kg m<sup>-3</sup>, CRC 2006).
5. Average grain density for 70:20:10 mix of quartz sand (2650 kg m<sup>-3</sup>, CRC 2006), asphalt (1035 kg m<sup>-3</sup>, Pettersson and Elert 2001) and hydrated lime (2200 kg m<sup>-3</sup>, CRC 2006).
6. Grain density of quartz given in CRC (2006).
7. Derived from grain density using Equation 4.4 and porosity value from Table 4.22.
8. Table 5 of Dixon et al. (2009).
9. See Section 4.4.2.

### Effective Diffusion Coefficients for Repository Materials

Parameter	Material	Undegraded	Degraded
Horizontal and Vertical Effective Diffusion Coefficient (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	Structural Concrete	2.5E-12	1.25E-10
	LHHPC	3E-13	1.25E-10
	Bentonite/Sand	3E-10	
	Asphalt	1E-13	
	Engineered Fill	2.5E-10	

Note:

No distinction is made between values for anions and other species.

### Two-phase Flow Parameters for Repository Materials

Material		<b>m</b>	<b>n</b>	<b>S<sub>ir</sub></b>	<b>S<sub>gr</sub></b>
	<b>Pa<sup>-1</sup></b>	-	-	-	-
Concrete (LPHPC & structural)	Ref: 1.0E-6 Min: 1.0E-7 Max: 3.0E-5	Ref: 0.5 Min: 0.3 Max: 0.6	Ref: 2.0 Min 1.5 Max: 2.3	Ref: 0.20 Min: 0.01 Max: 0.30	Ref: 0.10 Min: 0.00 Max: 0.20
Bentonite/ sand	Ref: 1.0E-7 Min: 3.0E-8 Max: 3.0E-5	Ref: 0.4 Min: 0.25 Max: 0.6	Ref: 1.8 Min 1.25 Max: 2.5	Ref: 0.01 Min: 0.0 Max: 0.60	0.01
Asphalt	Assume zero capillary pressure at all saturations				
Engineered Fill	2E-3	0.5	2.0	0.25	0.0

**Depths to Geological Units (metres below ground surface)**

<b>Geological Unit</b>	<b>Depth of Top Unit (mBGS)</b>	<b>Depth at Centre of Stratigraphic Unit (mBGS)</b>
Quaternary	0	10
Lucas	20	25
Amherstburg (upper)	30.4	40
Amherstburg (lower)	50	63
Bois Blanc	75	100
Bass Island (upper)	124	134
Bass Island (lower)	144	157
Salina G	169.3	174
Salina F	178.6	201
Salina E	223	233
Salina D	243	244
Salina C	244.6	252
Salina B	260.3	276
Salina B evaporite	291.2	292
Salina A2 carbonate	293.1	306
Salina A2 evaporite	319.7	323
Salina A1 Upper carbonate	325.5	327
Salina A1 carbonate	328.5	348
Salina A1 evaporite	367	369
Salina A0	370.5	373
Guelph	374.5	377
Goat Island	378.6	388
Gasport	397.4	401
Lions Head	404.25	406
Fossil Hill	408.7	410
Cabot Head	411	423
Manitoulin	434.8	441
Queenston	447.7	483
Georgian Bay	518	563
Blue Mountain	608.9	630
Collingwood	651.6	656
Cobourg	659.5	674
Sherman Fall	688.1	702
Kirkfield	716.1	739
Coboconk	762	774
Gull River	785	812
Shadow Lake	838.6	841
Cambrian	843.8	852
Precambrian	860.7	N/A

Note:

The DGR-1/2 stratigraphy is used as reference. All data from Table 3.1 of the DGSM report (INTERA 2011) except for Amherstburg (lower), Bass Islands (lower) and Salina A1 Upper Carbonate which are from TR-08-10 (Walsh 2011).

### Mapping of the Geological Units to the Hydrogeological Zones

Geological Unit	Hydrogeological Zones
Quaternary	Surficial Groundwater Zone
Lucas	Shallow Bedrock Groundwater Zone
Amherstburg (upper)	
Amherstburg (lower)	
Bois Blanc	
Bass Island (upper)	
Bass Island (lower)	
Salina G	Intermediate Bedrock Groundwater Zone
Salina F	
Salina E	
Salina D	
Salina C	
Salina B	
Salina B evaporite	
Salina A2 carbonate	
Salina A2 evaporite	
Salina A1 Upper carbonate	
Salina A1 carbonate	
Salina A1 evaporite	
Salina A0	
Guelph	
Goat Island	
Gasport	
Lions Head	
Fossil Hill	
Cabot Head	
Manitoulin	
Queenston	Deep Bedrock Groundwater Zone
Georgian Bay	
Blue Mountain	
Collingwood	
Cobourg	
Sherman Fall	
Kirkfield	
Coboconk	
Gull River	
Shadow Lake	
Cambrian	
Precambrian	

### Sampled Groundwater and Porewater Compositions

Sample	OGW-8	OGW-12	Salina A2	Salina A1	Georgian Bay Shale	Cobourg Limestone
Sample Type	Groundwater	Groundwater	Porewater	Porewater	Porewater	Porewater
Borehole	DGR-3	DGR-4	DGR-4	DGR-3	DGR-3	DGR-3
Depth (mBGS)	337.80-341.51	373.66-381.18	304.05	348.31	581.28	680.46
Formation	Salina Upper A1 Formation	Guelph	Salina A2 Unit - Carb	Salina A1 Unit - Carb	Georgian Bay	Cobourg
Source (INTERA 2011)	Table 4.7 and Table 4.8; Figures 4.53	Table 4.7 and Table 4.8; Figures 4.53	Figures 4.53 to 4.57	Figures 4.53 to 4.57	Figures 4.53 to 4.57	Figures 4.53 to 4.57
% Drill Water Contamination	3.1	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
pH	7.3	6.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Eh (mV)	-13	-141.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
DO (mg L <sup>-1</sup> )	0.3	0.23	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Sulphide (mg L <sup>-1</sup> )	5	0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calculated TDS (mg L <sup>-1</sup> )	26760	375468	131035	191664	298610	260362
Fluid Density (kg m <sup>-3</sup> )	1019	1210	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Na (mg L <sup>-1</sup> )	7835	99133	47446	61626	54486	59514
Ca (mg L <sup>-1</sup> )	1003	31597	2208	668	40533	9530
Mg (mg L <sup>-1</sup> )	580.6	7901	2558	8738	12651	22099
K (mg L <sup>-1</sup> )	125.2	3665	545	1407	16159	17303
Sr (mg L <sup>-1</sup> )	17.7	589.3	252	1128	1566	1868
Fe (mg L <sup>-1</sup> )	10	29.6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Mn (mg L <sup>-1</sup> )	1.03	4.27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cl (mg L <sup>-1</sup> )	13615	229635	77617	54775	212431	178956
Br (mg L <sup>-1</sup> )	<30	1715	167	30	2371	1824
F (mg L <sup>-1</sup> )	1.9	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
I (mg L <sup>-1</sup> )	<0.3	0.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Si (mg L <sup>-1</sup> )	2.6	987	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
SO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	3568	211	8713	80999	291	1415
NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	<6	<5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
B (mg L <sup>-1</sup> )	N.D.	N.D.	75	241	182	177
Alkalinity as CaCO <sub>3</sub>	180.6	42.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

**Notes:**

These compositions are groundwater and porewater analyses that have been corrected for perturbations due to sampling and analysis where feasible. It is expected that the departure from in-situ conditions will be greatest for the porewaters. Porewater concentrations (apart from TDS) were reported in the original source in units of mmol kg<sup>-1</sup> water. These concentrations have been converted to mg L<sup>-1</sup> based on 1 kg L<sup>-1</sup> water density. N.D. means no data.

**Geosphere Hydraulic Conductivity and Specific Storage**

<b>Geological Unit</b>	<b>Horizontal Hydraulic Conductivity (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>PDF</b>	<b>Vertical Hydraulic -1</b>	<b>PDF</b>	<b>Specific Storage (m )</b>	<b>PDF</b>
Quaternary	8E-10	(1)	4E-10	(1)	1E-3	(2)
Lucas	1E-06	4E-9 to 2E-4 (3)	1E-07	(1)	8E-07^	(2)
Amherstburg (upper)	1E-06	1E-8 to 2E-5 (3)	1E-07	(1)	2E-06	(2)
Amherstburg (lower)	1E-07	1E-8 to 2E-5 (3)	1E-08	(1)	2E-06	(2)
Bois Blanc	1E-07	6E-10 to 1E-4 (3)	1E-08	(1)	1E-06	(2)
Bass Island (upper)	1E-04	1E-5 to 3E-4 (3)	1E-05	(1)	2E-06	(2)
Bass Island (lower)	1E-05	(1)	1E-06	(1)	2E-06	(2)
Salina G	1E-11	(1)	1E-12	(1)	5E-06^	(2)
Salina F	5E-14	(1)	5E-15	(1)	3E-06^	(2)
Salina E	2E-13	(1)	2E-14	(1)	3E-06^	(2)
Salina D	2E-13	(1)	2E-14	(1)	8E-07^	(2)
Salina C	4E-13	(1)	4E-14	(1)	5E-06^	(2)
Salina B	4E-13	(1)	4E-14	(1)	3E-05^	(2)
Salina B evaporite	3E-13	(1)	3E-14	(1)	9E-07^	(2)
Salina A2 carbonate	3E-10	(1)	3E-11	(1)	2E-06	(2)
Salina A2 evaporite	3E-13	(1)	3E-14	(1)	7E-07^	(2)
Salina A1 Upper carbonate	2E-07	(1)	2E-07	(1)	1E-06	(2)
Salina A1 carbonate	9E-12	(1)	9E-13	(1)	1E-06	(2)
Salina A1 evaporite	3E-13	(1)	3E-14	(1)	4E-07	(2)
Salina A0	3E-13	(1)	3E-14	(1)	2E-07^	(2)
Guelph	3E-08	(1)	3E-08	(1)	1E-06	(2)

Goat Island	2E-12	(1)	2E-13	(1)	5E-07	(2)
Gasport	2E-12	(1)	2E-13	(1)	5E-07	(2)
Lions Head	5E-12	(1)	5E-13	(1)	7E-07	(2)
Fossil Hill	5E-12	(1)	5E-13	(1)	9E-07^	(2)
Cabot Head	9E-14	(1)	9E-15	(1)	3E-05	(2)
Manitoulin	9E-14*	(1)	9E-15*	(1)	2E-06^	(2)
Queenston	2E-14*	(1)	2E-15*	(1)	4E-06^	(2)
Georgian Bay	3E-14	(1)	3E-15	(1)	1E-05	(2)
Blue Mountain	5E-14*	(1)	5E-15*	(1)	1E-05^	(2)
Collingwood	2E-14	(1)	2E-15	(1)	1E-06	(2)
Cobourg	2E-14*	(1)	2E-15*	(1)	7E-07^	(2)
Sherman Fall	1E-14*	(1)	1E-15*	(1)	3E-06^	(2)
Kirkfield	8E-15*	(1)	8E-16*	(1)	2E-06	(2)
Coboconk	4E-12*	(1)	4E-15*	(1)	2E-06^	(2)
Gull River	7E-13*	(1)	7E-16*	(1)	2E-06^	(2)
Shadow Lake	1E-09	(1)	1E-10	(1)	1E-06	(2)
Cambrian	3E-06	(1)	3E-06	(1)	1E-06	(2)
Upper Precambrian	1E-10	(4)	1E-10	(4)	1E-06	(4)

Notes:

Horizontal hydraulic conductivity from Table 4.19 of INTERA (2011).

Vertical hydraulic conductivity calculated using anisotropy given in Table 4.19 of INTERA (2011). Specific storage from Table 4.19 of INTERA (2011).

1. Log triangular PDF with the minimum/maximum minus/plus 0.699 (i.e., a factor of 5) based on Figure 4.88 of INTERA (2011) compared with Figure 4.90 of INTERA (2011).
2. Log triangular PDF with the minimum minus 1.0 and the maximum plus 0.699 (i.e., a factor of 5) based on Figure 4.94 of INTERA (2011) and the discussion therein.



3. Log triangular PDF with the minimum/maximum values shown here – taken from Table 4.12 of INTERA (2011).

4. Single point value.

\* Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010). Values differ (up/down) by a factor of two or less from those given in the final version, see Appendix A, INTERA (2011).

^ Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010). Values differ (up/down) by a factor of two or less from those given in the final version, with the exception of the Salina G, Fossil Hill, Coboconk and Gull River for which the value is up to a factor of five higher than the value given in the final version, see Appendix A, INTERA (2011).

### Geosphere Porosities

Geological Unit	(Liquid) Porosity (-) <sup>(1)</sup>	PDF (Fractional Std.Dev) <sup>^</sup>	PDF (min/max) <sup>(3)</sup>
Quaternary	0.2	0.80	0.04 / 0.36
Lucas	0.07*	0.80	0.014 / 0.13
Amherstburg (upper)	0.07*	0.80	0.014 / 0.13
Amherstburg (lower)	0.07*	0.80	0.014 / 0.13
Bois Blanc	0.077*	0.80	0.015 / 0.14
Bass Island (upper)	0.057*	0.80	0.011 / 0.10
Bass Island (lower)	0.057*	0.80	0.011 / 0.10
Salina G	0.172*	0.80	0.034 / 0.31
Salina F	0.128*	0.80	0.026 / 0.23
Salina E	0.135*	0.80	0.027 / 0.24
Salina D	0.098*	0.80	0.020 / 0.18
Salina C	0.205*	0.80	0.041 / 0.37
Salina B	0.165*	0.80	0.033 / 0.30
Salina B evaporite	0.098*	0.80	0.020 / 0.18
Salina A2 carbonate	0.145*	0.80	0.029 / 0.26
Salina A2 evaporite	0.098*	0.80	0.020 / 0.18
Salina A1 Upper carbonate	0.07*	0.80	0.014 / 0.13
Salina A1 carbonate	0.019*	0.80	0.038 / 0.034
Salina A1 evaporite	0.007*	0.80	0.001 / 0.013
Salina A0	0.027*	0.80	0.005 / 0.049
Guelph	0.057*	0.80	0.011 / 0.10
Goat Island	0.02*	0.80	0.004 / 0.036
Gasport	0.02*	0.80	0.004 / 0.036
Lions Head	0.031*	0.80	0.006 / 0.056
Fossil Hill	0.031*	0.80	0.006 / 0.056
Cabot Head	0.116*	0.80	0.023 / 0.21
Manitoulin	0.028*	0.80	0.006 / 0.050
Queenston	0.073*	0.22	0.057 / 0.089
Georgian Bay	0.071	0.22	0.055 / 0.087
Blue Mountain	0.078*	0.22	0.061 / 0.095
Collingwood	0.012*	1.0	0 / 0.024
Cobourg	0.015*	1.0	0 / 0.030
Sherman Fall	0.016*	1.0	0 / 0.032
Kirkfield	0.021*	1.0	0 / 0.042
Coboconk	0.009	1.0	0 / 0.018
Gull River	0.022	1.0	0 / 0.044
Shadow Lake	0.097*	0.74	0.025 / 0.17
Cambrian	0.071*	0.74	0.018 / 0.12
Upper Precambrian	0.038	0.5 <sup>(2)</sup>	0.019 / 0.057

Notes:

1. Liquid porosity from Table 4.18 of INTERA (2011).
2. No data in Table 4.3 of INTERA (2011), assumed based on the ranges for units where data are available.

3. Triangular distribution. Min/max equals mean minus/plus one standard deviation.

\* Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010).

Values differ (up/down) by a factor of less than two from those given in the final version, with the exception of the Fossil Hill which is about a factor of six higher than the value given in the final version; see Appendix A of INTERA (2011).

^ Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010). Values differ (up/down) by a factor of less than 1.2 from those given in the final version; see Appendix A of INTERA (2011).

### Hydraulic Properties of the Shaft EDZs

Parameter	Inner EDZ		Outer EDZ	
	Reference Value	PDF (1)	Reference Value	PDF (1)
Thickness (2)	$0.5 \times r'$	-	$0.5 \times r'$	-
Hydraulic Conductivity (3)	100 x geosphere (vertical) (5)	100 to 10,000 x geosphere (vertical)	10 x geosphere (vertical)	10 to 100 x geosphere (vertical)
Total, Transport and Diffusion (Accessible)	2 x geosphere	-	Geosphere	-

Notes:

1. Taken to be log uniform.
2.  $r'$  is the radius of the excavated shaft (i.e., prior to removal of HDZ).
3. Hydraulic conductivity taken to be isotropic in EDZs.
4. Note that this is the matrix porosity, not fracture porosity.
5. 100x is recommended as the reference value to be consistent with the assumed areas of the shaft EDZs.

### Hydraulic Properties of the Repository HDZ and EDZ

Parameter	Emplacement Rooms & Unsupported Access Tunnels				Supported Access Tunnels			
	HDZ		EDZ		HDZ		EDZ	
	Reference Value	PDF	Reference Value	PDF (1)	Reference Value	PDF	Reference Value	PDF (1)
Thickness (m)	0.5	-	8	-	2 (top & bottom) 0.5 (sides)	-	3	-
Hydraulic Conductivity (2)	1E-6 m s <sup>-1</sup>	-	1,000 x geosphere (horizontal)(4)	100 to 10,000 x geosphere (horizontal)	1E-6 m s <sup>-1</sup>	-	1,000 x geosphere (horizontal)	100 to 10,000 x geosphere (horizontal)
Total, Transport and Diffusion (Accessible)	4 x geosphere	-	2 x geosphere	-	4 x geosphere	-	2 x geosphere	-

Notes:

1. Taken to be log uniform.
2. Hydraulic conductivity taken to be isotropic in HDZs and EDZs.
3. Note that this is the matrix porosity, not fracture porosity.
4. Mid-range of the PDF is recommended noting that lateral transport will be dominated by presence of the HDZ and open tunnels.

## Geosphere Grain Densities

Geological Unit	Grain Density Values (kg m <sup>-3</sup> )	PDF
Quaternary	2800 <sup>(4)</sup>	(1)
Lucas	2700*	(2)
Amherstburg (upper)	2700*	(2)
Amherstburg (lower)	2700*	(2)
Bois Blanc	2700*	(2)
Bass Island (upper)	2700*	(2)
Bass Island (lower)	2700*	(2)
Salina G	2700*	(2)
Salina F	2760*	(2)
Salina E	2830*	(2)
Salina D	2930	(2)
Salina C	2750*	(2)
Salina B	2810	(2)
Salina B evaporite	2930	(2)
Salina A2 carbonate	2870*	(2)
Salina A2 evaporite	2930*	(2)
Salina A1 Upper carbonate	2720*	(2)
Salina A1 carbonate	2720*	(2)
Salina A1 evaporite	2930	(2)
Salina A0	2780*	(2)
Guelph	2810	(3)
Goat Island	2730	(3)
Gasport	2730	(3)
Lions Head	2730	(3)
Fossil Hill	2730	(3)
Cabot Head	2800*	(3)
Manitoulin	2730*	(3)
Queenston	2770	(3)
Georgian Bay	2760	(3)
Blue Mountain	2760*	(3)
Collingwood	2690*	(3)
Cobourg	2710	(3)
Sherman Fall	2720	(3)
Kirkfield	2700*	(3)
Coboconk	2690	(3)
Gull River	2730	(3)
Shadow Lake	2750*	(3)
Cambrian	2660*	(3)
Precambrian	2590	(1)

Notes:

1. Assume triangular distribution with min and max -5% and +5% of the mean.
2. Triangular distribution with min and max -5% and +5% of the mean based on Figure 4.1 of INTERA (2011).
3. Triangular distribution with min and max -2.5% and +2.5% of the mean based on Figure 4.1 of INTERA (2011).
4. Nominal value for clay based on illite mineral density (CRC 2006).

\* Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010). Values differ (up/down) by a factor of less than 1.08 from those given in the final version; see

### Geosphere Dry Bulk Densities

Geological Unit	Dry Bulk Density Values (kg m <sup>-3</sup> )	PDF
Quaternary	2240 <sup>(1)</sup>	(2)
Lucas	2490*	(3)
Amherstburg (upper)	2490*	(3)
Amherstburg (lower)	2490*	(3)
Bois Blanc	2490*	(3)
Bass Island (upper)	2490*	(3)
Bass Island (lower)	2490*	(3)
Salina G	2480*	(3)
Salina F	2300*	(3)
Salina E	2490*	(3)
Salina D	2870*	(3)
Salina C	2290*	(3)
Salina B	2370*	(3)
Salina B evaporite	2870*	(3)
Salina A2 carbonate	2440*	(3)
Salina A2 evaporite	2870	(3)
Salina A1 Upper carbonate	2630*	(3)
Salina A1 carbonate	2630*	(3)
Salina A1 evaporite	2870*	(3)
Salina A0	2600*	(3)
Guelph	2600*	(4)
Goat Island	2600*	(4)
Gasport	2600*	(4)
Lions Head	2600*	(4)
Fossil Hill	2600*	(4)
Cabot Head	2540*	(4)
Manitoulin	2660*	(4)
Queenston	2580*	(4)
Georgian Bay	2610	(4)
Blue Mountain	2560*	(4)
Collingwood	2580*	(4)
Cobourg	2660	(4)
Sherman Fall	2660	(4)
Kirkfield	2640*	(4)
Coboconk	2670	(4)
Gull River	2670	(4)
Shadow Lake	2530*	(4)
Cambrian	2400*	(4)
Precambrian	2490	(2)

Notes:

1. Calculated from grain density in Table 5.10 and the porosity in Table 5.6 using Equation 4.4.
2. Assume triangular distribution with min and max -5% and +5% of the mean.
3. Triangular distribution with min and max -5% and +5% of the mean based on Figure 4.1 of INTERA (2011).
4. Triangular distribution with min and max -2.5% and +2.5% of the mean based on Figure 4.1 of INTERA (2011).

\* Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer

2010). Values differ (up/down) by a factor of less than 1.09 from those given in the final version; see App. A of INTERA (2011).



### Geosphere Sorption Coefficients

Element	Limestone and Dolostone (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	Shale (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>
C	0	0
Cl	0	0
Cr	0 <sup>(1)</sup>	0 <sup>(1)</sup>
Ni	0	0
Cu	0 <sup>(1)</sup>	0 <sup>(1)</sup>
Zr	0 <sup>(1)</sup>	0.01
Nb	0 <sup>(1)</sup>	0.05
Cd	0 <sup>(1)</sup>	0.05
I	0	0
Pb	0 <sup>(1)</sup>	0.03
Ra	0	0
U	0.001	0.001
Np	0.001	0.03
Pu	0.02	0.2
All other elements and organic contaminants	0	0

Notes:

1. No relevant data available, therefore no sorption is conservatively assumed.
2. Geological Units classified as shale are: Salina C and F, Cabot Head, Manitoulin, Queenston, Georgian Bay and Blue Mountain.

### Geosphere Effective Diffusion Coefficients

Geological Unit	$D_e$ NaI Normal to Bedding ( $m^2 s^{-1}$ ) (1)	$D_e$ HTO Normal to Bedding ( $m^2 s^{-1}$ ) (3)	PDF	$D_{e-h}:D_{e-v}$ (-)
Quaternary (2)	6.0E-11	1.2E-10	(2)	1:1
Lucas	6.0E-12*	1.2E-11	(2)	1:1
Amherstburg (upper)	6.0E-12*	1.2E-11	(2)	1:1
Amherstburg (lower)	6.0E-12*	1.2E-11	(2)	1:1
Bois Blanc	6.0E-12*	1.2E-11	(2)	1:1
Bass Island (upper)	1.3E-11*	2.6E-11	(2)	1:1
Bass Island (lower)	1.3E-11*	2.6E-11	(2)	1:1
Salina G	4.3E-13	8.6E-13	(2)	2:1
Salina F	4.1E-12	8.2E-12	(2)	2:1
Salina E	4.7E-12	9.4E-12	(2)	2:1
Salina D	4.7E-12	9.4E-12	(2)	2:1
Salina C	1.1E-11	2.2E-11	(2)	2:1
Salina B	1.2E-11	2.4E-11	(2)	2:1
Salina B evaporite	7.7E-14	1.5E-13	(2)	2:1
Salina A2 carbonate	1.2E-12	2.4E-12	(2)	2:1
Salina A2 evaporite	7.7E-14	1.5E-13	(2)	2:1
Salina A1 Upper carbonate	4.9E-12*	9.8E-12	(2)	1:1
Salina A1 carbonate	1.8E-13	3.6E-13	(2)	2:1
Salina A1 evaporite	3.0E-14	6.0E-14	(2)	2:1
Salina A0	3.0E-14	6.0E-14	(2)	2:1
Guelph	3.2E-12*	6.4E-12	(2)	1:1
Goat Island	1.5E-13	3.0E-13	(2)	2:1
Gasport	1.5E-13	3.0E-13	(2)	2:1
Lions Head	6.2E-12*	1.2E-11	(2)	2:1
Fossil Hill	1.6E-11*	3.2E-11	(2)	2:1
Cabot Head	3.1E-12	6.2E-12	(2)	2:1
Manitoulin	1.5E-13	3.0E-13	(2)	2:1
Queenston	1.0E-12	2.0E-12	(2)	2:1
Georgian Bay	6.8E-13*	1.4E-12	(2)	2:1^
Blue Mountain	8.2E-13	1.6E-12	(2)	2:1
Collingwood	4.9E-13	9.8E-13	(2)	2:1
Cobourg	3.7E-13	7.4E-13	(2)	2:1
Sherman Fall	2.2E-13	4.4E-13	(2)	2:1
Kirkfield	4.2E-13	8.4E-13	(2)	2:1
Coboconk	2.7E-13	5.4E-13	(2)	2:1
Gull River	2.6E-13	5.2E-13	(2)	2:1
Shadow Lake	6.1E-12*	1.2E-11	(2)	2:1
Cambrian	7.7E-12*	1.5E-11	(2)	1:1
Upper Precambrian	3.0E-13	6.0E-13	(2)	1:1

Notes:

1. From Table 4.19 of INTERA (2011).
  2. Log-triangular distribution with the minimum/maximum minus/plus 0.699 (i.e., a factor of 5) based on Figure 4.38 of INTERA (2011).
  3. A factor of two greater than De Nal normal to bedding.
- \* Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010). Values are up to a factor of 30 higher than those given in the final version, except for the Shadow Lake which is a factor of 1.5 lower and the Fossil Hill which is almost a factor of 400 higher than final value; see Appendix A of INTERA (2011).
- ^ Value from interim version of INTERA (2011) at time of data freeze for safety assessment (summer 2010). Value of 7:1 is given in the final version; see Appendix A of INTERA (2011).

### Two-phase Flow Parameters for van Genuchten Model

Geological Unit	Number of Samples	$\alpha^{-1}$ (Pa <sup>-1</sup> )	m (-)	n (-)	$S_{ir}$ (-)	$S_{gr}$ (-)	Notes/Comments
Shallow Bedrock Groundwater Zone	0	-	-	-	-	-	Not included in gas models
Salina G	0	Ref: 4.11E-08 Min: 3.55E-08 Max: 4.53E-08	Ref: 0.817 Min: 0.356 Max: 1.567	Ref: 3.873 Min: 1.620 Max: 5.520	0.000	Ref: 0.040 Min: 0.000 Max: 0.100	Assume equal to Salina F
Salina F	3	Ref: 4.11E-08 Min: 3.55E-08 Max: 4.53E-08	Ref: 0.817 Min: 0.356 Max: 1.567	Ref: 3.873 Min: 1.620 Max: 5.520	0.000	Ref: 0.040 Min: 0.000 Max: 0.100	
Salina E (1)	1	1.70E-06	0.460	4.310	0.010	0.150	
Salina D	0	1.70E-06	0.460	4.310	0.010	0.150	Salina E
Salina C (1)	2	3.23E-06	0.350	4.220	0.550	0.000	
Salina B	1	1.21E-07	0.931	2.170	0.000	0.035	
Salina B evaporite	0	4.86E-07	0.990	2.280	0.010	0.100	Assume equal to Salina A2 evaporite
Salina A2 carbonate	2	Ref: 1.32E-06 Min: 3.04E-07 Max: 5.76E-06	0.500	Ref: 3.060 Min: 2.420 Max: 3.700	0.000	0.000	m adjusted to achieve improved qualitative fit
Salina A2 evaporite	1	4.86E-07	0.990	2.280	0.010	0.100	
Salina A1 Upper carbonate	0	2.70E-05	0.145	4.890	0.248	0.000	Assume equal to Guelph
Salina A1 carbonate	1	2.57E-08	0.990	2.410	0.000	0.000	

Geological Unit	Number of Samples	$\sigma^{-1}$ (Pa <sup>-1</sup> )	m (-)	n (-)	$S_{ir}$ (-)	$S_{gr}$ (-)	Notes/Comments
Salina A1 evaporite	1	4.86E-07	0.990	2.280	0.010	0.100	Assume equal to Salina A2 evaporite
Salina A0	2	Ref:1.70E-07 Min:1.20E-07 Max: 2.41E-07	Ref:1.131 Min:0.990 Max: 1.272	Ref:2.250 Min:1.790 Max: 2.710	Ref:0.002 Min:0.000 Max: 0.004	Ref:0.143 Min:0.020 Max: 0.265	
Guelph	1	2.73E-05	0.145	4.890	0.248	0.000	Based on limited fit for sample 4-5.5 (DGR-4, Salina A0)
Goat Island	3	Ref:3.58E-08 Min:9.47E-09 Max: 3.77E-08	Ref:0.684 Min:0.527 Max: 15.244	Ref:6.110 Min:2.170 Max: 6.540	Ref:0.025 Min:0.020 Max: 0.030	0.000	Reference calculation neglects sample 4-6B (DGR-4)
Gasport	0	3.58E-08	0.684	6.110	0.025	0.000	Assume equal to Goat Island
Lions Head	0	3.58E-08	0.684	6.110	0.025	0.000	Assume equal to Goat Island
Fossil Hill	0	3.58E-08	0.684	6.110	0.025	0.000	Assume equal to Goat Island
Cabot Head	1	6.83E-08	0.243	6.820	0.000	0.050	Assume Sgr of 0.05

Geological Unit	Number of Samples	$\sigma_{-1}$ (Pa)	m (-)	n (-)	$S_{lr}$ (-)	$S_{gr}$ (-)	Notes/Comments
Manitoulin	2	Ref:2.45E-08 Min:2.00E-08 Max: 3.00E-08	Ref:1.305 Min:0.682 Max: 1.927	Ref:3.650 Min:3.430 Max: 3.870	Ref:0.106 Min:0.000 Max: 0.211	Ref:0.050 Min:0.000 Max: 0.100	
Queenston	7	Ref:2.81E-08 Min:1.58E-08 Max: 3.81E-08	Ref:1.133 Min:0.429 Max: 2.466	Ref:4.454 Min:2.470 Max: 8.840	Ref:0.086 Min:0.000 Max: 0.197	Ref:0.056 Min:0.000 Max: 0.195	
Georgian Bay	7	Ref:3.32E-08 Min:1.34E-08 Max: 4.78E-08	Ref:1.097 Min:0.457 Max: 3.195	Ref:3.813 Min:2.660 Max: 4.580	Ref:0.166 Min:0.000 Max: 0.377	Ref:0.037 Min:0.000 Max: 0.120	
Blue Mountain	5	Ref:2.33E-08 Min:1.04E-08 Max: 3.80E-08	Ref:1.089 Min:0.505 Max: 2.372	Ref:3.184 Min:2.380 Max: 3.760	Ref:0.065 Min:0.000 Max: 0.155	Ref:0.010 Min:0.000 Max: 0.050	Calculated from Calder (2011) by combining Blue Mountain Upper and Lower
Collingwood	1	1.06E-08	2.570	2.140	0.000	0.120	
Cobourg	4	Ref:1.62E-08 Min:7.11E-09 Max: 2.69E-08	Ref:1.689 Min:0.109 Max: 3.454	Ref:3.130 Min:1.520 Max: 7.560	Ref:0.060 Min:0.015 Max: 0.171	Ref:0.025 Min:0.000 Max: 0.085	
Sherman Fall	2	Ref:3.54E-08 Min:2.89E-08 Max: 4.33E-08	Ref:0.999 Min:0.791 Max: 1.206	Ref:2.335 Min:2.160 Max: 2.510	Ref:0.170 Min:0.130 Max: 0.210	Ref:0.110 Min:0.000 Max: 0.220	
Kirkfield	1	5.78E-09	7.216	2.170	0.000	0.150	

Geological Unit	Number of Samples	$\sigma_{cr}^{-1}$ (Pa <sup>-1</sup> )	m (-)	n (-)	$S_{ir}$ (-)	$S_{gr}$ (-)	Notes/Comments
Coboconk	2	Ref: 1.51E-08 Min: 1.14E-08 Max: 1.99E-08	Ref: 1.732 Min: 0.738 Max: 2.726	Ref: 1.820 Min: 1.700 Max: 1.940	0.000	Ref: 0.025 Min: 0.000 Max: 0.050	
Gull River	1	2.50E-08	0.775	4.060	0.210	0.110	
Shadow Lake	0	4.41E-06	0.583	1.200	0.040	0.000	Assume equal to Cambrian
Cambrian	1	4.41E-06	0.583	1.200	0.040	0.000	
Precambrian	0						Not included in Gas models

Notes:

Data based on limited fit to capillary pressure data with liquid saturations between 0.7 and 1.0.