

核電廠除役期間廠址
地下水水質採樣及監測作業技術要項
研析

期末報告(定稿版)

受託單位：中華民國地球物理學會

計畫執行期間：114年2月14日至114年12月31日

中華民國 114 年 12 月

**核電廠除役期間廠址
地下水水質採樣及監測作業技術要項研析
期末報告**

目錄

第一章 計畫目的與工作	1
1.1 計畫緣起與目的	1
1.2 計畫工作內容	3
1.3 計畫報告章節說明	4
第二章 研析核能電廠除役作業地下水監測井水質採樣與分析流程	5
2.1 代表性水樣與地下水採樣分析	5
2.2 EPRI「建立地下水採樣和分析過程」	8
2.3 美國環境保護署「地下水採樣規範」	21
2.4 環境部「監測井地下水採樣方法」	35
2.5 環境部「環境水質監測採樣作業指引」	42
2.6 地下水防護管制建議事項	44
第三章 研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則	47
3.1 地下水採樣與監測數據評估準則	47
3.2 EPRI「評估採樣和監測數據」	52
3.3 小結與建議	65

第四章 彙整研析國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務 經驗	66
4.1 Kori 核電廠的關鍵族群劑量計算	66
4.2 Oyster Creek 核電廠	78
4.3 Wolsong 核電廠	112
4.4 NUREG-1757 的地表水與地下水特性調查	131
4.5 ASTM 場址概念模式建置.....	140
第五章 結論與建議.....	151
5.1 結論	151
5.2 建議.....	153
參考文獻	154
附件、歷次工作會議審查意見回覆.....	159

中文摘要

為研析我國核電廠除役階段地下水防護之管制要項與技術議題，核安會已於108年至113年間完成委託研究計畫，逐步建立廠址水文地質參數評析準則，檢視核一、核二及核三廠之地下水傳輸模式與防護監測方案，進一步發展場址概念模型建置原則、監測井設置與試驗作業要項，亦蒐集國際核電廠相關案例經驗，以強化我國核電廠除役期間地下水防護之管制審查與視察能力。

本計畫目的為進行核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項研析，計畫完成三項重要工作。工作項目一為參考國內外文獻，研析核能電廠除役作業地下水監測井水質採樣與分析流程，提出供管制單位審查及現場視察之建議。工作項目二為參考國內外文獻，研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則，提出供管制單位審查及現場視察之建議。工作項目三為蒐集國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗，研析重點事項以提出精進我國核能電廠地下水特性評估檢核作業之建議。本計畫已完成上述工作內容，據此彙整出核電廠除役期間地下水採樣與監測作業重要規範，建立地下水監測數據之評析與檢核準則，並提出相關作業流程及審查機制之改善建議，以提升我國核電廠除役階段地下水防護的審查及監管效能。

Abstract

To analyze the regulatory requirements and technical issues of groundwater protection during the decommissioning phase of nuclear power plants in Taiwan, the Nuclear Safety Commission (NSC) completed a series of commissioned research projects from 2019 to 2024. These projects gradually established evaluation criteria for site hydrogeological parameters, reviewed the groundwater flow and radionuclide transport models, as well as protection and monitoring programs of Chin-Shan, Kuosheng, and Maanshan Nuclear Power Plants, and further developed principles for conceptual site model construction, monitoring well installation, and hydraulic testing. Additionally, international case studies were also compiled to enhance Taiwan's regulatory review and inspection capabilities for groundwater protection during nuclear decommissioning.

The objective of this project is to conduct a technical analysis of groundwater sampling and monitoring procedures pertinent to decommissioning nuclear power plants, with three major tasks completed. Task 1 analyzes domestic and international literature to examine groundwater sampling and analytical procedures for monitoring wells at decommissioning nuclear power plant sites, and provides recommendations for regulatory review and on-site inspection. Task 2 focuses on the evaluation criteria and data interpretation methods for groundwater sampling and

monitoring results through a review of domestic and international literature, providing recommendations for regulatory review and on-site inspection. Task 3 compiles practical experiences and regulatory approaches related to groundwater protection during operation and decommissioning at international nuclear power plants, summarizes key findings, and offers recommendations to enhance groundwater characterization and protection strategies for nuclear facilities in Taiwan. The project has completed the aforementioned tasks and, based on these outcomes, has compiled key specifications for groundwater sampling and monitoring during the nuclear decommissioning phase, established evaluation and verification criteria for groundwater monitoring data, and proposed improvements to relevant operational procedures and review mechanisms. These efforts aim to enhance review and regulatory effectiveness for groundwater protection during the nuclear decommissioning stage in Taiwan.

第一章 計畫目的與工作

1.1 計畫緣起與目的

本服務案名稱為「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項研析」。依據工作說明書之「問題背景」內容，依核子反應器設施管制法規定，核能電廠設備與設施皆須確保不會威脅到公眾健康及安全，而對於環境保護及生態保育之影響亦須合於相關法令規定。我國核電廠在運轉期間已建立廠址地下水傳輸概念模式與防護方案，進入除役期間仍須持續執行該方案，透過監測廠區地下水輻射狀況，掌握廠址是否有發生放射性核種外釋情事，以立即採取防範地下水污染或外釋擴大之應變處理措施。

為研析我國核電廠除役期間廠址地下水防護管制要項，核能安全委員會(簡稱核安會)108年至113年委託研究計畫，針對核電廠廠址水文地質參數、地工特性參數等進行探討，對核一、二、三廠地下水傳輸模式與防護方案進行檢視，並探討核電廠地下水防護方案之廠址概念模型建置及地下水監測相關專業技術，亦蒐集國際核電廠相關案例，作為我國核電廠地下水防護管制之基礎。

核電廠除役期間仍須持續執行地下水防護方案，掌握廠址地下水變化狀況，確認無放射性物質污染地下水而影響周圍環境之疑慮，保障

電廠周圍民眾之健康與安全。管制單位為掌握國際核電廠除役作業地下水採樣與監測等相關專業技術資訊，並持續蒐集及彙整國際核電廠地下水防護管制資訊，以精進我國核電廠地下水防護方案審查及管制之技術能力，爰委託專業團隊協助辦理本案計畫。

1.2 計畫工作內容

依本服務案工作說明書所說明計畫執行期間將於決標日起至 114 年 12 月 31 日止執行完成。本案委託研究內容如下：

本計畫須蒐集並研析國際核電廠廠址地下水防護管制相關資訊，並參考歷年相關委託研究報告，就我國核能電廠除役作業廠址地下水採樣與監測作業之審查及管制，提出相關建議供核安會參考。

(一)參考國內外相關文獻，研析核能電廠除役作業地下水監測井水質採樣與分析流程，提出管制單位審查、視察之建議事項。

(二)參考國內外相關文獻，研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則，提出管制單位審查、視察之建議事項。

(三)蒐集國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗，彙整研析重點事項，俾供精進我國核能電廠廠址地下水特性評估的參採。

1.3 計畫報告章節說明

本報告分為 5 章，第 1 章為「計畫目的與工作」，主要說明計畫緣起與目的、計畫工作內容與計畫報告章節組成。第 2 章為「研析核能電廠除役作業地下水監測井水質採樣與分析流程」，主要內容為代表性水樣與地下水採樣分析、美國電力研究院 (Electric Power Research Institute, 簡稱 EPRI) 指引的建立地下水採樣和分析過程、美國環境保護署的地下水採樣規範與、行政院環境部的監測井地下水採樣方法與環境水質監測採樣作業指引、地下水水質採樣與分析流程建置要項評析。第 3 章為「研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則」，主要內容為地下水採樣與監測數據評估準則、EPRI 指引的地下水採樣與監測數據評估準則與地下水採樣與監測數據評估準則要項評析。第 4 章為「彙整研析國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗」，主要包括 Kori 核電廠的關鍵族群劑量計算、Oyster Creek 核電廠的地下水防護、Wolsong 核電廠的地下水數值、NUREG-1757 的地表水與地下水特性調查(Appendix F. Surface Water and Groundwater Characterization)與 ASTM 場址概念模式建置。第 5 章為「結論與建議」，主要總結整個計畫的執行成果，並就地下水採樣與分析過程、監測數據評估準則及國際核電廠地下水防護經驗提出建議，同時納入未來研究方向規劃。

第二章 研析核能電廠除役作業地下水監測井水質採樣與分析

流程

2.1 代表性水樣與地下水採樣分析

核電廠的地下水監測井網的設置，主要目的是長期監測廠區地下水中的放射性核種的濃度時間變化與空間分布特性，藉以掌握廠址地下環境是否有發生放射性物質外釋或遷移至地下水系統，並在異常情況下可以即時採取防治與緊急應變措施，以防範地下水污染或外釋範圍擴大。核電廠廠址地下水水質採樣作業的目的則是採集監測井周圍的含水層的「代表性地下水水質樣品 (representative groundwater samples)」，以進行放射性核種與一般水質項目的檢驗分析，從而了解核電廠監測井設置位置含水層的地下水水質背景與時空變化特徵。所謂「代表性地下水水質樣品」是指能真實呈現監測井井篩段周遭含水層的地下水水質狀況，且不受井管、設備或採樣過程影響之樣品。

在自然情況下，含水層的地下水的流動速度非常緩慢，因此其地下水水質隨時間變化亦相當緩慢，基於此特性，地下水的採樣的頻率通常不需太高，一般可介於數週至數月之間進行採樣。如圖 2-1 所示，含水層的地下水會流經監測井的井篩段(即井壁上設有濾水孔或井篩的區段)，因此井篩段的地下水是持續被置換。然而，相較之下，井管段(即

井壁上沒有濾水孔或井篩的區段)內所滯留的積水無法與流經井篩段的地下水進行交換，長時間處於近乎靜止狀態，井管積水會與井管材料、上方空氣接觸一段時間後，可能會產生化學反應，進而改變原來的水質特性，因此井管段的積水並無法代表監測井周遭含水層的真實地下水水質概況，故需要在採集水樣前進行洗井(purge)，洗井的目的是抽取並且置換井管段的積水，使井內的水為來自含水層流入而且是沒有與井管、空氣充分接觸的「新鮮」地下水作為「代表性地下水水質樣品」。

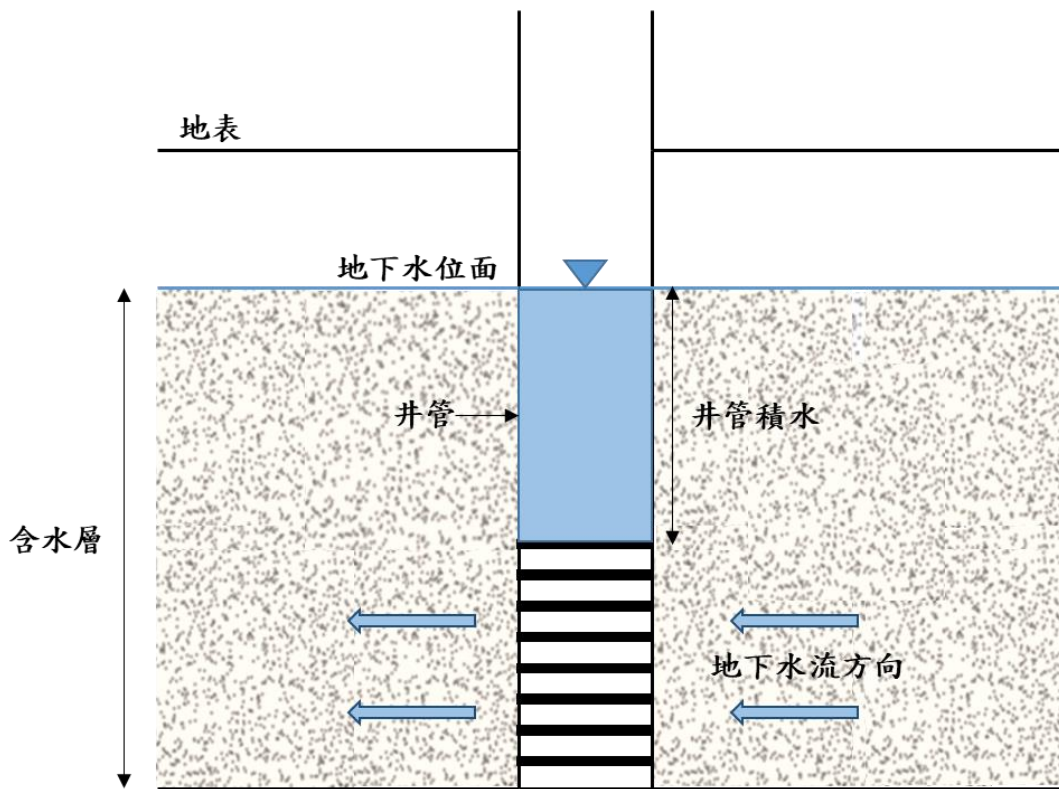


圖 2-1 地下水監測井內沒有被置換的井管積水示意圖

為了確認井內水質經洗井已恢復至代表性含水層狀況，也就是要

確保井中水樣能真實反映地下水體本身的水質，在洗井過程中需連續監測水質參數項，以水質參數穩定性作為科學依據判定洗井是否達到穩定與清淨的「代表性地下水水質樣品」，採集地下水水質樣品應依據相關地下水水質採樣品質保證／品質控制(Quality Assurance，簡稱 QA／Quality Control，簡稱 QC)作業規範進行樣品分裝程序，水質樣品分裝完成後，水質樣品應以適當保存條件運送至具認可資格的實驗室進行相關水質特性分析，相關水質特性分析項目包括水質的無機與有機化學成分與特性、生物性指標與放射性物質，視監測目的與廠址/場址特性而定。水質樣品分裝與保存作業目的在於避免水質樣品在運送和儲存過程中因物理、化學或生物反應導致交叉污染、氧化還原變化或揮發性成分改變，確保水質樣品真實呈現其在含水層的原始水質狀況以確保水質樣品的原始性。採用符合標準作業程序(standard of operation，簡稱 SOP)的地下水採樣及樣品分裝方法，可提升後續地下水水質分析結果的準確性、再現性與代表性，並降低分析數據的不確定性。透過系統化的水質分析與數據管理，有助於建立地下水水質的長期監測數據庫，掌握廠區或周圍區域性地下水水質的時空變異特性，進而支援污染來源鑑識與趨勢評估，為地下水防護提供科學化且具追溯性的地下水水質的基礎數據，為後續地下水防護與管理決策提供可靠的支持。

2.2 EPRI 「建立地下水採樣和分析過程」

美國數座核電廠在土壤與地下水中偵測到少量放射性物質，這些放射性物質係由非預期外釋所造成，雖然後續的調查顯示這些污染事件對輻射劑量的影響極為微小，並不足以造成健康風險，但美國核能產業主動展開一項自願性計畫，在所有核電廠廠址實施地下水監測計畫，以向地方利害關係人(stakeholders)證明，公共健康與安全受到充分保障。EPRI 於 2007 年發表了「核電廠地下水防護指引(groundwater protection guidelines for nuclear power plants) EPRI report 1015118」(以下簡稱 EPRI 指引)。此報告首次提出核電廠地下水防護的完整框架，包括前在外釋來源、廠址概念模型、地下水監測、取樣、資料記錄及事件通報機制，EPRI 指引的目的是提供核能產業者設計與執行完善的地下水防護方案 (groundwater protection program) 的指引，確保地下水防護方案能符合核電廠廠址的水文地質特性。地下水防護方案的目標在於有效控制放射性物質外釋，最大程度降低核電廠運轉過程中可能產生的環境影響，並減少潛在地下水污染可能造成的長期成本負擔。EPRI 指引提供了系統性且實務可行的核電廠地下水防護的執行方法，涵蓋核電廠地下水防護各個階段所需的工作、執行準則與細節。其內容具體且具可行性，也適用於台灣三座核電廠的地下水防護需求。EPRI 指引以兩個階段的

地下水防護方案為基礎。第一階段藉由系統、結構與組件(system, structure, and components, 簡稱 SSC)或工作操作的評估, 深入了解 SSC 對廠址土壤與地下水污染可能的風險與影響。此階段的過程可辨認廠址現有與潛在的地下水污染風險, 並優先採取所需的任何緩解風險措施。第二階段則是藉由執行綜合基線地下水監測方案(comprehensive baseline groundwater monitoring program)的具體指引, 涵蓋廠址概念模型 (site conceptual model, 簡稱 SCM) 的發展、監測井的設置, 以及監測數據的分析與解釋。

若根據使用者對地下水污染現有或潛在風險的理解, 需要對核電廠廠址的水文地質進行更詳細的了解, 指引建議採用工具與方法, 作為地下水監測分級方法 (graded approach) 的一部分, 以逐步深化對廠址特性的認識, 並有效提升監測方案的科學性與針對性。

第一次修訂版(Revision 1) EPRI Report 3002000546 於 2013 年發表, 針對第一版內容進行更新與擴充, 特別強化了放射性同位素監測與取樣策略、地下水監測井設計與維護、監測資料管理與風險通報流程與美國 NRC (Nuclear Regulatory Commission, 簡稱 NRC) 相關法規的一致性。第二次修訂版(Revision 2)於 2024 年完成並發表, 由於完整報告取得不易, 執行團隊蒐集並分析可取得之相關文獻, 以 2008 年發表的報

告為基礎進行研讀，並比較其與修訂版之更新內容。

EPRI《Groundwater Protection Guidelines》Revision 2 之更新重點包括：強化地下水監測資料之品質保證與追溯性要求、增加對井況管理與採樣程序標準化之規範、提出更嚴謹的資料一致性與異常檢核流程、要求定期更新 SCM，並明確納入監測網布設合理性、外洩事件通報程序與長期趨勢分析方法。新版指引亦強調風險導向（risk-informed）之監測策略，提升監測資源配置效率與方案可執行性。

團隊依據 EPRI《Groundwater Protection Guidelines》Revision 2 相關簡報內容，整理並逐一說明本次版本更新的內容。首先，指引重新組織為「計畫啟動期」與「維護期」兩大類，使監測規劃、廠址概念模型之定期審查與修訂、地下水監測計畫定期檢討與優化(含監測項目、採樣頻率、監測井位置)等工作在時序與責任分工上更為清晰，也取消 BASELINE 與 ELEVATED 分類，改採所有電廠都應執行的統一原則，並將原屬於 ELEVATED 的技術內容更新為參考建議。亦強化系統、結構與元件(systems, structures and components，簡稱 SSC)與作業風險緩解相關內容，加強討論如何運用風險排序的結果推動風險緩解行動，並取消對特定工作程序進行風險排序的要求，改為提供檢討與優化審查流程之建議，以減少洩漏事件的風險。此外，針對地下水整治與除役部

分，新增整治決策流程的指引說明，並強化除役電廠地下水防護的相關討論。而其他變更事項包括：新增土壤採樣與分析與相關指引，避免與現有的核電廠土壤調查程序衝突、新增地下水洩漏事件應對指引，以及更新附錄至 EPRI Groundwater Hub，方便與核電廠人員互通資訊。

國外核電廠營運者在更新地下水防護方案時，多依循 EPRI Revision 2、NRC Regulatory Guide、IAEA Safety Standards 等最新國際導則進行全面盤點。其作法包括：重新檢視監測井布設與井況、提升 QA/QC 管理深度、導入數據管理系統以確保資料可追溯性、定期驗證與更新 SCM、增設異常數據處理與回報機制，以及建立跨部門稽核流程。透過採納最新國際要求，營運者能提高方案操作性、減少監測盲點，並強化長期追蹤與管理的完整性，以符合核電廠營運期間對環境安全之最高標準。

EPRI 2008 指引的相關章節主要包括「1 Introduction」、「2 Graded Approach for the Groundwater Protection Program」、「3 Evaluation of Potential Subsurface Releases」、「4 Establishing a Site Conceptual Model」、「5 Locating, Installing and Testing Groundwater Monitoring Wells」、「6 Establishing a Groundwater Sampling and Analysis Process」、「7 Evaluating Sampling and Monitoring Data」、「8 Program Validation and Review」、「9

Communication with Stakeholder and Regulators」與「10 Potential Mitigating Actions」。

「6 Establishing a Groundwater Sampling and Analysis Process 建立地下水採樣與分析過程」包括「6.1 地下水採樣數據品質目標(data quality objectives for groundwater sampling)」、「6.2 樣品採集程序(sample collection procedure)」、「6.3 分析物清單(analyte list)」、「6.4 最低可偵測濃度要求與有效檢出判定準則(minimum detectable concentration requirements and criteria for positive detection)」、「6.5 樣品體積、容器和保存要求(sample volume, container and preservation requirements)」、「6.6 採樣計畫(sampling schedule)」與「6.7 分析結果的驗證(validation of analytical results)」

以下就 EPRI 「6 建立地下水採樣和分析過程」進行說明：

6.1 Data Quality Objectives for Groundwater Sampling 地下水採樣的數據品質目標

導則說明 6.1 [基準版]：對於每次採樣的作業建立數據品質目標(Data Quality Objectives，簡稱 DQOs)或等效策略並撰寫文件記錄，須以採樣計畫的形式加以呈現。

藉由 DQOs 流程確認地下水採樣重點(feature)並撰寫文件記錄，相

關採樣重點包括：

- 樣品的目的和目標
- 為了取得代表性數據集(data set)所需的樣本數量
- 採樣方法
- 在採樣過程中需要測量的水質指標及其可接受標準
- 採樣過程中廢棄物(含抽水廢水)的處理方法
- 樣品的目標項目分析物(analyst)
- 樣品允許最長的保留時間
- 所需樣品容積、容器種類及保存藥劑(preservatives)
- 現場品質管制(QC)樣品的數量與種類
- 樣品處理、標示、保存、運送和交接程序(chain-of-custody procedures)
- 採樣人員的資格和訓練要求
- 政府或主管機關所訂定相關法規標準限值
- 分析方法與最低可檢出濃度(minimum detectable concentrations, 簡稱 MDC)要求
- 分析方法的不確定(uncertainty)性要求
- 實驗室品質控制(QC)樣品的數量和種類，以及分析的接受準則
- 每一批分析所需的樣品數量

- 如果無法取得樣品，應採取的替代措施
- 如果未達到最低可檢出濃度(MDC)，應採取的替代措施
- 樣品分析結果的驗證方法

6.2 Sample Collection Procedures 樣品採集程序

導則說明 6.2a [基準版]: 建立例行和特殊監測地下水採樣程序，並

應涵蓋以下項目：

- 採樣計畫
- (如果適用的)數據品質目標(DOQs)
- 樣品採集方法
- 採樣過程中須檢測的水質指標(water-quality indicator)以及其可接受標準
- 樣品分析物項目(analysts)
- 樣品保存時間(holding time)
- 所需樣品容積、容器種類及保存藥劑(preservatives)
- 現場品質管制(QC)樣品的數量，例如重複樣品(duplicates)、基質添加(matrix spikes)樣品、設備清洗空白(equipment rinsate blanks)樣品以及分樣(splits)樣品
- 採樣人員的資格和訓練要求

- 採樣廢棄物的管理，包括洗井水(well purge water)
- 樣品的處理(handling)、標示(labing)、保存(storage)和運送(shipment)
- 樣品交接程序(chain of custody)
- 分析數據的接收(receipt)和審查(review)

導則說明 6.2b [基準版]: 在受地下水污染的區域進行採樣時，應在收集樣品前適當管控自監測井抽取之井水，並於處置洗井水 (purge water) 前進行評估。

如果尚未確定監測井內的地下水水質，良好的採樣技術建議應先收集並管控洗井水，直到樣品完成分析為止，才能決定適當的洗井水處置的方式。每一次的採樣程序前，應明確訂定並撰寫一個「行動準則值 (action level)」。當監測結果超過此準則值時，後續採樣作業即需對洗井水持續進行「阻隔與管控」(containment and control)，以避免污染水外逸或不當排放。在許多情況下，適當的管理方式包括對抽出的地下水進行阻隔以及藉由核電廠現有且經許可的液體廢水排放的途徑進行處置。持照人應評估是否需要修訂核電廠的廠外劑量計算手冊(offsite dose calculation manual，簡稱 ODCM)，以建立允許污染地下水排放的途徑。

6.3 Analyte List 分析物清單

導則說明 6.3a [基準版]: 分析物的選擇至少應根據 SSC 中可能是

地下水污染的潛在來源的放射性核種，分析項目應包括氫及 γ 射線放射性核種。此外，在分析物項目清單中應納入包括系統、結構與元件(SSC)相關的過去與目前的來源項，廠內的外洩(spill)、洩漏(leak)或未分析的路徑的歷史分析，以及土壤、地下水和其他環境樣品介質中曾出現放射性檢測結果為陽性的進一步審視。

因為大量存在一次側冷卻水中和在地下水系統中的移動性(mobility)，氫被認為是主要的分析物。半衰期少於幾天的放射性核種通常不是地下水監測關切的核種；同樣地可將地下水中相對不具移動性的放射性核種從分析物項目清單中移除。

硼雖然不是放射性核種，因為硼通常作為中子減速劑添加到主冷卻水中，可以作為壓水式反應爐(pressurized water reactor，簡稱PWR)核電廠地下水監測中有用的分析物。

因此，當檢測到硼的濃度高於背景濃度時，可能表示一次側系統洩漏，並且它的出現存在可能與地下水中與電廠有關的放射性核種。另外，由於附近石化燃料電廠的污染，在環境中也可能會發現硼。

在建立分析物項目清單時，不能假定廠內放射性核種來源的相對分佈也適用於地下水系統。例如，儘管它們總是在一次側冷卻水一起被發現，在某些廠址，地下水中發現Sr-90，但卻沒有Cs-137。在所有情

況下，應撰寫文件說明選擇和不選擇分析物的理由。

以下是美國康乃迪克州的 Connecticut Yankee 核電廠除役期間採用的分析物項目清單：H-3、C-14、Mn-54、Fe-55、Co-60、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Cs-134、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Eu-155、Pu-238、Pu-239、Pu-241、Am-241 與 Cm-243。此清單是核電廠除役期間分析物清單的一個案例，並不表示在其他任何電廠也需使用相同的分析物項目清單。此清單也不包括在運轉中核電廠可能適用於短半衰期放射性核種分析物項目清單。

導則說明 6.3b [基準版]：定期重新評估分析物項目清單

如果已經進行了幾次檢測放射性核種，而始終沒有檢測到放射性核種，則可以考慮從分析物項目清單中刪除該放射性核種。或者，電廠改變過程或先前未發現污染物的檢測可能促使分析物項目清單中增加該放射性核種。

6.4 Minimum Detectable Concentration Requirements and Criteria for Positive Detection 對於陽性檢測的最低可檢測濃度要求和標準

導則 6.4 [基準版]：應建立並撰寫最低可檢測濃度(MDC)的技術依據，以及判定分析結果的統計有效性的準則

為每一放射性核種建立最低可檢測濃度(MDC)，是任何採樣實務

的數據品質目標(DQOs)流程中一個要素。另一個相關的要素是判定分析結果是否為「陽性檢出」的標準。該標準是根據分析測量不確定性而定，該不確定性隨著最低可檢測濃度 MDC 的降低而增加。

需要注意的是，在某些情況下，用於分析作為輻射環境監測計畫 (radiological environmental monitoring program, 簡稱 REMP) 的一部分所收集檢驗的樣品的事後最低可檢測濃度(MDC)，可能因為最低可檢測濃度(MDC)不夠低，無法達到地下水採樣計畫的數據品質目標(DQOs)。

同樣也應注意，儘管存在的廢棄物或聯邦法規第 10 篇第 61 部分 (10 CFR Part 61) 的分析物項目清單可能在地下水防護計畫分析物項目清單的初始規劃具有參考價值(請參見第 6.3 節)，但用於廢水或第 61 部分(Part 61)分析的最低可檢測濃度(MDC)也可能不夠低，不能達到地下水採樣的數據品質目標(DQOs)。

6.5 Sample Volume, Container and Preservation Requirements 樣品體積、容器和保存要求

導則說明 6.5 [基準版]：記錄用於確定最低樣品體積、容器種類和地下水樣本保存要求的原則和依據。

最小樣品體積、容器種類與保存要求，是由所採用分析方法之最低可檢測濃度 (MDC) 及實驗室作業程序所決定；相關議題之進一步討

論可參考 ASTM D5903-96 (2006) 與 ASTM D6517-00 (2005)。

如果樣品需要分裝(例如：與監管機構共享)則需要相應地調整樣品體積和容器數量。

6.6 Sampling Schedule 採樣計畫時程

導則說明 6.6 [基準版]：擬定一份書面採樣時程表(sampling schedule)與採樣計畫(sampling plan)，內容需符合既定的數據品質目標(DQOs) 或各採樣點與分析物項目的採樣要求。

採樣點可以包括監測井(monitoring well)、供水井(water supply well)、地表水體(surface waterbody)、湧泉(spring)、基礎排水管(foundation drains)、雨水排水管(storm drains)、污水坑(sump)、結構(structure)或組件(component)的滲漏，以及地下水滲入的地下室地板(basement floor)或牆面(wall)。

採樣頻率可以根據廠址目標，但是通常每季採樣是一個很好的初期做法，採樣頻率將取決於廠址的特定條件，例如：土壤種類、水力梯度、鄰近污染源距離以及是否存在優勢遷移路徑。如果污染物濃度具有季節變化，則經過數年每季採樣後，數據的周期性可能會變得更為明顯。在積累了數年的數據後，如果污染物濃度趨於穩定或呈現下降趨勢，則通常可降低採樣頻率。

如果樣品需要分裝(例如，與監管機構共享)，則應在採樣前事先確定並達成共識的事項包括：分析物項目清單及其相對應的最低可檢測濃度(MDC)。此外，在收集樣品之前，應協議所有採樣方法以及樣品的標示、處理、儲存、運送與樣品交接程序(chain of custody)。最後，如果無法獲得足夠的樣品體積，所有接受樣品分裝的接收方都應在樣品收集前就後續處理方式達成共識。

6.7 Validation of Analytical Results 分析結果的驗證

導則說明 6.7 [基準版]：建立一套一致且的具有文件記錄的程序，以審查分析數據，內容應包括以下項目：

- 分析結果清單，以確保分析實驗室已回報所有數據
- 對已完成的實驗室最低可檢測濃度(MDC)的評估
- 評估實驗室的品保/品管(QC / QA)數據
- 評估任何分裝(split)樣品、重複(duplicate)樣品、空白(blank)樣品

或添加基質(spike)樣品的結果

- 評估以確定是否達到每品質控制樣品的接受標準

此訊息可以已包含在 DQO 文件檔中，有關數據驗證方法的導則，請參見適用的州導則和 MARLAP (Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual)。

2.3 美國環境保護署「地下水採樣規範」

地下水採樣規範為美國環保署(U.S. Environmental Protection Agency, 簡稱 USEPA)發表的文件,最新修訂日期為 2013 年 3 月 6 日;此文件提供地下水樣品現地採樣與實驗室分析的標準化操作規範,其目的在確保採樣過程具科學性、可重現性與樣品代表性。文件內容涵蓋地下水採樣作業流程、洗井與採樣技術、設備管理及清潔程序、安全注意事項與品質保證措施等,可作為地下水防護與監測管理的重要依據。

USEPA 文件提供多項具體指引,包括:(1)標準化採樣流程,規範洗井作業、監測化學參數達穩定狀態後方可採樣,以及地下水樣品保存與運送程序;(2)設備管理與清潔要求,明定採樣設備的選擇標準、使用方式及去污清潔流程,避免交叉污染;(3)樣品保存與處理,依不同分析物性質(如金屬、有機物、放射性物質等)提出適當的保存條件與保存期限;(4)環境影響管理,強調作業須符合環境法規並降低採樣行為對周邊環境的干擾;(5)特殊採樣需求之應對方式,可依廠址水文地質條件、監測目的,調整採樣技術與設備配置。

本章節針對該文件第 3 章與第 4 章內容,分析地下水採樣的洗井作業、採樣方法與現場監測程序,並探討其在核電廠廠址地下水防護、監測與污染控制中的應用性與可行性,以作為建立我國核電廠地下水

管理機制的重要參考與技術依據。

第 3 章：地下水採樣方法-洗井

3.1 概述

洗井是指在採樣前從井中移除井管積水，並使其被來自相鄰含水層的地下水取代，以代表實際的含水層條件。為確定監測井的井管積水已充分置換，現場調查人員至少應量測被移除地下水的 pH 值、導電度和濁度；對於永久監測井，還應觀察和記錄移除的水量。

根據特定的井採樣情況，可以採用不同洗井策略。當根據現場調查人員的經驗和專業將某口井判斷為具有相對典型的水位、深度和換水量時，通常按照本章節 3.2.1 中描述的程序，使用多倍體洗井法或替代洗井方法（如篩段內管法）

當考慮使用傳統多倍體積洗井法，且發現這種方法會產生過多的調查衍生廢物(investigation derived waste，簡稱 IDW)時，在特定情況下可使用替代方法，以減少需要移除的水量和時間。在經過監測井條件及採樣時間與管理等各方面完整考量後，方可選擇替代方法。可用的替代洗井程序或採樣策略包括「篩段內管法」和微洗井或無需洗井的方法。

- 3.2 洗井方法與策略

傳統多倍體積洗井法

在開始洗井之前，應確定井管中的積水水量（即井套管和篩管內的水）。為此，應確定井的直徑，測量並記錄水位和井的總深度。

取得數據後可使用多種方法計算需要置換的水量。其中一種方法公式如下：

$$V = 0.041 \cdot d^2 \cdot h \quad (1)$$

其中：

h = 水深（英尺）

d = 井直徑（英寸）

V = 水量（加侖）

另外，還可使用適用於井直徑的每英尺套管體積系數來確定單倍或 3 倍井柱水體積，可參考表 2-1 數據，將總深度減去水位，得出水柱的長度，然後用該長度乘以表中相應的係數來計算單倍和 3 倍井柱水體積（單位為加侖）。

表 2-1 井套管直徑體積系數

Casing Diameter (inches)	Gallons/ft, One Water Column	Gallons/ft, Three Water Columns
1	0.04	0.12
2	0.16	0.48
3	0.37	1.11
4	0.65	1.98
5	1.02	3.06
6	1.47	4.41
7	1.99	5.97
8	2.61	7.83
9	3.30	9.90
10	4.08	12.24
11	4.93	14.79
12	5.87	17.61

資料來源: U.S. EPA (2013), Groundwater Sampling (SESDPROC-301-R3), Table 3.2.1

置換水量通常以 3 至 5 倍井柱水體積來執行。現場記錄應清楚反映單倍井柱水體積計算或確定方法，並參考相應的倍數（即至少 3 倍井柱水體積），以明確定義置換水量目標。

從地下水化學角度來看，當地下水的 pH 值(≤ 0.1)和導電度($\leq 5\%$)穩定，且濁度穩定或低於 10 NTU（濁度單位）（為飲用水主要標準 5 NTU 的 2 倍）時，即為洗井充分。雖然 10 NTU 通常認為是大多數地下水採樣目標的最低標準，仍應盡可能達到較低的濁度。

穩定性指的是至少連續 3 次測量中，pH 值變化不超過 0.1，且導

電度變化幅度不超過 5%。其他參數例如溶氧 (dissolved oxygen, 簡稱 DO), 也可用作換水充分性參數。溶氧的目標值通常為 0.2 毫克/升或 10%飽和度, 以較高者為準。溶氧測量必須使用流通池(flow-through cell) 或覆蓋池(over-topping cell)進行, 以減少或消除樣本測量過程中的氧化作用。氧化還原電位 (oxidation-reduction potential, 簡稱 ORP) 不應作為換水穩定性參數, 但可在換水過程中測量。

目前沒有既定的規範來確定需要進行多少次測量才能充分代表參數的穩定性。如果計算出的換水量較小, 則應該頻繁進行測量以獲得足夠的數據來評估穩定性; 如果換水量較大, 每 15 分鐘測量一次可能已足夠。具體測量程序可參考以下文件:

- SESD 現場 pH 測量操作程序 (SESDPROC-100)
- SESD 現場導電度測量操作程序 (SESDPROC-101)
- SESD 現場溫度測量操作程序 (SESDPROC-102)
- SESD 現場濁度測量操作程序 (SESDPROC-103)
- SESD 現場溶氧測量操作程序 (SESDPROC-106)
- SESD 現場氧化還原電位測量操作程序 (SESDPROC-113)

如果在移除 3 倍井柱水體積後, 化學參數仍未穩定, 則應移除更多的水 (最多到 5 倍井柱水體積)。如果在 5 倍井柱水體積內參數仍未

穩定，則由項目負責人決定是否採樣或繼續洗井。如果在移除 5 倍井柱水體積後，pH 值和導電度穩定，但濁度仍在降低且接近可接受水平，應考慮進一步洗井，以獲得濁度更低的樣本。採樣條件應記錄於現場日誌中。

篩段內管法

篩段內管法也稱為「低流速法」，主要用於當傳統洗井方法計算出的換水體積過大且會影響工作進度或調查衍生廢物 (IDW) 的管理時。

蠕動泵的泵管或潛水泵的進水口應放置於井篩的中間位置附近，而此方法無法用於使用取樣器進行換水。

在開始抽水之前，應使用清潔後的水位測量器將其降入需採樣的井中，以監測靜水位（抽水前的水位）及抽水過程中的水位變化。理想情況下，抽水開始後水柱的下降應僅為輕微且穩定。如果無法滿足此條件，則應採用其他方法。

至於化學參數的穩定性則與前述傳統換水方法相同，採樣前必須確保所有化學參數達到穩定性。

- 3.3 洗井設備考量

在地下水採樣作業中，泵浦的選擇主要取決於井的直徑、水位深度、井深以及所需置換的水量。換水前須量測水位與井深，設備須依據

SESD 調查衍生廢物管理操作程序 (SESDPROC-202) 去污程序完成清潔，以避免井間交叉污染。

對於無固定泵的監測井，可依井深與水位回復情況使用蠕動泵、潛水泵或取樣器，其中蠕動泵適用於吸程 25 英尺以內的井，將清潔後的特氟隆管降至水面以下抽水，並依水位調整深度或流速；潛水泵則應放在水柱上部，以確保排出的為靜滯水而非井底沉積物，抽水後也須立即清洗設備。取樣器雖可用於狹小井徑或低流量條件，但操作技術要求高，較不建議作為主要洗井方式。

若井已裝設固定泵（如市政供水或工業用井），則依其運作方式判斷是否需洗井：若泵持續運轉通常僅需開啟水流沖洗幾分鐘即可採樣，若為間歇運作則需排除管線或儲水槽內的靜滯水，並監測 pH、導電度與濁度是否穩定。

臨時井因設置目的為立即採樣，沒有長時間靜水，通常不需抽除多倍井體積的水，但若放置過久造成水柱靜滯，仍應依永久井標準換水。若水位在吸程範圍內，可使用低流速蠕動泵抽水並降低濁度；當水位過深或超過吸程限制，則應改用氣囊泵或慣性泵。至於直推式或 Hydropunch® 等無法換水的採樣方式，僅適用於快速採樣或揮發性有機化合物 (volatile organic compound，簡稱 VOC) 檢查，但不適合高精度

金屬分析。

- 3.4 洗井設備保養

為避免設備在作業過程中被污染，井口周圍應先鋪設乾淨的塑膠薄膜，避免泵浦、軟管或繩索直接接觸地面；即使設備不慎落地，也能受到防護。接觸地下水的軟管建議保持在卷軸上，或暫置於內襯塑膠薄膜的清潔桶中，無論在運輸或現場皆能降低污染風險。

若井中含高濃度油性污染物，潛水泵不易在現場徹底清潔，不宜使用換水作業。此情況可改採取樣器或其他換水方式，以避免交叉污染或設備損耗。

3.5 調查衍生廢物

洗井與換水過程會產生大量廢水及固體污染物，這些均屬於調查衍生廢物(IDW)，若未妥善處理，可能造成二次污染或增加整治成本。因此，現場作業需依據相關指引執行廢物流向與處置規劃，特別是美國環保署 SESD 所訂定的「調查衍生廢物管理操作程序」(SESDPROC-202)。依此程序管理與處置調查衍生廢物(IDW)，不僅可降低環境風險，也有助於確保整體監測與整治作業的合規性與效率。

第 4 章：地下水採樣方法-採樣

- 4.1 概述

採樣是指在洗井完成後，對地下水樣本進行採集、存放及保存（如有需要）的過程

一般不應使用非專用泵進行樣本採集。許多泵由黃銅、塑膠、橡膠或其他彈性材料製成，可能會對樣本造成化學干擾。此外，泵的運作原理也可能使其不適合作為採樣設備。

然而，某些情況下，例如工業、市政供水井或私人住宅井，井可能配備了專用泵，此時通常不會更換採樣設備

- 4.2 配備內置管線的井採樣

在完成洗井後，應從靠近井的閘門或冷水水龍頭處採集樣本，最好是在儲水罐或物理/化學處理系統之前的管線位置進行採樣。

若採樣點裝有軟管，採樣前應先將軟管移除，並調整水流至低速，以減少水樣受到擾動，特別是避免揮發性有機化合物在採樣過程中逸散或受到干擾。依據 ASBLOQAM（分析支援分支實驗室操作與品質保證手冊）的規定，樣本應直接收集於指定且潔淨的樣本容器中；若採樣點位置過低而無法直接裝填，可先使用乾淨的二次容器（如 8 盎司樣品瓶或不鏽鋼勺）承接，再轉入正式樣本瓶。採樣同時需量測並記錄水樣的 pH、導電度、濁度，必要時亦應量測水溫，以作為樣本品質與穩定性的判斷依據。

- 4.3 無管線且在吸程範圍內的井採樣

在吸程限制範圍內進行地下水採樣時，首選設備為可變速蠕動泵，亦可使用配備特氟隆®管線的 RediFlo2® 電動潛水泵或封閉式特氟隆®採樣器。若採集無機分析物，並在每口井更換泵頭管且依 SESD 品質控制程序 (SESDPROC-011) 驗證清潔，即可直接由泵管採樣；但針對揮發性有機化合物，禁止水樣經由柔性泵管或泵頭，必須使用特氟隆®或不銹鋼採樣器、真空罐系統，或經批准的方法(如吸管法 soda straw method) 採樣，以避免揮發與污染。使用 RediFlo2® 時，可在換水完成後由排水口直接採樣，但泵及管線必須完成內外部清潔並確認無交叉污染，同時在採集揮發性有機化合物樣本時須降低流速減少擾動。汲水器亦可作為輔助方式，採樣時應緩慢放入水柱上部、避免增加濁度，但僅建議在無法使用泵具或水位過深時採用。

- 4.4 無管線且超過吸程範圍的井採樣

當井中水位過深、超出蠕動泵吸程時，需改採 RediFlo2® 電動潛水泵或汲水器進行採樣。使用 RediFlo2® 進行揮發性有機化合物採樣時，必須降低排水速率，以減少對水樣的擾動並避免氣泡產生或揮發損失；而若改用汲水器，則應以全新汲水繩搭配具特氟隆®塗層的不鏽鋼絲連接使用，確保水樣在採樣與提取過程中不受污染。

- 4.5 微洗井或無須洗井的採樣程序

微洗井或無須洗井的採樣技術多用於需要盡量降低置換水量的情況，例如採用低流速蠕動泵或潛水泵進行微洗井採樣，或使用 HydraSleeve™ 與被動擴散袋（passive diffusion bag，簡稱 PDB）等設備。這些方式僅在充分了解井篩區地層水力傳導係數（如 $K > 10^{-5}$ cm/sec）並可確定井內水體已自然與含水層平衡時才適用，井被視為處於「永遠已洗井」狀態，不需再抽除多倍井體積的水。然而，由於 SESD 多數監測井的水文地質資訊不足，加上泵具放置常會造成渾濁，因此此類方法在實務上較不常採用。若仍使用泵具採樣，蠕動泵或潛水泵的吸入口應放置於井篩中段，並在渾濁度或金屬分析敏感時預留緩衝時間，待水質穩定後再啟動泵具，以低流速抽取所需水量，並確認 pH、導電度等清洗參數連續穩定後再採樣。HydraSleeve™ 則以密封狀態放入井中，於目標深度快速向上拉起時開啟收集井水，幾乎不擾動水柱，再取出並將軟式採樣囊袋內水樣轉移至容器；PDB 則是預先裝滿無氣泡純水的低密度聚乙烯（low-density polyethylene，簡稱 LDP）袋放入井中靜置約 14 天，待與地下水達平衡後回收取樣。此類技術在金屬或高濁度條件下可能受限，因此使用前仍須評估井況與目標分析物的適用性，並在可能造成渾濁的情況下提前放置泵具或採樣器，以避免影響採樣品

質。

- 4.6 樣品保存

採樣完成後，所有需要保存的樣品應盡快依規定進行保存。各項分析物所需使用的保存方式和保存劑，應依 ASBLOQAM 的規定辦理。凡是透過酸化或鹼化進行 pH 保存的樣品（揮發性有機化合物除外），在保存後必須以 pH 試紙確認保存是否確實到位。檢測時應將少量樣品滴在試紙上，而不是將試紙直接浸入樣品瓶中，以避免污染樣品。至於須低溫保存的樣品，應立即置於冰塊上冷卻保存。

- 4.7 特殊樣品收集程序

在採集微量有機污染物與金屬分析用地下水樣品時，所有與井水接觸的設備（如泵、汲水器、水位測量器材等）都必須依 SESDPROC-205 或 SESDPROC-206 進行清潔與去污，並於正式採樣前收集設備空白樣品，以確認設備潔淨度符合要求。為避免洗井後再度擾動水柱，採樣應儘量減少對井水的干擾，並遵循建議的採樣順序：金屬優先，其次為無機物、有機物，最後才為揮發性有機化合物，以降低交叉污染的風險。

一般地下水樣品不建議進行過濾，除非用於地球化學模擬或必要之分析需求。若需過濾，應使用一次性大容量濾芯，以維持數據的一致

性與代表性；對於微量污染物樣品，設備清潔與採樣順序更需嚴格遵守，以避免污染源干擾。若井需採集細菌或微生物分析樣本(如飲用水井)，則所有進入井中的採樣器材必須保持無菌狀態，並於採集後適當保存與運送，確保樣本品質不受影響。

- 4.8 特定採樣設備的品質保證技術

所有用於收集地下水樣品的設備必須按照規範 SESDPROC-205 或 SESDPROC-206 中規定的程序進行清潔，並在現場調查完成後進行必要的維修和存放。任何現場清潔或設備維修的過程均需詳細記錄在現場文件中。

- 4.9 輔助數據收集

地下水採樣過程中除取得樣本本身外，記錄現地相關數據亦十分重要，這些輔助資料能用以驗證採樣品質並支持後續分析判讀。

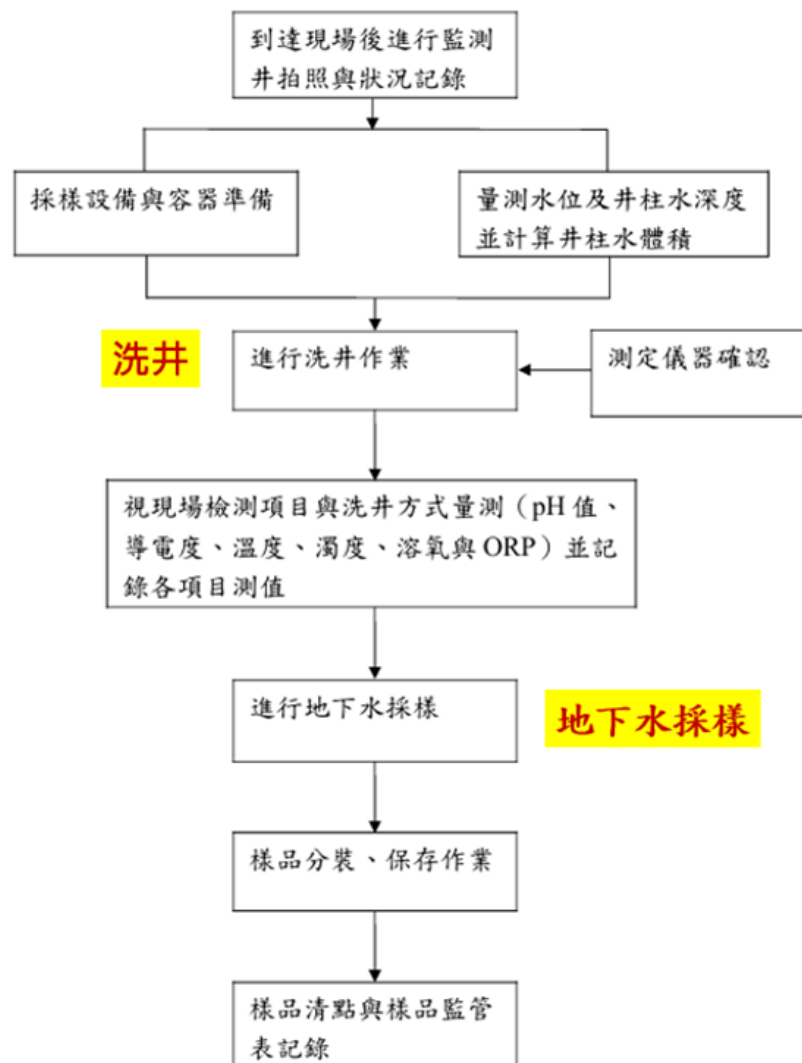
需記錄的項目包括所量測之井中水位、計算之井體積與洗井充分性判斷結果、洗井過程中的抽水速率，以及若可取得則包含鑽孔或井之施工紀錄。所有資料皆應完整登錄於現場紀錄表或作業文件中。

抽水速率則可利用桶與碼表方法(bucket/stop watch method)進行測定，即以桶收集泵浦排水，再以碼表記錄填滿特定水量所需的時間，據此換算每分鐘抽水量（如加侖或公升），以作為控制流量與評估洗井是

否充分的依據。

2.4 環境部「監測井地下水採樣方法」

本小節主要根據環境部制定的「監測井地下水採樣方法」分析，其為用於取得具有代表性地下水樣品的標準程序。以下就幾項重要內容進行說明，包括「方法概要」、「適用範圍」、「干擾」、「設備與材料」、「試劑」、「採樣與保存」、「結果處理」與「品質管制」。相關監測井地下水採樣作業流程如圖 2-2。



圖片來源：環境部 (2021)，圖 4

圖 2-2 監測井地下水採樣作業流程

1. 方法概要

此方法主要以抽水泵或貝勒管作為採樣設備，確保採集到的地下水樣能真實反映地下水狀況。

2. 適用範圍

本方法適用於依「地下水水質監測井設置作業原則」設置的監測井進行地下水採樣作業。

3. 干擾

在地下水採樣過程中可能出現多種干擾情形。例如，使用貝勒管洗井時若上下移動過快，會導致濁度升高。若水中存在不互溶的有機液體，也可能在採樣時一併被取入而造成干擾。使用抽水泵洗井時，若汲水速度過大，同樣會引發濁度增加及氣提效果等問題。此外，採樣設備若未妥善清洗，易造成不同監測井之間的交叉污染。由於採樣規劃與檢測項目及濃度密切相關，特別是針對低濃度的揮發性有機化合物，更須謹慎操作以避免外界干擾影響測值。

4. 設備與材料

地下水採樣所需的設備與材料包括：電子式水位計；pH 計；導電

度計；溶氧計；氧化還原電位計；濁度計；溫度計；水流元，以避免水樣因接觸空氣或擾動而造成水質參數不穩定。另包括採樣設備，像是可調整流率的抽水機或貝勒管；並依規定使用合適的樣品容器。過濾相關設備則包括塑膠或鐵氟龍製的固定座與濾膜。

此外還須包括洗井設備，主要可分為：

(1) 井柱水體積置換法 (well volume approach)：可調整汲水流率(2.5 L/min 以下)之抽水機或貝勒管。

(2) 微洗井 (micro purge water)：可調整汲水流率(約 0.1 L/min 至 0.5 L/min) 之抽水機。

5. 試劑

所需的試劑主要依據相關規範選用與配置。首先，試劑水與保存劑均須遵循「水質檢測方法總則 (NIEA W102.5)」的要求，確保樣品品質。量測相關參數時，需使用符合標準的校正溶液，包括依「水之氫離子濃度指數 (pH 值) 測定方法—電極法 (NIEA W424.5)」規範的 pH 標準緩衝溶液，以及依「水中導電度測定方法—導電度計法 (NIEA W203.5)」所配置的導電度標準溶液。另在濁度量測方面，則使用符合「水中濁度檢測方法—濁度計法 (NIEA W219.5)」規定的標準濁度懸浮液。

6. 採樣與保存

(1) 安全裝備及注意事項

- (i) 採樣人員需了解環境背景資料與所需安全裝備。
- (ii) 採樣設備應避免接觸污染源。
- (iii) 當井水補注充足時，避免使用貝勒管洗井，改用低流率抽水機。

(2) 採樣前

- (i) 採樣前須清洗水位計、貝勒管、抽水機、汲水管線、水流元等。
- (ii) 樣品容器清洗依「水質檢測方法總則 (NIEA W102.5)」規定。
- (iii) 填寫監測井地下水採樣紀錄表，包括採樣日期、地點、井篩深度、井管內徑、水位、井底至井口深度、井柱水深與體積、抽水機型號及汲水流率、抽水方法、水流元使用及微洗井相關資料。

(3) 洗井

目的是抽換井內滯留水以獲得代表性樣品，汲水流率應小於補水流率，避免濁度增加、氣提或氣曝作用。

常用方法：

(i) 井柱水體積置換法

(將井柱水抽換 3 倍至 5 倍井柱水體積後進行採樣)

使用抽水機：汲水流率 ≤ 2.5 L/min，汲水位置於井篩中部或中點，水

質穩定後可採樣。

使用貝勒管：汲水於井底，每抽 2 倍井柱水體積測量水質，穩定後採樣。

(ii) 微洗井

使用可調流率抽水泵（控制約 0.1–0.5 L/min），汲水放置需緩慢，避免擾動水。量測水位與水質，確認井水洩降未超過 1/8 倍井篩長，水質穩定後採樣。

(4) 採樣

(i) 採樣應在洗井完成後 2 小時內進行，低滲透性地層需盡快於井底採樣。

(ii) 貝勒管放置於井篩中部或中點，視污染物分布調整。

(iii) 揮發性有機化合物採樣，洗井與採樣設備應一致，抽水泵流率 ≤ 0.1 L/min，避免管線氣泡；貝勒管採樣需注意避免井水擾動。

(iv) 洗井後水質穩定，可使用原洗井之低流率直接採樣。

(v) 採樣時記錄開始時間，取足量樣品裝入容器，並貼好標籤。

(vi) 按檢測項目依敏感度順序裝瓶。

(vii) 溶解性金屬應於現場過濾，抽水泵建議於線上直接過濾，貝勒管使用加壓過濾。

(5) 樣品保存

依「水質檢測方法總則 (NIEA W102.5)」規定進行保存。

7. 結果處理

重金屬檢測結果須註明為溶解性或總量。此外洗井作業及採樣時若發現有不互溶有機相存在時，應記錄所發生實況於紀錄表。

8. 品質管制

(1) 現場空白樣品 (Field blank sample) :

- (i) 為裝入試劑水的容器，於採樣地點開封並模擬採樣過程但不取樣。
- (ii) 與正式樣品一起帶回檢驗室檢測，用以確認採樣過程是否受污染。
- (iii) 檢測水中揮發性有機化合物時，每批採樣行程需 1 件現場空白樣品。

(2) 設備空白樣品 (Equipment blank sample) :

- (i) 為以清洗後的採樣設備，用採樣泵以試劑水流洗約 5 L 並收集設備水的流洗液。
- (ii) 流洗液視同樣品檢測，用以確認採樣設備是否受污染。
- (iii) 檢測水中揮發性有機化合物或重金屬時，每 1 口監測井需 1 件設備空白樣品。

(3) 運送空白樣品 (Trip blank sample) :

- (i) 在檢驗室以試劑水裝入容器並密封後帶至採樣地點，但不在現場開封。
- (ii) 採樣完後與正式樣品一起帶回檢驗室檢測，用以確認運送過程是否受污染。
- (iii) 檢測水中揮發性有機化合物時，每批採樣行程需 1 件運送空白樣品。

2.5 環境部「環境水質監測採樣作業指引」

本小節內容依據環境部之環境水質監測採樣作業指引(114 年 2 月 17 日修訂 5 版)整理，法源依據包括《水污染防治法》第 10 條（河川與水庫監測）及《土壤及地下水污染整治法》第 6 條（地下水監測）。其目的在於於不同水體如河川、水庫及地下水中取得具代表性的水質資料，掌握水質特性並建立長期變化資訊。

採樣規劃作業依據環保署公告之標準方法執行，包括「河川、湖泊及水庫水質採樣方法」(NIEA W104.52C)及「監測井地下水採樣方法」(NIEA W103.56B)，並依各水體特性規劃採樣頻率與作業流程。

河川採樣原則為每月一次，於白天進行並於同日完成各採樣點之採樣；水庫採樣頻率為每月或每季一次，需事先與管理單位聯繫確認排洪時間並於同日完成所有採樣點作業；地下水井則原則每季採樣一次，特殊狀況得調整，並以白天作業為主。採樣前須評估天候條件以避免降雨干擾，若河川或水庫前一日降雨超過 50 mm，當日累積降雨超過 130 mm（須延後 7 日），或降雨超過 200 mm（須延後 14 日）皆應停止採樣；地下水監測於颱風及豪雨時亦不得採樣，VOC 採樣之降雨限制同河川與水庫規定。

採樣過程中亦須依水體條件注意作業安全與樣本代表性。河川若

水深低於 10 公分則停止採樣，溶氧採樣時取水面下 0.6 倍水深；水庫採樣則依水深進行表層（0.5 m）、中層（一半水深或 1/3 與 2/3 水深）及底層（底床上 1 m）分層採樣；地下水井則使用原洗井泵浦或汲水器於井篩區採樣。

採樣過程如遇河道施工或污染異常，應記錄距離與施工方式並通報當地環保局，水樣是否採用則由水保處與環境督察總隊判定。此作業規範可確保採樣安全、提升樣本代表性並維持全國水質監測結果的一致性與可比較性。

2.6 地下水防護管制建議事項

本研究為建立核電廠除役階段地下水防護及監測管理之關鍵指標，參考美國 EPRI、USEPA 與我國環境部（原環保署）之相關技術規範，將洗井方法、採樣原則與樣品保存方式彙整於表 2-2。整體比較結果顯示，EPRI 作為國際核電廠除役地下水防護的重要依據，強調放射性核種控制與最低可偵測濃度（MDC）之設定，屬於系統化且高標準之規範；USEPA 地下水採樣指南則提供最完整與具操作性的技術內容，包含 3-5 倍井柱水體積置換、低流速微洗井、現場化學參數穩定判據，以及適用於不同井型之採樣設備（如 VOC 專用採樣器、PDB 被動擴散袋等），並重視儀器品質控制與採樣順序；環境部制定之地下水監測井作業規範則依據國內水質法規及環境條件制訂，貼近實務作業現場，要求詳細記錄井深、水位、水體積等數據，並強調洗井後 2 小時內完成採樣、VOC 需採低擾動方式，以及依 NIEA 規範保存樣本與蒐集空白樣品，以確保水質監測資料的一致性與可追溯性。

綜合上述三種相關技術規範作業原則分析，建議我國核電廠除役地下水監測制度可採國際標準與在地實務並行之方式，一方面參考 EPRI 設置最低可偵測濃度（MDC）等高規格規範標準，以提升放射性核種監測敏感度；另一方面依 USEPA 指引導入多元洗井與採樣技術，

並依分析物類型採取適用之工具與採樣順序；同時比照環境部規範落實作業紀錄，確實記載井深、水位、抽水量、水化學參數變化與作業流程。如此可確保地下水監測具備敏感度、代表性、可比性與法規符合性，亦可作為後續主管機關審查與現場稽核之依據。

為使地下水監測在實務執行上更容易檢核，亦可進一步就地下水監測井的洗井作業訂定基本查核項目，作為洗井程序查核及現場視察查驗等相關建議事項的參考依據。建議將洗井作業納入基本查核內容，也可視情況安排現場確認。包含檢查井柱水體積的估算方式、置換水量是否達到 3-5 倍井柱水體積，以及評估水質是否已達穩定狀態（如 pH 變化不超過 0.1、導電度變化不超過 5%、濁度符合 10 NTU 等）。同時，可請承作單位提供洗井過程紀錄，包括監測數據、置換水量、儀器操作與校正等資訊，並比較洗井前後的監測結果，以確認水質已穩定。如果仍未達穩定條件，應考慮再進一步洗井。也可透過現場抽查或陪同查核，確認洗井作業是否確實執行，讓地下水監測結果更能反映真實狀況。

表 2-2 國內外地下水監測規範之比較 (EPRI、USEPA 與環境部)

項目	EPRI	USEPA	環境部 (台灣)
洗井方法	建議妥善收集及控制洗井水，待確認樣品進行分析以及建立適當的洗井水處置方法。	<ul style="list-style-type: none"> • 傳統多倍體積洗井 (3-5 倍) 或使用低流速 (微洗井) • 化學參數(pH、導電度、濁度)穩定為判斷依據 	<ul style="list-style-type: none"> • 井柱水體積置換法 (建議 5 倍) 或微洗井 • 化學參數(pH、導電度、濁度)穩定為判斷依據
採樣原則	採樣程序須依據 DQO 規劃，並確認洗井完成後即刻採樣	詳列不同井型適用的採樣設備，包含 VOC 特殊採樣、低擾動方式、低洗井水量的方法 (如 PDB)	採樣於洗井完成 2 小時內進行，特定項目 (如 VOC) 需低擾動取樣
樣品保存	每種分析物所需體積、容器材質與保存劑，考量 MDC 與分析方法進行調整	<ul style="list-style-type: none"> • 依 ASBLOQAM 規定保存 • 需採集空白樣品 • 不同分析物有不同保存方式與採樣順序 	<ul style="list-style-type: none"> • 參照「水質檢測方法總則(NIEA W102.5)」 • 需採集空白樣品

第三章 研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則

3.1 地下水採樣與監測數據評估準則

地下水採樣與監測數據評估準則 (groundwater sampling and monitoring data evaluation criteria) 在於確保環境監測資料之代表性 (representativeness)、可靠性 (reliability) 與可比性 (comparability)，核電廠地下水採樣與監測數據評估準則之重點如下。

(1) 數據品質目標 (Data Quality Objectives，簡稱 DQOs)

評估地下水採樣與監測數據前，應明確設定數據品質目標 (DQOs)，以確認監測數據能滿足監測計畫或法規需求。DQO 涵蓋以下 5 大要素：

- (i) 精確度 (precision)：重複測定結果之離散程度，用以評估測值再現性；
- (ii) 準確度 (accuracy)：量測值與真值之接近程度；
- (iii) 代表性 (representativeness)：樣品能否真實反映地下水體之物理化學狀態。
- (vi) 完整性 (completeness)：有效數據量占計畫總樣品數之比例；以及
- (v) 可比性 (comparability)：不同時間、地點或分析單位所得數據具一致可比性，以利長期趨勢分析。

(2) 現地採樣品質控制

採樣階段應依標準作業程序執行，以確保樣品的品質與代表性。包

括：(i)採樣前檢查：確認井深、水位、洗井狀況及水質穩定性等；(ii)現地水質指標穩定性：連續監測 pH、導電度、Eh、溫度及溶氧值等，當 3 次連續測值變動低於 10%時，視為達穩定狀態；(iii)樣品保存與運送：應使用適當保存劑與容器材質，並於 $4\pm 2^{\circ}\text{C}$ 冷藏條件下運送至實驗室；(vi)品質保證樣品(QA samples)：包括空白樣品(field/equipment blank)：檢查交叉污染、重複樣品(duplicate sample)：檢核採樣重現性、設備清洗空白樣品(rinsate blank)：確認清洗程序完整性；(v)若現地參數異常或樣品未符合保存要求，應註記於採樣紀錄並視情況重採，以確保資料有效性。

(3)實驗室分析品質保證與控制

為確保分析結果具準確性與再現性，實驗室應依據美國環保署 (USEPA)與 ASTM 國際標準執行品質保證作業。具體規範如下：(i)儀器校正(calibration curve)：採用多點校正方式，以確保儀器響應線性並維持長期穩定性，(ii)實驗室控制樣品(laboratory control sample)與平行樣品(matrix spike/matrix spike duplicate)：用以監控分析之準確度(accuracy)與精確度(precision)，確保結果在可接受之誤差範圍內；(iii)數據判定標準(data quality criteria)：相對百分差(relative percent difference，簡稱 RPD) $<20\%$ ，代表重複測試結果間差異應在 20%以內；(vi)回收率

(recovery)介於 70–130%，反映分析方法的準確性；(v)偵測極限(method detection limit)與報告極限(reporting limit)應低於監測標準值(regulatory or monitoring standard value)，確保分析靈敏度足以偵測環境中低濃度污染物；(vi)所有分析結果須記錄量測不確定度與最小可偵測濃度(MDC)，以確保放射性核種或化學污染物的可判定性。

(4)數據一致性與異常值分析(Data Consistency and Outlier Evaluation)

數據評估須檢視其時間與空間一致性，包括：(i)時間序列檢核：分析同一井位之歷年濃度變化趨勢，以識別潛在上升或異常變化；(ii)空間一致性分析：比較鄰近監測井與背景井數據，以辨識污染團方向與範圍；(iii)異常值確認：對異常高值進行交叉檢核，包括檢視現地紀錄及實驗室 QA/QC 結果，以區分污染事件與採樣誤差。

(5)數據接受與拒收準則(Data Acceptance/Rejection Criteria)

數據接受與拒收準則可分為(i)接受資料：完全符合 DQOs 與 QA/QC 規範；(ii)條件接受數據：雖有輕微偏差但可合理解釋(如季節變動、儀器校正誤差)；(iii)拒收資料：樣品明顯污染、保存時間超標、空白樣受污染、實驗室品質控制失效等情形。

(6)核能電廠地下水監測應用(Application to Nuclear Power Plants)

依 EPRI 指引，核能電廠地下水數據評估除一般 QA/QC 原則外，尚應考量放射性物質特性及潛在污染途徑，包括：(i)現地水質指標穩定性與代表性檢核（如 pH、ORP、DO、導電度）；(ii)背景放射性濃度評估：整合 REMP 資料、USGS（U.S. Geological Survey，美國地質調查局）/EPA/IAEA 公開數據，以釐清自然背景與人為源差異；(iii)統計誤差控制：採用 2σ （95%信賴區間）準則時應考慮 Type I Error(約 5%偽陽性機率)；(iv)大氣沉降與液體再循環途徑評估：分析氫等放射性核種於降雨或冷卻水循環中的遷移行為，必要時以數值模式模擬沉降與流動；(v)廠址概念模型(SCM)動態更新：結合監測結果與水文地質條件，定期修訂模型與許可文件，以維持科學一致性與法規合規性。

綜合而言，地下水採樣與監測數據評估準則建立於「資料品質控制 → 採樣驗證 → 實驗室校正 → 背景修正 → 模型回饋」的循環管理架構。強調數據的可追溯性與科學合理性，確保監測資料能真實反映地下水體之動態變化，並支援污染早期預警與風險管理。針對在核能廠址環境監測中，地下水採樣與監測數據評估準則不僅提供放射性污染之定量評估依據，亦兼具國際標準化與長期監測可持續性，為建立安全、透明與永續的地下水防護機制提供技術支撐。

為確保核能電廠地下水監測資料之可信度，遇監測結果偏離歷史趨勢或不符水文地質條件時，須先建立啟動異常數據管制的程序。

異常判定包括：濃度超出背景統計範圍、井中水質指標與短期數據變異過大(>20 - 30%)、複測差異超標(RPD>20%)、與鄰井趨勢不符，或採樣／分析 QA/QC 存疑等情形。

啟動異常數據管制的程序後，應執行資料驗證(查核採樣紀錄、鏈結文件、儀器校正、QA/QC)、必要之重採樣或再分析，並檢查井況及現地環境因素。資料確認前需標註為「待驗證」，不得作為趨勢或合規判定依據。

異常數據事件應建立調查、矯正與追蹤紀錄，全部資訊需納入資料管理系統並具可追溯性。主管機關審查時應重點檢視資料品質控管、井況管理、版本紀錄與異常處置流程，以維持監測資料之完整性與可靠性。

3.2 EPRI 「評估採樣和監測數據」

評估採樣和監測數據是指對採樣監測與後續實驗室分析產出的環境樣品數據進行品質確認、合理性檢查、統計判讀以及符合性判斷的過程，確保資料足以支持後續的核電廠地下水防護工作的地下水監測計畫。EPRI 2008 指引中「7 Evaluation Sampling and Monitoring Data 評估採樣和監測數據」，主要涵蓋「7.1 Analytical Data Evaluation 分析數據評估」、「7.2 Evaluation of Field Water-Quality Indicator Data 現場水質指標數據評估」、「7.3 Analytical Data Management and Data Quality Assessment 分析數據管理和數據品質評估」、「7.4 Ambient Concentrations 環境濃度」以及「7.5 Review and Revision of the Site Conceptual Model 廠址概念模型的審查和修訂」。

以下就 EPRI 「7 評估採樣和監測數據」進行說明：

7.1 Analytical Data Evaluation 分析數據評估

導則說明 7.1(基準版)：在進行分析數據評估之前，應先驗證資料，並納入與法規標準的比較。

此項評估過程通常包括常態分布與分析偏差的統計分析、水平與垂直空間相關性判定，以及採樣點的污染物濃度的時間序列變化圖，以辨識長期趨勢。

除地下水外，其它介質(matrices)的分析數據，在評估環境影響(environmental impact)時也可能具有重要價值。這些數據可能包括：地表水、海水、降水、暴雨逕流，以及建物滲入水的水位量測與其化學或放射性成分分析。潮汐變化可能會沿近岸地下水向內陸傳遞，並可能影響污染物的遷移。潮汐變化可能藉由近岸地下水傳遞至內陸，進而影響污染物的傳輸動態。

在建置廠址概念模型(SCM)或進行長期地下水防護決策時，不應僅依據單一樣本的分析結果，這為良好的作業實務。相同採樣位置的不同批次樣品分析結果的差異可能來受限於取樣技術不一致、實驗室分析精度限制、或地下水品質的時序變化等因素。在出現不如預期的異常樣品結果時，應定期進行後續追蹤的採樣(follow-up sampling)，直到充分確認數據的變異原因。最終，分析結果應與自願性通報機制(voluntary communication protocol)所訂之觸發值(trigger levels)進行比對，以確保監測成果的回報與解釋符合產業地下水防護倡議的原則與標準。

7.2 Evaluation of Field Water-Quality Indicator Data 現地水質指標數據評估

導則說明 7.2(基準版): 應依照相關主管機關的規定或許可條件採集地下水樣品。

以下這些參數為一般水質的重要指標，可在進行放射性分析的地下水採樣之前進行量測與評估，以確保所取得的樣品具有代表性。常用的水質指標包括：濁度(turbidity)、溫度(temperature)、酸鹼值(pH)、氧化還原電位(oxidation-reduction potential，簡稱 ORP)、比導電度(specific conductivity)，以及溶氧濃度(dissolved oxygen concentration)。這些水質參數不僅能反映地下水之一般水質狀況，亦可作為採樣過程中判定樣品穩定性與代表性的依據。

在實務操作中，水質指標通常需於採樣前定期測量，藉以判定何時可取得具代表性的樣本。若監測值未在規定範圍內呈現穩定，或觀測到異常數據，則可能顯示該樣本並非反映實際含水層條件的代表性樣品。此時，應對分析結果中報告之污染物濃度進行進一步評估，以確認其意義與可靠性。

此外，現地水質指標的測定及其穩定判定準則(stabilization criteria)可參考相關文獻(ASTM D6452、ASTM D6771-02 之水質與地下水採樣相關內容)，其中詳細說明了地下水採樣過程中水質指標測量技術與資料品質控管之要求。

7.3 Analytical Data Management and Data Quality Assessment 分析數據管理與品質評估

導則說明 7.3a(基準版)：在記錄之分析數據中，應包含以下項目：樣本編號(sample identification)、樣本位置或監測井識別碼(sample location or well identification)、採樣日期與時間、所有已分析放射性核種之測得濃度(無論結果為檢出或未檢出、正值或負值)、量測不確定度(measurement uncertainty)、達成之最小可偵測濃度(achieved MDCs)、資料驗證與查核紀錄(data validation and verification records)、是否有分析結果超過場址行動準則(site action levels)，以及缺漏樣本結果之註記。這些資訊構成分析資料品質評估的重要基礎，有助於確保監測結果的透明性與完整性。

分析資料可透過多種方式進行呈現與分析，例如利用電腦化視覺化軟體(computerized visualization software)將潛在污染團(plume profiles)疊加於廠址地圖，以直觀方式展示污染分布與遷移趨勢，協助決策與風險評估。

導則說明 7.3b (基準版)：應管理數據，以確保摘要結果被記錄、保存，並且可隨時取用。

根據第 2 項基準原則 (Guidance Statement 7.3b [BASELINE])，資料管理系統應確保所有摘要性結果均被妥善記錄、保存並可迅速調閱。有效的資料管理工具應具備以下屬性：資料須集中維護於單一位置，並

依據核能紀錄部門之標準程序定期備份，以防資料遺失；資料庫應對不同層級使用者明確設定讀寫權限，以維持資料安全與一致性；當資料內容可被修改時，系統必須保留變更紀錄，以確保版本可追溯性與審核完整性。

7.4 Ambient Concentrations 環境濃度

7.4.1 Background Radionuclide Concentrations 背景放射性核種濃度

導則說明 7.4.1a (基準版)：確定放射性核種分析物的背景濃度。

根據基準指導原則 (Guidance Statement 7.4.1a [BASELINE])，在進行核能設施地下水監測與污染評估時，應先確定環境中放射性核種之背景濃度，以區分自然或人為放射源與潛在污染貢獻之差異。由於環境中普遍存在背景放射性核種，其濃度可能與核電廠活動產生之污染物重疊，導致分析與解釋上的挑戰。此類干擾效應不同於分析偏差 (analytical bias)，亦不屬於因接近最低可偵測濃度 (MDC) 而出現的統計性假陽性結果。

背景放射性核種可能來源於自然過程或人為活動。自然來源包括土壤與岩石中礦物所含放射性元素，以及大氣層中宇宙射線誘發的同位素生成作用；人為來源則可能包括：大氣核武試驗、核事故 (如車諾比事件)、上游污水處理廠與掩埋場、以及上游核電廠設施、醫療機構、

美國國防部與能源部設施之排放。

確定背景濃度時，可參考多種資料來源，包括核能設施營運單位輻射環境監測計畫（Radiation Environmental Monitoring Program，簡稱 REMP）於控制點所收集的長期數據，或政府機構（如美國核管會 NRC、美國能源部前環境量測實驗室（U.S. Department of Energy Environmental Measurements Laboratory）、美國環保署（USEPA）及美國地質調查局（USGS）所發布的監測資料。國際原子能總署（IAEA）亦提供相關背景輻射資訊。此外，美國地質調查局之全國水質評估報告（National Water Quality Assessment Report）與美國環保署針對土壤放射性物質之篩選值開發指引，皆為重要參考資料；一般而言，低於該篩選值的放射性濃度可視為環境背景值。

在部分情況下，某些核種的背景濃度可能低於該廠址既有 REMP 分析之偵測靈敏度，此時應採集更多樣本，並以更高靈敏度進行分析，以獲得具代表性的廠址特定背景濃度。若某核種未納入 REMP 分析範圍，則可透過查閱前述資料來源、於控制點採樣並以適當靈敏度分析，或採用其他科學方法加以確定。

導則說明 7.4.1b（基準版）：評估分析數據中可能發生的第一類型誤差（偽陽性檢出）

根據基準指導原則 (Guidance Statement 7.4.1b [BASELINE])，在進行低濃度放射性核種分析時，應評估分析資料中可能發生的第一類型誤差 (Type I error)，亦即偽陽性檢出 (false positive detections)。當監測數據接近最低可偵測濃度 (MDC) 時，若採用二倍標準差 (2-sigma) 準則作為正檢出判定依據 (即 95% 信賴區間)，則統計上預期約有 5% 的分析結果將被誤判為陽性。此統計性偽陽性問題在低放射性環境監測中具有重要意義，特別是當測值接近偵測極限時，誤判的風險將直接影響污染識別的準確性與決策判斷。

7.4.2 Atmospheric Deposition of Plant-Related Radionuclides 與電廠相關放射性核種之大氣沉降

導則說明 7.4.2 (基準版): 評估並記錄與電廠相關之放射性核種的大氣沉降 (atmospheric deposition) 的重要性

根據基準指導原則 (Guidance Statement 7.4.2 [BASELINE])，應評估並記錄核電廠營運過程中放射性核種 (如氫) 之大氣沉降效應及其對地下水污染的潛在貢獻。受控排放源包括通風煙囪、冷卻塔與冷凝器抽氣系統，其逸散之放射性氣體可在廠區周邊環境形成可量測的沉降累積。這些物質可能沉積於建築屋頂表面，並於降雨事件中經排水系統沖入地面；降雨亦可將氣載物 (airborne material) 沉降至土壤與建築外牆。

除雨水沖刷外，空調冷凝水、儲槽通氣口氣體交換、及低溫設施(如冰冷凝器、低溫設備)上的霜凍，皆曾被觀察到含有高濃度氙。其對地下水污染之影響會因氣象條件與排放期間而異。雖此途徑通常非主要污染源，但部分電廠觀測顯示，其地下水中低濃度氙污染可能與氣載沉降有關。當無其他污染來源可辨識時，將大氣沉降視為氙在地下水中廣泛低濃度分布的合理解釋具可行性。

為評估此潛在來源的影響，應首先量測其實際發生情況，例如於降雨期間選取下風向代表性屋頂排水口採樣，分析氙或其他放射性核種濃度。於單次降雨事件中分析多個樣本，可推估沖蝕過程的持續時間與平均濃度，再結合屋頂面積與總降雨量以估算總放射性活度。然沉降模式與沉積量受多項變數影響，僅以少量樣本推論不具代表性。故建議採長期、多地點採樣並結合大氣傳輸與沉降模式模擬 (numerical modeling)，以獲得統計上具意義的結論。

7.4.3 Plant-Related Liquid Pathways 與電廠相關之液體途徑

導則說明 7.4.3 (基準版): 在此類過程發生的情況下，應評估並記錄冷卻水排放及其後續於電廠系統或廠內飲用水中再利用所造成的潛在影響。

依據基準指導原則 (Guidance Statement 7.4.3 [BASELINE])，對於

存在冷卻水排放及再循環利用的電廠系統，應評估並記錄其對放射性核種潛在再外釋之影響。若冷卻水經排放至湖泊、冷卻塔或冷卻水渠後再次被取用並導入其他系統，則可能在其他廠內迴路中偵測到回收之放射性核種。此過程雖通常不構成直接健康或安全風險，但可能形成一條包含再循環系統的放射性物質外釋途徑，導致廠址內部低濃度放射性污染的累積。

此現象或可解釋部分電廠中來源不明的低濃度放射性污染。雖該污染程度多不需立即修復，但其成因與流動機制應加以理解與紀錄，以完善廠址概念模型與監測策略。

7.5 Review and Revision of the Site Conceptual Model 廠址概念模型之檢討與修訂

導則說明 7.5a(基準版): 定期依據資料評估結果檢視廠址概念模型，若發現顯著偏差，應考慮修訂該模型。

導則說明 7.5b(基準版): 在發生以下任何情況後，應檢討廠址概念模型。

導則說明 7.5c(基準版): 若廠址概念模型被修訂，應評估是否需要同步修訂相關的廠址許可基礎文件，以及屬於電廠設計基礎文件一部分的

相關廠址圖紙。

根據基準指導原則 (Guidance Statements 7.5a–7.5c [BASELINE])，廠址概念模型 (SCM) 應定期依據最新資料進行評估與更新，以確保模型能準確反映廠址之實際水文地質與污染行為特徵。廠址特徵化 (site characterization) 為一持續性與循環性的過程；每當透過新增監測井鑽設、土壤採樣、含水層參數測試、電廠建造紀錄檢閱或飽和層地下水定期監測等活動取得新資料時，均應在現有 SCM 架構下進行比對與評估。若新資料與現行模型不符，則須修訂模型內容以反映實際廠址狀況。例如，若某區域先前污染物濃度長期穩定而後出現上升趨勢，即顯示模型需重新檢討與修正。

此外，當廠址發生以下重大變化時，亦應重新檢視 SCM 的適切性：

(1) 廠址內部或鄰近地區之重大工程施工或地表擾動；(2) 廠址內外用水條件發生重大變化；(3) 廠區或鄰近地區抽水井之抽水速率有顯著變動。隨著電廠運行時間增加，非飲用水於工業製程或消防用途的使用量可能上升，此類變化將改變廠區周邊的水力梯度 (hydraulic gradient)，進而影響地下水流向與污染物遷移行為。因此，廠址經營單位應預先評估並納入潛在未來水資源利用變化的情境分析。

若 SCM 經修訂，應進一步評估相關廠址許可基礎文件 (site

licensing basis documents) 及設計基礎圖資 (plant design basis documentation) 是否需同步更新, 以確保技術文件之一致性與合規性。

地下水採樣與監測數據評估關鍵指標

1. 樣品識別與追蹤完整性 (Sample Identification and Traceability)

每一採樣點應具唯一編號 (含井號、GPS 座標、日期、時間), 並具備樣品監管表 (chain-of-custody) 紀錄以確保可追溯性。

2. 現地水質指標穩定性 (Stabilization of Field Water-Quality Indicators)

連續監測 pH、導電度 (EC)、氧化還原電位 (Eh/ORP)、溫度及溶氧 (DO), 三次連續測值變化小於 $\pm 10\%$ 方可採樣。

3. 樣品保存與運送條件 (Sample Preservation and Transportation Conditions)

檢查保存劑種類、容器材質與冷藏溫度 ($4 \pm 2^\circ\text{C}$), 並確認是否於 24-48 小時內送達實驗室。

4. 品質保證樣品 (QA Samples) 覆蓋率 (Coverage of Quality Assurance Samples)

應含至少 10% 空白樣 (blank)、5% 重複樣 (duplicate) 與定期穿透樣 (rinsate blank) 以監控交叉污染與重現性。

5. **儀器校正與量測線性 (Instrument Calibration and Linearity)**

校正曲線 (calibration curve) 需多點校正且相關係數 $R^2 \geq 0.995$ ，並保存校正記錄以供稽核。

6. **數據品質控制 (Data Quality Control, 簡稱 DQC) 指標**

- 相對百分差 (RPD) $< 20\%$
- 回收率 (recovery) 介於 70–130%
- 偵測極限 (Method Detection Limit, 簡稱 MDL) 與報告極限 (Reporting Limit, 簡稱 RL) 低於監測標準值

7. **放射性核種最小可偵測濃度 (Minimum Detectable Concentration, 簡稱 MDC)**

各放射性核種之分析靈敏度應達規範要求；未達 MDC 者應註記並重新分析。

8. **背景濃度與異常值辨識 (Background Concentration and Outlier Identification)**

應對照長期背景值、鄰井數據與時間序列趨勢，以辨識異常高值(含偽陽性 Type I Error)。

9. **數據管理與可視化 (Data Management and Visualization)**

所有監測結果須納入中央資料庫，具備版本控制與備份機制，並以

地理資訊系統 (GIS) 或污染團 (plume) 圖呈現。

10. 廠址概念模型 (Site Conceptual Model, 簡稱 SCM) 更新頻率與依據 (SCM Update and Validation Frequency)

應於新增監測井、地表擾動、抽水變動或水文條件改變後檢討修訂，並保留修訂紀錄與依據。定期依據監測資料更新 SCM；若發現偏差或場址工程變動，應修訂並同步更新設計文件與許可基礎。

3.3 小結與建議

依據前 2 個小節地下水採樣、監測作業與數據評估原則，提出供管制單位審查與視察之建議事項如下。

1. 資料品質與採樣/分析程序查核

管制單位應要求核電廠執行地下水採樣與實驗室分析均須符合標準作業程序與品質管制要求，包括數據品質目標、現地水質指標穩定性、樣品保存條件、品質保證樣品完整性，以及實驗室校正、偵測極限與資料驗證等項目，確保監測資料的代表性與可靠性。

2. 監測數據異常判識與追蹤機制

建議要求核電廠建立並查核異常數據處置流程，包含異常值判定（與背景資料、鄰近井或歷史趨勢不符）、資料驗證、必要之重採樣或再分析、井況檢查及原因調查。異常事件應完整記錄以確保資料可追溯性並避免誤判。

3. 廠址概念模型（SCM）定期檢視與更新

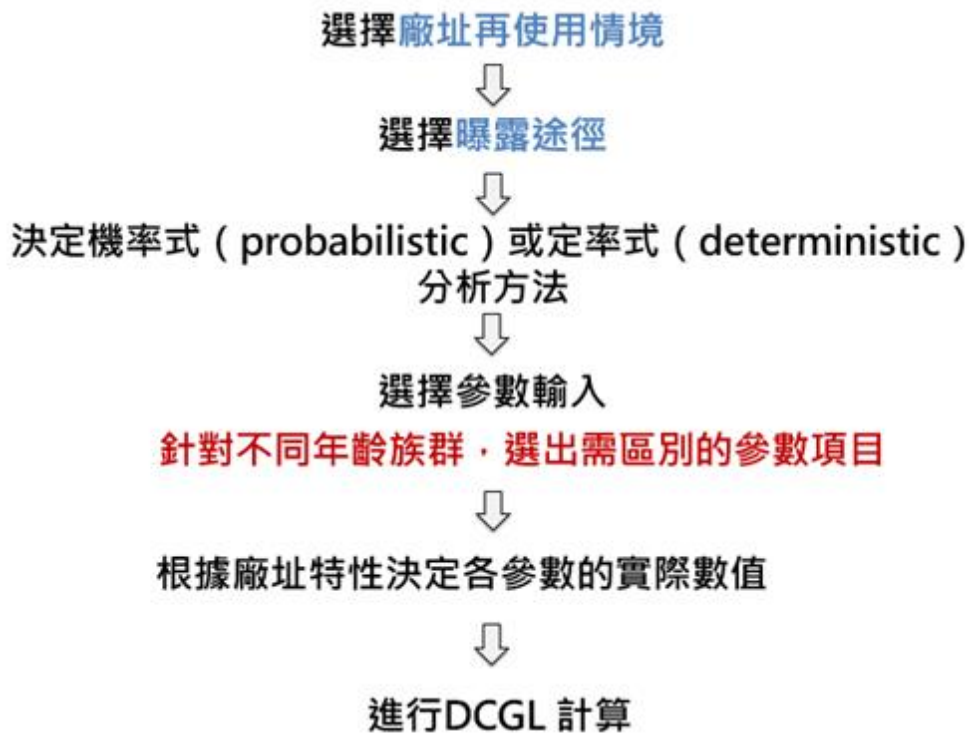
管制單位應要求核電廠定期確認電廠是否依最新監測資料、地表擾動、抽水或水文條件變動等情況更新廠址概念模型，並同步修訂相關文件。可確保地下水流向與污染行為等判釋與防護策略保持科學一致性與合規性。

第四章 彙整研析國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防

護實務經驗

4.1 Kori 核電廠的關鍵族群劑量計算

在南韓核電廠分析中，研讀 Kori 核電廠最新的文獻(Seo et al., 2024)，Kori 核電廠前一期報告中相關文獻(Seo et al., 2023)主要比較在考慮居住農民、工廠工人與核電廠設施三種情境下的影響差異。而本次最新的閱讀報告文獻為納入不同年齡層對導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level，簡稱 DCGL)的影響。由於在核電廠除役後廠址再利用須符合年劑量不超過 0.1mSv 的標準(site release criteria)，因此 DCGL 是放射性濃度的管制限值，用於評估廠址是否符合安全外釋標準，作為無法直接量測劑量時的替代依據，需考量廠址再使用情境、曝露途徑、評估方法，以及相關輸入參數。圖 4-1 即為 RESRAD 對於 DCGL 的評估流程。



圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 1

圖 4-1 RESRAD 的評估流程

文獻的主要目的為使用 RESRAD-ONSITE 評估不同年齡層在除役廠址中的輻射劑量，考量生活行為差異，建立最適導出濃度指引水平 (DCGL) 的方法。其中考量 6 個年齡族群的生活行為差異，模擬各年齡層在核電廠除役廠址的輻射曝露情境。並用 RESRAD-ONSITE，搭配廠址的實際使用情境和相關參數，推算放射性濃度的上限。

有關廠址再使用情境，需先判定廠址的使用類型，分為非限制性再使用與限制性再使用，非限制性再使用考慮所有的曝露途徑，包括攝入、吸入等，而限制性再使用則考慮廠址中設有限制的措施，部分曝露途徑

可排除。接著再根據未來使用的曝露族群區分再使用的情境包括居住農民、工廠工人。

在曝露途徑上，可分為體外曝露與體內曝露，體外曝露主要指土壤中放射性物質所產生的 γ 射線輻射影響。體內曝露可分為攝入 (ingestion) 與吸入 (inhalation)，攝入包括直接攝取受污染的土壤，或污染物經由植物、肉類、牛奶、魚類與飲用地下水等食物鏈轉移後的攝入。吸入指空氣中懸浮的放射性核種再次被吸入。表 4-1 為在 RESRAD 中考慮的曝露途徑。表 4-2 為不同的再使用情境其是否有考慮的曝露途徑種類。為進行保守且不同年齡層的劑量分析，該文章選擇年齡層能涵蓋從剛出生的嬰兒至成人曝露行為的「居住農民」作為模擬情境。

表 4-1 RESRAD 考慮的曝露途徑

Pathway	RESRAD
External	<ul style="list-style-type: none">• Direct exposure to external radiation from the contaminated soil
Internal	<ul style="list-style-type: none">• Inhalation:<ul style="list-style-type: none">- Airborne radionuclides, including radon progeny• Ingestion:<ul style="list-style-type: none">- Plant foods grown in the contaminated soil and irrigated water- Meat and milk from livestock fed with contaminated fodder and water- Drinking water from a contaminated well or pond- Fish from a contaminated pond- Contaminated soil

資料來源: Seo et al. (2024), Table 1

表 4-2 不同再使用情境考慮的曝露途徑種類

Exposure Pathway	Scenarios		
	Unrestricted condition		Restricted condition
	Residential Farmer	Industrial Worker	Industrial Worker
External gamma	Yes	Yes	Yes
Inhalation of dust	Yes	Yes	Yes
Ingestion of plant foods	Yes	No	No
Ingestion of meat	Yes	No	No
Ingestion of milk	Yes	No	No
Ingestion of fish	Yes	No	No
Ingestion of soil	Yes	Yes	Yes
Ingestion of water	Yes	Yes	No

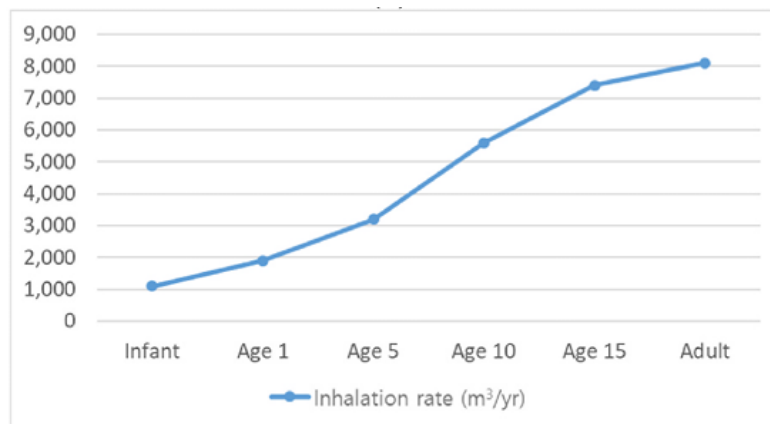
資料來源: Seo et al. (2024), Table 2

由於有考慮不同年齡層的影響，因此需根據不同年齡別界定不同的參數設定，表 4-3 即為該文章考慮 6 個年齡層的不同種類劑量曝露設定值，相關的曝露劑量隨年齡增長的曲線變化如圖 4-2，可發現大多數的曝露參數是會隨年齡增長而增加，僅有肉類攝入以在 15 歲年齡層最高，牛奶攝入的部分則主要在嬰兒時期為主，因此隨著年齡增長而逐漸下降。

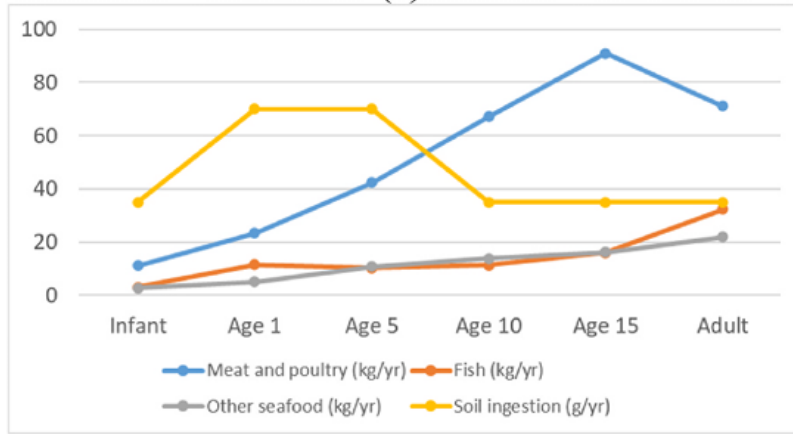
表 4-3 不同再使用情境考慮的曝露途徑種類

Parameter	Unit	Infant	Age 1	Age 5	Age 10	Age 15	Adult
Inhalation rate	m ³ /yr	1100	1900	3200	5600	7400	8100
Fruit, vegetable, and grain	kg/yr	66.3	161.7	187.1	226.4	222.3	257
Leafy vegetable	kg/yr	12	49.7	95.2	146.1	184	251.7
Milk	L/yr	241.5	219.6	184.4	166.5	151.3	73.2
Meat and poultry	kg/yr	11.1	23.4	42.3	67.2	91.1	71.1
Fish	kg/yr	3.1	11.6	10.3	11.3	16	32.4
Other seafood	kg/yr	2.7	5.1	10.8	13.9	16.2	21.9
Soil ingestion	g/yr	35	70	84	51.66	54.96	42.03
Drinking water intake	L/yr	78.5	130.9	130.9	205	205	196.3
Indoor time	-	1	1	0.79	0.65	0.61	0.68
Outdoor time	-	0	0	0.042	0.03	0.028	0.15

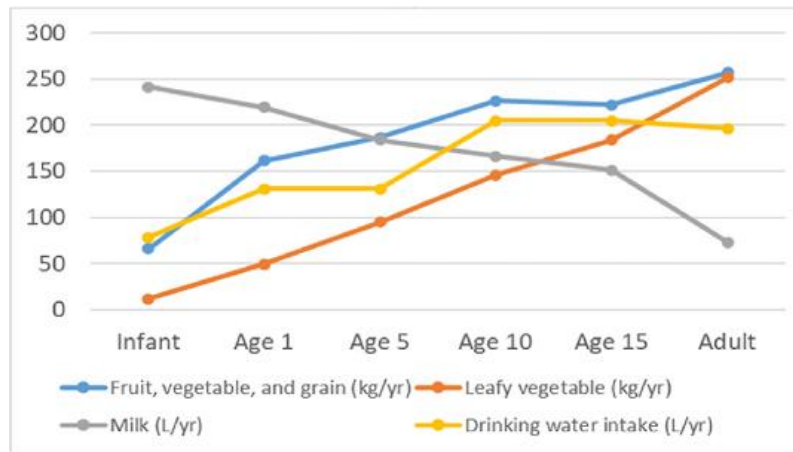
資料來源: Seo et al. (2024), Table 3



(a)



(b)



(c)

圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 4

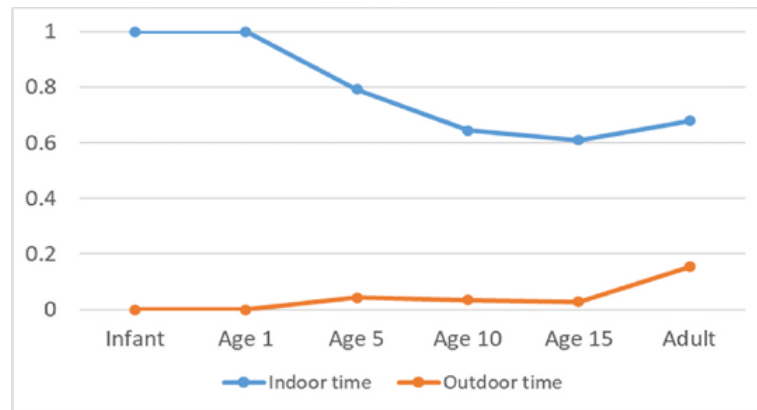
圖 4-2 各種曝露種類劑量隨年齡長的曲線變化

此外該文章也有把各年齡層在室內外不同的活動行為差異考慮進來，如表 4-4 的種類與對應每天的時間長度，可觀察到嬰幼兒的室內停留比例接近 1，成人則僅約 0.6，主要因為工作的關係導致在戶外時間相對較多，圖 4-3 為隨年齡增長室內外時間比例的曲線變化。

表 4-4 不同的室內外活動行為 (min/day)

Classification	Sub division	Indoor, Outdoor, Offsite	Age	Age	Adult
			10	15	
Essential	Sleeping	Indoor	565	525	489
	Meals and snacks	Indoor	110	102	116
	Other Personal	Indoor	73	78	88
Mandatory	Work	Outdoor	0	0	212
	Study	Off-site	286	357	24
	House works	Indoor	18	19	126
Leisure	Transportation	Off-site	77	74	98
	Companionship	Off-site	47	58	60
	Media use	Indoor	113	113	150
	Cultural and Tourism	Off-site	5	4	4
	Sports	Off-site	21	13	31
	Game & play	Indoor/Outdoor	96	80	19
	Etc.	Off-site	28	17	24

資料來源: Seo et al. (2024), Table 4

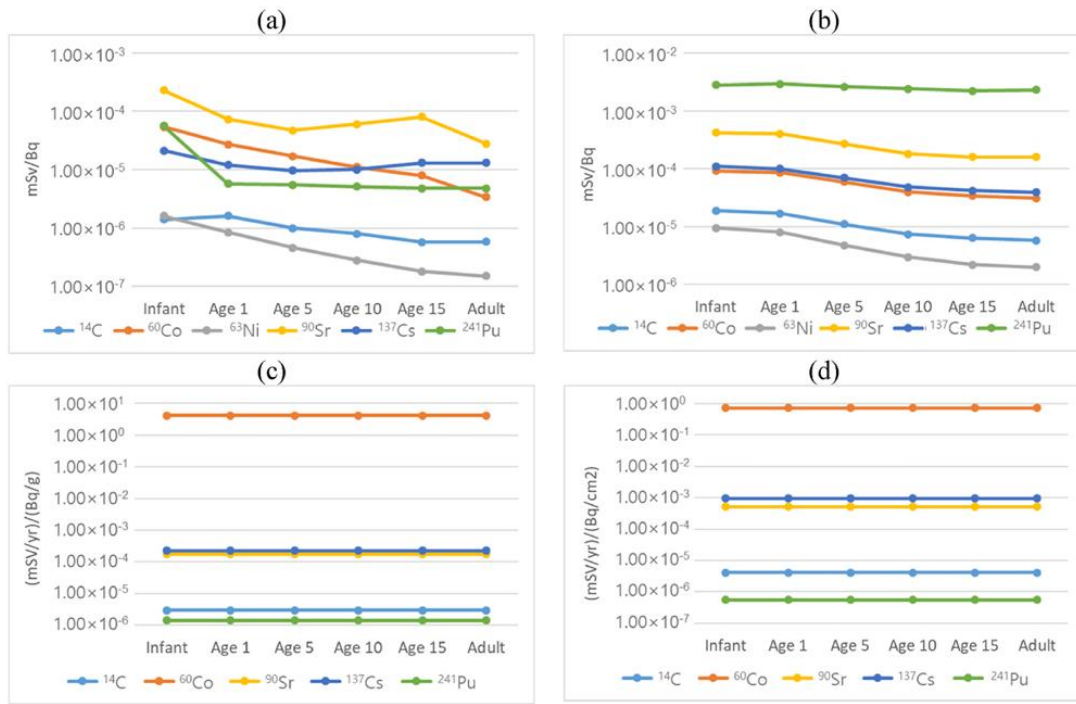


圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 4

圖 4-3 室內與室外停留比例隨年齡長的曲線變化

在核種的部分，該文章主要關切的 6 種代表性核種為 C-14, Co-60, Ni-63, Sr-90, Cs-137, Pu-241。圖 4-4 為不同放射性核種隨年齡層改變的劑量轉換因子(dose conversion factor，簡稱 DCF)變化，DCF 差異可合理解釋不同年齡層於各放射性核種之劑量差異，其值參考 ICRP72 及 FGR No.12 報告。根據圖中趨勢可發現攝入 DCF 隨年齡增加而下降，

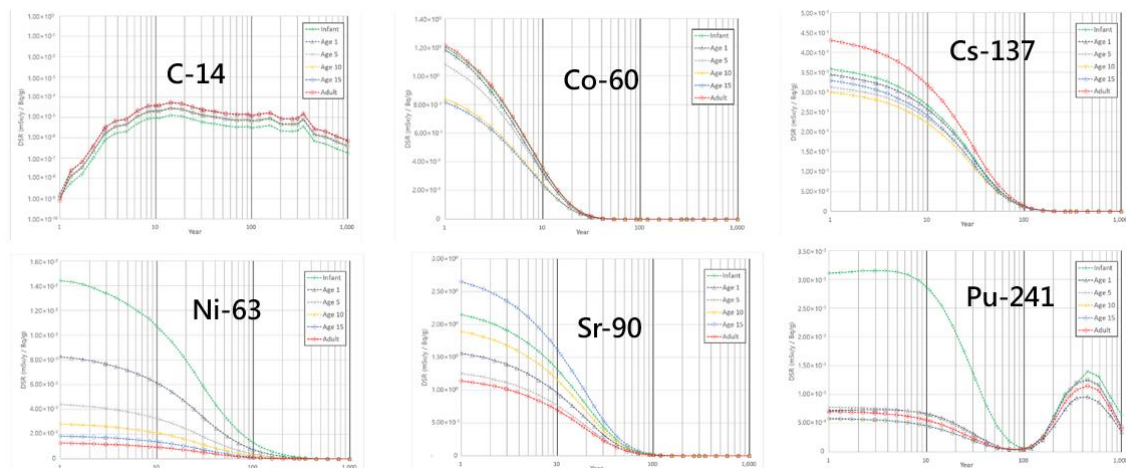
當年齡越小，體重較輕、器官發育未成熟且代謝率較高，單位放射性攝入所產生的劑量越高，因此 DCF 在嬰幼兒顯著高於成年人。



圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 5

圖 4-4 不同放射性核種隨年齡層改變的劑量轉換因子(DCF)變化

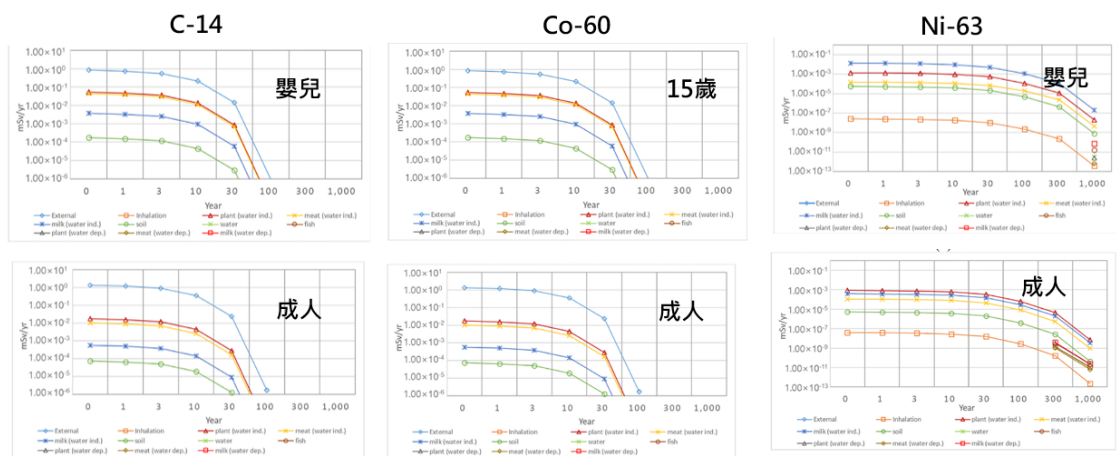
圖 4-5 為不同年齡層劑量隨時間變化的計算結果，可發現劑量分布差異與核種、年齡行為有關。像是嬰兒在 C-14、Ni-63、Pu-241 劑量最高，以體外曝露為主的核種如 Co-60 與 Cs-137 則因成人在戶外時間比例較高，導致成人劑量高於其他年齡層。



圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 3

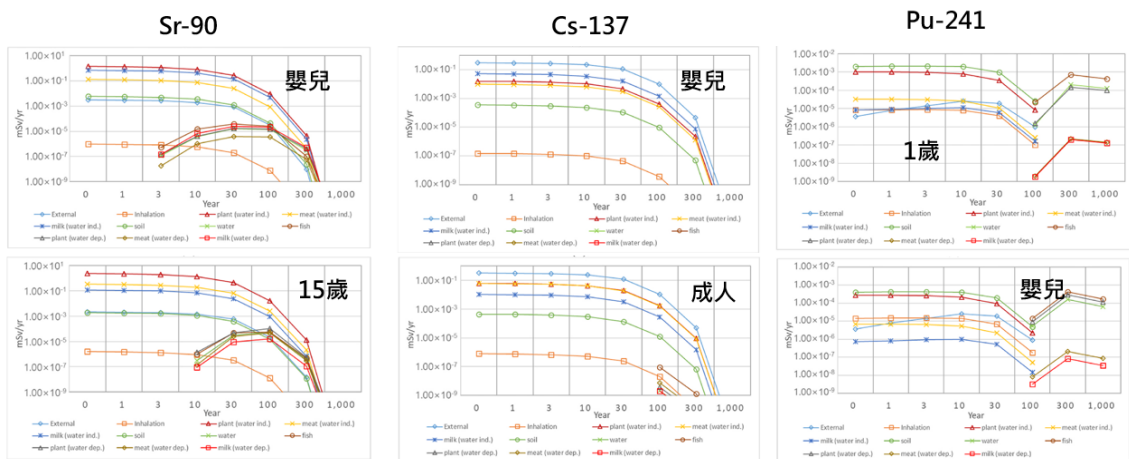
圖 4-5 不同年齡層劑量隨時間變化的計算結果

圖 4-6 與圖 4-7 則為進一步比較不同曝露途徑對不同核種以及年齡層的差異，其中發現與年齡層有高度相關，以 Co-60 為例，不論是那一種族群，體外曝露皆為最主要的劑量來源，Ni-63 對牛奶攝取量高的嬰兒族群影響最為顯著。以 Sr-90 為例，整體劑量影響以 15 歲族群最高，因其植物與肉類攝取量較高。以 Pu-241 為例，嬰兒雖攝取量較低但因劑量轉換因子較高，導致累積劑量較大。



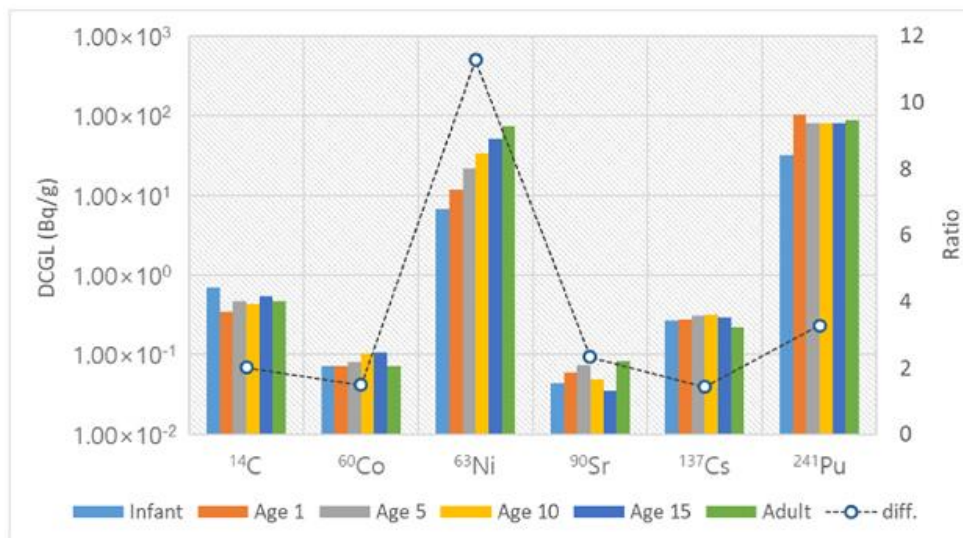
圖片來源: Seo et al. (2024), Figures 6-8

圖 4-6 不同曝露途徑對核種 C-14、Co-60 與 Ni-63 以及不同年齡層的差異



圖片來源: Seo et al. (2024), Figures 9-11
 圖 4-7 不同曝露途徑對核種 Sr-90、Cs-137 與 Pu-241 以及不同年齡層的差異

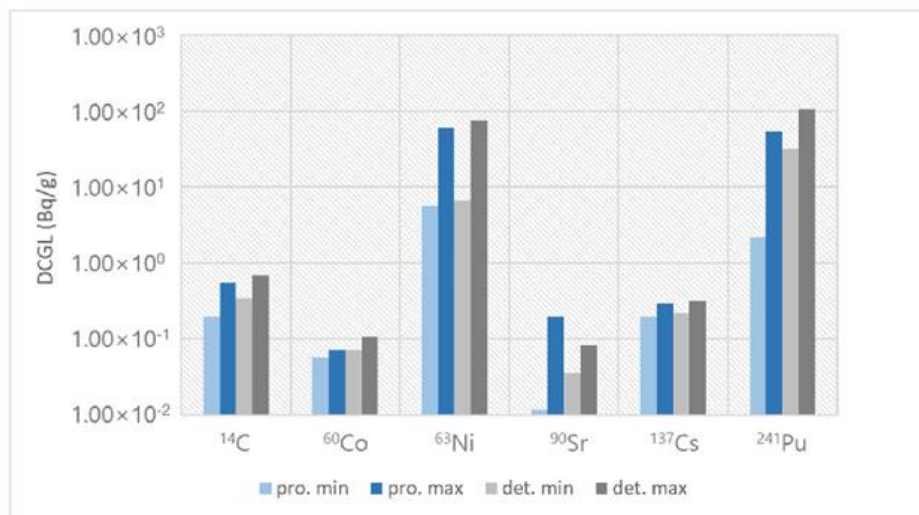
接著該文章也進一步比較不同核種對應各年齡族群的 DCGL，相關結果如圖 4-8，顯示不同年齡族群對放射性核種的敏感度不同，會影響 DCGL 的高低。像是嬰幼兒對某些核種的敏感度較高，因此其 DCGL 值有較低的現象。



圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 12
 圖 4-8 各核種與年齡族群的 DCGL 比較

該文章接著進一步針對不同的年齡族群參數進行機率性分析，由於不同年齡組別與不同核種，敏感性參數可能不同，須分別評估各年齡層的主要影響參數。像是 Co-60 為體外曝露最主要的劑量來源，因此與室內外時間有關。Ni-63 則與牛奶與肉類攝入有關，Sr-90 與肉類攝入有關，Pu-241 則與海鮮食物攝入有關。

圖 4-9 為採用機率性與定率性分析不同核種的最大／最小 DCGL 的比較，結果可發現採用機率式分析考慮輸入參數的分布範圍而非單一值，因此能更全面反映實際變異，降低低估劑量的風險，尤其像是核種 Sr-90 與 Pu-241，計算出的 DCGL 最小值遠低於定率性模擬的最小值。顯示機率式評估結果更保守。

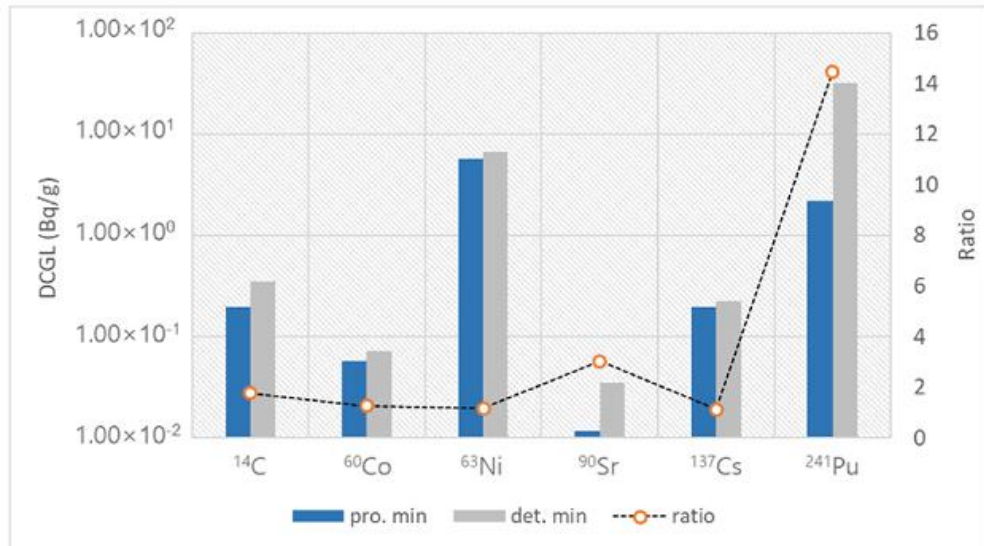


圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 14

圖 4-9 不同核種在採用不同分析方式的最大／最小 DCGL 比較

此外進一步比較機率式與定率式最小 DCGL 的比較如圖 4-10，其

中最終 DCGL 的值也建議採用兩種方法中之最小值，以確保不會低估潛在風險。



圖片來源: Seo et al. (2024), Figure 15

圖 4-10 機率式與定率式最小 DCGL 比較

根據該文章研究結果，不同年齡的參數，像是嬰兒與成人在攝入量、曝露時間上的差異，會造成劑量的差異進而影響評估結果。各種曝露途徑像是攝入、吸入與體外曝露應根據場址再利用情境進行調整。相較於傳統的定率式方法，機率式方法能提供更保守且合理的 DCGL 值，並可透過敏感度分析針對關鍵參數進行更精確設定。雖然成人為代表性評估對象，但非限制再利用區域仍需考慮所有年齡層的曝露風險，以符合法規與安全標準。總結以上，在考慮各種曝露途徑同時，應不只考慮成人，所有年齡層都很重要。

4.2 Oyster Creek 核電廠

本計畫蒐集國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗，此小節以 Oyster Creek 核電廠為例，探討其地下水防護經驗並研析重點事項，以作為精進我國核能電廠除役階段地下水特性評估的參考依據。

此份 2022 年水文地質調查報告 (Hydrogeologic Investigation Report, 簡稱 HIR) 記錄了依據核能工業協會 (Nuclear Energy Institute, 簡稱 NEI) 於 2019 年 3 月發布之 NEI 07-07 Rev.1 (Industry Ground Water Protection Initiative – Final Guidance Document, Rev. 1 (工業地下水防護倡議—最終指導文件 修訂版 1))，以及 EPRI 之 EPRI Groundwater Protection Guidelines (核電廠地下水防護指引) 所完成之氚 (tritium) 調查成果。採用了 GHD (前身為 Conestoga-Rovers & Associates, 簡稱 CRA) 在 2006 年 5 月之《水文地質調查工作計畫》進行的廠址特徵的成果、CRA 2006 年 9 月與 2011 年的 HIR (CRA, 2006, 2011)、GHD 2017 年 1 月的 HIR (GHD, 2017)，以及後續與 Oyster Creek 核電廠進行相關的調查。GHD 受 Holtec Decommissioning International (簡稱 HDI) 委託編製本次更新版的 HIR。

經美國核能管制委員會 (NRC) 核准將本廠營運執照移轉後，HDI

於 2019 年 7 月自 Exelon Generation (簡稱 Exelon) 取得 Oyster Creek 發電站；該移轉由 Oyster Creek Environmental Protection (簡稱 OCEP) 為所有人，HDI 為運轉 (除役) 業者進行除役。

依照 NEI 07-07, GHD 檢視 2006 年 9 月至 2021 年 10 月期間電廠之相關作業，以及地下水與地表水之狀況。並記錄自 2006 年來於水文地質研究 (含廠內與廠外地下水供水)、地下擾動與重大施工情形、已記錄之放射性外洩或滲漏事件、放射性整治行動之狀態等領域所發生的變化。

- 水文地質研究

電廠自 2006 年起啟動持續至今的水文地質研究。重點結論為：

- 氚 (tritium) 從未向廠外遷移，且任何可檢出的濃度皆低於 (約低 100 倍) 聯邦飲用水標準 20,000 pCi/L。
- 與持照電廠運轉相關之伽瑪發射核種 (gamma emitting radionuclides)，在放射性地下水防護計畫 (Radiological Groundwater Protection Program, 簡稱 RGPP) 採樣取得並分析的所有地下水與地表水樣中，皆未檢出超過最低可檢出限值 (lower limits of detection, 簡稱 LLDs) 的濃度。
- 透過可能潛在曝露途徑，目前並無與持照運轉相關之放射性核種

的曝露風險。地下水可能的遷移途徑包括：(1) 在廠區內流向飲用水使用者；(2) 離開廠址流向私人與公共地下水使用者；(3) 離開廠址流向地表水體。

需進一步評估之區域 (Areas for Further Evaluation, 簡稱 AFE)

檢視 2006 年 10 月至 2021 年 10 月之資料後，不需要新增 AFE。

- 地下擾動與重大施工 (Subsurface Disturbances and Major Construction)

自 2016–2021 廠址未發生可能影響地下水流動的地下擾動或重大施工。除役程序中，廠址已進行大規模拆除作業。

廠內與廠外地下水供水之變更 (Changes in On Site and Off Site Groundwater Supplies)

2016–2021 年間，廠內與廠外的地下水供水均無變更。

- 已記錄之放射性外洩或滲漏 (Documented Radiological Spills or Leaks)

2016–2021 年間，未發生放射性滲漏或需通報之放射性外洩事件。

- 放射性整治行動之狀態 (Status of Radiological Remedial Actions)

2010 年新澤西州環境保護廳 (**New Jersey Department of Environmental Protection**, 簡稱 NJDEP) 與美國核能管制委員會 (NRC) 討論後，Exelon 於淺層 Cohansey 組當時存在之氙污染團中心處設置一口抽水井 (MW-73)，以控制污染團並抽取含氙地下水。該抽水井於

2010 年 11 月 17 日開始抽水，並於 2018 年結束。已回收受氙影響之地下水，並降低含水層中之氙濃度。

以下針對此份報告內容目錄分述如下：

(1)前言

GHD Services Inc. (GHD) 受 HDI 委託，更新水文地質調查報告 (Hydrogeologic Investigation Report, 簡稱 HIR) 修訂第 4 版，2006 年 CRA (Conestoga-Rovers & Associates) (GHD 前身為 CRA) 擬定水文地質調查工作計畫，以協助建立自願性地下水監測計畫，重點在於及早偵測廠內之放射性核種。此計畫即為放射性地下水防護計畫 (Radiological Groundwater Protection Progra, 簡稱 RGPP)。

作為產業利害關係人之 NEI (Nuclear Energy Institute)，制定指導文件以界定電力公司在非預期之放射性物質外逸可能導致低但可檢出之廠址相關物質存在於地下土壤與地下水時，強化管理與應對，詳載於 NEI (Industry Ground Water Protection Initiative – Final Guidance Document, Rev. 1) (NEI 07-07, 2019 年 3 月)。由於 Exelon 在 NEI 倡議提出前即主動建立並實施其計畫，故 NEI 指導文件中的建議與方法已視需要納入並整合至電廠既有地下水防護計畫。

EPRI (Electric Power Research Institute) 致力於電力發電、輸送與

使用之研發，並依「地下水防護倡議」編製指引。EPRI (Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants) (2007 年 11 月) 由專家團隊撰寫，目的在為核電產業提供於核電廠推行地下水防護計畫之指導原則；其目標包括：展現對持照物質管控之承諾、最小化運轉過程中未計畫／未監測之放射性排放對環境的潛在影響，以及降低與地下水及地下介質可能污染相關之長期成本。HIR 之水文地質調查與撰寫，已考量 EPRI 指引之技術。

2006 年，Exelon 完成基準水文地質調查報告，內容包括監測井與地表水之採樣，水樣中之氚(H-3)濃度，均未超過美國環保署(USEPA) 飲用水標準 20,000 pCi/L。

依 NEI 07-07，GHD 檢視了 2006 年 10 月至 2021 年 10 月期間電廠之相關作業與地下水狀況。本次檢視係依 NEI 07-07 Rev.1 指南之第 3.0 節 Program Oversight／目標 3.1 進行，並就 2006 年以來下列五項條件或作業進行說明：

- 水文地質研究 (含廠內與廠外地下水供水)
- 地下擾動與重大施工
- 已記錄之放射性外洩或滲漏
- 放射性整治行動之狀態

– 概念性地下水模型(conceptual groundwater model)之驗證

電廠描述 (Station Description)

電廠廠址位於新澤西州 Ocean County 之 Lacey Township 與 Ocean Township (如圖 4-11)，廠址分為兩個區域包括：Oyster Creek Nuclear Generating Station (OCNGS) 與 Former Finninger Farm 場地 (Former Finninger Farm Property)。OCNGS 其東側以 US Route 9 為界，北、西、南側以進水運河 (intake canal) 為界。核電設施與相關構造物之建造期為 1963 年 12 月至 1969 年 12 月。Former Finninger Farm 約 626 英畝，位於 Route 9 以東，區域多為植被覆蓋且未開發。

周邊地區土地使用 (surrounding area land use)

周邊土地使用為混合住宅、商業與未開發地的混合型態。Exelon 於 2018 年完成停機後除役活動報告 (post-shutdown decommissioning activities report, 簡稱 PSDAR)。報告結論為：規劃中的 OCNGS 除役活動所伴隨之環境影響，不超出先前發布之環境影響說明書所處理的影響範圍。因此 Exelon 的結論為：OCNGS 的除役活動不太可能對任何受脅或瀕危物種造成不利影響，且不會對任何指定之關鍵棲地造成影響。

電廠環境概述 (Station Setting)

OCNGS 廠址整體地形平坦，標高約在平均海平面以上 10-23 英尺之間，廠址略向北側與南側緩降，分別趨向 Forked River 南支或 Oyster Creek(視場址內位置而定)；整體亦略向東側緩降，趨向 Barnegat Bay。距廠址最近的地表水體包括：Forked River 南支與 Oyster Creek。此外，為 OCNGS 設計之人工進／放水運河分布於 OCNGS 的北、西、南側，用以提供非接觸式冷卻水，並將 Forked River 南支與 Oyster Creek 相連。

本區域之地質 (geology) 由砂、礫、黏土與泥灰岩 (marl) 所構成，整體向東南緩傾。Oyster Creek 地區底下主要為三個地層單元：Cape May 組、Cohansey 組與更古老的 Kirkwood 組。Cape May 組：平均厚度約 40 ft；由淡灰至棕褐色、中—細粒砂組成，夾有少量粉砂與粗砂；固結差。在沿海地區常見薄、淺層的黑色黏土層。Cohansey 組：位於 Cape May 組之下，平均厚度約 60 英尺；主要由赤褐與棕褐色的中—細粒砂組成，含少量粉砂、粗砂，並夾有粗—細粒礫；有時可見透鏡狀黏土層；其下部固結度高。Kirkwood 組：位於 Cohansey 組之下；由淡灰至黃褐色、富雲母且含鈦鐵礦 (ilmenite) 的木質化 (lignitic) 極細—細粒石英砂組成，並含部分粗—細粒礫；固結致密，自地表下約

100 英尺延伸至至少 250 ft。廠址地質自 1960 年之初步調查起，已透過岩心採樣、地下水位量測、地下水採樣與分析等方式進行長期詳查。電廠構造物附近之地表標高約為平均海平面 (msl) 以上 23 英尺。廠址內自淺至深的地層單元分別為： Fill、The Cape May Formation、The Upper Clay、The Upper Cohansey Formation、The Lower Clay 與 The Kirkwood。



圖 4-11 Oyster Creek Nuclear Generating Station 廠址位置圖

水文地質 (Hydrogeology)

The Cape May Formation 與 The Upper Cohansey Formation 均包含非受壓含水層。這些地層中偶見的黏土層會在局部區域造成輕微的自流（受壓）狀況，但一般而言，這兩個地層在水力上相互連通。一層黏土作為隔水層將 Kirkwood 與 Cohansey 分開，並且在貫穿 Kirkwood 組的水井中。由進水與放水運河所圍限的區域內之地下水流動與周邊地區大不相同。在區域尺度上，地下水通常向東南朝海岸流動，該地區之供水來自水井。這些水井通常深 60 至 70 英尺，進入 The Upper Cohansey Formation 或更深，並且穿透至少一層黏土邊界，以避免受到海水入侵或當地化糞池滲出液的污染。該地區較深的水井穿透 The Kirkwood 含水層，並提供更高品質的水。

區域地下水使用 (Area Groundwater Use)

以下依廠內地下水使用 (on-site groundwater use)、廠外地下水使用 (off-site groundwater use) 與 JCP&L (Jersey Central Power & Light Company) 分別敘述。

- 廠內地下水使用 (on-site groundwater use)

電廠之用水目前僅由位於 Parcel 1 的井 (north domestic water well) 所供應作為生活實際供水井，另 1 口井 (south domestic water well) 雖

仍持有許可，但目前未使用。South Domestic Water Well 與 North Domestic Water Well 均取自 Kirkwood 層之地下水。另外廠內之飲用水井 1N 為 REMP 監測用的飲用水採樣點，例行做放射性核種分析。

- 廠外地下水使用 (off-site groundwater use)

電廠所在及鄰近地區設有供水井。估計新澤西州海洋郡 (Ocean County) 有 83% 的人口由公共供水服務。以供水量計，地下水取用約占公共供水的 87% (USGS, 2004)。自 1990 年代初期起，當地居民之室內與家庭用水來源已由私人井改為公共供水 (URS GWC, 2000)。鄰近電廠的 3 口飲用水井例行進行電廠的 REMP 放射性核種採樣。其中 1 口井位於電廠南方 1.6 英里，深度約為 360 英尺，另 2 口井位於電廠北方 2.2 英里與 3.5 英里，深度皆大於 200 英尺。此外，在 U.S. Route 9 以東另有三口灌溉井，井深約 65–125 英尺 (自地表起算的深度)，三口灌溉井不得用作飲用水來源，僅用於灌溉或其他戶外非飲用用途。

JCP&L 是一家電力公用事業公司，在電廠以西的 JCP&L Back Site 用地上有 8 口供水井。這 8 口井分別供應消防用水 (4 口井)、燃燒渦輪系統之製程用水 (2 口井) 以及民生用水 (2 口井)。針對位於 JCP&L Back Site 用地之靶場 (firing range) 進行非放射性影響調查，靶場內及

其周邊設置 11 口監測井。

電廠外水井搜尋 (Off-Site Water Well Inventory)

為確認 Oyster Creek 核電廠廠址外之地下水利用現況與潛在受影響區域，依據新澤西州環境保護署 (New Jersey Department of Environmental Protection, 簡稱 NJDEP) 之水資源供應局 (Bureau of Water Supply, Water Well Systems and Well Permitting Division) 提供的資料，進行不同半徑範圍內的水井搜尋與資料比對。本項調主要建立廠址周界外水井分布資料庫，以支援地下水流場建模與潛在污染傳輸評估。

CRA (Conestoga-Rovers & Associates) 於 2010 年 4 月啟動首次搜尋作業，包含：2 英里 (約 3.2 公里) 手動半徑搜尋 (manual radius well search)：涵蓋私人、公用、工業及監測用水井。以及 5 英里 (約 8 公里) 電腦化搜尋 (computer search)：針對每日抽水量超過 10 萬加侖 (gallons per day, 簡稱 gpd) 之抽水井或分流井 (pumping or diversion wells)。

2010 年 5-6 月，CRA 接收並整理 5 英里半徑內之搜尋結果，共確認約 51 口高抽水量水井。2010 年 6 月 4 日，完成 2 英里半徑搜尋，共取得約 4,000 筆電子記錄及 200 份紙本歷史資料 (2000 年以前)，其中多為監測井與灌溉井。經資料篩選後，保留約 2,000 口家庭、

工業與公共用水井。2016 年 7 月 GHD 執行更新搜尋，範圍為距電廠中心英里內，僅納入 2010 年後新設水井。結果顯示新增 2 口水井，其中 1 口為灌溉井，1 口為家庭用水井。2022 年 3 月 GHD 依相同條件再次搜尋，新增 4 口水井，皆為灌溉用途。

調查結果顯示，電廠周邊區域存在多樣化的用水井分布，主要以家庭及農業灌溉用途為主。透過不同時期之資料比對，可評估地下水開發利用變化及潛在受影響風險。該資料亦可作為後續地下水模式（groundwater flow model）邊界條件設定及污染傳輸途徑分析之依據。

(2)需進一步評估區域(areas for further evaluation)

在 2006 年水文地質調查期間，AFEs 最初為電廠內需要進一步評估的區域。當時，Exelon 在評估電廠之地下水水質並建立 AFEs 時，將電廠的所有運轉活動一併納入考量。依據 NEI 07-07 Guidance 進行，AFEs 的鑑別需要包括電廠檢查、與電廠人員的訪談、電廠系統之評估、已確認與未確認之放射性外釋的調查、進行中監測計畫之檢視以及過去電廠調查之檢視。主要針對電廠水文地質條件之檢討所得資訊，用以鑑別可能受到電廠運轉影響而導致地下水受到影響之區域。GHD 於 2006 年展開調查，以判定是否有任何已確認或可能的外釋，或其他放射性核種之外釋對地下水造成不利影響，包含評估現有電廠地下水監

測系統是否足以在 AFEs 內評估地下水水質。若不足以充分調查地下水水質，則將於 AFE 設置監測井。

Ongoing Monitoring (持續性監測)

電廠正在進行的監測計畫，包括 輻射環境監測計畫(Radiological Environmental Monitoring Program，簡稱 REMP)與輻射地下水保護計畫(Radiological Groundwater Protection Program，簡稱 RGPP)。

-輻射環境監測計畫(Radiological Environmental Monitoring Program，簡稱 REMP)

在電廠運轉前為了建立背景放射性水準，曾進行運轉前放射性調查(pre-operational radiological survey)。其中一部分進行生活用水、地表水的監測。監測結果詳載於 1968 年報告 (pre-operational radiological survey, oyster creek nuclear generating station)。生活用水監測包括井水樣品分析。其中來自井所採集樣品分析結果顯示：在任一地下水樣中的氚濃度皆未高於 LLD (1,000 pCi/L)；Gross beta 分析結果介於 LLD (0.2 pCi/L)至 38.6 ± 2.1 pCi/L (maximum detected activity)。REMP 於 1969 年啟動。依 REMP 將分析樣品包括 beta、gamma emitting radionuclides、tritium, 與/或 strontium。地下水水樣採自 2 口監測井 (W-3C 與 MW 24 3A)，地表水樣品有 4 個採樣點，每月或每半年採集一次。飲用水

水樣目前採自 3 口飲用水井 (north domestic、LMUA、ocean township)。
所有地下水水樣分析的 tritium 與 gamma emitting radionuclides 均低於
LLD。所有地表水 tritium 結果皆低於 LLD (200 pCi/L)，飲用水 tritium
低於 LLD (200 pCi/L)。

2022 年 REMP 出版之年度輻射環境運轉報告(annual radiological
environmental operating report)結論為自 2021 年 01 月 01 日至 2021
年 12 月 31 日的期間，OCNGS 之除役作業對環境未造成不利的放射
性影響。

-輻射地下水保護計畫(Radiological Groundwater Protection Program，簡
稱 RGPP)

Exelon 於 2006 年建立了評估電廠運轉對電廠附近地下水與地表水
影響之計畫。Exelon 的 RGPP (EN OC 408 4160, rev. 10) 納入了 NEI
07-07 (Industry Groundwater Protection Initiative – Final Guidance
Document)、ANI 07-01 (ANI Nuclear Liability Insurance Guideline 07-01:
Potential for Unmonitored and Unplanned Off-Site Releases of Radioactive
Material) 與 EPRI 3002000546 (Revision 1 of EPRI 1015118:Groundwater
Protection Guidelines for Nuclear Power Plants) 中之指引。依據「Annual
Radiological Environmental Operating Report, April 2022」之結論：Oyster
Creek Generating Station 的運轉對環境未造成不利的放射性影響。

在 2018 年第 4 季基於歷史氡結果、井與 SSCs 的位置、近距離處新增的井、地下水流與岩性(lithology)，RGPP 的採樣位置數量由 52 口井減少至 34 口井。共 14 口 Background wells、14 口 Detection wells，以及 6 口 Long-Term Shutdown wells。2022 年，基於穩定的歷史地下水採樣分析的結果，RGPP 的採樣頻率由每季改為每半年（5 月／10 月）進行。地下水監測井如圖 4-12~4-13。在 2009 年發現凝結水儲槽（condensate storage tank，簡稱 CST）之地下管線洩漏，因此建立一項整治計畫。整治計畫中設置 1 口抽取井（W-73），Exelon 於 2010 年 11 月 17 日開始抽取地下水。當氡污染團整治完成後抽取井（W-73）的抽水於 2018 年結束。監測井網中的氡濃度已由大於 4,000,000 pCi/L，降至低於美國 USEPA 飲用水標準（20,000 pCi/L）。

(3) 支持持續調查之現地作業 (field activities to support ongoing investigations)

本次《水文地質調查報告》(HIR) 記錄的現地作業，為持續進行中的放射性地下水保護計畫 (RGPP) 及地下水調查的一部分。

GHD 與該電廠共同執行了以下作業：

- 地下水與地表水水位監測 (groundwater and surface water elevation monitoring)
- 地下水與地表水採樣 (groundwater and surface water sampling)

地下水與地表水水位量測 (Groundwater and Surface Water Elevation Measurements)

GHD 與電廠承包商 Normandeau 持續定期進行地下水與地表水水位量測。並提供了 2016 年至 2021 年間的地下水與地表水水位監測摘要。

地下水與地表水採樣與分析 (Groundwater and Surface Water Sampling and Analysis)

電廠及其承包商 Normandeau 定期採集地下水與地表水樣品。採樣過程中使用混合採樣器 (composite sampler) 與瞬間取樣法 (grab sampling) 採集地下水樣品，以進行氚 (tritium) 及目標放射性核種 (target

radionuclides) 之分析。

地表水樣品則自三個監測站以直接填充法 (direct-fill method) 採集。

2021 年該電廠之放射性地下水保護計畫 (RGPP) 包含：

14 口背景井 (background wells)、14 口偵測井 (detection wells)、6 口長期停機井 (long-term shutdown wells)，以及 3 個地表水監測站 (surface water monitoring locations)。

生活用水井採樣與分析 (Domestic Well Sampling and Analysis)

每月自三口飲用水井 (north domestic、LMUA 及 ocean township) ——採集瞬間樣本 (grab samples)。進行以下項目的分析：
氚 (tritium)、總 β 放射體 (gross-beta emitters)，以及伽瑪射線放射性核種 (gamma-emitting radionuclides)。

(5) 結果摘要 (results summary)

(i) 停機前與停機後之電廠水文地質 (pre- and post-shutdown station hydrogeology)

電廠的水文地質概要，地下水與地表水水質，內容更新至 2016 年至 2021 年 10 月期間，涵蓋停機前與停機後的狀況。根據停機前與停機後的地下水水位比較，停機對 Cape May、Cohansey 與 Kirkwood 各

地層的地下水位或流向並未造成顯著影響。停機後，Cape May 與 Cohansey 地層的地下水流動仍受反應爐與渦輪機建築、取水與排水隧道，以及取水與排水運河施工期間上層黏土層移除的影響。此一影響未受停機影響而改變。

地下水水位含水層 (water table aquifer) 自地表下約 15 至 100 英尺 (bgs) 延伸至電廠場區下方。此非受壓含水層 (unconfined aquifer) 由 Cape May 地層及其下方的 Cohansey 地層組成，兩者之間局部由厚度約 5 至 10 英尺的上層黏土層 (upper clay) 隔離。該上層黏土層於建設階段遭破壞，使得兩個滲透性地層在取水／排水運河及反應爐與渦輪發電機建築區內連通。

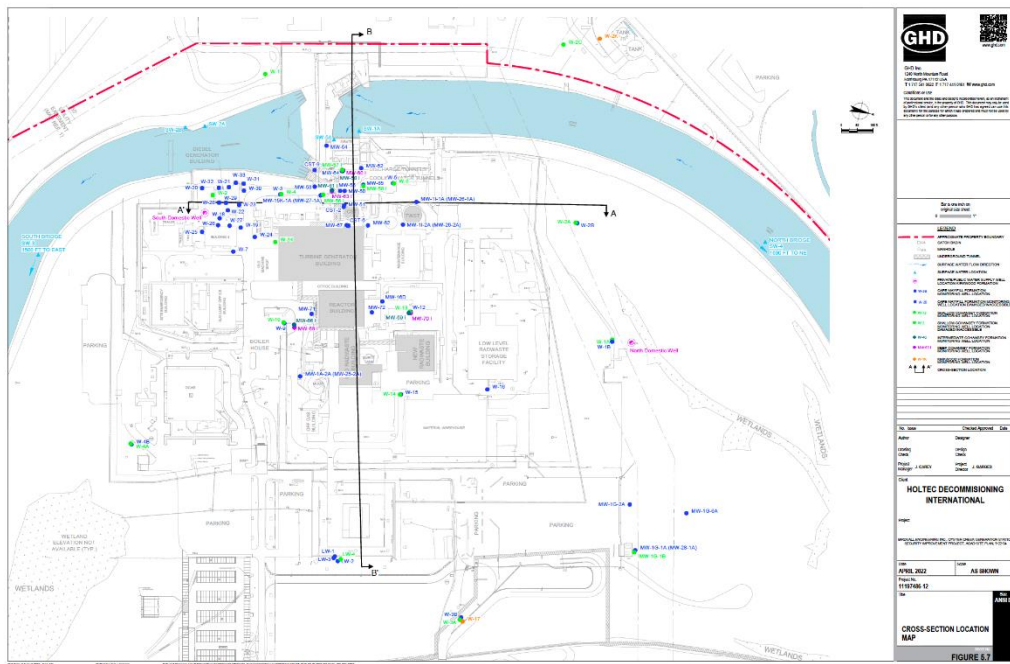
下伏的 Kirkwood 地層為局部受壓含水層 (locally confined aquifer)，深度約達 500 英尺，下層黏土層 (lower clay) 將 Cohansey 與 Kirkwood 地層隔開。

電廠設置的監測井監測以下 3 個地層：

- Cape May 地層之水位含水層；
- Cohansey 地層的上部、中部與深層區間；
- 以及受壓的 Kirkwood 地層。

圖 4-14 監測井網與地質剖面位置的關係圖，與水文地質剖面圖是

基於其接近歷史上 AFE 區域及可能影響地下水流動模式的建築結構，並用以顯示氚污染團 (tritium plume)、地下水流向及受體位置。這些剖面圖(圖 4-15~4-23)顯示電廠建設已顯著改變原始地形與地下結構，並對廠址水文系統造成影響。



圖片來源: Holtec Decommissioning International (2022), Figure 5.7

圖 4.14 監測井網 (monitoring well network) 與地質剖面位置 (geologic profile locations) 之間的關係。

地下水流向 (Groundwater Flow Directions)

Cape May 地層：

圖 4-15 與圖 4-16 分別顯示 2016 年 7 月與 2021 年 10 月測得的 Cape May 地層地下水位等高線。分別代表電廠停機前與停機後的地下水狀況。

圖 4-15 顯示地下水自電廠中央東部呈現向西、北與南的匯流，流向取水與排水運河，顯示這些運河為主要的地下水排放區。圖 4-15 所示的 2021 年測得流況與 2016 年相似，顯示流向仍以運河為主。因此可判定，停機並未對 Cape May 地層的地下水位或流向造成顯著影響。

Cohansey 地層：

圖 4-17 與圖 4-18 顯示 2016 年 7 月與 2021 年 10 月於 Cohansey 地層淺部井測得的地下水位等高線。兩者皆顯示在反應爐建築南側存在水力高點，地下水向北、西與南流向運河，呈放射狀分布 (radial flow)。結果顯示，運河仍為該地層的主要排放區，停機並未對其水位或流向造成明顯影響。

Kirkwood 地層：

圖 4-19 顯示 2016 年 7 月於 Kirkwood 地層量測的地下水等高線，之後電廠不再定期監測該層。此次報告製作新等高線，於 2022 年 6 月再次收集數據(圖 4-20)。結果顯示地下水於該層呈由西南向東北流動，流向 Barnegat 灣與大西洋，與區域水流方向一致。停機對 Kirkwood 地層地下水流向或水位並無顯著影響。



圖 4-15 顯示 2016 年 7 月測得的 Cape May 地層地下水位等高線

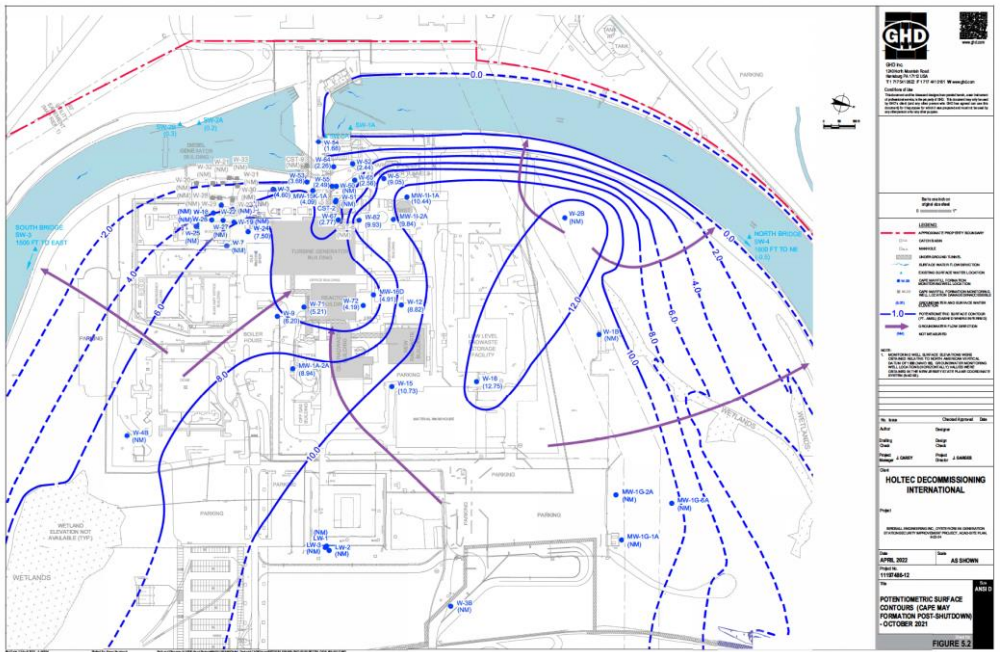
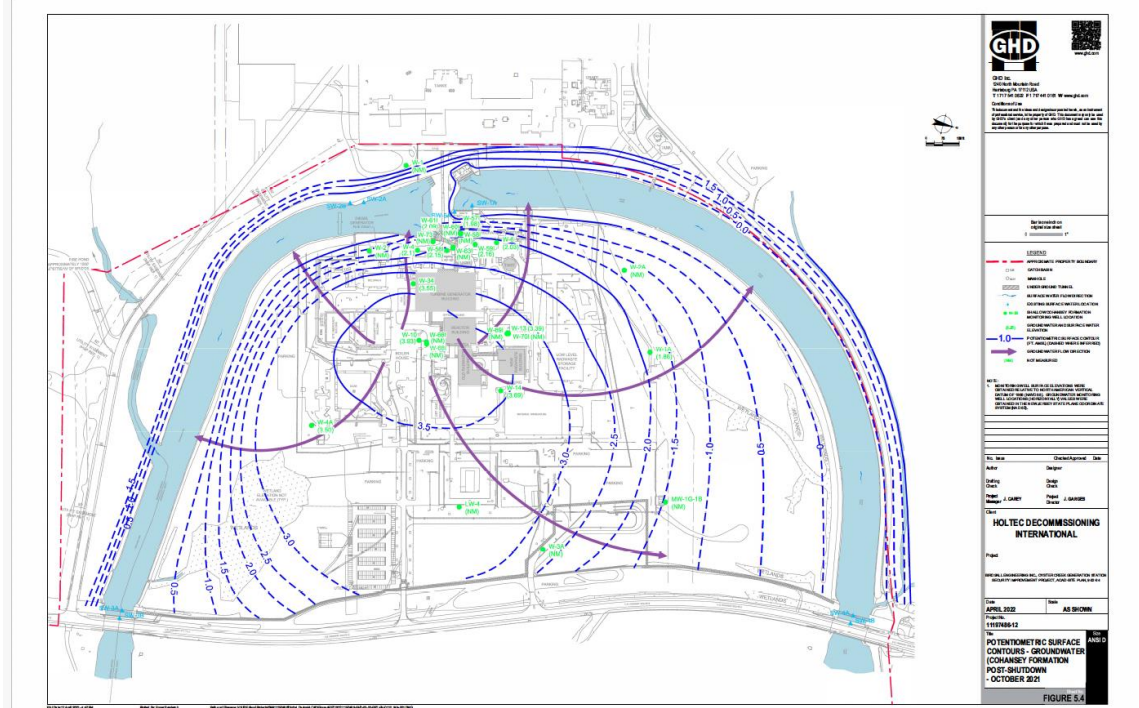
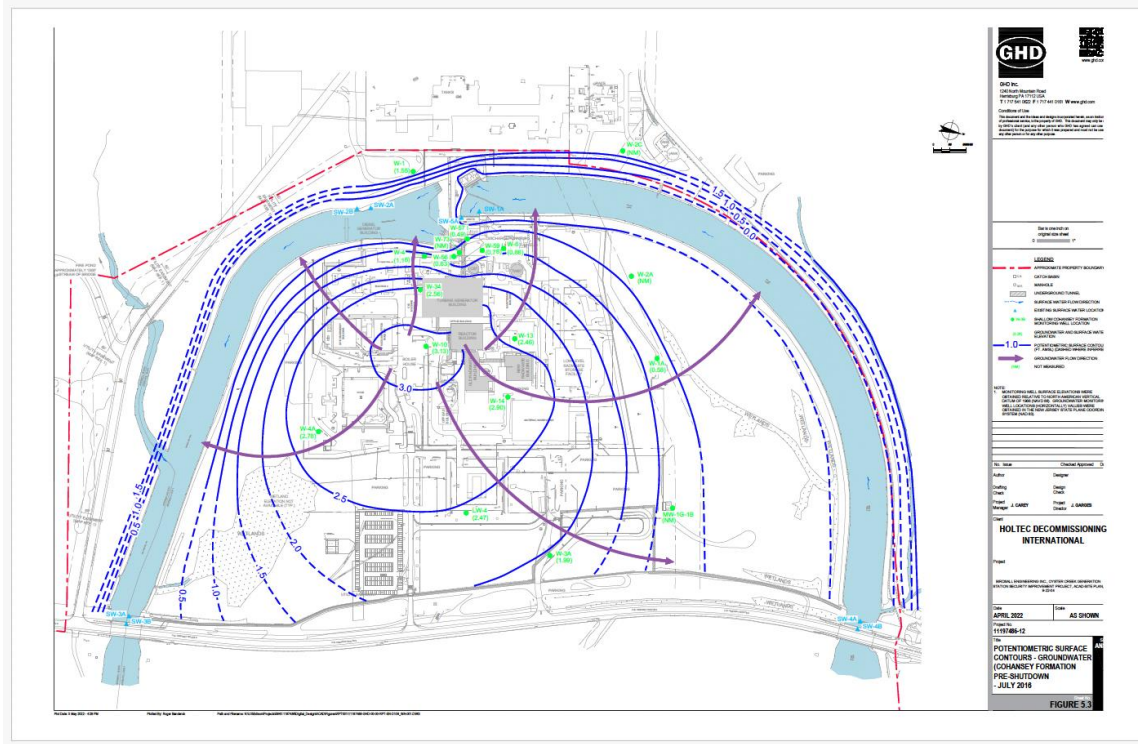
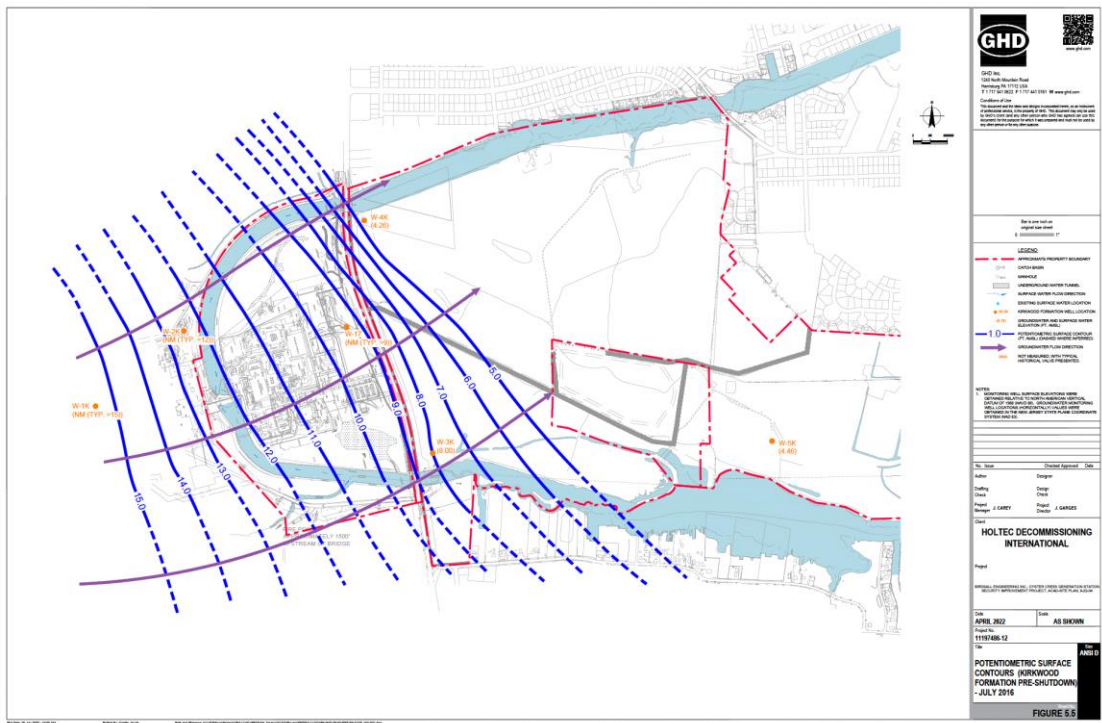


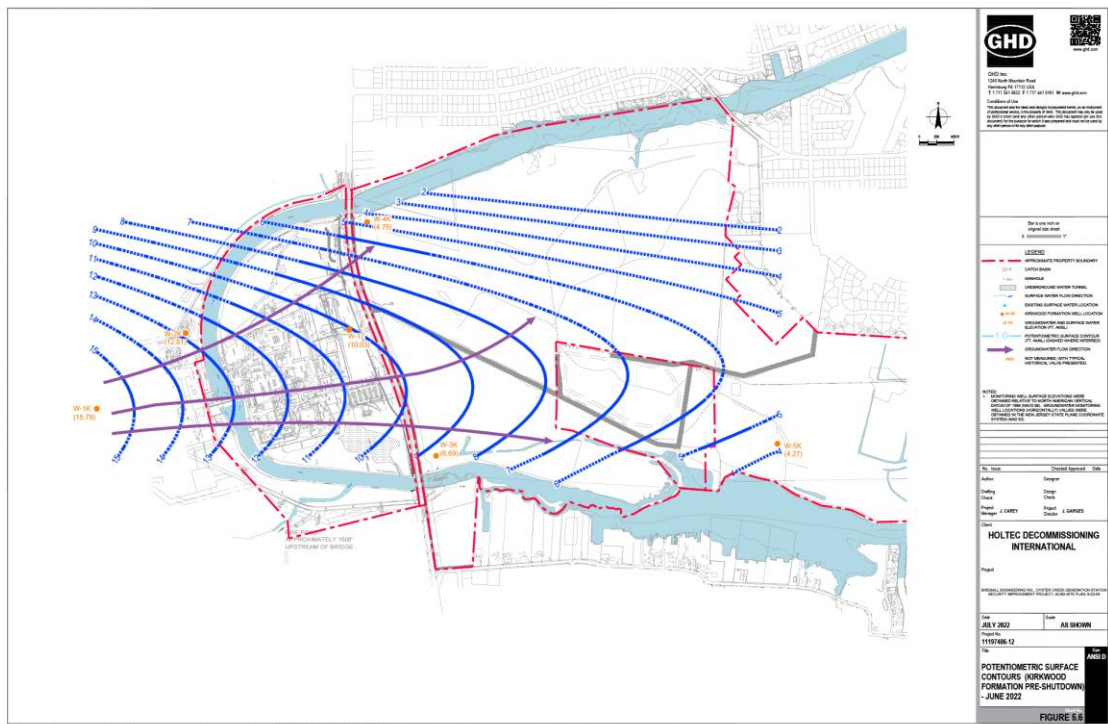
圖 4-16 顯示 2021 年 10 月測得的 Cape May 地層地下水位等高線



圖片來源: Holtec Decommissioning International (2022), Figure 5.3 , Figure 5.4
 圖 4-17 (上)與圖 4-18 (下)顯示 2016 年 7 月 18 日與 2021 年 10 月
 19-20 日於 Cohansey 地層淺部井測得的地下水位等高線



圖片來源: Holtec Decommissioning International (2022), Figure 5.5
 圖 4-19 顯示 2016 年 7 月於 Kirkwood 地層量測的地下水等高線



圖片來源: Holtec Decommissioning International (2022), Figure 5.6
 圖 4-20 Kirkwood 地層的地下水新等高線

人工構造對地下水流動之影響 (Man-Made Influences on Groundwater Flow)

Cape May 與 Cohansey 地層之地下水於電廠範圍內主要排放至取水與排水運河。此外，地下水流動亦受建廠期間之開挖工程與後續地下結構（如反應爐建築、渦輪機建築及取水／排水隧道）影響。圖 4-15 顯示地下水等高線向這些結構匯流，顯示地下水被誘導流入其周圍高滲透回填區。圖 4-21 與圖 4-22 顯示地下水在 Cape May 與 Cohansey 地層間直接排放至運河。此外，這些剖面顯示建設過程中上層黏土層被移除，並於深基礎周圍回填滲透性材料，導致地下水由上層（cape may）向中層（cohansey）下滲。此現象同樣未受停機影響。

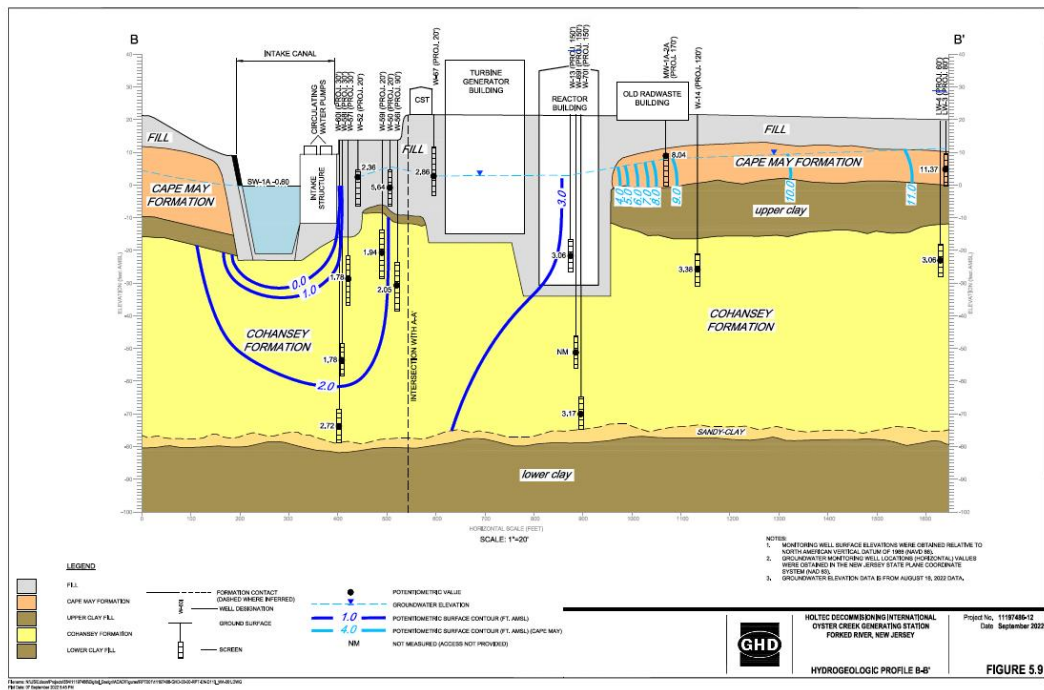
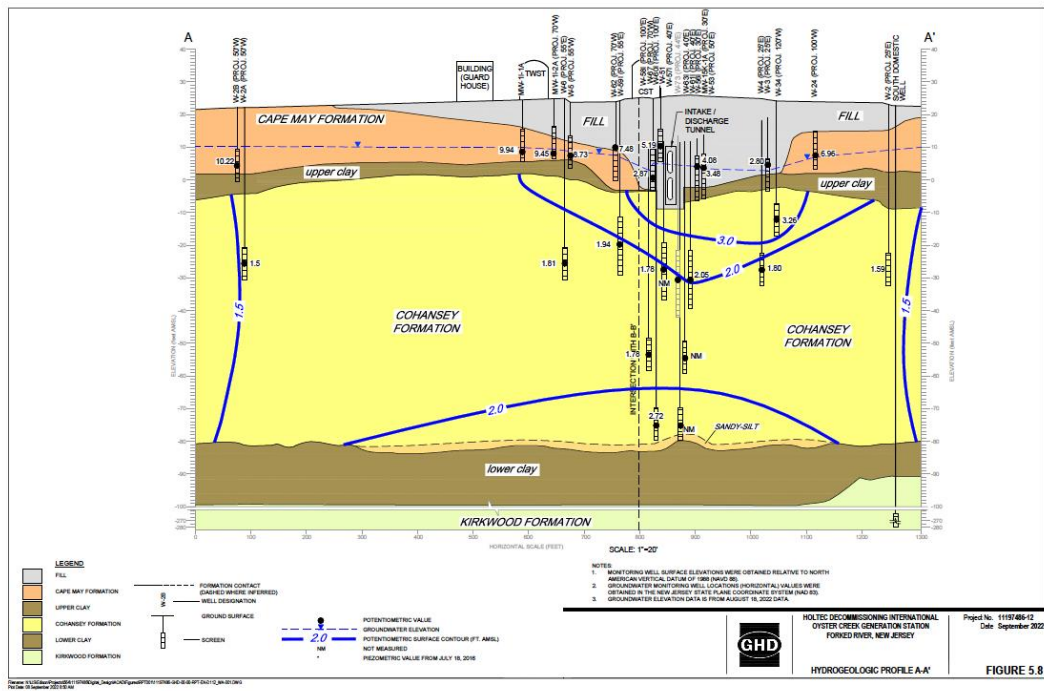


圖 4-21 (上) 與圖 4-22 (下) 顯示地下水在 Cape May 與 Cohansey 地層間直接排放至運河

垂向水力梯度 (Vertical Hydraulic Gradients)

GHD 根據現有井數據計算了廠址內之垂向水力梯度 (vertical hydraulic gradient)，在 Cape May 與 Cohansey 地層之間，呈向下的垂向水力梯度，但於上層黏土層缺失區 (如 PA 區與運河附近) 則不明顯。圖 4-21 與圖 4-22 顯示此梯度及兩地層間的地下水流動。在 Cohansey 與 Kirkwood 地層之間，則呈向上的垂向水力梯度。根據成對井 (如 W-1C/W-1K、W-2C/W-2K、W-3C/W-3K、W-4C/W-4K、W-5C/W-5K) 水頭差異，可見整個場址存在一致的上升梯度，顯示 Kirkwood 含水層為受壓狀態。地下水位資料證實 Cape May–Cohansey 含水層與 Kirkwood 含水層在水力上並不連通。此情況亦未受停機影響。

地下水流速 (Groundwater Flow Velocity)

水平水力梯度為根據 2021 年 10 月 19–20 日之監測資料計算。如下：

在 Cape May 地層，地下水整體由東向西流過電廠馬蹄形區域，但圖 4-15 顯示局部變化，包括渦輪機建築下方水力低點，以及靠近取水與排水運河的北向與南向流動。水平梯度介於 0.01–0.04 英尺。根據監測井 W-50 之抽水試驗，水力傳導係數 (hydraulic conductivity) 為 24.62 英尺/日，與過去瞬變試驗所得結果一致。根據此值與有效孔隙

率 0.25 計算，Cape May 地層平均線性流速約為每年 300 英呎（中央區域）至 1800 英呎（靠近取水運河區域）。

在 Cohansey 地層，水平梯度呈放射狀，南側最陡，向排水運河流動；向西與西北方向梯度較緩。依據抽水試驗結果，其水力傳導係數為 2.7×10^{-4} 英呎／秒。以平均孔隙率 0.25 計算，Cohansey 地層地下水平均線性流速約為每年 100 英呎（中央區）至 550 英呎（靠近取水運河）。

在 Kirkwood 地層，地下水整體由西南向東北流動，流向海洋。其水平水力梯度於電廠對面的 JCP&L Back Site 區域（橫跨美國 9 號公路）約為 0.003 英呎。

(ii) 地下水水質 groundwater quality

核電廠於 2016 至 2021 年間近期監測事件的地下水採樣結果。其中針對地下水與地表水採樣中，氚 (tritium) 及目標放射性核種 (target radionuclides) 的分析結果均記錄最新完整採樣事件之氚濃度與目標放射性核種資料。

地下水中氚分析結果顯示，所有樣品中的氚濃度均低於美國環保署 (USEPA) 飲用水標準 20,000 pCi/L。在地下水樣品中未檢出與核電廠許可運轉相關的伽瑪放射性核種 (gamma-emitting radionuclides)。此外，銫-89/90 (strontium-89/90) 濃度亦未超過 2.0 pCi/L 的最低可檢出

限值(lower limit of detection, 簡稱 LLD)。地下水調查(2006–2021 年)採集之地下水樣品目標放射性核種結果,伽瑪放射性核種的濃度均未超過各自的最低可檢出限值。

(iii)地表水水質(surface water quality)

核電廠於 2021 年進行地表水採樣,分析項目包括氡與目標放射性核種。2021 年所採集的地表水樣品,包括取自三個監測站(SW-1、SW-2、SW-3),氡濃度均未超過 200 pCi/L 的最低可檢出限值。伽瑪放射性目標核種的濃度均未超過其各自的最低可檢出限值。

(6) 曝露途徑評估(exposure pathway assessment)

在評估地下水中之氡時,需要確認潛在曝露途徑(potential exposure pathways)與潛在受體(potential receptors),因此考量三種潛在曝露途徑包括以下:

- 廠址內地下水遷移至飲用水使用者
- 地下水離開廠址遷移至私人與公共地下水使用者
- 地下水離開廠址遷移至地表水體

評估電廠內潛在之地下水遷移至飲用水使用者,是依據電廠民生供水井所採集之地下水樣與自地下水至飲用水之潛在曝露途徑不完整。

因此，此潛在曝露途徑未有相關之曝露風險。潛在地下水遷移至廠外飲用水使用者之潛在曝露途徑，根據此次調查結果雖然存在潛在曝露途徑，但此曝露途徑不完整。因此，就任何廠外飲用水使用者之飲用地下水並未有曝露風險。針對潛在地下水離開廠址遷移至地表水體，根據調查結果，雖然存在潛在完整的曝露途徑，因 REMP 執行之地表水採樣結果，顯示 Oyster Creek 或 Barnegat Bay 的地表水中未有與電廠運轉相關之放射性物質，因此此一潛在曝露途徑未有曝露風險。

潛在的氚曝露途徑

評估來自廠區的氚在地下水的三條潛在曝露途徑為：

- 潛在之地下水遷移至電廠的可飲用供水井
- 潛在之地下水離開廠址遷移至私人與公共飲用水使用者
- 潛在之地下水離開廠址遷移至地表水使用者。

三種途徑中的兩種途徑潛在之地下水遷移至電廠的可飲用供水井，以及潛在之地下水離開廠址遷移至私人與公共飲用水使用者，潛在曝露途徑不完整。自放水運河（route 9 橋）採集水樣之分析資料顯示，第三種潛在途徑，即地下水離開廠址遷移至地表水使用者，曝露途徑不完整。此次調查之地下水與地表水資料，任何潛在受體皆不面臨曝露於高於美國環保署（USEPA）飲用水標準（20,000 pCi/L）之氚濃度的風

險。2021 年 RGPP 報告中的結論為：Oyster Creek 電廠之運轉與除役未對廠址邊界之外的環境造成不利的放射性影響。

目標放射性核種 (Target Radionuclides)

放射性物質由環境傳輸至受體的曝露途徑為吸入 (inhalation)、攝入 (ingestion) 與直接輻射 (direct radiation)。曝露途徑是指殘餘放射性自來源經由環境到達受體可能的途徑。曝露途徑可能相當簡單且直接 (例如：表土中的殘餘放射性發出伽瑪輻射，導致站立於該土壤上的個體直接曝露)，亦可相當複雜且間接 (例如：表土中的殘餘放射性滲入 leaches 出至非飽和土壤層，並傳輸至下一含水層，而自含水層取水作為飲用水時，則導致攝入地下水之個體遭受到曝露)。

殘餘放射性物質 (residual radioactivity) 的曝露途徑通常依受曝個體與存在於環境介質之互動方式，分為三大類：攝入 (ingestion)、吸入 (inhalation) 與外部輻射曝露 (external radiation exposure)。雖然放射性核種可經由多種途徑到達人體，但某些途徑所造成的劑量大於其他途徑。關鍵途徑 (critical pathway) 係指對於特定放射性核物種，對整體族群或稱為關鍵族群 (critical group) 的特定族群造成最大劑量之曝露路徑。關鍵族群可能因之不同放射性核種、族群之年齡與飲食或其他文化因素而有所不同。劑量 (dose) 可以是針對全身或特定器官；而接受

最大劑量比例的器官稱為關鍵器官。目前已採集之地下水與地表水樣之目標放射性核種之濃度均未高於其各自的 LLD。

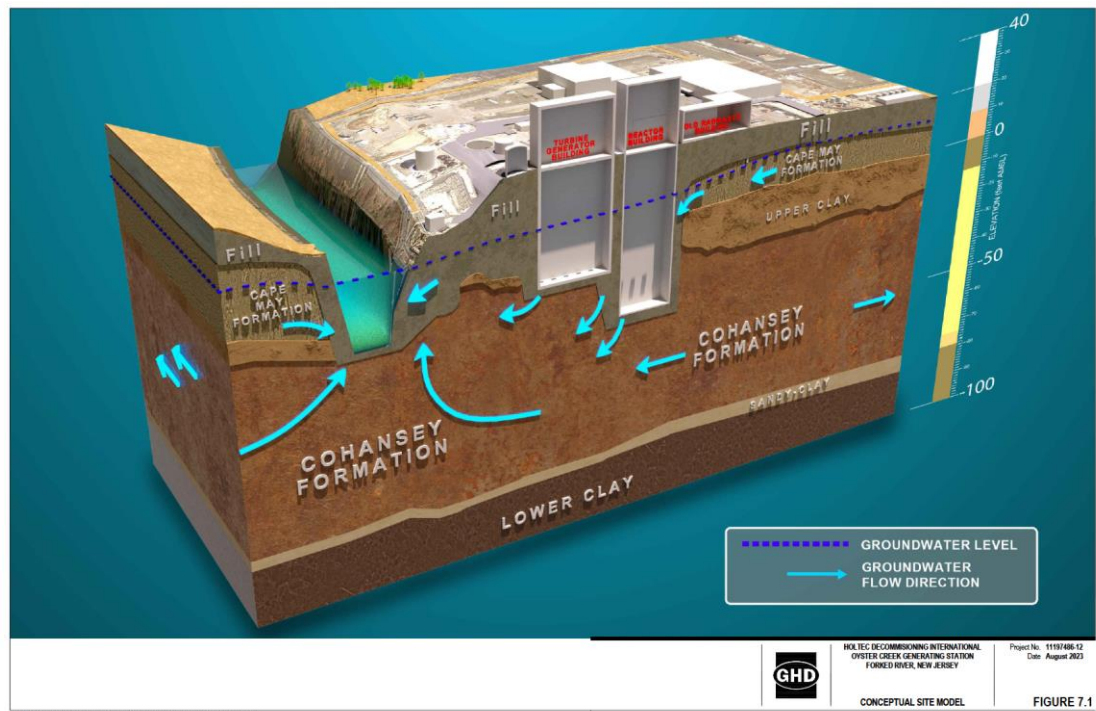
(7)概念廠址模式(conceptual site model)

GHD 對該廠建立地下水與氚遷移的概念廠址模式，如圖 4-23。

- 地層配置(由上而下):表層回填層(fill)／Cape May → Cohansey (主要淺層含水層) → Lower Clay。
- 人為改變:反應器/渦輪機建物與進排水隧道、運河在施工時穿透上部黏土層，四周以回填料補實，造成 Cape May 與 Cohansey 之間水力連通；回填層成為優先傳輸路徑。
- 地下水位與流向:圖中藍綠色平面為地下水位面，藍色箭頭示流向。廠內由四周向運河匯流(馬蹄形運河作為主要排出/匯水區與水力屏障)。
- 氚的來源與遷移:2009 年冷凝水系統地下管線滲漏後，氚先進入回填層與 Cape May，沿建物基礎側向移動，並經被穿透的上部黏土層局部垂向進入 Cohansey；隨地下水匯向運河。抽取井 W-73 (2010–2018) 與管線更新後，氚濃度大幅下降。
- 因 Lower Clay 隔離使向下遷移的驅動力不足，故廠內外飲用水井(kirkwood)未受影響。

- 監測井網顯示氡濃度已非檢出或遠低於飲用水標準 20,000 pCi/L；廠外地表水（oyster creek/barnegat bay）與飲用水監測未見與電廠營運相關的活動。

廠內地下水主要受運河與工程構造控制，氡曾沿回填層經 Cohansey 匯流至運河，但在下部黏土與 Kirkwood 受壓的保護下未向深部擴散，且整治與更新後濃度已大幅降低。



圖片來源: Holtec Decommissioning International (2022), Figure 7.1
圖 4-23 概念廠址模式

(8) 結論

依 NEI 07-07 定期檢討結果，廠址自 2006 年以來之水文地質、工程擾動、既往外洩/整治與概念模式均已檢視更新：地下水流向受反

應器/渦輪機建物與進排水隧道、運河等人為構造控制，Cape May 匯流並排入運河，Cohansey 自廠區中心向外發散且西側淺部亦排入運河，Kirkwood 則向東流往 Barnegat Bay；水質方面，自 2015/4 起監測井氚均低於 EPA 飲用水標準，4 口飲用井氚皆未檢出 (<LLD)，與持照運轉相關之 γ 核種與 Sr-89/90 亦未逾各自 LLD；地表水僅 2019/4/17 於 SW-2 檢測為 211 pCi/L (略高於 LLD 200 pCi/L) 之單一結果，其後樣品與其他數百件樣品皆未檢出。綜合判定：廠址無持續性放射性排放進入地下水，氚未超過可檢出濃度，依既定曝露途徑評估無曝露風險；另無需新增需進一步評估區域(AFE)，2016–2021 無影響地下水流動之重大地下工程，廠外地下水使用無重大變更，2016–2021/10 無通報之放射性外釋，且目前無進行中的放射性整治行動。

(9)建議

GHD 建議在電廠應執行並完成的各項工作包括：根據本次水文地質調查結果，資料完整；在地下水監測方面，建議電廠依現行 RGPP 與 NEI 07-07 持續對選定採樣位置進行例行監測；在地表水監測方面，建議電廠亦依 NEI 07-07 持續執行 RGPP 採樣。

4.3 Wolsong 核電廠

1. 研究背景與目的

核電廠在正常運行過程中會產生液態放射性物質，其中一小部分會依計畫嚴格監測與管制後定期排放至環境中，確保對公共健康與環境的影響維持在合理可行的最低水平。然而，美國近年報告指出多起核電廠因系統、結構與組件(SSC)或操作過程中發生洩漏，導致液態放射性物質的非計劃性外釋，進而造成廠址內地下水受到放射性物質，特別是氚(tritium)的污染。

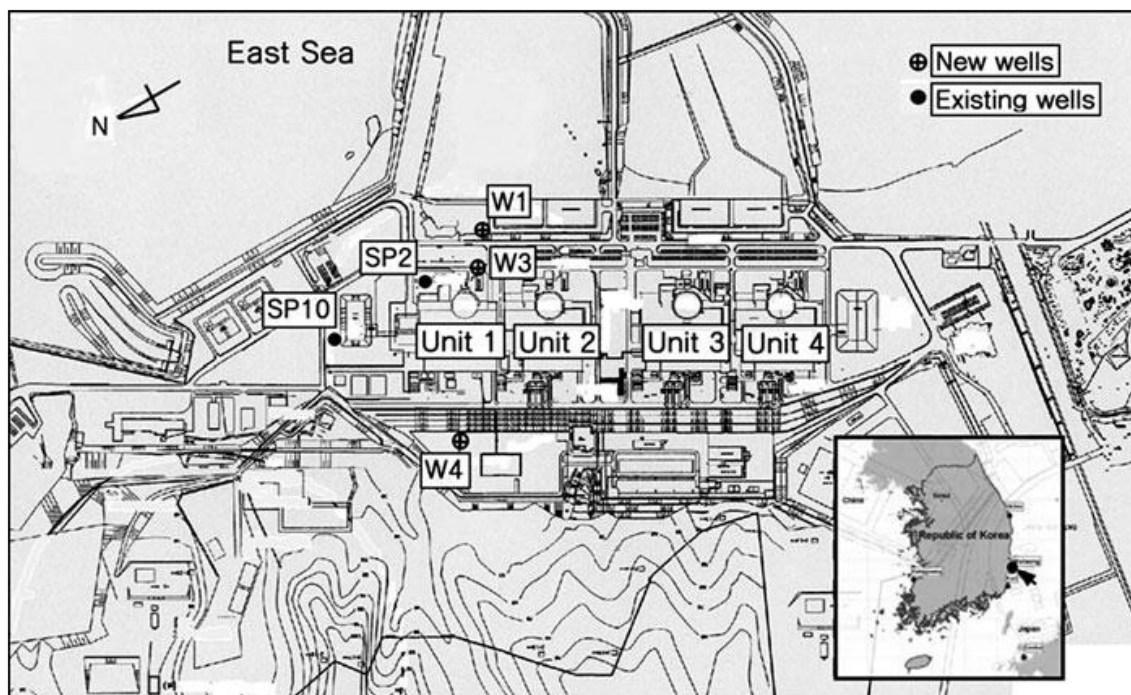
雖然美國核管會的調查結果顯示，這些非計劃性外釋對公共健康的影響可忽略不計，但社會大眾仍擔心放射性污染物可能在未受監測的情況下向廠區外擴散。此外，為了讓核電廠在除役時達到法規要求的輻射殘留標準，必須進行地下水與土壤整治，對除役的時程與成本可能造成影響。

為了回應大眾的關注，NEI 於 2007 年發布 NEI 07-07 地下水防護倡議，要求所有核電廠建立廠址內的地下水防護計畫，並提供利害關係人溝通指引。同時，電力研究院(EPRI)也發布技術指導方針，建議必須基於對廠址內地下水流動的充分理解，並合理預測非計劃性外釋的潛在影響，才能及時且有效地監測與控制地下水污染。

在韓國地下水防護計畫仍處於早期階段，相關廠址正進行基礎調查。該文章以 Wolsong 1 號機組為例，利用廠址地質與水文資料，模擬氙在地下水中的遷移行為，評估非計劃性外釋的潛在環境影響，並為建立韓國核電廠廠址地下水防護計畫提供決策依據。

2. Wolsong 廠址概要與水文地質

Wolsong 位於韓國半島東南部，共有四座加拿大重水反應爐 CANDU 機組，包括第 1 與第 2 機組 (plant 1) 以及第 3 與第 4 機組 (plant 2)。在 2008 年 6 月，除了在第 1 機組建設期間已設置的 SP2 與 SP10 兩口監測井之外，又新增了 W1、W3 與 W4 共 3 口監測井：其中 W1 位於第 1 機組泵浦站 (pump house) 入口，W3 位於第 1 機組用過核燃料建築 (spent fuel building) 前方道路旁，W4 位於第 1 機組後方山坡上，SP2 位於第 1 機組入口，SP10 則位於第 1 機組保健物理中心 (health physics center) 前方，如圖 4-24 所示。



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 1

圖 4-24 Wolsong 場址配置與監測井設置位置圖

新生代第三紀火山雜岩體曾侵入並噴發至中生代白堊紀的變質沉積岩之中，因此第 3 與第 4 機組建設期間繪製的地質圖顯示，安山岩 (andesite)、石英安山岩 (quartz-andesite) 及石英閃長岩 (quartz-diorite) 等岩層分布於頁岩 (argillites) 之上。此外，白堊紀晚期與第三紀期間的大規模火山活動對岩體施加高應力，導致岩層中形成發育良好的裂隙，使廠址周圍斷層系統呈現高度複雜的分布特徵。2008 年設置的 W1、W3 與 W4 監測井的岩心資料也顯示相同地質特徵，頁岩為主要岩層，部分區段有安山岩侵入，且由於裂隙高度發育導致岩層品質較差。

在水文特徵方面，針對 3 口監測井 W1、W3 與 W4 進行水文試

驗，結果如表 4-5 所示。其中對基岩進行的 Lugeon 試驗所得的水力傳導係數係數 (hydraulic conductivity) 分別為 W1： 3.77×10^{-6} cm/sec，W3： 6.22×10^{-6} cm/sec，W4： 5.53×10^{-5} cm/sec；對風化帶進行的微水試驗所得的水力傳導係數為 W1： 1.01×10^{-4} cm/sec，W3： 1.49×10^{-4} cm/sec，W4： 2.57×10^{-5} cm/sec，由於風化帶內裂隙與節理發育，水力傳導係數係數明顯高於基岩層。

此外，利用自動水位測量系統，監測 2008 年 7 月至 2009 年 6 月地下水位變化，結果彙整於表 4-6，為後續地下水流動與氙遷移數值模擬提供基本水文參考依據。

表 4-5 監測井基本資訊及量測之水力傳導係數

Well no.	W1	W3	SP2	SP10	W4
Ground height (EL. m)	7.0	12.0	12.5	12.4	35.0
Boring depth (m)	20.0	20.0	18.2	37.8	48.0
Boring ending depth (EL. m)	-13.0	-13.0	-5.7	-25.9	-13.0
Hydraulic test (cm/sec)	3.77×10^{-5}	6.22×10^{-6}	-	-	5.53×10^{-5}
Slug test (cm/sec)	1.01×10^{-4}	1.49×10^{-4}	-	-	2.57×10^{-5}

資料來源: Sohn et al. (2013), Table 1

表 4-6 監測井地下水位長期變化分析 (2008/07 - 2009/06)

Well No.	W1	W3	SP2	SP10	W4
Dry season average level (EL./m)	3.68	3.10	3.77	1.12	9.06
Rainy season average level (EL./m)	4.27	4.40	4.02	1.23	10.76
Automatic level measuring system installation depth (EL./m)	-10.4	-10.2	-5.5	-9.6	5.0

資料來源: Sohn et al. (2013), Table 2

3. 數值模擬

該文章使用商業軟體 MODFLOW-2000 進行地下水流與地下水中氙遷移的數值模擬。程式採用有限差分法，能在考慮地下水分布與流動變化的情況下，模擬非受壓含水層(unconfined aquifer)中的地下水流動，並且適用於穩態與非穩態條件。

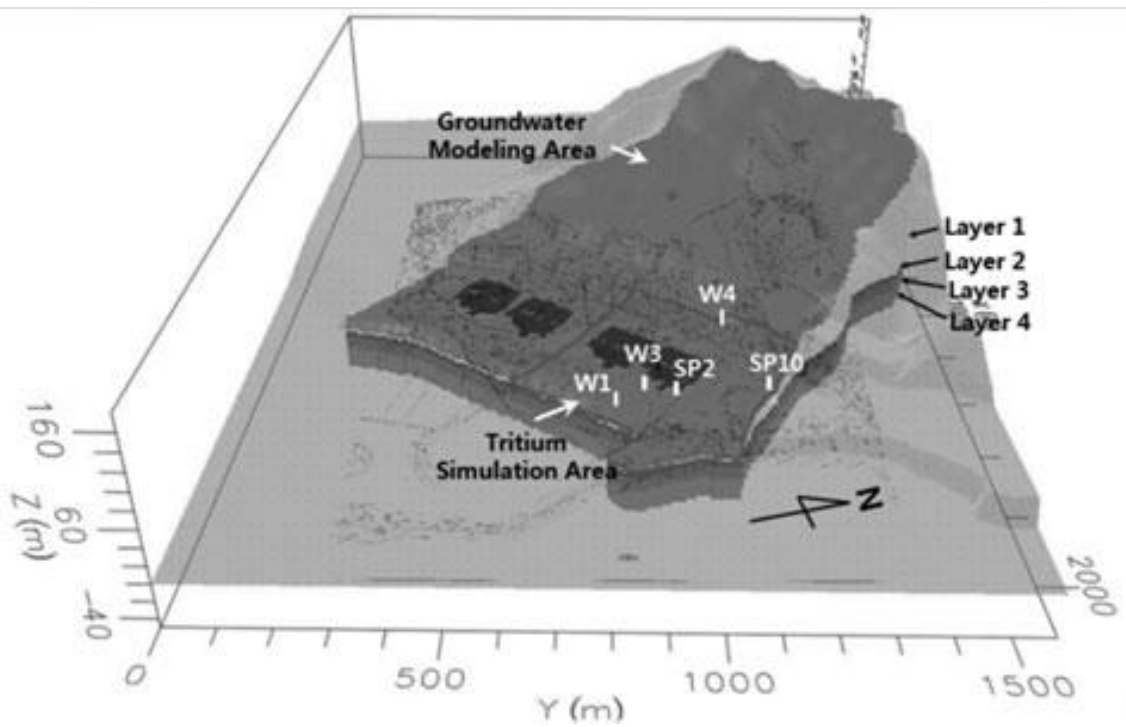
模擬過程可以考慮抽水、地表水補注、地下水蒸發以及與地表水交互作用等影響因素，亦可模擬非均質與具異向性介質中的地下水流動，而對於具有裂隙的岩層(通常非均質且具異向性)同樣適用。

(1) 地下水流模擬

地下水流模型範圍為 1500 m × 1400 m，格網間距為 10 m。模擬範圍包含整個 Wolsong 廠址以及廠址邊界與山脊部分，邊界在臨海側沿海岸線劃定，其餘部分沿山脊劃定。因此，模型的上游與側向邊界均設為無流量邊界 (no-flow boundary)。

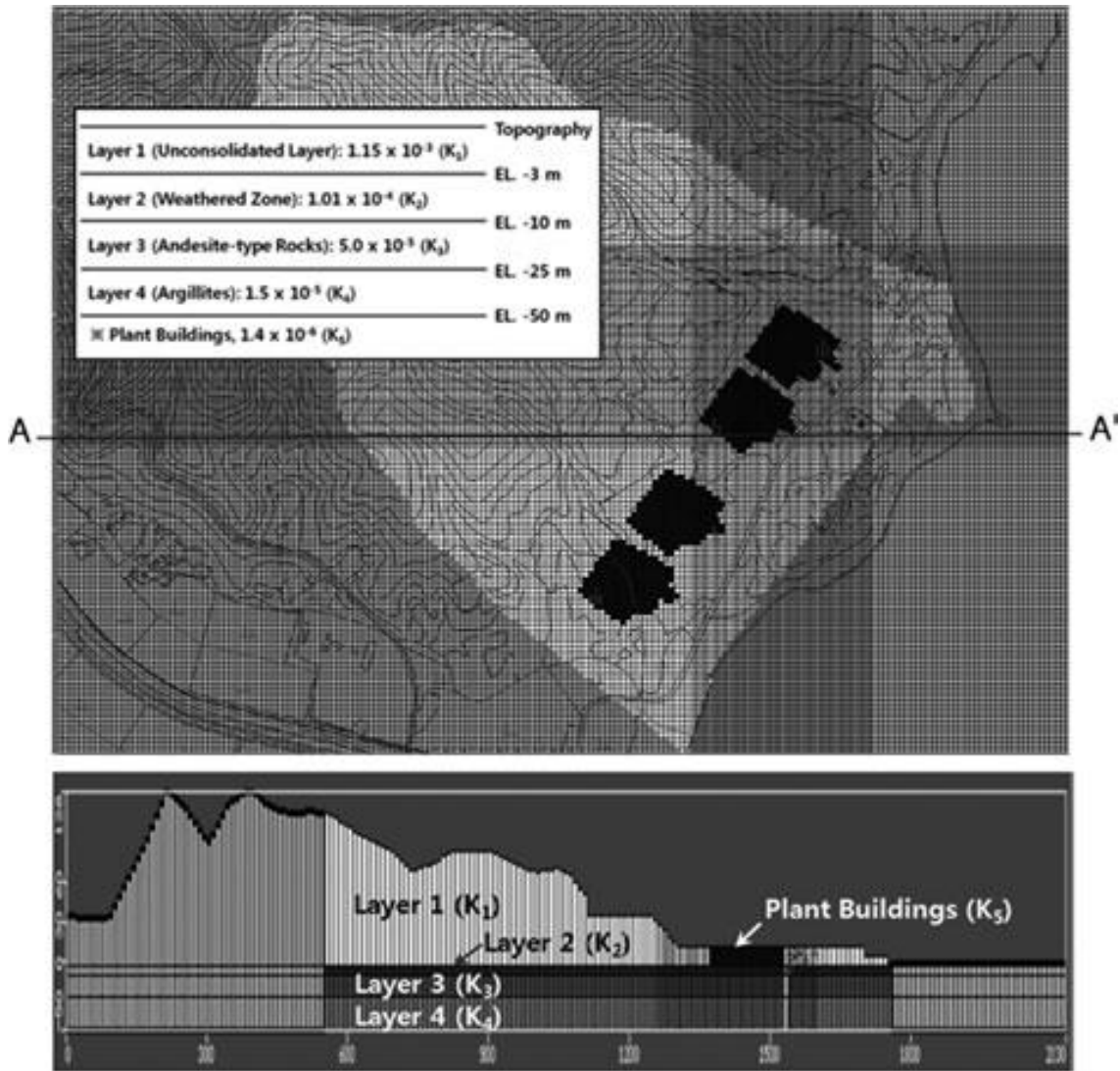
地下水模擬區域的三維配置如圖 4-25 所示，範圍包含廠區周邊地表地形、5 口地下水監測井位置以及氙遷移模擬的涵蓋區域。模型建置所依據的地層資料主要來自 Wolsong 核電廠建廠期間的地質調查成果與監測井岩心記錄，並據此將廠址模型劃分為 4 個地層，由地表向下依序為：由人工填築形成的回填層，其下為受風化作用影響的風化帶，

母岩組成以安山岩為主；再往下為主要的安山岩岩層，包括安山岩斑岩、安山岩、石英安山岩與石英閃長岩等不同岩性組成；最底部則為頁岩層。模型各地層的空間分佈與厚度變化如圖 4-26 所示。



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 3

圖 4-25 Wolsong 場址配置與監測井設置位置圖



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 4

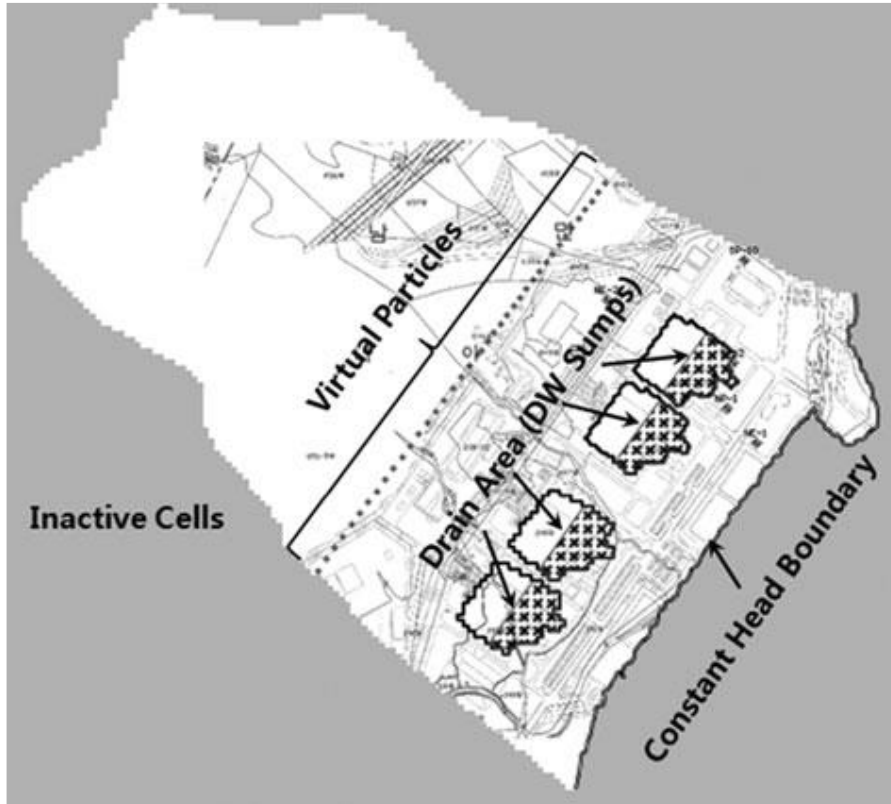
圖 4-26 模擬區域剖面圖及各層水力傳導係數

(2) 水力傳導係數

模型各分層的水力傳導係數初始值依據前述的含水層試驗結果設定，並透過模擬地下水位與監測井實測水位進行比對與校正，最終得到較佳符合之參數。回填層(第 1 層)水力傳導係數為 1.15×10^{-3} cm/sec；風化帶(第 2 層)為 1.01×10^{-4} cm/sec；安山岩裂隙層(第 3 層)為 $5.0 \times$

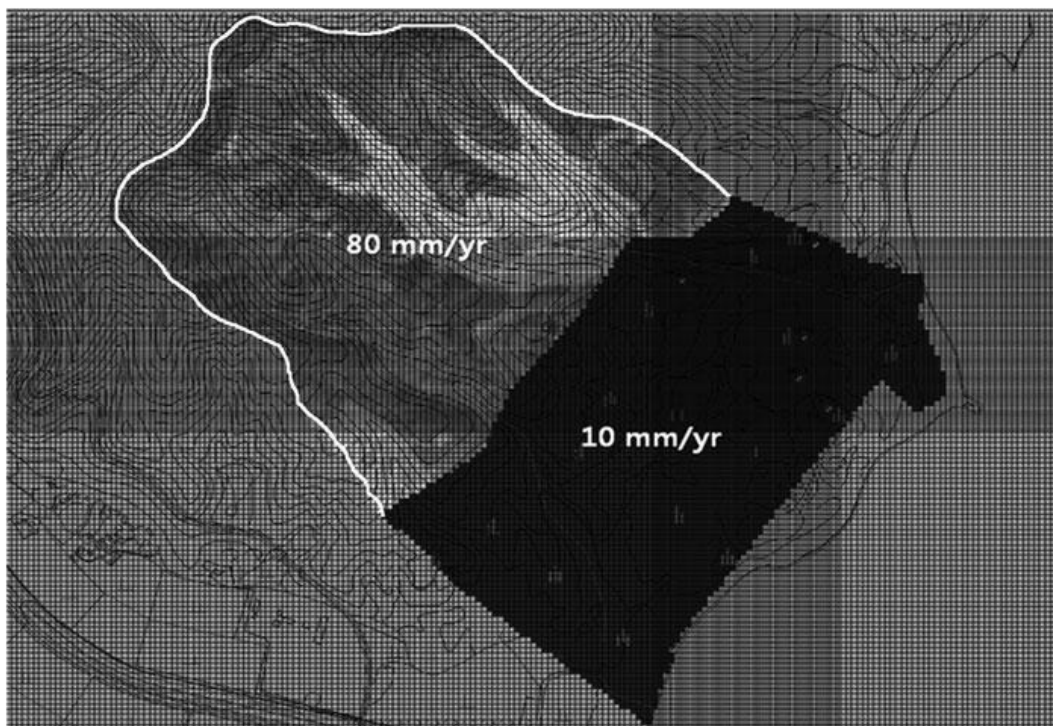
10^{-5} cm/sec；頁岩層(第 4 層)為 1.5×10^{-5} cm/sec；而廠房建築下方因地質受切削與覆蓋結構影響，其水力傳導係數係數假設為 1.4×10^{-6} cm/sec。模型邊界條件如圖 4-27，臨海側設定為海平面高度 EL. 0 m 的定水頭邊界，其餘三側沿山脊劃定為無流量邊界，邊界之外則為非活化單元。

集水井 (dewatering sumps) 為設置於廠房下方 EL. 1 m 之地下水集水井系統，主要用以長期截集並排除滲入廠區建築底部的地下水。為模擬其排水效應，模型中使用排水模組將廠房區域一半面積設定為導水率 $200 \text{ m}^2/\text{day}$ 的排水單元。為分析地下水流經廠房後排入海洋之路徑，於廠房上游配置 40 個粒子進行流跡追蹤。補注條件如圖 4-28 所示，山區裸露地表補注率設定為 80 mm/year ，約為年有效降水量之 10%；其餘大部分鋪設瀝青或建築物覆蓋區域則設定為低補注區，補注率為 10 mm/year 。



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 5

圖 4-27 邊界與排水條件及粒子追蹤設定示意圖



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 6

圖 4-28 模擬區域地下水補注區劃分

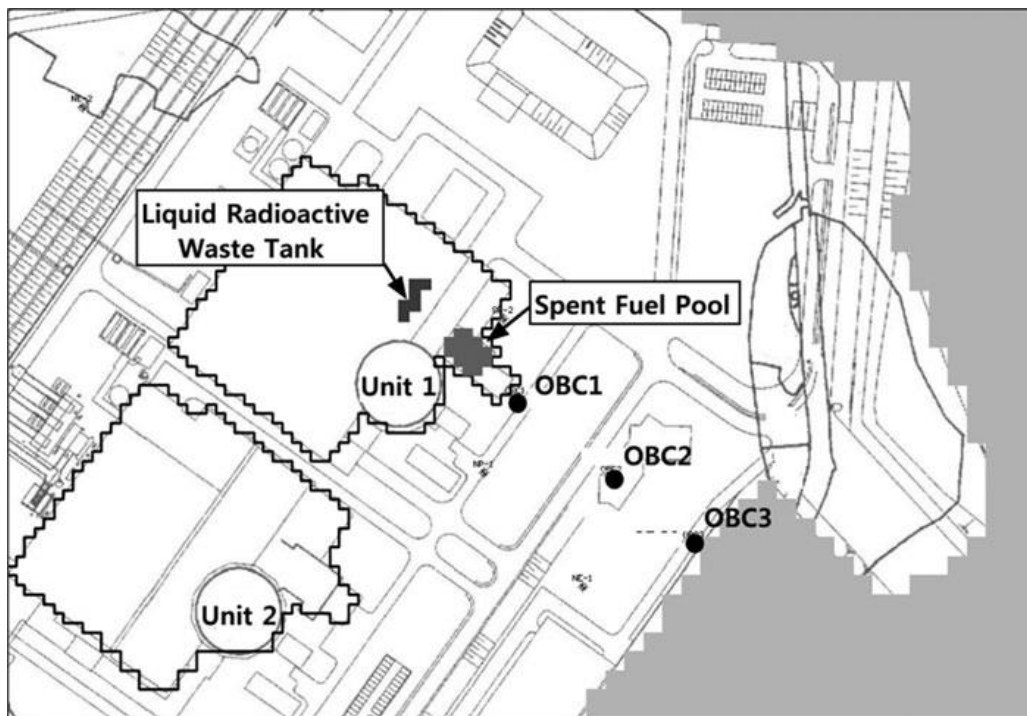
(3) 氙遷移模擬設定

氙遷移模擬範圍設定為 680 m × 640 m，格網間距 5 m，較地下水流動模型的網格更為精細，以準確描述氙在地下水中的移動行為。此模擬範圍包含了 Wolsong 1 號機組的所有監測井、廠址邊界與部分山體，邊界條件的設定分別為：西南邊界沿粒子追蹤路徑劃定，西北邊界沿第 1 層地下水位 10 m 等水位線劃定，東北邊界與地下水流動模型的邊界一致，東南邊界則在海岸線上並設定為定水頭邊界，如圖 4-27 所示。

在氙洩漏模擬設計中，首先假設廠區集水井正常運作，並設定兩種可能的污染來源：一是來自液態放射性物質儲存槽 (liquid radioactive waste tank, 簡稱 LRWT)，二是來自用過核燃料儲存池 (spent fuel pool, 簡稱 SFP)。這兩處為最可能發生洩漏的位置，因過去研究指出，地上儲槽、埋地管線及用過核燃料儲存池是核電廠內最易出現滲漏的系統與構件。氙濃度則採用實際監測值，LRWT 為 2.92×10^9 Bq/L，SFP 則為 1.65×10^{10} Bq/L。為了評估排水系統停止運作後對氙遷移的影響，該文章亦模擬集水井關閉的情況。因此整體共設計四個情境：情境 1 為 LRWT 洩漏且集水井開啟、情境 2 為 SFP 洩漏且集水井開啟、情境 3 與情境 4 則分別為 LRWT 與 SFP 洩漏、但集水井關閉。

模擬均設定最大模擬時間為 15 年，LRWT 與 SFP 的洩漏流量

分別為 52.73 m³/day 和 32.02 m³/day，氙在模型中視為不會被含水層吸附，並依一階衰變行為進行計算。為了掌握氙污染團從廠房向海岸推進的過程，在用過核燃料儲存池與海之間設置 3 口虛擬觀測井 OBC1、OBC2 與 OBC3，分別距離 SFP 約 35 公尺、100 公尺與 156 公尺，其中 OBC3 位於海岸邊界，其濃度代表污染團進入海水前的最終值。洩漏源與 3 個觀測井的配置如圖 4-29 所示。



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 7

圖 4-29 洩漏源與 OBC 虛擬觀測井位置示意圖

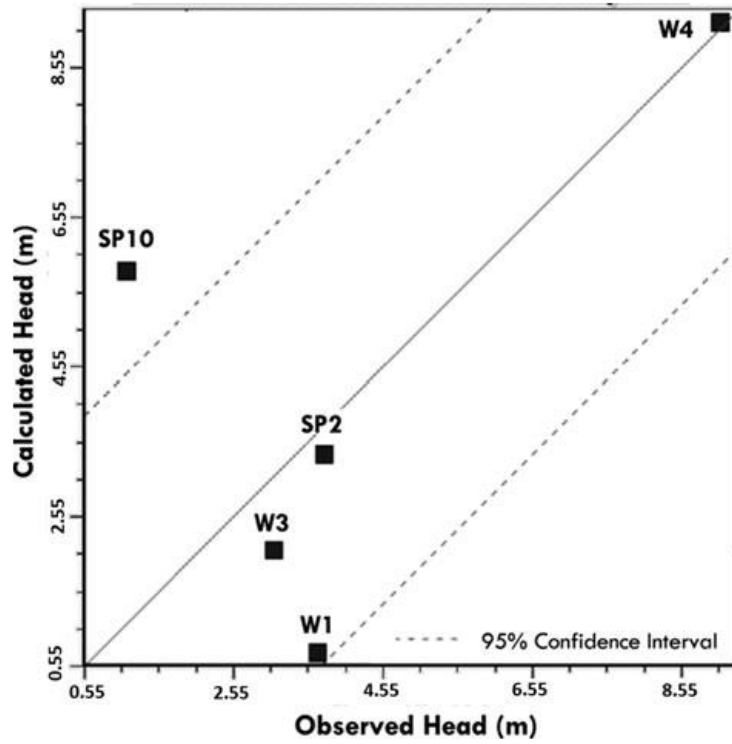
4. 結果與討論

(1) 地下水流動模擬

模型地下水位的模擬結果與監測井實測值整體吻合良好，除了 SP10 井之外，其餘井的模擬值皆在 95% 信心水準內，如圖 4-30 所示，顯示前述水力傳導係數設定合理。SP10 誤差較大，推測與其位置接近無流量邊界有關。

粒子追蹤結果顯示地下水主要由西北往東南流，最終全部流入海洋。在廠房建築區附近，因地層導水性較低，水流出現繞流現象，部分粒子進入建築下方後即被集水井抽走，無法回到含水層，表示抽水系統對流場具有控制作用。由於集水井排放最終仍排入環境水體，這些粒子亦視為進入海洋。

圖 4-31 顯示抽水影響隨深度遞減，因集水井設於 EL. 1 m，高度接近地表，因此對第 1 層作用最強，第 4 層最弱。整體而言，地下水流入海洋主要有兩條路徑：一條為沿廠區地表直接流向海岸，另一條則經建築區被集水井抽排後再排入海洋。計算得到的各層平均流速分別為：第 1 層 0.139 m/day、第 2 層 0.013 m/day、第 3 層 0.006 m/day，以及第 4 層 0.002 m/day。



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 8

圖 4-30 洩漏源與 OBC 虛擬觀測井位置示意圖



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 9

圖 4-31 洩漏源與 OBC 虛擬觀測井位置示意圖

(2) 氡污染模擬

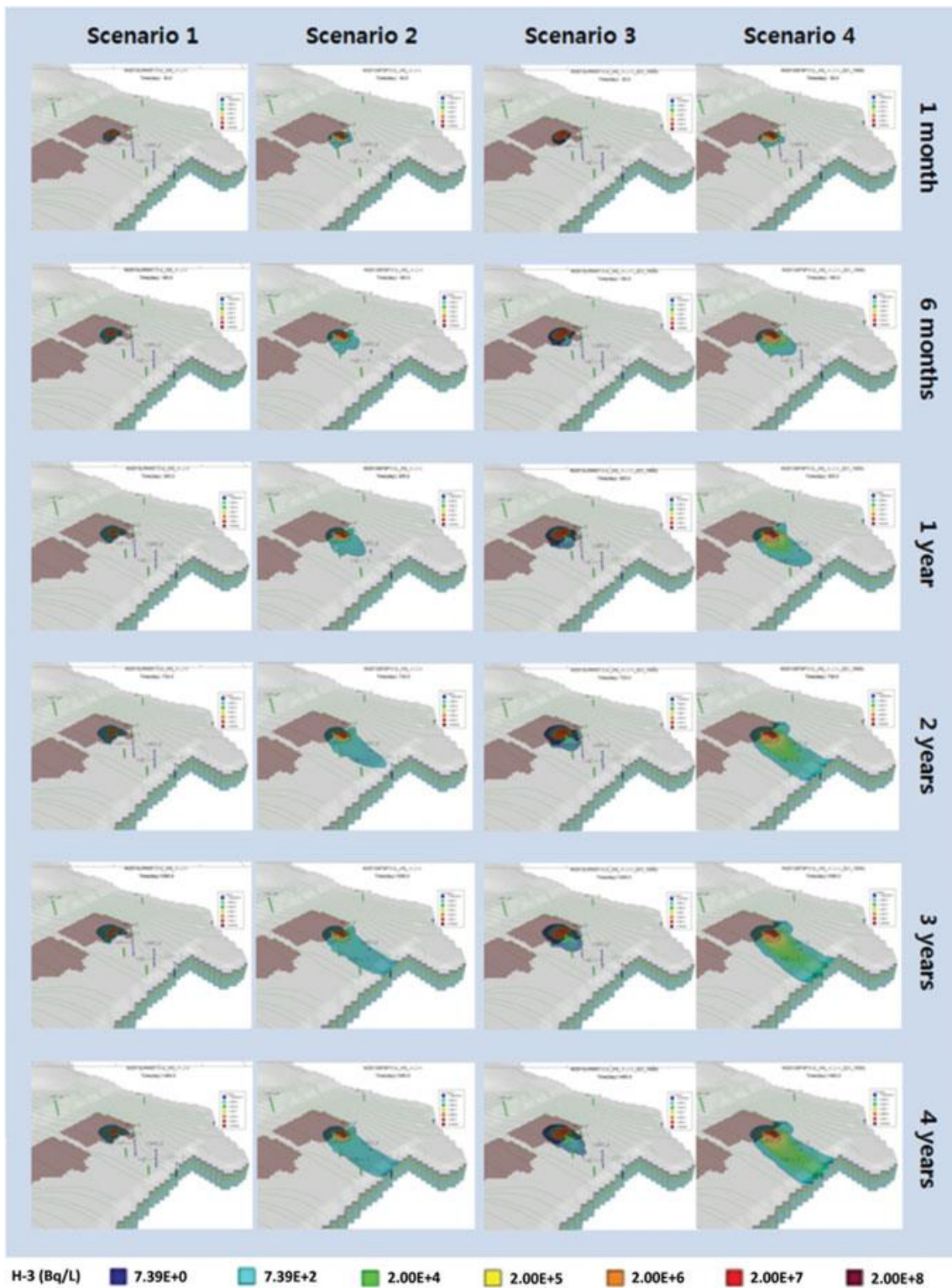
氡污染團在 4 種情境下於四種情境下氡污染團在地下水中的三維擴散情形如圖 4-32，模擬時間雖設定為 15 年，但氡濃度在第 4 年已趨於穩定，因此僅展示前 4 年結果。模擬結果發現，若洩漏來自 SFP 污染範圍會較大；若來源為 LRWT，範圍相對較小，原因是 LRWT 位於集水井附近，氡會被大量抽排截留。因此，在四種情境中，只有 SFP 洩漏（情境 2 與 4）會使污染團明顯接近海岸邊界。

集水井是否運作也明顯影響污染擴散速率。以 LRWT 為例，在集水井持續運作時（情境 1），污染團幾乎不擴散；一旦停止抽水（情境 3），氡會逐漸向下游擴散並到達 OBC2 觀測井。對於 SFP 洩漏而言，若集水井停止運作（情境 4），污染更快到達海岸邊界且濃度更高。

為比較 SFP 洩漏在不同排水條件下的差異，圖 4-33 顯示情境 2 與 4 的氡濃度變化，並與美國環保署飲用水最大污染物容許濃度（maximum contaminant limit，簡稱 MCL，其值為 7.04×10^2 Bq/L）與韓國液體放射性廢水排放標準（effluent control limit，簡稱 ECL，其值為 4.00×10^4 Bq/L）進行比較。結果顯示，集水井可有效降低污染濃度與擴散速度。在 OBC1 觀測井處，情境 2 與 4 的氡濃度分別趨近於 6.89×10^3 與 2.51×10^5 Bq/L；OBC2 則為 3.21×10^2 與 1.74×10^4

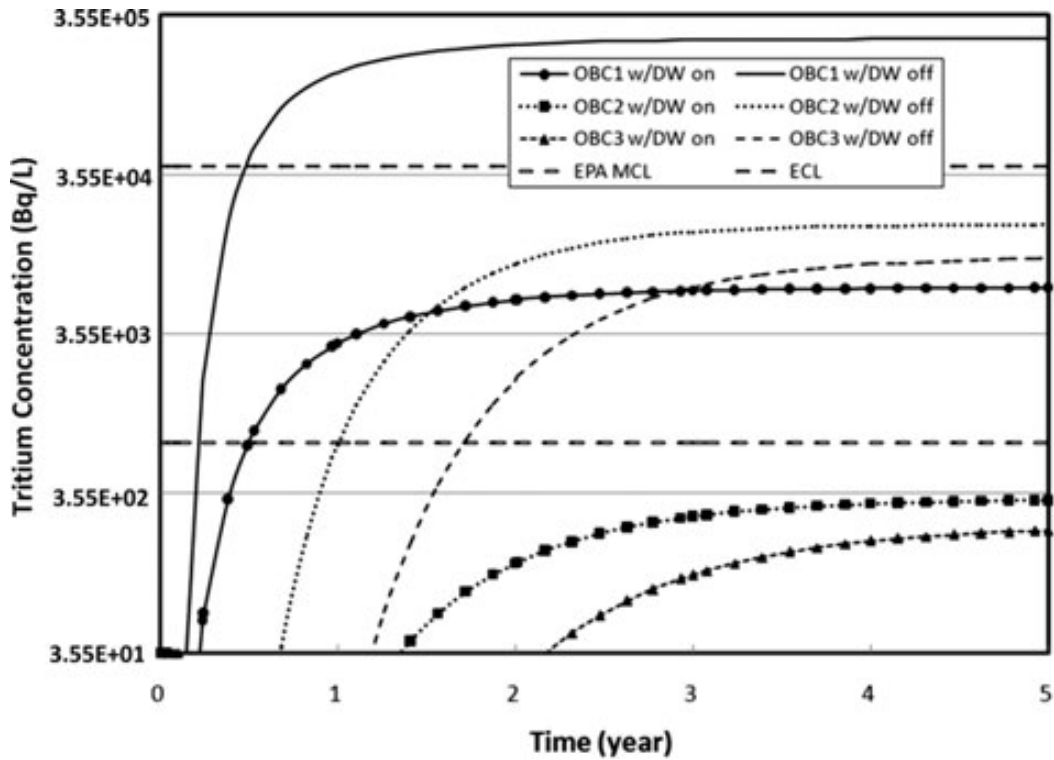
Bq/L；OBC3 則為 2.18×10^2 與 1.11×10^4 Bq/L。此外，觀測井濃度達到 MCL 的時間在情境 2 都比情境 4 更晚到達，例如 OBC1 約為 172 天，而情境 4 僅需 80 天，縮短約 53%，相關結果彙整於表 4-7。

整體來看，不論是否抽水，氚濃度到達海岸（OBC3）時皆低於韓國 ECL 標準；但若集水井停止運作，部分觀測井可能短期內超過 MCL。然而，由於 Wolsong 廠內持續抽水運轉，實際狀況出現超標的可能性不高。需要注意的是，目前僅有 5 口監測井，因此未來若增加監測資料，模型結果仍需進一步調整率定。



片來源: Sohn et al. (2013), Figure 11

圖 4-32 各地層地下水中氚遷移模擬結果



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 12

圖 4-33 情境 2 與情境 4 第 1 層虛擬井氚濃度隨時間變化圖

表 4-7 情境 2 與 4 虛擬井達到氚濃度標準所需時間與最終收斂濃度

Well ID	Time needed to observe the following tritium levels				Converged tritium concentration (Bq/L)	
	EPA MCL		Korean ECL		DW on	DW off
	DW* on	DW off	DW on	DW off		
OBC1	172 days	80 days	–	175 days	6.89×10^3	2.51×10^5
OBC2	–	366 days	–	–	3.21×10^2	1.74×10^4
OBC3	–	617 days	–	–	2.18×10^2	1.11×10^4

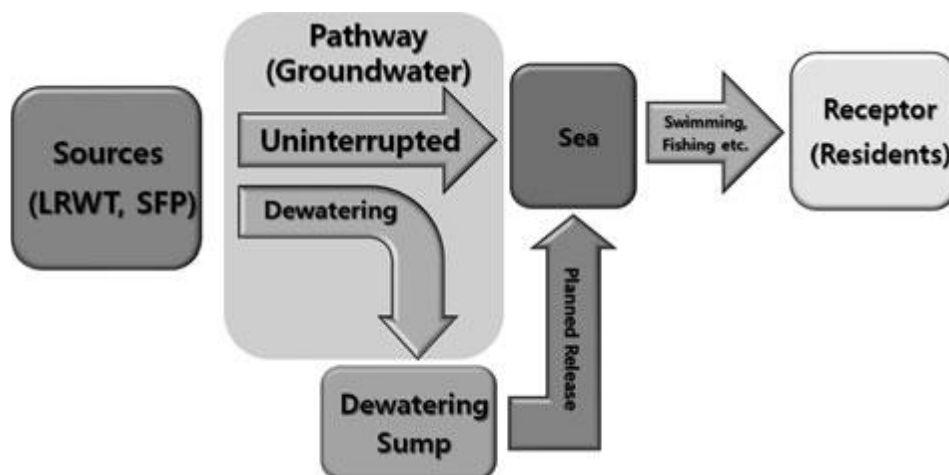
*Dewatering sumps.

資料來源: Sohn et al. (2013), Table 4

(3) 暴露途徑與劑量

根據研究結果建立 Wolsong 1 號機組的廠址概念模型，如圖 4-34 所示。該模型假設廠址內地下水不作為飲用水使用，居民唯一可能的暴

露途徑來自於海洋活動，如捕魚與游泳。如捕魚與游泳。然而，地下水進入海洋後會被大量海水稀釋，其輻射劑量貢獻極低，幾乎可忽略不計。在最嚴重的假設情境下，若 1 名成年人連續 1 年每天飲用 2 公升在情境 4 的 OBC3 處觀測到的最高氡濃度地下水 (1.11×10^4 Bq/L)，其年輻射劑量約為 0.15 mSv，仍遠低於年劑量標準(1 mSv/年)。然而該情境為假設最壞狀況，因為實際上集水井持續運作，且海岸邊無人居住，因此該劑量僅供參考之用。



圖片來源: Sohn et al. (2013), Figure 13

圖 4-34 Wolsong 1 號機組場址概念模型

5. 結論

該文章以 Wolsong 1 號機組為案例，利用 MODFLOW-2000 建立地下水流與氡遷移模式，模擬氡在含水層中的移動情形。模型僅使用五口監測井的資料來推估廠區地下水流動，因此結果仍受資料量限制，若未

來有更多監測數據或廠址條件改變，模擬結果亦需更新。

模擬結果顯示 3 項重要結論。首先，廠址內地下水最終皆流向海洋，表示氚若進入地下水系統，其可能曝露途徑主要來自海域活動，例如捕魚或游泳，而非經由地下水飲用途徑。其次，不論集水井是否持續運作，氚抵達海岸時的濃度均低於韓國 ECL 及美國環保署 MCL，且進入海水後會被海水大量稀釋，因此對民眾造成的輻射劑量風險極低。最後一項為集水井的抽水作用對污染擴散有明顯抑制效果，能有效降低氚污染團擴散速度，對於地下水防護是一項有利機制。

因此，在規畫 Wolsong 廠址或其他核電廠除役階段地下水防護計畫，建議保留及維持集水井運作，同時於遠離集水井的可能洩漏構件周圍增設監測井，亦可將集水井視為特定監測點，以提高污染監測範圍與早期預警能力。

4.4 NUREG-1757 的地表水與地下水特性調查

1. 介紹

本次研析 NUREG-1757 文件附錄 F 的中譯版本(Appendix F. Surface Water and Groundwater Characterization, NUREG 1757 Vol.2, Rev.2, July 2022, Consolidated Decommissioning Guidance: Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria – Final Report)，主要說明地表水與地下水特性調查的相關導則，內容可協助建立概念廠址模型(conceptual site model，簡稱 CSM)、進行劑量評估模型所需的水文參數，以及執行輻射調查以估算地下水中殘餘輻射造成的劑量。其中包括「地表水及地下水特性調查之規劃」、「發展概念廠址模型及數學模型」、「地下水中可能殘餘輻射之指標」、「地下水特性調查」、「監測實務及程序書」、「監測網及取樣頻度」、「地表水及沉積物」、「地質化學條件」、「佐助劑量模擬的地表水及地下水模型」、「發展較複雜模型的程式」、「使用在除役的典型程式」。

以下就各附錄章節重點條列說明：

2. 地表水及地下水特性調查之規劃

- (1) 持照者應以最大範圍與使用各階段調查所收集的資訊來規劃地表水及地下水的特性調查。

- (2) 此規劃應在除役過程的早期進行，以促進執照終止計畫 (license termination plan，簡稱 LTP) 的發展。
- (3) 在初步範疇界定調查期間，須要安裝額外的監測井並進行採樣，以確定地下水中殘餘輻射的性質和程度。
- (4) 對除役的目標是針對特性調查地下水中殘餘輻射的範圍及強度。

3. 發展概念廠址模型及數學模型

- (1) 概念廠址模型係廠址的污染源、地質、水文、化學、生物及人口等特性提供了一個假設的架構。
- (2) CSM 提供了解廠址的流量及傳輸的基礎。
- (3) 若地表水及地下水中有污染，則 CSM 是數值模型的起點，並應隨著新資訊而更新。
- (4) 概念模型助於將系統簡化來解釋複雜系統的行為。
- (5) 需對地面下情況進行適當的特性調查，以建構可解釋的水文地質概念模型執行劑量模擬。
- (6) 監測數據可用來確認地下水是否受到污染，以及評估與地下水流徑相關的潛在風險。持照者應透過收集更多監測數據與資訊，以降低曝露位置濃度的不確定度。

4. 地下水中可能殘餘輻射之指標

與地表下特性調查相關的作業，在很大程度上取決於地表下土壤或岩盤中的殘餘輻射程度，以及地下水系統中殘餘輻射的傳輸能力。對廠址歷史評估及廠址基礎設施的分析可提供地下水中潛在殘餘輻射的指標。

主要分為以下三類：

- (i) 高潛勢
- (ii) 中潛勢
- (iii) 低潛勢

5. 地下水特性調查

- (1) 地下水特性調查需包括所有重要的輻射成分，以及無機與有機成分及相關參數，應能適切確認污染物的範圍和濃度分佈、來源、遷移速率等。
- (2) 解析參數包括特定輻射核種濃度、所有疑似有外釋伽瑪之輻射核種的伽瑪能譜分析等。
- (3) 監測井的實際數量、位置及設計須視污染區的大小、污染物的類型及程度、背景地下水之水質、水文地質系統以及監測計畫的目標而定。
- (4) 廠址特性調查作業的規劃應提供監測井完工圖，說明標高、內、外

尺寸、套管類型、回填與密封類型、井篩類型及其位置與尺寸、鑽孔直徑與孔的標高與深度。

- (5) 在污染物垂直遷移顯著的廠址，應提供描繪地下水中污染物垂直分佈的水文地質橫截面。
- (6) 廠址特性調查計畫應充分取樣並分析廠址上游的地下水樣本，以建立代表性的背景地下水水質特性。
- (7) 若廠址附近存在廠址以外的污染源，持照者應評估其潛在影響，以確認對地下水污染的程度。

6. 監測實務及程序書

- (1) 廠址特性調查應包括所有地表水及地下水特性調查作業、方法及監測設施的描述，以證明數據能夠代表廠址狀況。
- (2) 含水層測試描述應包括組態、結果、假設、解析方法、程序、基線條件、限制、誤差及結果討論。

7. 監測網及取樣頻度

- (1) 監測井的數量與設置位置應根據以下來設計：
 - (i) 污染來源區
 - (ii) 緊鄰來源區的下游

(iii) 污染團邊緣

(iv) 管制邊界

- (2) 應在目標監測區域的高滲透區設置監測井。
- (3) 取樣頻率應根據污染物濃度的變化調整頻率。
- (4) 對大多數廠址，每季對每口井各取 1 次樣本即可反映水質的時間變化。
- (5) 在與廠外或潛在廠外污染的地下水來源的廠址，則可能須更頻繁取樣。

8. 地表水及沉積物

- (1) 地表水定義：包括池塘、小溪、河流、湖泊、潮汐水域、海洋等。
- (2) 廠內水體除役要求：廢水洩漏進地下水在運轉期間不需再次通報，但除役階段須依 NUREG 指導處理湖泊/池塘沉積物中殘餘輻射及地下水污染。
- (3) 廠外地表水處理：NRC (nuclear regulatory commission, 簡稱 NRC) 通常不要求除役處理，但可能需進行調查以評估潛在外釋污染；歷史數據可用於輔助判斷。
- (4) 背景樣本採集：應從上游或未受廠址影響區域採集背景地表水樣本。
- (5) 特殊取樣需求：必要時應進行分層地表水採樣與河川沉積物取樣，

以評估各成分間關係。

- (6) 除役期間，廠內的地下水中所有殘留輻射均須納入劑量評估及廠址外釋標準。
- (7) 持照者應在調查表上詳細記錄每個地表水與沉積物的取樣位置，並可利用地表水流動模型輔助估算污染物濃度或遷移情形。

9. 地質化學條件

- (1) 持照者應描述廠址的地球化學條件，包括固體組成、pH 值、氧化還原電位、吸附作用(Kd 值)等，這些因子會影響輻射與非輻射污染物的傳輸與去向。
- (2) 若 Kd 值對劑量評估關鍵，應進行個廠條件下的實驗測定；若不具關鍵性，可使用已發表文獻的通用數值範圍。

10. 支援劑量模擬的地表水及地下水模型 (Surface Water and Groundwater Models to Support Dose Modeling , NUREG-1757 Vol.2 附錄 F.10)

- (1) 地下水模型的選擇應視廠址水文地質條件與殘餘污染複雜性而定。
- (2) 對於簡單廠址，可使用如 DandD 程式的簡化模型。
- (3) 對於複雜廠址或有現存污染者，則應採用如 RESRAD-ONSITE 等

更複雜的流動與傳輸模型，並納入現存污染的影響以協助 DCGLs 的發展與劑量估算。

11.發展較複雜模型的程式

- (1) MODFLOW：模擬穩態與非穩態地下水流動。
- (2) MODFLOW-2005:可模擬不規則形狀流動系統中的穩態與非穩態流動；含水層可為受壓與不受壓的組合，並能模擬由外部壓力所造成的流動。
- (3) MT3DMS：模擬三維的地下水溶質傳輸，處理移流、擴散與化學反應，常與 MODFLOW 結合使用。
- (4) 進階模擬工具：對幾何形狀複雜之廠址，可使用 TOUGH2 或 PORFLOW 進行多相流體、多孔隙、非均質與化學反應模擬。

12.使用在除役的典型程式

RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE 是目前常用於除役劑量評估計算地下水濃度及相關劑量的程式。以下針對兩模式差異列表比較：

	RESRAD-ONSITE	RESRAD-OFFSITE
用途	廠址內井之地下水濃度計算	受體井(廠外)之地下水濃度計算

模型類型	質量平衡模型 + 非擴散模型	移流-擴散模型
移流	考慮 1 維移流	考慮 1 維移流
擴散	不考慮擴散	考慮飽和區之 3 維擴散與非飽和區之 1 維擴散
區域分割功能	無區域細分功能	可將非飽和區、飽和區與污染區分割為較小區域以提高模擬精度
子代可變傳輸速率 (衰變產生的子核種可有各自的傳輸參數)	可模擬	可模擬(兩種演算法: 親代與子代可變傳輸速率、模擬縱向擴散)
使用建議	適用於簡單場址, 擴散與子代傳輸影響不大時使用	當可變傳輸速率或縱向擴散為主導時, 建議選擇對應演算法, 必要時細分傳輸區域以提高精度

(1) RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE 之比對驗證 (廠內模擬)

(i) 模擬一致性可達成：

在調整參數以符合 RESRAD-ONSITE 概念模型後，RESRAD-OFFSITE (2.0 版) 能有效模擬 RESRAD-ONSITE 的結果。

(ii) 孔隙率差異設定：

初始模擬結果差異主要由於兩程式使用不同孔隙率設定，影響污染物傳送時間。

(iii) 遲滯因子處理方式：

雖然最新版本預設使用相同遲滯因子公式 (RESRAD - ONSITE 7.2 與 RESRAD - OFFSITE 4.0)，但 RESRAD-OFFSITE 4.0 仍保留早期開發的選項，可讓使用者自選切換不同遲滯因子公式。

(iv) 灌溉水模擬時間差異：

RESRAD-OFFSITE 模擬多年灌溉下的土壤累積，RESRAD-ONSITE 則僅考慮單一生長季節，導致水相依路徑模擬結果差異。

(2) RESRAD-OFFSITE 及其他與 PRESTO、MMSOILS、MEPAS 三個程式進行比對驗證。

(i) PRESTO 未考慮縱向擴散與子代可變傳輸率(衰變產生的子核種可有自己的傳輸參數)，因此在長距離與長時間的模擬下 (縱向擴散重要時) 結果與其他程式差異顯著，但在短距離情況下差異不大。

(ii) RESRAD-OFFSITE 早期開發模型在遲滯計算中僅考慮不動孔隙水 (即土壤孔隙中不隨地下水流動的水)，因此計算出的遲滯因子可能偏高。

(iii) 各程式對抽水井稀釋效應的處理不同，部分只考慮含水層濃度，RESRAD-OFFSITE 與 PRESTO 可考慮井中稀釋，並指出污染團與井的相對位置會影響污染物濃度的預測結果。

4.5 ASTM 場址概念模式建置

美國材料及試驗學會(American Society for Testing and Materials，簡稱 ASTM)的「ASTM E1689 Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites」提供建置污染場址的 CSM 標準指引，主要包括「1. Scope 適用範圍」、「2. Referenced Documents 參考文件」、「3. Terminology 專業術語」、「4. Summary of Guide 指引重點摘要」、「5. Significance and Use 重要性與用途」、「6. Procedure 步驟」、「7. Keywords 關鍵字」與「Appendix 附錄」；以下就各項目進行簡要說明。

1. 目的與適用範圍

指引目的在協助建置概念場/廠址模型，用以：(1)整合多種來源的技術資訊(technical information)；(2)用來支援(或佐證)為建立各種物質的背景濃度(background concentration)而選擇採樣位置的過程；(3)用以判定所需的資料類型，並作為規劃與執行資料收集活動的指引；(4)評估污染場址對人類與生態的風險；(5)適用於各類污染場址（含放射性污染場址）。

2. 參考文件

參考下列文件：

美國材料及試驗學會ASTM 標準

- (1) D2216 Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

美國環保署文件

- (2) Guidance for Data Useability in Risk Assessment (part A) Final, Publication 9285.7-09A, PB 92-963356, April 1992
- (3) Guidance for Data Useability in Risk Assessment (part B), OSWER Directive 9285.7-09B, May 1992
- (4) Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA, OSWER Directive 9355.3-01, October 1988

3. 專業術語

定義了包括背景濃度(background concentration)、概念場址模型(conceptual site model)、污染物(contaminants)、污染物排放(contaminant release)、環境受體(environmental receptor)、環境傳輸(environmental transport)、曝露途徑(exposure route)、遷移路徑(migration pathway)以及(污染)來源(source)。

4. 指引重點摘要

4.1 CSM 的 6 大工作項目(activity)：(1)辨識潛在污染物(potential

contaminants)；(2)污染來源與辨識特性分析 (identification and characterization of sources of contaminants)；(3)界定污染物在各種環境介質 (environmental media) 的潛在遷移路徑 (potential migration pathway)，包括地下水、地表水、土壤、底泥 (sediment)、生物體 (biota) 以及空氣等；(4)為各受污染介質建立污染物的背景濃度區域 (background area)；(5)辨識並分析人類與生態等潛在環境受體 (environmental receptor)；以及(6)界定研究區域的範圍或系統邊界。

4.2 CSM 的複雜度應與場址本身的複雜程度以及可取得的資料相符。概念場址模型的建立通常是一個重覆迭代 (iterative) 進行的過程。模型發展應在場址調查的最初階段就開始，並在整體調查過程中隨著新資料的取得不斷進行修正 (revised) 與優化 (refined)。最終的模型應包含足夠的資訊，以支援現行與未來的曝露情境 (exposure scenarios) 的建構。

4.3 生態風險評估關注的議題，與人體健康風險評估並不相同，例如重要的遷移路徑、曝露途徑以及環境受體都可能有所差異。這些差異通常足以使人體健康風險評估與生態風險評估在 CSM 需要分別進行描述與呈現。然而，兩者的 CSM 之間仍會有部分元素是相同或重疊的。因此，風險評估人員應共同發展和確認這些共同元素，以確保兩者之間的一致性。

5. 重要性與用途

5.1 藉由場址調查所取得的資訊，可用於分析場址現存的物理、化學與生物系統的特性。影響污染物排放、污染物遷移以及環境受體曝露於污染物的相關過程，則會在 CSM 加以描述並整合。

5.2 概念場址模型的發展對於判定潛在的曝露途徑(例如：攝入(ingestion)與吸入(inhalation)，以及推估污染物對人體健康與環境可能造成的影響，都具有關鍵性意義，也必須清楚識別與 CSM 相關的不確定性(uncertainty)，以便後續採取行動將這些不確定性降低到可接受的水準。概念場址模型的早期版本(early version)通常基於有限或不完整的資訊，因此會突顯並強調必須加以處理的不確定性。

5.3 概念場址模型用於整合所有場址資訊，並判斷是否有缺漏的資料(資料缺口)，以及是否需要在場址進行其他的補充資料收集。此外，概念場址模型也用於協助選擇適當的整治替代方案，並評估整治行動在降低環境受體曝露於污染物方面的成效。

5.4 本指引並非用來取代管制機關對污染場址(包括放射性污染場址)環境特性調查的相關規定，而是作為既有指引的補充，並促進概念場址模型建立方式的一致性。

5.5 本指引適用於所有參與建置概念場址模型的人員，理想情況下，應

包括調查與整治程序各階段的代表，例如初步評估、整治調查、基準(baseline)人類健康及生態風險評估，以及可行性研究(feasibility study)。概念場址模型應作為一項工具，協助各領域的專家彼此有效溝通、共同解決場址關切問題，並協助推動決策程序的進行。

5.6 建立概念場址模型的程序中所包含的步驟，有時會被統稱為「場址特性分析(site characterization)」的一部分。雖然場址整治本身不在本指引的範疇之內，但概念場址模型仍可應用於整治作業過程

6. 步驟

6.1 資訊彙整(Assembling Information)

從地圖、空拍影像(aerial image)、剖面(cross sections)圖、環境資料、紀錄、報告、研究以及其他資訊來源，彙整場址的歷史與現況相關資料。強烈建議負責建立概念場址模型的人員親自至現地訪查。對所蒐集資訊的品質應加以評估，最好能包含量化的方法；是否採用該資訊，應以其是否符合客觀的定性與定量標準為判斷依據。應描述取得分析資料的方法，並引用所有資訊來源。每一個場址均應建立概念場址模型；但如果多個場址彼此位置接近，以致無法判別單一污染來源或多個污染來源時，則可將這些場址視為一個整體進行彙整，此時應為整體建立概念場址模型。

6.2 污染物識別(Identifying Contaminants)

辨識存在於地下水、地表水、土壤、底泥、生物體以及空氣中的污染物。若未偵測到污染物，則應利用概念場址模型協助記錄並證明此一發現。

6.3 建立污染物的背景濃度(Establishing Background Concentrations of Contaminants)

背景樣品(background samples)具有 3 項主要功能：(1)建立場址中由自然來源所造成的分析物濃度範圍；(2)建立由本次評估以外的其他來源所造成的分析物濃度範圍；與(3)協助判定污染程度是否超出背景值。

6.3.1 概念場址模型應包含場址中所有污染物的天然背景濃度，為建立各種介質的背景濃度，其所需的樣本數與採樣位置會因場址特性與調查需求而有所不同。模型中應包含足夠的背景樣品，以區分目前所評估來源造成的污染，與天然背景或鄰近其他人為污染來源所造成的濃度差異。6.2 與 6.3 所述的步驟有時會統稱為「污染物評估(contaminant assessment)」，並可能於建立概念場址模型之前作為一項獨立作業執行。

6.4 污染來源特性描述(Characterizing Sources)

在最低限度下，場址應量測或估算以下污染來源的特性：

6.4.1 污染來源的位置、範圍與體積

來源應在場址地圖上準確標示。地圖應包含比例尺與方向指示，並應顯示污染來源與土地邊界之間的相對位置關係。

6.4.2 潛在具危害性的成分及其在來源介質中的濃度。

6.4.3 污染來源的啟始時間、持續期間以及污染物的釋放速率。

6.5 辨識遷移路徑(Identifying Migration Pathways)

應針對每一個污染來源，辨識別其可能的污染遷移路徑，包括地下水、地表水、空氣、土壤、底泥以及生物體等環境介質。應辨識完整曝露途徑並將其與不完整途徑區分開來。若以下任一要素缺少，則曝露途徑屬於不完整途徑：(1)污染物自主要或次要來源釋放的機制；(2)在環境受體不位於污染來源處時，污染物在環境介質中的傳輸途徑；(3)環境受體與受污染環境介質可能接觸的位置。應評估污染物在完整曝露途徑上，對環境受體造成目前與未來污染釋放與遷移的可能性。應繪製一張示意所有污染來源類型之曝露途徑的圖，並確保其內容與曝露或風險評估報告中敘述性文字與表格一致。

6.5.1 地下水遷移途徑(Ground Water Pathway)

當具危害性的固體或液體已經或可能與地表或地下的土壤／岩層接觸時，應考量地下水遷移路徑。在此情況下，需進一步考慮包括至飽和帶的垂直距離、地下介質中的流動速率、下游是否存在滲流水、湧泉

或孔穴及其距離、裂隙或其他優勢流動途徑、受壓含水層之存在與否、水井(特別是灌溉井或飲用水井)的存在與位置、場址的地質與水文特性。此外，應考慮其他污染宿命與傳輸(fate and transport)過程，包括：水力延散(hydrodynamic dispersion)、污染物的相間轉移(interphase transfers)、污染物在多孔隙介質中的遲滯作用(retardation)。污染物在通氣層(vadose zone)中的遷移也應納入評估。

6.5.2 地表水與底泥路徑(Surface Water and Sediment Pathway)

在以下情況中，應始終對此路徑進行調查：(1) 河流、湖泊、常年性溪流、排水溝等永續性水體(perennial)與污染源或受污染區直接接觸，或有可能受到污染；污染源或受污染區與地表水體之間存在不中斷的傳輸途徑；(2) 地表水或底泥進行採樣分析後，發現污染物濃度明顯高於背景值；(3) 已知或懷疑有受污染的地下水或地表逕流(surface runoff)排入地表水體；以及(4) 在乾旱地區，降雨後的間歇性排水路徑(ephemeral drainage)可能將污染物輸送到下游的曝露點。

6.5.3 空氣路徑(Air Pathway)

凡是地表土壤、地下土壤、地表水或其他可能向空氣中釋放氣體或懸浮微粒的介質所含的污染物，都需評估其經由空氣傳輸的可能性與影響。此外，也要考慮空氣中的污染物如何再遷移(migration)到其他環

境區塊(compartment)，例如：焚化過程產生的微粒(particulate)沉降至地表水體或土壤。

6.5.4 土壤接觸路徑(Soil Contact Pathway)

可能與人類或生態受體直接接觸的受污染土壤，都應進行調查。包括：皮膚吸收(dermal absorption)造成的化學物質直接曝露、受輻射污染土壤所產生的伽瑪射線對人體造成的直接曝露。人類與生態受體可能在不同深度的土壤中接觸到污染物(例如：人類通常僅接觸表層土壤或淺層地下土壤；然而植物與動物可能會接觸到埋藏較深層的污染物)。因此，在評估受污染土壤時，應納入考量不同深度的曝露情形與受體差異。

6.5.5 生物路徑(Biotic Pathway)

應考量污染物在生物體(organisms)內的生物濃縮(bioconcentration)與生物累積(bioaccumulation)，以及因此可能在食物鏈(food chain)中轉移與生物放大(biomagnification)的情形，同時也要注意生物的移動所造成的污染物環境傳輸。

6.6 環境受體確認 (Identifying Environmental Receptors)

應確認目前或可能曝露於場址污染物的環境受體，這些受體包括：人類、其他生物體直接接觸污染源可能出現在污染遷移途徑上或位於

場址周邊。建議彙整一份代表場址中主要物種群組的分類單元(taxa)清單。通常不可能，也沒有必要，去辨識場址存在的每一個物種，建議在概念場址模型中納入代表主要營養階層(trophic levels)的物種或生態功能群(guilds)。

6.6.1 人類受體(Human Receptors)

概念場址模型應包含一張或多張地圖，用以顯示環境受體目前或可能曝露於污染源或污染遷移途徑之範圍的物理邊界。必要時，可另外繪製地圖以呈現特定污染物或污染物群組的曝露範圍。

6.6.2 生態受體(Ecological Receptors)

概念場址模型應包含一張或多張地圖，用以辨識並標示研究區域內部及周邊植物與動物的陸域(terrestrial)與水域(aquatic)棲地，以及這些棲地是否與污染源或污染遷移途徑相關。應諮詢地方與州政府官員、EPA 區域專家，以及自然資源受託人(natural resource trustees)，以確認所識別的區域中是否包含：聯邦或州級列管的受威脅或瀕危物種的關鍵棲地(critical habitats)、環境敏感地區(sensitive environments)。應識別所有在研究區域內主要(dominant)、重要(important)、數量下(declining)、受威脅(threatened)、瀕危(endangered)、稀有(rare)的物種，

包括那些永久、季節性、短暫性棲息於研究區域，或遷徙途經研究區域的生物。

-

7. 關鍵字(Keywords)

- 概念場址模型(conceptual site model)
- 生態(ecological)
- 有害廢棄物場址(hazardous waste site)
- 人體健康(human health)
- 風險評估(risk assessment)
- 場址特性分析(site characterization)

附錄

提供一個污染場址的場址概念模式範例。

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 本計畫針對地下水監測井水質採樣與分析流程進一步探討，分別詳細分析 EPRI「建立地下水採樣和分析過程」指引、美國環境保護署「地下水採樣規範」、行政院環境部「監測井地下水採樣方法」與「環境水質監測採樣作業指引」進行分析比較，以提出相關地下水防護管制建議事項。EPRI 指引著重於放射性核種控制及最低可偵測濃度之管理，屬於系統化且高規格的規範；USEPA 文件則提供全面的採樣操作細節，強調現場儀器品質與採樣順序的重要性；環境部規範則依據我國法規與實務需求制定，貼近實際操作情境，對各項數據紀錄要求明確，強調實務可行性與紀錄完整性。
2. 有關在研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則，本計畫進一步分析 EPRI「評估採樣和監測數據」。為確保核能電廠地下水監測數據之準確性與代表性，應依據評估準則建立完善且具追溯性的資料管理與品質控管機制。整體而言，持續性的監測、資料品質管理與廠址概念模型動態更新，為確保核能電廠地下水環境長期安全的關鍵基礎，可有效支援污染預警與環境防護決策。
3. 綜合國外除役核電廠文獻之經驗，Oyster Creek 核電廠監測資料顯

示氬及其他放射性核種濃度均低於標準，強調持續監測與現行地下水防護措施的重要性；Wolsong 電廠研究指出集水井設計對控制氬擴散具有關鍵作用，並建議持續更新模型以納入最新現場資料；Kori 電廠則強調不同年齡層曝露參數與場址再利用情境對劑量評估的影響，建議採用機率式方法設定導出濃度指引。在 ASTM 的文件分析中，建議透過系統化概念廠址模型整合現場資料與監測資訊，以支援背景濃度建立、劑量評估及管理決策。對我國核電廠而言，應依各廠水文地質特性建立完善監測網與資料管理制度，定期更新廠址概念模型，並在防護計畫中考量不同曝露族群與集水井系統，以確保核能電廠除役期間及後續再利用階段的地下水環境長期安全。

5.2 建議

1. 本計畫針對地下水監測井水質採樣與分析流程進行說明，建議管制單位可參考 EPRI 的高規標準，設置最低可偵測濃度 (MDC)、依 USEPA 指引落實洗井與採樣方法，地下水監測作業應依環境部規範詳實記錄井深、水位及操作流程，並建立完整的資料管理制度，確保監測資料的完整性、可追溯性及實務可用性。此外，建議建立異常數據處理程序，包括超出過去變動範圍的再採樣或比對分析，以提升監測資料的可靠性。
2. 建議管制單位可依 EPRI 相關地下水採樣與監測數據評估準則，督促台電公司定期檢討並更新廠址概念模型，確保其反映實際水文地質與監測結果。建議定期進行模型驗證與相關水文地質參數調查，並明確訂出模型更新的頻率與重要影響條件(如重大降雨事件、廠區工程變動或監測數據異常)，以提升模型可信度。地下水監測網應持續強化監測井維護，確保監測網完整性，並建立異常數據追蹤及評估程序，提高地下水防護效能。
3. 建議我國核能電廠持續建立完善監測網與資料管理制度，定期更新廠址概念模型，並在地下水防護計畫中納入集水井系統及不同族群曝露風險評估，以確保地下水環境長期安全。

參考文獻

American Society for Testing and Materials (ASTM International), 2008.

ASTM E1689–95: Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites. West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM International), 2017.

ASTM D6312–17: Standard Guide for Generation of Environmental Data Related to Waste Management Activities. West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM International), 2021.

ASTM D4448–21: Standard Guide for Sampling Groundwater Monitoring Wells. West Conshohocken, PA.

Bruce Power (2023, April 24), Environmental Protection Report, 2022.

Retrieved from <https://www.brucepower.com/uploads/2023/04>

Electric Power Research Institute (EPRI), 2008. Groundwater Protection

Guidelines for Nuclear Power Plants (Public Edition) (Report No. 1016099). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.

Enemark, T., Peeters, L. J., Mallants, D., Batelaan, O., 2019.

Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. Journal of Hydrology, 569, 310-329.

EPRI, 2008. Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants

(Public edition).

Gilbert, R. O., 1987. Statistical Methods for Environmental Pollution

Monitoring. New York: John Wiley & Sons.

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M., 2002. Statistical Methods in Water Resources. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 4, Chapter A3.

Holtec Decommissioning International, 2022. Hydrogeologic Investigation Report: Oyster Creek Generating Station Forked River, New Jersey

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2010. Monitoring for Compliance with Standards for Radiation Protection of the Public and the Environment. Safety Reports Series No. 64. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2014. Guidelines for Tritium and Radiocarbon Sampling in Water and Environmental Materials. Vienna: IAEA.

International Organization for Standardization (ISO), 2017. ISO 5667 Series: Water Quality – Sampling. Geneva: ISO.

Kamboj, S., E. Gnanapragasam, Yu, C., 2018. User's Guide for RESRAD-ONSITE Code Version 7.2. Argonne National Laboratory ANL/EVS/TM-18/1. ANL, Environmental Science Division: Argonne, IL.

Kwon, C. G., Ahn, S., Lee, J. Y., 2022. Preliminary Evaluation of Derived Concentration Guideline Level for Surface Soil at Wolsong NPP Site Using RESRAD-ONSITE Code. Applied Sciences, 12(7), 3659.

- Park, J.B., Jung, H.R., Lee, E.Y., Kim, C.L., Kim, G.Y., Kim, K.S., Koh, Y.K., Park, K.W., Cheong, J.H., Jeong, C.W., 2009. Wolsong low- and intermediate-level radioactive waste disposal center: Progress and challenges. *Nucl. Eng. Techno*, 41, 477–492.
- Petisco-Ferrero, S., Idoeta, R., Rozas, S., Olondo, C., Herranz, M., 2023. Radiological environmental monitoring of groundwater around NPP: A proposal for its assessment. *Heliyon*, 9(9).
- Seo, H. W., Ryu, G. W., Na, Y. I., Park, C. G., Son, J. W., Kim, C. W., 2024. A study on the dose evaluation of critical groups for unrestricted reuse of the site after the decommissioning of Kori Unit 1. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(8), 3359–3368.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2024.03.036>
- Seo, H. W., & Kim, H., 2023. The effect of sensitive and non-sensitive parameters on DCGL in probability analysis for decommissioning of nuclear facilities. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(10), 3559-3570.
- Sohn, W. and Lee, G. B., 2013. Numerical simulation of tritium migration in groundwater at Wolsong Plant 1 site. *Journal of nuclear science and technology*, 50(11), 1099-1109.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2013.834801>
- Sullivan, T., 2013. Evaluation of Potential Radionuclide Release and

- Transport for the Zion Nuclear Power Station Basement Fill End State: Conceptual Model Development and Sensitivity Analysis (Technical Report No. BNL-107249-2014-IR). Brookhaven National Laboratory.
- U.S. Department of Energy (DOE), 2011. Environmental Radiation Protection Standards and Implementation Guidance. DOE/EH-0173T.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2002. Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection. EPA QA/G-5S.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2004. Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners (EPA QA/G-9R). Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2006. Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process. EPA QA/G-4.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2016. National Functional Guidelines for Inorganic Superfund Methods Data Review. EPA-540-R-16-007.
- U.S. Environmental Protection Agency Science and Ecosystem Support Division Athens, Georgia, 2013. Groundwater Sampling (Report No. SESDPROC-301-R3). Effective Date: March 6, 2013.
- U.S. Geological Survey (USGS), 2018. National Field Manual for the

Collection of Water-Quality Data (NFM). Techniques of Water-Resources Investigations, Book 9.

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), 2009. Regulatory Guide 4.15: Quality Assurance for Radiological Monitoring Programs (Normal Operations) — Effluent Streams and the Environment. Rev. 1.

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), 2022. Consolidated Decommissioning Guidance: Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria – Final Report (NUREG-1757, Vol.2, Rev.2).

環境部全國環境水質監測資訊網，環境水質監測採樣作業指引，

https://wq.moenv.gov.tw/EWQP/zh/News/NewsDetail.aspx?Category_ID=2&News_ID=4797ff3d-91c9-43d7-9b7a-80ce5e3a2896

行政院環境保護署(2021)。監測井地下水採樣方法(NIEA W103.56B)。

中華民國110年1月5日環署授檢字第1091007293號公告，自中華民國110年4月15日生效。收錄於《行政院公報》，第27卷第2期（農業環保篇）。臺北市：行政院環境保護署。

台電公司(2012)。《建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式》。

台電公司技術報。

附件、歷次工作會議審查意見回覆

「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項
研析」案

研究計畫書審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	請就過去研究成果與本年度研究區別加以論述，補充說明過去實績經驗足以勝任本研究計畫內容。	謝謝指正，已補充說明於第 4 頁。
2	請說明我國與國際核電廠在除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術的差異，並說明本計畫預期達成的成果。	謝謝指正，已補充說明於第 12 頁。
3	第 1 頁國外差旅費名稱，請修正。	謝謝指正，已完成修正。
4	第 21 頁 EPRI、NEI 報告參考文獻編號未列，請補正。	謝謝指正，參考文獻編號已完成補正。
5	第 21 頁行政院環境防護署，請更正。	謝謝指正，已完成修正。
6	第 21 頁監測井地下水採樣方法資料來源網址，請更正。	謝謝指正，資料來源網址已完成修正。
7	第 25 頁短差、中差、長差-差旅費，行程概述已編列各差旅人次數量，而編列數量誤繕為「天數」，請改正。	謝謝指正，已完成改正。
8	第 25 頁差旅費用地點誤繕為行政院原能會，請改正。	謝謝指正，已完成改正。
9	第 35、37 頁計畫團隊兼任助理學經歷文件，載明參與本計畫間自 114 年 3 月 1 日至 114 年 12 月 31 日；而計畫書第 28 頁之人事費用欄位載明兩位兼任助理本計畫內工作月數皆為 7 個月。請改正。	謝謝指正，已完成改正。

10	第 37 頁計畫團隊成員陳琤雯之學經歷文件，未填列最高學歷，請補正。	謝謝指正，已完成補正。
11	第 37 頁計畫團隊成員陳琤雯之學經歷文件，參與本計畫期間誤繕為 113 年 12 月 31 日，請改正。	謝謝指正，已完成改正。
12	預定進度表，請依決標日期進行調整。	遵照辦理，預定進度表已完成調整修正。
13	經費依決標金額進行調整。	已完成修正。

「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項
研析」案

第一次工作會議審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	請蒐集彙整地下水監測實務相關文獻，如 EPRI Report No. 1016099、EPRI Report No. 1011730 及 U.S. EPA、NRC 發布的文件，研析核能電廠除役作業地下水監測井水質採樣與分析流程，並提出管制建議。	遵照辦理，已補充說明於第三章。
2	請蒐集彙整地下水監測標準相關文獻，如 NUREG-1757 Volume 2 Appendix F、NUREG/CR-5849、NUREG/CR-6948 等，研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則，並提出管制建議。	遵照辦理，已補充說明於第三章。
3	為有效掌握本案進度，本計畫執行期間，本會將視需要，於工作期間加開工作會議，廠商應配合提報工作進度。	遵照辦理。
4	廠商執行本案委託工作事項所供應標的(含財務與勞務)，應依本案投標須知及契約書等相關規定辦理。	遵照辦理。

「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項
研析」案

期中進度會議審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	依契約第五條規定：「廠商應於 114 年 7 月 18 日以前，提送期中簡報紙本 10 份及電子檔 1 份，由本會召開期中進度審查會或辦理書面審查」，中華民國地球物理學會已於 114 年 6 月 20 日提交，完成期中之履約標的與研究項目，符合契約規定。	後續將持續依規定配合辦理。
2	本案期中進度簡報內容，經本次會議審查同意通過。	後續將持續依規定配合辦理。
3	簡報所提 EPRI 報告係 2008 年版，該報告之 Revision 2 已在 2024 年 10 月出版，請掌握相關技術內涵更新之部分。	遵照辦理，相關技術內容已補充於本次會議簡報第二章。
4	NUREG-1757 之附錄 F 提出許多參考文獻，請研析這些參考文獻，若與今年度研究主題相關之參考文獻，建議納入今年項目做比較；若與今年研究無直接關係之參考文獻，建議依技術事項做分類並提出後續規劃做法。	遵照辦理，相關內容已補充於本次會議簡報第三章。
5	倘若研究成果內有透過本會所取得之資料、參數或相關報告，在經過本會審核同意前，不得對外發表，請注意並配合辦理。	遵照辦理。

6	為掌握本案計畫執行方向與進展，預訂於 9-10 月份辦理工作進度會議，屆時請中華民國地球物理學會配合提報進度，會議通知將另行函送。	遵照辦理。
---	---	-------

「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項
研析」案

第二次工作會議審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	請針對會議中本會人員所提建議事項，研處納為後續委託研究方向，並納入下次會議簡報說明及將相關內容詳實納入期末報告。	遵照辦理，已彙整並提供相關資料加以說明。
2	研究團隊成員如因故須異動，請事前書面洽經本會同意後辦理。	遵照辦理。
3	倘若研究成果內有透過本會所取得之資料、參數或相關報告，在經過本會審核同意前，不得對外發表，請注意並配合辦理。	遵照辦理。
4	依契約第五條規定，廠商應於 114 年 11 月 21 日前，提送期末報告紙本 10 份(初稿)、電子檔 1 份及原創性舉證措施(文件)，屆時請研究團隊配合提出。	遵照辦理。

**「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項
研析」案**

期末報告審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	報告內容部分語句不夠通順或過長，影響可讀性。建議再檢視報告內容語句結構，以提升報告之可讀性與專業表達品質。	謝謝指正，已檢視並完成修正。
2	首次出現英文縮寫時，應以全名開頭，並在括號中註明該縮寫，請再檢視報告全文進行修正。	謝謝指正，已檢視報告全文並完成修正。
3	中英文摘要內容，除請再檢視修改，確認中英文一致性外，並請補充本年度實際完成之具體成果重點。	謝謝指正，已檢視並完成修正。
4	目錄之參考文獻頁碼排版異常，請修正。	謝謝指正，已完成修正。
5	P.1 所述“本服務案名稱為「核電廠除役期間廠址地下水水質採樣及監測作業技術要項研析」，依據工作說明書所書列的「問題背景」說明依據核子反應器設施管制法，核能電廠設備與設施應足以保障公眾健康及安全，對於環境保護及生態保育之影響應合於相關法令規定。”請再檢視語句通順性並予以修改。	謝謝指正，已完成修正。
6	P.3：「113 年 12 月 31 日」請修正為「114 年 12 月 31 日」。	謝謝指正，已完成修正。

7	<p>P.4：“第5章為「結論與建議」，主要總結整個計畫的執行工作，並在核電廠地下水採樣和分析過程要項、核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則要項以及國際核能電廠的地下水防護經驗與未來可行工作給予建議。”一句，請再檢視修飾。</p>	<p>謝謝指正，已完成修正。</p>
8	<p>P.5：“所謂「代表性地下水水質樣品」是指採集得的地下水水質樣品能真實呈現緊鄰監測井的井篩段周遭含水層內的真實地下水水質狀況，不受井管、設備或採樣過程影響。”一句，請再檢視修飾。</p>	<p>謝謝指正，此段詞句已完成修正潤飾。</p>
9	<p>P.9：“地下水防護方案的目標是控制放射性物質外釋，最大可能減低核電廠運轉過程對環境可能造成的非計劃性外役，並降低潛在地下污染的長期成本。”一句，請再檢視修飾。</p>	<p>謝謝指正，此段詞句已完成修正潤飾。</p>
10	<p>P.10：有關 EPRI 地下水防護指引版本介紹，請再檢視增述 EPRI Rev.1 / Rev.2 之更新內容重點，並刪除「非免費且價格昂貴」之字眼。另建議說明國外核電廠經營者在更新地下水防護方案時，採納國際最新實務導則與技術要求，提高方案可執行性與追蹤管理機制完整性之作法。</p>	<p>謝謝指正，已補充並說明於內文。</p>
11	<p>P.12~P.13：請對齊各小項縮排。</p>	<p>謝謝指正，已完成修正。</p>

12	P.14：“導則說明 6.2b [基準版]：在受地下水污染的區域進行採樣時，在收集樣品之前，應適當管控從監測井中抽取的水，在處置洗井水(purge water)之前應適當評估。”一句，請再檢視潤飾。	謝謝指正，此段詞句已完成修正潤飾。
13	P.14：「基質加標(matrix spikes)樣品」建議修正為「基質添加(matrix spikes)樣品」。	謝謝指正，已完成修正。
14	P.15：「陽性放射性核種檢測(positive radionuclide detection)」一詞，請檢視修正。	謝謝指正，已完成修正。
15	P.16：「Connecticut 州的 Yankee (Haddam Neck)核電廠」建議修正為「美國康乃迪克州的 Connecticut Yankee 核電廠」。	謝謝指正，已完成修正。
16	P.18：「……，請參閱對於這些主題的進一步討論 ASTM D5903-96(2006)與 ASTM D6517-00(2005)」語句不通順，請檢視修正。	謝謝指正，此段詞句已完成修正潤飾。
17	P.22：所述之洗井方法描述完整，建議於第 2.6 節「地下水防護管制建議事項」，補充洗井程序查核及現場視察查驗等相關建議事項，以作為管制參考。	謝謝建議，已補充相關建議事項於 2.6 節。
18	P.35：「相關檢測井地下水採樣作業流程如圖 2-2」一行排版異常，請修正。	謝謝指正，已完成修正。
19	P.35：「行政院環境保護署」建議修正為「環境部」。	謝謝指正，已完成修正。
20	P.39：第(vii)項縮排異常，請修正。	謝謝指正，已完成修正。

21	P.47：請於第三章「研析核能電廠評估地下水採樣與監測數據的準則」，補充監測數據異常時之管制處置機制，並說明判定條件、應採行之管制措施、回報與追蹤機制。另提出可供管制單位審查、視察參採之建議事項，例如數據管理與追溯性要求等。	謝謝指正，已補充並說明於內文。
22	P.54~P.59：各項“導則說明 7.x.x(基準版)”之縮排格式不一致，請再檢視修飾。	謝謝指正，已完成檢視及修正。
23	P.51：請說明引用之 EPRI 版本，增述 Revision 2 更新內容重點，並說明國外核電廠經營者在更新地下水防護方案時，採納國際最新實務導則與技術要求，並提高方案可執行性與追蹤管理機制完整性之作法。	謝謝指正，已補充並說明於內文 p.10-11。
24	P.51：「進行 品質確認」多一空格，請修正。	謝謝指正，已完成修正。
25	P.52：「以確保監測成果的回報與解釋符合產業地下水防護倡議的原則與標準」，缺少句號，請修正。	謝謝指正，已完成修正。
26	P.55：「上游核電廠」用詞，請再檢視修正。	謝謝指正，已完成修正。
27	P.61~63：有關所述「地下水採樣與監測數據評估關鍵指標」內容，請再檢視確認其是否為第 3.2 節 EPRI 報告內容或是新增之章節內容。	此部分為依 EPRI 精神自行整理出的「完整化」監測資料品質指標，做為第 3 章補強依現行台灣實務需求用的技術綱要。
28	P.64：所述「在南韓核電廠分析中，本次報告同樣研讀 Kori 核電廠最新的文獻」及 P.70、P.73、P.74 等頁使用之「本研究」一詞，並不妥適，請再檢視修正。	謝謝指正，已完成檢視修正。

29	P.75：有關「小節結論」一行之格式，請再檢視修正。	謝謝指正，已完成修正。
30	P.76：有關所述“本計畫蒐集國際核能電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗，此內容針對 Oyster Creek 核電廠地下水防護經驗，彙整研析重點事項，俾供精進我國核能電廠廠址地下水特性評估的參採。(Hydrogeologic Investigation Report: Oyster Creek Generating Station Forked River, New Jersey, 2022 年水文地質調查報告)”一段文字，請再檢視修正，以提升可讀性。	謝謝指正，已完成檢視及修正。
31	P.76、P.77：「Holtec Decommissioning International (Holtec)」、「Exelon Generation (Exelon)」等詞，請再檢視修正。	謝謝指正，已完成檢視及修正。
32	P.77：「依照 NEI 07-07...」、「重點簡述如下」、「水文地質研究...」等行格式，請再檢視修改。	謝謝指正，已完成檢視及修正。
33	P.88、P.99： “NEI 07 07” 請修正為 “NEI 07-07”。	謝謝指正，已完成修正。
34	P.90：請刪除“(OCGS)原文中寫的，並非寫 OCNGS 不清楚是否筆誤”乙句，OCGS 敘述請改以 OCNGS 表示。	謝謝指正，已完成修正。
35	P.91：「文件補充」一段格式，請再檢視修改，以提升報告之可讀性。	謝謝指正，「文件補充」相關段落已補充修正原文內容，以提升報告可讀性。
36	P.93：有關「Normandeau Associates (Normandeau)」、「與」等字無需以粗體標示，請再檢視修正。	謝謝指正，已完成修正。

37	P.111：“系統、結構與元件(SSC)”，“元件”請修正為“組件”。	謝謝指正，已完成修正。
38	P.112 使用之「本研究」一詞，並不妥適，請再檢視修正。	謝謝指正，已完成修正。
39	P.130：第 4.4 節「NUREG 的地表水與地下水特性調查」，請補充所研析之 NUREG 報告名稱。	謝謝指正，已完成修正。
40	P.135：有關「佐助劑量模擬的地表水及地下水模型」之用語，請再檢視確認翻譯正確性並括號標註原文。	謝謝指正，已完成修正與標註。
41	P.145：“不完整途徑：(1)……(2)……(3)……”一段文字格式，請調整與本頁字體大小一致。	謝謝指正，已完成修正。
42	<p>有關報告中所使用之技術用語或專有名詞，需再檢視修訂處，建議如下：</p> <p>(1) 「集水井系統」、「集水井」、「集水措施」等，請補充說明其功能性質，並區分註明為「雨水集水井」或「地下水集水井」。</p> <p>(2) 「SCM」、「CSM」用詞，請統一。</p> <p>(3) 「主要系統」、「主要冷卻水」、「一級冷卻水」，請將「主要」一詞修正為「一次側」。</p> <p>(4) 「健康物理」一詞請修正為「保健物理」。</p>	<p>謝謝指正，已完成修正。針對「SCM」、「CSM」之用詞，建議忠於原本文獻之用語。EPRI 使用「Site Conceptual Model (SCM)」來稱呼概念廠址模型，而 ASTM 與 NUREG 相關文獻則使用「Conceptual Site Model (CSM)」來表述同一概念。團隊已依各文獻原本的使用法統一名稱，以確保用詞一致且正確。</p>