

# 深孔處置(Deep Borehole Disposal)

-傳統深層地質處置的替代選擇

黃慶村

中華民國核能學會常務理事  
暨放射性廢棄物管理學術委員會召集人

e-mail: [chilton.h@gmail.com](mailto:chilton.h@gmail.com)

2022. 12. 23



# 報告大綱

- 前言
- 深孔處置介紹
- 深孔處置的推展概況
- NUTHOS-13會議的專家對談
- 深孔處置的關鍵優勢-被動安全性
- 結語

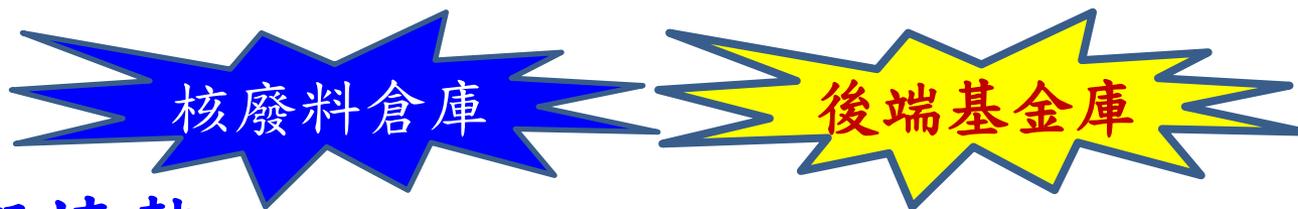


# 前言

## □ 核能發展情勢國內外 **大異其趣**

### ■ 國內情勢

- 核電命垂一線；後端營運陷入泥淖！



### ■ 國際情勢

- 核電新技術層出不窮！
- 後端營運曙光已現，光明在望！

**高放最終處置庫**

**化高放為低放！**

**深孔處置技術！**



# 前言

## □ 深孔處置(Deep Borehole Disposal)

- 1950年代即被考慮，但因當時的鑽探能力不及而被擱置。
- 現代鑽井、封閉技術的進步，促使深孔處置的優點重被重視！



# 深孔處置介紹

## □ 鑽孔式處置庫(Borehole Repository)

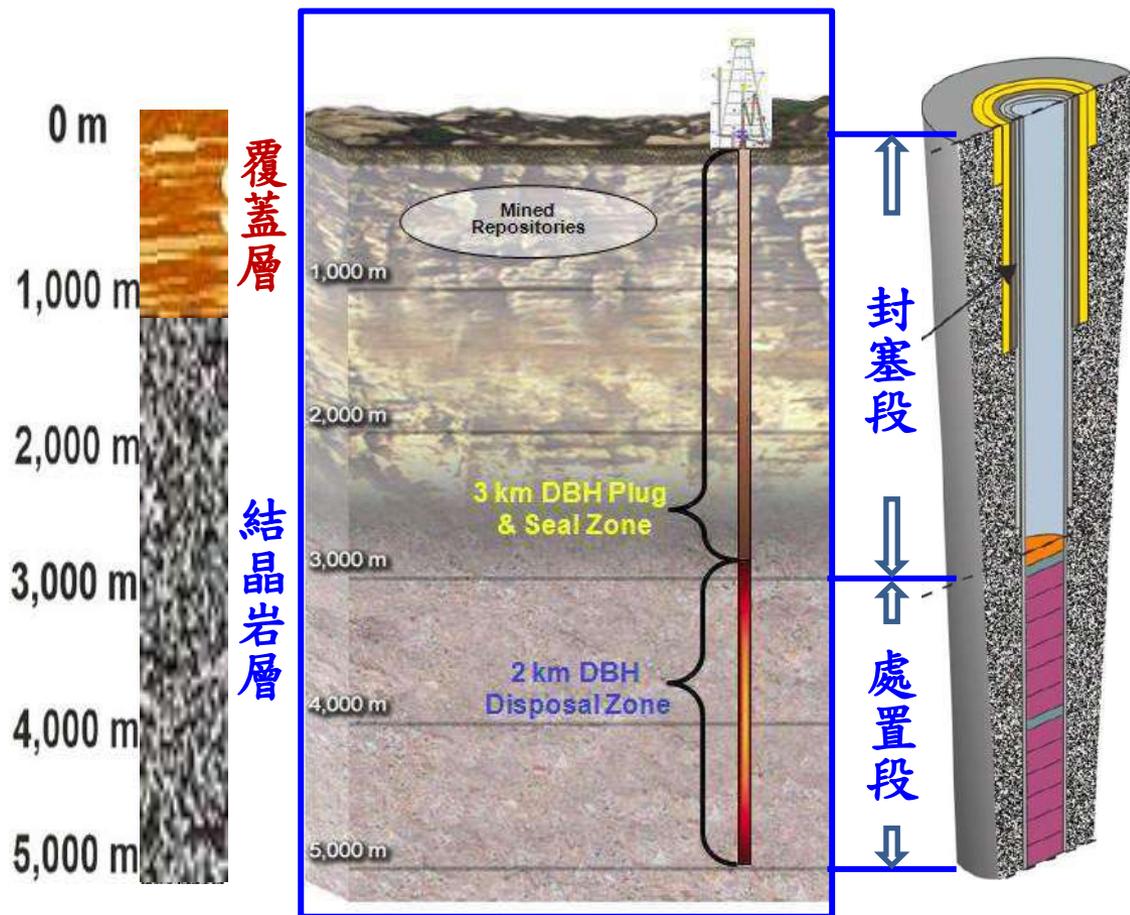




# 深孔處置介紹

## □ 鑽孔式處置庫(Borehole Repository)

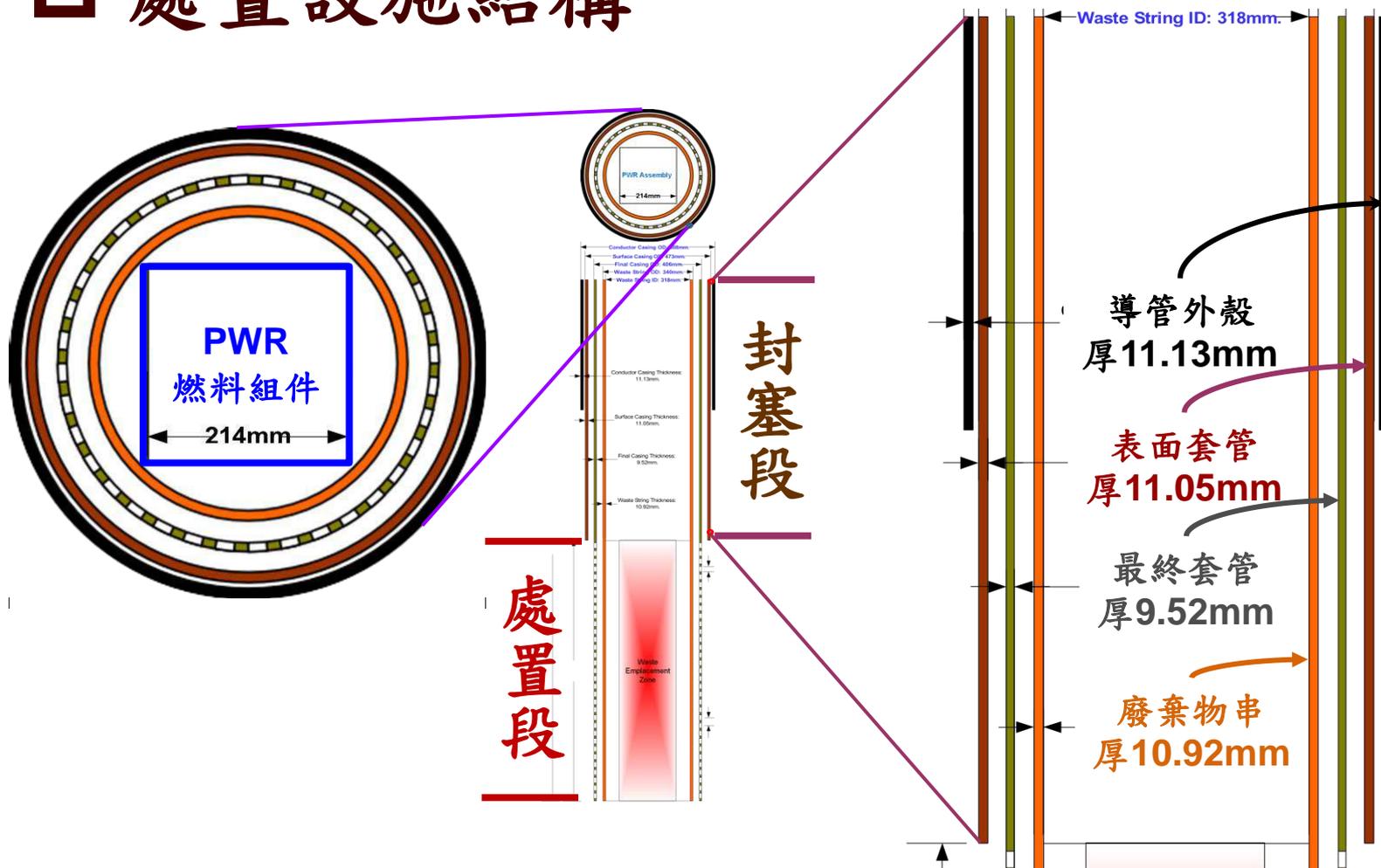
從地面鑽孔至5公里深度，以地面至3公里深度為封塞區，3至5公里之結晶岩為處置區，進行高放廢棄物之處置。





# 深孔處置介紹

## □ 處置設施結構

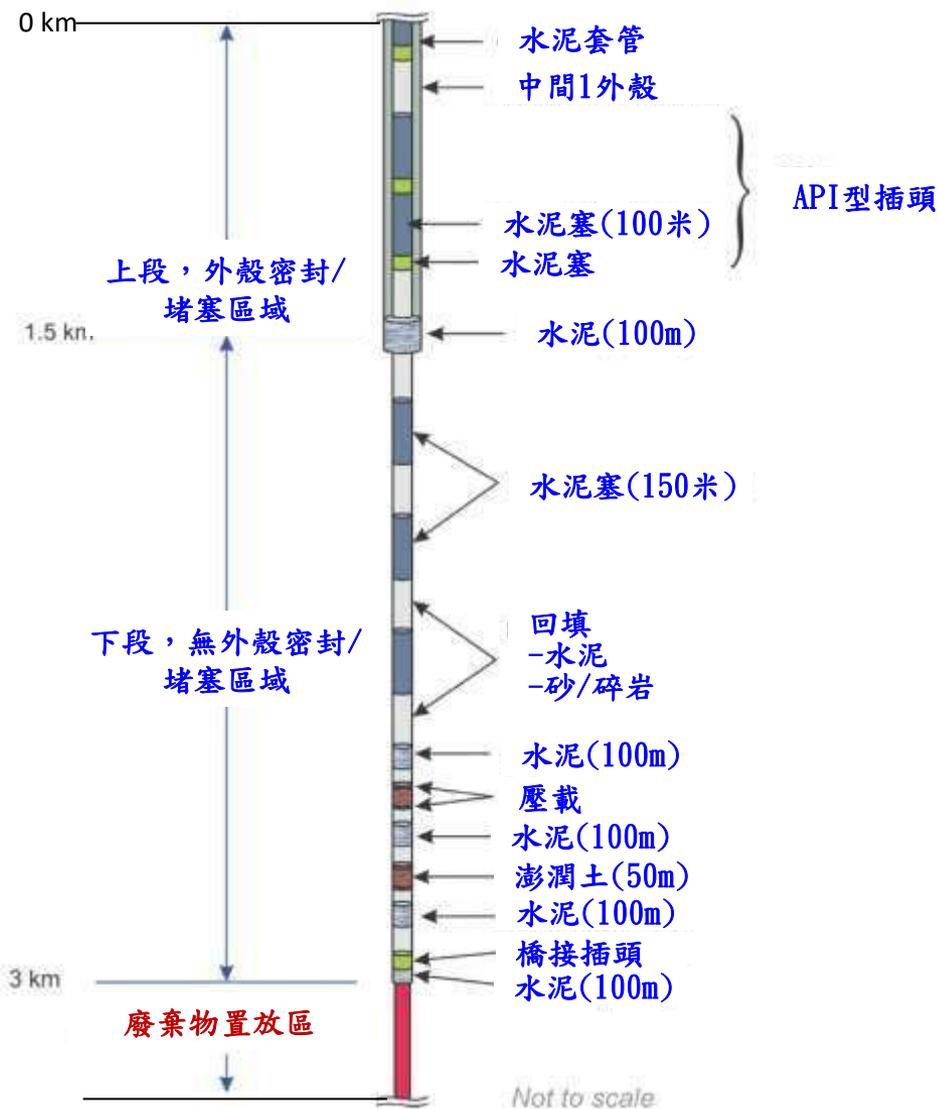
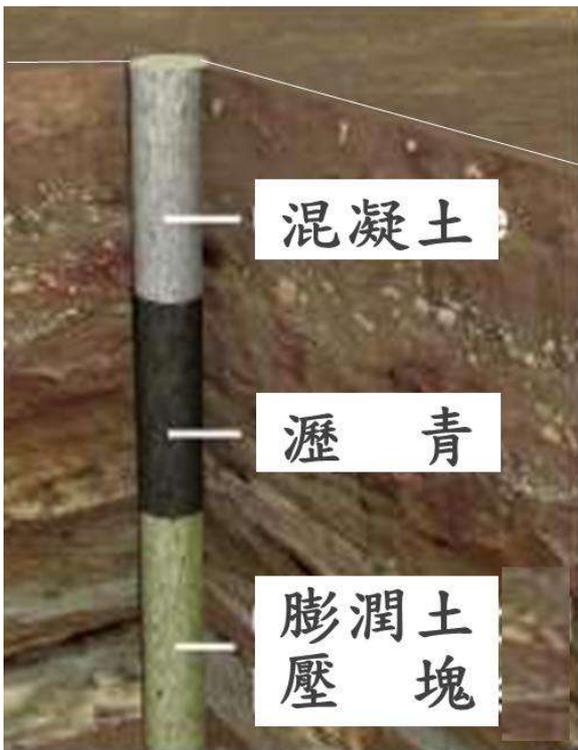




# 深孔處置介紹

## □ 工法與材料

### ■ 封塞段的封閉





# 深孔處置介紹

## □ 工法與材料

### ■ 處置段的封閉

- 防止鑽孔及擾動岩石區(DRZ)成為液體和氣體向上流動的破口
- 封閉材料需具以下特性
  - 具有低滲透性
  - 與周圍的鑽孔壁和DRZ能有效粘合
  - 耐熱、化學和機械變化





# 深孔處置介紹

## □ 工法與材料

### ■ 封閉材料

- 混凝土(水泥)
- 膨潤土及其它粘土基材料
- 地質聚合物(Geopolymers)
- 矽橡膠
- 瀝青
- Sandaband®
  - 一種專有的礦物密封材，由重晶石和膨潤土的乾燥混合物以及高達75%的細砂組成
- 陶瓷密封件(Ceramic seals)
- 岩石焊接(Rock Welding)
  - 使用井下電加熱，將破碎的花崗岩回填材料和鑽孔的壁岩部分熔化，並重結晶成類似於天然結晶岩的“焊縫”



# 深孔處置介紹

## □ 工法與材料

採用成熟的鑽井技術！

### ■ 廢棄物罐的置放

#### ● 鑽串置放(Drill string emplacement)

- 將所有廢棄物罐連接成一串，並將它們作為一個 600,000 磅的包件下放

#### ● 纜線置放(Wireline emplacement)

- 一次下放一個廢棄物罐

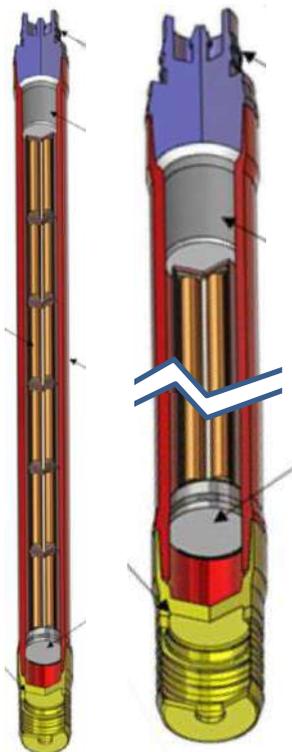
#### ● 撓性管置放(Coiled tubing emplacement)

- 一次下放一個廢物罐



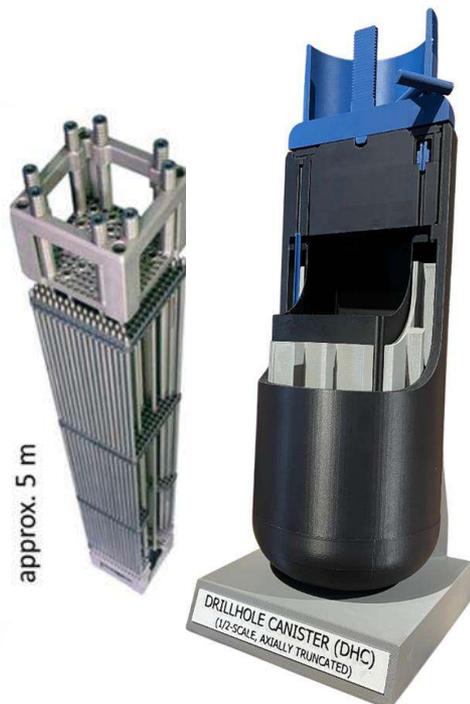
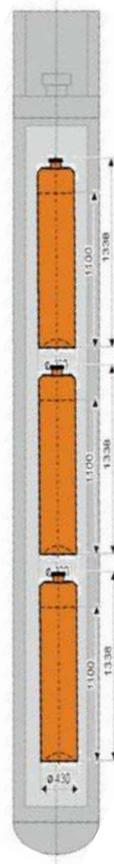
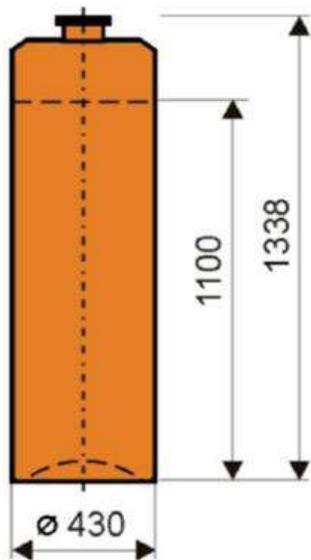
# 深孔處置介紹

## □ 處置容器(廢棄物罐)



容納三個廢密封射源的通用深孔處置罐

德國擬議的高放深孔處置容器



Deep Isolation與NAC合作設計的PWR SNF貯存、運輸及處置專用鑽孔罐



# 深孔處置介紹

## □ 理想的場址地質特徵

- 地表2000米內的結晶岩
- 無商業礦產資源和危害
  - 石油、天然氣、商業礦產
- 無火山或最近的斷層
- 低地震風險潛力(50年內 $<0.16G$ )
- 低熱流及溫和的溫度(低於沸騰)



# 深孔處置介紹

## □ 與挖掘式處置庫比較

### ■ 選址較容易

- 結晶岩地質很常見，可能的場址多

### ■ 處置具有靈活性

- 可處置較小的廢棄物
- 某些廢棄物可進行早期處置

### ■ 建設時間少，成本低

- 使用現有成熟的鑽井技術，可以在可接受的成本下建造



# 深孔處置介紹

## □ 與挖掘式處置庫比較

### ■ 地質深度提供強健的核種隔離潛力

- 高鹽度地下水環境，停滯時間長，滲透率低
- 地球化學還原環境抑制廢棄物罐的腐蝕，減緩放射性核種的釋放
- 保護免受氣候變化和其他自然過程的長期影響
- **絕大多數放射性核種永遠接近不了生物圈**
  - 處置區到地表的行程長，許多岩層有吸附核種的特性

### ■ 歷經百、千萬年的隔離表現提供安全的保證

- 可根據同位素標記尋找已被隔離數百萬到數千萬年的母岩



# 深孔處置介紹

## □ 與**挖掘式處置庫**比較

- 人為入侵的風險低
- 封閉和回填成本大幅降低
- 對母岩的挖掘與擾動大幅減少



# 深孔處置介紹





# 深孔處置介紹

□ 與挖掘式處置庫比較對母岩的挖掘與擾動大幅減少

■ “北山1號” 螺旋式掘進機

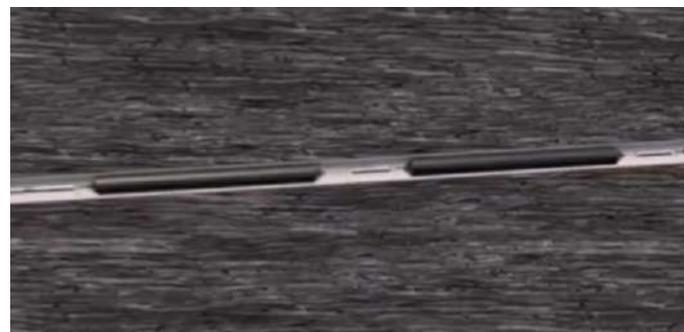
- 整機長約100米、直徑7.03米；能實現水平200米轉彎半徑、豎向380米曲線半徑





# 深孔處置介紹

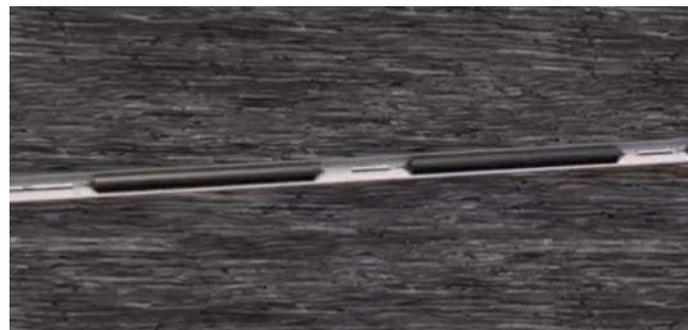
- 對母岩的挖掘與擾動大幅減少
- 與甘肅北山處置庫(預想圖)比較





# 深孔處置介紹

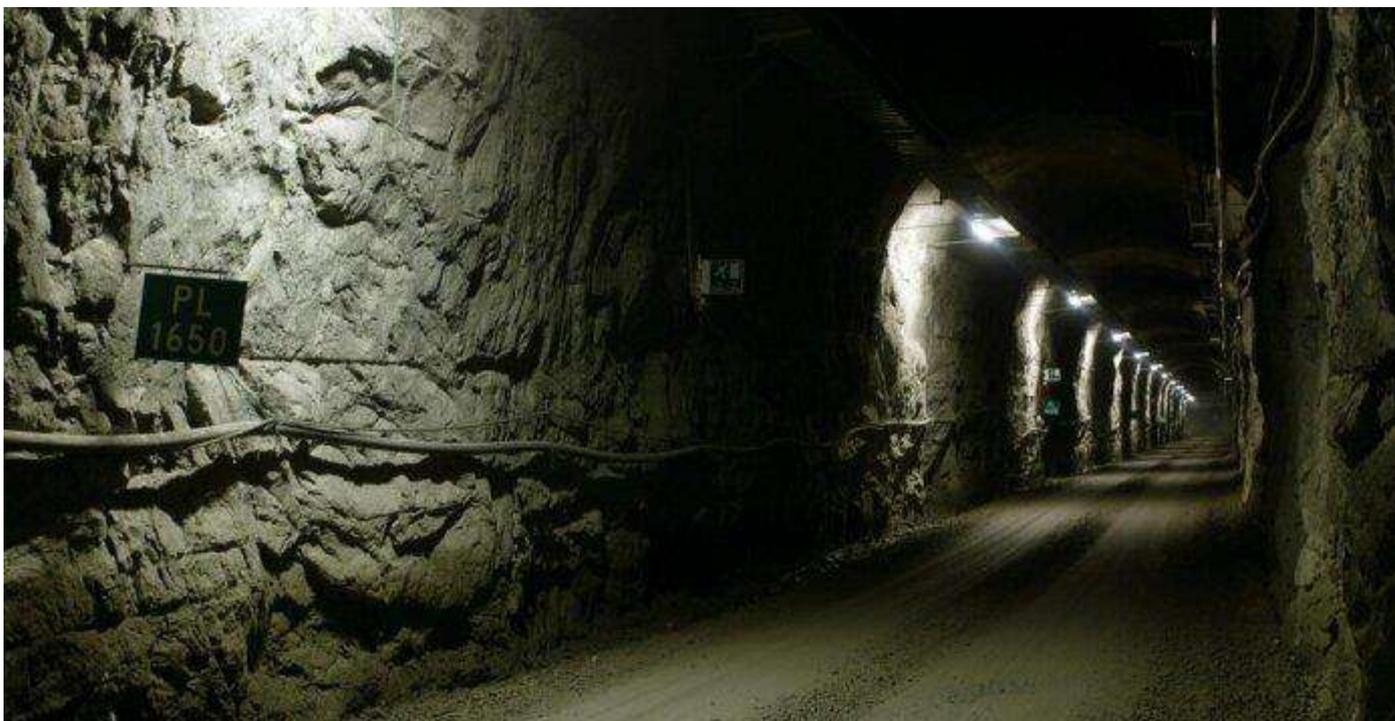
- 對母岩的挖掘與擾動大幅減少
- 與瑞典FORSMARK處置庫比較





# 深孔處置介紹

- 對母岩的挖掘與擾動大幅減少
- 與芬蘭ONKALO處置庫比較



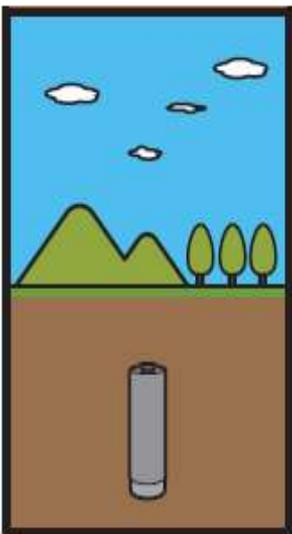


# 深孔處置介紹

## □ 歷史回顧

### ■ 深層地質處置方式之一

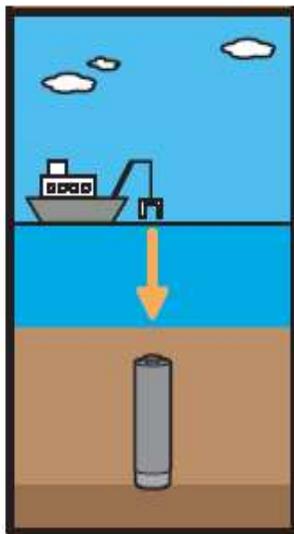
地質處置



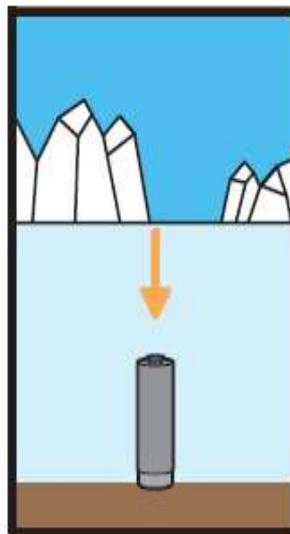
太空處置



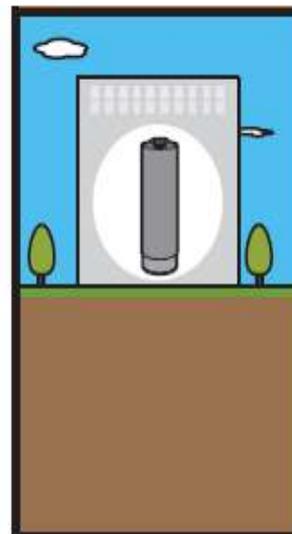
海床下處置



冰床處置



地面貯存





# 深孔處置介紹

## □ 歷史回顧

- 1950年代即被考慮，因當時的鑽探能力不足而被放棄。
- 亞卡山計畫擱置後重被青睞
  - 鑽井技術及封閉技術的進步
  - 優於挖掘式處置庫
    - 可能更安全
    - 更有保障
    - 成本效益更高
    - 對環境無害



# 深孔處置介紹

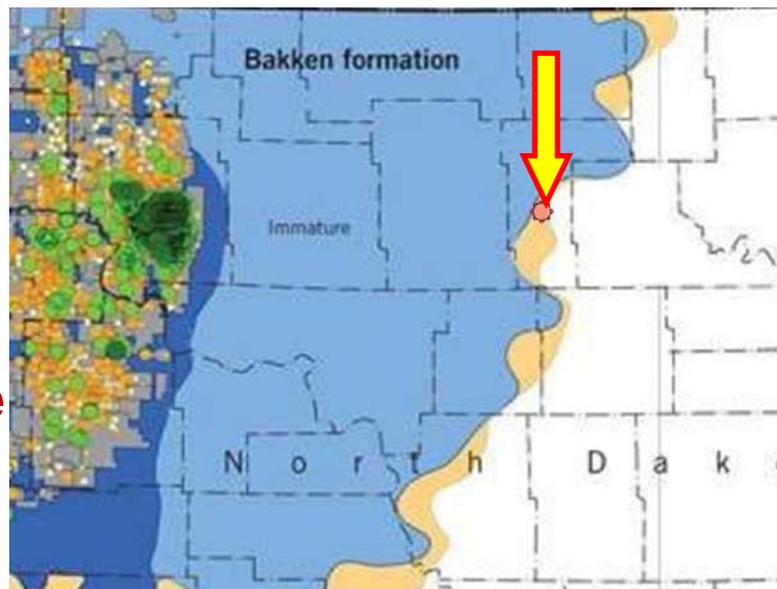
## □ 歷史回顧

### ■ 2016一次未竟其功的現場鑽探(DBFT)計畫

- 在美國北達科他州皮爾斯縣Rugby20英畝國有土地

- 在結晶岩進行超過16,000英尺的鑽孔測試

- 美國能源部發包給Battelle Memorial Institute領導的團隊
  - » 3500萬美元的5年合同



- 因當地民眾反對，DOE於2017/05/23宣布取消

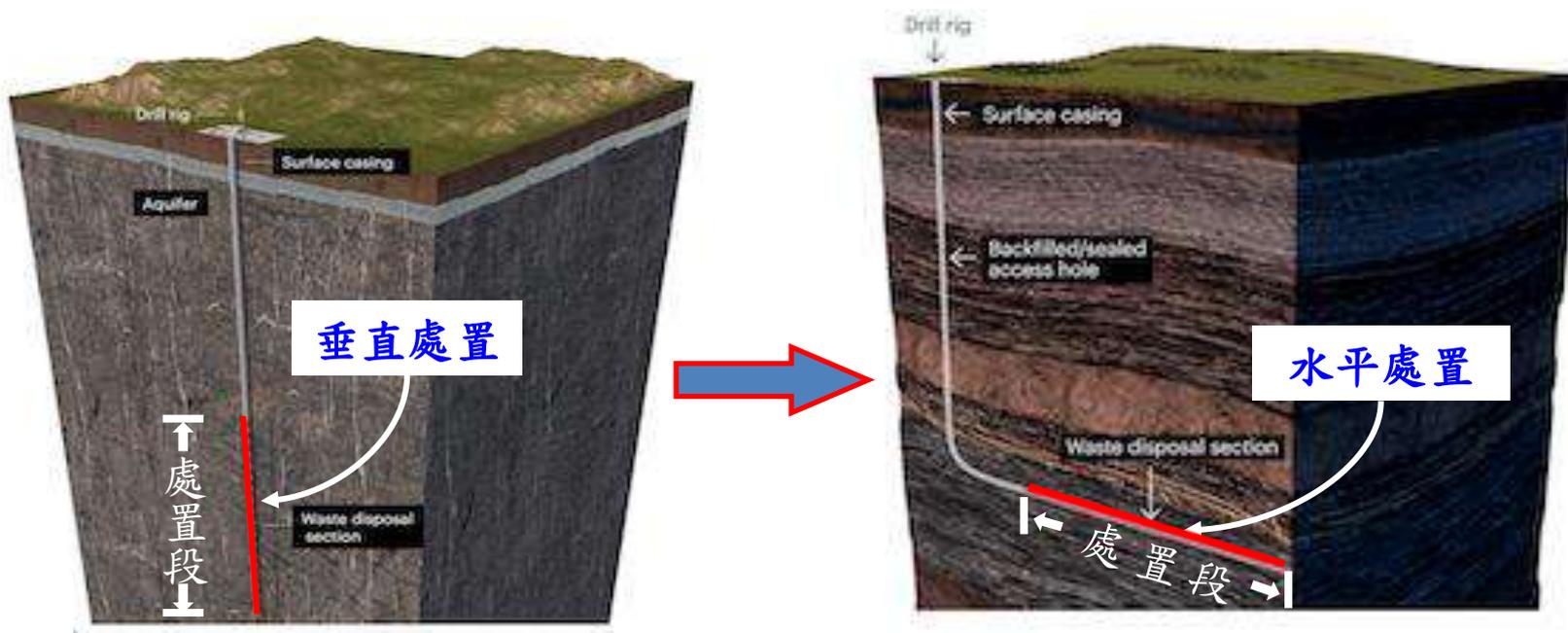


# 深孔處置介紹

## □ 歷史回顧

### ■ 由垂直處置邁向水平處置

- 2016年Deep Isolation率先採用**定向鑽孔**





# 深孔處置介紹

## □ 歷史回顧

### ■ 水平處置帶來更多優點

- 適合的潛在場址較多

- 可輕鬆地在1~3公里深的常見環境中找到所要的地質

- 可以在單個場址或多個地點實施模組化處置

- 可以在許多生產和儲存核廢的場址或其附近進行處置

- 處置容量較高，每個鑽孔可以處置較多的廢棄物罐



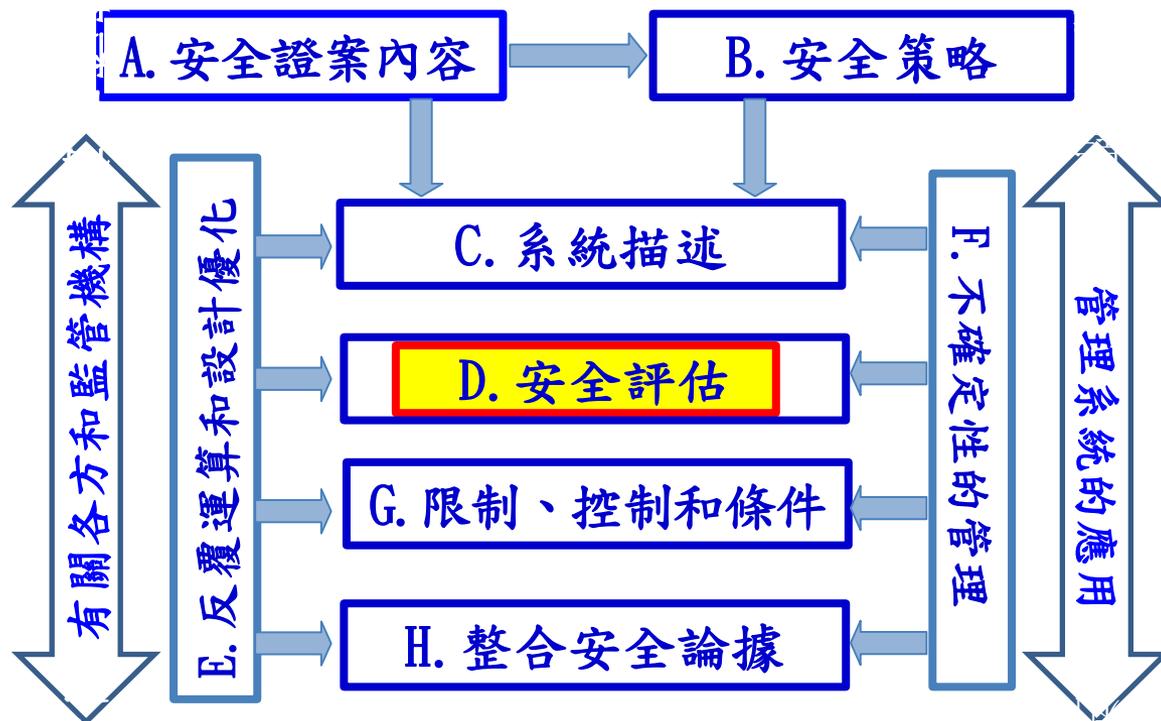
# 深孔處置介紹

## □ 安全性的確保

IAEA安全要求

## ■ 建立安全證案(Safety Case)

- 彙集設施與活動的安全性科學論據和證據
- 安全評估的結果和對結果的信心聲明
- 考量未來的風險與可能損害，評估及制定適當之安全條件與限值，以及須採取之因應措施
- 迭代式的特性參數輸入與安全評估
- 獨立的同儕審查



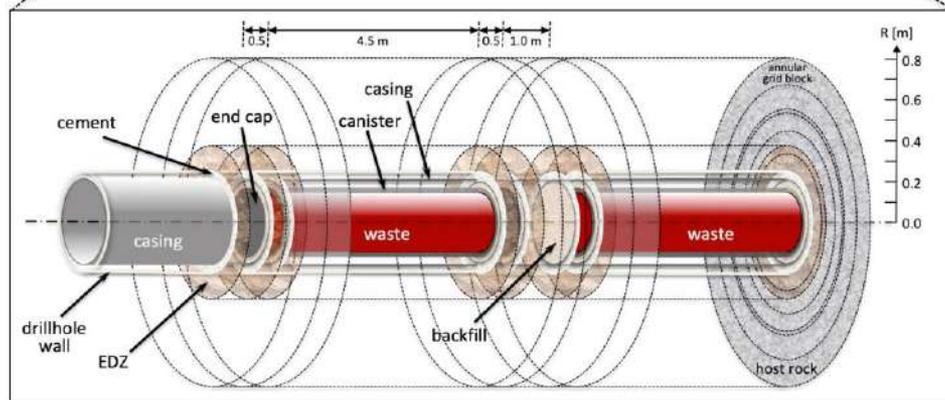
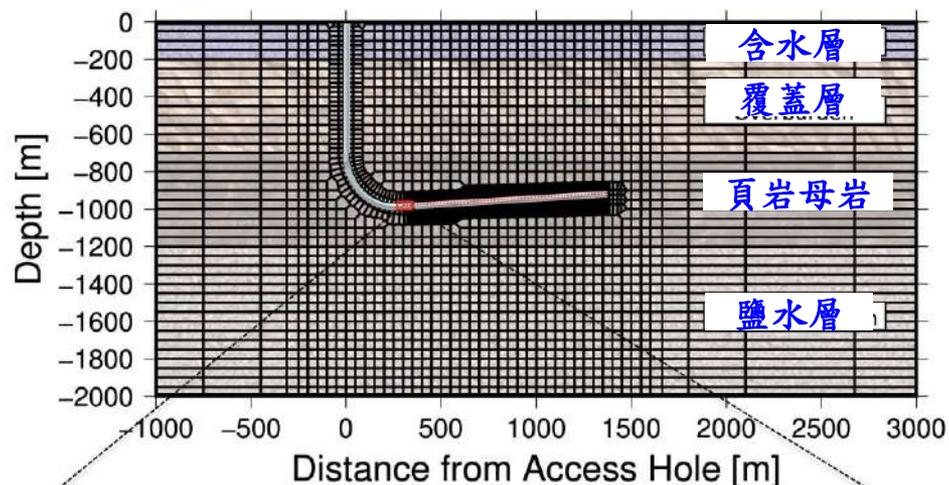


# 深孔處置介紹

## □ 安全評估案例

### ■ 評估情境

- PWR用過核燃料，有安全證案支持
- 非特定之非均質地質(頁岩)
- 處置罐在1萬年後失去屏障功能
- 鋼外殼在100年後完全腐蝕





# 深孔處置介紹

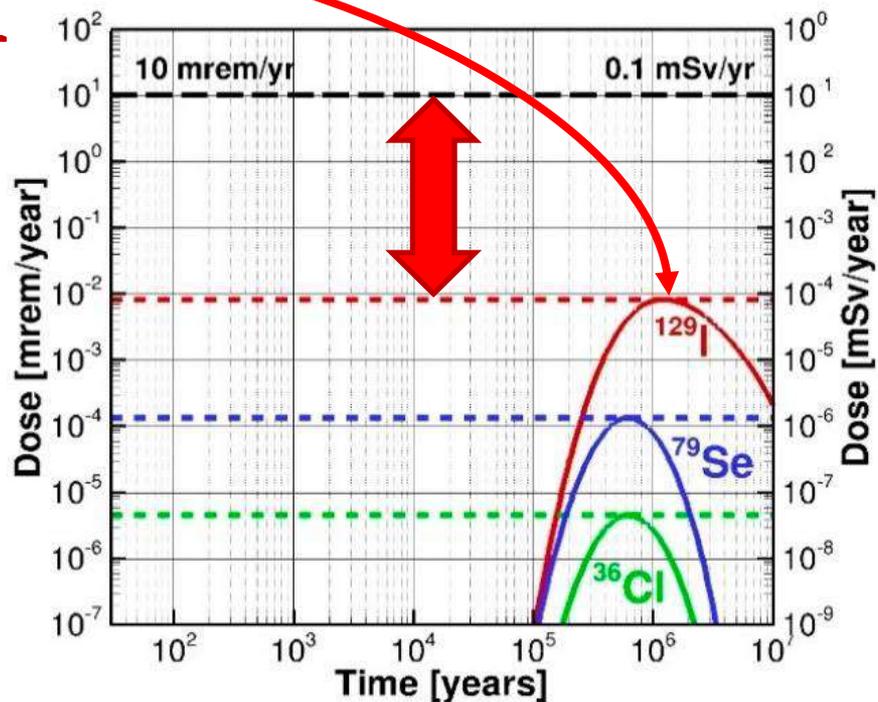
## □ 安全評估案例

### ■ 評估結果

- 1,600,000年後出現外釋劑量峰值

➤  $10^{-4}$ 毫西弗/年  
碘-129核種

外釋劑量是  
管制值的千  
分之一！

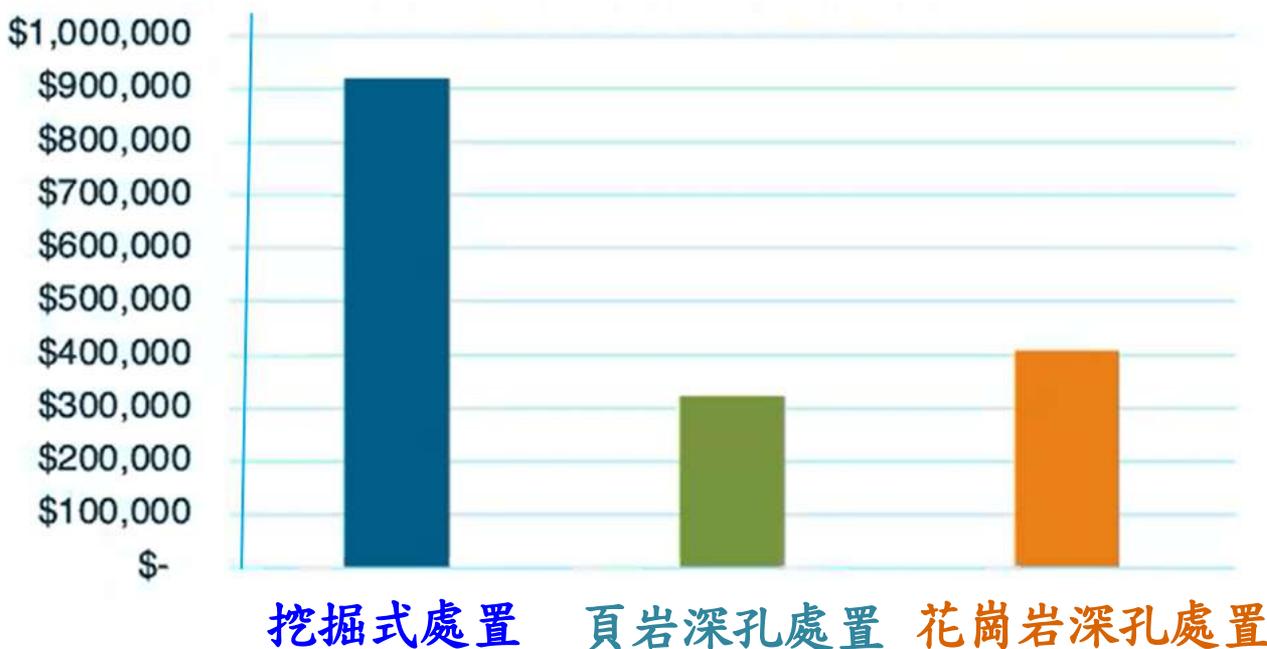




# 深孔處置介紹

## □ 成本估算案例

- 水平深孔處置費用約為深層地質處置之1/3至1/2
  - 歐洲處置庫開發組織 (ERDO)國家的初步評估



每MTHM用過核燃料/高放廢棄物的處置成本



# 深孔處置的推展概況

## □ 國際反饋調查

### ■ 美國EPRI, Southern Company

- 建立了在美國進行模組化深孔處置的可行性，與傳統挖掘處置庫相比，**成本節省62-76%**

### ■ 英國NDA

- 與傳統地質處置設施相比，深孔處置為英國高產熱放射性廢棄物提供了潛在的顯著成本節省和靈活性

### ■ 斯洛維尼亞ARAO (Slovenia's radioactive waste management organization)

- 深孔處置是斯洛維尼亞考慮的重要替代方案，研究顯示深孔處置有突出的潛在好處，技術日益成熟



# 深孔處置的推展概況

## □ 國際反饋調查

### ■ ERDO(克羅埃西亞、丹麥、義大利、荷蘭、挪威、波蘭和斯洛維尼亞)工作組與NND(挪威核除役)

- 深孔處置為ERDO國家提供了用過核燃料、高放廢棄物和長壽命低中放廢棄物合適和有成本競爭力的替代方案

### ■ ARPA·e (美國先進研究計畫局)

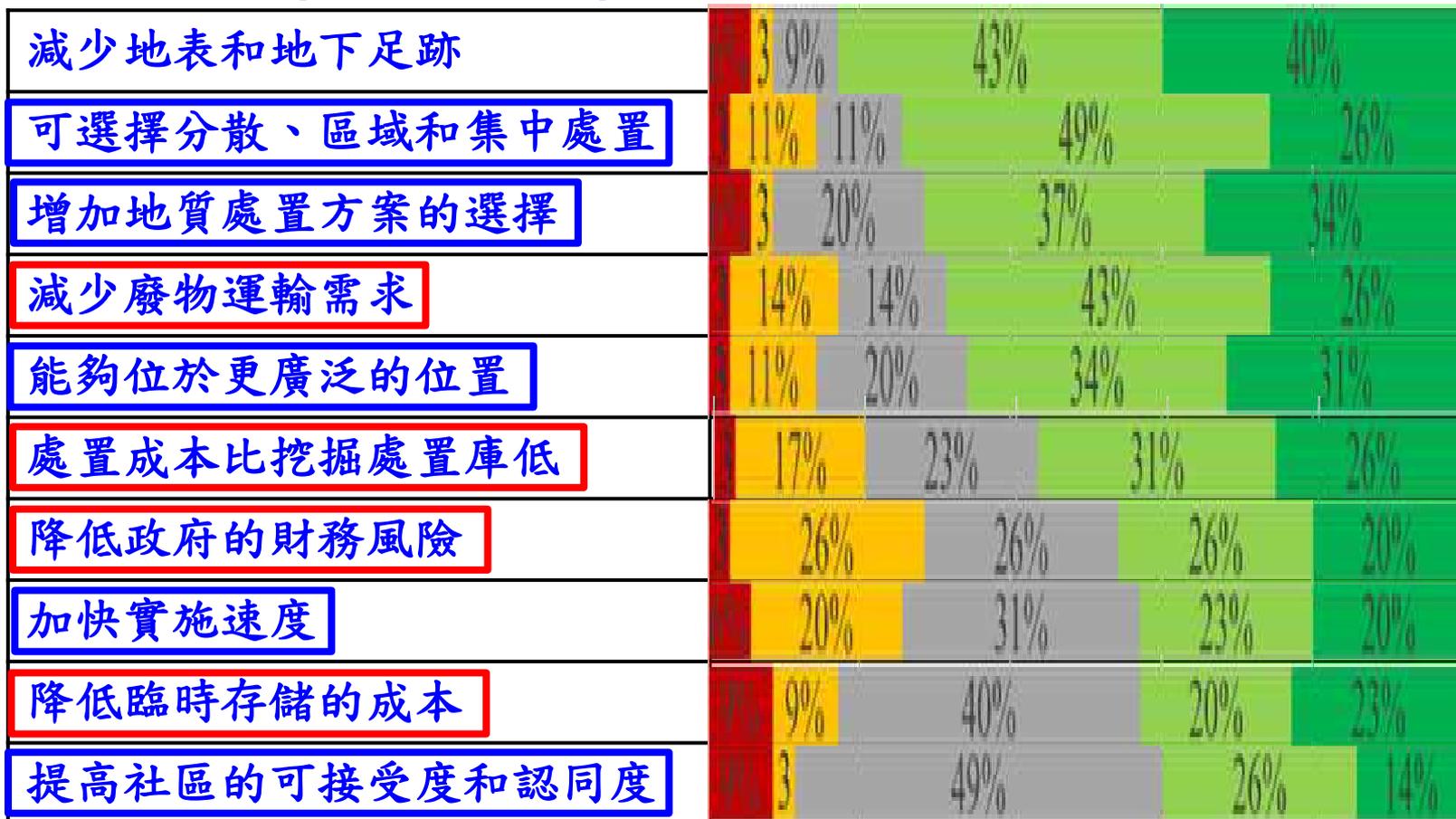
- 2022年授予2個獎項(深孔處置領先專案3.6億美元)- 將深孔處置能力應用到小型模組化反應爐、先進反應爐和燃料再處理廢棄物



# 深孔處置推展概況

## □ 國際反饋與意見調查

### ■ 國際(18國x35人)利益相關者觀點





# 深孔處置推展概況

## □ 國際反饋與意見調查

待解決問題

### ■ 國際(18國x35人)利益相關者觀點

需要更徹底地展示端到端過程，然後才能被視為我們國家的選擇	9%	9%	40%	40%
與開採的處置庫相比，DBD的操作和關閉后安全證案不太完善	3%	14%	51%	26%
關於如何實施和許可DBD的國家標準或法規不足	6%	17%	46%	26%
我們社會對DBD的態度沒有足夠瞭解	9%	20%	46%	26%
如何實施和許可DBD的國際標準不足	9%	17%	51%	17%
DBD尚未作為我國潛在選擇進行討論	9%	23%	29%	34%
關於如何評估深孔處置的安全證案，國際管制共識不足	17%	23%	37%	23%
與關閉后的安全證案相比，DBD的操作安全證案較不完善	11%	23%	43%	17%
社會對放射性廢棄物一切形式的地質處置持否定態度	20%	17%	49%	11%
我們現有的地質處置管制標準和指南需要進行重大調整，以涵蓋DBD	14%	29%	34%	23%



# NUTHOS-13會議的專家對談

## □ Mr. Hans Forsström 回答提問

Special Session - Development and Prospect of Nuclear Backend

**Session Chair**  
Dr. Ching-Tsuen Huang

**Mr. Hans Forsström**  
瑞典SKB資深顧問、  
前技術長  
IAEA核燃料循環與廢  
棄物管理組前組長



# NUTHOS-13會議的專家對談

## □ 問題：

- 部分歐洲國家認為深孔處置庫比較安全，並表達採用之興趣；瑞典MKG也建議以深孔處置庫取代需使用銅罐的挖掘式處置庫，您對此有何看法？

## □ 答覆

- 他們可能是對的！深孔處置可能更安全，但問題是如何證明？
- 對廢棄物的隔離是最終處置的一個重要部分，挖掘式處置庫經過長期發展，對此已有清楚的結論。
- 深孔處置庫利用岩石層遏制核種遷移，效果可能更正面，但目前要證明其完全隔離廢棄物的效果，可能是很大的挑戰！



# NUTHOS-13會議的專家對談

## □ Deep Isolation 營運長回答提問

**Special Session - Development and Prospect of Nuclear Backend**

**Session Chair**  
Dr. Ching-Tsuen Huang

**Mr. Rod Baltzer**  
Deep Isolation 營運長(COO)

暫停 (k)

NUTHOS-13 2022  
Advancing Sustainable Development of Nuclear Power

September 5 to 10, 2022  
Tainan, Taiwan



# Deep Isolation營運長回答提問

## □ 問題

- DHC(鑽孔罐)的直徑約為15英寸，約38釐米，長度在5米左右。如果直徑和長度能夠減小，部署將更容易、更安全。

## □ 答覆

- 是的！我們在2019年的一次演示中就是這麼做的。我們用的直徑是13厘米，長度91厘米，燃料罐的大小和鈾密封罐及CANDU燃料組件相當
- 如果使用較小的罐子，較大的燃料需要移除部分組件並重新包裝，這會增加人工和成本，因此保持燃料組件完好無損將更安全、更高效
- 典型的油井鑽環是使用9米長的套管，把三個套管放在一個27米長的套管柱中，所以五米長的處置罐與27米長的油井鑽環套管串相比是相當短的。因此，我們將鑽38英寸孔和置放30公分處置罐進行全尺寸處置能力的展示



# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 如果DHC卡在深井內，有什麼技術可以把它「釣」出來嗎？

## □ 答覆

- 是的！我們設計的鑽孔罐與現有的石油和天然氣的”釣魚工具”兼容，在罐子的頸部有可以用工具抓住的接觸螺絲。
- 罐設計可承受約 6,000psi的壓力，取回它大約需要 26.7千噸的力。如果DHC卡在任何東西上，可以取回而不被破壞。
- 另外，所設計的鑽孔罐操作程序都是確保永遠不會被卡住的。如果卡住的話，我們也已設計了可移動的冗餘(Redundancy)能夠取回它。





# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 已注意到深孔處置的成本約為當前處置模式的1/3，高地質構造活動地區的成本增加比例是多少？

## □ 答覆

- 我們曾發表了一篇題目是〈Sealing of a Deep Horizontal Borehole Repository for Nuclear Waste〉的論文，考察了北方儲存庫在正常條件下和在地震事件後儲存庫開裂場景對封閉產生的影響。
- 模擬表明，即使回填材料因為質量或變質，在底部地層產生過大的壓力使儲存庫開裂，流體經由維修通道推擠到地表時，所釋放的放射性的核種劑量貢獻也很小。
- 居於以上，我們預計我們的設計或成本，不會因地質構造活動的大小而發生任何重大變化。



# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 如何確認回填和封閉的施工品質？是否比現行的地質處置模式更難管控？

## □ 答覆

- 深孔處置是在深的飽和層進行處置，環境永遠不會被氧化，即使在處置操作後它仍然會是還原環境，因此腐蝕的問題少。
- 我們的鑽孔罐直徑約為 45 厘米，而現行地質處置庫隧道的直徑則超過 5 米，亦即廢物處置通道的橫截面積與長度的比率相對很小，因此對母岩的擾動很小；因處置深度大，地質圈的阻隔效應也大，降低了對包括緩衝材料、封閉和回填層等工程障壁系統(EBS)性能的要求。
- 此外，採取水平置放時處置空間與垂直鑽孔通道相隔，至少與鑽孔彎曲部分的曲率半徑相隔幾百米，可能引起流體流動和放射性核種沿處置段傳輸的梯度與沿通道孔向上遷移所需的梯度成垂直；相反的，自然產生的或儲存庫引起的向上驅動力，例如熱引起的浮力效應，也與水平處置方向不一致，因此助長核種外釋的作用小。
- 最後，水平處置的廢物罐不會累積任何堆疊力，亦即不需要橋塞(bridge plug)，因此回填和封閉不是那麼重要。



# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 深孔處置導致地表足跡不如當前模式明顯，這是優點也是缺點。會否導致意外入侵的可能性增加嗎？

## □ 答覆

- 挖掘式處置庫的一般預防措施同樣也適用於深孔處置庫，包括制度控制以放置標記或其他警告標誌等。
- 如果制度控制失敗，深孔處置庫的深度確實是防止人類入侵的關鍵，與大約 500 米深度左右的挖掘式處置庫相比，深孔處置庫通常深為 1 至 3 公里甚至更深，我們預計就人性和真實的可能性而言，意外闖入深孔處置庫的可能性會比闖入挖掘式處置庫者少。



# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 已有幾個國家考慮使用深孔處置。與傳統深層地質處置相比，公眾對深井處置的接受度如何？請分享實際的溝通經驗。

## □ 答覆

- 我們2018年在美國 20 個有儲存核廢棄物的州進行受影響社區調查，平均 82% 的受訪者更喜歡核廢棄物在現場進行深孔處置，而不是通過當地道路運輸到遠處的貯存設施。
  - 他們不想讓廢棄物進入他們的社區，也不想廢棄物在他們的州內運輸。
- 對管制單位和從業者社群的調查，大多數受訪者看到了深孔處置本質上更安全，比較容易被社區所接受，原因如下：
  - 深度更大，地質屏障的隔離效果增加了幾個數量級
  - 不太容易受到地層構造活動事件的影響



# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 深孔處置似乎選址更靈活。對環太平洋地震帶地質活躍地區，地質條件方面有哪些限制？

## □ 答覆

- 環太平洋地震帶並不一定意味著就要被排除在外，可以利用定向鑽井方法進行鑽測，尋找被隔離超過一百萬年，還保持低滲透性的地層作為處置庫。



# Deep Isolation 營運長回答提問

## □ 問題

- 地下5~6km深度的地層高溫對處置安全的影響如何解決？

## □ 答覆

- 採用水平鑽孔可以得到比垂直鑽孔涼爽的溫度，例如在溫度為40-60°C的處置深度；如果在第一個十年中，廢熱會額外使溫度上升30-40°C，這樣最高溫度仍會低於沸點；如採垂直鑽孔處置，溫度則會明顯高於100°C。



# 深孔處置的關鍵優勢-被動安全性

## □ IAEA的地質處置安全要求

- 要求5：確保處置設施安全的被動手段(passive means)
- 要求10：被動安全(passive safety)特性的監控和控制

## □ 被動安全性的意義

保證安全

- 系統本質上不存在安全事故的肇因
- 系統不依靠人為的介入而因應、消弭安全肇因，免除安全事故



# 深孔處置的關鍵優勢-被動安全性

## □ 封閉前安全(Pre-closure safety)

■ 深孔處置消除了人類建造和操作地質處置庫一系列關鍵作業對人類生命的安全風險

- 落石
- 火災
- 爆炸
- 洪水

雖然在深孔內進行處置，但建造工作都是在地面進行！



# 深孔處置的關鍵優勢-被動安全性

## □ 封閉後安全(Post-closure safety)

### ■ 深度帶來更多的地質圈保護和被動安全優勢，不必依賴工程障蔽系統

- 深孔處置庫深度是挖掘式處置庫的2~5倍
  - 處置區到地表的路徑更長，提供放射性核種更大程度的延散與稀釋
- 對自然事件的更高保護水準
  - 地震、火山、氣候變化影響等
- 防止人為入侵的安全性更高



# 深孔處置的關鍵優勢-被動安全性

## □ 水平處置提高被動安全性

- 免除廢棄物罐的互相擠壓，無需設置防止底部罐破碎的橋接塞
- 彎曲孔道會使掉落罐減速，並在碰觸前安全地漂移並停止
- 可選擇較低的處置溫度，使處置溫度  $<100^{\circ}\text{C}$



# 深孔處置的關鍵優勢-被動安全性

## □ 水平處置提高被動安全性

- 深厚的地質屏障，沒有遷移到地面的垂直傳輸路徑，強力遏制核種遷移

安全水準是最嚴格管制要求的1,000倍，IAEA地質處置安全要求的10,000倍！



# 結 語

## □ 深孔處置的特點

### ■ 安全性高

- 主要倚靠地質障壁而非工程障蔽

### ■ 成本較低

- 競爭力強大，並將加速技術發展

### ■ 選址容易

- 值得期待！
- 反核政策才是選址的最大阻礙！



# 結 語

## □ 深孔處置的意義

- 順應世界核能發展潮流，發展可期
- 幫助我國脫離動彈不得的困境
  - 高安全性有利於公眾溝通
  - 成本降低可充實回饋金/補助金，以促進地方發展

核廢料倉庫

後端基金庫



# 結 語

□ 大眾是可以溝通的！

公開、透明！

■ 我國低放射性廢棄物最終處置選址的審議示範會議(2010年2-3月)

● 審議會後參加的公民對政策的認同度明顯增加

參加者	20名(由173名報名者中以分層隨機抽樣方式抽出)		
意見調查	國內處置	國外處置	其它
審議會前	25%	20%	55%
審議會後	60%	20%	20%



# 結 語

## □ 大眾可以理性溝通！

### ■ 以韓國新古里5、6號核電機組復建審議會 議(2017年7月)為例

- 參加審議會議時的分次調查顯示，未決定的比率逐漸減少，最後一次的調查中，所有參加者皆做出決定，同意/不同意的比率也拉大。

調查對象		同意	反對	未決定
一般調查(20,006人)		36.6	27.6	35.8
審議小組 (500人)調查	第一次	36.6	27.6	35.8
	第三次	44.7	30.7	24.6
	第四次	57.2	39.4	3.3
	最後	59.5	40.5	-



敬請指教！