

出國報告（出國類別：開會）

參加「台、法低放射性廢棄物最終處置  
技術交流研討會」（含設施參訪）

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：黃秉修資深專業工程師

派赴國家：法國

出國期間：111年9月19日～111年9月30日

報告日期：111年11月16日

## 目 次

目 次.....	- 1 -
壹、目的.....	- 2 -
貳、行程.....	- 3 -
參、工作內容.....	- 4 -
肆、心得及建議 .....	- 31 -

## 壹、 目的

法國有 58 部核能機組，目前已興建 La Manche、CSA 及 CIRES 等 3 處中低放最終處置場、其處置技術為國際最先進；法國並輸出技術至西班牙及中國。本次職應法國 ORANO 公司及法國放射性廢棄物最終處置專責機構 ANDRA 之邀，擬赴法國參加「台、法低放射性廢棄物最終處置技術交流研討會」(含技術參訪)。

台電後端處為降低低放處置設施之建置成本，擬參考法國經驗，規劃建置近地表與坑道共構形式之處置技術，藉旨揭出國計畫赴法國參加法國 ORANO 公司及法國放射性廢棄物最終處置專責機構 ANDRA 所辦理之「低放射性廢棄物技術交流會議」並參訪法國 CSA 及 CIRES 兩處低放與極低放最終處置場，就低放射性廢棄物處置設施相關主題進行會議交流。

藉由本次技術交流會議與設施參訪，能汲取法國在低放射性廢棄物處置設施工程設計、安全分析、興建之技術與經驗，有助於強化本公司相關工作之設計、規劃與推動。

參加低放處置技術交流會議與設施參訪計畫，汲取法國目前營運用近地表低放射性廢棄物處置設施之經驗，並就其從①場址選擇、②地質調查、③工程設計、④安全分析、⑤申照、⑥興建乃至⑦營運過程間所需之技術。藉此強化本公司相關專案之設計、規劃、管理與技術能力，並將此次技術交流作為辦理「近地表低放射性廢棄物處置設施計畫」之參考。

## 貳、行程

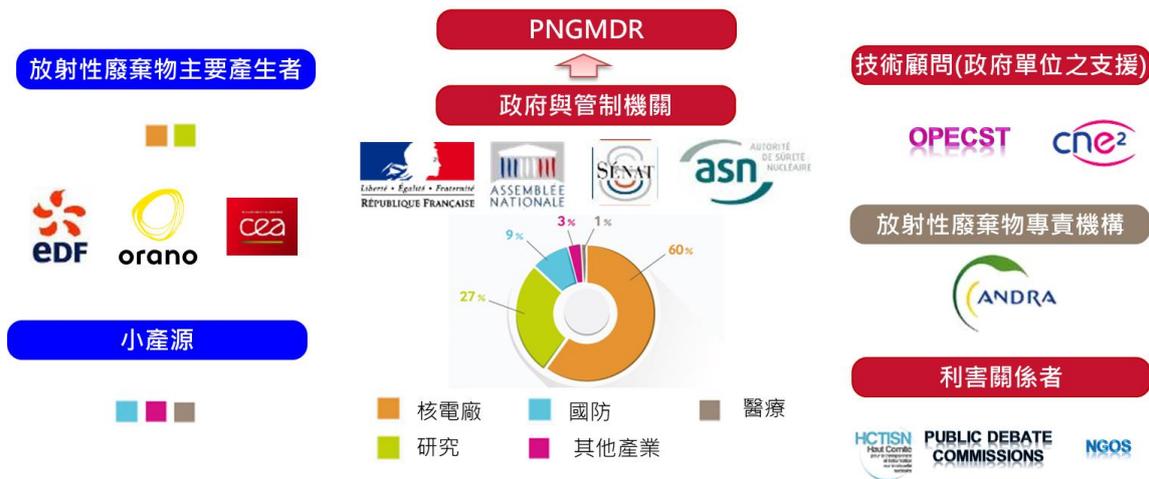
自 111 年 09 月 19 日出發，迄 09 月 30 日返國（共計 12 天），停留巴黎、特魯瓦兩地。詳細訪問行程如下：

日期	地點與行程	工作內容
09 月 19 日（一） 09 月 20 日（二）	台北到巴黎	去程（台北到法國巴黎） 會議 報到
09 月 21 日（三） 09 月 23 日（五）	法國 ORANO 公司	參加台、法低放射性廢棄物 最終處置技術交流研討會
09 月 24 日（六） 09 月 25 日（日）	巴黎	例假日，整理報告
09 月 26 日（一） 09 月 27 日（二）	法國 ORANO 公司	參加台、法低放射性廢棄物 最終處置技術交流研討會
09 月 28 日（三）	法國 ANDRA 公司	技術參訪 ANDRA CSA 低放射性 廢棄物最終處置場與 CIRES 極低 放射性廢棄物處置場
09 月 29 日（四）	巴黎到台北	返程
09 月 30 日（五）	巴黎到台北	台北

## 參、 工作內容

### 一、 法國專家說明低放處置管理層面概況

法國放射性廢棄物領域架構同樣可分為廢棄物產生者、政府與管制單位，以及 NGO 等民間團體，如圖一所示。



圖一 法國放射性廢棄物領域主要關聯性

法國在放射性廢棄物處置管理方面有幾項特色，例如:1. ANDRA 為負責放射性廢棄物處置設施選址、設施設計、運轉、封閉與監管之專責機構。2. 政府單位具有 OPECST 與 CNE2 之技術顧問單位，作為提供民意代表機關之技術顧問腳色。3. 由法國生態部(MTE)制定國家層級之放射性廢棄物管理計畫(PNGMDR)等。其中 PNGMDR 主要用意在於制定全國一致的廢棄物管理策略與標準，提供產生放射性廢棄物之核能發電業者、研究單位與小產源業者在擬定其自身放射性廢棄物處理與包件策略時之參考與作業依循。

在低放射性廢棄物處置方面，則是配合國家能源政策調整所需管理之放射性廢棄物總量、制定對應之放射性廢棄物處置計畫執行目標、統籌放廢管理研究並監督各項放廢管理作業執行進度。此外，PNGMDR 訂有公眾參與機制，透過舉辦公開辯論會之方式，徵求各界意見藉以凝聚共識。

依據法方專家表示，法國各類低放處置設施的選址作業，並未遭到民眾強力反對，或許資訊透明與公民參與機制為主要的原因之一。

## 二、 參加會議單位簡介

以下針對在本次會議中，議題相關性較大的兩間法國單位/公司作介紹：

### (一) 法國國家放射性廢棄物管理署（National Agency for Radioactive Waste (ANDRA) 簡介



圖二 ANDRA 公司法國放射性廢棄物管理機構

ANDRA 是法國唯一的放射性廢棄物管理機構，負責核廢處置設施的設計、建造、營運、監測、核廢料處理技術研發及民眾溝通。是一個獨立行政的專責機構，目前管理三座中低階、極低階核廢處置設施及一座高階核廢處置實驗坑道。資金來源的部分，除了政府以外，也向核廢料產生單位收取處理費用。

國家放射性廢棄物管理署負責對法國產生的放射性廢棄物進行長期管理。作為這項使命的一部分，ANDRA 將其專業知識為國家服務：為所有法國放射性廢棄物做尋找、實施和保證安全管理的解決方案，以保護當代和未來一代面對這種廢棄物所可能帶來的風險。

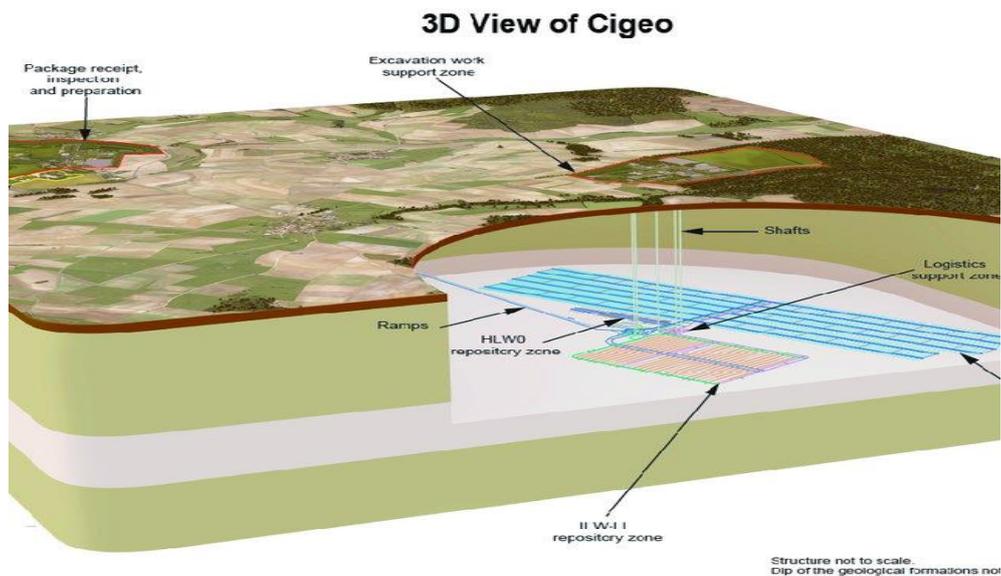
2005 年 6 月，ANDRA 提交了關於高放廢棄物和長周期中放射性廢棄物的深層地質處置可行性的報告（有時稱為 Dossier 2005）。這份 10,000 頁的報告介紹了自 1991 年法案通過以來進行的研究。得出的結論是，Meuse/Haute-Maine 地區的泥質層非常適合建設高放廢棄物和長周期中放射性廢棄物的處置設施。這是法國放射性廢棄物管理向前邁出的重要一步。2005 年 9 月 12 日至 2006 年 1 月 13 日期間，就放射性廢棄物管理進行了公開辯論，並收集了研究人員及其不同評估的意見，以便在 2006 年就該法律草案進行辯論之前告知和澄清政府的立場。2005 年的公開辯論反映了一些將在 2006 年通過的法律中得

到體現的願望，例如，制定涵蓋所有放射性材料和廢棄物的國家管理政策，重申禁止在法國處置外國廢棄物，建立負責核安全的獨立行政機構，擴大 ANDRA 的職責並加強地方信息和監督委員會的作用。

2006 年 6 月 28 日法律合併了 ANDRA 設計和運營放射性廢棄物處置設施的任務。

2008 年 6 月，ANDRA 確定了 3,115 個鄉鎮的場地地質條件適合建造低放長周期廢棄物（LLW-LL）處置設施，並向這些城市發起了徵收申請。到 2008 年底，已有 40 多個城市申請設立這樣的處置設施。

2009 年底，ANDRA 向政府提交了一份關於處置設施項目的新進展報告。這包括與當地利益相關者進行對話的提議，旨在研究深部地質處置設施地下設施的選址，確定一個 30 平方公里的區域，稱為 ZIRA。2010 年 3 月，ANDRA 被授權在 ZIRA 進行詳細的地質調查。深部地質處置設施項目被命名為 Cigeo（地質處置工業中心）。



圖三 Cigeo 高放地質處置實驗室

2010 年 8 月 3 日，在法國的“未來投資”計劃下，ANDRA 獲得了 1 億歐元，用於資助開發創新的放射性廢棄物處理解決方案，以減少某些類型的廢棄物的體積，而這些廢棄物沒有簡單的處置解決方案存在並將相關風險降至最低。該協議為 ANDRA 提供了擴展其在放射性廢棄物管理上游採取行動的能力。

2012 年，ANDRA 向政府提交了一份報告，提出了關於處置 LLW-LL 的新研究領域，同時考慮了法國核能安全透明度和信息高級委員會（HCTISN）提出的建議。根據這份報告，政府向 ANDRA 通報了其開展該項目的指導方針。公眾辯論於 2014 年初以公民大會正式結束。在工業發展方面，Cigeo 項目隨後進入基礎工程設計階段，該階段確定了將放置放射性廢棄物的地下結構，以及挖掘工作和設施運行所需的地面設施。

2015 年 2 月，ANDRA 向法國核安全局（ASN）提交了一份關於 Manche 處置設施（CSM）上限的狀態報告。該文件描述了確保長期設施安全的計劃，其結論將用於起草 CSM 安全審查報告，該報告將於 2019 年提交給 ASN。ANDRA 與法國國家研究機構（ANR）合作，並在法國未來投資計劃的支持下，組織了第一次關於優化拆解放射性廢棄物管理的提案徵集活動。12 個研發項目被選中獲得總價值 4000 萬歐元的資助。ANDRA 的內部組織將在 9 月份進行根深蒂固的變革，以確保 Cigeo 項目在進入新的設計階段之前得到更緊密和更強有力的協調。這種新的矩陣結構涉及設立兩個新部門（Cigeo 項目部門和工程部門）並重組現有部門，例如風險管理部門，成為安全、環境和解決方案戰略部門。

2016 年初，法國生態、永續發展和能源部長為 Cigeo 項目設定了 250 億歐元的目標成本，涵蓋了計劃的 150 年建設和運營。關於 Cigeo 的工業設計，該項目現已進入詳細工程設計階段，這是提交施工許可證申請前的最後一站。ANDRA 向法國核安全局（ASN）提交了有關 Cigeo 的安全選項報告。國際同儕評審小組、諮詢委員會、國家審查委員會（CNE2）、IRSN 和 ASN 對安全方案報告進行了長達數月的深入審查，並於 2018 年 1 月發布了意見。在完成了兩年的程序和工程之後，用於分類和處理放射性廢棄物的設施的大樓在 Aube Industrial 的分組、儲存和處置設施（Cires）落成。這個新設施旨在滿足核能發電以外部門放射性廢棄物生產者的要求。2016 年底，ANDRA 的道德與社會委員會（CES）成立，這是 ANDRA 在 2013 年公開辯論後作出的承諾的結果。CES 專注於環境民主，監督 ANDRA 對社會開放和與社會互動的承諾的履行情況。

ANDRA 位於巴黎附近的總部，設有與任務相關的特定部門，如科學部門、項目部門、工業部門（負責公共服務任務）、風險管理部門（主要負責安全、品質和環境問題，以及國家放射性物質和廢棄物清單），和其他支持部門

如總秘書處（管理、採購和合同、會計和控制、法律和保險）、人力資源部門、通信部門和國際部門（其中包括一個商業合約業務部門與處理外國之業務單位）。

## （二） 歐安諾集團（ORANO）簡介



圖四 會議中專家討論

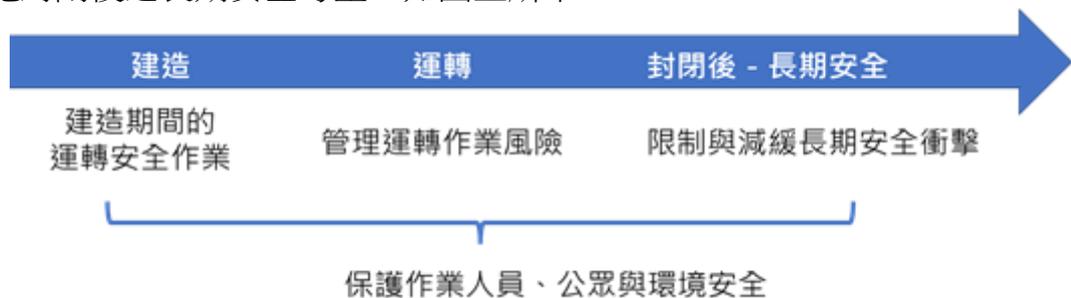
ORANO 公司是法國的一家跨國能源公司，其前身為曾是全球核電業中排首位的 Areva 公司，主要業務為核能相關。

ORANO 前身的 Areva 是法國一家國有的核能與再生能源公司，擁有垂直整合「燃料前端」、「核電廠輸出」及「燃料後端再處理」的大型企業。但在日本福島事件後鈾礦價格暴跌，以及在芬蘭及法國建造 EPR 大型反應器所遭遇到的工期延長（尤其芬蘭建案幾乎是災難性的建築工地，而且每部機組造價都超過 50 億美元等），等幾項重大打擊後，幾乎讓前 Areva 沉沒在 2015 年初。該組織承認虧損了 50 億歐元，並向國有股東尋求幫助，在此過程中也解雇了將近 6,000 名的員工。之後 Areva 公司在 2016 年成立了 New Areva，將重心放在核燃料的循環領域上，在瀕臨破產和部分解散後，這家核集團放棄了 Areva 的名稱，於 2018 年正式將自己重新命名為 ORANO。並於 2019 年將 900 名員工搬到位於巴黎地區的新總部以降低成本。新公司標誌，代表了”改革”與”野心”，將追求“donner toute sa valeur au nucléaire”（全部價值賦予核能）。

### 三、 法國放射性廢棄物管理架構與現況議題

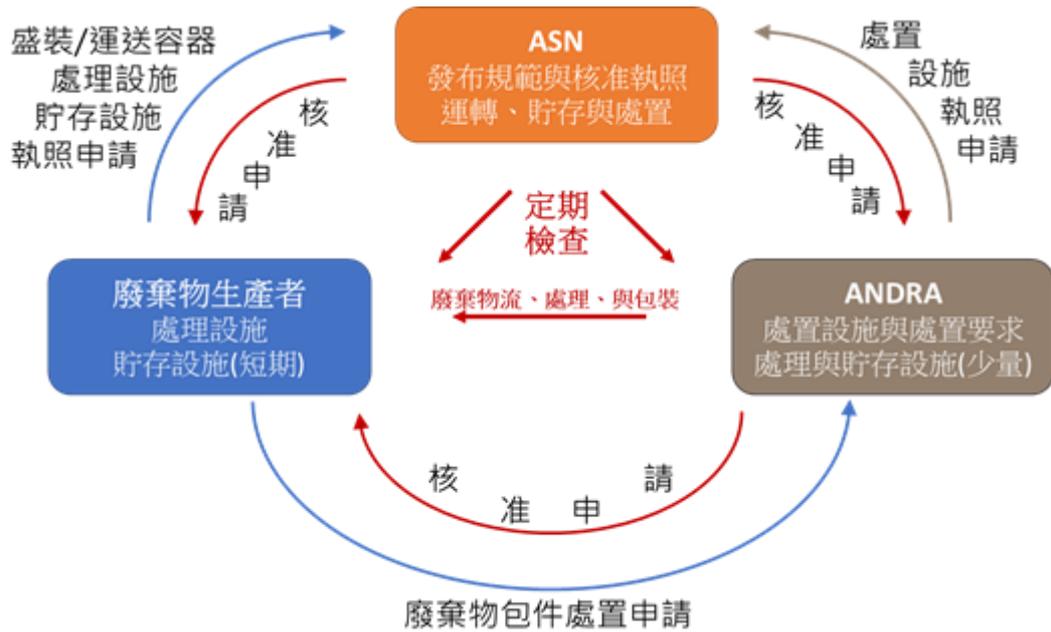
#### (一) 法國低放處置管理系統發展現況

法國對於低放射性廢棄物處置之安全基本要求，其基本安全目標是保護人和環境免受輻射危害影響。雖然法國低放處置發展早於 IAEA 制定各項安全指引之前，發展至今其放射性廢棄物處置安全要求均符合 IAEA SSR-5 的 26 項要求之規範。安全功能亦是以圍阻與隔離為最主要之安全功能，並以多重安全功能與深度防禦為工程障壁系統設計精神。低放處置依其作業階段不同，其主要之安全考量有所差異，但就處置設施而言，最關鍵之考量為處置設施封閉後之長期安全考量，如圖五所示。



圖五 法國低放處置安全要求

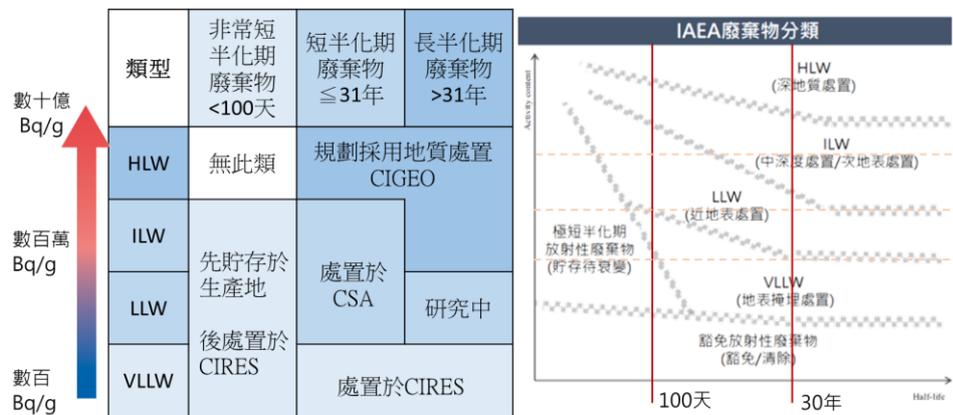
ASN 為法國之核能安全管制機關，為各類處理、貯存與處置設施執照之審查與發照機關。由於 ANDRA 為獨立之處置設施專責機構，其主要利用廢棄物接收準則 (Waste Acceptance Criteria WAC)，控制廢棄物生產端可以送到處置場的核種盤量。因此，放射性廢棄物生產端之核電廠與小產源業者，須向 ANDRA 申請欲將廢棄物送至其處置設施進行處置。其申請方式是依照廢棄物流、廢棄物處理與包裝方式進行該單位之廢棄物包件處置申請，當 ANDRA 核准後，廢棄物生產端業者不需再重複申請核准，僅須提前通知欲送置處置場之單次運送包件類型與總量。此外，為確保處置場接收之處置包件均符合 WAC 規定，ANDRA 亦會至廢棄物生產端進行定期檢查，因此 WAC 為處置場接收作業之關鍵依據。



圖六 法國低放處置日常工作主要關聯

(二) 法國低放射性廢棄物分類處置規劃與營運經驗

法國在放射性廢棄物分類與處置規劃主要是由 ANDRA 負責，其分類考量因子以放射性廢棄物之比活度與半衰期長短為主要考量。雖然其分類考量因子與 IAEA 建議相同，但在分類上比 IAEA 更為細緻，實質上在低放與中放廢棄物另區分出低放長半衰期廢棄物 LLW-LL、低放短半衰期廢棄物 LLW-SL、中放長半衰期廢棄物 ILW-LL 與中放長半衰期廢棄物 ILW-SL。置於其處置規劃，基本符合 IAEA 對於不同分類廢棄物之處置建議，如圖七所示。



圖七 法國放廢分類與處置規劃

目前法國運轉中處置設施包含自 1992 年開始運轉之 CSA 低放處置設施與 2003 年開始運轉之 CIRES 極低放處置設施。CSM 低放處置設施已進入主動監管期、CIGEO 高放處置設施則預計在 2025 年完成申照程序，如圖八所示。

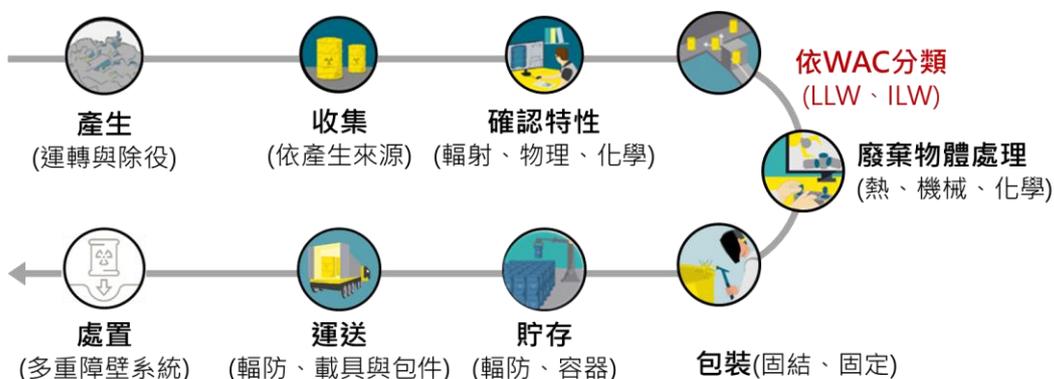
由於只要符合 CIRES 極低放處置設施之廢棄物接收準則(WAC)要求，即可將放射性廢棄物包件送至 CIRES 處置設施進行處置。基於 CIRES 極低放處置設施之單位體積處置費用僅為 CSA 低放處置設施單位體積處置費用的十分之一。因此，在法國出現了廢棄物生產者儘可能將廢棄物處理為此類包件的情形，並導致 CIRES 的接收量超出了原本規劃的預期。為此，目前法國正著手規畫擴建 VLLW 的處置設施。



圖八 法國各處置廠目前概況

### (三) 法國低放廢棄物進處置場前之關鍵考量

低放廢棄物從其產生至進行處置之生命週期如圖九所示，分別包含產生、收集、確認特性、依 WAC 分類、廢棄物體處理、包裝、貯存、運送、處置。

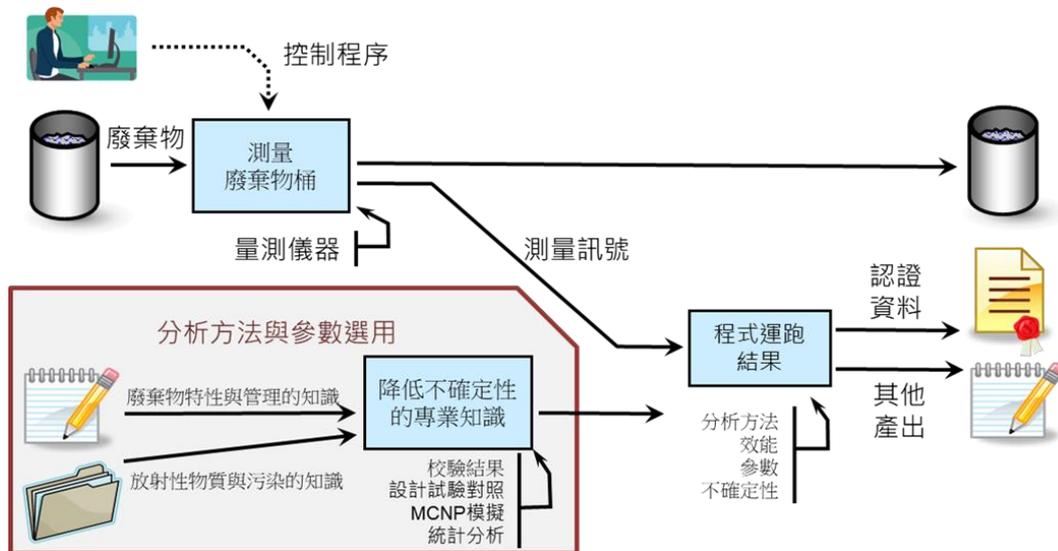


圖九 低放射性廢棄物生命週期(廢棄物生產端)

因此可說明廢棄物進行處置前主要之作業階段為分類、處理與貯存三種。依法方廢棄物生產端之與會代表表示，廢棄物包件的處理與容器選擇之關鍵考量主要為廢棄物接收準則。生產端業者會依據 WAC 分類標準，除基於廢棄物流進行廢棄物分類外，另外會依據處理與處置成本分析，選擇整體成本較低之分類與處理方式。

在本節會議議題中，法國方面討論之重點在於如何落實 WAC 以「廢棄物流」作為管理分類的作法，以及如何在廢棄物處理與包裝選擇上取得安全、運輸、貯存與成本間之最佳效益研擬廢棄物管理策略為其論述重點。

為了落實所研擬之廢棄物管理策略，確認放射性廢棄物特性成為關鍵考量。由於固化之廢棄物包件在放射性量測上有相當之難度，法方建議應在進行廢棄物處理之前即須進行放射性量測。由於不同廢棄物流具有不同之放射能量特性，除需要依其特性規劃採用之量測設備，通常還會牽涉複雜的訊號解讀與分析，例如：許多長半化期核種難以直接量測 ( $\alpha$ ,  $\beta$ )；或廢棄物包件中具有低占比的 Cs-137 與 Co-60 即可能掩蓋錒系元素的低強度與低能量伽馬射線而導致量測誤差。法方說明其常用之輻射檢測與分類流程如圖十所示。

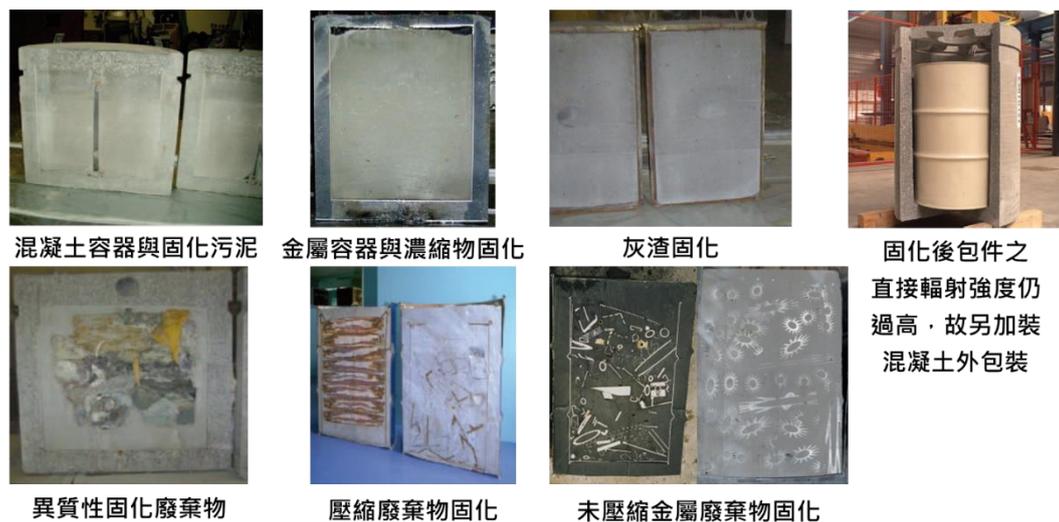


圖十 輻射檢測與分類之流程

#### (四) 法國廢棄物接收準則 (Waste Acceptance Criteria) 簡介

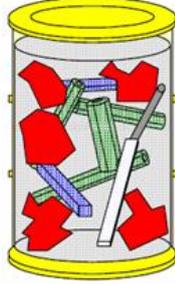
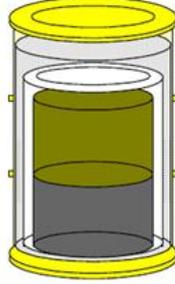
廢棄物接收準則的主要參數有：廢棄物的物理與化學型式、安定性含水量、化學與有毒成分、核種最大比活度、表面劑量率、表面污染、包件尺寸與重量、搬運方式，以及其他等等。因此廢棄物產生者的考量關鍵，就在於如何減少放射性廢棄物的產生與體積，以及如何透過分類處理包裝程序，讓廢棄物包件符合處置設施的 WAC。

由於接收準則要求內容與處置場環境及障壁系統具有高度的相關性，故不同處置場址與處置設施，會有不同的廢棄物接收準則。法方代表表示，依廢棄流與考量差異，整體約有 60 中不同的 WAC 要求。其中與核電廠相關的約有 5~10 種。雖然各種廢棄物流的 WAC 要求不太相同，但均要求廢棄物體需進行安定化或固結，如圖十一所示



圖十一 低放射性廢棄物固化與包裝類型

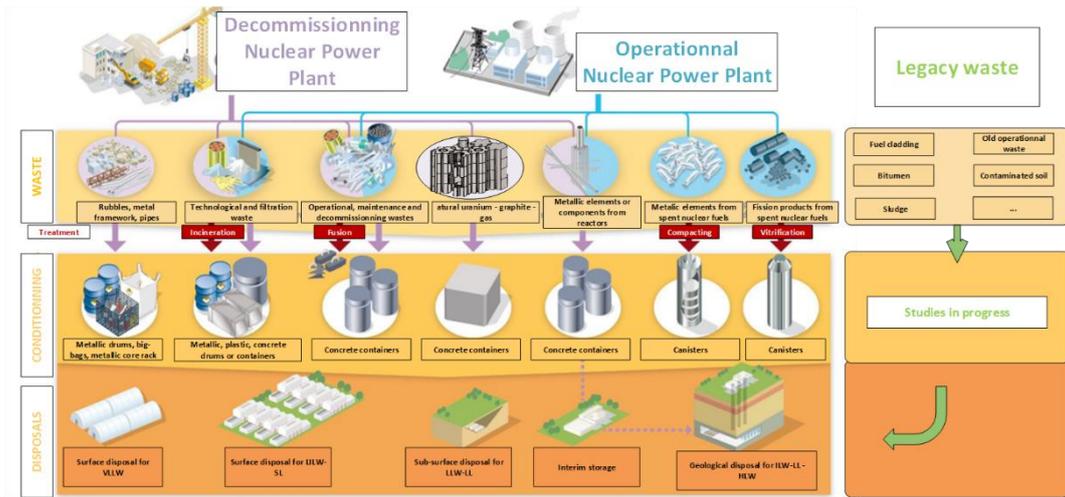
依法國 WAC，不論選用何種盛裝容器，低放廢棄物均需進行固化與固結，若有處置功能需求則另由 ANDRA 自行設計。因此，廢棄物生產者端在選擇容器時，並不需要考量處置功能需求。而在國際經驗方面，近地表處置設施之廢棄物體均需安定化處理（固化）。例如日本近地表處置設施不論試運轉或除役廢棄物，均須採用固化處理，如圖十二所示。

Facility	No.1	No.1、No.2、No.3	
Type of waste	Homogeneously-solidified waste	Solidified dry active waste	
		Encapsulated waste package	Melting-solidified waste package
Image of waste package			
Target waste	Condensed liquid spent resin, etc.	Dry active waste	Dry active waste
Solidified material	Cement, asphalt or plastic	Mortar	Mortar

圖十二 日本六所村近地表處置設施之固化處理方式

目前法國的廢棄物接收準則並未涵蓋該國之所有放射性廢棄物。就低放射性廢棄物而言，低放長半衰期廢棄物 LLW-LL 與遺產類廢棄物尚無接收準則，LLW-LL 是因為尚未決定採用核種處置障壁系統，遺產類廢棄物則是因為不確定其核種盤量特性。由此可知，廢棄物接收準則需要在有明確處置規劃以及明確掌握廢棄物流核種盤量的情況下，方可研擬出較佳之廢棄物接收準則。

前述遺產類廢棄物主要是法國核能產業發展前其所處置之放射性廢棄物。由於當年全球對於低放射性廢棄物處置安全標準尚處於摸索階段，而導致這些廢棄物之處置方式並不符合目前的處置安全要求。目前這些廢棄物正由 ORANO 公司進行檢整作業中，其與會代表表示當完成廢棄物核種盤量研究後，會將資料送予 ANDRA 研討如何進行處置規劃並研訂相關 WAC。目前法國之放射性廢棄物產源、分類與處置規劃如圖十三所示。



圖十三 法國不同廢棄物流的處理與處置規劃

### (五) 法國低放處置場設計與運轉經驗

CSM (la Manche) 為法國首座近地表處置設施，目前已進入封閉監管階段，法方表示此設施的設計與運轉經驗為後續各低放處置設施設計之重要經驗來源，CSM 簡史如圖十四並說明如下：

1. 1967 年選址
2. 1969 年取得執照。
3. 1979 年 ANDRA 成立，重新檢討 1969 與 1971 設計。
4. 1985 年重建與檢整已處置廢棄物。
5. 1991~1997 年封閉作業。



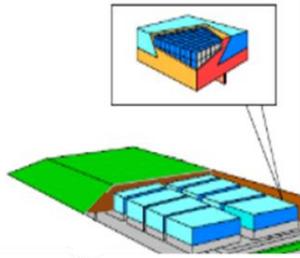
圖十四 法國低放處置場 CSM 發展歷程紀錄照片

就經驗傳承與設計改善經驗而言，由於當初在運轉階段並未妥適的維持廢棄物與水隔離之設計，同時堆疊方式亦缺乏力學穩定性。因此將廢棄物重新包裝、重新設計處置區基礎設計型式，加入處置窖設計，以及充分利用空間之堆疊方式等。當年的重新檢討過程，確立了現今法國採用處置窖搭配覆蓋層的設計概念。

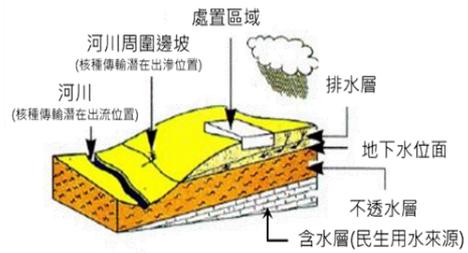
目前法國低放處置多重障壁系統，其組成概念從廢棄物中 WAC（廢棄物體、容器）與分類處置（比活度與半化期）的確認；到處置系統中處置窖與填充、覆蓋層、底部阻水/排水與其他等等的工程措施；再到場址中符合 IAEA 處置選址禁置類條件建議（嚴重天然災害），優先選擇高透水地面層與其下不透水層夠厚，且不與民生及農業用水層連通，還有固定的潛在出滲與出流趨勢（豐枯水期流場特性相同或相似）等等的標準確立，如圖十五所示。



廢棄物



處置系統



場址

圖十五 法國低放處置多重障壁系統組成概念

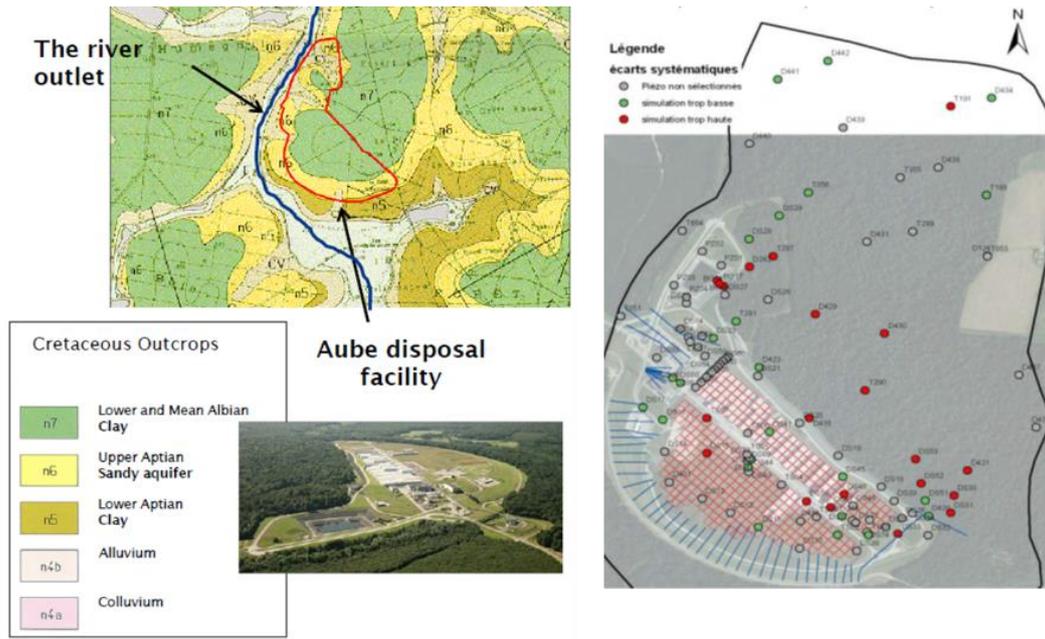
(六) 法國低放處置場 CSA 案例介紹、關鍵設計考量

CSA 處置場總面積 95 公頃，處置區域 30 公頃，設計容量（核發執照）為 1,000,000 m<sup>3</sup>。自 1992 年迄今已處置廢棄物 408,298 包件，以及已封閉 152 處置窖，處置占比 35.3%。其他在 2020 數據中顯示處置場 9,411 m<sup>3</sup> 的接收體積、8,229 m<sup>3</sup> 的處置體積、6,941 個已處置包件、已貯存 11,095 桶（55 加侖桶壓縮後裝於 2418 個 450 升桶）、以及 380 桶已澆置的容器，如圖十六所示。

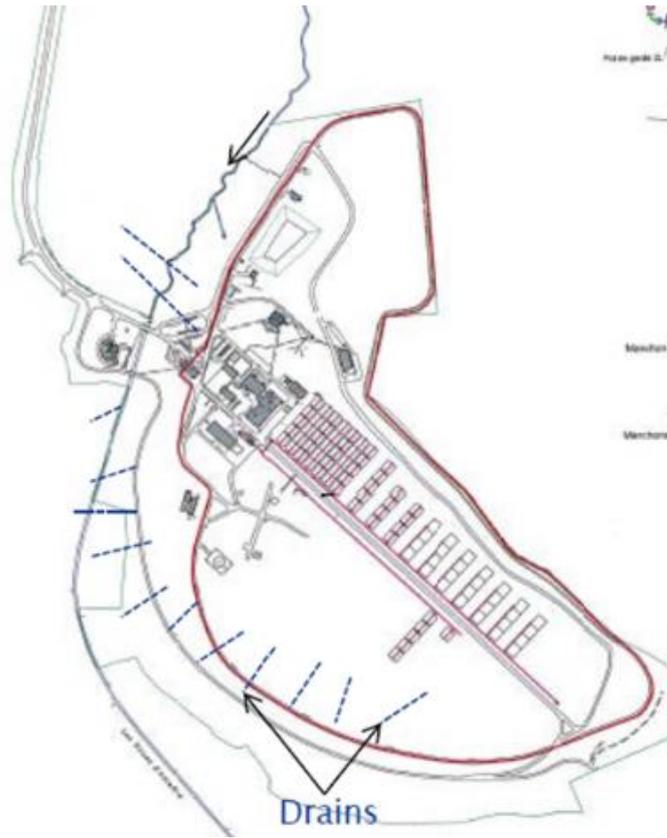


圖十六 法國低放處置場 CSA 簡介

在 CSA 場址的環境選擇與控制關鍵考量中，以橫向排水功能與避免垂直下滲功能為主要考量的場址障壁系統，以及確認地質條件擁有足夠厚的黏土，如圖十七綠色區塊、河川旁有透水層，如圖十七黃色區塊。設施設置總數超過 40 個之地下排水系統，以便控制地下水位，如圖十八所示。最後備有完整的監測井網，並配合地下水模型校驗與長期預測。藉以確認可達成維持地下水位距離處置窖底至少 30 公分之設計要求。

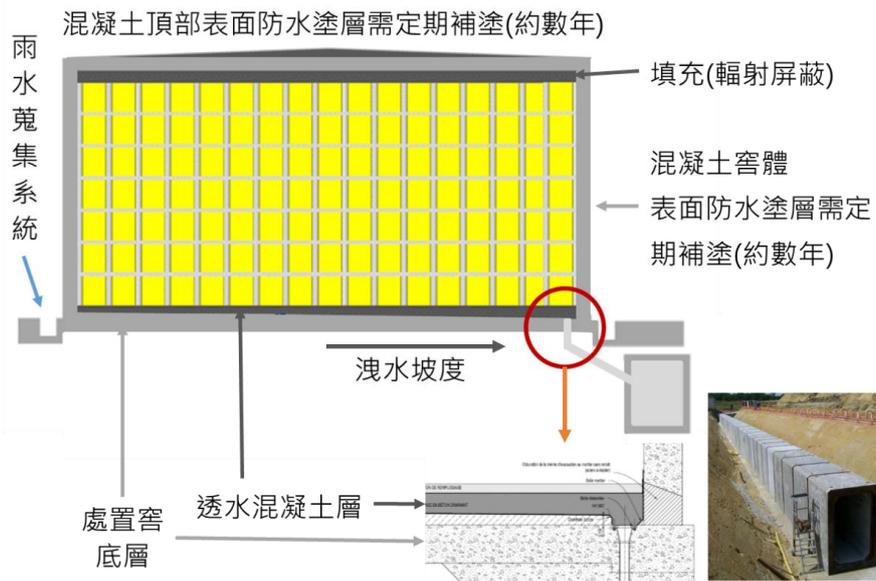


圖十七 法國低放處置場 CSA 設施區域地質環境與地下水監測站網示意圖

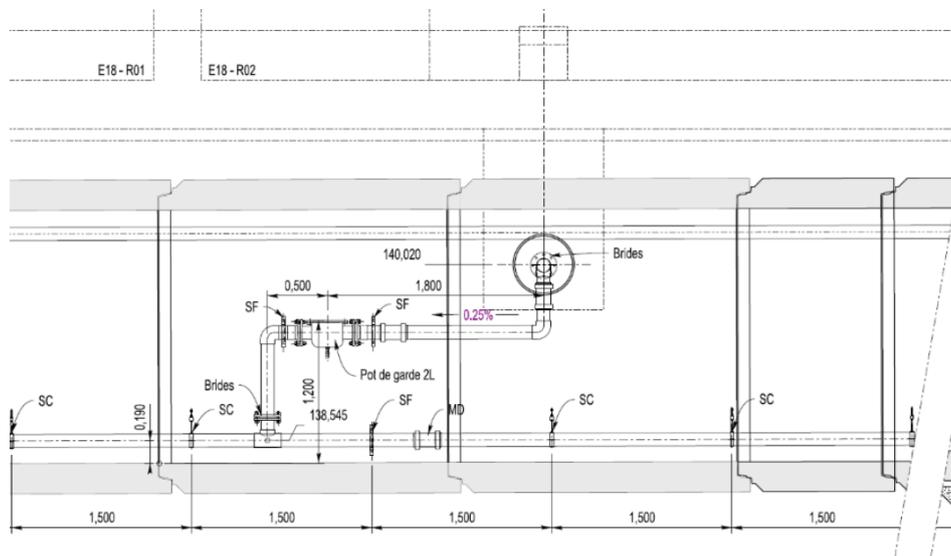


圖十八 法國低放處置場 CSA 地下水排水設施分布示意圖

在 CSA 處置窖的設計概念中，處置窖頂部與底部較厚，兩側較薄，以抵抗降雨入滲，與底部發生滲流交換之情況為主要設計重點，如圖十九。另配合處置窖底部的監測管線，將各處置窖監測管線連接至整場監測系統，並設有觀察窗，可隨時以肉眼確認哪個處置窖出滲，如圖二十所示。

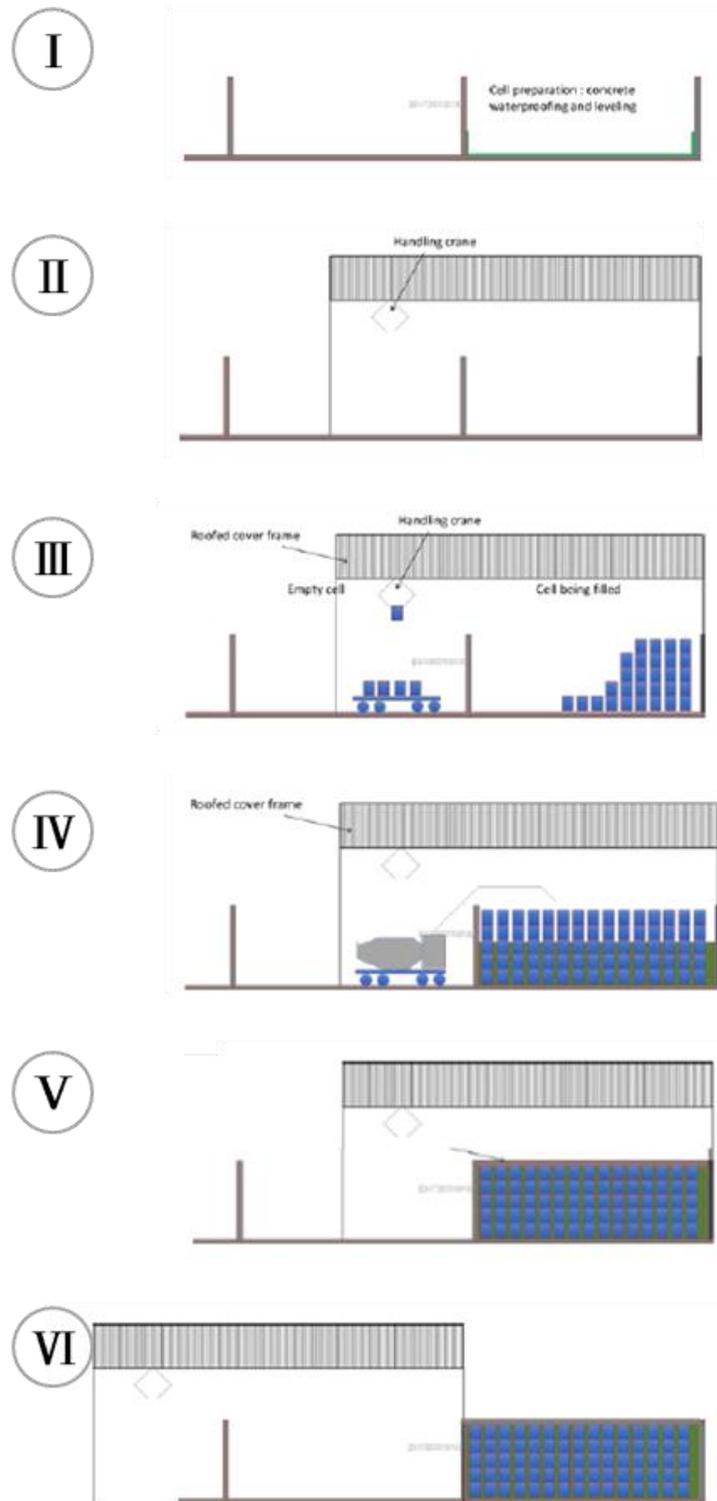


圖十九 CSA 處置窖的設計概念圖



圖二十 法國低放處置場 CSA 處置窖底部監測管線剖面圖

關於處置作業流程與關鍵考量整理如圖二十一所示並說明如下：



圖二十一 法國低放處置場處置作業流程示意圖

#### 1. 法國處置窖與監測系統

此階段有兩項重要的變革，即處置窖由每排獨立 4~5 個處置窖，轉為 4~5 個連在一起的處置窖，主因是法國地震威脅小，以及確認興建工法可以確保整體品質；另一項則是地下監測管線改為雙排處置窖共用一條監測坑道，目的為節省工程與維護成本。

#### 2. 移動式屏蔽吊車就定位

#### 3. 吊運廢棄物作業

軌道式的移動系統，屏蔽吊車具有定點旋轉 90 度之換軌裝置，且同排處置窖規劃處置相同的包件（原則上單一處置窖僅堆放一種包件類型，以提高堆疊率。），不需更換吊具，相當方便。另外，吊車作業為全自動控制，作業員僅是監看過程與避免操作錯誤，安全且高效。原則上單一處置窖僅堆放一種包件類型，以提高堆疊率。

#### 4. 每一層進行填充作業

填充物均須提供力學穩定功能。若容器為混凝土材質，採用細骨材填充（如圖二十二上排）；若容器為金屬材質，則採用混凝土填充（如圖二十二下排）。

#### 5. 處置窖封蓋作業

最後一層廢棄物堆置後，需先設置一層輻射屏蔽層。為了降低該層厚度，可透過包件堆疊規劃，將表面劑量率較低的包件暫存並用於堆置於頂層，以頂層包件提供屏蔽作用，削減來自其下之輻射強度。

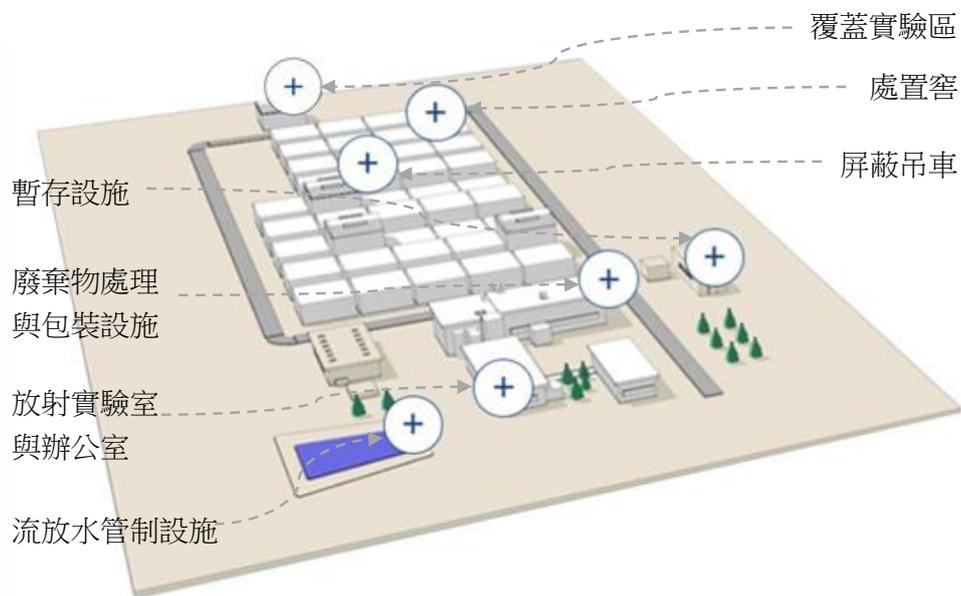
#### 6. 移動式屏蔽吊車移至下一個處置窖

重複 2~5 步驟，直到整排處置窖均完成封蓋，之後再於中央通道架設連結軌道，將移動式屏蔽吊車移動至下一排處置窖作業區繼續進行作業。



圖二十二 處置窖填充作業示意圖

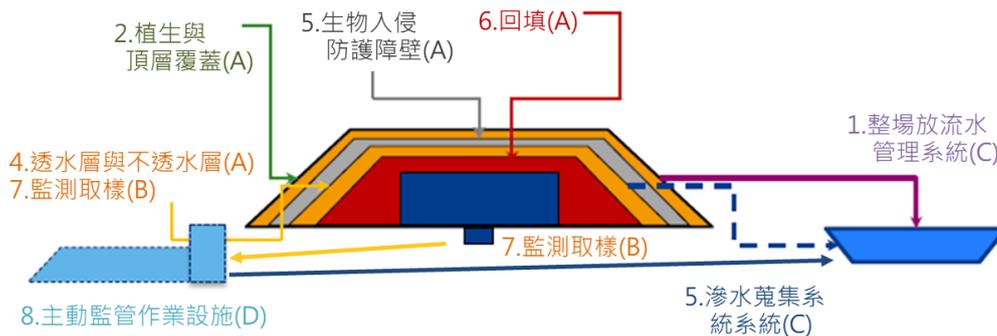
CSA 處置設施整布局如圖二十三所示，包含：處置區、暫存設施、廢棄物處理與包裝設施、試驗室與辦公室、放流水管制設施等。其中，廢棄物處理與包裝設施主要是用於服務少數之小型小產源單元，由於該單位規模太小且廢棄物數量過少，故採用送至 CSA 處置設施進行處理後再進行處置之方式。ANDRA 表示其處理設施能量有限，並無法提供大量之廢棄物處理服務。



圖二十三 CSA 處置設施分布示意圖

## (七) CSA 覆蓋系統設計

最終覆蓋系統設計基本上分為：雨水蒐集與監測系統、處置系統滲水收集與監測系統，如圖二十四所示。圖中可見：子系統A的覆蓋層系統、子系統B的監控/監視系統、子系統C的整場放流水管理系統、子系統D的主動監管作業設施，用於取樣與水質檢測等作業。



圖二十四 覆蓋系統設計示意圖

覆蓋層系統中，排水型的覆蓋層設計通常會有複數的阻/排水系統組合設計。在 CSM 封閉後，曾發生覆蓋層邊坡坍塌事件，依 CSM 經驗來預測，在 300 年的主動監管期內，除需要經常性的簡易維護以外，由於會發生不均勻沉陷與坍塌，定期還會有重新鋪設的需求，如圖二十五所示。目前 CSA 最終的覆蓋系統設計尚未定案，但已確定覆蓋層兩側邊坡改緩坡的設計，以及處置窖外不再堆疊混凝土包件以避免不均勻沉陷。



圖二十五 法國低放處置場 CSM 覆蓋系統設計施工

ANDRA 曾分別考量過四種不同的覆蓋層組合概念：

1. 屋頂（圖二十六，左 1）

難以維持 300 年不需維護，需增加耐震、耐風設計等考量，以及需落柱（沒辦法在封閉時才做）。

2. 土壤、砂石、黏土互層（圖二十六，左 2）

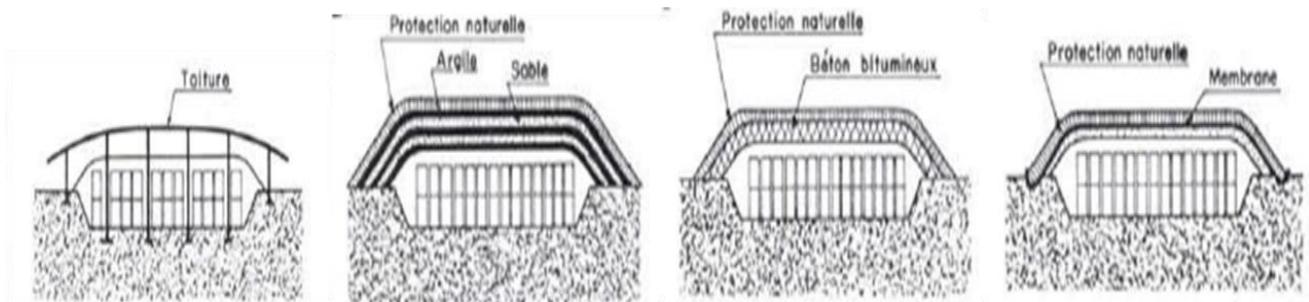
黏土要夠厚才能確保不透水性。另外，複數排水系統會導致覆蓋層變厚。最後的問題是坡度越緩，面積需求就越高。

3. 土壤、膨潤土、混凝土（圖二十六，右 1）

混凝土有張力破壞問題（應該要做處置窖）以及膨潤土較貴（可以混砂）。日本六所村的概念屬於這類型。

4. 土壤、砂石、不透水布（圖二十六，右 2）

不透水布並不是十分可靠，施工時就有可能有些破洞沒發現，而且在力學與耐久度方面也很有有限。



圖二十六 覆蓋層單元組成示意圖

CSA 目前研究的方向，是以維修需求與材料取得難易度為考量，ANDRA 嘗試以黏土層替代不透水布，目前仍在研究與驗證不同設計的效果。同時，亦研究氣候變遷對降雨影響，以及降雨對表面層的影響。

從現場的了解與議題討論終中，若要應用在台灣，需注意台灣特殊天氣之強降雨特性對於覆蓋層的影響，其設計重點應放在避免於主動監管期內進行多次維修。排水型處置系統之覆蓋層設計難以避免維護，可調整為阻水型處置系統，雖然興建成本較高，但維護成本將大幅降低。



圖二十七 法國低放處置場 CSA 設施參訪

(八) 極低放處置場 CIRES 案例介紹、關鍵設計考量與設施參訪

CIRES 也位於 Troyes 地區，與 CSA 設施相距不遠，因此區域環境位置與 CSA 相同，但較特別的是 CIRES 位於相較 CSA 地勢較低之地區，設施也座落在不同的地質層，因此地下水環境特徵略有差異。處置場總面積 46 公頃，處置區域 18 公頃，設計容量（核發執照）為 650,000 m<sup>3</sup>。自 2003 年迄今已處置廢棄物 487,904 包件，以及已封閉 18 條壕溝，處置占比 63.4%，預計在 2030 年擴充至 1,100,000m<sup>3</sup>。其他在 2020 數據中顯示處置場 15,974m<sup>3</sup> 的接收體積、18,270 m<sup>3</sup> 的處置體積、17,325 個已處置包件、已壓縮廢棄物進行塑膠布外包裝共 2,817 m<sup>3</sup>、以及已壓縮廢棄物進行容器包裝共 666 m<sup>3</sup>。，如圖二十八所示。



圖二十八 法國低放處置場 CIRES 處置場簡介

CIRES 的原意為” Le Centre Industriel de Regroupement, d’ Entreposage et de Stockage” ，意思是用於分組、分類和處置的工業設施，因此這個單位被賦予了多項活動。

1. 生產。

VLLW 廢棄物主要來自核設施的運行或拆除、使用放射性的常規工業以及污染場地的修復。

2. 廢棄物包裝。

廢棄物在生產現場進行處理，大部分包裝在金屬盒或稱為太空包的大塑料袋中。

3. 廢棄物運輸和交付。

按照嚴格的國際法規，幾乎所有 VLLW 包裝都通過公路從生產商運送到處置設施。每個工作日平均有 10 輛卡車將廢棄物包運送到處置設施。

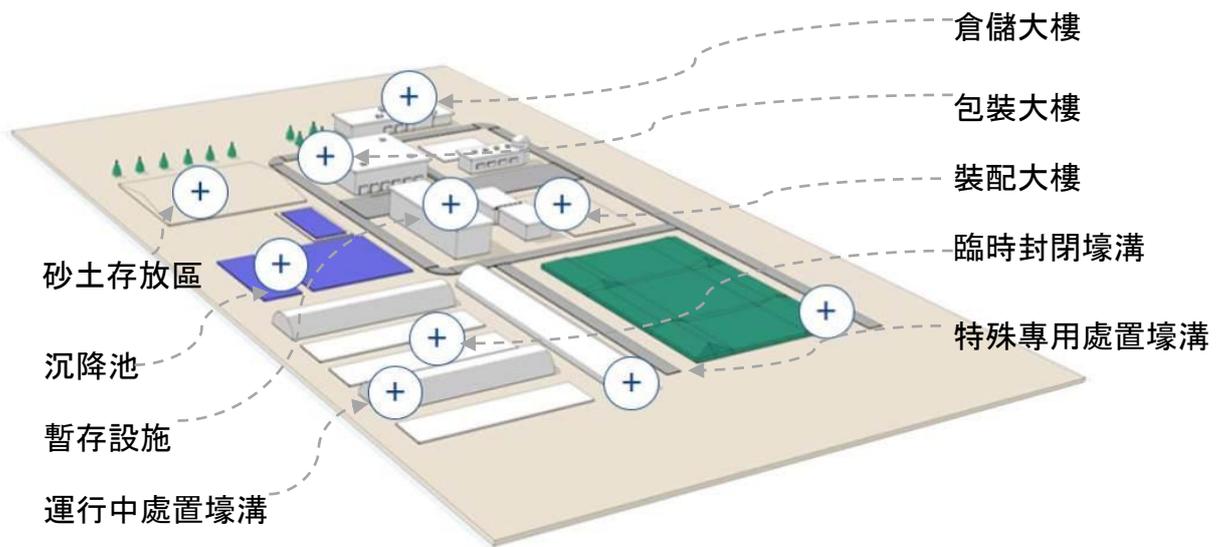
4. 抵達 CIRES。

進行測量以驗證運輸容器上的輻射水平（劑量率和污染）和廢棄物包的放射性特徵。

#### 5. CIRES 的加工處理和調節。

某些廢棄物包在處置前須先經過前處理，例如一些塑料廢料或廢料被壓實以減少體積、污泥和廢液固化、處置。

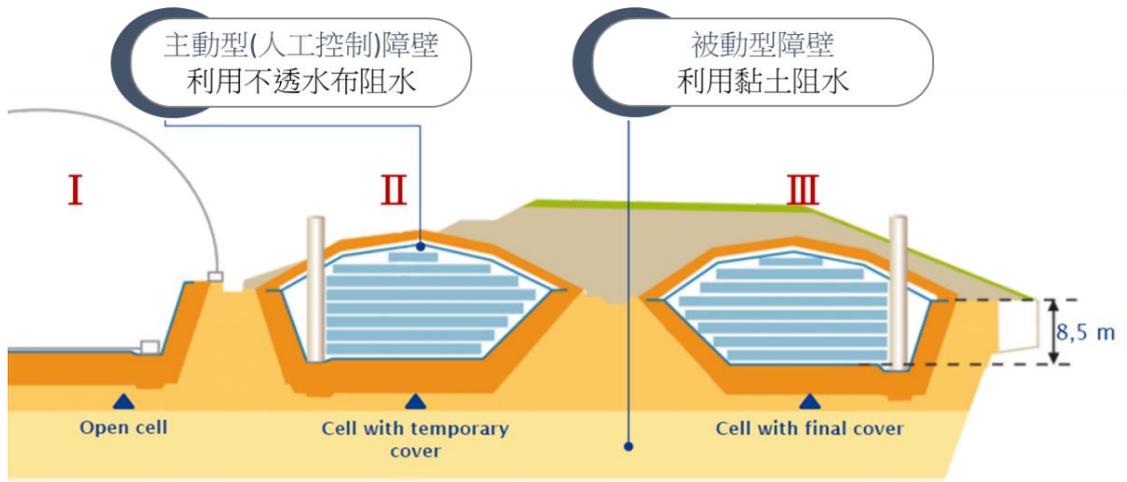
85%交付的廢棄物已經經過處理和包裝以供進行直接處置。每年，大約有 30,000 m<sup>3</sup>的廢棄物被放置在粘土層中的壕溝中。



圖二十九 法國低放處置場 CIRES 設施現地分布圖



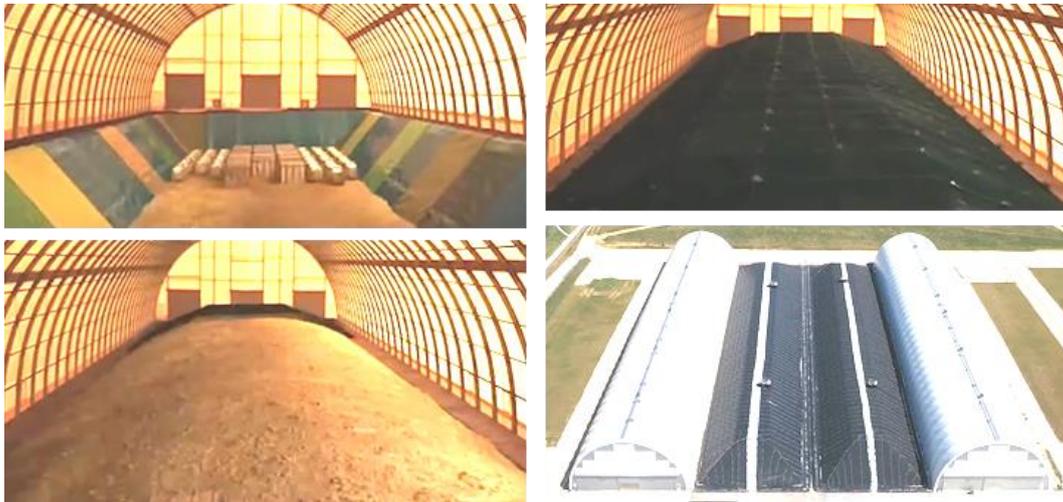
CIRES 處置系統可大致分三階段，如圖三十一所示並說明如下：



圖三十一 法國低放處置場 CIRES 處置系統三階段示意圖

### 1. 運轉階段

開放壕溝與頂部屏蔽。其運轉流程為在壕溝中堆疊完成後（如圖三十二，左上）覆土回填（如圖三十二，左下），再以不透水布鋪設（如圖三十二，右上），最後移除屏蔽屋頂（如圖三十二，右下）。



圖三十二 CIRES 運轉時期不同作業階段示意圖

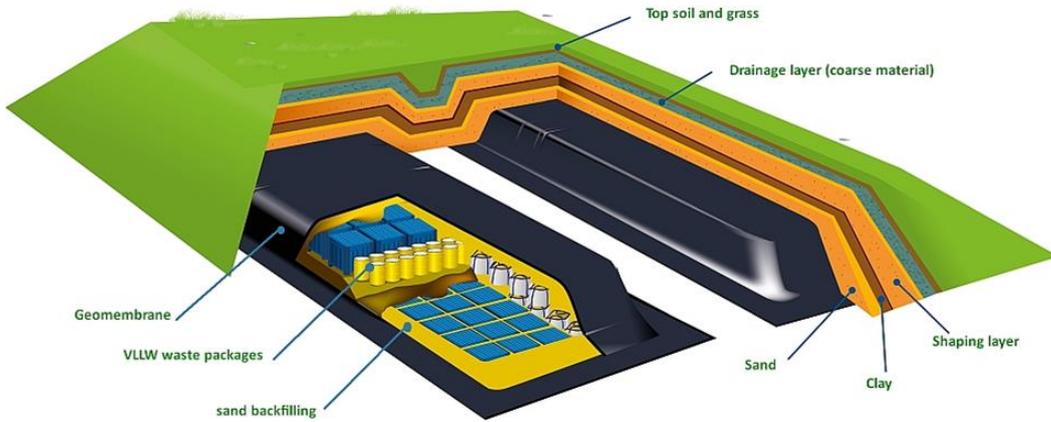
### 2. 壕溝封閉階段

已處置與回填壕溝，並臨時覆蓋。

### 3. 處置場封閉階段

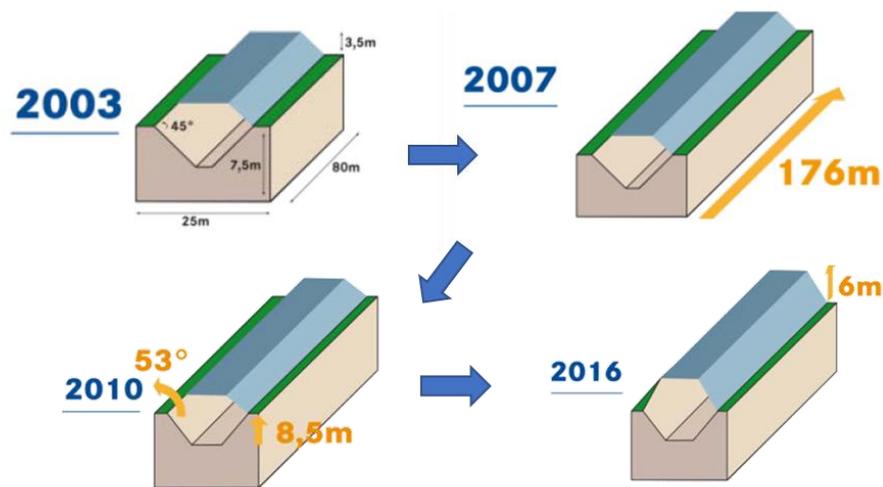
已處置與回填壕溝，然後最終覆蓋。

其中大型與重件廢棄物處置部分，可搭配設置吊車，來堆置這類物件。目前規劃兩個壕溝為一組，設置最終覆蓋層，如圖三十三所示。



圖三十三 雙壕溝最終覆蓋示意圖

針對 CIRES 的接收量超出了原本規劃的預期的部分，CIRES 處置系統自 2003 年開始持續進行設計調整。從 2003 年的設計容量  $10,000\text{m}^3$ ；到 2007 年將壕溝延長至 176m，設計容量達到  $25,000\text{m}^3$ ；然後 2010 年又進行了壕溝邊坡角度的改造改為  $53^\circ$ ，並將深度增加至 8.5m，設計容量達到  $30,000\text{m}^3$ ；最後 2016 年將壕溝地面上堆疊高度調高至最高至 6m，其設計容量擴充為  $34,000\text{m}^3$ ，如圖三十四所示。



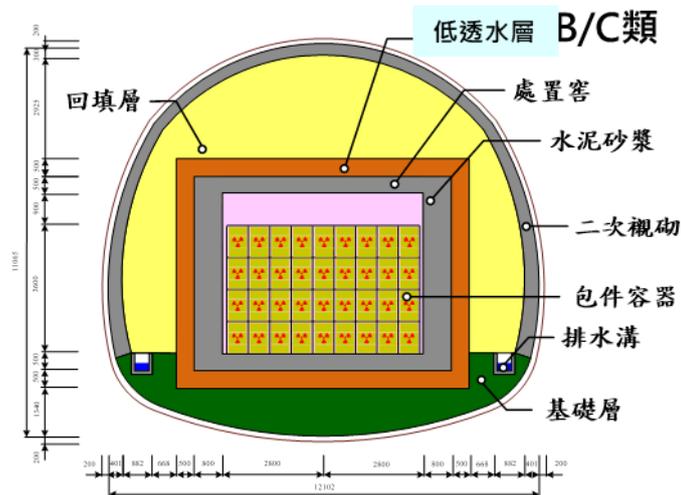
圖三十四 法國低放處置場 CIRES 處置系統設計最佳化調整過程

#### 肆、心得及建議

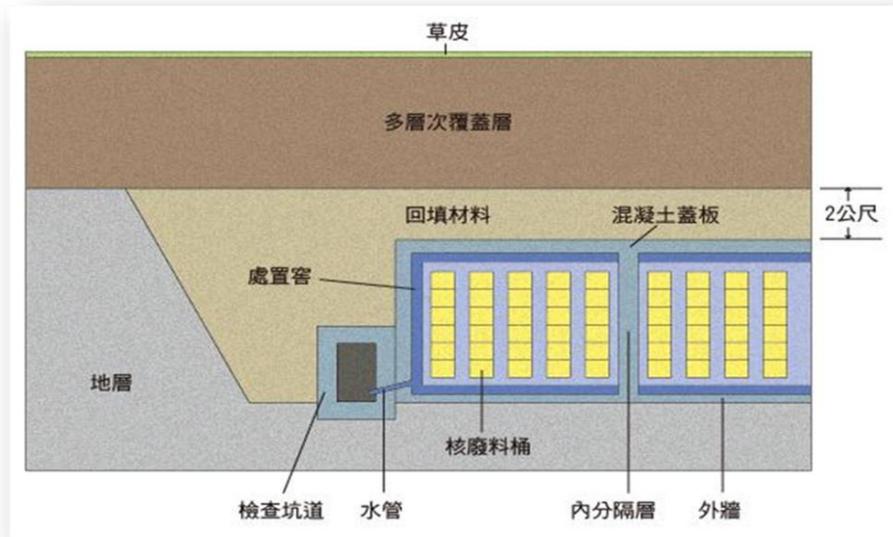
一、 台灣目前低放射性廢棄物處置深度規劃均類似日本 Level 1 放射性廢棄物之次地表處置形式（地下深度達 70 公尺以上），全採坑道式處置方式，成本相對較高，但反觀中國大陸、法國、西班牙、日本 Level 3 低放射性廢棄物都採近地表處置，降低處置成本，安全性也無疑慮，台灣似乎可再思考台灣低放射性廢棄物近地表處置的可行性。



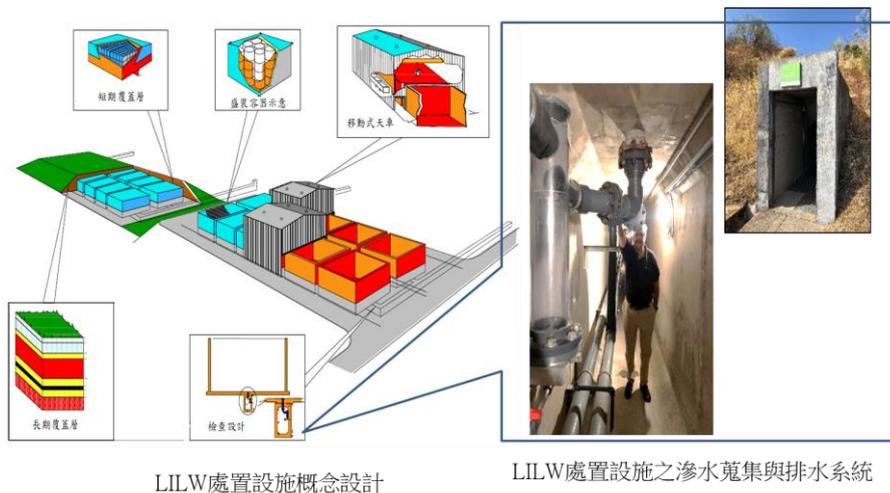
圖三十五 會議討論



圖三十六 台灣目前規劃之放射性廢棄物之次地表坑道式處置形式



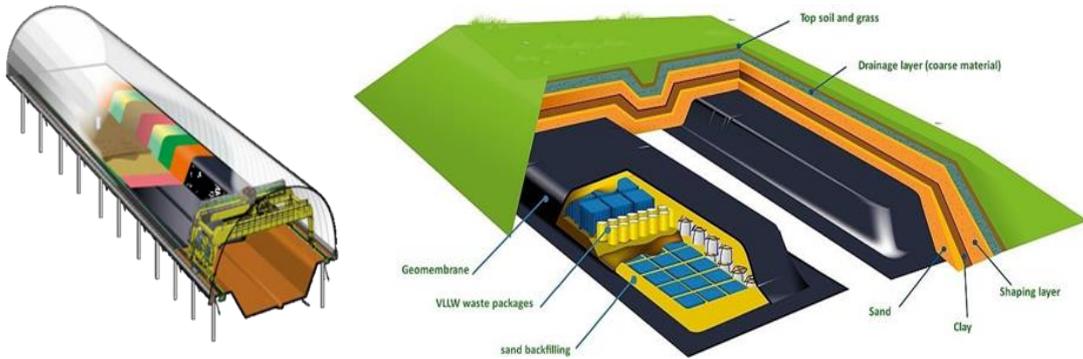
圖三十七 日本目前規劃之放射性廢棄物之近地表處置形式



圖三十八 法國及西班牙目前規劃之放射性廢棄物之近地表處置形式

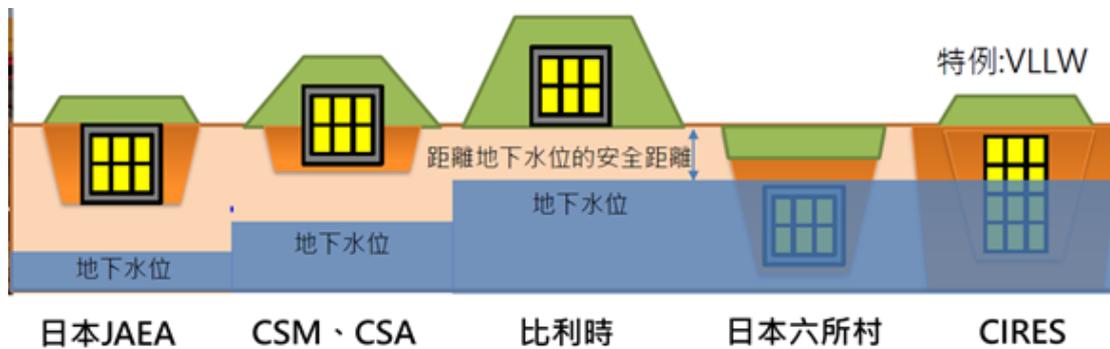
二、 由於我國低放射性廢棄物絕大多數為 A 類，如果在 A 類放射性廢棄物中再細分出比活度低於法規上限 10 分之 1 的 A0 類（very low level waste VLLW），則 A0 類可以直接以近地表壕溝掩埋式的方式處置，但近地表壕溝掩埋式的方式處置必須要有地質阻水層加上不透水布作為阻

水的工程障壁。此種處置方式成本更低，較一般的近地表處置為 10 分之 1 成本，且安全無慮。



圖三十九 法國近地表壕溝掩埋處置

三、 審視國際低放處置為搭配以及環境及地質特性會有各種不同的設計，這些設計又可分為排水設計及阻水型設計，各種設計圖示如下：



圖四十 國際低放處置之各種設計圖示

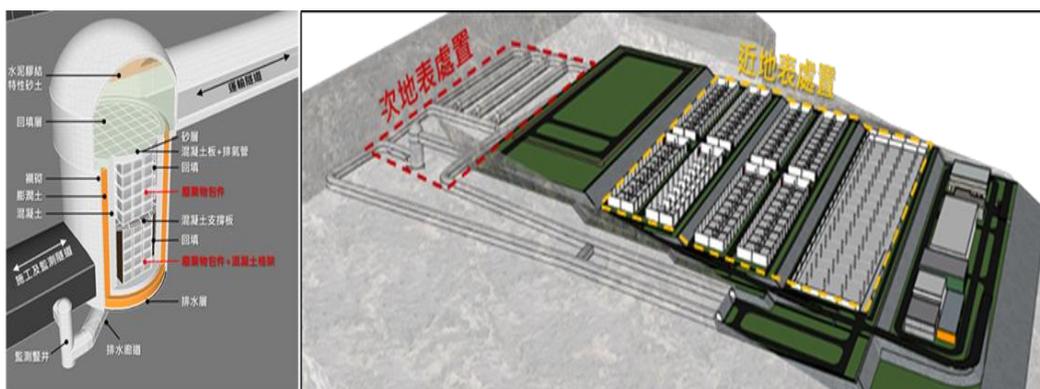
- (一) 排水型須確保處置系統與地下水位的的安全距離，至少 300 年以上。
- (二) 覆蓋層以排水功能為主。
- (三) 處置窖凸出地面的高度越高，覆蓋層越難設計。
- (四) 阻水型須確保處置系統有足夠厚且足夠不透水的回填層。
- (五) VLLW 因所需時間短（50 年），可利用人工手段維持 50 年的避免水入侵。

四、 由於法國採取的近地表處置是屬於黏土層搭配地平線以上處置窖及 Capping System，是如下圖四十二的第 3 種近地表處置，考慮台灣地震，颱風、強降雨等氣候條件及地質環境，建議應可思考採日本的近地表處置，如下圖的第 5 種近地表處置。



圖四十一 低放處置之各種設計圖示

五、 在討論會議的議程中，我們發現處置設計若配合源項特性，採多元化與半地下化之設計方向，初估將可較次地表坑道處置節省 30%的處置工程建造經費。為達目標，我們可先將台灣法規 C 類低放廢棄物再細分出 CS（Clevel-Short half-life）與 CL（C level-Long half-life）類廢棄物，CS 類廢棄物可放近地表處置，CL 類廢棄物可放次地表處置，此為台電未來可思考安排規劃的重點之一。次地表處置可以採取行類似瑞典、韓國的筒倉設計（Silo）將 CL 類廢棄物及超 C 類廢棄物放進筒倉處置。



圖四十二 近地表處置與次地表處置共構概念